

정적 내공변위를 이용한 터널라이닝 손상 검출기법에 관한 연구

A Study on the System Identification of Tunnel Lining Using Static Deformation Data

이 준 석*1 Lee, Jun-Suk

최 일 윤*2 Choi, Il-Yoon

Abstract

A new system identification method based on tunnel deformation data is proposed to find the damage in the lining structure. For this, an inverse problem in which the deformation data and dead load of concrete lining are known *a priori* is introduced to estimate the degree and location of the damages. Models based on uniform reduction of stiffness and homogenized crack concept are individually employed to compare the applicability and relative advantages of the models. Numerical analyses are performed for the idealized tunnel structure and the effect of white noise, common in most measurement data, is also included 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 homogenized crack concept is proven to be easily applied to the field situation since the effect of stiffness reduction is rather small.

요 지

본 연구에서는 터널 내공변위 계측데이터를 이용한 라이닝 구조물의 손상도 평가기법에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 정적으로 획득되는 내공변위 데이터와 라이닝의 자중을 고려하여 라이닝내 발생가능한 손상의 위치 및 정도를 파악할 수 있는 일종의 역해석 기법을 도입하였다. 특히 라이닝 요소내 강성도를 일정수준 저감하는 모형 1과 분산형 균열모형을 응용한 모형 2 등 두 가지 방법을 고려하였고 각각의 장단점을 비교·분석하였다. 이상적인 터널라이닝 구조물을 가정하여 두 가지 모형에 대한 수치해석을 실시하였으며 계측데이터에 포함되는 노이즈의 영향을 함께 고려하였다. 이 결과, 모형 1의 경우, 노이즈의 영향은 상대적으로 미미하나 내공변위에 민감하게 작용하므로 현장적용시 주의가 요구되며 모형 2의 경우에는 노이즈에 민감하게 작용하는 반면 강성도의 저감량이 미소하여 실제 터널라이닝 구조물의 손상파악에 손쉽게 적용될 수 있음을 보였다.

Keywords : Homogenized crack model, System identification, Tunnel lining

1. 서 론

최근 들어 고속철도 및 고속도로 건설시 10Km를 넘는 장대터널의 설계 및 시공이 이루어지고 있으며 이

들 장대터널에 대한 유지관리 차원의 상시계측시스템이 함께 설치되는 추세이다. 상시계측시스템은 터널의 내공변위 뿐만 아니라 슛크리트 응력, 지하수 변동 및 터널내 노반의 변동상황 등을 실시간 혹은 일정 간격

*1 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원 (Member, Chief Researcher, KRRI, jslee@krii.re.kr)

*2 한국철도기술연구원 주임연구원 (Assistant Researcher, KRRI)

으로 확인할 수 있으며 미리 정한 관리기준을 넘는 경우에는 관리자에게 실시간으로 통보할 수 있는 기능도 추가되고 있다(이준석 외, 2001). 그러나 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; 2002a, 2002b) 과 시간영역 기법(최일운 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 가정하였다. 따라서 지하수압 및 외부 편토압 등에 의한 추가변형은 없으며 프리캐스트 조립식 라이닝(PCL)의 경우와 유사하게 라이닝 구조물과 슛크리트 혹은 원지반은 방수막 등으로 인해 완전히 분리되어 있다고 가정한다.

터널 라이닝의 손상도 평가기법은 그 사례가 매우 국한되어 있으며 주로 충격파 및 음향 등에 의한 손상파악

이 주요 관심사가 되고 있다. 최근 국내에서도 충격에 의한 응력파의 고유진동수를 검출함으로써 손상의 위치 및 정도를 파악할 수 있는 기법(김문겸 외, 1998) 및 음향분석을 통한 공동부 및 균열부 파악기법(이인모 외, 2001) 이 제안된 바 있다. 한편, 터널 라이닝의 손상을 검출하기 위한 모니터링 시스템 및 손상도 판정기법이 개발된 바 있으나(Bairaktaris, et al., 1998), 주로 외부 지진에 의한 심각한 손상을 다루었다는 점에서 본 연구에서 제안하는 기법과 차이가 있다.

