

터널 배수처리 및 시설개선방안에 관한 연구

A Case study on the Improvement of Tunnel Drainage systems

유상건*
Yoo S. G

박태순**
Park T. S

이준석***
Lee J. S

ABSTRACT

Since the urban subway is normally constructed under the groundwater level, the drainage system will be one of the most important factors during maintenance period. Therefore, to investigate suitability of the design approach and the construction specification, the inflow and the contents of the groundwater in the Route 5 of Seoul subway system are analysed. From these, the possibility of the design improvement and the economy of the maintenance cost are proposed.

1. 서론

국내 지하철 건설기술은 20 여년 동안의 기술축적으로 인하여 흠피복이 얇고 함수비가 높은 지반에서도 터널을 시공할 수 있을 정도로 발전되었다. 그 결과, 하자, 하천, 주택가, 저지대, 연약지반 등 지질여건이 불리한 지형하부를 통과하여 시공을 할 수 있는 비약적인 발전을 가져왔다. 그러나 유지관리측면에서는 아직 보완이 미흡한 상태에 있는데, 그 이유는 터널 건설이후 현장확인곤란, 시공자료 공유부족과, 설계 단계에서는 터널내부로 유입되어 흐르는 지하수는 맑은 물만 흐를 것으로 간주하고 배수처리계획 수립시 지역특성 등을 고려하지 않는 설계를 적용하고 있기 때문이다.

현재 지하철의 배수 펌핑시설 및 터널배수시설의 설계기준은 1km당 박스구조물 2m³/min, 터널 구조물 3m³/min을 적용하고 있는데 실제 현장에서 발생하는 차이점을 알아보기 위하여 지형별, 하천별로 지하수 유입량을 조사분석 하여 비교하였으며, 터널의 배수장애와 배수기능저하의 주원인이 되고있는 침전물의 종류와 특성, 성분, 유입경로를 분석하여 문제점에 대하여 고찰하였다.

본 연구의 주요목적은 이러한 문제점을 근본적으로 해결하기 위하여 유지관리기간 중에 도출된 배수펌핑량, 침전물유입현황 및 배수시설에 대한 조사자료를 참고로 배수장애로 인한 도시지하터널의 안정성 향상을 구축하는데 있다.

2. 지하철내부 지하수유입량 분석

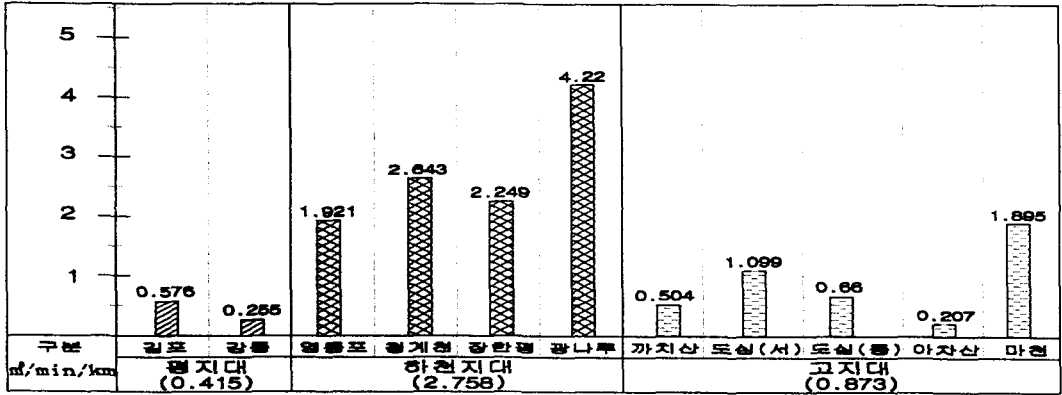
터널 내로 유입되는 지하수 유입량이 설계기준과의 차이를 조사하기 위하여 지하철 5호선57.9km 간에 설치된 63개집수정으로 유입되는 지하수량을 96년부터 2001년6월까지 분기별로 조사결과 지하수 유입량은 1km당 0.77m³/min로 나타나서 집수정 설계기준인 1km당 박스구조물 2m³/min, 터널구조물 3m³/min을 고려했을 때 상당한 여유가 있는 것으로 나타났다.

