

단보

### 터널 시공 중 막장 선행변위 계측기법

서용석<sup>1\*</sup> · 임성빈<sup>1</sup> · 박시현<sup>2</sup> · 안명운<sup>3</sup> · 우상백<sup>4</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 지구환경과학과·기초과학연구소, <sup>2</sup>한국시설안전기술공단 지하시설설  
<sup>3</sup>(주)아주엔지니어링, <sup>4</sup>대원토질(주)

### Technique for Measuring Displacement ahead of Tunnel Face

Yong-Seok Seo<sup>1\*</sup>, Sung-Bin Yim<sup>1</sup>, Si-Hyun Park<sup>2</sup>, Myung-Woon Ahn<sup>3</sup>, and Sang-Baik Woo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth & Environmental Sci. & Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University

<sup>2</sup>Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Underground Facility Dept.

<sup>3</sup>Ahjuo Engineering Co., Ltd., <sup>4</sup>Daewon Soil Co., Ltd.

#### 서 론

일반적으로 현장에서 행해지고 있는 A계측은 막장이 굴착된 후 환기 및 버럭 처리에 필요한 일정한 시간과 막장에서의 거리를 두고 측정을 시작하게 된다. 그러나 터널굴착에 의해서 각 막장 이전에서도 변위가 발생하는데 이러한 변위 등을 선행변위라 하며, 굴착이 터널에 미치는 영향을 평가함에 있어서 선행변위량을 측정함으로써 지반의 쏠변위를 측정할 수 있고, 또한 막장전방의 파쇄대와 같은 지질 이상대를 파악 할 수 있다. 그러나 현실적으로 굴착 전 지반에서 발생하는 변위의 양과 막장 형성 후 계측개시까지 발생하는 변위의 양을 정확히 측정하는 것은 매우 힘들다.

막장 선행변위의 측정을 위해 일반적으로 사용되는 방법에는 수치해석을 이용한 방법, 모형실험을 통한 방법 그리고 실제 계측을 통한 방법 등이 있다. 앞의 두 가지 방법은 간접적인 방법으로서 실제 계측에 비해 비용과 시간적인 측면에서는 다소 유리하지만, 일반적으로 선행구조물인 터널의 노선을 따른 지반의 다양한 지질학적 특성을 충분히 고려하기 어려우며, 전망 예측이 어려운 터널의 특성상 정확한 선행변위를 산정하기에는 한계가 있다. 직접적인 방법으로는 현장에서 막장전방에 계측기를 설치하여 굴착과 동시에 지반변위 또는 변형을 계측하는 방법이 있으며, 해외의 경우 많은 시공사례

를 가지고 있는 반면, 국내에서는 아직까지 활발히 이용되지는 못하고 있는 실정이다. 현장계측을 통한 막장선행변위 측정은 Umbrella Arch 공법 적용현장에서 터널과 주변 지반의 거동 특성을 분석하여 강관 및 그라우트재의 보강효과를 확인하는 연구와 병행하여 이루어져 왔다(Pelizza *et al.*, 1994; Harazaki *et al.*, 1998; Shirakawa *et al.*, 1999). 국내에서도 막장 선행변위를 측정하는 연구는 산발적으로 실시된 바 있다(김호영과 박의섭, 1993; 배규진 등, 1997; 서용석 등, 2002). 이들이 사용한 계측기는 대부분 외국에서 수입한 고가의 계측기를 사용하고 있으며, 그 시험방법 또한 현장에서 실시하기에는 어려운 점이 다수 확인되었다.

따라서 본 고에서는 터널에서 지반특성을 고려한 쏠변위를 측정하기 위하여 사용되는 막장 선행변위 측정용 계측기와 계측방법에 대해서 기술하였다. 특히 막장 선행변위 측정용 계측기 부문에서 가장 앞선 기술을 보유한 국가인 일본에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 계측기에 대하여 소개하고 이러한 기술의 국내 적용성 및 문제점에 대하여 논하였다.

