

## 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(I) - 수문학 및 암반수리학적 접근을 중심으로

이희근<sup>1)</sup> · 전효택<sup>1)</sup> · 이종운<sup>2)</sup> · 이대혁<sup>2)</sup> · 류동우<sup>2)</sup> · 오석영<sup>2)</sup>

### A Study on the Variation of the Surface and Groundwater Flow System related to the Tunnel Excavation in DONGHAE Mine Area (I) - Concern on Hydrological and Rock Hydraulic Approach

Hi-Keun LEE, Hyo-Taek CHON, Jong-Un LEE, Dae-Hyeok LEE,  
Dong-Woo RYU, Seok-Young OH

**ABSTRACT** The purpose of this study was that manage effectively the excavation process of the transport tunnel in DONGHAE mine area by investigating the variation of the surface and groundwater flow system around the tunnel and neighbouring villages. Thus, the effect of excavation and water-proofing process on the water system has been studied through the naked eye survey of the tunnel and the surface outcrop, joint survey, core drilling, the measurement of the surface water quantity, evapotranspiration and precipitation analysis, rock hydraulics approach, the pressure test of boreholes, the variation of the water level, and finally the numerical analysis. From above approaches, we derived the conclusion that the exhaustion of the surface water was not caused by the tunnel excavation but by the continuous drought during 1 year, and that the effect of the excavation on the groundwater system was minimized by effective water proofing process.

## 1. 서 론

최근 지하공간의 개발과 더불어 발생하는 제 문제 중의 하나가 지표수 및 지하수 시스템의 변화문제이다. 지하공간의 굴착은 굴착면 주위의 지하수 유동 체계를 변화시켜, 즉 터널내로의 지하수 유동 유발, 지하수 수두 분포의 변화, 지표수 고갈, 지하수 유동 방향의 변화 등을 가져온다. 터널내로 유출되는 용출수는 터널굴착 시공 중 굴착장비 운영을 저해하거나, 작업장을 교란시켜 공사에 지장을 초래하기도 한다. 또한 터널 상부의 지반에서 지하수 유출에 따른 현지응력의 변화로 말미암아 지표침하 문제를 유발시킬 수 있고, 그에 따라 하천수나 계곡수의 지표수를 고갈시킬 수 있다.

본 연구는 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사로써 석회석 운반

터널 굴착공사와 관련한 방수처리와 지하수의 유동변화 및 인근부락과 하천에 미치는 수질환경영향을 파악함으로써 터널 굴착과정을 효율적으로 관리함에 그 목적이 있다.

직경 4.5 m TBM 공법으로 공사 진행 중, 1구간 시점 기준 1680~1900 m( 1860 m에서는 지표하 90 m) 통과시 주 절리에서 지하수가 용출되어 TBM 작업이 곤란해지고 여러 가지 시공 작업을 저해하였다. 또한 1994년도 봄부터 시작된 가뭄과 겹쳐 터널이 통과하는 계곡중 하나인 강원도 삼척군 미로면 내미로리 천은사 계곡 주위의 지표수가 고갈되어 터널공사로 인한 영향이라는 민원이 제기되었다. 공사의 원활한 지속을 위해 지하수 용출대에 대한 예폭시 그라우팅을 수행하여 용

- 1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수
- 2) 학생회원, 서울대학교 자원공학과 대학원 과정

출을 줄인 뒤 다시 시멘트 그라우팅 및 슛크리팅 보강을 통해 완전 방수처리 하였다. 천은사 계곡 지표에서도 32공에 달하는 지표 그라우팅을 수행하였다.

연구를 위해 천은사 계곡을 통과하는 터널 1000여 m 구간에 대한 육안관측 결과 출수 구간을 확인하였고, 절리조사를 통해 불연속면의 특성을 파악하였으며, 또한 천은사 계곡의 지표노두조사를 통해 지표지질을 파악하였다. 천은사 계곡의 지표수 유동상황을 판단하기 위해 투사법을 이용하여 연구기간 동안 개략적인 지표수량 조사를 실시하였다. 지하수 유동 전산 해석을 위한 입력자료로서, 천은사 계곡 인근의 지표 토사의 투수성을 알기 위하여 크게 농경지와 산림 지역으로 나누어 지표 투수계수를 측정하였으며, 삼척지역 기상자료를 입수하여 증발산량 및 물수지 분석을 수행하였다. 지하 지질상황을 알아보기 위하여 4개의 시추지점을 지표지질 상황에 적합하게 선정하여 그 중 2개의 시추공을 통해 구한 암석코어를 이용하여 역학적 실험을 수행하였으며 시추코어를 감정하였다. 시추공에 지하수위계를 장착하여 지하수위변화를 계측하였다. 시추공을 이용한 현지 암반 수압시험을 수행하여 기반암의 투수성을 구하였다. 본 유역(조사지역)의 유동상황을 모사(Simulation)하기 위하여 지하수유동 프로그램 MODFLOW를 이용하였으며, 입력자료는 현지실험자료를 이용하였다.

본 조사는 크게 지표수문학적 조사, 암석역학을 이용한 암반 수리학적 조사 및 수리지구화학적 조사로 나누어 서로 보완적으로 연구하였다. 강우량, 지표 유출량, 증발산과 같은 손실량의 분석은 수문학적 접근 방법에 의해 이루어졌으며 수압시험을 통한 투수계수 및 절리 특성 조사를 통한 결과의 분석은 암반수리학적 접근에 의해 이루어졌고, 물시료의 이화학적 분석 및 해석을 통한 물-암석 반응 및 수질환경 영향평가는 수리지구화학적 연구에 의해 이루어지며 이들의 결과를 이용하여 종합적으로 유동 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 수리지구화학적 연구 결과는 제 II 보에서 기술하였다.

## 2. 지형 및 터널개요

본 조사지역은 강원도 삼척시 미로면의 내미로리 천은사 계곡으로서 태백산맥의 줄기인 두타산(1352.7 m)을 중심으로 북쪽은 고봉인 선운산(668.0 m)을 따라 능선이 펼쳐져 있으며 이 능선을 가로지르면 터널의 시점

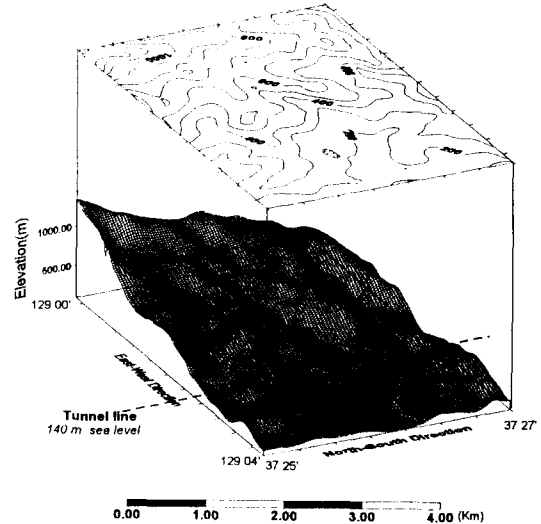


Fig. 1. The topographical map and 3-D view of the studied area.

부인 동해시의 쌍용시멘트 철산이고 남쪽 능선을 가로지르면 죽방골이 형성되어 있다. 두타산에서 발원하는 양 능선은 북쪽능선은 NE방향으로 이어지며 남쪽능선은 두타산에 가까이에서는 북쪽능선과 마찬가지로 NE방향으로 이어지다가 EW 방향으로 뻗어있다.

수계는 높은 산들의 지형과 연관되어 북쪽능선과 남쪽능선으로 둘러싸인 골짜기로 유입되는 형태를 띄고 있으며, 해발 약 750 m 지점에서 발원하여 내미로리 석탄 마을까지 거의 단일 수계를 형성하고 있다. 산악 지형상 북쪽 능선과 남쪽능선을 넘어 형성되어 있는 수계는 지하수위 분수령에 의해 분리되어 있어 본 수계에 영향을 끼치지 않으리라 사료된다.

본 지역의 등고선도와 3차원적 지형형상을 도시하면 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 EW방향으로 뻗어있는 가운데 부분의 두 능선이 위에서 언급한 북쪽과 남쪽능선이다. 따라서 천은사 계곡은 남북 방위자료로 표시하면 NS 437~439 km 사이에 존재한다. Fig. 1에서와 같이 터널선은 남북방향에 평행하다.

터널은 총 13.6 km 로서 조사지역을 통과하는 터널은 TBM 방식으로 굴착되었다. 터널의 직경은 4.5 m이고 노반공사를 통해 1.2 m 가량을 피복 하였다. 터널바닥에서 용출되는 지하수를 억제하기 위해 다짐흙 대신 콘크리트로 노반공사를 수행하였고 천은사 계곡 균열대를 만나는 200 여 m 구간에서는 터널벽면에 대해 에폭시 그라우팅을 수행하여 방수처리를 하였다. 터널은

해발 110 m를 따라 구배를 0.1~0.7%로 하여 용출수를 흘려보내게 유지하고 있다. 천은사 계곡을 통과하는 터널 직상부 덮개암은 대략 115 m 가량으로서 지표와 터널사이의 암층은 터널 가까이에서는 삼화화강암이고 그 위 지표까지는 석회암층이다.

