

# 화강 풍화암지반의 터널굴착에 따른 변형예측

차봉근<sup>1</sup>, 김영수<sup>2\*</sup>, 권태순<sup>3</sup>, 김성호<sup>4</sup>

## The prediction of deformation according to tunnel excavation in weathered granite

Bong-Geun Cha, Young-Su Kim, Tae-Soon Kwon, Sung-Ho Kim

**Abstract** Mechanical behavior of underground cavity construction such as tunnel is very difficult to estimate due to complexity and uncertainty of ground. Prediction of behavior according to excavation of tunnel mainly uses method utilized of model test or numerical analysis. But scale model test is difficult to reappear field condition, numerical analysis is also very hard to seek choice of suitable constituent model and input data. To solve this problem, this paper forecasted the deformation of tunnel that applied to information of crown settlement and convergence, RMR in weathered granite by using the regression analysis. The result of the analysis shows that the crown settlement according to excavation occurs approximately 70~80% of total displacements within about 20 days. As a result of the prediction of crown settlement and convergence, an exponential function becomes more accurate at measurements than an algebraic function. Also this paper got a correlation in comparison of RMR and displacements of 6 sections.

**Keywords:** Crown settlement, convergence, regression analysis, RMR

**요지** 터널과 같은 지하공동 구조물의 역학적 거동은 지반의 복잡성 및 불확실성으로 인해 예측이 매우 어렵다. 터널굴착에 따른 거동 예측은 주로 모형실험이나 수치해석을 이용한 방법을 사용한다. 그러나 모형실험은 현장조건을 재현하기 어렵고, 수치해석 또한 적합한 구성 모델의 선정과 입력인자를 구하기가 매우 힘들다. 본 연구는 국내 화강암 풍화토 지반에 건설되는 터널의 천단침하와 내공변위에 대한 계측자료와 RMR을 근거로 하여 회귀분석방법을 사용하여 천단침하와 내공변위를 예측하였다. 계측자료를 분석한 결과 터널 굴착에 따른 천단침하는 굴착 초기인 약 20일 이내에 총 변위 변화량의 약 70~80%가 발생되었다. 천단침하와 내공변위를 예측한 결과, 지수함수가 대수함수보다 비교적 계측값에 잘 일치하였다. 또한 RMR값과 각 단면의 변위를 비교하여 상관관계식을 얻었다.

**주요어:** 천단침하, 내공변위, 회귀분석, RMR

### 1. 서론

지반과 지보공의 복합 구조체인 터널의 거동은 본래 구성인자와 그 상호작용을 충분히 고려해서 평가해야만 한다. 그러나 현실적으로는 각각의 인자에 관련된 불확정 요인과 함께 실제 시공과정의 복잡하므로 복합 구조체인 터널 거동을 정확히 예측하는 것은 쉽지 않다. 이러한 예측의 정도를 향상시켜 구조물의 합리적 설계나 시공을 실현시키기 위해서는 시공 중의 구조물의 거동을 관찰·계측하고 그 결과를 바탕으로 당초 설계를 재검토 하게 되는 정보화 시공이 요구된다(방준호, 2007).

현장에서는 변위, 변형, 응력, 토압 등이 비교적 계측이 쉬우며 정도 높게 측정이 가능하다. 그러나 여기에서 중요한 것은 계측된 데이터를 어떻게 해석하고 평가하여 합리적으로 설계·시공에 반영시키는 것이다. 이를 위해 계측결과를 정량적으로 평가하여야만 정보화시공을 할 수 있다. 과거의 실적을 토대로 하는 경험적 수법으로 터널의 계측결과를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 국내 화강암 풍화지반의 터널 시공현장 계측·관측 결과를 활용하여 굴착중인 터널 및 주변지반의 거동과 터널 안정성 평가를 목적으로 하고자 하였다. 이에 국내 기 시공 중인 화강암 풍화지반의 터널 단면 중 6단면에 대한 천단침하와 내공변위의 현장 계측값을 시간과 막장 거리에 관한 변화를 살펴보고자 하였다.

<sup>1</sup>경북대학교 토목공학과 석사과정

<sup>2</sup>경북대학교 토목공학과 교수

<sup>3</sup>경북대학교 토목공학과 박사

<sup>4</sup>경북대학교 토목공학과 석사과정

\*교신저자: 김영수 (E-mail: kimysu@knu.ac.kr)

## 2. 현장 개요

본 연구 대상 현장은 그림 1에서와 같이 OO-OO 고속 철도 건설공사 OO터널 상행선과 하행선 시점부 지역의

화강섬록암으로 이루어진 화강암 풍화 지반에 위치한다.

본 연구대상 지역의 광역지질은 최하부에 백악기 하양층군 진동층의 암회색 내지 흑색 셰일 및 실트암, 백악기 흑운모화강암과 제3기 퇴적층과 중생용회암, 현무

