

풍화 화강암 지반에 건설된 NATM터널에서의 내공변위 연구

신상식, 김학준*, 배규진

Study on the Convergence of the NATM Tunnel Constructed in the Weathered Granite

Sang-Sik Shin, Hak Joon Kim*, Gyu Jin Bae

Abstract Predicting and measuring tunnel convergence is very crucial for estimating tunnel stability and economical construction of NATM tunnels. The method to estimate the tunnel convergence that occurs before and after construction is proposed based on literature reviews. The total displacement occurring related to tunnel construction is determined to be about 2.5 times that of measured displacements. The results of displacement measurements at two tunnels constructed with similar rock types are examined for the investigation of factors affecting the tunnel convergence. The average convergence of Gyungju A Tunnel is about 6.7 times bigger than that of Daejeon B Tunnel. The possible causes of the large convergence in Gyungju A Tunnel are suggested. In order to predict the convergence of tunnels, careful investigation of the geological structures in the ground surface and the influence of external conditions as well as careful face mapping of the tunnel face should be conducted.

Key words Tunnel convergence, Rock mass ratings, Field measurements

초 록 터널의 안정성 평가와 경제적인 NATM 시공을 위해서는 터널의 내공변위에 대한 예측과 측정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 계측 결과를 활용하여 굴착 전과 굴착 후에 지반에서 발생하는 변위를 추정하는 방법을 문헌조사를 통하여 제시하였다. 일반적으로 터널 건설과 관련하여 지반에서 발생하는 전체 변위량은 계측 변위 값의 약 2.5배 정도일 것으로 판단되었다. 또한 본 연구에서는 암반등급이 유사한 화강암 지반에 건설된 두 터널에서의 현장 계측 결과를 분석하여 내공변위에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다. 경주 A터널이 대전 B터널보다 변위량이 6.7배 더 크게 측정되었으며 이에 대한 원인이 제시되었다. 터널 내공변위를 예측하기 위해서는 터널 내부에서의 굴착면의 막장관찰뿐만 아니라 지표면에서의 지질구조 특성과 터널에 응력을 증가시킬 외부적인 요인에 대한 면밀한 검토가 수반되어야 한다.

핵심어 내공변위, 암반등급, 현장 계측

1. 서 론

경제적인 NATM 시공을 위해서는 대상 지반의 역학적 거동을 정확히 예측한 후 적절한 터널 지보재를 적용하는 것이 매우 중요하다. 그러나 터널 설계 단계에

서 가정한 터널 주변 지반과 지보재의 변위나 응력변화는 지반 정수 산정의 불확실성, 지반의 불균질성과 이방성, 굴착과 지보재 적용 과정을 정확히 반영하기 어려운 해석 모델링의 한계, 시공 중 발생하는 여러 변수 등의 차이로 인하여 실제 현장과 상당한 차이를 보이는 것이 일반적이다. 이러한 터널 설계상의 한계로 인하여 실제 시공 중에는 굴착에 의해 노출된 막장면의 관찰 결과에 따라 암반을 재분류하고 암반등급에 따른 지보패턴의 적정성을 검토하여 시공에 반영하게 된다. 본 연구에서는 국내에 가장 넓게 분포되어 있는 화강암질 풍화대구간의 2개 터널 현장에서 수행된 내공변위와 RMR 평가의 상관관계 분석을 통하여 현장에 적용된

Received: Dec. 4, 2015

Revised: Dec. 17, 2015

Accepted: Dec. 17, 2015

***Corresponding Author:** Hak Joon Kim

(Tel) +82422802574, (Fax) +82422802576

E-Mail) hakkim@dju.ac.kr

Daejeon University, 62, Daehak-ro, Dong-gu, Daejeon, Korea

지보패턴의 적정성을 검증하고, 터널 막장관찰을 통한 내공변위 예측의 문제점과 개선 방안을 제안하고자 한다.

2. 터널 내공 변위 연구 현황

2.1 국내 터널 내공 변위 측정 현황

터널 계측은 크게 일상계측과 정밀계측으로 구분할 수 있으며 굴착면 후방의 벽면 변위를 계측하는 내공변위 측정은 일상계측에 해당된다. 따라서 국내의 거의 모든 터널 현장에서 터널 굴착과 함께 내공 변위 측정이 이루어진다. 내공변위 측정은 터널 시공의 안정성, 지보의 효과, 지보의 시공시기 및 방법 등을 검토하기 위한 가장 기본적인 계측으로서 단면의 변형상태, 변위의 분포 상태 및 변위속도 등에 의한 지반의 안정성을 검토한다. 막장 굴착 이후 가능한 초기에 최종 변위량을 예측하고 안정성을 검토하여 1차 복공의 추가여부를 판단하며, 하반굴착 등에 의한 1차 복공의 안정성 판단 자료로 사용하게 된다.

MOCT(2007)에 의하면 계측측선은 터널 축 방향을 따라 20 m 간격으로 배치함을 표준으로 하며, 갱구부 50 m 이내 구간과 토피가 터널직경의 2배 이하인 구간은 10 m 간격으로 배치함을 원칙으로 한다. 내공변위계는 실링 슛크리트가 타설된 직후 설치하고 다음 막장의 굴착이 진행되기 전에 초기치를 측정하여 터널 굴진에 따른 변위를 최대치로 측정할 수 있도록 하여야 한다. 측정기간은 계측기 설치 후부터 변위의 수렴이 확인될 때까지로 함을 원칙으로 하며, 측정 빈도는 변위속도 또는 막장 거리에 근거하여 결정하되 변위 양상에 따라 조정하여야 한다.