#### 선행변위 측정 기법

##### 파이프 변형틀을 이용한 방법

막장 선행보강공법은 굴착에 앞서 막장전방에 강관을

\*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

타설함으로써 천단침하 및 선형변위 등의 억제효과가 있는 것으로 알려져 있으나, 이러한 보강효과와 확인은 거의 이루어 지지 않고 있다. 그 원인으로는 강관에 변형을 계측할 수 있는 센서를 직접 설치하는 것이 어렵기 때문이다. 따라서 강관내부에 변형률계를 붙인 알루미늄제 파이프를 설치하고 파이프의 변형률을 산출하여 강관의 변형률을 간접적으로 측정하는 방법이 사용된다 (Figs. 1, 2).

측정된 변형률계의 환산 방법 및 기본 조건은 다음과 같다.

① 알루미늄제 파이프의 상·하부면에 2매의 게이지를 부착하고 축 변형률을 회로적으로 삭제함으로써 파이프의 휨만을 출력하게 된다. 파이프의 변형률은 다음 식으로 계산한다.

$$\epsilon_a = (\epsilon_{a1} - \epsilon_{a2})/2$$

여기서,  $\epsilon_a$ 는 계측관의 휨변형률,  $\epsilon_{a1}$ 은 계측관 상부의 휨변형률,  $\epsilon_{a2}$ 는 계측관 하부의 휨변형률이다.

② 측정용 파이프의 변형률로부터 강관의 휨 변형률을 구하는 방법은 사전에 실시된 실내재하시험 결과에 기초하여 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_a \times A$$

여기서,  $\epsilon_{sp}$ 는 강관의 변형률, A는 상수이다. 예를 들어 A는 강관일 경우 1.45가 적용된다.

이러한 방법이 성립되기 위해서는 다음과 같은 가정

이 필요하다.

- 강관의 종단부에서 측정된 침하량과 선단부에서의 휨각이 0도이어야 한다.
- 강관인 외관과 측정파이프인 내관에 동일한 변형률이 발생해야 한다.
- 강재의 탄성범위 내에서 발생하는 변형률이어야 한다.
- 충전재와 강관이 분리되지 않아야 한다.

**수평경사계를 이용한 방법**

강관다단공법에 사용되는 강관 내부에 수평경사계를 설치하여 강관의 변위량(처짐량)을 구하는 방법이다. 이 측정법의 측정원리는 강관의 길이방향을 따라 일정구간 별로 경사계를 설치하여 강관의 휨변위를 측정하는 것으로서, 보통 1 m 간격으로 가이드관내에 수평경사계를 설치하여 계측하며, 계측 종료 후에 계측기를 회수하여 재사용이 가능하다.

현재 일본에서 출시된 최신모델(연결형수평경사계, BKP-10ES, 동아측기&지오프론프회)의 측정정밀도는 1 m당 0.3-0.5 mm의 변위량을 측정할 수 있으며, 측정 가능 수평각도는 0-30° 범위 내이다. 그 특징을 정리하면 다음과 같다.

- ① 유효 계측기간은 1-2개월간이며 계측기는 고가이다. 따라서 재생 가능하도록 설계되어 있다.
- ② 일반적으로 예상되는 강관의 변형량은 수 mm에서 수cm에 달한다. 따라서 충분히 정밀한 측정이 가능하다.
- ③ 계측기의 설치작업이 단시간에 이루어지며, 철거도 간단하다.
- ④ 온도변화 및 굴착진동, 운반, 설치의 조건에 영향을 적게 받는 설계이다.
- ⑤ 강관의 타설각도는 터널에 따라서 차이가 있기 때문에 5-15°의 각도에서도 정밀도를 유지할 수 있다.

이 공법을 이용한 휨 변위량은 Fig. 3의 모식도에 의해 계산되어질 수 있으며 각 측정점에서의 휨 변위량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y_0 &= 0 \\
 y_1 &= x_1 + \tan\theta_1 \\
 y_2 &= y_1 + x_2 + \tan\theta_2 \\
 &\vdots \\
 y_n &= y_{(n-1)} + x_n \cdot \tan\theta_n
 \end{aligned}$$

여기서,  $\theta_1 \sim \theta_n$ 는 측정경사각,  $x_1 \sim x_n$ 는 측정구간거리,

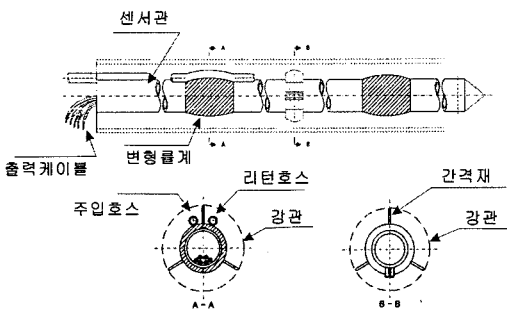


Fig. 1. 강관용 알루미늄 변형률계의 외관도.



