

## 구간양수시험과 수질검층자료에 의한 균열암반내 지하수 유동 분석

함세영\*<sup>1</sup> · 성익환<sup>3</sup> · 이병대<sup>3</sup> · 장 성<sup>2</sup> · 정재열<sup>1</sup> · 이정환<sup>1</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구환경시스템학부

<sup>2</sup>한국농촌공사, <sup>3</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부

## Groundwater Flow Analysis in Fractured Rocks Using Zonal Pumping Tests and Water Quality Logs

Se-Yeong Hamm\*<sup>1</sup>, Seong Jang<sup>2</sup>, Jae-Yeol Cheong<sup>1</sup>, Ig Hwan Sung<sup>3</sup>,  
Byeong Dae Lee<sup>3</sup>, and Jeong-Hwan Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National University

<sup>2</sup>Korea Rural Community & Agriculture Corporation

<sup>3</sup>Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

본 연구의 목적은 나주시에 위치하는 시추공 NJ-11호공과 SJ-8호공에서 구간양수시험, 순간충격시험, 수질검층, 공내 TV검층을 실시하여 균열암반내에서 심도에 따른 지하수 유동 특성을 파악하는데 있었다. 본 연구에서는 특히 깊이에 따른 균열암반의 지하수 유동 특성 변화를 규명하기 위하여 단일팩커를 사용한 구간양수시험을 실시하였다. 구간양수시험 결과, NJ-11호공에서는 팩커 설치심도가 가장 깊은 때(56.9 m) 1.6차원정도의 유동차원을 보이고 팩커 설치심도가 얕아질수록 유동차원이 감소하여 팩커 설치심도 24 m에서는 1차원을 나타내었다. 이는 NJ-11호공에서는 하부에 유동성 균열이 더 균일하게 발달되어 있음을 지시한다. 한편 SJ-8호공에서는 팩커 설치심도가 가장 깊은 50 m 심도에서 1.7차원정도이고, 팩커 설치심도 32 m에서는 1.8차원 그리고 팩커 설치심도 19 m에서는 1.4차원을 나타내고 있다. 이와 같이 팩커 심도에 따라서 유동차원이 달라지는 것은 균열암반에서 심도에 따라 유동성 균열의 발달정도가 달라지기 때문으로 해석된다. 구간양수시험분석에 의하면, 균열암반의 일반적인 수리적 특성을 잘 대변하는 Moench(1984)의 이중공극모형이 대체로 잘 들어맞는다. 수질검층에 의하면, 심도가 깊어질수록 지온이 증가하고 불-광물반응에 의해서 pH가 높아지며, 지하수흐름에 따라 용존산소량은 감소하는 일반적인 경향성을 보여주고 있다. 그리고 대부분의 균열대 구간에서 전기전도도가 증가하고, 용존산소량이 감소하는 경향성을 보여주었다.

**주요어** : 구간양수시험, 균열암반, 수질검층, 분할유동차원, 수리상수

This study aimed to recognize characteristics of groundwater flow in fractured bedrocks based on zonal pumping tests, slug tests, water quality logs and borehole TV camera logs conducted on two boreholes (NJ-11 and SJ-8) in the city of Naju. Especially, the zonal pumping tests using single packer were executed to reveal groundwater flow characteristics in the fractured bedrocks with depth. On borehole NJ-11, the zonal pumping tests resulted in a flow dimension of 1.6 with a packer depth of 56.9 meters. It also resulted in lower flow dimensions as moving to shallower packer depths, reaching a flow dimension of 1 at a 24 meter packer depth. This fact indicates that uniform permissive fractures take place in deeper zones at the borehole. On borehole SJ-8, a flow dimension of 1.7 was determined at the deepest packer level (50 m). Next, a dimension of 1.8 was obtained at 32 meters of packer depth, and lastly a dimension of 1.4 at 19 meters of packer depth. The variation of flow dimension with different packer depths is interpreted by the variability of permissive fractures with depth. Zonal pumping tests led to the utilization of the Moench (1984) dual-porosity model because hydraulic characteristics in the test holes were most suitable to the fractured bedrocks. Water quality logs displayed a tendency to increase geothermal temperature, to

\*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

increase pH and to decrease dissolved oxygen. In addition, there was an increasing tendency towards electrical conductance and a decreasing tendency towards dissolved oxygen at most fracture zones.

**Key words** : zonal pumping test, fractured rock, water quality log, fractional flow dimension, hydraulic parameter

## 서 언

양수시험분석의 주된 목적은 대수층의 수리상수를 산정하는 것이다. 그러나 양수시험은 대수층의 수직적, 수평적인 규모와 대수층의 형태에 관한 정보들도 제공한다. 대수층의 수직적, 수평적인 규모와 대수층의 형태를 명확하게 알기 위해서는 양수시험과 함께 지질조사, 물리검층, 시추자료, 물리탐사자료 등의 여러 가지 정보를 필요로 한다. 또한 이러한 자료들로부터 현장조건에 가장 적합한 대수층 모델을 결정할 수 있다. 균열암반의 경우에는 균질한 등방성 매질에 적용되는 2차원 방사상 흐름식인 Theis 식이 맞지 않는 경우가 많다. 이는 균열암반내에 지하수 흐름은 지하수 통로인 균열이나 단층의 발달상태에 크게 지배받기 때문이다. 즉, 균열암반내 지하수 흐름은 불연속면(단층, 균열)의 특성(연장, 빈도, 연결성, 교차성, 방향성, 경사, 간극, 거칠기, 충전물질 등)에 좌우된다(Sahimi, 1995).

균열암반내 양수시험 해석방법에는 균열암반을 연속체로 보는 것과 불연속체로 보는 해석방법이 있다. 전통적인 양수시험 해석모델(Theis, 1935; Papadopulos-Cooper, 1967; Hantush, 1960, 1962; Hantush-Jacob, 1955; Moench, 1985; Neuman-Witherspoon, 1969; Gringarten-Witherspoon, 1972; Gringarten-Ramey, 1974; Barenblatt *et al.*, 1960; Warren and Root, 1963; Boulton and Streltsova, 1977; Kazemi, 1969; Moench, 1984)은 연속체 모델로서 균열암반을 수리지질학적으로 균등하고 다공질 매체로 본다. 불연속체 모델(Anderson *et al.*, 1984; Long *et al.*, 1985; Long and Billau, 1987; Cacas *et al.*, 1990a, 1990b)은 개개 균열을 지하수 흐름의 영역으로 보고, 관찰되지 않은 균열들에 대한 정보는 추계론적 기법으로 해석한다. 따라서 불연속체 모델은 연속체 모델보다 균열의 수리적 특성을 자세히 묘사할 수 있으나, 한정된 야외 자료에 의거한 추계론적 방법으로 인해서 해석의 불확실성은 여전히 남게 된다. 따라서 연속체 모델이나 불연속체 모델이나 어느 것도 실제 야외 현상을 정확하게 묘사할 수는 없다(Jones, 2001).

한편 지하수유동의 프랙탈 모델은 불연속체 모델보다

는 단순화된 모델이지만 연속체 모델보다는 균열암반을 현실에 가깝게 묘사할 수 있는 장점을 가진다. 지금까지 여러 학자들에 의해서 지하수 유동에 관한 프랙탈 모델이 제안되었다(Barker, 1988; Chang and Yortsos, 1988; Hamm and Bidaux, 1994a, 1994b, 1996; Acuna and Yortsos, 1995; 함세영, 1997). 지하수유동의 프랙탈 모델은 암반 균열의 형태에 관한 프랙탈 이론(Allégre *et al.*, 1982; Thomas, 1987; Velde *et al.*, 1991)과 같이 규모에 관계없이 반복되는 자기 유사성(self-affinity)으로 대표되는 프랙탈 차원으로 표현된다. 균열암반내 지하수 유동은 균열의 특성에 좌우되므로 균열 암반의 프랙탈 이론과 지하수 유동의 프랙탈 모델은 서로 연관된다. 그러나, 모든 균열이 지하수유동과 관련되는 것은 아니므로 지하수 유동대와 균열대의 프랙탈 차원은 꼭 서로 일치하지는 않는다. 삼투이론(percolation theory)에 의하면, 균열들 중에서 지하수 유동과 관련되는 것은 일부이며, 수리적 연결성은 삼투 한계값(percolation threshold)으로 감에 따라(즉, 유로의 굵기가 증가함에 따라) 작아진다(Sahimi, 1995). 그러나, 균열계는 삼투에만 관련되는 것이 아니고, 진단균열이나 확장균열과 같은 여러 가지 균열 메카니즘과도 관련된다(Acuna and Yortsos, 1995). Jones (2001)는 여러 종류의 불균질 암반에서 수행된 양수시험으로부터 균열대의 양상과 관련된 분할유동차원을 제시하였다.

통합 프랙탈 모델은 반복 함수 시스템(iterated function system)에 의한 균열망을 묘사한다(Barnsley, 1988; Acuna and Yortsos, 1995). 균열망은 단순한 형태의 균열로부터 시작되어 반복적으로 세분화되고 일부는 균열화되지 않고 남는다. Barker의 해(1988)는 Acuna and Yortsos(1995)의 통합 프랙탈 모델의 한 특수해로서 수리전도도지수(conductivity index,  $\theta$ )가 0인 경우이다. 수리전도도지수는 프랙탈망의 수리전도도와 관련되는 지수로서 정상적인 프랙탈망에서 벗어나는 편차를 나타낸다. 만약,  $\theta > 0$ 이면, 수리분산지수(hydraulic diffusivity)가 위치에 따라 달라진다. 한편  $\theta$ 가 0에 가까워지면, 프랙탈망의 연결성이 좋아짐을 의미한다.

