

# Tunnelling Technology

## 산악터널 공사의 지하수 문제(1)



윤상길  
(주)바우컨설팅  
전무이사/기술사



김선명  
(주)바우컨설팅  
차장/공학박사

본고는 일본의 학술지인『터널과 지하』에 2002년 7월부터 2003년 9월까지『산악터널공사의 환경보전』이라는 제목으로 15회 연재된 강좌 중에서 (9), (10)번 강좌를 편역한 것으로 원저자는 일본『산악터널공사의 환경보전 연재강좌 소위원회』임을 밝혀두는 바이다. 총 2회에 걸쳐서 산악터널 공사에 따른 물문제의 기본 개념 및 대처방법 등에 관해서 소개할 예정이다.

### 1. 터널굴착에 따른 지하수 문제

#### 1.1 터널공사 영향에 따른 지하수 문제

##### 1.1.1 시공에 미치는 영향과 주변에 미치는 영향

터널공사에 기인하는 지하수 문제는 터널이 지하수면 아래를 굴착하는 것을 피할 수 없으므로 터널공사에 있어서는 특별히 중요한 위치를 차지하고 있다.

건설공사의 지하수 문제는『시공에 미치는 영향 = 지하수로부터 받는 영향』과『주변에 미치는 영향 = 지하수에

미치는 영향』이라는 양면이 있다.

『시공에 미치는 영향』이라는 것은 용수로 인한 막장 붕괴, 지압의 증가, 기초 지지력의 저하, 배수불량의 발생 등 시공에 영향을 미치게 되는 시공 상의 내부 문제이다. 한편『주변에 미치는 영향』이라는 것은 터널 굴착에 따른 용수로 인해 기존의 물이용이나 물 환경에 영향을 주는 외부 문제이다. 이 두 가지 문제는 반드시 같은 현장에서 동시에 발생한다고 한정지을 수는 없지만 둘은 서로 밀접한 관계를 가지고 있다.

과거 터널공사에서는『시공에 미치는 영향』이 터널공사의 안전 상 큰 문제이며 또 공사기간이나 공사비에 중대한 영향을 미치기 때문에 지하수위 저하(물빼기)공법이나 지수공법을 채용하여 지하수로부터 미치는 영향을 가능한 한 작게 함으로써 터널공사를 안전하고 능률적으로 시공하는 것이 중요한 과제였다.

터널 용수가 주변의 물순환을 구성하는 지하수나 지표수에 관련되어 있다는 것은 그림 1을 보면 스스로 해석 가능한 것이다. 물문제가 일본의 터널공사 역사상 일반적인 사람에게 알려지는 형태의 문헌에 기록된 것은 전쟁 전에

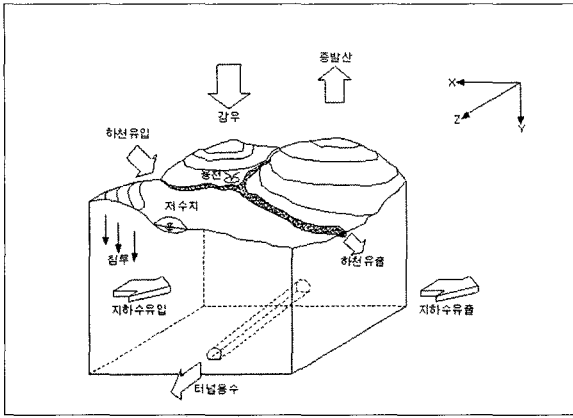


그림 1. 터널 물수지를 구성하는 각 요소

발간된 와타나베의 700페이지에 달하는 명저「지질공학」이 최초라고 생각된다.

그 내용 중에 한 예로 단나(Tanna)터널의 경우에 관해서는「단나분지 내에 샘의 침출선상에 분포하는 고추냉이밭의 고갈을 시작으로 분지 내 70만여m<sup>2</sup>의 관개용수가 결핍되어 저수지의 건설 및 수도의 부설 등을 수행하였으나 결국 배상금 약 150만 엔을 지출하였다. 아마도 이러한 예는 세계 터널공사상 초유의 사태가 되었을 것이다.」라고 기술되었다.

그 밖에도 기세(Kisei)선의 유량(Yura)·소범사(Koboushi) 터널에 관해서는「중생대 혈암·사암 호층을 굴착하였으나 지하수면의 저하는 산정상부에서 30m 이상 발생하여 큰 피해를 주었다.」오(Go)선의 오(Go)터널에 관해서는「화강암 암반을 굴착하는 중에 다량의 용수로 터널상부 일대의 지하수가 고갈되어 이러한 영향을 받은 집은 100호 이상에 달하였다. 이 부근은 양조장이 있으며 음료수 및 관개용수의 문제와 동반하여 민원이 한층 증가하였다.」와 같은 기록이 있는 등 이미 전쟁 전부터 터널공사와 동반하여 갈수문제는 피할 수 없는 문제가 되었다는 것을 알 수 있다.

그러나 지하수 고갈문제를 매우 신중하게 생각하게 된 것은 거주지에 근접 시공하는 터널이 많아지고 수자원이

고도로 이용된 1970년 대에서부터였으며 이때부터「주변에 미치는 영향」이라는 문제를 무시한 터널공사는 생각할 수 없게 되었다. 이 글은 이러한「주변에 미치는 영향」을 해결하기 위해 조사 및 대책을 중심으로 서술하였다. 더욱이 본 장의 제목에서 “지하수 문제”라고 한 것은「주변에 미치는 영향=지하수에 미치는 영향」의 주된 내용이 지하수위 저하에 기인하는 고갈의 문제이기 때문이다.

일본에서는 예전부터 다양한 목적으로 물을 이용해왔으며 물이 일종의 재산처럼 간주되어왔다고 해도 과언이 아니다. 더욱이 수자원은 부동산과 현저하게 다르며 일반적으로 무형물적 요소가 많아 누구에게 귀속되어있는 것조차도 법적으로 명료하지 못한 점이 많고 정량적 또는 금전적으로 평가하는 것도 매우 어렵다. 또한 공사와의 인과관계에서도 터널공사와 관계없는 타공사와 깊은 우물의 과잉양수에 기인하며 갈수년에 있어서 지표수의 감소와 지하수위의 저하를 함께 가져오는 현상에 지나지 않는다. 따라서 터널굴착에 동반하는 물문제는 「시공에 미치는 영향」과 「주변에 미치는 영향」의 두가지 측면으로부터 사전조사를 실시하여 착공후의 사태를 예측하여 총괄적이고 정확한 판단을 통해 대책을 마련할 필요가 있으며 문제가 발생한 후에 적당히 대응하여 넘어가는 식의 조사 및 대책으로는 절대 해결되지 않는다는 인식이 필요하다.

### 1.1.2 지하수 문제의 특징

터널 굴착에 따른 지하수 문제를 고려할 경우 다음과 같은 지표수·지하수의 특수성을 상세히 고려할 필요가 있다.

① 물은 순환하고 있다.

물은 강수, 침투, 증발 등의 현상에 의해 대기권, 지표, 지중을 순환하는 성질을 가지고 있으며 지표나 지하수는 그 순환계의 하나의 형태로써 존재하고 있다. 즉, 지하수는 항상 광범위하게 천천히 순환한다.

② 지하수는 일반적으로 변동하고 있다.

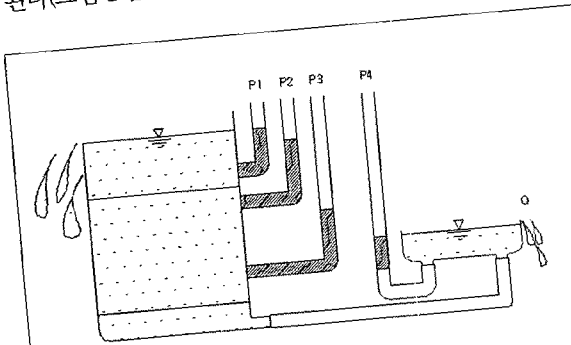
지하수는 강수, 하천, 소호 등에 대해서 함양되며 그 저

류능력을 초과할 때에 용천이나 하천 등으로 유출한다.  
 그러므로 지표수·지하수는 강수 등의 기상변화의 영향을 받아서 적절하게 변동하고 있다. 똑같이 물이용도 토지이용상황에 따르지만 적절히 변화하고 있다.