Fig. 2. 강관용 알루미늄 변형률계.

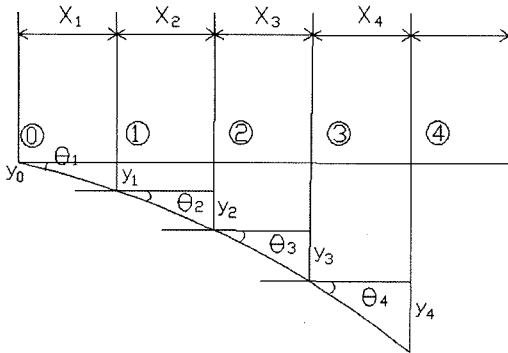


Fig. 3. 수평경사계 각 측정점에서의 휨 변위량 계산.

$y_0 \sim y_n$ 는 누적 휨변위이다.

막장굴진에 따른 수평경사계를 이용한 AGF 강관 휨 분포의 변화 측정 예를 나타내면 Fig. 4와 같다.

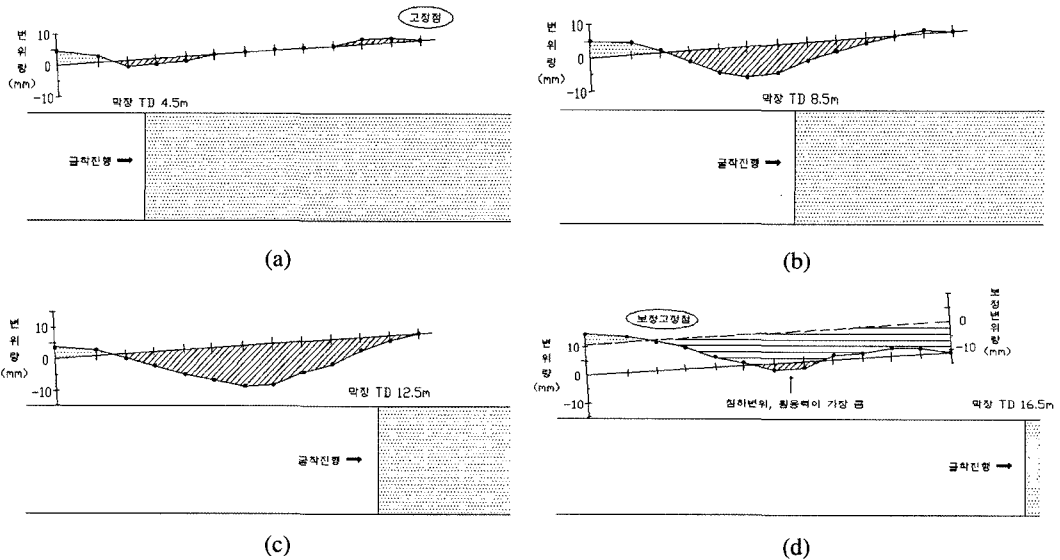


Fig. 4. 수평경사계를 이용한 막장 굴진에 따른 휨분포의 변화.

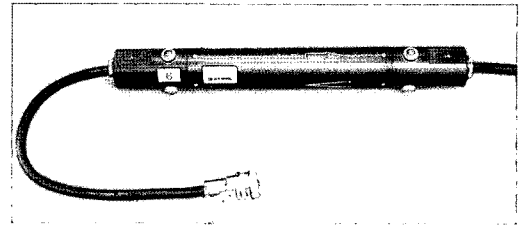


Fig. 5. Stress - axial strain curve in cyclic loading test.

Fig. 5는 AGF 강관측정을 위하여 제작된 수평경사계의 사진이며, Fig. 6은 개략적인 설계도이다. 이 계측기는 일본의 동이측기(주)와 지오포른트회에서 공동으로 제작하여 현재 일본에서 널리 사용되고 있는 수평경사계이다.

