

# 무선인터넷을 이용한 웹 기반 원격지 철도터널의 계측관리

Web-based Monitoring System for a Railroad Tunnel by Wireless Internet

노 병 철\*                      김 종 우\*\*                      김 정 훈\*\*\*  
Lho, Byeong-Cheol      Kim, Jong-Woo      Kim, Jeong-Hoon

## Abstract

Mobile communication with wireless modem can be powerful tool in web-based structural health monitoring system in which power and communication method are crucial points. In this study, the major reasons of side cracks in tunnel lining are studied by FEM analysis. In addition, a web-based monitoring system using mobile communication with wireless modem is applied to the tunnel structure to monitor the long term behavior of the side cracks. The field application shows that CDMA is useful method for structural health monitoring system which installed long distance away.

## 요 지

원격지에 위치하여 접근이 곤란한 지역에 위치한 토목구조물의 구조건전성을 모니터링하기 위해서는 무엇보다도 전원과 통신방법의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 장기간 사용하지 않은 원격지 터널의 균열 원인 분석을 위하여 FEM해석을 수행하였고, 다양한 하중과 온도변화에 따른 구조물의 균열 진전여부를 장기간 모니터링 할 필요가 있다고 판단하였다. 따라서 최근 휴대전화에서 널리 사용되고 있는 무선 CDMA통신 기법을 이용하여 균열의 원격모니터링을 수행하였고 그 결과, 이 시스템이 접근 곤란한 구조물의 장기모니터링에 매우 유용함을 확인하였다.

**Keywords :** Wireless Modem, Structural Health Monitoring, CDMA, Web-Based Monitoring System

**핵심 용어 :** 구조건전성 모니터링 시스템, CDMA통신기법, 원격모니터링

\* 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 부교수

\*\* 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 박사과정 (주)에이티맥스 대표이사

\*\*\* 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 겸임교수, (주)에이티맥스 부사장

E-mail : bclho@sangji.ac.kr 033-730-0474

•본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

토목구조물은 그 특성상 시공되어지는 현장이 도시와 떨어진 곳이 많기 때문에 관리자가 수시로 점검하기 곤란한 경우가 있다. 이러한 경우 구조물의 중요도에 따라 차이가 있지만 정기점검이나 일상점검을 통해 정해진 시간에 상태를 육안점검을 실시하게 된다. 그러나 장기적으로 폐쇄한 구조물을 재사용하거나 육안점검으로 심각한 손상이 발견되어 이의 발전 여부를 지속적으로 관찰해야 하는 경우에는 효율적인 실시간 계측관리기법을 도입하는 것이 시간과 경비절약 측면에서 대단히 유리하다. 본 연구에서는 1930년대 준공된 OO철도연결 구간의 철도터널을 정밀안전진단 한 결과, 발견된 라이닝의 균열원인을 FEM해석을 통해 추정하였고, 구조물의 재사용 시 장기적으로 관찰할 필요가 있는 라이닝의 균열을 웹 기반의 원격계측시스템을 이용하여 모니터링이 가능함을 확인하였다.<sup>(7)</sup>

## 2. 대상구조물 개요

본 연구의 대상구조물은 Photo 1 및 Table 1에 나



Photo. 1 대상구조물 전경

Table 1 대상구조물 개요

위 치	강원도 OO군 OO기점 0 km
준공년도	1930년대
연 장	110.0 m
폭 원	3.8 m
높 이	5.9 m
평면선형(R)	400.0 m

타낸 바와 같이 1930년대 준공된 터널로서, 강원도 OO군 OO기점 0km에 위치하고 있다.

## 3. 구조해석에 의한 손상원인 추정

### 3.1 외관조사 결과

외관조사 결과, 입구로부터 55m~59m를 떨어진 양쪽 측벽부 모두에서 폭 5~20mm의 종방향 균열이 20m가량 발생하였고, 북쪽 입 출구 방향으로 진행하면서 좌측 벽에는 균열상부 단면이 0.7mm가량 돌출된 단차가 조사되었다. 균열의 형태 및 발생위치가 방호벽에 의한 국부적인 침하 또는 편토압에 의한 구조균열로 의심되어 구조해석을 통한 역해석이 요구되었다.<sup>(1)</sup>

### 3.2 유한요소구조해석

균열의 발생 원인을 추정하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 3차원 Shell 요소 모델로 대상터널을 아래의 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