* 서울산업대학교 철도기술대학원 석사과정. 정회원 (서울특별시 도시철도공사)

** 서울산업대학교 토목공학과 교수. 정회원

*** 철도기술연구원, 서울산업대학교 철도기술대학원 겸임교수. 정회원

지하수 유입량의 변화를 조사하기 위하여 평야지대, 하천지대, 고지대로 구분하여 <그림1>과 같이 조사 분석한 결과 평지대는 0.415m³/min/km, 하천지대 2.758m³/min/km, 고지대 0.873m³/min/km로 하천지대가 평지대보다 6.6배가 많은 지하수가 유입되고 있으며,



<그림 1> 각 지대별 지하수 유입량

5호선을 구간별로 세분하여 유입량을 <표 1>과 같이 분석한 결과 고지대인 아차산~광나루 구간이 0.207m³/min/km로 가장 적고 광나루~천호 하저터널구간이 4.22m³/min/km로 가장 많은 지하수가 유입되고 있었으며, 터널 전구간 평균지하수 유입량은 1.38m³/min/km로 설계기준3m³/min/km과는 약 2배의 차이가 있었다

<표 1> 지형별 터널구간 지하수 유입량 (단위 : m³/min)

지형	구간	터널연장(km)	심도(m)	지하수 유입량	1km당 유입량	비고
계		31.293		43.342	1.38	
김포	김포 - 마곡	0.865	9 - 15	0.498	0.576	평지대
까치산	화곡 - 신정	2.022	22 - 37	1.019	0.504	구릉지대, 고지대
영등포	오목교 - 마포	7.370	17 - 33	14.162	1.921	안양천, 셋강, 한강
도심(서)	마포 - 종로3	4.028	14 - 30	4.704	1.167	구릉지대, 고지대
청계천	종로3 - 을지4	0.890	19 - 25	2.345	2.634	청계천
도심(동)	을지4 - 마장	5.423	19 - 45	3.583	0.660	구릉지대, 고지대
장안평	마장 - 군자	3.475	11 - 18	7.817	2.249	청계천, 전농천, 중랑천
아차산	군자 - 광나루	1.570	12 - 33	0.325	0.207	구릉지대, 고지대
광나루	광나루 - 천호	0.870	16 - 58	3.677	4.226	한강 (하저막스 991제외)
강동	강동 - 고덕	2.346	10 - 15	0.598	0.255	평지대
마천	강동 - 마천	2.434	12 - 22	4.614	1.895	구릉지대, 고지대

지하철 5호선을 통과하고 있는 한강 및 중소8개 하천7.937km구간 터널내부로 유입되는 지하수 유입량을 조사한 결과 <표 2>와 같이 34,444m³/day가 유입되고 있어 <표2>의 터널 전구간(31.293 km)에 유입되는 지하수량은 62,412m³/day의 55.2%를 차지하고 있으므로 하천구간에서 터널로 지하수의 유입을 억제할 수 있다면 유지관리 비용이 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 하천구간으로 유입되는 지하수량이 설계기준과 비교 검토한 결과 1km당 유입수량은 3.01 m³/min로서 설계기준의 3.0m³/min과 비슷한 수준으로 유입되고 있었으나, 터널평균 유입수량 1.38 m³/min/km에 비교했을 때 하천구간에서는 2.18배의 지하수가 더 유입되고 있는 것으로 나타났다.

하천통과 구간중 지하수 유입수량이 가장 많은 구간은 안양천 구간으로 평균 1km당 7.20m³/min 이고 가장 적은 구간은 청계천구간으로서 1.24m³/min가 유입되고 있어 많은 차이가 있었다. 지하

수 유입수량 발생 차이는 지질 또는 지형적인 문제보다는 차수그라우팅 방법의 차이로부터 발생된 것으로 판단된다. 동일한 조건하에서 건설된 3개 하천구간의 지하수 유입량을 비교한 결과 청계천구간 1.24m³/min과 셋강구간 2.90m³/min은 설계기준이하이지만, 안양천구간은 7.2m³/min로 설계기준의 2.4배를 초과하고 있다. 3개 하천에 대한 시공과정을 조사한 결과 차이가 나는 공종은 그라우팅공법으로 안양천은 RMG(Root Milk Grouting)공법을 셋강과 청계천구간은 SGR그라우팅 공법을 적용할 것으로 조사되었다.