③ 굴착공사는 배수가 전제되며 물순환에 영향을 미친다.  
 산악터널 공사는 통상적으로는 갱내로 물을 배수하며 굴착하는 것을 전제로 하고 있다. 이것은 동수상태가 되어 복공에 작용하는 수압을 감소시키게 되며 해저터널이 시공 가능한 이유의 하나가 되고 있다.

물을 한방울도 흘리지 않고 굴착한다고 하는 것이 얼마나 비현실적인가는 막장의 배면에 정수압을 남기면서 굴착하는 것이 가능한가를 고려한다면 이해될 것이다. 그 이유는 그림 2의 실험수조의 설명으로 보다 이해가 될 것이다.

따라서 일반적인 산악터널 공사에 있어서 지하수를 배수(경우에 따라서 차수)한다면 지하수의 흐름에 영향을 미치게 되어 크게는 물순환계의 일부에 영향을 미치게 된다(그림 1 참조).



우측 작은 그릇을 좌측 수조의 윗 수면과 같게 한 경우

$P_1 = P_2 = P_3 = P_4$ 로 되며  $Q = 0$ 이라는

정수압상태(동수압=0)가 된다.

우측 작은 그릇을 서서히 아래로 내리면

$Q$ 는 서서히 증가하지만 수두는  $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$ 로

수두차(손실수두)가 형성되게 된다.

이 상태가 동수상태이다.

그림 2. 정수압과 동수압의 개념

④ 영향은 영속적으로 남는다.  
 지하수에 미치는 영향 정도와 범위는 물순환계의 크기나 성질에 따르게 되고 터널공사의 규모나 성격에 좌우되지만 다른 환경문제와는 달리 범위는 넓고 그 영향은 공사종료 후에도 남는다.

⑤ 지반구조와 물순환·물이용의 실태파악이 중요하다.  
 터널 굴착에 따른 지표수·지하수 문제의 유무를 평가한다고 하는 경우는 지하수의 용기인 지반의 구조를 광범위하게 파악할 필요가 있다.

또, 함양원으로서의 강수·하천수와 지하수와의 관계(물순환)를 장기간에 걸쳐서 파악하고 또한 대상으로 하는 지역의 물이용 실태를 가능한 한 상세하게 파악하지 않으면 안 된다.

⑥ 물순환에 미치는 영향과 물이용에 미치는 영향은 일치하지 않는다.

물순환계에서의 영향(물순환계의 변화) = 물이용에의 영향은 아니라는 것을 잊지 말아야 한다.

## 1.2 지표수·지하수에 미치는 영향

### 1.2.1 산지의 지하수

#### (1) 표층부의 물 이동

산지의 표층부는 암체가 풍화하여 형성된 토양층이나 풍화층으로 덮혀 있으며 그 아래에 미풍화된 암체가 존재하는 경우가 일반적이다. 표층부의 침투능은 비정상적으로 크며(표 1), 강수의 대부분은 일단 지하로 침투하여 토양수로서 저장된다.

그 후, 표층으로부터 1~수 m의 토양층이나 풍화층에서의 증발, 식물의 뿌리에서의 흡수·증산, 심부에서의 침투가 발생한다. 그 토양수는 강수에 의존하고 있으며 지하수위 변동과 거의 무관하게 존재한다.

심부로 침투한 물의 일부는 비정상적으로 느린 속도로 더욱 깊은 암반 속으로 침투하며 심부 지하수를 함양하고 있다(그림 3).

# 기술 강좌

## 산악터널 공사의 지하수 문제(I)

표1. 토지 피복조건별 최종침투능<sup>5)</sup>

(최종침투 rate : mm/hour)

임야		활엽수 천연림	벌채적지		초생지		나대지		
침엽수 천연림	인공림		경도 교란	중도 교란	자연 초지	인공 초지	붕괴지	보도	밭
211.4 (5)	260.2 (14)	271.6 (15)	212.2 (10)	49.6 (5)	143.0 (8)	107.3 (6)	102.3 (6)	12.7 (3)	89.3 (3)
임야 평균 258.2(34)		벌채적지 평균 158.0(15)		초생지 평균 127.7(14)		나대지 평균 79.2(12)			

주 : ( )내의 수치는 측정된 지역 수

또한 토양층이나 풍화층과 미풍화층의 투수계수에 큰 차이가 있다면 양자의 경계면이 실질적으로 불투수면이 되어 강우시에 침투된 물의 대부분이 이 경계면을 따라 경사면 하부로 이동하며(측방류, 지중류), 경사면 말단부근에서 포화층을 형성한다.

이 포화층은 심부 암반 속에 존재하는 심부지하수와는 단절되어 존재하며 산체의 표층에 국부적으로 존재하는 얇은 지하수면을 형성한다(그림 4). 이러한 표층에 존재하는 지하수에 의존하는 우물이나 용수는 터널 굴착에 의해 심부 지하수가 크게 수위저하를 하여도 거의 영향을 받지 않는다.

### (2) 지하수의 존재형태

터널공사에 있어서 용수의 형태는 지하수의 존재형태

와 밀접한 관계가 있다.

그 형태는 지하수를 포함하는 공극의 존재에 의해서 층상수와 맥상수로 대별되며 또 지질구조에 따라 부압지하수와 피압지하수로 분류된다.

#### · 층상수와 맥상수

층상수라는 것은 토립자의 간극을 포화하여 유동하는 물이다. 맥상수는 암석의 균열(공동, 단층, 절리, 암맥 등)을 포화하여 유동하는 것으로 지하수맥을 형성한다(그림 5). 심부암체 속 지하수의 대부분은 이 형태를 보인다.

#### · 부압지하수와 피압지하수

부압지하수는 상부의 통기대와 접한 대기압과 평형상태에 있는 지하수면을 말한다. 지표부근의 얇은 지하수면을 가진 지하수는 부압지하수인 경우가 많다.

피압지하수는 대수층의 상부에 난투수성의 지층이 있

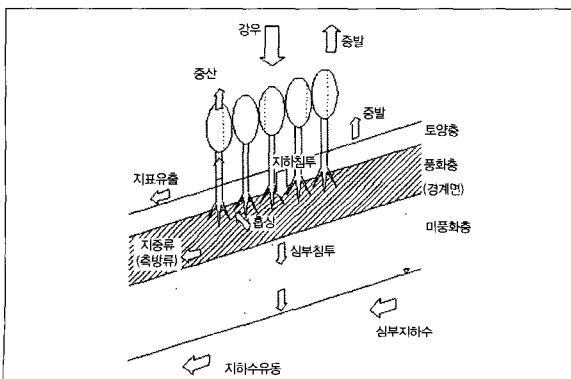


그림 3. 산지표층부의 물 순환

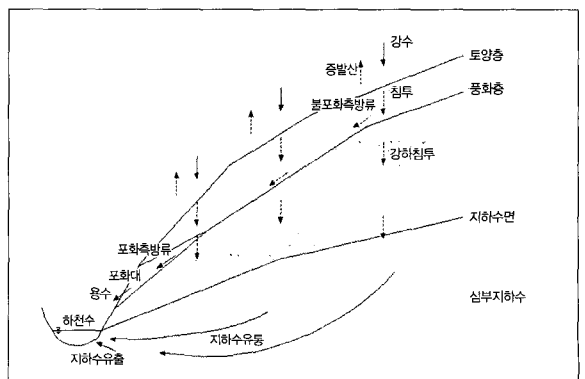


그림 4. 얇은 지하수면과 심부 지하수면의 관계 모식도

는 경우에 존재하며 대수층 상부면보다 높이 수두를 가진 지하수이다. 곡부의 심부지하수는 피압으로 있는 경우가 많다. 피압의 정도는 지형이나 지질구조에 따라 다르다.

