

KEI/2000
연구보고서

수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구

2000. 12

이창희
유혜진



한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

序 言

수저퇴적물은 전통적으로 수로유지 및 하천의 홍수통제를 위한 준설의 대상으로 관리되어 왔으나 최근 환경적 측면에서의 관리가 필요하다는 의견이 국내외적으로 크게 대두되고 있습니다. 이는 수저퇴적물에 포함된 영양염류가 부영양화 및 수질악화의 원인이 되고 유해물질로 오염된 수저퇴적물은 직·간접적인 노출경로를 통해 수생생물 및 더 나아가 국민건강에 악영향을 끼친다는 사실이 잘 알려져 있기 때문입니다.

지금까지 우리나라 환경관리에 있어 수저퇴적물은 수질오염원의 일종으로 간주되어 ‘오염하천정화사업’ 및 ‘오염해역준설사업’의 예에서 볼 수 있듯이 오염원관리 차원에서만 다루어져 왔습니다. 그러나, 수저퇴적물에 서식하는 저서생물뿐만 아니라 이를 포함하는 수생태계를 건강하게 유지·보전하기 위해서는 수저퇴적물을 단순한 수질오염원으로 보기보다는 물, 대기, 토양과 같이 적정한 질을 유지해야하는 독립적인 매체로 인식할 필요가 있습니다. 이러한 인식은 수저퇴적물의 관리가 수질관리에 초점을 둔 사후처리 위주의 단편적 목적에서 벗어나 저서생물 보호를 포함한 생태적인 목적으로 전환되어야 함을 의미하는 것입니다.

이러한 관점에서 본 연구는 수저퇴적물 관리의 궁극적인 목표일뿐만 아니라 퇴적물의 오염평가, 오염퇴적물의 제거, 오염퇴적물의 정화, 준설퇴적물의 투기 등 실질적으로 수저퇴적물 관리에 있어 관리기준 또는 판단기준으로 사용될 있는 수저퇴적물 환경기준 개발의 필요성과 개발방안을 제시했다는데 무엇보다 큰 의의가 있다고 봅니다. 특히, 아직까지 퇴적물 관리와 관련하여 정부차원의 기본적인 방향조차 마련되어 있지 않은 실정을 고려할 때 여기서 제시하고 있는 퇴적물 환경기준의 개념, 국외의 퇴적물 환경기준 개발사례, 국내의 퇴적물 오염현황 및 퇴적물환경기준의 개발방안은 향후 정부차원의 체계적인 퇴적물 관리체제를 구축하는데 중요한 밑거름이 되리라고 확신합니다.

끝으로 본 연구를 수행한 이창희 박사와 유혜진 연구원의 노고에 깊은 감사를 표합니다. 또한 자문을 통해 도움을 주신 본 연구원의 정희성 박사, 박용하 박사, 이상돈 박사, 송영일 박사와 환경부 수질정책과의 윤성규 과장, 해양연구소의 김창식 박사, 농업기반공사의 최강원 박사께도 심심한 감사를 드립니다. 아울러 본 연구의 내용은 본 연구원의 공식 견해가 아닌 연구자 개인의 견해임을 밝혀드립니다.

2000년 12월

한국환경정책·평가연구원

院 長 李 相 垠

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 필요성과 목적	1
1.1. 필요성	1
1.2. 목적	2
2. 연구의 범위 및 방법	3
2.1. 연구범위	3
2.2. 연구방법	4
II. 퇴적물 환경기준의 개념	6
1. 용어정의	6
2. 퇴적물 환경기준 개발의 배경	8
2.1. 수질/자연자원 관리	8
2.2. 준설퇴적물 관리	10
2.3. 수저퇴적물 관리	14
2.4. 퇴적물질기준 개발과 관련된 문제점	19
III. 퇴적물질기준의 개발사례	20
1. 일반퇴적물관리기준	20
1.1. 퇴적물지표의 종류	20
1.2. 퇴적물지표의 설정 및 관리사례	23
1.3. 시사점	27
2. 준설퇴적물 관리기준	28
2.1. 투기기준	29
2.2. 제거기준	33
2.3. 시사점	35
3. 수저퇴적물 관리기준	39
3.1. 미국	40
3.2. 캐나다	44
3.3. 유럽	47
3.4. 시사점	49
IV. 국내퇴적물 오염현황	50
1. 연구방법	50
2. 오염현황	51
2.1. 유기물에 의한 오염현황	51
가. 강열감량	51
나. 화학적산소요구량	52
2.2. 영양염류에 의한 오염현황	53

가. 총질소	53
나. 총인	55
2.3. 중금속에 의한 오염현황	56
2.4. 기타화학물질에 의한 오염현황	59
3. 시사점	59
V. 퇴적물질기준 개발방안	60
1. 퇴적물 오염현황 파악	62
1.1. 퇴적물 조사지침의 개발	62
1.2. 담수퇴적물 측정망 구축	63
2. 퇴적물질예비기준(안)의 도출	
2.1. 개발의 필요성	68
2.2. 퇴적물질기준의 항목	68
가. 유기물 및 영양염류	68
나. 중금속 및 유기화합물질	69
2.3. 퇴적물질예비기준(안)의 도출	71
가. 유기물 및 영양염류	71
나. 중금속 및 기타 유해화학물질	72
a. 담수퇴적물	73
b. 연안퇴적물	74
2.4. 퇴적물질예비기준(안)의 적용 한계	76
3. 지역퇴적물질기준의 설정	77
3.1. 지역퇴적물질기준의 개념 및 필요성	77
3.2. 지역퇴적물질기준의 설정방법	77
3.3. 퇴적물 제거 및 정화기준	80
4. 퇴적물질기준의 적용방안	83
4.1. 예비평가	84
4.2. 지역평가	85
VI. 요약 및 결론	86
[참고문헌]	88
[부표 1] 미국 주정부의 퇴적물질기준 설정사례	95
[부표 2] 캐나다 주정부의 퇴적물질기준 설정사례	118
[부표 3] 유럽의 퇴적물질기준 설정사례	124
[부표 4] 퇴적물질기준 개발을 위한 국내 연구사례	131
[부표 5] 오염원 종류에 따른 퇴적물 오염 가능물질	135
[부록] 미국의 퇴적물에 대한 TMDL	142

표 목 차

<표 II-1> 일반퇴적물이 미치는 영향	10
<표 II-2> 준설퇴적물의 투기를 위한 단계별 영향 평가(예)	11
<표 II-3> 퇴적물 질 평가를 위한 수치기준의 개발 방법론 비교	18
<표 III-1> 수층지표의 장단점 비교	21
<표 III-2> 수저퇴적물지표의 장단점 비교	21
<표 III-3> 생물학적 평가지표의 장단점 비교	22
<표 III-4> 수변지역/경사면 지표의 장단점 비교	23
<표 III-5> 단일 퇴적물지표의 사례	23
<표 III-6> 복합 퇴적물지표의 사례	24
<표 III-7> 퇴적물지표의 설정사례 (San Diego Creek/Newport Bay)	25
<표 III-8> 퇴적물 지표의 설정사례 (Redwood Creek)	26
<표 III-9> 하천사면 퇴적물의 수치기준 (Redwood Creek)	26
<표 III-10> 퇴적물지표의 설정 및 관리사례	27
<표 III-11> 미국에서 개발된 각종 퇴적물 투기기준의 예	29
<표 III-12> 오대호 담수퇴적물 오염분류를 위한 지역환경보호청의 기준	30
<표 III-13> 퇴적물 투기기준 (미육군공병단, 시애틀 사무소)	32
<표 III-14> 동경만, 요코하마만 및 나고야항의 퇴적물 제거기준	34
<표 III-15> 일본의 오염퇴적물 잠정 제거기준	34
<표 III-16> 퇴적물 제거기준의 사례	36
<표 III-17> 미국의 퇴적물질 관련기준 개발현황	41
<표 III-18> 저서생물 보호를 위한 미국환경보호청의 퇴적물질준거기준	42
<표 III-19> 미국해양대기청에서 사용되는 퇴적질권고기준 (해양퇴적물)	43
<표 III-20> 캐나다 담수퇴적물질권고기준 및 악영향 기대확률 (%)	44
<표 III-21> 캐나다 해양퇴적물질권고기준 및 악영향 기대확률(%)	46

<표 III-22> 유럽 퇴적물질예비기준 (예)	48
<표 IV-1> 강열감량으로 본 수역별 퇴적물의 유기물 오염	51
<표 IV-2> 화학적산소요구량으로 본 수역별 퇴적물의 유기물 오염	52
<표 IV-3> 총질소로 본 수역별 퇴적물의 영양염류 오염	55
<표 IV-4> 총인으로 본 수역별 퇴적물의 영양염류 오염	55
<표 IV-5> 중금속 항목에 대한 오염도별 분포	57
<표 V-1> 퇴적물 조사 및 평가지침의 내용 (예)	63
<표 V-2> 수질측정망 운영현황	66
<표 V-3> 토양측정망 운영현황 (1999)	66
<표 V-4> 퇴적물 오염측정망 운영현황 (2000)	67
<표 V-5> 유기물 및 영양염류 기준비교	69
<표 V-6> 생활기준 외 화학물질에 대한 우리나라 관리기준 설정항목	70
<표 V-7> 담수퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교	73
<표 V-8> 연안퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교	74
<표 V-9> 중금속에 대한 퇴적물질예비기준 (안)	75
<표 V-10> 담수퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교 (PCBs, PAHs)	75
<표 V-11> 연안퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교 (PCBs, PAHs)	76
<표 V-12> 퇴적물질기준 개발방법 선택을 위한 평가	79
<표 V-13> 팔당호 표층퇴적물 내 유기물·영양염류의 오염현황 및 비교	80
<표 V-14> 오염하천정화사업 추진실적 ('87-'99)	82
<표 V-15> 오염해역준설사업의 연차별 사업내역	82

그림 목차

<그림 I-1> 연구내용 및 방법	5
<그림 II-1> 퇴적물 관리와 관련된 기준	7
<그림 II-2> 퇴적물 오염과정과 물질순환 및 수질의 영향	12
<그림 II-3> 중금속의 수계 내 퇴적물, 공극수, 생물간 거동 모식도	13
<그림 IV-1> 수역별 퇴적물의 강열감량	52
<그림 IV-2> 수역별 퇴적물의 화학적산소요구량	53
<그림 IV-3> 수역별 퇴적물의 총질소 함량	54
<그림 IV-4> 수역별 퇴적물의 총인 함량	56
<그림 IV-5> 퇴적물의 카드뮴 함량	58
<그림 V-1> 퇴적물질기준의 설정을 위한 일반적 절차	61

부 표 목 차

<부표 1-1> 뉴욕주의 금속에 대한 퇴적물질권고기준	95
<부표 1-2> 뉴욕주의 무극성 유기오염물질에 대한 퇴적물질권고기준	96
<부표 1-3> 뉴저지주의 퇴적물질예비기준	101
<부표 1-4> 뉴저지주의 휘발성 유기물질에 대한 퇴적물질예비기준	102
<부표 1-5> 워싱턴주의 퇴적물 관리기준 (푸젯만 퇴적물에 적용)	104
<부표 1-6> 워싱턴주의 담수퇴적물 환경기준 (안)	106
<부표 1-7> 텍사스주의 금속에 대한 퇴적물질예비기준	108
<부표 1-8> 텍사스주의 유기물질에 대한 퇴적물질예비기준	109
<부표 1-9> 플로리다주의 퇴적물질예비기준 (해양퇴적물)	116
<부표 1-10> 사우스캐롤라이나주의 퇴적물질예비기준 (해양퇴적물)	117
<부표 2-1> 온타리오 환경부의 금속, 영양염 퇴적물 환경기준 (담수퇴적물)	118
<부표 2-2> 온타리오 환경부의 유기화합물 퇴적물 환경기준 (담수퇴적물)	119
<부표 2-3> 브리티시컬럼비아주 담수 퇴적물질예비기준	120
<부표 2-4> 브리티시컬럼비아주의 해양 및 연안 퇴적물질예비기준	122
<부표 3-1> 네덜란드 퇴적물질권고기준	124
<부표 3-2> 스웨덴의 퇴적물질예비기준	130
<부표 4 > 퇴적물질기준 개발을 위한 국내 연구사례	131
<부표 5 > 오염원 종류에 따른 퇴적물 오염 가능물질	135

I. 서론

1. 연구의 필요성과 목적

1.1. 필요성

수저퇴적물(水底堆積物)은 육지로부터 유입되거나 내부적인 생·화학적 작용을 통해 호소, 하천, 하구, 바다 등의 바닥에 쌓이는 자갈, 모래, 점토, 유기물질, 광물질을 통칭한다¹⁾. 이러한 퇴적물은 오래 전부터 자연자원의 이용, 이수(利水), 치수(治水), 및 수운(水運)과 관련된 측면에서 관리의 대상이 되어왔다. 즉, 건설골재의 원료로 사용될 수 있는 모래, 자갈 등은 집중적인 채취의 대상으로, 수로 및 박지(泊地)수심의 감소 원인이 되는 퇴적물은 원활한 수운(水運)을 위한 준설(浚渫)대상이 되어왔으며, 하천 통수량(通水量)의 확보를 위한 하천정비 또는 홍수통제 사업의 대부분도 하상퇴적물의 준설을 수반한다.

퇴적물과 관련된 이러한 전통적인 문제와 더불어 최근에는 환경적인 측면에서 퇴적물관리의 필요성이 크게 대두되고 있다. 이는 수저퇴적물이 수체(水體)와 함께 수생태계(水生態界)를 구성하는 기본적인 요소로 저서생물의 서식지를 제공하는 동시에 수체와 유기적으로 연결되어 있어 퇴적물에 축적된 각종 오염물질이 수생태계의 자연적인 순환과정을 통해 직·간접적으로 수질, 저서생물 및 야생생물에 여러 가지 악영향을 미치고 있다는 사실이 밝혀지고 있기 때문이다.

예를 들어 호소나 하천에 과도한 세립(細粒)퇴적물이 쌓이게 되면 어류의 산란을 위한 자갈층을 덮어 산란을 저해하고, 퇴적물에 포함된 유기물이 분해되면서 소모하는 산소가 수층으로부터 적절히 공급되지 않는 경우 퇴적물 주위에 무산소환경이 형성되어 수생생물의 생존에 치명적인 영향을 미치게 된다. 한편 퇴적물에 포함된 중금속 등의 유해 화학물질은 농도, 영향, 시기에 따라 어폐류의 사멸을 초래할 수 있고, 환경의 변화에 따라 생지화학적 반응을 통해 수중으로 재용출 되어 수생생물에게 악영향을 미친다. 특히 퇴적물에 포함된 중금속과 잔류성 유기화합물질은 저서생물에게는 물론이고 먹이사슬을 거치면서 체내에 축적되어 상위

1) 퇴적물은 ‘수질환경보전법’, ‘해양오염방지법’, ‘하천법’, ‘폐기물관리법’ 등에서는 오니, 퇴적물, 침전물, 토사, 골재 등 다양한 용어로 표현되고 있으나 여기서는 이창희 외(1998)의 정의에 따른다. 즉, 퇴적물이 수서 생물 혹은 국민건강에 악영향을 미칠 수 있는 농도 이상의 중금속, 다환방향족탄화수소(PAHs), 유기염소계 농약, 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs) 등의 유해화학물질을 포함하는 경우 오염퇴적물(汚染堆積物)이라 한다. 오염퇴적물을 제외한 퇴적물을 일반퇴적물(一般堆積物)이라 하고 악영향을 미칠 정도의 유해화학물질을 포함하지는 않으나 유기물, 인(燐), 질소 등의 영양염류를 많이 포함하여 수질악화의 원인이 될 수 있는 퇴적물은 오염퇴적물과 구분하기 위해 유기오염퇴적물(有機汚染堆積物)로 정의한다. 또한 환경분야에서 일반적으로 사용하는 오니(汚泥) 및 슬러지는 자연상태에서 형성된 퇴적물과 구분하기 위해 본 연구에서는 수처리(水處理) 공정에서 발생하는 슬러지의 의미로만 한정하여 사용하기로 한다.

단계의 수생생물 또는 인체에도 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 또한 직접적인 환경문제뿐만 아니라 퇴적물의 오염은 수로, 항구, 박지 등의 준설 비용을 높여 간접적으로 운송비용에도 영향을 미치며 수계의 과도한 퇴적물 유입은 저수용량의 감소, 수로 변경, 투명도 감소 등의 원인이 되어 수영, 뱃놀이, 낚시 등 수체가 가지는 위락 또는 심미적 가치를 크게 감소시킬 수 있다.

그럼에도 불구하고 수저퇴적물은 물, 대기, 토양 등의 매체와는 달리 환경관리의 대상에서 도외시 되어왔다. 이는 퇴적물이 토양의 침식, 유수에 의한 운반, 대기로부터의 침전 등 어떤 경로를 거치든지 최종적으로 수저에 퇴적되기 전까지 여타 매체의 2차적 영향권에 속하며, 여타의 매체와는 달리 일상 생활에 노출되지 않아 오염으로 인한 악영향을 일반국민이 직접적으로 접하기 어렵고, 수계로 유입된 오염물질이 최종적으로 축적되는 저장소로 인식되어 오염에 비교적 관대하다는 종합적인 원인에 기인한다고 볼 수 있다(이창희 외, 1998). 또한 수질관리의 측면에서 보면 수저퇴적물은 적절한 질을 유지해야하는 관리대상이기보다는 수질에 영향을 미칠 수 있는 하나의 오염원으로 인식되고 있는 것도 퇴적물에 대한 관리가 미흡한 근본적 요인의 하나로 볼 수 있다.

최근 우리나라 환경정책도 선진외국의 경험을 거울삼아 매체별로 분화된 관리방식에서 벗어나 매체간의 유기적인 연결과 상호작용을 고려하는 통합관리의 쪽으로 방향 전환을 꾀하고 있다. 이런 견지에서 기존의 물, 대기, 토양의 관리와 더불어 수생태계의 구성요소인 퇴적물에 대한 관리는 통합적 환경관리체제를 구축하는데 필수적인 요건이며 퇴적물 환경기준은 퇴적물 관리의 목표를 제공함과 동시에 실제 퇴적물 관리상 요구되는 판단의 기초가 된다는 점에서 개발의 필요성이 아무리 강조되어도 지나치지 않을 것이다. 즉 퇴적물 환경기준은 실질적으로 하천, 저수지, 댐, 하구, 해양 등 수저퇴적물의 오염여부를 판정하는 기준이 되며, 오염된 퇴적물의 제거여부를 가리는 판정기준으로 사용될 수 있고, 오염지역을 정화하는데 우선순위를 설정하는 판단기준이 될 수 있으며, 준설된 퇴적물을 수계에 투기하는 경우 처리여부를 판정하는 척도가 될 수 있고, 퇴적물 측정망 등을 고안하는데 기초적인 틀로 사용되는 등 퇴적물과 관련된 다양한 관리기준이 될 수 있다.

1.2. 목적

본 연구의 목적은 퇴적물 관리의 목표이고 실질적으로 퇴적물 관리의 기준으로 사용될 수 있는 수저퇴적물의 환경기준 개발방안을 제시하는데 있으며 구체적인 연구목표는 다음과 같다.

첫째로는 퇴적물 환경기준 개념을 소개하고 이의 이해에 필요한 관련용어 및 배경지식을 정리·제시하고자 한다. 아직까지 퇴적물 환경기준에 대한 개념이 부재한 국내 상황을 고려하여 퇴적물 환경기준의 적용범위 및 적용 예를 배경지식과 함께 소개함으로써 정책입안자나 환경관리자의 이해를 돕고자 한다.

둘째 목표는 국내외의 퇴적물 환경기준 개발현황 및 기준의 개선을 위한 연구동향을 파악·제시하고자 한다. 국내의 일부 대학에서 퇴적물 환경기준에 대한 연구가 시도되었지만

아직까지 연구의 시작단계에 지나지 않으므로 이미 정부차원의 개발사업이 완료되어 실제 관리기준으로 퇴적물 환경기준을 사용하고 있는 외국의 예와 연구동향을 중점적으로 제시하도록 하겠다.

셋째는, 이미 개발된 외국의 다양한 퇴적물 기준을 비교·분석하여 국내에의 적용가능성을 검토하고 퇴적물 관리에 참고적으로 적용 가능한 기준을 제시하고자 한다.²⁾ 물론 관리기준으로서 엄격하게 적용될 수 있는 퇴적물 환경기준은 과학적인 연구에 기초한 신뢰성 있는 자료에 근거하여 개발되어야 하므로 여기서 제시되는 기준은 외국의 퇴적물 환경기준 개발배경 및 목적과 국내의 현실적인 여건과 관리목적을 비교하여 도출한 단지 참고 또는 예비기준의 성격으로 이해해야 할 것이다.

마지막으로 퇴적물 환경기준을 설정하여 퇴적물 관리에 적용 할 때 예상되는 기술적, 제도적 문제점 및 대책을 일반적인 관점에서 서술하고 장기적으로 퇴적물 환경기준 개발을 위한 추진방안을 제시하도록 하겠다.

2. 연구의 범위 및 방법

2.1. 연구범위

본 연구에서 사용되고 있는 퇴적물 환경기준(堆積物環境基準)은 일단 수질환경기준(水質環境基準)에 준하는 개념, 즉 정부차원의 수질관리를 통해 궁극적으로 달성해야 하는 목표수질로 볼 때 정부차원의 관리를 통해 궁극적으로 달성해야하는 퇴적물질(堆積物質)의 수준을 수치적 혹은 서술적으로 정의한 기준으로 이해할 수 있다.

그러나 제2장에서 자세히 언급하겠지만 실제적으로 퇴적물 환경기준은 관리의 대상, 기준의 적용범위, 관리상 사용목적에 따라 매우 다양한 형태로 주어질 수 있다. 즉, 퇴적물 환경기준이 저서생물을 보호하기 위한 것인지, 야생생물보호를 위한 것인지, 아니면 국민건강 보호를 목적으로 하는지 설정대상에 따라서 다르게 주어질 수 있고 특정사업, 특정지역에 적용되는 것인지 전국적으로 적용될 수 있는지의 적용범위에 따라서도 그 성격이 달라 질 수 있다. 또한 퇴적물 관리의 목적상 단순히 오염여부를 예비적으로 판단하는 척도로 사용되는지, 오염퇴적물의 정화기준인지, 퇴적물 독성여부를 판단하는 기준인지, 아니면 생체농축의 정도를 평가하는 목적인지 등의 사용목적에 따라 달리 주어질 수가 있다. 따라서 본 연구에서 사용되는 퇴적물 환경기준은 제2장에 일반적이고 포괄적인 관점에서 정의되는 퇴적물질기준(堆積物質基準)의 의미로 이해하는 것이 바람직해 보인다.

이러한 정의에 따르는 경우 퇴적물 환경기준의 범위가 너무 넓어 아직까지 퇴적물 관리의 필요성 제기 수준에 머물고 있는 국내 상황에서 연구의 초점을 유지하는데 많은 어려움이 있을 수밖에 없으므로 본 연구에서는 다음과 같이 연구의 범위를 내용적으로 제한하기로 한다.

첫째, 퇴적물 환경기준의 개발항목은 중금속, 유기화학물질 등의 국민건강항목에 국한하고

2) 우리나라 퇴적물 관리의 필요성에 대한 분석과 연구는 이창희 외(1998)를 참고

유기물, 영양염류 등의 일반 생활항목에 대한 것은 수치기준보다는 평가절차를 제안하는 측면에서 접근하기로 한다. 이는 생활항목에 속하는 오염물질에 의한 수질, 수생태계에 대한 영향이 수체의 이용목적, 수체의 물리화학적 특성 등에 따라 크게 달라지므로 이들 항목에 적용되는 일반적인 수치기준을 개발하는 것은 불가능하고 따라서 사업별, 또는 지역별로 적용할 수 있는 퇴적물질 평가절차를 제공하는 것이 더욱 타당하다고 판단되기 때문이다.

둘째, 퇴적물 환경기준의 개발은 저서생물의 보호에 궁극적인 목표를 두고 연구내용도 이를 중심으로 전개해 나간다. 물론 야생생물 및 국민건강 보호를 위한 기준의 개발도 장기적으로 필요하겠지만 저서생물에 대한 악영향을 방지할 수준의 퇴적물 질이 유지된다면 여타의 목적을 달성하는데 큰 문제가 없으리라 판단된다. 또한 저서생물보호를 위한 화학물질 농도에 근거한 수치기준이 많은 국가에서 개발·사용되고 있으므로 많은 자료가 이용 가능하다는 장점이 있다.

셋째, 공간적으로 보면 퇴적물은 호소, 하천, 하구, 해양 등의 모든 수계에 분포하는데 외국의 예를 보면 퇴적물 환경기준은 해양(연안)퇴적물과 담수퇴적물(일부는 하구퇴적물도 별도로 분리하기도 함)로 분리하여 적용하는 것이 보통이다. 본 연구는 1) 사례분석을 위주로 하고 있기 때문에 지역적인 수계환경의 특수성은 고려하지 못한다는 근본적인 문제점과, 2) 가능하면 퇴적물 환경기준에 대한 다양한 자료를 제공하는 것이 바람직하며, 3) 대부분의 경우 공단 및 도시관류하천 등을 제외하면 퇴적물 오염문제는 반폐쇄성 연안수역에서 큰 문제가 되고, 4) 퇴적물 환경기준의 개발 방법론에 있어서는 담수퇴적물과 해양퇴적물의 구분이 큰 의미가 없다는 점에서 담수 및 해양퇴적물 모두를 대상으로 한다.

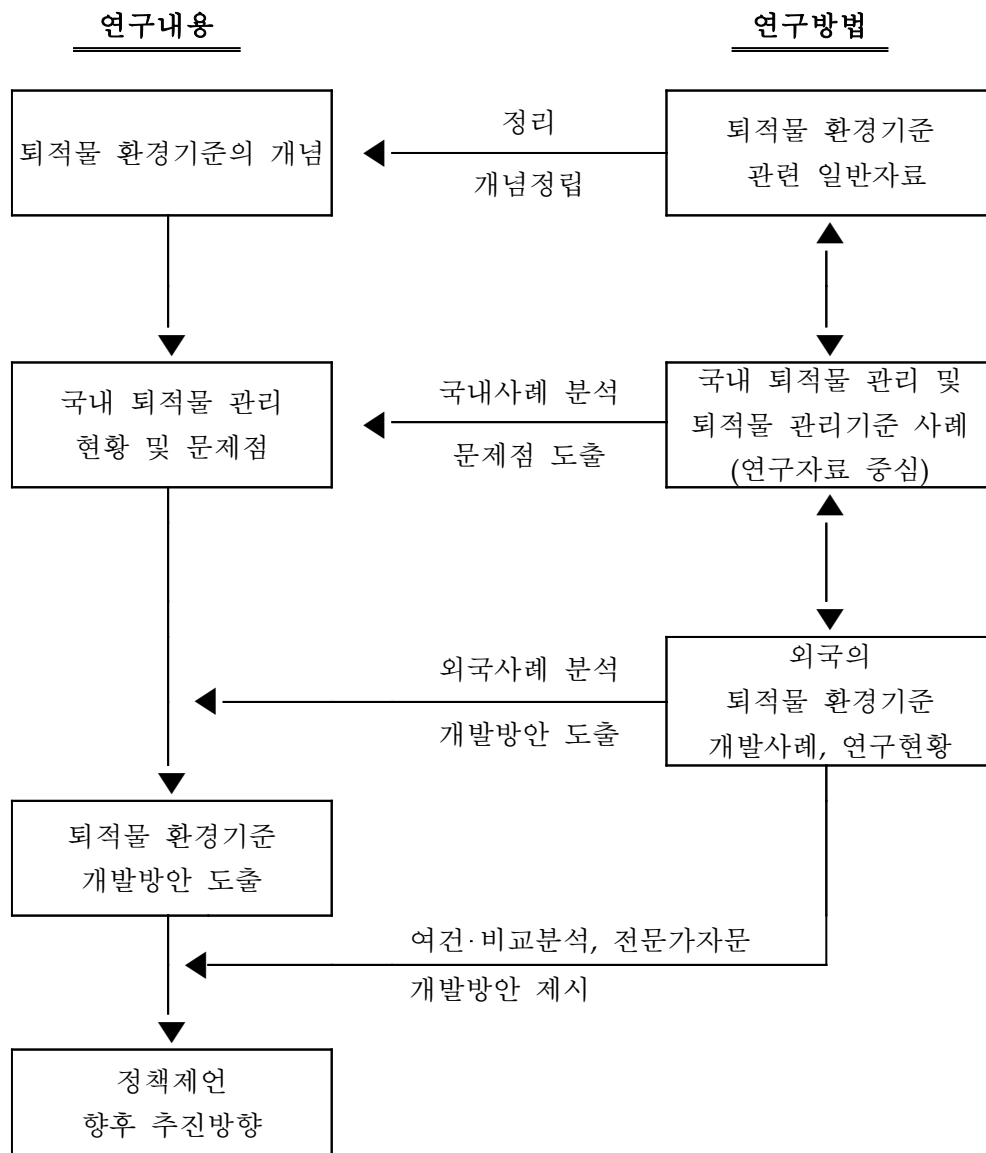
끝으로, 강조해야 할 점은 여기서 제시되는 퇴적물 환경기준은 외국의 퇴적물질기준 사례를 통해 도출한 것이므로 국내의 여건과 지역 특수성을 반영하고 있지 않다. 따라서, 제시되는 기준은 관리상 법적 구속력을 가지는 판단의 근거로 사용되어서는 안되며 단지 수저퇴적물의 오염평가, 퇴적물 정화의 우선순위 설정, 수저퇴적물의 제거여부 등을 판단할 때 지역특성 및 사업의 목적을 반영한 추가적인 평가방법과 더불어 참고적인 기준으로 병행하여 사용되어야 할 것이다.

2.2. 연구방법

아직까지 국내에서는 퇴적물 환경기준의 개발을 위한 정부차원의 체계적인 전략이 마련되어 있지 않은 실정이므로 이미 퇴적물 환경기준을 개발한 외국의 현황 및 연구동향에 기초한 사례분석이 연구의 근간을 이루고 있다(그림 I-1). 퇴적물환경기준 관련 일반자료로부터 기본적인 환경기준의 개념을 파악하였고 국외의 퇴적물 환경기준 개발현황 및 연구동향에 대한 기초자료는 인터넷을 통해 관련자료를 다운로드 받거나, 각 관련 국가에서 퇴적물 관리를 담당하는 관련자를 이메일로 접촉하여 입수하거나, SQA 2000(Sediment Quality Assessment 2000)³⁾ 등의 국제 세미나 참석을 통해 입수하는 등 다양한 경로를 통해 파악하였다.

3) 본 국제 심포지엄은 4회째로 2000년 10월 24부터 27일 까지 일본 오쓰에서 열렸다. 아시아태평양지역의 퇴적물 관리 및 정화현황을 비롯하여, 퇴적물 위해성평가, 정화 및 복구기술, 생물이용성 및 독성평가,

이러한 외국의 사례와 국내의 퇴적물 관리현황, 개발여건, 향후의 관리 추진방향등을 고려하여 퇴적물 환경기준 개발방안을 도출하였다. 이 과정에서 요구되는 전문적 또는 기술적인 사항은 생태학, 독성학, 퇴적학, 퇴적물 이동역학, 분석화학, 해양학, 담수학, 환경학 등 관련 분야의 전문가를 초청하여 세미나 형식으로 자문을 구하거나, 방문이 가능한 경우 직접방문을 통해, 직접적인 자문이 어려운 경우에는 이메일을 통하여 자문을 구하였다.



<그림 I-1> 연구내용 및 방법

부영양화에 미치는 영향, 물-퇴적물간의 반응관계, 퇴적물질 평가 등 퇴적물 관리에 관련되는 실질적인 내용들이 토의되었다.

II. 퇴적물 환경기준의 개념

1. 용어정의

퇴적물의 관리에는 다양한 판단기준이 사용될 수 있는데 이러한 판단의 척도를 정량화 또는 수치화하여 제시한 기준을 본 연구에서는 퇴적물질기준(堆積物質基準, Sediment Quality Criteria)이라 정의하기로 한다. 실제 퇴적물질기준은 기준의 설정목적, 기준 설정의 과학적 근거, 기준의 법적인 성격 등에 따라 다양한 용어로 표현되고 있기 때문에 아직까지 국내외적으로 명확하고 일관적인 정의는 확립되어 있지 않다. 따라서 용어사용의 혼동을 피하고 서술내용에 대한 명확성과 일관성을 유지하기 위하여 본 연구 내에서는 퇴적물질관련 용어를 다음과 같이 정의하여 사용하기로 한다(그림 II-1).

가) 퇴적물지표(堆積物指標, Sediment Indicator): 일반퇴적물의 관리기준은 종종 수질환경기준 등에서 정량적인 수치로 표현되지 않고 서술적으로 주어지는 경우가 많다. 이러한 서술적인 목표를 정량화 또는 수치화 된 기준으로 표시하는데 용이하도록 하고 지역적인 퇴적물 문제를 정량적으로 적절히 반영하는 지표를 퇴적물지표라 한다⁴⁾.

나) 퇴적물투기기준(堆積物投棄基準, Sediment Disposal Criteria): 항로 및 박지 유지 또는 치수를 위한 하천정비 등과 관련하여 준설된 퇴적물을 수역에 투기할 때 허용되는 최대 오염물질 농도 또는 척도이다. 일반적으로 투기기준을 초과하는 오염물질은 투기하기 전에 적절한 처리를 통해 투기기준 이하로 오염물질 농도를 감소시켜야 하기 때문에 준설퇴적물을 처리하는데 있어 관리기준으로 사용된다.

다) 퇴적물제거기준(堆積物除去基準, Sediment Removal Criteria): 수저의 퇴적물이 수역의 이용목적에 저해가 되거나 환경에 대해 악영향을 미칠 정도로 오염된 정도를 나타내는 정량적인 오염물질 농도나 척도이다. 일반적으로 제거기준은 생물에 대한 악영향이 명확한 수준에서 결정되기 때문에 기준 이상으로 오염된 퇴적물에 대한 적절한 처리를 요구하거나 관리자가 개입하는 기준으로 사용된다.

라) 퇴적물질예비기준(堆積物質豫備基準, Sediment Quality Screen Criteria): 일반적으로 법적인 강제성은 없는 참고기준으로 퇴적물 관리에 있어 퇴적물이 오염된 정도를 평가하고, 퇴적물 오염수역을 구분하고 오염퇴적물로 인해 발생할 가능성이 있는 악영향을 예비적으로 판

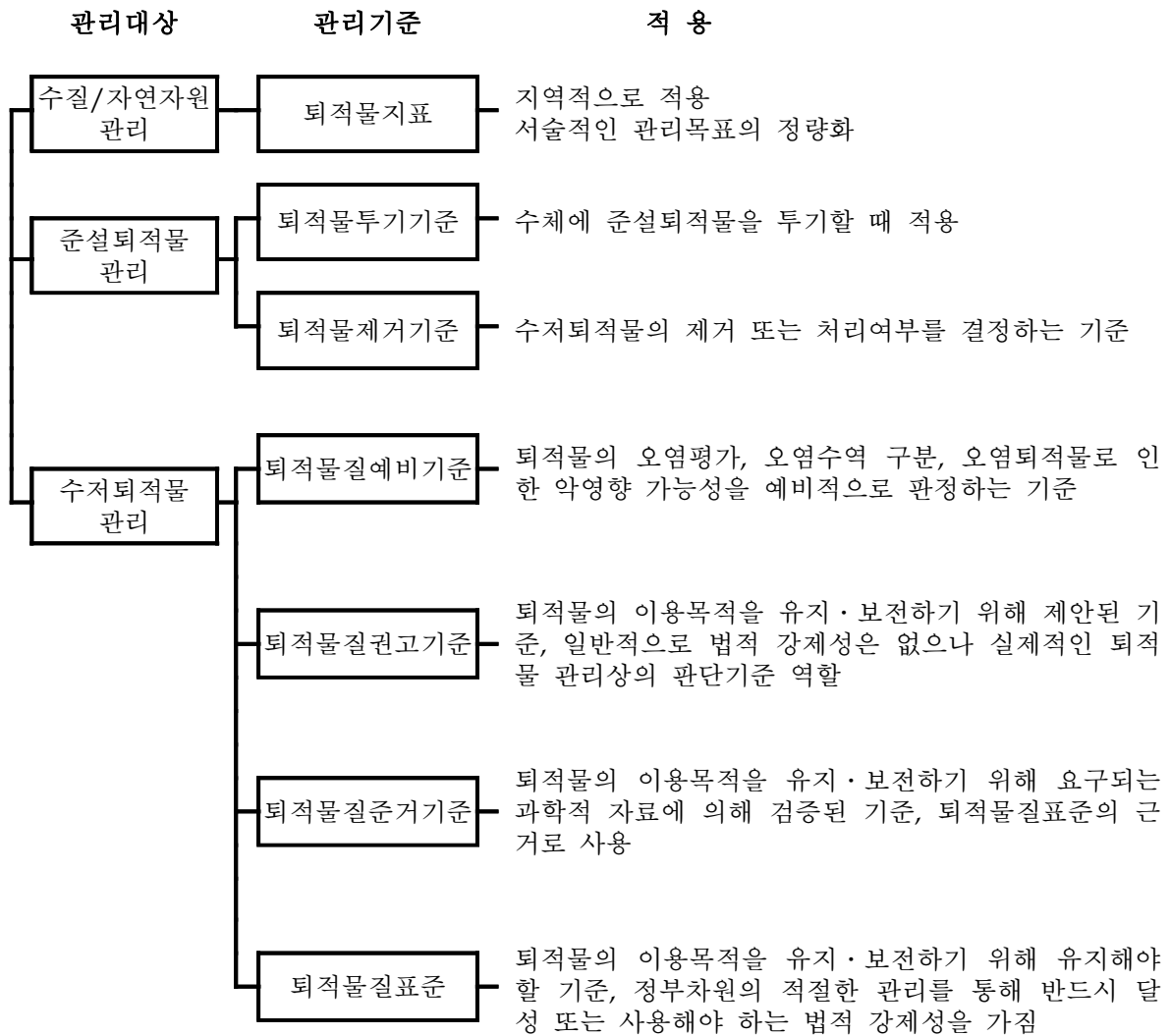
4) 일반적으로 퇴적물 환경기준 문제를 다룰 때 잘 사용되지 않는 용어이지만 미국의 Total Maximum Daily Loads(TMDLs)와 관련하여 서술적으로 표현된 퇴적물 관련기준을 관리가 가능한 정량적인 수치로 표현한 기준을 말한다. 일반적으로 오염되지 않은 일반퇴적물 또는 퇴적물 관리와 관련된 사항에 대한 정량적인 관리지표로 퇴적물 자체에 대한 환경기준이기보다는 수질환경기준의 일부로 퇴적물을 다룰 때 사용되는 기준이다(USEPA, 1999a).

정하기 위해 제안된 정량적인 퇴적물 오염물질 농도 또는 척도이다.

마) 퇴적물질권고기준(堆積物質勸告基準, Sediment Quality Guidelines): 퇴적물의 관리에 있어 퇴적물의 이용목적에 유지·보전하기 위해 제안된 정량적인 퇴적물 오염물질 농도 또는 서술적인 척도를 말하며 정부차원의 관리를 통해 반드시 달성하거나 사용해야하는 법적인 강제성은 없으나 많은 경우 퇴적물 관리의 기준으로 사용된다.

바) 퇴적물질준거기준(堆積物質準據基準, Sediment Quality Criteria): 퇴적물 관리에 있어 퇴적물 이용목적에 유지·보전하기 위해 요구되는 과학적 자료에 의해 검증된, 정량적인 오염물질의 한계 농도 또는 서술적인 척도로서 퇴적물질표준 개발 또는 적용의 근거로 사용된다.

사) 퇴적물질표준(堆積物質標準, Sediment Quality Standards): 퇴적물 관리에 있어 퇴적물 이용목적에 유지·보전하기 위해 유지해야할 정량적인 오염물질 농도 또는 서술적인 척도로서 정부차원의 적절한 관리를 통해 반드시 달성 또는 사용해야하는 법적 강제성이 있는 기준이다.



<그림 II-1> 퇴적물 관리와 관련된 기준

2. 퇴적물 환경기준 개발의 배경

퇴적물질을 반영하는 다양한 관리기준의 설정은 퇴적물이 환경에 미치는 악영향을 사전에 예방하거나 이미 악영향이 있다고 판단되는 퇴적물에 대해서는 정화 또는 복구등의 적절한 조치를 취하도록 하는 등의 관리기준을 제시하는데 목적이 있다. 따라서 퇴적물질기준 설정의 배경을 이해하기 위해서는 적어도 퇴적물이 수질 및 수생태계에 미치는 영향에 대한 이해가 선행되어야 한다. 특히 퇴적물 관리에 있어 유의할 점은 일반적으로 매체에 포함된 오염물질이 문제가 되는 경우와는 달리 퇴적물의 경우 오염되지 않은 퇴적물이라 하더라도 퇴적물 자체만으로도 문제가 야기될 수 있다는 사실이다.

2.1. 수질/자연자원 관리

수체에 유입되는 퇴적물이 적절히 관리되지 않을 경우 자연자원, 용수이용, 위락/심미적인 측면에서 다양한 악영향을 초래함을 볼 수가 있다(표 II-1). 생태학적으로 퇴적물은 저서생물이 부착 또는 생활할 수 있는 공간을 제공하는 동시에 각종 수생생물의 산란장 또는 양육장으로서의 역할을 하고 있다. 어류의 산란에 적절한 조성을 가진 하상에 세립퇴적물이 유입되어 쌓이게 되면 산란장을 덮게되고 해당어류의 증식에 지대한 악영향을 미치며, 퇴적으로 인한 하상의 변화는 양육 또는 서식지 환경을 악화시켜(포식자나 적정한 수온이 유지되는 서식처가 노출) 궁극적으로 생물다양성 감소의 원인이 된다.

또한 수층에 지나친 부유퇴적물이 존재하는 경우에는 어류가 먹이를 찾는데 저해 요인이 되며 최악의 경우 부유물이 일정농도 이상이 되면 부유물 자체가 물고기의 아가미를 막는 등 직접적인 악영향을 미칠 수 있다. 한편, 부유퇴적물(浮游堆積物)의 퇴적뿐만 아니라 댐의 건설 등으로 인해 퇴적물 공급의 중단 또는 하상의 침식이 일어나는 경우 하상 변화에 따른 서식지 변화, 이에 따른 저서생물 및 하천 생물상의 변화가 불가피하다.

또한, 퇴적물이 자연자원뿐만 아니라 수질에 직·간접적으로 영향을 미치는 것은 잘 알려진 사실이다. 특히 상수원수로 사용되는 하천이나 호소수가 지나친 부유퇴적물을 포함하는 경우 미관상 문제를 일으키거나, 취수구를 막거나, 처리시스템을 더럽히는 등의 문제를 초래할 수 있고, 지나친 부유물의 퇴적은 수심감소 및 장기적으로는 저수용량 감소의 원인이 된다.

이러한 퇴적물 문제는 지역적인 문제인 경우가 많으므로 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서는 상수원수의 안정적 확보를 위해 직접적으로 관계되는 부유퇴적물농도(또는 탁도) 등을 수질환경기준에 반영하고는 있으나(최지용 외, 1997) 그 외의 퇴적물 관련기준은 대부분 전국적으로 적용되는 기준보다는 지역특수성과 문제의 성격에 따라 지역적으로 적용되는 기준인 경우가 대부분이다. 그 예로, 미국의 경우를 보면 부유물 농도(또는 탁도)등의 일부를 제외하면 퇴적물 관련항목은 주정부 차원의 서술적인 수질기준의 하나로, 예를 들어 ‘수저퇴적물은 특정어류의 산란에 영향을 미치지 않을 입도(粒度)를 유지·보전할 것’등의 형태로 반

영되어 있는 것이 보통이다.

그러나 미국 TMDLs의⁵⁾ 예에서 보듯이 퇴적물 관리의 목표 달성여부는 수질기준 자체보다는 수역특성에 따라 수질기준을 해석할 수 있는 지표, 즉 수질에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 퇴적물지표(最大濁度, 浮游物質 濃度, 底質의 平均粒徑, 細粒 堆積物의 含量, 産卵魚類의 數, 제방 또는 독의 침식정도 등)를 통해 판단하는 것이 현실적으로 볼 수 있다(구체적인 설정사례는 제3장을 참조).

물론 이러한 퇴적물지표는 지역적인 특수성 반영을 전제로 하여 수층지표, 수저퇴적물지표, 수로상태를 대표하는 지표, 생물학적 평가지표, 수변지역/수변경사지(水邊地域/水邊傾斜地)와 관련된 지표로 크게 분류되는데 지표의 선택 시 다음사항을 고려하도록 권하고 있다(USEPA, 1999a).

첫째, 과학적 또는 기술적 타당성을 고려해야 한다. 지표는 수질기준과 논리적으로 연관되어야 하며 수체에 대한 영향을 민감하게 반영해야 하는데 특히 퇴적물문제는 지역 또는 시기에 따라 크게 변하게 되므로 시간적, 공간적으로 변하는 퇴적물 문제를 적절하게 설명할 수 있어야 한다. 예를 들어 호우시 대량의 부유물로 인해 상수원 취수구가 막힐 수 있는 경우에는 호우시 예상되는 최대부유물농도를 지표로 설정하는 것이 논리적으로 타당하다는 것이다. 또한 퇴적물지표는 오염원과 그로 인한 반응을 적절하게 반영할 수 있어야 하며 기술적으로 신뢰성(정량적인 측정이 가능하고 재현성이 있어야 함)이 필요함은 물론이다.

둘째, 실질적 여건을 고려하여야 한다. 이는 자료수집은 가능한 한 경제적이어야 하며, 지표의 모니터링 또한 경제적이어야 함을 의미한다.

셋째는 관리목표에 적합한 퇴적물지표의 수는 반드시 단일 항목일 필요가 없다는 사실이다. 즉, 퇴적물의 영향을 역으로 추정할 수 있을 정도로 유역에서 일어나는 자연현상이 간단치 않으므로 필요한 경우 하나 이상의 복합적인 퇴적물 지표 선정이 필요할 수 있다.

5) TMDLs은 처리기술에 근거한 배출규제로나 기존의 수단을 통한 오염원 관리에도 불구하고 수질환경기준의 달성이 어려운 수계의 수질개선을 이루기 위해 1991년부터 미국에서 시행되고 있는 일종의 수질총량규제이다. TMDLs는 수질환경기준이 설정된 모든 물질을 대상으로 하므로 퇴적물관련 기준을 달성하지 못한 수계도 퇴적물에 대한 TMDLs을 수립·시행해야 한다. 기타 자세한 사항은 이창희(2000)를 참조바란다.

〈표 II-1〉 일반퇴적물이 미치는 영향

항 목		자연자원 문제	관련 퇴적물 문제
수생 생물	어류	· 어류의 이동 · 어류의 산란 · 먹이 확보 · 치어 성장 · 포식자로부터 보호 · 겨울철 양육지 · 먹이 감소	· 이동통로 차단 · 산란을 위한 자갈층 손실 · 퇴적물의 축적 또는 세굴 · 하천지형의 변화 · 수변녹지 손실 · 세립퇴적물 축적으로 산소량 감소
	무척추동물	· 다양성 및 개체 밀도 감소	· 세립퇴적물 축적 · 수변녹지 감소
	양서류	· 유생(幼生) 발생 및 성장	· 세립퇴적물 축적
상수원수		· 저수용량 감소 · 맛/미관 악화 · 취수구 막힘 · 원수처리 저해	· 퇴적 · 부유물 농도(탁도) · 총부유물 · 파손, 마모(취수구)
위락/심미		· 미관저해 · 하도구조 변경에 따른 낚시, 수영, 래프팅 저해	· 부유물 농도(탁도) · 하도변경 · 연못, 웅덩이 수심감소
농업		· 취수펌프 막힘 · 가축용 용수공급 · 농업용 저수지 저수용량 감소	· 부유물 · 가축이 먹기에 너무 탁함 · 부유물 퇴적
공업		· 수처리 · 냉각수	· 장비에 부유물 부착 · 부유물 처리 곤란
수운(水運)		· 수로변경	· 부유물 퇴적

2.2. 준설퇴적물 관리

퇴적물 관리문제는 수로, 항로 및 박지의 유지를 위해 준설했던 퇴적물을 처분하는데 있어 환경에 미치는 악영향을 최소화하는 노력에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 즉, 항로, 박지, 수로의 퇴적물은 오염여부에 관계없이 수운을 위한 적절한 수심유지를 위해 주기적인 준설이 불가피하고 대부분의 준설했던 퇴적물은 그 양이 많기 때문에 운반의 편의를 위해 준설수역 주위의 준설퇴적물투기장에 투기되는 것이 보통이다. 만일 준설했던 퇴적물이 오염되어 있는 경우 투기과정에서 수질에 대한 악영향은 물론이고 투기해역의 바닥에 퇴적된 이후에도 지속적인 악영향을 미칠 가능성이 있기 때문에, 투기기준을 설정하여 기준을 초과하는 퇴적물에 대해서는 기준이하로 처리하여 투기하거나 폐쇄처분장과 같은 다른 처분방법을 선택하도록 관리하게 된다. 우리나라에 잘 알려진 미국연방수질국의 투기기준이나 이와 유사한 개념에 근거하여 미국 위스콘신주에서 설정한 준설퇴적물 잠정투기기준은 이러한 투기기준의 전형적인 예로 볼 수 있다(표 III-11참조).

그러나 같은 오염물질 농도를 가진 퇴적물이라 하더라도 투기하고자 하는 수역의 물리, 화학, 생물학적인 환경에 따라 그 영향이 크게 달라지므로 최근에는 투기기준에 근거하여 투기 여부를 결정하기보다는 단계화된 영향평가 과정을 거쳐 투기여부를 결정하는 것이 보통이다 (USEPA&USACE, 1991; 1998a; 1998b). 이러한 단계화된 영향평가는 기존 해당 수역의 자료를 효과적으로 사용할 수 있고 불필요하게 많은 검사를 요구하지 않으며 환경에 대한 악영향을 정확히 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 미국에서 사용하고 있는 단계화된 영향평가 과정은 <표 II-2>와 같으며, 본 보고서의 주 관심이 되고 있는 수저퇴적물에 대한 퇴적물질기준이 설정되어 있다면 제2단계 평가과정에서 퇴적물질기준이 사용될 수 있다.