수평경사계를 강관내부에 설치하는 개요도를 나타내

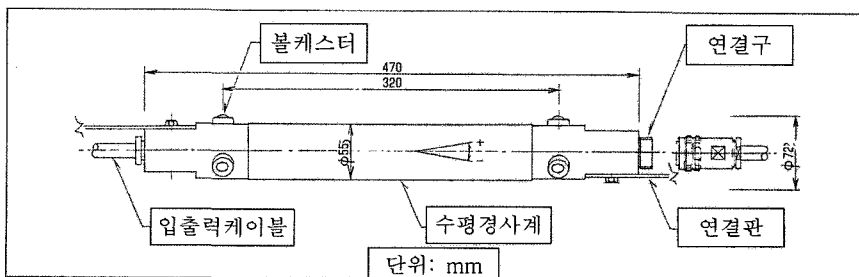


Fig. 6. 수평경사계의 개략설계도.

면 Fig. 7과 같다. 현재 시공현장에서 사용되고 있는 수평경사계는 가이드관 및 출력케이블 등과 같은 부속품이 표준화되어 있다. 개발된 AGF 강관용 수평경사계는 성능시험을 위한 실내시험 과정을 거쳐 시험결과를 분석하고 계측기를 업그레이드함으로써 정밀하고 내구성을 갖춘 수평경사계를 생산하고 있다.

Fig. 8은 AGF 공법에서 강관의 휨변형을 측정하기 위한 계측기 배치 예를 나타낸 것이다. 터널의 천단부에 1m 간격으로 경사계를 설치하여 측정하고 있다.

수평 경사계를 이용한 강관 휨변형 측정을 위한 일반적인 시공순서를 나타내면 Fig. 9와 같다.

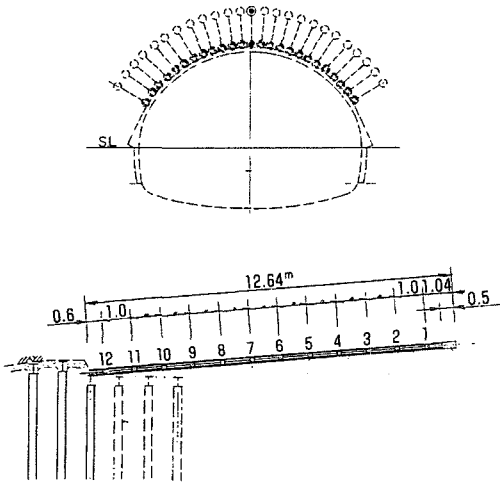


Fig. 8. AGF 공법의 계측기 배치 예.

### 선행변위 측정 기법의 적용성 및 문제점

현재 국내 및 국외에서 사용되고 있는 계측기는 앞 절에서 언급된 바와 같이 크게 두 가지 종류로 구분된다. 첫 번째는 변형률 게이지를 이용하여 변형율을 측정하고 계산에 의해 보강재의 변형률을 산정하는 방법이고, 두 번째는 수평경사계를 이용하여 휨변형을 직접 계측하여 천단침하를 계산하는 방법이다. 터널굴착에 따른 선행변위를 측정하기 위해서는 두 가지 방법이 모두 적용되어야 하며, 동시에 적용하여 측정결과의 신뢰성을 확인할 필요도 있다. 이 두 가지 방법을 국내에 적용하기 위해 고려되어야 할 문제점 및 개선방안은 다음과 같다.

#### 파이프 변형률을 이용한 방법

변형률계를 이용한 방법은 일본의 경우 앞 절에서 언급한 바와 같이 측정용 알루미늄관을 강관내부에 삽입하여 측정하는 간접측정방식을 택하고 있다. 이는 센서로부터 데이터로거까지의 측정선을 알루미늄관 내부를 통하게 함으로써 시공에 따른 손상을 막는 방법이다. 하지만 시공방법이 까다롭고 간접측정방법이라는 점을 단점으로 꼽을 수 있다.