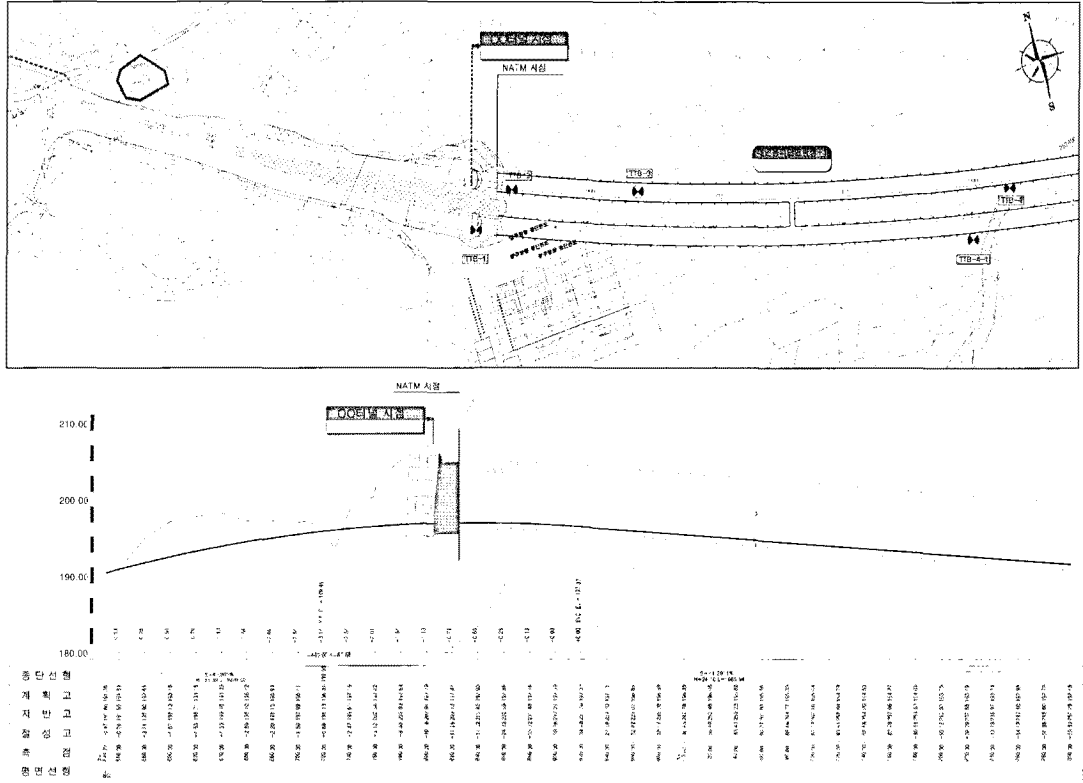


그림 1. 시점부의 평면도 및 종단면도

표 1. 지층분포 현황 및 지질계통표

시대	지층	분포암석	비고
제4기	상부대	붕적층, 선상지 퇴적물	연약지반
	하부대	선상지 퇴적물, 다소고결	연약지반
제3기	미고결 퇴적층(역암층)	사질, 실트질의 기질부에 아가력의 거력 역암	기질부는 미고결의 연약층 대상구간 양북터널 중앙부~종점부
	유문암	유문상조직의 유문암	대상구간 시점부 소규모로 발달
	염기성 및 산성 용회암	테사이트질의 용회암, 현무암질 화산쇄설암	대상노선구간의 북동부에 분포
	염기성 및 산성암맥	현무암질의 암맥과 화강암질의 암맥	대상구간 양북터널 시점부
백악기	흑운모화강암	등립질의 반상구조를 보이는 화강암	대상구간 시점부
	각섬석-흑운모 화강섬록암	조립질의 입상조직을 보이는 화강섬록암	대상구간 시점부에서 중앙부 단층대에 의하여 심하게 파쇄
	하양층군 퇴적암류(흑색 셰일)	암회색 셰일, 실트암, 호온펠스	대상구간 종점부

암류로 구성된 어일층군으로 구성되어 있다(건설교통부 국토관리청, 2006).

연구대상 구간 시점부에서 ○○터널 시점부에 이르는 구간에 분포하는 것들은 현재 상당 부분이 모래상태로 나타났다. 비록 공학적으로는 등방성을 보이거나 이 구간의 암석들은 입자크기에 따른 불균질성을 보인다. 생성 후 냉각에 따라 발생한 절리가 많고, 특히 단층운동의 이력을 받아 전단절리가 발달하고 있으며, 양북터널 시점부일원의 깎기부에서 단층대까지는 상당수의 단층파쇄대 및 염기성 암맥이 분포함으로 인하여 암반의 역학적, 수리적 거동 분포성의 상세한 파악이 필요하다. 단층대 통과부의 암석들은 단층작용 및 지하수의 영향으로 인하여 이들 암석내의 장석광물들이 점토 광물화되어 swelling 및 slaking 현상을 일으킬 가능성이 높다. 표 1은 지층분포 현황 및 지질 계통표를 나타낸 것이다.

### 3. 시공방법

터널 굴착방법은 전단면, 상하반굴착, 상하반 링컷 방법이 나누어 실시되었으며 상하행선 시점부는 상하반 분할굴착이 적용되었다. 지보공으로는 쇼크리트 타설, 록볼트, 복공 콘크리트, 격자지보 등이 실시되었으며 시점부 화강암 구간의 터널 지보재로는 16 cm두께의 쇼크리트, 격자지보재, 길이 4 m의 락볼트를 적용되었다. 터널의 천단과 막장의 안정을 위하여 보조공법으로는 포폴링과 강관다단 그라우팅, 대구경 강관 다단 그라우팅이 시공되었다. 용출수 대책으로 deep well 공법과 well-point 공법을 적용시켜 지하수를 터널 막장면 이하까지 저하 시켰다.

