

터널의 내공변위 자동화 계측기술 분석

정소결^{1)*}

Convergence Monitoring Technologies for Traffic Tunnels - State of the Art

So-Keul Chung

Abstract Measurement of convergence was/is carried out manually throughout the world for tunnels under construction. However, manual method has certain limitations in terms of applicability for the tunnels in operation. This paper describes state of the art of convergence monitoring systems which are available for measuring displacement of existing tunnels. These technologies are analyzed as follows:

1. The Sofo system using the fiber optic sensors has been applied to the stress measurement of the tunnel lining. It has not yet been used for the monitoring of tunnel convergence because of its cost and reliability.

2. A TPMS(Tunnel Profile Monitoring System) using tilt sensors and displacement sensors is used for the convergence monitoring of highway tunnels, subway tunnels and underground ducts.

3. A BCS(Bassett Convergence System) using a pair of tilt sensors can be used for the convergence monitoring of tunnels, however the accuracy of the measurement has to be improved because it uses AC input voltage during data acquisition. The system has to be validated before it can be applied to the tunnels in operation.

Convergence monitoring systems using TPMS and/or BCS are recommended to be evaluated and improved by a series of tests in tunnels under construction in order to be applied to the main measuring section and the tunnels in operation.

KeyWords convergence monitoring system, tilt sensors, displacement sensor, tunnel in operation

초 록 지금까지 국내에서 적용된 내공변위 계측은 수동식 시스템 혹은 계측 정밀도가 떨어지는 방법들로서 운영중인 터널에 적용하는데 한계가 있는 것으로 평가되어 최근 국내에 도입되고 있는 자동화 내공변위 계측 시스템들을 비교 분석하고 앞으로 운영중인 지하공간과 터널에의 적용성에 대해 검토하였다.

1. 광섬유 센서를 이용한 Sofo는 국내에서 터널 라이닝의 응력 측정에는 활용된 바가 있으나 아직 터널의 내공변위와 지중 변위의 측정에 적용된 실적이 없으며 앞으로 계측 자료의 신뢰도 및 시스템의 경제성 등에 대한 충분한 검토가 요구되고 있다.

2. 각도센서와 변위센서를 이용한 TPMS는 현재 국내에서 운영중인 터널인 천안-논산간 고속도로 차령터널과 지하철 터널 및 공동구 등에서 적용중이다.

3. BCS는 두 개의 각도 센서를 한 조로 이용하는 점이 TPMS와 다른 점으로서 거의 TPMS와 같은 특성을 지니고 있다. 앞으로 센서의 정밀도가 개선될 필요가 있으며 현장에서 아주 정밀한 교류 입력 전위차를 취득하는 데는 어려움도 있어 자동화 계측 가능여부가 검증되어야 할 것으로 본다.

앞으로 터널 시공 현장에 자동계측 시스템의 검증을 위하여 TPMS 및 BCS 등을 설치 및 운영하고 기술적인 문제를 보완함으로써 이를 시공중인 주계측 단면과 운영중인 터널에 적용하여야 할 것으로 본다.

핵심어 내공변위 모니터링시스템, 각도센서, 변위센서, 운영중 터널

1. 서 론

터널을 시공할 때에는 계측을 통하여 지보력을 검증하고 추가지보에 의한 변위 및 응력을 제어하여야 하

며, 특히 NATM 공법을 적용할 경우에는 계측이 필수적이다. 즉 장단기적인 터널의 안정성 평가가 계측의 주목적이며 계측을 통해 과지보가 시공되었다고 판단이 될 경우에는 이후의 시공과정에 동일한 암반조건이 나타나면 지보력을 낮추어 조정하여야 한다.

