

## 암반 등급 변화에 따른 터널 내공 변위 거동 특성

김광염\*

한국건설기술연구원 지하구조물연구실

### Characteristics of Tunnel Convergence Behaviour based on Variation of Rock Mass Rating

Kwang-Yeom Kim\*

Underground Structure Div., Korea Institute of Construction Technology (KICT)

터널 시공 중 막장관찰과 계측자료는 굴착으로 인하여 발생하는 지반 및 주변 구조물의 안정성 평가를 위한 가장 중요한 정보이다. 특히, 발파 굴착으로 이루어지는 NATM 공법에서 막장관찰과 계측은 다음 막장의 굴착 및 지보설계를 위한 핵심자료로 활용이 된다. 하지만, 국내에는 암반분류 결과와 계측결과와의 관계에 대한 연구가 많이 부족하여 굴착 및 지보설계에 제대로 활용되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 막장관찰에 의한 암반분류 중 국내외에서 가장 많이 사용되는 RMR 분류법과 내공변위 계측결과와의 분석을 통해 지질상태의 변화가 터널의 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 내공변위의 계측위치와 계측 시점에 따른 변위 측정 편차를 변위 함수를 이용해 보정하였으며, 이를 통해 내공변위의 영향선과 지반조건의 관계를 고찰하였다. 또한 변위 함수 파라미터와 초기변위 발생비율 등 내공변위와 관련된 다양한 요소들의 지반조건에 따른 변화양상을 파악함으로써 막장관찰 및 내공변위 계측을 통한 지반 평가의 기초자료를 제시하고자 하였다.

**주요어 :** 막장관찰, RMR, 계측, 내공변위

Face mapping and displacement monitoring during tunnel construction are the most influential information for the stability assessment of ground and around structures. Especially, the result of face mapping and displacement analysis is essential to the excavation and support design in NATM which is based on the drilling and blasting. However, there have not been so many studies to put those useful information into practice for decision-making process during construction. The study reviewed the tunnel behaviour based on the RMR rating and displacement monitoring when the geological condition of rock mass varies inevitably. The study analysed the crown settlement using convergence equation in order to compensate the disparity induced by the location and time of measurement and found a distinct relation between the geological condition and the line of influence. As a result of analysing the various parameters related to the tunnel convergence according to the geological condition, the study suggested the basic knowledge about the relation between face mapping and displacement behaviour of tunnel.

**Key words :** face mapping, RMR, monitoring, convergence

## 서 론

터널 시공 중 계측과 막장관찰은 터널 굴착으로 인하여 발생하는 굴착면 주변 지반, 인접 구조물 및 각종 지보재에 대한 변화 양상을 측정하는 행위로 정의된다. 이러한 계측 및 관찰의 목적은 터널의 굴착에 따른 지반

및 주변 구조물의 거동을 파악하고 각종 지보재의 효과를 확인하여 터널 공사에 따른 주변 시설물이나 터널 자체의 안정성 및 경제성을 확보하는데 있다. 터널 계측 계획은 사전조사 및 해석 결과를 기초로 하여 터널의 용도, 규모, 지반조건, 주변환경, 시공방법, 계측 목적 등을 고려하여 시공에 적합하도록 체계적인 계측 계획을 수립하

\*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

여야 한다. 터널 계측은 일상적인 시공관리를 위한 일상 계측과 정밀분석을 위한 정밀계측으로 분류한다. 일상계측은 일상적인 시공관리상 반드시 실시해야 할 항목으로서 갭내 관찰조사, 내공변위 측정, 천단침하 측정, 록볼트 인발시험 등이 이에 포함된다. 정밀계측은 지반조건에 따라 일상계측에 추가하여 선정하는 항목으로서 지중변위 측정, 록볼트 축력 측정, 콘크리트 라이닝 응력 측정, 지표 및 지중침하 측정 등이 이에 포함된다.