본 연구에서는 나주시 지역(금남면 보산리 장산마을에 위치하는 NJ-11호공과 세지면 교산2리 풍동마을에

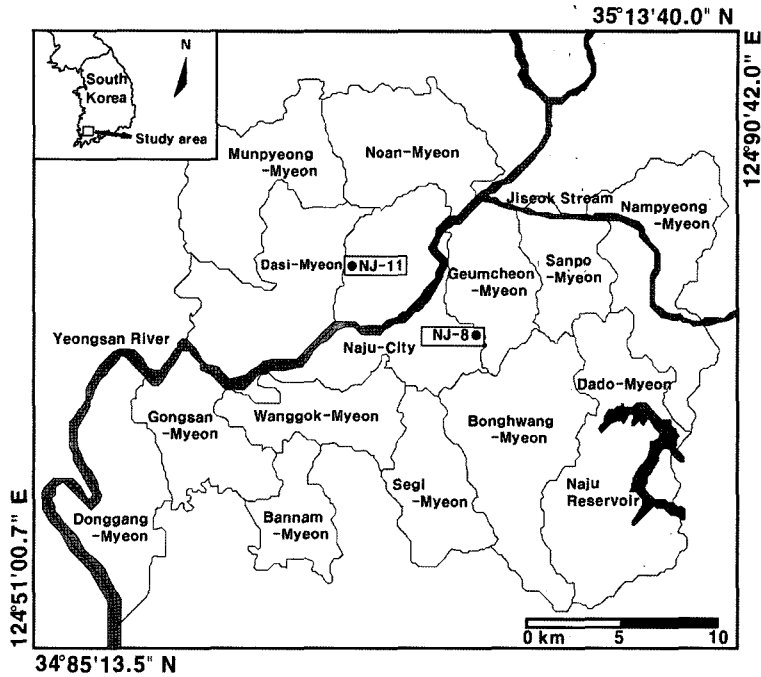


Fig. 1. Location of the test holes.

위치하는 SJ-11호공)에서 행한 구간양수시험, 순간충격 시험, 수질검층 그리고 공내TV검층을 바탕으로 깊이에 따른 지하수 유동 특성을 분석하였다(Fig. 1의 사각형에 들어있는 지하수공 번호). 균열내 지하수 유동을 좀 더 깊이 있게 이해하기 위하여 구간양수시험의 수위하강곡 선으로부터 지하수 유동의 분할유동차원을 구하였다. 그리고 분할유동차원과 유동성 균열대에 관련성을 해석하였다. 본 연구는 나주시 봉황면, 반남면, 다도면, 공산면, 문평면, 금남면, 이창면, 영산면, 세지면, 동강면, 왕곡면 지역(Fig. 1)에 수행된 지하수의 조사 연구의 일환으로 수행되었다(한국지질자원연구원, 환경부, 2003).

**지형 및 지질개요**

연구지역인 나주시는 지리적으로는 북동-남서로 발달하는 소백산맥의 남서쪽 끝 부분에 위치하며, 중생대 혹은 고생대 화강암으로 구성된 저구릉지와 광주평야에 연결되는 나주평야로 이루어져 있다. 그러나 나주시의 인접 서쪽과 광주-나주지역의 동쪽에는 백악기 말엽의 화산암으로 구성된 험준한 산세가 발달한다. 광주-나주간에는 영산강의 상류인 극락강이 북동-남서방향으로 흐르고 있으며, 지석천이 동서로 영산강에 합류된다, 이들은 2~3

차수의 수계를 형성하며, 3.4~9.8 m의 낮은 해발고도를 이루며 대부분 만곡현상을 보인다. 이러한 만곡현상은 북동-남서방향으로 발달된 전주-나주-광주 단층의 주향과 이에 수반된 북서-남동방향의 전단단열의 영향 때문이다. 산계의 평균 해발고도는 200~300 m 밖에 되지 않으나, 화산암의 특성상 대부분의 산사면은 가파르다.

지질학적으로 나주시 북쪽에는 화강편마암과 화강암 질편마암이 분포하는데, 이들 암석은 우수향 전단대의 포획체로 산출되기도 하며 엽리의 꺾적양상은 좌수향의 영향을 받은 것으로 보인다(한국지질자원연구원, 환경부, 2003). 나주지역의 저구릉지는 중생대 혹은 고생대 화강암으로 구성되며, 화강암의 지질시대는 과거에 쥬라기로 알려져 왔으나, 김용준 외(1991)는 Rb/Sr 연대측정방법에 의하여 트라이아스로 보고한 바 있다. 이는 전주-순창전단대의 주 활동기간이 쥬라기 전기(170~180 Ma)라는 것과 부합된다. 쥬라기 화강암 분포지역은 장석으로 인한 풍화대의 깊이가 전반적으로 깊다.

나주지역의 산계를 형성하고 있는 백악기 화산암류는 대부분 안산암, 유문암, 응회암으로 구성되어 있으며, 하위에는 퇴적암류가 놓인다. 퇴적암류는 대부분 저색사암과 녹회색 사암으로 구성되며, 담회색 사암-셰일이 상부에 분포한다. 본 지역의 동쪽 연변부는 능주분지의 응회

암과 유문암이 분포하며, 나주시내로부터 북서부로서 본 연구지역의 1/4에 해당하는 구역은 나주분지의 저색사 질암을 기저로 하고 상위에 안산암, 응회암, 유문암이 피복하고 있다. 중성암맥은 대부분이 안산암질이나, 부분적으로는 관입응회암상을 띠기도 한다. 암맥들은 일반적으로 과거에 활동을 하였던 전단단층을 따라서 관입하였다.

구조지질학적으로 나주지역은 북서쪽과 남동쪽에 각각 전주단층과 광주단층으로 규제된 지역 내에 속한다(한국지질자원연구원, 환경부, 2003). 나주를 통과하는 나주단층은 취성단층으로서 목포까지 연장된다.

## 구간양수시험

### 구간양수시험 방법

나주시 금남면 보산리 장산마을에 위치하는 NJ-11호공과 나주시 세지면 교산2리 풍동마을에 위치하는 SJ-11호공에서 구간양수시험을 실시하였다. 구간양수시험은 단일팩커를 일정 심도에 설치하고 팩커 설치심도와 시추공저 사이 구간에 대해서 실시하였다. 구간양수시험의 목적은 시추공 심도에 따른 균열암반의 수리적 특성을 파악하는데 있다. 구간양수시험시 시험구간보다 상위의 지하수위도 측정하였다. 이는 상부로부터의 누수(leakage)가 시험구간의 대수층 개념모델을 설정하는데 유용한 정보를 제공하기 때문이다. 만약 양수시험구간 상부에서 지하수위 변화가 일어난다면 누수피압대수층이나 또는 누수를 고려한 균열모델을 적용하여야 할 것이다. 그러나, 이때 상부개입층으로부터의 누수인지 팩커와 공벽간의 불완전 접촉에 의한 누수인지를 잘 판단하여야 할 것이다.

본 연구에서는 구간양수시험분석을 위해 전체적인 암반을 대표하는 수리상수를 구하기에 더 적당한 연속체 모델을 적용하였다. 아울러서 본 연구에서는 암반균열의 수리적 특성을 파악하기 위하여 수리적 유동차원을 구하였다. 적용한 모델은 양수정의 우물저장효과를 고려한 Papadopoulos-Cooper(1967)모델, 균열암반의 이중공극과 균열스킨(fracture skin)을 고려한 Moench(1984)의 이중공극모델, 유한한 길이의 수직균열모델(Gringarten and Witherspoon, 1972), 그리고 준대수층에 의해 분리되어 있는 두개의 피압대수층 모델(Neuman and Witherspoon, 1969)이다.

분할유동차원은 양수시간에 따른 수위하강자료를 양대수그래프에 도시하였을 때 양수 후기의 수위하강곡선

의 기울기에 의해서 결정될 수 있다. 예를 들면, 유동차원이 1차원인 경우에 기울기는 1/2이고, 1.5차원일 경우에는 1/4이다. 그리고 2차원인 경우에는 0에 가깝게 된다. 지하수유동차원(D)과 수위하강 기울기(S)의 관계를 다항식으로 나타내면(Hamm, 1994a)

$$S = 1.09241 - 0.86576 D + 0.60854 D^2 - 0.503343 D^3 + 0.196047 D^4 - 0.0257641 D^5 \quad (1)$$

과 같다. 또한 대수좌표상에서 유동차원에 따른 수위하강곡선의 기울기(S)와 지하수유동 차원(D)의 관계를 다항식으로 표현하면

$$D = 2.18601027 - 2.713906761 S + 0.6495417072 S^2 \quad (2)$$

와 같다.

### NJ-11호공

NJ-11호공 지점은 화산암으로 구성되어 있다. NJ-11호공의 심도는 96.8m이고, 케이싱은 지하 5.5m까지 설치되어 있으며(한국지질자원연구원, 환경부, 2003), 지하수위는 8.1~9.1m 범위에 있다. 공내TV검층에 의하면, NJ-11호공에서 균열대는 19.0~19.9m, 34.0~39.0m, 40.9~41.0m, 43.8m 지점, 48.3m 지점, 48.7~50.0m, 54.3m 지점, 56.9m 지점, 59.5m 지점, 77.5m 지점에 발달되어 있다. 구간양수시험은 1차 구간(96.8~56.9m), 2차 구간(96.8~45.0m), 3차 구간(96.8~24.0m)에서 실시되었다. (2)식에 의해서 지하수 유동차원을 구한 결과, 팩커 설치심도가 가장 깊을 때(56.9m) 1.6차원정도를 보이거나 팩커 설치심도가 얕아질수록 지하수 유동차원이 작아져서 24m 심도에서는 1차원이 된다(Table 1, Fig. 2). 균열대의 분포와 지하수 유동차원을 관련시켜 볼 때, 균열대는 천부로 갈수록 특정한 방향성을 가지며 균열대의 규모는 커지고 있음을 지시한다. 반대로 심도가 깊어질수록 균열대의 규모는 작으나 균열대의 발달 상태는 균일해짐을 알 수 있다. 양수시험구간 보다 상위부분의 지하수위 변화를 보면, 시험구간이 가장 깊은 1

**Table 1.** Flow dimension obtained by zonal pumping tests on borehole NJ-11.

Test section	Drawdown slope	Flow dimension
96.8-56.9 m	0.236	1.58
96.8-45.0 m	0.399	1.21
96.8-24.0 m	0.513	1.00

