



II. 터널과 지하수

1. 서언

최근 국토의 효율적인 이용을 위하여 고속철도, 지하철 등의 교통시설을 위한 터널과 산업 폐기물 처리 시설, 에너지 저장시설, 공장 및 발전소 등을 위한 지하공간에 대한 수요가 증대되고 있다. 과거에 필요했던 터널은 도로 및 철도 터널이 주종을 이루었으므로 터널이 산악지에 주로 건설되었다. 특별한 경우가 아니고는 산악터널에서 지하수 문제가 크게 대두되지 않았다. 그러나 작금에는 지하철 터널, 위락 및 상업시설 등 도심지에 지하공간을 설치하는 경우가 빈번하게 되었다. 도심지는 그 지대가 높지 않을 뿐 아니라 각종 하천 인근으로 터널을 건설해야 하는 경우도 왕왕 발생한다. 따라서, 과다 지하수로 인한 제반 문제가 도심지 터널 시공시, 또한 시공후 사용할 때에 빈번하게 발생되고 있다. 특히, 한강 하부나 한강주변에 터널을 설치해야 하는 경우는 그 수위가 높아, 수압으로 인한 제반 문제를 처리해야 하는 당면 과제들이 있었다. 옛날 은(殷)나라 시대에는 치산치수(治山治水)라고 산과 물을 잘 다스릴 수 있는 사람이 황제가 된 역사를 우리는 잘 알고 있다. 자연의 물은 워낙 거대하여 인위적으로 그 힘을 막는 것은 현명하지 못하다. 물을 잘 모셔야 하는 것이 engineering이 아닌가 싶다. 도심지 터널 현장에 가보면

물이 유출되는 경우 무조건 grouting으로 물을 막으려 한다. 특별한 경우가 아니면 물은 인위적으로 막도록 고생할 것이 아니라, 잘 유도 처리하여 배수가 되도록 하는 것이 전체적인 안정상 유리할 때가 많다. 도심지 터널 설계개념은 대별하여 두 가지가 있다. 그 하나는 배수 개념에 의한 설계요, 다른 하나는 비배수 개념(완전 방수)에 의한 설계를 말한다. 이제까지 서울 지하철 터널설계의 경우 1~5호선까지는 주로 배수개념에 의하여 지하철 터널이 설계되었으나, 6호선에 가서는 완전 방수로 설계하도록 기본 요구 조건이 이루어져, 각 설계회사들이 고심하는 것을 종종 보아왔다.

한편, 배수 개념에 의한 터널 설계의 개념은 실제로 산악지와 같이 지하수가 터널의 아래 부분에 존재하는 경우를 주로 일컬어 왔으나, 비록 터널 내로 지하수가 흘러 들어서 궁극적으로 터널외부 filter재에 이르러서는 수압이 '0'이 되어도 전술한 완전 배수 상태와는 완전히 다른 경우가 있다. 즉, 지하수의 공급원이 충분하기 때문에 지하수위의 하강이 크지 않은 경우 지하수가 계속적으로 터널로 흘러 들어와서 지하수가 흐르는 방향으로 침투압이 작용되는 경우가 있기 때문이다. 따라서, 본 강좌에서는 이제까지도 계속적으로 문제되어 왔고, 앞으로도 도심지에 터널을 뚫는 한 계속 문제가 발생할 것으로 생각되어지는 터널설계시 지하수의 고려방안에 대하여 서술하고자 한다.

* 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

2. 지하수 흐름의 이론적 고찰

지반속에 있는 지하수는 수두가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 흐름의 속도는 수두의 차이와 지반의 투수성에 따라 달라진다. 만일 수두가 같아 정수압으로 정체해 있는 경우에도 굴착 등의 인위적인 영향으로 조건이 바뀌어 수두차가 발생하면 지하수는 흐르게 된다. 흐름에 대한 형태는 지반조건의 복잡성과 함께 그 형상이 워낙 복잡하여 자연계에서 완전히 규명하는 것은 불가능하다. 다만 거시적인 관점에서 지하수도 일정한 법칙을 가지고 흐르는 것으로 간주하고 있으며 그 흐름의 기본 원리를 정리하면 다음과 같다.

다르시의 법칙(Darcy's law)과 연속성(continuity)을 기초로 지하수 흐름에 대한 방정식을 유도할 수 있으며, 경계조건(boundary condition)별 지하수의 흐름에 대한 기본 방정식은 다음과 같다.

(1) 정상류(steady-state flow) : 유출량(outflow) = 유입량(inflow)의 조건으로부터 유도되며 다음의 편미분 방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

(2) 부정류(transient flow) : 유출량(outflow)과 유입량(inflow)이 같을 수 없는 경우를 말하며 (유출량 - 유입량)만큼 체적수축이 발생한다.

1) 피압 대수층 (confined aquifer)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) \\ = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 S_s : 비저류 계수(specific storage coefficient)

= 단위 수두저하에 의한 대수층의 단위 부피당 배출되는 물의 양
 $\approx 10^{-5} \sim 10^{-7} / m$

2) 자유수면 대수층(unconfined aquifer)

① 내부 : 기본방정식이 피압대수층과 동일하나, 자유 수면의 경우 S_s 값이 극소하여 오히려 (1)식에 가깝다.

② 자유수면(free water surface) : 수두 움직임은 그림 1과 같으며 수두차는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

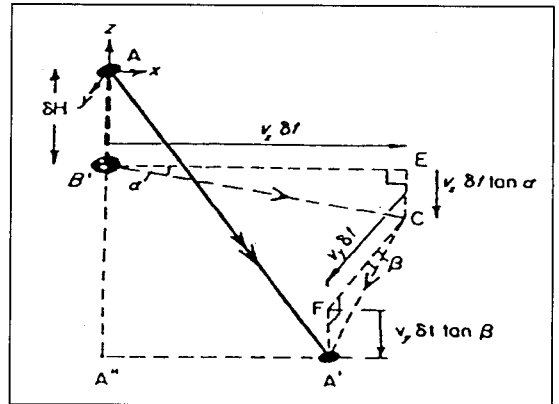


그림 1. 자유 수두면에서의 수두 움직임

$$AB' = \frac{-\delta t}{S_y} (V_z + V_x \tan \alpha + V_y \tan \beta) \quad (3)$$

여기서, S_y (비산출량, specific yield) : 자유수면의 단위 저하에 의한 단위 면 적당 배출되는 물의 양
 $\approx 0.01 \sim 0.30$

터널내로 유입으로 인한 투수의 기본방정식의 경우, 하저 터널과 같이 지하수 공급원이 충분한 경우는 정상류 흐름이 발생하며, 지하수가 충분치 않아 지하수위가 저하되는 경우는 자유수면 대수층에서의 부정류 흐름이 지배한다.

3. 지하수를 고려한 터널설계기본

3.1 배수조건에 따른 터널의 종류

라이닝 배면부에 지하수가 체류하면 라이닝 배면에 과대한 수압이 작용하게 되어 터널의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 누수에 의하여 내부설비의 기능저하, 라이닝의 재질약화 및 유지관리상의 문제 등을 초래할 수 있으므로, 터널 설계시 지하수의 합리적인 고려방안이 요구된다.

