제주도 성산유역의 담수와 염수 지하수 개발의 영향 Impacts of Fresh and Saline Groundwater Development in Sungsan Watershed, Jeju Island

박 남 식* / 고 병 련** / 임 영 덕***

Park, Namsik / Koh, Byoung-Ryoun / Lim, Youngduck

Abstract

Saline groundwater, in addition to fresh groundwater, is actively developed for inland aqua culture in Jeju Island where groundwater is practically the only source of freshwater. In this work we analyzed impacts of saline and fresh groundwater development on groundwater systems in Sungsan subwatershed in Jeju. A sharp-interface model was used to simulate fresh and saline groundwater flows. Withdrawal of freshwater imparted adverse impacts by lowering groundwater level and inducing saltwater encroachment. Withdrawal of saline water imparted mixed results: on one hand it lowered groundwater level, on the other hand it reduced saltwater encroachments. However, freshwater development lowered groundwater level much more than salinewater development did. Modified Ghyben-Herzberg ratio was developed for a transition zone with finite width. Comparison against observed data resulted in fair agreement.

Keywords : fresh and saline groundwater, aquaculture, saltwater intrusion, Ghyben-Herzberg ratio

요 지

지하수 의존도가 높은 제주도에서는 담수 지하수는 물론 어류의 육상 양식을 위한 염분이 높은 지하수도 활발하게 개발되고 있다. 본 연구는 제주도 성산유역을 대상으로 담수와 염수 지하수 개발이 지하수계에 미치는 영향을 분석하였다. 경계면 모델을 이용하여 담수와 염수의 흐름을 모의하고 담수와 염수 개발의 영향을 조사하였다. 담수 개발은 기존의 연구결과에서 익히 알려진 바와 같이 지하수위 강하와 해수침투를 야기하는 것으로 나타났다. 염지하수 개발은 지하수위를 강하시키는 부정적 영향과 함께 해수침투를 저감시키는 긍정적 효과도 있는 것으로 나타났다. 담-염수 사이의 유한한 두께의 천이대에 대한 수정 Ghyben-Herzberg 비율을 유도하고 해수침투 관측정에서 관측된 자료와 비교하였다.

핵심용어 : 담수와 염 지하수, 양식, 해수침투, Ghyben-Herzberg 비율

1. 서 론

2011년 기준 제주도의 용수 이용량은 486,300 m³/d인데

이 중에서 지하수 및 용천수가 92.2%를 차지하고 있어 지하수의 중요성을 잘 보여주고 있다(KIGAM, 2011). 일반적으로 해안지역의 지하수 개발은 염도가 낮은 담 지하수를

* 교신저자, 동아대학교 토목공학과 교수 (e-mail: nspark@dau.ac.kr, Tel: 051-200-7629)

Corresponding Author, Professor, School of Civil Engineering, Dong-A University, 840 Hadan-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

** 제주국제대학교 토목공학과 교수 (e-mail: kbrcv@jeju.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Eng., Jeju International University

*** 한국전력공사 개발본부 송변전개발처 처장 (e-mail: lim5701@kepeco.co.kr)

General Manager, Transmission Construction Department, KEPCO

목표로 하며 지하수 개발 시 해수침투 방지가 주요 고려사항이다. 그러나 염도가 높은 지하수(염 지하수)를 의도적으로 양수하는 경우도 있는데 주요 목적에는 육상의 어류 양식, 해수 담수화 시설 원수, 해수 침투 억제, 광업, 해수 목욕탕 등이 있다. 염지하수를 이용한 육상의 양식업은 전 세계에서 보편적으로 실행되고 있다. 염지하수는 대체적으로 하구의 해수와 화학적으로 유사하며 표류 해수에 비하여 수질이 양호하고, 기생충 등의 위험이 적으며, 수온이 연중 균일하여 어류 양식에 유리하다(Shearer, 1997). 또한 염지하수는 태풍 등의 기상 여건에 영향을 받지 않으며, 표층수 취수를 위한 시설이 불필요하므로 해안 주변 환경 보호에도 유리하다.

제주도에서는 담지하수 외에도 염지하수 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 2011년 기준 1,166개의 염지하수 관정에서 737만8천 m^3/d 가 양수되고 있다. 이중 양식용이 1,066공 735만5,400만 m^3/d 로 전체 염지하수 개발량의 99.7%를 차지한다(Jeju Peoples Daily, 2012). 2011년 말 제주도의 담 지하수 개발량의 18배에 달하는 양의 염지하수가 개발되고 있다.

Kim et al. (2003)은 '94년 8월부터 '95년 12월까지 제주도 해안 지역에서 활발히 개발되고 있는 육상 양식장의 염지하수와 연안 해수의 수질 분석을 시행하였다. 동부 지역의 경우 신양, 온평, 신산 등 3개 지역의 염지하수 관정 수질을 분석하였다. 염지하수 수온의 범위는 16.9~18.2 $^{\circ}\text{C}$ 로 그 범위가 14.5~27.2 $^{\circ}\text{C}$ 인 연안 해수에 비하여 상대적으로 일정한 값을 유지하였다. 그러나 염지하수의 염도는 20.6~33.0 g/kg로 32.0~34.5 g/kg의 범위를 보인 연안 해수에 비하여 큰 변화를 보였다. 저염도 지하수의 원인은 조사 기간 중 발생한 집중 호우라고 추정하였다.

염지하수는 해수담수화 시설의 원수로 유리하다. 염지하수는 총용존고형물(TDS)의 농도가 낮아 담수화 시설의 전처리 여과공정과 역삼투막의 막힘 현상이 적다. 또한 연중 수온이 대체적으로 일정하게 유지되므로 수질 관리가 용이하다. 게다가 어느 정도의 범위에서는 염지하수의 염도 제어가 가능한데 저염도 지하수를 확보할 수 있으면 해수담수화 비용을 절감하게 해준다. Park et al. (2011a)은 국내 40여개소의 해수담수화 비용을 분석하고 해수담수화 비용의 60% 가까이가 원수의 염도에 영향을 받는다고 분석한바 있다.