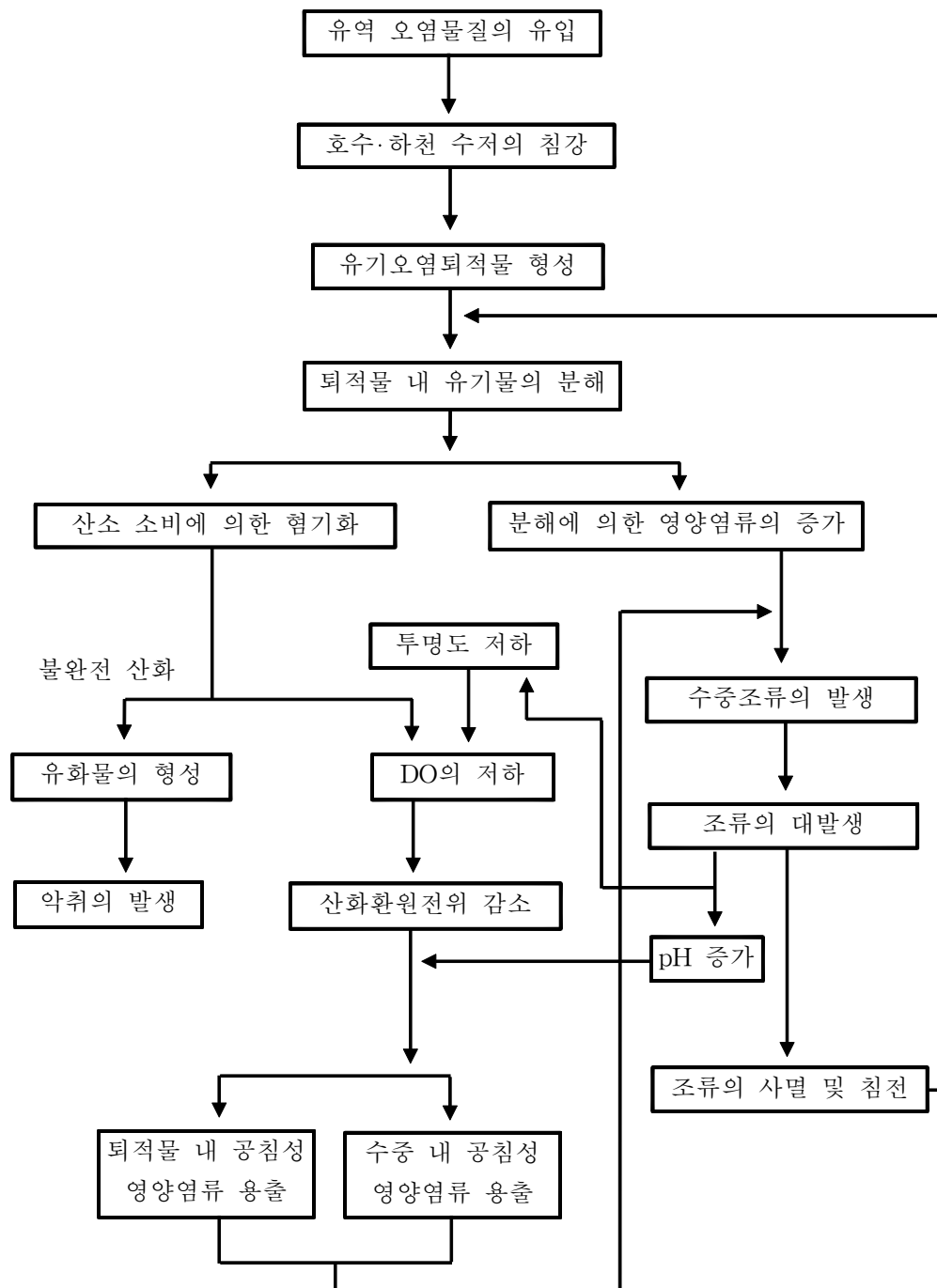
이러한 걱정수심 유지를 위한 전통적인 준설과는 별도로, 수질 또는 수생태계에 악영향을 미칠 정도로 오염된 유기오염퇴적물이나 오염퇴적물을 정화하는 차원에서 시행하는 환경준설의 경우에는, 투기기준보다는 수저퇴적물의 오염여부와 제거여부를 결정하는 판단기준으로서의 퇴적물제거기준을 설정하는 것이 일반적이다. 폐수, 생활오수, 폐기물처리장 침출수, 도시 및 농촌의 강우 유출수에 포함되어 하천으로 유입된 유기물, 영양염류, 유해화학물질 등의 오염물질은 비교적 유속이 약한 하천, 호소, 하구, 해양 바닥에 침강되어 퇴적물에 저장되었다가 환경변화에 따른 재용출, 먹이사슬을 통한 생물농축을 통해 저서생물, 수생생물, 국민건강에 악영향을 미칠 수 있다. 즉, 퇴적물에 포함된 유기물질이 분해될 때 용존산소를 소모하므로 수층의 혼합이 원활하지 않아 지속적으로 산소가 공급되지 않을 경우 무산소 환경이 되어 수중생물 생존에 치명적인 영향을 미친다. 또한 이러한 환원환경에서는 유기물을 분해하는 미생물이 메탄, 황화수소 등의 유독성 가스를 생성할 뿐만 아니라 인, 질소 등의 영양염류가 다시 무기이온 상태로 수중에 용출될 수 있으므로 이것은 부영양화의 원인이 되어 조류(藻類) 대발생에 의한 수질악화를 초래할 수 있다(그림 II-2).

<표 II-2> 준설퇴적물의 투기를 위한 단계별 영향 평가(예)

단계	평가	수층	수저
1	· 기존의 자료분석을 통해 준설물질의 악영향 가능성 평가	· 악영향 가능성에 대한 전반적 판단 · 다음 단계에서 고려 또는 배제해야 할 오염물질 선별 · 악영향 가능성이 없는 오염물질 배제를 위한 제한적 실험	
2	· 수층과 수저퇴적물의 화학분석을 통한 스크린	· 수층의 오염물질 농도 측정 및 모델 · 수질환경기준과 비교 (수치 혼합 모델 사용)	· 비이온 유기오염물질의 이론적인 생물농축 가능성 계산 · 퇴적물질기준과 비교
3	· 일반적인 독성검사와 생물농축검사	· 수층 오염물질의 독성 측정: 혼합작용 후 독성, 주로 단기 독성 (실험실 검사)	· 전량 퇴적물에 대한 독성 및 생물농축 검사: 주로 단기독성 (실험실 검사) · FDA기준 및 관련 기준과 비교
4	· 사안의 특성에 적합한 독성검사 및 생물농축검사	· 사안 특성에 따른 수층 오염물질의 독성측정: 장기독성 (주로 현장검사 또는 장기 실험실 검사)	· 전량 퇴적물에 대한 독성 및 생물농축 검사: 주로 장기독성 (현장검사 또는 장기 실험실 검사) · 필요에 따라 저서생물 검사

자료: 이창희 외(1998)로부터 재인용

<그림 II-2> 퇴적물 오염과정과 물질순환 및 수질의 영향



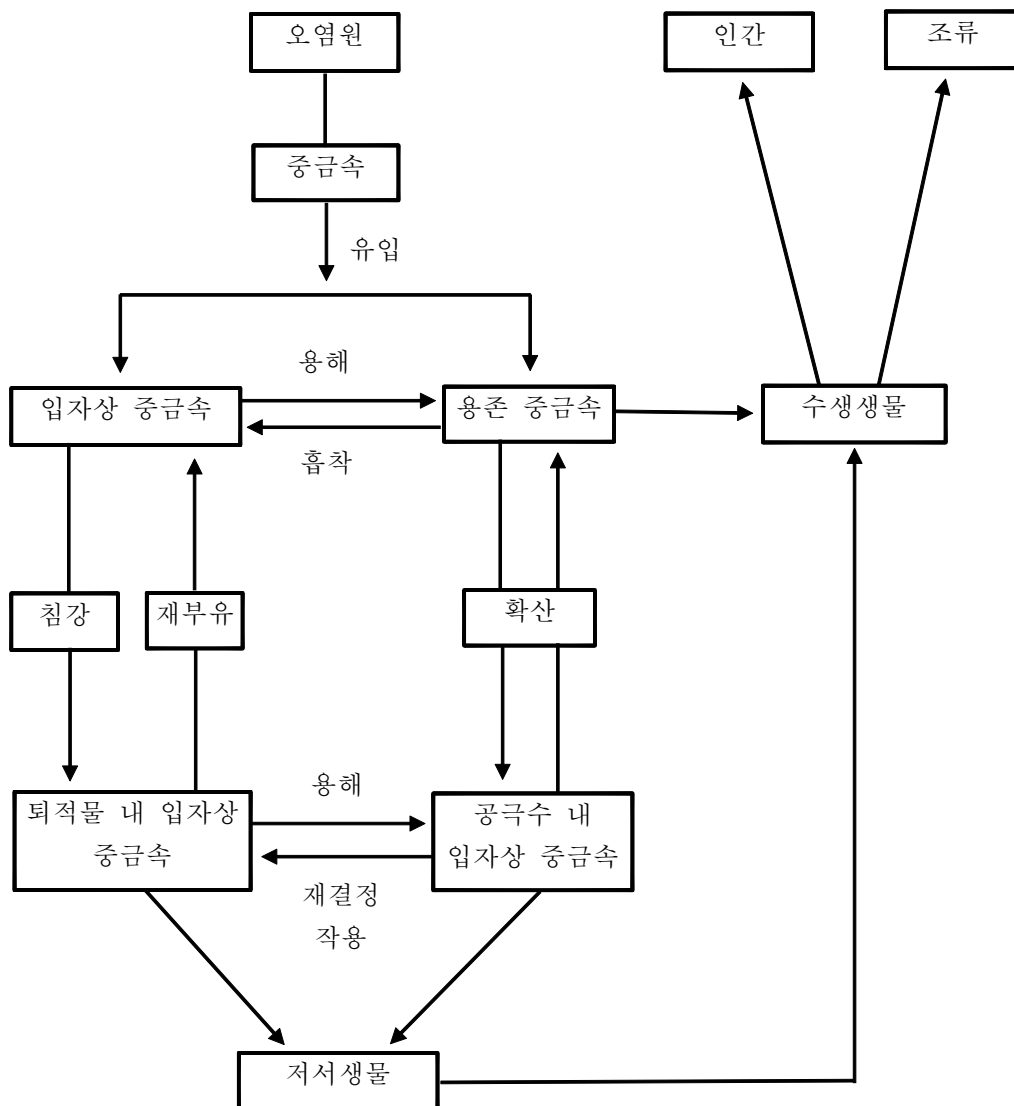
자료: 국립환경연구원 (1990)

또한 퇴적물에 포함된 중금속 등의 유해물질은 환경의 변화에 따라 생지화학적 반응을 통해 수중으로 재용출되어 수생생물에게 악영향을 미치게 되는데, 특히 잔류성 및 생물농축성이 강한 유해화학물질은 저서생물에게는 물론이고 생물농축과정을 거쳐 먹이사슬을 통해 연결되어 있는 수생생물, 더 나아가서는 국민건강에 악영향을 미칠 수 있다(그림 II-3).

따라서, 오염된 퇴적물이 수질, 저서생물, 야생생물 또는 국민건강에 미칠 수 있는 악영향

을 방지하기 위해서는 오염된 퇴적물을 수저에서 제거하거나 이에대한 적절한 처리가 필요하며, 퇴적물 관리상 이러한 제거 또는 처리 여부를 결정하는 기준으로서 제거기준이 설정되게 된다. 제거기준은 외국의 설정사례를 보면 오염물질의 종류(유기물 또는 영양염류, 유해물질), 관리의 대상(수질, 저서생물, 야생생물, 국민건강)에 따라 다양하게 설정되며 실제 관리대상에 미치는 악영향을 조절하는 지역의 자연환경 특성을 반영하여 개발된다.

퇴적물 제거기준은 다음에서 상세히 설명되겠지만 최근 저서생물에 대한 악영향을 근거로 개발되고 있는 수저퇴적물 관리기준의 하나로 통합되고 있는 경향이 있다. 즉, 통계적으로 퇴적물 속에 포함된 오염물질이 악영향을 빈번하게 보일 수 있는 농도, 이미 오염이 진행되어 그대로 방치할 경우 저서생물에 대한 악영향이 확실히 예상되어 적극적인 대책이 강구되어야 하는 농도가 일반적으로 퇴적물 제거기준으로 설정되고 있다.



<그림 II-3> 중금속의 수계 내 퇴적물, 공극수, 생물간 거동 모식도

2.3. 수저퇴적물 관리

최근의 환경관리는 수질, 대기질, 토양질 각 매체별 관리에서 벗어나 매체간의 유기적인 연관관계를 고려한 통합적인 관리로, 오염물질에 대한 사후처리의 개념보다는 발생원 차원의 예방대책으로, 환경문제를 발생원 중심에서 벗어나 수용자 입장에서 파악하는 경향으로 전환되고 있다. 특히 오염퇴적물에 대한 연구가 진행되어 오염퇴적물에 의한 악영향이 명확히 밝혀지면서 미국, 캐나다, 유럽국가들은 퇴적물 관리기준 및 관리체계의 개발을 통해 기존의 물, 대기, 토양과 더불어 퇴적물을 포함하는 종합적인 환경관리의 기틀을 구축해 가고 있다.

모든 환경관리의 시작은 환경문제의 파악 및 평가에서 비롯되듯이 퇴적물 관리의 시작은 퇴적물과 관련된 문제의 파악 및 문제의 심각성을 평가하는 작업에서 비롯된다. 퇴적물로 인한 악영향의 평가, 특히 오염퇴적물로 인한 악영향의 평가는 생물학적 검사, 화학적 검사, 저서생물 분석, 퇴적물질기준과의 비교를 통해 수행할 수 있는데 신뢰성 있는 관리기준 즉 퇴적물질기준이 설정되어 있다면 전문적인 지식이 없는 공무원, 사업자 및 관리자들도 비교적 쉽게 퇴적물의 질을 평가할 수 있으며 비용효율적 방법이 될 수 있다.

특히 퇴적물질기준도 수질환경기준과 마찬가지로 오염물질별 농도로 표현되어 화학물질별 악영향 평가와 해당 오염물질에 대한 오염원 관리를 가능하게 한다는 점에서 선호되고 있으며, 실제 대부분의 국가가 화학물질 농도기준의 퇴적물질기준을 개발하였거나 개발하고 있다. 그러나 제1장에서 간단하게 언급한 바와 같이 퇴적물질기준은 오염물질의 종류(유기물 및 영양염류, 유해화학물질), 적용대상(저서생물, 야생생물, 국민건강), 적용지역 또는 적용범위(사업별, 지역적, 전국적), 퇴적물 관리상 사용목적(오염평가기준, 정화목적, 독성판정, 생물농축판정)에 따라 개발방법론이 다르기 때문에 실제로 각국에서 사용되고 있는 퇴적물질기준은 제3장에 제시한 것 처럼 매우 다양하다. 따라서 설정된 퇴적물질기준에 대한 이해를 위해서는 퇴적물질기준의 개발에 사용된 방법론에 대한 검토가 선행되어야 하는데 각 개발방법의 개요는 다음과 같다.

가. 배경농도법 (Sediment Background Approach, SBA)

이 방법은 평가되는 지역의 퇴적물 오염물질 농도를 자연조건을 대표하여 반영한다고 여겨지는 지역의 오염물질 농도(배경농도)와 비교하는 것이다. 배경농도 설정이 여의치 않은 경우에는 대안으로 특정한 지역의 과거 측정 자료 또는 적절하게는 퇴적물 주상시료로부터 얻어진 오염물 측정자료를 배경농도로 정의할 수 있다. 이 방법을 사용하면 만약 하나이상의 오염물이 평균 배경농도를 유의한 차이(예를 들어 표준편차의 2배 이상)로 초과한다면 그 지역은 오염된 것으로 간주될 수 있다. 이 방법을 적용할 때는 표본지점의 선정, 시료준비, 시료분석방법, QA/QC에 있어 특별한 주의가 요구된다.

나. 퇴적물주입 생물검정법 (Spiked-Sediment Bioassay Approach, SSBA)

퇴적물주입 생물검정법은 퇴적물질기준을 설정하기 위해 실험실 조건에서 특정 오염물질에 대한 생물의 반응, 즉 생물위해성을 평가하는 방법이다. 이 방법에서는, 화학물질의 농도와 생물반응간의 원인과 결과를 설명하기 위해(예를들어 사멸율, 성장, 생산 감소, 생리학적 변화) 깨끗한 퇴적물에 농도를 알고 있는 오염물질을 주입한다.

이 방법은 하나의 화학물질 또는 몇 가지 화학물질이 혼합된 퇴적물의 위해성을 평가하는데 사용되어 왔다. 전형적으로 정량적인 농도로 주어지는 퇴적물질기준치는 안전율을 가장 민감한 종에 대한 가장 낮은 영향수준에 적용하여 얻는다.

다. 평형분배법 (Equilibrium Partitioning Approach, EqPA)

평형분배법은 미국의 환경보호청에서 퇴적물질기준을 설정하는데(주로 비극성 유기화합물에 대해) 사용되는 방법이다. 이 방법은 퇴적물 매트릭스의 여러 상간의 오염물질 분배는 그 물질의 물리적, 화학적 성질을 바탕으로 예측 가능하다는 가정에 기초하고 있다. 또한 여러 상간에는 계속적인 물질교환이 이루어지기 때문에 퇴적물의 오염물질과 공극수의 오염물질 간에는 평형이 이루어진다는 가정을 하고 있다. 이 방법은, 관찰되는 생물학적 영향과 공극수에서 측정되는 비극성 유기오염물질 농도사이에 양의 상관관계가 존재한다는 것을 보여주는 퇴적물 독성 시험결과에 의해 뒷받침되고 있다.

이 방법에서는, 수중의 생물보호를 위해 개발된 수질기준(또는 표준)이 퇴적물질기준도출의 기초로 사용된다. 퇴적물질기준은 특정 오염물질에 대해 퇴적물-수체간의 화학물질 분배계수를 이용하여 수질기준(또는 표준)치로부터 계산될 수 있다. 즉, 비극성 유기화학물질에 대한 계산 과정은 다음과 같다.

$$SQG = K_p \cdot FCV$$

여기서 SQG: 퇴적물질기준($\mu\text{g/kg}$)

K_p : 화학물질의 분배계수(L/kg)

FCV: 수질기준($\mu\text{g/L}$)

현재 이 방법은 비극성 유기화합물질(예를 들어 PAHs, PCBs, biphenyl, furan, dioxin과 여러 종의 살충제)에 대한 퇴적물질기준을 설정하는데 적합한 것으로 여겨지고 있는데 지금까지 미국 환경보호청은 5가지 화학물질(표 III-18 참조)에 대해 퇴적물질기준을 개발하였다. 또한, 금속의 생물이용성에 대한 황화합물의 역할도 연구 중에 있고, 중금속의 퇴적물질기준 설정을 위한 연구도 활발히 진행중이다.

라. 체조직내 잔여량 측정법 (Tissue Residue Approach, TRA)

이 방법은 생물-수체-퇴적물 평형분배방법으로 알려져 있으며 생물의 체조직에 악영향을 미치지 않는 수준의 퇴적물 화학물질 농도를 결정하여 이를 퇴적물질기준으로 삼자는 것이다. 이를 위해서는 퇴적물 오염물질 농도와 생물의 체조직 오염물질 잔여수준간의 관계에 대한 파악이 필요하며, 그 체조직의 잔여수준과 생물종의 포식자에 미치는 악영향간의 관계가 설정되어야 한다. 몇몇 방법이 식용에 적합한 생물체 체조직 오염물질 수준에 대한 기준을 설정하는데 사용 가능하다.

마. 스크린 수준 농도 결정법 (Screening Level Concentration Approach, SLCA)

기본적으로 이는 저서생물 보호를 위한 퇴적물질기준의 설정에 사용될 수 있는 생물학적 영향에 기초한 방법이다. 이 방법은 현장조사를 통해 수집된 생물학적 자료와 화학적 자료를 이용하여 일정한 비율의 저서생물종이 견딜 수 있는 오염물질의 최고농도인 스크린 수준 농도(SLC)를 결정하는 방법이다. 먼저, 적절한 자료가 있는 각각의 저서생물종에 대한 개별 SLC가 결정되는데 이는 그 종이 존재하는 모든 지역에 대한 오염물질 농도와 생물종의 빈도 분포를 구했을 때(적어도 10개의 장소에 대한 자료가 요구된다) 이 분포의 90퍼센트에 해당하는 농도로 정의된다. 모든 생물종에 대한 SLC가 결정되면 95퍼센트의 생물종이 견딜 수 있는 농도값을 빈도분포에서 얻을 수 있는데 이를 해당 오염물질에 대한 SLC라고 한다.

바. 퇴적물질 종합평가법 (Sediment Quality Triad Approach, SQTA)

퇴적물질 종합평가법은 원래 특정지역 퇴적물의 오염정도를 평가하기 위해 개발되었으나 이를 위해 수집된 자료는 퇴적물질기준의 설정을 위한 기초자료로도 사용되고 있다. 이 방법은 퇴적물의 화학적 특성, 생물검정, 현장에서의 생물학적 영향의 세 가지 측정자료를 종합적으로 고려하여 오염여부를 결정하는 방법이다. 퇴적물 화학과 다른(물리학적)특성에 관한 자료는 특정지역의 오염정도를 평가하고 저서 생물종의 수와 분포에 영향을 주는 다른 요소를 밝히기 위해 수집된다. 생물검정 결과는 퇴적물 층에 존재하는 오염물질의 독성을 평가하는데 사용된다. 저서 생물상 군집구조나 기형 저서 어류종의 발견과 같은 현장의 생물 영향은 퇴적물 오염물질로 인해 발생할 수 있는 생물영향을 평가하는 자료로 이용된다. 이 세 요소의 종합적인 고려를 통해 조사지역의 관리상 우선순위 결정을 위한 평가나 특정지역 퇴적물질 관리목표의 설정이 가능하나 지역적, 국가적으로 적용되는 퇴적물질기준의 개발방법론으로는 적합하지 않다.

사. 악영향 임계법 (Apparent Effects Threshold Approach, AETA)

워싱턴주 푸젯사운드의 퇴적물 관리에 사용되도록 미국의 유명한 환경컨설팅 업체인 테트라텍에 의해 개발되었다. 이 방법은 주로 저서생물에 대해, 측정된 퇴적물의 오염물질 농도와 관찰된 생물학적 영향사이의 관계에 기초하여 생물학적 악영향이 항상 관측되는 농도를 정의하는 것이다. 이런 생물학적 영향은 저서 또는 수체생물종(퇴적물 독성시험의 대상이 되는)에

대한 독성, 저서 무척추 생물의 수 변화, 저서 무척추 생물종 군집구조 변화 등을 포함한다.

이는 생물학적 영향과 퇴적물 화학물질자료 간의 관계에 기초한다는 점에서 위에서 언급한 스크린 수준 농도 결정법과 유사하다. 그러나, 악영향 임계법이 생물학적 영향을 더욱 다양하고 민감하게 고려하고 있기 때문에 퇴적물질기준의 설정에 있어서는 스크린 수준 농도 결정법보다 더욱 적절하게 사용될 수 있다.

아. 증거자료 가중법 (Weight of Evidence Approach, WEA)

퇴적물질기준을 설정하기 위한 이 방법은 원래 미국해양대기청의 ‘퇴적물 오염현황 및 전망 프로그램’에 의해 수집된 해양퇴적물의 화학물질 자료를 평가하기 위한 평가지침으로 개발되었다. 이 방법은 위에서 언급한 세 종류의 방법, 즉 평형분배법, 퇴적물주입 생물검정법과 퇴적물 화학물질과 생물학적 영향간의 관계자료에 기초하는 다양한 방법(예를 들어, 악영향 임계법, 스크린 수준 농도 결정법, 퇴적물질 종합 평가법)에 의해 생성된 자료를 포함하는 데이터베이스를 이용한다. 데이터베이스의 모든 자료는 그것을 도출한 방법과는 상관없이 같은 가중치가 주어진다.

퇴적물질기준의 개발에 적합한 자료를 선정하기 위해서 데이터베이스에 수록되는 자료는 자료의 특징(예를 들어, 퇴적물 화학자료와 생물학적 영향의 관련여부), 사용된 방법, 측정된 종말점의 형태와 크기, 화학적, 생물학적 자료간의 관련정도 등의 기준에 의해 적정성이 평가된다. 화학적, 생물학적 변수간의 조화를 보이지 않는 자료도 데이터베이스에 수록되기는 하지만 자료의 통계적 평가에는 사용되지 않는다.

모든 선정기준을 만족하는 자료는 데이터베이스에 통합된다. 각각의 기재사항에는 오염물 농도, 측정된 생물학적 반응의 형태, 관찰된 영향과 오염물질 농도 사이의 관련 정도 등이 포함된다. 비독성, 영향이 관찰되지 않은 시료에 관한 자료는 배경조건을 대표하는 것으로 가정한다. 이러한 자료들은 화학물질 농도의 증가에 따른 생물학적 영향을 볼 수 있도록 분포그래프로 작성되고 각 화합물에 대한 농도와 생물영향에 대한 분포그래프에서 영향을 주는 하위 10%, 50% 농도가 결정된다. 여기서 하위 10%에 해당하는 부분을 ERL(Effect Range Low)이라 정의하고, 이 이상의 농도에서는 민감한 생활단계나 생물종에 대한 악영향이 시작되는 것으로 보아 낮은 한계값으로 설정된다. 50%에 해당하는 부분은 ERM(Effect Range Median)으로 정의되고 이 값 이상에서는 대부분의 종에 대한 악영향이 자주 또는 항상 관찰되는 두 번째 한계값으로 설정된다. 이 두 가지 값들이 퇴적물질기준으로 사용된다.

이상과 같이 퇴적물질기준의 개발을 위해서 실제 많은 방법들이 사용되고 있으나 각 방법들은 나름대로의 장단점을 가지고 있기 때문에(표 II-3), 퇴적물질기준의 개발시 퇴적물질기준의 적용대상, 적용범위, 적용목적을 고려하여 가장 적절한 방법, 또는 필요하다면 적절한 몇 가지 방법을 선택해야 함을 알 수 있다.

〈표 II-3〉 퇴적물 질 평가를 위한 수치기준의 개발 방법론 비교

방 법	장 점	단 점
배경농도법 (SBA)	· 일반적으로 충분한 양의 자료 가용	· 생물에 대한 영향정도를 고려하지 않음
퇴적물주입 생물검정법 (SSBA)	· 생물에 대한 영향평가에 기초 · 모든 화학물질 및 대부분의 퇴적물 유형에 적용 · 원인과 영향에 대한 평가가 가능	· 일반적으로 충분한 자료가 가용하지 않음 · 시행비용이 매우 큼 · 퇴적물 주입방법 및 실험과정의 표준화 미흡
평형분배법 (EqPA)	· 생물에 대한 영향평가에 기초 · 모든 화학물질 및 대부분의 퇴적물 유형에 적용 · 오염물질의 생물유효성 고려 · 원인과 영향에 대한 평가가 가능 · 방법의 보완 및 검증을 위한 미국 환경보호청의 지속적인 지원	· 소수의 화학물질에 대한 기준만이 현재 개발되어 있음 · 일부 오염물질에 대한 수질기준이 가용하지 않음 · 자연상태의 퇴적물은 거의 평형상태에 있지 않음
체조직내 잔여량 측정법(TRA)	· 적용이 비교적 용이 · 생물농축 현상 고려 · 국민건강을 위한 신체조직 잔여 농 도 측정 프로토콜이 개발되어 있음	· 야생생물을 위한 신체조직 잔여농도측정 프로토콜 이 개발되어 있지 않음 · 자연상태의 퇴적물은 거의 평형상태에 있지 않음
스크린 수준 농도 결정법 (SLCA)	· 생물에 대한 영향평가에 기초 · 일반적으로 충분한 양의 자료 가용 · 모든 화학물질 및 대부분의 퇴적물 유형에 적용	· 원인과 영향에 대한 직접적인 관계정립이 불가능 · 방대한 양의 자료가 요구됨 · 사용되는 종말점이 예민하지 않음 · 오염물질의 생물유효성에 대한 고려 없음
퇴적물질 종합 평가법 (SQTA)	· 생물에 대한 영향평가에 기초 · 화학물질 농도, 생물검정 및 현장 의 생물영향을 종합적으로 고려 · 증거자료에 대한 가중 평가 가능	· 기준을 수치로 나타내기 어려움 · 많은 노동력 및 비용이 요구됨 · 종합적 평가를 위한 통계적으로 유의한 기준이 확 립되어 있지 않음 · 지역 특성을 반영하는 방대한 자료가 요구됨 · 원인과 영향에 대한 직접적인 관계 정립이 불가능 · 오염물질의 생물유효성에 대한 고려 없음
악영양 억제법 (AETA)	· 생물에 대한 영향평가에 기초 · 모든 종류의 생물자료가 고려됨 · 모든 화학물질 및 대부분의 퇴적물 유형에 적용	· 지역 특성을 반영하는 방대한 자료가 요구됨 · 원인과 영향에 대한 직접적인 관계 정립이 불가능 · 자원보호를 위해 기준이 지나치거나 미흡할 위험성 있음 · 광범위한 지역에 적용되기 어려움 · 오염물질의 생물유효성에 대한 고려 없음
증거자료 가중법 (WEA)	· 생물에 대한 영향평가에 기초 · 모든 종류의 생물자료가 고려됨 · 모든 화학물질 및 대부분의 퇴적물 유형에 적용 · 증거자료에 대한 가중 평가 가능	· 지역 특성을 반영하는 방대한 자료가 요구됨 · 원인과 영향에 대한 직접적인 관계 정립이 불가능 · 다양한 종류로부터의 자료추출이 미확인된 불확실 성의 원인이 될 수 있음 · 지역 특성을 반영하는 방대한 자료가 요구됨 · 오염물질의 생물유효성에 대한 고려 없음

자료: FDEP(1994a)로부터 정리

2.4. 퇴적물질기준 개발과 관련된 문제점

퇴적물질기준 개발을 위해서 많은 종류의 방법이 사용되고 있는 것은 기준설정 목적, 적용 범위, 법적 성격 등에 따라 개발방법이 달라질 수 있음을 반영하는 것이기도 하지만 어느 한 가지 방법도 만족스러운 방법이 아님을 의미하기도 한다. 이는 퇴적물 및 퇴적물에 포함된 오염물질이 실제 저서생물을 포함한 환경에 미치는 영향을 파악하는데 있어 과학적으로 많은 불확실성이 내재되어 있기 때문이다.

이러한 불확실성은 많은 요인에 의해 발생하는데, 첫번째로 퇴적물에 포함된 오염물질은 대부분의 경우 다른 오염물질들과 공존하고 있으나 실험실 조건하에서는 이러한 복잡한 오염물질간의 상호작용과 공존물질에 의한 영향을 정량적으로 파악하기 어렵다는 사실을 들 수 있다. 또한 퇴적물 내에서 오염물질들은 자연적 조건과 환경에 따라서 다양한 형태로 존재한다. 예를 들어 금속의 경우 퇴적물 내에서 여러가지 산화상태로 존재할 수 있는데, 이러한 다양한 형태는 발생하는 독성수준의 예측을 어렵게 하고 생물농축시 그 형태와 들어가는 경로에 따라 생물에 미치는 영향이 달라진다.

또 다른 불확실성은 퇴적물의 오염물질 전체농도 중 생물이 이용가능한 비율을 예측하기가 쉽지 않다는데서 비롯된다. 이러한 생물이용성은 직접적인 방법으로 특정 오염물질에 대한 노출실험을 통해 파악하게 되는데, 실험실 조건에서는 퇴적물과 생물체간 상호작용의 경로와 생물에 대한 독성물질의 다양한 흡수 경로를 파악하기 쉽지 않으므로 생물에 대한 악영향을 정확히 평가하기가 어렵다. 또한 오염물질의 생태계내에서의 이동과 각 단계에 대한 영향 등 생태적 연관성이 명확히 밝혀져 있지 않아 실제 자연환경에서의 생물이용성을 예측하는 것은 더욱 어려운 문제이다.

한편, 저서생물에 대한 악영향을 토대로 기준을 개발하는 경우 저서생물 군집을 이루는 각 생물종이 퇴적물에 포함된 오염물질에 대해 각각 다르게 반응할 수 있으므로, 저서생물 군집의 보호를 위해서는 어느 특정 종의 반응만으로 전체 악영향을 예측하기가 불충분하다. 따라서 오염물질 악영향에 대한 민감성이 여러 종에 대해 평가되어야 하나, 지금까지는 일부 종에 대해서만 생물독성 평가가 수행되어 왔고 이러한 점도 퇴적물질기준 설정시의 제한요인으로 작용한다.

또한 퇴적물에 포함된 오염물질의 농도는 퇴적물 입경, 유기물 함량, 수환경의 변화, 퇴적물의 수직분포, 지질학적인 구성요소, 유속 등의 지역적인 요인에 의해 크게 좌우되므로 이들 요인에 대한 적절한 보정이 필요하다.

이처럼 다양한 물리, 화학, 생물학적인 총체적 요인이 오염물질에 대한 저서 생물의 반응을 결정하므로 퇴적물질기준의 설정을 위해서는 자연환경에서의 오염물의 분포와 거동을 지배하는 전 과정을 포함할 수 있는 방법이 사용되어야 한다. 그러나, 이러한 방법의 설정을 위해서는 많은 연구가 뒷받침되어야 하고, 지역간 통계적 비교를 위한 양적인 데이터, 퇴적물 독성 검사를 위한 생물학적, 물리학적, 화학적, 지리학적, 수문학적 데이터의 포괄적 분석을 필요로 하므로 아직까지 퇴적물질기준 설정에 있어 어느 한가지 특정방법을 적용시키기는 어려운 실정이다.

Ⅲ. 퇴적물질기준의 개발사례

1. 일반퇴적물관리기준

오염되지 않은 일반퇴적물은⁶⁾ 주로 저서생물의 서식처, 주요어류의 산란 및 양육을 위해 적절한 질이 유지되어야 한다는 생태학적인 측면, 상수원수 및 농공용수를 취수하는데 저해가 되지 않아야 한다는 용수이용 측면과 위락/경관에 저해가 되지 않아야 한다는 측면에서 관리되어야 한다. 이러한 일반퇴적물에 대한 관리기준은 국가에 따라 그 설정양상이 매우 다르지만 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서는 상수원수의 안정적 확보를 위해 직접적으로 관계되는 부유물 농도(SS) 등을 수질환경기준에 반영하고 있다.

그러나 부유물 농도(또는 탁도)등의 일부를 제외하면 퇴적물관련 항목은 수질환경기준에 정량적인 수치로는 반영되어 있지 않은 것이 일반적이다. 이는 일반퇴적물로 인해 야기되는 문제가 전국적으로 다루어야 하는 환경문제이기보다는 지역특수성과 문제의 성격에 따라 지역적으로 문제가 되는 경우가 대부분이기 때문이다. 따라서, 일반퇴적물에 대한 관리기준의 설정사례를 광범위하게 수집하기보다는 최근 TMDLs의 시행과 함께 수질관리의 입장에서 일반퇴적물 문제를 집중적으로 다루고 있는 미국의 사례를 중심으로 소개하도록 하겠다.

1.1. 퇴적물지표의 종류

퇴적물지표는 크게 수층지표, 수저퇴적물지표, 수로상태를 대표하는 지표, 생물학적 평가지표, 수변지역/수변경사지와 관련된 지표로 크게 분류된다(USEPA, 1999a).

가) 수층지표는 총부유물질 또는 탁도에 대한 수질기준이 설정된 수역, 부유물질이 주로 문제가 되는 지역(예로서 상수원수 취수, 공업용수 공급, 위락용 등), 퇴적물 부하로 인한 문제가 있거나(예로서 저수지 또는 하구) 부유 및 침적 퇴적물 분석을 기초로 한 퇴적물 평가방법이 사용되는 지역, 수층지표에 대한 정보는 기존자료로부터 수집이 가능하나 여타의 지표에 대해서는 자료수집이 어려운 지역(예를 들어 수저의 세립퇴적물 문제에 대한 대체지표로 이용), 여러 지천으로부터 유입되는 상대적인 퇴적물의 부하량을 고려할 필요가 있는 지역, 사업구간 상류와 하류 모두의 수질지표가 필요한 지역, 퇴적물 지표가 일반적으로 유량에 의존하므로 유량자료가 가용한 지역에서 유용하게 사용되며 그 장단점은 <표 III-1>과 같다.

6) 여기서 일반퇴적물은 오염퇴적물 또는 유기오염퇴적물을 제외한 퇴적물로서 퇴적물 조성으로 볼 때 일반적으로 오염문제를 야기하지 않는 조립질 퇴적물(모래, 자갈 등)이나 퇴적물에 포함된 오염물질 보다는 퇴적물 자체가 가지는 성질로 인해 수환경 이용에 장애가 될 수 있는(부유퇴적물 등) 퇴적물을 의미한다.

<표 III-1> 수층지표의 장단점 비교

장점	단점
· 직접 수체의 변화를 체감할 수 있기 때문에 일반 시민에게도 직관적으로 인식됨 · 부유물질 및 탁도는 지정된 사용목적에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 주요인 · 지표 자료가 퇴적물 부하량을 측정하는데 사용될 수 있으므로 지표는 이중 효과를 제공 · 작물 재배, 도시 유출, 방목 등으로부터 야기되는 지표 변화에 대한 실질적인 경험이 가능 · 몇몇 유역에서 방대한 자료가 가용함(특히 부유물질 농도)	· 특정 관리행위와 총부유물질/탁도 변화와의 관련성을 찾기 어려움 · 강우, 수문, 기타 다른 요소의 변동에 따라 시간적, 공간적 변화가 매우 심함 · 유량이 풍부한 시기에는 측정이 어렵거나 불안정할 수 있음 · 서식지의 상태 등의 지정목적 또는 이용목적에 나타내기는 부적합 · 하상 근처에서 움직이는 밑짐(bed load)을 반영 못함. 밑짐은 측정하기도 매우 어려움 · 유용한 자료가 되기 위해서는 동일한 시기에 측정된 유량 또는 방류량에 대한 자료가 요구됨 · 인간활동으로부터 기인하는 변화를 구별하기 어려움

나) 수저퇴적물 지표는 자갈층 내 세립퇴적물이 산란 또는 부화에 악영향을 미치는 수역, 자갈층 주변의 퇴적물 축적이 무척추동물과 어류 양육을 위한 서식지 조건을 악화시킬 수 있는 수역, 웅덩이 내부의 퇴적물 축적이 어류의 양육을 위한 서식지나 은신처를 손상시키는 수역, 유량이 너무 커서 제한적인 샘플채취만이 가능한 지역, 사전에 수집된 자료가 가용한 지역에 적용 가능하며 그 장단점은 <표 III-2>와 같다.

<표 III-2> 수저퇴적물지표의 장단점 비교

장 점	단 점
· 하상퇴적물의 입도분포와 같은 지표는 이용된 사례가 많아 비교적 경험이 풍부 · 퇴적물 부하 및 이동효과를 최종적으로 반영함으로서 연 단위의 저수기간 샘플링을 통해서도 유용한 결과를 유추 · 특정지역의 경우 하상지표는 하천사면의 교란지역과 비교란지역의 영향을 효과적으로 구분 · 샘플링 방법이 비교적 간단하며 복잡한 장비를 필요로 하지 않음 · 특정 지표의 경우 냉수어류의 생활단계와 실험적인 연관관계가 알려져 있음 · 입자크기는 대형무척추동물의 번식력과 관련 있음	· 자갈층의 문헌정도와 같은 지표는 반복 측정하기 어려움 · 선택된 지표에 대한 적절한 목표 또는 고안된 조건은 유역특성 및 수생태계 특징에 따라 크게 변화될 수 있으며, 많은 지역에서 지표 목표치가 가용하지 않을 수 있음. · 하상퇴적물 조성은 모래질 하상의 하천, 하도 경사가 작은 온수어류가 서식하는 하천, 대부분의 호수 등에서 서식지의 질을 결정하는데 중요하지 않을 수 있음. · 세립퇴적물 축적은 용존산소가 지하수의 용승작용에 의해 조절되는 냉수하천에서는 중요한 문제가 아님. · 몇몇 지표는 일반시민에게 그 중요성을 설명하기 어려움

다) 수로상태를 반영하는 지표로는 웅덩이와 얇은 여울의 상대적 비율, 하천 단면적, 수로 폭/깊이 비율, 수로의 만곡된 정도, 하도경사, 수로가 파인 정도, 하천 자연제방의 안정성, 웅덩이 관련 측정 자료(웅덩이 부피, 웅덩이가 차지하는 비율, 웅덩이의 평균 깊이 등) 등을 포함한다.

라) 생물학적 평가지표는 수중 서식지가 주요 관심사가 되고 있는 지역, 수중생물의 생활과 정이나 서식지 이용에 대한 연구가 충분한 지역, 정량적인 방법이 검토되었거나 신뢰성이 입증된 지역, 현장의 조사요원이 생물학적 방법 수행의 경험이 많고 사후 모니터링이 가능한 지역, 퇴적물의 배출원이 수중서식지에 미치는 영향이 잘 알려져 있지 않은 지역에서 적용가능하며 그 장단점은 <표 III-3>과 같다.

<표 III-3> 생물학적 평가지표의 장단점 비교

장점	단점
· 퇴적물이 여러 배출원의 영향을 받는 경우를 포함해 유역의 수리학적 변화, 침식과정 변화 등 여러 변화에 의한 중첩된 영향에도 민감함 · 과거의 토지교란 및 관련된 퇴적물 유입으로부터 수중서식지가 회복되는 과정을 볼 수 있고, 일단 수계로 유입된 후 수로에 저장되었던 퇴적물의 영향을 설명함 · 모니터링이 간헐적이라도 효과 있음 · 많은 사업에 있어 지정목적 또는 용수이용과 관련된 우려를 직접적인 방법으로 측정하므로 일반인들이 인식하는데 효과적 (특히 관심이 되는 어종의 수와 같은 지표)	· 정성적인 방법으로는 정량적인 수치지표를 도출하기 어려움 · 정성적인 방법은 반복하여 의미 있는 경과를 얻기 곤란함 · 퇴적물, 영양염류, 온도 등 스트레스 요인별로 영향을 구분하는데 한계 · 몇몇 방법들은 정량화에 어려움(예로, 어류의 수를 정확히 세는 어려움) · 어류관련 지표들은 어류의 분포가 희박할 경우 사용하기에 어려움 · 어류지표는 여타의 퇴적물과 여타의 환경요인에 의한 영향을 구분하기 곤란함 · 많은 어류가 장기간에 걸쳐 영향을 받으므로 어종의 수를 세는데 있어 목표조건을 적절히 설정하기가 어려움

마) 수변지역/경사지역과 관련된 지표는 하천 퇴적물질의 상태에 대한 광범위한 영향을 반영한다. 전형적인 지표의 예로 수변지역의 폭과 수변녹지 식생의 특징, 큰 나무조각의 양(하천의 단위거리 당 나무조각의 수), 도로건설면적의 지표로 환산된 토지교란 지표, 침식에 노출된 위험한 지역, 수역과 밀접한 지역 내의 불투수성 토지의 분포, 흙사태가 일어나는 지역 등을 들 수가 있다.

이러한 지표는 주로 하천변 침식이 주요한 퇴적물 유입의 원인인 경우, 방목, 휴양, 수변개발이 주요 쟁점인 지역, 큰 나무조각이 수로의 다양성 및 웅덩이 생성에 크게 기여하는 지역, 하천 경사면과 수로내 영향간의 관계를 평가하기 어려운 지역, 관련지표에 대한 사전 모니터

링이 포괄적으로 수행되어 왔던 지역에 적용하기 적합하며 그 장단점은 <표 III-4>와 같다.

<표 III-4> 수변지역/경사면 지표의 장단점 비교

장점	단점
· 직접적인 문제(독의 침식, 도로건설, 벌목지역 등)의 원인을 다룸 · 하천으로 유입되는 퇴적물량을 저감하기 위한 방안 제시(수변구역) · 많은 수계에서 건강한 하천상태의 유지요건인 대규모 나무조각에 대한 관리목표 설정을 용이하게 함 · 퇴적물 문제의 원인이 되는 대상과 직접 연관이 됨 · 상대적으로 쉽게 이해할 수 있고 측정이 용이(수변 구역의 폭 등) · 원인과 수로내 영향을 연계시키는 어려움을 쉽게 설명 · 연 1회의 측정만으로도 유용한 정보의 수집 이 가능	· 정량적인 지표(나무조각, 독의 안정성)는 광역적으로 입증되거나 적용되지 않았음 · 정량적인 관리목표의 설정이 불가능한 경우가 많음 · 수변구역/경사면에 대한 지표와 하천 내 상태에 대한 연관관계가 대부분의 지역에서는 잘 알려져 있지 않음 · 이러한 지표들은 상대적으로 측정하기에 어려우며 시간도 많이 소요됨

1.2. 퇴적물지표의 설정 및 관리사례

가. 퇴적물 관리지표의 수

퇴적물 문제는 위에서 언급한 다양한 지표 중 단일지표만 설정하는 것이 아니라 퇴적물 관리목적에 따라 단일지표 또는 복합지표 등 적절한 수의 퇴적물 지표를 설정하여 사용할 수 있으며 그 예를 보면 <표 III-5>, <표 III-6>과 같다.

<표 III-5> 단일 퇴적물지표의 사례

수체	선택된 지표	선택에 대한 해석
Ninemile Creek, MT	단위 하천 길이 당 송어 수	송어 서식지 상태에 대한 직접 측정
Lemon Creek, AK	저유량 및 고유량 상태에서의 탁도	주 수질기준의 직접적인 해석
Humboldt River, NV	총부유물질 농도	주 수질기준의 직접적인 해석

자료: USEPA(1999a)

〈표 III-6〉 복합 퇴적물지표의 사례

수체	선택된 지표	지표 선택 이유
Deep Creek, MT	세립퇴적물(<6.35mm)의 함량	산란 사력층의 모래 함량
	송어의 수	지정목적 또는 이용목적에 대한 직접 측정
	총부유물 부하를 기준이 되는 하천의 총부유물 부하와 비교	어류에 미치는 부유물의 영향을 직접 반영
	유량과 총부유물 관계 회귀직선의 기울기	유량변동에 따른 부유물의 변화 반영
	독이 침식된 주요구간의 퍼센트	주요 퇴적물의 공급원 측정
	증가된 하천 수로의 길이	복구된 수로 형태를 반영
	최소 유량	저유량과 관련된 심각성
	온도	어류에 대한 직접적인 스트레스
South Fork Salmon River, ID	자갈층 형성 정도	산란 서식지 특성 반영
	자갈 내 세립퇴적물의 함량	산란 서식지 특성 반영
	광점(photo point) 비교	퇴적물 특성 변화를 반영
Pittsfield Lake, IL	호수로 유입되는 퇴적물 부하량	퇴적물 유입량 측정 및 BMP 효과 반영
	Secchi disk 깊이	호수의 투명도(또는 탁도) 측정
	총부유물질 · 휘발성 부유물질 농도	총퇴적물 · 유기퇴적물 농도 측정
Yager Creek, CA	○ 주요 지표 · 0.85mm이하 세립퇴적물 함량 · 퇴적물 중앙 입경 (D_{50})	· 산란 사력층 내 세립자 측정 · 산란 사력층 상태 측정
	○ 이차 지표 · 6.4mm 이하 세립퇴적물 함량 · 세립퇴적물이 차지하는 잔여 웅덩이 부피 · 대형 척추동물 지표 · 하천수로 폭-수심 비율 · 하천 단위길이 당 훼손된 도로 · 하천 단위길이 당 존재하는 큰 나무 조각 부피	· 산란 사력층 내 모래함량 측정 · 양육장 또는 포식동물로부터의 은신처로서의 웅덩이 상태 측정 · 수로의 복구 정도 측정 · 서식지 상태를 민감하게 반영 · 하천사면으로부터의 퇴적물 유입 가능성 반영 · 지천의 복잡성, 웅덩이 상태에 영향을 미치는 주요인 측정

자료: USEPA(1999a)

나. 지표의 설정사례

a. San Diego Creek/Newport Bay: 이 지역은 야생생물 서식지, 하구서식지, 회귀종 및 멸종 가능성이 있는 생물종의 서식지, 해양서식지, 생태계 보전지역 등으로 지정된 지역의 보호, 상업적 또는 취미 낚시, 수운(水運)을 위한 수로 유지 등의 수역 관리목적을 달성하기 위해 다양한 퇴적물지표를 설정하여 관리하고 있다(표 III-7).

〈표 III-7〉 퇴적물지표의 설정사례 (San Diego Creek/Newport Bay)

지표 및 근거	수치 목표
서식지 구성: 상류지역 4개의 주요서식지 형태별 서식지 면적(상류로부터의 퇴적물 유입에 의한 파괴의 우려가 높은 주요 서식지의 적정면적 확보)	다음과 같은 4개 종류의 서식지 면적의 변화가 1%이내에서 유지 -해양야생생물 서식지(0.85km ²) -갯벌 서식지(0.87km ²) -해안늪지대(1.12km ²) -수변지대(0.13km ²)
해양서식지의 적정 수심(상류로부터의 퇴적물 유입에 의해 파괴될 우려가 높은 생태보호지역 보호)	해양 서식지의 수심이 적어도 2.1m 이상이 되도록 유지
유역으로부터 유입되는 년평균(톤/년, 10년평균) 퇴적물 부하(유역의 이용목적을 담보하기 위해 요구되는 퇴적물 부하)	연평균 퇴적물 부하량이 125,000 톤/일 이하가 되도록 유지
퇴적물의 준설 빈도(적정한 서식지의 질을 유지하기 위해서 빈번한 퇴적물 준설은 바람직하지 못함)	적어도 20~30년에 1번 이상의 준설이 필요하지 않도록 유지
침사지의 용량 확보(퇴적물 부하를 저감하기 위해 풍수기 전에 하천수로 및 하천변의 침사지 용량 확보)	적어도 풍수기가 시작되는 11월 15일 이전에 하천수로 및 하천변 침사지 용량의 50% 이상이 확보되도록 침사지 관리

자료: USEPA(1998b)

b. Redwood Creek: 이 하천은 산림지대를 관통하는 수계로 많은 이용목적 중 특히 냉수 어족에 대한 내수면 어업의 보호가 주요 관심사가 되고 있다. 이를 위해서 개발로 야기되고 있는 하천 내 퇴적물의 양 증가, 하천 내 웅덩이의 수 및 웅덩이 깊이 감소, 하천 폭의 증대 및 하천 수심의 감소, 커다란 나무 조각의 보충 감소, 하천 바닥 세립퇴적물의 집적, 커다란 나무 조각의 양 감소 등의 문제를 해결하기 위해 다양한 퇴적물지표를 설정하여 관리하고 있다(표 III-8, III-9).

〈표 III-8〉 퇴적물 지표의 설정사례 (Redwood Creek)

지 표	수치목표 ¹⁾
어류 생육수역의 연흔(ripple) 정점에 0.85mm 미만 퇴적물의 함량 ²⁾	14% 미만
어류 생육수역의 연흔 정점에 2 mm 미만 퇴적물의 함량	10~20% 미만
어류 생육수역의 연흔 정점에 6.5mm 미만 퇴적물의 함량	30% 미만
연흔이 존재하는 하천 길이 ³⁾	하천구간 중 25~30%에 연흔 존재(하상경사 2% 미만)
하천 주류의 웅덩이 깊이(연흔-웅덩이가 공존하는 지형 특성이 있는 곳)	저수기에 웅덩이의 평균 수심이 2m 이상
하천 3차지류, 4차지류의 웅덩이 깊이(연흔-웅덩이가 공존하는 지형 특성이 있는 곳) ⁴⁾	저수기에 웅덩이의 평균 수심이 1~1.5m 이상
연흔 정점 퇴적물의 중앙입경(d_{50})	37mm 이상(구간의 최소치) 69mm 이상(구간의 평균치)
퇴적물을 하류로 운반할 수 있는 하천 내의 커다란 나무 조각	커다란 나무 조각이 많아지는 방향

1) 수치목표는 자연적인 과정에 의한 변화를 고려하여 적어도 10년간의 평균치를 사용한다.

2) 어류 생육수역: 어류가 항상 또는 계절적으로 존재하거나 어류 생육의 바탕이 되는 서식지. 일반적으로 어류 생육수역의 하상경사는 3% 미만

3) 연흔(낮은 하상경사): 일반적으로 유속이 빠르고 부분적으로 하상이 노출된 하천 구간. 일반적으로 하상경사가 4% 미만일 때 하상은 주로 왕자갈로 구성된다. 여기서 하상경사는 하천 단위 거리당 하상고의 변화율 또는 단위 거리당 어떤 특성의 변화율을 의미한다.

4) 여기서 지류는 1차지류의 경우 하천 최상류의 작은 하천을 말하며 1차지류가 합쳐져서 2차지류를 형성하는 등 숫자가 커질수록 수계의 하류에 위치하는 큰 하천을 의미한다.

