

터널 라이닝 단면력 역산을 위한 유지관리 내공변위계측시스템 적용 연구

이대혁¹⁾ · 김기선²⁾ · 한일영³⁾ · 박연준⁴⁾ · 유광호⁴⁾

A Study on the Application of Convergence Measurement System to Inverse Calculation of Tunnel Lining Sectional Forces

Dae-Hyuck Lee, Ki-Sun Kim, Il-Yeong Han, Yeon-Jun Park and Kwang-Ho You

Abstracts. An inverse calculation method to obtain sectional forces, axial force and flexural moment of a tunnel concrete lining was developed by utilizing convergence measurements acquired at the maintenance stage. To monitor the behavior of the lining, DOCS system was applied to a subway tunnel section. The method was proved to be effective, yielding the same results as measured forces of buried instruments. Many effects such as vibration of sensors, vibration due to test train operation, the variation of temperature and high voltage were checked and a new management scheme for tunnel maintenance was proposed.

Keywords: Convergence, Inverse calculation, Sectional forces, DOCS automatic convergence system

초 록. 터널 유지관리 단계의 계측을 통해 획득한 내공변위 자료를 이용하여 라이닝 단면에 작용하는 축력 및 휨 모멘트의 단면력을 역산하기 위한 기법을 제시하였다. 계측을 위해 Digital 방식의 DOCS 시스템을 지하철 단면에 적용하였다. 역산결과 매설식 계측기기에 의해 측정된 측정하중과 일치함을 알 수 있어 기법의 효용성이 입증되었다. 또한, 계측기 센서의 진동, 시험 열차 운행, 터널내 온도변화 및 고전압에 의한 영향을 검토하여 향후 유지관리 방안을 제시하였다.

핵심어: 내공변위, 단면력, 역산, DOCS 내공변위 자동계측시스템

1. 서 론

터널에서의 유지관리 계측은 터널구조물의 안전관리와 정밀안전진단을 위해 필요한 각종 정량화된 현장정보를 지속적, 체계적으로 얻을 수 있는 유일한 방법이다. 이러한 현장 계측은 터널구조물의 시공중 계측뿐만 아니라, 구조물의 완공 후에도 지속적으로 수행함으로써 시간경과와 환경변화에 따른 구조물의 이상 및 변화 추이를 파악할 수 있게 하며, 결과분석단계를 거치면 터널구조물의 안전유무도 판단할 수 있게 한다.¹⁾

터널 콘크리트 라이닝의 유지관리계측시스템은 철근 응력계, 콘크리트 응력계 등의 매설식 기기와 내공변위

계, 광파측정 타겟과 같은 부착식 기기로 구성된다. 유지관리 계측시스템 중에서도 부착식 자동내공변위계 계측기술은 고도의 기술로서 고가의 장비와 고정밀, 고정확도의 센서 및 관련시스템을 필요로 한다. 터널구조물의 콘크리트 라이닝 거동을 직접 측정하는 이러한 부착식 자동내공변위계는 경제성에 대한 지적 및 시스템의 필요성에 대한 비판에도 불구하고, 가장 직접적인 거동 측정수단으로서 지속적으로 보급되고 있다. 유지관리계측이 이제 새로운 분야로 자리를 잡으면서, 시스템을 필요로 하는 공공기관들에서 발주가 집행되었거나 예정되어 있는 사례가 많아지고 있다.

계측시스템의 제어프로그램은 계측치의 획득모듈, 처리모듈, 분석모듈로 구분되어 구성된다. 획득모듈은 유무선 통신선을 활용, 원격지 데이터로거를 제어하여 센서의 계측값을 실제 획득하는 부분이고, 처리모듈은 획득된 계측치를 DataBase를 이용하여 저장하거나 공학적 단위의 물리량으로 변환하는 부분이다. 분석모듈은 제어프로그램의 기능에 따라 구조물에 대한 역학적 표

¹⁾정회원, SK건설(주)연구소 선임연구원

²⁾정회원, 동흥개발(주) 대표이사

³⁾비회원, SK건설(주)연구소 수석연구원

⁴⁾정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

접수일 : 2001년 2월 17일

심사 완료일 : 2001년 3월 26일

현이 수행되는 부분이다.

대부분의 제어프로그램은 정보통신 기술의 발달과 더불어 획득모듈, 처리모듈에 있어서 탁월한 기능향상을 통하여 GUI(Graphic User Interface)를 활용한 그래픽 화면으로 사용자의 조작 편의성을 도모하고 있다. 그러나, 분석모듈에 있어서는 터널 라이닝 변위거동의 그래픽 표현 등의 수준에 머물고, 라이닝의 역학적 상태 평가는 시스템을 벗어난 별도의 과정으로 처리되는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 부착식 자동내공변위계로부터 획득되는 내공변위치를 입력하여 라이닝에 작용하는 단면력을 역산하는 기능 및 콘크리트 공학의 축력-휨모멘트 상관도를 활용한 라이닝 역학적 상태 평가를 수행할 수 있는 기능을 포함한 제어프로그램을 활용하여 그 기능성을 실제 검증하였다. 또한, 유지관리 계측시스템의 실제 시험운영 결과를 중심으로 센서 및 그 환산 내공변위 계측치의 기술적 사항, 매설식 유지관리 기기와의 관계 및 관리기준치 설정방안에 대해 제시하였다. 이를 통하여 향후 터널의 유지관리 계측시스템이 나아갈 방향에 대하여 검토하고자 하였다.