일반적인 터널 계측은 지질 및 암반이 역학적으로 취약한 지점에 중점을 두어 계측하는 주계측 단면과 주계측 단면 사이에 적절한 간격으로 계측단면을 설정

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원
*교신저자(Corresponding Author): skchung@kigam.re.kr
접수일: 2005년 1월 10일
심사 완료일: 2005년 2월 16일

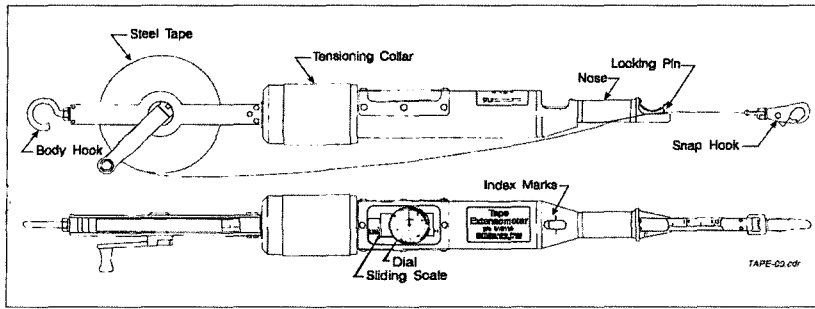


Fig. 1. Tape extensometer(Durham Geo)

하는 보조계측 단면으로 나뉜다. 주계측 단면에 이용되는 계측 장비로는 지중 변위계, 내공 변위계, 반경방향 및 접선방향의 응력계, 그리고 천반 및 바닥 측량 등이 있으며, 보조계측 단면에 활용되는 계측 장비로는 주로 내공 변위계와 천반 및 바닥 측량 등이 있다.

또한 계측은 초기에 즉, 터널막장이 계측단면으로부터 터널 직경의 두 배 범위까지 굴착되었을 때는 매일 혹은 격일 간격으로 계측하는 것이 바람직하며, 그 이

후 변형률과 응력변화 속도가 안정화되면 주1 회로부터 월1 회까지의 간격으로 계측 주기를 조정한다.

계측을 통하여 터널과 지하공간의 안정성을 평가하기 위한 기준으로는 일반적인 경우 변위와 변위속도가 이용된다. 예를 들어 계측된 변위가 탄성해석으로부터 계산된 변위 보다 크게 나타났을 때, 소성변형을 일으켜 절리면 등을 따라 국부적인 파괴가 일어날 가능성이 있으며, 이 때 계측된 변위의 크기가 탄성해석으로부터 계산된 변위 보다 5-10배 이상 크게 되면 터널의 파괴를 방지하기 위해 터널의 지보를 재산정하여야 한다. Bieniawski(1984)에 의하면 터널이 불안정성을 보일 때 변위의 크기는 일반적으로 12 mm로부터 75 mm 까지의 범위로 관측되었다. 또한 계측된 변위속도가 0.001 mm/일 이내일 경우에는 터널이 안정된 상태로 볼 수 있고, 변위속도가 0.05 mm/일 일 경우에는 위험한 수준으로 평가되며 만일 변위속도가 1.0 mm/일 이상일 경우에는 추가 지보를 반드시 시공해야 한다.

터널 시공 현장의 계측 관리자와 시공 감리자는 계측을 통하여 터널 시공의 품질관리를 할 수 있으며, 이 때 터널의 설계과정에서 추정된 지반의 물성과 거동을 확인할 수 있고, 추가 보강에 대한 필요성을 결정하고 설계를 위한 근거 자료를 제공할 수 있다. 또한 1차 보강시에 적용된 안전율의 판정과 최종 보강 또는 라이닝의 두께를 결정하는 데 계측자료를 활용할 수 있으며, 공사 품질 최종 책임자는 시공에 대한 종합적인 평가를 하는데 활용할 수도 있다.

본 연구에서는 이러한 계측 관리에 적합할 것으로 평가되며, 최근 외국에서 개발되어 국내에 도입되고 있는 자동화 내공변위 계측 시스템을 비교 분석하고 앞으로 운영 중인 지하공간과 터널에의 적용성에 대해 검토하였다.

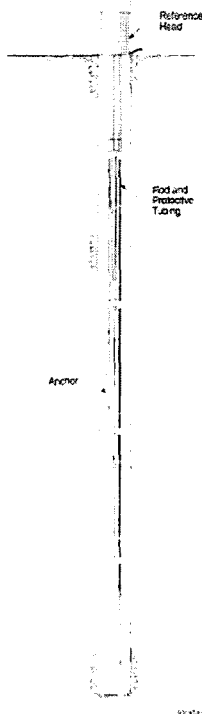


Fig. 2. Rod extensometer(Durham Geo)

