

천층 광폭터널의 내공변위 및 침하거동특성 예측을 위한 수치해석적 연구

문승백¹⁾ · 송승곤²⁾ · 양형식³⁾ · 전양수⁴⁾ · 한공창⁵⁾

A Numerical Analysis Study for the Prediction of Convergences and Characteristics of Subsidence behavior in Shallow, Wide Tunnel Excavation

Seung-Beak Moon, Seung-Gon Song, Hyung-Sik Yang, Yang-Soo Jeon and Gong-Chang Han

Abstract. Final convergence of tunnel crown due to excavation have been well predicted by regression analysis which is expressed as a function of convergence curve on a time and distance dependent. In this study, the validity of the equations for shallow, wide tunnel was investigated by measurement and numerical analysis. Studied tunnel(Sansoo Tunnel) is located at the boundary of downtown and mountain park. Exponential predictions equation was better coincided with measured data than fractional equation for studied tunnel, although the ground was expected to be elasto-plastic. This is because weathered rock ground is changed elasto-plastic ground into elastic ground by multi-steel grouting and forepoling.

Keywords: convergence, prediction, shallow-wide tunnel, displacement, exponential function, fractional function

초 록. 터널 굴착으로 인한 천반의 최종 변위는 내공변위 곡선을 시간과 거리에 따른 임의의 함수로 표현하여 예측할 수 있다. 본 연구에서는 도심지 주변의 천층 광폭터널에서의 변위 예측식의 적합성을 검토하였다. 연구 대상 터널은 도심과 무등산 공원의 경계에 위치하여 터널 상부의 토피고가 낮고 폭이 넓은 터널이다. 연구 결과, 토피고가 낮은 갱구부에서 풍화암 지반이 강관다단 그라우팅 및 forepoling 보강에 의해 탄소성지반이 아닌 탄성지반에 준하는 특성을 나타내는 풍화암 내지 연암층으로 된 연구대상 터널의 경우 지수함수식이 더 적합한 것으로 나타났다.

핵심어: 내공변위, 예측, 천층광폭터널, 변위, 지수함수, 분수함수

1. 서 론

터널의 계획단계에서 충분히 조사하여 얻어지는 정보에는 많은 한계가 있어, 지층이 복잡한 지반을 대상으로 하는 경우에는 터널의 거동이 설계시의 예측과 다르다. 따라서, 터널 굴진시 지반거동을 측정하고 그 결과를 설계시의 예측과 비교함으로써 당초 설계의 타당성 및 시공법의 적부를 검토하고, 필요에 따라 설계를 변경하기 위해서 계측이 반드시 요구된다.

본 연구대상의 터널은 도심지 주변에 시공되고 있으며, 터널 상부의 토피고가 8~24 m로 낮고 폭이 3차선 병렬 터널로 13.1 m에 이르는 비교적 폭이 넓은 터널로서

내공변위의 측정이 수행되었다. 특히 갱구부는 지형, 지질 외에도 기후 및 기상 등 외적인 요인에 의해서도 큰 영향을 받을 수 있으므로 갱구부 주변을 중심으로 터널 내 변위계측을 실시하였으며, 터널굴진에 따른 막장전방의 선형변위의 예측에 대해서 연구하였다.

지반굴착으로 인한 터널의 최종 변위량을 예측하기 위한 방법으로서 내공변위 곡선을 시간과 거리에 따른 임의의 함수(지수함수, 분수함수 등)로 표현하여 최종변위를 예측하거나 과거의 시공실적을 바탕으로 굴착개시 후 초기 변위량에서 최종 변위량을 통계적 방법을 통해 예측하려는 연구가 진행되어왔다.¹⁻⁵⁾

국내에서도 도로터널의 계측결과를 일반화된 함수식으로 회귀 분석함으로써 측정 전 변위를 포함한 최종 변위량을 예측한 경우와 도심 지하철 터널에서 계측사례를 바탕으로 최종 변위량을 예측한 경우 등이 있다.⁶⁾

본 연구에서는 시간과 거리에 따른 근사방법에 의한 최종변위 예측기술의 광폭 천층 터널에 대한 적용가능성을 알아보기 위하여 터널현장들에서 실측한 내공변위

¹⁾정회원, (주)희송지오테크 근무

²⁾전남대학교 자원공학과 석사과정

³⁾정회원, 전남대학교 자원공학과 교수

⁴⁾정회원, 한국지질자원연구원 연구원

⁵⁾정회원, 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 책임연구원

접수일 : 2000년 7월 31일

심사 완료일 : 2000년 8월 30일

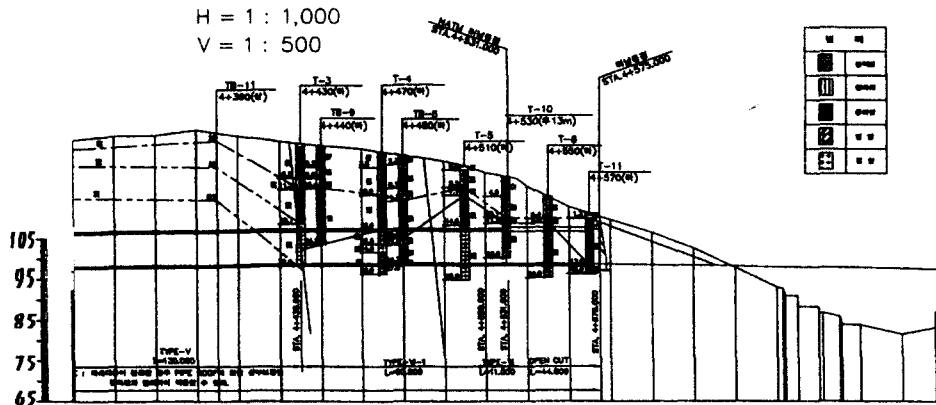


Fig. 1. A view of cross-section.

