

해수면상승에 따른 지하수 및 토양 염류화 저감 방안 개발

Impact of Sea-Level Rise on Coastal Agricultural Land and Water using a
Saltwater Intrusion Modeling Approach

전종안

해수면상승에 따른 지하수 및 토양 염류화 저감 방안 개발

Impact of Sea-Level Rise on Coastal Agricultural Land and Water using a
Saltwater Intrusion Modeling Approach

전종안

발간사

우리나라 전체 평균 해수면은 RCP4.5 시나리오하에서 2100년에 65cm, RCP8.5 시나리오하에서 83.8cm가 상승할 것으로 전망하고 있습니다. 우리나라는 특히 간척지를 많이 개발하였는데, 3개 해역 중에서는 서해안에 집중되어 분포하고 있어서 해수면 상승에 취약한 지역이 많습니다. 또한, 아직도 우리나라에서는 많은 인구(약 976천명)가 상수도 미급수 인구로 분류되고 있으며, 이들 대부분은 농어촌 읍면단위에 생활하며 지하수를 많이 이용하고 있습니다. 이러한 생활용수 뿐 만 아니라 지하수는 하천이나 저수지가 개발되지 않은 지역에서는 농업용수의 대부분을 차지하고 있는 실정이기도 합니다.

본 연구에서는 지하수 해수침투 모의에 많이 쓰이는 SUTRA모형을 변산1과 변산2의 해수침투관측공에 적용하였으며, baseline 기간 (2005-2015, 해수면 0m)의 관측점의 관측 염도와 비교하였습니다. 먼저 군산 조위관측소의 조위자료를 분석하여 2050년 해수면 상승 시나리오를 총 4가지의 경우로 전망하였습니다. 지하수 함양율 시나리오 또한, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 따른 강수량 전망자료로부터 추정하여 총 4가지 경우로 산정하였습니다. 이렇게 얻어진 4가지 해수면 상승전망자료와 4가지 지하수 함양율을 조합하여 14가지의 경우를 가정하였으며, baseline (2005-2015, 해수면 0m)을 포함하여 총 15가지 경우에 대하여 해수면 상승과 함양율의 지하수 해수침투 영향을 분석하였습니다. 이 중 관측점에서 가장 많은 염도의 증가를 보인 경우에 한해, 해수빼기제어방안 중, 해안쪽에 관정을 설치하고 흡입펌프를 이용하여 해수를 양수하는 방안을 SUTRA모형에 적용하여 그 효과를 분석하였습니다.

본 연구에 적용한 모델링 기법을 다양한 해수빼기제어방안에 적용하여 최적의 해수빼기제어방안을 제시할 수 있을 것으로 기대가 됩니다. 한편, 강수예측 자료로부터 지하수 함양율의 예측치와 조석 변화의 예측자료를, 본 연구에서 적용한 모델링기법은 해수침투관측망 주위의 지하수 관정에 대한 염해조기경보시스템 개발에 활용하여, 농민들이 지하수로 인한 농작물의 염피해를 줄이는 데 활용 될 수 있을 것으로 기대가 됩니다. 토양 복원 및 지하수 오염 복원, 지하수나 토양 오염으로부터 지하수 오염을 복원하여 수자원 확보에도 활용할 수 있을 것으로 기대됩니다.

끝으로 본 연구를 맡아 수행해주신 본 센터의 전종안 박사의 노고에 감사를 드립니다. 그리고 본 연구를 위해 많은 도움을 주신 박남식 교수(동아대학교), 김진성 박사(농어촌연구원), 최지용 교수 (서울대학교), 신현석 교수 (부산대학교), 본 센터의 임창묵 연구원께도 감사를 표합니다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

Sea-levels can rise due to expanding seawater resulting from ocean warming and by melting ice over land due to climate change. It is widely known that sea-level rise contributes to the increase of seawater intrusion on coastal groundwater systems. The objectives of this report are to investigate the impacts of sea-level rise on coastal groundwater systems and to provide recommendations to control seawater wedge through the SUTRA model. We collected and analyzed tide gauge station data to project sea-level rise based on the tide gauge station data at the Gunsan station. In addition, freshwater recharge rates were estimated using the precipitation projection data provided by the Korea Meteorological Administration. The observed electrical conductivity at the Byeonsan1 and Byeonsan2 monitoring wells for seawater intrusion were used to estimate the transport parameters for the study sites. The changes in salinity at the monitoring wells for a total of 15 scenarios including the baseline period (2005–2015) were investigated with the combinations of 4 sea-level rise projections (0.12m sea-level rise by 2050 with linear regression, 0.32m sea-level rise by 2050 with polynomial regression of order 2, 0.57m sea-level rise by 2050 under Representative Concentration Pathway (RCP)4.5, 0.72m sea-level rise by 2010 under RCP8.5) and 4 freshwater recharge rates (0.00627kg s⁻¹ in 2050s under RCP4.5, 0.0058kg s⁻¹ in 2050s under RCP8.5, 0.00549kg s⁻¹ in 2090s under RCP4.5, 0.00694kg s⁻¹ in 2090s RCP8.5). While 0.72 sea-level rise contributed to the largest increase in salinity at monitoring wells without consideration of the changes in freshwater recharge rates, 0.57m sea-level rise with a freshwater recharge rate of 0.0058kg s⁻¹ contributed to the largest

salinity increase. The effect of the Saline Groundwater Extraction method on seawater intrusion was also investigated through the SUTRA model. The results showed that when both top and bottom extraction pumps were run, the seawater wedge could be effectively controlled. These methods were also used for the pacific island countries for this study. However, due to the data availability, the simulation of seawater intrusion was conducted with an island from a previous study that can adequately represent a pacific island country. For Samoa, rises of 27.61cm and 98.36cm in sea-levels by 2050 were projected with linear regression and polynomial regression of order 2. Based on this result, the effect of a rise of 1m in sea-level on seawater intrusion was investigated with the SUTRA model. The results showed that the sea-level rise contributed to the increase in salinity at the monitoring well, which was assumed to be installed at a depth of 40m at the center of the island. It is concluded that this study can be useful to secure water resources by efficaciously controlling the seawater wedge and subsequently leads to the reduction of saline damage to crops.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	4
2.1 자료수집	5
2.1.1 조위자료	5
2.1.2 지하수위 및 수질 자료	6
2.1.3 기상 및 기후자료	12
2.2 해수면상승전망	12
2.3 해수침투모델링	14
3. 연구결과 및 토의	23
3.1 해수면상승전망	23
3.2 해수침투모델링	26
3.3 지하수 해수침투 저감 방안	32
4. 활용방안	38
4.1 태평양도서국의 해수면상승전망	38
4.1.1 자료수집	38
4.1.2 해수면상승전망	42

4.1.3 해수침투모의	46
4.2 해수빼기제어	51
5. 요약 및 결론	54
Ⅱ REFERENCE	58

LIST OF TABLES

표 1. SUTRA 모형의 입력파일과 출력파일 (Voss and Provost, 2010) -----	19
표 2. 변산1과 변산2 관측공의 수리상수 (한국농어촌진흥공사, 2015b) -----	19
표 3. 해수면 상승과 함양율에 따른 case study -----	28
표 4. 관측공별 상/하부 흡입펌프 위치 및 양수량 -----	33
표 5. 남태평양 해수면 및 기후 모니터링 프로젝트 (SPSLCMP)의 위치 및 추세 -----	40

LIST OF FIGURES

그림 1. 전체 연구의 수행 방법 및 SUTRA 모형의 입력 및 출력 파일들 -----	4
그림 2. 국립해양조사원 (http://www.khoa.go.kr/) -----	5
그림 3. 농어촌지하수넷 지하수관정정보 지도서비스 (https://www.groundwater.or.kr) -----	8
그림 4. 전라북도 부안군 해수침투관측망 (변산1, 변산2) -----	8
그림 5. 지하수 수위 (a) 변산1, (b) 변산2 -----	9
그림 6. Piper diagram을 이용한 유형 분류 (Piper, 1944) -----	10
그림 7. Piper diagram (a) 변산1, (b) 변산2 -----	11
그림 8. 목포지점의 조위 자료 (a)1995년과 (b)1996년 결측구간과 조화분해를 활용하여 결측구간 보간한 결과 예시 (c)1995년과 (d)1996년 -----	13
그림 9. 군산지점의 조위 자료 (a)1995년과 (b)1996년 결측구간과 조화분해를 활용하여 결측구간 보간한 결과 예시 (c)1995년과 (d)1996년 -----	14
그림 10. 지하수 해수침투 개념도: (a) 초기상태 해수침투, (b) 해수면 상승과 양수 등 인공적활동에 의한 해수침투 (Adapted from Werner et al., 2013) -----	18

그림 11. 지하수 모델링의 flow chart (adapted from Li et al., 2015) -----	20
그림 12. 변산지구 (변산1과 변산2)의 고도 (Elevation) (a)과 대략적인 유선 분포 (b) -----	20
그림 13. 변산1의 경계조건 및 FEM Mesh (vertical exaggeration=20×)-----	21
그림 14. 변산2의 경계조건 및 FEM Mesh (vertical exaggeration=20×)-----	21
그림 15. 흐름 및 수송매개변수 (Flow and transport parameters)의 등방성 및 균질성 -----	22
그림 16. Dispersivity scale effect (adapted from Gelhar et al., 1992)-----	22
그림 17. 목포지점의 (a) 시간별, 일별, 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면 -----	24
그림 18. 군산지점의 (a) 시간별, 일별, 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면 -----	24
그림 19. 월별 해수면과 해수면 변동 추세 분석 (a) 목포, (b) 군산 -----	25
그림 20. 해수면 상승 전망 (a) 목포, (b) 군산 -----	25
그림 21. 변산1 관측공의 Baseline의 경우 지하수 해수침투 모델링 결과-----	29
그림 22. 변산2 관측공의 Baseline 경우 지하수 해수침투 모델링 결과 -----	29
그림 23. Case 별 관측공에서의 염도 변화율: (a) 변산1, (b) 변산2 -----	30

그림 24. 변산1 관측공의 2090RCP45_RR2090RCP45의 경우 지하수 해수침투 모델링 결과	31
그림 25. 변산2 관측공의 2090RCP45_RR2090RCP45의 경우 지하수 해수침투 모델링 결과	31
그림 26. 변산1에서의 해수빼기제어를 위한 양수시험 모델링 결과 (a) 상부 (-20m) 양수, (b) 하부 (-40m) 양수, (c) 상부와 하부 동시에 양수	34
그림 27. 변산2에서의 해수빼기제어를 위한 양수시험 모델링 결과 (a) 상부 (-20m) 양수, (b) 하부 (-40m) 양수, (c) 상부와 하부 동시에 양수	35
그림 28. 변산1의 해수빼기 제어 양수시험 모델링 결과 (a) 상부양수시, (b) 하부양수시, (c) 상/하부 동시양수시 염도변화 (Time step: 1=약 7일)	36
그림 29. 변산2의 해수빼기 제어 양수시험 모델링 결과 (a) 상부양수시, (b) 하부양수시, (c) 상/하부 동시양수시 염도변화 (Time step: 1=약 7일)	37
그림 30. 남태평양 해수면 및 기후 모니터링 프로젝트 (South Pacific Sea Level and Climate Monitoring Project, SPSLCMP) : http://www.bom.gov.au/pacific/projects/pslm/ ---	39
그림 31. Samoa 조위자료 결측구간 (a)와 (b) 및 조석조화분해를 통한 결측구간 보간 결과 (c)와 (d)	41
그림 32. Vanuatu 조위자료 결측구간 (a)와 (b) 및 조석조화분해를 통한 결측구간 보간 결과 (c)와 (d)	41
그림 33. Samoa의 (a) 시간별, 일별, 월별 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면	44

그림 34. Vanuatu의 (a) 시간별, 일별, 월별 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면 -----	44
그림 35. 월별 해수면과 해수면 변동 추세 분석 (a) Samoa, (b) Vanuatu -----	45
그림 36. 해수면 상승 전망 (a) Samoa, (b) Vanuatu -----	45
그림 37. 섬지역 지하수 해수침투 3D 모델링을 위한 FEM Mesh (Top view) -----	48
그림 38. 섬지역 지하수 해수침투 3D 모델링을 위한 FEM Mesh (Front view) (vertical exaggeration=5×) -----	48
그림 39. 섬지역 3D 모델링 결과 (Top view, 해수면 = 0m) -----	49
그림 40. 섬지역 3D 모델링 결과 (Front view, 해수면 = 0m) -----	49
그림 41. 섬지역 3D 모델링 결과 (Top view, 해수면 = 1m 상승) -----	50
그림 42. 섬지역 3D 모델링 결과 (Front view, 해수면 = 1m 상승) ---	50
그림 43. 변산지구의 농업용지하수관정분포 -----	52

1. 서론

지구의 평균해수면에 대한 전망은 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 시나리오 (말하자면, RCP4.5)의 경우 2081-2100년 약 47cm 상승할 것으로 전망하고 있으며, 온실가스의 감축 없이 현재와 같은 추세로 온실가스를 배출할 경우 (말하자면, RCP8.5) 2081-2100년 지구의 평균해수면은 약 63cm 상승할 것으로 전망하고 있다 (IPCC, 2013). 기상청에서 제공하는 2100년 우리나라 전체 평균해수면은 RCP4.5 시나리오에서 약 65.0cm, RCP8.5 시나리오에서 약 83.8cm가 상승하는 것으로 전망하고 있으며, 해역별로는 RCP4.5에서 동해 79.5cm, 남해 58.1cm, 서해 57.3cm와 RCP8.5 시나리오에서 동해 108.1cm, 서해 72.4cm, 남해 70.8cm 순으로 평균해수면이 상승할 것으로 전망하고 있다. 우리나라의 경우 삼면이 바다로 둘러싸여있고, 해안에 접한 우리나라 54개 시·군의 경지면적은 전체 경지면적의 42%를 차지하며, 지역별로는 전남이 약 14%, 충남과 전북이 각각 7.4%와 5% 순이다. 우리나라에서는 과거 식량증산을 목적으로 한 대규모 간척사업의 결과로 해안에 접한 농경지가 많이 분포하고 있다. 특히 간척지는 서해안에 집중되어 분포하고 있는데, 전남이 40개소로 전체 간척지 면적 (91개소, 209,333ha)의 30.8% (64,485ha)로 가장 큰 면적을 차지하며, 충남이 22.1% (46,290ha), 전북이 약 21.7% (45,389ha) 순으로 나타났다.

우리나라에서 약 976천명은 상수도 미급수 인구로 분류되고 있으며, 이러한 곳에 지하수가 상당부분 생활용수로 이용되고 있다 (환경부, 2014). 이러한 미급수 인구의 약 83%에 해당하는 약 805천명의 인구는 농어촌 읍면단위에 생활하고 있다. 또한, 하천이 발달하지 않았거나, 저수지가 개발 되지 않은 농어촌지역에서 지하수는 농업용수의 대부분을 차지하고 있다. 가뭄의 발생 또는 기후변화 등으로 농업용수 및 생활용수로 즉각적이며 추가적으로 개발할 수 있는 자원 중의 하나가 바로 지하수 수자원을 들 수 있다 (한국농어촌공사, 2015a). 그러나 기후변화에 따른 해수면 상승으로 해수침투에 의한 지하수 염류피해의 위험도가 높아지고 있으며, 해안가에 위치한 농업용관정을 통한 지하수를 관개수로 활용할 경우 작물의 염류피해 뿐만 아니라 농경지 토양오염위험이 증가한다고 할 수 있다. 특히 바다와 인접한 간척지의 경우, 지하수위가 높아 가뭄상황 등 농업용수가 충분하지 못할 경우 염해가 많이 발생할 수 있으며, 인천의 여차지구, 경기 김포·시화지구, 충남 이원지구, 전북 석포·줄포지구, 전남 하태·보전지구 등은 현재 염피해가 발생하고 있는 지역으로, 가뭄상황에서 염류

피해가 더욱 확대할 것으로 예상된다. 양정석 등(2011)은 우리나라의 경우 서해안에서 해수침투 영향이 남해안이나 동해안보다 심각하다고 판단하였다.

해안지역의 지하수는 바다의 영향으로 담수체와 해수체가 공존하게 되는데, 상대적으로 밀도가 큰 해수가 썰기형태로 해안지역의 기저부에 존재하게 되며, 해수체와 담수체의 경계면은 해안가에서 낮은 심도로 존재하고, 내륙쪽에서는 깊은 심도로 존재하게 된다. 이러한 해수침투의 사례는 우리나라 (장선우, 2014)를 비롯하여 미국 (Johnson, 2007; Kentel et al., 2005; Johnson and Whitaker, 2004; Guvanasen et al., 2000; Lipshile and Larson, 1995), 호주 (Werner and Gallagher, 2006), 중국 (Cheng and Chen, 2001), 인도 (Datta et al, 2009; Bobba, 2002; Rouve and Stoessinger, 1980), 이집트 (Sherif et al., 1988), 방글라데시 (Nobi and Gupta, 1997) 등 세계 곳곳에서 보고되고 있다. 지하수의 해수침투가 발생하는 원인은 여러 가지가 있는데, 해수면이 상승하여 해수침투가 더욱 진행하기도 하며, 상승추 현상에 의해서 일어나기도 한다. 해안지역에서 담수와 해수의 경계면에서 흡입펌프에 의한 양수를 할 경우, 해수와 담수의 경계면이 관정주위에서 상승하게 되어 관정내로 해수가 침투하게 되는데, 이러한 현상을 상승추(upconing)라고 한다. 이러한 해수침투를 제어하는 방안으로 해안지역의 지하수 개발이나 이용을 적절하게 규제하여, 관정 내부로 염수가 유입되지 않게 하는 방법이나, 해안변에 해수 침투를 차단할 수 있는 차폐벽을 설치하는 방안 등이 있다.

해수면상승에 따른 지하수 및 농업부문의 영향 평가를 한 해외사례를 아태지역을 중심으로 살펴보면, 베트남과 방글라데시 등을 들 수 있다. 베트남 연안 부근에서 해수면상승으로 인한 지하수 염분 증가로 농업 피해 가능성을 제시한 바 있다 (Hanh and Furukawa, 2007). Sarwar (2005)와 Brammer (2014)은 방글라데시 연안 지역에서 해수면 상승에 따른 지하수염류화 및 농업에 대한 영향을 평가한 바 있다. 이러한 해수침투 등으로 농경지가 염류에 의해 오염이 되면 작물의 생산성이 저하될 수 있다. 예를 들어, 벼 작물의 경우 토양 염류에 의한 피해로 벼 작물의 생장 및 발달에 영향을 주며, 결과적으로 50% 이상의 쌀 단수의 손실을 가져오기도 한다고 보고된 바 있다(Zeng and Shanon, 2000). 우리나라에서도 임강빈과 심재욱 (1970)이 간척지에서 벼의 내염성에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 염도에 따른 보리 생육에 대한 생리반응은 이석영 등 (1996)에 의해 수행 된 바 있다. 한편, 최원영 등 (2011)은 간척지에서 완전낙수시기 별 쌀 품질을 조사한 바 있고, 가능한 늦은 시기에 완전낙수하는 것이 유리 할 것으로 판단 한 바 있다. 김현지 등 (2009)은 우리나라의 사천-하

동 해안지역에서 해수침투와 농업활동에 따른 지하수의 오염특성을 분석한 바 있다. 또한, 이봉주와 문상호 (2008)는 우리나라의 서천-군산 지역의 해수침투 특성을 분석하는데 시계열 및 요인분석을 활용한 바 있다.

해수면상승에 따른 지하수 해수침투의 영향을 다양한 모형을 이용하여 모의한 바 있다. 예를 들어, Bear (1979)는 수학적 모델을 이용하여 지하수 해수침투와 관련한 문제를 설명하였다. Datta et al. (2009)은 FEMWATER 모형 (Lin et al., 1997)을 이용하여 인도의 한 연안 대수층의 해수침투를 모의하고 해수침투를 조절하기 위한 효과적인 양수계획을 평가한 바 있다. Yang et al. (2013)은 조석과 스톱서지 (storm surge)의 연안대수층에 대한 영향 분석에 HGS모형을 이용하였다. MODFLOW 모형은 해수침투를 모의하기 위해 다른 모형과 연계되기도 하였다. Luoma and Okkonen (2014)는 MODFLOW-2005모형과 UZF1모형을 연계하여, 핀란드의 기후변화와 해수면 변화의 지하수시스템 (지하수위, 지하수 함양 등)에 대한 영향을 평가하는 데 활용한 바 있다. 다수의 모형이 지하수해수침투 관리를 위한 모형으로 사용된 바 있다 (예를 들어, Datta et al., 2009; Bobba, 2002; Das and Datta, 2000; Finney et al., 1992; Willis and Finney, 1988). 정은태 등 (2014)은 해안 지역에 설치한 이중 양수정의 해수침투 저감 효과를 분석하는데, 경계면 수치 모델을 이용한 바 있다. SUTRA 모형 (Voss, 1984)은 포화 및 불포화 지하수 흐름과 용질 수송 (solute transport)을 모의 할 수 있는 모형으로 지하수 해수침투에 대한 문제를 해결하기 위해 많이 적용된 바 있는 모형이다 (e.g. Narayan et al., 2007; Ghassemi et al., 1990; Bush, 1988; Souza and Voss, 1987; Voss and Souza, 1987). 예를 들어, SUTRA모형을 활용하여 지하수 펌핑의 호주의 Burdekin Delta지역의 해수침투에 대한 영향을 분석한 바 있다 (Narayan et al., 2007).

본 연구의 목적은 해수면상승으로 인한 지하수 해수침투 및 토양 염류피해, 이로 인한 농경지 토양염류화 피해, 작물생산성영향 등을 분석 하고 농경지 염류화 및 작물생산성 피해 저감 방안을 제시하는 것을 최종 목적 (3년차 과제목표)으로 하며, 올해의 구체적 연구목적은 다음과 같다.

- 조위자료를 활용하여 대상지역의 해수면상승 변동율 추세를 분석하여 평균해수면 상승을 전망하고
- 해수면상승전망 및 기후변화에 따른 강수량 전망자료를 활용한 지하수 함양율을 고려하고, SUTRA 모형을 활용하여 지하수 해수침투를 모의하고 저감 방안을 제시

2. 연구 자료 및 방법

그림 1은 본 연구의 전체 수행 방법으로 자료의 흐름이나, 케이스스터디 (case study), SUTRA모형의 입력 및 출력 파일 등을 보여주고 있다. 먼저 조위자료로부터 미래 해수면 상승 전망을 하였고 (총 4가지 경우), 기후변화시나리오 (RCP 4.5 와 RCP 8.5)의 강수량 전망으로부터 총 4가지의 경우의 함양율을 추정하였으며, SUTRA 모형의 경계조건에 활용되었다. 기후변화에 따른 해수면상승이나 강수량 변화의 지하수 해수침투 영향을 분석하기 위한 baseline기간은 대상지역의 지하수 수질 자료 기간으로 결정하였다. SUTRA 모형의 입력자료 구축을 위해 ModelMuse (Winston, 2009)를 사용하였다. 맨 먼저, ModelMuse를 이용하여 모델링 도메인을 구축하고 FEM mesh를 생성하였다. SUTRA.FIL파일에는 SUTRA모형의 입력과 출력 파일들이 수록이 되어 있으며, SUTRA 모형의 입력파일 중 .inp는 주입력파일이며 .ics는 초기조건을 나타내는 파일이다. 각 파일들의 설명은 표 1에 요약하여 제시하였으며, 이에 대한 설명과 자세한 연구의 방법 및 내용은 다음 장에서 서술하였다.