이중 터널 현장의 가장 중요한 관측 항목은 내공변위 계측과 막장관찰(face mapping)이다. 터널의 변위 계측은 터널 자체의 지보능력을 파악함으로써 지보방법 및 지보량을 결정하는 기준이 되며, 굴진면의 상황을 가장 먼저 확인 할 수 있는 중요한 정보이기 때문에 터널 내공변위에 대한 정확한 계측 및 이를 활용한 연구가 필수적이다. 여기서 막장관찰이라 함은 단순히 터널 막장면 만을 말하는 것이 아니라 터널이 1회 굴착되면서 생성되는 굴착면에 대한 다양한 지질정보, 공학적 특성, 지보 등의 다양한 항목이 포함된다. 이러한 막장관찰은 단순히 막장에 대한 조사기록을 보존하는 것 뿐 아니라 관찰 결과를 바탕으로 다양한 분석을 통해 암반등급을 밝혀내고 계측과 연관하여 터널의 거동에 대한 예측을 가능토록 할 수 있기 때문에 그 중요성이 점차 커지고 있는 실정이다.

국내에서 터널의 암반분류를 위한 방법으로 가장 많이 사용되는 것은 Bieniawski(1973)에 의해 제안된 RMR 분류법이다. 경험적 분류에 기초한 RMR 분류법은 암반의 역학적 강도뿐만 아니라 불연속면의 평가도 포함되어 있기 때문에 많은 연구자들이 활용하고 이를 통해 꾸준히 개선되어 온 가장 신뢰도가 높은 분류법이다(Bieniawski, 1976; Lauffer, 1988). 국내에도 RMR 인자의 다중회귀모형 개발 연구(위용근 등, 2000), 일부 정량적 인자를 통한 RMR 값 산출 연구(이송 등, 2004), 지질조건을 고려한 RMR 인자별 배점 분류를 위한 연구(서용석 등, 2005; 임성빈 등, 2007; 김광염 등, 2006) 등이 수행되었다.

막장관찰을 통한 암반분류는 굴착면을 대상으로 육안으로 관찰되어지는 지질 상태의 변화를 기초로 한다. 하지만, 굴착 전방의 갑작스러운 지질 구조의 변화 등은 막장관찰을 통해 예측하기가 어렵다는 단점이 있다. 많은 연구자들은 이러한 단점을 보완하기 위해 터널 내공변위 계측을 수행하여 지반거동의 평가를 통해 막장관찰 결과를 검증하고 전방의 지질 구조를 예측하기 위한 연구를 수행해 왔다. 터널의 내공 변위를 이용하여 굴착 전방의 단층대를 예측하기 위한 시도는 80년대 말부터 지속적인

로 연구되고 있다. 터널 축방향으로의 변위의 경향선(trendline)과 영향선(influence line)등에 대한 분석을 통한 방법(Vavrovsky, 1988; Schubert & Vavrovsky, 1994; Steindorfer, 1998; 이인모 등, 2001; 김기선 등, 2003), 반경방향 변위와 진행방향 변위의 비인 벡터방향성(vector orientation)의 변화 추이를 분석하는 방법(Steindorfer, 1998; 김창용, 2003), 변위함수 파라미터(function parameter)를 이용하여 전방의 막장 암반상태 변화를 예측하는 방법(Sellner, 2000; 김창용 등, 2004), 계측단면 중심을 이용하여 전방 단층대 방향성을 예측하는 방법(김광염, 2007) 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

이와 같이 많은 연구가 터널 막장관찰과 계측 정보의 분석과 관련하여 진행되어 왔지만 막장관찰 결과와 변위 계측 정보의 관계에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히, 암반의 불균질성과 이방성은 터널 굴착에서 복합적인 거동양상으로 나타나기 때문에 이러한 관계를 체계화 하는 것은 많은 경험과 연구가 필요하다. 본 연구에서는 막장관찰에 의해 분석된 RMR 배점과 계측된 내공변위에 대한 다양한 분석을 통하여 터널 시공 중 지질변화가 계측결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 통해 다양한 지질 상태 평가 인자 중 RMR이 내공변위 거동과 어떠한 관계가 있는지 살펴보고자 하였다.

