

통계처리를 활용한 터널 내공변위의 분석에 관한 연구

김종우¹⁾

Estimation of Tunnel Convergence Using Statistical Analysis

Jong Woo Kim

Abstract. Measured convergence data of a tunnel were investigated by means of statistical and regression analysis, where the rock mass were mainly composed of andesite and granite. The rock mass around tunnel were classified by RMR method into five different ratings, and then convergence data which belong to individual ratings were statistically processed to find out the appropriate regression equations. Exponential equations were better coincided with measured data than logarithmic equations. As the number of rock mass rating was increased, the magnitude and standard deviation of convergence were increased. Final convergence data were also investigated to study the relevance with both maximum displacement rate and early measured convergence. Some brief results of their relevance are presented. For instance, the regression coefficient between final convergence and maximum displacement rate was turned out to be 0.87 for this studied tunnel.

KeyWords: Convergence, Statistical analysis, Regression, Displacement rate, Rock mass rating

초 록. 백악기 경상계 안산암과 불국사 화강암류가 주로 분포하는 지반에서 시공된 터널의 내공변위 계측자료를 분석하였다. 터널 주변 암반을 RMR법에 의한 다섯 가지 암반등급으로 구분하고 각 등급에 포함된 계측자료들을 통계처리하여 암반등급별 내공변위의 회귀분석을 실시하였다. 연구 결과, 로그함수보다는 지수함수의 상관계수가 더 크며, 연약한 암반등급일수록 내공변위의 크기와 표준편차가 크게 나타났다. 또한, 최종내공변위에 대한 최대변위속도 및 초기내공변위의 관계를 도출하였으며, 이 중에서 최종내공변위와 최대변위속도의 상관계수는 0.87로 나타나 이들은 비교적 높은 상관성을 가지는 것으로 확인되었다.

핵심어: 내공변위, 통계처리, 회귀분석, 변위속도, 암반등급

1. 서 론

설계단계에서 예측된 터널의 거동은 실제 시공중의 터널 거동과는 많은 차이가 있다. 따라서, 시공중 터널의 거동을 현장 계측하여 얻은 정보로부터 설계 및 시공법의 타당성을 검토하는 것이 필요하다. 최근 NATM 공법으로 시공중인 터널에서는 장단기적인 안정성 평가를 주된 목적으로 현장 계측이 실시되고 있으나, 완공 후에는 수집된 계측 자료들이 다소 등한시되며 심지어 멸실되는 경우도 많다. 그러나, 수집된 계측자료들을 통계처리 및 회귀분석함으로써 기시공된 터널의 거동을 해석하면 향후 유사 지반조건 및 유사 시공조건에 해당하는 터널을 시공할 때 중요한 설계 보조자료로

활용할 수 있다.

터널의 계측항목으로는 내공변위, 천단침하, 지중변위, 록볼트 축력, 슛크리트 응력 등의 여러 가지가 있으나, 이 중에서 내공변위는 터널 안정성을 판단하기 위한 가장 기본적인 계측항목으로 이용되고 있다. 특히, 내공변위 곡선을 시간과 거리에 따른 임의의 함수로 표현함으로써 터널의 최종 내공변위를 예측하려는 연구가 진행되어 왔으며¹⁻⁴⁾, 국내에서도 활발히 연구가 진행되고 있다⁵⁻¹¹⁾.

특히 최근에는 지수함수, 로그함수, 분수함수 등으로 표현되는 내공변위 함수를 현장 및 지반조건별로 적용한 연구 사례가 발표되었으며^{6,10,11)}, 통계적 방법을 동원하거나 굴착전 선행변위를 고려한 연구가 보고된 바 있다⁸⁻⁹⁾.

본 연구에서는 백악기 경상계 안산암과 불국사 화강암류로 주로 구성된 지반에서 최근 시공된 A터널의 내

¹⁾청주대학교 지구환경시스템공학과 부교수
접수일: 2003년 2월 27일
심사 완료일: 2003년 4월 23일

공변위 계측자료를 분석함으로써 변위특성을 연구하였다. 본 터널의 내공변위 곡선을 지수함수와 로그함수로 표현하여 각 함수의 적합성을 조사하였고, 측정전 선행 변위를 고려한 회귀분석을 실시하였다. 또한, 본 터널을 다섯 가지 암반 및 지보 등급으로 구분하고 각 등급에 포함된 계측자료들을 통계처리함으로써, 암반등급별 내공변위의 회귀분석을 실시하였으며, 최종내공변위에 대한 최대변위속도 및 초기내공변위와의 관계를 도출하였다.

2. 현장 계측

2.1 현장개요 및 지반특성

본 터널은 왕복 2차로 병렬터널로서, 총 연장은 1818m이며 평균 경사는 1.83%이다. Fig. 1은 지질중단면도를 나타낸 것으로서, 높은 산지는 대체로 풍화작용에 강한 백악기 경상계 안산암류로 이루어지며 낮은 구

릉지는 풍화에 약한 불국산 화강암류(소위 “마산암”)로 이루어져 있다. 터널주변의 절리계는 N20~40°E 계와 N70~80°W 계가 우세하게 분포하고 있으며, 경사는 대체로 50~85°이다.