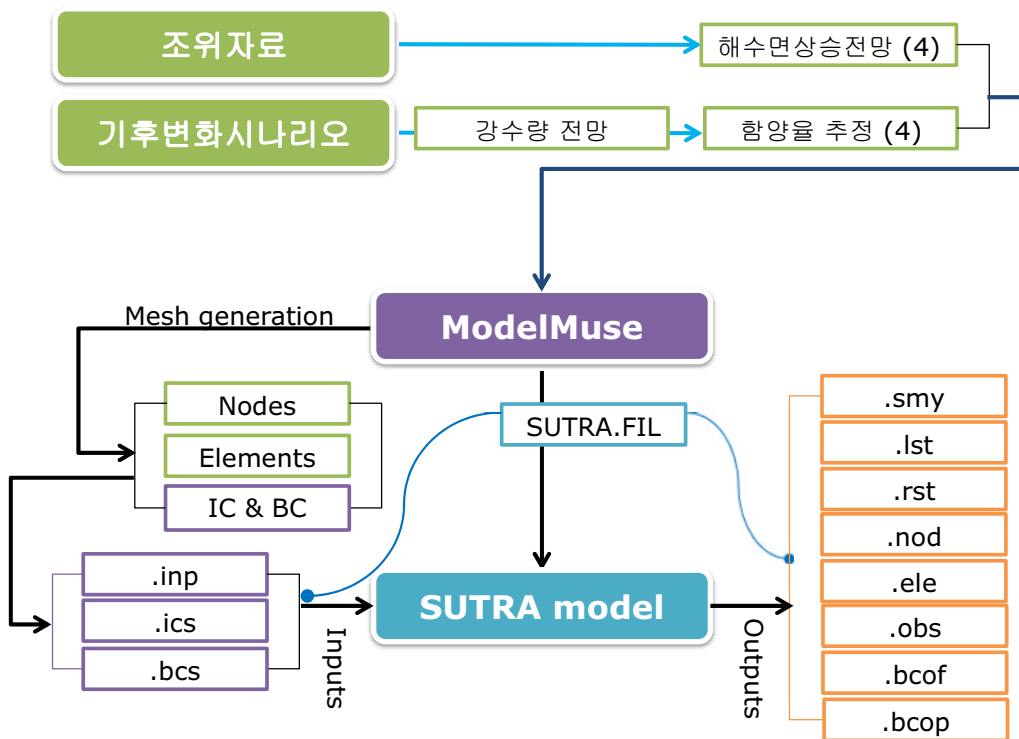


그림 1 전체 연구의 수행 방법 및 SUTRA 모형의 입력 및 출력 파일들

2.1 자료수집

2.1.1 조위자료

평균해수면 상승치 전망을 위한 조위자료는 국립해양조사원 (그림 2, <http://www.khoa.go.kr/>)에서 내려받기 하였다. 국립해양조사원에서는 우리나라 47개 조위관측소와 6개 해양관측소의 다양한 해양 관측 정보를 제공하고 있으며, 품질 관리를 거쳐 1시간 간격 및 월별 조위 자료를 제공하고 있다. 그러나 총 53개 관측소 중 30년 이상의 관측기간을 가진 관측소는 19개에 불과하였다. 해역별로 살펴보면, 서해에서는 목포조위관측소가 1952년 8월 관측을 개시하여 가장 긴 관측기간을 가졌고, 남해해역에서는 부산조위관측소가 1955년 2월, 동해해역에서는 울산조위관측소가 1962년 9월에 관측을 개시하여 가장 긴 관측기간을 가진 것으로 나타났다. 본 연구에서는 해수면상승이 지하수 해수침투에 미치는 영향을 분석 (1년차 과제목표)하고 최종적 (3년차 과제목표)으로는 농경지와 작물의 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 따라서 간척지가 많은 서해해역 중 대표적인 군산과 목포 2개의 조위 관측 지점을 선정하여 해수면 상승치를 전망하였다. 본 연구에 사용된 관측기간은 목포 조위 관측소의 경우 1960년부터 2015년까지이며, 군산 조위관측소의 경우 1981년부터 2015년까지이다. 이러한 해수면 상승 전망치는 미래 기후변화에 따른 지하수 해수침투 영향 분석을 위한 모델링에 경계조건으로 활용하였다.

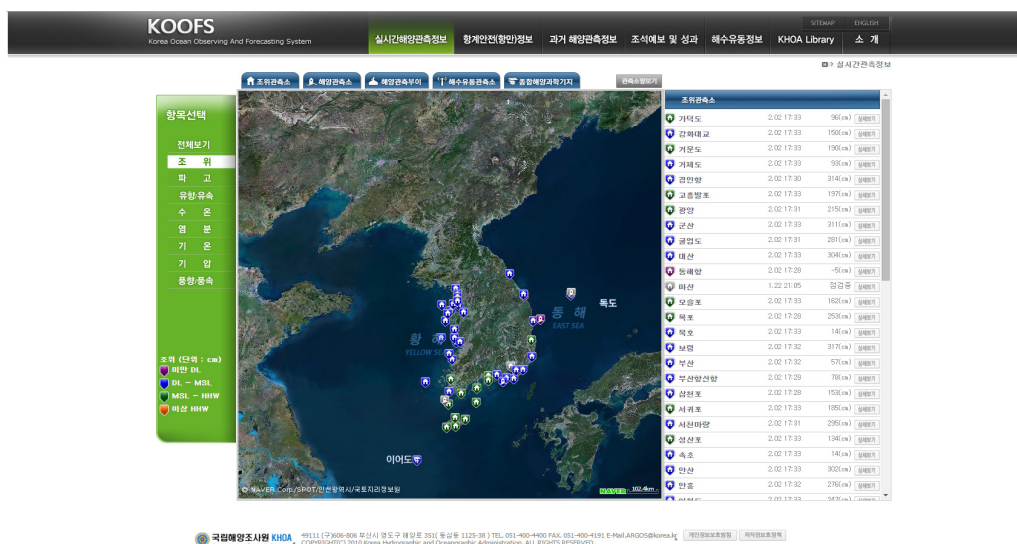


그림 2 국립해양조사원 (<http://www.khoa.go.kr/>)

2.1.2 지하수위 및 수질 자료

농어촌지하수의 합리적인 개발·이용 및 보전·관리 목적으로 2015년 12월 현재 농촌지하수관리 관측망 210개소 (한국농어촌공사, 2015a)와 해수침투 관측망 154개소 (한국농어촌공사, 2015b) 등 전국 283개소에 농어촌지하수관측망이 설치 및 운영 중이다. 농촌지하수관리 관측망은 국내 도서 및 해안지역에 설치 및 운영하고 있는 지하수 관측공에 대한 총 관리 체계이며 (한국농어촌공사, 2015a), 해수침투 관측망은 1998년에 해수침투가 보고되거나 위험도가 큰 도서 및 해안지역에 최초 10개소에 설치하여 운영한 게 그 시초이다 (한국농어촌공사, 2015b). 해수침투 관측망 설치수를 해역별로 살펴보면, 서해안 67개소, 남해안 59개소, 동해안 28개소가 각각 설치되어 운영되고 있다 (한국농어촌공사, 2015b). 각 관측공에서는 1시간 간격의 지하수위, 수온, 전기전도도를 자동으로 수집하여 농어촌공사에 소재한 서버로 자동 전송된다. 한국농어촌공사 해수침투 관측공은 전국적으로 해안으로부터 평균 593m (최대 4230m, 최소 10m)에 위치에 설치되어 있으며, 전국 154개 관측공 평균 개발심도는 약 78m로 나타났다 (한국농어촌공사, 2015b).

지하수위, 수온, 전기전도도 등 관측자료는 농어촌지하수넷 (그림 3, <https://www.groundwater.or.kr>)에서 검색 및 내려받기가 가능하다. 전라북도지역에는 대창지구 (2개소), 변산지구 (2개소), 자룡지구 (1개소), 금평지구 (1개소), 내흥지구 (2개소) 총 5개지구, 8개소의 해수침투 관측망이 설치되어 운영되고 있다. 본 연구에서는 해안에 인접한 농경지의 분포 등을 고려하여 전북지역의 8개소 해수침투 관측망 중 본 연구에 조위자료를 활용하여 해수면상승 전망치를 분석한 서해해역의 군산 조위관측소와 근접한 변산지구의 변산1과 변산2 관측공 (그림 4)을 선정하였다. 본 연구에는 변산1과 변산2 관측공 모두 2005년부터 2015년까지의 자료를 사용하였다. 변산1과 변산2 관측관정은 모두 정호심도 60m깊이 까지 관정을 설치하였고, 수위센서는 10m에, 전기전도도 센서는 변산1의 경우 25m와 28m에 설치하였고, 변산2의 경우는 50m에 설치하여 운영 중이다. 관측한 변산1 (평균 -0.18m)과 변산2 (평균 -0.04m)의 지하수 수위자료는 그림 5에 표시하였다. 이와 같이 수집한 자료는 SUTRA 모형을 검증하는데 활용하였다.

변산1 관측공의 EC1 (25m 심도)의 전기전도도는 $29245 \pm 2870 \mu\text{S cm}^{-1}$, EC2 (28m 심도)의 전기전도도는 $32395 \pm 2380 \mu\text{S cm}^{-1}$ 의 값을 보였으며, 수온의 경우

14.3±1.5°C의 값을 보였다. 변산2의 경우에는 전기전도도 (50m 심도)의 값은 7556±813 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 수온 (50m 심도)은 15.0±0.3°C의 값을 보였다. 농촌진흥청 (2006)은 전기전도도에 따른 작물의 생육상태에 대해 보고한 바 있다. 전기전도도가 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이하의 경우 모든 작물이 생육 가능하고 2000에서 4000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 범위에서는 염분에 예민한 작물(예를 들어 배, 복숭아, 완두, 감자 콩 등)은 생육이 불량하고, 4000에서 8000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 범위에서는 양배추, 목화 등의 내염성 작물만 생육이 가능하나, 8000에서 15000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 범위에서는 대부분의 작물의 생육이 불량하며, 15000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이상에서는 대부분 작물의 생육이 불가능하다. 내염성이 중간정도인 작물은 포도, 기장, 보리, 귀리, 벼, 밀 등이 있다. 변산 2의 경우는 전기전도도가 2005년 7753 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 에서 2006년 8139 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 대부분의 작물이 생육이 불량한 범위로 해수의 영향이 계속 증가하고 있다고 보고 된 바 있다 (한국환경정책평가연구원, 2007).

일반적으로 지하수 해수침투의 정도를 전기전도도, Piper diagram (그림 6), 염소이온(Cl)/중탄산이온(HCO₃) 몰비 (Revelle, 1941) 등을 통해 판단할 수 있다 (한국농어촌공사, 2015). 먼저, 전기전도도를 기준으로 담수: 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이하, 기수: 1000 - 10000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 염수: 10000 - 100000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 고염수: 100000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이상 등으로 분류할 수 있다. Piper diagram을 이용하면 해수침투의 진행 정도를 분류할 수 있는데, 해수침투가 진행함에 따라, CaHCO₃ 유형, Ca-Cl 유형, Na-Cl 유형 순으로 분류된다. Revelle (1941)에 따르면 Cl/HCO₃ 몰비가 0.5이하이면 해수침투의 영향이 거의 없고, 0.5 - 1.3 범위에서는 약간 문제가 되며, 1.3 - 2.8 범위에서는 약간의 영향을 받고, 2.8 - 6.6 범위에서는 보통 정도의 오염을 받고 있으며, 6.6 이상인 경우에는 매우 심한 정도의 영향을 받고 있는 것으로 분류할 수 있다. 이러한 분류 방법에 따르면, 변산1과 변산2의 경우 기수에 해당하며, Cl/HCO₃ 몰비가 각각 57.18, 19.97 (한국농어촌공사, 2015)로 매우 심한 정도의 해수침투영향을 받고 있는 것으로 나타났다. Piper diagram으로 도시하여 나타내 보면 (그림 7) 변산1과 변산2 관측공 모두 Na-Cl 유형의 염수 유형에 해당된다고 볼 수 있다.

8 | 해수면상승에 따른 지하수 및 토양 염류화 저감 방안 개발

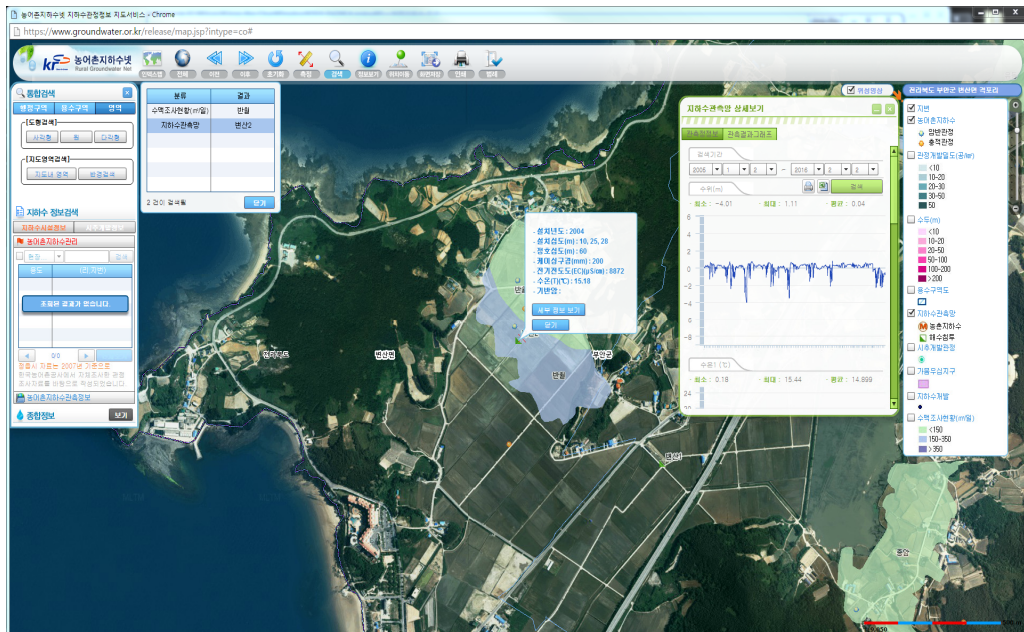


그림 3 농어촌지하수넷 지하수관정정보 지도서비스 (<https://www.groundwater.or.kr>)

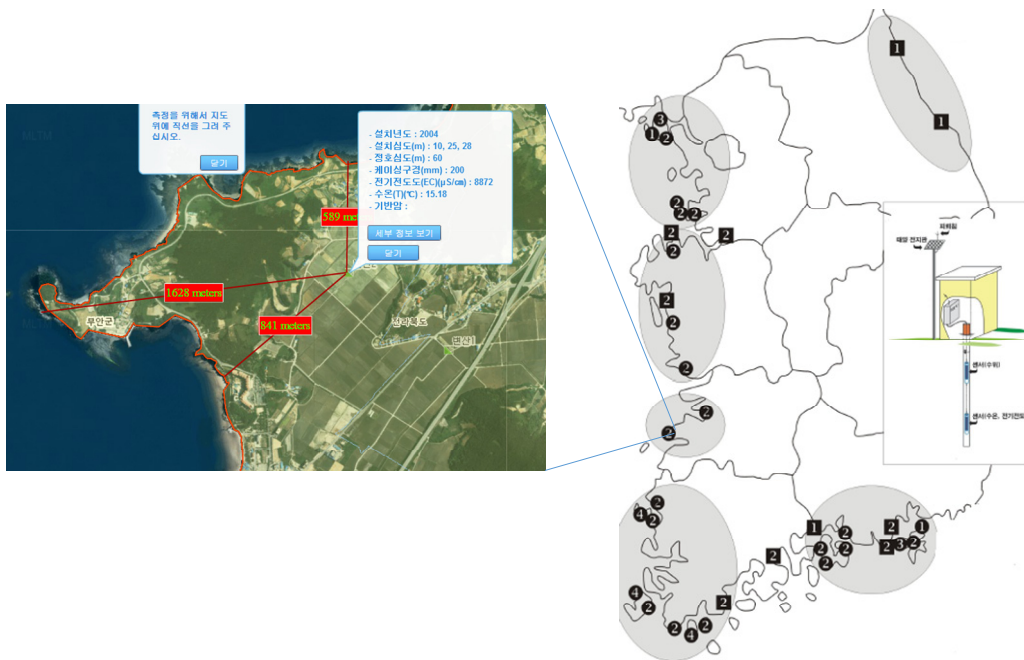


그림 4 전라북도 부안군 해수침투관측망 (변산1, 변산2)

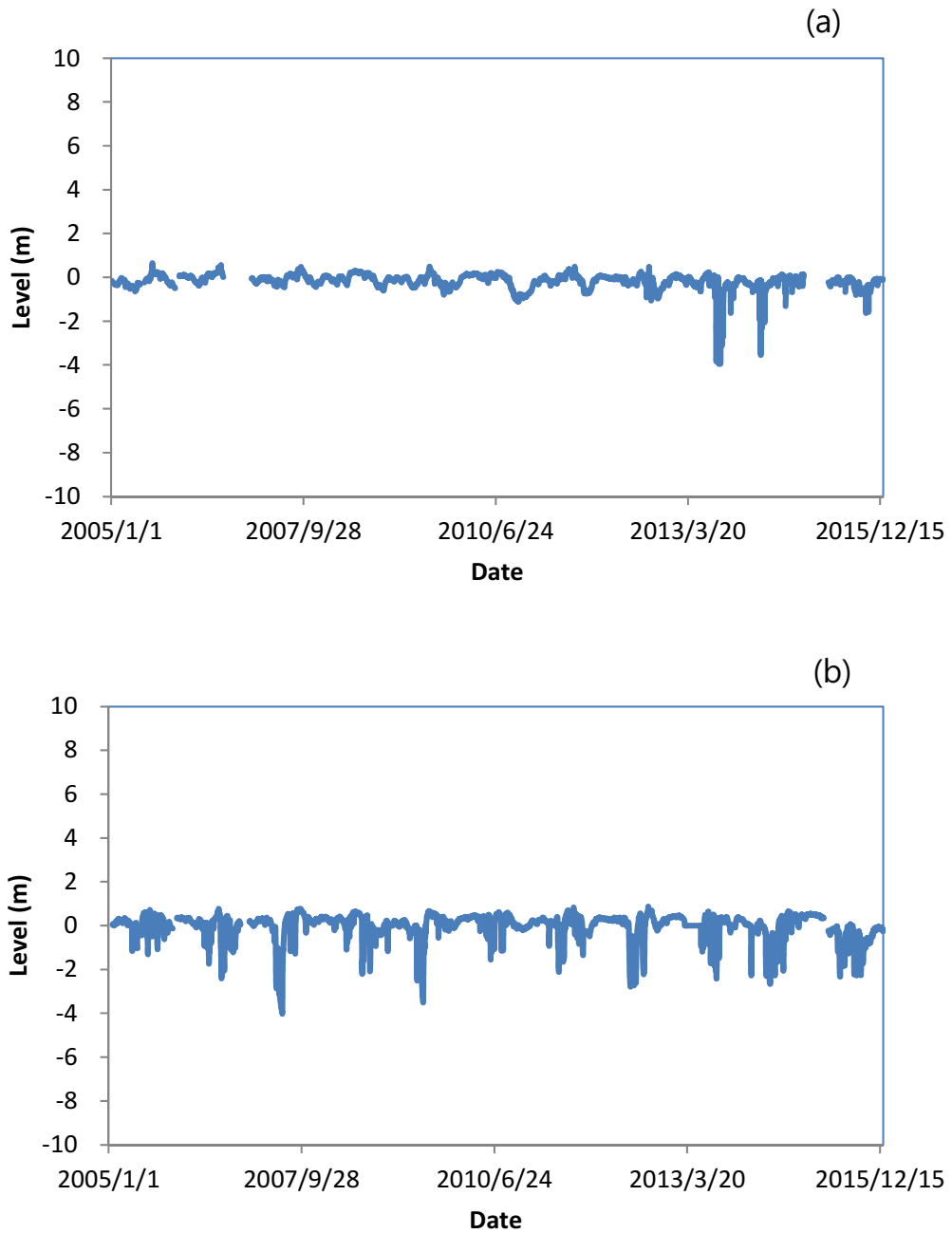


그림 5 지하수 수위 (a) 변산1, (b) 변산2

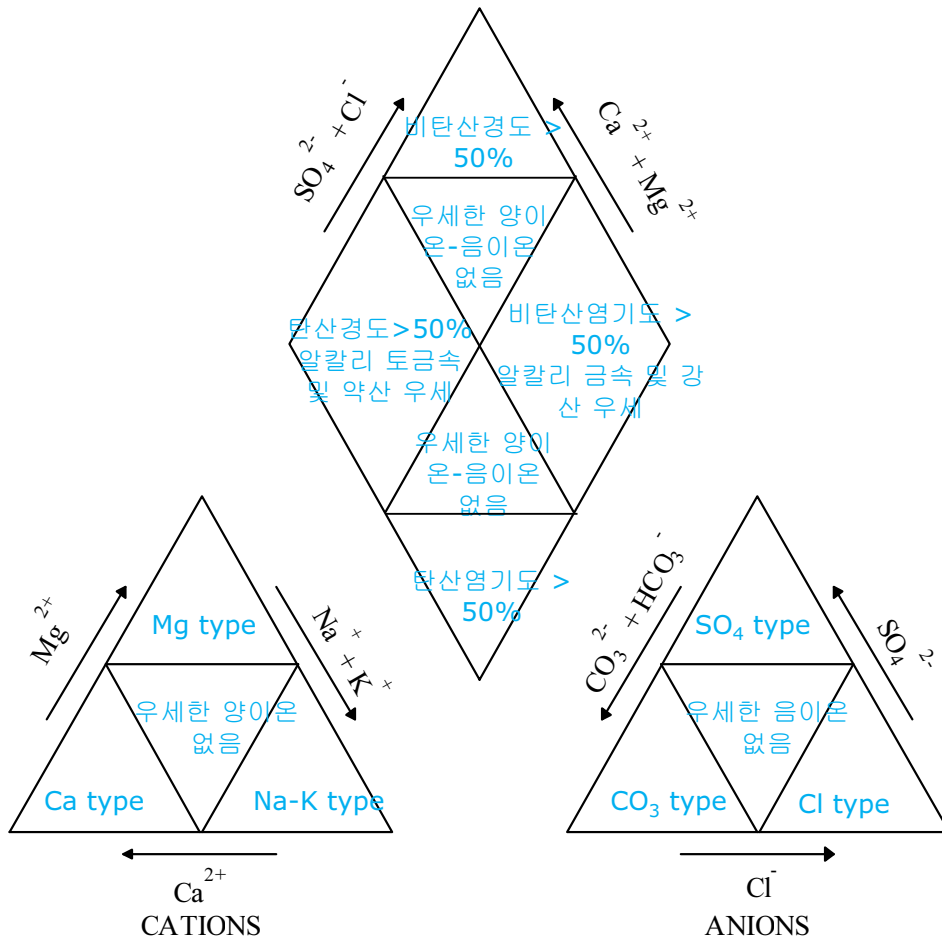


그림 6 Piper diagram을 이용한 유형 분류 (Piper, 1944)

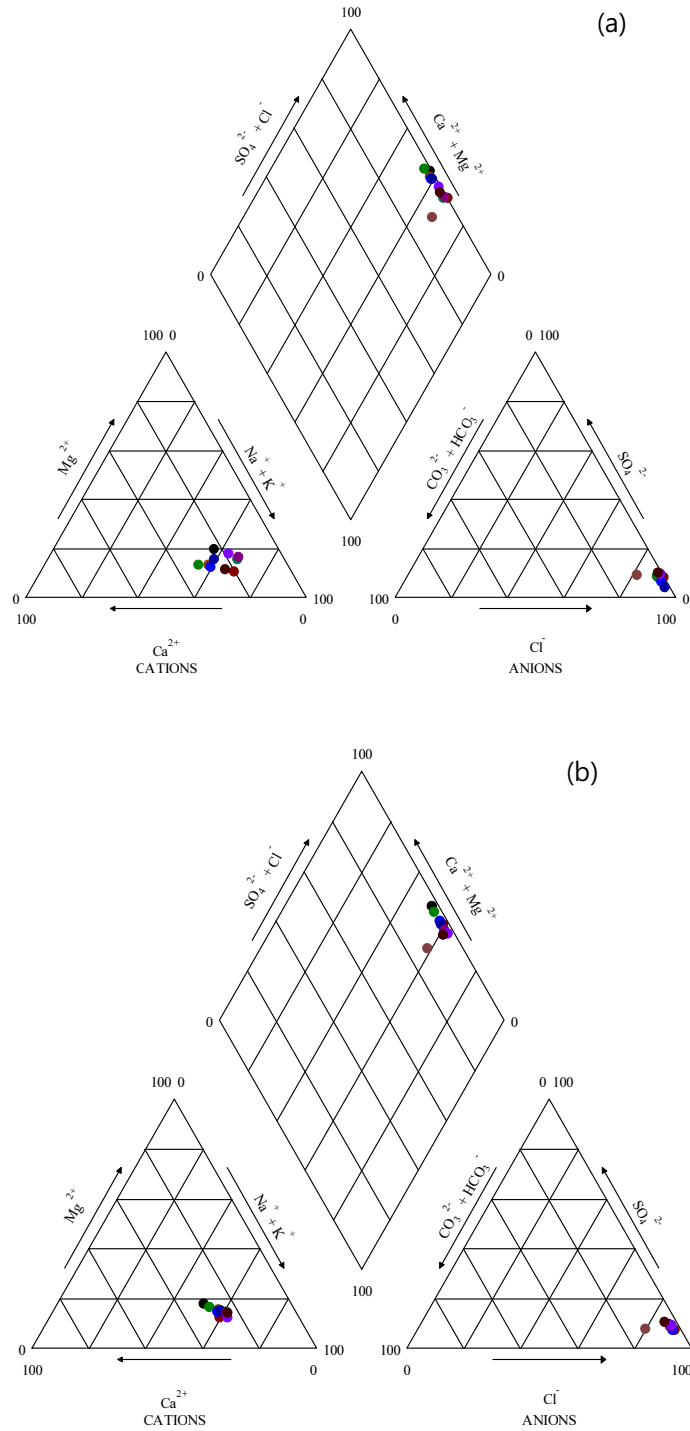


그림 7

Piper diagram (a) 변산1, (b) 변산2

2.1.3 기상 및 기후자료

부안지역의 연평균기온은 약 12.6°C , 연평균최고기온은 약 18.0°C , 연평균최저기온은 약 8.0°C 이며, 연평균강수량은 약 1250.4mm이다. SUTRA모형의 입력자료로서 함양율 (Recharge rate, kg s^{-1})계산을 위해 본 연구의 분석기간 (2005년부터 2015년)의 평균강수량을 구한 후, 평균강수량의 10% (박남식 동아대 교수, Personal communication, 2016년 9월 22일)를 함양율로 산정하였다. 우리나라의 경우 보통 강수량의 10~20%를 함양율로 추정하는 데, 본 연구에서는 가능한 해수면상승의 영향을 주로 분석하기 위해 가장 낮은 10%로 함양율을 산정하였다. 강수량 자료는 변산 지구와 가장 가까운 부안지점 (지점번호: 243, 위경도: 35.72°N , 126.71°E)의 부안 자동기상관측소 자료를 활용하였다. 기후변화에 따른 해수면상승에 대한 지하수 해수침투의 영향을 분석하기 위한 미래기후 상황에서 함양율 계산은 Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 사용하였다. RCP 4.5와 8.5 기후변화시나리오는 기후정보포털 (<http://www.climate.go.kr/>)의 RCP 남한상세 (1km)자료를 사용하였다. 본 연구 대상지구와 가장 가까운 격자점 (35.63°N , 126.47°E) 자료를 사용하여 2050년대 (2051년에서 2060년까지)와 2090년대 (2091년에서 2100년까지)의 평균강수량을 산정하고 평균강수량의 10%을 함양율로 가정하여 SUTRA 모형에 대입하였다. RCP 4.5 기후변화시나리오하에서 2050년대는 평균강수량: 1318.6mm, 2090년대는 평균강수량: 1153.47mm를 보였으며, RCP 8.5 기후변화시나리오하에서는 2050년대는 평균강수량: 1219.04mm, 2090년대는 평균강수량: 1458.67mm를 보였다.

