

## 적외선 열화상기법을 이용한 콘크리트 터널 라이닝의 비파괴 시험에 관한 연구

### A Study on the Non-Destructive Test of Concrete Tunnel Lining Using Infrared Thermography Technique

김영근<sup>1)</sup> · 장정범<sup>2)</sup> · 김영진<sup>3)</sup>

Y. G. Kim, J. B. Jang and Y. J. Kim

**Abstract** The interest of diagnosis and maintenance of construction is increasing due to the collapse of infrastructures. To obtain the complete, reliable and reproducible data on the state of the entire structure, various non-destructive techniques are available. Especially, specific constructional characteristics of tunnels make the application of non-destructive tests more difficult. Despite of the complications of these conditions, non-destructive techniques should be capable of providing a description of the state of the tunnel lining, without the removal of the tunnel installations. In this paper, the infrared thermography technique using the difference of surface temperature was studied. The optimum equipment was selected and introduced, the principle, testing method and data analysis were investigated. Also, through the case study for inspection of concrete tunnel lining, this technique has proven to be a valuable non-destructive test for detecting the defects such as crack, leakage of water and exfoliation of concrete. The applicability and usefulness of this technique for estimation of concrete tunnel lining have been conformed.

## 1. 서 론

최근 대형 구조물의 붕괴사고 및 각종 안전사고로 인하여 교량, 터널과 같은 사회간접 시설물의 안전진단 및 유지관리에 대한 국민적 관심이 높아지고 있으며 이와 관련하여 구조물의 효율적인 진단을 위한 조사기술이 활발히 적용되고 있다.

그러나 지하에 시공되는 터널 구조물은 지상구조물과는 달리 건설 당시부터 불확실성이 많이 내포되어 있고, 구조물의 한쪽이 지반과 밀착되어 있어 터널 구조물의 전부분에 대한 관찰이 불가능하기 때문에 아직까지 체계적인 조사·진단기법이 확립되어 있지 못한 실정이다. 이로 인해 터널과 같은 지하구조물에서의 안전진단 및 유지관리에 많은 어려움을 겪고 있다.

또한 구조물이 점점 노후화됨에 따라 구조물에 대한 효과적인 조사·진단이 매우 중요하며, 노후화된 터널의 효율적인 유지·보수를 위해서는 비파괴 시험을 이용한 터널 라이닝의 건전도를 평가하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 이 때 구조물에 손상을 주지 않는 비파

괴 시험기술(Non-destructive test, NDT)이 요구되며, 특히 터널의 경우 구조물의 한쪽면의 관찰에 의하여 지반과 밀착되어 있는 부분의 관찰이 가능한 비파괴 조사기술이 널리 활용되어야 할 필요가 있으며, 그 적용성에 대한 평가가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 터널 구조물의 조사·진단에 활용되는 다양한 비파괴 조사기술중, 광학기술을 이용한 적외선 열화상기법(Infrared thermography technique)의 터널에서의 적용성을 검토하기 위하여 적외선 열화상기법의 원리 및 장비를 이용한 측정방법을 검토하고 실제 터널에서의 측정을 수행하였다.

## 2. 터널 비파괴 시험

### 2.1 비파괴시험의 조건

비파괴 시험기술은 조사대상물을 분해하거나 파괴하

1) (주)대우 건설기술연구소, 주임연구원  
2) 전, (주)대우 건설기술연구소, 선임연구원  
3) (주)대우 건설기술연구소, 책임연구원

지 않고, 손상의 유무 및 내부구조를 확인하며, 강도를 간접적으로 측정하는 것으로서, 구조물의 점검 및 진단 시 실시되는 조사기법이다.

그러나 터널은 다른 구조물과는 달리 터널 라이닝의 벽면 쪽으로만 접근이 가능하며, 라이닝 벽면에 타일이나 코팅 등으로 미장이 되어 있고, 터널 구조물내의 조명, 환기, 접지선 등 다양한 설비시설 등이 설치되어 있으며, 콘크리트 라이닝이 내부에 철근으로 보강되는 경우 등 비파괴 시험의 적용에 어려운 점이 많다.

이와 같은 문제점에도 불구하고 비파괴 시험은 터널에 손상을 입히지 않고 터널의 건전도(soundness)를 판단할 수 있는 자료를 제공하는데 있어서 필수불가결한 시험으로 인식되고 있으며 또한 널리 활용되고 있다.

터널 내부의 손상 및 결함부위를 조사하는데 있어서 비파괴 시험 조건은 다음과 같다.