· 지하수의 존재형태와 지형·지질

이들 지하수의 존재형태는 지형·지질과 깊은 관계가 있으며 일본에 있어서는 표-2에 제시한 것처럼 요약이 가능하다. 대상이 되는 터널 주변의 지하수의 존재형태, 수문지질 구조를 정확히 파악하는 것은 물문제에 대처하

는데 있어서 빠뜨려서는 안 될 사항이다.

(3) 지하수의 분포

산지의 지하수는 거시적으로 본다면 지형기복에 영향에 따라 포텐셜 분포에 지배받는 지하수 유동계를 보여주고 있으며 상대적으로 표고가 높은 언덕부가 함양지역으로 되고 표고가 낮은 계곡부가 유출지역으로 된다(그림 6). 따라서 함양지역이 되는 언덕부의 수두 포텐셜은 심부

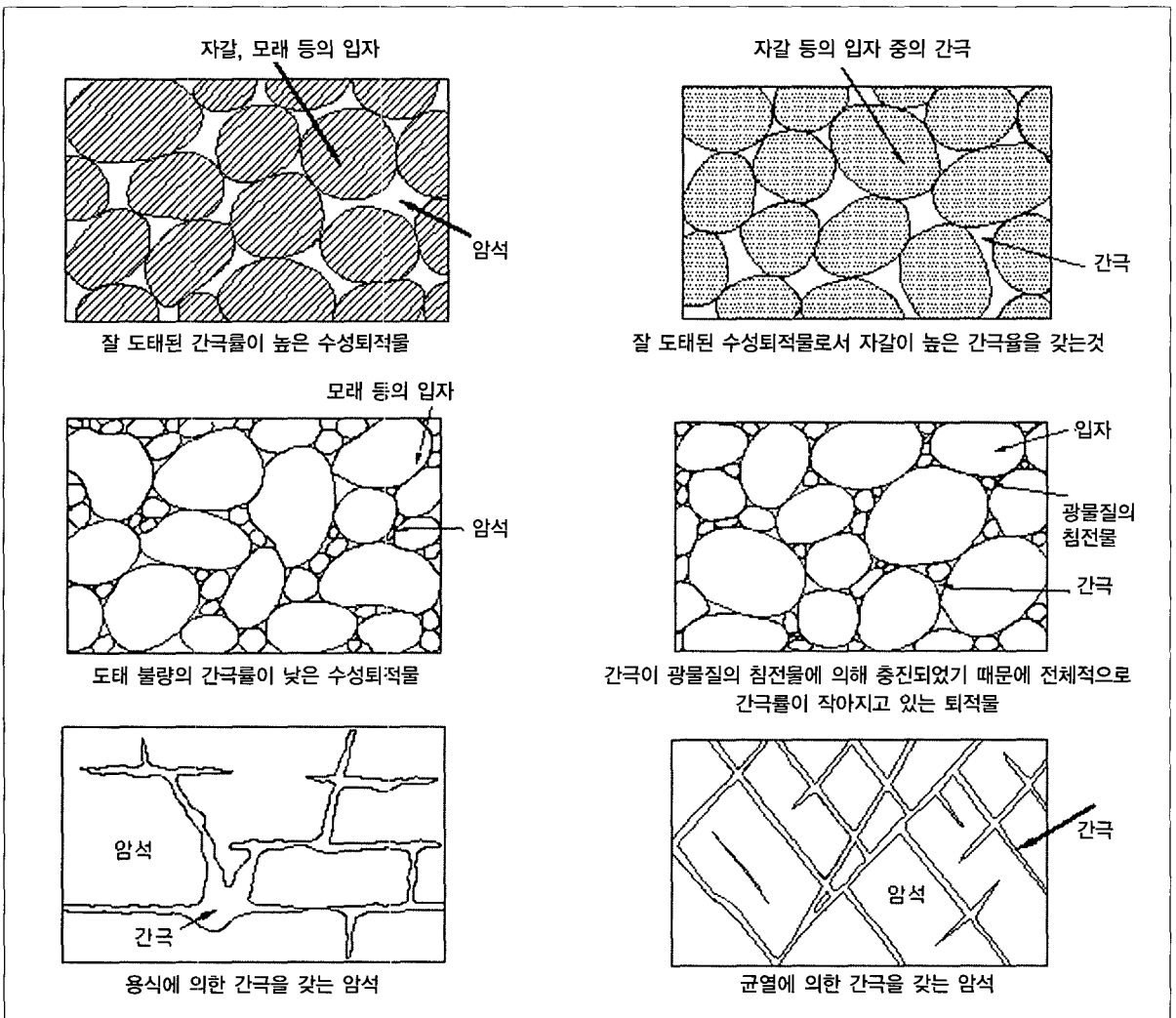


그림 5. 층상수와 맥상수<sup>6)</sup>

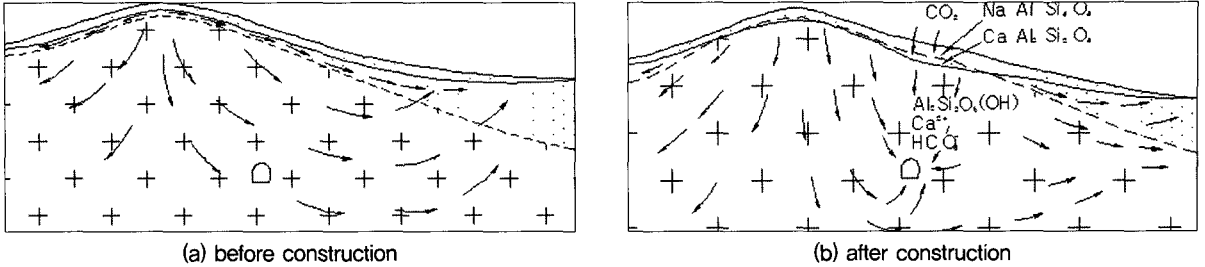


그림 6. 터널 굴착 전후의 주변 암반내의 지하수 유동 개념도<sup>8)</sup>

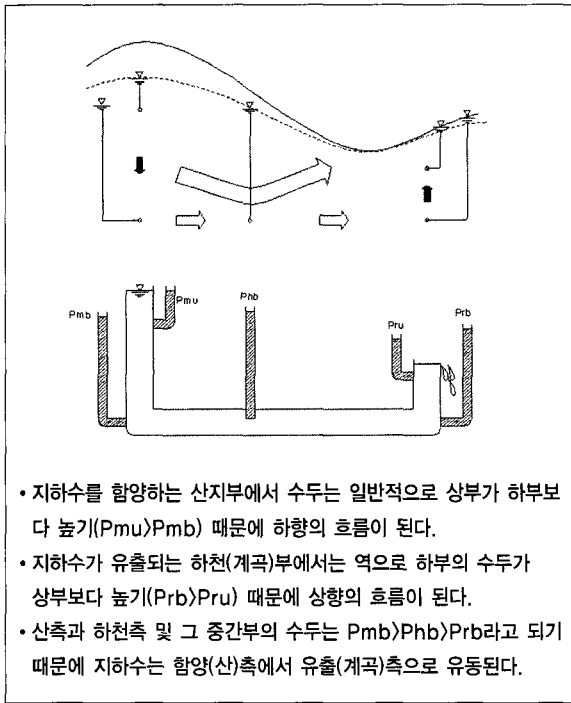


그림 7. 암반내의 지하수 포텐셜 분포<sup>3)</sup>

보다 작고, 유출지역인 계곡부의 포텐셜은 심부보다 크게 된다(그림 7).

지하수면의 형상은 지형 기록을 계곡부에 접하도록 매끈한 곡선으로 묶은 형상이며, 언덕부에서는 지표면보다 낮고(그러나 계곡부 보다는 높다), 계곡부에서는 지표면보다 약간 높다(그러나 언덕부 보다는 낮다)라는 특징을 가지고 있다.