2. 터널의 계측 내용 및 방법

터널의 거동은 지질조사와 암반분류 등을 통해 예측할 수 있으며 관찰된 지반조건을 비롯하여 설계시 추정된 조건과 계측 자료를 비교 분석함으로써 지반거동과 터널의 안정성을 평가할 수 있다. 그리고 터널의 계측에 여러 가지 측정기법을 활용할 수 있는데, 먼저 변위를 계측 대상으로 하는 내공변위 계측과, 지중변위 계측 및 천단침하 등을 들 수 있으며, 힘의 크기 혹은 응력을 측정하는 지반내 응력변화 측정, 록볼트 축력 측정, 숏크리트 응력 측정 등이 있다.

계측기술에는 측정하고자 하는 물리량, 측정되는 물리량 및 실제 계측기로 측정하는 물리량 등이 모두 같은 직접계측 방법과 이들이 서로 다른 간접계측 방법이 있다. 예를 들어 현장에서 계측하고자 하는 물리량은 지보하중 측, 힘의 단위 또는 응력, 그리고 암반의 변위 및 변형률 등이 있고, 이들 값의 결정을 위해 측정되는 물리량으로는 압력, 변형률, 주기 또는 주파수, 그리고 변위 등이 있다. 실제로 계측기로 측정되는 물리량으로는 예를 들어 변위를 측정하는데 전압 또는 전류, 광도 등이 이용되고, 힘과 응력을 측정하는데 유압 또는 유량 등이 이용된다.

2.1 터널의 변위 측정

터널을 굴착하게 되면 터널 굴착 이전에 주변 암반내에 작용하던 응력이 재배치 되고 이로 인해 터널 내부로 암반의 변위가 발생하며 이 때의 변위량을 측정하는 물리량이 내공변위와 지중변위이다.

내공변위는 터널벽 면상 두 점 사이의 상대변위를 말하는데, 내공변위를 측정하는 계측기의 종류로는 내공변위계(tape extenso-meter)가 지금까지 주로 이용되어 왔으며 그 측정 정밀도는 0.01-0.05 mm의 범위가 요구되고 있다.

지중변위는 터널 벽면으로부터 암반 내부에서 발생하는 변위를 말하며, 지중변위를 측정하는 계측기의 종류에는 터널 측벽으로부터 암반 내부로 굴착된 시추공 내에 하나의 고정점을 가지는 일점 지중변위계(single point borehole extensometer)와 여러 개의 고정점을 가지는 다점지중변위계(Multi-Point Borehole extensometer, MPBX)가 있다.

여기에 변위를 계측하는 센서로는 포텐시오메터(potentiometer)형, 진동현개이지(vibrating wire gauge)형, 다이얼개이지 형 등이 있으며, 지중변위계의 측정 정밀도는 0.01-0.02 mm의 범위를 유지해야 한다.

포텐시오메터형의 지중변위계와 진동현개이지형의

지중변위계는 계측장비에서 각각 전위와 주파수 센서를 이용하여 변형률을 측정하므로 자동 변위계측이 가능하였지만 내공변위계는 직접 변위를 계측하기 때문에 자동계측이 불가능하였으며 최근까지 인력에 의한 측정에 의존하여 왔다. 특히 계측점인 앵커와 테이프의 연결상태와 테이프의 인장력 유지, 측정장비의 무게에 의한 처짐, 벽면에 근접한 상태에서 다이얼개이지의 판독자세 등에 의한 측정 오차의 발생이 필연적이었다. 최근에 와서는 레이저 또는 광파를 이용한 내공변위 계측시스템이 현장에 적용되고 있으나 이들의 정밀도가 1 mm 이상이 되어 적정 계측 정밀도 수준에 미치지 못하고 있는 실정이다.

2.2 운영중인 터널에서의 계측

터널을 시공하기 전부터 시공중에 여러 가지 기술적인 사항을 모두 고려하여 터널을 완공하였더라도 운영중에 일어나는 지반 조건의 변화가 터널의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 점을 고려하여 운영중인 터널의 모니터링이 필요하다. 운영중인 터널에 대해서는 터널의 영구 계측 단면에 이용되는 계측 방법에서와 같이 터널 구조물의 변위를 계측하는 방법이 바람직할 것으로 판단된다. 그러나 지금까지 국내에서 적용된 내공변위 계측은 수동식 시스템 혹은 계측 정밀도가 떨어지는 방법들로서 운영중인 터널에 적용하는데 한계가 있는 것으로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 최근 외국에서 개발되어 국내에 도입되고 있는 자동화 내공변위 계측 시스템을 비교 분석하고 앞으로 운영중인 지하공간과 터널에의 적용성에 대해 검토하였다.

