

## 터널 시공 중 수평경사계를 이용한 변위 분석

장원일<sup>1)\*</sup>, 양형식<sup>2)</sup>, 정소걸<sup>3)</sup>

### Analysis for Measuring Displacement of Tunnel Face using Horizontal Inclinometer

Won-Yil Jang, Hyung-Sik Yang and So-Keul Chung

**Abstract** Displacement of tunnel face is important issues for the evaluation of tunnel safety. In this study, conventional convergence and displacement data measured from horizontal inclinometer were analyzed to investigate the trend and characteristics of tunnel deformation during construction. Trend of measured displacement agreed with general understanding of tunnel deformation prior to excavation. It shows that displacement measured from horizontal inclinometer can be used to preestimate the total deformation of tunnel.

**Key words** Tunnel, Convergence, Measurement, Horizontal inclinometer

**초 록** 터널의 굴착에 따라 발생하는 변형은 터널의 안정성 판단에 중요한 요인으로, 계측을 통해서 측정할 수 있으나 현장에서 재래식 방법에 의한 계측치는 시·공간적인 요인으로 계측결과에 차이를 나타내게 된다. 그러나 시공 중 터널에 발생하는 변위에 대한 연구는 수치해석적 연구가 대부분이며 실제 현장 계측연구는 그 사례가 많지 않다. 본 논문에서는 대상 터널에 대한 재래식 방법에 의한 내공변위 계측치와 선행변위를 계측할 수 있는 방법인 수평경사계를 설치하여 얻은 천단변위를 분석하여 상호 비교하였다. 또한 이를 통하여 시공 중 터널의 변위 발생 양상을 확인하고 굴착 중 터널의 변위 특성을 파악하고자 하였다. 수평경사계 계측의 결과는 선행변위에 대한 일반적인 거동과 잘 일치하였으며, 이 계측 자료로 전체 변위 양상을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심어** 터널, 내공변위, 계측, 수평경사계

## 1. 서 론

터널이 굴착됨에 따라 터널 주변 지반의 응력 재분산과 이에 따른 압반의 변형이 발생하며, 이러한 변형은 연약한 압반이나 심도가 깊거나 혹은 대규모 공동의 경우 특별히 중요하다.

굴착기간 동안 터널의 내공변위는 일반적으로 굴착면 전진에 따른 응력변화에 대한 지반의 반응으로 간주되고 그 과정은 굴착단면 전 지반에서 시작하여 굴착된 터널 주변에 계속되며, 터널 직경의 2~3배 거리를 따라 지보시스템에 변형을 발생한다(Hoek, 2000; Lunardi,

2000).

따라서 일반적으로 터널 시공현장에서는 터널의 안정성을 판단하는 방법의 하나로 대부분 변위계측을 수행하고 있다. 이러한 변위 계측 결과는 터널의 안정성 판단에 중요한 자료로 활용될 수 있으며, 시공현장에서는 변위에 대한 허용 기준치를 제시하여 계측치가 허용 기준치 이내이면 터널의 안정성이 확보된 것으로 판단한다.

이와 같이 터널의 굴착에 따라 발생하는 변형은 터널의 안정성 판단에 중요한 요인으로 계측을 통해서 측정할 수 있으나, 현장에서 계측하는 내공변위, 천단변위 등은 계측기를 설치하는 시점, 계측기와 막장면과의 거리, 지보재 설치 등 시·공간적인 요인으로 계측결과에 차이를 나타내게 된다. 즉, 터널변위의 발생경향은 터널을 굴착하면 막장면에 도달하기 이전 상태부터 변위는 발생하게 되며, 굴착 후에도 계측을 실시하기 이전에 변위는 발생되므로 터널 굴착에 의해 발생하는 총변위는 굴

<sup>1)</sup> 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

<sup>2)</sup> 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>3)</sup> 지질자원원 책임연구원

\* 교신저자 : jwy@hhu.ac.kr

접수일 : 2007년 10월 2일

심사 완료일 : 2007년 10월 23일

착전 변위, 계측전 변위와 계측변위의 합으로 표현된다. 굴착 이전에 발생하는 변위에 대한 연구는 수치해석적 연구가 대부분이며 실제 현장 계측연구는 그 사례가 많지 않다.

