

오염매체 통합관리를 위한 유해화학물질의 다매체 환경기준 설정에 관한 연구

-다매체거동모델을 활용한 타당성 평가를 중심으로

신용승 이동수 구현정



한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 신용승 (한국환경정책·평가연구원)
연구참여자 구현정 (한국환경정책·평가연구원)
이경빈 (한국환경정책·평가연구원)
이동수 (서울대학교 환경대학원)
김수진 (서울대학교 환경대학원)
이경림 (서울대학교 환경대학원)
장길호 (서울대학교 환경대학원)

연구자문위원

김 균(한국화학연구원 책임연구원)
박광식(동덕여자대학교 교수)
백도명(서울대학교 교수)
정희석(환경부 환경보건정책과 과장)
최경희(국립환경연구원 연구관)

© 2004 한국환경정책·평가연구원

발행인 윤서성
발행처 한국환경정책·평가연구원
서울시 은평구 불광동 613-2
우편번호 122-706
전화 380-7777 팩스 380-7799
<http://www.kei.re.kr>

인쇄 2004년 12월
발행 2004년 12월
출판등록 제17-254호
ISBN 89-8464-103-0 93530

값 6,000원

서 언

산업발달에 따라 다양한 배출원으로부터 수많은 화학물질이 환경으로 배출되고 있으며 이에 따라 환경오염현상은 점차 복잡화되어가고 있습니다. 또한 환경은 대기, 물, 토양 등 여러 가지 매체가 상호작용하는 유기적 시스템이라는 점은 익히 잘 알려져 있는 사실입니다. 과거의 환경관리정책은 각각의 매체들을 개별적으로 접근하여 다루어 왔었으나 이러한 매체별 접근방식은 현대의 복잡한 환경문제를 해결하기에는 그 한계를 드러내고 있습니다. 따라서 최근 들어 선진국에서는 ‘통합 환경관리’ 개념에 기초한 정책개발이 시작되었으며 그 주요 대상과 내용은 유해화학물질에 대한 매체 통합관리로 통하고 있습니다.

이제 세계적으로 통합 환경관리가 환경관리정책의 새로운 패러다임으로 자리 잡아가고 있음은 재론의 여지가 없는 것으로 생각됩니다. 이에 따라 각국은 유해화학물질에 대한 매체 통합관리를 차츰 정책에 확대·반영해 나가고 있는 것으로 보입니다. 예컨대, 네덜란드에서는 다양한 종류의 다매체 거동모델을 개발하고 이를 유해화학물질의 다매체 환경기준설정 등 환경관리정책수립에 적극적으로 활용하고 있는 것으로 알려져 있습니다. 우리나라도 환경부 G7과제 및 차세대핵심환경기술개발사업의 다매체 거동연구를 통해 국내의 환경적, 지역적 특성을 고려한 다매체 거동모델을 개발해 온 것으로 알고 있습니다. 그러나 개발된 틀을 활용하여 통합 환경관리의 실천을 위한 구체적인 정책수단을 개발함에 있어서는 초기단계로서 아직 연구해야할 과제들이 산적해 있다고 할 수 있습니다. 앞으로 우리나라에서 유해화학물질의 통합 환경관리를 위해서는 무엇보다도 기존의 환경관리정책의 문제점 특히, 매체별 환경기준설정의 문제점을 진단하고 이를 개선하는 것이 시급한 과제라 할 수 있습니다.

이에 본 연구원에서는 지금까지 기존의 유해화학물질에 대한 매체별 환경기준설정의 문제점을 진단하고 새로운 다매체 환경기준설정방안을 모색하고자 본 연구를 수행하였습니다. 본 연구에서는 무엇보다도 ‘다매체 거동모델’이라는 과학적 틀을 적용하여 유해화학물질 정책수립에 있어서의 시사점과 정책방안을 도출하였다는 점이 가

장 큰 의의라 할 수 있을 것입니다. 이러한 연구는 기존의 유해화학물질 거동연구를 통해 집적된 과학적 연구 성과를 환경관리정책수립과 연계시킴으로써 “과학적 토대를 기반으로 하는 관리정책수립”이라고 하는 21세기 환경정책연구의 목표달성에 기여할 수 있을 것으로 기대됩니다. 아무쪼록 본 연구를 통해 우리나라 유해화학물질관리정책이 한 걸음 더 진보하고 선진화될 수 있는 계기가 마련되었으면 하는 바램입니다.

끝으로 연구를 맡아 수행해 주신 본 원의 신용승 박사께 사의를 표하며, 과제에 참여하여 주신 구현정, 이경빈 연구원의 노고에 감사드립니다. 그리고 공동연구자로서 성공적으로 연구가 마무리될 수 있도록 도와주신 서울대학교 이동수 교수님과 연구진으로 참여하신 김수진, 이경림, 장길호씨께 감사드립니다. 또한 바쁘신 중에도 불구하고 심사를 맡아주신 한국화학연구원 김균 박사, 동덕여자대학교 박광식 교수, 서울대학교 백도명 교수, 환경부 환경보건정책과 정희석 과장, 국립환경연구원 최경희 연구관, 그리고 본 원의 황상일 박사, 이정호 박사, 방상원 박사께도 감사를 드립니다.

2004년 12월

한국환경정책·평가연구원

원 장 윤 서 성

국 문 요 약

환경이란 물, 공기, 토양, 그리고 생물계로 이루어진 하나의 시스템이며 매체별 환경관리 또는 특정매체 중심의 환경관리방식은 때로는 비효율성을 초래하거나 정책의 실패로 이어질 가능성이 잠재해 있다. 더욱이 최근 들어 급격한 산업화에 따라 배출원이 다양해지고, 여기서 배출되는 오염물질 역시 다양한 유해화학물질이 포함되는 등 점차 환경오염문제가 복잡·다원화되는 양상을 나타내고 있다. 이러한 복잡한 환경오염 문제를 효과적으로 해결하기 위해서 선진국에서는 ‘통합 환경관리체계’ 구축을 21세기 주요 환경정책 방향으로 설정하고 이와 관련한 연구·개발 및 제도도입을 적극적으로 추진하고 있는 추세이다.

선진국에서 추진하고 있는 통합 환경관리의 내용을 살펴보면, 유해화학물질에 대한 매체 통합관리가 그 핵심을 이루고 있음을 알 수 있다. 유해화학물질은 환경중에 미량으로 존재하며 매체간 이동·분배하는 다매체 거동특성을 지니고 있어 관리정책 수립에 있어서도 ‘다매체적 접근방법’(multi-media approach)이 요구된다. 일찍이 선진국에서는 이러한 유해화학물질의 다매체거동특성을 해석하기 위한 효과적인 툴로서 ‘다매체 거동모델’(multimedia fate model)을 개발하고 이를 유해화학물질 관리정책수립 및 평가에 적극적으로 활용하고 있다. 우리나라에서도 최근 들어 다매체 거동 측정 및 모델링 분야의 연구를 추진해 오고 있으나 아직 그러한 연구 성과를 활용하여 정책수립 및 평가에 적용한 사례는 없는 실정이다.

한편, 환경기준은 환경관리정책의 기본목표이자 최종적인 목표라고 할 수 있다. 따라서 이러한 목표달성을 위해서는 과학적 근거를 바탕으로 환경기준을 설정하는 것이 최소한의 요구사항이라 할 수 있다. 더욱이 유해화학물질은 앞서 지적인 대로 환경중에서 복잡한 다매체거동특성을 나타내기 때문에 환경기준을 설정함에 있어서 어느 한 매체에 대해 개별적으로 기준치를 설정할 경우 다른 매체의 기준치와 모순성을

유발할 가능성이 있으며 이는 궁극적으로 환경행정의 실패로 이어질 가능성을 내포하게 된다.

본 연구의 주요 목적은 21세기 환경관리의 정책기조인 통합 환경관리의 국내 도입을 위한 첫 단계의 기초연구로서 다매체 환경기준 설정의 타당성을 평가하고 이를 설정하기 위한 과학적 방법론을 제시하는 데 있다. 이를 위해 국내에서 개발된 다매체 거동모델을 활용하여 대표적인 유해화학물질인 벤조(a)피렌(benzo(a)pyrene, B[a]P)을 대상으로 기존의 매체별 환경기준에 대한 '일관성 평가(coherence test)'를 수행하였다. 다매체 환경기준은 매체 통합관리를 위한 여러 구성요소 중 하나이며, 그 시발점에 불과하다고 본다. 이에 본 연구에서는 유해화학물질에 대한 매체 통합관리의 국내 도입을 위해 필요한 여러 가지 정책적, 기술적 향후과제들을 제안하였다.

본 연구의 주요 연구내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 선진국에서는 통합 환경관리 개념에 기초한 다양한 정책이 수립·시행되고 있는데, 그 핵심적인 내용으로서 유해화학물질에 대한 매체 통합관리가 강조되고 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 기본적으로 유해화학물질은 환경으로 배출된 후 여러 매체에 걸쳐 이동·분배하는 다매체 거동특성으로 인하여 이에 대한 해석 및 관리방안의 수립에 있어서 다매체 접근방식을 요한다. 이를 위해서는 우선 유해화학물질 관리정책의 기본 목표가 되는 환경기준부터 다매체 접근방식에 의거하여 설정할 필요가 있다.

셋째, 우리나라의 환경기준 설정현황을 살펴보면, 기본적으로 유해화학물질에 대한 기준설정 항목수가 절대적으로 부족할 뿐 아니라 위해성 평가와 같은 과학적 설정근거가 미흡한 것으로 분석된다. 특히, 매체간 환경기준의 조화가 전혀 고려되지 않고 있을 뿐 아니라 배출기준과의 연계성도 미흡하여 매체 통합관리 측면에서 볼 때 상당한 취약점을 내포하고 있는 것으로 평가된다.

넷째, 기존의 국내에서 개발된 EDCSeoul모형을 이용하여 벤조(a)피렌을 대상물질로 매체별로 설정된 환경기준간의 일관성 평가를 수행하였다. 대기, 수체, 토양, 퇴적물 등의 기준 매체별로 설정된 환경기준을 만족시키는 배출량을 계산하고, 각각에 대한 시나리오별 모델링을 수행하였다. 그 결과, 수체를 기준매체로 한 경우를 제외한 모든 시나리오에서 기준매체의 환경기준을 만족시키도록 배출량을 제어한다고 하더라도 장기적으로 다른 매체에서의 환경기준을 초과하게 되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 유해화학물질에 대한 환경기준을 설정할 때는 매체간 오염물질의 이동·분배특성을 고려한 ‘다매체 환경기준’으로서 설정해야 궁극적인 환경관리목표를 달성할 수 있음을 확인할 수 있었다.

다섯째, ‘사전오염예방’, ‘과학적 위해성 관리’, ‘다매체 접근방식’의 세 가지 원칙에 입각한 유해화학물질 매체 통합관리의 기본 정책방향을 제시하였다. 또한 유해화학물질관리우선순위 설정, 우선대상물질에 대한 다매체접근방법에 기초한 위해성 평가, 다매체 환경기준 및 배출허용기준 설정, 환경기준에 대한 기술적·경제적·사회적 타당성 검토, 사후 환경 모니터링 및 배출원 관리 활동 등의 구성요소들 간의 상호 피드백적인 매체 통합관리 체계를 제시하였다.

여섯째, 이상의 연구결과를 토대로 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 향후과제로서 ‘유해화학물질의 다매체 환경기준항목 확대’, ‘다양한 배출원 관리정책의 개발’, ‘업무분장 및 조직체계 정비’ 등 정책적 과제를 제안하였다. 또한 향후 기술적 과제로서 ‘환경모니터링 기술개발 및 데이터 축적’, ‘다매체 거동모델의 신뢰성 확보’, ‘위해성 평가 기술기반 확립’, ‘의사결정 지원 시스템 구축’ 등을 제안하였다.

본 연구는 국내에서 처음으로 ‘다매체 접근방법’을 적용한 환경정책 연구사례라는 데 가장 큰 의의가 있을 것으로 생각한다. 비록 벤조(a)피렌이라는 단일물질에 대한 평가이긴 하지만 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가결과는 다매체 환경기준설정의 필요성을 명백히 보여주었다고 판단된다. 앞으로 본 연구를 계기로 다양한 대상물질에 대해 다매체 접근방법에 기초한 연구를 지속할 필요가 있으며, 이를 통해 궁극적으로 국내 유해화학물질 관리의 선진화라는 목표를 달성할 수 있을 것으로 기대한다.

차 례

서 언 국문요약

제1장 서 론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구내용 및 방법	3
제2장 선진국의 매체 통합관리 현황	7
1. 매체 통합관리의 개념 및 필요성	7
가. 통합환경관리	7
나. 통합오염관리	9
2. 매체 통합관리의 시행배경	11
3. 선진국의 매체 통합관리 현황	13
가. 영국	13
나. 미국	14
다. 스웨덴	15
라. 일본	17
마. 네덜란드	19
4. 시사점	20
제3장 매체 통합관리를 위한 환경기준 설정현황	23
1. 환경기준의 정의 및 설정절차	23
가. 환경기준의 정의	23
나. 환경기준 설정시 고려요인	24

다. 환경기준 설정절차	25
2. 국내외 환경기준 설정현황	28
가. 국내외 매체별 환경기준 설정현황	28
나. 각국별 환경기준의 특징	34
3. 우리나라 환경기준의 문제점	39
제4장 다매체거동모델의 개발 및 활용 현황	41
1. 다매체거동모델의 정의 및 유용성	41
2. 다매체거동모델의 종류 및 구성요소	42
가. 다매체거동모델의 종류	42
나. 다매체거동모델의 구성요소	44
3. 외국의 다매체거동모델 개발 및 활용 현황	46
가. 네덜란드	48
나. 미국	50
다. 캐나다	52
라. 영국	54
마. 기타	55
4. 국내 다매체거동모델의 개발 및 활용 현황	55
가. POPsME	56
나. EDCSeoul	57
다. ECO2	58
제5장 다매체거동모델을 이용한 매체별 환경기준의 타당성 평가	59
1. 대상물질 및 다매체거동모델의 선정	59
가. 대상물질의 선정	59
나. 다매체거동모델의 선정	63
2. EDCSeoul 모델의 개요	63
가. 모델의 대상지역	63
나. 대상 환경매체	63

다. 모델에 포함된 거동기작	64
라. 모델의 자료처리 구조	66
3. 모델 입력자료 및 기초자료 수집	67
가. 벤조(a)피렌의 물리·화학적 특성	67
나. 대상 지역 토지이용도	68
다. 기상자료	69
라. 배출량 추정 자료	69
4. EDCSeoul의 예측 정확도 평가	70
가. 실측농도 자료수집	70
나. EDCSeoul 모델 예측 결과	72
다. EDCSeoul 모델 예측농도와 실측농도의 비교	75
라. EDCSeoul 모델 예측 상대농도와 실측 상대농도의 비교	76
5. 매체별 환경기준의 일관성 평가	79
가. 일관성 평가 절차	80
나. 벤조(a)피렌의 환경기준 설정현황	82
다. 매체별 환경기준의 일관성 평가결과	84
6. 시사점	87
제6장 유해화학물질의 매체 통합관리 및 다매체 환경기준 설정 방안	89
1. 매체 통합관리를 위한 기본방향 및 체계	89
가. 기본 정책방향의 설정	89
나. 유해화학물질의 매체 통합관리체계	92
2. 유해화학물질의 다매체 환경기준 설정방안	94
가. 다매체 환경기준 설정 절차	95
나. 매체간 환경기준 조화를 위한 알고리즘	97
3. 향후과제 및 정책제언	100
가. 정책적 과제	100
나. 기술적 과제	101

제7장 요약 및 결론	105
1. 요약	105
2. 연구의 한계 및 결론	107
 참 고 문 헌	 109
1. 국내문헌	109
2. 외국문헌	111
3. 전자물	116
 약 어 정 리	 117
 <부록> 외국의 주요 다매체거동모델의 구조 및 특징	 119
 Abstract	 147

표 차례

<표 2-1> 통합적 환경관리기법의 장점과 장애요소	9
<표 2-2> ‘기존제도’와 ‘상식적인 환경관리(CSI)’의 차이점	15
<표 2-3> 일본의 지방자치단체-사업체간 협약들의 예	18
<표 3-1> 우리나라의 대기환경기준 설정현황	29
<표 3-2> 각국의 대기환경중 유해물질(납)에 대한 환경기준 설정현황 비교	29
<표 3-3> 우리나라 수질기준항목 설정현황	31
<표 3-4> 각국의 유해물질관련 수질환경기준 설정현황 비교	32
<표 3-5> 각국의 토양오염기준 설정현황 비교	34
<표 3-6> 네덜란드의 다매체 환경기준 설정현황	38
<표 4-1> 다매체거동모델의 종류 및 기본 가정	44
<표 4-2> 주요 외국의 다매체거동모델	47
<표 4-3> SimpleBox 모델을 활용한 연구대상 물질 및 주요 연구내용	49
<표 4-4> 국내 다매체거동모델 개발 현황	56
<표 5-1> 16가지 PAHs의 주요 물리·화학적특성	60
<표 5-2> 벤조(a)피렌의 인체 유해성 및 유해 기준	62
<표 5-3> 모델 입력값으로 사용된 벤조(a)피렌의 물리·화학적 성질	68
<표 5-4> 서울지역 매체별 용적 계산을 위한 입력값	69
<표 5-5> 서울지역의 벤조(a)피렌 연간 배출량 추정결과	70
<표 5-6> 서울지역의 매체별 벤조(a)피렌 실측농도 결과	71
<표 5-7> EDCSeoul의 매체별 벤조(a)피렌 농도 예측결과	72
<표 5-8> 벤조(a)피렌의 대기농도에 대한 매체별 상대농도 예측 및 실측 결과	78
<표 5-9> 벤조(a)피렌의 매체별 환경기준 설정현황	83
<표 5-10> 벤조(a)피렌의 매체별 환경기준(MPC)에 대한 일관성 평가 결과	84
<표 6-1> 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 향후과제	104

<부표 1> GlobeTox 모델의 compartments and phases	122
<부표 2> Matrix of exposure pathways linking environmental media, exposure scenarios, and exposure routes.	129
<부표 3> 모델을 구성하는 volume elements와 compartments, phase.	131

그 립 차 례

<그림 1-1> 연구의 구성체계	4
<그림 2-1> 유해화학물질의 다매체거동 특성	12
<그림 3-1> 매체별 환경기준 설정절차	27
<그림 4-1> POPsME 모델의 개념도	57
<그림 5-1> 벤조(a)피렌의 구조	62
<그림 5-2> EDCSeoul의 모델 개념도	65
<그림 5-3> 모델의 자료입출력 및 처리흐름도	66
<그림 5-4> EDCSeoul의 매체별 벤조(a)피렌 농도 예측결과	73
<그림 5-6> EDCSeoul의 벤조(a)피렌 예측농도와 실측농도의 비교	76
<그림 5-7> 벤조(a)피렌의 대기농도에 대한 매체별 상대농도 예측치 및 실측치 비교	78
<그림 5-8> 매체별 환경기준의 일관성 평가 절차	81
<그림 6-1> 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 기본 정책방향	90
<그림 6-2> 유해화학물질의 매체 통합관리 체계도	92
<그림 6-3> 다매체 환경기준 설정 절차	96
<그림 6-4> 매체간 환경기준 조화를 위한 알고리즘	99
<부록 그림 1> SimpleBox 2.0 모델의 5개 partial scale간의 관계 구조	120
<부록 그림 2> GlobeTox의 계층적 구조.	123
<부록 그림 3> GlobeTox 모델의 입력과 출력.	123
<부록 그림 4> Air compartment of the continental scales.	124
<부록 그림 5> Water compartment of the continental scales.	124
<부록 그림 6> Sediment compartment.	125
<부록 그림 7> Ice caps compartment.	125
<부록 그림 8> CalTOX의 환경 매체사이의 오염물질 이동과정과 노출경로.	126

<부록 그림 9> CalTOX model의 7개 compartment에 대한 mass-exchange processes.	127
<부록 그림 10> TRIM.Fate 모델 시스템	133
<부록 그림 11> 환경 중 오염물질 거동에 영향을 미치는 관계 및 과정에 대한 모델 개념도	134
<부록 그림 12> EQC model Environment.	136
<부록 그림 13> EUSES 모델의 기본 과정	137
<부록 그림 14> EUSES의 Nested continental 구조	138
<부록 그림 15> Globo-POP 모델의 구조	139
<부록 그림 16> MSCE-POP 다매체거동모델의 입출력 자료.	141
<부록 그림 17> MSCE-POP hemispheric model의 processes	142
<부록 그림 18> MEDIA로 계산한 1993년 지표 5245m의 α -HCH의 농도	145

제1장 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

과거의 환경정책은 대기, 수질, 토양, 폐기물 등 매체별 관리에 초점을 맞추었을 뿐 아니라 환경기준에 있어서도 매체별로 개별적인 기준을 설정하였다. 이러한 개별적이고 단편적인 환경관리체계는 초기 환경오염을 관리하기 위해 불가피하였으나, 21세기의 새로운 환경오염문제를 해결하기에는 미흡한 측면이 있다.

환경이란 물, 공기, 토양, 그리고 생물계로 이루어진 하나의 시스템이며 매체별 환경관리는 한 매체에서의 오염문제를 다른 매체에서의 환경문제로 치환하는 것에 불과한 경우가 많다. 즉, 환경문제를 대기, 수질, 폐기물, 토양 등 환경매체별로 접근하여 어떤 매체에 대한 규제를 강화할 경우 다른 매체에 대한 압력을 증가시키는 경향이 있다. 그러므로 ‘매체별 환경관리’ 또는 ‘특정매체 중심의 환경관리방식’은 때로는 비효율성을 초래하거나 정책의 실패로 이어질 가능성이 잠재해 있다(정희성, 1996).

현재 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서는 매체별 환경관리프로그램을 활용하고 있으나 결국 이러한 접근방법이 정책실패로 이어지는 사례를 종종 찾아볼 수 있다. 그 대표적인 예가 미국 뉴욕주의 죠지호의 사례라고 할 수 있다. 죠지호는 뉴욕주의 대표적인 휴양지역의 하나로 주정부는 일찍이 이지역의 폐수배출을 금지하였다. 그러나 1970년대 중반이후 이 호수에서 잡히는 물고기에서 인체에 위협한 수준의 수은과 PCBs가 함유되어 있다는 사실이 밝혀지면서 이의 원인을 조사한 바 있다. 그 결과, 오염원인이 폐수가 아닌 산업시설과 발전소에서 배출되는 대기오염물질이 호수로 침적됨으로써 발생한 것으로 결론지어졌다(노유희 외, 1989).

최근 들어 급격한 산업화에 따라 배출원이 다양해지고, 여기서 배출되는 오염물질 역시 다양한 유해화학물질이 포함되는 등 점차 환경오염문제가 복잡·다원화되는 양상을 나타내고 있다. 이러한 복잡한 환경오염 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 선

진국에서는 ‘통합 환경관리체계’ 구축을 21세기 주요 환경정책 방향으로 설정하고 이와 관련한 연구·개발 및 제도도입을 적극적으로 추진하고 있는 추세이다.

우리나라도 환경부의 『환경백서(환경부, 2001)』에서 21세기 환경정책의 방향으로 ① 환경친화적 경제 사회체계 구축, ② 사전예방정책, ③ 통합 환경관리정책, ④ 수요관리정책, ⑤ 시민참여의 환경정책, ⑥ 지구환경보전 정책과 남북환경협력 등을 제시함으로써 통합 환경관리체계의 구축을 향후 주요 추진과제로 발표한 바 있다.

그러나 통합 환경관리의 개념은 배출원 통합관리에서부터 오염매체 통합관리에 이르기까지 매우 포괄적이고 광범위한 개념과 대상을 담고 있다. 선진국에서 매체통합적 환경관리가 가장 활발하게 적용되고 있는 분야가 바로 유해화학물질 관리정책이라고 할 수 있다. 유해화학물질은 환경중에 미량으로 존재하며 매체간 이동·분배하는 다매체 거동특성을 지니고 있어 관리정책수립에 있어서도 ‘매체 통합적’ 또는 ‘다매체 접근방법’(multi-media approach)이 요구된다.

일찍이 선진국에서는 이러한 유해화학물질의 다매체거동특성을 해석하기 위한 효과적으로 툴(tool)로서 ‘다매체 거동모델’(multimedia fate model)을 개발하고 이를 유해화학물질 관리정책수립 및 평가에 적극적으로 활용하고 있다. 우리나라에서도 최근 들어 다매체 거동측정 및 모델링 분야의 연구를 추진해 오고 있으나 아직 그러한 연구성과들을 유해화학물질의 정책수립 및 평가에 적용한 실질적인 사례는 없는 형편이다.

한편, 환경기준은 환경관리정책 또는 행정의 기본목표이자 최종적인 목표라고 할 수 있다. 따라서 이러한 목표달성을 위해서는 무엇보다도 과학적 근거를 바탕으로 환경기준을 설정하는 것이 최소한의 요구사항이라 할 수 있다. 더욱이 유해화학물질은 앞서 지적한 대로 환경중에서 복잡한 다매체거동특성을 나타내기 때문에 환경기준을 설정함에 있어서 어느 한 매체에 대해 개별적으로 기준치를 설정할 경우 다른 매체의 기준치와 모순성을 유발할 가능성이 있으며 이는 궁극적으로 환경행정의 실패로 이어질 수 있다. 그러나 아직까지 우리나라는 유해화학물질에 대한 환경기준 설정항목이 미흡할 뿐 아니라 매체별 기준에 대한 매체통합적 관점에서의 검토가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 국내에서 통합 환경관리정책의 효과적인 도입 및 시행

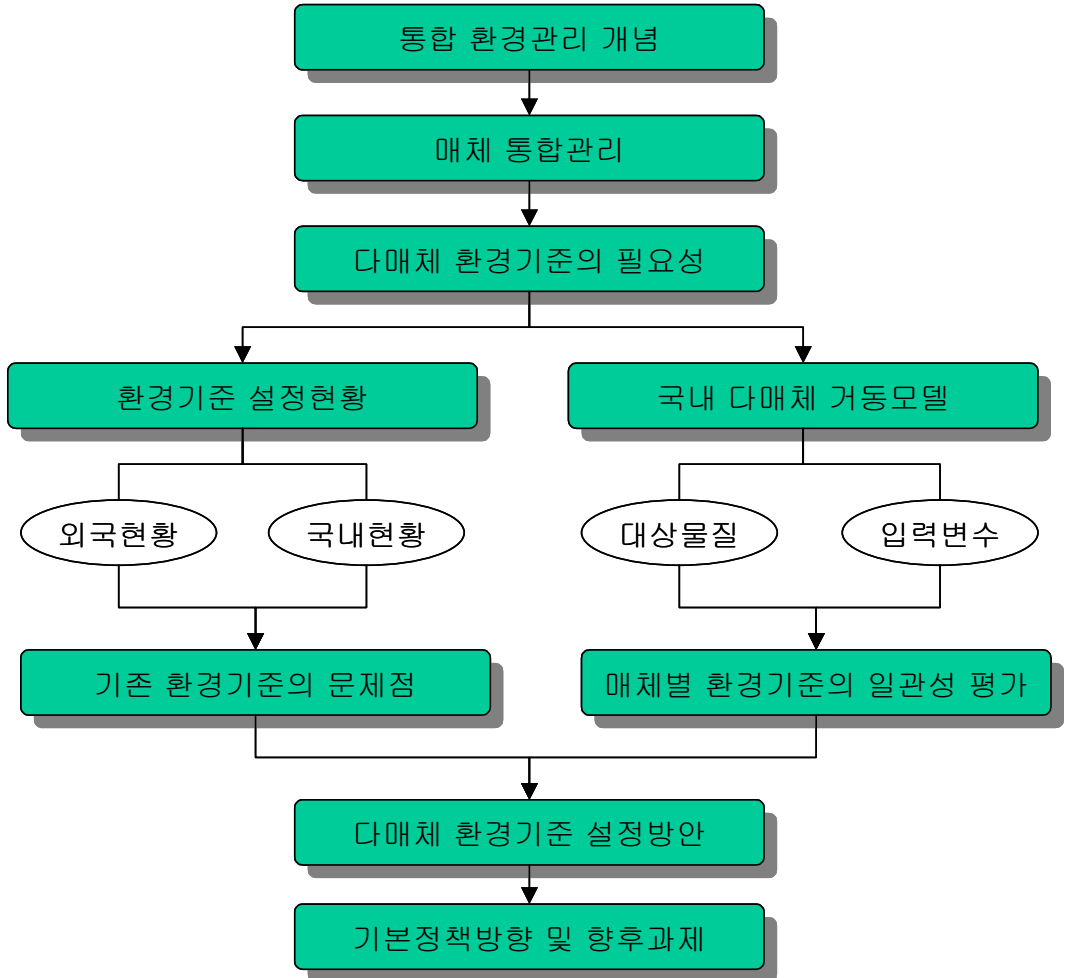
을 위해서는 무엇보다도 매체 통합적 관점에서 기존 환경정책의 문제점을 진단하는 것이 필요하며, 특히 그동안 매체별로 단절되어 있던 환경기준에 대한 검토가 시급한 과제라 할 수 있다.

본 연구의 주요 목적은 21세기 환경관리의 정책기조인 통합 환경관리의 국내 도입을 위한 첫 단계의 기초연구로서 ‘다매체 환경기준’¹⁾ 설정의 타당성을 평가하고 이를 설정하기 위한 과학적 방법론을 제시하는 데 있다. 이를 위해 국내에서 개발된 다매체 거동모델을 활용하여 대표적인 유해화학물질인 벤조(a)피렌(benzo(a)pyrene, B[a]P)을 대상으로 기존의 매체별 환경기준에 대한 ‘일관성 평가’(coherence test)를 수행하였다. 다매체 환경기준은 매체 통합관리를 위한 여러 구성요소 중 하나이며, 그 시발점에 불과하다고 본다. 이에 본 연구에서는 유해화학물질에 대한 매체 통합관리의 국내 도입을 위해 필요한 여러 가지 정책적, 기술적 향후과제들을 제안하였다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구의 내용은 크게 통합 환경관리개념에 기초한 유해화학물질의 매체 통합관리에 대한 ‘정책동향분석’과 유해화학물질의 매체별 환경기준의 문제점 진단을 위한 ‘다매체 거동모델 적용연구’로 나눌 수 있다. 정책동향분석에서는 선진국의 정책사례들을 소개하고 이를 분석하여 이의 국내도입을 위한 시사점을 도출하였다. 한편, 다매체 거동모델 적용연구에서는 사례물질인 벤조(a)피렌에 대한 모델링을 통한 매체별 환경기준의 ‘일관성 평가’(coherence test)를 수행함으로써 기존 매체별 환경기준의 문제점을 분석하고 이에 대한 대안으로서 다매체 환경기준설정의 필요성과 설정방안을 제시하였다. 끝으로 이상의 연구결과를 종합하여, 향후 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 기본 정책방향 및 향후과제를 도출하였다.

1) 본 연구에서는 대기, 수체, 토양 등 개별적으로 설정된 ‘매체별 환경기준’에 대비되는 용어로서 유해화학물질의 매체간 이동·분배 특성을 고려하여 매체간 환경기준의 상호모순성을 배제한 일련의 환경기준으로서 ‘다매체 환경기준’이란 용어를 사용하였다.



<그림 1-1> 연구의 구성체계

제1장 ‘서론’에서는 연구의 필요성 및 목적, 연구내용 및 방법에 대해 기술하였다.

제2장 ‘선진국의 매체 통합관리 현황’에서는 매체 통합관리의 개념 및 필요성을 소개하고 이의 시행배경을 제시하였으며 영국, 미국, 스웨덴, 네덜란드 등 선진국에서 시행하고 있는 매체 통합관리의 현황 및 시사점을 분석하였다.

제3장 ‘매체 통합관리를 위한 환경기준 설정현황’에서는 국내외의 환경기준, 특히 유해화학물질에 대한 환경기준설정 현황을 분석하고 매체 통합관리 측면에서 우리나라 환경기준설정의 문제점을 도출하였다.

제4장 ‘다매체 거동모델의 개발 및 활용현황’에서는 국내외에서 개발되어 활용되고 있는 Simplebox, Caltox, Chemcan, TRIM, POSMe, ECO2, EDCSeoul 등 여러 종류의 다매체 거동모델의 특징 및 장단점을 분석하고 이들 모델이 환경관리, 특히 유해물질 관리 정책분야에 있어 어떻게 활용되고 있는지에 대한 현황을 조사·소개하였다.

제5장 ‘다매체 거동모델을 이용한 매체별 환경기준의 타당성 평가’에서는 대표적인 위해우려물질의 하나인 벤조(a)피렌을 대상물질로 선정하고 기존의 국내 개발된 EDCSeoul 모델을 이용하여 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가를 수행하고 시사점을 도출하였다.

제6장 ‘유해화학물질의 매체 통합관리 및 다매체 환경기준설정 방안’에서는 이상의 연구결과를 토대로 앞으로 우리나라에서 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 기본 정책방향 및 체계, 다매체 환경기준 설정방안, 그리고 향후 정책적·기술적 과제를 제안하였다.

제7장 ‘요약 및 결론’에서는 이상의 연구결과들을 요약하고 이로부터 도출된 결론 및 한계점을 제시하였다.

제2장 선진국의 매체 통합관리 현황

본 장에서는 매체 통합관리의 개념에 대해 고찰하고 외국에서 도입·시행하고 있는 관련제도 사례를 분석함으로써 매체 통합관리의 필요성 및 국내 도입에 따른 시사점을 도출하고자 한다.

1. 매체 통합관리의 개념 및 필요성

가. 통합환경관리

최근 들어 환경관리의 핵심적인 대안으로 대두되기 시작한 통합 환경관리(Integrated Environmental Management, 이하 IEM)는 환경오염간의 상호관련성에 대한 인식을 토대로 환경을 하나의 시스템으로 파악하여 총체적인 영향을 파악하고 이에 대처하는 ‘총체적인 접근방법’(holistic approach)의 하나라고 할 수 있다. IEM의 개념은 1970년대의 환경문제를 해결하기 위해 전통적으로 적용하던 개별적 접근방법이 이후 새로운 환경문제의 등장과 비효율성의 벽에 부딪히면서 새로운 대안으로서 대두되기 시작하였다.

IEM은 통합적 환경관리 제도 및 수단을 통하여 사회경제적인 개발목표와 환경질 및 생태적 기능의 보전 목표와의 조화를 목표로 한다(Antunes & Santos 1999). 따라서 IEM은 지속 가능한 개발을 달성하고 생물권(biosphere)의 최대 잠재발전능력을 보전하기 위하여 자원배분을 실행함에 있어서 사회경제적, 기술적, 생태적 힘의 균형을 이루는 것을 지향한다.

‘통합 환경관리’라는 용어는 크게 (1) 환경정책과 경제정책 등 여타의 국가정책간의 통합, (2) 대기·수질·토양 등 환경매체간의 통합관리, (3) 특정오염현상에 대한 저감

대안의 통합적 최적화 등의 의미로 혼용되고 있으나 대체적으로는 두 번째의 의미로서 통용되고 있다(정희성, 1996). 한편, 통합 환경관리정책이란 다음과 같이 환경질의 관점에서 오염매체, 환경기준, 관련학문, 수용체 등을 통합적으로 관리함을 의미한다.

- ① 오염매체 : 개별매체 중심에서 모든 매체를 종합적으로 관리
- ② 환경기준 : 화학적 환경기준에서 화학적, 생물학적, 물리학적 기준의 종합관리
- ③ 관련학문 : 개별학문 중심에서 학문분야간의 공동작업을 통하여 환경을 관리하는 접근
- ④ 수 용 체 : 주로 인간의 건강에 초점을 맞추던 관리정책에서 벗어나 인체 및 생태계 영향을 모두 고려한 종합적인 관리기술

IEM은 환경오염문제가 다른 환경문제로 전환하는 것을 실질적으로 해결하며, 효율적인 환경오염제어수단을 선택할 수 있도록 하며, 환경개선에 대한 우선순위 결정능력을 제고하는 등 장점을 제공한다. 반면, IEM이 실질적인 효과를 거두기 위해서는 활용 가능한 정책수단에 대한 폭넓은 이해와 정보의 축적이 요구되며, 혁신적인 체제의 변화로 매우 정밀하게 설계하여 접근하지 않으면 조직의 저항과 공동화 현상이 발생할 우려가 있다(정희성&변병설, 2003).

<표 2-1> 통합적 환경관리기법의 장점과 장애요소

통합적 환경관리기법의 장점	통합적 환경관리기법 도입의 장애요소
① 환경오염문제를 다른 환경문제로 전환하는 것을 막고 실질적으로 해결 ② 효율적인 환경오염제어수단을 선택할 수 있음 ③ 환경개선에 대한 우선순위 결정능력을 제고함 ④ 다른 국가정책분야와 효율적으로 협조할 수 있음 ⑤ 환경행정체계를 단순하게 할 수 있음	① 활용 가능한 정책수단에 대한 폭넓은 이해와 정보의 축적이 부족함 ② 혁신적인 체제의 변화로 매우 정밀하게 설계하여 접근하지 않으면 조직의 저항과 공동화 현상이 발생할 우려가 있음

나. 통합오염관리

최근에는 통합 환경관리의 일환으로서 모든 환경매체에 대한 영향을 고려하여 체계적으로 환경오염을 감소시키는 방법을 찾는 통합오염관리(Integrated Pollution Prevention and Control, 이하 IPPC)가 대두되고 있다. 이러한 맥락에서 IPPC는 IEM을 실행하기 위한 방법론이라 할 수 있는데, IPPC는 오염물질의 배출을 최소화 또는 예방하고 배출된 오염물질의 유해성을 제거하며, 산업생산과정에서부터 모든 매체까지의 단계별 오염관리수단을 개발하는 것을 기본 목표로 한다(정회성&변병설, 2003).

IPPC는 ‘통합적 위해성 평가’, ‘통합적 의사결정’, ‘통합적 집행 및 운영’ 등 세 가지 요소를 포함하고 있다(OECD, 1994).

첫째, 전체로 환경을 고려하여 오염물질이 각 매체를 통하여 노출되는 경로나 생애주기를 종합적으로 고려하여 오염물질이나 행위에 대해 ‘통합적 위해성 평가’(integrated risk assessment)를 하는 것이다.

