

# 해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응 정책 수립 II

- 연안역 범람 평가 및 대응 방향

조광우 | 강정은 | 양원준 | 공성용 | 이해미 | H. Nobuoka

## 🔥 연구진

연구책임자 조광우 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)  
참여연구원 강정은 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)  
양원준 (한국환경정책·평가연구원 박사후연구원)  
공성용 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)  
이해미 (한국환경정책·평가연구원 위촉연구원)  
H. Nobuoka (일본 이바라키대학 수권환경연구센터)

## 🔥 산학연정 연구자문위원

김정식 (기상청 기후정책과 연구관)  
김철호 (한국해양연구원 기후·연안재해연구부 책임연구원)  
정태성 (국립방재연구소 연구관)  
이정호 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)  
이진희 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)  
최희선 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)

© 2010 한국환경정책·평가연구원

---

<b>발행인</b>	<b>박태주</b>
<b>발행처</b>	한국환경정책·평가연구원 서울특별시 은평구 진흥로 290 (우편번호) 122-706 전화 02)380-7777 팩스 02)380-7799 <a href="http://www.kei.re.kr">http://www.kei.re.kr</a>
<b>인쇄</b>	2010년 12월 26일
<b>발행</b>	2010년 12월 31일
<b>출판등록</b>	제17-254호
<b>ISBN</b>	978-89-8464-521-9

---

값 9,000원



## 서 언

연안역은 보전 가치가 높은 자연 생태계를 보유하고 있으며, 사회·경제적 활용도가 매우 높은 지역으로 미래 세대를 위하여 지속 발전적인 차원에서 관리해야 합니다. 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 산지가 많은 지형적 특성으로 인하여 연안역에 사회·경제적 활동이 집중되어 있습니다. 그 동안 우리나라 해안은 과도한 개발로 인하여 많은 환경적 문제점을 도출하여 왔습니다. 최근 가속화되고 있는 기후 변화로 인하여 연안역의 다양한 사회·경제적 활동이 피해를 입고 있으며 향후 그 피해가 증대될 것으로 전망되고 있습니다.

최근의 기후 변화로 인한 해수면 상승과 태풍 및 파랑의 강도 증가로 인하여 연안역의 습지와 저지대 손실, 홍수와 하구의 염분 증가, 염분의 담수층 침투, 해안 침식 문제와 함께 연안역의 범람이 큰 문제로 대두되고 있습니다. 따라서 우리나라 해안은 해안의 생태적 다양성을 유지하면서 해안의 사회·경제적 이용을 유지해야 하는 이중의 문제를 가지고 있습니다.

본 연구원에서는 기후 변화 시대를 맞이하여 연안역의 지속 발전을 유지해야 하는 국가적인 도전에 대응하기 위하여 본 연구를 녹색 전략 과제로 수행하고 있습니다. 본 연구는 “해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응 정책 수립 과제” 중 2차연도 과제로 해수면 상승과 함께 기후 변화로 인해 발생하는 연안 외력을 통합적으로 고려하여 연안 취약성 평가 지수 산정 및 연안역 범람에 대한 평가를 실시하였고, 적절한 대응 방안을 마련함으로써 미래의 기후 변화에 대한 우리 사회의 적응 능력 제고에 일조하고자 합니다.

본 연구를 수행한 조광우 박사, 강정은 박사, 양원준 박사, 공성용 박사, 이해미 연구원의 노고에 감사를 표합니다. 더불어 본 연구에 참여하신 일본 이바라키 대학 수권환경연구센터의 Nobuoka 교수께도 감사드립니다. 또한 자문을 통하여 도움을 주신 한국해양연구원 김철호 박사님, 기상청 김정식 연구관, 국립방재연구소 정태성 연구관, 본원의 이정호 박사님, 이진희 박사님, 최희선

박사님께 감사를 드립니다.

2010년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 박 태 주

## 국문요약

본 연구는 기후 변화 및 해수면 상승이 우리나라 연안에 미치는 영향을 통합적으로 평가하고 적절한 대응 방향을 도출함으로써 연안역의 지속 발전에 기여하고자 한다. 1차연도(2009년) 연구는 우리나라 해수면 상승 현황과 해수면 상승에 대한 취약성의 지표로서 해안의 후퇴 거리(해안 침식률)를 정량적으로 산정하였다. 2차연도(2010년) 연구에서는 범람 평가에 초점을 맞추어 해수면 상승과 함께 기후 변화로 인해 변화 가능한 요소들을 통합적으로 고려하여 연안역의 범람 영향을 평가하고 적절한 대응 방안을 마련하고자 하였다.

본 연구에서는 IPCC AR4(2007) 이후 해수면 상승에 관한 최근 연구 결과를 분석하였다(제2장). 그 결과 지구해수면은 20세기 이전 0.8mm/yr, 20세기 1.8mm/yr, 최근 3.4mm/yr의 상승률을 나타내고 있으며, 최근 해수면 상승에 기여하는 주요 성분인 해양의 열팽창, 육상 빙하 및 빙모의 해빙, 남극 및 그린란드 빙상의 융해 및 분리, 육상 물 수지 등에 대한 정량적 기여분에 대한 정확도가 증가하고 있다. 그러나 아직까지 남극 및 그린란드 빙상의 역학, 지역 차원의 해수면 예측은 많은 도전적인 과제로 대두되고 있으며, 이로 인하여 해수면 상승에 대한 대응 방안은 과학적인 불확실성이 매우 높은 상태에서 정책 결정을 해야 하는 어려움이 있다. 최근에는 해양의 수온 상승과 이에 따른 해양의 열팽창, 육상 빙하 및 빙모의 해빙, 남극 및 그린란드 빙상의 융해 및 분리, 육상 물수지 등이 해수면을 상승시키며, 이들 성분 수지를 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 주요 국가의 연안역 취약성 평가와 관련하여 미국, 호주, 네덜란드, 일본 등 주요 국가들은 자국 해안의 자연 및 사회·경제적 지속성을 유지하기 위해 국가 차원의 취약성 평가 작업과 대응 전략을 수립하고 있다(제3장). 이들 국가의 취약성 평가의 핵심은 연안시스템을 통합적인 관점에서 평가하고 이를 토대로 새로운 해안관리 방식(예: build with nature)을 제안하고 있는 점이다. 더불어 네덜란드와 같이 저지대 국가는 구체적인 대응 전략과 더불어

구체적 이행방식을 도출하고 있는 점은 우리의 향후 대응에 많은 시사점을 주고 있다.

본 연구에서는 해수면 범람 취약성 평가를 스크리닝과 스코핑 단계로 나누어 평가를 실시하였다. 먼저 스크리닝 평가는 계획 차원에서 활용이 가능하도록 취약성 지수를 선정하여 동해안(강원도 해안)을 대상으로 평가하였다. 그 결과 우리나라 동해안(강원도 해안)의 경우 취약성 지수가 현재 1.826~22.361(평균 7.085)이며, 2100년 해수면이 1m 상승하는 경우 그 범위가 2.887~30.619(평균 12.361)로 크게 증대하였다. 해수면 상승에 대하여 매우(very high) 취약한 지역의 경우 현재 평가 대상 해안선의 8.57%에서 2100년 해수면 1m 상승하는 경우 현재 기준의 취약지구가 35.56%로 증가하였다. 강원도 동해안 지역에 대한 해수면 상승 취약성 평가 결과 동해안 해안 도로 주변의 주거 지역, 해안 침수 지역, 매립 지역은 범람 취약성이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 취약지구에 대한 구체적인 범람 평가(제4장)는 해안 도로에 인접한 소규모 주거 지역, 기존 태풍 등에 의하여 범람 피해를 입고 있는 상습 피해 지역인 해안 시가지 지역, 기존의 태풍 내습으로 인하여 이미 피해를 입었던 임해산업단지 등의 사례 지역을 대상으로 시도하였다. 이들 지역에 대한 범람 평가는 외력 및 자료의 제한으로 인하여 기후 변화로 인한 잠재적인 취약성 정도를 시나리오별로 평가하는 수준에서 수행되었다.

해수면 상승 범람 대응 방향(제5장)은 지역 차원에서 해수면 상승의 매우 높은 과학적 불확실성을 감안하여 과정(process)의 중요성에 기초한 방향을 제시하였으며, 해수면 상승 범람 피해를 최소화하기 위한 계획 차원의 대응 방향을 제시하였다. 사례 지역에 대한 대응 방향과 더불어 연안의 지속성을 유지하기 위한 평가 도구로서 지속성 평가 개념을 소개하였다. 연안 지역의 특수성과 기후 변화 적응을 공통적으로 고려하기 위한 구체적인 대책으로 현행 방재지구, 자연재해위험지구 제도의 보완 활용과 동시에 전략환경평가 제도를 활용한 방법, 도시계획 제도 중 지구단위계획을 활용하는 방법을 제안하였다. 특히, 지구단위계획은 용도지역지구가 관리하기 어려운 특화된 목적을 가진 경우에 효과적이므로 해수면 상승 및 해안가 재해의 취약성이 큰 지역의 관리에 타당하다고 판단되며, 효과적인 활용을 위해서는 구체적인 토지 이용과 건축물 계획 등 세부 대책에 대한 연구가 이루어질 필요가 있다.



제1장 서언 .....	1
제2장 해수면 상승 연구 현황: IPCC AR4(2007) 이후 .....	5
1. 해수면 상승 현황 및 예측 .....	7
2. 우리나라 주변 현황 .....	17
제3장 주요 국가의 해수면 상승 취약성 평가 현황 .....	21
1. 미국 .....	23
2. 호주 .....	25
3. 네덜란드 .....	28
4. 일본 .....	33
5. 우리나라 .....	38
제4장 연안역 범람 평가: 사례 연구 .....	47
1. 취약성 평가 지수 .....	49
가. 평가 방법론 .....	49
나. 취약성 지수 결과 .....	52
2. 범람 평가: 사례 지역 .....	64
가. 평가 방법론 .....	64
나. 해수면 시나리오 .....	73
다. 사례 지역 평가 결과 .....	78
3. 사례 지역 분석 및 고찰 .....	103
가. A 지역 .....	103
나. B 지역 .....	106



다. C 지역 .....	107
<b>제5장 해수면 상승 범람 대응 방향 .....</b>	<b>109</b>
1. 해수면 상승 대응 기본 방향 .....	111
가. 대응 과정 .....	111
나. 전략적 대응 방향 .....	115
2. 해수면 상승에 대한 계획적 적응 방안 .....	123
가. 현행 관련 제도 고찰 .....	126
나. 해수면 상승에 대한 도시계획적 대응 방안 .....	133
3. 해수면 상승 대응과 지속성 평가 .....	135
<b>제6장 요약 및 결론 .....</b>	<b>139</b>
<b>참고 문헌 .....</b>	<b>145</b>
<b>부록 1: 폭풍 해일 특성 및 피해 현황 .....</b>	<b>153</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>165</b>



표 2-1. 해역별 지각 변동 속도 및 해수면 상승률	18
표 3-1. 주요 국가 및 우리나라 해수면 상승 취약성 평가 현황	22
표 3-2. 네덜란드 부가가치세를 포함한 2007년 수준에서의 유로 금액	31
표 3-3. 해수면 0.1m 상승 시 피해 면적 비교	39
표 3-4. IPCC SRES 시나리오별 조건대 침수 면적	41
표 4-1. 연안 취약성 지수(CVI) 인자의 순위	51
표 4-2. 연안 취약성 지수(CVI) 산정에 사용된 기본 자료 및 지표값 결정 방법	53
표 4-3. 연안 취약성 지수(CVI)의 인자별 지표값 분류 기준	54
표 4-4. 연안 취약성 지수(CVI) 지표 범위	59
표 4-5. 미국의 연안 취약성 지수(CVI) 지표	59
표 4-6. 연안 취약성 지수(CVI) 카테고리별 분류 및 점유율(%)	60
표 4-7. LISFLOOD-FP 모형을 이용한 기후 변화에 따른 범람 영향 평가에 관한 주요 연구 사례	67
표 4-8. 주요 국가 해수면 상승 시나리오	74
표 4-9. A군의 지역별 인구 수(2009. 12. 31 기준)	79
표 4-10. A 지역의 30년 기후 월 평년값 자료(1971-2000년)	79
표 4-11. A 지역의 일평균 기온 및 일 강수량(2009년)	80
표 4-12. A 해안 지역의 해수면 시나리오	85
표 4-13. 대상 지역 행정 구역 및 가구(인구) 현황	90
표 4-14. 근덕면 강수량 및 강우 기간(장마 기간 중, 단위 mm)	92
표 4-15. B시 근덕면 침수 피해 원인	92
표 4-16. B시 근덕면 시물레이션 시나리오	95
표 4-17. C 공단 지역의 범람 시나리오	101
표 5-1. 연안역 적응 목표별 적응 수단 및 기후 변화와의 관련성	113
표 5-2. 해수면 상승에 대한 적응 방안 및 그 특성	120
표 5-3. 도시계획 수립 지침(2007년 개정) 상 연안 지역 및 재해 관리 관련 항목	128



표 5-4. 도시관리계획 수립 지침(2008년 개정) 상 연안 지역 및 재해 관련 항목 .....	129
표 5-5. 자연재해위험지구 정비 사업 투자 우선 순위 평가 항목 .....	130
표 5-6. 지속 발전 매트릭스(Sustainable development matrix) .....	136
부록표 A1-1. 월별 태풍 발생 현황 .....	160
부록표 A1-2. 부산 전 지역 피해 현황 집계(2003년 9월 22일 현재) .....	163
부록표 A1-3. 경남 전 지역 피해 현황 집계(2003년 9월 22일 현재) .....	163



그림 2-1. IPCC 예측과 해수면 상승 현황 비교 .....	6
그림 2-2. 20세기 동안 가속화된 해수면 상승 .....	7
그림 2-3. 해수면 고도 측정법(altimetry)에 의해 측정된 지구 평균 해수면 .....	8
그림 2-4. 1970-1980년대의 작은 신호폭 .....	9
그림 2-5. XBT 자료 교정에 의해 명확히 나타나는 지구 온난화 추세 .....	9
그림 2-6. 남대서양 서측부의 온도 상승(1989-2005년) .....	9
그림 2-7. 해양 수심 4000m까지의 심층수 온도 상승 .....	10
그림 2-8. 육상 빙하 및 빙모의 해수면 상승 기여분 .....	11
그림 2-9. 육상 빙하 및 빙모의 질량 변화율 .....	11
그림 2-10. 최근 5년간(2003-2007년) 그린란드 빙상의 두께 변화 .....	12
그림 2-11. 지난 30년간 그린란드 전체 해빙 지역의 변화(1979-2009년) .....	12
그림 2-12. 육지의 물 이용도 .....	13
그림 2-13. 해수면 상승 관측치 및 성분별 합계 .....	13
그림 2-14. IPCC A1B 및 B1 시나리오에 의한 바람 변화가 지역 해수면 변화에 미치는 영향의 수치 모델 결과 .....	15
그림 2-15. 준경험적 방법에 의한 21세기 해수면 상승 예측치 .....	16
그림 2-16. Topex/Poseidon 및 Jason 위성고도계 자료를 이용한 한반도 주변 해수면 상승 경향(1993-2008년 자료) .....	19
그림 2-17. 일본 주변 해역의 장기 해수면 변동 .....	20
그림 3-1. 해수면 상승에 대한 미국 동부 연안 지형의 잠재적 반응 .....	24
그림 3-2. 미국 동부 연안 지역의 잠재적 습지 잔존 .....	24
그림 3-3. 해수면 상승(0.1m, 0.5m)에 따른 극치 해수면 빈도 분포 변화 .....	26
그림 3-4. Stony Point 지역의 해수면 상승 시나리오별 해일고 빈도 분포 변화 .....	26
그림 3-5. 1m의 해수면 상승으로부터의 범람 위협에 있는 기존 주거 건물의 추산 .....	27
그림 3-6. 네덜란드 국토의 고도별 분포 .....	29
그림 3-7. Delta 위원회의 지역 구분 .....	31



그림 3-8. 현재의 각종 방제 시설 기준과 해수면 상승(2050년)에 따른 하천 배수율 변화	32
그림 3-9. 해수면 상승에 따른 염수 침투로 인한 하천 제방 취약성 및 대응책 지도	34
그림 3-10. 일본 서부 지역의 고조 침수 지역	34
그림 3-11. 해수면 상승 및 태풍 강도 변화(0.1-1.6배)에 따른 경제적 손실	35
그림 3-12. 해수면 상승과 강우 변화를 고려한 액상화 재해 지도(2081-2100년)	36
그림 3-13. 해수면 상승에 의한 사빈 침식의 경제적 가치	37
그림 3-14. 시나리오별 조간대 침수 지역	42
그림 4-1. 미국 동부 연안의 취약성 지수(CVI)	50
그림 4-2. 애서티그 섬 국립 해안의 상대적인 해안 취약성	50
그림 4-3. 지형 인자 1, 2: 삼척시 원덕읍 임원리 암석 해안 일대	55
그림 4-4. 지형 인자 3: 삼척시 동해항 일대(인공 해안)	55
그림 4-5. 지형 인자 3: 삼척시 정라동 일대(낮은 암석 해안)	55
그림 4-6. 지형 인자 4: 양양군 양양읍 남대천 하구역(estuary)	55
그림 4-7. 지형 인자 4: 고성군 죽왕면 송지호 일대(석호)	56
그림 4-8. 지형 인자 5: 동해시 망상해수욕장(모래 해안)	56
그림 4-9. 연안 취약성 지수(CVI)의 카테고리별 분류 결과	60
그림 4-10. 현재 상태에 대한 CVI	61
그림 4-11. 1m 해수면 상승 시 CVI	61
그림 4-12. 강원도 고성-속초 지역 CVI	62
그림 4-13. 강원도 양양 지역 CVI	62
그림 4-14. 강원도 강릉-동해 지역 CVI	63
그림 4-15. 강원도 삼척 지역 CVI	63
그림 4-16. Nicholls(2002)에 의해 적용된 홍수 모형 알고리즘을 나타내는 도표	64
그림 4-17. Bucket fill 방법 사례(좌: 연성 해안의 경우, 우: 강성 해안의 경우)	66
그림 4-18. LISFLOOD-FP 모형의 계산 격자와 흐름 구조	68
그림 4-19. 사용된 좌표계와 몇몇 변수들의 정의	70
그림 4-20. Representation of the control volumes formed by node-centered (a) and cell-centered (b) formulations used in finite volume discretizations	73



그림 4-21. 과거(1951-2007년) 태풍에 의한 우리나라 해안의 해일고 .....	76
그림 4-22. A군의 지역별 인구 수(2009.12.31 기준) .....	79
그림 4-23. 동해안 A 해안 지역의 전형적인 취락 입지와 해안 도로의 모습 (A군 기성면 봉산리) .....	80
그림 4-24. A군 기성면 기성리 해안(2010년 6월 현재 방파제 공사중) .....	81
그림 4-25. A군 기성면 기성리와 해안 후면의 넓은 충적 평야 .....	81
그림 4-26. 남대천 하류의 평야 지대에 위치한 평해읍 .....	82
그림 4-27. 평해읍 월송리 월송정 전면의 사빈 해안 .....	82
그림 4-28. 평해읍 월송리 월송정 인근에 발달한 하구역 습지 .....	83
그림 4-29. 평해읍 거일리의 해안 도로 .....	83
그림 4-30. 후포면 후포4리 일대의 취락 입지와 해안 도로 .....	84
그림 4-31. Case 1: Tide+SS(0.135+0.5+0.5=1.135m) .....	87
그림 4-32. Case 2: Tide+SS+SLR(1.135+0.75=1.885m) .....	87
그림 4-33. Case 3: Tide+SS+SLR(1.135+1.1=2.235m) .....	87
그림 4-34. Case 4: Tide+SS+SLR(1.135+1.9=3.035m) .....	87
그림 4-35. Case 5: Tide+SS+WAVE(10년)(0.635+1.82=2.455m) .....	88
그림 4-36. Case 6: Tide+SS+WAVE(50년)(0.635+2.115=2.75m) .....	88
그림 4-37. Case 7: Tide+SS+WAVE+SLR(0.635+1.82+0.75=3.205m) .....	88
그림 4-38. Case 8: Tide+SS+WAVE+SLR(0.635+1.82+1.1=3.555m) .....	88
그림 4-39. Case 9: Tide+SS+WAVE+SLR(0.635+1.82+1.9=4.355m) .....	89
그림 4-40. Case 10: Tide+SS+WAVE+SLR(0.635+2.115+0.75=3.5m) .....	89
그림 4-41. Case 11: Tide+SS+WAVE+SLR(0.635+2.115+1.1=3.85m) .....	89
그림 4-42. Case 12: Tide+SS+WAVE+SLR(0.635+2.115+1.9=4.65m) .....	89
그림 4-43. B시 근덕면 일대 위성 사진 .....	91
그림 4-44. B시 근덕면 침수 흔적도 .....	93
그림 4-45. B시 근덕면 실제 피해 현황 .....	94
그림 4-46. Scen.02: Tide+SS+SLR(1) .....	96
그림 4-47. Scen.03: Tide+SS+SLR(2) .....	96



그림 4-48. Scen.04: Tide+SS+SLR(3) .....	96
그림 4-49. Scen.05: Tide+SS+SLR+Wave(10) .....	96
그림 4-50. Scen.06: Tide+SS+Wave(50) .....	97
그림 4-51. Scen.07: Tide+SS+Wave(10)+SLR(1) .....	97
그림 4-52. Scen.08: Tide+SS+Wave(10)+SLR(2) .....	97
그림 4-53. Scen.09: Tide+SS+Wave(10)+SLR(3) .....	97
그림 4-54. Scen.10: Tide+SS+Wave(50)+SLR(1) .....	98
그림 4-55. Scen.11: Tide+SS+Wave(50)+SLR(2) .....	98
그림 4-56. Scen.12: Tide+SS+Wave(50)+SLR(3) .....	98
그림 4-57. 해수면 0.75m 상승 시 파랑에 의한 범람 예상 지역 .....	99
그림 4-58. 해수면 1.1m 상승 시 파랑에 의한 범람 예상 지역 .....	99
그림 4-59. 해수면 1.9m 상승 시 파랑에 의한 범람 예상 지역 .....	100
그림 4-60. C 공단 지역의 위성영상(Google 위성영상) .....	102
그림 4-61. Case 1: Tide only(1.123m, HHW) .....	102
그림 4-62. Case 2: Tide+SS(pressure+wind+wave setup)(1.123+1.1+0.3=2.523m) .....	102
그림 4-63. Case 3: Tide+SS+SLR(2.523+0.75=3.273m) .....	102
그림 4-64. Case 4: Tide+SS+SLR(2.523+1.1=3.623m) .....	103
그림 4-65. Case 5: Tide+SS+SLR(2.523+1.9=4.423m) .....	103
그림 5-1. 해수면 상승 대응 정책 과정 .....	112
그림 5-2. 해수면 상승에 대한 연안역 취약성 평가 모식도 .....	117
그림 5-3. 해수면 상승에 대한 적응 방안 모식도 .....	117
그림 5-4. 해수면 상승에 대한 영향 평가 및 적응 골격 .....	122
그림 5-5. 기후 변화와 연안 지역의 취약성 .....	124
그림 5-6. 해수면 상승 적응 방안 .....	125
그림 5-7. 도시계획 체계 .....	127
그림 5-8. 해수면 상승에 대한 도시계획적 대응 방안 제안 .....	133
부록그림 A1-1. 천문조와 기상조 .....	153
부록그림 A1-2. 저기압에 의한 흡입 효과 .....	154



부록그림 A1-3. 바람의 영향 .....	155
부록그림 A1-4. Myers식에 의한 기압 분포 .....	157
부록그림 A1-5. 변형된 기압 분포 .....	158
부록그림 A1-6. 경도풍에서 힘의 평형 .....	159
부록그림 A1-7. 월별 발생된 태풍의 경로 .....	161
부록그림 A1-8. 태풍 중심 기압 940hPa의 경로 .....	162



## 제1장

### 서 언

해안은 모래사장, 습지, 산호초 등 독특하고 보전 가치가 높은 자연생태계를 가지고 있으며, 전 세계 인구의 약 50%가 해안 100km 이내에 거주하는 등 사회·경제적 활용도 또한 높은 지역이다. 최근 가속되고 있는 기후 변화로 인한 해수면 상승과 태풍 및 파랑 강도 변화 등으로 인해 습지와 저지대 손실, 홍수, 하구의 염분 증가와 담수층 침투, 해안 침식 문제와 함께 연안역 범람 문제가 큰 문제로 대두되고 있다(IPCC, 2007; 조광우 등, 2009). 이와 같은 연안 재해는 피해가 발생하였을 경우 사회적 대응책을 고려하나 기존의 대응책은 환경적, 경제적, 사회적 측면을 모두 고려해야 하는 연안의 지속 발전 관점에서 바람직하지 못한 대응책인 경우가 많으며 기후 변화 적응 관점에서 잘못된 적응일 수도 있다. 기후 변화 및 그 영향은 장기적인 경향이며 기후시스템의 속성상 온실가스 감축에도 불구하고 상당 기간 지속될 것으로 예상된다. 이에 대한 대응책은 기존의 방식과는 다르게 수립되어야 하는데 이에 대한 제도적, 사회적 준비에도 장시간이 소요될 것으로 예상되므로 사전에 영향을 평가하고 미래에 대한 정보를 공유하여 우리 사회가 갖는 기존의 대응 관행에 대한 관성(inertia)을 줄임으로써 우리 사회의 적응 능력(adaptive capacity)을 증가시키는 것이 필요하다.

본 연구의 대상인 해안에 대하여 인류 사회는 파랑, 태풍, 쓰나미 등에 의한 해안 재해를 경험하여 왔으며 이와 같은 재해에 대하여 다양한 지식을 통하여 대응하여 왔다. 그러나 이와 같은 기존의 대응과 관련한 전통적 지식(traditional knowledge)은 어느 정도 시간 규모에서 축적된 소중한 지식 및 경험이지만 현재의 기후 변화는 이들 시간 규모에서 경험하지 못한 새로운 외력 조건임을 감안할 때 이와 같은 경험적 지식이 기후 변화에 대한 효과적인 대응에 장애 요인으로 작용할 수 있다. 기존의 연안역의 사회·경제적 활동의 기준이 되는 해수면은 일정한 것으로 가정하였으나 기후 변화 상황 하에서는 이들 기준이 변화하고 있으며 그 변화의 시기 및 크기에 불확실성이 존재하고 있다. 더불어 평균 해수면의 변화와 더불어 파랑, 조석, 해일 등의 외력 조건도 기후 변화에 의하여 변화하기 때문에 해수면과 관련된 연안역의 다양한 사회·경제적 활동에는 새로운 기준 및 접근 방법이 요구되고 있다. 따라서 본 연구와 같은 취약성 평가를 통하여 새로운 정보를 도출하고 관련 정보를 연안 재해 대응 과정의 다양한 이해 당사자들에게 제공함으로써 이들이

가지는 다양하고 소중한 경험적 지식들이 진화할 수 있도록 하는 것 즉 연안역에 대한 우리 사회의 적응 능력 제고가 본 연구의 일차적인 목표이다.

우리나라의 경우 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 최근 태풍, 파랑, 폭풍 등에 의하여 영향을 받으며, 연안역에 사회·경제적 활동이 집중되어 있어 상당한 피해를 주기적으로 경험하고 있는 실정이다. 2002년 태풍 루사(강수량: 870mm/day, 피해액 약 6조원), 2003년 태풍 매미(중심기압 950hPa, 피해액 약 5조원) 등을 예로 들 수 있다. 기후 변화와 관련한 취약성 평가의 기존 연구에 의하면 우리나라에 대하여 해수면 1m 상승 시 조석 및 폭풍의 영향을 고려했을 경우 잠재 범람 면적이 2,643km<sup>2</sup>, 잠재 피해 인구 1,225천명으로 예상되고 있다(조광우 등, 2002). 지구 온난화에 의한 해수면 상승은 태풍(해일), 파랑, 바람 및 강수 변화와 중첩하여 연안역의 자연환경 및 사회·경제시스템의 취약성을 유발하며 현 기후 변화 영향은 연안 경계(해양, 육지, 대기)에 작용하는 외력의 누적 영향(cumulative effect)으로 나타나고 있음을 주시할 때 그 영향은 연안역의 다양한 사회·경제적 활동의 기준을 초과할 수 있다. 본 연구는 연차 과제인 “해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응 정책 수립” 과제 중 2차연도 과제로 해수면 상승과 함께 기후 변화로 인해 변화 가능한 요소를 통합적으로 고려하여 연안역 범람에 대한 영향을 평가하고 적절한 대응 방안을 마련함으로써 미래의 기후 변화에 대한 우리 사회의 적응 능력 제고에 일조하는 목적을 가지고 있다.

이를 위한 본 연구의 주요 내용은 IPCC AR4(2007) 이후 해수면 상승에 대한 최신 연구 현황(2장)과, 주요 국가의 해수면 상승 취약성 평가 현황을 조사하였다(3장). 우리나라 해수면 상승 범람 평가는 취약성 평가 체계를 제공하기 위하여 먼저 스크리닝을 통한 취약지구를 파악하였으며 취약지구에 대해서는 스코핑 과정을 통하여 비교적 상세한 범람 평가를 실시하였다(4장). 해수면 상승 범람 취약성 스크리닝은 강원도 해안을 대상으로 미국지질조사국(USGS)에서 개발된 취약성 지표를 활용하여 취약지역을 파악하였으며, 스코핑 평가는 취약지구로 예상되는 해안 주거 지역, 기존 범람 지역 및 매립 지역 등 3개 지역에 대하여 실시하였다. 이들 취약성 평가는 1차연도 연구로 산출된 해안 침식 결과를 포함하여 해수면 상승, 태풍, 파랑, 조석, 해일 등을

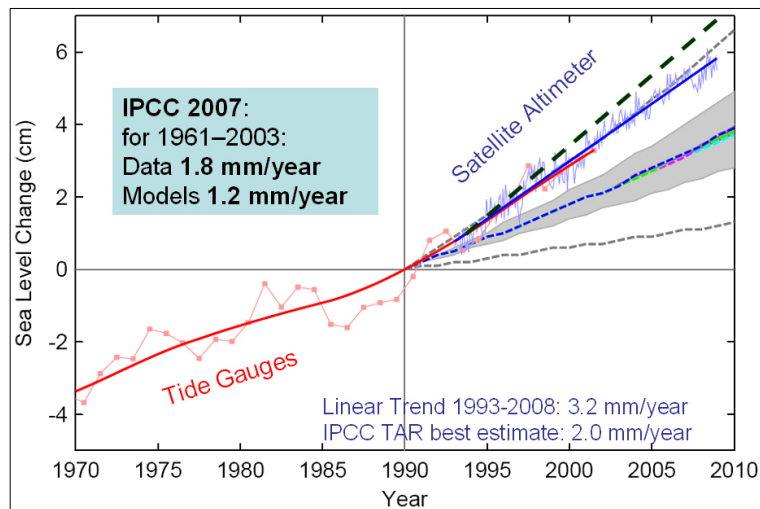
고려한 기후 변화 시나리오를 산출하고 기후 변화 시나리오별 취약성 인덱스 산출 및 범람 평가를 실시하였다. 마지막으로 대응 방향(5장)은 환경, 경제, 사회를 모두 고려하는 지속성 평가 관점에서 검토하였으며, 해수면 상승의 주요 대응 수단인 토지 이용 방안을 포함하였다. 본 연구의 태풍 해일 시나리오 선정은 일본 이바라키 대학의 노부오카 교수와 공동으로 수행하였다. 부록에서는 기후시나리오에 사용된 폭풍 해일의 특성과 피해 현황을 수록하였다.



## 제2장

해수면 상승 연구 현황: IPCC  
AR4(2007) 이후

IPCC 4차보고서(2007)는 최근 지구의 온난화가 인간의 온실가스 배출에 의한 인위적인 것으로 결론을 내렸으며, 지구 온난화로 인하여 다양한 기후 변화 및 변동이 발생할 것으로 평가하고 있다. 지구의 온도 상승이 해양의 온도 상승과 육상의 얼음을 해빙시킴으로써 지구의 해수면을 상승하게 하는 것은 자명하다. 그러나 기후 변화에 의하여 시·공간적으로 해수면이 어느 정도 변화할 것인가에 대한 대답은 아직까지도 과학적으로 매우 어려운 과제이다.



자료: Rahmstorf *et al.*(2007), 조광우 등(2009)

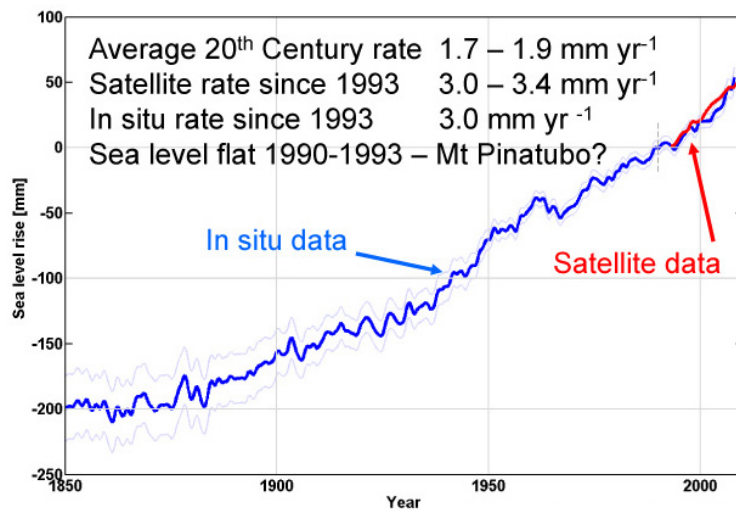
■ 그림 2-1. IPCC 예측과 해수면 상승 현황 비교

〈그림 2-1〉은 1990년대부터 21세기 초반까지 IPCC 예측치와 관측치의 비교 그림을 보여 주고 있다. 지구 평균 해수면 관측치는 예측 최적값을 상회하여 최고 상한치를 따라 상승하고 있음을 알 수 있다. 또한 여기에서는 해수면 상승 예측의 어려움과 동시에 기후 변화의 과학적 불확실성을 동시에 제시한다고 할 수 있다. 더욱이 해수면 상승 대응의 이해당사자들이 필요로 하는 지역 해수면에 대한 과학적 불확실성은 아직까지 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 이와 같은 과학적 불확실성은 해수면 상승에 대한 효과적인 대응을 어렵게 하는 주요한 요소이다.

따라서 해수면 상승 대응을 위하여 대응 지역의 상대적 해수면 변화를 주기적으로 평가하는 작업은 매우 중요하다고 할 수 있다. 여기서는 IPCC AR4(2007) 이후 해수면 상승 평가와 관련하여 이루어진 2009년 코펜하겐 작업(2009년 3월)과 2010년 IPCC 해수면 워크숍(2010년 6월 말레이시아)의 결과를 중심으로 해수면 상승 연구 현황을 소개하고자 한다.

## 1. 해수면 상승 현황 및 예측

지구 해수면은 20세기 동안 평균 1.7~1.9mm/yr의 상승을 나타내었으며, 위성고도계 자료 활용이 가능한 1993년 이후에는 위성 자료의 경우 3.0~3.4mm/yr, 현장 관측 자료의 경우 3.0mm/yr를 나타내고 있다(그림 2-2; Church, 2010).

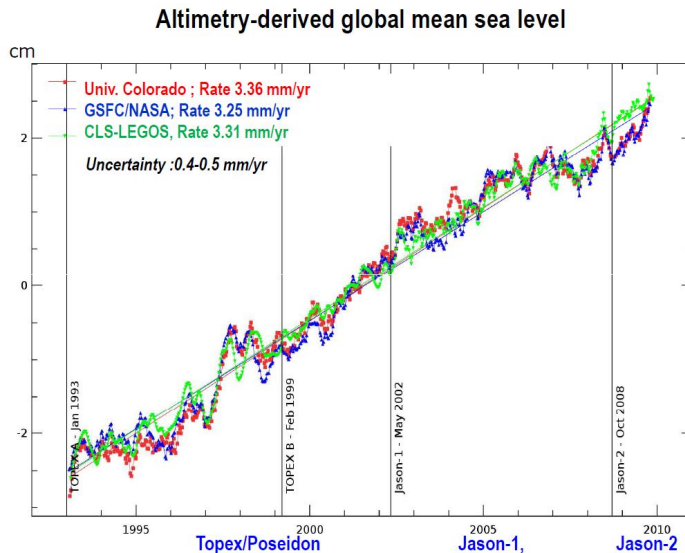


자료: Church(2010)

■ 그림 2-2. 20세기 동안 가속화된 해수면 상승

〈그림 2-2〉에서 1990년부터 1993년까지 동안에는 미나투바 화산 활동으로 인하여 지구 해수면

상승이 이루어지지 않은 것으로 평가되고 있다. <그림 2-3>은 위성고도계가 발사된 20세기 후반부터 현재까지 지구 평균 해수면 상승률을 나타내는 것으로 평균 3.25~3.36mm/yr(uncertainty: 0.4~0.5mm/yr)를 나타내며, 연구 기관에 따라 약간 다르나 그 차이는 크지 않다. 지구의 온난화는 해양의 수온 상승과 이에 따른 해양의 열팽창, 육상 빙하 및 빙모의 해빙, 남극 및 그린란드 빙상의 용해 및 분리, 육상 물수지 등을 통하여 해수면을 상승시키며, 이들 성분 수지를 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

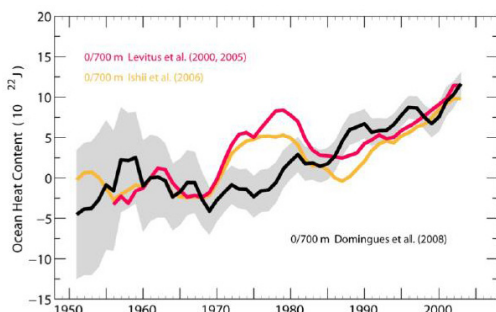


자료: Church(2010)

■ 그림 2-3. 해수면 고도 측정법(altimetry)에 의해 측정된 지구 평균 해수면

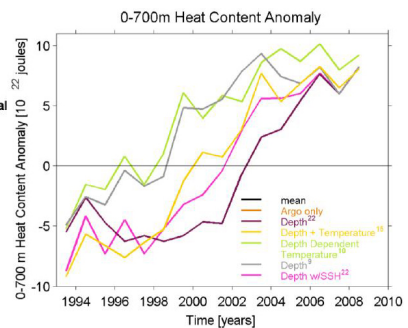
먼저 해양의 열팽창과 관련하여 AR4 이후 다양한 관측 자료에 대한 수정이 이루어지고 있다. 대표적으로 XBT의 침강 속도 및 Argo 센서 문제에 대한 교정, 특히 침강 속도에 대한 수정이 집중적으로 이루어졌으며, 그 결과 해양의 열용량의 지속적인 증가 유형이 뚜렷하게 나타나고 있다(그림 2-4, 그림 2-5). 이들 그림은 해양 수심 700m까지의 지구 해양 열용량의 시계열을

나타내고 있는데, <그림 2-4>에서는 AR4에서 1970년대 및 1980년대의 변동 성분이 제거되고 지속적인 상승 경향을 뚜렷이 나타내고 있으며, <그림 2-5>는 특히 XBT 자료 교정으로 인하여 모든 자료에서 뚜렷한 상승 경향을 보여주고 있다. 이들 열용량 상승 경향은 1.2mm/yr의 해수면 상승을 나타내는 것으로 평가하고 있다(Lyman *et al.*, 2010). 해양의 온도 상승과 관련하여 새롭게 도출된 연구 결과는 그 동안 자료 부족 등으로 고려하지 않았던 심층수의 온도 상승이다.



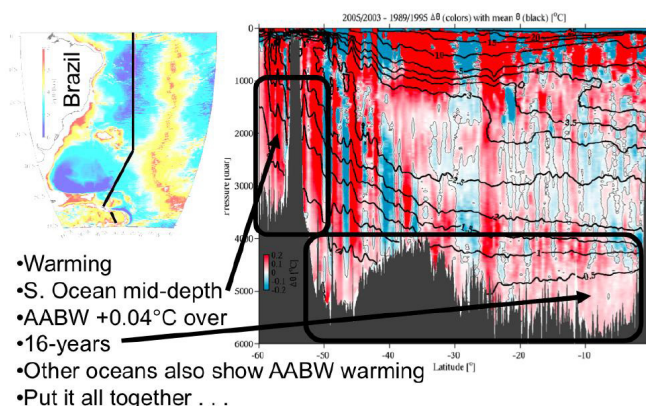
자료: Levitus *et al.*(2000)

■ 그림 2-4. 1970-1980년대의 작은 신호폭



자료: Lyman *et al.*(2010)

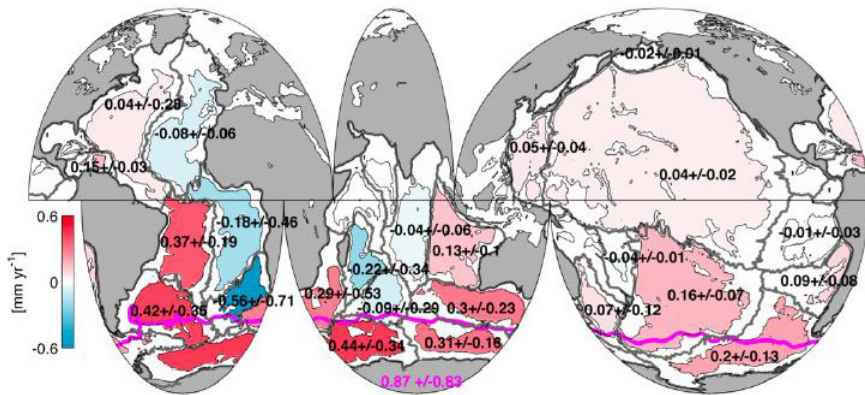
■ 그림 2-5. XBT 자료 교정에 의해 명확히 나타나는 지구 온난화 추세



자료: Gille(2010)

■ 그림 2-6. 남대서양 서측부의 온도 상승(1989-2005년)

〈그림 2-6〉은 1989년부터 2005년까지 남대서양 서측부의 온도 상승을 나타내고 있으며, 〈그림 2-7〉은 해양 수심 4000m까지의 심층수 온도 상승을 보여주고 있다. 이들 그림에서 남빙양 심층수(Antarctic Bottom Water; AABW)의 상승이 현저한 것을 볼 수 있다. 심층수의 수온 상승은 약  $1.13 \pm 0.09 \text{ mm/yr}$ 의 해수면을 상승시킬 수 있는 것으로 평가하고 있다(Gille, 2010).

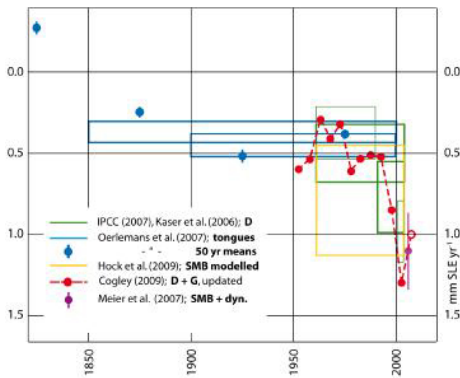


자료: Gille(2010)

■ 그림 2-7. 해양 수심 4000m까지의 심층수 온도 상승

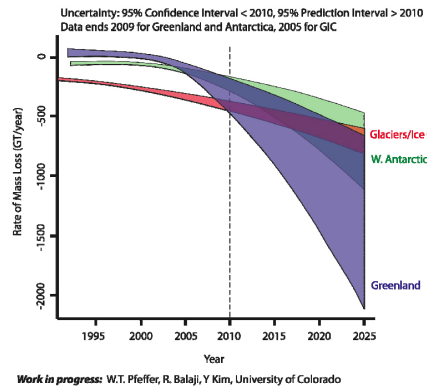
지구의 빙하권은 눈, 강 및 호수 얼음, 해빙, 빙하 및 빙모, 빙상 등으로 구성되어 있다. 빙하권은 지구시스템 중 해양 다음으로 질량과 열용량이 큰 시스템이며, 육지 면적의 약 10%, 해양 면적의 약 7%를 차지하고 있다. 육상 빙하권에 저장하고 있는 담수는 육상수의 약 75%를 보유하고 있으며, 지구 온난화는 기온 상승을 통하여 이들 빙하들을 해빙 및 분리시키고, 이들이 바다로 유입되어 지구 해수면이 상승하게 된다. 빙하 성분 중 해수면 상승 잠재력이 있는 주요 성분은 남극 빙상, 그린란드 빙상, 그리고 육지의 빙하 및 빙모이다. 빙하권 중 가장 큰 체적을 차지하는 남극의 경우 해수면을 약 57m 상승시킬 수 있는 잠재력이 있으며, 그린란드 빙산은 약 7m의 해수면 상승 잠재력에 해당하는 양을 가지고 있다(IPCC, 2007). 먼저 육상 빙하 및 빙모는 IPCC AR4에 의하면 지구 해수면을 0.49~0.74m 상승시킬 수 있는 양(남극 및 그린란드 부분

포함하는 경우)으로 보고되었으며, 최근 연구(Radić & Hock, 2010)에 의하면 그 수치가 0.60 mm±0.07로 새롭게 수정되었다. 그러나 육상 빙하의 해수면 기여 정도는 관측 자료의 시·공간적 제한성 및 관련 역학에 대한 이해도 부족으로 인하여 불확실성이 여전히 큰 것으로 평가하였다. <그림 2-8>은 여러 연구자에 의한 육상 빙하 및 빙모의 해수면 상승 기여분을 나타내고 있다. IPCC AR4에서는 0.8mm/yr로 평가되었으나 최근 연구 결과 약 1.0mm/yr의 해수면 상승을 유발하는 것으로 평가되고 있다.



자료: Pfeffer *et al.*(2010)

■ 그림 2-8. 육상 빙하 및 빙모의 해수면 상승 기여분



자료: Pfeffer *et al.*(2010)

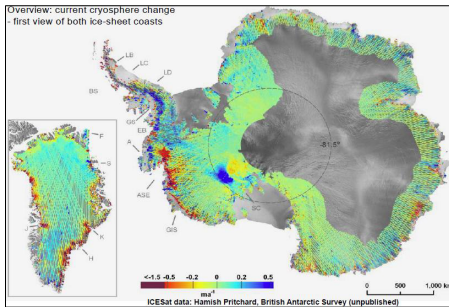
■ 그림 2-9. 육상 빙하 및 빙모의 질량 변화율

<그림 2-9>는 육상 빙하 및 빙모(그린란드 및 남극 빙상)의 질량 변화율을 나타내고 있다. 육상 빙하 및 빙모의 해수면 상승에 대한 기여 성분은 불확실성이 크지만 향후 150년간 해수면 상승의 주요 성분으로 작용할 것으로 예상되고 있다.

해수면을 변화시키는 위의 여러 요인 중 남극(Antarctic) 및 그린란드(Greenland) 빙상의 변화가 있다. 그린란드와 남극 빙상에 함유되어 있는 물의 양은 해수면 70m에 해당되는 상당한 양이다. 따라서 지구 온난화에 기인하여 이들 빙상의 질량 수지에 적은 변화가 일어나도 해수면 변화에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이들 빙상의 질량 수지는 연간 해수면의 약 6.5mm에 해당되는

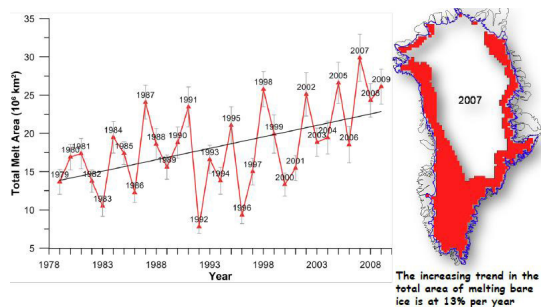
강설에 의한 유입과 결빙, 빙산 분리 형태의 유출에 의하여 질량 수지가 거의 균형을 이루고 있다. 질량 수지의 과정은 두 빙상이 다르게 이루어지고 있다. 남극 빙상의 경우 유출은 남극의 저온에 기인하여 주로 빙상 분리의 형태로 이루어지고 있으나, 그린란드 빙상의 경우 해빙과 빙상 분리가 절반씩 이루어지고 있는 것으로 알려져 있다. 빙상의 변화는 표면 질량 수지 관측이나 부피 변화 측정에 의해서 계산할 수 있다. 그러나 관측치의 대부분은 수십 년 정도이므로 관측치로부터 빙상의 변화가 단기간의 기후 변동에 의한 것인지 아니면 오래 전에 발생한 변화에 대해 느리게 조정되어 가고 있는지를 판단하는 것은 어렵다.