자료: USEPA(1998c)

〈표 III-9〉 하천사면 퇴적물의 수치기준 (Redwood Creek)

지 표	수치 목표
수로가 우회할 우려가 있는 하천 도로의 교차	수로가 우회하지 않도록 도로 시공
도로 암거/교차 지역의 크기	모든 암거 및 교차지점은 50년 빈도 홍수량에서 퇴적물과 각종 조각들이 소통할 수 있는 크기로 건설
도로사면의 안정성	50%경사 이상의 도로사면은 하천으로 유입되는 퇴적물을 적절히 저감할 수 있도록 후퇴시키고 안정화
도로표면 및 배수	모든 도로 표면, 배수시설 및 구조물은 목적에 적합하도록 조치
도로의 조사, 관리 및 폐쇄	모든 도로는 조사, 관리 또는 폐쇄. 폐쇄된 도로는 수리학적으로 유지관리가 필요 없도록 조치 ¹⁾
협곡 내부나 불안정한 사면	불가피한 경우가 아니면 협곡 내부나 불안정한 수두사면에 도로 건설 금지 ²⁾
별목방법	협곡 내부, 불안정 지역, 하천변 등에서는 하천에 퇴적물 부하를 증가시킬 가능성이 있는 별목방법의 사용 제한 ³⁾

1) 수리학적으로 유지관리가 필요 없도록 조치란 다음을 의미:

- 도로의 배수체계가 자연상태의 배수체계에 따름
- 모든 배수는 적절한 배수방법을 이용하여 사면에 분산
- 모든 교차지점에서는 암거나 충전체를 제거
- 굴착된 폐기토양 등은 수로로 유입되지 않는 장소에 적치

2) 불안정한 수두사면의 일반적인 특징은

- 사면경사가 50% 이상
- 토양 또는 암석종류가 침식에 취약
- 경사면이 오목한 형태를 보임
- 과거에 경사면이 움직였던 흔적을 보임

3) 협곡 내부, 불안정 지역, 하천변의 일반적인 특징은

- 사면경사가 50%이상
- 제1차, 제2차, 제3차 하천 지류의 수로로부터 1km 이내에 위치
- 토양 또는 암석종류가 침식에 취약
- 경사면이 오목한 형태를 보임
- 과거에 경사면이 움직였던 흔적을 보이거나 지하수의 수렴대가 형성

자료: USEPA(1998c)

다. 퇴적물지표를 이용한 퇴적물 관리사례

미국의 경우에는 1991년 이후부터 시행된 TMDLs의 관리대상에 퇴적물도 포함되어 있으므로 퇴적물 관리를 위한 퇴적물지표의 설정 및 이에 근거한 관리 활동이 다양하게 전개되고 있다(부록). TMDLs 시행의 일환으로 관리되고 있는 전형적인 퇴적물 관리의 일례를 보면 <표 III-10>과 같다.

<표 III-10> 퇴적물지표의 설정 및 관리사례

퇴적물지표	관리목표	실행 방안
○ 하천 내 퇴적물지표 · 수저퇴적물 중앙입경 >12mm · <15% 세립퇴적물(<0.85mm) ○ 수변/경사면 · 연구지역 단위면적(mile²)당 침식가능성이 있는 도로길이를 3마일 이하로 유지	○ 토지소유자1 · 침식가능성이 있는 도로를 12마일까지 감소시킴 ○ 토지소유자2 · 침식가능성이 있는 도로를 5마일까지 감소시킴	○ 토지소유자1 · 새로운 도로 건설 불허 · 기존 도로 중 5마일을 폐쇄 ○ 토지소유자2 · 기존 도로 중 2마일 폐쇄 · 15개 하천 교차로 정비
○ 하천 내 퇴적물지표 · 유속 <0.2 cm/s · >50 하천정비/mile ○ 하천변 사면 · 현재 침식이 진행되는 하천변을 10% 이내로 유지	○ 침식 하천사면의 길이를 다음과 같이 감소시킴 -1차지류: 25% -2차지류: 5% -3차지류: 10%	-1차지류: 하천 및 제방 복구사업 시행 -2차지류: 새로운 수변녹지 조성 및 살수탱크 설치 -3차지류: 수변보호를 위한 새로운 울타리 설치

자료: USEPA(1999a)

1.3. 시사점

이상의 퇴적물지표에 대한 사례를 퇴적물질기준 개발과 관련하여 분석해 보면 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다.

첫째, 퇴적물 관리를 위한 정량적인 목표의 설정은 화학물질 농도기준처럼 항상 명확한 것

은 아니지만 상기 사례에 제시된 다양한 지표를 통해 정량화 또는 수치화가 가능함을 볼 수 있다. 일반적으로 퇴적물 문제는 정성적인 관점에서 접근하려는 경향이 강하고 따라서 관리 목표의 설정 자체가 불확실한 경우가 많은데, 퇴적물지표를 이용하는 경우 명확한 관리 목표의 설정이 가능할 뿐만 아니라 관리의 효과도 설정된 지표에 근거하여 평가할 수 있다는 장점이 있다.

둘째, 일반퇴적물의 관리는 수역의 지정목적, 자연적인 여건, 관리의 우선순위 등에 따라 지역별 또는 사안별로 결정되고 있다. 즉, 일반퇴적물 관리를 위한 퇴적물질기준은 탁도 등 용수이용에 직접적으로 관계되는 일부 항목을 제외하면 국가차원의 일률적인 관리기준을 설정하기보다 지역적인 문제의 해결에 초점을 둔 지역수준에 적용할 수 있는 관리기준을 설정하는 것이 바람직해 보인다.

셋째, 수역의 지정목적을 달성하기 위해서는 다양한 측면에서 퇴적물 문제를 고려할 필요가 있는데, 미국의 경우에는 용수이용 뿐만 아니라, 위락/심미적인 측면, 건강한 수생태계의 유지·보호의 측면 등 다각적인 면에서 퇴적물 문제에 접근하고 있으며 이에 적합한 다양한 형태의 퇴적물지표를 개발하여 사용하고 있다. 따라서 향후 우리나라의 수질관리가 지금까지와 같은 단편적인 수질관리에서 벗어나 건전한 하천생태계의 유지·보전을 포함한 통합적인 수질관리로 전환된다면 퇴적물지표의 설정이 적어도 지역적 사안에 따라서는 필요할 것으로 보인다.

넷째, 퇴적물지표의 사례를 보면 우리나라에서는 아직까지 문제라고 인식하지도 못하는 퇴적물 관련사안에 대해서도 상당한 연구가 진척된 것을 볼 수 있다. 퇴적물지표 설정의 필요성이 적어도 수질관리, 하천관리, 생태계 관리에 있어 퇴적물 영향에 대한 인식에서 비롯된다고 보면 현재 우리가 직면하고 있는 퇴적물 문제가 과연 무엇이며 향후에는 어떤 영향이 예상되는지에 대한 연구가 선행될 필요가 있다.

2. 준설퇴적물 관리기준

준설회(浚渫)은 박지 또는 수로 유지, 홍수통제를 위한 하천정비, 건설용 골재채취, 저수지 용수증대, 공유수면 매립 등 수저퇴적물과 연관된 사업에서 오래 전부터 사용되어온 퇴적물관리의 가장 고전적인 방법이다. 일반적으로, 준설퇴적물 관리의 핵심적인 사항 중 하나는 수저에서 준설회된 대량의 수저퇴적물을 어떻게 효율적으로 처분할 것인가이다. 따라서 대부분의 경우, 항구, 박지 및 수로 유지를 위해 준설회한 퇴적물은 운반이 용이한 근처의 수계에 처분장을 만들어 투기하거나 대규모 매립공사와 함께 준설회가 실시될 경우에는 매립용으로 사용되는 것이 보통이다.

환경적인 측면에서는 어떻게 하면 준설회된 퇴적물을 환경에 대한 악영향 없이 처분할 수 있을가에 초점이 맞추어져 왔다. 처분과 관련된 악영향을 평가하는 방법은 매우 다양하지만 관리자의 입장에서는 설정된 투기기준에 근거하여 투기여부를 결정하는 것이 가장 쉽고 단순한 방법이기 때문에 실제로 다양한 투기기준이 설정되어 왔다. 또한, 2장에서 설명한 바와 같이 퇴적물의 악영향은 단순히 오염물질의 농도에 좌우되는 것이 아니라는 사실이 밝혀지면서

지역적인 영향요인을 고려한 다양한 평가방법의 개발이 병행되고 있다.

한편, 투기기준은 여러 가지 이유로 인해 어쩔 수 없이 준설된 퇴적물을 수계에 투기하는 과정에서 환경에 미칠 수 있는 악영향을 방지하는데 목적이 있다면, 제거기준은 수저퇴적물 자체가 오염되어 수질이나 저서생물에 악영향을 미칠 우려가 있는 경우 악영향의 판단기준으로 사용될 수 있다. 즉, 수저의 퇴적물이 수질 또는 수생생물에게 악영향을 미칠 정도로 오염되어 있는 경우 오염된 퇴적물을 제거하여 악영향을 막아보자는 소위 ‘환경준설’의 개념이 도입되면서, 준설 여부를 결정하기 위한 관리기준의 하나로 수저퇴적물 제거기준이 설정되었다. 본 장에서는 이러한 준설과 관련된 투기기준 및 제거기준의 설정사례를 소개하도록 하겠다.

2.1. 투기기준

준설퇴적물에 대한 투기기준의 대표적인 사례로는 1973년 미국 연방수질국에서 설정한 ‘준설퇴적물의 수계투기를 위해 허용되는 오염물질의 최대농도’를 들 수 있다(표 III-11). 이 기준은 투기하려는 준설퇴적물에 포함된 7개의 오염물질 농도를 측정하여 한 항목이라도 투기기준을 초과하면 수계에 악영향을 미칠 것으로 판단하여 투기를 허용하지 않거나 투기 전에 해당 오염물질에 대한 적절한 처리를 요구하는데 사용되었다. 이와 유사한 개념에 근거하여 미국 위스콘신주 및 캐나다 온타리오주에서도 퇴적물 투기기준을 설정하여 준설퇴적물의 수계투기를 관리하였고, 캘리포니아주에서는 이러한 투기기준을 제방이나 둑 등에 준설된 퇴적물을 재활용할 수 있는지 여부를 결정하는 기준으로 활용하고 있다.

담수퇴적물의 오염정도를 평가하기 위해 우리나라에서 가장 많이 인용되고 있는 퇴적물질 기준은 미국지역환경보호청(V지역)에서 배경농도법에 기초하여 설정한 오대호 퇴적물 분류기준으로 볼 수 있다(표 III-12). 이 기준은 오대호 항구의 퇴적물을 배경농도와 비교하여 비오염, 약간오염, 심한오염으로 등급화하여 분류하고 있어 사용이 간편하고 이해가 쉽다는 장점이 있으며 일부 항목은 캐나다 온타리오주의 투기기준에 이용되고 있다(표 III-11 참조). 그러나, 이 지역환경보호청 기준은 지역적인 특성을 반영하여 설정된 기준이므로 환경이 상이한 타 지역에 대한 직접적인 적용이 어려우며, 오염분류가 생물에 대한 실질적인 악영향을 근거로 설정된 것이 아니기 때문에 퇴적물 오염평가를 위한 예비기준으로 사용할 수는 있으나 현재의 기술수준을 고려할 때 최선의 기준으로 보기는 어렵다.

〈표 III-11〉 미국에서 개발된 각종 퇴적물 투기기준의 예

항목	연방수질국 ¹⁾ (%, 건중량)	위스콘신주 ¹⁾ (mg/kg, 건중량)	캘리포니아주 ²⁾ (mg/kg, 건중량)	캐나다 온타리오주 ³⁾ (mg/kg, 건중량)
Volatile Solid	6.0	-	-	6(%)
COD	5.0	-	-	-
TKN	0.10	-	-	2,000
TP	-	-	-	1,000
Oil and Grease	0.15	-	-	1,500

〈표 III-11〉 미국에서 개발된 각종 퇴적물 투기기준의 예 (계속)

항목	연방수질국 ¹⁾ (%, 건중량)	위스콘신주 ¹⁾ (mg/kg, 건중량)	캘리포니아주 ²⁾ (mg/kg, 건중량)	캐나다 온타리오주 ³⁾ (mg/kg, 건중량)
As	-	10.00	10.00	8.00
Cd	-	1.00	5.00	1.00
Cr	-	100.00	220.00	25.00
Cu	-	100.00	90.00	25.00
Hg	0.0001	0.10	0.35	0.30
Ni	-	100.00	140.00	25.00
Pb	0.005	50.00	50.00	50.00
Zn	0.005	100.00	160.00	100.00
Aldrin	-	0.01	-	-
Chlordane	-	0.01	-	-
Dieldrin	-	0.01	-	-
Endrin	-	0.05	1.30	-
Heptachlor	-	0.05	-	-
Lindane	-	0.05	-	-
total PCBs	-	0.05	0.05	0.05
Toxaphene	-	0.05	-	-

1) 이창희 외(1998)로부터 재인용

2) URL: http://sdelta.water.ca.gov/web_pg/studies/wq/org95/loc.htm

3) Ontario Ministry of the Environment(1993)

〈표 III-12〉 오대호 담수퇴적물 오염분류를 위한 지역환경보호청의 기준

(단위: mg/kg)

항목	비오염	중간 오염	심한 오염
Volatile Solids(%)	<5	5~8	>8
COD	<40,000	40,000~80,000	>80,000
Phosphorous	<420	420~650	>650
TKN	<1,000	1,000~2,000	>2,000
Ammonia	<75	75~200	>200
Cyanide	<0.10	0.10~0.25	>0.25
As	<3	3~8	>8
Ba	<20	20~60	>60
Cd	-	-	>6
Cr	<25	25~75	>75
Cu	<25	25~50	>50
Fe	<17,000	17,000~25,000	>25,000
Hg	-	-	≥1.0
Mn	<300	300~500	>500
Ni	<20	20~50	>50
Pb	<40	40~60	>60
Zn	<90	90~200	>200
Oil & Grease	<1,000	1,000~2,000	>2,000
PCBs	-	-	≥10

자료: 이창희 외(1998)로부터 재인용

최근 다양한 퇴적물 평가방법이 개발됨에 따라 준설퇴적물의 관리를 담당하고 있는 미육군 공병단의 준설퇴적물 관리프로그램(Dredged Material Management Program)은 퇴적물이 실제 생물에 미치는 악영향을 근거로 준설퇴적물의 오염평가기준을 지속적으로 개정하고 있다. 예를 들면, 시애틀지방 준설퇴적물 관리프로그램은 미국 워싱턴주의 푸젓사운드(Puget Sound), 그레이스항(Grays Harbor), 윌라과만(Willapa Bay) 및 잠정적으로 컬럼비아강(Columbia River)의 수계에 적용되고 있던 기존의 투기기준을 1998년에 개정·고시하였다(표 III-13).

특징을 보면 지역적인 특성에 따라 수계에 미치는 영향이 달라질 수 있는 유기물이나 영양염류 등의 생활항목 보다는 주로 중금속, 유기화학물질 등 유해물질에 대한 투기기준이 제시되어 있음을 볼 수 있다. 또한 개정 후의 투기기준이 개정 전에 비해 대부분 완화된 것을 볼 수 있는데, 이는 생물영향에 대한 각 오염물질별 실험자료의 추가적인 확보에 따른 자료의 갱신을 반영한 것이기도 하지만, 준설퇴적물의 투기와 관련된 관리비용의 지나친 증가를 고려한 현실적인 여건이 반영된 것으로도 볼 수 있다.

여기서 투기기준은 예비수준(Screen Level, SL)과 최대수준(Maximum Level, ML) 두 가지로 설정되어 있는데, 예비수준 이하의 오염물질을 포함하는 퇴적물은 별도의 조치 없이 수계 투기가 허용되고, 최대수준 이상의 오염물질을 포함하는 퇴적물은 처리과정 등을 거쳐 오염물질의 수준을 저감하기 이전에는 수계투기가 허용되지 않는 것으로 이해할 수 있다. 즉, 여기에 제시된 투기기준은 제2장에 제시된 단계화된 오염물질 평가의 제2단계 판단기준으로 사용되며(표 II-2), 오염물질 농도가 예비수준과 최대수준 사이에 있는 경우에는 추가적인 단계의 평가과정을 거쳐 투기여부를 결정하게 된다. 이러한 단계화 된 평가는 미국뿐만 아니라 기본적으로 국제법상⁷⁾의 준설퇴적물투기에 대한 영향을 평가하는 방법으로, 기존의 퇴적물관련자료를 효과적으로 사용할 수 있으므로 불필요하게 많은 검사를 요구하지 않을 수 있고 특히 투기기준이 설정된 경우에는 준설퇴적물의 화학물질 농도에 근거하여 악영향을 정확히 판단할 수 있다는 장점이 있다.

7) 준설퇴적물의 해양투기 문제를 다루고 있는 런던협약의 제22차 회의(2000.9.18~9.22)에서는 수저퇴적물을 포함한 해양투기가 가능한 8개 폐기물에 대한 평가지침을 결정형식으로 채택. 수저퇴적물의 평가에 있어 투기기준 등의 정량적인 기준은 아직 제시되지 않고 있으므로 영향평가는 개념적으로는 단계화 된 평가방법에 근거하도록 규정.

〈표 III-13〉 퇴적물 투기기준 (미육군공병단, 시애틀 사무소)

항목	기존 SL	개정 SL	기존 ML	개정 ML
금속 (mg/kg 건중량)				
Ag	20	150	200	200
As	57	57	700	700
Cd	0.96	5.1	9.6	14
Cu	81	390	810	1300
Hg	66	450	660	1200
Ni	0.21	0.41	2.1	2.3
Pb	140	140	-	370
Sb	1.2	6.1	6.1	8.4
Zb	160	410	1600	3800
유기화합물 저분자 PAH ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
LPAH	610	5200	6100	29000
2-Methylnaphthalene	67	670	670	1900
Acenaphthene	63	500	630	2000
Acenaphthylene	64	560	640	1300
Anthracene	130	960	1300	13000
Fluorene	64	540	640	3600
Naphthalene	210	2100	2100	2400
Phenanthrene	320	1500	3200	21000
고분자 PAH ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
HPAH	1800	12000	51000	69000
Benz[a]anthracene	450	1300	4500	5100
Benzo[a]pyrene	680	1600	6800	3600
Benzo[fluoranthene]	800	3200	8000	9900
Benzo[g,h,i]perylene	540	670	5400	3200
Chrysene	670	1400	6700	21000
Dibenzo(a,h)anthracene	120	230	1200	1900
Fluoranthene	630	1700	6300	30000
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	69	600	5200	4400
Pyrene	430	2600	7300	16000
Chlorinated Organic Compounds ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
1,2-dichlorobenzene	19	35	350	110
1,2,4-trichlorobenzene	13	31	64	64
1,3-dichlorobenzene	170	170	-	-
1,4-dichlorobenzene	26	110	260	120
Hexachlorobenzene	23	22	230	230

(표 계속)

항목	기존 SL	개정 SL	기존 ML	개정 ML
Phthalates ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
Bis[2-ethylhexyl]phthalate	3100	8300	-	-
Butyl benzyl phthalate	470	970	-	-
Diethyl phthalate	97	1200	-	-
Dimethyl phthalate	160	1400	-	-
Di-n-butyl phthalate	1400	5100	-	-
Di-n-octyl phthalate	6200	6200	-	-
Phehols ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
2-methylphenol	20	63	72	77
2,4-dimethylphenol	29	29	50	210
4-methylphenol	120	670	1200	3600
Pentachlorophenol	100	400	690	690
Phenol	120	420	1200	1200
Miscellaneous Extractables ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
Benzoic acid	400	650	690	760
Benzyl alcohol	25	57	73	870
Dibenzofuran	54	540	540	1700
Hexachlorobutadiene	29	29	290	270
Hexachloroethane*	1400	1400	14000	14000
N-Nitrosodiphenylamine	28	28	220	130
Volatile organics ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
Ethylbenzene	10	10	50	50
Tetrachloroethene	14	57	210	210
Trichloroethene*	160	160	1600	1600
total Xylene	12	40	160	160
Pesticides and PCBs ($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)				
Aldrin	10	10	-	-
Chlordane	10	10	-	-
Dieldrin	10	10	-	-
Heptachlor	10	10	-	-
Lindane	10	10	-	-
total DDT	6.9	6.9	69	69
total PCB	130	130	2500	3100

*이 권고치는 평형분배법에 의해 유도됨

자료) URL: http://www.nws.usace.army.mil/dmmo/sl_ml-t.htm

2.2. 제거기준

일반적으로 유기물이나 영양염류 등에 의해 오염된 유기오염퇴적물에 대해서는 용수이용 목적, 자연 환경적인 특성 등을 고려하여 단위 사업별로 퇴적물 제거기준이 설정되므로 전국적으로 적용되는 기준개발 사례는 없으나, 우리나라의 청초호, 한강 등지의 수저퇴적물 준설

을 위해 적용되었던 동경만, 요코하마만, 나고야항의 퇴적물제거기준과 같이 사례별 또는 지역별로 필요한 경우 제거기준을 설정하여 사용하는 경우는 있다(표 III-14).

그러나 오염될 경우 악영향이 심각하여 국가적 차원에서 관리할 필요가 있는 유해화학물질에 대해서는 제거기준을 설정하여 관리하는 경우가 적지 않다. 예를 들어 일본에서는 심각한 사회문제를 야기했던 수은과 PCB 문제 해결의 일환으로 1972년 이들 항목에 대한 ‘잠정 퇴적물 제거기준’을 설정하고(표 III-15) 이에 근거하여 대상지역을 선정한 후 1970년대 이후 대대적인 준설사업을 실시하였다.

〈표 III-14〉 동경만, 요코하마만 및 나고야항의 퇴적물 제거기준

항목		범위	평가점	비고
동경만 및 요코하마만	강열감량 (%)	5 미만	0	총 평가점이 6점 이상이면 퇴 적물 제거
		15 미만	3	
		15 이상	6	
	COD (mg/g)	13 미만	0	
		20 미만	1	
		30 미만	2	
		40 미만	4	
		40 이상	6	
	황화물 (mg/g)	0.6 미만	0	
		1 미만	1	
		5 미만	2	
		10 미만	4	
		10 이상	6	
나고야항	강열감량 (%)	10 이상	+	3개 항목 중 2개 항목 이상 이 +이면 퇴적물 제거
		10 미만	-	
	COD (mg/g)	20 이상	+	
		20 미만	-	
	유화물 (mg/g)	1 이상	+	
		1 미만	-	

자료: 이창희 외(1998)로부터 재인용

〈표 III-15〉 일본의 오염퇴적물 잠정 제거기준

항목	담수퇴적물	해양퇴적물
Hg	25ppm 이상	산출값 (C) 이상 ¹⁾
PCBs	10ppm 이상	10ppm 이상 ²⁾

1) $C = 0.18 \times \Delta H/J \times 1/S$ (ppm): 퇴적물 건조중량 기준

ΔH =평균 조차(潮差) (m), J =용출률, $1/S$ =안전율

- 평균 조차(m)는 해당 수역의 평균 조차로 한다. 단, 조석의 영향에 비례하여 부가적인 진동의 영향을 크게 받는 해역에서는 평균 조차 대신 다음 식에서 산출된 값으로 한다.

$\Delta H = \text{부가 진동의 평균 진폭 (m)} \times [12 \times 60 \text{ (분)}] / \text{평균 주기 (분)}$

- 용출률(I)은 해당 수역에서 비교적 오염이 심각하다고 사료되는 4개 지점 이상의 퇴적물에 대하여 「퇴적물 조사 방법」의 용출실험을 통해 용출률을 산출하고 그 평균값을 해당 수역의 퇴적물 용출률로 한다.
- 안전율(S)은 해당 수역 및 그 주변 어업의 실태에 따라 다음의 구분에 의해 정한 값으로 한다. 또한 지역의 식습관 등 특이성에 따라 안전율을 다시 예측하는 것도 무방하다.
 - 가) 어업이 행해지지 않는 수역에 있어서는 10으로 한다.
 - 나) 어업이 행해지는 수역에서 퇴적물 및 퇴적물에 부착하고 있는 생물을 섭취하는 어패류(새우, 게, 가재, 해삼, 소라고둥 등 권패류 등)의 어획량이 총어획량의 약 1/2이하인 수역에서는 50으로 한다.
 - 다) 상기 나)의 비율이 약 1/2 이상인 수역에서는 100으로 한다.
- 2) 어패류의 PCBs 오염추이를 파악한 후 추가 문제가 예상되는 수역에서는 실정에 맞게 보다 엄격한 기준값을 설정하도록 권고한다.

자료: 이창희 외(1998)로부터 재인용

퇴적물 제거기준은 기준 이상의 퇴적물 오염을 더 이상 방치하지 않겠다는 관리목적으로 설정되는 것이므로 퇴적물 정화기준(Sediment Cleanup Level)과 비슷한 성격을 가지는데 미국의 워싱턴주나 네덜란드가 이러한 정화기준을 설정하고 있다 (표 III-16).

미국의 워싱턴주는 미국에서도 유일하게 퇴적물질표준을 설정하여 퇴적물을 관리하고 있으며 관리기준의 하나로 정화기준을 설정하고 있다. 정화기준은 악영향임계법에 의해 설정되는데, 저서생물에 미치는 악영향이 미미한 수준을 퇴적물질표준으로, 악영향의 가능성이 큰 수준을 정화기준으로 정하고있다. 네덜란드의 정화기준은 2개의 기준으로 구분되어있는데 하나는 토양과 퇴적물 모두에 적용되는 기준으로 중금속 유기화합물질 등 많은 오염물질에 대해 설정되어 있으며, 또 하나는 퇴적물에만 적용되는 기준으로 아직까지는 일부 중금속 항목에 대해서만 설정되어 있다. 이와 같은 구분은 초창기에 퇴적물 오염문제를 토양오염문제와 연관하여 관리한데서 비롯된 것으로 보이는데, 오염 및 노출 경로가 토양과 다른 퇴적물을 동일한 기준에서 다루기는 어렵다는 인식과 현실적으로 준설퇴적물의 관리에 드는 비용을 감안하여 퇴적물에 대해서는 별도의 정화기준을 추가적으로 설정하고 있다.

여기서, 주의해야 할 점은 사례로 제시된 제거기준을 직접적으로 비교하기 어렵다는 사실이다. 예를 들어, 수은을 기준으로 비교해 볼 때 일본, 네덜란드, 워싱턴주의 정화기준이 각각 25ppm, 15ppm 및 0.59ppm으로 설정되어 있는데, 네덜란드기준의 경우에는 표준퇴적물(10% 유기물 및 20% 실트 함량)로 환산한 수치이고 워싱턴주의 경우에는 유기물함량으로 표준화했을 경우의 수치이다(표 III-16). 이는 퇴적물에 포함된 오염물질의 양 및 생물에 미치는 실질적인 영향이 제2장에서 설명한 대로 여러 요인에 의해 좌우되기 때문에 비교를 위해서는 이러한 지역적인 요인을 보정할 필요가 있기 때문이다.

2.3. 시사점

제거기준(또는 정화기준)의 설정에 대한 외국의 사례는 많지 않지만 가용한 자료에 근거하여 관리적인 측면에서 그 시사점을 도출하면 다음과 같다.

첫째, 유기물 및 영양염류 등의 생활관련 오염물질에 대한 제거기준은 주로 특정사업별로 설정된다. 이는 이들 오염물질이 수생태계, 용수이용 등에 악영향을 미치는 것은 하지만 지역적인 문제일 경우가 대부분이며 해당 지역의 환경요인에 의해 매우 크게 좌우되기 때문으로 보인다.

둘째, 제거기준은 실제적으로 큰 환경문제를 야기할 수 있는 오염물질에 대해서만 선택적으로 설정할 수 있다. 예로서, 일본에서는 심각한 사회문제가 되었던 수은과 PCB에 대한 제거기준이 설정되었는데 이는 기본적으로 수저의 오염퇴적물을 유해폐기물로 간주하여 처리여부를 판단하는 기준으로 제거기준이 이용됨을 의미한다.

셋째, 제거기준은 오염퇴적물에 대한 자연정화가 기대되지 않고 더 이상 방치할 경우 수질, 수생생물 또는 저서생물에 대한 심각한 악영향이 예상되는 수준에서 설정된다. 따라서 제거기준은 퇴적물 관리에 있어 선언적인 성격을 갖는 기준이 아니라, 실제 정부 또는 관련 공권력이 강제적으로 개입하여 적절한 처리를 하도록 하는 집행을 전제로 한 규제기준으로 볼 수 있다.

넷째, 관리적인 측면에서 보면 다음 장에서 제시할 퇴적물질기준을 제거기준 또는 정화기준으로 사용할 경우 지나친 관리가 될 가능성이 매우 크다. 왜냐하면 일반적으로 퇴적물질기준은 퇴적물이 저서생물 등에(적어도 통계적으로는) 악영향을 미치지 않거나 미미한 악영향을 미치는 수준에서 설정되기 때문이다.

다섯째, 수저퇴적물의 제거기준이 별도로 설정되어 있지 않은 경우, 대부분 퇴적물을 폐기물로 보아 유해폐기물 판정기준에 의해 유해성여부를 판정하고 이에 따라 제거 또는 정화 등의 적절한 처리를 하도록 하고 있다. 유해폐기물 판정기준은 오염물질의 용출량을 기준으로 하기 때문에, 저서생물의 보호를 목적으로 설정되고 건중량(또는 유기물함량으로 표준화된)으로 표시되는 제거기준과 직접적으로 비교하기는 어려우나 일반적으로 그 기준이 상대적으로 매우 높게(오염물질의 농도가 크게) 설정되어 있다.

〈표 III-16〉 퇴적물 제거기준의 사례

항목	위싱턴주 퇴적물 관리기준*	네덜란드 오염퇴적물 정화기준	
	SIZ _{max} , CSL, MCUL	토양+퇴적물 적용	퇴적물적용
금속 (mg/kg 건중량)			
As	93	55	150
Cd	6.7	12	30
Cr	270	380	1000
Cu	390	190	400
Ni	-	210	200
Pb	530	530	1000
Hg	0.59	10	15
Ag	6.1	-	-
Zn	960	720	2500

(표 계속)

항목	워싱턴주 퇴적물 관리기준*	네덜란드 오염퇴적물 정화기준	
	SIZ _{max} , CSL, MCUL	토양+퇴적물 적용	퇴적물 적용
Nonionizable Organic Compounds Aromatic Hydrocarbons	(mg/kg OC)	(mg/kg 건중량)	
total LPAH ¹⁾	780	-	
Naphthalene	170	-	
Acenaphthylene	66	-	
Acenaphthene	57	-	
Fluorene	79	-	
Phenanthrene	480	-	
Anthracene	1200	-	
2-Methylnaphthalene	64	-	
total HPAH ²⁾	5300	-	
sum 10-PAH ³⁾	-	40	
Fluoranthene	1200	-	
Pyrene	1400	-	
Benz(a)anthracene	270	-	
Chrysene	460	-	
total Benzofluoranthenes ⁴⁾	450	-	
Benzo(a)pyrene	210	-	
Indeno(1,2,3,-c,d)pyrene	88	-	
Dibenzo(a,h)anthracene	33	-	
Benzo(g,h,i)perylene	78	-	
금속 (mg/kg 건중량)			
As	93	55	150
Cd	6.7	12	30
Cr	270	380	1000
Cu	390	190	400
Ni	-	210	200
Pb	530	530	1000
Hg	0.59	10	15
Ag	6.1	-	-
Zn	960	720	2500
Nonionizable Organic Compounds Aromatic Hydrocarbons	(mg/kg OC)	(mg/kg 건중량)	
total LPAH ¹⁾	780	-	
Naphthalene	170	-	
Acenaphthylene	66	-	
Acenaphthene	57	-	

(표 계속)

항목	워싱턴주 퇴적물 관리기준*	네덜란드 오염퇴적물 정화기준	
	SIZ _{max} , CSL, MCUL	토양+퇴적물 적용	퇴적물 적용
Fluorene	79	-	
Phenanthrene	480	-	
Anthracene	1200	-	
2-Methylnaphthalene	64	-	
total HPAH ²⁾	5300	-	
sum 10-PAH ³⁾	-	40	
Fluoranthene	1200	-	
Pyrene	1400	-	
Benz(a)anthracene	270	-	
Chrysene	460	-	
total Benzofluoranthenes ⁴⁾	450	-	
Benzo(a)pyrene	210	-	
Indeno(1,2,3,-c,d)pyrene	88	-	
Dibenzo(a,h)anthracene	33	-	
Benzo(g,h,i)perylene	78	-	
Chlorinated Benzenes	(mg/kg OC)	(mg/kg 건중량)	
1,2-Dichlorobenzene	2.3	-	
1,4-Dichlorobenzene	9	-	
1,2,4-Trichlorobenzene	1.8	-	
Hexachlorobenzene	2.3	-	
sum chlorobenzene	-	30	
Nonionizable Organic Phthalate Esters	(mg/kg OC)		
Dimethyl phthalate	53	-	
Diethyl phthalate	110	-	
Di-n-butyl phthalate	1700	-	
Butyl benzyl phthalate	64	-	
Bis(2-ethylhexyl)phthalate	78	-	
Di-n-octyl phthalate	4500	-	
Miscellaneous	(mg/kg OC)	(mg/kg 건중량)	
Dibenzofuran	58	-	
Hexachlorobutadiene	6.2	-	
N-nitrosodiphenylamine	11	-	
Total PCBs	65	-	
sum 7-PCB ⁵⁾	-	1	
Mineral oil	-	5000	

(표 계속)

항목	위싱턴주 퇴적물 관리기준	네덜란드 오염퇴적물 정화기준
	SIZ _{max} , CSL, MCUL	토양+퇴적물 적용
Ionizable Organic Compounds	(µg/kg 건중량)	(mg/kg 건중량)
Phenol	1200	-
2-Methylphenol	63	-
4-Methylphenol	670	-
2,4-Dimethylphenol	29	-
Pentachlorophenol	690	5
Benzyl alcohol	73	-
sum chlorophenol	-	10
Benzoic acid	650	-
Chloradane	-	4
유기 염소계 살충제		(mg/kg 건중량)
sum drins	-	4
sum DDT/DDD/DDE	-	4
α-Endosulfan	-	4
sum HCH(α,β, γ, δ)	-	2
Heptachlor	-	4
Heptachlorepoide	-	4
Chloradane	-	4
유기주석화합물(sum total)		(mg/kg 건중량)
담수	-	2.5
해수 및 기수	-	2.5

SIZ_{max}: sediment impact zone maximum allowable contaminant level(WAC 173-204-420)

CSL: 정화 스크린 수준(cleanup screening level)

MCUL: minimum cleanup level

1) LPAH: 저분자 polycyclic aromatic hydrocarbon(Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene)의 합, 그러나 HPAH 화합물 각각의 합이 아님

2) HPAH: 고분자 polycyclic aromatic hydrocarbon(Fluoranthene, Pyrene, Benz(a)anthracene, Chrysene, Total Benzo(a)fluoranthenes, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, Dibenzo(a,h)anthracene, Benzo(g,h,i)perylene)의 합, 그러나 HPAH 화합물 각각의 합이 아님

3) sum 10 PAH: Naphthalene, Anthracene, Phenanthrene, Fluoranthene, Benz(a)anthracene, Chrysene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indenopyrene, Benzo(g,h,i)perylene의 합

4) Total Benzo(a)fluoranthenes: Benzo(a)fluoranthenes의 isomer b,j,k농도의 합

5) sum 7-PCB: PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-118, PCB-138, PCB-153, PCB-180의 합

*자료: 위싱턴주의 경우 WSDE(1998)

3. 수저퇴적물 관리기준

본 보고서의 편의상 준설퇴적물의 투기기준 및 퇴적물 제거기준을 별도로 다루었지만 기본

적으로 이러한 기준들도 퇴적물질을 평가하는 관리기준의 하나로 볼 수 있다. 그러나 이러한 기준들은 기본적으로 퇴적물 문제를 사후처리 또는 사후 대책의 개념에 기초하여 다루고 있기 때문에, 퇴적물 문제의 발생을 예방하거나 수용자의 입장에서 문제의 심각성을 평가하는 기준은 아니다.

반면 수저퇴적물에 대한 퇴적물질기준은 수저퇴적물을 관리해야 할 독립적인 매체로 보고, 매체에 일차적으로 노출되는 저서생물을 보호한다는 입장에서 설정되는, 퇴적물 관리의 목표가 될 수 있는 기준이라 할 수 있다. 그러나 제2장에서 언급한 바와 같이 단순히 퇴적물에 포함된 오염물질의 농도로 실제 저서생물에 미치는 영향을 예측하기에는 너무 많은 불확실성이 있기 때문에 퇴적물질기준의 개발은 물, 공기, 토양 등의 타 매체에 비해 아직까지 미흡한 실정에 있다. 따라서, 모든 사람이 수궁할 만한 퇴적물질기준의 개발사례는 없으나, 여기서는 각 국에서 사용하고 있는 퇴적물질기준의 다양한 사례를 통해 외국의 퇴적물질기준 개발현황을 제시하고 향후 퇴적물질기준의 개발과 관련된 시사점을 도출해 보도록 한다.

3.1. 미국

지금까지 많은 퇴적물질기준이 제안되었지만 실질적인 규제기준으로서 사용되고 있는 퇴적물질기준은 많지 않으며, 개발된 대부분의 퇴적물질기준은 퇴적물 오염평가를 위해 사용되는 예비기준 또는 퇴적물 관리에 있어 참고적인 판단기준으로 사용되는 권고기준의 성격으로 사용되고 있다(표 III-17).

연방정부 차원에서는 미국환경보호청에서 다섯 종류의 화학물질에 대해 설정한 저서생물 보호를 위한 퇴적물질준거기준(표 III-18)과 미국해양대기청에서 해양퇴적물의 오염평가를 위해 사용하도록 권고하고 있는 퇴적물질권고기준(표 III-19)이 있다.

미국환경보호청은 저서생물을 관리대상으로 하여 전국적인 적용을 전제로 평형분배법을 이용하여 5개의 비극성 유기화학물질에 대한 준거기준을 설정하고 있으며 중금속을 포함한 다른 오염물질에 대한 기준도 개발 중에 있다.⁸⁾ 그러나 환경보호청의 준거기준은 아직까지 오염물질의 배출허가 등의 직접적이고 전국적인 규제기준이 아닌 퇴적물 오염지역의 확인, 정화사업의 효과 평가, 퇴적물 관리의 목표설정을 위한 판단기준으로 사용되고 있다. 이는 특정 지역의 퇴적물 또는 오염물질의 특성이 생물유용성에 영향을 주어 평형분배법에 의해 예측된 악영향과 다를 수 있기 때문이다.

한편 환경보호청의 준거기준 개발과는 별도로 해양대기청은 해양퇴적물의 오염지역선별, 오염평가 등에 사용되는 퇴적물 권고기준을 설정하고 있다. 이는 퇴적물의 오염물질농도와 실제 관찰되는 생물악영향에 근거하여 오염여부를 평가하는 증거자료 가중법에 근거한 기준으로, 통계적으로 저서생물에 10% 악영향이 나타날 수 있는 농도(ERL)와 50%의 악영향이 나타날 수 있는 농도(ERM)를 기준값으로 설정하고 있다.

8) 현재 여섯가지 금속(Cd, Cu, Pb, Ni, Ag, Zn) 혼합물과 PAH 혼합물에 대한 EPSG(Equilibrium Partitioning Sediment Guidelines)를 개발중

〈표 III-17〉 미국의 퇴적물질 관련기준 개발현황

관련기관	퇴적물질기준	특 성
환경보호청	준거기준	· 퇴적물질표준 개발을 위한 준거기준(해양, 담수퇴적물) · 5개 유기화학물질에 대한 기준개발 완료
해양대기청	권고기준	· 전국현황및추이프로그램을 통해 수집한 퇴적물의 오염평가, 비교, 악영향 예측을 위한 기준(해양퇴적물) · 비규제 기준 · 환경보호청의 준거기준 이외에 증거자료 가중법에 의해 중금속을 포함한 11개 항목에 대한 기준 제시
캘리포니아주	예비기준	· 퇴적물의 유해성은 유해퇴적물 판정기준에 준함 · 저서생물보호를 위한 기준은 캐나다 온타리오주의 기준준용 · 퇴적물의 재활용기준으로서의 퇴적물질예비기준 설정
뉴욕주	권고기준	· 평형분배법을 이용하여 64종의 유기화학물질, 스크린 수준 농도법에 의해 12종의 금속에 대한 기준 마련 · 퇴적물 오염수역구분, 오염퇴적물로 인한 악영향을 예측하는 기준으로 사용
뉴저지주	예비기준	· 기본적으로 퇴적물질 종합평가법을 사용하나 담수퇴적물은 온타리오주 기준, 해양/하구퇴적물은 해양대기청 기준 등을 사용
매사추세츠주	예비기준	· 자체기준은 제시하지 않고 환경보호청, 미육군공병단, 캐나다 온타리오주 권고기준 사용
사우스캐롤라이나주	예비기준	· 증거자료 가중법을 이용하여 32개 화학물질의 해양/하구 퇴적물에 대한 기준 제시
워싱턴주	표준 (규제기준)	· 악영향 임계법과 퇴적물질 종합평가법을 이용하여 뚜렷한 퇴적물 관리에 적용되는 47개 화학물질에 대한 퇴적물질표준 제시 · 뚜렷한에서의 준설퇴적물 투기를 관리하는 기준으로 투기기준 별도로 제시 · 상기의 수치기준 이외에 생물에 대한 독성을 근거로한 퇴적물 관리표준을 설정
위스콘신주	절차규정	· 퇴적물 관리목적에 따라 퇴적물 오염평가를 위한 절차를 규정, 오염평가의 기준이 되는 수치기준은 환경보호청, 캐나다 온타리오주 기준 등을 준용 · 준설퇴적물의 수계투기에 대해서는 별도로 투기기준 설정
플로리다주	권고기준	· 증거자료 가중법을 이용해 34개 물질에 대한 기준제시 · 퇴적물 오염평가, 오염우심지역 파악, 습지환경 복구를 위한 계획, 환경오염에 대한 추이평가 기준으로 활용
텍사스주	예비기준	· 증거자료 가중법에 근거하여 12개 금속류, 131개 유기화학물질에 대한 기준제시 · 수질에 악영향을 미칠 수 있는 우려항목의 하나로 수질 안전성을 평가하는 척도로 사용

주정부 차원의 퇴적물질기준 설정은 각 주의 자연적인 여건, 관리의 우선순위등에 따라 크게 다른 양상을 보여주고 있고 주에 따라서는 매우 복잡한 기준을 설정하고 있기 때문에 주정부의 기준설정 사례는 부표에 정리하여 제시하도록 하겠다. 각 주정부의 기준 설정사례를 주별로 살펴보면, 캘리포니아주는 별도로 퇴적물질기준을 설정하기보다 퇴적물에 의한 유해성 평가는 유해폐기물 판정기준을, 저서생물에 대한 영향은 캐나다 온타리오주의 퇴적물질기준을 준용하고 있으며(부표 2-1, 2-2) 준설토의 재이용을 위한 일종의 투기기준은 별도로 설정하고 있다(표 III-11).

한편 뉴욕주는 원래 1989년 퇴적물 정화기준의 마련을 위한 연구보고서의 부록으로 퇴적물질기준을 제안했으나, 기준개발을 위해 사용된 방법인 평형분배법이 당시 미국환경보호청으로부터 공식적인 방법론으로 확정되지 못한 상태였고, 기준 자체가 오염퇴적물 복구시 최종목표가 되는 정화기준으로 인식되어 논란이 되어왔다(NYSDEC, 1999). 이 기준은 1989년 이후 발표된 과학적인 실험자료를 반영하며 지속적으로 개정되어, 퇴적물 오염수역을 구분하고 오염퇴적물이 국민건강, 저서생물, 야생생물에 미치는 악영향을 평가하는 예비기준으로 사용되고 있다(부표1-1, 부표 1-2).

뉴저지주는 자체적인 퇴적물질기준을 설정하기보다는 기본적으로 담수퇴적물은 캐나다 온타리오주의 담수퇴적물질기준을 해양 및 하구퇴적물은 해양대기청의 퇴적물질권고기준을 사용하고 있다(부표 1-3, 부표 1-4). 비극성 유기화학물질의 경우 저서생물에 미치는 양상이 해양퇴적물이나 담수퇴적물에 있어 비슷하기 때문에 해양 또는 담수퇴적물 한쪽 기준이 설정되어있지 않은 경우에는 설정된 다른 쪽의 기준을 차용하고 있다(NJDEP, 1998).

〈표 III-18〉 저서생물 보호를 위한 미국환경보호청의 퇴적물질준거기준

항목	담수퇴적물 (mg/kg)	해양퇴적물 (mg/kg)
Acenaphthene	130	230
Dieldrin	11	20
Endrin	4.2	0.76
Fluoranthene	620	300
Phenanthrene	180	240

주) 이 기준은 총유기탄소량이 건조퇴적물 중량의 0.2%이상인 지역, 퇴적물과 직접적인 접촉이 노출의 1차 경로인 지역, 퇴적물이 지속적으로 침전되거나 물과 퇴적물과의 평형이 형성된 지역에 적용된다.

자료: 이창희 외(1998)로부터 재인용

〈표 III-19〉 미국해양대기청에서 사용되는 퇴적질권고기준 (해양퇴적물)

항목	ERL (mg/kg 건중량)	ERM (mg/kg 건중량)
Ag	1	3.7
As	8.2	70
Cd	1.2	9.6
Cr	81	370
Cu	34	270
Hg	0.15	0.71
Ni	21	52
Pb	47	220
tDDT	1.6×10^{-3}	46×10^{-3}
tPAH	4	45
tPCB	23×10^{-3}	0.18

주) ERL(Effects Range Low)은 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 최소 농도이고(10%의 악영향) ERM (Effects Range Median)은 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 중간 농도이며(50%의 악영향), 추가적으로 환경보호청의 준거기준이 설정된 5개의 화학물질은 환경보호청 기준을 사용

자료: 이창희 외(1998)로부터 재인용

실제 주정부 차원의 규제기준으로서 퇴적물질기준을 설정하고 있는 예로는 위싱턴주를 들 수가 있다(WSDE, 1998). 위싱턴주는 푸젯사운드 해역에 적용되는 관리기준으로 악영향 임계법과 퇴적물질 종합 평가법에 근거한 퇴적물질표준(Sediment Quality Standard, SQS), 퇴적물 영향지역 최대허용기준(Sediment Impact Zone Maximum Criteria, SIZ_{max}), 퇴적물 정화기준(Sediment Cleanup Standards, SCS) 및 퇴적물 수계투기기준 등을 별도로 설정하고 있다⁹⁾. 퇴적물질기준은 저서생물에 악영향을 미치지 않는 오염수준을 나타내는 수치로서 화학물질 농도, 생물학적 영향, 인류 보건 및 기타 독성, 방사성, 생물학적 유해성 물질 기준에 따라 개별적으로 설정될 수 있는데 현재 푸젯만 해역의 퇴적물 관리를 위해서는 화학물질 농도와 생물학적 영향을 근거로 한 퇴적물질기준이 설정되어 있으며 그 기준을 <부표 1-5>에 제시하였다. 한편, 담수퇴적물에 대한 퇴적물질기준은 아직 확정되지 않은 상황이며 잠정적으로 제안된 담수퇴적물에 대한 퇴적물질기준은 <부표 1-6>에 제시하였다.

텍사스주에서는 오염퇴적물을 수질에 악영향을 미칠 수 있는 우려항목으로 보아 안전한 수준의 수질을 유지하고 있는지를 평가하는 척도의 하나로 퇴적물질예비기준을 사용하고 있다(TNRCC, 2000). 이 기준은 미국해양대기청이 사용한 증거자료 가중법에 근거하여 오래 전부터 지표수질모니터링을 통해 수집한 퇴적물 자료를 분석하여 설정하였으며, 현재 12개의 금속류와 131개의 유기화합물질에 대한 기준이 설정되어 있다(부표 1-7, 부표 1-8).

플로리다주의 퇴적물질기준은 일종의 예비기준으로 퇴적물의 오염평가, (비점오염원 관리가 필요한) 오염 우심지역 파악, 습지환경 개선을 위한 계획수립, 환경오염에 대한 추이 평가에 도움을 주기 위한 지침으로 활용하기 위해 개발되었다(FDEP, 1994a; 1994b). 이 기준은

9) 위싱턴주에서 설정하고 있는 퇴적물질기준의 관리상 의미는 이창희 외(1998)를 참조바람

미국해양대기청 퇴적물질권고기준 개발에 사용된 증거자료 가중법에 의해 총34개 오염물질에 대해 개발되어 있는데 지표수 및 지하수 수질환경기준처럼 강제적인 집행성격을 갖지는 않는다(부표 1-9). 준설퇴적물 관리에 있어서, 플로리다의 퇴적물질예비기준은 미국환경보호청과 미육군공병단에서 제시하고 있는 준설퇴적물 평가프로토콜을 대신하기 위해 설정된 것은 아니지만 퇴적물의 오염정도 및 분포를 결정하는데 실제적으로 유용하게 사용되고 있다.

플로리다와 유사한 접근방식을 통해 사우스캐롤라이나주도 해양 및 하구퇴적물에 대한 퇴적물질예비기준을 설정하고 있으며(부표 1-10), 위스콘신주는 주 자체적인 퇴적물질기준이 설정되어 있지는 않으나 퇴적물질을 평가하는 절차를 규정하고 있다(WNDR, 1995).

3.2. 캐나다

캐나다 연방정부는 저서생물 보호를 위한 담수퇴적물 및 해양퇴적물에 적용되는 퇴적물질 기준 개발을 위한 프로토콜을 발표한 후(CCME, 1995), 1998년에 잠정퇴적물질권고기준(Interim Sediment Quality Guidelines, ISQGs)과 악영향 기대수준(Probable Effect Level, PEL)을 발표하였다(EC, 1998). 이 퇴적물질기준은 기본적으로 미국해양대기청의 퇴적물질권고기준의 개발에 사용된 증거자료 가중법에 의해 설정되었기 때문에 저서생물에 대한 악영향을 확률적으로 표현하고 있다(표 III-20, III-21).

즉, 잠정퇴적물질권고기준 미만의 농도는 저서생물에 대한 악영향이 거의 없는 오염되지 않은 퇴적물의 상태를 나타내며, 악영향 기대수준 이상의 농도는 수생생물에 대한 악영향이 빈번하게 나타날 수 있는 수준으로 퇴적물 오염이 상당히 진행된 상태를 나타낸다. 또한 잠정퇴적물질권고기준과 악영향 기대수준 사이의 오염물질농도는 악영향이 가끔 발생하는 정도의 오염상태를 나타낸다.