이 방법을 국내에 적용하기 위해서 몇 가지 사항이 고려되어야 한다. 우선 변형률게이지는 저가이므로 외국에서 수입하여 사용하고, 이를 지반과의 마찰에 의한 손상으로부터 보호할 수 있는 부재 개발이 필요하다. 또한 변형률게이지와 데이터로거를 연결하는 측정선을 보호할 수 있는 부재의 개발이 필요하다. 이는 시공방법이

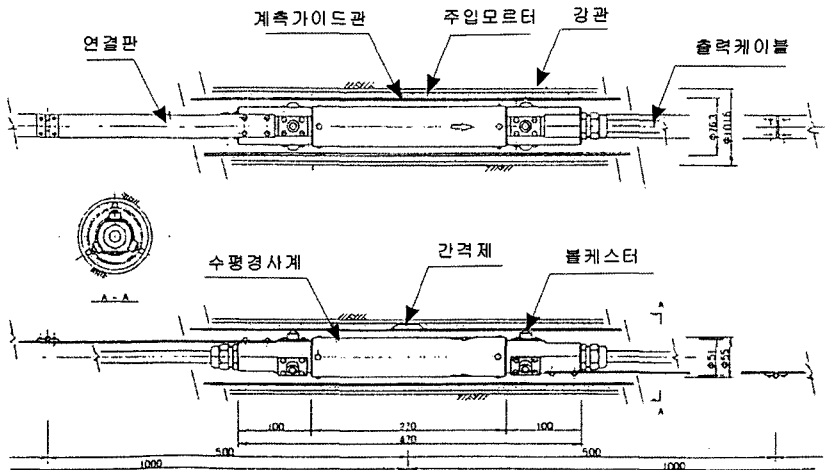


Fig. 7. 수평경사계 설치 개요도.

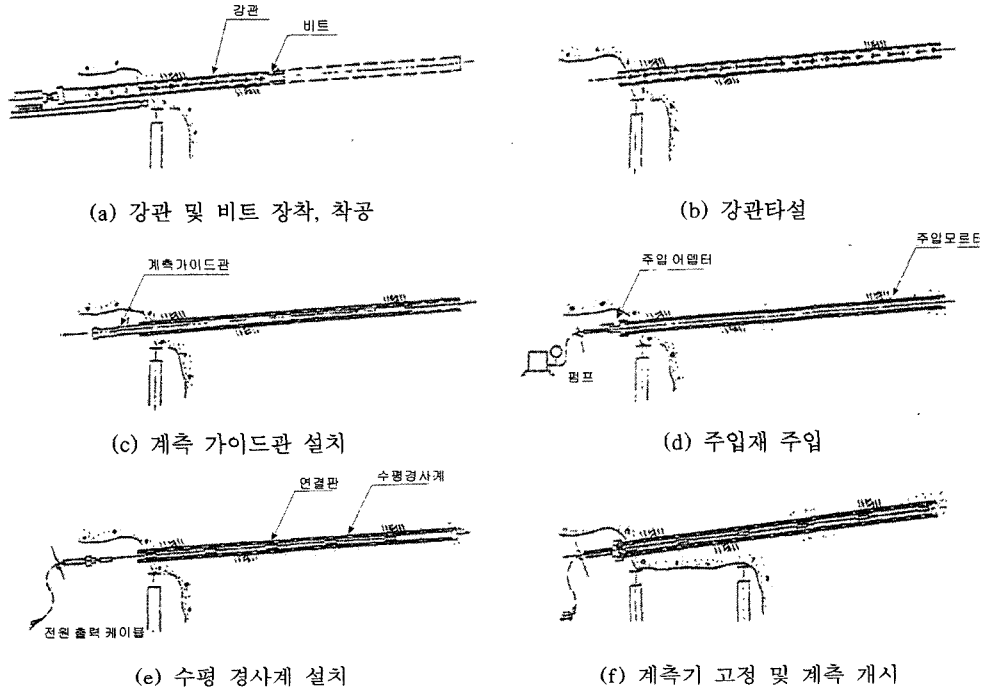


Fig. 9. 강관 휨변형 측정을 위한 수평경사계 시공순서.