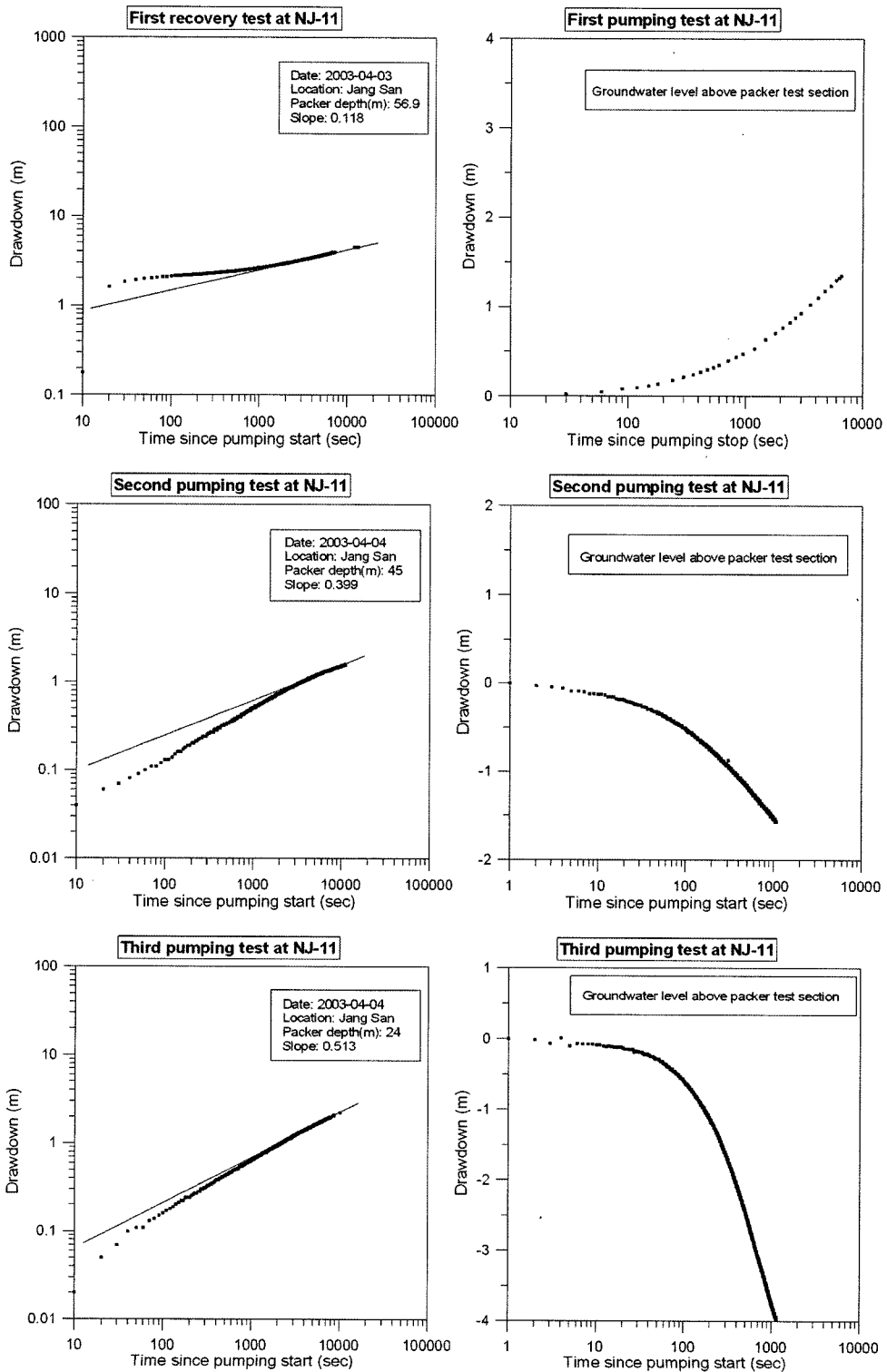


Fig. 2. Drawdown slope by zonal pumping at test hole NJ-11.

차 양수시험구간(96.8~56.9 m)에서는 양수에 따라 시험구간 상위에서 지하수위가 하강하고 있다. 그러나 심도가 얕은 2차, 3차 양수시험에서는 시험구간에서는 수위 하강이 일어나는 반면에, 양수시험구간보다 상위부분에서는 지하수위가 상승하고 있다. 또한 시험구간의 지하수 유동차원의 감소에 따라 시험구간보다 상부의 지하수 유동차원은 오히려 증가하고 있다. 이는 시험구간의 대수층과 시험구간 상위의 대수층이 서로 별개로 거동하고 있으며, 양수량보다 더 많은 양의 지하수가 시험구간 상위구간에 공급되고 있음을 지시하는 것이다.

NJ-11호공에서 구간양수시험결과는 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5와 같다. 그림에서 실선은 이론적인 곡선이고 점선은 수위하강 측정값이다. 1차 구간양수시험(Fig. 3)에서는 4개 모델 중 Neuman-Witherspoon(1969) 모델이

가장 잘 맞는다. 이는 양수시험구간 보다 상부(34.0~41.0 m 구간)의 큰 규모의 대수층의 영향으로 판단된다. 2차 구간양수시험(Fig. 4)과 3차 구간양수시험(Fig. 5)에서는 Moench(1984) 모델이 가장 잘 맞는다. 이는 이들 양수시험구간에서는 균열대와 블록으로 모사되는 이중공극모델이 가장 적합하다는 것을 뜻한다. 또한 Gringarten-Witherspoon(1972) 모델도 비교적 잘 맞아 들어간다. 이는 1.63~4.88m 길이(Lf)의 수직성 균열이 존재함을 뜻한다. 아울러서 Papadopoulos-Cooper(1967) 모델도 잘 들어맞는 것으로 보아 넓은 범위로는 2차원의 방사상모델을 적용하여도 큰 무리가 없음을 의미한다. Moench(1984) 모델에 의하면, 1차 구간양수시험에 의한 수리전도도가 2차, 3차 구간양수시험보다 더 크다(Table 2). 이는 앞에서 언급한 바와 같이 시험구간보다 상위에

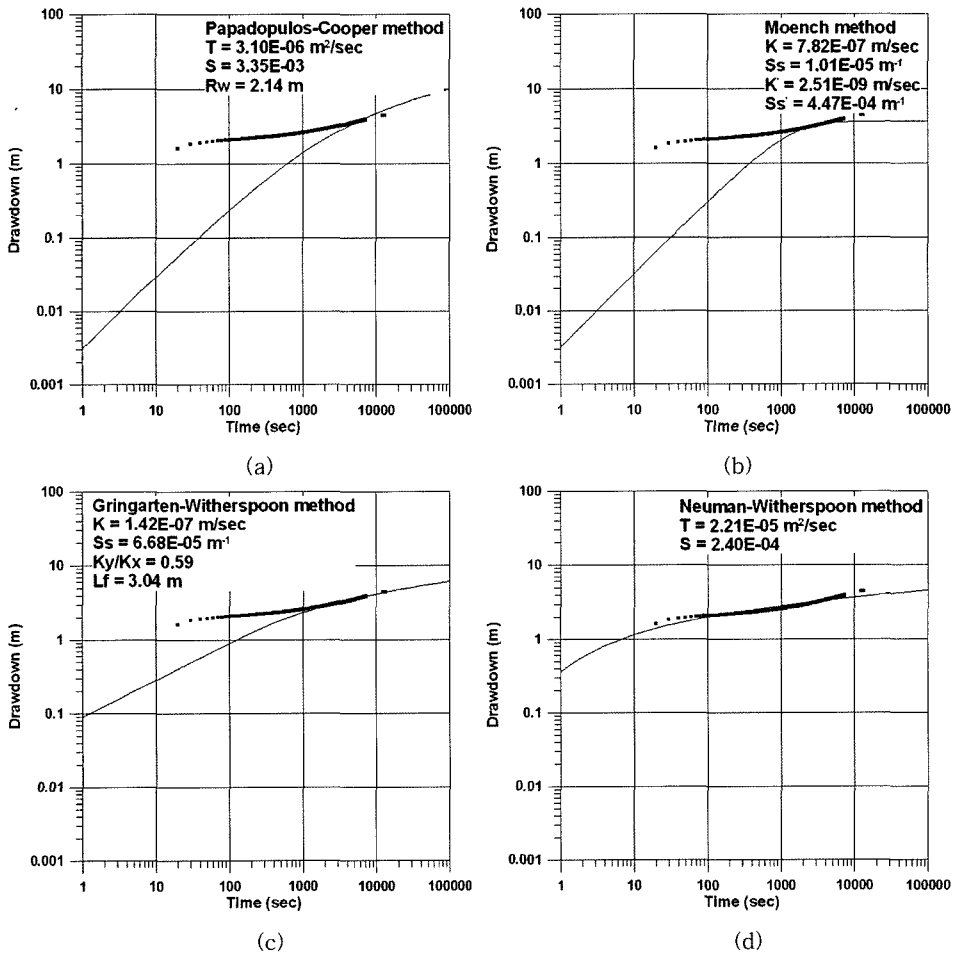


Fig. 3. Curve-fitting results of the first pumping test at NJ-11 using (a) Papadopoulos-Cooper, (b) Moench, (c) Gringarten-Witherspoon, and (d) Neuman-Witherspoon methods.

