

## 영천댐 도수로터널내 지하수 유출구간의 불연속성 단열 특성 및 단열 프랙탈 차원

### Discontinuous Fracture Characteristics and Fractal Dimensions of Groundwater Flow Section in Youngchun Waterway Tunnel

이 병 대(Byeong Dae Lee)	한국지질자원연구원 환경지질연구부
추 창 오(Chang Oh Choo)	경북대학교 지질학과
이 인 호(In Ho Lee)	한국지질자원연구원 환경지질연구부
정 교 철(Gyo Cheol Jeong)	안동대학교 지구환경과학과
함 세 영(Se-Yeong Hamm)	부산대학교 지구환경시스템학부
조 병 옥(Byong Wook Cho)	한국지질자원연구원 환경지질연구부

#### 요약 / ABSTRACT

영천댐 도수로터널 내의 지하수 유출량이 단열면의 통계적인 분포 특성에 어느 정도 지배받는지를 파악하기 위하여, 지하수 유출구간에 분포하는 단열의 기하학적 매개변수의 분포특성 및 단열 프랙탈 차원과 지하수 유출량과의 상관성을 규명하려고 시도하였다. 전체 구간을 통하여 단층구조에서의 유출량은  $84,465\text{m}^3/\text{day}$  로 전체 유출량의 70%, 절리구조에서의 유출량은  $36,525\text{m}^3/\text{day}$  로 전체 유출량의 30%를 차지하고 있다. 이로써 단층이 연구지역 터널내의 지하수 유출을 지배하는 주된 지질구조임을 알 수 있다. 터널내의 유출량과 암석 구간별 단열 프랙탈 차원과의 관련성은 퇴적암 구간인 NATM 전 구간에서 프랙탈 차원이 증가함에 따라 유출량이 증가하였다. 단열특성에 따른 프랙탈 차원과 유출량의 관계는 절리 구간에서보다 단층 구간에서 더욱 정비례 관계를 보이고 있다.

**주요어 :** 터널, 지하수, 유출량, 단열, 프랙탈 차원

To clarify the relationship between groundwater flow rate and statistical distribution of fractures in Youngchun waterway tunnel, the fracture characteristics and fractal dimensions of groundwater flow section were evaluated. The flow rate of  $84,465\text{m}^3/\text{day}$  was identified in fault, accounting for about 70 percent of the total flow rate. The flow rate of  $36,525\text{m}^3/\text{day}$  was identified in joint, accounting for about 30 percent of the total flow rate. The flow rate in the NATM section of

sedimentary rocks increased with the fractal dimensions. The fractal dimensions determined in fault or fracture zones show more positive relation with the flow rate than those in joint developed zones.

**Key Words** : tunnel, groundwater, flow rate, fracture, fractal dimension

## 서론

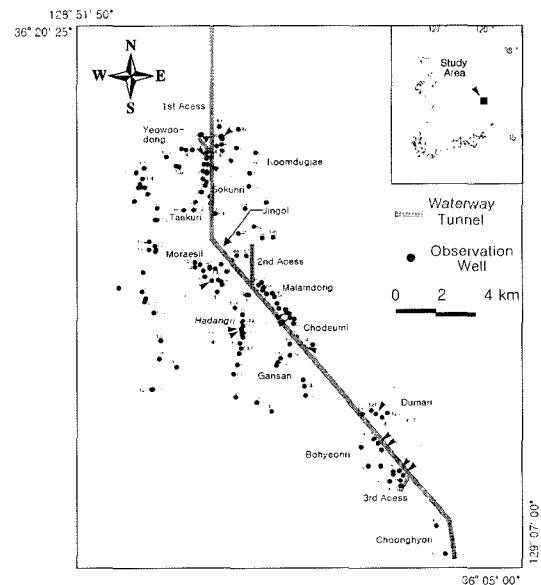
암반내에 존재하는 불연속면으로서의 단열은 암반의 역학적 거동과 수리학적 측면에서 매우 중요하다. 그러나 실제 암반내의 단열은 다양한 형태와 크기로 분포하면서 불규칙적으로 존재하기 때문에 이러한 단열계를 어떻게 취급하는가가 중요한 문제로 되고 있다. 최근 복잡한 단열계에 프랙탈 개념을 도입함으로써 단열계의 규칙성을 검토할 수 있게 되었다(Udagawa, 1993).

단열 암반에서 단열을 측정할 경우, 보통 터널 내와 시추공벽 등의 유한한 범위를 이용하여 측정이 이루어진다. 이러한 조사 영역보다 규모가 큰 단열들은 측정 영역 내에 들어가지 않기 때문에 실제보다 짧게 평가된다. 이러한 연유에서 자연계에서의 단열 규칙성이 프랙탈 차원으로 존재한다 하더라도 통계학적으로 대수 정규분포와 근사한 분포를 갖는 것으로 생각된다. 이러한 통계학적 프랙탈 차원을 갖는 불연속면에서 지하수 유동 통로가 되는 열린 단열로서의 변수로는 단열의 간극, 단열의 연장성 및 연결성, 단열의 밀도, 단열면의 거칠기 등을 들 수 있다. 이들 중 단열의 간극은 주변 단열과의 상대적인 유동 통로가 될 수 있기 때문에 일반적으로 지하수 유동 흔적이 있는 것 중에서 고려되어야 할 것이다. 단열의 연장성 및 연결성은 지하수 유동에 있어서 중요한 변수로서 단열의 간극이 크다 하더라도 연장성 및 연결성이 없을 때는 유동 통로로서의 역할을 할 수 없게 된다. 단열의 밀도는 단열의 복잡성을 의미하는 것으로서 지하수 유동 통로가 많이 분포할수록 지하수 유동 압력을 빠르게 해방시켜 줌으로써 지하수의 흐름량을 증가시키는 변수가 될 수 있다. 단열면의 거칠기는 지하수 유동에 영향을 주는 저항을 가리킨다.