3. 터널 내공변위 자동계측 시스템 분석

3.1 Sofo

Sofa는 광섬유 센서를 이용한 계측 시스템으로서 원래 프랑스어로 명명된 'Surveillance d'Ouvrage par Fibres Optiques' 즉, 'Structural Monitoring Using Optical Fibers'의 약어로 스위스 IMAC-EPFL에서 개발되어 교량, 댐 그리고 여러 종류의 지반 구조물의 모니터링에 적용되고 있다. 국내에도 최근에 도입되어 여러 구조물의 계측에 활용되고 있으나 아직까지 터널의 변위 계측에는 그 활용이 저조하여 충분한 검증이 되지 않은 것으로 보고되고 있다. Sofa 시스템의 구성은 크게 자료 측정기(reading unit), 광섬유 센서(fibre optic sensor) 및 자료 분석 프로그램 등으로 구성되어 있다 (Inaudi et al., 1998).

센서는 두 종류의 광섬유로 구성되어 있는데 그 중

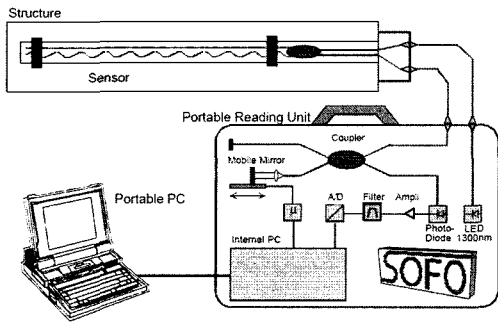


Fig. 3. Setup of the Sofo system

하나는 구조물의 변위를 직접계측하는 계측 광섬유 (measurement fiber)로서 구조물에 부착되어 구조물과 함께 변형 거동을 보이고 다른 하나는 기준 광섬유 (reference fiber)로서 구조물에 부착하지 않고 계측 광섬유 가까이에서 두어 구조물의 거동에는 영향을 받지 않는다. 따라서 구조물에 변형이 발생되면 이 두 광섬유 센서의 거동에 차이가 발생하며 결국 두 센서의 길이의 차이로 나타나서 이 길이 차이를 계측하여 구조물의 변위를 계측하는 것이 광섬유 센서의 원리이다.

본 Sofo 시스템은 국외에서는 스위스의 Champ Baly 터널 등의 계측에 활용되었으며, 터널의 내공변위와 지중변위 계측에 활용된 것으로 보고되었다(Glisic et al., 2000).

Sofo는 계측 중 진동에 의한 영향과 전자파에 대한 영향을 받지 않으며, 한 개의 센서로 변형률, 처짐, 곡률 등 여러 형태의 물리량을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 센서가 가늘기 때문에 센서의 설치가 용이하다. 그러나 Sofo를 이용하여 내공변위를 측정하기 위해서는 측정 자료의 품질에 비해 상대적으로 많은 비용이 소요되며, 터널 전단면의 내부 혹은 외부 중 어느 한 쪽에만 설치할 경우에는 실변위량의 산정이 어려운 점이 있다.

국내에서는 터널 라이닝의 응력 측정에 활용된 바가 있으나 아직 터널의 내공변위와 지중변위의 측정에 적용된 바는 없으며 앞으로 계측 자료의 신뢰도 및 시스템의 경제성 등에 대한 충분한 검토가 요구되고 있다.

3.2 TPMS

TPMS(Tunnel Profile Monitoring System, GTC Eng., 2003)는 국내에 적용되고 있는 터널 내공 변위의 자동계측 시스템으로서 여러 조의 각도 센서(tilt sensor)와 길이센서(displacement sensor, rod)를 이용하여 터널의 내공변위를 계측하는 시스템이다.