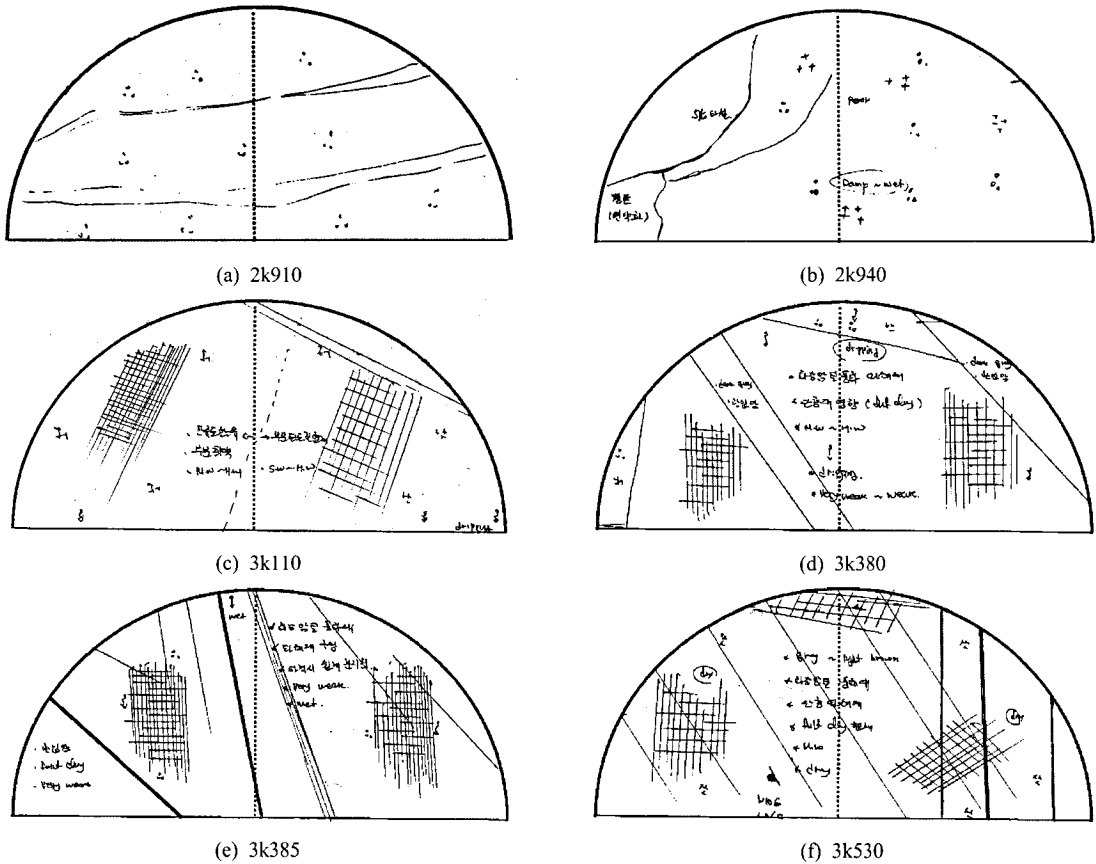


그림 2. 막장 관찰 자료

#### 4. 막장관찰자료

국내 터널현장에서는 통상적으로 RMR 분류법(CSIR 기준)에 근거하여 시공 중 막장 지질조사가 이루어지며, 관찰항목은 Hammer 타격시 반발력 등으로 확인하는 암석 강도, RQD, 불연속면 간격, 불연속면 상태, 지하수 조건 등의 모두 5가지이다. 이런 기본적 항목 외에 터널 굴진방향과 불연속면의 방향성과의 관계를 고려해 평점 합계로 암반평가가 이루어지며 지질학적인 사항의 기록 및 지하수 용출상황 등의 종합적인 막장관찰을 실시하고 있으며 절리의 진행방향과 파쇄대의 분포를 상세하게 기록한다.

본 연구 대상인 국내 화강암 풍화 지반인 ○○터널 현장의 6단면의 막장관찰 자료를 선정하였다. 그림 2는 6단면의 막장관찰을 나타낸 것이다. 2k910의 막장 형상은 화강암질의 풍화대로 풍화잔류토로 형성되어 있으며 막장 중앙과 하부에는 점토질의 띠장을 띠고 있다. 2k940의 막장형성은 화강암질의 풍화대로 풍화 토사를 주로 형성하고 있으며, 부분 풍화진행 중인 암편을 관찰할 수 없다. 풍화정도는 완전풍화상태로 나타내며, 좌측하부에 점토층의 협재를 나타낸다. 3k110은 화강암질의 풍화파쇄대가 전면에 나타나 있으며, 절리 사이에 잔류토 및 점토질이 부분적으로 함유하고 있으며 낙석의 가능성이 보인다. MW(moderately weathered) ~ HW(highly weathered)의 풍화상태이며 일부 암편은 타격시 경음을 나타낸다. 3k380의 막장은 화강암질의 풍화파쇄대와 관입암(세립질)의 혼재를 나타내고 있다. MW~HW의 풍화상태로 매우 약한 상태의 암질구성이고, smooth한 절리면 타격시 쉽게 분리되며, 천단부 및 막장면에서 자연 낙석을 유발한다. 3k385는 화강암질 풍화파쇄대 및 좌측부의 관입암의 구성과 중앙부에 fault clay가 있어 막장구성에 불리하게 나타난다. MW~HW 풍화로 partly open된 상태의 암질은 쉽게 분리되고, 매우 약한 암질의 구성과, 굴착시 자연 낙석의 발생을 나타낸다. 3k530의 막장면은 화강암질의 풍화대로 단층으로 인한 전면 파쇄대 및 joint사이 fault clay의 협재를 나타내고 있다. MW의 풍화상태로 smooth한 절리면은 타격시 쉽게 분리되며, 부분적으로 open된 절리를 나타내고, 불연속면의 연속성은 짧으나 fault clay로 인한 점착력의 저하를 보이므로 굴착시 여굴 가능성이 보인다.

표 2. RMR 평점

구분	R1	R2	R3	R4	R5	R6	RMR총점
2k910	0	3	5	0	4	-5	7
2k940	0	3	5	0	7	-5	10
3k110	2	3	5	9	4	5	28
3k380	4	8	8	9	4	12	45
3k385	4	3	5	9	15	5	41
3k530	4	8	8	14	7	12	53

표 2는 RMR 평점을 나타낸 것이다.

#### 5. 현장계측

연구대상터널의 시점부 2k830~3k745 중, 본 연구에서 대표단면으로 선정한 6단면에 대해서 계측결과를 분석하였다. 이 지점은 화강암 풍화 지반으로 NATM으로 시공된 터널로서 본 연구 대상의 목적이 되는 화강 풍화토 지역의 터널거동의 평가를 보다 명확하게 파악할 수 있다고 고려되어 연구 대상으로 선정하게 되었다.

본 논문의 대상 터널은 터널 직경이 약 13m 정도이며, 굴착공법은 상하반 굴착을 실시하여 상반계측과 하반계측을 실시하였으며 선행변위는 계측되지 않았다. NATM 시점 2k825와 NATM 시점 2k830은 대상 터널의 시점 부로서 화강 섬록암 지대이며 갱구부로 풍화가 많이 진행되었고 토피고 또한 낮아 변위가 많이 발생되었다.

일반적으로 풍화된 토사지반은 시공시 가장 문제가 되는 것이 굴착면의 자립성이며 특히 지하 수위가 높은 지반에서는 지반이 유출된다든지 천단붕락의 위험성이 존재하므로 막장의 관찰조사가 필요하다(김영배와 조용량, 2009).