- ① 터널의 누수, 균열, 공동, 열화상태를 탐지할 수 있어야 한다.
- ② 비파괴시험 장비는 터널라이닝 내부의 결함을 탐지할 수 있어야 한다.
- ③ 라이닝의 시공재료와는 무관하게 여러 종류의 터

널에 대하여 비파괴시험을 수행할 수 있어야만 한다.

- ④ 비파괴시험의 결과는 터널 내부의 설비시설에 의하여 영향을 받으면 안된다.
- ⑤ 비파괴시험 장비는 진동에 대한 저항성이 있어야 한다.
- ⑥ 비파괴시험 장비는 터널 내부의 기상조건에 적절히 작동되어야 한다.
- ⑦ 비파괴시험 장비는 주전원과는 별도로 보조전원을 갖고 있어야 한다.
- ⑧ 가능한한 비파괴시험 결과는 비파괴시험 후 즉시 활용가능하여야 한다.

### 2.2 비파괴시험의 종류 및 선정

터널에서 활용될 수 있는 비파괴시험은 크게 4가지로 분류할 수 있다.

- ① 기계적 진동기법(Mechanical Oscillation Technique)
- ② 방사선 기법(Radiation Technique)
- ③ 전기 및 전자 기법(Electric and electronic technique)

Table 1. 비파괴 시험법의 터널에의 적용성 검토

	기 술	주요 적용대상	터널 적용성	문제점	이점
起振機 Mechanical Oscillation	공진법	교량(상부공)	Very low	벽면凹凸, 불균질 암반, 수위변동	없음
	진동반사법	지반조사(층두께의 결정)	Low	속도, 정도	라이닝내의 대공동
	미진동 및 AE 해석법	채탄(실내시험)	Very low	재현성, 정도	AE
	초음파	강구조, 기계공학 파이프 탱크	Very low	지질조사 병용 불균질성	없음
放射線 Radiation	γ선 후방산란법	도로토공(합수비, 습윤, 밀도)	Very low	측정속도, 측정심도	없음
	중성자 후방산란법		Low	측정속도, 측정심도	이산점의 합수비
電氣 및 電子 Electric & Electronic	渦動전류법	전도금속(파이프의 균열탐지), 보강판단	Low	측정속도, 측정심도 비전도체	보강재의 조사
	레이다법	교량 및 터널의 지반조사	High	평가방법 금속피복 반사	양호한 투과
	전위법	보강재의 부식탐지	Low	측정속도, 측정심도	부식탐지
光學 Optical	Infrared thermography	열단열체의 검사, 터널	Very high	터널환경 막장의 열방사	공동, 누수균열, 빠른속도
	Multispectral 해석	기념비, 건물, 터널	High	속도, 진동 강력 광원필요, 측정심도, 평가방법	미소한 마른 균열 탐지

④ 광학 기법(Optical techniques)

기계적 진동기법은 인공적으로 만들어진 진동에 대한 구조물의 동적응답을 측정하는 방법이며, 방사선 기법은 원자입자의 광선에 대한 구조물의 영향을 측정하는 기술로서 도로시공시 보조기층이나 표층의 밀도, 수분량을 측정하는데 많이 사용된다. 전기 및 전자 기법은 철근탐사, 구조물 또는 지반에 있는 결함탐사 등 건설분야에서 가장 많이 사용되는 방법이다. 광학 기법은 가시광선이나 적외선파장에 민감한 필름이나 필터를 사용하여 구조물의 표면을 촬영하는 방법으로 눈에 보이지 않는 구조물 표면결함을 찾는 데 유용하다.

Table 1은 국제터널협회(ITA)에서 보고한 터널에서의 비파괴시험 방법의 적용성 및 문제점을 비교·검토한 결과이다.<sup>1)</sup> 표에서 보는 바와 같이 터널에서 적용성이 높은 것으로는 전자파를 이용하는 레이더법(Ground Penetrating Radar, GPR)과 적외선을 이용하는 열화상기법 등으로 보고되었다.

Table 2는 일본터널협회(JTA) 보수관리위원회에서 보고한 터널라이닝에서의 비파괴 조사법을 평가한 결과이다.<sup>2,3)</sup> 대상물은 콘크리트, 철근, 균열, 라이닝으로 구분하여 4가지의 등급으로 그 적용성을 평가하였다. 각각의 비파괴조사법의 적용대상에는 차이가 있으나, 초음파법, 전자파법(레이더법), 적외선법 그리고 타격

법의 적용성이 비교적 높게 평가되었다.

