

## 다변량 통계분석을 이용한 농경지역 충적대수층 지하수의 수직적 수질특성 평가

최병영<sup>1)\*</sup> · 김현중<sup>1)</sup> · 김강주<sup>1)</sup> · 김석휘<sup>1)</sup> · 정화진<sup>1)</sup> · 박은규<sup>2)</sup>

### 1. 서 론

충적층 지하수는 수량이 풍부하고 개발이 용이하기 때문에 많은 나라에서 음용수로 사용되고 있다. 하지만 충적층 지하수 수질은 활발한 농업활동에 기인하는  $\text{NO}_3$ 에 의해 악화되고 있다. 이러한  $\text{NO}_3$ 은 많은 경우에 약한 환원환경에서도 자연적으로 탈질반응에 의해 저감되는 것으로 알려져 있다. 하지만 환원환경이 발달함에 따라 Fe, Mn 농도의 증가와 황화수소 형성에 의해 수질이 악화되기도 하며, 이러한 현상은 종종 강변여과와 인공함양 기술을 적용하는데 어려움으로 작용하고 있다. 반면, 만경강 유역에 위치한 본 연구 지역의 경우에는 심도가 깊은 지하수의 경우 심도가 낮은 지하수와 반대로 Fe, Mn과  $\text{NO}_3$ 의 농도가 매우 낮음을 보여주었다. 이는 본 연구가 이들 화학종의 자연저감 반응을 이해하는데 중요한 정보를 제공해 줄 수 있음을 나타내고 있다. 본 연구의 목적은 수직적인 산화/환원 대를 구분하고 지하수 수질에 영향을 미치는 지구화학 반응들을 규명하는 것이다. 이를 위해 다변량 통계분석인 군집분석과 요인분석이 사용되었다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 연구지역 및 연구 방법

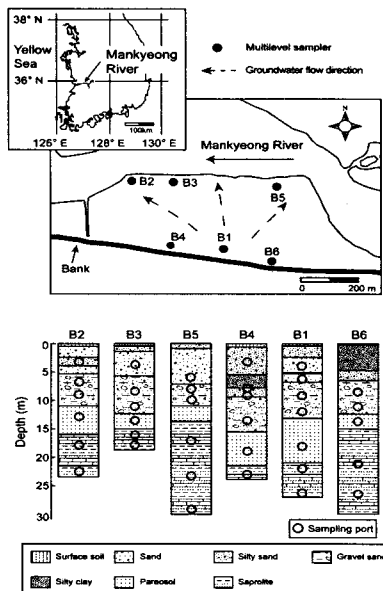


그림 1. 연구지역 및 시료채취위치

본 연구는 만경강이 사행하면서 형성된 포인트 바(point bar) 지역에서 수행되었다(그림 1). 연구지역은 황해와 가깝고 지형이 낮기 때문에 본 연구지역의 하류 7 km 지점에 제수문이 설치되기 이전에는 바닷물의 영향을 받았던 곳이다. 본 연구지역의 월별 평균 기온은  $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 보여주고 있으며 연평균 강우량은 1,287 mm 이다. 연평균 강우량의 60% 이상은 여름철에 발생하고 있다. 본 연구 지역은 농업활동이 활발한 곳으로 대부분 논농사가 행해지고 있다. 논농사 지역은 벼 재배기간 동안 물에 잠겨있어야 하기 때문에 이 지역에서 중요한 지하수 충전 지역으로 판단된다.

본 연구를 위해 6개의 다심도 관측공이 설치되었으며 충적층은 약 11-15 m 두께로 분포하고 있었다(그림 1).

통계분석은 총 108개의 시료와 13개의 변수(pH, EC, alkalinity, Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Si, Cl,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ )가 사용되었다.

주요어 : 충적층 지하수, 산화/환원 반응, 지구화학반응, 군집분석, 요인분석

1) 군산대학교 (kangjoo@kunsan.ac.kr)

2) 경북대학교 (egpark@knu.ac.kr)

2.2. 연구 결과

표 1. 요인분석 결과

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
pH	-0.41	0.75	0.34
EC	0.10	0.17	0.92
Alkalinity	-0.04	0.85	0.30
Na	-0.53	0.26	0.74
K	0.75	-0.32	0.14
Ca	0.72	-0.25	-0.01
Mg	0.90	-0.10	-0.02
Cl	0.04	0.09	0.88
NO3	0.02	-0.79	-0.29
SO4	0.15	-0.68	0.37
Fe	0.55	0.46	-0.11
Mn	0.83	0.12	-0.25
Si	-0.59	0.02	-0.35