#### (4) 지하수 유동

암반 내에 존재하는 심층 지하수가 대상이 되는 경우 엄밀하게는 맥상수(균열수)로서 취급할 필요가 있다. 다만, 광역적인 지하수 유동을 대상으로 하는 경우에는 암반 내의 지하수 유동도 일반적으로는 Darcy의 법칙을 따른다고 가정하여도 큰 오류가 없다.

이 경우, 지하수 유동량은 아래와 같이 산출된다(그림 8).

$$Q = k \cdot A \cdot (dh/l)$$

Q : 지하수 유동량, k : 투수계수,

A : 통수단면적, dh : 수두차, l : 거리

산지의 지하수의 경우, 지형기록이 크기 때문에 동수구배는 크지만, 투수계수가 비정상적으로 작은 경우가 대부분이기 때문에, 지하수 유동량은 평야부의 지하수 유동량과 비교해 보면 비정상적으로 작다.

#### (5) 지하수위의 변동

심부 암반내의 지하수는 비정상적으로 느리게 움직이지만 산체 표층부로부터 함양을 받고 계곡부에서 지표에 유출되는 유동을 하고 있다. 그러므로 자연상태에서도 주로 강수량의 영향을 받은 수위변동을 하고 있다.

수위변동은 강수 후에 상승하고 그 후 저하하여 수일에서 수주간 단위의 변동을 보이며 봄부터 여름까지 상승하고 겨울에 저하하는 계절변동이나 갈수년에 저하하고 홍수

표 2. 일본의 지형과 지하수의 존재형태의 특징<sup>7)</sup>

대구분	중구분	지질·지하수의 존재 양식의 특징				
		주된 구성지질	층상	주요채수층의 피압도	주된 채수방식과 수량	(예)
해안 평야	① 사구	총적층(특히 하위에 홍적층)	모래	대부분 부압지하수 하부의 홍적층에 피압 지하수	얕은우물→중 (얕은우물→소)	芦原(Ashihara) 砂丘
	② 해안소 평야	총적층(최대 20m)	모래·실트	하압지하수 하위에 홍적층이 있는 경우	얕은우물→소	九十九里浜 (Kujukurihama)
	③ 홍적대지	홍적층(최대 100m 전후)	자갈·모래· 실트	부압지하수	얕은우물→소	牧ノ原 (Makinohara) 台地
	④ 선상지성 평야	홍적층, 총적층 (층두께는 100m이상에 달함)	모래·자갈· 실트	총적층중→부압지하수 홍적층중→피압지하수	얕은우물→대 용천→중 집수지→대 깊은우물→중	大井川河口 (Ookikawakawaguchi)
	⑤ 구조분지 평야	신제3기층, 홍적층, 총적층 (각각 층두께 큼)	모래·실트· (자갈)	중적층중→부압지하수 홍적층중→반피압지하수 신제3기층중→피압대수층	얕은우물→소 얕은우물→중	關東(Kantou) 平野
내륙 분지	⑥ 산간구조 분지	총적층, 홍적층 (각각 층두께 큼)	자갈(모래)	일부에서 피압 (층끝부분 등) 외에 부압지하수	용천→중 얕은우물→중 깊은우물→대	松本(Matsumoto) 盆地
	⑦ 선상지성 분지	총적층, 홍적층 (홍적층이 두꺼운 경우가 많음)	자갈(모래)	선정부→부압지하수 선양부→부압지하수 선부 일부를 피압지하수	얕은우물→대 용천→대	那須野ヶ原 (Nasunogahara)
	⑧ 하안단구	홍적층(최대 100m 전후) (일부총적층)	자갈(모래)	부압지하수	얕은우물→중	美濃加茂(Minokamo) 台地
화산 분지	⑨ 화산산록	홍적세의 화산분출물	각력응회암, 붕괴퇴적물, 강하견암, 용암	산체 근처 부압지하수 산록하부에 일부 피압	깊은우물→중~대 깊은우물→소 용천→대	八ヶ岳 (Hachigadake) 西麓
	⑩ 용암대지	신제3기~전기홍적세의 화산 분출물	용암, 각력응회 암류	균열수 피압지하수 부압지하수	깊은우물→중~소 용천→대	霧ヶ峰 (Kirigamine)
	⑪ 화산성 폐석대지	신제3기~전기홍적세의 화산 분출물	시라스·용결 응회암	부압지하수	깊은우물→중~소 용천→대	南薩(Nansatsu) 台地
	⑫ 화산도	신제3기~전기홍적세의 화산 분출물(일부에 총적세의 것도 있음)	용암각력응회암· 집괴암	부압지하수	깊은우물→중	伊豆七島 (IzuShichitou)
산지 구릉	⑬ 제3계 구릉	신제3기층	자갈·실트· 모래	피압지하수	깊은우물→소	魚沼丘陵
	⑭ 석회암 지대	중·고생층	석회암·돌로 마이트	공동수 부압지하수 균열수	용천→대	帝釋峽
	⑮ 중·고생 계 산지	중·고생층	혈암·사암· 쳐트 등	균열수·부압지하수	용천→중~소	秋父山地

# 기술강좌

## 산악터널 공사의 지하수 문제(I)

년에 상승하는 연단위의 변동 등이 조합된 변동을 보인다.

일반적으로는 지하수의 변동량은 작게 수십 cm~수 m 정도의 경우가 많다.

### 1.2.2 터널 굴착이 물순환에 미치는 영향

산악터널의 굴착에서는 시공성 등의 문제로 인해, 통상은 배수를 전제로 한 시공을 하고 있다. 이 때문에 굴착에 따른 지하수, 더욱이 지표수도 포함하는 물 순환계 전체에 대한 영향을 미치게 되는 것을 피할 수 없다.

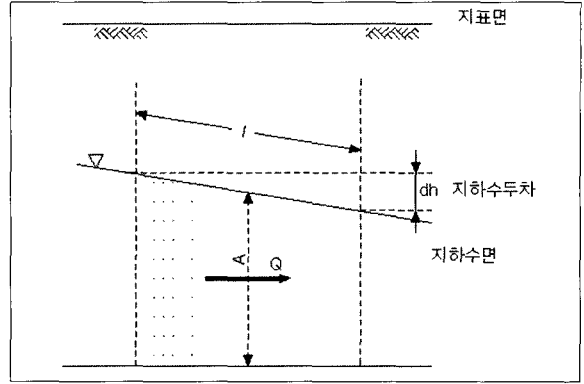


그림 8. Darcy의 법칙

#### (1) 물순환의 변화

산지의 물은 강수, 침투, 유동, 유출, 증발로 대기, 지표하를 순환하는 물순환계 속에 있으며 상호 밀접한 관계를 가지고 있다. 산지의 물순환계 속에 터널 용수를 위치시켜 물순환계와의 관계 및 터널 굴착에 따라 발생하는 영향을 개념적으로 나타낸 것이 그림 9이다. 산지에 내리는 비는 산지표층의 토양층(식생을 포함)에서 증발산, 지표유출, 지하침투로 나뉜다.

증발산과 지표유출은 시간·일 order의 비교적 빠른 이동을 보인다. 또 지하에 침투한 물의 경우 토양층·풍화층과 미풍화층과의 경계에서 측방으로 유동하는 물은 비교적 빠른 경사면 하단에서 포화되며 지표로 유출한다. 한편, 심부 암반으로 침투한 물은 느린 유동을 보이던 일부는 지하수를 지닌 계곡부에 유출하고 일부는 그 사이 지하수로서 산지 밖으로 유출한다.

