

지하철 터널 균열밀도 분석을 통한 합리적인 보수보강 방안 연구

Study on a rational repair and reinforcement by analysis of crack density in ○○subway

윤태국¹⁾, Tae-Gook Yoon, 신용석²⁾, Yong-Suk Shin, 안상로³⁾, Sang-Ro Ahn 이 송⁴⁾, Song Lee

¹⁾ 한국시설안전기술공단 진단1본부 차장. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

²⁾ 한국시설안전기술공단 진단1본부 부장. Team Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

³⁾ 한국시설안전기술공단 진단1본부 실장 Director, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

⁴⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수 Professor, University of Seoul

SYNOPSIS : The priority order about a rational repair and reinforcement is generally decided by subjective decision of engineer. An appearance investigation by tunnel scanner that is widely used in foreign nation was carried out to decide about a rational repair and reinforcement through systematic and objective analysis in box and NATM tunnel. We have decided on the order of priority of an rational repair and reinforcement through the crack density analysis by span, distance and location with the result of tunnel scanner.

Key words : crack density analysis, repair and reinforcement, tunnel scanner

1. 개요

일반적으로 터널에 대한 정밀안전진단시 보수 보강 방법 및 우선순위를 결정하는 것은 책임기술자의 주관적인 판단에 의존하여 결정할 뿐 아니라, 시설물 유지관리 주체에서는 이를 활용하여 다른 추가적인 검토가 미흡한 상태에서 터널에 대한 보수 보강 공사가 시행됨에 따라 비효율적이고 구조적 취약구간이 발생하는 경우가 있다.

이에 본 연구에서는 지하철 ○○구간에 대한 정밀안전진단을 실시함에 있어, 박스 터널 및 NATM 터널 라이닝의 전 구간에서 조사된 균열, 누수, 박락, 재료분리 등의 열화현상을 보다 체계적이고 객관적인 분석을 통하여 보수 보강 방법을 결정하고자 하였다. 이를 위하여 선진 외국에서 현재 널리 사용되고 있는 터널 스캐너를 이용한 외관조사를 실시하고, 이의 결과를 근간으로 하여 Span별, 거리별, 위치별로 터널 균열밀도분석을 실시함으로써 합리적인 보수 보강 방안을 선정함은 물론 체계적인 보수 보강 우선순위를 결정하였다.

