

## 지하철의 터널 배수체계에 따른 결함 사례 Case Study on defects of Tunnel Drainage in Subway

김석조<sup>1)</sup>, Suk-Cho Kim, 이재욱<sup>2)</sup>, Jae-Uk Lee, 조성우<sup>3)</sup>, Sung-Woo Cho, 신용석<sup>4)</sup>, Yong-Suk Shin

<sup>1)</sup> 한국시설안전기술공단 차장, Assistant director, Korea Infrastructure Safety & Technology Co.

<sup>2)</sup> 한국시설안전기술공단 직원, Employee, Korea Infrastructure Safety & Technology Co.

<sup>3)</sup> 한국시설안전기술공단 직원, Employee, Korea Infrastructure Safety & Technology Co.

<sup>4)</sup> 한국시설안전기술공단 부장, Team Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Co.

**SYNOPSIS** : Tunnel in subway should be designed as a water-proof type tunnel as much as possible but it is difficult to make it come true due to several facts, such as construction technique and cost.

A drainage type tunnel as a substitute of a water-proof tunnel lead to the increase of water pressure on the concrete lining that make bad effect to tunnel structure when it has some problem to operate the drainage system.

Throughout studying about cases on defects of tunnel drainage in subway. We hope it contributes to tunnel maintenance.

**key words** : A drainage type tunnel, defect, maintenance

### 1. 서론

일반적으로 터널에서의 방수는 지하구조물의 안전은 물론 운행기능확보등을 고려하여 설계하여야 하며 운행시 용수등에 의한 문제가 생길 경우 이에 대한 보수 및 재시공이 대부분 불가한 실정인바 건설초기에 신중한 방수공사가 시행되어야하는 특징을 갖고 있다.

그러나 용수가 발생될 경우에 미관을 해치거나 라이닝의 배면 하중이 점점 증가하여 터널의 안전마저 위협받을 수 있으며, 이의 보수를 위해 재원마련은 물론 교통장애등 여러 가지 어려움이 수반될 수 있다.

본 연구에서는 지하철의 터널 배수체계에 따른 결함 사례들을 분석하여 터널별 지형·지질조건, 구조물 현황, 손상상태, 보수보강 현황을 검토하여 공용중인 터널의 안전관리에 기여코자 한다.

### 2. 지하철의 터널 배수

#### 2.1 터널 배수 실태

본 검토사례는 ◎◎지하철의 배수체계에 의한 결함 등을 터널의 주요형식인 재래식터널(단선,복선)과 NATM터널의 사례를 중심으로 정리하여 수록하였다.

지하철은 일반적으로 도심지에 위치하여 있으며 이에 따른 지하수 양압의 대책으로 침입수를 터널내부로 유도하고 배수시킬 경우 유지관리면에서 부가적인 업무발생으로 나타나므로 완전 방수방식으로 계획 시공하는 것이 바람직하나 시공당시의 기술로는 터널의 설계, 시공에서 지하수의 유입을 완전 차단하는 데는 한계가 있는바 특수한 몇몇의 경우를 제외하고는 대부분의 터널에서 지하수의 유입을 억제하면서 침입수는 합리적인 방법으로 유도 처리하는 공법이 채택되고 있다.

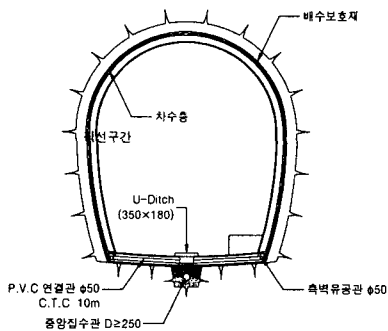
## 2.2 재래식과 NATM의 배수 단면 비교

본장에서는 검토사례의 주요형식인 재래식터널과 NATM 터널의 배수형태와 단면을 배수조건을 중심으로 기술하였다.

