

배수형 터널과 방수형 터널의 설계와 시공 Design and Construction of Bottom Drainage Tunnel and the Watertight Tunnel

김 승 털, SEUNG RYULL KIM

(주)대우엔지니어링, 부장, Manager, DAEWOO Engineering Company.

박 광 준, KWANG JOON PARK

(주)대우엔지니어링, 과장, Senior Engineer, DAEWOO Engineering Company.

박 봉 기, BONG KI PARK

(주)대우엔지니어링, 대리, Lead Engineer, DAEWOO Engineering Company.

SYNOPSIS :

Reappraisal of the design and the construction concept of the bottom drainage tunnel has been made through the seepage analysis. An appropriate design approach for this tunnel has also been proposed. It was revealed from this study that water pressures acting on the concrete lining in the bottom drainage tunnel much depend on the permeability of the surrounding ground, the source of water supply and the discharge capacity of drainage facilities. The full release of these water pressures by the current drainage system could not be expected if this type of tunnel is constructed in the ground including alluvial deposits having a high permeability. The necessity of a proper reinforcement of the concrete lining or a modification of its shapes corresponding to the water pressure has been suggested.

1. 서론

지하수는 우리생활과 밀접한 관계를 가지고 있는 중요한 자원 중의 하나로서 그것을 대하는 동기, 장소, 시기 및 주변환경등에 따라서 우리생활에 긍정적 혹은 부정적인 영향을 끼치게 된다. 지하수는 지반중에 존재하면서 여러가지 물리적인 법칙에 순응하며 거동하므로 지하공간 개발에 참여하고 있는 기술자들은 신중하고 지혜롭게 이에 대응하지 않으면 큰 재난을 초래할 수 있음을 주지하여야 한다. 최근 기초 터파기나 터널굴착등의 지하공간 개발이 활발해짐에 따라 지하수로 기인되는 공학적인 문제점들이 자주 보고되고 있다. 특히, 지하수위 아래의 사질 지반 굴착시 지하수처리하는 공사의 성패와 직결되어 있다고 하겠다. 뿐만 아니라 도심지에서는 지하수 배수에 의해 지하수원이 고갈되고 지반이 침하하여 건물이나 시설물들이 파손되기도 하여 (멕시코 시티, 방콕, 상하이등) 심각한 사회문제가 되기도 한다.

현재 건설중에 있는 서울 지하철 노선은 상당부분이 하천(한강 정계천, 안양천, 중랑천등)과 연결되어 있는 충적지반을 통과하거나 인접해 있다. 터널붕괴 사고도 이러한 충적지반에서 여러 번 발생하였음을 주목하여야 한다. 이 지역에서는 시공중 측정된 유입수량도 당초 예상량을 초과하고 있어서 배수형 터널을 구축하였을 경우 운영기간 동안의 유입수 처리를 위한 비용도 과다해질 것으로 판단된다.

배수형 터널은 콘크리트 라이닝 배면에 부직포를 설치하고 이에 연결된 바닥의 유공관에 의해 유입 지하수를 흡수하여 흡수정으로 보내진 후 펌프를 이용하여 지상으로 배출한다. 콘크리트 배면의 수압은 이 배수시설에 의하여 완전히 해소된다고 가정하고 있다. 그러나, 수압의 해소 유무는 지반의 투수성 및 지하수 공급원과 배수조건에 크게 의존하므로, 무한한 지하수원에 연결된 투수성이 큰 지반에 터널을 구축하고 터널내부로 유입되는 지하수를 콘크리트 라이닝 배면의 배수시설을 통하여 인위적으로 배출할 경우에는 반드시 콘크리트 배면의 수압해소 유무를 분석해 보아야 한다. 왜냐하면, 유입되는 수량을 배수시설이 즉시 배출할 수 없을 때에는 유입수가 콘크리트 배면의 부직포를 연하여 누출되고 최악의 경우에는 콘크리트 라이닝을 위협하는 크기

의 수압으로까지 상승하게 된다. 따라서, 터널주위의 지반 및 지하수 특성이나 배수시설의 능력을 평가하지 않고 단순히 터널 바닥에 흡수관을 묻고 배수 시키기만 하면 콘크리트 라이닝에는 수압이 완전 해소될 것이라는 추정에 근거한 기존의 콘크리트 라이닝 설계방법은, 터널구조물이 영구구조물이라는 관점에서 위험한 접근방법이라 하겠다.

본 논문에서는 지하수 유입량이 많고 세립토사의 유실이 예상되는 지역에 배수형 터널을 구축할 경우에 대한 지하수 거동을 체계적으로 분석하고 그에 대한 설계 및 시공상의 접근방법을 제시하고자 한다.

2. 터널의 방수 및 배수

2.1 방수형 터널과 배수형 터널의 정의

지하수를 처리하는 방법에 따라 터널은 크게 배수형과 방수형으로 나누어지며, 배수형 터널은 다시 부분배수형과 완전배수형으로 구분된다. 방수형 터널이란 터널 주변의 지하수가 터널내부로 전혀 유입될 수 없도록 차단한 경우를 말한다. 이때 작용하게 되는 수압은 주로 철근 콘크리트 라이닝에 의해서 지탱된다.

배수형 터널이란 터널 주변의 지하수를 인위적으로 배수시키는 터널로서 배수의 허용정도에 따라 완전배수형과 부분배수형으로 세분될 수 있다. 배수형 터널중 완전배수형이란 터널내부의 전단면으로 배수를 허용한 경우도 일부 수로터널이나 시공중의 터널이 여기에 해당되며, 부분배수형이란 왜곡된 공간제공을 목적으로 터널의 천정과 측벽까지 방수막을 설치하여 지하수의 유입을 차단하고 유도하여 터널바닥의 측방향 배수관이나 중앙배수관을 통해서 배수시키도록 설계·시공된 터널을 말한다. 부분배수형 터널을 통상 '배수형 터널'이라고 칭하며 또한 방/배수형 터널이라고 표현하는 경우도 있다. 이 배수형 터널에서는 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않는 것으로 간주되고 있으나 수압의 작용유무는 아직 검증되지 않고 있는 실정이다.