2.2 터널 내공 변위 크기

일반적으로 터널 내공변위(Convergence)란 굴착면 후방의 벽면 변위를 이르며 NATM의 안정성을 평가하기 위한 가장 기본적인 계측항목이다. 그러나 실질적으로 터널 굴착으로 인하여 지반에서 발생하는 최종 변위량 U_t 는 Fig. 1과 같이 굴착 전 선행변위 U_a 와 굴착 이후 계측기 설치 전까지의 변위량 U_0 , 실제 계측에서 측정된 변위 U_m 으로 구분된다(식 1). 계측은 막장으로부터 X_0 떨어진 지점에서 t_0 의 시간이 경과한 후에 시작된다.

$$U_t = U_a + U_0 + U_m \quad (1)$$

계측값(U_m)은 굴착 후 지보재의 설치시기, 초깃값 측정 시의 막장과 계측지점의 거리, 터널굴착 후 초깃값

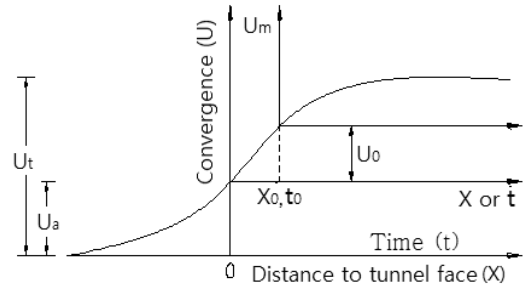


Fig. 1. Typical tunnel convergence occurring during tunnel excavation

측정까지의 시간, 지보재와 지반의 상대적 강성 등에 따라 달라진다. 따라서 NATM 시공에 있어 경제성 및 안정성 확보를 위해서는 막장 굴착 후 초기에 계측기 설치가 완료되어야 하며, 신속한 계측 결과 분석에 의한 피드백 시스템이 적용되어야 한다. 그러나 실제 현장에서는 계측기 설치를 위한 별도의 시간이 필요함을 인정하려는 인식이 부족하여 굴착 후 버럭 제거, 지보재 설치 등의 후속공정이 진행된 후에 계측을 위한 시간과 공간이 제공되는 경우가 일반적이다.

이러한 이유 등으로 국내 터널 현장에서는 막장 굴착 이후 초기에 계측기 설치가 이루어지지 못하여 초기치 측정이 지연되는 경우가 많다. Chung et al.(1998)에 의하면 국내터널의 막장과 계측시점까지의 거리는 약 5~6 m로 조사되었다. 따라서 계측기 설치 전에 발생하는 선행변위를 제외하고 계측 결과에서 확인된 누적변위량(U_m)만을 가지고 계측 분석을 수행할 경우에는 초기치 측정의 차이로 인하여 계측 결과 해석에 한계가 있을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 굴착 전 선행변위 U_a , 굴착 후 계측기 설치 전 발생변위 U_0 및 계측결과에 의한 누적변위 U_m 에 대한 많은 연구가 있었다. Park and Shin(2007), Park(2008), Park(2011) 등은 한계변형률을 이용한 터널의 안정성 평가에 최종 변위량(U_t)을 이용하였다.

2.3 굴착 전의 선행변위

굴착 전의 선행변위 연구는 계측에 의한 실측변위에 관한 연구와 수치해석에 의한 연구 방법으로 구분된다. KICT(2003), Kim et al.(2003), Jang et al.(2008), Park(2008), Kang and Yoon(2008), Kim et al.(2008) 등은 지중 수평경사계를 이용하여 막장 전방 천단침하량에 대한 선행변위 비율을 분석하였으며 Chae et al.(2011) 등은 광섬유센서를 이용하여 선행변위 비율을 분석하였

Table 1. The ratio between U_a and U_t obtained from the field measurements and the numerical analyses

U_a/U_t (%)	Method of estimation	References
59~64	Horizontal inclinometer	KICT (2003)
60		Kim et al. (2003)
40		Jang et al. (2008)
30~60		Kang and Yoon (2008)
46		Kim et al. (2008)
42	Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)	Chae et al. (2011)
40	Extensometer	Kitagawa et al. (1991)
49~63	Field measurements and numerical analysis	Yim et al. (2007)
30	Numerical analysis	Hanafy and Emery (1980)
21~27		Panet and Guenot (1982)
28~32		Vassilev and Hrisstov (1988)

다. 수치해석에 의한 굴착 전의 선형변위 계산은 Hanafy and Emery(1980), Panet and Guenot(1982), Vassilev and Hrisstov(1988), Yim et al.(2007), Park and Shin(2007) 등 여러 연구자들에 의하여 제시되었다. 최종 변위량에 대한 선형변위의 비율을 정리하면 Table 1과 같으며, 전반적으로 계측에서 얻어진 값은 40~60%(평균 50%), 수치해석에서 얻어진 비율은 20~30%의 비율을 보이고 있다. 두 값이 차이가 발생하는 이유는 수치해석에서 얻어진 선형변위의 비율은 무지보 상태에서 발생하는 전체 변위와 비교한 값이고, 현장계측에서 얻어진 선형 변위 비율은 라이닝 등의 설치로 감소된 전체 변위(U_t)와 비교하기 때문으로 판단된다. 실제로 Yim et al. (2007)이 제시한 선형변위 비율도 실제 현장에서 라이닝의 설치에 의하여 감소된 전체 변위(U_t)와 비교한 값이다.

2.4 굴착 후 계측기 설치 전 변위(U_0)

계측 전 발생된 변위 U_0 를 파악하기 위해서 많은 연구(Hanafy & Emery, 1980; Kaiser, 1980; Lombardi, 1979; Otsuka & Kondoh, 1981; Panet & Guenot, 1982; Sulem et al., 1987; Vassilev & Hrisstov, 1988)가 진행되었으며, 국내에서도 Kim and Park(1993), Chung, et al.(1998), Song, et al.(2002)의 연구가 있었다.

실측된 터널 계측자료 분석 방법은 크게 통계적 방법과 근사함수에 의한 방법으로 나눌 수 있으며, 과거 시공된 유사 터널자료에 의한 통계적 방법은 터널 단면 형상이나 지반 조건 등의 상이성으로 분석결과를 해당 현장에 적극적으로 반영하기에는 한계를 가지고 있다. 근사함수에 의한 터널 변위 분석 방법은 터널 굴착 시 발

생하는 지반변위를 굴착 후, 시간 또는 막장면까지의 거리에 의한 함수에 근사시킴으로써 초기 변위로부터 최종 변위량을 예측할 수 있다.

최종 변위량 U_t 에 대하여 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 변위 U_0 의 비율은 지수함수에 의한 회귀분석 결과로부터 구할 수 있다. Song, et al.(2002)은 4개 터널에 대한 계측 결과 값을 시간경과에 따른 지수함수식에 의해 회귀분석하였으며, U_0/U_t 의 비율은 14~36%로 나타났다. Park(2011)의 연구 결과에서는 평균 9%, Kim et al.(2008)은 유사한 연구사례 분석을 통하여 전체변위에 대한 계측 전 변위의 비율을 10% 정도로 제시하였다.