2. 터널 유지관리 계측시스템

2.1 부착식 자동내공변위 계측시스템

최근 지하철, 도로터널, 고속철도터널 등, 국내 지하구조물들의 유지관리 및 보수·보강 문제가 사회적 문제로 대두됨에 따라 발주관청에서는 터널 설계단계에서부터 터널 구조물의 유지관리 대책을 마련토록 요구하는 사례가 늘고 있다.²⁾ 이와 관련된 유지관리 계측의 문제점 및 개선방안에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 제안된 바 있다.^{1,3)}

국내에 유지관리 계측시스템이 도입된 지하구조물은 서울지하철을 비롯하여 고속도로터널, 고속철도터널 등이 있고, 점차 확대되고 있는 추세다. 유지관리 계측시스템은 크게 부착식 자동내공변위계 및 3차원 광과측량을 위주로 한 일반관리 계측 항목과 라이닝 및 지반에 설치되는 토압계, 수압계, 철근 및 콘크리트 응력계로 대변되는 대표단면 계측항목으로 구분 될 수 있다.³⁾ 이들 유지관리계측을 수행하는 방식은 사용목적 및 운용상의 방법에 따라 자동 및 수동으로 구분되어 수행된다.

부착식 자동내공변위시스템은 계측항목 중 고도의 기술 및 운용상의 노하우를 요하는 기술로서 광섬유센서시스템, 3차원 광과기 계측시스템, BCS(Bassett Convergence System), DOCS(Digital Optic Convergence

System), DTLS(Dongwoo Tunnel Lining System), EL Beam 센서시스템 등이 보급되어 있다. 이중 광섬유 센서시스템은 외국에서 도입된 기술로서 서울지하철 유지관리 계측 방법으로 이미 사용된바 있으나 길이에 대한 변형량만을 측정함으로써 해당 길이에 대한 실변위 산정이 곤란하여 운용자가 거동 평가에 어려움을 겪고 있다. 따라서, 최근에는 각 2차원 단면의 구간별 길이 및 각도 변화량을 측정하여 내공변위의 Δx , Δy 의 실변위를 계측하는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다.

2.2 광길이변형 계측시스템(DOCS) 및 TEMS 3.0

DOCS 계측시스템⁴⁾은 길이변형량과 각변화량을 측정하는 센서가 한 셋트로 구성된 센서시스템과 통신 및 로거와 관련된 계측시스템 및 센서 및 로거를 제어하고 계측자료를 획득, 처리하는 운용소프트웨어 부분으로 구성되어 있다.

내공변위 센서 DOCS501/502는 센서내 광발전기를 통해 임의 설치구간에서의 강선의 변위량과 임의 측정에서의 각변화량을 측정하여 내장된 마이크로 프로세서 칩을 통해 디지털 신호로 송신한다. 따라서, 고압선이 관통하는 지역에서 전자기장의 영향을 받지 않고 송신 거리에 따라 비례적으로 증가하는 노이즈가 발생하지 않는다. 또한, 각 센서마다 일련번호가 부여되어 송수신 선을 하나의 선으로 단일화하므로 기존의 자동계측시스템에서 필요로 했던 다수의 데이터 로거, A/D 컨버터, MUX 등의 장비가 현격히 줄어드는 장점이 있다.

운용 소프트웨어 TEMS 3.0(일명 TEMS/DOCS)는 SK건설연구소의 계측관련 노하우를 총 집합한 프로그램으로서 DOCS 계측자료의 획득, 처리, 분석의 일련의 과정을 한글 Window 환경 하에서 사용자 편의의 그래픽 툴을 사용하여 손쉽게 사용할 수 있게 되어있다. 분석기능에서는 사용자의 손쉬운 조작으로 내공변위 계측자료를 역산하여 터널 라이닝에 작용하는 단면력인 축력과 휨모멘트를 시간별로 계산하여 나타낼 수 있으며, 일반적으로 터널 구조물에 사용하지 않았던 P-M 상관도 개념을 이용함으로써 구조물의 역학적 거동상태를 추정할 수 있도록 하였다.

3. 터널 콘크리트 라이닝의 단면력 역산 및 P-M 상관도 평가기법

3.1 단면력 역산

완공 터널 콘크리트 라이닝에 작용하는 외부하중의 평가는 토압 및 간극수압계를 설치하여 직접 계측함으

로써 가능하다. 또한 라이닝이 외부하중에 반응하여 작용하는 축력, 전단력 및 휨모멘트 등의 단면력은 콘크리트 응력계, 철근 응력계 등을 통하여 직·간접적으로 평가할 수 있다. 그러나 이러한 계측기들은 터널 구조물의 시공단계에서 매설 설치되므로 주의 깊은 설치가 필요하고, 또한 완공후 지속적으로 장기간 기기가 고장없이 활동해야 한다. 그러나 실제 주의 깊은 완벽한 설치를 만족하는 것은 사실상 불가능하고, 고장시 보수가 불가능한 단점이 있다. 따라서 유지관리단계에서 설치가능한 부착식 내공변위계가 유지보수 측면에서 유리하나, 대부분 고가이고 완공후 어느 일정 시점에서 설치하므로 부가변위만을 계측하게 되는 단점이 있다.

매설식 기기를 근간으로 하고, 시공시 문제가 되었던 구간 및 3차원적 응력분포가 고려되는 구간, 기존 지상 주요 구조물이 존재하는 구간에 대해서 부착식 내공변위계의 설치가 필요로 할 수 있으며, 변위자료를 근간으로 라이닝에 작용하는 단면력을 산정하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 변위자료 및 시공시 설계되었던 라이닝 물성을 이용한 단면력 환산법을 소개하고자 한다.

라이닝의 단면력을 역산하기 위한 방법으로는 크게 내공변위를 이용하는 Kovari⁵⁾의 방법과 변형률자료를 이용하는 Taylor⁶⁾ 및 Choquet⁷⁾의 방법이 있다. 변형률 자료는 라이닝 단면에 작용하는 변형률을 측정해야 하므로 실제 적용이 어렵고, 내공변위를 이용하는 Kovari 방법이 부착식 내공변위계의 적용에 유리하다.

Kovari법은 강구조물에 적용되었던 방법으로서 라이닝 단면의 일정 원호구간에서의 현의 길이변화 및 내공변위 변화값과 탄성계수 및 2차모멘트 값을 이용하여 축력과 휨모멘트를 계산할 수 있다. 강구조와 달리 콘크리트 라이닝은 두께가 있으나, 두께가 터널 직경의 1/10 이하에서는 얇은 강구조와 동일하게 취급할 수 있다.