한편, 본 현장은 RMR법에 의해 암반을 분류하고 이에 따른 표준지보패턴을 설정하였는데, 다섯 가지 암반 등급의 구간별 분포현황은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 대체적으로, 터널 중앙부의 안산암으로만 구성된 암반은 1등급 암반으로, 시점 갱구부의 화강풍화토 구간은 5등급 암반으로 결정되었으며, 기타 등급 암반은 화강암과 안산암이 혼재된 영역에 분포하였다. 이 중에서 3등급 암반은 터널 전체 연장의 47%를 차지하여 가장 널리 분포하였다.

2.2 터널 시공

본 터널은 NATM공법을 적용한 상부반단면 선행굴진공법으로 시공되었다. 작업공정은 1일 2발파 굴착을

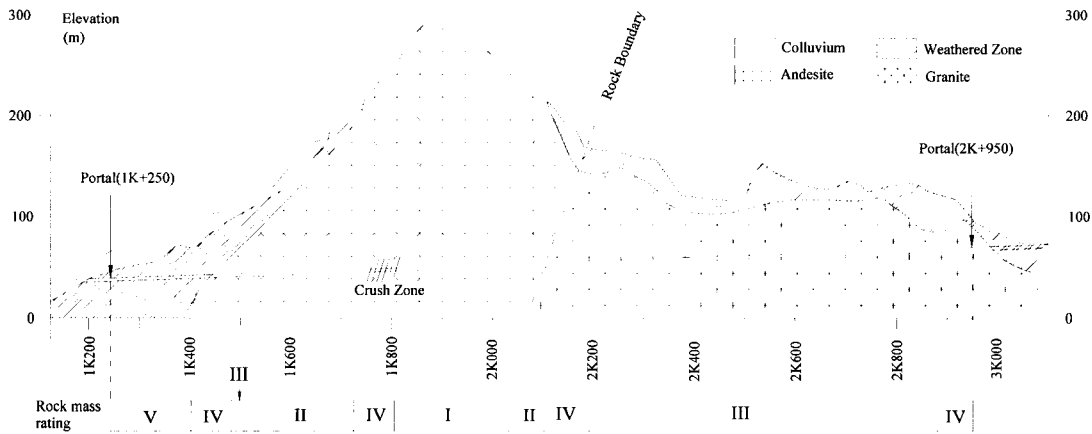


Fig. 1. A view of longitudinal section.

Table 1. A standard support pattern.

Pattern		I	II	III	IV	V	Remarks
Shotcrete		50 mm	80 mm	100 mm	150 mm	200 mm	
Rock Bolt	Type	Random	System	System	System	System	
	Length	3.0 m	3.0 m	4.0 m	4.0 m	5.0 m	SD40-D25
	Spacing	-	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m	0.8 m
-		3.0 m	2.0 m	1.5 m	1.5 m	0.8 m	Longitudinal
Advance		3.0 m	3.0 m	2.0 m	1.5 m	0.8 m	
Steel arch		-	-	Optional	1.5 m	0.8 m	H100×100×6×8
Wiremesh		-	1 Layer	1 Layer	1 Layer	2 Layer	4.8×100×100

원칙으로 진행하였으며, 굴진장은 I, II등급 암반에서는 3 m, III등급 암반에서는 2 m, IV등급 암반에서는 1.5 m, V등급 암반에서는 0.8 m 등이다. 갱구부를 제외한 대부분의 경우에서 long bench cut 공법이 적용되었다.

Table 1은 본 터널의 5가지 암반 등급에 따른 표준지 보패턴을 나타낸 것이다. 록볼트는 주로 모르타르 접착형이 사용되었으며, 파쇄대 및 절리발달구간에는 레진볼트가 사용되었다. 4, 5등급 암반에는 강지보를 전면적으로 시공하였으며, 3등급 암반의 일부 파쇄구간에 대해서도 선택적으로 설치하였다. 또한, 갱구부, 파쇄대, 용수구간에서는 강판다단 그라우팅, 포어폴링 등의 보조공법이 병행 실시되었다.

2.3 터널 계측

터널의 장단기적인 안정성을 검토하기 위하여 시공 중에 일상계측(A계측)과 대표단면계측(B계측)을 실시하였다. 총 54개 단면에서 일상계측을 실시하였는데, 계측항목은 갱내관찰조사, 내공변위, 천단침하, 록볼트 인발시험 등이며, 총 7개의 대표단면을 선정하여 지중변위, 록볼트 축력, 슛크리트 응력 등을 추가로 측정하였다.