및 천단침하 계측결과들을 이용하여, 변위예측 기술의 타당성 및 정확도를 분석·검토하였다.

Fig. 1은 본 연구 터널의 종단면도를 도시한 그림이다.

2. 현장개요 및 계측

2.1 적용 터널의 지반특성 및 터널계측

본 지역에 분포하고 있는 지반의 특성을 보면 기반암은 화강암질 편마암으로서 국부적으로 맥암이 관입되어 있으며 터널노선 중앙부~종점부에 넓게 분포되어 있는 화산 쇄설성 퇴적암인 응회암이 국부적으로 혼재되어 있었다. 또한 본 연구에서 수치해석이 적용된 종점부의 경우 응회암을 기반암으로 한 지역으로서 지표로부터 연·경암의 분포가 불규칙하여 깊은 심도에서 경암층 하부에 파쇄연암 또는 풍화암이 국부적으로 나타나기도 하였다. 또한, 지형이 얇은 하행선 우측으로는 지표에서 3~5 m 정도까지 붕적층이 분포되어 있어 이 지역은 심하게 풍화된 HW 등급 및 중간 풍화된 MW 등급이 함께 발견되었다.

변위계측은 굴착 후 시간의 경과에 따라 실시되었으며 최초의 계측은 시공 여건상 굴착이 이미 진행된 후, 즉 막장면에서 어느 정도(3~6 m) 떨어진 위치에서 실시되었다. 산수터널의 상·하행선에 대한 계측기에 대한 설치수량 및 측정빈도는 Table 1과 같다.

3. 계측 및 계측결과의 해석

3.1 터널 내공변위의 이론

터널의 변형은 굴착면 진행의 영향과, 굴착면 주변의 하중 이력에 대응한 암반의 변형특성에 의해 결정된다. 또한 암반보강의 종류와 특성에 따라서도 변형이 달라진다.

터널 벽면에서 발생하는 변위의 일반적인 형태는 Fig. 2와 같다. 굴착이전에 발생하는 변위 U_a 는 암반의 변형특성에 의존하는 것으로 알려져 있다.^{2,3)}

Panet(1982)에 의한 Axi-symmetric FEM 해석에 따르면 최종변위 U_f 에 대한 U_a 의 비율은 탄성해석에서 27%, 소성해석시 Von Mises 파괴조건일 때 30%, 완전탄소성 Drucker 파괴조건에서 20%, Strain-softening 재료에서는 21%로 계산되었다. Hanafy (1980)에 의해 수행된 점탄성 Axi-symmetric FEM 해석의 경우, U_a 의 비율은 30% 내외로 나타났다. 한편 Vassilev(1988)는 터널 형상에 의한 영향을 규명하기 위하여 3차원 탄성 FEM 해석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 즉 U_a 의 비율은 28~32%로서 터널의 형상에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

전술된 세 가지 사례는 모두 보강이 없는 경우에 대한 해석으로서, 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉, 일반적인 탄성, 점탄성 또는 탄소성 암반에서 보강이 없는 경우 굴착면 이전에 발생하는 변위는 작업장

Table 1. Number and frequency of measurement.

계측항목	계측기기	수량	계측간격	설치시기	측정빈도		
					0~15일	0~15일	0~15일
내공변위	Tape- Extensometer	330개소	15~50 m	막장후방 5~8 m	1~2회/일	2회/주	1회/주
천단침하	Bolt, Level	66개소	15~50 m	막장후방 5~8 m	1~2회/일	2회/주	1회/주

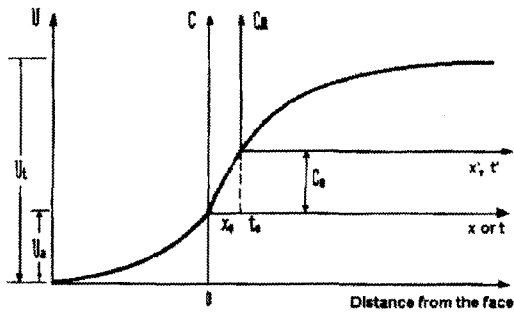


Fig. 2. Generalized form of tunnel convergence.

후방에서 응력조건이 2차원 상태로 수렴될 때까지 발생하는 최종변위의 20~35% 수준이 되며, 그 값은 터널의 형상에 큰 영향을 받지 않는다.^{4,6)}

내공변위(Convergence)는 굴착 이후 시간의 경과에 따라 계속되며 계속된 결과는 시간과 굴착면 거리의 함수로서 각 암반의 조건에 따라 다음과 같은 여러 가지의 식으로서 나타낼 수 있다.