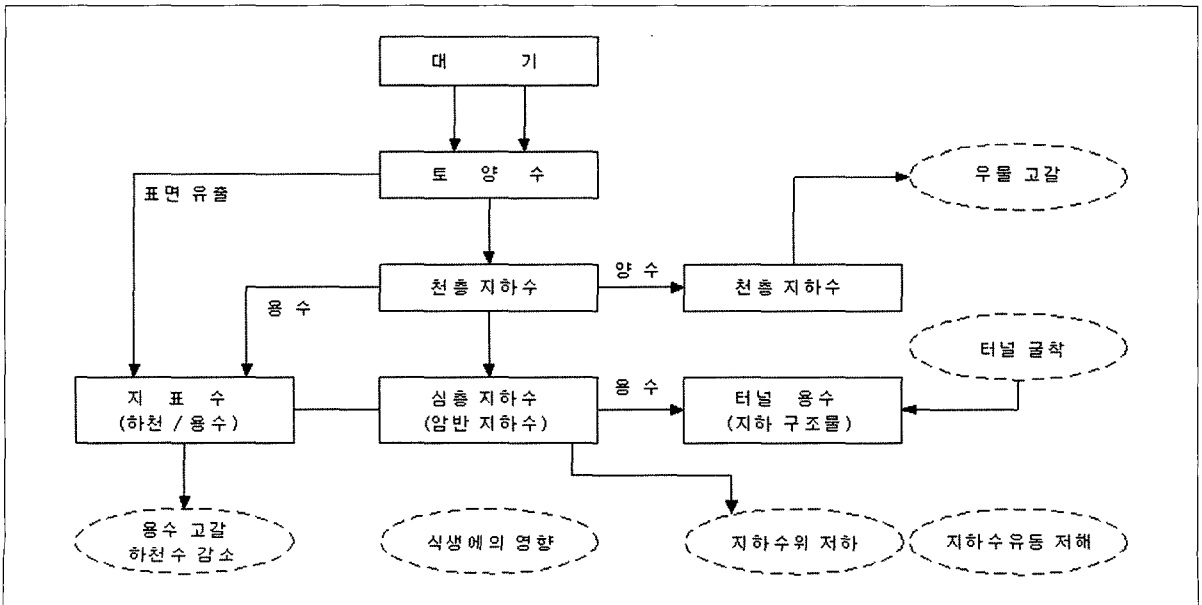


그림 9. 터널에 관한 물수지와 영향 발생의 개념<sup>9)</sup>



# 기술강좌

산악터널 공사의 지하수문제(1)

침투량과 유출량의 차이가 지하저류량의 변화로 되어 지하수위의 변화로 나타난다. 이 관계를 물수지식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R = E + D + G + S$$

위 식은 강수량(R)로부터 증발산량(E), 지표유출량(D), 지하수유출량(G)을 뺀 양과 그 영역에 저류된 양(S)이 같다고 하는 식이 성립한다.

자연의 물 순환에 터널 용수량(T)를 추가한 경우, 터널 주변의 지하수위의 저하에 따른 저류량의 감소(ΔS), 지표유출량의 감소(ΔD), 지하수유출량의 감소(ΔG)라는 형태로 물수지에 변화를 미치게 된다.

$$R = E + (D - \Delta D) + (G - \Delta G) + (S - \Delta S) + T$$

터널 용수량의 발생에 의해 터널 굴착 전후에 물수지가 변화하고 지표유출량과 지하수유출량이 감소하는 결과가 된다. 물수지 전체에 걸쳐 터널 용수량의 분배가 매우 크게 되며 물수지가 대폭적으로 변화하는 경우도 있다(그림-10).

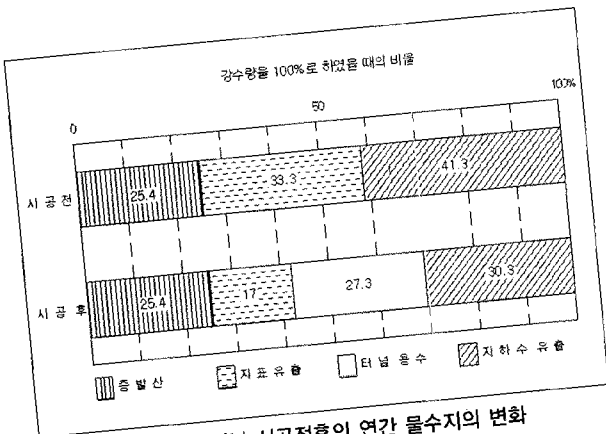


그림 10. 터널 시공전후의 연간 물수지의 변화 (福岡(Hukuoka)터널의 사례)<sup>1)</sup>

## 2) 터널 용수

일반적으로 터널 용수량은 굴착의 진행과 더불어 증대되며 단층파쇄대 등을 만나면 일반적으로 대량출수(집중용수량)가 있지만, 터널이 관통하는 시점에서 용수량은 감소한 후 거의 안정된 용수량(항상용수량)으로 떨어진다. 단순화한다면 집중용수량이 지하수위 저하에 따른 저류량의 감소량(ΔS)에, 항상용수량이 하천이나 지하수의 유출량의 감소량(ΔD + ΔG)에 해당한다고 볼 수 있다(그림 11).

$$T = (\Delta D + \Delta G) + \Delta S$$

약 480개의 기존 터널 사례를 조사한 결과에 의하면 터널 연장 1km당 비용수량은 그 대부분이 0.2~5m<sup>3</sup>/min/km의 범위에 분포하고 있다(그림 12).

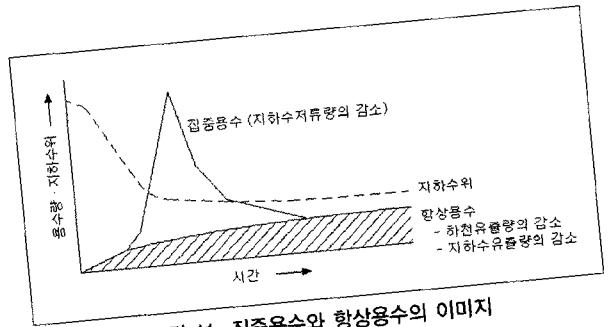


그림 11. 집중용수와 항상용수의 이미지

## (3) 지하수위의 저하

터널 굴착에 의해 지하수가 배수되고 지하수위의 저하가 생긴다. 지하수위는 굴착이 진행됨에 따라 서서히 낮아지고 굴착 막장의 통과시에 급격하게 저하한 후 수년에 걸쳐 안정된 수준까지 저하가 이어지는 경우가 많다(그림 13).

일반적으로는 지하수위 저하량은 터널 노선을 따라 가장 크게 발생하며 터널과 멀어지면서 작게 발생한다(그림 14). 다만 지형의 형상, 단층 등 지질구조에 의해서는 광

# 기술 강좌

## 산악터널 공사의 지하수 문제(I)

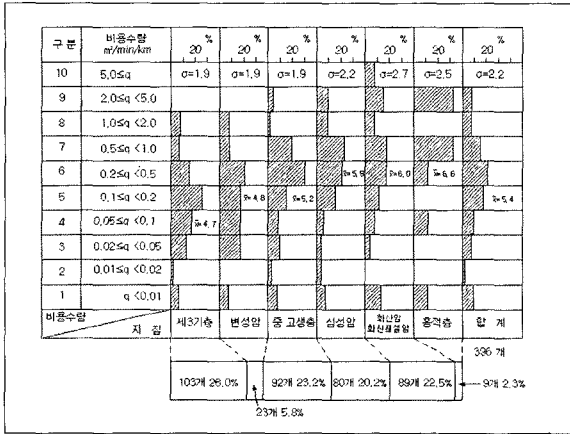


그림 12. 철도 터널의 비용수량<sup>1)</sup>

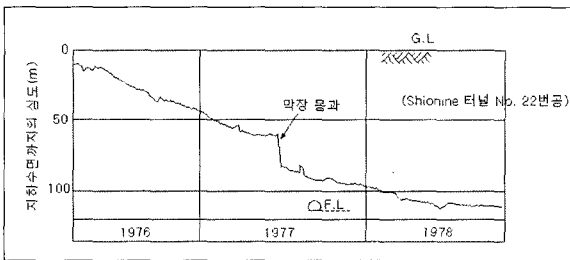


그림 13. 터널굴착에 따른 지하수위의 저하<sup>1)</sup>

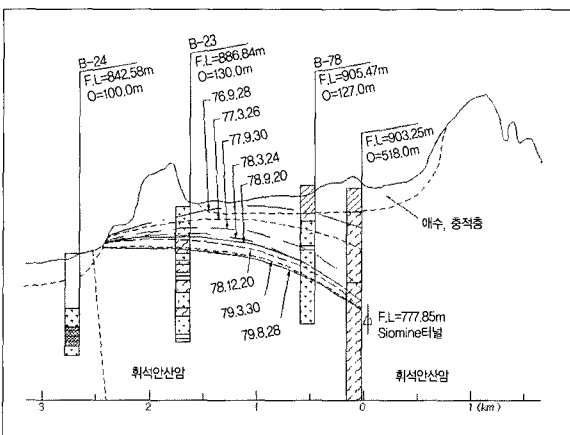


그림 14. 터널굴착에 의한 횡단방향의 지하수위 유동<sup>1)</sup>

역적으로 지하수위 저하가 발생하게 되며 의외의 장소에 영향을 미치는 경우가 있다.