풍화암 지반에서는 초기 응력에 대해 암반강도의 크기에 따라 다르나 초기응력이 충분히 크면 굴착시 큰 토압이 발생하지 않으며 단지 응력이완에 의한 느슨함이 발생한다. 갱내관찰조사에 의한 막장의 지질변화, 지하수의 상태변화의 관찰과 더불어 내공변위측정, 천단 침하측정을 병행해서 해야 한다(김호영과 박의섭, 1993). 본 장에서는 일상관리 계측 중 통상적으로 많이 실시하는 천단침하와 내공변위에 대해서 정리하였다. 그림 3은 연구대상 터널의 중단면도를 나타낸 것이다.

표 3은 천단침하와 내공변위 계측 항목과 계측개소와



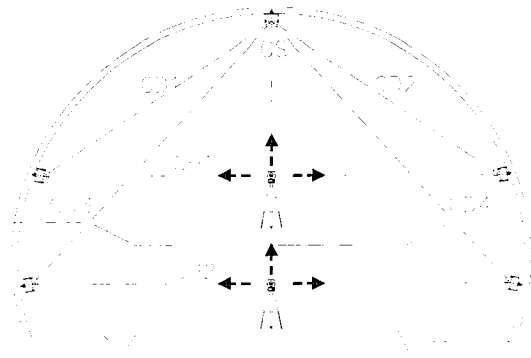


그림 5. 천단침하와 내공변위의 단면도

낸 것이다. 천단침하와 내공변위의 측정 목적은 변위량, 변위속도, 수렴여부 및 주변지반의 안정성을 파악하기 위한 계측으로 안전시공을 도모하기 위한 계측이다(이두화, 2002).

## 6. 터널굴착에 따른 변위의 경시변화

막장진행에 따른 터널의 변위발생 정도 및 양상을 파악하기 위해서는 계측결과에 영향을 미칠 수 있는 요인들에 대한 기록을 경시그래프 상에 함께 나타내어만 현상 파악을 명확히 할 수 있다. 그림 6은 연구 대상 터널

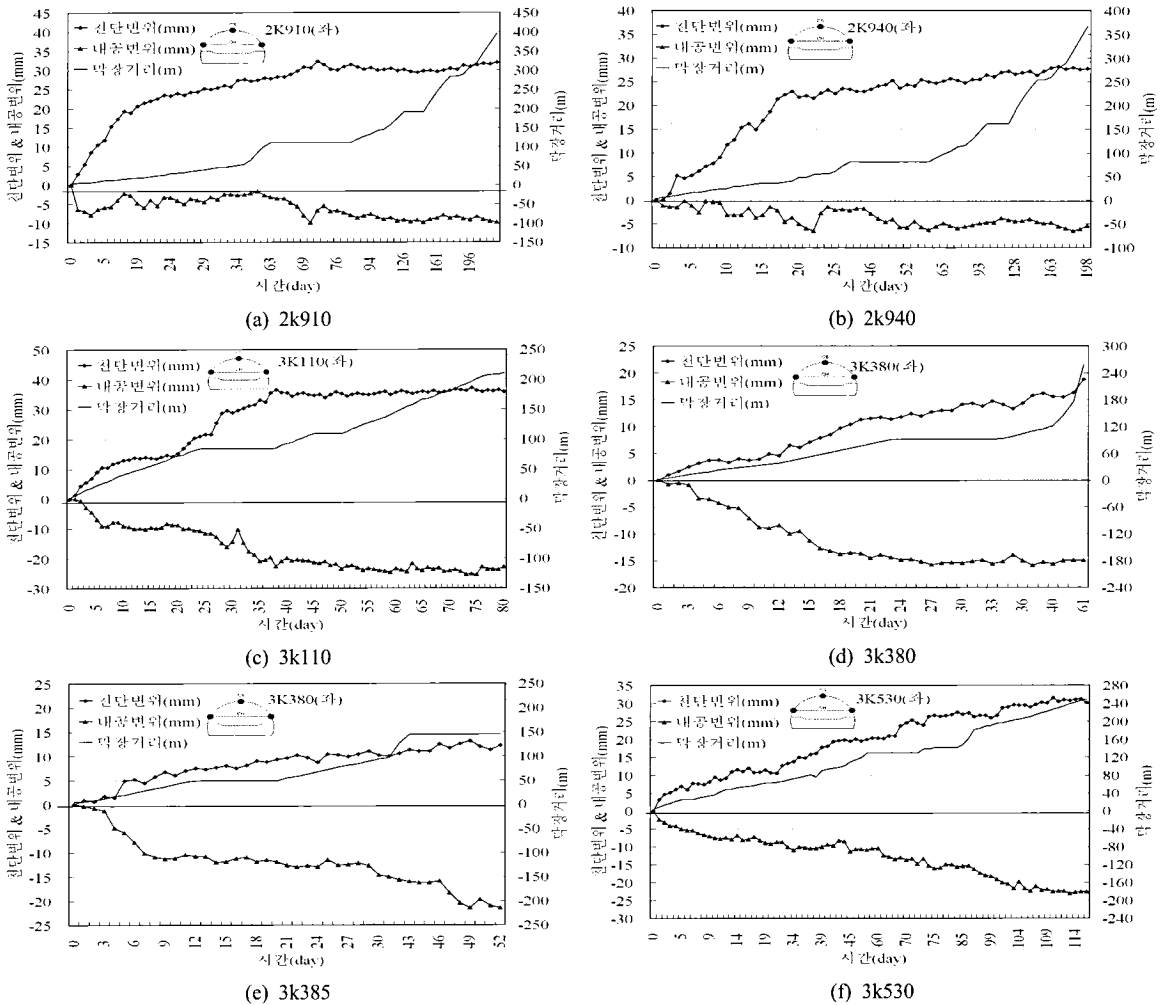


그림 6. 단면의 경시변화도

의 계측 결과를 천단침하와 내공변위를 날짜와 막장거리에 대하여 나타낸 경시변화도이다.