Panet(1982)에 의한 축대칭 유한요소해석과 Hanafy (1980)에 의한 점탄성 모델에 의한 해석에 의하면 굴착 이전에 발생하는 변위는 최종변위에 대해 조건에 따라서 30%~20%로 계산되었다.

시간 의존적 변형거동을 보이는 암반에서 터널의 변형에 대해서는 최근에 Kontogianni 등(2006)은 geodetic record를 이용한 Patras 터널과 Paraionia Odos 터널의 굴착기간 동안 계측된 내공변위를 이용하여 특정 단면의 변형 특성인 시간의존과 단면의존의 비를 결정할 수 있다고 제안하였다.

이와 같이 내공변위는 터널 주변 암반의 거동특성에 따라 여러 형태로 모델화 되며 실제 측정된 내공변위를 모델함수에 대해 회귀 분석하여 선형변위를 예측할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 대상 터널에 대한 재래식 방법에 의한 내공변위 계측치와 선형변위를 계측할 수 있는 방법인 수평경사계를 설치하여 얻은 천단변위를 분석하여 상호 비교하였다. 또한 이를 통하여 시공 중 터널의 변위 발생 양상을 확인하고 굴착 중 터널의 변위 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 계 측

본 논문의 현장 계측은 당진-대전간 고속도로 제6공구의 2개 터널 중 363 m의 차동터널에서 수행되었다. 대상 지역의 지반은 풍화잔류토, 풍화암, 연경암층으로 구성되어 있으며, 풍화잔류토층은 기반암이 풍화작용에 의해 완전 풍화되어 형성된 지층으로 0.5~10.5 m의 두께로 분포하고 있다. 풍화암층은 기반암이 완전 풍화된

상태로 현재 토사화 되어가고 있으며, 잔류토층 하부에 0.5~7.5 m 두께로 분포하고 있으며, 연암층은 모암이 풍화작용을 받아 심한 내지 약한 풍화상태로 지표면 아래 1.0~10.0 m 심도에서 3.5~11.9 m 두께로 분포하고 있다. 이 층은 터널 시점부에서 비교적 두꺼운 층후를 보이고, 종점부에서는 얇은 층후를 나타내고 있으며, 경암층은 연암층 하부에 지표면 아래 6.8~29.0 m 심도에서 8.5~42.2 m 두께로 분포하고 있다.

### 2.1 내공변위 계측결과

내공변위 계측은 그림 1의 터널 종단면도에서 sta+695 지점과 sta+710 지점을 중심으로 수행되었다. 수평경사계는 sta+664와 sta+694 사이에 매설하고 계측은 수평경사계 27.2 m 전방에서부터 계측이 수행되었다.

따라서 계측치 분석은 수평경사계 매설 전방 sta+695 지점과 sta+710 지점의 자료를 중심으로 천단변위, 내공변위 등을 상부굴착을 중심으로 분석하였다.

굴착은 II type 암반은 1굴진장이 3.5 m이고, 수평경사계를 매설한 구역에 해당하는 IV type 암반은 1굴진장 1.5 m 1일 2회, V type 암반은 1 굴진장 1.2 m, 1일 2회로 하였다.

내공변위계에 의한 계측은 터널 단면 좌, 우측(D1, D2)와 중앙(H1)에서 수행되었고, sta+710 구간은 Itype의 암질상태(화강암질 백암류로 추정)에서 바로 IV type의 암질이 이어지는 지점으로 전체적으로 2.5~3.5 mm 정도의 안정된 변위량을 보이고 있다. 내공변위 계측치에 의하면 터널 좌측의 변위가 중앙과 우측에 비해 약 1 mm 정도 크게 발생되었다. 반면에 터널의 좌측의 경우 막장 후방 0.9D에서 약 34%의 변위가 발생한 후 2.2D 이후에 최종변위에 수렴하며, 중앙의 경우는 좌측에 비해 막장에서 거리 증가에 따라 빠르게 최종변위에 수렴하고 있다.

