

## 도수로터널 굴착에 따른 지하수 유출량과 단열의 관련성

### Relation of Groundwater Flow Rate and Fracture System Associated with Waterway Tunnel Excavation

---

이병대(Byeong Dae Lee)  
함세영(Se Yeong Hamm)  
이춘오(Choon Oh Lee)  
조병욱(Byong Wook Cho)  
성익환(Ig Hwan Sung)

한국지질자원연구원 환경지질연구부  
부산대학교 지구환경시스템학부  
한국지질자원연구원 지질연구부  
한국지질자원연구원 환경지질연구부  
한국지질자원연구원 환경지질연구부

---

#### 요약 / ABSTRACT

터널 굴착에 따른 연구지역 지하수체의 거동 특성을 파악하기 위하여 터널 굴착시 그라우팅 이전의 초기 유출량과 초기 그라우팅 이후의 구간별 유출량을 측정하였고 단열구조와 비교, 분석하였다. 초기 유출량은  $120,990\text{m}^3/\text{day}$ 이며, 초기 유출이 심했던 구간은 크게 6개 구간으로 구분할 수 있다. 초기 그라우팅 이후에 지하수 유출이 심했던 구간도 그라우팅 이전과 마찬가지로 6개 구간으로 구분할 수 있다. 그라우팅 전, 후의 유출량을 비교해 보면 그라우팅 후의 유출량은  $42,844\text{m}^3/\text{day}$ 으로, 그라우팅 전에 비해 많이 감소되었다. 그러나 주변 지역에 있는 관측공들의 지하수위는 그라우팅 전, 후를 비교하여 큰 차이가 없었다. 터널 굴착시 터널내로 유출되는 지하수의 대부분은 터널과 직교 혹은 사교하는 단층 및 단층 파쇄대와 연장성 및 연결성이 양호한 절리면들을 따라서 유동되고 있다. 터널내의 지하수 유출에 영향을 미치는 단열들은 대체로 4조의 불연속군으로 분류 할 수 있는데, 주 분포방향은 크게 TSet 1 :  $N60-85^\circ W \cdot 25^\circ SW/80^\circ SW$ , TSet 2 :  $N40-50^\circ E \cdot 85^\circ SE/85^\circ NE$ , TSet 3 :  $N10-20^\circ E \cdot 85^\circ SE$ , TSet 4 :  $N70-80^\circ E \cdot 80^\circ SE$  이다.

주요어 : 터널 굴착, 유출량, 그라우팅, 단열구조, 지하수

To verify the characteristics of groundwater inflow accompanied by the tunnel excavation, the flow rate was measured before and after primary grouting. The relationship between the flow rate and fracture system was also analyzed. The initial flow rate was estimated as  $120,990\text{ m}^3/\text{day}$  through

six zones, which were characterized by a large amount of inflow before the primary grouting. After the primary grouting, although considerable amount of inflow was still recognized at the six zones, the flow rate was greatly reduced as 42,844 m<sup>3</sup>/day. However, great recovery of water levels was not observed. Groundwater flow into the tunnel by excavation of the tunnel is mainly controlled by the fracture system that include faults and joints developed in the host rocks. Four sets of discontinuities affecting on the network of groundwater inflow in the study area were identified as follows: N60-85° W • 25° SW/80° SW(TSet 1), N40-50° E • 85° SE/85° NE(TSet 2), N10-20° E • 85° SE(TSet 3), and N70-80° E • 80° SE(TSet 4).

Key Words : tunnel excavation, flow rate, grouting, fracture, groundwater

## 서 론

대규모 지하공동으로의 지하수 유출은 단열변의 특성에 따라 좌우된다. 암반내에 발달하는 단열들은 각종 토목 구조물의 건설 및 설계에 있어서 매우 중요한 역할을 하며, 또한 최근 주요 연구대상이 되고 있는 결정질 암반내의 지하수 유동을 지배하는 중요한 요소이다(강병무 등, 1993).

최근 지하철헌설, 고속전철공사, 도수로터널 등 대규모 지하공간 개발의 증가에 따른 지하수 유동 체계의 변화로 인하여 지하수와 관련된 다양한 문제가 발생되고 있다. 터널 굴착중에 발생하는 지질 공학적인 문제들 중의 하나는 터널내로의 지하수 유출이다. 많은 양의 지하수가 유출되면, 터널 굴착이 어렵고 위험하게 되며 많은 비용이 들고 작업 공정이 지연된다.

터널내로의 지하수 유출의 예측에 대한 이론적인 분석은 Goodman et al.(1965)에 의해 보고되었다. Meiri(1985)는 터널내로 유출되는 지하수 유출량의 산정에 있어서 좀더 복잡한 수리학적인 조건에 대하여, 특수한 경우의 수치 모델이 마련되어야 한다고 보고하였으며, 유한요소법에 의한 수치 모델을 개발하였다.

국내에서 터널 지하수와 관련한 연구로는 이종운 등(1996)의 영천댐 도수로터널 주변지역 지하수에 대한 수리지구화학적 연구와 성익환 등(1998)의 영천댐 도수로터널 주변지역의 지하수유동 연구가 수행되었다. 조병욱 등(1999)은 터널 굴착에 의한 지하수 유출량을 산정하기 위한 방법으로 유속계를

이용하였다. 또한 이병대 등(2000)은 터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조와의 관련성을 연구함으로써, 터널내로의 지하수 유출로 인한 주변 지역 지하수공들의 갑작스러운 지하수위 하강은 단열의 방향성, 연장성, 연결성 및 이방성 등 단열 분포 특성에 지배받고 있음을 규명하였다.