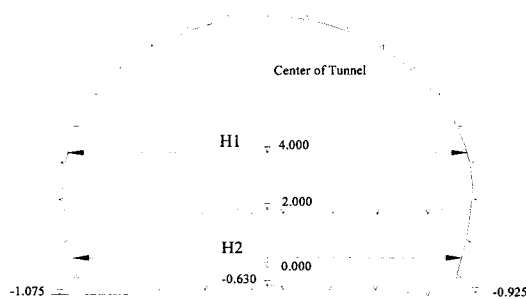


Fig. 2. Cross-section for measuring convergence.

Fig. 2는 본 터널의 내공변위 측선을 나타낸 것이다. 본 터널은 상부반단면 선형굴진공법으로 시공되는 관계로, 상부반단면과 하부반단면에 대해 각각 H1, H2 등의 2개 측선으로 내공변위를 측정하였다. 계측빈도는 굴착 후 0~15일까지는 1일마다 측정하였고, 이후 변위 수렴여부를 감안하면서 계측빈도를 점차 조정하였으며, 터널 굴착 후 약 150일까지 주기적으로 계측을 실시하였다. 사용된 계측기는 GEOKON사의 내공변위계이며, 정밀도는 0.01 mm이다.

3. 계측 분석

3.1 내공변위 예측이론

내공변위는 터널의 안정성을 판단하기 위한 가장 기본적인 계측항목으로서, 국내외에서 활발히 연구되고 있다. 특히, 내공변위 곡선을 경과시간 및 굴착면 거리에 따른 임의의 함수로 표현하고, 측정전 변위를 고려한 최종변위를 예측하는 연구가 주로 실시되고 있다. 대부분의 연구에 있어서, 실제 측정된 내공변위(C_m)는 (1)식과 같이 표현된다.

$$C_m = C(x, t) - C_0 \quad (1)$$

여기서, $C(x, t)$ 는 거리 및 시간에 따른 내공변위 함수이고 C_0 는 측정전 내공변위이다. 내공변위 함수로는 암반의 특성에 따라 지수함수, 로그함수, 분수함수 등이 고려되며, Table 2는 이를 요약한 것이다.

3.2 내공변위 계측결과

일반적으로 굴착 직후 터널 주변 암반의 이완에 따라 내공변위는 점차 증가하며, 이후 주변 암반이 안정화됨에 따라 내공변위는 어느 일정치에 수렴하는 경향을 보

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
$C(x) = C_x \left\{ 1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right\}$	C_x, X	Elastic-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

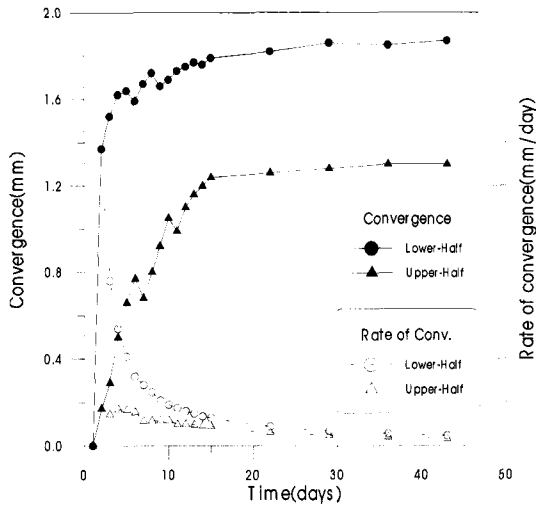


Fig. 3. Variation of convergence at 1K+560 section.

이게 된다.

본 터널 굴착 중에 총 54개 단면에서 상반 및 하반의 수평 내공변위가 측정되었다. Fig. 3은 내공변위 측정결과 중의 한 예를 나타낸 것으로서, 1K+560 단면(2등급 암반)에서의 경과시간에 따른 변위 발생양상이다.

1K+560 단면의 상반 내공변위는 초기치 측정 후 계속적으로 증가하다가 14일 경과시부터 거의 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 최종내공변위는 1.30 mm(42일 경과시점)로 나타났다. 또한, 동일 단면에서 하부단면을 추가로 굴착한 후에 측정한 하반 내공변위도 상반과 마찬가지로 초기치 측정 후 계속적으로 증가하지만, 상반보다는 다소 빠른 시간에서 일정치에 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 최종내공변위는 1.87 mm(42일 경과시점)이다.

한편, 내공변위의 계측결과로부터 터널의 안정성을

판단할 때, 발생하는 변위량을 기준으로 하는 방법과 변위속도를 기준으로 하는 방법이 있다. Fig. 3에서 점선으로 표시한 것은 1K+560 단면에서의 변위속도를 나타낸 것으로, 상반 및 하반의 최대 변위속도는 각각 0.17, 1.37 mm/day(1일 경과시점)로 나타났다.