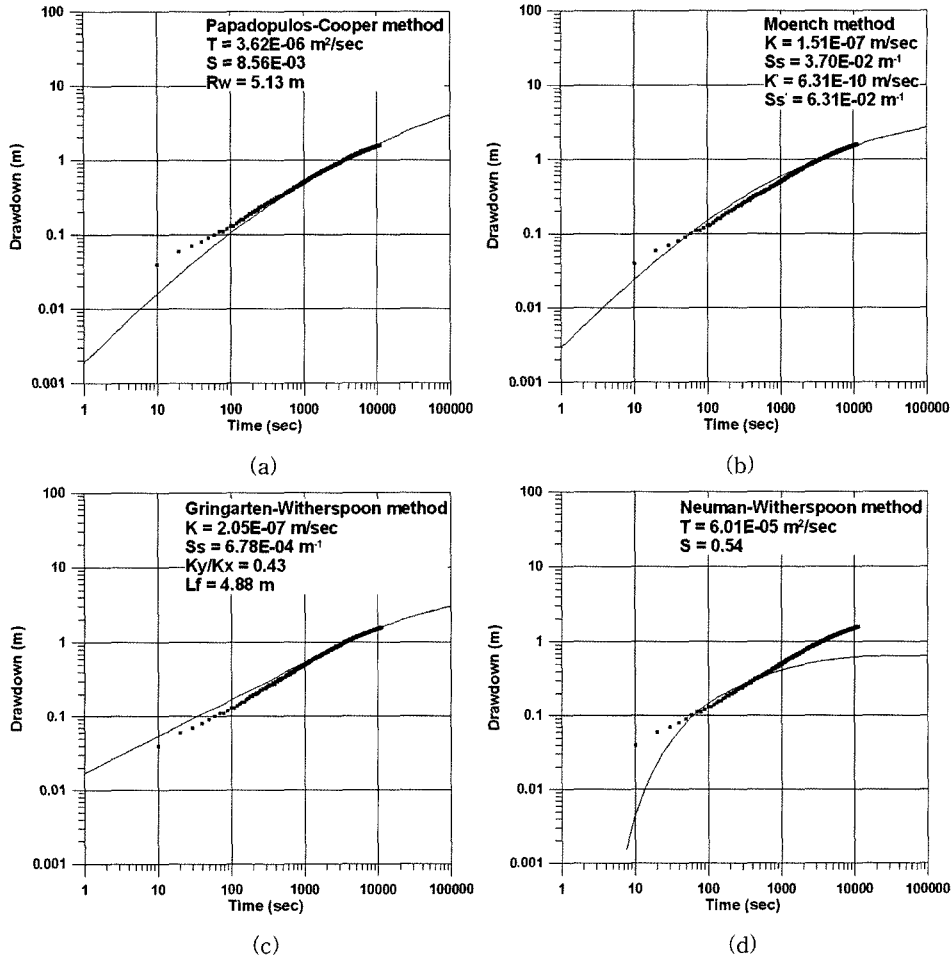


Fig. 4. Curve-fitting results of the second pumping test at NJ-11 using (a) Papadopulos-Cooper, (b) Moench, (c) Gringarten-Witherspoon, and (d) Neuman-Witherspoon methods.

있는 큰 균열대의 영향으로 해석된다. 또한 Papadopulos-Cooper 식에 의하면, 1차, 2차, 3차 구간양수시험으로 갈수록 투수량계수가 증가한다. 이는 대수층의 두께가 증가함에 따라 투수량계수가 증가하는 일반적인 경향성과 일치한다.

### SJ-8호공

SJ-8호공의 심도는 134.9 m이고, 케이싱은 지하 14.8 m까지 설치되어 있다. 지하수위는 3.2~3.7 m 범위에 있다. 공내TV검층에 의하면, SJ-8호공에서 균열대는 69.8 m 지점, 85.3~86.0 m, 93.7 m 지점, 116.9~117.0 m, 131.5 m 지점에 발달되어 있다. SJ-8호공에서는 균열대 구간을 참조로 하여, 1차 구간양수시험(134.9 m(공저)

~50.0 m), 2차 구간양수시험(134.9~32.0 m) 그리고 3차 구간양수시험(134.9~19.0 m)을 실시하였다. 대수좌표상에서 시간에 따른 수위하강 기울기에 의해서 지하수 유동차원을 구해본 결과, 펌프 설치심도가 가장 깊은 1차 양수시험구간에서 1.7차원정도를 보이고, 2차 양수시험에서는 1.8차원 그리고 펌프 설치심도가 가장 얇은 3차 양수시험구간에서는 1.4차원을 보이고 있다(Table 3, Fig. 6). 따라서 3차 구간양수시험구간의 유동차원이 1차, 2차 구간양수시험구간보다 작게 나타나고 있다. 이는 천부(32~19 m)에 발달된 균열대가 일정한 방향성을 가지고 있는 것으로 추정되며, 반면에 심부에서는 균열대가 비교적 균일하게 분포하기 때문에 유동차원이 증가하는 것으로 해석된다. 양수시험시 펌프보다 상부구

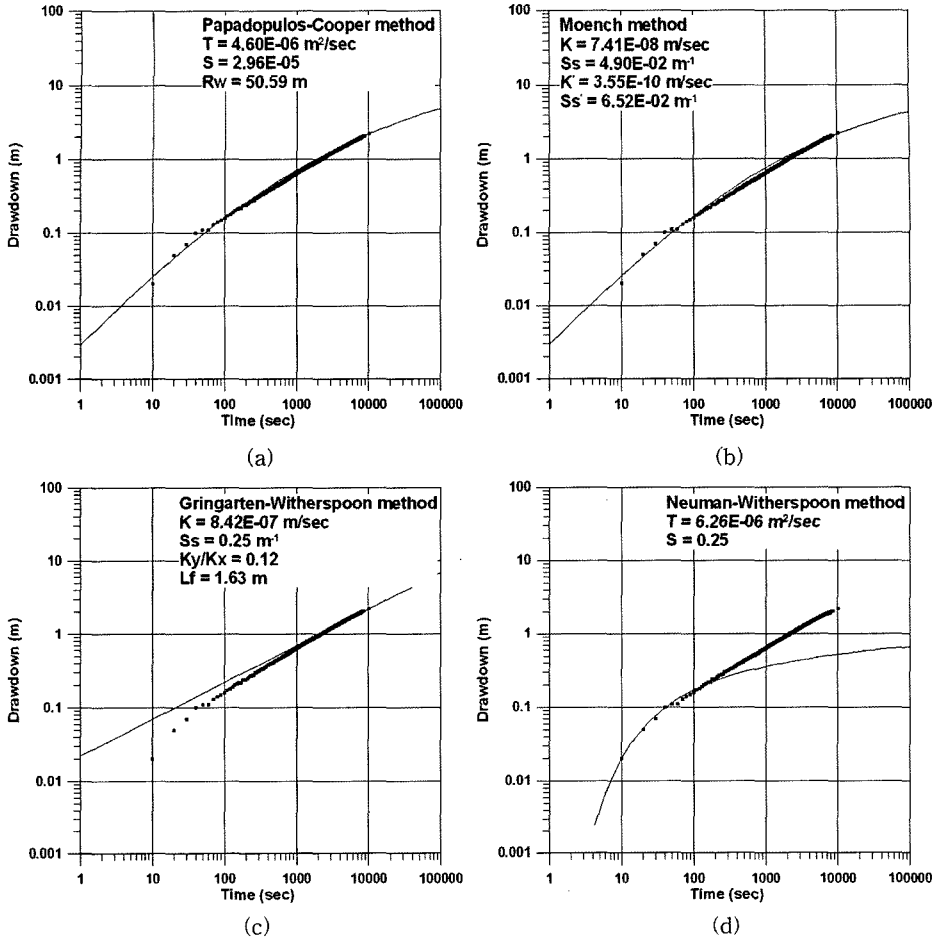


Fig. 5. Curve-fitting results of the third pumping test at NJ-11 using (a) Papadopolos-Cooper, (b) Moench, (c) Gringarten-Witherspoon, and (d) Neuman-Witherspoon methods.

간의 지하수 유동차원을 보면, 대체로 팩커구간의 지하수 유동차원이 감소함에 따라 감소하는 경향성을 보여 준다. 이는 팩커구간의 지하수 양수로 인해서 팩커보다 상부구간의 균열대로부터 팩커구간의 지하수가 공급됨을 지시하는 것이다.

SJ-8호공에서 구간양수시험결과는 Fig. 7~Fig. 9와 같다. 그림에서 실선은 이론적인 곡선이고 점선은 수위하강 측정값이다. 1차 구간양수시험(Fig. 7)에서는 Moench(1984)모델과 Gringarten-Witherspoon(1972)모델이 비교적 잘 맞는다. 이는 1차 양수시험구간에서는 수직 또는 수평적인 균열대가 발달되어 있음을 뜻한다. Gringarten-Witherspoon(1972)모델에 의한 수직균열대의 길이(L)는 3.69 m로 산정되었다(Fig. 7). 2차 구간양수시험(Fig. 8)에서도 Moench(1984)모델과 Gringarten-Witherspoon

(1972)모델이 비교적 잘 맞는다. 또한 Neuman-Witherspoon(1969)모델도 잘 맞는 편이다. 2차 양수시험구간에서는 상부 대수층의 영향도 받고 있음을 지시한다. 3차 구간양수시험(Fig. 9)에서는 양수시험에서는 4가지 모델 중에서 Moench(1984)모델이 양수시험결과와 가장 잘 맞으며, Gringarten-Witherspoon(1972)모델과 Neuman-Witherspoon(1969)모델도 비교적 잘 맞는 편이다. 그러나 세 모델 다 양수 후기로 가면서 실제 수위관측값보다 더 낮은 값을 나타낸다. 따라서 수위하강 기울기(Table 3)에 제시된 대로 시추공 천부에서 지하수 유동차원이 감소한다는 것을 나타낸다.