해수빼기 침투를 제어하기 위하여 염지하수를 양수할 수 있다. 해수 빼기 내에서 염지하수를 양수하면 해수 빼기의 수두가 낮아지므로 내륙에서 해안 방향으로 해수의 동수경사가 형성되므로 해수빼기 침투를 저감시킬 수 있

다. 그러나 염지하수가 부적절하게 양수되면 많은 양의 담지하수를 낭비될 수 있음에 유의해야 한다. 국내에서는 해수침투 억제를 위하여 염지하수를 양수한 사례가 보고된 바 없으나 해외 사례를 나열하면 다음과 같다. Aliwei et al. (2001)은 팔레스타인 지역에서 염지하수 위에 얇은 렌즈 형태로 존재하는 담지하수를 개발할 때 발생하는 염지하수 상승추(saltwater upconing) 현상과 담/염지하수 천이대 두께 증가를 방지하기 위하여 염지하수 양수에 대한 수치모델링 연구를 수행한 바 있다. 대상 지역에서는 담지하수와 염지하수 양수비율이 2:1일 때 가장 우수한 효과가 도출되었다. Sherif and Hamza (2001)는 인도 Madras 지역에서 담/해수 천이대에서 기수를 양수하여 천이대의 두께를 축소시키는 연직 2차원 수치모델링 연구를 수행하였다. 동 연구는 천이대의 기수 양수가 천이대 두께를 줄이는 데 효과적이라고 결론을 내렸다. Coe (1972)는 캘리포니아의 벤츄라군에서 해수침투방지를 위한 염지하수 양수 파이프 플랜트 연구를 수행하였다. 총 5개의 염지하수 양수정을 이용하여 해수침투 면적을 25 km^2 에서 19 km^2 로 축소시킬 수 있었다. Coe의 연구는 해수침투를 방지하는데 염지하수 양수방법의 효과가 우수하다고 결론지었다. 파키스탄의 여러 지역에서 렌즈 형태로 존재하는 담지하수를 이용한 관개농업은 염지하수 상승추 현상을 야기하고 담지하수의 염도를 증가시켰다. 동 지역에서는 하부 염지하수 층에서 염수를 양수하는 방법으로 상부의 담지하수 양수정을 상승추 현상으로부터 보호할 수 있었다(Kumbhar et al., 2003, Asghar et al., 2001). 이집트 나일강 하구의 델타와 오만의 Al Wusta 대수층에서는 하부에 기수가 존재하는 담지하수를 개발할 때 하부의 기수 양수가 담지하수 관정을 보호하는 데 효과적이라고 발표된 바 있다(NWRA, 2000). 이 외에도 국내 일부 해안 지역에서는 해수 목욕탕을 위하여 염지하수가 개발되고 있다. 또한 해외의 경우 광산 산업에서 염지하수를 개발하는 사례들도 보고되고 있다.

전술한 바와 같이 제주도에서 막대한 양의 염지하수가 개발이 되고 있으나 염지하수 개발이 지하수 환경에 미치는 영향에 대한 평가는 거의 없는 실정이다. 제주도 지하수에 대해서는 해수침투 현상 등을 포함하여 담지하수 흐름 위주로 많은 연구가 수행되었다. 최근에 수행된 연구 중 일부 연구를 소개하면 다음과 같다. Kang et al. (2008)은 제주도 지역의 지하수위와 지표 표고 사이에서 해안선에서 4km 이내인 경우 상관성이 높고, 더 내륙에서는 상관성이 낮아진다고 보고하였다. Boo and Jung (2000)은 동부지역에서 대수층의 투수성이 크고 동부 지역이 해수

침투에 가장 취약하다고 하였다. Lee et al. (2006)은 제주도 동부지역의 관측정 지하수위 자료와 조석 변화 자료를 분석한 결과 수리특성이 피압대수층과 비피압대수층의 특성을 모두 보이고 있으므로 동부 지역 지하수 흐름에 대한 새로운 개념이 필요하다고 주장하였다. Kim et al. (2005)도 제주도 동부지역의 대수층이 피압 또는 비피압이라고 단순히 규정할 수 없다고 하였다. Choi et al. (2011) and Park et al. (2011b)은 지하수위 변동법을 이용하여 제주도의 지하수 함양율을 추정한 바 있다. Lee et al. (2008) 등은 해수침투관측망의 EC 자료를 분석하고 지역별 해수침투 특성을 분석한 바 있다. Kim et al. (2007)은 제주도 전역을 500×500 m 격자망으로 구분하고 각 격자에 속한 관측정의 수질을 분석하고 염수 이온의 경우 평균적인 개념에서 뚜렷한 증가세가 나타나지 않는다고 판단하였다. Kho (1998)은 제주 성산지역에서 담수체로 해수가 확산되는 현상을 모델링하고 해안에서 약 4,300 m까지 해수가 침입하고 있다고 보고하였다. 또한 양수 시 영향추 현상과 스크린 위치 등을 고려하여 해안지하수를 개발해야 하며 해수침입 방지 기법으로서 동시 양수법을 제시한 바 있다.

전술된 문헌 조사에서 나타났듯이 제주도의 염지하수 개발에 대한 영향이 심층 평가된 바가 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 용수 공급을 위한 담 지하수 개발과 어류 양식을 위한 염지하수 개발이 활발하게 이루어지고 있는 제주도 성산 유역에 대한 지하수 흐름 분석을 수행하고 담수와 염수 지하수 개발, 담수 개발, 염지하수 개발이 미치는 영향을 평가하였다.