굴착 후 터널의 변위는 경과시간에 따라 급격히 증가하기 때문에 굴착 직후 즉시 내공변위를 측정할 필요가 있으나, 현장의 시공상황 등에 따라 굴착 후 수일이 경과한 후에 초기치가 측정되는 것이 일반적이다. 본 현장의 경우에는 대체적으로, I, II등급 암반은 굴착 후 1일 경과시점에 초기치가 계측되었고, III, IV등급 암반은 굴착 후 2일 경과시점에 초기치가 계측되었으며, V등급 암반은 굴착 후 3일 경과시점에 각각 초기치가 계측되었다.

또한, 54개 계측단면의 측정결과를 전체적으로 분석한 결과, 대부분의 단면에서 굴착 후 1~2주만에 변위가 수렴되었으며, 최대변위속도는 1~3일 경과시점에서 발생함을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 모든 계측단면에 대해 42일(6주)까지 발생한 변위량을 최종 변위량으로 설정하여 계측 결과를 분석하였다.

Table 3은 54개 계측단면을 암반 등급에 따라 분류한 것이다. 본 터널은 Fig. 1과 같이 3등급 암반이 가장 널리 분포하므로 계측단면들 중에서 3등급 암반의 사례 수가 가장 많게 나타났다.

Fig. 4는 각 계측단면에서 측정된 상반 및 하반의 최

Table 3. Number of measuring sections classified by RMR.

Rating	I	II	III	IV	V	Total
Number	4	7	22	12	9	54
(%)	(7)	(13)	(41)	(22)	(17)	(100)

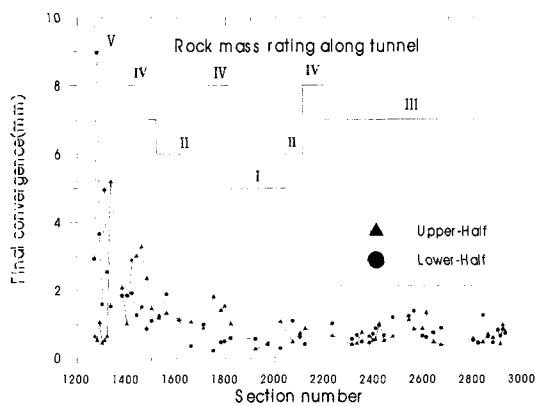


Fig. 4. Variation of final convergence measured at 54 different sections.

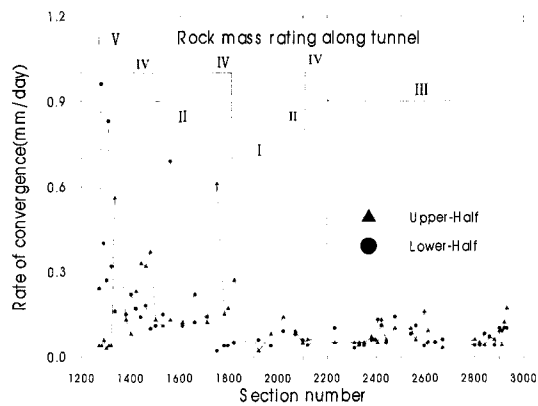


Fig. 5. Variation of rate of convergence measured at 54 different sections.

종내공변위를 터널 연장에 따라 도시한 것으로서, 각 계측단면이 속한 암반등급을 함께 나타낸 것이다. 시점 갱구부인 V등급 암반 구역에서 상하반 최종내공변위가 가장 크게 나타났으며, 1K+780 부근의 암반파쇄대(IV등급 암반)에서도 상대적으로 큰 변위가 발생하였다. 한편, 기타 등급은 대체로 비슷한 크기의 변위를 나타내었다.

Fig. 5는 각 계측단면에서 측정된 상반 및 하반의 최대변위속도를 나타낸 것이다. Fig. 4와 마찬가지로 시점부와 암반파쇄대 지역에서 상대적으로 큰 변위속도를 보이고 있으며, 이는 최종내공변위가 최대변위속도와 밀접한 관계가 있다는 기존의 연구결과와 부합한다.

3.3 회귀분석

김호영(1993)은 내공변위 함수로서 탄성암반에는 지수함수, 탄소성 암반에는 분수함수가 적합함을 국내 사례연구로 보고하였으며, 외국의 사례연구 및 송승곤(2002)의 연구결과도 마찬가지이다. 한편, 문승백(2001)은 탄소성 암반에서도 보강이 충분한 경우 지수함수가 더 적합함을 보고하였다.

본 연구에서는 54개 단면의 상·하반 내공변위로서 108개의 계측자료에 대해 Table 2의 지수함수 및 로그함수를 적용한 회귀분석을 실시하였다. 측정전 변위를 고려한 지수함수 및 로그함수의 회귀식은 각각 (2), (3) 식과 같다.

$$C(t) = a(1 - \exp(-bt)) - C_0 \tag{2}$$

$$C(t) = a \log(1 + bt) - C_0 \tag{3}$$

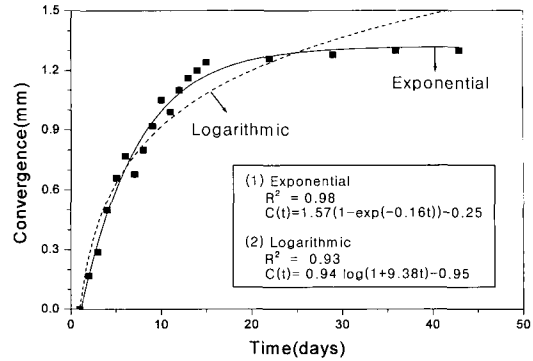


Fig. 6. Results of regression at 1K+560 upper-half section.

