

터널 시공 중 3차원 절대변위 계측시스템의 개발과 적용

방준호¹, 김기영², 정용훈^{3*}

Development of 3D absolute displacement monitoring system and its application at the stage of tunnel construction

Joon-Ho Bang, Ki-Young Kim, Yong-Hun Jong

Abstract The 3D absolute displacement monitoring system has been developed to analyze the tunnel convergence measured under construction of underground structures and to manage effectively the measured data. The system is comprised of the total station, the anchor-typed target pin and the 3D absolute displacement measurement and management program. In this paper, the types and specifications of the 3D total station were presented. The anchor-typed target pin, an improved model of traditional one, was developed and its sightable distance and measurement accuracy were checked by field tests. Also a 3D absolute displacement measurement and management program, TEMS 3D, was developed to provide some analysis tools including the trend and influence lines, L/C ratio, S/C ratio and the like. The developed system was applied the construction stage of a railway tunnel for testing purpose. It is verified that the developed system is capable of predicting weak zones ahead of tunnel face by comparing with results of TSP (Tunnel Seismic Prediction) survey.

Keywords: 3D absolute displacement monitoring system, Target pin, Convergence, Influence line, Trend line

요 지 터널 및 지하공간 시공 중 일상계측에서의 계측관리 효율성 및 고급의 내공변위 분석을 위해 3차원 광파기, 선단앵커정착형 타겟부착장치, 절대변위 계측관리 프로그램으로 구성된 3차원 절대변위 계측시스템을 구축하였다. 본 연구를 통해 3차원 절대변위 계측에 필요한 광파기의 종류와 사양을 제시하였고, 기존 타겟부착장치의 문제점을 개선한 선단앵커정착형 타겟부착장치에 대한 성능시험을 수행하여 우수한 시준거리와 측정정밀도를 확인하였다. 또한 절대변위 계측관리 프로그램에 대한 현장성능시험을 수행하여 얻어진 경향선/영향선 등 다양한 분석방법을 활용하여 막장전방의 연약대 존재 예측이 가능하였고, TSP탐사결과와 비교하여 정확성을 확인하였다.

주요어: 3차원 절대변위 계측시스템, 타겟부착장치, 내공변위, 영향선, 경향선

1. 서 론

최근 국내에서는 사회간접시설의 확충 계획에 따라 경부고속철도, 도심지 지하철, 도시고속도로 건설 등 대규모 프로젝트가 추진되고 있고 이러한 대부분의 프로젝트는 중장대터널을 포함하고 있어, 이에 따라 고급화된 시공 기술의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 충분한 지반 조사를 수행하더라도 지반의 불확실성에 기인하여 설계 단계에서 예측한 터널의 거동과 실제 시공 시 발생한 거동이 서로 다른 경우가 존재하게 된다. 이러한 설계와 시공 단계에서의 불일치성을 보정하기 위한 수단으로 현장 계측을 이용한 정보화 시공이 널리 적용되고 있다.

일반적으로 터널에서의 계측은 크게 일상계측과 대표 단면계측으로 구분되며, 각 계측에서 측정된 변위, 응력, 축력 등의 물리적인 값을 분석하여 그 결과를 시공에 다시 반영한다. 터널 계측항목 중 천단침하와 내공변위 측정은 시공 단계에서의 안정성 평가, 다음 굴착단계의 진행여부 평가 등과 같은 중요한 판단의 기초 자료로 제공될 수 있다.

현재 국내 NATM 터널의 천단침하와 내공변위 계측에는 테이프식 내공변위계(tape extensometer)와 레벨(level)을 이용하는 상대변위 계측 방식이 주로 적용되고 있다. 그러나 이 방식은 터널 내공면에서 두 측정간의 상대적인 변위의 변화 측정에만 국한되므로, 터널 단면이 큰 경우 측정이 상당히 어렵고 막장전방의 연약대 존재 예측과 같은 고급 분석이 곤란하다. 또한 비대칭적인 터널 변위 또는 중방향 변위의 계측은 불가능하며, 계측자로 수집을 위해 상당한 시간과 인력을 필요로 할

¹SK건설(주) 연구소 선임연구원

²SK건설(주) 연구소 주임연구원

³정회원, SK건설(주) 연구소 주임연구원

*교신저자: 정용훈 (jyh@skcc.co.kr)

뿐만 아니라 환기덕트, 건설장비 또는 기타 지장물로 인하여 변위 측정 자체가 어려운 경우가 빈번하게 발생한다. 이에 반해 3차원 절대변위 계측 방식은 3차원 절대좌표 측정이 가능한 광파기(total station)를 이용하여 3차원 절대좌표의 변화를 측정하고 이를 3차원 절대변위로 환산하는 방식으로, 터널의 절대변위 변화 거동을 파악할 수 있고, 막장 전방의 연약대 존재 여부와 방향성 예측 분석이 가능하며, 1인의 측정원으로도 계측이 가능하고 추가적인 장비 동원이 불필요하기 때문에 공정상의 제약을 유발하지 않는다(김창용 등, 2005).

본 연구에 앞서 시공 중 천단침하와 내공변위 측정 방식의 개선을 위해 측량용 광파기를 도입하여 다수 터널 현장에 적용한 바 있다(이대혁 등, 2000). 그러나 광파기의 현장 보급 확대를 위해서는 막장면에 근접하여 설치 가능하고 광파기의 빛을 반사하는 터널 전용 타겟부착 장치의 개발과 3차원 절대변위의 이력 관리 및 변위분석 프로그램의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존 타겟부착장치의 문제점을 개선한 선단앵커정착형 타겟부착장치(target pin)와 3차원 절대변위의 이력 관리

기능과 전방 연약대 예측을 위한 다양한 분석 기능을 내장한 3차원 절대변위 계측관리 프로그램(TEMS 3D)을 개발함으로써, 3차원 절대변위 계측시스템을 구축하였다. 또한 실제 터널 시공 현장에서 3차원 절대변위 계측시스템을 적용하여 막장 전방의 연약대를 예측한 사례를 소개하고자 한다.