각도센서의 원리는 유리관이나 세라믹 관내에 기포를

포함하는 액체(도전체)에 닿은 전극으로부터 센서의 기울기에 따라 기포의 위치가 달라져서 일어나는 전류의 변화량을 측정하는 것으로서, 암반 내 변위가 발생하면 각도센서의 기울기가 변화됨으로써 전류의 변화가 발생된다. 각도센서와 변위센서들로부터 계측된 자료를 데이터로거(data logger)에 전달하며, 전달된 자료는 자료취득 프로그램으로 처리됨으로써 터널 프로파일을 실시간으로 측정할 수 있다. 연속적인 계측 자료는 컴퓨터에 데이터베이스 형태로 저장되어 터널 단면 변화를 장기간 동안 실시간으로 분석할 수 있으며, 사용자가 언제라도 네트워크 접근을 통해 서버로부터 계측 자료를 얻을 수 있어 터널의 안전 감시에 활용될 수 있다.

Sofo에 비해 상대적으로 저렴하며 센서의 유지 보수

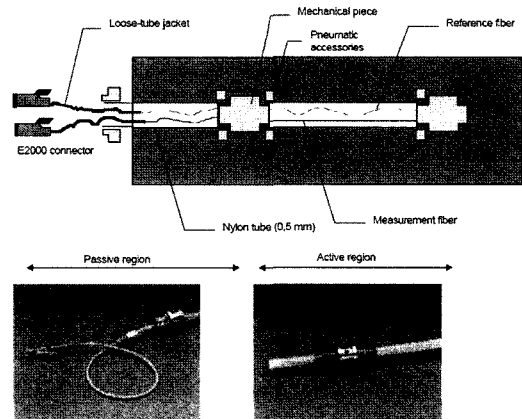
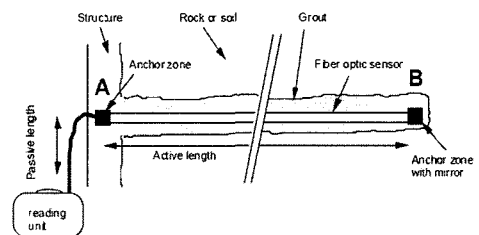


Fig. 4. Sofo fiber optic deformation sensor



(a) single point borehole extensometer,

(b) multi-point borehole extensometer

Fig. 5. Schematic representation of Sofo borehole extensometer



Fig. 6. Tunnel profile monitoring system

가 용이할 뿐만 아니라 국내에 적용된 사례로부터 기술 및 품질의 검증이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 센서 자체가 진동에 대한 영향을 받을 수 있어, 설치 인력의 전문성이 요구된다. 따라서 최근에 개발되어 적용중인 진동 영향을 고려한 센서의 성능에 대한 검증이 요구되며 전자파의 차폐 기능과 접지가 필요하다.

한편 각도센서를 전도성이 있는 액체에 의한 방법 대신 중력에 의한 방법을 사용하는 계측 시스템(共放鳴 등, 1999)도 있는데 계측의 신뢰성이 국내에서는 아직 검증이 되지 않고 있다.

3.3 BCS

TPMS와 유사한 내공변위 시스템으로는 Bassett system(Bassett Convergence System, BCS, Slope Indicator, 1999)이 있다. BCS는 두 개의 각도센서를 이용하여 터널의 내공변위를 계측하는 방법이다. BCS는 두 개의 각도 센서를 한 조로 이용하는 점이 TPMS와 다른 점으로서 거의 TPMS와 같은 특성을 지니고 있다. 앞으로 내공변위 계측 오차 범위를 만족시킬 수 있도록 센서의 정밀도가 향상되어야 할 것으로 판단되며 상대적인 도입 가격이 비싼 관계로 국내에 적용실적이 부족한

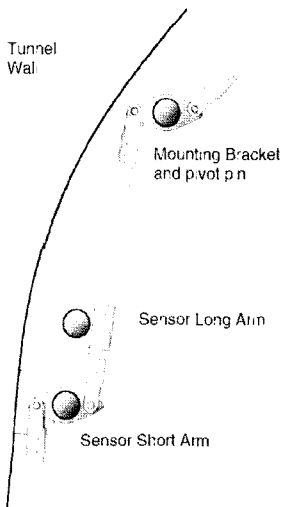


Fig. 7. Bassett Convergence System

실정이다. 또한 교류 입력 전위차(AC input volt)에 대한 교류 출력 전위차(AC output volt)를 나타내는 센서를 사용하므로 현장에서 아주 정밀한 교류 입력전위차를 취득하는 데는 어려움이 있어 자동화 계측 가능여부가 충분히 검증되어야 할 것으로 본다.