표1. 배수조건에 따른 터널의 비교

	배수공법	비배수공법(완전방수공법)
형식	방수포를 천정부와 측벽부에 설치하고 유입수를 터널내부로 유도하여 배수처리	터널 전단면에 방수포에 의한 차수층을 설치하여 지하수의 유입을 완전차단
장점	<ul style="list-style-type: none"> 라이닝의 수압을 고려하지 않으므로 구조적으로 얇은 무근콘크리트 라이닝도 가능하다. 특수대단면의 시공이 가능하다. 누수시 보수가 용이하다. 시공비가 적게 든다. 	<ul style="list-style-type: none"> 유지비가 적게 든다. 터널 내부가 청결하며 관리가 용이하다. 지하수위의 변화가 없으므로 주변환경에 영향을 미치지 않는다.
단점	<ul style="list-style-type: none"> 자연배수가 불가능한 경우에 유지비가 많이 든다. 지하수위의 저하로 주변지반침하와 지하수 이용에 문제가 생길 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 시공비가 많이 든다. 또한 완전한 시공이 어렵다. 특수 대단면에서는 단면이 커서 비경제적이다. 누수가 발생하면 보수비가 많이 들고 완전보수가 어렵다. 라이닝의 두께가 커지고 그에 따라 철근이 요구된다.
적용	<ul style="list-style-type: none"> 지질조건이 양호 주변에 구조물이 없을 때 지하수가 낮을 때 	<ul style="list-style-type: none"> 지질조건이 불량 지하수가 높거나, 지하수의 공급이 많을 때 도심등 주변에 중요구조물이 존재할 때

일반적으로 지하수를 고려한 터널의 설계방법은 크게 두 가지로 분류하는데 라이닝 배면에 지하수를 유도하는 배수공을 매설하는 배수공법과 터널 굴착 후 라이닝의 주변을 완전방수 처리하여 라이닝 내부로 지하수가 침투하지 못하도록 하는 비배수 공법(완전방수공법)이 있다. 두 공법의 특징은 표 1에 수록한 바와 같이 배수공법은 라이닝의 수압을 고려하지 않으므로 시공비가 적게 드는 장점이 있으나 지하수위의 저하를 초래하여 지표침하 문제를 야기할 뿐

만 아니라 시공후 운영 중에 항상 배수시설을 가동하여야 하는 문제점이 있다. 이에 반하여, 완전방수터널은 라이닝에 정수압이 작용하므로 단면보강으로 인한 시공비가 증가하는 문제점이 있다.

3.2 배수조건에 따른 터널의 설계개념

배수조건에 따른 터널의 설계개념은 표 2에 보인 바와 같이 배수개념의 경우에 지중응력을 전응력으로 고려하고 라이닝에 수압이 걸리지 않는 것으로, NATM에서는 라이닝에 작용하는 하중을 거의 무시할 수 있다. 비배수 개념은 지중응력을 유효응력과 정수압으로 고려하므로 라이닝에 정수압이 작용하게 되며, NATM에서도 수압에 견딜 수 있도록 라이닝의 단면을 보강하여야 한다.

표2. 배수조건에 따른 터널의 설계 개념

	배수개념	비배수개념(완전방수공법)
지중 응력	<p>γ_t : 습윤단위중량</p> <p>$K_0 \cdot \gamma_t \cdot Z$</p> <p>$\gamma_t \cdot Z$</p>	<p>$\gamma_{wb} \cdot \gamma_w$</p> <p>$(K_0 \cdot \gamma_{wb} + \gamma_w) \cdot Z$</p> <p>$(\gamma_{wb} + \gamma_w) \cdot Z$</p>
라이닝에 작용하는 수압	Zero	<p>$\gamma_w \cdot Z$</p> <p>$\gamma_w \cdot (Z+D)$</p>

3.3 지하수를 고려한 터널설계

배수터널의 설계개념은 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정 하에서 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 이 가정은 지하수위가 터널 하단부 아래로 저하되는 경우에는 합당하지만, 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위의 저하가 크지 않은 하천 인접구간 등에서는 침투력(seepage force)이 라이닝에 작용하므로 수압을 고려하지 않으면 터널안정성

에 문제가 발생할 수 있다. 또한 국내의 지하철 터널에서 실제 배수층을 슛크리트층과 라이닝 사이에 설치함으로써 투수계수가 적은 슛크리트층에 상당한 수압이 작용하게 될 가능성도 존재한다. 표 3에 나타난 바와 같이 지하수위의 저하가 크지 않은 배수터널에서는 지하수의 흐름이 발생하며 이로 인하여 지중 응력의 상태가 변하므로 라이닝에 영향을 끼친다. 표 4에 보인 바와 같이 침투가 발생하는 터널의 지중 응력은 유효응력과 침투압이며, 침투경계에서는 정수압이 작용하다가 라이닝 배수층에서 수압이 '0' 이 된다. 이와 같이 라이닝 배수층에 걸리는 수압이 '0' 이나, 지하수가 터널 하단부 이하로 하강한 배수 터널과 비교해 보면 지중의 응력상태는 현저하게 다르다.

표3. 배수조건에 따른 터널해석

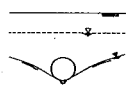
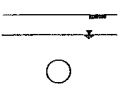
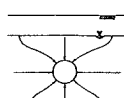
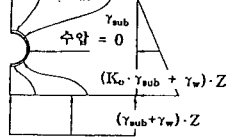
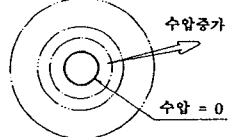
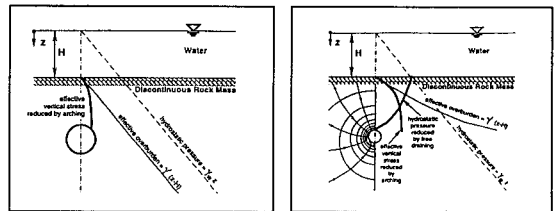
	배수개념	비배수개념 (완전방수공개념)	침투를 고려한 배수개념
개념			
지하수위	배수에 의한 강하	변동 없음	변동 없음
침투	발생	발생 없음	발생
해석 조건	해석 경계부	전응력 (=유효응력)	유효응력 + 정수압
	지중 응력	유효응력 (=전응력)	유효응력 + 정수압
	라이닝에 작용하는 수압	0	정수압

표4. 침투를 고려한 터널설계

지중응력	라이닝에 작용하는 수압
	

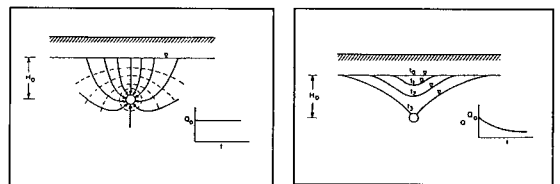
상기에서 언급한 바와 같이 실제 침투가 발생하는 터널의 라이닝 설계는, 해석경계부는 유효응력과 정수압이 작용하는 방수개념을 적용하고, 라이닝에 걸

리는 수압은 0이며, 지중에는 해석경계부와 라이닝과의 수두차(터널 중심에서의 지하수위)로 인한 정상류(steady state)의 흐름으로 인한 유효응력과 침투압을 적용해야 한다. 흙 자체는 아칭현상에 의하여, 토압의 감소를 가져올 수 있으나, 침투압은 물이 흙 사이로 흘러감으로 인하여 생성되는 압력이기 때문에 아칭현상이 존재하지 않아 큰 압력이 터널의 지보 시스템에 작용될 수 있다. 해저(海底)터널에 대하여 아칭으로 토압이 감소한 경우와 침투압으로 인하여 흙의 무게가 증가하게 된 예가 그림 2에 표시되어 있다.



(a) 방수식 터널의 경우 (b) 배수식 터널의 경우
그림 2. 해저터널에서 배수조건에 따른 터널 상부의 연직응력 비교

그렇다면 실제 현장의 조건은 어떤 것인지 유추해 보자. 만일, 하저(河底), 해저(海底)터널 등 아예 수위선이 지표면보다 높은 경우에는 당연히 정상류 조건이다. 한편 산악 부근과 같이 비록 지하수위가 처음에 존재하였다 해도 터널굴착으로 인하여 지하수가 저하되고 지하수의 뚜렷한 공급원이 없다면 이는 완전배수개념으로 설계하여도 무방할 것이다. 다만, 궁극적으로 배수개념으로 간다고 하더라도 그림 3(b)에서와 같이 부정류흐름(transient flow)이 되어 이 때의 지하수 유입량에 대한 검토는 해 볼 필요가 있다.



(a) 정상류 상태 (b) 부정류 상태

그림 3. 배수터널에서 지하수 유입형태

3.4 지하수 유입량 해석방법

배수형 터널의 경우 터널내로 유입되는 지하수는 슛크리트층과 콘크리트 라이닝 사이에 설치된 배수층을 따라 터널측면 하단과 인버트의 배수관으로 유도되어 배수된다. 지하수의 공급이 충분하여 지하수 위의 변화가 없게 되면 지하수의 흐름은 정상류(steady-state flow)가 되며, 지하수의 공급이 제한되어 있을 경우에는 부정류(transient flow)가 되게 된다. 터널 주위 지하수의 흐름이 '정상류인가' 아니면 '부정류인가'를 판단하는 것은 터널의 배수형식을 결정하는 중요한 요건이 됨은 전 절에서 이미 서술한 바와 같다.