2. 제주도 성산유역

2.1 일반 현황

제주도 동부에 위치한 성산 유역(Fig. 1)은 면적 114.9 km^2 에 인구 14,483명이 거주하는 소읍에 해당되는 농어촌지역으로 성산기상관측소의 자료에 의하면 연평균기온 15.4°C , 연평균강수량 $1,966 \text{ mm}$, 평균강수일수가 122.2일, 평균강우강도는 15.5 mm/일 의 기후학적 특성을 갖고 있다. 이 유역은 해안 일부지역의 사구지대로 제외하면 전형적인 현무암지대인 지형경사가 10% 이하인 표고 600 m 이하지역으로 평균지형경사가 4.5%로 완만한 지형을 형성하고 있다. 또한 토지이용은 해안가의 도시화지역을 제외하고 대부분 경작지와 초지로 이용되고 있으며, 토양의 형태가 Type A와, Type B인 배수가 양호하고 침투율이 우수한 수문학적 특성을 갖고 있다. 성산유역의 하천밀도는 0.13 km/km^2 , 유출곡선지수(CN)는 66.1, 평균경사는

10.9%, 유출률은 10%로 보고된 바 있다(Jeju and Kwater, 2003).

성산유역의 지하수는 염수와 담수 비중차이에 의한 렌즈형태로 지하수가 존재하고 있으며 담수층이 얇아 해수가 쉽게 혼합될 수 있는 특성을 갖는다고 알려져 있다.

2.2 지하수 관정 및 관측정 현황

2.2.1 담수 및 염수 지하수 양수관정

성산 유역에는 94개의 담수관정과 333개의 해수관정이 존재한다(Fig. 1). 담수관정의 양수량은 사각형의 크기로, 해수관정의 양수량은 삼각형의 크기로 도시하였다. Fig. 1에서 나타나듯이 내륙 지역에 위치한 담수관정의 양수량이 해안에 가까운 담수관정의 양수량보다 크게 나타난다. 또한 해안선 인근의 관정들의 굴착심도가 내륙에 소재한 관정들의 굴착심도보다 작다. 이는 해안선에 가까울수록 해수의 upconing 위험성이 커지므로 당연한 결과로 여겨진다. 담수관정 자료에 대한 통계치를 Table 1에 제시하였다.

333개 해수관정은 주로 해안선에 인접해있으나 일부는 해안선으로부터 수백m 이상 내륙에 위치한다(Fig. 1). 염지하수 양수량은 최소 $2 \text{ m}^3/\text{d}$ 에서 최대 $19,519 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 분포이며 평균 양수량은 $6,358 \text{ m}^3/\text{d}$ 이다. 총 양수량은 $208 \text{ 만 m}^3/\text{d}$ 에 달한다(Table 2). 해수관정의 표고는 최저 1 m에서 최고 73 m로 제시되었다. 그러나 최고 표고 지점이 해안선에 인접해있어 기록 오류로 판단된다.

성산유역에서는 담수 지하수 개발량의 70배에 육박하는 많은 양의 염지하수가 개발되고 있다. 두 종류의 지하수가 지역에서 중요한 가치를 가지므로 지하수 자원의 지속

Fig. 1. Pumping Wells and Monitoring Wells

Table 1. Statistical Properties of Hydrogeologic Characteristics at 94 Freshwater Pumping Wells

Item	Elevation (m)	Depth (m)	Bottom Elev. (m)	Pumping Rates (m ³ /d)	Water level (m)		Drawdown (m)	Specific Capacity (m ² /d)
					before pumping	after pumping		
Average	66.6	84.5	-17.9	307	2.5	-0.13	3.9	109.6
Std. Dev.	42.7	48.0	10.3	357	6.9	13.1	5.3	
Minimum	3.0	6.0	-47.0	15	-11.0	-19.0	-3.0	1.7
Maximum	158.0	205.0	0.0	1500	36.0	110.0	23.0	16,000
Sum				31,321				

Table 2. Statistical Properties of Hydrogeologic Characteristics at 332 Saltwater Pumping Wells (Excluding one well suspected of an erroneous elevation)

Item	Elevation (m)	Depth (m)	Bottom Elev. (m)	Pumping Rates (m ³ /d)	Equilibrium water level after pumping (m)
Average	6.2	55	-48.4	6,225.0	-0.86
Std. Dev.	3.1	10	9.9	4,667.6	4.2
Minimum	1	15	-69.3	2.0	-23
Maximum	39	81	-3	19,519.0	6.4
Sum				2,079,198	

가능한 관리를 위해서는 담수와 염수의 개발이 상호간에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

2.2.2 해수침투 관측정

성산유역의 해수침투 현상을 관측하기 위해 수산과 삼달지구에 해수침투 관측정이 설치되어 있다. 7개의 관측정은 각각 4개(수산(SS)계열)와 3개(삼달(SD)계열) 관측정으로 구성된 2개의 해수침투 감시망을 구성하며 해안선과 대략 수직방향으로 설치되어 있다(Fig. 1). 수산계열 해수침투 관측망은 해안선으로부터 1.4~8.1 km 거리에 설치된 4개의 관측정으로 이루어져 있으며 성산 유역의 중심부를 가로지르고 있다.

삼달계열 관측정은 2005년 11월에, 수산계열 관측정에서는 2003년 2월에 관측이 시작되었다. 본 연구에서는 2012년 3월 27일까지 각각 약 6년 5개월 및 9년 2개월 기간의 지하수위 자료와 전기전도도 자료를 분석하고 Table 3에 그 결과를 제시하였다. 하루 중에는 조석의 영향을 받고 있으나 장기적으로 지하수위는 주로 강수의 영향으로 인한 계절적 변화를 보였다. 지하수 동수경사는 수산계열에서 보다 삼달계열에서 더 크게 나타나고 있다.

해안지역에서 한 지점의 전기전도도는 일반적으로 센서의 연직 위치에 큰 영향을 받는다. 수산 4호정(SS4)을

제외한 6개 관측정의 센서 설치 심도는 Table 3에 제시하였다. 삼달2, 삼달3 그리고 수산4 관측정의 경우 센서 위치에 해수가 도달하지 않은 것으로 나타난다. 그런데 수산1~3호공의 경우 최소값은 담수의 전기전도도 범위에 속하며 표준편차가 매우 커서 담수-해수 천이대의 위치가 크게 변하고 있음을 보여준다. 이는 전술된 바와 같이 조위 및 강수의 영향으로 판단된다.