<표 2> 하천별 지하수 유입량 (단위 : m³/min)

하천명	구간	터널패턴	보조공법	토피 (m)	상부토질	배수연장(km)	지하수유입량	
							분당	1km당
계	8개소					7.937	23.92	3.01
안양천	오목교-양평	복선 PD-2	M.Roof, RMG	20-23	층적토, 풍화암	0.772	5.56	7.20
셋 강	신길-여의도	복선 PD-2,3	강관SGR, JET	25-32	"	0.757	2.20	2.90
한 강	여의나루-마포	단선(완전방수)	강관다단. LW	23-31	풍화암, 경암	1.546	3.13	2.02
청계천	종로3-올지4	복선, 단선	SGR	19-25	"	0.890	2.345	2.63
청계천	마장-답십리	복선 PD-2,3	SGR JET	10.2-17	층적토, 풍화암	0.767	0.95	1.24
전농천	답십리-장안	복, 단선 PD-2,3	LW, JSP F.p	16.6-22	"	1.045	4.33	4.14
중랑천	장안평-군자	단선 PS-2,3	반현탁액 Pre.G	12.4-20	풍화암, 연암	1.290	2.41	1.87
한 강	광나루-천호	복선 PD-2	JET그라우팅	22-34	풍화토, 풍화암	0.870	3.00	3.45

3. 터널내부의 침전물 유입현황 및 성분분석

3.1 지형별 침전물 유입현황

지하수와 함께 터널내부로 유입되고 있는 부유물 및 침전물은 종류별로 다양한 특징을 갖고 있다. 부유물은 배수로에 흐르면서 배수흐름을 방해하지만 침전물은 배수관 내부로 퇴적되어 배수기능 상실 및 배수장애를 일으키고 있는데 지형별로 유입되는 침전물의 종류는 <표 3>와 같다

<표 3> 지형별 침전물 유입현황

구 간	지 형	침전물 준설량 (Kg)				토 질	그라우팅 및 보조공법	
		백색침전물		붉은색 침전물	검은색 침전물			계
		백태	백색침전					
계		1,565	7,590	3,186	1,495	12,891		
김포~송정	평지대	-	360	-	-	360	풍화암 SGR	
화곡~신정	까치산	200	4035	-	85	4320	연, 경암 F.P, PR	
오목교~영시장	안양천	-	390	600	-	990	층적, 풍화암 RMG	
영시장~신길	저지대	300	-	-	-	300	풍, 연암 SGR	
신길~여의도	셋 강	-	-	240	-	240	풍화토, 암 SGR, 강관다단	
여의~여의나루	하 천	90	-	75	-	165	연, 경암 LW, SGR	
마포~서대문	고지대	480	1800	-	765	3045	연, 경암 F·poling	
서대문~행당	고지대	90	-	-	90	180	" 우레탄	
행당~마장	고지대	210	-	135	120	465	" F. Poling	
마장~답십리	청계천	-	105	660	-	765	층적, 풍화암 SGR, JET	
답십리~군자	전농, 중랑천	-	-	1221	300	1521	" LW, SGR	
군자~광나루	아차산	-	450	-	135	585	연, 경암 Pipe roof	
길동~굽은다리	평 지	-	-	165	-	165	풍화암 peck	
명일~상일	평 지	120	450	-	-	570	풍, 연암 C.G, LW	
강동~둔촌	언 덕	-	-	90	-	90	풍, 연암 강관다단	
오금~마천	구릉지	75	-	-	-	75	풍, 연암 Jet	

붉은색 침전물이 유입되는 지역은 토사터널 및 풍화암층이 터널상부까지 깊게 분포되어 있는 평야지대, 하천통과구간에서도 발견되고 있으며, 위치별로는 터널과 박스구조물이 연결되는 부위에서 가장 많은 침전물이 터널내부로 유입되어 배수장애를 일으키는 주원인이 되고 있다.

