

# 터널의 내공변위 계측 시스템 개발 Development of Tunnel Convergence Measuring System

정성혁\* · 박찬홍\*\* · 이재기\*\*\*

Jung Sung-Hyuk · Park Chan-Hong · Lee Jae-Kee

## 要 旨

터널공사의 시대에 따라 그 시공방법이 많은 발전을 해왔으나 아직도 시시각각으로 일어나는 터널 공사중의 사고는 반드시 극복해야할 과제다. 이러한 위험요소를 빨리 발견하고 대비하기 위해서는 계측의 정확성과 신속성이 요구되고 있으나 아직도 천단 침하 및 내공변위 계측에 줄자, 레벨 또는 토탈스테이션 등을 이용하는 일반적인 측량 방법에 의존하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 산업사진측량기법을 이용하여 터널의 내공변위를 더욱더 정밀하고 신속하게 측정할 수 있는 기법을 제시하므로서 산업사진측량을 응용한 터널계측의 발전과 향후 무인 자동 계측시스템의 개발에 이바지 하고자 하는데 목적이 있다.

## ABSTRACT

Together with the requirements of tunnels, its construction methods and technologies have been pretty much developed, but frequent accidents happened under the constructions are just one of important problems which should be improved. To detect the potential hazardous factors in or ahead of time, speedy and accurate measurement are absolutely required, but currently surveying method using tapes, level and total station, has been generally taken in measuring of tunnel convergence and crown.

The purpose of this study is, as using of "Industrial photogrammetry" system which is supplying more accuracy and speedy in the measure of tunnel convergence, aimed at promotion of tunnel measurement technique and development in unmanned automatic measuring system in the future finally.

---

\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 공학박사, 043)273-0485, email@chungbuk.ac.kr

\*\* 정회원, 충북대학교 산업대학원 석사과정, 02)2662-4929, shinsng@yahoo.co.kr

\*\*\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 043)261-2403, leejk@chungbuk.ac.kr

## 1. 서론

고대로부터 자연이 제공한 천연동굴은 인류의 생존과 생활을 위하여 사용되었지만, 현재는 인구증가와 각종 산업시설의 급속한 발달로 인간이 활동할 수 있는 지상의 가용면적은 이미 한계에 가까워지므로 인류의 미래지향적이고 항구적인 생활환경 개선을 위해 다양한 생활공간이나 산업시설, 폐기물 저장시설, 교통시설, 통신시설, 전력시설 등 대규모의 지하 공간 건설이 절실히 요구되고 있다.

특히, 교통수단의 획기적인 발달로 교통로인 도로나 철도의 건설이 어느 때보다도 활발하게 이루어지고 있는 현대사회에서 도로나 철도의 경사는 기능에 치명적인 영향을 주기때문에 경사도를 완만하게 하기 위해 터널과 고가교량 구조물을 주로 이용하고 있다.

터널공사의 필요에 따라 그 시공방법은 많은 발전을 해왔으나 아직도 시시각각으로 일어나는 터널 공사중의 사고는 조속히 극복해야할 과제다. 이러한 위험요소를 빨리 발견하고 대비하기 위해서는 계측의 정확성과 신속성이 요구되고 있으나 아직도 천단침하 및 내공변위 계측에 줄자, 레벨 또는 토털스테이션 등을 이용하는 일반적인 측량 방법에 의존하고 있다.

터널의 변형계측을 위한 일반측량방법은 사람이 직접 그 측점에 접근해야하며, 관측에 시간이 많이 소요되고, 관측하는 기술자의 능력에 따라 큰 차이가 있을 수 있는 등 여러 문제점을 안고 있다.

따라서, 본 연구에서는 산업사진측량기법을 이용하여 터널의 천단침하 및 내공변위를 더욱더 정밀하고 신속하게 측정할 수 있는 기법을 제시하므로서 산업사진측량을 응용한 터널계측의 발전과 향후 무인 자동 계측시스템의 개발에 이바지하고자 하는데 그 목적이 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 산업사진측량의 응용으로서 터널의 내공변위 및 침

하량 등 사진으로 촬영할 수 있는 외적인 변위량을 측정하고, 현재 사용하고 있는 측정기법과 정확성, 소요시간, 소요인원 등을 연구하고자 한다.