다음에서는 본 연구의 기초가 되는 정적 손상도 평가기법에 대하여 소개하고 자중 혹은 기타 원인에 의해 라이닝부에 터널 축방향으로 균열이 발생한 경우를 가정하여 균열을 포함한 개선된 평가기법을 도출하였다. 개발한 기법은 수치해석 예를 통하여 그 효용성을 입증하고 향후 개발방향에 대하여 논의하였다.

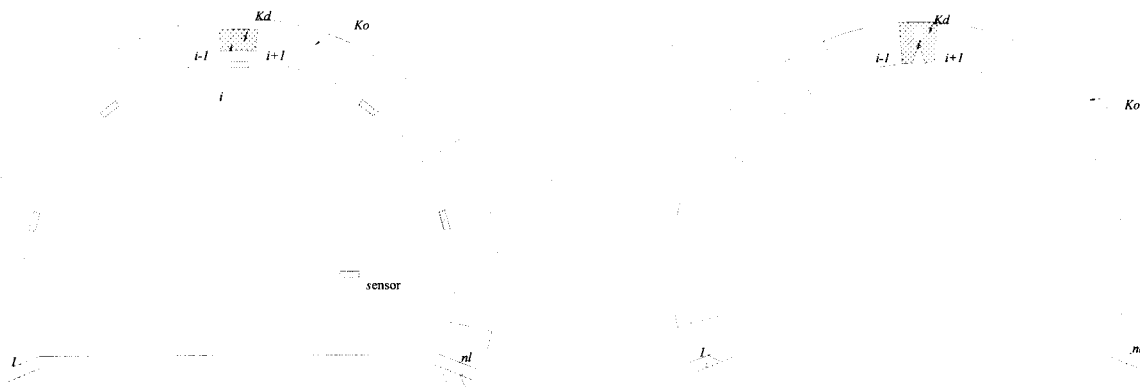
2. 정적 내공변위를 이용한 터널라이닝 손상평가

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.

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

여기서, K , u 및 F 는 각각 강성행렬, 변위벡터 및 하중벡터를 의미하며 라이닝 손상전후에 대한 질량의 변



(a) 모형 1: 강성도 저감모형

(b) 모형 2: 균열모형

그림 1. 터널 라이닝의 손상모형

화는 없는 것으로 가정하면 식 (1)의 우변 항은 자중만의 값이 되고 구조부재에 발생한 손상은 강성행렬과 변위벡터에만 영향을 미치게 된다.

손상전후의 강성행렬 및 변위 벡터의 관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K_d = K_0 - \Delta K = (1 - \alpha) K_0 = \beta K_0 \quad (2)$$

$$u_d = u_0 + \Delta u \quad (3)$$

- 여기서, K_0 : 초기상태의 강성행렬
- K_d : 손상후 강성행렬
- u_0 : 초기상태의 내공변위 벡터
- u_d : 손상후 내공변위 벡터
- α : 손상계수 ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- β : 유효강성비

이며, 손상후의 평형방정식은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$K_d u_d = F \quad (4)$$

따라서, 초기강성행렬을 기준치로 가정하고, 식 (2), (3)과 식 (4)를 조합하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(1 - \alpha) K_0 (u_0 + \Delta u) = F \quad (5)$$

$$u_0 = K_0^{-1} F \quad (6)$$

일반적으로, 전체 강성행렬은 요소 강성행렬의 조합으로 표현되므로 식 (5)를 부재별 손상계수의 항으로 분리하면 식 (7)과 같다.

$$F = \sum_{i=1}^{nl} (1 - \alpha_i) k^i u_d \quad (7)$$

여기서, nl 및 k^i 는 각각 전체 요소 수 및 i -번째 요소의 강성행렬을 의미한다. 식 (7)을 식 (2)를 이용하여 다시 쓰면

$$R \beta = F \quad (8)$$

와 같고 여기서,

$$R = [k^1 u_d, k^2 u_d, \dots, k^{nl} u_d] \quad (9)$$

$$\beta = [(1 - \alpha_1), (1 - \alpha_2), \dots, (1 - \alpha_{nl})]^T \quad (10)$$

로 된다. 결국, 식 (8)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. 실제 수치해석시에는 식 (8)의 역행렬 계산과정이 포함되어야 하며 singular value decomposition 기법(Press 등, 1994)이 가장 안정적인 것으로 파악되었다.