### (4) 지표수 유량의 감소

지하수위 저하는 물순환계를 구성하는 용수나 지표수에도 영향을 미친다. 언덕부 등 함양지역에서는 지하수위 저하에 의해 지하침투량이 증가하여 지표수의 유출량이 감소하는 것이다.

또한 계곡부 등 유출지역에서는 지하수로부터의 유출량이 감소·소멸됨에 따라 용수가 고갈되어 습지의 수량이 감소하게 된다. 특히 강우가 없는 시기에 있어서 기저 유출 성분이 큰 폭으로 감소하기 때문에 갈수기에 영향이 크게 나타나는 경우가 많다(그림 15).

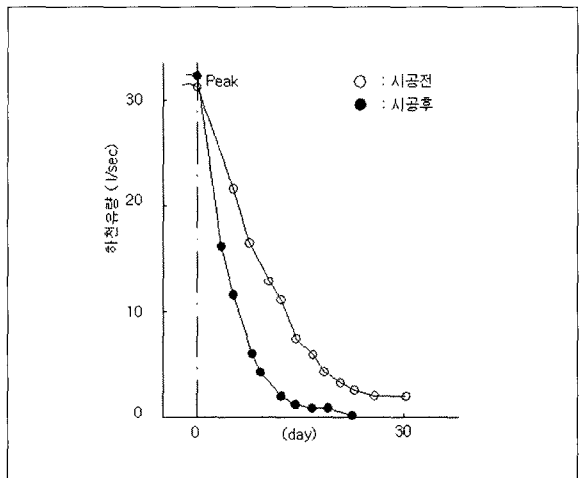


그림 15. 터널시공 전후에 있어서 하천유량의 감소경향의 변화<sup>1)</sup>

### (5) 지질과 갈수영향 범위

기존 갈수의 사례조사에서는 지질구분에 의해 갈수영향 범위에는 다음과 같은 특징이 있다고 보고하고 있다.

#### ① 중·고생대층

토피 150m 이내에 대부분의 갈수가 발생하고 있다. 갈수 범위는 토피 50~100m로 최대 폭을 가지며 토피가 크게 됨에 따라서 그 범위는 감소하는 경향이 있다.

파쇄질의 지질의 경우는 영향범위가 1,000~2,000m에 도 미치는 경우가 있다.

② 심성암류

갈수사례의 대부분은 토피 200m 이내, 터널로부터 이격 1,000m 이내에 있다. 중·고생대층과 같이 갈수범위는 토피 50~100m로 최대 폭(편측 1,500m에 달하는 예도 있음)이 되며 토피가 커짐에 따라 갈수범위는 감소하는(눈에 띄지 않는) 경향이 있다.

③ 변성암류

데이터 수가 작아 그 경향을 파악할 수 없지만 토피 50m 이내에서 갈수가 발생하고 있다.

④ 화산암 및 화산쇄설암류

갈수사례는 토피 250m~300m 이내에서 대부분 발생하며 범위는 토피 100m~200m 로 최대 폭이 된다.

⑤ 사력층

데이터 수가 작아 그 경향을 파악할 수 없지만 갈수사례의 대부분은 토피 50m 이내에서 갈수가 발생하고 있다.

⑥ 이암·사암류

갈수사례의 대부분이 토피 100m 이하, 터널로부터 거리 500m 이내에 있다. 심성암류에 비교해서 토피, 이격 거리에 각각 1/2의 규모이다. 토피 20~30m로 갈수범위가 최대 폭이 되고 있다.

⑦ 화산이류 퇴적암

갈수범위는 ①~⑥과 달리 토피가 커짐에 따라 범위도 증가하는 경향이 있다.

1.2.3 물이용·물순환에 미치는 영향

터널굴착에 따른 용수로 『주변에 미치는 영향』은 수량 감소, 수질변화, 지반침하로 대별된다.

수량감소에는 ①우물물 등의 감소·고갈 ②지표수·용수의 수량감소·고갈 등이 있으며 특수한 문제로서 ③지하수 유동의 저해나 ④식생에의 영향이 있으며 ⑤수질 변화는 지하수위 저하에 따른 것이다.

(1) 우물물 등의 감소·고갈

수도가 부설되어 있지 않는 지역은 물론 수도가 부설되

어 있어도 음료수나 잡용수 등 생활용수를 소규모 얕은 우물에 의존하고 있는 민가가 매우 많다. 특히 예로부터 군락 등에서는 우물물을 이용하고 있는 경우가 대부분이다. 이러한 민가가 터널 노선 주변에 존재하는 경우 지하수위 저하에 의해 우물물 이용에 장애를 미치는 경우가 있다.

이 외에도, 농업용, 공사용, 수도용 등 지하수 이용에 장애를 주는 경우가 있으며 특히, 수온이나 수질의 문제에서 다른 수원으로 교체하는 것이 곤란한 경우도 있기 때문에 충분한 사전검토가 필요하다.

또 터널 부근의 용천이나 온천 등에 영향을 주는 경우가 있다. 그 외 지하수로부터 물이 공급되어 유지되고 있는 연못의 경우는 지하수위가 저하함으로써 공급이 단절되어 물이 감소하는 경우가 있다.

(2) 지표수·용수의 수량 감소 및 고갈

산간부의 계곡을 따라서 분포하는 논 등에서는 관개용수를 연못수나 용천수에 의존하는 경우가 많다. 지표수나 용천수의 수량이 감소하면 논 경작에 중대한 장애를 끼칠 가능성이 있다. 또 잡용수, 양어용수 등을 지표수에 의존하고 있는 경우에도 생활이나 생업활동에 직접 큰 영향을 미치게 된다.

직접적인 물 이용에는 물론이고 폭포 또는 못 등의 유수가 소멸되거나 크게 감소함으로써 그 지역의 종교적인 환경이나 관광 명소로서의 가치를 훼손하는 경우도 있다.

최근에는 물 환경에 대한 의식도 높아지고 있어 물이용에 대한 영향뿐만 아니라 물 환경면에 대한 영향에 있어서도 배려할 필요가 커지고 있다.

(3) 지하수 유동의 저해

지하수 유동방향에 교차하는 터널이 건설되는 경우 토피가 낮다면 터널이 지하수 흐름의 차수벽으로서의 효과를 일으켜 지하수 유동을 저해하는 경우가 있다. 이 경우 상류 쪽에서는 지하수가 dam up되고, 지하수의 용출이

## 기술 강좌

### 산악터널 공사의 지하수 문제(I)

나 배수불량·담수현상이 발생하고 하류 쪽에서는 역으로 지하수위가 저하하여 우물의 고갈이 문제가 되는 경우가 있다(그림 16).

또 구조물의 배면이 충분히 매립되지 않은 채 구조물의 지표부위의 출구가 종단적으로 낮은 위치에 있는 경우가 되면 배면이 큰 수로가 되어, 자연의 지하수 유동계와는 전혀 다른 새로운 지하수 유동계가 형성되어 큰 문제를 일으키는 경우가 있다.

