

제주도 동부지역에서 해안지하수의 염분화

°고병권¹⁾, 이순탁²⁾

1. 서론

해안지하수의 전형적인 문제로서 대수층으로의 해수침입은 침입된 해수와 담수간에 오랜 시간에 걸쳐 동역학적으로 균형이 파괴되어, 염·담수 상호간에 밀도차에 의한 불균형이 어떠한 양상으로 발달할 것인가는 해수로 인한 오염 가능성 측면에서 볼 때, 대양을 접한 해안대수층에서는 매우 큰 관심이 되고 있다. 그러나 염분화의 규명은 원인의 결합정도에 따라 지하수의 화학조성을 나타내는 수질의 다양성으로 지역마다 상당한 변화를 보이기 때문에 일반적인 접근을 어렵게 한다. 또한 지역과 지역간에 잠재적인 염분화 원인이 변화할 뿐아니라 각 지하수의 화학성분이 담수와 해수 사이의 혼합이 가능한 잠재적인 결합이 정도를 일률적으로 제시하기는 매우 곤란하다.

본 연구는 제주도 동부지역의 해안 저지대 분포되어 있는 관정중 관측조사가 가능한 지하수를 중심으로 해안대수층에서 염분화로 진행되는 지하수의 이화학적 수질특성 고찰하고 해안지하수의 염분화의 특성을 제시하여 염분화 가능성이 높은 제주도와 같은 도서지역에서 해안지하수 개발뿐만 아니라 이용·관리에 도움을 주고자 한다.

2. 이론적 배경

지하수의 화학성분을 대표하는 주요 이온성분인 음이온과 양이온에 의해 Piper Diagiagram(Van Everdingen, 1971)으로 담수에서 염수로의 진행과정을 파악할 수 있으며 화학조성과 성분비의 변화는 염분화 원인의 가능성있는 추적자로서 사용되고 있는데, 지하수 수질 연구에 사용되고 있는 주요이온(Major Ions)은 대부분의 지하수에서 주 양이온으로 Ca, Mg, Na, K, 그리고 주 음이온인 HCO₃, SO₄, Cl을 포함하며, 계산된 Na+K값과 Ca+Mg의 차이로부터 meq/L의 단위를 사용하여 수질 평형(ion balance) 절차에 의해 결정되어 진다. 마찬가지로 지하수의 염분화에 관한 연구에 있어서는, 주 양이온과 음이온 분석을 통해 염화물과 연관된 농도 비율 관계에 의해 규명되어지고 있다. 지하수의 수질은 각종 물의 변성·혼성되어 있어 용존물질의 여러 가지 변화가 암석중의 화학적 조절작용에 관계하기 때문에 시간적, 공간적인 변화와 성격을 분명히 할 수 있다. 특히 해수의 영향을 받는 지하수인 경우 염수화를 일으키는데 이에 대한 여부를 확인하기 위해서는 Table 2-1과 같이 화학요소들의 분석이 요구된다.

Table 2-1 Geochemical parameters used for identification of salinity sources

Salinization Sources	Chemical parameter
Sea-Water intrusion versus others	Cl, Major ions(Piper), I/Cl, B, Ba, I, 18O, 2H, 13C, Ca/Mg, Cl/SO ₄ , B/Cl, Ba/Cl, Br/Cl

1) 제주산업정보대학 토목과 교수

2) 영남대학교 토목공학과 교수

3. 연구 대상지역의 설정 및 자료구축

본 연구는 제주도 동부지역에서 지역적 위치를 고려하여 해수의 영향을 받는 것으로 예상되는 해안지하수의 수직·수평적 수질특성 및 수질형태를 파악하기 위하여 1998년 4월부터 8월까지 주기적으로 시료를 채수하여 분석하였는데, Fig 3-1에서와 같이 총 14개 지점으로 기 개발된 관정 11개소와 지표면에 자연 유출하는 샘인 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), 스트론튬(Sr)를 추가하여 분석하였다. Table 3-1에서 연구대상지역에서 분석지점으로 선정된 관정을 지역, 위치, 고도, 그리고 해안까지의 거리로 구분하여 제시하였다.