2.2 균열모형

앞서 손상이 발생한 라이닝 부재내의 요소 강성행렬 k 는 일정한 양으로 감소한다는 기본 가정을 사용하여 손상도를 평가하였다. 그러나 라이닝 손상의 주원인중 하나인 종방향 균열을 고려할 수 있다면 좀 더 정확한 모형화가 가능하며 따라서 본 절에서는 교량 구조물의 동적 손상도 평가를 위해 도입한 바 있는 균열모형(이준석 등, 2002a)을 라이닝의 종방향 균열에 적용하였다. 즉, 손상이 발생한 라이닝 부재의 종방향 균열을 요소내로 균질화시키는 분산형 균열모델(homogenized crack model)을 도입하고 균열의 위치 및 크기를 산정함으로써 라이닝의 손상도를 평가할 수 있다.

3차원 보요소에 대한 분산형 균열모형은 다음과 같은 과정을 거쳐 정식화할 수 있다. 우선 고체(solid) 요소에 대한 균열 모형을 정식화하기 위하여 그림 1(b)와 같은 경우를 가정하고 응력-변형률 관계식을 구성하면

$$\dot{\sigma} = D \dot{\epsilon} \quad (11)$$

와 같다. 여기서 rate 형태로 표기된 $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ 는 각각 3차원 영역에서의 응력 및 변형률을 의미하고 D 는 구성행렬 (constitutive matrix)을 나타낸다. 마찬가지로 균열을 포함한 고체요소의 응력-변형률 관계식 D^{eq} 는

$$D_i^{eq} = D_i S_{ii} = D_i + \delta D_i \quad (12)$$

로 나타낼 수 있으며 여기서 S_{ii} 는 구조 관계식을 의미한다. 한편 식 (12)는 다음과 같이 전체 응력-변형률 관계식으로 표기할 수 있으며

$$D^{eq} = \sum_{i=1}^{nl} D_i + \sum_{i=1}^{nl} \delta D_i S_{2i} \quad (13)$$

여기서,

$$S_{2i} = S_{1i} - \mathbf{I} \quad (14)$$

이고 \mathbf{I} 는 크기가 6×6인 단위 행렬을 의미한다. 식 (14)의 S_{1i} 는 Lee et al.(2002)의 전개식을 참조할 수 있으며 이 구조관계식은 유한요소의 체적에 대한 균열의 면적비, μ , 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 (14)는

$$S_{2i} = -\mu_i \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_{22}}{K_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D_{44}}{K_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D_{55}}{K_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = -\mu_i S_{3i} \quad (15)$$

와 같이 쓸 수 있다. 한편 균열면의 전단 강성, K_{22} , K_{33} 이 일반적인 암반절리 등에 적용되는 가정과 같이 $K_{22}=K_{33}$ 로 가정하면 식 (15)의 S_{3i} 는 3차원 보요소에 대하여 다음과 같이 간략히 쓸 수 있다.

$$S_{4i} = \left[\begin{array}{cccccc|cccccc} C_c & & & & & & & & & & & \\ & C_c & & & & & & & & & & \\ & & C_c & & & & & & & & & \\ & & & C_d & & & & & & & & \\ & & & & C_c & & & & & & & \\ & & & & & C_c & & & & & & \\ \hline & & & & & & C_c & & & & & \\ & & & & & & & C_c & & & & \\ & & & & & & & & C_c & & & \\ & & & & & & & & & C_d & & \\ & & & & & & & & & & C_c & \\ & & & & & & & & & & & C_c \end{array} \right] \quad (16)$$

여기서,

$$C_c = \frac{E^u}{\mu E^u + K_N}, \quad C_d = \frac{G^u}{\mu G^u + K_S} \quad (17)$$

이고 만일 $\mu E^u \ll K_N$, $\mu G^u \ll K_S$ 의 관계가 성립한다면

$$C_c = \frac{E^u}{K_N}, \quad C_d = \frac{G^u}{K_S} \quad (18)$$

와 같이 간략화될 수 있다. 한편, K_N 및 K_S 는 각각 균열면의 수직 및 전단 강성도를 의미하며, E^u 및 G^u 는 손상이 없는 상태의 라이닝 탄성계수 및 전단탄성계수를 의미한다.

