

통계적 방법에 의한 터널 최종변위량 예측에 관한 연구

Prediction Of Ultimate Displacement in Tunnel Using Statistical Method

정형식¹⁾, Hyung-Sik Chung, 김성환²⁾, Sung-Hwan Kim, 이상돈³⁾, Sang-Don Lee, 김낙영⁴⁾, Nag-Yong Kim

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.

²⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 수석연구원, Research Director, Geotechnical Div. of Highway Research Center, Korea Highway Corporation

³⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Div. of Highway Research Center, Korea Highway Corporation

⁴⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Div. of Highway Research Center, Korea Highway Corporation

SYNOPSIS : The prediction of tunnel behavior at the investigation and design stages mostly do not match with actual behavior of tunnel due to the complex ground characteristics. Therefore, in tunnelling, it is important to analyze the characteristics of ground behavior and to appreciate the safety of support members by daily observation and instrumentation at tunnel face. In this study, it was performed to predict behavior of the tunnel through the field measurements.

KEY WORDS : Instrumentation, Convergence, Determination Coefficient, Displacement

1. 서론

지반굴착으로 인한 터널의 최종 변위량을 예측하기 위한 방법으로서 내공변위 곡선을 시간과 거리에 따른 여러 함수로 표현하여 최종변위를 예측하거나 과거의 시공실적을 바탕으로 굴착개시 후 초기 변위량에서 최종 변위량을 통계적 방법을 통해 예측하려는 연구가 진행되어왔다. 국내에서는 도로터널의 계측 결과를 일반화된 함수식으로 회귀분석하므로써 측정 전 변위를 포함한 최종 변위량을 예측한 경우와 도심 지하철 터널에서의 계측사례를 바탕으로 최종 변위량을 예측한 경우 등이 있다. 본 논문에서는 통계적 방법을 이용하여 터널 굴착시 최종 변위량을 예측하는데 있어 이를 위하여 기 시공된 터널의 계측결과를 이용, 굴착 개시 후 초기의 내공변위량과 최종 내공변위량과의 관계를 통계적 방법에 의해 예측하는 방법과 내공변위 곡선을 시간과 거리에 따른 여러 함수로 나타내어 예측하는 방법들에 대해 기존의 연구결과들을 고찰한다. 또한 실제로 시공 중인 국내 터널 현장의 계측결과를 이용하여 통계적인 방법으로 굴착 초기의 변위량으로부터 최종 변위량을 예측한다. 최종 변위량에 포함되어야 하는 굴착 직후 최초 계측시점까지의 미계측 구간 변위량은 다음의 두 가지 방법을 사용하여 추정하였다. (1) 각 계측자료 조사지점(총 30개소, 90 측정점)에 대해 미계측 구간인 막장으로부터 최초 계측위치까지의 거리를 조사하고 막장거리 증가에 따른 내공변위의 변화를 지수함수로 근사해석하여 추정하였다. (2) 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 변위 증가경향이 최초 계측시부터 막장거리 1D(D:터널직경)까지의 변위 증가경향과 일치한다고

가정하고 굴착 개시점을 원점으로하는 내공변위량과 막장거리의 관계그래프상에서 막장거리1D(D:터널직경)인 위치까지의 계측결과들을 선형 회귀분석하여 추정하였다. 위의 두 가지 방법으로 추정된 계측 전 변위량을 포함한 상반굴착 초기의 변위량(막장거리 1D에서의 변위량)과 상반 최종 변위량들의 관계를 통계적으로 표현하므로써 최종적으로 둘 사이의 상관관계를 각각 유도하였다.

2. 터널 최종변위 예측방법

2.1 통계적 방법에 의한 예측

통계적 방법에 의한 최종변위 예측방법은 이미 시공이 완료된 터널의 계측결과를 이용하여 각 계측지점에 대해 굴착 초기단계에서의 변위량(혹은 변위속도)과 최종 변위량의 크기를 비교하고 그 결과를 통계분석하여 상호간의 상관관계를 유도해내는 방법이다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 얻어진 상관관계는 비슷한 조건의 시공 중인 터널에 대해서 굴착 초기의 측정 변위량으로부터 개략적인 최종 변위량의 예측을 가능하게 한다.