아치 범의 여러 지점에서 각각의 길이변화와 곡률반경 변화를 계측하여 이로부터 휨모멘트(M)와 축력(축하중, P)을 구한다. Fig. 1과 같이, 곡률 변화(Δf)와 현의 길이변화(ΔL)를 계측하거나, 다른 계측항목으로부터 환산해야 한다. 원래 현의 길이가 L일 경우 다음과 같다.

$$P = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{8e}{L^2} \Delta f \right) EA \tag{1}$$

$$M = \frac{8EI}{L^2} \Delta f$$

본 논문에서는 무근 콘크리트(Plane concrete)를 고려하였다. e는 인장 fiber에서 중립축(Neutral axis)까지의

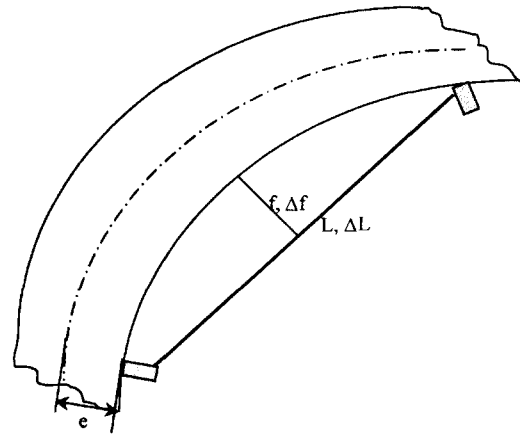


Fig. 1. Kovari's method(Kovari, 1977).

거리이나, 인장 fiber가 없는 무근 콘크리트 라이닝이므로 인장축 연단에서 중립축까지의 거리이다. 그런데 중립축은 무근 콘크리트 라이닝의 두께 중간에 존재하므로 e는 두께의 1/2로 고려된다. A는 단면적이다. 또한, 탄성계수(E)와 2차 관성모멘트(I)는 다음과 같다. 탄성계수식은 콘크리트 구조설계기준⁸⁾에 따라 보통골재를 사용한 경우로서 평가하였다.

$$E = 15,000 \sqrt{f_{ck}} \tag{2}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \tag{3}$$

여기서 f_{ck} 는 일축압축강도, h는 콘크리트 라이닝의 두께, b는 단위 폭이다.

보강 철근이 사용된 철근콘크리트라이닝의 경우, 단면적, 2차모멘트, 합성탄성계수, 중립축까지의 거리를 구하기 위해서는 다음과 같은 변환계수(Transformation factor) n을 이용하여 합성범(Composite beam)의 일차모멘트 관계와 평행축 원리(Parallel-axis theorem)⁹⁾에 따라 계산해야 한다.

$$n = \frac{E_{steel}}{E_{concrete}} \tag{4}$$

여기서 E_{steel} 은 철근의 탄성계수이고, $E_{concrete}$ 는 콘크리트의 탄성계수이다.

대부분의 부착식 자동내공변위계는 설치된 현(강봉)의 길이변화와 현의 각도변화를 계측하므로 Kovari식에 직접 적용하기 위해서 Δf값은 강봉의 길이변화와 각도변화를 통해 환산해야 한다. 이중 고정점 혹은 광파기

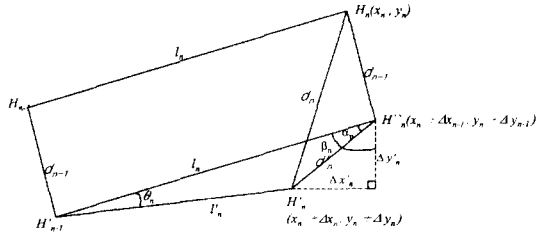


Fig. 2. Calculation of absolute coordinates on tunnel cross-section.

등의 측량에 의해 보정된 기준점을 기준으로 한 절대좌표 산출방식을 소개하면 다음과 같다.

어느 시점에서 길이가 l_n 이고 현의 두 점이 H_{n-1} 및 H_n 인 강봉이 길이변화와 각도변화(θ_n)를 통해 l'_n 이고 현의 두 점이 H'_{n-1} 및 H'_n 인 강봉으로 변화되었을때 Fig. 2로부터 H'_n 의 좌표는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta x'_n = d'_n \sin(\alpha_n - \beta_n) \quad (5)$$

$$\Delta y'_n = -d'_n \cos(\alpha_n - \beta_n) \quad (6)$$

여기서 d'_n , α_n 및 β_n 은 다음과 같다.

$$d'_n = \sqrt{(l_n)^2 + (l'_n)^2 - 2l_n \cdot l'_n \cos \theta_n}$$

$$\alpha_n = \sin^{-1} \left(\frac{l'_n \sin \theta_n}{d'_n} \right)$$

$$\beta_n = \sin^{-1} \left(\frac{x_n - x_{n-1}}{l_n} \right)$$

H'_n 의 좌표는 다음과 같다.

$$H'_n = \left(x_n + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta x'_i + \Delta x'_n, y_n + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta y'_i + \Delta y'_n \right) \quad (7)$$

3.2 콘크리트 라이닝의 P-M 상관도 기법

압축과 휨을 동시에 받는 기둥의 축력-휨모멘트상관도(Axial load-moment Diagram) 평가기법에 3.1절에서 구한 축력 및 휨모멘트를 시간별로 도시함으로서 콘크리트 라이닝의 거동 기구를 파악함과 동시에 극한상태 곡선(Failure envelope)과 비교하여 구조물의 현 상태를 평가할 수 있다.