2.2 해수면상승전망

본 연구에서는 미국 해양대기국 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 조위자료를 이용하여 해수면 상승 추세 분석을 한 방법을 적용하여 목포와 군산 조위관측소에서 해수면 상승 추세 분석을 실시하였다. 국립해양조사원에서는 영국의 Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)에서 개발한 Tidal Analysis Software Kit-2000 (TASK-2000)이라는 조화분석 프로그램을 이용하여 결측치를 보완한 조위자료를 배포하고 있다. 그러나 일부 구간이나

1998년 이전 자료 등에서는 결측 자료를 보완하지 않고 배포되기도 한다. 따라서 본 연구에서는 국립해양조사원에서 사용한 동일한 프로그램을 적용하여 일부 구간에 대해서 결측자료를 보완하였다. TASK-2000은 결측 구간이 있는 연도의 전년도 자료를 사용하여 조화분석을 실시하고, 총 62개의 조화상수를 산정하여 결측 구간을 보완하는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 목포와 군산 조위관측소의 결측구간을 보완하였으며, 결측구간과 보간 후 결과 예시를 그림 8과 그림 9에 도시하였다.

본 연구에서 해수면 변동률 분석을 위해, 우선 시간별 조위자료를 이용하여 월별 해수면자료로 변환하였다. 이러한 월별 해수면 자료로부터 계절사이클 (Seasonal cycle)을 제거한 다음 회귀분석을 통하여 해수면 변동률을 분석하였다. 계절사이클은 12개월 평균 계절 사이클을 의미하므로, 월별 해수면 자료를 활용하여 계절사이클을 산정할 수 있다. 월별 해수면 자료로부터 계절사이클을 제거한 다음 회귀분석을 통하여 해수면 변동률을 분석하였으며, 선형회귀법으로부터 해수면 상승률을 추정하고, 이차회귀법으로부터 해수면 변동률의 가/감속률을 추정하였다. Boon et al. (2010)은 대조위계 (RSL) 자료를 이용하여 선형회귀 및 이차회귀 방법을 통해 Chesapeake Bay의 해수면 상승 추세를 분석한 바 있다. Boon (2012)는 Quadratic regression 방법을 이용하여 U.S, Canadian tide stations, Atlantic Coast, North America에 대한 해수면 상승 추세 및 전망을 분석한 바 있다.

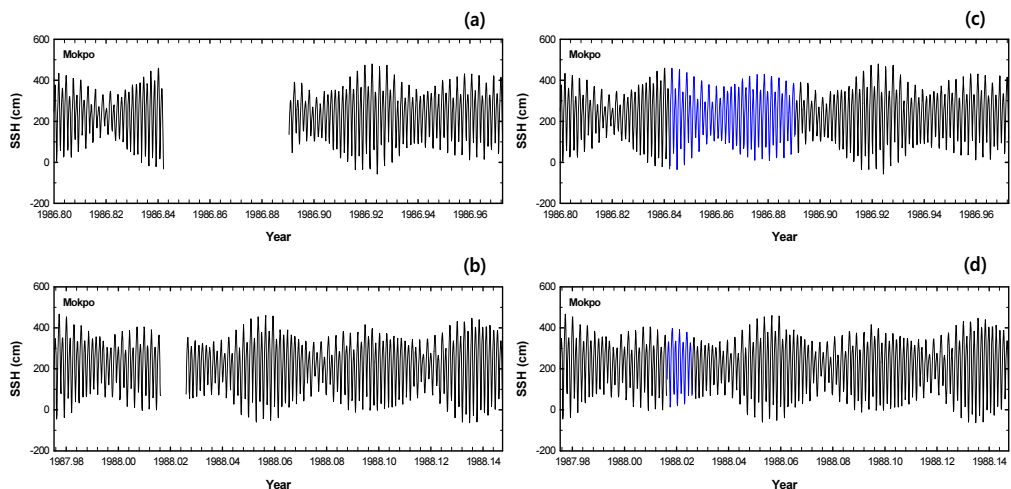


그림 8 목포지점의 조위 자료 (a)1995년과 (b)1996년 결측구간과 조화분해를 활용하여 결측구간 보간한 결과 예시 (c)1995년과 (d)1996년

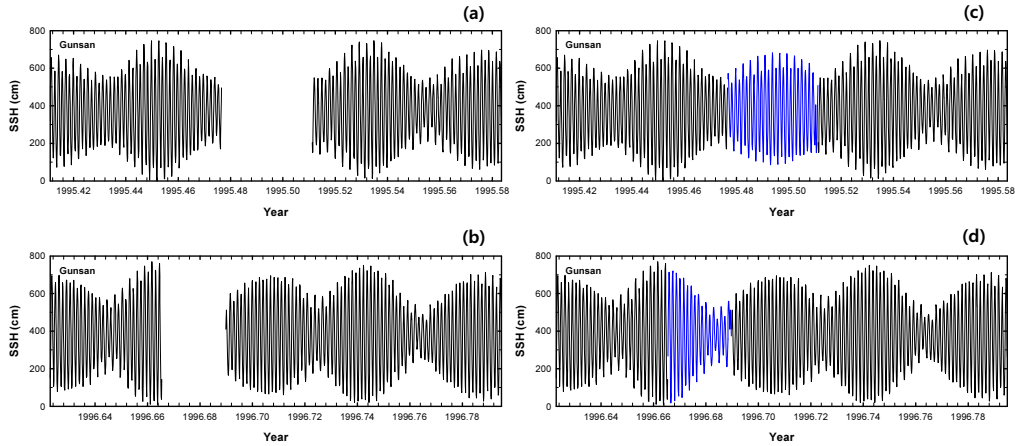


그림 9 군산지점의 조위 자료 (a)1995년과 (b)1996년 결측구간과 조화분해를 활용하여 결측구간 보간한 결과 예시 (c)1995년과 (d)1996년

2.3 해수침투모델링

해안지역 비피압대수층 (Unconfined aquifer)에서 해수침투현상을 개념도로 나타내면 그림 10와 같다. 지하수 해수침투가 발생하면, 그림 10(a)와 같이, 해수체와 담수체의 경계면이 형성이 된다. 그러나, 실제로는 해수체에서 담수체로 변화하는 염도가 점차 줄어드는 영역인 전이대 (transition zone)가 형성된다. 일반적으로 해수 침투 영역이 내륙쪽으로 들어갈수록 그 심도가 깊어지는 쐐기형태가 나타나, 이를 해수 쐐기 (seawater wedge)라 칭한다. 그림 10(a)의 h 와 z 의 관계는 Ghyben-Herzberg 관계식 (Verrjuit, 1968)에 의해서 설명이 되는데, z 는 h 의 약 40배에 해당된다는 게 그 주요 내용이다. 그림 10(b)와 같이 해수면이 상승하면 해수침투에 의해 영향을 받는 지역이 넓어진다. 일반적으로 가뭄이 심해지거나, 지하수 함양이 감소하는 등 자연적 영향에 의한 해수침투가 커지고, 양수량 증가와 같이 인공적인 원인에 의해 해수의 침투에 영향을 받는 지역이 증가하기도 한다. 특히, 그림 10(b)의 ①에서처럼 해수체와 담수체의 경계면에서 양수할 경우 상승추 현상이 나타날 수 있다. 우리나라 해안지역의 대수층은 대부분 비피압대수층(unconfined aquifer)인 경우가 많다고 알려져 있다 (Kim, 2016). 본 연구는 비피압대수층을 중심으로 해수면상승과 기후변화에 따른 해수침투 영향을 평가하였다.

지하수 해수침투영향 분석에 수치모델링기법이 널리 이용되어 왔다. 본 연구에서

는 지하수 흐름 및 용질수송 (groundwater flow and solute transport)을 3차원으로 모의가 가능한 SUTRA 모형을 활용하여 지하수 해수침투를 분석하였다. SUTRA 모형은 Finite Element Method (FEM)기반 지하수 및 오염물질 (용질, solute)을 3차원으로 모의 가능한 모형으로 (Voss, 1984), 지하수 해수침투 연구에 자주 활용되는 모형이다(예, Narayan et al., 2003). SUTRA 모형에서는 지하수, 용질, 에너지 플럭스와 관련한 수지방정식 (balance equation)은 FEM으로 수치해석하고, 플럭스와 관련되지 않는 모든 항목은 FEM mesh를 활용한 integrated Finite Difference Method (FDM)로 수치해석 한다. 본 연구에서 사용한 SUTRA 모형의 입력 및 출력 파일들을 표 1에 요약하여 제시하였다. SUTRA.FIL 파일은 SUTRA 모형의 입력과 출력 파일들이 적혀있는 필수 파일이며, .inp파일 역시 필수 입력 파일로 전체적인 모의 방법 (Steady/non-steady flow and transport, Saturated/unsaturated flow)과 FEM mesh의 각 node와 element 정보들이 들어 있다. 출력 파일 중 .rst파일은 초기조건과 경계조건을 각 node나 element별로 모두를 관측하여 입력하기 사실상 불가능하므로, cold start로 첫 번째 모형을 구동하고, 이때 모의결과 (steady state flow and transport)를 non-steady flow and transport를 위한 모의의 초기 및 경계조건으로 활용할 때 사용하는 파일이다. 이 밖에도 .obs파일은 관심이 있는 특정 node나 element들을 지정해 그 node나 element의 모의결과 값을 따로 저장해주는 파일이므로, 모형을 검정하거나 보정할 때 유용한 파일이다. 본 연구에서는 ModelMuse (Winston, 2009)을 활용하여 FEM mesh를 생성하고, 각 경계조건과 초기조건 등을 입력하여 SUTRA입력 파일들을 생성하여 모델링하였다.

지하수 해수침투는 밀도의 변화에 의한 포화흐름 (variable density saturated flow)이고, 염분이나 총용존고형물질 (Total Dissolved Solids, TDS)이나 chloride의 비반응 용질 수송 (non-reactive solute transport)이다. 따라서 지하수 해수침투에 대한 지배방정식은 다음 식 [1]에서 [3]까지 나타낼 수 있다 (Voss, 1999).

$$\rho S_{op} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial \rho}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{k\rho}{\mu} \cdot (\nabla p - \rho g) \right] = Q_p \quad [1]$$

여기서, ρ = the fluid density [ML^{-3}]

S_{op} = the specific pressure storativity [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]⁻¹

t = time [T]

ϵ = the fractional porosity [1]

U = Solute mass fraction [MM^{-1}]

k = the permeability tensor [L^2]

μ = the fluid viscosity [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$]

p = the fluid pressure [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]

g = the gravity vector [MT^{-2}]

Q_p = a fluid mass source [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$]

$$v = -\frac{k\rho}{\epsilon\mu} \cdot (\nabla p - \rho g) \quad [2]$$

여기서, v = the fluid velocity [MT^{-1}]

$$\epsilon\rho\frac{\partial U}{\partial t} + \epsilon\rho v \cdot \nabla C - \nabla \cdot [\epsilon\rho(D_m I + D) \cdot \nabla U] = Q_p(C^* - C) \quad [3]$$

여기서, D_m = the coefficient of molecular diffusion in porous medium fluid [L^2T^{-1}]

I = the identity tensor [1]

D = the dispersion tensor [L^2T^{-1}]

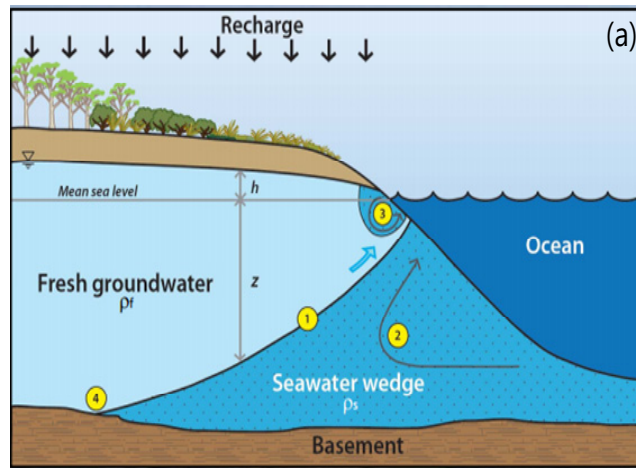
C = the concentration of solute [MM^{-1}]

C^* = the concentration of a fluid source [MM^{-1}]

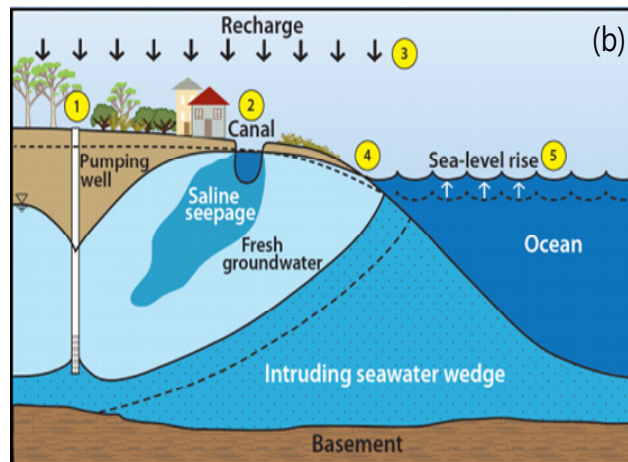
그러나 이러한 모델링의 방법에 실제 현장의 지형정보, 수리정보, 지질정보 등을 그대로 모델에 반영하기는 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 일반적으로 그림 11과 같이 현장의 상황을 간략화 하는 과정을 거치는데, 이를 conceptualization이라 하고, 각 모델링의 단계를 거치면서 더 구체화하거나 간략화 하는 수정작업을 거치기도 한다 (Li et al., 2015). 따라서 본 연구에서도 변산지구의 두 관측공에 대해 실제적 모델링이 가능하도록 conceptualization 과정을 거쳤다. 변산지구가 위치한 부안군 변산면 격포리 지역의 수리지질 분포는 충적층과 풍화대 및 기반암으로 구성이 되어 있다 (<https://www.kigam.re.kr/>). 변산1과 변산2 관측공의 주변지형 및 지질분포 (그림 12b)와 고도분포 (그림 12a)를 고려하여, 대략적인 유선분포를 추정하고 이

를 따라 단면을 펼쳐서 각 관측공의 도메인에 따른 FEM mesh를 비정형 (Irregular mesh)으로 생성하였다 (박남식 동아대 교수, Personal communication, 2016년 9월 22일). 이와 같은 방법으로 생성한 변산1과 변산2의 도메인 및 경계조건 등을 그림 13와 그림14에 각각 도시하였다. 변산1의 경우 총 5021 nodes와 4913 elements가 생성이 되었고, 변산 2의 경우에는 총 4637 nodes, 4539 elements가 생성되었다. 해안선과 지표부터 지하 5m까지는 조밀한 mesh를 생성하였고, 변산1의 경우 지표에서 25m와 28m깊이에 관측센서가 설치되어 있으므로 이 깊이에 관측노드 (node)를 위치하여 모델링 결과로 관측센서의 염도의 변화를 비교할 수 있도록 하였다. 마찬가지로 변산2의 경우, 지표에서 50m 깊이에 관측노드를 삽입하였다. 한편, 변산1과 변산2의 수리상수는 표 2에 요약하여 제시하였다. 변산1의 경우 수리전도도가 $0.2 \times 10^{-3} \text{ m day}^{-1}$ 였고, 변산2의 경우에는 $3.4 \times 10^{-4} \text{ m day}^{-1}$ 였다.

흐름 및 수송 매개변수 (flow and transport parameters, 예를 들어, 수리전도도, dispersivity)는 그 등방성과 균질성 특성에 따라 그림 15에서와 같이 총 4가지로 분류할 수 있다. 그림 15a는 매개변수가 각 축에 따라 같은 값을 갖는 등방성과, 전체 도메인에서 같은 이와 같은 값이 균질한 균질성을 보여주는 그림이며, 그림 15b는 매개변수의 값이 각 축에 따라 다른 이방성의 성질을 갖는 반면, 전체 도메인에서는 그대로 유지되는 균질성을 보여주는 그림이다. 마지막으로 매개변수의 값이 각 축에 따라 다르고, 전체 도메인에서도 다른 이질성을 보여주는 그림은 그림 15d에서 보여주고 있다. 보통 수리전도도와 같은 flow parameter들은 토양샘플을 채취한 후 실험실에서 일정수두시험 (constant head test)과 같은 방법으로 구할 수 있으나, dispersivity와 같은 transport parameter는 그림 16에서 보여주듯이 스케일에 따라서 그 값이 증가하는 이른바 “scale effect” (Gelhar et al., 1992)현상 때문에 반드시 현장에서 트레이서 시험 (tracer test)을 통해서 구해야 한다. 하지만, 본 연구에서는 여러 가지 상황상 이러한 트레이서 시험을 수행하지 못하였고, dispersivity를 활용하여 SUTRA모형을 보정 하여 dispersivity를 추정 (말하자면, 관측노드에서 관측 염도와 모의 염도의 차이가 가장 작게 될 때의 dispersivity)하였다. 향후, 변산1과 변산2 도메인에 대한 트레이서 시험 등을 통하여 transport parameter를 산정하는 노력이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 변산1과 변산2의 토양 매질이 우선 이방성과 균질성 특성을 가정하고 longitudinal dispersivity와 transverse dispersivity를 추정하였다.



Homogeneous, unconfined aquifer: the freshwater-seawater interface ① is a gradual transition in salinity rather than the commonly assumed sharp interface (as illustrated for simplicity). The interface is stationary only under long-term, constant stresses (e.g. recharge, pumping, sea level). There are two circulating seawater plumes: ② density driven ($\rho_f < \rho_s$), and ③ tidally driven. The wedge toe ④ location is the maximum seawater extent.



--- Original condition
 — Modified condition
 ① Excessive pumping
 ② Land-use change (e.g. canal development)
 ③ Reduction in recharge
 ④ Overtopping, caused by sea-level rise, storm surges, and tsunamis
 ⑤ Sea-level rise

그림 10 지하수 해수침투 개념도: (a) 초기상태 해수침투, (b) 해수면 상승과 양수 등 인공적활동에 의한 해수침투 (Adapted from Werner et al., 2013)

표 1 SUTRA 모형의 입력파일과 출력파일 (Voss and Provost, 2010)

	Filename or extension	Contents
Input files	SUTRA.FIL	File assignments
	.inp	Main input
	.bcs	Time-dependent sources and boundary conditions
	.ics	Initial conditions
Output files	.smy (SUTA.SMY)	Simulation summary
	.lst	Main results listing
	.rst	Restart file (same format as . ics file)
	.nod	Nodewise results
	.ele	Elementwise results
	.obs	Observation results
	.obc	Observation results (alternative format)
	.bcof	Fluid source/sink specifications and results
	.bcos	Solute or energy source/sink specifications and results
	.bcop	Pressure specifications and results
	.bcou	Concentration or temperature specifications and results

표 2 변산1과 변산2 관측공의 수리상수 (한국농어촌진흥공사, 2015b)

관측공	투수량계수 (Transmissivity, $\text{m}^2 \text{ day}^{-1}$)	수리전도도 (Hydraulic conductivity, m day^{-1})
변산1	2.472	0.2×10^{-3}
변산2	0.670	3.4×10^{-4}

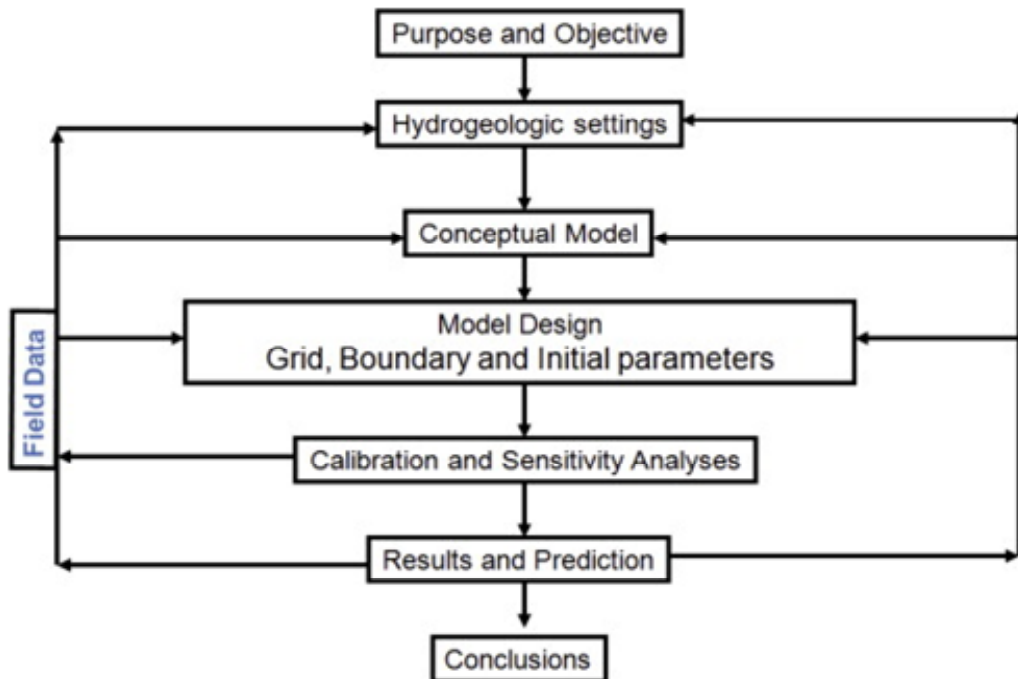


그림 11 지하수 모델링의 flow chart (adapted from Li et al., 2015)