2.2 근사함수에 의한 예측

근사함수를 이용한 최종변위 예측방법은 터널 내공변위 이론을 바탕으로 굴착에 따른 내공변위의 변화를 여러가지 형태의 함수로 모델화 한 후 실제 측정된 내공변위를 특정 모델함수에 대해 회귀분석하므로써 최종변위를 예측하는 방법이다. Panet(1982)은 Axis-symmetric FEM 해석을 통해 단성암반에서 굴착면을 원점으로 한 경우 내공변위는 다음과 같은 근사함수식으로 표시될 수 있다고 하였다.

$$C = C_x(1 - \exp(-\frac{X}{X})) \quad (1)$$

여기서, C_x : 최종 내공변위

x : 막장거리

X : 굴착면의 영향거리에 관련된 상수

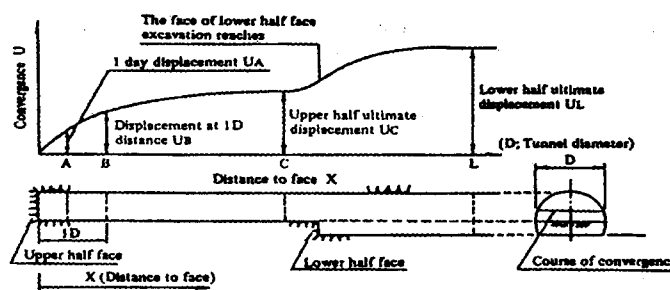


그림 1. 터널 굴진에 따른 내공변위의 변화(Junich,1987)

한편, 굴진속도가 일정하다면 식(1)은 다음과 같이 시간에 대한 함수로 표시 할 수 있다.

$$C = C_x(1 - \exp(-\frac{t}{T})) \quad (2)$$

여기서, C_x : 최종 내공변위

t : 막장진행시까지의 시간

T : 굴착면의 굴착시기에 관련된 상수

Panet의 연구결과 이후 내공변위 계측결과에 대한 여러 저자들의 해석을 통해 암반의 탄성뿐 아니라 탄소성 또는 점탄성적인 변형거동 특성을 반영한 모델함수들이 개발되었다.

3. 계측 전 변위량 예측의 필요성

일반적으로 터널 내공변위란 굴착면으로부터 그 후방의 벽면변위를 말하며 굴착 직후, 막장의 근방에서 급격히 증대하는 경향이 있다. 그러나 실제적으로 변위량 측정을 위한 계측은 굴착면으로부터 어느 정도의 거리(x_0)가 떨어져서 어느 정도의 시간(t_0)이 경과한 후에야 시작된다. 특히, 국내 시공여건상 터널 굴진시 별도의 계측기 설치시기가 주어지지 못하는 경우가 대부분이며 주·야간작업도중 록볼트 설치를 위한 천공시에만 내공변위편의 설치가 가능하므로 비교적 충실한 계측관리를 수행할 경우라도 막장면에서 설치위치까지의 거리는 대개 2~3m로 알려져 있다.(남순성,1996) 따라서 굴착 후 계측시작 전에 이미 발생한 변위(Y_0)는 계측이 지연되어 굴착 직후로부터 최초 계측시점까지의 막장 진행거리(x_0)와 시간(t_0)이 증가와 더불어 증가하게 되어 상대적으로 측정된 내공변위(Y_m)값은 실제 변형으로부터 감소하게 된다. 그러므로 측정된 결과만을 이용해 최종 변위량 예측을 실시한다는 것은 불합리하며 전체적인 내공변위에 대한 분석을 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