둘째, 상품과 용역의 생산과 관련된 생애주기를 통한 배출을 억제하고 (원재료와 에너지투입, 수송, 생산, 제품설계와 이용, 제품의 폐기) 특정지역에서 모든 오염원과 모든 매체에 걸친 오염영향을 막기 위한 대안을 강구함으로써 '통합적 의사결정'(integrated decision-making process)을 수행하는 것이다.

셋째, IPPC를 지원하기 위한 법적, 행정적, 제도적 장치를 마련하는 '통합적 정책집행 및 운영'(integrated implementation and operations)을 수행하는 것이다.

이상과 같은 IPPC의 구현을 위해 일반적으로 동원되는 방법으로는 '오염물질 통합관리', '배출원 통합관리', '지역통합관리' 등이 있다(Irwin, 1990).

○ 오염물질 통합관리

오염물질은 환경중에서 반응에 의해 다른 형태로 변화하고 다른 매체로 이동하는 특징이 있다. 따라서 통합오염물질관리는 특정오염물질, 특히 유해화학물질의 위해성을 감소시키며 이를 안전하게 관리하는데 주 목적이 있다.

오염물질은 배출원으로부터 한개 이상의 환경매체로 배출이 일어나며, 환경매체간 경계를 넘어 분배 또는 이동하므로 이를 통합관리하는 것은 당연하다. 이러한 환경매체간 이동특성이 두드러진 것으로 유해화학물질을 들 수 있다. 따라서 유해화학물질은 여러나라에서 통합오염관리의 중점 대상물질이 되고 있다. 그러나 환경중으로 배출되는 유해화학물질은 엄청나게 많은 종류²⁾가 있으며 더욱이 이들 물질은 환경중에서 복잡한 반응작용을 통해 변화하게 되는데, 이러한 화학물질들간의 상호작용을 명백히 규명하는데 통합오염물질관리의 한계가 있다.

○ 배출원 통합관리

IPPC의 두 번째 방법은 오염 배출원(emission sources) 관리이다. 대기, 수질, 폐기

2) 전세계적으로 약 10만종의 화학물질이 유통되고 있으며, 우리나라에서만도 약 3만7천여종의 화학물질이 유통되고 있음.

물 등 배출활동에 대해 각각 별도의 모니터링, 허가제도, 또는 환경검사프로그램을 시행하기 보다는 배출물질을 중심으로 통합하여 규제하는 것이 배출원 통합관리의 개념이라 할 수 있다.

o 지역 통합관리

IPPC를 구현하기 위해서는 지역 통합관리가 필요하다. 이는 지리적 또는 생태학적 지역의 특성을 고려하여 그 지역에 영향을 줄 수 있는 모든 활동들을 효과적으로 관리하도록 의사결정을 하는 것을 의미한다. 즉, 특정지역의 배출원과 생태자원의 위치 및 특성, 오염물질 배출로 인한 영향을 파악함으로써 그 지역의 환경질을 유지하기 위해서는 각각 어떠한 조치가 있어야 하는지를 결정해야 한다. 또한 지역의 특성을 감안하여 개별 매체중심의 관리방안에 의해 파악되지 않은 부분이 있는지를 검토해야 한다. 최근 미국 등 주요 선진국과 우리나라에서 추진되고 있는 ‘오염총량관리제도’가 지역통합관리적 접근방법에 기초한 통합 환경관리제도의 가장 적절한 사례라 할 수 있겠다.

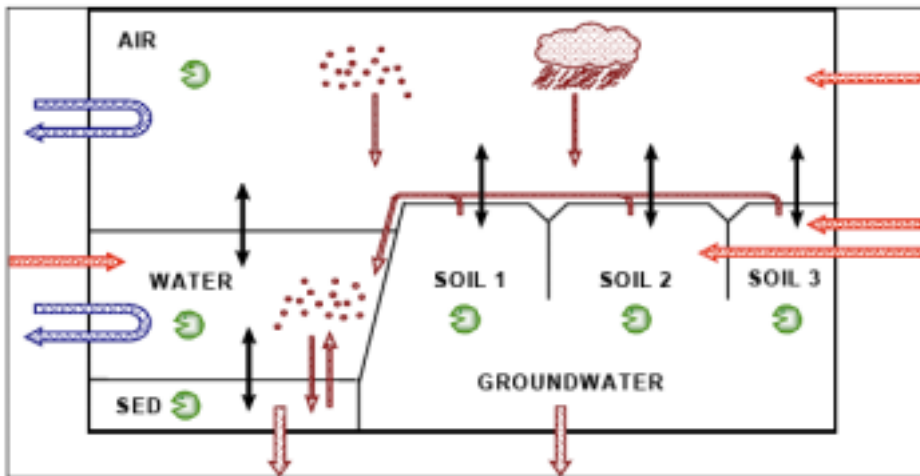
2. 매체 통합관리의 시행배경

이상에서 살펴본 대로 IEM 및 IPPC의 공통된 특징은 바로 오염물질에 대한 ‘매체 통합관리’를 강조하고 있다는 점이다. 즉, 기존의 전통적인 배출원관리에서 배출물질 중심으로 환경관리의 관점이 이동되면서 환경중에서 오염물질의 변환 및 이동을 규명하고 이를 토대로 오염매체를 통합관리하려는 경향이 생겨나고 있음에 주목할 필요가 있다.

일찍이 선진국에서는 환경오염의 원인물질로서의 화학물질의 중요성을 인식하고, 유해화학물질의 위해성관리를 위한 다매체적 접근방법을 채택하고 있다. 지금까지의 환경관리개념이 개별 매체로의 오염물질의 배출과 이로 인한 인체 및 생태계에 대한 노출영향을 저감하는 차원이었다면, 앞으로의 환경관리는 매체간 오염물질의 이동·

분배를 포함한 거동해석에 기초한 다매체적 접근방식을 요구하고 있다. 이러한 환경 관리에 있어 다매체적 접근방법에 대한 논의는 1984년 미국의 환경보존재단 (Environmental Conservation Foundation)과 US EPA가 공동으로 주최한 『새로운 차원의 오염원 관리』 (New Dimensions of Pollutant Control)에서 시작되었다.

환경 중으로 배출된 유해화학물질들은 대기 중에서 지표면으로 침강하여 토양이나 식물에 축적되거나 매립지 침출수로부터 하천으로 흘러들어가 어패류에 축적되거나 농약 등에 의해 토양이나 식품으로 이동하고 생물체로 축적되는 등 환경 중에 지속되고 잘 분해되지 않으며 여러 매체로 이동, 축적된다. 또한 대기나 수체 또는 이동하는 생물종들을 매개로 하여 국가간 경계를 넘어 장거리 이동을 하는 것으로 전 세계적으로 그 발생의 억제나 모니터링과 처리에 대한 관심이 증가되고 있다. 이와 같은 오염 물질의 다매체 환경적 특성은 일찍이 여러 연구자들에 의해 지적되어져 왔으며, 최근에는 다매체적 접근방법을 통한 오염물질의 관리가 하나의 정책적 수단으로 자리잡아가고 있다.



<그림 2-1> 유해화학물질의 다매체거동 특성

오염지역을 중심으로 수체나 토양, 대기 등 개별 매체에서의 유해화학물질을 관리하고자 한 전통적인 환경관리에서는 주로 해당 매체로의 배출량 삭감이 일반적인 정책방안으로 제시되었다. 하지만 최근의 환경관리정책은 점차 환경과 인체를 동시에 고려하고 이에 대한 유해물질의 노출 및 영향까지 고려하는 경향을 취하고 있다. 더 나아가서 단일 매체가 아니라 다매체를 동시에 고려하는 방향으로 ‘매체 통합관리’의 개념이 확산되고 있다. 또한 정책집행의 내용과 방법에 있어서도 점차 이러한 개념이 구체화되어가고 있는 실정이다.

3. 선진국의 매체 통합관리 현황

가. 영국

영국은 1987년에 왕립환경오염검사단(HMIP)을 설치하면서 통합 환경관리를 지향하기 시작했는데, 1990년에 제정된 “환경보호법”(The Environmental Protection Act, 이하 EPA)에서 이 원칙을 보다 강조함과 동시에 IPPC제도를 도입하였다. 특히 IPPC에서는 오염물질의 배출을 사전에 예방하기 위한 ‘오염 사전예방 원칙’이 강조되고 있다. 그 밖에도 IPPC에는 ‘환경 및 인체보건 위해성의 최소화’, ‘최신기술의 개발과 적용’, ‘지역 환경용량에 따른 임계 부하량의 적용’, ‘오염자부담원칙의 철저한 적용과 이행’ 등이 명시되어 있다. 한편, IPPC에서는 대기나 수체, 토양 등 오염물질이 직접 배출되는 매체에서의 영향뿐 아니라 인접한 다른 환경매체에 미치는 영향까지 함께 고려하여 배출허용기준을 설정하도록 명시하고 있음을 알 수 있다.

영국 EPA의 특징적인 매체 통합관리 제도중 하나는 오염배출시설에 대한 ‘통합오염허가제도’를 들 수 있다. 통해 운영허가를 획득하여야만 한다. ‘통합오염허가제도’는 오염이 매우 심하거나 기술적으로 복잡한 산업공정에 대해 예상되는 매체별 오염 부하량을 종합적으로 고려하여 시설허가를 발급하는 일종의 ‘다매체 허가제도’라 할 수 있다. 통합오염허가제도의 대상이 되는 산업은 석유 및 발전, 폐기물 처리, 광업

및 시멘트·요업, 화학산업, 금속산업, 기타 제지, 도금, 목재산업 등 주로 오염이 집중적으로 발생하는 산업들을 대상으로 하고 있다.

통합오염허가를 원하는 기업은 “적정비용의 최적활용가능기술”(BATNEEC: Best Available Techniques Not Entailing Excessive Cost) 및 “최적활용가능환경대안(BPEO: Best Practicable Environmental Option)”을 이용해 오염물질의 배출을 방지 또는 최소화하여야 하며, 정부는 4년마다 오염배출기준을 강화함과 동시에, 오염물 배출 감소를 유도할 수 있도록 해당 허가권을 재검토할 수 있음을 규정하고 있다.

환경청에서 통합오염허가 조건을 결정하는 중요한 판단 조건이 되는 BPEO를 판단할 때에는 해당 시설이 대기, 수질, 토양의 각 매체에 끼치는 영향을 종합적으로 고려해야 한다. 물론 BPEO를 판단할 때 고려되는 요소로는 장·단기적인 지역 환경영향, 지구대기권 영향, 액체 및 고형쓰레기 처리와 재활용, 실용성과 효율성, 공정비용과 저감대안 등을 들 수 있다. 그러나 무엇보다도 중요한 고려사항은 여러 매체들 중 어떤 한 매체라도 오염농도가 환경기준을 초과하지 말아야 한다는 점이다. 이 점에서 볼 때 영국은 비록 아직 다매체 환경기준을 채택하고 있지는 않지만, 매체 통합적 환경관리를 통해 적절한 환경질을 유지할 수 있도록 적극적으로 노력하고 있는 나라로 볼 수 있다.

나. 미국

전통적으로 미국은 매체별로 구분된 환경법 체계를 가지고 있으며, 규제와 허가제도 역시 개별매체 관리제도에 맞게 구축되어 왔다. 그러나 새로운 환경관리체계 추세에 대응하여, 오염방지를 본격적으로 국가정책에 반영하는 ‘오염방지법’을 1990년에 통과시켰는데, 이 법에 의해 미국 환경보호청 산하에 다매체 및 특정매체에 대한 구체적인 개정안 마련과 제안된 규정을 검토하는 “범기관적 성격의 업무조직”을 설립하였다.

미국은 클린턴정부 출범 이래 통합오염관리 목표를 달성하기 위한 ‘상식적 환경관

리정책(Common Sense Initiative, 이하 CSI)를 추진하고 있다. CSI란 “환경기준은 강화하되 이 기준을 달성하기 위한 방법에 있어서는 상식적이면서도 혁신적이고 유연성 있는 접근을 강조하여 보다 쾌적한 환경을 보다 저렴한 비용으로 달성하고자 하는 것”이다. 특히, 매체 통합관리 관점에서 볼 때 CSI는 기존의 배출원별 규제에서 산업별 규제로 전환되었다는 특징을 가지고 있다. 이는 각 산업별로 총량규제와 배출권거래제, 정보 공개, 규제자와 피규제자 간의 파트너십 형성 등 다양하고 유연한 수단을 활용하여 보다 적은 비용으로 배출총량을 억제할 수 있도록 하는 데 역점을 두고 있다. CSI는 자동차, 컴퓨터, 전자산업, 철강, 금속, 도금, 정유, 인쇄 등 대표적인 대규모 혹은 다발오염 산업을 1차 대상으로 하고 있다.

<표 2-2> ‘기존제도’와 ‘상식적인 환경관리(CSI)’의 차이점

기존제도	상식적인 환경관리
오염물질별 규제	산업별 규제: 환경오염이 다른 오염으로 치환되는 것을 막고 오염을 예방하고 정화
이해관계자들은 적대적이며 회피적	이해관계자간의 협의: 모든 이해당사자를 참여시켜 합의된 해결방식을 찾아 성공적인 정책집행의 계기 마련
엄격한 수단선택	신축적인 수단선택: 엄격한 기준을 달성하는데 혁신과 상식 활용
최종배출구일변도 규제	환경오염의 예방: 보다 적은 오염이 기업운영의 표준이 되도록 함
한가지 기준으로 모든 것을 맞춤	실정에 맞는 보전: 기업운영방식에 맞게 요구하여 환경 개선에 실질적인 효과가 나타나도록 함

다. 스웨덴

스웨덴은 세계적으로도 매체 통합관리에서 가장 선진적인 나라 중의 하나라 할 수 있다. 스웨덴은 ‘환경보호법’(Environmental Protection Act)을 1981년에 개정할 때 이

미 '최적 실행 수단(best practical means)'이라는 개념으로 각 공장과 공정에서 배출되는 모든 종류의 오염물질을 규제하는 방법을 택하였다(Hinrichsen, 1990). 즉, 오염배출 시설에 대한 인허가나 지도단속을 배출구별이 아닌 공장별로 하는 '다매체 허가' 제도를 조기에 확립한 것이라 할 수 있다. 이 법에는 다매체 허가 또는 보고를 의무적으로 해야 하는 환경적으로 유해한 활동목록이 명시되어 있다. 이들 환경적으로 유해한 활동은 반드시 관할기관의 허가를 사전에 받아야만 가동 및 운영이 가능한데, 허가 조건이 개개 산업시설에 대한 실사를 거친 후에 결정되어 진다는 점이 특징적이다. 이러한 실사 과정에서 모든 산업시설은 당연히 환경적으로 영향을 저감할 수 있는 대안제시를 요구받게 된다. 한편, 펄프·제지, 석유화학, 다전력 사용 또는 연소시설, 제철·제강, 공항, 인구 10만명 이상 지역의 폐수배출행위 등의 대규모 배출원은 반드시 '국가환경보호허가위원회(National Licensing Board for Environmental Protection)'의 허가를 얻어야 하며, 그 밖의 소규모 산업시설 및 활동은 '지역행정위원회(County Administrative Board)'의 허가를 얻어야 한다.

다매체 허가를 심의할 때 허가기관은 대기·수질·토양오염배출 감시 및 화학폐기물 감시 등이 함께 결부된 감시프로그램을 운영하여 다양한 매체에 대한 통합관리를 지향하고 있다. 이 제도의 또 다른 중요한 특징은 허가기관과 사업체간의 대화채널이 완전 개방되어 있고 상호신뢰에 바탕을 두고 있는 점이다. 이는 허가기관이 적절한 정보를 획득하는 데도 유리하며, 신기술 도입, 새로운 합의점에 도달하는 데도 긍정적 영향을 끼치고 있는 것으로 평가된다. 이 처럼 스웨덴에서는 다매체 허가제도를 시행함으로써 특정 산업시설로부터 배출되는 각종 오염물질을 동시에 평가함으로써 이로 인한 환경영향을 저감하기 위한 '최적가용기술'의 선택을 용이하게 하는 측면이 있다. 예컨대, 어떤 공장에서 대기오염배출을 약간 증가시키는 대신 폐수배출을 크게 줄이는 등의 유연한 대처가 가능했던 것이다.

라. 일본

일본은 통합 환경관리 또는 매체 통합관리라는 개념으로 환경정책을 수립하고 있는 것은 않은 것으로 평가된다. 대신 일본의 경우 지방자치단체의 환경자치제도가 특징적으로 보여진다. 일본에 있어서는 환경정책의 수립은 중앙정부의 환경청이 담당하되 이를 집행하는 권한은 자치단체의 고유 업무로 되어 있기 때문에, 배출시설에 대한 인·허가 업무는 지방자치단체가 담당하여 중앙정부차원에서 배출업소의 통합관리에 대해 특별한 관심을 기울이거나 연구를 하고 있지는 않다. 그러나 1960년대 이래 심각한 공해문제를 겪으면서 지방자치단체와 산업체가 지역의 환경개선을 위한 '환경협정'을 체결하여 각 업체가 배출할 수 있는 대기오염물질, 수질오염물질, 폐기물 등의 배출저감을 추진하였다.

각각의 환경협정은 해당 사업체별로 다양한 매체와 오염물질을 대상으로 하고 있는데, <표 2-3>에 간단히 정리해 두었다.

이처럼 중앙정부보다는 지방자치단체와 각 사업체간의 공해방지협정을 통한 접근 방식이 일본 오염관리 정책의 특징인데, 이 협정들은 사업체별 오염관리를 강조하기 때문에 통합오염관리와 유사한 개념을 가지고 있으며, 최근 OECD국가에서 강조하고 있는 협력적인 환경관리정책과도 일맥상통한다. 또한 공해방지협정체결행위의 특징 중 하나는 협정체결행위 등을 명문화하여 공해방지조례로 규정하고 있는 지방자치단체가 많다는 것인데, 이들 중 일부는 지역적 특성에 따라 법적 허용치 보다 훨씬 높은 수준의 규제 수준을 요구하거나, 중앙정부의 규제 대상이 아닌 물질들에 대해서도 규제를 요구하기도 하며, 환경오염 이외의 요소에 대한 의무사항을 삽입하기도 한다. 이와 같은 현상은 각 지역별로 자체 실정에 맞는 환경관리 방안을 수립할 수 있다는 점에서 긍정적으로 평가할 수 있다.

<표 2-3> 일본의 지방자치단체-사업체간 협약들의 예

협약사업체 업 종	협약규제 대상의 예
농업(축산)	배수, 악취규제, 분뇨 등
광업, 채석	수질오염, 소음·진동, 분뇨, 자연경관보호, 토사유출, 교통공해 등
건설	대기오염(비산먼지 등), 수질오염(자재생산업), 소음·진동
의류·섬유	대기·수질오염
목재	소음, 폐기물 소각 대기오염, 유해가스(포름알데히드 등), 특정 수질오염(6가크롬, 페놀 등)
펄프·제지	대기·수질오염, 소음, 악취
화학	대기·수질오염, 악취, 유해가스 누출 방지
석유·석탄	대기·수질오염(공장별 총량규제), 연료규제, 기름누출 방지, 사고발생시 협력 규정
고무	분뇨, 매연, 악취, 폐기물 처리
요업·시멘트	소음, 분뇨, 사업종료후 처리, 문화재 출토 대책
철강	대기·수질오염(총량규제), 소음·진동, 악취, 공해방지 지도·감시의무
비철금속	대기, 수질, 소음, 중금속 측정 의무
금속	소음, 수질, 폐액처리, 특정물질 사용금지, 폐액 누출 등
기계·조선	대기, 수질, 소음, 기름누출 대책, 특정화학물질
무선기기	전파장애
전기·전력	대기오염 총량 규제, 폐기물, 저주파 진동, 이상시 대응방안 수립 등
반도체·생명	수질, 대기, 특정화학물질 규제, 미생물·실험동물 안전관리
산업폐기물	수질, 폐기물 반입 대상·기간 규제, 유실 방지
골프장	농약, 모니터링, 정보 공개, 경관 보존, 지역 고용
기타	쓰레기소각장, 비행장, 혈액분석, 주택단지조성, 공업단지조성, 운수업, 저탄장, 스키장 등의 업종들

마. 네덜란드

네덜란드는 일찍부터 매체 통합관리 개념이 발달한 나라 중 하나로서, 일찍이 1983년에 '리지몬드 환경정책계획'(Rijmond Indicative Environmental Policy Plan)을 수립했을 당시, 계획상에 통합환경보호정책들의 수립, 질적·양적 환경기준을 통한 환경정책목표의 수립, 환경정책과 기타 정책분야간의 관계정립, 효율적인 통합환경정책 계획과정 수립, 정책우선순위 결정의 기본원칙 수립, 환경보호집행 프로그램 및 연구 프로그램의 작성 등과 같은 통합 환경관리와 관련된 내용들을 다수 포함시켰다(Bennett, 1993).

네덜란드에서는 환경관련 정부부처간의 업무협조체제가 잘 이루어져 있다는 점이 특징적이라 할 수 있다. 즉, 네덜란드에서 환경관리업무를 담당하는 기구는 '주택·도시계획 및 환경부'(The Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment)이지만, 이곳 외에도 여러 부서가 환경정책의 개발에 참여하고 있기 때문에 환경정책 수립 시 관련 부처간의 외적통합에 많은 노력을 기울여 왔다.

1993년에 새롭게 개정된 '환경보전법'이 통과되어 기존의 매체별 관리체계에서 통합관리체계(수질부문은 제외)로 전환되었다. 개정 환경보전법은 환경기준, 환경 프로그램 및 집행 항목을 통합하고 있으며, 오염원으로부터의 유해성 저감대책 및 폐기물 처분에 이르기까지 모든 환경정책의 집행에 있어 특정 매체만이 아니라 전체 환경을 고려하도록 규정하고 있다. 또한 이 개정법에는 IPPC와 관련된 중요한 원칙들이 포함되어 있다. 이러한 네덜란드의 통합 환경관리정책은 기존의 매체별 배출규제에서 탈피하여 환경문제를 모든 사회적 활동으로 통합하려는 시도의 일환으로 받아들여지

고 있다.

이상에서 살펴본 대로 네덜란드의 통합 환경관리는 부처간 통합을 통한 보다 종합적이고도 지속가능한 환경계획수립과 지역별 특성을 살린 환경관리계획 등으로 외형적 인프라를 구축하고 있다고 볼 수 있다. 한편, 네덜란드에는 매체 통합관리 개념에 입각한 정책개발을 과학적 차원에서 지원하기 위하여 ‘국립보건환경연구소’(National Institute for Public Health and the Environment, 이하 RIVM)라는 연구·개발 조직을 두고 있는데, RIVM에서는 일찍이 각 매체간 화학물질의 흐름이 전체 환경의 질에 끼치는 영향에 관심을 기울이고, 기존의 매체별 환경기준이 전체 매체에 있어 일관되고 적합한지에 대한 여부를 다매체 거동모델을 이용하여 평가함으로써 오염물질에 대한 ‘다매체 환경기준 설정’을 위한 연구를 지속적으로 추진해 오고 있다.

4. 시사점

이상과 같이 선진국의 매체 통합관리 현황에 대한 분석을 통해 다음과 같이 국내도 입에 따른 시사점을 도출하였다.

첫째, 세계적으로 환경관리에 있어서 새로운 패러다임으로 등장하고 있는 통합 환경관리는 나라마다 다양한 개념 및 방향을 내포하고 있으나 공통적으로 ‘매체 통합관리’가 특히 강조되고 있음을 알 수 있다. 매체 통합관리의 대상에 있어서는 ‘유해화학물질’이 그 주요 대상으로 부각되고 있다. 이는 최근 화학물질로 인한 환경·보건적인 피해가 증가하고 있는데 기인한다고도 볼 수 있으나, 유해화학물질은 환경중에서의

다매체거동특성으로 인해 그 어느 오염물질보다도 ‘매체 통합관리’ 또는 ‘다매체 접근 방식’에 기초한 정책개발이 요구되기 때문이라고 할 수 있다.

둘째, 유해화학물질은 환경중에 미량으로 분포하고 그 피해가 광역적, 장기적으로 나타나기 때문에 일단 오염이 발생한 후에는 사후대처가 어렵다. 따라서 유해화학물질 관리에 있어서는 ‘사전 오염예방 원칙’에 기초한 정책수립이 무엇보다도 중요하다.

셋째, 유해화학물질에 대한 매체 통합관리를 위해서는 기본적으로 환경관리정책 전반에 걸쳐서 매체 통합관리 개념의 도입이 필요하며, 이와 더불어 관리정책의 기본 목표가 되는 환경기준의 설정이 필요하다. 예컨대, 앞서 살펴본 네덜란드의 경우처럼 유해화학물질의 매체 통합관리를 위해서 기본적으로 기존의 전통적인 방식의 매체별 환경기준과는 차별화되는 ‘다매체 환경기준’의 설정이 필요할 것이다. 유해화학물질에 대한 다매체 환경기준 설정은 매체 통합관리의 시발점이자 궁극적인 목표를 제시해 줄뿐만 아니라 이와 연관된 매체 통합관리 정책 및 수단 개발의 촉매제 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

넷째, 매체 통합적 환경관리 개념 및 목표가 설정되면 이를 실질적으로 뒷받침 할 수 있는 매체 통합적 제도 및 관리수단을 개발할 필요가 있다. 예컨대, 영국과 스웨덴에서 도입·시행하고 있는 ‘다매체 허가제도’가 그 좋은 사례라고 할 수 있겠다.

다섯째, 유해화학물질에 대한 매체 통합관리를 위해서는 조직적 차원에서의 통합 작업과 지원이 요구됨을 주지할 필요가 있다. 미국과 네덜란드의 사례에서 볼 수 있듯이 환경관리 부처의 내부적으로는 유해화학물질의 매체 통합관리를 전담하여 추진

할 수 있는 부서가 지정되어야 함은 물론이고, 타 부처와의 체계적이고도 효율적인 업무분장 및 의견조정이 필요하다. 또한 매체 통합관리에 동원될 수 있는 과학적 수단 및 정책 개발을 전담할 수 있는 연구기구가 필요할 것으로 사료된다.

제3장 매체 통합관리를 위한 환경기준 설정현황

본 장에서는 기존의 국내외 환경기준설정 현황에 대해 고찰함으로써 매체 통합관리 관점에서의 문제점을 분석하고 이를 개선하기 위한 다매체 환경기준 설정방안을 제시하고자 한다.

1. 환경기준의 정의 및 설정절차

가. 환경기준의 정의

1) 환경의 질

‘환경의 질’(environmental quality)이란 생태계의 모든 구조 및 기능적 상태 또는 수준을 말한다. 이는 자원, 잠재력 및 기능을 포함한 보존요소들의 특징 및 특성들의 시공간적, 물적 상태를 나타내며 이에는 생태 시스템적 관계가 고려되어야 한다.

2) 환경 목표치

‘환경 목표치’(environmental quality objectives, 이하 EQO)란 달성 또는 유지되어야 할 환경의 질을 규정한 일련의 기준값을 말한다. 예를 들면, ‘대기중 존재하는 모든 온실가스의 지속적 제거’ 등과 같이 행정적 관점이 제외된 채로 환경적 관점에서만 볼 때 달성해야할 ‘환경적 목표’라 할 수 있다.

3) 환경기준

‘환경기준’(environmental quality standards)이란 대기기준 또는 수질기준과 같이 구체적인 환경의 질을 평가할 수 있는 기준으로서 환경질에 대한 행정적 목표치를

말한다. 예컨대, 환경기준은 환경관리 행정의 목표라는 점에서 환경목표와는 구분된다. 따라서 환경기준은 환경정책과 환경행정의 목표 및 기본적인 지표가 되지만, 그 자체가 법적 규제기준이 되거나 안전한 수준을 의미하지는 않으며, 또 법적 구속력도 갖지 않는다. 다만 환경행정상 피해 정도와 용인 정도를 고려하는데 중요한 척도가 되며, 일반적으로 환경기준을 초과하였을 때에는 환경질에 심각한 문제가 있는 것으로 보고 각종 법적, 행정적 규제수단을 동원하게 된다.

환경기준이란 모든 국민이 건강한 삶을 유지하기 위하여 요구되는 바람직한 환경 상태를 전제로 이에 관계되는 오염물질의 농도를 정해 놓은 기준을 의미한다³⁾. 즉, 환경기준이란 환경정책의 목표를 표현하는 기준으로서 국가전체를 대상으로 하는 일반기준과 특정지역을 대상으로 하는 지역기준으로 구분된다.

환경정책당국은 이러한 정책목표를 달성하기 위해 다양한 정책수단을 준비하고 행정조직, 주민참여 등 각종 제도적 장치를 통해 접근하게 된다. 그리고 환경정책의 목표를 달성하기 위한 규제는 크게 이행규제와 불이행규제로 구분할 수 있다. 이행규제는 환경기준을 달성하기 위하여 환경관련 행위자로 하여금 특정행위를 이행하도록 하는 규제를 말한다. 이행규제 중 대표적인 것이 규제기준 또는 배출허용기준이다. 한편, 불이행규제는 이 같은 이행요구사항을 환경이용자가 이행치 않을 경우 이에 대한 불이익을 주는 조치를 말한다.

나. 환경기준 설정시 고려요인

환경기준의 설정은 먼저 오염물질이 인간의 건강이나 생태계에 어떻게 유해한 것인지 입증하는 준거치(criteria)의 설정에서 출발한다. 각종 생물학적 독성 실험이나,

3) 각국의 환경입법에서 환경기준에 해당하는 용어는 판정조건 또는 준거치(criteria), 목표(goal), 지침(guide or guideline) 및 규제기준(standards) 등으로 다양한 용어로 표현되고 있다.

기존의 사고 기록 같은 것을 통하여 유해성을 입증하는 것이 보통이다. 환경기준은 이상적인 수준인 준거치에 접근하기 위한 것이지만 현실적이지 못한 경우가 많다. 따라서 사회적, 경제적, 기술적 여건을 감안하여 단계적인 목표치로서 환경기준을 설정하게 된다. 또 한번 설정된 환경기준은 고정된 것이 아니라 사회·경제적, 기술적 여건 등의 변화에 따라 주기적으로 검토하여 적절한 수준을 유지하는 것이 보통이다.

환경기준을 설정하기 위해 고려하여야 할 주요 사항들은 다음과 요소들이 있다.

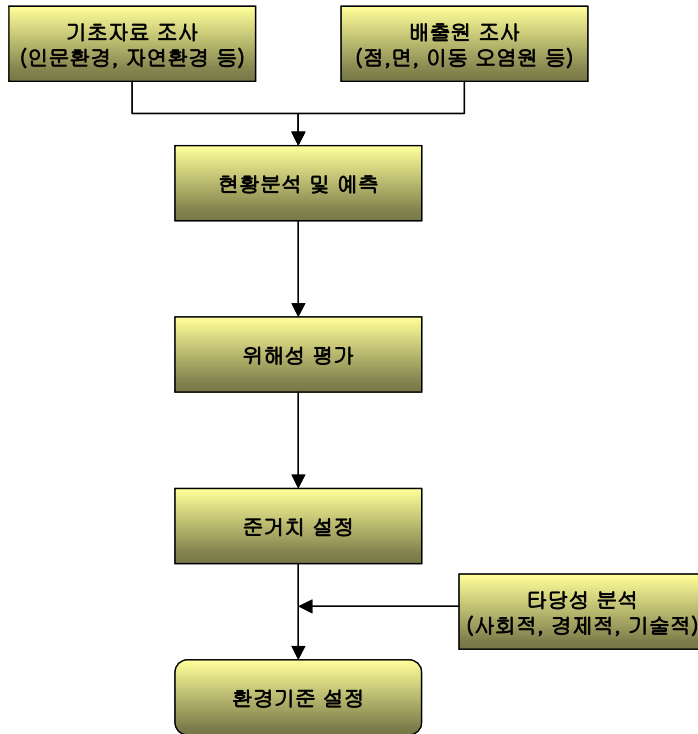
- 인문 및 자연환경
인구, 경제, 산업, 교통 등의 인문환경
기상, 지형, 지표상태 등 자연환경
- 배출원 특성
대형 배출시설, 이동배출원, 면배출원, 기타 배출원들의 분포 및 배출 특성에 대한 조사 분석
- 환경질 현황 조사 및 예측
- 오염물질에 대한 위해성 평가
유해성 물질의 확인, 인간 건강위해성 평가, 생태계 위해성 평가, 준거치 설정 등
- 목표 환경질에 도달하기 위한 조건 분석
적용 가능한 기술 검토
경제적으로 가능한 조건 분석 등

다. 환경기준 설정절차

앞서 설명한 대로 환경기준은 인간의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 보전하

기 위하여 유지되어야 할 최소한의 환경질 수준을 의미한다. 환경기준은 대기·수질·토양 등 환경매체에 따라 달리 설정된다. 환경기준을 설정할 때는 건강기준뿐 아니라 경제기준도 고려해야 한다. 즉, 환경기준은 통상 경제적·기술적 달성가능성, 경제성장과 지역경제의 특성, 국민의 환경질 욕구수준 등을 적절히 감안하여 설정되게 마련이다. 또한 환경질 목표치를 나타내는 환경기준은 자연환경의 용도에 따라 달라지게 됨은 물론이다.

기존의 전통적인 방식의 매체별 환경기준 설정 단계를 간단히 요약하면 (그림 3-1)과 같다(경기개발연구원, 2001). 먼저 인구, 경제, 산업 교통 등의 인문환경 및 기상, 지형, 지표상태 등의 자연환경에 대한 기초자료와 해당 지역의 오염 배출원 특성에 대한 조사 자료들로부터 오염의 현황과 장래 전망을 하고, 해당 오염물질들이 실제로 인체나 생태계에 위해한 정도를 평가함으로써 준거치를 설정하게 된다. 그러나 이 준거치는 하나의 이상적인 수준을 언급하는 것이기 때문에, 원활한 정책 집행을 위해 사회적, 경제적, 기술적 타당성 분석을 통해 단계적인 목표치로서의 환경기준이 다시 설정되게 된다. 여기서 가장 중요한 부분은 위해성 평가에 기초한 준거치 설정 및 그 사회·경제적, 기술적 타당성 분석이다. 한번 설정된 환경기준은 고정된 것이 아니라 사회, 경제적, 기술적 여건 등의 변화에 따라 주기적으로 검토하여 적절한 수준을 유지하는 것이 보통이다.



<그림 3-1> 매체별 환경기준 설정절차

기본적으로 환경기준은 과학적 근거에 의하여 설정되며 사회적·경제적 요소는 보다 효율적 달성을 위한 이차적 고려대상이라고 보는 것이 타당하다. 대개 사회적·경제적 요소는 특정 환경질을 달성하기 위한 방법에 보다 효율성과 유연성을 부여하기 위해 고려되는 경우가 많다. 물론 이론상 최대한의 사회적 효율성을 추구하는 관점에서 본다면, 사회적으로 최적의 환경기준을 설정하기 위해서는 그 환경기준을 준수하기 위해 수반되는 제반의 행위가 사회복지를 극대화하는 점을 찾아 이를 환경기준으로 하면 된다. 즉, 경제학적 입장에서 볼 때 어떤 환경매체에 대한 질적 요소가 한 수준에서 다른 수준으로 변화할 때 필연적으로 발생하는 편익과 비용간의 차이, 즉 순편익이 극대화되는 점을 최적 환경기준으로 볼 수 있다(임종수, 1997).

현실적으로 환경기준을 설정하는 데 있어 가장 손쉬운 방법으로는 WHO의 권고기

준이나 다른 국가에서 이미 제정한 기준을 그대로 따르는 방법이 있다. 그러나 WHO의 권고기준은 단순히 건강에 영향을 미치지 않는 수준의 환경기준을 의미하기 때문에 이것을 그대로 해당 국가 및 지역에 적합한 최적의 환경기준으로 받아들이는 데에는 무리가 있으며, 타 국가의 기준 역시 해당국의 자연적, 경제적, 기술적 여건에 차이가 있으면 그대로 수용하기는 어려운 측면이 있기 때문에, 부득이한 경우가 아니라면 기본적인 위해성 평가 절차는 반드시 거친 연후에 새 기준을 제정하는 것이 타당하다. 그러나 위해성 및 경제성 평가를 위한 시간 및 자원이 부족한 경우, 일시적으로는 WHO나 선진국에서 기 제정된 기준을 잠정기준으로 사용하는 경우도 많다. 예를 들어 국내의 내분비계 장애물질과 관련된 규제물질 대상 목록들의 경우, 아직까지 충분한 위해성 평가 자료가 축적되어 있지 않기 때문에, 잠정적으로 WHO의 권고 목록을 그대로 받아들여 사용하면서 기초연구를 지속적으로 실시하고 있다.

2. 국내외 환경기준 설정현황

가. 국내외 매체별 환경기준 설정현황

1) 대기

우리나라의 국가대기환경기준은 아황산가스(SO_2), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO_2), 미세먼지(PM_{10}), 오존(O_3), 납(Pb) 등 총 6개 항목에 대해 설정되어 있다. 유해물질과 관련해서는 중금속인 납에 대해서 유일하게 환경기준이 설정되어 있다. 한편, 이러한 국가대기환경기준과 별도로 지역대기환경기준(3개월 평균농도기준)⁴⁾을 설정하여 운영하고 있는 자치단체는 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 제주도 등이 있다.

4) 환경정책기본법 제10조(환경기준의 설정) 제3항에 의거 환경부장관의 승인을 얻어 당해 지방자치단체의 조례로 별도의 지역대기환경기준을 설정할 수 있음

<표 3-1> 우리나라의 대기환경기준 설정현황

설 정 항 목	기 준
아황산가스(SO ₂)	연간 평균치 0.02ppm 이하, 24시간 평균치 0.05ppm 이하 1시간 평균치 0.15ppm 이하
일산화탄소(CO)	8시간 평균치 9ppm 이하, 1시간 평균치 25ppm 이하
이산화질소(NO ₂)	연간 평균치 0.05ppm 이하, 24시간 평균치 0.08ppm 이하 1시간 평균치 0.15ppm 이하
미세먼지(PM10)	연간 평균치 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균치 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
오존(O ₃)	8시간 평균치 0.06ppm 이하, 1시간 평균치 0.1ppm 이하
납(Pb)	연간 평균치 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하

우리나라와 마찬가지로 외국에서도 대부분 일반적으로 아황산가스, 미세먼지, 질소산화물, 오존 등 일반적인 오염항목을 중심으로 대기환경기준이 설정되어 있으며, 유해물질 가운데는 납 이외에는 대기환경기준을 설정한 나라는 없는 것으로 조사되었다. <표 3-2>에서 보는 바와 같이, 우리나라를 포함하여 이태리, 스위스는 WHO와 EU의 기준에 따라 장기기준(1년)을 채택하고 있는 반면, 미국, 싱가포르, 대만 등은 중기기준(3개월, 1개월)을, 태국은 단기기준(24시간)을 채택하고 있다.

