

PE1) 해안지하수의 염분화특성과 해수침입 해석

송인렬, 고병련¹, 최윤영², 배상근³

경일대학교 도시정보지적공학과, ¹제주산업정보대학 토목환경
과, ²상주대학교 환경공학과, ³계명대학교 토목공학과

1. 서 론

해수는 장소에 따라 그 성분 농도에 차이가 있지만 주요성분에 대한 이온상호간의 존재비는 거의 일정한 비율로 존재하므로 표준해수의 이온성분을 토대로 지하수가 해수에 의해서 염분화된 것인지의 여부를 추론할 수 있다(Gupta, A. D., 1985). 현재 해안지역의 무분별한 지하수 개발은 해수의 침입에 의한 해안지역의 염분화를 가속시킴으로서 해안지역 지하수에 대한 잠재적 오염으로 확대되어 가고 있는 실정이다. 해안 대수층에서 해수침입을 모의하는 모델들은 대부분 용질-수송방정식의 해를 사용하고 있다. 해수침투의 모형들은 전통적인 Dupuit가정에 의하여 분석학적으로 해결하는데, 이와 같은 해는 Henry(1959), Dagan과 Bear(1964) 등에 의해 발전되었으며, 이러한 모형들은 유한차분법, 유한요소법, 경계요소법으로 발전되어 왔다.

본 연구에서는 먼저, 제주도 동부지역의 해안 저지대 분포되어 있는 관정 중 관측조사가 가능한 지하수를 중심으로 해안대수층에서 염분화로 진행되는 지하수의 이화학적 수질특성 고찰하며 해안지하수의 염분화의 특성을 제시하여 염분화 가능성이 높은 제주도와 같은 도서지역에서 해안지하수 개발뿐만 아니라 이용·관리에 적용할 수 있는 기초자료를 제시하고 다음으로, 해안대수층 지역에서 해수침입에 따른 지하수 염분화의 분포범위와 분포밀도 등을 예측하는데 있어, 수치모델의 적용 분석결과를 제시하고 해수침입으로 인한 해안지역 지하수의 염분화 확산을 억제할 수 있는 과학적 근거를 제시하고자 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 적용 및 분석

2.1. 대상유역 설정 및 자료구축

본 연구는 제주도 동부지역에서 지역적 위치를 고려하여 해수의 영향을 받는 것으로 예상되는 해안지하수의 수직·수평적 수질특성 및 수질형태를 파악하기 위하여 2002년 4월부터 8월까지 주기적으로 시료를 채수하여 분석하였다. 총 14개 지점으로 기 개발된 11개 소와 지표면에 자연 유출하는 용출수 3개 지점에 대해 지하수의 수질조성비를 나타내는 양·음이온을 대상으로 이화학적 분석을 실시하였으며, 매월 1회에 걸쳐 현장조사를 통해 EC에 대하여 측정하였다. 또한 염분화의 진행정도를 보다 확실히 하기 위하여 해수성분에 존재하는 불소(F), 브롬(Br), 스트롬(Sr)를 가스크로마토그래피법으로 추가하여 분석하였다(Moore, Y. H., 1992). Table 1은 연구대상지역에서 분석지점으로 선정한 관정을 지역, 위치, 고도, 그리고 해안까지의 거리로 구분하여 제시하였다(김성홍, 1993 ; 오상실, 1993).

Table 1. Present conditions of each well

Area	Well No.	location	Elevation (m)	Depth (m)	Natural water level(m)	Dynamic water level(m)	Distance from costline(m)
Sungsan	D-28(SW3)	Kosung	28.24	41	27.2	27.3	1800
	D-30	Onpyung	33.26	50	32.4	33.65	1400
	D-69	Susan	109	132	100	146	5800
	D-124(SW4)	Susan	28.65	51	27.3	33	2400
	D-194	Nansan	88.28	102	87.5	92.5	3400
	D-282	Susan	130	170	151	158	6750
	W-15	Nansan	40.02	55	38.8	40.8	3300
	Susan3(SW5)	Susan	92.09	120	91.4	107	5700
Kujwa	D-57	Pyungdae	57.28	79.5	56	56.1	2050
	D-152	Sangdo	40.55	60	37.5	43.6	2600
	D-200	Jongdal	52.02	75	51	62	2700
	D-203	Pyungdae	68.08	90	67	73	2900
	W-10	Sangdo	29.78	50	29.7	29.8	2000
Pyosun	Sungeup2	Sungeup	147	173	124	150	7100

2.2. 지하수의 화학적 특성검토

제주도 동부지역에서 이화학적 분석 결과에 의해 Cl을 기준으로 한 음이온과 양이온의 분포를 보면 Fig. 1과 같다. 연구대상지역인 동부지역의 Cl농도는 Na와 0.945의 강한 상관관계를 갖고 있는 것을 볼 수 있으며, SO₄와 Mg, 그리고 EC와의 상관성도 0.9이상으로 상관성이 높음을 알 수 있지만 Ca와 NO₃, 그리고 HCO₃와의 상관관계는 거의 없다는 것을 알 수 있다. 해수의 영향을 직접적으로 받고 있는 해안용출수를 제외한 미량원소 Sr과 F, 그리고 Br의 분석치를 Cl과 관련하여 도표화하고 상관관계를 구한 결과, 미량원소인 경우 Cl과의 상관성이 0.9에 근접할 정도로 상관성이 매우 크게 나타나고 있었다.

