

청송군 현서면 일대 도수로터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성

Relation between Groundwater Inflow into the Waterway Tunnel and Hydrogeological Characteristics in Hyeonseo-myeon, Cheongsong-gun, Korea

박 재 현 (Jae-hyun Park)

한국수자원공사

함 세 영 (Se-Yeong Hamm)

부산대학교 지질학과

성 익 환 (Ig Hwan Sung)

한국지질자원연구원 환경지질연구부

이 병 대 (Byong Dae Lee)

한국지질자원연구원 환경지질연구부

정 재 열 (Jae Yeol Cheong)

부산대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

영천댐 도수로 터널 중 청송군 현서면 지역의 터널 구간(연장 1,484m)에 대한 터널내 유입량과 수리지질학적 특성간의 관계를 연구하였다. 본 연구에서는 터널내로 유입되는 초기 유입량(라이닝 및 그라우팅 이전의 유입량)과 터널지역의 사암층, 절리빈도, 절리간극 및 간격, 단층, 수리전도도간의 관계를 분석하였다. 그리고 절리빈도와 수리전도도의 관계도 고찰하였다. 본 연구지역에서는 단층폭과 터널내 지하수 유입량의 관련성이 가장 크며, 사암의 두께, 수리전도도, 절리빈도순으로 관련성이 낮아지는 것으로 판단된다.

주요어 : 도수로터널, 터널내 유입량, 절리빈도, 절리간극, 단층, 사암층 두께, 수리전도도

The waterway tunnel zone (length 1,484m) in the Hyeonseo-myeon area that is a part of Yeongcheon dam waterway tunnel has been studied to characterize the relationship between groundwater inflow into the waterway tunnel and hydrogeologic characteristics. The effects of sandstone thickness in the tunnel section, fracture density, fracture aperture and spacing, fault zone width and hydraulic conductivity on the early inflow (inflow prior to the lining and grouting) are investigated. The relationship between fracture density and hydraulic conductivity is also considered. The result of the study suggests that fault zone width has the greatest effect on groundwater inflow

into the tunnel, and sandstone thickness, hydraulic conductivity and fracture density in order shows an influence on the inflow.

Key Words : waterway tunnel, inflow into the tunnel, fracture density, fracture aperture, fault zone width, sandstone thickness, hydraulic conductivity

서 론

현대 산업사회에서는 경제적 또는 군사적인 목적으로 지하공동(유류비축기지, 핵폐기물 및 그 외 폐기물 저장시설, 식품저장시설, 군사시설, 철도용 또는 도수로 터널 등)을 많이 건설하고 있다. 이러한 지하 공동 건설시에는 기반암의 지질공학적, 수리지질학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이는 지하 공동의 안정성이 기반암의 지질공학적, 구조지질학적, 수리지질학적 특성에 크게 지배되기 때문이다. 또한 지하 공동 건설에 따른 지하수 유동체계의 변화에 의해서 주변지역의 지하수 흐름이 교란되거나 공동 내로의 지하수 유출에 의해서 원저한 지하수위 하강이 일어날 가능성이 있다. 따라서, 터널 굴착시에는 지하수 유동체계 변화를 최소화하는 것이 터널의 안정성 확보 및 주변환경에 미치는 영향을 줄이는데 중요한 관건이 된다. 이를 위해서는 결정질 암반내 지하수 흐름을 이해하여야 하는데, 결정질 암반내 지하수 흐름은 절리나 단층 또는 암질의 특성 그리고 이와 관련된 수리적 특성에 좌우된다.

도수로터널은 각 댐과 댐을 연결하거나 댐과 저수지를 잇는 장대한 암반관로이며, 그 규모면에서도 지하 지질에 미치는 영향이 매우 광범위하다. 대규모의 도수로 터널 건설과 관련되어 발생하는 문제점은 터널 내로 유입하는 다량의 지하수에 의한 주변지역의 지하수 고갈, 이로 인한 지표 또는 지하 천부의 오염물질 유입과 농작물 생육에 미치는 영향 등을 생각할 수 있다. 특히, 도수로 터널은 대부분 농촌지역을 통과하므로 수자원 고갈로 인한 농작물 재배에 큰 영향을 미칠 수 있으며 민원의 소지도 높다. 따라서, 터널내 지하수 유출을 최소화시키는 것은 도수로 터널 굴착에 있어서 매우 중요한 문제이다.

우리나라에서 터널과 관련된 연구로는 영천댐 도수로 터널과 관련된 연구로서 이종운 외(1996)의 터널 주변지역에 대한 수리지구화학적 연구, 김남

중(1992)의 터널설계 적용에 관한 지질공학적 연구 그리고 이병대 외(2000)에 의한 터널 굴착에 따른 주변지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성에 대한 연구가 있다. 특히, 이병대 외(2000)는 영천도수로 터널의 굴착에 따른 수위하강은 터널과 직교 또는 사교하는 북북서 방향과 북동 및 동북동 방향의 단층파쇄대 부분과 퇴적암 지역의 습곡축이 위치하는 부분에서 가장 크게 일어남을 확인하였다. 이는 도수로 터널 굴착에 따른 터널내 지하수 유출과 이로 인한 주변지역의 지하수위 하강이 단열구조에 크게 지배되고 있음을 보여주는 것이다. 성익환 외(1996, 1998, 1999)는 영천댐 도수로 터널 주변지역에 대한 지하수 유동조사를 수행하여 터널 공사로 인한 지하수 유동체계의 변화를 연구하였으며, 성익환 외(2000a, 2000b)는 영천댐 도수로 터널 주변지역의 지하수위 하강 원인 및 회복 시기 예측에 대해서 연구하였다.

그 외에 터널 및 지하공동 주변의 지하수에 관한 연구로는 방사성폐기물 처분장 건설과 관련된 지하수유동 연구(강병무 외, 1993)가 있으며, 동해신광산 터널 굴착과 관련된 지표수 및 지하수에 관한 연구로서 수리지구화학적 연구(전효택 외, 1997)와 수문학 및 암반수리학적 연구(이희근 외, 1995)가 있다.