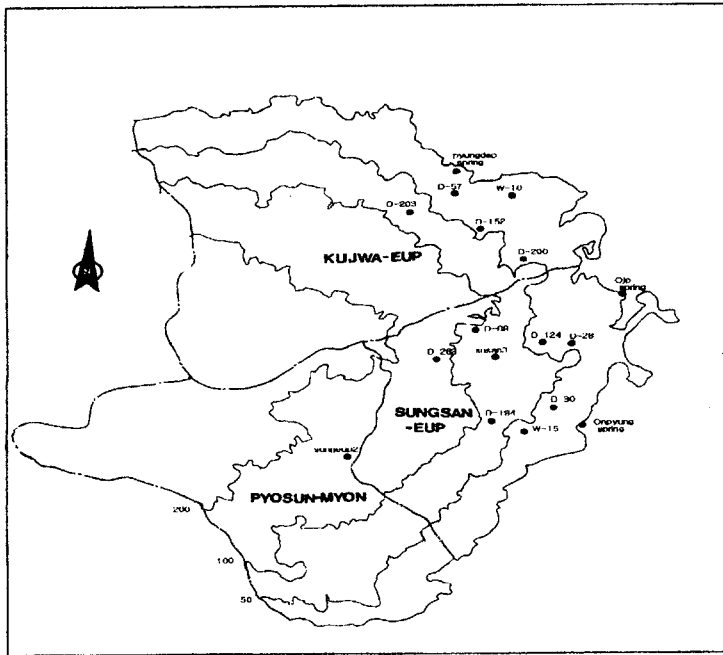


Fig 3-1 Local distribution of qualysis for groundwater in the east area

Table 3-1 The present data of investment well at east area

a) Distance from coastline(m)

Area	2000≥	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000≤	sum
Sungsan	2	1	2	-	3	8
Kujwa	-	5	-	-	-	5
Pyosun	-	-	-	-	1	1
sum	2	6	2	-	4	14

b) Elevation(m)

Area	20≥	20-40	40-60	60-80	80≤	sum
Sungsan	-	4	1	-	3	8
Kujwa	-	1	3	1	-	5
Pyosun	-	-	-	-	1	1
sum	-	5	4	1	4	14

4. 지하수의 화학적 특성검토

1) 자연조건에서의 특성

제주도 동부지역에서 이화학적 분석 결과에 의해 Cl을 기준으로 한 음이온과 양이온의 분포를 보면 Fig. 4-1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 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 결과를 Fig. 4-2와 같은데, 미량원소인 경우 Cl과의 상관성이 0.9에 근접할 정도로 상관성이 매우 크게 나타나고 있었다. 특히 해수 침입을 받은 대수층에서 Br/Cl비율은 광물이나 강우에 의해 영향을 받지 않으며, Br/Cl비율은 일반적으로 1의 값이라고 알려져 있는데, 본 연구에서의 Br/Cl의 상관성에 대한 분석값 0.923으로 1에 근접하는 값을 보이고 있다. 어질수록 Br값도 커지는 경향을 보이고 있다.

