

광섬유 센서를 이용한 터널 지중 및 내공변위 자동계측 프로그램 개발 Development of Underground Displacement and Convergence Auto-Measuring Program for the Tunnel Using the Fiber Optic Sensor

최명호¹⁾, Myong-Ho Choi, 윤지선²⁾, Ji-son Yoon, 권오덕³⁾, Oh-Duk Kwon, 권오준⁴⁾, Oh-Jun Kwon

¹⁾ (주)삼보기술단 지반부 기사, Engineer, SAMBO Engineering Co., LTD

²⁾ 인하대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

³⁾ (주)세미텔 기술연구소 소장, Head, SemiTel, Institute of Technology

⁴⁾ (주)세미텔 기술연구소 팀장, Team Manager, SemiTel, Institute of Technology

SYNOPSIS : In this paper, the theoretical method of measuring the tunnel convergence and underground displacement, the objective indices of assessing safety for tunnel construction, using the fiber optic sensor is studied by developing the program to automatically measure them. The model test of Con'c beam is conducted to evaluate reliability of the fiber optic sensor. Furthermore, using the RS232 communication protocol as well as Visual C# and Visual C++, the programming tools, the program was developed to detect automatically the measured value of the fiber optic sensor, calculate the tunnel convergence and underground displacement, predict the deformed shape of the tunnel, and evaluate loosening zone due to the tunnel excavation.

Key words : underground displacement, convergence, fiber optic sensor, tunnel measurement, estimation of tunnel safety

1. 서 론

지하구조물 시공 시 가장 손쉽게 계측할 수 있고 많이 이용되는 계측항목은 변위이다. 터널의 계측항목은 주로 내공변위와 지중변위가 있으며 Rod Extensometer, Tape Extensometer, 계측용 광파기 등을 사용하여 그 변위를 계측하고 있으나 정확도 및 신뢰성 측면에서 개선해야할 점이 많다. 기존 Extensometer의 경우 보통 $\pm 1\text{mm}$ 의 정확도를 나타내는데 이러한 정확도로는 적용하기에 불충분한 경우가 많으며 적어도 10-100 μm 정도의 정확도가 필요하다. 또한 습기, 온도, 자기장 등과 같은 환경적 요인에 의해서 이상이 생기는 등 내구성측면에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 계측의 신뢰성과 안정성 등을 고려할 때 높은 정밀도를 가진 내구성 있는 계측기기의 적용이 요구된다.

최근의 각종 터널 유지관리 설계 사례로 살펴보면 광섬유센서, 3차원 내공변위계, 광변형센서, 전단면 내공변위 감지기 등과 같은 외국에서 개발된 고가의 최신계측기술을 무분별하게 적용하고 있는 실정이지만 그 성과는 기대에 미치지 못하고 있다. 이 중 광섬유 센서는 전자기 간섭을 받지 않으며 설치 및 포설의 용이성, Compact한 구조 및 뛰어난 내구성, 뛰어난 Resolution 및 정확성, 다중화(multiplexing)성 등 다른 계측기에 비해 탁월한 성능을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 개발된 광섬유 센서를 이용하여 터널 시공 중 뿐만 아니라, 시공 후 터널 공용기간동안 유지관리계측시스템으로 연결되어 사용할 수 있는 자동계측 시스템을 구축하기 위해서 시스템의 필수요소인 터널의 내공 및 지중변위 자동계측 프로

그럼 개발과 관련하여 광섬유 센서를 이용한 터널 모니터링의 개념을 이론적으로 검토하고, 광섬유 센서를 이용한 Con'c beam 모형실험의 실시를 통하여 센서의 계측 적용성 및 개발된 프로그램의 적합성을 평가하는데 본 연구의 목적을 두었다.

