

# 배수형터널내 과다유입수가 터널의 안정에 미치는 영향

- A Study on the Groundwater Effects in the Design of Tunnel Lining -

천 병 식\*<sup>1</sup>

Chun, Byung - Sik

최 송 암\*<sup>2</sup>

Choi, Song - Am

남 순 성\*<sup>3</sup>

Nam, Soon - Sung

---

## Abstract

Generally, the groundwater pressure is not considered in the design of concrete lining of bottom drainage tunnel. This design method implies that the phreatic surface is drawdown to the bottom of tunnel. When the groundwater is continually supplied without changing of groundwater table, there is a possibility at which the groundwater pressure acting on the tunnel lining after the completion of tunnel. Therefore, the safety of tunnel lining must be checked in this case. In this paper, the stability of bottom drainage tunnel which is affected by groundwater discharge is analyzed by using of the Finite Element Method at the 2 sections of subway where the groundwater level has a little change during the construction. As the result of analysis, the grouting for the water tightness and the permanent monitoring system of tunnel are required for maintaining of long-term stability of bottom drainage tunnel for the case of groundwater pressure acting on the tunnel lining is greater than that of design stage.

## 요 지

배수형터널의 설계개념은 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정하에서 터널 라이닝에 작용하는 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같은 설계개념은 지하수위가 터널 하단부 아래로 저하되는 경우에는 합당하지만, 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위 저하가 크지 않은 정상류 상태인 하천 인접구간 등에서는 침투력이 라이닝에 작용할 수 있으므로 이 경우 수압을 고려하지 않으면 터널 안정에 문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 주변 지하수위 저하가 거의 없는 서울지하철 ○호선중 4개 공구중 대표 단면 2개에 대해 배수형터널 내부의 과다유입수가 터널 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하

---

\*<sup>1</sup> 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*<sup>2</sup> 정회원, 공영토건(주) 자상

\*<sup>3</sup> 정회원, 한양대학교 대학원 박사과정

여 침투류 해석 및 라이닝 검토를 유한요소법을 이용하여 검토하였다. 그 결과 터널의 라이닝에 대한 수압이 당초 설계에 비해 다소 크게 나타났으며 터널구조물의 장기적인 안전을 위하여는 차수공의 설치 또는 영구계측 등의 대책이 필요할 것으로 판단되었다.

## 1. 서론

지하수는 우리 생활과 밀접한 관계를 가지고 있는 중요한 자원 중의 하나로써 그것을 대하는 동기, 장소, 시기 및 주변환경등에 따라서 우리 생활에 긍정적 혹은 부정적인 영향을 끼치게 된다. 지하수는 지반 중에 존재하면서 여러 가지 물리적인 법칙에 순응하며 거동하므로 지하공간 개발에 참여하고 있는 기술자들은 신중하고 지혜롭게 이에 대응하지 않으면 큰 재난을 초래할 수 있다. 최근 건물 기초 터파기나 터널굴착등의 지하공간 개발이 활발해짐에 따라 지하수로 기인되는 공학적인 문제점들이 자주 보고되고 있다. 특히, 지하수위 아래의 사질지반 굴착시 지하수 처리는 공사의 성패와 직결되어 있다고 하겠다. 뿐만 아니라 도심지에서는 지하수 배수에 의해 지하수원이 고갈되고 지반이 침하하여 건물이나 시설물들이 파손되기도 하여 심각한 사회문제가 되기도 한다.<sup>1)</sup>

현재 공사 중인 국내 서울지하철 노선의 상당부분이 여러 하천과 연결되어 있는 충적층 지반을 통과하거나 인접해 있다. 따라서 지하철 건설공사에서 지반굴착으로 인한 과도한 지하수의 터널내 유입과 이로 인해 연약해진 충적지층 지반은 붕괴사고 우려가 크고 터널 자체의 안정에도 상당한 영향을 미친다. 이러한 여러 문제점들에 대하여 본 논문에서는 배수형 터널에서의 과다유입수로 인한 터널의 안정에 미치는 영향과 지하수의 수질이 터널 콘크리트 열화에 미치는 영향 등에 대하여 체계전~중앙천 하류지역에 현재 건설 중에 있는 서울지하철 ○호선 중 비교적 저지대이고 인근에 하천이 있는 4개 공구를 대상으로 검토하였다.

연구대상 4개 공구의 집수정에 집수되는 지하수의 펌핑에 소요되는 경비(전기요금, 양수기 손료, 호스손료, 양수공 등)는 1개 공구 당 월평균 10,000,000원으로 4개공구 연간 총비용은 4억 8천만원, 10년후에는 물가상승율을 감

표 1 배수조건에 따른 터널해석 개념

개 념		배수개념	비배수개념(완전방수개념)	침투를 고려한 배수개념
지하수위		배수에 의한 강하	변동없음	변동없음
침 투		발생	발생없음	발생
해 석 조건	해석경계부	전응력(=유효응력)	유효응력 + 정수압	유효응력 + 정수압
	지중응력	유효응력(=전응력)	유효응력 + 정수압	유효응력 + 침투압
	라이닝에 작용하는 수압	0	정수압	0

안하면 약 60억여원이 소요될 것으로 추정되는 바 경제성만을 고려하여도 차수공을 설치하는 방안이 유리할 수 있다.

터널의 라이닝 배면부에 지하수가 위치하면 라이닝 배면에 과대한 수압이 작용할 수도 있어 터널의 안정성을 저하시킬 수가 있으며 뿐만 아니라 누수에 의해 내부설비의 기능 저하, 라이닝의 재질약화 및 유지관리상의 문제 등을 초래할 수 있으므로, 터널 설계시 지하수에 대한 합리적인 대처방안이 요구된다. 일반적으로 터널 설계시 지하수를 고려하는 방법은 배수조건에 따라 두 가지로 분류되는 데, 터널 라이닝 배면에 지하수를 유도하는 배수공을 설치하여 콘크리트 라이닝에 수압이 걸리지 않도록 지하수를 배수시키도록 한 배수공법과 터널 라이닝 주변을 완전배수처리하여 라이닝 내부로 지하수가 침투하지 못하도록 하면서 콘크리트 라이닝이 수압을 받도록 한 배수공법이 있다.<sup>1, 2, 3)</sup>

한편, 이러한 차이점으로 인해 터널 설계시의 설계개념이 상이하며 표 1은 배수조건에 따른 터널해석개념에 대하여 나타낸 것이다.