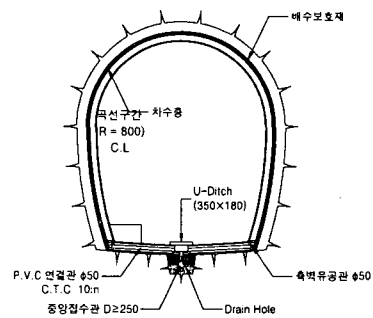
재래식 터널과 NATM의 다른점은 방수지 부착면이 슛크리트면이 아니고 1차 라이닝 콘크리트면에 설치한다는 점에서 차이가 있다. 따라서, 슛크리트면과 달리 부착면에 록볼트 두부, 요철 등이 없어 NATM보다 시공성이 용이하며 재료가 적게 든다.

터널의 배수형태는 배수조건 및 용수정도에 따라 조정하여 적용토록 하며 <그림 1~4>에 보여지는 것처럼 중앙집수관이 직접 집수정에 연결 가능한 구간은 Type 1과 3으로 시공하며 Type 2와 4는 직접 집수정에 연결 불가능한 구간으로서 집수량의 흐름 방향으로 하부에 개착 박스나 정착장 구조물이 시공 완료되어 터널의 중앙집수관의 연결이 불가능한 경우가 해당되며 측벽하부의 2차 라이닝 콘크리트 규격이 NATM과 ASSM이 서로 상이하여 유공관 규격을 달리하여 시공한다.

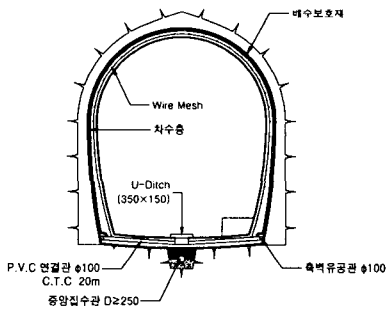
<그림 5>는 암석의 종류에 따른 중앙집수관 형식을 보여주고 있으며 <그림 6~7>은 수직중앙집수관 및 기초 Con'c 타설과 필터 Con'c 타설을 나타내고 있다.