2. 3차원 절대변위 계측시스템의 개발

터널에서의 3차원 절대변위 계측방법은 광파기로 변위가 수렴되어 안정한 상태에 도달한 지점을 기준점으로 설정하고, 측정하고자 하는 위치의 타겟을 광파기로 시준함으로써 측정점의 횡방향(X축), 종방향(Y축), 연직방향(Z축)의 절대좌표를 얻는 것이다(그림 1; 이대혁 등, 2000).

본 연구에서 개발한 3차원 절대변위 계측시스템은 광파기, 선단앵커정착형 타겟부착장치와 3차원 절대변위 계측관리 프로그램으로 구성된다(그림 2). 특히 광파기의 계측 데이터는 사용자의 직접입력이나 광파기 데이터 파일의 로딩을 통해 프로그램 내장 데이터베이스에 축적되며, 프로그램에서 처리된 계측정보는 유니코드 텍스트 파일 형식으로 저장되므로 프로그램이 설치된 컴퓨터라면 어디서든 파일을 열어 계측 데이터를 관리할 수 있을 뿐 아니라 프로그램이 설치되지 않은 컴퓨터에서도 텍스트 기반의 데이터 확인이 가능하다.

3. 터널 계측용 광파기의 도입

3.1 개요

시공 중 터널의 천단침하와 내공변위를 계측하는 방

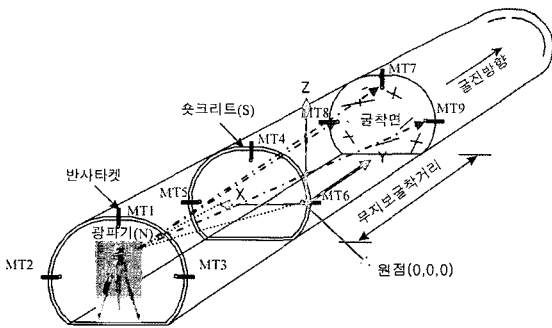
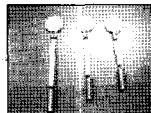


그림 1. 3차원 절대변위 계측 개념 (이대혁 등, 2000)



천단침하/내공변위 계측 현장



선단앵커정착형 타겟부착장치 (Target Pin)



광파기

3차원 절대좌표 다운로드



3차원 절대변위 계측관리 프로그램(TEMS 3D)
: 3차원 절대변위 환산
: 막장전방 연약대 존재 예측

그림 2. 3차원 절대변위 계측시스템 구성

법은 앞서 설명한 바와 같이 테이프식 내공변위계와 레벨을 이용하는 형식과 광파기를 이용하는 새로운 형식으로 구분될 수 있다. 테이프식 내공변위계의 정확도(accuracy)는 $\pm 0.01 \sim 0.1$ mm로 기기형식, 테이프재료, 테이프를 앵커 볼트에 연결하는 형식 등에 따라 달라질 수 있다. 이에 반해 광파기는 $\pm 0.1 \sim 1.0$ mm의 정확도로 측량목적과 계측목적에 따라 그 정확도를 다르게 적용할 수 있다. 현실적으로 테이프식 내공변위계에 의한 정확도가 광파기에 비해 더 높지만 광파기는 3차원 절대변위 획득, 신속한 측정, 1인 계측 등 장점을 가지고 있어 오늘날 유럽의 터널현장에서는 테이프식 내공변위계와 레벨 대신에 광파기를 이용한 계측이 거의 표준화되어 사용되고 있다(Bock, 2000).


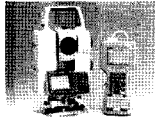


그러나, ± 1 mm의 분해능(resolution)을 보장하는 광파기일지라도 실제 운용상에서의 시스템 정확도(system accuracy)는 $\pm 2 \sim 3$ mm에 불과하다. 따라서 수 mm 이내의 변위가 예상되는 경암 지반에 시공되는 터널 현장에서의 그 효용성은 테이프식 내공변위계에 비해 떨어지는 결과를 초래하고 있는 것이 국내의 현실이다. 변위가 수 mm 이내로 측정될 것으로 예상되는 터널 공사에서의 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 0.1 mm의 분해능과 $\pm \{(0.6 \sim 1) + 2 \text{ ppm} \times D\}$ mm (D: 측정거리)의 측정정밀도, 즉, 측정거리 100 m를 기준으로 $\pm 0.1 \sim 1.2$ mm의 시스템 정확도를 보여주는 광파기가 사용되어야 한다(이대혁 등, 2000). 표 1은 상기 조건에 적합한 광파기 사양을 제시하였다.

3.2 계측 원리

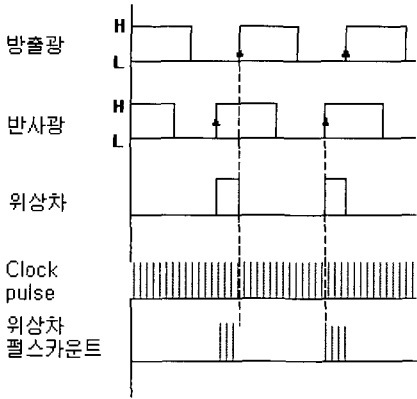
광파기는 전기식 거리 측정기(electric distance meter)와 경위의를 통한 삼각측량법을 적용하고 있는데, 전기식 거리 측정기에 의한 거리 측정의 원리는 “거리는 빛의 속도를 경과시간으로 곱하여 산출된다”는 것이다. 그러나 0.1 mm의 정밀도를 확보하기 위해서는 경과시간이 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 초의 정밀도를 보여야 하므로 사실상 불가능하다. 따라서 실제로 빛을 이용한 거리 측정은 위상차를 이용하게 된다. 그림 3의 (a)와 같이 방출되는 빛과 타겟에 의해 반사되는 빛의 1/2파장의 위상차를 결정함으로써 거리를 산출하게 된다. 그림 3의 (b)는 광파기의 사용으로서 전기식 거리 측정기와 경위계가 결합된 형태이다. 좌표는 대상점까지의 거리, 수직각, 수평각을 구함으로써 쉽게 구할 수 있고 대상점에서 구해진 좌표의 초기치 대비 변화량에 대한 벡터합을 계산하여 절대변위를 산출하게 된다.