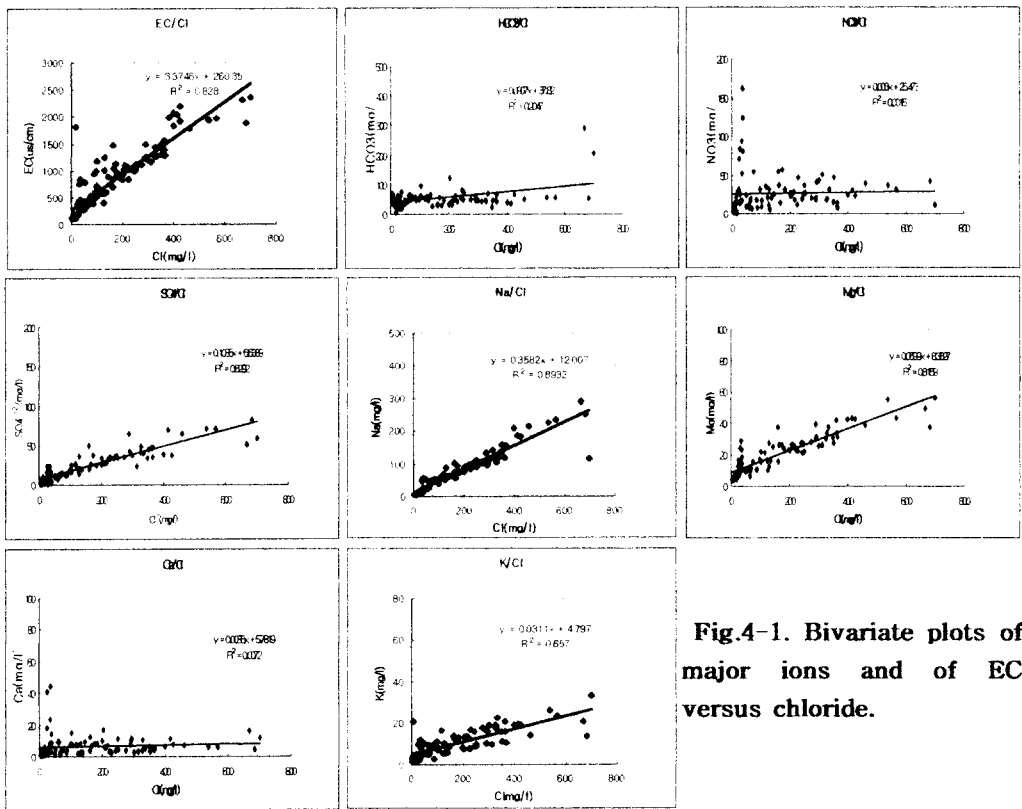


Fig.4-1. Bivariate plots of major ions and of EC versus chloride.

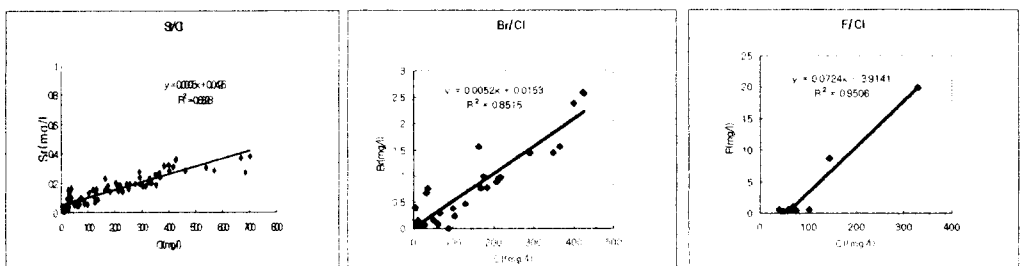


Fig 4-2. Bivariate plots of Minor ions(Sr, F, Br) versus Cl

2) 해수침입(Sea-Water Intrusion)에 의한 특성

1일 동안 조석변동에 의한 이온들이 단기간에의 변화요인을 파악하기 위해 연구대상 지점에서 가장 심하게 해수의 영향을 받는 것으로 판단된 D-28(Fig.4-3)과 D-124(Fig.4-4)를 양이온과 음이온으로 구분하여 나타낸 것이다. 염분화와 관련하여 D-28에서는 깊은 심도(40m)에서 Cl과 Na의 변동이 뚜렷하게 나타나고 있는데, 조석변화에 의한 영향은 약 2시간 정도의 간격차에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타나고 있으며, 이외의 이온들은 미소한 폭으로 조석의 영향에 의한 변동을 보이고 있지만 보다 안정적인 상태로 나타나고 있는 것을 알 수 있다. D-124인 경우에는 D-28과는 역으로 낮은 심도(30m와 40m)에서 Cl과 Na의 변동이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 조석변화에 의한 변동양상은 2시간~3시간 사이에서 일어나고 있으나 이온들의 변동이 다소 불안정하게 나타나고 있어서 조석에 의한 영향으로 인한 해수침입이 영향은 D-28과는 차별되고 있다고 판단되며, 특히 음이온의 변화가 양이온에 비해서 매우 불규칙적이고 불안정하다는 것을 알 수 있다. 이런 원인은 D-28보다는 대수층의 구조와 해안까지의 거리에서 오는 영향, 그리고 인근 인구 밀집지의 영향의 차이에 의해 오는 영향으로 판단되지만 장기간에 걸쳐 보다 면밀한 조사가 선행되어야 하겠다.

