



# Analysis of the effects of the seawater intrusion countermeasures considering future sea level rise in Yeosu region using SEAWAT

Yang, Jeong-Seok<sup>a\*</sup> · Lee, Jae-Beom<sup>a</sup> · Kim, Il-Hwan<sup>a</sup>

<sup>a</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

Paper number: 18-021

Received: 5 March 2018; Revised: 19 March 2018; Accepted: 19 March 2018

## Abstract

Seawater intrusion areas were calculated in Yeosu region considering sea level rise and the effects of countermeasures for seawater intrusion were analyzed using SEAWAT program. The estimated seawater intrusion area was 14.90 km<sup>2</sup> in 2015. When we applied climate change scenarios the area was changed to 19.19 km<sup>2</sup> for RCP 4.5 and 20.43 km<sup>2</sup> for RCP 8.5 respectively. The mitigation effects by artificial recharge with total 50 m<sup>3</sup>/d, 100 m<sup>3</sup>/d, and 300 m<sup>3</sup>/d are from 3.75% to 10.68% for RCP 4.5, and from 5.82% to 10.77% for RCP 8.5 respectively. If we install barrier wall with the thickness 0.8 m, 1.3 m, and 1.8 m, the mitigation effects are from 6.67% to 12.04% for RCP 4.5, and from 6.17% to 14.98% for RCP 8.5 respectively. The results of this study can be used to be a logical means of quantitative grounds for policy decisions to prevent groundwater contamination by seawater intrusion and subsequent secondary damage in coastal areas.

**Keywords:** Seawater intrusion, SEAWAT, Sea level rise, Yeosu

## SEAWAT을 이용한 미래 해수면 상승에 따른 여수지역 해수침투 저감 대책 효과 분석

양정석<sup>a\*</sup> · 이재범<sup>a</sup> · 김일환<sup>a</sup>

<sup>a</sup>국민대학교 건설시스템공학부

## 요 지

본 연구에서는 SEAWAT을 이용하여 여수지역의 해수침투 피해 면적을 파악하고, 기후변화 시나리오 적용에 따른 미래의 해수침투 피해 예상 면적을 산출하였으며 해수침투 피해 저감 대책의 피해면적 저감 능력을 분석하였다. 2015년 기준 여수지역의 해수침투 피해 면적은 14.90 km<sup>2</sup>로 나타났고, 기후변화 시나리오를 적용하였을 때 2099년 여수지역의 예상 해수침투 피해 면적은 RCP 4.5의 경우 19.19 km<sup>2</sup>이며, RCP 8.5의 경우 20.43 km<sup>2</sup>로 나타났다. 이에 대한 저감대책으로 인공함양을 고려하였을 때, 총 300 m<sup>3</sup>/d, 100 m<sup>3</sup>/d, 50 m<sup>3</sup>/d의 함양 시나리오를 설정하였을 때 RCP 4.5의 경우 해수침투 면적은 평균 7.03%, RCP 8.5의 경우 8.32% 감소하였다. 물리적 차수벽 대책의 경우는 차수벽의 두께를 0.8 m, 1.3 m, 1.8 m로 설정하였을 때 RCP 4.5의 경우 해수침투 면적은 평균 9.80%, RCP 8.5의 경우 10.30% 감소하였다. 본 연구는 연안지역의 해수에 의한 지하수 오염과 그에 수반한 2차적인 피해를 막기 위한 대비책을 결정하기 위한 정량적인 근거로서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 해수침투, SEAWAT, 해수면 상승, 여수 지역

## 1. 서 론

최근 기후변화와 함께 해수면 상승으로 인하여 해수침투 피해가 발생하고 있고, 해수면 상승이 가속화 될 경우 더 큰

해수침투 피해가 발생할 것으로 예상된다. 기후 변화와 함께 연안지역 도시화로 인한 불투수면적 증가, 지하수이용량의 증가 등으로 인한 지하수위의 하강은 해수면 상승으로 인한 해수침투 현상의 악화를 초래하게 되어 해안지역의 지하수와 토양수의 염분농도를 높이게 되며 염수가 섞인 지하수면이 높아져 작물의 염해피해를 끼칠 수 있다(Kim, 2014). Lee *et*

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-910-4289  
E-mail: jyang@kookmin.ac.kr (J.-S. Yang)