요인분석 결과 3개의 요인이 추출되었으며 이들은 전체 분산의 72.3 %를 설명하였다. 각 변수들의 요인 적재 값은 표 1에 나타내었으며 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 요인 1 (농업활동)
  - Ca, Mg, K와 Si의 상반된 적재 값은 농업활동의 영향을 반영
  - Fe/Mn의 양의 적재 값은 Fe/Mn 수산화물의 환원이 활발함을 반영
  - Na의 음의 적재 값은 잔존해수 및 담수의 flushing 과정에서의 이온교환 반영

- 요인 2 (산화/환원 반응) - pH, alkalinity와 NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>의 상반된 적재 값은 탈질과 황산염 환원 반응을 반영
- 요인 3 (잔존해수) - EC, Na, Cl의 높은 양의 적재 값은 잔존해수의 영향 반영

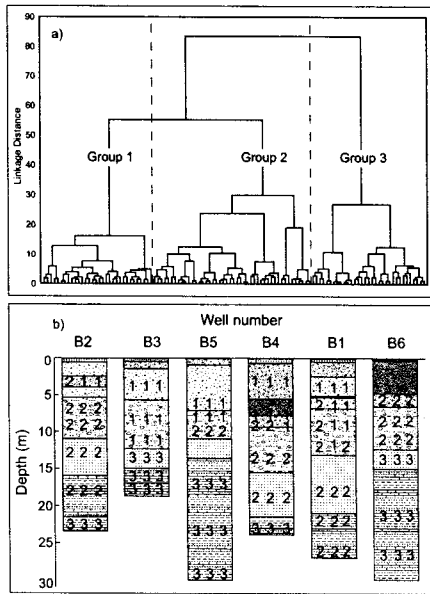


그림 2. 군집분석 결과

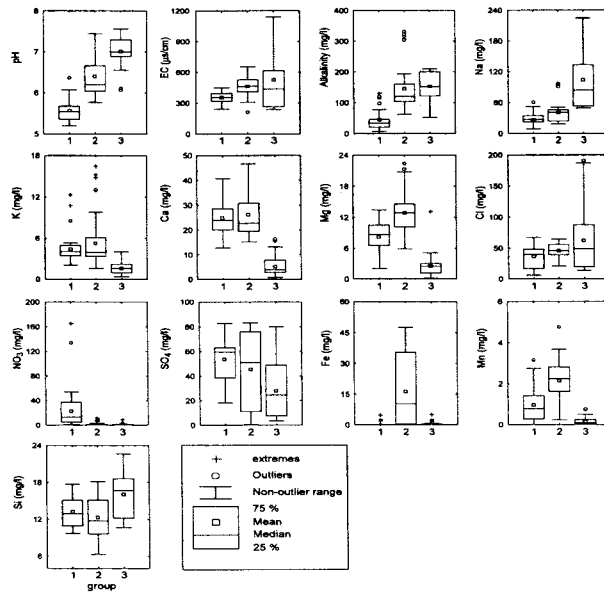


그림 3. 각 그룹별 이온들이 농도 분포

군집분석 결과 연구 지역 지하수는 3개의 군집으로 분류되었으며 각 그룹은 심도별로 뚜렷이 구분되어 분포하였다 (그림 2). 각 그룹의 이온분포를 나타내는 그림 3을 살펴보면 농업활동을 나타내는 요인 1과 관련된 Ca, Mg, K는 그룹 1과 2에서 높은 농도를 보여주고 있어 그룹 1과 2는 농업활동의 영향을 받은 것으로 판단된다. 이는 각 그룹의 요인점수를 나타내는 그림 4 a) 에서도 그룹 1과 2가 높은 양의 요인 점수를 나타내는 것으로도 확인할 수 있다.

농업활동에 기인하는 NO<sub>3</sub>은 그룹 1에서 높은 농도를 보이거나 그룹 2와 3에서 급격히 감소하고 있어 탈질반응에 기인하는 것이며 그룹 2에서 높은 Fe/Mn 농도는 Fe/Mn 수산화물의 환원 반응의 결과로서 일련의 산화/환원 반응을 잘 나타내고 있다. 또한 SO<sub>4</sub> 역시 그룹 1과 그룹 2에서 높은 농도를 보여주고 있어 농업활동에 기인하고 있음을 보여주고 있으나 그룹 3에서 급격히 낮아진 농도를 보여주고 있어 황산염 환원 반응을 나타내고 있다. 이러한 산화/

환원 반응은 요인 2의 요인 점수가 그룹 2와 3에서 높은 것으로도 확인 할 수 있다 (그림 4 b). 특히 그룹 3에서는 낮은 SO<sub>4</sub> 농도와 함께 Fe/Mn의 농도 또한 매우 낮음을 볼 수 있다. 이는 황산염 환원에 의해 형성된 황화수소와 결합하여 황화광물로 침전되기 때문인 것으로 보이며, 지하수내 Fe/Mn 농도를 저감시키는 주요 반응으로 잘 알려져 있다.