풍화토 지반 2k910의 천단침하는 굴착 후 약 20일 정도 경과된 지점에서 변위가 전체 측정변위의 약70% 정도 발생하였으며 전체적인 변화 경향은 초기 변위 발생 후부터 70일 이후로 약 32 mm로 수렴형태를 나타내고 있다. 내공변위는 초기에 급격히 발생하여 증감형태를 나타내며 100일 이후 10 mm로 수렴하였다. 2k940의 천단침하는 굴착 후 약 18일 정도 경과된 지점에서 변위가 전체 측정변위의 약 90% 정도 발생하였으며 내공변위는 초기의 변위발생량은 적고 증감형태를 나타내다가 약 50일 이후 약 5 mm로 수렴하였다.

풍화암 지반 3k110의 천단침하는 초기 변위 발생은 굴착 후 약 6일부터 약 13 mm로 수렴하다 하반 굴착 지점부터 변위가 증가하고 약 38일 경과 후 약 35 mm로 수렴형태를 보인다. 내공변위도 천단침하의 전반적인 양상과 유사하나 변위발생량은 천단침하보다 적다. 3k380의 천단침하는 굴착 후 약 3일 이후 서서히 변위 증가하여 40일 이후로 약 12 mm로 수렴하였다. 내공변위는 굴착 3일 이후 급격히 변위 증가하여 50일 이후 약 22 mm로 수렴하였다. 3k380 천단침하는 굴착일로부터 서서히 증가하여 40일 이후로 약 18 mm로 수렴하였고 내공변위는 굴착 3일 이후 서서히 증가하여 25일 이후 약 15 mm로 수렴하였다. 3k530 천단침하는 굴착 일로부터 변위가 증가하여 약 100일 이후 30 mm로 수렴하였다. 내공변위는 굴착 초기부터 증가형태를 나타

내어 경과일 약 100일 이후 23 mm로 수렴하였다.

### 7. 계측 자료에 의한 변위 예측

대상터널의 계측자료 분석결과 대부분 막장의 굴진속도가 일정하지 않으므로 변위예측함수의 설정에 있어 시간에 대한 함수보다는 막장거리에 따른 함수로 표현하는 것이 합리적이라고 판단하였다. 천단침하와 내공변위를 log함수와 지수함수로 사용하여 예측한 결과 전반적으로 지수함수가 대수함수보다 현장 계측값에 잘 일치하였다. log함수는 식 1과 같으며 지수함수는 식 2와 같다. 여기서  $X_0$ 는 계측전까지의 거리이며  $X$ 는 막장과의 거리를 직경( $D$ )로 나눈 값이다.

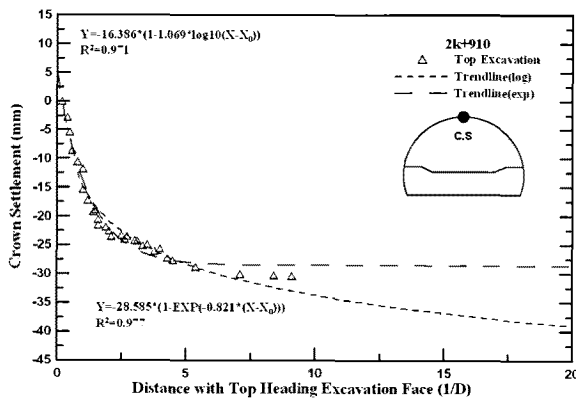
$$Y = B(1 - A \log(X - X_0)) \tag{1}$$

$$Y = C \times (1 - \exp(D(X - X_0))) \tag{2}$$

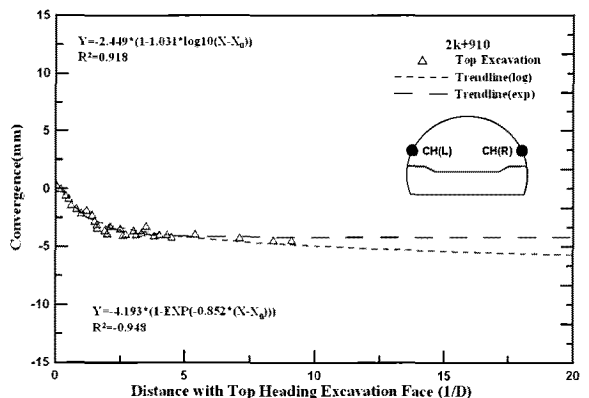
A, B, C, D에 대한 것은 그림 7~12에 나타내었다.

#### 7.1 각 단면의 변위

풍화토 지반 2k910의 천단침하를 막장거리의 함수로 나타내는 경우 결정계수의 지수함수는 대수함수보다 비교적 계측값에 잘 일치하였다. 2k940의 막장거리별 천단침하에서 굴착초기 변위 발생이 많으며 지수함수는 대수함수보다 계측치와 유사한 값을 나타냈다. 풍화암