2.2 방수 및 배수형 터널의 특성

2.2.1 방수형 터널의 특성

방수형 터널은 터널주위의 지하수를 배수시키지 않기 때문에 공사중 일시 변화되었던 지하수위는 곧바로 복원되게 된다. 따라서 터널구조물은 터널주위의 지하수위에 해당하는 정수압을 견디도록 설계되어야 한다. 작용수압에 가장 유리한 단면은 원형이며 수압이 높 경우에는 철근보강이 필요하다. 방수형 터널의 장점으로서는,

- 1) 지하철의 내구연한동안 양수를 위한 유지관리비용의 절감,
- 2) 지하수위에 영향을 미치지 않으므로 이와 관련된 지반침하나 건물피해의 예방,
- 3) 터널구조체, 내부시설물, 운행차량등을 습기에 의한 부식으로부터 예방할 수 있는 것등이고,

예상되는 문제점으로는,

- 1) 단면형상의 제한으로 불필요한 공간의 형성,
- 2) 고도의 방수공이 요구되고 보수가 곤란함,
- 3) 철근 조립공사가 까다롭고 복잡하여 부실 시공의 원인이 됨,
- 4) 대단면이나 심도가 깊으면 구조체가 막중해져 비경제적이라는 것등을 들 수 있다.

2.2.2 배수형 터널의 특성

배수형 터널은 터널주위에 흘러 들어오는 지하수를 계속적으로 배제하기 때문에 얇은 콘크리트 라이닝에 의해서도 구조적으로 안전할 수 있다. 특히, 지하수 유입량이 소량인 산악터널에서는 경제성이 좋은 터널형식이 된다. 그러나, 유입수량이 과다하거나, 지하수위 저하에 영향을 미치는 지역에서는 여러가지 사회, 경제적인 문제를 야기시킨다. 배수형 터널의 장점을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 단면형상이 방수형보다 자유롭고 경제적인 콘크리트 라이닝 시공이 가능하다.
- 2) 방수형보다 시공성이 양호하다.

단점으로는,

- 1) 지하철 내구연한동안 유입수 처리 경비가 소요된다.
- 2) 지하수위 저하를 초래하여, 지하수원을 고갈시키고 자연환경과 식생에 영향을 미친다.
- 3) 지역에 따라 지표침하를 유발시키고 주변건물에도 손상을 미치게 한다.
- 4) 터널내부의 습도를 증가시켜 시설물과 차량의 부식을 촉진시키고 배수시설의 기능마비시 구조물의 안정성을 위협하게 된다는 점등이다.

2.3 방수형 및 배수형 터널의 적용기준

국내의 지하철 설계기준에는 방수형 터널과 배수형 터널의 적용에 관한 명확한 기준이 제시되어 있지 않다. 개착구간은 모두 완전방수형 구조물(Box 구조물)인 반면, 터널은 원칙적으로 배수형을 지향하고 있다. 단지, 하천 하부통과구간과 같이 많은 양의 지하수가 유입될 것으로 예상되는 지역에 대해서만 제한적으로 방수형 터널을 적용하고 있으나, 이와 유사한 지반조건을 갖고 있는 인접구간에서는 대부분 배수형 터널로 설계되어 있다. 이는 배수형 터널과 방수형 터널의 설계기준이 명확하게 정립되어 있지 않은 증거라 하겠다.

3. 터널내 유입수 처리개념과 문제점 분석

3.1 지반특성과 지하수

충적지반은 주로 층상구조를 가지고 있으며 위치에 따라 수십미터의 심도까지 발달된 곳도 있다. 수평방향과 연직방향의 지반특성도 서로 상이한 이방성을 가지고 있으며, 잔적토가 발달한 지역에서도 지반은 대부분 이방성 성질을 가지고 있다. 지반에 터널을 굴착할 경우 지반의 이력과 성질 및 지질학적인 조건에 따라서 예측하기 어려운 다양한 문제점들이 대두되지만 모든 지반에서 공통적으로 만나는 문제는 지하수이다. 이러한 지하수는 시공에 결정적인 악영향을 주는 요인중의 하나이며, 터널굴진중 예기치 못한 지하수가 파쇄대를 통해 대량 유입됨으로써 큰 재해를 당한 경우도 종종 있다.

지하수위면 이하의 지반중에 배수형 터널을 구축하게 되면 터널은 지중에 설치된 배수관과 같은 역할을 감당하게 되는데, 이에 반응하는 지하수의 형태는 크게 두가지 극단적인 형태로 나눌 수 있다. 즉, 터널내부로 유입되는 지하수면이 터널바닥까지 저하되는 부정류(Transient State Inflow) 상태이며(그림 1(가)), 다른 하나는 지속적인 배수를 실시한다 하더라도 원래의 지하수위를 유지하는 이른바 정상류(Steady State Inflow)(그림 1(나))이다. 전자의 경우는 배출되는 수량이 공급되는 양을 상회할 경우에 발생하며 계절적인 영향을 무시한다면 터널축 상부에는 지하수가 존재하지 않게 된다. 후자의 경우는 지반의 투수성이 크고 공급수원이 무한하여 유입수량이 배출수량을 초과할 경우에 발생하며 지속적인 배수에도 불구하고 터널상부의 원지하수위가 크게 변화를 받지 않는 상태이다. 대부분 배수형 터널의 실제상태는 이 두가지 극단적인 경우의 중간형태가 될 것으로 사료된다. 이와같이 지하수의 반응은 지반의 특성과 주위환경 및 터널의 배수상태에 따라 큰 차이를 보이게 되므로 특수한 조건하에서는 이들의 종합적이고 신중한 분석이 수반되어야 할 것이다.