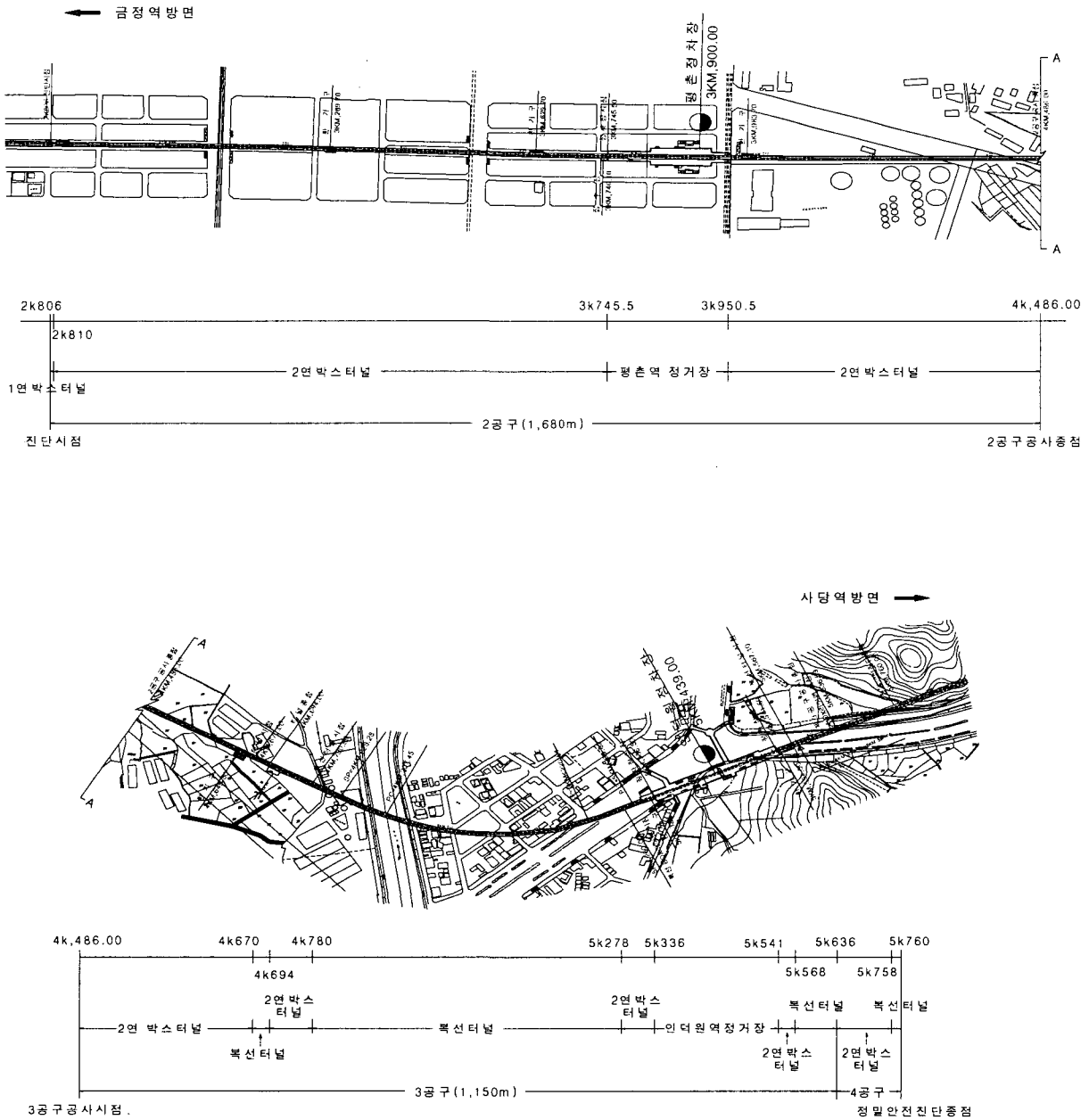
2. 대상 시설물 개요

대상 시설물은 서울지하철 ○○구간으로서 이 중 정밀안전진단구간은 Sta.2k806부터 Sta.5k760까지 2,954m의 구간이다. 시공당시의 ○○터널 공사는 2, 3, 4공구에 해당되며, 이 중 2공구 구간은 시점부터 4.0m는 1련 박스 구간이고 2련 박스로 이어져 정거장을 거쳐서 Sta.4k486까지의 구간이다. 또한, 3공구

구간은 2련 박스에서 복선 터널로 이어지며, 복선터널 구간 중간에 환기소 구조물을 시공하기 위한 2련 박스구간이 있고, 정거장 구간을 지나서 2련 박스 구조물과 복선터널 구간까지가 3공구이다. 4공구 구간은 2련 박스와 마지막 2m의 복선터널로 되어 있으며 정밀안전진단 중점구간에 해당한다.

또한 터널 제원은 박스구간이 2,357m, NATM터널이 597m로 구성되어 있으며, 박스구간의 경우 철근 콘크리트 구조이고 NATM터널 구간의 경우 철근 콘크리트와 무근 콘크리트 구간이 혼재해 있다. 터널 형상은 마제형이고 터널 양측 벽체 하부를 통하여 배수되는 양측배수 시스템이다.

이러한 조사 대상 구간을 나타내면 <그림 2.1>과 같다.



<그림 2.1> 정밀안전진단 대상 구간 현황

3. 외관조사

외관조사는 안전점검, 정밀안전진단시 가장 중요한 조사항목 중의 하나로서 대상 시설물에 대해서는

선진외국에서 널리 사용되고 있는 터널 스캐너를 이용하여 외관조사를 실시한 후 이의 결과를 재차 확인하는 기법으로 외관조사를 실시하였다.