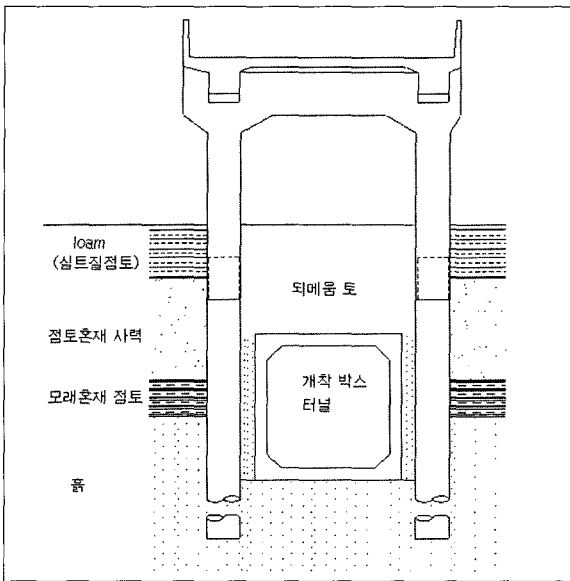


그림 16. 지하수 유동 저해의 예<sup>1)</sup>

#### (4) 식생에 미치는 영향

「터널을 건설하면 산의 푸름을 잃는다.」라는 소리를 들은 적이 있지만 일본의 이러한 습윤 기후 하에서는 일반적으로 식생은 토양수에 의존하고 있고 토양수는 강우의 양에 지배를 받기 때문에 지하수위 저하가 직접적으로 식생에 영향을 미치는 가능성은 거의 없다.

대량의 용수가 있었던 과거의 산악터널의 경우에서도 그러한 원인으로 터널 주변의 식생 활력이 저하하였다고 하는 예는 들은 일이 없다. 이것은 터널 시공 전후의 토양 수분의 변화를 계측한 사례로부터도 알 수 있다(그림 17).

그러나 단나(Tanna)터널의 예와 같이 고추냉이 등 일부 친수성 식물은 용천수나 연못수에 의존하고 있는 경우가 있기 때문에 지하수위 저하에 따른 용천수 고갈·연못수 감소의 영향을 받는 경우가 있다.

#### (5) 수질의 변화

터널 굴착 중 및 완성 후에 갱내수의 수온이나 수질이 문제가 되는 경우가 있다. pH에 문제가 있는 물, 극단적으로 수온이 낮은 혹은 높은 물, 유해물질을 함유한 물 등이 그 예이다.

또한 지하수위 저하나 압기공법을 채용한 현장 부근에서는 지반이 공기에 반응하여 산화상태로 됨으로서 수질이 변화되어 문제가 발생하기도 한다.

더욱이 해안부근의 공사에서는 지하수위 저하에 따라

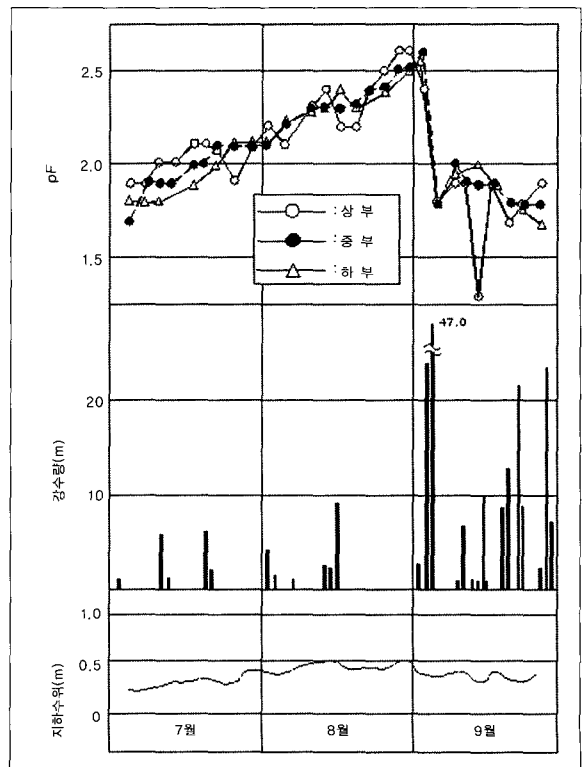


그림 17. 토양수분(pF치)의 변동 예<sup>1)</sup>

## 기술강좌

### 산악터널 공사의 지하수 문제(I)

해수와 담수의 경계면이 육지 쪽으로 후퇴함으로써 지하수가 염수화 되어, 물이용에 장애를 주는 경우가 있다.

그 외 터널 용수의 배수에 의한 수질·수온에의 영향 문제, 지수에 따른 약액 등에 의한 지하수 오염, 수위저하에 따른 산결공기의 발생, 산성지반화의 문제 등도 있다.

#### (6) 지반침하

지하수위의 저하에 따라 지반침하(탈수압축침하)는 산악 터널에서는 무시해도 된다고 생각하고 있지만 다음과 같은 사례도 있어 무시할 수는 없다.

염령(Shiomine)터널에서는 100m의 토피가 있는 분지부에서 침하가 있다고 하였다. 상월(Joetsu) 신간선(Shinkansen)의 고기(Takasaki)·상모(Jomo) 고원역 사이의 터널부에서는 연질의 응회암질 지반의 탈수압축에 의해 송전선이 약간 기울어졌다는 보고도 있다.

### 1.2.4 기존 터널의 영향 사례

기존 터널에서 발생한 고갈 문제 중, 대표적인 사례로서 단나(Tanna)터널과 염령(Shiomine)터널의 사례를 소개한다.

#### (1) 단나(Tanna)터널

동해도선의 단나터널은 16년 공사기간을 거쳐 1934년에 준공하였다. 단나터널이 난공사였던 가장 큰 요인이 된 대량용수는 동시에 커다란 갈수문제를 발생시켜 건설에 따른 환경문제의 시작이라고도 한다.

구 단나터널의 전체연장 7.8km의 구간 중에서는 단나 단층을 시작으로 다수의 단층파쇄대가 존재하고 있다. 굴착 중 대량의 용수가 발생한 것은 단층운동에 의해 파쇄되어 점토화된 부분으로 인해 흐름이 막힌 물이 굴착에 의해 한순간에 분출하였기 때문이라고 여겨지고 있다.

굴착기간을 통틀어 열해(Atami)방향 갱구에서는 30~60m<sup>3</sup>/min 정도, 합남(Hakonan) 방향 갱구에서는 40~60m<sup>3</sup>/min 정도의 용수가 발생하고 있다. 특히, 합남

(Hakonan)방향에서는 peak 시에는 210m<sup>3</sup>/min이라는 대량 집중용수량을 기록하고 있다.

터널 굴착에 의한 갈수현상은 1926년 8월경부터 현저해졌다. 그 시기는 열해(Atami) 방향에서 용수량이 증가하기 시작하고 합남(Hakonan) 방향에서 약 210m<sup>3</sup>/min의 집중용수가 발생한 시기이다. 기존조사에 의하면 갈수현상은 단나분지로부터 시작하여 주변의 부락에 넓게 퍼져, 우물물·용수의 고갈, 하천유량의 감소시켰다. 영향 범위는 약 37km<sup>2</sup>의 타원형으로 광범위하게 미친다고 추정되고 있다(그림 18).

또 항상용수량은 74m<sup>3</sup>/min(1977년 조사)가 되고 있다. 기존조사보고에 따르면 이 항상용수량을 사용하여 물수지법에 의해 유출면적을 추정해보면 약 43km<sup>2</sup>이 되며 구 단나터널의 갈수면적과 거의 같게 된다.

신 단나터널은 구 단나터널 굴착 26년 후인 1959년에 굴착을 시작하였다. 구 터널의 북측의 약간 높은 위치(7m 정도)에서 평행하게 굴착하였다. 굴착중의 용수량은 최대일 경우도 5m<sup>3</sup>/min이하로 유지하고 있으며 갈수현상이 발생하는 범위도 구 터널에 비교하면 소규모(약 16km<sup>2</sup>)였다. 신 터널의 항상용수량은 약 4m<sup>3</sup>/min(1977년 조사)였다.

또 온천의 마을, 열해의 발생은 단나터널로부터 나오는 대량의 항상용수 없이는 불가능하기 때문에 수자원개발로서 터널의 역할은 분지 부분의 갈수문제와는 분리해서 높게 평가되어야만 한다.