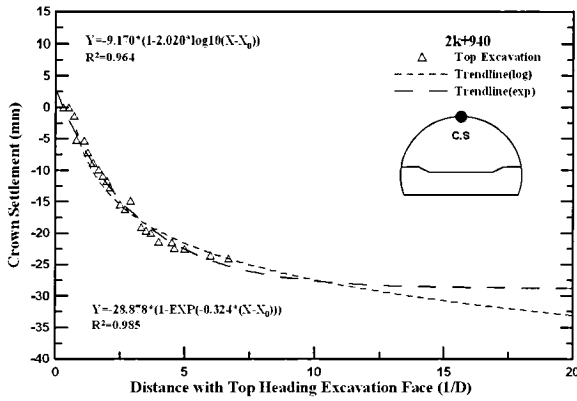


(a) 천단침하

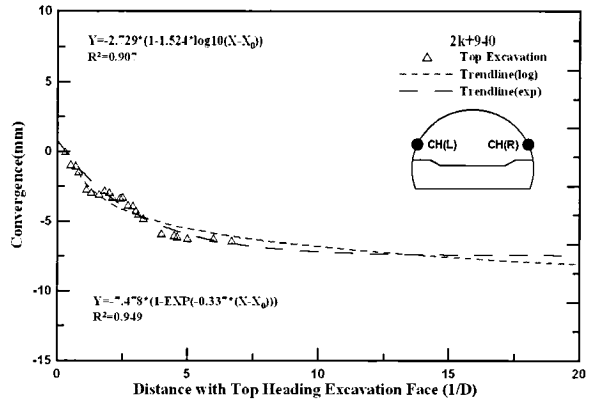


(b) 내공변위

그림 7. 2k910 막장거리에 따른 천단침하와 내공변위

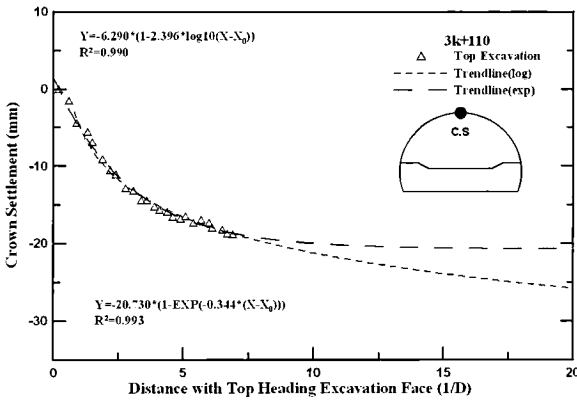


(a) 천단침하

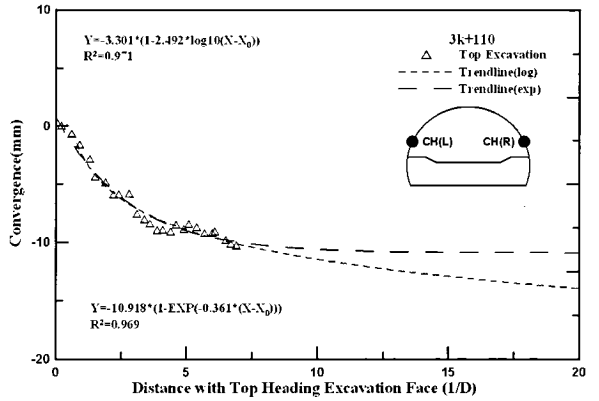


(b) 내공변위

그림 8. 2k940 막장거리에 따른 천단침하와 내공변위

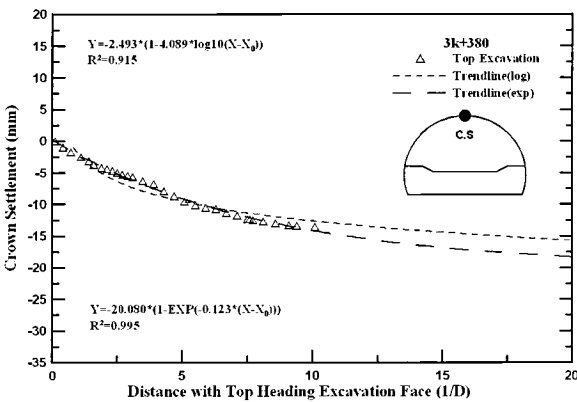


(a) 천단침하

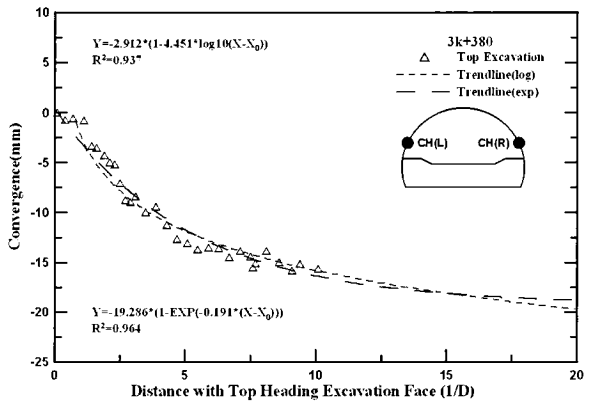


(b) 내공변위

그림 9. 3k110 막장거리에 따른 천단침하와 내공변위



(a) 천단침하



(b) 내공변위

그림 10. 3k380 막장거리에 따른 천단침하와 내공변위



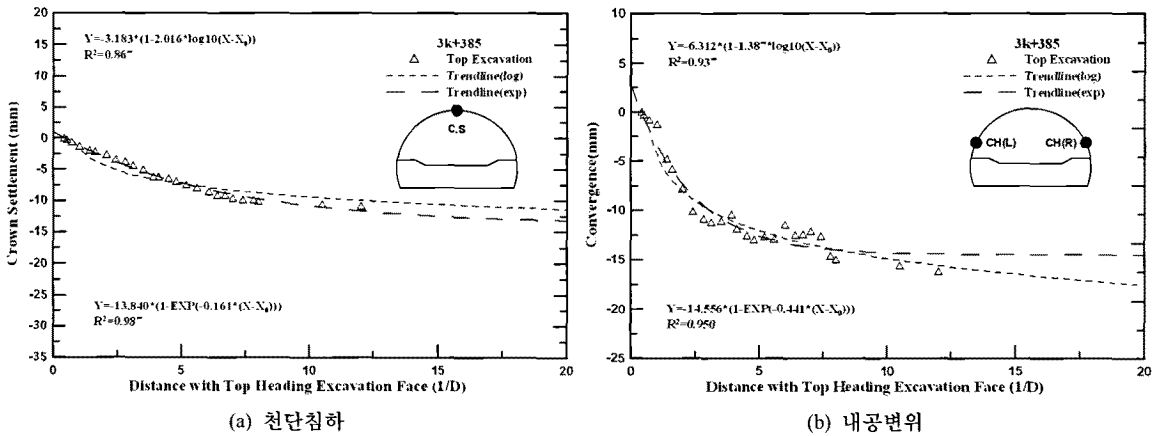


그림 11. 3k385 막장거리에 따른 천단침하와 내공변위

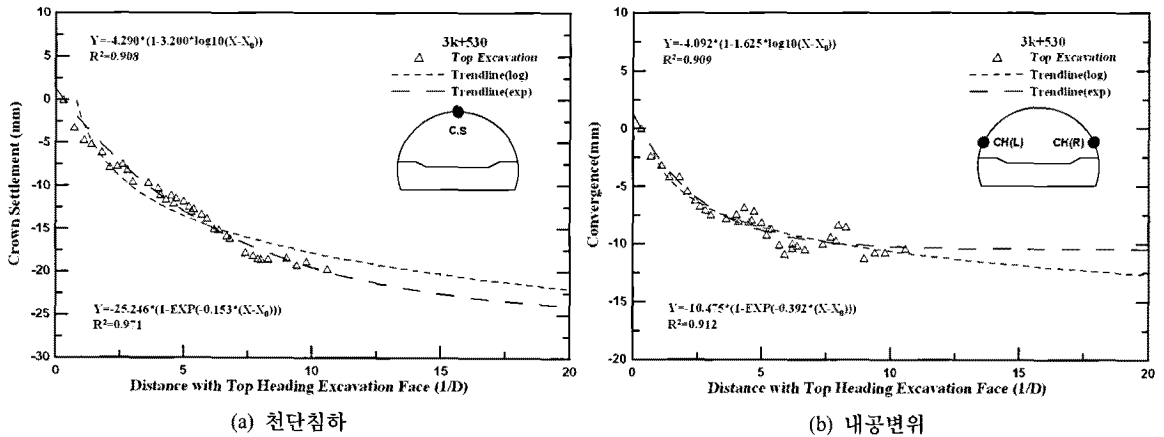


그림 12. 3k530 막장거리에 따른 천단침하와 내공변위

지반인 3k110의 천단침하에서 지수함수는 막장거리 5D 까지 변위발생량이 많으며 대수함수가 약간 높게 나타났다. 내공변위를 막장거리의 함수로 나타낸 경우 7D부근에서 수렴하며 대수함수가 지수함수에 비해 계측값과 비교적 유사한 형태를 나타낸다. 3k385의 천단침하에서 막장거리의 함수는 지수함수가 대수함수보다 계측값과 일치하는 형태로 나타났으며 내공변위의 지수함수가 막장거리의 함수로 나타냈을 때 대수함수보다 비교적 높은 값을 나타내었다. 3k380의 천단침하를 막장거리의 함수로 나타낸 경우 지수함수가 대수함수보다 계측값에 일치하는 값을 보인다. 내공변위가 막장거리의 함수인 경우 지수함수가 대수함수보다 계측치와 유사한 값을