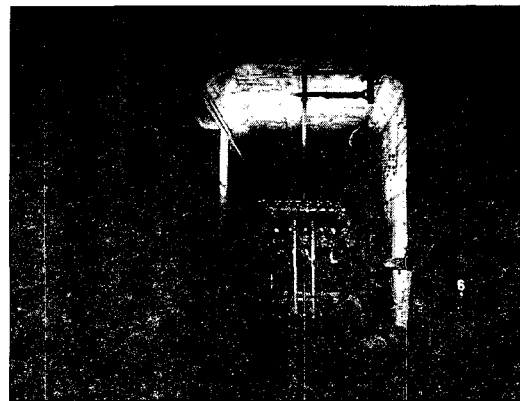
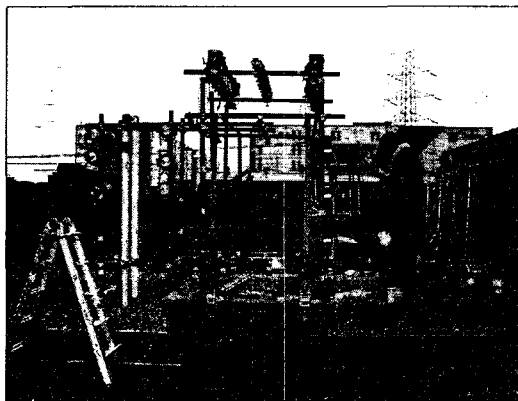
3.1 터널 스캐너에 의한 외관조사

터널스캐너는 구조물에 발생한 균열, 누수 등을 육안으로 조사한 후 스캐치하여 손상상태를 파악하는 기존의 외관조사방식을 레이저, 광학 등의 기술로 신속, 정확하게 상태를 파악하는 첨단기술의 장비이다. 이는 외관조사망도, 손상 물량 등을 자동으로 집계하며 이의 분석이 가능할 뿐 아니라 객관적이고 정확한 터널스캐너 자료를 활용하며 구조물 내에서 발생한 균열, 누수, 박락 등의 주요 열화현상의 진행성 등의 분석도 가능한 특징이 있다.

즉 기존의 육안조사는 터널의 현장 여건을 고려할 때 주로 야간 시간에 현장조사를 수행함에 따라 기입누락, 기입오차, CAD화 작업시 오차 등으로 인하여 자료의 활용성이 매우 저조하고 변상의 진행성 파악이 불가능하다. 또한 균열, 누수, 박락 등의 조사내용 판단 및 외관조사 결과를 보수·보강 물량으로 산출함에 있어 측정 기술자별로 주관적인 판단을 함에 따라 객관적이고 정확한 자료의 확보가 곤란하다.

이에 따라 금번에 적용한 터널 스캐너는 다음과 같은 장비를 적용하였다.

- 1) 장비명 : 콘크리트 구조물 균열 검출 시스템
- 2) 화상촬영장치 : 디지털 비디오 카메라 8set
- 3) 현장 장비 : 조명기, 디지털 녹화장치, 화면분할 장치
- 4) 분석 장비 : 화면처리보드, 화면 처리장치



<그림 3.1> 터널스캐너 (좌 : 장비 전경, 우 : 터널 스캐닝 작업)

3.2 기존의 육안조사와 장단점 비교 분석

기존의 육안조사와 터널스캐너와 비교를 하면 다음과 같은 장단점이 있다.

- 1) 기존 외관조사 문제점
 - 주 공종인 터널의 현장 여건을 고려할 때 주로 야간 시간에 현장조사를 수행
 - 조사 대상 구조물의 높이가 대부분 5m를 초과함에 따라 외관조사시 장시간 고개를 쫓힌 상태에서 조사가 수행되어 산업재해의 가능성 농후
 - 기입누락, 기입오차, CAD화 작업시 오차 등으로 인하여 5년 주기로 실시하는 정밀안전진단시 기존 자료의 활용성이 매우 저조하고 변상의 진행성 파악이 불가능함.
 - 균열, 누수, 박리, 박락 등의 조사내용 판단 및 외관조사 결과를 보수·보강 물량으로 산출함에 있어 측정 기술자별로 주관적인 판단을 함에 따라 객관적이고 정확한 자료의 확보가 불가능함.
- 2) 터널스캐너 도입시 기존 육안조사 보완점
 - 작업환경 개선 : 장기간의 야간 현장 조사 작업으로 인한 열악한 작업환경이 개선되어 산재의 가능성이 현저히 낮아짐
 - 정밀도 향상 : 외관조사 자료를 짧은 시간(탐사속도 : 4km/h ~ 10km/h)에 영