2. 광섬유 센서를 이용한 터널 내공 및 지중변위 측정

2.1 광섬유 센서를 이용한 내공변위 측정기법

2.1.1 터널 내공변위 계측 단면

광섬유 센서를 이용하여 터널의 내공변위를 측정하기 위해 아래와 같은 측정 단면을 설정하였다. 광섬유 센서는 Spring line과 Center line의 교점을 기준으로 하여 0°(SL left, right), 45°(DL left, right), 90°(CL) 되는 터널벽면의 접선방향에 이층구조로 평행하게 설치되어진다.

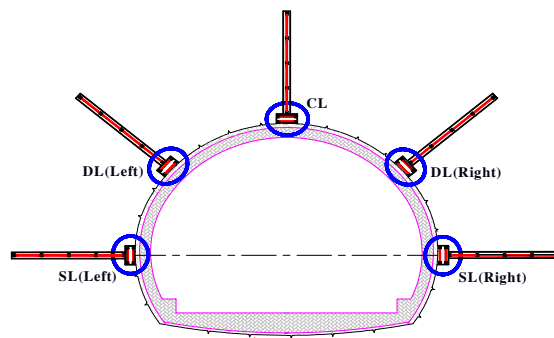


Fig 1. Cross Sectional View of the Convergence Measuring

2.1.2 광섬유 센서를 이용한 터널 내공변위 측정원리

내공변위 측정지점의 변형 전·후의 모습도는 그림 2. (a), (b)와 같다. 측정 단면을 beam 요소로 가정한다면 Beam 요소 dx 에 Bernoulli 법칙을 고려하면 단순한 굴곡에서, 곡률 방정식은 다음과 같이 표현 되어진다.

$$\frac{1}{r(x)} = -\frac{\epsilon(x)}{y} \quad (1)$$

여기서 r 은 곡률 반경, x 는 곡선을 이루는 횡좌표, ϵ 는 x 방향의 변형 그리고 y 는 중립축으로부터의 거리이다.

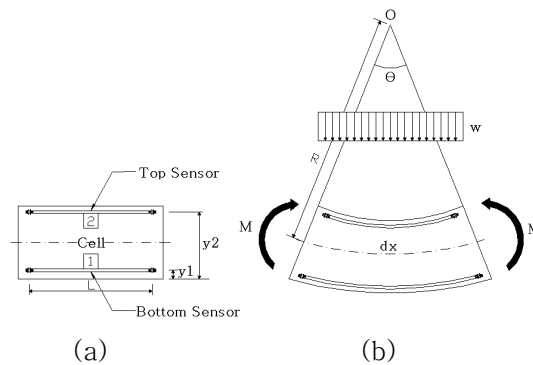


Fig 2. Detailed Diagram of Measurement Area Before and After Deformation

중립축에 평행하게 설치된 광섬유 센서는 센서 길이 L에 걸쳐서 변형을 측정한다. (1)의 적분은 다음과 같이 주어진다:

$$\frac{1}{L_0} \int_0^L \frac{dx}{r(x)} = -\frac{1}{L} \left[\int_0^L \epsilon(x) dx \right] / y \rightarrow \frac{1}{r_m} = \frac{-\Delta L}{yL} \quad (2)$$

여기서 r_m 은 평균곡률반경이고, ΔL 은 하중재하 후에 센서에 의해 측정되어진 변형이다. 복잡한 굴곡과 온도 변화의 경우, 중립축에 평행한 다른 거리에 설치된 한 쌍의 광섬유 센서가 cell의 평균 곡률을 측정하는데 쉽고, 필요하다는 것을 보여준다. 이 경우 곡률은 다음과 같은 식에 의해 얻어질 것이다;

$$\frac{1}{r_m} = \frac{\Delta L_2 - \Delta L_1}{(y_1 - y_2)L} \quad (3)$$

여기서 ΔL_1 과 ΔL_2 는 두개의 센서에 의해서 측정된 변형이고, 두 센서의 길이 L과 cell내의 수직방향의 위치 $y_{1,2}$ 는 모두 공통적인 임의의 원점(ex: beam의 바닥부)에 관련된다.