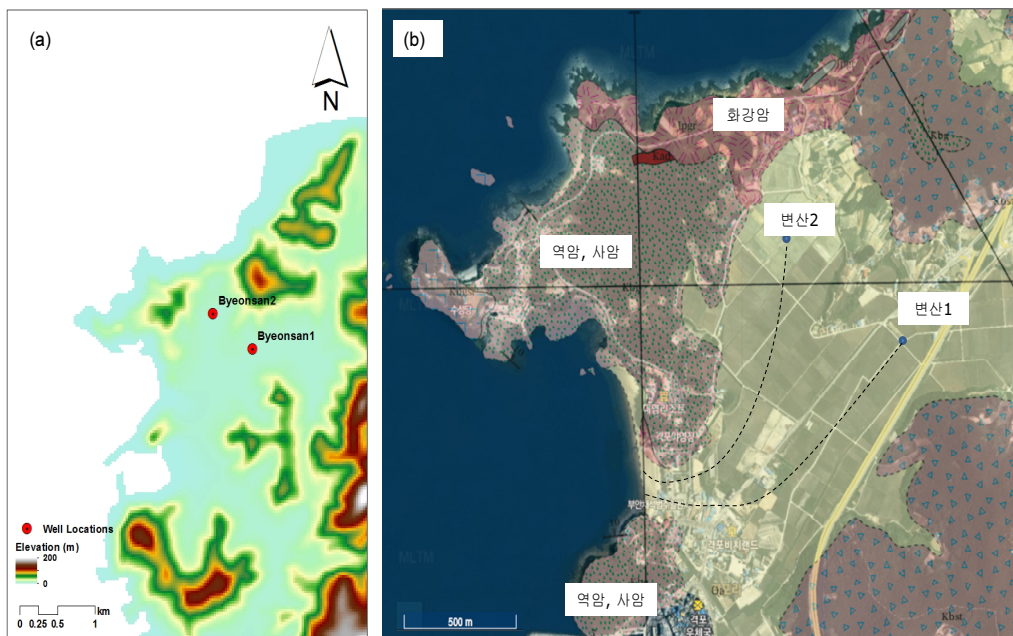


그림 12 변산지구 (변산1과 변산2)의 고도 (Elevation) (a)과 대략적인 유선 분포 (b)

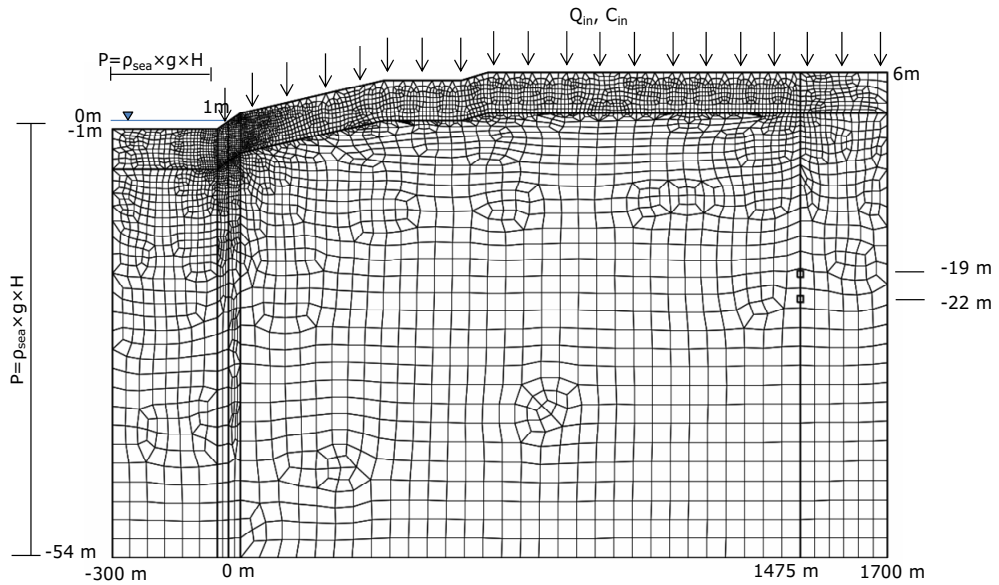


그림 13 변산1의 경계조건 및 FEM Mesh (vertical exaggeration=20×)

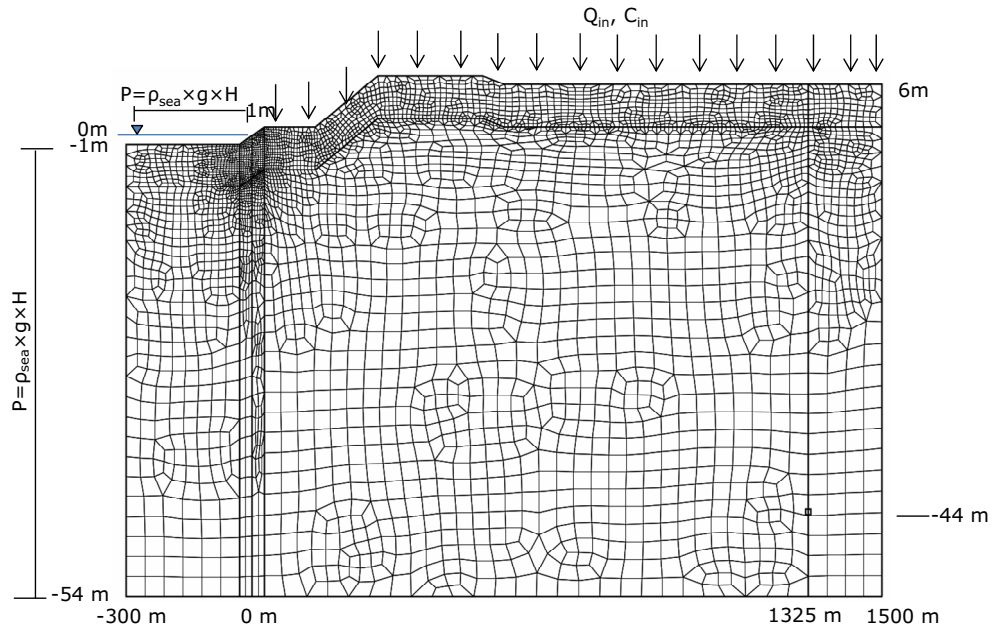


그림 14 변산2의 경계조건 및 FEM Mesh (vertical exaggeration=20×)

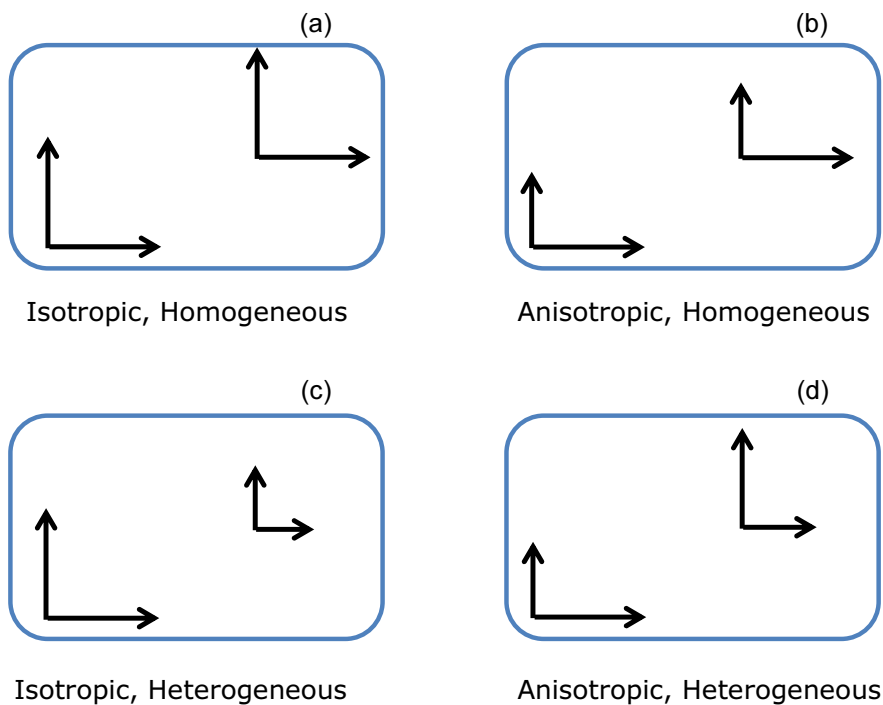


그림 15 흐름 및 수송매개변수 (Flow and transport parameters)의 등방성 및 균질성

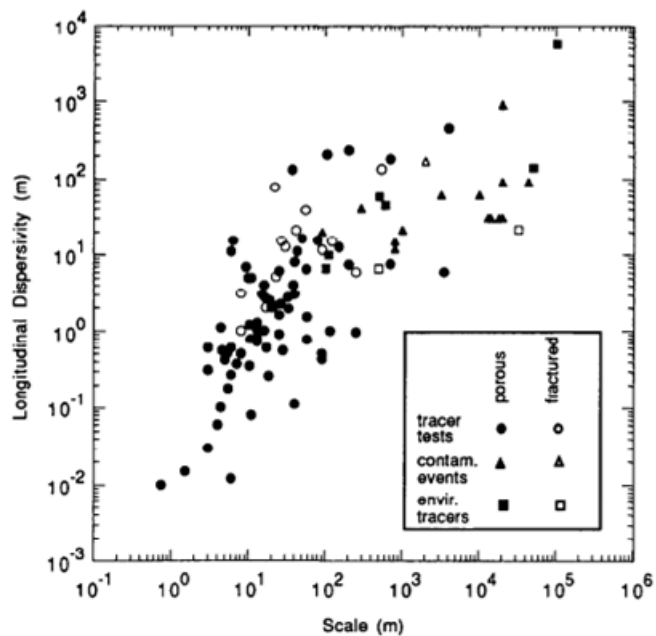


그림 16 Dispersivity scale effect (adapted from Gelhar et al., 1992)

3. 연구결과 및 토의

3.1 해수면상승전망

본 연구에서는 목포 (그림 17)와 군산 (그림 18) 조위관측소의 평균해수면 상승을 분석하기 위해 시간별 조위자료 (그림 17a, 그림 18a)를 월별 자료로 변환 하였다 (그림 17b, 그림 18b). 월별 자료로부터 계절사이클을 제거하기 위해 총 자료기간의 각 월별 평균으로부터 산정하였다 (그림 17c, 그림 18c). 이러한 방법으로 산정 한 월별 자료로부터 계절사이클을 제거한 후의 결과는 그림 17d와 그림 18d에 각각 도시하였다. 계절사이클은 목포 (그림 17c)와 군산 (그림 18c) 모두 유사한 결과를 보였는데, 8월에 최대를 보였고, 2월에 최소의 값을 보였다.

목포 조위 관측소 (그림 19a)는 분석기간 (1960-2015)동안 약 7.84cm가 상승한 결과를 보였으며, 군산 조위 관측소 (그림 19b)의 경우 분석기간 (1981-2015)동안 약 12.08cm가 상승한 것으로 나타났다. 1차 선형회귀분석에 의하면 목포 조위관측소 (그림 19a)의 경우 분석기간 동안 선형추세분석결과는 약 $1.4 \pm 0.26 \text{ mm yr}^{-1}$ (p-value: <0.0001)로 추정되었으며, 가속성분을 추정하기 위한 2차회귀분석의 결과는 가속성분 0.08 mm yr^{-2} (p-value: <0.0001)로 나타났다. Kim and Cho (2016)는 Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) 방법을 통해서 분석기간 1960-2011동안 목포의 해수면 상승 변동율은 약 3.5 mm yr^{-1} 이고, 가속 성분은 약 0.17 mm yr^{-2} 라 보고한 바 있다. 본 연구 결과와는 다소 차이가 있는데, 이는 본 연구에서 계절사이클을 제거하는 방법과 EEMD의 방법에서 오는 차이 때문인 것으로 판단된다. 군산 조위관측소 (그림 19b)의 경우 분석기간 동안 선형추세분석결과는 약 $3.45 \pm 0.49 \text{ mm yr}^{-1}$ (p-value: <0.0001)로 나타났고, 가속성분의 결과는 목포 조위 관측소와 유사한 0.08 mm yr^{-2} (p-value: 0.001)로 나타났다. 이러한 해수면 변동율은 전지구 해수면 평균 변동율 $3.4 \pm 0.4 \text{ mm yr}^{-1}$ (Nerem et al., 2010)와 비교하였을 때, 군산의 경우는 전지구 해수면 평균 변동율과 비슷한 추세를 보였으나, 목포의 경우는 전지구 해수면 평균 변동율보다 작은 추세를 보였다.

1차와 2차 회귀분석 결과를 바탕으로 2050년 평균 해수면 상승을 전망하였으며, 그 결과를 그림 20에 도시하였다. 그림 20a와 같이, 목포 조위관측소의 경우 선형추세분석 결과를 적용하면, 2050년에 현재 (2016년 기준)보다 약 4.76cm가 상승할 것

으로 전망되며, 가속성분을 적용하여 전망하였을 경우, 현재보다 약 27.86cm가 상승할 것으로 전망되었다. 군산 조위관측소 (그림 20a)의 경우, 선형추세에 의해서는 2050년에 현재보다 약 11.73cm가 상승할 것으로 전망되었으며, 가속성분을 적용할 경우, 2050년에 약 31.59cm가 현재보다 더 상승할 것으로 전망되었다. 이와 같이, 목포 조위관측소 보다는 군산 조위관측소에서 평균해수면이 더 상승할 것으로 전망되었다. 군산 조위관측소의 이러한 해수면 상승 전망결과는 변산지구의 변산1과 변산2의 해수면 상승에 따른 지하수 해수침투영향을 분석하기 위해 2050년 해수면의 경계 및 초기조건에 활용하였다.

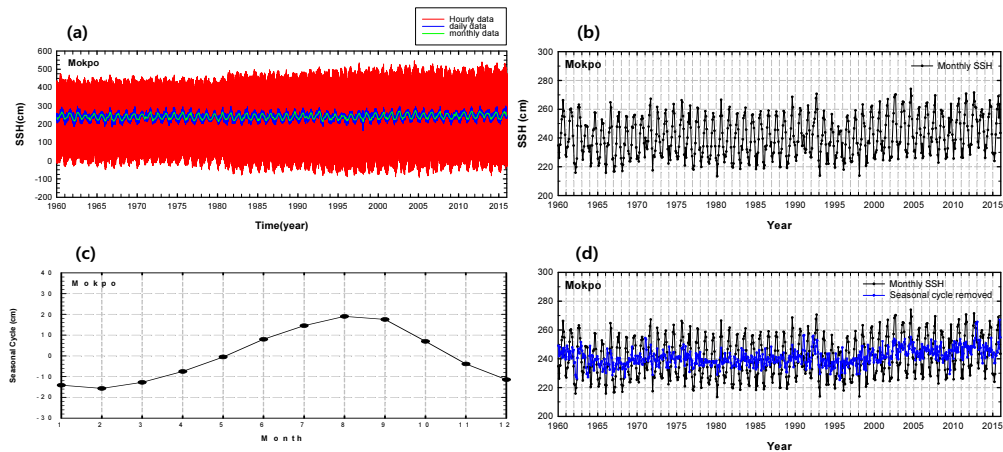


그림 17 목포지점의 (a) 시간별, 일별, 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면

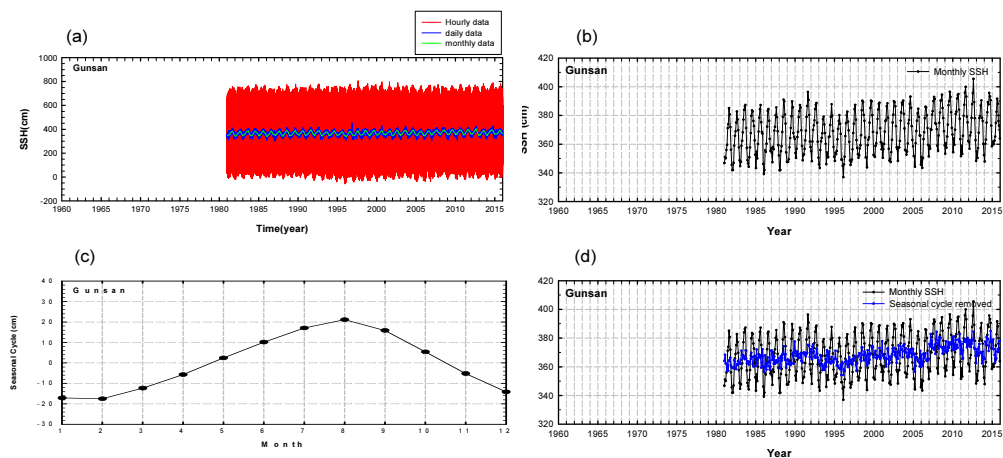


그림 18 군산지점의 (a) 시간별, 일별, 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면

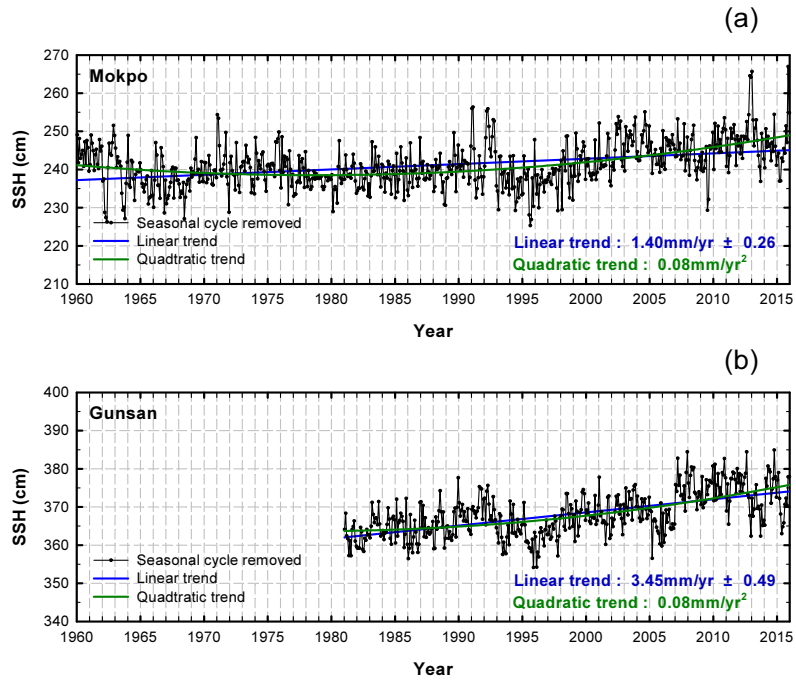


그림 19 월별 해수면과 해수면 변동 추세 분석 (a) 목포, (b) 군산

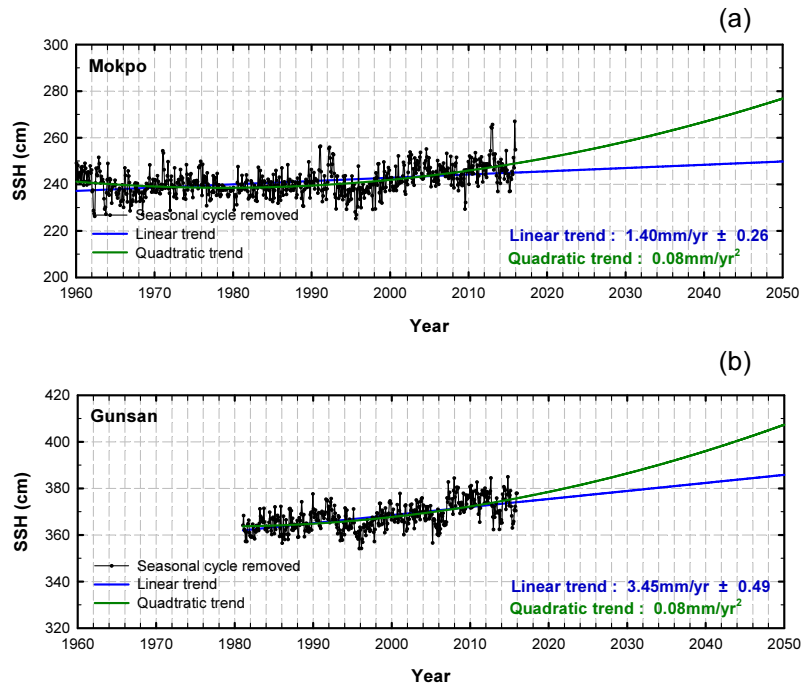


그림 20 해수면 상승 전망 (a) 목포, (b) 군산

3.2 해수침투모델링

일반적으로 함양율이 높으면 함양율이 낮은 경우보다 상대적으로 지하수의 염도를 낮추는 효과가 있으며, 반면에, 해수면이 상승할 경우 지하수 해수침투의 영향이 더 커지는 것으로 알려져 있다. 따라서 기후변화에 따른 해수면 상승의 지하수 해수침투에 대한 영향을 평가하기 위해 2050년대와 2090년대의 해수면 상승 전망과 강수량 전망을 조합하여 case study를 수행하였다. Baseline은 2005년부터 2015년까지의 해수면 높이 (0m)와 함양율 (0.00603kg s^{-1})이고, 기후변화시나리오에 따라 총 4가지 함양율과 4가지 해수면 상승 전망 시나리오를 시기 별 (말하자면, 2050년대와 2090년대)과 RCP시나리오 (RCP4.5와 RCP8.5)를 고려하여 조합하였다. 여기에 baseline의 경우를 포함하면 총 15가지의 시나리오가 나오는데, 이를 표 3에 요약하여 제시하였다. 해수면이 상승하면 해안선이 바뀌게 되고 각 노드 (node)들에 대한 수압도 달라지므로 그에 따라 적절하게 새로운 경계조건을 입력해야 한다. 예를 들어, 2090RCP45의 경우 평균해수면이 약 0.57m 상승함에 따라, 변산1과 변산2 모두 해안선의 위치는 내륙쪽으로 약 17.1m 이동하게 된다. 이러한 경계조건에서는 수압이 평균해수면이 상승한 만큼 해수면으로부터 각 노드까지 깊이를 다시 계산하여 구해야 한다. 함양율의 경우, RCP 4.5시나리오 하에서 2090년대가 0.00549kg s^{-1} 로 가장 낮았으며, RCP 8.5시나리오 하에서 2090년대가 0.00694kg s^{-1} 로 가장 높았다. 해수면 상승의 경우는 2050년 선형추세분석의 결과가 0.12m로 가장 낮았으며, RCP 8.5시나리오 하에서 2090년대가 0.72m로 가장 높은 것으로 나타났다 (표 3).

Baseline의 변산1과 변산2 관측공에 대한 지하수 해수 침투 모델링 결과는 각각 그림 21과 그림 22에 도시하였다. 관측된 전기전도도 ($\mu\text{S cm}^{-1}$)는 염도 [$\text{kg-dissolved solids (kg-seawater)}^{-1}$]로 변환하였다. 해수의 경우 약 $0.0357\text{kg-dissolved solids (kg-seawater)}^{-1}$ 의 값으로 알려져 있다. 그림 21과 그림 18에서와 같이, 해수 침투에 의한 해수빼기 (적색부분)가 변산1에서 변산2 보다 더 내륙쪽으로 진행해 있는 결과를 보여주고 있다. 변산1과 변산2의 dispersivity는 본 연구에서는 SUTRA모델링을 활용하여 추정 하였다. 변산1의 EC1과 EC2에서 관측 염도와 EC1과 EC2에 해당하는 관측 노드에서 모의 염도와 차가 가장 작게 되는 longitudinal dispersivity와 transverse dispersivity의 값을 변산1에서의 추정 longitudinal dispersivity와 transverse dispersivity로 하였으며, 변산2에서도 같은 방법으로 longitudinal

dispersivity와 transverse dispersivity값을 추정하였다. 이러한 방법으로 추정된 값은 변산1의 경우 longitudinal dispersivity가 10m이었고, transverse dispersivity는 0.05m이었으며, 변산2의 경우, longitudinal dispersivity가 10m이었고, transverse dispersivity는 0.1m로 추정되었다. 한편, Anderson (1979)는 longitudinal dispersivity와 transverse dispersivity의 비가 약 10에서 100정도의 값을 보인다고 했는데, 본 연구의 결과도 변산1의 경우 다소 그 비율이 크게 나왔으나, 전반적으로 유사한 결과를 보인다고 할 수 있겠다. 그러나 향후 longitudinal dispersivity와 transverse dispersivity의 값을 현장에서 트레이서 시험을 통해서 측정하고, 이 값과 모델링에서의 추정치와 비교하여 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 변산1 관측공의 EC1에서의 관측값과 모의값의 상대오차는 약 11.6%이고, EC2는 약 2.8%의 상대오차를 보였다. 변산2 관측공의 EC1의 관측값에 대한 모의값의 상대오차는 약 2.5%로 나타났다.