최근에 발달한 인공위성 고도계를 통해 우주로부터 지구의 고도를 정확하게 측정할 수 있게 됨에 따라 이를 응용하여 현재 고도의 변화 자료를 이용하여 빙상의 질량 변화를 추산하는 연구가 수행되고 있다. 최근 연구 결과 두 빙상의 두께가 얇아지고 있는 것이 확인되었으며(그림 2-10; Pritchard *et al.*, 2009), 최근의 중력 측정 위성(GRACE)을 통해서도 유사한 질량 감소가 보고되고 있다(Khan *et al.*, 2010; Velicogna, 2009).



자료: Pritchard *et al.*(2009); Church(2010)

■ 그림 2-10. 최근 5년간(2003~2007년) 그린란드 빙상의 두께 변화

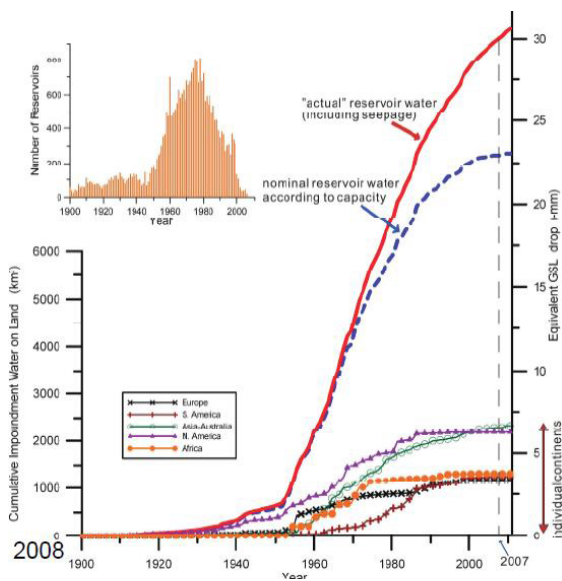


자료: Steffen(2010)

■ 그림 2-11. 지난 30년간 그린란드 전체 해빙 지역의 변화(1979-2009년)

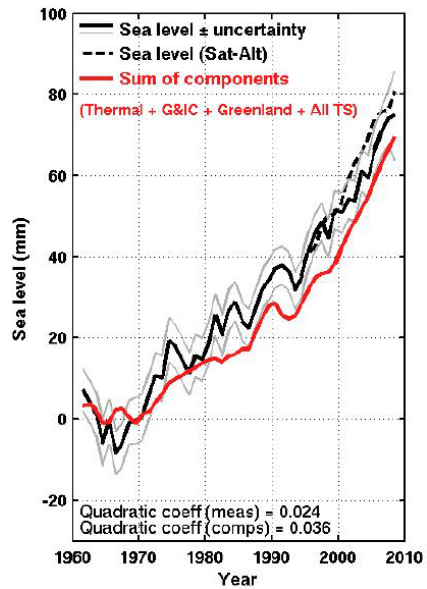
〈그림 2-10〉은 최근 5년간(2003~2007년) 그린란드 빙상의 두께 변화를 보여 주고 있다. 해안 경계를 따라 두께의 감소가 현저히 나타나고 있고, 특히 서측과 남동쪽에서 그 감소가 크게

일어나고 있음을 알 수 있다. 남극의 경우 남서측에서 그 변화가 현저히 나타나고 있다. 그린란드의 전체 해빙 지역은 지난 약 30년간(1979~2009년) 대략 65% 증가하였다(연간 약 2%, 그림 2-11). 현재 그린란드 및 남극의 빙하 손실률은 각각  $-230 \pm 33 \text{ Gt/yr}$ ,  $-143 \pm 73 \text{ Gt/yr}$  로서 이들 감소율은 지구 해수면  $0.6 \text{ mm/yr}$ (1993~2009년:  $0.4 \text{ mm/yr}$ ; 2003~2009년:  $0.6 \text{ mm/yr}$ ) 및  $0.4 \text{ mm/yr}$ (1993~2009년:  $0.3 \text{ mm/yr}$ ; 2003~2009년:  $0.5 \text{ mm/yr}$ )에 해당한다(Khan *et al.*, 2010).



자료: Chao *et al.*(2008)

■ 그림 2-12. 육지의 물 이용도



자료: Church(2010)

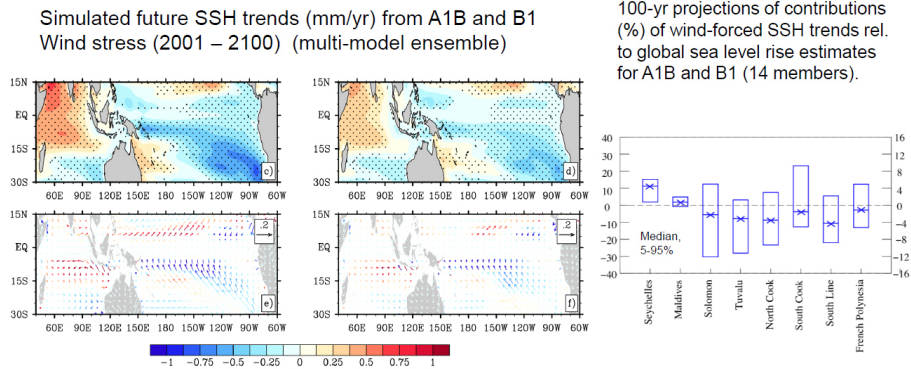
■ 그림 2-13. 해수면 상승 관측치 및 성분별 합계

지구 온난화와 더불어 인간의 물 이용도는 지구 해수면 변화에 영향을 줄 수 있다. 해수면 상승에 영향을 미칠 수 있는 주요 성분으로는 지하수 이용, 댐 건설, 습지 파괴 등을 들 수 있다. 지하수의 경우 자연적인 상태에서는 유입과 유출이 균형을 이루지만 인간의 과도한 지하수 이용으로 지하수 유출이 유입보다 크게 되며 그 잉여 지하수는 최종적으로 해양으로 유입되어 해수면을

상승시키게 된다. 지하수 이용과는 달리 인간의 물 공급을 위한 댐 건설은 해양으로의 육상 물 공급을 감소시키므로 해수면 감소에 기여하게 된다. 인간 사회의 다양한 물 사용 수요를 위한 육상의 물 저장 용량은 꾸준히 증가한 것으로 평가되었다(그림 2-12; Chao *et al.*, 2008). 따라서 이들 성분은 불확실성이 크지만 해수면 감소에 기여하는 것으로 평가되고 있다.

해수면 상승 관측치와 기여 성분별 합계는 공히 해수면 상승의 가속을 보이며, 남극의 기여도가 증가하면서 거의 균형을 이루고 있다(그림 2-13; Church, 2010). 이러한 수치는 1993년 이후 관측치(3.0~3.4mm/yr)와 성분별 기여도(열팽창 1.2mm/yr+육상 빙하 및 빙모 1.0mm/yr+그린란드 및 남극 빙상 1.0mm/yr+물 이용)를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 IPCC AR4와 비교하여 육상의 빙하권에 의한 해수면 상승 기여 정도가 크게 증가한 것으로 평가되고 있으며, 이 같은 추세는 그린란드 및 남극 빙상의 해빙 및 불안정에 의하여 크게 변할 수 있는 것으로 보인다. 더불어 그린란드 및 남극 빙상의 불안정성에 대한 연구는 다양한 이론(해양 빙상 불안정, 조석 빙하 불안정, basal sliding, 표층 질량 균형 불안정 등)에 대한 연구가 진행되고 있으나 아직까지 과학적 불확실성이 매우 높은 부분으로 파악되고 있다.

해수면 변화의 지역적 분포는 해양 과정의 변화, 육상 빙하 및 빙모, 그린란드 및 남극 빙상의 fingerprint 등으로 일정하지 않을 것으로 예상되나 이 분야에 대한 연구는 아직도 부족한 실정이다. 특히 육상 빙하에 대한 모델 개발이 많이 이루어지지 않았으며 검증할 자료도 많지 않은 실정이다. 더불어 빙상의 해수면 상승의 영향을 평가할 때 지역 차원의 해수면 상승에 대한 정보가 지구 평균치에 대한 정보보다 더 중요하다. 지역 해수면은 바람, 해양 순환 변화, 해양의 열 용량 및 담수 유입, 질량 변화 등에 의하여 변한다. 예를 들어 그린란드 해빙에 의하여 유입되는 담수가 지역적인 해수면에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구를 보면 해양의 경압 반응만으로는 수백년의 반응 시간이 걸리지만, 대기와 결합하는 경우 그 반응 시간은 훨씬 줄어든다(Stammer, 2008, 2010).



자료: Timmermann *et al.*(2010)

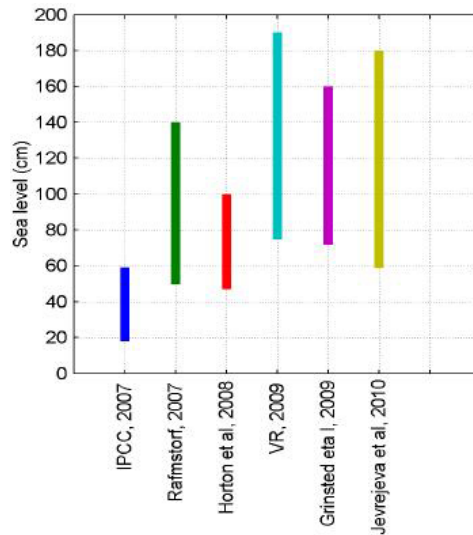
### 그림 2-14. IPCC A1B 및 B1 시나리오에 의한 바람 변화가

지역 해수면 변화에 미치는 영향의 수치 모델 결과

〈그림 2-14〉는 IPCC A1B 및 B1 시나리오에 의한 바람 변화가 지역 해수면 변화에 미치는 영향의 수치 모델 결과를 나타내며(Timmermann *et al.*, 2010), 지역별로 해수면 변화율은 지구 평균치를 상회하는 것을 알 수 있다. 따라서 기후 변화에 의하여 대기-해양 상호작용의 변화도 지역 해수면에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 이들을 종합적으로 고려하여 지역 해수면을 분석하고 예측하는 연구는 현재 활발히 진행되고 있지만 정책 결정을 위한 지역적인 영향 평가에 활용되기 위해서는 상당한 시간이 소요될 것으로 파악된다. 더불어 해수면의 지역적인 분포와 함께 중력장 변화로 인한 지역 해수면에 미치는 영향, 극치 해수면(해일, 파랑, 연변동 등)에 대한 연구도 매우 도전적인 과제로 대두되고 있다.

최근 기후 모델을 이용한 해수면 상승 예측과 관련하여 다양한 불확실성에 대한 대안으로 일종의 통계 모델인 준경험적(semi-empirical) 모델을 통한 연구가 수행되었으며(Jevrejeva *et al.*, 2010 등) 2009년 코펜하겐 기후의회에서는 이들 결과를 보고서에 포함시키고 있다. 이 모델은 과거 및 미래 지구온도 변화와 해수면과의 관계를 단순한 매개변수식으로 표현하고 있다. 해수면 상승 분포는 AR4의 시나리오 및 온도 변화에 따른 해수면 상승을 나타내고 있으며 그 수치는 0.5~2.0m에 달하고 IPCC 예측치를 훨씬 상회하고 있다(0.5~1.4m(Rahmstorf,

2007), 0.75~1.90m(Vermeer & Rahmstorf, 2009), 0.8~2.0m(Pfeffer *et al.*, 2008), 0.8~1.3m(Grinsted *et al.*, 2009), 0.6~1.6m(Jevrejeva *et al.*, 2010), 그림 2-15).



자료: Gregory(2010)

■ 그림 2-15. 준경험적 방법에 의한  
21세기 해수면 상승 예측치

이와 같은 과학적인 문제점에도 불구하고 지역 차원에서 해수면 상승 정보는 연안역의 다양한 사회·경제적 이유로 인하여 매우 중요하다. 여기서는 영국의 사례를 중심으로 해수면 상승의 과학적인 불확실성에 기초한 예측 방안을 소개하고자 한다. 먼저 해수면 상승 예측을 준경험적 방법(Jevrejeva *et al.*, 2010)(이 방법은 지역적인 정보를 제공하지 못함)을 이용하거나 IPCC AR에 의한 물리 모델을 이용하는 방법이 있다. 영국의 경우 후자를 사용하여 지구 평균 해수면 상승에 대한 정보를 습득하고 이들 지구 평균치와 지역 해수면의 차이는 지역 해수면을 산출하는데 적합한 지역 기후 모델을 선정하여 산출하고 있다. 이러한 지역 기후 모델은 다양한 방식으로 지역 해수면의 적정성을 평가하고 있다(Lowe *et al.*, 2010). 영국의 경우 21세기 해수면 시나리오

를 두 개의 수치를 합하여 12~76cm를 도출하였다(여기에는 육상 이동 성분이 제외됨). 실제 연안 영향을 고려할 때 주요한 해수면 효과는 앞에서 산출한 지구 평균 및 지역 해수면보다 해일 및 파랑에 의한 극치 해수면이다. 해수면은 기존의 자료를 활용하는 방법도 있지만 영국에서는 11개의 지구 기후 모델 앙상블 수치를 이용하여 11개의 지역 기후 모델(유럽 지역)을 구동하고 모델에서 나온 높은 주파수의 기상 조건을 가지고 구동한 해일 모델(12km 분해능 및 순압 모델) 결과를 활용하여 지역적인 해수면 시나리오를 산정하고 있다.

이러한 해수면 시나리오 이외에도 가능성이 적지만 해수면 상승의 불확실성, 빙하의 흐름, 고기후대의 해수면 변화 등을 고려하여 21세기 말까지 해수면이 2m 상승할 가능성도 고려하는 H++ 시나리오도 동시에 설정하고 있다. 이 시나리오에는 해일 고도 모델 중 가장 극치의 값을 사용하고 있다. 이들 시나리오의 활용 예로서 영국 환경청에서는 런던의 연안 범람 방제 계획에 활용되고 있다. 이 방제 계획은 불확실성에 의하여 적응적 적응(adaptive adaptation) 과정으로 계획을 수립하며 모델 시나리오 및 H++ 시나리오에 따라 홍수 방제 방안을 구상하였다. 홍수 방제 방안을 이행하는 구체적인 시기는 아직 결정되지 않았으며, over-adaptation 및 under-adaptation으로 인한 비용을 최소화하기 위하여 예측 및 모니터링에 지속적인 개선을 하고 있다.

## 2. 우리나라 주변 현황

우리나라 주변 해역에 대해서도 해수면 상승 현황을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 먼저 국립해양조사원(2009)은 우리나라 해안의 조위 관측 자료와 후빙기 지각 변동 모델(ICE-5G) 및 GPS를 이용한 수직지각 운동을 측정하여 상대 해수면을 산출하였으며(표 2-1), 그 결과를 요약하면 다음과 같다. ICE-5G 모델을 이용하여 우리나라의 후빙기 지각 변동 수치는 38개 조위관측소 평균 +1.2mm/yr로 나타났다. 52개 GPS 관측소를 대상으로 산출한 수직 지각 변동 속도는 +2.4mm/yr를 나타내었다. 상대 해수면의 경우 관측 기간이 10년 이상인 22개 관측소 중 17개를 대상으로 연평균 해면의 선형 분석을 통하여 해수면을 조사한 결과(2008년까지의)

전체 평균 해수면 상승률은 2.2mm/yr를 나타냈고, 지역별로는 서해 1.1mm/yr, 남해 3.2mm/yr, 동해 2.2mm/yr를 나타냈으며, 제주도 부근은 평균 4.9mm/yr의 높은 상승률을 나타내었다. 이 상승률에 지각 변동을 고려하면 3.4mm/yr로서 최근 지구 평균 해수면 상승률과 유사한 수치를 나타내고 있다.

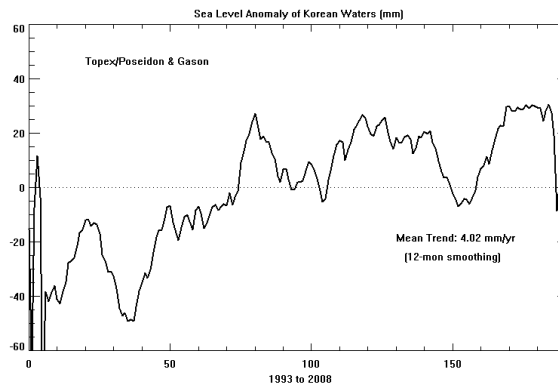
■ 표 2-1. 해역별 지각 변동 속도 및 해수면 상승률

해역	조위 관측소	상대 해수면 상승률 (RSLR) (mm/yr)	수직 지각 변동 속도				절대 해수면 상승률 (ASLR)
			GPS (mm/yr)	GIA (mm/yr)	RSLR+GPS (mm/yr)	RSLR+GIA (mm/yr)	RSLR +(GPS-GIA) (mm/yr)
서해	안흥	1.3	2.2	1.3	3.5	2.6	2.2
	군산	1.3	1.8	1.3	3.1	2.6	1.8
	목포	1.2	3.0	1.2	4.2	2.4	3.0
	대흑산도	0.5	2.9	1.1	3.4	1.6	2.3
	평균	1.1	2.5	1.2	3.6	2.3	2.4
남해	완도	1.1	2.1	1.1	3.2	2.2	2.1
	여수	1.6	1.8	1.2	3.4	2.8	2.2
	통영	1.6	1.9	1.2	3.5	2.8	2.3
	가덕도	2.2	2.1	1.2	4.3	3.4	3.1
	부산	2.3	2.0	1.2	4.3	3.5	3.1
	평균	1.8(3.2)	2.0(2.1)	1.2(1.1)	3.7(5.3)	2.9(4.3)	2.6(4.2)
제주 부근	추자도	1.9	2.4	1.1	4.3	3.0	3.2
	제주	6.0	1.9	1.0	7.9	7.0	6.9
	서귀포	5.8	2.5	1.0	8.3	6.8	7.3
	거문도	6.0	2.2	1.1	8.2	7.1	7.1
	평균	4.9	2.3	1.1	7.2	6.0	6.1
동해	포항	2.2	2.6	1.2	4.8	3.4	3.6
	묵호	2.1	2.1	1.2	4.2	3.3	3.0
	속초	2.4	1.7	1.3	4.1	3.7	2.8
	울릉도	2.2	4.0	1.1	6.2	3.3	5.1
	평균	2.2	2.6	1.2	4.8	3.4	3.6
전체 평균		2.2	2.4	1.2	4.6	3.4	3.4

자료: 국립해양조사원(2009)

(주) ( ): 제주 부근을 포함한 남해 해수면 상승률

위성고도계를 통한 우리나라 주변 연구로는 조광우 등(2001, 2009), Kang *et al.*(2008), 국립해양조사원(2009) 등의 연구가 있다. 이러한 연구 결과들의 해수면 상승률은 4.02~5.40mm/yr로 보고하고 있으며 계산에 사용된 관측기간에 따라 그 값이 차이가 나고 있다. 조광우 등(2009)은 우리나라 주변 해역의 해수면 변화를 산출하기 위하여 경도 115°E~145°E, 위도 32°N~50°N 지역에 대한 위성고도계 자료를 분석한 결과, 우리나라 해수면 상승률은 평균 4.02 mm/yr로 지구 평균 3.16mm/yr 보다 높게 나타난 것으로 보고하였다(그림 2-16). 해역별 상승률은 동해 3.86mm/yr, 서해 4.18mm/yr, 남해 4.66mm/yr로 남해안이 상대적으로 높게 나타나고 있다.

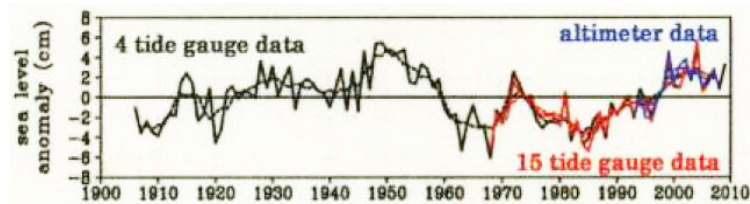


자료: 조광우 등(2009)

■ 그림 2-16. Topex/Poseidon 및 Jason 위성고도계 자료를 이용한 한반도 주변 해수면 상승 경향(1993-2008년 자료)

위도별 해수면 상승률의 평균을 보면 우리나라 해수면 상승은 남측에서 해수면 상승률이 상대적으로 크며 위도가 증가할수록 상승률이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 공간적인 특성은 해양 열팽창의 경우 온도가 높은 지역일수록 체적 팽창 정도가 크게 나타나는 점과 쿠로시오의 영향을 받는 남측 해역에서 와동 에너지(Eddy Energy)가 크게 나타나(조광우 등, 2002) 연직 대류가 상대적으로 크게 나타나는 특성을 반영하는 것으로 가정할 수 있다. 위와 같은 해수면 변화와 지구 온난화와의 직접적인 상관관계를 설명하기 위해서는 장기 해양 자료와 상세한 비교·

검토가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다. Kang *et al.*(2008)에 의하면 이 상승률은 해양의 열팽창과 밀접한 관련이 있음을 보고였다.



자료: Yasuda & Sakurai(2006)

■ 그림 2-17. 일본 주변 해역의 장기 해수면 변동

그러나 이와 같은 연구는 상당히 단기간의 자료를 활용한 연구로서 그 변화를 지구 온난화에 의한 해수면 상승과 직접적으로 연관시키는 데에는 조심스러운 접근이 필요하다. 우리나라와 유사한 북서태평양 순환계의 영향을 받는 일본 해안의 해수면 상승에 대한 장기 연구(Yasuda & Sakurai, 2006; Yasuda *et al.*, 2010)는 이와 같은 점을 지적할 수 있다. <그림 2-17>은 일본 주변 해역의 장기 해수면 변동을 보여주는 그림이다. 이 그림에서 두 개의 수 십년 변동이 뚜렷하게 나타나고 있으며 20세기 동안 뚜렷한 해수면 상승 경향은 나타나지 않고 있다. 우리나라 자료의 경우 대부분 1980년대 이후 자료(위성고도계의 경우 1993년 이후)를 사용하고 있어 상승 모드 기간만을 나타낼 수 있다. 이러한 연구는 수치 실험을 통하여 이와 같은 변화의 상당 부분이 북태평양의 바람장의 변화에 기인하는 것으로 설명하고 있으며, 그 중 최근 20년간은 열팽창에도 주요 성분인 것으로 분석하고 있고, 연구 결과는 우리나라 주변 해역의 해수면 상승률도 자연적인 성분 이외에도 기후 변화에 의한 바람장의 변화도 영향을 미칠 수 있음을 간접적으로 제시하고 있다.



## 제3장

주요 국가의 해수면 상승 취약성  
평가 현황

해안은 기후 변화의 가장 취약한 지대로 평가된 이후(IPCC, 2001, 2007) 해안을 가지고 있는 국가들은 자국 해안의 자연적 및 사회·경제적 지속성을 유지하기 위하여 국가 차원의 취약성 평가 작업과 대응 전략을 수립하고 있다. 현재 해수면 상승의 취약성은 열대 섬 국가를 통하여 일차적으로 나타나고 있지만 본 연구에서는 주요 선진국을 대상으로 사례 국가를 선정하였다(표 3-1). 이들 선진 국가들은 해안의 관리 정책이 지속성 관점에서 성공적인 나라들이며(일본 제외), 본 연구에서 이들 국가들의 연안에 대한 영향 평가 현황 및 적응 전략을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 중앙 정부 차원의 노력에 대한 사례 조사에 한정하여 조사하였다. 그러나 기후 변화 적응은 주로 지역 차원에서 이루어지는 점을 감안할 때 지자체의 기후 변화 영향 및 적응 전략에 대한 현황과 중앙 정부의 정책 등과 연계 전략 등에 대한 조사도 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

■ 표 3-1. 주요 국가 및 우리나라 해수면 상승 취약성 평가 현황

국가	평가 기관	제목
미국	U.S. Climate Change Science Program(2009)	Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: Focus on the Mid-Atlantic Region
호주	Department of Climate Change(2009)	Climate Change Risk to Australia' Coast: National Assessment
네덜란드	Deltacommissie(2008)	Working with together with water: Living land builds for its future
일본	NIES S4 Project(2009)	S-4 Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts. : Estimation of inundation damage caused by global warming in three major bays and western parts of Japan
우리 나라	한국환경정책·평가연구원(2002)	지구 온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구(II) (조광우 등, 2002)
	충남발전연구소(2008)	서해안 해수면 상승에 따른 영향 및 대책
	환경부(2009)	우리나라 기후 변화의 경제학적 분석( I )
	김장수·장동호(2010)	침수 취약성 평가: 안면도 바람아래 조건대 지역을 사례로 (한국지형학회지, 17(2), pp.29-39)

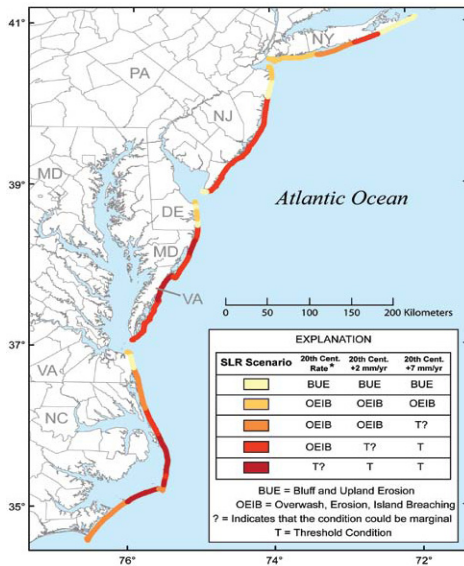
## 1. 미 국

미국은 주정부 중심의 분권 국가이다. 해양과 관련하여 중앙 정부 및 지역 정부의 역할이 다르며 관할 범위도 다르나 완전히 지방 정부를 중심으로 모든 일이 이루어지는 구조는 아니다. 예를 들어 지자체 연안 관리를 위한 연안역통합관리(CZM)의 주체는 지자체이지만 예산의 일정 부분은 중앙 정부에서 지원하고 있어 중앙 정부의 정책과 연계가 필요하다. 기후 변화 과학 및 영향에 대해서도 중앙 정부의 통합적 노력의 필요성에 따라 대통령 및 의회 중심의 미국기후변화프로그램(U.S. Climate Change Science Program: USCCSP)이 있으며 이 프로그램의 일환으로 기후 변화 영향 등에 대한 종합 및 평가(Synthesis & Assessment) 작업을 지속적으로 수행하고 있으며 2010년 관련 보고서가 출간되었다. 해수면 상승과 관련한 평가보고서도 위와 같은 작업의 일환으로 수행되어 2009년에 보고서(USCCSP Synthesis & Assessment Product 4.1)가 출간되었다. 이 보고서는 미국의 사회·경제적 활동이 집중된 대서양 중부 연안을 중심으로 해안의 자연환경을 진단하고, 해수면 상승이 연안 환경, 습지, 취약종, 사회에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 평가하였다. 더불어 해수면 상승에 민감한 정책, 적응 기회, 적응을 위한 제도적 장애물 등에 대한 평가를 통하여 전 미국 해안을 대상으로 정책 방향을 제시하고 있다. 주요 영향 평가 결과를 소개하면 아래와 같다.

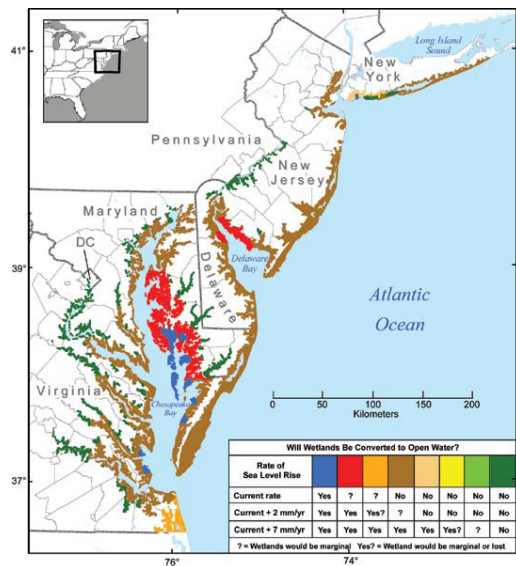
미국은 New York에서 North Carolina까지 미국 동부 연안 지역에서의 검조기(tide-gauge) 관측을 통해 상대적인 해수면 상승률(지구적 해수면 상승과 육지 침강의 결합)을 측정하였으며, 그 범위는 일반적으로 연간 2.4~4.4mm 사이로(20세기 동안 약 0.3m 상승) 지구 평균보다 더 높게 상승한 것으로 나타났다. 해안 지역의 취약성은 이동성이 적은 건물, 도로, 기타 사회 기반 시설 등을 포함하는 해안 지역 개발로 인해 커지고 있으며 가속화되고 있다. 가속화되는 해수면 상승률에 대한 취약성은 해안을 따라 높은 인구 밀도, 기후 변화의 다른 영향의 가능성, 가뭄, 침입종과 같은 환경적 스트레스와 폭풍에 대한 해안 지역의 민감성을 포함하여 누적적으로 나타난다.

미국은 전국적으로 해안 침식이 해수면 상승과 유사하게 증가할 것으로 예측되는데, 정확한

방식과 비율은 해안 지형의 특성과 자연적 과정에 따라 다르게 나타날 것으로 예상된다. 특히 전체 미국 동부 연안 지역을 구성하고 있는 모래 해변에서 헤드랜드, 콧(串), 보초도(堡礁島)는 미래의 해수면 상승에 대응하여 빠른 속도로 침식될 것이 확실시된다. 연간 2~7mm의 해수면 상승률 가속화에 대해 이 지역의 일부 보초도는 빠른 이주나 분할이 일어나는 임계치를 넘을 것으로 예상된다. 최근 기름 누출 사고를 경험하고 있는 루이지애나의 미시시피 하구 삼각주와 메릴랜드 Blackwater River 습지(marsh) 등 미국 연안 습지는 이미 상대적인 해수면 상승으로 인해 물속으로 잠긴 경험이 있고, 이는 높은 습지 손실 비율과 관련된다.



3개의 해수면 상승 시나리오에 대한 잠재적 미국 동부 해안 지형 반응(mm/yr)  
 자료: USGS(<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/cvi/>)



3가지 해수면 상승 시나리오 하에, 습지 지역은 감소하거나 손실될 것임(mm/yr).  
 자료: USGS(<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/cvi/>)

■ 그림 3-1. 해수면 상승에 대한 미국 동부 연안 지형의 잠재적 반응

■ 그림 3-2. 미국 동부 연안 지역의 잠재적 습지 잔존

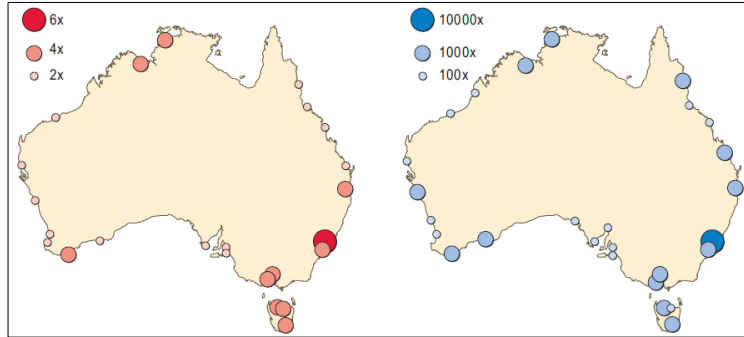
미국 동부 연안 지역에서 연간 2mm의 해수면 상승이 가속화되면 많은 습지가 스트레스를 받게

되고, 연간 7mm의 해수면 상승이 가속화되면 대부분의 습지는 존속하지 못하게 된다. 습지는 내륙의 저지대로 확장될 것이고, 기존 습지가 해수면 상승 속도를 따라가지 못하면, 미국 동부 연안의 습지 지역 전체는 손실될 것이다. 홍수 조절 능력, 폭풍 해일에 대한 완충지대로서의 역할, 수질 보호, 서식지로서의 역할 등을 수행하는 습지의 생태적 기능이 해수면 상승과 관련하여 손실되면, 2005년에 발생한 허리케인 카트리나와 관련된 폭풍 해일에서 보여준 것과 같이 중요한 사회적 결과를 낳게 된다.

## 2. 호 주

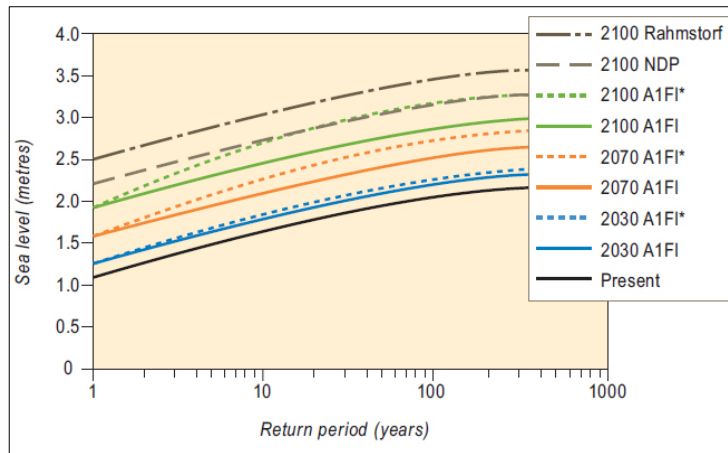
호주는 기후 변화에 조직적 대응을 위한 독립부서를 갖추고 있는 나라로서 기후 변화 및 에너지 효율부(Department of Climate Change and Energy Efficiency)가 설립되어 있다. 에너지효율부는 기후 변화 감축 및 적응 등을 총괄하고 있으며 2007년 설립된 기후 변화부(Department of Climate Change)에서 확대·개편되었다. 기후 변화 적응과 관련된 조직으로 국가 적응 정책을 개발하는 National Climate Change Adaptation Framework와 기후 변화 적응 연구를 조정하는 National Climate Change Adaptation Research Facility(NCCARF)로 구성되어 있다. 본 연구에서는 호주의 기후 변화부에서 최초로 수행된 국가 해안선 취약성 평가(2009년) 연구 결과를 분석하였다.

인구의 약 85%가 현재 해안 지역에 거주하고 있는 호주에서는 해수면 상승으로 앞으로 십년 내에 호주 해안 지대에 중요한 변화를 가져올 것으로 예측한다. 먼저 해안의 사회·경제적 활동의 기준이 되는 해수면 빈도 분포와 관련하여 21세기에 0.5m의 중간급의 해수면 상승이 이루어지는 경우 현재 10년마다 일어나는 사건들이 2100년에는 대략 10일마다 일어날 것이고, 현재 100년에 1회 발생하는 사건은 1년에 수차례 발생할 것이다. 주로 시드니 주변 지역과, 애들레이드와 호주의 서부 해안 지대를 따라 높은 해수면 상승 이벤트의 빈도 증가가 훨씬 클 것으로 예측하고 있다. 100년에 1번 일어나는 사건은 현재 극단적인 위험을 평가하기 위한 기준으로, 가이드라인을 계획하는 데 이용된다.



자료: Australian Government Department of Climate Change(2009)

■ 그림 3-3. 해수면 상승(0.1m, 0.5m)에 따른 극치 해수면 빈도 분포 변화

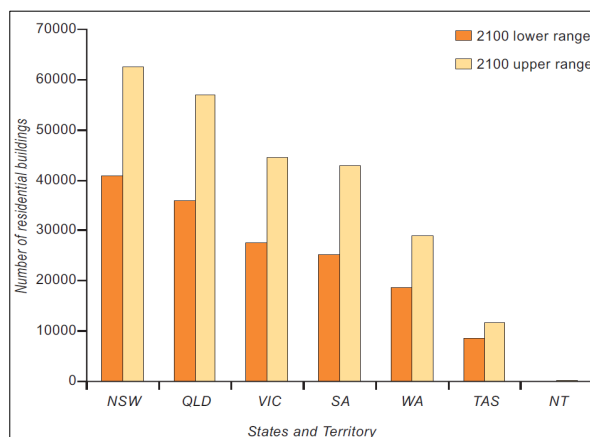


자료: Australian Government Department of Climate Change(2009)

■ 그림 3-4. Stony Point 지역의 해수면 상승 시나리오별 해일고 빈도 분포 변화

해안 범람 평가를 위한 호주의 평가 작업은 침식과 범람을 함께 고려하고 있다. 해안선의 안정도와 관련하여 최근 수십년에 걸쳐 호주의 많은 해안들은 충분한 퇴적물 공급으로 인해 안정되거나 훨씬 확장되어 왔다. 해수면 상승은 이러한 원동력을 변화시키는데, 안정되거나 확장된 해변이

상승하는 해수면에 직면하여 언제 후퇴하는 해변으로 바뀔 것인가 하는 것이 중요하다. 이것이 해안 관리에 있어서 핵심 임계치이다. 기후 변화와 함께 일부 해안은 이번 세기 동안, 수백 m 감소할 수도 있다. 이 첫 번째 단계의 국가 해안 평가는 취약한 연안 국가인 호주의 문제의 규모를 강조하기 위해서 기존 정보와 새로운 정보를 합쳐서 평가하고 있다. 이들 평가는 호주 해안선 주변의 침식과 범람으로부터 위험한 거주 지역 분석을 제공하는데, 이 평가에서 사용된 모델링에는 제약이 있다. 즉, 'bucket fill' 접근법이 범람을 평가하는 데 사용되었다. 이는 기본적으로 잔잔한 표면을 가정하고, 지역적 수문학적 프로세스에 대한 모델을 시도하지 않는 것을 가정한다. 100년에 1번 일어나는 이벤트에 대한 범람 위험(최상위 해수면 상승에 대해)은 호주의 연방과학 산업연구기구(CSIRO)의 폭풍 조수 데이터에 기초하여 Victoria, New South Wales, Tasmania에 대해 평가하였고, New South Wales, Victoria, Tasmania에 대한 평가가 다른 주보다 더욱 극단적인 이벤트로부터 범람이 확인되었다. 이들 모델링의 한계가 인정됨에도 불구하고, 분석은 현재의 광범위한 위험을 나타냈다. 주거지, 사회·경제적 사회공공기반시설은 범람과 피해의 위험에 노출된다. 최고 630억\$의 기존 주거 건물의 잠재적인 범람 위험이 1.1m 해수면 상승으로부터 있고, 157,000~247,600 사이의 개별 건물에 대한 높고 낮은 위험 평가가 있었다(그림 3-5).



자료: Australian Government Department of Climate Change(2009)

■ 그림 3-5. 1m의 해수면 상승으로부터의 범람 위험에 있는 기존 주거 건물의 추산

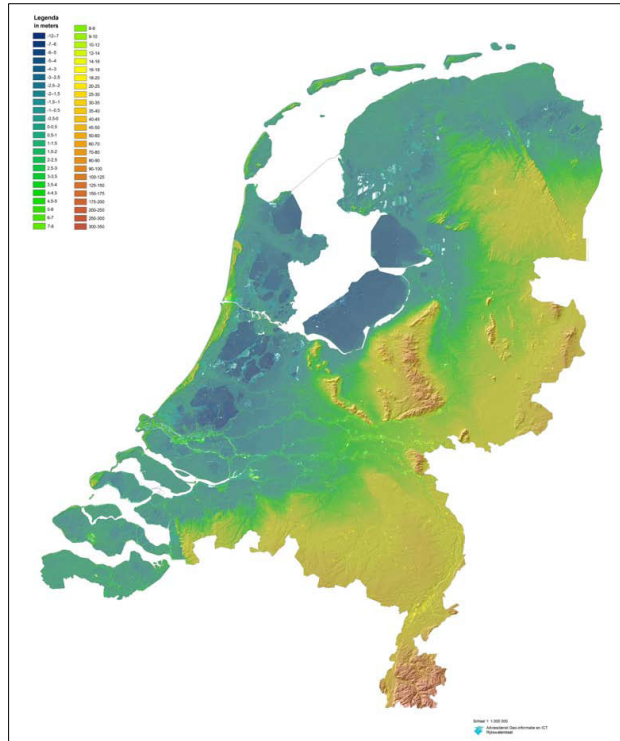
### 3. 네덜란드

네덜란드는 국토의 상당 부분이 해수면 아래에 있으며 네덜란드의 역사가 물과의 투쟁의 역사라고 하여도 과언이 아니다(그림 3-6). 따라서 해수면 상승 및 기후 변화가 네덜란드 국토에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있으며 이들 영향에 대한 네덜란드의 반응은 매우 민감하다고 할 수 있다. 이와 같은 중요성을 감안하여 네덜란드는 국회 차원의 위원회(Delta Committee)를 구성하여 국가 차원의 영향 평가를 실시하고 대응 전략을 수립하였다(Deltacommissie, 2008). 정부는 이 위원회를 통하여 기후 변화에 대응하여 해안 및 저지대를 어떻게 방어할 것인가에 대한 권고안을 요청하고 있다. 여기서 대응(coping)이 아니라 방어(how to protect) 전략에 대한 권고 사항을 요청하고 있는 점은 매우 흥미롭다.

이 요청 사항은 기후 변화 시대에 네덜란드를 장기적으로 연안 범람 및 홍수에 안전한 국가(climate-proof)를 만들 수 있는가에 대한 것으로 해석된다. 이들 위원회는 정부의 요청 사항과 관련하여 당면한 문제는 단지 홍수 방지보다는 그 이상의 것들과 연관되어 있으며, 따라서 Delta 위원회의 비전은 삶과 일, 농업, 자연, 레크리에이션, 경관, 사회 기반 시설과 에너지 등의 상호 작용을 포괄한다. 미래 세기를 위한 전략(계획)은 홍수 방지와 지속 가능성이라는 2개의 기둥에 달려 있다.

먼저 물 안보와 관련하여 홍수 방지와 안전한 민물(담수) 공급을 공히 포함한다. 물 안보를 달성하는 것은 네덜란드의 경제, 경관, 자연, 문화와 명성에 대한 피해를 방어하는 동시에 피해자(사상자)와 사회적 분열을 방지한다. 홍수 방지의 수준은 현재 수준에 대하여 최소한 10배 정도 증가되어야 한다. 지속 가능성을 위한 기회와 관련하여 위원회의 권고는 기후 변화와 생태적 프로세스를 함께하는 개발에 주안점을 둔다. 따라서, 그것들은 비용 효율이 높고 사회를 위해 추가적인 가치를 생산한다. 권고된 조치(정책)는 유연하고, 서서히 시행될 수 있으며, 단기간에 행동을 위한 예상(전망)을 제공한다. 그것들의 실행은 네덜란드가 보다 기후 변화의 영향에 적응하고 새로운 기회들을 만들 수 있도록 해준다. 권고는 지속 가능하도록 만들어졌다. 그것들의 실행은 물과 에너지와 다른 자원의 효율적인 이용을 만들어야 하는데, 이는 환경의 질이 그저

유지되지 않고 그렇다고 향상되지도 않기 때문이다.



자료: Deltacommissie(2008)

■ 그림 3-6. 네덜란드 국토의 고도별 분포

Delta 위원회는 기후 변화에 안전한 국가를 위한 권고 사항을 이행하기 위한 Delta 프로그램을 만들었으며, 이 프로그램은 재정적, 정치적, 행정적으로 새로운 Delta 법에 포함된다. 더불어 이들 권고의 실행은 긴급한 문제이다. 네덜란드는 그에 대한 노력을 가속화해야 한다. 왜냐하면 현재, 홍수 보호의 현재 기준조차 어디나 충족되지 않는다. 더욱이, 현재 기준은 뒤떨어져 있고, 제기되어야 하며, 기후는 빠르게 변화하고 있고, 해수면은 아마도 예측되었던 것보다 빠르게 상승하며, 강의 유출에 있어서 더욱 극단적인 변화가 예상된다. 네덜란드에서 경제적, 사회적, 그리고

자연적(물리적) 이해관계는 매우 크고 여전히 커지고 있다. 제방 내의 해안은 국가 전체에 대해 심각하게 파괴적인 결과를 가져온다. Delta 위원회는 2100년까지 0.65~1.3m, 2200년까지 2~4m의 지역적 해수면 상승이 고려되어야 한다고 결론 내렸다. 이는 육지 침강의 효과를 포함하고 있으며, 이들의 값은 최신의 과학적 통찰력에 기초한 타당성 있는 상한선을 의미한다.

온도 상승과 변화된 강수 패턴으로 인해서 Rhine(라인)과 Meuse(뫼즈)에 대한 여름 유출은 감소할 것이고, 겨울 유출은 증가할 것이다. 대략 2100년의 Rhine와 Meuse의 최대 (design)유출은 각각 약 18,000m<sup>3</sup>/s와 4,600m<sup>3</sup>/s가 될 것으로 보인다. 현재 (design)유출은 16,000m<sup>3</sup>/s와 3,800m<sup>3</sup>/s이다. 상승하는 해수면, 여름에 감소된 강 유출, 강과 지하수를 통한 염수 침입은 국가의 식수 공급, 농업, 해운 등 생각이나 그 반대에 대해 물에 의존하는 경제 부문에 모든 압력을 준다.

Delta 위원회는 현재 권고 사항의 부분을 형성하는 다수의 경향에 대한 과학적 충고를 모색하였다. 요약하면, 이들은 홍수 방제와 물 관리에 대한 IPCC와 네덜란드 전문가를 포함하는 국가 및 국제 전문가 그룹의 연구 결과이다. 이 전문가 그룹은 기후 시나리오에 대한 최신의 통찰력을 보충했고, 극단 값의 새로운 평가를 내놓는다. 2050년까지 Delta 프로그램의 이행은 연간 12억~16억 유로, 그리고 2050~2100년 기간까지 연간 9억~15억 유로의 비용을 포함한다. Delta 프로그램에서 해안 홍수 보호는 주로 양빈에 의해 달성된다. 만약 이 방법이 강화되면, 네덜란드 해안의 성장은 바다 쪽으로 1km 전진하게 되고, 따라서 새로운 육지가 만들어지며, 레크리에이션과 자연과 같은 여러 기능을 위해 연간 1억~3억 유로의 추가적인 비용을 포함할 것이다.

Delta 위원회는 2100년까지 그리고 그 이후의 미래를 위한 통합된 비전을 개발했다. 이와 같이 장기간의 비전은 국가적, 유럽과 지구적 개발에 의존한다. 단·중기를 위한 구체적인 권고는 만들어져야 하지만 홍수 방제의 수준을 높이고 안전한 담수를 공급하는데 있어서, 현재 직접적인 행동이 요구된다. Delta 위원회는 단기와 중기에 대한 12개 권고 사항을 공식화했다.

이들 권고 사항 중 1-3은 홍수 방어 기준, 도시 개발 계획, 방조제 외부 지역에 대한 것이며, '권고 사항 4-11'은 지역별(그림 3-7) 권고 사항을 나타내며, '권고 사항 12'는 정치-행정, 법률,

재정적인 내용을 포함한다.