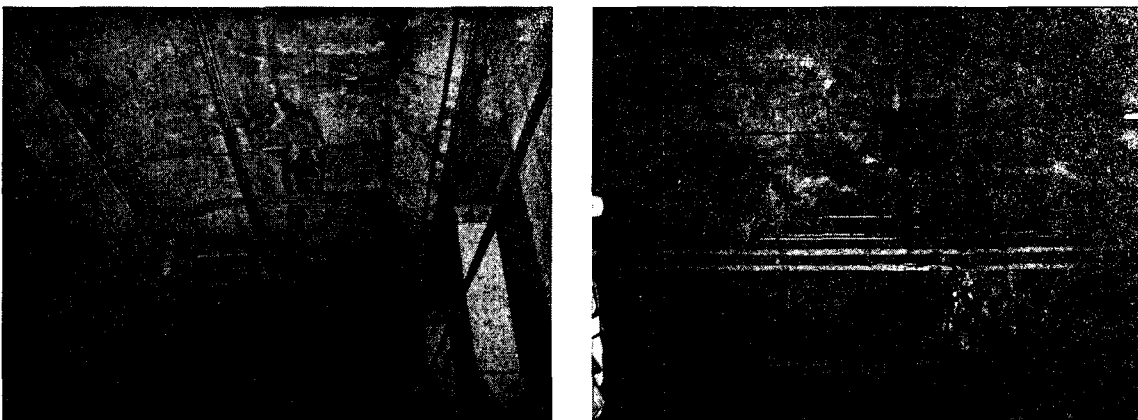
- 상으로 취득함으로써 변상상태의 변화를 오차없이 신속, 정확하게 분석
- 상태평가 및 보수·보강과 상관성 확보 : 외관조사결과가 자동으로 Excel File화하여 신뢰성있는 상태평가 및 보수·보강 방안의 제시가 가능
- 상태평가 및 보수·보강과 상관성 확보 : 외관조사 결과가 자동으로 Excel File화하여 신뢰성있는 상태평가 및 보수·보강 방안의 제시가 가능
- 객관적인 데이터 베이스 구축 : 5년 주기로 시행하는 정밀안전진단 결과를 객관적이고 신뢰성있는 DATA BASE로 구축할 수 있어 변상 진행 상태를 확인
- 정보 관리의 일원화 : 국내 전 구조물에 대하여 외관조사에 대한 정보관리를 일원화할 수 있으며 IT기술과 접목을 통하여 획기적 기술력 향상을 도모

3.3 터널 스캐너 분석처리 작업

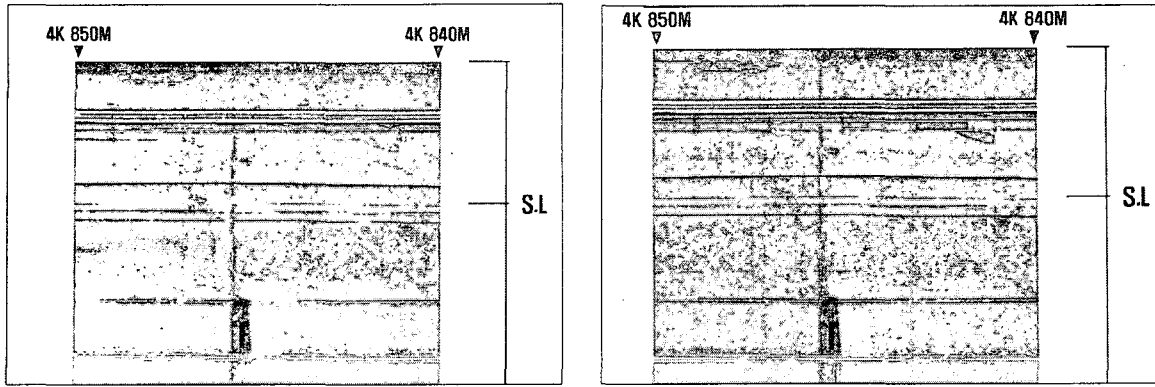
터널 스캐너에 의한 분석처리 작업은 각각의 스캐너 시스템 별로 상이하며 이러한 특성을 정확하게 분석하는에는 한계가 있으나 대부분 다음과 같은 스캐너 영상을 분석하는 과정을 거치게 된다.