무근 콘크리트 단면에 대한 축력-모멘트도를 유도하면 다음과 같다. 단면은 높이 h 이고 깊이는 b 이다 Fig. 3에서 보는 바와 같이 왼쪽은 압반에 접해있고, 오른쪽

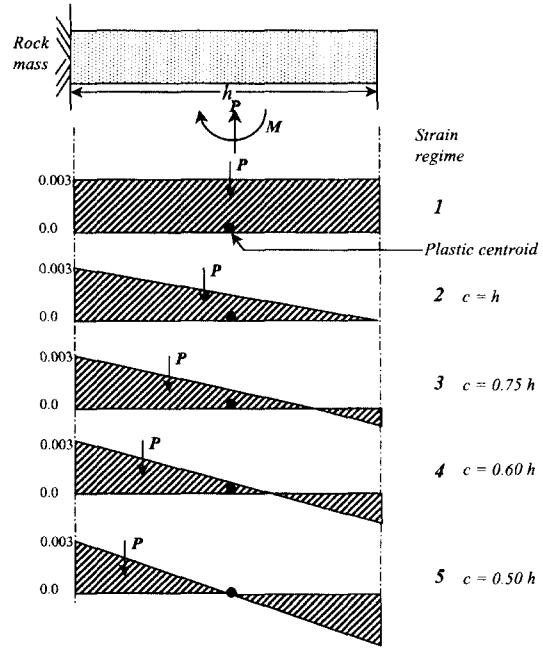


Fig. 3. Strain scheme on plane concrete section.

은 터널이다. 압반면을 슛크리트면이라 가정해도 된다.

Fig. 3의 아래쪽에는 라이닝에 가해지는 5가지 변형률 관계(Regime)를 도시하였다. 첫번째 변형률 관계는 0.003의 균등압축변형률이다. 콘크리트 설계기준강도를 f_{ck} 라 할 경우 이에 따른 콘크리트내 최대허용 축응력은 $0.85f_{ck}$ 로 일정하다. 가해진 응력에 저항하는데 필요한 축력 P_n 는 $0.85f_{ck} \cdot h \cdot b$ 이다. 가해진 모멘트 M 은 가정에 따라 0이다.

나머지 변형률 관계에서는 공동근처에서 변형률이 점차로 작아진다. 이러한 변형률의 관계로서 콘크리트내 응력은 콘크리트 응력-변형률 곡선과 일치하여 단면을 통하여 분포된다. 허용휨모멘트는 철근이 없으므로 축방향 압축력 P 의 우력(Couple)으로 야기된다. 강도설계법을 고려하여 강도감소계수를 ϕ 라 하면 계수축력 및 계수휨모멘트는 다음과 같이 구한다(refer, Fig. 4).

$$P_u = \phi P_n = \phi 0.85f_{ck} k c b \quad (8)$$

$$M_u = \phi M_n = P_u \frac{(h - kc)}{2} \quad (9)$$

이와 같은 방법으로 구한 각 축력 및 휨모멘트를 도시하면 Fig. 8에서 보는 바와 같은 포락선을 구할 수 있다. 이 포락선의 불룩한 꼭지점에서 원점까지 이은 곡

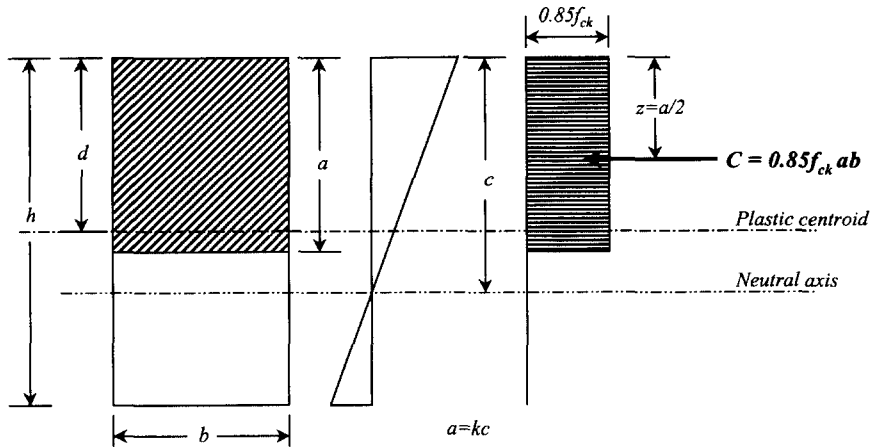


Fig. 4. Cross-section, strain and stress map on concrete lining section.

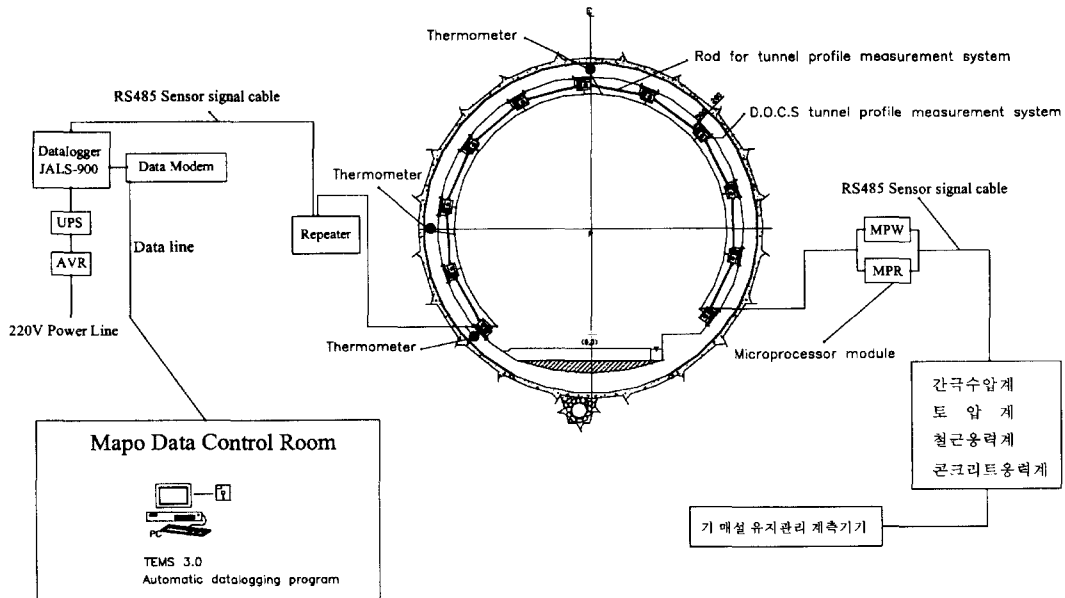


Fig. 5. Schematic diagram of DOCS automatic convergence system and TEMS 3.0.