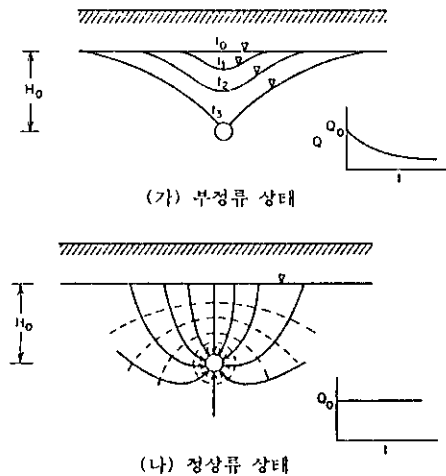


그림 1. 배수터널에서의 지하수 유입형태

3.2 시공중 유입수 처리

터널 굴착중에는 막장면과 슛크리트가 타설된 벽면 및 터널 바닥면을 통해서 지하수가 터널내부로 유입된다. 이때에는 전 굴착면이 자유수면이 되어 굴착면에는 수압이 전혀 발생하지 않게 되고 다량의 수량이라 할지라도 자유롭게 유입하게 된다. 시공중 유입되는 지하수는 굴착면의 양측면이나 중앙에 설치된 배수구를 통하여 신속히 배수하여 굴착면이 지하수에 의해 연화되지 않도록 한다. 집수된 유입수는 다시 수직구에 설치된 집수정으로 보내져 지상으로 배수시킨다. 시공중 유입수량을 측정할 후 예상했던 유입수량과 비교하여 원설계의 타당성을 점검하도록 하여야 한다.

3.3 운행중 유입수 처리

배수형 터널에서 2차 라이닝이 완공된 후에는 굴착면 주변의 지하수는 부직포포된 유도배수층을 따라 흐르고 터널내부의 측방향 배수관이나 중앙 배수관에서 집수되고 경계장에 설치된 집수정으로 보내진 후 외부로 배출된다. 운행중 처리하여야 할 수량은 터널주변의 지하수위, 지층의 투수계수, 유도배수층(부직포층)의 풍수능력(discharge capacity)과의 상관관계에 의해 결정된다. 즉, 주변지반의 지하수위가 낮거나 지반의 투수성이 낮아 유입수량이 유도 배수층의 풍수가능량 보다 적을 경우에는 유입량이 곧 집수정 용량상정용 수량이 된다. 그러나, 유도배수층의 풍수능력보다 더 많은 양의 지하수가 유입될 경우는 유입수량의 완전배제는 불가능하며 유도배수층의 풍수량에 의해 집수정의 용량이 결정되어야 한다. 표 1은 현재 운행중인 서울시 지하철에 설치된 집수정으로 부터 측정된 집수용량을 나타낸 것이다. 개착식의 완전방수형으로 시공한 1, 2호선 보다는 일부구간(도심지)을 터널식으로 시공한 3, 4호선의 유입량이 상대적으로 많은 것으로 나타났으며, 전체적으로는 1일 약 57,000 ton의 지하수를 배수시키는 것으로 나타났다. 이를 다시 세분하여 주요하천에 위치한 집수정에서 측정된 유입량을 살펴보면(표 2참조), 주요 하천에 인한지역에서의 유입량은 각 노선별 평균 유입량보다 2~5 배 정도 많은 것으로 나타났다. 이는 지하수의 반응이 지반의 특성과 주위조건에 의해 영향을 받고 있음을 시사하는 증거이다.

표 1. 서울시 지하철 각 노선별 집수정 유입량 현황(1992년3월현재)

노 선	집수정 개소 (지하 총연장)	집수정 유입량(m ³ /min) (1.0 x 10 ⁻²)		전체 유입량 (m ³ /day)	비 고
		최 대	평 균		
1호선	13개소(본선3) (9.5 km)	22.7	10.5	1,981	개착 Box
2호선	41개소(본선10) (39 km)	102.4	27.0	16,115	개착 Box
3호선	26개소(본선3) (25 km)	239.0	63.0	23,587	개착 Box 일부터널
4호선	23개소(본선3) (24 km)	210.0	47.0	15,832	개착 Box 일부터널
계	103개소(본선19) (97.5 km)	-	36.9	57,515	

표 2. 주요 하천주변 집수정에서 측정된 집수량 현황 (1992년 3월 현재)

노 선	위 치	하 천 명	집수정 유입량 (m ³ /min)	비 고
1호선	청양리(계기)	경 룡 천	0.227	개착 Box
	신 설	안 압 천	1.261	개착 Box
2호선	아 현	북아현 지류	1.024	개착 Box
	연 신 내	불 광 천	1.400	개착 Box
3호선	홍 제	홍 제 천	1.600	개착 Box
	경 북 궁	북악산 지류	2.250	터 널
	종 로 3 가	청계천 지류	2.390	터 널
4호선	길 율	경 룡 천	2.100	개착 Box
	동 대 문	청 계 천	1.820	터 널
	사 당	이 수 천	1.400	개착 Box
계			평균 1.547	

3.4 배수형 터널의 문제점

도심지역이라 할지라도 지반특성을 크게 고려하지 않은 채 대부분 배수형 터널을 적용하고 있으며 일부 하상하부에서만 방수형 터널을 적용하고 있다. 광범위한 구간에 적용되고 있는 배수형 터널의 문제점을 살펴 보면 다음과 같다.

- 1) 장기적인 배수가 미치는 영향분석이 미흡하다.
- 2) 터널내 집수정 용량은 지반의 투수성, 지하수위 그리고 터널 내의 유도 배수층의 풍수 능력을 분석하여 결정하지 않고 일률적인 기준을 적용하고 있다.
 [개착구간 2m³/min/km
 터널구간 3m³/min/km
- 3) 터널주변 여건에 근거한 배수재의 적합성이 검증되고 있지 않다. 일률적으로 300g/m², t=3mm 규격의 부직포를 사용하고 있다.
- 4) 모든 경우의 지하수는 터널바닥까지 지하되며 콘크리트 라이닝에는 전혀 수압이 작용되지 않는다고 가정하여 콘크리트 라이닝을 설계하고 있다.
- 5) 모든 경우에 대해 현재 배수되고 있는 수량이 실제로 유입되는 수량이라고 판단할 수는 없다. 경우에 따라서는 현재의 배수량이 배수재의 풍수능력을 나타내고 있을 수 있다. 이때에는 콘크리트 라이닝에 일정량의 수압이 작용하게 된다. 배수형 터널도 시공된 콘크리트 라이닝이 파손되어 다량의 지하수가 유입된 사례는 이런 사실을 뒷바침 해주고 있다.