영천댐 도수로터널 지하수와 관련한 연구로는

성익환 등(1998)의 영천댐 도수로터널 주변지역의 지하수유동 연구가 수행되었다. 조병욱 등(1999)은 터널 굴착에 의한 지하수 유출량을 산정하기 위한 방법으로 유속계를 이용하였다. 박재현 등(2001)은 도수로터널내의 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성을 규명하였다. 또한 이병대 등(2000)은 터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조와의 관련성을 연구하였다.

연구지역은 영천댐 도수로터널 구간으로, 청송군 안덕면과 현서면, 그리고 영천시 자양면 일대이다(Fig. 1). 이 지역은 도수로터널 굴착으로 인



**Fig 1.** Location of study area and the waterway tunnel.

하여 터널 주변 대수층의 지하수가 터널내로 유출되면서 연구지역내의 지하수위가 급격히 하강하고, 주위의 지하수 수리시스템이 변화되었고, 지표수와 지하수의 고갈 현상이 발생하였다. 본 연

구는 도수로터널내 지하수 유출구간의 단열들에 대한 매개변수의 기하학적인 특성 및 단열 프랙탈 차원을 파악하고, 또한 유출량과의 관련성을 규명하기 위한 것이다. 이를 위하여 터널내 유출구간에 분포하는 단열들에 대한 간극과 빈도, 그리고 단열 프랙탈 차원을 계산하였고 지하수 유출량을 측정하였다. 본 연구에 이용된 단열은 터널내 열린 단열로서 지하수 유출이 직접 확인된 단열을 대상으로 하였다. 그러므로 지하수 유출 현상을 보이는 단열은 지하수 유동 통로로서 그 크기가 무한한 것으로 가정하였다.

### 터널 개요

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 임하댐 및 길안천의 물을 영천댐으로 도수하여 경북 동남부지역에 용수를 공급하고 금호강의 수질을 개선하기 위한 것으로 지표하 100m~800m 깊이에서 굴착되었다. 터널의 방향은 남북방향과 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 유하식 수로 터널로서, 터널 입구의 표고는 183m이고 터널 출구의 표고는 162m로 입구와 출구의 고도차는 21m로서 약 0.06%의 경사를 가지는 아주 완만한 경사의 터널이다. 터널 굴착공법은 약 11km 구간은 재래식 공법인 발파

에 의한 굴착공법(NATM)과 22km 구간은 TBM (Tunnelling Boring Machine) 공법으로 굴착되었다(Fig. 2).

### 수리지질 및 단열구조

연구지역은 경상퇴적분지 하양층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 관입암류들이 분포한다.

퇴적암류는 사암과 셰일의 호층이며, 암색은 저색, 녹회색 및 회색으로, 이 층은 접촉변성작용을 받아 대부분이 호온펠스화 되어 있다. 층리발달이 아주 양호하며, 부분적으로 파쇄된 사암층은 이 지역의 주 대수층을 형성하고 있으며, 층리면은 지하수의 주요 통로 역할을 하고 있다. 사암층은 일반적으로 셰일보다 입자가 크고 강도가 약하므로 연구지역내 화강암류의 관입에 의해 연약대를 형성하므로 주 함수 단열대 및 양호한 대수층을 형성하고 있다.

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

연구지역을 지배하는 지질구조는 퇴적암의 습곡구조 운동에 의한 층리변화와 암반의 취성변형 작용에 의해 변형된 단층 및 절리들이다. 단층구조는 서북서 방향의 좌수향의 주향이동 단층이 지배적이며, 화목리를 중심으로 거의 남북 내지 북북동-남남서 방향의 단층들이 발달하기도 한다. 서북서 방향의 좌수향 주향이동 단층으로는 금천

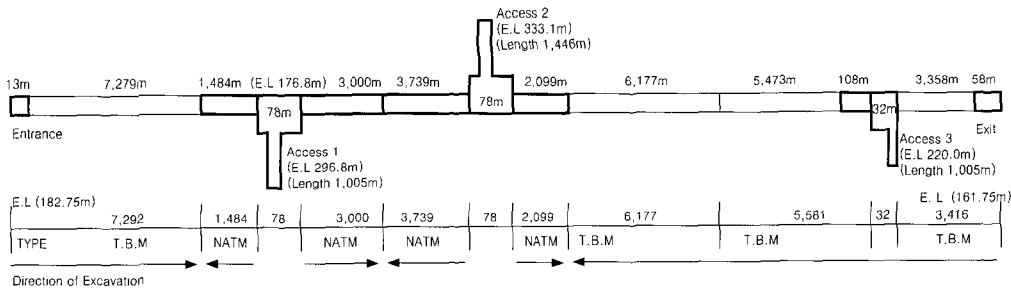


Fig 2. A schematic illustration of the waterway tunnel in the study area.

단층과 가음단층이 있다. 연구지역의 단열구조들은 이들 두 단층과 관련되어 동서 혹은 서북서 방향의 단열들이 많이 발달되어 있다. 연구지역내 단열발달은 퇴적암의 층리면, 층리절리, 그리고 화강암류의 판상절리와 같은 저각의 경사를 가지는 부분과 75° 이상의 고각의 경사를 가지는 군의 두 개의 뚜렷한 단열군으로 형성되어 있다. 퇴적암 지역내에는 층리절리가 가장 많이 발달되어 있으며 평균 주향과 경사는 N70-80°W·25°SW이다. 화강암의 판상절리는 N35°W·12°NE의 배향을 가진다. 고경사의 절리들은 퇴적암 지역에서는 N80°W·85°SW와 N10°E·85°SE 두 방향의 절리조가 우세하며 이들은 서로 직교하는 신장성의 규칙절리들이 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.