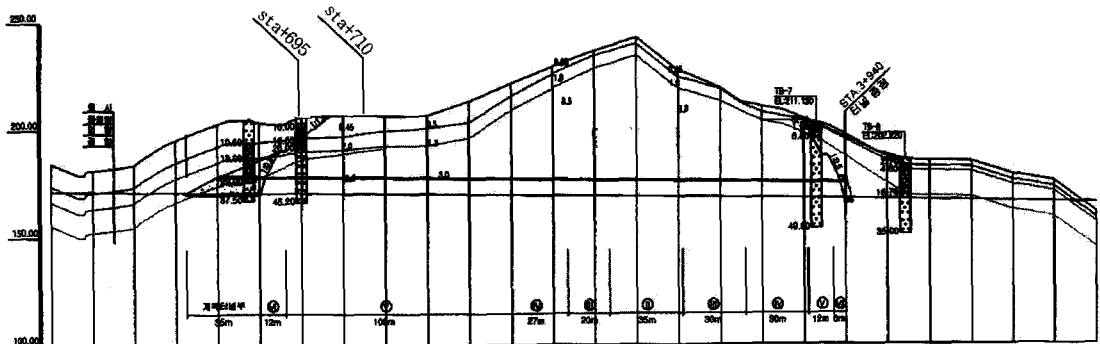


그림 1. 터널 종단면도

Sta+695 구간은 IV type과 V type의 경계지점에 위치하며, 편마암질로 추정되는 막장면이나 풍화가 상당히 진행되어 점토성 충전물이 발견되는 지점으로 sta+710 구간에 비해 좌측과 중앙은 약 1 mm 정도 큰 변위를 보이고 있다.

또한 sta+710 지점과는 달리 터널의 중앙과 좌측이 우측에 비해 약 2 mm 정도 큰 변위를 나타낸다.

내공변위 계측치에 의하면 터널의 좌측의 경우 막장 후방 1.45D에서 약 78.5%의 변위가 발생한 후 1.9D 이후에 최종변위에 수렴하며, 중앙의 경우는 좌측에 비해 초기에 발생하는 변위는 느리나 약 1.5D 이후에는 막장에서의 거리 증가에 따라 빠르게 최종변위에 수렴한다.

이와 같이 sta+695 구간과 sta+710 구간에서의 발생

변위의 차이와 터널 좌측과 중앙의 변위 발생 속도가 다른 것은 sta+710 구간은 지반이 비교적 안정적이나 sta+695 구간은 풍화가 진행되어 불안정한 영향 때문인 것으로 추정된다.

2.2 수평경사계 계측결과

초기변위를 포함한 변위를 측정하여 내공변위계에 의한 계측치와 비교하여 발생 변위 양상 등을 검토하기 위하여 수평경사계를 설치하고 계측한 결과는 그림 4와 같다.

수평경사계 매설 터널방향 끝 지점인 sta+694 지점과 sta+697 지점에서 수평경사계의 계측치를 막장 전진에 따른 천단변위의 변화와 막장 전진에 따른 최종 변위에