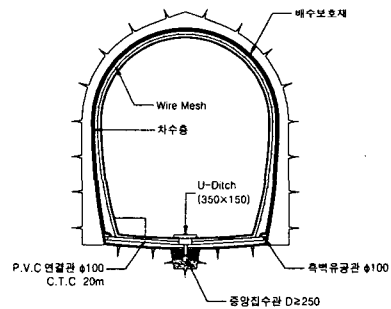
<그림 1> NATM Type 1



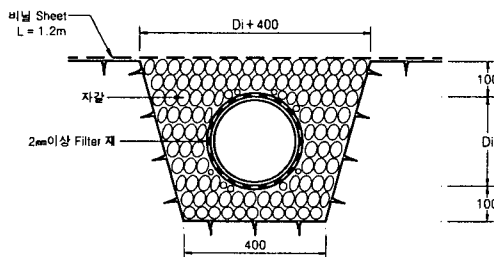
<그림 2> NATM Type 2



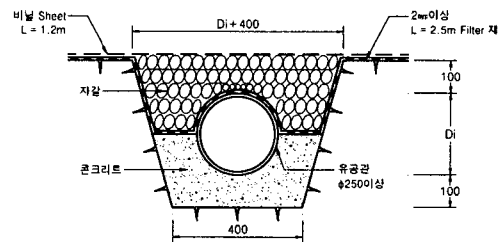
<그림 3> ASSM Type 3



<그림 4> ASSM Type 4

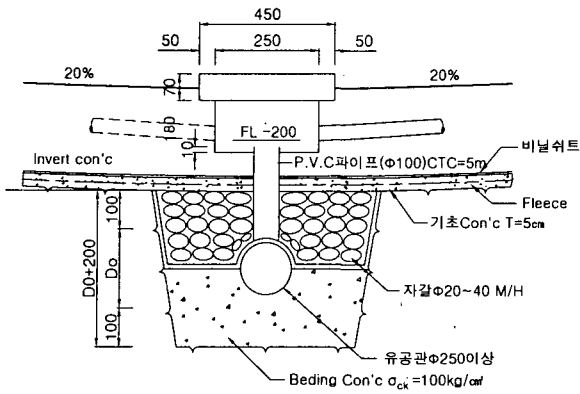


(a) 연암 및 경암구간

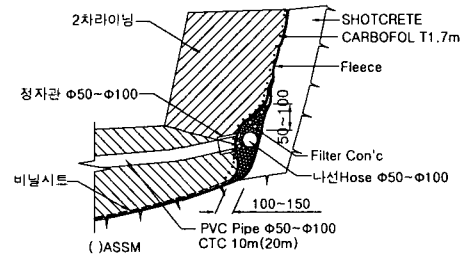


(b) 토사, 풍화토(암)구간

<그림 5> 중앙집수관 형식



<그림 6> 수직중앙집수관 및 기초 Con'c 타설



<그림 7> 필터 Con'c 타설

### 3. 지하철 터널 배수체계의 결함 사례

#### 3.1 지하철 단선터널(ASSM)

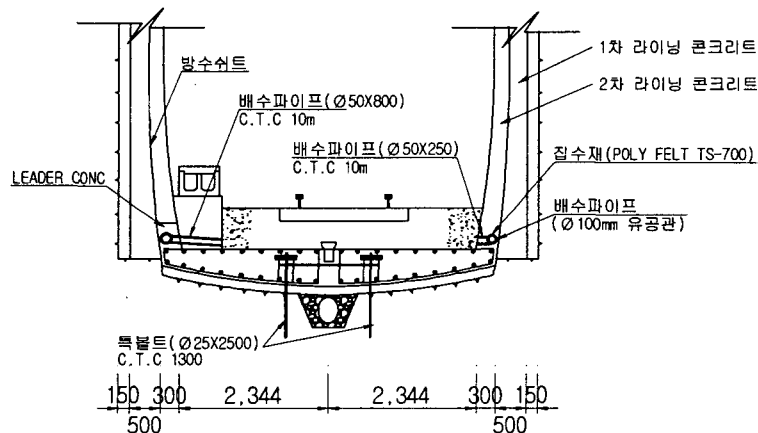
##### 1) 지형·지질조건

중단면상의 지표구배는 하향 4%이고, 터널은 7%의 하향 구배이다. 지형적으로 급한 경사로 내려오고 있는 지역으로서 굴착구간은 균열이 심하게 발달한 편마암(Gneiss)질 청갈색 경암, 연암, 황갈색 모래 매립토사로 구성되었으며 대부분 경암층이다.

본 지역의 지질구조는 절리 및 균열의 형태가 편마구조의 엽리의 영향으로 쪼개지는 Fracture Cleavage가 30~60°의 경사로 매우 많이 나타나며, 2차적으로 경사절리 및 수직절리가 발달되어 있다. 국부적으로 전단파쇄대가 형성되어 있으며, 이 경우 절리면은 대부분 흑연질 및 Calcite가 파쇄면에 부착되어 있는 것이 특징이다.

##### 2) 구조물 현황

- 준공도면의 터널굴착 단면은 높이가 7.33m, 폭이 6.29m이다.
- 1차 콘크리트 라이닝 두께는 25cm이며, 그 후에 슈트방수를 시공하고 2차 콘크리트 라이닝 두께는 20cm로 시공되었다.
- 방수 및 배수공 : 인버트 중앙에 설치된 배수로는 콘크리트 라이닝 측벽부에서 발생하는 누수량을 집수시킬 수 있도록 설계되어 있으며 구형배수로(폭30cm×높이30cm)에 뚜껑을 설치하였고, 인버트 방수슈트 하부에 유공배수관(φ250mm)을 설치하였다.



<그림 8> 터널방수 및 인버트 시공도면

- 1, 2차 콘크리트 라이닝 설계두께(45cm)는 확보된 것으로 조사되었으나 2차 콘크리트 라이닝 설계

두께(20cm)가 일부 구간에서 15cm미만으로 조사되었으며, 일부 구간의 천장부와 측벽부에서 공동이 발견되었다.