그림 3의 (c)는 광파기의 좌표 결정원리를 나타낸 것으로, 기존의 전기식 거리 측정기보다 거리측정 및 좌표결정의 정밀도를 향상시켰고, 좌표축을 구성하기 위한 새로운 방법을 사용한다. 이 방법은 측정이 쉽게 이루어질 수 있는 임의의 공간에 광파기를 자유롭게 배치할 수 있도록 한 것으로, 기존의 측정기기가 기지점에 설치되어야 한다는 것과 정반대이다. 광파기가 설치되는 위치의 연직방향이 Z축이 되며, 측정되는 첫 번째 점은 좌표계의 원점(origin)이 되고, 두 번째로 측정되는 점을 통해 XZ평면이 형성되는데 그 수평방향이 X축이며 Y축은 X 및 Z축에 대해 90° 각도로 자동적으로 결정된다. 이러한 방식으로 좌표계의 원점을 원하는 대로 설정할 수 있다(이대혁과 방준호, 2000).

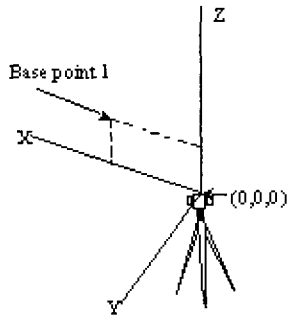
표 1. 터널 계측용으로 사용 가능한 광파기의 제원 (Leica Geosystems, 2006; Sokkia, 2006)

모델명	NET1200	NET1100M	TCA1800	TCA2003
제품 사진				
거리 정밀도 ^{a),b)}	$\pm(0.6+2 \text{ ppm} \times D)$ mm	$\pm(1+2 \text{ ppm} \times D)$ mm	$\pm(1+2 \text{ ppm} \times D)$ mm	$\pm(1+1 \text{ ppm} \times D)$ mm
분해능	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
데이터 전송	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C
최대시준거리 ^{a)}	200 m	300 m	200 m	200 m

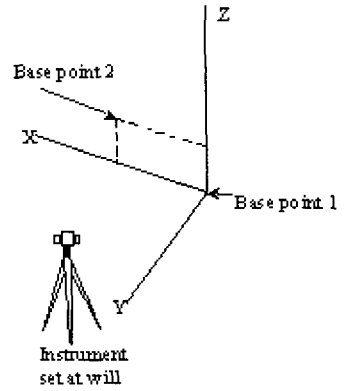
a) 반사시트 적용시, b) D: 측정거리 (m)



(a) 측정 원리



(b) 사용 예



(c) 절대좌표 결정원리

그림 3. 광파기의 측정원리 및 절대좌표 결정원리

4. 선단앵커정착형 타겟부착장치의 개발

4.1 개요

타겟부착장치는 터널의 3차원 절대면위 계측시스템의 구성요소 중 하나로 광파기로부터 발사된 빛을 반사할

수 있는 타겟을 부착하는 장치이다. 기존 타겟부착장치는 철근 정착형의 착탈식 구조(그림 4)로서, 설치위치에 홀을 천공하고 여기에 타겟부착장치를 그라우팅 또는 레진으로 충전하여 고정하는 방식으로 시공된다. 그러나 이러한 타겟부착장치는 설치를 위한 충분한 시간적 여유가 없는 터널현장의 실정을 감안할 때 상당히 불편함이 따른다. 또한, 헤드부가 철재 또는 알루미늄 재질을 사용하여 타겟부착장치의 단가 상승 요인이 된다.

본 연구에서는 설치의 간편화, 시준성 향상, 손망실 최소화, 부품 경량화를 개선방향으로 설정하여 선단앵커정착형 타겟부착장치(target pin; 그림 5)를 개발하였다.

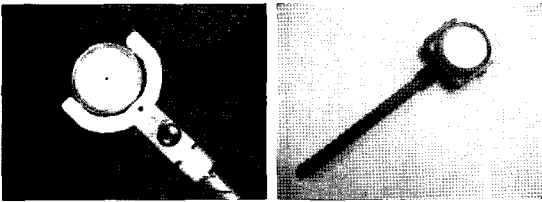
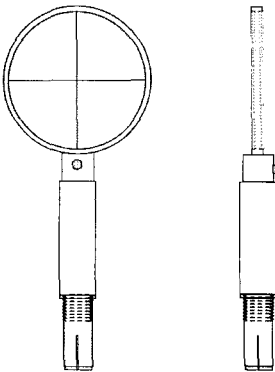
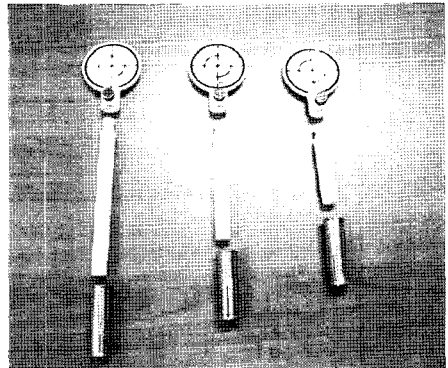


그림 4. 철근 정착형 타겟부착장치의 예



(a) 개요도



(b) 사진

그림 5. 선단앵커정착형 타겟부착장치

4.2 구성 요소

선단앵커정착형 타겟부착장치는 정착부, 연결부, 헤드부로 구성되는데, 정착부는 썬기형 앵커 방식으로 제작되어 휴대용 전동드릴에 의한 천공과 해머에 의한 타격으로 쉽고 간단하게 설치할 수 있다. 연결부에는 발파 및 슛크리트 타설 과정에서 일부 부품의 착탈 시 발생할 수 있는 측정오차가 최소화되도록 유니버설 조인트 방식의 연결 구조를 적용하였고, 헤드부는 터널 내에서 시준거리와 측정 정밀도를 향상시키기 위해 십자(+) 표시한 고휘도 반사시트를 양면에 부착한 양면반사 구조로 개발되었다(표 2).