선이 평형축이며 평형축 상부는 압축지배, 하부는 휨지배 영역이다.

4. DOCS 계측시스템의 시험운영 적용

본 시스템을 서울지하철 시험시공 및 시험운영 절차에 적용하였다. 시스템 구축은 Fig. 5와 같이, 현장 단면에 부착식 자동내공변위계 DOCS 센서 및 이미 매설된 매설기기를 자동으로 연결하여 다른 장소의 계측실에서 실시간 자동계측하는 운영 S/W로 구성된다. 본 시

스템의 주요 특징을 다음 사항을 중심으로 기술하였다.

- 센서 vibration에 의한 유효 최소치(trigger level)
- Tape Extensometer/3차원 광파기 자료와의 비교
- 단면력 역산 자료 검토 및 P-M 상관도 평가
- 시험운영 열차, 터널내 온도변화, 전기충격 및 고전압에 의한 영향 검토

- 유지관리기준 설정방안 제시

특이사항으로는 시험운영 단면은 횡경과 10m 가량 인접한 구간으로서 3차원적 구조형상에 의한 편압의 작용 가능성이 대두되었다.

4.1 센서 vibration에 의한 유효최소치 선정

모든 센서는 센서가 신호를 획득하는 과정에서 일정한 주기로 변동하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 변동치를 유효최소치(trigger level)로 설정하여 이 값 이상의 변화를 보일 경우 유효치로 간주하는 것이 필요하며, 그에 따른 구조물 거동에 관한 분석이 이어질 수 있다.

$\Delta x, \Delta y$ 를 획득하기 위한 운용프로그램의 처리는 크게 상대좌표방식과 절대좌표방식으로 이루어진다. 상대좌표방식은 각각의 DOCS의 한 세트를 각 단면의 구간별로 상대적으로 처리함으로써 좌표변화를 구하는 방식이다. 이에 반해 절대좌표방식은 먼저 측량기를 이용하여 기계점을 기준으로 초기 절대좌표를 구하고, 단면의 한점을 원점으로 처리하여 좌표변화를 산출함으로써 정확한 절대좌표의 변화를 추적하는 방식이다. 따라서 고정 원점을 사전에 적절히 선택해야 하며, 만약 고정 원점의 변화가 발생할 경우 상대좌표방식의 계측자료와 비교 검토해야 한다.

Fig. 6에 상대좌표방식의 시간별 내공변위 자료를 도시하였다. 그림과 같이 구조물의 유의미한 거동없이 길이변형 및 각센서 자체의 변동으로 인한 Vibration만 존재하였다. 상대좌표방식에서는 -0.15~0.15 mm, 절대좌

표방식에서는 -0.30~0.30 mm로 산출되었다. 따라서 이 유효최소치를 벗어난 값을 기준으로 의미있는 분석이 뒤따라야 할 것이다.

4.2 Tape Extensometer 계측치와의 비교

시험운영이 1주일 진행되어 정확한 비교 분석이 불가능하지만, 시험운영시 부착식 자동내공변위계가 설치된 단면에서 실시되었던 Tape Extensometer 자료와 3차원 광파기 계측자료를 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 보는 바와 같이 시간이력에 따라 T/E가 0.5 mm 이상을 경험한 측선 P00-P04, P00-P05, P00-P09에 대해 비교하였다. 그러나 10월 10일에서 12일 사이에 기온 변화가 극심해서 기온의 급격한 하강으로

Table 1. Comparison of measured relative convergences of Tape extensometer & DOCS system.

	P00-P04		P00-P05		P00-P09	
	T/E (mm)	DOCS (mm)	T/E (mm)	DOCS (mm)	T/E (mm)	DOCS (mm)
Oct. 10	-0.75	-0.35	-0.55	-0.30	-0.55	-0.30
Oct. 11	-0.50	-0.40	-0.30	-0.25	-0.20	-0.30
Oct. 12	-0.40	-0.50	-0.20	0.50	-0.10	-0.70

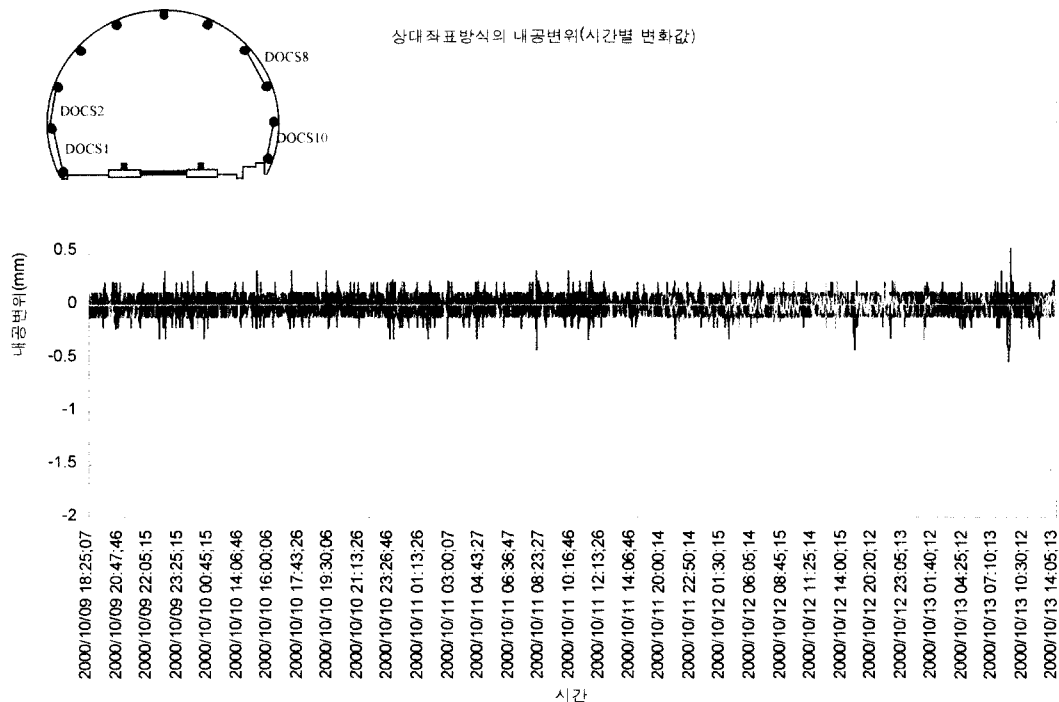


Fig. 6. Convergence variation with measured time according to DOCS relative coordinates scheme.