표 3-2. 네덜란드 부가가치세를 포함한 2007년 수준에서의 유로 금액

Indicatie extra annual costs [billions of euros]	Period		Average
	2010-2050	2050-2100	2010-2100
Deltaprogramme	1,2 to 1,6	0,9 to 1,5	1,0 to 1,5
Deltaprogramme, with additional coastal space for other functions	1,3 to 1,9	1,2 to 1,8	1,2 to 1,8

자료: Deltacommissie(2008)

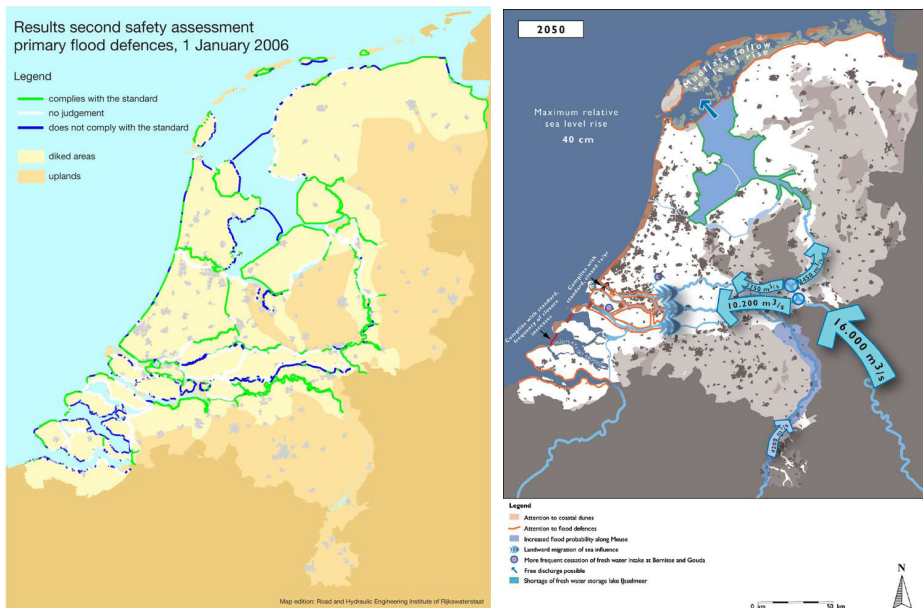


자료: Deltacommissie(2008)

그림 3-7. Delta 위원회의 지역 구분

먼저 홍수 방제 기준과 관련하여 기존 방제 시설에 대한 평가 및 2050년까지 방조제 및 제방 높이의 증고를 제시하며, 이들 기준은 2013년까지 새로운 기준을 만들 것을 권고하고 있다. 2050

년 이후에는 이들 기준을 주기적으로 갱신토록 하고 있다. ‘권고 사항 2’에서 저지대 신도시 개발 계획은 비용편익 분석을 거친 후 정책 결정이 이루어지도록 하며, 비용은 현재 및 미래 비용을 공히 포함하도록 하고 있다. 이들 비용은 오염자 부담 원칙(PPP)과 유사하게 이해당사자가 아닌 사회나 정부에 전가하지 말아야 한다. 하천 제방 외부 지역의 개발(권고 사항 3)과 관련하여 개발이 하천의 배수 능력 및 미래의 하천 수위를 저해하지 않도록 하고 있다. 더불어 이곳 개발자들은 스스로 위험에 대처할 책임을 명시하고 있으며 정부는 관련 정보 제공, 기준 설정 및 홍수 경보 등의 역할을 담당토록 하고 있다. 지역별 권고 사항은 지역별 특성에 따라 다르게 이루어지고 있는데, 해안의 경우에도 지역별로 다르게 권고하고 있으나 기본적으로 해안의 기능과 조화시키는 전략(Build with nature)을 취하고 있다. 가장 중요한 전략은 양빈(Beach Nourishment)을 통해 해안을 보호하고 해안의 생태적 기능을 취한다는 점으로서 이는 네덜란드의 오랜 해안 보호 정책과 일치하고 있다. 이러한 면은 해안 적응책의 선택을 기존 경험을 통하여 습득하고 기후 변화 시대에 활용한다는 점에서 좋은 본보기라 할 수 있다.



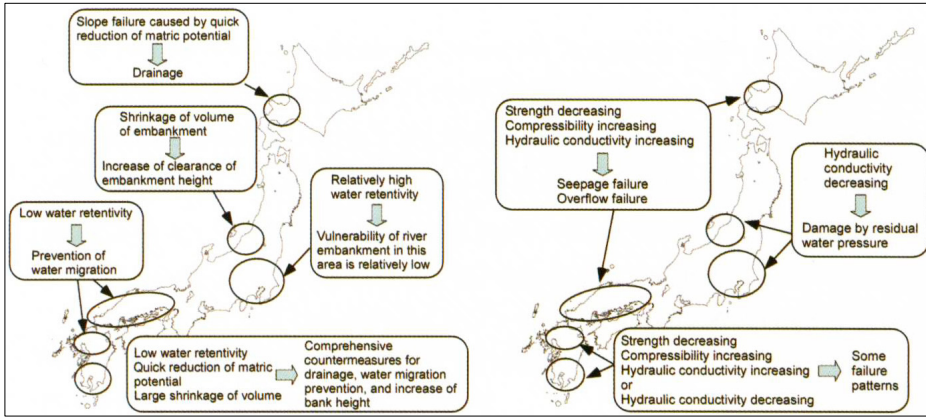
자료: Deltacommissie(2008)

■ 그림 3-8. 현재의 각종 방제 시설 기준과 해수면 상승(2050년)에 따른 하천 배수율 변화

## 4. 일본

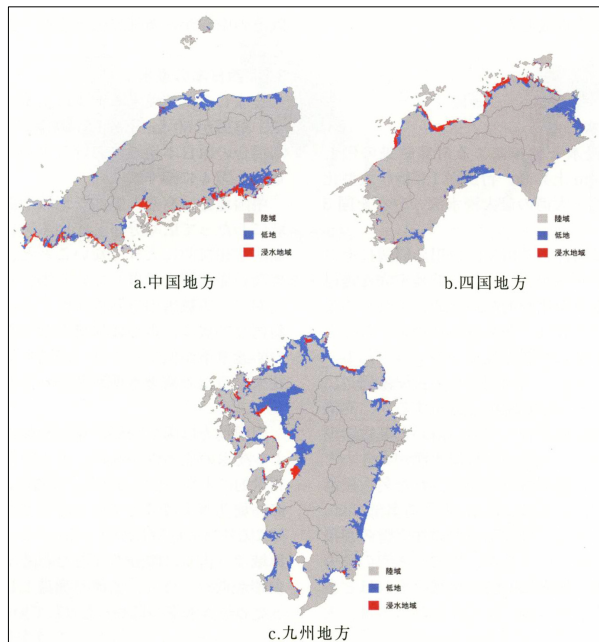
일본의 경우 중앙 정부 차원의 기후 변화 대응은 총리실 산하 대책 위원회와 각 부처별 관련 위원회를 통하여 중앙 정부의 기후 변화 대응 전략을 수립한다. 기후 변화 영향 및 적응과 관련된 연구는 환경부를 중심으로 이루어지고 있으며, '기후 변화 영향 및 적응 연구에 관한 위원회'를 통하여 일본 정부의 적응 전략(wise adaptation)을 수립하고 있다(2008). 더불어 2005~2009년까지 기후 변화가 수자원, 건강, 농업, 산업 및 연안역에 미치는 영향을 물리적 및 사회·경제적으로 평가하는 작업을 수행하였다. 이 작업이 완료되는 2010년에는 S-8 프로젝트를 출발시켜 기후 변화 영향을 주기적으로 평가하고 그 결과를 통하여 국가 전략을 수립하는 체제를 갖추고 있다. 이와 같은 국가 차원의 영향 평가 및 '적응 전략 4'는 상당히 오랜 기간 동안 수행되어 왔으며 시간이 경과할수록 정보가 축적되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이들 S-4 계획의 평가 작업 중 연안역 부분에 대한 평가를 요약하고자 하였다. 연안역 부분에 대한 주요 평가는 해수면 상승 태풍 강도 변화에 따른 범람 영향 평가, 모래 사장의 침식에 따른 경제적 가치 손실, 해수면 상승에 따른 지하수 염분 침투에 발생하는 액상화 문제 등을 포함하고 있다.

먼저 하천의 경우 해수면 상승에 의하여 해수가 상류 쪽으로 침입하는 거리가 증가하게 된다. 하천으로의 염수 침투 증가는 다양한 문제를 유발할 수 있으며 그 중에서도 하천 제방의 안정도에 미치는 영향을 평가하였다(그림 3-9). 본 평가에서 하천 제방에 사용하는 재질을 현장 조사를 토대로 9개로 설정하여 해수 침투가 이들 재질에 미치는 영향 및 대응책을 평가하였다. 해수면 상승 영향은 모든 지역에서 나타나고 있으며 취약성의 영향 및 대응책은 지역에 따라 다르다(그림 3-9).



자료: Komine(2007a, b)

그림 3-9. 해수면 상승에 따른 염수 침투로 인한 하천 제방 취약성 및 대책 지도

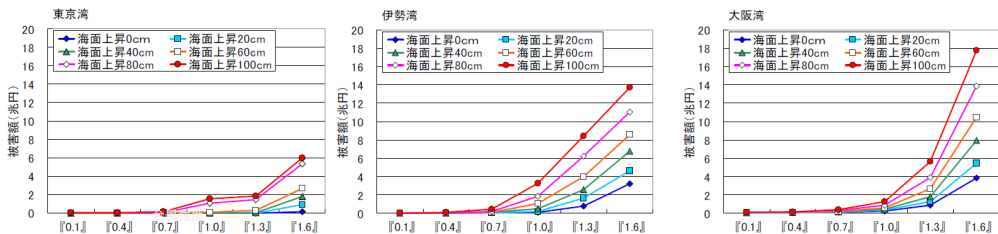


자료: NIES S4 Project(2009)

그림 3-10. 일본 서부 지역의 고조 침수 지역 (해면 상승 60cm, 해일 1.3배 시)

지역 및 지구 온난화로 인한 해수면 상승과 폭풍 해일의 강화는 연안 범람에 취약한 지역과 취약 인구를 증가시키게 된다. 일본의 경우, 연안 범람과 관련된 피해 변화 예측을 일본 서부의 Chugoku, Shikoku, Kyushu 지역, 그리고 일본의 주요 내만인 Tokyo만, Ise만, Osaka만 지역을 대상으로 예측 평가하였다(그림 3-10). 지형과 제방 등의 해안 보호 시설에 대한 정보와 공간 모델을 이용하여 해수면의 변화와 월파(overtopping), 내륙으로의 범람 계산을 기반으로 예측하였고, 그 결과 범람 위험이 특히 높은 지역으로는 반폐쇄된 해안 지역과 예전에 매립이 이루어진 일본의 3군데 주요 만 내부와 경계를 이루는 육지 지역으로 나타났다.

폭풍 해일에 의해 홍수 범람 위험 지역의 면적은 2000년에 20,000ha에서 2030년 29,000ha, 2100년 58,000ha까지 증가할 것이고, 범람에 의해 영향을 받는 인구는 각각 29만명, 52만명, 137만명까지 증가할 것이다. 이들 범람 지역의 경제적 피해액은 <그림 3-11>과 같다.

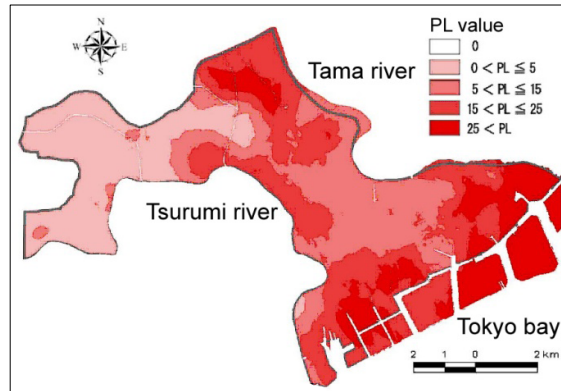


자료: Suzuki(2009)

■ 그림 3-11. 해수면 상승 및 태풍 강도 변화(0.1-1.6배)에 따른 경제적 손실

또한 상승하는 해수면과 극심한 경우는 지하수면을 상승시키고, 지진이 발생했을 때 액상화 대상 지역을 확대시킬 것이다. 이에 대한 연구는 Tsurumi와 Tama 강 사이에 있는 Kawasaki와 Yokohama 지역을 대상으로 이루어졌다(그림 3-12). Ground structure modeling은 대상 지역에 대해 지질 공학과 지질 정보 데이터베이스를 이용하여 수행되었다. 해수면 상승과 다른 기후 변화 영향을 수반하는 해안 지역에서 지하수면의 상승은 유한요소법(finite element method)과 함께 2-D unconfined groundwater(불피압 지하수) flow analysis를 이용하여

분석하였다. 그리고, 액상화에서의 변화가 평가되었다. 해수면 상승과 강우 강도와 빈도의 변이는 해안뿐만 아니라, 하천 연안 지역까지 확장되어 예상된 높은 액상화 위험 지역에서 커질 것으로 나타났다.

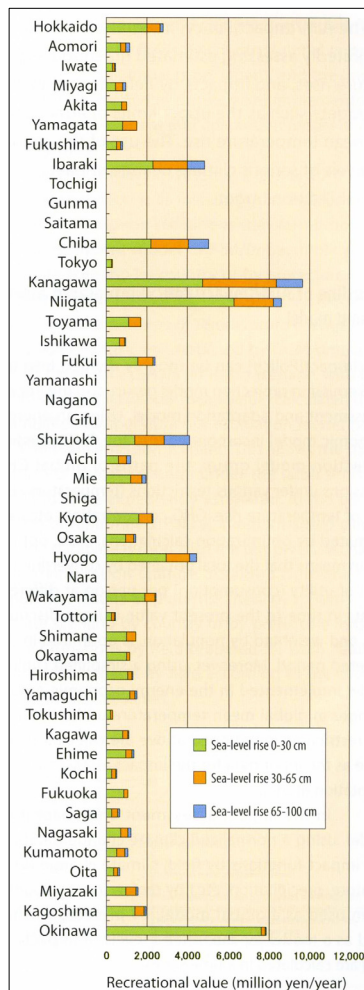


자료: Murakami *et al.*(2005)

■ 그림 3-12. 해수면 상승과 강우 변화를 고려한 액상화  
재해 지도(2081-2100년)

지구 온난화로 인한 30cm, 65cm, 100cm의 해수면 상승에 의해 손실된 모래 해안의 가치를 평가한 사례가 있다. 여행비용법(travel cost method; TCM)을 이용하여 모래 해안의 레크리에이션적 가치를 측정하였는데, 이는 현(prefecture)에 의해 해수면 상승으로 인한 모래 해안의 손실을 방지하기 위하여 측정 비용 효과를 연구할 때 요구된 화폐 평가의 기본 단위를 계산하기 위해서 측정되었다. 그 결과, 모래 해안 1회 방문의 가치는 2,179엔으로, 일본 전체에 대해서 92.2십억 엔/year에 달한다. 이 가치를 연간 4%의 사회적 할인율을 적용하여 현재 가치로 전환하면 전국적인 모래 해안의 레크리에이션적 가치는 2,304.6십억엔이 된다. 일본 각 현에 대한 모래 해안의 최대 경제적 가치는 가나가와 현(Kanagawa)이 9.6십억엔/year(현재 가치:240십억엔)으로 가장 높고, 다음으로 니가타 현(Niigata) 8.7십억엔/year(217.4십억엔), 오키나와 현

(Okinawa) 7.87십억엔/year(196.7십억엔) 순으로 나타났고, 이는 모래 해안의 연간 이용자 수와 정비비례한다(그림 3-13). 일본에서 모래 해안의 총 면적이 191km<sup>2</sup>인 이후로, 단위 면적당 모래 해안의 레크리에이션적 가치는 12,058엔/m<sup>2</sup>인데, 이 수치는 화폐 평가의 기본 단위 역할을 한다. 향후 과제로는 모래 해안의 레크리에이션적 조건 뿐 아니라 시장 가치 조건, 생물 다양성의 가치, 이용 가치 등을 총망라한 종합적인 가치가 평가되어야 한다.



자료: Ohno *et al.*(2009)

■ 그림 3-13. 해수면 상승에 의한 사빈 침식의 경제적 가치

## 5. 우리나라

강주환 등(2005)은 한반도 주변 해역에서의 해수면 변동 특징이 계절별로 다르게 나타남을 설명하였다. 본 연구에 따르면, 여름의 평균 해면이 겨울철에 비하여 높고 전체 진폭의 변화는 대기압에 의해 약 8.5cm이며, 계절별 수온의 변화에 따른 해수 팽창의 영향은 약 4~8cm 기여하고 있고, 특히 수온에 의한 해수면의 변화는 서해안에서 가장 크게 나타나는 것으로 관측된다고 설명하였다. 동해안의 경우 계절풍에 의한 연교차는 약 20cm이고, 서해안은 이에 비해 약 40cm 상승하고 있다. 장기 관측별과 평균 해수면의 변화는 1~3mm/yr 정도로 특히 1990년대 상승률이 높으며 이는 전 세계 평균 해수면 상승률인 1~2mm/yr 보다 높은 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 이러한 1990년 이후의 높은 상승률이 기후 변화로 인하여 발생되었다고는 주장할 수 없으며, 이외의 방조제 건설 등으로 인한 외부 작용이 또한 중요한 영향을 미치고 있음을 지적하였다.

김종덕 등(2005)은 우리나라의 전 연안에서 해안 침식이 발생하고 있음을 설명하였다. 이 연구에 따르면 동해안 지역의 경우 백사장 침식이 많이 발생하고, 서해안 지역은 사구 포락에 의한 모래 해안 침식이 많이 발생하고 있다. 국토해양부에서는 침식이 일어나고 있는 지역을 대상으로 연안 침식 이력 조사 지점을 62개소를 지정하고 해빈 폭의 변화가 발생하는 곳이 약 54개소로 보고하고 있다.

조광우 등(2006)은 연안 침식이 발생하는 유형별·지역별 특성을 살펴보았는데, 전빈에서 사빈으로 충분한 모래 공급이 유지되지 못할 때 파랑의 영향이 배후지 전면까지 영향을 주게 되는데, 사질 해안이 분포된 강원도, 경상남·북도 지역에서 많이 발생된다.

장학봉 등(2006)은 경기만 남쪽 해안 승봉도의 이일레해수욕장을 사례로 모래 침식을 조사하였는데, 이일레해수욕장의 경우는 모래 사장의 침식이 심각하게 일어나고 있고, 주로 주변 해역에서 골재 채취를 위한 해사 채취가 원인인 것으로 설명하였다.

조광우 등(2002)은 해수면 상승에 따른 우리나라의 침수 가능 면적을 산출하였다. 해수면 상승(sea-level rise), 조석(tide), 해일고(storm surge)에 관한 총 14개 시나리오를 작성하여

1분의 공간 해상도 표고 및 수심 자료를 이용하여 한반도 전체의 침수 가능 면적 및 침수 가능 인구를 산출하였고, 취약성 지표로서 해수면 상승에 따른 범람 면적과 범람 인구를 제시하였다. 해수면 상승은 IPCC 3차 보고서(TAR)에서 제시하는 0.3m(low scenario), 0.5m(medium scenario), 1.0m(high scenario)와 지역적 편차를 고려한 1.5m(regional high scenario)의 총 4가지 시나리오를 고려하였고, 조석에 관해서는 우리나라에서 관측된 조석 자료(국립해양조사원, 2002)를 이용하여 산정하였다. 해일고는 기존에 발생한 태풍 자료와 폭풍 해일 산정 경험식을 이용하였고, 한반도의 인구 자료로 LandScan 2000 자료를 이용하였다. 지구 온난화에 따른 해수면 상승과 조석 및 태풍 해일에 의해 영향을 받는 지역의 산출은 해수면 변화 시나리오별로 계산된 해수위 아래에 놓인 지역이 침수 또는 범람될 것이라는 가정 하에 산출되었고, 본 연구에서 산출된 범람 면적은 범람의 최대 가능 면적을 나타내며, 이는 연안역의 잠재적인 위험 정도만을 제시하지만, 본 연구는 우리나라에서 해수면 상승과 관련된 취약성 분석을 시작한 연구로서 의미가 있다.

환경부(2009)의 ‘우리나라 기후 변화의 경제학적 분석(Ⅰ)’에서는 해수면 상승 시나리오에 따라 해수면 1m 상승 시 침수 가능 면적을 조광우 등(2002)의 연구와 비교하였다.

■ 표 3-3. 해수면 0.1m 상승 시 피해 면적 비교

해수면 상승 시나리오	0.1m 상승 시 피해 면적(km <sup>2</sup> )		
	S9	S10	S11
조광우 등, 2002	600,979	984,304	189,518
환경부, 2009	854,158		

자료: 환경부(2009)

환경부(2009)의 연구에서는 조석에 의한 상승과 태풍 해일을 고려하지 않았다. 조광우 등(2002)의 연구에서는 해수면이 1m 상승 시 조석만을 고려할 때 약 600,979km<sup>2</sup>, 조석과 태풍 해일을 동시에 고려할 때 약 984,304km<sup>2</sup>, 두 인자를 고려하지 않고 해수면 상승만 고려할 경우 약 189,518km<sup>2</sup>가 산출되었는데, 환경부(2009)의 연구에서는 1m 상승 시 침수 면적이 854,158km<sup>2</sup>

가 산출되었다. 즉 아무런 인자를 고려하지 않고 해수면 상승만 고려한 침수 면적과 비교해 보면 20% 정도의 차이를 보인다. 하지만 전체적인 해상도를 고려할 때 도출된 값의 정확도 평가 보다는 도출된 면적을 사용하여 방법론의 계산을 통해 피해액의 산정이 가능한지를 검토하는데 의의가 있으며, 또한 추후 고해상도의 자료를 사용할 때 정확한 자료를 유추할 수 있음을 제안하였다. 이 연구는 침식 및 퇴적 등 장기 지형 변동에 대한 부분을 고려하지 못한 한계가 있으며, 해수면 상승으로 인한 수질 변화, 수온 변화, 그리고 강 혹은 지하수의 영향으로 인해 발생하는 연안 지역의 물 순환 체계와 더불어 과연 해수면 상승에 대한 기준선 설정을 무엇을 근거로 하는 것이 바람직할 것인가에 대한 고민의 필요성을 제기하였다.

연안 지역의 침수 취약지 분석에 중점을 둔 연구로는, 충남발전연구소(2008)와 김장수 등(2010)의 연구가 있다. 충남발전연구소(2008)는 GIS기법을 이용하여 충남 지역 서해안에 대해서 침식 취약 지도를 작성하였다. 0.5m, 1m, 3m, 5m의 해수면 상승 시나리오를 적용하여 만조 시 예상 수위를 통해 토지 이용별 침수 취약지를 분석하였고, 지자체별(서천군, 보령시, 홍성군, 태안군, 서산시, 당진군, 아산시, 예산군)로 분석하여 지역 단위로 취약지역을 분류하고 지자체별로 위험을 받을 수 있는 해수면 상승량을 제시하고 대응 방안을 분석하였다. 연안역에 미치는 다양한 기후 변화 요인들(해일, 하천 유출 등)을 고려하는 데 한계가 있지만, 국내에서 기후 변화에 따른 해수면 상승과 그에 대한 영향으로 침식 및 침수의 위험도를 분석하고 지자체 단위의 대응 방안을 제안하였다는 데 의의가 있다.

김장수 등(2010)은 충남 태안군 안면도 남단 바람아래해수욕장 조간대 지역을 대상으로 조간대 지역에 대한 침수 취약성을 평가하였다. 조간대 지역의 지형 특성상 수준 측량이 어렵고 형태 변형이 심하여 다중 시기 원격 탐사 자료와 보령검조소의 조위 자료를 이용하여 DEM을 생성하였으며, IPCC SRES 시나리오별(A1F1, A1T, A1B, A2, B1, B2) 해수면 상승에 따른 조간대 지역의 침수 취약성을 평가하였다. 1991년부터 2009년까지 10scene의 Landsat 영상을 이용하여 각 위성영상별 조간대 경계를 추출하고, 각 영상별 조간대의 면적을 산출하였다. 조간대의 경계 추출 시 저조위 때의 영상은 비교적 쉽게 경계 추출이 이뤄졌으나 중조위 때의 영상은 경계

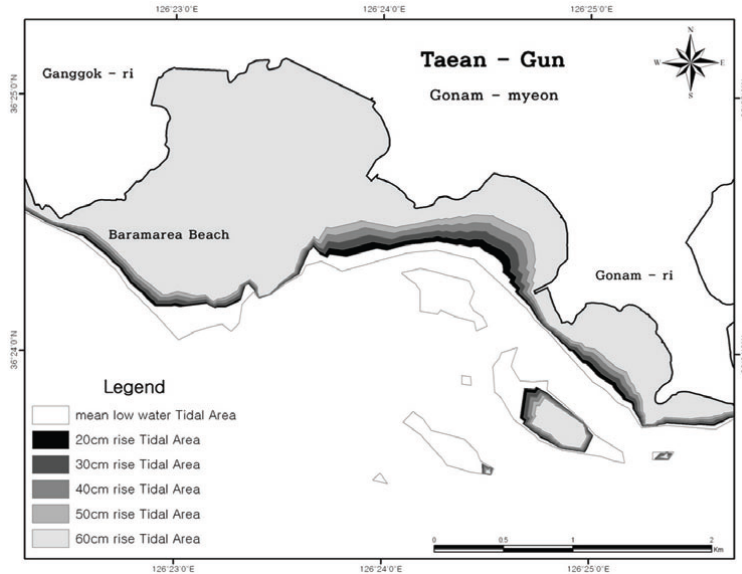
추출에 어려움이 있어, 오류가 발생한 부분에 대해서는 영상의 히스토그램 조정을 통해 육안으로 판독 분류하였다. 조간대 경계선에 고도값을 결정하기 위해 필요한 조위 자료는 연구 지역과 가장 가까운 보령검조소의 조위 관측 자료를 이용하여 위성영상 촬영 당시의 조위를 획득하여 보정하였다. 그러나, 보정된 조위 값과 인천만의 평균 해수면을 기준으로 작성된 지형도의 등고선 높이가 서로 다른 문제점이 있는데, 이를 위해서는 보정된 조위 값에서 인천만의 평균 해수면과 연구 지역의 평균 해수면의 차를 이용하여 재보정을 실시하였다.

■ 표 3-4. IPCC SRES 시나리오별 조간대 침수 면적

Sea Level Rise Scenario	Tidal area(ha)	Variation(ha)
20cm	415.13	▼ 67.96
30cm	398.05	▼ 85.04
40cm	380.46	▼ 102.63
50cm	362.34	▼ 120.75
60cm	343.70	▼ 139.39

자료: 김장수·장동호(2010)

분석 결과에 따르면, 해수면이 20cm 상승하면 약 68ha의 간석지가 침수되고, 30cm 상승하면 85ha, 40cm가 상승하면 103ha, 50cm 상승 시 121ha, 60cm 상승 시 139ha의 간석지가 침수되었다. 해수면 상승의 영향을 가장 크게 받는 지역은 태안군 고남면 고남리 가경주 마을 전면에 위치한 간석지로, 이 지역은 다른 지역에 비해 상대적으로 간석지의 고도가 낮고 경사가 완만하기 때문인 것으로 나타났다. 김장수 등(2010)의 연구에서는 중해상도 광학 원격 탐사 자료를 이용하여 조간대 DEM을 작성할 때, 경사가 완만한 조간대 지역에서는 실제 지형과 유사한 패턴의 DEM을 작성할 수 있지만, 경사가 급한 조간대 지역에서는 경사가 완만한 조간대에 비해 패턴의 유사성이 떨어지는 점과, 작성된 조간대 DEM을 검증하기 위해서는 연구 지역의 정확한 조위 값이 필요하나 기존 수준점성과표 또는 조화상수표가 부재하여 검증을 할 수 없는 한계점을 제시하였다.



자료: 김장수·장동호(2010)

■ 그림 3-14. 시나리오별 조건대 침수 지역

최진영 등(2006)은 IPCC 3차 보고서에서 제시된 시나리오를 이용하여 한반도 침수 가능 면적을 예측하였고, 그 결과 한반도 서해안이 동해안이나 남해안에 비해 20배 가량 침수 면적이 넓은 것으로 예상하였다.

해안의 취약성과 관련하여 정부 차원의 대응도 다양하게 이루어지고 있다. 먼저 국토해양부는 2000년 6월에 제1차 연안 정비 계획을 수립(해양수산부 고시 제2000-33호)하여 연안 정비 사업을 실시하고 있으며, 제1차 연안 정비 10개년 계획에 반영된 총 680개 사업 중에서 연안 침식 방지 사업은 229개소이고, 연안 침식 지역 현황을 살펴보면, 동해안은 백사장 침식(강원도, 경북 해안 등)이 가장 많고, 남해안은 토사 포락(해남, 장진, 거제, 여수 등) 및 호안 붕괴(사천, 여수 등)가 가장 많으며, 서해안은 사구 포락(태안, 신안 등) 및 토사 포락(무안 등)이 주를 이루고 있다. 해양수산부에서는 2002~2003년에 걸쳐 '연안 침식 방지 종합 대책 수립을 위한 조사 연구'를 실시하여 침식 대상 연안의 침식 방지 대책 수립에 필요한 침식 이력과 원인 분석을

위한 장기 모니터링 자료가 전무하므로 체계적이고 효율적인 연안 침식 모니터링의 필요성을 제기하였다. 또한 2003년부터 62개 주요 해안에 대해 연안 침식 이력 조사를 실시하여 경년적인 침식 상황을 모니터링하고 있고, 2006년까지 20개소 주요 해안에 대해 비디오 모니터링 체계를 구축하여 실시간 정보 제공 시스템을 구축하는 등 적극적인 해안 침식 문제에 대응하는 정책을 추진하고 있다(해양수산부, 2002, 2003, 2004). 영덕군(2008)에서는 연안 시설물 건설로 인한 표사 이동 경로의 차단과 최근 동해안에 자주 내습하는 고파랑의 영향으로 고래불해수욕장의 모래 유실이 심각해짐에 따라 침식 변화 모니터링 체계를 구축하여 백사장의 해안선 변화, 면적 변화 등을 실시간으로 모니터링하였다. 고래불해수욕장의 가장 큰 침식 원인은 북측 병곡항 주변의 연안 구조물에 의한 표사 이동 차단으로, 병곡항 주변으로는 모래가 계속 퇴적되고 영4리 해수욕장과 고래불해수욕장은 지속적인 침식이 발생하고 있다. 고래불해수욕장의 침식 대책 방안으로 친환경적인 연성 공법인 순환 양빈 공법을 적용하여 해수욕장 자체 모래를 활용하여 병곡항 입구부 퇴적으로 인한 어항 기능 상실 문제와 침식으로 인한 해수욕장 기능 상실 문제를 동시에 해결할 수 있음을 제시하였다.

한국해양수산개발원의 '우리나라 모래 해안의 실태와 환경관리방안 연구(2005)'에서는 우리나라 모래 해안의 문제를 해안 침식, 과밀 이용, 식생 훼손, 경관 훼손, 수질 오염 등 5개 분야로 나누어 분석하고 각각의 대응 방안을 관리정책적 관점에서 제시하였다. 즉, 모래 해안의 통합적인 관리를 위해서는 관광 자원으로서의 관리 정책뿐만 아니라 해안 침식, 식생을 비롯한 생태계와 수질, 경관 등 자원과 이용객의 만족도를 높이는 적정 수준의 수용력 개념의 도입까지 고려된 관리 방안이 필요하며, 이를 위해서는 모래 해안 모니터링 강화와 과학적 분석, 해안 침식 통합적 관리를 위한 체계 강화, 과밀 이용에 대한 대응 방안 마련, 생태계 및 경관 보호를 위한 조사와 보호조치 강화, 수질 보호 및 위생 관리의 선진화 등의 제도적인 보완과 더불어 과학적인 조사가 이루어져야 함을 제시하였다.

최근 서해, 남해, 동해 연안 지역에서 이상 파랑 및 너울성 파도 등이 빈발하여 높은 파도와 해수 범람으로 인명 및 재산 피해가 반복적으로 발생함에 따라, 기상청(2009)에서는 이상 파랑으

로 인한 연안 재해를 줄이고 신속히 대응하기 위해서 이상 파랑의 원인을 분석하고, 이상 파랑 감시를 위한 최적 관측망 구성 및 예측 기법과 사전 예측 가능성을 종합 검토하였다. 동해안과 서해안에서의 이상 파랑 발생 시 관측한 기상 자료와 해수면 자료의 분석 결과에 따르면, 동해안에서 발생하는 이상 파랑은 동해선풍과 겨울에 나타나는 서고동저형 기압 배치에 의해 동해상에 발달하는 기압골에 의한 것이고, 서해안의 이상 파랑은 주로 양쯔 강 유역에서 발생한 저기압의 이동과 관련되어 나타났다. 저기압이 서해상을 통과하면서 주변에 대기 상태가 불안정해져 대기압 점프와 대기 중력파가 해상에 장파를 발생시키는데, 이것이 해안가에 도달하면 이상 파랑으로 관찰된다. 즉, 이상 파랑의 발생 원인이 해역별로 상이하게 나타남을 알 수 있다.

국립방재연구소(2008)는 대형화되는 태풍, 홍수 등 자연재해 피해를 저감하기 위해 재해정보 DB 및 분석 시스템을 구축하여 방재 대책 수립에 필요한 자료 관리, 재해 관리 의사 결정 지원에 활용 가능한 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 기상 정보 DB, 재해 정보 DB 및 1951년도부터 발생한 태풍 이력 정보를 기반으로 구축한 태풍 정보 DB와 연계하여 과거 기상 정보 및 태풍 이력 정보의 검색, 재해 원인별 피해 정도 등을 바탕으로 발생한 태풍에 대해 현 시점에서의 정보 입력 시 과거 유사 태풍을 추출하는 알고리즘을 적용하여 유사 태풍의 이동 경로를 파악하고 지역별 위험성 분석 결과를 도출할 수 있도록 하여 데이터 기반의 체계적인 재해 관리 및 의사 결정 지원을 목표로 한다.

한국해양수산개발원(2009)은 기후 변화로 인한 해수면 상승, 침식, 태풍, 집중 호우, 해일과 같은 자연재해로부터 연안 지역 사회·경제 활동을 보호하고, 피해 발생 후 이를 효과적이고 체계적으로 복구할 수 있는 방안을 레질리언스(resilience) 강화의 관점에서 제시하였다. 레질리언스 관점의 복구 대책은 전통적인 접근 방법인 시설물의 단순한 복구를 위한 재원이나 기자재 확보뿐만 아니라 복구를 위한 사회적 역량을 입체적으로 확보하는 것까지 포괄하는 것으로, 연안 지역에서 기후 변화의 영향과 피해를 최소화할 수 있는 전략적 방향으로 레질리언스 강화의 필요성을 제시하고, 추진방향을 제시하였다.

또한 지난 2003년 9월에 발생한 태풍 매미로 인해 마을 전체가 큰 피해를 입었던 경남 거제시

일운면 와현마을의 복구 사례를 통하여 자연재해 적응 측면에서 향후 연안 지역 공간 관리 방식에서 고려해야 할 시사점을 도출하였다. 경남 거제시 와현마을 이주 단지 조성 사업은 자연재해로 인해 피해를 받은 연안 지역을 원상태로 복구하지 않고 자연재해에 적응한 방식으로 복구한 모범적인 사례로 평가받는다. 태풍 매미가 발생할 당시 와현마을에 있던 주택(34동) 중 12동이 전파, 8동이 반파, 14동이 침수되는 피해를 입었으나, 이후 거제시는 2003년 11월에서 2004년 8월까지 약 139억원을 투입하여 와현마을 복구 사업인 ‘와현마을 이주 단지 조성 사업’을 실시하였고, 거제시는 피해 지역이 유사한 자연재해로 다시 피해를 입을 수 있음을 인식하여 기존 입지에 복구하지 않고 기존 마을에서 육지 방향으로 약 45m 후퇴하여 안전한 지역에 택지를 조성하였다. 피해를 입었던 공간은 분양하지 않고 자연재해의 영향을 완충하면서 지역 주민이나 관광객이 쉴 수 있도록 해안 공원 및 주차장으로 조성하였다. 와현마을 이주 단지 조성 사업에서는 재해 발생 후 기존 입지에 동일한 모습으로 복구하던 기존 방식을 탈피하고 유사한 재해로 인해 영향을 받을 수 있는 일정 지역을 완충 공간으로 조성하는 좀 더 개선된 공간 관리 방식을 활용하였다. 특히, 연안 선진국에서 자연재해에 적응하기 위해 사용하는 공간 관리 수단인 연안 후퇴(setback)를 기존 제도의 틀 안에서 적용했다는 점에 주목할 필요가 있다.





## 제4장

연안역 범람 평가: 사례 연구

본 연구에서 해수면 상승 및 연안 외력에 대한 평가는 환경영향평가에서 사용하는 스크리닝과 스코핑 평가 개념을 사용하여 취약성 평가의 프레임워크를 제공하고자 하였다. 먼저 스크리닝을 통하여 범람이 예상되는 취약한 지역을 파악하고 취약지역에 대해서는 상세한 스코핑 평가를 실시하는 체계이다. 스크리닝을 위하여 미국지질조사국에서 개발된 취약성 지수를 활용하여 동해안(강원도 해안)을 대상으로 평가하였으며, 이들 지수가 2100년 기후 변화로 어떻게 변화하는지를 정량적으로 파악하였다. 취약성 지수 등급은 상대적인 기준을 사용하므로 본 연구에서 제시하는 것이 절대적인 기준으로 활용되는 것은 어려울 것으로 파악되나 상대적인 비교를 통한 개발 입지 선정 등 전략적인 측면에서는 유용한 접근 방식이라고 할 수 있다.

해수면 상승에 따른 연안 범람 평가는 사례 지역을 대상으로 시도하였다. 사례 지역의 선정과 관련하여 주요 기준은 기존의 외력으로 범람 및 침식 위험이 있는 지역, 사회·경제적 측면에서 대응이 필요한 대표적인 지역, 기후 변화의 평등(equity) 문제와 관련하여 가장 취약한 계층(빈곤층) 등을 고려하여 대상 지역을 선정하고자 하였다. 본 연구에서 미개발 지역에 대한 취약성 평가는 선정에서 제외하였다. 이는 미개발 지역은 개발 지역보다 토지 이용 계획 제한, 개발자 책임 원칙 등의 제도적 적응 방안 도입이 개발지보다 상대적으로 수월한 점을 반영하였다. 이와 같은 기준을 토대로 선정된 사례 지역 중 첫 번째 사례 지역은 해안 도로에 인접한 소규모 주거 지역으로 해안 도로 개설로 인한 해안 침식과 범람 위협을 동시에 받는 지역으로 동해안에서 빈번히 볼 수 있는 지역이다. 이들 지역은 현재에도 도로 시설물에 의한 해안 침식 가중과 월파 등의 피해를 입고 있으며, 향후 기후 변화 및 해수면 상승으로 인하여 이와 같은 피해가 크게 가중될 것으로 전망되는 지역이다. 두 번째 사례 지역은 해안 시가지 지역으로 기존 태풍 등에 의하여 범람 피해를 입고 있는 상습 피해 지역이다. 이들 지역은 주로 하천을 통하여 범람이 이루어지고 있으나 기후 변화 및 해수면 상승으로 범람 피해 증가가 예상되는 지역이라고 할 수 있다. 세 번째 임해산업단지는 기존의 태풍 내습으로 인하여 이미 피해를 입었던 지역으로 피해 대책 수립 및 대응 방안 연구 등이 수행된 지역이다. 우리나라의 경우 과거 바다를 매립하거나 바다 인근에 조성한 임해산업단지가 상당수 있는데, 이들 산업단지의 지반고는 과거의 해수면을

기준으로 하였기에 기후 변화에 매우 취약할 수 있어 향후 대응이 필요한 지역이라 할 수 있다. 그러나 이들 지역에 대한 범람 평가는 다양한 연구의 한계성을 가지고 있다. 먼저 과학적 문제점으로 지역적인 해수면 변화 시나리오가 부재하고 범람을 정확히 평가할 파랑 등에 대한 정보가 부족하며 해안의 파랑 등을 고려하는 범람 평가 방법론이 부재한다는 것 또한 큰 제한점으로 작용한다. 다음으로 자료의 부족이다. 본 연구에서는 기존의 ASTER DEM 및 수치 지도 등을 사용하였으나 국지 차원의 평가에는 정확한 분해능을 가지는 자료가 필요하며 예산상의 문제도 동시에 가지고 있다. 취약성 평가 지수 산출을 위한 지역 정보 자료(지형적: 지형, 경사, 침식; 물리적: 파랑, 조석, 해수면 상승) 등도 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구는 기후 변화로 인한 잠재적인 취약성 정도를 시나리오별로 평가하는 것을 목적으로 하고 있다.

## 1. 취약성 평가 지수

### 가. 평가 방법론

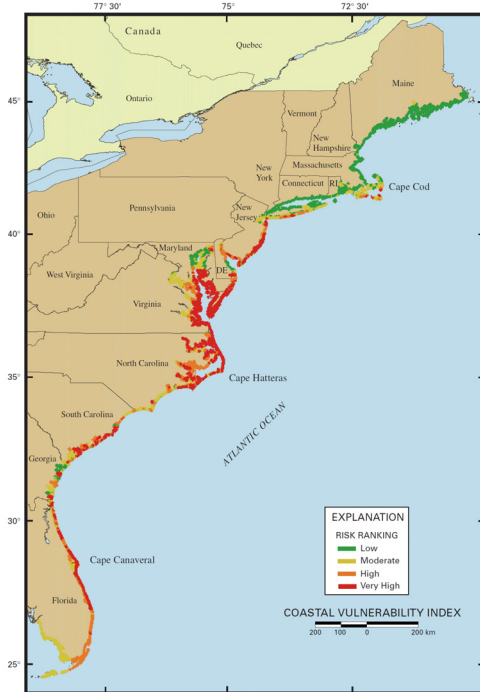
응용해안지질 분야에서 최근 가장 중요한 문제 중 하나는 미래의 해수면 상승으로 인한 해안선의 물리적 반응을 결정하고 취약성을 평가하는 작업이다. 하지만, 해수면 상승에 따른 연안 지역의 물리적 변화에 대한 취약성 평가는 다양한 인자가 관련되어 있기 때문에 어려운 문제이다.

USGS(U.S. Geological Survey)는 미국의 연안 지역에 대해서 상당히 단순한 분류 방법을 사용하여 해수면 상승에 따른 연안 환경의 상대적인 취약성을 분류하고 있다.

연안 취약성 지수(CVI: Coastal Vulnerability Index)는 해수면 상승으로 인한 물리적 변화가 해안선을 따라 나타날 가능성에 대해서 상대적인 순위를 산출한다. 취약성 분류에는 지형(geomorphology), 해안 경사(coastal slope), 상대적인 해수면 상승률(relative sea-level rise rate), 해안선 침식률(shoreline erosion rate), 평균 조차(mean tidal range), 평균 파고(mean wave height) 등 수량화할 수 있는 총 6개 인자가 포함되며, 이들 변수의 상대적인 기여도와 상호작용에 근거를 둔다.

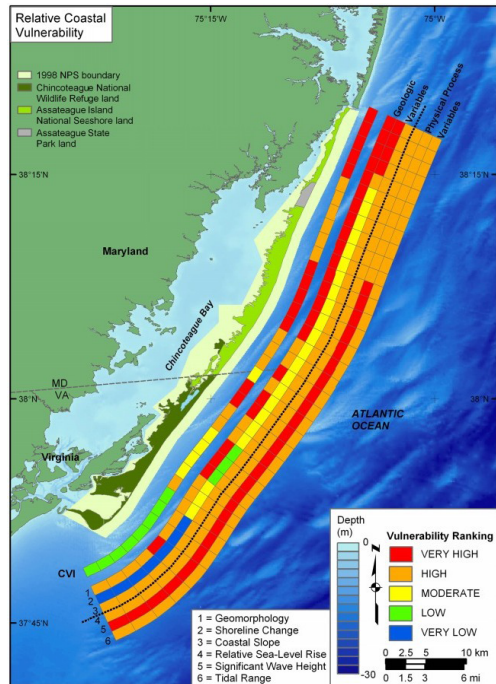
$$CVI = \sqrt{(a*b*c*d*e*f)/6}$$

- a = geomorphology
- b = coastal slope
- c = relative sea-level rise rate
- d = shoreline erosion/accretion rate
- e = mean tide range
- f = mean wave height



자료: Thieler and Hammar-Klose(2000)

■ 그림 4-1. 미국 동부 연안의 취약성 지수(CVI)



자료: Thieler et al.(2004)

■ 그림 4-2. 애서티그 섬 국립 해안의 상대적인 해안 취약성

<그림 4-1>은 미국 동부 연안을 대상으로 미래의 해수면 상승으로 인한 연안 지역 변화의

상대적인 취약성을 지도로 나타낸 것이다. 미국 동부 연안 지역의 경우 전형적으로 조차가 작고, 높은 파도, 낮은 해안 경사, 해수면 상승의 높은 역사적 비율을 지닌 보초도(barrier island)에서 취약성이 크게 나타나고, 반대로 해안 경사가 가파른 해식에, 높은 조차, 해수면 상승의 낮은 역사적 비율을 가진 해안 지역은 가장 낮은 취약성을 나타낸다. 연안 취약성 지수(CVI)에 사용된 각 인자는 해수면 상승으로 인한 해안의 물리적 변화에 대한 기여도의 잠재적 규모(중요도)를 기반으로 한 상대적인 위험이 부여된다. 각 인자들의 특징은 다음과 같다.

■ 표 4-1. 연안 취약성 지수(CVI) 인자의 순위

VARIABLE	Ranking of coastal vulnerability index				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Geomorphology	Rocky, cliffed coasts Fjords Fiards	Medium cliffs Indented coasts	Low cliffs Glacial drift Alluvial plains	Cobble beaches Estuary Lagoon	Barrier beaches Sand Beaches Salt marsh Mud flats Deltas Mangrove Coral reefs
Coastal Slope (%)	>.2	.2 - .07	.07 - .04	.04 - .025	<.025
Relative sea-level change (mm/yr)	<1.8	1.8 - 2.5	2.5 - 2.95	2.95 - 3.16	>3.16
Shoreline erosion/accretion (m/yr)	>2.0 Accretion	1.0 - 2.0	-1.0 - +1.0 Stable	-1.1 - -2.0	< -2.0 Erosion
Mean tide range (m)	>6.0	4.1 - 6.0	2.0 - 4.0	1.0 - 1.9	<1.0
Mean wave height (m)	<.55	.55 - .85	.85 - 1.05	1.05 - 1.25	>1.25

자료: USGS(<http://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/pages/cvi.html>)

먼저 지형(geomorphology) 인자는 각기 다른 형태의 지형의 상대적인 침식도를 표현하고 있는데, USGS는 지질도와 USGS 1:250,000 축척의 지형도에서 그 값을 구하였다. 해안선

침식률과 퇴적률(shoreline erosion rate/accretion rate)은 해안 침식 정보 시스템(CEIS:Coastal Erosion Information System)에서 참고할 수 있고, 여러 연구자들(May and others, 1983, Dolan and others, 1985)에 의해 작성되어 왔다. CEIS에는 대서양(Atlantic), 멕시코만(Gulf of Mexico), 태평양(Pacific)과 오대호 연안(Great Lakes coasts)과 주요 만, 하구에 대한 해안선 변화 데이터가 포함되어 있는데, 이 데이터들은 기존 문헌, 역사적 해안선 변화 지도, 야외조사, 항공 사진 분석 등 다양한 출처로부터 도출되었다. 해안 지대의 경사(coastal slope)는 해안선에서 육지와 바다 쪽으로 약 50km 정도의 지형과 등심선 고도의 그리드로 계산한 것으로, 낮은 경사의 해안 지역은 급경사 지역보다 더 빠르게 해안선이 후퇴하기 때문에 해당 지역의 경사를 통해서는 범람의 상대적인 위험뿐 아니라 해안선 후퇴의 잠재적인 속도를 알 수 있다. 상대적인 해수면 상승률(relative sea-level rise rate) 인자는 본질적으로 범지구적 해수면 변화와 국지적 해수면 변화, 구조적 지반 운동을 포함하며, 시간에 따라 검조소(tide gauge station)에서 측정된 연평균 수위의 증가로 나타낼 수 있다.