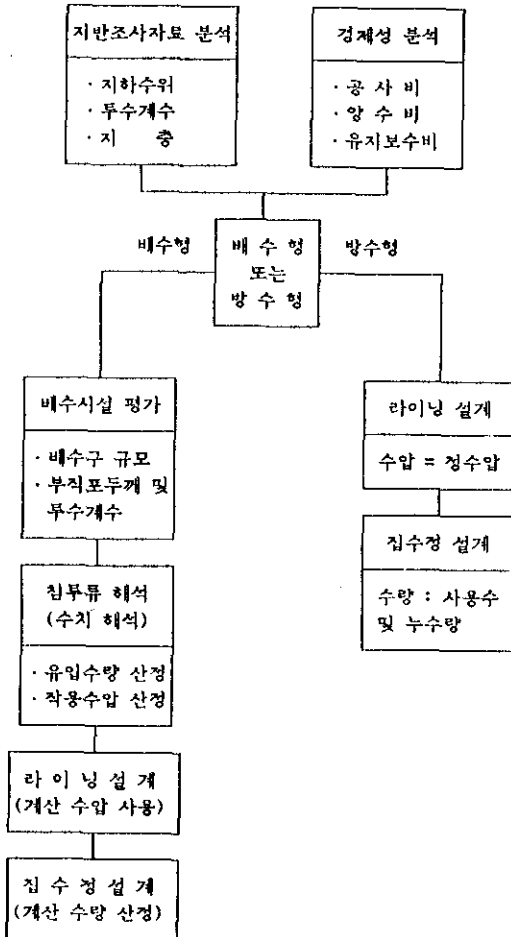
한편, 완전 방수형으로 기 시공되었거나 현재 설계된 구간의 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 방수형 터널로 설계·시공된 기존의 지하철 노선의 일부 구간에서는 방수막 설치시의 시공 능력이 요구되는 수준에 미치지 못하여 배수 터널로 전환한 바 있다.
- 2) 하천 종과 구간에서 완전 방수형 터널 구간을 결정할 때 하천 주위의 지반특성과 지하수 상황을 고려하지 않은채 하천 직하부만을 완전방수터널 구간으로 설계하기 때문에 방수터널로서의 효과가 저감된다.

4. 과내 유입수 처리를 위한 접근방법

4.1 설계시 접근 방법

지하수의 흐름은 지반의 투수계수와 동수경사에 의해 지배된다. 자연지반은 층별로 각각 다른 투수성을 가질 뿐만 아니라 동일한 층에서도 연직방향과 수평방향에 따라 값이 다르다. 이러한 이방성 특성을 등가 투수계수로 환산하여 균질한 지반으로 가정하여 지하수의 흐름을 분석하는 간편법과 각 지층의 특성을 모두 고려한 상세분석으로 구분될 수 있다. 이두 방법 모두 측정된 투수계수에 크게 의존하게 된다. 터널설계에서 지하수 처리방법을 결정하는 과정을 도식화하면 다음과 같다.



4.1.1 유도배수층과 풍수능력

1) 유도배수층의 기능

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

2) 풍수 영향 요인

부직포의 풍수능력은 부직포내의 동수경사와 풍수단면적 및 투수성에 의해 좌우된다. 동수경사는 수두차에 의해 결정되지만 풍수단면적 및 투수성은 부직포 자체의 물리화학적 특성에 의해 좌우된다. 부직포는 작용압력에 의해 쉽게 압축되기 때문에 숏크리트면과 콘크리트면이 서로 압착하면 투수성과 풍수단면적이 크게 감소한다. 또한, 화학적 침식성이 크고 주위 여건에 따라 부직포 간극의 막힘현상(clogging)이 대두될 가능성이 있다.

3) 부직포의 풍수능력

현장에 설치되어 있는 부직포의 풍수능력을 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 풍수능력이 저하되더라도 그렇지 못한 인접구간에서 이를 감당해 주기 때문에 배수상의 문제점이 야기되지 않을 수 있다. 이런 사항은 침투류 해석과정에서 검토되어야 할 사항이다. 여기에서는 부직포 자체의 풍수능력만을 살펴 보기로 한다.

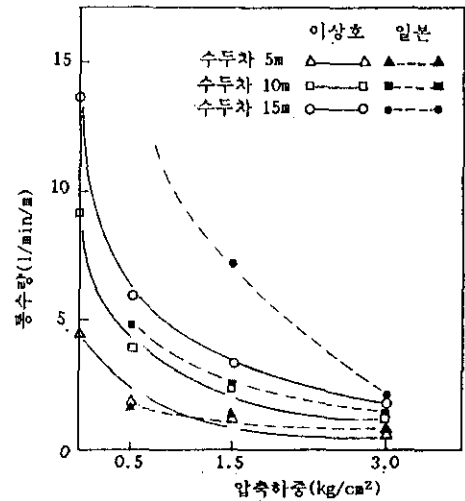


그림 2. 압축하중 및 수두차에 따른 배수층의 풍수량

그림 2에 나타난 일본의 고속 도로 공단(1989) 자료와 이상호(1992)의 실험연구결과에 의하면 부직포의 투수능력은 수두차가 클수록 증가하고 압축력이 증가함에 따라 급격히 감소하여 어느 압력 이상에서는 감소현상이 둔화된다. 즉, 부직포의 투수능력은, 낮은 압력강도에서 민감하게 영향을 받는다. 이는 부직포가 압축되면서 투수계수가 감소하지만 어느 하중 이상에서는 거의 일정해짐을 의미한다. 이 결과들을 압축하중과 수두차별로 분류하여 표 3에 수록하였다. 실험결과치들이 거의 일치하고 있음은 주목할만한 사항이다.