*al.* (2014)는 장기 조위자료를 이용하여 한반도 서해, 남해, 동해 권역 별 미래 해수면 상승 경향을 분석한 결과 서해안 및 남해안 권역의 조위 증가가 높게 나타난 것으로 발표하였다. 1880년부터 2012년까지의 측정 자료를 분석한 결과 지구의 연평균 온도는 과거에 비해  $0.85^{\circ}\text{C}$  상승하였고, 그에 따라 만년설과 극지방의 빙하가 녹아 평균 해수면이  $0.19\text{ m}$  상승하는 등 기후변화가 진행되고 있으며 이는 점점 가속화 되고 있다 (IPCC, 2014). 우리나라의 해수면 상승률은 평균  $2.48\text{ mm/yr}$ 로 해역별로 남해, 동해, 서해의 해수면 상승률은 각각  $2.89$ ,  $2.69$ ,  $1.31\text{ mm/yr}$ 로 나타났다(KHOA, 2015). Lee *et al.* (2015)는 PBM (Porous Body Model) 기반의 N-S Solver를 이용하여 해안지역의 지하수-해수면의 수위 차와 해수위의 비율을 다르게 적용하였을 때, 지하수위가 낮을수록 해수가 내륙으로 더 깊이 들어옴을 밝혔다.

Mahesha (1996)은 인공 주입정의 주입 유량과 주입 주기, 거리에 따라 염수짜기를 제어할 수 있다고 발표하였다. 이에 Rastogi *et al.* (2004)는 염수의 추출과 담수의 주입을 혼합한 방식은 해수침투로 인한 대수층 내의 염수의 부피를 줄이고 담수체의 부피를 증가시킬 수 있을 것이라는 연구를 발표하였다. 인공 함양은 지하수위를 상승시키고 인공 함양의 수원으로서 지표수, 지하수, 처리된 오수 등을 이용할 수 있다(Papadopoulou *et al.*, 2005). Jung *et al.* (2014)은 해수침투를 저감하기 위하여 해수와 담수를 각각 양수하는 이중 양수정을 이용한 경우를 수치모델을 이용하여 검증하였고 담수정의 위치는 해수짜기 침투 지점의 내륙에 위치해야 하며 담수정의 양수량이 지나치게 높을 경우 해수침투를 더욱 촉진시키는 결과를 초래하고, 해수정의 양수량을 증가시키면 해수정으로 유입되어 낭비되는 담수량이 크게 증가하므로 이중 양수정의 설계 시 담수정의 해수 비율뿐만 아니라 해수정의 담수 낭비량도 중요한 인자로 고려해야 함을 보였다. Hame *et al.* (2006)은 유역으로의 해수의 유입을 제한하기 위하여 지하차수벽 설치의 효과가 있음을 보였다. Antoifi *et al.* (2017)은 물리적으로 해수 침투를 방지하기 위해서 물리적 차수벽을 설치하는 실험실 규모의

실험을 통해 물리적 차수벽의 깊이, 위치 등에 따른 염수의 썩기 발달에 미치는 영향을 분석했다. 또한, Jung *et al.* (2017)은 RCP 4.5와 8.5의 해수면 상승 시나리오를 적용하였을 때 가상의 간척 농경지의 지하수 염류 피해면적을 산정하였다.

본 연구에서는 지하수 유동 수치해석 프로그램인 Visual MODFLOW SEAWAT을 이용하여 해수침투를 저감할 수 있는 대책을 제시하고, 기후변화 시나리오를 적용한 각 대책의 해수침투 면적 저감 능력을 분석하였다. 인공함양, 물리적 차수벽 설치 두 가지의 시나리오를 적용하고 각 대책의 해수 침투 저감 능력을 분석하였다. 연구의 결과로 연구지역의 해수침투 피해 면적 현황을 분석하고, 기후변화 시나리오를 적용하여 미래의 연구지역의 해수침투 피해 예상 면적을 산출하였다. 이에 해수침투 방지 대책을 적용하여 해수침투 피해 면적 저감 효과를 확인하였다. 연구 결과는 해수침투 피해와 관련된 정책 입안자, 해수침투 피해로 영향을 받을 수 있는 현지 주민 등 실제 연구지역 구성원에게 해수침투 방지 대책의 해수침투 저감 능력을 정량적인 근거로 제시할 수 있고, 근거를 바탕으로 연구지역에 적합한 해수침투 방지 대책을 선택할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 연구지역을 선정하고, 연구지역의 자연 상태와 가장 가까운 해수침투 수치모델 구성을 위하여 자료의 수집을 실시하였다. 수집된 자료를 바탕으로 해수침투 모의 위한 모델링을 구성하고, 정류상태의 수치모델 결과를 실제 관측 값과 비교하여 보정을 통하여 모델의 신뢰도를 입증하였다. 정류상태 보정 이후 기후변화 시나리오를 적용하였을 때 연구지역의 해수침투 면적을 산정하고, 해수침투를 저감하기 위한 대책을 적용하였으며 각 대책의 해수침투 면적 저감 비율을 통하여 각 대책별 해수침투 방지 대책을 분석하였다. Fig. 1은 본 연구의 순서도이다.