Fig. 6은 회귀분석 결과의 예를 나타낸 것으로서 108개 회귀결과중의 하나이다. 이 그림은 Fig. 4, 5와 마찬가지로 1K+560 단면의 상부반단면 내공변위를 상기의 두 가지 방법에 의해 회귀분석한 것으로서, 본 단면의 경우 지수함수 및 로그함수의 회귀상관계수는 각각 0.98, 0.93으로서 지수함수의 상관계수가 더 크게 나타났다.

한편, Table 4는 108개 계측자료에 대해 각각 회귀분석을 실시한 후, 결정된 회귀상관계수들을 통계처리하여 암반등급별로 정리한 것이다. 표에서 지수함수의 상관계수는 전체평균 0.95이고 로그함수는 0.91로서, 지수함수의 상관계수가 더 크게 나타났으며, 이는 암반등급과 거의 무관하였다. 또한, 표에서 회귀상관계수들의 표준편차도 지수함수의 경우가 더 작음을 볼 수 있다. 이와 같이 본 터널의 내공변위 함수로서 지수함수가 더

Table 4. Comparison of regression coefficient between exponential and logarithmic functions.

Item	Rating	Exponential		Logarithmic	
		Upper-Half	Lower-Half	Upper-Half	Lower-Half
Average	I	0.96	0.94	0.91	0.90
	II	0.97	0.93	0.92	0.89
	III	0.94	0.95	0.92	0.90
	IV	0.97	0.96	0.92	0.92
	V	0.97	0.91	0.92	0.88
	Total		0.95		0.91
Standard deviation	I	0.03	0.04	0.04	0.01
	II	0.02	0.07	0.02	0.07
	III	0.04	0.03	0.04	0.08
	IV	0.02	0.02	0.04	0.05
	V	0.04	0.07	0.11	0.10
	Total		0.04		0.06

적합한 것으로 판단되며, 이는 전술한 다른 연구결과와 부합한다. 특히, 탄소성거동을 하는 것으로 예측되는 낮은 등급의 암반에서도 지수함수식의 적합성이 높게 나타난 것은 본 터널에 적용된 표준지보 및 보조공법에 의해 터널 주변암반이 탄성암반에 준하는 특성을 나타낸 것이라 생각된다¹⁰⁾.

다음으로 각 암반등급에 적합한 내공변위의 지수함수를 구하기 위하여, 각 계측단면별 경과일수에 따른 상반과 하반의 내공변위 계측자료를 모두 평균하여 암반등급별로 회귀분석을 실시하였다. 아래의 관계식은 회귀분석의 결과를 나타낸 것이다.

$$I \text{ 등급: } C_m = 0.76 \{1 - \exp(-0.26 t)\} - 0.13 \quad (4)$$

$$II \text{ 등급: } C_m = 1.12 \{1 - \exp(-0.18 t)\} - 0.14 \quad (5)$$

$$III \text{ 등급: } C_m = 0.98 \{1 - \exp(-0.15 t)\} - 0.25 \quad (6)$$

$$IV \text{ 등급: } C_m = 1.95 \{1 - \exp(-0.22 t)\} - 0.68 \quad (7)$$

$$V \text{ 등급: } C_m = 4.73 \{1 - \exp(-0.27 t)\} - 2.53 \quad (8)$$

4. 통계 처리

4.1 최종내공변위와 최대변위속도

54개 계측단면의 108개 계측자료에 대해 최종내공변위를 조사하고 이를 암반등급에 따라 도시하면 Fig. 7과 같다. 그림(a)는 각 암반등급별 최종내공변위의 평균값을 나타낸 것이고 그림(b)는 표준편차를 보여준다.

그림(a)에서 최종내공변위는 각 등급별로 상이하며, 일반적으로 연약한 암반등급일수록 내공변위는 크게 나타났다. 또한, 상반 및 하반 내공변위의 크기를 등급별로 비교하면, I 등급 암반의 경우에는 상반 굴착시의 내공변위가 하반 내공변위보다 크게 나타났으나, V 등급 암반은 반대의 경향을 보였다. 그러나 본 연구의 I 등급 암반은 사례수가 상대적으로 적기 때문에 보다 신뢰성 있는 분석을 위해서는 향후 심도 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 그림(b)에서 연약한 지반인 IV, V 등급 암반은 계측치의 분산 정도도 큰 것을 볼 수 있다.