<표 3-2> 각국의 대기환경중 유해물질(납)에 대한 환경기준 설정현황 비교

구분	한국	미국	이태리	스위스	터키	일본	태국	싱가폴	대만	WHO	EU
Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.5 /년	1.5 /3개월	2.0 /년	1.0 /년	-	-	10 /24시간	1.5 /3개월	1.0 /1개월	0.5 /년	0.5 /년

한편, 세계적으로 유해물질에 대해서는 대기환경기준보다는 배출허용기준을 설정함으로써 오염을 관리하는 추세이다. 대기배출허용기준으로 정하고 있는 오염물질의 수는 거의 200여 항목에 가까울 정도로 대단히 많다. 우리나라도 기준에 25개 물질을

특정대기유해물질로 지정하고 최근에 휘발성유기화합물질에 대한 관리 대책이 시행되기 시작했지만, 배출허용기준이외의 환경기준에 대한 설정은 전무한 실정이다. 그러나 이들 배출허용기준은 배출원별 농도규제의 형태로 이루어지기 때문에 매체별 및 지역별 오염물질 배출총량을 감안한 통합 환경관리관점에서 기존의 배출허용기준에 대한 재검토가 필요하다고 할 수 있다.

2) 수질

우리나라의 수질환경기준은 하천, 호소, 해역, 지하수 등 각 수체별로 설정되어 있으며, '생활환경'과 '사람의 건강보호'로 나누어 세분기준항목을 설정하고 있다. 유해물질관련 수질기준은 '사람의 건강보호' 항목에 포함된다. 하천과 호소 수질기준에는 카드뮴, 비소, 수은, 납, 6가크롬 등 중금속과 PCBs, 시안, 유기인, 계면활성제등 9개항목이 설정되어 있다. 해역의 수질환경기준에는 아연, 구리 등 중금속 항목과 다이아진논 등 농약류, 그리고 1,1,1-트리클로로에탄 등 유기화합물이 추가되어 총 19개 유해물질에 대한 수질기준을 설정하고 있다(표 3-3).

<표 3-4>에 각국의 수질기준 중 유해물질관련 항목들을 정리하였다. 우리나라의 수질환경기준설정체계는 일본의 그것과 유사한 것으로 알려져 있다. 일본과 유럽연합 국가들의 경우 기본적으로 유기화합물에 대한 설정항목수가 다양함을 알 수 있다. 이에 비해 우리나라는 대체로 규제대상 범위와 개별 항목 수에서 일본에 비해 못 미치는 실정이다. 미국의 경우에는 연방정부 기준과는 별도로 각 주정부 마다 적용되는 기준이 조금씩 다르긴 하지만 대체적으로 수질기준도 급성기준과 만성기준으로 구분하여 설정하고 있는 점이 특징적이다. 또한 여타국가에 비해 미국에서는 농약류에 대한 수질기준을 강화하고 있음을 알 수 있다.

<표 3-3> 우리나라 수질기준항목 설정현황

항 목		기준설정현황(mg/l)		
		하천	호소	해역
중금속	카드뮴(Cd)	0.01	0.01	0.01
	비소(As)	0.05	0.05	0.05
	수은(Hg)	ND	ND	0.0005
	납(Pb)	0.1	0.1	0.05
	6가크롬(Cr ⁶⁺)	0.05	0.05	0.05
	아연(Zn)	-	-	0.1
	구리(Cu)	-	-	0.02
	소계	5개 항목	5개 항목	7개 항목
농약	다이아지논	-	-	0.02
	파라티온	-	-	0.06
	말라티온	-	-	0.25
	소계	-	-	3개 항목
유기화합물	PCB	ND	ND	0.0005
	1,1,1-트리클로로에탄	-	-	0.1
	테트라클로로에틸렌	-	-	0.01
	트리클로로에틸렌	-	-	0.03
	디클로로메탄	-	-	0.02
	벤젠	-	-	0.001
	페놀	-	-	0.0005
	소계	1개 항목	1개 항목	7개 항목
기타	시안(CN)	ND	ND	0.01
	음이온계면활성제(ABS)	0.5	0.5	0.5
	유기인	ND	ND	-
	소계	3개 항목	3개 항목	2개 항목
합계		9개 항목	9개 항목	19개 항목

ND: 검출되어서는 안됨

<표 3-4> 각국의 유해물질관련 수질환경기준 설정현황 비교

물질분류	한국		EU (표충수)	미국				프랑스	일본 (하천)
	하천/ 호소	해역		담수		해수			
				급성 기준	만성 기준	급성 기준	만성 기준		
계	9	19	29	23	22	23	21	13	23
중금속	5	7	8	10	9	9	8	8	6
농 약	-	3	7	11	9	11	9	-	3
유기화합물	1	7	11	1	2	1	2	1	12
기 타	3	2	3	1	2	2	2	4	2

우리나라의 수질환경기준은 외국에 비해 항목수가 적을 뿐 아니라 하천/호소와 해역간 수질기준항목에 있어서도 매체간 통합이 이루어지지 못하고 있다. 예를 들면, 해역수질기준에 포함된 항목이 하천/호소 수질기준에는 포함되어져 있지 않다. 연안 해역의 주된 오염원이 육상을 통해 기인한다는 사실로 볼 때 이러한 점은 통합관리에 있어 심각한 문제점을 유발할 수 있다.

3) 토양

<표 3-5>에는 우리나라를 포함한 각국의 토양오염기준을 정리하였다. 대부분의 국가에서 토양오염기준의 경우 환경기준보다는 오염토양의 복원기준으로서 설정되어 있는 것이 특징적이다. 우리나라에서도 토양환경기준은 설정되어 있지 않으며, 대신 토양오염 '우려기준' 및 '대책기준'이 토지용도별(가지역, 나지역)로 설정되어 있는 상황이다.

각국별 토양오염기준은 토양이용 용도에 따라 규제치 및 규제대상 물질에 다소 차이가 있으나 대부분의 국가에서 토양오염기준은 중금속과 유해화학물질 위주로 구성

되어 있음을 알 수 있다. 기본적으로 우리나라의 경우는 카드뮴, 납, 수은, PCBs, 페놀류에 대한 규제치만 설정이 되어 있는 반면, 다른 나라들의 경우 농약 및 각종 유기물질들에 대한 규제가 존재한다.

또한 많은 나라들에서 토양기준과 지하수 기준을 함께 언급하여 관리하고 있다. 이는 많은 나라들이 음용수의 상당 부분을 지하수에서 충당하고 있는데, 지하수 수질의 경우 토양질이 적절하게 관리되지 않으면 그 질을 보장할 수 없기 때문에 필연적으로 토양관리와 지하수관리는 함께 이루어지게 된다. 토양의 경우 수질과 함께 인간이 직접 접촉을 하기 때문에 비교적 일찍부터 위해성 평가와 관련된 요소가 환경기준에 반영되고 있다.⁵⁾ 우리나라의 경우에는 1993년에 비로소 지하수법이 제정됨으로서 무분별한 지하수 개발과 사용을 억제할 수 있게 되었으나, 아직 그 관리단계는 초보적인 수준에 머물고 있다.

5) 독일의 경우 아예 토지용도 구분이 크게 토양-인체 경로, 토양-식물 경로, 토양-지하수 경로의 3부분으로 이루어져 있으며, 토양조사 기준(Trigger Value) 등의 실제 환경기준값 역시 이들 용도 구분에 따라 서로 다르게 설정된다. 이러한 구분은 위해성 평가 및 매체간 오염물질 이동과 관련된 부분이 상당히 반영된 결과로 볼 수 있다.

<표 3-5> 각국의 토양오염기준 설정현황 비교

물질분류		한국				네덜란드 (토양/퇴적물)		독일			영국	일본 (판단 기준)
		우려 기준		대책 기준		목표 기준	개입 기준	인체	농경지/ 초지	점토, 모래		
합계		9	12	8	11	74	81	14	9	10	20	25
중금속		6	6	6	6	12	12	6	8	7	11	7
시안화합물 및 기타 무기물		1	1	1	1	4	6	1			7	2
유 기 물 질	방향족*	2	2	2	2	10	10				1	1
	PAHs					10	10	1	1/0	2	1	
	유기염소계		1		1	18	18	3	0/1	1		10
	농약/살충제					13	19	3				3
	기타		2	1	1	7	6					2

*) 유류 항목의 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 총량 기준은 하나의 항목으로 처리

나. 각국별 환경기준의 특징

1) 미국

미국은 연방정부가 대략적인 법령틀을 짜기는 하지만, 구체적인 환경기준 및 관리 가이드라인을 크게 벗어나지 않는 한에서 지방정부에 권한이 이양되어 있다. 그에 따라 대부분의 경우 US EPA에서 정하는 권고치들은 법적, 행정적 구속력이 없는 하나의 판단기준으로서만 작용하는 경우가 많으며, 각 주에서는 제각기 실정에 맞는 환경기준치를 별도로 구성하여 사용한다. 각 주 정부의 환경기준들을 보면 기본적인 목록 분류체계는 연방정부안을 따르지만, 구체적인 규제대상 물질 수나 규제기준값은 주에 따라 변동이 있다.

미국 환경기준의 특징은, 용도 및 대상에 따라 기준이 세분화되어 구현된 정도가 매우 자세하다는 것이다. 예를 들어 대기기준의 경우 생활환경 보호를 위한 일차 기준과 건강 보호를 위해 훨씬 강화된 이차 기준이 설정되어 있으며, 수질 기준을 보면 담수 및 해수 기준과 음용수 기준들 각각은 다시 적용 경우에 따라 세분화되어 있다. 담수 및 해수 수질의 경우 급성기준과 만성기준 항목이 별도로 관리되고 있으며, 음용수 기준의 경우에도 음용수의 사용 용도에 따라 기준값이 서로 다르게 책정되어 있다. 토양의 경우 기본적인 미 연방정부의 토양선별기준을 보면 주거지, 비주거지, 공사현장으로 구분되었을 뿐 아니라, 인체 노출도에 따라 외부인과 내부인으로 다시 구분하여 기준을 설정한 것을 알 수 있다. 이러한 환경기준의 세분화는 행정체계를 복잡하게 만드는 요인이 되기도 하지만, 인체 건강상으로 보면 보다 적절한 관리를 가능하게 해 주는 장점으로 작용한다.

2) 일본

일본 환경기준의 특징은 중앙정부에서 법령으로 정해진 기준도 존재하지만, 실제 환경관리는 각 지자체들이 해당 사업장과 개별적으로 체결한 ‘협약’의 형태로 이루어진다는 점이다. 일반적으로 지방분권이 보장되는 국가라면 지방정부가 중앙정부가 정한 환경기준과 별도의 기준을 제정, 적용할 수는 있지만⁶⁾, 그 형태는 대개 지방조례 등의 법령과 유사한 형태를 띠기 마련이다. 그러나 일본의 경우에 지방조례에는 협약의 체결을 의무화한 조항들만 존재할 뿐, 실제 환경기준값의 결정은 조례가 아닌 지자체-사업장 간 개별 혹은 단체 협약에 의해 결정된다. 이러한 모델은 일종의 협력적 관리모델로서, 지자체와 사업체 및 지역 주민들의 합의에 의해 적절한 결론을 끌어낼 수 있다는 점에서 높이 평가를 받고 있지만, 지역 정치기제가 제대로 작동하지 못할 경우 제대로 된 관리에 많은 지장을 초래할 우려가 있다.

이러한 협약 관리의 결과 일본의 지자체별 환경 기준은 매우 다양한 편차를 보인다. 즉, 지역적 특성에 따라 어떤 경우는 법적 허용치보다 훨씬 높은 수준의 규제를 요구

6) 우리나라의 경우에도 지역환경기준이 별도로 존재한다. 예를 들어 대기기준의 경우 서울, 인천, 대전, 제주 등에서 지역환경기준을 설정하고 있는데, 대개 중앙정부의 환경기준보다 어느 정도 강화된 값으로 설정하는 것이 보통이다.

하거나, 법적 규제 대상에 포함되어 있지 않은 대상들에 대해서도 환경규제에 포함시키고 있다. 예를 들면, 무선기기 제조업체에 해당 지역의 전파장애 방지 요구를 한다든지, 주변 지역의 공해방지를 위한 지도·감시 의무를 일정 정도 부여하거나, 폭넓은 개념의 안전관리 인증을 요구하는 등 통상적인 환경관리 범위에서 살짝 벗어난 범위까지 협약에 포함시키고 있다. 이들 사안들은 일종의 준 환경규제의 성격을 띠고 있으며, 보다 종합적인 사업장 규제의 한 부분을 담당하고 있다.

화학물질 관리의 경우 공해병이 이슈가 된 이후로는 오랫동안 주로 중금속 및 농약 등의 급성유독물 관리에 초점을 맞추어 오랫동안 자료 구축을 해 왔는데, 최근에는 다이옥신류 및 각종 내분비계 장애물질 등의 다양한 화학물질 관리 및 모니터링에 중점을 두고 시야를 넓혀 가는 중이다. 다만 다른 나라들과 마찬가지로 이들 물질들은 아직 관리대상 목록에 포함되어 있기는 하지만, 아직 환경기준에는 편입되지 못하고 있다.

3) 영국

영국은 유럽 국가들의 특성상 상당부분 EU의 권고기준을 따르기도 하지만, 통합오염물질 관리를 일찍부터 시작하였기 때문에, 나름대로 독특한 운영체계를 가지고 있다. 영국은 환경기준에서 규제 대상으로 다루는 물질의 수는 다른 선진국들에 비해 많은 편은 아니지만, 그들 각각에 대해 목표기준과 실행기준을 설정하여 매체 통합관리에 적절하게 운용을 하고 있다. 실제로 영국의 대기환경 기준은 상당부분 EU 기준과 WHO 권고안을 그대로 수용하고 있으며, 수질이나 토양 항목 기준들 역시 그다지 종류가 많거나 복잡한 편은 아니다.

다만 최근에 내분비계장애물질과 같은 각종 유해화학물질의 매체간 이동이 문제가 되면서 이에 대한 관리대책이 요구되기 시작하면서, 90년대 말부터는 법령에 감시대상 물질을 추가하려는 노력을 하고 있다. 예를 들어 토양환경기준의 경우 기존에는 18개만 규제대상 화학물질이 존재했지만, 2005년까지 55개 항목에 이르는 토양질 가

7) 토양질 가이드라인으로 설정된 2개 항목 제외

이드라인을 추가할 계획이다. 이들 가이드라인은 동일한 물질이라도 그 사용 용도에 따라 기준치가 서로 다르게 설정되어 있어, 매체 통합관리 대상에서 제외되는 지역에 대해서도 적절한 환경관리를 가능하게 할 것으로 예상된다. 이런 환경법령 강화 현상은 대부분의 나라들이 공통적으로 법적 환경규제 대상에서 아예 누락된 물질들에 대해서는 행정력과 감시 체계가 작용하기 힘든 측면을 충분히 인지하였기 때문이기도 하다. 다만, 이들 새로이 검토되는 관리기준들은 아직은 기존의 강력한 구속력을 가지는 규제기준들에 비해서는 그 기능이 약한, 감시와 관리에 대한 준거치로서 도입될 것으로 판단된다.

4) 네덜란드

네덜란드는 유럽국가들 중에서는 환경기준에 포함된 관리대상이 매우 폭넓은 편이다. 특히 수체와 토양에 대해서는 다른 유럽연합 국가들의 몇 배에 이르는 항목을 환경기준에 반영하고 있는데, 이는 일찍부터 매체 통합관리가 정착해 온 것과 더불어 다매체간 환경기준 연구에 많은 노력을 기울여 온 결과이기도 하다. 네덜란드는 유럽에서도 특히 국토가 좁고 인구가 많은 나라에 속하며, 또한 상당수의 용수를 지하수원에 의존하고 있기 때문에, 토양과 수질 및 지하수에 대한 관리기준이 타국보다 잘 발달하게 되었다.

네덜란드의 수질, 대기, 토양 기준은 유럽연합 권고안과 마찬가지로 ‘목표기준’(target value), ‘한계기준’(limit value), ‘개입기준’(intervention value)으로 구분된다. 목표기준은 기본적으로 인체 및 생태계에 대한 위해성이 무시될 수 있는 농도를 의미하며, 인위적 발생 화학물질은 위해성을 무시할 수 있는 농도로 결정되지만, 자연 발생 물질은 자연적인 바탕농도로 결정된다. 개입기준은 즉각적인 조치가 필요한 수준으로서, 생태계와 인체에 대한 위해성 농도에 의해 결정된다. 한계기준은 일종의 임시적 기준으로써 단기간 내에 목표기준을 만족시킬 수 없을 때 일정 기간 동안 만족시켜야 할 환경질 기준을 의미하는 것으로 한계기준의 경우 결정시 현실적 요소가 고려되어 조정되기는 하지만, 기본적으로는 모델링에서 산출된 계산 결과가 한계기준 설정의 기초 자료가 된다.

네덜란드는 유해화학물질의 다매체 거동특성을 고려한 ‘다매체 환경기준’ 설정에 관한 연구가 그 어느 나라보다도 발달해 있다 (Plassche & Bruijn, 1992). 네덜란드의 환경기준 설정 및 관리에 있어서 모델링 결과를 상당히 적극적으로 활용하고 있는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 토양오염평가에 있어서도 오염물질의 거동모델 및 위해성 평가모델을 이용하여 평가하는 절차가 필수적으로 포함되어 있다.⁸⁾ (환경부 토양보고서, 2003) 또한 새로운 환경기준을 제정하거나 혹은 개정할 때도 다매체 거동모델을 활용하여 매체간 환경기준의 일관성 평가를 거치도록 하고 있다. 네덜란드 보건복지부 산하 RIVM에서는 그동안 100여종이 넘는 화학물질 중에 대하여 다매체 환경기준 설정을 위한 연구를 해 왔으며, 그 결과 세계의 어느 나라보다도 다양한 물질을 아우르는 환경기준을 보유할 수 있게 되었다.

<표 3-6> 네덜란드의 다매체 환경기준 설정현황

대상 매체	대기, 토양, 수체, 퇴적물
대상 물질	중금속, PAHs, 살충제, chlorophenols 등 총 45종
	chlorobenzenes 12종
	휘발성 유기화합물(VOCs)
	중금속 9종 , VOCs 46종
	PAHs 10종
	PCBs
적용 모델	NORMTOX
	SimpleBox

8) 토양오염에 의한 인체 노출을 평가할 때 육상토양은 C-soil 모델을, 퇴적물인 경우 SEDI-soil 모델을 사용하여 노출도 및 위해성을 평가한다.

이와 같이 네덜란드는 지금까지 매체 통합관리를 꾸준히 추진하였으며, 그 과정에서 거동모델 및 위해성 평가모델 등의 다양한 과학적, 기술적 도구를 정책결정에 적극적으로 이용함으로써 보다 선진적인 환경기준 체계를 구축하고 있다.

3. 우리나라 환경기준의 문제점

앞서 살펴본 바와 같이 환경기준의 경우 나라별로, 그리고 매체별로 그 대상 물질이나 기준치에서 공통되거나 비슷한 부분도 있지만 각각의 환경적, 산업적, 사회·경제적 특성이 반영됨으로써 서로 상이한 요소들이 상당히 존재하다. 이러한 점을 감안한다 하더라도 우리나라의 환경기준은 매체별 환경기준 자체의 문제점과 더불어 매체 통합관리 측면에서도 다음과 같은 문제점을 제시할 수 있을 것이다.

첫째, 미국, 일본, 네덜란드 등 선진국과 비교할 때 전반적으로 우리나라는 환경기준으로 설정된 유해화학물질의 항목수가 절대적으로 적다는 점을 지적할 수 있다. 최근 들어 사회적으로 문제가 크게 제기되고 있는 내분비계장애물질 등 각종 신종 유해화학물질들에 대해서 모니터링 및 거동연구 등 조사·연구사업을 추진하고 있기는 하나 기본적으로 관리목표가 되는 환경기준설정이 이루어지지 않음으로 인해 행정적 측면에서의 대처가 미흡한 실정이라 할 수 있다.

둘째, 우리 실정에 맞는 위해성 및 오염실태 현황 자료가 부족하여, 현재의 환경기준이 오염물질의 위해성 정도에 따라 적절하게 설정되었는지에 대한 신뢰성이 떨어진다. 현재 대부분의 환경기준들의 경우에는 최초 설정시 주로 외국의 자료들을 수집·분석함으로써 설정된 수치로서, 이후 차츰 보완이 이루어져 왔지만 아직도 이를 충분히 극복하지 못하고 있다. 기본적으로 오염물질의 노출경로 자체가 대규모로 신뢰성 있게 조사된 연구가 드물며, 그나마 대부분의 역학 연구에서 기초자료의 미비 또는 연구 성과의 미흡으로 인해 오염물질과 위해성과의 확실한 상관관계를 제시하

지 못하고 있다. 이러한 결과는 현재 환경기준의 적정 수위에 대한 불확실성이 크며 신뢰성이 낮다는 문제점을 야기하고 있다.

셋째, 매체 통합적 관점에서 볼 때 우리나라의 환경기준의 또 다른 문제점은 오염물질의 매체간 이동 및 분배현상을 고려하여 설정된 값이 아니라는 점이다. 이는 환경기준을 설정하는 과정에서 네덜란드에서와 같이 매체별 환경기준의 일관성 평가절차가 생략되어 있기 때문이다. 예컨대, 앞서 살펴본 대로 하천/호소 수질항목 및 기준치가 해역 기준과 상이한 것은 매체간 오염물질 이동에 대한 종합적 고려가 미흡한 대표적인 사례로 볼 수 있다⁹⁾.

9) 이러한 문제점은 우리나라의 하천/호수 및 해역의 관리권역이 각각 환경부와 해양수산부로 나누어져 있는데서 기인하는 문제이기도 하지만, 궁극적으로 이는 매체 통합적 환경관리체계가 미흡한 데 기인하는 것이라 할 수 있다.

제4장 다매체거동모델의 개발 및 활용 현황

다매체 거동모델은 유해화학물질의 오염도 예측 뿐 아니라 위해성 평가, 환경기준 및 배출기준 설정, 저감계획 수립 및 평가 등 환경관리정책 수립을 위한 다양한 의사결정에서 과학적 근거를 제공하기 위한 목적으로 활용성이 매우 높다. 다매체 거동모델의 유용성과 신뢰성이 인정되면서 사용목적, 대상물질, 대상지역에 따라 다양한 종류와 형태로 개발되어지고 있다. 따라서 본 장에서는 다매체 거동모델의 종류 및 구성요소, 그리고 이들 모델들의 국내·외 활용현황에 대하여 소개하고자 한다.

1. 다매체거동모델의 정의 및 유용성

환경중 오염물질의 종국적인 농도분포는 다양하고 복잡한 여러 기작들의 상호과정의 결과로서 나타나기 때문에 흔히 환경 매체간 또는 매체내에서의 오염물질의 이동, 변화를 모사하기 위해 질량보존법칙에 기초한 거동모델들이 개발되어져 왔다. 이러한 모델을 일컬어 ‘다매체 거동모델’(multimedia fate model)¹⁰⁾이라 한다.

다매체 거동모델은 다양한 매체간 혹은 매체내 오염물질의 이동, 변화과정들을 수학적으로 정량화하여 그 거동을 추적·분석하는 과학적 도구로서 환경 중에 지속성이 강하고 장거리 이동을 하거나 환경내에서 장기간 축적되는 특성을 가진 미량 유해화학물질의 거동연구에서 특히 많이 활용되고 있다. 거동모델을 이용한 시뮬레이션 과정을 통해 오염물질의 매체별 이동 메커니즘과 이와 관련된 물리적 프로세스를 이해할 수 있고, 오염물질의 환경 중으로의 배출(직접적 배출 및 지류, 강, 대기를 통한 유입 등)과 대기, 물, 퇴적물, 토양에서의 오염도 사이의 인과관계를 이해할 수 있다. 또한 대상지역 특성과 대상 물질의 특성에 맞는 결과를 얻을 수 있고, 특정 매체이나 오염원에 대한 환경 관리시스템을 유지하기 위해 중요한 인자들을 도출할 수 있다.

10) 통상적으로 ‘거동모델’, ‘다매체모델’ 등의 용어를 사용하기도 하는데, 이들 모두 ‘다매체 거동모델’을 지칭한다.

다매체 거동모델의 경우 매체간 이동현상을 고려하므로 한 화학물질에 대해 각각 대기, 수체, 토양, 퇴적물 등 여러 매체에서의 오염농도를 동시에 예측할 수 있다는 점이 다른 환경모델과 비교할 때 가장 큰 장점이라 할 수 있다(서혜선, 1999; Meent and Bruijn, 1995).

유해화학물질의 잠재적 환경영향은 대기, 수체, 토양, 퇴적물, 생물체 등의 다양한 환경 매체내의 오염물질의 농도와 지속성에 의해 결정된다. 따라서 오염물질의 환경 영향과 이에 따른 위해성을 평가하기 위해서는 환경매체간의 오염물질의 이동 및 분배, 그리고 축적현상에 관한 정보가 필요하다. 또한 환경 매체별 유해화학물질의 잔류 농도 분포를 이해하기 위한 목적뿐만 아니라, 오염물질의 인체노출 및 위해성 분석을 위해서도 대기, 수체, 토양 등 각각의 환경매체에 존재하는 오염물질의 농도를 파악하는 것이 기본적으로 필요하다. 그러나 환경매체별 오염물질의 농도를 직접 실측하려면 대부분의 경우 많은 비용과 시간이 소요된다. 또한 내분비계장애물질과 같은 유해화학물질은 환경 중에 극미량으로 존재하기 때문에 실측을 통한 연구가 어려운 경우가 많다. 따라서 수학적 모델을 이용하여 오염물질의 거동 및 이동을 평가하는 것이 보다 신속하며 경제적인 수 있고, 또한 새롭게 생산되거나 배출되는 화학물질에 대해서 다매체 거동모델을 이용하여 환경 매체 및 인체에 미칠 영향을 미리 예측해볼 수도 있다(Mackay et al., 2001; OECD, 2004; WMO/EMEP/UNEP, 1999).

2. 다매체거동모델의 종류 및 구성요소

가. 다매체거동모델의 종류

다매체 거동모델은 여러 나라에서 많은 연구자와 연구기관들에 의해 다양한 형태로 개발되어져왔다(Cowan et al., 1995). 일반적으로 다매체 거동모델의 종류는 우선 모델에 포함된 기작의 범위에 따라서 '기작 모델'과 이보다는 비교적 단순한 형태의 '평가 모델'로 구분할 수 있다. 또한 대상지역의 규모에 따라 '국지 모델'과 '광역 모

텔', 그리고 '지구 모델' 등으로 나눌 수 있다 (Wania and Mackay, 2000). 또한 다매체 거동모델은 오염물질의 거동기술방식에 따라 크게 '물질수지 모델'과 'fugacity 모델'로 나눌 수 있다.

다매체 거동모델은 시간에 따른 시스템의 변화과정을 기술하는 수준에 따라 다시 Level I에서 Level IV까지 구분할 수 있다. 즉, 다매체 거동모델에서 다루는 오염물질의 변화 및 이동의 고려 범위 및 정상·비정상상태 등에 따라 단계별로 Level I에서 IV까지 나뉘어 진다(OECD, 2004). Level I은 닫힌 계 내에서 오염물질의 분해반응을 고려하지 않고 매체간 평형분배를 가정하여 정상상태로 서술하며, Level II에서는 일정한 발생량과 이류(advection)에 의한 오염물질의 흐름이 있는 열린계에서 오염물질의 매체간 평형 분배와 정상상태를 가정한다. 그리고 Level III는 매체간 오염물질 이동을 도입하여 매체간 오염물질의 분배를 비평형(non-equilibrium)으로 고려한 정상상태의 모델이며 Level IV는 오염 물질의 매체간 비평형 및 비정상상태를 가정한다. 현재 비평형의 정상상태를 다루는 Level III 모델이 가장 많이 이용되고 있는데, 이 단계의 모델은 화합물의 분포 및 거동경로, 상대농도 등을 정성·정량적으로 예측하는데 효과적이며 광역적 또는 국지적인 오염농도를 예측하는데 적용이 가능하다. 그러나 대상지역의 규모가 커지면 비정상상태의 Level IV 모델이 적합하며 오염물 저감정책에 따른 배출량 변화에 대한 환경 잔류량의 변화나 계절적 환경변화가 큰 경우 그에 따른 오염물 잔류량 변화를 추적하는 데 적용될 수 있다.

<표 4-1> 다매체거동모델의 종류 및 기본 가정

모델구분	기본 가정
Level I	• Equilibrium partitioning • non-reacting chemical (General partitioning tendencies for persistent chemicals) • steady-state media in the closed system.
Level II	• equilibrium and steady-state media in the open system with inputs and outputs. • degrading reactions and advective loss included. • Mode-of-entry of a chemical to the environment is irrelevant • No intermedia transport rates are deduced.
Level III	• Non-equilibrium(different fugacities generally apply to each medium) steady-state in the Open system • rates of inter-media transport are calculated. • chemical mode-of-entry information is needed.(Influence of mode of emission on fate and transport)
Level IV	• Non-equilibrium • dynamic or unsteady-state in the Open system • time-course of chemical emissions into each media (to any time-varying conditions) is needed.

나. 다매체거동모델의 구성요소

환경 중의 오염물질의 종국적인 농도분포는 다양하고 복잡한 여러 기작들의 상호 과정의 결과로서 나타나기 때문에 다매체 거동모델을 개발하기 위해서는 많은 양의 입력 자료와 매개변수, 그리고 매체간의 이동을 정량적으로 표현할 수 있는 매체 간 수송과정에 대한 수식이 필요하다. 다음은 일반적인 다매체 거동모델의 특성 및 모델

에서 고려되어야 할 요소들을 정리한 것이다(Mackay et al., 2001).

1) 환경매체

일반적으로 다매체 거동모델은 크게 대기/수체/토양/퇴적물의 4개의 환경매체로 구성되는데, 식생을 추가하거나 모델의 공간규모, 토지이용도 등에 따라 대기, 수체 혹은 토양 공간이 보다 세분화됨으로써 모델에 포함되는 환경매체의 수가 점차 늘어나고 있는 추세이다. 한편, 모델내에서 각 환경매체는 몇 개의 부매체(sub-compartment)로 구성되어 있는데, 일반적으로 대기에서는 가스상-입자상, 수체에서는 용존상-부유고형상, 토양은 토양입자-간극수-토양공기, 퇴적물은 간극수-퇴적물입자 등으로 세분화된다.

2) 입력자료

다매체 거동모델을 실행하기 위해서는 모델의 각 수식에 포함된 변수값을 지정해 주어야 한다. 다음은 다매체 거동모델에 필요한 대표적 입력변수들을 분류한 것이다.

- 물리·화학적 특성값: 대상물질의 옥탄올-물 분배계수, 증기압, 헨리상수 등
- 매체특성인자: 토양공극률, 토양 유기물함량, 수체속도, 수체중 부유고형물농도 등
- 기상특성인자: 기온, 풍속, 습도 등
- 배출특성인자: 시간별, 매체별 오염물질 배출량 등

3) 거동기작

다매체 거동모델에 포함되는 매체내, 매체간 거동기작의 종류는 모델의 종류에 따라 매우 다양하지만 보편적으로 다음과 같은 기작들이 포함된다.

- 매체내 거동기작: 이류, 확산, 분해, 반응 등
- 매체간 거동기작: 분배, 이동(건식침적, 습식침적, 휘발), 흡·탈착 등

3. 외국의 다매체거동모델 개발 및 활용 현황

다매체 거동모델은 유해화학물질 관리정책 수립을 위한 의사결정과정에서 매우 경제적이며 효과적인 수단으로서 장점을 제공한다. 이에 따라 선진국에서는 각 지역적 특성에 따라 오염물질별 농도분포를 예측할 수 있는 다매체 거동모델을 개발하고, 이를 자국의 유해화학물질 관리를 위한 정책수립 및 평가에 매우 적극적으로 활용하고 있다.

앞서 살펴본 대로 외국에서는 이미 평가목적에 맞게 다양한 수준의 다매체 거동모델에 관한 연구개발이 이루어지고 있다. 지금까지 다매체 거동모델은 대부분 폴리염화비페닐류(PCBs), 다이옥신류(PCDD/Fs), 다환방향족탄화수소류(PAHs), 유기염소계농약류(OCPs) 등 주로 유기화학물질에 국한되어 개발·적용되어져 왔으나, 점차 카드뮴(Cd), 구리(Cu) 납(Pb) 등 중금속까지 대상물질을 확대하고 있으며, 대상지역에 있어서도 국지적 또는 광역적 규모에서 시작하여 최근에는 전지구적 스케일의 모델들이 활발히 개발되어지고 있는 추세이다. 다음 <표 4-2>에 외국에서 개발되어 오염물질 농도분포 및 위해성 평가에서 활용되고 있는 대표적 다매체 거동모델들을 요약하였다. 한편, 외국의 다매체 거동모델들의 구조 및 주요 특징에 관한 자세한 내용은 <부록>에 별도로 정리하여 수록하였다.

<표 4-2> 주요 외국의 다매체거동모델

국가/기관	모델명	모델종류	모델 적용 사례	
			대상 지역	대상 물질
네덜란드/RIVM	SimpleBox 1.0	Level III	네덜란드	VOCs, DEHP, DBP, Cd, Cu
	SimpleBox 2.0	nested multimedia fate model	네덜란드, 전지구	VOCs, DEHP, DBP, Cd, Cu
	GlobeTox	global model	전지구	DDT, PCBs, DEHP, Pb
	EUSES	Level III	유럽	기존 및 신규 화학물질, 살생물제
미국/EPA	CalTOX	Level III	미국, 캘리포니아	TCE, PCE, Titume, PAHs
	TRIM.Fate	dynamic mass balance model	미국	VOCs, PAHs, Hg
캐나다/Health Canada, CEMC, Trent Univ.	ChemCAN	Level III	캐나다	benzo(a)pyrene, chlorobenzene, hexachlorobenzene, chlordane
	EQC	Level I, II, III	가상환경	기존 및 신규 화학물질
캐나다/NSERC 노르웨이/NILU	Globo-POP	non-steady state nested model	전지구	α-HCH, PCBs
캐나다/MSC, ACSD, Environment Canada	MEDIA	Multi-compartment Environmental Diagnosis and Assessment model	전지구	α-HCH, lindane(γ-HCH)
영국/Lancaster Univ.	UK-MODEL	Dynamic box model	영국	PCBs
	EVn BETR	steady and non-steady state(dynamic) mass balance model	유럽	PCBs, PCDD/FS, PAHs, PBDEs, OCPs
WMO/AMAP /EMEP project	MSCE-POP	regional and hemispheric model	유럽, 북반구	PCBs, PCDD/FS, PAHs, HCH, HCB

가. 네덜란드

1) SimpleBox

네덜란드 RIVM은 매체간 농도비를 예측하여 대기, 수체, 토양, 퇴적물 등 매체별 EQO가 서로 조화되게 설정되었는지 검토하고, 지역 환경 중 화학물질들의 농도를 예측하여 대상 화학물질에 대한 평가가 이루어질 수 있도록 하기 위한 목적으로 1981년 SimpleBox 모델 1.0을 최초로 개발하였다. 이후 이 모델은 모델 검증을 위한 연구를 통해 SimpleBox 2.0으로 업데이트 되었으며 SimpleBox 2.0은 '유럽 화학물질 평가 시스템'(European Union System for Evaluation of Substances, 이하 EUSES)을 개발하는데 모태가 되었다(Brandes et al., 1996). 최근까지도 SimpleBox에 대한 연구는 활발하게 지속되고 있으며, 다양한 오염물질 군에 대해서 예측 및 모니터링 데이터를 비교한 연구 결과들이 꾸준히 발표되고 있다. 지금까지 SimpleBox를 이용하여 연구된 대상 화학물질들을 보면 <표 4-3>과 같다. 2002년에는 1997-2001년 동안 조사된 다매체 환경 중 DEHP(di ethylhexyl phthalate)와 DBP(di n-butyl phthalate)의 매체간 실측 농도비를 모델 예측치와 비교하였는데, 그 결과 매체별 예측농도비가 실측농도비와 거의 일치하는 것으로 조사되었으며 이로부터 다매체 거동모델이 검증 단계를 거쳐 정책적 의사결정 목적으로 활용될 수 있는 잠재적 가능성을 충분히 입증하였다(Struijs, 2002).

<표 4-3> SimpleBox 모델을 활용한 연구대상 물질 및 주요 연구내용

연도	대상물질	주요 연구내용	보고서
1993	VOCs 46종	- 46개 VOCs에 대한 다매체 환경기준 설정	RIVM Report No. 719101020
1995	21개 화합물	- 토양/대기간 농도비를 이용한 모델 불확실성 평가	RIVM Report No. 719101020
1996	카드뮴 및 구리	- 토양내 중금속 거동에 대한 모델링 및 실측치와의 비교	RIVM Report No. 713501001
1997	VOCs 11종	- 모델 입력변수의 불확실성으로 인한 대기-수체 농도비 예측의 불확실성 평가	RIVM Report No. 719101031
2002	DEHP 및 DBP	- 프탈레이트 계열 화합물에 대한 모델 예측치와 실측치 비교	RIVM Report No. 607220008
2003	TCE, lindane, benzo[a]pyrene, fluoranthene, chrysene 등	- 모델 예측치와 실측치 비교, 모델 불확실성 평가	RIVM Report No. 607220010

2) EUSES

EUSES는 EU 국가들의 화학물질 위해성 평가를 위해 개발되었다. 1990년 EU 국가들은 신규 화학물질의 위해성 평가에 관한 일반 원칙과 절차에 관한 문서를 채택한 바 있는데, 이를 계기로 네덜란드에서는 신규 화학물질, 농약, 살생물제(biocides) 등의 위해성 평가를 위한 시스템으로서 USES(Uniform System for the Evaluation of Substances)를 개발하였다. USES 1.0은 기존 화학물질과 신규 화학물질에 대한 위해성 평가를 위한 EU Technical Guidance Documents(이하 TGD)에 기초하여 개발되는데, 이후 USES를 업데이트한 모델이 바로 EUSES이다. 최근에는 업데이트된 TGD와 살충제에 대한 추가 지침을 반영한 EUSES 2.0 버전이 개발되었다. EUSES는 특정한 지역의 평가를 위해 설계된 것이 아니지만 특정 장소나 지역의 상황에 따라 입력변수들을 조정하여 사용할 수 있도록 설계되어 있다(Lijzen and Rikken, 2004). EUSES는 화학물질의 인체 및 환경에 대한 잠재적인 위해성을 평가함으로써 정부기관, 연구기관, 산업체 등의 위해성 관리자들에게 의사결정을 위한 정보를 제공하는데 활용되고 있다.