결론적으로 라이닝의 균열을 고려한 3차원 보요소의 강성도 행렬 k_d^i 는 식 (2)와 유사한 방법으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_d^i = k^i + \delta k^i = k^i - \mu_i k^i S_{4i} \quad (19)$$

혹은

$$\delta K = - \sum_{i=1}^n \mu_i k^i S_{4i} \quad (20)$$

와 같으며, 균열면의 강성도는 구조물의 재질에 따라 입력 데이터로 주어지는 변수이고 구하고자 하는 변수 μ_i 는 손상 면적에 대한 요소의 체적비와 같다. 따라서 균열모형에 의한 변수 μ_i 는 강성도 저감모형에 의한 변수 a_i 와 같은 의미로 해석할 수 있다. 한편 구조물이 본 연구에서와 같이 콘크리트인 경우에는 실험을 통하여 균열면의 강성도를 유추할 수 있으며 Gopalaratnam & Shah(1985)에 의하면 K_N 은 약 1,300 GPa/m인 것으로 보고된 바 있다.

한편, 그림 1(b)에서 알 수 있는 바와 같이 라이닝 구조물내 종방향 혹은 횡방향 균열의 경우 구조관계식 S_{4i} 가 다른 값을 갖게 되므로 식 (20)은 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. 분석 및 고찰

본 장에서는 앞서 소개한 두 가지 손상도 평가기법에 대하여 각각의 장단점을 비교·분석하였고 실제 라이

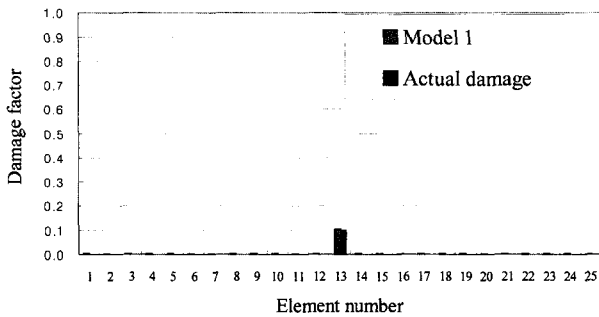
닝 내공변위계 계측데이터의 활용방안에 대하여 중점적으로 조사하였다. 이를 위하여 계측된 내공변위 데이터는 노이즈가 전혀없는 이상적인 경우와 일정부분의 백색 노이즈(white noise)를 포함한 경우로 나누어 고려하였고 실제 내공변위계의 센서 수도 따로 고려하였다. 다음에서는 해석의 편의를 위하여 강성도를 일정부분 저감시키는 방법은 모형 1로, 균열모형을 이용한 손상도 평가기법은 모형 2로 표현하였다.

3.1 모형 1: 강성도 저감모형

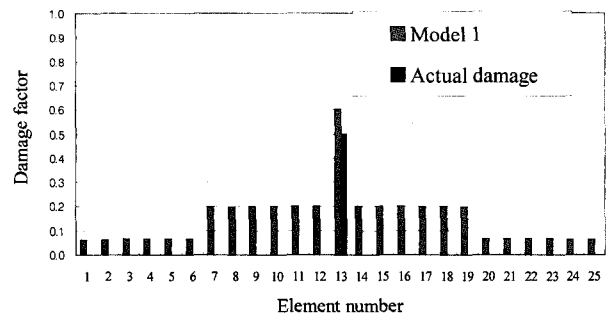
우선 그림 1(a)의 무근콘크리트 라이닝을 일정 길이로 분할한 25개의 유한요소로 가정하고 모형 1을 적용하였다. 터널 라이닝의 내공은 반경이 약 6.6m로서 고속철도용 터널과 유사한 형태를 갖도록 하였으며 천단부에 해당하는 13번째 요소의 강성도를 주변에 비해 10% 저감시켜 손상도를 평가하였다. 그림 2(a)는 손상도 평가결과를 나타내고 있으며 해석결과와 실제 손상이 정확히 일치함을 알 수 있다. 천단부의 손상도를 50%로 증가시킨 결과는 그림 2(b)에 나타내었으며 손상 발생 부위의 인접 구간에서도 손상을 예측하는 오류가

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.