지하수 이동에 따른 지하수 유입량은 흙속의 지하수 흐름의 기본방정식으로부터 구할 수 있으며, 일반적으로 수치해석기법을 사용하여 구한다. 여러 종류의 유입량 해석 프로그램들이 개발되어 있지만 간편성 때문에 자주 사용되는 경험식에 대한 예를 들면 다음과 같다.

(1) 정상류 해석을 위한 경험식

Goodman 등(1965)에 의해 제시된 식은 등방성 균질 지반에서 터널내로 유입되는 지하수 유입량 산정공식으로 식 (4)와 같다. 본 공식의 적용을 위해서는 균일한 지반층을 대변하기 위한 등가투수계수를 사용해야 하며 터널의 단면이 원형이 아닌 구간은 주변장과 비슷한 일정한 터널반경을 가지는 원형단면으로 가정하여야 한다.

$$Q = \frac{2\pi k H_0}{\ln(2H/r)} \quad (4)$$

여기서, Q : 유량 ($m^3/sec/m$)

k : 투수계수 (m/sec)

r : 터널반경 (m)

H_0 : 터널중심으로부터
지하수위까지의 수두차 (m)

H : 지하수의 침투거리 (m)

(2) 부정류 해석을 위한 경험식

부정류의 해석은 다음과 같은 유량 산정공식을 사용할 수 있다.

$$Q(t) = (8 \frac{C}{3} k H_0^3 S_y t)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서, S_y : 비산출량, 즉 자유수면의 단위 저하에 의한 단위면적당

배출되는 물의 양 $\approx 0.01 \sim 0.30$

C : 임의 상수 ≈ 0.75 (Goodman 등이 제안)

k : 투수계수 (m/day)

H_0 : 터널중심으로부터 지하수위까지의 수두차 (m)

$Q(t)$: 시간 t 일 때의 단위폭당 누가유량 (m^3/m)

식 (5)는 누가유량 산정공식이므로 단위 시간당의 유입량을 계산하기 위하여는 누가유량의 차로부터 구하여야 한다.

3.5 터널 유도배수층의 통수능력

배수형 터널에서 완전히 공사가 완료된 후에, 콘크리트 라이닝과 1차 지보 시스템에서 주된 역할을 하는 슛크리트 사이에 설치된 부직포로 된 유도배수층으로 지하수가 유입되고 이 유도층을 따라서 터널 저부에 있는 측방배수관 또는 중앙배수관까지 흐르게 되며, 배수관으로 유입된 지하수는 다시 집수정으로 흘러서, 집수정으로부터 펌핑작업으로 외부로 배출되어 진다. 여기에서 우리가 짚고 넘어가야 할 문제들이 있다. 첫째는, 라이닝과 슛크리트 사이에 설치된 부직포가 지하수를 유도배수하기에 충분한 통수능력이 있는가 하는 점이다. 3mm의 두께로 된 부직포는 만일에 부직포에 외부로부터 압력이 가해져 압착되는 경우 통수능력이 급격히 떨어지는 것으로 보고되어 있다. 또한, 둘째로 만일 외부 원지반이 이산현상(dispersiv)을 띠는 경우 부직포의 간극이 막힐 가능성(clogging)도 있으며, 이 경우 더더욱 통수능력이 저하되어 터널 라이닝에 추가적인 압력이 작

용할 수 있음을 밝혀둔다. 다음절에서는 필터재의 투수특성 및 통수능력을 서술하고자 한다.

(1) 필터재의 투수 특성

필터재로 사용되는 지오텍스타일은 니들 펀칭 장섬유 부직포를 주로 사용하며, 국내에서 사용되는 대표적인 장섬유 부직포는 P.E.T(polyester)의 재질로 제조되었으며 표 5의 물성은 한국원사직물시험연구소의 역학적 실험장치를 사용하여 측정된 것이다.

표5. 실험에 사용된 지오텍스타일의 물성

중량 (g/m ²)	311.2	인장강도 (kg/cm)	36.6
인장신도 (%)	60~100	수직투수계수 (cm/sec)	2.1×10 ⁻¹
두께 (mm)	2.8	EOS (mm)	0.103
비중	1.35	섬도(denier)	4.74

지오텍스타일이 압축응력을 받게 되면 두께가 감소하게 된다. 지오텍스타일의 전수성은 두께에 비례하게 되므로 지오텍스타일의 두께변화가 배수능력에 현저한 영향을 미치게된다. 지오텍스타일의 하중에 의한 두께 변화를 구하기 위해서 지오텍스타일을 2cm이상의 두께가 되도록 겹친 다음 각 하중 단계에서의 시료의 두께를 다이얼 게이지(dial gauge)로 측정하여 다음 해당되는 지오텍스타일의 개수로 나눈 평균값을 구하여 보았다. 그림 4는 지오텍스타일의 압축응력에 대한 두께의 변화를 도시한 것이다.

평면 투수계수를 계산할 경우 압축응력에 따른 지오텍스타일의 두께의 변화는 식(6)의 hyperbolic 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\epsilon_n = \frac{\sigma'_n}{a+b\sigma'_n} \quad (6)$$

그림 4의 실험결과를 이용하여 curve fitting으로 구해본 결과 a=0.00515446, b=0.0101039의 결과를 얻었으며, a와 b는 압축응력과 변형량의 관계로 계산되어진 지오텍스타일에 관계된 상수이다.

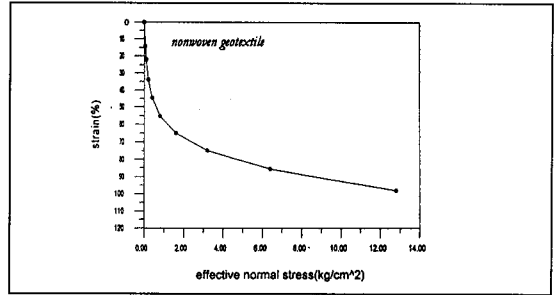


그림 4. 지오텍스타일의 하중에 따른 변형률

배수용 지오텍스타일의 투수성은 물이 지오텍스타일의 평면을 따라 흐르는 평면투수성으로 고려되어지며 수류의 통수단면은 지오텍스타일의 단면이 된다. 또는 평면투수계수에 두께를 곱한 전수성(transmissivity)이 지오텍스타일의 배수능력을 평가하는 기준이 될 수 있다. 식(7),(8)을 이용하여 압축응력에 따른 평면 투수계수를 구해보면 그림 5와 같다.

$$k_p = \frac{q_p L}{Ah} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{q_p L}{Wh} \quad (8)$$

- 여기서 θ = 전수성 계수(transmissivity)
- k_p = 평면투수계수
- q_p = 유량 (L3/T)
- A = 지오텍스타일의 단면(W×t)
- t = 지오텍스타일의 두께
- h = 지오텍스타일 양단에서의 수두차
- L = 지오텍스타일의 길이

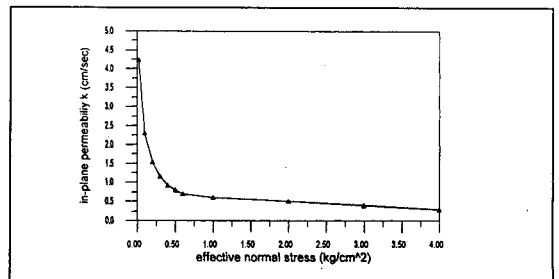


그림 5. 압축력에 따른 평면투수계수의 변화

(2) 터널에서의 배수성능 평가

터널에 설치되는 지오텍스타일의 배수성능평가를 위해서, 본 장에서는 침투를 고려한 배수개념으로 원형단면의 예제해석을 수행하여 보았다.