따라서 본 논문에서는 서울지하철 ○호선 4개 공구를 대상으로 침투류해석을 수행하고 여기서 도출된 수압에 대해 콘크리트라이닝에 대한 안정검토를 수행하여 배수형터널내의 과다 유입수가 터널구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 터널내 유입수 처리개념 및 문제점 분석

터널은 주변 지하수의 처리개념에 따라 크게 배수형터널과 방수형터널로 분류할 수 있는데 배수형터널의 경우는 터널 주변의 지하수를 인위적으로 배수시키는 형식의 터널을 의미하며 방수형터널의 경우는 터널 주변 지하수의 터널 내 유입을 완전히 막는 형식의 터널을 의미한다. 한편, 배수형 터널의 경우 배수의 허용 정도에 따라 완전배수형과 부분배수형으로 세분될 수 있다. 배수형 터널 중 완전배수형이란 터널 내부의 전단면으로 배수를 허용한 경우로

일부 수로터널이나 시공중의 터널이 여기에 해당되며, 부분배수형이란 쾌적한 공간제공을 목적으로 터널의 천정과 측벽까지 방수막을 설치하여 지하수의 유입을 차단하고 유도하여 터널 바닥의 측방향 배수관이나 중앙배수관을 통해서 배수시키도록 설계·시공된 터널을 말한다. 부분배수형 터널을 통상 배수형 터널이라고 칭하며 또한 방/배수형 터널이라고 표현하는 경우도 있다.<sup>2)</sup>

방수형터널의 경우는 주변 지하수위저하로 인한 주변환경파괴 등을 막을 수 있으나 막대한 공사비, 기술상의 어려움 등의 이유로 아직까지 국내에서의 적용사례는 적은 편이다.

### 2.1 지하수 유입유형

지하수위면 이하의 지반중에 배수형 터널을 구축하게 되면 터널은 지중에 설치된 배수관과 같은 역할을 하게 되는데 이에 반응하는 지하수의 형태는 크게 두가지 극단적인 형태로 나눌 수 있다. 즉, 터널 내부로 유입되는 지하수면이 터널바닥까지 저하되는 부정류(transient state flow) 상태(그림 1(가))와, 다른 하나는 계속적인 배수를 실시한다 하더라도 원래의 지하수위를 유지하는 이른바 정상류(steady state flow) 상태(그림 1(나))이다. 전자의 경우는 배출되는 수량이 공급되는 양을 상회할 경우에 발생하며 계절적인 영향을 무시한다면 터널측 상부에는 지하수가 존재하지 않게 된다. 후자의 경우는 지반의 투수성이 크고 공급수원이 무한하여 유입수량이 배출수량을 초과할 경우에 발생하며 계속적인 배수에도 불구하고 터널 상부의 원지하수위가 크게 변화를 받지 않는 상태이다. 대부분 배수형 터널의 실제 상태는 이 두 가지 극단적인 경우의 중간 형태가 될 것으로 보인다. 이와 같이 지하수의 반응은 지반의 특성과 주변환경 및 터널의 배수상태에 따라 큰 차이를 보이게 되므로 특수한 조건하에서는 이들의 종합적이고 신중한 분석이 수반되어야 한다.

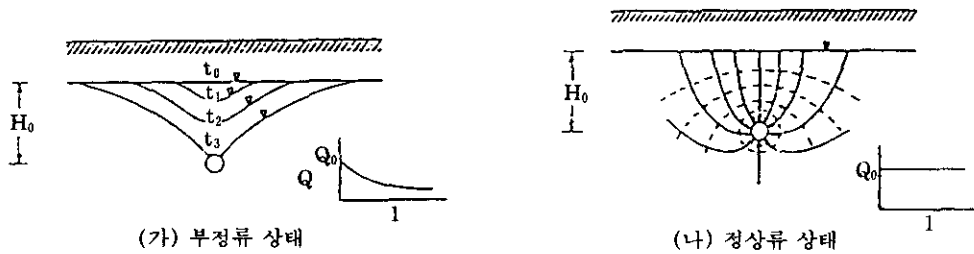


그림 1. 배수터널에서의 지하수 유입형태

## 2.2 배수형터널의 유입수 처리상의 문제점

배수형 터널에서의 콘크리트 라이닝이 완공된 후에는 굴착면 주변의 지하수는 부직포로 된 유도배수층을 따라 흐르고 터널저면의 측방향 배수관이나 중앙 배수관에서 집수되고 정거장에 설치된 집수정으로 보내진 후 외부로 배출된다. 운행중 처리하여야 할 수량은 터널 주변의 지하수위, 지층의 투수계수, 유도배수층(부직포층)의 통수능력(discharge capacity)과의 상관관계에 의해 결정된다. 즉, 주변지반의 지하수위가 낮거나 지반의 투수성이 낮아 유입수량이 유도배수층의 통수능력 보다 적을 경우에는 유입량이 곧 집수정 용량산정용 수량이 된다. 그러나, 유도배수층의 통수능력 보다 더 많은 양의 지하수가 유입될 경우는 유입수량의 완전배제는 불가능하며 유도배수층의 통수량에 의해 집수정의 용량이 결정되어야 한다.