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 0.05mm인 노이즈를 계측 데이터에 포함시켰다. 그 결과 그림 4에 나타낸 바와 같이 표준편차가 0.01mm인 노이즈의 경우에는 비교적 정확한 예측결과를 획득할 수 있으나 표준편차가 이보다 크

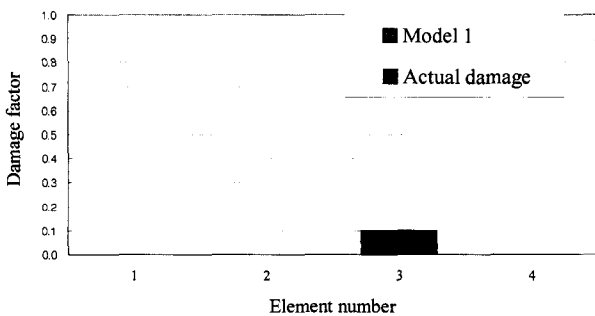


(a) 10% 손상

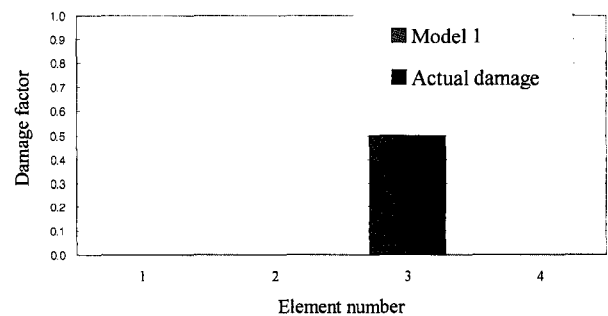


(b) 50% 손상

그림 2. 모형 1 및 균일한 25개 요소를 적용한 라이닝의 손상도 평가

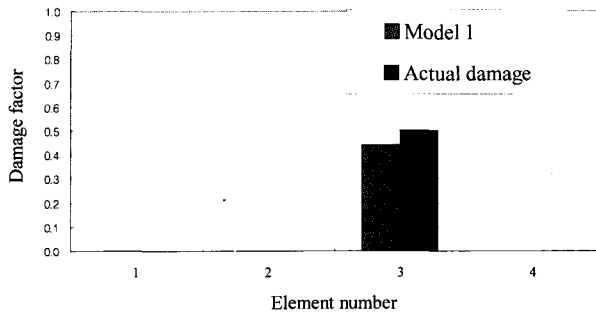


(a) 10% 손상

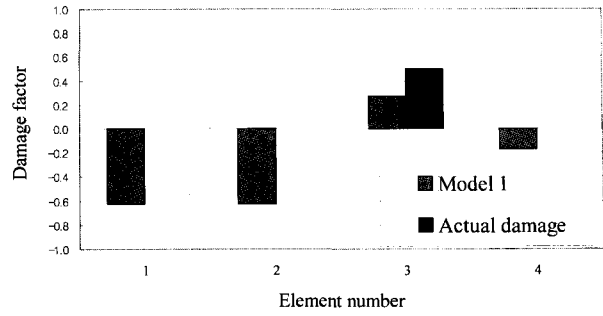


(b) 50% 손상

그림 3. 모형 1 및 균일한 4개 요소를 적용한 라이닝의 손상도 평가

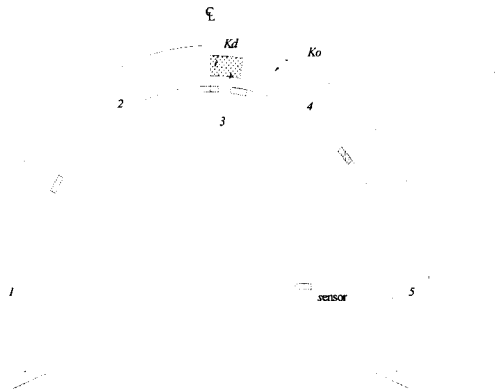


(a) 0.01mm 노이즈 포함

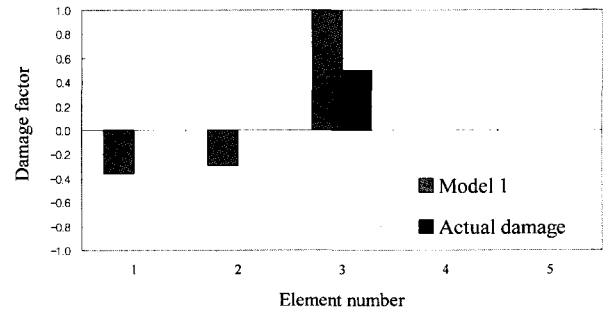


(b) 0.05mm 노이즈 포함

그림 4. 50% 손상시 모형 1 및 균일한 4개 요소를 적용한 라이닝의 손상도 평가



(a) 적용 모형



(b) 0.05mm 노이즈 포함

그림 5. 50% 손상시 모형 1 및 불균일한 5개 요소를 적용한 라이닝의 손상도 평가

계되면 예측결과와 신뢰도가 저감하는 것을 알 수 있다.