위의 총 15개 경우의 지하수 해수침투 모델링 결과를 그림 23에 나타냈다. 변산1 (그림 19a)의 경우 변산2 (그림 19b)에 비해 증감폭이 그다지 크지 않았으며, 변산1에서 관측 노드별로는 EC1이 EC2보다 증감율이 다소 컸다. 변산1에서 기후변화에 따른 함양율의 변화만을 고려했을 때, RR2090RCP85가장 큰 변화율 (EC1: -3.9%, EC2: -2.5%)을 보였고, 해수면 상승만을 고려했을 때는 2090RCP85가 증가율이 EC1이 7.83%, EC2가 5.2%로 가장 컸다. 기후변화에 따른 함양율변화와 해수면 상승을 동시에 고려했을 경우 2090RCP45_RR2090RCP45가 가장 증가율 (EC1: 8.3%, EC2: 5.4%)이 큰 것으로 나타났다. 변산2 관측공의 경우, 현재 해수면에 기후변화에 따른 함양율 변화만을 고려했을 경우 2090RCP85가 가장 증가율이 컸으며 RR2090RCP45가 현재 염도보다 약 13.3%로 가장 큰 증가율을 보였고, RR2090RCP85가 -19.6%로 가장 큰 감소율을 보였다. 해수면상승 효과만 고려했을 경우 2090RCP85가 31.7%로 가장 큰 염도 증가를 보였으나, 각 RCP 시나리오 및 연대별 강수량에 따른 함양율과 함께 고려했을 경우에는 2090RCP45_RR2090RCP45의 경우가 가장 큰 염도의 증가율 (40.3%)을 보였다. 이와 같이 변산1과 변산2 관측공의 각 시나리오별 염도의 증가율을 살펴보면, 해수면 상승 효과만 고려했을 경우에는 RCP8.5 시나리오 하에서 2090년대 (2090RCP85)가 가장 컸으나, 기후변화에 따른 함양율의 변화와 함께 해수면 상승 효과를 동시에 고려하면, RCP 4.5 시나리오 하에서 2090년대 (2090RCP45_RR2090RCP45)가 가장 크게 나타났는데, 이는 RCP 8.5 시나리오 하에서 2090년대

해수면 상승에 대한 지하수 해수침투의 영향보다, 함양율의 증가에 의한 영향이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 총 15개 경우 중 가장 큰 염도의 증가율을 보인 2090RCP45_RR2090RCP45의 모델링 결과를 그림 24 (변산1)과 그림 25 (변산2)에 나타내었다. 변산1과 변산2 모두 해수빼기 (적색부분)가 내륙쪽으로 다소 진행한 것을 알 수 있다.

표 3 해수면 상승과 함양율에 따른 case study

Case	해수면상승 (m)	함양율 (kg/s)	비고
Baseline	0	0.00603	2005-2015
RR2050RCP45	0	0.00627	2050s, RCP4.5 강수량 (1)
RR2050RCP85	0	0.00580	2050s, RCP8.5 강수량 (2)
RR2090RCP45	0	0.00549	2090s, RCP4.5 강수량 (3)
RR2090RCP85	0	0.00694	2090s, RCP8.5 강수량 (4)
2050L	0.12	0.00603	2050년 선형추세 해수면 상승 전망 (5)
2050C	0.32	0.00603	2050년 가속성분고려 해수면 상승 전망 (6)
2090RCP45	0.57	0.00603	RCP4.5시나리오 서해 평균해수면 상승전망 (7)
2090RCP85	0.72	0.00603	RCP8.5시나리오 서해 평균해수면 상승전망 (8)
2050L_RR2050RCP45	0.12	0.00627	(5) + (1)
2050L_RR2050RCP85	0.12	0.00580	(5) + (2)
2050C_RR2050RCP45	0.32	0.00627	(6) + (1)
2050C_RR2050RCP85	0.32	0.00580	(6) + (2)
2090RCP45_RR2090RCP45	0.57	0.00549	(7) + (3)
2090RCP85_RR2090RCP85	0.72	0.00694	(8) + (4)

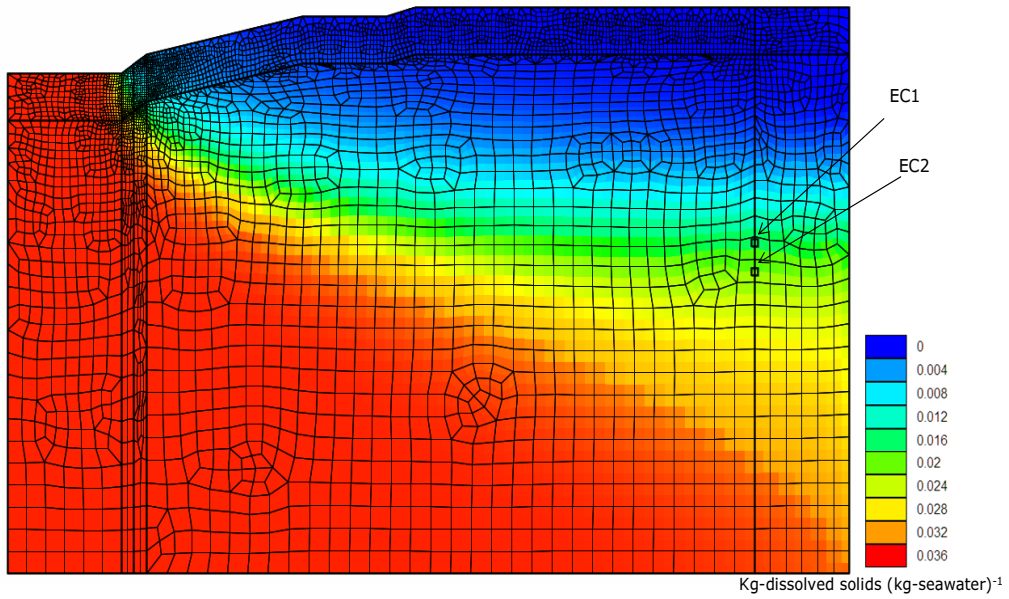


그림 21 변산1 관측공의 Baseline의 경우 지하수 해수침투 모델링 결과

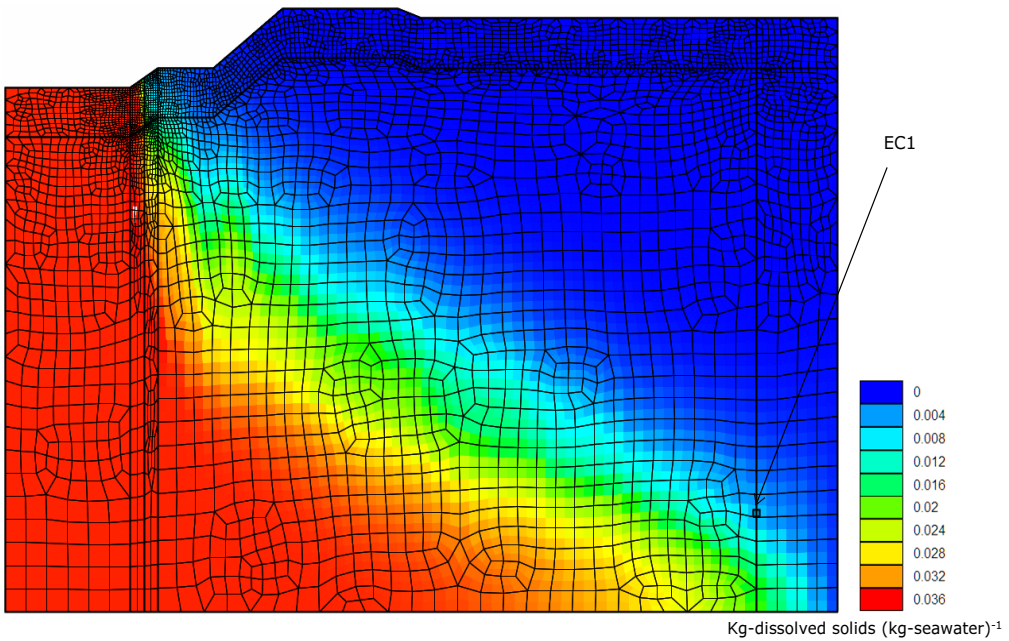


그림 22 변산2 관측공의 Baseline 경우 지하수 해수침투 모델링 결과

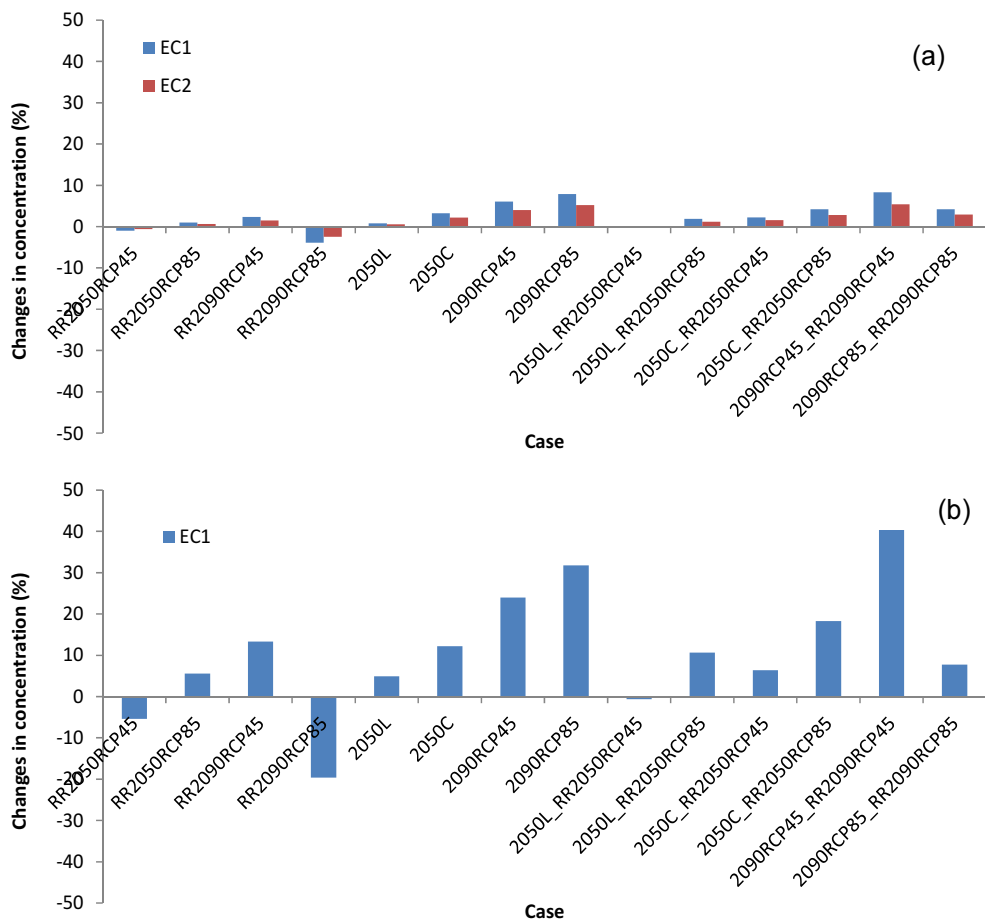


그림 23 Case 별 관측공에서의 염도 변화율: (a) 변산1, (b) 변산2

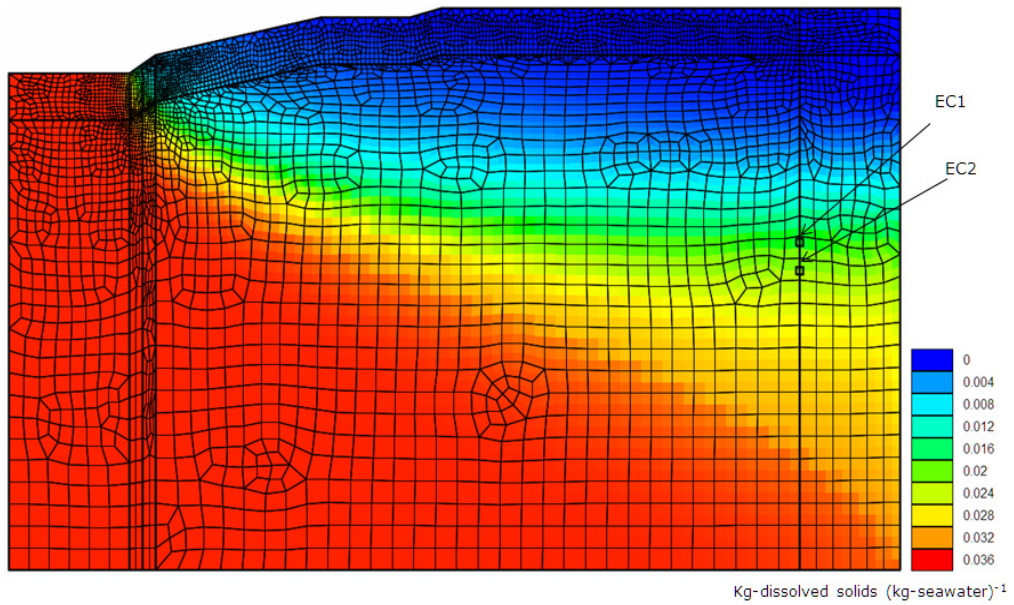


그림 24 변산1 관측공의 2090RCP45_RR2090RCP45의 경우 지하수 해수침투 모델링 결과

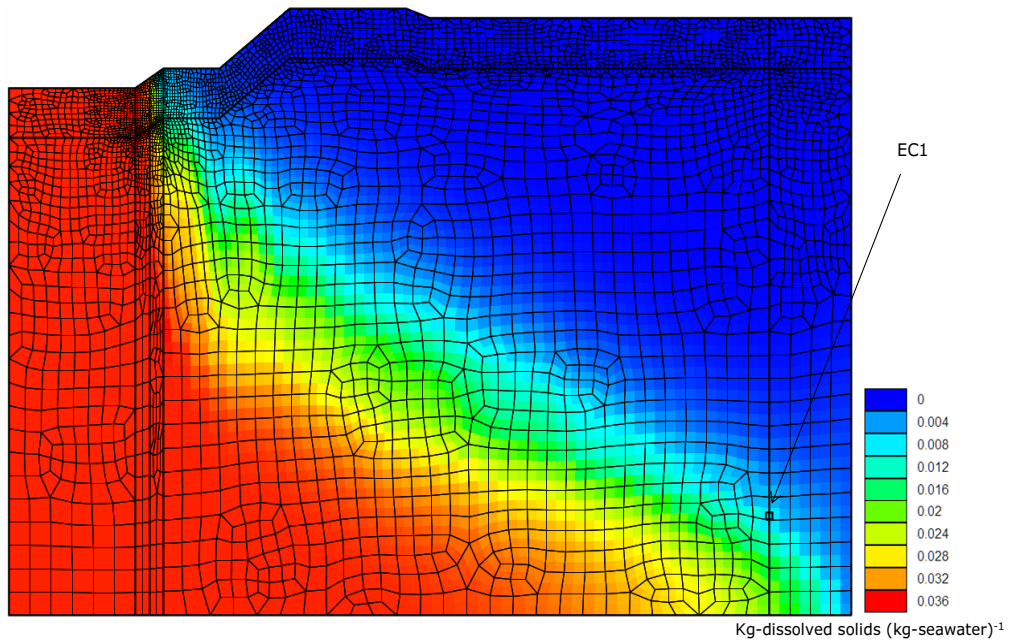


그림 25 변산2 관측공의 2090RCP45_RR2090RCP45의 경우 지하수 해수침투 모델링 결과

3.3 지하수 해수침투 저감 방안

해수빼기를 제어하는 방법에는 주입관정의 주입량을 늘리는 방법 (deep-well infiltration), 간척지를 개발하여 해안선을 바다쪽으로 이동시키는 방법 (land reclamation), 해수를 관정을 이용하여 양수하는 방법 (saline groundwater extraction), 인공적인 함양저수지를 만들어 지하수에 함양되는 양을 늘려주는 방법 (artificial recharge area), 관정의 양수량을 평소보다 줄여주는 방법 (modifying pumping rates), 물리적 차폐벽 (physical barrier)을 지하에 설치하는 방법 등 여러 가지가 있다. 이 중 변산1과 변산2는 양수나 주입을 하는 관정이 아니고 모니터링관정이므로, 주입관정의 주입량을 늘리는 방법 (deep-well infiltration)이나, 양수량을 평소보다 줄여주는 방법 (modifying pumping rates)등은 본 연구에서 적합하지 않다고 할 수 있다. 본 연구에서는 여러 해수빼기 제어 방법 중 변산1과 변산2에 적용하기 용이한 방안으로 해수를 양수하는 방법 (saline groundwater extraction)을 선택하였다. 해안쪽에 관정을 설치하여 양수량에 따라 해수빼기와 관측점 (변산1의 EC1과 EC2, 변산2의 EC1)에서 염도의 변화를 모의하도록 하였다. 이 때, 양수량은 상부와 하부에 각각 흡입펌프를 설치하여 양수량에 따른 해수빼기 및 염도의 변화를 모의 하였다. 자세한 흡입펌프 위치 및 양수량은 표 4에 요약하여 제시하였다. 모델링에서 상부의 흡입펌프는 해수빼기의 상단에 설치를 하는 것으로 가정하여 해당 노드에 양수량을 경계조건으로 입력하였고, 하부는 상부 흡입펌프설치위치와 암반과의 거리를 고려해서 설치하는 것으로 가정하였다. 상부와 하부의 흡입펌프를 각각 단독으로 가동하여 양수하는 경우와, 상부와 하부의 흡입펌프를 동시에 가동하여 양수하는 경우 세 가지로 나누어 모의하였다. 상부와 하부의 흡입펌프의 양수량은 표 4에 제시된 바대로 상부의 흡입펌프의 양수량은 변산1과 변산2 모두 0.3472kg s^{-1} 로 가정하였고, 하부의 흡입펌프의 양수량은 0.9259kg s^{-1} 로 가정하였다.

기후변화에 따른 해수면상승과 강수량의 변화를 고려한 총 15개 경우 중 가장 큰 염도의 증가율을 보인 2090RCP45_RR2090RCP45에 관정을 이용하여 해수 양수방법을 적용하였으며, 결과를 그림 26 (변산1)과 그림 27 (변산2)에 제시하였다. 그림 26과 27에서 보여주는 바와 같이, 해수빼기 (그림의 적색부분)가 흡입펌프 위치에서 변화하는 모양을 잘 나타내고 있다. 변산1의 상부 흡입펌프를 단독 가동시 (그림 26

a)에는 해수빼기의 모양이 원래 모양과 (그림 24a) 크게 변화하지 않았으나, 변산 2에서는 상부 흡입펌프만 가동하였을 경우에도 크게 변화하는 결과를 보여주었는데, 이는 변산2의 해수체와 담수체의 경계면에 위치한 상부 흡입펌프가 비교적 깊은 곳에 위치하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 양수에 의한 해수빼기 제어 모델링 결과에서 해수체는 줄어들고, 담수체가 늘어나는 경향을 분명히 보여주고 있으며, 이러한 경향은 변산2에서 더욱 두드러지게 나타났다. 변산1과 변산2의 상부와 하부의 흡입펌프 양수시 관측 노드에서 시간별 염도의 변화를 도시하였다 (그림 28과 그림 29). 변산1에서는 상부 (그림 28a)와 하부 (그림 28b)의 흡입펌프를 각각 단독으로 가동하였을 경우 초기 염도가 약간 상승하는 경향을 보였는데, 이는 해수빼기의 상승추에 의한 영향으로 판단된다. 변산1과 변산2에서의 결과를 종합하여 보면, 상부와 하부 흡입펌프를 각각 단독으로 가동하여 양수 (그림 28a, b와 그림 29a, b)하였을 때보다, 상부와 하부 흡입펌프를 동시에 가동하여 양수 (그림 28c와 그림 29c)하는 경우가 더 큰 해수빼기 제어 효과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 전체 도메인에서 해수빼기 분포 (그림 26와 23)와 동일한 결과이다. Datta et al. (2009)는 해수침투를 제어하는 해수를 양수하는 방안을 모델링하였고, 효과적인 양수계획을 수립하는 데 모델링 기법이 유용하다고 한 바 있다.

표 4 관측공별 상/하부 흡입펌프 위치 및 양수량

관측공	상부			하부		
	해안으로부터 거리 (m)	심도 (m)	양수량 (kg s ⁻¹)	해안으로부터 거리 (m)	심도 (m)	양수량 (kg s ⁻¹)
변산 1	490	-20	0.3472	490	-40	0.9259
변산 2	370	-33	0.3472	370	-44	0.9259

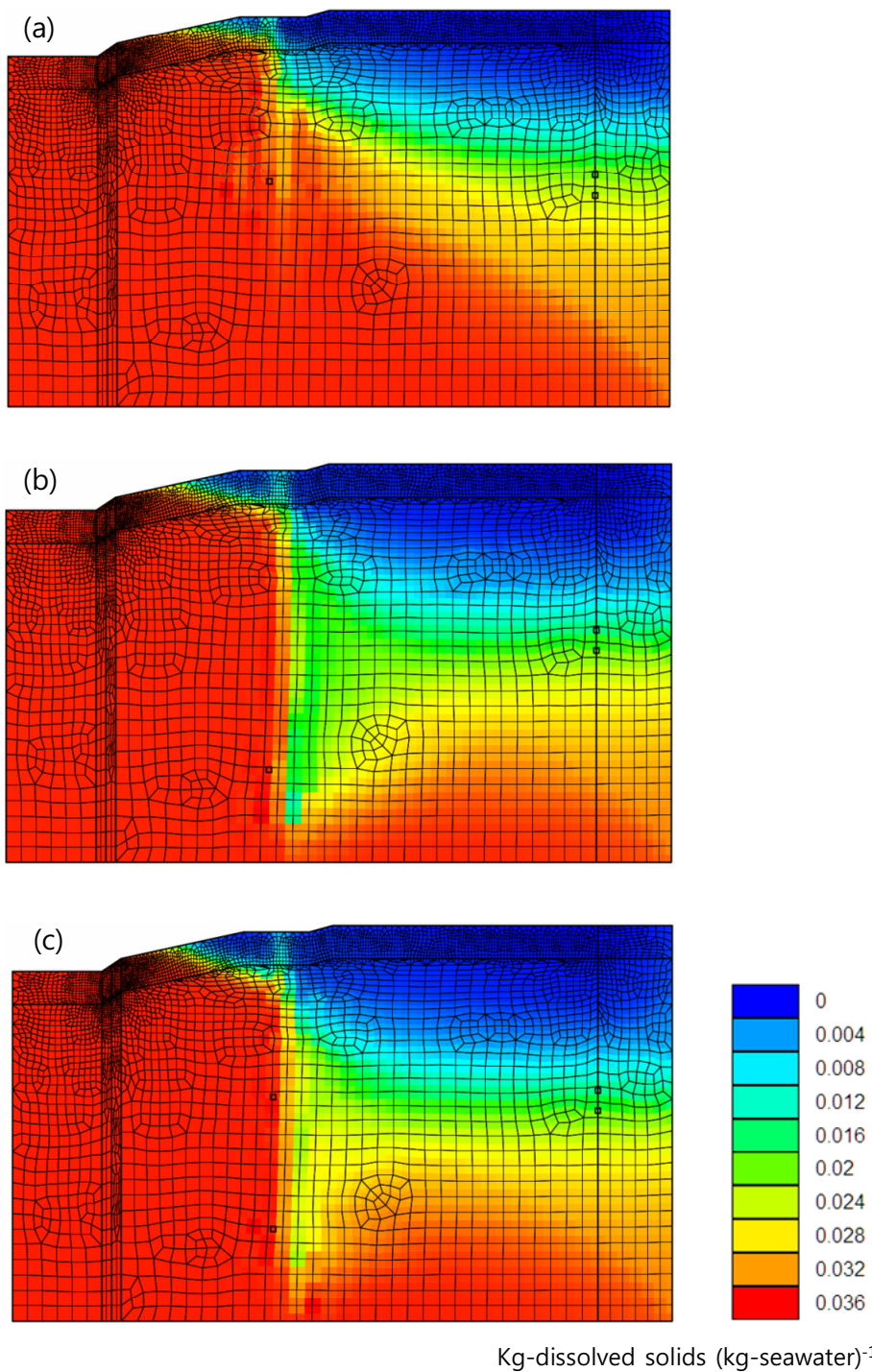


그림 26 변산1에서의 해수빼기제어를 위한 양수시험 모델링 결과 (a) 상부 (-20m) 양수, (b) 하부 (-40m) 양수, (c) 상부와 하부 동시에 양수