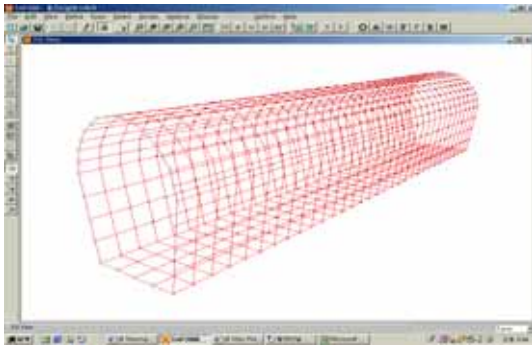
### 3.3 원인추정결과

#### 3.3.1 암반하중에 의한 최대응력

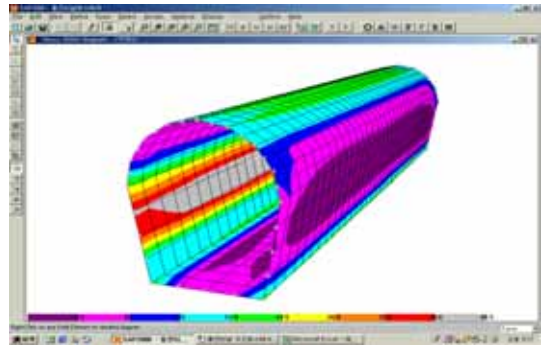
암반하중만 작용하는 경우는 각 암반상태에 따라서 Table 2와 같이 4.2~196kgf/cm<sup>2</sup>의 범위의 최대 응력 값이 분포되는 것으로 해석되었다. 대상터널의 암반상태는 해석결과를 토대로 판단해 볼 때, 보통정도의 블록상, 균열상을 갖는 RQD 75~85범위의 암반상태로 추정되며, 해석결과 암반하중에 대해서는 콘크리트의 인장강도인 29kg/cm<sup>2</sup>에 크게 못 미치는 4.2kg/cm<sup>2</sup>정도로 나타나 균열저항에 문제가 없을 것으로 판단된다.<sup>(2)</sup> 또한 암반하중에 따른 최대응력 분포는 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

Table 2 암반하중에 의한 최대응력

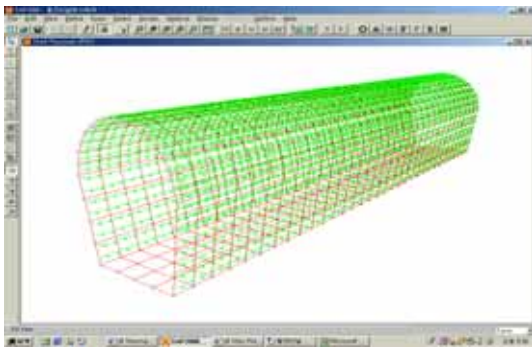
암반하중(tonf/m)	최대응력(kgf/cm <sup>2</sup> )
1.9	4.2
7.6	24.5
68.4	196.0