휨 변형에 대응하여 휨응력이 생기는데 이 응력의 분포형태는 두 가지 평형조건을 만족시켜야 한다.

첫 번째 조건은 x방향의 응력의 합이 영이 되어야 하는 점이고 두 번째 조건은 인장응력의 합력과 압축응력의 합력이 만드는 우력이 외부 모멘트와 평형을 이루어야 하는 것이다.

이 응력 분포의 두 가지 평형조건을 고려하면 곡률(curvature)과 모멘트(moment)의 관계식은 다음과 같이 유도되어진다.

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad (4)$$

이 식에 의하면, 휨에 의한 보의 곡률은 모멘트에 비례하고 탄성계수와 단면2차 모멘트에 반비례한다. 식(4)에서 EI 는 재료와 단면의 성능이 결합하여 휨 변형에 저항하는 능력을 나타낸 것으로, 휨 강성이라고 한다. 또한 보 처짐의 미분방정식은 식 (5)로 유도된다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (5)$$

보 요소의 경계조건을 고려한 미분방정식의 이중적분을 이용하여 보 처짐의 산출식을 다음과 같이 도출하였다.

$$y_x = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{y_1 - y_2} (x^2 - Lx) \quad (6)$$

위에서 기술된 광섬유 센서를 이용한 터널 내공변위 측정에 대해 정리를 하면 다음과 같다. 광섬유 센서 한 쌍은 아치형 천장(vault)에서 국부평균곡률의 변화양상을 얻어내는데 이용될 수 있다. 이러한 경우 센서는 터널벽면의 내호면(intrados)과 외호면(extrados)에 두개의 평행한 층으로 설치된다. 만일 터널 형상과 규모에 따른 센서의 사용이 가능하다면 광섬유 센서를 이용하여 측정한 곡률(κ_m)의 이중적분을 수행하여 최대 처짐량(y_{max})을 구함으로써 터널 벽면의 반경방향 변위(즉, 내공변위)와 터널 단면의 변형형상(Deformed Shape)을 추정할 수 있다.

2.2 광섬유 센서를 이용한 지중변위 측정기법

2.2.1 터널 지중변위 계측 단면

내공변위와 같은 측정위치에 터널 벽면의 반경방향으로 센서를 설치하도록 한다. 터널이 굴착되는 지반조건에 따라 이완영역의 범위가 달라지는 것에 대응하여 센서의 길이는 변경이 가능하며 기존 지중변위 설치방식과 유사하지만, 앵커(Anchor)와 같은 강재에 광섬유 센서를 부착하고 매설하므로써 센서 길이의 증대에 따른 직선성 저하를 방지하도록 한다.

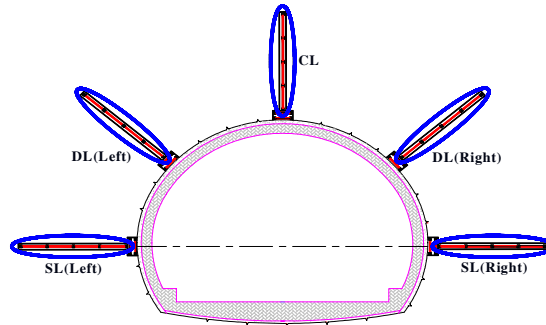


Fig 3. Cross Sectional View of the Underground Displacement Measuring

2.2.2 광섬유 센서를 이용한 터널 지중변위 측정원리

기존의 Extensometer와 비교해 볼 때 광섬유 센서의 주요장점은 기존의 방법보다 더 높은 분석 정밀도가 있으며, 상대적으로 더 적은 시추공으로 많은 개수의 광섬유 센서를 직렬로 연결하여 설치할 수 있으며, 자동적으로 측정이 가능하며 Cable로 연결하여 원거리에서도 계측 수행을 할 수 있다는 것이다.