한편, Fig. 8은 Fig. 7에 나타낸 상반 및 하반의 내공

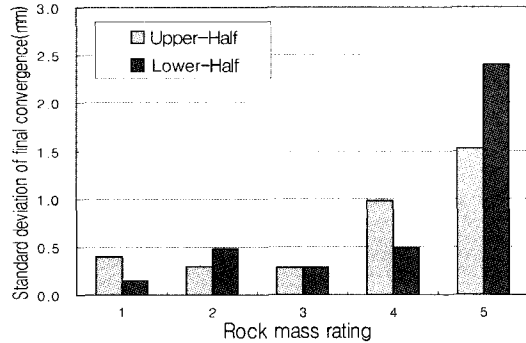
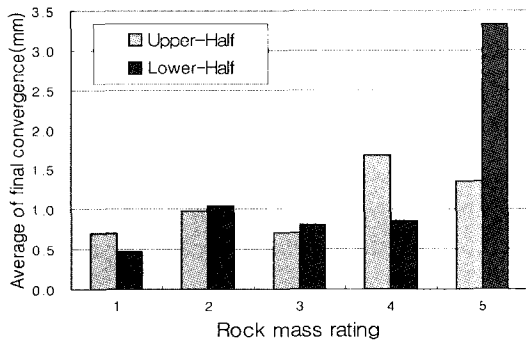


Fig. 7. Distribution of final convergence at upper-half and lower-half sections.

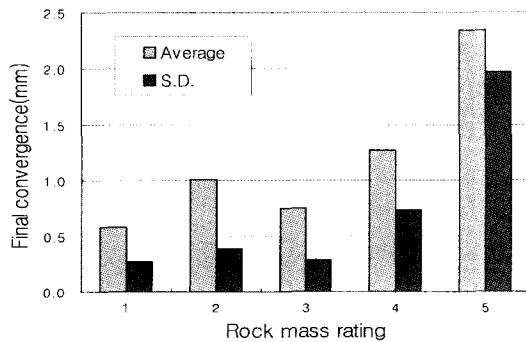


Fig. 8. Distribution of final convergence by rock mass rating.

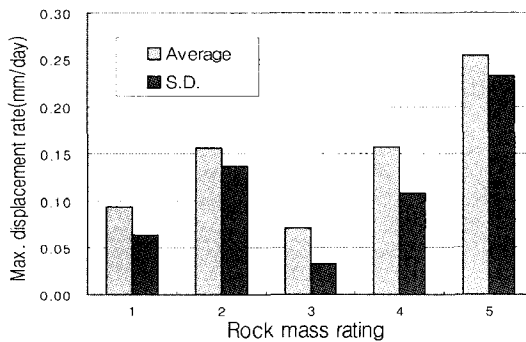


Fig. 9. Distribution of maximum displacement rate by rock mass rating.

변위 자료를 다시 평균하여 나타낸 것으로서, 연약한 암반등급일수록 최종내공변위의 크기와 표준편차가 크게 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 여기서 Ⅲ등급 암반의 내공변위가 상대적으로 작게 나타난 점에 대해 언급하면 다음과 같다.

Ⅲ등급 암반은 역학적으로 I, Ⅱ등급의 암반보다 불안정하므로 내공변위가 크게 발생할 것으로 예측되는데 비해, 실제로는 그렇지 않은 것으로 나타났다. Ⅲ등급 암반은 본 터널의 계측단면 54개중에서 22개를 차지(41%)하고 있어, 다른 등급에 비해 계측자료의 빈도가 크며, 표준편차도 작기 때문에 통계자료의 신뢰성은 큰 편이다. 따라서 Ⅲ등급 암반의 내공변위가 Ⅱ등급에 비해 작게 나타났음은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

이와 같은 현상이 나타난 이유는 Ⅲ등급 암반의 내공변위 측정시점이 I, Ⅱ등급 암반보다 늦기 때문에 Ⅲ등급 암반에서 측정전 선행변위(C_0)가 더 발생하였음에 그 원인을 찾을 수 있다. 그러나, Ⅲ등급 암반의 측정 변위가 작은 또다른 원인으로는, 적용된 지보체계(Table 1 참고)가 본 터널의 경우 암반 변위를 충분히 제어한 것으로 판단되며, 경제적인 관점에서 보면 이보다 지보량을 감소시켜 적용할 수도 있을 것으로 생각된다.

한편, 108개 계측자료에 대해 각각 최대변위속도를 조사하고 상기와 같은 방식으로 통계처리를 실시하였다. Fig. 9는 각 계측단면별 상반 및 하반의 최대변위속도를 평균하여 암반등급별로 정리한 것이다. 이를 Fig. 8과 비교하면 이들은 매우 유사하기 때문에 최종내공변위의 크기와 최대변위속도는 높은 상관성을 가지는 것으로 생각된다. 또한, Ⅲ등급 암반의 최대변위속도가 가장 작게 나타난 것은 전술한 바와 같이 초기치 계측시

점과 적용된 지보체계의 영향으로 판단된다.