2.5 실측에 의한 누적변위(U_m)계측 사례

실측에 의한 변위량 측정은 국내 대부분의 터널 현장에서 수행되었으며, Kim(2010)은 터널 시공 중 계측한 변위를 이용하여 시공이 완료되었을 때 발생할 최종 누적변위를 예측하는 연구를 수행하였다.

본 연구를 위하여 6개 현장에서 측정된 국내 터널의 변위 계측 사례를 조사한 결과는 Table 2와 같다. 현장에서 실시된 RMR 평가결과에 따라 각 암반등급의 누적변위량을 조사하였으며, 암반등급별로 -3.0~-19.0mm의 변위량을 보이고 있다.

Table 2와 같이 비교적 암반이 양호한 I~II등급의 경우 -3.0~-8.0mm의 변위량을 보이고 있으며, III~IV등급의 경우 -4.0~-13.0mm, 암반상태가 상대적으로 불량한 V등급은 -5.0~-19.0mm의 내공 변위량을 나타내었다. 평균적으로 암반등급이 불량할수록 내공변위값이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Yim et al.(2007)에 의

Table 2. Maximum measured displacements (U_m) obtained from this study (- ; compression)

Tunnel Names (Construction year)	Rock mass ratings (RMR), mm				
	I	II	III	IV	V
Hakcheon (2012)	-5.0	-4.0	-6.0	-8.0	-8.0
Seocheon (2005)	-	-4.0	-6.0	-	-8.0
Saegok 1 (2008)	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-5.0
Gaeryong (2005)	-8.0	-7.0	-7.0	-	-19.0
Haewol (2006)	-	-6.0	-6.2	-8.0	-13.0
Hoegae (2006)	-	-8.0	-8.0	-13.0	-18.0
Averages	-5.3	-5.5	-6.2	-8.3	-11.8

하여 제시된 계측결과에 의하면 암반등급별로 변위량에 특정한 변화를 보이지 않았으며 이것은 평가된 등급에 따라 적용된 지보재의 보강 효과로 해석하였다. 결론적으로, 터널 현장에서 계측에 의하여 측정되는 변위량은 암반등급, 지보재 타입, 지반보강 유무, 터널 크기, 터널 심도, 원지반 응력, 공사방법 등 많은 요인에 의하여 영향을 받을 것이므로 계측 결과를 암반등급과 연결하여 일반화시키는 것에는 한계가 있다.

2.6 전체 내공 변위량(U_t)의 산정

NATM 시공 시 발생하는 전체 내공변위(U_t)는 굴착 전 선형변위(U_a), 계측 전 초기변위(U_0)와 실측에 의한 계측 변위(U_m)의 합으로 나타낼 수 있다. Chung et al.(1998)과 Song et al.(2002)은 막장 거리 1D 혹은 2D까지의 계측 변위를 이용하여 최종 내공 변위량을 산정하는 방법을 제시하였다. 기존의 내공변위에 대한 연구 결과를 종합하면 굴착 전 선형변위(U_a)는 전체 변위량(U_t)의 약 50%, 계측 전 초기변위(U_0)는 전체 변위량의 10% 정도로 나타났으며, 이를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (2)와 같다. 식 (2)는 국내 터널 현장 계측 사례를 통하여 얻어진 값이다.

$$U_t = 2.5 U_m \quad (2)$$

전체 내공변위(U_t)는 무지보 상태에서 발생 가능한 최종 변위량이 아닌, 지보재를 설치한 경우의 최종 변위량이며 계측에 의한 실측변위의 약 2.5배 정도이다. 현장 계측 결과에 의하면 선형변위의 비율이 전체 내공변위의 40~60%를 보이므로 최종 변위량은 계측 변위값의 2~3배(평균 2.5배) 정도일 것으로 판단된다. 이 값은 최종변위를 막장거리 1D에서 측정한 변위량의 1.4~1.6배의 범위로 제시한 Chung et al.(1998)의 결과와 크게 벗어나지 않는다. 또한 Kim et al.(2008)의 경우 수

평경사계를 사용하여 측정한 선형변위(22mm)와 최종 변위(42mm)를 고려했을 때, 최종 변위량은 계측변위의 약 2.4배로, 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 그러나 Park (2011)에 의하여 상행선 11개 지점에서 제시된, 전체 내공변위와 계측변위의 평균 비율인 1.63, 하행선 12개 지점에서의 평균 비율 1.65보다는 다소 높다. 따라서 식 (2)를 모든 터널 현장에 적용하기에는 다소 한계가 있을 수 있다. 그러나 선형변위나 계측 전에 발생한 변위를 측정하기 어려운 상황에서, 계측값을 이용하여 최종 변위를 추정해야 하는 경우에는 식 (2)가 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

3. 현장 계측 결과 및 분석

3.1 현장 개요

국내 터널 현장에서 내공변위 계측은 암반등급에 따른 지보패턴의 적정성을 검증하는 데 가장 최선의 방법으로 활용되고 있다. 본 연구에서는 지보패턴의 적정성을 검증하고자 화강암 풍화대지반에 시공되고 있는 2개 터널 현장에 대하여 내공변위 계측을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

경주 A터널의 터널 폭은 13.5 m, 최대토피고 약 415 m, 총연장 7.54 km에 이르는 대심도 장대터널이다. 이 지역은 백악기 경상누층군 퇴적암(세일)과 백악기~제3기 불국사 화강암류, 3기 퇴적암류 및 4기 층적층으로 구성되며, 백악기 퇴적암류는 대부분 세일이 우세한 열접촉 변성퇴적암류이다. 본 연구구간에 존재하는 것으로 확인된 탐정단층대는 지표지질조사에서 전체 영향 범위가 150~180m에 이르는 대규모 단층대로 심한 파쇄 상태의 압편 등으로 구성되어 있으며, 지하수 유동의 통로로 작용되어 실제 굴착 시 지하수 유출이 매우 심하였다.