터널해석은 유한 차분법(finite difference method, FDM) 알고리즘을 이용한 지반구조 해석 프로그램인 'FLAC' (fast Langrangian analysis of continua)을 이용하였다. 본 해석에서 사용된 FLAC은 유체에 대한 Laplace방정식과 구성방정식(constitutive equation)을 동시에 적용할 수 있으므로 흙과 지하수의 상호작용에 의한 지반 및 지하수의 거동해석이 가능하다. 따라서 지하수의 흐름해석도 터널해석과 동일한 프로그램으로 수행하였으며, 침투를 고려한 배수개념 해석 시에는 라이닝타설 후 응력계산과 침투해석을 동시에 실시하였다. 본 예제에서 택한 해석조건은 해석경계부에서는 「유효응력 + 정수압」이 작용하고, 라이닝 배면에 작용하는 수압이 0이며, 지중응력은 터널중심부에서 지하수위까지의 수두차에 의한 정상류 흐름으로 인한 「유효응력 + 침투수압」의 상태이다.

원형단면의 지반은 층적으로 구성된 사질토로서, 지반상수 및 지반조건은 그림 6에 나타내었다. 해석에 사용된 터널의 단면형상은 그림 7에 보인 바와 같다. 터널의 배수재는 방수막과 숏크리트 사이에 설치하게 되며, 배수재는 숏크리트를 타설하고 응력의 분배와 변형이 완료된 후 설치하게 되므로, 작용하는 하중은 내부 라이닝이 타설될 때 자중에 의해 영향을 받게 된다. 즉 그림 8에서와 같이 터널의 바닥 부에서 최대의 압축력을 받게 된다. 라이닝의 단위중량을 $2.5t/m^3$, 터널의 높이 10m, 축압계수를 0.2로 본다면 최대 $5t/m^2$ 정도가 배수재에 작용하는 압축응력으로 볼 수 있다. 따라서 그림 5로부터 최대값 $0.5kg/cm^2$ 에 해당하는 투수계수 $0.75cm/sec$ 를 배수재의 투수계수로 사용하였다.

그림 9는 터널 및 주변 지반에서 지하수의 흐름양상, 그림 10은 터널내 배수재에서의 흐름특성을 각각 나타내고 있다. 그림 11에서 알 수 있는 것처럼

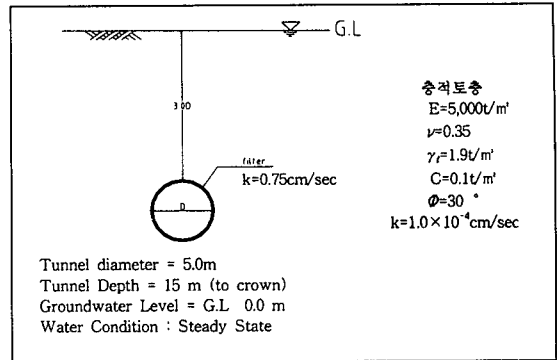


그림 6. 지반조건 및 지반상수

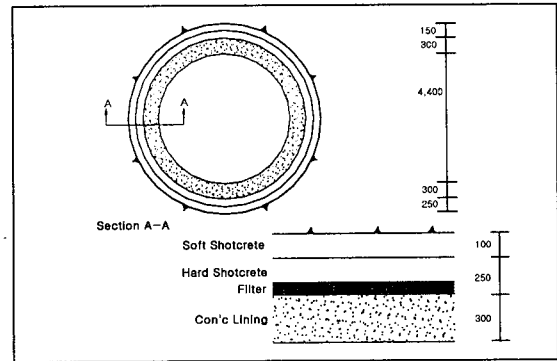


그림 7. 터널 단면도

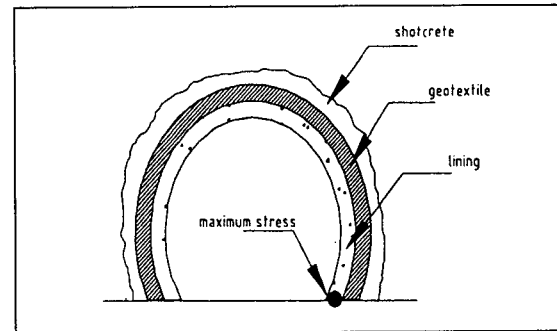


그림 8. 터널에서 지오텍스타일이 받는 최대응력

$300g/m^2$ 부직포를 사용하는 터널에서 배면 수압은 0(zero)으로 떨어지지 않는 것을 알 수 있으며, 지오텍스타일의 투수계수 $0.75cm/sec$ 에서 터널주변지반의 지하수는 터널내 설치된 배수재를 따라 원활한 배수가 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. 그림 11은 $300g/m^2$

부직포를 사용하는 터널주위에서의 수압분포를 나타내고 있으며 그림 12는 부직포에 작용하는 압축응력에 따른 터널 천정부에서의 최대 수압을 나타내고 있다. 압축응력이 증가할수록 터널 천정부에서의 수압이 0(zero)으로 떨어지지 않음을 알 수 있다.

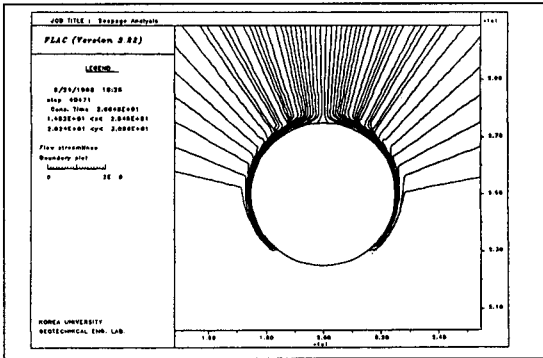


그림 9. 터널 및 주변지반에서 지하수의 흐름양상 (flow streamlines)

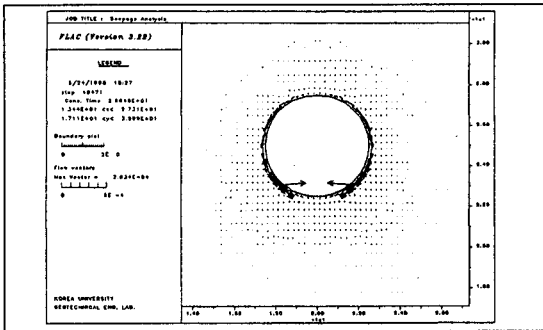


그림 10. 터널 배수재에서 흐름 특성 (flow vectors)

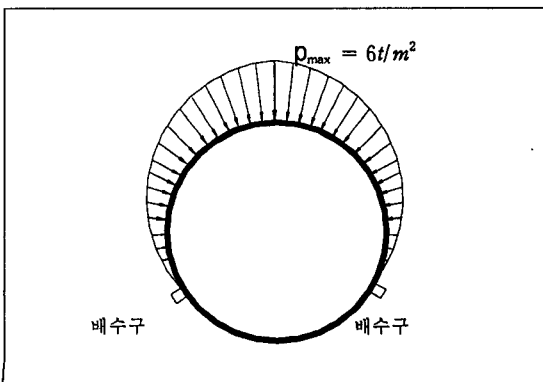


그림 11. 터널 주변에서의 수압분포

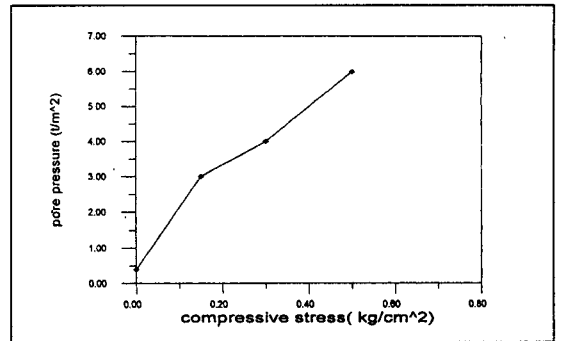


그림 12. 부직포에 작용하는 압축응력에 따른 터널 주변에서의 수압

4. 외국의 하저·해저터널 시공사례

터널의 설계·시공에서 물의 흐름에 대한 고려를 해야 하는 가장 대표적인 예가 하저 또는 해저에 터널을 뚫는 경우일 것이다. 전 세계적으로 가장 대표적인 해저터널을 꼽아보면 영국과 프랑스를 잇는 'Channel' 터널과, 일본에서 완성한 '세이칸' 터널 일 것이다. 두 개의 터널은 그 지질구조가 전혀 다르며, 설계·시공된 개념도 다르다. 본 장에서는 두 터널의 기본적인 설계개념의 차이를 서술하고자 한다.