탄성암반에서 굴착면을 원점으로 한 경우 내공변위는 다음 (1)식과 같이 지수함수로 표시될 수 있다. 이 경우 내공변위는 터널 폭의 2~3배 이내에서 수렴하는 것으로 나타났다.³⁾

$$C = C_x(1 - \exp(x/X)) \tag{1}$$

여기서, C_x : 최종 내공변위
 x : 막장거리

X : 굴착면의 영향거리에 관련된 상수

굴진속도가 일정하다면 (1)식은 (2)식과 같이 시간에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

$$C = C_x(1 - \exp(t/T)) \tag{2}$$

Otsuka(1981)는 Kelvin-Voigt 모델을 이용하여 암반의 점탄성 해석을 실시하고 내공변위의 이론적인 변형특성을 다음 (3)식으로 단순화하였다.

$$C = a(1 - \exp(-bx)) + c(1 - \exp(-dt)) \tag{3}$$

(3)식의 전항은 굴착면 진행에 의한 영향을 나타내며, 마지막 항은 암반의 시간 의존적 변형특성을 나타내는 것으로서 내공변위는 두 변위의 합으로 표시된다.

한편, 소성변형이 있는 경우에 대해서는 수치해석 결과를 이용하여 다음 (4)식이 제안되었다.

$$C(x) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{1}{1 + (x/(0.84r_p))} \right)^2 \right\} \tag{4}$$

여기서 r_p 는 소성영역의 반경이다.

(4)식은 굴착면 진행의 영향만을 고려한 것이며 소성 변형이 시간 의존적으로 발생한다면 이에 의한 변위가 부가되어야 한다. 계측자료의 분석결과, 시간 의존적 변형은 (3)식과 같이 독립적으로 발생하는 것이 아니라 굴착면 진행에 의한 영향을 받는 것으로 밝혀졌는데, 이는 Kaiser(1980)에 의해 제시된 바와 같이 하중이력의 영향이 시간 의존적 변형에 관련됨을 의미한다 하겠다. 따라서 내공변위는 다음 (5)식과 같이 표시될 수 있다.

$$C(x, t) = C_1(x) + A(x)C_2(t) \tag{5}$$

한편 굴착면에서 멀리 떨어진 지점에서 발생하는 시간 의존적 변형은 log 함수보다는 다음 (6)식과 같은 분수함수에 더 잘 부합하는 것으로 나타났다. 탄소성 암반에서 상수 n 은 일반적으로 0.3이 적합한 것으로 제안되었다.

$$C(x) = A \left\{ 1 - \left(\frac{1}{1+T} \right)^n \right\} \tag{6}$$

최종적으로 (4)식 및 (6)식을 (5)에 대입하여 다음 (7)식과 같은 함수가 제안되었다.

$$C(x) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^{0.3} \right\} \right] \tag{7}$$

여기서,

X : 굴착면의 영향거리에 관련된 상수

T : 암반의 시간 의존적 변형특성에 관련된 상수

C_x : 굴착면이 무한히 멀 때 굴착면 진행영향으로만 발생한 변위

$C_x(1+m)$: 굴착면이 무한히 멀고 장시간이 경과한 후의 최종적인 내공변위이다.

Sulem 등은 (7)식을 이용하여 평균심도 600~1200 m의 Frejus 터널과, 심도 100 m의 Marly Soil에 굴착된 Las Planas 터널에서의 계측결과에 적용하여 좋은 결과를 얻었다. 터널주위 암반의 거동특성은 암반의 특성에 의해 여러 가지 형태의 함수로 모델화되며, 이를 요약하면 Table 2와 같다.^{4,8)}

T. Kitagawa, T. Kumeta 등은 상·하반 분할굴착을 할 경우 선행변위는 상반 벤치 내공변위의 약 40%, 최종변위에 대하여 약 17%를 차지한다고 발표하였다.⁹⁾

3.2 내공변위 계측 및 결과

본 연구가 실시된 터널의 하행터널현장에서 실제 계

Table 2. Modelling functions of tunnel convergence.

Modelling function	Parameter	Remarks
$C(x) = a\{1 - \exp(-bx)\}$ or $C(t) = a\{1 - \exp(-bt)\}$	a, b	Elastic
$C(t) = a \log(1 + bt)$	a, b	Visco-plastic
$C(x) = Cx\{1 - (X/(X+x))\}$	C_x, X	Elasto-plastic
$C(x,t) = a\{1 - \exp(-bx)\} + c\{1 - \exp(-dt)\}$	a, b, c, d	Visco-elastic(Kelvin-Voigt)
$C(x,t) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[1 + m \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T+t} \right)^{0.3} \right\} \right]$	C_x, X, T, m	Elasto-plastic with time-dependent closure

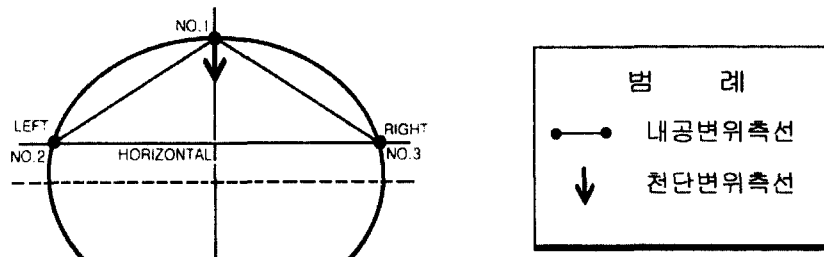


Fig. 3. Arrangement of the measurements.