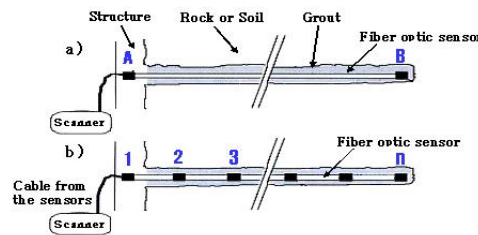


Fig 4. Schematic representation of the Fiber Optic Extensometer

a) Single length set-up : b) Multi-point set-up

3. 광섬유 센서의 계측 신뢰성 시험

3.1 실험장치 및 내용

아래와 같이 제작한 광섬유 센서를 매설한 Con'c beam 양 끝단에 지보를 하여 그 위에 거치하고 하중은 같은 재료를 이용하여 제작한 하중 재하용 Con'c beam을 이용하여 작용시켰다. 하중은 4 step(134kg, 268kg, 402kg, 536kg)으로 단계적 재하를 하였으며, 각 단계마다 dial gage의 수렴된 수직 변위량을 측정하였고, 실시간으로 측정되는 광섬유 센서 자체의 변형 data를 획득하였다.

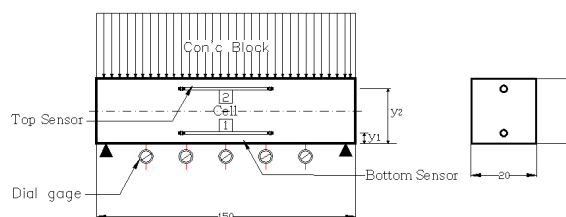


Fig 5. Diagram of the Test Equipment

획득된 센서의 변형 data를 본 연구에서 개발하고자 하는 내공변위 프로그램에 적용된 식에 입력하여 센서의 변형에 따른 평균곡률반경(r_m)과 beam의 horizontal position에 따른 수직방향 변위(y_x) 및 최대 변위(y_{max})를 도출하였다. 또한 보의 처짐(deflection)이론에 따른 다음과 같은 구조역학적인 식을 이용하여 수직변위(처짐)량을 산출하였다.

$$y_x = \frac{w}{24EI} (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) \quad (7)$$

w: Load

E: Young's modulus

I: Section modulus

x: Position in the beam

L: Length of Con'c beam

위에 기술되어진 바와 같이 광섬유 센서를 통해 얻어진 변형 data를 프로그램 적용식에 입력하여 도출되는 변위 data, dial gage를 통해 직접 얻어진 수직방향 변위 data, 그리고 보의 처짐 이론을 적용하여 획득한 수직방향 처짐 값을 비교하여 광섬유 센서의 계측 신뢰성과 프로그램 적용식의 타당성을 검증하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

하중이 단계적으로 증가함에 따라서 센서의 변형은 일정한 변형률 증분으로 생긴다는 것으로 판단되었고, 보의 응력 이론에서 Con'c beam의 상-하부에 압축-인장응력이 발생하는데, 상부에 설치된 센서에서 압축 변형, 하부에 설치된 센서에서는 인장 변형이 발생하고 압축-인장 변형량도 거의 일치하는 것으로 광섬유 센서가 보에서 발생하는 응력조건을 정확히 반영하는 것을 확인할 수 있다.