4. 터널 내공변위 자동계측 기술과 그 활용성

현재 국내 기술로 개발되어 현장에 적용중인 TPMS는 대부분 운영중인 터널을 대상으로 하고 있으며, 천안-논산간 고속도로 차령터널과 지하철 터널 및 공동구 등이 그 예이다. 고속도로 터널의 경우는 고속도로의 운영중에 발생하는 터널의 변위를 모니터링하는 것이 계측의 목적이며, 지하철과 공동구의 경우는 이들에 인접하여 토목시공을 할 때 예상되는 터널의 변위를 계측하여 터널의 안정성에 미치는 영향을 평가하는 자료로 이용되고 있다. 한편 BCS는 철도터널에 적용되기 시작하였으며 앞으로 적용성의 검증이 필요할 것으로 판단된다.

지하철 터널의 경우 TPMS가 적용되고 있는 사례는 문배동 00타운 신축공사와 관련하여 지하철 6호선 구간에 3개의 단면이 설치되어 있고, 청계천 복원공사와 관련하여 인접 지하철 터널에 시공된 예는 4개소로서 지하철 3호선 을지로3가역과 종로3가역 사이에 4개 단면 그리고 5호선 종로3가역과 을지로4가역 사이에 4개 단면이 설치되어 있으며, 지하철 4호선 동대문역과 동대문 운동장역 사이에 4개 단면 그리고 6호선 동묘앞역과 신당역 사이의 4개 단면 등으로 총 19개 단면에 적용되고 있다. 계측된 자료는 현장에서 맥스 데이터 로거(Mux data logger) 등으로 자동 계측되어 모뎀을 통하여 전송되며 원격지 사무실에서 모뎀이 연결된 컴퓨터로 자료처리를 할 수 있게 운영되고 있는데, 앞으로는 Web 상에서 자료의 열람이 가능하도록 개선할 필요가 있는 것으로 분석된다. Fig. 9는 TPMS 계측 후 초기치와 약 1개월 후의 내공변위 변화를 그래프로 보여 주고 있다.

또한 서울 지하철 9호선 건설공사 중 지하철 터널 근처에 있는 통신구에 가까운 곳에서 터널과 구조물을 건설을 위해 굴착할 때 굴착으로 인해 통신구에 변위의

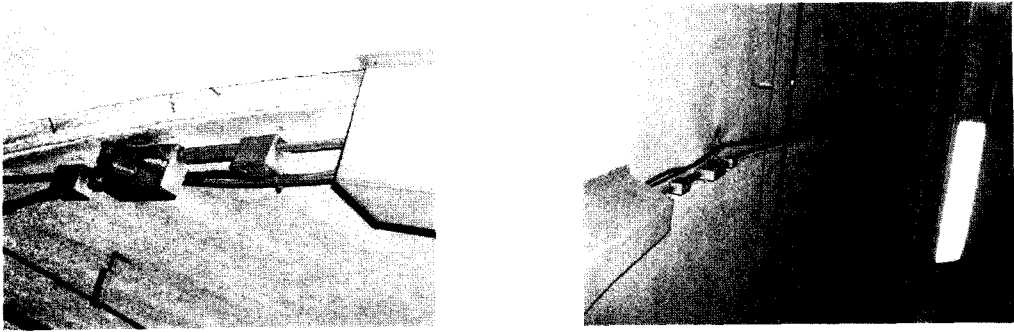


Fig. 8. Tilt sensor and displacement sensor of TPMS in a highway tunnel

발생이 예상되어 이를 계측하기 위하여 총 5개 단면의 TPMS가 설치되어 운영중이다.

앞으로 터널 시공 현장에 자동계측 시스템의 검증을 위하여 TPMS등을 설치 및 운영하고 그 결과를 인접하여 설치된 기존의 재래식 내공변위계에 의한 계측결과와 비교 분석함으로써 터널 내공변위 자동계측 시스템을 운영하는 중에 발생하는 기술적인 문제를 보완하고 이를 시공중인 주계측 단면과 운영중인 터널에 적용하여야 할 것으로 본다.