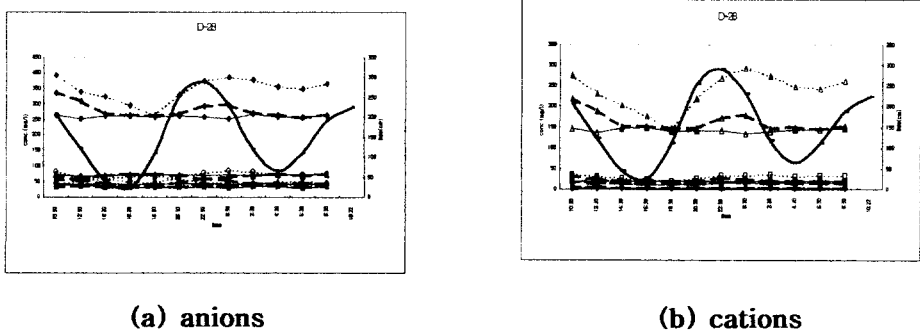


Fig. 4-3. Major ions distribution versus tidal fluctuation in D-28

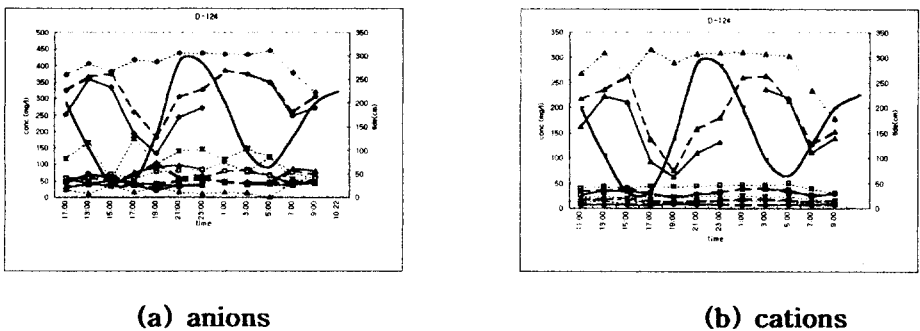


Fig. 4-4. Major ions distribution versus tidal fluctuation in D-124

4-2. 염분화로 진행되는 지하수의 화학적 특성변화 고찰

1) 계절적 변화

본 연구에서 시간적 변화 특성을 파악하기 위하여 '98.4월과 '98.8월까지의 수질변동을 연구대상 지점별로 양이온과 음이온으로 나누어 분석한 결과, 염분화와 관련되어 Cl과 Na값은 대부분의 관정에서 6월 혹은 7월까지 큰 폭으로 증가되고 있으며, 심도가 깊을수록 높은 값을 보이고 있으며, 낮은 심도에서 깊은 심도로 갈수록 변화폭도 대단히 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이외의 이온성분에 대해서는 변동폭이나 변화값이 차이가 특이하게 나타나는 지하수는 없었다.

2) 시간적 · 공간적 변화

조석작용에 영향을 받고 있는 D-28과 D-124, 두 관정을 표본으로 하여 1일 동안 공간적 변화특성을 파악하기 위하여 평균해수면을 기준으로 개발심도까지의 이온별 변화양상을 비교하였는데, D-28에서는 08:30대에 해수면하 8m에서 심도가 깊어질수록 각 이온들이 급격히 변화하는 변화층을 형성하고 있으며, 그 외의 시간대에는 점진적으로 증가하거나 감소하는 경향을 보이고 있다. D-124에서는 해수면하 13m 지점까지는 이온들이 변화는 일정하게 증가하거나 감소되고 있지만 13m 하부에서는 급격히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 또한 D-124에서 HCO_3 의 값이 변화폭이 대단히 크고 SO_4 값이 일부 시간대에서 감소되고 있는 특성을 보이고 있어서 D-28과의 수질조성이 다소 틀리다는 것을 보여주고 있다. 이런 특성으로 볼 때 D-124는 해수의 영향과 함께 담수의 유동에 따른 영향도 받고 있다고 판단된다.