본 연구대상 지역은 영천댐 도수로터널구간 중 경상누층군에 속하는 주로 사암과 셰일로 구성된 퇴적암이 분포하는 청송군 현서면의 연장 1,484m 지역이며 연구지역 직상부인 길안천 남서측에는 청송군 현서면 여유동 마을이 위치하며, 터널 상부 지표 부근에 현서면 고평, 한거리 마을 부락이 위치한다. 영천댐 도수로 터널 전구간은 행정구역상으로 안동시의 임하면과 길안면, 청송군의 안덕면, 현서면, 현동면, 포항시의 죽장면 그리고 영천시의 자양면에 속하며, 경위도상으로는 북위 36°05'~36°33', 동경 128°52'~129°05'에 속한다. 국내 최장인 이 도수로 터널은 금호강의 수질개선과 경북 동남부지역의 용수공급을 위하여 건설되었다. 영천댐

도수로 터널은 본 터널과 3개의 사갱으로 구성된 수정마제형의 재래식 밭파 NATM식 도수로 터널로서, 터널의 길이는 경북 안동시 길안면 송사리 입구에서부터 경북 영천시 자양면 충효리의 출구까지 총 연장 32.97km에 달하며, 터널은 대부분의 구간에서 지표하 100~800m 깊이에 위치하고 있다.

본 연구에서는 터널지역의 암층, 지질구조(절리와 단층 등) 그리고 수리전도도와 터널내로 유입되는 초기 유입량 즉, 라이닝 및 그라우팅 이전의 유입량 사이에 상관관계를 분석하였다. 그리고 절리와 초기 유입량의 관계에서는 절리간격과 절리간극을 고려하였다.

지질 및 수리지질

연구지역은 주로 백악기의 경상누층군 하양층군에 속하는 사곡층이 분포하며, 암적색 세일이 주를 이루고 부분적으로 암녹색 세일 및 파쇄된 소폭의 사암이 협재한다. 그리고 지표부는 10m내외의 충적층으로 피복되어 있다(Fig. 1). 세일은 석영반암의 관입으로 인한 접촉변성작용에 의해 호은펠스화되어 있으나 대체로 층리가 잘 발달되어 있다. 이 층의 주향과 경사는 N80~90W/30~40SW의 범위를 보인다. 그리고 북측으로 향할수록 층리의 경사가 점점 급해진다.

터널 구간내에서는 부분적으로 층리발달과 N40~60W/85NE 절리 및 터널과 평행한 절리교차에 의해 불량한 암질과 지하수 유출 및 소규모 낙반이 발생되는 구간도 있다. 특히 950~975m 구간은 N10~15E/85NW 방향의 단층파쇄대 영향으로 암질이 불량하고 다량의 지하수가 유출되었다. 본 구간은 전반적으로 층리발달과 절리교차 등으로 지하수 유출 정도가 물방울이나 젖은 상태를 보이고, 부분적으로는 흘러내리고 있다. 터널과 지표와의 토피고는 대략 117~160m 정도이고, 터널노선이 길안천과 소지류(소근리~여우동 하천)를 인접 또는 관통하는 지역에서 많은 양의 지하수가 유출되고 있다.

이 지역의 주요 대수층을 형성하는 것으로 보이는 사암은 세일내에 협재되며, 층리가 잘 발달되어 있고, 폭 2~5m의 파쇄된 구간을 보인다. 파쇄대는 점토물질로 충전되어 있다. 사암층은 일반적으로

세일보다 입자가 크고 강도가 약하므로 상류쪽의 석영반암의 관입에 의해 약대를 형성하므로 주 함수 질리대 및 양호한 대수층을 형성할 수 있다. 사암층은 상류쪽으로 갈수록 퇴적암의 경사가 급해지며, 단층의 방향성이 N80W로 거의 일정함을 확인할 수 있다. 이러한 방향성을 갖는 단층의 발달은 상류쪽의 석영반암의 관입과 하류쪽의 화강암의 관입에 의해 퇴적암체가 팽압력을 받아 공액단층을 형성한 후, 구조운동에 의해 북북서 방향으로 이동한 안동, 금천, 가음, 송사리, 소근리 단층과 같은 좌수향 이동단층으로서 해석될 수 있다(성익환 외, 2000a). 사암층은 터널 주변 지역에 노두로서 많이 관찰되고 있으며, 특히 청송군 현서면 두현리 고평마을의 인근에서 나타나는 사암층의 주향 및 경사는 터널내의 확갱부를 기준으로 700~800m의 것과 동일 연장선상에 있는 암석으로 확인되었다.

연구지역의 터널상부 토피고 약 150m내외에는 길안천이 횡단하고 있고, 얇은 산과 계곡부가 형성되어 있는데 이러한 계곡부는 터널내의 곳곳에 발견되는 터널과 직교하는 소규모 단층들로서 나타나고 있다.

지질구조는 현서면과 안덕면에 분포된 퇴적암류에 발달한 습곡구조와 안동단층에 수반되어 발달한 것으로 판단되는 단층구조를 들 수 있다.

균열내 지하수 유동 이론

지금까지 국내에서는 암반내 절리와 지하수 유동에 대한 다수의 연구들이 있었다(김경수 외, 1998, 1999; 배대석 외, 1996; 조성일 외, 1999; 한일영 외, 1995; Park and Lee, 1995). 암반내의 변화하는 간극을 가지는 절리나 균열을 Fig. 2와 같이 구간별로 평행하고 평탄한 것으로 단순화시킨다면 (Neuzil and Tracy, 1981), 이 절리나 균열을 통한 층류의 유량(Q)은 cubic law 또는 간단한 Poiseuille 식에 의해서

$$Q = \frac{\gamma}{12\mu} \ell b^3 J \quad (1)$$

로 나타내진다. 여기서, μ 는 유체의 동점성계수(M/LT), ℓ 은 흐름에 직각방향의 구간별 길이(L), b 는 구간별 간극(L), J 는 수두경사(무차원), γ 는 물의 비중량(M/L²T²)이다. 따라서, 층류의 유량은