표 3. 압축하중과 수두차에 따른 부직포의 투수능력 Q(l/min/m)
[이상호(1992); 일본고속도로공단(1989)]

압축하중 σ (t/m ²)	부 직 포 의 투 수 계 수 kr (m/sec)	투 수 능 령 Q(l/min/m)		
		$\Delta H = 5m$	$\Delta H = 10m$	$\Delta H = 15m$
0	5.0×10^{-1}	4.5	9.0	13.5
5	2.2×10^{-1}	1.98 (1.90)*	3.96 (4.80)*	5.94 (-)
15	1.25×10^{-1}	1.12 (1.20)	2.24 (2.40)	3.36 (7.30)
30	7.0×10^{-2}	0.63 (0.80)	1.26 (1.50)	1.89 (2.10)

* ()안은 $W=300g/m^2$ 부직포에 대한 일본에서의 실험결과임.
 $\Delta H =$ 수두차(m)
부직포의 두께($t=3mm$)

4.1.2 터널 주변지반의 침투류 해석

1) 일반

앞에서 언급한 바와같이 지반은 여러층으로 구성된 이방성 특성을 보유하고 있다. 이러한 지반에서 지하수면 이하에 배수형 터널을 구축한다는 것은 지중에 배수관을 설치한 경우와 유사하다. 이에 따른 지하수의 거동을 정확히 분석하기 위해서는 올바른 입력데이터와 경계조건 및 해석방법을 사용하여야 한다. 또한 해석하는 기법과 프로그램의 정도에 따라 큰 차이를 보이므로 본 논문에서는 현재의 문제점을 검토해 보고 앞으로 접근해야 할 방향 제시에 주 목적을 두고 해석에 접근하였다.

2) 해석기법 및 프로그램

침투유량을 산정하기 위해서는 일반적으로 유선망 작도법이나 이론식을 이용한다. 이러한 방법은 본 검토에 필요한 콘크리트 라이닝의 수압해소 유무에 직접적인 답을 주지 못하기 때문에 본 검토에서는 해석 프로그램을 이용한 침투류 해석을 실시하여 지반조건과 부직포의 투수계수가 지하수 분포에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하였다. 본 해석에 사용된 프로그램은 'SEEP'로서 2차원이나 축대칭 지반의 정상류(Steady State) 해석용 프로그램이다.

3) 해석조건 및 입력데이터

가) 경계조건 및 해석범위

터널단면은 마제형 복선터널을 대상으로 하였으며 지층 구조는 매립층, 충적층, 중화암, 중화암 순으로 구성된 대표적인 지층구조를 대상으로 하였다. 압층은 파쇄가 심하여 Darcy 법칙이 적용되는 것으로 가정하였으며 지하수위는 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 지층구조 및 해석단면은 그림 3에 나타나 있다.

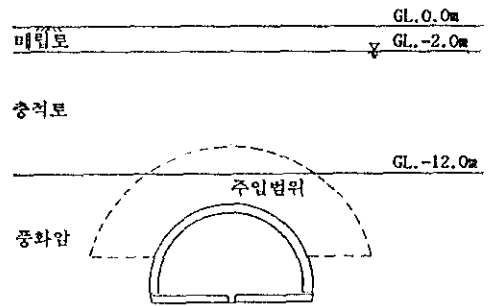


그림 3. 해석 단면

나) 입력자료

- 지반의 투수계수
각 지층의 투수계수는 지반조사시 수행한 현장시험(수압시험이나 주수시험)으로부터 구한 투수계수를 이용하였다.
- 지하수위
터널내로 배수가 이루어지면 주변지반의 지하수위는 감소할 수 있으나, 안전측으로 검토하기 위하여 년중 최고 지하수위로 가정하였다.
- 주입지반의 투수계수
터널 주위에 차수주입을 실시한 경우에는 확인시험을 실시하여 주입후의 투수계수를 측정하여 사용한다. 주입후 확인시험을 실시하지 않은 경우에는 주입효과를 평가하여 투수계수를 추정할 수 있다. 참고로 5-XX공구의 현장에서 측정된 결과를 보면, 복선터널에서 5m폭의 차수주입을 경내에서 실시한 경우 유입량은 주입전 유입량의 약 30%로 감소된 것으로 나타났다. 이는 주입에 의해 원지반 투수계수가 약 0.1배로 감소한 효과와 같으며 주입효과가 90% 정도로 양호하였음을 알 수 있다. 문헌에 의하면 유입량을 주입전 유입량의 10%로 감소시키기 위해서는 지반내 모든 균열의 99%를 주입재로 채워야 하기 때문에 주입에 의한 완전차수는 거의 불가능에 가깝다고 하였다(Cedergren, 1977). 본 해석에서 사용한 주입층의 투수계수는 원지반의 1/10로 감소된 것으로 가정하였다.

- 슛크리트층의 투수계수
현장에 타설된 슛크리트층에 대한 투수시험 자료가 없어서 슛크리트의 투수계수는 콘크리트 보다 약 5배정도 큰 것으로 간주하여 $k_a=5.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 가정하였다.
- 부직포층의 두께 및 투수계수
시공후 부직포의 두께와 투수계수는 모형시험을 통하여 결정함이 바랍직 하지만 이는 고가이므로 실현실에서 측정된 부직포의 투수계수를 적용하였다. 시공에서 발생할 수 있는 투수성의 증가요인은 투수계수를 증가하여 일력시험으로써 이러한 영향의 정성적인 경향을 분석하고자 하였다.
- 측구 및 중앙배수구 설정
설계대로 측구와 중앙배수구의 위치와 규모를 설정하여 이곳을 통하여 모든 유입수가 배수되도록 하였다.

본 해석에 사용한 각 지층 및 재료별 투수계수는 표 4에 요약하였다.

표 4. 해석지반 및 재료의 투수계수

지 층	투 수 계 수 k(m/sec)
매립토층	2.4×10^{-6}
충적토층	8.9×10^{-5}
풍화암층	5.0×10^{-6}
그라우팅층	0.1 x 원지반 투수계수
스�크리트층	5.0×10^{-7}
부직포층	1.25×10^{-3}

- 나) 해석결과
- 유입수량

부직포의 투수계수에 따른 각 CASE별 유입수량은 표 5와 같다. 여기에 나타난 유입수량은 천단과 터널바닥을 연하는 좌우 어느 한쪽에서 유입되는 유량을 의미한다.

지반의 주입범위용 2.5m와 5.0m로하면 주입량에 비해서 각각 7.3%와 11.3%가 감소한다. 주입범위용 2배 증가하여도 유입량 감소율은 4%에 지나지 않는다. 이는 그라우팅에 의해 유입수량은 감소하지만 감소율은 그라우팅 두께에 비례하지 않는 것임을 의미한다. 이에 대한 정확한 원인은 아직 불분명 하지만 주입에 의한 차수효과는 한정적이며, 주입부 하반의 지반이 유입수량을 지배한 결과로 분석될 수 있다. 측벽 하부의 배수관으로 유입되는 유량이 중앙배수관을 통해서 유입되는 양보다 훨씬 큰 것으로 분석된 사실은 측방향 배수관의 역할의 중요성을 상기시켜 주는 결과라 하겠다. 부직포의 투수계수를 4배까지 증가시켰을 경우는 유입수량은 약 20~25%정도 증가하였다.