4. 계측 전 변위량 추정방법

4.1 지수함수에 의한 추정방법

내공변위 곡선은 여러가지 형태의 지수함수들로 표현 될 수 있으며 실제 측정된 내공변위를 지수함수에 대해 회귀분석하므로써 각 함수의 미지계수들을 결정 할 수 있다. 그러나 이 경우, 측정 전 내공변위가 고려되어야 하며 회귀분석시 미지수가 되어 해석에 포함되어야 한다. 따라서 실제 측정된 내공변위를 Y_m 이라고 한다면 최초 계측시점 전에 발생한 변위를 고려한 내공변위에 대한 지수함수는 다음과 같이 표현 될 수 있다.(김호영,1993)

$$Y_m = Y(x,t) - Y_0 \quad (3)$$

여기서, Y_m : 실제 측정된 내공변위
 Y_0 : 측정 전 내공변위
 x : 막장거리
 t : 막장거리 진행시까지의 시간

굴착 직후로부터 최초 계측시점까지의 막장 진행거리(x_0) 및 지연시간(t_0)을 알고있다면 그 동안의 발생변위 Y_0 값은 식(3)의 x 와 t 를 각각 x_0 , t_0 만큼 축이동 시킨 함수식으로 변형하므로써 추정 할 수 있다.

4.2 선형 회귀분석에 의한 추정방법

터널 굴착으로 인한 내공변위의 증가경향은 대부분 초기에 급격한 변위가 발생하고 막장이 어느정도 경과함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 이 방법은 내공변위&막장거리의 관계에서, 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 변위 증가경향이 최초 계측시부터 막장거리 $1D$ (D :터널직경)까지의

변위 증가경향과 일치한다고 가정하고 막장거리 1D까지의 계측자료를 이용, 선형 회귀분석을 실시하므로써 초기 미계측 구간에서의 발생 변위량을 추정하는 방법이다.

5. 통계적 분석방법의 현장 적용

5.1 적용대상 현장

본 논문에서는 터널 최종변위 예측의 현장적용을 위하여 터널시공방법 및 지반조건이 유사한 터널들을 선정하여 현장 계측자료를 검토하였으며 각 현장에 대한 개요는 다음과 같다.

5.1.1 A고속도로 a터널

(1) 개요

- 공사위치 : (상행선) STA.2K+370 ~ STA.3K+060, (하행선) STA.2K+360 ~ STA.3K+060
- 연장 : (상행선)= 690 m, (하행선)= 700 m ◦ 폭원 : 12.8 m ◦ 높이 : 8.3m ◦ 공법 : NATM

(2) 지질특성

시추조사결과 터널구간의 지층은 상부로부터 표토, 붕적토, 잔류토, 풍화암, 연암 및 경암층의 순으로 분포하고 있으며 터널 통과지층인 경암층의 지질상태는 모암인 편마암이 풍화를 받지않은 신선한 상태인 것으로 나타났다.

(3) 내공변위 계측현황

내공변위 측정은 상부 반단면에 대해서 각각 수평(H), 좌측(L), 및 우측(R)에 대해서 실시되었으며 상반굴착 완료 후 하반굴착시 수평(H'), 좌측(L'), 및 우측(R')에 대해서 실시된다. 계측기 설치 단면도는 그림 2.와 같다.

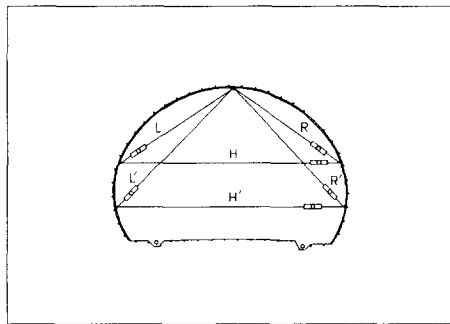


그림 2. 계측기 설치 단면도

5.1.2 B고속도로 b 터널

(1) 개요

- 공사위치 : (상행선) STA.1K+265.28 ~ STA.1K+673.28, (하행선) STA.1K+272 ~ STA.1K+680
- 연장 : (상행선) = 408m, (하행선) = 408m ◦ 폭원 : 11.1m ◦ 높이 : 7.2m ◦ 공법 : NATM

(2) 지질특성

터널 시점, 중앙, 종점부를 대상으로 총 6개공의 시추조사를 실시하였으며 시추조사결과 시점부의 지질은 RQD 75%이상의 양호한 상태의 경암인 것으로 나타났다. 그러나 터널 중앙과 종점부 구간의 지질

은 풍화암, 연암으로서 풍화암의 경우 기반암이 심하게 풍화작용을 받았으나 아직 암의 성질을 많이 보유하고 있는 상태이며 풍화암 하부의 연암층은 RQD 0~40% 범위의 매우 불량한 상태로 풍화가 진행되어 암석의 원강도를 유지 할 수 없는 상태인 것으로 나타났다.