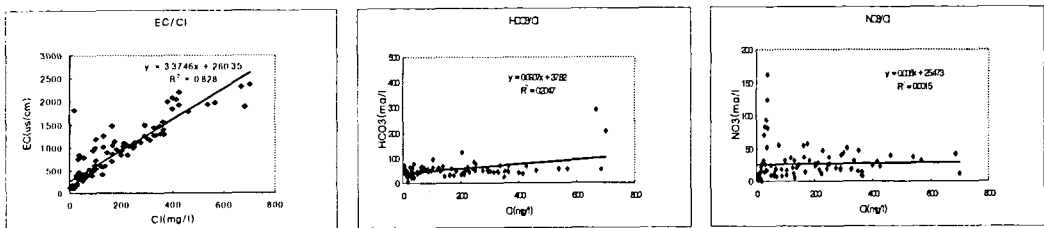


Fig. 1. Distribution plots of major ions and EC versus chloride.

2.3. 수치해석 유역 및 해석자료

해석대상지역으로 선정된 제주도 동부지역의 성산지구인 고성-수산일대의 일부 관정에서는 염분도가 먹는 물 기준치인 150mg/l를 상회하며, 농업용수기준인 300mg/l를 훨씬 초

과하는 실정으로 해수침입에 의한 염분화는 매우 심각하게 나타나고 있는 지역이다. 오염 예측을 위한 모델의 대상지역 크기는 이 지역의 염분 확산정도를 고려하여 폭(y) 2,000m, 길이(x) 5,000m로 하였으며 z축 방향의 대수층의 깊이는 난대수층을 포함하여 300m로 고정한 횡단면 직육면체를 모의 대상 영역으로 하였다.

먼저, 선정된 모델링지역에 적용된 격자망은 수평방향인 X축과 깊이방향 Z축에 대한 2방향에 대해서 100개의 격자점으로 형성된 12×7의 격자망을 사용하였다. 격자망의 수평방향인 X축의 거리는 신양해안에서부터 수산2리 부근까지의 5,000m이며, Z축의 깊이는 평균 해수면으로부터 300m이다.

다음으로, 매개변수 추정에서 고성-수산 지구는 FOB의 암층으로 주 대수층을 형성하고 있으며 그 하부에는 세화리 현무암이라는 미고결층과 미고결층하부에는 고결층인 응회암이 분포되어 있으므로 주 대수층의 깊이를 300m로 정하였다. 공극율은 현무암지대의 공극율 4~40%로 알려져 있으나, 그 변화폭이 매우 크므로 모델링에 적용된 값은 기왕의 보고된 자료에 근거하여 공극율을 20%로 적용하였다.

마지막으로, 확산계수의 추정에서는 Anderson(1979)이 현무암지역에서 적용한 중확산지수의 값인 30.5m와 Fried(1975)가 제시한 40~100m 및 Table 3을 참고하여 시행착오법에 의해 최종적으로 매개변수를 결정하였다.

Table 2. Hydraulic parameter of wells in the modelling zone

Well No.	Altitude (m)	Well Dep. (m)	Water Table (m)	Pumping Rate (m ³ /day)	T (m ² /day)	S	K (m/day)	Distance from coast
Sw3	28.24	41.0	1.04	1901.0	1.87E+02	3.60E-02	1.36E+00	1800m
Sw4	28.65	51.0	1.35	1650.0	1.182E+01	4.00E-01	1.08E+00	2400m
Sw5	73.81	82.0	1.41	1052.0	1.77E+01	-	2.71E-01	4800m

Table 3. Hydraulic characteristics of Sungsan basin (The middle area)

Area		Divide Coefficient (mg/g)	Hysteresis Coefficient	Longitudinal Dispersion Coefficient	Dispersion Coefficient (m ² /hr)	Field Infiltration (cm/hr)
Sungsan	Distribution range	2.67~19.29	3.65~14.79	-	-	5.29~83.9
	Mean	7.46	7.29	2.0	77.6	28.24