4.3 설치 방법

선단앵커정착형 타겟부착장치는 기존 타겟부착장치에 비해 설치가 간단하여 신속한 측정이 가능한 장점을 지닌다. 설치 방법은 설치 위치를 선정한 후 햄머드릴을 이용하여 직경 20 mm, 길이 65 mm의 공을 뚫고 여기에 앵커볼트를 삽입하고 앵커볼트 내의 썬기를 해머로

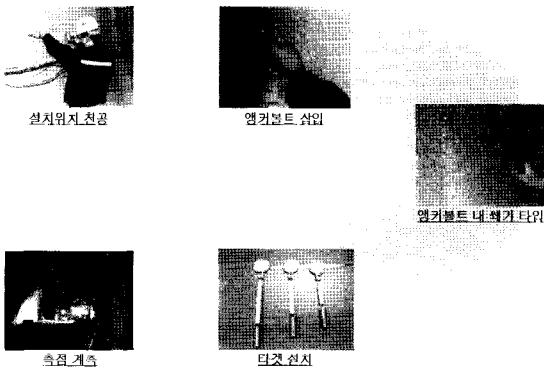


그림 6. 선단앵커정착형 타겟부착장치의 설치 방법

타격하여 앵커볼트가 공 내에 정착이 되도록 한다. 앵커볼트가 정착된 후 연결부와 헤드부를 체결하여 설치를 종료한다(그림 6).

4.4 측정 성능의 평가

일반적으로 타겟부착장치의 성능은 측정 거리에 따른 측정오차와 광파기의 기기오차를 비교하여 평가된다. 개발된 선단앵커정착형 타겟부착장치의 성능 평가를 위해 도로터널 현장에서 성능 시험을 실시하였다.

그림 7은 시험 터널에서 수행한 선단앵커정착형 타겟부착장치의 성능 평가를 수행한 결과이다. 터널 내에서의 최대 허용 측정거리는 약 90 m이었으며, 이 한계 내에서의 측정오차는 광파기의 기기오차 범위 이내였다.

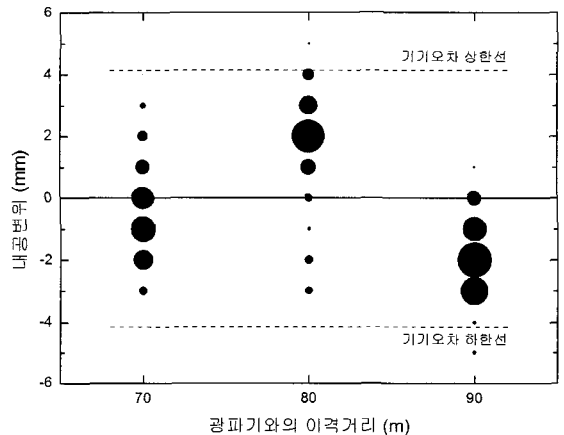


그림 7. 선단앵커정착형 타겟부착장치의 측정성능 평가 결과

표 2. 선단앵커정착형 타겟부착장치 제원

구성요소	부품명	재질	제원	기능	비고
정착부	앵커볼트	아연도금 스테인레스 스틸	직경 20 mm 길이 65 mm	타겟 고정	썬기형
연결부	연결봉	ABS수지	직경 10 mm 길이 100 mm	앵커볼트와 타겟부착판 연결	길이는 현장조건에 따라 다르게 제작 가능
헤드부	타겟부착판	ABS수지	직경 65 mm 두께 6 mm	반사시트 부착	-
	반사시트	아크릴산 레진	직경 60 mm 두께 1 mm	광파 반사	입사각 30도 양면반사 (bireflection)

5. 3차원 절대변위 계측관리 프로그램(TEMS 3D)의 개발

5.1 3차원 절대변위 계측관리 프로그램

3차원 절대변위 계측관리 프로그램(TEMS 3D)은 3차

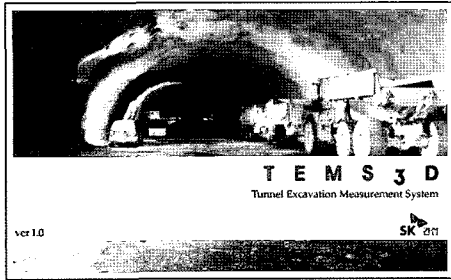


그림 8. 3차원 절대변위 계측관리 프로그램(TEMS 3D)의 시작 화면

원 절대변위 계측시스템의 구성요소 중 데이터 관리 및 분석에 해당하는 부분으로, 터널 시공 중 광파기를 통해 측정된 3축방향의 좌표를 변위로 환산하는 변환알고리즘을 내장해 측정에서의 종방향, 횡방향, 연직방향 절대변위를 산정한다. 절대변위 정보는 텍스트 파일로 영구 저장되므로 사용자의 임의 편집과 활용이 가능하며, 프로그램에 내장된 데이터베이스에 저장되어 3차원 절대변위의 시간이력관리와 3차원 절대변위를 이용한 막장전방의 연약대 존재 여부를 예측하는데 사용된다.

개발된 프로그램은 3차원 절대변위를 이용하여 막장전방의 연약대 존재 예측이 가능한 계측관리 프로그램으로 다음과 같은 특징을 지닌다(그림 8).

- ▶ 프로그램 내부 인터페이스를 통한 데이터 입력방식(그림 9)과 텍스트 파일 편집이나 광파기 계측 파일의 직접 불러오기가 가능한 데이터 입력방식을 채택함으로써 현장여건에 따른 계측관리가 용이하다

현장정보

현장명:

현장위치:

공사명:

공사기간: ~

발주자:

시공자:

관리자:

계측자:

비고:

(a) 현장정보 입력 및 수정

터널정보

터널직경: M

단면형식: 마체형 계란형 원형 공동형

터널구간:

시점:

종점:

(b) 터널정보 입력 및 수정

단면정보

20730 20760 20790 20820 20850

단면번호	단면거리	장표형식	비고
020K+740M	020+740	좌측	터널굴착면
020K+750M	20+750	좌측	
020K+760M	20+760	좌측	
020K+770M	20+770	좌측	
020K+780M	20+780	좌측	
020K+790M	20+790	좌측	
020K+800M	20+800	좌측	
020K+810M	20+810	좌측	