숏크리트층과 방수막 사이에 위치하는 유도배수층의 주 기능은 터널주변에서 숏크리트층으로 침투한 지하수를 터널 하부의 측방향 배수관으로 유도 배수시키는 것이다. 부수적으로 숏크리트 층과 콘크리트 복공층의 전단변형으로 인한 방수막의 손상을 방지하기 위한 완충재로서의 기능도 있다. 따라서 유도배수층에 사용되는 재료는 유도배수를 원활히 할 수 있으면서 마찰저항을 저감시킬 수 있는 토목섬유(이하 부직포)를 사용한다.

부직포의 통수능력은 부직포내의 동수경사와 통수단면적 및 투수성에 의해 좌우된다. 동

수경사는 수두차에 의해 결정되지만 통수단면적 및 투수성은 부직포 자체의 물리화학적 특성에 의해 좌우된다. 부직포는 작용압력에 의해 쉽게 압축되기 때문에 숏크리트면과 콘크리트면이 서로 압착하면 투수성과 통수단면적이 크게 감소한다. 또한 화학적 침식성이 크고 주위 여건에 따라 부직포 간극의 막힘현상(clogging)이 대두될 가능성이 있다.

현장에 설치되어 있는 부직포의 통수능력을 정량적으로 산정하는 데에는 큰 어려움이 있다. 그 이유는 숏크리트 벽면이 거칠고 콘크리트 라이닝 타설시 과연 부직포가 숏크리트면을 따라 완전하게 밀착될 것이냐 하는 의문점 때문이다. 따라서, 일부구간이 잘 밀착되어 다소 통수능력이 저하되더라도 그렇지 못한 인접구간에서 이를 보완해 주기 때문에 배수상의 문제점이 야기되지 않을 수 있다. 이러한 것은 침투류 해석과정에서 검토되어야 할 사항이다.

## 3. 배수형터널 주변지반의 침투류해석 및 콘크리트라이닝 검토

배수형 터널의 설계개념은 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정하에서 터널 라이닝에 작용하는 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 이 가정은 지하수위가 터널 하단부 아래로 저하되는 경우에는 합당하지만, 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위 저하가 크지 않은 하천 인접구간 등에서는 침투력이 라이닝에 작용할 수 있으므로 이로 인한 터널 안

정성에 문제가 발생할 수 있음을 주목하여야 한다. 또한 국내 지하철 터널에서 실제 배수층을 숏크리트층과 라이닝 사이에 설치함으로써 투수계수가 적은 숏크리트층에 상당한 수압이 작용하게 될 가능성도 존재한다.

### 3.1 침투류 해석을 위한 해석단면

본 논문에서는 서울지하철 ○호선 4개공구중 대표적인 복선구간 및 단선병렬구간 2개공구(A, B공구)를 대상으로 FEM("SEEP" program)에 의한 침투류 해석을 실시하여 지층구성, 지반조건, 터널형상, 수위변화에 따른 유입량, 수압을 정량적으로 분석 검토하였다. 침투류 해석에 이용한 단면은 그림 2와 같이 복선구간과 단선병렬 구간으로 풍화암층에 터널이 건설되어 있는 형태이다. 본 구간은 주변에 하천이 존재하고 투수성이 큰 충적층이 깊게 분포하고 있을 뿐만 아니라 용수 유입이 무한하며 지하수위는 Bk260지점의 경우 GL-6m, Bk640지점의 경우는 GL-5m 이다. 본 해석에서는 안전측결과를 위해 측방향배수구의 영향을 고려하

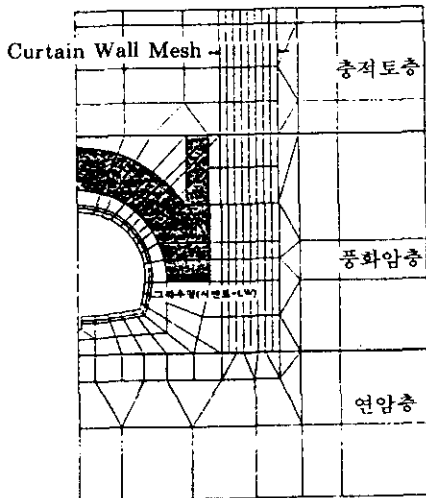
지 않았다.

그림 2의 해석단면에서 (a)의 경우 복선구간(Ak765~Bk360구간)의 대표단면이고 (b)의 경우는 단선병렬구간(Bk360~Bk689구간)의 대표단면이다. 이 2개구간에 발생한 지하수 유입이 Bk200지점의 집수정을 통해 유출된다. 그러므로 침투류 해석에서는 상기 두 구간의 대표단면으로의 지하수 유입량을 근거로 전 집수구간에 대해 산술적으로 전 유입량을 산정하였다.

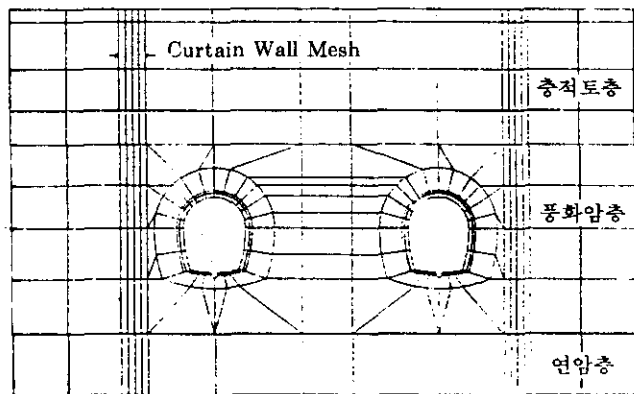
a) Ak765~Bk360구간의 경우(복선터널구간)

Bk260지점을 해석단면으로 선정하였으며 본 단면은 차수공이 적용되어 있는 단면으로 침투류해석시에는 차수공 적용시와 차수공을 적용하지 않을 경우의 각각에 대해 지하수 유입량을 산정하여 복선구간인 Ak765~Bk360구간 유입량 산정에 적용하였으며

b) Bk360~Bk689구간의 경우(단선병렬터널구간)



(a) 복선구간 해석단면(Bk260지점)



(b) 단선병렬구간 해석단면(Bk640지점)

그림 2. 유한요소 해석단면

Bk640지점을 해석단면으로 선정하였으며 본 단면은 차수공이 적용되어 있지 않은 단면으로 침투류 해석시에는 a)항과 같이 차수공 적용시와 차수공을 적용하지 않을 경우의 각각에 대해 지하수 유입량을 산정하여 단선병렬터널구간인 Bk360~Bk689구간 유입량 산정에 적용하였다.