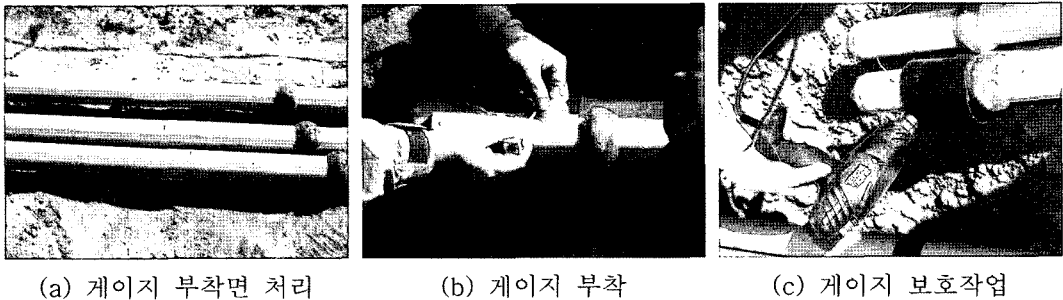


Fig. 10. 변형률게이지 부착방법.

단순하면서도 내구성에 있어서 탁월해야 한다.

일반적으로 FRP관에 변형률게이지를 부착하여 계측하는 방법을 나타내면 Fig. 10과 같다. 먼저 게이지를 부착할 면을 갈아내는 부착면 처리를 수행한다. 그리고 게이지를 순간접착제로 부착한 후 방수성 고무제질의 보호막을 이용하여 게이지 보호작업을 수행한다. 이러한 방법은 강관 보강재의 경우에도 거의 동일하게 적용할 수 있으나, Fig. 10에서와 같이 간격재가 있는 FRP관의 경우 측선을 보호하는 실링이 지반에 직접 접촉하지는 않지만, 강관의 경우 간격재가 없으므로 측선보호용 실

링이 직접 지반에 닿게 되는 단점이 있다. 이를 보완할 수 있는 부재의 개발이 필수적이다.

현재 현장에서 FRP관을 이용한 현장시험 결과 약 20% 이상의 게이지에서 단선 등의 문제점이 생기고 있고, 장기 내구성에 대해서는 현재 평가가 진행 중이므로 평가를 유보하고 있다.

**수평경사계를 이용한 방법**

수평경사계를 이용한 측정방법은 지반 또는 강관내부에 경사계를 삽입, 설치하여 지반 또는 보강재의 휨변형

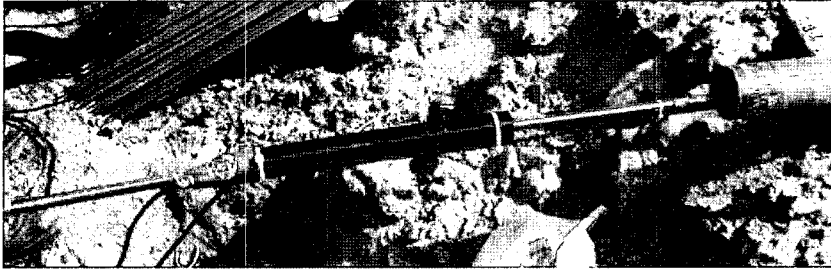


Fig. 11. 국내에서 사용되고 있는 수평경사계.

을 측정하는 방법이며, Fig. 11은 현재 국내에서 사용되고 있는 수평경사계 중 하나이다.

수평경사계를 이용한 측정방법의 현재까지 밝혀진 문제점으로는 다음과 같은 점이 있다.

① 대부분의 제품이 외국산으로서 매우 고가이므로 현장에서 사용하기 곤란하고, 국내 생산의 경우도 많은 부품이 외국산이어서 외화유출의 단점이 있다.

② 국내에서 현장별 가변성이 떨어져서 활용도가 극히 저조한 실정이다.

③ 굴착에 따른 진동 및 먼지 등에 대한 내구성이 떨어져 실제 계측 개시 후 망실되는 비율이 높은 실정이다.

④ 터널계측은 정밀도 0.1 mm 단위가 요구되는 고정밀 계측임에도 국내 조립품의 경우 그 정밀도가 기준에 미치지 못하는 경우도 있다.

⑤ 현장에서 시공하기가 매우 복잡하고 긴 시간을 요하므로 터널 굴착 사이클을 지연시키는 단점을 가지고 있다.