3. 비교 및 고찰

본 연구에서 염분화 현상을 보이는 지하수인 경우에는 Na+K와 Cl값이 크게 나타나고 있으며, 담수 지하수인 경우에는 Mg와 HCO₃값이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 D-152, W-10, D-124 및 D-28은 같은 위치의 지하수이지만 심도에 따라 수질 성분조성비가 다르고 Na+K와 Cl 성분이 크게 나타나고 있다. D-30과 W-15에서는 심도별 수질성분

조성에 있어 특별하게 큰 차이를 보이지 않고 있으며 표고 50m를 경계선으로 하여 해안저지대에는 해수의 영향을 받는 NaCl형, 50m 상부지역에는 담수상태의 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형 지하수가 거의 분포하고 있음을 알 수 있다. 수치해석을 이용한 결과 양수의 영향은 해안으로부터 대수층내의 염분화 현상을 심화시키고 내륙으로의 침입거리도 크게 확산하는 것으로 나타났다. 관측정에서 모델에 의한 관측치와 부정류상태에서의 염수확산 상대증가비가 180일, 1년, 5년, 10년 및 20년에 있어 MOCDENSE모델인 경우에 SW3에서는 -0.15%, -0.31%, -0.51%, -0.60% 및 -0.73% 증가하였으며 SW4에서는 각각 -0.12%, -0.22%, -0.37%, -0.55% 및 -0.69% 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 분석에서는 양수정(SW5)에서 장기간 양수할 경우 두 관측정에서의 염수 상대증가비가 해안에 가까운 관측정(SW3)일수록 큼을 알 수 있다. 한편, 모델의 결과에서 양수기간이 10년 이상 경과한 경우에 양수로 인한 두 밀도류의 이송과 확산의 영향으로 약 4000m까지 해수가 침입되고 있는 것으로 분석되었다. 대상지역에 선정된 지하수의 수질성분조성을 위치와 공간적 특성으로 비교하기 위하여 Fig. 2로 나타내었다.

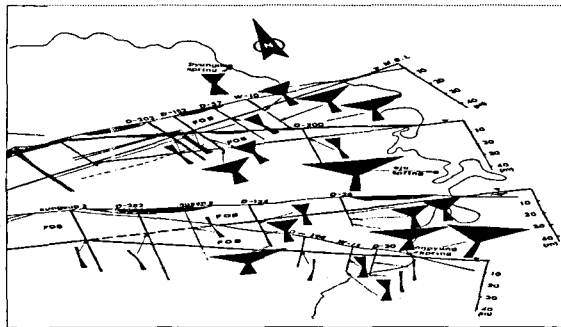


Fig. 2. Local pattern of groundwater quality by stiff diagrams.

4. 결 론

연구대상지역인 동부지역의 Cl농도는 Na와 0.945의 강한 상관관계를 갖고 있는 것을 알 수 있으며, SO_4 와 Mg 그리고 EC와의 상관성도 0.90이상으로 상관성이 높게 나타났으나 Ca, NO_3 및 HCO_3 와의 상관관계는 거의 없는 것으로 분석되었다. 미량원소 Sr과 F, 그리고 Br의 분석치를 Cl과 관련하여 도표화하고 상관관계를 구한 결과 Cl과의 상관성이 0.9에 근접할 정도로 상관성이 매우 크게 나타나고 있었다. 수질성분 분석을 Stiff diagram을 사용하여 지역별로 위치와 공간에 대해서 비교한 결과, 염분화 현상을 보이는 지하수인 경우에는 Na+K와 Cl값이 높게 나타나고 있으며, 담수 지하수인 경우에는 Mg와 HCO_3 값이 높게 나타나고 있었다. 표고 50m를 경계로 하여 해안저지대에는 해수의 영향을 받는 NaCl형, 50m 상부지역에는 담수상태의 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형 지하수가 거의 분포하는 것으로 분석되었다. 모델링 지역에 최적화된 확산계수를 결정하기 위하여 유한차분에 의해 종확산지수를 40, 60, 80, 100의 값을 정류상태에서 시행착오법에 의해 점진적으로 적용한 결과, 종확산지수가 100일 때가 가장 안정화된 상태로 모의되었으며, 해안에서부터 약 1,500m지점을 기점으로

로 하여 염·담수 밀도차에 의한 압력경계가 형성되고 있었다.

참 고 문 헌

- Gupta, A. D., 1985, Approximation of saltwater interface fluctuation in an unconfined coastal aquifer. *Journal of Groundwater*, 23(6), pp. 783-794.
- Henry, H. R., 1959, Salt Intrusion into Freshwater Aquifers. *J. Geophys. Res.*, 64(1), pp. 1911-1919.
- Bear, J., Dagan, G., 1964, Some Exact Solutions of Interface Problems by means of the Hodograph Method. *J. Geophys. Res.* 69, pp. 1563-1572.