### 3. 지질 및 대수층의 종류

#### 3.1 지표지질

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 변성암류인 원남층군과 고생대의 오오도비스기인 대석회암층군(Great Limestone Group)으로 분포하며, 류라기의 대보화강암이 큰 조산작용과 화강암화 작용을 수반하며 관입한 후 세립-중립의 흑운모 화강암이 소량 관입되어 분포하고 있다. 원남층군은 안구상 편마암, 호상편마암, 운모편암 및 결정질 석회암과 셰일 등으로 구성되며 대석회암층군의 하부는 주로 규암, 셰일등으로 구성되며 상부는 두께 약 500~1000 m의 두꺼운 석회암층으로 구성되어 있다.<sup>1)</sup>

조사지역내 세부적인 지표지질 상황을 표시하면 Fig. 2와 같다. 지질연대가 불분명한 삼화화강암(Gs)은 두타산 아래 북동 지역을 광범위하게 덮고 있고, 두타산에서 천은사 수십여 미터 앞까지 본 조사지역의 지역

을 대부분 차지하고 있는 지층이다. 지표노두 육안 조사 결과 지표지질도의 경계선이 정확히 들어맞음을 확인하였다. 대부분 지질연대는 고생대 캄브리아기와 오오도비스기에 생성된 암층이다. 조선누층군은 주로 규암과 셰일로 된 하부의 양덕층군과 두꺼운 석회암층으로 구성되어 있는 상부의 대석회암층군으로 양분되는데, 본 지역에서는 대부분의 층이 대석회암층군에 속한다. 조선누층군의 대석회암층군의 누층순서대로 본 조사지역의 지층이 정합으로 덮고 있어, 그 순서가 역전되는 큰 습곡작용이나 단층작용은 없었던 것으로 사료되며, 실제 지표답사결과 그러한 노두는 발견되지 않았다. 따라서 대단위 습곡작용이나 단층작용으로 인한 파쇄대의 발생은 지질이력으로 보아 없는 것으로 사료되며, 단지 조산작용으로 인한 계곡군열대만이 유일한 대수층으로 작용하고 있으리라 판단된다.

Gs가 Ep로 바뀌면서 지표지질선은 남북방향으로 연해서 발달한 형태를 보이며 이는 Ew, Od, Odu등에서도 마찬가지로 1 km 이내의 좁은 폭으로 남북방향으로 길게 발달되어 있는 현상을 보이고 있다. Odu를 지나 Omg가 광범위하게 발달되어 있다. Ew 지역에서 지표 하천수로 복귀된 계곡수는 내미로리 석탄마을에서 다른 수계와 합쳐서 폭 3 m 이상의 큰 하천으로 바뀌어 내미로리를 따라 흐르게 된다. 따라서 지표지질상황과

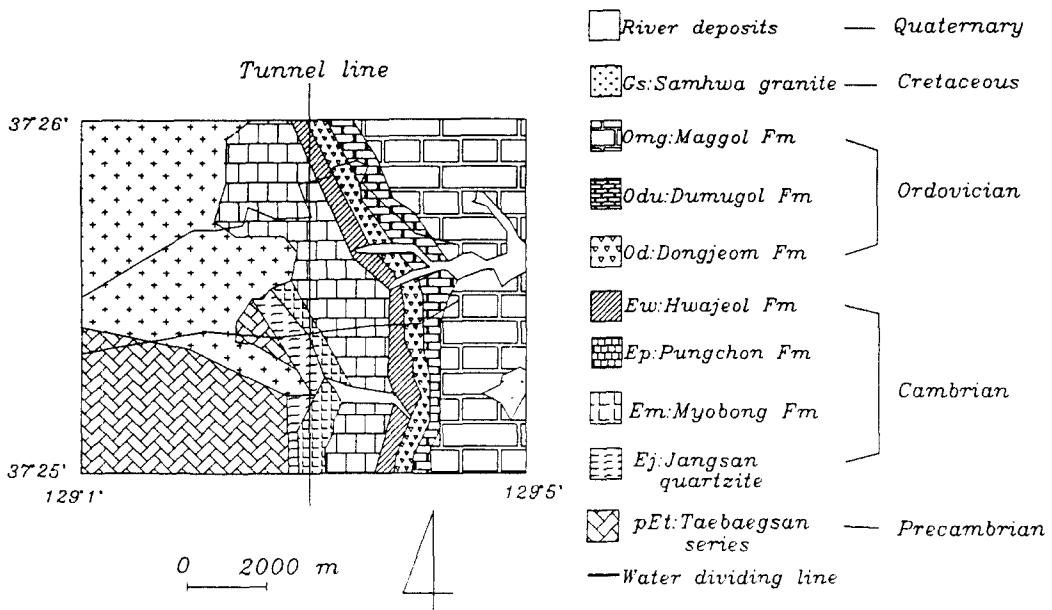


Fig. 2. The surface geological map of SAM-CHUK area including the experimental basin.

지표수 유동양상을 관찰해 보았을 때 풍촌 석회암층인 Ep지역에서 복류수의 유동양상 및 지하암반으로의 지표수의 침투량, 증발산 같은 손실량의 물 수지 분석이 중요하게 대두되었다.

### 3.2 탄산염암 대수층(Carbonate rock aquifer)

본 조사지역의 대수층으로 작용하고 있는 층은 탄산염암 석회암층의 대수층이다. 조사지역의 유역중 지하수 함양지역을 대부분 차지하고 있는 화강암층은 시추코아 분석과 터널내 조사결과 준대수층(Aquitard)으로서만 기능을 할 뿐이라고 판단된다. 즉 화강암층의 지하수 유동특성은 절리와 같은 불연속면에 의해 좌우되며 국부적인 함수대만이 존재할 것으로 사료된다. 본 터널의 바로 위는 화강암층이고, 그 상부를 정합으로 탄산염암 대수층인 석회암이 덮고 있다.

탄산염 대수층은 크게 3가지 종류로 구분할 수 있다. 확산유동탄산염대수층(Diffuse-flow carbonate aquifer)은 공동 즉 큰 채널로의 용해작용이 거의 없다. 이들은 어느 정도까지는 균질하다. 자유유동탄산염 대수층(Free-flow carbonate aquifer)은 확산 지하수 함양을 받지만 대부분의 유동이 발생하는 잘 발전된 용해채널이 존재한다. 이 자유유동탄산염 대수층에서 지하수 유동은 어떤 피암층에 의해서가 아니라 용해관(Solutional conduits)의 위치를 결정하는 층리면과 균열에 의해서 좌우된다. 피압유동탄산염대수층(Confined-flow carbonate aquifer)은 탄산염암에 용해동굴이 형성되어 있지만 투수계수가 낮은 비탄산염층이 지하수 유동방향을 좌우한다.<sup>2)</sup>

본 조사지역의 시추공 3과 4번공의 시추코아를 조사함으로써 대수층 형태가 확산유동탄산염대수층이라는 결론을 얻었다. 확산유동대수층은 전형적으로 백운암질 암석이나 혈암질 석회암(Shaly limestone, 거의 용해성이 없음)에서 발견된다. 지하수 거동은 거의 절리나 층리면을 따라 일어나는데 작지만 용해작용을 받는다. 흐르는 지하수는 대수층 어느 영역에서도 농집되지 않고, 공동이 존재한다 하더라도 작고 상호연결되지 않는다. 이는 본 조사지역의 시추공 #3과 #4번공 시추코아에서 발견되는 충식석회암지대에 해당한다. 공극율은 다른 암종에 비해 크고 용해작용을 받아 공동이 형성되어 있지만 상호연결되어 있지 않아 유동채널로서의 효과는 발휘하지 않고 있으리라 사료된다. 배수는 수많은 작은 샘이나 조금씩 흘러나오는 누출면(Seeps)을 통해 발생

한다. 실루리아기 백운암 대수층이 그 좋은 예이다. 우물시험을 통해 수평지하수 유동이 백운암의 여러 층리면을 따라 발생하고 있었고 수직적인 함양이 균열을 따라 일어날 수 있다. 층리면은 시추공 지구물리학적 검층에 의해 확인될 수 있다. 지하수 유동이 폭넓은 층리면을 따라 발생하기 때문에 우물 산출을 또한 어느 지역에서나 일정하다.

### 3.3 지하지질

지하지질 상황을 판단하기 위해 본 조사지역내 #3 및 #4공 2개의 시추공의 시추코아를 분석하였다. 이러한 시추공은 시추코아를 회수하고 회수된 시추코아를 이용하여 지하의 지질상황을 지표지질상황에 부합하여 비교하였고, 암반의 양질성을 판단하는 RQD (Rock Quality Designation), 절리사이의 간격 등을 구하고 실험실 실내시험을 통해 여러 가지 역학적 특성을 구하였다. 또한 이들 시추공은 수압시험을 실시하기 위한 시험공으로 사용되었으며 시험후 Casagrande tip을 공내에 설치하여 계속적인 지하수위 변동상황을 조사하는데 이용하였다.

