

# 철도터널 라이닝에 대한 손상도 파악기법의 현장적용

## An application of damage detection technique to the railway tunnel lining

방춘석\* 이준석\* 최일윤\* 이희업\* 김연태\*\*

Bang, Choon-seok Lee, Jun S. Choi, Il-Yoon Lee, Hee-Up Kim, Yun Tae

### ABSTRACT

In this study, two damage detection techniques are applied to the railway tunnel liner based on the static deformation data. Models based on uniform reduction of stiffness and smeared crack concept are both employed, and the efficiency and relative advantage are compared with each other. Numerical analyses are performed on the idealized tunnel structure and the effect of white noise, common in most measurement data, is also investigated to better understand the suitability of the proposed models. As a result, model 1 based on uniform stiffness reduction method is shown to be relatively insensitive to the noise, while model 2 with the smeared crack concept is proven to be easily applied to the field situation since the effect of stiffness reduction is rather small. Finally, real deformation data of a rail tunnel in which health monitoring system is in operation are introduced to find the possible damage and it is shown that the prediction shows quite satisfactory result.

### 1. 서론

최근 장대교량 및 특수교량뿐 아니라 연장이 10Km를 넘는 장대터널의 건설에 모니터링 시스템 및 자료관리 시스템이 도입되고 있으며, 유지관리의 중요성이 대두됨에 따라 설계단계 및 구조물 완공 직후부터 상시계측시스템의 도입 등 안전대책을 수립하고 있는 추세에 있다. 유지관리 차원에서 장대터널에 대한 상시계측시스템(이준석 외, 2001)은 터널의 내공변위 뿐만 아니라 슛크리트 응력, 지하수 변동 및 터널내 노반의 변동상황 등을 실시간 혹은 일정간격으로 확인할 수 있으나, 터널의 내공변위에 대한 자료는 일상적인 변화추세를 감안하여 관리기준을 초과하는 지의 여부가 주요 관건이 되어 왔으며 내공변위에 대한 기초자료를 가공하여 터널 라이닝의 손상해석과 같은 응용분야에 적용되지 못하는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 터널 라이닝에 부착된 내공변위계를 고려하여 장기간에 걸친 내공변위 추이를 이용한 터널내 라이닝 손상도 평가기법에 대하여 논의하였다.

토목구조물에 대한 손상도 검출 및 평가기법은 최근 들어 크게 각광을 받고 있는 분야로서 주로 교량 및 철골구조 등에 적용된 바 있다. 손상도 검출기법은 사용하는 데이터의 형식에 따라 정적 및 동적 검출기법으로 나눌 수 있으며, 동적 검출기법의 경우에는 다시 주파수영역 (이준석 외, 2002) 과 시간영역 기법 (최일윤 외, 2001) 으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 터널 내공변위계의 특성상 정적 데이터를 이용한 손상도 검출기법에 한정하여 이론을 전개하였으며 NATM 등의 발파공법 터널의 특성을 최대한 활용하여 라이닝의 변형은 자중에 국한하는 것으로 가정하

\* 한국철도기술연구원, 정회원

\*\* 서울산업대학교 교수, 정회원

였다. 따라서 지하수압 및 외부 편토압 등에 의한 추가변형은 없으며 프리캐스트 조립식 라이닝 (PCL)의 경우와 유사하게 라이닝구조물과 숏크리트 혹은 원지반은 방수막 등으로 인해 완전히 분리되어 있다고 가정하였다.

본 논문에서는 고속철도 터널 라이닝의 내공변위 현장 계측데이터를 적용하여 손상의 정도와 위치를 파악하였으며, 손상도 평가를 역해석으로 추정하기 위한 해석기법을 개발하였다. 수치해석 결과 실제 현장 계측에 포함될 수 있는 노이즈의 영향 및 터널 라이닝 구조물에 발생된 가상의 손상 위치를 파악할 수 있었으며, 실제 고속철도용 터널구조물에 적용한 결과를 예시하였다. 분석 결과, 신규구조물의 특성상 실제 계측 데이터에 의한 손상은 경미한 것으로 파악되었다.