Tape Extensometer의 Tape 자체가 온도변화를 받아 줄어들어서 결과적으로 마치 길이가 늘어난 것처럼 계측되었다. 따라서 DOCS와의 정량적인 자료 비교가 정확하지 않게 되어 버렸지만, 표에서와 같이 두 측정에서는 오차가 ±0.4 mm 였고, P00-P09의 10월 12일 자료에서는 차이가 크게 발생하였다. 이는 실제 P00와 P09 측정에서 구조물의 약간의 거동이 발생한 것으로 보이나, 단기적인 분석으로 이를 명확히 증명하지는 못했다.

광파기 계측자료와의 비교분석은 광파기 측정 자체가 측정 도중에 기계접이 틀어진 관계로 정확한 데이터를 산출하지 못하여 분석이 불가능하였다.

4.3 단면력 역산자료 검토 및 P-M 상관도 평가

운영 프로그램은 산출된 내공변위 자료를 이용하여 콘크리트 라이닝의 단면력인 축력과 휨모멘트를 역산할 수 있다.

최종 계측일을 기준으로 하여 구한 축력 및 휨모멘트는 Table 2와 같고 축력에 관한 단면력도는 Fig. 7과 같다.

축력은 Table 2와 같이 DOCS8, DOCS10에서는 매

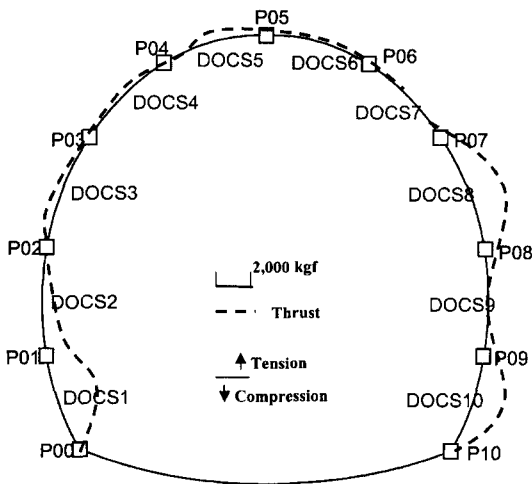


Fig. 7. Additional thrust map acting on the cross-section.

우 큰 인장력이 부가적으로 발생하였고, DOCS1, DOCS2에서는 압축력이 부가적으로 작용하였다. 본 공구는 설계시 부재력 계산결과 최대 압축력 91,800 kgf이 작용하는 것으로 보고되었다. 따라서 설계치에 비해 매우 작은 값을 보이기 때문에 현 상태에서는 라이닝 내구성에 이상을 초래하지 않고 있다. 휨모멘트는 설계시 1.18×10⁶ kgf-cm 로 보고되었었다. 따라서 설계치에 비해 1/100 이하의 매우 작은 값을 보이기 때문에 현 상태에서는 축력과 마찬가지로 라이닝 내구성에 이상을 초래하고 있지 않다.

최대값을 기준으로 할 경우, 역산결과 라이닝의 우측 각부에서 최대 39 kg/cm²의 인장응력이 발생하였다. 실제 라이닝이 철근 콘크리트 라이닝이므로, 철근의 하중분담율이 콘크리트에 비해 15배 이상인 것을 고려해볼 때 실제 콘크리트 라이닝의 분담율은 39 kg/cm²/15 ≃ 3 kgf/cm² 이다. 한편, 매설센서인 콘크리트 응력계의 계측값은 시험운영기간 동안 평균 0.5~3 kgf/cm² 인장 부가응력이 발생하였다.

따라서 내공변위의 역산을 통한 콘크리트 라이닝의 발생 추가 응력은 매설센서에서 계측한 추가 응력과 거의 동일함을 알 수 있다. 이를 통해 역산 알고리즘의 정확도가 검증되었다.

구조해석 프로그램을 이용한 설계단계에서 콘크리트 라이닝은 Beam 요소 및 Shell 요소로 취급되어 설계된다. 아치빔의 원리에 따라 지하철 콘크리트 라이닝은 지반으로부터 슛크리트 및 강지보를 거쳐 전달되는 외부 하중을 압축력으로서 분담 지지한다. 그러나 위와 같이 실제 무시할수 없을 만큼의 인장응력이 국부적으로 작용한다는 사실은 결국 지하철 구조물의 3차원적 구조형상에 의한 편압의 작용 사실을 입증하고 있다. 만약, 철근 보강없는 무근 콘크리트 라이닝이었을 경우 인장균열의 발생이 필히 수반되었으리라 판단된다.

무근 콘크리트 라이닝의 계수 축력및 계수 휨모멘트를 기준으로 한 P-M 상관도상에 작용 축력 및 휨모멘트를 도시하면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 평형축을 기준으로 압축 지배 영역에 속하고 있고 파괴 포락선에 최대 50% 수준에 불과하여 안정한 상태에 있다. 그러나 위의 P-M

Table 2. Additional thrust and flexural moment(above trigger level).