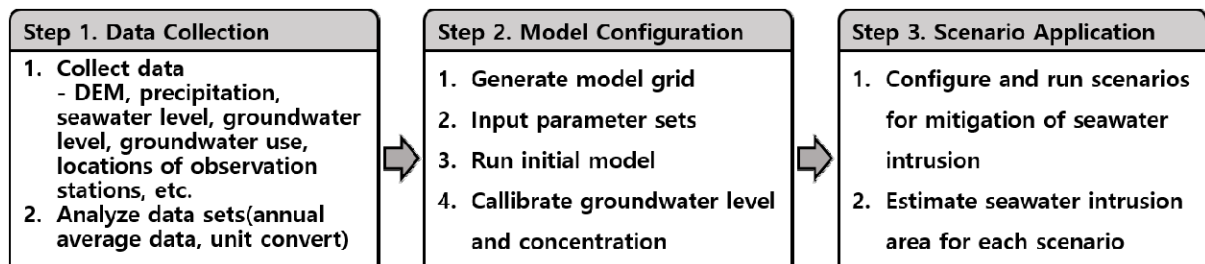


Fig. 1. Procedure of this study

### 2.1 연구지역

본 연구의 연구지역은 여수시의 화양면, 소라면, 울촌면, 시내동지구로 여수시 중 돌산읍, 화정면, 남면, 삼산면을 제외한 육지와 연한 지역을 선정하였다. 돌산읍, 화정면, 남면, 삼산면은 섬 지역으로 국가 지하수 관측망 지하수위 관측소, 농어촌공사 해수침투관측소가 존재하지 않기 때문에 위의 3개면, 시내 동 지구를 선택하여 분석하였다. 해수침투조사 보고서 (MAFRA, 2017)에 의하면 여수시 화양지역은 해안 지역의 경우 해수로 인한 해수침투가 관측되고 있고 내륙지역의 경우

연간 관측공 전기전도도가 약 1,100~1,400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  으로 답작이 가능한 상황이며, 여수시 소라지역은 관측공 전 구간에 걸쳐 45,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 전기전도도가 관측되었고 이온분석 결과 해수의 직접적인 영향을 받는 것으로 나타나 주변 농경지에서 지하수 이용을 규제하는 등의 관리가 이루어지고 있다. Fig. 2는 본 연구의 연구지역인 여수시 화양, 소라, 동지역이며 수문관측소의 위치를 나타내고 있다. Table 1은 모델 구성을 위하여 수집한 자료의 종류와 출처를 수록하였다.