Na와 Cl은 그룹 3에서 높은 농도를 보여주고 있으며 (그림 3), 요인 3의 요인점수 역시 그룹 3에서 가장 높은 값을 보여주고 있어 잔존 해수의 영향을 보여주고 있다 (그림 4 c). 하지만 그룹 3의 Na/Cl 비율 (1.5)이 해수의 비율 (0.85)보다 높게 나타나고 있어 이온교환 반응에 의해 Na의 농도가 증가하였음을 나타내고 있다. 이온교환은 담수가 해수를 대체하는 대수층에서 흔히 관찰되는 현상이며 그림 5 b)에서 Na-Cl vs Ca+Mg-Alkalinity-SO<sub>4</sub>의 직선 기울기가 -1에 가까운 -0.94를 보여주고 있어 이를 뒷받침하고 있다. 이는 또한 그룹 3의 용질들이 대부분 해수를 대체하는 상부 지하수로부터 기인하고 있음을 나타내고 있으며, Fe/Mn의 농도를 제거하는데 중요한 역할을 하는 SO<sub>4</sub> 역시 농업활동의 영향을 받은 상부 지하수와 일부 잔존해수로부터 기인하고 있음을 알 수 있다.

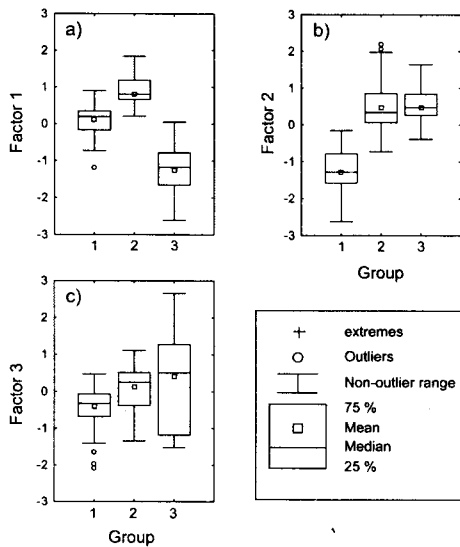


그림 4 . 각 그룹별 요인 점수 분포

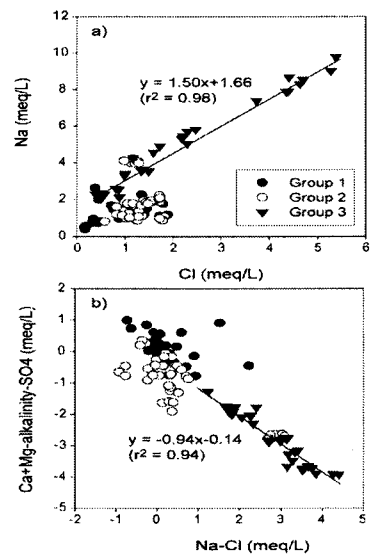


그림 5 . Cl vs Na 및 Na-Cl vs Ca+Mg-Alk-SO<sub>4</sub>

### 3. 결 론

본 연구 결과 연구 지역의 지하수는 군집분석에 의해 수직적으로 3개의 그룹으로 분류되었으며 요인 분석을 통해 농업활동, 산화/환원 반응, 잔존 해수에 의해 수질이 결정되었다. 그룹 1과 2는 농업활동의 영향을 받았지만 그룹 1은 높은 NO<sub>3</sub>와 낮은 Fe/Mn 농도를 보여주었으며, 반면 그룹 2는 탈질반응에 의한 낮은 NO<sub>3</sub>와 Fe/Mn 수산화물의 환원에 의한 높은 Fe/Mn 농도를 보여주었다. 그룹 3은 잔존해수와 이온교환 반응을 받았으며 담수에 의해 대체되고 있음을 나타내고 있었다. 또한 농업활동과 일부 잔존해수에 의해 공급된 SO<sub>4</sub>의 환원 반응에 의해 Fe/Mn의 농도가 매우 낮았다. 이러한 결과들은 본 지역의 지하수 수질이 일련의 산화/환원 반응에 의해 결정되며 그 결과 심도별로 서로 다른 산화/환원 대를 형성하고 있음을 보여주고 있다. 또한 군집분석과 요인분석이 산화/환원 대와 지하수 수질을 결정하는 주요 반응을 설명하는데 효과적인 기법임을 보여주고 있다.