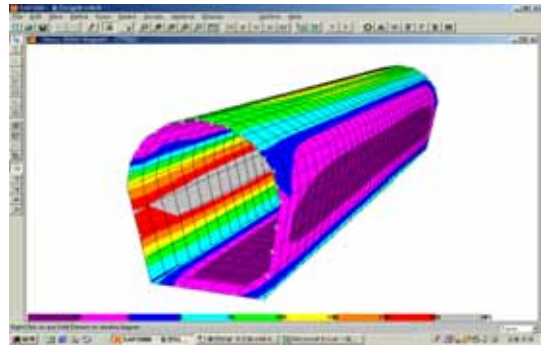
(a) 셸 요소 모델링



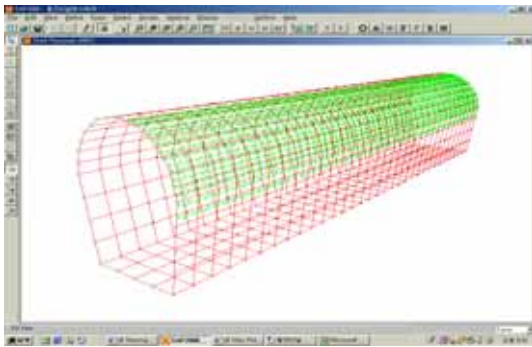
(a) 1.9 tonf/m 작용 시



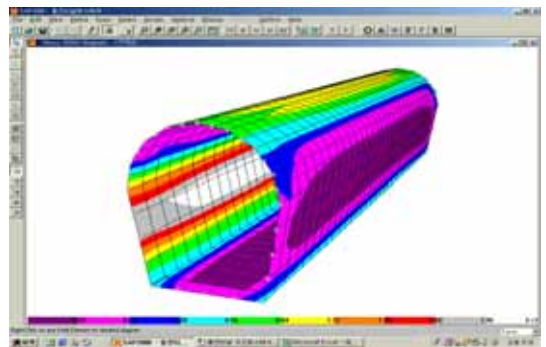
(b) 암반하중 재하



(b) 7.6 tonf/m 작용 시



(c) 편토압 재하



(c) 68.4 tonf/m 작용 시

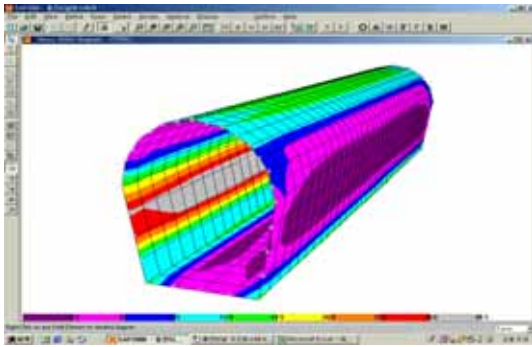
Fig. 1 대상터널 모델링 및 하중조건

Fig. 2 암반하중에 의한 최대응력의 분포

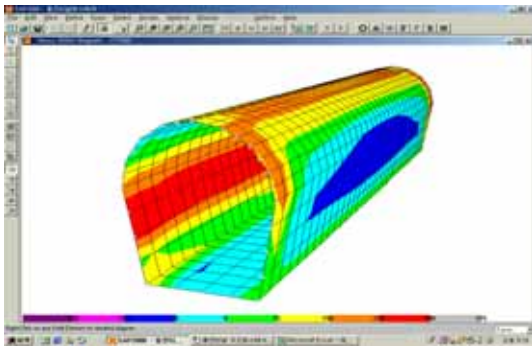
3.3.2 암반하중에 편토압이 작용할 경우 최대응력 암반하중이 가해지는 상태에서 갱문부 콘크리트 라이닝의 부족, 성토재료의 불량 등에 의해서 편토압이 발생했을 경우를 시뮬레이션하기 위해 암반하중의 1/2 크기의 분포하중을 터널해석모델의 상부에서 편재하

해보았다. 해석결과 최대응력분포는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

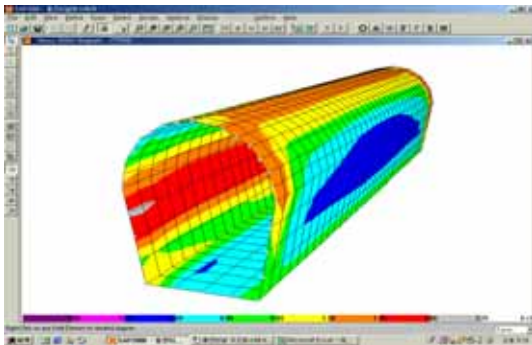
편토압의 작용을 고려한 해석결과, Table 3과 같으며 편토압이 3.8 tonf/m 이상 가해지는 경우에는 Fig. 4와 같이 편토압이 가해진 측벽의 중앙부에 콘크리트의



(a) 편토압 0.95 tonf/m



(b) 편토압 3.8 tonf/m



(c) 편토압 34.2 tonf/m

Fig. 3 편토압에 의한 최대응력의 분포

Table 3 편토압에 의한 최대응력

암반하중 (tonf/m)	편토압 (tonf/m)	최대응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1.9	1.0	4.6
7.6	3.8	37.5
68.4	34.2	325.0

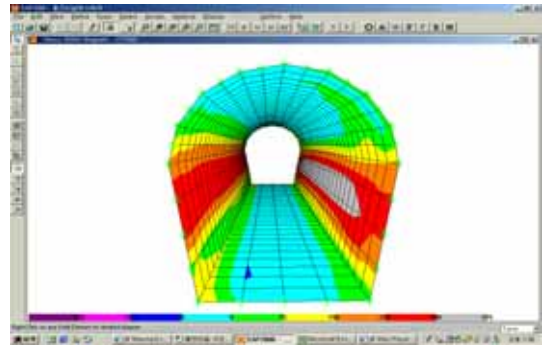


Fig. 4 편토압에 의한 응력분포도

인장강도를 30%정도 초과하여 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 반대편 측벽은 이보다 조금 더 상부에서 콘크리트의 인장강도를 초과하는 응력이 발생함을 알 수 있었다.