새 단면(N) | 제거(R) | 수정(M)

(c) 단면정보 입력 및 수정

타겟정보

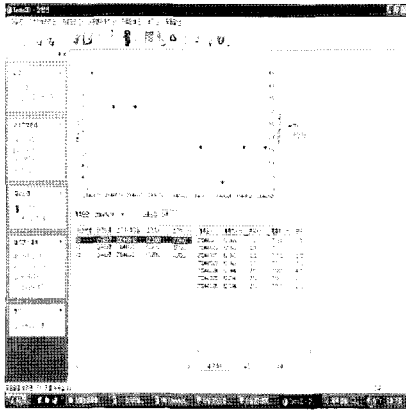
단면번호: 020K+740M

20740 20760 20780 20800 20820

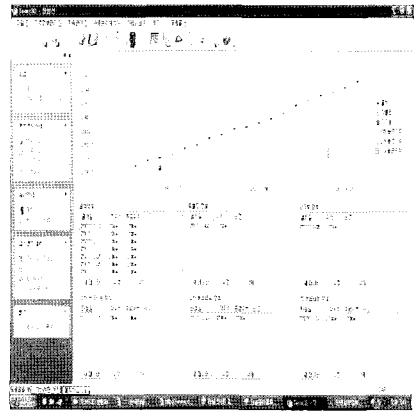
타겟번호	타겟거리	스카의 수직좌표	스카의 X(m)	스카의 Y(m)	스카의 Z(m)	공차계수	타겟 수
05	신관점	2004+08+18	62.3460	-7.0849	9.6645	1000.00	1
06	신관점	2004+08+19	62.2760	-12.0210	0.3493	1200.00	1
02	신관점	2004+08+18	63.2060	-0.2080	0.3780	1200.00	1

(d) 타겟정보 입력 및 수정

그림 9. 프로젝트 관리를 위한 자료 입력 기능의 활용 예

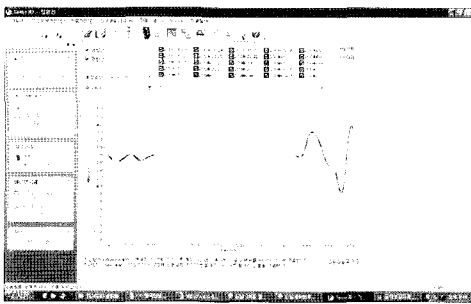


(a) 절대변위의 입력과 시간이력관리



(b) 굴착/보강데이터 관리

그림 10. 자료 관리 기능의 활용 예



(a) 영향선과 경향선



(b) 내공변위 벡터

그림 11. 내공변위 분석 기능의 활용 예

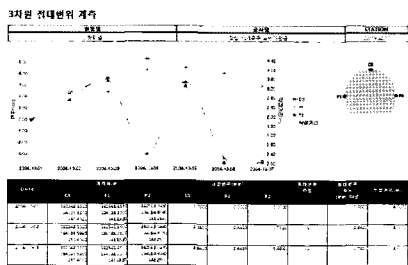


그림 12. 계측 결과 보고서의 출력 예

(그림 10).

- ▶ 3차원 절대변위를 이용한 영향선과경향선, L/C비 이력, S/C비 이력, 내공변위 벡터 이력, 내공변위 벡

터의 평사투영 등의 다양한 내공변위 분석 기법을 활용하여 막장 전방의 연약대 존재 여부를 예측할 수 있다(그림 11, 14-17).

- ▶ 계측 자료와 분석 결과를 토대로 계측보고서를 쉽게 생성, 출력할 수 있다(그림 12).

5.2 프로그램의 내공변위 해석 기능의 검증

개발된 프로그램의 내공변위 해석 기능에 대한 현장 적용성을 평가하기 위하여 철도터널 현장에 사용하였다. 시험 현장은 단굴 복선터널 현장으로서 연장은 2.3 km 이고, 터널 폭은 10.0 m이며, NATM공법으로 굴착을 시행하였다. 시험 현장의 암반은 흑운모호상편마암, 각섬석편마암, 녹니석편암 등이 포함된 시대미상의 편마암류와 후기인 중생대 백악기에 관입한 화강암류로 구성되어 있다. 특히 편마암류는 화강암의 관입으로 인하

표 3. TSP 탐사위치와 탐사범위

막장 위치	발신폭 위치	수신폭 위치	탐사 범위
STA.20+721	STA.20+704 ~ 671	STA.20+651	STA.20+651 ~ 851

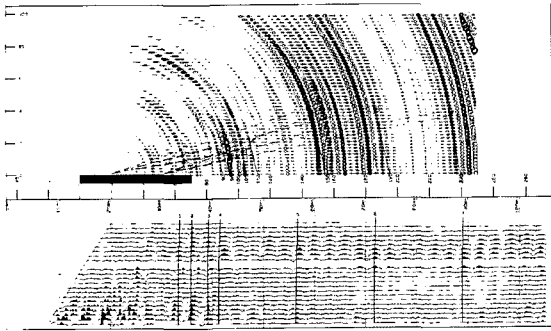


그림 13. TSP탐사 해석결과

표 4. TSP 탐사에 의한 추정 연약대와 막장관찰 결과

TSP 탐사		막장관찰
위치	추정 연약대 특성	
STA.20+785	파쇄대	단층
STA.20+805	파쇄대	단층파쇄대
STA.20+820	파쇄대	파쇄대
STA.20+825	파쇄대	절리군
STA.20+840	파쇄대	파쇄대
STA.20+845	파쇄대	절리군

여 페그마타이트 및 석영맥의 발달이 많은 곳으로 절리 발달이 비교적 심한 편이며, 편마구조 및 편리가 잘 발달되어 있다.