Fig. 2에는 수산1~수산4 관측정에서 측정된 연직방향 EC 검층 자료가 도시되어 있다. 수산4호공의 경우 -80 m 까지 염도가 담수의 범위에 있다. 수산1~수산3호공에서는 하부의 전기전도도가 상부의 그것보다 큰 값을 보이는 전형적인 해안 지역 지하수 특성을 보이고 있다. 각 관측공에서 2회씩 측정되었는데 수산1호공과 수산3호공은 각각 2003년 5월 초(우기 시작 직전)와 6월초(우기 시작 직후) 자료는 건기의 EC 분포를, 수산 2호공의 2003년 8월 말과 9월말 측정 자료는 우기에 해당된다. 건기와 우기의 EC 분포 형태는 유사성을 유지하나 우기에 담지하수 영역이 확장되는 상황을 잘 보여주고 있다. 수산2호공에서는 7월 말과 9월 말에 측정되어 2개의 EC 분포가 모두 우기 상황을 나타내고 있다. Fig. 2의 중측에서 까만색 원은 센서의 설치 위치를 나타낸다. 센서는 대체적으로 천이대의 상부에 설치된 것으로 나타난다.

Table 3. Statistical Properties of Hydrogeologic Data for Samdal (SD) and Susan (SS) Seawater-Intrusion Monitoring Wells

		SD1	SD2	SD3	SS1	SS2	SS3	SS4
Sensor Elev. (m)		-48.1	-47.8	26.2	-31.2	-39.7	-63.8	
Water Level (m)	Average	1.407	2.015	3.231	0.846	1.257	1.913	2.619
	Std. Dev.	0.2550	0.4952	1.8683	0.2081	0.3524	0.6275	0.7328
	Maximum	2.43	5.65	17.74	2.36	4.15	6.58	6.08
	Minimum	0.07	1.38	1.79	0.34	0.74	1.07	1.72
	Difference	2.36	4.27	15.95	2.02	3.41	5.51	4.36
Electrical Conduct. ($\mu S/cm$)	Average	8,726.0	218.5	144.0	10,951.5	9,392.6	21,122.6	110.1
	Std. Dev.	468.2	87.5	69.3	4,956.5	4,550.8	9,480.2	10.1
	Maximum	11,881.0	708.0	353.0	36,385.0	29,672.0	38,653.0	164.0
	Minimum	7,612.0	88.0	73.0	213.0	809.0	260.0	92.0
	Difference	4,269.0	620.0	280.0	36,172.0	28,863.0	38,393.0	72.0

Fig. 2. Vertical EC Logging Profiles for Susan Monitoring Wells (a) SS1, (b) SS2, (c) SS3 and (d) SS4. (Jeju and Kwater, 2003)

각 관측공별로 상이한 천이대의 양상을 보인다. 수산1호 공에서는 천이대의 두께가 대략 10m 정도로 가장 적고(Fig. 2(a)), 수산3호공의 경우 20~40m, 수산2호공의 경우 40~50m로 가장 크게 나타난다. 전반적으로 천이대의 두께가 크게 나타나지만 관측 기간 중에 그 형태는 크게 변화하지 않고 상하 이동하고 있는 것으로 나타난다.

3. 담수-염수 천이대에 대한 수정 Ghyben-Herzberg 이론

잘 알려진 Ghyben-Herzberg 이론은 담수와 염수 사이

에 선명한 경계와 수평방향 흐름만 존재한다는 가정 하에 유도되었다. 동 이론에 의한 평균해수면에서 경계면까지의 깊이(d)와 담수 수두(h_f) 사이의 비율은 다음과 같다 (Bear, 1979).

$$\frac{d}{h_f} = \frac{\rho_f}{\Delta\rho} \quad (1)$$

여기서, ρ_f 는 담수의 밀도, 그리고 $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$, ρ_s 는 해수의 밀도이다. 해수와 담수의 경우 $d/h_f (= \rho_f/\Delta\rho)$ 의 값은 대략 40이다.

어느 지점에서 두께가 Δt 인 천이대가 존재하는 경우

에 수평방향 흐름을 가정하면 연직방향(z)으로 다음의 정수압분포가 성립된다.

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (2)$$

또한 천이대 내의 지하수 밀도 분포가 선형이라고 가정하면 지하수 밀도 분포는 다음과 같다.

$$\rho = \begin{cases} \rho_f, & z > -d_U \\ az + b, & -d_U > z > -d_L \\ \rho_s, & z < -d_L \end{cases} \quad (3)$$

여기서, d_U 와 d_L 은 각 각 천이대 상부 경계와 하부 경계의 깊이이다(Fig. 3).

Eq. (3)의 계수 a 와 b 는 $z = -d_U$ 에서 $\rho = \rho_f$, $z = -d_L$ 에서 $\rho = \rho_s$ 라는 조건을 사용하면 $a = -\Delta\rho/\Delta t$, $b = \rho_f - (\Delta\rho/\Delta t)d_U$ 가 된다. 그러면 천이대 내 압력 분포는

$$p(z) = -g\left(\frac{a}{2}z^2 + bz\right) + c \quad (4)$$

여기서, 적분상수 c 는 $z = -d_U$ 에서 $p_U = (h_f + d_U)\rho_f g$ 라는 조건을 적용하면 $c = P_U + g(ad_U^2/2 - bd_U)$ 로 계산된다. 그러면 천이대 상부면과 하부면에 대한 수정된 Ghyben-Herzberg 비율은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{d_U}{h_f} = \frac{\rho_f}{\Delta\rho} - \frac{\Delta t}{2h_f} \quad (5)$$

$$\frac{d_L}{h_f} = \frac{\rho_f}{\Delta\rho} + \frac{\Delta t}{2h_f} \quad (6)$$

Eqs. (5) and (6)에서 첫 번째 항은 경계면에 대한 전통적인 G-H 비율(40)이며 둘째 항이 천이대에 대한 수정항

Fig. 3. Transition Zone (TZ) with Linear-Density Distribution Assumption

이다. 천이대 상부 경계면에 대한 수정 G-H 비율($\Delta t/h_f$)을 h_f 와 Δt 의 함수로 도시하면 Fig. 4의 곡선군으로 나타낼 수 있다. 곡선군의 제일 위쪽 곡선(직선)은 $\Delta t=0$ (경계면)에 대한 G-H 비율(40)에 해당하며 천이대의 두께가 커질수록 비율이 작아진다.