본 연구에서는 다양한 비파괴 조사법중 적외선법 또는 적외선 열화상기법의 터널에서의 적용성을 판단하고자 측정 원리, 조사가능 대상, 적용상의 문제점 등을 검토하였다.

3. 적외선 열화상기법의 원리 및 장비

3.1 적외선에 의한 온도 측정

적외선은 파장이 약 0.72~1000 μm까지의 전자파로 가시광선의 장파장에서 마이크로파의 단파장까지의 총칭이다. 이 적외선은 물질의 온도와 밀접한 관계가 있어, 절대영도 (-273°C) 이상의 모든 물체는 연속적으로 적외선을 방사하고 있다. Planck 법칙에 의하면 흑체(black body)의 방사 Power (단색 방사 발산도)는 식 (1)에 의해 얻어질 수 있다.<sup>4)</sup>

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \text{ (W/cm}^2 \cdot \mu\text{m)} \quad (1)$$

여기서, λ : 파장 (μm)

T : 흑체의 절대온도

C<sub>1</sub> : 3.7402 × 10<sup>-12</sup> (W · cm<sup>2</sup>)

C<sub>2</sub> : 1.4388 (cm · °C)

여기에서 흑체는 입사한 적외선을 완전히 흡수하는

Table 2. 터널 라이닝의 비파괴 검사법의 평가

조사대상물 기법	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	콘크리트					철근			균열		라이닝 박리	라이닝 두께	배면공 동
	압축 강도	배합 추정	알카리 골재반응	중성화 깊이	염화 물량	위치 깊이	경	부식	깊이	길이 폭			
육안검사			○					○		●	○		
반발경도법	○												
초음파법	△					△			○		△	△	△
전자파법						●	△				◎	◎	◎
전자유도법						●	○						
레이더법										●			
사진화상법										○			
적외선법										△	◎		△
타격법·타음법	○										○	○	○
평가기준	● : 높은 정밀도로 실용적인 방법    ◎ : 높은 능력로 실용적인 방법 ○ : 실용적인 방법                      △ : 원리상으로 적용가능한 방법												

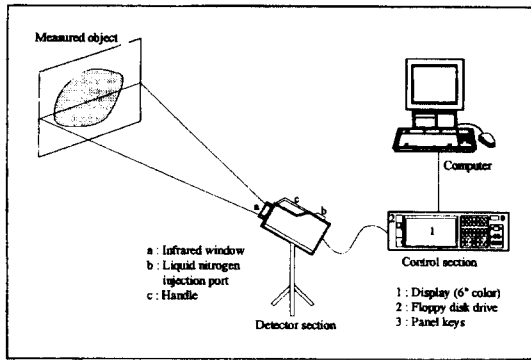


Fig. 1. 적외선 열화상 장비의 구성도.

물체로, 바꾸어 말하면 어느 온도에 있어서 다른 어떤 물체보다 방사하는 에너지가 큰 물체라고 말할 수 있다.

방사율은 흑체에 대한 방사(흡수)의 효율이라고 정의되므로 흑체의 방사율은 1이 된다. 일반적인 물체는 방사율이 1보다 적으며, 측정물에 대해 그 방사율 보정을 해야만 한다. Emissivity에 의한 방사율 보정은 이를 의미하고 있다. 또한, 식 (1)을 전과장으로 적산하면 전방사 발산도가 얻어지고 식 (2)와 같이 온도의 4제곱에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W\lambda d\lambda = \sigma T^4 \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$  : Stefan-Boltzmann의 정수  
 $5.673 \times 10^{-12} \text{ (W/cm}^2 \cdot \text{°C)}$

여기에 전과장을 검지할 수 있는 검출기가 있다고 한다면 온도의 4제곱에 비례하는 출력을 얻을 수 있다.

### 3.2 적외선 열화상 장비

본 연구에서 사용된 적외선 열화상장비는 비접촉형의 고감도 방사온도계로 측정대상의 표면으로부터 방출되는 적외선영역 (8~10  $\mu\text{m}$ )의 전자파를 감지, 검출하여 열화상으로 표시하는 장치이며, Fig. 1과 같이 검출부, 콘트롤부 및 부속품으로 구성되어 있다.<sup>5)</sup>

검출부 (Detector Section)는 적외선 에너지를 주사 집광하여 전기신호로 변환하는 unit 이고, 콘트롤부 (Control Section)는 온도신호를 처리하여 주사계를 콘트롤하는 unit로, 온도신호를 화상메모리로 기억하여 표시모드에 따라서 신호처리를 하고 내장된 6" 칼라 액정 Display로 표시하며, 화상데이터를 기록하기 위한 3.5" Floppy Disk Driver 가 내장되어 있다.