연구지역은 영천댐 도수로터널 구간으로, 청송군 안덕면과 현서면, 그리고 영천시 자양면 일대이다(Figure 1). 이 지역은 도수로터널 굴착으로 인하여 터널 주변 대수층의 지하수가 터널내로 유입되면서 연구지역의 지하수위가 급격히 하강하고, 터널 주위의 지하수 수리시스템이 교란되었고, 지표수와 지하수의 고갈 현상이 발생하였다. 이로 인한 대규모 민원이 제기되면서 터널내로 유출되는 지하수 유출량과 유출구간 규명의 필요성이 요구되었다. 본 연구는 도수로터널내의 유출량과 단열과의 관련성을 규명하기 위한 것으로, 이를 위하여 야외지질 조사 및 지질구조조사, 터널내 지질구조조사를 실시하였고, 터널내 유출지점의 단열구조 및 지하수 유출량을 측정하였다.

## 터 널 개 요

영천댐 도수로터널은 경북 안동시 길안면 송사리 터널 입구로부터 청송군 및 포항시 일부지역을 지나 영천시 자양면 충효리의 출구까지 총 32.97km에 달하는 장대터널로 본 터널과 3개의 사갱으로 형성되어 있다. 이 도수로터널 건설사업은 임하면

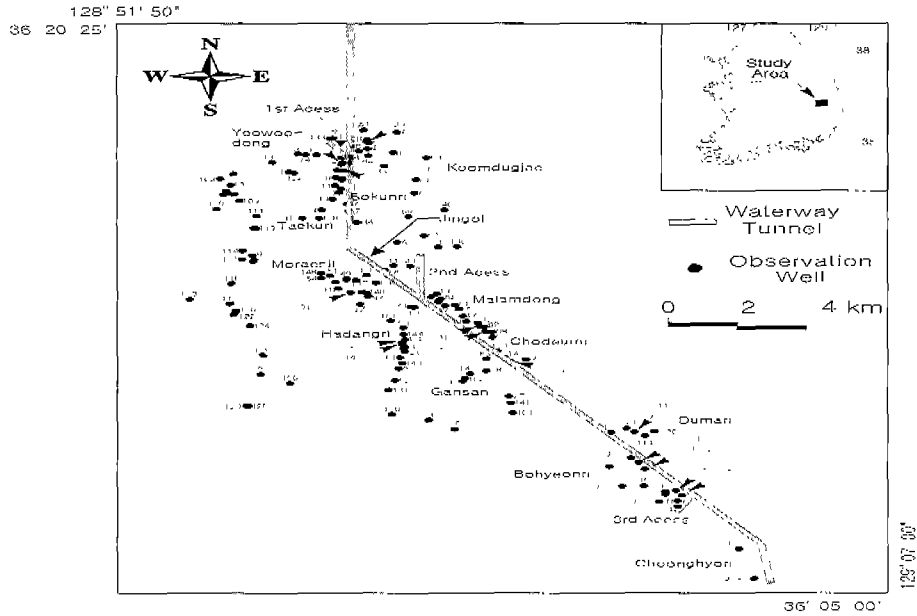


Figure 1. Location of study area and the waterway tunnel.

및 길안천의 물을 영천댐으로 도수하여 경북 동남부지역에 용수를 공급하고 금호강의 수질을 개선하기 위한 것으로 지표하 100~800m 깊이에서 굴착되고 있다. 터널의 방향은 남북 방향과 남동 방향으로, 입구쪽의 안동시 길안면 송사리에서 청송군 현서면 백자리 사이의 구간은 남북 방향이고, 백자리에서 출구쪽의 영천시 자양면 충효리 사이의 구간은 남동(N40° W) 방향이다. 이 터널은 자연 유식수로 터널로서, 터널 입구의 표고는 183m이고 터널 출구의 표고는 162m로 입구와 출구의 고도차는 21m로서 약 0.06%의 아주 완만한 경사의 터널이다. 터널 굴착공법은 약 11km 구간은 재래식 공법인 발파에 의한 굴착공법(NATM)과 22km 구간은 TBM(Tunnel Boring Machine) 공법으로 굴착되었다.

### 수리지질 및 단열구조

연구지역에는 경상퇴적분지 하양층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 관

입암류들이 분포한다(장기홍 등, 1977; Figure 2). 퇴적암류는 사암과 셰일의 호층이며, 암색은 저색, 녹회색 및 회색으로, 이 층은 접촉변성작용을 받아 대부분이 호온펠스화 되어 있다. 층리는 동서방향 내지 서북서방향의 주향과 15°~25°의 경사각을 가지며, 완만한 습곡의 익간경사각(Interlimb)이 큰 항사형의 개방습곡을 이루고 있다. 층리발달이 아주 양호하며, 부분적으로 파쇄된 사암층은 이 지역의 주 대수층을 형성하고 있으며, 층리변과 층리절리들은 지하수의 주요 통로 역할을 하고 있다.

유천층군의 산성 화산암류는 주로 유문암질 응회암으로 화산력을 함유하는 화산력 응회암이 대부분이다. 불국사 관입암류들의 주된 암석은 화강암류로 입도가 거의 전역에 걸쳐 균등하나 암체의 주변부는 비등립질인 반암으로 산출된다.