### 단열 프랙탈 차원 계산

프랙탈의 기본개념은 크기(축적) 변화에 무관하게 똑같은 형태를 가지는 것이라고 할 수 있다. 다시 말해서 자기상사성(self-similarity), 즉 어떤 형태의 부분을 확대했을 때 전체 형태와 같은 모양을 가지는 형태라고 할 수 있다. 이러한 프랙탈의 개념은 Mandelbrot(1983)에 의해 해안선의 길이 측정 등 여러 가지 자연계의 기하학적인 형태의 특성을 규정하기 위해 처음으로 도입되었다. 최근에는 프랙탈을 이용하여 제 4 기 단층의 활동성, 단열의 연결성, 석유지질학, 지하수 유동 특성 등의 응용지질학 분야에서 많이 적용되고 있다(Cello, 1997).

본 연구에서는 통계학적인 단열분포 특성을 파악하기 위한 방법으로 박스카운팅법(Box counting method; Walsh and Watterson, 1993)을 이용하여 프랙탈 차원을 구하였다. 박스카운팅법은 한 변의 길이가 r인 사각요소(box)를 가진 격자를 프랙탈 차원을 구하기 위하여 설정된 영역상에 겹친 다음, 단열을 포함하는 사각요소의 수(n)를 측정한다. 이러한 작업을 사각요소의 한 변의 길이를 축소시키며 반복하여 시행함으로써 단열을 보다 정확하게 근사시킬 수 있다. 이때 일정하게 축소되

어지는 길이 r0를 감소율이라고 한다. 그리고 각각의 r에 대한 n값을 양대수 방안지(log-log sheet)에 표시하여 나온 곡선상에서 최소자승법을 이용하여 회귀선을 그었을 때 직선부의 기울기가 프랙탈 차원이 된다(Fig. 3). 계산된 사각요소의 수(n)와 사각요소의 한 변의 길이(r) 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

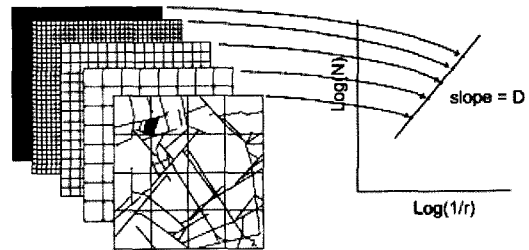


Fig 3. Illustration of the box counting method for measuring fractal dimension by overlying sequence of grids.

$$nr^D = 1$$

이 식을 정리하여 양변에 log 값을 취하면,

$$D = \frac{\log n}{\log(1/r)}$$

여기서 D가 구하고자 하는 프랙탈 차원이 되고 이때 D값의 범위는 1<D<2가 된다. 여기서 한 가지 주의해야 할 사항은 프랙탈 차원은 상한선(upper limit)과 하한선(lower limit)을 가진다. 즉 프랙탈 차원은 한계성을 나타내는 특징을 가지고 있다. r에 대한 n값을 표시하는 곡선상에서 r값이 너무 작아서도 또는 너무 커서도 안 된다는 것이다. 너무 작을 경우에는 사각요소의 한 변의 길이가 단열에 비해 너무 작아서 단열을 포함하는 사각요소가 하나도 없거나 단지 하나의 단열만이 사각요소에 포함되어 프랙탈 차원이 1에 가까워지게 되고, 너무 클 경우에는 사각요소의 한 변의 길이가 단열에 비해 너무 크기 때문에 사각요소가 모두 하나 이상의 단열을 포함하여 프랙탈 차원이 2에 접근하게 된다(선우춘, 1989).

### 단열 특성에 따른 지하수 유출량

단열의 기하학적인 특성과 유출량

도수로터널내 유출구간에서의 단열들에 대한 기하학적인 분포 특성을 파악함에 있어, 암반분류법중 RMR 분류에 기준을 둔 단열빈도, 단열간극, 그리고 각 유출구간에서 측정된 유출량과 이 구간의 불연속 단열면에 근거한 프랙탈 차원을 구하여 해석하였다.

불연속성 단열암반에서 물을 통과시키는 능력은 주로 단열간극에 좌우된다(Neuzil and Tracy, 1981). Snow(1970)는 화강암에 발달되어 있는 단열을 연구하여, 여러 다른 단열들의 평균 간극들이 대략적으로 대수정규분포를 보인다고 하였다. 또한 Snow(1970)는 단열간극 분포는 깊이에 따라서도 대수정규분포를 보인다고 보고하였다. 따라서, 투수성 단열의 간극도 대수정규분포 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 도수로터널내 지하수 유출이 많은 구간에서의 단열간극을 측정하였고 지하수 유출량과의 관련성을 분석하였다. 일반적으로 간극을 측정하는 방법으로는 시추공에서의 초음파주사검층에 의한 측정 방법과 암석 노두에서 직접 측정할 수 있는 틈계이지(Thickness gauge) 측정 방법이 있다. 또한 실내에서 측정하는 방법으로는 수지를 간극에 주입한 후 굳힌 다음 직접 측정하는 방법이 있다. 이 연구에서의 간극 측정은 현장에서 측정할 수 있는 일본 Fusso MD101 Thickness gauge를 사용하여 측정하였다. 물론 절리면 거칠기를 포함한 블록 부분에서 가장 근접한 부분의 측정이기 때문에 거침면에서의 실제 지하수 유동을 정밀하게 반영하는 간극은 아니지만, 현장 노두에서 쉽게 측정할 수 있고 평균 간극을 쉽고 빠르게 계산할 수 있는 장점이 있다. 각 변수에 대하여 해석을 하기에 앞서 각 구간에서의 RMR 값을 실제 측정치로 환산하였다. 각 구간의 간극은 RMR 값에서 실측치로 환산하여 사용하였기 때문에 측정된 값에 대한 근사치가 될 것이다. RMR 값에서 간극이 없는 암반에 대한 값을 0으로 하고, 0.1 mm보다 작은 간극의 값을 0.1로 하고, 0.1 mm~1.0 mm 사이의 값을 0.5, 1.0 mm~5.0 mm 사이의 값을 3.0으로 설정하였다. 5.0 mm 이상의 간극을 가지는 부분에 대한 값은 5.0으로 하여 근사치로 계산하였다.