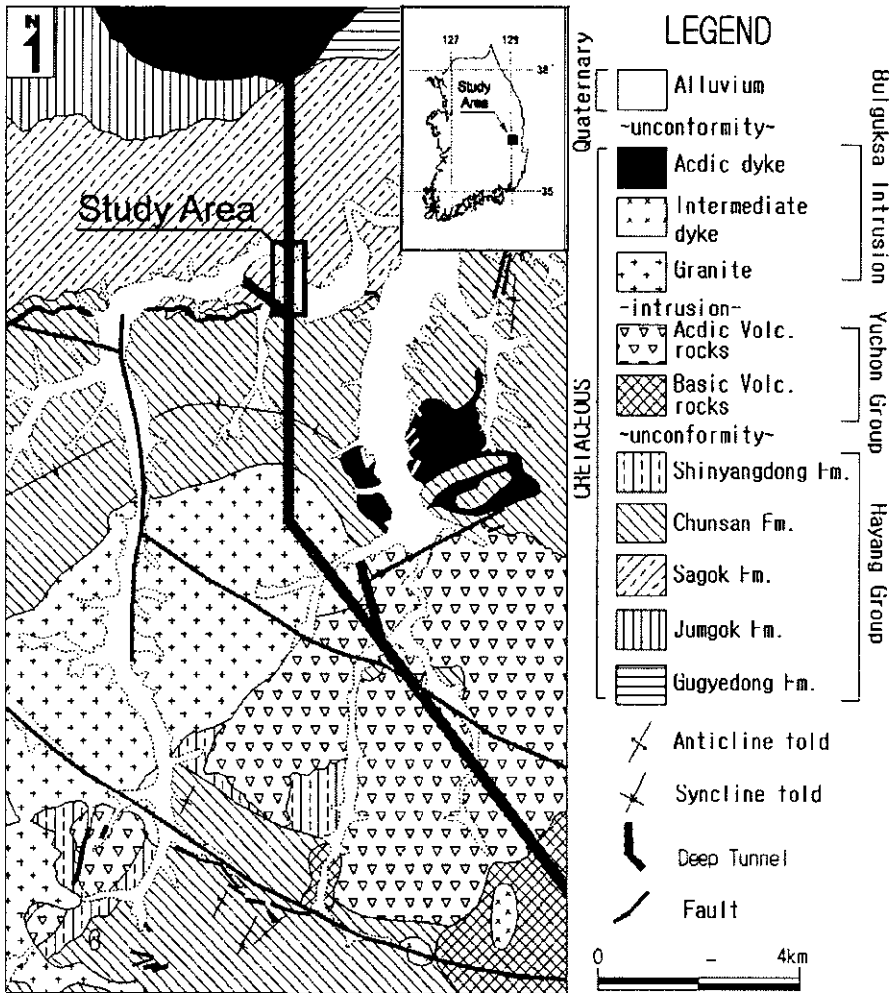


Fig. 1. Geologic map of the study area (Chang et al. 1977).

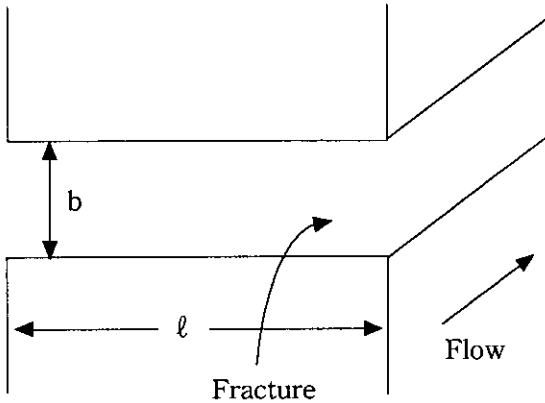


Fig. 2. Conceptual parallel plate of fracture.

간극의 3승에 비례한다. Darcy의 법칙을 이용하여 (1)식을 다시 쓰면

$$Q = \frac{Cb^2 \gamma A}{\mu} J = KAJ \quad (2)$$

와 같다. 여기서 $A = b \ell$, $C = 1/12$, K 는 수리전도도 (L/T)이다.

균열내의 유체의 흐름은 레이놀즈수(Re)와 마찰 계수(ψ)에 의해서 일반화할 수 있다(Romm, 1966; Louis, 1969). Romm(1966)은 균열내의 층류는 간극이 최소 $0.2\mu m$ 까지도 cubic law에 지배된다고 결론을 내렸다. Witherspoon et al.(1980)은 균열면이 개구되어 있든지 닫혀 있든지 간에 그리고 압중에 관계없이 cubic law가 성립함을 밝혀내었다.

Snow(1970)는 화강암 노두에서 측정된 여러 개

의 절리의 평균 간극이 대체로 대수정규분포를 보인다는 것을 연구결과 밝혀내었다. 그는 심도에 따른 절리 간극 분포도 유사한 경향을 보인다고 하였다.

터널내 지하수의 유입량과 절리 빈도의 관련성

영천댐 도수로 터널 굴착을 시작하기 직전에 실시한 1차 그라우팅과 굴착한 후에 실시한 2차 그라우팅에서 터널내로 유입되는 지하수 유입량을 측정하였다. 1차 그라우팅은 높은 수압이나 과다한 용출로 장약이 불가능한 모든 구간에 대해서 실시하였다. 1차 그라우팅시에는 시멘트 밀크 그라우팅(cement milk grouting)을 실시하기 위해 NATM터널의 특성상 발파를 위한 장약공 천공시 용출량이 큰 구간에서만 막장 전방면에 대해 주입공을 $5 \sim 20^\circ$ 각도, 심도 $6 \sim 20m$, $7 \sim 12$ 공으로 시공하였으며, 루전시험을 실시하였다(박재현, 2000). 루전시험은 주입공 구간에 물을 10bar의 유효압력으로 주입하여, 주입되는 양을 측정한다. 원래 루전시험의 목적은 시멘트 그라우팅을 실시하기 전에 Lugeon치에 의한 배합비를 설정하고 차수량을 파악하기 위함에 있었다.

굴진시 중첩구간을 뺀 초기 유입량은 $109.0 \sim 3,110.0 m^3/day$ (평균 $910.4 m^3/day$)이며 m 당 유입량은 $11.1 \sim 518.3 m^3/day/m$ (평균 $66.1 m^3/day/m$)을 보인다

Table 1. Basic statistics of data.