5. 연구결과의 고찰

본 연구 결과를 고찰하기 위하여 stiff diagrams(일명 헥사다이어그램)과 Piper diagrams(일명 트리리아법)을 사용하여 염분화 특성을 고찰하였는데, 지하수들의 수질성분조성을 위치와 공간에 대해서 비교할 수 있도록 Fig.5-1로 제시하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 염분화 현상을 보이는 지하수인 경우에는 Na+K와 Cl값이 크게 나타나고 있으며, 담수 지하수인 경우에는 Mg와 HCO_3 값이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 D-152, W-10, D-124, D-28에서는 같은 위치의 지하수이지만 심도에 따라서 수질 성분조성비가 다르고 Na+K와 Cl 성분이 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있지만, D-30과 W-15에서는 심도별 성분조성에 특별하게 큰 차이를 보이지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 지금까지 논의된 결과를 종합하여 표고 50m를 기준으로 위치를 구분하여 Piper diagram으로 나타내보면 Fig.5-2과 같으며, 그림은 표고 50m를 경계선으로 하여 해안 저지대에는 해수의 영향을 받는 NaCl형의 지하수가 우세하며, 50m 상부지역에는 담수상태의 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형의 지하수가 우세하다는 것을 보여주고 있다.

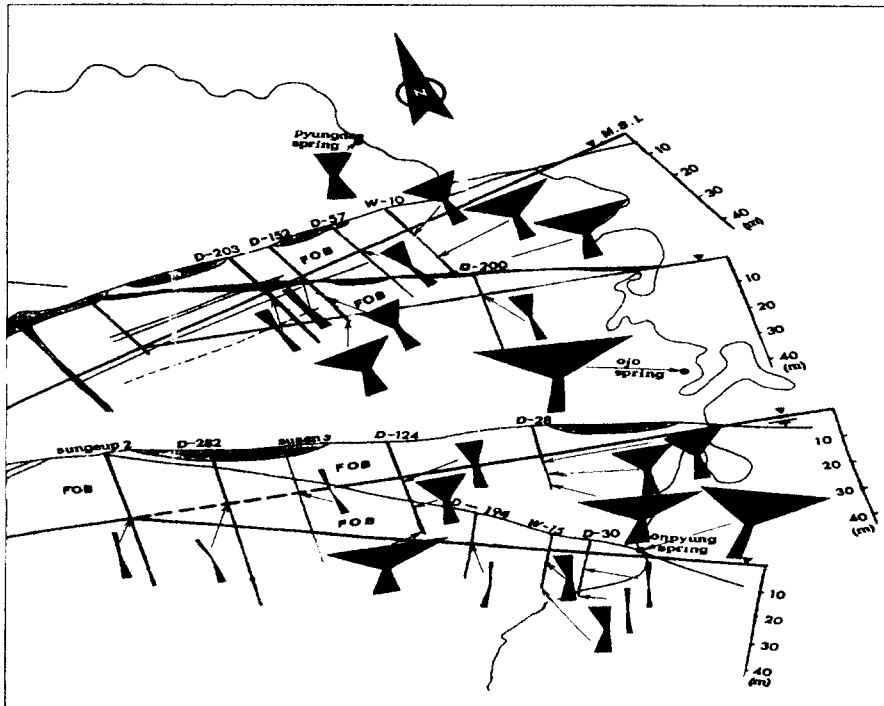
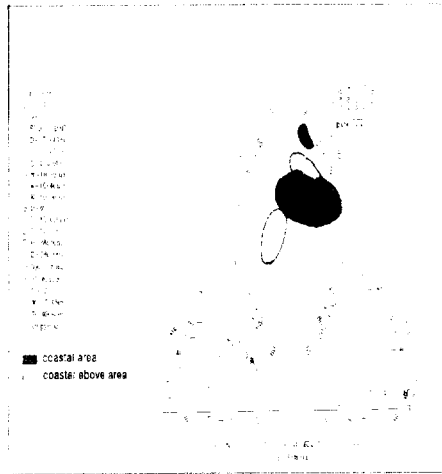
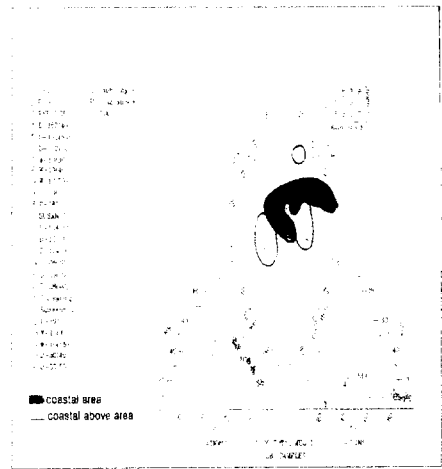