백색침전물이 발생하는 지역은 고지대 및 터널입구에서 주로 발생되는데 그 원인은 터널중앙배수관 부설깊이 단차로 인하여 배수가 정체되어 침전물이 흘러가지 않고 배수관내부에 퇴적되기 때문이다. 백태는 지하철 터널 전구간에서 발생하지만 지하수 유입량이 적은 지역에서 주로 발견되고 있다.

검은색 침전물은 배수가 정체되는 역사주변에서 주로 발생되고 있는데 역사청소수 등이 배수시설에 쌓여있는 백색침전물 또는 붉은색 침전물과 혼합되어 색상이 변색된 것으로 조사되었다.

3.2 침전물 유입경로 및 성분분석

붉은색 침전물은 충적토 및 풍화암지대의 토사터널구간에서는 배수시설을 통하여 유입이 되고 있고 일반구간에서는 터널과 Box구조물 연결부위로 통하여 유입이 되고 있는데 그 이유는 공사중 터널입구 안전성을 확보하기 위해 설치된 이스양카 및 가시설을 공사완료후 제거가 불가능하여 지중에 매몰하였기 때문에 되메우기 시공여건상 완벽한 다짐이 곤란했을 것이므로 투수계수가 상대적으로 커서 외부유입수와 붉은색 침전물 등이 터널 내부로 유입되고 있다.

백색 침전물이 주로 고지대에서 많이 발생하는 이유는 단층 파쇄대 지층의 지반보강 및 차수조치를 위하여 시행한 그라우트 주입재(SGR, LW, CG)가 지층속에 존재하다가 용탈작용에 의해 지하수와 함께 터널로 유입되고 기타 지역에서는 터널구조물과 Box구조물이 연결되는 접합부에서 유입이 되고 있다. 백색침전물은 터널 배수시설에 퇴적되어 배수장애 및 배수기능을 저하시키기도 하고 건조되면 바람에 날려 터널을 오염시키는 주성분은 산화칼슘(CaO)이 많이 포함되어 있다.

백태는 콘크리트 중성화 과정에서 발생된 백색의 결정체로서 물 유리와 같아 초기에는 지하수 등 작은 충격에도 쉽게 파괴 분해되지만 시간이 경과되면 동굴의 석순이 자라듯이 백태는 배수관로 내부에 서서히 쌓여 완전히 막히게 된다. 지하수 유입이 많은 지역에서는 백태가 쌓이지 않고 지하수와 함께 흘러가지만 지하수 유입량이 소량인 구간에서는 쌓이게 된다.

3.3 침전물 성분분석

붉은색 침전물을 건조시켜 육안관찰한 결과 터널과 Box구조물입구에서 유입되는 침전물은 이물질이 많이 함유되어 있었으며, 자석을 접근시킨 결과 상당량의 철성분이 침전물 내에 포함되어 있었지만, 배수확인구로 유입된 침전물질은 부드럽고 가벼운 고운 분말이었다.

<표 4>은 배수확인구에 퇴적되어 쌓여있는 백색침전물을 채취하여 성분을 분석한 결과이다. 산화칼슘(CaO)성분이 많이 함유하고 있으므로 시멘트성분으로 판단되며, 시멘트의 원료인 석회석, 규석, 산화철원료, 석고 중에서도 석회석성분과 거의 일치하고 있으므로 이 침전물은 숯크리트 및 콘크리트 등이 물과 접촉하여 발생된 백화현상은 아니고 지반 차수그라우트 주입재가 이탈되어 퇴적 된 것으로 판단된다.