암반내의 단열빈도는 단위길이당 평균 단열수

로 정의되며 이는 평균 단열간격의 역수와 같다. 단열빈도 측정에 있어서 Kikuchi et al.(1988)은 단위 체적당의 단열수 혹은 단위 체적당의 절리면의 면적으로 정의하였다. 또한 Priest and Hudson(1976)은 측선법을 이용하여 단열빈도를 단위 길이당 단열수로 나타내었다. 이 연구에서는 Priest and Hudson(1976)의 방법에 의한 단열빈도 값을 구하여 이용하였다.

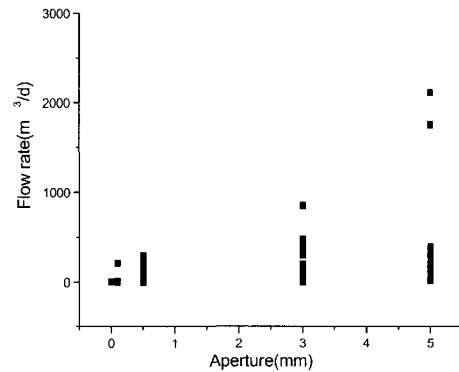
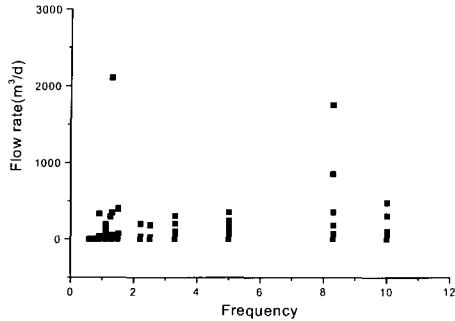


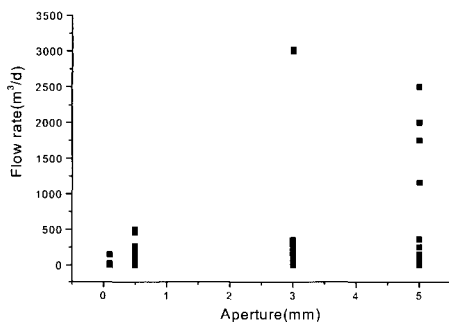
Fig 4. Relationship between aperture and flow rate in the TBM Section.

Fig. 4는 TBM 전체구간에서의 간극에 대한 유출량의 관계를 나타낸 그림으로 간극이 증가함에 따라 유출량 역시 증가하는 경향이 나타나고 있다. 반면 TBM 전체구간에서의 빈도에 대한 유출량의 관계는 뚜렷하지는 않지만 미약한 양의 상관성을 보이고 있다(Fig. 5). NATM 구간에서의 간극에 대한 유출량의 관계는 간극이 증가함에 따라 유출량 역시 증가하는 경향이 나타나고 있다(Fig. 6). Fig. 7은 전체 NATM 구간에서의 빈도에 대한 유출량의 관계를 나타낸 것으로 빈도가 증가함에 따라 유출량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 1,500m³/day 이상의 유출량을 보이는 몇 개 지점을 제외하면 전체적으로는 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다.

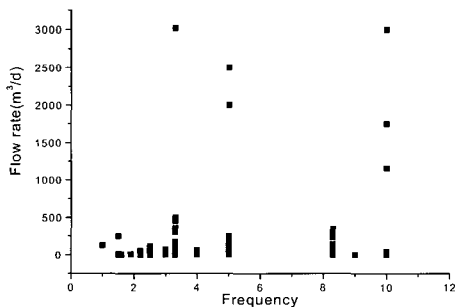
TBM 구간과 NATM 구간 각각의 경우에 대하여 비교해 보면 다음과 같은 경향이 있음을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig 6에서 간극에 대한 유출량의 관계는 두 구간 모두 미약하게 비례적인 관계를 가지고 증가하고 있다. 그러나 TBM 구간과



**Fig 5.** Relationship between frequency and flow rate in the TBM section.



**Fig 6.** Relationship between aperture and flow rate in the NATM section.



**Fig 7.** Relationship between frequency and flow rate in the NATM section.

NATM 구간별로는 뚜렷한 차이를 보이지 않으며 NATM 구간이 TBM 구간에 비해 다소 큰 증가 형태를 보이고 있다. 이 그림에서 터널내로의 지하수 유출량은 단열빈도보다는 단열간극에 더 많은 지배를 받고 있으며, 단열간극이 3mm 이상인 구간에서 유출량이 집중되어 있음을 알 수 있다. 이는 연구지역의 터널내 유출량이 단순히 단열빈도에 지배되기보다는 간극에 더 지배되고 있음을 의미하여, 일부 투수성이 크고 연장성 및 연결성이 양호한 단열에 지배될 가능성을 보여준다.

#### 단열의 종류에 따른 유출량

터널내로의 지하수 유출 양상은 유출구간에 발달하고 있는 단열의 특성에 따라 많은 영향을 받는다. 실제 연구지역의 지하수 유출은 단열의 종류, 즉 그 단열이 단층인지 혹은 절리인지의 여부, 단열의 규모, 단열의 연장성, 그리고 단열의 우세 방향성 등에 지배를 받고 있다. 연구지역 터널의 지하수 유출과 관련된 단열의 연장성 및 우세방향성에 대해서는 이병대 등(2000)에 의해 보고되었다. 그래서 본 연구에서는 지하수 유출구간의 단열이 단층인지 혹은 절리인지의 여부에 따른 유출량과 그 단열들의 광역적인 분포특성을 연구하였다. 이 논문에서 단층의 정의는 단열면에 단층조선이 발달되어 있어 변위가 인지되는 단열을 단층이라 하였다.