천이대 하부 경계(d_L/h_f)에 대한 곡선군은 $d_U/h_f=40$ 선을 축으로 하는 대칭 곡선군으로 나타난다. 만약 어느 지점에서 천이대의 두께가 크게 변하지 않는다면 상기 관계식을 이용하여 수위 관측자료로부터 천이대의 표고 변화를 추정할 수 있다.

수산1~3 관측정에 대한 EC 검층자료(Fig. 2)로부터 개략 산정된 천이대의 두께와 장기 관측 지하수위(Table 3)를 이용하여 천이대 상하부 경계의 표고를 산정하고 관측된 천이대 상 하부경계 표고를 비교하였다(Table 4).

수정 G-H이론으로 산정된 계산 결과와 관측자료 간의 비교는 비교적 양호하다. 그러나 여기서 천이대의 두께가 지하수위의 변동과 무관하게 일정하게 유지된다는 가정과 특정 시점에 취득된 EC 검층 자료로부터 관측된 경계면 상하부 표고를 장기 관측 지하수위의 평균값으로 계산한 상하부 표고와 비교하는 데에 무리가 있으므로 수정 G-H 이론의 현장 자료 적용성에 대한 추가 조사가 필요하다.

Fig. 4. Modified Ghyben-Herzberg Ratios for the Upper Limit of a Transition Zone

Table 4. Observed and Computed Transition Zone (TZ) Elevations

Well	Approximate Observation (m)				Computed (m)	
	h_f	Δt	$-d_U$	$-d_L$	$-d_U$	$-d_L$
SS1	0.846	10	-30	-40	-28.8	-38.8
SS2	1.257	50	-30	-80	-25.0	-75.2
SS3	1.913	40	-50	-90	-56.5	-96.5

4. 지하수 흐름모델

4.1 개념화

현 기술 수준에서 해안 지역의 담수와 염수 흐름을 모의하는 데 가장 정밀한 이론은 밀도 변화 흐름과 용질 수송 방정식 접근 방법이다. 그러나 이 방법은 까다로운 수치 안정성 조건의 제약을 받으며 비선형성이 크기 때문에 넓은 지역에 적용해야 할 경우 미지수가 많아져서 계산 시간이 오래 걸리고 수렴에 어려움이 있는 단점을 가진다. 본 연구에서는 해안 지역의 담수와 염수 흐름을 모의하기 위하여 담수와 염수가 서로 섞이지 않는다는 가정에 기반을 둔 경계면 모델을 이용하였다(Huyakorn et al., 1996). 경계면 모델은 천이대를 모의할 수 없다는 약점이 있으나 넓은 지역에 대한 담염수 지하수 흐름 모의가 상대적으로 용이하다는 유리한 측면이 있으므로 광역의 지하수 관리 대책 수립에 적합한 모형이다. Shi et al. (2011)은 실험실의 소형 모래상자를 이용한 실험에서 경계면 모델이 양수정의 염도를 충실하게 모의할 수 있음을 보인 바 있다. 경계면 모델은 관정 스크린 구간, 담수층과 염수층의 두께 그리고 대수층의 투수량계수를 이용하여 관정에서 양수되는 지하수의 염도를 평가한다.

모델링을 위하여 성산 유역을 가로 161×146개의 격자망으로 이산화하였다. 격자의 크기는 100×100m이다. 총 23,506개의 절점 중에서 12,282개의 절점이 유역 내에 속한 유효 절점이다. 해안선에 위치한 절점에서 해수 방정식은 일정 수두(1st type) 조건을 담수 방정식에는 수두 종속 흐름률(3rd type) 조건을 적용하였다. 그 외의 경계에는 no-flux 조건을 적용하였다(Huyakorn et al., 1996). 성산 유역의 지하수 함양률은 57.5%, 대수층의 유효공극률은 0.14로 조사된 바 있으며, 대수층 하부에는 서귀포층이 존재하는데(성산유역의 경우 표고 약 -100m 정도에) 투수성은 매우 작아서 불투수층으로 알려져 있다(Jeu and Kwater, 2003).

제주도에서는 1960년대 후반부터 지하수 개발이 본격적으로 시작되었다. 그러나 본격적인 지하수 관측은 2000년대 들어 시작되었기 때문에 개발 전 지하수 상태와 개발에 대한 지하수의 변화 이력을 알 수 없다. 따라서 본

연구에서는 현재(2012년 초)의 담수와 염수 지하수 개발이 장기간 지속되었으며, 현재의 지하수 흐름은 정상 상태에 도달한 것으로 가정하였다.

4.2 모델 보정 및 검정

본 연구에서는 수치모델에서 관측 지하수위를 재현하기 위하여 대수층의 수리전도도를 조정하였다. Jeju and Kwater (2003)는 동부유역의 27개 관측망에서 측정한 수리전도도 분포가 최소 173 m/d에서 최대 2,266 m/d, 평균 839 m/d, 중앙값 659 m/d로, 광역상수도 1단계 시설 수원에 대한 수리상수 조사에서는 성산 유역의 남측과 북측에 위치한 표선과 구좌 유역에서 7개 시험정-관측정 세트에 대수성 시험결과 수리전도도가 260~340 m/d의 범위에 있다고 보고하였다. 그러나 소유역에 따라 투수계수를 구분할 근거는 제시되지 않았다. 다만 Jeju (2004)는 용암이 바닷물에 닿아 급격히 냉각될 때 용암들이 부서져 투수성이 좋은 지층이 형성된다고 한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 해안지역의 투수성이 내륙보다 더 클 것으로 판단하고 수리전도도를 내륙과 해안으로 구분하였다(Fig. 5).