Moench 모델에 의하면, 3차 구간양수시험의 수리전도도가 1차, 2차 구간양수시험보다 더 크게 나타난다(Table 2). 또한 2차 구간양수시험(팩커 설치심도 32 m)



**Table 2.** Hydraulic parameter estimates obtained from zonal pumping tests on boreholes NJ-11 and SJ-8.

	Pumping rate (m <sup>3</sup> /sec)	Method	T (m <sup>2</sup> /sec)	K (m/sec)	K' (m/sec)	S	S <sub>s</sub> (m <sup>-1</sup> )	S <sub>s</sub> ' (m <sup>-1</sup> )
NJ-11 (1st test)	1.07E-04	Papadopulos-Cooper	3.10E-06			3.35E-03		
		Moench		7.82E-07	2.51E-09		1.01E-05	4.47E-04
		Gringarten-Witherspoon	1.42E-07				6.68E-05	
		Neuman and Witherspoon	2.12E-05			2.40E-04		
NJ-11 (2nd test)	1.07E-04	Papadopulos-Cooper	3.62E-06			8.56E-03		
		Moench		1.51E-07	6.31E-10		3.70E-02	6.31E-02
		Gringarten-Witherspoon		2.05E-07			6.78E-04	
		Neuman and Witherspoon	6.01E-05			0.54		
NJ-11 (3rd test)	1.06E-04	Papadopulos-Cooper	4.60E-06			2.96E-05		
		Moench		7.41E-08	3.55E-10		4.90E-02	6.52E-02
		Gringarten-Witherspoon		8.41E-09			0.25	
		Neuman and Witherspoon	6.26E-06			0.27		
SJ-8 (1st test)	1.11E-04	Papadopulos-Cooper	4.03E-05			3.34E-03		
		Moench		8.87E-07	1.12E-10		1.04E-05	8.81E-04
		Gringarten-Witherspoon		6.04E-07			8.27E-07	
		Neuman and Witherspoon	3.64E-05			2.94E-02		
SJ-8 (2nd test)	1.11E-04	Papadopulos-Cooper	4.80E-05			7.34E-03		
		Moench		1.12E-06	2.24E-09		7.84E-06	1.12E-04
		Gringarten-Witherspoon		7.76E-07			9.72E-07	
		Neuman and Witherspoon	6.68E-05			1.42E-03		
SJ-8 (3rd test)	1.13E-04	Papadopulos-Cooper	4.23E-04			2.63E-02		
		Moench		2.04E-06	5.01E-09		4.71E-05	1.93E-04
		Gringarten-Witherspoon		9.42E-06			2.66E-04	
		Neuman and Witherspoon	4.56E-05			0.64		

**Table 3.** Flow dimension obtained by zonal pumping tests on borehole SJ-8.

Test section	Drawdown slope	Flow dimension
135-50.0 m	0.178	1.72
135-32.0 m	0.159	1.77
135-19.0 m	0.308	1.41

보다 3차 구간양수시험(팍커 설치심도 19 m)에서 상대적으로 수리전도도가 증가하고, 비저유율은 감소하였다. Papadopulos-Cooper 식에 의하면, 3차 구간양수 시험에서 구해진 투수량계수가 1차, 2차 구간양수 시험의 투수량계수보다 훨씬 더 크다. 이러한 사실들은 시추공 SJ-8호공의 천부에 투수성 균열대가 더 잘 발달되어 있음을 암시한다. 그러나 공내 TV검층에서는 69.8 m 보다 더 얕은 심도에서는 균열대가 발견되지 않았다. 이는 비록 폭이 얇은 균열대라도 투수성이 높을 수 있음을 지시한다.

### 순간충격시험

NJ-11호공과 SJ-8호공에 대해서 순간충격시험을 실시하여 수리상수를 구하였다. 순간충격시험을 위해서는 폐쇄된 쇠파이프(dummy)를 순간적으로 투입하여 상승된 수위가 하강하기 시작하여 최초수위에 도달할 때까지 경과시간별로 지하수위를 측정하였다. 그리고 최초 수위에 도달하였을 때, dummy를 물 속에서 순간적으로 인양하여 최초수위로 회복될 때까지 지하수위를 측정하였다. 이때 수위변화는 자동수위측정기(네덜란드 Eijkelpamp사의 DIVER, 측정범위 10 m)를 사용하여 1초 단위로 자동 계측하였다. 순간충격시험분석에는 Hvorslev법, Bower & Rice법 그리고 Cooper-Bredehoeft-Papadopulos 법 (C-B-P법)을 적용하였다. 그리고 본 조사지역의 대수층은 균열암반대수층이므로 대수층의 두께를 정확히 할 수 없으므로 케이싱 바닥심도로부터 시추공 바닥까지를 대수층 두께로 간주하여 해석하였다.

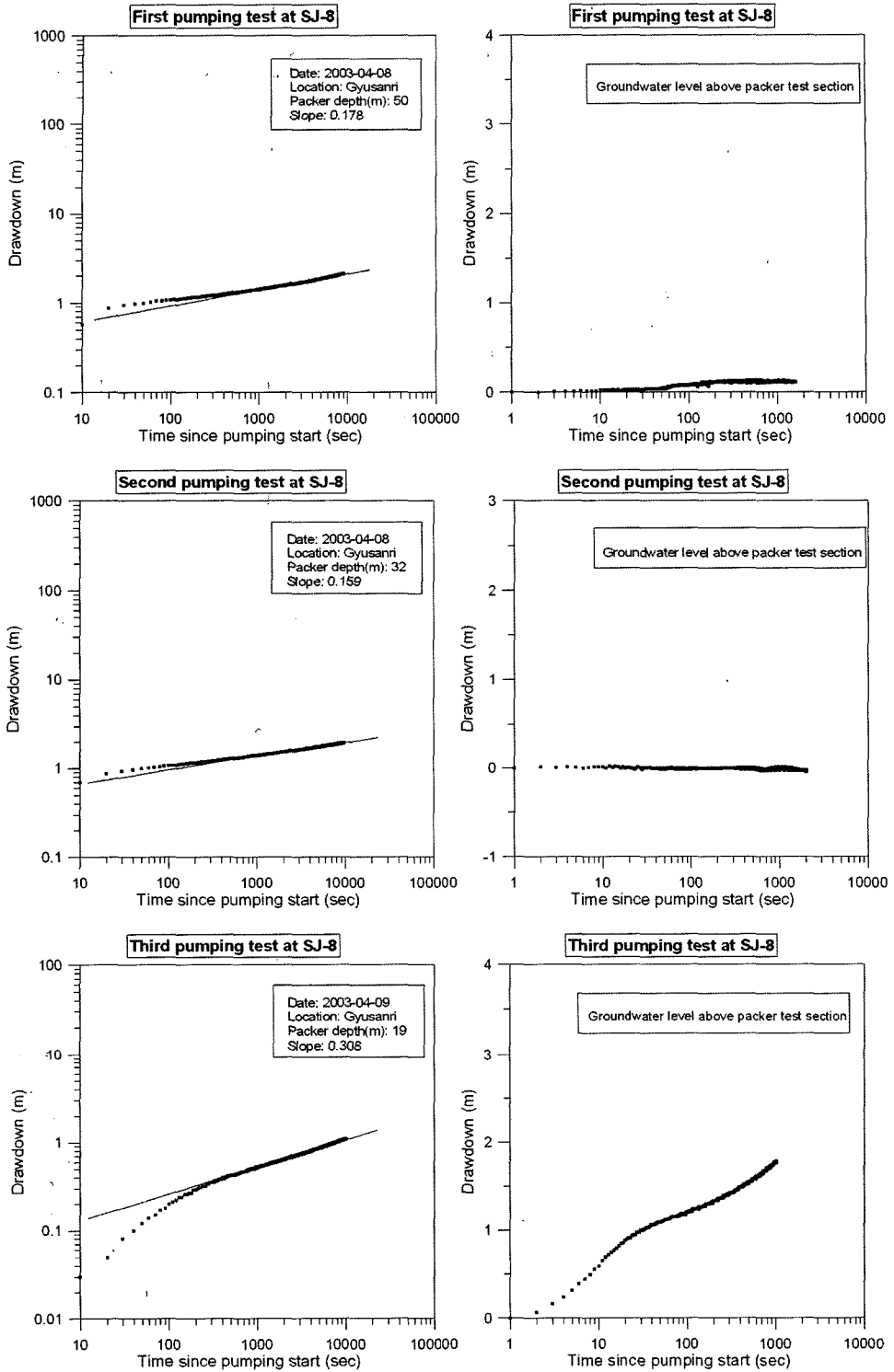


Fig. 6. Drawdown slope by zonal pumping at test hole SJ-8.

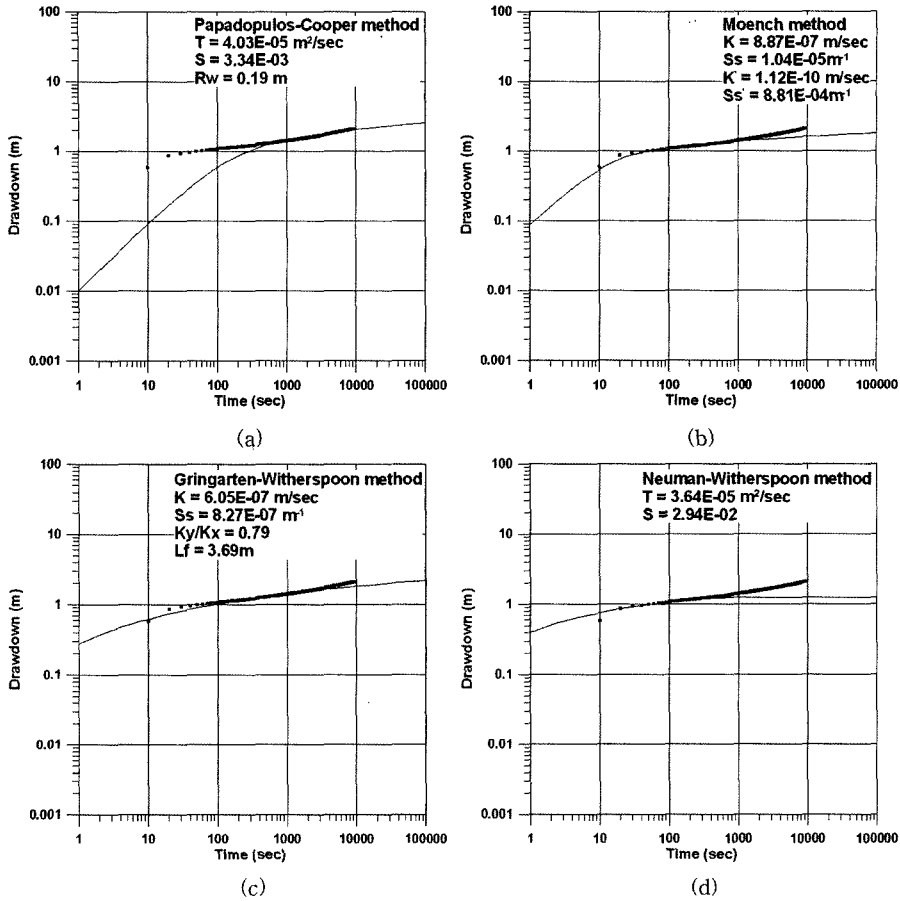


Fig. 7. Curve-fitting results of the first pumping test at SJ-8 using (a) Papadopolos-Cooper, (b) Moench, (c) Gringarten-Witherspoon, and (d) Neuman-Witherspoon methods.