Data Statist.	No. of Data	Min.	Max.	Mean	Med.	Std. Dev.	Sample Variance	Skewness	Kurtosis
Unit inflow ($m^3/day/m$)	33	11.08	518.33	66.13	45.00	89.71	8048.42	4.04	17.87
ln(Unit inflow)	33	2.41	6.25	3.74	3.81	0.90	0.82	0.44	0.06
Fracture density (no/ m^3/m)	33	23.08	66.67	35.36	32.05	9.96	99.23	1.90	2.84
ln(Fracture density)	33	3.14	4.20	3.54	3.47	0.24	0.06	1.41	1.61
Hydraulic conduc. (m/sec)	33	1.15E-6	1.02E-5	4.17E-6	3.85E-6	2.33E-6	5E-12	1.18	1.01
ln(Hydraulic conduc.)	33	-13.7	-11.5	-12.53	-12.47	0.56	0.31	-0.18	-0.25
Faultzone width (m)	89	0	31.00	1.92	0	4.44	19.73	4.26	21.84
ln(Faultzone width+1)	89	0	3.47	0.59	0	0.84	0.70	1.37	1.12
Sandstone thick. (m)	89	0	4.0	0.22	0	0.64	0.41	3.69	15.11
ln(Sandstone thick.+1)	89	0	1.61	0.13	0	0.33	0.11	2.71	6.72

(Table 1). 이때 각 구간의 위치는 확검부를 기점으로 한 것이다. 초기 유입량은 그라우팅 천공공에서 흘러 나오는 양을 비이커로 측정하였으며, 눈에 보이지 않는 바닥부 유출과 측정이 불가능한 소량의 흐름들은 고려하지 않았다. 따라서, 터널의 침전지 배출수량과는 정확하게 일치하지는 않으나, 상대적인 증감현상은 확인할 수 있다. 절리빈도는 RMR값에 의해 m^2 당 절리의 개수를 구해주고 이를 scanline method 방식으로 터널연장 단위길이당 절리빈도로 평균값을 취하였다. 절리빈도는 23.08~66.67개/ m^3/m (평균 35.36개/ m^3/m)이다.

절리빈도의 분포도(Fig. 3)를 보면, 터널 중첩구간을 뺀 절리빈도는 대수정규분포를 보이지 않고 왜도가 양의 값(1.41)을 보인다. 터널 중첩구간을 빼고 산정한 절리빈도와 초기 유입량을 양대수방안 지상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 음의 상관계수(-0.36450)를 보인다(Fig. 4). 터널 중첩구간을 빼고 산정한 절리빈도를 산술좌표상에 그리고 초기 유입량을 대수좌표상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 음의 상관성(-0.3916)이 약간 더 크게 나타난다(Fig. 5). 이와 같이 전체 절리빈도에 대한 터널내 유입량의 상관성이 음의 관계를 나타내는 것은 터널내 유입량이 절리빈도보다는 일부 투수성이 큰 절리와 관련될 가능성을 보여

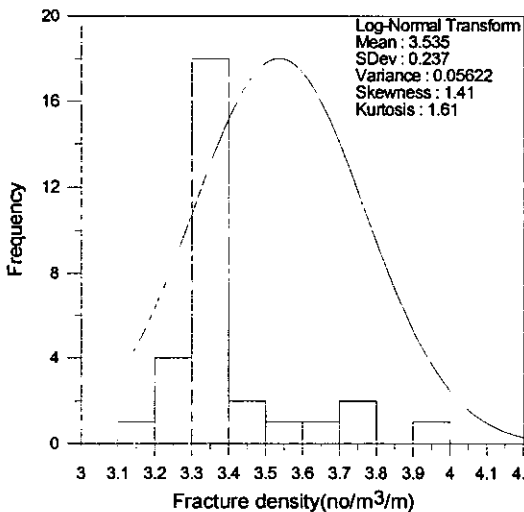


Fig. 3. Fracture density distribution with nonoverlapping section before first order grouting.

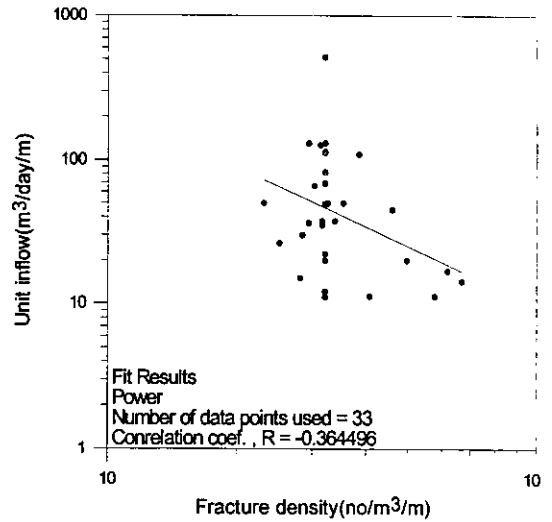


Fig. 4. Unit inflow vs. fracture density with nonoverlapping section before first order grouting on bi-logarithmic scale.

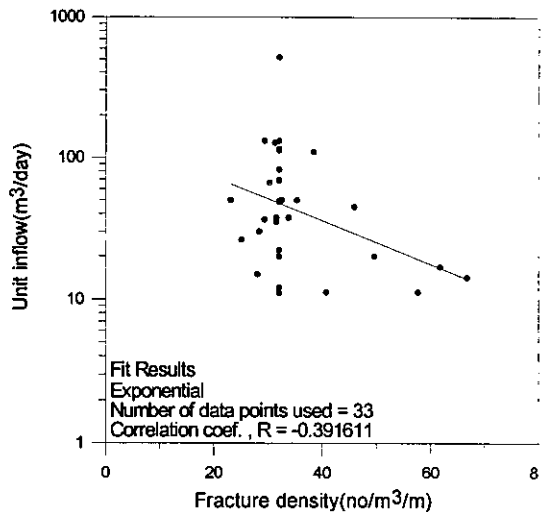


Fig. 5. Unit inflow vs. fracture density with nonoverlapping section before first order grouting on semi-logarithmic scale.

주는 것이다. 또한, 절리빈도가 30~40개/ m^3/m 내에서 단위 유입량의 변화가 크며(518.3~11.1 $m^3/day/m$), 자료가 집중되어 나타난다(Fig. 4). 이는

절리빈도 30~40/m'을 기준으로 이 보다 절리빈도가 높아지면 지하수에 의한 암반의 풍화가 잘 진행되어 절리내에 점토광물이 많이 형성되고 이 점토 충전물이 지하수 유동을 방해하는 역할을 하게 되므로 상대적으로 지하수 유입량이 적어진다고 보여진다.