조차(tidal range) 데이터는 NOS(National Ocean Service)에서 구할 수 있고, 연속적인 그리고 가끔씩 발생하는 범람 재해와 연관된다. 파고(wave hight)는 파동 에너지의 지표로 사용된다.

#### 나. 취약성 지수 결과

앞에서 언급한 연안 취약성 평가 기법 중 수치 모형을 이용한 취약성 평가는 자료 수집, 물리적인 모델링 시간, 자료 분석 등에 상당히 많은 시간과 비용을 필요로 할 뿐만 아니라 대규모 지역에 적용하는 것 또한 현재까지는 불가능한 실정이다. 그러나 앞에서 소개한 연안 취약성 지수(CVI)와 같은 지표를 이용한 취약성 평가 방법은 비교적 단순하고 빠르게 특정 지점의 연안 취약성을 산정할 수 있으며, 대규모 지역에 적용하는 것 또한 매우 용이하다. 즉 국가적 정책 결정을 위한 기본 자료를 작성할 경우 빠른 의사 결정에 사용하기에는 수치 모형에 비해 큰 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 앞에서 소개된 USGS의 연안 취약성 지수 산정법에서 제시한 산정 기준에 맞추어 우리나라 동해안 지역 중 강원도 지방의 취약성 지수를 산정하였다. USGS의 연안 취약성 지수 산정에는 앞에서 언급한 것과 같이 지형(geomorphology), 해안선 침식률(shoreline erosion rate), 해안 경사(coastal slope), 상대적 해수면 상승률(relative sea-level rise rate), 평균 파고(mean wave height), 평균 조차(mean tidal range) 등 6개의 지표를 고려하도록 되어 있다. 각 지표는 <표 4-1>에 도시된 기준에 따라 1~5의 값을 결정하도록 되어 있다. 본 연구에서는 다양한 자료를 이용하여 6개의 지표별 인덱스 값을 결정하였으며, 결정에 사용된 자료 및 방법은 <표 4-2>와 같다.

■ 표 4-2. 연안 취약성 지수(CVI) 산정에 사용된 기본 자료 및 지표값 결정 방법

지표명	사용 자료	결정 방법
지형	동해안 지역 위성 사진, 지형도, 현지 답사	위성 사진을 이용한 해안선 구성 지형 인자 목록 지형도 및 답사를 통한 실제 현장 조사 실시
해안선 침식률	연안 침식 모니터링 (김인호, 2010)	지점별 실측 해안선 침식률 자료 이용 및 보간
	해안선 후퇴율 자료 (조광우 등, 2009)	해수면 1.0m 상승 시 기 산정된 해안선 후퇴율을 이용하여 지점별 침식률 산정 후 선형 보간
해안 경사	ASTER DEM	ArcGIS를 이용한 해안선 경사 분석
해수면 상승률	조광우 등(2009)	동해안 위도별 해수면 상승률 산정 후 선형 보간 실시
	Vermeer & Rahmstorf(2009)	해수면 상승량을 고려한 해수면 상승률 보정(지구 평균 9.25mm/yr)
평균 파고	장기 파랑 산출 자료집 (한국해양연구원, 2003) HYPA 모델링 결과자료	장기 파랑 산출 자료집 상의 연안 격자점별 장기 파랑 자료 취득 자료의 시간 평균을 통한 지점별 평균 파고 산정 및 선형 보간
평균 조차	2008 조석표(한국 연안) (국립해양조사원, 2007)	서호진, 원산, 장전, 거진, 속초, 기사문, 주문진, 묵호, 동해, 삼척, 임원 동해안 산정 지역에 위치한 조석 관측점 자료를 이용한 지점별 선형 보간

■ 표 4-3. 연안 취약성 지수(CVI)의 인자별 지표값 분류 기준

구 분	Very Low	Low	Moderate	High	Very High
	1	2	3	4	5
지형	높은 절벽 (대략 높이 70~100m의 해식에)	중간 절벽 (대략 높이 40~70m의 해식에)	낮은 절벽, 인공 해안 (대략 높이 40m 이하의 암석 해안)	석호, 강 하구, 자갈 해안	모래 해안
해안선 침식률(침식/ 퇴적률, m/yr)	>2.0	1.0~2.0	-1.0~1.0	-2.0~1.0	<-2.0
경사(%)	<1.20	1.20~0.90	0.90~0.60	0.60~0.30	<0.30
해수면 상승률 (mm/yr)	<1.8	1.8~2.5	2.5~3.0	3.0~3.4	>3.4
평균 파고(m)	<0.55	0.55~0.85	0.85~1.05	1.05~1.25	1.25)
평균 조차(m)	<6.0	4.0~6.0	2.0~4.0	1.0~2.0	<1.0

### 1) 인자별 지표값 분류 기준

#### 가) 지형

지형 인자의 경우 위성 사진과 지형도를 통한 목측, 그리고 현장 답사를 통하여 지표값을 결정하였다. 연안 취약성 지수(CVI)의 중요 인자 중 하나인 지형 인자는 해안 침식에 대한 지형의 저항 강도에 따라 저항도가 높은 암석 해안에서부터 침식에 대한 저항도가 낮은 모래 해안에 이르기까지 지형적 특성에 따라 1에서 5의 값으로 유형화하였다. 먼저 1의 값을 갖는 지역은 비교적 비고가 높은 70~100m 내외의 산지가 바다와 바로 접한 지역 또는 해식애가 발달한 지역으로 삼척시 원덕읍 임원리·노곡리 일대의 해안과 삼척시 근덕면 부남리 일대 해안, 동해시 묵호동의 일부 해안이 이에 해당된다. 2에 해당하는 지역은 고도 40~70m 내외의 암석 해안이고, 3은 40m 이하의 낮은 암석 해안과 항구 등 인공 시설물로 이루어진 인공 해안이 이에 해당한다.

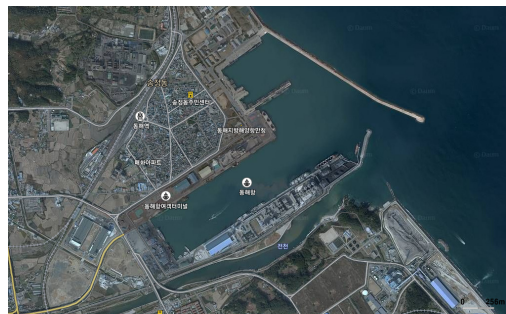
4에 해당하는 지역의 주요 지형은 화진포, 송지호, 경포호 등의 동해안의 대표적인 석호(lagoon) 지형, 고성 북천·남천, 속초와 양양의 경계를 흐르는 쌍천, 양양 물치천, 양양 남대천, 강릉 연곡천, 남대천 등과 같이 강이 바다로 흘러들어 가는 하구 지역(estuary), 그리고 자갈 해안 지역이고, 5에 해당하는 지역은 비고가 낮고 평탄한 모래 해안으로 강원도 지역의 대표적인 화진포, 송지호, 낙산, 하조대, 주문진, 경포대, 정동진, 망상해수욕장 등이 이에 해당한다.



자료: Daum 지도(<http://local.daum.net/>)

■ 그림 4-3. 지형 인자 1, 2

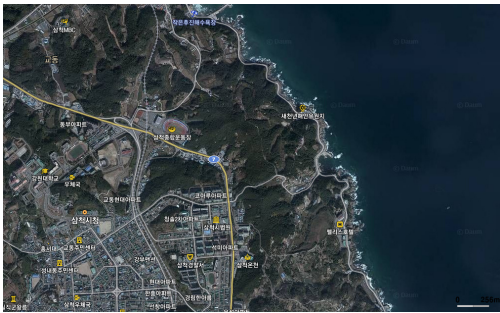
: 삼척시 원덕읍 임원리 암석 해안 일대



자료: Daum 지도(<http://local.daum.net/>)

■ 그림 4-4. 지형 인자 3

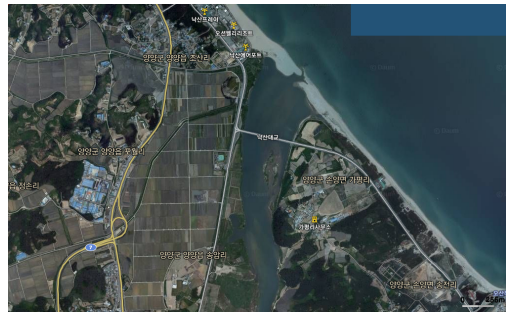
: 삼척시 동해항 일대(인공 해안)



자료: Daum 지도(<http://local.daum.net/>)

■ 그림 4-5. 지형 인자 3

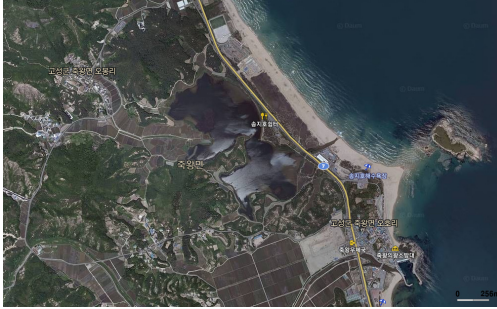
: 삼척시 정리동 일대(낮은 암석 해안)



자료: Daum 지도(<http://local.daum.net/>)

■ 그림 4-6. 지형 인자 4

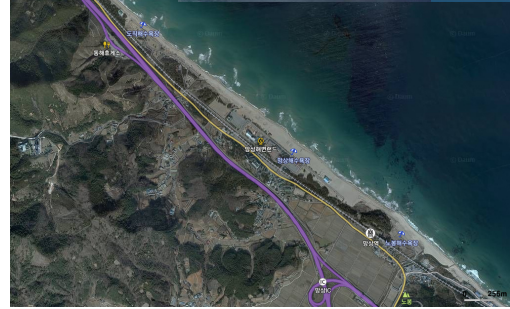
: 양양군 양양읍 남대천 하구역(estuary)



자료: Daum 지도(<http://local.daum.net/>)

■ 그림 4-7. 지형 인자 4

: 고성군 죽왕면 송지호 일대(석호)



자료: Daum 지도(<http://local.daum.net/>)

■ 그림 4-8. 지형 인자 5

: 동해시 망상해수욕장(모래 해안)

#### 나) 해안선 침식률

해안선 침식률은 연간 침식률에 따라 1에서 5의 값으로 유형화하였다. <표 4-3>에 도시된 것과 같이 연간 2m 이상 퇴적되는 경우에는 Very Low에 해당하며, 연간 2m 이상 침식되는 경우에는 Very High에 해당한다. 본 연구에서는 김인호(2010)에서 제시된 해안선의 실측 자료와 조광우 등(2009)에서 제시된 1.0m 해수면 상승 시의 해안선 후퇴율을 이용하여 현재 상태와 1m의 해수면 상승이 발생하였을 경우에 대해 각각 해안선 침식률을 결정하였다. 해안선 침식의 경우 사질토로 이루어진 해변의 경우 빠른 속도로 침식이 발생할 수 있지만, 앞의 지형 인자에서 암석으로 구분되는 지점의 경우 침식이 매우 느린 속도로 발생하기 때문에, 암석 해안에 대해서는 침식률이 Very Low에 해당하도록 조정하였다.

김인호(2010)의 경우 해안선 침식률을 세 가지(침식, 안정, 퇴적)로 구분하였기 때문에 본 연구에는 각각 High, Moderate, Low의 CVI 인자를 부여하였고, 1.0m 해수면 상승의 경우에는 기존에 제시된 해안선 후퇴율을 이용한 결과 대부분의 경우 연간 0.8~1.0m의 침식률을 갖는 것으로 나타났다. 우리나라 동해안의 경우 대부분의 지역에서는 Moderate와 High에 해당하는 CVI 해안선 침식률을 갖는 것으로 나타났다.

#### 다) 해안 경사

해안 경사는 해수면 상승의 영향이 미치는 범위와 관련된 인자로서, <표 4-3>에 도시된 것과 같이 1에서 5의 값으로 구성되어 있다. 해안의 경사가 큰 경우에는 Very Low에 해당하며, 해안선의 경사가 작은 경우에는 Very High에 해당한다. 이는 해안의 경사가 작으면 해수면 상승 영향 구간의 범위가 크게 되기 때문에 이 같은 형태로 구분한 것이다. USGS에서는 해안선 경사의 경우 가능한 실측된 자료를 이용할 것을 권고하고 있으나, 동해안 전체에 대해서는 이와 같은 작업을 수행하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 ASTER DEM을 이용한 경사 분석을 수행하였다. ASTER DEM 상에서는 해수면의 표고가 0이고, ArcGIS상에서 해안선과 150m와 300m 떨어진 지점에서의 표고값을 산출한 뒤, 경사 분석을 수행하였다. 분석 결과 해수욕장과 같은 사질토를 갖는 지점에서는 경사가 0.3% 이하인 것으로 나타났으며, 그 이외의 지역에 대해서는 지형학적인 인자에 영향을 받아 절벽에서는 큰 값으로 나타났으며, 이외의 지역에서는 Low 혹은 Moderate에 해당하는 것으로 나타났다.

#### 라) 해수면 상승률

연안 취약성 지수와 직접적인 관련을 갖는 해수면 상승률은 국내의 여건에 맞도록 다른 값을 이용하여야 하지만, 본 연구에서는 USGS에서 제시된 값을 동일하게 사용하였다. <표 4-3>에 도시된 것과 같이 연간 해수면 상승률(mm/yr)에 따라 5개의 구간으로 분류하였다. 해수면 상승률이 3.4mm/yr 이상인 경우에는 Very High에 해당하고, 1.8mm/yr 이하인 경우에는 Very Low에 해당한다. 본 연구에서는 두 가지의 해수면 상승률을 고려하였다. 첫째는 현재 상태의 해수면 상승률과 둘째는 향후 1.0m(SLR 1.0m)에 해당하는 해수면 상승률이다. 현재 상태 해수면 상승률의 경우 국립해양조사원(2010)에서 제시된 값을 이용하였으며, 우리나라 동해안은 2.0~3.0mm/yr에 해당하기 때문에 대부분의 지역에서 Low와 Moderate에 해당하는 것으로 나타났다. 1.0m 해수면 상승의 경우에는 Vermeer & Rahmstorf(2009)의 전지구 평균값을 이용하였으며, 해수면 상승률은 약 9.2mm/yr인 것으로 나타났으며, 이와 같은 경우에는 동해안의 모든 지역이 Very

High에 해당하는 것으로 나타났다.

#### 마) 평균 파고

평균 파고의 경우 해수면 상승으로 인한 연안 취약성과 직접적인 관련을 갖지는 않지만, 해수면 상승과 중첩될 경우 파급력이 크다. 또한 해안선의 침식률에는 직접적인 영향을 미치지 때문에, 연안 취약성 지수 선정 시 기본 인자로 사용한다. 각 지점별 평균 파고는 한국해양연구원(2003)의 '장기 파랑 산출 자료집'에 제시된 HYPА 모델링 자료를 이용하여 격자별 평균 파고를 추출하였고, 이를 이용하여 해안선을 따라서 평균 파고를 산정하였다. 평균 파고는 <표 4-3>에 도시된 것과 같이 55~125cm의 범위를 갖는다. 우리나라 동해안의 경우 약 0.7~0.9m의 평균 파고를 갖는 것으로 나타났고, 그 결과 대부분의 지점이 Low와 Moderate에 해당하는 것으로 나타났다.

#### 바) 평균 조차

조차의 범위 또한 연안 취약성 지수의 중요 인자로 사용된다. 해당 지점에서의 조차 범위가 클 경우에는 해수면 상승에 저항할 수 있는 여력이 크다고 판단할 수 있으며, 작을 경우에는 해수면 상승의 영향이 매우 급박하게 나타나기 때문에 지수가 크게 나타난다. 조차는 서호진, 원산, 장진, 거진, 속초, 기사문, 주문진, 묵호, 동해, 삼척, 임원과 같은 동해안의 조석 관측점 자료를 이용하였으며, 지점 사이의 값은 선형 보간을 통해 산정하였다. 평균 조차는 <표 4-3>에 도시된 것과 같이 1.0~6.0m의 범위를 갖는다. 우리나라 동해안은 서해안과는 달리 조차의 크기가 0.25~0.35m로 매우 작기 때문에 본 연구에서는 대부분의 지역이 Very High에 해당하는 것으로 나타났다.

### 2) 동해안의 연안 취약성 지수(CVI)

다음 <그림 4-10>과 <그림 4-11>은 현재 상태와 1.0m 해수면 상승 시의 연안 취약성 지수(CVI)를 도시한 것이다. 그림에 도시된 CVI는 4개의 지표로 분류되어 있으며, 취약성이 낮은

순서에서 높은 순서로 Low(초록색), Moderate(노랑색), High(주황색), Very High(빨간색)로 구분한다. USGS에서 제시한 CVI 구분 방법은 결정된 CVI 지표를 크기 순으로 나열한 뒤, 전체 자료 중 하위 25%, 50%, 75% 값을 구분 지표로 사용한다. 따라서 본 연구에서 사용한 USGS의 CVI는 최대값과 최소값, 그리고 구분 지표가 사용 지역 및 자료에 따라 달라지는 경향이 발생하게 되며, 이를 보정할 수 있는 지표 혹은 새로운 지표 산정 기법이 필요한 것으로 판단할 수 있다. 참고로 본 연구에서 산정된 동해안의 CVI 지표 범위는 다음 <표 4-4>와 같다. 또한 산정된 CVI의 지표 범위가 적정한지 판단하기 위해 기존 미국의 동·서부 해안 및 멕시코만 일대의 CVI 산정값을 <표 4-5>에 도시하였다. 우리나라 동해안의 경우 미국의 서해안 지역과 비교적 유사한 것으로 나타났으며, 경사 산정 시 사용되는 평균 구간 거리에 따라서는 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 해수면이 1.0m 상승하는 조건에 대해서는 CVI의 평균값이 약 5 이상 증가하는 것으로 나타났다.

■ 표 4-4. 연안 취약성 지수(CVI) 지표 범위

CVI	현재 상태	1.0m 해수면 상승 시
최소	1.83	2.89
최대	22.36	30.62
평균	7.09	12.36
중앙값	5.77	11.18

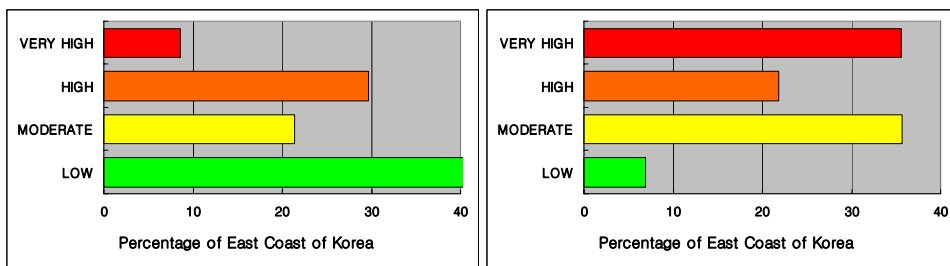
■ 표 4-5. 미국의 연안 취약성 지수(CVI) 지표

CVI	Assateague island(USGS)	US pacific coast (USGS)	US Gulf of Mexico coast (USGS)	US atlantic coast (USGS)
최소	14.61	2.00	1.20	1.22
최대	32.66	28.30	39.50	39.52
평균	24.90	9.92	15.25	14.75
중앙값	25.30	8.48	15.50	15.49
Low CVI zone	14.61~20.50	2.00~5.54	1.20~8.70	1.22~8.70
Moderate CVI zone	20.50~25.50	5.54~8.54	8.70~15.60	8.70~15.60
High CVI zone	25.50~29.00	8.54~12.52	15.60~20.00	15.90~20.00
Very high CVI zone	29.00~32.66	12.52~28.30	20.00~39.50	20.00~39.52

〈그림 4-9〉는 앞에서 언급한 CVI 지수의 지점별 점유율 분류 결과 및 해수면 상승 시 카테고리 변화를 나타낸 것이다. 각 카테고리별 점유율은 〈표 4-6〉에 제시되어 있다. 경사 산정 시 구간값의 변화에 대해서는 전체적으로 둔감한 것으로 나타났지만, 〈그림 4-9〉의 (a)와 (b)를 살펴보면 LOW 카테고리에 해당하는 지점의 수가 급격히 감소하는 것으로 나타났지만 대부분이 MODERATE 카테고리로 이동하는 것으로 나타났고, HIGH 카테고리의 점유율 또한 크게 증가하지 않기 때문에 경사 산정 구간값의 변화는 CVI에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다. 그러나 해수면이 1.0m 상승하는 경우에 LOW에 해당하는 지점은 크게 감소하고, VERY HIGH 카테고리에 해당하는 지점의 개수는 큰 증가를 보이는 것을 확인하였다.

■ 표 4-6. 연안 취약성 지수(CVI) 카테고리별 분류 및 점유율(%)

	가	나
LOW	40,38	6,92
MODERATE	29,69	35,68
HIGH	21,36	21,83
VERY HIGH	8,57	35,56



(a) 현재 상태

(b) 1.0m 해수면 상승 시

■ 그림 4-9. 연안 취약성 지수(CVI)의 카테고리별 분류 결과

제시된 그림과 표에서 볼 수 있듯이 동해안 지역의 CVI는 위치 및 조건에 따라 매우 다양하게

변화하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 해수욕장 등이 위치한 모래 해안은 CVI가 큰 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 절벽 혹은 해안선의 경사가 급한 지역에서는 CVI가 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그러나 각각의 CVI 지표 인자의 값을 결정하는 기준이 미국의 지역적 특수성을 고려하여 만들어져 있기 때문에 우리나라에 본격적으로 적용하는 데는 지표 인자의 범위를 다시 결정해야 할 것으로 판단할 수 있다.

다음 <그림 4-12>~<그림 4-15>는 각각 고성~속초, 양양, 강릉~동해, 삼척 구간을 확대하여 나타내었고, 동시에 CVI를 도시한 것이다. 각 인자 중에서는 해수면 상승률, 평균 파고, 평균 조차의 경우 크게 변화하는 양상은 없는 것으로 나타났고, 동해안 지역의 CVI에 영향을 미치는 요소는 해안선 지형, 침식률, 그리고 해안 경사에 관한 인자인 것으로 판단되었다.

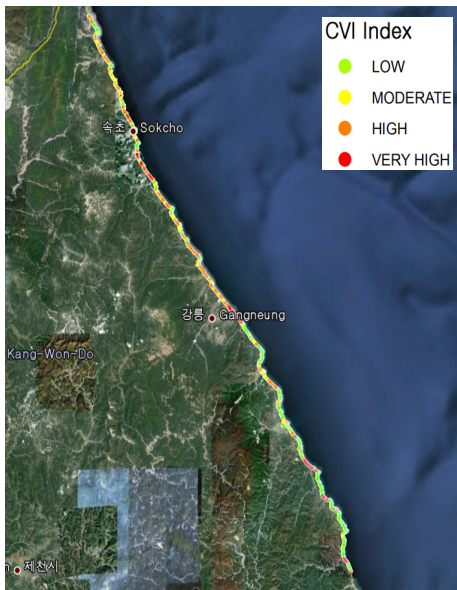


그림 4-10. 현재 상태에 대한 CVI

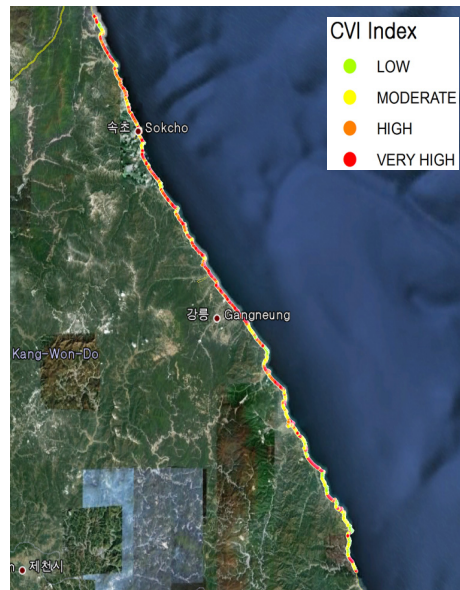


그림 4-11. 1m 해수면 상승 시 CVI



(a) 실측자료 이용 시

(b) 1.0m 해수면 상승 시

그림 4-12 강원도 고성~속초 지역 CVI



(a) 실측자료 이용 시

(b) 1.0m 해수면 상승 시

그림 4-13. 강원도 양양 지역 CVI



(a) 실측자료 이용 시

(b) 1.0m 해수면 상승 시

■ 그림 4-14. 강원도 강릉~동해 지역 CVI



(a) 실측자료 이용 시

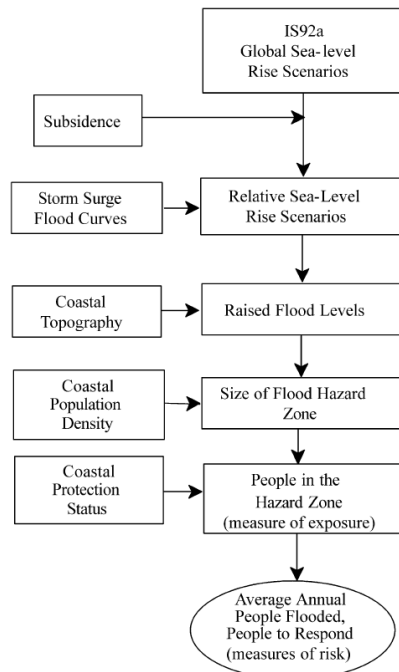
(b) 1.0m 해수면 상승 시

■ 그림 4-15. 강원도 삼척 지역 CVI

## 2. 범람 평가: 사례 지역

### 가. 평가 방법론

해수면 상승에 따른 연안역의 범람 평가는 다양한 방식으로 이루어질 수 있으나 대표적인 모식도는 <그림 4-16>과 같다(Nicholls, 2002). 범람 영향 평가의 기본적인 요소는 크게 지역 기후 시나리오(해수면, 강수 등) 및 DEM이며 사회·경제적 영향을 위해서는 인구, 주거, 인프라, 기타 산업 활동 등에 대한 정보가 필요하다. 여기서는 범람을 직접적으로 평가하는 방법과 해수면 시나리오에 대하여 검토하고자 하였다. 연안역 범람 평가 방법은 해수면 상승과 관련하여 연안 범람을 모사한 경험이 있는 방법론을 검토하였다. 해수면 상승 시나리오는 지역 시나리오 산출을 고려하여 해수면 상승, 조석, 해일, 파랑 등을 종합하는 시나리오를 검토하였다.



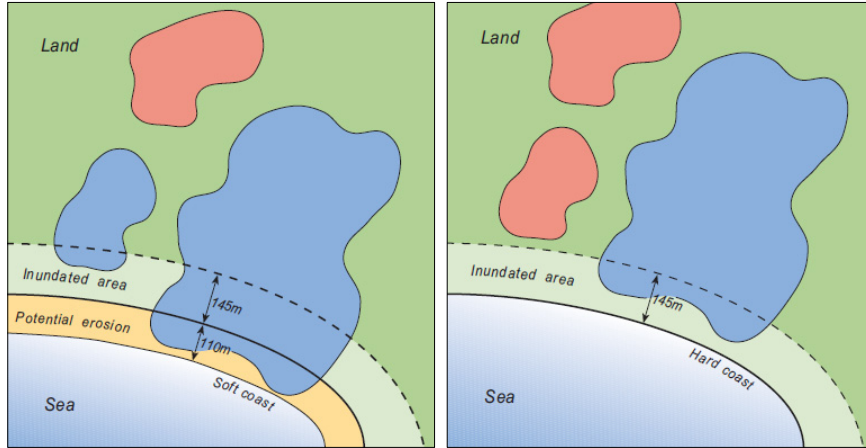
자료: Nicholls(2002)

■ 그림 4-16. Nicholls(2002)에 의해 적용된 홍수 모형 알고리즘을 나타내는 도표

### 1) Bucket fill 방법

Bucket fill 방법은 용어가 의미하는 것과 같이 해안에서 버킷에 물을 담아 육지 쪽으로 부었을 때 범람하는 지역을 나타내는 방법이다. 이 방법은 해수면 상승과 조석 등의 특정 해수면 높이를 산정하고 고도가 이 높이 아래에 있는 육역은 범람 지역으로 평가하는 방법이다. 따라서 이 방법은 범람 계산 시 필요한 수력학적인 과정은 고려하지 않는 단순한 방법이다. 해안에서 다양한 원인에 의한 해수면 상승은 인접한 육역의 저지대로 흐름을 유발할 것이기 때문에 범람을 평가하는 가장 간단한 방법인 동시에 해안에 인접한 범람을 평가하는 데에는 합리적인 방법으로 평가되고 있다. 이들 방법을 연안역 범람 평가에 사용한 예는 다양하다(조광우 등, 2002; Hisamichi *et al.*, 2009; Australian Government Department of Climate Change, 2009).

여기서는 호주의 국가 취약성 평가(2009)의 사례를 소개하고자 한다. 연안 범람 지역 범위 산정을 위하여 잠재적 해수면 상승과 수치 모델에 의한 고조를 합산한 해수면 시나리오를 해안 10km 마다 산출하고 30m 분해능의 DEM 자료를 사용하고 있다. 본 방법에 의해 범람 지역을 과도하게 산출하는 것을 줄이기 위하여 두 가지 규칙을 도입하고 있다. 그 하나는 연결성의 범칙으로 해안으로부터 145m 이내의 해안 지역에 대해서 이 규칙을 적용하고 있다. 또 다른 규칙은 모래 해안의 침식을 고려하여 2100년에 새로운 해안선을 가정하는 것이다. 호주의 경우 1.1m 해수면 상승 시나리오를 선정하고 있으며 Bruun's rule에 의거하여 100배의 해안선 후퇴 즉 110m의 해안선 후퇴를 가정하고 있다. 이로 인하여 암반 해안의 경우(그림 4-17의 오른쪽) 푸른색 지역이 범람 지역으로 산정되나 붉은색 지역은 고도가 해수면보다 낮음에도 불구하고 범람 지역으로 산정되지 않는다. 침식 해안의 경우(그림 4-17의 왼쪽) 110m 내륙 쪽에서 범람 범위가 시작되어 좌측의 저지대도 범람 지역으로 평가하고 있다. 뒤쪽에 있는 붉은 지역은 연결성의 규칙에 의거하여 범람 지역에서 역시 제외되고 있다. 호주의 국가 평가서는 잠재 범람 지역을 평가하는 효율적인 방법으로 평가하고 있다. 이 방법은 국가, 지역, 전 세계 공간규모에 1차적인 범람 잠재 지역을 스크리닝하는 데 유용한 방법으로 사료된다. 그러나 특정 대응 및 개발을 결정하는 정책 결정에서는 좀 더 수력학적인 접근 방법이 필요하다고 할 수 있다.



자료: Australian Government Department of Climate Change(2009)

■ 그림 4-17. Bucket fill 방법 사례

(좌: 연성 해안의 경우; 우: 강성 해안의 경우)

## 2) LISFLOOD-FP 모형

LISFLOOD-FP 모형은 University of Bristol의 Paul Bates 교수팀에 의해 개발되었으며, 고해상도의 지형 자료를 이용하는 래스터(raster) 기반의 범람 모형이다(Bates & De Roo, 2000). LISFLOOD-FP는 충분하지 않은 검정 자료 상황에서도 범람을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 간단하고 합리적인 물리적 재현성을 가진 모형으로 평가되고 있다. 이와 같은 이유로 인해 하천 홍수 범람 사례나 연안역에 대하여 기후 변화로 인해 초래될 수 있는 다양한 변화 시나리오 하에서의 상황을 재현할 때 많은 적용 사례가 있어 왔다(표 4-7).

표 4-7. LISFLOOD-FP 모형을 이용한 기후 변화에 따른 범람 영향 평가에 관한 주요 연구 사례

저자	연도	연구 제목 및 내용
Hunter <i>et al.</i>	2007	Simple Spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review : 래스터(raster) 기반의 2차원 Inundation 모형의 개념을 소개하고 고려해야 할 요소들을 소개
Purvis <i>et al.</i>	2008	A Probabilistic Methodology to Estimate Future Coastal Flood Risk Due to Sea Level Rise : IPCC TAR의 시나리오를 기반으로 tidal effect와 storm surge의 가능한 범위에 대해 LISFLOOD-FP 모형을 이용하여 침수 구역을 결정하고 2차원 평면에 대해 홍수 피해 가능 확률을 추정
Dawson <i>et al.</i>	2005	Quantified Analysis of the Probability of Flooding in the Thames Estuary under Imaginable Worst-case Sea Level Rise Scenarios : 해수면 상승에 있어서 극한 상황(5-6m 상승 시나리오)에 대해 100년 빈도 storm surge 사상의 침수 상황을 LISFLOOD-FP 모형을 이용하여 재현
Bate <i>et al.</i>	2005	Simplified two-dimensional Numerical Modelling of Coastal Flooding and Example Applications : 2차원 래스터 기반의 'LISFLOOD-FP model'과 이와 관련하여 적용 사례를 소개

LISFLOOD-FP는 하천 흐름에 대해서는 1차원 kinematic wave 모형으로, 범람원에서의 흐름은 2차원 flood spreading 모형을 기반으로 범람 범위를 예측한다. 하도와 홍수터의 지형학적 정보는 ARC-INFO 아스키(ascii) 형식의 래스터 자료를 이용하여 구축하며, 홍수터의 흐름은 Manning 방정식, 또는 storage cell 개념의 웨어 방정식(Cunge *et al.*, 1980)을 이용하여 계산한다. 예를 들어 연안 제방 붕괴(coastal dyke breaches)와 같은 하천 흐름의 범람 문제에 대해서는 하도 추적에 관한 요소들을 제외시킬 수 있다. LISFLOOD-FP에서는 홍수터 내에서 홍수의 전파는 중력과 지형 인자의 함수로 나타내어진다.

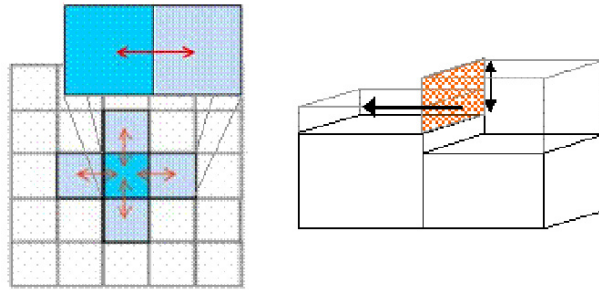
LISFLOOD-FP 하천 흐름은 운동량과 연속 방정식을 나타내는 1차원 St. Venants 방정식을 이용한다(Knight & Shiono, 1996). 홍수터의 흐름 또한 정사각형 셀의 형태로 나타나는 그리드로 세분화되어 연속 방정식과 모멘텀 방정식의 항으로 나타내어진다(그림 4-18). 이것은 홍수터의 2차원 동역학적 흐름장을 표현하기 위한 모형화를 따른다. 두 셀 간의 흐름은 단순하게 이들

셀들 사이에서 발생하는 자유 수면고 차이의 함수로 가정한다.

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (1)$$

$$Q_x^{i,j} = \frac{h_{flow}^{5/3}}{n} \left( \frac{h^{i-1,j} - h^{i,j}}{\Delta x} \right)^{1/2} \Delta y \quad (2)$$

여기서  $h^{i,j}$ 는 격자점( $i,j$ )에서 자유수표면고,  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 셀의 차원,  $n$ 은 유효 격자 스케일의 홍수터에 대한 Manning의 조도 계수,  $Q_y$ 는 또한 하천과 홍수터 간의 흐름을 나타내는 데 이용된다. 구조물 위로 흐름은 웨어 방정식을 이용하여 모형화 된다.



■ 그림 4-18. LISFLOOD-FP 모형의 계산 격자와 흐름 구조

모형은 다음과 같은 가정을 따른다.

- 하도 내 흐름 성분은 1차원 kinematic wave 모형을 이용하여 표현될 수 있으며, 하도는 직사각형으로 단순화될 수 있다.
- 하도 단면은 광폭 단면으로 가정될 수 있으며, 따라서 윤변은 하도 쪽으로 근사될 수 있다.
- 범람원과 제방 외 흐름에 대해서는 하나의 래스터 그리드로 세분화된 저류 격자를 이용하여 모형화될 수 있다.
- 저류 격자 간의 흐름은 분석적 등류 흐름 공식(Manning 또는 웨어 공식)을 이용하여 계산될

수 있다.

- 주 하천과 범람원 간의 흐름에서는 모멘텀의 전달은 없으며, 질량의 전달만이 있을 뿐이다.
- 흐름은 점변류로 가정한다.
- 모형은 SI 단위계를 이용하여 길이는 미터(m), 시간은 초(sec), 플럭스는 m<sup>3</sup>/s로 표현한다.

### 3) MD\_SWMS 모형

미국 USGS에 의해 개발된 MD\_SWMS(Multi-Dimensional Surface Water Modelling System)는 SToRM(System for Transport and River Modeling)이라는 천수 방정식으로 알려진 2차원 수심 적분된 방정식을 사용하는 수치 모형을 포함하여 흐름과 물질 거동을 해석한다. 천수방정식은 하천, 호수, 연안, 그리고 해안 흐름 현상을 해석하기 위하여 주로 사용되는 방정식으로서 다양한 흐름을 잘 재현하는 것으로 알려져 있다. 이 밖에 SToRM은 비정상 흐름과 젖음-마름(wet and dry) 현상의 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

MS\_SWMS의 SToRM 또한 연직 방향 적분 2차원 모형이다. 흐름과 유사 이동을 위한 2차원 모형은 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 2차원 모델은 연직 방향 적분 2차원 모형과 횡방향 적분 2차원 모형으로 구분된다. 연직 방향 적분 2차원 모형은 하천 수로를 따라 수심 적분된 유속과 수리학적 변수들의 횡방향 변위를 재현하기 위한 모형이다. 횡방향 적분 2차원 모형은 하천 수로를 따라 횡방향으로 적분된 유속과 수리학적 변수들의 연직 방향을 따르는 변위를 재현하기 위한 모형이다.

고정 격자에 직각한 흐름이 없다고 가정할 때 연속 방정식과 자유 수면 상태 방정식으로부터 다음과 같이 연직 방향 적분된 2차원 연속 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial(DU)}{\partial x} + \frac{\partial(DV)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 수심,  $t$ 는 시간,  $x, y$ 는 직교 좌표계(그림 4-19),  $U$ 는 수심 적분된 종방향 유속,  $V$ 는 수심 적분된 횡방향 유속으로 다음과 같이 정의된다.

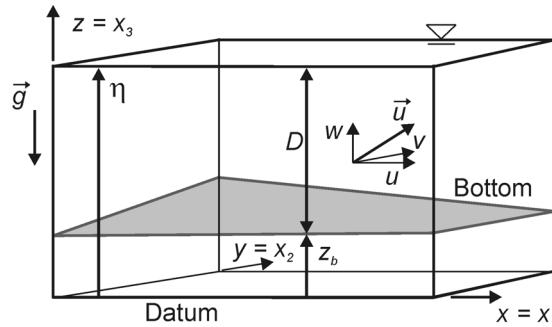
$$U = \frac{1}{D} \int_{z_b}^h u dz \quad (4)$$

$$V = \frac{1}{D} \int_{z_b}^h v dz \quad (5)$$

여기서  $z_b$ 는 하상고,  $h$ 는 자유 수면 높이,  $u$ 는 종방향 유속,  $v$ 는 횡방향 유속,  $z$ 는 연직 방향 거리이다. Coriolis력과 압력항이 포함된 수심 적분된 2차원 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(DU)}{\partial t} + \frac{\partial(DU^2)}{\partial x} + \frac{\partial(DUV)}{\partial y} \\ &= F_x + fDV - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial(D\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(D\tau_{xy})}{\partial y} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(DV)}{\partial t} + \frac{\partial(DUV)}{\partial x} + \frac{\partial(DV^2)}{\partial y} \\ &= F_y + fDU - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial(D\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(D\tau_{yy})}{\partial y} \end{aligned} \quad (7)$$



■ 그림 4-19. 사용된 좌표계와 몇몇 변수들의 정의

Note that  $u = u_1$ ,  $v = u_2$ , and  $w = u_3$ .

식 (6)~(7)에서  $f$ 는 Coriolis력으로  $2\Omega \sin\psi$ 와 같으며, 이때  $\Omega$ 는 지구의 회전각 속도,

그리고  $\psi$ 는 국지위도,  $F_x$ 는  $x$ 방향 외력,  $F_y$ 는  $y$ 방향 외력이며  $\rho_o$ 는 유체의 밀도,  $\tau_{bx}$ 는  $x$ 방향 바닥마찰계수,  $\tau_{by}$ 는  $y$ 방향 바닥마찰응력이다. 이 지배 방정식은 주로 천수 방정식 혹은 수심 적분된 Navier-Stokes 방정식으로 불린다. 마찰응력  $\tau_{ij}$ 는 와점성 계수와 난류 확산 그리고 방사응력으로 수심 적분 과정에서 발생한 비선형항을 포함한 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\tau_{ij} = \frac{1}{D} \int_{z_b}^{\eta} \left[ v \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_j' v_i'} + (u_i - U_i)(u_j - U_j) \right] dz \quad (8)$$

대부분의 자연 수체에서 분자 확산항은 난류 확산항에 비해 그 크기가 작으므로 무시된다. 방사응력은 종종 무시되기도 하나 물리 현상을 표현하는 매우 중요한 인자이다. 예를 들면 곡선 수로에서 방사응력은 곡선수로 상류부의 속도가 빠른 주 흐름을 곡면의 바깥 부분으로 이동하는 역할을 수행한다. 일반적으로 이러한 항들은 모두 분산 계수로 표현되는데, 분산 계수를 이용하여 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\tau_{ij} = D_i \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

여기서  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta 상수로서 만약  $i = k$ 이면  $\delta_{ij}$ 는 1, 만약  $i$ 와  $k$ 가 같지 않다면,  $\delta_{ij}$ 는 0의 값을 갖는다.  $D_i$ 는 각 방향 분산 계수로서 일반적으로  $D_{x_i} = D_{x_j} = D_{x_k}$  ( $D_x = D_y = D_z$ )을 사용한다.

난류 흐름에서 분산계수는 측정 혹은 기준에 개발된 경험식이나 난류 모형을 사용하여 계산될 수 있다. 바닥마찰응력은 수심평균유속과 방향은 같으며 그 크기는 수심평균유속의 제곱근 형태로 나타나며, 바닥마찰응력은 다음과 같은 식으로부터 구한다.

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_0} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (11)$$

여기서  $C_f$ 는 항력 계수로서 대략적으로 0.003이 사용된다. 바닥마찰응력은 Manning의 조도 계수  $n$ 이나 Chézy의 조도 계수  $C$  등을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = \frac{gn^2}{D^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{g}{C^2} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (12)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_0} = \frac{gn^2}{D^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{g}{C^2} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (13)$$

MD\_SWMS의 SToRM은 유한 체적법을 사용하는 모형이다. 유한 체적법은 보존법칙을 사용하는 방법으로써 지배 방정식의 적분 형태를 사용하는 수치 기법이다. 계산 격자 시스템은 명확한 개수의 유한 체적으로 세분화되며 방정식은 검사 체적(control volume) 경계 조건을 통과하는 몇몇의 진동을 해석 가능한 정도로 세분화한다. 기술적으로 독립 변수가 계산되는 세분화된 격자점을 결정하기 위한 검사 체적의 형상과 위치를 결정하는 2개의 주요한 형태가 있는데, 하나는 격자점 중심 기법과 다른 하나는 요소 중심 기법이다. 이 두 개의 수치 기법은 <그림 4-20>에 나타나 있다. 격자점 중심 기법은 검사 체적의 중심에 계산격자점에 위치하는 방법으로 검사 체적은 동일한 격자요소를 만드는 역할을 한다. 요소 중심기법에서 검사 체적은 인접한 격자점의 연결에 의해서 구성된다.

유한 체적법의 주요 장점은 공간적인 분할을 수행하는 것으로서 이는 격자 시스템과 물리적 체계의 변환 과정 없이 물리적 공간을 직접적으로 분할하는 것이 가능하다는 점이다. 이것은 매우 유연성 있는 방법으로 정형 격자는 비정형 격자체계 모두를 사용해서 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법은 지배 방정식에 포함된 물리적 보존 법칙, 즉 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존이 직접적으로 수치 기법에 적용되고 수치 모의에서 자동적으로 보존이 이루어진다는 장점이 있다. 수치 분할 방법에는 다양한 방법이 있으나 유한 체적 방법은 특별한 경우에 적용할 경우 확실한 장점이 있다. 그들 중 위에서 묘사된 전통적인 격자 체계를 사용하지 않는 것이다.

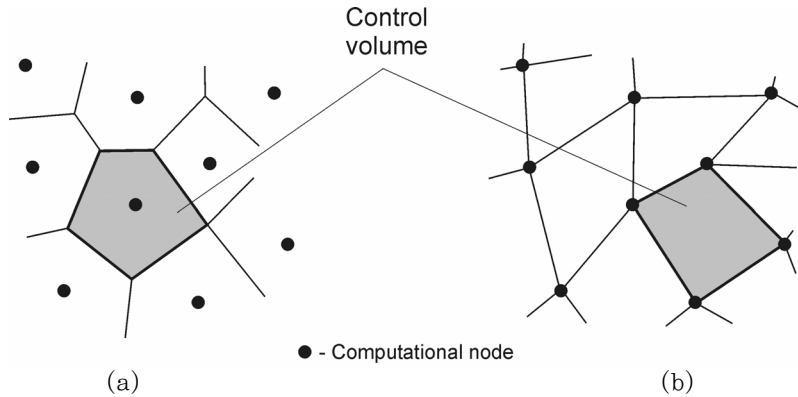


그림 4-20. Representation of the control volumes formed by node-centered (a) and cell-centered (b) formulations used in finite volume discretizations.

MD\_SWMS 모형은 지형 정보를 간단하게 입력할 수 있으며, 경계 조건을 자유롭게 입력할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 아울러 GUI 기반의 작동으로 손쉽게 대상 범위에 대한 홍수 범람 지역을 확인할 수 있다. 이와 같은 장점으로 인해 기후 변화로 인한 연안역에서 홍수 범람을 모의하는 데 있어서 큰 적용성을 가진다.

## 나. 해수면 시나리오

본 연구에서는 지역 해수면 시나리오 선정을 위하여 지구 온난화에 의한 평균 해수면 상승, 태풍 해일, 조석 및 파랑 자료를 사용하였다.

### 1) 평균 해수면 상승

기후 변화의 불확실성은 크게 미래의 온실가스 배출 시나리오+배출 시나리오별 기후 모델의 반응의 합으로 나타낼 수 있다. 본 연구와 같이 국지(local) 차원에서 해수면 상승 영향 평가를 하기 위해서는 배출 시나리오별 해당 지역의 해수면 상승 예측치를 필요로 한다. 그러나 2장에서 설명한 것과 같이 기후 변화에 따른 해수면 변화가 지역(regional) 및 국지(local) 규모에서 어느 정도 일어날 것인가를 예측하는 것은 아직까지 과학적으로 어려운 분야이다. 이로 인하여

3장에서 주요 국가의 해수면 시나리오도 지구 평균치에 기초한 특정 수치에 기초하여 선정되고 있다. <표 4-8>은 최근 주요 국가의 해수면 상승 영향 평가 시 사용되었던 시나리오를 나타내고 있다. 이들 국가의 시나리오는 IPCC AR4의 최대치 79cm를 초과하고 있음을 알 수 있다. IPCC AR4에서 해수면 상승 예측 시 빙상의 역학과 관련 문헌의 부족으로 이들 성분을 포함하지 않았으며 이를 포함하는 경우 해수면 상승이 증가할 수 있다는 점을 지적하고 있다. 최근 그린란드 및 남극 빙산의 관측 정보는 빙산의 흐름 및 해빙이 가속화되고 있음을 보고하고 있으며 이로 인하여 미래의 해수면이 크게 증가할 수 있음을 암시하고 있다. 그러나 빙상 역학에 대한 과학적인 정보 부족에 따라 이들 기여도의 규모 및 시기 등을 정하는 것은 어려운 실정이다. 그러나 그린란드 및 남극 빙산의 기여로 금세기 말까지 해수면이 1m 이상 상승할 수 있다는 연구 결과들이 보고되고 있는 실정이다. 특히 2009년 열렸던 코펜하겐 기후 변화의회의 평가 작업에서는 2장에서 소개한 준경험적인 통계 모델 결과를 인용하여 해수면이 75~190cm(중간값 110~120cm) 상승할 수 있다고 소개하였다.