3) 손상 상태

- Rock Bolt 보강후 Bearing Plate 시공시 방수 미흡
- 콘크리트 라이닝 증방향 균열은 방수층 배면에 마대를 사용하여 유도배수층을 시공함으로서 불완전 유도 배수층이 형성되어 불규칙한 지층구조인 원지반의 다량의 지하수가 용출되어 수압이 외력으로 가중되면서 복합적인 원인에 의해 취약지점에 증방향 균열을 유발, 확산된 것으로 판단되었다.

4) 보수·보강 현황

- Rock Bolt(외선:40m, 내선:60m, 횡경:10m,  $\psi$ 25mm, L=3m, 150공) 및 배수공설치(외선:90m, 내선:100m, PVC $\psi$ 50mm, 7공) 보강공사가 시행되었으며, Rock Bolt 주변은 국부 누수가 조사되었다.
- 균열(탄소섬유 보수) 및 누수부위에 대한 보수가 전반적으로 시행되었으며, 보수상태는 대체로 양호한 것으로 조사되었다.

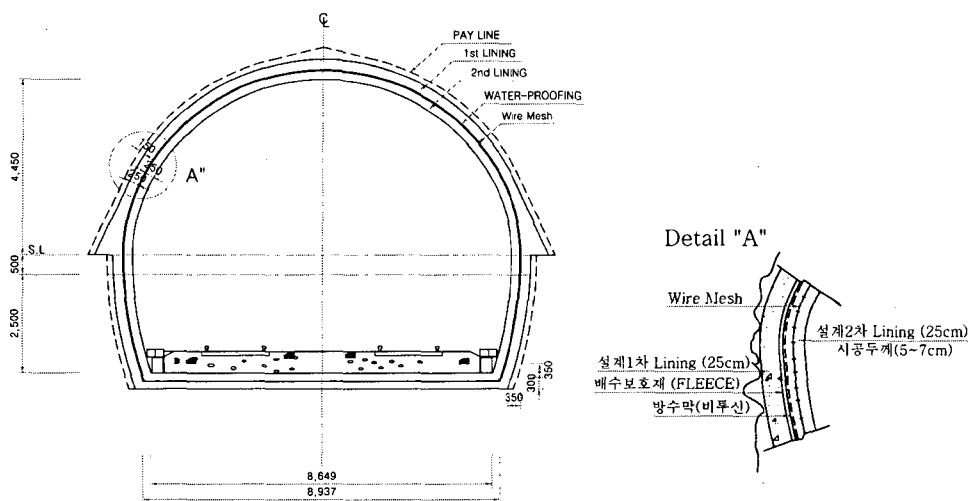
3.2 지하철 복선터널(ASSM)

1) 지형·지질조건

주변 지형·지질 및 토질에 관련된 자료를 분석해 보면 지표면 부근 2~5m의 풍화토를 제외하고는 그 밑의 2m 내외의 풍화암, 연암층으로 구성되어 있고, 그 암층은 북에서 남으로 40°~60°의 경사를 이루고 있으며, 편마암의 절리는 70°~80°의 경사로 발달하고 있다. 또한, 수개의 단층들이 구성되어 있는 구간들도 있어 이러한 지층구조 내의 균열부와 절리부로 장마 및 집중호우로 인한 우수가 지표하로 침투되어 지하수위가 급격히 증가하게 되고, 터널내로 다량의 유수가 유입될 수 있는 조건이다.