Top - Bottom Sensor		Loading Step I	Loading Step II	Loading Step III	Loading Step IV
S19(300mm) ~	dial gage	0.6(92.74)	1.077(83.29)	1.755(90.46)	2.321(89.72)
	광섬유 sensor	0.637(98.45)	1.274(98.53)	1.910(98.45)	2.519(97.37)
S8(300mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)
S13(348mm) ~	dial gage	0.611(94.44)	1.175(90.87)	1.908(98.35)	2.543(98.30)
	광섬유 sensor	0.634(97.99)	1.267(97.99)	1.900(97.94)	2.534(97.95)
S4(300mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)
S17(330mm) ~	dial gage	0.582(89.95)	1.034(79.97)	1.802(92.89)	2.402(92.85)
	광섬유 sensor	0.634(97.99)	1.268(98.07)	1.902(98.04)	2.537(98.07)
S3(400mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100%)	2.587(100)
S16(340mm) ~	dial gage	0.597(92.27)	1.164(90.02)	1.815(93.56)	2.354(90.99)
	광섬유 sensor	0.635(98.15)	1.269(98.14)	1.903(98.09)	2.537(98.07)
S6(400mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)
S12(400mm) ~	dial gage	0.604(93.35)	1.170(90.49)	1.802(92.89)	2.414(93.31)
	광섬유 sensor	0.634(97.99)	1.267(97.99)	1.900(97.94)	2.534(97.95)
S5(400mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)
S11(400mm) ~	dial gage	0.604(93.35)	1.205(93.19)	1.900(97.94)	2.450(94.70)
	광섬유 sensor	0.633(97.84)	1.267(97.95)	1.900(97.94)	2.534(97.95)
S7(400mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)
S1(1280mm) ~	dial gage	0.620(95.83)	1.123(86.85)	1.902(98.04)	2.301(88.94)
	광섬유 sensor	0.612(94.59)	1.221(94.43)	1.832(94.43)	2.577(99.61)
S2(1264mm)	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)
S4(1422mm)	dial gage	0.600(92.74)	1.277(98.76)	1.702(87.73)	2.321(89.72)
	광섬유 sensor	0.642(99.23)	1.288(99.61)	1.930(99.48)	2.577(99.61)
	beam deflection	0.647(100)	1.293(100)	1.94(100)	2.587(100)

Fig 6. Comparison of the Maximum Vertical Displacement (y_{max} = mm(%))

센서의 길이가 증가함에 따라 같은 하중조건에서 평균곡률(κ_m)은 증가하고, 평균 곡률반경(r_m)은 감소함을 알 수 있고, Loading step이 높아질수록 Con'c beam에 더 큰 휨 변형이 발생하므로 평균곡률(κ_m)은 증가하고, 평균 곡률반경(r_m)은 감소함을 알 수 있다.

수직방향 최대변위량(y_{max}) 산출방법에 따른 최대변위(y_{max})값 비교에서는 역학적인 이론식을 통해 도출된 값을 100%로 보았을 때 dial gage값은 79.97~98.76%로 편차가 크게 나타났으며, 광섬유 센서를 통한 최대변위 값은 94.43~99.61%의 편차를 보여 균일한 계측 신뢰도를 보였다.

센서 길이에 따른 계측 신뢰도를 볼 때 최대변위량(y_{max})은 광섬유 센서의 길이에 거의 무관하게 높은 신뢰도를 보였지만 위에 도시된 graph에서 볼 수 있듯이 센서의 길이가 증가함에 따라 beam의 전반적인 계측값 추정의 신뢰도가 높아진다는 것을 알 수 있고, 시험을 통해서 센서의 길이가 약 50cm(Con'c beam 길이의 1/3) 이상일 경우 전체적인 계측값을 신뢰할 수 있다고 판단된다. 즉, 센서 길이의 3배정도가 계측 신뢰범위로 판단된다.

4. 광섬유 센서를 이용한 터널의 내공 및 지중변위 자동계측 프로그램

4.1 Visual C#을 활용한 터널 내공변위 자동계측 프로그램

본 연구에서 개발한 터널 내공변위 자동계측 프로그램은 센서의 계측 data를 Input value로 하여, 터널 굴착으로 인한 응력조건 변화에 따른 센서의 평균 곡률(κ_m)과 평균 곡률반경(r_m)을 결정하고 터널 내에 접선 방향으로 설치된 광섬유 센서의 horizontal position에 따른 변위 값을 도출한 후 터널의 곡률반경(r_m)과 최대변위량(y_{max})을 이용하여 터널의 개략적인 변형형상(Deformed Shape)을 추정하는 것이 프로그램의 전체적인 구조적 흐름이다. 또한 실시간의 시공 중 계측뿐만 아니라 터널 공용 중 유지관리 계측도 수행되므로 Data Base 개념을 프로그램에 추가하여 터널 공용기간 동안의 Time- (y_{max}) 누적 history graph를 도시할 수 있도록 하였다. 개발한 내공변위 자동계측 프로그램의 scheme를 살펴보면 다음과 같다.