## 2. 손상도 평가를 위한 해석모델

### 2.1 강성도 저감모형

자중 등에 의한 정적 내공변위를 이용하여 터널 라이닝의 손상정도를 파악하기 위하여 그림 1과 같은 이상적인 라이닝 구조물을 가정하면 평형방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

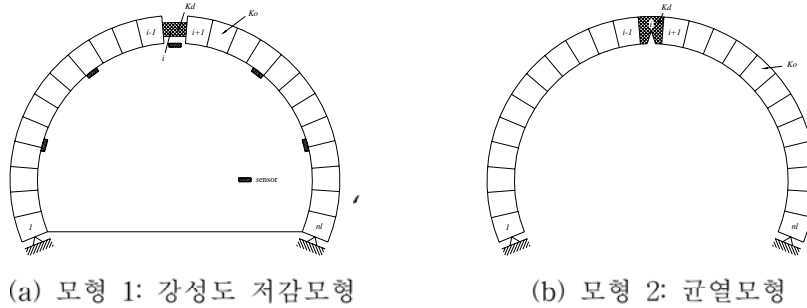


그림 1. 터널 라이닝의 손상모형

$$K u = F \quad (1)$$

여기서,  $K$ ,  $u$  및  $F$  는 각각 강성행렬, 변위벡터 및 하중벡터를 의미하며 라이닝 손상전후에 대한 질량의 변화는 없다고 가정하면 강성행렬 및 변위의 관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K_d = K_0 - \Delta K = (1 - \alpha) K_0 = \beta K_0 ; u_d = u_0 + \Delta u \quad (2)$$

여기서,  $K_0$ 는 초기상태의 강성행렬,  $K_d$ 는 손상 후 강성행렬,  $u_0$ 는 초기상태의 내공변위 벡터,  $u_d$ 는 손상 후 내공변위 벡터,  $\alpha$ 는 손상계수 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) 및  $\beta$ 는 유효강성비를 나타내며 손상 후의 평형방정식은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$K_d u_d = F \quad (3)$$

따라서 초기강성행렬을 기준치로 가정하고 식 (2)와 (3)을 조합하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(1 - \alpha) K_0 (u_0 + \Delta u) = F ; u_0 = K_0^{-1} F \quad (4)$$

일반적으로 전체 강성행렬은 요소 강성행렬의 조합으로 표현되므로 식 (4)를 부재별 손상계수의 향으로 분리하면 식 (5)와 같다.

$$F = \sum_{i=1}^{nl} (1 - \alpha_i) k^i u_d \quad (5)$$

여기서,  $nl$  및  $k^i$  는 각각 전체 요소 수 및  $i$ -번째 요소의 강성행렬을 의미한다. 식 (5)를 식 (2)를 이용하여 다시 쓰면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R \beta = F \quad (6)$$

$$R = [k^1 u_d, k^2 u_d, \dots, k^{nl} u_d] ; \beta = [(1 - \alpha_1), (1 - \alpha_2), \dots, (1 - \alpha_{nl})]^T$$

결국, 식 (6)에서 기지의 값으로 가정할 수 있는 자중  $F$ 와 손상이 없다고 가정한 요소의 강성행렬  $k$  및 계측에 의한  $u$ 를 구할 수 있으면 라이닝 부재의 손상 위치와 크기를 규명할 수 있다.

## 2.2 균열모형

균열모형은 라이닝 손상의 주원인 중 하나인 중방향 균열을 고려하였다. 즉, 손상이 발생한 라이닝 부재의 중방향 균열을 요소내로 균질화시키는 분산형 균열모델 (homogenized crack model)을 도입하고 균열의 위치 및 크기를 산정함으로써 라이닝의 손상도를 평가할 수 있다. 그림 1(b)와 같은 경우 3차원 보요소에 대한 분산형 균열모형의 응력-변형률 관계식을 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\sigma} = D \dot{\epsilon} \quad (7)$$

여기서 rate 형태로 표기된  $\dot{\sigma}$ ,  $\dot{\epsilon}$ 는 각각 3차원 영역에서의 응력 및 변형률을 의미하고  $D$ 는 구성 행렬을 나타낸다. 마찬가지로 방법으로 균열을 포함한 고체요소의 응력-변형률 관계식  $D_{eq}$ 는

$$D_i^{eq} = D_i S_{li} = D_i + \delta D_i \quad (8)$$

로 나타낼 수 있으며 여기서  $S_{li}$ 는 구조 관계식을 의미한다. 한편 식 (8)은 전체 응력-변형률 관계식으로 표기할 수 있으며 다음과 같다.