3) GlobeTox

GlobeTox는 네덜란드의 의사결정지원시스템인 TARGETS를 구성하는 한 부분으로 SimpleBox를 기본모델로 하여 개발된 전지구 규모의 다매체 거동모델이다. GlobeTox는 시간에 따른 환경 매체별 농도변화 추이를 모델링 할 수 있고 온도 등의 모델 입력변수들의 변화에 따른 모델 예측치의 영향을 파악할 수 있다. 한편, GlobeTox는 서로 다른 물리·화학적 특성을 가지는 네 가지 대표적인 화학물질(표 4-2 참조)에 대해 적용되었다(Verbruggen et al., 1997).

4) NORMTOX

네덜란드에서는 기존에 매체별로 설정된 EQO와 일일허용섭취기준(Acceptable or Tolerable Daily Intake, ADI 또는 TDI)간에 상호 모순성이 있는지를 평가하기 위하여 다매체 거동모델인 NORMTOX를 개발하였다(Ragas et al., 1998).

나. 미국

1) CalTOX

CalTOX는 오염된 토양 및 공기, 수체, 퇴적물, 지하수의 오염에 따른 인체 위해도를 평가하기 위한 목적으로 1992년 캘리포니아 EPA의 유독물관리부(Department of Toxic Substances Control)에서 개발되었다(Mckone et al., 1993). CalTOX는 광역규모 모델로서 대기·수체·퇴적물 및 식생은 정상상태로 가정한 반면, 토양에 대해서는 비정상상태로 가정한 모델이다. 모델은 크게 오염물질의 이동 및 변환을 계산하는 모듈과 노출평가 모듈로 구성되어 있다. 이동 및 변환 모듈은 동적 비정상상태 모델로서 토양에 직접 오염물질이 투입되거나 계속적으로 대기, 토양, 수체에 오염물질이 배출될 경우 시간의 경과에 따른 각 매체별 오염물질의 농도변화를 예측할 수 있는데, 대기와 수체로 유해화학물질이 배출될 때 인접 토양에 미치는 오염도를 예측하는데 처음 사용되었다. CalTOX는 2002년 4.0 버전까지 업데이트 되었으며, 각 버전은

각기 다른 목적으로 사용되고 있다. CalTOX는 유해화학물질의 물리·화학적 특성이 나 혹은 지역적 특성이 오염물질의 환경 중 이동경로 및 종국적인 농도 분포를 계산할 뿐 아니라 인체에 어떤 영향(노출량)을 미치는지를 정량적으로 평가하는데 널리 사용되고 있다.

2) TRIM

미국 EPA의 대기질 계획 및 기준 위원회(Office of Air Quality Planning and Standards Organization, 이하 OAQPS)는 대기 오염물질의 규제 기준을 마련하기 위한 청정 대기법(Clean Air Act, 이하 CAA) 프로그램들을 진행 중이며 이 프로그램의 일부는 오염물질에의 노출에 따른 인체 위해도와 환경 영향에 대한 평가도 포함하고 있다. OAQPS는 이런 목적을 위해서 오염물질의 거동과 이동, 노출 위해도 모델링의 필요성을 인식하고 1996년에 TRIM(Total Risk Integrated Methodology)이라 명명된 다매체 거동모델의 개발에 착수했다. 1998년에 첫 번째 모듈로 TRIM.Fate를 개발하고, 이어서 두 번째, 세 번째 모듈로서 TRIM.Expo와 TRIM.Risk를 발표했다. TRIM.Fate는 다매체 환경과 생물체에서 오염물질의 농도 분포를 예측하는 다매체 거동 모델이며 TRIM.Expo는 다매체 환경에서 인체 노출 event, TRIM.Risk는 인체의 다매체 노출경로 및 노출량 정보로부터 위험정도 및 생태계 위해도를 알아내기 위한 모델이다. 예를 들어 수은과 같은 다매체 대기 오염물질의 인체 건강 위해도를 분석하려면 TRIM.Fate의 출력결과가 TRIM.Expo 모듈의 입력데이터로 또 TRIM.Expo의 출력결과가 TRIM.Risk의 입력값으로 사용되어 최종 결과를 얻을 수 있게 된다. 각 모듈은 필요에 따라 선택적으로 혹은 독립적으로 사용될 수 있다.

TRIM.Fate는 1998년 이후로 계속 알고리즘이 개선되어 현재 prototype V가 발표되어 있다. '97-'98년까지 모델 개발 초창기에는 비이온성 유기화합물(nonionic organic compounds)을 대상으로 phenanthrene과 benzo(a)pyrene을 대상으로 하여 모델 입력 변수값을 설정하였으나 OAQPS의 요구에 따라 최근 개발된 prototype V에서는 유기화합물 이외에도 수은과 수은 화합물 등의 무기화합물(inorganic compounds)의 거동예측에도 사용할 수 있도록 알고리즘들이 추가되었다(US EPA, 2002).

다. 캐나다

1) ChemCAN

ChemCAN은 캐나다의 24개 지역을 대상으로 화학물질의 다매체 거동을 예측하고 인체 노출을 평가할 수 있도록 캐나다 보건부(Health Canada)의 지원으로 캐나다 환경 모델링 센터(Canadian Environment Modelling Center, 이하 CEMC)에서 1991년에 개발된 광역규모의 Level III 모델이다(<http://www.trentu.ca/cemc>). 이후 1996년 5월에 4.95 버전이, 2003년 9월에는 6.0 버전이 발표되었다. ChemCAN은 캐나다의 지역별 정보를 DB로 구축하고 있으며 위해성 평가를 하기 위해서는 그 물질의 배출 패턴이나 배출량에 대한 정보가 필요하다. 2003년에는 ChemCAN 모델을 이용, 캐나다의 3개 지역을 대상으로 benzo(a)pyrene, chlorobenzene, hexachlorobenzene, chlordane 등 4개 화학물질의 환경 중 이동경로와 농도분포에 대해 시뮬레이션하고 화학물질의 지역별 체류시간 및 지형적 요인이 지역별 오염물질의 이동 경로에 개별적 혹은 복합적으로 어떻게 영향을 미치는지 예측하였는데, 그 결과 지역적 특성의 차이로 인해 화학물질의 이동 경로와 농도, 노출에 상당한 차이가 발생할 수 있다는 연구결과를 발표하기도 하였다(E. Webster et al., 2003).

2) EQC

EQC(Equilibrium Criterion)는 여러 화학물질의 환경 거동을 평가하기 위해 캐나다 CEMC에서 개발되어 사용되고 있다. EQC는 1997년 5월 1.01 버전을 개발한 이후로 2003년 5월 2.02버전까지 업데이트 되었다. 이 모델은 화학물질과 화학물질간의 비교를 위해 개발되었으며, 신규 화학물질이나 기존 화학물질의 일반적인 거동을 평가하는데 적은 입력자료를 이용하여 간편히 이용할 수 있는 모델이다. 한편, 미국 EPA에서는 화학물질의 특성을 설명하기 위하여 EQC III 수정버전을 사용하고 있다. 입력자료로서 분자량, 반감기, 용해도 등의 화학물질 특성 자료와 각 매체별 배출량 자료가 필요하다. 모델 출력결과는 대부분 그림과 도표 형태로 제공됨으로써 환경중 화학물질의 거동을 한 눈에 쉽게 파악할 수 있게 설계되어 있다.

3) Globo-POP

Globo-POP은 캐나다 NSERC(Natural Sciences and Engineering Research Council)와 연방정부의 지원으로 개발되었으며, 노르웨이 NILU(Norwegian Institute for Air Research) 등에서 사용하고 있다. 잔류성유기오염물질(persistent organic pollutants, 이하 POPs)의 환경 중 오염도에 대한 보고가 전 세계적으로 계속 발표되자 이 물질의 장기간에 걸친 이동과 소멸 과정에 대한 관심이 대두되었다. 실측조사만으로는 POPs 물질의 시간적 공간적으로 단편적인 모습 밖에 볼 수 없기 때문에 POPs 물질의 지구적인 움직임에 대해 명확한 설명을 하기 위해 이 모델이 개발되었다. Globo-POP은 과거의 배출량자료를 이용하여 α -HCH와 PCBs에 대해 수세기 동안의 이동 경로를 모사하였고, 가설 시나리오를 이용하여 POPs의 장거리 이동을 평가하는데 사용되었다(Wania et al., 2000; Wania, 1999). 모델은 Visual Basic으로 프로그램 되어서 어떤 윈도우 환경에서나 사용 가능하고 www.uts.utoronto.ca/~wania에서 무료로 다운받아 사용이 가능하다.

4) MEDIA

캐나다 환경부 산하 MSC(Meteorological Service of Canada)는 1997년부터 약 3년에 걸쳐 인간의 활동에 의해 환경으로 배출된 유기 화합물의 이동과정과 대기, 수체, 토양, 극지지역에서의 거동을 평가하기 위하여 MEDIA(Multi-compartment Environmental Diagnosis and Assessment)를 개발하였다. 이 모델은 α -HCH의 이동을 $2^\circ \times 2^\circ$ 의 해상도를 가지는 격자를 통해 전지구적 규모의 거동평가에 사용되고 있다. 이후 이 모델은 캐나다에서 나오는 lindane과 γ -HCH의 이동을 평가하는데 사용되기도 하였다. 향후 이 모델은 습식침적(wet scavenging) 알고리즘을 추가하고, 다른 여타 화학물질에 대해서도 적용 가능하도록 개발할 계획이다(Shatalov et al., 2003; Koziol and Pudykiewicz, 2001).

라. 영국

1) UK-MODEL

영국에서 PCBs의 배출과 생산은 1960년대 말 최고치를 나타낸 이후 50년 가까이 계속되고 있다. 이런 경향을 파악하기 위해서 비평형, 비정상상태의 level IV 다매체 거동모델인 UK-MODEL이 영국 DEFRA(Department of Environmental Food and Rural Affairs)의 지원으로 Lancaster 대학에서 개발되었다. 이 모델은 영국에서 PCBs를 비롯한 POPs의 장거리 이동을 예측하거나 경향을 모사함으로써 이들 물질의 관리를 위한 의사결정 도구로서 매우 유용하게 활용되고 있다(EMEP, 2004).

2) EVn BETR

영국의 Lancaster대학에서는 유럽대륙 전체를 대상지역으로 POPs의 거동을 모델링할 수 있는 EVn BETR을 개발하였는데, 이 모델은 캐나다 CEMC의 'BETR North America' 모델을 토대로 하여 만들어졌으며 토지이용도, 수문 정보, 토양 유기탄소량, 강우 및 기온과 같은 지역 특성 정보를 보다 쉽게 다룰 수 있도록 GIS 시스템이 추가되었다. EVn BETR 모델은 유럽을 54개 지역으로 나누며 총 50개 cell로 이루어진 하나의 유럽대륙과 주변 지역인 대서양, 지중해, 유라시아 대륙과 북극의 4개 box로 구성되어 있으며 다른 지구 순환 모델들로부터 얻어지는 출력 결과 데이터들과도 쉽게 통합될 수 있다. 대상물질로는 폴리염화비페닐류(PCBs), 다이옥신류(PCDD/Fs), 다환방향족탄화수소류(PAHs), 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs), 유기염소계농약류(OCPs) 등 POPs에 해당되는 물질들에 대해 광범위하게 적용할 수 있도록 구성되었으며 현재 일부 화학물질에 대해서 배출량을 추정하고 모델링 결과값과 실측 자료를 비교하여 모델을 평가하고 있다(<http://www.es.lancs.ac.uk/>).

마. 기타

EMEP(European Monitoring and Evaluation Program)의 2003 MSC-E(Meteorological Synthesizing Centre-East) 계획에 따라 유럽과 북반구 지역의 POPs 오염도를 평가하기 위하여 다매체 거동모델인 MSCE-POP을 개발·사용하였다. MSC-E는 장거리월경성대기오염물질에 관한 의정서(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) 협약국들에 의해 제출된 배출원 자료를 기초로 유럽과 북반구에서의 POPs의 공간적 분포를 계산하였으며, 1980년부터 2000년에 걸친 기간 동안의 POPs(PAHs, PCDD/Fs, PCBs, HCH, HCB) 배출원 정보를 구축한 바 있다(Shatalov et al, 2003).

4. 국내 다매체거동모델의 개발 및 활용 현황

이상에서 살펴본 바대로 일찍이 외국에서는 다양한 종류의 다매체 거동모델들을 개발하여 나름대로의 목적에 따라 사용하고 있다. 그러나 외국에서 개발된 모델 및 프로그램들은 대부분 각 나라별 환경특성을 반영하도록 패키지화되어 있어서 국내 현실에 직접 이용하기에는 어려움이 많다. 특히 노출평가를 위해 개발되어온 환경 및 인체 노출관련 모델들은 그 나라의 독특한 노출시나리오 및 데이터베이스가 입력되도록 되어 있어 사실상 국내 적용은 불가능하다고 할 수 있다. 국내에서도 최근들어 유해화학물질의 노출 및 위해성 평가 등의 요구에 따라 다매체 거동모델 개발에 대한 관심도가 점차 증가되고 있다. 따라서 여기서는 지금까지 국내에서 개발된 다매체 거동모델들의 개발 및 활용 현황에 대해 간략하게 살펴보기로 한다.

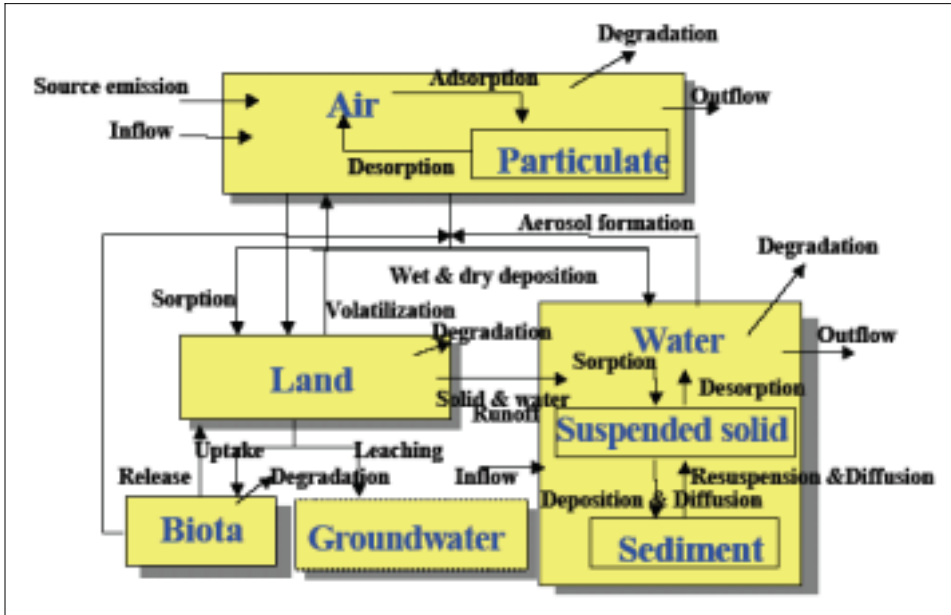
2002년 UNEP의 잔류독성유해화학물질에 관한 지역보고서에는 국내의 다매체 거동 모델로 POPsME, EDCSeoul, ECO2 등 우리나라에서 개발된 세 개의 다매체 거동 모델을 소개함으로써 국제적으로도 널리 알려지게 되었다(UNEP, 2002). 이들 세 모델의 일반적인 특성을 간략하게 비교·소개하면 다음 <표 4-4>와 같다.

<표 4-4> 국내 다매체거동모델 개발 현황

모델명	모델 종류	대상 매체	대상 지역	대상 물질	개발 목적
POPsME	non-equilibrium, unsteady-state level IV model	대기, 수체, 퇴적물, 토양, 식생	서울 및 경기지역 30km×30km	PAHs(16) PCBs, Phthalates PCDD/Fs	POPs 장거리 이동 예측
EDCSeoul	non-equilibrium, unsteady-state level IV model	대기, 수체, 퇴적물, 토양, 식생	서울지역 소유역단위	Alkylphenols, Phthalates, OCIs, PCBs, PAHs(16)	내분비계장애물질 의 환경중 거동 연구
ECO2	non-equilibrium, unsteady-state level IV model	대기, 수체, 퇴적물, 토양, 식생	도시산단지역 소유역단위	PAHs(16) VOCs OCIs, PCBs	인체 및 생태계위해성평가 를 위한 유해화학물질의 다매체 거동연구

가. POPsME

POPsME 는 최근 30년 동안의 급격한 산업화가 이루어진 수도권 지역을 대상으로 PAHs 등 POPs의 환경중 거동을 예측하고자 개발된 비정상상태 다매체 거동모델이다. POPsME 모델은 수도권 지역을 25개 지역으로 세분화하고 있고, 각 격자에서 배출되는 배출과정과 인근 지역에서 바람이나 수체의 흐름으로 인하여 유입되는 과정, 격자내의 매체에서 매체로 이동하는 과정 등을 포함하고 있어 POPs의 장거리 이동과 장시간 동안 환경 내에 머무르면서 축적되는 특성을 잘 반영한 모델이라고 할 수 있다. POPsME 모델의 개념도는 <그림 4-2>와 같다(이윤아, 1999).



<그림 4-1> POPsME 모델의 개념도

한편, 모델의 보정 및 검증을 위해 16종의 PAHs에 대해서 대기 중의 입자상 농도, 토양, 퇴적물, 부유물질과 수체에서의 농도를 측정하고 모델의 예측농도와 비교하여 모델을 평가한 바 있으며(김정, 2002), PCBs와 프탈레이트류 등의 물질에 대해서도 모델의 예측력에 대한 평가를 실시하였다(국립환경연구원, 2003).

나. EDCSeoul

EDCSeoul은 국립환경연구원의 지원하에 3차년도에 걸쳐 진행된 「내분비계장애 물질 조사사업」의 일환으로 서울대 환경계획연구소에서 개발한 비정상 상태 다매체 거동모델이다. EDCSeoul은 내분비계장애물질의 다매체 환경중 거동특성에 대한 종합적이고 보편적인 이해를 돕기 위하여 개발되었다. 이 모델은 서울지역의 대상공간을 크게 대기, 수체, 퇴적물, 토양, 식생의 5개 주매체과 각각의 부매체로 구분하고 5

개의 주매체에는 서울 지역의 환경특성을 고려하여 매체별 면적 및 용적 등의 공간 환경에 대한 자료가 입력되어 있으며, 강우량, 대기 중 분진농도 등의 기상 및 기후 조건은 계절적 변동성을 고려하여 조사된 월별 통계치가 입력되어 있다. 매체내 기작과 매체간 기작을 포함하는 물질 수지 식을 세워 매체별 오염물질의 시간적 농도 변화를 예측할 수 있다¹¹⁾. 알킬페놀류, 프탈레이트류, 유기염소계농약류(OCIs), 폴리염화비페닐류(PCBs), 다환방향족탄화수소류(PAHs) 등 5개 물질군에 대해 다매체에서 실측한 농도를 모델 예측치와 비교·평가함으로써 모델을 검증한 바 있다(국립환경연구원, 2003).

다. ECO2

ECO2는 국내 주요 도시 및 공단지역 12 곳을 대상으로 유해화학물질의 다매체 거동 및 인체 위해도를 평가하기 위하여 '03 환경부 지원 연구사업의 일환으로 서울대에서 개발된 물질수지방정식에 기초한 다매체 거동모델이다. 모델의 원리나 구조는 POPsME와 유사하나 PAHs 이외에 VOCs에 대해서도 모델링이 가능하도록 개발된 것이 특징이다. 모델의 검증을 위하여 국내 주요 도시 및 공단지역의 다매체 환경 중 PAHs, VOCs, POPs의 잔류농도를 실측하고 모델의 예측치와 비교·평가한 바 있다.

이상에서 살펴 본 대로, 국내에서도 몇 가지 종류의 다매체 거동모델들이 개발되었으며 이들 모델은 지금까지 꾸준한 개선 및 검증 연구를 통해 점차 예측 신뢰도를 확보해 나가고 있다. 그러나 지금까지 이들 모델은 환경중 유해화학물질의 거동을 평가하는데 국한되어 활용되고 있을 뿐 외국에서와 같이 다양한 화학물질 관리를 위한 정책개발 및 평가에 적용한 사례는 찾아보기 힘든 형편이다. 따라서 앞으로 다양한 정책개발 및 평가에 관한 연구에 있어서 국내에서 개발된 모델을 적용함으로써 보다 과학적 분석에 기초한 유해화학물질 관리정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

11) 모델의 구조 및 기작에 대한 보다 자세한 내용은 본 보고서 제5장 2절에 수록하였다.

제5장 다매체거동모델을 이용한 매체별 환경기준의 타당성 평가

본 장에서는 국내에서 개발된 다매체 거동모델의 하나인 EDCSeoul을 이용하여 벤조(a)피렌을 대상으로 기존 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가를 수행하고 이로부터 다매체 환경기준설정의 타당성 및 시사점을 도출하고자 한다.

1. 대상물질 및 다매체거동모델의 선정

가. 대상물질의 선정

본 연구에서는 다매체 거동모델을 이용한 유해화학물질 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가의 대상물질로 PAHs의 일종인 벤조(a)피렌을 선정하였다. PAHs는 '03년 환경부에서 선정한 '위해우려물질목록'에 제3순위 물질¹²⁾로 포함된 물질군이다. 일반적으로 각 나라별로 관리대상에 포함되는 PAHs의 종류 및 개수가 다르긴 하지만, 대체로 다음 <표 5-1>과 같이 16개 PAHs가 공통적으로 포함된다.

12) 유독물 우선순위평가(CRS) 결과 및 전문가 평가 등에서 우선순위는 높으나, 국내 내분비계장애 물질 사업, 환경잔류성유기오염물질(POPs) 사업 및 OECDs SIDS 사업등 관련 사업이 추진되고 있는 물질로 이에는 총 61종의 유해물질이 포함되어 있음

<표 5-1> 16가지 PAHs의 주요 물리·화학적 특성

No.	PAH chemical name	ring no.	molecular weight (g/mol)	solubility (μg/l) at 25°C	log K_{ow}	log K_{oc}	vapor pressure (mmHg) at 25°C
1	Naphthalene	2	128.2	3400	3.37		1.8E-2
2	Acenaphthylene	2.5	152.2	3420	4.07	3.04	1.0E-4~1.0E-3
3	Acenaphthene	2.5	154.2		3.98	3.66	
4	Fluorene	2.5	166.2	800	4.18	3.86	
5	Phenanthrene	3	178.2	435	4.46	4.15	6.8E-4
6	Anthracene	3	178.2	59	4.5	4.15	2.4E-4
7	Fluoranthene	3.5	202.3	260	4.9	4.58	
8	Pyrene	4	202.1	133	4.88	4.58	6.9E-7
9	Benzo(a)anthracene*	4	228.3	11	5.63	5.3	1.1E-7
10	Chrysene*	4	228.3	1.9	5.63	5.3	
11	Benzo(b)fluoranthene*	4.5	252.3	2.4	6.04	5.74	
12	Benzo(k)fluoranthene*	4.5	252.3	2.4	6.21		
13	Benzo(a)pyrene*	5	252.3	2.4	6.06	5.74	5.5E-9
14	Indeno(1,2,3-cd)pyrene*	5.5	276.3		6.58	6.2	
15	Dibenzo(a,h)anthracene*	5	278.3	0.4	6.86	6.52	
16	Benzo(g,h,i)perylene*	6	276.3	0.4	6.78	6.2	1.0E-10

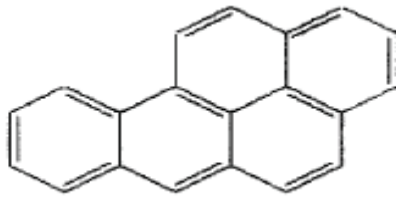
*animal carcinogen, international agency for research on cancer

 K_{ow} : Octanol-Water partition coefficient, K_{oc} : Organic carbon-Water partition coefficient

PAHs는 전 세계적으로 대기와 수계 등에 널리 퍼져있는 소수성 화합물로서 불완전 연소과정에서 탄화수소류가 다른 물질과 반응하여 복잡한 다환구조(polycyclic structure)를 형성함으로써 생성된다. 환경내 PAHs의 인공오염원으로는 주로 자동차와 기타가스를 태우는 엔진, 산업장의 연기와 매연, 나무를 때는 난로, 용광로, 담배연기, 그을린 음식 등이 있고 자연 오염원으로는 화산, 산불, 원유 등이 있다. 환경으로의 직접적인 배출은 대기로 이루어지며 반휘발성(semi-volatile)을 띠고 있어서 장기간에 걸쳐 환경내의 고체상(토양, 퇴적층, 분진 및 입자상 물질)에 축적되는 경향을 가지고 있다(조규탁외, 2000). 대기 중 PAHs는 입자에 흡착되어 장거리 이동을 할 수 있으며 습식 및 건식침적을 통해 대기로부터 제거되는데, 최근에는 인체 건강에 부작용을 초래하며 발암물질로 작용하여 장기간에 걸친 만성적 노출이 단기간의 급성노출보다도 훨씬 더 중요하다고 밝혀짐에 따라 환경 내 PAHs에 대한 관리 및 규제 필요성이 제기되고 있다(서혜선, 1999). PAHs는 현재 UNECE(United Nations Economic Commission for Europe)가 1998년 6월 채택한 '장거리월경성대기오염물질

에 관한 의정서'(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution)에서 회원국 간에 생산, 사용, 배출 등을 공동규제하기로 결정한 16종의 화합물질 군에 포함된다. 또한 '오대호의 잔류성 독성물질의 궁극적 제거를 위한 캐나다-미국간의 공동전략'(The Canada-United States Strategy for the Virtual Elimination of Persistent Toxic Substances in the Great Lakes Basin)에서 양국은 1997년부터 2006년 사이에 eldrin/dieldrin, 벤조(a)피렌, DDT, PCBs, 다이옥신류, HCB 등의 물질을 없애거나 감소시키기로 합의하였다. 그밖에도 POPs 물질에 의한 해양의 오염을 방지하기 위한 'OSPAR 협약'(Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic)이 서부와 북부유럽국가들 사이에 체결되어 1998년부터 발효되었는데 여기에 다이옥신류, PCBs, PAHs 등을 포함한 15개 물질군이 우선조치 대상물질목록에 포함되었다(이동수 외, 2000). PAHs는 향후 UNEP의 POPs규제대상물질로 선정될 가능성이 가장 높은 물질로서 앞으로 배출량 저감 등의 필요성이 증가될 것으로 예상되는데 현재 국내에서는 별다른 관리가 이루어지고 있지 않아 향후 규제 대상에 추가될 경우 적절한 대처방안의 마련이 쉽지 않을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 여러 PAHs 물질군 가운데 국내외 환경기준 설정항목에 대체로 공통적으로 많이 포함된 벤조(a)피렌을 모델링 대상화합물로 결정하였다. 벤조(a)피렌은 벤젠고리를 5개 가진 PAHs 군에 속하는 물질로 PAHs 중에서도 특히 독성이 강하여 전 세계적으로도 위해성에 대한 관심이 높고 그에 따라 다른 PAHs 물질들에 비해서는 상대적으로 배출에 대한 조사가 어느 정도 이루어지고 있는 물질이다(그림 5-1). 현재 미국 EPA에서는 인체 위해도에 따라 특별히 관리하여야 할 16개 PAHs 물질을 선정하였고, 그 물질들 중 발암성이 있는 것으로 생각되는 7개의 물질을 7-PAHs로 분류하여 관리하고 있는데, 여기에도 벤조(a)피렌이 포함되어 있다.



<그림 5-1> 벤조(a)피렌의 구조

벤조(a)피렌은 거의 모든 실험동물에서 가능한 모든 경로를 통해 낮은 농도에서도 암을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 벤조(a)피렌은 인간의 피부를 통한 흡수가 가능하며, 호흡노출도 인체노출의 주요경로로 문제시 되고 있어 작업장에서의 PAHs 호흡노출로 인한 상대적으로 높은 폐암발생이 보고되고 있다. 또한, 벤조(a)피렌은 성장 저하 등 급성독성과 장기간 노출시 피부암, 색소침착(pigmentation), 광알러지를 발생시키는 만성독성, 임신 중 노출시 태아독성, 유산, 기형을 유발시키고 불임을 유발시키는 생식독성 및 돌연변이원성이 보고되어 있다.

<표 5-2> 벤조(a)피렌의 인체 유해성 및 유해기준

증 상	유 해 기 준
- 점막에 자극성, 피부염, 기관지염, 기침, 결막염, 폐수종, 백혈병 - 피부접촉시 홍반, 색소침착, 박리, 가려움 - 만성노출시 각막 탈색, 눈가에 홍반, 피부 발진, 빈혈	LD50 ¹⁾ : 50mg/kg LDLo ²⁾ : 500 mg/kg

1) Lethal Dose 50 percent kill (50% 치사량)

2) Lowest Published Lethal Dose (최저치사량)

나. 다매체거동모델의 선정

다매체 거동모델은 평가목적에 따라 적절하게 선택이 되어야 하는데 대상물질의 일반적인 환경거동을 정량적으로 이해하고 경제적이며 효과적으로 정책결정을 지원하기 위해서는 모델의 구조가 비교적 단순하고 입력자료의 종류와 숫자가 적으며, 예측 정확성이 검증된 모델을 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 국내에서 개발된 다매체 거동모델 중에서 이상의 조건에 비교적 잘 부합되는 EDCSeoul을 적용모델로 선정하였다.

EDCSeoul 모델은 서울지역에서 내분비계장애물질의 거동해석을 위해 개발된 다매체 거동모델로서 PAHs, PCBs, 기타 유기염소계화합물 등의 거동예측에 있어 비교적 정확한 예측력을 나타내는 것으로 검증된 모델이다.

2. EDCSeoul 모델의 개요

가. 모델의 대상지역

기후, 수리·지리학적 성질 등이 유사하다고 판단되는 서울 및 경기를 포함한 150 km×150km 지역(126°08'12"~127°50'05"E, 36°52' 51"~38°13'56"N)을, 각 매체의 균질성을 가정할 수 있는 30km×30km의 cell 25개로 나누어 모사하였다.

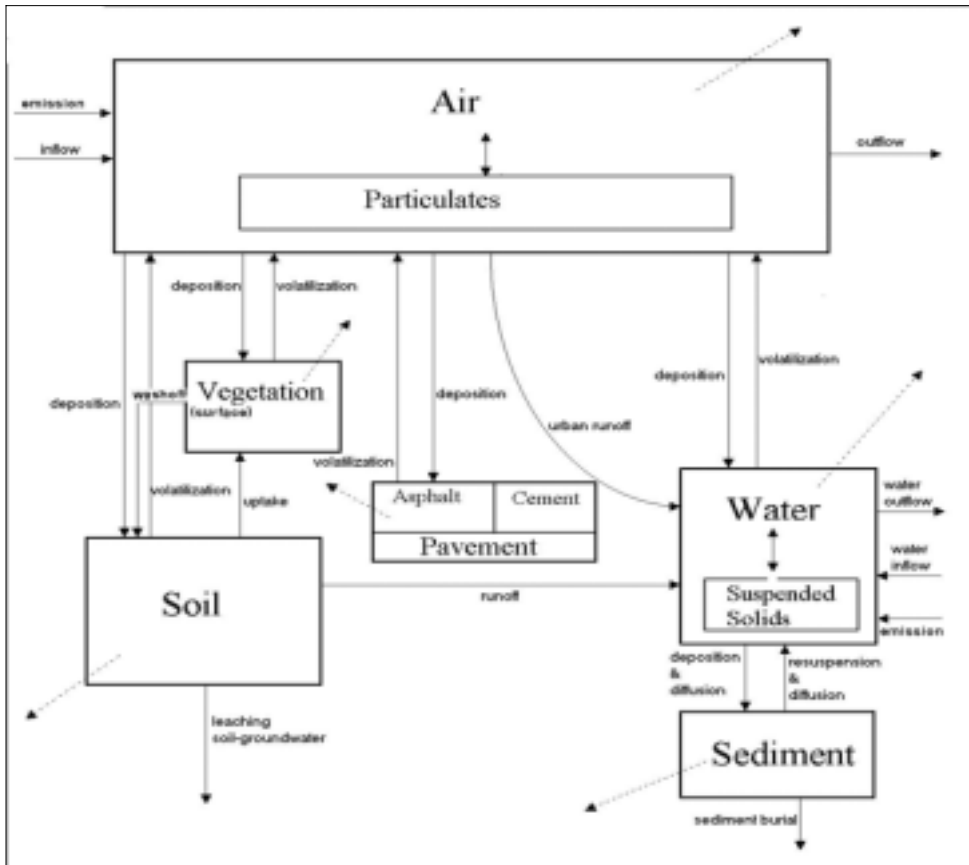
나. 대상 환경매체

서울지역의 대상공간은 크게 대기, 수체, 퇴적물, 토양, 식생의 5개의 매체로 구분되고, 대기는 기체상과 입자상으로, 수체는 용존상과 부유고형물로, 토양은 나대지와 산

림토양, 아스팔트 및 콘크리트 포장으로, 식생은 침엽수와 활엽수 등 부매체(sub-compartment)로 구분된다. 한편, EDCSeoul에서는 대기와 토양간의 오염물질 전달과정을 더욱 상세히 기술하기 위하여 침엽수표면과 활엽수표면을 별도의 부매체로 구분하였다.

다. 모델에 포함된 거동기작

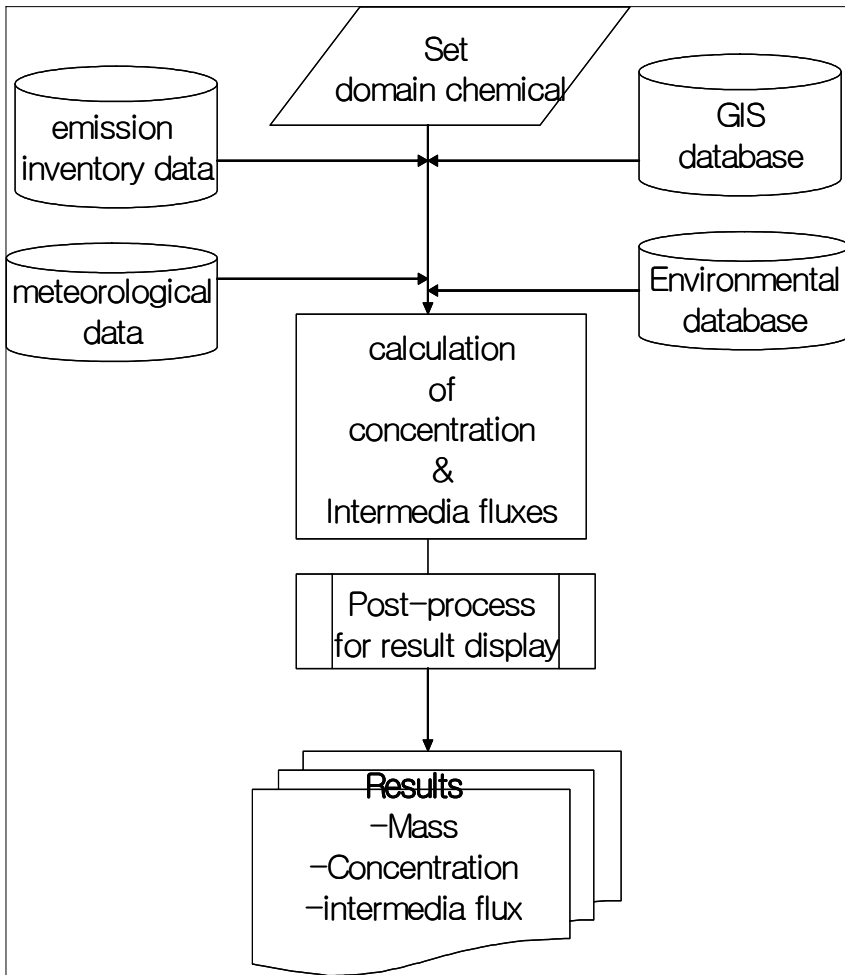
모델에서 고려한 환경거동기작들은 크게 매체내 기작과 매체간 기작으로 구분할 수 있는데, 매체내 기작에는 ①유출입(inflow and outflow), ②분해(degradation), ③침출(leaching), ④영구퇴적(sediment burial) 등이 포함되었고, 매체간 기작에는 ⑤휘발(volatilization), ⑥건식침적(dry deposition), ⑦습식침적(wet deposition), ⑧강우유출(run-off), ⑨식생 뿌리에서의 섭취(uptake), ⑩식생표면에서의 강우에 의한 세정(wash-off), ⑪대기에서 토양 및 수체로의 가스상 물질의 분자확산(diffusion), ⑫수체에서 퇴적층으로의 SS 침강(deposition) 및 재부유(resuspension) 등이 고려되었다. 각 매체간의 오염물 거동을 도식화하면 <그림 5-2>와 같다.



<그림 5-2> EDCSeoul의 모델 개념도

라. 모델의 자료처리 구조

EDCSeoul 모델의 개략적인 자료 입출력 및 처리 흐름 구조는 <그림 5-3>과 같다.



<그림 5-3> 모델의 자료입출력 및 처리흐름도

3. 모델 입력자료 및 기초자료 수집

모델수행에 필요한 입력자료는 대상물질의 물리·화학적 특성자료와 배출량 자료, 12개 대상 지역의 지리정보자료, 기상자료 등이 사용된다.