본 연구에서 사용한 적외선 열화상장비는 THERMO TRACER/TH 1101로 제품의 제원 및 사양은 다음과 같다.

- (1) 제품명 : THERMO TRACER/TH1101
- (2) 제조회사 : 일본전기 (주)삼영
- (3) 성능사양 :
  - ① 온도 측정범위 : -50~2000°C
  - ② 최소 검지 온도차 : 0.1°C (30°C 흑체로에서) 0.025°C (S/N 개선시, 30°C 흑체로에서)
  - ③ 감도설정 : 0.1~200°C/DIV, RANGE 1 0.1~30°C/DIV
  - ④ 수평해상도 : 344 본 이상
  - ⑤ 주시선수 : 207 본(Frame 시간 1초시)
  - ⑥ 방사율 설정 : 0.1~1.0 (0.01 Step)
  - ⑦ 검출기 : HgCdTe (액체 질소 냉각형), 측정과장 8~13  $\mu\text{m}$
  - ⑧ 정도 :  $\pm 0.5$  Range full scale

또한 적외선 열화상장치는 광범위한 부위에 대한 신속한 표면온도의 측정 및 접근이 어려운 부위의 측정이 가능하지만, 정량적인 열저항 측정이 어렵고 측정대상 물체의 표면 방사율에 대한 기초자료가 필요하며, 주변 환경 및 측정위치 등에 따라 상이한 결과가 도출될 가능성이 있는 단점도 가지고 있다.

### 3.3 측정 방법

일반적으로 콘크리트 표면은 기온이나 태양의 복사열의 변화에 따라 온도변화를 나타낸다. 콘크리트 표면은 콘크리트를 구성하는 재료의 비열과 열전도율 등의 물리적 성질의 상이, 표면상태나 형상에 따라 변화한다. 따라서, 콘크리트 표면의 열자료가 다른 영역, 즉, 박리부, 누수부 등의 결합부와 건전부에는 일정한 물리적 법칙에 따라 온도차가 생긴다. 적외선 열화상기법은 이들의 온도차를 열화상 정보로 파악하여 누수부 등을 검출하는 비파괴 시험법이다.

특히, 터널 라이닝은 타일의 박리와 콘크리트의 박리부는 건전부와 비교하여, 가열된 상태에서는 온도가 높게 되고, 외기온이 실내온도 보다도 낮은 경우는 박리부의 온도가 측정부위보다 낮게 된다. 측정면이 고르게 가열되었다고 한다면, 이와 같이 건전부와 결합부 사이에 온도차가 생기기 때문에 그 온도차를 해석하므로써 콘크리트 터널 라이닝의 조사진단이 가능하게 된다.

• 기준 온도

터널 라이닝의 결합부는 건전부보다 높은 온도가 된다. 그러나 높은 온도중에서도 어느 범위까지가 결합부 인가를 해석할 수 없기 때문에 건전부와 결합부의 한계 온도를 확인할 필요가 있다. 이 경계온도를 기준온도라 한다. 터널 라이닝의 외벽온도는 비교적 일정하기 때문에 기준온도는 결합이 없는 부위에서의 벽면과 천정부로 설정한다.

• 측정거리

측정거리는 면적분해능에 비례하며, 100 m 떨어진 경우 15 cm각의 평균 온도를 나타낸다. 일반적으로 터널의 바닥의 중앙에서 라이닝 까지의 거리가 측정거리가 된다.

• 콘크리트 라이닝의 상태

콘크리트 라이닝이 경년변화나 차량의 배기가스에 의해 오염물질(검댕이, soot)이 부착되어 있는 경우, 정상부에서도 높은 온도를 나타내나, 이는 박리부나 누수부의 경우와는 다르다. 이 때 사진을 촬영하여 해석시의 자료로 하는 것이 바람직하다.

• 측정시간

측정하는 시간은 계절, 지역, 터널의 방위에 따라 다르지만 온도차가 클수록 양호한 측정이 이루어진다. 계절에 따른 일사각도, 반사에 의한 입사광, 하루중의 일영변화에 의해 측정오차가 발생할 수 있으므로 주의해야 한다. 특히 터널의 입구나 출구는 이의 영향을 받기 쉬우므로 측정시간을 잘 선택하여 데이터를 수집하여야 한다.