연구지역을 지배하는 지질구조는 퇴적암의 층리변화에 의한 습곡구조와 암반의 취성변형 작용에 의해 변형된 단층 및 절리들이다. 단층구조는 서북서 방향의 좌수향의 주향이동 단층이 지배적이며, 화북리물 중심으로 거의 남북 내지 북북동-남남서 방향의 단층들이 발달하기도 한다. 서북서 방향의

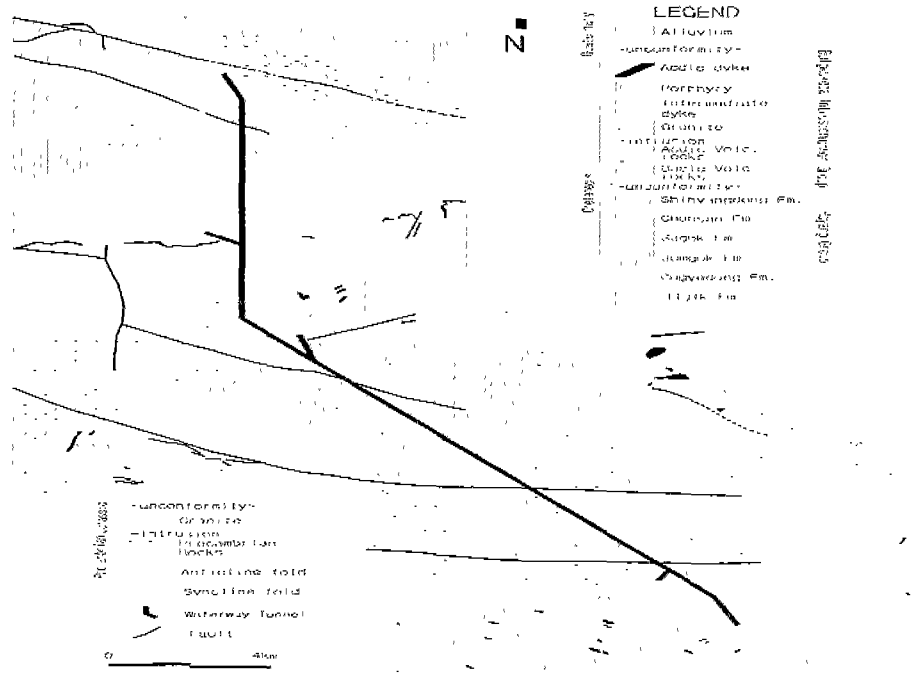


Figure 2. Geologic map of the study area.

좌수향 주향이동 단층으로는 금천단층과 가음단층이 있다. 연구지역의 단열구조들은 이들 두 단층과 관련되어 동서 혹은 서북서 방향의 단열들이 많이 발달되어 있다. 연구지역의 단열발달 상태를 보면, 퇴적암의 층리면, 층리절리, 그리고 화강암류의 판상절리와 같은 저각의 경사를 가지는 부분과 75° 이상의 고각의 경사를 가지는 부분의 두 개의 뚜렷한 단열군이 나타나고 있다. 퇴적암 지역내에는 층리절리가 가장 많이 발달되어 있으며 평균 주향과 경사는 N70-80°W·25°SW이다. 화강암의 판상절리는 N35°W·12°NE의 배향을 가진다. 고각의 절리들은 퇴적암 지역에서는 N80°W·85°SW와 N10°E·85°SE 두 방향의 절리조가 우세하며 이들은 서로 직교하는 신장성의 규칙절리(systematic joint)들이 대부분이다. 화산암 및 화강암 지역은 N40-50°E·85°SE/85°NE, N70°E·80°SE, 그리고 N70-75°W·80°SW 방향의 절리조가 우세하게 발달한다.

**터널내 단열분포 특성**

터널 내부도 지표에서 확인되는 것과 크게 다르지 않은 지질구조적 특성을 보인다. 단층과 절리를 포함하는 단열구조의 발달이 현저하며 맥암류의 관입구조도 뚜렷하게 인지된다. 이들 단열구조들 중에는 단층각력이나 단층점토가 발달되어 있는 것들은 쉽게 단층으로 인식될 수 있으나, 그렇지 못한 경우 절리와 구분이 어려운 경우가 많다.

터널내 단열들의 발달은 연구지역 전구간에 걸쳐 N70-80°W 방향이 우세하게 발달하며 N20°E 방향도 뚜렷한 발생빈도를 보인다. 그러나 N70-80°W 방향의 단열들이 비교적 균일한 분포특성을 보이고 있는 반면, N20°E 방향의 단열들은 국부적으로 치밀한 간격으로 밀집 분포하는 경향이 있다. 이외에도 N40°-50°E, N70°E, N60°W 방향의 단열군들도 잘 발달하고 있다. 이러한 여러 단열들 중에서 단층의 증거를 명백히 보여주는 것들이 몇 개 있다. 대부분이 N70-80°W 방향의 것들이며, 입구

로부터 16,730~16,750m 구간인 금천단층이 통과하는 지점에서는 폭 1m 안팎의 단층대를 형성하기도 한다. 또한 입구로부터 26,840m 지점에서는 N60° W 방향의 단층과 N20° E 방향의 저각도 단열의 교차선이 단열대(Fracture zone)를 형성하여 심하게 파쇄되어 있으며, 이를 통하여 다량의 지하수가 유출되었다(Figure 3).

암맥류들은 대부분 안산암질 암맥으로 터널 내부에서 화강암과는 매우 불규칙한 접촉면을 보이나, 일반적으로 N70° W 방향의 단열들과 평행하게 발달하고 있다.

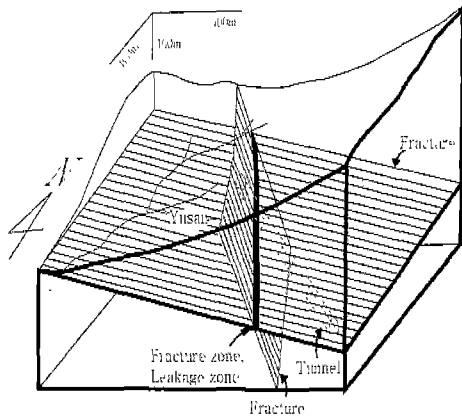


Figure 3. A schematic illustration showing a pattern of the fracture zone in the leakage site at a distance of 26,840m from the entrance of tunnel.