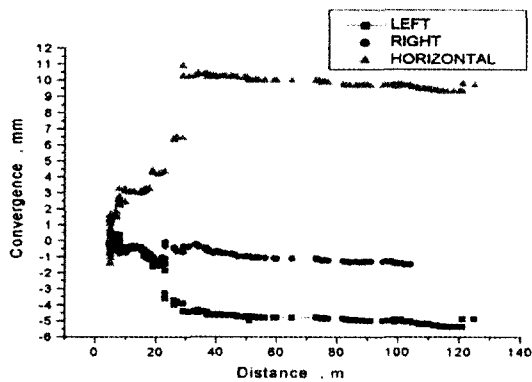


Fig. 4. Variation of convergence by distance change at Sta.4K + 530.

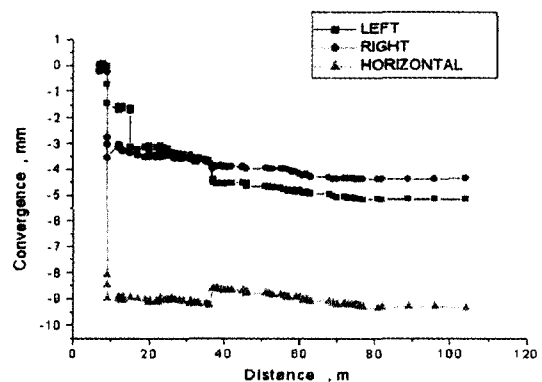


Fig. 5. Variation of convergence by distance change at Sta.4K + 516.

측을 실시하여 내공변위 및 천단침하 등의 Data를 획득하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 적용된 측선도를 보여주고 있으며, 내공변위 계측결과 중 몇몇 측정점의 자료를 도시하면 Fig. 4, 5와 같다.

굴진거리의 변화와 시간의 경과에 따른 내공변위의 변화 추이는 각 지점마다 약간의 차이는 있지만 시간과 거리의 변화에 대한 변위의 변화양상은 서로 비슷함을 알 수 있다. 내공변위가 굴진거리 뿐만 아니라 시간의

존적 변형거동을 보임을 알 수 있다.

Sta.4K + 530의 지점에서는 Horizontal 부분(2-3번 수평 방향)의 내공변위가 (+)변위로 증가하는 것으로 나타났다, left와 right의 변위차도 가장 크게 나타났다. 이것은 Sta.4K + 530 지점이 터널 갱구 바로 앞에 위치하는 부분으로써, 강지보와 록볼트의 지지 및 슛크리트의 반력 등이 상대적으로 크게 작용하지 못했기 때문에 갱문이 상하방향으로 일그러지면서 양 측벽 방향으로 늘어나는 현상을 나타냈다. 그러나 Sta.4K + 516 지점

에서는 반대로 수평방향의 변위가 팽창이 아닌 수축작용으로 일어나는 양상을 볼 수 있다.

x : 막장거리

t : 막장거리 진행시까지의 시간

4. 선행변위 추정을 위한 회귀분석 결과

4.1 계측 결과의 분석을 통한 회귀분석

내공변위 곡선은 여러 가지 형태의 지수함수들로 표현될 수 있으며 실제 측정된 내공변위를 지수함수에 대해 회귀분석을 함으로써 각 함수의 미지계수들을 결정할 수 있다. 굴착 후 계측시작 전에 이미 발생한 변위(C_0)는 계측이 지연되어 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 막장 진행거리(x_0)와 시간(t_0)의 증가와 더불어 증가하게 되어 상대적으로 측정된 내공변위(C_m)값은 실제 변형으로부터 감소하게 되므로 측정 전 내공변위(C_0)가 고려되어야 하며 회귀분석시 미지수가 되어 해석에 포함되어야 한다. 따라서 실제 측정된 내공변위를 C_m 이라고 한다면 최초 계측시점 전에 발생한 변위를 고려한 내공변위에 대한 지수함수는 다음 (8)식과 같이 표현될 수 있다.⁶⁾

$$C_m = C(x, t) - C_0 \quad (8)$$

여기서, C_m : 실제 측정된 내공변위

C_0 : 측정 전 내공변위

또한 $U_i = U_a + C_0 + C_m$ 로부터 U_a 는 기존의 문헌(Panet (1987), Kitagawa(1991))을 바탕으로하여 최종변위(U_i)의 약 30%를 적용하여 구하였다.^{8,9)} 단, C_0 는 회귀분석결과 그림 내에 삽입된 C_0 이며, C_m 은 계측된 최종변위를 나타낸다.

본 터널은 터널의 내공변위 계측에 대해 한 단면에서 각각 5개의 측선에 대해 측정이 실시되었으며, 측정은 굴착 후 6일이 경과시 굴착면 거리가 5 m일 때부터 계측이 시작되었다. 회귀분석결과와 구해진 측정 전 변위 C_0 는 최종변위의 30~40%에 달하고 있음을 알 수 있다. 회귀 분석의 상관계수는 91.7%로 모델함수의 적합도는 양호한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 내공변위의 회귀분석을 통해 초기변위와 최종변위의 비율을 산정하여 연구지역에서의 최종변위에 대한 선행변위의 비율(50%-25%-25%)을 산정하여 수치해석에 하중분담율로 반영하였다.