대전 B터널은 터널 연장 1,205 m의 병렬터널로서 터

널 폭 16.3 m에 터널 높이 9.8 m의 편도 3차로 대단면 터널이다. 본 대상구간의 지질은 시점부에서 중앙부에 걸쳐 쥐라기에 생성된 흑운모화강암이 분포하고 있으며, 금강과 금강 지류 주변, 상대적인 저지대에는 제4기 미고결의 충적층이 이들 지층들을 부정합으로 피복하며 분포한다. 지형이 낮은 터널 시점부는 굴착 중 진행된 막장관찰에서 심한 풍화 내지 완전 풍화상태의 암반상태를 보이며, 전기비저항 탐사결과에서도 상대적으로 낮은 저비저항대가 넓고 깊게 연장되어 나타난다. 막장관찰에서 확인된 주 불연속면은 터널 진행방향과 평행한 절리가 우세하게 나타나며, 대부분 심한 풍화~완전 풍화상태를 보였다.

3.2 현장계측 결과

경주 A터널에서는 본 연구를 위해 울산방향 시점 측으로 역방향 굴진이 진행 중인 터널 현장 약 100 m 구간에서 VI 타입의 불국사 화강암 지반에 내공변위 측정용 3D 반사 타깃을 종방향 10 m 간격으로 설치하고 하반 굴착 전까지 내공변위를 측정하여 분석하였으며, 대변 측량에 의해 측선의 길이 변화량을 내공 변위량으로 산출하였다. Fig. 2는 경주 A터널과 대전 B터널에서의 내공변위 측선 위치를 보여주고 있다.

Table 3에서와 같이 굴진 중 현장 막장관찰을 통하여 평가된 RMR값은 14~19점으로 V등급의 암반상태로 평가되었으나 시공 중 내공변위 발생량이 최대 56 mm로 비교적 크게 나타나 VI등급 지보패턴이 적용되었다.

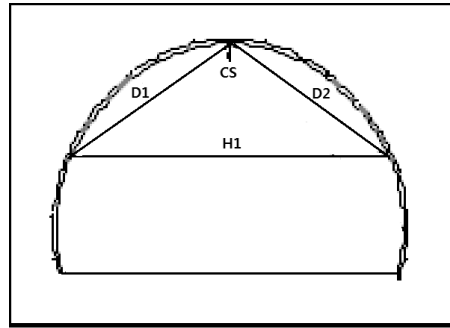


Fig. 2. Location of convergence measurements in two tunnels

터널의 1회 굴진장은 1.0 m, 강섬유보강 슛크리트 두께 20 cm, 록볼트 길이 4.0 m(1.5 m×1.0 m)로 시공이 이루어졌으며, 보조 보강공법으로 이중 강관다단그라우팅(270°)이 시행되었다.

현장 계측에서 나타난 수평측선의 평균 변위량은 -37.5 mm로 좌대각 및 우대각의 평균 변위량 -15.3~-13.3 mm와 비교하여 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 천단부의 평균 침하량인 -2.2 mm에 비해 매우 큰 차이를 보이고 있다. 천단침하량이 전반적인 내공변위량에 비해 매우 미소한 침하발생을 나타낸 것은 현장 계측구간이 대규모 단층대와 교차하는 지질 특성과 터널 양측 측벽방향으로 작용하는 응력이 터널 상부에서

Table 3. Results of final convergence measurements in Gyeongju A Tunnel

Location (Sta.)	Displacements (mm)				RMR	Support type
	CS (Crown settlement)	H1 (Horizontal line)	D1 (Left diagonal)	D2 (Right diagonal)		
3+830	-5.0	-24.0	-10.0	-15.0	17	VI
3+820	-5.0	-27.0	-16.0	-16.0	19	VI
3+810	-3.0	-17.0	-12.0	-10.0	18	VI
3+800	-1.0	-28.0	-13.0	-16.0	19	VI
3+790	-2.0	-39.0	-7.0	-19.0	14	VI
3+780	-3.0	-56.0	-25.0	-25.0	17	VI
3+770	-2.0	-40.0	-12.0	-16.0	18	VI
3+760	-1.0	-47.0	-14.0	-13.0	17	VI
3+748	-1.0	-53.0	-16.0	-13.0	17	VI
3+740	-1.0	-39.0	-10.0	-10.0	17	VI
3+730	0.0	-43.0	-11.0	-15.0	17	VI
Average	-2.2	-37.5	-13.3	-15.3	17.3	-

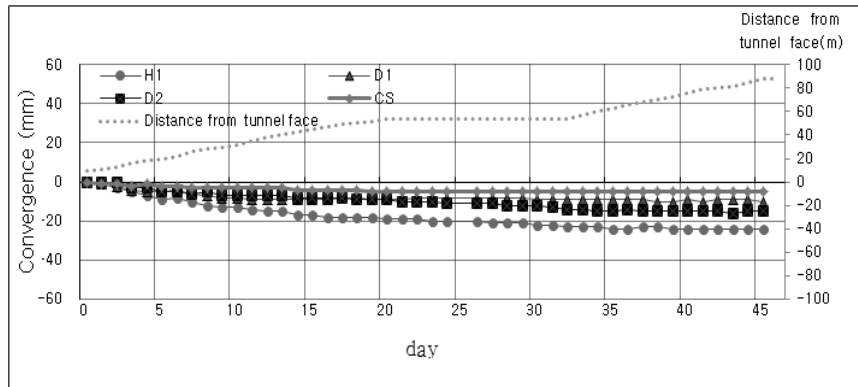


Fig. 3. Measured displacements with time at Sta.3+830 in Gyeongju A Tunnel

Table 4. Estimated total displacements in Gyeongju A Tunnel

Location (Sta.)	Convergence (mm) - Horizontal line			
	Ua	UO	Um	Ut
3+830	-30	-6	-24.0	-60
3+820	-34	-7	-27.0	-68
3+810	-22	-4	-17.0	-43
3+800	-35	-7	-28.0	-70
3+790	-49	-10	-39.0	-98
3+780	-70	-14	-56.0	-140
3+770	-50	-10	-40.0	-100
3+760	-59	-12	-47.0	-118
3+748	-66	-13	-53.0	-133
3+740	-49	-10	-39.0	-98
3+730	-54	-11	-43.0	-108
Averages	-47	-9	-37.5	-94

의 응력보다 크게 작용하고 있기 때문에 판단된다. Fig. 3은 한 계측 지점(Sta.3+830)에서의 시간 경과 및 막장과의 거리와 내공변위의 관계를 정리한 결과이다. Table 4는 식 (2)를 이용하여, 측정된 내공변위 U_m 로부터 최종 변위량 U_t 를 산정한 결과이며, 수평 축선 계측 결과로부터 산출된 최종 변위량은 -140~-43mm로 나타났다.