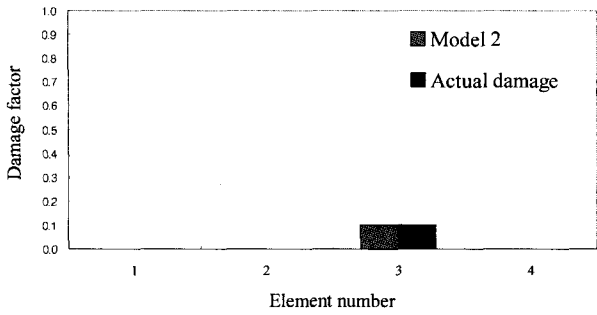
한편 요소의 크기가 결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림 5(a)와 같이 손상을 일부 구간에 한정시킨 경우를 고려하였다. 즉 그림 5(a) 및 5(b)와 같이 불균일한 5개의 요소를 적용하고 0.05mm의 표준편차를 갖는 노이즈를 포함시킨 경우, 그림 4(b)에 비해 개선된 결과를 얻었다. 즉, 모형 1은 고려하는 라이닝 요소의 크기에 따라 손상 예측값이 달라질 수 있으며 이는 손상의 모형화 단계에서 일률적인 강성도 저감모형을 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. 실제 계측현장에서 그림 5(a)와 같은 센서배치를 고려하기는 매우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

3.2 모형 2: 균열 모형

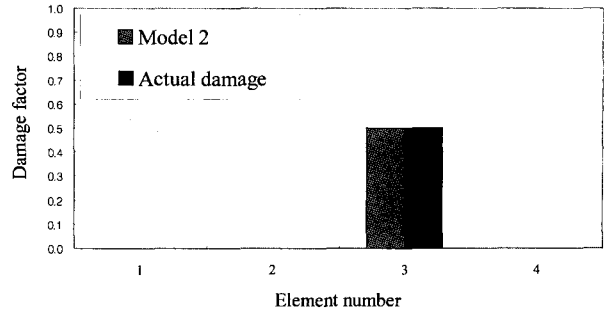
터널 라이닝내 균열에 의한 손상을 파악하기 위하여 앞서 논의한 분산형 균열모형을 고려하였다. 이를 위하여 균일한 4개의 보요소를 가정하고 3번째 요소에 균열

을 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_M 은 앞서 소개한 바와 같이 고강도 콘크리트의 대표적인 값인 1,300 GPa/m을 적용하거나 식 (17) 혹은 식 (18)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 상당