표 5. 부직포 투수계수와 각 CASE별 유입수량

구 분	유 입 수 량 ($\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$)					
	$k_{f1} = 1.25 \times 10^{-3} \text{m/sec}$			$k_{f2} = 5.00 \times 10^{-3} \text{m/sec}$		
	측 구	중앙구	계	측 구	중앙구	계
CASE I (자연지반상태)	3.27	1.25	4.52	4.99	1.11	6.10
CASE II (2.5m 그라우팅)	2.99	1.19	4.18	4.12	1.05	5.17
CASE III (5.0m 그라우팅)	2.85	1.15	4.00	3.87	1.01	4.88

4) 해석경우와 결과

가) 해석경우

침투류 해석은 다음의 3가지 경우에 대해서 실시하였다

- 자연상태(CASE I)
- S.L 상부용 2.5m로 그라우팅(CASE II)
- S.L 상부용 5.0m로 그라우팅(CASE III)

부직포의 투수계수는 1.5kg/cm^2 의 압력하에서의 투수계수를 사용하였다. 이 투수계수는 다시 4배정도 크게 하여 투수계수 증가에 대한 영향을 살펴보도록 하였다.

나) 압력 수두 분포

그림 4~6은 CASE별 등수두선과 천단부와 측방향 배수구 직상부 지반의 수압분포상태를 나타낸 것이다. 등수두선은 터널천단 상부지반에서는 거의 수평으로 서로 평행하다가 침도가 깊어지면서 굴착면과 평행해지려는 경향을 보이고 있다. 따라서, 유선은 터널상부에서 거의 연직이다가 굴착면으로 접근하면서 그 방향을 바꾸어 결국 굴착면과 직각을 이루며 유입된다. 각 그림에 나타난 Δabc 와 $\Delta a'b'c'$ 등은 터널천단부와 측방향 배수관 직상부 지반에서의 경수압 분포를 나타내고 $adec$ 와 $a'd'e'c'$ 로 둘러싸인 면적은 각각 해석에서 분석된 이 점들에서의 수압분포상태이다. 대체적으로 주입범위가 증가할수록 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압은 감소한다. 그러나, 이 그림들은 유입지하수가 측방향 배수관에서 대기압 상태로 배출되더라도 콘크리트 라이닝에는 수압이 완전히 해소되지 않았음을 분명히 시사해 주고 있다.

그림 7~9는 이러한 수압이 콘크리트 라이닝 배면, 숏크리트 배면 및 주입범위의 언단에서 어떠한 상태로 분포하고 있는가를 나타내 주고 있다. 각 CASE 모두 측방향 배수관에서 천단으로 이어지면서 수압이 증가한다. 이는 유입지하수가 신속히 배출되지 못한 원인에서 기인된 것으로 보인다. 주입을 실시하지 않은 상태(CASE I)의 천단부 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압은 $10.2t/m^2$ 로 나타났으나 2.5m와 5.0m의 두께로 주입하였을 경우에는 이

값이 각각 $7.4t/m^2$ 와 $6.4t/m^2$ 로 감소되었다. 콘크리트 배면의 수압은 측방향 배수관 부근에서 급격히 감소하며 대기압 상태로 되지만 숏크리트 배면이나 주입범위 언단에서는 이러한 경향이 나타나지 않았다. 따라서, 숏크리트가 균질하고 균열이 없을 경우는 양쪽면의 수두차에 의한 침투압을 받게 된다. 또한, 콘크리트 라이닝에는 일정한 수압이 작용하므로 설계시 이를 반영하여 대책을 강구하여야 할 것이다.