■ 표 4-8. 주요 국가 해수면 상승 시나리오

Country	Publication	Sea Level Rise Scenario
Netherlands	Working together with water(Delta Committee established by government) Nov 2008	0.65-1.3m(2100), 2-4m(2200)
US	Coastal Sensitivity to Sea-level Rise:A Focus on the Mid-Atlantic Region(US Climate Change Science Program) Jan 2009	0.3-0.4m, 0.5-0.6m, 1-1.1m (2100)
UK	UK Climate Projecyions - Marine and Coastal Projection (UK Department of Environment) June 2009	A <sup>++</sup> 0.93-1.9m(2095)
NZ	Coastal Hazards and Climate Change (NZ Ministry for the Environment) July 2008	0.8m (0.5-1.4m)(2100)

기후 변화 영향 평가 및 대응 정책 결정은 과학적인 불확실성 하에서 이루어지는 작업으로 다양한 시나리오에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 기본적 접근에 근거하여 75cm,

1.1m, 1.9m의 3개 시나리오를 선정하였다. 여기서 75cm는 IPCC AR4의 최대 시나리오를 동시에 포함할 수 있으며, 1.2m는 IPCC 표준 방법론인 1m 시나리오, 1.9m는 주요국의 최대 시나리오인 동시에 우리나라 해수면 상승치가 지구 평균치보다 높게 나타나고 있는 점을 감안하여 선정하였다.

## 2) 태풍 해일

태풍 통과 시 기압, 바람, 해저 마찰, 쇄파, 기상 교란 이동, 지구 자전, 지형, 조석 및 하천 등의 효과의 복합 요인에 의하여 해일이 일어난다. 태풍 해일의 이론적 정보 및 우리나라에 미친 사례 등은 부록 I에 수록하였다. 우리나라의 경우 만구가 남쪽이나 서쪽으로 열리고 비교적 수심이 낮은 곳에서 현저한 해일이 빈번히 일어나며 이로 인한 인명 및 재산 손실이 매년 보고되고 있다. 해일에 의한 해수면 상승 계산은 모델링에 의한 방법과 경험식에 의한 방법으로 구별할 수 있다. 본 연구에서는 선형 장파 이론(linear long wave theory)에 기초한 수치 모델을 이용하여 해일고를 산정한 Nobuoka & Mimura(2009)(hereafter NB 2009)에 의한 수치 모델을 활용하여 우리나라 주변의 해일고를 산출하였다. NB(2009)에 의한 해일고 산정은 기압과 바람에 의한 해일고를 산정하며 구조표상에서 선형 장파 이론(linear long wave theory)에 기초하고 있다(식 14, 15, 16).

$$\frac{\partial M}{\partial t} - 2\Omega N \sin \varnothing + \frac{gh}{R \cos \varnothing} \frac{\partial(\eta - \eta_0)}{\partial \lambda} = \frac{\tau_s^{(\lambda)}}{\rho_w} - \frac{\tau_b^{(\lambda)}}{\rho_w} \quad (14)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + 2\Omega M \sin \varnothing + \frac{gh}{R} \frac{\partial(\eta - \eta_0)}{\partial \lambda} = \frac{\tau_s^{(\varnothing)}}{\rho_w} - \frac{\tau_b^{(\varnothing)}}{\rho_w} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varnothing} \frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \varnothing} \frac{\partial N}{\partial \varnothing} (N \cos \varnothing) = 0 \quad (16)$$

본 결과는 선형을 가정하였으므로 비선형 효과가 큰 지역(수심이 얇은 지역 등)에서는 그 오차를 포함할 것으로 예상된다(일반적으로 수치값이 관측치보다 작음).

해일고 산정을 위하여 사용한 바람 및 해면 기압은 일본 기상청 등의 태풍 경로를 활용하여 예측하였다(hindcasted)(식 17, 18).

$$P(r) = P_C + \Delta p \cdot \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (17)$$

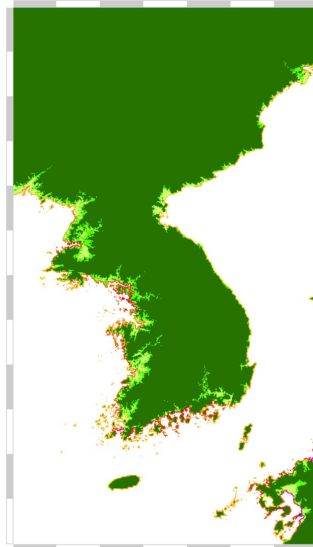
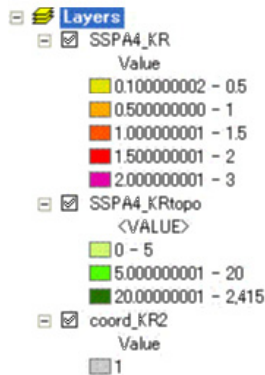
$$V_{gr} = \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) - \frac{rf}{2}} \quad (18)$$

$$V = C_1 V_{gr}$$

여기서 대기압 및 바람은 Myer 공식이 사용되었다. 일반적으로 태풍 반경에 대한 자료는 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 Kato(2005)의 경험식이 이용되었다. 해표면에 작용하는 바람 응력에 의한 마찰 계수는 Honda & Mituyasu 방정식(1980)을 사용하였다. 수치 모델의 격자 크기는 2초이며 적분 간격은 5분으로 하였다. 예측 기간은 1951년부터 2007년까지이다. 본 연구에서는 1초 간격으로 다운스케일링하여 사용하였다. <그림 4-21>은 우리나라 해안의 최고 해일고(바람 및 대기압)를 나타낸다.

## RESULTS

SSPA4\_KR Storm surge deviation on astronomical tide<unit: m>  
SSPA4\_KRtopo : land elevation <unit: m>



■ 그림 4-21. 과거(1951-2007년) 태풍에 의한 우리나라 해안의 해일고

### 3) 조석

본 연구에서 사용한 조석은 연간 최대 진폭을 나타내는 약최고고조위(App. H.H.W.)를 사용하였다. 한반도의 조석은 해역별로 다른 특성을 가지고 있다. 해역별 조석의 특성(국립해양조사원, 2007)을 살펴보면 동해안의 경우 조석은 매우 작아 조차가 일반적으로 0.3m 내외에 불과하고 일조부등도 매우 현저하여 1일 1회조가 되는 경우도 있는 것으로 알려져 있다. 대조차는 감포 이북이 0.3m 이하이고 울산에서는 0.5m, 고리에서 0.7m, 부산에서 1.2m로 동해안을 따라 남쪽으로 갈수록 점차 증가한다. 평균 해면은 3월에 가장 낮고 8월에 가장 높으며, 그 차는 약 0.3m로서 여름철의 가장 낮은 조고가 봄철의 가장 높은 조고와 거의 같은 높이로 되는 곳도 있다. 또한 어떤 항만에서는 해면의 부진동 현상이 있어 그 승강이 조석에 의한 승강보다 큰 경우도 있다.

남해안의 경우 조석은 동해안의 조차보다 크게 나타나며 남해안의 대조차는 부산에서 1.2m로부터 남해안의 서쪽으로 갈수록 증가하여 여수에서는 3.0m, 완도에서는 3.1m 정도가 된다. 남해안은 일조부등이 매우 적으며 대개 규칙적인 승강을 하는 것으로 조사되고 있다. 평균 고조 간격은 남해안의 동부에서는 8시부터 서쪽으로 갈수록 점차 증대하여 남해안의 중부에서는 9시, 서부에서는 11시가 된다. 평균 해면은 2월에 최저, 8월에 최고로 되며 그 차이는 약 0.3m가 된다.

서해안의 경우 조석은 동해안이나 남해안에 비하여 조차가 매우 크게 나타나며, 대조차의 경우 서해안의 남부에서는 약 3.0m 정도이며 북쪽으로 올라갈수록 대조차는 증가하여 군산에서는 6.0m, 인천 근방에서는 약 8.0m에 달한다. 여기서부터 북쪽으로는 감소하여 대청도 부근에서는 약 2.8m가 되나 여기서부터 다시 증가하여 남포에서는 약 4.8m, 압록강 입구에서는 약 4.2m가 된다. 서해안은 일조부등은 일반적으로 적으나 조차가 크므로 어느 정도의 조고의 부등은 나타나고 있다. 평균 해면은 남해안과 마찬가지로 2월에 가장 낮고 8월에 가장 높으며 그 차이는 약 0.5m 정도이다. 평균 고조 간격은 서해안의 남부에서는 약 11시이고 북쪽으로 가면서 점차 증가하여 군산 부근에서는 약 3시, 인천 부근에서는 약 4.5시, 대동강 부근에서는 약 8시이고 압록강 부근에서는 약 9시가 된다.

#### 4) 파랑

본 연구의 사례 지역과 관련하여 C 공단의 경우 파랑은 고려하지 않았으며 단지 본 연구에서 사용한 태풍 해일은 기압 및 바람 효과만을 고려하므로 파랑에 의한 set-up은 피해 대책 연구 결과(부산광역시, 2004) 수치(0.3m)를 사용하였다. 동해안 사례 지역의 경우 파랑에 의한 효과를 두 가지로 검토하였다. 먼저 파랑에 의한 set-up은 50cm(관련 전문가 면담)를 임의적으로 산출하여 해일고에 적용하였으며, 이외에도 천해 파랑의 효과를 반영하기 위하여 기존의 천해 파랑 자료 중 10년 빈도 파랑(3.64m) 및 50년 빈도 파랑(4.23m)의 반(평균해면 기준)을 사용하여 추가적인 범람 가능성을 평가하였다.

#### 다. 사례 지역 평가 결과

본 연구에서는 해수면 상승에 의하여 범람 피해가 예상되는 3개 지역에 대한 평가를 실시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 현재의 연안 사회·경제적 활동에 대한 취약성 평가에 주안점을 두었다. 취약지구의 사회적 민감도를 감안하여 해안 주거 지역을 A지역, 해안 시가지 지역을 B지역, 임해공단 지역을 C지역으로 처리하였다.

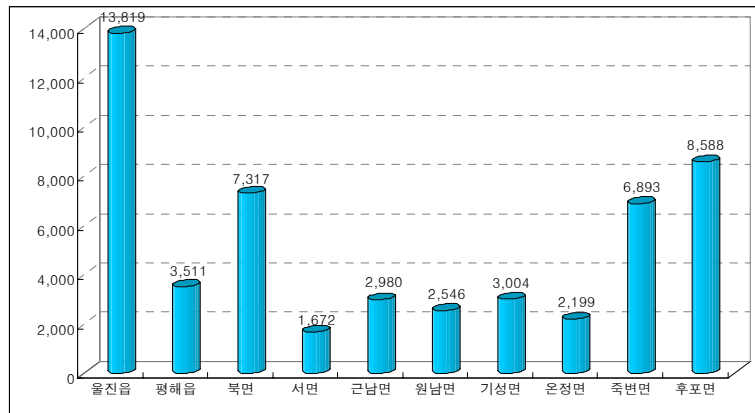
##### 1) A 지역: 해안 주거지

###### 가) 지역 개요

경상북도의 동북단에 위치한 A군은 동쪽으로는 동해, 서쪽으로는 봉화군과 영양군, 남쪽은 영덕군, 북쪽으로는 강원도 삼척시와 접하고 있다. 2개의 읍과 8개의 면으로 구성되어 있으며, 989.04km<sup>2</sup>의 면적에 52,529명(2009. 12. 31 기준)의 인구가 거주하고, 주로 농업과 어업에 종사하고 있다.

■ 표 4-9. A군의 지역별 인구 수(2009. 12. 31 기준)

읍·면	총인구	울진읍	평해읍	북면	서면	근남면	원남면	기성면	온정면	죽변면	후포면
인구수	52,529	13,819	3,511	7,317	1,672	2,980	2,546	3,004	2,199	6,893	8,588



■ 그림 4-22. A군의 지역별 인구 수(2009. 12. 31 기준)

A군의 연평균 기온은 약 12.5℃로 동일 위도상에 위치한 다른 도시들에 비해 1~2℃ 높은 편이다. 이는 태백산맥의 동사면에 위치하여 겨울철의 탁월풍인 북서계절풍의 풍하지역에 해당하고, 또한 동한해류(난류)의 영향을 받기 때문이다. A군의 강수량은 1,102.3mm이고, A 지방의 강수량의 계절적 분포 특징을 보면 여름(6·7·8월) 강수량이 연 강수량의 40.9%를 차지하여 가장 높게 나타나고, 다음으로 가을(9·10·11월)이 연 강수량의 27.9%, 봄(3·4·5월) 19.0%, 겨울(12·1·2월) 12.1% 순으로 나타난다.

■ 표 4-10. A 지역의 30년 기후 월 평년값 자료(1971-2000년)

요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균기온(℃)	1.0	1.9	6.0	11.9	16.1	19.0	22.9	23.8	19.8	14.9	9.0	3.6
강수량(mm)	47.9	48.0	66.6	74.2	69.0	105.7	153.8	191.7	169.3	77.0	61.3	37.8

자료: 기상청(<http://www.kma.go.kr/>)

표 4-11. A 지역의 일평균 기온 및 일 강수량(2009년)

요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균기온(°C)	1.4	6.1	7.4	12.4	17.1	20.1	21.3	22.8	20.1	15.9	8.6	2.7
강수량(mm)	10.1	13.0	51.2	59.0	73.8	81.0	205.0	131.2	107.5	1.9	96.0	22.0

자료: 기상청(<http://www.kma.go.kr/>)



그림 4-23. 동해안 A 해안 지역의 전형적인 취락 입지와 해안 도로의 모습(A군 기성면 봉산리)

A 지역의 해안은 대부분 소규모의 어촌이 바닷가에 매우 인접하고 있고, 마을을 전면으로 해안 도로가 방파제와 함께 연안을 따라 건설되어 있다. 이러한 지역은 파랑의 세굴 현상에 의해 지반이 연약화되면서 도로 유실이 일어날 가능성이 매우 높다.

A 지역에서 해수면 상승에 따른 범람 위험이 큰 지역으로는 기성면 기성리와 평해읍 일대를 들 수 있다. 이들 지역은 태백산맥의 동사면에서 발원한 하천들이 흘러 동해로 유입하는 지역으로 해안의 후면에 충적 평야가 넓게 형성되어 있다.



■ 그림 4-24. A군 기성면 기성리 해안(2010년 6월 현재 방파제 공사 중)



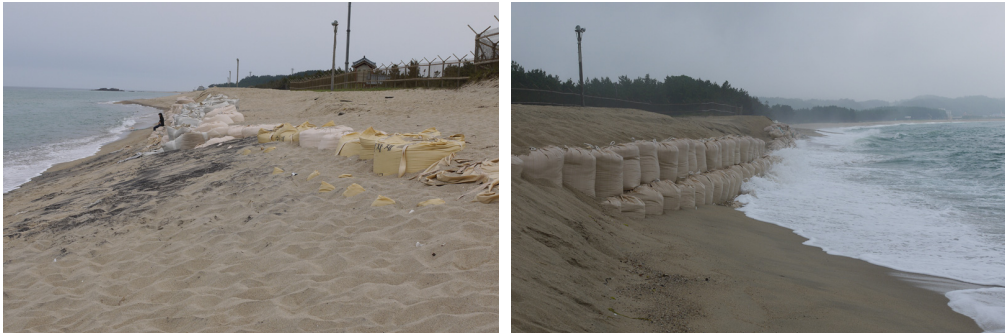
■ 그림 4-25. A군 기성면 기성리와 해안 후면의 넓은 충적 평야

평해읍은 A군 온정면 백암산(1,003m) 남쪽의 삼승령(747.3m) 부근에서 발원하여 평해읍을 지나 동해로 흘러드는 남대천 하류의 저지대에 위치하고 있다. 평해 남대천은 감입 곡류 하천으로, 특히 온정면 도계리에서 평해읍 삼달리 사이는 전형적인 감입 곡류의 형태를 이루고 있고, 평해읍 부근의 하곡 사이에는 넓은 충적 평야가 발달해 있다. 이곳은 태풍이나 홍수와 같은 집중 호우 시 남대천이 바다로 쉽게 빠져나가지 못하고 범람하는 상습침수피해지역으로, 앞으로 해수면 상승에 따른 피해도 증가할 것으로 예상되는 지역이다.



■ 그림 4-26. 남대천 하류의 평야 지대에 위치한 평해읍

평해읍 월송리의 월송정은 과거 바닷가의 모래가 바람에 날려 와 쌓여서 형성된 해안 사구에 자리하고 있다. 하지만, 현재 월송정 전면의 해안은 모래 침식이 가속화되고 있고, 침식으로 인해 해변이 급경사를 이루고 있다. 임시방편으로 모래 포대를 쌓아두고 있으나, 파랑으로 인해 계속 깎여 나가고 있는 현상을 쉽게 관찰할 수 있다.

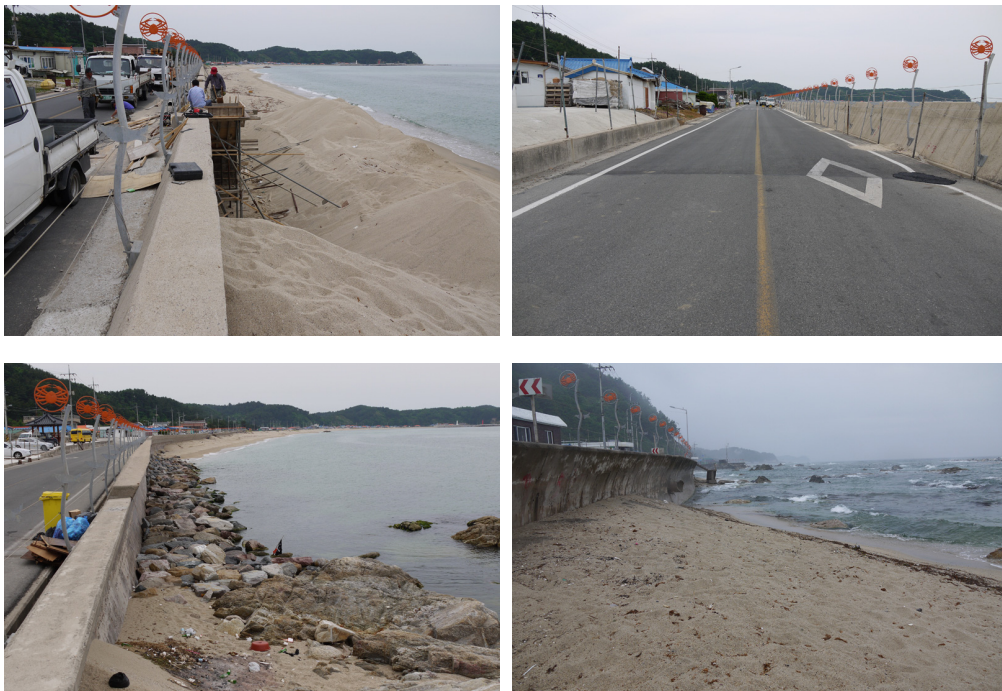


■ 그림 4-27. 평해읍 월송리 월송정 전면의 사빈 해안

인근에는 사주로 인해 하구가 막히면서 형성된 하구역 습지가 넓게 발달하고 있으나, 해수면이 상승하면 이로 인해 습지의 수위도 상승하면서 식생 파괴나 염도 변화 등으로 인한 피해의 가능성도 매우 높은 곳이다.



■ 그림 4-28. 평해읍 월송리 월송정 인근에 발달한 하구역 습지



■ 그림 4-29. 평해읍 거일리의 해안 도로

평해읍 거일리 지역은 해안의 모래 침식으로 해안 도로의 일부(약 90m 구간)가 유실되어 새로이 도로 포장을 하고, 기반에 거력을 설치하여 그 위에 다시 모래를 피복하는 작업이 이루어졌다.

〈그림 4-30〉의 후포면 후포4리 일대는 독특한 취락 입지 형태를 보여 준다. 마을 뒤편으로는 석회암질 기반암이 단애를 이루며 마을을 둘러싸고 있고, 마을 전면으로는 해안 도로를 사이에 두고 동해와 접하고 있다. 마을이 위치한 곳은 현재 해안 도로보다 지대가 낮은 곳인데, 이곳은 만약 범람이 이뤄진다면 물이 빠져나갈 곳이 없어 마치 저수지 형태로 물에 갇히게 될 것으로 예상된다. 현재는 마을의 해안 도로 전면 테트라포트로 방파제를 쌓아 해수의 범람 및 침수를 방지하고 있다.



■ 그림 4-30. 후포면 후포4리 일대의 취락 입지와 해안 도로

## 나) 범람 평가

동해안의 사례 지역은 동해안의 다른 지역과 같이 모래 해안에 인접하여 해안 도로가 시설되어 있고 도로 배후에 주거 시설이 입지해 있는 전형적인 동해안 취락 지대이다. 이들 지역은 현재에도 도로 시설물에 의한 해안 침식 가중과 월파 등의 피해를 입고 있으며, 향후 기후 변화 및 해수면 상승으로 인하여 이와 같은 피해가 크게 가중될 것으로 전망되는 지역이다. 더불어 이 지역에는 동해의 많은 지역과 같이 하천이 포함되어 있다. 따라서 해수면 상승과 하천 유출이 중첩되는 경우 범람 피해가 크게 증가할 수 있다. 먼저 본 연구에서는 장래의 해수면 상승에 대한 해양으로부

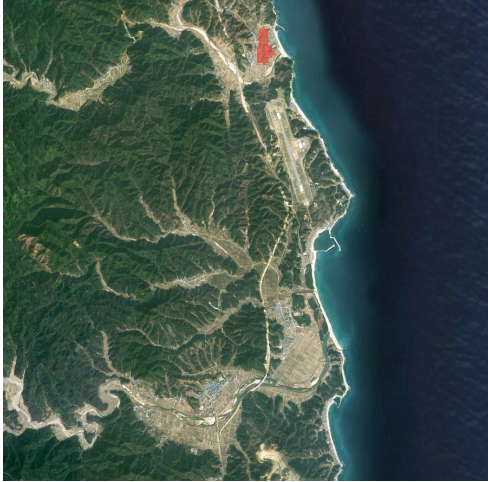
터의 잠재적 범람 가능성을 평가하기 위하여 12개의 해수면 시나리오(표 4-12)를 대상으로 평가하였다. 이들 시나리오에는 조석, 태풍 해일, 해수면 상승 및 파랑의 4개 성분을 고려하였다. 사례 지역의 해일고는 약 0.5m로 산출되었으나 파랑에 의한 set-up에 대한 정보가 존재하지 않아 관련 전문가의 면담을 통하여 0.5m를 추가적으로 선정하였다. 이들 시나리오 중 1~4 시나리오는 직접적인 범람을 나타내며, 시나리오 5~12는 파동에 의한 추가적인 가능성을 평가한 결과이다(그림 4-35~그림 4-42).

■ 표 4-12. A 해안 지역의 해수면 시나리오

Scenario	Tide	Storm Surge	wave	Sea Level Rise
1	O	O(wave setup)	X	X
2	O	O(wave setup)	X	O(0.75m)
3	O	O(wave setup)	X	O(1.1m)
4	O	O(wave setup)	X	O(1.9m)
5	O	O	O	X
6	O	O	O	X
7	O	O	O	O(0.75m)
8	O	O	O	O(1.1m)
9	O	O	O	O(1.9m)
10	O	O	O	O(0.75m)
11	O	O	O	O(1.1m)
12	O	O	O	O(1.9m)

Case 1: Tide+SS=0.135+0.5+0.5=1.135m  
 Case 2: Tide+SS+SLR=1.135+0.75=1.885m  
 Case 3: Tide+SS+SLR=1.135+1.1=2.235m  
 Case 4: Tide+SS+SLR=1.135+1.9=3.035m  
 Case 5: Tide+SS+wave(10년)=0.635+1.82=2.455m  
 Case 6: Tide+SS+wave(50년)=0.635+2.115=2.75m  
 Case 7: Tide+SS+wave+SLR=0.635+1.82+0.75=3.205m  
 Case 8: Tide+SS+wave+SLR=0.635+1.82+1.1=3.555m  
 Case 9: Tide+SS+wave+SLR=0.635+1.82+1.9=4.355m  
 Case10: Tide+SS+wave+SLR=0.635+2.115+0.75=3.5m  
 Case11: Tide+SS+wave+SLR=0.635+2.115+1.1=3.85m  
 Case12: Tide+SS+wave+SLR=0.635+2.115+1.9=4.65m

시나리오 5~12는 파랑은 인근 천해역의 10년, 50년 빈도파의 수치 모델 결과의 1/2 수치를 사용하였다. 따라서 파랑을 고려한 해수면과 육상의 고도와의 비교를 통하여 범람 지역을 산정하였다. 이들 파랑에 의한 추가적인 범람 지역은 노란색으로 표시하였다. 해수면 상승이 증가할수록 많은 지역에서 범람이 증가함을 볼 수 있다. 이들 지역 해안은 대부분 사빈으로 구성되어 있고 해안 도로가 인접하고 있어 침식이 증가하고 있으며, 향후 해수면 상승은 이들 침식 효과를 더욱 증대시킬 것으로 예상된다. 이와 같은 침식 영향 및 강성 구조물에 의한 월파 효과까지 고려하는 경우 범람이 더욱 증대될 수 있을 것으로 사료된다.



■ 그림 4-31. Case 1: Tide+SS  
( $0,135+0,5+0,5=1,135\text{m}$ )



■ 그림 4-32. Case 2: Tide+SS+SLR  
( $1,135+0,75=1,885\text{m}$ )



■ 그림 4-33. Case 3: Tide+SS+SLR  
( $1,135+1,1=2,235\text{m}$ )



■ 그림 4-34. Case 4: Tide+SS+SLR  
( $1,135+1,9=3,035\text{m}$ )



그림 4-35. Case 5: Tide+SS+WAVE(10년)  
( $0.635+1.82=2.455\text{m}$ )

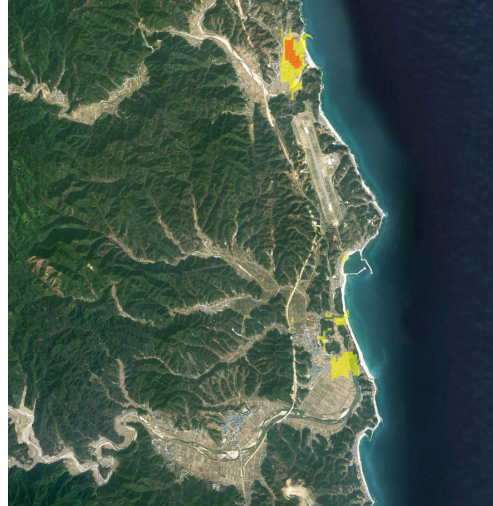


그림 4-36. Case 6: Tide+SS+WAVE(50년)  
( $0.635+2.115=2.75\text{m}$ )



그림 4-37. Case 7: Tide+SS+WAVE+SLR  
( $0.635+1.82+0.75=3.205\text{m}$ )

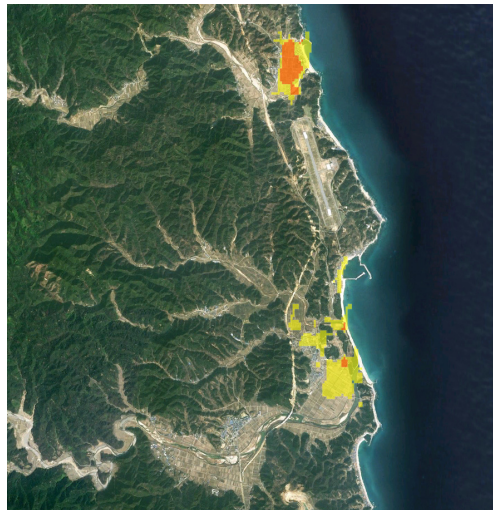
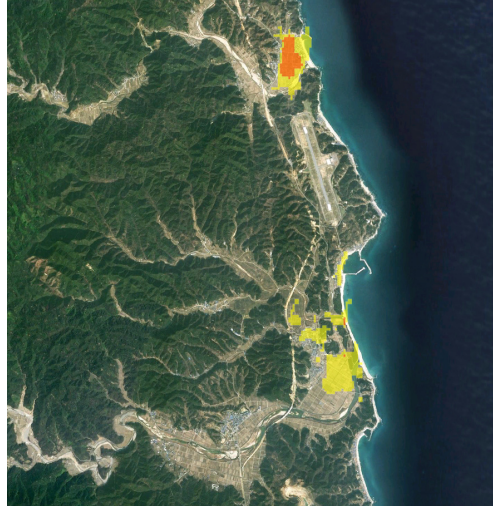


그림 4-38. Case 8: Tide+SS+WAVE+SLR  
( $0.635+1.82+1.1=3.555\text{m}$ )



■ 그림 4-39. Case 9: Tide+SS+WAVE+SLR  
( $0,635+1,82+1,9=4,355\text{m}$ )



■ 그림 4-40. Case 10: Tide+SS+WAVE+SLR  
( $0,635+2,115+0,75=3,5\text{m}$ )



■ 그림 4-41. Case 11: Tide+SS+WAVE+SLR  
( $0,635+2,115+1,1=3,85\text{m}$ )



■ 그림 4-42. Case 12: Tide+SS+WAVE+SLR  
( $0,635+2,115+1,9=4,65\text{m}$ )

## 2) B 지역: 해안 시가지(상습 침수 구역)

### 가) 지역 개요

B시는 강원도 최남단에 위치한 산업/관광의 중심 지역으로서 동쪽은 동해안 해안선과 북쪽은 동해시, 서쪽은 정선군과 태백시, 남쪽은 경상북도 울진군과 접하고 있으며, 동단은 원덕읍 월천리, 서단은 하장면 공전리로 동서간 거리는 45.75km이며, 남단은 가곡면 풍곡리, 북단은 교동 증산으로 남북간 거리 48.60km이다. 행정 구역 개편으로 인하여 원덕읍 초곡리/매원리(1943년), 노곡면 금계리(1973년), 원덕읍 용화리와 장호리(1987년)가 근덕면에 편입되었으며, 현재 14개의 법정리와 38개의 행정리, 138개의 새마을반, 56개의 자연 부락으로 편성되어 있다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 근덕면은 삼척시의 동남쪽에 위치하고 있으며, 동쪽으로는 동해, 서쪽은 노곡면, 북쪽은 사직동 남쪽은 원덕읍에 서로 이웃하고 있다. 자세한 행정 구역 현황 및 가구(인구) 수는 다음 <표 4-13>과 같다.

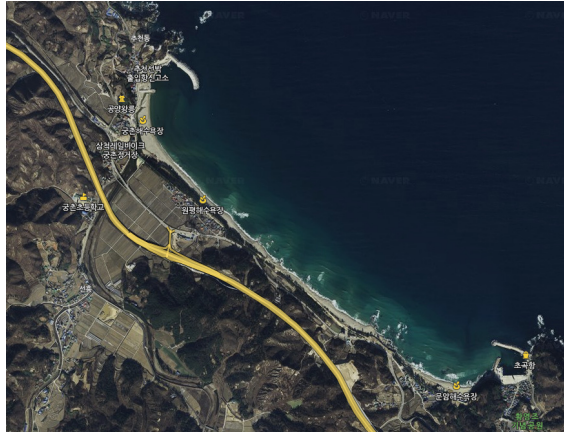
■ 표 4-13. 대상 지역 행정 구역 및 가구(인구) 현황

행정구역	가구 수(호)	인구 수(인)	면적(km <sup>2</sup> )
강원도 B시 근덕면 궁촌리	283	717	31.51
강원도 B시 근덕면 매원리	75	299	10.05
계	358	946	41.56

### 나) 하천 및 지형 현황

수치 모델링 적용지역인 B시 근덕면에는 <그림 4-43>에 보이는 것과 같이 '추천'이 흐르고 있다. 추천은 동해로 유입되는 지방 2급 하천으로서 유역 면적은 41.57km<sup>2</sup>, 유로 연장 12.50km인 수지상 하천이다. 추천 유역은 동쪽으로는 동해안과 접하고 있으며, 서쪽으로는 강원도 B시 노곡면, 남쪽으로는 B시 근덕면 용화리, 북쪽으로는 근덕면 동막리와 접하고 있다. 유역의 북단에 위치한 마읍천과 경계를 이루는 해발 443~932m에 이르는 고봉으로 연결하여 분수령을 이루고

있기 때문에 지세가 험준한 편이며, 추천 양안을 따라 농경지가 분포되어 있을 뿐 대부분의 유역은 산지로 형성되어 있다.



■ 그림 4-43. B시 근덕면 일대 위성 사진

유역의 평균 고도는 323.76m, 평균 경사 40.26%로 비교적 고도가 높고, 경사는 하구로부터 상류로 올라갈수록 점차 급해지는 일반적인 성향을 보이고 있다. 토지 이용 현황의 경우 경작지가 9.34%(3.88km<sup>2</sup>), 임야가 88.67%(36.86km<sup>2</sup>), 대지 1.51%(0.63km<sup>2</sup>), 기타 0.48%(0.20km<sup>2</sup>)로 임야가 대부분을 차지한다. 기상의 경우 연평균 기온 12.4℃, 상대 습도 69%로 조사되었으며, 추천의 하상 경사는 중/하류부에서는 1/55-1/380으로 비교적 완만하며, 중/상류부에서는 1/21-1/55로 경사가 급한 산지 하천을 유지하고 있다. 하상 재료의 구성은 중/하류부에서는 자갈 및 모래, 갈대밭으로 이루어져 있고, 중/상류부는 큰호박돌, 전석 및 암으로 형성되어 있다.

#### 다) 피해 현황

대상 지역인 강원도 B시 근덕면은 ‘국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)’ 상 수해 상습 지구로 지정되어 있다. 해당 지역은 연안가에 위치한 취락과 주변 하천의 영향을 받아 태풍 내습 시 상습적으로 침수 피해를 입고 있는 실정이며, 2005년 약 57억원, 2006년 약 140억원(이 중 47억원은 2007년 7월 제3호 태풍 ‘에위니아’에 의한 피해), 2007년 태풍 제12호 태풍 ‘위파’에

의해 큰 피해를 입을 것으로 알려져 있다. 한국방재협회(2008)의 'B시 침수 흔적 조사 보고서'에 따르면, 2006년 7월 10일 태풍 당시 장마 전선의 영향으로 호우주의보, 풍랑주의보 및 강풍주의보 기상 특보가 발효되어 7월 10일 최고 166mm(노곡면)의 집중 호우가 발생하였으며, 특히 근덕면(107mm) 소재 추천 하구 부근에서 과도로 인한 해수면 상승으로 하구에 모래 둑이 형성되어 하천 배수능력 저하에 따른 범람으로 궁촌리, 매원리 일대에 주택 침수 및 농작물 피해가 발생한 것으로 알려져 있다. 다음 표는 2004~2007년의 해당지역 강수량 및 기간을 도시한 것으로, 해당 2007년의 태풍이 비교적 적은 강수량임에도 불구하고 해수면의 상승으로 인해 피해가 발생한 것을 알 수 있다.

■ 표 4-14. 근덕면 강수량 및 강우 기간(장마 기간 중, 단위 mm)

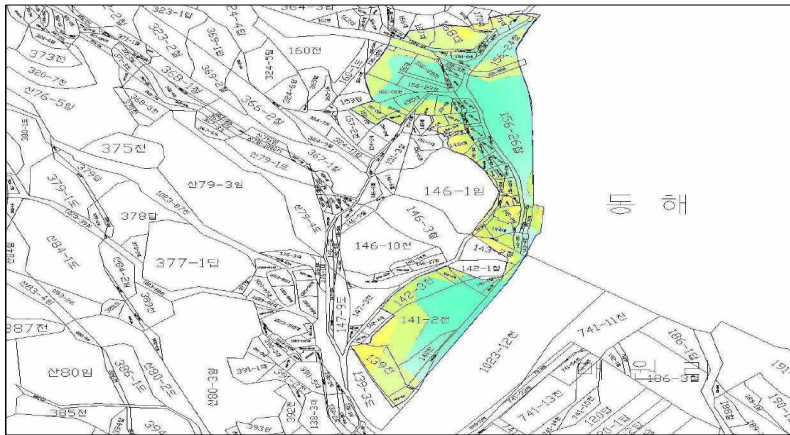
순 위	2007년 발생 장마	1	2	3
연 도		2006	2004	2005
시작일	6.23	6.26	6.19	6.26
종료일	7.24	7.21	7.25	7.13
강수량	273	754	561	314

■ 표 4-15. B시 근덕면 침수 피해 원인

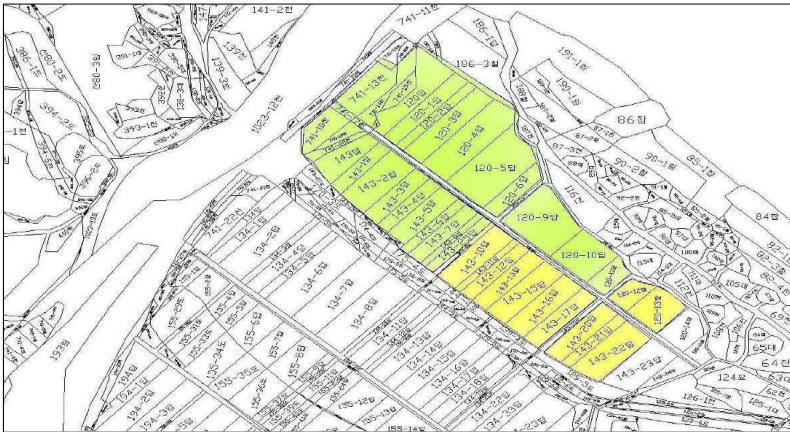
기본 원인	원인 발생 요인	범람 직접 원인
자연적 원인	지구 온난화 기상이변	강수량 및 홍수량 증가
	자연지형적 원인	하천 하구 해수면 상승 모래둑 형성으로 인한 배수 능력 저하
사회적 원인	지자체 투자/정비 미흡	
	홍수 예방 대책 미흡	홍수위 산정, 수문사상 관측 미흡
	재해 예방 시스템 미비	
경제적 원인	하천 부지 점유	비닐하우스, 축사 설치: 피해액 증가
	급격한 도시화	유출 속도 증가

'B시 침수 흔적 조사 보고서'는 해당 지역의 침수 피해 원인을 자연적 원인과 사회적 원인으로 구분하여 제시하였고, 자세한 내용은 <표 4-15>와 같다. 범람의 직접적인 원인 중 하구의 해수면

상승이 범람 피해의 원인 중 하나인 것으로 보고되었다. <그림 4-44>는 태풍 ‘에위니아’ 내습 시 B시 근덕면의 피해 현황을 나타낸 도면으로, 주택지와 농경지 23,524m<sup>2</sup>(궁촌리), 50,690m<sup>2</sup>(매원리)의 피해 지역을 보여주고 있다.



(a) 궁촌리 피해 지역



(b) 매원리 피해 지역

■ 그림 4-44. B시 근덕면 침수 흔적도



(a) 궁촌리 피해 현황



(b) 매원리 피해 현황

■ 그림 4-45. B시 근덕면 실제 피해 현황

#### 라) 범람 분석

A 사례 지역의 경우와 마찬가지로 해당 지역의 DEM을 이용하여 기본 지형 자료 구성, '추천 하천정비기본계획'의 조도 계수와 하천 단면, 그리고 100년 빈도 계획 홍수량을 이용하여 범람 분석을 실시하였다. 사례 지역의 수치 모델링에 사용된 해수면 경계 조건은 다음 표에 도시된 것과 같다. A 지역과 동일하게 총 11개의 해수면 상승 시나리오를 작성하였으며, 10년과 50년 빈도에 대한 파랑 시계열 자료를 작성하여 사용하였다. 각 시나리오가 의미하는 것은 A 사례 지역과 동일하도록 하였으며, 해당 지역에 알맞은 조석, 태풍 해일, 파랑에 대한 입력 자료를 구성하였다.

표 4-16. B시 근덕면 시뮬레이션 시나리오

Scenario	Tide (0.145m)	Storm Surge (0.6m)	wave (m)	Sea Level Rise (m)
2	O	O	X	O(0.75m)
3	O	O	X	O(1.1m)
4	O	O	X	O(1.9m)
5	O	O	O(10년 빈도)	X
6	O	O	O(50년 빈도)	X
7	O	O	O(10년 빈도)	O(0.75m)
8	O	O	O(10년 빈도)	O(1.1m)
9	O	O	O(10년 빈도)	O(1.9m)
10	O	O	O(50년 빈도)	O(0.75m)
11	O	O	O(50년 빈도)	O(1.1m)
12	O	O	O(50년 빈도)	O(1.9m)

〈그림 4-49〉와 〈그림 4-50〉은 해수면 상승의 영향이 없는 경우 근덕면의 범람 시뮬레이션 결과이다. 근덕면의 경우 거주 및 상업 지구들이 해안선에 매우 근접하여 있으며, 지반과 해수면과의 평균 높이 차가 약 2.0m 정도이기 때문에 해수면 상승의 영향 없이 조석과 태풍 해일, 그리고 파랑에 의해 백사장과 해안가가 범람으로 인한 침수가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 같은 모의 조건의 경우 근덕면의 추천 상류부에서도 100년 빈도 홍수량에 의해 침수가 발생하는 것을 확인할 수 있다.



그림 4-46. Scen.02: Tide+SS+SLR(1)



그림 4-47. Scen.03: Tide+SS+SLR(2)

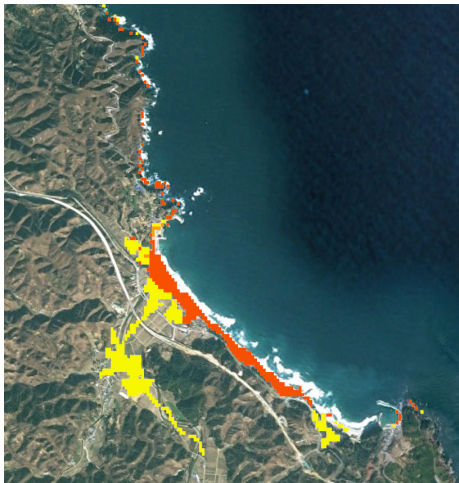


그림 4-48. Scen.04: Tide+SS+SLR(3)



그림 4-49. Scen.05: Tide+SS+Wave(10)



■ 그림 4-50. Scen,06: Tide+SS+Wave(50)



■ 그림 4-51. Scen,07:  
Tide+SS+Wave(10)+SLR(1)



■ 그림 4-52. Scen,08:  
Tide+SS+Wave(10)+SLR(2)



■ 그림 4-53. Scen,09:  
Tide+SS+Wave(10)+SLR(3)

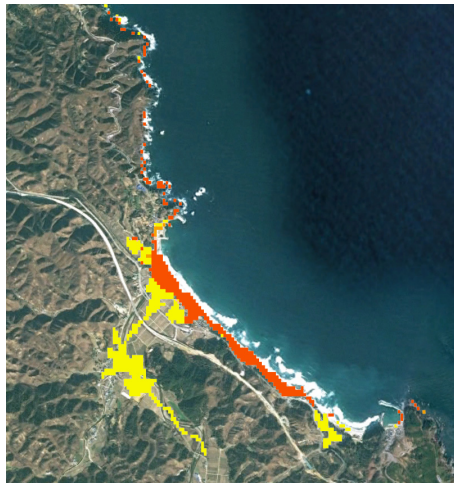


■ 그림 4-54. Scen,10:

Tide+SS+Wave(50)+SLR(1)

■ 그림 4-55. Scen,11:

Tide+SS+Wave(50)+SLR(2)



■ 그림 4-56. Scen,12:

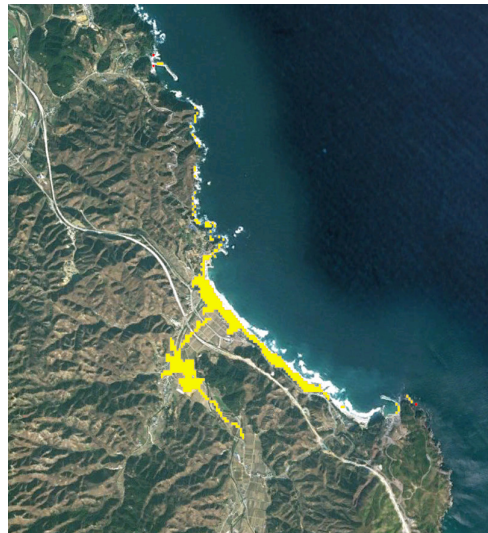
Tide+SS+Wave(50)+SLR(3)

〈그림 4-57~그림 4-58〉은 파랑에 의한 침수 면적 증가를 분석한 것이다. 그림에서 노란색으로 침수된 부분은 조석, 태풍 해일, 해수면 상승만 있을 경우 침수되는 면적을 나타내고, 적색으로

침수되는 부분은 파랑에 의해 증가되는 침수 면적을 보여주는 것이다. 근덕면의 경우 A 지역과는 다르게 해수면 상승에 의해 대부분의 지역에서 이미 침수가 발생하기 때문에 파랑으로 인한 침수 면적의 증가 양상은 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 해수면 상승 및 파랑 등이 영향을 미치는 방식이 지역별 조건에 따라 서로 다른 것을 나타내며, 이 같은 상황을 고려하여 해수면 상승에 대한 방어 대책을 수립하여야 함을 의미한다.



■ 그림 4-57. 해수면 0.75m 상승 시  
파랑에 의한 범람 예상 지역



■ 그림 4-58. 해수면 1.1m 상승 시  
파랑에 의한 범람 예상 지역



■ 그림 4-59. 해수면 1.9m 상승 시  
파랑에 의한 범람 예상 지역

### 3) C 지역: 임해공단

부산광역시 강서구에 위치한 C 국가산업단지는 태풍 매미 내습 시(2003년) 해일로 인한 범람 피해를 입은 지역이다. 본 연구에서는 동 지역을 사례 지역으로 선정하여 해일 범람 평가 방법론 및 대응 현황을 기존 연구(부산광역시, 2004; 환경관리공단, 2008)를 토대로 검토하고, 해수면 상승 시 사례 지구의 범람 취약성에 대한 검토와 대응 방향을 지속성 평가 틀 안에서 검토하였다.

C 국가산업단지는 1990년부터 부산 강서구 녹산동 일대에 해양 매립을 통하여 조성된 산업단지(211만평)로서 고용 인원 22,998명, 연 생산량 약 3.4조에 이르고 있다. 2003년 9월 내습한 매미로 인하여 가동 업체 43%인 388개 업체가 피해를 입었으며, 그 규모는 572억원으로 집계되었다. 이로 인하여 사업지 전면부 해상의 일정 부분 매립하는 방재 대책이 계획되어 2010년 현재 사업이 진행 중에 있다.

본 연구에서는 장래의 해수면 상승에 대한 C 공단지역의 잠재적 범람 가능성을 평가 5개의 해수면 시나리오(표 4-17)를 대상으로 평가하였다. 이들 시나리오에는 조석, 태풍 해일 및 해수면

상승의 3개 성분을 고려하였다. 사용된 조석은 약최고고조위를 사용하였다. 사례 지역의 해일고는 1.1~1.68m(본 연구: 1.1m; 부산광역시(2004): 1.40m; 환경관리공단(2008): 1.68m)로 분포하였으며, 여기서는 본 연구에서 산출된 해일고를 활용하였다. 이들 해일고 산출은 파랑에 의한 set-up을 고려하고 있지 않으므로 기존 연구 결과(부산광역시, 2004; 환경관리공단, 2008)의 자료를 이용하여 0.3m를 이용하였다. 사업 지역의 DEM 자료는 최근의 현장 관측 자료(환경관리공단, 2004)를 이용하여 산출하였다.