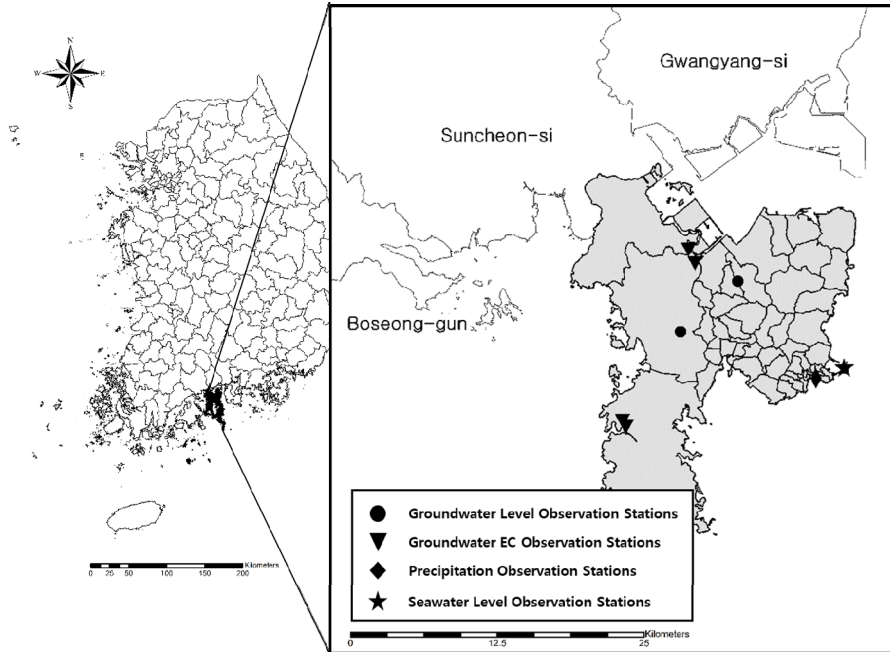


Fig. 2. Study area and locations of observation stations

Table 1. List of collected data

Data	Form	Collection period	Source	Application
Geographic intelligence	Contour, Slope, Area	2017	www.ngii.go.kr	Grid, Layer
	DEM, Station, Administration border			
Precipitation	Time series data	2016	www.kma.go.kr	Recharge
River level	Time series data	2016	www.wamis.go.kr	River package
Groundwater level	Time series data	2016	www.gims.go.kr	Head
Groundwater use	Location of pumping well	2016	www.gims.or.kr	Pumping well Pumping rate
	Pumping rate			
Groundwater electric conductivity	Time series data	2016	www.gims.go.kr www.groundwater.or.kr	Observed concentration
Tidal level	Time series data	2015	www.khoa.go.kr	Constant head (ocean)
Groundwater investigation report	Hydraulic conductivity, Geological structure	2017	www.gims.go.kr	Layer

**2.2 SEAWAT**

본 연구에서 이용한 SEAWAT은 미국 지질조사소(USGS)에서 개발된 Visual MODFLOW의 연계 프로그램이며 대수층의 가변밀도 지하수 흐름과 다종의 용질수송 모의가 가능한 3차원 유한차분 모델이다. Noorabadia (2017)은 실험실 규모의 수리실험모형과 본 연구에서 이용된 SEAWAT을 해수면 변동에 따른 지하수 대수층에 대한 영향을 분석한 바 있다.

SEAWAT의 가변 밀도 흐름 방정식은 기존의 유체밀도와 유체압력을 이용하는 것과 달리, 유체밀도와 담수두 관점에서 개발되었으며 MT3DMS를 이용하여 아래의 Eq. (1)과 같이 염분농도의 변화를 계산한다(Guo and Langevin, 2002).

아래의 식에서  $x, y, z$  은 모델 내 유체 흐름의 방향성분이며,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\rho_f$ 는 물의 밀도,  $h_f$ 는 수위를 나타낸다. 좌변 항의  $K$ 는 유공매체의 수리전도도,  $Z$ 는 계산되는 특정한 점 또는 셀의 위치를 의미한다. 우변 항의  $S_f$ 는 물의 비저류계수,  $\theta$ 는 매체의 공극률,  $E$ 는 유체 밀도와 용질 농도의 비율,  $C$ 는 용질의 농도,  $\bar{\rho}$ 는 유입 또는 유출되는 물의 밀도,  $q_s$ 는 유입점과 유출점을 나타내는 대수층의 단위 체적 당 체적 유량을 의미한다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho K_{fx}[\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial x}]) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho K_{fy}[\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial y}]) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho K_{fz}[\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial z}]) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} - \rho q_s \tag{1}$$

**2.3 해수침투 방지 대책**

본 연구에서는 해수침투 대책의 저감 효과 분석에 있어 지하수위 확보를 위해 대수층에 담수를 주입하는 인공함양과 물리적 차수벽 설치의 두 가지 대책을 적용하였다. 인공함양은 해수침투가 발생하는 해안 지역에 담수를 인공 함양하여 해수 침투 썩기를 밀어내어 해수침투를 저감하는 방법이다. 실제로 해수침투 피해를 줄이고 개발 지하수의 오염을 예방하기 위해서 튀니지 Cape Bon 북동쪽 Korba 대수층에 2008년부터 인공함양을 통한 해수침투를 저감시설이 설치되었다 (Amira and Abderrazek, 2016). 인공함양 대책은 해수침투 피해 저감에 효과적인 대안으로 알려져 있으나 인공주입정에 담수를 지속적으로 공급할 수 있는 수원이 필수적이고, 담수를 낭비한다는 단점이 있다.