Fig. 6은 터널내공변위와 막장거리 및 시간의 진행에 따른 탄소성압반의 해석을 위한 분수식과 탄성압반의 해석을 위한 지수함수식을 적용·비교한 것이다. 또 다른 측정중 하나인 하행선 Sta.4K + 516지점에서는 좌측

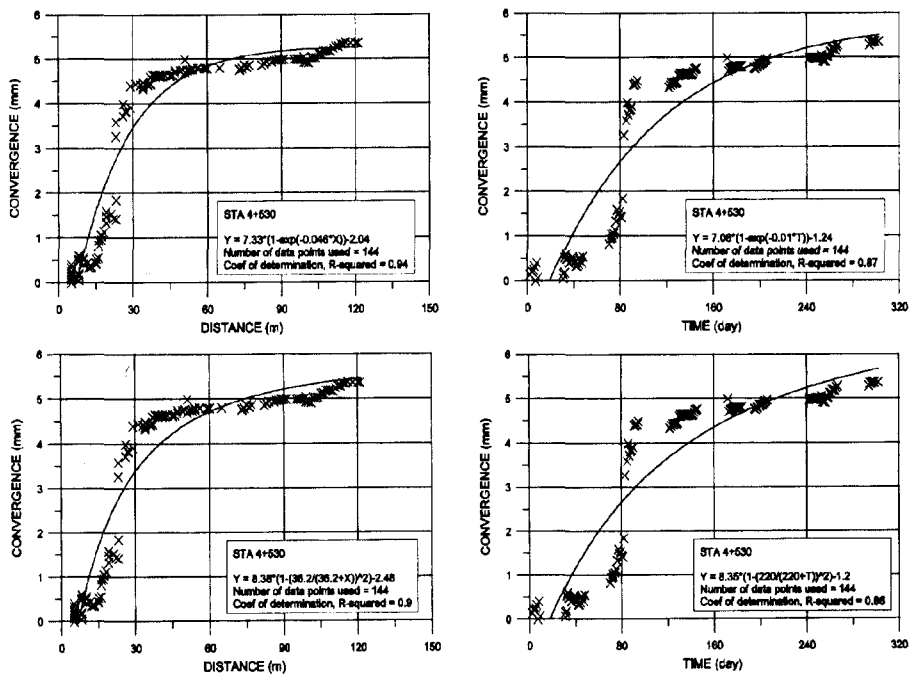


Fig. 6. Regression results of convergence.

Table 3. Regression results of convergence measurements.

Sta.	Parameter dimension	exponential*				fractional**			
		a	b	C ₀	R ²	C _x	X	C ₀	R ²
4K + 516	Distance	7.55	0.058	2.43	0.96	9.1	24.9	3.46	0.95
	Time	5.03	0.03	0.44	0.93	6.15	48.4	0.23	0.94
4K + 525	Distance	3.05	0.035	0.13	0.93	3.59	46.9	0.39	0.93
	Time	3.08	0.02	-0.002	0.93	3.64	89.3	0.12	0.93
4K + 530	Distance	7.30	0.046	2.04	0.94	8.38	36.2	2.48	0.90
	Time	7.08	0.01	1.24	0.87	8.66	220	1.2	0.86

* : $C(x) = a\{1 - \exp(-bx)\} - C_0$ or, $C(t) = a\{1 - \exp(-bt)\} - C_0$

** : $C(x) = C_x\{1 - (X/X+x)^2\} - C_0$

벽 축선에서 지수함수식에 의한 회귀분석 결과 지수함수식에 의해서 상관계수값이 0.96의 높은 값을 얻었고, 분수식에 의한 탄소성 해석의 회귀분석 결과 상관계수가 0.91을 나타냈다. 좌측벽의 변위계측치에 의한 상관성은 매우 좋은 편이지만 Right(우측)의 회귀분석결과 상관계수는 각각 0.64, 0.67로 상관계수가 떨어졌다. Horizontal 축선의 경우는 Sta.4K + 516 하행선 지점의 좌측벽의 경우 지수함수식과 분수함수식 모두 상관계수값이 0.95이상을 나타냈다. 우측벽의 경우는 상관계수값이 0.83~0.86으로 나타났다. Horizontal 축선의 회귀분석 결과는 88개의 축점에서 지수함수식의 상관계수가 0.84로 분수식의 0.78보다 크게 나타났다.

Sta.4K + 516의 수평 축선에 대한 회귀분석결과 지수함수식의 경우 상관계수가 0.84로 분수함수식의 상관계수 0.78보다도 높게 나타났다.

막장 굴진 거리에 대한 내공변위의 측정식의 결과 지수함수식과 분수함수식의 경우 모두 상관계수가 0.92이상으로 높게 나타났다.

전반적으로 계측된 변위량 측정수단으로서 내공변위 곡선에 대한 함수를 지수함수로 가정하여 분석한 결과가 분수함수로 가정하여 분석한 결과보다 상관계수의 크기를 비교하여 볼 때 거의 대부분의 결과에서 우세하게 나타나므로 상관계수 값만을 비교하여 본다면 지수함수식으로 분석한 결과가 비교적 만족할 만한 결과를 얻을 수 있는 것으로 평가되었다.

상부 반단면 굴착 후 이루어진 회귀분석 결과 지수함수에 의한 계측 전 변위량은 Sta.4K + 516지점에서 Left 2.4 mm, Right -0.5 mm이고 Sta.4k + 525지점에서 0.4 mm, Sta.4K + 530지점에서는 Left 2.0 mm, Horizontal 에서는 1.1 mm로 나타났다.