	DOCS1	DOCS2	DOCS3	DOCS4	DOCS5	DOCS6	DOCS7	DOCS8	DOCS9	DOCS10
Thrust (kgf)	-2190	-360	0	0	575	290	0	2320	0	1580
Flexural moment (kgf-cm × 10 ⁴)	-1.8	-0.3	-0.03	0	0.5	0	1.0	0.0	0.0	1.73
Axial stress(kgf/cm ²)	-44	-7	0	0	11.5	5.8	0	36	0	31.6

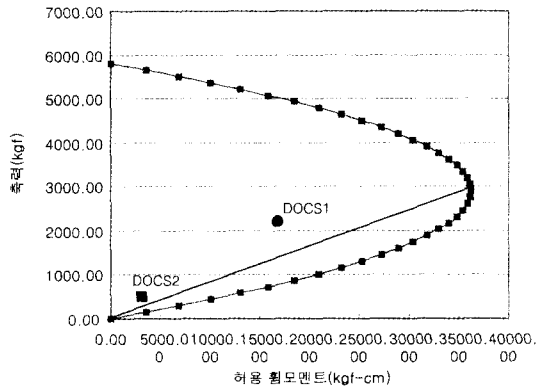


Fig. 8. Presentation of DOCS1 and DOCS2 sets onto P-M diagram based on plane concrete lining.

상관도는 무근 콘크리트 라이닝을 기준으로 한 값이라는 사실에 유의해야 한다. 실제 철근 콘크리트 라이닝을 기준으로 한다면 훨씬 작은 값일 것으로 추정된다.

4.4 시험운영 열차, 터널내 온도변화, 전기충격 및 고전압에 의한 영향 검토

해당 설치 단면 지상에는 용산선 철도가 통과하며, 해당 지하철은 시험운영 열차가 오전 10시부터 오후 4시까지 10분 간격으로 통과하였다. 이에 대한 영향을 평가하기 위해 계측자료 및 내공변위 환산 자료를 분석한 결과 그 영향이 없는 것으로 검토되었다.

터널내 천단, 측벽, 바닥부의 온도차에 의한 영향을 검토하기 위해 온도를 동시에 측정하였다. 천단과 바닥부 사이에는 약 2~3도의 온도차가 발생하였는데, DOCS 센서 및 매설식 유지관리 센서의 자동계측결과에서 온도에 의한 영향을 발견하지 못했다. 장기시험계측이 이루어진다면 온도변화 대비 신호값 및 내공변위값의 비교 및 정확한 영향 파악이 가능하리라 사료된다.

지하철에는 고전압선이 천단부에 장착된 가이드를 따라 흐른다. 따라서 고전압에 의한 계측에 대한 영향이 규명되어야 한다. 계측결과를 비교해본 결과, 부착식 자동내공변위계에서는 고압선의 전압에 의한 영향이 없었다. 그러나 일반 매설센서를 자동계측 라인에 연결한 결과, Fig. 9와 같이 열차 운행시간 즉 통전시간에 노이즈가 발생하여 수압계의 경우 잘못된 값인 5 kg/cm²까지 계측되었다. 따라서 매설센서에 대한 노이즈 방지용 Shielding 작업을 실시하였고 그 이후에는 통전시간대의 매설센서의 노이즈 영향이 발견되지 않아 성공적인 계측이 이루어졌다.

이러한 고전압에 의한 영향에 대처하여 노이즈

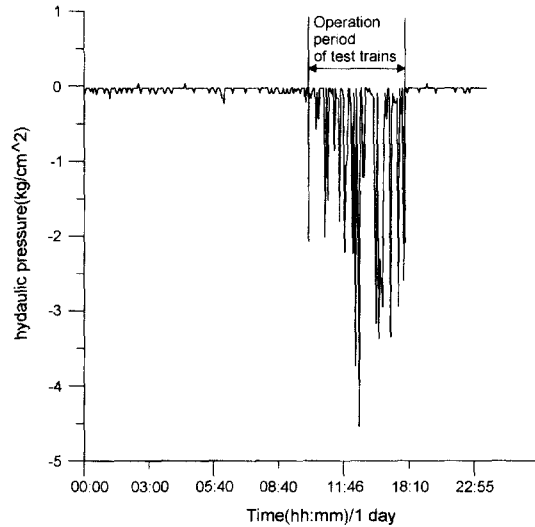


Fig. 9. Variation of measured hydraulics pressures of buried sensors according to the operation of test subway trains (10 am~4 pm).

Shielding 작업을 실시하는 것이 자동계측에 있어 가장 중요한 인자라는 사실을 알 수 있었다.

4.5 유지관리기준 설정방안

위와 같은 시험운영 결과로부터 장기적인 관점에서 지하철 구조물의 유지관리 기준 설정을 위한 방안이 모색될 수 있었다(Fig. 10).

첫째, 원시 계측자료와 환산 내공변위 자료의 시계열 분석이 필요하리라 사료된다. 계측자료의 시간이력에 대한 센서 vibration에 의한 영향치를 고려하여 trigger level을 사용자가 임의로 설정할 수 있지만, 보다 과학적인 시계열 분석이 필요하리라 사료된다. 이는 시간이력에 대한 계측자료의 주기성 및 그에 따른 경향성을 파악하여 무의미한 유효치 이하의 값들을 계산해 내고, 또한 지하수 침투량 및 터널내 배수량과 같은 환경자료를 시계열 분석에 입력치로 입력하여 그에 따른 계측치의 변화를 분석해 낼 수 있다면 예측가능한 모델이 선정될 수 있으리라 판단된다.

둘째, 부착식 자동내공변위계에 의한 내공변위치는 역산을 통해 반드시 라이닝에 작용하는 단면력으로 환산되어야 한다. 환산된 값들은 매설 센서 즉 토압계, 수압계, 철근 및 콘크리트 응력계 계측자료와 비교되어 종합적으로 구조물의 상태를 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