NJ-11호공에서 dummy 투입에 의한 Hvorslev법과 Bower & Rice 법으로부터 구한 수리전도도는 각각  $1.80 \times 10^{-5}$  m/sec와  $1.51 \times 10^{-5}$  m/sec이었고, C-B-P법에 의한 수리전도도는  $1.75 \times 10^{-4}$  m/sec(Table 4)로서, 구간양수시험에 의한 수리전도도보다 약 100~1,000배 정도 높다. 이는 순간충격시험에서 구한 수리전도도는 지표 가까운 천부지층의 수리전도도를 대표하기 때문으로 해석된다.

SJ-8호공에서 dummy 투입에 의한 Hvorslev법과 Bower & Rice법으로부터 구한 수리전도도는 각각  $3.34 \times 10^{-6}$  m/sec과  $2.78 \times 10^{-6}$  m/sec이었고, C-B-P법에 의한 수리전도도는  $1.21 \times 10^{-5}$  m/sec이었다(Table 4). 이는 구간양수시험에서의 수리전도도보다 약 100배 이상 높은 값이다. 이와 같이 NJ-11호공의 수리전도도가 SJ-8호공보다 약 10배 정도 더 높은 것은 NJ-11호공의 천부지

층의 투수성이 상대적으로 더 크음을 지시한다. 따라서 NJ-11호공과 SJ-8호공에서 천부의 미고결층과 암반층의 수리적 특성이 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

### 공내수질검층

NJ-11호공과 SJ-8호공에서 독일 SEBA사의 KLL-Q 모델의 공내수질검층기를 사용하여 심도 1 m 간격으로 공내수질검층을 실시하였다. 수질검층항목은 지하수 온도, 전기전도도(EC), pH, 용존산소(DO), 산화-환원전위(Eh)이다(Fig. 10, Fig. 11). Fig. 10과 Fig. 11에서 무늬로 된 구간과 점선은 균열대를 나타낸다.

NJ-11호공에서는 EC값의 범위가 150~200  $\mu$ S/cm, pH가 6.10~7.30으로서(Table 5), 전체적으로는 심도에 따라 값이 증가하는 추세를 보인다(Fig. 10). 가장 구

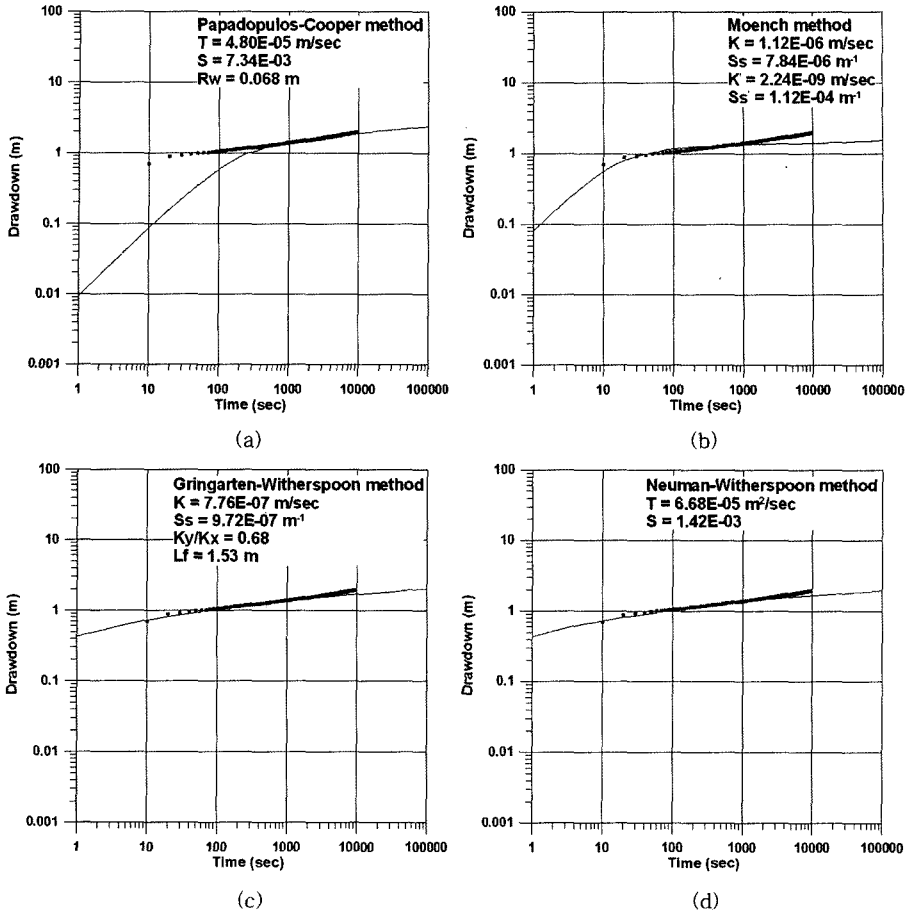


Fig. 8. Curve-fitting results of the second pumping test at SJ-8 using (a) Papadopolos-Cooper, (b) Moench, (c) Gringarten-Witherspoon, and (d) Neuman-Witherspoon methods.

모가 큰 균열대 구간(34.0~39.0 m)에서의 수질변화를 보면, EC가 증가하고, DO가 감소하며, Eh가 증가하는 현상을 보인다. 그러나 수온은 거의 일정하게 유지되고 있다. 이는 NJ-11호공의 천부에서 유동차원이 1차원인 특정 유동성 균열의 발달을 지시하는 것과 연관된다.

NJ-11호공에서 각각의 성분들간의 상관성을 분석한 결과(Table 7), 심도증가에 따라서 온도, pH, Eh가 증가하고, DO는 감소하는 경향성을 보인다. 이는 심도가 깊어질수록 지온이 증가하고 물-광물반응에 의해서 pH가 높아지며, 지하수흐름에 따라 DO는 감소하는 일반적인 현상과 잘 일치한다. 그러나 심도가 깊어질수록 Eh가 증가하는 경향성은 설명하기가 어렵다. 온도는 pH, Eh와 양의 상관성을 보이고 있으며, DO와는 음의 상관성을 나타낸다. 온도-pH 그리고 온도-DO의 관계는 일반적인 경향성과 대체로 일치한다. EC는 DO와는 음의 상

관성을 보이거나 온도, pH와는 비교적 낮은 양의 상관성을 보인다. 그리고 Eh와는 매우 낮은 음의 상관성을 보인다. EC는 DO와 음의 상관성을 보이며, 이것은 지하수 흐름에 따라 용존물질의 농도가 증가하고 용존산소량이 감소하는 경향성과 일치한다. pH는 온도, EC, Eh와 비교적 높은 양의 상관성을 보인다. 또한 Eh는 DO를 제외한 다른 성분들과는 비교적 높은 양의 상관성을 나타낸다. 그러나, DO는 다른 모든 성분들과 높은 음의 상관성을 보인다.

SJ-8호공에서는 EC값의 범위가 380~460  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH가 6.80~8.00으로서(Table 6), 지표에서 15 m까지는 값이 감소하다가 그 이후에는 대체로 심도에 따라 증가하는 추세를 보인다(Fig. 11). SJ-8호공의 pH와 EC의 최대값이 NJ-11호공보다 높은 이유는 SJ-8호공의 공심도가 더 깊기 때문이다. 균열대와 수질검층 결과를 비교하면,

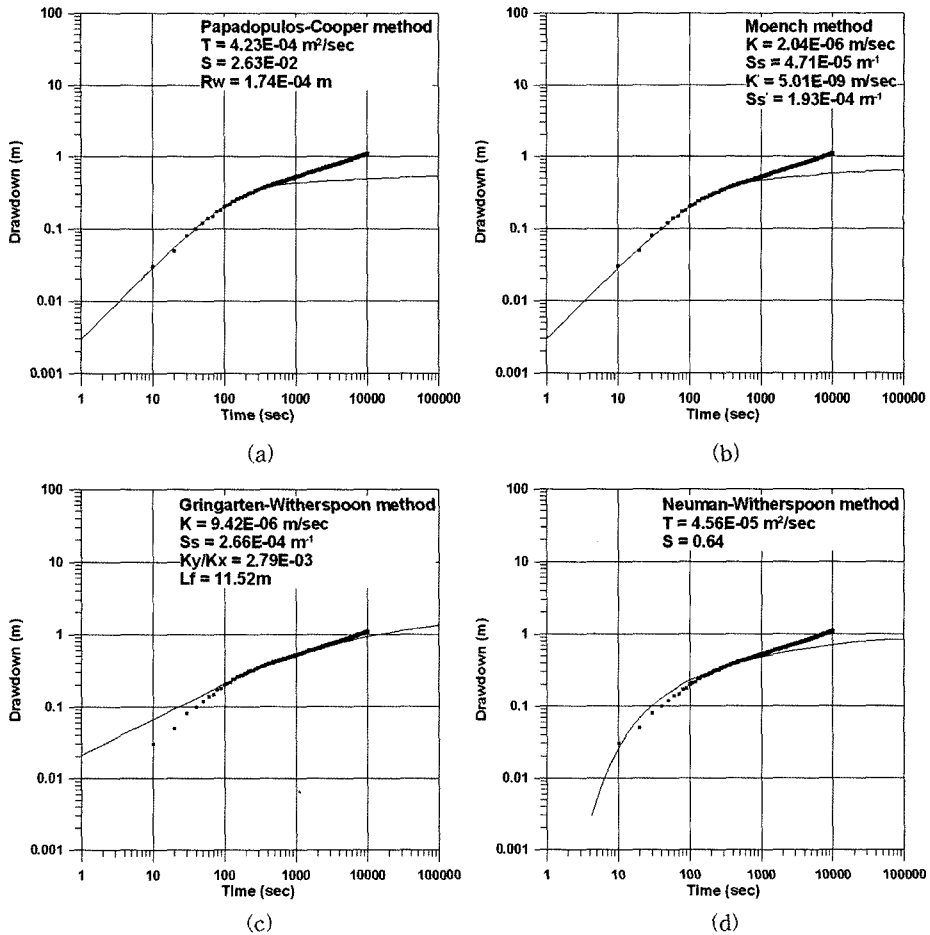


Fig. 9. Curve-fitting results of the third pumping test at SJ-8 using (a) Papadopulos-Cooper, (b) Moench, (c) Gringarten-Witherspoon, and (d) Neuman-Witherspoon methods.