가. 벤조(a)피렌의 물리·화학적 특성

대상 오염물질인 벤조(a)피렌의 물리·화학적 특성값은 미국 EPA에서 개발된 EPI Suite(US EPA, 2000)의 최근 조사된 자료와 「Physical-Chemical Properties and Environmental Fate Handbook」 (Mackay et al., 2000)을 참조하였다. 모델링을 위해 요구되는 대상화합물의 물리·화학적 특성값으로는 분자량(Molecular Weight; MW), 증기압(Vapor Pressure; VP), 옥탄올-물 분배계수(octanol-water partition coefficient; K_{ow}), 대기-물 분배계수(air-water partition constant; K_{aw}), 공기와 물에서의 분자확산속도(molecular diffusivity; D_a , D_w), 그리고 대기, 물, 퇴적물, 토양에서의 분해율 상수(degradation rate constant; k_d^a , k_d^w , k_d^{sed} , k_d^{bs}) 등으로 본 연구에서 적용한 벤조(a)피렌에 대한 입력값은 다음 <표 5-3>과 같다. 물성자료 중에서 불확실성이 가장 큰 변수는 분해율 상수값인데, 특히 대기 중 부유분진 및 수체 내의 부유 고형물, 식생(침엽수, 활엽수)에서 화합물의 분해율 상수에 대한 기존 연구가 부족한 관계로 이들 값에 대해서는 보수적인 관점에서 0으로 적용하였다. 모든 대상화합물에 대해 식생토양(vegetation soil)에서의 분해율 상수는 문헌조사에서 구한 나대지(bare soil)에서의 분해율 상수와 동일한 값을 적용하였다.

<표 5-3> 모델 입력값으로 사용된 벤조(a)피렌의 물리·화학적 성질

MW	K _{ow}	VP	K _{aw}	D _a	D _w	
252.32	1.349E+06	7.000E-07	6.920E-08	0.0181	0.000342	
분해율 상수						
k_d^a	k_d^w	k_d^{sed}	k_d^{bs}	k_d^{fs}	k_d^{cv}	k_d^{dv}
1.567	1.567	5.993E-05	2.397E-04	5.993E-05	2.397E-04	2.397E-04

나. 대상 지역 토지이용도

환경부 소유 토지이용도 자료를 바탕으로 대상 지역에 대한 토지이용도를 산정하고, 그 결과가 모델에 적용되었다. 수계는 수역과 습지 지역을 수계로, 시가화지역은 도시로, 나대지는 비삼림토양으로, 녹지/초지/산림지역/농업지역은 삼림토양으로 분류된다. 지리정보자료로는 지형도와 토양도, 도로망도, 하천도, 토지이용도, 행정 구역도와 같이 6가지가 이용되었다. 서울지역의 매체별 용적 계산을 위한 대상 지역의 공간 환경에 관한 입력값은 <표 5-4>에 요약되어 있다.

<표 5-4> 서울지역 매체별 용적 계산을 위한 입력값

입력변수	단위	입력값	비고
대기고	m	1000	대기 혼합고
수심	m	5.0	연평균 수심
토양 깊이	m	0.10	토양 유효 깊이
퇴적층 깊이	m	0.25	표층 퇴적층 깊이
침엽수 단위 엽면적	m^3/m^2	0.002	계산값 적용 ¹⁾
활엽수 단위 엽면적	m^3/m^2	0.0006	계산값 적용 ²⁾

¹⁾ 단위면적당 침엽수 엽중량 2 kg/m^2 및 용적 밀도 900 kg/m^3 로부터 환산

²⁾ 단위면적당 침엽수 엽중량 0.6 kg/m^2 및 용적 밀도 900 kg/m^3 로부터 환산

다. 기상자료

기상자료는 다매체 환경에서 화학물질의 농도 및 거동에 영향을 주는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 대상 지역에 대한 기상자료로 풍향, 풍속, 강우량, 기온, 수온, 습도 등과 미세먼지에 대한 1998~2003년의 6년 평균값을 EDCSeoul의 입력값으로 적용하였으며 계절적 변동이 큰 강우량, 대기 중 분진농도 등의 기상 및 환경 인자에 대해서는 계절적 변동성을 고려하여 조사된 월별 통계치를 사용하였다. 또 최근 30년간의 바람과 관련된 통계자료로부터 만들어진 바람장미(wind rose)를 이용하여 대기 중 화학물질의 이동을 모사하였다.

라. 배출량 추정 자료

본 연구에서는 대상물질의 배출량 입력값으로 최근에 발간된 「다매체 환경에서 오염물질 농도와 매체간 이동량 추정(환경부, 2003(a))」의 지난 10년간 (1991-2000) 벤

조(a)피렌의 지역별 배출량 자료를 활용하였다. <표 5-5>는 서울지역의 연평균 벤조(a)피렌 배출량 추정결과를 정리한 것이다.

<표 5-5> 서울지역의 벤조(a)피렌 연간 배출량 추정결과

(단위; kg/년)

년도	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
배출량	85.4	90.4	94.6	99.2	102.8	90.7	93.5	89.6	73.5	73.9

4. EDCSeoul의 예측 정확도 평가

매체별 환경기준의 일관성 평가는 적용하는 다매체 거동모델의 예측결과에 따라 서로 다른 결론이 도출될 수 있다. 따라서 본격적인 일관성 평가에 앞서 적용코자 하는 모델이 대상물질에 대한 예측 정확도 또는 불확실성을 확인하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 벤조(a)피렌에 대한 EDCSeoul의 예측농도와 서울지역에서의 실측농도를 직접 비교하고, 대기농도를 기준으로 매체간 농도비(concentration ratio, 이하 C_{ratio})의 예측치와 실측치를 비교함으로써 모델의 예측 정확도를 평가하였다.

가. 실측농도 자료수집

우선 모델의 결과와 매체별 농도를 비교하기 위해 서울시에서 측정된 벤조(a)피렌의 농도 자료를 수집하고 매체별로 동시에 실측조사가 이루어진 자료들을 정리하였다. 그 결과가 <표 5-6>에 나타나 있다. 환경부(2001)의 자료는 G7공공기반기술사업의 일환으로 1999-2000년에 걸쳐 PAHs의 도심지역과 비도심지역에 대한 계절별 지

역별 환경 중 농도가 측정된 결과이며 국립환경연구원(2003)의 자료는 EDCSeoul모델의 검증에 위해 모델개발과 동시에 PAHs와 PCBs가 실측되었던 조사결과이다. 환경부(2002)의 농도는 2001년 내분비계장애물질 환경잔류실태조사 결과 서울지역에서 조사된 벤조(a)피렌의 결과를 정리한 것이다.

<표 5-6> 서울지역의 매체별 벤조(a)피렌 실측농도 결과

매체 (농도단위)	측정지점	측정 기간	시 료 수	농도				비고
				평균	표준 편차	최소값	최대값	
대기 (ng/m ³)	신촌(이대)*	'99.8-'00.5	4	3.84	6.17	0.08	13.04	환경부, 2001
	관악, 남산, 신촌	'02.11-'03.4	10	1.32	0.91	0.56	3.16	국립환경연구원, 2003
	시청앞,서울역,대치동	2001	3	0.60	0.19	0.39	0.76	환경부, 2002
	서울시 5곳_ 입자상	'98.9-'98.10	10	1.63	1.94	0.13	5.54	서혜선, 1999
토양 (ng/g)	신촌(안산)	'99.8-'00.7	5	36.69	11.12	21.36	46.72	환경부, 2001
	관악산,남산,신촌(안산)	'02.10-'03.7	4	30.77	39.83	3.56	88.92	국립환경연구원, 2003
	한강잠실, 구로	2001	2	2.45	0.50	2.10	2.80	환경부, 2002
	서울시 9곳	'98.8	17	35.05	64.42	0	267.73	서혜선, 1999
퇴적물 (ng/g)	광나루, 망원	'99.8-'00.7	9	13.22	5.67	5.49	21.6	환경부, 2001
	광나루, 망원	'02.12-'03.5	4	8.44	6.17	5.04	17.67	국립환경연구원, 2003
	한강 5개 지점	2001	5	0.2	0.45	ND	1.0	환경부, 2002
	서울시 6곳(호수,연못)	'98.9	12	40.98	73.32	0	197.17	서혜선, 1999
수체 (ng/l)	광나루, 망원	'99.8-'00.7	9	0.40	0.36	ND	1.17	환경부, 2001
	광나루, 망원	'02.12-'03.5	4	0.10	0.03	0.08	0.13	국립환경연구원, 2003
	한강 10개 지점	2001	10	·	·	ND	ND	환경부, 2002

*) 가스상을 제외한 입자상 농도만 측정

나. EDCSeoul 모델 예측 결과

EDCSeoul(ver. 2004)을 이용하여 서울시 환경 중 대기의 가스상 및 입자상, 토양과 퇴적물, 수체의 용존상과 부유물질, 그리고 식생에서의 벤조(a)피렌 농도를 예측하였다. 모델링을 위한 입력자료는 앞서 정리한 벤조(a)피렌의 물리·화학적 특성값, 대상 지역인 서울의 기상 및 토지이용도 등 환경정보, 배출량 추정자료가 사용되었다.

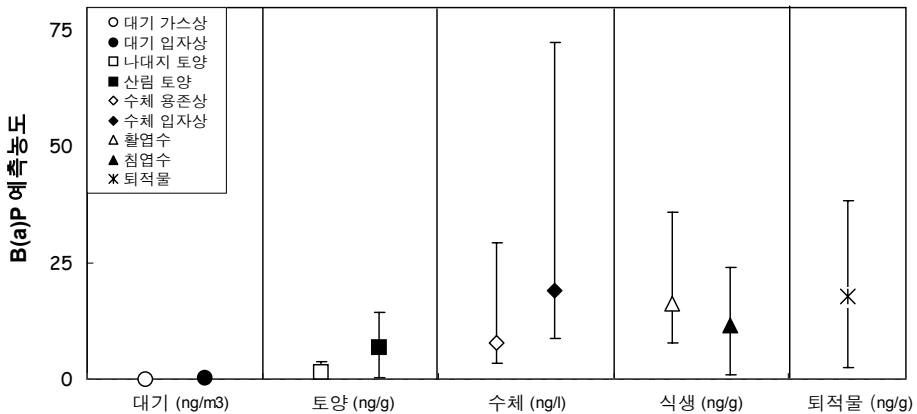
다음 <표 5-7>과 <그림 5-4>는 모델링 결과 전체 시뮬레이션 기간인 20년 중 매체별 농도가 정상상태에 충분히 도달하였다고 판단되는 마지막 1년 동안의 매체별 예측 농도에 대한 평균값과 최대, 최소값이다.

<표 5-7> EDCSeoul의 매체별 벤조(a)피렌 농도 예측결과

매체	부매체	예측농도		
		평균	최소값	최대값
대기 (ng/m ³)	증기상	0.08	0.06	0.09
	입자상	0.25	0.20	0.31
토양 (ng/g)	나대지 토양	1.66	1.40	2.20
	산림 토양	6.86	6.48	7.40
수체 (ng/l)	용존상	7.75	4.18	21.69
	입자상	19.09	10.30	53.44
식생 (ng/g)	활엽수	16.15	8.49	19.69
	침엽수	11.55	10.52	12.53
퇴적물 (ng/g)		17.72	15.25	20.88

1) 대기

벤조(a)피렌은 PAHs 화합물 중에서도 벤젠고리의 개수가 5개로 고분자에 속하는 화합물인데, 벤젠고리가 5개 이상의 고분자 PAHs는 벤젠고리가 3~4개인 PAHs 화합물과는 대조적으로 입자상의 농도가 가스상 농도를 포함한 전체 PAHs농도의 거의 대부분을 차지하는 것으로 보고되고 있다. EDCSeoul 모델의 예측결과 벤조(a)피렌의 입자상 농도는 전체 대기 농도의 약 76.8 %를 차지하는 것으로 나타났다.



<그림 5-4> EDCSeoul의 매체별 벤조(a)피렌 농도 예측결과

2) 토양

대기에서 토양이나 수체 등으로 매체간 이동을 하는 주요 경로는 대기 중에 존재하는 입자상물질의 침적이다. 대기 중의 벤조(a)피렌은 대부분이 입자상물질에 수착된 형태(sorbed form)로 존재하면서 강우시에는 강우와 함께 침적되어 토양 및 수체로 이동(습식 침적)하고, 강우가 없을 때에는 건식침적을 통해 이동하게 된다(이동수, 2001). 모델링 결과 토양은 나대지 토양과 삼림토양에서의 농도로 구분되어 예측되었는데, 나대지 토양에 비해 식생토양에서 벤조(a)피렌의 농도가 4.1배 높은 것으로 나타났다.

3) 수체

수체(한강)의 경우 토양과 마찬가지로 대기로부터 입자를 통해 직접 침적되는 것이 가장 중요한 유입경로로 대기의 오염이 수질오염으로 이어지는 원인이다. 이외에도 지표유출수를 통해 수체로 유입되는데 이는 토양의 오염이 수질오염으로 이어질 수 있음을 보여주는 것이다. 특히 서울과 같이 도시화된 지역에서는 지표면의 많은 부분이 아스팔트와 콘크리트 등의 인공적인 물질로 덮여 있으므로 지표유출수의 양은 상

대적으로 늘어나게 되고, 또 이런 인공물질은 매우 낮은 유기탄소 함유율로 인해 소수성 유기화학물질의 보유능력이 거의 없으므로 결국 한강으로의 이들 물질의 유입량을 증가시키는 원인이 될 수 있다(이동수, 2001; 권정환, 1998).

벤조(a)피렌과 같은 유기오염물질이 수체로 유입되면 일부는 용존 상태로 있게 되고 일부는 물속의 부유고형물질에 흡착되는데 모델링 결과 용존상에 비해 입자상의 농도가 2.5배이며 전체 수체 농도에 대한 입자상 농도의 비율은 71.1 % 로 예측되었다. 수체 입자상은 농도 분포 폭도 매우 크게 나타났다. 입자에 흡착된 형태로 존재하는 경우 대기 중으로 직접 휘발되지 않으며 분해속도도 달라지고, 입자의 운동에 따라 이동하게 되므로 유기오염물질의 거동에 있어서 용존된 상태와는 많은 차이를 나타내게 된다(이동수, 2001).

4) 퇴적물

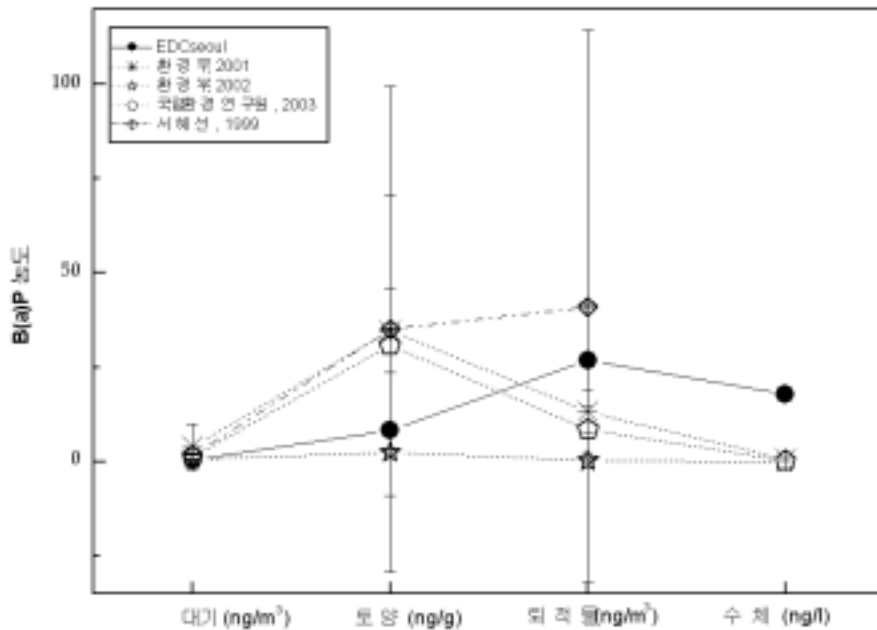
수체로 흘러들어간 독성물질의 대부분이 퇴적물에 쌓이므로 퇴적물은 오염물질의 거동에서 중요한 저장고로서의 역할을 한다(Macay et al., 2001). 수체 중 입자는 특히 침강을 통해 바닥의 퇴적물에 쌓이게 되는데 주로 이 과정에서 수체 중 유기오염물질이 퇴적물로 이동하며 부유고형물질이나 퇴적물의 유기탄소함량이 높을수록 축적량이 많아진다. 한편 퇴적물은 대기나 물과는 대조적으로 농도변화의 속도가 느리고 전체의 농도를 빨리 그리고 한꺼번에 변화시킬 수 있는 기작이 없어 장기간에 걸쳐 지속적인 변화양상을 보이므로 유기오염물질의 유입조건이 안정화되어도 농도변화는 장기간(수년-수십년) 지속되게 된다. 예를 들어 대기로의 배출을 성공적으로 규제한다 하더라도 퇴적물이 오염되기 이전의 수준으로 돌아오기 위해서는 매우 긴 시간이 필요하고 또 대기나 수체의 농도가 낮아지게 되면 이러한 퇴적물의 퇴적층이 거꾸로 오염물질을 배출할 수도 있기 때문에 장기적인 오염원으로 작용하게 된다. 모델링 결과 퇴적물의 농도 수준은 수체의 입자상 다음으로 높게 나타났으며 최대, 최소값 사이의 폭도 수체 입자상 다음으로 크다.

5) 식생

유기화학물질의 식생으로의 분배는 계산이 어려워 거동모델에서 고려되지 않다가 최근 그 중요성이 강조되면서 보다 복잡한 거동모델에서 주요 매체로 포함되어 있다. 식생은 토양을 안정화시키고 수분이 토양에서 대기로 이동하게 하며 토양에서 화학물질의 분해속도를 증가시킨다(D.Macay, 2001). 또, 대기에서 식생(특히, 활엽수)으로 침적되거나 흡착되는 독성화학물질의 양이 일반 토양보다 매우 높은 것으로 보고되고 있다(Horstmann and Mclachlan, 1998). 모델링 결과에서도 식생에서의 농도 분포가 다른 매체에 비해 매우 높게 나타났으며 식생 중에서도 활엽수가 침엽수보다 약 1.4배 높은 농도로 예측되었다.

다. EDCSeoul 모델 예측농도와 실측농도의 비교

EDCSeoul 모델에서 예측된 평균 농도를 환경부(2001, 2002)자료와 국립환경연구원(2003), 서혜선(1999)의 실측 농도 평균값들과 비교해 보았다(그림 5-6). 전체 매체별 실측농도를 보면, 대기와 수체에 비해 토양과 퇴적물에서의 농도 수준이 훨씬 높고, 퇴적물에 비해 토양의 농도 수준은 대체로 두 배 이상 높게 나타나는 비슷한 농도 분포 패턴을 볼 수 있다. 그러나 서혜선(1999)의 경우 토양보다 퇴적물의 농도가 약간 높아서 조금 다른 경향을 보이는데, 이것은 <표 5-6>에서 나타나 있듯이 다른 조사 사례들이 하천의 퇴적물을 측정했기 때문에 비해 서혜선(1999)의 퇴적물 시료는 호수나 연못에서 채취되었기 때문인 것으로 분석된다. 우리나라는 여름에 집중 강우로 인해 하상퇴적물 대부분이 강이나 바다로 유실되므로 하상퇴적물에는 PAHs가 장기간 축적되기 어려운 것으로 알려져 있다. 반면 호소의 퇴적물은 강우로 인한 퇴적물 유실이 적어 강우시 침적되거나 지표면 유출수로 흘러들어난 PAHs가 꾸준히 축적되어 매우 높은 농도가 측정된 것으로 보인다. 이는 동일한 매체에서도 환경조건이 달라짐에 따라 측정농도에 있어 상당한 차이를 나타낼 수 있음을 의미한다.



<그림 5-6> EDCSeoul의 벤조(a)피렌 예측농도와 실측농도의 비교

매체별 예측농도와 실측농도를 비교해보면, EDCSeoul의 매체별 예측농도 평균값이 다른 4개 다매체 실측조사 결과들의 측정값 범위 내에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 수체의 경우는 EDCSeoul 예측값이 실측값에 비해 과대평가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

라. EDCSeoul 모델 예측 상대농도와 실측 상대농도의 비교

매체간 환경기준의 일관성 평가하는 과정은 사실상 주어진 환경내에서 여러 매체간의 상대적인 농도를 평가하는 것이다. 그런데 이러한 상대적인 농도는 항상 하나의 값으로 정해진 것은 아니며 환경이 다른 지역마다 다르고, 같은 지역에서도 시간에

따라 바뀌게 된다. 따라서 일관성여부를 판단하려 할 때 시간이나 지역에 따라 달라지는 상대농도값 변이에 대한 검토가 수반되어야 한다.

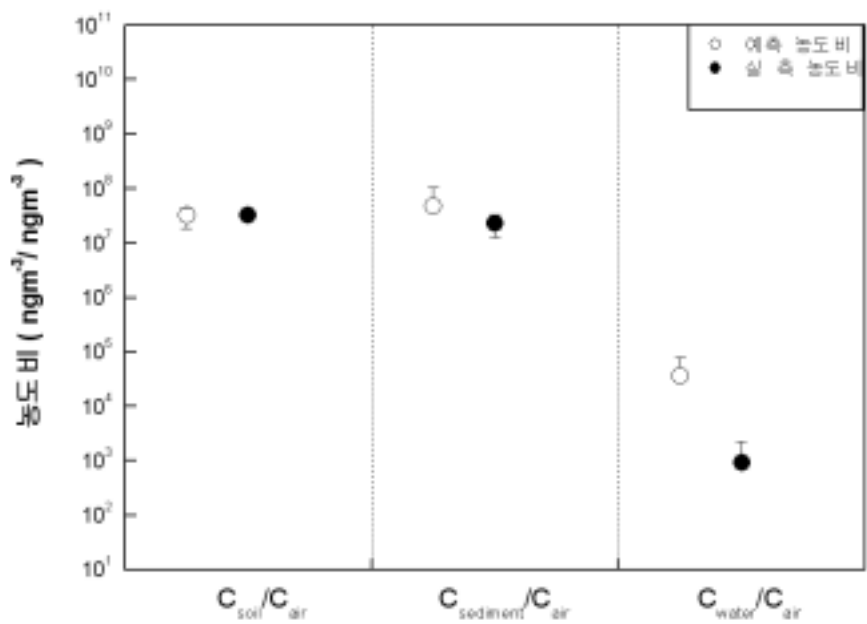
PAHs의 경우 오염물이 직접 대기로 배출되고, 바람에 의한 이류가 대기 중 오염물의 거동을 결정하는 주 과정이 되고 있어, 대기 중의 농도는 배출량과 풍속에 의해 일차적으로 결정이 된다. 또한 토양 및 수체에서의 농도는 대기로부터 건식 및 습식 침적에 의해 주로 결정되므로 토양의 농도 또한 대기 중의 농도와 마찬가지로 발생량과 풍속에 의해 결정된다고 할 수 있다. 따라서 발생량 추정이 불확실한 경우 각 매체에서의 농도 분포를 절대농도로 비교, 평가하는 것보다 기준매체에 대한 상대농도로 평가한다면, 대상 오염물질의 배출 속도와 경로에 의해 영향을 받지 않는, 매체간 오염물질의 농도 분포 특성을 알 수 있게 된다.

특정 오염물질의 다매체 농도분포 특성을 고려한 다매체 환경 기준을 설정하거나 매체별로 따로 설정된 환경기준들의 일관성을 평가하기 위해서도 불확실성이 높은 배출 입력값의 영향을 직접적으로 받는 절대농도보다는 매체간 상대농도를 평가 기준으로 사용하는 것이, 대상 오염물질의 농도를 변화시키는 여러 인자들의 영향에 덜 민감하면서 배출원이나 배출량의 조건이 다른 경우에 대해서도 보다 포괄적으로 적용될 수 있는 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

<표 5-8>과 <그림 5-7>은 벤조(a)피렌이 주로 배출되어서 여러 경로로 이동하는 매체인 대기 농도에 대한 다른 각 매체에서의 상대농도를, 서울지역에 대한 EDCSeoul 예측결과와 실측농도 결과로부터 계산한 것이다. 대기에 대한 토양의 상대농도는 예측 및 실측농도 모두에서 $6.1 \times 10^6 \sim 3.9 \times 10^7$ 까지 분포하고 있고, 대기에 대한 퇴적물의 상대농도는 6.7×10^5 부터 1.1×10^8 까지 분포하고 있다. 대기농도에 대한 수체농도는 앞서 절대농도의 예측치와 실측치 비교에서 살펴보았듯이, EDCSeoul의 예측치가 실측치보다 상대적으로 과대평가하는 경향을 나타내고 있다.

<표 5-8> 벤조(a)피렌의 대기농도에 대한 매체별 상대농도 예측 및 실측 결과

구분		상대농도 ($\text{ngm}^3/\text{ngm}^3$)		
		$C_{\text{soil}}/C_{\text{air}}$	$C_{\text{sediment}}/C_{\text{air}}$	$C_{\text{water}}/C_{\text{air}}$
예측 농도	EDCSeoul	3.89E7	1.08E8	81716.8
실측 농도	환경부, 2001	1.35E7	6.89E6	163.28
	국립환경연구원, 2003	3.50E7	1.28E7	76.14
	환경부, 2002	6.13E6	6.67E5	.



<그림 5-7> 벤조(a)피렌의 대기농도에 대한 매체별 상대농도 예측치 및 실측치 비교

이상에서 서울지역을 대상으로 벤조(a)피렌의 절대농도 및 상대농도 각각에 대하여 EDCSeoul의 모델 예측치와 실측치간의 비교를 통하여 모델 예측력을 검증하였다. 그 결과, 수체에서 모델 예측결과가 다소 과대평가하는 경향이 있기는 하지만 대체로 실측결과 범위에 있으며 이러한 불확실성을 감안하여 모델링 결과를 해석할 필요가 있다. 이상의 결과로 볼 때 본 연구에서는 EDCSeoul을 이용하여 벤조(a)피렌의 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가를 수행하는 데는 무리가 없는 것으로 판단된다.

5. 매체별 환경기준의 일관성 평가

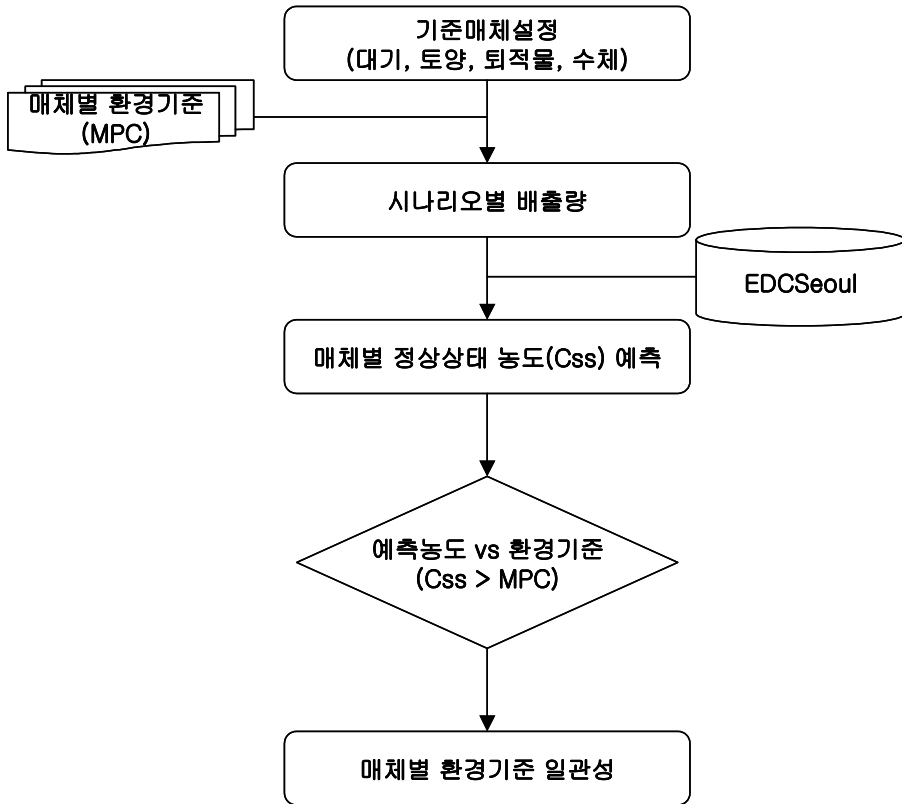
매체별 환경기준에 대한 ‘일관성 평가’란 어느 특정 매체의 오염농도가 해당매체에 설정된 환경기준 이하로 유지될 수 있는 배출량을 가정한 시나리오에 대해 다매체 거동 모델링을 수행하여, 그와 인접한 다른 매체에서 예측된 오염농도가 각각의 매체에서의 환경기준을 만족시키는지 여부를 판단하는 과정을 말한다. 이러한 일관성 평가를 통해 어느 한 매체에서의 환경기준을 유지함으로써 인접한 다른 매체에서도 정해진 환경기준이 실제 환경에서 유지될 수 있는지, 또는 매체별로 설정된 환경기준이 상호 모순됨이 없이 함께 유지될 수 있는지를 평가할 수 있게 된다.

국내에는 유해화학물질에 대해 여러 환경매체에 대해 동시에 환경기준이 설정되어 있는 사례가 아직 없으므로 본 연구에서는 이미 설정되어 있는 외국의 기준을 이용하여 일관성 평가를 수행하였다. 한편, 이러한 외국의 기준에 대한 일관성 평가를 통해 우리나라와 자연환경이나 기상조건이 다른 외국의 매체별 환경기준을 그대로 가져와서 적용하는 경우에 발생할 수 있는 문제점을 파악할 수도 있을 것이다.

가. 일관성 평가 절차

우선 일관성 평가의 대상이 되는 매체별 환경기준을 조사한다. 본 연구에서는 EDCSeoul 모델링 대상물질인 벤조(a)피렌에 대한 국내외 환경기준 설정현황을 조사하여 대기, 수체, 토양, 퇴적물 등 각 매체별 기준이 모두 설정되어 있는 네덜란드의 MPC¹³⁾를 일관성 평가 대상 매체별 환경기준으로 설정하였다. 한편, 매체별 환경기준이 정해지면 어느 특정 기준매체를 정하고 시나리오별(기준 매체별)로 해당매체의 환경기준을 만족할 때의 오염물질 배출량을 결정하게 된다. 이렇게 결정된 배출량을 입력값으로 하여 EDCSeoul을 이용하여 다매체 거동모델링을 수행하고, 정상상태에 도달했을 때 각 매체별 예측농도(steady-state concentration, 이하 C_{ss})를 해당 매체에 설정된 환경기준값과 비교함으로써 C_{ss} 가 매체별 환경기준을 초과하는지 여부를 평가하게 된다. 이상과 같은 다매체 거동모델을 이용한 매체별 환경기준의 일관성 평가 절차를 도식화하면 다음과 같다.

13) MPC(maximum permissible concentration)은 각 매체별로 유해특성을 나타내지 않도록 허용할 수 있는 매체별 '최대허용농도'로서 법적인 구속력을 갖는 환경기준과는 구분된다.



<그림 5-8> 매체별 환경기준의 일관성 평가 절차

나. 벤조(a)피렌의 환경기준 설정현황

우리나라에는 벤조(a)피렌에 대한 매체별 환경기준 또는 권고기준이 설정되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 외국의 매체별 환경기준 설정 현황을 조사하여 그 결과를 <표 5-9>에 정리하였다. 벤조(a)피렌과 같은 PAHs화합물은 아직 환경 기준이 설정된 사례가 많지 않았지만 미국과 캐나다, 유럽연합이나 영국, 네덜란드, 독일 등 선진국을 중심으로 매체별로 오염이 되었는지, 혹은 오염의 대책이나 복원이 필요한지, 퇴적물의 경우에는 저서생물에 악영향을 미치지 않는 수준이 어느 정도인지를 나타내어 주는 기준이 개별 매체에 대해 마련되어 있는 것으로 조사되었다. 이러한 기준들은 대부분이 권고기준으로 법적 규제력을 가지고 있지는 않다. 그리고 보다 직접적인 인체영향을 고려하여 일반 대기나 하천수 보다는 사람이 생활하면서 직접 노출되는 정도가 높은 민감 지역의 토양이나 음용수에서 기준이 설정되어있는 경우가 많은데, 전 세계적으로 매체 통합관리를 충실하게 시행하고 있는 네덜란드에서는 벤조(a)피렌에 대한 대기, 수체, 토양, 퇴적물 각각의 매체별 최대허용기준으로서 MPC를 설정하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 네덜란드의 MPC를 대상으로 하여 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가를 수행하였다.

<표 5-9> 벤조(a)피렌의 매체별 환경기준 설정현황

매체 국가(기관)		대기(ng/m ³)	토양(ng/g)	퇴적물 (ng/g)	수질, 지하수(ng/l)	참고문헌
이탈리아		1				WHO(1998)
구소련		1	20		5	WHO(1998)
유럽연합 ¹⁾			민감 지역: <100 목초지/숲: 10000 거주지: 200 산업/기간시설: 20000	안 전 기 준 : 90	(지하수:75(1% 유기물함량)) 음용수기준: 10	한국환경정책 평가연구원, 2000
미 국	코네티컷	(8시간평균) : 100				환경부, 1999a
	펜실 베이아	(연평균): 0.7				환경부, 1999a
	뉴저지		(오염토양복원기준) 거주지: 660 비거주지: 660 심토(subsurface soil):100000			환경부, 2003
네덜란드(MPC)		1	260	2700	50	RIVM, 1995
덴마크		100	(가장민감한지역복원목표) C ²⁾ 기준: 10000 A ³⁾ 기준: 20		(지하수 C ²⁾ 기준:50 A ³⁾ 기준: 1)	환경부, 1999b
핀란드		실내공기최 대기준농도: 1	산업지역 : 100 오염토양: 10000		음 용 수 권 고 기 준:10	환경부, 1999b
독일			놀이터: 2000 주거지:4000 공원레크리에이션용지: 10000 공장상업용지:12000 농경지 조사기준: 1000 우려기준 (휴믹성분함유>8%):1000 우려기준 (휴믹성분함유≤8%):300			환경부, 2003
캐나다			농경지: 100 주거지 및 공원: 700 상업지 및 산업지: 700	- 담 수 퇴 적 물 ISQGs ⁴⁾ : 31.9, PEL ⁵⁾ : 782 - 해 양 퇴 적 물 ISQGs ⁴⁾ : 88.8, PEL ⁵⁾ : 763		환경부, 2003

1) Human health not affected

2) C기준 : 대책기준(intervention value), 3) A기준 : 목적기준(target value)

4) ISQGs: 캐나다연방정부의 잠정퇴적물질권고기준(Interim Sediment Quality Guideline), ISQGs 미만의 농도는 저서생물에 대한 악영향이 거의 없는 오염되지 않은 퇴적물의 상태를 나타낸다.

5) PEL: 악영향기대기준(Probable Effect Level), 악영향 기대수준 이상의 농도는 수서생물에 대한 악영향이 빈번하게 나타날 수 있는 수준으로 퇴적물 오염이 상당히 진행된 상태를 나타낸다.

다. 매체별 환경기준의 일관성 평가결과

네덜란드의 벤조(a)피렌 다매체 환경기준을 사례로 이들 매체별 기준(MPC)을 대상으로 국내에서 개발된 EDCseoul 모델을 이용하여 다음과 같이 일관성 평가를 실시하였다.

EDCSeoul 모델을 이용하여 서울지역에서 각 매체별 벤조(a)피렌 농도가 기준매체(대기, 토양, 퇴적물, 수체)의 MPC 수준으로 유지되는 배출량을 계산한 다음, 각각의 배출량을 모델 입력값으로 가정한 일관성 평가 시나리오를 작성하였다. 각각의 시나리오에 대해 모델링을 수행하고 전체 매체에서 정상상태¹⁴⁾에 도달했을 때의 벤조(a)피렌의 예측농도를 계산하였다. 각각의 시나리오별 매체별 벤조(a)피렌 예측농도를 <표 5-10>에 나타내었다.

<표 5-10> 벤조(a)피렌의 매체별 환경기준(MPC)에 대한 일관성 평가 결과

시나리오	기준매체	대기 (ng/m³)	토양 (ng/g)	퇴적물 (ng/g)	수체 (ng/L)
	배출량(mol/hr)				
I	0.38	1.00 ¹⁾	25.95	53.96	81.72
II	3.82	10.02	260.00 ²⁾	540.62	818.78
III	19.09	50.04	1298.50	2700.00 ³⁾	4089.19
IV	0.23	0.61	15.88	33.01	50 ⁴⁾

1) MPC_{air}, 2) MPC_{soil}, 3) MPC_{sediment}, 4) MPC_{water}

14) EDCSeoul의 모델링 수행기간 최종년도(20년)의 매체별 예측농도를 정상상태 농도로 간주하였다.

1) 오염도 예측결과

네덜란드의 매체별 MPC 기준에 맞춰 배출량을 가정하고 시뮬레이션 한 시나리오 I ~ IV의 모든 경우에서 환경 매체별 예측농도는 서울시에서 실측된 매체별 농도 수준보다 모두 높은 것으로 나타났다. MPC는 각 매질에서 유해성을 나타내지 않는 '최대허용 가능한 농도수준'을 나타낸다. 따라서 실제 환경기준은 이 보다 훨씬 엄격한 수준으로 설정될 필요가 있으며¹⁵⁾, 이러한 환경기준을 만족하기 위해서는 대상물질의 환경중 배출량을 본 연구에서 적용한 배출량보다는 상당히 낮은 수준으로 관리해야 할 것이다.

2) 시나리오별 평가결과

o 시나리오 I

벤조(a)피렌의 대기 MPC기준(1.0 ng/m^3)을 만족하도록 배출량(0.38 mol/hr)을 가정한 시나리오 I의 정상상태에 도달했을 때 토양과 퇴적물의 농도는 각각 25.95 ng/g , 53.96 ng/g 으로 각각의 매체별 MPC기준 260.0 ng/g , 2700 ng/g 을 만족시키는 것으로 나타났다. 그러나 수체 농도의 경우 81.72 ng/L 로 예측되어 수질기준인 50 ng/L 를 초과하는 결과를 보였다. 따라서 이 경우 대기기준을 만족하도록 오염물질 배출량을 관리하더라도 토양과 퇴적물 환경에서는 문제가 없지만 수질기준을 만족시킬 수 없다는 결론을 내릴 수 있다.