프로그램의 성능 평가를 위하여 현장에서 시행된 TSP (Tunnel Seismic Prediction) 탐사 결과와 막장관찰로부터 확인된 연약대의 위치와 본 프로그램의 내공변위 해석 기능을 통해 추정된 연약대의 위치에 대해 상호 비교하였다. TSP 탐사는 막장위치가 STA.20+721일 때 STA.20+651에서 STA.20+851까지 약 200 m 구간에 대해 시행하였고, 회절중합법을 이용하여 자료처리를 실시하였다(표 3). TSP 탐사에서 얻어진 회절단면도(그림 13)로부터 탐사 구간 내에 총 6개소의 연약대가 추정되었다(표 4). 해당 연약대의 시공 이후 막장 관찰 결과, 전반적으로 대규모 단층대나 파쇄대는 관찰되지 않았으며 소규모 파쇄대만 관찰되었다(표 4).

Schubert와 Steindorfer(1996)는 영향선(influence line)과 경향선(trend line)으로 정의된 그래프를 측정위치에 따라 도시하고 그래프의 변화로부터 막장전방의 연약대 존재를 예측할 수 있다고 제안하였다. 즉, 막장전방에 연약대가 존재하는 경우 막장이 연약대에 접근함에 따라 영향선 그래프에서는 영향선간의 면적이 증가하게 되고, 경향선 그래프에서는 경향선이 직선으로 일정하게 진행되다가 연약대에 접근함에 따라 증가 또는 감소하게 되므로, 이러한 영향선과 경향선의 변화로부터 막장전방의 연약대 존재여부를 판단할 수 있게 된다고 하였다. 그림 14는 개발된 프로그램의 해석 기능을 이용하여 천단침하의 영향선과 경향선 도시결과와 TSP 탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 것이다. 프로그램에서 도시된 영향선 또는 경향선의 최고점 또는 최저점이 TSP 탐사의 연약대 위치와 대부분 일치하고 있어 예측이 가능한 것으로 확인되었다. STA.20+785, 20+805, 20+820, 20+825지점은 영향선의 증감변화 경향으로부터 추정할 수 있으며, STA.20+840, 20+845지점은 경향선의 감소 후 증가 경향으로부터 추정할 수 있었다. 분석 결과 전반적으로 영향선의 변화로부터 연약대 존재 예측이 가능하나, 일부 구간에서는 경향선의 변화 특성도 고려하여 연약대 존재를 예측할 수 있었다. 따라서 연약대의 예측에 있어서 경향선과 영향선 각각을 별도의 산정 자료로 활용하기보다는 동시에 고려하여 판단하는 것이 보다 효과적이라 판단된다.

Schubert와 Steindorfer(1996)는 천단부에서의 종방향변위(L)와 연직방향변위(C)의 비(L/C비)를 통해 막장전방의 연약대 존재를 예측할 수 있다고 제안하였는데, 막장 전방으로 연약대가 존재하는 경우 아칭효과에 의한 응력재배치 작용이 막장전방의 연약대로 인해 제한을 받게 되어 막장면과 연약대 사이에서 응력집중이 발생하여 천단부에서의 종방향변위와 연직방향변위가 크게 발생하게 되고 종방향변위가 연직방향변위보다 상대적으로 크게 작용하여 전반적으로 천단부에서의 종방향변위와 연직방향변위의 비가 크게 나타나게 된다. 그림 15는 천단부에서 측정된 종방향변위와 연직방향변위의

비를 station에 따라 표시한 것으로, 본 현장의 경우 전반적으로 천단침하의 영향선/경향선 분석결과와 유사하게 L/C비가 증가 또는 감소하는 경향성으로부터 연약대의 존재 유무에 대한 예측이 가능하여 막장전방의 연약대 존재 예측이 유효한 예측인자로 확인되었다. STA.20+785, 20+820, 20+825, 20+840, 20+845 지점은 L/C비가 감소

후 증가하는 경향으로부터 예측이 가능하였고, STA.20+805 지점은 L/C비가 감소 중 일정한 값으로 수렴하는 경향으로부터 예측할 수 있었다.

Schubert와 Steindorfer(1996)는 동일한 단면에서 측벽변위(S)와 천단침하(C)의 비(S/C비)를 구해 터널 굴진방향의 좌우에 연약대가 존재하는지를 판단할 수 있

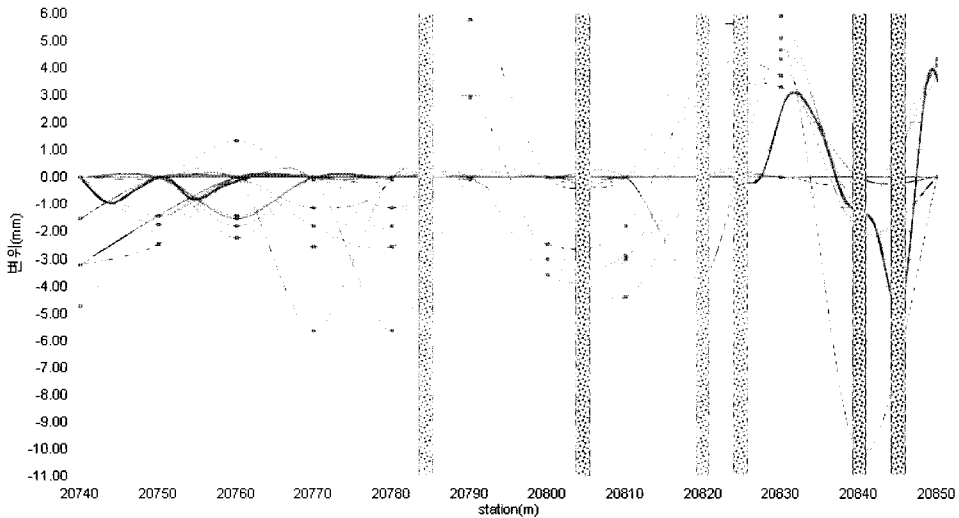


그림 14. 천단침하의 영향선 및 경향선 (굵은 선: 경향선, 가는 선: 영향선, 막대: TSP 탐사에 의한 추정 연약대)