물리적 차수벽 설치하는 해수침투 피해지역의 지하에서 해수 썩기에 낮은 투수성을 갖는 벽을 설치하여 해수의 침투를 물리적으로 막는 방법이다. 실험실 규모의 수리실험을 통하여 물리적 차수벽은 해수침투가 직접적으로 이루어지는 해안

선과 인접 할수록, 설치 관입 깊이가 깊을수록 효율이 좋은 것으로 알려져 있다(Luyun *et al.*, 2011). 지하 차수벽은 다른 대안에 비해 해수의 직접적인 차단으로 해수침투 피해 저감에 효과적이지만 설치비용이 크다는 단점을 갖고 있다.

**3. 연구결과**

**3.1 SEAWAT 모델 구성**

SEAWAT을 이용한 지하수 및 해수침투 현상을 모의하기 위해서 자료 수집을 실시하였다. 함양량은 여수기상대의 2015년 자료를 수집하고 여수지역 지하수기초조사 보고서 (MLTM, 2008)를 바탕으로 행정구역 별 함양량을 산정하였다. 지하수위와 전기전도도는 2015년 여수 지역의 관측소 별 관측 자료를 수집하고 2015년 관측 자료의 연평균 데이터를 입력하였다. 해양 경계조건을 모의하기 위하여 해수면과 염분농도 자료를 수집하였으며 남해안의 여수 조위관측소의 2015년 시간위 시계열 자료를 수집하여 연평균 데이터를 입력하였다. Table 2는 입력한 속성 값을 정리하여 나타내고 있다.

**3.2 정류상태 및 기후변화 시나리오 적용 후 해수침투 피해면적 산정 결과**

SEAWAT 초기 조건 모델 구성 이후 2015년 연구지역 해수 침투 피해 면적을 산정하기 위해 정류상태 수치해석 결과를 분석하였다. 보정 과정을 통하여 얻어진 수위와 전기전도도 값이 관측된 값과 비교하여 95% 이상 유사한 경우 정상류 유동 모델링이 연구지역의 전반적인 지하수, 해수침투 양상을

Table 2. Input values of parameter sets

Parameter		Value
Groundwater level observation well (El.m)	Yeosu-Sora	32.00
	Yeosu-Pyeongyeo	23.74
Salt concentration observation well (mg/L)	Hwayang1	6329.28
	Hwayang1	785.54
	Sora1	26440.43
Constant head (El.m)	Sora2	31147.52
	South sea	1.885
Constant concentration (mg/L)	South sea	28,464
Recharge (mm/yr)	Yulchon-myeon	121.13
	Sora-myeon	155.81
	Hwayang-myeon	242.88
	City (dong region)	146.49

모사했다고 볼 수 있다.

국가지하수관측망 여수소라, 여수평여 관측소의 지하수 전기전도도 관측자료가 존재 하나 보정 과정에서 계산 값과 관측 값의 차이가 크게 나타났고, 보정과정에서 모델에서는 표현하지 못한 외부적인 인자로 인하여 보정이 어렵기 때문에 해수침투 관측망 관측소의 관측자료만을 이용하여 보정을 실시하였다. 지하수위 보정 결과 평균잔차는 -0.006 m이고, 절대 평균잔차는 0.094 m, 표준오차는 0.094 m, RMS (Root mean

square)는 0.094 m, Normalized RMS 는 1.139%로 나타나 95% 신뢰구간을 만족하였다. 염분농도 보정 결과 평균잔차는 -140.402 mg/L이고, 절대평균잔차는 140.402 mg/L, 표준 오차는 92.49 mg/L, RMS (Root mean square)는 232.229 mg/L, Normalized RMS 는 0.861%로 나타나 95% 신뢰구간을 만족하였다. 보정 결과는 Fig. 3과 같다.