4.2 회귀분석에 의한 내공변위 예측의 상관성

내공변위의 경우 회귀분석에 대한 결정계수(Coeffi-

cient of determination)가 비교적 정확도가 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 지수함수에 의한 회귀 분석식의 적합성은 경암층과 같은 탄성 암반의 해석시 높은 것으로 나타난다. 그러나 탄소성 암반의 해석에 적합도가 더 있다고 하는 분수함수식과 비교해 본 결과 지수함수식의 상관도가 분수식의 경우보다 높게 평가되었다. Table 3에서 보듯이 결정계수값을 비교해보면 지수함수식이 더 높은 경우가 많게 나타난다. 지수함수식의 평균상관도는 90%이었으며, 분수함수식의 평균상관도는 85.6%로 나타났으며 분수함수의 상관계수가 더 큰 경우는 전체의 1/3에 못 미쳤다.

그러므로 본 연구 대상지역과 같은 천층광폭터널의 경우 풍화암 내지 연암층의 갱구부에서 사용되는 회귀 분석식으로 분수함수식보다는 지수함수식이 훨씬 더 적합하다는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과는 막장 전방의 지반 보강을 위해 forepoling이나 강관다단 그라우팅을 실시하여 지반의 전체적인 물성이 증가한 결과라고 볼 수 있다. 이것은 일반적으로 강관다단 그라우팅 및 시멘트 밀크 그라우팅 등에 의하여 토사층 또는 풍화토의 탄성계수가 20~40배 가량 증대되는 것으로 알려져 있어서¹¹⁾ 본래의 풍화토의 성질보다는 오히려 지보재의 영향으로 지반이 굳어져서 탄소성의 모델보다는 탄성모델에 더 가깝다고 판단된다.

이상의 결과를 종합해보면 내공변위를 지수함수나 분수함수로 회귀분석한 경우에 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 탄성암반에서는 지수함수, 탄소성암반에서는 분수함수로 내공변위가 모델화된다는 기존이론에 위배된다.

이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 매우 풍화가 심한 지반을 보강하기 위하여 forepoling이나 강관다단 그라우팅을 통해 과도한 보강을 실시한 것에 기인한 것으로 판단된다.

5. 수치해석

5.1 해석과정 및 단면모델

수치해석 적용시 터널의 거동과 가까운 결과를 얻기 위해서는 현장의 시공방법과 시공순서를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 실제 시공순서대로 굴착에 의한 터널 주변의 거동에 대해 검토하기 위해 수치해석 입력자료에 현장의 시공절차와 같은 순서로 모델링을 적용하였다. 또 지보 성분은 탄성매질로 가정하였다.

Flac에서 슛크리트는 Beam요소로, 록볼트는 Cable요소로 모델링된다. Flac에서 사용할 수 있는 기본적인 구성 방정식은 크게 Null model group과 Elastic model group, Plastic model group이 있다. 본 연구에서는 토질과 암석의 모델링에 사용되는 소성모델 중에 하나인 Mohr-Coulomb모델을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 굴착단계별 하중분담율을 내공변위의 회귀분석결과로부터 각 단계별로 추정되어진 변위 비율을 사용하여 하중분담율을 산정하였는데, 굴착으로 인해 터널의 변위는 최종 변위의 약 50%가 발생되었으며, 1차 슛크리트 후 2차 슛크리트가 타설되기까지 75%의 변위가 발생한 후 암반이 안정화 되었을 때 100%의 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 각 단계별 하중분담율은 50%, 25%, 25%를 적용하였다.

Flac에서 사용된 해석 단면은 Sta.4 + 530지점이며, 본 연구에서 터널계측자료가 상하행 모두 터널 상부반 단면에 대한 것이므로 Flac 해석도 상하행 상부반 단면에 대해서만 이루어졌다. 선정된 단면에서 해석 모델의 영역은 중앙에 터널 단면을 포함하여 수평 폭 200 m, 깊이 100 m으로 설정하였으며, 이 모델 영역을 11250 개의 요소망으로 분할하였다. 해석 영역을 크게 설정한 것은 해석시에 경계 영향을 가능한 배제할 수 있도록 하기 위한 것이다. 모델의 하부 경계에서는 경계조건으로 종방향에 대하여 구속하였으며, 모델의 좌우경계는 횡방향의 변위를 구속하였다.

Fig. 7은 전체 해석모델을 나타낸 것이다. 해석단면의 크기는 실제 암반의 scale에 의해 120 m × 80 m으로 하고 터널 주변의 요소망 크기를 1 m × 1 m의 정사각형으로 하였다. 지반 층서는 시추 자료를 참고로 하여 상부로부터 풍화토, 풍화암 및 연암 파쇄대층, 경암층으로 구분하였다. 좌측터널은 풍화암 및 연암파쇄대층과 경암층의 경계부에 걸쳐있고 우측터널은 경암층에 속한다.

본 대상지역의 암반층은 크게 풍화암 및 연암 파쇄대층, 경암층으로 구분된다. 지반 물성에 대한 기초자료는 지반조사보고서를 토대로 선정하고 상기 제안식을 이용

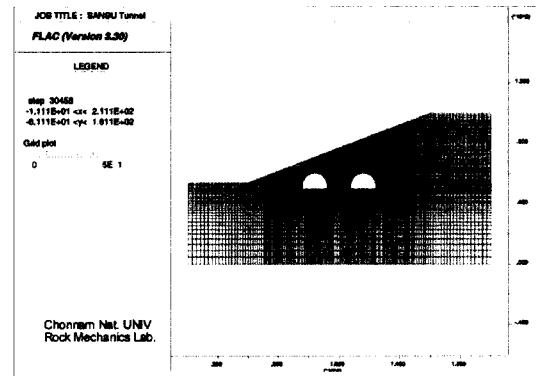


Fig. 7. Geological condition of the tunnel site.