### 터널내 유출량

연구지역의 도수로부터 터널은 입·출구부를 제외한 대부분의 구간이 지표하 100~800m 깊이에서 굴착되고 있는 산악터널이다. 터널이 굴착되지 않은 자연적인 환경에서는 지하수의 이동속도가 매우 느리다. 그러나 연구지역과 같이 지표하에 터널이 굴착되면 지하에서 수두차가 거의 없는 느린 유동상태에서 터널 굴착으로 야기되는 터널 주변과의 급격한 수두차로 인하여 주로 단열대를 따라서 지하수가 빠른 속도로 터널내로 유출된다. 터널 굴착동안

지하수 유출은 지하수위면의 강하와 더불어 터널 붕괴와 같은 분체점을 야기함으로써 터널의 안정성 및 시공 공정을 어렵게 한다. 그러므로 터널 굴착시 지하수 유출량 및 유출구간을 예측하는 것이 필요하다(Akama et al., 1988). 이 연구에서는 터널 굴착에 따른 연구지역내 지하수체의 거동 특성을 파악하기 위하여 터널 굴착시 그라우팅 이전의 초기 유출량과 초기 그라우팅 이후의 구간별 유출량을 측정하였고 단열구조와 비교, 분석하였다.

### 그라우팅 이전의 초기 유출

터널 굴착시에는 보통 굴착전 터널 막장부에서의 선진천공이나 발파를 통하여 많은 양의 지하수가 초기에 유출된다. 이러한 많은 양의 초기 유출은 주민 민원을 야기하고 시공 공정을 어렵게 하므로 그 양을 정확하게 파악하고 차수 그라우팅 공법을 적용하는 것이 필요하다. Figure 4는 초기 유출량이 많았던 구간들을 대상으로 입구로부터 떨어진 거리와 유출량과의 관계를 도시한 그림이다. Figure 4에서 전체 유출량은 총 120,990m<sup>3</sup>/day이며, 초기 유출이 심했던 구간은 크게 6개 구간으로 세분할 수 있다. 첫 번째 구간은 1사갱 북쪽 구간으로 7,355~7,545m 구간에서 25,182m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이러한 지하수 유출로 인하여 실제 이 구간에 위치한 관측공인 cs-37, cs-38, cs-39, cs-41의 지하수위는 굴착 초기에 60m 이상 하강하였다(이병대 등, 2000). 두 번째 구간은 1사갱 남쪽 구간중, 10,993m에서 12,588m 구간으로 여우동, 신촌, 소근리 등에 해당되며, 29,070m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간에 위치하고 있는 cs-7, cs-8, cs-10, cs-13, cs-14, cs-18, cs-78, cs-79, cs-134 등은 대부분 연구기간 초기부터 100m 이상의 수위하강을 보여주고 있다(성익환 등, 1998; 성익환 등, 2000). 특히, 11,330m 구간에 위치한 cs-18은 터널이 통과되지 않은 사절에서의 지하수위는 자분하고 있었다. 그러나 1997년 10월 20일경 cs-18이 위치하고 있는 지점으로 터널이 통과하면서 10,000m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 지점으로 유출되었다. 이 지하수 유출로 인하여 cs-18의 1997년 11월의 지하수위는 지표하 92.55m로 10월의 8.18m에 비해 1개월만에 84.37m가 하강되었다. 이병대 등(2000)은 cs-18과 같이 일직선으로 급격하

게 떨어지는 지하수위 하강 양상을 홈통형태 (trough of depression)의 하강 양상으로 보고하였으며, Smith(1985)는 이와 같은 홈통형태의 하강양상은 터널내로의 지하수 유출에 대한 주위 대수층의 반응이 터널로 향하는 방사상의 흐름이 아니라 선형적인 일차원 흐름이라는 강력한 증거라고 하였다. 세 번째 구간은 2사갱 북서 구간중, 13,358~13,903m 구간으로 백자리에 해당되며, 이 구간에서 9,357m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 네 번째 구간은 2사갱 남동구간 중, 16,730m에서 17,683m 구간으로 무계리에 해당되며, 터널 굴착시 11,463m<sup>3</sup>/day의 지하수가 초기에 유출되었다. 이 지하수 유출로 인하여 이 구간에 위치한 cs-31, cs-32, cs-81, cs-82, cs-96, cs-98 등의 지하수위는 터널 굴착전에 비하여 최소 30m에서 100m 까지 하강되었다. 다섯 번째 구간은 3사갱 북서 구간중, 19,525~19,530m 구간으로 조돛이 지역에 해당된다. 이 구간의 모암은 안산암질 응회암으로 30cm~1m의 폭을 가지는 암맥류가 3조 발달하고 있다. 암맥류의 접촉면에는 단층조선이 잘 발달되어 있는데 이는 조돛이 일대의 N40-50°E와 N60-70°W 방향의 단층구조 운동과 연관된 것으로 판단된다. 이들 3조의 암맥류 중 하단부의 암맥 부근에 폭이 약 3m이고, 높이가 약 1m인 지하공동이 터널 우측벽에서 조돛이 방향으로 발달되어 있다. 터널 굴착중

이 지하공동 구간을 통과하면서 10,000m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 지점의 터널내로 유출되었다. 이 지하수 유출로 인하여 cs-28, cs-29, cs-66, cs-76, cs-140 등의 지하수위는 150~200m 이상까지 큰 폭으로 하강하였다. 여섯 번째 구간 역시, 3사갱의 북서 구간으로 24,290~24,570m 구간이며 두마리 지역에 해당되며, 터널 굴착으로 10,850m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 구간으로 유출되었다. 이로 인하여 이 구간의 관측공인 113, 114, 115, 120, 121공의 지하수위는 터널 굴착 전에 비하여 대부분 100m정도 하강되었다.