5. 결 론

최근 국내에 도입되고 있는 자동화 내공변위 계측 시스템을 비교 분석하고 앞으로 운영중인 지하공간과 터널에의 적용성에 대한 검토 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 지금까지 국내에서 적용된 내공변위 계측은 수동

식 시스템 혹은 계측 정밀도가 떨어지는 방법들로서 운영중인 터널에 적용하는데 한계가 있는 것으로 평가된다.

- 2) 광섬유 센서를 이용한 Sofo는 계측 중 진동에 의한 영향과 전자파에 대한 영향을 받지 않으며, 한 개의 센서로 변형률, 처짐, 곡률 등 여러 형태의 물리량을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 센서가 가늘기 때문에 센서의 설치가 용이하다. 그러나 Sofo를 이용하여 내공변위를 측정하기 위해서는 측정 자료의 품질에 비해 상대적으로 많은 비용이 소요되며, 터널 내공 전단면의 내부 혹은 외부 중 어느 한 쪽에만 설치할 경우에는 실변위량의 산정이 어려운 점이 있다. 또한 국내에서 터널 라이닝의 응력 측정에는 활용된 바가 있으나 아직 터널의 내공변위와 지중 변위의 측정에 적용된 실적이 없으며 앞으로 계측 자료의 신뢰도 및 시스템의 경제성 등에 대한 충분한 검토가 요구되고 있다.
- 3) 각도센서와 변위센서를 이용한 TPMS는 Sofo에 비해 상대적으로 저렴하며 센서의 유지 보수가 용이할 뿐만 아니라 국내에 적용된 사례로부터 기술 및 품질의 검증이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 센서 자체가 진동에 대한 영향을 받을 수 있고 전자파 및 cable의 노이즈에 대한 영향을 받을 수도 있다. 또한 설치에 많은 시간이 소요되며 설치 인력의 전문성이 요구된다. 따라서 최근에 개발되어 적용중인 진동 영향을 고려한 센서의 성능에 대한 검증이 요구되며 전자파의 차폐 기능과 접지가 필요하다.
- 4) 한편 각도센서를 전도성이 있는 액체에 의한 방법 대신 중력에 의한 방법을 사용하는 계측 시스템은 계측의 신뢰성이 국내에서는 아직 검증이 되지 않고 있다.
- 5) BCS는 두 개의 각도 센서를 한 조로 이용하는 점

전단면 터널 내공변위계
[00 구간 단면]