따라서 Bk200지점의 집수정을 통해 유입되는 지하수량은 a)항과 b)항의 합산으로 Ak765~Bk689 구간의 유입수량으로 산정하여 현재 실제로 Bk200지점의 집수정에서 측정된 유입수량과 비교하였다. 본 해석에서는 터널 측방 향배수구는 고려하지 않고 중앙집수관만을 고려하여 해석을 수행하였다.

### 3.2 해석에 적용한 특성치

#### 3.2.1 지반투수계수<sup>4)</sup>

본 연구 대상지반은 지표로부터 매립토층(모래, 자갈), 충적토층, 풍화암층, 연암층의 순서로 분포하고 있으며 각 지층별 투수계수는 기본설계치를 참조하여 터널내 유입수량 및 콘크리트 라이닝 작용수압에 대한 안전 측면에서 다소 큰 값을 적용하였다. 각 지층별 투수계수 및 해석시 적용된 투수계수는 표 2와 같다.

표 2 해석지반의 투수계수

구 분	투수계수 범위 (cm/s)	적용 투수계수 (cm/s)
매립토층	$6.23 \times 10^{-5} \sim 1.68 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
충적토층	$6.23 \times 10^{-5} \sim 1.68 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
풍화암층	$1.49 \times 10^{-5} \sim 3.94 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-4}$
연 암 층	$9.18 \times 10^{-6} \sim 1.41 \times 10^{-5}$	$4. \times 10^{-5}$

#### 3.2.2 슛크리트의 투수계수

스�크리트의 투수계수에 관한 실험 자료가 없어 콘크리트의 투수계수 시험결과와 슛크리트의 시공 기준을 참고로 적용하였다. 일반적으로 콘크리트의 투수계수는 그림 3과 같이 물/

시멘트비에 따라  $10^{-8} \sim 10^{-10}$  cm/s의 범위를 보이며, 슛크리트는 가능한 한 투수성이 작게 시공될 수 있도록 허용 최대 공극률이 12% 이내이어야 하나 터널시공에 따른 불균질성 등을 감안하여 콘크리트보다는 투수성이 큰  $10^{-5}$  cm/s로 정도로 적용하였다.

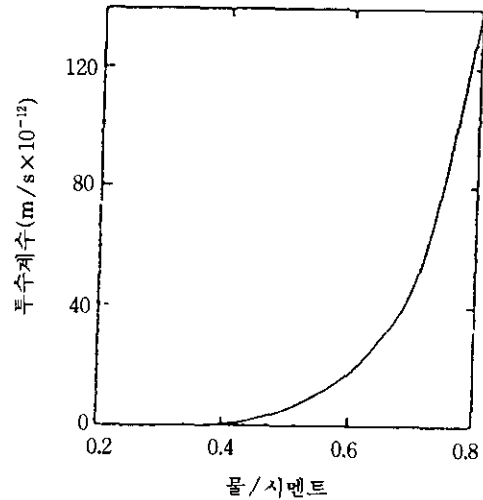


그림 3. 물/시멘트비에 따른 콘크리트 투수계수

#### 3.2.3 부직포 투수계수

부직포의 투수계수는 침투류 해석에서 가장 중요한 인자로서 보통  $1 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-1}$  cm/s이지만, 3mm부직포에 대한 시험결과(그림 4)에 따르면 압축하중을 받는 부직포의 투수계수는 감소하여 대체로  $1 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-1}$  cm/s의 범위를 보이며, 터널시공에 사용된 부직포에도 어느 정도의 압축하중이 작용하리라고 판단된다. 본 연구대상 단면에 사용된 부직포는 P550-NW-210로서 두께는 약 4mm이며 시험결과 투수계수는  $3.1 \times 10^{-1}$  cm/s(한국원사직물 시험연구원, 1994. 10)로 나타났으나 작용하는 압축하중을 고려하여 본 침투류 해석에서는  $2.0 \times 10^{-1}$  cm/s를 적용하였다.

### 3.2.4 그라우팅 지반 투수계수<sup>(6)</sup>

그라우팅 주입지반의 차수효과는 지반에 따라 실내시험의 70~95% 정도로의 연구결과가 나와 있다. 일본에서 사질토층에서의 확인 시험결과는 90% 내외의 차수효과가 나타났으며, 인천에서 풍화암에 실시한 차수 주입효과는 70% 내외로 나타났다. 그리고 서울지하철 ○호선 ○○공구에서의 그라우팅 시험시공 결과 유입수량의 감소율은 65.6%~88.3%의 범위로 확인되었다.

또한, 댐 기초지반에서의 차수 그라우팅 시험 결과 투수계수 감소효과가 90%, 95%일때의 개량지반 투수계수는 원지반 투수계수의 1/10, 1/20인 것으로 나타났다.<sup>(7)</sup> 따라서, 본 해석에서는 그라우팅 지반은 원지반 투수계수의 1/

10을 적용하였다.(표 3 참조)

표 3 그라우팅 지반의 투수계수

지 층	투수계수(cm/s)	
	원 지반	그라우팅 지반
풍화암층	$4.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-5}$

## 3.3 결과분석

### 3.3.1 유입량 산정

터널 내부에 과다 유입지하수량 산정 및 감소대책공법 제시를 위하여 유한요소법을 이용한 침투류 해석결과는 다음과 같다.