$$D^{eq} = \sum_{i=1}^{nl} D_i + \sum_{i=1}^{nl} D_i S_{2i} ; S_{2i} = S_{li} - I \quad (9)$$

여기서,  $I$ 는 크기가  $6 \times 6$ 인 단위 행렬을 의미한다. 식 (9)의  $S_{li}$ 는 Lee et al. (2002)의 전개식을 참조할 수 있으며 이 구조관계식은 유효요소의 체적에 대한 균열의 면적비,  $\mu$ , 및 Lee, et al. (1999)에서 제안된 균열면 강성도,  $K_{11}$ ,  $K_{22}$  &  $K_{33}$ 의 함수로 표현된다. 한편 콘크리트로 이루어진 라이닝 구조물은 탄성 영역내에서 거동하고 모든 비탄성 거동은 균열면에 집중된다고 가정한 후 보요소와 같이 포아송비가 0인 경우를 고려하면 식 (9)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_{2i} = -\mu_i \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_{22}}{K_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D_{44}}{K_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D_{55}}{K_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = -\mu_i S_{3i} \quad (10)$$

한편 균열면의 전단 강성,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$ 이 일반적인 암반절리 등에 적용되는 가정과 같이  $K_{22}=K_{33}$ 로 가정하면 식 (10)의  $S_{3i}$ 는 3차원 보요소에 대하여 다음과 같이 간략히 쓸 수 있다.

$$S_{4i} = \begin{bmatrix} C_c C_c C_c C_d C_c C_c & [0] \\ [0] & C_c C_c C_c C_d C_c C_c \end{bmatrix} \quad (11) \quad \begin{aligned} C_c &= \frac{E^u}{\mu E^u + K_N} \\ C_d &= \frac{G^u}{\mu G^u + K_S} \end{aligned} \quad (12)$$

만일  $\mu E^u \ll K_N$ ,  $\mu G^u \ll K_S$ 의 관계가 성립한다면 다음과 같이 표현된다.

$$C_c = \frac{E^u}{K_N}, \quad C_d = \frac{G^u}{K_S} \quad (13)$$

한편,  $K_N$  및  $K_S$ 는 각각 균열면의 수직 및 전단 강성도를 의미하며,  $E_u$  및  $G_u$ 는 손상이 없는 상

태의 라이닝 탄성계수 및 전단탄성계수를 의미한다. 결론적으로 라이닝의 균열을 고려한 3차원 보 요소의 강성도 행렬  $k_d^i$  는 식 (2)와 유사한 방법으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_d^i = k^i + \delta k^i = k^i - \mu_i k^i S_{4i} \quad \text{or} \quad \delta K = - \sum_{i=1}^n \mu_i k^i S_{4i} \quad (14)$$

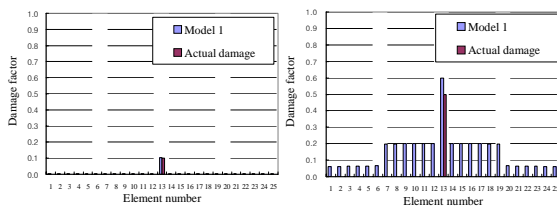
균열면의 강성도는 구조물의 재질에 따라 입력 데이터로 주어지는 변수이고 구하고자 하는 변수  $\mu_i$  는 손상 면적에 대한 요소의 체적비와 같다. 따라서 균열모형에 의한 변수  $\mu_i$  는 강성도 저감 모형에 의한 변수  $\alpha_i$  와 같은 의미로 해석할 수 있다.

한편, 그림 1(b)에서 알 수 있는 바와 같이 라이닝 구조물내 중방향 혹은 횡방향 균열의 경우 구조관계식  $S_{4i}$  가 다른 값을 갖게 되므로 식 (14)는 균열의 방향성을 파악할 수 있는 지표가 될 수 있다. 또한 실제 문제에 있어서 요소의 크기가 변화하면 균열의 체적비도 변화하게 되며 따라서 요소내 강성도를 일정수준으로 저감하는 방법에 비해 손상의 위치 파악이 비교적 용이해질 수 있다. 다음에서는 이와 관련한 수치해석 과정을 자세히 다루었다.