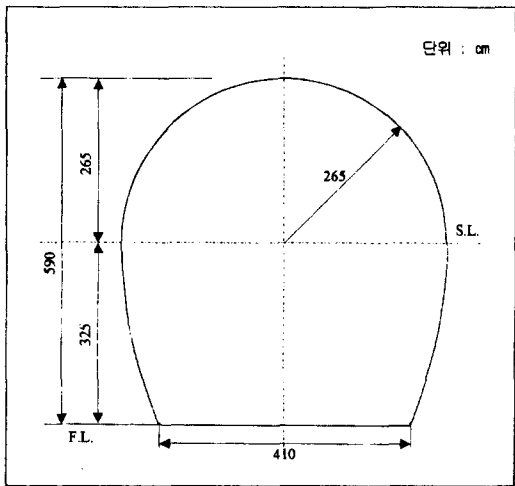


Fig. 2. 측정대상 터널의 단면도.

4. 조사 · 진단사례 및 분석

4.1 대상터널 및 조사

비파괴 시험법인 적외선 열화상기법을 이용하여 터널 구조물의 안전진단에 대한 효율성을 확인하기 위하여 노후화된 터널을 대상으로 측정을 수행하였다.

측정대상 터널은 중앙선중 지평역과 석불역사이에 위치한 총 연장 100 m, 제 4종 말굽형 단선 철도터널로서 1942년에 준공되었으며, 터널고 5.90 m, 유효폭 4.1 m, 상구배 11/1000이며, 곡선반경이 400 m이다. Fig. 2는 측정대상 터널의 단면도, Fig. 3에는 평면도 및 종단면도가 나타나 있다.<sup>6)</sup>

무근콘크리트인 라이닝의 상태는 누수와 노후화로 인하여 보수를 시급히 요구하는 부위와 균열 및 백화는 터널의 라이닝에서 전구간에 걸쳐 발견되었으며, 배수 상태는 매우 불량한 것으로 조사되었다.

본 조사에서는 먼저 외관조사를 통하여 누수, 박리, 균열 및 백화 등이 심하다고 판단되는 천정부와 측벽부를 집중적으로 측정하였다. Fig. 4은 적외선 열화상 장비를 이용한 측정모습을 보여주고 있다.

4.2 측정결과 및 분석

본 터널에서 조사지점은 총 10개 지점으로, 먼저 육

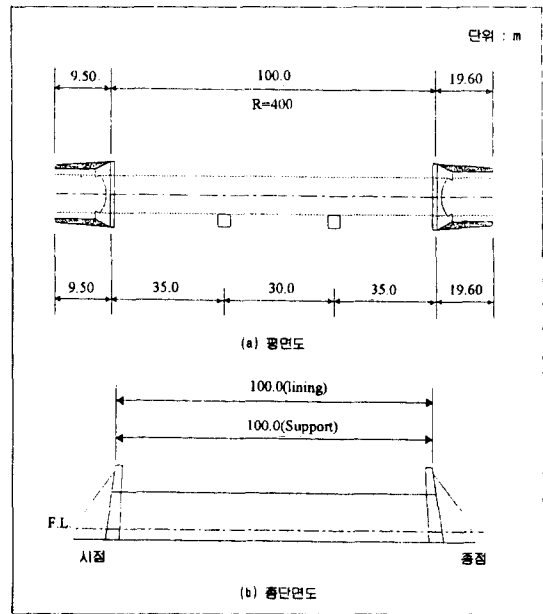


그림 3. 측정대상 터널의 평면도 및 종단면도.



Fig. 4. 적외선 열화상 측정모습.

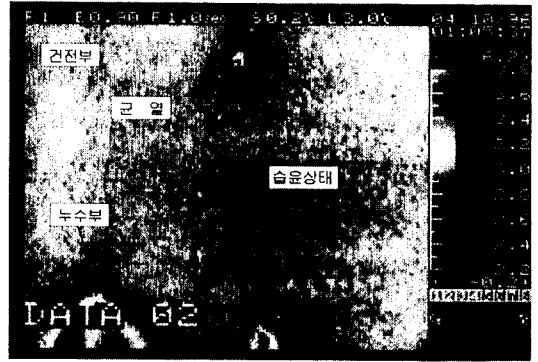


Fig. 7. 측정점 2에서의 적외선 열화상 측정결과.