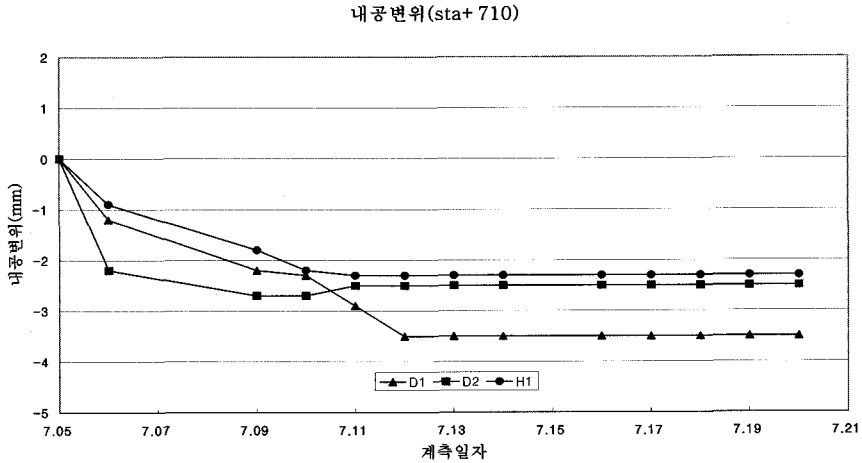


그림 2. sta+710 구간의 내공변위

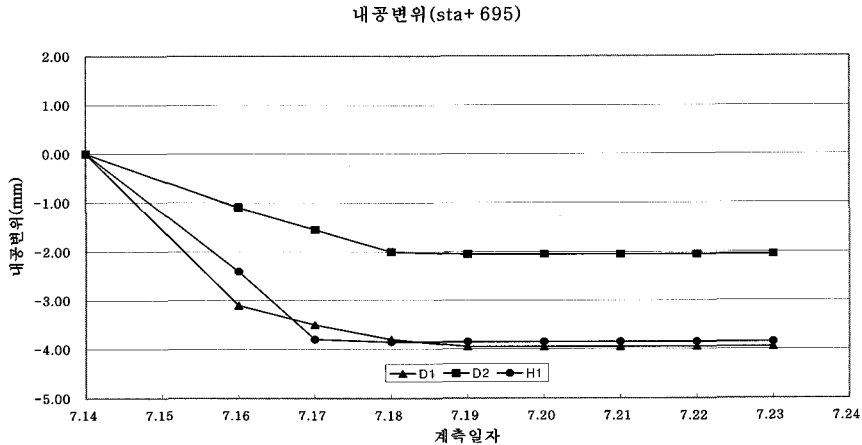


그림 3. sta+695 구간의 내공변위

대한 계측치의 변화 양상을 도시하면 그림 5와 같다.

그림 5에 나타나는 바와 같이 sta+697과 sta+694 두 지점 모두 막장으로부터의 거리에 따라 발생하는 변위는 터널직경의 약 0.5D까지는 비선, 지보설치 등으로 인하여 불안정한 구간을 지나 최대변위까지 빠른 속도로 증가한 다음 점차 일정한 값으로 수렴하고 서서히 감소하는 경향을 나타낸다.

수렴하는 변위량은 그림 5와 같이 지반 차이에 따라 sat+697 지점이 약 4~5 mm 정도 크게 나타나지만, 최종 변위에 대한 비율로 볼 때는 거의 동일한 값을 나타낸다.

### 3. 계측자료 분석

#### 3.1 내공변위 회귀분석

내공변위 계측치를 근사함수에 의해 회귀 분석하여 계측 전 변위량을 예측하고 총 변위량을 산정하였다. 모델함수는 지수함수식과 분수함수식(김호영 외, 1980)으로 sta+695 지점과 sta+710 지점에 대해 그림 6과 같이 회귀분석을 수행하였고 터널 직경에 비해 약 50% 거리 이후 계측치의 경우 회귀분석 결과는 일반적으로 알려진 것과 같이 지수함수식이 보다 적합한 것으로 나타났다.