〈표 III-20〉 캐나다 담수퇴적물질권고기준 및 악영향 기대확률 (%)

항목	ISQG ¹⁾	PEL ¹⁾	% ≤ ISQG	ISQG < % < PEL	% ≥ PEL
무기물질 (mg/kg 건중량)					
As	5.94	17.0	5	25	12
Cd	0.6	3.5	11	12	47
Cr	37.3	90.0	2	19	49
Cu	35.7	197	4	38	44
Pb	35.0	91.3	5	23	42
Hg	0.17	0.486	8	34	36
Zn	123	315	5	32	36

(표 계속)

항목	ISQG ¹⁾	PEL ¹⁾	% ≤ ISQG	ISQG < % < PEL	% ≥ PEL
유기물질 (μg/kg 건중량)					
Acenaphthene	6.71 ²⁾	88.9 ³⁾			
Acenaphthylene	5.87 ²⁾	128 ³⁾			
Anthracene	46.9 ²⁾	245 ³⁾			
Aroclor 1254	60 ⁴⁾	340 ⁵⁾			
Benz(a)anthracene	31.7	385	13	6	38
Benzo(a)pyrene	31.9	782	11	16	30
Chlordane	4.5	8.9	2	17	70
Chrysene	57.1	862	8	14	25
DDD ⁶⁾	3.54	8.51	3	30	85
DDE ⁶⁾	1.42	6.75	6	20	47
DDT ⁶⁾	1.19 ²⁾	4.77 ³⁾	8	5	59
Dibenz(a,h)anthracene	6.22 ²⁾	135 ³⁾			
Dieldrin	2.85	6.67	1	10	60
Endrin	2.67	62.4	1	64	59
Fluoranthene	111	2355	8	23	49
Fluorene	21.2 ²⁾	144 ³⁾			
Heptachlor epoxide	0.60	2.74	3	12	67
Lindane	0.94	1.38	0	50	49
2-Methylnaphthalene	20.2 ²⁾	201 ³⁾			
Naphthalene	34.6 ²⁾	391 ³⁾			
total PCBs	34.1	277	4	40	50
Phenanthrene	41.9	515	4	17	44
Pyrene	53.0	875	7	16	32
Toxaphene	0.955 ⁷⁾	na ⁸⁾			

(표 계속)

1) ISQGs와 PELs는 미국해양대기청의 '오염현황 및 오염추이 파악을 위한 조사 프로그램(National Status and Trends Program)' 방법에 의거(CCME, 1995)

2) 잠재적으로 해양퇴적물 ISQG 채택; 3) 잠재적으로 해양퇴적물 PEL 채택

4) 잠재적으로 온타리오주의 Lowest Effect Level 채택

5) 잠재적으로 온타리오주의 Severe Effect Level 채택 (assumes 1% TOC; Persaud *et al.*, 1993)

6) *p*, *p'* 및 *o*, *p'* isomers 합계; 7) 잠재적으로 수질환경기준으로부터 계산

8) 기준이 설정되지 않음

자료: Environment Canada(1998)

〈표 III-21〉 캐나다 해양퇴적물질권고기준 및 악영향 기대확률 (%)

항목	ISQG ¹⁾	PEL ¹⁾	% ≤ ISQG	ISQG < % < PEL	% ≥ PEL
무기물질 (mg/kg 건중량)					
Ar	7.24	41.6	3	13	47
Cd	0.7	4.2	6	20	71
Cr	52.3	160	4	15	53
Cu	18.7	108	9	22	56
Pb	30.2	112	6	26	58
Hg	0.13	0.70	8	24	37
Zn	124	271	4	27	65
유기물질 (µg/kg 건중량)					
Acenaphthene	6.71	88.9	8	29	57
Acenaphthylene	5.87	128	7	14	51
Anthracene	46.9	245	9	20	75
Aroclor 1254	63.3	709	1	24	76
Benz(a)anthracene	74.8	693	9	16	78
Benzo(a)pyrene	88.8	763	8	22	71
Chlordane	2.26	4.79	9	12	17
Chrysene	108	846	9	19	72
DDD ²⁾	1.22	7.81	4	11	46
DDE ²⁾	2.07	3745	5	16	50
DDT ²⁾	1.19	4.77	8	5	59
Dibenz(a,h)anthracene	6.22	135	16	12	65
Dieldrin	0.72	4.30	4	13	50
Endrin	2.67 ³⁾	62.4 ⁴⁾			
Fluoranthene	113	1494	10	20	80
Fluorene	21.2	144	12	20	70
Heptachlor epoxide	0.60 ³⁾	2.74 ⁴⁾			
Lindane	0.32	0.99	3	21	26
2-Methylnaphthalene	20.2	201	0	23	82
Naphthalene	34.6	391	3	19	71
total PCBs	21.5	189	16	37	55
Phenanthrene	86.7	544	8	23	78
Pyrene	153	1398	7	19	83
Toxaphene	0.1 ⁵⁾	na ⁶⁾			

1) ISQGs와 PELs는 미국해양대기청의 '오염현황 및 오염추이 파악을 위한 조사 프로그램(National Status and Trends Program)' 방법에 의거(CCME, 1995)

2) *p*, *p'* 및 *o*, *p'* isomers의 합계; 3) 잠정적으로 담수퇴적물 ISQG 채택

4) 잠정적으로 담수퇴적물 PEL 채택; 5) 잠정적으로 NYSDEC(1993) 기준 채택

6) 기준이 설정되지 않음

자료: Environment Canada(1998)

이러한 퇴적물질권고기준은 퇴적물의 오염물질 농도로부터 저서생물에 대한 유해성 평가를

가능하게 하기 때문에 오염퇴적물의 관리나 퇴적물 정화의 우선순위를 결정하는데 사용될 수 있다. 또한 연방정부의 잠정퇴적물질권고기준은 캐나다 전역에 일률적으로 적용되는 것이 아니라, 이 기준에 근거하여 각 주정부가 지역특성, 용수이용목적 등을 고려하여 주정부 차원의 자체 퇴적물질기준을 설정할 것을 권고하고 있다.

연방정부의 퇴적물 권고기준이 설정되기 이전부터 캐나다 온타리오주는 담수퇴적물에 대한 퇴적물질기준을 설정하여 사용해 왔다¹⁰⁾ (부표 2-1, 2-2). 이 기준은 대부분의 해양퇴적물 기준의 경우 미국해양대기청의 퇴적물질권고기준을 준용했던 것처럼, 많은 주정부나 국가에서 담수퇴적물의 평가에 준용할 정도로 잘 알려져 있다.

브리티시컬럼비아주는 오염된 수질, 대기, 토양, 퇴적물의 관리를 위해 두 가지 접근방법을 사용하고 있는데 하나는 농도(기준)에 근거한 방법이고 또 하나는 유해성에 근거한 접근방법이다(BC, 1999). 수치기준은 퇴적물의 오염여부, 오염정도를 파악하고, 오염퇴적물 정화 사업의 정화목표로 사용될 수 있는 일반퇴적물질기준(Generic Numerical Criteria, Level I Criteria)과, 지역여건 및 지역의 수용능력을 고려한 일반퇴적물질기준의 보완적 기준으로 지역퇴적물질기준(Site-specific Numerical Criteria, Level II Criteria)을 설정하고 있다¹¹⁾ (부표 2-3, 2-4).

유해성기준(Risk-Based Criteria)은 퇴적물 오염으로 인해 야기될 수 있는 유해성 문제의 해결을 위해, 지역적인 특성을 고려하고 보다 엄밀한 단계적인 평가와 상세한 검토를 거쳐 개발된 규제적 성격의 퇴적물질표준이나 아직 확정되지 않은 실정이다. 적절한 기준의 적용 여부는 상황 및 여건에 따라 결정되는데, 예를 들어 오염퇴적물의 분포가 좁아 정화량이 적을 때는 엄밀한 평가비용이 정화비용에 비해 과다할 수 있으므로 일반퇴적물질기준을, 이와 반대의 경우에는 유해성기준을 적용한다.

3.3. 유럽

유럽에서는 1980년대 초반부터 퇴적물질기준의 개발을 위한 연구가 영국, 프랑스, 독일, 벨기에, 네덜란드, 스웨덴 등지에서 개별적으로 추진되어 왔으며 유럽연합의 출범과 더불어 퇴

10) 온타리오 기준은 저서 생물의 보호를 위해 생물체에 대한 오염물질의 만성적, 장기적 영향을 기초로 하여 개발됨. NEL(No Effect Level), LEL(Lowest Effect Level), SEL(Severe Effect Level)의 세단계로 구성되며, LEL은 퇴적물에 서식하는 생물체에 어떠한 영향도 미치지 않는 오염수준, LEL은 퇴적물에 서식하는 대다수의 생물체에 영향을 미치지 않는 오염수준, SEL은 저서 생물에 악영향을 미칠수 있는 심하게 오염된 수준을 의미함.

11) 일반퇴적물질기준은 퇴적물 전체의 평균영향수준(Average Effect Levels, AELs)으로 대체로 캐나다 연방 퇴적물질기준의 ISQG와 PEL의 평균값에 해당. 만일 ISQG와 PEL이 없는 경우에는 이에 준하는 다른 권고치(Ingersoll et al., 1996; MacDonald 1998b)를 사용. 퇴적물 공극수 기준은 BC 주정부의 수질권고치를 사용하고 야생생물과 국민건강을 위한 기준은 뉴욕주 기준을 사용.

지역퇴적물질기준으로서 수생생물 보호를 위한 담수, 하구, 해양퇴적물 기준은 캐나다 연방 퇴적물질권고기준의 PEL에 따르며 공극수 기준은 BC 주정부의 수질기준의 두 배를 사용. 퇴적물질기준은 지역적인 생물상에 따라 달라지며, 일반적으로 생물의 활동깊이는 퇴적물 표면으로부터 15~30cm 정도이지만 일부 무척추동물이나 양서류는 100cm 까지 서식하기 때문에 약 100cm 깊이까지 기준이 적용.

적물질기준의 개발을 위한 공동연구 노력이 진행 중에 있다. 아직까지 수질환경기준과 같이 유럽연합 전 국가에 적용되는 지침이 마련되지는 않았지만 OSPAR(Oslo-Paris Commission)나 영국의 WRC(Water Research Center)등에서는 퇴적물로 인한 악영향의 방지를 위해 일부 금속물질과 유기화합물에 대한 안전기준으로서의 퇴적물질기준을 제시하고 있다(표 III-22).

미국이나 캐나다의 퇴적물질기준 설정사례에서 보았던 것처럼, 네덜란드도 생물에 대한 악영향이 확률적으로 적은 퇴적물 관리의 목표가 되는 퇴적물질권고기준과, 더 이상 방치할 경우 생물에 대한 악영향이 예상되는 최대허용기준의 2단계로 퇴적물질기준을 설정하고 있다(부표 3-1). 여기서 퇴적물질권고기준은 퇴적물만을 위해서 별도로 설정된 것이 아니라 토양환경기준을 준용한 것으로 사실상 퇴적물보다는 토양의 오염물질 배경농도를 반영하고 있다고 보는 것이 타당하다. 한편 대부분의 퇴적물 오염물질, 특히 금속물질에 대한 최대허용기준은 <표 III-16>에 제시한 네덜란드의 오염퇴적물 정화기준과 일치하는 것을 볼 수 있다.

스웨덴의 경우 자체적으로 설정한 퇴적물질기준은 없으며 퇴적물의 오염평가는 <표 III-22>의 안전기준, <표 III-19>의 미국해양대기청 퇴적물질권고기준 또는 <표 III-20>의 캐나다 연방정부의 퇴적물질권고기준을 준용하고 있다. 한편, 해양 및 연안퇴적물의 오염평가는 자체적으로 통계적인 분류에 의해 설정된 퇴적물질예비기준에 따른다(부표 3-2).

<표 III-22> 유럽 퇴적물질예비기준 (예)

항목	안전기준 (OSPAR)	안전기준 (WSC, UK)
금속 (mg/kg 건중량)		
As	7.2	8
Cd	0.7	2
Cr	52	100
Cu	19	40
Hg	0.13	0.4
Ni	16	100
Pb	30	40
Zn	12	200
유기화합물 (mg/kg 건중량, 1% 유기물함량)		
p,p'-DDE	0.02	
Dieldrin	0.0007	0.005
Naphthalene	0.04	
Phenanthrene	0.09	
Anthracene	0.05	
Fluoranthene	0.1	
Pyrene	0.15	
Benzo[a]anthracene	0.075	
Chrysene	0.1	
Benzo[a]pyrene	0.09	
PCB(sum of 7)	0.001	
TBT	0.00002	

3.4. 시사점

앞에서 제시한 외국의 퇴적물질기준 설정사례를 통해 다음과 같은 시사점을 도출할 수가 있다.

첫째, 비오염퇴적물에 대한 퇴적물질기준은 전국적이고 일률적인 기준보다는 퇴적물로 인해 용수이용, 서식지 훼손, 수생생물 생육등에 저해가 있는 지역에 대해 당면하고 있는 문제를 중심으로 정량적인 관리목표를 설정하는 것이 바람직하다. 또한 이러한 일반퇴적물은 수생생물 및 국민건강에 직접적인 악영향의 원인이 되지는 않으므로 퇴적물지표의 설정과 관련된 문제는 향후의 논의에서 제외한다.

둘째, 준설퇴적물의 투기와 관련하여 환경적인 악영향을 방지하려면 준설퇴적물의 투기에 대한 적절한 영향평가 절차가 마련될 필요가 있다. 만일 투기기준이 설정될 수 있다면 투기와 관련된 악영향을 평가하는 일차적인 기준이 될 수 있으며 평가와 관련된 많은 시간과 재원을 절약할 수 있을 것이다. 그러나 퇴적물질기준이 설정되면 투기기준으로도 준용할 수 있으므로 별도의 투기기준의 개발보다는 퇴적물질기준의 개발에 초점을 두는 것이 바람직해 보인다.

셋째, 퇴적물질기준의 설정항목을 보면 초기에 개발된 일부 투기기준에는 유기물 및 영양염류 등의 일반항목이 포함된 사례가 있으나 대부분의 경우에는 중금속, 유기화합물질 등의 유해화학물질에 대한 기준만이 설정되어 있다. 이는 일반항목이 생체에 대한 직접적인 위해성 문제보다는 수질, 서식지 환경의 악화 등 주로 용수이용의 저해문제와 관련되고 문제의 심각성 또한 지역적인 환경특성에 크게 좌우되기 때문이다. 따라서 이들 일반항목에 대해서는 일률적인 기준의 설정보다는 악영향을 적절히 평가할 수 있는 평가절차의 개발이 필요하다고 판단된다.

넷째, 대부분의 퇴적물질기준은 통계적으로 볼 때 악영향이 발생할 확률이 적은 수준과 악영향이 명확히 기대되는 수준 두 단계로 나누어 설정되는 것을 볼 수 있다. 즉 전자는 퇴적물의 관리를 통해 달성해야 할 이상적인 관리목표로서 본래의 퇴적물질기준의 의미이며, 후자는 현실적인 관리기준으로 퇴적물의 제거기준, 정화기준 또는 처리기준 등에 준용할 수 있는 기준으로 볼 수 있다. 따라서, 악영향 여부를 명확히 구분할 수 있는 방법론이 가용하기 전까지는 방법론의 불확실성을 고려하여 하나의 기준보다는 오염정도와 악영향을 몇 단계로 구분할 수 있는 단계화된 기준체계가 바람직하다고 판단된다.

IV. 국내퇴적물 오염현황

퇴적물질기준이 궁극적으로는 퇴적물 관리의 정책적 목표이며 적어도 지역적 또는 사업에 따라서는 실질적인 규제기준이 될 수 있다는 점에서 기준의 설정 및 적용 여부는 국내의 환경관리 수준과 여건에 따라 정해질 수 있을 것이다. 그러나 제3장의 외국사례에서 보듯이 굳이 규제기준으로서의 퇴적물질기준이 아니라 퇴적물의 오염평가, 퇴적물 오염수역의 구분, 퇴적물 관리의 우선순위 설정, 준설퇴적물의 환경안전성 관리, 오염퇴적물의 정화수준 제시, 연안습지의 보전 및 정화기준 제시, 퇴적물의 수생태적 중요성 판단기준 등 실질적으로 다양한 관리기준으로 퇴적물질기준이 활용될 수 있음을 알 수 있다.

그럼에도 불구하고 퇴적물질기준의 개발에 대한 인식의 부족은 현재 우리나라의 환경관리 수준을 반영하는 것으로 볼 수 있으며 따라서 퇴적물질기준 개발방안을 논하기에 앞서 퇴적물 관리현황 및 여건에 대한 분석이 선행될 필요가 있다. 우리나라 퇴적물 관리현황 및 문제점, 예를 들어 퇴적물 관리제도 및 체계, 오염원관리, 준설퇴적물관리 등에 관한 일반적인 내용은 이창희 등(1998)이 상세히 기술하고 있으므로 여기서는 퇴적물질기준의 개발과 관련하여 국내의 퇴적물 오염현황을 유기물, 영양염류, 중금속 및 기타 항목으로 나누어 살펴보도록 하겠다¹²⁾.

1. 연구방법

국내퇴적물 오염현황 파악을 위하여 먼저 퇴적물에 함유된 중금속, 유기물, 영양염류의 농도 측정 데이터를 포함하고 있는 국내의 조사자료를 구하였다. 여기에는 환경부, 국립환경연구원, 국립수산진흥원 등의 국가 기관에서 발행된 자료와 학위논문, 학술지 논문 등 개인 연구자에 의한 자료가 모두 포함되었다. 구해진 조사자료에 대해 임의로 번호를 매기고, 각 문헌에 대한 모든 측정값을 입력한 후, 측정데이터를 호소, 하천, 연안 수역별로 분리하였는데, 이 과정에서 수역의 구분이 모호한 데이터는 제외되었다. 이렇게 구분된 데이터를, 각 항목에 대해 외국기준을 참고로 설정된 기준값(제5장에서 정의된 ‘목표수준’과 ‘우려수준’)에 따라 세 단계(심한오염, 약간오염, 비오염)로 나눈 후, 각 수역별, 전체수역별 각 단계에 포함되는 데이터의 퍼센트, 각 수역별 측정치의 평균값 비교 등의 통계분석과, 수역별 데이터의 도식화를 통하여 국내현황을 파악·분석하였다.

이 과정에서 각 조사자료의 측정방법이 상이하고, 표층시료의 경우 표층의 두께가 일정하지 않으며, 수역의 구분이 불명확한 자료들이 있고, 시료 채취지점의 선정과 대표성에 문제가 있는 등 퇴적물 조사지침의 부재로 인한 근본적인 문제점들이 확인되었다. 한편 본 연구에 있어서는, 데이터의 도식화에 있어 시간적·공간적 분포가 고려되지 않았다는 것, 즉, 과거의

12) 본 장은 퇴적물질기준의 필요성을 강조하는 의미에서 제시되고 있고 본문에 사용된 퇴적물 자료 이외에도 가용한 많은 자료가 있을 수 있으므로 여기에 제시된 내용을 일반화하여 적용하지 말아야 한다.

자료와 현재의 자료가 혼재되어 오염도의 시간별 추이를 알 수 없고, 같은 지역(예를 들어 대청호)의 자료들이 참고문헌별로 도식화되었기 때문에 함께 비교되지 못하는 제약이 있음을 염두에 두어야 한다.

2. 오염현황

2.1. 유기물에 의한 오염현황

퇴적물의 대표적인 유기물 지표항목으로는 강열감량(LOI, Loss of Ignition)과 화학적산소 요구량(COD, Chemical Oxygen Demand)을 들 수가 있다. 여기서는 호소(저수지포함), 하천, 연안퇴적물의 오염정도를 기준에 발표된 강열감량과 화학적산소요구량에 근거하여 살펴본다.

가. 강열감량

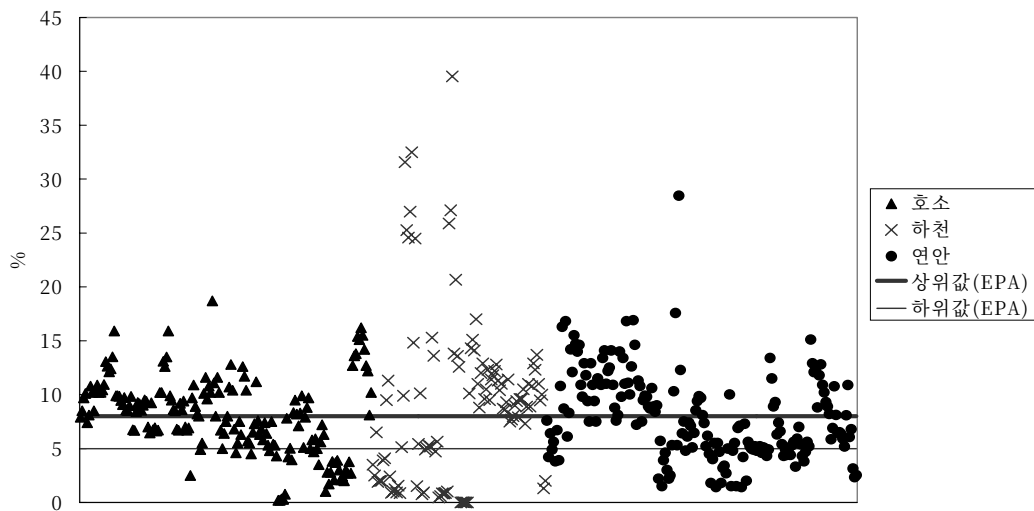
호소, 하천, 연안퇴적물의 강열감량을 오대호 퇴적물분류를 위해 사용된 미국지역환경보호청의 기준(표 III-12)과 비교하였다. 이 기준은 담수퇴적물에 적용되는 것이지만 해양퇴적물의 경우 적당한 기준이 제시되어 있지 않고 수역환경에 따른 대체적인 유기물의 함량 비교를 위해 같은 기준을 이용하였으며 따라서 연안퇴적물의 경우 오염이 과도하게 평가되었음을 감안해야 한다(그림 IV-1).

호소의 경우 측정치중 51% 정도가 심한오염을 보이고 있고, 이 중 대청호(국립환경연구원, 1998a; 1998b)와 금강(황종연 외, 1998) 퇴적물의 오염이 심한 것으로 나타났다(표 IV-1). 하천의 경우 측정치중 57% 정도가 심한오염으로, 약 31%가 오염되지 않은 것으로 나타나 지역에 따라 오염정도가 심한 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 중 특히 금강(국립환경연구원, 1997)의 경우 전체 강열감량 조사값 중 최대값을 보였고 금강권역의 호소에서도 높은 강열감량을 보여 금강권역 수계의 퇴적물 유기물 함량이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다.

연안의 경우는 70% 이상의 조사값들이 중간오염 이상을 보이며 이 중 '97 진해만(이홍재 외, 1997), '91 진해만(양한섭 외, 1995)의 측정값이 상대적으로 큰데, '97년의 경우 해당시기에 발생한 적조와 관련이 큰 것으로 나타났다. 또한 '94 완도 신지도(윤양호, 1998)의 값도 다른 측정값보다 비교적 큰 수치를 나타내고 있다.

〈표 IV-1〉 강열감량으로 본 수역별 퇴적물의 유기물 오염

오염평가	호소	하천	연안	자료수 (n)
심한오염	51.4%(89)	57.3%(59)	44.6%(82)	230
약간오염	30.7%(53)	11.7%(12)	31.0%(57)	122
비오염	17.9%(31)	31.0%(32)	24.4%(45)	108



〈그림 IV-1〉 수역별 퇴적물의 강열감량¹³⁾

나. 화학적산소요구량

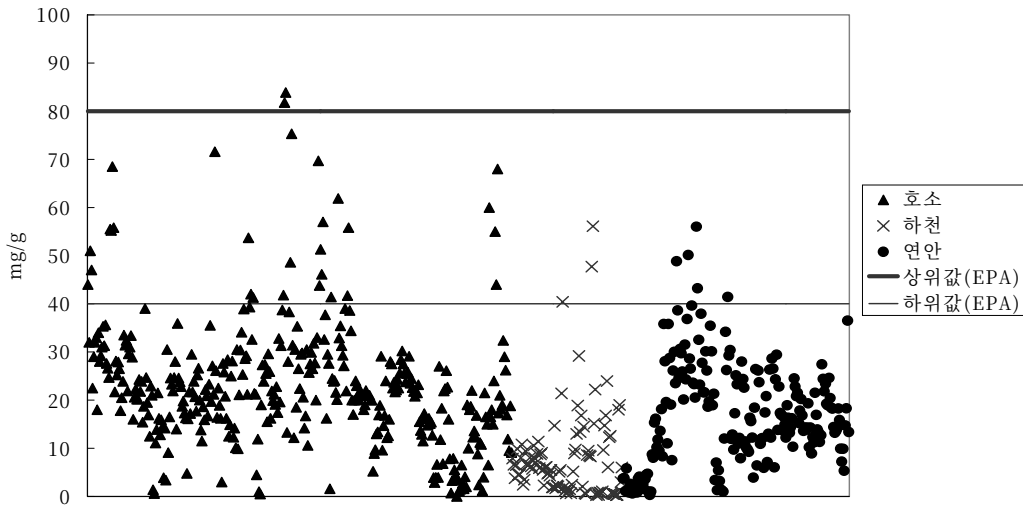
미국지역환경보호청의 기준을 이용하여 호소, 하천, 연안퇴적물의 오염을 평가해보면 대부분의 퇴적물(약 95%)이 화학적산소요구량을 기준으로 볼 때 오염되지 않은 것으로 나타나고 있다(그림 IV-2). 평균값은 호소가 가장 높았고, 연안, 하천의 순으로 나타났으며 최대 화학적 산소요구량은 '94 소양호(환경부, 1995) 퇴적물로 나타났다.

주목할 것은 강열감량에 의한 평가에 의하면 심하게 오염된 퇴적물이 화학적산소요구량 항목에 의하면 오염되지 않은 것으로 나타나고 있다는 사실이다. 물론 이는 자료의 출처가 다르고 이에 따른 조사지역의 차이가 반영된 것이기도 하지만 미국환경보호청의 기준이 지역 환경에 근거하여 설정된 기준이기 때문에 우리나라의 수역특성에 적합하지 않은 부분도 있어 일반적인 적용에는 무리가 있는 것으로 여겨진다.

〈표 IV-2〉 화학적산소요구량으로 본 수역별 퇴적물의 유기물 오염

오염평가	호소	하천	연안	자료수 (n)
심한오염	0.5%(2)	0%(0)	0%(0)	2
약간오염	7.7%(28)	3.2%(3)	2.6%(5)	36
비오염	91.8%(335)	96.8%(92)	97.4%(190)	617

13) 국립환경연구원(1992, 1997, 1998a, 1998b, 1999), 농어촌진흥공사(1999a, 1999b, 1999c), 한국수자원공사(1997), 환경부(1998), 안병영(1998), 백성복(1998), 박동규(1995), 조기찬(1995), 박종수(1993), 김봉진(1993), 이홍재외(1997), 백철인의(1997, 1998), 김귀용외(1997, 1998, 1999), 이필용외(1996), 김복기외(1998), 정팔진외(1998), 조현서외(1998), 윤양호(1998), 이동훈(1999), 김창모(1999), 황종연외(1998), 양한섭외(1995)



〈그림 IV-2〉 수역별 퇴적물의 화학적산소요구량¹⁴⁾

2.2. 영양염류에 의한 오염현황

질소, 인등의 영양염류는 제1장에서 소개한 바와 같이 환경변화에 따라서는 퇴적물로부터 용출되어 부영양화 및 조류의 이상번식의 원인이 될 수 있다는 점에서 오래 전부터 관심의 대상이 되어 왔다(국립환경연구원, 1990;1996, 수자원공사 1996; 1997). 수질관리에 있어 영양염류에 의한 오염은 퇴적물질기준에 의한 단순한 비교보다는 대상지역의 영양염류에 대한 물질수지에 근거하는 것이 일반적이며 따라서 이들 항목에 대해 퇴적물질기준이 설정된 사례는 많지 않다.

영양염류에 의한 오염평가는 총질소, 총인에 대한 퇴적물질기준이 설정되어 있는 온타리오 주의 퇴적물질기준과 비교하였다(부표 2-1). 여기서 LEL(Lowest Effects Level)은 저서생물 다수가 견딜 수 있는 수준이나 몇몇 종에게는 악영향을 미치거나 악영향이 시작될 수 있는 농도를 말하며, SEL(Severe Effects Level)은 저서생물의 뚜렷한 장애발생이 예상되는 농도로 대부분의 군집중에 심한 악영향을 끼치는 농도이고, 이 값 이상이면 오염된 것으로 간주한다. 단, 이 기준은 온타리오 주정부가 지역특성과 생물영향을 고려하여 자체적으로 개발한 것으로 타 지역에 적용될 경우에는 지역특성을 고려하지 못한다는 한계를 염두에 두어야 한다.

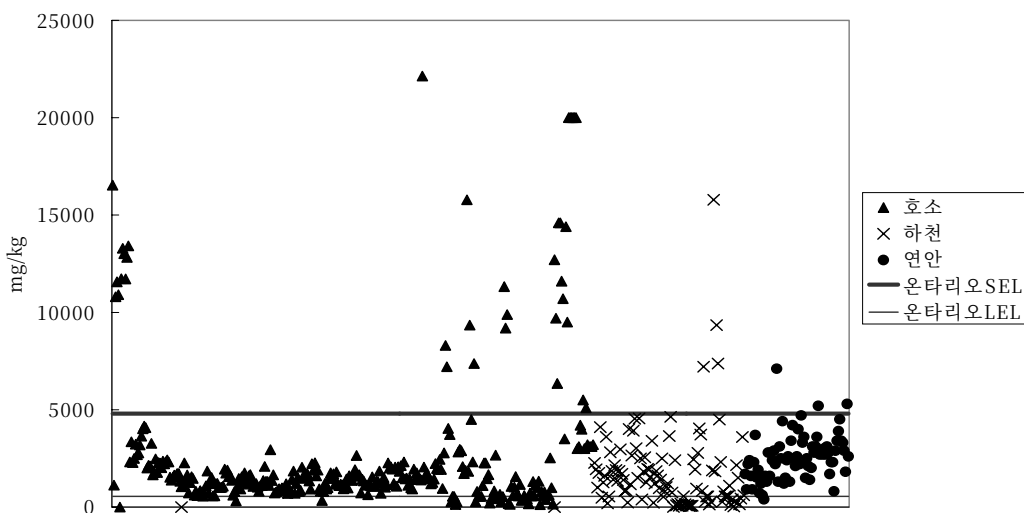
가. 총질소

14) 국립환경연구원(1992, 1997, 1998a, 1998b, 1999), 농어촌진흥공사(1999a, 1999b, 1999c), 한국수자원공사(1997), 환경부(1994, 1995), 이종현(1996), 백성복(1998), 박동규(1995), 박종수(1993), 김봉진(1993), 이홍재외(1997), 백철인외(1997, 1998), 김귀용외(1997, 1998, 1999), 이필용외(1996), 김복기외(1998), 정팔진외(1998), 조현서외(1998), 윤양호(1998), 김창모(1999), 황중연외(1998)

호소, 하천, 연안에서 측정된 퇴적물의 총질소 농도에 대해 각 수역별 측정값을 비교해 본 결과 평균값은 연안이 가장 높았고, 하천이 가장 낮았다. 각각의 측정자료에 대해 살펴보면 대부분의 조사값(약 90%)들이 온타리오의 LEL을 초과하는 것을 보여주므로 거의 모든 지점에서 어느정도의 악영향이 시작 될 수 있다는 것을 알 수 있다(그림 IV-3).

이중에서 특히 SEL값들을 초과하여 심한 오염도를 보이는 측정값들을 살펴보면, 먼저 그 래프 앞부분의 값들이 SEL을 크게 초과하고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 대청호에서 99년에 측정한 값들(국립환경연구원, 1999)로 계절에 관계없이 현재 대청호 퇴적물의 오염도가 심하다는 것을 보여준다. 그리고 나머지 문헌에서도 대청호에 대해 조사한 값들 중 SEL을 초과하는 것이 있었다(국립환경연구원, 1998a; 한국수자원공사, 1997). 그 외에도 '94 옥정호(환경부, 1994), '97 삽교호, 금강하구연(국립환경연구원, 1998a) 등의 퇴적물 총질소의 농도가 매우 큰 것으로 나타나고 있고, 왕궁, 감돈지(농어촌진흥공사, 1999c)의 값도 SEL을 크게 초과하는 것으로 나타났다. 이는 왕궁지내의 가두리 양식장과 감돈지 유역내의 대규모 축산시설로부터 강우시 축분이 유출된 결과로 보여진다.

하천의 경우 '97 금강(국립환경연구원, 1997)의 측정값 중 일부가 SEL을 넘어서고 있으나 대부분은 SEL이하로 나타났고, 연안퇴적물의 경우도 대부분 LEL은 초과하나 SEL보다는 작은 값을 보이고 있었다(표 IV-3). 온타리오 기준에 따르면 LEL과 SEL사이의 값을 갖을 경우 퇴적물 오염으로 간주하고 보통의 악영향을 미치는 것으로 판단하는데, 우리나라의 자료들이 이 기준에 비추어 보면 SEL을 초과하는 지점을 제외하고는 대부분이 이 구간에 속하므로, 퇴적물이 오염된 상태이며 악영향의 가능성을 전적으로 배제할 수 있는 수준이 아니라고 할 수 있다.



<그림 IV-3> 수역별 퇴적물의 총질소 함량¹⁵⁾

15) 국립환경연구원(1997, 1998a, 1998b, 1999), 농어촌진흥공사(1999a, 1999b, 1999c), 한국수자원공사(1997), 환경부(1994, 1995), 백성복(1998), 조기찬(1995), 박종수(1993), 김봉진(1993), 이홍재외(1997), 정팔진외(1998), 김창모(1999)

〈표 IV-3〉 총질소로 본 수역별 퇴적물의 영양염류 오염

오염평가	호소	하천	연안	자료수 (n)
심한오염	10.7%(36)	3.8%(4)	4.1%(3)	43
약간오염	82.5%(277)	68.6%(72)	94.5%(69)	418
비오염	6.8%(23)	27.6%(29)	1.4%(1)	53

*담수퇴적물의 평가기준이므로 연안퇴적물의 오염은 과소추정될 수 있다.

나. 총인

총인의 경우 호소, 하천, 연안퇴적물 측정자료의 45%가 온타리오 LEL을 초과하고 있는 것으로 나타나, 대부분의 측정값들이 LEL을 초과하고 있는 총질소에 비해서는 오염정도가 상대적으로 적은것으로 나타났다(그림 IV-4, 표 IV-4). 수역별 평균값에 있어서는 호소가 가장 높았고, 하천, 연안 순으로 나타났다.

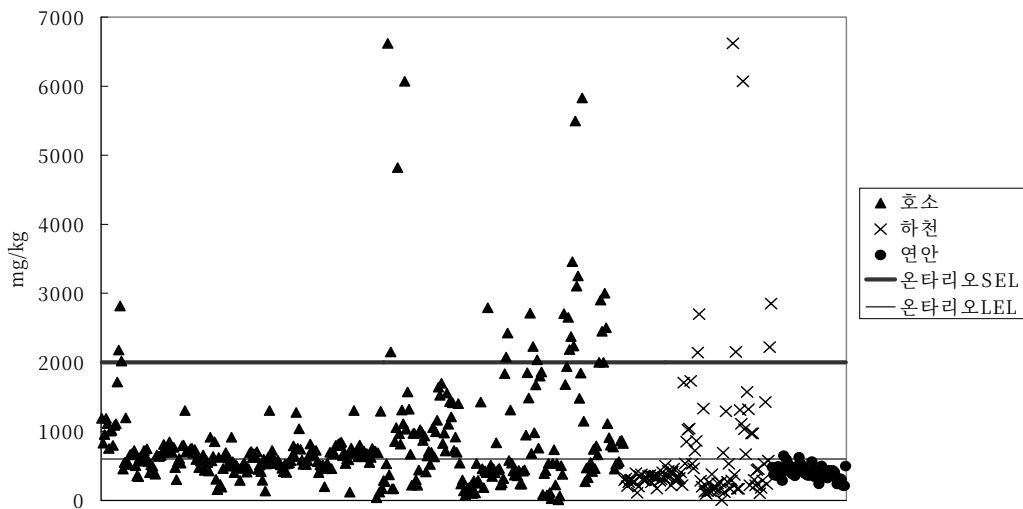
SEL을 초과하는 값들을 살펴보면 총질소의 경우와 마찬가지로 대청호 퇴적물의 오염이 심각한 것으로 나타났다. '96(한국수자원공사, 1996), '97(국립환경연구원, 1998a), '96(한국수자원공사, 1997)에 대청호에서 측정된 총질소 농도가 SEL을 초과하고 있었고, 이와 더불어 '96 안동호(한국수자원공사, 1996)의 측정값도 SEL을 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 농업용수 조사에 의한 결과로부터, '99 만운(농어촌진흥공사, 1999a), '99 삽교(농어촌진흥공사, 1999b), '99 왕궁, 감둔(농어촌진흥공사, 1999c) 지역에서의 측정값들이 모두 SEL을 초과하고 있음을 알 수 있었다. 이 지역들은 모두 농경지와 삼림으로 이루어져 있으므로 주로 화학비료, 시비, 농약으로 인한 인과 질소의 유입과 강우시 토사의 유입에 따른 영향에 의한 것으로 보인다.

하천의 경우는 '98 한강 지류인 월문천(김창모, 1999)이 SEL을 초과하고 있었는데 월문천은 생활하수와 공장폐수에 의한 오염외에도 홍수기 하류부 침사지에 퇴적되었던 유기오염물에 의한 수세현상에 의한 것으로 분석되고 있다. '98 전주천(정팔진 외, 1998)의 측정값도 SEL을 초과하였고 이것은 하수종말처리장 하류부에서 측정한 결과로 판단된다. SEL 초과값 중 특히 '97 금강(국립환경연구원, 1997)의 퇴적물 오염도는 SEL을 크게 초과하고 있는 것으로 나타났다.

〈표 IV-4〉 총인으로 본 수역별 퇴적물의 영양염류 오염

오염평가	호소	하천	연안	자료수 (n)
심한오염	7.3%(27)	6.7%(7)	0%(0)	34
약간오염	48.5%(180)	18.1%(19)	7.3%(4)	203
비오염	44.2%(164)	75.2%(79)	92.7%(51)	294

*담수퇴적물의 평가기준이므로 연안퇴적물의 오염은 과소추정될 수 있다.



〈그림 IV-4〉 수역별 퇴적물의 총인 함량¹⁶⁾

2.3. 중금속에 의한 오염현황

중금속은 직접적으로 생물에 악영향을 줄 수 있다는 점에서 제3장에서 살펴 본 바와 같이 퇴적물질기준의 기본적인 항목으로 설정되어 있다. 개발된 퇴적물질기준은 설정방법, 적용지역, 적용대상에 따라 매우 다양하기 때문에 어떤 기준이 우리나라 퇴적물의 오염평가에 가장 적절한 기준인지 판단하기 쉽지 않다. 따라서, 미국 캐나다의 연방정부와 주정부의 퇴적물질기준의 대부분이 저서생물에게 미치는 악영향이 미미한 수준(제5장에서 ‘목표수준’으로 정의)과 저서생물에게 미치는 악영향이 확률적으로 분명한(제5장에서 ‘우려수준’으로 정의)수준의 두 단계로 설정되었으므로 이에 근거하여 오염정도를 대체적으로 비교해 보고자 한다.

즉, 목표수준은 목표수준에 해당하는 기준치 중에 최저치를(표 V-7(a), V-8(a)), 우려수준은 여러 우려수준에 해당하는 기준치 중 최대치를 이용하여(표 V-7(b), V-8(b)) 평가하되 최소치 이하의 농도는 비오염으로, 최고치 이상은 심한오염으로, 최소치와 최고치의 중간농도는 중간오염으로 구분하였다. 또한 대부분의 퇴적물질기준은 담수퇴적물과 연안(해양)퇴적물에 대해 별도로 설정되어 있으므로 호소 및 하천퇴적물은 담수퇴적물질기준, 연안퇴적물은 연안퇴적물질기준에 따라 별도로 평가하였다.

호소, 하천, 연안퇴적물의 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 납 등의 중금속 농도를 기준치와 비교해 본 결과를 정리하면 <표 IV-5>와 같다. 중금속 항목에 대한 오염도별 분포를 전체적으로 살펴보면, 호소, 연안의 경우는 심한오염으로 평가되는 측정값이 거의 없으나, 하천은 비소를 제외한 모든 항목에 있어서 심한오염을 보이고 있는 측정값들이 10% 내외로 지역에

16) 국립환경연구원(1992, 1997, 1998a, 1999), 농어촌진흥공사(1999a, 1999b, 1999c), 한국수자원공사(1996, 1997), 환경부(1994, 1995), 백성복(1998), 박동규(1995), 박종수(1993), 김봉진(1993), 정팔진외(1998), 김창모(1999), 임홍탁(1991), 오현주(1999)

따라서 퇴적물 오염이 심한 것으로 분석되었다.

카드뮴, 크롬, 구리, 납의 경우는 호소, 하천, 연안에 따라 다소 차이를 보이기는 하지만, 공통적으로 퇴적물 오염이 심한 경우는 하천에서 찾아볼 수 있다. 예를 들어, 호소, 하천, 연안 퇴적물의 카드뮴 농도를 기준치와 비교해 보면 호소 및 연안퇴적물은 중간오염 이하를 보이고 있는 반면 일부 하천자료는 심한오염 상태를 보이고 있으며(그림 IV-5), 이런 경향은 크롬, 구리 및 납의 분포에서도 발견되고 있다. 심한오염으로 나타나는 대부분의 자료는 남천의 측정값을 반영하는 것으로 보이는데(전기정, 1995; 권영택, 1993; 안병영, 1998), 이는 남천 주변에 위치한 창원공업단지에 의한 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 준설이 이루어지기 전인 '94 이전의 측정값들은 심한오염의 기준값을 크게 초과하고 있었고, 준설이 이루어진 후에는 오염도가 상당히 낮아진 것으로 보이나 몇몇 값들은 여전히 이 기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다.

〈표 IV-5〉 중금속 항목에 대한 오염도별 분포¹⁷⁾

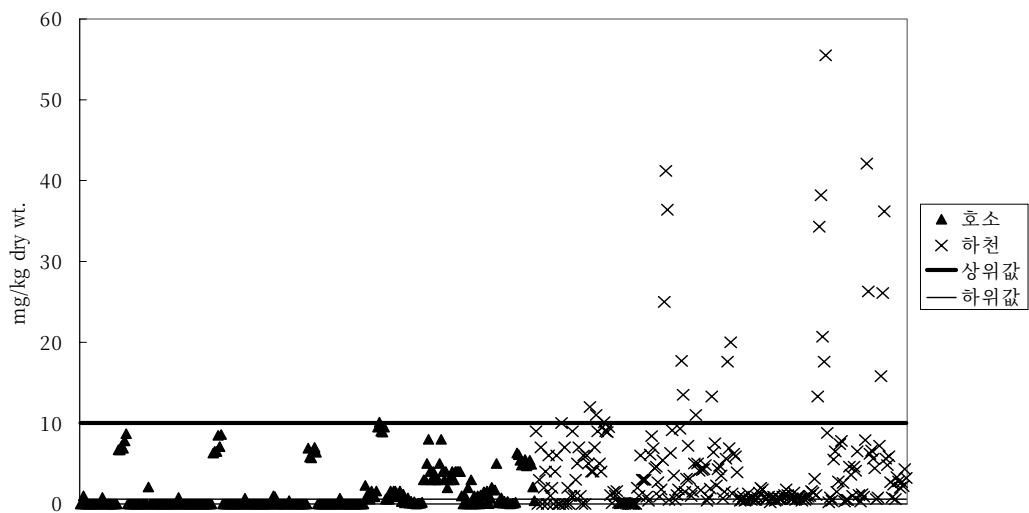
항목	오염평가	호소	하천	연안	자료수 (n)
As	심한오염	0%(0)	0%(0)	0%(0)	0
	약간오염	0.6%(1)	0%(0)	31.5%(17)	18
	비오염	99.4%(180)	100%(54)	68.5%(37)	271
Cd	심한오염	0.3%(1)	9.8%(23)	0%(0)	24
	약간오염	35.1%(101)	70.2%(165)	56.8%(54)	320
	비오염	64.6%(186)	20.0%(47)	43.2%(41)	274
Cr	심한오염	0%(0)	12.4%(26)	0%(0)	26
	약간오염	45.2%(28)	69.9%(146)	76.2%(170)	344
	비오염	54.8%(34)	17.7%(37)	23.8%(53)	124
Cu	심한오염	0%(0)	14.8%(46)	0.4%(1)	47
	약간오염	39.7%(117)	62.3%(193)	45.8%(110)	420
	비오염	60.3%(178)	22.9%(71)	53.8%(129)	378
Hg	심한오염	0%(0)	4.5%(7)	0%(0)	7
	약간오염	0%(0)	72.1%(111)	23.1%(9)	120
	비오염	100%(181)	23.4%(36)	76.9%(130)	247
Pb	심한오염	0%(0)	12.8%(35)	0%(0)	35
	약간오염	33.7%(85)	59.1%(162)	50.3%(82)	329
	비오염	66.3%(167)	28.1%(77)	49.7%(81)	325

반면 수은의 경우는 '94 영산강(환경부, 1995), '94 낙동강(환경부, 1995) 퇴적물의 수은 함

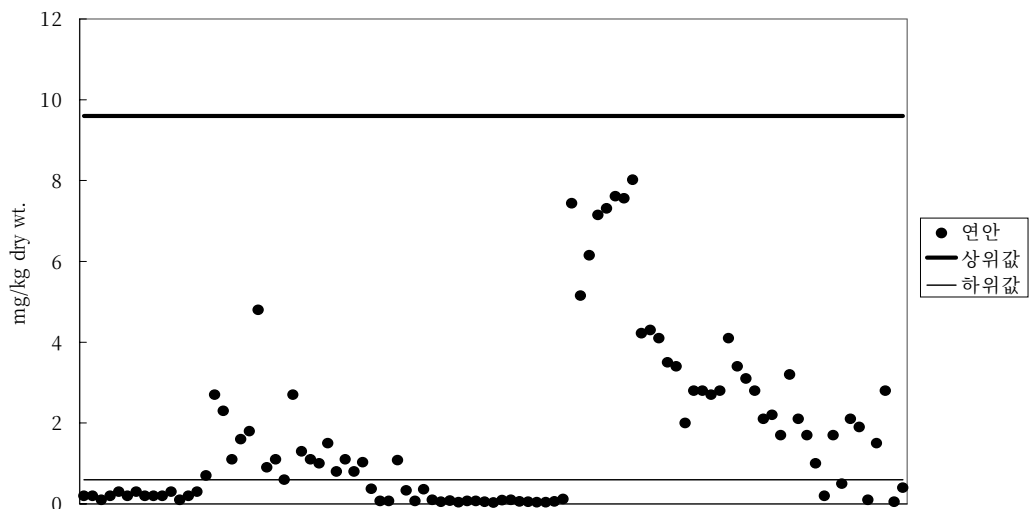
17) 국립환경연구원(1992, 1997, 1998a), 환경부(1994, 1995), 안병영(1998), 백성복(1998), 박동규(1995), 이길영(1999), 조영길외(1998), 황종연외(1998), 오현주(1999), 이종현(1996), 노장규(1995), 전기정(1995), 오근창(1995), 이윤택외(1991), 조기찬(1995), 강윤석(1992), 조규홍(1991), 진현국외(1997), 김학균외(1996), 이종현외(1998), 윤석태외(1998), 최만석외(1999), 권영택(1992, 1993), 양한섭외(1995)

량이 이 기준값을 크게 초과하고 있었다. 수역별 오염도를 살펴보면, 하천이 다른 수역에 비해 비소를 제외한 모든 항목에 있어서 비오염의 비율이 가장 적어 다른 수역에 비해 오염도가 높은 것으로 분석되었다. 그러나, 중금속 기준에 비추어 볼 때, 전체적으로 비소와 수은을 제외한 모든 항목에 있어 약간오염 이상의 비율이 50%를 초과하고 있으므로 중금속 오염으로 인한 악영향의 가능성이 어느 정도 존재한다고 할 수 있다.

(a) 담수퇴적물



(b) 연안퇴적물

〈그림 IV-5〉 퇴적물의 카드뮴 함량¹⁸⁾

2.4. 기타화학물질에 의한 오염현황

대부분 외국 주정부의 퇴적물질기준을 보면 중금속 이외의 유기화합물질에 대한 기준이 오염물질별로 제시되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 유기화합물질로는 다환방향족탄화수소(PAHs)계의 물질, 폴리염화비페닐(PCBs), 그리고 퇴적물 오염의 주된 요인중의 하나였던 유기인계 농약물질 등을 들 수 있다. 그러나 아쉽게도 이들 기준과 비교할 수 있는 국내의 측정자료가 매우 부족한 상태이므로 기타 화학물질에 의한 퇴적물 오염현황은 현 단계에서는 파악하기 어려운 실정이다.

3. 시사점

이상의 현황분석을 통해 도출된 주요 시사점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 퇴적물 오염물질 중 유기물, 영양염류, 중금속에 대한 자료는 어느 정도 가용한 상태로 외국기준을 이용하여 적어도 간접적으로 퇴적물 오염평가가 가능한 수준이나 중금속 이외의 기타 유해 화학물질에 대한 자료는 매우 미흡한 실정이다.

둘째, 유기물, 영양염류, 중금속의 화학물질에 대한 농도 측정자료는 많이 있지만 이들 농도 자료와 연관된 생물영향에 대한 자료가 부족하여 이들 자료를 직접적으로 퇴적물질기준의 개발에 이용하기는 현실적으로 어렵다.

셋째, 같은 유기물 지표라 하더라도 강열감량을 사용하는 경우에는 퇴적물 오염이 심각하게 평가되는 반면, 화학적산소요구량을 사용하는 경우 오염되지 않는 상태로 나타나는 것으로 보아 유기물에 의한 영향은 지역특성에 크게 좌우되는 것을 볼 수 있다.

넷째, 총질소는 모든 수역에서 약간오염이상의 오염상태를 보이고 있고 특히 정체수역인 호소의 경우 상대적으로 오염이 심한 것으로 나타나고 있는 반면 인의 경우에는 심하게 오염된 수역이 10% 미만으로 나타나고 있다. 그러나 영양염류에 대한 퇴적물질기준 또한 지역적인 특성에 많이 좌우되므로 이들 결과는 상대적인 관점에서 이해해야 할 것이다.

다섯째, 중금속에 의한 오염은 오염원에 가까운 하천에서 심한 것으로 나타나고 있다. 특히 중금속 등의 유해물질을 배출하는 업소가 밀집된 공단관류 하천이나 공단폐수가 유입되는 하천에 대한 특별한 관리가 필요할 것으로 보인다.

18) 국립환경연구원(1992, 1997, 1998a), 환경부(1994, 1995), 안병영(1998), 백성복(1998), 박동규(1995), 조기찬(1995), 진현국외(1997), 김학균외(1996), 최만식외(1999), 이길영(1999), 오현주(1999), 안병영(1998), 노장규(1995), 전기정(1995), 오근창(1995), 권영택(1992), 이유대외(1991)

V. 퇴적물질기준 개발방안

퇴적물 오염현황에서 보듯이 우리나라 호소, 하천, 연안 수역의 퇴적물은 적어도 외국의 퇴적물질기준을 근거로 판단할 때 유기물, 영양염류, 중금속 등에 의해 오염되어 있음을 알 수 있다. 비록 중금속 이외의 유해물질에 의한 퇴적물 오염은 기초자료의 부족으로 인해 파악할 수 없는 아쉬움이 있으나 향후 퇴적물 오염의 정도를 국내의 환경특성을 고려하여 평가하고 퇴적물 오염으로 인한 저서생물에 대한 악영향을 방지하기 위해서는 퇴적물질기준의 개발이 필요하다는 공감은 충분히 얻을 수 있을 것이다.

1970년대 중반 이후 퇴적물질기준의 개발을 위한 기술개발과 학문발전에도 불구하고 아직 까지도 퇴적물질기준의 개발수준은 수질, 토양, 대기 등 타 매체에 비해 뒤져 있음을 부인할 수 없다. 환경기준의 일반적인 개발절차를 볼 때 미국의 워싱턴주를 제외하면 대부분의 국가나 주정부가 실질적인 규제기준보다는 비규제적 성격의 퇴적물질권고기준 정도를 설정하고 있는 상태이다(그림 V-1). 이는 물론 타 매체에 비해 퇴적물의 관리 우선순위가 뒤진 탓도 있겠지만 제2장에 언급한 바와 같이 퇴적물이 가지는 특성, 예를 들어 생물유효성 문제 등을 해결하기가 그리 쉽지 않았기 때문이다.

생태위해성을 야기할 수 있는 모든 항목에 대해 전국적으로 적용할 수 있는 규제적 성격을 가진 퇴적물질기준의 개발은 오랜 기간의 연구를 통해서만 이루어 질 수 있다. 그러나 일부 수역의 퇴적물은 이미 생태계에 악영향을 미칠 정도로 오염되어 있고 대부분의 퇴적물도 어느정도 오염이 진행되고 있는 상황에서는 현재의 관리목적에 적합한 퇴적물질기준을 개발하고 여건에 따라 보완해 나가는 것이 바람직한 접근방법이 될 것이다. 이러한 관점에서 이창희 등(1998)은 퇴적물질기준의 필요성을 제기하면서 다음과 같은 5단계 개발방안을 제시하였다.