일반적으로 터널 측벽의 균열은 터널이 사면의 밑에 위치하거나 경사진 편리나 층리의 직교방향에 느슨함이 생겨 발생한 편토압에 의한 것이 대다수이나 일반적으로 콘크리트 구조물의 균열은 건조수축, 소성수축, 급속 타설에 의한 침하 등의 재료적인 원인뿐만 아니라 느슨한 토압에 의한 돌발성 붕괴, 편토압 및 사면이동 등 구조적인 원인이 복합적으로 발생하는 경우도 적지 않다.<sup>(3)</sup> 본 해석에서는 원인으로 추정되는 암반하중, 편토압, 시설물에 의한 사하중에 의한 작용 응력을 모두 검토한 결과, 대상터널은 상부 지질이 경사진 편리나 층리로 이루어져 있으며, 상당부분 풍화가 진행되고 있고, 이의 직각방향의 풍화암 및 토사가 느슨해져 편토압에 의한 균열이 발생한 것으로 추정되며, 여기에 지형적으로 토사의 피복이 상대적으로 작은 사면의 직하에서 지표수와 강우의 침투에 의한 수압의 증가가 더해질 경우 터널의 중앙부에서 균열발생 확률은 더 커질 것으로 추정된다.

#### 4. 균열모니터링 시스템의 구성

##### 4.1 적용센서 및 무선모뎀

본 계획에서의 주된 관심은 균열의 진전유무였으므로 아래의 Table 4와 같은 특성을 가진 스트레인게이

Table 4 적용센서의 특성

구 분	사 양		그 림
균열계이지	용 량 (mm)	± 5	
	정 격 출 력	1.5mV/V (4000×10 <sup>-6</sup> )	
	감도(×10 <sup>-6</sup> /mm)	800	
	비 직 선 성	1% RO	
	허용온도범위	-20 ~ 60℃	
정적데이터로거	데이터 저장	512 byte	
	저 장 용 량	128kbyte (60,000데이터)	
	사 용 온 도 범 위	-20℃ ~ 50℃	
	측 정 속 도	최대 100 Hz	

지 방식의 장기계측용 균열계를 설치하였고 외기온도 변화에 의한 균열거동을 관찰하기 위해서 열전대를 별도로 설치하여 터널내부의 온도이력을 계측하였다.<sup>(4)</sup>

이때 무선인터넷을 활용하여 원격제어를 하기 위해서는 Cellular Phone을 통한 무선모뎀을 데이터로거에 부착하여 1시간 단위로 계측된 데이터를 관리자에게 전송하도록 하였고 이를 가공하여 시간이력 그래프를 얻을 수 있게 웹 기반의 계측관리프로그램을 구성하였다.

#### 4.2 무선인터넷에 의한 웹 기반 계측시스템

아래의 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 무선인터넷을 이용한 원격계측시스템은 초절전회로를 갖춘 센서시스템이 개발되거나 태양열 등에 의한 자연전원만 공급가능하다면 어떠한 환경에서도 계측이 가능한 시스템으로 향후 계측시스템의 발전방향으로 주목받고 있다.

계측관리 프로그램은 다수의 PC에서 여러 사용자가 동시 접속하여 계측 업무를 수행할 수 있고, 별도의 프로그램 설치 없이 인터넷이 연결된 곳이라면 어디서나 손쉽게 운영할 수 있도록 웹페이지로 적용하였으며, 향후 다른 사양의 센서를 관리할 경우에도 손쉽게 수정이 가능한 호환성 있는 프로그램을 활용하였다. 계측시스템을 구성하는 소프트웨어로는 응용 수준에서 Delphi 기반의 C/S 응용 프로그램, 웹 서비스를 위한 Java/JSP 기반의 웹 프로그램으로 구성하였다. 데이터베이스 서비스를 위해서는 SQL Server DBMS가 사용가능하다.<sup>(5),(6)</sup>

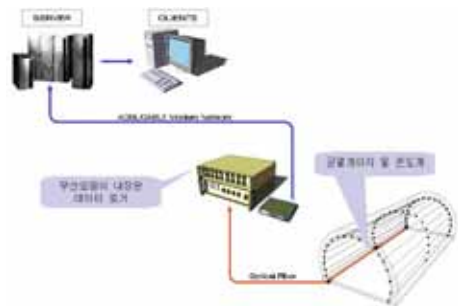


Fig. 5 무선인터넷을 이용한 웹 기반의 원격계측시스템 구성도



Fig. 6 웹 기반의 원격계측관리 웹사이트 화면-계측관리

### 5. 모니터링 결과

이상의 시스템을 이용하여 1시간 단위로 균열폭의 변화와 온도를 계측한 결과 Fig. 7~8에서와 같은 온도 및 균열의 분포이력을 얻었다. 이 결과에 의하면 터널라이닝에 발생한 구조균열은 외기온도의 변화에 의해서만 그 폭의 변화를 보일 뿐 별다른 구조적인 원인으로 추정되는 변화는 발견할 수 없었다.