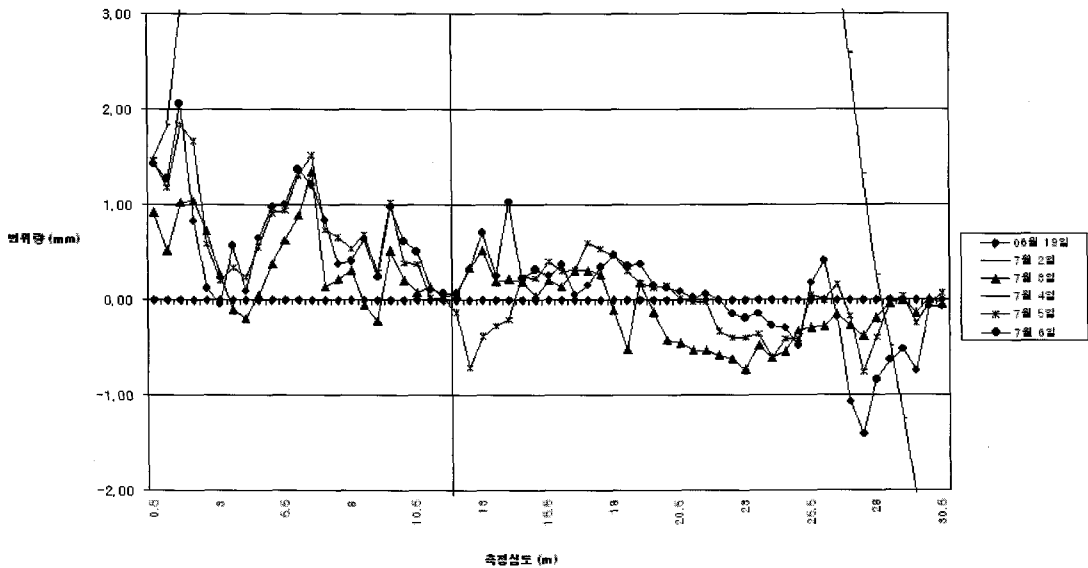


그림 4. 수평경사계 측선 지점변위

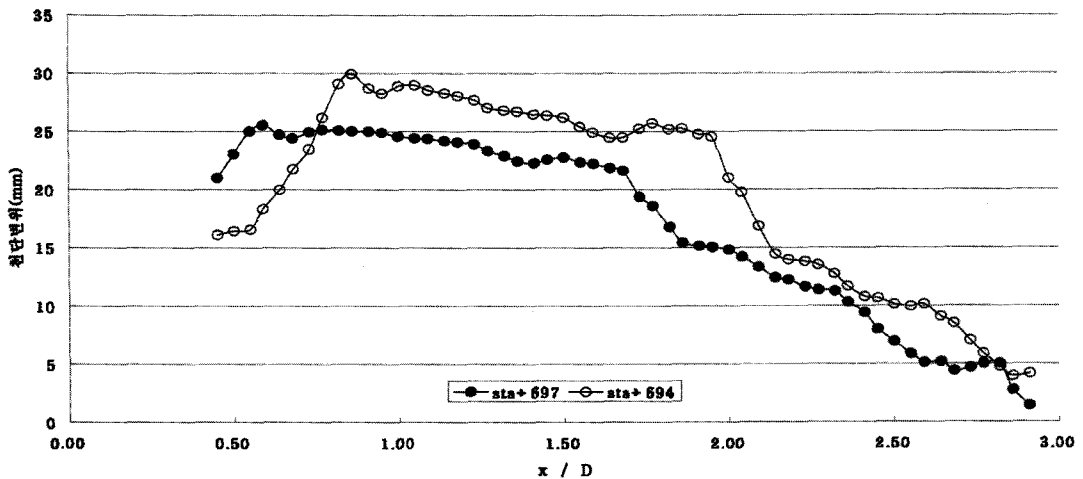


그림 5. 막장으로부터 거리에 따른 천단변위

지수함수식에 의한 회귀분석 결과를 기준으로 sta+695에서 계측 전 변위는 터널의 중앙(H1)은 24%, 터널의 우측(D2)은 38%, 터널의 좌측(D1)은 23%이며, sta+710에서는 터널의 중앙은 26%, 터널의 우측은 14%, 터널의 좌측은 52%의 값을 보이고 있다.

3.2 수평경사계에 의한 변위 분석

수평경사계에 의해 계측된 천단변위를 분석하여 가장 적합한 발생 변위의 양상을 도출하기 위해 계측자료를 1일 굴진장인 3 m 막장별로 수정 작업을 수행하였다. 또한 수정된 자료를 이용하여 계측이 수행된 동일 구간의 자료를 추출하고 이 자료의 근사함수에 의한 수행 결과는 그림 7과 같다.

위치	변위	지수함수식			분수함수식		
		H1	D1	D2	H1	D1	D2
sta+695	계측변위	3.85	3.95	2.05	3.85	3.95	2.05
	초기변위	1.83	2.41	0.60	1.67	1.67	0.70
	총 변위	5.68	6.36	2.65	5.52	5.62	2.75
	R-sq	0.9879	0.9953	0.9902	0.8870	0.8894	0.9338
sta+710	계측변위	2.30	3.50	2.50	2.30	3.50	2.50
	초기변위	0.70	0.59	2.71	0.79	1.60	0.84
	총 변위	2.73	4.09	5.21	3.09	5.10	2.98
	R-sq	0.9817	0.9821	0.9866	0.9134	0.9537	0.7981