4.2 최종내공변위의 예측

터널의 최종내공변위를 조기에 예측하면, 시공중인 터널의 안정성을 판단하는데 매우 유용하다. 본 연구에서는 최종내공변위를 조기에 예측할 수 있는 기법으로서 다음의 두 가지 방법을 연구하였다.

첫째, 터널의 최종내공변위는 전술한 바와 같이 최대변위속도와 상관관계가 있으므로, 이들의 상관성을 조사함으로써 최종변위를 예측할 수 있다. 본 터널의 경우 최대변위속도는 초기치 계측 이후 1~3일 정도만에 나타나므로, 이 방법을 이용하면 조기에 최종변위를 예측할 수 있다.

Fig. 10은 본 터널의 108개 계측자료를 통괄하여 분석한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 최종내공변위와 최대변위속도의 상관관계식은 (9)식과 같고, 이때 상관계수는 0.87로 나타났다. 이와 같이 최종내공변위와 최대변위속도는 비교적 높은 상관성을 가지는 것으로 확인되었으며, 이 식은 본 터널과 유사한 지반조건 및 시공조건을 가지는 터널을 시공할 경우에 최종내공변위를 조기에 예측할 수 있는 방법이 될 것으로 생각된다.

$$\log C_{\max} = 0.72 \log C_{v, \max} + 0.70 \tag{9}$$

여기서, C_{\max} 는 최종내공변위(mm)이고 $C_{v, \max}$ 는 최대변위속도(mm/day)이다.

둘째, 터널 굴착 후 내공변위를 최초로 측정할 시점의 계측치와 다음날 측정할 계측치와의 차이(즉, 1일 경과시의 내공변위로서, 이하 “초기내공변위”라고 칭함)를 이용하여 최종내공변위를 예측할 수 있다. 이 방법은

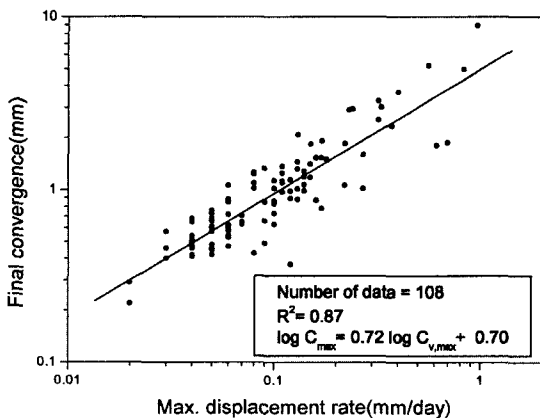


Fig. 10. Relationship between maximum displacement rate and final convergence.

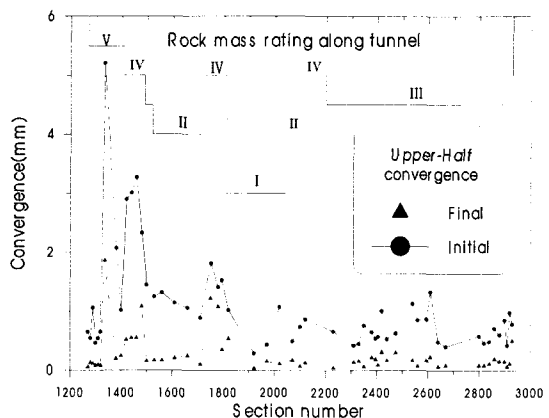


Fig. 11. Variation of initial and final convergence at 54 different upper-half measuring sections.

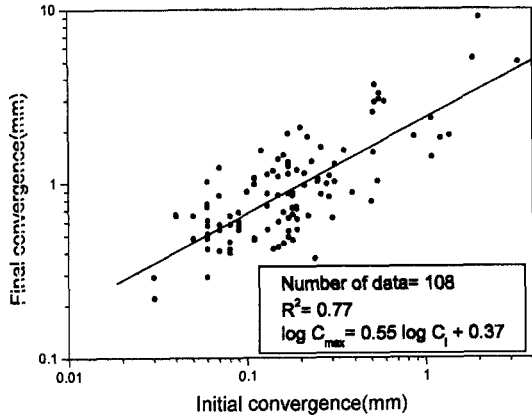


Fig. 12. Relationship between initial and final convergence.

(9)식에 비해 널리 알려진 방법은 아니지만, 최종변위량을 계측 즉시 예측할 수 있는 장점이 있으며, 실제로 佐伯正治(1985)는 일본 蛇尾川 발전소의 도로터널 시공에서 이를 계측관리 기준치 설정에 이용한 바 있다¹²⁾. 또한, 이와 유사한 방법으로서 정형식(1998), 송승곤(2002)은 막장거리 1D 또는 2D에서 계측된 변위량과 최종변위량 사이의 상관관계를 연구하기도 하였다^{8,11)}. 본 터널의 54개 계측단면에서 상부반단면의 내공변위 계측자료를 분석하여, 초기내공변위와 최종내공변위를 각 계측단면에 따라 도시하면 Fig. 11과 같다. 여기서 내공변위의 초기치와 최종치는 어느 정도 상관성을 나타낼 수 있으며, 본 터널의 경우 초기변위량은 최종변위량의 약 25% 수준에 해당하였다.