<표 4> 백색 침전물의 화학성분 시험 결과

성분	강열감량1g loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	합계
침전물	43.4	0.51	0.17	0.41	55.1	-	99.59

백태는 콘크리트 중성화 과정에서 발생되는 백색의 결정체로서, $[CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2+CO_2 \rightarrow CaCO_3+H_2O]$ 산화칼슘(CaO)이 물과 접촉하면 수산화칼슘으로 변화한 후 대기중 탄산가스와 결합하면 탄산칼슘(백태)으로 변화되는 현상으로서 그 형태는 물 유리와 같은 형태이다

부유물중 터널 내부로 유입되는 부유물질은 세립분과 혼합되어 지하수와 함께 구름송이처럼 흘러가지만 부유물질은 점성이 크고 걸죽해서 배수로 및 배수관의 돌출물 등에 저축되면 정체되면

서 모이는 특성 때문에 배수흐름을 정지시켜 배수를 정체시키는데, 이 부유물은 터널지반보강을 위하여 시행한 그라우팅 주입재가 지층내에 존재하다가 용탈작용에 의해 지하수와 함께 터널내부로 유입되고 있는데 주입재 성분으로 추정된다.

4. 배수처리시설개선

4.1 개착 구조물의 배수유입 기준조정

개착구조물의 방수는 시트롤 이용한 비배수공법으로 시공되어 있기 때문에 평상시에는 구조물 누수 일부를 제외하고는 평상시 갱내청소수와 우천시 본선환기구 개구부를 통하여 우수가 유입될 수는 있으나 본선구간에는 환기구가 평균3개가 설치되어 있으므로 우수 유입량은 약 0.16m³/min이므로 설계기준 1km당 2m³/min의 50%(1m³/min)만 적용하여도 여유가 있으므로 개착구조물 배수유입수량을 1km당 분당 1m³/min/km로 조정되어도 충분할 것이다.

4.2 고지대 집수정 배수Pump용량 조정

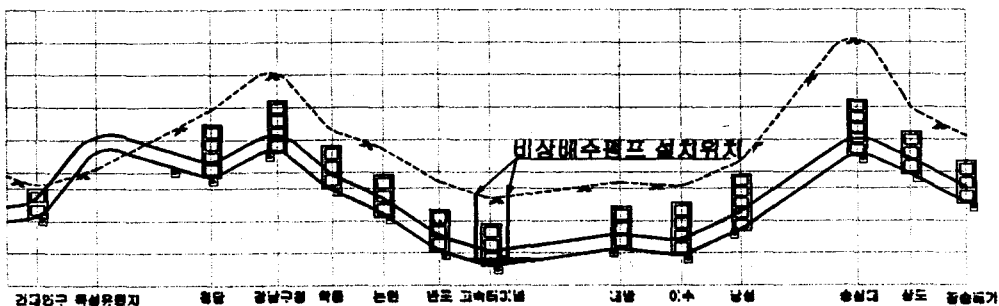
개착구조물구간은 완전방수공법으로 시공되어 지하수 유입량은 0.1~0.3m³/min정도이지만 집수정설계기준을 적용하여 고지대, 저지대구분 없이 집수정 및 배수Pump를 설치하기 때문에 고지대에 위치한 집수정은 배수유입량이 거의 발생되지 않고 있는데도 1km당 2m³/min기준으로 집수정이 설치되어 있어 악취발생 등 필요이상의 배수Pump시설이 설치되어 비경제적인 배수관리가 되고 있으므로 배수구역별로 배수계획을 수립 집수정규모 및 배수Pump용량을 결정할 필요가 있다.

4.3 터널 구조물

터널내부로 유입되는 지하수량의 설계기준을 3m³/min/km를 적용하고 있으나 지형별로 고지대, 저지대, 하천지대별로 많은 차이가 있으므로 터널 주변의 지하수위, 지층의 투수계수, 유도배수재(부직포)의 통수능력을 고려 배수량을 결정해야 하며 하천구간과 같이 지하수 유입량이 설계기준을 초과하여 다량 유입되는 경우에는 차수벽(Cut Off Wall)을 설치하여 지하수유입을 최대한 억제하여 구조물의 안정성 유지는 물론 배수Pump관리비용을 절감할 수 있을 것이다.