Fig. 3은 본 천은사 계곡의 유역경계선(Dividing line)과 지표지질도를 선운산, 두타산, 천은사, 내미로리 석탄마을과 터널선등의 주요 지점과 함께 나타낸 그림이다. 또한 #3과 #4의 시추공 위치를 나타내었다. 3번, 4번공의 회수된 시추코아의 암종을 확인하여 작성한 지질단면도를 AA' 선을 기준으로 아래 부분에 나타내었다.

모든 층은 거의 정합으로 두타산에서 석탄마을에 이어지는 지형구배와 비슷한 경사로 덮고 있다. Gs 화강암층이 기저를 이루며 층이 단층이나 습곡으로 역전되지 않고 지질연대순으로 순서에 따라 형성되어 있다. 따라서 본 조사지역은 단층이나 습곡 같은 지질작용을 크게 받지 않은 것으로 판단된다.

용해작용을 크게 받은 곳을 시추시에는 이수가 갑자기 대량으로 소비되거나 타격식 시추의 경우 속 빠지는 경우가 발생하나 #3과 #4의 시추에서는 그러한 경우가 발생하지 않고 시추코아의 회수율이 100%에 가까운 것으로 보아 용해동굴과 같은 구조는 없으리라 판단되었다.

시추공 #3의 경우, 지표지질도상으로는 화절층(Ew) 지역으로 이 화절층은 충식석회암, 녹회색 이암 및 회색 세일로 구성되어 있고 그 하부에 풍촌석회암층(Ep)이 존재한다. 6 m 정도까지 공벽붕괴의 위험성이 있었고, 세일층에서 시추의 어려움을 겪었으나 용해동굴의

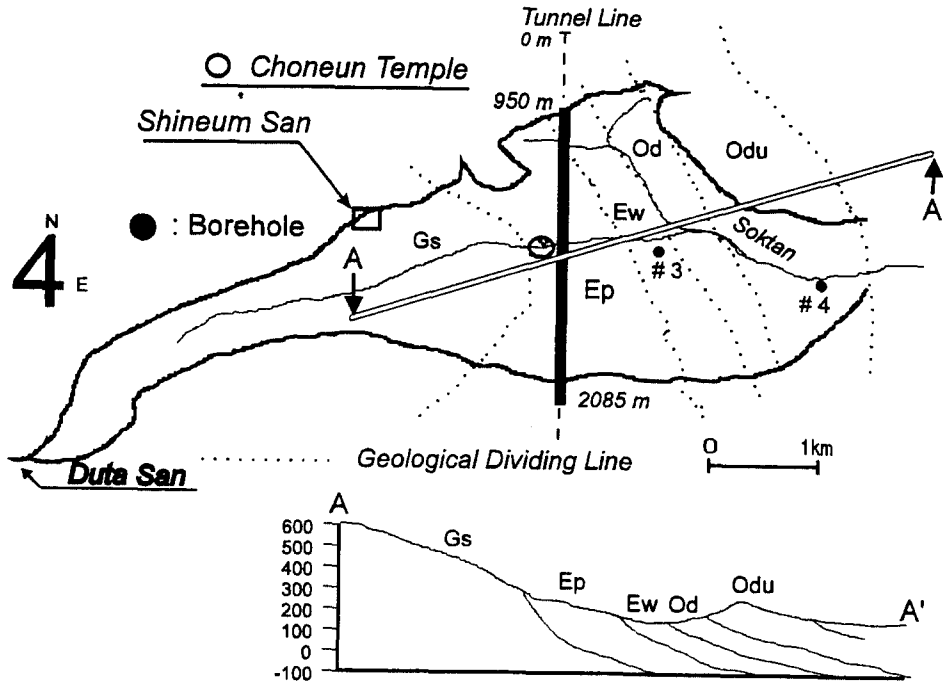


Fig. 3. The studied experimental basin marked by the surface and crosssectional geology.

흔적은 발견되지 않았다. 심도 5 m 이하는 신선한 경암 이고, 파쇄대는 존재하지 않았다. 이 시추공 지역은 계곡 파쇄대 지역과는 떨어져 있는 곳으로 추정되며, 5내지 6m 심도 이하에서는 암이 극히 양호해 강우에 의한 지표수 침투가 있다 하더라도 많은 양이 지표 가까운 투수층에서 유동이 형성되는 복류수가 되어 지형구배에 따라 마을 쪽으로 흐르는 물이 형성될 것으로 사료되었다. 특히 30여 m 를 기점으로 그 이하에서는 Ep지역의 석회암이 우세하게 발달하고 있다. 편광현미경을 통한 시추 코아의 광물감정 결과 다수의 변성광물이 발견되었다.

시추공 #4의 경우, 지표지질도 상으로 두무골층인 회색 충식 석회암(Odu)상에 위치하고 있는 본 공은 충식 석회암이 전형적으로 나타나고 있다. 벌레 먹은 구멍처럼 부분 부분(지하수 유동경로에 해당하는 부분에서) 1~3 cm 크기로 발달해 있다. 이 구멍에는 석영 암주가 발달해 있어 지속적인 지하수 유동이 일어나고 있음을 시사해 주고 있다. 20 m 근처부터 동점층에 해당하는 Od(규암)가 협재되어 호상으로 나타나고 있다. 심도 35 m를 기점으로 하여 충식의 정도가 현저히 저하되어 충식되지 않은 백운암이 계속 나타나고 있다. 이러한

사실은 지하수 유동의 범위가 심도 30 m까지의 천부에서만 주로 이루어지고 있다는 사실을 반증하고 있다. 광물학적으로 시추공 3번보다 더 다양한 다수의 변성 광물이 존재하는 규산질 석회암/돌로마이트인 것으로 판단된다.

#### 4. 절리조사 및 암반공학적 접근

##### 4.1 시추코아를 이용한 절리간격 및 계산 RQD분석<sup>3)</sup>

절리의 발생이 코아에서 랜덤하다고 할 때, 시추공 #3에서 심도 1~14 m까지의 암편을 이용하여 평균불연속면 간격을 추정하였다. 14~51 m 구간에서는 불연속면 간격이 1 m 이상이였다.

시추길이(L)가 14 m였고, 10 cm보다 긴 코아 27개였다. 평균불연속면 간격을  $\bar{x}_i$ 라 하고, 빈도수를  $\lambda_i$ 라 하면,  $\lambda_i = 1/\bar{x}_i$ 이다. 분리된 코아의 갯수  $n_{ini}$ 는 불연속면의 갯수와 같으며 다음과 같다.

$$n_{ini} = \lambda_i L = \frac{14}{x_i} \tag{1}$$

코아의 길이가 0.1 m보다 클 확률  $P(x_i > x)$ 는 (0.1 m

보다 긴 것의 갯수/전체갯수)로 나타낼 수 있고, 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.<sup>1)</sup>

$$P(x_i > x) = e^{-\lambda x} \quad (2)$$

따라서  $x$  가 0.1 m이면 다음과 같다.

$$\frac{27\bar{x}_i}{14} = e^{-0.1/\bar{x}}$$

위식을 풀어 쓰면  $\bar{x}_i = 0.5185e^{-0.1/\bar{x}}$ 과 같이 쓸 수 있다. 위 식의 해를 구하기 위해 반복법을 사용하였다. 그 결과  $\bar{x}_i = 0.405$  m,  $\lambda_i = 1/0.405 = 2.47$  m<sup>-1</sup>이다.

TRQD<sub>i</sub>는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$TRQD_i = 100e^{-\lambda_i(1 + \lambda_i t)} \quad (3)$$

여기서,  $t$ 는 문턱 값으로써 RQD를 구하기 위한 하한 기준값이다. 보통의 RQD는 이  $t$ 를 0.1 m 로 계산하기 때문에 0.1 m 값을 대입하고 구해보면 TRQD<sub>i</sub>는 97%이다.

위와 같은 방법을 통하여, 시추공 #4에 대해서도 조사한 결과 심도 28 m 까지는  $\bar{x}_i = 1.02$  m,  $\lambda_i = 1/1.02 = 0.98$  m<sup>-1</sup>였고 TRQD는 99%였다. 심도 47 m까지는  $\bar{x}_i = 0.985$  m,  $\lambda_i = 1.02$  m<sup>-1</sup>였다.

시추공 #3과 #4의 시추코어에 대한 불연속면 간격 조사 결과에 준하여 터널내에서 절리조사를 통해 구한 불연속면 간격과 거의 일치하여 이 지역의 암의 절리패턴은 지표근처에서 터널이 위치한 심도까지 절리분포 패턴이 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서 위의 절리 조사 결과와 지표절리조사 결과 및 출수대 터널벽면의 절리조사 결과를 비교하면, 유역 전체 암반의 절리패턴을 비교할 수 있으리라 사료된다.