터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성

야의 자료들에 의하면, 수리지질도는 대수정규분포를 하는 것으로 알려져 있다(Sagar and Runchal, 1992; Freeze, 1975). Freeze(1975)와 Dagan(1979, 1981)은 다공성 균질 매체에서 수리지질도 분포가 대수정규분포를 보인다는 것을 이론적으로 증명하였다.

루전시험(Louis, 1974)에 의해서 터널내에서 Lugeon값(6.2~55.0Lu, 평균 22.5Lu)을 구하였다. 1 Lugeon(Lu)은 10bar의 유효압력으로 주입할 때 시추공 1m 구간을 통하여 1분 동안 주입되는 양으로서 수리지질도 K(m/sec)를 1.85×10^{-7} 로 나눈 값이다(Louis, 1974). 따라서, 구해진 Lu값을 수리지질도로 환산하였다.

수리지질도의 빈도분포도(Fig. 6)를 보면, 수리지질도의 빈도 분포가 대수정규분포를 보이지 않으며

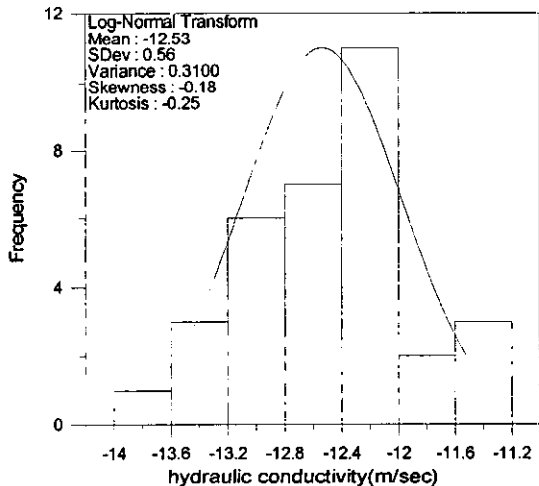


Fig. 6. Hydraulic conductivity frequency distribution with nonoverlapping section.

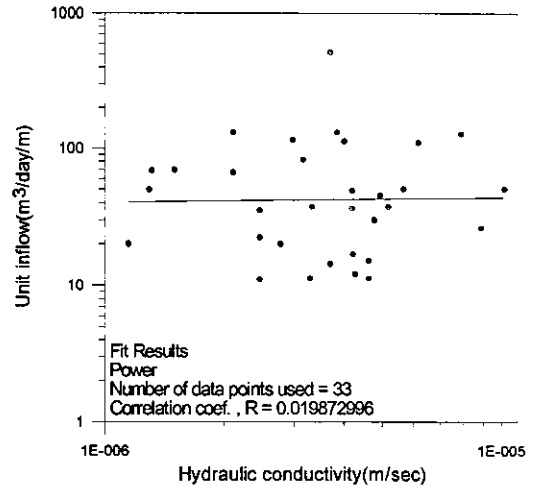


Fig. 7. Unit inflow vs. hydraulic conductivity with nonoverlapping section on bi-logarithmic scale.

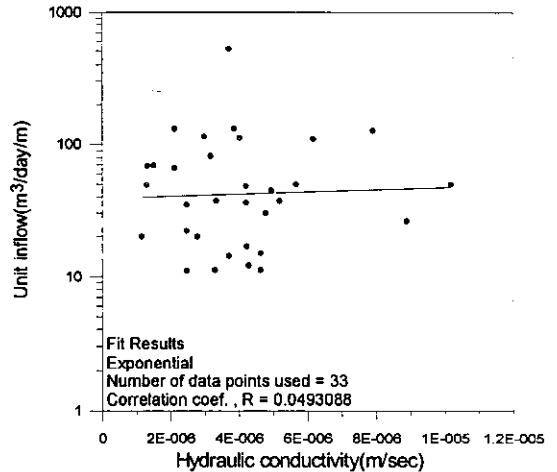


Fig. 8. Unit inflow vs. hydraulic conductivity with nonoverlapping section on semi-logarithmic scale.

왜도는 약간 음의 값(-0.18)으로 치우쳐 있다(Table 1). 수리지질도 값과 터널 중첩구간을 배제한 초기 유입량을 양대수방안지상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수는 0.01990으로서 매우 낮은 양의 상관성을 보인다(Fig. 7). 수리지질도 값을 산술좌표(x)상에 그리고 터널 중첩구간을 배제한 초기 유입량을 대수좌표(y)상에 y도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수는 0.0493으

로서 역시 매우 낮은 양의 상관성을 보인다(Fig. 8). 초기 유입량과 수리전도도간의 이와 같은 낮은 상관성은 이 지역에서 터널내 유입량이 수리전도도 보다는 수두경사에 더 큰 영향을 받고 있음을 지시한다(2)식 참조). 수리전도도 값의 빈도분포를 보면, $1.85 \times 10^{-6} \sim 5.55 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 사이에 자료가 집중되어 있으며, $1.85 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이하와 $5.55 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이상에서는 빈도가 낮다.

절리빈도와 수리전도도의 관련성

여수 북부 화산암지역에서 행한 수리시험에 의하면(조성일 외, 1999) 전체 단열의 교차빈도와 수리전도도간에 특별한 상관관계를 보이지 않았다. 그러나, 절리를 Type 1(개방절리), Type 2(준 개방절리) Type 3(폐쇄절리)으로 나누어 분석한 결과, 절리 교차 빈도와 수리전도도의 관계는 양의 상관성을 보였으며, Type 1+Type 2의 경우(상관계수 0.6760)가 Type 3의 경우(상관계수 0.2811)보다 더 높은 상관성을 보였다. 본 연구에서는 터널을 따라 만나는 절리빈도와 수리전도도 값을 양대수방안지상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수 -0.0651로서 거의 상관성을 보이지 않는다(Fig. 9). 또한 절리빈도를 산술좌표(x)상에 그리고 수리전도도 값을 대수좌표(y)상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수 -0.0279로서 역시 거의 상관성을 보이지 않는다(Fig. 10). 따라서, 조성일 외(1999)와 같이 절리의 개방성을 따지지 않고 단순히 절리의 개수 만으로 수리전도도와 상관성을 논하기는 어려운 것으로 판단된다. 절리의 연장이 짧고 빈도가 높을수록 수리전도도가 낮고, 반면에 절리의 연장이 길고 절리빈도가 낮을수록 수리전도도가 높은 것으로 알려져 있다(Long and Witherspoon (1985)). 본 연구지역에서도 이와 같은 사실과 연관성을 가질 수 있을 것으로 보인다. 즉, 절리빈도가 높은 구간은 절리의 연장이 짧은 구간이며 따라서 수리전도도가 낮게 나타날 수 있을 것이다. 또한, 연장이 짧고 절리빈도가 높은 구간에서는 점토충전물이나 방해석 등이 간극을 채우고 있는 경우가 많으며, 이는 앞에서 언급한 절리빈도와 지하수 유입량간의 낮은 상관성과 일치한다.