연구방법은 현재 시공중에 있는 터널을 선정하여 근거리 사진측량 장비인 EOC사의 Photomodeler Pro 5.0 system을 이용하여 측정하고 분석함으로써 붕괴위험이 있는 터널 막장에서 정밀하고 짧은 시간 내에 경제적으로 각종 변위량을 측정할 수 있는 기법을 개발 제시하고자 한다.

## 2. 터널계측 현황분석

토사 지반에서 시공상 가장 문제가 되는 것은 굴착면의 자립성이다. 특히 지하수가 피압되고 있는 경우에는 지반이 반평하는 경우도 있고, 굴착후의 흠막이공이 늦어지거나 부족하면, 천단붕락의 위험성이 있기 때문에 면밀한 막장의 관찰 조사가 중요하다. 특히 근접해서 구조물이 존재하는 경우에는 터널내 뿐만 아니라 지표면이나 구조물의 관찰조사를 함께 할 필요가 있다.

또한, 굴착에 의한 암반거동이 침하현상으로 되어 나타나기 때문에 터널내, 노천의 침하측정도 시공관리에 도움이 되므로 철저한 계측이 실시되어야 하며, 계측항목은 다음과 같다.

### 2.1 터널계측 항목

터널의 계측항목은 일상의 시공관리를 위해 반드시 실시되어야 할 계측항목인 A 계측과 지반조건에 따라 계측 A에 추가하여 선정하는 계측항목인 B 계측으로 구분되며, 세부 항목은 다음과 같다.

- 1) A 계측
  - 터널내 관찰조사
  - 내공변위 측정
  - 천단 침하 측정
- 2) B 계측
  - 지표 지중의 침하측정

- 지중변위 측정
- 록볼트 축력 측정
- 샷크리트 응력측정
- 라이닝 응력측정
- 원지반 시료시험
- 터널내 탄성과속도 측정

## 2.2 내공변위와 천단침하 측정

천단침하 측정은 터널천단의 중심점에 설치하는 것을 원칙으로 하며, 일반적으로 레벨 또는 토털스테이션 등으로 실시하고 있다. 터널 내부의 계측 지점은 터널 외부에 설치한 수준점을 기준으로 좌상, 천단, 우상 측정의 높이값을 구한다. 측정에 따른 정밀도는 약 1~3mm 정도의 오차가 발생할 수 있으며, 레벨 대신 침하측정기로 측정하는 방법도 사용된다.

내공변위 측정은 터널 벽면간 거리의 상대적 변화를 말하는 것으로, 터널 내공의 변화현상, 침하나 용기의 절대량 및 편압현상, 변위의 증가상태 또는 변위의 안정화 시기 등 막장의 공사진행과 관련하여 많은 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 이를 통해 사고를 예방할 수 있다.

내공변위의 측선 배치의 예는 그림 1과 같이 2측선, 3측선, 6측선 배치 등이 있으며, 3측선의 경우 그림 2와 같이 D1, D2, H1 측선의 변위를 계측한다.

내공변위를 측정하기 위해서는 스틸 테이프를 주체로한 테이프식 내공변위계 또는 토털스테이션을 이용하여 관측한다. 내공변위계는 측선양단의 터널벽면에 앙카볼트를 설치하여 2측점간의 간격 변위량

을 측정한다.

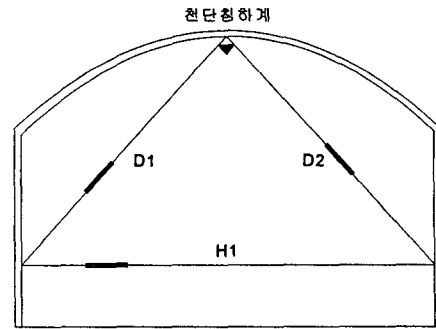


그림 2. 천단침하 내공변위측정

내공변위 및 천단침하의 측정빈도는 표 1과 같으며 변위량이 작은 터널(내공변위량이 25mm이하, 50mm이하)의 경우에는 비교적 빨리 수렴하므로 변위량이 일정치에 달하고부터 1주일 정도를 1회 2일의 빈도로 지반의 안정상태 및 변위의 수렴상태를 확인후 결정한다. 변위가 큰 터널(내공변위량이 복선단면 50mm이상, 단선단면이 25mm 이상)의 경우에는 변위량이 완전히 수렴한 후 2주간 정도 1회/2일의 빈도로 안정상태를 확인하여 결정한다.