(3) 내공변위 계측현황

내공변위 측정은 상부 반단면에 대해서 각각 수평(H), 좌측(L), 및 우측(R)에 대해서 실시되었으며 상반굴착 완료 후 하반굴착시 수평(H'), 좌측(L'), 및 우측(R')에 대해서 실시된다. 계측기 설치 단면도는 그림 2.와 같다.

5.2 변위에측을 위한 현장 계측자료 조사

대상터널들의 굴착은 모두 상·하반 분할 굴착방식으로 계획되었으며 계측자료 확보 당시에 하반굴착이 시작되지 않은 관계로 상반굴착시의 계측자료만을 대상으로 조사하였다. 변위 계측은 굴착 후 시간의 경과에 따라 실시되었으며 최초의 계측은 굴착이 이미 진행된 후, 즉 막장면에서 어느정도 떨어진 위치에서 실시되었다. 따라서 측정된 자료를 토대로 최초 계측시점에서의 막장거리를 조사하였다. 굴착에 따른 터널 변위의 변화를 가능한 정확히 파악하기 위해서는 굴착 이전 상태부터 굴착 직후 그리고 굴착의 진행에 따라 연속적이고 일률적인 계측이 필요하나 그림 3.에서도 알 수 있듯이 시공 여건상 대부분의 계측이 굴착 진행 후 어느정도 시간이 경과한 후에야 가능하였다. 또한 계측시점에서의 막장 진행거리도 일률적이지 못하고 지점마다 많은 차이가 있는 것으로 조사되어 초기 미측정 부분에 대한 변위의 예측과정이 터널의 최종변위를 파악하는 데 매우 중요한 요소로 판단되었다.