Table 4. Rock mass properties.

	Weathered Soil	Weathered Rock Soft Rock Shear Zone	Soft/Hard Rock
Density(kg/m ³)	1800	2300	2500
Bulk modulus(Pa)	1.00e8	1.87e9	1.18e10
Shear modulus(Pa)	1.00e8	8.65e8	7.80e9
Friction angle(°)	25	35	54
Cohesion(Pa)	2.72e4	1.38e5	2.88e6
Tensile strength(Pa)	1.58e3	1.02e4	4.18e5

하여 필요한 지반정수를 추정하였다. 이상으로부터 얻어진 지반 층서별 지반정수 입력자료는 Table 4와 같다.

토사층의 물성은 시추시의 표준관입시험 결과를 토대로 가능한 보수적으로 산정하였으며, 암반층에 대해서는 시추추상도에 나타난 코어 logging 자료를 참고로 하여 현지 암반의 강도 및 변형성 추정 제안식을 이용하여 산정하였다.

시추자료에 나타난 표준관입시험치(N)는 분산도가 비교적 크게 나타나 있는데, 평균적으로 보아 N = 30으로 하였다. 이로부터 지반정수 추정 제안식에서 내부마찰각(Φ)은 Dunham의 제안식을 이용하고 Young's Modulus (E)는 Schmertman의 제안식을 이용하였는데, 안전한 측면을 고려하여 하한식들을 이용하였다.

$$\Phi = \sqrt{12 \cdot N} + 12 \quad (^\circ) \quad (9)$$

$$E = 12 \cdot N$$

현지 암반층의 지반정수는 통상 실내시험 및 암반평가자료에 의한 RMR을 이용하여 추정한다.

RMR을 이용한 암반의 영률은 Bieniawski 또는 Serafim & Pereira에 의한 영률(E_m) 추정 제안식을 이용

한다.

$$E_m = 2 \cdot \text{RMR} - 100 \quad (\text{GPa}) \text{ for } \text{RMR} > 50$$

$$E_m = 10 \frac{\text{RMR} - 10}{16} \quad (\text{GPa}) \text{ for } \text{RMR} \leq 50 \quad (10)$$

RMR을 이용한 암반의 강도정수 추정식은 Truman, Hoek & Brown 등에 의해 제안되고 있다. Truman이 제안한, 암반의 압축강도(σ_m)와 점착력(C_m) 및 내부마찰각의 추정식은 다음 식과 같다.

$$\sigma_m = 0.5 \cdot \exp(0.06\text{RMR}) \quad (\text{MPa})$$

$$C_m = 0.25 \cdot \exp(0.05\text{RMR}) \quad (\text{MPa}) \quad (11)$$

$$\phi = 0.5 \cdot \text{RMR} + 5 \quad (\text{deg.})$$

5.2 해석결과 및 검토(내용검토-그림내용 참조)

하행터널의 굴착 후 상행터널의 하반 굴착 상태 및 상반 굴착 상태에서의 수직응력변화 양상은 Fig. 8과 같다. 상반이 굴착되고 내벽지보설치가 이루어진 경우에 바닥부 전체적으로 응력이완대가 발생하고 있으며 천반의 보강영역에서도 응력이완대가 나타나고 있다. 상반 굴착단계에서 상반 바닥부에 뚜렷한 인장응력 영역의 발생은 곧 천반의 부분적 붕락이나 바닥부에

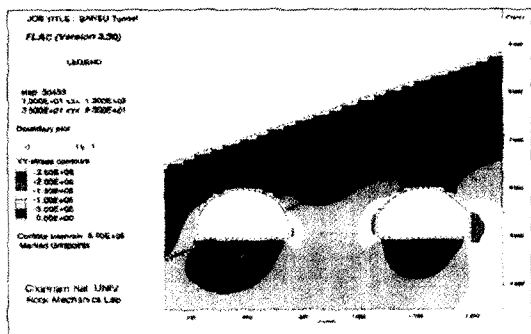


Fig. 8. Stress distribution after tunnel excavation.

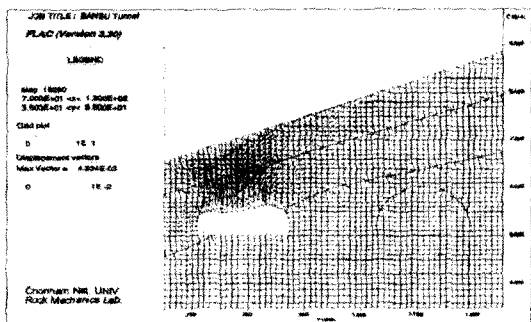


Fig. 9. Displacement vectors of the Left Tunnel.

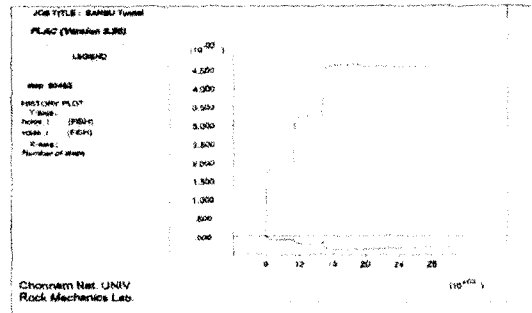


Fig. 10. Convergence of the vertical, horizontal direction.

heaving이 발생함을 의미한다.