Table 4. Hydraulic parameter estimates by slug test analysis.

Dummy		K (m/sec) by Hvorslev	K (m/sec) by Bouwer-Rice	K (m/sec) by C-B-P	S by C-B-P
NJ-11	Injection	1.80E-05	1.51E-05	1.75E-04	3.72E-04
	Withdrawal	2.89E-05	2.43E-05	2.57E-04	4.37E-02
SJ-8	Injection	3.34E-06	2.78E-06	1.21E-05	5.96E-05
	Withdrawal	2.88E-06	2.40E-06	8.21E-06	1.68E-04

Table 5. Water quality log at boreholes NJ-11.

NJ-11	Temp.(°C)	EC (mS/cm)	pH	DO (mg/l)	Eh (mV)
Min	14.50	0.15	6.10	3.80	214.80
Max	16.60	0.20	7.30	8.40	330.90
Mean	15.58	0.17	6.67	5.77	291.73
Median	15.50	0.18	6.70	5.30	308.10
Std. Dev	0.59	0.01	0.27	1.25	36.74
Kurtosis	-1.02	-1.00	-0.27	-1.07	-1.03
Skewness	-0.09	-0.28	0.24	0.37	-0.78

**Table 6.** Water quality log at boreholes SJ-8.

SJ-8	Temp.(°C)	EC (mS/cm)	pH	DO (mg/l)	Eh (mV)
Min	14.00	0.38	6.80	1.50	122.70
Max	17.40	0.46	8.00	4.40	216.70
Mean	16.05	0.40	7.35	2.45	167.62
Median	16.05	0.39	7.20	2.70	169.20
Std. Dev	0.87	0.02	0.34	0.55	17.12
Kurtosis	-0.95	2.53	-1.35	-0.42	2.05
Skewness	-0.13	1.80	0.32	-0.08	0.52

**Table 7.** Matrix of correlation coefficients among physical components from the NJ-11.

	Depth	Temp.	EC	pH	DO	Eh
Depth	1.000	0.887	0.687	0.889	-0.952	0.817
Temp.	0.887	1.000	0.296	0.774	-0.819	0.703
EC	0.687	0.296	1.000	0.672	-0.731	0.634
pH	0.889	0.774	0.672	1.000	-0.905	0.665
DO	-0.952	-0.819	-0.731	-0.905	1.000	-0.854
Eh	0.817	0.703	0.634	0.665	-0.854	1.000

**Table 8.** Matrix of correlation coefficients among physical components from the SJ-8.

	Depth	Temp.	EC	pH	DO	Eh
Depth	1.000	0.993	0.554	0.770	-0.852	-0.011
Temp.	0.993	1.000	0.587	0.721	-0.863	-0.093
EC	0.554	0.587	1.000	0.415	-0.756	-0.295
pH	0.770	0.721	0.415	1.000	-0.780	0.308
DO	-0.852	-0.863	-0.756	-0.780	1.000	0.029
Eh	0.817	0.703	0.634	0.665	-0.854	1.000

균열대와 수질성분 간에 특별한 관련성을 보이지 않는다.

SJ-8호공에서 각각의 성분들간의 상관성을 분석한 결과(Table 8), 심도가 깊어질수록 온도와 pH가 증가하지만, DO는 감소하는 경향성을 보인다. 이는 심도가 깊어질수록 지온이 증가하고 물-광물반응에 의해서 pH가 높아지며, 지하수흐름에 따라 DO는 감소하는 일반적인 현상과 잘 일치한다. 그러나 Eh는 심도에 따른 경향성을 보여주지 않는다. 온도는 pH와 비교적 높은 양의 상관성(상관계수 0.72)을 보이고 있으며, EC와는 양의 상관성을 보이지만 상관계수는 0.59로서 높지 않다. 한편 온도-DO는 높은 음의 상관계수(-0.86)를 보여주고 있다. 그러나 온도-Eh간에는 상관성이 거의 나타나지 않는다. 온도-pH 그리고 온도-DO의 관계는 일반적인 경향성과 대체로 일치한다. EC는 DO와 음의 상관성을 보이나 온도, pH와는 비교적 낮은 양의 상관성을 보인다. 그리고 Eh와는 매우 낮은 음의 상관성을 보인다. EC가 DO와 음의 상관성을 보이는 것은 지하수 흐름에 따라 용존물질의 농도가 증가하고 용존산소량이 감소하는 경향성과 일치한다. pH는 온도와 비교적 높은 양의 상관성(상관

계수 0.72)을 보인다. 그러나 pH와 DO간에는 비교적 높은 음의 상관성(상관계수 -0.78)을 보여준다. 한편 pH-EC, pH-Eh간에는 낮은 양의 상관성을 보여준다. DO는 온도, pH, EC와 높은 음의 상관성을 나타낸다. 그러나 DO-Eh간에는 상관성이 거의 나타나지 않는다. Eh는 다른 모든 성분들과 낮은 음의 상관성을 보이거나 낮은 양의 상관성을 보인다.

## 토의 및 결론

NJ-11호공(심도: 97 m)에서 공내TV검층에 의해서 확인된 파쇄대 구간은 19.0~19.9 m, 34.0~39.0 m, 40.9~41.0 m, 43.8 m 부근, 48.3 m 부근, 48.7~50 m, 54.3 m 부근, 56.9 m 부근, 59.5 m 부근, 77.5 m 부근이다. 한편 SJ-8호공(심도: 135 m)의 파쇄대 구간은 69.8 m 부근, 85.3~86 m, 93.7 m 부근, 116.9~117.0 m, 131.5 m 부근이다. 이를 바탕으로 NJ-11호공에서는 97 (공저)~56.9 m, 97~45.0 m 그리고 97.0~24.0 m의 세 구간 대해서 양수시험을 실시하였다. 또한 SJ-8호공에서는

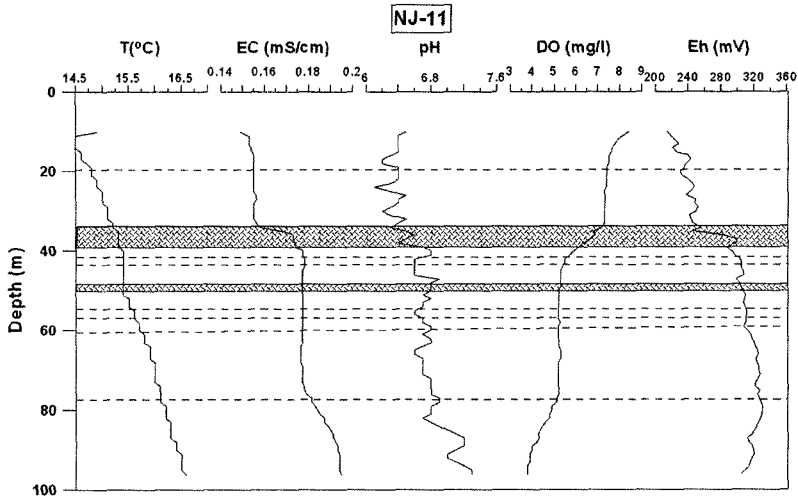


Fig. 10. Water quality log in NJ-11.

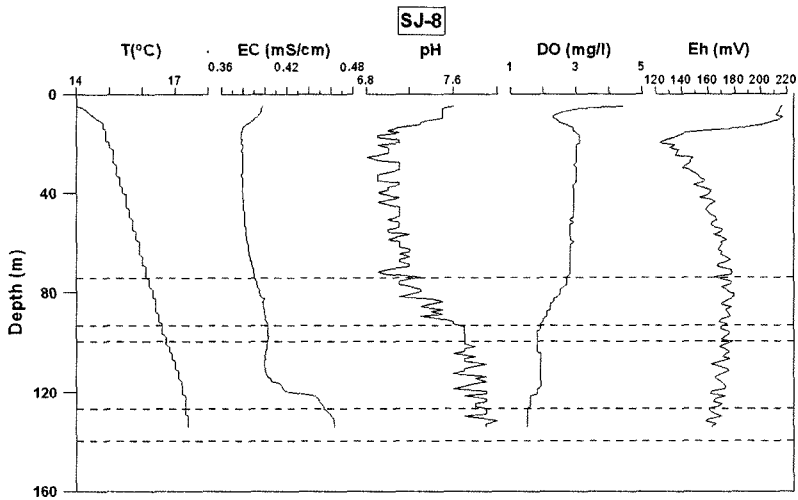


Fig. 11. Water quality log in SJ-8.