Fig. 5. Calibrated Hydraulic Conductivity Distribution

전술된 수산과 삼달 계열의 7개 관측정의 관측 지하수 위자료를 이용하여 지하수 흐름모델을 보정하였다. 보정한 결과 내륙 지역의 수리전도도는 550 m/d, 그리고 해안선으로부터 약 700 m 이내 지역(Fig. 5)의 수리전도도는 8,000 m/d일 때 계산 지하수위의 평균 오차가 0.1 m 이내로 감소되었다. 본 연구에서 보정된 내륙 지역의 수리전도도 자료는 기존 조사(Jeju and Kwater 2003)에서 보고된 평균 값 분포의 중간 정도에 위치하고 있다. 개별 관측정 별 비교결과는 Table 5에 제시하였다.

계산 지하수위는 삼달계열 지점에 대해서는 과소평가, 수산계열 지점에 대해서는 과대평가 되었다. 이는 삼달 관측망 지역의 투수계수가 더 작거나 함양량이 더 클 개연성이 있는 것으로 판단되는 바 이에 추가 조사가 요구된다.

관측정 별 계산 지하수위 오차를 관측 수위자료의 표준편차와 비교하면 수산2와 삼달1을 제외한 나머지 5개 관측정에 대해서는 오차가 표준편차보다 작으며 계산결과가 관측자료의 평균값에서 그다지 크게 벗어나지 않음을 보여준다. 다만 삼달1의 경우 계산 지하수위가 관측자료의 범위를 많이 벗어나는 것으로 나타난다.

성산 지역의 지하수 관측정 개수는 7개소에 불과하여 모든 관측정의 지하수위 자료가 모델 보정에 이용되었다. 보정된 모델의 검증(validation)에는 경계면 표고와 양수정의 염도가 이용될 수 있다. 본 연구에서는 양수정의 염도 자료가 확보되지 않아 관측정의 EC 자료를 검증에 이용하였다. 수산 1~3 관측정에 대한 계산된 담수/해수 경계면 표고(Table 5)는 2003년에 수행된 동 관측정의 EC 검증자료(Fig. 2)에서 관측된 천이대 범위의 하부에 위치하는 것으로 나타난다. 계산된 경계면 표고가 관측된 천이대의 범위를 크게 벗어나지는 않으나 모델의 검증 결과

로는 충분하지 않다. 추가 검증을 위하여 향후 양수정의 염도 자료를 조사할 필요가 있다.

4.3 현재 상태 지하수 흐름 특성

전술된 성산유역 지하수 흐름 모델의 결과를 이용하여 흐름 특성을 분석하였다. 담수와 염수 지하수 개발의 영향이 평형상태에 도달한 것으로 가정된 현재 상태에 대한 지하수위 분포를 Fig. 6에 제시하였다. 성산유역의 대수층의 투수성이 큰데다 100개에 달하는 담수 관정이 비교적 유역에 고르게 분포하고 있고 담수 양수량이 그다지 크지 않아 등수위선은 거의 동심원의 형태를 가지고 있다. 유역의 최상류에서 수두는 2.8m 정도로 모의되었다.

Fig. 6. Simulated Groundwater Potentiometric Map

Table 5. Comparisons Between Observed and Computed Data

Well	Observation				Computed			
	Water Level (m)	Std. Dev. (m)	TZ Elev. (m)		Water Level (m)	Error (Comp-Obsvd)	Error/Std.Dev	Elev. of Sharp Interface(m)
SS4	2.62	0.73			2.79	0.0763	0.10	
SS3	1.91	0.63	-50	-90	2.35	0.437	0.69	-94.58
SS2	1.26	0.35	-30	-80	1.80	0.541	1.55	-72.46
SS1	0.85	0.21	-30	-40	1.02	0.175	0.83	-41.28
SD3	3.23	1.87			2.32	-0.912	-0.49	-93.58
SD2	2.01	0.50			1.97	-0.0375	-0.08	-79.77
SD1	1.41	0.26			0.55	-0.859	-3.30	-23.13
					Avg.	-0.0826		

해수썰기의 두께 분포를 Fig. 7에 도시하였다. 해수썰기 두께 분포도 등수위 선과 유사한 형태를 가지고 있으며 최대 침투 지점은 수산3 관측정과 수산4 관측정 사이 지점으로 나타났다.

성산 유역에서 담수관정과 해수관정에서 양수되는 지하수의 특성을 분석하였다. 담수 관정 94개로 유입되는 총 해수량은 $105\text{ m}^3/\text{d}$, 평균 $1\text{ m}^3/\text{d}$ 로 나타났으나 한 개 관정에서 총 해수 토출량의 60%를 초과하는 $68\text{ m}^3/\text{d}$ 가 토출되는 것으로 나타났다. 나머지 담수관정들에서는 해수침투는 심각하지 않은 것으로 판단된다. 또한 333개 해수관정에서 유출되는 담수량은 $375\text{ m}^3/\text{d}$ 에 불과하여 담수 낭비가 그다지 심하지 않은 것으로 판단된다.

해수관정의 심도는 확보되어 있으나 설치된 스크린에 대한 정보가 없다. 담수관정들은 관정 깊이 전체에 스크린이 설치된 것으로, 해수 관정의 경우 스크린이 관정 하부 30%에만 설치된 것으로 가정하였다(Lee, 2012). 스크린이 해수관정 전체 깊이에 설치된 경우에는 염수관정에

서 토출되는 담수의 양이 약 $10\text{ 만 m}^3/\text{d}$ 에 달하며, 유역의 대부분 지역에서 해수침투를 심각하게 촉진시키는 것으로 나타났다. 따라서 염지하수 개발이 담 지하수체에 미치는 부정적 영향을 줄이기 위해서는 해수관정의 적정 스크린 심도를 유지해야할 것으로 판단된다.