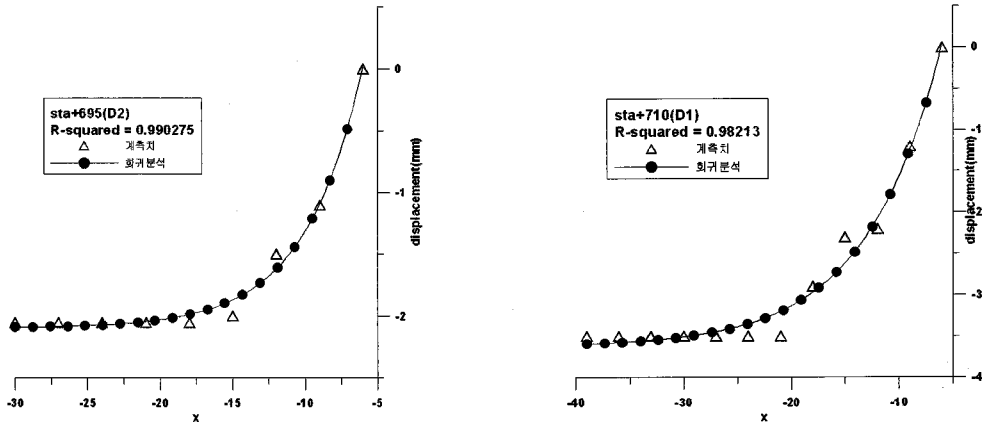


그림 6. 회귀분석 결과

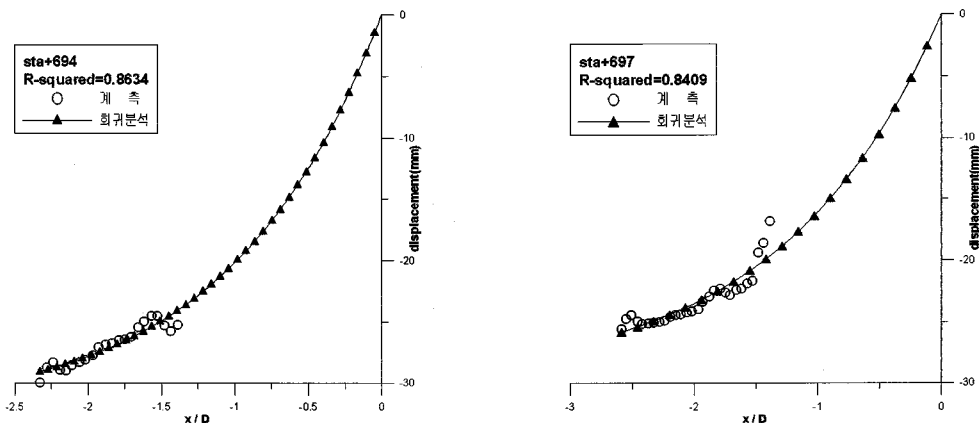


그림 7. 추출된 자료의 근사함수에 의한 수행 결과

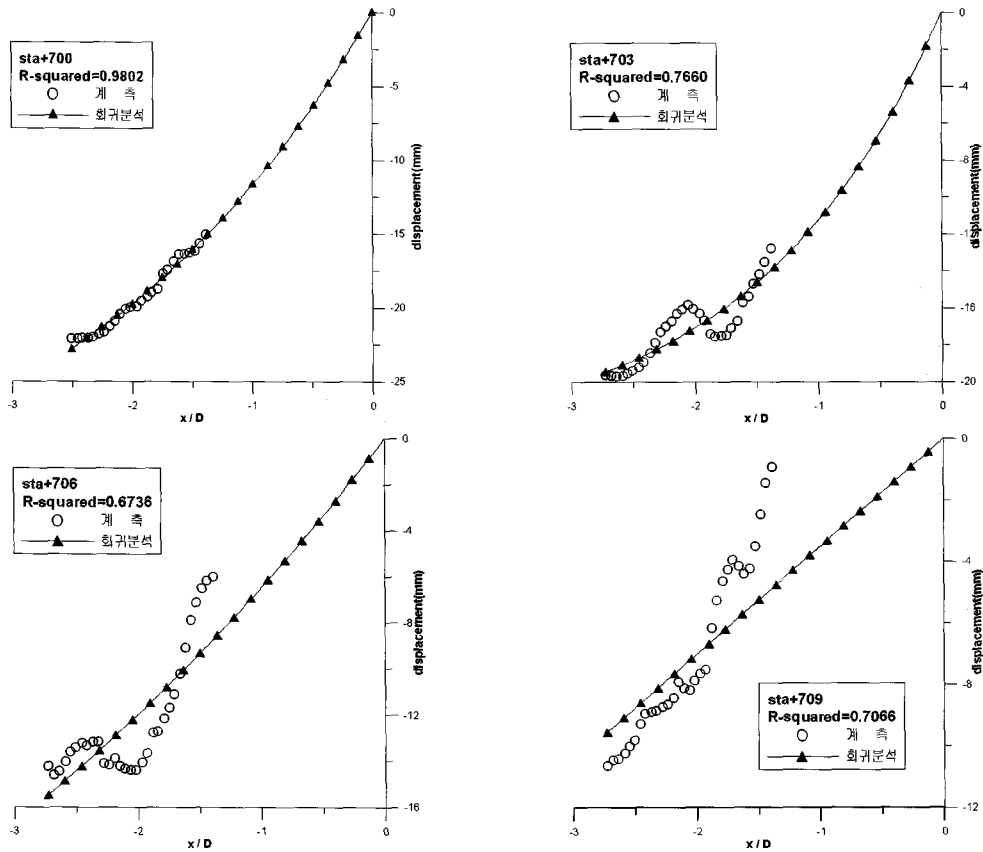


그림 7. 추출된 자료의 근사함수에 의한 수행 결과 (continued)