135.0(공저)~50.0 m, 135.0~32.0 m, 135.0~19.0 m에 대해서 구간양수시험을 실시하였다. 구간양수시험 결과, NJ-11호공에서는 팍커 설치심도가 가장 깊을 때(56.9 m) 1.6차원의 유동차원을 보이고 팍커 설치심도가 얕아질수록 유동차원이 감소하여 팍커 설치심도 24 m에서는 1차원을 나타내었다. 균열대의 분포와 지하수 유동차원을 관련시켜 볼 때, 균열대는 천부로 갈수록 특정한 방향성을 가지며 규모는 커지고 있음을 지시한다. 반대로 심도가 깊어질수록 균열대의 규모는 작으나 균열대의 발달 정도가 균일해짐을 알 수 있다. 즉, 균열대의 규모가 가장 큰 34.0~41.0 m 구간에서 특정한 방향의 균열들이

많이 발달되어 있음을 알 수 있다. 수질검층과 비교하면, 34.0~41.0 m 구간에서 EC가 증가하고 DO가 감소하며, 온도는 비교적 일정함을 알 수 있다. 이는 비교적 지하 심부로부터 지하수가 균열대 구간으로 유입함을 시사하며, 균열대내의 대류로 인하여 지하수 수온은 비교적 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

SJ-8호공에서는 팍커 설치심도가 가장 깊은 50 m 심도에서 1.7차원정도이고, 팍커 설치심도 32 m에서는 1.8차원을 그리고 팍커 설치심도 19 m에서는 1.4차원을 나타내었다. 이는 천부(32~19 m)에 발달된 균열대가 일정한 방향성을 가지고 있는 것을 지시하고, 반면에 심부에

서는 균열대의 분포가 비교적 균일함을 지시한다. 양수 시험시 팩커보다 상부구간의 지하수 유동차원을 보면, 대체로 팩커구간의 지하수 유동차원의 감소와 함께 감소하는 경향성을 보여준다. 이는 팩커구간의 지하수 양수로 인해서 팩커보다 상부구간의 균열대로부터 팩커구간의 지하수가 공급됨을 지시하는 것이다. 수질검층과 균열대의 발달상태로 볼 때, 모든 주요 균열대가 발달된 69m 보다 깊은 심도에서는 지하수 유동차원이 1.5차원 정도를 보임을 알 수 있다. 특히 116.9~131.5 m 구간에서는 EC가 증가하고, DO가 감소하며 온도는 비교적 일정하다. 따라서 심부구간에서 지하 심부로부터 지하수가 균열대 구간으로 유입함을 시사한다.

구간양수시험분석에 의하면, Moench(1984)의 이중공극모델이 모든 구간에서 대체로 수위하강곡선과 잘 들어맞는다. 이는 이중공극모델이 시험공 주변의 균열암반의 수리적 특성을 비교적 잘 대변하고 있음을 지시한다. 순간충격시험분석에서 구한 천부의 미고결층의 수리전도도( $2.78 \times 10^{-6} \sim 1.75 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ )는 구간양수시험의 Moench(1984) 식으로 구한 암반층의 수리전도도( $7.41 \times 10^{-8} \sim 2.04 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ )보다 1.4~2,360배 정도 더 크다 이는 시험공 주변에서 천부 미고결층의 수리전도도가 심부 암반층의 수리전도도보다 크다는 것을 나타낸다.

수질검층에 의하면, 심도가 깊어질수록 지온이 증가하고 물-광물반응에 의해서 pH가 높아지며, 지하수흐름에 따라 DO는 감소하는 일반적인 경향성을 보여주고 있다. 심도에 따른 균열대와 물리화학적 성분들간의 관계를 보면, 대부분의 균열대 구간에서 전기전도도가 증가하고, 용존산소량이 감소하는 경향성을 보인다. 그러나 온도, pH, Eh는 일정한 경향성을 보이지 않는다. 수질검층과 균열대의 관계를 보면, NJ-11호공에서는 가장 규모가 큰 균열대 구간(34.0~39.0m)에서의 수질변화를 보면, EC가 증가하고, DO가 감소하며, Eh가 증가하는 현상을 보이거나, SJ-8호공에서는 수질검층자료와 균열대 사이에 특별한 관련성을 보이지 않는다. 이는 수질검층이 1m 간격으로 되어 있는데, 반해서 균열대 구간은 1m 미만인 경우가 많아서 균열대와 수질성분의 변화를 정확하게 파악할 수 없기 때문이다.

## 사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드린다. 또한 현장시험시 도움을 준 한국지하수테크(주)에도 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 김용준, 박영석, 주승환, 오민수, 박재봉, 1991, 옥천지향 사대 동남대에서의 화성활동(III) (나주-남창지역을 중심으로), 광산지질, 24(3), pp.361-376.
- 한국지질자원연구원, 환경부, 2003, 폐공을 이용한 도심 지역 지하수 환경성 복원기술개발, 567p.
- 함세영, 1997, 일정수두 상부경계를 가지는 이중공극 대수층내 부정류에 관한 프랙탈모델, 지하수환경, 4(2), pp.95-102.
- Acuna, J.A. and Yortsos, Y.C., 1995, Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient, Water Resources Research, 31(3), pp.527-540.
- Allégre, C.J. Le Mouél, J.-L., and Provost, A., 1982, Scaling rules in rock fractures and possible implications for earthquake prediction, Nature, 297, pp.47-49.
- Anderson, J., Shapiro, A.M., and Bear, J., 1984, A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information, Water Resour. Res., 20(1), pp.79-88.
- Barenblatt, G.E., Zheltov, I.P., and Kochina, I.N., 1960, Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks, Jour. Appl. Math. Mech, pp.1286-1303.
- Barker, J.A., 1998, A generalized radial flow model for pumping tests in fractured rock, Water Resources Research, 24, pp.1796-1804.
- Barnsley, M.F., 1998, Fractals everywhere, Academic, San Diego, Calif., 530p.
- Boulton, N.S. and Streltsova, T.D., 1977, Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation, Jour. Hydr., 35, pp.257-269.
- Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B., and Peaudecerf, P., 1990a, Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network : calibration and validation, 1. The flow model, Water Resour. Res. 26(3), pp.479-489.
- Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., and Margritta, R., 1990b, Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network : calibration and validation, 2. The transport model, Water Resour. Res., 26(3), pp.491-500.
- Chang, J. and Yortsos, Y.C., 1988 Pressure transient analysis of fractal reservoirs, SPE 18170, pp.1-14.
- Gringarten, A.C. and Ramey, H.J., 1974, Unsteady state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry, Soc. Petro. Engrs. J., pp.413-426.
- Gringarten, A.C. and Witherspoon, P.A., 1972, A method of analyzing pump test data from fractured aquifers, Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Assoc. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics, Stuttgart, 3-B, pp.1-9.
- Hamm, S.Y. and Bidaux, P., 1996, Dual-porosity fractal models for transient flow analysis in fissured rocks, Water Resources Research, 32(9), pp.2733-2745.
- Hamm, S.Y. and Bidaux, P., 1994a, Ecoulements tran-



- sitoires en géométrie fractale avec drainage : théorie et application, C. R. Acad. Sci. Paris, série II, 318(2), pp.227-233.
- Hamm, S.Y. and Bidaux, P., 1994b, Stationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fissured aquifers, *The Jour. Eng. Geol.*, 4(2), pp.127-138.
- Hantush, M.S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, *Jour. of Geophys. Res.*, 65(11), 3713-3725.
- Hantush, M.S., 1962, Flow of groundwater in sands of nonuniform thickness; 3. Flow to wells, *Jour. Geophys. Res.* 67(4), pp.1537-1534.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E., 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, *Am. Geophys. Union Trans.*, 36, pp.95-100.
- Jones, M.A., 2001, Discrete fracture network modeling to differentiate conceptual models of fluid flow, *New approaches characterizing groundwater flow, Proceedings of the 31 International Association of Hydrogeologists Congress, Munich, Germany*, pp.835-837.
- Kazemi, H., 1969, Pressure transient analysis of naturally fractured reservoir, *Trans. AIME*, 256, pp.451-461.
- Long, J.C.S. and Billau, D.M., 1987, From field data to fracture network modeling an example incorporating spatial structure, *Water Resour. Res.*, 23(7), pp.1201-1216.
- Long, J.C.S., Gilmour, P., and Witherspoon, P.A., 1985, A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures, *Water Resour. Res.*, 21(8), pp.1105-1115.
- Moench, A.F., 1984, Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, *Water Resour. Res.*, 20, pp.831-846.
- Moench, A.F., 1985, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, *Water Resources Research*, 21(8), pp.1121-1131.
- Neuman, S.P. and Witherspoon, P.A., 1969, Theory of flow in a confined two aquifer system, *Water Resources Research*, 5(4), pp.803-816.
- Papadopoulos, I.S. and Cooper, H.H., 1967, Drawdown in a well of large diameter, *Water Resources Research*, 3, pp.241-244.
- Sahimi, M., 1995, *Flow and transport in porous media and fractured rock*, VCH, 482p.
- Theis, C.V., 1935, The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using groundwater storage, *Transaction, American Geophysical Union*, 16, pp.519-524.
- Thomas, A., 1987, Structure fractale de l'architecture des champs de fractures en milieu rocheux, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 304, Ser. 2, pp.181-186.
- Velde, B., Dubois, J., Moore, D., and Touchard, J., 1991, Fractal patterns of fractures in granites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104, pp.25-35.
- Warren, J.E. and Root, P.J., 1963, The behavior of naturally fractured reservoirs, *Soc. Pet. Engr. Jour.*, pp.245-255.

---

2006년 11월 20일 원고접수, 2006년 12월 17일 게재승인

#### 함세영

부산대학교 지질학과  
609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30  
Tel: 051-510-2252  
Fax: 051-516-7767  
E-mail: hsy@pusan.ac.kr

#### 성익환

한국지질자원연구원  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3082  
Fax: 042-868-3808  
E-mail: sih@kigam.re.kr

#### 이병대

한국지질자원연구원  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3088  
Fax: 042-868-3808  
E-mail: blec@kigam.re.kr

#### 장성

한국농촌공사  
641-733, 경상남도 창원시 용호동 8-3  
Tel: 055-269-9462  
Fax: 055-261-8612  
E-mail: seong@ekr.or.kr

#### 정재열

부산대학교 지질학과  
609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30  
Tel: 051-510-2252  
Fax: 051-516-7767  
E-mail: jyy@pusan.ac.kr

#### 이정환

부산대학교 지질학과  
609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30  
Tel: 051-510-2252  
Fax: 051-516-7767  
E-mail: oathway@pusan.ac.kr