프로그램 계산치에 의한 집수유량(4.77  $m^3/min$ )은 실제 Bk200지점 제 3환기구 집수

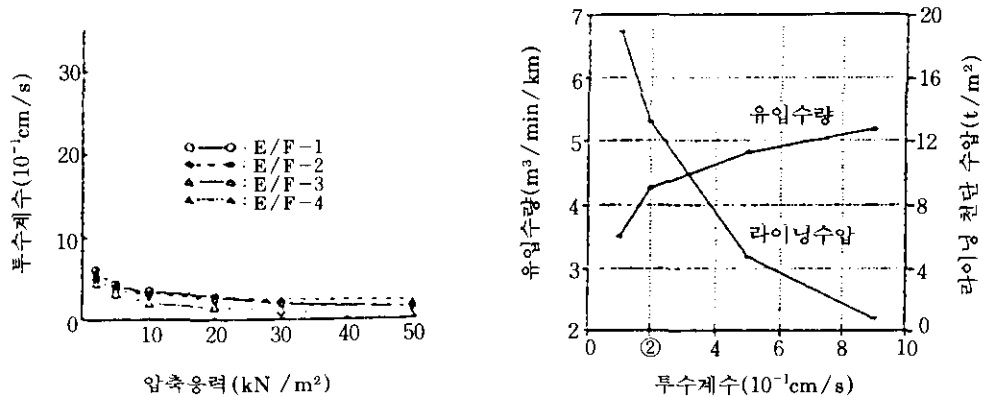


그림 4. 압축응력 · 투수계수 관계<sup>5)</sup>

표 4 유입량 산정

구 분		유입수량 ( $m^3/min$ )	적용구간 (m)	구간 유입수량 ( $m^3/min$ )	총 유입수량 ( $m^3/min$ )
Bk260 (복선)	차수공*무	$4.58e^{-3}$	201	0.92	4.77
	차수공 유	$2.93e^{-3}$	394	1.15	
Bk640 (단선병렬)	차수공 무	$10.35e^{-3}$	231	2.39	
	차수공 유	$3.28e^{-3}$	98	0.31	
Bk200지점 실측유량 ( $m^3/min$ )		3.2			

\* 터널 시공중 터널 crown부에 적용된 보조공법

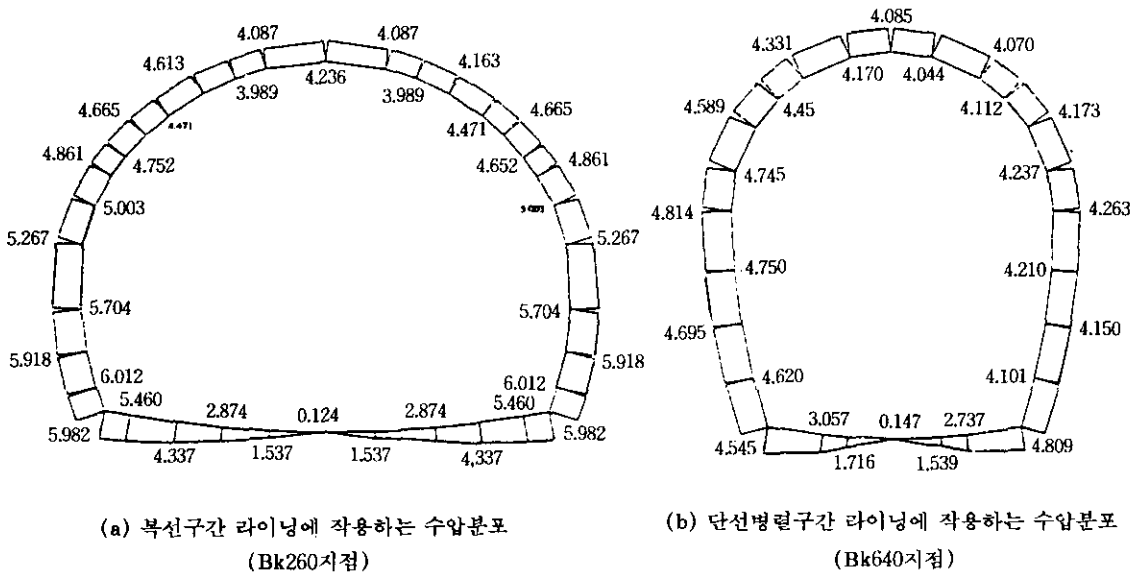


그림 5. 터널 라이닝에 작용하는 수압분포

정에서 측정된 집수유량(3.2m<sup>3</sup>/min)보다 큰 값으로 나타났다. 이는 앞에서 언급하였듯이 전 집수구간에 대한 유입량 산정에 있어서 약간의 차이가 있을 수 있으며 한편으로 집수정에서 측정된 유량은 갈수기인 1994년 12. 22~23일에 측정된 수치로서 지하수위 변화에 따른 차이라고도 생각되기 때문에 집수정 용량에 다소 문제가 있을 것으로 판단된다.

### 3.3.2 콘크리트라이닝에 작용하는 수압분포

FEM 해석결과 그림 2의 a, b의 해석단면에서 라이닝에 작용하는 수압분포는 다음 그림 5와 같다.

## 4. 터널구조물의 안전에 미치는 지하수의 영향 검토

지하철 배수터널에서의 콘크리트 라이닝은 숏크리트면을 통해 침투된 지하수를 숏크리트면과 콘크리트 라이닝 사이에 설치된 배수층을

통해 중앙집수관이나 측벽 배수구로 유도배수함으로써 수압이 전부 배제된 것으로 전제하고 배수형 단. 복선 터널에서는 콘크리트 라이닝을 무근으로, 완전방수형 단. 복선 터널에서는 수압 대응의 철근을 보강하게 된다.