4.1 Channel 터널 (유로 터널)

터널은 가능한 얇게 뚫어야 길이가 짧아지므로 경제적이 된다. 그러나 무한정 얇게 할 수만은 없다. 얇은 지층일수록 지반이 풍화가 많이 되어 시공이 어려운 뿐만 아니라, 지하수 유입량도 많아지게 되기 때문이다. 물론, 이 경우 완전방수로 계획할 수 있지만 아무리 뚫수록 얇게 터널을 설치한다해도 그 수압이 대단하므로 라이닝의 두께가 상상할 수 없을 정도로 두꺼워져야 한다는 문제가 대두된다.

Channel 터널은 그 지질구조가 비교적 안정되고 간단하여 잔층에 터널이 계획된 경우이다. 그림 13에서와 같이 지층은 주로 chalk로 이루어져 있으며, 특히 지표 하 40m되는 곳의 투수성이 급격히 감소하여 배수터널로 설계하더라도 유입량이 극소할 것으로 판단되는 'chalk marl' 층이 존재한다(그림

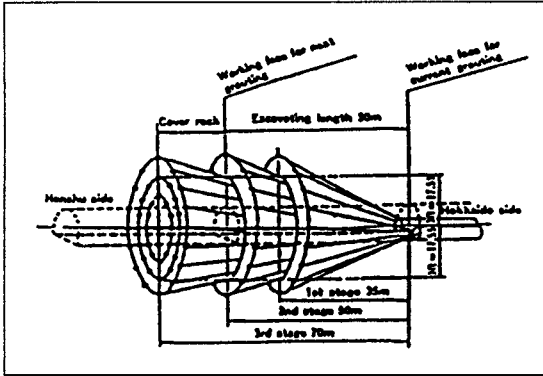


그림 18. 세이칸 터널의 그라우팅 개념도

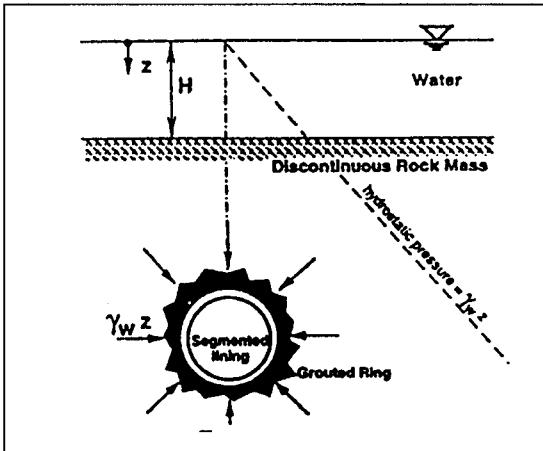


그림 19. 그라우팅 링 외부에 작용하는 수압(세이칸 터널)

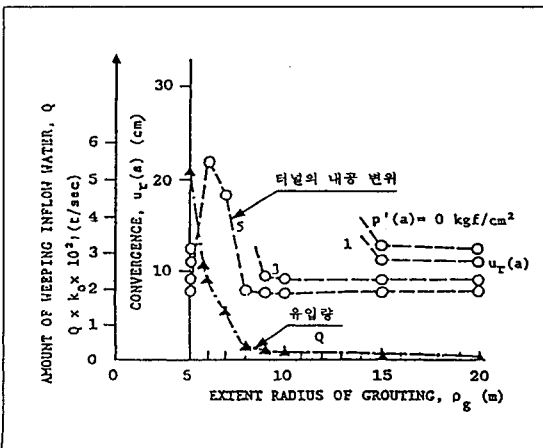


그림 20. 그라우팅 최적두께 결정

주는 것이 공학적 견지에서 불가능하기 때문이다. 따라서, 그림 18과 같은 방법으로 터널 주위로 그라우팅을 해주어 터널내로 유입되는 지하수 양을 최대한으로 막고, 최후로 유입되는 양만 집중정에 모아 유출시킨다는 개념을 도입하였다. 여기에서 한가지 반드시 기술적으로 검토되어야 할 사항이 있다. 터널 주위로 그라우팅 작업을 해 주면 그라우팅 실시지역은 여타의 지역보다 상대적으로 불투수성 성향이 크므로 그림 19에서 보여주는 것과 같이 오히려 그라우팅 링 외부에 $\gamma_w \cdot z$ 의 큰 수압이 작용된다는 점이다. 이러한 큰 수압이 그라우팅 zone을 지나면서 소산되어 이 zone에 큰 투수력이 작용되는 결과를 가져오게 된다. 따라서, 그림 20에서와 같이 그라우팅의 두께에 대한 설계는 유입량이 작아지는 정도뿐만 아니라, 그라우팅 zone 외부에 작용되는 수압으로 인하여 발생하는 변위를 제어할 수 있는 정도까지 해 주어야 한다는 두 가지 요건을 다 만족시키는 방향으로 이루어졌음을 말해 둔다. 즉, 터널에 작용되는 투수력이 전체 터널 설계를 지배하는 큰 인자가 되었다는 결론에 도달한다.

5. 배수형 터널과 비배수형 터널의 선택

최근에 국내에서 배수형을 채택할 것인지 아니면 비배수형 터널이 우리가 가야할 방향인가에 대한 논란이 끊임없이 일고 있다. 실제로 서울지하철 6호선 일부구간에서 또는 통신구 터널 등에서는 비배수형으로 설계 시공되었으나, 누수로 인하여 원래의 목적대로 유지관리를 하지 못하고 터널 저부에 설치된 유공관으로 배수시키는 외부 배수형으로 변경된 경우가 허다하다. 본 장에서는 고려하여야 할 요소들을 종합하여 배수형 및 비배수형 터널의 선택과 이에 따른 문제점들을 다음에 요약한다.

5.1 배수형 터널의 선택

배수형 터널은 근본적으로 콘크리트 라이닝에 수

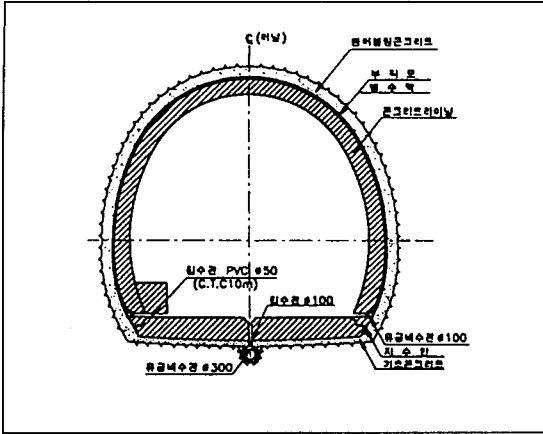


그림 21. 내부 배수형 단면 개념도

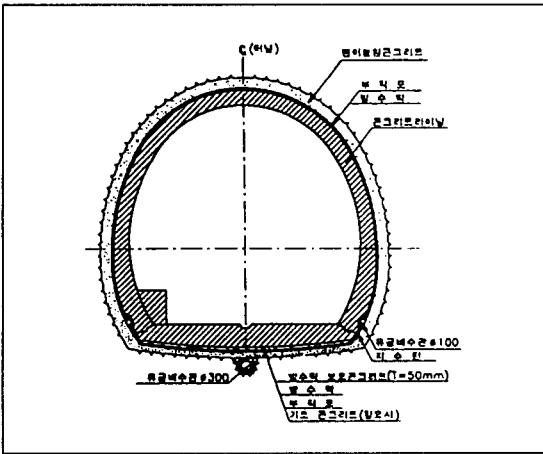


그림 22. 외부 배수형 단면 개념도

압이 작용하지 않도록 하는 터널의 구조개념이다. 이 형식은 기존에 국내에서 빈번히 적용해 온 형식이며 터널의 배수시설은 수명기간동안 유입수를 원활히 처리할 수 있도록 계획하여야 한다. 배수형 터널은 배수방식에 따라 내부배수형과 외부배수형으로 구분하며, 내부배수형(그림 21)은 콘크리트 라이닝 내부에 배수로를 설치하여 배수하는 형식이며, 외부배수형(그림 22)는 콘크리트 라이닝밖에 배수로를 설치하는 형식을 말한다. 외부배수형 터널을 서울 지하철 건설본부에서는 '전주형 방수'라는 용어로 표기하기로 하였다.