2) 구조물 현황

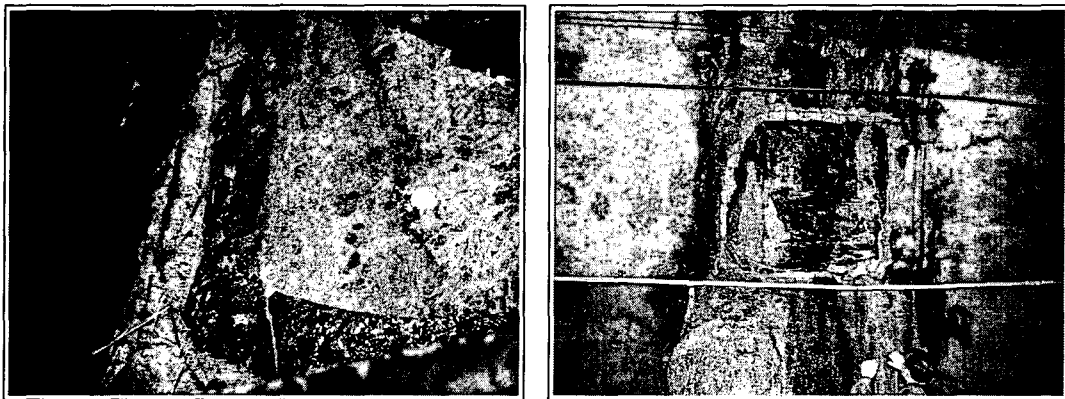
- 복선터널 구간은 전체 연장 430m이다.
- 굴착방법은 상부반단면 굴진공법과 균열이 아주 심하게 발달된 편마암(Gneiss)층으로 낙반이 심한 구간은 도갱굴진공법으로 시공하고 지보공은 1.0~ 0.5m 간격으로 시공되었다.
- 본 터널의 방수 방식은 1차적으로 콘크리트의 품질개선을 통해 누수 요인을 줄이고 2차적으로 1차 라이닝 콘크리트 타설 후 육안으로 나타난 결함부분을 보완한 후 시트방수재를 완전히 접착시키고 시트방수재 표면에 접착제를 도포 2차 라이닝 콘크리트를 타설하므로써 1차 라이닝과 2차 라이닝의 접착효과를 증대토록 하여 배수형방식으로 시공되었다.



<그림 9> 터널단면 및 방수 현황

### 3) 손상 상태

- 박락부위는 <그림 9>의 “A”지점으로, 시공당시 용출수를 처리하기 위하여 도수처리용 반월 홈 파기에 설치된 PVC(φ 50) 유도배수관이 조사되었고 방수지(비투신)와 보호재(부직포), 철망이 노출되었으며, 파손부 경계의 2차 라이닝 두께가 5~7cm로 확인되었다. 또한 박락부 제거시 2차 라이닝 콘크리트와 박락부위의 콘크리트에 경계면이 조사되었는데 이는 용출수 처리를 위해 따로 콘크리트를 타설한 부위로 판단된다.
- 박락의 발생 당시 이 지역은 계속된 장마 및 집중호우(기상청 자료 ; 평년793mm의 1.5배 이상인 1,233mm)로 지하수위가 증가됨에 따라 용수 처리관의 누수 및 2차 라이닝과 비투신의 접촉불량 등에 따른 누수의 저류와 2차라이닝 콘크리트 열화 등으로 인한 배수체계의 결함이 원인으로 추정되며 측벽부의 취약부위에 수압증가로 2차 라이닝 콘크리트가 국부적으로 박락되는 상태로 나타났다.