### 3. 수치모델의 해석비교

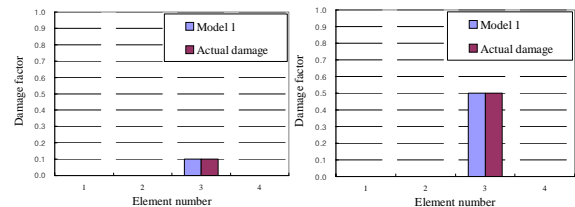
#### 3.1 모형 1 (강성도 저감모형)

우선 그림 1(a)의 무근콘크리트 라이닝을 일정 길이로 분할한 25개의 유한요소로 가정하고 모형 1을 적용하였다. 터널 라이닝의 내공은 반경이 약 6.6m로서 고속철도용 터널과 유사한 형태를 갖도록 하였으며 천단부에 해당하는 13번째 요소의 강성도를 주변에 비해 10% 저감시켜 손상도를 평가하였다. 그림 2(a)는 손상도 평가결과를 나타내고 있으며 해석결과와 실제 손상이 정확히 일치함을 알 수 있다. 천단부의 손상도를 50%로 증가시킨 결과는 그림 2(b)에 나타내었으며 손상발생 부위의 인접 구간에서도 손상을 예측하는 오류가 나타나고 있다. 이는 25개의 요소를 사용함에 따른 전체 자유도의 증가로 인해 일부 구간의 예측오류가 수치해석시 누적되기 때문인 것으로 파악된다. 실제 현장에서 그림 2와 같은 결과를 얻기 위하여는 약 24개 정도의 센서가 필요하게 되며 따라서 비현실적인 평가가 될 수 있다.



(a) 10% 손상 (b) 50% 손상

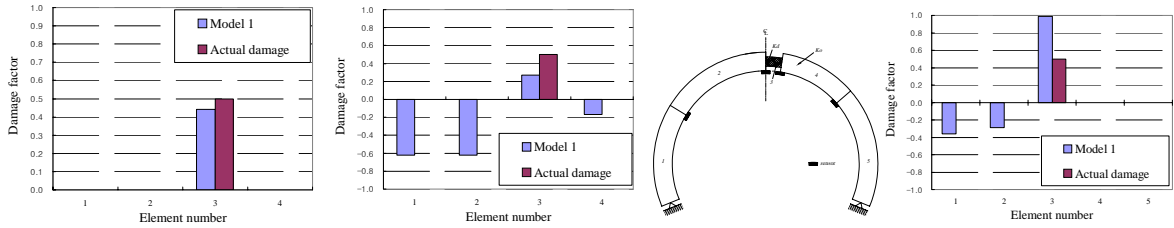
그림 2. 모형 1 (균일 25개 요소)



(a) 10% 손상 (b) 50% 손상

그림 3. 모형 1 (균일 4개 요소)

그림 3은 실제 계측현장의 센서 수를 고려하여 라이닝을 4개의 일정한 크기로 나누어 예측한 결과를 보여주고 있다. 앞서의 경우와는 다르게 손상의 정도에 관계없이 일관된 결과를 보여주고 있으며 특히 손상이 심한 경우에도 예측결과와 실제 손상이 일치함을 알 수 있다. 그러나 실제 계측데이터는 알 수 없는 원인에 의해 노이즈가 포함되는 경우가 있으며 특히 전철구간내 내공 계측센서 등과 같이 유도장애가 예상되는 구간에 있어서는 데이터 분석에 주의를 필요로 한다. 본 연구에서는 이와 같은 노이즈를 고려하기 위하여 평균값이 0이고 표준편차가 각각 0.01mm 및 0.05mm 인 노이즈를 계측 데이터에 포함시켰다. 그 결과 그림 4에 나타난 바와 같이 표준편차가 0.01mm인 노이즈의 경우에는 비교적 정확한 예측결과를 획득할 수 있으나 표준편차가 이보다 크게 되면 예측결과와 신뢰도가 저감하는 것을 알 수 있다.