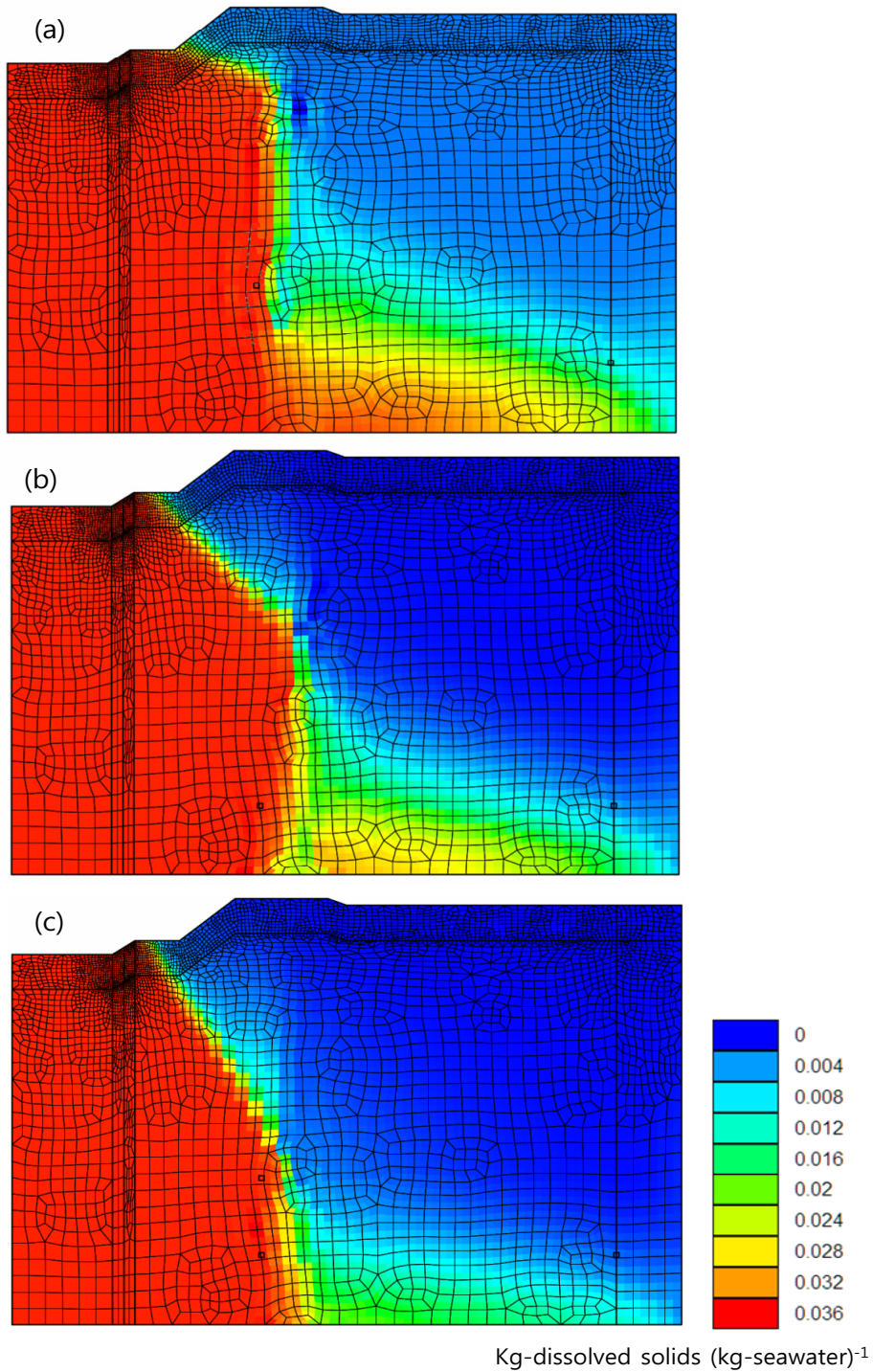


그림 27 변산2에서의 해수빼기제어를 위한 양수시험 모델링 결과 (a) 상부 (-20m) 양수, (b) 하부 (-40m) 양수, (c) 상부와 하부 동시에 양수

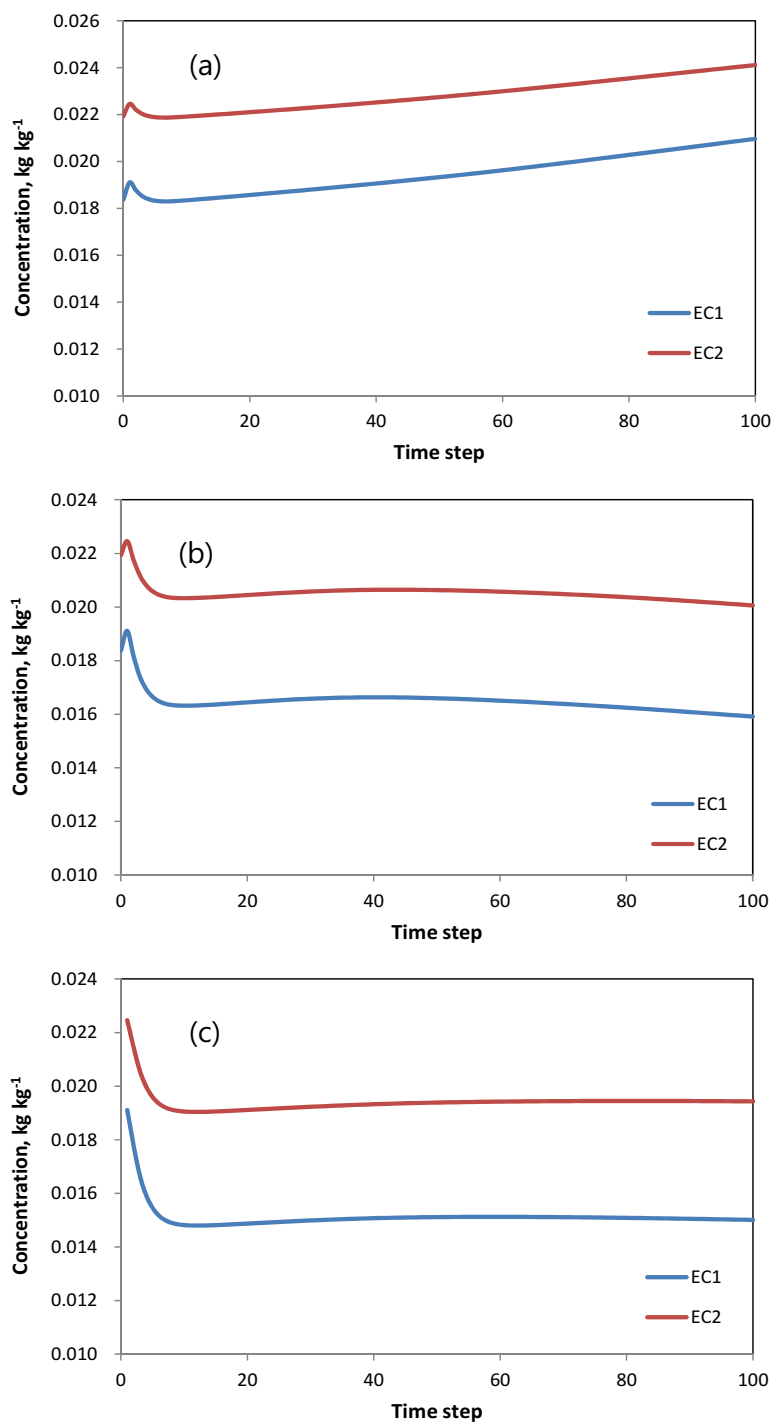


그림 28 변산1의 해수빼기 제어 양수시험 모델링 결과 (a) 상부양수시, (b) 하부양수시, (c) 상/하부 동시 양수시 염도변화 (Time step: 1=약 7일)

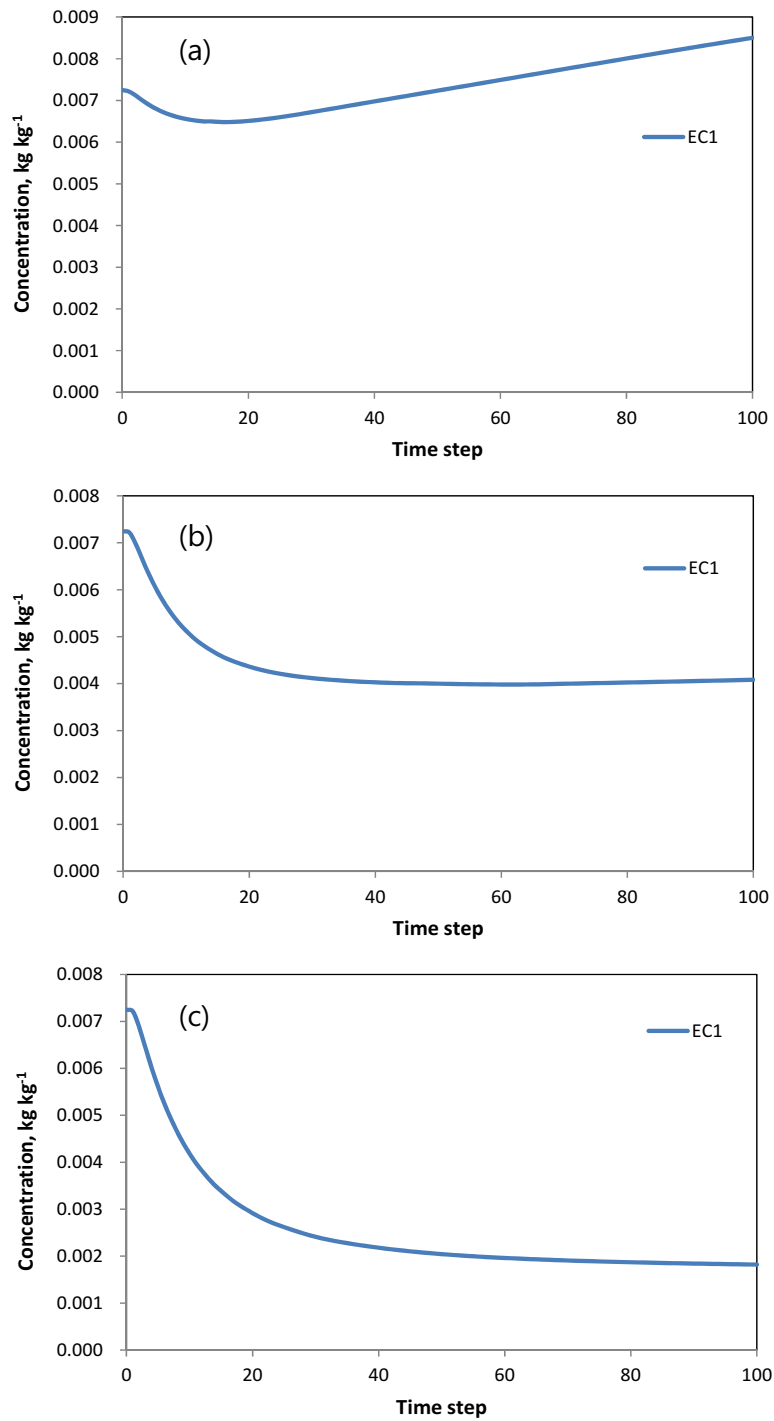


그림 29 변산2의 해수빼기 제어 양수시험 모델링 결과 (a) 상부양수시, (b) 하부양수시, (c) 상/하부 동시 양수시 염도변화 (Time step: 1=약 7일)

4. 활용방안

4.1 태평양도서국의 해수면상승전망

4.1.1 자료수집

국내에 적용한 조위자료를 기반으로 한 해수면 상승 전망방법을 기후변화에 따른 해수면 상승의 위험이 큰 태평양도서국에도 적용하였다. 태평양 도서국의 조위자료는 남태평양 해수면 및 기후 모니터링 프로젝트 (South Pacific Sea Level and Climate Monitoring Project, SPSLCMP, <http://www.bom.gov.au/pacific/projects/pslm/>)에서 내려받기 하여 수집하였다. SPSLCMP (그림 30)는 남태평양 총 14개 지점 (Cook Islands, Federated States of Micronesia, Fiji, Kiribati, Marshall Islands, Nauru, Niue, Palau, Papua New Guinea, Samoa, Solomon Islands, Tonga, Tuvalu, Vanuatu)에 대하여 1992년부터 최근까지의 해양 및 기후 정보를 제공하고 있다 (표 5). 이들 중 Niue와 Palau는 관측장비를 기반하여 자료를 제공하는 것이 아니라 다른 정보를 기반으로 조위자료를 추정하여 제공하고 있다. 한편, SPSLCMP는 시간별 또는 월별 해수면높이, 수온, 기온, 기압, 풍향, 풍속 등을 ASCII자료 형태로 제공하고 있으며, 2006년부터 매달 월보(monthly report)를 제공하며 해수면 변화 추세, 수온 아노말리 등 다양한 분석 결과를 제공하고 있다.

향후 해수면 상승 전망에 대한 지하수 해수 침투 영향을 태평양 도서국에 적용하기 위해, 우선 SPSLCMP에서 제공하는 국가 중 수자원 중 지하수가 차지하는 비율이 비교적 높은 Samoa (음용수 기준으로 약 35%를 지하수가 공급, <http://www.pacificwater.org/>)와 Port Vila와 Luganville 대수층에 대한 생활용수, 농업용수, 기타 개발용수로의 수요가 지속적으로 증가하고 있는 Vanuatu (<http://www.pacificwater.org/>)를 선정하였다. Samoa와 Vanuatu의 관측소에서는 각각 1993년 2월, 1993년 1월부터 관측을 시작하였으나, 자료품질이 초기 비교적 낮고, 결측 기간이 비교적 많은 1993년 (Samoa)과 1994년 (Vanuatu)은 분석기간에서 제외하여, Samoa는 1994년부터, Vanuatu는 1995년부터 2015년까지의 해수면 높이 자료를 분석하였다.

본 연구에서 국내에 적용한 방법을 이용하여 Samoa와 Vanuatu의 결측구간을 보완하였으며, 그 결과를 그림 31과 그림 32에 도시하였다. 두 지역의 결측 구간은 조석조화분해 프로그램(Task-2000)을 이용한 결측값의 보간 작업을 실시하였다. 참고로, SPSLCMP에서는 내려받기 한 자료는 결측구간이 비교적 많았었는데, 두 지역의 결측 구간의 정보는 다음 과 같다. Samoa의 경우, 1995년 12월, 1996년 10월, 2002년 10~12월, 2005년 2~3월, 2007년 7~8월, 2010년 5월, 2011년 3월에 대해 결측값이 나타났으며, Vanuatu의 경우 1999년 2월, 2001년 4월, 2004년 10월, 2005년 2월, 2009년 1~2월, 2011년 11월, 2012년 5월, 2014년 5월, 2015년 2월에 대해 결측값이 나타났다.

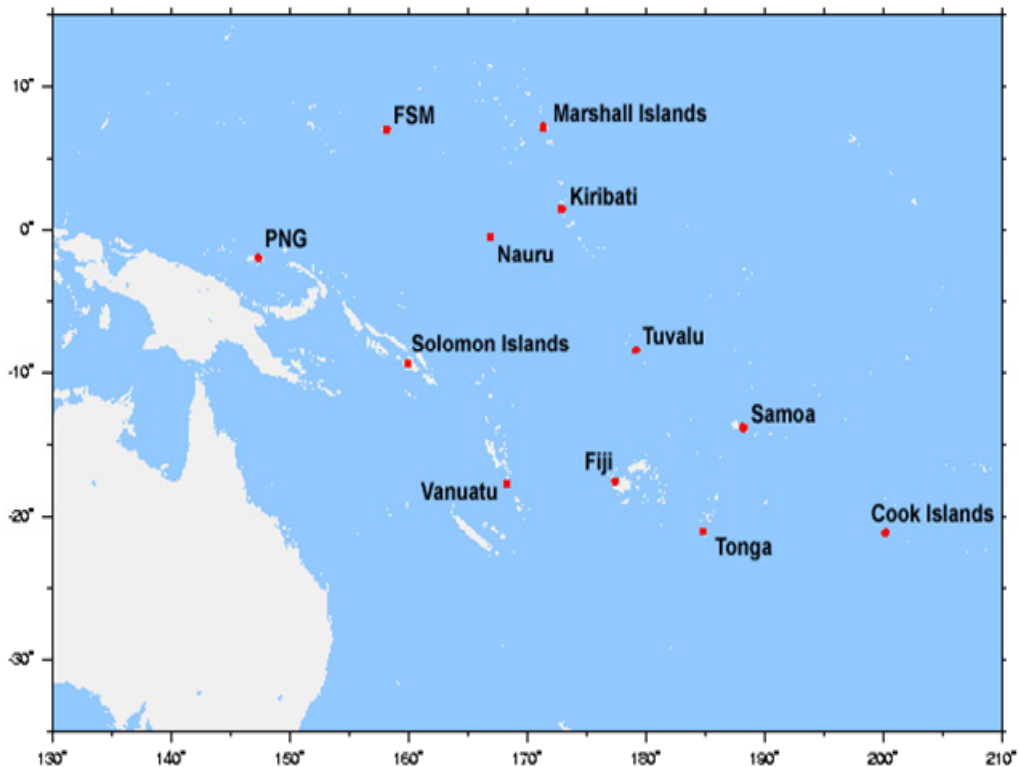


그림 30 남태평양 해수면 및 기후 모니터링 프로젝트(South Pacific Sea Level and Climate Monitoring Project, SPSLCMP) : <http://www.bom.gov.au/pacific/projects/pslm/>

표 5 남태평양 해수면 및 기후 모니터링 프로젝트 (SPSLCMP)의 위치 및 추세

Location	Latitude	Longitude	Installed	Trend (mm/yr)
Marshall	7°6'21.7"N	171°22'22.1"E	May 1993	3.8
FSM	6°58'49.9"N	158°12'0.8"E	Dec 2001	16.5
PNG	2°2'31.5"S	147°22'25.6"E	Sep 1994	5.8
Solomon Is.	9°25'44.1"S	159°57'19.3"E	Jul 1994	6.4
Kiribati	1°21'54.2"N	172°55'58.8"E	Dec 1992	2.9
Nauru	0°31'45.9"S	166°54'36.2"E	Jul 1993	3.7
Tuvalu	8°30'8.9"S	179°11'42.6"E	Mar 1993	4.0
Samoa	13°49'36.4"S	171°45'40.7"W	Feb 1993	5.4
Vanuatu	17°45'19.2"S	168°18'27.7"E	Jan 1993	5.7
Fiji	17°36'17.7"S	177°26'17.7"E	Oct 1992	4.9
Tonga	21°8'12.5"S	175°10'50.5"W	Jan 1993	8.6
Cook Is	21°12'17.1"S	159°47'5.2"W	Feb 1993	4.8

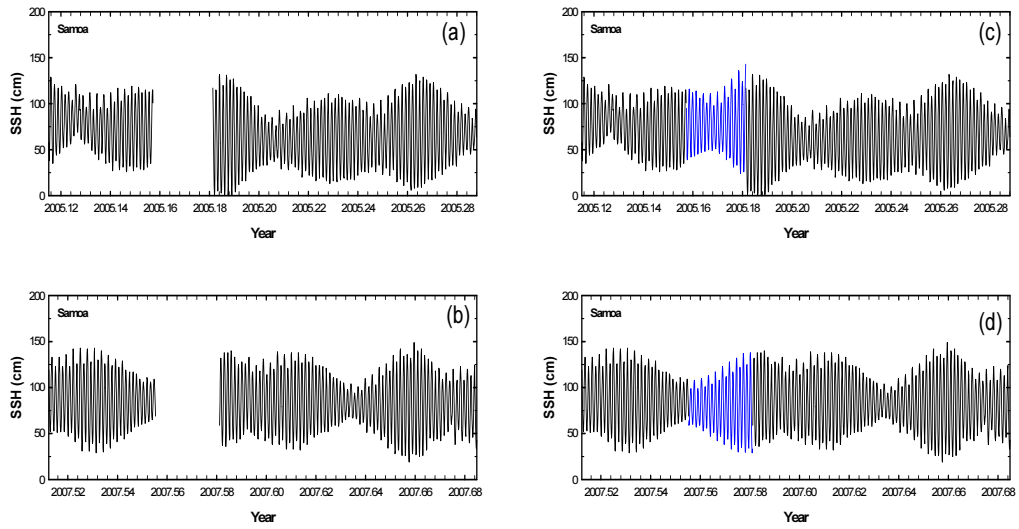


그림 31 Samoa 조위자료 결측구간 (a)와 (b) 및 조석조화분해를 통한 결측구간 보간 결과 (c)와 (d)

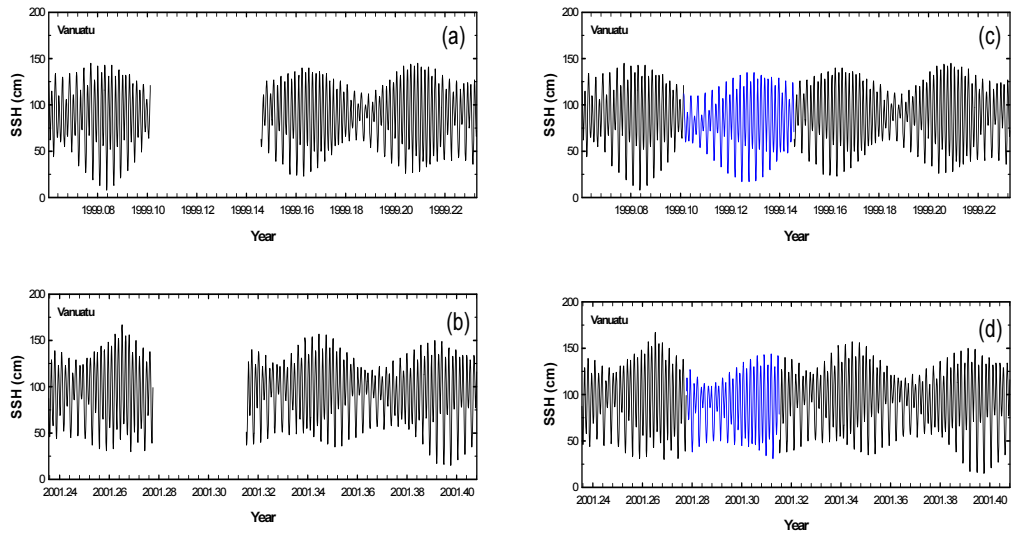


그림 32 Vanuatu 조위자료 결측구간 (a)와 (b) 및 조석조화분해를 통한 결측구간 보간 결과 (c)와 (d)

4.1.2 해수면상승전망

국내 적용사례와 마찬가지로 시간별 및 월별 조위자료 (Samoa: 그림 33a, b, Vanuatu: 그림 34a, b)로부터 계절사이클 (Samoa: 그림 33c, Vanuatu: 그림 34c)을 구하였다. 이러한 방법으로 구한 계절사이클을 제거한 후 그림 33d (Samoa)와 그림 34d (Vanuatu)에 나타내었다. 분석기간 동안의 계절사이클은 우리나라와 상당히 다른 결과를 보여주었다. 목포나 군산의 조위 관측소의 경우 8월에 최대값을, 2월에 최소값을 보여주었고, 최대와 최소의 차이가 약 40cm 정도로 비교적 컸으나, Samoa와 Vanuatu 두 지역 모두 최대와 최소 차이가 각각 약 4cm와 10cm 정도로 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. Samoa의 경우 최대값은 7월에 최소값은 3월에 보였으며, Vanuatu의 경우 최대값은 1월에 최소값은 6월로 나타났다.

Samoa (그림 35a)의 경우, 1차 선형 회귀 분석에 의하면 분석기간(1994-2015) 동안 $8.12 \pm 1.27 \text{ mm yr}^{-1}$ (p-value: <0.0001)가 상승추세로 나타났으며, 가속성분을 고려하기 위한 2차 회귀 분석에 의하면 0.37 mm yr^{-2} (p-value: 0.0008)로 가속하는 것으로 나타났다. Vanuatu (그림 35b)의 경우, 1차 선형 회귀 분석에 의하면 분석기간(1995-2015) 동안 $1.95 \pm 1.16 \text{ mm yr}^{-1}$ (p-value: 0.0009)가 상승추세로 나타났으며, 가/감속 성분을 고려하기 위한 2차 회귀 분석에 의하면 1차 선형 회귀 분석과는 다르게 2007년을 기준으로 감소 추이를 보이며 -0.45 mm yr^{-2} (p-value: <0.0001)로 감속하는 것으로 나타났다. 이는 아직 자료 기간이 그렇게 길지 않아서, 감속성분으로 나온 2차 회귀 분석의 결과를 그대로 고려하여 해수면 상승 전망을 분석하기에는 다소 적절하지 않을 것으로 판단되었으며, 본 연구에서 지하수 해수침투 모델링을 위한 평균해수면 경계조건으로 Vanuatu 결과는 제외하였다. SPSLCMP의 한 보고서 Pacific Country Report, <http://www.bom.gov.au/pacific/projects/pslm/>에 따르면 Samoa의 경우는 평균해수면 상승추세가 5.4 mm yr^{-1} 로 본 연구의 결과인 8.12 mm yr^{-1} 보다 다소 작았으며, Vanuatu의 경우도 5.7 mm yr^{-1} 로써, 본 연구의 결과인 1.95 mm yr^{-1} 와 많은 차이가 났다. Pacific Country Report의 경우 2010년도에 발간된 것으로서 자료 분석기간이 본 연구와 다소 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 FSM의 경우 다른 나라들과도 평균해수면 추세가 큰 차이가 보이는데 보고서에서는 자료기간이 상대적으로 짧기 때문으로 원인을 분석하고 보고하고 있다.