초기 그라우팅 이후의 구간별 유출량

터널내의 각 유출지점에 대한 지하수의 유출양상은 아주 다양하게 나타나고 있어 양을 측정하는데 어려움이 따른다. 터널 굴착시 터널내로의 지하수 유출이 터널 굴진에 미치는 영향은 다양하고 이에 따라서 지하수 유출에 대한 처리가 달라지며, 일반적으로 배수방법과 차단방법이 적용되고 있다(김천수, 1991; Takashi, 1988). 보통 터널 굴착 도중 터널내로 지하수 유출이 일어날 경우, 차수 그라우팅을 하는 것으로 되어 있다. 그러나 연구지역의 경우는 굉장히 많은 양의 지하수가 초기에 유출되어 그라우팅 작업으로도 완전히 차수가 되지 않았고, 초기 그라우팅 후에도 계속 많은 양의 지하수가 유출되었다. 본 연구에서 그라우팅 이후의 유출량을 산정하기 위하여 구간별로 유속을 측정하였는데, 유속 측정은 주로 지표수의 유출량을 산정하기 위하여 이용되는 방법이다. 유출량의 계산은 하천의 단면을 여러 개의 소 단면으로 나누어서 각 단면에 대하여 수직으로 유속을 측정하여 각 소 단면의 유출량을 합하여 특정 지점의 유출량을 계산하는 방법이다. 터널 구간별 지하수 유출량은 Toho CM-10S 유속계를 사용하여 유출량을 산정하였으며, 측정 유속의 오차범위는 ±2% 이내이다(성익환 등, 1998; 조병욱 등, 1999).

Figure 5는 초기 그라우팅 후, 터널 입구로부터 거리에 따른 구간별 유출량을 도시한 그림이다. Figure 5에서 지하수 유출이 심했던 구간은 Figure 4와 마찬가지로 크게 6개 구간으로 구분할 수 있다. 그라우팅 전 후의 유출량을 비교해 보면 그라우팅후의 유출량은 42,844m<sup>3</sup>/day으로, 그라우팅 전

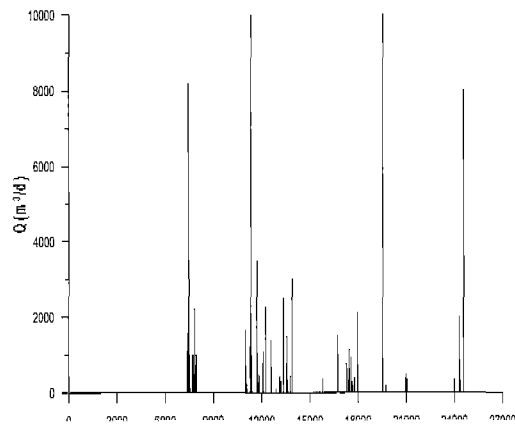


Figure 4. Relation between inflow rates of the first stage and the distance from the entrance of tunnel.

에 비해 많이 감소되었다. 이는 연구지역과 같이 터널 굴착으로 인하여 다량의 지하수가 일시에 유출된 경우에는, 터널내로 지하수가 일단 유입되고 난 뒤에 실시한 차수 그라우팅 효과는 그렇지 않은 경우보다 떨어진다는 것을 지시한다. 또한 그라우팅으로 인한 지하수 유로의 변경 때문에 유출지점에는 약간의 차이가 있지만 유출구간에는 크게 차이가 없다. 그리고 지하수 흐름은 단열을 따라 이루어짐으로 그라우팅으로 발생하는 유로 변경 역시, 최초의 유출지점으로부터 가까운 곳에 있는 다른 단열을 따라 다시 터널내로 유출된다. Figure 5에서 터널내로의 지하수 유출이 심했던 6개 구간 중, 1구간은 1사갱 북쪽 구간 중 7,435m 내외 구간으로 찬거리 지역의 cs-37, cs-38, cs-39, cs-41이 위치하는 곳에 해당된다. 이 구간에서의 지하수 유출량은 1,648m<sup>3</sup>/day로서 초기 유출량인 25,182m<sup>3</sup>/day와 비교하면 93.5%가 감소되었다. 2구간은 1사갱 남쪽 구간 중, 11,000~11,875m 구간으로 여우동, 신촌, 소근리 지역의 cs-7, cs-8, cs-10, cs-13, cs-14, cs-18, cs-78, cs-79, cs-134가 위치하는 곳에 해당되며, 이 구간에서 7,589m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간에 위치하고 있는 관측공들은 그라우팅후에도 많은 양의 지하수가 유출됨으로써 계속 100m 내외의 수위하강을 보여주고 있다. 3구간은 2사갱 북서 구간 중,

13,365~13,920m 구간으로 백자리의 cs-44, cs-90, cs-93, cs-147이 위치한 구간에 해당되며, 이 구간에서 6,218m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 4구간은 2사갱 남동 구간 중, 17,780~17,980m 구간으로 무게리 지역의 cs-31, cs-32, cs-81, cs-82, cs-96, cs-98이 위치하는 구간에 해당되며, 2,541m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간은 그라우팅으로 인한 지하수 유로의 변경이 심하여, 그라우팅 전 유출구간에 비해 그라우팅 후의 유출구간이 변경된 현상을 여러 곳에서 확인하였다. 5구간은 3사갱 북서 구간 중, 19,520m 내외 구간으로 조둑이 지역의 cs-28, cs-29, cs-66, cs-76, cs-140이 위치하는 곳에 해당되며, 4,750m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 지점의 터널내로 유출되었다. 6구간은 3사갱의 북서 구간으로 24,295~24,575m 구간이며 두마리 지역의 113, 114, 115, 120, 121호공이 위치한 구간에 해당되며, 10,885m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 구간으로 유출되었다. 이 구간의 지하수 유출양상은 그라우팅전과 비교하여 변화가 없으며, 관측공의 지하수위 역시 대부분 100m 정도 하강되어 그라우팅전과 변화가 없다.