<사진 1> 2차 라이닝 탈락 우려 부분 제거 후 현황

### 4) 보수·보강 현황

- 지하수압의 작용 유무는 지반조건에 따른 지하수의 공급량과 배수시설의 용량 및 기능유지에 절대적으로 지배를 받기 때문에 배수형 터널에 작용시키는 수압의 크기를 일률적으로 결정하는데 어려움이 따르게 되고 자칫 합리성이 상실되게 된다. 따라서, 배수형 터널에서는 작용하는 수압의 크기 결정을 문제 삼기보다는 배수시설의 배수능력을 증가시키고 원활한 기능을 유지시켜 수압이 작용되지 않도록 하여 원래의 배수형 터널의 설계 개념과 일치시키도록 하는 접근방법이 바람직하다.
- 내면보강공법은 라이닝콘크리트의 박락과 두께부족구간에 대하여 내면에 인장보강재를 접착하여 보강하는 공법으로 판부착공법과 섬유쉬트접착공법 등이 있다. 단면을 거의 축소하지 않고서 보강할 수 있기 때문에 최근 터널의 보강대책으로 이용되고 있다.
- 본 터널이 배수형으로 설계된 것을 고려하면 2차 라이닝에 잔류수압이 작용되지 않도록 기존의 아치와 측벽에 누수 및 백태가 발생된 지점(11개소)을 대상으로 유도배수공을 설치하고 시공이음부에 백태 및 누수가 발생된 지점(8개소)은 동판설치에 의한 유도배수와 주변부 누수보수를 시공하였다.

## 3.3 지하철 단선터널 라이닝(NATM)

### 1) 지형·지질조건

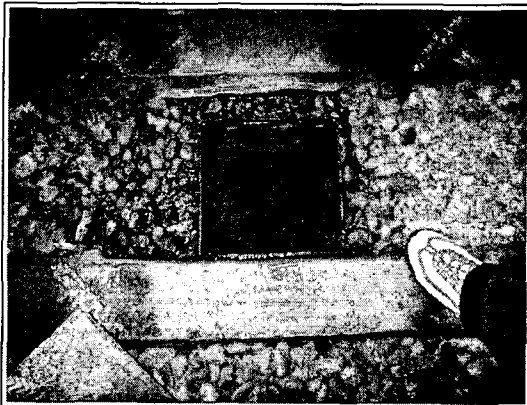
- 연약지반의 토피가 불과 5m의 하천 횡단 등 난공사 구간이었으며 주택지 근접시공시에는 제한 발파작업으로 민원을 최소화하면서 시공한 구간이다.
- 토질의 지층구성은 지표면으로부터 아래로 충적전석층, 사력층, 모래·사력층, 풍화암층, 연암층으로 구성되며 터널단면상으로 보면 터널천단 아래로 1.0m 까지가 모래사력층이 분포함되고 터널의 아치부 아래는 풍화암, 연암층으로 분포한다.

## 2) 구조물 현황

- 터널 굴착 방법은 하천 직전까지 상, 하 반단면으로 분할 굴착하였으나 하천에 근접하면서 상, 중, 하의 3단계로 분할 굴착하였다. 상, 중 반단면까지는 Bench 연장을 3m로 하는 Shot Bench를 채택하였고, 하부 반단면은 상,중 단면이 완료된 후에 굴착하였다. 막장에는 낙방 방지용으로 Fore Piling(φ 32mm, L=2.5m)을 20cm 간격으로 1단면에 35개씩 설치하였으며 Rock Bolt는 상부 중간부 Steel Rib 설치시에 Steel Rib 하단 고정을 위하여 설치하였다.
- 콘크리트 라이닝 시공은 두께 30cm이며 라이닝콘크리트 배면측에 와이어 메쉬 1렐이 시공되어있다.
- 터널의 배수단면은 터널로 유입된 지하수를 방수시트 말단부(측벽양측면 바닥)에는 종단방향 유공관(φ 100mm)을 10m 간격으로 하여 중앙 집수관을 통하여 집수정까지 유도하여 배수처리하는 방법이다.
- 또한, 중앙집수관으로의 배수가 불가 또는 불량한 경우로 U-Ditch에 φ 100 mm의 수직 Drain Hole을 설치하여 터널 인버트에 작용하는 지하수를 터널내로 유도 처리토록 하고 기초콘크리트를 타설하였다.

## 3) 손상 상태

- 현장 점검시 라이닝 벽체 및 아치부에는 누수가 발생되지 않았다.
- 양측벽 하단부의 바닥부에서 자갈도상에 유입된 누수가 자연 배수되고 있다.
- 상행선의 터널과 정거장박스의 배수구이음부는 유입된 토립자(미세모래)가 퇴적되어 배수기능이 저하되어 있다.