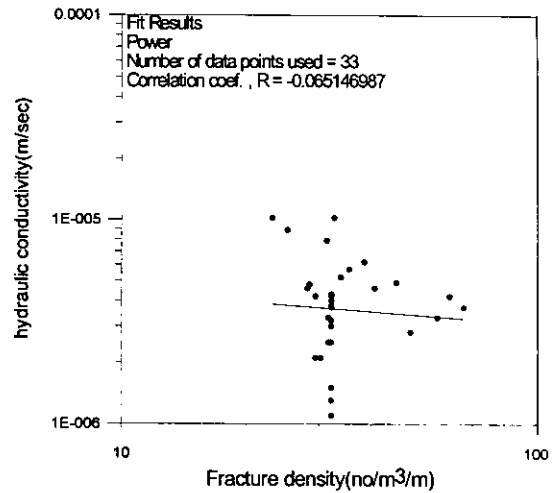


Fig. 9. Hydraulic conductivity vs. fracture density on bi-logarithmic scale.

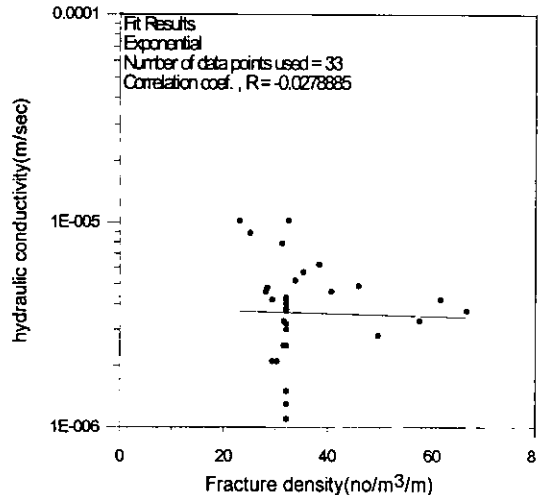


Fig. 10. Hydraulic conductivity vs. fracture density on semi-logarithmic scale.

터널내 지하수 유입량과 우세한 절리 간극의 관련성

절리가 물을 통과시키는 능력은 주로 절리간극에 좌우된다(Neuzil and Tracy, 1981). Snow(1970)는 화강암 노두의 절리를 연구하여, 여러 다른 절리들의 평균 간극들이 대략적으로 대수정규분포를 보이는 것을 발견하였다. 그는 절리간극 분포는 깊

이에 따라서도 대수정규분포를 보인다고 제안하였다. 따라서, 투수성 절리의 간극도 대수정규분포를 보인다고 말하는 것은 타당성이 있을 것이다(Park and Lee, 1995).

도수로 터널내 지하수 유입량과 우세한 절리의 간극의 관련성을 분석하였다. 터널내로 지하수가 유입되는 각 구간내에서 가장 빈도가 높은 절리를 우세한 절리로 규정하였다. 먼저 절리간격 및 간극을 고려한 초기 지하수 단위 유입량의 빈도분포도를 작성하였다(Fig. 11). 이는 절리간격과 간극의 혼합된 효과가 터널내 지하수 유입량에 미치는 효과를 알아보기 위한 것이다. x축의 번호 1은 절리간격 <60mm, 간극 <0.1mm를, 2는 절리간격 <60mm, 간극 0.1~1.0mm, 3은 절리간격 <60mm, 간극 1.0~5.0mm, 4는 절리간격 60~200mm, 간극 0.1~1.0mm, 5는 절리간격 60~200mm, 간극 1.0~5.0mm를 나타낸다. 5의 경우가 가장 높은 자료 빈도를 보여주며, 단위 유입량 0.9~467.7m³/day/m의 범위를 보여준다.

다음으로는 터널내 지하수 유입량과 우세한 절리의 간극의 관련성을 나타내었다(Fig. 12). x축의 번호 1은 간극 <0.1mm를, 2는 간극 0.1~1.0mm, 3은 간극 1.0~5.0mm이다. 절리간극 1.0~5.0mm에 유입량이 집중되어 있음을 알 수 있다.

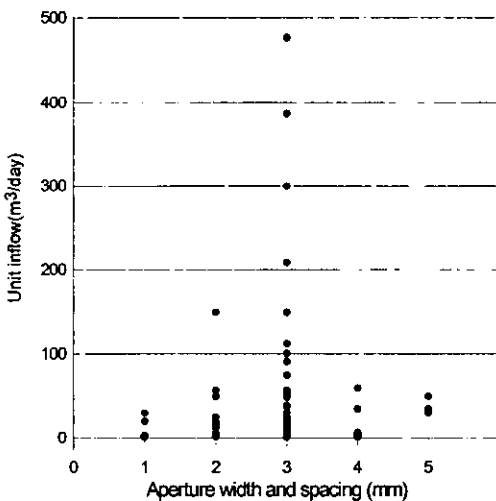


Fig. 11. Unit inflow vs. fracture aperture and spacing.

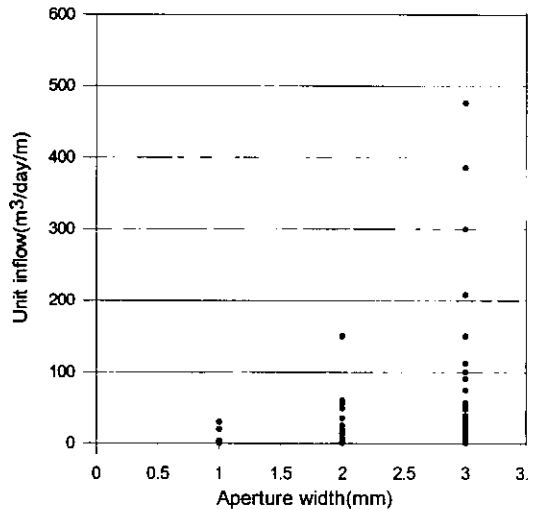


Fig. 12. Unit inflow vs. fracture aperture.