지표근처에서 쉽게 볼 수 있는 인장절리(Tension joint)나 판상절리(Sheet joint)에서는 그 틈새 간격이 커서 많은 지하수 유동이 발생할 수 있고 대개 지하수가 다량으로 흐르면서 남겨놓는 철수산화물이 육안 관찰 가능하다. 본 시추 코어의 절리면 육안관찰결과 그러한 흔적은 거의 찾아볼 수 없었고 대부분의 절리가 대부분의 montmorillite계열의 충진물로 충전되어 있는 전단절리로 지하수 유동량이 많지 않으리라는 것을 알 수 있었다. 또한 시추공 #4번 두무골층 충식석회암에서도 그 충식범위가 크지 않아 완전한 유동경로로서 작용하기에는 미흡하다는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 지표 노두 및 터널 벽면의 절리조사 결과

터널의 고도는 해발 110 m(m as sea level)이고 조사지역의 북쪽능선을 가로질러 통과하는 지점은 동해시 철산 시점부로부터 길이가 약 950 m이고 남쪽능선을 통과하는 지점은 터널기점부로부터 2085 m로서 그 폭이 약 1 km 정도이다. 그러나 양 능선에서 계속으로의 구배가 천은사 지점에서 북쪽능선의 경우 38%(350:900), 남쪽능선의 경우 37%(413:1125)로서 유역의 지하로 침투된 침투수는 계속중심선쪽으로 집중될 가능성이 크다. 천은사 지점은 철산 시점으로부터 1830 m 떨어진 지점에 해당한다.

토목공사중 TBM 굴착에서 만난 용출구간은 철산 시점으로부터 1680 m와 1900 m 사이인 약 200여 미터에 해당하는 구간이다. 이 용출구간은 터널 벽면의 절리조사 결과 파쇄대가 아니라, 절리틈새(Aperture)가 대략 1~3 cm 정도로 집중적으로 용출되는 우세절리가 발달한 구간인 것으로 판명되었다. 절리 틈새는 절리충진물이 존재하지 않았고(이는 용출시에 씻겨 나갔을 수도 있다) 절리벽면은 풍화 흔적이 보이지 않은 깨끗한 절리였다. 절리간격은 대개 1 m 이상으로서 절리 사이의 암석은 신선암이었다. 절리의 경사와 주향은 모든 절리가 거의 동일하여 평균 70°N60°E(경사의 경사방향은 측정할 수 없었음)로서 매우 급한 경사를 띄고 있었다.

터널내 지질은 복잡한 협재물을 제외하고 크게 두 가지의 암종으로 나타났다. 철산 시점부에서 1700 m 즉 조사지역의 북쪽능선을 통과하기 전까지는 석회암이 주류를 이루고 있었고 1700 m 이후에는 2000여 m까지는 화강암지대로 뚜렷이 구분되었다. 이 화강암은 지표지질도와 비교 분석시 삼화화강암인 것으로 추정되며 이는 Fig. 3의 지질단면도를 도시하는데 이용되었다. 따라서 지표지질도상으로 터널은 조사 지역내에서 Ep지역 즉 풍촌석회암지대를 통과하는 것으로 표시되지만 실제 지하 110 m 심도하에서는 터널이 삼화화강암을 통과하는 것으로 결론지을 수 있다.

천은사 계곡의 지표에 발달한 지표절리의 주향과 경사 조사결과와 터널내 용출구간에서의 측정된 주향/경사 결과를 종합하여 등면적 투영망(Equal area stereonet)에 나타낸 결과는 Fig. 4와 같다. 투영된 자료로부터 평균 불연속방향을 구하여 그 빈도차에 따라 절리군을 구분하였다. 주절리군은 절리군 1이며 부절리군은 두개가 더 있어 이를 각각 절리군 2 및 절리군

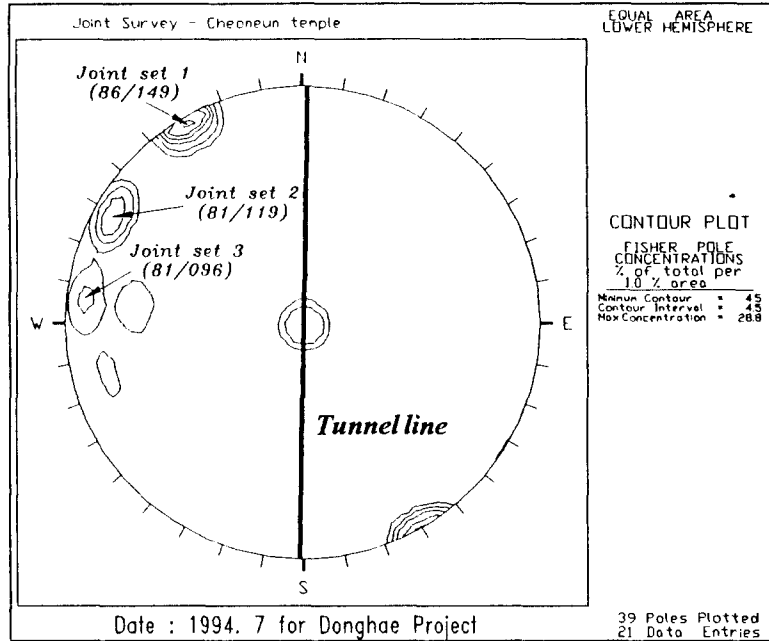


Fig. 4. The stereonet of measured joint directions at the tunnel and surface outcrop.

3으로 지칭하였다. 각각의 절리군의 경사 및 경사방위는 다음과 같다.

절리군 1(Joint set 1) : 경사 및 경사방위 - 86°/149°, 주향 및 경사 환산 -N59°E/86°SE

절리군 2(Joint set 2) : 경사 및 경사방위 -81°/119°, 주향 및 경사 환산 -N29°E/81°SE

위의 결과는 앞에서 설명한 것처럼 터널내 용출구간에서만 주 절리방향을 구한 값 70°/N60°E과 거의 동일하다. 이 주향은 두타산에서부터 형성되는 계곡의 발달 방향과 거의 동일하고 경사가 80° 이상인 절리가 대부분인 관계로 터널과 거의 수직으로 만나는 방향으로 발달하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 암석이 생성된 후 영향력 있는 다른 지질학적 습곡, 단층 작용을 받은 흔적이 보이지 않는 것으로 보아 계곡 양쪽 산이 조산 작용을 받을 때 일어나는 보통의 계곡 균열대인 것으로 판단된다.

따라서 위의 결과를 이용하여 계곡에 수직으로 즉 터널 종단면도를 통해 용출 구간 220 m 상부의 균열대의 지표 폭을 구하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 아래 부분의 색칠부분이 터널의 용출구간이고 용출구간이 아닌 터널선은 점선으로 나타내었다. 2개의 주 절리군의 경사가 86° 및 81°이므로 지표까지의 덮개암의 깊이 115

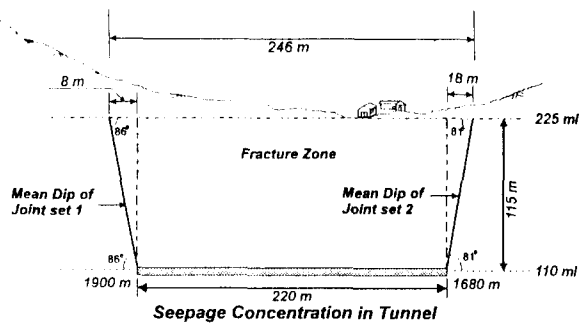


Fig. 5. The interval of the seepaged concentration in the crosssection along the tunnel axis and the predicted surface fracture zone.

m를 이용하여 그림과 같이 지표 균열대 폭을 구할 수 있다. 구한 지표균열대 폭은 246 m로서 터널 근처 암반 균열대에 비해 12% 더 길다.