Samoa의 해수면 변화는 분석기간 (1994-2015)의 22년 동안 선형적으로 17.86cm (그림 35a)가 상승하였으며, 그림 36a에서와 같이, 이러한 상승률을 유지하면 현재 (2016년)에 비해 2050년에 약 27.61cm가 상승할 것으로 전망되었으며, 가속성분을 고려할 경우 현재에 비해 2050년에 약 98.36cm가 상승할 것으로 전망되는 결과를 보였다. Vanuatu의 해수면 변화는 분석기간 (1995-2015)의 21년 동안 선형적으로 4.07cm (그림 35b)가 상승하였으며, 그림 36b에서와 같이, 이러한 상승률을 유지하면 현재 (2016년)에 비해 2050년에 약 6.80cm가 상승할 것으로 전망되었다.

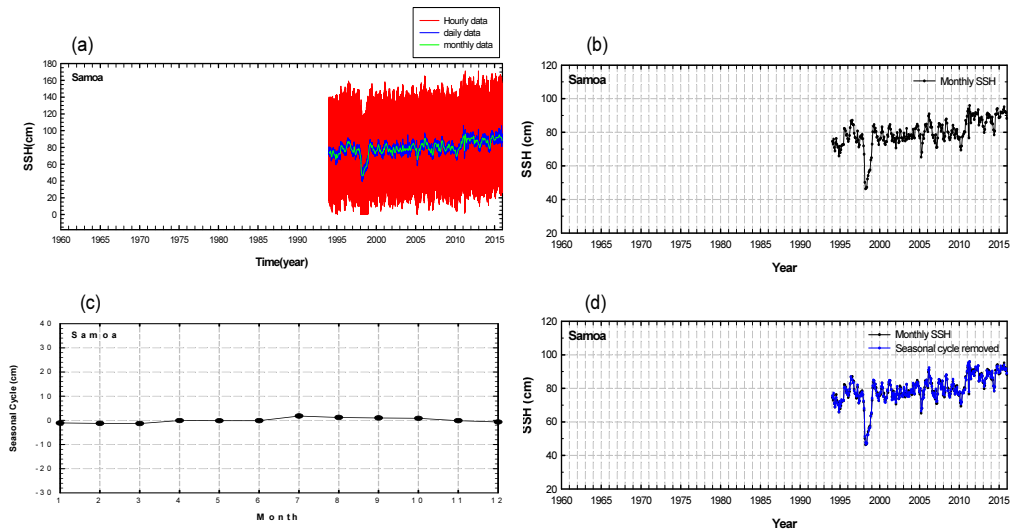


그림 33 Samoa의 (a) 시간별, 일별, 월별 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면

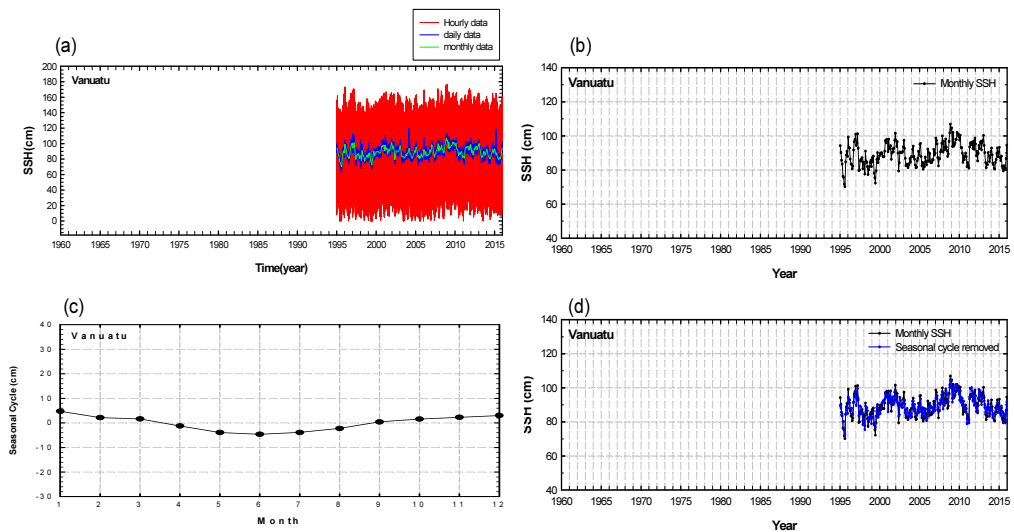


그림 34 Vanuatu의 (a) 시간별, 일별, 월별 월별 평균 해수면, (b) 월별 평균 해수면, (c) 계절 사이클, (d) 월별 해수면과 계절 사이클 제거 해수면

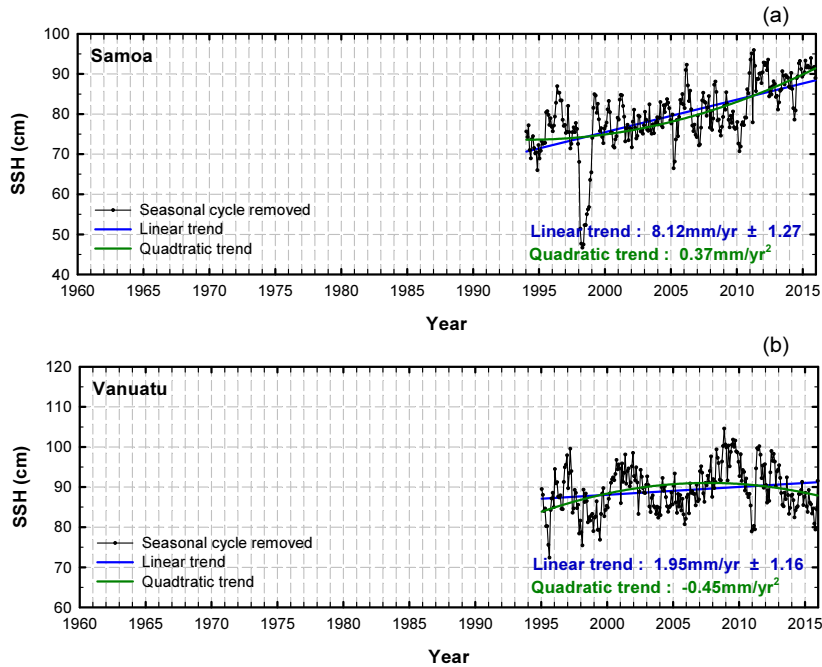


그림 35 월별 해수면과 해수면 변동 추세 분석 (a) Samoa, (b) Vanuatu

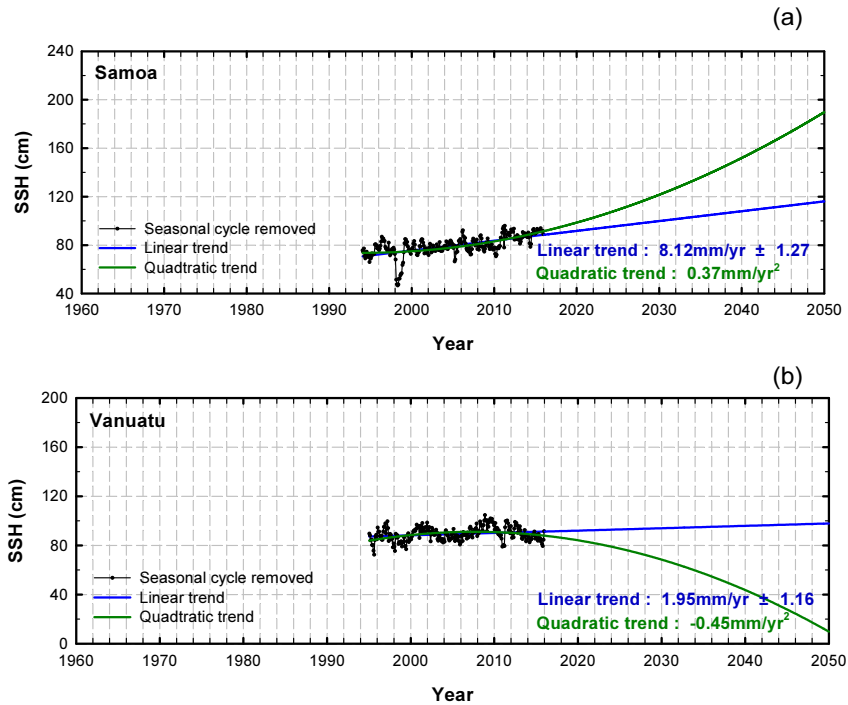


그림 36 해수면 상승 전망 (a) Samoa, (b) Vanuatu

4.1.3 해수침투모의

본 연구에서 변산지구에 적용하여 기후변화에 따른 해수면 상승에 따른 지하수 해수침투 모델링을 태도국을 대상으로 활용하기 위한 사전 단계로 섬지역을 가정하여 3차원으로 모델링 하였다. 사모아 조위자료를 활용한 가속성분을 고려했을 경우 2050년 약 98.36cm의 해수면이 상승하는 것으로 전망되었다. 이를 바탕으로 선행연구들 중 섬지역 (Voss and Provost, 2010)에서 해수침투를 연구한 사례를 기반으로 하여, 본 연구에서는 SUTRA모델을 이용하여 3차원모델링과 해수면이 1m 상승했을 경우 해수빼기 및 관측 노드에서 염도변화를 분석하였다. 관측노드는 섬 중앙에서 지하 40m 깊이의 노드로 선정하였다. 노드의 위치를 x , y , z 3차원 좌표로 표시하면 (0m, 0m, -40m)이다. 섬의 고도는 해수면에서 5m이고 섬중앙에서 500m에 해안선이 위치하는 도메인이다. ModelMuse Ver. 3.8.1 (Winston, 2009)을 이용하여 3차원 모델링을 위한 노드와 element를 생성 (그림 37, Top view; 그림 38, Front view)하였고, 도메인의 경계조건 및 초기조건은 그림 38 (Front view)에 제시하였다. 본 연구에서 생성한 총 노드수는 158834개이고 element는 150925개로 Voss and Provost (2010)의 노드수 42432개와 element수 39175개보다 훨씬 많았다. 함유율은 약 18.666kg s^{-1} 이며, 그 외 흐름 및 수송 매개변수 (flow and transport parameters)는 Voss and Provost (2010)이 제시한 값을 사용하였다. 모델링을 위한 time step 크기는 0.2년이며, 총 모의 기간은 20년이다. 그러나 향후 사모아의 섬지역에 본 SUTRA모형을 적용할 시에는 실제 측정한 흐름 및 수송 매개변수를 수집하여 사모아 섬지역의 흐름 및 수송 특성을 반영하여야 할 것이다.

해수면이 현재 상태 (말하자면, 해수면 높이가 0m)일 때 모델링 결과는 그림 39 (Top view)와 그림 40 (Front view)에 나타났다. 그림 39 (Top view)에서 보여주는 바와 같이, 해안선 주변에 해수체와 담수체의 경계가 이른바 전이대 (transitional zone)가 넓게 분포하는 결과를 나타냈다. 해수면이 현재보다 1m 상승했을 경우 같은 기간 해수체와 담수체의 변화를 모의 하였고, 그림 41 (Top view)과 그림 42 (Front view)에 도시하였다. 담수체와 해수체의 경계부근에 형성 된 전이대 (transitional zone)가 현재 상태보다 줄어들었으며, 담수체의 크기도 줄어들고, 해수체의 크기가 증가한 것으로 나타났다. 가상섬의 중앙 40m 깊이의 관측노드에서 염도의 변화는 해수면의 높이가 0m일 때 0.013kg kg^{-1} 에서 해수면의 높이가 1m 상승했을 경우

0.022kg kg⁻¹로 약 64.5% 상승한 것으로 모의되었다. 따라서 해수면 상승에 따른 해수침투가 증가하여 지하수의 염수에 의한 오염에 대비하기 위해 적절한 해수빼기 제어 방안이 필요하다고 하겠다.

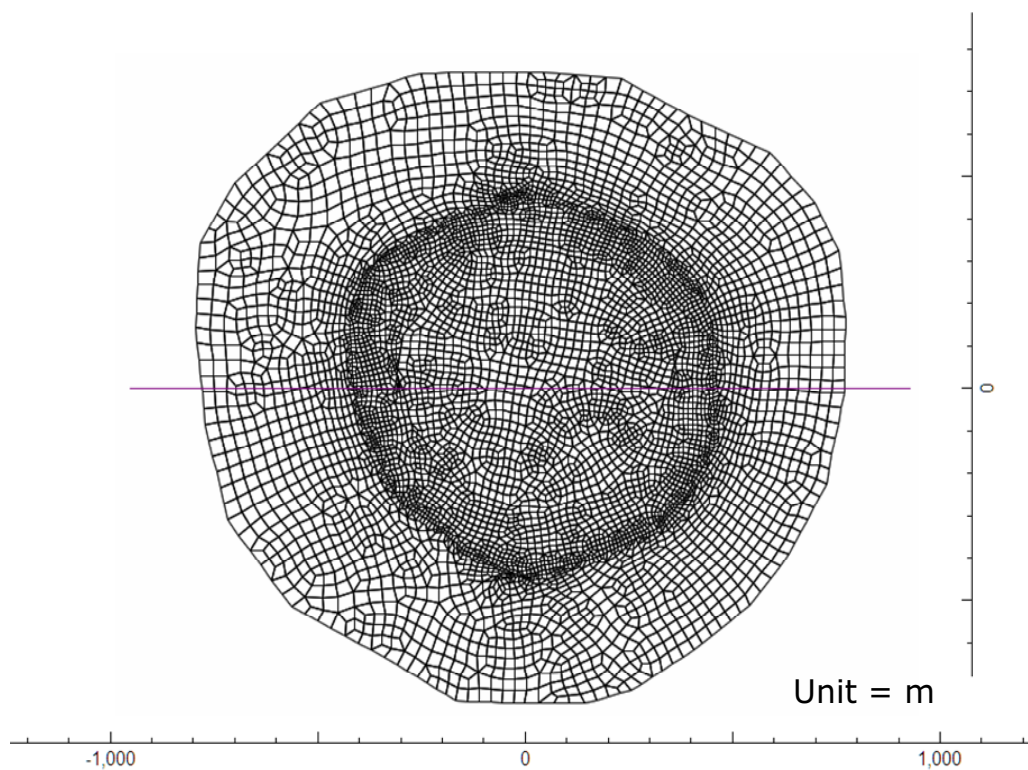


그림 37 섬지역 지하수 해수침투 3D 모델링을 위한 FEM Mesh (Top view)

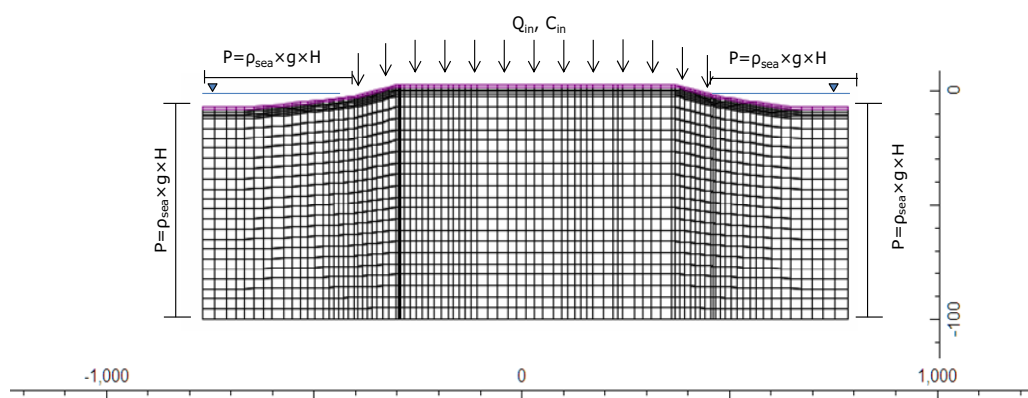


그림 38 섬지역 지하수 해수침투 3D 모델링을 위한 FEM Mesh (Front view) (vertical exaggeration=5×)

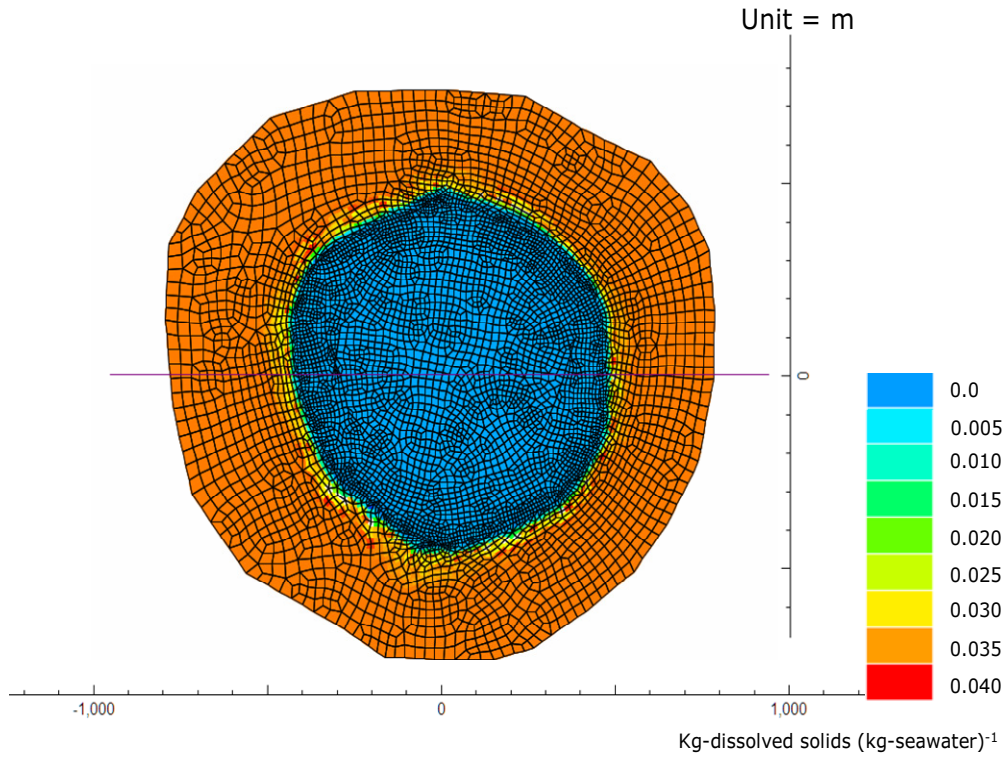


그림 39 섬지역 3D 모델링 결과 (Top view, 해수면 = 0m)

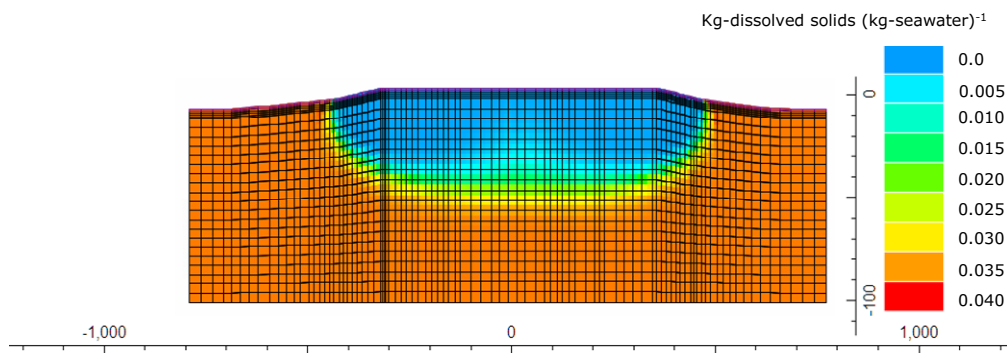


그림 40 섬지역 3D 모델링 결과 (Front view, 해수면 = 0m)

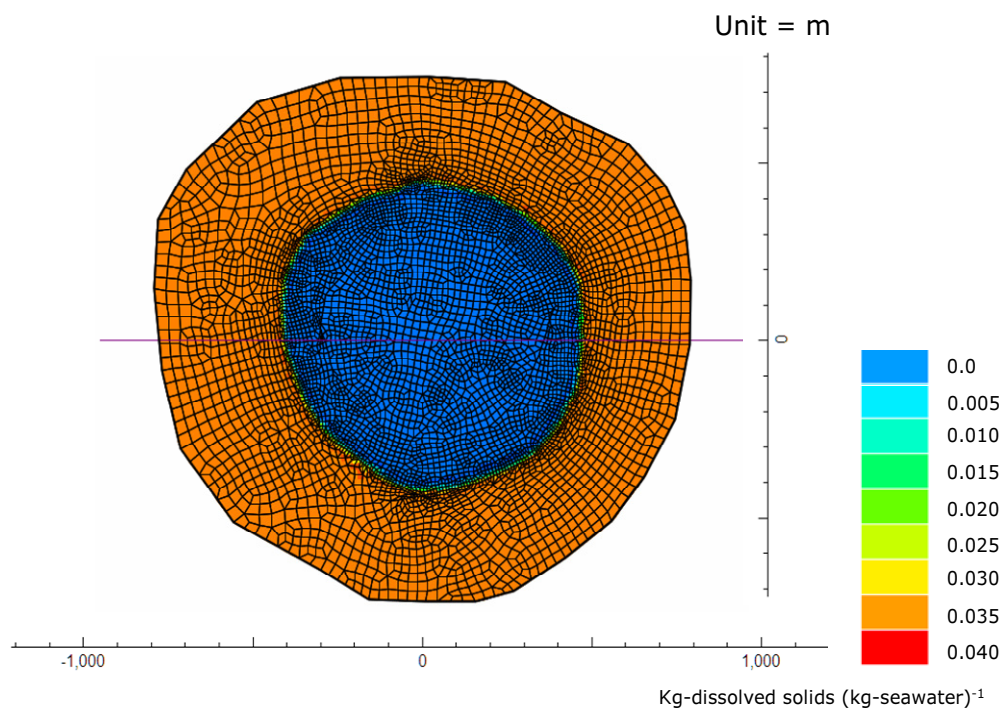


그림 41 섬지역 3D 모델링 결과 (Top view, 해수면 = 1m 상승)

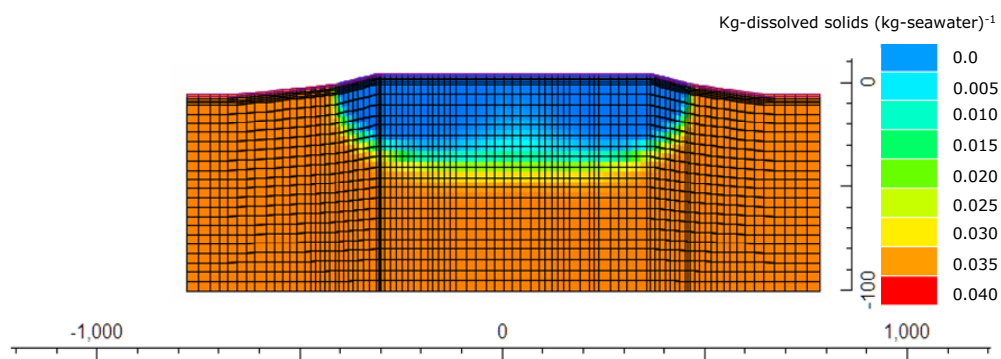


그림 42 섬지역 3D 모델링 결과 (Front view, 해수면 = 1m 상승)

4.2 해수빼기제어

본 연구의 결과에서도 보여 주듯이 기후변화에 따른 해수면상승과 강수량의 변화는 지하수 해수침투에 영향을 줄 수 있다. 특히, 해수면 상승은 지하수 해수침투의 영향이 더 증가하는 형태로 나타나 그 피해가 더욱 크다고 할 수 있다. 이러한 해수빼기를 제어하기 위해서 다양한 방법들이 사용되고 있다. 우선, 해안지역의 지하수 양수가 상승추 현상을 포함하여 해수침투를 일으키는 만큼, 해안지역에서 지하수의 무분별한 개발을 막는 방법이 있다. 이러한 방법에는 이미 개발된 지하수 관정의 취수량을 해수침투의 영향이 일어나지 않을 정도로 규제하는 방법이 포함 될 수 있으며, 해안지역을 아예 보전지역으로 지정해 개발을 원천적으로 막는 방법도 포함 된다. 이 밖에도 지하수 인공함양기술을 활용하는 방법이나 지하에 인공적인 차수벽 시설을 통한 지하수를 저장하는 지하댐을 설치하는 방법 등도 해수빼기제어에 사용할 수 있는 방안들이다.