4.4 지하수 개발의 영향

성산유역의 담수와 염수 지하수 개발이 유역의 지하수 흐름에 끼친 영향을 평가하기 위하여 전술된 현재 상태(시나리오 A)에 대하여 보정된 흐름 모델을 이용하여 다음의 3 가지 시나리오에 대한 지하수 흐름 모델링을 수행하였다: (B) 지하수 개발 전 상태, (D) 담수만 개발(94개 관정, 총 양수량 $31,321\text{ m}^3/\text{d}$), (D) 염수만 개발(333개 관정, 총 양수량 $2,79,198\text{ m}^3/\text{d}$). 총 4가지 시나리오에 대하여 결과되는 해수썰기의 특성을 분석하였다. 또한 현재 상태와 추가된 3가지 시나리오 간의 상호 비교를 통하여 담수와 염수 개발의 영향, 염수 개발의 영향, 그리고 담수 개발의 영향을 분석하였다.

지하수 개발 시나리오에 따라 형성될 것으로 예상되는 성산 유역의 해수썰기 특성을 Table 6에 제시하였다. 흥미로운 점은 현재 상태(담수 및 염수 지하수 개발, 시나리오 A)와 담수만 개발 상태(시나리오 C)에서 예상되는 해수 썰기 특성이 유사하며, 개발 전 상태(시나리오 B)와 해수만 개발 상태(시나리오 D)에서 예상되는 해수 썰기 특성이 유사하다는 점이다. 이는 현재 상태의 해수 썰기 특성이 거의 담수 개발의 영향이며 해수 양수는 해안선 인근의 해수 수두를 낮추지만 내륙의 해수침투 양상에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Table 7에는 시나리오 A와 나머지 시나리오의 개별 비교를 통하여 특정 종류의 지하수 개발이 해수 썰기의 위치(절점)별 두께 변화특성을 분석하고 통계결과를 제시하였다. 담수와 염수 개발은 개발 전 상태 대비 대부분의 지역에서 해수썰기 두께가 증가하였으나 일부 지역에서는 염수 개발의 영향으로 두께가 감소한 것으로 나타났다. 개발 전 상태 대비 현재 상태의 해수썰기 두께 변화는 대부분 담

Fig. 7. Simulated Thickness (m) of Saltwater Wedge

Table 6. Characteristics of Saltwater Wedges Formed by Various Types of Pumping

Scenario	Area (km^2)	Vol. (km^3)	Avg. Thickness (m)	Avg. Piezometric Head (m)
A	98.68	4.448	45.1	-0.015
B	90.71	4.164	45.9	0
C	98.93	4.467	45.1	0
D	90.96	4.163	45.8	-0.015

Table 7. Impact of Various Types of Pumping on the Thickness of the Saltwater-Wedge

Impact of Pumping	Area (km ²) in which SW thickness		Nodal Changes (m)			Scenarios Compared	
	Decreased	Increased	Avg.	Max.	Min		
Freshwater & Saltwater	5.46	90.17	2.88	6.28	-5.89	B	A
Saltwater	85.9	7.35	-0.19	0.23	-6.44	C	
Freshwater	0.0	95.46	2.89	6.08	0	D	

수 개발의 영향임을 의미한다.

성산 유역의 지하수 개발이 해수침투에 끼친 영향을 Fig. 8에 도시하였다. 영향은 다음의 4가지로 구분된다: 개발 전에는 담수 영역이었으나 개발로 인해 해수가 침투되었거나, 썰기 두께가 증가하였거나, 두께 변화가 없었거나, 오히려 감소하였다. 지하수 개발 전 상태에 비하여 해수침투는 내륙으로 약 7~8백m 정도 침범하였으며 유역의 대부분 지역에서 해수침투 두께가 증가하였다. 그런데 염지하수 관정이 집중된 일부 해안 지역에서는 해수침투의 두께가 감소하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

담수와 염수 지하수가 활발하게 개발되고 있는 제주도 성산 유역에 대한 경계면 지하수 흐름 모델링을 통하여 지하수 개발 영향을 평가하였다. 관측 자료의 한계로 제한적으로 검보정된 모델을 이용하여 3가지 개발 시나리오에 대한 결과를 비교하여 담수와 염수 개발의 영향, 염수 개발의 영향, 그리고 담수 개발의 영향을 추정하였다. 개발 전 상태에 비하여 현재 상태(담수와 염수 개발)의 해수침투는 약 800m 내륙으로 침투하였으며 유역의 대부분 지역에서 해수침투 두께가 증가하였다. 그러나 염 지하수 관정이 밀집된 일부 해안 지역에서는 두께가 감소한 것으로 나타났다. 염지하수 개발량이 담지하수 개발량보다 훨씬 더 크나 현재의 지하수 개발로 인한 영향은 대부분 담 지하수 개발의 영향인 것으로 나타났다. 염지하수 개발은 해수침투 면적이나 썰기의 두께를 감소시키는 긍정적 영향과 지하수위를 낮추는 부정적 영향을 함께 끼치는 것으로 나타났다. 그러나 염지하수 개발은 관정의 스크린 심도가 충분하지 않으면 많은 양의 담수를 낭비하고 큰 부정적 영향을 끼칠 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 담수와 염수 지하수가 동시에 개발되는 경우에는 지하수위 강화와 해수침투 저감의 상반되는 영향을 고려하여 적정 수준의 염수 개발량을 결정하는 것이 필요하다.

본 연구는 제한적 현장 자료를 바탕으로 수행되었다. 따

Fig. 8. Changes in Thickness of the Saltwater Wedge Caused by Development of Freshwater and Saltwater

라서 모델 결과의 신뢰도 제고를 위하여 양수정의 전기전도도의 정기적 측정과 스크린 자료 조사, 대수층 수리지질 특성의 세분화, 지하수 흐름의 계절 및 조위 영향 분석 등을 통한 추가 연구가 필요하다.