- 1) DATA 획득 : 각 시스템마다 상이하지만 영상방식과 레이저방식으로 구분하여 현장에서 터널의 외관상태에 대한 원 DATA를 취득한다. 이러한 시스템을 운영하기 위해서는 광학시스템, 스캐닝 시스템, 방진 시스템이 필요하다. 또한 현장에 직접 DATA를 얻을 경우는 터널의 기하학적 특성으로 인하여 DATA와 실제 현장과의 위치를 추적관리하기 위한 위치추적 장치도 필요하다.
- 2) DATA 저장 : DATA의 저장은 현장에서 획득한 DATA를 비디오 테이프, 하드디스크, CD 등의 매체를 통하여 DATA를 저장한다.
- 3) DATA 판독 : 획득된 터널의 영상에서 균열, 누수, 박락, 박리, 재료분리 등의 열화형상을 포함한 외관조사망도를 얻기 위하여 사용자가 쉽게 운영할 수 있는 가시화하고 이를 전문가 시스템이 처리할 수 있는 정량적인 DATA를 생성한다.
 - 균열의 모델링 : 영상처리에 이용할 수 있는 균열의 특징 형상을 정의한다.
 - 필터링 알고리즘 : 영상처리를 위하여 노이즈를 제거할 수 있는 필터를 설계하여 현장 기술자가 필요한 부분을 부각할 수 있는 필터링 작업이 필요하다.
 - 균열 추출 알고리즘 : 시공이음부, 분진, 그늘음 등의 다른 이상구간과 구별하는 균열 추출 알고리즘이 필요하며 또한 이를 실제 좌표계에 나타낼 수 있는 매핑작업이 필요하다.
 - 균열 이외의 열화형상을 나타내는 알고리즘의 설계 작업

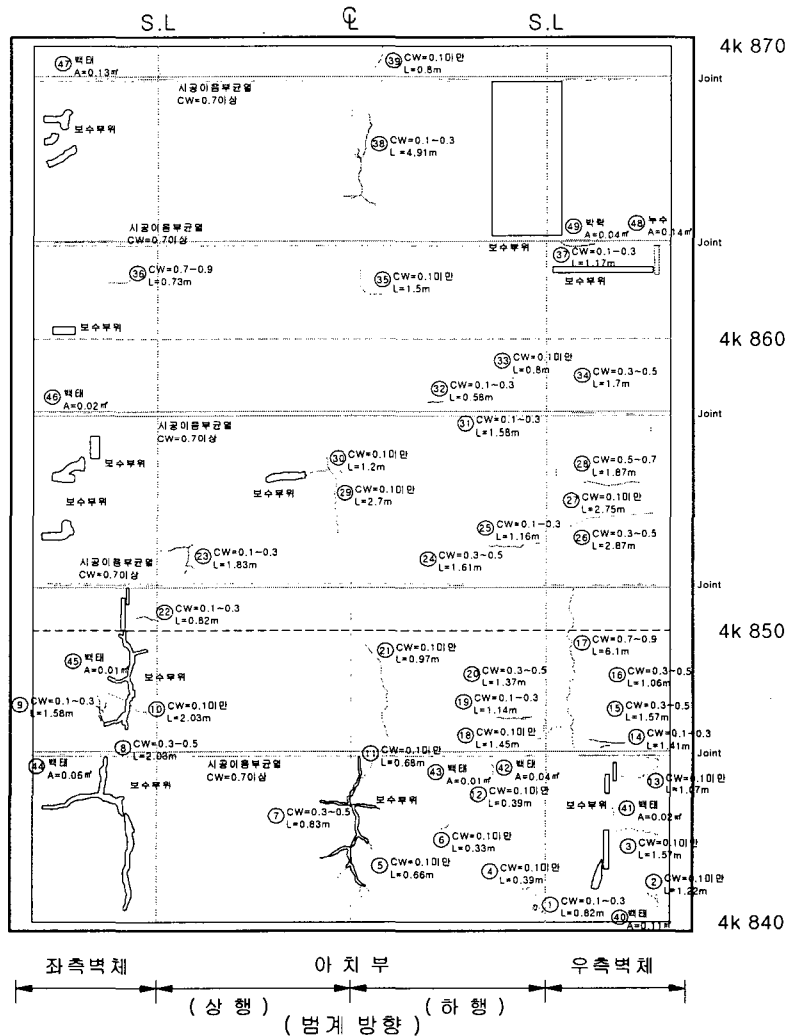
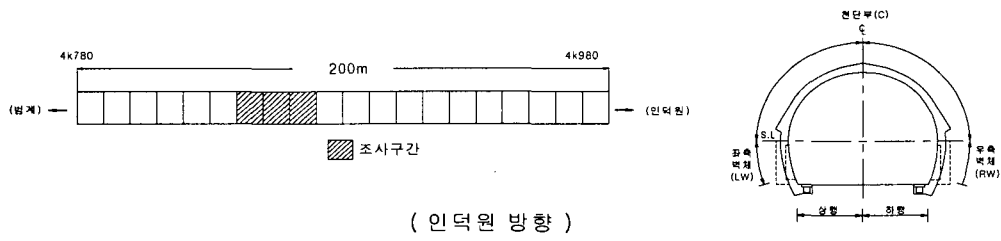
이와 같은 일련의 외관조사는 <그림 3.2>의 실제 터널에서의 외관상태에 대하여 <그림 3.3>과 같은 현장 영상자료를 획득하여 분석함으로써 <그림 3.4>와 같은 외관조사망도를 득하게 된다.