한편, 하부반단면의 계측자료 역시 같은 방법으로 분석되었으며, 이와 같이 총 108개의 계측자료를 통괄하여 분석한 결과는 Fig. 12와 같다. 여기서 본 터널의 최종내공변위와 초기내공변위의 상관관계식은 (10)식과 같고, 이때 상관계수는 0.77로 나타났다. 이와 같이 초기내공변위는 최종내공변위와 어느 정도 상관성을 가지는 것으로 확인되었으며, 이 식 역시 본 터널과 유사한 조건을 가지는 터널 시공에 적용될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나, (10)식은 (9)식에 비해 회귀상관계수가 작으므로 그 결과의 신뢰성은 다소 떨어질 것으로 생각된다.

$$\log C_{\max} = 0.55 \log C_i + 0.37 \quad (10)$$

여기서, C_{\max} 는 최종내공변위(mm)이고 C_i 는 초기내공변위(mm)이다.

5. 결론

기시공된 터널에서 수집된 계측자료를 분석하면 향후 유사 지반 및 시공 조건을 가지는 터널을 시공할 때 중요한 설계자료로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 백악기 경상계 안산암과 불국사 화강암류로 주로 구성된 지반에 시공된 A터널의 내공변위 계측자료를 분석하여 변위특성을 조사하였다. 총 54개 계측단면에서 측정된 108개 계측자료에 대해 회귀분석과 통계처리를 실시하였으며, 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 측정전 변위를 고려한 내공변위 곡선에 대해 지수함수와 로그함수로 회귀분석을 실시한 결과 암반등급에 관계없이 지수함수의 상관계수가 더 크게 나타났다.
2. 모든 계측단면을 RMR에 의한 다섯 가지 암반등급으로 구분하고, 각 등급에 포함된 계측자료들을 통계 처리함으로써 암반등급별 내공변위의 회귀함수를 구하였다. 또한, 통계분석 결과 연약한 암반등급일수록 내공변위의 크기와 표준편차가 크게 나타났다.
3. 최종내공변위와 최대변위속도의 상관관계식은 다음과 같고, 이때 상관계수는 0.87로 나타나 이들은 비교적 높은 상관성을 가지는 것으로 확인되었다.

$$\log C_{\max} = 0.72 \log C_{v, \max} + 0.70$$

4. 최종내공변위와 초기내공변위의 상관관계식은 다음과 같고, 이때 상관계수는 0.77로 나타났다.

$$\log C_{\max} = 0.55 \log C_i + 0.37$$

참고문헌

1. Panet, M., 1979, Time-dependent deformations in underground works, 4th Int. Congr. on Rock Mechanics, ISRM, Montreux, Vol.3, 279-289.
2. Panet, M. & A. Guenot, 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling 82, IMM, Brighton, 197-204.
3. 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.
4. Sulem, J., Panet, M., Guenot, A., 1987, An Analysis Solution for time-dependent displacements in a circular tunnel, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 24.3, 145-154.
5. 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과와 분석, 터널과 지하공간 3.1, 80-95.
6. 장정범, 김용일, 김영근, 정한중, 1995, 도심지 NATM 터

- 널에서의 계측관리시스템 적용 연구, 터널과 지하공간 5.3, 193-204.
7. 김영근, 장정범, 정한중, 1996, 경암지반 NATM 터널에서 암반분류 및 계측에 의한 최적지보공 선정에 관한 연구, 터널과 지하공간 6.2, 197-208.
 8. 정형식, 김성환, 이상돈, 김낙영, 1998, 통계적 방법에 의한 터널 최종변위량 예측에 관한 연구, 한국지반공학회 98년 춘계 학술발표논문집, 347-356.
 9. 신동오, 임한욱, 김지환, 1998, NATM 시공에 의한 터널 굴착시 선행변위 추정에 관한연구, 터널과 지하공간 8.1, 87-95.
 10. 문승백, 송승근, 양형식, 전양수, 한공창, 2001, 천층 광폭터널의 내공변위 및 침하거동특성 예측을 위한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간 11.1, 20-29.
 11. 송승근, 양형식, 임성식, 정소걸, 2002, 초기계측치를 이용한 경암 지반내 터널의 최종변위량 예측, 터널과 지하공간 12.2, 99-106.
 12. 암반역학위원회, 1994, 터널에서의 조사·계측의 평가와 이용, 원기술, 서울, 353p.



김종우

1986년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과
 공학석사
 1993년 서울대학교 대학원 자원공학과
 공학박사
 Tel: 043-229-8471
 E-mail: jwkim@chongju.ac.kr
 현재 청주대학교 지구환경시스템공학과
 부교수