경주 A터널의 변위 수렴양상과 경과일, 막장과의 거리 및 터널 폭과의 상관성을 파악하기 위하여 변위 수렴조건을 1주일간의 변위속도 1 mm/day이내로 가정하고 Table 5와 같이 정리하였다. 계측기 설치 시점은 굴착 후 초기치 측정 시까지의 평균 막장 거리가 8.3 m로 Chung et al.(1998)이 국내 터널 사례 조사에서 제시한 5~6 m보다 2~3 m 후방에서 초기치 계측이 이루어졌

으며, 과 변위 발생에 따른 보강 작업 등 굴착 후 후속 공정으로 인하여 타 현장보다 다소 늦게 계측이 시작되었다. 설치 위치별 변위 수렴 경과 일수는 29~42일(평균 34.2일), 이때 계측 위치와 막장까지의 거리(X)는 42~73 m(평균 57.0 m)로 터널 폭(D)의 3.1~5.4배(평균 4.2배)에 해당된다.

대전 B터널은 터널 연장 1,205 m중 시점부 약 90 m 구간에 내공변위 측정용 3D 반사 타깃을 10 m 간격으로 설치하여 하반 굴착 전까지 내공변위를 측정하였으며, 대변측량에 의해 축선의 길이 변화량을 내공 변위량으로 산출하였다.

Table 6과 같이 대전 B터널의 굴착 중 막장관찰에 의한 RMR 평가 결과는 7~25점(평균 15.3점)으로 암반 등급은 IV~V로 평가되었으며, 암반등급과 동일한 V

Table 5. The relationship between the convergence of displacements and X/D in Gyeongju A Tunnel

Location (Sta.)	Convergence of displacements			X at the time of initial readings (m)
	Time (day)	X (m, Distance from tunnel face)	X/D (Ratio between X and tunnel width)	
3+830	39	73	5.4	9
3+820	30	47	3.5	6
3+810	40	68	5.0	8
3+800	32	55	4.1	8
3+790	35	48	3.6	9
3+780	42	54	4.0	4
3+770	29	57	4.2	10
3+760	31	52	3.9	10
3+748	32	42	3.1	6
3+740	31	65	4.8	11
3+730	35	66	4.9	10
Averages	34.2	57.0	4.2	8.3

Table 6. Results of final convergence measurements in Daejeon B Tunnel

Location (Sta.)	Displacements (mm)				RMR	Support type
	CS (Crown settlement)	H1 (Horizontal line)	D1 (Left diagonal)	D2 (Right diagonal)		
7+440	-7.0	-9.0	-8.0	-8.0	20	V
7+450	-7.0	-4.0	-3.0	-3.0	24	IV
7+460	-5.0	-6.0	-4.0	-6.0	17	V
7+470	-5.0	-7.0	-4.0	-5.0	25	IV
7+480	-4.0	-4.0	-2.0	-4.0	13	V
7+490	-2.0	-3.0	-1.0	-2.0	7	V
7+500	-4.0	-5.0	-4.0	-4.0	12	V
7+510	-4.0	-5.0	-5.0	-5.0	11	V
7+520	-10.0	-9.0	-7.0	-7.0	12	V
7+530	-5.0	-4.0	-4.0	-4.0	12	V
Average	-5.3	-5.6	-4.2	-4.8	15.3	V

등급의 지보패턴이 적용되었다. 터널 굴착 시 1회 굴진장은 1.0~1.2 m, 강섬유보강 슛크리트 두께 20 cm, 록볼트 5 m(1.0 m×1.0 m, 1.2 m×1.2 m)로 시공이 이루어졌다. 변위 측정 결과에 의하면, 천단침하는 -10.0~-2.0 mm(평균 -5.3 mm), 수평측선 및 좌·우대각의 내공변위는 -9.0~-1.0 mm로 나타났다.

대전 B터널 Sta.7+440단면의 시간경과에 따른 내공변위는 Fig. 4와 같은데 계측기 설치 후 5일 이후 뚜렷

한 변위 수렴양상을 보이고 있으며, 최종변위는 -9.0 mm가 발생되었고 이때의 막장과의 거리는 약 10 m이다.

Table 7은 (식 2)를 이용하여, 측정된 내공변위 U_m 으로부터 최종 변위량 U_r 를 산정한 결과이며, 수평 측선 계측 결과로부터 산출된 최종 변위량은 -23~-8 mm(평균 -14 mm)로 나타났다.

대전 B터널의 변위 수렴에 따른 경과일, 막장과의 거리 및 터널 폭에 대한 비율을 정리하면 Table 8과 같다.

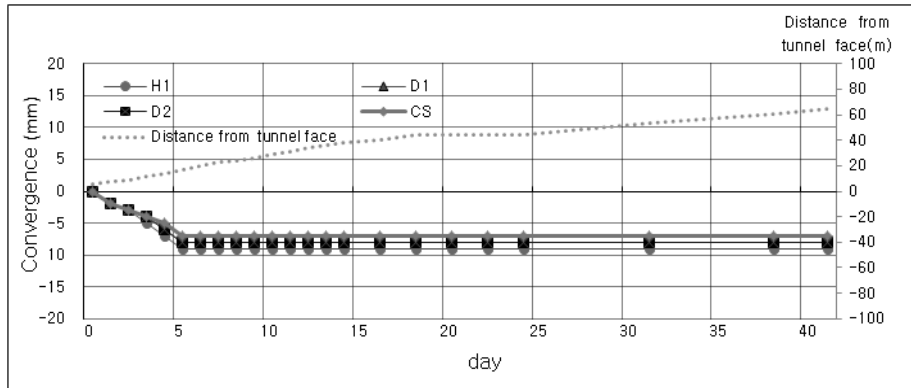


Fig. 4. Measured displacements with time at Sta.7+440 in Daejeon B Tunnel

Table 7. Estimated total displacements in Daejeon B Tunnel

Location (Sta.)	Convergence (mm) - Horizontal line			
	U_a	U_o	U_m	U_t
7+440	-11	-2	-9.0	-23
7+450	-5	-1	-4.0	-10
7+460	-8	-2	-6.0	-15
7+470	-9	-2	-7.0	-18
7+480	-5	-1	-4.0	-10
7+490	-4	-1	-3.0	-8
7+500	-6	-1	-5.0	-13
7+510	-6	-1	-5.0	-13
7+520	-11	-2	-9.0	-23
7+530	-5	-1	-4.0	-10
Averages	-7	-1	-5.6	-14