## 대상지역의 암반분류와 계측 결과

### 연구 지역 개요

대상 터널은 경남 울산의 B 터널로서 퇴적암류가 기반암을 이루고 있으며, 이후 화강암이 관입하여 발생한 접촉변성대가 발달하고 있다. 특히, 2개의 큰 단층대와 인접하여 각종 수반 단층들로 인한 파쇄대가 발달하였다. 절리는 수평절리(10도 이하)와 수직절리(80도 이상)가 교차하여 발달하고 있다. 본 연구에서는 대상 터널 중 STA.1+125~STA.1+805까지 약 680 m 구간에 대한 암반분류 자료 및 계측자료를 분석에 사용하였다.

### 천단변위 거동양상 분석

터널의 천단 침하량을 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정된 변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선(lines of influence)이라 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(trend line)이라고 정의한다(Fig. 1).

영향선으로부터 얻어진 경향선을 토대로 외삽법에 의해 막장후방의 특정지점에서의 변위예측도 가능하다. 그

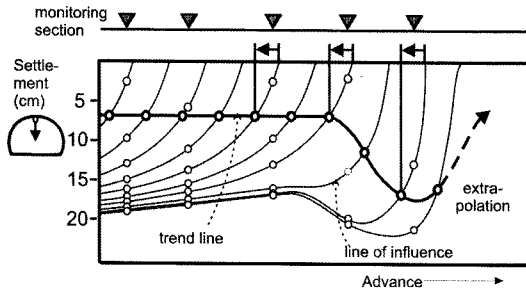


Fig. 1. The extrapolation of lines of influence to the tunnel face and trend line (modified after Steindorfer, 1998).

러나 외삽법에 의한 변위추정으로 막장전방의 암반 특성에 대해서는 많은 것을 얻기가 힘들다. 서로 다른 지점에서 측정된 변위그래프를 한 그래프 상에서 비교하기 위해서는 초기계측값(zero reading)이전에 발생한 선행변위에 대한 결정이 중요하다. 김광염 등(2003)은 수평경사계를 이용하여 터널 시공 중 선행변위를 계측하기도 하였으나, 공사비 및 공기 등의 문제로 모든 구간에서의 선행변위 계측은 현실적으로 불가능하다. 터널공사의 특성상 초기계측값이 이루어지는 시간이나 거리가 항상 일정할 수 없다. 이는 막장전방 및 계측기 설치점 이전의 지점에서 발생하는 변위는 계측될 수 없음을 의미한다. 계측된 데이터를 비교하기 위해서 일반적으로 막장전방에서 발생하는 선행변위는 무시된다. 또한, 막장면에서의 변위를 0으로 간주하게 된다. 막장면과 계측지점사이에서 발생하는 변위를 계측하기 위해서는 시간과 거리에 따른 함수를 사용하는 것이 가장 일반적이다(Steindorfer, 1998).

균질한 암반을 일정한 속도로 굴착을 하는 경우는 변

위양상 파악이 매우 용이하고, 굴착 직후 터널의 안정은 점진적인 변위량의 감소로 나타나게 되며, 최종적으로 일정한 값에 수렴되는 양상을 보여준다. 반면에, 불균질한 이방성 암반을 일정하지 않은 속도로 굴질할 경우에는 계측데이터의 분석이 매우 어려워지게 되며, 또한 동일한 조건의 터널에서 굴진율이 틀린 경우, 시간에 따른 내공변위 양상은 암반의 시간 의존적 특성에 의해 다르게 나타날 수 있다. 터널 막장 진행에 따른 변위를 고려하지 못한다면 변위 양상을 정량적으로 해석하기 어려워지며, 추가적인 굴착, 불균질한 암반조건 또는 시간 의존적인 지보의 거동에 대해 변위이력만을 가지고 적절하게 분석하기는 힘들기 때문에 최근에는 이러한 여러 복합적인 상황에서도 변위를 예측할 수 있는 기법들이 많이 개발되고 있으며, 이러한 기법을 이용하여 막장 진행효과, 지보의 시간 의존적 거동을 분석할 수 있게 되었다(Guenot et al., 1985; Sulem et al., 1987).