2015년의 해수침투 피해 면적 산정 결과 연구지역 총 면적 329.97 km<sup>2</sup> 중 14.90 km<sup>2</sup>로 산정되어 연구지역의 4.51% 지역

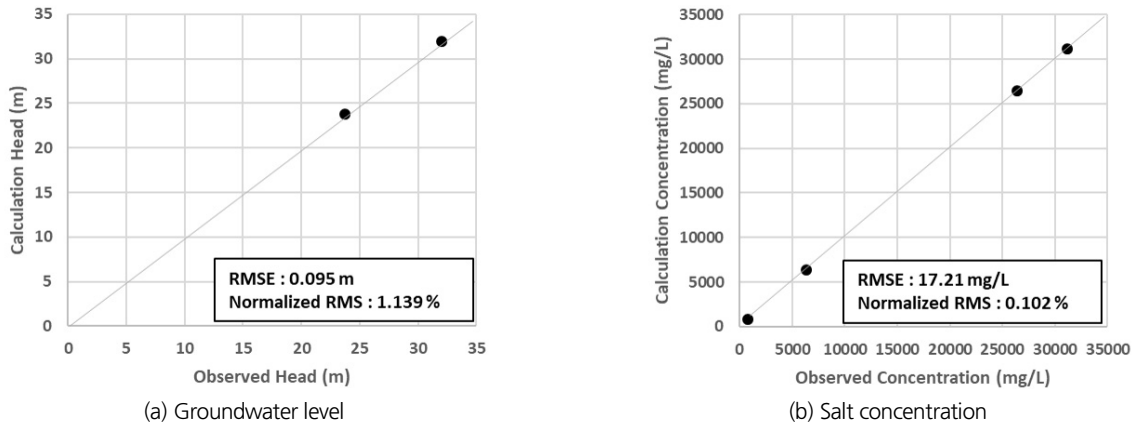


Fig. 3. Calibration results

Table 3. Results of seawater intrusion areas and mitigation ratios for artificial recharge and barrier wall installation options

Seawater intrusion areas in 2015 and 2099				
Climate change scenario	Seawater intrusion area in 2015 (km <sup>2</sup> )	Seawater intrusion area in 2099 (km <sup>2</sup> )	Seawater intrusion area change (%)	
RCP 4.5	14.90	19.19	+28.79	
RCP 8.5	14.90	20.43	+37.11	
Artificial Recharge (AR)				
Climate change scenario	No measure (km <sup>2</sup> )	AR scenario (m <sup>3</sup> /d)	AR measure (km <sup>2</sup> )	Mitiation ratio (%)
RCP 4.5	19.19	Total 300	17.14	10.68
		Total 125	17.91	6.67
		Total 50	18.47	3.75
RCP 8.5	20.43	Total 300	18.23	10.77
		Total 125	18.72	8.37
		Total 50	19.24	5.82
Barrier Wall Installation (BWI)				
Climate change scenario	No measure (km <sup>2</sup> )	Wall thickness scenario (m)	BWI measure (km <sup>2</sup> )	Mitiation ratio (%)
RCP 4.5	19.19	1.8	16.88	12.04
		1.3	17.14	10.68
		0.8	17.91	6.67
RCP 8.5	20.43	1.8	17.37	14.98
		1.3	18.44	9.74
		0.8	19.17	6.17

이 해수침투 피해가 예상된다. 행정구역 별로 해안선이 가장 긴 화양면이 9.76 km<sup>2</sup>로 해수침투 피해면적이 가장 크게 산출되었고, 울촌면 2.19 km<sup>2</sup>, 소라면 1.95 km<sup>2</sup>, 동지역 1.00 km<sup>2</sup> 순으로 나타났다.

연구지역의 2015년 해수침투 예상 피해지역을 산정한 후, IPCC (2012)에서 발표한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 기후변화 시나리오 적용에 따른 해수면의 상승을 고려한 미래의 해수침투 피해면적을 산정하였다. 시나리오를 적용에 따라 2099년 까지 남해의 해수면이 RCP 4.5의 경우 +0.612 m, RCP 8.5의 경우 +0.802 m 상승할 것으로 예상하였다(NIMS, 2012). 그에 따라 2099년의 예상 해수면 수위를 적용하여 해수면 상승에 따른 예상 해수침투 피해지역을 산정하였다. Fig. 3은 2015년 해수침투 모의 보정 결과이다.