연구지역의 터널내로 유출되는 지하수의 대부분은 터널과 직교 혹은 사교하여 관통하고 있는 단층 및 단층운동과 관련된 단층 파쇄대와 연장성이 양호한 절리면들을 따라 유출되고 있다. 단층과 절리를 따라 터널내로 유출되는 지하수 유출량은  $120,990\text{m}^3/\text{day}$ 이다(Table 1). 이중 TBM 구간에서의 유출량은  $23,695\text{m}^3/\text{day}$  로 전체 유출량의 20%, NATM 구간의 유출량은  $97,295\text{m}^3/\text{day}$  로 전체의 80%를 차지한다. TBM 구간의 유출량중 단층구조를 따라 유출되는 지하수는  $22,850\text{m}^3/\text{day}$  이고, 절리구조를 따라 유출되는 지하수는  $845\text{m}^3/\text{day}$  이다. NATM 구간의 경우, 단층구간에서 유출되는 지하수는  $61,615\text{m}^3/\text{day}$  이고, 절리구간에서 유출되는 지하수는  $35,680\text{m}^3/\text{day}$  이다. 또한 전체 구간을 통하여 단층구조에서의 유출량은  $84,465\text{m}^3/\text{day}$  로 전체 유출량의

**Table 1.** Flow rate associated with fractures in the tunnel.

(unit : m<sup>3</sup>/day)

Fracture	NATM	TBM	Total
fault	61,615	22,850	84,465
joint	35,680	845	36,525
sum	97,295	23,695	120,990

70%, 절리구조에서의 유출량은 36,525m<sup>3</sup>/day 로 전체 유출량의 30%를 차지하고 있다. 이로써 단층이 연구지역 터널내의 지하수 유출을 지배하는 주된 지질구조임을 알 수 있다. 이는 박재현 등(2001)에 의한 연구 결과와도 잘 일치하고 있다. 박재현 등(2001)은 본 연구지역 터널의 일부 구간에서의 지하수 유출량과 수리지질 매개변수들과의 관련성을 연구하였는데, 이 연구에서도 유출량과 단층과의 관련성이 상관계수 0.3430 으로 절리빈도, 수리전도도, 그리고 사암의 분포 등 다른 변수들에 비해 가장 높다고 하였다.

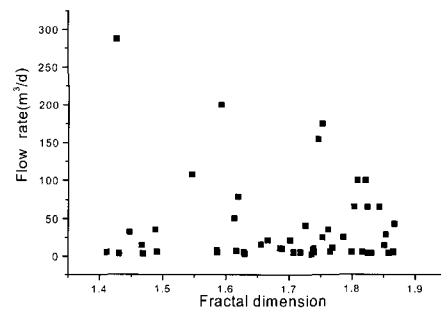
터널내로의 주된 유출구간에 대한 단열들의 광역적인 분포특성은 지표 노두에서의 단열발달 상태와 양상이 거의 같다. NATM 구간 주변지역에서의 단열발달 양상은 EW 내지 WNW 방향의 층리면 및 층리절리들로서 대부분의 층리면에는 단층조선들이 발달되어 있는 단층구조이며, 터널내의 유출구간의 단열구조와 유사한 양상을 보이고 있다. NATM 구간중 3구간 지역은 N65-70°E 와 N40-50°E·80°SE 단열의 교차선이 지하수 유출을 지배하는 구조요소로, N65-70°E 방향의 단열구조는 단열면을 따라 단층조선이 발달되어 있는 소규모 단층들이다.

TBM 구간의 경우 3구간 지역은 N60-70°W 방향의 연장성이 양호한 절리 및 파쇄대를 따라 많은 양의 지하수가 유출되는 지역이다. 이들은 연장성이 양호한 신장절리로서, 암맥류의 관입과 연관성이 있다. 4구간 및 5구간 지역은 연장성이 양호한 단층대를 따라 터널내로 지하수가 유출되는

대표적 구간중의 하나이다. 이 지역의 단층구간은 연구지역내 서북서 방향의 좌수향 주향이동단층인 가음단층 및 금천단층의 단층구조 운동과 관련된 광역적인 응력작용에 의해 발생한 변형산물로 해석된다. 실제 이 구간내에 위치한 조듬이 지역과 두마리 지역은 이 단층 및 단층과 관련된 단열대를 따라서 10,000m<sup>3</sup>/day의 많은 양의 지하수가 유출되었다.

**유출량과 전체 단열에 대한 프랙탈 차원**

연구지역 터널내의 지하수 유출량과 단열의 통계적인 분포 특성과의 관련성을 파악하였다. 이를 위하여 먼저 터널 전체 구간에 대하여 단층 및 절리의 특성 구분없이 전체 단열에 대한 프랙탈 차원과의 관련성을 논하였다. 연구지역의 터널은 상기한바와 같이 본 터널과 3개의 사갱으로 구성되어 있으며, 구성암석에 따라 굴착공법을 달리하고 있다. 퇴적암 구간은 재래식 공법인 발파에 의한 NATM 공법, 화강암과 화산암 구간은 TBM 공법으로 굴착되었다(Fig. 2). Fig. 2에서 3구간 NATM의 경우는 퇴적암과 화산암의 2종류의 암석이 분포하는 구간이다.



**Fig 8.** Relationship between fractal dimension and flow rate in the section-1TBM.

연구지역에서 NATM 구간의 단열 프랙탈 차원은 최소 1.5300에서 최대 1.9788의 범위이며, 평균은 1.7762이다. TBM 구간의 단열 프랙탈 차원은 1.3754에서 1.9406의 범위를 가지며 평균은 1.7442로서, NATM 구간의 프랙탈 차원이 TBM 구간에 비해 다소 큰 편이다. Fig. 8은 화강암 구간인

TBM에서의 단열 프랙탈 차원과 유출량과의 관계를 도시한 것이다. 이 그림에서 프랙탈 차원이 증가함에 따라 유출량은 다소 감소하는 경향으로 양자간의 상관성은 미약하다. Fig. 9는 퇴적암 구간인 2구간 NATM 구간이고, Fig. 10은 퇴적암과 화산암이 동시에 분포하는 3구간 NATM으로서 프랙탈 차원이 증가함에 따라 유출량 역시 증가하는 양의 상관성을 나타내고 있다.