터널 내부를 완전히 건조한 상태로 유지하여야 하거나 내부에 습기에 민감한 시설물이 있을 경우 또는 유해 지하수로부터 콘크리트 라이닝을 보호해 주어야 할 경우에는 외부배수형을 채택하는 것이 바람직하다. 이 경우에는 배수로 유지관리에 대한 대책을 수립하여야 한다. 배수형 터널은 유입수처리 및 시설물 유지관리비를 증가시키기 때문에 유입수량을 최대한로 억제해주는 시공법을 병행하여야 하며 터널의 내구연한동안 배수시설의 기능이 충분히 유지되어 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않도록 고려하여야 한다. 본 배수형 터널은 유입수량이 적거나 지하수위 저하가 심각하지 않아 사회·경제적인 문제를 야기하지 않는 경우에 채택한다. 특히, 지하수위 수두는 높지만 지반의 투수성이 적어 터널 내부로의 유입수가 소량일 것으로 판단되는 지역은 모두 이러한 배수 터널을 채택하여야 한다. 강이나 하천하부 등과 같이 지하수 유입이 많을 것으로 예상되는 지반 조건에서 적극적인 차수 그라우팅을 실시하여 유입수량을 현격히 감소시켰을 경우에도 본 배수형 터널을 적용하도록 한다.

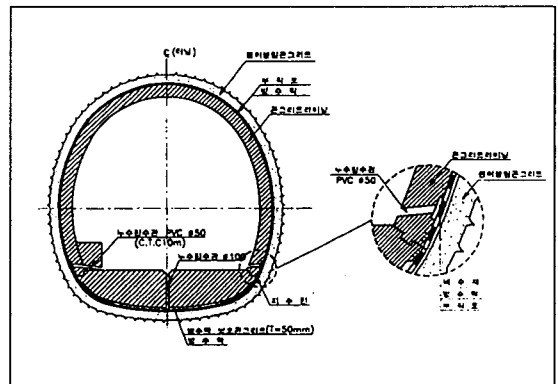


그림 23. 비배수 단면 개념도

5.2 비배수형 터널의 선택

지하수위 저하로 인한 터널주위의 지반의 침하가 발생하고 주요 시설물에 영향을 미쳐 사회·경제적인 손실발생이 우려되어 지하수위를 보존하여야 하

거나, 차수공법으로는 지하수의 유입량을 감소시킬 수 없어서 고가의 유지비를 장기간 지불하여야 할 경우 등과 같은 경우에는 지하수를 인위적으로 배수시키지 않는 비배수형 터널을 채택한다. 이 경우에는 터널굴착시 일시적으로 저하되었던 지하수위가 시간이 경과되면서 원래의 상태로 복원되기 때문에 지하수압이 콘크리트 라이닝에 작용하게 되므로 이에 대한 적합한 조치를 취하여야 한다. 특히, 콘크리트의 품질을 확보하고 시공중 방수막이 손상되지 않도록 하여야 하며 시공이음부 및 개착구조물과의 이음부 방수에 대한 상세보완이 필요하다. 비배수형 터널의 개념을 그림 23에 나타내었다.

선진국에서의 터널 배수개념을 살펴보면 과거에는 배수형식을 채택하였으나 환경보존의 중요성이 강조되면서 방수형식으로 바뀌게 되었고 이러한 목적을 달성하기 위한 노력이 계속 경주되어 왔다. 이러한 추세에 비추어 볼 때 우리 나라의 경우에도 비배수형 터널 적용은 미래 지향적인 선택으로 평가할 수 있으나, 형식전환에 있어서 작금까지는 심도있는 기술적인 검토가 미흡하며 국내의 시공기술이 이를 뒷받침해주지 못함을 지적하고 싶다. 선진국의 방수형 터널에서의 방수방식과 국내의 그것을 비교해 보면 크게 다음의 몇 가지의 차이점이 있음을 알 수 있다.

- 1) 선진국에서는 콘크리트 라이닝으로 하여금 더 큰 비중의 방수기능을 유지하도록 하는 반면 국내에서는 방수막에 더 의존하고 있다.
- 2) 선진국에서는 방수기능을 국내의 경우와 같이 방수막에 더 크게 의존하고자 할 경우에는 2겹의 방수막을 시공한다.
- 3) 특히, 시공이음부에 대한 누수대책이 철저한 반면 국내의 경우는 이에 대한 고려가 없는 실정이다.

이러한 관점에서 볼 때 현행 국내의 방수방식으로는 우수한 방수시설을 시공하기는 어렵다고 보아야 할 것이다. 특히 양호한 지반으로 이루어진 산이나 고개 등지를 통과하는 도심도 터널에서의 비배수형 터

널의 채택은 합리적이지 못하며 선진국에서 시행하는 방법과도 상이하게 됨을 간과해서는 안될 것이다.

머지 않아 국내에서도 지하수 보존 등의 환경문제와 배수에 따른 비경제성 문제가 심각하게 대두될 것으로 예측되기 때문에 앞으로 비배수형 터널을 건설하게 되는 경우가 급속히 증가할 것으로 전망된다. 따라서, 비배수형 터널의 방수방식에 대한 다각적이고 종합적인 개선 안을 수립하여 이에 대비하여야 할 것이다. 이러한 개선이 없는 한 비배수형 터널의 적용은 그 실효를 거두지 못할 것이다.

5.3 방수형 터널의 상세

전 절에서 서술한대로 비배수형 터널은 라이닝이 수압을 견디도록 설계하여야 한다는 개념 정립만으로는 완벽한 비배수형 터널의 설계·시공이 될 수 없다. 터널의 방수방식에 대한 종합적인 개선 안이 있어야 한다. NATM터널의 경우에 대하여 방수상의 문제점을 나열하고 이를 토대로 개선안의 근간으로서 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

(1) NATM터널의 방수상의 문제점

- 1) 방수막의 봉합 불량
 - ▷ 수평·수직접합부는 3겹 봉합으로 특히 불량
- 2) 방수막의 파손
 - ▷ 철근 조립시 파손이 많음
 - ▷ 파손여부 확인이 어렵고 파손부 보수부위는 봉합확인 불가능
- 3) 배수재의 배수능력 저하
 - ▷ 압착 및 세립토가 침투시 통수단면적 감소
 - ▷ 토사지반에서 배수능력 저하발생 가능성이 있음
- 4) 배수재와 방수막의 과소, 과다 이격
 - ▷ 과소 이격시에는 콘크리트 타설로 인하여 방수막 파손
 - ▷ 과다 이격시에는 방수막 배면에 공극 발생
- 5) 분기부 및 접속 구조물과의 방수막 접합
 - ▷ 방수막을 재단하여 덧 붙이기 봉합시 봉합상

- 태가 불량하게 되고 봉합확인 불가능
- ▷ 터널과 접속구조물 방수막의 재질이 상이할 경우(대부분의 경우) 방수막 접합불량으로 누수 발생
- ▷ 개착구조물의 침하, 콘크리트 수축등 변형 발생시 방수막 파손

- 6) 콘크리트라이닝과 개착구조물의 구조물 이음
- ▷ 콘크리트라이닝과 개착구조물은 분리구조로 되어 있음
 - ▷ 콘크리트 라이닝 하부(인버트 부위)와의 이음부에서 개착구조물의 콘크리트 채움 불량으로 공극발생→ 방수막 파손→ 집중누수발생. 이 경우 보수·보강이 불가능

- 7) 비 배수형 터널의 경우 방수
- ▷ 방수막 주위로 높은 정수압이 작용되고 있어 방수막의 미소한 파손에도 누수발생
 - ▷ 누수가 발생되어도 방수막 파손구간을 파악할 수 없고 효율적인 보수·보강 방법이 없음
 - ▷ 계속되는 과다누수는 수압대응의 철근 콘크리트라이닝을 열화시켜 구조적 기능이 저하됨
 - ▷ 철근 조립시 방수막 파손이 가능성이 매우 크며 이를 완벽히 배제할 수 없으며 보수의 확실성이 없음
 - ▷ 과다한 방수막의 파손이나 접합구조물과의 접합이 불량한 경우에는 지하수가 계속 유입되고 이 경우 배수 system의 용량이 부족하면 터널의 기능이 마비됨.