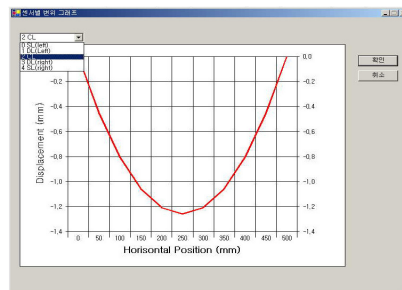


Fig 7. Sensor Displacement Graph At the Measuring Position

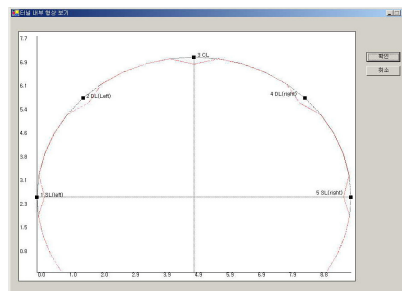


Fig 8. Tunnel Deformed Shape Graph

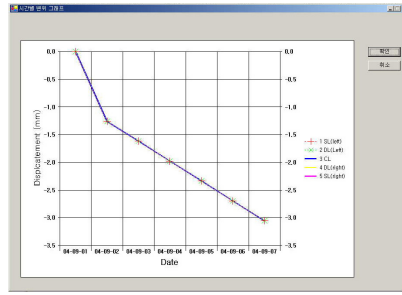


Fig 9. Convergence Accumulated History Graph

4.2 Visual C++을 활용한 터널 지중변위 프로그램

광섬유 센서를 이용하여 터널굴착이나 발파에 의해 발생할 수 있는 지중변위를 계측하고 실제 계측치를 Input value로 하여 터널주변암반의 이완영역을 판단하는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램의 궁극적인 개발 목적은 지중변위 경시변화 graph와 광섬유 센서의 심도별 변위를 graph화하면 아래그림과 같은 심도의 불연속선이 나타나며 이로써 각 지점의 지중변위 범위를 알 수 있으며 이에 따라 이완영역을 판단할 수 있으며 Rock Bolt의 적정 길이를 파악할 수 있도록 하는 것이다.