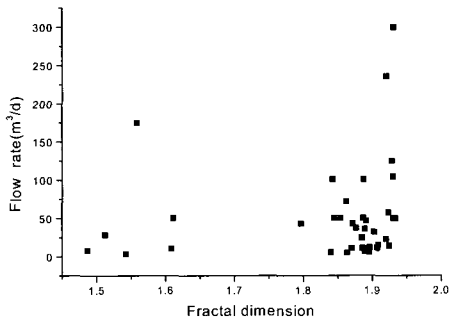


Fig 9. Relationship between fractal dimension and flow rate in the Section 2-NATM.

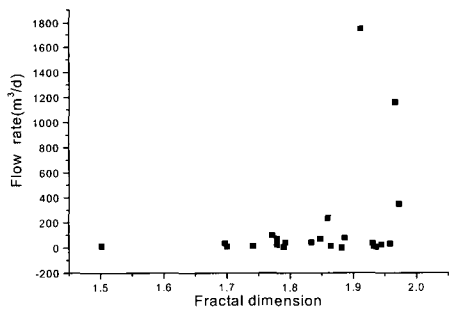


Fig 10. Relationship between fractal dimension and flow rate in the Section 3-NATM.

각각의 구간별 관계를 살펴보면 퇴적암 구간인 NATM 전 구간에서는 프랙탈 차원이 증가함에 따라 유출량 역시 증가하는 형태로 나타나며, 화강암 구간인 TBM 구간에서는 프랙탈 차원과 유출량과의 관계가 상관성이 미약한 경향을 보여주고 있다. 이것을 TBM 구간과 NATM 구간으로 나누어 비교하면 TBM 구간은 NATM 구간에 비

해 굴착 당시 암반 변형이 덜 수반되는 것으로 설명될 수 있다. 이것은 암반 단열면에 대한 영향 또한 줄이게 되므로 유출량 역시 퇴적암구간에 비해 상대적으로 프랙탈 차원에 큰 영향을 받지 않는 것으로 고려된다.

NATM 구간은 퇴적암 구간으로 TBM 구간에 비하여 발파에 의한 충격이 크므로 이에 따른 암반 변형이 TBM 구간보다 심할 것으로 판단된다. 이에 따라 새로운 단열의 생성과 기존 단열의 결합으로 인한 새로운 단열이 발달하게 된다. 이처럼 굴착공법의 차이로 인하여 단열의 교란영역과 이 영역의 외곽에 분포되어 있는 단열과의 상호연결성 확장이 이 구간의 지하수 유출과 직접적인 영향이 있는 것으로 해석된다.

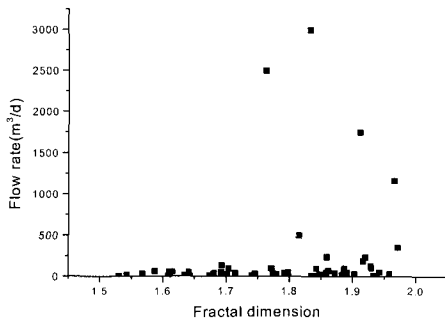
### 유출량과 단열 특성별 프랙탈 차원

연구지역 터널내의 지하수 유출량과 단열의 통계적인 분포 특성과의 관련성을 파악하기 위하여, 터널내의 유출구간의 단열들에 대하여 단층과 절리를 구분하여 분석하였다. 연구지역에서 NATM 구간에 발달되어 있는 단층에 대한 단열 프랙탈 차원은 최소 1.5300, 최대 1.9717이며 평균은 1.7939이고, 절리에 대한 프랙탈 차원의 범위는 1.4869 ~ 1.9920이고 평균 1.8093이다. 그리고 TBM 구간에서 단층에 대한 프랙탈 차원은 1.4112 ~ 1.9371의 범위이며 평균은 1.6845이고, 절리 프랙탈 차원의 범위는 1.3755 ~ 1.9406 이고 평균 1.7526 이다.

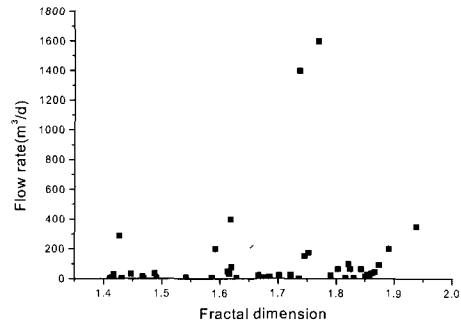
Fig. 11과 Fig. 12는 터널내 유출구간에 대해서 NATM 구간과 TBM 구간을 구별하여 각 구간에 대해서 단층이 발달한 구간과 절리가 발달한 구간에서의 유출량 특성을 각각 도시한 것이다. 이 그림에서 단층 구간에서의 프랙탈 차원과 유출량의 관계는 대체적으로 정비례 관계를 보이며 상관계수는 NATM 구간에서 0.1517, TBM 구간에서 0.1390을 나타내고 있다. 절리 구간에서는 NATM 구간의 경우는 상관계수가 -0.0037로 아주 미약한 음의 상관관계를 나타내며, TBM 구간은 상관계수가 0.0093으로 미약한 양의 상관관계



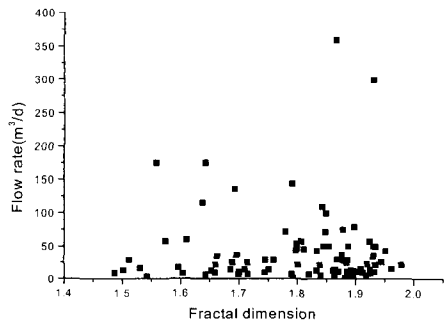
영천댐 도수로터널내 지하수 유출구간의 불연속성 단열 특성 및 단열 프랙탈 차원