15) 네덜란드에서는 일반적으로 MPC의 1% 수준으로 환경기준이 결정되고 있는 것으로 알려져 있다.

o 시나리오 II

벤조(a)피렌의 토양 MPC기준(260.0 ng/g)을 만족하도록 배출량(3.82 mol/hr)을 가정한 시나리오 II의 경우, 정상상태에 도달했을 때 대기, 퇴적물, 수체의 농도는 각각 10.02 ng/m^3 , 540.62 ng/g , 818.78 ng/L 로 퇴적물을 제외하고는 모두 매체별 MPC기준을 초과하는 것으로 예측되었다. 따라서 이 경우도 토양기준을 만족하도록 오염물질 배출량을 관리하게 되면 퇴적물을 제외한 다른 매체에서 오염도가 심각한 수준에 달하게 되는 결과를 초래하게 된다.

o 시나리오 III

벤조(a)피렌의 퇴적물 MPC기준(2700.0 ng/g)을 만족하도록 배출량(19.09 mol/hr)을 가정한 시나리오 III에서는 20년 후 모든 매체에서의 정상상태 농도가 매체별 MPC기준을 50배 이상 초과하는 것으로 나타났다. 이는 다른 매체기준에 비해 완화된 기준이 적용되는 퇴적물을 기준매체로 하여 환경관리(배출량 제어)를 시행할 경우 여타의 매체에서는 설정된 매체별 기준을 만족시킬 수 없음을 명백히 보여주고 있다.

o 시나리오 IV

벤조(a)피렌의 수질 MPC기준(50.0 ng/L)을 만족하도록 배출량(0.23 mol/hr)을 가정한 시나리오 IV의 경우, 20년 후 모든 매체에서의 정상상태 농도가 각각의 매체에 설정된 MPC기준을 만족하는 것으로 나타났다.

6. 시사점

이상의 시나리오별 매체별 환경기준의 일관성 평가 결과, 수체를 기준매체로 가정한 경우를 제외하고는 모든 시나리오에서 기준매체의 환경기준을 만족시키더라도 장기적으로 인접한 다른 매체의 기준을 만족시키지 못하는 결과를 확인하였다. 물론, 이러한 결과는 벤조(a)피렌 하나만의 물질을 대상으로 한 평가결과로서 다른 물질 또는 다른 환경기준을 대상으로 평가할 경우 다른 결과가 나올 수도 있다. 그러나 이상의 일관성 평가결과는 인접 매체와의 다매체 거동특성을 무시한 채로 단지 독성자료 등의 정보로부터 개별적으로 만들어진 매체별 기준이 환경정책의 실패로 이어질 수 있다는 사실을 보여주는 좋은 사례라고 할 수 있다. 따라서 앞으로 유해화학물질에 대한 환경기준을 설정하기 위해서는 본 연구에서 제시한 ‘다매체 환경기준 설정 절차’에 따라 매체별 기준간의 조화과정을 반드시 거치는 것이 타당하다는 결론을 얻을 수 있다.

또한, 본 연구의 결과는 환경기준의 설정에 있어서 뿐 아니라 배출원 관리에 있어서도 하나의 매체만을 중심으로 배출량을 관리할 경우 인접한 다른 매체에서 심각한 영향 또는 오염을 유발 할 수도 있다는 교훈을 전해준다. 따라서 앞으로 유해화학물질의 배출원 관리정책은 기본적으로 매체 통합적 관점에서 추진되어야 함을 시사한다고 하겠다.

끝으로 본 연구에서는 네덜란드에서 설정한 매체별 MPC 기준을 대상으로 하여 일관성 평가를 수행하였다. 앞서 기술한 대로 화학물질의 환경중 거동은 대상지역의 환경적, 기상적 조건에 따라 상당히 다른 양상을 나타낼 수도 있다. 벤조(a)피렌에 대한 서울지역에서의 매체별 오염도 실측 및 예측 결과에서 볼 수 있듯이, 측정지점이나 시점에 따라 농도 분포가 매우 다양하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 환경기준을 설정하기 위하여 다매체 거동모델링을 수행할 때는 다양한 조건에서의 매체별 오염물

질의 농도분포 특성도 함께 파악함으로써 지역간 편차나 시간적 차이에 따른 매체별 기준농도의 허용범위나 환경기준의 적용범위를 적절하게 반영할 필요가 있다. 물론, 어떤 대상물질에 대한 환경기준을 설정할 때는 지역적 특성을 고려하여 다양한 시나리오에 대해서 위해성 평가를 거쳐 그 결과를 종합하여 기준을 설정하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 이러한 과정을 생략한 채로 외국에서 설정된 기준을 참고로 기준을 설정해야 하는 경우에라도 매체별 환경기준의 조화 또는 일관성 평가를 수행함으로써 최소한 과학적 근거를 확보할 필요가 있다.

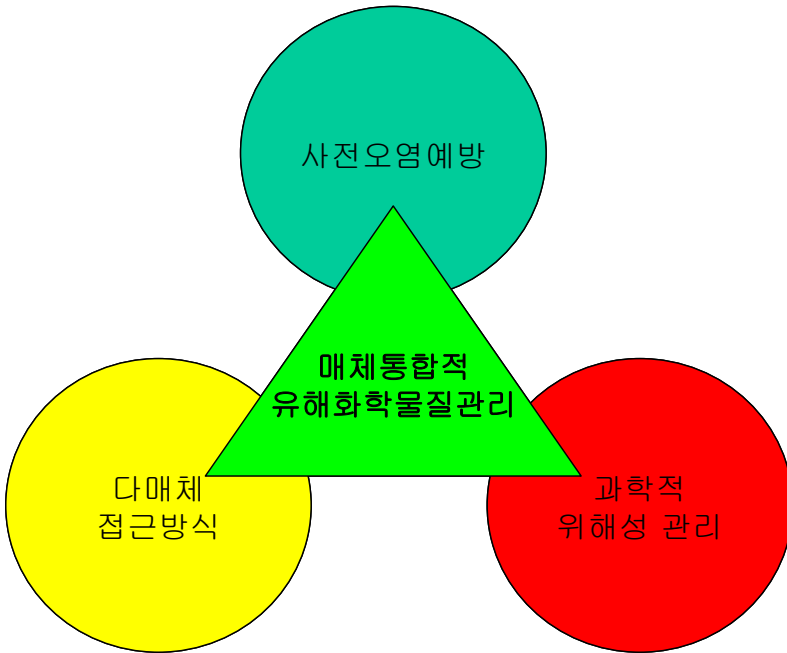
제6장 유해화학물질의 매체 통합관리 및 다매체 환경 기준설정 방안

이상의 연구에서 ‘선진국의 매체 통합관리 현황’, ‘환경기준 설정현황’, ‘매체별 환경기준의 문제점 및 다매체 환경기준설정의 타당성’에 대하여 고찰하였다. 이에 본 장에서는 앞서 제시한 연구결과 및 시사점을 바탕으로 우리나라에서 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 기본 정책방향 및 관리체계, 다매체 환경기준 설정방안, 향후과제를 제안하고자 한다.

1. 매체 통합관리를 위한 기본방향 및 체계

가. 기본 정책방향의 설정

수많은 화학물질이 새로이 만들어지고 이의 생산 및 사용량이 날로 증가하며, 이를 배출하는 오염원이 다양해져 가는 현대사회에서 기존의 전통적인 관리방식으로는 환경문제를 효과적으로 해결할 수 없게 되었다. 제2장에서 살펴 본 대로, 선진국에서는 이미 ‘통합 환경관리’ 그리고 이에 기초를 둔 ‘유해화학물질의 매체 통합관리’가 환경정책의 수립 및 집행을 위한 새로운 패러다임으로 자리잡아가고 있다. 따라서 앞으로 우리나라에서도 ‘사전오염예방’, ‘과학적 위해성 관리’, ‘다매체 접근방식’의 세 가지 기본원칙에 입각한 유해화학물질의 매체 통합관리 정책을 수립·추진할 필요가 있다고 생각한다.



<그림 6-1> 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 기본 정책방향

첫째, 유해화학물질은 한번 환경으로 배출되면 오랜 기간 잔류하며 국경을 초월하여 이동하는 특성이 있으므로 무엇보다도 오염물질이 배출되기 이전에 배출을 차단 또는 관리할 필요가 있다. 즉, 유해화학물질의 관리에 있어서는 ‘사전오염예방’ 원칙에 입각한 오염원관리가 필요하며 이러한 원칙은 이미 전 세계적으로 유해화학물질 관리정책의 기본 패러다임으로 자리 잡고 있다. 사전오염예방을 위해서는 기본적으로 배출원에 대한 사후관리보다는 근본적으로 유해화학물질의 생산 및 사용을 줄이는 것을 유도할 수 있는 정책수단들이 개발되어야 할 것이다.

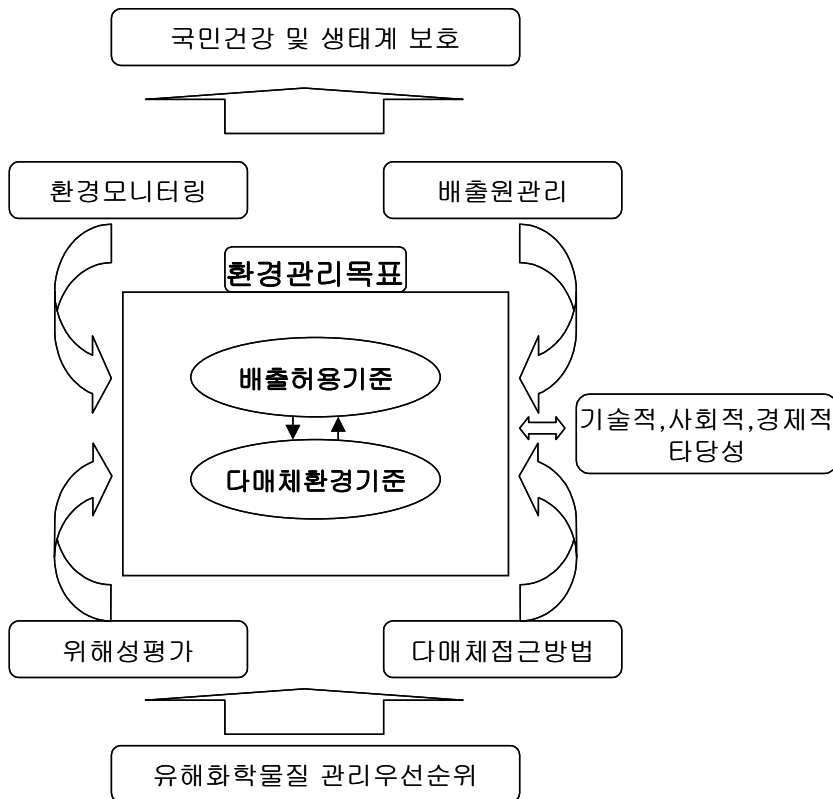
둘째, 지금까지 우리나라의 화학물질 관리는 배출원 중심의 관리정책 위주로 시행

되어 온 것이 사실이다. 그러나 앞으로 화학물질로 인한 인체 및 환경 피해의 원인을 규명하고 이를 효과적으로 줄이기 위해서는 기존의 화학물질 관리체제를 ‘과학적인 위해성 관리’ 원칙에 입각한 수용체 중심의 관리체제로 전환하는 것이 필요하다. 최근 환경부는 「유해화학물질관리법」의 개정을 통하여 화학물질에 대한 위해성 평가 원칙을 규정함으로서 이제 우리나라에서도 이의 제도적 기틀은 마련되었다고 본다. 그러나 아직까지 우리나라에는 위해성 평가를 수행할 수 있는 기술적 토대가 미흡한 것으로 평가된다. 따라서 앞으로 우리나라에서 유해화학물질에 대한 실질적이고도 과학적인 위해성 관리를 위해서는 현재 취약한 기술적 기반을 확고히 하는 것이 필요하며 이를 위해서는 위해성 평가 및 관리 분야에 대한 연구·개발에 적극적인 지원이 있어야 하겠다.

셋째, 앞서 지적한 대로 유해화학물질은 기본적으로 매체간 이동·분배하는 다매체 거동특성을 나타낸다. 유해화학물질은 어느 한 매체로 배출되더라도 이러한 다매체 거동을 통하여 다른 매체에까지 영향을 미치게 되며, 다양한 경로를 통해 인체 및 생태계에 노출이 일어난다. 따라서 유해화학물질의 효과적인 관리를 위해서는 환경기준의 설정에서부터 배출원 관리정책 수립에 이르기까지 ‘다매체 접근방법’에 기초한 매체 통합관리의 개념이 요구된다고 할 수 있다. 한편, 네덜란드의 사례에서 볼 수 있듯이 다매체 접근방법에 기초한 정책수립 및 평가에서 다매체 거동모델을 적극 활용하는 것이 효과적일 것이다. 이에 본 연구에서는 다매체 접근방법에 기초한 유해화학물질 관리정책의 출발점으로서 다매체 거동모델을 이용하여 기존의 매체별 환경기준의 문제점을 분석하고 이의 대안으로서 다매체 환경기준 설정을 제안하였다.

나. 유해화학물질의 매체 통합관리체계

유해화학물질의 매체 통합관리를 위해서는 무엇보다도 각각의 실행요소들 간의 상호 피드백(feedback)을 통한 조화과정이 강조될 필요가 있다. 따라서 여기서는 앞서 제시한 세 가지 기본 정책방향을 이행하기 위한 유해화학물질의 매체 통합관리의 단계별 구성요소 및 관리체계를 다음과 같이 제시하였다.



<그림 6-2> 유해화학물질의 매체 통합관리 체계도

첫째, 다매체 환경기준설정 대상이 되는 유해화학물질의 관리우선순위를 설정할 필요가 있다. 현재 우리나라에서 유통되는 화학물질의 숫자 만해도 2만종이 넘고 그 가운데 인체 및 생태계에 유해한 물질이 1만종이 넘는 것으로 알려져 있다. 따라서 수많은 유해화학물질 가운데 국내의 유해화학물질 관리우선순위를 토대로 환경기준의 설정이 필요한 물질을 선별할 필요가 있다. 그런데 우리나라는 특히, 내분비계장애 물질이나 잔류성 유기물질 등 유해화합물에 대한 기준이 전무한 실정이다. 최근 국내 외적으로 유해유기화합물로 인한 인체 및 생태계 피해가 심각해지고 이에 따른 규제 의 필요성이 제기되는 시점에서 이들 물질에 대한 국가차원의 중장기적 관리목표로서 환경기준 및 배출허용기준의 설정이 시급하다 하겠다.

둘째, 유해화학물질에 대한 환경기준설정을 위해서는 우리나라의 환경적 특성을 감안한 위해성 평가가 전제되어야 하며 기준설정 방식에 있어서는 '다매체 환경기준 설정'이 바람직 할 것이다. 즉, 위해성 평가를 통해 결정된 매체별 환경기준에 대해 조화 또는 일관성 평가 절차가 필수적이다. 또한 이러한 조화과정은 환경기준에만 국한되는 것이 아니라 환경기준과 배출기준 간에도 필요하다. 즉, 설정된 배출허용기준을 통해 지역적 또는 국가적으로 목표로 하는 환경기준이 달성될 수 있는지를 과학적으로 검토함으로써 필요할 경우 양자를 조정해야 한다.

셋째, 기본적으로 환경기준 및 배출허용기준은 과학적으로 뿐 아니라 기술적, 경제적, 사회적으로도 달성 가능한 목표치로서 설정되어야 한다. 따라서 기준치에 대한 기술적 가능성, 사회적 합의, 경제성 평가 등을 통해 합리적인 수준으로 목표치를 설정하는 것이 필요하다. 즉, 기술적으로는 배출저감을 위한 최적가용기술, 분석기술 수준 등을 감안해야 하며, 경제적으로는 배출저감시설에 소요되는 경제적 비용 및 산업계 파급효과 등을 분석할 필요가 있으며, 사회적으로도 전문가 토론회 및 공청회 등을 거쳐 이해 당사자간의 합의를 도출하는 과정이 필요하다.

넷째, 환경관리목표로 설정된 환경기준을 달성하기 위해서는 무엇보다도 환경모니

터링 및 배출원 관리 등 사후관리기능을 강화하는 것이 중요하다. 우선 환경기준이 설정된 물질에 대해 대상매체에서 정기적으로 오염도의 추이를 파악하는 것이 필요하다. 이러한 모니터링 결과를 토대로 기존에 설정된 환경기준 및 배출허용기준의 달성여부를 점검할 뿐 아니라 필요시 목표치에 대한 재조정도 검토할 수 있다. 한편, 화학물질 배출량 및 유통량 조사와 더불어 배출량 및 배출농도 실측조사 등 직접적인 배출원 조사를 통해 법적 기준을 준수하지 않은 사업체에 대한 엄격한 제재조치와 더불어 자발적 배출량 저감을 유도하기 위한 다양한 인센티브를 개발할 필요가 있다.

이상에서 제시한 여러 과제들 가운데 유해화학물질의 다매체 환경기준설정은 선진적인 매체 통합관리체계의 구축을 위하여 가장 기본적인 단계일 뿐 아니라 그 핵심을 이루는 과제라 할 수 있다. 다매체 환경기준의 설정은 다매체 접근방식에 기초한 위해성 평가, 환경 모니터링, 배출원 관리 등 여타 환경관리정책 분야에 상당한 파급효과를 미치게 될 것이며 이는 궁극적으로 우리나라의 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 촉매제 역할을 할 것으로 기대된다. 따라서 앞으로 유해화학물질에 대한 다매체 환경기준설정을 포함한 매체 통합관리정책을 충실하게 이행함으로써 궁극적으로 국민건강 및 생태계 보호라는 환경관리정책의 목표를 달성할 수 있을 것이다.

2. 유해화학물질의 다매체 환경기준 설정방안

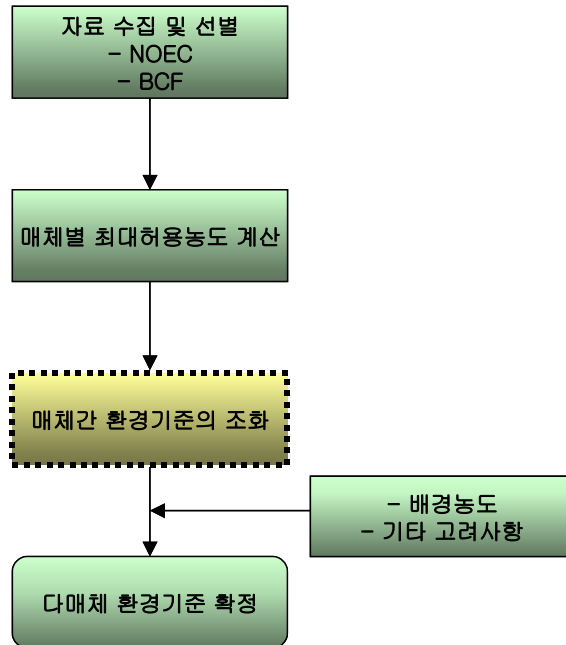
지금까지 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서는 오염물질의 매체 간 이동을 고려하지 않고 즉, 대상물질이 주로 배출되는 매체 이외의 매체에 대한 영향에 대해 고려하지 않은 채 매체별로 환경기준을 설정·관리하고 있는 실정이다. 따라서 기존의 환경기준들은 매체 통합관리 측면에서 볼 때 상당한 취약점을 내포하고 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 매체별 환경기준에 대한 일관성 평가를 통해 이러한 문제점을 과학적으로 입증하고자 하였다. 본 장에서는 네덜란드의 사례를 참고로 하여 기존

의 매체별 환경기준의 문제점을 극복하기 위한 대안으로서 다음과 같이 다매체 환경기준 설정을 위한 과학적인 방법론을 제시하고자 한다.

가. 다매체 환경기준 설정 절차

일단 유해화학물질이 생성되어 환경 중에 배출되면 다양한 경로를 통해 여러 매체로 이전이 되고 생태계와 인체에 유입되게 된다. 따라서 이러한 고려 없이 매체별로 따로 설정된 환경기준은 그 기준들 사이에 일관성이 유지되지 못하는 과학적 오류를 범할 가능성이 높다. 즉, 어느 한 매체에서 환경기준을 달성한다고 해서 그와 인접한 다른 매체에서도 그 설정된 환경기준을 달성한다고 보장할 수는 없다고 하는 것이다. 더욱이 인체나 생태계 생물들은 대기, 토양, 수체 등 다매체에 동시에 노출되기 때문에 매체별로 각각 설정된 환경기준이 궁극적으로 이들에게 무해한 수준이라고 판단하기도 어렵다. 결국 매체별로 따로 정해진 환경기준은 실제로 유지되는 것이 불가능하거나 혹은 환경관리의 실패로 귀결될 수 있다는 점을 간과해서는 안 된다.

이러한 점에 주목하여 네덜란드 보건복지부 산하 RIVM에서는 90년대 이후부터 매체간 환경기준의 상호 조화를 통해 ‘통합 환경기준’ 또는 ‘다매체 환경기준’을 도출해내는 과학적 방법론을 연구하고 그 결과를 자국의 환경기준설정에 적극적으로 적용하고 있다(RIVM, 1994). 따라서 본 연구에서는 네덜란드의 환경기준설정 절차를 토대로 하여 기존의 매체별 환경기준설정의 문제점을 개선하기 위한 방안으로서 다매체 환경기준 설정절차를 다음과 같이 제시하고자 한다.



<그림 6-3> 다매체 환경기준 설정 절차

① 자료 수집 및 계산

- 다양한 문헌고찰 또는 실험을 통하여 환경기준 설정 대상물질에 대한 다양한 독성자료를 수집한다.
- 수집된 독성자료 가운데 수생동물이나 척추동물, 그리고 조류에서 조사된 LC_{50} 등을 이용하여 무영향농도(No Observed Effect Concentration, 이하 NOEC)값 도출
- 대상물질의 물리화학적 성질을 이용하여 적절한 추정방법을 통해 생물농축계수(Bioconcentration factor, 이하 BCF) 계산¹⁶⁾

16) 예를 들면, 어류에 대한 $BCFs=0.048K_{ow}$ [l/kg]로 계산

② 매체별 최대허용농도 계산

- 앞서 계산된 NOEC과 BCF값을 이용하여 $MPC_{water, soil} = \frac{NOEC_{bird, mammal}}{BCF_{fish, mammal}}$
상관관계로부터 매체별 최대허용농도(maximum permissible concentration, 이하 MPC) 계산

③ 매체간 환경기준의 조화

- 매체별 MPC가 구해지면 대상물질의 분해율 상수, 물질전달계수 등을 구한 다음, 다매체 거동모델링을 통하여 매체별로 설정된 기준값들을 조정함으로써 상호 조화를 이루도록 함

④ 다매체 환경기준의 확정

- 상기 절차를 통해 결정된 기준값들을 대상지역의 배경농도, 기타 기술적, 경제적 타당성 등을 검토하여 최종적으로 환경기준으로서 확정

나. 매체간 환경기준 조화를 위한 알고리즘

전통적인 매체별 환경기준 설정절차와 비교할 때 다매체 환경기준 설정절차의 가장 큰 차이점은 바로 매체간 환경기준의 조화단계, 즉 매체별 환경기준을 조정하는 과정이 추가된다는 점이다. 매체별로 각기 설정된 환경기준이 전체 매체에 대해서 일관성을 가지고 있는 기준인지를 다매체 거동모델을 이용하여 평가하고 필요시 개별 매체의 기준값을 조정하게 된다. 이러한 매체간 환경기준의 조화절차는 다음과 같다 (Ragas et al., 1999; Meent and Bruijn, 1995)

① 일차매체에서의 환경목표치 설정

대기, 수체, 토양, 퇴적물 등 오염물질의 배출이 주로 발생하는 매체를 일차매체로 가정하고 일차매체에서의 EQO(1)를 설정한다.

② 이차매체에서의 평형농도 계산

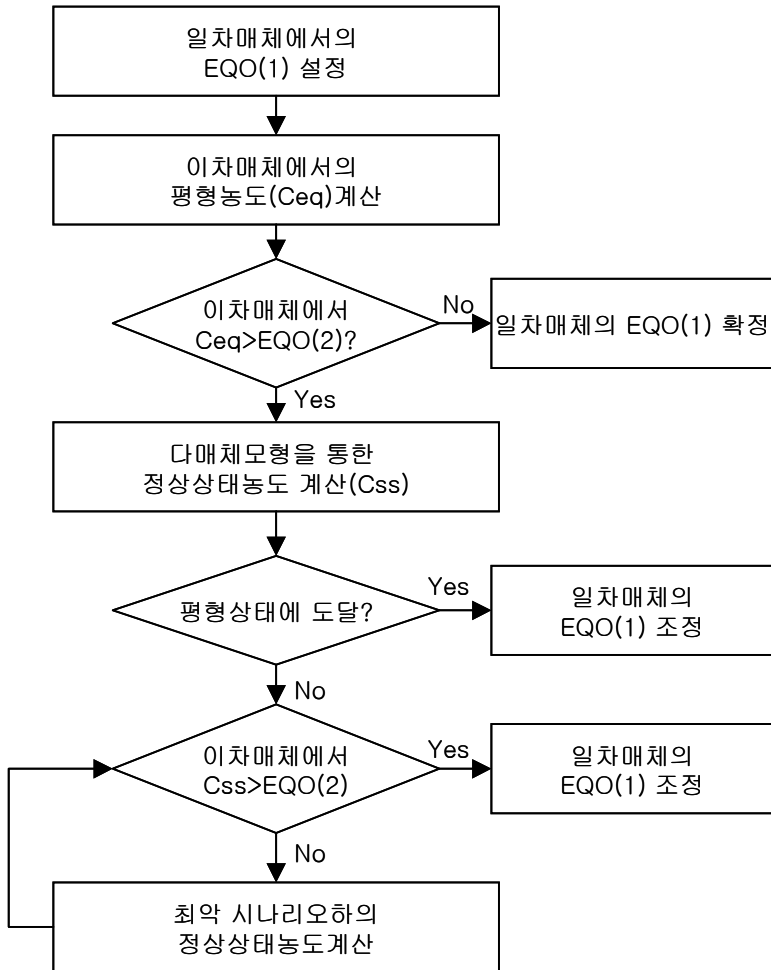
간단한 평형분배 상관관계를 이용하여 일차매체의 EQO(1)와 평형을 이룰 때 인접한 이차매체에서의 평형농도(C_{eq})를 계산한다.

③ 이차매체에서의 평형농도와 환경기준의 비교

이차매체에서 계산된 평형농도가 해당 매체에 설정된 EQO(2)보다 높지 않으면 주매체에서 설정된 환경기준을 그대로 확정할 수 있다. 반면에 평형농도가 EQO(2)을 초과하는 경우에는 다매체 거동모델을 이용하여 이차매체에서 대상물질의 정상상태농도(C_{ss})를 계산한다.

④ 이차매체에서 정상상태농도와 환경기준의 비교

최악의 시나리오를 가정할 경우에도 이차매체에서의 C_{ss} 가 EQO(2)을 초과하지 않는지 확인하여 그럴 경우 이차매체의 EQO(2)를 초과하지 않도록 일차매체의 EQO(1)을 조정한다.



<그림 6-4> 매체간 환경기준 조화를 위한 알고리즘

3. 향후과제 및 정책제언

끝으로 본 연구에서는 앞으로 우리나라에서 유해화학물질의 매체 통합적 관리를 추진하는데 필요한 정책적 과제 및 기술적 과제를 다음과 같이 제안하고자 한다.

가. 정책적 과제

첫째, 유해화학물질에 대한 환경기준항목을 확대하는 것이 시급하다. 이는 단순히 외국에 비해 부족한 유해물질에 대한 기준항목을 보완한다는 의미뿐 아니라 현재 우리나라가 가입한 스톡홀름협약, 로테르담협약, 바젤협약 등 유해화학물질에 대한 각종 국제협약에 대해 향후 이행계획을 구체화하고 이를 실천하는데 있어서 반드시 필요한 이행조치의 첫걸음이라 할 수 있다. 유해화학물질에 대한 환경기준의 설정에 있어서는 매체간, 기준간 조화를 기본으로 하는 다매체 환경기준 설정을 기본방향으로 추진하는 것이 바람직할 것이다. 한편, 유해화학물질에 대한 환경기준은 지역마다 배출되는 오염물질의 종류 및 양이 다르고 환경조건이 상이하므로 국가환경기준으로 설정하기 보다는 ‘지역환경기준’을 적극 활용하는 방안을 검토할 필요가 있다. 즉, 일본의 사례에서처럼 지방자치단체마다 지역적 특성을 고려하여 환경기준항목의 종류 및 기준치를 유연성있게 설정하도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

둘째, 통합 환경관리개념에 입각한 다양한 배출원 관리정책의 개발이 필요하다. 유해화학물질의 다매체 환경기준설정이 구체적인 정책효과로서 나타나려면 이에 상응하는 배출원 관리정책들이 개발되어야 한다. 다양한 배출원 및 배출경로를 나타내는 유해화학물질의 경우 무엇보다도 통합 환경관리개념에 입각한 정책수단의 개발이 요구된다. 예컨대, 유럽 등 선진국에서 시행하고 있는 ‘다매체허가제도’ 또는 ‘통합오염허가제도’, ‘유해화학물질의 지역배출총량제’ 등과 같은 배출원 관리제도의 개발 및 도입 타당성에 대한 검토가 필요하다. 한편, 배출원 관리수단에 있어서도 규제일변도의 정책보다는 산업계-정부간 자발적 협약추진, 배출량 저감에 따른 인센티브제도 등

다각적인 방안들을 검토하는 것이 바람직하다.

셋째, 유해화학물질의 매체 통합관리를 위해서는 효율적인 업무분담 및 조직체계의 정비가 필요하다. 그런데 기존의 우리나라의 환경관리 행정체계는 대기, 수질, 토양 등 매체별로 분화되어 있을 뿐 아니라, 유해화학물질, 폐기물 등 대상 오염물질에 따라서도 분화되어 있는 특징을 가지고 있다. 따라서 앞으로 유해화학물질에 대한 매체 통합관리를 본격적으로 도입하기 위해서는 무엇보다도 기존의 매체중심의 환경관리에서 '물질중심의 환경관리체제'로의 전환이 요구된다. 이를 위해서는 환경부내에 환경기준설정에서 배출원 관리정책의 수립 및 이행에 이르기까지 유해화학물질의 환경관리업무를 통합적으로 관장할 수 있는 전담부서가 지정될 필요가 있으며 이는 기존의 화학물질관리부서에서 담당하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

나. 기술적 과제

다매체 환경기준설정 등 유해화학물질의 매체 통합관리정책을 추진하기 위해서는 실질적으로 적용 가능한 기반기술 및 툴의 개발, 그리고 기초 데이터의 축적이 뒷받침되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 기술적 과제들을 단계적으로 추진할 것을 제안하였다.

첫째, 다양한 유해화학물질에 대한 환경모니터링 기술개발 및 자료의 축적이 필요하다. 환경기준설정의 필요성이 있는 유해화학물질을 선정하기 위해서는 다양한 물질에 대한 환경중 농도분포 및 변화양상을 파악할 필요가 있다. 현재 우리나라의 유해화학물질에 대한 환경모니터링은 중금속 및 내분비계장애물질을 중심으로 이루어지고 있다. 따라서 앞으로 국가사업 및 연구지원사업을 통하여 POPs 등 다양한 유해화학물질에 대한 모니터링 기술을 개발하고 이를 통하여 환경농도 분포 등 데이터를 축적하는 것이 필요하다. 이와 더불어 현재 유독물 위주로 되어있는 화학물질 배출량

조사사업의 대상물질목록에 내분비계장애물질 및 잔류성유기오염물질 항목들을 더욱 추가할 필요가 있다. 배출량조사에서 얻어진 결과를 환경모니터링 결과와 비교함으로써 향후 다매체 환경기준설정이 필요한 유해화학물질을 결정할 수 있을 것이다. 한편, 유해화학물질의 다매체 환경기준설정을 위해서는 기본적으로 대기, 수체, 토양 등 다양한 매체에 대한 동시측정을 원칙으로 하는 ‘다매체 환경모니터링’을 수행할 필요가 있으며 이를 데이터베이스화함으로써 관리·활용할 수 있도록 제공할 필요가 있다.

둘째, 환경거동인자의 측정을 통한 다매체 거동모델의 신뢰성을 확보하는 것이 필요하다. 앞서 살펴본 대로 다매체 거동모델의 예측결과는 유해화학물질의 다매체 환경기준설정 과정에서 과학적인 근거를 제공하므로 올바른 환경기준설정을 위해서는 다매체 거동모델의 신뢰성이 전제되어야 한다. 환경중의 오염물질의 거동특성은 물질에 따라, 지역적 환경특성에 따라 상당한 차이를 나타낸다. 따라서 환경중의 유해화학물질의 다매체 거동모델은 기본적으로 대상지역에서 모델링 대상물질의 환경거동에 대한 이해를 기초로 하여야 한다. 결국, 유해화학물질의 환경거동을 해석하기 위해서는 해당지역에서의 환경거동특성인자에 대한 측정이 반드시 필요하다. 그런데 환경거동연구는 다매체에 대한 실측을 바탕으로 하는 연구는 상당한 시간과 비용을 필요로 하는 분야이다. 지금까지 우리나라에서는 환경부 G7과제 및 차세대핵심환경기술개발사업, 국립환경연구원의 내분비계장애물질 환경거동연구 등을 통하여 지속적으로 환경거동연구를 추진해오고 있다. 따라서 앞으로도 중장기적인 관점에서 환경거동연구 분야에 대한 지속적인 연구개발지원이 이루어지도록 정책적 배려가 필요하겠다.

셋째, 다양한 물질에 적용될 수 있는 다매체 거동모델의 개발이 필요하다. 기존의 우리나라에서 개발된 다매체 거동모델은 주요 대상물질이 반휘발성 또는 휘발성 유기화합물에 적용할 목적으로 개발된 것들이다. 그러나 유해물질 가운데는 다양한 물리화학적 특성을 가지는 대상물질들이 존재한다. 최근 네덜란드와 같은 다매체거동

연구의 선진기술을 확보한 나라에서도 기존의 다매체 거동모델을 확장하여 중금속에 적용 가능한 모델을 개발하기 시작하였다. 따라서 우리나라에서도 앞으로 다양한 종류의 유해물질에 적용 가능한 다매체 거동모델을 개발하는 것이 필요하다.

넷째, 노출평가기법의 개발 및 평가인자에 대한 데이터 축적을 통한 위해성 평가기술 기반확립이 필요하다. 현재 우리나라에서 추진되고 있는 유해화학물질에 대한 위해성평가는 기존의 독성자료 수집 및 생산, 환경중 오염도 분석에 연구개발이 집중되어 왔다. 특히 우리나라는 OECD 대량생산물질위해성초기평가 (SIDS) 사업에 참여하면서 유해물질에 대한 독성평가에 대한 연구개발이 활발히 추진되고 있다. 이러한 연구개발 노력의 결과, 위해성 평가를 위한 기초기술은 어느 정도 확보가 된 상태라고 할 수 있다. 그러나 위해성 평가결과를 정책수립의 근거로 활용하기 위해서는 평가결과의 신뢰도를 높이는 것이 무엇보다도 급선무일 것이다. 위해성 평가는 독성평가뿐만 아니라 인체 및 생태에 대한 노출평가를 필요로 하며 많은 경우 불충분한 노출인자로 인하여 위해성 평가결과의 불확실성이 초래될 가능성이 크다. 따라서 앞으로 위해성 평가의 신뢰도 확보를 위해서는 노출평가인자 등 위해성 평가에 사용되는 기초자료의 확보를 위한 측정 및 추정방법에 대한 연구개발에 더 많은 노력이 필요하다.

끝으로, 네덜란드의 TARGETS와 같은 화학물질 관리정책 의사결정에 적용할 수 있는 시스템으로서 다매체 거동모델을 활용한 ‘통합 환경관리 의사결정 지원 시스템’(Decision Support System)의 구축을 제안한다. 지금까지 우리나라에서는 몇 년간 유해화학물질의 다매체거동연구에 대한 지속적인 연구개발이 지속되어 왔다. 이러한 연구의 성과들이 실질적으로 이들 물질에 대한 환경관리정책수립에 활용되어지기 위해서는 궁극적으로 유해화학물질 관리정책 수립을 위한 도구로 확장되어야 함은 물론이다. 특히, 다매체 거동모델은 적은 시간과 비용으로써 다양한 정책수단의 사전 예측 및 사후평가에 있어 효과적으로 활용될 수 있는 유용한 도구로서 인정을 받고 있다. 그 밖에도 다매체 거동모델은 배출허용기준 설정, 배출저감계획 수립 등 다양한 유해화학물질 관리정책수립 및 평가를 위한 의사결정도구로 확장되어지고 있다. 따

라서 앞으로 기존의 국내에서 개발된 다매체 거동모델의 신뢰성을 향상시키는 노력을 기울이는 한편, 다양한 물질 및 지역에 대해 적용할 수 있는 모델을 개발하는 것이 필요할 것이다.

<표 6-1> 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 향후과제

정책적 과제	기술적 과제
- o 유해화학물질 환경기준항목 확대 - 다매체 환경기준설정 - 지역환경기준설정 - o 배출원 관리정책개발 - 다매체허가제도 또는 통합오염허가제도 - 유해화학물질 지역총량제도 등 - o 업무분장 및 조직체계 정비 - 매체중심에서 ‘물질중심’의 업무분장 - 통합 환경관리 전담부서 지정	- o 환경모니터링 기술개발 및 데이터 축적 - 다매체 환경모니터링기술개발 - 데이터베이스 개발 및 활용 - o 다매체 거동모델 개발 및 신뢰성 확보 - 중장기적 환경거동연구 지속 - 다양한 물질에 적용가능한 모델개발 - o 위해성평가 기술기반 확립 - 노출인자 측정·확보 - o 의사결정 지원 시스템 구축 - 다매체 거동모델을 활용한 의사결정 지원 시스템 개발

제7장 요약 및 결론

1. 요약

본 연구의 주요 목적은 21세기 환경관리의 정책기조인 통합 환경관리의 국내 도입을 위한 첫 단계의 기초연구로서 ‘다매체 환경기준’ 설정의 타당성을 평가하고 이를 설정하기 위한 과학적 방법론을 제시하는 데 있다. 이를 위해 국내에서 개발된 다매체 거동모델을 활용하여 대표적인 유해화학물질인 벤조(a)피렌을 대상으로 기존의 매체별 환경기준에 대한 ‘일관성 평가’를 수행하였다. 다매체 환경기준은 매체 통합관리를 위한 여러 구성요소 중 하나이며, 그 시발점에 불과하다고 본다. 이에 본 연구에서는 유해화학물질에 대한 매체 통합관리의 국내 도입을 위해 필요한 여러 가지 정책적, 기술적 향후과제들을 제안하였다.