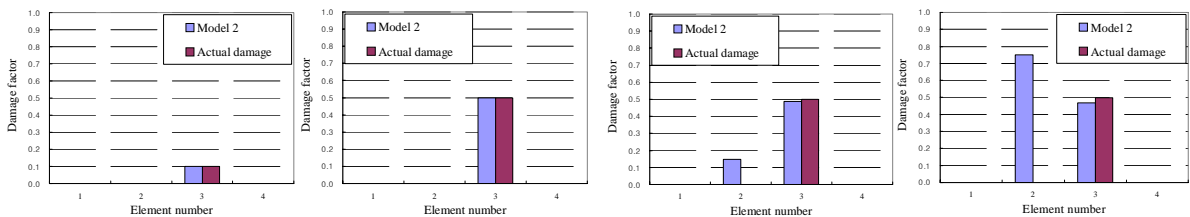
(a) 0.01mm 노이즈 포함 (b) 0.05mm 노이즈 포함 (a) 적용 모형 (b) 0.05mm 노이즈 포함  
 그림 4. 50% 손상시 (균일) 그림 5. 50% 손상시 (불균일)

한편 요소의 크기가 결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림 5(a)와 같이 손상을 일부 구간에 한정시킨 경우를 고려하였다. 즉 그림 5(a) 및 5(b)와 같이 불균일한 5개의 요소를 적용하고 0.05mm의 표준편차를 갖는 노이즈를 포함시킨 경우, 그림 4(b)에 비해 개선된 결과를 얻었다. 즉, 모형 1은 고려하는 라이닝 요소의 크기에 따라 손상 예측값이 달라질 수 있으며 이는 손상의 모형화 단계에서 일률적인 강성도 저감모형을 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. 실제 계측현장에서 그림 5(a)와 같은 센서배치를 고려하기는 매우 곤란하므로 모형 1은 내공변위계의 개수가 충분한 경우로 한정하는 방안이 바람직하다.

### 3.2 모형 2 (균열 모형)

터널 라이닝내 균열에 의한 손상을 파악하기 위하여 앞서 논의한 분산형 균열모형을 고려하였다. 이를 위하여 균일한 4개의 보요소를 가정하고 3번째 요소에 균열을 도입하였다. 수치해석을 위해 입력데이터로 주어지는 균열의 체적비는 요소의 체적에 대한 균열면의 면적으로 정의되며 (1/길이)의 단위를 갖는다. 본 연구에서는 면내 자중만을 고려하였으므로 균열면의 전단강성도는 고려하지 않았으며 균열면의 연직강성도  $K_N$  은 고강도 콘크리트의 대표적인 값인 1,300 GPa/m을 적용하거나(Gopalaratnam & Shah, 1985) 식 (12) 혹은 식 (13)을 이용하여 산정할 수도 있다. 그림 6에는 균열의 체적비 (damage factor)가 각각 0.1 및 0.5인 경우에 대한 예측값을 도시하였으며 이론적으로 정확한 손상평가가 가능함을 알 수 있다.

모형 1의 경우와 마찬가지로 노이즈를 포함한 손상 검출결과를 도시하면 그림 7과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모형 2에 대한 노이즈의 영향은 모형 1에 비해 상당히 현저함을 알 수 있고 특히 표준편차가 0.005mm인 경우에는 손상의 평가가 곤란함을 알 수 있다. 이는 모형 2의 경우 라이닝의 균열을 요소내로 분산시키는 과정에서 강성도의 저감량이 모형 1에 비해 상당히 작아지게 되므로 내공변위의 변화량도 상대적으로 줄어들고 따라서 노이즈의 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단되며 따라서 고성능 계측센서 및 AD (Analog/Digital) 변환장치가 요구된다.



(a) 균열 체적비(10%) (b) 균열 체적비(50%) (a) 0.001mm 노이즈 포함 (b) 0.005mm 노이즈 포함  
 그림 6. 모형 2 (균열 4개 요소) 그림 7. 모형 2 (균열 체적비 50%)

### 3.3 현장 적용

본 절에서는 고속철도 터널에서 획득한 상시계측데이터를 이용하여 실제 터널 라이닝의 손상을 예측하였다. 본 연구과정에서 건설 직후 초기 측정데이터를 확보하지 못하였으므로 수치해석에서 일단 라이닝의 사하중에 의한 초기변형을 계산하였고 이를 위하여 터널반경은 6.6m이고 라이닝의 두께는 0.3m인 보통콘크리트 재료의 물성값을 이용하였다. 라이닝의 주위를 따라 5개의 센서가 설