터널내부 220 m 용출구간에 대한 불연속면 간격조사를 실시하였다. 조사선(Scan line)의 길이는 37.65 m였으며 평균 불연속면의 간격은 1.255 m였다. 전체 불연속면 간격을 추정하기 위해서는 다음 공식을 이용한다. 불연속면의 분포가 음지수분포(Negative exponential distribution)를 따른다고 할 때 조사선에

서 구한 평균불연속면 간격을  $\mu_{XL}$ 이라 하고 아래 식으로부터 전체불연속면 빈도 추정치  $\lambda$ 를 구해서 그 역수를 취하면 전체 불연속면 간격 추정치가 된다.<sup>3)</sup>

$$\mu_{XL} = \frac{1 - e^{-\lambda L} - \lambda L e^{-\lambda L}}{\lambda(1 - e^{-\lambda L})} \quad (4)$$

여기서,  $\mu_{XL}$ 은 평균불연속면의 간격(m),  $\lambda$ 는 전체 불연속면 빈도 추정치( $m^{-1}$ ), L은 조사선의 길이(m)이다. 상기 방정식의 해는 Newton second order 방법에 의해 구할 수 있다. 구한 전체 불연속면 간격의 추정치는 1.255 m로서 시추공 4호공에서 구한 값 1.02, 0.98과 거의 동일함을 알 수 있고, 또한 3호공의 경우 심도 14 m까지의 자료를 제외하고 그 이상의 심도에서의 간격 값과 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 조사지역의 불연속면 간격이 지표에서 50 m 이내에서의 값과 심도 110 m인 터널 내에서 관측한 값이 서로 유사하다는 결론으로부터 터널내 절리패턴은 지표까지 이어지고 있을 정도로 균일함을 알 수 있고, 이러한 절리 불연속면 간격의 추정치로부터 구한 RQD가 95% 이상이라는 결과로부터 암반이 터널까지 전체적으로 아주 양호한 암반이라는 잠정적인 결론을 얻을 수 있다. 이러한 절리자료는 차후 컴퓨터를 이용한 유동 시뮬레이션 과정에서 중요한 입력변수로 사용된다.

기반암의 투수계수 자료로부터 계곡균열대를 제외한 암반은 대수층으로서의 기능을 기대하기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 계곡균열대의 절리경사가 80° 이상으로 급하다는 사실로부터 계곡 및 하천과 관련된 본 유역(조사지역)의 유동량 및 지하심부로의 침투현상은 주로 계곡균열대에 의해 좌우되리라는 결론을 얻을 수 있다.

터널굴착시 계곡균열대 즉 터널내 용출대의 절리간격이 1 m 이상이었으며, 절리틈새(Aperture)가 큰 몇 개

의 절리에서 용출이 있었다는 사실로부터, 그 몇 개의 절리에 대한 적절한 방수처리로 방수 그라우팅 및 슛크리트에 의한 방수효과는 양호한 것으로 판단되었고, 실제 터널벽면에서의 유출은 거의 없음을 관측하였다.

#### 4.3 시추코아 실험실 시험결과

전술한 시추공에서 샘플링한 코아들에 대한 암석의 역학적 성질을 알기 위해 실험실 실험이 이루어졌다. 비중, 공극율, 탄성파속도 등의 기본적인 물성을 구하였다.

3호공의 시추코아들은 전술된 바와 같이 사암 및 역암이 혼재되어 있는 층, 셰일층, 석회암층 등으로 크게 대별되며, 각 층을 대표하는 무결암 부분을 샘플링하여 실험실 시험을 시행하여 Table 1에 나타내었다. 심도 4 m에서 채취된 역암은 공극이 육안으로 확연히 보일 정도로 상당히 컸으나, 공극율 측정 결과 예상보다는 작은 값인 3.43%를 보였다. 이는 지하수의 유동경로 혹은 포수체로서의 역할을 할 수 있는 유효공극, 즉 상호연결된 공극이 상대적으로 작다는 것을 암시한다. 탄성파 속도가 작은 값을 보이는 것은 낮은 비중과 전체적으로 큰 공극 및 공극율에 기인한다. 풍화 정도에 따라 본 지역의 천층부(1~5 m)는 침투층으로서의 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 추정된다. 5~14 m에서 채취된 셰일층은 낮은 공극율과 높은 탄성파 속도를 보여 주고 있다. 또한 전술된 자료에서 나타난 높은 RQD와 TCR의 값으로 보아 5~10 m 셰일층은 난투수층으로서의 역할을 할 것으로 추정된다. 이하 심도에서 샘플링된 시추코아의 물성치들은 대체로 낮은 공극율과 높은 탄성파 속도를 보여주고 있다.

심도가 깊어질수록 지표천층에 비해 공극율은 10배 이상 작은 값을 보이고 있다. 절리틈새와 절리표면 특성의 고려가 지하수 유동을 좌우하는 주 요인이지만,

Table 1. The properties of intact rocks for borehole No. 3

Table of Rock Propetry Data (Borehole No. 3)

| Rock type | Depth (m) | Specific gravity | Porosity (%) | Wave Velocity (m/sec) |        | Dynamic Young's Modulus $10^6(kg/cm^2)$ | Dynamic Poisson's Ratio |
|-----------|-----------|------------------|--------------|-----------------------|--------|---|-------------------------|
|           |           |                  |              | P wave                | S wave |   |                         |
| Quartzite | 1-4       | 2.51             | 3.43         | 3670                  | 1980   | 4.34                                    | 0.30                    |
| Shale     | 5-14      | 2.86             | 0.66         | 5560                  | 2700   | 8.21                                    | 0.38                    |
| Limestone | 14-32     | 2.80             | 1.46         | 5450                  | 2505   | 7.74                                    | 0.36                    |
| Dolomite  | 32-51     | 2.62             | 0.31         | 4795                  | 2185   | 5.33                                    | 0.37                    |

\*presented values are averaged on each rock type



Table 2. The properties of intact rocks for borehole No. 4

| Rock type       | Depth (m) | Specific gravity | Porosity (%) | Wave Velocity (m/sec) |        | Dynamic Young's Modulus $10^6(\text{kg/cm}^2)$ | Dynamic Poisson's Ratio |
|-----------------|-----------|------------------|--------------|-----------------------|--------|--|-------------------------|
|                 |           |                  |              | P wave                | S wave |  |                         |
| Wormy limestone | 4-5       | 2.74             | 2.26         | 4940                  | 1919   | 4.19   | 0.41                    |
| Wormy limestone | 8-20      | 3.00             | 5.07         | 3710                  | 2100   | 5.94   | 0.26                    |
| Wormy limestone | 23-35     | 2.90             | 4.56         | 4270                  | 2200   | 6.12   | 0.36                    |
| Wormy limestone | 41-47     | 2.79             | 0.36         | 4940                  | 2230   | 5.90   | 0.37                    |

단순히 공극율만으로 고려할 때, 그만큼 지하수 유동은 점점 어려워지고 있음을 알 수 있다. 암반의 절리패턴이 터널이 통과하고 있는 지하 100 여 m 심도까지 일정하다는 앞절의 결론으로부터 이러한 상황은 심부까지 계속되리라 판단된다. 더불어 터널에 가까워지면서 암종이 화강암으로 바뀌면서는 투수성은 더 작아질 것이라는 것을 알 수 있다. 실제 화강암 지대에 시추된 시추공 #1에서의 시추코어를 시험한 결과 이를 확인하였다.

비중과 P와 속도는 조적이 치밀하고 미세열극이 보이지 않는 천층의 셰일층에서 크고 석회암으로 갈수록 작아지면서 일정한 값을 보이고 있다. 즉 셰일층은 지표천층과 심부의 석회암층의 사이에서 투수성이 낮은 난투수층으로 작용하고 있다는 것을 알 수 있고 절리패턴을 고려하지 않았을 때 지표층의 지하수가 지하로 침투하기가 어렵고 낮은 유동 침투속도를 보이리라 예상할 수 있다.

4호공의 시추코어들은 전체적으로 석회암층으로 천층부인 1~8 m에서 부분적으로 균열이 40 cm 존재한다. Table 2에서 보는 바와 같이, 심도 4~35 m의 시추코어는 대체로 높은 공극율과 낮은 탄성과 속도를 보여주고 있다. 이는 코어표면에 나타난 바와 같이 지하수 유동에 의한 충식이 원인이 될 수 있다. 하지만, 심도 40 m 이하에선 낮은 공극율과 높은 탄성과 속도를 보여주고 있다.

### 5. 지표수문

#### 5.1 증발산량, 손실량 및 물수지 분석

지구전체로 볼 때 지상에 낙하된 降雨의 약 75%는 다시 증발(Evaporation)과 증산(Transpiration)으로

대기로 환원되는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 수문과정에서는 수면에서의 증발과 식물에서의 증산을 함께 취급하는 경우가 많으므로, 이를 통칭하여 증발산(Evapotranspiration)이라 한다. 증발산량의 추정방법 중 기후인자와의 상관관계에 의한 방법은 주로 경험공식에 의한 식물의 소비수량을 계산하는 방법이므로 灌溉용 수량추정 등 실제 식물성장에 필요한 수량을 결정하는데 많이 사용된다. 본 연구에서는 이 방법인 Thornthwaite의 방법을 이용하였다.