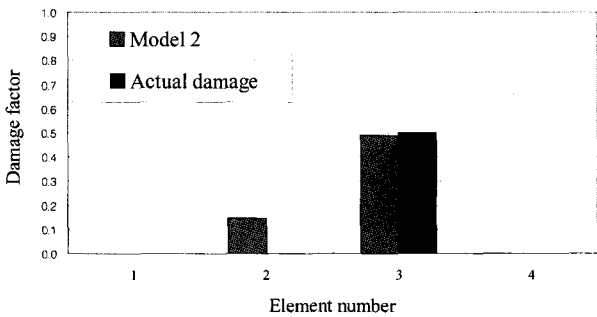


(a) 균열의 체적비 : 10%

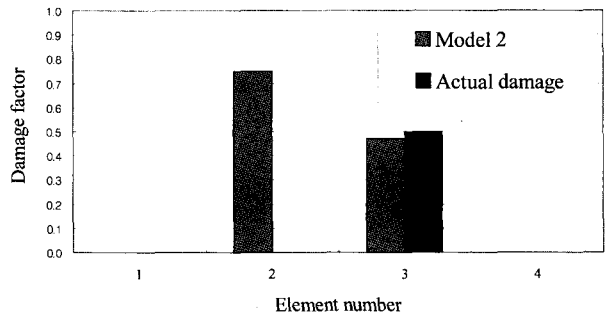


(b) 균열의 체적비 : 50%

그림 6. 모형 2 및 균일한 4개 요소를 적용한 라이닝의 손상도 평가



(a) 0.001mm 노이즈 포함



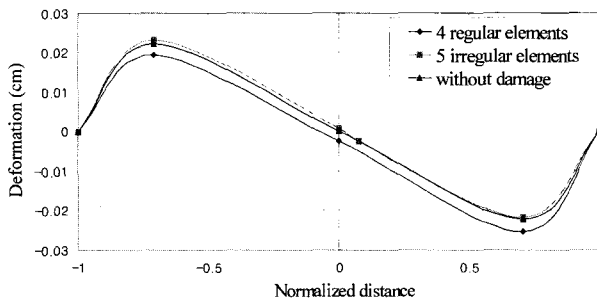
(b) 0.005mm 노이즈 포함

그림 7. 균열의 체적비가 50%인 경우, 모형 2 및 균일한 4개 요소를 적용한 라이닝의 손상도 평가

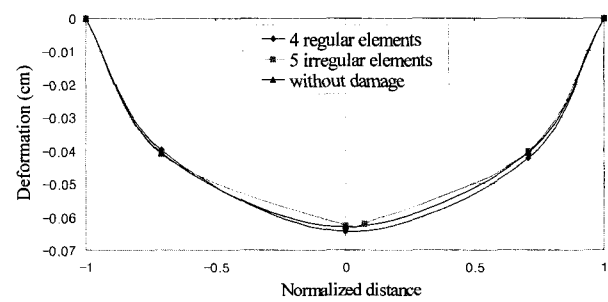
히 작아지게 되므로 내공변위의 처짐량도 상대적으로 줄어들고 따라서 노이즈의 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단되며 따라서 고성능 계측센서 및 AD(Analog/Digital) 변환장치가 요구된다.

실제 현장에 있어서는 모형 1과 같은 내공변위 형상은 기대하기 어려우며 이는 앞에서 논의한 4개의 균일한 요소 및 5개의 불균일한 요소를 적용한 내공변위의 추이를 분석함으로써 더욱 명확해 진다. 즉, 그림 8과 같이 요소의 특성에 따른 내공변위의 추이를 고려하면 실제 손상과 유사한 5개의 불균일한 요소의 수평방향

변위와 4개의 균일한 요소에 의한 수평방향 변위는 무시할 수 없는 차이가 발생함을 알 수 있고 수직방향 변위의 경우에는 그 차이가 현저하지 않다. 그러나 동일한 방법으로 모형 2에 의한 내공변위 양상을 도시하면 그림 9와 같고 분산형 균열모형의 특성상 요소수에 따른 변화량은 무시할 수 있는 정도이다. 결국 계측센서 및 시스템의 정밀도가 향상될 수 있다면 모형 2에 의한 터널 라이닝의 손상도 평가기법이 좀 더 안정적인 결과를 제시할 수 있으며 향후 터널 내공변위계의 정밀도를 향상시킬 수 있는 방안 및 전철화에 따른 철도터널내 유도장애를 제거할 수 있는 기법의 개발이 요구된다.