Table 8. The relationship between the convergence of displacements and X/D in Daejeon B Tunnel

Location (Sta.)	Convergence of displacements			X at the time of initial readings (m)
	Time (day)	X (m, Distance from tunnel face)	X/D (Ratio between X and tunnel width)	
7+440	2	10	0.6	4
7+450	6	20	1.3	6
7+460	4	14	0.9	4
7+470	4	10	0.6	1
7+480	3	4	0.3	3
7+490	6	7	0.4	1
7+500	3	10	0.6	3
7+510	2	8	0.5	5
7+520	7	11	0.7	3
7+530	4	13	0.8	7
Averages	4.1	10.7	0.7	3.7

수렴 경과일은 초기치 측정일로부터 2~7일(평균 4.1 일), 이때 계측기 설치 위치와 막장까지의 거리(X)는 4~20 m(평균 10.7 m)로 터널 폭(D)의 0.3~1.3배(평균 0.7배)에 해당되며 비교적 빠른 수렴양상을 보였다. 대전 B터널은 굴착 이후 초기치 측정까지의 거리는 1~7m(평균 3.7 m)로 경주 A터널의 평균 이격거리인 8.3 m보다 더 짧았다.

3.3 내공변위와 RMR과의 상관관계

굴착 중 노출되는 굴착면의 암반강도나 지하수 상태 및 불연속면의 특성들과 내공변위의 상관관계를 규명하고자 내공변위 측정 단면에서 실시한 RMR 평가 결과를 이용하여 각 평가 항목과 내공변위 양상과의 상관성을 분석하였다.

Table 9에 의하면 경주 A터널의 굴착 중 막장면에 대한 RMR 평가 결과에서 무결암 강도의 평균 점수는 4.3점으로 항목별 최대 점수 대비 29%로 나타났으며, 암질지수는 5.7점으로 최대 점수 대비 29%로 나타났다. 지하수 유출량에 의한 평가 점수는 10점으로 최대 점수 대비 67%로 나타나 상대적으로 고평가되었다.

다른 항목에 비해 절리면 상태 평가 항목이 최대 점수 대비 15%로 타 항목과 비교 시 가장 낮은 비율을 보이고 있는데 이는 대규모 단층대가 인접되어 있어 불연속면의 연속성이나 간격이 발달되고, 충전물이나 풍화정도가 심한 상태로 나타난 결과로 판단된다. 또한 지표면 상부에서부터 연장되어 있는 수직 절리가 막장면 관찰 시 확인되었으며, 절리의 주향이 터널 굴진방향과 평행하게 발달되어 나타나고 있어 RMR 평점은 낮게 평가되었다.

경주 A터널의 노선 방향은 N60E방향을 이루고 있

며 막장관찰에 의해 나타난 절리들의 주향은 N10~80E 방향이 주를 이루며, 경사는 35~80SE로 나타나 터널 방향과 평행한 절리가 우세하게 분포하고 있다. 따라서 경주 A터널은 절리 방향에 의한 보정점수인 -12점이 적용되어 최종 RMR 평점은 평균 17.3으로 V등급으로 분류되었으며, 과변위 발생에 따라 VI 타입의 지보패턴이 적용되어 시공되었다.

대전 B터널의 막장면 관찰 결과, 지하수 용수상태는 습윤(damp)한 것으로 나타나며, 불연속면에 점토질 충전물이 협착되어 있다. 화강암질 기반암은 보통 내지 심한 풍화상태를 보이고 있으며 부분적으로 완전 풍화되어 햄머 타격 시 실트질 모래로 분해된다. 대전 B터널의 주향은 N70E이며 주 절리들의 주향은 N42~88E, 경사방향은 68~88SW로 터널 진행 방향과 평행한 절리가 주를 이루고 있다. 따라서 대전 B터널은 절리 방향에 의한 보정점수인 -12점이 적용되어 최종 RMR 평점은 평균 15.3으로 Table 9와 같이 V등급으로 분류되었다. 대전 B터널에 대한 각 항목의 평가 결과를 살펴보면 배점 기준 대비 무결암 강도비율이 17%로 가장 낮게 평가되었으며, 지하수 유출 관련 항목은 55%로 비교적 높게 평가되었다.

두 대상 터널의 암반등급은 Table 9에서와같이 경주 A터널은 RMR 평점이 평균 17.3점으로 암반등급 V등급 중 상위점수로 평가되었으며, 변위량이 상대적으로 적게 나타난 대전 B터널의 RMR 평점도 이와 유사한 15.3점으로 평가되었다. 그러나 경주 A터널의 계측에서 나타난 변위량은 Table 10과 같이 대전 B터널보다 6.7배의 과변위 발생을 보이고, 변위 수렴시간은 8.3배, 변위 수렴거리는 5.3배, 변위 수렴 시 터널 폭에 대한 막장거리 비는 6배로 분석되었다. 특히 경주 A터널은

Table 9. Results of RMR evaluations in two tunnels

	Gyeongju A Tunnel (From 11 Stations)	Daejeon B Tunnel (From 10 Stations)
Strength of intact rock (15)	4~5 (average 4.3)	1~4 (average 2.6)
RQD (20)	4~8 (average 5.7)	3~8 (average 4.5)
Spacing of discontinuities (20)	5~6 (average 5.1)	5~8 (average 6.2)
Condition of discontinuities (30)	3~6 (average 4.6)	3~11 (average 5.8)
Groundwater (15)	10 (average 10)	7~10 (average 8.2)
Discontinuity orientations (-12)	-12 (average -12)	-12 (average -12)
RMR (100)	14~19 (average 17.3)	7~25 (average 15.3)
Class No.	V (average V)	IV~V (average V)
Um (mm)	24~56 (average 37.5)	3~9 (average 5.6)

Table 10. Results of average convergence measurements in two tunnels

	Gyeongju A Tunnel	Daejeon B Tunnel	Ratios
Class No.	V	V	-
RMR	17.3	15.3	1.1:1
Convergence (mm)	37.5	5.6	6.7:1
Crown settlements (mm)	2.2	5.3	0.4:1
Total displacements (Ut, mm)	94	14	6.7:1
Convergence time (day)	34.2	4.1	8.3:1
Convergence distance (m)	57.0	10.7	5.3:1
Ratio between X and tunnel width (X/D)	4.2	0.7	6.0:1
X at the time of initial readings (m)	8.3	3.7	2.2:1

Table 2의 타 현장 사례에서 조사된 최대 변위량 19mm의 197%, KR(2008)에서 제시하고 있는 풍화암 지반의 내공변위 관리기준치 15 mm의 250% 수준으로 타 현장 계측 사례에 비해 변위발생이 크게 나타났다.