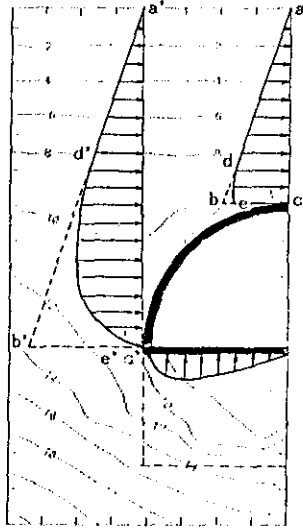


그림 4. 자연지반상태의 수압분포

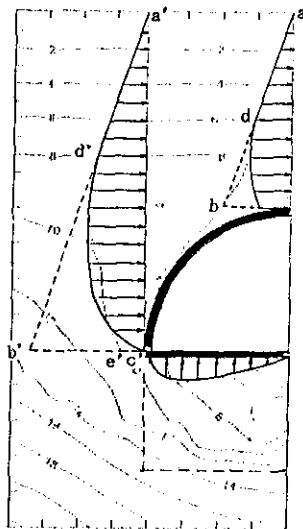


그림 5. 2.5m폭 그라우팅 상태의 수압분포

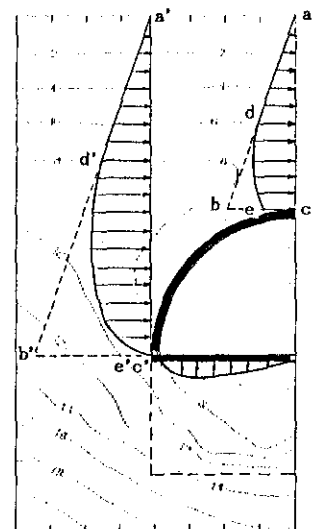


그림 6. 5.0m폭 그라우팅 상태의 수압분포

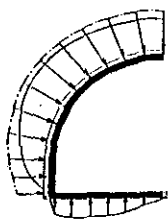


그림 7. 자연지반상태의 수압분포

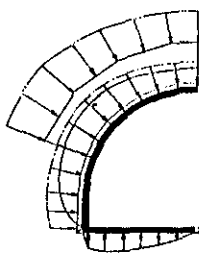


그림 8. 2.5m폭 그라우팅 상태

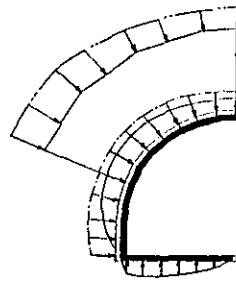


그림 9. 5.0m폭 그라우팅 상태의 수압분포

— 라이닝면 작용수압
 --- 숏크리트면 작용수압
 - - - 그라우팅면 작용수압

4.1.3 유입수 처리대책과 콘크리트 라이닝 설계

1) 유입수 처리대책

일반적으로 지하수위 아래 지반에서 인위적으로 배수층을 실시하면 원지하수위는 저하된다. 배수공법(dewatering)에 의해 지하수로 기인되는 제반 공학적인 문제점들이 극복되고 있다는 사실은 이러한 사항을 뒷받침해 주고 있다. 그러나, 지하수위 저하는 근본적으로 배수량과 공급량과의 관계에 의존하므로 지반의 투수성이 크고(충적층) 지반이 무한한 양의 지하수 공급원(하천등)으로 연결된 지역은 중력배수만으로 지하수위가 배수지점까지 저하되리라고는 기대하기 어렵다. 따라서, 배수형 터널의 설계와 시공과정에서 배수터널이 구축될 지반의 특성과 주위환경 및 배수시설(부직포, 배수관등)의 능력에 대한 충분한 검토가 실시되어야 한다. 특히, 배수능력이 시간의존성 특성을 가질때에는 이를 간과해서는 안된다.

배수형 터널설계와 시공에서의 지하수 처리대책으로는 첫째, 차단벽(cut-off wall)이나 차단주입을 실시하여 유입 지하수량을 감소시키는 것이고 둘째, 배수시설의 기능을 유지시켜 콘크리트 라이닝의 구조적인 유효요인을 제거시키는 것이다. 지금까지 후자의 중요성이 경시되어온 것은 유입지하수량이 소량이고 배수시설의 3차원적 기능이 수압의 상승을 해소시킨 결과로 사료되지만 지하수에 의한 영구구조물의 훼손도 종종 보고 되었음을 상기하여야 한다.

배수형 터널에서 콘크리트 배면의 수압해소 유무는 배수시설의 배수능력과 직결되어 있다. 즉, 유입수량이 소량이라 할지라도 배수시설이 이를 원활하게 배수시키지 못하면 수압은 상승하게 된다. 이러한 경우에는 배수시설의 배수능력을 증대시켜 수압이 상승되지 않도록 하거나 배수형 터널이라 할지라도 배수지연으로 인해 발생될 수 있는 수압을 안전하게 견딜 수 있는 콘크리트 라이닝 구조를 갖추도록 하여야 한다. 앞에서 살펴본대로 유입수량이 설계기준 값을 상회하고 있으며 콘크리트 라이닝에도 상당량의 수압이 발생하는 것으로 나타나고 있으므로 지역조건에 따라 배수형 터널의 적용여부에 대한 신중한 검토가 이루어져야 할 것이다.

2) 콘크리트 라이닝의 설계

본 검토에 적용된 지반조건에서는 콘크리트 라이닝에 수압이 작용할 것으로 예측되었으므로 배수시설의 배수능력을 증대시켜 이러한 수압을 해소시키거나 이 수압을 콘크리트 라이닝이 지탱할 수 있는지 여부를 파악한 후 적절한 보강대책을 강구하여야 할 것이다. 여기에서는 후자의 경우에 대해서 검토하고자 한다.

가) 수압하중에 유리한 단면형상

수압에 가장 효율적으로 대응하는 단면 형상은 원형이고, 수압강도에 따라서 두께를 결정하는 것은 어려운 일이 아니다. 그러나, 현재의 마제형 콘크리트 라이닝으로도 어느정도의 수압은 견딜 수 있으므로 먼저 산정된 수압에 원단면이 견딜수 있는지 여부를 검토하여

야 한다. 축벽과 인버트가 연결되는 우각부가 구조적으로 가장 취약한 부분이 될 것이다. 만약, 단면의 형상을 변경하여야 할 경우에는 현재의 선형에 지장을 주지 않는 단면 형상이 현시공에 대한 충격을 최소화하게 될 것이다. 이를 위해서는 단면의 변화없이 콘크리트 라이닝을 철근으로 보강하는 경우와 내공단면은 현상태를 유지한채 하부 인버트의 두께만 증가시키는 방안이 검토될 수 있다.

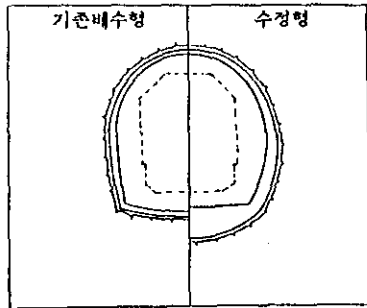
나) 수압을 고려한 콘크리트 라이닝

방수형 터널은 수압에 대해 가장 경제적인 단면이 되도록 하여야 한다. 배수형으로 설계되어 이미 굴착 완료한 지반에 방수형 콘크리트 라이닝을 시공하고자 할때에는 단면형상 때문에 여러가지 문제가 대두된다. 그림에도 불구하고 유입수량이 많아서 유지관리상 비경제적이거나 지하수저하에 의한 지반침하로 주위시설물에 피해를 주게될 때에는 방수형 터널로의 전환을 피하여야 할 것이다. 침투류 해석에서 밝혀진 바와같이 지반조건과 지하수 조건에 따라 배수형 터널에 수압이 작용할 경우는 콘크리트 라이닝이 이 수압에 견딜 수 있도록 하는 구조적인 배치가 필요하다. 그림 10에 제안된 수정단면은 현선형을 변화시키지 않고 이러한 사항을 반영한 단면의 대안이다. 기존단면과 수정단면에 대한 구조 검토결과에는 그림 11의 휨모멘트도로 나타났다. 원단면은 우각부에서 최대 모멘트가 집중 발생하고 철근보강이 없는 현단면으로는 수압에 안전하게 저항할 수 없는 것으로 판단되었다. 수정단면은 휨선 구조적으로 안정될 것으로 분석되었고 철근보강이 다소 필요한 것으로 검토되었다.