<사진 2> 터널중앙배수구 정제



<사진 3> 배수구 모래퇴적 및 펌프실 연결부

- 상행선의 배수구와 배수펌프장의 이음부는 배수펌프실로의 유입구가 정거장내 사용되고 있는 연결철관으로 단면이 축소되어있어 흐름을 정체시키고 있다.
- 터널의 양압력 작용시 측벽하단의 축소, 궤도의 이탈, 변위발생 등이 발생할 수 있으나 본구간은 외관조사 및 손상이 없는 양호한 상태로 양압력으로 인한 문제는 없다고 판단된다.
- 본 터널의 배수형식은 바닥의 양측면 하단부에 종방향 배수구를 시공하여 20m 간격으로 설치된 횡배수관으로 중앙집수관에 유도처리하는 형식이며, 이럴 경우 1차 숏크리트 타설면에 방수지 보호층과 방수지(카보폴)를 붙이고 2차 라이닝을 타설할 때 방수지 손상과 측벽의 바닥부 종방향 유공관 위치이탈등의 하자가 많이 발생하는 문제점을 안고 있으며, 특히 본 지역이 시공시 난공사 구간으로 용출수로 인한 물의 유입이 많아 시공불량의 원인이 된 것으로 판단된다.

## 4) 보수·보강 현황

- 상기 원인에 의한 누수량과 공용기간의 경과에 따라서 퇴적된 배수구의 미세립자가 배수단면을 축소하여 원활히 배수되지 못하게 되고 집수정 부위의 지속적인 배수용량의 유입량을 초과하여 적체된 물이 정거장구간으로부터 터널내로 역류되어 도상자갈이 침수되고 있는 것으로 판단된다.
- 본 구간의 배수불량은 유입수에 대한 배수량의 부족으로 판단되는 바 배수펌프장의 배출량을 우기

시와 건기서를 고려하여 가동하고 터널과 정거장 배수구의 퇴적물 준설 및 배수펌프장 유입구의 단면 확보(파이프제거)가 필요한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 ㉠㉠지하철의 터널 배수체계에 결함 사례를 검토하였고 이를 통해 배수형 터널에서는 배수시설의 설계목적에 맞는 체계적인 유지관리를 통하여 콘크리트 라이닝에 수압이 작용되지 않도록 배수체계를 관리하는 것이 중요하며 비배수터널의 경우, 유지관리시에도 허용누수량 검토등과 아울러 이러한 손상등에 대한 지속적인 자료수집 및 데이터베이스화를 통하여 결함원인을 사전에 조치토록하는 설계방향제시와 적절하고 체계적인 유지관리 방안의 제시가 필요하다.

터널 결함 사례에 대한 원인 및 조치에 대해서는 크게 두가지로 나눌 수 있으며 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 배수터널의 경우, 불리한 지형·지질구조속에서 배수체계의 결함을 원인으로 하여 취약지점에 수압이 외력으로 작용하면서 박락 및 종방향 균열과 같은 결함을 발생시키는 경우이며 이와 같은 경우에 대한 대책으로는 록볼트 설치, 유도배수관 설치와 주변부 누수보수가 이루어졌다.
- 2) 배수구이음부에 유입된 토립자의 퇴적등이 원인이 되어 배수기능을 저하시키고 있었으며 그에 대한 대책으로 퇴적물 준설, 배수펌프 유입구의 단면확보 및 건기, 우기에 따른 배수펌프장 배출량의 유연한 조절이 제안되었다.

#### 참고문헌

1. (사)대한토목학회(1997), “서울지하철 터널 방수개념 정립을 위한 연구보고서”
2. (사)한국터널공학회(2002), “터널의 이론과 실무”, 터널공학시리즈(I)
3. 정형식, 이인모, 김승렬, 남석우(2004), “전력구 침투수에 대한 설계기법 및 기준에 관한 연구”, 한국터널공학회 정기학술발표회
4. 유충식(2003), “터널시공과 지하수의 상호작용”, 대한토목학회 논문집