나타낸다. 3k530의 천단침하를 막장거리로 나타낸 경우 지수함수가 대수함수보다 더 계측치와 유사한 값을 나타냈다. 내공변위는 막장거리나 막장거리의 함수로 나타낸 경우 지수함수가 대수함수보다 더 큰 결정계수 값을 나타낸다. 따라서 천단침하나 내공변위의 경우 지수함수가 대수함수보다 현장계측값과 비교적 일치하는 값을 나타내었다.

천단침하의 막장거리에 대한 지수함수 결정계수는 0.971~0.995이며, 대수함수의 결정계수는 0.867~0.990이다. 내공변위의 막장거리에 대한 지수함수 결정계수는 0.912~0.969이며, 대수함수의 결정계수는 0.907~0.971의 범위를 나타내었다.

## 7.2 RMR과 각 단면의 변위 예측

RMR과 각 단면의 변위 예측은 전반적으로 예측값이 잘 일치하는 지수함수를 이용하여 예측하였다. 자료 분석결과와 RMR값이 작을수록 각 단면의 변위가 급격히 증가하는 경향을 나타냈다.

그림 13에는 각 단면의 RMR과 변위 예측에 대한 지수함수의 상수 C, D와의 관계를 나타내었다. 각 단면의 천단변위에 대한 상수 C와 D의 RMR값의 관계는 다음식과 같다.

$$C = 0.0029R^2 + 0.1188R - 31.329 \quad (3)$$

$$D = -0.0002R^2 + 0.0203R - 0.6539 \quad (4)$$

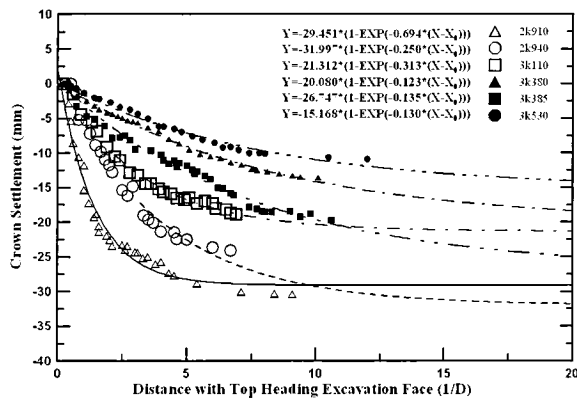
각 단면의 내공변위에 대한 C값, D값과 RMR값의 관계는 다음식과 같다.

$$C = -0.0002R^2 - 0.2245R - 5.0976 \quad (5)$$

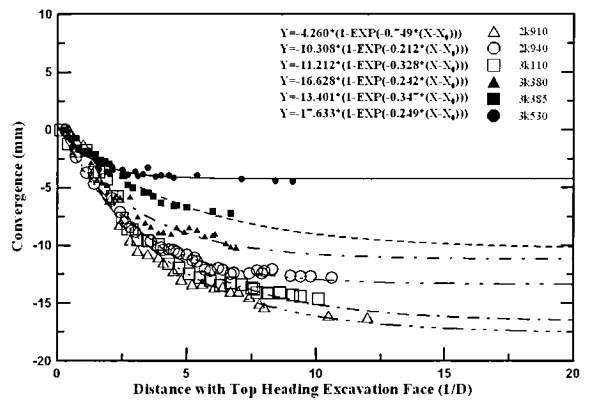
$$D = 0.0029R^2 + 0.1188R - 31.329 \quad (6)$$