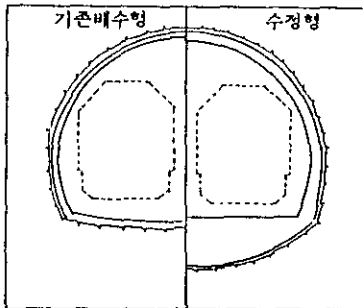
3) 배수시설 설계와 시공

침투류 해석에 의해서 배수형 터널의 콘크리트 라이닝이 추가적으로 보강 및 수정되더라도 개념상으로는 배수형 터널에 해당되므로 북공배면의 유도배수층과 축방향 배수관, 그리고 중앙배수관에서 원활한 배수가 이루어지도록 해야 한다. 따라서, 현재 사용하고 있는 부직포의 사양을 300g/m²(t=3mm)에서 500g/m²(t=5mm)으로 증가시키고 또한 축방향 배수관은 관경을 ϕ 50mm에서 ϕ 100mm이상으로 확대하는 것이 바람직하다. 그리고, 축방향 배수관과 중앙배수관에는 청소용 맨홀을 설치하여 콘크리트 백태나 이끼 및 유실토사에 의해 배수계통이 막혀서 기능이 저하되는 일이 없도록 해야 한다.

특히, 시공과정에서 향후 배수기능에 저해되는 사항이 발생하지 않도록 각별히 주의하여야 할 것이다.



(가) 단선터널



(나) 복선터널

그림 10 수압에 대비한 단면형상 및 콘크리트 라이닝 수정

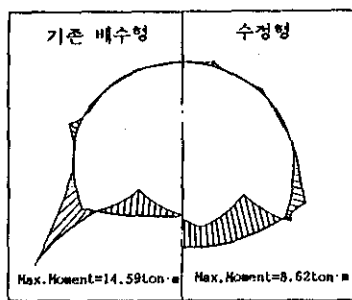


그림 11. 수압 작용시 콘크리트라이닝의 B.M.D.

4.2 시공시 고려사항

완전배수형으로 설계된 터널을 시공단계에서 부분배수형으로 변경하기 위해서는 주변지반의 지하수위 자도와 시공중 터널내로 유입되는 수량을 단위 미터당으로 측정한 결과가 있어야 한다. 시공중 변경할 수 있는 수정사항은 다음과 같다.

첫째, 상부반단면은 수정하지 않아도 된다.

둘째, 하부반단면은 측벽부를 약간 확장하여야 할 것이다.

셋째, 인버트는 모든단면에서 필요하므로 세토이 추가되어야 한다.

넷째, 전체적으로 검토하여 내공단면이 부족한 경우에는 권도중단을 0.3~0.4m 정도 하향조정하면 해결될 수 있다.

5. 결론

계속적인 배수를 실시하여야 하는 배수형 터널을 도심지에 건설한다는 것은 사회/경제적인 측면에서 재검토 되어야 한다. 특히, 이러한 터널이 장기적으로 다량의 유입수 처리 문제를 야기시킬 수 있는 하천지역의 충적지반에 건설될 때에는 항구적인 지하수 대처방안이 심층있게 분석되어야 한다. 그동안 배수형 터널의 설계와 시공과정에서는 이러한 사항이 경시되어 왔다. 아마도, 유입 지하수량이 소량인 것이 그 이유중의 하나일 것이다.

본 논문에서는 지반과 지하수원 특성 그리고 배수시설의 배수능력을 종합적으로 고려하는 배수형 터널의 설계접근방법을 제시하였다. 전개과정에서 부직포의 배수능력평가에 대한 것은 실 시공여건을 총체적으로 반영하지 못하여 다소 경험적인 분석이라 할 수 있겠지만 설계의 접근방법 제시라는 측면에서는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 본 검토에서 분석된 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 배수형 터널을 설계할 때에는 반드시 지반의 특성과 주위여건 및 배수시설의 배수능력을 평가하여야 한다. 특히 충적모래 지반에서는 기존 배수형 설계개념을 재분석할 필요가 있다.
- 2) 총유입수량은 5.0m 주입을 실시한 경우에도 약 8.0m³/min/km로 예상되며 이 값은 설계기준값 3.0m³/min/km의 2.7배이다.
- 3) 유입수량은 주입범위의 폭에 비례하여 감소하지 않는다. 주입범위폭 2.5m, 5.0m로 하였을 경우는 유입수량이 자연상태에 비해 각각 7.3%, 11.3% 감소하였다. 부직포의 투수계수를 4배로 증가시켰을 경우에는 이 값의 감소폭이 약 20~25%이었다.
- 4) 배수지점에서 기인되는 콘크리트 라이닝 배면의 수압은 터널의 아치부(S.L과 Crown 사이)에서 최대가 되며 자연상태인 경우에 1.02kg/cm²로 나타났으며, 주입범위폭 2.5m, 5.0m로 할 경우에는 이 값이 0.74kg/cm²와 0.64kg/cm²로 감소하였다. 따라서, 모래 및 자갈로 구성된 충적지반에서는 배수형 터널일지라도 콘크리트 라이닝 배면에는 수압이 완전히 해소되지 않으므로 이에 대한 구조적 대책이 필요하다.

6. 감사의 글

항상 격려와 온정으로 후배 기술자들을 보살펴 주신 (주)대우 엔지니어링의 유태성 부사장님과 헌신적으로 협조해 주신 동료 직원들에게 감사드립니다. 아울러 본 논문작성을 위해 협조해 주시고 격려해주신 서울시 지하철 건설본부의 관계자에게 진심으로 감사의 뜻을 포함합니다.

참고 문헌

Cedergren H.R.(1977). Seepage, Drainage and Flownets. 2nd ed., Wiley Interscience, PP. 235-238.

Jozuka H, Haneda H, Yagi H, and Nagarawa T, (1989). Experimental Study on economical and efficient waterproofing for tunnel. Proc. of the Int. Congress on Progress and Innovation in Tunnelling, Vol.1, PP. 503-510.

Freeze R.A, Cherry J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Chap.10, PP. 487-491.

이상호(1992). 배수용 Geotextile의 평면 투수성능 분석. 한국지반공학회지, Vol18, No3. PP. 61-73.