표 1. 내공변위 천단침하의 측정빈도

측정빈도	변위속도	거리	비고
1~2회/1일	100mm/일 이상	0~1D	D: 터널의 굴착폭
1회/1일	10~5mm/일	1D~2D	
1회/2일	5~1mm/일	2D~5D	
1회/1주	1mm/일 이하	5D 이상	

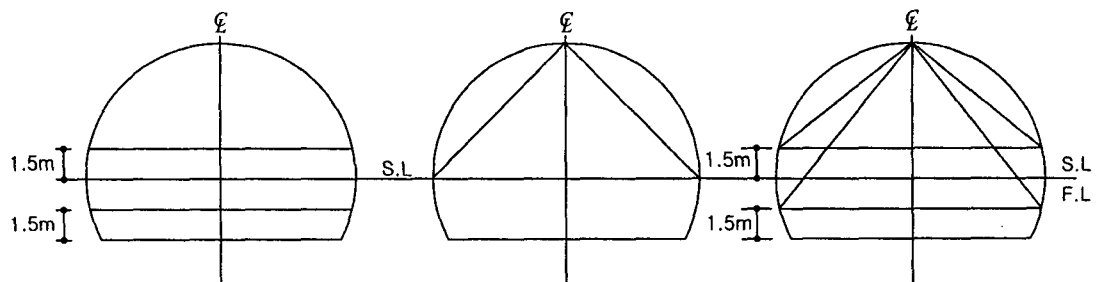


그림 1. 2측선, 3측선, 6측선 배치

이와 같이, 현재 터널 계측 및 관리는 수동계측에 의해 주로 이루어졌으나, 계측 장비, 컴퓨터, 통신장비의 발달로 점차 자동화 계측 시스템으로 바뀌고 있다. 일반적으로 수동계측은 숙련된 계측인원이 필요하며, 계측인원의 현장 상주 또는 빈번한 출장이 요구되기 때문에 비용의 지출이 많다.

또한, 계측자의 숙련도에 따라 계측오차가 발생할 수 있으며, 계측회수가 제한될 뿐만 아니라, 자료취득 후 분석 결과값을 알기까지 상당한 시간이 소요된다. 따라서 계측자가 계측 지점에 접근하여 직접 측정하지 않고 자동으로 계측할 수 있는 시스템의 중요성이 점차 증가되고 있다.

이와 같은 자동계측 관리는 인건비 절감과 계측오차를 최소화할 수 있고, 계측 자료의 가공성을 높이는 등의 장점을 갖고 있으며, 측정자료 활용을 위한 DB구축과 측정자료를 실시간 분석, 처리할 수 있는 통합 프로그램의 개발 및 구축, 그리고 공간의 개념을 극복할 수 있는 인터넷망을 이용한 자동계측시스템 및 측정자료 활용을 위한 네트워크 등이 반드시 구축되어야 할 것이다.

### 3. 산업사진측량기법

#### 3.1 산업사진측량

본 연구는 사진측량의 응용중 토목, 건축의 시설물의 크기 및 변위량을 파악하고자 하는 것이다.

과거에서 현재에 이르기까지 사진측량은 국토 기본도 및 지형도 작성을 비롯하여, 고고학, 문화재 보존과 복원, 토목·건축 시설물 위치, 크기 및 변위량 파악, 인체공학, 의학, 교통조사, 교통사고 및 도로상태조사, 산업 생산품 설계 및 제품조사, 우주개발 등 광범위한 응용분야에서 이용되어왔다.

특히, 고해상도 디지털 영상의 취득과 영상자료처리 프로그램의 성능이 강화되

면서 보다 실시간 처리에 근접하게 되었고, 사진측량의 산업 및 공업분야에 응용이 점점 증가되고 있다.