유출구간의 단열구조

터널 굴착시 터널내로 유출되는 지하수의 대부분은 터널과 직교 혹은 사교하는 단층 및 단층운동과 관련된 단층 파쇄대와 연장성 및 연결성이 양호한 절리면들을 따라서 이동되고 있다. 연구지역 터널과 사교내지 평행하는 지질구조는 북북동, 북동 방향군의 구조와 서북서 방향군의 지질구조가 특징적이다. 연구지역의 남쪽에는 금천단층이 발달되어 있고, 또한 연구지역 전반에 걸쳐서도 금천단층과 평행한 수조의 절리 및 소규모의 단층들이 발달하고 있으며, 이들은 도수로터널과 사교하고 있다. 이들 서북서 방향의 구조보다는 연장길이가 미약하나 연구지역에는 남북방향의 구조와 북동방향, 동북동 방향의 지질구조들이 다수 발달되어 있으며, 이들은 도수로터널과 평행하거나 또는 도수로터널과 사교한다.

Figure 6은 터널 굴착으로 인한 터널내로의 초기 유출량과 단열구조의 방향과의 관계를 나타낸 그림이다. N75-85°W 방향의 단열대에서의 초기 유출량은 약 70,000m<sup>3</sup>/day로서 가장 많이 유출되었다.

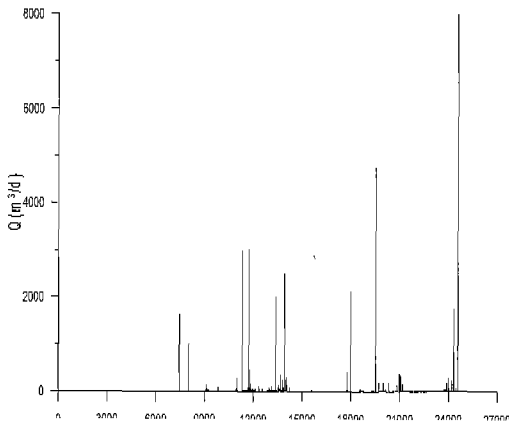


Figure 5. Relation between inflow rates after grouting and the distance from the entrance of tunnel.

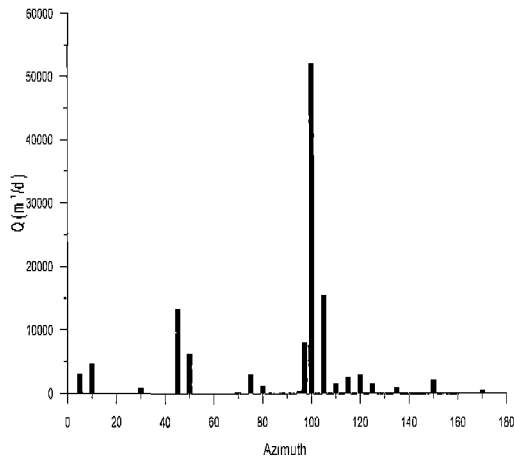


Figure 6. Relation between inflow rates of the first stage and fracture orientation.

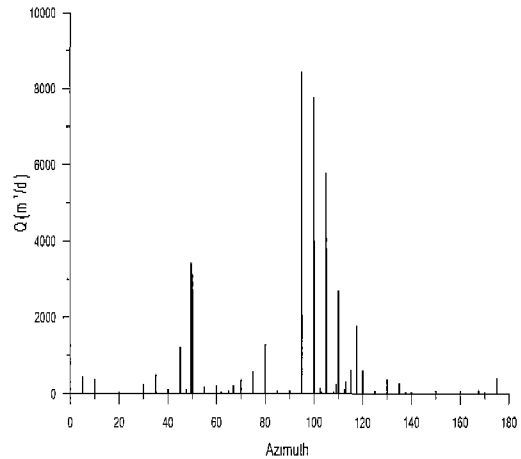


Figure 7. Relation between inflow rates after grouting and fracture orientation.

다음은 N40-50°E 방향에서 17,100m<sup>3</sup>/day, N60-70°W 방향의 단열을 따라서 8,700m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었고, 이외에도 각각 N5-10°E, N70-80°E, N30°W, EW 방향의 순으로 지하수가 유출되었다. 이는 이들 단열구조위에 놓여있는 관측공들의 지하수위가 다른 방향대의 단열구조위에 위치하고 있는 관측공이나 혹은 단열구조위에 놓여 있지 않은 관측공들의 지하수위보다 훨씬 많이 하강되어 있는 사실과도 잘 일치하고 있다(이병대 등, 2000). 그라우팅 후 유속측정에 의해 산정된 구간별 유출량과 단열방향과의 관계를 보면, 주향의 분산은 조금 인지되나 대부분 N75-85°W 방향의 단열대와 N40-50°E, N60-70°W 방향의 단열에서 많은 양의 지하수가 유출되었다(Figure 7).

터널내로의 주된 유출구간을 지역별로 살펴보면, 여우동의 cs-6, cs-78, 신촌부근의 cs-13, cs-16, 소근리의 cs-18, 백자리의 cs-93, cs-136, 무계리의 cs-67, cs-81, cs-149, 조듬이 일대의 cs-28, cs-29, cs-66, cs-76, 두마리의 113, 114, 115, 120, 121호 공이 위치한 지역에 해당되는 구간이다.