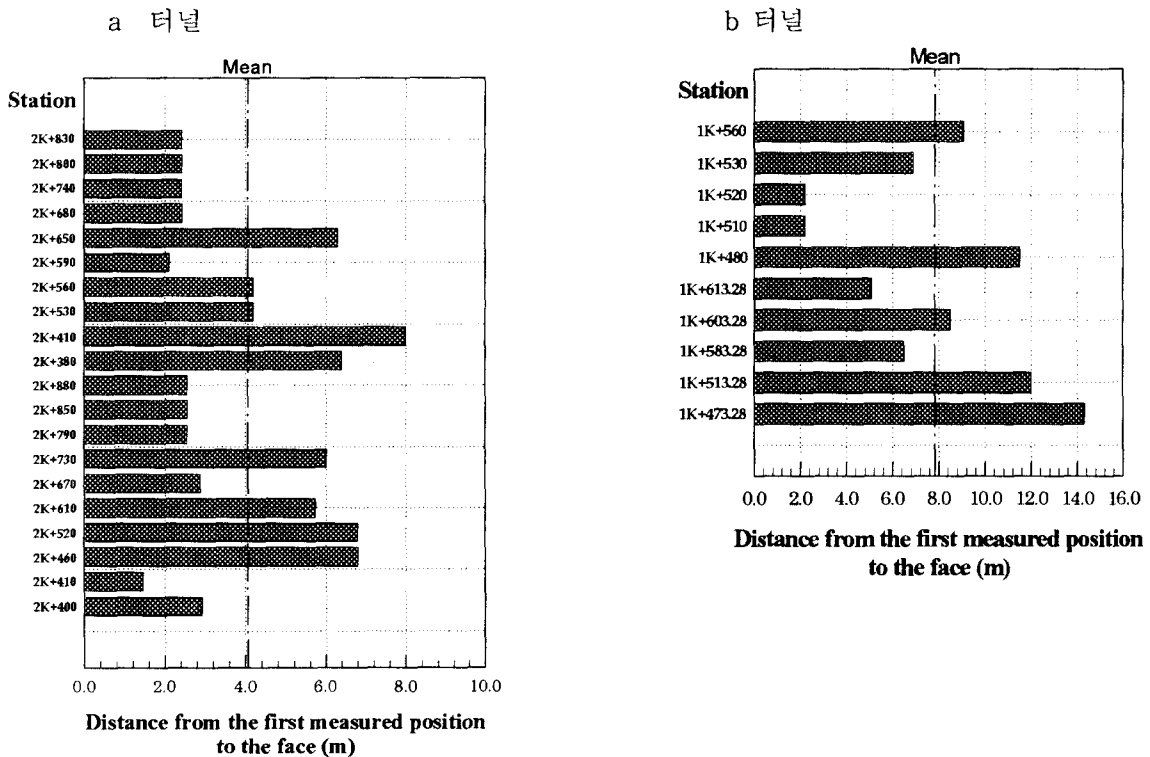


그림 3. 최초 계측지점으로부터 막장까지의 거리 (a,b 터널)

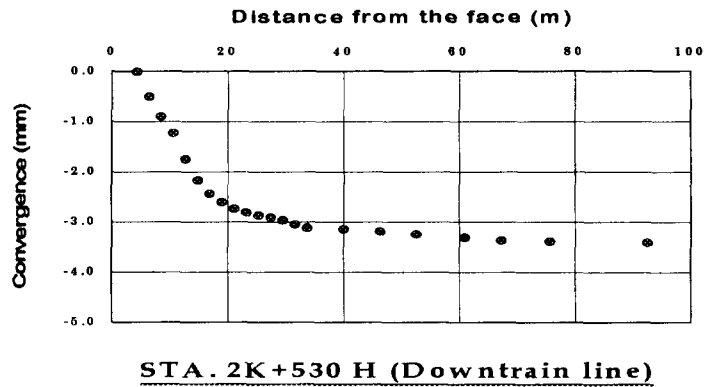


그림 4. 막장거리 증가에 따른 내공변위량 변화의 예 (수평측선)

5.3 지수함수에 의한 계측 전 변위량 추정 결과

대상터널의 계측자료 분석결과 대부분 막장의 굴진속도가 일정하지 않으므로 변위예측함수의 설정에 있어 시간에 대한 함수보다는 막장거리에 따른 함수로 표현하는 것이 합리적이라고 판단하였다. 또한 터널 주위지반은 계측자료 조사지점 대부분이 경암층이었으므로 탄성거동을 한다고 가정하고 Panet (1978)의 이론을 적용, 막장거리에 따른 실측 내공변위의 함수로서 지수함수를 사용하였다.

회귀분석식은 식(4)와 같은 지수함수 형태(Otsuka, 1981)를 기본식으로 하였으며 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 발생변위를 고려하기 위하여 식(4)을 미계측 구간(x_0)만큼 x축으로 이동시킨 지수함수 식(5)에 대하여 회귀분석을 실시하였다.

$$Y_m(x) = A(1 - \exp(-Bx)) \quad (4)$$

여기서, A, B : 계수
x : 막장진행거리

$$Y_m(x) = A(1 - \exp(-B(x - x_0))) \quad (5)$$

여기서, x_0 : 막장으로부터 최초 계측지점까지의 거리

그림 5.는 내공변위 측정결과에 대하여 지수함수로 회귀분석한 예이며 각각의 터널들에 대하여 아래와 같은 방법으로 회귀분석을 하였다.