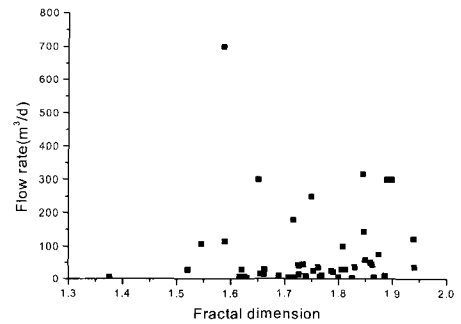
(a)



(a)



(b)



(b)

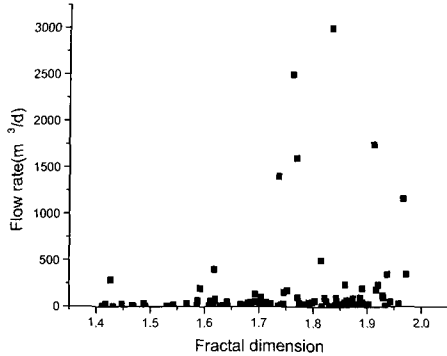
**Fig 11.** The relationship between fractal dimension and flow rate in the NATM section.  
(a) : fault section, (b) joint section

**Fig 12.** The relationship between fractal dimension and flow rate in the TBM section.  
(a) fault section (b) joint section

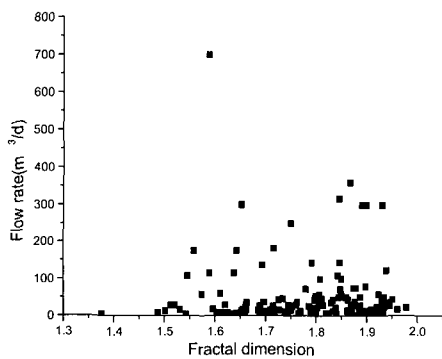
를 나타내는 구간으로 구분된다. 이를 암석의 분포별로 비교하면 터널의 입구와 출구 구간의 화강암 지역에서는 대체로 미약한 음의 상관관계를, 그리고 퇴적암 지역 및 화강암과 화산암이 동시에 분포하는 3구간 NATM 구간에서는 미약한 양의 상관관계를 보인다. 이는 유출량과 전체 단열에 대한 프랙탈 차원과의 관계와 잘 일치하고 있는 양상이다. 그러나 절리 구간에서 유출량과 프랙탈 차원과의 음의 상관관계에 대해 프랙탈 차원이 증가함에 따라 반드시 유출량이 감소한다는 것은 아니다. 이는 이 그림에서의 경향은 단지 하나의 지점에 대한 유출량의 크기에 크게 좌우되기 때문이다. 따라서 유출량과 단열 특성에 대한

프랙탈 차원과의 관련성을 좀더 정확하고 전반적으로 파악하기 위해서는, 특정 구간에서의 비교와 함께 전체 구간에 대한 유출량과 각각의 단열 프랙탈 차원과의 관련성을 평가하는 것이 더 효과적이라 할 수 있다. Fig. 13과 Fig. 14는 전체 구간에서의 유출량과 단층 및 절리의 각각에 대한 프랙탈 차원과의 관련성을 도시한 것이다. 단층구간에서 프랙탈 차원과 유출량과의 상관관계는 대체로 양의 상관관계를 보이고, 절리구간에서의 상관성은 미약한 양의 상관관계를 보이고 있으나 단층구간에 비해서 뚜렷하지 않다. 이 그림에서 단층구간과 절리구간의 프랙탈 차원과 유출량의 관계는 미소한 차이는 있으나 전반적으로 프랙탈

## 토의 및 결론



**Fig 13.** The relationship between fractal dimension and flow rate in the fault(total section).



**Fig 14.** The relationship between fractal dimension and flow rate in the joint(total section).

차원이 증가함에 따라 유출량 역시 소규모의 증가를 보이고 있음을 알 수 있다.

즉 단열 특성별 프랙탈 차원에 대한 유출량은 프랙탈 차원이 증가함에 따라 유출량 역시 증가하는 경향을 보이며, 증가 폭은 절리 구간에서보다 단층 구간에서 더 크게 나타난다. 하지만 이것은 대략적인 경향이며, 지하수체계의 불규칙성과 프랙탈 차원의 고저와 상관없이 높은 유출량을 보이는 구간을 볼 때 프랙탈 차원과 유출량의 상관관계를 정확하게 설명하기는 어렵다.

이 연구에서는 터널내의 지하수 유출량이 단열의 통계적인 분포 특성에 어느 정도 지배받는지 파악하기 위하여, 단열 특성 및 프랙탈 차원에 의해 각 단열분포지역에서의 지하수 유출량과의 상관성을 규명하려고 시도하였다. 터널내로의 지하수 유출량은 퇴적암 구간에서 약  $65,000\text{m}^3/\text{day}$ , 화강암과 화산암 구간에서 각각 약  $35,000\text{m}^3/\text{day}$ 와  $25,000\text{m}^3/\text{day}$ 로서, 퇴적암 구간에서 가장 많은 양의 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. 실제 터널 주변에 위치하고 있는 여우동, 신촌, 찬거리, 원평, 소근리 지역의 지하수공들의 지하수위는 대부분 굴착 초기부터 100m 이상의 수위하강을 보여주고 있다(이병대 등, 2000). 이러한 양상은 터널내의 유출량과 암석 구간별 단열 프랙탈 차원과의 관련성에서도 파악된다. 퇴적암 구간인 NATM 전 구간에서는 프랙탈 차원이 증가함에 따라 유출량 역시 증가하는 양의 상관관계를 보이고 있다. 이로써 퇴적암 구간 내에는 기존의 층리면 및 층리절리와 더불어 발파공법에 의해 인공적으로 단열이 발생하는 현상이 화강암과 화산암 구간에 비해 우세함을 알 수 있다.