지하수 유입량과 단층 및 사암의 분포와의 관련성

지하수 유입량의 주된 요인을 가려내기 위하여 단층 및 사암과의 관계를 분석하였다. 먼저, 터널을 따라 단층대의 폭을 산술좌표(x)상에 그리고 지하수 유입량을 대수좌표(y)상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수는 0.3430으로 절리나 수리전도도와와의 상관계수보다 높게 나타났다(Fig. 13). 한편, 터널을 따라 나타나는 사암의 폭을 산술좌표(x)상에 그리고 지하수 유입량을 대수좌표(y)상에 도시하여 둘간의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수는 0.1446으로서 유입량과 절리 또는 수리전도도의 상관계수보다 높으나 단층의 폭과 유입량의 상관계수보다는 낮게 나타났다(Fig. 14). 따라서, 터널내 유입량과 사암층, 절리빈도 또는 수리전도도간의 상관성보다 단층의 상관성이 더 높으며, 이는 이병대 외(2000)의 연구에서 영천댐 도수로터널을 직교 또는 사교하여 가로지르는 단층과쇄대가 터널내로의 유입량에 지배적인 요인이라고 한 결과와 잘 일치한다.

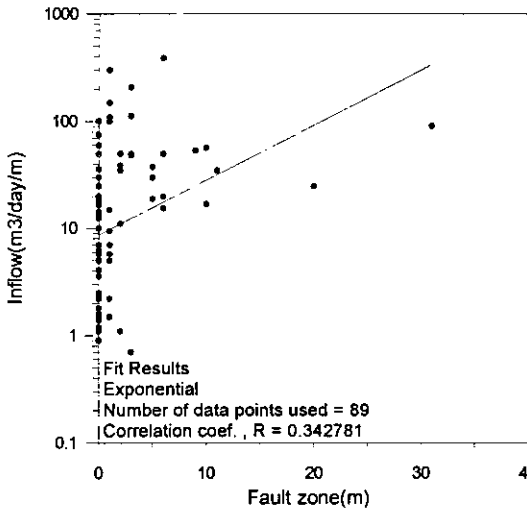


Fig. 13. Fault zone width vs. unit inflow along tunnel section.

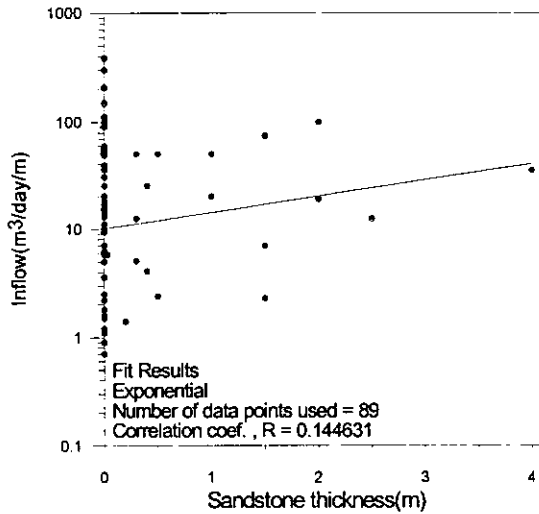


Fig. 14. Sandstone thickness vs. unit inflow along tunnel section.

토의 및 결론

본 연구에서는 영천댐 도수로 터널구간 중 경북 청송군 현서면 일대의 터널구간에 대해서 절리빈도, 절리간격, 절리간극, 수리전도도, 단층 및 암절과 터널내로 유입되는 초기 유입량(라이닝 및 그라우팅 이전의 유입량)의 관계를 분석하였다.

중첩된 구간을 뺀 절리빈도와 터널내 초기 단위 유입량간의 상관성은 비교적 낮게 나타나며 상관계수는 -0.3916 이다(Fig. 5). 다른 요인을 고려하지 않고 절리빈도만 고려한다면, 절리빈도가 높을수록 터널내 유입량이 많을 것으로 예상되나, 본 연구에서는 절리빈도와 터널내 유입량간의 상관성이 낮으며 음의 상관성을 보인다. 이는 절리빈도가 높은 구간에서는 지하수에 의한 암반의 풍화가 잘 진행되어 절리내에 점토광물이 많이 형성되고, 이 점토광물이 지하수 유동을 방해하는 결과로 해석될 수 있다. 또한 터널내 유입량이 단순한 절리빈도보다는 일부 투수성이 큰 절리에 지배될 가능성을 보여준다.

수리전도도와 초기 단위 유입량의 상관성은 매우 약한 양의 상관관계를 보인다. Darcy의 법칙에 의하면, 지하수 유량은 수리전도도에 비례한다. 그러나, 수두경사가 큰 경우에는 비록 수리전도도가 작더라도 유량이 클 수 있다. 따라서, 본 연구지역에서도 터널내 유입량이 수리전도도보다 수두경사에 더 크게 지배되는 것을 암시한다. 또한, 수리전도도 값의 빈도는 $1.85 \times 10^{-6} \sim 5.55 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 와 사이에 집중되어 있으며, $1.85 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이하와 $5.55 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이상에서는 자료의 빈도가 낮다.

절리빈도와 수리전도도의 상관관계는 약한 음의 상관성을 보인다. 앞에서 터널내 유입량과 절리빈도 그리고 터널내 유입량과 수리전도도의 상관성이 낮은 사실과 절리빈도와 수리전도도간의 상관성이 낮은 사실은 서로 잘 들어맞는다. 절리빈도와 수리전도도간의 낮은 상관성은 절리빈도가 높은 구간에는 점토광물이나 방해석 등이 간극을 채우고 있으며 절리의 연장성도 짧기 때문으로 해석된다.

우세한 절리의 간극과 터널내 지하수 유입량의 관련성을 보면, 절리간극 $1.0 \sim 5.0 \text{mm}$ 에 유입량이 집중되어 있음을 알 수 있다. 이는 유입량이 간극의 3층에 비례한다는 사실과 일치한다.