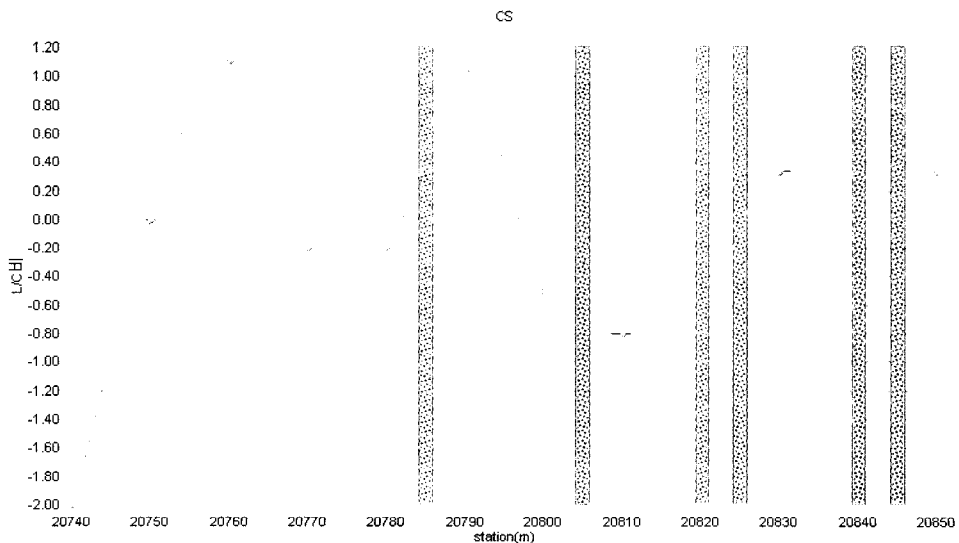
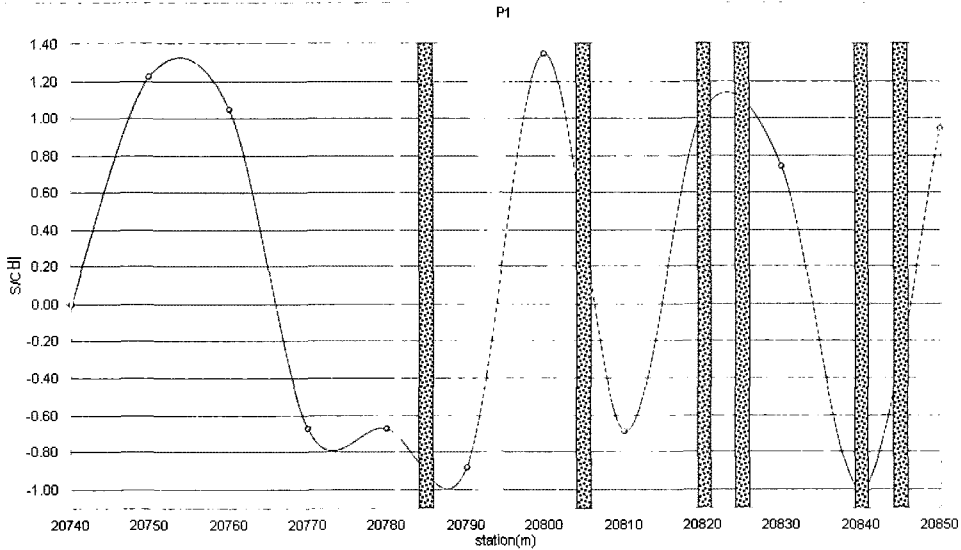


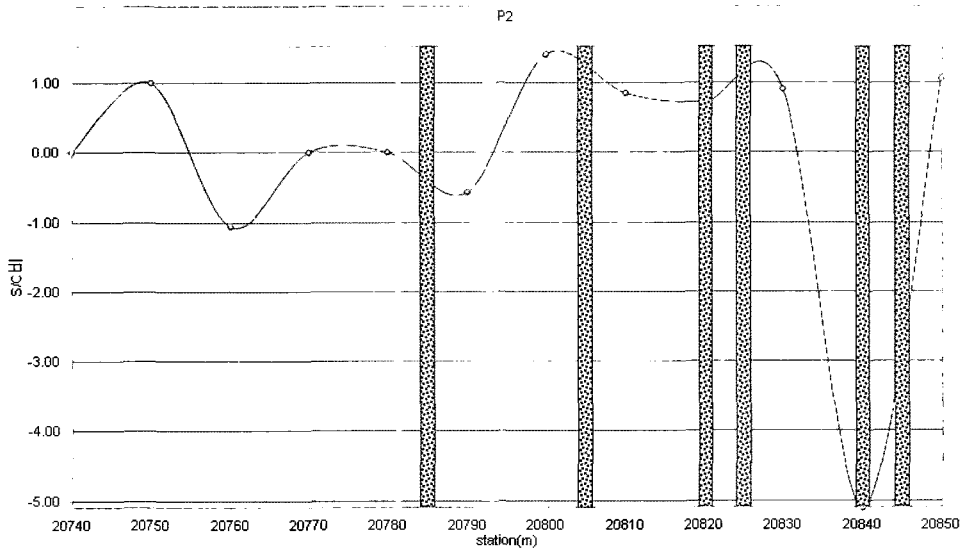
그림 15. 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비(L/C비) 분석 (막대: TSP 탐사에 의한 추정 연약대)

다고 하였는데, 연약대가 터널 굴진방향과 임의의 각도로 존재하는 경우 막장이 좌측 연약대에 접근함에 따라 좌측벽변위와 천단침하의 비가 증가하다가 감소하고, 막장이 우측 연약대에 접근함에 따라 다시 우측벽변위와 천단침하의 비가 증가하다가 감소하는 경향을 보이게 된다. 따라서 좌측벽변위와 천단침하의 비, 우측벽변

위와 천단침하의 비를 동시에 고려하면 터널 굴진방향에 대한 연약대가 어떠한 방향으로 존재하는가를 예측할 수 있게 된다. 그림 16은 각각 좌측벽변위와 천단침하의 비, 우측벽변위와 천단침하 비를 도시한 것으로 산정된 비의 등락 경향으로부터 연약대의 예측이 가능하였다. 그림에서 보는 바와 같이 TSP탐사구간에서 6개소



(a) 좌측벽변위 적용



(b) 우측벽변위 적용

그림 16. 측변변위/천단침하 비(S/C비) 분석 (막대: TSP 탐사에 의한 추정 연약대)

의 파쇄대가 관찰되었는데, 연약대의 위치와 S/C비의 최저점이나 최고점과 일치하고 있어 S/C비로부터 연약대의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 한편, 좌우 측벽변위와 천단침하 비의 그래프는 터널 굴진방향에 대해 연약대가 어떤 방향으로 위치하는가를 보여주는 유효한 인자임에 착안하여 본 현장에서의 좌·우측벽변위와 천단침하 비의 그래프를 도시한 결과 station 진행에 따라 그래프의 형상은 다소 차이가 있으나 그래프의 최고점과 최저점의 위치가 거의 동일하게 나타나고 있어 본 현장의 경우는 연약대가 터널 굴진방향에 직각으로 존재하고 있음을 유추할 수 있었다.