잠재증발산량(Potential evapotranspiration)을 추정하기 위한 Thornthwaite 경험식은 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$PE = cT_m^a \tag{5}$$

여기서, PE=잠재증발산량(mm), a,c=계수, T<sub>m</sub>=월평균기온(°C)이다. a와 c 계수는 지역, 위도에 따라 변하나 a의 값은 년열지수(Annual heat index)를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = 67.5 \times 10^{-8} I^3 - 77.1 \times 10^{-6} I^2 + 0.01791 I + 0.492$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left[ \frac{T_m}{5} \right]^{1.51} \tag{6}$$

매일 12시간의 낮의 길이, 월 30일이라 가정하면 위(5)식은 다음과 같이 간단히 표시할 수 있다.

$$PE = 1.62b \left[ \frac{10T_m}{I} \right]^a \tag{7}$$

여기서 b는 위도에 따라 정해지는 조정계수로써 조사지역인 삼척지역을 기준으로 월별로 낮의 길이를 구하고 12시간으로 나누어 조정계수를 구하면 Table 3과

Table 3. The length of daylight time, and adjustment coefficient according to the latitude.

| Month                  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Latitude               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 30                     | 10.4 | 11.0 | 11.9 | 12.8 | 13.6 | 14.1 | 13.9 | 13.1 | 12.3 | 11.4 | 10.6 | 10.2 |
| 37.5                   | 9.8  | 10.6 | 11.8 | 13.1 | 14.1 | 14.8 | 14.4 | 13.5 | 12.4 | 11.2 | 10.1 | 9.5  |
| 40                     | 9.6  | 10.5 | 11.8 | 13.2 | 14.3 | 15.0 | 14.6 | 13.6 | 12.4 | 11.1 | 9.9  | 9.3  |
| Adjustment coefficient | 0.82 | 0.88 | 0.98 | 1.09 | 1.18 | 1.23 | 1.20 | 1.13 | 1.03 | 0.93 | 0.84 | 0.79 |

같다. 식 (6)과 (7)에서 월평균 기온이 0°C이하일 때는 이를 포함시키지 아니한다.

1985년부터 1994년 12월까지 월별 강우량 및 연평균 강우량을 조사하고 위의 Thornthwaite 경험식을 이용하여 잠재 증발산량을 구하여 비교하여 보았다. 1993년 9월부터 1994년 7월까지의 강우량은 월 평균 강우량 110.3 mm에 훨씬 못 미치는 47.4 mm로서 극심한 가뭄이 연속되고 있다는 것을 알 수 있었고, 특히 1994년 7월에는 7월 평균 강우량의 23%에 해당하는 극심한 가뭄을 보이고 있다. 잠재증발산량은 월 평균 62 mm로 매년 평균에 가까운 값을 보이고 있고 최소치를 기록한 1993년과 최대치를 기록한 1990년과는 약 10%의 차이를 보이고 있다.

1994년도 10월에는 태풍으로 인한 집중호우로 예년에 비해 3배 이상으로 강우량이 많았다. 실제 11월과 12월의 현장답사결과 천은사 상부로부터 석탄마을에 이르는 모든 구간의 지표수 상황이 호전되어 많은 지표수가 계곡을 따라 흐르는 것을 볼 수 있었다. 그러나 다시 1994년도 12월부터의 겨울 가뭄으로 말미암아 지표수 상황은 악화되어 1995년도 2월 답사결과 1994년도 7월 중순과 같은 지표수 고갈현상이 보이고 있었다. 따라서 터널이 이 지역의 지표수 고갈을 일으킬 만큼의 지하수계 변동을 일으키지 않았다면, 지표수 고갈은 가뭄과 가뭄의 악순환으로 인한 것이라는 잠정적인 결론을 얻을 수 있었다.

잠재증발산량 가운데 실제증발산량이 어느 정도가 될지를 계산하기 위해 토양 보유수량(SS, Soil-moisture storage capacity)을 42.8 mm로 상정하였다. 최근 10년간 월 평균 강우량 및 잠재증발산량을 입력하여 계산한 것이다. 이에 대한 그림은 Fig. 6과 같다. 월 평균강우량에 대해 증발산량과 토양보유수량을 감한 나머지에 전달의 토양보유수량을 더한 값이 강우의 잉여분(Surplus)이다. 상정한 SS가 월 강우량을 초과하는 경우에는 강우량에서 잠재증발산량을 감한 값

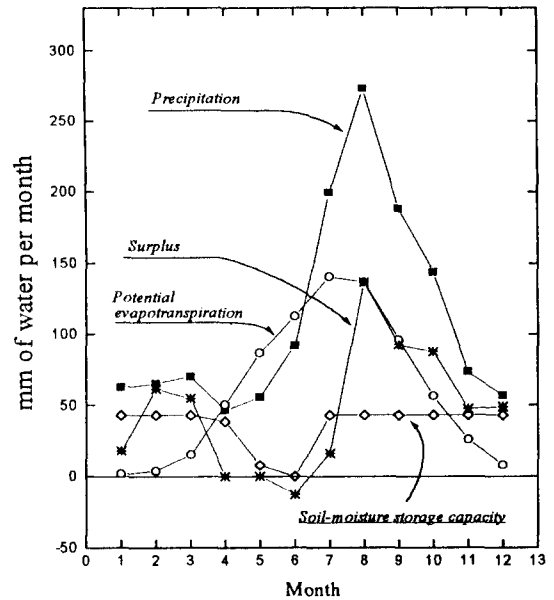


Fig. 8. The relation of the monthly average precipitation and potential evapotranspiration during the last 10 years.

이 실제의 토양보유수량이고, 강우량보다 증발산량이 더 많은 경우에는 그 만큼 토양보유수량의 일부가 이를 보충한다. 토양보유수량이 잠재증발산량에서 강우량을 감한 값을 채우지 못하는 경우는 평균적으로 6월 한 달에만 나타나고 있어 증발가능한 수량이 항상 충분하 공급되는 것으로 나타나므로, 삼척지역에서 실제 증발산량은 총강우량(P)에 대한 잠재증발산량(PE)의 비인 55%정도라고 할 수 있다.

Thornthwaite방법에 의해 구한 잠재증발산량과 실제증발산량과의 상관관계는 강우량과의 관계에 따라 두 값이 가까워질 수도 있고 차이가 커질 수도 있다.<sup>2)</sup>

1) 잠재증발산량이 실제증발산량에 가까워지는 경우 : 연중 강우량이 고른 습윤지역에서 잠재증발산량이 강우량보다 더 큰 달의 수가 적은 경우

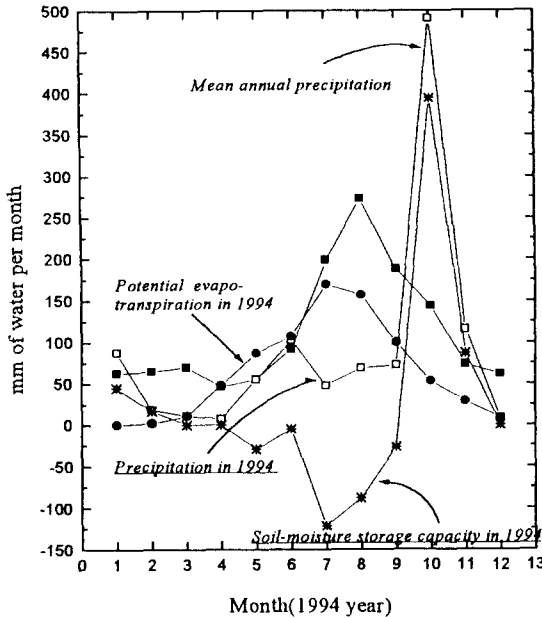


Fig. 7. The relation of the monthly average precipitation and potential evapotranspiration through 1994 year.

2) 실제증발산량이 잠재증발산량보다 훨씬 적은 경우 : 연중 강우량이 고르지 못하고 잠재증발산량이 강우량보다 더 큰 달의 수가 많은 경우

따라서 Fig. 6에서와 같이 연중강우량이 고른 경우가 7개월, 고르지 못한 경우가 5개월로 나타나고 있으며 잠재증발산량이 강우량보다 더 큰 경우가 4~6월 3개월에만 나타나고 있으므로 위의 1)과 2)중 1)의 경우에 접근하므로 잠재증발산량을 실제증발산량으로 유추하는데는 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

Fig. 6에 대해 1994년의 상황을 비교하기 위한 그림은 Fig. 7과 같다. 1994년 강우량은 5~6월을 제외하고는 10년간 각각의 월평균강우량에 크게 미치지 못하다가 10월에 집중강우로 인해 많은 강우량이 발생하고 11월에는 10년간 11월 월평균강우량에 비해 40 mm 가량 많지만 다시 12월부터 가뭄이 시작되었다. 잠재증발산량이 4월부터 9월까지 6개월 동안 강우량을 초과했고 7월에는 121.9 mm 가량의 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 토양보유수량은 3월부터 바닥을 보이고 있어 잠재증발산량에 강우량을 감한 값을 토양보유수량이 보충하지 못하고 있다. 또한 Fig. 7에서 보는 것처럼 강우량의 편차가 크며 잠재증발산량이 강우량보다 큰 달의 수가 많아 실제증발산량은 잠재증발산량보다 훨씬 적은 값을 보이리라 사료된다.