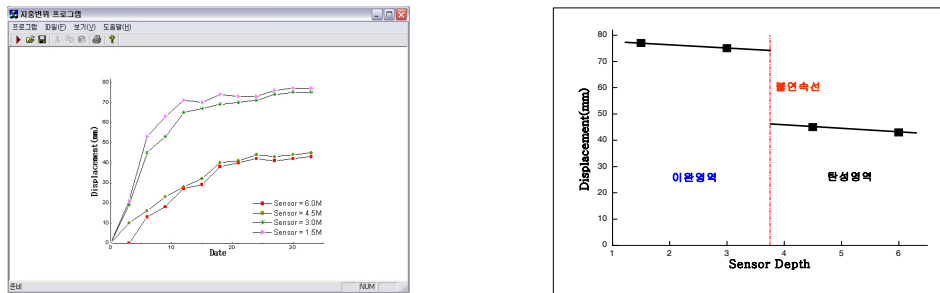


Fig 10. Underground Displacement Accumulated History Graph

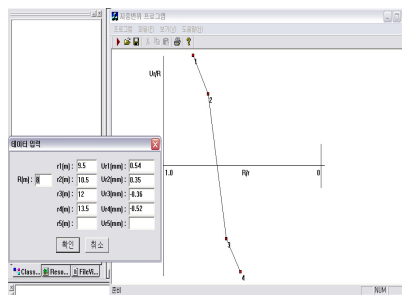


Fig 11. Loosening Zone Evaluation Graph

5. 결론

본 연구에서는 터널 내공 및 지중변위 자동 계측프로그램을 개발하기 위하여 광섬유 센서를 이용한 터널 모니터링 개념의 검토와 센서의 신뢰성 시험을 실시하여 계측 적용성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 광섬유 센서를 이용한 터널의 내공변위 및 지중변위 계측단면은 Spring line과 Center line의 교점을 기준으로 하여 0°(SL left, right), 45°(DL left, right), 90°(CL)로 설정하였으며 내공변위 측정 센서

는 이층구조로 터널벽면에 접선방향으로 설치되며, 지중 변위 측정 센서는 터널벽면의 반경방향에 multi-point set-up 방식으로 센서를 직렬로 연결한 뒤 앵커에 고정하여 설치된다.

2) 센서의 신뢰성 시험 결과 광섬유 센서가 하중과 같은 외력의 작용에 의해 발생하는 구조물의 내부의 응력상태 또한 정확히 평가할 수 있다고 판단된다.

3) 수직방향 최대처짐량 산출방법에 따른 최대변위량(y_{max}) 비교에서는 역학적인 이론식을 통해 도출된 값을 기준값(100%)으로 보았을 때 dial gage 값은 79.97~98.76%로 편차가 크게 나타났으며, 광섬유 센서를 통해 얻어진 최대변위량(y_{max})은 94.43~99.61%의 편차를 보여 균일한 계측 신뢰도를 가지고 있다고 판단된다.

4) 센서 길이에 따른 계측 신뢰도를 볼 때 센서의 길이가 증가함에 따라 beam의 전반적인 수직변위량 추정의 신뢰도가 높아진다는 것을 알 수 있고, 센서의 길이가 약 50cm(Con'c beam 길이의 1/3) 이상 일 경우 beam의 수평방향 위치에 따른 변위량(y_x) 추정의 신뢰성을 가진다고 판단된다. 즉, 광섬유 센서로 평가할 수 있는 계측 신뢰범위가 센서 길이의 약 3배정도로 판단된다.

5) 내공변위 및 지중변위 프로그램은 광섬유 센서의 변형량을 자동으로 detecting 할 수 있도록 하였으며 계측 데이터의 활용성을 높이기 위해 계측 데이터를 이용하여 터널의 변형형상(deformed shape) 과 터널 굴착으로 인한 암반 내 이완영역 범위의 판단이 가능하도록 하였다.

6. 참고 문헌

1. 김상식, 『구조역학』, 보성각, pp. 212-278, 2001
2. 李熙穆, 『應用力學』, 구미서관, pp.504-507, 1998
3. 尹志善, 『NATM 工法の 調査・設計・施工』, 歐美書館, pp.9-16, 1991
4. 黃忠烈, 『構造解析學』, 普成文化社, pp. 239-249, 1989
5. Daniele INAUDI, Nicoletta CASANOVA, 『SOFO: Tunnel Monitoring with Fiber Optic Sensors』 Reducing Risk in Tunnel Design and Construction. 7-8. 1998, Basel Switzerland
6. Daniele INAUDI, Nicoletta CASANOVA, P Kronenberg, 『Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors』, Smart Mater. Struct 7. 1998. 199-208 Printed in the UK
7. Daniele Inaudi, Casanova, Pascal Kronenberg, Silvio Marazzi, Samuel Vurpillot, 『Embedded and surface mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring』, SPIE Conference on Smart Structures and Materials, 5-6. 03.1997. San Diego, USA
8. Samuel Vurpillot, Daniele Inaudi, Antonio Scano, 『Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurements of a bridge』, SPIE Smart Structures and Materials, 1996, San Diego, USA