기후변화에 따른 해수면 상승에 의한 지하수 해수침투가 증가하여 해안지역의 지하수의 농업용수 등으로 활용이 감소할 것으로 전망된다. 하지만, 본 연구의 모델링기법을 활용하여 해수빼기를 효과적으로 제어하는 방안을 다양한 케이스 스터디를 통하여 최적의 해안지역의 지하수 수자원 활용방안 등을 기대할 수 있다. 실제 관정을 설치하고 흡입펌프나 주입펌프를 설치하는 일은 많은 비용이 필요할 뿐 만 아니라, 한 번 설치하면 이동하기도 사실상 불가능하여 그 위치 및 펌프의 설치 심도도 최초 설치시 매우 신중하게 판단하여야 한다. 본 연구에서 사용한 모델링 기법을 통하여 다양한 해수 빼기 제어 방안과 관정의 위치와 펌프의 심도 등을 모의하여 최적의 방안 및 위치나 심도 등을 결정할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 해안지역에 지하수 관정을 설치하여 지하수를 취수하고 있는 상황이라면, 취수량을 규제하는 방법과 새로운 관정을 설치하고 흡입펌프를 통하여 해수를 양수하여 인공적으로 해수와 담수의 경계면을 낮추는 방법 등을 고려할 수 있다. 이때, 본 연구에서 제안한 모델링 기법을 통하여, 취수량을 규제할 때 어느 정도 양을 규제할 것인지를 모의해보고, 새로운 관정을 설치하여 해수를 양수하는 방안에서는 위치와 흡입펌프의 심도 등을 다양하게 모의 한 후, 여러 방안 들 중 최적의 방안을 결정하고 이를 제시 할 수 있다.

본 연구는 기후변화에 대한 해수면 상승과 함양율 변화를 고려한 연구이지만, 지하수위의 조석에 대한 영향 분석 등 작은 시간스케일에 본 연구와 유사한 방법을 적

용할 수 있다. 이 경우, 관측공 주변의 농업용 지하수 관정들에게 염해조기경보시스템 등 개발에 활용하여 농민들에게 염해피해를 줄일 수 있는 제안 등을 할 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 그림 43에서 보여주는 바와 같이, 변산1과 변산2 관측공 주변에는 농업용 지하수 관정이 다수 설치되어 이 지역의 지하수가 농업용수 등에 이용되고 있다. 현재는 농민들이 해수에 오염된 지하수를 양수하여 관개하여 농작물의 피해를 막기 위해, 해수침투관측망 관측공의 관측 기반으로 농민들에게 염해피해가 우려되는 전기전도도가 관측되었을 경우, 지하수를 관개용으로 이용하지 않도록 농민들에게 통보하는 구조이다. 이 경우에는 이미 관개를 위해 지하수에서 취수한 농민들은 피해를 볼 수 밖에 없는 단점이 있다. 본 연구에서 사용한 모델링 기법을 활용하면, 비교적 조기에 염해피해가 예상되는 염도를 예측하고 경고를 해 줄 수 있는 염해조기경보시스템 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대 된다. 염해조기경보시스템에는 지하수 함양을 산정을 위한 강수량 예측이 중요한 예측정보가 될 것이므로 APCC의 계절예측 자료나 S2S 예측정보의 활용성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.



그림 43 변산지구의 농업용지하수관정분포

현재 APCC의 수자원 및 농업부문 등 응용부문에서는 기후변화시나리오, 계절예측 자료, S2S 예측정보 등 다양한 시간 스케일의 기후정보를 활용한 연구를 수행하고 있다. 그러나 대부분의 APCC의 연구는 농업수자원을 포함한 수자원분야를 살펴보면, 댐, 저수지, 하천 등 지표수 관련한 연구에 집중이 되어 있는 실정이다. 본 연구를 통해 현재 수자원분야에 집중 되어 있는 APCC 응용분야의 연구를 지하수 분야로 확대하여, APCC 응용분야 연구의 다양성을 확보할 수 있을 것으로 기대 된다. 또한, 이를 통하여 지하수 관련한 APCC 자체 기술 확보를 통하여 개발도상국의 수자원 개발 등에 APCC 자체 기술로 참여 할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 본 연구에서 사용한 모델링기법은 토양 및 지하수오염 복원기술에 활용이 가능한 방법이다. 토양 및 지하수 오염 복원기술 뿐만 아니라, 토양이나 지하수 내의 오염물질의 이동을 예측하는 데에도 본 연구의 모델링 기법은 유용하며 주로 사용되고 있다. 일반적으로 토양이나 지하수 등의 매질에서 오염물질의 이동은 이류-

확산-반응 방정식 (Advection-Dispersion-Reaction Equation)에 의해 설명이 가능하고, 본 연구에서 활용한 기본 지배방정식 (식 [1]에서 [3])도 이류-확산-반응 방정식을 기본으로 하므로, 본 연구의 모델링기법을 확대 적용하여 토양 복원 및 지하수 오염 복원 기술에 확대해 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

5. 요약 및 결론

우리나라 전체 평균 해수면은 RCP4.5 시나리오하에서 2100년에 65cm (동해 79.5cm, 남해 58.1cm, 서해 57.3cm), RCP8.5 시나리오하에서 83.8cm (동해 108.1cm, 서해 72.4cm, 남해 70.8cm)가 상승할 것으로 전망하고 있다. 우리나라는 간척지를 많이 개발하였는데, 3개 해역 중에서는 서해안에 집중되어 분포하고 있다. 우리나라 인구 중 약 976천명은 상수도 미급수 인구로 분류되고 있으며, 대체 수자원은 대부분 지하수로 나타나고 있으며, 이 중 약 83%에 해당하는 805천명은 농어촌 읍면단위에 생활하고 있다. 지하수가 하천이나 저수지가 개발되지 않은 지역에서는 농업용수의 대부분을 차지하고 있는 실정이다. 바다와 인접한 간척지의 경우 가뭄상황에서 이미 염피해를 입고 있는 지역이 발생하고 있으며, 우리나라에서는 특히 서해안에서 해수침투 영향이 더 심각하다고 보고한 바 있다 (양정석 등, 2011)

본 연구에서는 SUTRA모형을 변산1과 변산2의 해수침투관측공에 적용하여 지하수 해수침투를 모의하였으며, baseline 기간 (2005-2015, 해수면 0m)의 관측점의 관측 염도와 비교하였다. 먼저 군산 조위관측소의 조위자료를 분석하여 2050년 해수면 상승을 총 4가지의 경우를 전망하였으며, RCP4.5와 RCP8.5시나리오에 따른 강수량 전망자료로부터 지하수 함양율을 4가지 경우로 산정하였다. 이러한 4가지 해수면 상승전망자료와 4가지 지하수 함양율을 조합하여 baseline (2005-2015, 해수면 0m)을 포함하여 총 15가지 경우에 대하여 SUTRA 모델링을 통하여 해수면상승과 함양율의 지하수 해수침투 영향을 분석하였다. 이 중 관측점에서 가장 많은 염도의 증가를 보인 경우에 해안쪽에 관정을 설치하고 흡입펌프를 이용하여 해수를 양수하는 방안을 SUTRA모형에 적용하여 해수빼기제어 시험을 모델링하였다.

본 연구에서는 PSMSL에서 개발한 TASK-2000이라는 조화분석 프로그램을 사용하여 군산과 목포의 조위자료를 활용하여 해수면 상승 추세를 분석하고 2050년의 평균해수면 상승을 1차회귀방법과 2차회귀방법 (해수면 변동률의 가/감속률 고려)을 통하여 전망하였다. 본 연구의 해수침투 모델링 대상지인 변산1과 변산2 관측공과 가까운 군산 조위관측소의 결과를 살펴보면, 분석기간 (1981-2015)동안 약 12.08cm가 상승하였으며, 선형추세분석결과 전지구 해수면 평균 변동율과 비슷한 약 3.45mm yr⁻¹로 나타났고, 가속성분은 0.08mm yr⁻²로 나타났다. 이러한 변동추세와 가속성분

을 고려하면 각각 2050년에 11.73cm와 약 31.59cm가 현재보다 더 상승할 것으로 전망되었다. 이 두가지 경우와 서해 해역의 RCP시나리오에 따른 평균해수면 상승 전망 2가지 경우를 더하여 총 4가지 평균해수면 상승 시나리오를 SUTRA모델링에 적용하였다. 또한 2050년대와 2090년대의 RCP시나리오에 따른 연평균강수량을 산정하고 이의 10%를 지하수 함양율로 적용하는 관용적인 방법으로 총 4가지 지하수 함양율시나리오를 추정하였다 (2050년대 RCP4.5: 0.00627kg s^{-1} , 2050년대 RCP8.5: 0.0058kg s^{-1} , 2090년대 RCP4.5: 0.00549kg s^{-1} , 2090년대 RCP8.5: 0.00694kg s^{-1}). 이러한 총 4가지 해수면 상승 시나리오와 4가지 함양율을 해당 시기와 RCP시나리오를 고려하면, 총 14가지 경우로 나타난다. 이를 해수면 상승과 기후변화에 따른 강수량의 변화가 지하수 해수침투에 미치는 영향을 분석하기 위한 SUTRA 모델링의 경계조건으로 활용하였다.

SUTRA모델을 활용하여 baseline에 대한 적용 결과, 변산1 관측공의 두 개의 관측점 (EC1과 EC2)에서의 관측값과 모의값의 상대오차는 약 11.6%와 약 2.8%이었으며, 변산2 관측공의 관측점 EC1에서의 상대오차는 약 2.5%로 나타났다. Baseline기간을 제외한 총 14가지 시나리오에 대한 변산1과 변산2의 관측점에서 염도의 변화는 변산1 (그림 19a)의 경우 변산2 (그림 19b)에 비해 증감폭이 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 증감폭이 큰 변산2를 살펴볼 경우, 해수면 상승만 고려했을 경우 2090RCP85가 증가율이 관측점 EC1에서 31.7%로 가장 큰 염도 증가를 보였으나, 함양율을 같이 고려했을 때는 2090RCP45_RR2090RCP45의 경우가 약 40.3%로 가장 큰 염도의 증가율을 보였다. 이는 해수면 상승에 따른 염도의 증가효과 (해수침투)를 함양율의 증가가 상쇄하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 해수면 상승에 따른 지하수 해수침투의 영향을 분석하기 위해서는 미래기후에 대한 강수량의 전망을 같이 고려하여야 좀 더 정확한 영향을 평가할 수 있음을 의미한다. 이 시나리오의 경우 해수빼기가 baseline기간에 비해 내륙쪽으로 다소 진행한 결과를 보여주고 있다 (그림 24와 그림 25). 이 시나리오에 해안쪽에 (변산1: 490m, 변산2: 370m)에 관정을 설치하고 해수를 양수하는 해수빼기제어시험을 모델링으로 구현하였다. 상부 (변산1: 20m, 변산2: 33m)와 하부 (변산1: 40m, 변산2: 44m) 흡입펌프를 설치하여 상/하부 흡입펌프 동시 양수 (그림 28c와 그림 29c)시 해수빼기 제어 효과 더 큰 것으로 나타나, 해수 양수 방안 (saline groundwater extraction)이 효과적으로 해수빼기를 제어하고 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서 적용한 해수면 상승 추세분석과 지하수해수침투 모델링 기법을 태평양도서국 (태도국)에 적용하기 위해 우선 SPSLCMP는 남태평양 Samoa와 Vanuatu를 포함한 총 14개 지점의 조위자료를 이용해서 평균해수면 상승추세를 분석하였다. 태평양도서국에 지하수해수침투 모델링 기법을 적용하기 위해서는 현실적으로 지하수 수위 및 지하수 수질 등의 관측자료를 수집하기에 매우 제한적이다. 따라서 향후 연구에서 Samoa나 Vanuatu 등의 태도국에서 지하수 관련한 자료나 지형 및 지질 자료를 수집하여 SUTRA모형을 적용하여 지하수 해수 침투 및 해수썰기제어 시험을 모델링을 수행하기로 하였으며, 현 단계에서는 섬으로 구성된 태도국의 상황을 반영한 섬지역의 선행연구사례를 기반으로 한 도메인으로 모델링을 수행하였다. Samoa의 경우, 분석기간 (1994-2015)의 동안 평균해수면이 선형적으로 17.86cm가 상승하였으며, 현재 (2016년)에 비해 2050년에 약 27.61cm 가 상승할 것으로 전망되었다. 가속성분을 고려할 경우에는 2050년에 현재 평균해수면보다 약 98.36cm 가 상승할 것으로 전망되었다. Vanuatu의 경우는 분석기간 (1995-2015)동안 선형적으로 4.07cm가 상승한 것으로 나타났으며, 이러한 선형추세가 지속되면 2050년에 현재 평균해수면보다 약 6.80cm가 상승할 것으로 전망되었다. 그러나 Vanuatu의 경우 2차회귀방법에 의해서는 감속성분으로 나타나 본 연구에서는 제외하였다. 본 연구에서는 해수면상승의 지하수 해수침투영향을 큰 시나리오를 고려하기 위해 Samoa의 가속성분을 고려한 현재보다 약 1m 상승하는 경우를 모델링하여 해수면이 0m일 때와 해수썰기의 범위와 섬 중앙에서 40m심도에 관측 노드를 추가하여 해수면 상승 전후의 염도의 변화를 모델링하였다. 해수면의 높이가 1m 상승했을 경우에 담수와 해수의 경계면에 형성되는 전이대가 줄어들었으며, 담수체의 크기도 다소 줄어드는 결과를 보였다. 섬 중앙 40m심도에서 염도의 변화는 해수면 높이가 1m상승했을 경우 (0.022kg kg^{-1}), 해수면 높이가 0m일 때 (0.013kg kg^{-1})보다 약 64.5% 상승한 것으로 나타났다.

해수썰기를 제어하는 방법 중에 다음 과 같은 방안들은 모두 본 연구에서 적용한 SUTRA 모델을 활용하여 다양한 시나리오를 모의할 수 있는 방안들이다.

- (1) 주입관정의 주입량을 늘리는 방법 (deep-well infiltration)
- (2) 간척지를 개발하여 해안선을 바다쪽으로 이동시키는 방법 (land reclamation)

- (3) 해수를 관정을 이용하여 양수하는 방법 (saline groundwater extraction)
- (4) 인공적인 함양저수지를 만들어 지하수에 함양되는 양을 늘려주는 방법 (artificial recharge area)
- (5) 관정의 양수량을 평소보다 줄여주는 방법 (modifying pumping rates)
- (6) 물리적 차폐벽 (physical barrier)을 지하에 설치하는 방법

따라서 본 연구에 적용한 모델링 기법을 활용하여 위의 해수침해제어방법을 다양한 시나리오로 모델링하여 최적의 방안을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 함양율이나 조석의 변화 등의 예측자료를 활용하면 해수침투관측망 주위의 지하수 관정에 대한 염해조기경보시스템에 활용하여 농민들이 염피해를 줄이는 데 활용 될 수 있을 것이며, 토양 복원 및 지하수 오염 복원에 활용하여, 지하수나 토양 오염으로부터 지하수 오염을 복원하여 수자원 확보에 활용할 수 있을 것이다. 마지막으로 본 연구는 그 동안 APCC의 지표수에 집중된 수자원연구를 지하수부문으로 확대하고 지하수분야에 APCC 자체기술을 확보 할 수 있을 것으로 기대 된다.

REFERENCE

- 김현지, 함세영, 김남훈, 정재열, 이정환, 장성. 2009. 해수침투와 농업활동에 의한 사천-하동 해안지역 지하수의 오염 특성. *자원환경지질* 42(6), 575-589.
- 이봉주, 문상호, 2008. 시계열 및 요인분석을 이용한 해수침투 특성 평가: 서천-군산 지역. *지질학회지* 44(2), 219-232.
- 이석영, 김충수, 조진응, 강윤구, 1996. 염농도에 따른 보리 유묘의 생리반응, *한국작물학회지* 41, 665-671.
- 임강빈, 심재욱, 1970. 간척지에서 수도 및 기타작물의 내염성에 관한 연구. 1. 수도품종의 내염성에 관하여, *한국작물학회지* 8, 47-68.
- 장선우. 2014. 해안 지하수 연구 동향 및 사례 보고. *The Journal of Engineering Geology* 24(4), 597-608.
- 정은태, 이성준, 이미지, 박남식, 2014. 경계면 수치 모델을 이용한 해안 지역 이중 양수정의 해수침투 저감 효과. *한국수자원학회논문집* 47(11), 1087-1094.
- 최원영, 양창휴, 이장희, 김택겸, 정재혁, 최민규, 김시주, 2011. 신간척지에서 염해경감 및 등숙률 향상을 위한 완전낙수시기 구명. *한작지* 56(2), 177-181.
- 한국농어촌공사, 2015a. 농촌지하수관리 관측망보고서
- 한국농어촌공사, 2015b. 해수침투조사 보고서
- 한국환경정책평가연구원, 2007, 해안지역 지하수 수자원 통합관리방안 연구 I. *한국환경정책평가연구원 연구보고서* RE-13.
- 환경부, 2014, 상수도통계 2012 (<http://www.me.go.kr/>)
- Anderson, M.P., 1979., Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems. *Critical Reviews in Environmental Control* 9(2), 97-156.
- Bear, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. McGraw Hill, New York.
- Bobba, A.G. 2002. Numerical modelling of salt-water intrusion due to human activities and sea-level change in the Godavari Delta, India. *Hydrological Sciences* 47(S), S67-S80.
- Boon, J.D., 2012, Evidence of Sea Level Acceleration at U.S. and Canadian Tide Stations, Atlantic Coast, North America. *Journal of Coastal Research*. 28(6), 1437-1445.
- Boon, J.D., Brubaker, J.M., Forrest, D.R., 2010. Cheapeake bay land subsidence and sea level change: An evaluation of past and present trends and future outlook., *Special Report No. 425 in Applied Marine Science and Ocean Engineering*, Virginia Institute

- of Marine Science.
- Brammer, H., 2014, Bangladesh's dynamic coastal regions and sea-level rise, *Climate Risk Management*, 1, 51–62.
- Bush, P.W., 1988. Simulation of saltwater movement in the Floridan aquifer system, Hilton Head Island, South Carolina, U.S. Geological Survey. Water Supply Paper 2331.
- Cheng, J.M., Chen, C.X., 2001. Three-dimensional modeling of density dependent saltwater intrusion in multilayered coastal aquifers in Jahe River basin, Shandong province, China. *Ground Water* 39 (1), 137e143.
- Das, A., Datta, B., 2000. Optimization based solution of density dependent seawater intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE 5 (1), 82e89.
- Datta, B., Chakraborty, D., Dhar, A., 2009. Simultaneous identification of unknown groundwater pollution sources and estimation of aquifer parameters. *Journal of Hydrology* 376(1–2), 48–57
- Finney, B.A., Samsuhadi, S., Willis, R., 1992. Quasi-three-dimensional optimization model of Jakarta basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 118, 18e31.
- Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.R., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research*, 28(7), 1955–1974.
- Ghassemi, F., Jakeman, A.J., Jacobson, G., 1990. Mathematical modelling of seawater intrusion, Nauru Island. *Hydrological Processes* 4, 269–281.
- Guvanasen, V., Wade, S.C., Barcelo, M.D., 2000. 'Simulation of regional groundwater flow and saltwater intrusion in Hernando county, Florida'. *Ground Water* 38 (5), 772e783.
- Hanh, P., Furukawa, M., 2007. Impact of sea level rise on coastal zone of vietnam. *Bulletin of the college of science, University of the Ryukyus*, 84, 45–59.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johnson, T., 2007. Battling Seawater Intrusion in the Central & West Coast Basins. WRD Technical Bulletin Volume 13, Fall 2007.
- Johnson, T.A., Whitaker, R., 2004, Saltwater Intrusion in the Coastal Aquifers of Los Angeles County, California; Chapter 2 (pages 29–48) in *Coastal Aquifer Management*, edited by Cheng, A.H., and Ouazar, D., Lewis Publishers

- Kentel, E., Gill, H., Aral, M.M., 2005. "Evaluation of groundwater resources potential of Savannah Georgia region," Multimedia Environmental Simulations Laboratory, Report No. MESL-01-05.
- Kim, S.J., 2016. A study on the flow and dispersion in the coastal unconfined aquifer(Development and application of a numerical model). Journal of Korea Water Resources Association, 49(1), 61-72.
- Kim, Y., and K. Cho, 2016. Sea level rise around Korea: Analysis of tide gauge station data with the ensemble empirical mode decomposition method, Journal of Hydro-environment Research 11, 138-145
- Li, Y., Peng, S.S., Zhang, J., 2015. Impact of longwall mining on groundwater above the longwall panel in shallow coal seams., Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7(3), 298-305.
- Lin, H.-C.J., Richards, D.R., Talbot, C.A., Yeh, G.-T., Cheng, J.-R., Cheng, H.-P., Jones, N. L., 1997. A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variable saturated media: Version 3.0, U.S Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss.
- Lipshie, S.R., Larson, R.A., 1995, The West Coast Basin, Dominguez Gap, and Alamitos Seawater-Intrusion Barrier System, Los Angeles and Orange Counties, California. In AEG News, Vol 38, No. 4, pgs. 25-29.
- Luoma, S., Okkonen, J., 2014. Impacts of future climate change and Baltic sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko aquifer in Southern Finland
- Narayan, K.A., Schleeberger, C., Bristow, K.L., 2003. Modelling seawater intrusion in the Burdekin Delta Irrigation Area, North Queensland, Australia. Agricultural Water Management 89, 217-228.
- Narayan, K.A., Schleeberger, C., Charlesworth, P.B., Bristow, K.L., 2003. Effects of groundwater pumping on saltwater intrusion in the Lower Burdekin Delta, North Queensland. In MODSIM 2003 International Congress on modelling and simulation, ed. A.D. Post, 206-211. Perth, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- Nerem, R. S., D. Chambers, C. Choe, and G. T. Mitchum. 2010, "Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions." Marine Geodesy 33, no. 1 supp 1 : 435.
- Nobi, N., Gupta, A.D., 1997. Simulation of regional flow and salinity intrusion in an integrated stream aquifer system in a coastal region: southwest region of

- Bangladesh. Groundwater 35 (5), 786e796.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. American Geophysical Union Transactions, 25, 914–928.
- Revelle, R. 1941. Criteria for recognition of the sea water In ground-waters. American Geophysical Union Transactions, 22(3), 593–597.
- Rouve, G., and Stoessinger, W. (1980), Simulation of the Transient Position of the Saltwater Intrusion in the Coastal Aquifer near Madras Coast, Proc. 3rd Internat. Conf. Finite Elements in Water Resources, Univ. of Miss., Oxford, Miss.
- Sarwar, 2005, Impacts of sea level rise on the coastal zone of Bangladesh (Unpublished masters thesis) Lund University, Sweden.
- Sherif, M.M., Singh, V.P., Amer, A.M., 1988. 'A two dimensional finite element model for dispersion (2D-FED) in coastal aquifer'. Journal of Hydrology 103, 11e36.
- Souza, W.R., Voss, C.I., 1987. Analysis of an anisotropic coastal aquifer systems using variable-density flow and solute transport simulation. Journal of Hydrology 92, 17–41.
- Voss, C.I., 1984. SUTRA: A finite element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density dependent groundwater flow with energy transport or chemically reactive single-species solute transport, US Geological Survey, Water Resources Investigations, Report 84-4369, pp 409.
- Voss, C.I., 1999, USGS SUTRA Code-History, Practical Use, and Application in Hawaii. In Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices. Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I. (Eds) 1st edition, Springer Science & Business Media
- Voss, C.I., Provost, A.M. 2010. A model for saturated-unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport Water-Resources Investigations Report 02-4231, Reston, Virginia
- Voss, C.I., Souza, W.R., 1987. Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone. Water Resources Research 23(10), 1851–1866.
- Werner, A.D., and M.R. Gallagher. 2006. Characterisation of seawater intrusion in the Pioneer Valley, Australia using hydrochemistry and three-dimensional numerical modelling. Hydrogeology Journal 14, no. 8: 1452–1469.
- Werner, A.D., Jacobsen, P.E., Morgan, L.K. 2013. Understanding seawater intrusion. [Poster]. Earth Sciences collection, <http://hdl.handle.net/2328/26647>. Flinders Academic Commons, Adelaide, South Australia.

- Willis, R., Finney, B.A., 1988. Planning model for control of saltwater intrusion. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 114 (3), 333e347.
- Winston, R.B., 2009, ModelMuse-A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29, 52 p.
- Yang, J., Graf, T., Herold, M., Ptak, T., 2013. Modelling the effects of tides and storm surges on coastal aquifers using a coupled surface-subsurface approach. *Journal of Contaminant Hydrology* 149, 61-75.
- Zeng, L., Shannon, M.C., 2000, Salinity effects on the seedling growth and yield components of rice, *Crop Science*. 40, 996-1003.

연구보고서 2016-22

해수면상승에 따른 지하수 및 토양 염류화 저감
방안 개발

Impact of Sea-Level Rise on Coastal Agricultural Land and Water using a
Saltwater Intrusion Modeling Approach

전종안



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-173-2