전체적으로 굴착이 진행됨에 따라 지표면에서의 침하발생량은 계속적으로 증가하고 있고, 특히 터널 직상부 지표면에서 최대로 발생하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 좌측터널 굴착 후 터널의 변위 벡터를 나타낸 그림이다. 터널 상부의 지표침하 형태의 변위 벡터 양상을 보여준다. 상행터널의 굴착 후에는 더 뚜렷한 변위벡터를 볼 수 있다.

5.3 내공변위 양상

터널의 굴착 후 터널의 천반 중앙과 바닥의 수직방향의 내공변위와 좌측벽 및 우측벽 중앙 지점에서의 내공변위의 발생 양상을 보면 Fig. 10과 같다. 각 굴착 단계 별로 history를 보여주는데, 수직방향의 내공변위가 수평방향의 내공변위에 비해 약 10배 가량 큰 값을 나타내며, 수직방향의 변위는 압축하다가 약간씩 줄어드는 경향이며 수평방향의 변위는 팽창하다가 조금씩 줄어드는 경향을 보여준다.

6. 결 론

도심지의 풍화가 심한 지역에 건설되는 천층터널 현장에서 계측한 data로 계측 전에 발생된 선행변위량을 추정하고 이를 측정변위에 포함하여 터널의 최종변위량을 유도하였다. 특히 본 연구에서는 대상 터널의 갱구부 근방을 집중계측하여 이를 통하여 암반터널에서 일반적으로 적용되는 예측식들이 천층광폭터널에서도 적용될 수 있는지를 판단하였다. 또 수치해석을 통해 터널 주변의 응력과 변형상태를 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 탄소성거동을 하는 것으로 판단되는 풍화암내지 연암층에서 실제 계측자료 분석결과 분수함수식보다는

지수함수식이 더 높은 상관관계를 보였다. 이것은 토피고가 낮은 갱구부에서 풍화암 지반이 강관다단 그라우팅 및 forepoling 보강에 의해 탄소성지반이 아닌 탄성지반에 준하는 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

2) 도심지의 풍화토, 풍화암 내지 연암에 굴착되는 토피고가 12 m 내외인 천층의 터널에서 내공변위 계측을 통해 터널변형거동을 관찰한 결과 터널의 갱구부에서 10~15 m 정도 떨어진 계측지점에서 최대변위는 1.5 - 11 mm가 발생했다.

3) Sta.4K + 516아래 좌측점의 선형변위는 2.4 mm로 계산되었다. 이때 굴진거리와 변위의 회귀분석결과 96%의 높은 상관관계를 보였다.

이상의 결과들은 갱구부 주변들을 주 계측대상으로 하여 수치해석을 하였으므로 일반적으로 전구간에 걸쳐 적용된다고는 할 수 없겠으나 지속적인 연구를 통하여 천층광폭터널에서 기존의 내공변위 예측식들의 적용가능성을 판단할 수 있으리라 판단한다.

참고문헌

1. 최성웅, 신희순, 1997, 연약지반내 굴착터널의 안정성 평가 및 최적보강설계에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 7. 3, 191-201.
 2. Panet, M., A. Guenot, 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunneling 82, IMM, Brighton, 197-204.
 3. Panet, M., 1979, Time-dependent deforms in underground works, 4th Int. Congr. on Rock Mech., ISRM, Montreux, Vol. 3., 279-289.
 4. Sulem, J., Panet, M, Guenot. A., 1987, An analysis solution for time-dependent displacements in a circular tunnel, Int. J. Rock Mech. Sci., 24. 3, 155-164.
 5. Hoek E. and Brown, E. T., 1980, Underground Excavation in Rock, Inst. Mining and Metall., London., 382-396.
 6. 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과와 분석, 터널과 지하공간, 한국암반학회, Vol. 3, 80-95.
 7. 신동오, 임한욱, 김치환, 1998, NATM 시공에 의한 터널 굴착시 선형변위 추정에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 8. 2, 88-95.
 8. Sulem, J., Panet, M., A. Guenot, 1987, Closure analysis in deep tunnels, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 24. 3, 145-154.
 9. Kitagawa T., Kumeta T., etc., 1991, Application of convergence confinement analysis to the study of preceding displacement of a squeezing rock tunnel, Rock mech. & Rock Eng. Vol. 24, 31-51.
1. 최성웅, 신희순, 1997, 연약지반내 굴착터널의 안정성 평가 및 최적보강설계에 관한 연구, 터널과 지하공간,

문 승 백



1998년 전남대학교 자원공학과, 공학사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

Tel : 042-488-2374
E-mail : ilovemsb@hanmail.net
현재 (주)희송지오택 근무

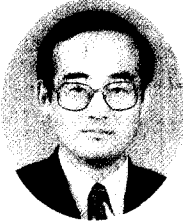
송 승 곤



1999년 전남대학교 자원공학과, 공학사

Tel : 062-530-0824
E-mail : kevinj@hanmail.net
현재 전남대학교 대학원 자원공학과 석사과정

양 형 식



1979년 서울대학교 자원공학과, 공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 062-530-1724
E-mail : hsyang@chonnam.ac.kr
현재 전남대학교 자원공학과 교수

전 양 수



1996년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1998년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과, 박사과정 수료

Tel : 042-868-3243
E-mail : ysjeon@kis.kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 인턴연구원

한 공 창



1976년 서울대학교 자원공학과, 공학사
1989년 Ecole des Mines de Paris (France), 공학석사
1993년 Ecole des Mines de Paris (France), 공학박사

Tel : 042-868-3241
E-mail : hankc@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 책임연구원