Fig.4-7. Local pattern of groundwater quality by stiff diagrams



(A) May



(B) August

Fig.4-8. Groundwater quality classification by piper diagram

5. 결론

본 연구는 제주도 동부지역에서 지역적 위치를 고려하여 해수의 영향을 받는 것으로 예상되는 해안지하수의 수직·수평적 수질특성 및 염분화의 규명을 위해 지역, 위치, 고도, 그리고 해안까지의 거리로 구분하여 Cl을 기준으로 이화학적 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 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.
- 2) 미량원소 Sr과 F, 그리고 Br의 분석치를 Cl과 관련하여 도표화하고 상관관계를 구한 결과 Cl과의 상관성이 0.9에 근접할 정도로 상관성이 매우 크게 나타나고 있었다.
- 3) 1일 동안 조석변동에 의한 이온들이 단기간에의 변화요인을 염분화와 관련하여
 - ① D-28에서는 깊은 심도(40m)에서 Cl과 Na의 변동이 뚜렷하게 나타나고 있는데, 조석변화에 의한 영향은 약 2시간 정도의 간격 차에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타나고 있으며, 이외의 이온들은 조석의 영향에 의한 변동은 미소한 폭으로 안정적인 변화상태를 보이고 있다.
 - ② D-124인 경우에는 D-28과는 역으로 낮은 심도(30m와 40m)에서 Cl과 Na의 변동이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 조석변화에 의한 변동양상은 2시간~3시간 사이에서 일어나고 있으나 이온들의 변동이 다소 불안정하게 나타나고 있는데 음이온의 변화가 양이온에 비해서 매우 불규칙적이고 불안정하게 나타나고 있다.
- 4) 수질 성분조성을 stiff diagram을 사용하여 지역별로 위치와 공간에 대해서 비교한 결과 염분화 현상을 보이는 지하수인 경우에는 Na+K와 Cl값이 높게 나타나고 있으며, 담수 지하수인 경우에는 Mg와 HCO₃값이 높게 나타나고 있다.

5) 표고 50m를 기준으로 위치를 구분하여 Piper diagram으로 제시하였는데, 표고 50m를 경계선으로 하여 해안저지대에는 해수의 영향을 받는 NaCl형의 지하수가 우세하며, 50m 상부 지역에는 담수상태의 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형 지하수가 우세하게 나타나고 있다.

참고문헌

- Bernd, C. R., Charles, W. K. : Geochemical techniques for indentifying sources of groundwater salinization, SMOLEY, 1993
- Frind, E. O. : Seawater intrusion in continuous costal aquifer-aquitard systems, Adv. Water Resources 5, 89-97, 1982
- Gupta, A. D. : Approximation of saltwater interface fluctuation in an unconfined coastal aquifer, J. Groundwater, Vol 23, No. 6, 783-794, 1985
- Hem, J. D. : Study and interpretation of the chemical characteristics of natual water, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263 P.
- Howard, K. W. F. : Beneficial aspects of seawater intrusion, J. Groundwater, Vol 25, No. 4, 398-406, 1987
- Howard, K. W. F., Lloyd, J. W. : Major ion characterization of coastal saline groundwater, J. groundwater, Vol. 21, No. 4, 429-437, 1983
- Lee soon-tak, Groundwater movement in the volcanic island of Cheju, Korea, 1996
- Moore, Y. H., Ronald, K., Stoessell, R. K., Easley, D. H. : Freshwater relationship within a groundwater flow system, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula, J. Groundwater, Vol 30, No. 3, 345-350, 1992
- 고병련 : 지하수 수질 및 오염예측 모델에 관한 연구, 영남대학교 박사학위논문, 1998
- 송영철 외 : 제주지하수의 수질특성, 제주도보건연구원보, 제7권, 155-183, 1996
- 오상실 외 : 제주도 지하수의 염분변화에 대한 고찰, 제주도보건연구원보, 제3권, 201-215, 1993
- 제주도 : 제주도수자원종합수립보고서, 1993
- 제주도 : 지하수 장기관측망 설치 및 조사 실적 보고서, 1992~1997