### 3.3 기후변화 시나리오 적용 및 해수침투 저감 대책 적용 결과

해수침투 피해 저감 대책을 적용하였을 때의 예상 피해 면적을 산정하였고, 각 대책의 피해면적 감소 비율을 분석하였다. 인공함양을 적용한 지역은 내륙방향으로 해수침투 깊이가 깊은 6개 지역을 선정하여 적용하였다. 여수 시내 동지역은 도심지역이기 때문에 현실적으로 인공함양을 적용하기 어렵기 때문에 해수침투 피해면적이 가장 넓게 산정된 화양면 3개 지역, 울촌면 2개 지역, 소라면 1개 지역을 선정하여 적용하였다. 인공함양량은 총 300 m<sup>3</sup>/d (60 m<sup>3</sup>/d × 5 개정), 125 m<sup>3</sup>/d (25 m<sup>3</sup>/d × 5개정), 50 m<sup>3</sup>/d (10 m<sup>3</sup>/d × 5개정)의 함양량 시나리오를 설정하여 적용하였고, RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오에 대하여 각각 2099년 연구지역의 해수침투 피해면적을 산정하여 적용 전 해수침투 피해면적과 비교하였다. 물리적 차수벽을 적용한 지역은 인공함양을 적용한 지역과 동일하게 적용하였다. 차수벽 적용은 Layer 1, 2에 적용하였고, 수리전도도는 문헌 검색을 통하여 10<sup>-5</sup> cm/d, 차수벽 두께는 0.8 m, 1.3 m, 1.8 m로 각각 적용하였다. Table 3은 기후변화에 따른 해수침투 피해 지역 산정 결과와 해수침투 피해 저감 대책으로 인공함양, 물리적 차수벽 설치를 적용하였을 때의 해수 침투 피해 면적 저감 능력 분석 결과이다.

## 4. 결론

본 연구는 여수지역 해수침투 저감 대책 적용 평가를 실시하였다. 선정된 연구지역에 대한 연구지역의 지형정보, 강수,

하천수위, 지하수위, 지하수 전기전도도, 지하수 이용공 위치 및 사용정보, 조위에 대한 자료를 수집하고, 지하수 기초조사 보고서, 하천정비 기본계획서 등의 문헌을 조사하여 SEAWAT에 적용하였다. SEAWAT을 이용하여 2015년의 지하수 유동 및 해수침투 피해 지역을 분석하였고, 분석된 결과를 바탕으로 기후변화 RCP 시나리오 중 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 적용하였다. RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오 적용에 따른 해수면 상승에 대한 해수침투 피해 면적의 변화를 모의하였다. 해수침투를 저감하기 위한 대책으로 인공함양, 물리적 차수벽 설치를 이용하여 해수침투 저감 효과를 분석하였다.

2015년에 대한 정류상태의 해수침투 영역의 면적은 14.90 km<sup>2</sup>로 나타났고, RCP 4.5 시나리오를 적용하였을 때 해수침투 예상 피해 면적은 19.19 km<sup>2</sup>이고, RCP 8.5 시나리오를 적용하였을 때 해수침투 예상 피해 면적은 20.43 km<sup>2</sup>로 나타났다. 2015년 정류상태 모의 해수침투 피해 면적과 RCP 기후변화 시나리오를 적용하였을 때의 해수침투 면적 비교 결과 RCP 4.5의 경우 28.79%, RCP 8.5 적용 시 37.11%의 해수침투 면적이 증가하는 것으로 분석되었다.

인공함양 대책은 내륙방향으로 해수침투 깊이가 깊은 6개 지역을 선정하여 적용하였다. 적용 지역은 화양면 3개 지역, 울촌면 2개 지역, 소라면 1개 지역을 선정하여 적용하였다. 인공함양량은 총 300 m<sup>3</sup>/d, 125 m<sup>3</sup>/d, 50 m<sup>3</sup>/d의 함양량 시나리오를 설정하였다. RCP 4.5의 경우 해수침투 면적은 평균 7.03%, RCP 8.5의 경우 8.32% 감소하였다. 물리적 차수벽 설치 대책은 인공함양 대책을 적용한 지역과 동일하게 적용하였다. 물리적 차수벽의 수리전도도는 10<sup>-5</sup> cm/d로 설정하였고, 차수벽의 두께는 0.8 m, 1.3 m, 1.8 m로 설정하여 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오에 대해서 각각 분석하였다. 분석 결과 RCP 4.5의 경우 해수침투 면적은 평균 9.80%, RCP 8.5의 경우 10.30% 감소하였다. 분석 결과를 통하여 해수침투 피해 면적을 저감하는 대책으로는 인공함양 보다 물리적 차수벽 설치가 더 효과적임을 알 수 있다. 그러나 물리적 차수벽은 해수침투를 저감하는 데에 효과적이나 설치비용이 높다는 단점이 있어 현실적으로 적용에 어려움이 있기 때문에 추가적인 조사 및 분석이 필요하다.