다음은 손실량 분석이다. 손실량이란 조사지역에 내리는 강우량에서 지표류 유출량을 뺀 값으로 정의한다. 물수지 분석에서는 지하로 침투하거나 지하의 유동경로를 통해서 다시 지표로 유출하는 양을 무시하고 있으므로, 이 경우에 손실량은 실제 증발산량과 같다. 그러나 이 양을 무시할 수 없을 경우에는 즉 실제증발산량과 손실량의 차이가 존재하는 경우 그 차이가 지하로 침투하는 지하수 함양량이 될 것이다. 우리나라 기상자료를 분석한 결과 대략 강우량의 42%가 손실량이고, 손실량의 43%는 침투량 즉 지하수 함양량(강우량의 18%), 나머지 57%(강우량의 24%)는 증발산량인 것으로 알려져 있다.<sup>5)</sup> 그러나 지역마다 지하수 함양량에는 큰 차이를 보일 수 있으므로, 손실량을 순수 증발산량 측면에서 먼저 고찰한 뒤 지하수 함양량을 고려하였다.

강우량과 증발산량 측면에서의 손실량과의 관계는 기온을 매개변수로 하여 공식으로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 Coutagne과 Turc의 경험공식을 적용하였다.<sup>6)</sup> 강우량이 많을수록 증발산으로 인한 실제 손실량은 증가하지만, 강우량이 일정한 수준을 초과하면 증발산량이 오히려 감소할 것이므로 손실량이 감소한다. 이러한 점은 본 조사지역에서도 나타나고 있다. 손실량은 강우량의 2차함수꼴로 표시할 수 있다. 이를 토대로 한 Coutagne의 공식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D = P - \lambda P^2 \tag{8}$$

여기서 D는 손실량(m), P는 강우량(m)이다. λ는 기온의 함수로서 다음과 같은 경험공식으로 표현된다.

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T} \tag{9}$$

여기서 T는 기온(°C)이다. 단 이 공식은 강우량이 1/(8λ) - 1/(2λ)범위에 존재할 때만 적용 가능하다. Turc는 전세계 254개 유역을 조사하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}} \tag{10}$$

여기서 P는 강우량(mm), L은 매개변수로 다음과 같은 기온의 함수로서 표현된다.

Table 4. The evaluation of lost quantities using Coutagne and Turc equations, and comparison with the evapotranspiration

| Input data   | Lost quantity(mm) |      | Ratio to precipitation (%) |      | The ratio of potential transpiration to precipitation(%) |
|--|-------------------|------|----------------------------|------|--|
|  | Coutagne          | Turc | Coutagne                   | Turc |  |
| Average during the last 10 years<br>T:12.5°C<br>P:1350mm | 638               | 633  | 47                         | 48   | 55   |
| During 1994 year<br>T:13.6°C<br>P:1083 mm                | 649               | 635  | 60                         | 59   | 71   |

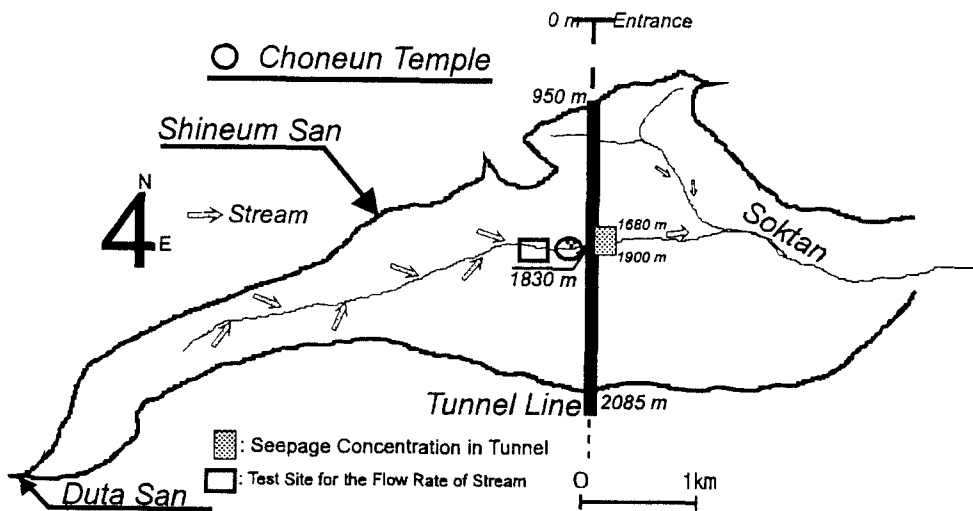


Fig. 8. The surface water flow in the basin and the measuring point for water quantity.

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (11)$$

여기서 T는 기온(°C)이다.

본 조사지역에 대해 Coutagne와 Turc식을 적용하였다. 각각의 식에 대하여 최근 10여년간의 d연평균기온과 연평균강우량(T는 12.5°C, P는 1350 mm)을 적용하고, 다음에 1994년도 연평균기온과 연평균 강우량(T는 13.6°C, P는 1083 mm)을 적용하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에 나타낸 바와 같이 손실량(실제 증발산량)은 잠재증발산량에 비해 최근 10년간의 경우 7~8% 작고 1994년도의 경우 11~12%의 차이가 존재한다. 그러나 1994년도의 경우 잠재증발산량이 실제 증발산량에 가깝지 않을 것이기 때문에 본 조사지역의 평균손실량은 최근 10년간의 자료를 이용하는 것이 타당하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 7~8%의 차이 값이 지하수

함양량으로 고려할 수 있으며 5.2절의 하천유량의 측정 결과해석절에서 구한 8%와 동일한 값이다.

### 5.2 하천유량 측정

본 조사지역의 하천 유동상황을 알아보기 위하여 1994년 7월부터 계속적으로 현지답사를 수행하여 하천 유량을 측정하였다. 본 지역의 수계는 Fig. 9에서 보는 것처럼 두타산 정상에서 동쪽으로 1.5 km지점 계곡에서 발원하여 군데군데 복류수로 바뀌어 보이지 않다가 다시 지표 하천수로 나타나는 반복 현상을 보이며 단일 수계를 형성하여 내미로리 석탄 부락 앞까지 흐르는 전형적인 계곡 하천을 띄고 있다. 사실 하천으로 보기에 는 그 지표수 유동량이 극히 적어 乾川의 전형적인 형태를 보이고 있었다.

두타산에서 바라볼 때 천은사 바로 앞까지 지표지질도 상으로 이어지는 삼화화강암 지대에서는 계곡 양 능

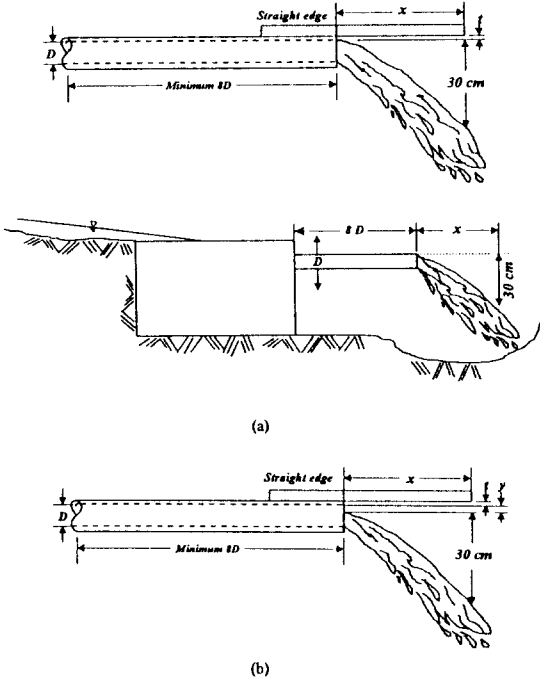


Fig. 9. (a) The trajectory method when the surface water flows through pipe.  
 (b) The trajectory method when the surface water flows through partially full pipe.

선의 구배가 급격해 계곡 중심선을 중심으로 하천의 좌우가 폭 4 m 이내로 좁다. 따라서 유동량은 천은사 바로 전에서의 하천유량을 측정하였다. Fig. 8에는 유역에서의 지표수 유동형태와 유량 측정 시험구간을 표시하고 있다. 화살표로 표시한 기호가 지표수 방향을 나타낸다. 전장에서 언급한 것처럼 지표지질도 상으로 Gs화강암이 바뀌는 경계부에서 지표수가 사라졌다가 Ew 근처에서 다시 나타난 지표수는 Od에서 다시 복류수로 바뀌어 사라졌다가 Odu 지역에서 재 출현한다. 천은사 하류의 계곡에서는 계곡에 유출된 지표수가 미미해 유량을 측정할 수 없었고 석탄 부락부터는 하천의 규모가 커지지만 그 유량이 작아 이 또한 측정할 수 없었다. 또한 1994년도 10월의 집중호우로 지표수량이 많아져 천은사 하부 100 m 지점인 '불이교' 밑에서 의외적으로 지표수량을 측정할 수 있었다.