여우동 지역은 동서 내지 서북서 방향의 층리면 및 층리절리를 따라 터널내로 지하수가 유출되고 있다. 대부분의 층리면 및 층리절리면에는 단층조선들이 발달되어 있다. 백자리 지역은 N65-70°E와 N40-50°E·80°SE 단열의 교차선이 지하수 유출을 지배하는 구조요소로, N65-70°E 방향의 단열

구조는 단열면을 따라 단층조선이 발달되어 있는 소규모 단층들이 대부분이다. 무계리 지역은 N60-70°W 방향의 연장성이 양호한 절리 및 파쇄대를 따라 많은 양의 지하수가 유출되는 지역이다. 이들은 연장성이 양호한 신장절리로서, 암맥류의 관입과 연관성이 있다. 조듬이 지역은 연장성이 양호한 단층대를 따라 터널내로 지하수가 유출되는 대표적 구간 중의 하나이다. 이 지역일대에 발달하고 있는 N40-50°E와 N60-70°W의 단층구조와 밀접한 관계를 보여주고 있다. 그리고 두마리 지역은 금천단층이 도수로터널을 사교하는 지점에 위치하고 있으며, 이 단층 및 단층과 관련된 단열대를 따라서 많은 양의 지하수가 유출되었다.

## 토의 및 결론

연구지역의 터널 굴착 공사로 인하여 주위 대수층으로부터 다량의 지하수가 터널내로 유출되었다. 지하수 유출은 인위적인 양수와 마찬가지로의 효과로서 주변 지하수공들의 수위하강을 초래하였으며, 연구지역 일대 약 100km<sup>2</sup>에 대하여 수위하강 영향추(conc of depression)를 형성하였다(이병대 등, 2000). 따라서, 주변지역의 지하수 유동계가 교란되었고, 지표수와 지하수의 고갈 현상이 발생하였으며, 주변지역 대수층의 지하수위가 하강하였다. 실



제 초기 유출량과 그라우팅 후 유속 측정에 의해 산정된 구간별 유출량이 많았던 것으로 나타난 6개 구간의 주변 지역에 위치한 관측공들의 지하수위는 초기수위와 비교해서 50~200m 이상까지 하강하였다.

터널 굴착에 의해 지하수 유출이 심했던 6개 구간에 대해 그라우팅 전 후를 비교해 보면, 초기 유출량이 120,990m<sup>3</sup>/day 이고, 그라우팅 후의 유출량은 42,844m<sup>3</sup>/day 로서 초기 유출량에 비해 65% 감소되었다. 그러나 이 구간들의 주변 지역에 있는 관측공들의 지하수위는 그라우팅 전 후를 비교하여 큰 차이가 없었다. 이는 차수 그라우팅 효과가 완벽하지 못하였고, 또한 초기 그라우팅 자체가 완벽한 차수를 시키는 것보다는 작업공정의 용이성에 목적을 두었기 때문이다. 또한 보통의 경우 양수정에서 적정량의 양수를 하고 양수를 중단하게 되면, 즉 응력을 제거하면 하강되었던 지하수위는 원래의 자연수위로 회복되는 탄성 거동을 하게 된다. 그러나 연구지역에서는 터널 굴착으로 인해서 짧은 시간에 다량의 지하수가 급격하게 터널내로 유출됨으로써, 탄성한계까지 거의 도달하였기 때문에 응력을 어느 정도 제거하여도 이상적인 탄성 거동을 하지 못하는 것으로 해석된다. 그리고 터널 굴착으로 연구지역 대수층의 지하수가 터널내로 유출되면서 터널에서 가까운 주변의 포화대가 거의 고갈 상태가 되었고, 터널내로의 심한 유출로 인하여 지하수위가 급격하게 하강됨으로써 터널 주변 지역에 새로운 수리지질학적 환경이 형성되었다. 게다가 그라우팅 후에도 계속적으로 터널내로 다량의 지하수가 유출되는 것은 그라우팅 효과로 어느 정도 차수가 되었지만, 터널 굴착으로 지하의 상태가 대기압의 환경에 놓여 있으므로 터널내로의 유출 속도가 수위상승의 속도보다 더 큰 것에 기인한다. 연구지역 일대에서는 이 새로운 수리지질 환경속에서 터널로부터 멀리 떨어진 지역으로부터 터널쪽으로 지하수 유동이 일어나고, 터널내로 일정량의 지하수가 유출되면서 지하수위 하강이 점차 평형상태에 도달하게 되는 것으로 판단된다.

암석별 터널내로의 지하수 초기 유출량을 보면 (Figure 8), 퇴적암 구간에서 약 65,000m<sup>3</sup>/day, 화강암과 화산암 구간에서 각각 약 35,000, 25,000m<sup>3</sup>/day로서, 퇴적암 구간에서 가장 많은 양

의 지하수가 유출되었다. 이는 퇴적암의 물리적인 성질 때문에 NATM 공법으로 터널을 굴착함으로써, 퇴적암에 우세하게 발달되어 있는 층리면 및 층리절리와 같은 단열구조가 더 많이 확장, 발생한 것에 기인되는 것으로 해석된다. Figure 6과 Figure 7에서 터널내로의 지하수 유출량이 N75-85°W·25°SW/80°SW 방향의 단열군에서 가장 많이 유출되고 있는데, N75-85°W의 단열군의 대부분은 연구지역 퇴적암 구간에서 발달하고 있는 층리면 및 층리절리라는 사실로서 이와 같은 해석이 가능하다. 실제 퇴적암 구간내에 위치하고 있는 여우동의 cs-7, cs-8, cs-10, cs-78, cs-79, cs-134 신촌 cs-13, cs-14, 찬거리 cs-37, cs-40, 원평 cs-41, 소근리 cs-16, cs-17, cs-18 등은 대부분 굴착 초기부터 100m 이상의 수위하강을 보여주고 있다. 이로써 퇴적암 구간 내에는 기존의 층리면, 층리절리와 더불어 발파공법에 의해 발생한 단열들의 공간적인 분포가 화강암 및 화산암 구간에 비해 우세함을 알 수 있다.