#### 3.2 카메라 검정 및 정확도 분석

대상물 촬영은 사전 실험에 의해 검정된 600만 화소의 Nikon D100 디지털 카메라와 SunSpark Ring Flash를 이용하였다. 본 연구에서는 카메라 검정 및 3차원 좌표측정을 위하여 Photomodeler Pro 5.0에서 제공하는 검정방식에 따라 실험하였다. 그림 3과 같이 검정판을 4 방향에서 총 8매를 촬영하여 카메라 검정 데이터를 프로그램에 의해 취득하였다.

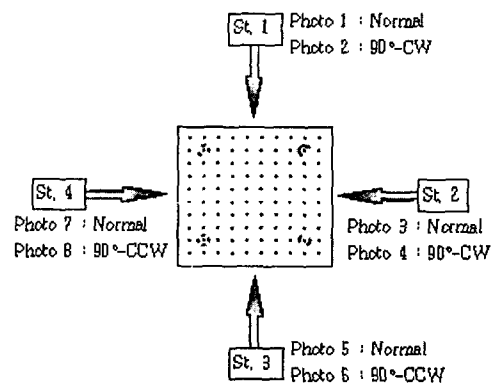


그림 3. 검정판 촬영위치와 회전각

검정된 카메라를 이용하여 3차원 측정의 정확도를 분석하기 위하여 그림 4와 같이 가로 6m, 세로 6m의 벽면에 타겟을 가로 60cm간격으로 5열, 세로 70cm간격으로 5열로 총 25매를 부착하였다.

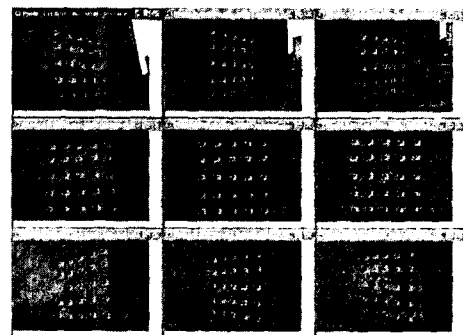


그림 4. Test Field 타겟 배치 및 촬영

3차원 측정결과 삼각수준측량 성과와 비교하여 실험에 사용한 카메라의 정확도를 분석한 결과 0.311mm의 평균표준오차를 나타냈으며, 대상물의 크기를 고려할 때 검정된 카메라를 이용하여 3차원 좌표를 계산할 경우 약 1:20,000의 정밀도로 측정할 수 있다.

### 3.3 대상물 선정 및 촬영

본 연구에서는 현재 시공중인 도로공사 현장의 터널을 연구대상으로 선정하였으며, 현장사진은 그림 5와 같다.



그림 5. 실험 대상 터널

실험에 사용할 타겟은 어두운 막장의 환경을 고려하여 카메라 플래시의 빛에 민감하게 반응할 수 있도록 광반사 타겟을 제작하여 이용하였다. 또한, 촬영된 영상에서 측정점의 3차원 위치를 자동으로 처리하기 위하여 그림 6과 같이 Coded 타겟과 원형 타겟을 터널 계측점에 부착하였다.



그림 6. 광반사 Coded 타겟

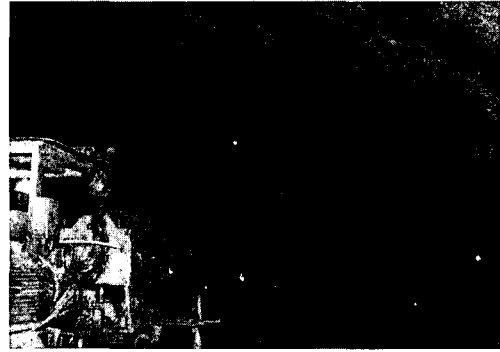


그림 7 현장 타겟팅

### 3.4 자료처리

촬영된 영상에서 타겟의 위치는 그림 8과 같이 프로그램에 의해 자동으로 취득하였으며, 표정과 광속조정을 거쳐 측정점의 3차원 좌표를 취득하였다.