일단 이러한 경우가 발생되면 현실적으로 보수·보강이 불가능하기 때문에 비배수형 터널의 기능을 포기하고 배수형 터널로 간주하여 이에 대한 대비책을 (영구 배수설비, 지하수 저하에 대한 영향 검토와 대처방안) 수립하여야 함

- 8) 배수형 터널의 경우
- ▷ 방수막 주위로 정수압이 작용되지 않아 미소한 방수막 파손으로는 누수가 발생되지 않음
 - ▷ 과다한 방수막 파손이나 접합부를 통한 지하수 유입시에는 배수 system으로 유도 처리 가능

- ▷ 콘크리트 라이닝은 비구조체로서 누수에 의한 콘크리트 열화에 대하여 내구성저하 영향이 적고 보수·보강의 처리가 가능함
- ▷ 배수재의 배수능력 저하와 배수 system의 기능이 마비되면 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하게 되어 구조적 파손을 유발하게 됨

(2) 비배수형 터널의 적용범위

비배수형 터널은 라이닝이 수압을 받는 구조로 설계되어야 하므로 작용 수압에 한계가 있을 수밖에 없다. 외국의 경우를 보더라도 비배수형 터널은 일반적으로 작용지하수압이 4kg/cm²을 한계로 적용하며, 수압이 그 이상 되는 터널에서는 배수형을 채택한다. 실제적으로 4kg/cm²이상의 수압을 라이닝이 견디도록 설계하는 것은 무리라고 생각한다.

(3) 방수등급과 허용누수량

모든 터널을 완전건조상태로 유지해야 할 필요는 없을 것이다. 터널의 기능에 따라서 어느 정도 터널 내로의 누수를 허용할 수 있을 것이다. 예를 들어서 독일의 경우에는 표 6에 예시되어 있는 것과 같이 터널의 용도에 따라 5가지로 방수등급을 나누며, 각 등급에서도 허용누수량을 어느 정도 인정하고 있다. 방수형으로 설계·시공된 외국의 지하철 터널의 경우에 대한 허용누수량을 종합하여 표 7에 나타내었다. 우리나라에서도 터널의 용도에 따라 방수등급을 나누고, 각등급에 따라 허용누수량을 설정하는 것이 필요하다고 하겠다. 우선적으로 서울 지하철 6호선의 경우와 통신구터널에 허용누수량을 제안한 시도가 있었으며, 이러한 노력에 의한 설계기준이 각 터널의 종류와 용도에 따라 설정되어야 할 것이다. 1999년에 제정된 터널 설계 기준에 그 guideline이 제시되어 있다. 터널의 방·배수 system을 정리하여 보면 표 8과 같다.

*STUVA : 독일의 지하교통 연구협회의 실용 터널을 기준한 값임.

*CIRIA : 영국의 Construction Industry

표 6. 터널의 방·배수 구분 기준

방수 등급	내부	상태용도	상태 정의	터널 연장을 기준한 허용 누수량 (l/m ² /dav) 10m 100m
1	완전 건조	주거공간, 저 장실, 작업실	벽면에 수분의 얼룩이 검출 되지 않을 정도의 누수상태	0.02 0.01
2	거의 건조	동결위험이 있는 교통터 널, 정거장 터 널	벽면의 국부적인 장소에 약 간의 수분얼룩이 검출될 수 있는 정도, 수분의 얼룩을 건조한 손으로 접촉하여도 손에 물이 묻지 않을 정도, 흡수지 또는 신문지를 붙여 보아도 붙여진 부분이 습기 로 인해 변색되지 않을 정 도의 누수	0.1 0.05
3	모관 습윤	방수 2등급 이상의 방수가 요구 되지 않는 교 통구간 터널	벽면의 국부적인 장소에 수분 얼룩이 검출되는 정 도, 수분의 얼룩에 흡수지 또는 신문지를 붙였을 경우 습기로 인해 변색되지만 수 분이 방울져 떨어지지 않을 정도의 누수	0.2 0.1
4	물방울 이 가끔 떨어짐	시설물 터널	독립된 장소에서 물방울이 가끔 떨어지는 정도의 누수	0.5 0.2
5	물방울 이 자주 떨어짐	하수터널	독립된 장소에서 물방울이 자주 떨어지거나 방울져 흐 르는 정도	1.0 0.5

표 7. 외국의 지하철 방수형 터널의 허용누수량

(단위 : l/min/100m)

구 분	독일	영국	미국			호주	벨기에
	STUVA	CIRIA	워싱턴, 샌프란 시스코, 아틀랜타	보스턴	볼티모어	버팔로	멜버른 엔트워프
지하철 단선 터널	0.28	1.39	1.25	2.5	0.97	0.28	0.14 0.14

Research and Information Association이 지정 Class A를 기준으로 한 값임.

*미국, 호주, 벨기에의 허용누수량은 Tunneling

and Underground Space Technology (Vol.6, No.3, 1991)에서 발췌한 것으로 터널 주변장이 약 20m인 단선터널을 기준으로 환산한 것임

(4) 방수상세

비배수형 터널의 적용을 위하여는 방수 상세에 대한 정립이 급선무라고 생각한다. 이러한 상세도 설계에 필요한 근간을 다음에 제시한다.

1) 라이닝 콘크리트 및 방수막

비배수형 터널에서 누수를 최소화하기 위하여는 수밀 콘크리트를 사용하여야 하며, 거의 건조한 터널의 방수등급을 이루기 위하여는 이에 추가하여 2중 방수막 등의 채택이 필요하다. 독일에서 사용하는 2중방수막의 예가 그림 24에 나타나 있다.

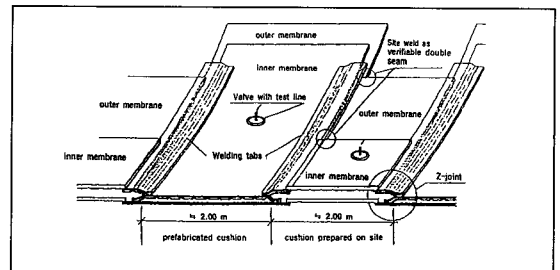


그림 24. 2중 방수막의 구성도 (독일)

2) 지수상세

콘크리트 이음부에는 반드시 지수판을 설치하여야 하며 또한 팽창·수축이 우려되는 곳에도 dilation joint의 설치가 필요하다. 그림 25 및 사진 1에 지수

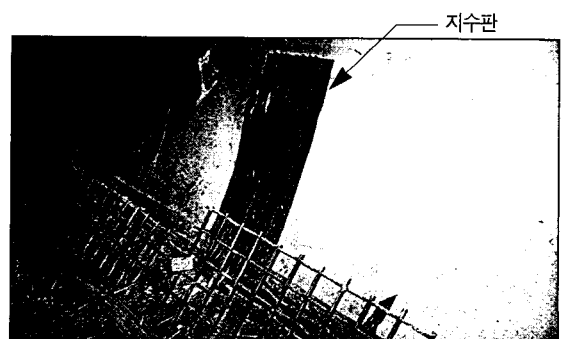


사진 1. 시공이음부 지수판 설치 사진

표 8. 터널의 방·배수 구분 기준

구분	system	적용 조건	적용 시설	특징
배수형 터널 (높은 수압, 양호한 지층에서 사용)	내부유도 배수형	교통이나 방수처리 시설물을 수용하는 공간으로서 습기나 누수를 허용하는 조건	지하철, 철도, 도로 등의 대단면 일반터널(지하수 저하에 대한 영향이 없는 여건)	시공성이 용이하고 공사비 저렴, 보수 보강이 용이
	외부 배수형	비교적 습기에 민감한 시설물, 저장물 등을 수용하는 공간으로서의 터널	통신구, 전력구 등 다소의 습기와 누수가 허용되는 터널(지하수 저하에 대한 영향이 없는 여건)	정교한 시공이 요구되며 배수 System의 유지관리가 필요. 하자발생시 조치 곤란
비배수형 터널(낮은 수압, 지하수가 많고 지층이 불량한 구간에서 적용)	누수유도 처리	교통이나 방수처리 시설물을 수용하는 공간으로서 다소의 습기나 누수를 허용하는 조건	통신구, 전력구 등 다소의 습기와 누수가 허용되는 터널 (수압 3~4kg/cm ² 미만)	수밀 콘크리트 사용. 누수유도장치를 하여 과다 누수 시 수압 해소
	누수차단 처리	습기에 민감한 시설물, 저장물 등을 수용하는 공간으로서의 누수에 대한 제한이 엄격한 조건	주거공간, 습기에 민감한 시설, 건조저장물의 터널	수밀 콘크리트, 2중방수막 등 특수재료의 사용과 정교한 시공으로 고가의 공사비, 하자 발생시 조치 곤란