본 연구의 주요 연구내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 영국, 네덜란드 등 주요 선진국에서는 점차로 복잡해져가는 환경문제에 대한 대응방안으로서 기존의 개별적으로 관리되던 배출원 및 환경매체에 대하여 ‘통합 환경관리’ 개념에 기초한 다양한 매체 통합관리정책을 수립·시행하고 있음을 알 수 있었다. 특히, 유해화학물질 관리에 있어서는 ‘매체 통합관리’가 무엇보다도 강조되고 있으며 이를 위해 ‘다매체적 접근방식’이 필수적인 방법론으로 제시되고 있음을 확인할 수 있었다. 기본적으로 유해화학물질은 환경으로 배출된 후 여러 매체에 걸쳐 이동·분배하는 다매체거동특성으로 인하여 이에 대한 해석 및 관리방안의 수립에 있어서 다매체적 접근방식을 요한다.

둘째, 우리나라의 대기, 수질, 토양 등 유해화학물질에 대한 환경기준설정현황을 외국과 비교·검토한 결과, 대체적으로 우리나라는 유해화학물질에 대한 기준설정 항목수가 부족하며 위해성 평가결과와 같은 과학적 설정근거가 미흡한 상태로 기준값이 결정된 것으로 평가된다. 특히, 매체간 환경기준의 조화가 전혀 고려되지 않고 있을 뿐 아니라 배출기준과의 연계성도 미흡하여 매체 통합관리측면에서 볼 때 상당한 취약점을 내포하고 있는 것으로 평가된다.

셋째, 유해화학물질의 환경중 거동특성을 효과적으로 평가하기 위해 세계 여러 나라에서 개발된 여러 종류의 다매체 거동모델들을 소개하고, 이의 활용현황을 소개하였다. 또한 기존에 국내에서 개발된 EDCSeoul모델을 이용하여 벤조(a)피렌을 대상물질로 매체별로 설정된 환경기준의 일관성 평가를 수행하였다. 어느 특정 매체의 환경기준을 만족시키도록 모델 입력값(배출량)을 결정하여 기준 매체별 시나리오에 따라 모델링을 수행한 결과, 수체를 기준매체로 가정한 시나리오를 제외하면 기준매체의 환경기준을 달성한다 하더라도 장기적으로 인접한 다른 매체에서의 오염도가 환경기준을 초과하게 된다는 사실을 확인하였다. 이는 유해화학물질의 다매체 거동특성을 고려하지 않고 매체별로 환경기준을 설정할 경우 궁극적으로는 환경관리목표를 달성하는데 실패할 수 있음을 시사한다.

넷째, 본 연구에서는 이상과 같은 기존 매체별 환경기준의 문제점을 극복하기 위한 과학적인 방법론으로서 ‘다매체 환경기준 설정 방안’을 제시하였다. 기존의 매체별 환경기준설정절차에 다매체 거동모델을 이용하여 매체간 환경기준의 일관성 평가를 통한 조화과정을 포함시키는 다매체 환경기준설정 절차를 제안하였으며, 이를 위한 알고리즘을 제시하였다.

다섯째, ‘사전오염예방’, ‘과학적 위해성 관리’, ‘다매체 접근방식’의 세 가지 원칙에 입각한 향후 유해화학물질의 매체 통합관리의 기본 정책방향을 제시하였다. 또한, 유해화학물질관리우선순위 설정, 우선대상물질에 대한 다매체접근방법에 기초한 위해

성 평가, 다매체 환경기준 및 배출허용기준 설정, 환경기준에 대한 기술적, 경제적, 사회적 타당성 검토, 사후 환경 모니터링 및 배출원 관리 활동 등을 포함한 매체 통합 관리 체계를 제시하였다.

여섯째, 이상의 연구결과를 토대로 유해화학물질의 매체 통합관리를 위한 향후과제로서 ‘유해화학물질의 다매체 환경기준항목 확대’, ‘다양한 배출원 관리정책의 개발’, ‘업무분장 및 조직체계 정비’ 등 정책적 과제를 제안하였다. 또한 향후 기술적 과제로서 ‘환경모니터링 기술개발 및 데이터 축적’, ‘다매체 거동모델의 신뢰성 확보’, ‘위해성 평가 기술기반 확립’, ‘의사결정 지원 시스템 구축’ 등을 제안하였다.

2. 연구의 한계 및 결론

본 연구에서는 국내에서 아직 환경기준이 설정되어 있지 않은 대표적인 유해화학물질의 하나인 벤조(a)피렌을 대상으로 하여 국내에서 개발된 다매체 거동모델을 활용함으로써 기존의 매체별 환경기준의 문제점을 분석하고 이에 대한 대안으로서 다매체 환경기준 설정의 필요성을 제시했다. 그러나 본 연구는 벤조(a)피렌이라는 단일 물질에 대한 평가결과라는 점을 주지할 필요가 있다. 따라서 이러한 연구를 시발점으로 하여 앞으로 다양한 물질에 대한 평가를 통하여 다매체 환경기준설정방안에 대한 연구를 지속할 필요가 있다. 이를 위해서는 앞서 제시한 대로 다양한 물질에 적용이 가능한 다매체 거동모델을 개발하고 이의 신뢰성을 확보하기 위한 연구노력을 기울이는 것이 필요하다고 할 수 있겠다.

이러한 한계에도 불구하고 본 연구는 국내 환경관리 정책연구 분야에서 처음으로 ‘다매체 접근방법’을 적용한 연구사례라는데 가장 큰 의의가 있을 것으로 생각한다. 앞으로 본 연구를 계기로 유해화학물질의 다매체 거동연구에 보다 많은 관심과 지원이 이루어지고 이를 응용한 정책연구 또한 보다 활성화되기를 기대해 본다.

유해화학물질관리를 통한 국민건강 및 생태계 보호는 세계 어느 나라를 막론하고 최

대의 환경현안과제로 대두되고 있다. 유해화학물질관리는 다양한 배출원 및 환경중 다매체 거동특성으로 인하여 그 어느 환경문제보다도 매체 통합관리를 요하는 분야이며, 매체 통합관리의 시발점이자 최종적인 달성목표로서 ‘다매체 환경기준설정’을 적극적으로 검토할 필요가 있다고 생각한다. 앞으로 본 연구에서 제시한 정책적, 기술적 향후 과제들에 대한 지속적인 연구를 추진하고 이를 보다 구체화함으로써 유해화학물질의 매체 통합관리, 나아가서 화학물질관리 선진화를 달성할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 경기개발연구원. 2001. 「경기도 지역대기배출허용기준 설정 방안」.
- 공성용. 1998. 「대기배출시설에서의 사전오염저감을 위한 관리방안 - 최적방지시설을 중심으로」. 한국환경정책·평가연구원.
- 권정환. 1998. 「Multimedia Fate Modeling of PCDD/Fs in Seoul metropolitan area」. 서울대학교 석사학위 논문.
- 국립환경연구원. 2000. 「정책결정자를 위한 수질관련 비교 분석」.
- 국립환경연구원. 2003. 「서울대환경계획연구소/전북대학교, 내분비계 장애물질의 환경중 거동연구(II) 최종보고서」.
- 김정. 2002. 「다환방향족탄화수소(PAHs)의 다매체 환경거동 모델(POPsME)의 보정과 평가」. 서울대학교 석사학위 논문.
- 나성린 외. 1992. 「환경규제기준 설정의 비용-편익 분석에 관한 연구, 환경관리공단」.
- 노유희 외. 1989. 「환경규제의 제도적 기반분석·평가 및 개선책 강구」. 한국환경과학연구협의회, p. 156.
- 서혜선. 1999. 「서울지역 PAHs의 분포실태와 다매체 거동모델에 의한 예측」. 서울대학교 석사학위논문.
- 이동수, 신용승, 조규탁. 2000. “잔류성유기오염물질의 국제공동규제에 대한 대응방안”.

News & Information for chemical engineers, 18(5).

이동수. 2001. 「G7최종보고서-다중경로 노출량의 추정을 위한 유해 오염물질의 다매체 동태 예측모델 개발」. 서울대환경계획연구소.

이윤아. 1999. 「Fate and Transport of Dioxin as Predicted by a Multimedia Model in Seoul Metropolitan rea」. 서울대석사학위논문.

임종수. 1997. 「대기환경기준의 설정체계 및 환경기준 개정에 따른 경제성 분석에 관한 연구」. 한국환경정책·평가연구원.

정희성. 1996. 「배출업소에 대한 통합오염관리방안 연구」. 한국환경기술개발원.

정희성, 변병설. 2003. 「환경정책의 이해」. 박영사.

조규탁, 이동수, 신용승. 2000. “다환방향족탄화수소(Polyaromatic Hydrocarbons, PAHs)의 국내 배출량 추정-잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants)의 국제규격에 대응하여”. 「대한환경공학회지」. 22(10): 1921-1932.

환경부. 2004. 「수질환경기준 개선방안」.

환경부. 2003(a). 「도시·산단지역의 통합 환경 관리를 위한 수용체 중심의 위해도 분석 시스템 개발·적용 연구 중간보고서, 제 2공동과제, 다매체 환경에서 오염물질 농도와 매체간 이동량 추정」.

환경부. 2003(b). 「대기환경기준(국가, 지역) 설정」.

환경부, 한국환경정책·평가연구원. 2003. 「토지 이용 용도별 토양오염기준 및 복원기준 마련을 위한 연구」.

환경부. 2001. 「환경백서」.

2. 외국문헌

- Antunes, P., Santos, R. 1999. "Integrated environmental management of the oceans". *Ecological Economics*, 31:215-226.
- Bennett, G.. 1993. Policy Planning in the Netherlands, p.213.
- Brandes L.J., H.den Hollander, D. van de Meent. 1996. *SimpleBox 2.0: A nested multimedia fate model for evaluating the environmental fate of chemicals*. RIVM report no.719101.
- Cohen, M.. 1997. "The transport and deposition of persistent toxic substances to the great lakes. III Modelling the atmospheric transport and deposition of persistent toxic substances to the great lakes". *International Joint Commission*. p88.
- Cowan, C.E., Di Guardo, Davis J., Feijtel, T.C.J., Mackay, D., Mackay, Neol., and Van de Meent, D.. 1995. *The multimedia fate Model : A vital tool for predicting the fate of chemicals*. SETAC.
- DEFRA. UK. 2002. *Integrated pollution Prevention and Control: A Practical Guide*.
- EC. 2003. *Technical Guidance Document on Risk Assessment (TGD)*. in support of Commission Directive 93/67/EEC, Commission Regulation (EC) No 1488/94 and Directive 98/8/EC.
- EMEP. 2004. *POP Model Intercomparison Study, stage 1. comparison of main processes determining POP behaviour in various environmental compartments*. technical report 1/2004.
- Gouin T., Don Mackay, Christina Cowan-Ellsberry. 2001. *Review and discussion of scientific and regulatory definitions of environmental persistence, part III models used to*

- estimate persistence, CEMC report no. 200103
- Hinrichsen, D.. 1990. "Integrated Permitting and Inspection in Sweden," Nigel Haigh and Frances Irwin, *Integrated Pollution Control in Europe and North America*, Washington D. C. The Conservation Foundation pp147-168.
- Horstmann, M. and M.S. McLachlan. 1998, "Atmospheric deposition of semivolatile organic compounds to two forest canopies", *Atmospheric Environment* 32(10): 1799-1809.
- Irwin, F. 1990. Introduction to Integrated Pollution Control, Nigel Haigh and Frances Irwin(eds.), *Integrated Pollution Control in Europe and North America*, Washington D.C.: The Conservation Foundation, pp. 3-30.
- Kalf, D.F., G.H.Crommentuijn, R.Posthumus, E.J. van de Plassche. 1995. *Integrated environmental quality objectives for polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)*. RIVM report No. 679101018.
- Kozioł A. and J. Pudykiewicz, 2001. "Global scale transport of persistent organic pollutants". *Chemosphere* 45(8): 1181-1200.
- Lijzen J.P.A. and M.G.J. Rikken. 2004. *European Union System for the Evaluation of Substances 2.0(EUSES 2.0)* background report. RIVM report No.601900005.
- Mackay,D., E. Webster, I. Cousins, T. Cahill, K.Foster, T. Gouin. 2001. *An introduction to multimedia models*, CEMC report no. 200102.
- McKone T.E., and K.G. Enoch CalTOX. 2002. *A Multimedia Total Exposure Model Spreadsheet User's Guide Version 4.0(Beta)*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

- McKone, T.E. 1993. *CalTOX: A Multimedia Total-Exposure Model for Hazardous-Wastes Site Part I:Executive Summary*. Lawrence Livermore Nation Laboratory, Livermore, CA, UCRL-CR-111456Pt I .
- McKone, T.E., D. Hall, W.E. Kastenberg. 1997. *CalTOX Version 2.3, Description of Modifications and Revisions*. The Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency, CA.
- Meent, D.Van de and J.H.M. de Bruijn. 1995. "A modeling procedure to evaluate the coherence of independently derived environmental quality objectives for air, water and soil". *Environmental Toxicology and Chemistry*. 14: 177-186.
- Ministry of Environment of Japan, *Water Pollution Control Law - Environmental Quality Standards for Water Pollution*.
- Ministry of Housing, Netherlands. 1994. *Environmental Policy of the Netherlands*.
- OECD. 2004. OECD series on testing and assessment no.45, *Guidance document on the use of multimedia models for estimating overall environmental persistence and long-range transport*, ENV/JM/MONO(2004)5. *(LEVEL, II...)
- OECD. 1994. *Integrated Pollution Prevention and Control: The Status of Member Country Implementation of Council Recommendation*, Environment Directorate, Environmental Policy Committee. p. 5.
- Plassche, E.J. van de. 1994. *Towards integrated environmental quality objectives for several compounds with a potential for secondary poisoning*. RIVM report No. 679101012.
- Plassche, E.J. van de and J.H.M. de Bruijn. 1992. *Towards Integrated Environmental Quality Objectives for Surface Water, Ground water, Sediment and Soil for Nine*

- Trace Metals*. Report No. 679101005, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, The Netherlands.
- Ragas, A.M.J. et al. 1998. "Evaluating the coherence between environmental quality objectives and the acceptable or tolerable daily intake". *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 27: 251-264.
- Ragas, A.M.J., R.S.Etienne, F.H.Willesmen, D.van de Meent. 1999. "Assessing model uncertainty for environmental decision making: a case study of the coherence of independently derived environmental quality objectives for air and water". *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18: 1856-1867.
- Shatalov, V., M. Fedyunin, E. Mantseva, B. Strukov, N. Vulykh. 2003. "*Persistent organic pollutants in the Environment*", MSC-E Technical report 4/2003.
- Sommer, A. 2003. Methodology of EIA and SEA Environmental Quality objectives and Integrated Assessment, *International workshop on environmental input assessment*, p.35-42.
- Struijs, J. 2002. Peijnenburg WJGM. RIVM report 607220008. *Predictions by the multimedia environmental fate model SimpleBox compared to field data: Intermedia concentration ratios of two phthalate esters*.
- Verbruggen E., van de Meent D, Bensen AHW, Hollander aden. 1997. *GLOBETOX Modelling the global fate of micropollutants*. RIVM report no. 461502014.
- Wania, F. and D. Mackay. 2000. "The global distribution model. A non-steady state multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants in the global environment". *Technical Report* (www.utoronto.ca/~wania).

- Wania, F. 1999. "Global Modelling of Polychlorinated Biphenyls". *WECC Report 1/99: Global Modelling of PCBs. WECC Wania Environmental Chemists Corp.*
- Webster E., D.Mackay, J.Hubbarde. 2003. *Development of tools to improve exposure estimation for use in ecological risk assessments using ChemCAN. CEMC report no. 200304.*
- WMO/EMEP/UNEP. 1999. *WMO/EMEP/UNEP workshop on modelling of a atmospheric transport and deposition of persistent organic pollutants and heavy metals, Volume 1.*
- Wolters, G.J.R.. 1994. Integrated environmental management: The Dutch government view. *Marine Pollution Bulletin*, 29: 6-12.
- UNEP. 2002. *Regionally based Assessment of Persistent Toxic substances, Europe(III). Central and North East Asia regional report(VII).*
- US EPA. 2004. *2004 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories.*
- US EPA. 2003(a). *Air Quality Index - A Guide to Air Quality and Your Health.*
- US EPA. 2003(b). *Intergovernmental Data Quality Task Force. Uniform Federal Policy for Quality Assurance Project Plans-Part1: UFP-QAPP Manual (Review Draft).*
- US EPA. 2002(a). *National Recommended Water Quality Criteria: 2002.*
- US EPA. 2002(b). *TRIM.FATE, TSD Volume I, chapter.3-4.*
- US EPA. 2000. *Ecological Soil Screening Level Guidance(Draft).*
- US EPA. 1994. *Environmental News.*
- US EPA, OAQPS. 1999. *Total Risk Integrated Methodology(TRIM) Status Report, EPA-453/R-99-010.*

3. 전자물

<http://www.defra.gov.uk/environment/ppc/ippcguide/contents.htm>

<http://www.dtsc.ca.gov/ScienceTechnology/index.html>

<http://www.env.go.jp/en/rep/hetp/index.html>

http://www.epa.gov/ttn/fera/trim_fate.html

<http://www.es.lancs.ac.uk/ecerg/kcjgroup/burnett.html>

<http://www.me.go.kr/>

<http://www.msceast.org/index.html>

http://www.msc-smc.ec.gc.ca/acsd/publications/ACSD_Report/2002ACSDReport_e.pdf

<http://www.niast.go.kr/environment/>

<http://www.rivm.nl/>

<http://www.rivm.nl/en/>

<http://star.eea.eu.int/>

<http://www.trentu.ca/cemc/welcome.html>

<http://www.utsc.utoronto.ca/~wania>

약 어 정 리

ADI or TDI: Acceptable Daily Intake or Tolerable Daily Intake(일일허용섭취기준)

BCF: Bioconcentration Factor(생물농축계수)

B(a)P: Benzo(a)pyrene(벤조(a)피렌)

CAA: Clean Air Act(미국 청정 대기법)

CEMC: Canadian Environmental Modeling Center(캐나다 환경모델링 센터)

Ceq: Equilibrium Concentration(평형농도)

CSI: Common Sense Initiative(상식적 환경관리정책)

Css: Steady-state Concentration(정상상태농도)

DEFRA: Department of Environmental Food and Rural Affairs

EQO: Environmental Quality Objectives(환경 목표치)

IEM: Integrated Environmental Management(통합환경관리)

IPPC: Integrated Pollution Prevention and Control(통합오염관리)

MPC: Maximum Permissible Concentration(최대허용농도)

NOEC: No Observed Effect Concentration(무영향농도)

PAHs: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons(다환방향족탄화수소류)

PCBs: Polychlorinated Biphenyls(폴리염화비페닐 화합물)

POPs: Persistent Organic Pollutants(잔류성 유기오염물질)

OAQPS: Office of Air Quality Planning and Standards Organization(미국 대기질 계획 및 기준 위원회)

RIVM: National Institute for Public Health and the Environment(네덜란드 국립보건환경 연구소)

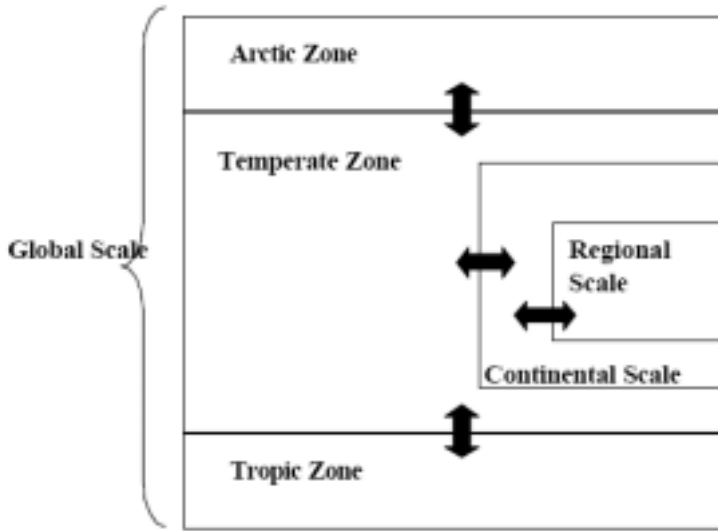
TRIM: Total Risk Integrated Methodology

VOCs: Volatile Organic Compounds(휘발성 유기화합물)

<부록> 외국의 주요 다매체거동모델의 구조 및 특징

SimpleBox

- 비평형(non-equilibrium), 정상상태(steady state)를 가정하는 level III 모델과 quasi-dynamic 비평형(non-equilibrium), 비정상상태(non-steady-state)를 가정하는 level IV 모델을 수행할 수 있다.
- 각 환경 매체(compartments)는 화학물질의 농도가 균일(homogeneous)한 공간적 단위인 box로 구현되고 이들 box 내 화학물질의 농도는 화학물질이 각 매체별로 유입, 유출되는 다양한 mass flow 경로들에 의해 영향을 받게 된다. 다양한 매체와 공간적 규모간 오염물질 이동 경로들이 <부록 그림 1>, <부록 그림 2>에 나타나 있다.
- 5 partial scales : a regional scale, a continental scale and a global scale(arctic, moderate, tropic geographic zones).
- 10 homogeneous environmental compartments(regional and continental scale) : air, water(fresh water/ sea water), sediment, soil(natural, agricultural, industrial/urban), vegetation on natural and agricultural soil.
- 4 compartments(global scale) : air, water, sediment and soil.



<부록 그림 1> SimpleBox 2.0 모델의 5개 partial scale간의 관계 구조

- 오염물질 mass flow와 농도 수준은 mass transfer coefficient(m/sec)에 근거하여 계산된다. 각 매체별로 적용되는 mass balance 식은 아래와 같다.

$$V_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = EMIS_i + IMP_i - EXP_i - DEGRD_i - LCH_i - BRL_i + ADV_{ij} + DIFF_{ij}$$

V_i : volume of box i [m^3]

dC_i : conc. of the chemical in box i [$mol.m^{-3}$]

dt : time(s)

$EMIS_i$: mass flow of the chemical from outside the system into box i by emission [$mol.s^{-1}$]

IMP_{in} : mass flow of the chemical from outside the system into box i by import [$mol.s^{-1}$]

EXP_i : mass flow of the chemical from box i to outside the system by export [$mol.s^{-1}$]

$DEGRD_i$: apparent degradation mass flow of the chemical from box i [$mol.s^{-1}$]

LCH_i : mass flow of the chemical from box i to outside the system by leaching [$mol.s^{-1}$]

BRL_i : mass flow of the chemical from box i to outside the system by sediment burial [$mol.s^{-1}$]

ADV_{ij} : advective exchange mass flow of the chemical from one box to another [$mol.s^{-1}$]

$DIFF_{ij}$: diffusive exchange mass flow of the chemical from one box to another [mol.s⁻¹]

- 증기압, 용해도, Henry's law constant와 분해율(degradation rate)이 온도에 따라 변하는 특성이 계산식에 반영되었다.
- 화학물질이 토양에서 수직 아래로 이동할 때 leaching, diffusion, adsorption, degradation 과정에 의해 이동깊이가 결정되도록 하여 화학물질 특성별로 다른 이동깊이가 적용된다. 쉽게 분해되거나 소수성(hydrophobic) 화학물질일수록 침투깊이는 작아진다.
- regional과 continental scale에서 육상 식생 모듈이 버전 2.0에서 추가되었다. 이에 따라 다음의 화학물질 이동 과정도 추가적으로 계산 알고리즘에 반영되었다.
 - diffusive exchange between air and leaves,
 - atmospheric deposition,
 - advective transport from soil to vegetation with the transpiration stream,
 - advective transport from vegetation to soil by plant depth,
 - degradation in plant tissue and removal from the soil compartment,
 - removal from the soil compartment.

GlobeTox

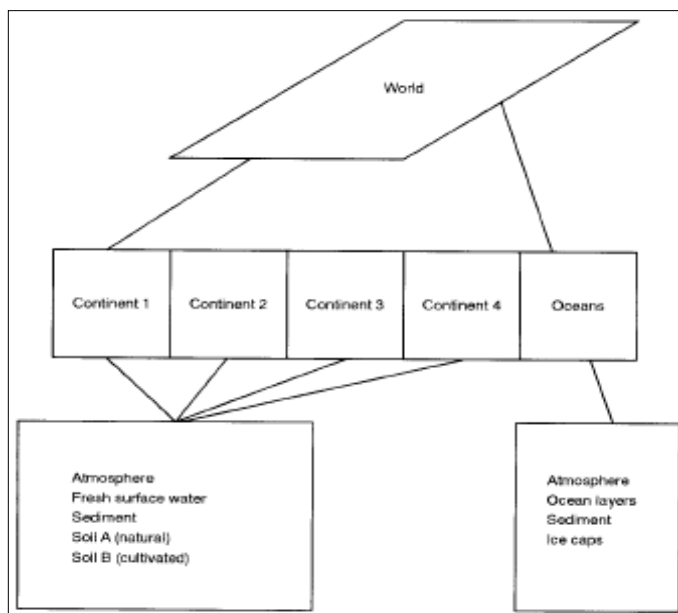
GlobeTox는 Simple Box ver. 1.0의 nested 버전으로 개발된 모델이다(Verbruggen E et al, 1997).

- 지구적 규모의 다매체 거동모델로 대륙과 대양이 다른 시스템으로 정의되며 각 시스템은 대기, 토양, 수체와 같은 compartments로 나뉜다. 또 이들 compartments는 다시 입자나 가스와 같은 몇 개의 상으로 구성된다. GlobeTox 모델의 compartment와 phase는 다음 <부표 1>과 같이 구성되어 있다.

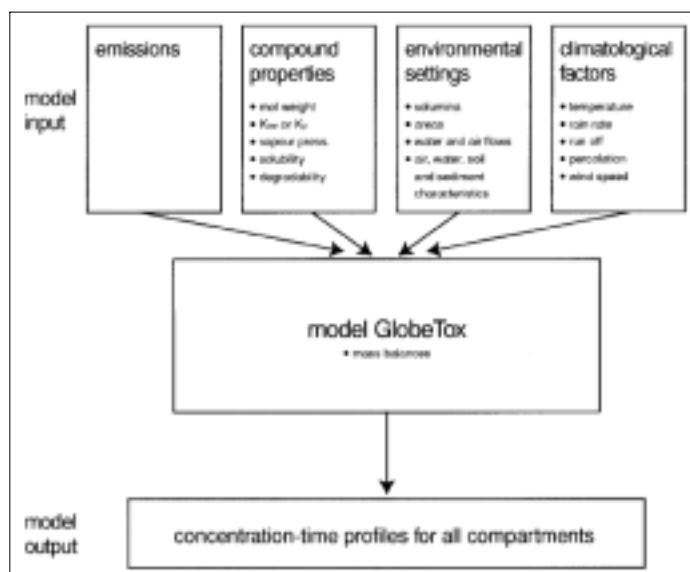
<부표 1> GlobeTox 모델의 compartments and phases

Compartment	Phase
Atmosphere	air
	water
	aerosol
Fresh surface water/	water
	biota
	solid particles
Sediment	water
	solid particles
Soil A/B	water
	air
	solid particles
Oceanic water	water
	solid particles
Ice caps	ice

▪ <부록 그림 2>는 GlobeTox 모델을 구성하는 공간 규모의 계층적 구조를 보여준다. 크게 5개의 공간 규모로 구성되어 있는데, 4개의 대륙 규모(북아메리카, 유럽, 아시아와 남아메리카, 아프리카와 오스트레일리아)와 대양 환경이다. 각 4개 대륙은 대기와 지표수, 퇴적물, 자연토양과 경작지 토양의 compartment로 구성되어 있고 대양은 대기, 대양 수체(7개 층으로 나뉨), 퇴적물과 ice caps로 구성된다. <부록 그림 3>은 모델의 입력과 출력에 대한 모식도이며 GlobeTox의 출력값은 화학물질의 시간에 따른 농도 변화이다. 입력값으로 매체별 배출 시나리오와 화학물질의 transport 및 transformation 속도, partitioning에 대한 평형 상수 값이 요구된다.



<부록 그림 2> GlobeTox의 계층적 구조.



<부록 그림 3> GlobeTox 모델의 입력과 출력.

▪ 환경 매체(compartment)는 오염물질의 분포가 균일한 box로 나타내어지고 compartment에서 농도 변화는 mass balance 식으로 계산되어 진다. 각 compartment에서 유입되거나 유출되는 mass flow로는 다음 3가지 과정으로 설명될 수 있다.

1) Advective transport. 대기나 수체의 흐름에 따른 용존상 및 고체입자상의 이동

2) Diffusive transport.

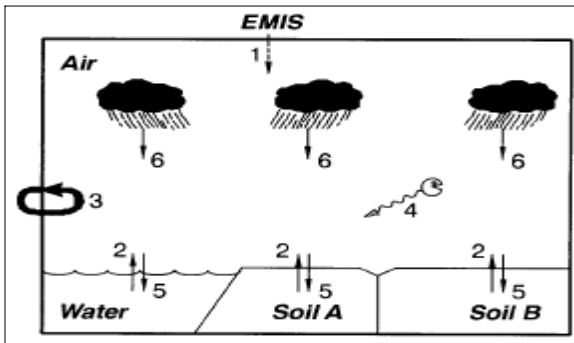
· 한 매체 내에서 확산에 의한 오염물질의 mass flow

· 두 매체의 경계에서 일어나는 매체 간 processes

: adsorption/volatilization(air-water), adsorption/desorption(water-sediment)

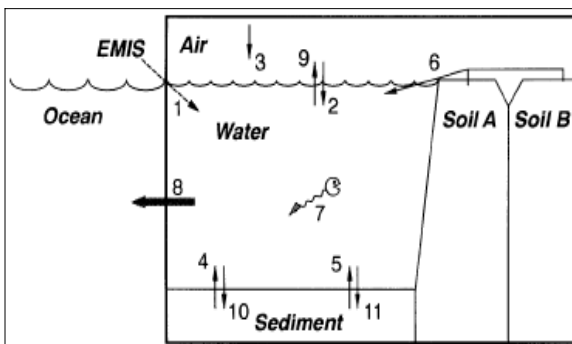
3) Chemical conversion. degradation mass flow

▪ 각 compartment별 mass balance equation이 <부록 그림 4>~<부록 그림 7>까지 나타나 있다.



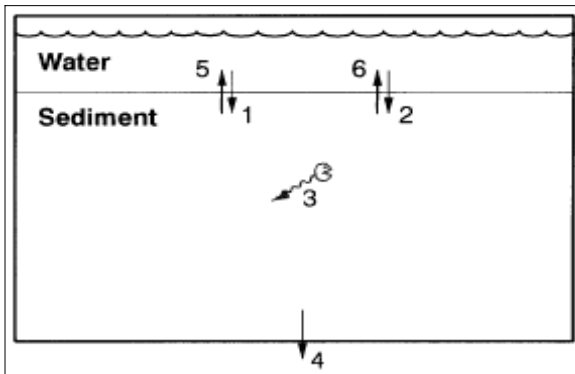
<부록 그림 4> Air compartment of the continental scales.

1)Emission, 2)Volatilization,
3)Air exchange, 4)Degradation,
5)Gas absorption,
6)Dry and wet deposition.



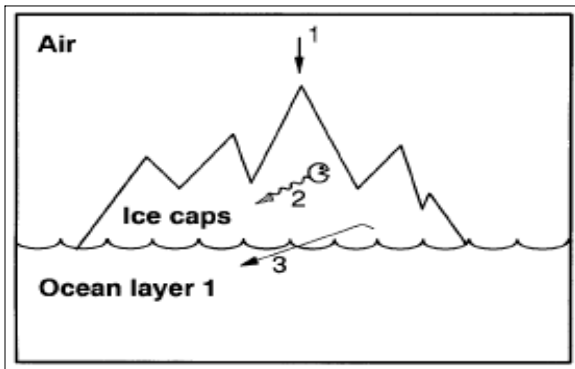
<부록 그림 5> Water compartment of the continental scales.

1)Emission, 2)Gas absorption,
3)Dry and wet deposition,
4)Desorption, 5)Resuspension,
6)Run off, 7)Degradation,
8)River discharge, 9)Volatilization,
10)Adsorption, 11)Sedimentation.



<부록 그림 6> Sediment compartment.

- 1)Adsorption, 2)Sedimentation,
3)Degradation, 4)Burial,
5)Desorption, 6)Resuspension.



<부록 그림 7> Ice caps compartment.

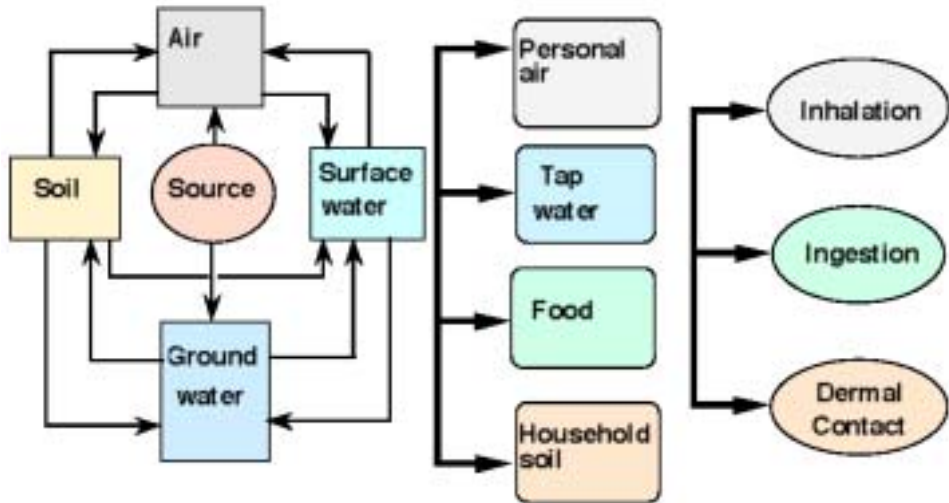
- 1)Dry and wet deposition,
2)Degradation,
3)Calving and melting.

▪ 지구적 규모에서 화학물질의 분포 특성을 조사하기 위해서 전 지구적으로 그 오염도에 관심이 높은 4개 화학물질-잔류성 유기오염물질(POPs)에 대해서는 DDT, PCBs, 프탈레이트류 중에서는 DHEP, 중금속류에 대해서는 납(Pb)에 대한 시뮬레이션 결과가 보고되어 있다.

CalTOX

▪ CalTOX는 독립적으로 작동할 수 있는 두 개의 모델인 Media transport and transformation 모델과 Human exposure 모델로 이루어져있다. 전체 모델은, 환경 매체에 분포하는 오염물질 농도로부터 모두 23개의 노출 경로를 통해 인체가 흡수하는

오염물질의 일평균 값이 계산되는 과정으로 구성되는데, 간략한 개념도가 아래 <부록 그림 8>과 같다.



<부록 그림 8> CalTOX의 환경 매체사이의 오염물질 이동과정과 노출경로.

▪ Media transport and transformation 모델은 토양에 직접 오염물질이 투입되거나 계속적으로 대기, 토양, 수체에 오염물질이 배출될 경우 시간에 따라 각 매체의 오염물질 농도변화를 볼 수 있다. Human exposure 모델은 환경 매체를 통해 인간이 접하는 오염물질의 농도와 매일 사람들이 흡수하는 오염물질의 평균값을 보여준다.

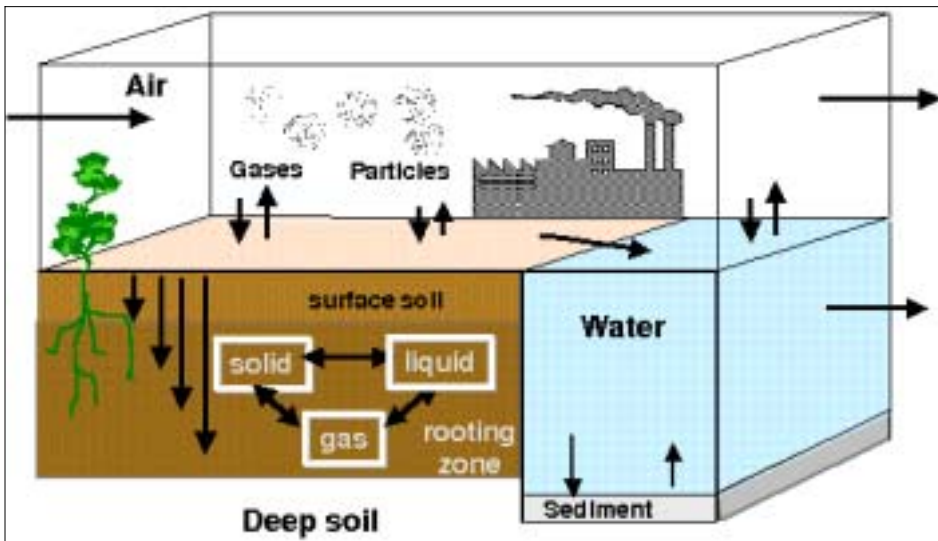
▶ The Multimedia Transport and Transformation model

▪ Fugacity 모델은 증기압, 용해도와 같은 화학종의 특성에 오염물질의 변이가 강하게 영향을 받는 nonionic 유기 화합물에 가장 적당하다. 그러나 CalTOX는 ionic 유기 화합물, 무기 화합물, 방사성핵종, 금속 역시 다룰 수 있도록 수정된 fugacity 모델을 사용하고 있다.

▪ CalTOX는 대기, 지표 토양, 식생, 뿌리토양(root-zone soil), 뿌리토양 아래의 퇴적물(vadose-zone), 지표수, 퇴적물의 7개 환경 매체(compartment)로 구성되어 있다(그

림 9).

- 대기, 지표수, 지표토양, 식생, 퇴적물의 환경 매체는 정상상태로 처리되며, 뿌리토양과 퇴적물의 오염물질은 시간에 따라 농도가 변하는 변수로 처리된다. 지하수의 오염물질 농도는 퇴적물로부터 발생하는 침출수의 농도로 계산된다.



<부록 그림 9> CalTOX model의 7개 compartment에 대한 mass-exchange processes.