변위 수렴 전까지의 일일 평균 변위속도는 경주 A터널은 2~9mm/day, 대전 B터널은 2~4mm/day로 나타났다. 경주 A터널은 전반적으로 30일 이상 변위발생이 지속되었다. 변위속도가 Franklin(1976)이 제안한 5mm/day를 초과하여 발생한 6개 단면은 일일 측정을 실시하여 지속적으로 변위양상을 관찰하였고 변위 가속이 확인된 경우에는 막장 중지 후 강지보 보강을 실시하여 변위발생을 억제하였다. 변위양상과 터널 내 육안관찰 결과 등을 종합적으로 검토하여 누적변위에 의한 관리허용치를 당초 40mm에서 50mm로 재설정하였으며, 일일 변위속도의 가속여부를 예의 주시하여 추가 보강 여부 및 굴착진행 여부를 결정하였다. 대전 B터널은 계측 10단면 중 일일 4mm 이상의 변위발생을 나타낸 단면은 총 3개 단면으로 Franklin(1976)이 제안한 기준치에 근접하고는 있으나 굴착 초기 일시적 변위발생 이후 평균 4일 이내에서 진행성 변위 발생 없이 수렴되는 양상을 나타내었다.

결론적으로 RMR값이 유사한 화강암 지반에 건설된 두 터널이, 계측도 동일한 회사에 의하여 수행되었음에도 불구하고 측정된 내공변위는 상당한 차이를 보였다. 경주 A터널의 내공변위가 대전 B터널보다 6.7배 더 크게 발생한 이유는 여러 가지 원인이 있을 수 있다.

먼저, 경주 A터널의 연구 구간 내에 교차하여 분포하고 있는 탐정단층대가 변위발생에 영향을 미쳤을 수 있다. 탐정단층대는 지표지질조사에서 나타난 전체 영향 범위가 150~180 m에 이르는 대규모 단층대로 본 연구 대상 구간인 Sta.3+815~860 위치에서 터널 계획심도

까지 연장되어 교차하는 것으로 확인되었으며, 지표면에서 확인된 단층대 구간의 수직절리는 터널의 굴진방향과 평행하게 발달되어 있으며, 오픈된 절리면에 연약 점토질이 충전되어 있었다. 암반분류 시 터널 주변 지반의 단층대를 포함한 지질특성을 고려하지 않은 경주 A터널의 경우 RMR 값이 다소 과하게 평가되었으며, 대전 B터널은 일부 IV타입 구간이 있었으나 V타입으로 비교적 저평가되어 다소 과한 지보패턴으로 내공변위가 조기 수렴되었다고 판단된다.

경주 A터널 과변위의 또 다른 원인은 높은 토피고에 기인할 수 있다. 경주 A터널의 토피고는 224.6~243.4 m(평균 231.7 m)로 대전 B터널의 토피고인 12.7~22.4 m(평균 19.1 m)보다 약 12.1배 더 높다. 따라서 경주 A터널의 경우, 터널 굴착 전의 원지반 응력이 대전 B터널에 비하여 훨씬 더 컸을 가능성이 크므로 이것이 터널 내공변위에 영향을 미쳤을 수 있다. 특히 천단침하에 비하여 수평방향의 내공변위가 큰 것은 수평방향으로 큰 응력이 작용했음을 암시해준다.

상부 지반의 토피고가 10~20m의 저심도이고 층적층과 풍화토 및 풍화암 지반을 통과하는 서울지하철 906공구 터널 공사 중에는 상부 사유지 빌딩 하부 통과구간에서, 유사한 암반상태인 다른 구간보다 상당히 큰, 최대 56mm의 내공 변위 발생 사례가 보고되었다(Kim, 2013). 따라서 NATM 시공 중 과변위 발생의 원인은 지반의 암반 등급뿐만 아니라 상부지반의 토피고와 터널 주변의 단층대를 포함한 지질구조, 원지반 응력, 외부 요인 등이 있을 수 있다. 그러므로 터널 내공변위를 신뢰성 있게 예측하기 위해서는 터널 내부에서의 굴착면의 공학적 특성뿐만 아니라 터널 상부 지표면의 구조적 지질특성이나 터널에 응력을 증가시킬 외부적인 요인에 대한 면밀한 검토가 수반되어야 한다. 특히 암반

등급이 불량하거나 단층대가 존재하는 경우에는 지반이 충분한 아칭효과(arching effect)를 발휘하기 어려우므로 터널 상부의 토피고의 영향에 대한 별도의 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 현장 계측 결과를 신속하게 반영하여 터널의 안정성을 확보하기 위해서는 현장에 상주하는 계측 전문가의 역할이 매우 중요하다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 화강암질 풍화대지반에 시공되고 있는 암반등급이 유사한 2개 터널현장에 대한 내공변위 측정 결과를 비교 분석하여 각기 다른 변위 양상에 대한 원인을 고찰하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 문헌조사에 의하면 터널 굴착 전 선행변위 U_a 는 전체 변위량 U_t 의 50%, 계측 전 초기변위 U_0 는 전체 변위량 U_t 의 10% 정도로 발생하며, 이로부터 암질이 양호한 암반터널에서의 전체 변위량 U_t 는 실측 변위량 U_m 의 약 2.5배로 추정할 수 있다.
2. 국내 6개 현장에서의 변위 계측 사례를 조사한 결과, 평균적으로 암반등급이 불량할수록 내공변위값이 증가하는 경향을 보였으나 내공변위와 암반등급의 관계를 일반화시키는 것에는 한계가 있었다.
3. 암반등급이 유사한 화강암 지반에 건설된 두 터널에서 동일한 계측회사에 의해서 계측이 수행되었음에도 불구하고 내공변위 크기와 수렴시간, 수렴기간, 수렴거리 등에서 상당한 차이를 보였다. 따라서 터널 내부의 막장관찰에서 얻어진 암반등급 자료는 터널의 내공변위와는 무관할 수 있음을 보였다.
4. 암반등급이 유사한 두 터널에서의 내공변위 양상이 큰 차이를 보이는 것은 암반이 불량한 지반에서 단층대의 발달과 높은 토피고 등으로 인하여 아칭효과가 충분히 발휘되지 못한 것에 원인이 있을 것으로 판단된다.
5. 암반등급이 불량하거나 단층대가 존재하는 지반에서의 터널 내공변위를 예측하기 위해서는 터널 내부 굴착면의 막장관찰뿐만 아니라 지표면에서의 단층대와 같은 지질구조 특성과 토피고를 포함한 터널 상부에 응력을 증가시킬 외부적인 요인에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