연구지역 터널내의 단층과 절리에 대한 각각의 프랙탈 차원은 거의 비슷한 값을 나타내나, 절리 구간에서의 값이 단층 구간에서보다 조금 더 큰 값을 보인다. 이는 단열분포 빈도가 거의 같더라도 단열의 분포상태에 따라 프랙탈 차원이 달라짐을 알 수 있다. 그러므로 단열의 빈도는 단순히 암반이 깨어져있는 정도 즉 단위 길이당 단열의 수 혹은 단위면적당 개수 등을 표현하는 것이라고 하면, 프랙탈 차원은 그것뿐만 아니라 같은 빈도 지역에서는 어느 부분이 많이 깨어져있는가 하는 분포 상태까지도 암시해줄 수 있는 것으로 해석된다.

단열 특성에 따른 프랙탈 차원과 유출량의 관계는 절리 구간에서보다 단층 구간에서 더 양의 상관관계를 보이고 있다. 이러한 특성을 암석별로

구분하면 단층 구간은 암석의 종류에 관계없이 양의 상관관계를 보이고 있으며, 절리 구간은 퇴적암 지역이 화강암이나 화산암 지역에 비해 양의 상관관계를 보이고 있다. 단층구간은 연구지역의 단층구조 운동과 관련된 광역적인 응력작용에 의해 발생한 단층파쇄대 및 2차적인 단열들로 인하여 절리구간에 비해 단열의 공간적인 분포가 우세한 것으로 해석된다(Chester et al., 1993; Nur, 1982). 단층구간내 프랙탈 차원이 높은 유출구간에서의 단열 분포 특성은 터널 주변의 연구지역에서 단층 주변부의 단열이 우세한 분포를 보이는 양상과 동일하다. 이는 연구지역의 단열 분포 특성이 프랙탈의 특징인 자기상사성을 잘 반영하고 있음을 보여준다. Mandelbrot(1983)는 프랙탈 차원은 모든 스케일상에서 일정해야 하고, 불연속면의 현장 측정에서 나타나는 공간적인 분포는 작은 척도에서도 동일한 분포를 보여준다고 하였다. 이러한 의미에서 연구지역과 같은 도수로 터널 굴착시, 야외지질조사 및 지질구조 조사, 그리고 각종 현장시험과 함께 프랙탈 차원을 계산하여 단열의 통계적인 분포 특성을 파악함으로써 터널내로의 지하수 유출구간 및 유출량에 대한 상대적인 예측이 가능하다. 결과적으로 프랙탈 차원과 유출량은 어느 정도의 상관관계를 가지면서 변화하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 정량적으로 정확하게 비교하기 위해서는 간극수압, 단열면에서의 조도 및 프랙탈 차원 계산시 오차를 발생시킬 수 있는 단열면의 굴곡 정도 등의 요소가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 박재현, 함세영, 성익환, 이병대, 정재열, 2001, 청송군 현서면 일대 도수로터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성, 지질공학, 11권, 2호, 141-152.
- 신우춘, 1989, 프랙탈 방법에 의한 fracture network의 분포 해석, 지질학회지, 25권, 4호, 468-473.
- 성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주, 김통권, 이병주, 채병근, 김경수, 김중렬, 현혜자, 이종철, 김복철, 이동우, 김원영, 1998, 영천댐 도수로터널 공사지역 지하수 유동조사, 한국자원연구소, 419 p.
- 이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수로터널 굴착에따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 지질공학, 10권, 2호, 143-162.
- 조병욱, 성익환, 이병대, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법 : 유속계의 이용, 자원환경지질, 32권 6호, 661-667.
- Cello, G., 1997, Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy, Jour. of struct. Geo., v. 19, 945-953.
- Chester, F.M., Evans, J.P., and Biegel, R.D., 1993, Internal structure and weakening mechanism of the San Andreas Fault, Jour. of Geophy. Research, v. 98(B1), 771-786.
- Kikuchi, K., Mimuro, T., Kobayashi, T., Izumiya, Y., and Mito, Y., 1988, A joint survey and determination of joint distribution, Proc. of 2nd Int. Symp. of Field Measurements in Geomechanics, Kobe, Japan, 239-248.
- Mandelbrot, B.B., 1983, The fractal geometry of nature, W. H. Freeman, New York, 468 p.
- Neuzil, C.E. and Tracy, J.V., 1981, Flow through fractures, Water Resour. Res., v. 17, n. 1, 191-199.
- Nur, A., 1982, The origin of tensile fracture lineaments, Jour. of struct. Geo., v. 4, 31-40.
- Priest, S.D. and Hudson, J.A., 1976, Discontinuity spacings in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 13, 135-148.
- Snow, D.T., 1970, The frequency and apertures of fractures in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v. 7, 23-40.
- Udagawa, Y., 1993, Examination on the evaluation of rock heterogeneity by fractal property of rock fracture, J. Japan Soc.

이병대, 추창오, 이인호, 정교철, 함세영, 조병욱

Dam Eng., v. 10, 20-28.

Walsh, J.J. and Watterson, J., 1993, Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies, Jour. of struct. Geo., v. 15, 1509-1512.

투 고 일	2002년 7월 10일
심 사 일	2002년 7월 11일
심사완료일	2002년 8월 22일

---

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

추창오 : 경북대학교 지질학과  
702-701, 대구시 북구 산격동  
Tel : 053-950-7317  
chooco@knu.ac.kr

이인호 : 한국지질자원연구원 환경지질연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30번지  
Tel : 042-868-3089  
ihlee@kis.kigam.re.kr

정교철 : 안동대학교 지구환경과학과  
760-740, 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel : 054-820-5753  
jeong@andong.ac.kr

함세영 : 부산대학교 지구환경시스템학부  
609-735, 부산시 금정구 장전동 산 30  
Tel : 051-510-2252  
hsy@pusan.ac.kr

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