⑥ 계측기법은 각 회사별로 서로 다른 기준을 가지고 시공하거나, 시공매뉴얼이 없어 계측당시의 담당자에 따라 시공방법이 서로 달라 계측결과와 신뢰성이 떨어진다.

따라서 막장전방 계측을 위한 수평경사계를 이용한 계측기기 개발을 위하여 다음과 같은 점이 필요하다.

① 계측기의 국산화를 통하여 가격을 현재보다 현저히 낮추는 것이 필요하다.

② 계측기는 터널현장의 열악한 시공환경에서도 장기간 작동이 가능하고, 발파 또는 굴착에 의한 충격에 견딜 수 있고 반복사용이 가능하도록 고내구성이어야 하며, 그 정밀도도 터널계측의 기준을 만족하는 범위를 갖추어야 한다.

③ 시공이 간편하고 시공절차도 표준화되어 현장에서 비교적 손쉽게 설치 및 계측할 수 있어야 한다.

## 결 론

본 고에서는 굴착 전 지반에서 발생하는 변위, 즉 선형변위를 정량적으로 측정하기 위한 계측기와 계측방법에 대해서 소개하였다. 특히 선진국에서 일반적으로 사용되는 막장 선형변위 측정용 계측기에 대해 소개하였고 이를 국내기술로 개발하기 위한 문제점 및 개선방안에 대하여 논하였다.

막장 선형변위 측정을 위한 방법에는 크게 변형을 게이지를 이용하여 변형율을 측정하여 보강재의 변형률을 간접적으로 계산하는 방법과, 수평경사계를 이용하여 휨변형을 직접 계측하여 변위를 계산하는 방법이 있다. 이들 방법을 국내에서 적용하기 위해서는 경제적·기술적인 면에서 몇 가지 문제점이 확인된다. 이러한 기술을 국내에 도입하여 활용하기에는 여러 가지 한계가 있다. 하지만 최근 이러한 계측장비의 국산화와 측정기술의 개발 연구가 활발히 진행되고 있어 현장적용성이 뛰어난 기술개발이 이루어질 것이다.

## 사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 "IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널시공 기술개발 - 막장전방 보강재의 성능평가 기법 및 보강효과에 대한 현장실험적 연구(과제번호: C105A1020001-05A0502-00240)" 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 3(1), pp.80-95.  
 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완, 1997, Umbrella Arch

공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 7권, pp.299-309.

서용석, 홍성완, 배규진, 김광염, 손창규, 오병화, 2002, 능동터널 막장 선행변위 계측을 위한 현장 시험, 제 57차 추계공동학술발표회, 91p.

Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T. and Hakoishi, Y., 1998, Field observation of large tunnel supported by umbrella method; Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan, Proc. of the World Tunnel Cong., 98 on Tunnels and Metropolises, Vol. 2, pp.1009-1014.

Pelizza, S., Pelia, D. and Oreste, P. P., 1994, A new approach for ground reinforcing design in tunnelling, soil and rock reinforcements, Tunnelling and Ground Condition, Abdel Salem(ed), Balkema, pp.517-522.

Shirakawa, K., Aoki, T., Fujii, Y. and Nakao, T., 1999, Excavation through Semicircular-shaped Shell formed by Umbrella Method at Fault Zone beneath Desely Residential Area, Proc. of the World Tunnel Cong. 99 on Challenge for the 21st Century, Vol. 1, pp.441-447.

---

2006년 8월 9일 원고접수, 2006년 8월 31일 게재승인

#### 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-276-9645  
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

#### 임성빈

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-276-9645  
E-mail: bins123@daum.net

#### 박시현

한국시설안전기술공단 지하시설실  
411-758, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311  
Tel: 031-910-4085  
Fax: 031-910-4178  
E-mail: parksh@kistec.or.kr

#### 안명운

(주)아주엔지니어링  
135-080, 서울시 강남구 역삼동 696-19 동원빌딩  
Tel: 02-576-2233  
Fax: 02-579-2234  
E-mail: myung@ahjoo.com

#### 우삼백

대원토질(주)  
138-801, 서울시 송파구 가락본동 29-11 태연빌딩  
Tel: 02-511-0600  
Fax: 02-544-2408  
E-mail: wsoil@hanmail.net