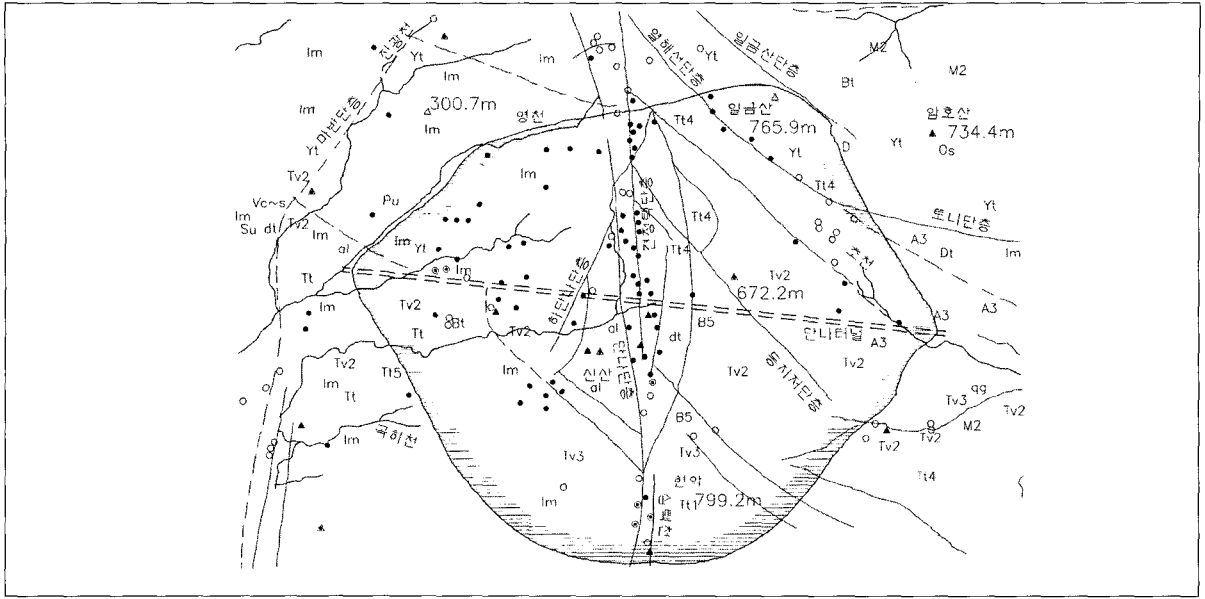
#### (2) 염령(Shiomine)터널

중앙본선 염령터널은 장야(Nagano)현 강곡(Okaya)시 염고(Shiojiri)시 사이의 6.2km의 터널로 노선 주변에서는 주로 연못수를 논 관개용수, 음용·잡용으로 사용하고 있었다. 갈수문제의 발생이 예상되었기 때문에 시공전후를 통해서 수문관측이 실시되었고 터널 굴착의 영향이 파악되었다.

터널 용수량은 굴착의 진보에 따라 염령누층 중의 화산

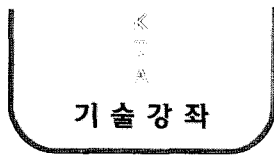
# 기술강좌

## 산악터널 공사의 지하수 문제(I)



		지질시대	기호	암상	범례			
신생대	제 4 기	총적층	al	원력, 모래, 점토	/			
		애추 및 붕적토	dt	원력, 모래, 점토				
	홍적세	총적세~ 홍적세	富士(Fuji) 화산분출물	lm	화산회, 경석	단층, 선상구조		
			箱根(Hakone) 화산분출물	Pu	경석류 퇴적물			
		홍적세		Su	암상류 퇴적물	구丹那터널의 유출범위		
			화산사력	Vc~s	화산역암, 화산사			
			箱根화산응암류	Os	안산암(암호산형)			
			日金山데사이트	D	석영안산암			
			多賀(Taga) 화산암류	湯河原(Yugawara) 화산암류	Yt		안산암, 응회각력암	고갈된 용수
					Tt5		현무암	▲ ▲
					Tt4		안산암, 응회각력암	
					Tv2~3		집괴암, 안산암	
		Tt1	응회각력암					
	신 제 3 기	선신세	下丹那(Shitatanna) 혈암	Ss	혈암, 경석응회암	○		
佃현무암류			B5	현무암, 응회각력암				
天昭山현무암류			B2	현무암, 응회각력암				
중신세		相ノ原안산암류	A3	변질안산암(온천여토화)	●			
		野中(Nonaka)층	Tt	열해응회암(온천여토화)				
		不動(Fudo)층	Bt	현무암				
	관입암체	qg	석영반려암	용수 · 유수가 있는 지점				
湯ヶ島(Yugashima) 층군	M2	변질안산암, 녹색응회암(온천여토화)						

그림 18. 丹那터널의 영향 범위<sup>[4]</sup>



산악터널 공사의 물문제(1)

성퇴적물 중에서 급증하며 최대로 57m<sup>3</sup>/min에 까지 달  
한 후, 관통 후에는 25m<sup>3</sup>/min에 까지 점차 감소하여 관  
통 4년 후에는 5m<sup>3</sup>/min 정도까지 감소하였다.

지하수위의 저하는 하류 쪽에서 약 3km까지 미쳤지만  
상류 쪽에서는 2km 미만으로 작았다. 노선 부근의 지하  
수위는 100m를 초과하여 지하하고 있다.

이 결과 하천 유량에 있어서도 기저유량이나 감쇄경향  
이 변화하였다는 사실을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 大島洋志(1983), 터널굴착에 의한 용수와 이로 인한 물수지 변화에 관한 수문지질학적 연구, 철도기술연구보고, No.1228.
2. 渡邊貫(1936), 지질공학, 고금서원, pp.284-285.
3. 大島洋志(2002), 나의 지질공학수상(隨想)
4. 塚本良則 編(1992), 삼림수문학, 분에이도우 출판, 1992
5. 村井宏, 岩崎勇作(1975), 임지의 물 및 토양보전기능에 관한 연구 (제1보), 임시연보 274
6. Meinzer, O.E.(1923), The Occurrence of Ground Water in the United States., USGS., Water Supply Paper, 489
7. 터널기술협회(1983), 터널시공에 따른 용수 및 갈수에 관한 조사연구 (제 2호) 보고서
8. 嶋田純, 筑波터널의 굴착에 따른 결정질 암종의 지하수거동과 수질변화, Hydrology, Vol.5, No.1, pp.42-54.
9. 藤原幹之, 터널굴착에 의한 지하수의 영향, 일본응용지질학회 평성10년도 연구발표회 강연논문집, pp.193~196.
10. 大島洋志·高木盛男·塚本秀明(1987), 철도터널의 용수량 실태조사, 터널과 지하, Vol.18, No.1, pp.45.
11. 大島洋志(1996), 지반공학자를 위한 지형·지질정보의 활용법 입문 12지형지질정보의 활용례 (제6호)-지하굴착공사와 지하수환경문제, 흙과 기초, Vol.44, No.7
12. 大島洋志·藤原幹之(1998), 터널굴착과 동반하는 지하수 영향평가, 지하수기술, 제40권, 제8호
13. 大島洋志(1999), 건설공사에 관한 지하수의 다양한 문제, 평성 11년도 심포지움 예고집, 일본응용지질학회
14. 村上郁夫·大島洋志·塚本良則(1977), 丹那터널의 용수·갈수는 어떠한 메커니즘인가, 터널과 지하, Vol.8, No.10  
\* 집필에 관해서는 상기 이외에 하기의 문헌 등도 참고하였음
15. 大島洋志, 西森紳一(1979), 터널공사를 대상으로 한 수문조사법의 연구, 철도기술연구보, No.1108
16. 토질공학회(1980), 건설공사와 지하수, (라이브러리 19)
17. 日野幹雄 외 공역(1983), 카-크비- 새로운 수문학, 아사쿠라서점
18. 新藤静夫(2000), 산지의 지하수, 평성12년 추계강습스트, 지하수 기술협회, pp.19-32