References

1. Chae, K.S., Lee, S.P., Lee, C.H., and Han, S.J., 2011, Application and development trend of OTDRs, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 21, No. 1, 1-10 (in Korean).
2. Chung, H.S., Kim, S.H., Lee, S.D., and Kim, N.Y., 1998, Prediction of ultimate displacement in tunnel using statistical method, Proceedings of the National Conference of the Korean Geotechnical Society, 347-356 (in Korean).
3. Franklin, J.A., 1976, An observational approach to the selection and control of rock tunnel linings, Proc. Conf. Shotcrete Ground Control, ASCE, Easton, MA, 556-596.
4. Hanafy, E.A. and Emery, J.J., 1980, Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement, 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, CIMM, Montreal, 119-125.
5. Jang, W.Y., Yang, H.S., Chung, S.K., 2008, Longitudinal deformation profile in tunnel using measured data, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 18, No. 5, 338-342 (in Korean).
6. Kaiser, P.K., 1980, Effect of stress-history on the deformation behaviour of underground openings, 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, CIM Special Vol. 22, Montreal, 133-140.
7. Kang, S.K., Yoon, J.S., 2008, The study on the pre-displacement before face of the shallow tunnel in the weathered soil, Proceedings of the Annual Conference of the Korean Society for Railway, 947-954 (in Korean).
8. KICT, 2003, Smart observation expert system, Final Report, Korea Institute of Construction Technology, 687p (in Korean).
9. Kim, C.H., 2010, Forecasting final displacement with displacement functions using deformation measurements while constructing a tunnel, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 20, No. 6, 408-420 (in Korean).
10. Kim, C.H., 2013, Relations between initial displacement rate and final displacement of arch settlement and convergence of a shallow tunnel, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 23, No.2, 110-119 (in Korean).
11. Kim, C.H., Chae, Y.S., and Park, Y.J., 2008, Prediction of preceding displacements of a soil-tunnel by displacement monitoring using horizontal inclinometer, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 18, No. 5, 355-365 (in Korean).
12. Kim, H.Y. and Park, E.S., 1993, Theory and analysis method of tunnel convergence, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 3, 80-95 (in Korean).
13. Kim, K.Y., Kim, C.Y., Hong, S.W., Bae, G.J., Seo, Y.S., and Jeon, J.S., 2003, A study on the measurement of tunnel pre-displacement using horizontal inclinometer, Proceedings of the Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineering, 4878-4883 (in Korean).
14. Kitagawa, T., Kumeta, T., Ichizyo, T., Soga, S, and Sato, M., 1991, Application of convergence confinement analysis to the study of preceding displacement of a squeezing

- rock tunnel, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 24, No. 1, 31-51.
15. KR, 2008. Guidelines for the field measurements, Office for the Seoul Metropolitan Area, Korea Rail Network Authority, 61p (in Korean).
 16. Lombardi, G., 1979, Long-term measurements in underground opening and their interpretation with special consideration to the rheological behaviour of the rock, Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich, Vol. 2, 839-858.
 17. MOCT (Ministry of Construction and Transportation), 2007, Design standard for tunnelling, Korean Tunnelling Association, 138p (in Korean).
 18. Otsuka, M. and Kondoh, T., 1981, On the displacement forecasting methods and their application to tunnelling by NATM, International Symposium on Weak Rock, Tokyo, 945-950.
 19. Panet, M. and Guenot, A., 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling '82, The Institution of Mining and Metallurgy, Brighton, 197-204.
 20. Park, S.H., 2008, A study on the application of the critical strain by using the displacements occurring before excavation in tunneling, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 10, No. 4, 337-347 (in Korean).
 21. Park, S.H. and Shin, Y.S., 2007, A study on the safety assessment technique of a tunnel using critical strain concept, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 23, No. 5, 29-41 (in Korean).
 22. Park, Y.H., 2011, Prediction of behavior during tunnel excavation using measured displacements Ph. D. thesis, Kyungpook National University, 236p (in Korean).
 23. Song, S.G., Yang, H.S., Lim, S.S., and Chung, S.K., 2002, Estimation of final deformation of hard rock tunnel using early measured deformation, Tunnels and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 12, No. 2, 99-106 (in Korean).
 24. Sulem, H., Panet, M. and Guenot, A., 1987, Closure analysis in deep tunnels, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 24, No. 3, 145-154.
 25. Vassilev, V.H. and Hrisstov, T.N., 1988, Influence of the heading face and a two-dimensional calculation model of tunnel linings, 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Vol. 3, 1551-1555.
 26. Yim, S.B., Yun, H.S., Seo, Y.S., and Park, S.H., 2007, Estimation of total displacements by RMR grades using 3-dimensional numerical analysis, The Journal of Engineering Geology, Vol. 17, No. 2, 217-224 (in Korean).

신 상 식



2000년 원광대학교 공과대학 토목환경
공학과 공학사
2014년 대전대학교 대학원 지구시스템
공학과 공학석사

Tel: 042-256-6500
E-mail: sss0713@daum.net
현재 ㈜일신엔지니어링 상무

배 규 진



1980년 경북대학교 농공학과 공학사
1982년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1990년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학박사

Tel: 031-910-0212
E-mail: gjbae@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구소
선임위원

김 학 준



1984년 경북대학교 자연과학대학 지질
학과 이학사
1992년 알버타대학교 대학원 지질학과
이학석사
1997년 알버타대학교 대학원 토목공학
과 공학박사

Tel: 042-280-2574
E-mail: hakkim@dju.ac.kr
현재 대전대학교 공과대학 지반방재공
학과 교수