첫째, 전국적인 퇴적물 오염현황 조사를 통해 퇴적물 오염현황을 파악하고 퇴적물 오염이 심한 지역, 즉 퇴적물 오염우심지역을 구분한다.

둘째, 일차적으로 외국에서 개발된 퇴적물질기준을 적용하여 퇴적물 오염도와 저서생물 등에 미치는 악영향의 가능성을 평가한다.

셋째, 이런 기준에 의해 퇴적물이 저서생물에 악영향을 미칠 정도로 오염되었다고 판단되는 오염우심지역에 대해서는 상세한 연구를 통해 지역적인 퇴적물질기준을 설정한다.

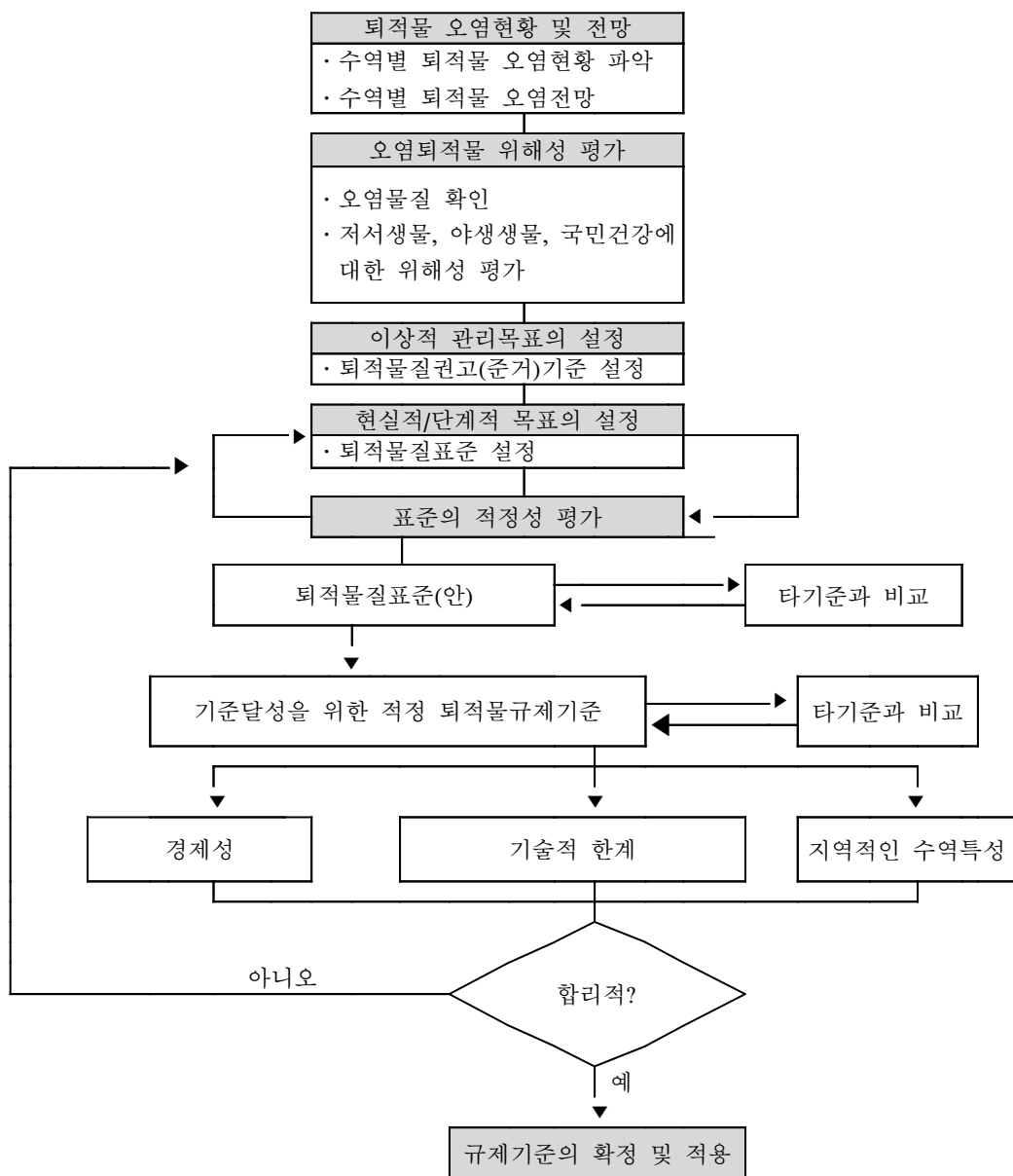
넷째, 오염의 정도가 더 이상 방치할 경우 심각한 악영향을 초래하는 수준으로 판단되면 개발된 퇴적물질기준을 참고하여 정화작업을 수행한다.

다섯째, 지역적으로 적용되는 퇴적물질기준의 개발경험과 취합된 자료를 종합하여 전국적으로 적용되는 퇴적물 관리기준으로서의 퇴적물질기준을 개발한다.

이러한 단계별 접근방법은 퇴적물질기준의 개발과 관련된 외국사례에서 공통적으로 발견되는 일반적인 과정이라고 볼 수 있다. 물론 이러한 접근은 퇴적물질기준의 개발과 연관된 현

실적인 문제, 즉, 퇴적물에 포함된 오염물질이 저서생물에 미치는 메카니즘에 대한 이해, 화학물질 농도와 생물영향과의 관계를 추정할 수 있는 방법론의 개발, 이러한 연구를 지원할 수 있는 여건(국민적인 관심, 재원의 확보 등)등이 아직 성숙되지 않았다는 점을 고려하여 가능한 수준부터 작업을 진행하자는 의미이지 순차적인 개념은 아니다.

최근 들어 퇴적물질기준의 개발과 관련된 연구가 급속히 진행되고 있고 신뢰성 있는 방법들이 개발되고 있어 머지않아 과학적으로 신뢰성이 있는 퇴적물질기준이 적어도 미국등의 선진국에서는 개발될 수 있을 것이다. 퇴적물질기준의 개발을 위한 연구를 시작하려고 하는 우리는 이러한 개발경험을 충분히 이용할 수 있다는 장점이 있으며, 따라서 본 장에서는 외국의 퇴적물질 개발사례와 우리나라의 현실을 고려하여 단계별 접근방법에 준하여 퇴적물질기준의 개발방안을 제시하도록 하겠다.



<그림 V-1> 퇴적물질기준의 설정을 위한 일반적 절차

1. 퇴적물 오염현황 파악

제4장에서는 지금까지 여러 연구자가 다양한 목적으로 여러 지역에서 수행해 왔던 연구결과를 취합하여 호소, 하천, 연안으로 구분하여 외국의 퇴적물질기준과의 비교를 통해 오염정도를 평가하였다. 이는 퇴적물질기준의 개발필요성을 도출하기 위한 연구의 일환으로 전국적으로 대체적인 퇴적물 오염현황을 파악하는데 주목적이 있었으며 따라서 정확한 퇴적물의 오염평가를 위해서는 다음과 같은 문제에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

1.1. 퇴적물 조사지침의 개발

유기물, 영양염류, 중금속 등에 대한 적지 않은 자료가 있음에도 불구하고 아직까지 퇴적물 관리의 전체적인 맥락에서 퇴적물 오염현황(정도와 분포)조차 파악되지 않은 데는 많은 이유가 있다. 그 중 하나는 대부분의 조사가 특정한 조사목적에 따라 수행되었으며 조사방법 또한 연구자별로 상이하여 서로 다른 조사자료를 객관적으로 비교하기 어렵다는 데 있다.

즉, 수저퇴적물의 오염현황을 파악하기 위해서는 수역의 특성에 따라 시료채취를 위한 위치, 간격, 빈도 및 방법이 표준화 될 필요가 있고 이렇게 채취된 시료를 어떤 방법으로 분석하고 분석된 자료를 어떻게 평가하는지에 대한 지침이 요구된다. 예를 들어 표층퇴적물의 중금속 함량이라고 할 때 표층퇴적물의 채취 깊이가 표면에서 1cm, 2~3cm 또는 5cm 등 연구자에 따라 다르므로 직접적인 비교가 곤란할 수 있다. 특히 퇴적물 오염문제에서 퇴적물의 깊이에 따른 오염물질의 농도변화는 해당 수역으로 유입되는 오염물질의 부하량 변화를 반영하므로 최근에 오염부하가 크게 감소되었거나 크게 증가한 경우에는 퇴적물 표층의 정의에 따라 부하량 증감에 따른 영향이 파악될 수도 안될 수도 있기 때문이다.

다행히 최근에 해양수산부는 해양퇴적물 분석을 위한 공정시험방법을 공포하였고 미진한 사항은 지속적으로 보완해 나가고 있으며(해양수산부, 1998) 환경부와 국립환경연구원에서조차 담수퇴적물에 대한 공정시험방법을 개발 중에 있다. 따라서 지금까지 연구자 별로 사용해 오던 분석방법이 표준화됨으로서 향후 퇴적물 자료의 비교에 있어서는 적어도 분석방법의 차이로 인해 발생하는 불확실성을 상당히 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 공정시험방법의 개발과 더불어 퇴적물 조사지침이 제시되지 않는 경우 여전히 퇴적물 자료의 불확실성은 존재하게 되므로 적어도 <표 V-1>과 같은 내용을 포함하는 퇴적물 조사지침의 개발이 병행되는 것이 바람직하다.

이러한 지침의 개발이 아직까지 추진되지 않은 것은 기술적인 문제이기보다는 정부의 소홀한 퇴적물 관리정책에 기인하는 것이므로 이 분야에 관심을 가지고 연구를 지원한다면 2~3년 이내에 개발이 가능할 것으로 보인다. 이러한 조사지침 및 공정시험방법의 개발은 신뢰성 있는 퇴적물 자료수집의 바탕이 됨으로서 정확한 오염평가를 가능하게 할뿐만 아니라 앞으로 운영될 필요가 있는 퇴적물측정망의 기반이 되며, 오염하천정화사업, 오염퇴적물준설사업, 하상정비 또는 골재채취에 따른 환경영향평가, 준설퇴적물의 오염평가 등 퇴적물과 관련된 관리활동의 토대가 될 수 있을 것이다.

1.2. 담수퇴적물 측정망 구축

지금까지 수집된 퇴적물 자료의 문제점 중 하나는 대부분의 자료가 일회적으로 측정된 자료로서 퇴적물 오염의 시간적인 추세를 파악할 수 있는 정기적이고 장기적인 자료가 부재하다는 사실이다. 수질관리를 위해서는 전국적으로 1,642개의 수질측정지점이 있어 정기적으로 수질이 측정되고 있고(표 V-2) 토양의 경우에는 전국망 1,499개 지점과 지역망 2,976개 지점에서 정기적인 조사가 행해지고 있다(표 V-3). 또한, 해양수산부는 2000년부터 정기적인 퇴적물 조사를 실시하여 60개 연안수질측정지점에서 11개 항목, 연안 20개 지점에 대해서는 추가적으로 유기염소계, PAHs, TBT에 대한 조사를 실시하도록 하고있다(표 V-4).

이러한 측정자료는 수질 및 토양이 문제되는 지역을 선별하고, 원인을 파악하며, 관리대책을 수립하고, 관리대책의 실효성을 평가하는 기초자료로 사용되고 있다. 따라서, 담수퇴적물 측정망의 부재는 담수퇴적물 관리의 부재를 반영하는 것으로 수질에 미치는 영향평가 차원의 퇴적물 관리뿐만 아니라, 적정한 퇴적물질의 보전을 통한 건강한 수생태계 유지를 위해 퇴적물측정망의 설치를 통한 전국적이고 정기적인 조사가 조속히 실시될 필요가 있다. 따라서 측정망과 관련된 이후의 논의는 담수퇴적물에 국한하도록 하겠다.

해양퇴적물 측정망의 구축사례에서 보듯이 퇴적물측정망은 기존의 수질측정망과 연계하여 운영하는 것이 수질관리와의 일관성을 유지한다는 측면과 퇴적물과 수질과의 상관관계를 파악할 수 있다는 점 등 여러 면에서 유리하다. 따라서, 기본적인 퇴적물측정망 운영체계는 기존의 수질측정망 운영체계에 따르되 퇴적물의 특성을 고려한 측정지점의 선정 및 측정빈도의 결정에 있어서 추가적으로 다음과 같은 면을 고려할 필요가 있다.

〈표 V-1〉 퇴적물 조사 및 평가지침의 내용(예)

퇴적물 조사 및 평가지침(예)	
I. 서론	
일반적 조사배경, 목적, 필요성	
II. 계획과 배경정보	
가. 퇴적물 조사계획	
1. 개관	
2. 기존의 퇴적물질조사	
3. 계획의 기본원칙	
4. 목표설정	
5. 통계적 필요성	
6. 시료채취 계획	
7. QA/QC 방법	

나. 가용한 기존자료 조사

1. 개관
2. 정보의 형태
3. 오염물질 배출 경로에 영향을 미치는 인자
4. 정보의 출처

Ⅲ. 퇴적물 시료채취와 모니터링 과정의 안전절차

Ⅳ. 현장 및 실험실 조사지침

가. 현장 위치 확인 방법

1. 개관
2. 지도를 사용한 위치의 확인과 기록
3. 정확한 위치를 찾기 위한 장비와 방법

나. 현장 관측과 측정

1. 현장 관측사항의 기록
2. 현장 측정

다. 일반적인 퇴적물 샘플링 장비와 절차

1. 개관
2. 장비와 준비물
3. 기본적인 퇴적물 시료채취 절차
4. 코아, 그랩시료채취기를 이용한 시료채취 과정
5. 채취된 시료의 조치 및 보관방법

라. 화학적, 물리학적 분석을 위한 퇴적물 샘플의 수집과 절차

1. 개관
2. 장비
3. 퇴적물 채취
4. 샘플의 보관
5. 포장과 운반

마. 무척추 저서생물 조사 -현장

1. 개관
2. 안전
3. 장비
4. 특별한 고려사항
5. 준비과정
6. 시료 수집과 절차
7. 문서화
8. 퇴적물질 유지

바. 무척추 저서생물 조사-실험실

1. 개관
2. 장비
3. 절차
4. 과정
5. 문서화
6. 퇴적물질 유지

사. 실험실 퇴적물 독성, 생물축적 시험

1. 개관
2. 장비
3. 시료의 수집
4. 독성과 생물축적 시험에 관한 설명
5. 퇴적물질 유지
6. 문서화
7. 시료의 보관과 운반
8. 데이터 분석과 보고

아. 수조 내에서 어류를 사용한 생물축적 시험

1. 개관
2. 장비
3. 방법
4. 문서화

첫째, 제4장에서 살펴 본 대로 유기물 및 영양염류에 의한 오염은 세립퇴적물이 많이 집적될 수 있는 정체수역, 즉 상수원으로 사용되는 호소, 석호, 반폐쇄성 연안수역에서 상대적으로 심각한 반면 중금속 등의 유해물질은 유해물질 배출원 근처인 도시관류하천, 공단배수하천 등에서 심각하게 나타나고 있다. 따라서, 측정항목의 선정에 있어 해당 하천 유역의 오염원 분포, 오염원으로부터의 거리, 물리화화적인 수역의 특성등을 고려하여 측정항목 및 측정빈도를 결정해야 한다.

둘째, 퇴적물 오염이 일단 호소나 연안처럼 광범위한 수역에 확대되게 되면 오염원관리가 철저하게 이루어진다 하더라도 자연적인 정화에 오랜 기간이 소요되고 인위적인 대책에 많은 재원이 필요하다. 따라서 퇴적물 관리의 일반적인 원칙은 수질관리처럼 일차적으로 오염원관리를 통해 배출부하 자체를 감소시키고, 이것이 여의치 않은 경우 넓은 수역으로 오염물질이 확산되기 전에 오염원 근처의 지천에서 차단되어야 한다. 이를 위해서는 퇴적물 오염물질 방출 가능성이 큰 오염원(공단방류수계, 산업폐수방류수계, 폐기물처리장 주변수계 등) 근처의, 소위 ‘오염우심예상지점’에 조사지점을 선정하여 퇴적물 오염을 모니터링하는 것이 요구된다.

셋째, 퇴적물은 오염물질의 공간적인 분포뿐만 아니라 퇴적물 내의 수직적인 분포까지 파악해야만 정확한 오염물질의 존재량을 파악할 수 있다. 역사적으로 퇴적물 오염물질 배출이 의심되는 지역에서는 퇴적물 오염의 수평적인 분포뿐 아니라 수직적인 분포조사가 필요하다. 또한 생태적인 측면에서 볼 때 자료를 보면 일부의 저서생물은 100cm 이상의 깊이 까지 서식하는 것으로 나타나고 있어, 저서생물을 포함하여 생태적으로 중요한 수역에 대해서는 표층퇴적물 뿐만 아니라 일정 깊이까지의 퇴적물시료 분석이 필요하다. 물론 주상퇴적물 시료의 경우 수역이 물리적으로 안정화되어 있어 하상의 변화가 심하지 않은 경우에는 일회적인 측정만으로도 소기의 목적을 달성할 수 있으나 계절적인 강우요인 등에 의해 하상의 변화가 심한 수역에는 요인변동에 따른 퇴적물질의 변화를 추정할 수 있는 빈도의 측정계획이 마련

되는 것이 바람직하다.

넷째, 이상에서 언급한 대로 시료의 측정주기는 수역의 이용목적, 오염원의 분포, 수역의 수리적인 특성 등에 따라 좌우된다. 그러나 퇴적물질이 수질과 근본적인 차이를 보이는 점 중에 하나는 직접적으로 오염물질 배출에 의해 영향을 받는 배출원 근처가 아닌 경우 수질처럼 퇴적물질의 변화가 그리 심하지 않다는 점이다. 따라서, 퇴적물질은 수질에 비해 상대적으로 장기적인 오염현상 즉 누적된 오염현황을 반영하므로 주요 지점은 6개월에 한번 기타지점은 일년에 한번정도의 측정 만으로도 기본적인 모니터링 목적의 달성이 가능할 것으로 보인다.

〈표 V-2〉 수질측정망 운영현황

구분		측정지점수	조사항목		측정주기
담수	하천수 (도시관류 포함)	578	pH, DO, BOD, COD, SS, 총질소, 총인 등 14개 항목		12회/년 (48회/년)*
			Cd, CN, Pb, Cr ⁺⁶ , As, Hg, ABS		4회/년 (12회/년)
			PCB, 유기인, TCE, PCE		1회/년
	호소수	153	pH, DO, BOD, COD, SS, 총질소, 총인 등 17개 항목		12회/년
			PO ₄ -P, Cd, CN, Pb, Cr ⁺⁶ , As, Hg, ABS		4회/년
			PCB, 유기인, TCE, PCE		1회/년
	상수원수	593	하천수	pH, DO, BOD, SS, 대장균군수	월1회 이상
				Cd, CN, Pb, As, Hg 등 18개 항목	4회/년
			호소수	pH, DO, COD, SS, 대장균군수	월1회 이상
				Cd, CN, Pb, As, Hg 등 18개 항목	4회/년
	공단배수	75	pH, DO, BOD, COD, SS, 수온, 전기전도도		24회/년
			Cd, CN, Pb, Cr ⁺⁶ , As, Hg 등 16개 항목		12회/년
			PCB, 유기인, TCE, PCE		1회/년
	농업용수	177	pH, DO, BOD, COD, SS 등 13개 항목		2회/년
해양	연안해역 (조사점)	60	수온, 염분, pH, DO, COD, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, SS, 총질소, 총인		4회/년 (계절별)
	근해해역 (조사점)	6			

*: ()는 4대강 및 금호강의 주요지점에 대한 조사횟수임

〈표 V-3〉 토양측정망 운영현황 (1999)

구분		전국망	지역망
설치지점		토지용도별 중심(12개)	토양오염원 중심(16개)
측정주기		매년 1회	매년 1회
조사항목		12개(중금속 6, 일반 5, pH)	12개(중금속 6, 일반 5, pH)
운영실적	계획	1,500지점	3,000지점
	실적	1,499지점	2,996지점
주관		환경부(환경관리청)	시·도지사

주: 토양오염도 조사항목의 경우 전국망 및 지역망 공히 토양산도(pH), 중금속 6종(카드뮴, 구리, 비소, 납, 수은, 크롬), 일반항목 5개(유류, 유기인, PCB, 시안, 페놀)등 총 12개 항목에 대하여 조사하되, 토지용도 및 오염원의 종류에 따라 조사항목을 구분하여 실시

〈표 V-4〉 퇴적물 오염측정망 운영현황 (2000)

측정지점수				조사항목	측정주기
계	동해	남해	서해		
60	15	35	10	· 일반항목 입도, 강열감량, 황화물, COD	1회/년
60	15	35	10	· 중금속 As, Cu, Pb, Zn, Cd, 6가크롬, 총수은	1회/년
20	6	8	6	· 유기화합물 유기염소제, TBT, PAHs	1회/년

퇴적물측정망의 측정항목은 기본적으로 수질관리에 필요한 항목과 퇴적물질기준이 설정되는 항목에 준하여 설정되는 것이 바람직할 것이다. 이는 측정항목이 일차적으로 퇴적물 관리를 염두에 두고 선택되며 화학물질의 유해성뿐만 아니라 용수이용 목적, 정책의 우선순위, 경제성, 분석기술의 가용성 등 실질적 요인을 반영하여 선정되어야 하기 때문이다. 따라서 적어도 측정망 항목은 퇴적물의 기본적인 항목인 입도, 유기물지표인 화학적산소요구량과 강열감량, 총질소, 총인 및 건강항목인 카드뮴, 비소, 크롬, 구리, 수은, 납 등의 중금속은 기본적으로 포함되는 것이 바람직하고, 유역에 위치하는 오염원의 분포로 볼 때 PAHs, PCBs 등의 배출이 예상되는 수역에 대해서는 이들 항목도 측정항목에 포함시키는 것을 고려할 필요가 있다.

미국의 경우에는 연방정부 또는 주 정부에 의해 운영되는 모니터링 프로그램을 통해 퇴적물 오염자료를 지속적으로 수집하여 왔고 1992년에 개정된 ‘수자원관리법’의 요구에 의해 특별히 전국 수계의 오염퇴적물 분포 및 심각성에 대한 대규모 조사를 실시하였다(USEPA, 1997a; 1997b; 1997c). 또한 퇴적물 관리를 위해서 퇴적물 자체의 오염도뿐만 아니라 오염물질을 배출하는 오염원, 오염물질이 퇴적물에 포함되기까지의 경로, 퇴적물이 존재하는 수계의 생·물리화학적 특성 등에 대한 광범위하게 분산된 자료를 종합한 데이터베이스인 「퇴적물목록」을 구축하고 있다 (이창희 외, 1998).

그러나, 최근에 들어서야 수질관리를 위한 오염원, 부하량, 수질측정자료, 수질모델이 통합된 ‘수질환경정책수립시스템’의 구축이 시작된 실정에서(이창희, 1998), 「퇴적물목록」과 같은 퇴적물 관련자료를 종합한 데이터베이스의 구축은 아직 요원한 실정이다. 물론 현 단계로서는 퇴적물관련 데이터베이스 구축의 필요성이 인식된다 하더라도 데이터베이스 구축을 위한 자료가 부실한 실정이므로 퇴적물측정망의 수립 및 운용시기와 연동하여 퇴적물 데이터베이스구축 작업이 추진되는 것이 바람직하다. 그 이전까지는 현재 지속적으로 보완·확충되고 있는 ‘수질환경정책수립지원시스템’에 퇴적물(담수퇴적물의 경우) 자료를 축적하는 것이 현실적인 대안이 될 수 있을 것이다.

2. 퇴적물질예비기준(안)의 도출

2.1. 개발의 필요성

최근 우리나라에서도 ‘연안저서환경 건강평가기술개발’이라는 G7과제를 통해 퇴적물질기준을 개발하기 위한 기초적인 작업을 수행한 바 있으며(환경부, 1999) 퇴적물질기준 개발의 필요성이 제기된바 있다(해양수산부, 1999). 그러나 지금까지의 연구는 퇴적물에 포함된 오염물질의 농도, 중금속 등에 대한 존재형태별 분석, 저서생물의 군집분석 등 생태적인 관점에서의 생물영향 조사, 일부 독성검사 방법과 관련된 국내 적용성 검토에 머물고 있고(부표 4 참조), 생물검정법등을 포함한 일부 방법론에 대한 QA/QC 과정에 대한 연구가 시작되는 초보적인 단계로 볼 수 있다.

특히, 제4장에 사용된 자료에서 볼 수 있듯이 단순히 퇴적물에 포함된 오염물질 농도자료는 적지 않지만 이러한 퇴적물에 포함된 오염물질이 실제로 생물에 미치는 영향을 추정할 수 있는 자료는 매우 제한적으로 존재하여(강성현, 1995; 환경부, 1999) 대부분의 퇴적물 농도자료는 오염물질의 분포와 오염원을 유추하는데 사용될 뿐 실제 환경 위해성에 대한 검토작업은 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 퇴적물 관리의 측면에서 볼 때 많은 퇴적물 자료가 있음에도 불구하고 퇴적물 오염도와 퇴적물 오염이 가지는 의미, 즉 저서생물을 포함한 생태계에 미치는 악영향을 판단할 수 있는 근거를 찾기 어렵게 된다. 이런 관점에서, 화학물질의 농도에 근거하여 퇴적물의 오염평가는 물론 생태계에 미치는 악영향을 추정할 수 있는 예비적인 판단기준을 외국의 규제기관들이 사용하고 있는 퇴적물질기준의 비교를 통해 도출한다는 것은 나름대로 의미가 있다고 하겠다.

2.2. 퇴적물질기준의 항목

제3장의 사례에서 보듯이 외국의 퇴적물질기준 개발항목은 매우 다양하여 이를 그대로 우리나라에 적용하기는 적합하지 않다. 따라서 여기서는 퇴적물질기준의 설정이 요구되는 항목을 유기물, 영양염류, 중금속 및 기타 유해화학물질 별로 검토해 보기로 하겠다.

가. 유기물 및 영양염류

우리나라 수질환경기준을 보면 소위 생물학적(또는 화학적) 산소요구량 등의 유기물지표와 총인, 총질소와 같은 영양염류를 포함하는 생활항목과 중금속, 유기인, 및 기타 유해화학물질을 포함하는 국민건강 항목으로 구분되어 있다. 수저퇴적물이 수계로 유입된 오염물질들이 축적되는 저장소 역할을 한다면 적어도 퇴적물관리기준은 수질관리의 기준과 연관성이 있어야 하며, 국민건강 항목뿐만 아니라 생활항목에 대한 퇴적물질기준을 설정하는 것이 가능하다면 관리자의 입장에서 매우 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

그러나, 유기물 및 영양염류에 대한 퇴적물질기준을 설정한 예는 매우 드물며 가용한 기준을 비교해봐도 큰 차이가 있어 일반적인 기준을 설정하는데는 큰 무리가 있다고 판단된다. 참고로 캐나다 온타리오주의 퇴적물질기준, 미국지역환경보호청의 퇴적물질 분류기준, 일본의 수산용수기준을 비교하면 이러한 차이를 쉽게 볼 수 있다(표 V-5). 지역환경보호청의 분류기준과 일본의 수산용수기준을 비교해 보면(COD) 측정방법, 기준설정방법, 담수와 연안환경, 설정목적의 차이가 있기는 하지만 2000배 가량의 차이를 보이고 있고, 비슷한 오대호 지역에 적용되는 미국환경보호청기준과 온타리오주 기준간에도(총인, 총질소) 적지 않은 차이가 있음을 볼 수 있다. 또한, 제3장에 제시했듯이 환경보호청기준을 적용한다 하더라도 우리나라의 호소, 하천, 연안퇴적물의 유기물 오염이 강열감량을 기준으로 심하게 나타나는 반면, 화학적산소요구량의 기준으로 보면 오염되지 않은 것으로 평가되고 있어, 외국에서 개발된 생활항목에 대한 퇴적물질기준을 국내에 직접 적용하는 것은 큰 의미가 없음을 알 수 있다.

따라서, 생활항목에 대한 퇴적물질기준은 만일 꼭 필요하다면 지역적 또는 특정사업 별로 설정하되 그렇지 않은 경우 일반적인 기준보다는 수질 또는 저서생물에 미치는 영향을 평가하는 방법 및 절차를 표준화하여 제시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

〈표 V-5〉 유기물 및 영양염류 기준비교

항목 mg/kg, 건중량	지역환경보호청(V) 퇴적물분류기준 (담수)			온타리오주 퇴적물질기준 (담수)			일본수산용수 저질기준 (해수)
	비오염	중간 오염	심한 오염	NEL	LEL	SEL	
COD	<40,000	40,000~ 80,000	>80,000	-	-	-	20
총질소	<1,000	1,000~ 2,000	>2,000	-	550	4,800	-
총인	<420	420~ 650	>650	-	600	2,000	-

나. 중금속 및 유기화합물질

퇴적물이 오염물질에 직접적으로 노출되는 물이나 토양에 비해 2차적인 영향권에 있다는 점을 고려하면, 중금속에 대한 퇴적물질기준의 설정에 있어 수질환경기준, 수질규제기준, 토양환경기준, 유해폐기물기준 항목과의 연관성을 고려하지 않을 수 없다. 또한 현실적으로 현재의 환경관리 역량, 관리수준, 관리 우선순위 등을 고려할 때 수질환경기준이나 토양환경기준에 설정된 항목보다 많은 항목을 설정하기는 현실적으로 어려운 것이 사실이므로 공통적으로 타 매체의 관리를 위해 환경기준이나 배출규제기준이 설정된 항목을 중심으로 한 퇴적물

질기준의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

실제 각 매체별로 설정된 관리기준이나(표 V-6) 외국의 퇴적물질기준 설정의 사례를 살펴 보면 담수퇴적물, 해양퇴적물에 관계없이 비소, 카드뮴, 구리, 크롬, 수은, 납에 대해서는 예외 없이 기준을 제시하고 있으며, 국가에 따라서 추가적으로 은, 아연, 니켈 등에 대해서도 퇴적물질기준을 설정하고 있다. 또한, 네덜란드와 같이 퇴적물을 토양관리의 수준에서 관리하는 국가는 일반적인 퇴적물질 항목보다 훨씬 더 포괄적으로 문제될 가능성이 있는 은, 코발트, 몰리브덴, 바나듐 등을 포함하여 퇴적물질기준을 설정하고 있다. 따라서, 일차적으로는 비소, 카드뮴, 구리, 크롬, 수은, 납에 대한 기준을 설정하고 타 매체의 기준항목 확대와 연계해서 항목을 추가하는 것이 바람직해 보인다.

퇴적물질기준의 개발항목은 환경에 노출될 경우 위해성이 있는 유해화학물질을 중심으로 설정되어야 하는데 퇴적물질 보전을 위해 일반적으로 관리해야 할 오염원 및 그로부터 배출되는 오염물질의 종류는 매우 다양한 것으로 알려져 있다(부표 5). 따라서, 외국의 퇴적물질기준을 보면 유기인계 농약을 보더라도 각 화학물질별로 기준이 설정되어 있고 다환방향족탄화수소도 전체적인 농도뿐만 아니라 각 화학물질별로도 기준이 설정되어 있음을 볼 수 있다.

그러나, 오염물질에 일차적인 영향을 받는 수질이나 토양기준에 있어서도 유기인, 유류 등 총괄적이고 애매한 기준이 설정되어 있는 실정에서 퇴적물질기준을 외국처럼 항목별로 설정한다는 것은 현실성이 없다고 판단된다. 또한 중금속 이외의 유해화학물질에 대한 배출부하량과 이러한 배출에 의한 환경 위해성을 추정하는 기초적인 자료가 부재한 실정이고, 제4장에서 지적한 것처럼 중금속 이외에 퇴적물 유해화학물질에 대한 측정자료도 매우 미흡한 실정임을 고려한다면 문제가 되는 퇴적물오염물질 항목의 파악도 여의치 않은 실정이다.

<표 V-6> 생활기준 외 화학물질에 대한 우리나라 관리기준 설정항목

설정항목	수질환경 ¹⁾	수질규제	토양환경	해양배출 폐기물	퇴적물 질
As	○	○	○	○	●
Cd	○	○	○	○	●
Cu	□	○	○	○	●
Cr(+6)	○	○	○	○	●
Hg	○	○	○	○	●
Pb	○	○	○	○	●
Zn	□	○	-	-	
Ag	-	○	-	-	
Fe	-	○	-	-	
Mn	-	○	-	-	
시안		○	○	○	
유기인		○	○	○	●
PCBs		○	○	○	●
유류		○	○	○	●
페놀		○	○	○	
불소		○		○	
트리클로로에틸렌		○			
테트라크로로에틸렌		○			

1) □: 해양수질환경기준에만 있는 항목

2.3. 퇴적물질예비기준(안)의 도출

자체적인 퇴적물질기준을 도출할 수 없는 현재와 같은 여건에서 가장 손쉽고 빠르게 퇴적물질기준을 설정하는 방법은 외국의 기준을 참고하는 것이다. 물론, 이렇게 개발된 퇴적물질기준은 규제적인 목적으로는 사용할 수 없으나 퇴적물의 오염정도, 오염퇴적물의 분포과악, 대책이 필요할 정도로 오염된 퇴적물의 구분 등 퇴적물 관리에 있어 다른 평가방법과 함께 보조적인 평가수단으로 유용하게 사용될 수 있다.

가. 유기물 및 영양염류

앞에서 지적한 대로 유기물 및 영양염류에 대한 퇴적물질기준은 외국의 기준을 그대로 적용하기에는 불확실성이 너무 크기 때문에 지역적으로 적용되는 지역기준을 개발하거나 퇴적물의 오염평가 과정을 개발하는 것이 필요하다고 판단된다.

지역적으로 적용되는 기준은 퇴적물 오염의 엄밀한 평가보다는 추가적인 평가가 필요한지의 여부를 결정하는 예비기준으로 사용될 수 있으며 우리의 여건을 고려할 때 일차적으로 배경농도법을 이용하여 설정되는 것이 바람직하다. 즉, 현재와 같이 화학물질농도와 생물영향과의 관계를 추정할 수 있는 자료가 부족한 상태에서는 오염되지 않은 퇴적물의 화학물질 농도를 측정하여 배경농도를 설정하고 이와 비교하여 오염여부를 판단하는 것이다. 물론 배경농도의 설정에 있어서는 해당 수역의 유역특성을 잘 반영하도록 시료를 채취하고 모암의 광물 조성, 퇴적물 입도 분포, 유기물 함량 등에 따른 지역적 편차를 보정할 수 있는 방법들이 강구되어야 하는 등의 기술적인 고려가 필요할 것이다.

비록 배경농도법이 화학물질의 농도와 비교적 간단한 퇴적물관련 특성의 조사만으로도 기준의 설정이 가능하며, 기준의 설정에 있어 비교적 짧은 기간과 한정된 자원만이 요구된다는 장점이 있지만, 이렇게 설정된 기준만으로는 수질 또는 수 생태에 미치는 악영향을 정량화하기(적어도 확률적으로라도) 어렵다는 한계가 있다. 따라서, 이렇게 설정된 기준에 의해 퇴적물오염여부를 일차적으로 판단하고, 악영향을 미칠 가능성이 있는 퇴적물에 대해서는 추가적으로 상세한 평가작업을 수행하는 것이 바람직할 것이다.

특히, 영양염류에 있어 수질에 대한 퇴적물의 영향은 해당수역의 오염부하 특성, 수역 크기, 물순환 패턴, 수리/수문 특성, 기후 등의 수많은 요인에 의해 좌우되기 때문에 일반적인 퇴적물질기준으로 그 영향을 평가하는 것은 큰 의미가 없다. 따라서 퇴적물에 포함된 영양염류가 수질에 미치는 영향은 영양염류의 용출량을 정량적으로 추정하여 파악하는 것이 일반적이다.

즉, 일반적인 퇴적물 내의 영양염류 존재형태의 파악을 통해 용출될 수 있는 가능성을 점검하고(Lopez & Morgui, 1993), 퇴적물 내 또는 퇴적물과 수층간 농도구배를 통해 확산에 의한 영양염류의 용출량을 계산하며(Kleeberg & Kozerski, 1997; Ulrich, 1997; Van Rapphorst & Brinkman, 1985), 실험실 내의 수조(배양)실험을 통해 수층의 환경변화에 따른 용출량의

변화를 예측함으로써(Kleeberg & Korzerski, 1997) 퇴적물로부터의 영양염류 부하량을 추정하는 것이다. 이렇게 추정된 내부부하를 외부로부터 수역으로 유입되는 부하와 비교하여 수질에 미치는 상대적인 영향을 파악한 후, 필요한 경우 퇴적물의 준설을 포함한 처리여부를 결정하게 된다(Hosper & Meijer, 1986; Lijklema, 1986).

이 방법은 우리나라에서도 팔당호, 마산만 등의 퇴적물 준설영향 평가 및 관리방안 수립에 이미 사용되고 있으나(국립환경연구원, 1990; 경기공영개발단, 1990; 환경처, 1993; 마산시, 1992), 아직 표준화된 절차는 마련되어 있지 않은 실정이다. 물론, 이 방법을 통한 평가를 위해서는 많은 비용이 들고 전문적인 지식이 없는 관리자의 입장에서 이해하기가 어렵다는 단점이 있으나 적어도 불확실성이 큰 유기물 및 영양염류에 대한 퇴적물질기준의 적용보다는 훨씬 올바른 판단을 기대할 수 있다.

나. 중금속 및 기타 유해화학물질

사례분석을 통해 본 퇴적물질기준의 특징 중 하나는 대부분의 기준이 두 단계, 즉 저서생물에 악영향을 미치지 않거나 미미한 악영향만이 예상되는 수준과 악영향이 뚜렷하거나 빈번하게 나타나는 수준으로 구분되어 있다는 것이다. 이는 퇴적물에 포함된 오염물질이 미치는 영향이 항상 일정농도에서 분명히 나타나는 것이 아니며 기준 설정시 사용한 오염물질 농도와 악영향간의 관계가 기본적으로 통계적인 확률로 표현되기 때문이다. 또한 관리적인 측면에서 볼 때, 퇴적물 관리에 있어 관리목표가 되는 이상적인 수준, 즉 저서생물에 대한 악영향을 예방하고 안전하게 보전할 수 있는 목표수준 또는 안전수준(이후 ‘목표수준’이라 함)과 더 이상 방지할 경우 악영향이 분명히 예상되어 적극적인 대책이 요구되는 우려수준 또는 대책수준(이후 ‘우려수준’이라 함)으로 구분하는 것이 유용할 수 있기 때문이다.

제4장에서는 대체적인 우리나라 퇴적물의 오염현황을 평가하기 위해 퇴적물을 담수퇴적물과 연안퇴적물로 구분하고 각 중금속 항목별로 제3장에 제시된 외국기준의 목표수준 중 최소치와 우려수준 중의 최고치를 이용하여 비교하여 보았다 (표 V-7, 표 V-8). 이 비교에 있어서, 목표수준의 최소치를 이용하여 평가하는 경우에는 실제 악영향이 없음에도 불구하고 지나치게 기준을 엄격하게 적용하여 오차가 커질 수 있고, 반대로 우려수준의 최대치를 이용하는 경우는 실제 악영향이 있음에도 불구하고 기준이 너무 높게 설정되어 악영향이 없다고 평가될 가능성이 있다.

그러나, 목표수준은 환경관리를 통해 달성해야 할 궁극적이고 이상적인 목표이기 때문에 여러 기준치 중 가장 엄격한 기준을 선택하는 것이 안전하게 저서생물을 보호할 수 있다는 관점에서 타당하다고 생각되며, 우려수준은 퇴적물의 제거, 정화 또는 처리와 관련된 관리기준으로 사용될 가능성이 있기 때문에 지나치게 엄격한 기준보다는 저서생물에 대한 지나친 악영향이 없는 범위 내에서는 완화된 기준을 선택하는 것이 현실적인 선택이라 할 수 있을 것이다. 따라서, 이 같은 관점에서 외국의 사례로부터 퇴적물질예비기준을 설정하면 다음과 같다.

a. 담수퇴적물

담수퇴적물의 목표수준은 캐나다 환경부의 퇴적물질권고기준(ISQG)과 캐나다 온타리오주의 최소영향수준(LEL) 중에 작은 수치를 선택한다. 왜냐하면, <표 V-7>에서 볼 수 있듯이 캐나다의 브리티시컬럼비아주(BC)를 제외하면 미국의 뉴욕, 뉴저지, 텍사스 등 대부분의 기준이 캐나다 퇴적물질권고기준이나 온타리오주 기준을 준용하고 있기 때문이다. BC의 기준이 상대적으로 큰 값을 보이는 것은 이 기준이 실제로 일반적인 정화기준으로 사용되기 때문에 기준에 연구된 퇴적물질기준 중 비교적 큰 수치를 선택하여 설정했기 때문으로 판단된다(제3장 참조).

한편 담수퇴적물의 우려수준은 목표수준과는 달리 주정부마다 차이가 있으므로 위에서 언급한 일반적인 관점에 근거하여 설정한다. 즉 우려수준은 이 수준을 초과하는 경우 제거, 정화 또는 처리라는 실질적인 대책이 필요할 수 있다는 현실적인 면을 고려하여 실제로 저서생물에 대한 악영향 가능성이 커질 수 있다 하더라도 제시된 기준 중 최고치를 선택하는 것이 바람직해 보인다.

<표 V-7> 담수퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교

(a) 목표수준

항목 mg/kg 건중량	연방정부	주정부					최대값	최소값
	캐나다 환경부	뉴욕	뉴저지	텍사스	온타리오	브리티시 컬럼비아		
	ISQG	LEL	LEL	TEL	LEL	AEL		
As	5.9	6.0	6.0	5.9	6.0	11.0	11.0	5.9
Cd	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	2.0	2.0	0.6
Cr	37.3	26.0	26.0	37.3	26.0	64.0	64.0	26.0
Cu	35.7	16.0	16.0	35.7	16.0	120.0	120.0	16.0
Hg	0.2	-	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2
Pb	35.0	31.0	31.0	35.0	31.0	63.0	63.0	31.0

(b) 우려수준

항목 mg/kg 건중량	연방정부	주정부					최대값	최소값
	캐나다 환경부	뉴욕	뉴저지	텍사스	온타리오	브리티시 컬럼비아		
	PEL	SEL	SEL	PEL	SEL	PEL		
As	17.0	33.0	33.0	17.0	33.0	17.0	33.0	17.0
Cd	3.5	9.0	10.0	3.5	10.0	3.5	10.0	3.5
Cr	90.0	110.0	110.0	90.0	110.0	90.0	110.0	90.0
Cu	197.0	110.0	110.0	197.0	110.0	200.0	200.0	110.0
Hg	0.5	-	2.0	0.5	2.0	0.5	2.0	0.5
Pb	91.3	110.0	250.0	91.3	250.0	91.0	250.0	91.0

b. 연안퇴적물

연안퇴적물의 경우 담수퇴적물과 같이 목표수준으로 <표 V-8> 자료 중의 최소치를 선택할 경우 대부분의 수치는 전 항목이 뉴욕주의 기준에 의해 좌우된다. 그러나 뉴욕주의 기준은 1990년대 초반에 발표된 일부 연구자료를 근거로 설정되었기 때문에, 비교적 많은 자료에 근거하고 추후 많은 검증과정을 거쳐 설정된 미국해양대기청(NOAA)의 권고기준과 캐나다 환경부의 권고기준 중 작은 값을 선택하는 것이 타당하다고 판단된다.

우려수준은 담수퇴적물의 경우처럼 저서생물의 보호라는 관점과 더불어 우려수준을 초과하는 경우 제거, 정화 또는 처리라는 실질적인 대책이 필요할 수 있다는 점을 고려하여 제시된 기준 중 최고치를 선택하는 것이 바람직해 보인다.

위와 같은 방법에 의해 도출된 담수퇴적물과 연안퇴적물에 대한 퇴적물질예비기준(안)을 정리하면 <표 V-9>와 같다. 물론, 여기에 제시된 목표수준은 여러 기관에서 사용하는 기준 중에 최소치를 선택하였으므로 지나치게 엄격하게 설정되어있을 가능성은 있지만, 실질적으로 여러 자료 중에 캐나다 환경부, 온타리오주, 해양대기청 등 신뢰성 있는 기관에서 설정한 자료에 기준치가 좌우되므로 안전하게 저서생물을 보호하려는 목표수준의 설정목적을 충분히 달성할 수 있다고 판단된다.

<표 V-8> 연안퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교

(a) 목표수준

항목 mg/kg 건중량	연방정부		주정부							최대	최소
	NOAA	캐나다 환경부	워싱턴	뉴욕	뉴저지	텍사스	사우스캐 롤라이나	플로리 다	브리티시 컬럼비아		
	ERL	ISQG	SQS	LEL	ERL	TEL	하위값	TEL	AEL		
As	8.2	7.2	57.0	6.0	8.2	17.0	8.2	7.2	25.0	57.0	6.0
Cd	1.2	0.7	5.1	0.6	1.2	3.5	1.2	0.7	2.4	5.1	0.6
Cr	81.0	52.3	260.0	26.0	81.0	90.0	81.0	52.3	110.0	260.0	26.0
Cu	34.0	18.7	390.0	16.0	34.0	197.0	34.0	18.7	64.0	390.0	16.0
Hg	0.2	0.1	0.4	-	0.2	0.5	0.2	0.1	0.4	0.5	0.1
Pb	47.0	30.2	450.0	31.0	47.0	91.3	46.7	30.2	71.0	450.0	30.2

(b) 우려수준

항목 mg/kg 건중량	연방정부		주정부							최대	최소
	NOAA	캐나다 환경부	워싱턴	뉴욕	뉴저지	텍사스	사우스캐 롤라이나	플로리 다	브리티시 컬럼비아		
	ERM	PEL	CLS	SEL	ERM	PEL	상위값	PEL	PEL		
As	70.0	41.6	93.0	33.0	70.0	41.6	70.0	41.6	42.0	93.0	33.0
Cd	9.6	4.2	6.7	9.0	9.6	4.2	9.6	4.2	4.2	9.6	4.2
Cr	370.0	160.0	270.0	110.0	370.0	160.4	370.0	160.0	160.0	370.0	110.0
Cu	270.0	108.0	390.0	110.0	270.0	108.2	270.0	108.0	110.0	390.0	108.0
Hg	0.7	0.7	0.6	-	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6
Pb	220.0	112.0	530.0	110.0	218.0	112.2	218.0	112.0	110.0	530.0	110.0

〈표 V-9〉 중금속에 대한 퇴적물질예비기준 (안)

항목 mg/kg 건중량	담수퇴적물		연안퇴적물	
	목표수준	우려수준	목표수준	우려수준
As	5.9	33.0	7.2	93.0
Cd	0.6	10.0	0.7	9.6
Cr	26.0	110.0	52.3	370.0
Cu	16.0	200.0	18.7	390.0
Hg	0.2	2.0	0.1	0.7
Pb	31.0	250.0	30.2	530.0

중금속 이외의 유해화학물질에 대한 퇴적물질기준은 앞 절에서 제기된 문제점이 어느 정도 해결된 시점에서 고려해야할 문제로 판단된다. 따라서 이들 물질에 대한 퇴적물질기준을 도출하는 것은 큰 의미는 없지만 제3장에 제시된 사례를 기준으로 PCBs, PAHs 등에 대한 외국기준을 정리하여 참고로 제시하였다(표 V-10, V-11).

〈표 V-10〉 담수퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교 (PCBs, PAHs)

(a) 목표수준

항목 µg/kg 건중량	연방정부	주정부				최대값	최소값
	캐나다 환경부	뉴저지주	텍사스주	온타리오주	브리티시 컬럼비아주		
	ISQG	LEL	TEL	LEL	AEL		
total PCB	34.1	70	34.1	70	370	370	34.1
total PAH	-	4000	-	4000	9200	9200	4000

(b) 우려수준

항목 µg/kg 건중량	연방정부	주정부				최대값	최소값
	캐나다 환경부	뉴저지주	텍사스주	온타리오주	브리티시 컬럼비아주		
	PEL	SEL	PEL	SEL	PEL		
total PCB	277	(530)*	277	(530)*	680	680	277
total PAH	-	(10000)*	-	(10000)*	17000	17000	17000

* : ()안은 mg/kg OC

〈표 V-11〉 연안퇴적물의 목표수준과 우려수준 설정을 위한 비교 (PCBs, PAHs)

(a) 목표수준

항목 μg/kg 건중량	연방정부		주정부						최대값	최소값
	NOAA	캐나다 환경부	워싱턴주	뉴저지주	텍사스 주	사우스캐롤 라이나주	플로리 다주	브리티시 컬럼비아주		
	ERL	ISQG	SQS	ERL	TEL	하위값	TEL	AEL		
total PCB	22.7	21.5	(12)*	23	21.6	22.7	21.6	420	420	21.5
total PAH	4022	-	-	4000	-	4022	1684	9200	9200	1684

* : ()안은 mg/kg OC

(b) 우려수준

항목 μg/kg 건중량	연방정부		주정부						최대값	최소값
	NOAA	캐나다 환경부	워싱턴 주	뉴저지주	텍사스 주	사우스캐롤 라이나주	플로리 다주	브리티시 컬럼비아주		
	ERM	PEL	CLS	ERM	PEL	상위값	PEL	PEL		
total PCB	180	189	(65)*	180	189	180	189	840	840	180
total PAH	45000	-	-	45000	-	44792	16770	17000	45000	16770

* : ()안은 mg/kg OC

2.4. 퇴적물질예비기준(안)의 적용 한계

사례분석을 통해 도출된 퇴적물질예비기준이 가지는 근본적인 문제점은, 어느 정도 우리나라의 실정에 적합한지 그리고 실제 오염평가기준으로 적용했을 경우 신뢰성은 얼마인지 현재로서는 판단할 수 있는 근거가 없다는 사실이다. 이는 외국기준이 설정과정에서 사용된 접근 방법, 생물종의 예민성, 퇴적물 특성 등 지역적인 특성에 의해 어느 정도 좌우될 수 있기 때문에 적용성의 평가를 위해서는 우리나라 자체의 자료가 요구되기 때문이다. 또한, 외국의 기준으로부터 퇴적물질예비기준(안)을 도출하는 과정에서 사용된 방법이 자의적인 판단기준에 의거하여 선택되었음을 부정할 수 없다. 예를 들어, 도출된 목표수준은 퇴적물질기준 중에 최소치를 선택하였으므로 지나치게 엄격하게 설정되었을 가능성이 있으므로 좀더 과학적인 접근방법을 통해 보완할 필요가 있다.

따라서 앞서도 여러번 강조했지만 여기서 도출된 기준은 규제기준이 아니며 단지 퇴적물의 화학물질 농도에 근거하여 퇴적물의 오염정도를 평가하고, 퇴적물 오염이 저서생물에 미치는 악영향을 추정하며, 오염하천 정비사업 등 퇴적물 정화와 관련된 정화목표를 설정하고, 준설퇴적물의 투기여부를 평가하는 과정에서 다른 평가방법과 병행하여 보조적인 관리기준으로 사용될 수 있는 퇴적물질예비기준으로 이해하면 될 것이다.

3. 지역퇴적물질기준의 설정

3.1. 지역퇴적물질기준의 개념 및 필요성

여기서 지역퇴적물질기준의 ‘지역’이라는 개념은 지리적으로 한계가 주어지는 특정지역을 지칭하기보다는 전국적이라는 개념에 대비되는 일반적인 개념으로 사용되고 있다. 따라서 지역퇴적물질기준은 한강수계, 낙동강수계 등의 유역, 인천연안, 마산만 등의 특정해역, 또는 팔당호, 대청호, 주암호 등의 호소역 등 어느 특정지역에 적용되는 퇴적물질기준을 지칭한다고 볼 수 있다.