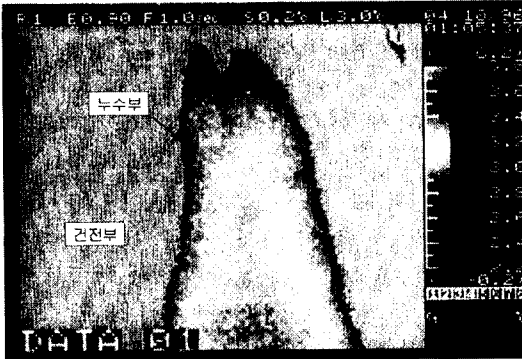


Fig. 5. 측정점 1에서의 적외선 열화상 측정결과.

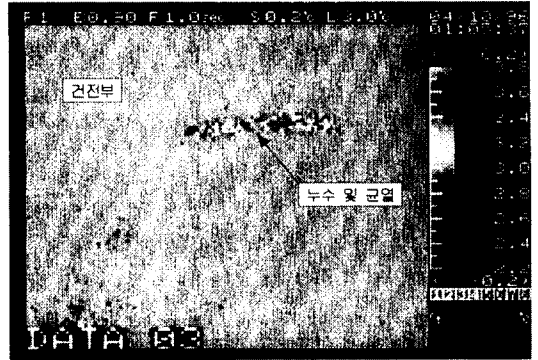


Fig. 8. 측정점 3에서의 적외선 열화상 측정결과.



Fig. 6. 측정점 1에서의 사진 촬영 결과.

안조사에 의해서 박리 및 누수가 의심되는 지점을 선정하여 측정을 실시하였다.

Fig. 5는 조사시점 1m, 터널 입구부의 우측 측벽 상단부에서 전형적인 누수부에 대한 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 그림에서 건전부는 분홍색을 띠게 되고 누수부는 노란색 및 녹색을 띠며 그 중앙부는 청

색을 띠고 있다. Fig. 6는 이 지점에서 사진촬영한 것으로 측정결과를 비교하기 위하여 나타내었다.

Fig. 7는 조사시점 1.5 m, 천정부에서 누수부와 균열에 대한 적외선 열화상결과를 보여주고 있다. 그림에서 우측의 붉은색을 띠는 부분은 콘크리트 라이닝의 습윤상태를 보여주는 것으로 주변의 건조한 건전부와 구별됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 조사시점 17.5 m, 우측측벽부 상단에서의 누수가 진행되고 있는 균열에 대한 전형적인 적외선 열화상결과를 보여주고 있다. 누수에 의해 균열내부가 청색을 띠고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9은 조사시점 29.5 m, 우측 측벽부 상단에서의 콘크리트 백화부에 대한 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 백화현상은 콘크리트의 노화에 의해 발생하는 것으로 누수부의 결과와 유사하나 주변의 온도가 누수부보다 완만하게 변하는 특징을 보여준다. 아래부분에는 누수가 진행되고 있는 균열이 관찰되었다.

Fig. 10은 조사시점 35 m, 좌측 측벽부에서의 누수

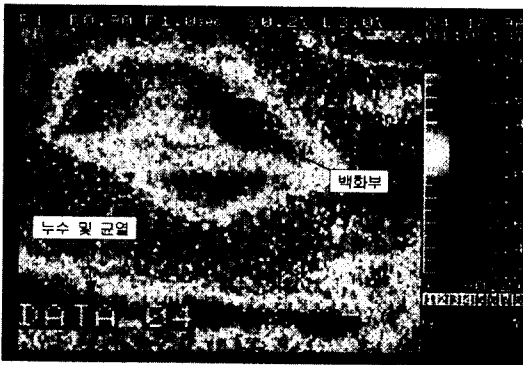


Fig. 9. 측점 40에서의 적외선 열화상 측정결과.

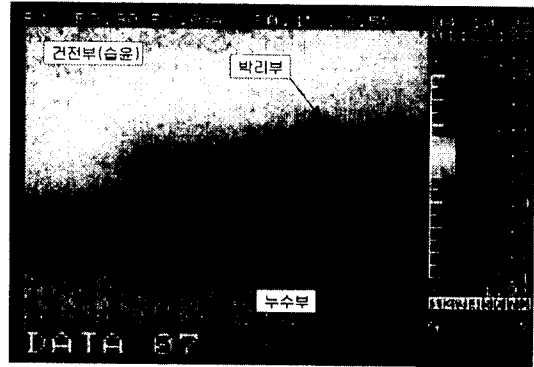


Fig. 12. 측점 70에서의 적외선 열화상 측정결과.