분석 결과 가장 근접한 결과를 나타낸 sta+700 지점의 자료를 통하여 가장 적합하다고 판단되는 발생 변위 양상을 도시하면 그림 8과 같다.

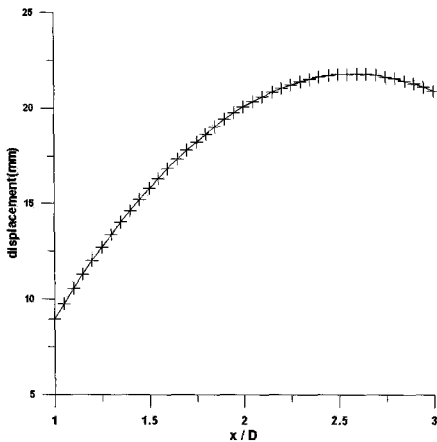


그림 8. 추출된 발생 변위 양상

수평경사계 계측자료의 분석 작업을 통하여 추출된 자료에 의한 발생 변위 양상은 굴착에 따라 낮은 속도로 변위가 발생하여 터널직경에 해당되는 1D에서 약 40%의 변위가 발생하고 2.5D 부근에서 최대변위가 발생한 후 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

대상 터널에 대한 재래식 방법에 의한 내공변위 계측치와 선형변위를 계측할 수 있는 방법인 수평경사계를 설치하여 얻은 천단변위를 분석하여 상호 비교한 결과 다음과 같은 시공 중 터널의 변위 발생 양상을 확인 하였다.

- (1) 대상 터널의 재래식 방법에 의한 내공변위 계측치에 의한 계측 전 변위는 터널의 중량은 약 25%, 지반에 따라 터널의 우측은 14%~38%, 터널의 좌측은 23%~52%의 값을 나타내었다.
- (2) 수평경사계에 의한 계측 변위는 터널직경의 약

0.5D 전까지는 비산, 지보설치 등으로 인하여 불안정하며, 이 구간을 지나 최대변위까지 빠른 속도로 증가한 다음 점차 일정한 값으로 수렴하고 서서히 감소하는 경향을 나타낸다.

- (3) 계측자료의 수정 작업을 통하여 추출된 자료에 의한 발생 변위 양상은 터널직경에 해당되는 1D에서 약 40%의 변위가 발생하고 2.5D 부근에서 최대변위가 발생한 후 감소하는 것으로 분석되어 수평경사계에 의한 계측 자료로 전체 변위 양상을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

**참고문헌**

1. 김호영, 박의섭, 1980, 터널 내공변위의 이론과 계측결과의 분석, 터널과 지하공간, Vol. 3 80~95.
2. Hanafy, E.A. & J.J. Emery, 1980, Advancing face simulation of tunnel excavation and lining placement, 13th Canadian rock mechanics symp., CiMM, Montreal, 119~125.
3. Panet, M & A. Guenot, 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling, 82, IMM, Brighton, 197~204.
4. Villy Kontogianni, Panos Psimoulis, Stathis Stiros, 2006, What is the contribution of time-dependent deformation in tunnel convergence?, Engineering Geology, 264-267.
5. Hoek, E., Marinos, P., 2000, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, Tunnels and tunnelling international 32, 45-51.
6. Lunardi, P., 2000, The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, T&T international ADECO-RS Approach.
7. Aydan, O., T. Akagi and T. Kawamoto, 1993, The Squeezing Potential of rocks Around Tunnels; Theory and Prediction, Rock Mechanics and Rock Engineering, 26, 137~163.

**장 원 일**



1977 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 1980 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
 Tel: 051-410-4438  
 E-mail: jwy@hhu.ac.kr  
 현재 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

**양 형 식**



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
 1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사  
 Tel: 062-530-1724  
 E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
 현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

**정 소 걸**



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