그러나 본 대상구간의 경우 배수터널은 배수층의 통수능력이 숏크리트면으로 침투되는 유입량에 비해 작고 세립분 이동에 의해 배수기능이 저하되는 경우 콘크리트 라이닝에 수압이 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 본 대상구간 터널의 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압 대응 범위를 알아보고 침투류 해석에서 도출한 수압에 대한 콘크리트 라이닝의 안정검토를 위해 SAP 90 프로그램을 이용하여 안정검토를 수행하였다. 본 검토에서는 배수형터널의 기본 설계형인 두께 300mm, 무근콘크리트를 대상으로 안정검토를 수행하였다.

### 4.1 적용 프로그램

“SAP 90” 프로그램은 유한요소해석 프로그램으로 frame, shell, solid, asolid 요소에 대



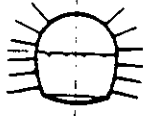
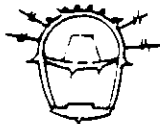




구 분		PS-3		PD-3	
		서울지하철	GTC안	서울지하철	GTC안
적용지반		풍화암	상반 : 풍화암 하반 : 풍화암, 연암	풍화암	상반 : 풍화암 하반 : 풍화암, 연암
굴착공법		Bench Cut	Ring Cut, Long Bench, Mini Bench	Bench Cut, Ring Cut, Shour, Bench	Ring Cut, Long Bench, Mini Bench
굴진장		1.2~1.8m	상반 : 1~1.2m 하반 : 2~2.4m	1.2~1.8m	상반 : 1~1.2m 하반 : 2~2.4m
1차 복공 (숏크리트)	1차	5 } 10 } 5 } 20cm	5 } 10 } 15cm *가인버트	5 } 10 } 5 } 20cm	5 } 10 } 5 } 20cm *가인버트
	2차				
3차					
철당	1차(부작용) 2차(부작용)	$\phi 3m/m-50 \times 50$ $\phi 5m/m-100 \times 100$	$\phi 5m/m-100 \times 100$	$\phi 3m/m-50 \times 50$ $\phi 5m/m-100 \times 100$	$\phi 5m/m-100 \times 100$
류볼트	재원 개수 타설위치	SBD 35, D 35 L=3m 12개/1.2m 주로 측벽	SBD 35, D 35 L=3~4m 주로 측벽	SBD 35, D 35 L=3m 12개/1.2m 주로 측벽	SBD 35, D 35 L=4~6m 주로 측벽
강지보재	재원 타설위치	H-100×100 1.2m	H-100×100 상반 : 1~1.2m 하반 : 2~2.4m	H-125×125 1.2m	H-100×100 상반 : 1~1.2m 하반 : 2~2.4m
2차 복공(콘크리트)		30cm	30cm	30cm	40cm
보조공법(필요시)		Forepoling	Forepoling Face Shotcrete	Forepoling	Forepoling Face Shotcrete
지보패턴			 <Long Bench>  <Mini Bench>		 <Long Bench>  <Mini Bench>

그림 6. 지보패턴도

해 구조물을 분석하는 프로그램으로서 결과치를 자체적으로 분석 및 후처리 기능을 이용하여 도식화한다.

#### 4.2 해석단면의 모델링 및 해석방법

본 해석의 경우도 Bk260지점과 Bk640지점

을 대상으로, 침투류 해석을 통한 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압에 대해 콘크리트 라이닝의 구조적 안정여부를 검토하기 위해 SAP90 프로그램을 이용하여 안정해석을 수행하였다.

배수터널에서의 콘크리트 라이닝은 3.3절에서 언급하였듯이 숏크리트면을 통해 침투된 지하수를 숏크리트면과 콘크리트 라이닝 사이에 설치된 배수층을 통해 중앙집수관이나 측벽 배수구로 유도배수함에 있어서 배수층의 통수능력이 숏크리트면으로 침투되는 유입량에 비해 작고 세립분 이동에 의해 배수기능이 저하되는 경우 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하게 되므로 콘크리트 라이닝에 작용하는 하중은 침투류 해석에 의해 도출된 수압과 자중을 고려하여 안정해석을 수행하였다.

침투류 해석단면과 같이 Bk 260지점은 지보패턴 PD 3단면, Bk640지점은 지보패턴 PS 3 단면으로(그림 6 참조) 콘크리트 라이닝은 보요소로 모델링하였으며 콘크리트 라이닝 콘크리트 법선 방향에는 지반 반력을 고려한 스프링 요소를 설치하였다.

콘크리트 라이닝에 접하는 지반 스프링은 반력이 압축일 경우는 요소로서 기능을 가지나 반력이 인장일 경우는 스프링으로서 기능을 하지 못한다. 따라서, 실제의 조건과 부합되게끔 인장력이 작용하는 스프링요소는 단계적으로 제거함으로써 모든 스프링에 압축력이 작용하도록 반복 해석을 수행하였다.

또한 구조물 대칭성을 고려한 반단면 해석은 가동(roller) 지점 조건으로 인해 변위량이 크게 되어 우각부에 과대한 모멘트가 발생하게 되므로 전단면에 대하여 해석을 수행하였다.

### 4.3 지반 스프링계수 및 콘크리트라이닝 특성치 산정

본 연구대상의 터널구간은 두 지점 모두 풍화암층을 통과하고 있으므로, 터널 주위 지반의 지반변형계수(E)는 FEM해석시 적용되는 30,000t/m<sup>2</sup>으로 가정하였으며 지반 스프링 계수는 이 값을 이용하여 산정하였다.

터널 주변지반의 스프링계수는 터널 단면의 기하학적 특성과 주변지반의 변형특성에 결정되는 바, 본 해석에 적용되는 스프링계수는 상기의 지반변형계수를 이용하여 Wolfer 공식에 의해 결정하였다.

$$K_s = \frac{E_s}{R} \quad (1)$$

여기서,  $K_s$  : 단위접선 길이당 스프링계수

$E_s$  : 주변지반의 변형계수

$R$  : 라이닝 콘크리트의 반경

콘크리트 라이닝(무근)의 두께는  $t=300\text{mm}$ , 설계기준강도는  $\sigma_{ck} = 210\text{kg/cm}^2$ 을 기준으로 하여 결정하였다.