Schubert와 Steindorfer(1996)는 터널 내공면에서 천단부, 좌·우 측벽부에서의 3측점변위를 평사투영도에 도시하고 평사투영도 상의 점들의 이동방향과 천단부의 L/C비의 변화 경향을 동시에 고려함으로써 현위치 대비 막장 전방 지반의 강성을 상대적으로 표현할 수 있다고 하였다. 즉, 평사투영도의 점들이 북쪽으로 이동하고 천단부의 L/C비가 감소하면 막장 전방이 현위치보다 강성 지반으로 판단될 수 있고, 평사투영도의 점들이 북쪽으로 이동하여 천단부의 L/C비가 증가하면 막장전방이 현위치보다 연성 지반이거나 파쇄대가 존재하는 것으로 판단될 수 있다(에스케이건설, 2001; 코오롱건설, 1999). 그림 17은 STA.20+805 지점에서 시간에 따라 3측점에서의 절대변위를 평사투영도에 표현한 것으로 측정시간

이 지남에 따라 평사투영도상의 점들이 북쪽으로 이동하고 있고, 그림 15의 천단부의 L/C비가 동일한 위치에서 감소하고 있는 형상으로부터 막장전방에 현 지점의 지반보다 강성 지반이 존재하는 것으로 예측할 수 있다. 이러한 예측 결과는 실제 막장 관찰 결과와 일치하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 터널 시공 중 내공변위와 천단침하의 계측관리 효율성 제고와 고급 내공변위 분석을 위해 광파기, 선단앵커정착형 타겟부착장치, 3차원 절대변위 계측관리 프로그램으로 구성된 3차원 절대변위 계측시스템을 개발하였다. 특히, 개발된 3차원 절대변위 계측관리 프로그램(TEMS 3D)은 3차원 절대변위의 이력 관리 뿐만 아니라 영향선과 경향선 분석, 종방향변위와 연직방향변위 비(L/C비) 분석, 측벽부변위와 천단침하 비(S/C비) 분석, 내공변위 벡터 분석, 평사투영 분석 등 고급 내공변위 분석 기능을 내장한 프로그램으로, 이 분석 기능을 활용하여 막장 전방에 위치한 연약대 존재를 간접적으로 예측할 수 있다.

현장에서의 TSP 탐사와 막장관찰로부터 확인된 연약대의 위치를 비교 분석한 결과, 개발된 3차원 절대변위 계측관리시스템은 막장 전방에 위치한 연약대의 존재를 예측하는데 활용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 첨단도시개발사업(과제번호: 04핵심기술C01)에 의한 것이며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김창용, 김광명, 백승한, 홍성완 (2005), 합리적인 터널 계측 및 막장관찰 방안 연구, 2005년 한국건설기술연구원 지반연구부 사이버 연구성과 발표회, pp. 1-25.
2. 에스케이건설 (2001), "터널 3차원 계측자료 경향선 및 영향선 분석알고리즘 개발", 최종보고서.
3. 이대혁, 방준호 (2000), "터널 내공변위 계측센서", 건설신기술, 통권2호, pp. 53-65.

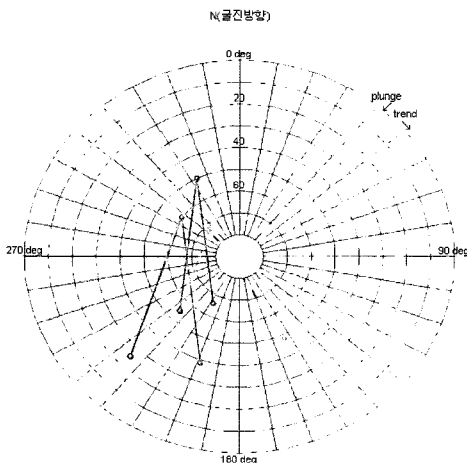
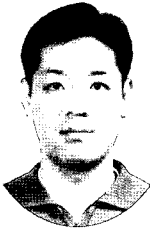


그림 17. STA.20+805지점에서의 평사투영도

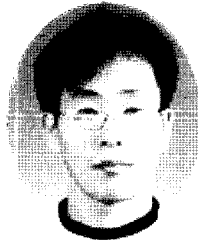
4. 이대혁, 한일영, 김기선, 진성우 (2000), “터널 시공 및 유지관리 단계 내공변위 계측시스템 적용사례 연구”, 터널기술 2권 3호, pp. 59-69.
5. 코오롱건설 (1999), “3차원 절대내공변위 계측을 통한 막장전방의 지반변화 예측시스템 개발”, 최종보고서.
6. Bock, H. (2000), European practice in performance monitoring for tunnel design verification - Part 1, Tunnels & Tunnelling International, July, pp. 35-37.
7. Leica Geosystems (2006), Total Station Catalogue, <http://www.leica-geosystems.com/>
8. Schubert, W., Steindorfer, A. (1996), Selective displacement monitoring tunnel excavation, Felsbau, Vol. 14, No. 2, pp. 93-97.
9. Sokkia (2006), Total Station Catalogue, <http://www.sokkia.co.kr/>



방 준 호

SK건설(주)
연구소
선임연구원

E-mail: jhbang-a@skec.co.kr



김 기 영

SK건설(주)
연구소
주임연구원

E-mail: kykim-e@skec.co.kr



정 용 훈

SK건설(주)
연구소
주임연구원

E-mail: jyh@skec.co.kr