치되었으며, 2조의 변형데이터를 이용하였으며 12일의 간격을 두고 동일한 시간대의 자료를 기준으로 하였다. 그림 8은 건설 직후의 변형양상을 보여준다. 측정센서는 수직변형만 측정할 수 있기 때문에 수평변위 및 경사각은 가정하여야 하며 여기서는 라이닝의 자중으로 계산된 동일한 값을 사용하였다. 상시계측데이터를 이용하여 분석한 결과 손상은 없는 것으로 파악되었다. 이는 계측자료가 아닌 초기변형을 이용했으며, 수평변형과 경사각을 초기변형과 동일하다고 가정했기 때문으로 판단된다. 그러나 지금까지 유관검서 결과 터널의 현저한 손상이 없음을 감안하면 손상정도의 예측은 타당하며, 특히 터널의 크라운부에 손상이 발생할 수 있는 경향을 그림 9와 같이 발견할 수 있었고 참고로 크라운부는 요소 3번과 4번 사이에 위치한다.

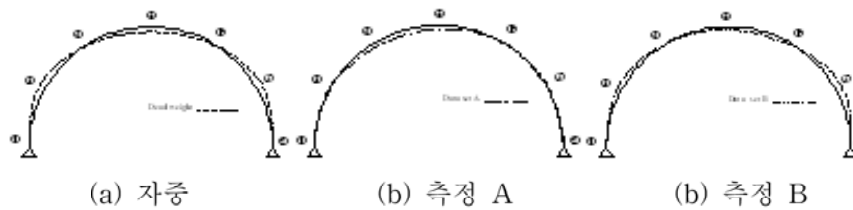


그림 8. 라이닝의 변형

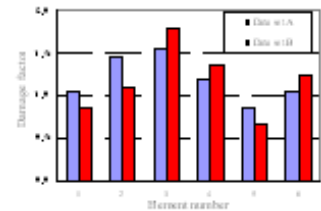


그림 9. 상시계측에 의한 손상분석

#### 4. 결 론

본 연구에서는 장대터널의 유지관리를 위한 내공변위계의 계측 데이터를 이용한 터널 라이닝의 손상도 평가기법에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 센서 설치부를 유한요소의 절점 (node)과 같이 가정하고 각 요소의 강성도를 일정하게 저감시키는 모형 1 및 분산형 균열모형을 이용한 모형 2 등 두 가지 기법에 대하여 기술하였다. 수치해석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 라이닝 요소내 강성도를 일정하게 저감시키는 모형 1의 경우, 외부 노이즈에 의한 영향은 모형 2에 비하여 상대적으로 작으나 계측변위 자체에 대한 민감도가 크므로 실제 현장 적용시에는 세심한 주의를 요하며 센서 수가 충분한 경우에 적합하다.
- 분산형 균열모형을 이용한 모형 2의 경우, 라이닝 요소내 강성도의 저감량이 상대적으로 작아 계측변위에 대한 민감도가 작다. 그러나 외부 노이즈에 대한 영향이 상대적으로 커질 수 있으므로 센서 및 송수신 장비, AD 변환기 등에 대한 성능향상이 요구된다.
- 실제 터널 내공변위 데이터를 이용한 손상도 파악결과, 특이 사항은 발견되지 않았으며 향후 지속적인 데이터 수집 및 해석을 통해 터널의 유지관리에 적극적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 이준석 외 (2001), "고속철도용 터널의 상시계측시스템 구축에 관하여", 한국터널공학회학회지, 제3권, 제2호, pp.63-67.
2. 이준석 외 (2002), "최적화기법을 응용한 주파수영역에서의 구조물 손상도 추정에 관한 연구 (I) - 손상의 모형화", 대한토목학회논문집, 제22권, 제1호, pp.1-10.
3. 최일윤 외 (2001), "시간영역에서의 교량 강성행렬 및 감쇠행렬의 추정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제21권, 제5호, pp.563-571.
4. Gopalaratnam, V. G. & Shah, S. P. (1985), "Softening response of plain concrete in direct tension", *ACI J.*, Vol. 82, No. 3, pp.310-323.
5. Lee, J. S., Choi, I-Y, Bang, C-S & Um, J-H (1999), "Three-dimensional homogenized crack model for tensile fracture of concrete, *KSCE J. Civil Eng.*, Vol. 3, No. 1, pp.37-46, in English.
6. Lee, J. S., Choi, I-Y & Cho, H-N (2004), "Modeling and detection of damage using smeared crack model" *Eng. & Str.*, Vol. 26, pp.267-278.