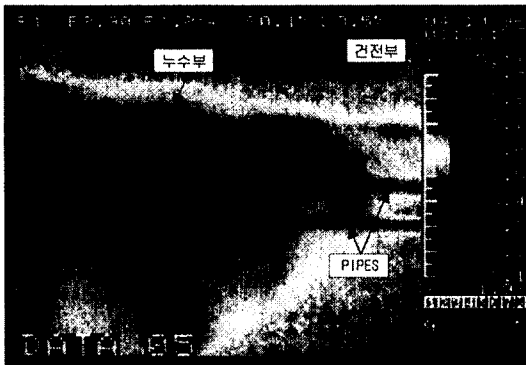


Fig. 10. 측점 50에서의 적외선 열화상 측정결과.

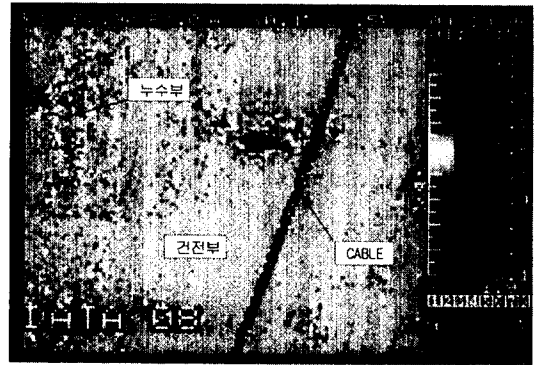


Fig. 13. 측점 80에서의 적외선 열화상 측정결과.

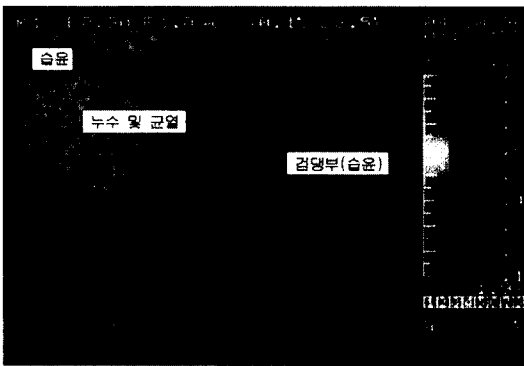


Fig. 11. 측점 60에서의 적외선 열화상 측정결과.

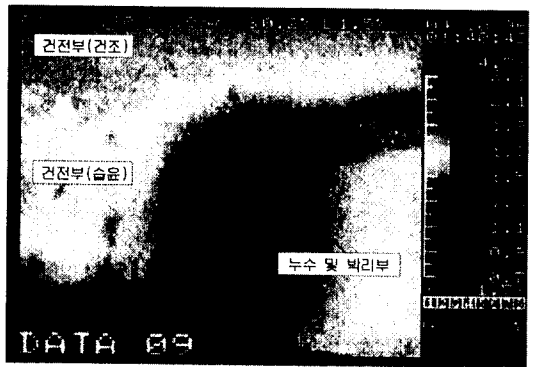


그림 14. 측점 90에서의 적외선 열화상 측정결과.

부에 대한 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 중앙의 두 개의 직선은 터널내 시설물인 배관 파이프이다.

Fig. 11는 조사시점 37.5 m, 우측 측벽부 상단에서의 측정결과로 검댕부에 대한 대표적인 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 검댕현상은 연료의 연소과정에서 생성된 탄소질 물질이 터널벽면에 오랫동안 누적되어 부착된 것으로서 환경상 청소하는 것이 좋다. 전체적인

상태는 습윤상태로 누수가 진행되고 있는 균열이 관찰되었다.

Fig. 12은 조사시점 45 m, 우측 측벽부 하단에서의 콘크리트 박리부에 대한 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 박리는 콘크리트 노화로 인해 부착력이 저하되어 발생한 것으로서 콘크리트의 강도저하가 우려되므로 주의깊은 조사를 필요로 한다. 또한 이 부분에 누

수가 진행되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 조사시점 69 m, 천정부에서의 누수부에 대한 적외선 열화상 결과로 우측부는 누수가 점차 미약하게 진행되고 있음을 알 수 있다. 중앙의 직선은 전선 케이블이다.

Fig. 14는 조사시점 70 m, 우측 하단부에서의 누수 및 박리부에 대한 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 그 주위는 습윤상태로 누수에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 15은 조사시점 82.5 m, 천정부하단에서의 누수부에 대한 적외선 열화상 결과를 보여주고 있다. 누수 현상은 터널상부의 지표수가 암반의 절리면이나 파쇄부를 타고 라이닝 배면을 흐르다가 줄눈부나 콘크리트 다짐불량을 통하여 흘러나온 것으로 판단된다.