표 4-17. C 공단 지역의 범람 시나리오

Scenario	Tide	Storm Surge	Sea Level Rise
1	O	X	X
2	O	O	X
3	O	O	O(0.75m)
4	O	O	O(1.1m)
5	O	O	O(1.9m)

Case 1: Tide only 1.123m (HHW)  
 Case 2: Tide+SS (pressure+wind+wave setup)=2.523m (1.123+1.1+0.3(wave setup))  
 Case 3: Tide+SS+SLR=2.523+0.75m=3.273m  
 Case 4: Tide+SS+SLR=2.523+1.1m=3.623m  
 Case 5: Tide+SS+SLR=2.523+1.9m=4.423m

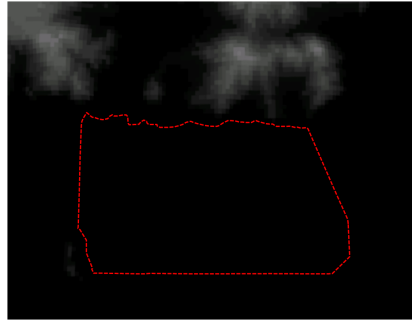
〈그림 4-61〉에서 보는 바와 같이 조석에 의해서는 잠재 범람이 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 태풍 해일로 인하여 사업지 전반부가 범람이 시작되고 있음을 보여주고 있다. 이는 기존 태풍에 의존하는 매립 기준 높이는 강도가 점차 강해지는 새로운 태풍에는 부족함을 보여주는 점과 동시에 이들 지역과 같은 매립지의 침하에 주요 역할을 한 것으로 평가된다. 이와 같은 결과는 우리나라 연안은 많은 매립지의 높이가 기후 변화가 가속되는 상황에서 조석 및 해일고를 감안한 해수면보다 낮음을 의미하며, 이는 다양한 형태(범람, 배수 시스템, 지반 안정성 등)로

취약성을 유발할 수 있을 것으로 사료된다.

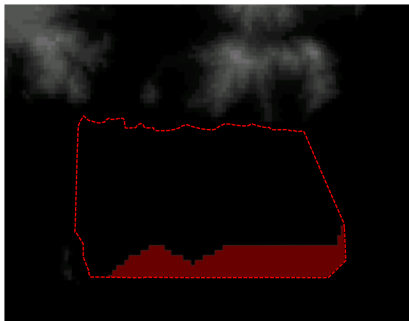
〈그림 4-63~4-65〉는 해수면 상승이 증가하면서 전 지역이 범람할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 본 연구는 사례 지역의 방파제, 배수 시설 등의 기능을 고려하고 있지 않다. 따라서 파랑에 의한 월파 등의 영향을 고려하지 않고 있다. 이와 같은 연구는 기존 연구(부산광역시, 2004: 환경관리공단, 2008)를 통하여 수행되었으며, 해수면 상승에 의한 연안역의 잠재적 취약성을 평가하는 것은 본 연구의 범위에 포함되지 않는다.



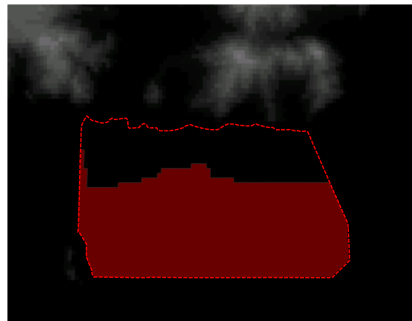
■ 그림 4-60. C 공단 지역의 위성영상  
(Google 위성영상)



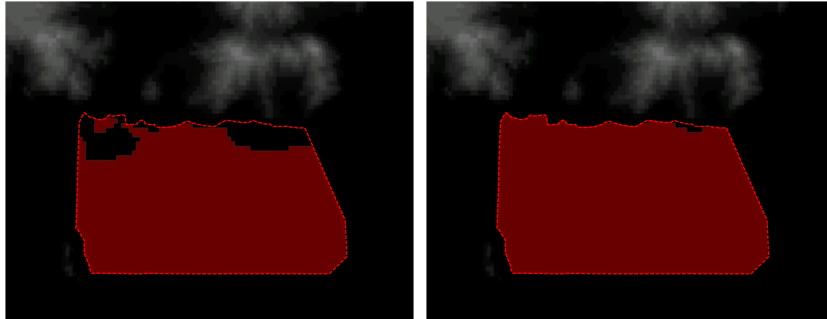
■ 그림 4-61. Case 1: Tide only  
(1,123m, HHW)



■ 그림 4-62. Case 2: Tide+SS  
(pressure+wind+wave setup)  
(1,123+1,1+0,3=2,523m)



■ 그림 4-63. Case 3: Tide+SS+SLR  
(2,523+0,75=3,273m)



■ 그림 4-64. Case 4: Tide+SS+SLR  
(2,523+1.1=3,623m)

■ 그림 4-65. Case 5: Tide+SS+SLR  
(2,523+1.9=4,423m)

### 3. 사례 지역 분석 및 고찰

#### 가. A 지역

본 사례 지역과 같이 우리나라 대부분의 해안 도로는 해안에 매우 인접하여 설치되어 해안의 사회·경제적 이용 측면을 크게 강조하고 있어 해안의 생태적 기능 및 방재적 기능을 크게 훼손하고 있는 것으로 평가되고 있다.

#### 1) 환경적 문제점

먼저 방재적 기능과 관련하여 이들 해안 도로 중 해안에 매우 인접하여 이설한 해안 도로는 해안 침식을 통한 해안 사빈 유실 등 해안의 기능 및 자원을 심각하게 훼손하게 된다. 이와 같은 해안 침식은 국토 보전 문제, 연안 방재 문제, 해안 도로 유실 및 파괴 문제, 관광 자원 훼손 문제, 해양 생태계 및 수질 악화 문제, 범람으로 인한 인명 및 재산 피해, 지속적인 복구 비용 문제, 주변 재산 가치 하락 등 다양한 사회·경제적 문제를 야기할 수 있다. 해안의 활용 측면에서도 해안에 인접하여 해안 도로를 이설한 경우에는 해안 도로의 기능 외에 해안이 가지는 다양한 이용 기능을 훼손하게 된다. 해안 도로 활용 기능도 해안 침식, 도로 훼손, 범람, 토사 유입, 산사태 등으로 그 기능의 훼손을 유발하고 있으며, 이들 기능을 유지하기 위하여 많은 사회·경제적

비용을 희생하고 있는 실정이다. 또한 태풍, 고파랑, 폭우 등에 의한 위험(risk)도 높은 것으로 평가되고 있다.

해안 도로는 해안의 생태적 기능을 심각하게 훼손할 수 있다. 해안의 생태적 기능과 관련하여 해안 도로는 해양 생물의 서식지 단절 및 파괴, 물리적 환경 변화에 따른 종 다양성 저하(해안의 생산성 저하), 서식 기질 변화로 인한 저서생물상 변화, 해양 생물의 산란장 환경 변화, 새로운 생태계 출현, 철새 서식처에 영향, 공사 시 부유 토사 발생, 운영 시 도로 소음 진동에 의한 영향 등 매우 다양한 악영향을 줄 수 있다. 육상 생태계와 관련하여 해안 도로 건설에 따른 해안 식생의 직접적인 훼손, 해안 생태계의 단절 및 단편화, 관광객 및 인간 출입으로 인한 오염 등으로 식생 구조와 기능을 교란할 수 있으며, 동물 서식지 단편화, 생태 공간 단절 등으로 수달 등 육상과 해양을 이동(transboundary)하면서 생활하는 동물의 생존에 영향을 줄 수 있다. 해안 도로는 독특한 경관적 가치를 가지는 해안 지형(해식애, 몽돌 해안, 사빈 해안, 자갈 해안, 암석 해안, 포켓 비치, 갯벌, 사구, 해안 단구, 육계 사주 등)의 직접적인 훼손, 해안 침식에 의한 해안 지형 변화 유발, 해안 지형 훼손으로 인한 경관 악화 등의 문제점을 유발하는 것으로 평가되었다.

## 2) 사회·경제적 문제점

해안 도로의 사회·경제적 문제점은 21세기에 들어 가속되고 있는 기후 변화에 더욱 취약할 것으로 예상된다. 현재 진행되고 있는 지구 환경 변화는 해양으로부터 해수면 상승, 태풍 강도 증가, 육지로부터는 강수 유형 변화를 유발하며 각종 취약성 평가 결과 해안 지역이 21세기 기후 변화에 가장 취약한 지대로 평가되고 있다. 이와 같은 지구 환경 변화는 기존의 해안 도로와 관련하여 침식 증대, 도로 훼손, 범람 증대, 토사 유입 및 산사태 증대를 통하여 도로의 기능 및 위험을 크게 증대시킬 것으로 예상되며, 도로의 기능을 유지하기 위해서는 현재보다 훨씬 많은 경제적 비용 또는 적응 한도를 초과할 수도 있을 것으로 예상된다. 이상을 고려할 때 현재의 사회·경제적 문제점을 유발하고 있는 해안 도로는 해안의 기능 중 생태적 및 방재적 기능의 지속성(sustainability)을 훼손하고 있으며 활용 측면의 지속성을 유지하기 위하여 사회·경제적으로도

많은 비용을 지불하고 있는 실정이다(예, 울릉도). 21세기의 지구 환경 변화는 이와 같은 해안 도로의 사회·경제적 지속성도 크게 위협할 것으로 예상된다.

### 3) 대응 방안

해안 도로가 가지는 이와 같은 다양한 문제점을 저감하기 위한 방안에 대한 구체적인 연구 결과는 매우 미흡하다. 해안의 다양한 기능과 관련하여 해안 공학, 해안 생태(해양 및 육상), 해안 지형, 기후 변화를 모두 고려할 때 유일한 저감 방안은 해안 도로를 해안에서 충분히 이격하는 방안이다. 해안 도로를 해안으로부터 얼마나 이격해야 할 것인가는 사업 해역 해안의 물리적(physical), 지형학적(geomorphological), 지질학적(geological), 화학적(chemical), 생물학적(biological) 특성에 따라 달라진다.

해안 침식과 관련한 저감 방안은 해안으로부터 이격하되 고파랑(태풍 등)에 의하여 영향을 받지 않는 범위까지 이격하는 것이 최선이며, 장래 기후 변화를 고려하면 해안 쪽 완충 지대를 추가로 확보하는 것이 요구된다. 해안 도로로 인한 해안 침식의 공학적 저감 방안으로는 파랑의 영향을 저감할 수 있는 완경사 호안이 최적의 현실적 저감 방안으로 사료되나, 이 방안은 해안의 생태적 기능과 사회·경제적 특수성을 함께 감안해야 한다. 또한 해안의 침식을 저감하기 위한 잠재 등을 설치하는 방안도 존재하나 공사비와 더불어 동 공법의 환경적 문제점을 감안할 때 해안 도로 자체만에 대한 저감 방안으로 도입하기에는 어려움이 따를 것으로 예상된다. 현재 해안의 기능을 종합적으로 고려한 친수 공간(waterfront)에 대한 연구가 진행 중에 있어 추후 이에 대한 도입 여부를 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다. 해안 도로의 친환경적인 설계 방향과 관련하여 신부용(2004)의 연구는 매우 유용하게 활용될 수 있다.

해안 생태적인 저감 방안으로는 해안은 독특하고 대체 불가능한 생태계의 특성상 해안 도로 건설로 인하여 해안 생태계를 보전하고 직·간접적으로 해안에 영향을 미치지 않는 범위까지 이격시켜 도로를 건설하여야 한다. 일반적으로 해안 영향 범위는 30~100m 정도이지만 해안 식생, 육상 생태계와의 연결성, 생태계 보전 정도 등에 따라 다를 수 있으므로 관련 전문가를 통하여

결정하는 것이 바람직하다. 해안에 접근하는 주요 육상 동물(수달 등)에 대해서는 이동 통로 설치 및 서식 공간의 확보가 저감 방안으로 제공될 수 있다. 해안 지형의 경우 보전 가치가 높은 수려한 해안 지형은 한번 훼손되면 복원이 거의 불가능하다는 점을 감안하여 해안의 지속성을 유지하는 차원에서 보전이 필요하다.

해안 도로와 관련한 환경적 개선 방안에는 다양한 연구 과제가 놓여 있다. 먼저 해안 도로가 해안의 기능에 미치는 영향에 대한 장기적인 조사와 모니터링에 대한 연구가 필요하다. 현재 해안 도로가 해안의 기능에 어떤 영향을 주며 해안 환경은 어떻게 적응하는가에 대한 구체적인 연구는 침식과 같은 공학적인 분야 외에는 거의 없는 실정이다. 이들 문제에 대한 환경영향평가에서의 개선 방안으로는 철저한 사후환경영향조사를 통하여 이루어지는 체계가 필요하다. 장기적이고 지속적인 사후 환경 조사를 통하여 환경에 미치는 영향을 모니터링하고 그 결과가 다시 환경영향평가 단계에서 사용되어 효율적인 저감 방안이 수립되도록 하는 시스템 구축이 필요하다. 제도적인 개선 방안과 관련하여, 현재 해안 도로의 경우 대부분이 소규모 지방도로 환경영향평거나 사전 환경성 검토를 받지 않는 경우도 많다. 따라서 해안의 등급 설정 등을 통하여 평가 기준 재설정 등에 대한 검토가 필요하다. 마지막으로 해안의 지속 발전 개념을 도입하여 연안을 종합적으로 계획, 관리하는 방안인 통합 연안 관리(Integrated Coastal Zone Management : ICZM)에서 해안 도로 문제를 다루는 방안이다. ICZM은 연안역의 지속성을 가장 잘 구현하며 현재는 지구 환경 변화까지도 고려하는 계획으로 많은 나라에서 적극적으로 도입하고 있다. 우리나라에서도 현재 지역 계획이 수립되고 있음을 감안하여 이들 해안 도로의 환경적 이슈들을 적절히 고려하는 연안 관리 계획 수립이 요구된다고 할 수 있다.

#### 나. B 지역

본 사례 지역은 해안 저지대에 위치한 시가지로 폭우 시 상습 침수가 발생하는 지역이다. 본 평가 결과 해수면 상승으로 인하여 이들 침수 지역은 크게 확대될 것으로 예상된다. 더불어 최근 우리나라의 강수 패턴 변화와 태풍 해일 증가 등에 의한 외력 변화로 그 취약성이 점차 증대될

것으로 예상되는 지역이다. 따라서 동 지역은 하천의 제방 높이 및 배수 시설 기준에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다. 더불어 상세한 취약성 평가를 통하여 범람이 예상되는 저지대에 대한 개발은 지양하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 또한 이와 같은 정보는 다양한 이해 당사자에게 제공하여 미래의 개발 및 투자가 자신의 책임 하에 이루어지도록 하며, 동시에 지자체는 범람과 관련된 건설 지침 및 침수 경보 시스템 구축 등의 역할이 필요할 것으로 사료된다. 연안역의 기후 변화 및 해수면 상승은 연안역의 기존 이용 방식을 재검토할 수 있는 기회를 동시에 제공할 수 있는 바 해안을 자연 해안으로 계획하여 완충 지대로 활용하는 방안도 검토하는 것이 장기적인 관점에서 바람직할 수도 있다.

#### 다. C 지역

사례 지역은 2003년 태풍 매미 내습에 의한 범람 피해를 입은 후에 현재 해안 방재 사업을 계획하여 시행 중에 있다. 방재 계획의 주요 내용을 살펴보면 먼저 기존의 호안 천단고를 증고하고, 방파제를 확장하는 매립 사업, 지반 침하 대책 및 배수 대책 등을 포함한다. 이들 대책의 핵심은 해양으로부터의 범람을 막기 위한 방어 시설(Protection)과 배수 시설 보강으로 파악된다. 이와 같은 대책은 도시 개발로 인하여 지반 침하가 발생하는 지역(일본 동경, 중국 상하이, 태국 방콕 등)의 대책 방향과 유사한 접근 방식으로 접근하고 있다. 이들 대책은 기존 공학적인 관점에 최선의 대책으로 판단된다(환경관리공단, 2008).

그러나 기후 변화에 의한 해수면 상승과 더불어 태풍 강도 증가, 파랑 증가, 강수 강도 증가 등이 복합적으로 작용하여 범람 위험 증가가 바다로부터뿐만 아니라 육지로부터도 올 수 있으며, 지하수를 통한 액상화 증가 등 다양한 형태로 그 취약성이 크게 증가할 것으로 쉽게 전망할 수 있다. 현재의 대책 기준은 조석, 파랑, 해일 및 강수에 대하여 기존의 기준을 초과하여 시설하였지만 이러한 기준들은 기후 변화에 대한 기존의 연구를 감안할 때 향후 추가적인 대책이 필요할 수도 있을 것으로 전망된다. 따라서 기후 변화가 가속되는 상황을 감안하여 단기적 또는 장기적인 관점에서 대책을 추가적으로 검토하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

우리나라 해안에는 비교적 많은 임해산업단지들이 매립을 통하여 조성되었으며, 최근의 피해 사례에 따라 적절한 적응 방안에 대한 연구가 수행되었다(환경관리공단, 2008). 이 연구에서 제안된 주요 적응 전략은 이주, 순응, 방어, 관리 등의 IPCC 기본 대응 방안 관점에서 검토하고 있다. 사례 지역과 같이 매립에 의한 조성 단지는 이미 기준 매립고를 웃도는 기후 변화를 체험하고 있으며, 연약 지반의 특성상 발생하는 지반 침하로 이중적인 문제점을 가지고 있다. 그러나 이주는 현실적으로 상당히 어려운 문제로 인식하고 있으나 해안 습지의 중요성을 감안한 정책 등을 통하여 단계적 이주 적응 전략의 가능성도 제시하고 있다. 순응 방안과 관련하여 매립고 증고를 우선적으로 제시하고 있으며, 사업장 내 기기 재배치를 통한 방안 등도 제시하고 있다. 순응 전략과 관련하여 토지 이용 변경, 건축물 양식 변경 및 보험 제도도 주요 방안으로 제시하고 있다. 방어 전략과 관련하여 선단위(1차원) 및 면단위(2차원)의 방어 개념을 검토하고 있으며, 본 방재 계획은 강성 공법 중 면단위에 근거한 최신의 적응 공법으로 사료된다. 더불어 관리 방안으로 조직 운영 관리, 업종별 관리 및 인식 전환의 주요 적응 요소들을 제시하고 있다.



## 제5장

### 해수면 상승 범람 대응 방향

우리나라는 삼면이 바다이며 수려한 자연 경관은 물론 생태적 다양성 및 생산성을 가지고 있었으나 20세기부터 과도한 이용으로 인하여 다양한 환경 문제와 더불어 해안의 기능이 크게 훼손되어 왔다. 이와 같이 해안의 높은 사회·경제적 이용도는 전 세계의 공통적인 특징이며 그 경향 역시 증가하는 추세이다. 21세기 가속되는 기후 변화는 기존의 환경 문제에 더하여 누적적으로 영향을 미치고 있으며 이들 영향들은 대부분 악영향으로 나타날 것으로 평가되고 있다(IPCC, 2007). 따라서 해안은 기후 변화와 인간의 이용 방식에 의한 이중 문제에 직면하고 있으며 후자가 아직까지는 더 큰 압력으로 작용하고 있다. 기존 환경 문제는 우리 사회의 이용 방식에 의하여 해안이 주로 훼손되는 방향으로 문제가 유발되었으나 기후 변화 시대에는 우리 사회의 경제 활동이 동시에 피해를 입는 상황으로 변하고 있다. 본 연구에서는 미래의 해수면 상승에 의한 범람 평가를 위해 스크리닝(취약성 지수) 및 스코핑(사례 지역)을 대상으로 실시하였으며, 기후 변화에 잠재적 취약성이 높은 것으로 평가되었다. 본 연구의 사례 지역 평가는 우리나라 해안의 모든 사회·경제적 이용 방식을 포함하지 않지만 대표적인 사례라는 관점에서 많은 다른 지역에서 시사점을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 대응 방향의 전제는 해안은 지속 발전이 요구되는 지역이라는 점에서 출발한다. 해안은 독특하고(unique), 대체 불가능한(irreplaceable) 생태계를 보유하고 있으며, 운송, 자원, 에너지, 산업적 이용, 레크리에이션 등 인간에 의해 활용되는 측면도 매우 크고, 바다에서 접근하는 각종 재해에 대한 방재의 1차선을 형성한다. 이들 기능은 상호 독립적인 것이 아니라 서로 밀접하게 연관되어 있으므로 이들 기능을 조화롭게 유지 관리하면서 해안을 이용하는 것이 해안역의 지속성을 유지하는 데 필수적이라 하겠다. 이와 같은 특성으로 인하여 국제 사회는 해안을 “보전 가치가 매우 높고 대체 불가능한” 지역으로 정의하고 있다(IPCC, 2001). 이와 같은 인식에도 불구하고 그 동안 해안의 사회적 이용도가 매우 높았으며 그 이용 방식 또한 지속 가능한 관점에서 이루어지지 않았다. 따라서 기후 변화는 해안에 대한 새로운 위협인 동시에 우리가 가지고 있던 해안의 이용 방식을 점검하고 이를 통하여 새로운 이용 방식에 기회로 활용될 가능성에 대한 검토도 필요하리라 생각하며 본 연구의 대응 방향 검토도 이러한 방향을 감안하였다. 이러한

관점(context)에서 본 연구의 대응 방향은 해안의 생태적 및 사회·경제적 지속성을 어떻게 유지할 수 있는가에 주안점을 두고 제시하고자 하였다. 본 장에서는 먼저 해수면 상승에 대한 기본적인 대응 방향을 과정(process)의 중요성에 주안점을 두고 정리하였으며, 해수면 상승 범람 피해를 최소화하기 위한 계획 차원의 대응 방향을 제시하였다. 사례 지역에 대한 대응 방향과 더불어 연안의 지속성을 유지하기 위한 평가 도구로써 지속성 평가(sustainability appraisal) 개념을 소개하였다.

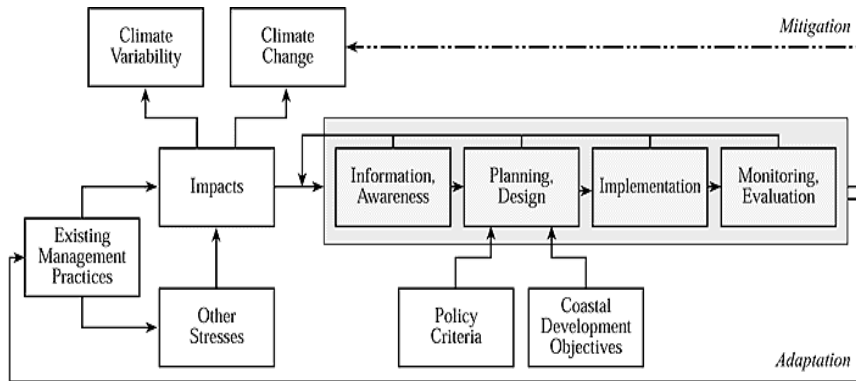
## 1. 해수면 상승 대응 기본 방향

### 가. 대응 과정

해수면 상승에 대한 기본적인 대응 방향 및 대응 과정에 관한 다양한 연구 사례가 존재한다. 기후 변화 영향에 대한 대응 즉 적응은 광범위하고 다양한 정의를 가지지만 기본적으로는 우리의 기후 변화 영향에 대하여 우리의 사회·경제적 행동 양식을 조정하는 것으로 정의할 수 있다. 여기서의 조정은 자연적, 공학적, 제도적, 사회적 등 모든 대상을 포함하여 이들 대상의 자발적 및 계획적 적응을 모두 포함한다. 적응의 개념과 함께 고려해야 할 용어는 적응 용량(adaptive capacity)이다. 적응 용량은 시스템, 지역, 또는 사회가 기후 변화의 영향에 적응할 수 있는 잠재력 또는 능력을 의미한다. 적응 능력 증진은 기후 변화, 기후 변동, 극단적인 기후 현상에 대처하는 실제적인 수단을 나타낸다. 적응 능력의 증진은 취약성을 감소시키고 지속 가능 발전을 촉진할 수 있다. 연안의 특수성은 다른 지역과 다르게 적응 전략을 수립하는 것이 중요하다.

해수면 상승에 대응하기 위하여 정책 결정을 포함한 기본적인 과정을 <그림 5-1>에 나타내었다(Klein *et al.*, 1999). 이 모식도와 같이 해수면 상승 대응 과정은 (1)정보와 인식 구축, (2)계획 및 구상, (3)실행, (4)모니터링 및 평가의 4단계로 실시될 것을 제안하고 있다. 먼저 정보와 인식 구축은 본 연구와 같이 해수면 상승으로 인한 영향 및 취약성을 파악하는 데서 출발한다. 해수면 상승으로부터 영향을 받을 수 있는 취약 대상(자연 생태계, 서비스, 저지대, 인프라 등)을 파악하는 것이다. 일반적으로 연안역은 기존의 태풍 및 파랑 등에 의하여 피해를 받는 지역 및

부분의 피해가 확대될 것으로 예상된다. 취약성은 영향과 적응 능력의 함수로 나타내며 지역적 대응의 중요한 기준이 된다. 대응 주체의 인식 증진은 대응의 효율성과 밀접한 관계가 있다. 특히 인식 증진은 다양한 대응 주체에 대하여 기후 변화 의사 결정을 원활하게 하는 매우 주요한 요소이다.



자료: Klein *et al.*(1999)

■ 그림 5-1. 해수면 상승 대응 정책 과정

다음은 정책 및 사업에 대한 계획과 설계 단계이다. 이 단계에서는 먼저 파악된 취약성에 대한 적응 목표 설정이 필요하다. 예를 들어 해수면 상승에 대한 연안역의 취약성을 환경적 및 사회·경제적 측면에서 모두 고려하는 적응 목표를 세우는 경우와 사회·경제적 측면만 고려하는 경우 대응 방안의 선택이 다를 수 있다. 연안역의 주요한 적응 목표로서는 연안 생태계의 기능 및 건강한 생태계 유지, 연안 구조물(주거 등)에 대한 취약성 감소, 연안 적응을 위한 거버넌스 프레임워크 강화, 생업 기회 유지 및 선택의 다양화와 건강 및 안전에 대한 위협 감소(USAID, 2009) 등을 들 수 있다. 이들 적응 목적을 달성하기 위한 적응 포트폴리오는 다양하게 존재하며 한 예로 USAID(2009)를 소개하면 <표 5-1>과 같다. 구체적인 적응 대책의 수용 여부는 지역 차원의 경험, 가치 등이 주요한 요소로 작용하며, 구체적 공법에 대한 기준인 USEPA의 3E (Environment, Economy, Engineering)를 활용하는 것도 유용한 접근 방법으로 판단된다. 이 단계에서는 모든 관련 정책에 기후 변화 및 해수면 상승에 대한 고려를 포함하는 것이 바람직하

며 이에 대한 구체적인 방안은 다음 절에서 다루고 있다.

표 5-1. 연안역 적응 목표별 적응 수단 및 기후 변화와의 관련성

연안역 적응 목표별 적응 수단 및 기후 변화와의 관련성	
<b>건전한 해양 생태계 유지</b>	
- 연안 습지 보호와 복원	극한 기후, 폭풍 해일, 침식, 홍수에 대한 완충 작용: 염수 침투 제한
- 해양 보호 협약	기후 변화에 대한 해양 생태계의 회복 능력 및 해안가 지역 사회의 사회/경제적 상태 개선
- 해양 보호 지구	건전하고 회복 가능한 해양 서식처와 어류 유지: 은신처(refugia)로서의 역할 및 새로운 미성숙 개체(larval recruits) 제공
- 환경 보존을 위한 지출	홍수, 폭풍 해일, 해안 침식을 방어할 수 있는 보호 서식처의 보호에 대한 인센티브 제공
<b>연안 구조물 취약성 감소</b>	
- 해변 및 사구 증대	해안 보호 및 해변 육성: 홍수, 침식, 세굴, 수해에 대한 soft 완충 지대 제공
- 건축 표준	기후에 대한 고려사항을 건축 설계에 포함시킴으로써 기후 변화로 인한 극한 사상, 해수면 상승, 홍수에 의한 위협 및 피해 경감
- 해안가 개발 제한	해수면 상승, 폭풍 해일, 침식으로 인한 사회적 위험성 및 대형 구조물의 피해 경감
- 해안선 서식 생물	침식 완화, 기후 변화에 대한 인간 및 생태계 보호, 보호된 해안선을 따른 저수준 및 중수준 에너지 지역의 다양화(예: 강어귀 및 석호 생태계)
- 구조물을 이용한 해안선 안정화	해수면 상승, 폭풍 해일, 파도(wave attacks)에 의한 침식과 홍수의 영향에 대한 일시적인 완충 지대 제공
<b>생계 수단의 다양화</b>	
- 수산업 지구(fisheries sector)에 관한 예시	극한 기후 사상, 강수 패턴 변화, 해양 산성화, 해수면 상승, 해수면 온난화의 영향에 대응한 도시 생활, 식량 안보 및 해양 생물 다양화와 같은 항목의 보호에 기여
- 해양 양식 관리에 관한 예시	기후 변화에 관한 고려 사항의 통합은 극한 기후 사상, 강수 패턴 변화, 해양 산성화, 해수면 상승, 해수면 온난화에 대응하는 보호 장치에 기여
- 여행업 관리에 관한 예시	기후 변화에 대한 관심의 통합은 극한 기후 사상, 강수 패턴 변화, 해수면 상승, 해수면 온난화 대응 및 보호 장치에 대한 해당 지구의 지속성 증진
<b>건강 및 안전 증대</b>	
- 지역 사회(community) 기반 재난 위험 감소	지역 사회의 특별한 요구를 반영한 선행 계획 및 안정성 증대는 극한 기후 사상과 홍수에 대응 및 복원할 수 있는 능력을 증가시킴.
- 홍수 피해 지도화(mapping)	해안 설계 및 정책 과정에서의 통지는 폭풍, 폭우, 폭풍 해일, 극한 조석에 의한 홍수 피해를 감소
<b>주요 계획 및 거버넌스</b>	
- 해안 습지 관리	태풍에 대한 완충 지역 및 지하수 염수화를 방지시킬 수 있는 하구언 보존
- 통합 해안 관리	해안 관련 주요 현안(기후 변화의 영향 포함)에 대한 목적, 우선 순위, 행동에 관한 종합적 방법 제공
- 특별 지구 관리 계획	극한 기후 사상, 강수 패턴 변화, 해양 산성화, 해수면 상승 및 온도 변화 등과 같은 복잡한 해안 관리 현안 및 충돌이 발생하는 개별 지역에 관한 관리 방법 개선

자료: USAID(2009)

모니터링 및 평가는 매우 주요하고 어려운 부분이다. 해수면 상승과 같은 기후 변화 문제에 관한 대응은 과학적으로 불확실한 상황 하에서 이루어지는 과정이다. 따라서 불확실성 하에서의 기후 변화 관련 정책 결정은 환경, 경제적 결과, 위험에 대한 사회의 태도 등을 주의 깊게 고려하면서 장기적이고 연속적인 과정으로 이루어져야 한다. 현재의 지구 온난화 및 기후 변화는 인간의 활동에 의한 온실가스 배출이 그 원인으로 파악되고 있지만 아직까지 불확실성이 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 기후 변화의 불확실성은 탄소 순환에 대한 현재까지의 지식의 불완전성, 이산화탄소 이외의 온실가스의 순환 과정에 대한 이해의 부족, 기후 모델의 불확실성 등이 있다. IPCC 4차 보고서에서 지적한 바와 같이 기후 변화 탐지 및 원인, 지역적인 기후 변화 및 기상 이상 변화에 대한 이해 및 예측, 국지/지역/지구 규모에서 기후 변화 영향의 정량화, 대응 및 저감 활동의 분석, 기후 변화 문제의 모든 면을 지속 발전 전략으로의 통합 문제, 기후계를 교란하는 위험한 인간 활동을 구성하는 요소에 대한 판단을 지원할 수 있는 종합적이고 통합적인 조사에 대해서는 향후 연구가 필요한 것으로 평가하고 있다.

기후 변화에 대한 과학적 불확실성은 기후 변화 문제에 대한 대응이 중요하지 않다는 것을 의미하지는 않는다. 현재 과학의 불확실성은 지구의 기후 변화 및 그 영향에 대하여 우리가 과소 평가 혹은 과대 평가하고 있는 것을 의미하며, 그 결과는 양방향으로 진행될 수 있다는 것을 모두 의미한다. 현재의 기후 변화에 대한 과학적 문제는 기후가 향후 인간 활동에 의하여 더 변화할 것인가가 아니라 오히려 어떻게(크기), 어디서(지역적인 유형), 언제(변화율) 일어날 것인가에 대한 것이다. 이 질문에 대한 대답은 국가별 지역별로 적절한 기후 변화 대응 방향 및 방법을 설정하는 데 매우 중요한 문제이다. 이들과 관련된 전략적 접근은 다음 절에서 다루고 있다. 이들 과정에서 모니터링 및 평가의 중요성은 현재의 대응 방법이 미래에는 과학 기술 및 지식 발전, 사회적 가치 변화로 인해 부적절할 수도 있다는 사실에 기초하고 있다. 위의 과정은 해수면 상승 대응 정책 결정 과정을 경험 획득 과정으로 본다고 할 수 있다. 따라서 해수면 상승의 적응은 과정으로서 그 과정도 적응 과정(adaptive adaptation process)으로 정의하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

## 나. 전략적 대응 방향

해수면 상승 적응책을 고려하는 적응 지역(when to adapt?), 적응 방법(how to adapt?), 적응 시기(when to adapt?)가 검토되어야 하며, 이를 계획하고 실행할 수 있는 제도적 장치가 요구된다. 기후 변화 특히 해수면 상승의 불확실성은 대응 방식이 결정론적이기보다는 확률 및 위험에 기초한 위기 관리(risk management)이기를 요구한다. 더불어 해안이 가지는 자발적인 적응 능력(해안 사빈 보호 등)을 최대한 증진시키는 방향으로 수립되어야 한다(build with nature). 먼저 해수면 상승에 대한 시스템의 자발적 적응(자발적 조절)이 어느 정도로 영향을 감소시키는지 파악하고, 계획된 적응이 필요한지에 대하여 고려하는 것이 중요하다. Klein *et al.*(1999)의 연구에 의하면 많은 경우 자발적 적응이 연안역에서 일어나지만, 연안역에서 기후 변화의 영향에 대해서는 대부분 계획된 적응이 필요하다고 제시하고 있다. 여기서 계획된 적응은 자발적인 적응을 최대한 수용하는 정책들을 포함한다. 따라서 해수면 상승의 제도적 적응을 위한 제도 개선도 주요한 요소이다. 그러나 지금까지 연안역에서의 관리 관행은 연안역이 가지고 있는 자발적인 적응을 감소시키는 방향에서 이루어져 왔다. 예를 들어 우리나라의 경우 개발 사업으로 해안 도로 건설 및 매립 사업 등으로 갯벌 및 사구가 훼손되어 왔으며 이들 행위는 연안역의 자발적인 적응 능력 즉 연안역 보호 능력을 훼손하는 행위로 간주된다. 역사적으로 많은 연안역 관리 결정이 자발적인 적응 과정을 감소시키는 방향에서 이루어진 것으로 평가되고 있다.

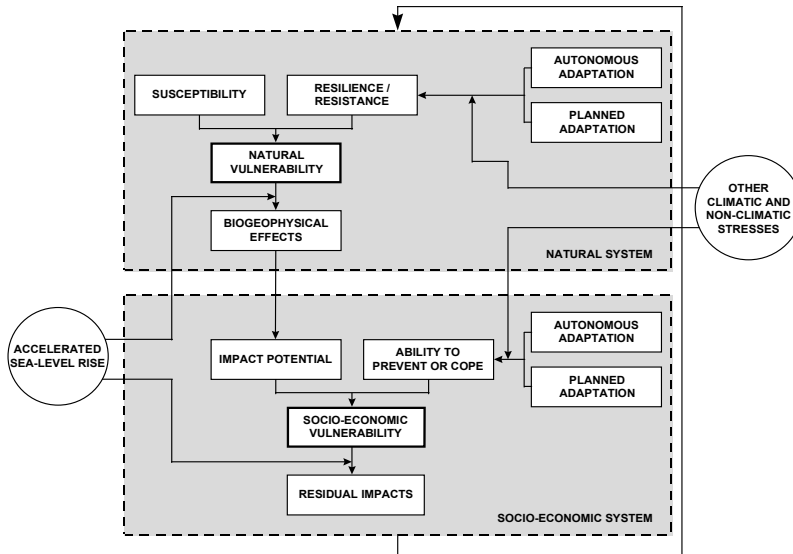
해수면 상승 영향에 대한 적응을 고려하는 경우 먼저 적응이 필요한 장소 및 대상에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서의 취약성 평가도 이를 위한 한 과정으로 평가될 수 있다. 그러나 연안역의 취약성 평가에 대하여 좀 더 근본적이고 과학적으로 접근해 보면 연안역의 취약성은 다차원적인 개념으로 그 구성 요소가 생지구물리적, 경제적, 제도적, 사회·문화적 요소와 관련이 있는 복잡한 개념이다. 해수면 상승에 대한 취약성을 고려하기 위한 개념적 모식도는 <그림 5-1>과 같다(Klein *et al.*, 1999).

해수면 상승에 대한 사회·경제적 취약성 평가를 위해서는 먼저 자연계가 어떻게 영향을 받는가

에 대한 평가가 선행되어야 한다. 따라서 해수면 상승에 대한 연안역의 취약성 평가는 해수면 상승의 생지구물리적(biogeophysical) 영향에 대한 자연계의 민감성(susceptibility)과 자연계가 이런 영향에 대응하는 자연적인 능력(탄성; resilience)과 저항(resistance)을 먼저 평가하는 것이 필요하다. 예를 들면, 민감성은 해수면 상승에 의한 삼각주 범람과 같은 해수면 상승에 대한 영향 잠재력을 의미하며, 탄성 및 저항은 산호초가 해수면 상승 속도보다 더 빨리 성장하여 해수면 상승에 대응하는 자연계의 자발적인 조절 능력을 의미한다. 따라서 민감성, 탄성, 저항의 3가지 요소가 해수면 상승 영향에 대한 연안역의 자연적 취약성을 결정하는 요소로 작용한다. 일반적으로 인간의 각종 행위는 연안역의 자연적 취약성에 부정적으로 작용한다. 그러나 계획된 적응은 시스템의 탄성과 저항을 강화시키고 이를 통해 자발적 적응 능력을 증대시켜서 자연적인 취약성을 감소시킬 수도 있다. 해수면 상승의 생지구물리적인 영향은 사회·경제적 영향의 범위를 증가시킬 가능성이 크다. 이런 영향 잠재력은 비록 현재는 그것이 인간 영향에 의존하고 있지만, 자연 시스템의 민감성에 상응하는 사회·경제적 민감성이다. 민감성, 탄성, 저항의 함수인 연안역의 자연적 취약성과 동시에 사회·경제적 취약성은 영향 잠재력과 이런 영향을 방지하거나 대처하는 사회의 기술, 제도, 경제, 문화적 능력(즉, 자연적 변화의 시간 규모 내에서 적응하는 능력)에 의해 결정된다. 자연 시스템의 탄성과 저항 안에서 자발적 적응의 포텐셜과 계획된 적응은 영향을 방지 또는 대처하는 능력을 결정한다.

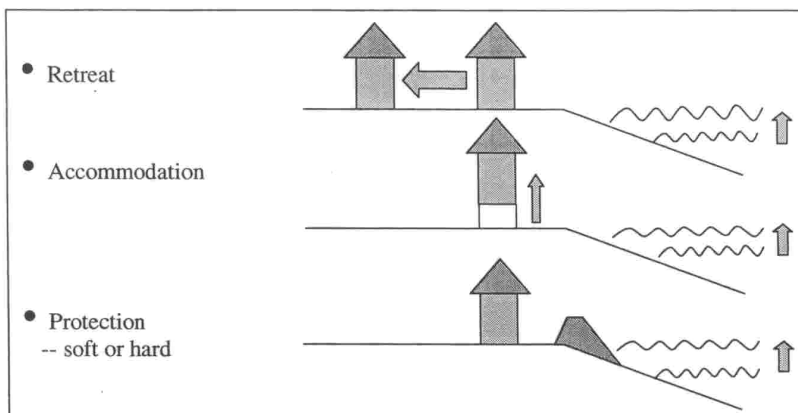
연안역의 취약성 평가의 모식도와 이에 대한 개념 및 구조가 <그림 5-2>에서 정의되었지만 해수면 상승에 대한 연안역의 취약성 평가에는 아직까지 많은 어려움이 존재하고 있다. 연안역의 종합적인 취약성 평가를 수행하는 데 주된 어려움은 먼저 해수면 상승에 의해 영향을 받는 과정과 그 과정들의 상호 작용에 대하여 아직까지 많이 알려져 있지 않은 점, 기존 상황에 대한 자료 부족, 장래의 변화에 대한 국지적/지역적 시나리오 개발이 어려운 점, 몇몇 영향에 대해서는 적절한 해석적 방법론이 부재하다는 것 등을 들 수 있다(Klein *et. al.*, 1999). 따라서 연안 시스템에 대한 과학적 역량을 증진시키는 것이 미래의 해수면 상승에 대한 우리 사회의 적응 역량을 증진시키는 주요한 요소로 작용하며, 더불어 과학과 정책이 밀접한 관계를 유지시키는

것도 통합적인 적응 역량 증진에 주요한 요소라 할 수 있다.



자료: Klein *et al.*(1999)

■ 그림 5-2. 해수면 상승에 대한 연안역 취약성 평가 모식도



자료: IPCC CZMS(1990)

■ 그림 5-3. 해수면 상승에 대한 적응 방안 모식도

해수면 상승에 대한 계획적인 적응 전략은 크게 관리적 이주(managed retreat), 순응(accommodation), 방어(protection)의 세 가지 전략으로 구분할 수가 있다(UNEP, 1996). 이들 중 방어 적응 전략은 크게 방파제와 같은 hard 기술과 사빈 보충과 같은 soft 기술로 다시 세분할 수 있다. 관리적 이주 방안은 모든 자연환경에 대한 해수면 상승 영향은 허용하고 인간에 대한 영향은 해수면 상승으로 영향을 받는 취약 지대로부터 후퇴함으로써 인간에 대한 영향을 최소화하는 개념이다. 순응의 방안은 자연환경에 대해서는 관리적 이주 방안과 같이 모든 영향을 허용하고 인간에 대한 영향은 연안역의 이용 방식을 조절함으로써 해수면 상승 영향을 최소화하는 방안이다. 방어의 방안은 hard 또는 soft 기술을 이용하여 영향을 받는 지역을 보호함으로써 인간에 미치는 영향 및 자연환경을 제어하는 방안이다. 위의 세 가지 적응 전략은 다시 적응의 유형에 따라 자발적인 조절(autonomous adjustment)과 전략적 행동(strategic action)으로 구분할 수 있다. 또한 위의 세 가지 적응 방안의 도입 시기에 관하여 예방적(proactive)인 것과 반응적(reactive)인 것으로 구분할 수가 있다.

해수면 상승에 대한 적응 방안을 적응 방안별 유형과 도입 시기에 따라 구분하면 <표 5-2>와 같다. 지금까지 우리나라의 경우 연안역에는 주거지, 산업시설, 도로 등과 같은 사회·경제적 활동이 집중되어 있어 이들을 범람 등의 원인으로부터 보호하기 위하여 방어의 개념으로 주로 이 문제에 접근하여 왔다. 앞 장에서 검토한 바와 같이 우리나라 연안역도 지구 온난화에 따른 해수면 상승으로 잠재 위험성이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 이러한 해수면 상승에 대한 잠재적 위협에 대한 방어만 하는 대처 방안은 효율적이지 못하며, 위에서 언급한 세 가지 방안을 종합적으로 고려하는 것이 연안역의 취약성을 줄이면서 지속 발전을 이룩할 수 있는 방안으로 사료된다.

해수면 상승에 대한 관리적인 이주 전략은 대응 전략 중 가장 효율적인 전략 중의 하나로 제시되고 있다. 이 전략은 해수면 상승으로 예상되는 지역과 이 지역의 경제성에 대한 사전 평가를 토대로 사전 예방적(proactive) 차원에서 전략적 행위로서 취하는 전략으로 해수면 상승으로 인한 인간 사회의 피해를 최소화할 수 있는 방안으로 사료된다. 본 연구의 사례 지역 중 동해안 지역은 장기적으로 이 전략을 취하는 것이 지속성 평가 관점에서 바람직하다고 할 수 있다. 그러나

관리적 이주 대응 전략은 그 사용에 있어 한계가 있다. 먼저 해수면 상승에 관한 취약성 평가 결과 취약한 지역으로 나타난 곳이 임해공단과 같이 많은 투자가 이루어진 지역에 대해서는 이 전략만으로는 대처가 불가능한 경우가 생길 수 있다. 그러나 미국의 카트리나 사태와 열대 지방의 섬나라의 사례에서 보듯이 방어 및 순응 전략도 지속성 관점에서 바람직하다고 볼 수 없을 것으로 판단된다. 순응의 대응 전략 중 연안역의 토지 이용 계획의 변경은 취약한 지역으로 파악된 지역에 경제적인 가치가 비교적 떨어지는 구조물을 설치하는 경우와 해양과 친화적인 용도로 토지 이용의 용도를 변경하는 경우를 포함할 수 있다. 전자의 경우는 주택보다는 주차장 등과 같이 경제적 가치 및 인명의 피해를 줄일 수 있는 구조물을 건축하는 경우이고, 후자는 농경지 등과 같이 해수에 취약한 지대에 양식장이나 염전 등과 같이 해수와 밀접한 시설물을 유지하는 것을 포함한다.

해수면 상승에 대응하기 위한 방어의 방안은 hard 또는 soft 기술을 이용하여 영향을 받는 지역을 보호함으로써 도시, 경제 활동, 자연 자원을 보호하는 개념이다. 방어의 개념은 가장 전통적인 방법으로 사용되는 개념이며, 지구 온난화로 인한 해수면 상승 문제가 발생하기 이전부터 파랑 및 해일 등에 대하여 연안역을 보호하기 위하여 가장 흔히 사용되어 왔던 방법이다. 삼면이 바다인 우리나라에도 해안을 따라 방어벽(새만금, 시화호 등), 어항 및 시설물에 대한 방파제 등이 다양하게 이미 설치되어 있다. 이러한 방어 시설의 방어 기준은 향후 지구 온난화에 의한 해수면 상승으로 새로운 기준 설정이 요구될 것으로 사료된다. 방어 적응 전략은 크게 방파제와 같은 hard 기술과 사빈 보충과 같은 soft 기술로 구분할 수 있다.

이상의 방안을 고려할 때 사례 지역에 대한 공학적 대안은 단기적이고 장기적인 관점에서 분리하여 적용될 것으로 전망된다. 단기적으로는 방어의 개념을 불가피하게 사용할 것으로 예상되며 기후 변화가 가속화되어 피해 규모의 증가가 확실시되는 경우 후퇴 전략도 검토될 것으로 사료된다. 그러나 no-regret 및 지속성 평가 관점에서 방어 전략도 해안의 생태적 다양성을 유지하는 soft 전략을 우선적으로 채용하고 순응 방안을 동시에 활용하며 이들 방안들을 미래의 후퇴 전략과 연계하여 실시하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 임해공단과 같은 매립을 통한 사회·경

제적 인프라 조성은 기후 변화 시대에 지양하는 것이 바람직하다.