앞에서 지적한 대로 전국적으로 적용되는 퇴적물질기준의 개발을 위해서는 적어도 통계적 유의성을 확보할 수 있을 정도의 많은 양의 자료 또는 지역적인 특성에 영향을 받지 않는 과학적으로 신뢰성 있는 기준 설정방법이 있어야 한다. 그러나 앞에서 살펴본 대로 우리나라는 퇴적물질기준을 도출할 만한 퇴적물 관련자료가 없는 실정이고 전 세계적으로도 아직까지 과학적으로 신뢰성 있는 일반적인 기준 설정방법은 없는 상황이다. 또한 유기물이나 영양염류와 같이 화학물질 그 자체가 저서생물에 악영향을 미치는 경우가 아닌 경우에는 해당물질의 화학적 농도와 생물에 대한 악영향은 해당지역의 생물, 물리, 화학적인 환경에 지배를 받는 동시에 용수이용 목적에도 영향을 받기 때문에 전국적인 기준을 설정하기가 현실적으로 어렵다.

한편, 중금속 등의 유해화학물질이 생물에 미치는 영향 또한 퇴적물의 황화물 함량, 퇴적물의 입도분포 등 지역적인 퇴적물 특성에 따라 좌우되기 때문에 외국에서 설정된 기준을 적용하여 퇴적물질을 평가하는데 문제가 있을 수 있다. 따라서 특정지역의 퇴적물 문제, 특히 퇴적물 오염평가의 스크린 단계에서는 위에 제시된 퇴적물질예비기준을 사용할 수 있지만, 퇴적물 오염으로 인한 실질적인 악영향을 엄밀히 평가하기 위해서는 지역적인 평가가 있어야 하며 이러한 과정이 지역퇴적물질기준 설정의 기반이 되는 것이다.

3.2. 지역퇴적물질기준의 설정방법

지역퇴적물질기준의 개발을 위한 방법의 일반적인 장단점은 <표 II-3>에 제시되어 있으나 개발방법의 선택은 개발방법론의 과학적인 신뢰성뿐만 아니라 퇴적물질기준으로서의 실용성, 개발의 경제성, 관리에 대한 적용성 또한 고려해야 하므로 단순한 문제가 아니다. 물론 다양한 요인을 고려하여 개발방법을 선택하는 것이 항상 최선이 아닐 수도 있으나, 적어도 퇴적물질기준의 개발에 있어 일부목적에 편향되기보다는 다양한 측면을 고려할 수 있다는 점에서 각 개발방법론에 평가를 위해 미국의 플로리다주가 사용한 평가방법을 참고하는 것도 의미가 있다(표 V-12).

플로리다 주정부는 <표 V-12>의 결과에 근거하여 최적으로 판단된 증거자료 가중법(WEA)을 이용하여 퇴적물질권고기준을 개발하였지만, 우리가 원하는 퇴적물질기준이 기본적

으로 수치기준이어야 한다는 점에서는 어느 방법을 사용하든 큰 차이가 없으며 어떤 평가항목에 중점을 두느냐에 따라 실제적인 평가가 크게 달라질 수 있음을 볼 수 있다. 예를 들어 실용성과 경제적 측면을 모두 고려한다면 배경농도법(SBA), 평형분배법(EqPA), 증거자료가중법(WEA)이 타당한 방법이 될 수 있으나 과학적인 신뢰성에서 배경농도법에 큰 문제가 있고 따라서 이 방법은 규제기준으로 사용되기에는 부적합하다고 판단된다.

그러나 규제기준으로 사용하지 않고 단기적으로 퇴적물 오염지역을 구분하거나, 대체적인 퇴적물 오염의 평가를 위한 퇴적물질기준을 개발한다면 오히려 배경농도법에 큰 장점이 있다고 볼 수 있다. 즉, 우리가 개발하고자 하는 퇴적물질기준의 목적에 따라 퇴적물질기준의 개발을 위한 접근방법이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 이러한 면을 고려할 때, 플로리다와 같이 비교적 기존의 자료가 많이 축적되어 있는 경우 별도의 추가적인 조사 없이 퇴적물질기준을 개발하는데 증거자료가중법을 사용할 수 있었으나 지금부터 자료를 구축해야하는 우리로서는 적어도 경제성의 입장에서 보면 이 방법이 타 방법에 비해 우월하다고 보기 어렵다. 오히려, 자료축적 수준, 기술수준, 연구지원규모 등의 현실적인 여건을 모두 고려한다면 빠른 기간 내에 퇴적물질기준을 개발할 수 있는 방법은 고전적으로 사용되어온 배경농도법 정도가 있을 뿐이다.

따라서, 단기적으로는 배경농도법에 근거하여 지역적으로 적용되는 비규제적인 지역퇴적물질기준을 개발하여 퇴적물의 오염분포, 오염정도를 평가하는데 사용하고, 생태위해성을 반영한 지역퇴적물질기준은 잠정적으로 외국의 퇴적물질기준 또는 여기에 제시된 퇴적물질예비기준(안)을 준용하는 것이 현실적인 대안으로 판단된다. 특히, 수질관리의 측면에서 지역적인 특성과 수역의 지정목적에 따라 관리의 범위가 결정되는 유기물 및 영양염류 항목에 대해서는 배경농도법을 사용해 지역퇴적물질기준을 개발하거나 앞에서 제시한 평가절차에 따라 사안별로 퇴적물에 의한 영향을 평가하는 것이 바람직하다.

그러나 장기적으로는 생물영향에 근거한 기준의 개발이 필요하다는 것은 의심의 여지가 없다. 예를 들어, 팔당호 유기물질과 영양염류 지표의 농도를 외국의 퇴적물질기준과 비교한 결과 총인 농도가 배경농도법에 기초하여 설정된 미국지역환경보호청의 심한오염 수준을 크게 초과하는 반면, 생물영향을 근거로 한 온타리오 주 기준에 의하면 악영향의 가능성이 있는 농도를 약간 초과하는 수준으로 평가되고 있다(표 V-13). 이는 상수원이며 가장 집중적인 오염원 관리가 이루어지고 있는 팔당호의 특징을 고려한다면 지역환경보호청의 기준이 팔당호퇴적물의 평가에 적합하지 않다는 사실을 시사하는 한편 온타리오주 기준의 타당성 또한 검토할 필요가 있음을 반영하고 있다.

<표 V-12> 퇴적물질기준 개발방법 선택을 위한 평가

평가기준/평가방법*	SBA	SSTA	EqPA	TRA	SL CA	SQ TA	AE TA	WEA
실용성								
수치로 표현된 기준개발이 가능한가?	O	O	O	O	O	O	O	O
짧은 기간 내에 사용될 수 있는가?	O	X	O/X	O/X	O/X	X	X	O
경제성								
시행에 많은 비용이 요구되는가?	X	O	X	O	O	O	O	X
새로운 자료의 조사나 축적이 요구되는가?	X	O	X	O	O	O	O	X
과학적 신뢰성								
생물유용성에 대한 고려가 가능한가?	X	O	O	O	X	O	O/X	O/X
원인과 영향에 대한 관계파악이 가능한가?	X	O	O	X	O/X	O/X	O/X	O/X
생물영향에 대한 자료에 기초하는가?	X	O	O	O	O	O	O	O
관심지역의 퇴적물 자료가 고려되었는가?	O	X	X	X	X	X	X	O
증거에 대한 가중적인 고려가 가능한가?	X	X	X	X	X	O	O	O
절대치보다 범위로서 평가기준의 제시가 가능한가?	X	X	O/X	X	X	X	X	O
혼합된 오염물질에 대한 고려가 가능한가?	X	X	X	X	O	O	O	O
현장자료에 의한 검증이 요구되는가?	O	O	O	O	O	O	O	O
지역적인 특성이 고려될 수 있는가?	O	O/X	O/X	X	X	O	O	X
모든 종류의 오염물질에 적용가능한가?	O	X	O/X	O	O	O	O	O
적용성								
모니터링 프로그램을 지원할 수 있는가?	O/X	O	O	O	O	O	O	O
문제지역의 선별을 지원할 수 있는가?	O/X	O	O	O/X	O	O	O	O
규제프로그램을 지원할 수 있는가?	X	O	O/X	X	O/X	O/X	O	O/X
전체적인 평가	나쁨	좋음	좋음	보통	보통	좋음	좋음	훌륭

*약자로 표기된 평가방법에 대한 설명은 <표 II-3>을 참조 바람

자료: FDEP(1994a)

생물영향에 기초한 퇴적물질기준의 개발을 위해서는 다양한 개발방법 중에 어떤 방법을 택하는 것이 타당한지 신중히 검토할 필요가 있다. 연안퇴적물의 경우에는 해양대기청에서 사용하는 증거자료가중법이 미국 뿐만아니라 유럽에서도 가장 많이 사용되고 있으며, 초기에는 주로 퇴적물 오염여부의 평가, 오염퇴적물의 분포, 퇴적물관리의 우선순위 설정 등의 목적으로 주로 사용되었으나 최근의 연구에 의하면 저서생물에 대한 악영향을 평가하는데도 적합한 것으로 알려지고 있다(Long et al. , 1998; Long and MacDonald, 1998). 한편, 담수퇴적물기준 설정을 위해서는 스크린 수준 농도법(SLCA), 퇴적물주입 생물검정법(SSBA) 등 다양한 방법이 사용되고 있고, 상대적으로 연구자에 따라 제안된 기준의 편차가 크기 때문에 최근에는 여러 실험자료의 평균값을 담수퇴적물에 대한 퇴적물질 권고기준으로 설정하자는 의견도 제시되고 있다(MacDonalds et al., 2000).

〈표 V-13〉 팔당호 표층퇴적물 내 유기물·영양염류의 오염현황 및 비교

항목	환경처 (1990)	본 연구 (1998)	캐나다 온타리오주 기준		미국 지역환경청 기준		
			악영향 최소 농도	최대 허용 농도	비오염	중간 오염	심한 오염
총인 ($\mu\text{g/g}$)	958	1,000	600	2,000	<420	420 ~650	>650
총질소 ($\mu\text{g/g}$)	1,600	1,620	550	4,800	<1,000	1,000 ~2,000	>2,000
COD ($\mu\text{g/g}$)	23,800	24,530	-	-	<40,000	40,000 ~80,000	>80,000
총유기탄소 (%)	-	1.36	1	10	-	-	-
강열감량 (%)	7.7	6.3	-	-	<5	5~8	>8

자료: 이창희 외(1999)

따라서, 외국에서도 아직까지는 개발방법론에 대한 합의가 도출되고 있지 못한 상황이므로 방법론의 선택은 실용성, 경제성, 과학적 신뢰성, 적용성 등의 종합적인 평가에 기초하는 것이 바람직하다(표 V-12). 여기서 과학적 신뢰성이나 적용성의 평가에 있어서는 큰 문제가 없을 것으로 보이나, 현황자료와 추가적으로 취합될 자료의 측면에서 보면 실용성과 경제성 측면의 평가가 단순하지 않으며 향후 논란이 있을 것으로 보인다. 따라서, 퇴적물질기준 개발 초기단계에서 정책입안자, 관리자, 과학자 및 기술자 등으로 구성된 퇴적물질기준 개발위원회를 조직하고 개발방법론에 있어 기술적, 경제적, 관리적 측면으로 가장 타당한 접근방법(또는 몇 개의 방법)을 채택하여 이에 근거한 체계적인 연구계획을 수립·추진해야 할 것이다.

3.3. 퇴적물 제거 및 정화기준

퇴적물질기준은 국가적으로는 퇴적물 관리에 있어 목표가 된다는 점도 있으나 지역적으로는 매우 현실적인 문제와 연관된, 퇴적물 제거기준, 퇴적물 정화기준 또는 퇴적물 처리기준으로 사용될 수 있다는데 그 중요성이 있다. 제3장의 사례에서 볼 수 있듯이 저서생물보호를 위한 퇴적물질기준의 개념이 성립되기 이전에는 준설퇴적물의 투기를 위한 투기기준, 오염된 퇴적물의 제거 여부를 평가하기 위한 제거기준, 오염된 퇴적물의 정화수준을 결정하는 정화기준 등이 목적에 따라 별도로 설정되는 경향이 있었는데, 환경에 대한 오염퇴적물의 영향이 밝혀지면서 모든 기준은 퇴적물질기준을 중심으로 통합되어가고 있다. 그렇다면 이러한 관점에서 본 퇴적물질기준 개발의 의미는 무엇인가?

이에 대한 토의를 전개하기 위해서는 먼저 오염퇴적물 제거와 관련된 사업현황을 살펴볼 필요가 있다. 환경부는 1999년까지 ‘오염하천정화사업’을 통해 1987~ 1999년에 걸쳐 연평균

31km씩 총 하천연장 397km, 퇴적물량으로는 약 11백만 m^3 의 퇴적물을 하천에서 제거하였고 (표 V-14), 2000년에는 지방양여금 343억원을 포함한 703억원의 예산을 투입하여 42개 하천에 대한 정화사업을 추진하고 있다. 한편 해양수산부는 ‘오염해역준설사업’을 통해 2000년까지 마산항, 축산항, 주문진항 등에서 약 2.7백만 m^3 의 퇴적물을 준설하였고 2005년까지 1,586억을 투입하여 영일만, 청초호 등에서 추가적으로 약 3백만 m^3 의 퇴적물을 준설할 예정이다 (표 V-15).

이러한 사업은 퇴적물이 오염되어 있으며 수질개선을 위해서는 오염원 관리차원에서 오염된 퇴적물을 수저에서 제거해야한다는 개념에 기반을 두고 있다. 그러므로 정화목적의 퇴적물 준설이라면 적어도 퇴적물이 제거될 정도로 오염되었는지, 정화작업은 어느 정도의 수준까지 진행해야 하는지에 대한 관리기준이 필요할 것이다. 그러나 ‘환경정책기본법’, ‘수질환경보전법’, ‘유해화학물질관리법’, ‘농약관리법’, ‘폐기물관리법’, ‘해양오염방지법’ 등의 현행법에서 퇴적물을 오니, 토사, 저니, 부유물 등으로 다양하게 언급하고 있으면서도, 실제적으로 수저퇴적물로 인한 악영향을 예방 또는 저감할 수 있는 직접적인 관련규정이 없다는 사실을 감안할 때 아직까지 퇴적물 제거기준, 퇴적물 정화기준 등의 관리기준이 개발되지 못한 것은 그리 놀라운 일이 아니다.

‘환경영향평가법’에 의하면 1) 항만에서의 준설사업 중 준설면적이 10만 m^2 이상 또는 준설량이 20만 m^3 이상인 준설사업, 2) 하천의 이용 및 개발에 있어서 공사구간이 하천 중심 길이로 10km 이상인 공사, 3) 토석, 모래, 자갈, 광물 등의 채취를 위한 공사 중 상수원 보호구역 안에서는 2만 m^2 , 상수원 보호구역에서 유수거리 5km 이내에서는 5만 m^2 이상인 공사, 4) 해안에서의 골재채취는 채취면적이 25만 m^2 이상 또는 골재채취량이 1백만 m^3 이상인 공사일 경우 환경영향평가 대상이 된다. 그러나, 이러한 환경영향평가는 기본적으로 수저퇴적물이 제거될 정도로 오염되어 있는가에 관심이 있는 것이 아니라 수저퇴적물의 제거, 운반, 투기 과정에서 발생할 수 있는 악영향의 저감에 초점을 맞추게 된다.

한편, ‘폐기물관리법’에 의하면 하천, 호소, 해양 등의 수저에서 준설한 수저퇴적물은 일반사업장폐기물로 분류되어 있다. 따라서 지정폐기물이면서 사업장에서 배출되는 오니(수분함량이 95% 미만이거나 고형물 함량이 5%이상)와는 달리 ‘폐기물관리법’에 규정되어 있는 일반사업장폐기물의 수집·운반·보관·처리 기준 및 방법에 따라 육상 매립장에 투기된다(폐기물관리법 시행규칙 별표 4).

‘해양오염방지법’의 적용을 받는 매립장에 배출할 경우에는 수저 준설퇴적물이 호안 밖으로 흘러나가지 않도록 조치하고, 상등수를 해양으로 배출하는 경우에는 부유물질의 오염을 방지할 수 있는 시설 또는 설비를 갖추 것을 요구하고 있다. 또한 해양투기의 경우에도 갑해역을 제외한 모든 배출해역에 집중식 투기를 허용하고 있는데, 준설퇴적물에 대해서는 오염된 정도와는 상관없이 거르기 등의 물리적인 처리 이외에는 배출을 위해 적용되는 전처리 기준이 없다. 이러한 해양투기 규정을 보면 수저 준설퇴적물은 사업장에서 배출되는 오니와 달리 유해물질에 의한 오염 가능성이 배제되어 투기를 위한 오염도 분석, 유해성 평가 등에 관한 실질적인 규제가 미흡한 실정임을 알 수 있다.

이렇게 수저퇴적물의 유해성에 대한 고려가 부족한 것은 수저퇴적물을 폐기물로 보아 퇴적

물의 유해성을 유해폐기물 판정기준에 의해 평가하기 때문이다. 그러나, 우리나라의 유해폐기물 판정기준은 일본의 그것보다 일부 항목에 대해서는 10배 이상 농도가 높게 설정되어 있어, 이런 기준을 적용할 경우 거의 대부분이 오염퇴적물로 분류되지 않는 문제가 있다. 그러나, 제4장의 오염현황에서 보듯이 외국의 퇴적물질기준을 적용한 오염평가 결과를 보면 일부 퇴적물은 심하게 오염되어 있었으며 이런 오염하천정화사업, 오염해역준설사업을 통해 지속적으로 제거되어온 오염퇴적물은 적절한 관리 없이 제거, 투기되고 있어 적지 않은 악영향이 있을 것으로 예상된다.

〈표 V-14〉 오염하천정화사업 추진실적 ('87-'99)

(단위: 백만원)

구분		계	‘87~’92	‘93	‘94	‘95	‘96	‘97	‘98	‘99
재원	계	303,524	120,582	27,093	32,029	30,291	43,073	50,4564	44,479	52,360
	양여금	171,198	72,757	17,498	17,429	16,248	22,598	24,668	24,464	24,831
	지방비	132,326	47,825	9,595	14,600	14,043	20,475	25,788	20,215	27,529
사업	하천수	118	20	8	9	14	20	14	16	17
물량	연장	397km	79km	21.4km	41.3km	52.2km	46.1km	54km	63km	40km

자료: 환경부(2000)

〈표 V-15〉 오염해역준설사업의 연차별 사업내역

(단위: 백만원/천 m³)

사업지역	총사업비	2000년 까지	연차별계획						
			소계	2001	2002	2003	2004	2005	비고
계	212,933/ 6,528	54,251/ 2,726	158,682/ 3,802	15,715/ 420	27,091/ 541	26,920/ 1,079	26,920/ 673	43,600/ 1,090	종료
마산항 (경남)	28,496/ 2,111	28,496/ 2,111							
축산항 (경북)	330/ 23	330/ 23							
주문진항 (강원)	7,750/ 231	7,750/ 231							
영일만 (포항)	34,606/ 651	12,403/ 234	22,203/ 417	7,143/ 166	9,060/ 151	6,000/ 100			시행중
청초호 (속초)	21,736/ 569	4,842/ 127	16,894/ 442	4,286/ 127	6,000/ 150	6,608/ 165			
선소해역 (여수)	23,635/ 600	429/ 설계	23,206/ 600	4,286/ 127	9,600/ 240	9,320/ 233			
방어진항 (울산)	6,515/ 158		6,515/ 158		195/ 설계	3,200/ 80	3,120/ 78		예정
행암만 (경남)	82,236/ 2,000		82,236/ 2,000		2,236/ 설계	20,000/ 500	20,000/ 500	40,000/ 1,000	
장생포항 (울산)	7,628/ 185		7,628/ 185			228/ 설계	3,800/ 95	3,600/ 90	

자료: 해양수산부(2000)

따라서, 수저퇴적물의 제거여부를 평가할 수 있는 퇴적물 제거기준과 정화사업을 실시하였을 때 정화목표로 사용될 수 있는 정화기준의 설정이 필요하며 퇴적물질기준은 이런 면에서 유용하게 사용될 수 있다. 즉, 퇴적물질기준 중의 목표수준이 퇴적물 관리를 통해 궁극적으로 달성해야 할 환경관리의 목표라고 한다면, 우려수준은 퇴적물의 제거여부를 결정하는 기준과 오염퇴적물의 정화사업에 있어 정화의 수준으로 사용될 수 있다는 것이다. 물론 유기오염퇴적물의 경우에는 중금속 등의 유해화학물질과는 달리 현재와 같이 사업단위의 평가과정을 거쳐서 퇴적물의 제거여부와 정화수준을 설정하는 것이 바람직하지만(지역기준 또는 사업별 평가) 중금속 등의 유해화학물질은 앞에서 제시된 퇴적물질예비기준을 통해 일단 오염정도를 스크린하고 (예를 들어, 목표수준 이하는 안전, 우려수준 초과는 제거, 중간은 추가적인 평가), 필요하다면 추가적인 평가를 수행하는 것이 효율적인 방법으로 판단된다. 또한 목표수준은 퇴적물 정화사업의 이상적인 정화목표로 사용될 수 있으며, 실질적인 정화목표는 지역적인 여건을 고려하여 우려수준을 초과하지 않는 범위에서 설정될 수 있을 것이다.

4. 퇴적물질기준의 적용방안

지금까지 논의된 본 연구의 핵심적인 사항을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 아직까지 일반적으로 적용되는 퇴적물질기준 개발방법은 없으며 어떤 방법을 사용하든지 장단점이 있다.

둘째, 배경농도법을 이용한 퇴적물질기준 이외에는 우리나라의 자체적인 자료를 근거로 퇴적물질기준을 단시간 내에 개발할 여건이 되지 못한다.

셋째, 외국의 퇴적물질기준을 근거로 퇴적물 오염평가, 퇴적물 제거, 퇴적물 정화기준 설정에 있어 참고할 수 있는 비규제적 성격의 퇴적물질예비기준을 설정한다.

넷째, 유기물, 영양염류 등에 의한 오염평가는 일반적인 기준보다 단위 사업 또는 지역적인 기준을 설정하거나 별도의 평가과정을 거치는 것이 바람직하다.

다섯째, 전국적으로 적용되는 퇴적물질기준의 개발에 앞서 지역적으로 적용되는 퇴적물질기준을 단위 사업 또는 지역적으로 개발한다.

이상의 결과를 놓고 볼 때, 관리자가 사용할 수 있는 규제성격의 퇴적물질기준의 개발에는 적지 않은 기간이 필요할 것으로 판단되며 더욱이 퇴적물 관리기반이 취약한 우리의 여건을 고려한다면 가능한 수준에서 퇴적물 평가를 시작하는 것이 현실적인 접근방법일 것이다. 즉, 퇴적물 관리를 위한 오염평가에 있어 단순한 예비평가로부터 필요한 경우 생물위해성 평가에 이르기까지 단계적인 평가방법을 사용하는 것도 일종의 퇴적물질기준 적용방안이 될 수 있다는 것이다.

예를 들어, 미국의 위스콘신주의 평가과정 처럼(WNDR, 1999) 일차적인 단계에서는 대상지역의 퇴적물이 용수이용이나 생물학적/생태학적인 요소에 미치는 악영향의 가능성을 제한된

자료를 통해 평가하고, 단계가 높아질수록 좀더 구체적인 퇴적물의 영향을 평가하기 위해서 추가적인 독성평가, 위해성 평가 등을 수행함으로써 퇴적물에 포함된 오염물질의 농도 및 그로 인한 악영향을 보다 신뢰성 있게 예측하는 방법이 있을 수 있다. 이러한 단계별 퇴적물 오염평가 과정은 예비수준의 평가와 지역적인 특성을 고려한 지역평가로 크게 구분 할 수 있을 것이다.

4.1. 예비평가

예비평가는 구체적이지는 않지만 대상수역 퇴적물에 대한 일반적인 분석자료와 퇴적물에 포함된 오염물질 농도, 수질 및 수생생물에 대한 악영향 가능성을 추정한 일부 자료에 근거하여 수행할 수 있다. 물론 주변환경에 관한 자료, 예를 들어 유역의 오염원 분포 및 수역으로 유입되는 오염물질의 부하량에 대한 자료가 이 단계에서는 필요할 것이다. 이 예비평가에서는 다음과 같은 두 가지 고전적인 방법이 사용될 수 있다.

첫 번째 방법은 오염되지 않은 기준이 되는 수역의 퇴적물 농도 또는 어류에 포함된 오염물질의 농도와 대상수역의 농도를 비교하는 방법이다. 이러한 상대적인 비교는 소위 EF(enrichment factor, 대상지역의 농도/기준지역의 농도) 상수로 나타내는데 이를 산정하기 위해서는 일단 기존의 퇴적물 관련자료를 이용하여 대상지역이 위치하는 유역에 포함된 수역 중 적절한 기준수역을 선택하되 여의치 않은 경우 지역특성이 비슷한 타 유역중 퇴적물 오염의 원인이 없는 수역을 기준수역으로 설정한다. 비교를 위한 퇴적물 자료는 적어도 통계적으로 95% 신뢰구간 내에서 비교가 가능해야 한다.

둘째 방법은 대상수역 퇴적물에 포함된 오염물질 농도를 기존의 퇴적물질기준과 비교하는 것이다. 제3장에서 소개한 대로 이미 여러 방법을 통해 개발된 외국의 퇴적물질기준을 이용하거나 이들 자료에 근거하여 본 연구에서 제시한 퇴적물질예비기준(표 V-9)과 비교하여 오염을 평가한다.

또한, 비극성 유기오염물질(중금속 등에 대한 방법론도 확정되면 이들 물질도 포함)에 대해서는 비교적 간단한 평형분배모델을 이용하여 퇴적물, 공극수, 수층, 어류 간 농도관계를 예측할 수 있다. 이 방법은 비교적 간단하여 국내에서도 적용된바 있으며(Lee et al., 1999; 박영동, 1998) 다음 두 가지 측면에서 이용할 수 있다.

첫째, 평형분배모델은 퇴적물 총유기탄소로부터 수층으로 용출되는 오염물질의 농도를 예측할 수 있으므로 평가기준으로 국민건강, 수생생물, 야생생물 보호를 위해 개발된 수질기준을 사용할 수 있다는 장점이 있다.

둘째, 퇴적물에 포함된 오염물질 중 생물에 농축될 수 있는 양을 BSAF(Biota-to-Sediment Accumulation Factor)를 통해 예측 가능하다. 이때 오염물질의 농도는 총유기탄소와 지질농도를 이용해 정규농도로 환산하여 사용하는 것이 바람직하며 평가기준이 될 수 있는 것은 어류와 어류를 섭취하는 인간 및 야생생물 보호를 위해 설정된 어류 생체 내 오염물질 허용농도이다. 한편 이러한 허용농도는 거꾸로 어류를 보호하기 위한 퇴적물질기준치 개발을 위한 기준으로 사용될 수 있다.

물론 기존의 보고된 퇴적물 관련자료를 취합·분석하여 평가를 수행하는 것도 필요한 과정일 것이다. 즉, 기존의 발간자료, 타 지역의 연구결과, 데이터베이스 자료 등을 취합하여 분석하되, 현재 우리나라에서는 가용한 자료가 별로 없지만 특히 퇴적물 내 오염물질의 이동경로, 생물유용성, 생물에 대한 악영향을 나타내는 자료를 중점적으로 수집하고, 가능한 경우 화학물질과 그 독성에 대한 자료를 이용하는 것도 좋은 방법이 될 수 있다.

4.2. 지역평가

지역적인 평가는 현실적으로 적용할 수 있는 다양한 방법을 이용하여 종합적으로 퇴적물 오염평가를 수행하는 것으로 이는 앞에서 지적인 대로 구체적인 연구를 지원할 수 있는 퇴적물 조사 및 연구지침의 마련이 요구된다. 퇴적물의 오염정도와 범위를 파악하기 위해서 현장의 퇴적물 시료를 채취해야 하고, 아직 우리나라에서는 표준화되지 않았지만 미국환경보호청 등의 표준 검사방법에 준한 독성검사를 통해 해당 수역의 퇴적물, 공극수, 수층, 또는 용출수에 포함된 오염물질이 (목적에 따라 선택) 각 영향단계 별로 그 단계를 대표하는 적절한 생물체에게 미치는 악영향을 파악해야 한다. 한편, 현장조사를 통해 저서생물의 군집 구조 및 생물 다양성, 야생 또는 수조의 어류에 대한 생물농축, 암 또는 기형 발생 빈도, 기타 퇴적물 오염으로 야기될 수 있는 생물지표를 파악하는 것도 중요한 지역평가 과정 중의 하나가 될 것이다. 물론, 퇴적물 오염물질의 순환과 이동에 관한 모델을 사용할 수 있다면 이러한 모델을 사용한 예측 결과는 정책적인 판단에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

현 수준에서는 기대하기 어렵겠지만 향후 퇴적물 위해성 평가에 대한 지침이 마련된다면 여러 단계의 위해성평가가 수행되어야 함은 물론이고, 미국환경보호청의 표준방법에 준한 국민건강 및 생태 위해성평가의 수행이 가능하다면 더욱 이상적인 평가가 될 수 있을 것이다.

이러한 단계적인 평가과정을 이용한다면 퇴적물 오염의 정도, 오염퇴적물의 분포, 퇴적물 정화의 목적, 퇴적물 정화의 수준 등 퇴적물 관리의 다양한 측면을 반영하여 지역에 가장 적합한 평가방법을 선택할 수 있을 것이다.

VI. 요약 및 결론

전통적으로 수저퇴적물은 골재자원으로서 채취의 대상이었고 수운을 위한 수로유지 및 하천 홍수통제를 위한 준설의 대상이 되어왔다. 최근 수저퇴적물이 수질 및 수생태계 미치는 영향이 상세히 밝혀지면서 이러한 전통적인 분야뿐만 아니라 수질 및 건강한 수생태계를 유지·보전하기 위한 환경적 측면에서의 퇴적물관리가 더욱 필요하다는 의견이 국내외적으로 크게 대두되고 있다.

환경적 측면에서의 퇴적물 관리란 퇴적물로 인한 악영향을 미연에 방지 또는 최소화하는 제반활동을 의미하는데 일반적인 관리목표로는 수생태계 및 국민건강 보호를 위한 퇴적물 오염예방, 오염된 퇴적물의 정화, 준설퇴적물의 환경친화적인 처리 등의 활동을 포함한다. 이러한 각 분야별 국내현황을 검토해 보면 정부차원의 체계적인 퇴적물 관리가 부재한 실정임을 알 수 있으며 이는 특히 퇴적물 관리의 궁극적인 목표치이며 실질적인 관리기준으로서의 퇴적물환경기준이(이하 본문의 정의대로 堆積物質基準이라는 용어사용) 아직 개발되지 않고 있다는 사실에서 분명하게 나타나고 있다.

이런 점에서 본 연구는 먼저 퇴적물질기준의 개발의 필요성을 제기하였으며 아직 정립되어 있지 않은 퇴적물질기준의 개념과 더불어 기준의 적용목적, 대상, 범위, 법적 성격에 따라 혼용되고 있는 퇴적물질기준 관련용어를 체계적으로 정리하여 제시하였다. 또한 외국에서 사용하고 있는 다양한 퇴적물 관리기준을 취합하여 퇴적물 투기기준, 퇴적물 제거기준(정화기준), 퇴적물질기준으로 분류하였고 이를 근거로 우리나라 호소, 하천 및 연안퇴적물의 오염현황을 분석해 보았다. 한편, 퇴적물질기준의 개발에 요구되는 기초적인 기반이 마련되어 있지 않은 국내의 현실을 고려하여, 퇴적물질기준 개발방안은 퇴적물 오염현황 파악, 사례분석을 통한 퇴적물질예비기준(안)의 도출, 지역퇴적물질기준의 개발 및 퇴적물질기준의 적용방안 등으로 나누어 기술하였으며 이 과정에서 관련성이 있다고 판단되는 국내의 퇴적물 관리현황을 제시하였다.

퇴적물질기준을 사용하고 있는 외국의 사례를 분석해 보면 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다. 1) 퇴적물을 오염되지 않은 일반퇴적물과 오염퇴적물로 구분할 때 일반퇴적물로 야기되는 문제는 전국적이고 일률적인 기준보다는 ‘퇴적물지표’등 지역적으로 적용 가능한 관리기준을 설정하는 것이 바람직하다. 2) 준설퇴적물의 투기와 관련하여 환경적인 악영향을 방지하려면 준설퇴적물의 투기에 대한 적절한 영향평가 절차가 마련될 필요가 있으며 만일 퇴적물질기준이 설정되면 이를 퇴적물 투기에 따른 영향을 평가하는 기준으로 사용할 수 있다. 3) 유기물 및 영양염류 등의 일반항목은 지역적인 특성, 용수이용 목적에 따라 평가가 크게 달라질 수 있으므로 일률적인 기준보다는 악영향을 적절히 평가할 수 있는 평가절차를 개발하는 것이 바람직하다. 4) 대부분의 퇴적물질기준은 통계적으로 볼 때 악영향 발생확률이 적은 수준과 악영향이 명확히 예상되는 수준의 두 단계로 나누어 설정되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 악영향 여부를 명확히 구분할 수 방법론이 가용하기 전까지는 오염/비오염을 구분하는 단일기준보다는 오염정도와 악영향의 수준을 단계별로 구분하는 기준체계가 바람직하다

고 판단된다.

국내의 이용 가능한 퇴적물 분석자료를 외국의 퇴적물질기준과 비교·검토한 주요결과를 정리하면 다음과 같다. 1) 퇴적물 오염물질 중 유기물, 영양염류, 중금속에 대한 농도자료는 외국의 퇴적물질기준을 이용하여 적어도 간접적으로는 오염평가가 가능한 수준이나 중금속 이외의 기타 유해화학물질에 대한 자료는 매우 미흡한 실정이다. 2) 유기물, 영양염류, 중금속의 화학물질에 대한 농도자료는 많지만 연관된 생물영향에 대한 자료가 매우 부족하여 이러한 농도자료를 직접적으로 퇴적물질기준의 개발에 이용하기는 현실적으로 어렵다. 3) 같은 유기물지표라 하더라도 강열감량을 사용하는 경우에는 퇴적물 오염이 심각하게 평가되는 반면 화학적산소요구량을 사용하는 경우 오염되지 않는 상태로 나타나는 것으로 보아 유기물에 의한 영향은 지역특성에 크게 좌우되는 것을 볼 수 있다. 4) 총질소는 모든 수역에서 약간오염 이상의 오염상태를 보이고 있고 특히 정체수역인 호소의 경우 상대적으로 오염이 심한 것으로 나타나는 반면 인의 경우에는 심하게 오염된 수역이 10% 미만으로 나타나고 있다. 5) 중금속에 의한 오염은 오염원에 가까운 하천에서 심한 것으로 나타나고 있어 중금속 등의 유해물질을 배출하는 업소가 밀집된 공단관류 하천이나 공단폐수가 유입되는 하천에 대한 특별한 관리가 필요할 것으로 보인다.

위와 같은 외국의 사례분석과 국내의 현황분석 결과를 토대로 퇴적물질기준의 개발방안을 제시하면 다음과 같다. 1) 일부 수역의 퇴적물은 이미 생태계에 악영향을 미칠 정도로 오염되어 있는 상황이므로 퇴적물질기준의 개발은 실현 가능한 수준부터 시작하여 보완해 나가는 5단계 개발방안에 따른다. 2) 퇴적물 오염현황의 파악을 위해서는 현재 진행되고 있는 공정시험방법이 조속히 완료되어야 하며 추가적으로 퇴적물 조사지침의 개발 및 퇴적물측정망의 설치가 필요하다. 3) 자체적인 퇴적물질기준의 개발 이전에는 외국의 퇴적물질기준으로부터 도출된 퇴적물질예비기준(안)을 이용하여 비규제적인 목적으로 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 납, 수은에 의한 퇴적물 오염을 평가할 수 있다. 4) 전국적으로 적용되는 퇴적물질기준의 개발 이전에는 배경농도법 등 비교적 쉽게 사용할 수 있는 방법을 이용하여 지역퇴적물질기준을 개발하는 것이 바람직하다. 5) 퇴적물의 제거 및 정화 목표의 설정은 해당 지역의 지역퇴적물질기준 개발을 통해 실시하는 것이 바람직하지만 중금속의 경우 잠정적으로 퇴적물질예비기준(안)을 참고할 수 있다. 6) 퇴적물의 오염평가는 단순한 예비평가로부터 필요에 따라 해당 지역에 대한 생물위해성 평가까지 단계적인 평가방법을 사용하는 방안이 현실적인 여건을 고려할 수 있다는 점에서 바람직하다.

이상에서 퇴적물질기준의 개발과 관련된 다양한 측면에 대한 검토를 해보았다. 퇴적물질기준 개발의 가장 큰 문제 중의 하나는 퇴적물 오염현황, 오염퇴적물의 분포, 퇴적물 오염추이 등을 파악할 수 있는 기본적인 체제조차 갖추어져 있지 않다는데 있다. 특히, 퇴적물 조사지침의 개발, 퇴적물측정망의 설치 및 운용과 같은 내용은 오염현황 파악을 위한 기초적인 사항이지만 오랜 기간의 연구를 요하지 않는 사항으로 정책입안자의 의지만 있으면 비교적 쉽게 해결될 수 있는 문제로 판단된다. 물론 규제적 성격을 가진 전국적으로 적용되는 퇴적물질기준의 개발은 방법론의 선택 등 기술적인 문제뿐만 아니라 실용성, 적용성을 평가할 수 있는 구체적인 분석이 요구되므로 에코테크노토피아 프로젝트와 같은 장기적인 기술개발과제에서 다루는 것이 바람직 할 것이다.

[참고문헌]

- 강성현, 진해만에 서식하는 해산 이매패류와 복족류의 독성유기오염물질 생물농축과 오염스트레스의 영향, 서울대학교 박사학위논문, p184, 1995.
- 강윤석, 남해 동부 연안의 패류 및 저질 중의 중금속 함유량에 관한 연구, 경남대학교 환경보호학과 석사학위 논문, 1992.
- 경기공영개발단, 팔당호 준설 및 효율적 관리방안 조사연구 보고서, p414, 1990.
- 국립환경연구원 금강수질검사소, 금강수계 상수원 수질조사, 1998a.
- 국립환경연구원 금강수질검사소, 대청호 영양염류 오염부하량 관리방안에 관한 연구(I), 1998b.
- 국립환경연구원 금강수질검사소, 대청호 영양염류 오염부하량 관리방안에 관한 연구(II), 1999.
- 국립환경연구원, 팔당 상수원 보호 종합 대책에 관한 연구 (III), NIER No. 90-17-291, 1990.
- 국립환경연구원, 호소 내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구 (II) : 오염하천 유입부의 물질순환 및 식물의 정화능 평가, NIER No. 96-17-488, 1996.
- 국립환경연구원, 호소 부영양화방지 대책에 관한 연구(I) -안동호, 주암호를 중심으로-, 1992.
- 국립환경연구원, 호소, 하천 퇴적물의 조사, 1997.
- 권영택, 마천 주물공업단지를 중심으로 한 토양, 하천 및 연안 퇴적물의 중금속 함량, 경남대학교 환경연구소 연구보고, 14, pp.153-162, 1992.
- 권영택, 중공업단지 하천퇴적물의 중금속 오염특성-창원 남천을 중심으로-, 경남대학교 환경연구소 환경연구, 15, pp.5-15, 1993.
- 김귀영 외, 동해연안 해양오염 및 적조조사, 동해수산연구소 사업보고서, pp.97-128, 1997.
- 김귀영 외, 동해연안 해양오염 측정망 및 적조조사, 동해수산연구소 사업보고서, pp.123-157, 1999.
- 김귀영 외, 어장환경오염 및 적조조사, 동해수산연구소 사업보고서, pp.134-158, 1996.
- 김귀영 외, 어장환경오염조사, 동해수산연구소 사업보고서, pp.47-66, 1995.
- 김복기 외, 동해연안 해양오염 및 적조조사, 동해수산연구소 사업보고서, pp.115-156, 1998.
- 김봉진, 남해연안 해양퇴적물내 인과 중금속의 존재형태에 관한 연구, 경남대학교 환경보호학과 석사학위 논문, 1993.
- 김창모, 하천 유기퇴적물 오염현황 및 특성연구, 한양대학교 환경대학원 석사학위 논문, 1999.
- 김학균 외, 연안 유해오염물질 동태 연구, 수진사업보고서, 국립수산진흥원, pp.371-379, 1996.
- 노장규, 마산·진해만 해역환경 구성인자의 중금속 오염 특성, 경남대학교 석사학위 논문, 1995.
- 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 만운지구 강우시 수질조사 및 저질조사 연구, 1999a.

- 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 삽교지구 유입하천·호소 저질 조사 및 강우시 수질조사(최중), 1999b.
- 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 왕궁, 감돈지구 유입하천 호소, 저질 조사 및 강우시 수질조사, 1999c.
- 마산시, 마산만 퇴적오니 준설 2단계 실시 설계 보고서, 1992.
- 박동규, 남해연안 해양퇴적물의 저질 산소요구량과 영양염류 용출, 경남대학교 석사학위 논문, 1995.
- 박영동, 오염된 퇴적물 준설을 위한 퇴적물 환경기준 설정에 관한 연구, 강원대학교 석사학위 논문, p48, 1998.
- 박종수, 원문만 해저 퇴적물중 인의 존재형태와 용출, 부산수산대학교 환경공학과 석사학위 논문, 1993.
- 백성복, 주남저수지 퇴적물내 인과 중금속의 존재형태별 분포 특성, 창원대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1998.
- 백철인 외, 남해연안 해양오염 및 적조조사, 남해수산연구소 사업보고서, pp.73-119, 1997.
- 백철인 외, 남해연안 해양오염 및 적조조사, 남해수산연구소 사업보고서, pp.84-145, 1998.
- 안병영, 퇴적물의 오염도 및 생태위해성 평가를 위한 중금속 존재 형태 규명, 경남대학교 환경보호학과 석사학위 논문, 1998.
- 양한섭, 김성수, 김규범, 진해만 퇴적물의 퇴적속도와 중금속 오염, Journal of the Korean Environmental Sciences Society, 4(5), pp.489-500, 1995.
- 오근창, 전남해안 표층퇴적물의 중금속 함유량에 관한 연구, 전남대학교 자원공학과 석사학위 논문, 1995.
- 오현주, 청평호 퇴적물의 오염현황 및 퇴적물이 수중 인 농도에 미치는 영향, 고려대학교 토목환경공학과 석사학위 논문, 1999.
- 윤석태 외, 함평만 표층퇴적물과 금속원소들의 분포특성, 한국환경과학회지, 8(6), pp.677-689, 1999.
- 윤양호, 완도 신지도 연안해역 표층퇴적물 중의 유기물 분포에 대하여, 여수대학교 논문집, 13(2), pp.1135-1151, 1998.
- 이길영, 금강호 내 퇴적 분포 및 처리방안 연구, Journal of the Institute of Industrial Technology(Taejon Univ.), 10(2), pp.73-86, 1999.
- 이동훈, 인천연안 퇴적물중 PCB의 분포에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1999.
- 이민영, 중량천유역의 심층수 및 퇴적표토 중에 함유된 중금속 오염도 연구, 고려대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1995.
- 이유대, 노영재, 수영만의 퇴적물 및 중금속 분포에 관한 연구, Journal of the Korean Earth Science Society, 12(4), pp.362-370, 1991.
- 이종현 외, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성, Journal of the Korean Society of

- Oceanography, 3(3), pp.103-111, 1998.
- 이창희, 수질오염총량관리제의 시행현황 및 발전방향. 환경포럼, 한국환경정책평가연구원, 2000.
- 이창희, 김은정, 팔당호 퇴적물의 오염현황 및 관리방안. 환경포럼, 한국환경정책·평가연구원, 1999.
- 이창희, 김은정, 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국환경정책·평가연구원, p138. 1998.
- 이창희, 수질정보시스템 구축현황과 발전방향, 환경포럼, 한국환경정책·평가연구원, 1998.
- 이필용 외, 남해 연안어장 환경오염 및 적조조사, 남해수산연구소 사업보고서, pp.417-459, 1996.
- 이흥재 외, 적조해역 퇴적물 정화 기술 연구, 수진사업보고서, 국립수산진흥원, pp.380-390, 1997.
- 임홍탁, 호소의 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출에 관한 연구 -소양호의 적조수역을 중심으로-, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문, 1991.
- 전기정, 창원 기계공업단지 하천 퇴적물의 중금속 오염도 변화에관한 연구, 경남대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1995.
- 정팔진 외, 하상퇴적물의 오염실태 조사분석, 도시 및 환경연구, 13, 전북대학교, pp.1-7, 1998.
- 조규홍, 안양천 수질 및 저질 오염도 조사, 아주대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1991.
- 조기찬, 한강유역 주요지천 하상저질층의 중금속 분포특성에 관한 조사연구, 건국대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1995.
- 조영길 외, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, 한국환경과학학회지, 7(3), pp.281-290, 1998.
- 조현서 외, 목포 북항 주변해역의 저질오염 특성, 여수대학교 수산과학연구소 연구보고, 7, pp.173-180, 1998.
- 진현국 외, 연안 유해오염물질 동태 연구, 수진사업보고서, 국립수산진흥원, pp.405-419, 1997.
- 최만식 외, 시화호 표층퇴적물의 중금속 및 퇴적상 변화, 한국환경과학학회지, 8(5), pp.593-600, 1999.
- 최지용, 신은성, 수질환경 및 규제기준의 합리적 조정, 한국환경정책·평가연구원, p157, 1997.
- 한국수자원공사, 기술지원보고서 -다목적댐 저수지 퇴적물 준설 타당성 연구-, 1999.
- 한국수자원공사, 댐저수지 유기퇴적물 분포 및 처리방안 연구(1차년도): 1996, 1996.
- 한국수자원공사, 댐저수지 유기퇴적물 분포 및 처리방안연구(2차년도), 1997.
- 한국수자원공사, 연구요약보고서, pp.572~585, 1996.
- 해양수산부, 오염해역정화사업 관련(내부자료), 2000.
- 해양수산부, 해양환경공정시험방법, p317, 1998.
- 해양수산부, 해양환경기준(퇴적물)개선 연구용역, p86, 1999.
- 환경부, 서남해안 갯벌 생태계 조사 보고서, 1998.
- 환경부, 수질환경기준 개선방안, p108, 2000.

- 환경부, 연안 저서환경 평가기술 (제 3차년도 최종 보고서), p786, 1999.
- 환경부, 오염하천정화사업 관련(내부자료), 2000.
- 환경부, 전국호소 환경현황조사 및 주요호소 영향권역설정 최종보고서, 1994.
- 환경부, 전국호소 환경현황조사 및 주요호소 영향권역설정(2차) 보고서, 1995.
- 환경처, 공지천 정화사업 기본계획 및 실시 설계 보고서, 1987.
- 환경처, 팔당호퇴적물준설사업 환경영향평가, p674, 1993.
- 황종연 외, 금강권역의 호소 및 하천 퇴적물 특성 비교, 환경영향평가, 7(2), pp.135-143, 1998.
- BC(British Columbia), Criteria for Managing Contaminated Sediment in British Columbia. Ministry of Environment, Lands and Parks, pp.35-41, 1999.
- CCME(Canadian Council of Ministers of the Environment), Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Report CCME EPA-98E, 1995.
- Environment Canada, Canadian Sediment Quality Guidelines, 1998.
- FDEP(Florida department of Environmental Protection), Approach to the Assessment of Sediment Quality in Florida Coastal Waters (Volume I -Development and Evaluation of Sediment Quality Assessment Guidelines), p126, 1994a.
- FDEP(Florida department of Environmental Protection), Approach to the Assessment of Sediment Quality in Florida Coastal Waters (Volume II - Application of the Sediment Quality Assessment Guidelines), p52, 1994b.
- Hosper, S.H. and M.-L. Meijer, Control of phosphorus loading and flushing as restoration methods for lake Veluwe. The Netherlands. Hydrobiol. Bull, 20, pp.183-194, 1986.
- Kleeberg, A. and H.P. Kozerski, Phosphorus release in Lake Großer Müggelsee and it's implications for lake restoration. Hydrobiologia 342/343, pp.9-26, 1997.
- Lee, K.-T., S. Tanabe, and C.-H. Koh, Application of Equilibrium Partitioning Approach for the Assessment of Polychlorinated Biphenyls(PCBs) Contamination in Sediment from Kyeonggi Bay, Namyang Bay, and lake Shihwa, West Coast of Korea. J. Korean Society of Oceanography, 33(1), pp.36-42, 1999.
- Lijklema, L., Phosphorus accumulation in sediments and internal loading, Hydrobiol. Bull, 20, pp.213-224, 1986.
- Long, E.R. and D.D. MacDonald, Recommended Uses of Empirically Derived, Sediment Quality Guidelines for Marine and Estuarine Ecosystems. Human and Ecological Risk Assesment, 4(5), pp.1019-1039, 1998.
- Long, E.R., L.J. Field, and D.D. McDonalds, Predicting Toxicity in Marine Sediments with Numerical Sediment Quality Guidelines. Environment Toxicology and Chemistry, 17(4), pp.714-727, 1998.
- Long, E.R. and L.G. Morgan, The potential for biological effects of sediment sorbed

- contaminants tested in the National Status and Trends Program, NOSOMA 52, NOAA, Seattle, Washington, 1990.
- Lopez, P. and J.A. Morgui, Factors influencing fractional phosphorus composition in sediment of Spanish reservoirs. *Hydrobiologia*, 253, pp. 73-82, 1993.
- MacDonalds, D.D., C.G. Ingersoll, and T.A. Berger. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. *Arch. Environ. Contam. Toxicol*, 39, pp.20-31, 2000.
- MDWPC(Massachusetts Division of Water Pollution Control), 314 CRM 9.07 Criteria for The Evaluatuion of Application for Dredging and Material Disposal, 1995.
- NJDEP(New Jersey Department of Environmental Protection), Guidance For Sediment Quality Evaluations, 1998.
- NOAA, Sediment Quality Guidelines Developed for the National Status and Trends Program.
URL:<http://response.restoration.noaa.gov/cpr/sediment/sediment.html>, 1999.
- NYSDEC(New York State Department of Environmental Conservation), Technical Guidance for Screening Contaminated Sediments. Division of Fish and Wildlife. Division of Marine Resources. New York, pp.20-26, p39, 1999.
- OMOE(Ontario Ministry of the Environment), Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario, pp.3-5, 1993.
- Persaud, D., R. Jaagumagi, and A. Hayton, Guidelines for the protection and management aquatic sediment quality in Ontario, ISBN 0-7729-9248-7, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Canada, p23, 1992.
- TNRCC(Texas Natural Resource Conservation Commission), Draft Guidance for Screening and Assessing Texas Surface and Finished Drinking Water Quality Data, pp.47-56, 2000.
- Ulrich, K-U., Effects of land use in the drainage area on phosphorus binding and mobility in the sediment of four drinking-water reservoirs. *Hydrobiologia*, 345, pp.21-38, 1997.
- USEPA & USACE, Evaluation of Dredged Material Proposed for Discharge in Waters of the U.S.-Testing Manual, EPA 823-B-98-004, 1998a.
- USEPA & USACE, Evaluation of Dredged Material Proposed for Ocean Disposal-Testing Manual, EPA 503/8-91, 1991.
- USEPA and USACE, Great Lakes Dredged Material Testing and Evaluation Manual(Final Draft), 1998b.
- USEPA, Garcia River Sediment Total Maximum Daily Load, USEPA Region 9, 1998c.
- USEPA, Noyo River Total Maximum Daily Load for Sediment, USEPA Region 9, 1999a
- USEPA, Protocol for Developing Sediment TMDLs. EPA841-B-99-004, 1999b.