제주도 성산 유역의 해수침투 관측정 전기전도도 연직 검층 자료에서는 두께가 상이한 천이대가 관측되었다. 이러한 경우 해수면과 경계면 사이의 거리는 해수면 상부 지하수위의 40배라는 전통적인 Ghyben-Herzberg (GH) 비율은 적용될 수 없다. 본 연구에서는 천이대 내 지하수 밀도분포가 직선형이라는 가정 아래 수정 GH 비율을 산정하였다. 수정 GH 비율은 전통적 비율(≈ 40)과 수정항의 합으로 나타났는데 수정항은 천이대의 두께와 지하수위의 함수로 나타났다. 수산 관측정에서 획득된 EC 연직 검층 자료와 비교한 결과 본 연구에서 계산된 수정 GH 비율과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으나 더욱 많은 경우에 대한 적용성 검증 연구가 필요하다.

References

- Aliawi, A.S., Mackay, R., Jayyousi, A., Nasereddin, K., Mushtaha, A., and Yaqubi, A. (2001). "Numerical simulation of the movement of saltwater under skimming and scavenger pumping in the pleistocene aquifer of gaza and jericho areas." *Transport in Porous Media, Palestine*, 43, pp. 195-212.
- Asghar, M.N., Ahmad, S., Shafique, M.S., and Kahlown, M.A. (2001). *Root zone salinity management using fractional skimming wells with pressurized irrigation*. Inception Report, International Water Management Institute (IWMI) Pakistan Lahore. pp. 35.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*, McGrawHill.
- Boo, S.A., and Chung, G.C. (2000). "Saltwater intrusion into coastal aquifers of Eastern Jeju Region." *Proceedings The Journal of Engineering Geology*, pp. 77-84.
- Choi, H.M., Lee, J.Y., Ha, K.C., and Kim, G.P. (2011). "The Study on Time Series Analysis of Groundwater Data and Ground water Recharge in Jeju Island." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 21, No. 4, pp. 337-348.
- Coe, J.J. (1972). "Seawater intrusion extraction barrier." *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 98, No. 3, pp. 387-403.
- Huyakorn, P.S., Park, N.S., and Wu, Y.S. (1996). "Multiphase approach to the numerical solution of a sharp-interfaces saltwater intrusion problem." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 93-102.
- Jeju (2004). Geology and volcanic activities in Eastern Jeju.
- Jeju and Kwater (2003). Comprehensive survey of hydro-geology and groundwater of Jeju (III).
- Jeju Peoples Daily (2012). "Water-resources exploitation caused by inefficient water supply system." November 20th
- Kang, D.H., Yang, S.I., Kim, T.Y., Park, H.J., and Kwon, B.H. (2008). "The Variation Characteristics of Groundwater Level with Distance from Shoreline in the Jeju Island." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 2, pp. 157-166.
- KIGAM (2011). Assessment of sustainable quantity and development of functional water.
- Kim, G.B., Kim, J.W., Won, J.H., and Koh, G.W. (2007). "Regional Trend Analysis for Groundwater Quality in Jeju Island-Focusing on Chloride and Nitrate Concentrations-." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 6, pp. 469-483.
- Kim, K.Y., Shim, B.O., Park, K.H., Kim, T.H., Seong, H.J., Park, Y.S., Koh, K.W., and Woo, N.C. (2005). "Analysis of Hydraulic Gradient at Coastal Aquifers in Eastern Part of Jeju Island." *Econ, Environ. Geol.* Vol. 38, No. 1, pp. 79-89.
- Kim, S.S., Kim, D.K., Son, P.W., Lee, C.H., and Ha, D.S. (2003). "Temporal and Spatial Variations of Water Quality of the Coastal Saline Groundwaters in Jeju Island." *J of Aquaculture*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-23.
- Koh, B.R. (1998). A study on the model for prediction of groundwater quality and contamination, Yeungnam University, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering.
- Kumbhar, R.A., Samoon, H.A., and Ansari, A.K. (2003). "Control of groundwater pollution by scavenger wells." *Second International Conference on Irrigation and Drainage* (eds: Clemmens, A.J., and Anderson, S.S.), Phoenix, Arizona, pp. 12-15.
- Lee, B.C. (2012). Personal communication.
- Lee, B.J., Koo, M.H., Park, Y.S., Koh, G.W., and Park, K.H. (2006). "Hydraulic diffusivity and possibility of conduit-flow of groundwater in eastern part of Jeju island." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 43, No. 3, pp. 439-454.
- Lee, B.J., Moon, S.H., Kim, G.P., Kim, Y.C., Kim, Y.J., and Koh, K.W. (2008). "Development of a Groundwater Sampler and Test in a Well Affected by Seawater Intrusion." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 3, pp. 331-338.
- National Water Resources Authority (NWRA) (2000). Republic of yemen, summary report of the proceedings of the regional workshop on sustainable groundwater management in the middle east and North Africa
- Park, N.S., Park, J.Y., Mun, Y.R., and Kim, J.K. (2011a). "Cost Reduction for Small-Scale Desalination Plants." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.

- 44, No. 10, pp. 809-817.
- Park, W.B., Kim, G.P., Lee, J.H., Moon, D.C., Kim, S.J., Koh, G.W., Pang, S.J., and Pang, I.C. (2011b). Variation of Groundwater Level and Recharge Volume in Jeju Island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 7, pp. 857-872.
- Shearer, T.R., Wagstaff, S.J., Calow, R., Stewart, J.A., Muir, J.F., Haylor, G.S., and Brooks, A.C. (1997). *The potential for aquaculture using saline groundwater*. BGS Technical Report WC/97/58.
- Sherif, M.M., and Hamza, K.I. (2001). "Mitigation of Seawater Intrusion by Pumping Brackish Water." *Transport in Porous Media*, Vol. 43, pp. 29-44.
- Shi, L., Cui, L., Park, N., and Huyakorn, P.S. (2011) Applicability of a Sharp-Interface Model for Estimating Steady-State Salinity at Pumping Wells-Validation Against Sand Tank Experiments." *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 124, pp. 35-42.

논문번호: 13-014	접수: 2013.02.09
수정일자: 2013.04.21/05.06	심사완료: 2013.05.06