- 대기 : 오염물질을 가스/입자상으로 구분하여 다루고 있어, 대기 분진을 sub-compartment로 설정하였고 대기 중 오염물질의 가스상/입자상 분배는 Junge (1997)의 개념을 사용하고 있다. 입자의 표면적은 대기 분진의 입도 분포를 고려하지 않고 지역구분 없이 도시지역의 평균값을 사용하고 있다.
- 수체 및 퇴적물 : 수체 내 용존상과 흡착상 오염물을 구분하고 있어, 부유입자 (suspended solid)를 하부구조로 두고 있다. 수체는 하천이나 호수 등의 내륙수 만을 고려한다.
- 토양 : CalTOX는 한 종류의 토지 이용을 고려하기 때문에 토양 종류도 하나로 통합하여 다루지만 수직으로는 3층 (surface ground soil, root-zone soil, vadose zone

soil)으로 나누며, 각 층의 깊이는 고정된 값을 사용한다.

· 식생 : CalTOX는 식생을 토양으로부터 독립된 매체로 간주하지만 식생 종류의 구분이 없다.

▪ Media transport and transformation 모델은 dynamic unsteady-state 모델로서 시간의 경과에 따른 각 매체별 오염물질의 농도변화를 예측하며 그 기본 원리는 다음의 물질수지 식과 같다.

$$\frac{d}{dt} N_i(t) = -R_i N_i(t) - \sum_{j=1, j \neq i}^m T_{ij} N_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^m T_{ji} N_j(t) + S_i(t) - T_{io} N_i(t)$$

N_i : time-varying inventory of a chemical species in compartment i [mol]

R_i : first-order rate constant for the transfer of the species from compartment i [1/d]

T_{ij} : rate constant for transfer of species from compartment i to compartment i [1/d]

T_{ji} : rate constant for transfer of species from compartment j to compartment i [1/d]

S_i : source term for the species into compartment i [mol/d]

m : total number of compartment

▶ Human Exposure Model

▪ 사람들이 오염물질에 노출되는 경로는 오염된 토양과 접촉하거나, 물 · 대기 · 음식을 통하는 경우, 약물이나 소비재를 통한 경우가 있다. 노출은 한 가지 매체를 통해 일어날 수도 있고, 여러 매체를 통한 동시 접촉에 의해 일어날 수도 있다.

▪ 환경 오염물에 대한 노출의 평가는 환경 농도를 개개인이 접촉하는 오염물질의 양으로 바꾸는 것이 필요하다. 매일 복용하는 양으로 계산되는 잠정적 투입량은 흡입, 음식을 통한 섭취, 피부 접촉을 통한 흡수를 통해 하루 동안 몸무게 1kg이 받아들이는 오염물질의 양으로 계산된다.

▪ CalTOX에 사용된 오염물질 노출 모델은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)와 캘리포니아 독성물질 관리부에서 보고된 모델을 바탕으로 만들어졌다.

▪ 오염물질에 노출되는 경로는 크게 인간에 의한 것과, 오염된 매체와의 접촉에 의

한 것으로 분리 된다. 인간에 의한 요인은 오염물질과 직접 또는 간접적인 접촉에 영향을 미치는 개인의 모든 행동, 사회활동, 생리적 특징이 포함된다. 이 요인에서 중요한 것은 음식, 대기, 물, 토양, 약물 등과의 접촉 비율이다. 어떤 장소에서 어떤 활동을 하며 시간을 보내느냐가 오염물질의 흡입량과 피부접촉량에 직접적으로 영향을 미친다.

▪ CalTOX는 개인의 노출량을 인간의 활동과 계산된 환경 매체별 농도 값의 함수로 나타내었다. <부표 2>는 세 가지 매체의 경우에 대해 노출이 일어나는 주요한 경로 세 가지를 보여주고 있다. CalTOX에 사용된 exposure 모델은 총 23개의 노출 경로를 포함한다.

<부표 2> Matrix of exposure pathways linking environmental media, exposure scenarios, and exposure routes.

노출 경로	매체		
	대기(가스와 입자)	토양(지표토양과 뿌리토양)	물(지표수와 지하수)
흡입	- 실외 공기를 통해 가스와 입자 흡입 - 실내 공기로 유입된 외부 공기의 가스와 입자 흡입	- 실내 공기로 이동된 토양 증발물 흡입 - 실내 공기로 이동된 토양 입자 흡입	수돗물을 통해 이동된 오염물 흡입
식품을 통한 섭취	- 대기로부터 과일, 채소, 곡물로 유입된 오염물질 섭취 - 대기로 인해 오염된 식물을 섭취한 동물의 육류, 우유, 계란 섭취 - 오염물질을 흡입한 동물에서 나온 육류, 우유, 계란을 섭취 - 모유를 통한 섭취	- 토양 섭취 - 토양으로부터 과일, 채소, 곡물로 유입된 오염물질 섭취 - 토양으로 인해 오염된 식물을 섭취한 동물의 육류, 우유, 계란 섭취 - 토양 섭취로 인해 오염된 동물 섭취 - 모유 섭취	- 물 섭취 - 물로 인해 오염된 식물 섭취 - 오염된 물을 먹은 동물의 육류, 우유, 계란 섭취 - 수영 등의 활동을 통한 물 섭취 - 모유 섭취
피부 접촉	(포함되지 않음)	토양과의 피부 접촉	- 목욕이나 샤워를 통한 피부 접촉 - 수영을 통한 피부 접촉

TRIM.Fate

▪ Compartment type

TRIM.Fate는 대기, 토양(surface, root zone, vadose zone), 지표수, 퇴적물, 지하수의 7개 비생물적(abiotic) compartment types와, birds, mammals, fish, terrestrial plants(leaf, root, stem), soil invertebrates, benthic invertebrates, algae and aquatic macrophytes 와 같은 육상 생태계와 수생 생태계의 일부 영양그룹으로 24개 생물적(biotic) compartment type을 포함하고 있다. 또 화학물질이 환경 중에서 다양한 상(phase)으로 존재할 수 있는 점이 고려되었다. 환경 매체별 compartment의 구성은 다음 <부표 3> 및 <부록 그림 10>과 같다. 사용자의 요구에 따라 volume element(한 개 이상의 compartment를 가지는 3차원 공간 범위)의 크기와 모양이 조절될 수 있고 이를 통해 공간적 해상도도 높일 수 있다.

▪ Processes

모델에 사용된 알고리즘은 크게 화학물질이 한 compartment에서 다른 compartment로 이동(transfer)하거나, 각 compartment 내에서 변환(transformation)되는 과정으로 이루어져 있다. 그 과정들을 보면 다음과 같다.

- Advection;
- Dispersion;
- Diffusion;
- Biotic processes; and
- Reactions and transformation.

<부표 3> 모델을 구성하는 volume elements와 compartments, phase.

volume Element	Compartments	Phase
Air	Air	vapor/gas suspended particulate
Surface water	Surface water Common Loon Mallard Macrophyte Water column Carnivore Water column Herbivore Water column Omnivore	water suspended solids-algae suspended solids-other
Sediment	Sediment Benthic Invertebrate Benthic Omnivore Benthic Carnivore	sediment pore water sediment solids
Ground water	Ground water	soil pore water soil solids
Vadose Zone soil	Soil	
Surface soil	Soil Leaf Leaf Particle Red-tailed hawk Short-tailed Shrew Raccoon Mouse Bald Eagle Mink Tree swallow White-tailed Deer Long-tailed Weasel Black-capped Chickadee Arthropod	soil pore water vapor/gas soil solids
Root Zone soil	Soil Worm	

- Sources

TRIM.fate는 한 개 혹은 다매체로 오염물질 배출 시나리오를 수행할 수 있도록 설계 되었으나 현재는 대기로의 배출에 대해서만 실행할 수 있다. 모델링 지역내의 배출 및 외부의 배출원에 의한 오염물질의 유입에 대해 구분하여 설명할 수 있다.

- Time-related terms

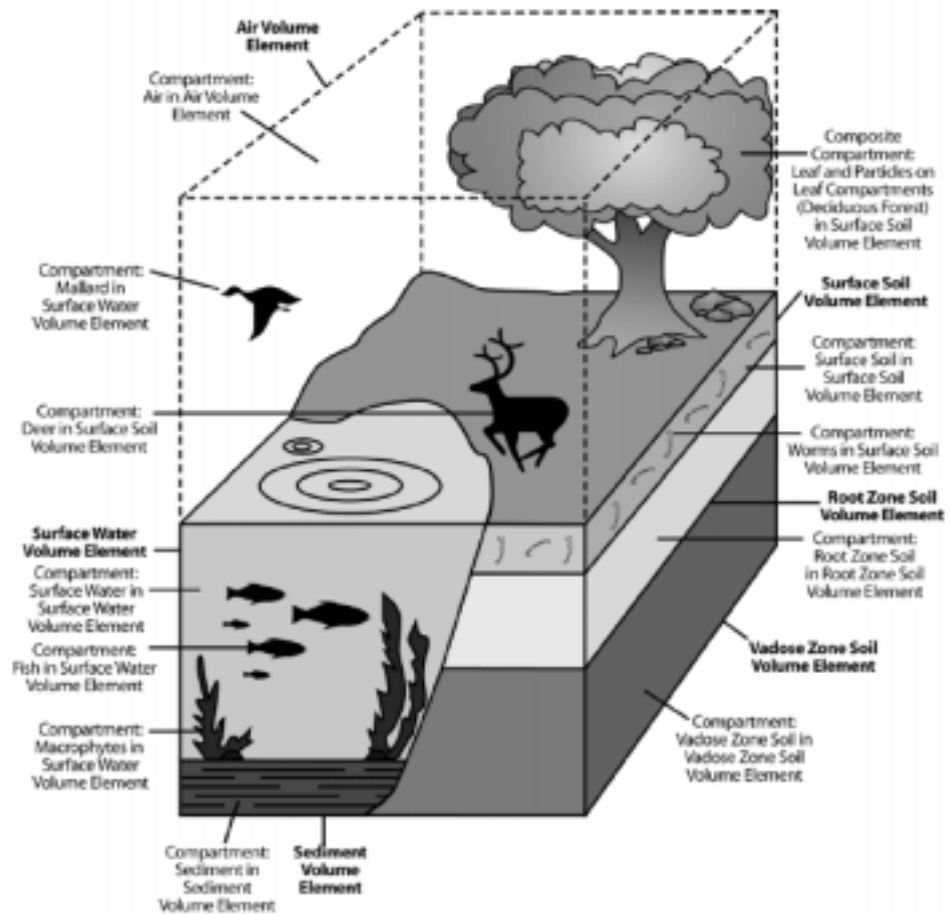
시뮬레이션 기간(1년이나 그 이상)과 입력자료가 입력되는 시간 간격(하루~9일 간격), 데이터 출력시 시간 간격(1시간 간격 이상)을 조절할 수 있다. 하지만, steady-state 모드에서 모델링할 경우에는 시간에 대해 고려할 필요가 없다.

- Seasonal processes

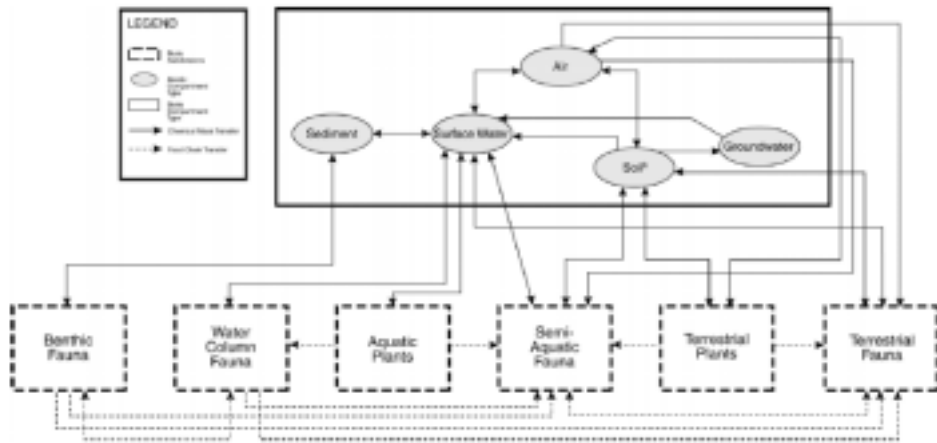
Litterfall 알고리즘과 식물의 화학물질 uptake 특성이 추가되었다. Litterfall은 식생의 종류에 따라서 짧게는 한 달에서 길게는 일년까지 지속적으로 나타날 수 있는데, 이 과정을 통해 잎 내부 혹은 표면의 화학물질이 표토로 이동하게 된다. 식물에 의한 화학물질의 uptake 과정은 마지막 서리와 첫 서리가 일어난 날 사이 기간동안 이루어진다. 모델링 과정동안 오염물질의 분포에 영향을 미치는 계절적 과정의 예를 보면 다음과 같다.

- The dynamics of snow
- Growth of organisms
- Litterfall to the surface water
- Transformation of chemicals in litter
- Senescence of plant foliage
- Blooming of algae
- Dietary changes of wildlife
- Habitat use
- Excretion periods

- TRIM.Fate는 모델 시스템 내에서 mass balance의 유지에 중점을 두고 있다. 즉 시스템에 잔류하거나 빠져나간 오염물질의 양은 시스템으로 유입된 오염물질의 양과 같다. Compartment에 대해서도 마찬가지로 일정 기간동안 해당 compartment에 잔류하는 대상물질의 양은, compartment의 초기값에서 그 기간동안 유입된 양을 더하고 유출된 양은 빼 값과 동일하다. <부록 그림 11>은 모델의 구성 요소 및 오염물질의 이동 경로에 대해 나타내고 있다. 그림에서는 생략되어 있으나 각 compartment 내에서 일어나는 화학적 변환과정도 모델에 포함되어 있다.



<부록 그림 10> TRIM.Fate 모델 시스템
(multiple volume elements, multiple compartments)



<부록 그림 11> 환경 중 오염물질 거동에 영향을 미치는 관계 및 과정에 대한 모델 개념도

- Chemical-specific algorithms

TRIM.Fate는 또한 화학물질(organic, inorganic)의 특성에 따른 이동 경로에 대한 알고리즘도 포함하고 있으며 수은의 경우처럼 다양한 형태(elemental, divalent, methyl)에 대한 알고리즘도 포함하고 있다. 사용자가 직접 대상 화학물질 혹은 화학물질 군에 특징적인 알고리즘을 algorithm library에 추가할 수도 있다. TRIM.Fate 모델은 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs), methylmercury, elemental mercury와 benzene에 대한 적용 연구가 발표되어 있다.

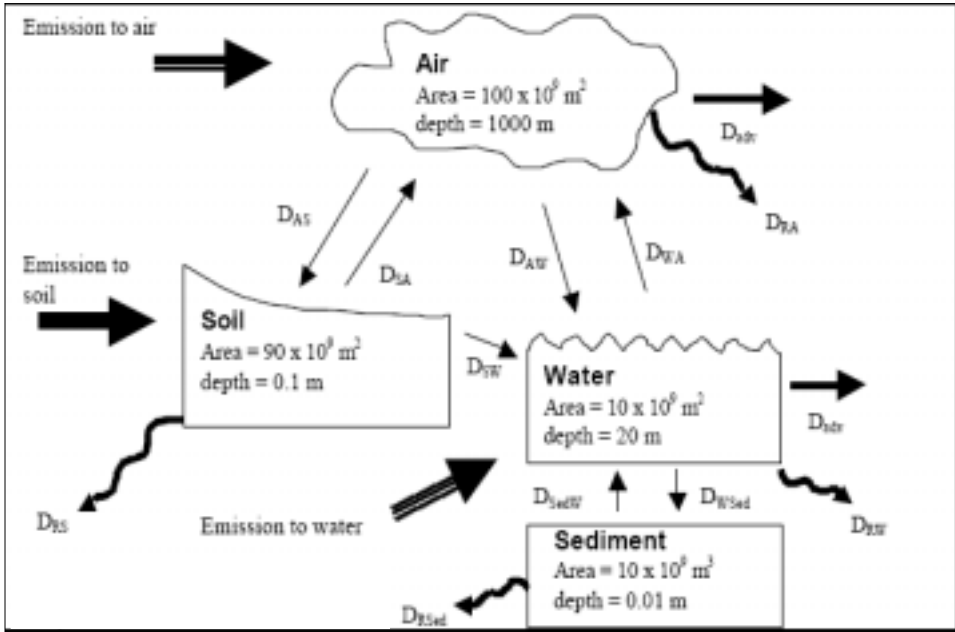
EVn-BETR

- Fugacity-based, steady and non-steady state(dynamic) mass balance model
- European scale, GIS s/w(describe geo-referenced data regarding landcover, water flows, soil organic carbon content, precipitation and temperature information)

- Compartment type : air, vegetation, soil, surface water, sediments and coastal water
- 각 지역마다 7개 mass balance equation으로 POPs의 이동을 설명한다. 그러므로 유럽 지역에 대한 전체 54개 구역에 대해 말하자면 계산식은 378개가 된다.
- 대기 상/하층에서 공기의 지역내 흐름, 각 지역 환경매체들을 잇는 담수와 해수의 지역 내 흐름, 모든 지역간 경계에서 일어나는 공기와 물의 이동이 수문 및 기상 데이터의 GIS 분석결과 만들어진 5가지의 flow matrices를 통해 모사된다.

EQC model

- EQC (Equilibrium Criterion) Model에서는 환경에서 화학물질의 이동량을 표시하기 위해 화학물질의 화학적 물리적 특성이 사용된다.
- 환경으로는 air, water, soil, sediment, aerosols, and suspended sediment 가 사용되었다. air, water, soil, sediment는 환경매체(compartment)로 사용되었고 aerosols, and suspended sediment는 환경매체 사이에서 화학물질을 전달하는 중간 환경매체(sub-compartment)로 이용되었다(그림 12).
- EQC 모델은 화학물질들 간의 비교를 가능하게 하는 모델로서 화학물질 비교를 위한 평균 환경(standard environment)을 제공하며, 이것은 사용자가 변환할 수 없다.



<부록 그림 12> EQC model Environment.

- 화학물질들은 물리화학적 특성에 따라 3 가지로 분류되어 다루어진다. 분류되는 3가지 종류는 모든 매체에 분할되는 화학물질(Type 1), 비휘발성 화학물질(Type 2), 용해도가 0이거나 거의 0인 화학물질(Type 3)이다.
- EQC 모델에서는 3단계(Level I, II, III)의 모델이 계산을 위해 사용되었다.
- Level I 와 Level II 는 열역학적 평형상태(thermodynamic equilibrium)이다.
- Level II는 Level I 과 비슷하나 수평류(advection)와 반응(reaction) 과정을 포함하고 있다.
- Level III 는 비평형(non-equilibrium) 정상상태(steady state)로 처리되었다.
- 화학물질과 화학물질의 특성에 대한 database를 제공한다.
- 이 모델은 피렌(pyrene)과 납(lead)을 기본물질로 설계되었다.

EUSES

- EUSES는 위해성 평가 모델로서 4단계로 진행된다(그림 13).

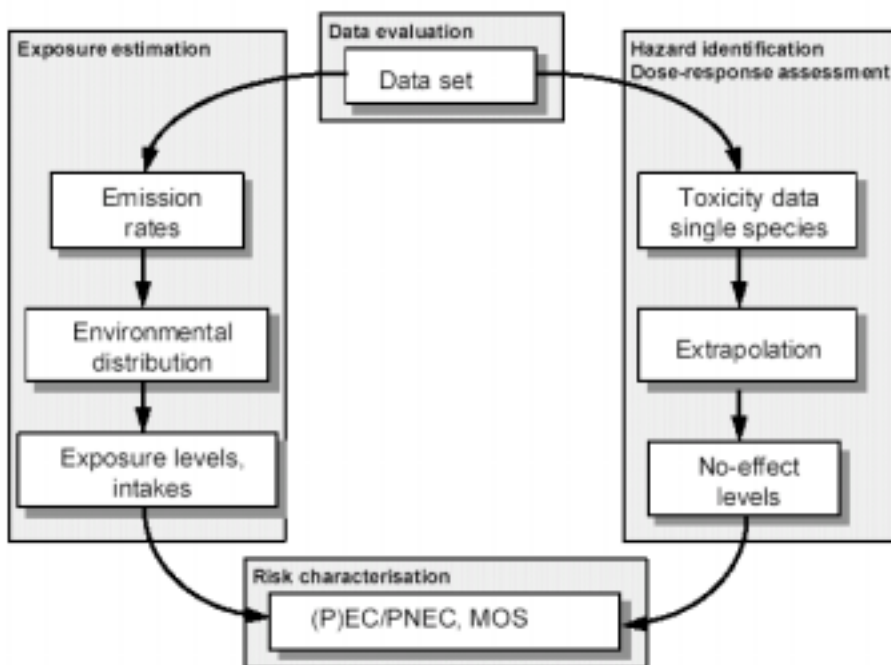
1) Data evaluation - 데이터 입력

2) Exposure assessment - 환경매체나 인간에게 노출되는 오염물질의 농도 예측

3) Hazard identification - 물질이 원래 가지고 있는 부작용 확인

Dose-response assessment - 노출 정도 차이에 대한 관계, 발생, 증상 정보

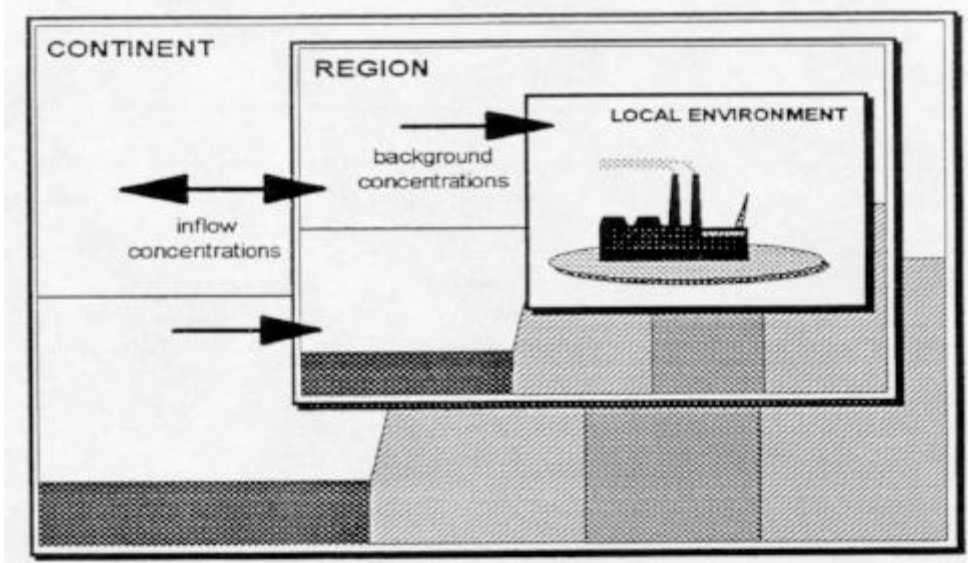
4) Risk characterization - 예상되는 물질의 노출로 인해 사람과 환경에 나타나는 부작용의 발생과 정도 평가



<부록 그림 13> EUSES 모델의 기본 과정

- EUSES 모델은 Environmental distribution module에서 Mackay- type levelⅢ multimedia model SimpleBox를 사용한다.

- EUSES의 공간 scale은 3가지(personal, local, regional)로 구분되며 서로 연관이 되어있다(그림 14).



<부록 그림 14> EUSES의 Nested continental 구조

(local 규모의 단위 공간이 regional 규모에 포함되어 있고, 이것은 다시 대륙 규모의 공간 속에 포함되어 있다).

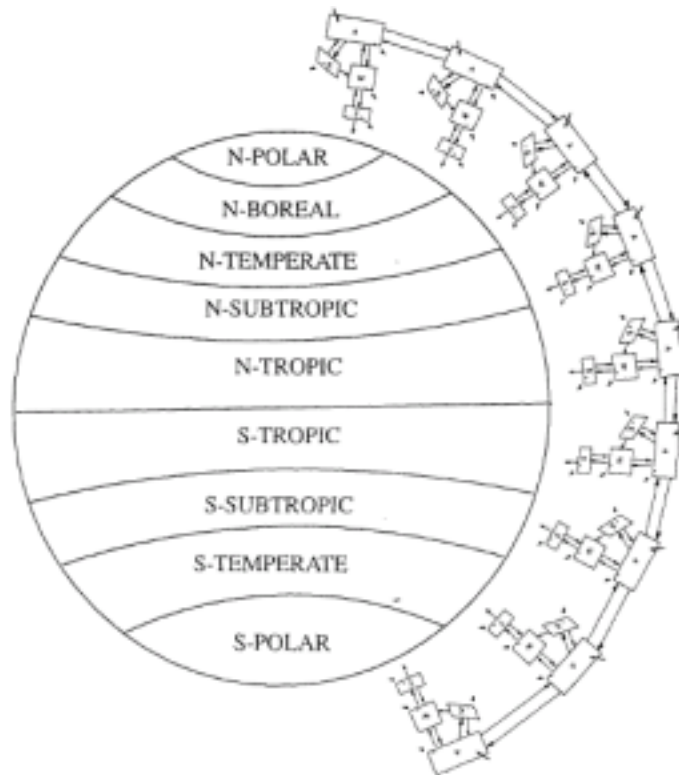
- 자연의 복잡성과 우리 지식의 한계로 인해 모델은 현실을 정확하게 나타내지 못한다. 이러한 불확실성을 나타내기 위해 EUSES는 realism scale을 사용하였다.

Globo-POP

- Globo-POP 모델은 fugacity 모델을 기반으로 한 지구 차원의 다매체 거동모델이다. 이 모델에서는 세계를 구분되는 기후적 특성으로 10개의 지역으로 나누었고 대기를 4개의 수직 층으로 나누어 처리하였다(그림 15).
- 4개의 수직 층은 각 층의 상부 기압이 83.5, 50, 11, 1 kPa 이고, 고도는 1.3, 5, 16,

33 km이다. 수직적 수평적 공기의 이동 속도와 확산량은 온도와 OH기의 농도로 표시된 월 평균값으로 정의하였다.

- 화학적 이동의 과정
- 중간 환경 매체들(sub-compartments) 사이의 partitioning,
- 환경 매체들(compartments) 사이의 이류(advection)와 확산(diffusion), 위도를 가로지르는 대기와 해수 이동,
- 각 환경 매체 내에서의 분해과정,
- 심해와 fresh water sediment로의 이동.

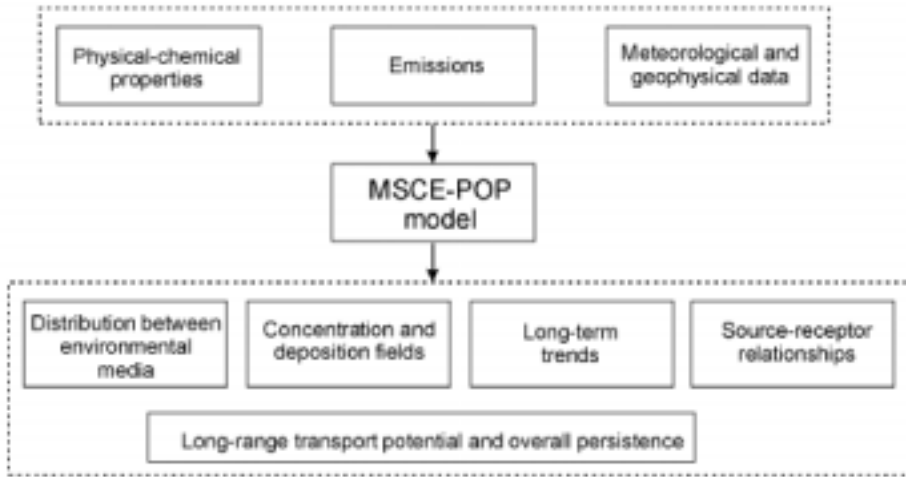


<부록 그림 15> Globo-POP 모델의 구조

- 각 위도 지역 안에서 지구의 표면은 두 종류의 soil(agricultural and non-cultivated soil), fresh water, freshwater sediment, surface ocean compartment(depth of 200m)로 나타내었다.
- 모델내의 90개 환경매체가 비정상 상태로 공식화 되었고, 한정 차이 근사법(finite difference approximation)에 의해 단계적으로 계산된다.
- fugacity를 기반으로 하는 다매체 거동 모델의 형식을 따랐지만, 내부의 상변화 에너지와 활동 에너지를 이용하여 분할(partitioning)과 감소(degradation)과정에서 온도의 영향을 계산에 넣었다는 특징이 있다.

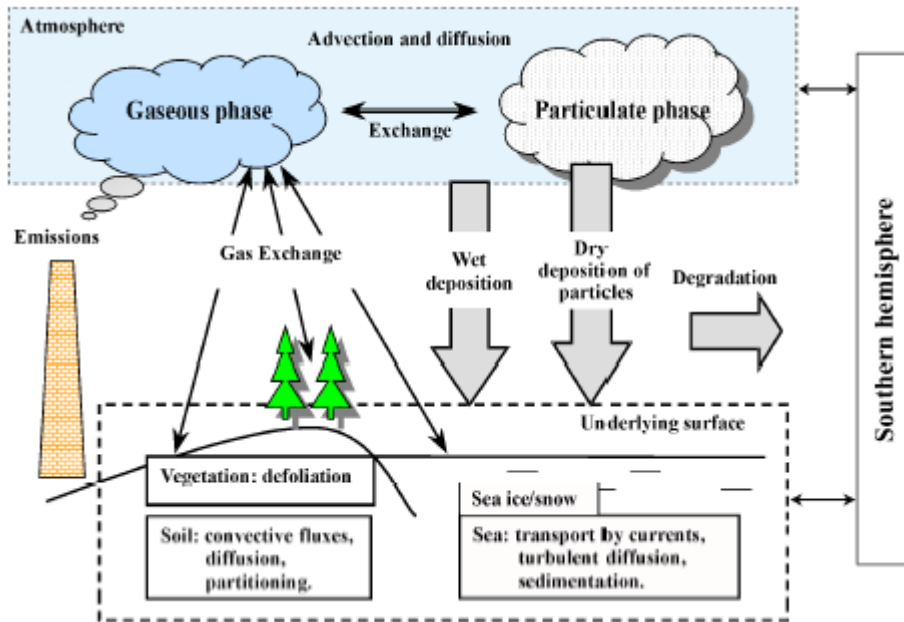
MSCE-POP

- MSCE-POP모델은 EMEP 지역을 대상으로 한 regional, hemispheric 의 두 가지 버전이 있으며 각각 50×50 km와 150×150 km 해상도를 갖는다.
- POP 거동 모델링을 하기 위해서는 화학물질의 물리화학적 특성자료와 배출자료 기상 및 지구 관측 값들이 필요하다. MSCE-POP 모델의 입출력 값이 아래 <부록 그림 16>에 나타나 있다.



<부록 그림 16> MSCE-POP 다매체거동모델의 입출력 자료.

- 모델의 입력 자료로는 기상 자료와 토지이용도(land cover) 자료, Leaf area index(LAI) 자료, 해수 흐름에 대한 자료, sea ice cover에 대한 자료들이 있고, 출력자료로는 1980년부터 2000년까지의 30개 협약 국가에 의해 제출된 POPs (PAHs, PCDD/Fs, PCBs, HCH, HCB) 배출 자료들이 사용되었다.
- 모델의 환경매체는 크게 토양, 토양, 해수, 식생, 빙하/눈으로 구성된다(그림 17).



<부록 그림 17> MSCE-POP hemispheric model의 processes

• POPs는 대기로 배출된 후 다른 매체로 이동되거나 대기 밖으로 이동되도록 설정되어 있다. 모델에서 POP의 장거리 이동에 영향을 미치는 경로들은 다음과 같다.

1) 대기

- transport with advection and diffusion
- partitioning of a pollutant between the gaseous and particulate phase;
- wet and dry deposition of the particulate and gaseous phase to the underlying surface;
- degradation.

2) 식생

- gaseous exchange with the atmosphere;
- defoliation.

3) Soil

- gaseous exchange with the atmosphere;
- partitioning by the gaseous , solid and liquid phase;
- vertical transport of a pollutant by convective water fluxes and diffusion;
- degradation.

4) Seawater

- gaseous exchange with the atmosphere;
- transport of a pollutant by sea currents and turbulent diffusion;
- redistribution between the dissolved and particulate phase;
- sedimentation;
- degradation

5) Sea ice/snow

- accumulation of POPs in the snow and ice medium,
- gas phase exchange between the snow and the atmosphere,
- fluxes into the seawater as a result of snow and ice melting,
- fluxes from the seawater to the ice cover during ice bottom/lateral accretion,
- horizontal transport with drifting ice,
- degradation in the snow pack and ice

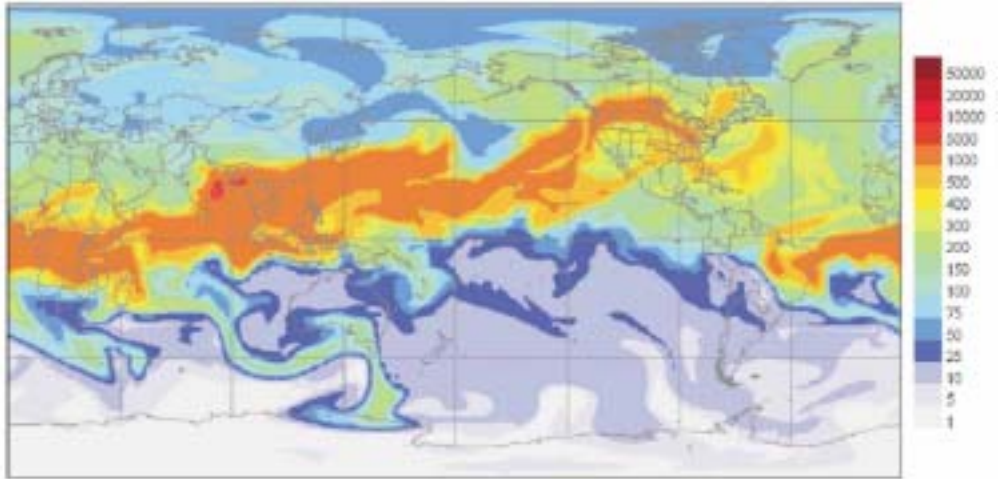
MEDIA

▪ MEDIA는 3차원 global scale의 다매체 거동모델이다. 이 모델의 환경 매체 (compartment)는 대기(atmosphere), 토양(soil), 저온영역(cryosphere), 바다(ocean)로 이루어진다.

▪ 대기(atmosphere)

• 3차원 이동 모델로서 수평으로는 0.5 x 0.5 ~ 2 x 2 도 사이의 크기로 균등하게 나누었으며, 수직으로는 15~25 층으로 나누어 계산한다.

- 수평으로 혼합(mixing)이 일어나고 수직으로는 대류(advection)가 일어난다. 구름과 강우에 의해 화학물질이 사라진다.
- 수평류(advection)는 semi-Lagrangian 연산법을 사용하여 계산하였고, 확산(diffusion)은 Crank-Nicholson 도표를 사용하여 처리하였다.
- 화학물질의 붕괴(decay)는 기온과 태양각에 의한 방정식으로 값을 구한다.
- 대기와 토양사이의 화학물질 교환은 두 매체가 만나는 낮은 층에서 일어난다.
- 토양(soil)
 - 토양은 10~15층으로 나누어 계산 하였다.
 - 토양에서는 대류와 확산에 의한 화학물질의 이동이 일어난다.
 - 이류와 확산(advection diffusion) 방정식에 기초한 원기둥 토양 모델이 다공성 매체 속에서 물과 화학물질의 이동을 나타내기 위해 사용되었다.
 - 토양에서 물과 화학물질의 이동은 Multidimensional Positive Definite Advection Transport Algorithm(MPDATA)에 의해 계산되었다.
 - 토양에서 물의 흐름은 지표에서 일어나는 증발과 강우를 포함한다.
 - 화학물질의 붕괴(decay)는 기온에 의한 방정식으로 값을 구한다.
- 저온영역(Cryosphere)
 - 얼음(또는 눈) 층에서 유기 화합물의 평형 분할은 얼음 입자에 흡착되는 과정과 얼음 간극 공기와 혼합되는 과정에서 일어난다.
 - 평형분할모델(equilibrium partition model)을 사용하였다.
- 해양(Ocean)
 - 정적(static) 버전에서 오염물질의 대기와 해양간의 교환은 헨리 법칙(Henry law)에 의해 일어난다. 동적(dynamic) 버전에서는 해양 표면과 대기 사이에 오염물질의 이동이 발생한다.
 - 정적 버전에서는 해양의 농도가 일정하다고 처리하였고, 동적 버전에서는 고위도 내부 확산 이동 모델(High-Latitude Exchange Interior Diffusion- Advection (HILDA))을 사용하였다.



<부록 그림 18> MEDIA로 계산한 1993년 지표 5245m의 α -HCH의 농도(Koziol A. et al, 2001)

Abstract

Multimedia environmental quality criteria for the integrated environmental management of hazardous chemicals

Basically, the environment is comprised of various multi-media including air, water, soil and so on. Numerous kinds of hazardous chemicals are increasingly emitted into the environment from various emission sources, which makes it more complex and difficult to resolve the environmental problems. Since hazardous chemicals behave interactively in the multi-media environment by being transferred and/or partitioned from one medium to another, it requires so-called 'multi-media approach' to assess their fate in the environment and to develop appropriate policy measures. Medium-specific environmental management of hazardous chemicals may result in the failure of environmental policies. Currently, 'integrated environmental management' has become a new paradigm for the management of hazardous chemicals in many countries.

Compared with other countries, Korea has less number of environmental quality criteria set up for the hazardous chemicals. Those existing criteria rarely have scientifically-defendable basis because they were not set by the results of risk assessment for the target chemicals. Furthermore, with respect to the purpose of integrated management, the existing criteria have never been examined for the consistency, which is individually set up for each medium.

In this study, 'coherence test' of medium-specific environmental quality objectives for the target chemical of benzo(a)pyrene was performed using EDCSeoul which is a multimedia fate model developed for the Seoul Metropolitan Area. The results

of coherence test revealed that the environmental criteria individually set up for each medium may result in inconsistency with the others.

For the successful implementation of multi-media environmental quality criteria, the following were suggested; (1) environmental quality criteria for the priority chemicals need to be developed on the basis of risk assessment with the multimedia approach, where the criteria should not only be scientifically defensible but also socially and economically sound, (2) future efforts should be exerted on the development of various policy measures for emission control, monitoring strategy, and organizational rearrangement within the government for the integrated management of hazardous chemicals, (3) technological development projects were also suggested such as monitoring database, risk assessment technologies, and decision support system using the multimedia models.

In order to generalize the conclusions of this study which were drawn from the results performed for a single chemical of benzo(a)pyrene, it is required to give more efforts for developing a multimedia fate model which is versatile for various chemicals with less uncertainty.