판 상세가 표시되어 있다. 특히 개착구조물과 터널의 접합부에도 지수상세가 필요하다. (예 : 그림 26)

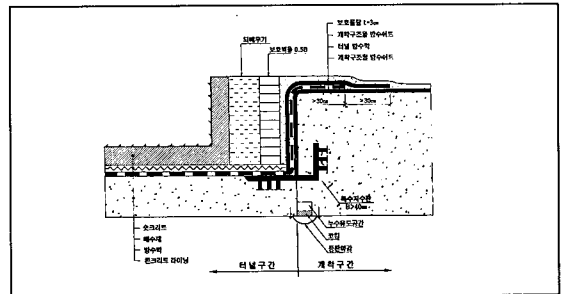
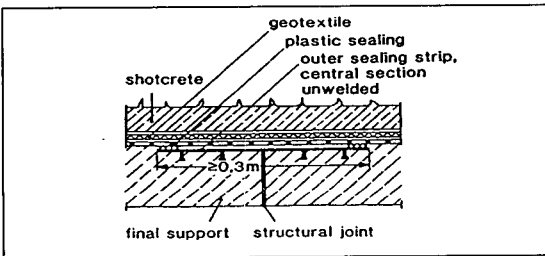


그림 26. 구조물의 접합부 상세 (예)

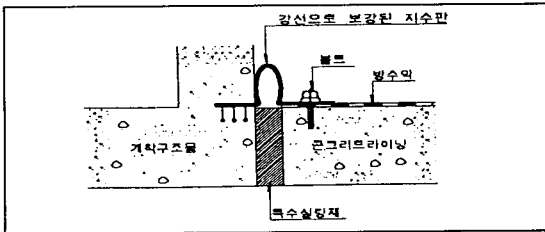


사진 2. 시공이음부 지수판 설치 사진

표 9. 외국과 국내의 실드 터널의 방수 현황 비교

	외국(독일, 일본, 영국 등)	국내
방수등급 설정	· 터널의 사용성에 따라 결정	· 방수등급이 없이 완전 방수 기대
뒤채움 주입	· 동시주입 원칙 · 공자갈 사용	· 설계는 동시주입으로 계획하나, 시 공은 즉시주입으로 이루어짐
실드기 종류	· 지반상태에 따라 조정	· 토압식
유도 배수 시설	· 허용누수량에 따라 계획 · 완전 방수 터널에서도 계획	· 설계시에는 없으나 시공 시에는 누수량으로 인하여 설치 됨
세그먼트 형식	· 주철 세그먼트 ↓ · 콘크리트 세그먼트 ↓ · 개스킷 부착식으로 발전	· 콘크리트 세그먼트
세그먼트 방수	· 접합부, 이음볼트공, 모서리, 홈실(Seal)재, 코팅, 상세 시공방안 제시	· 수 팽창 지수재에 의존

구분	Thermoplastic Waterstop (DIN 18541)		Elastomere Waterstop (DIN 7865)	
	Type	Shape	Type	Shape
Dilation Joint	D		FM	
	DA		FMS	
	FA		AM	
Construction Joint	A		F	
	AA		FS	
			A	

그림 25. 시공이음부의 시공사례 및 지수판 (독일 지하철)

표 10. 쉴드 터널의 누수 취약부 및 원인 요약

취약 부위	원인 추정	비고
1) 세그먼트 연결 부 (특히, 곡선 부) 누수	<ul style="list-style-type: none"> ● 세그먼트의 부정확한 조립 ● 세그먼트의 파손 또는 틈발생에 의한 실제 및 코킹재의 방수 효과 저하 ● 실재의 이탈 초래 ● 계획 선형에 대하여 부정확한 굴착 ● 세그먼트의 부정확한 조립 초래 ● 부적절한 뒤채움 주입 ● 부적합한 실재 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ● 시공중 정밀한 뒤채움 주입 필요 ● 코킹방수 시방 보완 ● 세그먼트 내측 이음부에 코킹흙을 설치하여 코킹재 충전 ● 내부 라이닝을 별도로 설치하지 않는 경우에는 코킹재의 선택 및 시공에 특히 주의 ● 2중 지수재 설치 ● 이음볼트공 공벽보호방법 보완 필요
2) 이음 볼트공의 누수	<ul style="list-style-type: none"> ● 볼트 체결력 저하 ● 이음 볼트공 주변의 손상 	<ul style="list-style-type: none"> ● 이음볼트공간의 간극충진 방법 보완 필요 ● 주입공자체 방수상세 계획필요
3) 주입공 주변의 백태 현상	<ul style="list-style-type: none"> ● 주입공 주변의 배면 공극에 지하수 유입 ● 지하수와 세그먼트의 직접접촉에 의한 백태 발생 	<ul style="list-style-type: none"> ● 접속부 방수 상세계획 추가 필요
4) 수직구와 쉴드 접합부 상·하 부의 누수	<ul style="list-style-type: none"> ● 세그먼트와 수직구 구조물과의 방수방식의 차이 ● 세그먼트는 자체이음부 방수 ● 수직구 구조물은 방수막(sheet) 방수 ● 접속부의 기하학적 복잡성 : 원형 수직구와 원형 세그먼트 라이닝과의 접속 ● 접속부 누수방지를 위한 계획 결여 	

5.4 쉴드 터널의 방수

쉴드 터널은 원칙적으로 방수로 설계되나 역시 누수 취약부로 인하여 누수가 심한 터널이 많음을 알 수 있다. 다음에 간략히 쉴드 터널에서의 방수 및 누수문제를 다루고자 한다.

1) 외국의 쉴드 터널과 국내 쉴드 터널의 방수 현황을 비교하면 다음 표 9와 같다.

2) 국내 쉴드 터널의 누수취약부위 및 원인을 정리하면 다음 표 10과 같다.

표 10에 나타난바와 같은 원인을 보완 할 수 있는 방수 상세법의 개발이 시급하다 하겠다.

참고문헌

1. 건설교통부(1999), 터널설계기준.
2. 이 인모, 김 동진, 이 명재, 남 석우(1993), 터널 설계시 지하수의 고려방안, '93년도 불학술발표회 논문집, 한국지반공학회.
3. 이 인모 외(1994), 경부고속철도 제 OO공구 방·배수식 터널

에 대한 검토 보고서, 고려대학교 생산기술연구소.

4. 이 인모, 남 석우, 이 명재(1994), 정상류 조건하의 토사 터널의 해석 및 설계, 한국지반공학회지, 10(2).
5. 이 상호(1992), 배수용 Geotextile의 평면투수성능 분석, 한국지반공학회지, 8(3).
6. Eisenstein, Z.D.(1994), Large undersea tunnels and the progress of tunnelling technology, tunnelling and under ground space technology, 9(3).
7. Goodman, R.E., Moye, D.G., van Schalkwyk, A., & Javandel, I.(1965), Ground water inflows during tunnel driving, Eng. Geol.,2.
8. Lee, I.M., Park, K.J., & Nam, S.W.(1998), Analysis of an underwater tunnel with the consideration of seepage forces, Proceedings of the world tunnel congress '98 on tunnels and metropolises.
9. Lee, I.M., You, S.H., Park, K.J., & Reddi, L.N.(1999), Clogging phenomena and water carrying capacity of a tunnel drainage system, Proceedings of the world tunnel congress '99 on challenges for the 21st century.