<그림 3.2> 실제 터널에서의 균열 영상



<그림 3.3> 터널스캐너 결과(좌 : 현장 영상자료, 우 : 실내 분석 결과)



<그림 3.4> 터널스캐너에 의한 외관조사망도

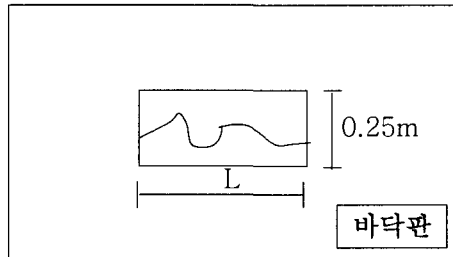
4. 균열밀도 분석

4.1 균열밀도 분석 기법

전술한 터널 스캐너에 의한 스캐닝 작업을 실시할 경우 획득되어지는 외관조사 결과는 일반적인 육안조사의 결과와 비교할 경우 정밀도 뿐 아니라 향후의 진행성여부를 판단하는데 중요한 자료로 활용할 수 있다. 반면 이러한 결과를 이용하여 분석을 실시함에 있어 아직 정량적인 분석기법이 없음을 고려하여 본 연구에서는 외관조사 결과를 분석함에 있어 다른 결함사항은 발생빈도가 많지 않음으로 인하여 균열에 대하여 보다 깊이 있는 외관조사 결과를 분석하였다.

이에 본 연구에서는 균열밀도를 분석함에 있어 다음과 같은 기준으로 적용하였다.

- 1) 균열발생면적은 균열길이당 0.25m폭을 차지하는 것으로 가정하였다. 이는 터널의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 의거하며 시각적으로 균열이 발생할 경우 균열이 발생하는 구간을 나타내는 것을 말한다.
- 2) 균열 밀도 분석의 경우 각각의 공구별로 구분함은 물론, 정거장 구간, 박스구간, 터널 구간으로 크게 분류하였다. 또한 터널의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에서 상태평가를 실시하기 위하여 무근 콘크리트 구간, 철근 콘크리트 구간으로도 구분하였으며 라이닝의 스팬길이는 5~50m의 기준으로 판단하는 것으로 되어 있으나 스팬의 길이는 박스구간의 경우 30m, 터널 구간의 경우 정확한 시공이음부를 확인할 수 있었으며 이를 적용하여 분석하였다.
- 3) 대상구간에 보수보강공법을 결정함에 있어 일반적으로 터널에서 보수 공법의 한계가 결정되어지는 0.3mm를 기준으로 분석을 실시하였다.