- USEPA, South Fork Eel River Total Maximum Daily Loads for Sediment and Temperature, USEPA Region 9, 1999c.
- USEPA, South Fork Trinity River and Hayfork Creek Sediment Total Maximum Daily Loads, USEPA Region 9, 1998.
- USEPA, The Incidence and Severity of Sediment Contamination in Surface Waters of the United States, Vol. I: National Sediment Quality Survey, EPAOST, EPA 823-R-97-006, 1997a.
- USEPA, The Incidence and Severity of Sediment Contamination in Surface Waters of the United States, Vol. II: Data Summaries for Areas of Probable Concern, EPAOST, EPA 823-R-97-007, 1997b.
- USEPA, The Incidence and Severity of Sediment Contamination in Surface Waters of the United States, Vol. III: National Sediment Contaminant Point Source Inventory, EPAOST, EPA 823-R-97-008, 1997c.
- USEPA, Total Maximum Daily Load(TMDL) Development for Sediment Little Shoals Creek, USEPA Region 4, 2000a.
- USEPA, Total Maximum Daily Load(TMDL) Development for Sediment Middle Fork Broad River, USEPA Region 4, 2000b.
- USEPA, Total Maximum Daily Load(TMDL) Development for Sediment North Fork Broad River, USEPA Region 4, 2000c.
- USEPA, Total Maximum Daily Load(TMDL) Development for Sediment South Fork Broad River, USEPA Region 4, 2000d.
- USEPA, Total Maximum Daily Load(TMDL) Development for Sediment Stekoa Creek, USEPA Region 4, 2000e.
- USEPA, Total Maximum Daily Load(TMDL) Development for Sediment Toccoa Creek, USEPA Region 4, 2000f.
- USEPA, Van Duzen River and Yager Creek Total Maximum Daily Load for Sediment, USEPA Region 9, 1999d.
- USEPA. Sediment TMDLs for Newport Bay and Sea Diego Creek. USEPA Region 9, p32, 1998b.
- USEPA. Total Maximum Daily Load for Sediment Redwood Creek, California. USEPA Region 9, p.71, 1998c.
- Van Raaphorst W. and A.G. Brinkman, The calculation of transport coefficients of phosphate and calcium fluxes across the sediment-water interface from experiments with undisturbed sediment cores. Water Sci. Technol. 17, pp.941-951, 1985.
- WDNR(Wisconsin Department of Natural Resources), Process Steps for Assessing Sediment Quality and Developing Sediment Quality Objectives Protective of

Human Health, Aquatic Organisms (Water Column and Benthic) and Aquatic Dependent Wildlife (Table), 1999.

WDNR(Wisconsin Department of Natural Resources). Guidance for Sediment Assessment in the State of Wisconsin, p64, 1995.

WSDE(Washington Department of Ecology), Creation and Analysis of Freshwater Sediment Quality Values in Washington State, Publication No. 97-323a, 1997., Creation and Analysis of Freshwater Sediment Quality Values in Washington State, Publication No. 97-323a, 1997.

WSDE(Washington State Department of Ecology), Sediment Quality Chemical Criteria. WAC 173-204-320(a), WAC 173-204-420(a), WAC 173-204-520(a), 1998.

[부표 1] 미국 주정부의 퇴적물질기준 설정사례

〈부표 1-1〉 뉴욕주의 금속에 대한 퇴적물질권고기준

항목	LEL ¹⁾ (µg/g)	SEL ²⁾ (µg/g)
Sb	2.0(P)	25.0(L)
As	6.0(P)	33.0(P)
Cd	0.6(P)	9.0(L)
Cr	26.0(P)	110.0(P)
Cu	16.0(P)	110.0(P)
Fe(%)	2.0%(P)	4.0%(P)
Pb	31.0(P)	110.0(L)
Mn	460.0(P)	1100.0(L)
Hg	0.15(P)	1.3(L)
Ni	16.0(P)	50.0(L)
Ag	1.0(P)	2.2(L)
Zn	120.0(P/L)	270.0(L)

1) Lowest Effect Level: Persaud et al(1992)의 Lowest Effect Level과 Long and Morgan(1990)의 Effect Range-Low값 중 작은 값

2) Severe Effect Level: Persaud et al(1992)의 Severe Effect Level과 Long and Morgan(1990)의 Effect Range-Moderate값 중 작은 값

L: Long and Morgan(1990)의 값을 따름

P: Persaud et al(1992)의 값을 따름

〈부표 1-2〉 뉴욕주의 무극성 유기오염물질에 대한 퇴적물질권고기준

항목	적용	보호 수준			
		국민건강에 대한 생물농축 ($\mu\text{g/g OC}$)	저서생물 급성독성 ($\mu\text{g/g OC}$)	저서생물 만성독성 ($\mu\text{g/g OC}$)	야생생물 생물농축 ($\mu\text{g/l}$)
Acenaphthene	FW SW			140(E) ²⁾ 240(E) ¹⁾	
Aldrin & Dieldrin	FS	0.1			0.77
Azinphosmethyl	FW SW			0.001 0.003	
Azobenzene	FS	1.0			
Benzene	FS	0.6			
Benzo(a)pyrene ³	FW SW	1.3 0.7			
Benzidine	FW	0.003			
Bis(2-chloroethyl)ether	FS	0.03			
Bis(2-ethylexyl)phthalate	FW			199.5	
Carbofuran	FW		1.82	0.2	
Carbon tetrachloride	FS	0.6			
Chloradane	FW SW	0.001 0.001	1.4 0.05	0.03 0.002	0.006 0.006
Chlorobenzene	FS		34.6	3.5	

* FW(Fresh Water): 담수퇴적물에 적용, SW (Salt Water): 해양퇴적물에 적용

FS (Fresh-Salt Water: 담수, 해양퇴적물 모두 적용)

(표 계속)

항목	적용	보호 수준			
		인간의 건강에 대한 생물농축 ($\mu\text{g/g}$ OC)	저서생물 급성독성 ($\mu\text{g/g}$ OC)	저서생물 만성독성 ($\mu\text{g/g}$ OC)	야생생물 생물농축 ($\mu\text{g/l}$)
Chloro-o-toluidine	FS	0.65			
Chlorpyrifos	FW		10.7	5.3	
	FS		1.4	0.72	
DDT, DDD, & DDE ⁴	FW	0.01	1100	1.0	1.0
	SF	0.01	130	1.0	1.0
Diazinone	FW			0.007	
Dichlorobenzene	FS		120.0	12.0	
1,2 Dichloroethane	FS	0.7			
1,1 Dichloroethylene	FS	0.02			
Dieldrin	FS	0.1		9.0(E) ⁵⁾	
	SW	0.1		17.0(E)	
Diphenylhydrazine	FS	0.58			
Endosulfan	FW		0.78	0.03	
	SW		0.12	0.004	
Endrin	FW			4.0(E) ¹⁾	
	SW	0.8		0.73(E) ¹⁾	0.8
Fluoranthene	FW			1020(E) ¹⁾	
	SW			1341(E) ¹⁾	

(표 계속)

항목	적용	보호 수준			
		인간의 건강에 대한 생물농축 ($\mu\text{g/g OC}$)	저서생물 급성독성 ($\mu\text{g/g OC}$)	저서생물 만성독성 ($\mu\text{g/g OC}$)	야생생물 생물농축 ($\mu\text{g/l}$)
Heptachlor& Heptachlor Epoxide	FW SW	0.0008 0.0008	13.1 1.3	0.1 0.09	0.03
Heptachlorbenzene	FW	0.15	9081	5570	12
Heptachlorbutadien	FW	0.3	55.0	5.5	4
	SW	0.3	16.4	1.6	4
Hexachlorocyclohexanes	FW	0.06	12.6	0.06	1.5
	SW	0.06	1.0	0.03	1.5
Hexachlorocyclopentadien	FW		44.0	4.4	
	SW		6.8	0.7	
Isodecyldiphenyl phosphate	FW		5526	427	
Linear AlkylBenzene Sulfonates	FW			373	
Malathion	FS			0.02	
Methoxychlor	FS			0.6	
Mirex	FS	0.07		0.7	3.7
Octachlorostyrene	FS				0.5
Parathion and Methyl Parathion	FW		0.02	0.003	

(표 계속)

항목	적용	보호 수준			
		인간의 건강에 대한 생물농축 ($\mu\text{g/g OC}$)	저서생물 급성독성 ($\mu\text{g/g OC}$)	저서생물 만성독성 ($\mu\text{g/g OC}$)	야생생물 생물농축 ($\mu\text{g/l}$)
Pentachlorophenol	FW		100	40	
Penanthrene	FW SW			120(E) ⁶⁾ 160(E) ¹⁾	
1,1,2,2-Tetrachloroethane	FS	0.3			
Tetrachloroethylene	FS	0.8			
o-Toluidine	FS	0.5			
Toxaphene	FW SW	0.02 0.02	3.2 0.14	0.01 0.01	
Trichloroethylene	FS		910	91	
1,1,2-Trichloroethane	FS	0.6			
Trichloroethylene	FS	2.0			
Triphenyl phosphate	FW		1556	456	
Vinyl Chloride	FS	0.07			
Anthracene	FW		986	107	
Benz(a)anthracene	FW		94	12	
Benzene	FW SW		103 90	28 26	
Ethylbenzene	FW SW		212 58	24 6.4	
Fluorene	FW SW		73 348	8 38	

(표 계속)

항목	적용	보호 수준			
		인간의 건강에 대한 생물농축 ($\mu\text{g/g}$ OC)	저서생물 급성독성 ($\mu\text{g/g}$ OC)	저서생물 만성독성 ($\mu\text{g/g}$ OC)	야생생물 생물농축 ($\mu\text{g/l}$)
Isopropylbenzene(cumene)	FW		105	12	
2-methylnaphthalene	FW		304	34	
	SW		348	30	
Naphthalene	FW		258	30	
	SW		328	38	
Pyrene	FW		8775	961	
Toluene	FW		235	49	
	SW		211	45	
1,2,4-trimethylbenzene	FW		1631	186	
	SW		956	107	
Xylene	FW		833	92	
	SW		240	27	

사용된 수질 권고치는 Togs 1.1.1.로부터 얻어짐, 만약 수질 권고치가 Togs 1.1.1.에 없을 경우 EPA 권고치를 사용하고 접미사 (E)로 표시함. EPA 권고치는 "Water Quality Criteria Summary"(EPA, 1991)로부터 구해짐. 인간의 건강 보호를 위한 EPA 수질 권고치는 "Recalculated Values-Organisms Only"column으로부터 얻어짐. 만약 TOGS1.1.1. 권고치가 존재하지 않는다면 야생생물과 인간건강 보호를 위한 권고치는 Appendix1을 인용. 비록 이 권고치는 단지 제안된 것이지만 잠재적 인간 건강 위험성을 평가하는 유용한 기준이 됨. 이 권고치는 "Proposed criteria values"를 나타내는 접미사 (P)로 표시함.

2) EPA는 저서생물 보호에 대한 퇴적물질 권고치를 제안함

3) 이 값은 benz(a)anthracene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, chrysene, indeno(1,2,3-cd)pyrene, 그리고 methylbenz(a)anthracene에만 적용됨

4) 저서생물에 대한 급성, 만성독성 권고치는 DDT에만 적용됨

5) EPA는 저서생물 보호에 대한 퇴적물질 권고치를 제안함

〈부표 1-3〉 뉴저지주의 퇴적물질예비기준

항목	담수 퇴적물		해수 퇴적물	
	LEL ¹⁾ (mg/kg, 건중량)	SEL ²⁾ (mg/kg, 건중량)	ER-L ⁴⁾ (mg/kg, 건중량)	ER-M ⁵⁾ (mg/kg, 건중량)
금속				
As	6	33	8.2	70
Cd	0.6	10	1.2	9.6
Cr	26	110	81	370
Cu	16	110	34	270
Pb	31	250	47	218
Hg	0.2	2.0	0.15	0.71
Ni	16	75	21	52
Ag	(해수 참조) ³⁾	--	1	3.7
Zn	120	820	150	410
Organics	담수 퇴적물		해수 퇴적물	
	LEL ¹⁾ (mg/kg, 건중량)	SEL ²⁾ (mg/kg OC, 건중량)	ER-L ⁴⁾ (mg/kg, 건중량)	ER-M ⁵⁾ (mg/kg, 건중량)
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs)				
Anthracene	0.220	370	0.085	1.1
Acenaphthene	(해수 참조) ³⁾	--	0.016	0.500
Acenaphthylene	(해수 참조) ³⁾	--	0.044	0.640
Benzo[a]anthracene	0.320	1480	0.261	1.6
Benzo[k]fluoranthene	0.240	1340	(담수 참조) ⁶⁾	--
Benzo[a]pyrene	0.370	1440	0.430	1.6
Benzo[g,h,i]perylene	0.170	320	(담수 참조) ⁵⁾	--
Chrysene	0.340	460	0.384	2.8
Dibenzo[a,h]anthracene	0.060	130	0.063	0.26
Fluoranthene	0.750	1020	0.600	5.1
Fluorene	0.190	160	0.019	0.54
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.200	320	(담수 참조) ⁵⁾	--
2-methylnaphthalene	(해수 참조) ³⁾	--	0.070	0.67
Naphthalene	(해수 참조) ³⁾	--	0.16	2.1
Phenanthrene	0.560	950	0.240	1.5
Pyrene	0.490	850	0.665	2.6
Total PAH	4.0	10000	4.0	45.0

(표 계속)

항목	담수 퇴적물		해수 퇴적물	
	LEL ¹⁾ (mg/kg, 건중량)	SEL ²⁾ (mg/kg OC, 건중량)	ER-L ⁴⁾ (mg/kg, 건중량)	ER-M ⁵⁾ (mg/kg, 건중량)
Pesticides				
Aldrin	0.002	8.0	(담수 참조) ⁵⁾	--
BHC-α	0.006	10	--	--
BHC-β	0.005	21	--	--
γ-BHC(Lindane)	0.003	1	--	--
BHC	0.003	12	(담수 참조) ⁵⁾	--
Chlodane	0.007	6	(담수 참조) ⁵⁾	--
Dieldrin	0.002	91	(담수 참조) ⁵⁾	--
Endrin	0.003	130	(담수 참조) ⁵⁾	--
DDT(Total)	0.007	12	0.0016	0.046
op+pp-DDT	0.008	71	--	--
pp-DDD	0.008	71	--	--
pp-DDE	0.008	71	0.0022	0.027
Hexachlorobenzene(HCB)	0.02	24	(담수 참조) ⁵⁾	--
Heptachlor epoxide	0.05	5	(담수 참조) ⁵⁾	--
Mirex	0.007	130	(담수 참조) ⁵⁾	--
Polychlorinated Biphenyls				
PCB-1016	0.007	53	--	--
PCB-1248	0.03	150	--	--
PCB-1254	0.06	34	--	--
PCB-1260	0.005	24	--	--
PCB(Total)	0.070	530	0.023	0.180

1) Lowest Effects Levels(LELs)는 저서생물에 대한 악영향이 시작될 수 있는 농도를 나타낸다. 만약 PCB, organochlorine, 살충제, 수은 등이 LEL 이상이면 수중 생물이나 야생 생물은 먹이 사슬에 의한 독성 축적이 일어날 수 있는 잠재적 위험이 있다. 온타리오 screening number에 없는 독성 축적을 일으킬 수 있는 물질들(dioxins, furans, other chlorinated organics, selenium)은 상황에 따라 평가된다.

2) Severe Effects Levels(SEL)은 대부분의 경우 저서 군집중에 심한 악영향을 끼치는 농도이다. 무극성 유기물질에 대해 SEL은 지역 특성의 TOC level로부터 계산되었다. 표의 SEL값이 100% 유기탄소를 기초로 계산되었기 때문에 계산된 지역특성의 값은 더 낮다. SEL을 계산하기 위해, TOC는 표의 SEL값과 곱해진다. 1% TOC에 대해, 만약 표의 SEL이 360ppm이면, SEL은 $360 \times 0.01 = 3.6\text{ppm}$ 이 된다. TOC값을 알 수 없는 경우 default값 0.01이 사용된다. 10% TOC는 SEL계산에 대한 상한값이다. 1%와 10% TOC는 이 조사가 시행된 지역의 평균 범위를 나타낸다(USEPA, 1988).

3) <담수 퇴적물>에 적당한 값이 없으면 <해수 퇴적물>을 참조하라. 무극성 유기물질의 생물학적 거동은 하구, 해양 환경에서와 크게 다르지 않다. 따라서 <해수 퇴적물>의 값이 대신 사용될 수 있다. 금속은 두 값이 차이가 있으므로 온만 <해수 퇴적물>의 값이 대신 할 수 있는 값으로 제안된다.

4) Effects Range-Low(ER-L)은 연구의 약 10%에서 저서생물에 대한 악영향이 관찰되는 농도를 나타낸다. 만약 PCB, organochlorine, 살충제, 수은 등이 ER-L 이상이면 수중 생물이나 야생 생물은 먹이 사슬에 의한 독성 축적이 일어날 수 있는 잠재적 위험이 있다. NOAA screening number에 없는 독성 축적을 일으킬 수 있는 물질들(dioxins, furans, other chlorinated organics, selenium)은 상황에 따라 평가된다.

5) Effects Range-Median(ER-M)은 이 이상에서는 연구된 50%이상에서 저서생물에 대한 악영향이 나타나는 농도를 의미한다.

6) <해수 퇴적물>에 적당한 값이 없으면 <담수 퇴적물>을 참조하라. 무극성 유기물질의 생물학적 거동은 담수 환경에서와 크게 다르지 않다. 따라서 <담수 퇴적물>의 값이 대신 사용될 수 있다.

<부표 1-4> 뉴저지주의 휘발성 유기물질에 대한 퇴적물질예비기준

항목	만성 기준 (mg/kg, 건중량 @1%TOC)	Log ₁₀ K _{OW} (Montgomery and Welkom, 1990)
Volatile Organics		
Benzene	0.34 ²⁾	1.69-2.12
Ethylbenzene	1.4 ²⁾	3.05-3.15
Tetrachloroethylene	0.45 ²⁾	2.1-2.9
Toluene	2.5 ²⁾	2.11-2.80
Trichloroethylene	1.6 ²⁾	2.29-3.3
Xylene	> 0.12 ³⁾	2.77-3.2(o,m,p)

1) 모든 권고기준은 해양 생물체의 보호를 위해 설정되었다. 그러나, 이 연구에서는 담수 환경에 대한 대응값으로 사용되었다.

2) Bolton, S.H., R.J.Breteler, B.W.Yigon, J.A.Scanlon and S.L.Clark.1985. National perspective on sediment quality(EPA제공, 194pp MacDonald et al.,1992).

3) Barrick, R., S.Becker, L.Brown, H.Beller and R.Pastorok.1988. Sediment quality values refinement:1988 update and evaluate of Puget Sound AET.Vol.1.(Puget Sound Estuary Program제공, PTI Environment Services, Bellevue, Wa.74pp. +appendices. MacDonald et al.,1992)

〈부표 1-5〉 워싱턴주의 퇴적물 관리기준 (푸젯만 퇴적물에 적용)

항목	퇴적물 관리기준	
	SQS	SIZ _{max} , CSL, MCUL
금속	(mg/kg 건중량)	
As	57	93
Cd	5.1	6.7
Cr	260	270
Cu	390	390
Pb	450	530
Hg	0.41	0.59
Ag	6.1	6.1
Zn	410	960
Nonionizable Organic Compounds	(mg/kg OC)	
Aromatic Hydrocarbons		
Total LPAH ¹⁾	370	780
Naphthalene	99	170
Acenaphthylene	66	66
Acenaphthene	16	57
Fluorene	23	79
Phenanthrene	100	480
Anthracene	220	1200
2-Methylnaphthalene	38	64
Total HPAH ²⁾	960	5300
Fluoranthene	160	1200
Pyrene	1000	1400
Benz(a)anthracene	110	270
Chrysene	110	460
Total Benzofluoranthenes ³⁾	230	450
Benzo(a)pyrene	99	210
Indeno(1,2,3,-c,d)pyrene	34	88
Dibenzo(a,h)anthracene	12	33
Benzo(g,h,i)perylene	31	78

(표 계속)

항목	퇴적물 관리기준	
	SQS	SIZ _{max} , CSL, MCUL
Chlorinated Benzenes		
1,2-Dichlorobenzene	2.3	2.3
1,4-Dichlorobenzene	3.1	9
1,2,4-Trichlorobenzene	0.81	1.8
Hexachlorobenzene	0.38	2.3
Nonionizable Organic		
Phthalate Esters	(mg/kg OC)	
Dimethyl phthalate	53	53
Diethyl phthalate	61	110
Di-n-butyl phthalate	220	1700
Butyl benzyl phthalate	4.9	64
Bis(2-ethylhexyl) phthalate	47	78
Di-n-octyl phthalate	58	4500
Miscellaneous		
Dibenzofuran	15	58
Hexachlorobutadiene	3.9	6.2
N-nitrosodiphenylamine	11	11
Total PCBs	12	65
Ionizable Organic Compounds	(µg/kg 건중량)	
Phenol	420	1200
2-Methylphenol	63	63
4-Methylphenol	670	670
2,4-Dimethylphenol	29	29
Pentachlorophenol	360	690
Benzyl alcohol	57	73
Benzoic acid	650	650

CLS: 정화 스크린 수준(cleanup screening level)

HPAH: high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbon

LPAH: low molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbon

MCUL: minimum cleanup level

ML: maximum cleanup level

SIZ_{max}: sediment impact zone maximum allowable contaminant level(WAC 173-204-420)

SL: screening level

SQS: sediment quality standards(WAC 173-204-320)

1) LPAH, sum of the low molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbon(Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene) 그러나 HPAH 화합물 각각의 합이 아님

2) HPAH, sum of the high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbon(Fluoranthene, Pyrene, Benz(a)anthracene, Chrysene, Total Benzo(a)fluoranthenes, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, Dibenz(a,h)anthracene, Benzo(g,h,i)perylene) 그러나 HPAH 화합물 각각의 합이 아님

3) Total Benzo(a)fluoranthenes, Benzo(a)fluoranthenes의 isomer b,j,k 농도의 합

자료: Washington Department of Ecology(1995)

〈부표 1-6〉 워싱턴주의 담수퇴적물 환경기준 (안)

항목	기준	
	LAET ¹⁾	FSQV ²⁾
PAH	($\mu\text{g/kg}$ 건중량)	
Naphthalene	46,000	37,000
Acenaphthylene	2,200	1,900
Acenaphthene	4,100	3,500
Fluorene	4,200	3,600
Phenanthrene	15,000	5,700
Anthracene	2,800	2,100
TOTAL LPAH	74,000	27,000
Fluoranthene	21,000	11,000
Pyrene	23,000	9,600
Benz(A)Anthracene	7,700	5,000
Chrysene	11,000	7,400
Total Benzofluoranthenes	16,000	11,000
Benzo(A)Pyrene	11,000	7,000
Indeno(1,2,3-Cd)Pyrene	760	730
Dibenzo(A,H)Anthracene	230	230
Benzo(G,H,I)Perylene	1,400	1,200
TOTAL HPAH	91,000	36,000
TOTAL PAH	170,000	60,000
Misc Organics	($\mu\text{g/kg}$ 건중량)	
Bis(2-Ethylhexyl)Phthalate	750	640
Di-N-Butyl Phthalate	43	-
Dibenzofuran	32,000	-
Carbozole	140	140
Phenol	48	-

(표 계속)

항목	기준	
	LAET ¹⁾	FSQV ²⁾
Chlorinated Organics		
Heptachlor Epoxide	260	-
PCB-1248	21	21
PCB-1254	7.3	7.3
TOTAL PCB	21	21
Metals	(mg/kg 건중량)	
Antimony	3	-
Arsenic	40	57
Cadmium	7.6	5.1
Chromium total	280	260
Copper	840	390
Lead	260	450
Manganese	1,800	-
Mercury	0.56	0.41
Nickel	46	-
Silver	4.5	6.1
Zinc	520	410
Conventionals		
Sulfides	130	120
Ammonia	930	-
Total organic carbon (%)	14	14

1) LAET: Lowest AET between Microtox and *Hyalella* AET

2) FSQV: Freshwater Sediment Quality Values; Organics derived from PAET Microtox and Metals from Marine SMS

자료: WSDE(1997)

〈부표 1-7〉 텍사스주의 금속에 대한 퇴적물질예비기준

항목	TEL ¹⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		PEL ²⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
As	5.9	7.24	17.0	41.6	6.32	7.78	37.3	6.9
Ba	--	--	--	--	181.0	230.0	297.0	381.0
Cd	0.596	0.676	3.53	4.21	1.00	0.75	2.00	0.95
Cr	37.3	52.3	90.0	160.4	18.9	30.0	40.0	31.0
Cu	35.7	18.7	197.0	108.2	15.9	33.3	24.4	19.0
Pb	35	30.24	91.3	112.18	31.6	107.0	58.7	24.39
Mn	--	--	--	--	557.0	477.0	1400.0	662.0
Hgy	0.174	0.13	0.486	0.696	0.11	0.288	0.198	0.304
Ni	18.0	15.9	35.9	42.8	14.2	20.5	29.9	18.4
Se	--	--	--	--	1.42	1.24	2.8	2.19
Ag	--	0.73	--	1.77	1.0	1.5	1.6	0.92
Zn	123.1	124.0	315.0	271.0	75.9	180.0	156.0	97

1) PEL: 영향을 받는 독성 표본의 50th percentile과 영향을 받지 않는 85th percentile의 기하평균값으로 이 농도 이상이면 생물에 대한 악영향이 자주 관찰 됨

2) TEL: 독성 영향 데이터의 15th percentile과 영향이 없는 데이터의 median의 기하평균값으로 이 농도 이하이면 생물에 대한 악영향이 드물게 관찰 됨

〈부표 1-8〉 텍사스주의 유기물질에 대한 퇴적물질예비기준

항목	TEL ¹⁾ (µg/kg, 건중량)		PEL ²⁾ (µg/kg, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile (µg/kg, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Pesticides								
2,4-D					37.5	60.0	95.0	75.0
2,4,5-T					8.0	11.5	24.0	15.0
2,4,5-TP(silvex)					6.5	10.5	28.0	14.55
Aldrin					5.72	16.4	13.5	5.0
α-Hexachlorocyclohexane					6.53	17.5	23.45	5.0
β-Hexachlorocyclohexane					7.8	47.0	30.0	9.52
δ-Hexachlorocyclohexane					7.8	50.0	30.0	9.52
γ-Hexachlorocyclohexane(Indane)	0.94	0.32	1.38	0.99	5.74	15.0	13.6	2.5
Chlordane, total	4.5	2.26	8.9	4.79	30.6	200.0	80.0	24.0
Chlorpyrifos (dursban)					45.75	87.15	172.5	80.0
DDD,total					11.5	34.95	26.68	12.5
DDD,total					14.15	25.0	23.0	5.0
DDD,total	6.98	3.89	4450.0	51.7	12.0	28.65	19.95	10.0
Demeton					100.0	102.05	301.0	--
Diazinon					40.45	72.0	105.0	48.0
Dicofol(kelthane)					25.0	31.0	--	25.0
Dieldrin	2.85	0.715	6.67	4.3	6.1	14.3	11.0	4.5
Endosulfan					10.7	65.0	27.2	10.0
Endosulfan sulfate					7.65	41.0	19.95	12.5
Endrin	2.67	--	62.4	--	9.85	24.38	18.15	5.0
Guthion					62.5	96.0	172.5	84.7
Heptachlor					5.72	12.19	12.75	5.0

(표 계속)

항목	TEL ¹⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		PEL ²⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Heptachlor epoxide					6.8	27.8	23.45	5.0
Heptachlorobenzene	0.6	--	2.74	--	434.1	395.85	150	119.5
Malathion					40.45	72.0	96.6	25.0
Methoxychlor					12.5	59.0	32.95	15.0
Mirex					2.5	25.0	--	3.85
Parathion					40.4	71.3	83.9	25.0
PCB-1016					41.7	1000.0	179.5	115.0
PCB-1221					43.85	1000.0	179.5	115.0
PCB-1232					41.7	1000.0	179.5	115.0
PCB-1242					35.25	1000.0	179.5	115.0
PCB-1248					40.6	1000.0	179.5	120.0
PCB-1254					40.6	1000.0	179.5	115.0
PCB-1260					41.7	1000.0	174	115.0
PCB-total	34.1	21.55	277.0	188.79	61.5	107.0	82.0	95.15
Pentachlorobenzene					452.0	950.0	--	1.2
Toxaphene					98.5	451.0	179.0	100.0
Volatile Organic Substances								
Acrylonitrile					1150.0	1650.0	2650.0	1950.0
Benzene					250.0	312.5	500.0	390.0
Bromoform					250.0	315.0	550.0	390.0
Bromomethane					480.0	750.0	1300.0	980.0
Carbon tetrachloride					250.0	312.5	500.0	390.0
Chlorobenzene					250.0	390.0	550.0	390.0
Chlorodibromomethane					250.0	315.0	500.0	390.0
Chloroethane					550.0	750.0	1300.0	980.0
2-Chloroethyl vinyl ether					1900.0	3000.0	5750.0	3900.0

(표 계속)

항목	TEL ¹⁾ (µg/kg, 건중량)		PEL ²⁾ (µg/kg, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile (µg/kg, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Chloroform					300.0	312.5	500.0	390.0
Chloromethane					480.0	750.0	1300.0	950.0
Dichlorobromomethane					250.0	312.5	500.0	390.0
1,2-Dibromomethane					220.0	435.0	--	400.0
1,1-Dichloroethane					250.0	312.5	500.0	390.0
1,2-Dichloroethane					250.0	312.5	500.0	390.0
1,1-Dichloroethylene					245.0	335.0	500.0	390.0
1,2-trans-Dichloroethylene					250.0	335.0	550.0	395.0
1,2-Dichloropropane					250.0	312.5	500.0	390.0
cis-1,3-Dichloropropylene					250.0	315.0	500.0	390.0
trans-1,3-Dichloropropylene					250.0	315.0	500.0	390.0
Ethylbenzene					250.0	340.0	550.0	390.0
Methylene chloride					350.0	340.0	550.0	400.0
Tetrachloroethylene					250.0	435.0	550.0	390.0
1,1,2,2-tetrachloroethane					250.0	390.0	550.0	390.0
Toluene					312.5	360.0	550.0	390.0
1,1,1-trichloroethane					250.0	312.5	500.0	390.0
1,1,2-trichloroethane					250.0	315.0	500.0	390.0

(표 계속)

항목	TEL ¹⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		PEL ²⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Trichloroethylene					250.0	390.0	550.0	390.0
Xylene, total					650.0	950.0	1600.0	1150.0
Vinyl chloride					550.0	750.0	1300.0	980.0
Semivolatile Organics Substances								
Acenaphthene	--	6.71	--	88.9	767.0	1399.5	2400.0	1050.0
Acenaphthylene	--	5.87	--	127.87	767.0	1399.5	2400.0	1050.0
Anthracene	--	46.85	--	245.0	776.45	1800.0	2400.0	1050.0
Benzidine					1050.0	6650.0	3150.0	1430.0
Benzo(a)anthracene	31.7	74.83	385.0	692.53	776.45	1709.0	2400.0	1110.0
Benzo(a)pyrene	31.9	88.81	782.0	763.22	750.0	1709.0	2400.0	1200.0
Benzo(b)fluoranthene					776.45	1800.0	2400.0	1050.0
Benzo(ghi)perylene					750.0	1709.0	2400.0	1100.0
Benzo(k)fluoranthene					767.0	1709.0	2400.0	1200.0
4-Bromophenyl phenyl ether					767.0	1709.0	2400.0	1050.0
Cresols, total					1648.2	2297.0	4185.75	1700.0
Bis(2-chloroethoxy)met hane					776.45	1399.5	2400.0	1050.0
Bis(2-chloroethyl)ether					776.45	1399.5	2400.0	1050.0
Bis(2-chloroisopropyl)et her					767.0	1399.5	2400.0	1050.0
2-Chloronaphthalene					950.0	1970.0	2790.0	1050.0
2-Chlorophenol					1050.0	1950.0	2400.0	1500.0
4-Chlorophenyl phenyl ether					767.0	1709.0	2400.0	1050.0
Chrysene	57.1	107.77	862.0	845.98	776.45	1800.0	2400.0	1200.0

(표 계속)

항목	TEL ¹⁾ (µg/kg, 건중량)		PEL ²⁾ (µg/kg, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile (µg/kg, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Dibenz(a,h)anthracene	--	6.22	--	134.61	750.0	1709.0	2400.0	1050.0
n-Butyl benzyl phthalate					792.0	1709.0	2400.0	1050.0
Di-n-butyl phthalate					900.0	2430.0	2400.0	1100.0
Di-n-octyl phthalate					800.0	1709.0	2400.0	1100.0
1,2-Dichlorobenzene					683.0	1375.0	2400.0	1050.0
1,3-Dichlorobenzene					670.0	1375.0	2400.0	1050.0
1,4-Dichlorobenzene					715.0	1375.0	2400.0	1021.45
3,3'-Dichlorobenzidine					1100.0	2750.0	4782.5	1563.9
2,4-Dichlorophenol					1207.0	1950.0	3850.0	1750.0
Diethyl phthalate					767.0	1800.0	2400.0	1100.0
2,4-Dimethylphenol					1150.0	1950.0	3850.0	1732.15
Dimethyl phthalate					800.0	1399.5	3850.0	1100.0
4,6-Dinitro-o-cresol					1950.0	3850.0	3850.0	3000.0
2,4-Dinitrophenol					2250.0	6550.0	6250.0	3450.0
2,4-Dinitrotoluene					800.0	1709.0	3850.0	1100.0
2,6-Dinitrotoluen					767.0	1399.5	2400.0	1050.0
1,2-Diphenylhydrazine					750.0	1300.0	1950.0	950.0
Bis(2-Ethylhexyl)phthalate					900.0	1920.0	2400.0	1200.0

(표 계속)

항목	TEL ¹⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		PEL ²⁾ ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile ($\mu\text{g/kg}$, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Fluoranthene	111.0	112.82	2355.0	1493.54	776.45	2176.9	2400.0	1200.0
Fluorene	--	21.7	--	144.35	750.0	1709.0	2400.0	1050.0
Hexachlorobutadiene					776.45	1550.0	3850.0	1257.4
Hexachlorocyclopentadiene					1321.65	1920.0	3900.65	1563.9
Hexachloroethane					776.45	1399.5	2400.0	1100.0
Hexachlorophene					490.0	4055.0	--	8850.
Indeno(1,2,3-cd)pyrene					750.0	1709.0	2400.0	1100.0
Isophorone					776.45	1399.5	2400.0	1050.0
3-Methyl-4-chlorophenol					1400.0	2450.0	--	1750.0
Naphthalene	--	34.57	--	390.64	700.0	1375.0	2400.0	1050.0
Nitrobenzene					767.0	1399.5	2400.0	1050.0
2-Nitrophenol					1150.0	1950.0	3850.0	1732.15
4-Nitrophenol					2250.0	6550.0	4170.0	3000.0
N-Nitrosodiethylamine					600.0	1920.0	--	900.0
N-Nitrosodimethylamine					850.0	1709.0	2400.0	1050.0
N-Nitrosodi-n-butylamine					700.0	1920.0	--	900.0
N-Nitrosodi-n-propylamine					767.0	1399.5	2400.0	1050.0
N-Nitrosodiphenylamine					767.0	1399.5	2400.0	1100.0

(표 계속)

항목	TEL ¹⁾ (µg/kg, 건중량)		PEL ²⁾ (µg/kg, 건중량)		수체에 대한 85 th Percentile (µg/kg, 건중량)			
	담수	해수	담수	해수	담수	감조 하천	저수지	하구
Pentachlorophenol					1600.0	3100.0	2440.0	3000.0
Phenanthrene	41.9	86.68	515.0	543.53	776.0	1800.0	2400.0	1100.0
Phenol					1050.0	1950.0	2400.0	1563.0
Pyrene	53.0	152.66	875.0	1397.6	776.45	2100.0	2400.0	1257.4
Pyridine					750.0	1800.0	4450.0	1100.0
1,2,4,5-tetrachlorobenzene					670.0	1920.0	--	950.0
1,2,4-trichlorobenzene					625.0	1375.0	2725.65	1100.0
2,4,5-trichlorophenol					1200.0	2050.0	2725.65	1650.0
2,4,6-trichlorophenol					1100.0	2050.0	2400.0	1563.9
Other Sediment Parameters								
Oil and grease					445.5	1210.0	1030.0	274.2

1) PEL: 영향을 받는 독성 표본의 50th percentile과 영향을 받지 않는 85th percentile의 기하평균값으로 이 농도 이상이면 생물에 대한 악영향이 자주 관찰 됨

2) TEL: 독성 영향 데이터의 15th percentile과 영향이 없는 데이터의 median의 기하평균값으로 이 농도 이하이면 생물에 대한 악영향이 드물게 관찰 됨

〈부표 1-9〉 플로리다주의 퇴적물질예비기준 (해양퇴적물)

항목	TEL ¹⁾	PEL ²⁾
금속 (mg/kg)		
As	7.24	41.6
Cd	0.676	4.21
Cr	52.3	160
Cu	18.7	108
Pb	30.2	112
Hg	0.13	0.696
Ni	15.9	42.8
Ag	0.733	1.77
Zn	124	271
PCBs (µg/kg)		
tPCBs	21.6	189
PAHs (µg/kg)		
Acenaphthene	6.71	88.9
Acenaphthylene	5.87	128
Anthracene	46.9	245
Fluorene	21.2	144
2-methylnaphthalene	20.2	201
Naphthalene	34.6	391
Phenanthrene	86.7	544
tLMW-PAHs	312	1442
Benz(a)anthracene	74.8	693
Benzo(a)pyrene	88.8	763
Chrysene	108	846
DiBenzo(a,h)anthracene	6.22	135
Fluoranthene	113	1494
Pyrene	153	1398
tHMW-PAHs	655	6676
tPAHs	1684	16770
농약류 (µg/kg)		
Chlordane	2.26	4.79
p,p'-DDD	1.22	7.81
p,p'-DDE	2.07	374
p,p'-DDT	1.19	4.77
tDDT	3.89	51.7
Dieldrin	0.715	4.3
Lindane(gamma-BHC)	0.32	0.99
Phthalates (µg/kg)		
bIS(2-ethylhexyl)phthalate	182	2647

1) TEL: Threshold effect level

2) PEL: Probable effect level

〈부표 1-10〉 사우스캐롤라이나주의 퇴적물질예비기준 (해양퇴적물)

항목	Lower	Lower	Upper	Upper
	생물영향 권고치	Type	생물영향 권고치	Type
Acenaphthene	16	ERL	500	ERM
Acenaphthylene	44	ERL	640	ERM
Ag (Silver)	1	ERL	3.7	ERM
Anthracene	85.3	ERL	1100	ERM
As (Arsenic)	8.2	ERL	70	ERM
Benzo[a]anthracene	261	ERL	1600	ERM
Benzo[a]pyrene	430	ERL	1600	ERM
Cd (Cadmium)	1.2	ERL	9.6	ERM
Total Chlordane (Alpha+Gamma+Oxychlordane)	2.26	TEL	4.79	PEL
Chrysene	384	ERL	2800	ERM
Cr (Chromium)	81	ERL	370	ERM
Cu (Copper)	34	ERL	270	ERM
4,4'-DDE	2.2	ERL	27	ERM
4,4'-DDD	1.22	TEL	7.81	PEL
4,4'-DDT	1.19	TEL	4.77	PEL
Dibenz[a,h]anthracene	63.4	ERL	260	ERM
Dieldrin	0.715	TEL	4.3	PEL
Fluoranthene	600	ERL	5100	ERM
Fluorene	19	ERL	540	ERM
Hg (Mercury)	0.15	ERL	0.71	ERM
Lindane	0.32	TEL	0.99	PEL
2-Methylnaphthalene	70	ERL	670	ERM
Naphthalene	160	ERL	2100	ERM
Ni (Nickel)	20.9	ERL	51.6	ERM
Pb (Lead)	46.7	ERL	218	ERM
Phenanthrene	240	ERL	1500	ERM
Pyrene	665	ERL	2600	ERM
Sb (Antimony)	2	ERL	25	ERM
Total DDTs (sum of all 6: 2,4'-DDD, DDT, DDE, and 4,4'-DDD, DDT, DDE)	1.58	ERL	46.1	ERM
Total PAH's (without Perylene)	4022	ERL	44792	ERM
Total PCBs	22.7	ERL	180	ERM
Zn (Zinc)	150	ERL	410	ERM

* 단위: 금속은 ug/g (mg/kg or ppm), 그 외의 물질은 ng/g (ug/kg or ppb).

ERL / TEL: Minimal-effects concentrations, 이 농도 이하에서는 생물에 대한 영향이 드물게 관찰됨

ERM / PEL : Probable-effects concentrations, 이 농도 이상에서는 생물에 대한 영향이 일반적으로 관찰됨

ERL과 ERM 값은 Long et al(1995) 인용

Long, E.R., D.D. MacDonald, S.L. Smith, and F.D. Calder. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Envir. Management*. 19:81-97.

모든 TEL과 PEL값은 MacDonald(1994)인용

MacDonald, D.D. 1994. Development of an approach to the assessment of sediment quality in Florida Coastal waters. Florida Department of Environmental Regulation.

[부표 2] 캐나다 주정부의 퇴적물질기준 설정사례

〈부표 2-1〉 온타리오 환경부의 금속, 영양염 퇴적물 환경기준 (담수퇴적물)

항 목	No Effect Level (NEL)	Lowest Effect Level (LEL)	Severe Effect Level (SEL)
금 속	(mg/kg 건중량)		
As	-	6	33
Cd	-	0.6	10
Cr	-	26	110
Cu	-	16	110
Fe (%)	-	2	4
Pb	-	31	250
Mn	-	460	1100
Hg	-	0.2	2
Ni	-	16	75
Zn	-	120	820
영양염류	(mg/kg 건중량)		
TOC(%)	-	1	10
TKN	-	550	4800
TP	-	600	2000

- : 데이터가 불충분하거나 적절한 방법이 없음

TOC: Total Organic Carbon

TKN: Total Kjeldahl Nitrogen

TP: Total Phosphorus

자료: Ontario Ministry of the Environment (1993)

〈부표 2-2〉 온타리오 환경부의 유기화합물 퇴적물 환경기준 (담수퇴적물)

항 목	No Effect Level (mg/kg 건중량)	Lowest Effect Level (m/kg 건중량)	Severe Effect Level ($\mu\text{g/g OC}$)*
Aldrin	-	0.002	8
BHC	-	0.003	12
α -BHC	-	0.006	10
β -BHC	-	0.005	21
γ -BHC	0.0002	(0.003) ¹⁾	(1) ²⁾
Chlordane	0.005	0.007	6
total DDT	-	0.007	12
op+pp-DDT	-	0.008	71
pp-DDD	-	0.008	6
pp-DDE	-	0.005	19
Dieldrin	0.0006	0.002	91
Endrin	0.0005	0.003	130
HCB	0.01	0.02	24
Heptachlor	0.0003	-	-
Hepoxide	-	0.005 ¹⁾	5 ²⁾
Mirex	-	0.007	130
total PCB	0.01	0.07	530
PCB 1254 ³⁾	-	(0.06) ¹⁾	(34) ²⁾
PCB 1248 ³⁾	-	(0.03) ¹⁾	(150) ²⁾
PCB 1016 ³⁾	-	(0.007) ¹⁾	(53) ²⁾
PCB 1260 ³⁾	-	(0.005) ¹⁾	(24) ²⁾
Anthracene	-	0.220	370
Benz(a)anthracene	-	0.320	1480
Benzo(k)fluoranthene	-	0.240	1340
Benzo(a)pyrene	-	0.970	1440
Benzo(g,h,i)perylene	-	0.170	320
Chrysene	-	0.340	460
Dibenzo(a,h)anthracene	-	0.060	130
Fluoranthene	-	0.750	1020
Fluorene	-	0.190	160
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	-	0.200	320
Phenanthrene	-	0.560	950
Pyrene	-	0.490	850
total PAH ⁴⁾	-	4	10000

LEL과 SEL은 Screening Level Concentration(SLC)에 대한 5, 95 백분위수 값

- : 기준 설정을 위한 데이터가 불충분

(): 임시 기준

*: 퇴적물의 실제 TOC농도를 곱하여 퇴적물 부피당 농도를 구하고 그 값을 기준으로 비교함

1) 10% SLC; 2) 90% SLC

3) PCB Arochlor에 대한 분석은 MOE에 의한 특별한 요구가 없으면 필수적이지 않음

4)PAH(total)은 Anthracene, Benz(a)anthracene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(b)fluorene, Benzo(a)pyrene, Benzo(g,h,i)perylene, Chrysene, Dibenzo(a,h)anthracene, Fluoranthene, Fluorene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Phenanthrene, Pyrene, Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene의 16개 PAH의 합

자료: Ontario Ministry of the Environment (1993)

〈부표 2-3〉 브리티시컬럼비아주 담수 퇴적물질예비기준

항목	Level I		Level II	
	퇴적물	공극수	퇴적물	공극수
금속	(mg/kg 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	(mg/kg 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
As	11 ¹⁸⁾	5 ³⁾	17 ¹⁹⁾	10 ⁷⁾
Cd	2.0 ¹⁸⁾	0.20~1.8 ^{3),5)}	3.5 ¹⁹⁾	0.40~3.6 ⁷⁾
Cr	64 ¹⁸⁾	Cr(VI) 1.0 ³⁾ Cr(III) 9.0 ³⁾	90 ¹⁹⁾	Cr(VI) 2.0 ⁷⁾ Cr(III) 18.0 ⁷⁾
Cu	120 ¹⁸⁾	2.0~9.0 ⁶⁾	200 ¹⁹⁾	4.0~18 ⁷⁾
Pb	63 ¹⁸⁾	4.0~16 ^{4),5)}	91 ¹⁹⁾	8.0~32 ⁷⁾
Hg	0.33 ¹⁸⁾	0.02 ⁴⁾	0.49 ¹⁹⁾	0.040 ⁷⁾
Ni	36 ¹⁾	25~150 ^{3),5)}	49 ⁸⁾	50~300 ⁷⁾
Ag	1.6 ¹³⁾	0.1~3 ^{4),5)}	2.2 ¹⁴⁾	0.2~6 ⁷⁾
Zn	220 ¹⁸⁾	30 ³⁾	320 ⁸⁾	60 ⁷⁾
PCBs	(mg/kg 건중량)	(ng/ ℓ)	(mg/kg 건중량)	(ng/ ℓ)
Aroclor 1254	0.15 ¹⁸⁾	NC	0.28 ¹⁹⁾	NC
total PCBs	0.37 ¹⁾	0.10 ⁴⁾	0.68 ⁸⁾	0.20 ⁷⁾
Low molecular wt PAHs	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Acenaphthene	48 ¹⁸⁾	6.0 ⁴⁾	89 ¹⁹⁾	12 ⁷⁾
Acenaphthylene	67 ¹⁸⁾	NC	130 ¹⁹⁾	NC
Acridine	NC	3.0 ⁴⁾	NC	6.0 ⁴⁾
Anthracene	150 ¹⁸⁾	4.0 ⁴⁾	250 ¹⁹⁾	8.0 ⁷⁾
Fluorene	83 ¹⁸⁾	12 ⁴⁾	140 ¹⁹⁾	24 ⁷⁾
Naphthalene	210 ¹⁸⁾	1.0 ⁴⁾	390 ¹⁹⁾	2.0 ⁷⁾
2-Methylnaphthalene	110 ¹⁸⁾	NC	200 ¹⁹⁾	NC
Phenanthrene	280 ¹⁸⁾	0.30 ⁴⁾	520 ¹⁹⁾	0.6 ⁷⁾
total LPAHs	880 ¹⁶⁾	NC	1400 ¹⁷⁾	NC
High molecular wt PAHs	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Benz(a)anthracene	210 ¹⁸⁾	0.10 ⁴⁾	390 ¹⁹⁾	0.20 ⁷⁾
Benzo(a)fluoranthene	NC		NC	
Benzo(k)fluoranthene	NC		NC	
Benzo(g,h,i)perylene	NC		NC	
Benzo(a)pyrene	410 ¹⁸⁾	0.010 ⁴⁾	780 ¹⁹⁾	0.020 ⁷⁾
Chrysene	460 ¹⁸⁾	NC	860 ¹⁹⁾	NC
Dibenz(a,h)anthracene	71 ¹⁸⁾	NC	140 ¹⁹⁾	NC
Fluoranthene	1200 ¹⁸⁾	4.0 ⁴⁾	2400 ¹⁹⁾	8.0 ⁷⁾
Indeno(1,2,3,c,d)pyrene	NC		NC	
Pyrene	460 ¹⁸⁾	NC	880 ¹⁹⁾	NC
total HPAHs	3700 ¹⁶⁾	NC	6700 ¹⁷⁾	NC
total PAHs	9200 ¹⁶⁾	NC	17000 ¹⁷⁾	NC

(표 계속)

항목	Level I		Level II	
	퇴적물	공극수	퇴적물	공극수
Pesticides	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	(ng/ℓ)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	(ng/ℓ)
Clordane	7.0 ¹⁸⁾	6.0 ³⁾	9.0 ¹⁷⁾	12 ⁷⁾
Dieldrin	5.0 ¹⁸⁾	NC	7.0 ¹⁷⁾	NC
Sum DDT	34 ¹⁾	1.0 ⁴⁾	63 ⁸⁾	2.0 ⁷⁾
Sum DDE	NC	NC	NC	NC
Sum DDD	NC	NC	NC	NC
total DDTs	290 ¹⁾	1.0 ³⁾	570 ⁸⁾	2.0 ⁷⁾
Lindane(γ -BHC)	3.7 ¹⁾	NC	5.0 ⁸⁾	NC
Endrin	33 ¹⁸⁾	2.3 ³⁾	62 ¹⁹⁾	4.6 ⁷⁾
Heptachlor epoxide	9.2 ¹⁾	10 ³⁾	16 ⁸⁾	20 ⁷⁾
Mirex	7.0 ²⁾	NC	14 ⁷⁾	NC
Toxaphene	1.0 ¹⁸⁾	8.0 ³⁾	2.0 ^{7),20)}	16 ⁷⁾
Phthalates	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Dibutylphthalate(DBP)	NC	19 ⁴⁾	NC	38 ⁷⁾
Di-(2-ethylhexyl)phthalate	1400 ¹⁶⁾	16 ⁴⁾	2600 ¹⁷⁾	32 ⁷⁾
Other Phthalate Esters	NC	0.20 ⁴⁾	NC	0.40 ⁷⁾
Chlorophenols	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Monochlorophenol	NC	1.7 ~ 130 ^{4),5)}	NC	3.4 ~ 260 ⁷⁾
Dichlorophenol	NC	0.50 ~ 68 ^{4),5)}	NC	1.0 ~ 136 ⁷⁾
Trichlorophenol	NC	0.20 ~ 54 ^{4),5)}	NC	0.40 ~ 108 ⁷⁾
Tetrachlorophenol	NC	0.40 ~ 36 ^{4),5)}	NC	0.80 ~ 72 ⁷⁾
Pentachlorophenol	400 ²⁾	0.20 ~ 5.5 ^{4),5)}	800 ⁷⁾	0.40 ~ 11 ⁷⁾
Volatile Aromatics	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Benzene	57 ⁹⁾	400 ⁴⁾	110 ¹⁰⁾	800 ⁷⁾
Ethylbenzene	NC	90 ⁴⁾		180 ⁷⁾
Trichloroethylene	NC	20 ⁴⁾	NC	40 ⁷⁾
Tetrachloroethylene	NC	110 ⁴⁾	NC	220 ⁷⁾
Toluene	890 ⁹⁾	2.0 ⁴⁾	1800 ¹⁰⁾	4.0 ⁷⁾
Xylene	25 ⁹⁾	300 ⁴⁾	50 ¹⁰⁾	600 ⁷⁾
Dioxins and Furans	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
2,3,7,8-TCDD TEQs	0.10 ¹¹⁾	NC	0.19 ¹²⁾	NC

NC: 기준이 설정되지 않음; 1) AEL: Ingersoll and MacDonald(1998)

2) AELequivalent: NYSDEC(1994); 3) CCREM(1987); 4) BCE(1998b)