단층의 폭과 지하수 유입량의 관계를 분석한 결과, 상관계수는 0.3430 으로 다른 변수에 비해서 높게 나타났다. 한편, 사암의 두께와 지하수 유입량의 상관관계를 분석한 결과, 상관계수는 0.1446 으로서 절리빈도나 수리전도도 값과의 상관계수보다 높으나 단층의 폭과 유입량의 상관계수보다는 낮게 나타났다. 그러므로, 연구지역에서는 단층이 터널내

지하수 유입량에 미치는 영향이 가장 크며, 사암의 두께, 수리전도도, 절리빈도 순으로 낮아지는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석, 1993, 분리열극개념을 이용한 지하공동 주변의 지하수유동 해석, 지질공학, 3(2), 125-148.
- 김경수, 김천수, 배대석, 정지곤, 1998, 순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법과 고찰, 지질공학, 8(1), 1-12.
- 김경수, 이은용, 김천수, 1999, 여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포 특성, 지질공학, 9(1), 31-44.
- 김남중, 1992, 지질공학적 분석기술의 터널설계 적용에 관한 연구, 이학석사 학위논문, 서울대학교 지질학과, 148p.
- 박재현, 2000, 청송군 현서면 일대 도수터널지역의 수리지질학적 연구, 이학석사 학위논문, 부산대학교 지질학과, 344p.
- 배대석, 송무영, 김천수, 김경수, 김종렬, 1996, 분리단열망 개념의 지하수유동 해석을 위한 단열투수량계수의 정량화 연구, 지질공학, 6(1), 1-14.
- 성익환, 이병대, 조병욱, 김경수, 류충렬, 이춘오, 황세호, 김유성, 이병대, 이봉주, 김종렬, 현혜자, 이상규, 황학수, 박인화, 임현철, 김용재, 이대하, 김형찬, 채병곤, 이한영, 이종철, 2000a, 영천시 자양면 보현리 용수고갈 원인조사, 한국자원연구소, 441p.
- 성익환, 이병대, 조병욱, 김경수, 류충렬, 이봉주, 이춘오, 이병대, 윤욱, 임현철, 김통권, 이종철, 이사로, 지세정, 이대하, 2000b, 영천댐 도수터널 주변지역 지하수 회복시기 예측 조사, 한국자원연구소, 256p.
- 성익환, 이병대, 조병욱, 김경수, 이병대, 이춘오, 채병곤, 1999, 영천댐 지하도수터널 지하수유동 조사, 한국자원연구소, 228p.
- 성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주, 김통권, 이병주, 채병곤, 김경수, 김종렬, 현혜자, 이종철, 김복철, 이동우, 김원영, 1998, 청송군 영천댐 도수터널 공사지역 지하수 유동 조사, 한국자원연구소, 419p.
- 성익환, 이병대, 조병욱, 김경수, 류충렬, 이춘오, 황세호, 김유성, 이병대, 이봉주, 김종렬, 현혜자, 이상규, 황학수, 박인화, 임현철, 김용재, 이대하, 김형찬, 채병곤, 이한영, 이종철, 1996, 영천시 자양면 보현3리(절골, 유산마을) 용수고갈원인조사, 한국자원연구소, 441p.
- 이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수로 터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 지질공학, 10(2), 143-162.
- 이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천도수터널 주변 지하수의 수리지구화학, 한국자원 공학회지, 33(4), 211-225.
- 이회근, 전효택, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1995, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(I)-수문학 및 암반수리학적 접근을 중심으로, 터널과 지하공간, 5, 347-362.
- 장기홍, 고인석, 이재영, 김상욱, 1977, 한국지질도구산동도폭(1: 50,000), 자원개발연구소, 25p.
- 전효택, 이회근, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1997, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(II)-수리지구화학적 고찰, 지하수환경, 4(1), 27-40.
- 조성일, 송무영, 김경수, 이은용, 1999, 여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와와의 관계, 지질공학, 9(3), 227-241.
- 최병렬, 1998, 지하수 유로조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석, 지질공학, 8(2), 131-144.
- 최한우, 장태우, 1999, 모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석, 지질공학, 9(2), 119-134.
- 한일영, 조성만, 정광필, 1995, 지하 LPG 저장공동의 기밀성 평가를 위한 분리열극개념의 지하수유동 및 용질 이동 모형 모의기법 적용, 지질공학, 5(2), 155-166.
- Dagan, G., 1981, Analysis of flow through heterogeneous random aquifers by the method of embedding matrix. 1. Steady flow, Water Resour. Res., 17(1), 107-122.
- Dagan, G., 1979, Models of groundwater flow in statistically homogeneous formations, Water

- Resour. Res., 15(1), 47-63.
- Freez, R. A., 1975, A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, *Water Resour. Res.*, 11(5), 725-741.
- Long, J. C. S. and Witherspoon, P. A., 1985, The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks, *Jour. Geophys. Res.*, 90(B4), 3087-3098.
- Louis, C., 1974, Introduction à l'hydraulique des roches, *Bulletin du B.R.G.M. (deuxième série), Section III, n. 4*, 283-356.
- Louis, C., 1969, A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, *Rock Mech. Res. Rep. 10, Imp. Coll., London*, 90p.
- Neuzil, C. E. and Tracy, J. V., 1981, Flow through fractures, *Water Resour. Res.*, 17(1), 191-199.
- Park, Y.-C. and Lee, K.-K., 1995, Simulation of groundwater flow in fractured porous media using a discrete fracture model, *Econ. Environ. Geol.*, 28(5), 503-512.
- Romm, E. S., 1966, *Flow Characteristics of Fractured Rocks (in Russian)*, Nedra, Moscow, 283p.
- Sagar, B. and Runchal, A., 1992, Permeability of fractured rock: effect of fracture size and data uncertainties, *Water Resour. Res.*, 18(2), 266-274.
- Snow, D. T., 1970, The frequency and apertures of fractures in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, 23-40.
- Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., and Gale, J. E., 1980, Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resour. Res.*, 16(6), 1016-1024.

박재현

한국수자원공사

306-711 대전광역시 대덕구 연축동 산 6-2번지

Tel: 042-629-2730

e-mail: geopark@kowaco.or.kr

함세영

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-2252

e-mail : hsy@hyowon.pusan.ac.kr

성익환

한국지질자원연구원 환경지질연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel: 042-868-3082

e-mail : sih@rock25t.kigam.re.kr

이병대

한국지질자원연구원 환경지질연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel: 042-868-3088

e-mail : blee@rock25t.kigam.re.kr

정재열

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-2252

e-mail : jjy@hyowon.pusan.ac.kr