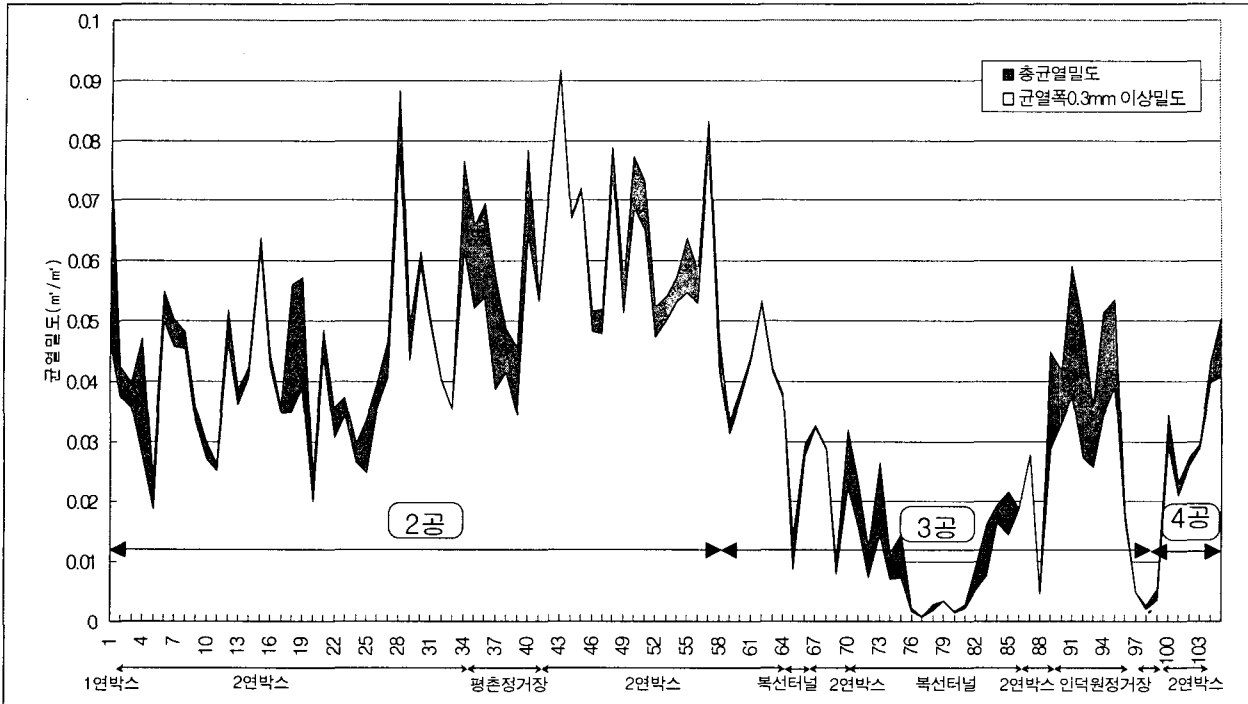


$$\frac{\text{균열발생면적}}{\text{바닥판(점검단위)면적}} \times 100(\%) = \frac{\text{균열길이(L)} \times 0.25}{\text{바닥판(점검단위)면적}} \times 100(\%)$$

4.2 균열 밀도 분석 결과

균열 밀도 분석 결과를 요약하면 <그림 4.1>과 같다.

- 1) 기 보수를 실시한 3, 4 공구에 비하여 2공구에서 상대적으로 균열 밀도가 많은 것으로 분석되었다.
- 2) 구조물별로는 박스구간, 정거장구간, 터널 구간 순으로 균열 밀도가 높은 것으로 분석되었다.
- 3) 균열밀도가 가장 높은 구간은 정거장 주변의 2공구 박스 구간이며, 상대적으로 3공구 복선 터널 구간의 균열 밀도가 가장 낮은 것으로 분석되었다.
- 4) 균열밀도가 0.06m²/m² 초과 구간을 집중관리구간으로 선정하였으며 향후 유지관리시 우선 보수해야 한다.
- 5) 균열 폭별로 분석한 결과 기 조사된 집중관리구간에서 0.3mm이상의 균열 발생정도가 더 심한 것으로 분석되었으며 균열의 방향별 특성은 본 대상시설물에서는 특징적인 구간이 없는 것으로 확인되었다.