■ 표 5-2. 해수면 상승에 대한 적응 방안 및 그 특성

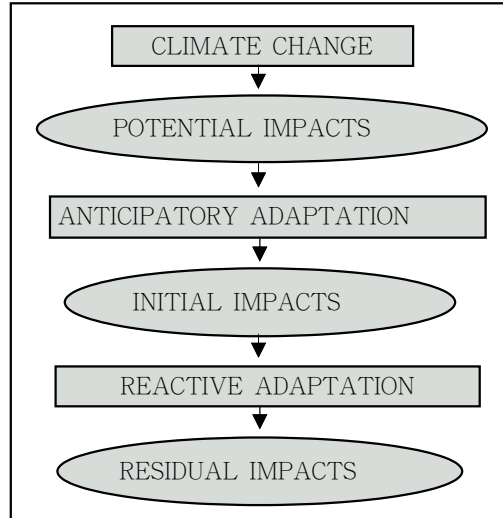
적응 방안	적응 유형		적응 시기	
	자발적 조정	전략적 행동	반응적	예방적
<b>관리적 이주</b>				
• 취약지구 미개발	✓	✓		✓
• 조건적, 단계적 개발 억제		✓	✓	✓
• 정부 보조금 폐지		✓	✓	✓
• 가정되는 이동성		✓		✓
<b>순응</b>				
• 최악 영향 회피 선행 계획	✓	✓		✓
• 토지 이용 변경	✓	✓	✓	✓
• 건물 양식 변경	✓	✓		✓
• 위협받는 생태계 보호		✓		✓
• 재해 지역 규제		✓	✓	✓
• 규제 강화를 위한 재해 보험		✓	✓	✓
<b>방어</b>				
1) hard 구조물 방법				
• 둑, 제방, 홍수 제방	✓	✓	✓	✓
• 방과제, 방벽	✓	✓	✓	✓
• 방사제	✓	✓	✓	✓
• 이안제		✓	✓	✓
• 방조문, 방조제		✓	✓	✓
• 해수 방어벽		✓	✓	✓
2) soft 구조물 방법				
• 주기적 사빈 공급		✓	✓	✓
• 사구 복원 및 조성	✓	✓	✓	✓
• 습지 복원 및 조성		✓	✓	✓
• 조림(稠林)		✓		✓

자료: UNEP(1996)

다음 과제는 언제 이 방안들을 적용할 것인가에 대한 시기 문제이다. 대응 시기와 관련하여

Smit *et al.*(1999)의 연구를 인용하면 계획 적응을 예측적(anticipatory)인 것과 반응적인(reactive) 것으로 구별하여 사용한다. 이들 개념을 좀 더 쉽게 풀이하면, 예상되는 해수면 상승 및 그 영향에 대하여 오늘 대응을 시작할 것인가 아니면 내일까지 기다려보고 해수면 상승에 대한 영향이 가시적일 경우 대응을 시작할 것인가로 설명할 수 있다. 예측적 대응은 반응적인 대응보다 불확실성이 더 큰 상태에서 이루어지는 대응이지만 미래의 해수면 상승에 대한 과학적인 정보에 근거하여 이루어지는 대응이다. 해수면 상승 영향이 가시적인 상황에서 이루어지는 반응적인 대응은 연안역의 범람 예상 지역에 취약 구조물의 증가와 같은 바람직한 해수면 상승 대응 방향과 역행할 수 있으며, 이로 인하여 오히려 효과적인 대응을 어렵게 할 수 있다. 해수면 상승 영향에 대한 예측적 대응과 반응적 대응을 적절히 조합하여 효과적으로 사용하는 것은 해수면 상승 영향의 대응 전략에 큰 도움을 주는 것으로 평가되고 있으며, 이에 대한 모식도는 <그림 5-4>와 같다.

이 모식도는 먼저 해수면 상승이 연안역에 잠재적인 영향(potential impact)을 준다는 가정에서 출발한다. 이와 같은 가정은 연안역의 해수면 취약성 평가를 통하여 나타나며 본 연구의 연구 결과를 토대로 볼 때 우리나라에도 적용되는 가정으로 판단된다. 이러한 향후 해수면 상승 영향에 대응하여 연안역의 각종 개발 및 보호 계획을 향후 해수면 상승을 예상하고 이에 따라 계획된 적응을 수립 실행하는 것은 해수면 상승의 잠재적 영향을 감소시킬 수 있으며, 이를 초기적 영향으로 정의한다. 이 초기 영향에 대한 반응적인 대응은 이 초기 영향을 더욱 감소시킬 수 있으며, 이를 잔여 영향으로 정의할 수 있다. 해수면 상승에 대한 적응 시기는 위의 예측적 대응과 반응적 대응을 함께 고려하는 장기적인 대응의 경우 그 시너지 효과가 크며 향후 충격(비용 및 영향)을 크게 완화할 수 있는 효율적인 선택으로 사료된다. 그러나 많은 경우 해수면 상승 영향에 대한 고려없이 연안역 개발이 이루어지고 있으며 그러한 경우 오히려 연안역의 취약성을 증가시키며 이들은 적응의 관점에서 부정적인 적응으로 표현된다.



자료: Klein(1998)

■ 그림 5-4. 해수면 상승에 대한 영향 평가 및 적응 골격

해수면 상승 영향에 대한 적응책 이행은 막대한 비용과 희생이 요구되는 경우가 많다. 따라서 해수면 상승 및 이에 따른 해수면 상승 영향이 불확실한 상태 하에서 미래의 해수면 상승 영향에 대하여 예측적 대응을 사회적으로 정당화하는 것은 쉬운 문제가 아니다. 예측적 대응을 도입하기 위한 기준은 해당 국가나 사회에 따라 달라질 수 있다. Smith(1997)는 예측적 대응이 정당화될 수 있는 몇 가지 경우에 대하여 언급하고 있다. 그 하나는 해수면 상승 문제 대응과는 별도로 예측적 대응으로 혜택이 있는 경우(이 경우를 win-win 상황으로 정의함)와, 해수면 상승 영향이 돌이킬 수 없는 파국적 영향을 주거나 해수면 상승 영향을 받을 것으로 예상되는 사회 인프라에 대한 장기 계획, 예측적 행위가 없는 경우 해수면 상승과 다른 장기적 경향 사이에 상호 나쁜 영향을 주는 경우로 제시하고 있다.

일반적으로 연안역에서 많은 사업(인프라 건설 등)들은 장기적 이용을 예상하여 이루어지므로 어떤 결정을 내리기 전에 예측적인 적응의 필요성을 주의 깊게 고려하는 것이 필요하다. 연안역에서의 예측적 적응의 예는 앞서 기술한 해수면 상승 대응 기술의 모든 것이 포함될 수 있다. 기존의

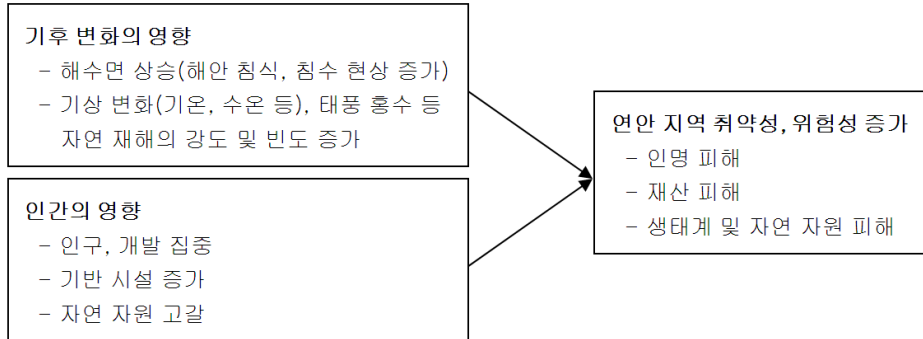
예로서는 범람 방파제 건설 및 폐수 배출 시스템 보강, 교량 및 방벽의 높이 증대, 연안으로부터의 구조물 후퇴 등이 포함될 수 있다.

해수면 상승의 영향은 몇몇 국가는 예외지만 전 세계 연안에서 일어날 수 있는 것으로 평가되고 있다. 해수면 상승은 연안역이 갖고 있는 오염, 수산 자원 감소, 연안역 훼손과 같은 현재의 압력과 문제들은 크게 악화시킬 것으로 예상되므로 연안역이 당면한 현안 문제들과 동시에 해수면 상승 문제를 포함한 기후 변화의 적응 문제를 함께 고려 시 시너지 효과를 가져올 것으로 기대되고 있다. 몇몇 상황에서 기후 변화는 기후 변화가 없는 상황에서도 실행할 만한 가치가 있는 “win-win”, no-regrets 상황을 정의하는 데 도움을 줄 수 있다. 앞에서 제시한 여러 적응 방안들은 장기적인 기후 변화뿐만 아니라 단기적인 기후 변동의 영향을 감소시키며, 동시에 해안의 생태적 기능을 증진시키는 역할을 한다. 적응 능력을 증대시키고 적응이 가능한 환경을 조성과 관련된 광범위한 방안들을 고려하는 것이 해수면 상승 및 기후 변화 대응에 무엇보다도 주요한 접근 방식이라고 사료된다.

## 2. 해수면 상승에 대한 계획적 적응 방안

해수면 상승은 연안 지역에 범람과 침식 현상을 가속시키고, 연안 습지·해안림뿐만 아니라 연안 생태계에도 부정적인 영향을 미친다. 이와 함께 해안가 저지대는 홍수와 침수가 증가하여 인명 및 재산 피해의 가능성이 증가된다. 해수면 상승의 주요 원인인 지구 온난화와 기후 변화 현상은 재해성 기상 현상의 증가와 밀접한 관련이 있으며, 태풍과 같은 자연재해는 연안 지역의 취약성을 더욱더 증가시킬 것이다.

따라서 연안 지역은 기후 변화로 인한 해수면 상승뿐 아니라 태풍, 홍수, 해일 등의 재해와 해안 침식의 문제가 복합적으로 발생하는 곳이다. 또한 해안 지역의 사회·경제적 활용도, 경관적 가치, 환경적 가치 등으로 지속적인 개발 압력과 인구 집중이 발생하는 곳이기도 하다. 결과적으로 환경적, 기후적 영향에 사회·경제학적 영향이 더해져 이 지역의 취약성은 더욱 커지고 있는 실정이다.



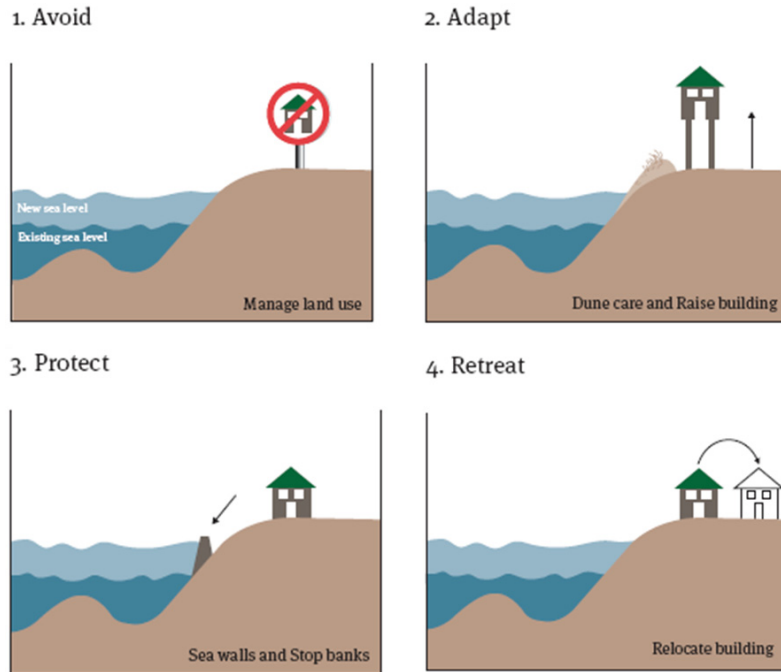
■ 그림 5-5. 기후 변화와 연안 지역의 취약성

현재 전 세계 연안 저지대는 인구와 개발이 집중되어 연안 10km 이내에 세계 인구의 절반 이상이 거주하고 있다고 알려져 있다. 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라의 지리적 여건과 해안 지역의 경관적 가치와 자원 등으로 우리나라의 연안 지역도 높은 개발 압력을 받아 왔으며, 지속적으로 건축물과 도로, 항만 등의 기반 시설이 증가되어 왔다. 더불어 매립 사업과 해안가 인접 지역 개발로 자연 습지 및 해안가 산림 등의 연안 재해 완충 지역이 급속도로 사라지고 있는 실정이다. 따라서 현재와 같은 속도로 어떤 대책없이 연안 지역 개발이 지속되고, 거기에는 기후 변화로 인한 해수면 상승 현상이 지속된다면 해안 침식으로 인한 피해는 물론이고 범람, 침수, 홍수, 높은 파도 등으로 인해 이미 개발된 지역에 대한 대규모 피해가 예상된다.

따라서 연안 지역 내 각종 재산, 시설물 및 인명 피해를 예방하기 위해서는 보다 근본적이고 선행적인 차원의 관리가 필수적이다. 다시 말해 현재의 해안가 토지 이용 및 개발 패턴을 좀 더 지속적인 개발(sustainable development)의 관점으로 전환시키고, 해수면 상승을 고려한 공간이용과 대책 마련이 필요하다고 할 수 있을 것이다. 이를 위해 해안 지역의 개발 방향을 결정하고 토지 이용 방안을 마련하는 도시계획을 활용한 관리 방안은 해수면 상승에 대한 핵심적이고 근본적인 적응 대책이 될 수 있을 것이다.

또한 도시계획 및 토지 이용의 활용은 <그림 5-6>에서 보여지는 주요 해수면 상승 적응 방안들의 실현을 위한 구체적인 전략(measure, policy)들을 포함하고 있으며, 특히 토지 이용을 활용한

해안가 인접 지역의 개발 규제(Avoid), 건축물 규제 등을 활용한 Adaptation 방안, 건축물의 이주를 통한 Retreat 방안 실현을 위한 구체적 제도 마련의 근거가 될 수 있다.



자료: 뉴질랜드 크라이스트처치 시의회(<http://www.ccc.govt.nz/>)

■그림 5-6. 해수면 상승 적응 방안

해수면 상승에 대한 계획적 적응 방안에서는 현재 우리나라 국토의 공간적 이용에 대한 기본 틀을 제공하는 「국토의계획및이용에관한법」을 기반으로 한 도시계획(도시기본계획, 도시관리계획) 제도를 고찰해 보고 해수면 상승 적응을 위한 계획적 방안 마련을 위한 근거들을 살펴볼 것이다. 또한 도시계획제도와 더불어 해수면 상승으로 가장 큰 피해를 볼 수 있는 연안 지역의 이용과 관리에 관련된 연안 관리법 이하 제도를 추가적으로 살펴보고자 한다. 더불어 해수면

상승이 태풍, 바람, 집중 호우 등 재해 유발 요인과 중첩했을 때 더 큰 영향을 미치므로 재해·재난 관리 관련 계획과 제도에 대해서도 살펴보고자 한다. 마지막으로 개발 사업이 환경적으로 건전하고 지속 가능하게 계획되고 시행될 수 있도록 하기 위해 제정된 「환경정책기본법」을 바탕으로 한 환경영향평가 및 사전 환경성 검토 제도에 대해서도 관련 내용을 살펴보았다.

이로써 해수면 상승에 효과적으로 대응하기 위한 대응책을 수립하는 데 기초 자료로 활용하고 현행 제도 고찰을 바탕으로 해수면 상승에 적응하기 위한 도시계획적 방안을 도출해 보고자 한다.

### 가. 현행 관련 제도 고찰

국토 공간 이용 및 개발에 관한 내용을 규정한 「국토의계획및이용에관한법률(국토이용관리법)」은 한정된 국토의 경제적, 효율적, 합리적 이용을 위해 토지 용도를 미리 용도지역, 용도지구, 용도구역 등의 수단을 활용하여 계획한다. 이에 따라 토지 이용 및 개발 행위를 유도하거나 규제함으로써 시가지의 무질서한 확장 및 무계획적 개발 방지, 계획적이고 단계적인 토지 이용 도모, 보전과 개발의 조화를 바탕으로 한 지속 가능한 국토 공간 개발 방향을 제시한다.

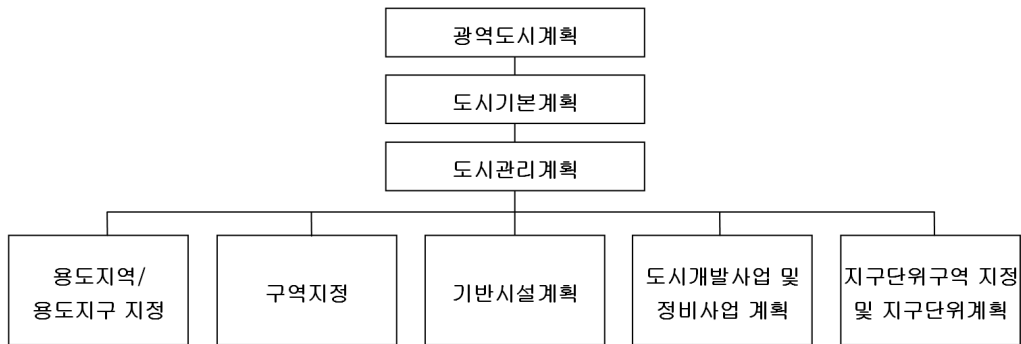
우리나라의 도시계획을 활용한 공간계획 체계는 계획 대상의 범위를 기준으로 볼 때 국토·지역, 도시·단지, 개별 필지의 3단계로 구분이 가능하다. 법을 바탕으로 살펴보면 국토이용관리법은 전 국토를 대상으로 적용되고, 도시계획법은 도시지역을 대상으로 적용되며, 건축법은 개별 필지에 적용된다고 볼 수 있다.

도시계획은 국토이용관리법에 의해 도시 지역에 주로 수립되며, 도시 전체를 대상으로 한 도시 기본계획, 도시(재정비)계획, 도시의 특정 지역을 대상으로 한 지구단위계획, 재개발계획, 택지개발계획 등으로 구분된다.

본 연구에서 관심을 가지고 있는 연안 지역을 포함한 일반적인 지역은 도시계획법에 의거하여 수립된 도시계획(도시기본계획, 도시관리계획)의 용도지역지구계획에 의해 개별필지의 개발이 이루어진다. 즉, 개별필지 개발은 용도지역지구를 바탕으로 각각의 용도지역지구에 정해진 행위

제한과 건축 규제 범위 내에서 이루어진다. 한편, 특정한 목적을 위해서는 지구단위계획구역 지정이 가능하며 이 구역 내의 개발 및 건축 행위는 지구단위계획에 의해 제약을 받게 된다.

가장 일반적으로 이야기하는 도시계획은 도시기본계획과 도시관리계획으로 구분되며 도시기본계획은 관할 지역의 기본적인 공간 구조 및 장기적 발전 방향을 제시하는 종합 계획으로 도시관리계획의 지침이 되는 계획이다. 도시관리계획은 도시기본계획의 내용을 구체화하는 계획으로 용도지역·용도지구, 개발제한구역·시기화조정구역·수자원보호구역의 지정, 그밖에 기반 시설에 관한 계획, 도시개발사업 및 정비사업에 관한 계획, 지구단위구역의 지정 및 지구단위계획에 관한 계획을 포함하며 법적 구속력을 가진다. 이러한 도시관리계획의 체계 내에서 각종 개발 사업과 건축이 관련법과 연계하여 이루어지게 되는 것이다(그림 5-7).



■ 그림 5-7. 도시계획 체계

위에서 언급된 도시계획의 체계 및 적용 원칙은 연안 지역 관리에도 동일하게 적용되며, 해당 지역의 토지 이용계획이 연안 지역의 개발 및 보전에 영향을 미치게 된다.

국토법을 바탕으로 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역의 4종류의 용도지역으로 구분되고 도시지역은 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로 구분하여 도시기본계획 및 도시관리계획을 근거로 관리된다. 또한 용도지역 내에서 도시 기능 증진 및 공공의 안녕질서를 위해 경관지구, 미관지구, 고도지구, 방재지구보존지구, 시설보호지구, 취락지구, 개발진흥지구, 특정용도제한지구의 용도지구를 지정할 수 있다.

도시기본계획과 도시관리계획의 수립 지침 및 관련 제도를 살펴보면 아직 연안 지역의 특수성을 고려한 토지 이용에 대한 규정이나 해수면 상승 등 기후 변화를 고려한 계획 수립 지침은 미흡한 상태이다. 다만 홍수, 침수 등 자연재해를 고려한 토지 이용을 수립해야 한다는 원칙적인 내용이 도시기본계획 및 도시관리계획의 수립 지침에 부분적으로 언급이 되어 있다. 상습수해지역은 시가화예정용지의 지정을 억제하고 보전용지로 지정하도록 했고 해안·하천·지천 등은 방재 기능을 고려하여 녹지 및 공원을 계획하도록 하고 있다(한국해양수산개발원, 2009).

■ 표 5-3. 도시계획 수립 지침(2007년 개정) 상 연안 지역 및 재해 관리 관련 항목

부문	내용
토지 이용 계획	- 상습수해지역 등 재해가 빈발하는 지역과 하천 하류 지역의 수해를 유발할 가능성이 있는 상류 지역은 원칙적으로 보전용지로 지정하되, 시가화예정용지로 설정하고자 하는 경우에는 당해 지역에 유수되는 우수의 흡수율을 높이기 위하여 녹지비율을 강화하는 등 방재 대책을 미리 수립
공원·녹지 체계	- 해안·하천·지천 등은 홍수 예방 등 방재 기능 수행을 고려하여 수변공간으로서의 이용성 검토 - 수변 공간 및 도시 지역 내부의 녹지는 방재 기능 동시 고려
방재 및 안전 계획	- 상습침수지역 등 재해가 빈발하는 지역은 가급적 시가화예정용지 지정 억제

도시기본계획의 내용을 구체화하고 실질적인 용도지역지구를 지정하는 도시관리계획의 수립 지침을 살펴보면 도시기본계획의 지침과 유사한 흐름을 보이며, 수해 등 재해빈발지역은 개발용도 지정을 억제하고 보전녹지로 지정하라는 원칙과 기준을 반복하고 있다. 하지만 보전녹지의 구체적 행위 제한과 건축 규제 범위를 살펴보면 보전녹지지역에서 개발 자체가 규제되는 것보다는 건폐율 20% 이하, 용적률 100% 이하에서는 일정 용도의 건축물 개발이 가능하다. 따라서 보전녹지 지정은 개발 규제의 근거가 될 수는 있겠지만 개발 제한을 보장하거나 해수면 상승과 관련된 건축물 높이 규제, 이주 정책을 수행할 수 있는 기준이 되기는 어렵다.

국토계획법상 도시관리계획의 용도지역 중 '방재지구'는 풍수해, 산사태, 지반의 붕괴, 지진,

해일 등의 재해를 예방하기 위하여 필요한 지역에 대해서 국토해양부장관, 시·도지사 또는 대도시장이 지정하는 지구이며, 지정된 곳에서는 도시계획조례에 의해 방재지구 내 행위제한 사항을 명시할 수 있다. 따라서 해수면 상승과 관련된 연안 지역의 침수 및 홍수 취약지역을 관리할 수 있는 근거로 활용될 수 있을 것으로 판단되나 2008년을 기준으로 전국에 5개소(203,670m<sup>2</sup>) 정도만이 지정되어 있는 실정이다.

표 5-4. 도시관리계획 수립 지침(2008년 개정) 상 연안 지역 및 재해 관련 항목

부분	내 용
용도지역계획의 기본원칙	- 수해 등 재해 빈발지역은 가급적 개발용도의 지역지정 억제하고 하천 상류 지역에 대하여도 개발에 따른 하류 지역의 재해 유발 가능성을 고려하여 적절한 용도지역 부여
보전녹지지역 지정 기준	- 환경오염과 재해의 방지, 생태계 보전 등을 위하여 필요한 차단지대 및 완충지대로서 적절한 위치·규모·형태를 가지고 있는 지역 - 상습수해지역 등 재해가 빈발하는 지역과 하천 하류 지역의 수해 가능성이 큰 하천 상류 지역
방재지구 지정 기준	- 풍수해, 산사태, 지반의 붕괴, 지진, 해일 등의 재해를 예방하기 위하여 필요한 지구
방재 및 안전계획의 원칙	- 안전계획 내 재해 발생 현황을 조사하고 수해·지진 등 위기사항에 대처하기 위한 방재계획을 수립 - 수해 지진 등 발생 가능한 지역은 내수 범람 및 침수 방지를 위한 배수 및 방수 시설을 충분히 설치하고, 취약지대에는 인구가 밀집되지 않도록 토지 이용계획을 수립

또한 재해예방과 관련된 용도지구로 「자연재해대책법」에 의한 ‘자연재해위험지구’가 있다. ‘자연재해위험지구’는 시·군·구청장이 상습침수지역, 산사태위험지구 등 지형적인 여건 등으로 재해가 발생할 우려가 있는 지역에 대해 지정하는 지구이며 재해위험 원인에 따라 침수위험지구, 유실위험지구, 고립위험지구, 취약방재시설지구, 붕괴위험지구, 해일위험지구로 구분이 가능하다. 특히 연안 지역 관리와 직접적으로 연관이 있는 해일위험지구는 2005년에 추가된 지구로 ‘폭풍 해일로 인하여 피해를 입었던 지역’, ‘지진 해일로 인하여 피해를 입었던 지역’, ‘해일 피해가 우려되는 지역’에 대해 지정할 수 있다. 2007년 말을 기준으로 전국에는 총 619개소의 자연재해위

험지구가 있고 침수위험지구(370개)의 비중이 가장 크며, 해일위험지구는 부산에 2개소, 강원도에 1개소, 전남에 1개소, 경남에 4개소, 총 8개소가 지정되어 자연재해위험지구의 범주에서 가장 적은 비중을 차지하고 있다(한국해양수산개발원, 2009).

자연재해위험지구로 지정이 되면 시장 군수 구청장은 정비 계획을 작성해야 하며 정비 사업에 대해 지구단위별로 타당성을 검토하여 검토 결과를 바탕으로 투자 우선 순위를 정하게 된다. 아래의 <표 5-5>는 자연재해위험지구 지정 시 정비 사업의 투자 우선 순위 결정을 위한 평가 항목이다.

해일위험지구의 지정은 현재 국내의 제도를 바탕으로 살펴볼 때 해수면 상승의 잠재적 취약성을 고려하고 연안 지역 관리의 목적을 실현하기 위해 활용이 가능하나, 현재의 제도상 해일 위협의 범위로 한정되어 있고 실제로 활용되는 사례가 매우 적으므로 지자체의 적극적인 노력 없이는 효과적인 해수면 상승 대응책으로 이용하는 데 한계가 있어 보인다.

■ 표 5-5. 자연재해위험지구 정비 사업 투자 우선 순위 평가 항목

구분		평가 항목	
기본 평가 항목 (1차)	효율성	비용편익비	해당 지구의 B/C 값
	형평성	피해면적	해당 지역의 피해 면적
		피해액	해당 지구의 재해 피해액
	긴급성	재해발생위험도	해당 지구의 재해 발생 위험도
		시민불편도	해당 지구의 사업지구 현황
위험성	인명손실도	해당 재해로 인해 발생한 인명 손실 지수	
부가적 평가 항목 (2차)	지속성	해당 사업에 대한 민원 발생 여부	
	정책성	해당 사업에 대한 예산 확보 가능성 및 자치단체의 의지	
	계획성	해당 사업에 대한 기본 계획 존재의 여부	

국토이용법을 바탕으로 한 도시계획 및 토지 이용 외에 연안 지역 관리와 관련된 주요 법으로는 「연안관리법」을 들 수 있다. 연안관리법은 연안 공간을 대상으로 효율적인 보전 및 이용을 위하여

연안정비계획을 수립하고 연안정비사업을 시행하는 것을 주요 내용으로 하고 있다. 연안정비사업은 해안 침식 저감 및 방지를 위한 사업과 연안을 보전 개선하기 위한 사업, 연안 친수 공간 조성사업 등을 포함한다. 그러나 현재 연안 정비는 인공 시설물을 중심으로 이루어지며, 연안 육역의 용도지정 및 관리에 대한 권한이나 내용은 포함되어 있지 않은 상태이다. 따라서 해수면 상승에 적응하고 해안 지역 침식 현상을 저감시키기 위한 주요 대책으로 운영되기 위해서는 인공 시설물 설치에 보다 유의하고 자연 해안 보전과 같은 친환경적 방법을 조화롭게 운용할 필요성을 내포하고 있다. 동시에 현행 연안관리법 관련 제도만으로는 공간 관리를 바탕으로 한 해수면 상승에 대응하는 장치로 활용하기에 미흡한 수준이다.

정부는 환경에 영향을 미치는 행정계획이나 개발사업에 대해서 환경적으로 건전하고 지속 가능하게 수립·시행될 수 있도록 「환경영향 평가법」, 「환경정책기본법」을 근거로 환경영향평가와 사전환경성검토를 시행하도록 하고 있다. 연안 지역에서 이루어지고 있는 개발사업 역시 예외가 아니므로 환경영향평가와 사전환경성검토의 지침들을 살펴보았다. 환경영향평가 제도는 대규모 개발사업이나 중요한 프로그램을 시행하는 과정에서 환경에 미치는 영향을 미리 예측, 분석하여 이를 최소화하는 방안을 강구하는 것을 목적으로 하고 있다. 환경영향평가는 대기 환경, 물 환경, 자연 생태 환경, 생활 환경 등 6개 분야 20개 항목을 평가하며 사업 유형별로 각각의 분야와 평가 항목이 결정된다(환경부, 2008, 환경영향 평가 관련 규정집). 이러한 과정을 통해 개별 사업들이 주변의 토지 이용, 지형·지질, 수리·수문 등에 미치는 영향을 조사하고, 개발로 인해 발생 가능한 재해에 대한 예방대책들을 수립해야 함을 명시하고 있으며, 특히 연안 지역에서 발생하는 항만건설 사업의 경우 해안 환경(해안 생태계, 해역 수질 등)에 미치는 영향이나 보전 가치 지역의 영향 등을 살펴보도록 하고 있다. 하지만 환경영향 평가는 개발계획이 확정된 후 사업 실시 단계에서 이루어지고 연안 지역 난개발의 원인인 소규모 민간사업들은 대부분 제외되므로 기후 변화나 해수면 상승의 주요 대책인 입지 선정에는 영향을 미치지 못하고 있다. 또한 기후 변화나 해수면 상승과 같은 전지구적 현상 및 불확실성이 높은 현상에 대해서는 실질적으로 영향을 평가하기에는 어려움이 있으므로 지침에는 이러한 내용들을 찾아보기가 어렵다.

사전환경성검토제도는 환경에 영향을 미치는 행정계획 또는 개발사업이 확정 시행되기 전에 환경적 영향을 고려하게 함으로써 환경영향평가가 관여하지 못한 부분들 즉, 입지의 타당성, 주변 환경과의 조화 여부 등에 대해서도 검토가 가능하다. 사전환경성검토의 업무 편람을 살펴보면 침수지역, 재해위험지역, 위험시설지역 등으로부터의 안정성에 대한 검토를 실시하도록 하는 내용을 포함하고 있으나 기후 변화나 해수면 상승과 같은 잠재적인 요소는 평가와 분석의 어려움, 상황의 복잡성, 데이터나 분석 방법 부재 등으로 자세한 내용을 찾기가 어렵다.

지금까지 해수면 상승에 적응하기 위한 계획적 대안의 근거가 될 수 있는 국내의 계획 관련 제도들에 대해 살펴보았다. 아직 국내에서는 공간계획 및 개발계획 수립 시 기후 변화 및 해수면 상승을 고려한 계획 수립은 이루어지고 있지 않은 실정이다. 다만, 기후 변화와 관련된 수해 및 자연재해에 관한 내용이 구체적이지 않지만 지침의 성격으로 제시되어 있었고, 재해 취약지에 대해서는 도시관리계획상 용도지역 중 보전지역으로 지정할 것을 강조하고 있었다. 하지만 앞에서 언급한 대로 보전지역으로 지정되더라도 도시계획법 및 조례에서 허용하는 개발행위가 다양하고 밀도도 높아 효과적인 대응 방법으로는 한계를 보이고 있었다. 또한 현행법상 특정 목적의 토지 이용을 가능하게 하는 용도지구, 특히 방재지구 및 자연재해위험지구 지정을 통한 재해관리를 활용할 수 있음을 확인했으나 현재 이러한 지구 지정은 실제로 많이 이루어지지 않고 있을 뿐더러 지자체의 관심이 낮은 상태이다. 또한 해수면 상승에 대한 대책으로 사용되기에는 보완되어야 할 부분들이 많은 것으로 확인되었다.

다시 말해 연안 지역의 특수성과 기후 변화 적응을 공통적으로 고려한 토지 이용계획, 취약지역에 대한 입지 제한, 건축행위 규제 등을 시행할 수 있는 여건들은 아주 미흡한 실정이라고 할 수 있다. 하지만 최근 기후 변화 및 해수면 상승에 대한 관심이 증대되고 취약성 분석에 대한 개발과 평가에 대한 연구가 보다 활발해진 시점에서 해수면 상승에 대한 계획적 대응 방안에 대한 연구도 보다 활발하게 진행될 필요가 있다. 이어지는 절에서는 현재 제도 고찰을 바탕으로 제안할 수 있는 도시계획적 대응 방안에 대해 간략하게 살펴보려고 한다.

나. 해수면 상승에 대한 도시계획적 대응 방안

해수면 상승에 적응하기 위한 대책은 다음 지속 가능한 토지 이용(sustainable land use), 재해예방(hazard mitigation), 자연자원보존과 환경보호(natural resource, environmentally sensitive area protection)의 성격을 모두 포함하고 고려하는 대책이어야 한다. 현행 도시계획체계와 개발평가 제도를 바탕으로 했을 때 해수면 상승을 고려한 도시계획적 대응은 세 가지 방향에서 이루어질 수 있다.



■ 그림 5-8. 해수면 상승에 대한 도시계획적 대응 방안 제안

우선 현재 있는 방재지구, 자연재해위험지구(해일위험지구)를 강화하거나 보완하여 활용하는 방법이다. 우리나라 개발계획의 가장 기본적인 틀은 용도지역·지구제이므로 현행 제도를 바탕으로 침수 및 해일 등 자연재해의 위험지역에 지정 가능한 지구제도를 보완하고 지자체에서 이를 적극적으로 활용하도록 유도하는 것이 첫 번째 방법이다.

두 번째는 환경에 영향을 미치는 행정계획이나 개발사업이 확정 시행되기 전에 입지의 타당성 및 환경에 미치는 영향을 검토하는 사전환경성검토제도를 활용하는 방법이다. 사전환경성검토제도는 내년부터 전략환경평가로 개편되어 시행될 예정이다. 전략환경평가는 정책, 계획이나 프로그램

램들이 승인되기 전의 시점에서 중요한 환경영향들을 사전에 평가하는 과정들로 행정계획과 개발 사업을 대상으로 한다. 사전환경평가는 계획 초기단계에서 환경적 이슈를 고려하여 잠재적인 환경문제들을 예측하고 규명하고 장기적인 환경계획 수립이 용이하도록 하며 현행 환경영향 평가가 수행하지 못하는 소규모 사업들의 누적 영향, 간접 영향, 지구적 영향, 지역적으로 이동하여 나타나는 영향들에 대해서 효과적인 평가를 할 수 있을 것으로 기대하고 있다(송영일, 2006). 또한 전략환경평가에서는 계획의 적정성과 입지의 타당성을 중점적으로 검토함으로써 입지 대안에 대한 검토 및 계획 취소와 같은 조치를 취할 수 있는 장점들이 있다. 이러한 관점에서 현재 문제가 되고 있는 기후 변화와 이로 인한 해수면 상승의 영향은 전략환경평가의 주요 이슈로 다루어질 필요가 있으며, 해수면 상승을 포함한 기후 변화의 영향에 대응하기 위한 전략환경평가를 위한 평가 기준 및 지침 개발, 그 외 평가를 위한 기본 데이터 구축 과정이 필요할 것으로 보인다.

마지막으로 지구단위계획을 활용하는 방법이다. 지구단위계획은 도시계획의 용도지역지구가 도시관리의 도구로서 역할을 해내기 어려운 경우 즉, 특화된 목적을 가진 경우 유용하다. 지구단위 구역은 도시관리계획에서 계획한 지역 또는 특별한 문제점이나 잠재력이 있는 곳으로서 지구단위 계획을 통하여 체계적 개발 또는 관리가 필요한 구역을 대상으로 지정되어야 하며 그 일정지역에 대해서는 토지 이용계획과 건축물계획이 함께 이루어질 수 있도록 하는 계획이다. 지구단위계획의 특성상 지정된 지구에 대해서는 용도지역에서 정한 내용을 보다 상세하게 정하거나 제한 할 수 있을 뿐 아니라 용도지역에서 정하지 못한 내용들도 지역의 여건과 계획 목표를 참고해서 별도로 구체화시킬 수 있다.

현재 우리가 관심을 가지고 있는 해수면 상승 및 해안가 재해로 인해 피해가 크거나 취약성이 큰 지역은 향후 지속적인 상황 악화로 경제적, 사회적 파급효과가 적지 않을 것으로 예상되므로 이 지역에 대한 체계적이고 계획적 관리를 목표로 하는 지구단위계획구역 지정과 관리가 필요하고 타당하다고 판단된다.

도시계획제도인 지구단위계획을 활용하여 해수면 상승에 대한 적응 대안은 구체적인 토지 이용

과 건축물 계획 등 세부 대책이 필요하다. 이 지구 내에서는 크기는 기반 시설 배치, 규모 산정, 획지 규모 및 조성, 건축물의 용도 제한 및 배치, 밀도, 건축선에 관한 계획 등이 모두 포함되어야 한다. 또한 해수면 상승 및 해안가 재해에 대한 지구단위계획의 특성상 이러한 지역에 발생할 수 있는 위험 요소 해소 사업에 대한 내용도 포함될 필요가 있을 것이다.

가장 이상적으로는 해안가 근처의 위험지에 건축물이나 기반시설의 개발을 규제하고, 현재 있는 시설물에 대해서는 철거 및 이주를 통해 위험지역을 완충지대(녹지, 공원, 해안림, 방풍림 조성 등)로 조성하는 것이 바람직할 것이다. 현재 연안 대부분의 인접 지역이 사유지인 특성을 감안한다면 시설물 철거, 이주 및 보전지 확보를 위해서 토지 수용 및 보상 방안에 대한 부가적인 연구와 대책 마련이 필요할 것으로 보인다.

만약 위험지에서 건축물 입지가 불가피할 경우는 한시 이용형, 소규모 시설로 그 용도를 한정할 필요가 있을 것이다. 또한 해안 지역의 경관적, 경제적 가치로 인하여 인근지역의 개발이 불가피할 경우는 해안가에서 충분한 이격거리(setback, buffer)를 확보한 후 건축물이 입지하도록 규제할 필요가 있다. 더불어 건축물 바닥높이, 구조, 재료, 용도, 배치, 밀도 등에 대한 적절한 가이드라인도 수립될 필요가 있다.

### 3. 해수면 상승 대응과 지속성 평가

연안역의 기후 변화 영향 평가 및 적응의 궁극적인 목적은 해안의 지속성을 유지하는 것이다. 해안의 지속성은 해안이 가지는 생태적 다양성을 유지하고 인간의 다양한 이용도를 유지시키는 것으로 정의할 수 있다. 기후 변화에 대한 적응과 지속 발전과의 가장 기본적으로 본질적인 관련성은 기후변화협약 2조에 잘 나타나 있다. 기후변화협약 2조는 본 협약의 궁극적인 목적 즉 감축을 통한 지구 기후 시스템 보호를 규정하며, 이와 같은 목표 달성은 “생태계가 기후 변화에 자연적으로 적응하도록, 식량생산이 위협받지 않도록, 지속 가능한 경제 발전이 가능하도록” 하는 시간 프레임 내에서 이루어지도록 하고 있다. 이와 같은 대응 프레임은 본 연구의 대상인 해안에서는 해안의 생태적 다양성을 유지하고 해안의 사회·경제적 이용도를 동시에 충족시키는 방안 도출을

의미한다. 여기서 제시되는 지속 발전은 적응 대상의 필요(환경적, 경제적, 사회적)를 만족시키되 동시에 다른 지역 및 미래 세대의 필요를 제한하지 않는 것을 의미한다. 따라서 지속 발전은 환경적, 경제적, 사회적인 측면을 모두 고려하며 동시에 해당 지역 및 관련 이해당사자뿐만 아니라 다른 지역 및 미래를 모두 고려하는 패러다임이라고 할 수 있다. 이와 같은 개념을 <표 5-6. 지속 발전 매트릭스>로 정의할 수 있으며, 지속 발전은 이들 모든 성분(9개의 박스)들이 서로 균형을 가지도록 하는 평가과정을 지속성 평가(sustainability appraisal)라고 하며 유럽을 중심으로 정책 결정에 활용되고 있다. 해안과 같이 보전 가치가 높은 지역에 대한 적응은 지속성 평가 관점에서 접근하는 것이 바람직하다고 판단된다.

■ 표 5-6. 지속 발전 매트릭스(Sustainable development matrix)

	Economy	Socio-cultural	Environment
Here & Now			
Later			
Elsewhere			

지속성 평가 관점에서 대응 방향의 몇 가지 주요 사항을 지적하면 이들 대응은 환경적, 경제적, 사회적으로 균형적인(balanced) 과정으로 진행되어야 한다는 것이다. 예를 들어 해안의 생태적 기능을 완전히 훼손하는 hard structure를 검토하는 것, 피해 주민의 사회적 영향을 단지 경제적 측면에서 보상하는 것, 경제성이 없는 대응 방안을 도입하는 것 등은 지속성 평가 관점에서는 적절하지 않은 방안으로 사료된다. 지속성 평가 관점에서 대응 방안을 검토하는 경우 또 다른 특성은 지속 발전 패러다임이 객관적인 면과 주관적인 면을 동시에 가지고 있는 점이다. 객관적인 점은 과학적 불확실성, 제도나 사회의 적응 능력 한계 등을 들 수 있으며 주관적인 면은 지속 발전에 대한 해당 사회의 가치 및 인식이다. 과학적 불확실성, 적응 과학의 부족 및 지속 발전의 주관적인 측면은 다양한 이해 당사자(지역 주민, 정책 결정자, 시민 단체, 과학자 및 공학자 등)

참여를 통한 해안의 지속성을 유지할 수 있는 적절한 대응 방안 도출이 요구된다.

기후 변화 및 해수면 상승에 대한 대응은 기존의 정책 관행과는 다르게 과학적 불확실성이 매우 높은 상황에서 이루어져야 한다는 점에서 적응(adaptation)이란 용어를 사용하거나 개념을 더욱 강화하기 위하여 적응적 적응(adaptive adaptation)이란 단어들도 빈번하게 인용되며 과정(process)의 중요성으로 인하여 이들 대응에 과정을 붙이는 경우도 많다. 이들 적응 과정은 온실가스 감축과는 다르게 적응 대상이 지역적인(localized) 특성을 가지고 있다. 지역적인 특성은 이해 당사자들의 가치(value), 인식(awareness), 행동 양식(style) 등의 사회·경제적인 요소들이 환경적 측면과 더불어 주요한 요소로 작용하게 된다. 이와 같은 특성은 A지역의 기후 변화 적응 방식이 B지역의 적응 방식과는 다를 수 있음을 암시하고 있다. 이와 같은 지역적 특성을 가지는 적응 과정에서 고려해야 할 주요한 요소 중의 하나는 지역 및 전통 지식(local and/or traditional knowledge)이라 사료된다. 적응과 관련된 많은 정책 결정자들의 경험은 과학보다는 지역의 전통적 지식이 중요함을 지적하고 있다.

이들 지속성 평가의 대응 과정, 대응 내용 및 도입과 관련한 주요 속성으로 먼저 대응 과정은 참여(participation), 다학제(multidisciplinary), 대중 관리(public-relation management), 품질 보증(quality assurance), 투명성(transparency) 등이 중요하다. 참여는 취약 그룹뿐만 아니라 반대 의견을 가지는 그룹도 참여하여 지속적인 의견 개진이 필요하다. 기후 변화는 특정 분야의 학문적 지식보다는 다양한 분야의 학문(특히 사회과학)의 정보가 필요하므로 여러 분야의 전문성이 필요하다. 기후 변화 적응은 취약 해당 지역과 직접적인 연관이 있으므로 이들과의 대화가 중요하며, 이와 같은 협의 과정에서 지역 주민 및 지도자의 참여가 중요하다. 더불어 모든 단계에서 정보가 공유되어야 하며 이런 투명성을 통하여 모든 과학적 및 경험적 지식이 수렴되는 과정이 바람직하다.

대응 방안 선정과 관련하여 주요 요소는 스코핑(scoping), 기준(criteria), 주관적 인식(subjectivity awareness), 보고(reporting) 및 정량화(level of detail) 등을 포함한다. 먼저 스코핑은 <표 5-6>의 9개 matrix 중에서 중요하지 않은 부분은 고려하지 않고 중요한 부분만을

추려내어 여기에 집중하도록 하여야 한다. 다음으로 대응 기준을 사용하되 사람들이 이해할 수 있도록 하여야 한다. 이들 기준으로 환경적, 사회적, 경제적인 것 등을 포함할 수 있다. 다음으로 대응의 주관적인 측면을 고려하여 대응 기준 및 방안은 상호 협의 가능하도록 하나 지속성 평가의 기저를 해치지 않는 말아야 한다. 정책 결정을 위한 효율적인 보고서 작성 및 정량적인 평가도 주요한 요소로 사료된다.



## 제6장

### 요약 및 결론

우리나라는 삼면이 바다이며 수려한 자연 경관은 물론 생태적 다양성 및 생산성을 가지고 있었으나 20세기부터 과도한 이용으로 인하여 다양한 환경 문제와 더불어 해안의 기능이 크게 훼손되어 왔다. 이와 같이 해안의 높은 사회·경제적 이용도는 전 세계의 공통적인 특징이며 그 경향 역시 증가하는 추세이다. 해수면 상승 및 기후 변화는 자연 생태계의 보고이고 사회·경제적 활동이 집중된 연안역에 대하여 기존의 환경 문제에 더하여 누적적으로 영향을 크게 증대시키고 있으며 기후 변화의 가속과 함께 그 취약성도 가속화될 전망이다. 이와 같은 전망은 IPCC 평가 작업과 더불어 해안을 가지고 있는 대부분 국가의 연구 결과 연안역이 기후 변화에 의한 가장 취약한 지대로 평가되고 있으며, 대응을 위한 국가적 노력을 다각도로 진행시키고 있다. 본 연구는 이와 같은 문제의 심각성에 기초하여 2009년부터 해수면 상승과 기후 변화로 인한 우리나라 연안역의 물리적 취약성을 다각도로 검토하는 작업에 착수하였다. 본 연구의 1차년도(2009년)에서는 해수면 상승에 의한 해안 침식 평가를 정량적으로 도출하였으며 2차년도(2010년)에서는 범람 평가에 초점을 맞추어 연구가 이루어졌다. 더불어 AR4 이후의 해수면 상승 현황, 주요 국가의 취약성 평가 현황에 대한 조사를 실시하였으며 대응 방향과 관련하여 구체적인 토지 이용계획 방안을 제시하고자 하였다.

먼저 지구 해수면 상승은 20세기 이후 현재 지속적으로 이루어지고 있으며 21세기 현재 연간 3mm 이상의 상승률을 나타내고 있다. 우리나라의 경우 지구평균치보다 높은 상승을 나타내고 있어 해수면 변화율에 대한 지속적인 모니터링이 필요한 실정이다. 그러나 우리나라를 포함한 지역적인 해수면 변화가 미래에 얼마나 일어날 것인가에 대한 과학적 예측 능력은 매우 낮은 편이며, 이로 인하여 매우 높은 과학적 불확실성 하에서 정책 결정을 이루어야 하는 어려움을 가지고 있는 분야이다. 본 연구는 우리나라 해수면 상승 취약성 평가를 계획 차원에서 활용이 가능하도록 취약성 지수를 통한 스크리닝과 이를 통하여 나타난 주요 취약 지대에 대한 범람 평가를 통한 스코핑 단계로 실시하였다. 그 결과 우리나라 동해안(강원도 해안)의 경우 취약성 지수가 현재 1.826~22.361(평균 7.085)이며, 2100년 해수면이 1m 상승하는 경우 그 범위가 2.887~30.619(평균 12.361)로 크게 증대하였다. 해수면 상승에 대하여 매우(very high) 취약한

지역의 경우 현재 평가 대상 해안선의 8.57%에서 2100년 해수면 1m 상승하는 경우 현재 기준의 취약 지구가 35.56%로 증가하였다. 이와 같은 상대적인 취약성 지수는 우리나라 동해안이 해수면 상승에 대하여 취약성이 높음을 간접적으로 나타낸다고 할 수 있다. 사례 지역에 대한 해수면 상승 취약성 평가 결과, 동해안 해안 도로 주변의 주거 지역, 해안 침수 지역, 매립 지역은 범람 취약성이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 해수면 상승 및 기후 변화와 관련한 우리나라 연안역의 기존 이용 방식의 취약성을 나타내며 동시에 새로운 기준 설정 및 적응 방안이 필요하다는 점을 나타내고 있다.