표 4. 각 단면의 변위 예측에 대한 함수별 결정계수

단면	변위	대상	대수함수			지수함수		
			R <sup>2</sup>	A	B	R <sup>2</sup>	C	D
2k910	천단	막장거리(m)	0.971	-16.386	-1.069	0.977	-28.585	-0.821
	내공	막장거리(m)	0.918	-2.449	-1.031	0.948	-4.193	-0.852
2k940	천단	막장거리(m)	0.964	-9.170	-2.020	0.985	-28.878	-0.324
	내공	막장거리(m)	0.907	-2.729	-1.524	0.949	-7.478	-0.337
3k110	천단	막장거리(m)	0.990	-6.290	-2.396	0.993	-20.730	-0.344
	내공	막장거리(m)	0.971	-3.301	-2.492	0.969	-10.918	-0.361
3k380	천단	막장거리(m)	0.915	-2.493	-4.089	0.995	-20.080	-0.123
	내공	막장거리(m)	0.937	-2.912	-4.451	0.964	-19.286	-0.191
3k385	천단	막장거리(m)	0.867	-3.183	-2.016	0.987	-13.840	-0.161
	내공	막장거리(m)	0.937	-6.312	-1.387	0.950	-14.556	-0.441
3k530	천단	막장거리(m)	0.908	-4.290	-3.200	0.971	-25.246	-0.153
	내공	막장거리(m)	0.909	-4.092	-1.625	0.912	-10.475	-0.392



(a) 천단침하



(b) 내공변위

그림 13. 각 단면의 RMR과 변위와의 관계

표 5. 각 단면의 RMR과 변위 예측에 대한 상수 C와 D

단면	변위	대상	지수함수			RMR
			R <sup>2</sup>	C	D	
2k910	천단	막장거리(m)	0.977	-28.585	-0.821	7
	내공	막장거리(m)	0.948	-4.193	-0.852	
2k940	천단	막장거리(m)	0.985	-28.878	-0.324	10
	내공	막장거리(m)	0.949	-7.478	-0.337	
3k110	천단	막장거리(m)	0.993	-20.730	-0.344	28
	내공	막장거리(m)	0.969	-10.918	-0.361	
3k380	천단	막장거리(m)	0.995	-20.080	-0.123	45
	내공	막장거리(m)	0.964	-19.286	-0.191	
3k385	천단	막장거리(m)	0.987	-13.840	-0.161	41
	내공	막장거리(m)	0.950	-14.556	-0.441	
3k530	천단	막장거리(m)	0.971	-25.246	-0.153	53
	내공	막장거리(m)	0.912	-10.475	-0.392	

### 8. 결 론

본 연구에서 국내 화강암 풍화토 지반의 터널 시공현장 계측 결과를 활용하여 터널에 따른 천단변위와 내공변위를 회귀분석을 통하여 예측한 결과는 다음과 같다.

1. 현장계측결과로부터 터널 굴착에 따른 천단침하량은 굴착 초기인 약 20일간 총 변위 변화량의 약 70~80%가 발생되었다.
2. 천단침하를 막장거리의 함수로 나타낸 경우 지수함수의 결정계수는 0.912~0.995, 상수 C는 -4.193~-28.585, D는 -0.123~-0.852 범위이고 대수함수의 결정계수는 0.867~0.990, 상수 A는 -2.449~-16.396, B는 -1.031~-4.451 범위로 지수함수가 보다 비교적 계측값이 잘 일치하였다.
3. 각 단면의 변위를 RMR에 대하여 지수함수를 이용하여 예측한 결과, RMR값이 작을수록 천단변위와 내공변위가 초기에 급격하게 감소하였다. 천단변위와 내공변위에 대한 상수 C와 D의 변화는 RMR값에 따라 일정한 관계식을 나타냈다.
4. 본 연구에서 사용된 화강암 풍화토 지반의 터널단면은 대표단면을 선정된 6단면의 계측결과를 이용하였다. 하지만 총 6단면으로 터널의 천단침하와 내공변위를 예측하는 것은 다소 오차가 있어 보인다. 추후

화강암 풍화토 지반의 터널단면의 더 많은 계측결과를 이용하여 보다 정확한 변위예측이 가능하리라 사료된다.

### 참고문헌

1. 건설교통부 부산지방 국토관리청(2006), OO-OOO 국도 건설공사 노선변경설계 토질조사 보고서 및 터널 보고서
2. 김광일(2008), 정보화 시스템을 이용한 터널의 변형거동 예측 및 안정성 평가, 경북대학교 대학원 박사논문, pp. 132~168.
3. 김영배, 조용량(2009), 터널계측의 기술현황, 한국터널공학회 학회지, Vol. 11, No. 4, pp. 86~96.
4. 김호영, 박익섭(1993), 터널 내공변위의 이론과 계측결과 분석, 터널과 지하공간, Vol. 3, No. 1, pp. 80~95.
5. 문승백, 송승곤, 양형식, 진양수, 한공창(2001), 천층 광폭터널의 내공변위 및 침하거동특성 예측을 위한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간, Vol. 11, No. 1, pp. 20~29.
6. 방준호, 김기영, 정용훈(2007), 터널 시공 중 3차원 절대변위 계측시스템의 개발과 적용, 한국터널공학회, Vol. 9, No. 3, p. 229.
7. 배규진(1989), 토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위 논문, p. 160.
8. 배병훈(2009), 퇴적암층에 굴착되는 터널의 굴착에 따

- 
- 른 거동, 경북대학교 대학원 석사논문, pp. 12~25.
9. 이두화(2002), 영동선 동백산-도계간 장대터널 시공사례 연구, 한국터널공학회, Vol. 4, No. 2, p. 163.
10. 이인모(2001), 암반역학의 원리, 새론출판사, p. 106~109
11. 정형식, 김성황, 이상돈, 김낙영(1998), 통계적 방법에 의한 최종변위량 예측에 관한 연구, 한국지반공학회 봄 학술 발표회 논문집, pp. 347~356.
12. 홍성완, 배규진, 구본효, 정하익(1985), 현장계측에 의한 터널주변지반의 변위연구, 대한토질공학회지, Vol. 1, No. 2, pp. 41~53.
13. Atkinson, J. H. and Potts, D. M.(1977), Subsidence above shallow tunnels in soft ground, *Journal of the Geotechnical Engineering, Div., ASCE*, Vol. 103, No. 4, pp. 307~325.
14. Panet, M., and Guenot, A.(1982), Analysis of convergence behind the face of a tunnel, *Tunnelling 82*, IMM, Brighton, pp. 197~204.
- 
- 접수일(2010.6.25), 수정일(2010.7.8), 게재확정일(2010.7.23)