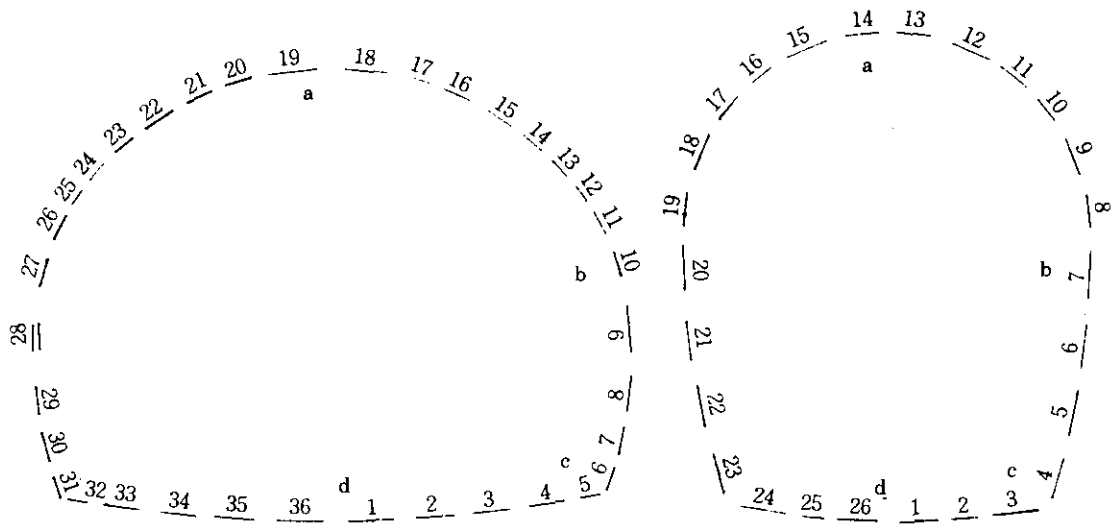
### 4.4 결과분석

유한요소법에 의해 터널단면의 콘크리트 라이닝의 안정성을 검토하기 위해 자중과 수압에 의한 콘크리트 라이닝에 작용하는 단면력(축력, 휨모멘트)과 이로 인한 응력을 각 허용치와 비교 분석하였으며 그 결과는 Bk260지점과 Bk640지점별로 구분하여 터널의 주요 부위별(그림 7 참조)로 표 6에 나타내었다.

표 5 콘크리트 라이닝 특성치 및 설계기준강도

구분	단위중량 $\gamma_c(\text{t/m}^3)$	설계기준강도 $\sigma_{ck}(\text{kg/cm}^2)$	탄성계수 $E(\text{t/m}^2)$	허용압축응력 $\sigma_{ca}(\text{kg/cm}^2)$	허용인장응력 $\sigma_{ta}(\text{kg/cm}^2)$
콘크리트 라이닝	2.3	210	$2.17 \times 10^6$	52.5	6.09

주) 1)  $\sigma_{ca} = 0.25\sigma_{ck}$     2)  $\sigma_{ta} = 0.42\sqrt{\sigma_{ck}}$



(a) 복선구간 해석단면(Bk260지점)

(b) 단선병렬구간 해석단면(Bk640지점)

그림 7. 터널 응력검토 부위

표 6 터널 주요부위별 응력검토

지 점	구 분	응력(kg/cm <sup>2</sup> )		허용응력(kg/cm <sup>2</sup> )		응력검토	
		압 축	인 장	압 축	인 장	압 축	인 장
Bk260	Crown 부 (a)	19.65	3.86	52.5	6.09	O.K	O.K
	S. L 부 (b)	21.38	3.49	52.5	6.09	O.K	O.K
	우 각 부 (c)	52.40	38.05	52.5	6.09	O.K	N.G
	Invert 부 (d)	19.48	8.82	52.5	6.09	O.K	N.G
Bk640	Crown 부 (a)	19.96	11.6	52.5	6.09	O.K	N.G
	S. L 부 (b)	25.24	17.6	52.5	6.09	O.K	N.G
	우 각 부 (c)	40.29	31.91	52.5	6.09	O.K	N.G
	Invert 부 (d)	10.33	2.86	52.5	6.09	O.K	O.K

침투류 해석결과 도출된 수압이 콘크리트 라이닝에 작용하는 경우, Bk260지점과 Bk640지점 모두 국부적으로 작용응력이 허용치를 초과하여 콘크리트 라이닝내에 인장 crack 발생등이 우려되는 것으로 판단되었다.

### 5. 터널내 유입수의 수질분석

각 공구에서 유입되는 지하수의 수질분석을

행한 결과는 표 7과 같다. 본 연구에서 pH는 pH meter를 사용하여 측정하였으며 Na, K, Ca 등 양이온들은 atomic absorption spectroscopy(AAS, GBC 903, Australia)를 이용하여 측정하였다. 또한 Cl<sup>-</sup> 이온은 Volhard filtration 법을 이용하여 측정하였고, 시료 약 500ml를 취하여 증발 후 잔여분의 함량을 계산하여 TGA법(DuPont model 2100)을 이용하여 100℃까지 승온 후 수분을 증발시키고 50℃로

표 7 수질분석 결과

항 목	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	청계천 원수
pH	7.85	7.39	7.30	7.28	7.4	6.87
Cl(ppm)	89	71	27	53	36	68
Na(ppm)	12	57	49	80	51	38
Ca(ppm)	69	66	61	81	81	79
K(ppm)	23	5	8	24	15	16
여과분(ppm)	10	18	20	11	15	233
600℃ 잔류량(%)	-	92.00	96.86	-	-	84.20

낮추어 다시 10℃/min씩 600℃로 승온시켜 잔류량(고상분함량)을 측정하였다.