이상의 10개의 조사지점에 대한 분석결과는 Table 3에 정리되어 있다.

본 터널에서의 적외선 열화상 조사결과, 터널 라이닝의 여러지점에서 누수 및 박리, 균열 등이 탐지되었다. 콘크리트 라이닝에 존재하는 박리, 백화, 균열 등과 같

은 결함부는 건전한 부분과 표면 온도차로 인해 비교적 잘 나타났으며, 대부분의 경우 누수현상을 동반하여 더욱더 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

따라서, 육안관찰이나 사진촬영이 어려운 경우, 콘크리트 라이닝의 표면결함에 대한 조사·진단에 적외선 열화상기법을 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

노후화된 터널에서 콘크리트 라이닝에 대한 적외선 열화상 비파괴시험을 실시하여, 그 적용성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 터널에 대한 비파괴시험법의 적용성을 검토한 결과, 전자파법과 적외선법에 의한 비파괴시험 방법이 적용성이 매우 높은 것으로 조사되었으며, 조사목적에 따라 적절한 비파괴 시험법이 선정되어야 한다.

2) 콘크리트 터널 라이닝 표면의 결함부는 건전부와 온도차를 나타냄으로써 적외선 열화상기법을 이용하여 신속하고 효율적으로 누수, 균열, 백화 그리고 박리와 같은 라이닝 표면의 결함을 조사할 수 있었으며, 특히 누수부는 정확하게 탐지되었다.

3) 철도터널과 같은 구조물은 조사시간이 제약되어 있기 때문에 신속하고 정확하게 터널 라이닝의 상태를 조사할 수 있으며, 특히, 육안관찰과 사진촬영이 제한된 경우에는 적외선 열화상기법은 효율적인 조사·진단기법이라 사료된다.

4) 적외선 열화상 측정시 콘크리트 라이닝의 열화상태에 유의해야 하며, 측정결과 분석시 가능한한 육안관찰과 사진촬영과 같은 자료를 참고하여 콘크리트 터널 라이닝의 결함여부를 판단해야 한다.

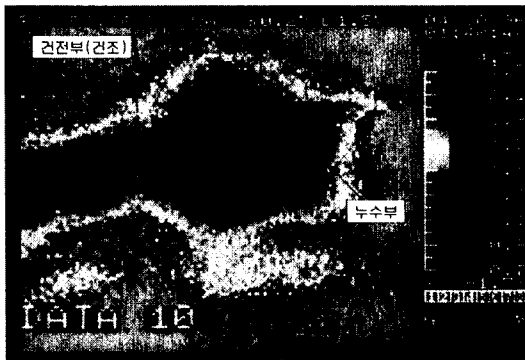


그림 15. 축점 100에서의 적외선 열화상 측정결과.

Table 3. 터널 조사지점 및 조사결과

조사 No.	조사위치(m)	조사지점	분석 결과
1	1	우측 측벽부(상단)	누수부
2	1.5	천정부	누수부, 균열, 습윤상태
3	17.5	우측 측벽부(상단)	누수가 발생하는 균열
4	27.5~30	우측 측벽부(상단)	백화부, 누수 및 균열
5	35	좌측 측벽부	누수부, Pipes
6	37.5	우측 측벽부(상단)	누수 및 균열, 습윤상태, 검댕부
7	45	우측 측벽부(하단)	습윤상태, 박리부, 누수부
8	49	천정부	누수부, Cable
9	70	우측 하단부	누수 및 박리부, 건전부(습윤, 건조)
10	82.5	천정부	누수부, 건전부(건조)



## 참 고 문 헌

1. A. Haack, J. Schreyer and G. Jackel, State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 413-431, 1995.
2. JTA 保守管理委員會, トンネルの新しい検査手法(1), トンネルと地下(日本トンネル技術協會誌), Vol. 27, no. 8, pp. 57-65, 1996
3. 大島洋志, 吉岡 修, コンクリト構造物 への 非破壊検査の適用例, 콘크리트 工學, Vol. 27, No. 3, pp. 89-92, 1989.
4. Mikael A. Bramson, Infrared Radiation-A Handbook for application, pp. 21-22, 1987
5. (주)대우건설기술연구소, 적외선 열화상장치를 이용한 건물에너지 진단시스템에 관한 연구, 1994.
6. (주)대우건설 기술연구소, 지평·판대터널 적외선 열화상 조사보고서, 1996.