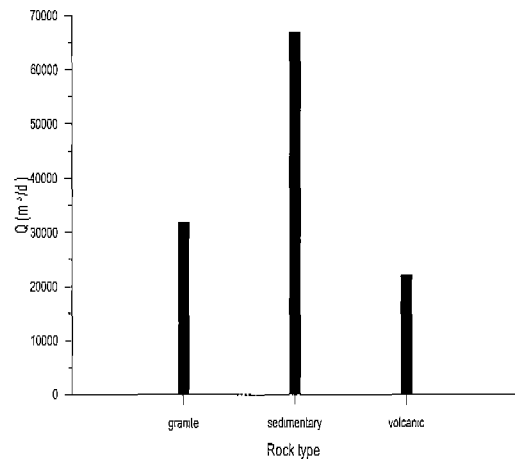


Figure 8. Relation between inflow rates of the first stage and rock type.

터널내 지하수 유출에 영향을 미치는 단열들은 대체로 4조의 불연속면군으로 분류할 수 있는데, 주 분포방향은 크게 TSet1: N60-85°W·25°SW/80°SW, TSet2: N40-50°E·85°SE/85°NE, TSet3: N10-20°E·85°SE, TSet4: N70-80°E·80°SE 이다. 이들 단열들에 대한 매개변수들의 발달상태는 지표 노두에서의 단열발달 상태와 양상이

거의 같다. 지표 노두상의 단열들이 연장성이 양호한 것으로 볼 때, 터널내의 단열들은 지표의 단열들이 연장되어 나타나는 것으로 해석된다. Nur(1982)는 절리들의 기원에 대한 연구에서 절리의 하부로의 침투 깊이(penetration depth)는 절리 길이와 직접적으로 관계가 있다고 하였다. 터널 구간내에서 TSet1은 퇴적암 지역에서는 층리면 및 층리절리와 관련된 단열들이며, 그리고 화강암 지역에서는 급천단층 및 급천단층과 10-20° 정도의 주향의 분산을 보이며 아평행(subparallel)하게 발달하고 있어, 이 단층과 관련된 단열로 해석된다(성익환 등, 2000). 상기한 바와 같이 터널내의 지하수 유출에 영향을 미치는 단열들은 연구지역 일대의 지하수 유동 통로 역할을 하여 터널 굴진 작업으로 인하여 터널내로 다량의 지하수를 유출시켰고, 하나의 연장된 우물(extended well)로서 역할을 하는 지질구조대인 것으로 해석된다.

### 참고문헌

강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석, 1993, 분리 열극개념을 이용한 지하공동 주변의 지하수유동 해석, 지질공학, 3(2), 125-143.

김천수, 1991, 결정질암반에서의 지하수유동 연구경향, 지질공학, 1(1), 137-145.

성익환, 이병대, 조병욱, 김경수, 류충렬, 이봉주, 이춘오, 이병대, 유욱, 임현철, 김통권, 이종철, 이사로, 지세경, 이대하, 2000, 영천댐 도수터널 주변지역 지하수 회복시기 예측, 한국자원연구소, 256p.

성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주, 김통권, 이병주, 채병곤, 김경수, 김충렬, 현혜자, 이종철, 김복철, 이동우, 김원영, 1998, 영천댐 도수터널 공사지역 지하수 유동조사, 한국자원연구소, 419p.

이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수로터널 굴착에 따른 주변지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 지질공학, 10(2), 143-162.

이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천 도수로터널 주변 지하수의 수리지구화학, 한국자원공학

회지, 33(4), 211-225.

조병욱, 성익환, 이병대, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법 : 유속계의 이용, 자원환경지질, 32(6), 661-667.

Akama, Y., T. Kitamura, and H. Kojo, 1988, On the behavior of groundwater around a tunnel during excavation in unconsolidated sandstone, *Tunnels and Water*, 1, 49-56.

Goodman, R. F., Moye, D. G., Van Schaikwyk, A., and Javandel, I., 1965, Groundwater inflows during tunnel driving, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 2(1), 39-56.

Meiri, D., 1985, Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel, *J. Hydrol.*, 82, 69-75.

Nur, A., 1982, The origin of tensile fracture lineaments, *Jour. of Structural Geo.*, 4, 31-40.

Smith, E. D. and Vaughan, N. D., 1985, Aquifer test analysis in nonradial flow regimes: A case study, *Ground Water*, 23(2), 167-175.

Takashi, S., 1988, Influence of water inflow for tunnelling and countermeasure, *Tunnels and Water*, 1, 597-604.

---

이병대 : 한국지질자원연구원 환경지질연구부  
305-350, 대전시 유성구 가경동 30번지  
Tel : 042-868-3088  
blee@kigam.re.kr

함세영 : 부산대학교 지구환경시스템학부  
609-735, 부산시 금정구 장전동  
Tel : 051-510-2252  
hsy@hyowon.pusan.ac.kr

이춘오 : 한국지질자원연구원 지질연구부  
305-350, 대전시 유성구 가경동 30번지  
Tel : 042-868-3131  
colee@kigam.re.kr

도수로터널 굴착에 따른 지하수 유출량과 단열의 관련성

조병욱 : 한국지질자원연구원 환경지질연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30번지  
Tel : 042-868-3083  
cbw@kigam.re.kr

성익환 : 한국지질자원연구원 환경지질연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30번지  
Tel : 042-868-3082  
sih@kigam.re.kr