본 연구에서는 지표유량 측정을 위해 투사법 (Trajectory method)를 사용하였다. 이 방법은 기본적인 물리학의 이론을 이용한다. 수평으로 놓인 파이프를 통해 흘러나온 물의 입자는 총에서 발사된 총알처럼 초

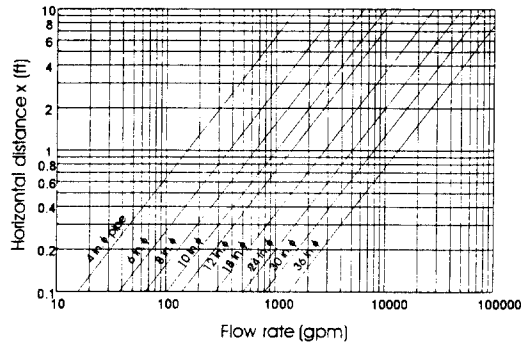


Fig. 10. Curve for trajectory method.

기속도와 중력가속도로 결정되는 경로를 따른다. Fig. 9 (a)와 같이 양단이 개방된 파이프로, 그 길이는 적어도 직경의 8배가 되어야 한다. 유선의 최상부가 12 inch(약 30 cm)아래로 떨어지는 지점까지의 수평거리 x를 측정하고, Fig.10으로부터 유량을 추산할 수 있다. 대개 직선자를 파이프 상부에 놓고, 직선자의 바닥에서 유선표면까지의 수직거리가 (12+파이프 두께 t) inch 될 때까지 직선자를 움직인다. 그리고 나서 수평거리 x를 읽는다. 또는 Fig. 9 (b)와 같이 지표수가 파이프를 부분적으로 채워서 흐르는 경우에도 유량을 측정할 수 있다. 파이프로부터 투사된 물의 유선상단까지 12 inch되는 거리는 파이프 상부가 아닌 유선 상부로부터의 수직거리이다. 대개 파이프내의 공간의 높이 y를 측정하고, 투사된 물의 유선상부가 직선자 하부 아래로부터 (12 inch+y+t)의 수직거리가 되는 곳까지의 수평거리 x를 파이프 끝으로부터 측정한다. 파이프를 부분적으로 채운 경우의 유량 추산치는 파이프의 빈 공간의 비에 근사적으로 비례하기 때문에 다음의 공식을 이용하여 보정한다.

$$\text{빈 공간의 비} \% = \frac{D-y}{D} \quad (12)$$

투사법은 유선 표면에서의 물입자속도를 추산하는 방법이다. 유선의 표면속도는 평균속도를 나타낸다고 가정한다. 정확한 값은 아니지만 정밀하게 측정만 하면 약 10% 오차범위에서 측정할 수 있다.

투사법을 이용하여 측정된 천은사 계곡의 유량 추산치를 Table 5에 나타내었다. 천은사 계곡의 유량 측정 시기는 94년 8월부터 95년 2월까지 5회 수행하였으며, 각각 시험횟수 4회씩 측정하여 평균값으로 유량을 산정하였다. Table 5에서 보는 바와 같이 가뭄이 한창 진행중이던 1차측정시기인 94년 8월 13일은 강우에 의한



우가 필요하였을 터이지만 회복되는데 요한 강우량이 평년과 비슷한 것으로 보아 수맥의 파괴는 매우 미미하다는 결론을 얻을 수 있다. 설사 더 진보적인 입장에서 고려해보면, 터널의 영향이 있었다 하더라도 터널 용출대 200 m 구간의 완전 방수처리 효과로 인하여 그 영향은 감소하게 되었다는 결론을 얻을 수 있다.

## 6. 결 론

1) 천은사 계곡을 통과하는 터널의 약 2000 m 정도의 구간에 대한 육안관측 결과 출수 구간은 철산 시점으로부터 1680 m와 1900 m 구간인 약 220 m 구간으로서 이는 본 조사지역의 계곡중심선인 1830 m를 포함한 구간이다. 이 구간의 절리간격은 1 m 이상으로서 통계처리 결과 평균 1.255 m이고 이는 '보통의 암반'에서 발견되는 수치이다. 즉 비록 이 구간이 계곡 균열대와 관련 있는 구간이지만 파쇄구간은 아니고 또한 용출이 어느 구간을 통틀어 발생하는 것이 아니라 틈새가 1~3 cm 정도인 주 절리로부터 발생하고 있으므로, 적절한 그라우팅에 의해 충분히 방수처리가 가능하였다.

2) 터널선은 본 조사지역을 통과하면서 지표지질도상으로 풍촌석회암 지대를 통과하는 것처럼 보이지만 실제 터널에서 관측된 지질은 삼화화강암으로서 층지형구배에 따라 경사져 있을 것이라는 결론을 얻을 수 있었다. 따라서 비교적 신선암의 투수성이 작은 화강암 지역을 통과하는 터널주위의 지하수 유동은 주로 화강암 절리의 유동패턴을 따를 것이고, 터널 직상부에서 암종은 삼화화강암인 것으로 판단되며 이 층의 상부를 덮고 있는 풍촌화강암의 투수성과 절리패턴이 지하 터널 쪽으로의 유동 가능성을 좌우할 것으로 사료되었다.

3) 조산작용으로 인한 계곡균열대를 제외하고는 특수한 지질작용의 이력은 관찰되지 않으며, 시추결과 확산유동석회암대수층으로 용해동굴과 같은 대규모 유동채널은 존재하지 않았다. 지표절리조사 및 터널내 절리조사 결과 주절리군의 주향은 두타선에서 양 능선이 뺨어가는 방향과 거의 유사한 방향이었으며 이는 지형구배와 비슷하게 절리가 발달되어 있어 내미로리 석탄마을쪽으로 즉 계곡 쪽으로 지하수 유동이 발생하고 있다. 터널선은 이 방향과 거의 직각으로서 터널선이 지하수 유동방향과 직각인 수리지질학적으로 안정한 터널이라고 판단된다. 또한 터널이 통과하는 암이 거의 불투수층이고, 그 불투수층 상부에 비교적 투수성이 좋

은 풍촌 석회암이 정합으로 덮고 있기 때문이다.

4) 천은사 계곡의 지표수 유동상황을 판단하기 위해 지표수 유동량 조사를 실시하였다. 94년 10월의 집중호우로 인하여 본 지역의 계곡 및 하천수가 일시적으로 회복하였는데, 완전히 회복한 11월말에는 가뭄이 한창 진행중이던 여름에 비해 지표수 유동량이 50% 이상 증가하였다. 또한 문제의 Ep 지역에서 지하로 침투하는 유량이 8%로 계산되었고 이는 물수지 분석에서 산정된 값과 동일한 값이었다.

5) 기저유출로부터 계곡 및 하천이 회복된 시점까지의 강우량과 연평균강우량을 비교해본 결과, 조사지역의 계곡이 상시적으로 물이 부족한 건천이라는 것을 알 수 있었고, 또한 평년의 유동량과 거의 동일하다는 사실로부터 터널의 지하수계에 대한 영향은 방수처리에 의해 경미해졌다는 결론을 얻을 수 있었다.

6) 시추공의 시추코어를 채취하여 RQD를 분석한 결과 아주 양호한 암반으로 판단되었으며 이러한 기반암은 수 m 이상부터 출현하고 있고 통계적 분석을 통한 시추코어의 절리간격과 터널내 용출구간의 절리간격이 거의 유사하다는 결과로부터 지표 가까이에서부터 출현하는 기반암내 절리패턴은 터널이 통과하는 지하 평균 110 m 이상의 깊이까지 계속되리라 판단된다.

7) 증발산량 분석을 수행하였다. 그 결과 잠재증발산량이 실제 증발산량이라는 결과를 얻을 수 있었고, 강우량의 57% 정도가 증발산으로 손실되는 양으로 파악할 수 있었다. 그러나 1994년도의 경우 극심한 가뭄으로 인하여 강우량이 년평균 강우량에 절대적으로 크게 미치지 못하고 있어 잠재 증발산량이 강우량을 초과하는 결과를 초래하고 있다. 따라서 1994년도의 경우 지표에 노출된 지표수는 빠른 시간에 증발하고 식물에 의해 증산되리라는 것을 알 수 있어 하천 및 계곡수는 쉽게 고갈될 수 있음을 시사해주고 있다. 손실량을 계산하여 잠재증발산량과의 비교를 통해 지하수 함양량이 8%라는 것을 추정하였고 이는 지표수 유동량 측정으로부터 구한 값과 동일하다.

## 참 고 문 헌

1. 쌍용엔지니어링 주식회사. 1991, 동해 신광산 B/C 토목 구조물 기본 설계중 터널 갱구부 및 교량구간 지질조사보고서, pp 15-16
2. C.W.Fetter, 1988 2nd edition, Applied Hydrology, Merrill Publishing Company, pp 285-

295

3. Stephen D. Priest, 1993, *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, pp 121-141
4. 선우중호, 1994 제 12판, 수문학, 동명사, pp 77-93,

pp 103

5. 한국수자원공사, 수자원통계표
6. 한국자원연구소, 1993, 마산공업용수로 제 2터널 일 부구간 지하수 유동조사 보고서, 한국수자원공사