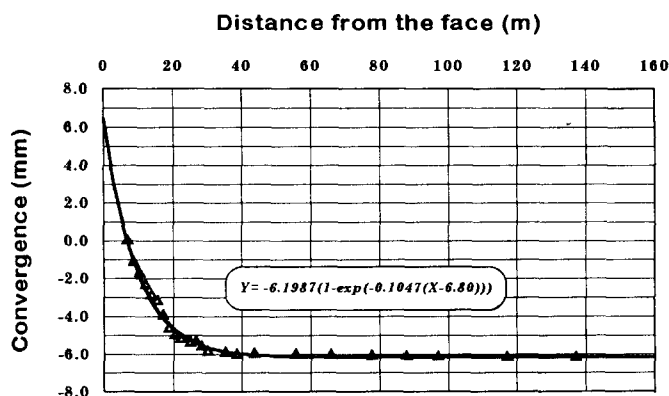


그림 5. 지수함수에 의한 계측자료 회귀분석 예

5.3.1 결과분석

분석된 회귀곡선식과 원 계측자료와의 오차는 평균 상대오차로 표시하였으며 다음과 같은 관계에 의해서 산정되었다.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|(Y_m)_{mi} - (Y_m)_{yi}|}{(Y_m)_{mi}} \quad (6)$$

여기서, S : 평균상대오차, N : 총 Data 수
 (Y_m)_{mi} : 측정된 변위, (Y_m)_{yi} : 계산된 변위

회귀분석시 계측자료의 불량으로 회귀분석이 되지 않은 지점(a 터널 상행선 STA.2K+400, b 터널 상행선 STA.1K+603.28, STA.1K+613.28)은 제외하고 지수함수식과 원 계측결과의 평균 상대오차들을 a 터널 19개 지점(57 측정점), b 터널 8개 지점(24 측정점)에 대해 각각 평균한 결과 a 터널의 경우 5.86%, b 터널의 경우 13.74%인 것으로 나타났다. b 터널의 경우 전체 평균오차가 a 터널과 비교해 큰 이유는 조사대상 지점들중 대부분을 차지하는 터널 중앙~종점부 부근의 풍화암 및 연암 구간에서 지수함수의 적합도가 저하되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 계측 전 변위량 추정수단으로서 내공변위 곡선에 대한 함수를 지수함수로 가정하여 분석한 결과 비교적 만족할 만한 결과를 얻을 수 있는 것으로 평가되었다.

표 1. 지수함수에 의한 계측 전 변위량 추정결과 예 (a 터널)

S T A		지수함수에 의한 계측 전 변위량		
		내공변위(수평)	내공변위(좌측)	내공변위(우측)
상	2K+400	—	—	—
	2K+410	1.4842	1.0500	0.8102
	2K+460	3.6222	6.4359	2.8897
행	2K+520	1.9296	0.9751	2.9957
	2K+610	2.1286	1.7823	1.0576
	2K+670	0.4131	0.2275	0.3942
	2K+730	1.4331	1.0469	1.0662
선	2K+790	0.4107	0.2919	0.3512
	2K+850	0.3631	0.3237	0.1897
	2K+880	0.2451	0.2010	0.3228

5.4 선형회귀 분석 의한 계측 전 변위량 추정 결과

표 2. 선형회귀 분석 의한 계측 전 변위량 추정결과 예 (a 터널)

S T A		굴착 초기 변위경향에 의한 계측 전 변위량		
		내공변위(수평)	내공변위(좌측)	내공변위(우측)
상	2K+400	1.0524	0.7770	2.1213
	2K+410	0.9159	0.5643	0.2940
	2K+460	2.2780	4.6000	1.4400
행	2K+520	1.4000	1.1200	1.8400
	2K+610	1.1800	1.0400	0.8400
	2K+670	0.3300	0.1767	0.3200
	2K+730	1.2600	0.7200	0.8400
선	2K+790	0.2367	0.2233	0.2800
	2K+850	0.2400	0.2267	0.1233
	2K+880	0.1233	0.1300	0.1933

5.5 상반굴착 초기 변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계

상반굴착 이후 막장거리 1D(D:터널직경)인 때의 내공변위량과 상반 최종 변위량 사이의 상관관계를 유도하기 위하여 a 터널과 b 터널의 막장거리 1D에서의 내공변위 Data와 상반 최종변위 Data에 대해 선형 회귀분석을 실시하였다. Data에 포함되야 할 계측 전 변위량은 두 가지 방법에 의해서 추정되었으므로 각 방법에 대하여 관계식을 유도하였다.