해수면 상승 및 기후 변화에 대한 대응은 (1)취약성 평가, (2)적응목표 및 방법론 설정, (3)정책의 메인스트리밍, (4)적응 대책 이행, 그리고 (5)이행 대책 평가를 포함하는 적응 과정(adaptive adaptation process)을 포함한다. 적응 목표는 연안의 환경적, 경제적, 사회적 측면을 모두 고려하는 지속성 평가 방식으로 이루어지는 것이 바람직하며 과학적 불확실성을 감안하여 현재의 환경 문제를 동시에 고려하는 전략적인 방식으로 이루어져야 한다. 본 연구에서 조사한 주요 국가의 대응 방향은 아직까지 (1)과 (2)단계에 머물러 있는 실정이다. 그러나 네덜란드와 같이 해수면 상승과 같이 물 관리에 대한 취약성 및 경험이 많은 국가는 국가 차원의 적응 대책을 수립하고 구체적인 지침을 제시하고 있어 우리나라 대응 방향에 주요한 시사점을 제시한다고 할 수 있다.

우리나라 해안 지역은 경관적 가치와 자원 가용성 등의 이유로 높은 개발 압력을 받아왔으며 건축물과 도로·항만 등의 기반시설이 지속적으로 증가되어 왔다. 현재와 같은 속도로 어떤 대책 없이 연안 개발이 지속되고 거기에서 기후 변화로 인한 해수면 상승 현상이 더해진다면 해안 침식으로 인한 피해는 물론이고 범람, 침수, 홍수, 높은 파도 등으로 인해 이미 개발된 지역에 대한 대규모 피해가 예상된다. 따라서 연안 지역 내 인명 및 재산 피해를 예방하기 위해서는 보다 근본적이고 선행적인 차원의 관리가 필수적이다. 이를 위하여 자연 해안이 가지는 방재적 기능을 보전하고 복원하는 기술적인 적응 대책과 더불어 해안가 토지 이용 및 개발 패턴을 좀 더 지속적인 개발의 관점으로 전환시키고, 해수면 상승을 고려한 토지 이용과 공간 이용 방안

마련이 필요하다고 할 수 있다. 해수면 상승을 위한 대응 과정은 정보와 기술적 및 제도적인 적응 방안으로 연안 습지 보전 및 복원, 해안 보전 지구 확대, 연안 빌딩 표준화, 연안 개발 후퇴선 지정, 해안 생태계 활성화, 해안 침식 양빈, 마을 단위 방재 계획, 재해 범람도 작성 및 경보 시스템 구축, 연안 수변 구역 관리, 통합 연안관리 등 다양한 적응 방안들이 존재하며, 이들 방안은 상호 보완 작용을 하는 바 상호 시너지 효과를 높이는 대책 혼합이 필요하다. 현행 도시계획 및 재해관련 계획, 환경영향평가 제도를 살펴보면 아직 국내에서는 해수면 상승에 대한 대책으로 사용되기에는 보완되어야 할 부분들이 많은 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 연안 지역의 특수성과 기후 변화 적응을 공통적으로 고려하기 위한 대책으로 현행 방재지구, 자연재해위험지구 제도의 보완 활용과 동시에 전략환경평가 제도를 활용한 방법, 도시계획 제도 중 지구단위계획을 활용하는 방법을 제안한다. 특히, 지구단위계획은 용도지역지구 관리하기 어려운 특화된 목적을 가진 경우에 효과적이므로 해수면 상승 및 해안가 재해의 취약성이 큰 지역을 관리하는 데는 타당하다고 판단하며, 효과적인 활용을 위해서는 구체적인 토지 이용과 건축물 계획 등 세부 대책에 대한 연구가 이루어질 필요가 있다.

우리나라의 경우 해양 부분에 대한 종합적인 영향 및 취약성 평가 자료가 매우 부족한 실정으로 국가 차원의 계획적이고 지속적인 평가 작업과 이를 통한 적응 전략 수립이 긴급하게 요구되는 실정이다. 이와 관련하여 일본의 영향 평가 및 적응 전략 수립은 우리에게 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 일본의 경우 연안을 포함하는 주요 분야에 대한 국가 차원의 영향 평가를 주기적으로 실시하여 주요 부분의 취약성을 확인하고, 이에 기초한 장단기 적응 전략을 수립하여 사회의 다양한 정책 결정에 활용하도록 하고 있으며, 더불어 이들 적응 전략을 국가발전전략과 통합하는 과정을 거치고 있다. 기후 변화 적응과 관련하여 우리나라 연안은 기후 변화+기존의 개발방식 등 이중의 문제를 가지고 있다. 우리의 기존 연안의 개발 및 관리 방식은 기후 변화 관점에서 취약성이 매우 높은 방식(과도한 해역 이용, 매립, 연안 인접 개발로 인한 완충 지대 부족, 연안 생태계 훼손 등)으로 진행되어 왔으며 이는 기후 변화에 매우 취약한 결과를 유발할 것으로 예상된다. 하지만 기후 변화 및 해수면 상승은 유럽을 중심으로 활용되고 있는 연안 개발 전략인

“build with nature”와 자연 해안이 최선의 적응 대책이라는 새로운 연안 관리 패러다임 창출을 통하여 기존의 우리나라 연안역 관리 문제를 동시에 해결할 수 있는 기회도 동시에 제공할 수 있을 것으로 사료된다.





- 강주환, 문승록, 오남선. 2005. “서남해안의 해수면 상승”. 「대한토목학회논문집」 25(2B): 151-157.
- 국립방재교육연구원 방재연구소. 2008. 「웹GIS를 활용한 국내 재해정보DB 및 태풍위원회 재해정보시스템 구축」.
- 국립해양조사원. 2002. 「조석표: 한국연안」.
- 국토해양부 국립해양조사원. 2007. 「조석표: 한국연안, 2008」 해양수산부 연구보고서.
- 국토해양부 국립해양조사원. 2009. 「해수면 변동 정밀분석 및 예측 용역 결과보고서」.
- 국토해양부 국립해양조사원. 2010. 「해수면 변동 정밀분석 및 예측(2차)」.
- 기상청. 2009. 「연안재해 실시간 감시 모니터링 체계 구축 방안」.
- 김경준, 조광우, 정태성. 2009. 「기후 변화에 따른 연안역의 해역-육역 통합 범람 예측 방안에 관한 기초 연구: 해석모형 비교·분석을 중심으로」. 한국환경정책·평가연구원.
- 김인호. 2010. 연안침식 모니터링. 「연안침식 모니터링 중간보고 자료집」. 강원도청.
- 김장수, 장동호. 2010. “침수 취약성 평가: 안면도 바람아래 조간대 지역을 사례로”, 「한국지형학회지」 17(2): 29-39.
- 김종덕, 장원근, 육근형. 2005. 「우리나라 모래 해안의 실태와 환경관리방안」. 한국해양수산개발원.
- 부산광역시. 2004. 「녹산공단 해일피해 방지대책 수립용역 종합보고서」.
- 송영일. 2006. 「전략환경평가 제도 도입에 따른 환경영향 평가 제도의 개선방안 연구」. 환경부.
- 신부용. 2004. “자원개발 및 보호를 위한 해안도로 건설방안”. 「2004년도 새국토연구협의회 성과발표회자료집」. 109-139.
- 영덕군청. 2008. 「해안 침식 모니터링 체계구축」.
- 장학봉, 김태균, Thomas Grigalunass. 2006. 「해사 채취에 따른 해안 침식 피해의 경제학적 평가」. 한국해양수산개발원.
- 조광우, 김경준, 정주철, 박원경, 강태순. 2009. 「해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응 정책 수립(I): 해안 침식 영향 평가」. 한국환경정책·평가연구원.
- 조광우, 김지혜, 정휘철, Nobuo Mimura, Robert J. Nicholls. 2002. 「지구 온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구Ⅱ」. 한국환경정책·평가연구원.
- 조광우, 김지혜. 2001. 「지구 온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구Ⅰ」.

- 한국환경정책·평가연구원.
- 조광우, 맹준호, 주용준, 신현화, 김규한. 2006. 「해안개발사업에 따른 해안 침식 영향 저감 방안 연구」. 한국환경정책·평가연구원.
- 최진영, 김계월, 정일웅. 2006. “지구 온난화로 인한 해수면 상승과 한반도 침수 가능 면적의 전망”. 「2006년도 한국기상학회 가을 학술대회 논문집」, 198-199.
- 충남발전연구소. 2008. 「서해안 해수면 상승에 따른 영향 및 대책」.
- 한국방재협회. 2008. 「침수흔적 조사보고서 작성 연구용역-삼척시 침수흔적 조사 보고서」. 대한지적공사.
- 한국해양수산개발원. 2005. 「우리나라 모래 해안의 실태와 환경관리방안」.
- 한국해양수산개발원. 2009. 「기후 변화 대응을 위한 연안 지역 레질리언스(Resilience) 강화 방안」.
- 한국해양연구원. 2003. 「장기 파랑 산출 자료집」.
- 한국해양연구원. 2003. 「해상파랑 관측 및 조사」. 해양수산부 연구보고서.
- 해양수산부. 2002. 「연안침식방지 종합대책수립을 위한 조사 연구용역(I)」.
- 해양수산부. 2003. 「연안침식방지 종합대책수립을 위한 조사 연구용역(II)」.
- 해양수산부. 2004. 「연안침식 모니터링 체계구축(I)」.
- 환경관리공단. 2008. 「산업계 기후변화 적응전략 수립연구: 임해산업단지를 중심으로」.
- 환경부. 2008. 「환경영향 평가 관련 규정집」.
- 환경부. 2009. 「우리나라 기후 변화의 경제학적 분석(I)」.
- Australian Government Department of Climate Change, 2009. *Climate Change Risks to Australia's Coast*.
- Bates, P.D. and A.P.J. De Roo. 2000. “A simple raster-model for flood inundation simulation”. *Journal of Hydrology*, 236: 54-77.
- Bates, P.D., R.J. Dawson, J.W. Hall, M.S. Horritt, R.J. Nicholls, J. Wick and M.A.A.M. Hassan. 2005. “Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications”. *Coastal Engineering*, 52(9): 793-810.
- Chao, B.F., Y.H. Wu and Y.S. Li. 2008. “Impact of Artificial Reservoir Water Impoundment on Global Sea Level”. *Science*, 320(5873): 212-214.
- Church, J.A. 2010. “Past and Present Sea level changes: Key Conclusions and Way

- Forward”. *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*, Kuala Lumpur Malaysia.
- Church, J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck and J.X. Mitrovica. 2004. “Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period”. *Journal Climate*, 17(13): 2609–2625.
- Coles, V.J., M.S. McCartney, D.B. Olson and W.M. Smethie Jr. 1996. “Changes in Antarctic Bottom Water properties in the western South Atlantic in the late 1980s”. *Journal of Geophysical Research*, 101(C4): 8957–8970.
- Cunge, J.A., F.M. Holly, Jr. and A. Verwey. 1980. *Practical aspects of computational river hydraulics*, Pitman, London, p.420.
- Dawson, R.J., J.W. Hall and P.D. Bate. 2005. “Quantified analysis of the probability of flooding in the Thames estuary under the imaginable worst-case sea level rise scenario”. *Water Resources Development*, 21(4): 577–591.
- Deltacommissie. 2008. *Working with together with water: A living land builds for its future*.
- Dolan, R., F. Anders and S. Kimball. 1985. *Coastal Erosion and Accretion: National Atlas of the United States of America*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 1 sheet.
- Gille S. 2010. “Changes in Ocean Properties Influencing Sea Level: Observations, Modeling, and Uncertainties”. *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*, Kuala Lumpur Malaysia.
- Gregory, J. 2010. “Future Sea Level changes: Key Conclusions and the way forward”. *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*, Kuala Lumpur Malaysia.
- Grinsted, A., J.C. Moore and S. Jevrejeva. 2009. “Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD”. *Climate Dynamics*, 34(4): 461–472.
- Honds, T. and T. Mitsuyasu. 1980. *Proceedings of the 27th Japanese Conference in Coastal Engineering*, 90–93.
- Hunter, N.M., P.D. Bates, M.S. Horritt and M.D. Wilson. 2007. “Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review”. *Geomorphology*, 90: 208–225.

- IPCC CZMS. 1990. *Strategies for Adaptation to Sea-level rise*. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Response Strategies Working Group of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ministry of Transport, Public Works and Water Management(the Netherlands).
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White Eds. Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry et al. Eds. Cambridge. UK.
- Jevrejeva, S., J.C. Moore and A. Grinsted. 2010. "How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100?". *Geophysical Research Letters*. 37:L07703. doi:10.1029/2010GL042947.
- Johnson, G.C. and S.C. Doney. 2006. "Recent western South Atlantic bottom water warming". *Geophysical Research Letters*. 33:L14614. doi:10.1029/2006GL026769.
- Kang, S.K., J.Y. Cherniawsky, Michael G.G. Foreman, J.K. So, and S.R. Lee. 2008. "Spatial variability in annual sea level variations around the Korean peninsula". *Geophysical Research Letters*. 35:L03603, doi:10.1029/2007GL032527.
- Katsumata, K. and Ichiro Yasuda. 2010. "Estimates of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific". *Journal of Oceanography*. 66(4): 489-504.
- Khan, S.A., J. Wahr, M. Bevis, I. Velicogna and E. Kendrick. 2010. "Spread of ice mass loss into northwest Greenland observed by GRACE and GPS". *Geophysical Research Letters*. 37:L06501. doi:10.1029/2010gl042460.
- Klein R.J.T. 1998. "Towards better understanding, assessment and funding of climate adaptation". *Change*. 44: 15-19.
- Klein R.J.T., R.J. Nicholls and N. Mimura. 1999. "Coastal Adaptation to Climate Change:

- Can the IPCC Technical Guidelines be Applied?”. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4(3-4): 239-252. doi:10.1023/A:1009681207419.
- Knight D.W. and K. Shiono, 1996. *River channel and floodplain hydraulics*. In : Floodplain Processes, Anderson M.G., Walling D.E. and Bates P.D.(eds.), John Wiley and Sons, Chichester, 139-182.
- Komine, H. 2007a. “Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan”. *Proceedings of the 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazard and Geoenvironmental Engineering*.
- Komine, H. 2007b. “Changes of fundamental properties of riverbank material by sea-level rising due to Global Warming”. *Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters*.
- Levitus S., John I. Antonov, Timothy P. Boyer and Cathy Stephens. 2000. “Warming of the World Ocean”. *Science*, 24, 287(5461): 2225-2229.
- Lowe J.A., T. Howard, A. Pardaens, J. Tinker, K. Horsburgh and T. Reeder. 2010. “Operationalising” Sea-Level Rise Projections for the United Kingdom.
- Lyman, J.M., S.A. Good, V.V. Gouretski, M. Ishii, G.C. Johnson, M.D. Palmer, D.M. Smith and Josh K. Willis. 2010. “Robust warming of the global upper ocean”. *Nature*, 465: 334-337.
- May, S.K., R. Dolan and B.P. Hayden. 1983. Erosion of U.S. shorelines: EOS, 64(35): 521-523.
- Ministry of the Environment Japan Global Environment Research Fund Strategic R&D Area Project. 2010. *Summary of Research Results -Global Warming Impacts on Japan-*.
- Murakami S., Yasuhara K., Suzuki N., Ni Wei, and Komine H. 2005. “Vulnerability Assessment to Liquefaction Hazard Induced by Rising Sea Levels due to Global Warming”. *Proceedings of the 1st International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*.
- Nicholls R.J. 2002. “Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding”. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 1455-1466.

- NIES S4 Project. 2009. *S-4 Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts: Estimation of inundation damage caused by global warming in three major bays and western parts of Japan*.
- Nobuoka, H. and Nobuo Mimura. 2009. "Global Storm Surges by Tropical Cyclone and Vulnerability Projection in Coastal Zones". *Journal of coastal Engineering-JSCE*. 56. Japan Society of Civil Engineering, Tokyo, 371-375.
- Nobuoka, H., N. Mimura and M. Tamura. 2009. "Asian and Oceanian Coastal-Risk Projection due to Sea-level Rise and Population Growth". *Proceedings of the 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2009*.
- Nobuoka, H., Nobuo Mimura and Makoto Tamura. 2009. "Asian and Oceanian Coastal-Risk Projection due to Sea-Level Rise and Population Growth". *5th International Conference on Asia and Pacific coasts. 2. World Science*. Singapore. 194-200.
- Ohno E., Hayashiyama Y., Morisugi H., and Nohara K. 2009. "Global warming damage cost of sandy beach loss: Travel cost method approach". *Global Environmental Research*. 14(2): 291-297.
- Pendleton, E.A., S.J. Williams, and E.R. Thieler. 2004. *COASTAL VULNERABILITY ASSESSMENT OF ASSATEAGUE ISLAND NATIONAL SEASHORE (ASIS) TO SEA-LEVEL RISE*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1020, Electronic Book.
- Pfeffer W.T., J.G. Cogley and G. Kaser. 2010. "Glacier Contributions to Sea Level Rise: Past, Present and Future". *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*. Kuala Lumpur Malaysia.
- Pfeffer W.T., J.T. Harper and S. O'Neel. 2008. "Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise". *Science*. 321(5894): 1340-1343. doi: 10.1126/science.1159099.
- Pritchard H.D., R.J. Arthern, D.G. Vaughan and L.A. Edwards. 2009. "Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets". *Nature*. 461: 971-975. doi:10.1038.
- Purvis, M.J., P.D. Bates and C.M. Hayes. 2008. "A probabilistic methodology to estimate

- future coastal flood risk due to sea level rise”. *Coastal Engineering*. 55: 1062–1073.
- Radić, V. and R. Hock. 2010. “Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data”. *Journal of Geophysical Research*. 115(F01010). doi:10.1029/2009JF001373.
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, J.A. Church, J.E. Hansen, R.F. Keeling, D.E. Parker and R.C.J. Somerville. 2007. “Recent climate observations compared to projections”. *Science*. 316. p.709.
- Ridley, J., J.M. Gregory, P. Huybrechts, J. Lowe. 2010. “Thresholds for irreversible decline of the Greenland ice sheet”. *Climate Dynamics*. 35(6): 1049–1057.
- Robertson, R., M. Visbeck, and A. Gordon. 2002. “Long-term temperature trends in the deep waters of the Weddell Sea”. *Deep Sea Research Part II*. 49: 4791–4806.
- Smith, J.B. 1997. “Setting priorities for adapting to climate change”. *Global Environmental Change*. 7: 251–264.
- Stammer, D. 2008. “Response of the global ocean to Greenland and Antarctic ice melting”. *Journal of Geophysical Research*. 113: C06022. doi:10.1029/2006JC004079.
- Stammer, D. 2010. “Influence of Ocean Circulation Changes on Sea-Level: Observations, Modeling and Uncertainties”. *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*. Kuala Lumpur Malaysia.
- Steffen K. 2010. “Greenland Mass Balance”. *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*. Kuala Lumpur Malaysia.
- Suzuki T. 2009. “Estimation of inundation damage caused by global warming in three major bays and western parts of Japan”. *Global Environmental Research*. 14(2): 231–236.
- Thieler, E.R., and Hammar-Klose, E.S. 2000. *National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: Preliminary results for the U.S. Atlantic Coast*. U.S. Geological Survey.
- Timmermann, A. and Shayne McGregor-Fei-Fei Jin. 2010. “Wind effects on past and future regional sea-level trends in the southern Indo-Pacific”. *Journal of Climate*; e-View. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 4.1. 2009. *Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region*.

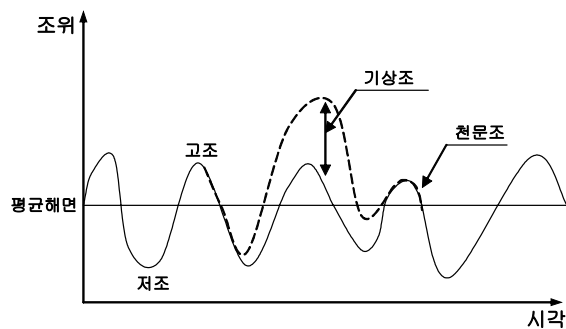
- UNEP. 1996. *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*.
- USAID. 2009. *Adapting to Coastal Climate Change: A Guidebook for Development Planners*.
- Velicogna, I. 2009. "Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE". *Geophysical Research Letters*, 36:L19503. doi:10.1029/2009GL040222.
- Vermeer, M. and Rahmstorf, S. 2009. "Global sea level linked to global temperature". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(51): 21527-21532.
- Yasuda, T., and K., Sakurai. 2006. "Interdecadal variability of the sea surface height around Japan". *Geophysical Research Letters*, 33:L01605, 4pp.
- Zenk, W., and E. Morozov. 2007. "Decadal warming of the coldest Antarctic Bottom Water flow through the Vema Channel". *Geophysical Research Letters*, 34:L14607, doi:10.1029/2007GL030340.
- 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) <http://www.wamis.go.kr/>
- 기상청 <http://www.kma.go.kr/>
- 뉴질랜드 크라이스트처치 시의회 <http://www.ccc.govt.nz/>
- 태풍연구센터 <http://www.typhoon.or.kr/>
- Daum 지도 <http://local.daum.net/>
- SD Dimensions <http://www.fao.org/sd/eidirect/eire0045.htm>
- USGS <http://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/pages/cvi.html>
- USGS <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/cvi/>



# 1:

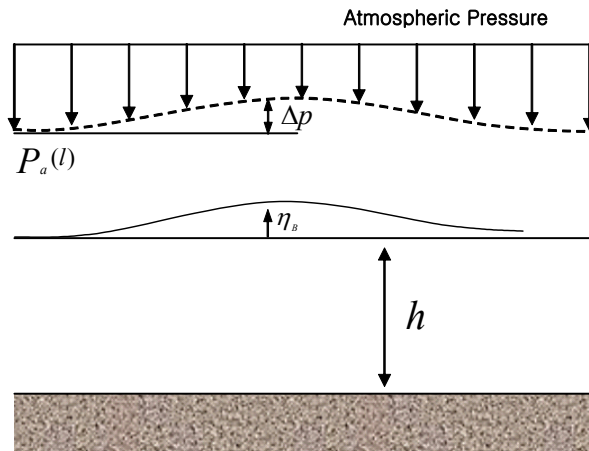
## 1. 해일의 발생 및 원인

- 달과 태양의 인력에 의해 발생하는 규칙적인 조석 현상을 천문조(astronomical tide)라고 하며, 바람과 기압의 변화 등 기상적 요인에 의해 발생하는 해면 변화를 기상조(meteorological tide)라 한다(부록그림 A1-1).
- 통상적으로 발생하는 해면 승강은 천문조와 기상조가 중첩되어 일어나는 현상으로 일반적으로 기상조가 극히 작고 천문조가 우세하게 나타나며, 천문조에 의한 해면 승강은 천체 운동과 같이 규칙적으로 반복되기 때문에 장기간에 걸친 조위 예보가 가능하다.
- 그러나 태풍이나 저기압의 영향을 받을 경우 폭풍이나 현저한 기압 강하로 인해 해양에서는 예보 조위와 일치하지 않는 해면 상승이 일어나게 된다. 이를 폭풍 해일(storm surge)이라 하며, 우리나라에서는 열대성 저기압(tropical low pressure), 특히 태풍의 접근에 의해 발생하는 경우가 많다.
- 폭풍 해일이 고조 시에 중첩되면 조위는 더욱 높아져 방파제를 파괴하고, 연안 시설, 가옥, 인명 등에 큰 피해를 미치기 때문에 폭풍 해일의 발생 시각과 해면 상승량을 예보하는 것은 극히 중요한 일이라 판단된다.



■ 부록그림 A1-1. 천문조와 기상조

- 태풍과 같은 저기압이 넓은 해역을 통과할 경우 인접한 해면고에 영향을 미치게 되는데, 이는 대개 기압 강하에 의해 해면이 상승하는 현상과 함께 저기압에 동반되는 강풍에 의한 해면 경사에 의해 발생하게 된다.
- <부록그림 A1-2>와 같이 태풍의 중심 부근은 그 주변에 비해 기압이 낮아 해면이 상승하게 된다. 이는 마치 태풍이 해면을 흡입하는 것과 같이 보이므로 이러한 효과를 흡입(suction)이라고도 한다.

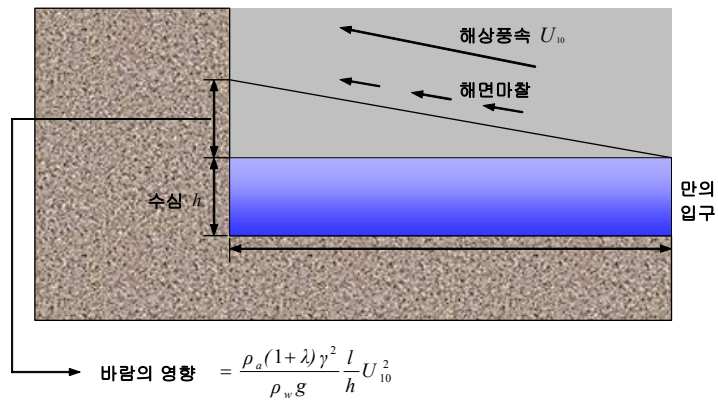


■ 부록그림 A1-2. 저기압에 의한 흡입 효과

- 태풍 등 기상의 영향을 고려하지 않을 경우 표준 대기압은 1,013hPa이며, 이 상태에서부터 기압이 1hPa 낮아짐에 따라 해면은 1cm 상승하게 된다. 예를 들어 태평양에 중심 기압 960hPa의 태풍이 정지하고 있다면 그 중심에서는 흡입 현상에 의해 해면이 약 53cm 상승하게 되고, 이때 태풍의 이동 경로에 따라 해면 상승도 이동한다. 그러나 태풍이 연안에 접근하면 천퇴나 육지의 영향으로 해면 상승의 높이는 변하여 1hPa=1cm의 관계가 유지되지 않는다.
- 이러한 기압에 의한 해면 상승 현상은 수심에 의한 영향은 받지 않지만 바람에 의해 밀어 올려진 해면은 수심에 반비례하여 높아지게 되므로 일반적으로 수심이 얕을수록 해일은

커지게 된다. 바람이 바다에서 육지로 향하여 불면 해면에 발생하는 마찰력에 의해 해수는 육지측으로 운반되고, 이것이 축적되어 해면이 상승하게 된다. 이와 같은 효과를 바람에 의한 해면 상승(wind setup)이라고 부른다.

- <부록그림 A1-3>에 도시한 바와 같이 단순한 직방체의 만에 동일한 강도의 바람이 불어 정적인 평형 상태에서 조위 편차(폭풍 해일고)를 산정하는 경우에 대한 이론은 다음과 같은 방법으로 추정될 수 있다.



■ 부록그림 A1-3. 바람의 영향

- 만내에서 바람에 의한 상승량  $\eta$ 는 만 입구  $x=0$ 에서 만의 임의 위치  $x=\ell$  까지 적분을 수행하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\eta = \int_0^\ell \frac{\rho_a(1+\lambda)}{\rho_w g h} \gamma^2 U_{10}^2 dx = \frac{\rho_a(1+\lambda)\gamma^2}{\rho_w g} \frac{\ell}{h} U_{10}^2 = k \frac{\ell}{h} U_{10}^2 \quad (1)$$

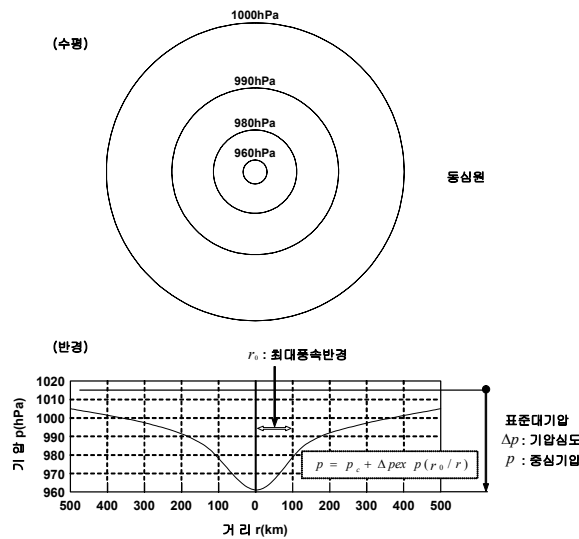
- 여기서,  $\ell$  은 만 입구로부터의 거리,  $k$  는 상수이며, Colding이 발트 해에서 관측한 결과에 의하면  $4.8 \times 10^{-5}$ 의 값으로 주어진다. 식 (1)이 나타내는 바와 같이, 바람에 의해 발생되

- 는 정적인 조위 편차는 만 입구로부터의 거리  $\ell$  에 비례하고, 수심  $h$ 에 반비례하며, 풍속  $U_{10}^2$ 에 비례한다. 즉, 만의 길이가 길수록, 수심이 얕을수록 조위 상승량이 커지게 된다.
- 해일이 천해역으로 진입하여 만내에 들어오면, 연안에서 반사가 일어나 그 에너지의 대부분은 장시간에 걸쳐 만내에 정체하면서 고유의 해면 진동을 유발한다. 이를 만내 부진동 (secondary oscillation of harbor; seiche)이라 하며, 이러한 만내 진동은 상당히 장시간 지속된다.
  - 만내의 경우 태풍의 중심이 육지로부터 100~300km 떨어져 기상 현상의 영향이 나타나기 이전에 평균 해면의 상승이 시작되며, 태풍역 내에 들어오면 해면의 상승은 급격해지고 이 부분을 폭풍 해일(storm surge)이라 칭한다. 연이어 해면이 하강하고 만의 고유 진동에 의한 해면 변동이 계속 나타난다.
  - 폭풍과 현저한 기압 강하 외에도 해저 지형과 해안 형상에 의해 폭풍 해일이 발생할 수 있으며, 만 입구가 남측을 향하고 있는 만에서 비교적 수심이 얇다면 큰 폭풍 해일이 내습할 가능성이 높다.
  - 해저 마찰의 효과, 풍파와 너울의 효과, 기상 교란의 이동과 장파의 속도와의 공명 현상, 지구 자전 효과, 만의 자유 진동 등이 폭풍 해일 현상에 복잡하게 영향을 미치게 된다. 또한 조석과 폭풍 해일의 상호 작용과 강우 효과 역시 중요한 폭풍 해일 발생 요인이 되기도 하며, 태풍과 저기압의 구조와 경로, 진행 속도 등에 의해서도 달라지기도 한다.
  - 폭풍 해일 수치 모의는 우선 태풍의 기압 분포를 산정한 후 이로부터 바람의 분포를 구하게 되며, 다음에 저기압이나 바람에 의해 발생하는 해수의 운동을 계산한다. 태풍의 기압 분포에 대해서는 일반적으로 동심원의 기압 분포 모델이 사용되고 있으며, 그의 대표적인 것이 식 (2)로 주어지는 Myers식(부록그림 A1-4)과 Fujita식 (3)이 있다.

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2)$$

$$p = (p_c + \Delta p) - \frac{\Delta p}{\sqrt{1 + (r/r_0)^2}} \quad (3)$$

- 여기서,  $p$ 는 태풍의 중심으로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 점에서 기압,  $p_c$ 는 태풍의 중심 기압,  $\Delta p$ 는 기압 심도,  $r_0$ 는 태풍의 반경(폭풍 반경과 강풍 반경과는 다름)이다.



부록그림 A1-4. Myers식에 의한 기압 분포

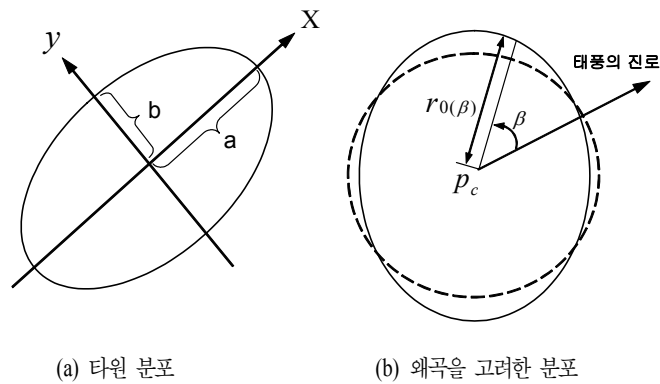
- 실제 태풍의 기압 분포가 이상적인 동심원이라고 한정할 수 없는 경우가 있어, 이와 같은 태풍에도 적용할 수 있도록 <부록그림 1-5>에 나타난 형태의 모델도 연구되어 있다. 타원 분포의 경우에는 다음 식 (4)를 사용할 수 있다.

$$p = p_c + \Delta p \exp \left\{ - \frac{1}{\sqrt{(x/a)^2 + (y/b)^2}} \right\} \quad (4)$$

- 여기서,  $a$ 는 장반경,  $b$ 는 단반경이다. 많은 지점에 대한 기압 데이터를 수집한 경우, Myers 식의 분포 반경  $r_0$ 를 다음의 식으로 나타내는 태풍의 중심으로부터 방향  $\beta$ 의 Fourier 급수로부터 나타낼 수 있으며, 복잡한 왜곡도도 표현할 수 있다.

$$r_0(\beta) = \bar{r}_0 + r_{01} \cos(\beta - \alpha_1) + r_{02} \cos(2\beta - \alpha_2) \quad (5)$$

- 여기서,  $\bar{r}_0$ 는 평균 반경,  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ 는 반경의 1차, 2차 성분,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 는 초기 위상이다.



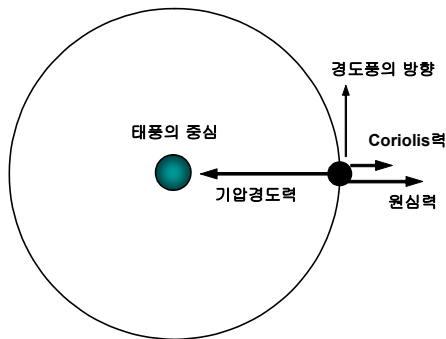
■ 부록그림 A1-5. 변형된 기압 분포

- 태풍의 중심부는 주변에 비해 기압이 낮기 때문에 중심으로 향하는 바람이 형성된다. 그러나, 지구의 자전에 의해 북반구에서는 오른쪽 방향의 힘(Coriolis force)이 작용하므로 태풍의 중심 주변으로 반시계 방향의 바람이 불게 되며 이 바람을 경도풍이라고 한다. 해면 위 마찰의 영향을 받지 않는 상공에서 경도풍의 풍속  $U_{sr}$ 은 <부록그림 A1-6>에 나타내고 있는 바와 같이 기압 경도력, 원심력, Coriolis력의 평형으로부터 다음의 식과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{U_{sr}^2}{r} + f U_{gr} \quad (6)$$

- 여기서,  $\rho_a$ 는 대기의 밀도( = 1.22kg/m<sup>3</sup> ),  $f$ 는 Coriolis계수( = 2 $\omega$  sin  $\Phi$ ,  $\omega$  : 지구자전의 각속도 = 7.29 × 10<sup>5</sup>rad/s,  $\Phi$  : 위도)이다. Myers 기압분포를 가정하여 식 (6)을 풀면 다음의 식이 얻어진다.

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (7)$$



■ 부록그림 A1-6. 경도풍에서 힘의 평형

## 2. 우리나라 월별 태풍 특성

- 태풍은 열대성 저기압의 일종으로 일반적으로 북태평양 남서부에서 발생하며, 우리나라에 내습할 때의 태풍은 최성기를 지나 빈약기에 들어갈 때이다. 따라서 상륙 직전의 태풍은

대단히 큰 힘을 가지고 있으나 상륙 후에는 어느 정도 약화되는 것이 보통이다.

- 태풍 발생 후 점점 발달하면서 서서히 서진 또는 북서진한 후의 태풍 진로는 두 가지로 대별할 수 있다. 첫 번째 경로는 서진하거나 북서진하여 필리핀 군도, 중국 서해 등으로 진행되는 것이고, 또 하나는 큰 포물선 형태로 방향을 바꿔 중국 대륙 동쪽, 한국, 일본 등으로 북동진하는 것이다. 그러나 태풍의 경로는 실제로는 매우 가변적이며, 최근 지구 온난화 등의 기후 변화에 따라 이상 경로를 취할 때가 있다.
- 우리나라는 지리적으로 일본에 비하여 태풍의 영향을 비교적 적게 받는 편이나 북동진하는 태풍의 길목에 위치하여 매년 2~3개의 태풍이 우리나라에 영향을 주고 있다.
- 우리나라에 영향을 미치는 태풍을 정의할 때 기상청에서는 피해 정도와 영향 범위 등을 고려하여 정하고 있다. 태풍백서(1986)에 의하면 태풍이 적도 전선 부근에서 발생하여 점차 북상한 후 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 영역 즉 32°~40°N, 120°~138°E에 도달하였을 때를 한반도에 영향을 끼친 태풍이라고 정의하고 있다.
- 태풍은 30년 평균(1971~2000년) 1년에 평균 26.7개가 발생하고 있으며, 우리나라에 평균 3.4개의 태풍이 영향을 미치고 있다(부록표 A1-1).

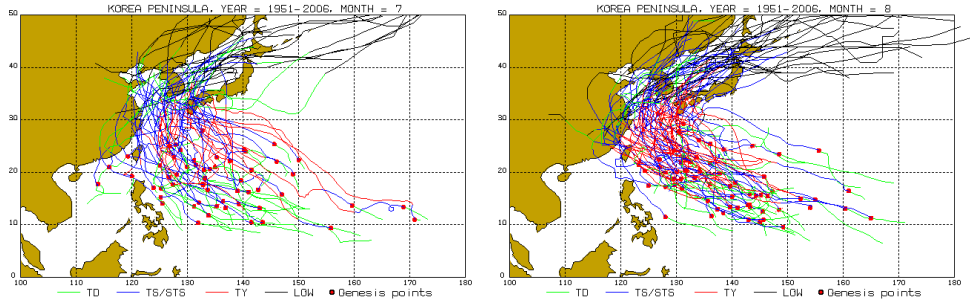
■ 부록표 A1-1. 월별 태풍 발생 현황

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
30년 평균 1971~2000년	0.5	0.1	0.4	0.8	1	1.7 (0.3)	4.1 (0.9)	5.5 (1.2)	5.1 (0.8)	3.9 (0.1)	2.5	1.3	26.7 (3.4)
10년 평균 1991~2000년	0.1	0.2	0.3	0.8	0.9	1.1 (0.1)	4 (1.1)	6.2 (1.4)	5.5 (1.0)	3.8 (0.2)	2.2	1.1	26.2 (3.8)

※ 괄호 안의 수는 우리나라에 영향을 미친 태풍의 수

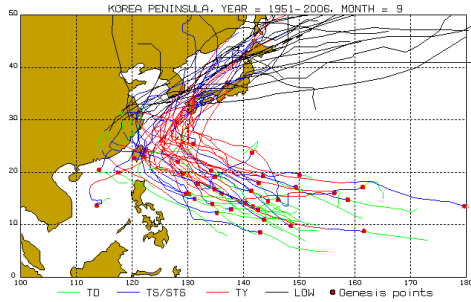
자료: 태풍연구센터(<http://www.typhoon.or.kr/>)

- <부록그림 A1-7>은 1951년부터 2006년까지 7~9월 발생된 태풍의 경로를 나타내고 있다.



(a) 7월

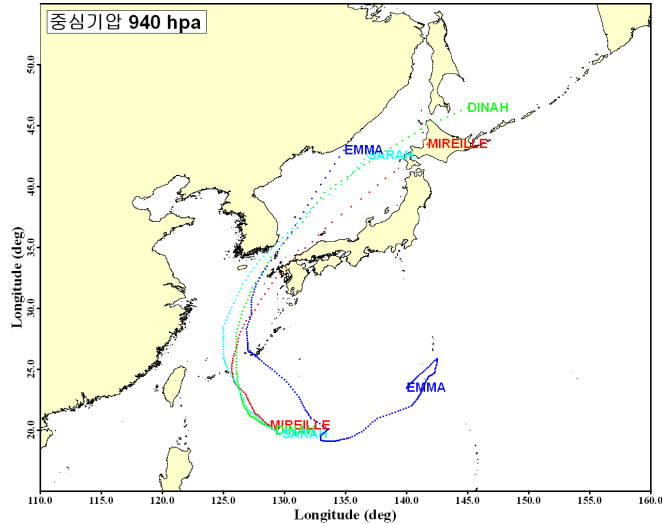
(b) 8월



(c) 9월

■ 부록그림 A1-7. 월별 발생한 태풍의 경로

- <부록그림 A1-8>과 같이 940hPa급의 태풍은 총 4개의 태풍이 내습하였으며 그 경로는 다음과 같다. 이동경로는 대부분 남해동부와 대한해협 사이를 지나는 것으로 나타났다.
- 우리나라에 내습하는 태풍은 1980년 이후부터 그 수가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 중심 기압이 낮은 대형 태풍의 경우 대부분 대한해협을 통과하여 진행하고 그 외의 태풍은 뚜렷한 이동 양상이 없이 불규칙하게 내습하고 있다.



■ 부록그림 A1-8. 태풍 중심 기압 940hPa의 경로

### 3. 태풍 및 해일 피해 사례

#### 가. 남해 동부 해역 태풍 피해 사례(태풍 MAEMI 중심으로)

##### 1) 부산과 경남 지역의 태풍 피해 가중 원인

- 태풍이 이동하고 있을 경우 진행 방향 오른쪽의 바람은 강해지고 왼쪽은 약해지는데, 부산과 경남 지역이 태풍 매미의 오른쪽에 위치했기 때문에 피해가 가중되었다. 태풍의 오른쪽 반원에서는 태풍의 바람 방향과 태풍의 이동 방향이 서로 비슷해 풍속이 커지는 반면, 왼쪽 반원에서는 그 방향에서는 방향이 서로 반대가 돼 상대적으로 풍속이 약화된다. 결국 위험 반원에 들어간 부산의 경우 순간 풍속이 초속 47m에 달하는 기록적인 강풍을 기록하였으며 강풍 피해 또한 컸다.
- 부산과 경남 지역의 피해가 컸던 또 하나의 원인은 만조시간대에 태풍이 상륙해 해일 피해까지 겹쳤기 때문이다. 태풍이 상륙했던 9월 12일 오후 8시 이후는 바닷물이 해안에 밀려드는

만조시간대로 이 시간대에 태풍이 강한 바람과 파도를 몰고 오면서 해일까지 덮쳤다.

- <부록표 A1-2>와 <부록표 A1-3>은 부산 지역의 피해 현황과 경남 지역 피해 현황을 나타내고 있다.

■ 부록표 A1-2. 부산 전 지역 피해 현황 집계(2003년 9월 22일 현재)

구분	총이재민		인명(명)				침수(ha)		
	세대	명	사망	실종	부상	소계	농경지	도시	계
계	2,799	9,008	14	3	116	133	670	68	738
구분	건물(동)				선박(피해액)		농경지(ha)	농작물(ha)	
	유실	반파	침수	계	단위 : 천원				
계	187	356	3,829	4,372	6,976,649		2.11	5,132.77	
구분	공공시설(피해액) 단위 : 천원								
	도로	하천	수도	항만	어항	학교	수리	사방	
계	13,288,020	-	2,722,216	42,059,477	23,356,223	2,131,121	2,800,434	44,822	
구분	사유시설(피해액) 단위:천원								
	축대, 담장	가축	축사, 잡사	수산증양식	어망, 어구	비닐하우스	기타		
계	58,000	-	2,406,624	22,193,173	1,657,799	8,038,092	116,041,05		

■ 부록표 A1-3. 경남 전 지역 피해 현황 집계(2003년 9월 22일 현재)

구분	총이재민		인명(명)				침수(ha)		
	세대	명	사망	실종	부상	소계	농경지	도시	계
계	3,774	10,607	26	-	25	51	2,723.50	80.0	2,803.5
구분	건물(동)				선박(피해액)		농경지(ha)	농작물(ha)	
	유실	반파	침수	계	단위 : 천원				
계	243	717	413	1,373	2,250,694		225.28	11,294.68	
구분	공공시설(피해액) 단위 : 천원								
	도로	하천	수도	항만	어항	학교	수리	사방	
계	9,546,562	13,637,654	16,326,496	30,000	1,187,932	4,761,989	30,653,677	2,407,134	
구분	사유 시설(피해액) 단위 : 천원								
	축대, 담장	가축	축사, 잡사	수산증양식	어망, 어구	비닐하우스	기타		
계	150,000	-	2,504,230	1,474,414	1,703,906	34,579,744	190,770,654		





# Abstract

## Vulnerability Assessment of the Korean Coast due to Sea-level Rise and Appropriate Response Strategies II - Evaluation of coastal inundation and its responses

The study deals with sustainability of the Korean coast in the context of the ecosystem and utilization under climate change and sea level rise. The integrated assessment have been done in terms of coastal erosion(2009) and coastal flooding(2010) by sea level rise. Global sea level has been accelerating such as 0.8mm/yr before 20th century, 1.8mm/yr in the 20th century, and 3.4mm/yr after 1993. Though considerable advances have been made in the understanding of sea level rise, there are still much uncertainties in the dynamics of sea level rise, especially in the local prediction and ice sheet dynamics, which makes response policy and its implementation difficult. Recently national strategies have been made for Australia, Japan, Netherlands, and USA based on the integrated national assessment of their coast to climate change.

Inundation assessment by future sea level rise has been done within the framework of screening and scoping. The former is adopted with Coastal Vulnerability Index(CVI) useful for coastal planning and the latter adopted IPCC common methodology. The CVI, with six components(geomorphology, coastal slope, relative sea level change, shoreline erosion, mean tide range, mean wave height) and developed by the USGS, has been applied for the East coast of Korea(Gangwondo). The range of CVI is 1.826~22.361 with a mean of 7.085 for present condition and increases into 2.887~30.619 with a mean of 12.361 for 2100(1m sea level rise). The very highly vulnerable coast is currently 8.57% and occupies 35.56% of the study coast in 2100. Three case studies

including coastal settlement adjacent to coastal driveway, coastal city with flooding risk, and industrial complex by reclamation reveals potential inundation impact due to future sea level rise.

The importance of process in responding to the inundation by sea level rise has emphasized due to the high scientific uncertainty in the dynamics of future sea level rise. Also response strategy in terms of planning are provided to minimize the damage of coastal inundation to sea level rise. This study examines local planning strategies to respond sea level rise. Local land use planning can provide critical tools by limiting development in area vulnerable to sea level rise. Korea uses zoning system as main land use planning tool. Among zones, "disaster prevention zone"(which are regulated by the Act on Planning and Use of National Territory) and "natural hazard danger zone"(based on the Hazards Prevention Policy Act) can be applied to sea level rise. However, these zones have been more focused on mitigating natural hazards rather than sea level rise. Thus it is necessary to revise current zoning system to apply to sea level rise. Also, we propose that strategic environmental assessment(SEA) needs to increase the consideration of sea level rise during decision making related to development in coastal areas. Finally, local governments use District Unit Planning(DUP) for the area which has specific problems difficult to be solved by general zoning system. We suggest the use of DUP in managing some coastal areas which are vulnerable to sea level rise and coastal hazards. For this, further study is needed to develop a guideline for sea-level rise risk district unit plan including specific land uses, building design, open space plan, street plans, financial plan etc.