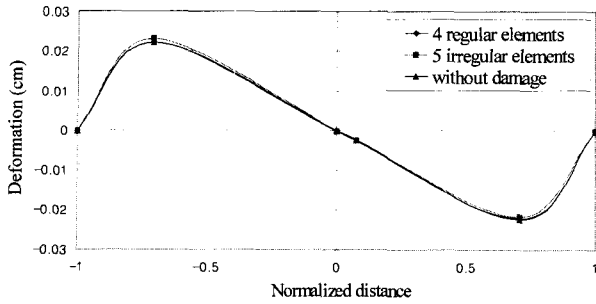


(a) 수평방향 변위

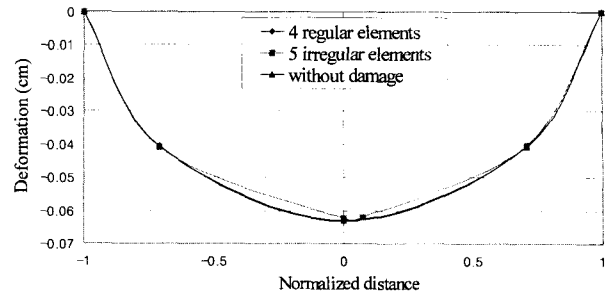


(b) 수직방향 처짐

그림 8. 50% 손상시 모형 1에 의한 내공변위 형상



(a) 수평방향 변위



(b) 수직방향 처짐

그림 9. 균열의 체적비가 50%인 경우, 모형 2에 의한 내공변위 형상

4. 결론

본 연구에서는 장대터널의 유지관리용 내공변위계의 계측 데이터를 이용한 터널 라이닝의 손상도 평가기법에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 센서 설치부를 유한 요소의 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.

- (1) 라이닝 요소내 강성도를 일정하게 저감시키는 모형 1의 경우, 외부 노이즈에 의한 영향은 모형 2에 비하여 상대적으로 작으나 계측변위 자체에 대한 민감도가 크므로 실제 현장적용시에는 세심한 주의를 요하며 센서 수가 충분한 경우에 적합하다.
- (2) 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.

본 연구에서는 터널 내공변위에 대한 상시 혹은 수동 계측 결과를 이용한 라이닝의 손상도 검출기법에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 내공변위 센서로부터 얻어지는 변위 및 라이닝의 자중을 기지로 하여 미지의 라이닝 강성도를 추출하는 수학적 역해석 기법을 도입하였다. 향후에는 기지의 라이닝 자중외에 외부 편토압 혹은 수압 등에 의한 추가변위를 고려할 수 있는 기법의 개발이 요구되며 특히 일정 지하수위가 관측되는 경우에는 본 연구에서 제안한 기법을 적용할 수 있다. 한편 외부

하중에 의한 라이닝내 손상의 위치 및 정도가 확인되는 경우에는 본 연구에서 도입한 이론을 일부 수정하여 미지의 외부 하중을 추적할 수도 있을 것이며 향후 이에 대한 연구가 지속될 예정이다.

참고 문헌

1. 김문겸, 이재영 (1998), "터널 라이닝내부에서 전파되는 탄성응력파를 이용한 수치해석적 비파괴검사", 한국전산구조공학회는문집, 제11권, 제3호, pp.187.
2. 이민도 외 (2001), "터널 모형을 이용한 콘크리트 라이닝 타격응진단기법 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집.
3. 이준석 외 (2001), "고속철도용 터널의 상시계측시스템 구축에 관하여", 한국터널공학회학회지, 제3권, 제2호, pp.63-67.
4. 이준석 외 (2002a), "최적화기법을 응용한 주파수영역에서의 구조물 손상도 추정에 관한 연구 (I) - 손상의 모형화", 대한토목학회논문집, 제22권 제1호, pp.1-10.
5. 이준석 외 (2002b), "최적화기법을 응용한 주파수영역에서의 구조물 손상도 추정에 관한 연구 (II) - 모형의 검증", 대한토목학회논문집, 제22권, 제1호, pp.11-20.
6. 최일완 외 (2001), "시간영역에서의 교량 강성행렬 및 감쇠행렬의 추정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제21권, 제5호, pp.563-571.
7. Bairaktaris, D., et al. (1998), "Intelligent monitoring of seismic damage in reinforced concrete tunnel linings", Proc. Reducing Earth. Risks to Str., Cambridge.
8. Gopalaratnam, V. G. & Shah, S. P. (1985), "Softening response of plain concrete in direct tension", ACI J., Vol.82, No.3, pp.310-323.
9. 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.
10. Lee, J. S., Choi, I-Y & Cho, H-N (2002), "Modeling and detection of damage using smeared crack model" Comp. & Str., submitted.
11. Press, W. H. et al. (1994), Numerical recipes in FORTRAN, Cambridge Univ. Press.

(접수일자 2002. 11. 25, 심사완료일 2002. 12. 24)