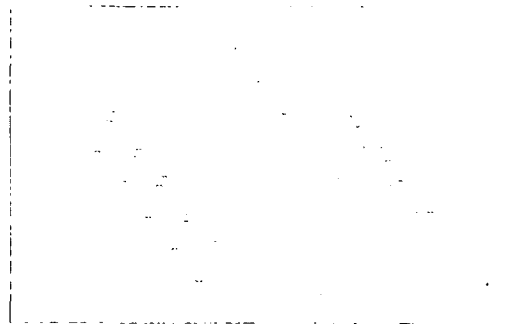


그림 8. 자동 측정된 측정점의 위치



그림 9. 터널 형상 모델링

### 3.5 결과분석

자료처리의 정확도는 선행실험을 통하여 약 1:20,000의 정밀도로 측정할 수 있으므로, 실험 대상물의 크기를 고려할 때 약 0.6mm이내의 오차로 측정할 수 있으

며, 이는 종래의 터널 측량방법과 비교할 때 허용오차를 충분히 만족하고 있다.

측정 소요시간은 타겟을 설치하기 위하여 1개 단면에 약 3분이 소요되어 5개 단면의 타겟 설치에 약 15분이 소요되었으나, 일단 타겟을 부착한 단면은 다음 계측 시 계속 이용할 수 있었다. 사진촬영은 총 10매의 사진을 촬영하였으며, 소요시간은 약 1분이 소요되었다. 자료처리시간은 메모리카드에 저장된 영상을 노트북 컴퓨터에 전송하고, 표정과 광속조정을 거쳐 측정점의 3차원 좌표를 출력하는데 약 5분이 소요되었다. 따라서, 초기 타겟팅 시간을 제외하고는 총 자료처리시간이 약 6분 소요되었으며, 특히, 작업자가 5개 단면의 측정점을 측정하기 위해 현장에서 체류하는 시간은 사진촬영을 위해 약 1분 이내의 시간만 필요하였다.

작업 인원은 타겟 설치시 3명이 작업하였으나, 사진촬영 및 자료처리과정에서는 1인의 작업자로 모든 작업이 충분히 이루어 졌다.

터널 내공변위 및 천단침하 계측이 정해진 빈도로 반복적으로 이루어져야함을 고려할 때 초기 타겟 설치에 소요되는 시간과 인원을 제외한다면 1인의 작업자가 매우 신속하게 계측지점을 측량할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 산업측량분야에 지금까지 해오던 방법들을 탈피하여 취급의 용이성, 결과의 신뢰성, 취득데이터의 정밀성, 소요시간 및 경제성 등을 고려하여 최신 산업사진측량기법으로 터널의 내공변위 및 천단침하를 측정하는 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널의 내공변위 및 천단침하 계측을 레벨, 토털스테이션 등을 이용하는 방법을 탈피하여 산업사진측량기법을 적

용하여 계측할 수 있었다.

2. 본 연구에서 검증된 디지털 카메라를 산업사진측량에 이용할 경우 1:20,000의 정밀도로 측정이 가능하며, 터널계측에 적용한 결과 0.6mm이내의 오차로 측정할 수 있다.
3. 5개의 단면을 측정하는데 총 소요시간은 21분이 소요되었으나, 초기 타겟 설치 시간을 제외한 사진촬영 및 자료처리시간은 6분이 소요되었다. 특히, 막장 현장에서 이루어지는 사진촬영에 소요되는 시간은 1분 이내이었다.
4. 초기 타겟 설치에 필요한 인원과 장비를 제외하면, 사진촬영에서 자료처리까지 1인의 작업자를 통해 충분히 결과를 취득할 수 있었다.

이상과 같은 연구를 통하여 열악한 작업환경 즉, 어둡고, 공기가 탁하며, 항상 붕괴의 위험을 안고 있는 터널 막장에서 오랜 시간을 정해진 주기에 따라 반복적으로 측량을 해야했던 방법을 지양하고 터널에 체류하며 작업하는 시간을 최소화하고, 최소의 작업인원으로 많은 측정점의 자료를 취득할 수 있는 기법을 제시할 수 있었다. 향후, 유/무선 디지털 영상 데이터를 전송할 수 있는 카메라와 본 시스템을 이용하여 무인 자동 계측시스템에 관한 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

1. "터널 및 강섬유 보강 슛크리트 실무서", 선경건설주식회사, 1994.
2. "지반계측", 일신엔지니어링, 2002.
3. 임한욱, 김치환, "터널공학", 구미서관, 2004.
4. 남상욱, "토목시공학", 청문문화사, 2002.
5. E., M. Mikhail, "Modern Photogrammetry", John Wiley & Sons, Inc., 2001.