5) 주변 수질특성을 고려한 준거치; 6) CSR로부터 채택(GBC 1997)

7) 수생생물 준거치를 2번 계산한 값; 8) PEC: Ingersoll and MacDonald(1998)

9) SQAL: USEPA(1997); 10) AEL equivalent: USEPA(1997)의 SQAL을 2번 계산한 값,

11) AEL equivalent: MacDonald(1998b); 12) PEL: MacDonald(1998b),

13) AEL equivalent: Long and Morgan(1991); 14) PEL equivalent: Long and Morgan(1991)

15) NYSDEC(1994); 16) AEL: MacDonald *et al.* (1996); 17) PEC: MacDonald *et al.*(1996)

18) AEL equivalent: BCE(1998c); 19) PEL equivalent: BCE(1998c)

20) SQG: Environment Canada(1997)-toxaphene

〈부표 2-4〉 브리티시컬럼비아주의 해양 및 연안 퇴적물질예비기준

항목	Level I		Level II	
	퇴적물	공극수	퇴적물	공극수
금속	(mg/kg 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	(mg/kg 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
As	25 ¹⁴⁾	12 ¹⁰⁾	42 ¹⁵⁾	24 ¹¹⁾
Cd	2.4 ¹⁴⁾	0.10 ¹⁰⁾	4.2 ¹⁵⁾	0.20 ¹¹⁾
Cr	110 ¹⁴⁾	Cr(VI) 1.50 ¹⁰⁾ Cr(III) 56 ¹⁰⁾	160 ¹⁵⁾	Cr(VI) 3.0 ¹¹⁾ Cr(III) 112 ¹¹⁾
Cu	64 ¹⁴⁾	2.0 ¹⁰⁾	110 ¹⁵⁾	4.0 ¹¹⁾
Pb	71 ¹⁴⁾	2.0 ¹⁰⁾	110 ¹⁵⁾	4.0 ¹¹⁾
Hg	0.42 ¹⁴⁾	0.02 ¹⁰⁾	0.70 ¹⁵⁾	0.040 ¹¹⁾
Ni	30 ¹⁴⁾	8.3 ¹⁰⁾	43 ¹⁵⁾	17 ¹¹⁾
Ag	1.3 ¹⁴⁾	1.5 ¹⁰⁾	1.8 ¹⁵⁾	3.0 ¹¹⁾
Zn	200 ¹⁴⁾	86 ¹⁰⁾	270 ¹⁵⁾	172 ¹¹⁾
PCBs	(mg/kg 건중량)	(ng/ℓ)	(mg/kg 건중량)	(ng/ℓ)
Aroclor 1254	0.20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ³⁾	NC	0.40 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ⁷⁾	NC
Aroclor 1016	NC	NC	NC	NC
Aroclor 1248	NC	NC	NC	NC
Aroclor 1260	NC	NC	NC	NC
total PCBs	0.42 ³⁾	0.10 ¹⁰⁾	0.84 ⁷⁾	0.20 ¹¹⁾
Low molecular wt PAHs	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Acenaphthene	48 ¹⁴⁾	6.0 ¹⁰⁾	89 ¹⁵⁾	12 ¹¹⁾
Acenaphthylene	67 ¹⁴⁾	NC	128 ¹⁵⁾	NC
Anthracene	150 ¹⁴⁾	NC	250 ¹⁵⁾	NC
Fluorene	83 ¹⁴⁾	12 ¹⁰⁾	140 ¹⁵⁾	24 ¹¹⁾
Naphthalene	210 ¹⁴⁾	1.0 ¹⁰⁾	390 ¹⁵⁾	2.0 ¹¹⁾
2-Methylnaphthalene	110 ¹⁴⁾	1.0 ¹⁰⁾	200 ¹⁵⁾	2.0 ¹¹⁾
Phenanthrene	320 ¹⁴⁾	NC	540 ¹⁵⁾	NC
total LPAHs	880 ¹⁾	NC	1400 ¹⁵⁾	NC
High molecular wt PAHs	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Benz(a)anthracene	380 ¹⁴⁾	NC	690 ¹⁵⁾	NC
Benzo(a)fluoranthene	NC	NC	NC	NC
Benzo(k)fluoranthene	NC	NC	NC	NC
Benzo(g,h,i)perylene	NC	NC	NC	NC
Benzo(a)pyrene	430 ¹⁴⁾	0.010 ¹⁰⁾	760 ¹⁵⁾	0.020 ¹¹⁾
Chrysene	480 ¹⁴⁾	0.10 ¹⁰⁾	850 ¹⁵⁾	0.20 ¹¹⁾
Dibenz(a,h)anthracene	71 ¹⁴⁾	NC	140 ¹⁵⁾	NC

(표 계속)

항목	Level I		Level II	
	퇴적물	공극수	퇴적물	공극수
Fluoranthene	800 ¹⁴⁾	NC	1500 ¹⁵⁾	NC
Indeno(1,2,3,c,d)pyrene	NC	NC	NC	NC
Pyrene	780 ¹⁴⁾	NC	1400 ¹⁵⁾	NC
total HPAHs	3700 ¹⁾	NC	6700 ¹⁵⁾	NC
total PAHs	9200 ¹⁾	NC	17000 ⁶⁾	NC
Pesticides	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	(ng/ℓ)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	(ng/ℓ)
Clordane	3.5 ¹⁴⁾	NC	5.0 ¹⁵⁾	NC
Dieldrin	2.4 ¹⁾	NC	4.0 ⁶⁾	NC
Sum DDT	30 ³⁾	NC	60 ⁷⁾	NC
Sum DDE	3300 ³⁾	NC	6600 ⁷⁾	NC
Sum DDD	450 ³⁾	NC	890 ⁷⁾	NC
total DDTs	3600 ³⁾	NC	7200 ⁷⁾	NC
Lindane(γ -BHC)	0.65 ¹⁴⁾	NC	1.0 ¹⁵⁾	NC
Endrin	1.0 ¹⁶⁾	NC	2.0 ¹¹⁾	NC
Heptachlor epoxide	1.8 ¹⁴⁾	NC	3.0 ¹⁵⁾	NC
Mirex	7.0 ²⁾	NC	14 ¹¹⁾	NC
Toxaphene	0.10 ¹⁷⁾	NC	0.20 ¹¹⁾	NC
Phthalates	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Bis-(2-ethylhexyl)phthalate	NC	NC	NC	NC
Chlorophenols	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Monochlorophenol	NC	1.7 ~ 130 ^{10),12),18)}	NC	3.4 ~ 260 ¹¹⁾
Dichlorophenol	NC	0.50 ~ 68 ^{10),12),18)}	NC	1.0 ~ 136 ¹¹⁾
Trichlorophenol	NC	0.20 ~ 54 ^{10),12),18)}	NC	0.40 ~ 108 ¹¹⁾
Tetrachlorophenol	NC	0.40 ~ 36 ^{10),12),18)}	NC	0.80 ~ 72 ¹¹⁾
Pentachlorophenol	360 ¹³⁾	0.20 ~ 5.5 ^{10),12),18)}	690 ¹³⁾	0.40 ~ 11 ¹¹⁾
Volatile Aromatics	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
Benzene	57 ⁴⁾	100 ¹⁵⁾	110 ¹¹⁾	200 ¹¹⁾
Ethylbenzene	NC	20 ¹⁵⁾		40 ¹¹⁾
Trichloroethylene	NC	NC	NC	NC
Tetrachloroethylene	NC	NC	NC	NC
Toluene	890 ⁴⁾	200 ¹⁵⁾	1800 ¹¹⁾	400 ¹¹⁾
Xylene	25 ⁴⁾	NC	50 ¹¹⁾	NC
Dioxins and Furans	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)	($\mu\text{g}/\ell$)
2,3,7,8-TCDD TEQs	0.10 ⁵⁾	NC	0.19 ⁸⁾	NC

NC: 기준이 설정되지 않음; 1) AEL: MacDonald *et al.* (1996)

2) AEL equivalent: NYSDEC(1994); 3) AEL equivalent: MacDonald로부터의 SEC를 0.5번 계산 (1997)

4) AEL equivalent: USEPA(1997); 5) AEL: MacDonald (1998b); 6) PEL: MacDonald *et al.* (1996)

7) PEL equivalent: MacDonald (1997); 8) PEL: MacDonald (1998b); 9) NYSDEC(1994)

10) BCE(1998b); 11) 수중생활 준거치를 2번 계산

12) 주변 수질 특성을 고려한 준거치; 13) Washington DOE(1991); 14) AEL equivalent : BCE(1998c)

15) PEL: BCE(1998c); 16) AEL equivalent: USEPA(1999); 17) AEL equivalent: Environment Canada (1997)

18) 담수에 적용됨; 19) 생물학적 축적 물질에 대해서는 적절한 절차를 이용하여 야생동물 및 인류건강에 대한 영향을 고려해야 함 (MacDonald 1999; BCE 1998a)

[부표 3] 유럽의 퇴적물질기준 설정사례

〈부표 3-1〉 네덜란드 퇴적물질권고기준

항목	퇴적물질권고기준 (목표기준)	퇴적물질기준 (최대허용기준)
금속 (mg/kg 건중량).		
Cd	0.8	12
Organic mercury	0.3	10
Methyl-mercury	0.3	1.4
Cu	36	73
Ni	35	44
Pb	85	530
Zn	140	620
Cr	100	380
Ar	29	55
Sb	3	15
Ba	160	300
Be	1.1	1.2
Co	9	19
Mo	3	200
Selenate	0.7	2.9
Tl	1	2.6
V	42	56
Ag	--	5.5

(표 계속)

항목	퇴적물질권고기준 (목표기준)	퇴적물질기준 (최대허용기준)
PAH (mg/kg 건중량)		
Naphthalene	0.001	0.1
Anthracene	0.001	0.1
Phenanthrene	0.005	0.5
Fluoranthene	0.03	3
Benzo[a]anthracene	0.003	0.4
Chrysene	0.18	11
Benzo[k]fluoranthene	0.02	2
Benzo[a]pyrene	0.003	3
Benzo[g,h,i]perylene	0.08	8
Indenopyrene	0.06	6
Chlorobenzene (μg/kg 건중량)		
Pentachlorobenzene	1	100
Hexachlorobenzene	0.05	5
Chlorophenol (μg/kg 건중량)		
Pentachlorophenol	2	300
Chloraniline (μg/kg 건중량)		
Tetrachloraniline(ind)	1.7	1220
Pentachloraniline	0.6	60
유기 염소계 화합물 (μg/kg 건중량)		
Aldrin	0.06	6
Dieldrin	0.5	450
Endrin	0.04	4
DDT	0.09	9
DDD	0.02	2
DDE	0.01	1
α-endosulfan	0.01	1
α-HCH	3	290
β-HCH	9	920
γ-HCH	0.05	230
Heptachlor	0.7	0.7
Heptachlorepoxyde	0.0002	0.02
Chloradane	0.03	3

(표 계속)

항목	퇴적물질권고기준 (목표기준)	퇴적물질기준 (최대허용기준)
유기인계 화합물 (µg/kg 건중량)		
Azinphosethyl	0.005	0.5
Azinphosmethyl	0.009	0.9
Chlorfenvinfos	0.0006	0.06
Chlorpyrifos	0.01	1
Demeton	--	--
Diazinone	0.01	1
Dichlorvos	0.00003	0.003
Disulfoton	0.03	6
Ethoprop	0.003	0.3
Fenitrothion	0.007	0.7
Fention	0.004	0.4
Malathion	0.009	0.9
Mevinphos	0.0006	0.06
Oxydemeton-methyl	0.0003	0.03
Parathion(-ethyl)	0.001	0.1
Parathion-methyl	0.01	1
Trichlorfon	0.00002	0.002
유기주석 화합물(µg/kg 건중량).		
Tetrabutyltin 화합물	0.8	78
염	0.008	0.8
Tributyltin 화합물	0.1	10
염	0.007	0.7
Trifenylyltinbutyltin 화합물	0.06	6
염	0.01	1

(표 계속)

항목	퇴적물질권고기준 (목표기준)	퇴적물질기준 (최대허용기준)
Octamethyltetrasiloxane	0.01	2
발효산($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량).		
Bentazon	1	130
2,4-D	0.3	27
Dinoseb	0.003	0.3
DNOC	0.7	280
MCPA	0.05	5
2,4,5-T	0.2	50
Carbamate & Ditro-carbamate($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량).		
Aldicarb	0.001	0.1
Benomyl	0.006	0.6
Carbaryl	0.03	3
Carbendazim	0.03	3
Carbofuran	0.02	2
Maneb	2	--
Methomyl	0.001	0.1
Oxamyl	0.01	1
Pirimicarb	0.02	2
Propoxur	0.0001	0.01
Thiram	0.008	0.8
Triallate	0.2	160
Zineb	130	--
Triazin, Pyridazine & Triazolen($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량).		
Anilazin	0.02	2
Atrazin	0.2	26
Chloridazin	3	350
Cyanazin	0.01	2
Simazin	0.009	1

(표 계속)

항목	퇴적물질권고기준 (목표기준)	퇴적물질기준 (최대허용기준)
Synthetic prtrthrin($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량)		
Bifenthrin	0.05	5
Cypermethrin	0.004	0.4
Deltamethrin	0.01	1
Permethrin	0.009	0.9
Aniline & Dinitro aniline($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량).		
Propachlor	0.06	6
Trifluralin	0.1	19
기타($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량).		
Diuron	0.08	9
Metpbromuron	1	110
Captan	0.01	1
NTA	--	--
Mineral oil	50	1000
PCB($\mu\text{g}/\text{kg}$ 건중량).		
PCB-28	1	4
PCB-52	1	4
PCB-101	4	4
PCB-118	4	4
PCB-138	4	4
PCB-153	4	4
PCB-180	4	4

(표 계속)

항목	퇴적물질권고기준 (목표기준)	퇴적물질기준 (최대허용기준)
스크린 항목($\mu\text{g/kg}$ 건중량)		
EOX	0.3	--
VOX	--	--
ETU	--	--
Cholinesterase remming	--	--
이온		
chloride(mg Cl/l)	-	100
fluoride(mg F/l)	500(mg/kg)	0.5
bromide(mg Br/l)	20(mg/kg)	0.3
sulfate(mg SO ₄ /l)	-	150
total sulfur($\mu\text{g S/l}$)	2(mg/kg)	10

〈부표 3-2〉 스웨덴의 퇴적물질예비기준
(연안 및 해양퇴적물에 적용, $\mu\text{g/kg}$ 건중량, 1% 유기물함량)

항목	Class1 Not effect	Class2 Low	Class3 Moderate	Class4 High	Class5 Very High
Phenanthrene	0	0-10	10-30	30-100	>100
Anthracene	0	0-2	2-8	8-30	>30
Fluoranthene	0	0-20	20-80	80-270	>270
Pyrene	0	0-12	12-50	50-200	>200
Benzo[a]anthracene	0	0-10	10-35	35-110	>110
Chrysene	0	0-13	13-50	50-180	>180
Benzo[b]fluoranthene	0	0-50	50-150	150-400	>400
Benzo[k]fluoranthene	0	0-20	20-50	50-160	>160
Benzo[a]pyrene	0	0-20	20-60	60-180	>180
Benzo[g,h,i]perylene	0	0-30	30-100	100-350	>350
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0	0-50	50-170	170-600	>600
sum id 11 PAH	0	0-280	280-800	800-2500	>2500
HCB	0	0-0.04	0.04-0.2	0.2-1	>1
PCB 28	0	0-0.06	0.06-0.2	0.2-0.6	>0.6
PCB 52	0	0-0.06	0.06-0.2	0.2-0.8	>0.8
PCB 101	0	0-0.16	0.16-0.6	0.6-2	>2
PCB 118	0	0-0.15	0.15-0.6	0.6-2	>2
PCB 153	0	0-0.03	0.03-0.3	0.3-3.5	>3.5
PCB 138	0	0-0.3	0.3-1.2	1.2-4.1	>4.1
PCB 180	0	0-0.1	0.1-0.4	0.4-1.9	.1.9
sum of 7 PCB	0	0-1.3	1.3-4	4-15	>15
total PCB	0	0-5	5-20	20-75	>75
a-HCH	0	0-0.01	0.01-0.07	0.07-0.3	>0.3
b-HCH	0	0-0.03	0.03-0.3	0.3-3	>3
g-HCH	0	0-0.01	0.01-0.1	0.1-1.3	>1.3
sum HCH	0	0-0.03	0.03-0.3	0.3-3	>3
Chlodane	0	0-0.01	0.01-0.04	0.04-0.1	>0.1
Chlodane	0	0-0.02	0.02-0.04	0.04-0.1	>0.1
trans-nonaklor	0	0-0.02	0.02-0.05	0.05-0.15	>0.15
sum Chlodane	0	0-0.02	0.02-0.08	0.08-0.3	>0.3
p,p'-DDT	0	0-0.02	0.02-0.1	0.1-0.7	>0.7
p,p'-DDE	0	0-0.2	0.2-0.7	0.7-2.5	>2.5
p,p'-DDD	0	0-0.13	0.13-0.8	0.8-5	>5
sum DDT	0	0-0.2	0.2-1	1-6	>6
EOCI	0	0-600	600-4000	4000-30000	>30000
EOBR	0	0-400	400-1000	1001-3000	>3000
EPOCI	0	0-150	150-700	700-3000	>3000
EPOBr	0	0-90	90-250	250-800	>800

[부표 4] 퇴적물질기준 개발을 위한 국내 연구사례

(환경부(1999)로부터 정리)

I. 퇴적물 내 농도 측정 (화학적 방법)

1. 퇴적물 내 중금속 분포

장소	연구목적	방법	결과	토의
마산만, 진해만	중금속 분포특성 파악 및 중금속을 지표로 한 저서건강 평가	용출법: Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, As	○평균입도 60보다 세립한 퇴적물 내 중금속 농도를 광양만, 영산하구, 울산만 퇴적물과 비교한 결과 다음이 비교적 높게 검출 · 마산만: Fe, Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As · 진해만: Mn	○마산만의 퇴적물내 중금속은 일차적으로 산업활동의 오염물질 유입에 따른 영향으로 판단
		R - m o d e 요인 분석	○Cu, Zn, Pb, Cd, As이 높은 적재값을 나타낸 Factor 1이 총 변량의 45% 차지	○이 중금속들은 인접한 산업시설과 일치하며, 퇴적물 입도와 관련이 없는 것으로 보아 오염요인으로 해석
		중금속 농도축비	○Cu, Zn, Pb, Cd, As ≥ 1	○진해만 일부 및 마산만 전체 퇴적물 내 중금속 농축이 매우 활발
울산만	"	용출법: Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Zn, Pb	○평균입도 60보다 세립한 퇴적물 내 중금속 농도를 광양만, 영산하구, 울산만 퇴적물과 비교한 결과 다음이 비교적 높게 검출 · Co, Cu, Zn, Pb	○Co 점오염원은 외항강 및 온산공단이며 Cu, Zn, Pb의 점오염원은 온산공단, 장생포항 유입 배수로 및 현대조선소로 추정
		R - m o d e 요인 분석	○Factor 1: 퇴적물의 입도요인 ○Factor 2: 오염요인 ○Factor 3: 오염요인 ○Factor 4: 퇴적환경요인	○퇴적물의 중금속 함량에 영향을 미치는 요인은 오염요인으로 파악
		중금속 농도축비	○Co, Zn, Cu, Pb ≥ 1	○용출법과 상동

2. 퇴적물 내 중금속 존재형태 평가

장소	연구목적	방법	결과	토의
경기만, 광양만, 영산강하구, 영산호, 울산만, 인천북항	퇴적물 평가방법에 대한 검증 및 기준 제시	*연속 추출법 :Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb	○ 각 지역 총농도에서 비광물 격자 부분의 농도가 평균입도와 낮은 상관성을 보임 ○ 거의 모든 중금속의 농도가 비광물격자 부분 (ERF, OF)에 집중	○ 비광물격자 부분 내 중금속 농도가 오염가능성을 지시 ○ 퇴적물 내 중금속이 인위적으로 유입되었을 때 오염을 지시할 수 있는 부분
		단일시약 추출법 :Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb	○ 연속추출법의 비광물격자 부분의 농도보다는 높으나 총농도보다는 낮음 ○ ERF와 OF 부분을 추출하는데 효율적인 시약은 중금속에 따라 상이 · Co, Mn, Ni: 질산, 혼합산 · Cr, Fe: 염산, 혼합산 · Cu: 염산, 질산, 혼합산	○ 비광물격자 부분의 대부분을 용해할 수 있으나, 광물격자 부분은 추출해 낼 수 없음

*연속추출법 1) AF or EF (Adsorbed fraction or Exchangeable fraction): 흡착부분
 2) ERF (Easily reducible fraction): 약한 산화물 부분
 3) RF (Reducible fraction): 산화물 부분
 4) OF (Organic fraction): 유기물 부분
 5) LF (Lattice fraction): 광물격자 부분

3. 퇴적물 내 유기화합물 분포

장소	연구목적	항목	방법	결과 및 토의
경기만	butyltins 농도분포 파악 및 입자, 유기탄소 함량과의 관계 파악	T B T , D B T , MBT	○ method of Iwata et al (1994)	○ 인천항 내부로부터 외부로의 감소 추세는 인천항이 오염유입원임을 입증
	간편하고 정량적인 분석법 제안	PAHs	○ 초음파추출법 ○ 실리카 카트리지 정제법	○ 분석시간 감소 및 높은 회수율과 정제도를 보임
울산만	정확하고 신속한 분석방법을 토대로 오염실태 조사	PAHs	○ 정성분석: 기체 크로마토그래피/질량분석기를 이용한 부분스캔방법 ○ 정량분석: 특정 이온만을 선택적으로 검출하는 방법	○ 최대 및 최소농도 지역 파악

II. 퇴적물 내 서식하는 생물군집 조사 (생태학적 방법)

장소	연구목적	방법	결과 및 토의
마산만, 진해만	저서동물의 군집 특성을 활용하여 특정지역의 환경 상태를 진단	○ 저서동물 군집특성 파악 · 종다양성지수 · 종풍부도지수 · 종균등도지수 · 우점도지수 ○ 집괴분석 (cluster analysis)	○ 저서동물의 군집특성에 따른 집괴분석을 통해 집괴별 생태학적 특성을 파악 · 예) 마산만과 같이 총 출현종수, 서식밀도가 상당히 낮으며 우점종이 유기물 오염지시종 (<i>Capitella capitata</i>)일 경우, 오염정도가 심한 것으로 판정
울산만	"	"	○ 집괴분석을 통해 유사지역 구분

III. 생물지표(bioindicator)로 퇴적물 독성 평가 (독성평가방법)

장소	연구목적	방법	결과 및 토의
in vitro	성게 생물검정법을 우리나라 동근성게 (<i>Strongylocentrotus nudus</i>)에 적용하여 중금속의 영향 조사	○ 중금속(Cd, Cu, Zn, Ag) 농도에 따른 수정률 및 발생률 측정 · ¹⁾ AC50 조사 · 민감도 비교	○ 중금속 농도가 높을수록 수정률 및 발생률 감소 ○ 외국의 자료와 비교할 때 비슷한 결과를 보이므로 우리나라에 적용 가능
인천북항, 시화호	성게의 수정률 및 발생률 측정을 통해 퇴적물의 독성 평가	○ 퇴적물의 공극수 및 유기용매 추출액에서 수정률 및 발생률 측정 ○ 공극수 및 유기용매 추출액의 수정률 또는 발생률로부터 각각 ²⁾ TS와 ³⁾ RT를 산출하여 독성의 공간적 분포 파악	○ 공극수의 경우 발생률이 더욱 민감하고, 유기용매 추출액의 경우 수정률이 더욱 민감 ○ 독성의 공간적 분포 파악
울산만	"	"	"
마산만	"	"	"
울산만, 온산만, 마산만, 진해만	Microtox기법에 의한 퇴적물 독성평가	○ 노출시간별 ⁴⁾ EC50 측정	○ Microtox기법의 장점 · 성게의 수정률 및 발생률 기법에 비해서 민감성은 떨어지나 신속하고 간편 · 주로 유기화합물의 독성 영향을 반영 · 표준화된 시험법으로 활용 가능

1) EC50: 수정률 또는 발생률이 50%로 감소하는 중금속 농도

2) TS: Toxicity Score)

3) RT: Relative Toxicities)

4) EC50: 미생물의 발광률이 50%로 저해되는 농도로서 EC50 값이 작을수록 독성이 강함

(표 계속)

장소	연구목적	방법	결과 및 토의
울산만	P450RGS기법을 이용하여 퇴적물 내 PAHs 오염평가	○ 생물세포내 Ah-receptor에 부착한 PAHs의 분해효소를 유도하는 유전자의 발광도를 측정하여 PAHs에의 오염 평가 ○ 퇴적물 내 PAHs 농도를 동시에 측정하여 상관성 분석	○ P450RGS 값 및 퇴적물내 PAHs 농도의 공간분포가 매우 유사한 것으로 나타남. 따라서 P450RGS기법은 PAHs에 의한 오염정도를 평가하는데 유용한 수단으로 판단됨.
인천북항, 시화-반월공단, 화성조간대	H4IIE cell line, MVLN cell line, alkylphenol analysis를 이용한 퇴적물 내 유기독성 평가	○ H4IIE cell line을 이용하여 퇴적물내 다이옥신류의 분해효소 교란(dioxin-like activity) 파악 ○ MCF cell line을 이용하여 퇴적물내 유기화합물의 호르몬 교란(estrogenic activity) 파악	○ H4IIE cell line 결과 인천북항, 시화호 내륙의 공단 지역의 퇴적물에서 높은 생물독성 발견 ○ MCF cell line 결과 화성조간대의 퇴적물에서 높은 생물독성 발견 ○ 결론: dioxin-like activity 또는 estrogenic activity는 오염의 잠재성 평가에 직접 사용하기 보다는 시료의 상황을 파악하여 희석액 농도 결정 등에 이용하는 것이 바람직함.
울주군 온산면 진하리	중금속 오염의 잠재적 지시자인 MTs의 총알고둥 (<i>Littorina brevicula</i>) 내 유도특성 파악	○ Cd 400ppm 농도에 11일간 노출된 총알고둥의 소화선, 생식선, 아가미, 신장의 단백질 조사	○ MTs (Cd-binding proteins) 발견 ○ 향후 MTs의 polypeptide 정제, amino acid sequencing, gene cloning을 통해 분자생물학적 수준에서 중금속 오염 측정
갯각류: 경남 기장부근 남동해역, 퇴적물: 마산만	⁵⁾ 효소역가법에 의한 퇴적물 오염 평가	○ 갯각류(<i>Ligia exotica</i>) 내 esterases, alkaline phosphatase, N-acetyl-β-D-glucosaminidase의 효소역가 측정 ○ 효소역가법을 이용하여 마산만 퇴적물독성 검사 ○ Microtox 독성시험과 상대적 비교	○ 장점: 간단, 신속, 경제적 ○ 단점: Microtox에 비해 비교적 낮은 민감성을 보임. 특정 효소에서만 반응이 나타날 수 있으므로 여러 효소에 대한 병렬실험 필요 ○ 결론: Microtox 독성시험 결과와 유사한 결과를 나타내어 유의적임. 따라서 해양환경시료의 상대적 독성을 일차적으로 검색하는 간이수단으로 활용 가능

5) 효소역가법: 유독성 물질에 의한 생체내 효소역가 저해도를 측정함으로써 유독성물질의 잔재 여부를 판정

[부표 5] 오염원 종류에 따른 퇴적물 오염 가능물질

오염물질 \ 산업체	알루미늄 (Aluminum)	총탄 · 폭탄류 (Ammunitions)	방오도료 (Anti-fouling paints)	자동차 (Automobile)	배터리 (Batteries)	화학물질 제조 (Chemical Manufacturing)
Acenaphthene						
Aldrin						
Ammonia						○
Aniline						
Arsenic				○		
Benzo(a)anthracene						
Benzo(a)pyrene				○		
Cadmium	○					○
Chlordane						
Chlorpynifos						
Chromium	○			○		
Copper		○	○	○		
Cyanide						
DDE						
DDT						
Dieldrin						
Endrin						
Ethyl Parathion						
Fluoranthene						
Heptachlor						
HCB						
HCBD						
HCCPD						
Lead			○		○	
Mercury			○		○	○
2-Methylnaphthalene						○
Nickel	○					
Oil & Grease				○		○
Organotin/Tin			○			
PCBs				○		
Phenanthrene						
Phosphorus		○				
Pyrene						
Selenium						○
TCDD						
TCDF						
Toxaphene						○
Zinc		○		○		

(표 계속)

오염물질 산업체	농장 (Commercial Farming)	부식 야금 (Corrosion Metallurgy)	낙농장 (Dairy)	세척제/ 계면활성제 (Detergents/ Surfactants)	염색 (Dye)	전기 (Electrical)
Acenaphthene						
Aldrin	○					
Ammonia	○		○			
Aniline					○	
Arsenic						
Benzo(a)anthracene						
Benzo(a)pyrene						
Cadmium						○
Chlordane						
Chlorpyrifos						
Chromium		○				
Copper		○				○
Cyanide		○				
DDE						
DDT	○					
Dieldrin	○					
Endrin						
Ethyl Parathion						
Fluoranthene						
Heptachlor						
HCB						
HCBD						
HCCPD						
Lead		○				○
Mercury						○
2-Methylnaphthalene						
Nickel		○				○
Oil & Grease						
Organotin/Tin						
PCBs						○
Phenanthrene						
Phosphorus	○		○	○		
Pyrene						
Selenium						○
TCDD						
TCDF						
Toxaphene	○					
Zinc		○		○		○

(표 계속)

오염물질 산업체	폭발물 (Explosives)	판유리 (Flat Glass)	과일 · 채소 (Fruits · Vegetables)	가죽 · 제혁 (Leather · Tanning)	고기 가공 (Meat Products)	금속 다듬질 · 제련 (Metal Finishing · Refining)
Acenaphthene						
Aldrin						
Ammonia	○		○		○	
Aniline		○				○
Arsenic						○
Benzo(a)anthracene						
Benzo(a)pyrene						○
Cadmium						○
Chlordane						
Chlorpynifos						
Chromium				○		○
Copper	○					○
Cyanide						○
DDE						
DDT						
Dieldrin						
Endrin						
Ethyl Parathion						
Fluoranthene						
Heptachlor						
HCB						
HCBD						
HCCPD						○
Lead						○
Mercury						
2-Methylnaphthalene						
Nickel						○
Oil & Grease						○
Organotin/Tin						
PCBs						
Phenanthrene						
Phosphorus			○			
Pyrene						
Selenium		○				
TCDD						
TCDF						
Toxaphene						
Zinc						○

(표 계속)

오염물질 산업체	야금 과정 (Metallurgical Processes)	질산 제조 (Nitric Acid Manufacturing)	산화물 제조 (Oxide Manufacturing)	향수 (Perfume)	살충제/ 비료 (Pesticides/Fert ilizers)	원유 정제 (Petroleum Refining)
Acenaphthene						
Aldrin					○	
Ammonia		○			○	○
Aniline				○		
Arsenic	○					
Benzo(a)anthracene						
Benzo(a)pyrene						
Cadmium						
Chlordane						
Chlorpynifos					○	
Chromium			○			
Copper			○			
Cyanide						
DDE						
DDT						
Dieldrin					○	
Endrin					○	
Ethyl Parathion					○	
Fluoranthene						
Heptachlor					○	
HCB					○	
HCBD					○	
HCCPD						
Lead						○
Mercury						
2-Methylnaphthalene						
Nickel	○					
Oil & Grease	○					
Organotin/Tin						
PCBs						
Phenanthrene						
Phosphorus					○	
Pyrene						
Selenium						○
TCDD						○
TCDF						○
Toxaphene					○	
Zinc	○		○			

(표 계속)

산업체 오염물질	인산염 채굴 (Phosphate Mining)	인 (Phosphorous)	사진 (Photographic)	색소/링크 (Pigment/Links)	플라스틱 (Plastics)	인쇄판 (Printing Plates)
Acenaphthene						
Aldrin						
Ammonia				○		
Aniline				○		
Arsenic		○	○			
Benzo(a)anthracene						
Benzo(a)pyrene						
Cadmium						
Chlordane						
Chlorpynifos						
Chromium			○			
Copper						
Cyanide						
DDE						
DDT						
Dieldrin						
Endrin						
Ethyl Parathion						
Fluoranthene						
Heptachlor						
HCB						
HCBD						
HCCPD						
Lead				○	○	
Mercury				○		
2-Methylnaphthalene						
Nickel						
Oil & Grease						
Organotin/Tin						
PCBs						
Phenanthrene						
Phosphorus	○	○	○			○
Pyrene						
Selenium			○	○		
TCDD						
TCDF						
Toxaphene						
Zinc						○

(표 계속)

산업체 오염물질	펄프·종이제조 (Pulp·Paper Mills)	고무 (Rubber)	증기력 (Steam Power)	강철/철 (Steel/Iron)	황산 (Sulfuric Acid)	직물 (Textiles)
Acenaphthene						
Aldrin						
Ammonia				○	○	○
Aniline			○	○	○	
Arsenic			○	○		
Benzo(a)anthracene				○		
Benzo(a)pyrene			○	○		○
Cadmium			○			
Chlordane						
Chlorpyrifos						
Chromium			○			
Copper			○			
Cyanide				○		
DDE						
DDT						
Dieldrin						
Endrin						
Ethyl Parathion						
Fluoranthene						
Heptachlor						
HCB						
HCBD						
HCCPD						
Lead			○	○		
Mercury	○					
2-Methylnaphthalene						
Nickel	○		○			
Oil & Grease	○			○		
Organotin/Tin						
PCBs				○		
Phenanthrene				○		
Phosphorus				○		
Pyrene				○		
Selenium		○				
TCDD	○					
TCDF	○					
Toxaphene						
Zinc		○		○		

(표 계속)

오염물질 산업체	실용품 (Utilities)	광물채굴 (Mineral Mining)	폐수처리시설 (Waster Water Treatment Plants)	비점오염원 (Potential non-point Sources)	보트제조/보수 (Boat Manufacturing/R epair)	보트 연료교체 (Boat Refueling)
Acenaphthene						
Aldrin						
Ammonia			○			
Aniline						
Arsenic				○		
Benzo(a)anthracene					○	○
Benzo(a)pyrene				○	○	○
Cadmium				○	○	
Chlordane			○			
Chlorpynifos						
Chromium			○	○	○	
Copper			○	○	○	
Cyanide						
DDE				○		
DDT				○		
Dieldrin						
Endrin						
Ethyl Parathion						
Fluoranthene				○	○	○
Heptachlor						
HCB						
HCBD						
HCCPD						
Lead		○	○	○		
Mercury	○		○	○	○	
2-Methylnaphthalene						
Nickel			○	○		
Oil & Grease			○	○	○	○
Organotin/Tin					○	
PCBs			○		○	
Phenanthrene	○				○	○
Phosphorus	○		○	○		
Pyrene			○	○	○	○
Selenium	○				○	
TCDD						
TCDF						
Toxaphene						
Zinc	○	○	○	○	○	

[부록] 미국의 퇴적물에 대한 TMDL

1. South Fork Trinity River와 Hayfork Creek (California 주)

- 1) 주요 이용목적: 수중 생물의 이주, 산란, 번식, 치어의 성장을 위한 냉담수 서식지
- 2) 문제점
 - 수로의 매적(channel aggradation)으로 인해 서식지와 서식지의 다양성이 감소함, 하천의 퇴적물 운반능력이 감소되어 웅덩이에 세립 퇴적물 퇴적됨
 - 세립 퇴적물이 퇴적되어 산란 자갈을 덮고 웅덩이를 막아 알의 부화를 방해하고, 어류 먹이인 무척추동물의 번식을 제한함
 - 퇴적물이 서식을 위한 웅덩이를 감소시키고, 수위를 감소시켜 여름철 수온이 증가됨
 - 부적절하게 설계되고 관리되는 도로로 인해 지표면 침식과 침식 퇴적물 증가함
- 3) 퇴적물 지표와 수치목표

〈표 1〉 퇴적물 지표와 수치목표 (South Fork Trinity River와 Hayfork Creek)

지 표	수치목표 ²⁾
1. 어류 군집 회복	
부화된 Spring Chinook	4000
부화된 Fall Chinook	3000
2. 수로의 형태와 구조 회복	
하천 주류의 웅덩이 깊이와 수	증가하는 방향
지류 웅덩이 회복 V^* ¹⁾	0.21: 서부 지류, 0.10: 다른 지류
증가된 수로의 복잡성 : 수로 요선 프로파일과 절단면 조사	개선되는 방향
3. 입경 크기 분포 개선	
퇴적물 입경 <0.85mm	≤14% (부피 기준)
4. 퇴적물 운반 감소	
수로가 우회할 우려가 있는 하천 도로의 교차(crossing)	≤1%
붕괴의 위험이 있는 하천 도로의 교차	≤1%
연별 도로 조사/관리	모든 도로 또는 폐쇄 도로에 대해 실시
도로의 위치, 도로 포장	퇴적물의 운반을 최소화하도록
벌채로 인한 퇴적물 운반 가능성	지질학적 조사 필요

1) V^* : 세립 퇴적물로 채워진 웅덩이 부피의 비율

2) 수치목표는 증거자료 가중법을 기초로 오랜 기간동안의 값을 평균하여 설정함.

2. Van Duzen Rive와 Yager Creek (California 주)

- 1) 주요 이용 목적: 냉수 어족의 성장을 위한 서식지
- 2) 문제점
 - ①상류
 - 퇴적물 부하량이 증가하여 산란 자갈과 무지개 송어 종의 웅덩이 서식지에 악영향을 미침
 - 도로와 불안정한 사면에 의한 퇴적물 침식과 부하 가능성이 증가됨

②중류

- 무지개 송어 종이 감소하여 멸종 위기에 처함
- 낮은 하상구배 구간의 퇴적 수준이 연어 서식지를 제한함
- 가파른 경사와 불안정한 지면, 벌채로 인해 퇴적물의 운반이 증가함

③하류

- 다른 구간보다는 많은 종의 어류가 있지만 과거보다는 줄어드는 추세
- 하천 수로의 매적이 서식과 산란을 위한 어류의 이동을 제한하고 유량이 적은 경우는 더 큰 방해 요인으로 작용함
- 웅덩이의 수와 깊이 감소, 과도한 세립 퇴적물의 퇴적, 큰 나무 조각의 감소로 서식지 조건이 악화됨
- 가파른 경사와 불안정한 지면에서의 도로 개발과, 벌채로 인해 퇴적물 운반이 증가됨

3) 퇴적물 지표와 목표

〈표 2〉 퇴적물 지표와 목표 (Van Duzen River와 Yager Creek)

목적	지표	바람직한 범위 또는 목표
무지개 송어와 연어의 산란 자갈 크기 분포와 질을 개선	% 세립 퇴적물	<14% (평균, 습윤 부피 기준)
	자갈의 묻힌 정도(embeddedness)	<25% (산란이 가능한 웅덩이에서)
	자갈의 수	D ⁵⁰ 이 69mm 이상인 수가 증가하는 방향
	수중 곤충	지표(풍부도(richness), % 우세종)가 증가하는 방향
	탁도	배경 수준보다 20%이상 높지 않을 것
수로의 복잡성, 웅덩이의 빈도와 깊이, 하위 평균 하상 고도의 개선	단면(하상 고도)	평균 하상 고도가 감소하는 방향
	요선 프로파일/웅덩이의 깊이	수로의 복잡성과 웅덩이 깊이가 증가하는 방향
	큰 나무 조각	하천의 단위길이당 큰 나무조각의 부피와 수가 증가하는 방향
	% 웅덩이와 웅덩이 깊이	주요 웅덩이(1, 2차 하천에 대해서는 수심이 2 feet, 3, 4차 하천에 대해서는 3 feet인 웅덩이)가 서식지의 40%이상
사면으로부터의 퇴적물 운반 위험 감소	수로가 우회할 우려가 있는 하천 도로 교차의 수	모든 하천 도로 교차에 대한 우회의 가능성 제거
	수로에 연결되지 않은 배수구	도로 표면과 배수구가 하천과 하천 도로 교차 암거와 연결되지 않도록
	도로와 활재선로의 돌운 흙 침식(fill failure) 감소	불안정한 돌운 흙 침식(fill failure) 방지
	하천 도로 교차 붕괴/유실로 인한 붕괴(washout) 감소	적절한 크기의 암거(최소 50년 빈도 유량)
	관리와 관련된 골짜기, 가파른 사면, 불안정한 강기슭으로부터의 침식 감소	골짜기와 잠재적으로 불안정한 지역에서의 벌채와 도로 수 감소

3. Noyo River (California 주)

- 1) 이용목적: 상업용수 공급, 생활용수 공급, 냉수 어족 어업, 수중 생물의 이주, 산란, 치어의

성장을 위한 냉수 서식지, 민감한 주요 이용 목적으로서의 하구 서식지

2) 문제점: 웅덩이의 수와 깊이 감소, 큰 나무조각의 수 감소, 세립 퇴적물의 비율 증가 등으로 인해 냉수 어족의 서식지가 파괴됨

3) 퇴적물 지표와 목표

〈표 3〉 퇴적물 지표와 목표 (Noyo River)

지표	목표
탁도	배경수준보다 20% 이상 높지 않을 것
% 세립 퇴적물 (<0.85mm)	14% (평균, 습윤 부피 기준)
자갈의 묻힌 정도(embeddedness)	자갈의 묻힌 정도(embeddedness)가 25% 이하인 연흔 서식지의 비율이 증가하는 방향
역수 웅덩이(backwater pool)	서식지 길이 당 역수 웅덩이(backwater pool)의 비율이 증가하는 방향
웅덩이 깊이/빈도	3차 이상의 하천에서 저유량일때의 깊이가 3피트 이상되는 웅덩이가 서식지 길이의 40%이상 되도록
V^*	0.27
큰 나무 조각	단위 하천길이당 큰 나무조각의 부피와 수의 증가
요선 프로파일	평균 요선 프로파일 경사주변의 요선 고도의 변이가 증가하는 방향
수로가 우회할 우려가 있는 하천 도로 교차	100년 빈도 홍수에 대해 모든 하천 도로 교차의 1%
붕괴의 위험이 있는 하천 도로 교차	100년 빈도 홍수에 대해 모든 하천 도로 교차의 1%
수문학적 연결성	수문학적으로 수로와 연결되어 있는 도로 길이의 감소
자연 훼손 지역	시설에 의한 자연 훼손 지역의 감소
불안정한 지역에서의 활동	상세한 지질학적 평가에 의해 퇴적물 침식 위험이 없다고 인정되지 않은 불안정한 지역(경사가 급한 곳, 골짜기, 하천 독 등)에서의 활동(도로, 벌채 등) 금지

4. Garcia River (California 주)

1) 이용 목적: 냉수 어족 어업, 수중 생물의 이주, 산란, 치어의 성장을 위한 냉수 서식지

2) 문제점

①하천내(instream)

- 산란자갈에 퇴적된 세립 퇴적물로 인해 산란할 수 있는 기질이 감소되고, 어류에 대한 산소공급, 자갈사이의 유속 감소가 영양물질 전달을 방해하여 어류의 성장 능력을 손상시킴
- 퇴적물이 웅덩이를 막아 서식지가 감소하고, 웅덩이의 깊이가 감소하여 수온이 상승함
- 퇴적물이 수로를 매적하고, 큰 나무 조각을 매장하여 자갈을 분류하는 하천의 능력을 감소시킴에 따라 우세한 입자 크기가 감소됨
- 매적, 수로 폭 증가, 범람 가능성 증가, 하천 독 침식 증가, 하상 구조 요소(큰 나무 조각)의 매장으로 인해 하상이 불안정해짐

◦ 매적으로 인해 수심이나 유량이 감소한 하천 구간은 연어의 이동에 물리적인 방해요소가 됨

②윗사면(upslope)

◦ 도로의 증가로 인해 표면 침식, 세립 퇴적물의 발생과 이동, 하천의 우회(diversion) 가능성이 증가됨

◦ 불안정한 지역(골짜기, 급경사 지역)에서의 활동이 침식을 증가시킴

◦ 수변 지역의 식생 제거는 하상의 안정성 감소, 침식 증가, 퇴적물 여과 능력 감소를 가져오고 이에 따라 퇴적물 이동이 증가됨, 또한 하천으로의 큰 나무조각 공급과 하천의 퇴적물 운반 효율성을 감소시킴

3) 퇴적물 지표와 수치목표

〈표 4〉 퇴적물 지표와 수치목표 (Garcia River)

생활단계와 수로의 안정성	지표	수치목표
배아 발달(embryo development)	% 세립 퇴적물 (<0.85mm)	14%
생장(rearing)	웅덩이 빈도	주요 웅덩이가 총 서식지 길이의 40%
수로의 구조/안정성	V^*	≤ 0.21 (평균) ≤ 0.45 (최대)
수로의 구조/안정성	d_{50} (평균 입자 직경)	$\geq 69\text{mm}$ (평균) $\geq 37\text{mm}$ (최소)

5. South Fork Eel River (California 주)

1) 주요 이용 목적: 냉수 어족 어업

2) 문제점: 하천 매적, 수위 감소로 인해 퇴적물 부하와 세립 퇴적물이 증가하고, 서식지 복잡도가 감소하여 어류가 감소함

3) 퇴적물 지표와 수치목표

〈표 5〉 퇴적물 지표와 수치목표 (South Fork Eel River)

지표	수치목표
1. 세립 퇴적물 지표	
% 세립 퇴적물<0.85mm	14%
V^*	<0.21(평균)
2. 수로 변화와 조립 퇴적물	
요선 프로파일	평균 요선 프로파일 경사주변의 요선 고도의 변이가 증가하는 방향
3. 부유 퇴적물 지표	
탁도	배경 수준보다 20%이상 높지 않을 것

6. Upper Grande Ronde Sub-Basin (Oregon 주)

- 1) 이용목적: 어업, 수중 생물의 생장(어류의 서식, 산란, 이주), 휴양, 관개용수, 식수 공급
- 2) 문제점: 세립 퇴적물의 퇴적 증가
 - 연어의 사망률 증가, 성장 감소, 병에 대한 저항력 감소
 - 유생의 성장 방해
 - 연어의 이동과 이주 변화
 - 먹이가 되는 유기물의 감소
- 3) 퇴적물 지표와 수치목표: 20% 하상 세립 퇴적물

7. Lake Luxembourg (Pennsylvania 주)

- 1) 이용목적: 홍수조절, 용수공급, 휴양
- 2) 문제점: 퇴적물, 영양염 부하 증가에 따른 수심 감소, 탁도 증가, 조류 증가로 인한 수질 악화
- 3) 퇴적물 TMDL: 퇴적물 연간 부하량 950123 lbs/yr

8. Georgia 주

- 1) 문제점: 과도한 퇴적물로 인한 생물학적 서식지 손상
 - 도로, 농업, 벌채, 주거지 개발, 휴양 활동으로 인한 유역으로부터의 퇴적물 부하 증가
 - 독 침식, 하상 침식, 비포장 도로, 목장, 하천에 인접한 도로에 의한 하천 내부의 퇴적물 부하 증가
- 2) 수치 목표
 - 수치 목표 설정 방법

상태가 양호한 참조 하천에 기초한 유량과 퇴적물 부하량과의 회귀직선식을 구하고(이 직선의 95% 신뢰구간 안에 있으면 하천이 매적이나 붕괴없이 퇴적물을 이동시킬 수 있는 양호하고 안정한 상태, 이 범위를 벗어나면 불안정하고 생물학적 손상을 줄 수 있는 상태로 간주), 비점오염원 모델을 이용하거나 과거의 유량 데이터를 바탕으로 일별 유량을 산정한 후, 이 유량과 회귀직선으로부터 퇴적물의 농도와 부하량을 구함, 연평균 퇴적물 부하 능력과 임계 유량 년도의 연간 부하량을 산정하여 TMDL의 수치 목표를 설정함.

3) Gorgia 주의 설정된 TMDL

〈표 6〉 Gorgia 주의 설정된 TMDL

지역	TMDL 목표	
	연평균 퇴적물 부하(Mg/yr)	임계 유량 연도 퇴적물 부하(Mg/yr)
Stekoa Creek	10000	2500
Little Shoals Creek	5100	1200
Middle Fork Broad River	25000	4400
North Fork Broad River	18000	4200
South Fork Broad River	33000	5700
Toccoa Creek	10000	2500

9. West Virginia 주

1) West Virginia 주의 호수에 대한 TMDL

〈표 7〉 West Virginia 주의 호수에 대한 TMDL

이용목적	문제점	지역	TMDL 수치목표
◦ 휴양 ◦ 수중 생물 의 서식지	◦ 두꺼운 진흙 침적, 서식지의 막힘, 탁도 증가로 인해 수중생물에 악영향을 미침 ◦ 접근성 감소, 호수의 심미적 기능 저하로 휴양기능에 악영향을 미침	Saltlick Pond #9	장기간 연간 퇴적율: 1.79cm/yr
		Mountwood Park Lake	◦ 퇴적물 부하: 1518.59 kg/day ◦ 40년 후 깊이의 30%를 유지 할 수 있는 퇴적율 (70% 감소)
		Bear Lake	장기간 연간 퇴적율: 0.3 cm/yr
		Castleman Run Lake	장기간 연간 퇴적율: 0.63 cm/yr
		Ridenour Lake	장기간 연간 퇴적율: 0.25 cm/yr
		Turkey Run Lake	장기간 연간 퇴적율: 0.33 cm/yr

10. Utah 주

〈표 8〉 Utah 주의 설정된 TMDL 요약

지역	수질목표/종말점	TMDL
Otter Creek	어류 번식 증가: 150-200 pds/acre 송어 어족의 회복	93000ton/yr 퇴적물 감소 30마일의 하천둑/수로를 따르는 퇴적물의 감소
Chalk Creek	195pd/acre 어류 재생산	130000ton/yr 퇴적물 감소 8200ton/yr 퇴적물감소(하천수로/하천제방)

11. Montana State

〈표 9〉 Montana 주의 설정된 TMDL 요약

지역	수질목표/종말점	TMDL
Deep Creek	◦ 30% 세립 퇴적물 (<6.35mm) ◦ TSS대 유량 Q 회귀 직선 기울기가 0.26	◦ TSS 부하가 참조 구간(reach)과 같도록 ◦ 수로 길이의 2275 feet 증가
Elk Creek	서식 송어의 회복	년간 퇴적물 부하의 50% 감소

12. South Dakota State

〈표 10〉 South Dakota 주의 설정된 TMDL 요약

지역	수질목표/종말점	TMDL
Lake Kampeska	과영양상태에서 부영양상태로의 전환	퇴적물 부하의 25% 감소
Pelican Lake		퇴적물 부하의 65% 감소
Lake Byron	연간 퇴적물 축적을 1200ton/yr로 감소	퇴적물 부하의 50% 감소
Lake Faulkton	15.5 acre의 평균 호수 깊이를 6 피트로 증가	호수 퇴적물의 150000 입방 야드 제거
Lake Hendricks	100 acre의 평균 호수 깊이를 6 피트로 증가	호수 퇴적물의 1000000 입방 야드 제거
Lake Hiddenwood	53 acre-feet로 증가된 부피에 대해 깊이 증가	증가된 깊이 유지 퇴적물 부하 5% 감소
McCook Lake	183 acre의 평균 호수 깊이를 4.5 feet로 증가	호수 퇴적물의 1700000 입방 야드 제거
Redfield Lake	31 acre의 평균 호수 깊이를 5 feet로 증가	호수 퇴적물의 250000 입방 야드 제거
Swan Lake	TSI(secchi depth) <65	

13. North Dakota State

〈표 11〉 North Dakota 주의 설정된 TMDL 요약

지역	수질목표/종말점	TMDL
Bisbee-Big Coulee Dam	TSI 개선	퇴적물 부하의 40% 감소
Harvey Dam	TSI 개선	퇴적물 부하의 30% 감소
Cottonwood Creek/Lake		퇴적물 부하의 30% 감소