4.4 침수대비 비상 배수Pump장 설치

지하철 노선은 저지대, 구릉지, 하천을 통하여 지하에 건설되어 지하철은 수방관리에 매우 취약하다. 최근 엘니뇨현상 등 기상이변에 의한 지역별 집중폭우로 지하철 침수사고가 종종 발생되어 많은 피해와 시민의 불편이 발생되고 있으므로 이에 대비하여 <그림 2>처럼 심도가 깊은 저점부에 비상용 배수펌프시설을 설치한다면 보다 신속한 배수처리로 시설물의 피해를 최소화하고 복구비용과 시간이 절약될 수 있을 것이며 조기 열차개통으로 시민의 불편을 최소화 할 수 있다. 비상펌프실 설치위치는 배수구역별 최저점부 환기구 풍도 위치에 비상배수Pump 및 토출배관을 설치한 후 침수사고 발생 시에 만 가동하도록 한다.



<그림 2> 비상배수Pump 장 설치위치도

5. 결 론

지하철 배수계획 수립 시 지하수 유입량은 일률적인 설계기준 적용보다는 지형별 특성과 투수 시험 결과를 고려하여 충분한 검토를 한 후 배수Pumping시설과 터널배수시설(부직포, 배수관)을 결정하여야 하며, 특히 하천통과구간과 하천인접구간에서는 지하수유입 억제대책(Cut Off Wall)을 마련하는 것이 바람직하다.

본 연구를 통하여 조사한 자료와 같이 박스구간에서는 최대 지하수 유입량은 $0.2\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 이하로 설계기준의 10%이므로 집수정용량 및 배수Pump용량은 안전율을 고려하여 $1.0\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 결정하여도 충분할 것으로 판단되나 침수에 대비하여 배수구역별 최저점부 환기구에 비상예비 Pump시설을 설치할 것을 제안한다.

도시지하에 건설된 배수식 터널에서는 산악터널과 달리 지하수와 함께 각종침전물이 터널내부로 유입되어 부직포 및 배수시설에 퇴적되어 배수기능 저하 및 배수장애가 발생되어 터널내 환경저해는 물론 구조물의 불안정을 초래할 수 있으므로 변단면 구조물접속부위의 배수구배는 단차없이 연속적인 기울기로 건설하여 원활한 배수처리가 될 수 있도록 하여야 할 것이다.

그러므로 배수처리 및 배수시설의 실시설계시 지형적인 특성과 운영중인 지하철의 하자발생유형 및 문제점을 유지관리기관으로부터 자료를 수집하여 건설에 임한다면 경제적이고 효율적인 건설이 될 수 있을 것이라 기대한다.

6. 참고문헌

1. 서울특별시 (1995) 5-36공구 시공감리종합보고서 P169~176
2. 서울특별시 (1996) 5-12공구 시공감리종합보고서 P 99~102
3. 서울특별시 (1996) 5-36공구 시공감리종합보고서 P115~120
4. A. Stading, "Tunnelling under a moterway in extremely difficult soil", AITES-ITA 2000 WORLD TUNNEL CONGRESS.
5. B.P.Kriekemans, "Polyurethane grouting for sealing leakages in tunnels", Tunnels and Metropolises, Vol 1, A.A.BALKEMA/ROTTERDAM/BROOKFIELD/1998.
6. J.R.Madinaveitia, "Control of leaks in the Bilbao Metro" , Tunnels and Metropolises, Vol 1, A.A.BALKEMA/ROTTERDAM/BROOKFIELD/1998.
7. M. Takenori, A. Kazuo, and K. Yukio, "Construction of subways crossing large rivers", AITES-ITA 2000 WORLD TUNNEL CONGRESS.
8. R.B.Clay, "Drainage maintenance", Tunnels and Metropolises, Vol 1, A.A.BALK-EMA/ROTTERDAM/BROOKFIELD/1998.
9. Y. Yuan, X. Jiang, X. Zhou, and J. Zhou, "Tunnel waterproofing practices in China", AITES-ITA 2000 WORLD TUNNEL CONGRESS.