셋째, 위의 시계열 분석을 통한 의미있는 자료와 응

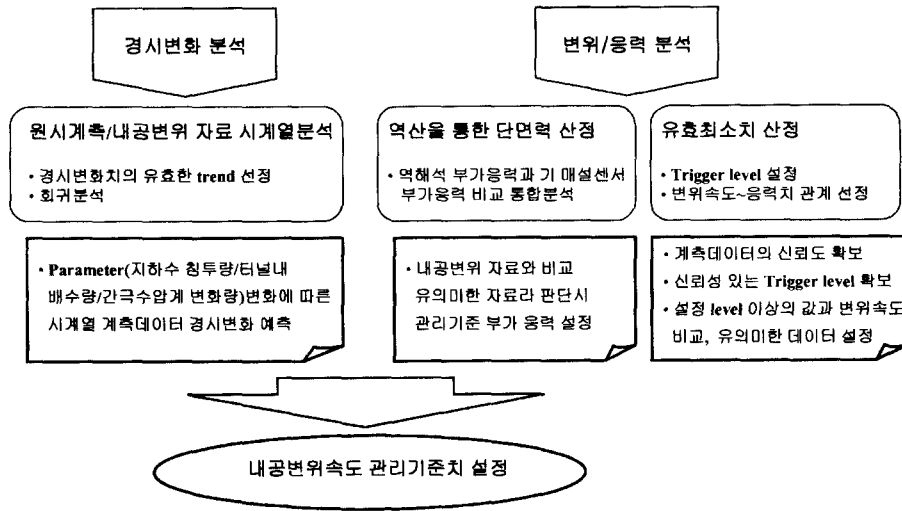


Fig. 10. Management criteria of subway tunnel by automatic measurements.

력 환산치 및 계측치를 통합 분석함으로써 내공변위량에 대한 관리기준치 설정을 할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이러한 관리기준치를 절대적인 내공변위 수치로 설정하는 것은 센서의 개개의 특성을 감안할때 위험한 방법이라 생각된다. 이는 센서별로 제작사의 표준화 노력에도 불구하고 거동 특성이 차이가 있을 것이기 때문이다. 따라서 시계열 분석자료와 통합 비교하여 각 단면별로 내공변위속도치로 관리기준치를 결정해야 가장 합리적인 기준이라 사료된다. 물론 외압과 관련된 토압계, 수압계의 계측치를 평가하기 위해서는 지하수를 고려한 수치해석 및 역해석 등의 보조 해석이 반드시 포함되어야 할 것으로 사료된다.

6. 결 론

터널의 유지관리 단계에서 계측된 내공변위를 이용하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 단면력을 역산하기 위한 기법을 개발하였고, 계측시스템을 터널 현장에 시험적용 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) Kovari이론에 기초하여 터널 내공변위 및 구조물 설계자료를 활용한 콘크리트 라이닝에 작용하는 단면력인 축력 및 휨모멘트를 역산하는 기법을 개발하였다. 실제 유지관리 내공변위 계측 및 역산 결과 매설센서인 콘크리트 응력계로부터 계측된 부가 응력값과 거의 동일한 값을 얻을 수 있어, 기법의 타당성을 검증하였다.

2) 라이닝에 작용하는 단면력을 역산한 결과, 국부적으로 큰 인장응력이 발생하였다. 철근 콘크리트 라이닝

이므로 철근과 콘크리트가 축력 및 휨모멘트를 분담하지만 무근 콘크리트 라이닝일 경우 인장균열 발생을 예상할 수 있을 만큼의 큰 규모였다. 따라서 지하철 터널 3차원적 구조형상 구간에서의 편압 재하 현상을 규명할 수 있었다.

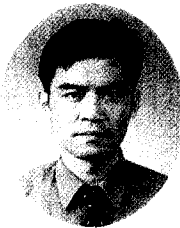
3) 기 매설센서를 자동계측시에는 지하철의 통전시간대에 고전압에 의한 노이즈 발생을 확인하였고, 노이즈 Shielding 작업후 이러한 노이즈 발생을 억제할 수 있었다. 따라서 기 매설센서를 자동계측시에는 이러한 노이즈 발생에 대비한 적절한 Shielding 조치가 필요함을 알 수 있었다.

4) 터널 유지관리 기준을 설정하기 위해선, 시계열 분석 및 내공변위 자료를 역산한 축력과 휨모멘트의 단면력 역산이 반드시 필요하며, 기 매설센서의 계측값과의 통합분석이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 배규진, 이성원, 1998, 지하구조물 유지관리 및 계측, 대한토목학회지, 16(11), 43-54.
2. 한국암반공학회, 삼보기술단, 1997, 터널유지관리용 자동화 계측시스템 연구, 2-25.
3. 우종태, 김홍석, 2000, 지하철유지관리 계측의 문제점 분석 및 개선방안 연구, 한국지반공학회 정보화기술위원회 2000년도 봄학술발표회 논문집, 94-104.
4. 지오넷주식회사, 2000, 서울지하철 2기2단계 구간 유지관리계측용역 시험운영보고서, 1-71.
5. Kovari, K., Amstad, Ch. and Fritz, P. 1977, Integrated measuring technique for rock pressure determination, Int. Sympo. on Field Measurements

- in Rock Mechanics, Zurich, 289-316.
6. Taylor, R.N., 1995, Geotechnical centrifuge technology, Chapman & Hall.
 7. Choquet, P., 1982, A failure criterion of steel arch supports for the interpretation of in-situ monitoring results, 14th Canadian Rock Mechanics Symp., 116-123.
 8. 한국콘크리트학회, 대한건축학회, 1999, 건설교통부제정 콘크리트 구조설계기준, 66p.
 9. Gere, J.M. and Timoshenko, S.P., 1991, Mechanics of materials, Chapman & Hall, 733-753.

이 대 혁

1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel : 02-3700-8644
E-mail : dhlee-d@skec.co.kr
현재 SK건설(주)연구소 선임연구원

박 연 준

1981년 서울대학교 자원공학과 학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1992년 미국 Minnesota대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel : 031-220-2580
E-mail : yjpark@mail.suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 조교수

김 기 선

1971년 한양대학교 토목공학과 학사
1990년 울산대학교 대학원 토목공학과 석사

Tel : 02-576-9081~3
E-mail : civil0224@hanmail.net
현재 동흥개발(주) 대표이사

유 광 호

1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과 학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과 석사

1992년 미국 Minnesota대학교 대학원 토목공학과 공학박사
Tel : 031-220-2566
E-mail : khyou@mail.suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 조교수

한 일 영

1983년 인하대학교 자원공학과 학사
1990년 호주 University of New South Wales 대학원 응용지질학과 석사

Tel : 02-3700-8651
E-mail : iyhan@skec.co.kr
현재 SK건설(주)연구소 수석연구원