연구 결과는 기후변화로 인한 자연재해의 강도가 증가하고, 지속개발 가능한 대체 수자원 개발을 위하여 지하수자원의 중요도가 높아지는 상황에서 연안지역의 지하수 오염과 그에 수반한 2차적인 피해를 막기 위한 정책적 결정에 정량적인 근거로써 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서 해수침투 저감 대책의 종류를 더욱 세분화 하고, 객관성 있는

해수침투 저감 대책 효과의 비교 분석을 위하여 각 대책의 효과와 설치비용을 고려한 평가 방법을 마련하고, 선정된 연구 지역에 대한 해수침투 방지 효과와 설치비용을 함께 고려한 해수침투 방지 대책의 우선 순위선정 기법을 개발하는 연구를 진행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 이공분야기초연구사업 중 견연구자지원사업 연구지원비 (NRF-2017R1A2B4005435) 를 지원받아 수행된 연구입니다.

## References

- Abdoulhalik, A., Ahmed, A., and Hamill, G. A. (2017). "A new physical barrier system for seawater intrusion control." *Journal of Hydrology*, Vol. 549, pp. 416-427.
- Amira, M., and Abderrazek, S. (2016). "The effectiveness of artificial recharge by treated wastewater in combating seawater intrusion - The case study of Korba-El Mida aquifer (Cape bon, Tunisia)." *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 264-274.
- Guo, W., and Langevin, C. D. (2002). *User's guide to SEAWAT; a computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow*. No. 06-A7.
- Hame, S., Chaube, U. C., Sharma, S., Sharma, P., and Parkhya, S. (2006). "Mathematical modelling of salt water transport and its control in groundwater." *Natural and Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 32-39.
- IPCC (2012). *Climate change 2012: The physical science synthesis report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland.
- Jung, E. T., Lee, S. J., Lee, M. J., and Park, N. S. (2014). "Effectiveness of double negative barriers for mitigation of seawater intrusion in coastal aquifer: sharp-interface modeling investigation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 1087-1094.
- Jung, E. T., Park, N. S., and Cho, K. W. (2017). "Composite model for seawater intrusion in groundwater and soil salinization due to sea level rise." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 6, pp. 387-395.
- Kim, S. G. (2014). "Development of reclaimed farm lands for future agriculture." *Proceedings Symposium on Revitalization of Agriculture in Reclaimed Land*, Grand Hall, aT Center, Korea Rural Community Corporation and Rural Development Administration, pp. 83-99.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2015). *Over the past 40 years, sea level has risen about 10 cm*. December 16, 2015.
- Lee, C.-E., Kim, S. U., and Lee, Y. S. (2014). "Estimation of the regional future sea level rise using long-term tidal data in the Korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 753-766.
- Lee, W. D., Jeong, Y. H., and Hur, D. S. (2015). "Numerical simulation of seawater intrusion in coastal aquifer using N-S solver based on porous body model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 12, pp. 1023-1035.
- Luyun, R., Momii, K., and Nakagawa, K. (2011). "Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion." *Ground Water*, Vol. 49, No. 2, pp. 239-249.
- Mahesha, A. (1996). "Steady - state effect of freshwater injection on seawater intrusion." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 122, No. 3, pp. 149-154.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural (2017). *Seawater intrusion research report*. Ministry of Agriculture, Food and Rural, pp. 445-457.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008). *Basic groundwater investigation report of Yeosu region*. pp. 94-97.
- National Institute of Meteorological Science (2012). *2012 Earth climate change report for correspondence of IPCC AR5*, National Institute of Meteorological Science, pp. 46-51.
- Noorabadi, S., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., and Delirhasannia, R. (2017). "Laboratory and numerical investigation of saltwater intrusion into aquifers." *Journal of Materials and Environmental Sciences*, Vol. 8, No. 12, pp. 4273-4283.
- Papadopoulou, M. P., Karatzas, G. P., Koukadaki, M. A., and Trichakis, Y. (2005). "Modeling the saltwater intrusion phenomenon in coastal aquifers-A case study in the industrial zone of Herakleio in Crete." *Global NEST J*, Vol. 7, No. 2, pp. 197-203.
- Rastogi, A. K., Choi, G. W., and Ukarande, S. K. (2004). "Diffused interface model to prevent ingress of sea water in multi-layer coastal aquifers." *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 4, No. 2.