수질분석결과, pH는 중성~약알칼리 영역의 수질이었고 Cl, Na, Ca, K등은 100ppm이하의 양호한 수질이였다. #4는 양이온들인 Na, Ca, K 등이 대체로 많았으나 콘크리트 열화에는 큰 영향은 없을 것으로 판단된다. 한편 고상잔여분은 10~20ppm, 이중 무기물이 92.0%~96.86%인 것으로 나타났으며 SiO<sub>2</sub>함량은 X-Ray, EDX의 성분 분석결과 #3여과분 중 약 73%가 존재하였다. 예를 들어 분출된 지하수의 고상잔여분중 SiO<sub>2</sub>(토사분)양을 계산하면

$$3,200\text{kg/km}^3/\text{min} \times \frac{20}{1,000,000} \times 20 \times 60 \\ \times 0.9686 \times 0.73 = 65.2\text{kg/day}$$

따라서 이상과 같이 1일 65.2kg의 토사분이 유출되므로 장기적으로 볼때 터널배면에 상당한 공동이 형성될 것으로 보여 터널 구조물의 안정에 상당한 영향이 미칠 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구는 서울지하철 ○호선 중 비교적 저지대이고 인근에 하천이 있는 4개 공구 배수형 터널 내부의 과다유입수가 터널구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토한 것으로서 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 배수형터널의 경우에도 배수에 따른 지하수의 저하가 크지 않은 지반조건에서는 수

압을 고려하지 않은 배수개념으로 해석하는 조건은 실제조건과 상이할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 현재 공사중인 지하철 대표단면 2개 공구를 대상으로 한 침투류 해석결과, 집수유량은 약 4.77m<sup>3</sup>/min로서 갈수기에 Bk200지점 집수정에서 측정된 집수유량 3.2m<sup>3</sup>/min 보다 크게 산정되었으며 설계 유입량과도 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 지하수위 변화에 따른 차이라고도 생각되기 때문에 집수정 용량에 다소 문제가 있을 것으로 판단된다.

(3) 침투류해석결과 도출된 수압에 대해 콘크리트 라이닝의 구조적인 안정성을 검토한 결과, Bk260지점과 Bk640지점 모두 터널 우각부와 국부적으로 작용응력이 허용치를 초과하여 불안정한 것으로 분석되었다. 따라서 일반 배수터널의 설계개념과 동일하게 수압이 배제되는 것으로 설계되는 두께 300mm, 무근의 콘크리트 라이닝으로는 작용수압에 대해 인장 Crack 발생등이 우려되는 것으로 판단되었다.

(4) 각 공구(A, B 공구)에서 유입되는 지하수의 수질분석결과(5개 시료), pH는 7.3~7.8 정도의 중성~약알칼리 영역의 수질이었고 Cl, Na, Ca, K등은 100ppm이하의 양호한 수질이였다. #1의 경우 Cl이 89ppm으로 가장 많았고 #4는 양이온들인 Na, Ca, K 등이 대체로 많았으나 콘크리트 열화에는 큰 영향은 없을 것으로 판단된다. 한편 고상잔여분은 10~20ppm, 이중 무기물이 92.0%~96.86%인 것으로 나타났으며 #3의 경우 지하수 유출을 통한 토사유출량은 약 65.2kg/day로서 장기적으로

볼때 터널배면에 상당한 공동이 형성될 것으로 보여 터널 구조물의 안정에 상당한 영향이 미칠 것으로 판단된다.

따라서 장기적인 지하철의 구조적 안전을 위하여 지하수 유출을 감소시킬 수 있는 차수공의 설치 또는 시설 유지관리 측면에서 볼때 지하수유출이 심한 지역에는 지하수위 및 지반침하를 영구적으로 측정할 수 있는 계측시설을 설치함이 바람직하다.

(5) 지하철 차수공으로서 국내에서 가장 많이 쓰여지고 있는 chemical grout는 불유리계 약액이다. 그러나 본 공법의 가장 큰 단점은 내구성 결여이지만 현재 선진외국 뿐 아니라 국내에서도 이 문제가 보완되어 거의 영구적 차수 및 보강목적으로 쓰여지고 있으므로 배수터널내 과다지하수유출을 막기 위해서 지금까지 적용되어 오고 있는 기존 차수공에서 탈피, 내구성이 우수한 약액(예, silicasol)을 지하철 굴착시공시점에서 적용함이 터널 준공후의 과다 지하수 유출 등 문제점을 막을 수 있고 터널의 안전성, 공사비 등 경제적 측면등에서 보아도 매우 바람직하다고 본다.

### 감사의 글

본 연구는 1995년 공영토건(주)의 연구비 지

원에 의하여 공영토건(주)와 본 대학의 공동 연구로 수행되었음을 밝히며 이에 심심한 감사의 뜻을 전하는 바입니다.

### 참 고 문 헌

1. 김승렬, 박광준, 박봉기(1993), "배수형 터널과 방수형 터널의 설계와 시공", 한국지반공학회 지반공학과 터널기술 '93년도 봄 학술발표회 논문집, pp.49~58.
2. 김승렬(1993), "서울지하철 터널의 설계 및 시공 현황과 평가", 한국지반공학회, 대한터널협회 지하공간 건설기술에 관한 서울심포지움 논문집, pp51~75.
3. 서울시 지하철 터널시공감리단(1993), "지하철 터널 설계와 시공 자료집(2)", 서울시 지하철건설본부, pp.7~15.
4. 천병식(1994), "서울지하철 5-36공구 터널공사 안정 및 보강대책 연구 보고서", 한양대학교 부설건설연구소, pp. 219~220.
5. 이상호(1992), "배수용 Geotextile의 평면 투수 성능분석", 한국지반공학회지, Vol.8, No.3, pp. 61~73.
6. 천병식(1995), "지반주입공법", 원기술, pp.107~113.
7. Cedergren H. R.(1977), "Seepage, Drainage and Flownets(2nd ed.)", Wiley Interscience, pp.235~238.

(접수일자 1995. 10. 15)