5.5.1 상반굴착 1D시 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계 (지수함수에 의해 추정된 계측 전 변위량 포함)

막장거리 1D에서의 내공변위 Data와 상반 최종변위 Data를 선형 회귀분석한 결과 그림 6.과 같은 결과를 얻었으며 결정계수(Coefficient of determination)값은 0.91로서 회귀식에 대한 정확도는 높은 것으로 나타났다. 따라서 상반 막장거리 1D때의 내공변위와 상반 최종변위와의 관계는 대략적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$U_{final} = 1.45U_{1D} + 0.85 \quad (7)$$

여기서,

U_{final} : 상반 최종 변위량(mm)

U_{1D} : 상반 막장거리 1D 때의 변위량(mm)

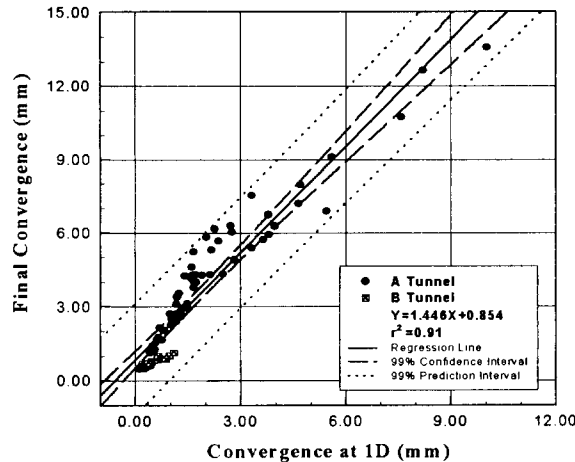


그림 6. 상반굴착 1D시 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계
(지수함수에 의해 추정된 계측 전 변위량 포함)

5.5.2 상반굴착 1D시 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계 (선형 회귀분석에 의해 추정된 계측 전 변위량 포함)

회귀분석 결과는 그림 7.와 같으며 결정계수(Coefficient of determination)값은 0.84로서 Data의 회귀분석식에 대한 적합정도는 비교적 높은 것으로 나타났다. 따라서 상반 막장거리 1D때의 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 관계는 대략적으로 다음과 같이 표현된다.

$$U_{final} = 1.51U_{1D} + 1.00 \quad (8)$$

여기서, U_{final} : 상반 최종 변위량(mm)
 U_{1D} : 상반 막장거리 1D 때의 변위량(mm)

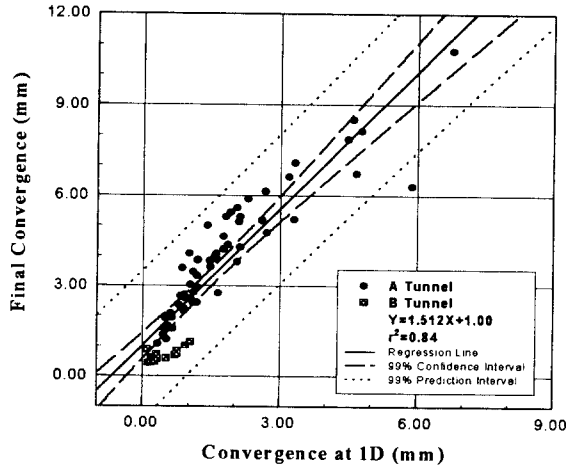


그림 7. 상반굴착 1D시 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계
 (선형 회귀분석에 의해 추정된 계측 전 변위량 포함)

5.5.3 통계적 분석방법에 의한 천단침하 예측의 상관성

내공변위의 경우 회귀분석에 대한 결정계수(Coefficient of determination)가 비교적 정확도가 높은 것으로 나타났다. 그러나 천단침하의 경우 두 방법에 대해서 결정계수가 매우 정확도가 낮은 값을 보였고 1D시의 침하량과 최종 침하량간에 특별한 상관성을 갖지 않는 것으로 나타났는데 이것은 천단침하 계측이 내공변위 계측과 달리 터널 천단부에서 상당한 계측오차를 수반하였기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. 통계적 분석방법에 의한 터널거동 예측방법의 상관도

초기예측구간의 변위 예측방법	천단침하 예측결과	내공변위 예측결과
지수함수에 의한 예측	$R^2=0.34$	$R^2=0.91$
선형회귀분석에 의한 예측	$R^2=0.638$	$R^2=0.84$