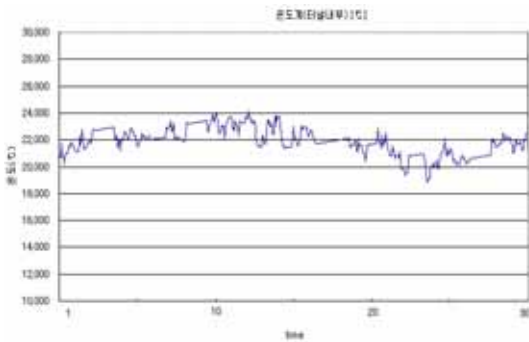


Fig. 7 시간에 따른 터널 내 온도분포

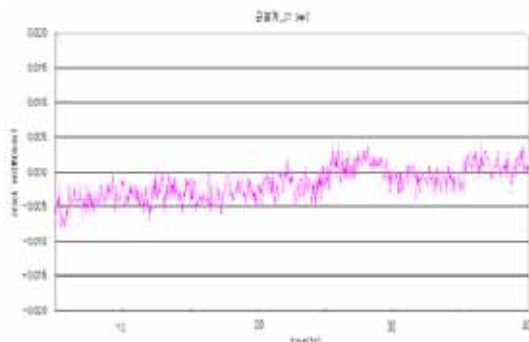


Fig. 8 균열의 시간에 따른 변화이력

즉, 온도변화폭은 대략 4°C내외로 외력이 존재하지 않을 경우 콘크리트의 열팽창률에 해당하는 0.04mm 이내의 균열변화폭을 보이므로 외력에 의한 균열진전은 나타나지 않은 것으로 분석된다.

## 6. 결론

본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) 외관조사 및 지질조사 결과, 대상터널은 상부 지질이 경사진 편리나 층리로 이루어져 있으며 상당부분 풍화가 진행되고 있었고 이의 직각방향의 풍화압 및 토사가 느슨해져 편토압이 발생한 것으로 추정된다.
- 2) 유한요소해석에 의해 암반하중, 편토압, 시설물에 의한 사하중에 의한 작용 응력을 모두 검토한 결과, 지형적으로 토사의 피복이 상대적으로 작은 사면의 직하에서 지표수와 강우의 침투에 의한 수압

의 증가가 더해져 여기에 위치한 터널의 중앙부에서 균열이 발생한 것으로 판단된다.

- 3) 인력의 접근이 곤란한 지형적인 특성을 고려 할 때 원격계측시스템이 필요하였으며 무선인터넷을 이용하여 원격지에서 균열 및 터널내부의 온도분포를 실시간 모니터링 할 수 있는 웹 기반의 계측 시스템을 구성할 수 있었다.
- 4) 계측대상 균열은 온도의 변화에 의해서만 그 폭의 변화를 보일 뿐 별다른 구조적인 원인으로 추정되는 변화는 발견할 수 없었으나, 향후 철도운행이 제기될 경우 진동에 의한 영향과 지하수위에 따른 영향에 따른 터널의 거동 분석을 위한 장기계측에 지속적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2003년도 상지대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 서강천 (2002) “터널 콘크리트 라이닝의 균열현황 및 분석”, 한국구조물진단학회 논문집, 한국구조물진단학회, 제6권, 제3호, pp. 24~25
2. 우중태 (2003) “터널의 계측결과 종합분석에 의한 지반의 거동 및 터널 구조체의 역학적 특성연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 한국구조물진단학회, 제7권, 제3호, pp. 121~122.
3. 변근주 (1992) “콘크리트의 품질관리”, 대한건설협회.
4. 일본 콘크리트협회 (1980) “콘크리트 균열조사, 보수 보강지침.” 건설도서.
5. 실무에 강해지는 JSP 프로그래밍, 도서출판 헤지원, p.114~303.
6. 「클릭하세요! SQL Server 2000」, 도서출판 대림, p.352~379.
7. A. Staerk R.B. Rokahr R. Zachow (2001) “A new method for a daily monitoring of the stress intensity of a sprayed concrete lining”, '98 Milan-Italy.

(접수일자 : 2006년 2월 10일)