<그림 4.1> 구간별 균열 밀도 분석

<표 4.1> 집중관리구간

Sta.	Sheet No.	연장(m)	선정사유
계		364	
2k980~988	7	8	측벽보수후 박리다수발생
3k174	14	1	시공이음 생략구간
3k200~230	15	30	균열밀도 0.06m ² /m ² 초과구간
3k590~620	28	30	균열밀도 0.06m ² /m ² 초과구간
3k745~770	34	25	균열밀도 0.06m ² /m ² 초과구간 3k745~748(RS) 사균열발생
3k920~4k100	40~45	180	균열밀도 0.06m ² /m ² 초과구간
4k220~280	50~51	60	균열밀도 0.06m ² /m ² 초과구간
4k430~460	57	30	균열밀도 0.06m ² /m ² 초과구간 4k445 시공이음 생략구간

5. 결론

일반적으로 터널에 대한 정밀안전진단시 보수 보강 방법 및 우선순위를 결정하는 것은 책임기술자의 주관적인 판단에 의존하여 결정되어 진다. 이에 지하철 ◎◎구간에 대한 정밀안전진단을 실시함에 있어, 박스 터널 및 NATM 터널 라이닝의 전 구간에서 보다 체계적이고 객관적인 분석을 통하여 보수 보강 방법을 결정하고자 선진 외국에서 현재 널리 사용되고 있는 터널 스캐너를 이용한 외관조사를 실시하고, 이의 결과를 근간으로 하여 Span별, 거리별, 위치별로 균열밀도분석을 실시함으로써 합리적인 보수 보강 방안을 선정함은 물론 체계적인 보수 보강 우선순위를 결정하였다.

- 1) 균열발생면적은 균열길이당 0.25m폭을 차지하는 것으로 가정하였으며 이는 안전점검 및 정밀 안전진단 세부지침(터널편)을 기준으로 설정하였다.
- 2) 균열 밀도 분석은 각각의 시설물의 특성을 고려하여 공구별, 시설물별, 무근 콘크리트 구간, 철근 콘크리트 구간으로도 구분하여 실시하였고, 대상구간에 보수보강공법을 결정함에 있어 일반적으로 터널에서 보수 공법의 한계가 결정되어지는 0.3mm를 기준으로 분석을 실시하였다.
- 3) 균열 밀도 분석결과, 공구별로 균열밀도가 상이하였으며, 시설물별로는 박스구간, 정거장구간, 터널 구간 순으로 균열 밀도가 높은 것으로 분석되었다. 또한 균열밀도가 상대적으로 높은 구간을 집중관리구간으로 선정하여 보수보강시 우선적으로 실시하여야 할 것이다.
- 4) 이러한 결과는 상대적으로 정밀하고 정확한 터널 스캐너의 외관조사 결과의 자료를 분석함에 있어 기존의 보수보강 우선순위 판단기법을 체계적이며 객관적으로 관리할 수 있는 것을 나타낸다.

금번 연구를 통하여 향후 국내 터널 현장에서 널리 사용될 것으로 판단되어지는 터널스캐너의 결과를 분석함에 있어 균열밀도분석을 실시해야 할 것이며 또한 과 같은 보다 체계적인 운영관리시스템에 대한 연구가 필요하다.

- 1) 운영 관리 시스템 : 일반 개인용 PC에서 사용자 중심형 메뉴로서 제어를 하여 데이터의 입출력 및 처리, DATA의 영상화, 분석, 평가 및 기타 응용 프로그램과의 연결을 통하여 운영시스템의 개발하여야 하며 이 경우 필수적으로 균열밀도분석이 포함되어야 한다.
- 2) DATA 관리 시스템 : 외관조사 자료 뿐 아니라 설계, 시공, 유지관리이력 등의 자료를 체계적으로 관리하여 효율적으로 활용할 수 있어야 하며 이를 통하여 누구나 쉽게 적용할 수 있는 검색, 조회 프로그램의 구축이 필요
- 3) DATA 평가 시스템 : 터널에서 발생한 여러 가지 형상의 열화현상에 대한 전문가시스템을 도입하여 정확한 원인 추정을 위한 평가 시스템의 구축이 필요
- 4) 영상처리 시스템 : 현장에서 획득된 자료를 3D 입체화하여 현장에서 직접 확인하는 것과 같은 영상처리 시스템 구축

참고문헌

1. 한국시설안전기술공단 : 정밀점검 및 정밀안전진단 세부지침, 2003.
2. 시설안전기술공단 : 정밀점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편), 1997.3
3. 일본철도 총합기술연구소 : 터널보강·보수 매뉴얼, 1990.
4. 사단법인 일본터널기술협회 : 터널보강·보수에 관한 연구보고서, 1986.
5. 일본철도총합기술연구소 : 변상터널 대책공 설계 매뉴얼, 1998.