6. 결론

본 연구에서는 터널 굴착시 초기단계에서 측정된 내공변위량으로부터 최종 변위량을 예측하는 방법들에 고찰하고 국내 도로터널 현장의 계측데이터를 수집, 계측 전에 발생한 미측정 변위량을 추정하고 이를 측정변위에 포함하여 통계적인 방법에 의해 굴착 초기 변위량과 최종 변위량간의 상관관계를 유도 하므로써 전체적인 터널거동에 대한 경향을 파악하였다. 본 연구수행결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 터널의 30개 지점(90개 측정점)에 대해서 막장진행에 따른 내공변위량의 변화를 지수함수식에 의해 회

귀분석한 결과 평균 상대오차는 10% 이내로써 탄성암반에서 내공변위는 지수함수로 표현된다는 기존의 이론과 비교적 일치함을 확인하였다.

- (2) 계측 전 변위량 추정방법으로서 기존의 지수함수를 이용한 방법과 비교해 간단하여 현장에서 용이하게 적용할 수 있는 선형 회귀분석에 의한 추정방법을 제안하였으며 이를 최종변위 예측에 적용하였다.
- (3) 지수함수에 의한 계측 전 변위량(미계측 구간 변위량) 추정시, 계측이 지연되어 최초 계측위치로부터 막장거리의 이격거리가 커질수록 지수함수의 특성상 계측 전 변위량을 과다하게 추정하는 경향이 있으므로 비교적 이격거리가 큰 경우에는 선형 회귀분석에 의한 방법이 보다 현실적인 것으로 판단된다.
- (4) 현실적으로 계측이 가능한 횡변위량을 100%로 가정하고 초기 계측지점의 지연에 따른 변위량의 비율을 비교한 결과, 본 연구에서 대상으로 터널의 초기계측지연에 대한 계측량의 손실은 약 20%~30% 정도인 것으로 추정된다.
- (4) 통계적인 방법을 통하여 막장거리 1D시의 내공변위량과 최종 수렴변위량과의 상관관계를 유도한 결과 막장거리 1D시 변위량에 대한 최종 변위량의 비는 계측 전 변위량 추정수단으로서 지수함수를 이용한 경우 약 1.45, 선형 회귀분석을 이용한 경우 약 1.51로 나타나 두 방법에 큰 차이가 없었으며 이로부터 터널 최종변위는 막장거리 1D시 변위량의 약 1.4~1.6배의 범위에 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 남순성(1996), “암반특성에 따른 NATM터널의 시공중 거동에 관한 연구”, 공학박사학위논문, 한양대학교대학원.
2. 배규진(1996), “터널 거동 해석 및 계측”, 한국지반공학회, 지반공학시리즈7, pp. 393~444.
3. 김호영, 박의섭(1993. 6), “터널 내공변위의 이론과 계측결과의 분석”, 터널과 지하공간, 한국암반역학회 제3권, pp. 80~95.
4. 정한중, 조경태, 김태영, 김용일(1993. 3), “도시 NATM터널에서 변위 예측기술의 적용 사례연구”, 한국지반공학회 '93년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 27~31.
5. Junichi S., Masayuki O., Hiroyuki I. & ToshihikoM(1987), “Adaptibility of convergence Forecasting Method for Controlling Tunnel Construction. 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics”, Sakurai(ed.), Kobe, pp. 907~916.
6. Panet M. & A. Guenot(1982), “Analysis of convergence behind the face of a tunnel”, Tunneling 82, IMM, Brighton, pp. 197~204.
7. 日本道路協會(1983), “道路トンネル觀察・計測指針”, pp. 125~132.
8. 高橋文雄, 佐雉聲介, 關順一, 岡園正之(1986), “變形の大きいトンネルでの計測管理事例”, 土と基礎, Vol. 34, No. 2.
9. 吉川恵地, 祖倉俊弘, 日吉直, 遠蘇眞一(1983), “NATM計測実績の統計分析”, 第5回岩盤力學に関するシンポジウム.