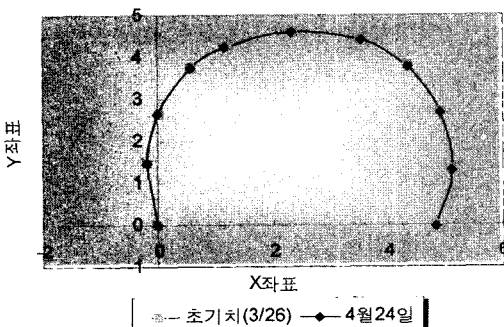


Fig. 9. Measured data by TPMS

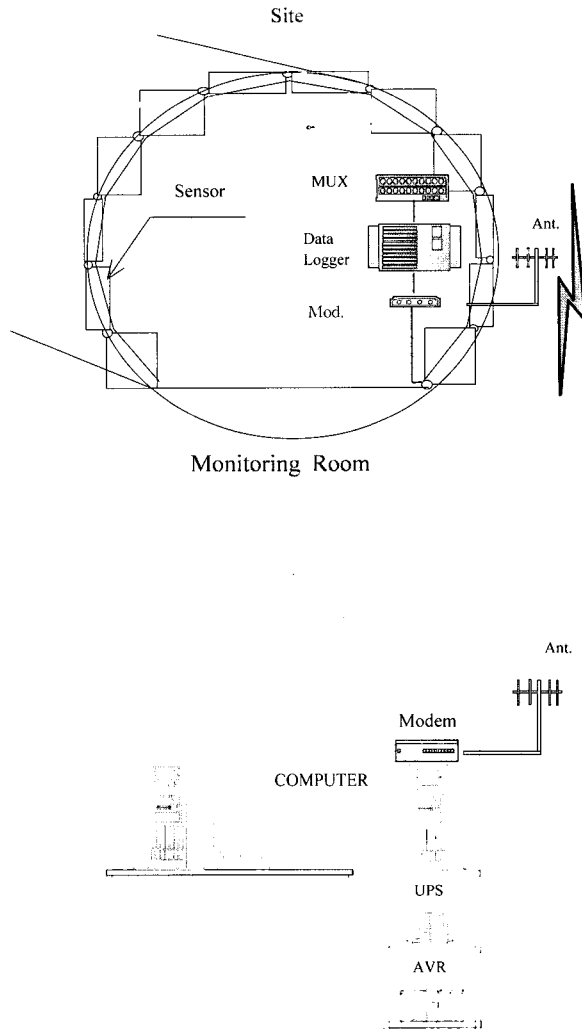


Fig. 10. Tunnel Profile Monitoring System

이 TPMS와 다른 점으로서 거의 TPMS와 같은 특성을 지니고 있다. 앞으로 내공변위 계측 오차 범위를 만족시킬 수 있도록 센서의 정밀도가 향상되어야 할 것으로 판단되며 상대적인 도입 가격이 비싼 관계로 국내 적용실적이 부족한 실정이다. 또한 교류 입력전위차에 대한 교류 출력 전위차를 나타내는 센서를 사용하므로 현장에서 아주 정밀한 교류 입력 전위차를 취득하는 데는 어려움이 있어 자동화 계측 가능여부의 검증이 필요할 것으로 본다.

- 6) 현재 국내에서 운영중인 터널을 대상으로 적용되기 시작한 시스템은 TPMS 및 BCS로서, TPMS의 경우 천안-논산간 고속도로 차량터널과 지하철 터

널 및 공동구 등이며 BCS의 경우는 철도터널이 그 예이다. 고속도로 터널의 경우는 고속도로의 운영중에 발생하는 터널의 변위를 모니터링하는 것이 계측의 목적이며, 지하철과 공동구의 경우는 이들에 인접하여 토목시공을 할 때 예상되는 터널의 변위를 계측하여 터널의 안정성에 미치는 영향을 평가하는 자료로 이용되고 있다.

앞으로 터널 시공 현장에 자동계측 시스템의 검증을 위하여 TPMS 및 BCS 등을 설치 및 운영하고 그 결과를 인접하여 설치된 기존의 재래식 내공변위계에 의한 계측결과와 비교 분석함으로써 터널 내공변위 자동계측 시스템을 운영하는 중에 기술적인 문제를 보완하고

이를 시공중인 주계측 단면과 운영중인 터널에 적용하여야 할 것으로 본다.

참고문헌

1. Bieniawski Z. T., 1984, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A.Balkema/Rotterdam/Boston, 272p.
2. Inaudi D., N. Casanova, G. Steinmann, J.F. Mathier and G. Martinola, 1998, SOFO: Tunnel Monitoring with Fiber Optic Sensors, Reducing Risk in Tunnel Design and Construction, 7-8. 12, 1998, Basel Switzerland.
3. Glisic B., M. Badoux, J.P. Jaccoud and D. Inaudi, 2000, Monitoring a Subterranean Structure with the SOFO System, Tunnel Management International magazine, ITC Ltd, Vol. 2 issue 8, 22-27.
4. Slope Indicator, 1999, Bassett Convergence System 56 806099, Operation manual, 18p.
5. GTC Eng. Co. LTD, 2003, 전단면 자동화 계측 유지관리 (Tunnel Profile Monitoring System) 매뉴얼.
6. 共放鳴, 日向洋, 明石敏文, 1999, 삼차원 변위계의 개발 및 계측 방법, Hokkaido Geotechnics. No. 10. 1999. 北海道應用地學合同研究會論文集.

정 소 길

1975년 서울대학교 공과대학
 자원공학과 공학사
 1982년 Ecole des mines de Nancy
 (France) DEA
 1984년 Orleans 대학(France) 공학박사
 Tel: 042-868-3231
 E-mail: skchung@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
 책임연구원