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

식 (1)은 Guenot et al.(1985)이 제안한 convergence equation을 보여주고 있으며, 이 식에서 X는 터널 막장면 굴착 영향거리 관련 상수, T는 암반의 시간 의존적 변형특성 상수, C<sub>x</sub>는 굴착면이 무한히 멀 때 굴착면 진행의 영향에 의해서만 발생하는 변위, m은 굴착과 시간 의존적 변형 상수를 나타낸다.

본 연구에서는 오스트리아 3G사에서 개발한 Geofit 프로그램을 이용하여 각 계측지점에서 계측된 천단 변위에 대한 내공변위 회귀식을 도출하였다. Fig. 2는 B터

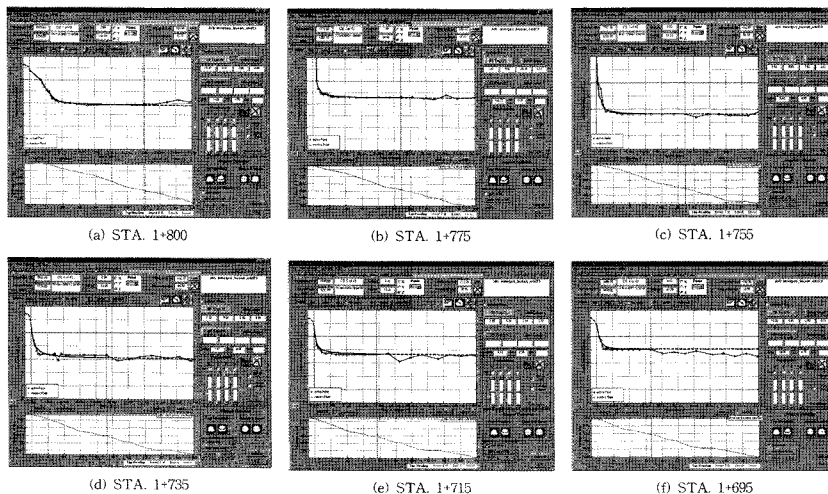


Fig. 2. Crown settlement history of B tunnel (STA.1 + 695~STA.1 + 800).

**Table 1.** Function parameters of the convergence equation of B tunnel.

Measurement STA	Face sta. at first reading	X	T	C	m
1805.0	1802.0	2.24	0.01	-1.20	4.34
1800.0	1798.0	16.37	0.01	-2.86	0.40
1775.0	1767.2	2.92	9.397	-28.29	0.01
1755.0	1752.4	5.44	9.73	-7.53	0.01
1735.0	1734.4	7.30	0.04	-0.50	4.95
1715.0	1712.8	9.55	0.04	-0.94	1.72
1695.0	1690.8	10.99	0.01	-2.69	0.01
1680.0	1674.8	4.00	0.03	-1.88	1.84
1670.0	1666.8	13.10	0.05	-0.65	2.86
1660.0	1652.8	7.17	9.94	-8.22	0.03
1650.0	1644.8	14.96	9.99	-4.48	0.01
1640.0	1634.8	10.67	10.00	-6.31	0.01
1630.0	1628.8	3.15	0.05	-0.33	4.96
1610.0	1608.4	4.38	0.10	-0.80	5.00
1600.0	1598.8	2.75	0.01	-0.92	2.43
1590.0	1588.0	14.02	0.48	-0.71	5.00
1575.0	1574.0	8.44	0.74	-0.88	5.00
1555.0	1554.3	4.66	6.84	-4.45	0.04
1535.0	1535.0	17.63	0.04	-1.22	3.20
1520.0	1520.0	3.85	0.40	-0.65	5.00
1515.0	1512.1	3.16	9.97	-17.22	0.01
1510.0	1508.9	2.67	0.03	-0.95	4.70
1500.0	1498.9	6.49	0.01	-0.79	4.60
1490.0	1488.5	5.43	9.99	-8.63	0.01
1485.0	1484.5	1.34	0.04	-0.63	5.00
1475.0	1474.1	2.28	0.08	-1.06	5.00
1460.0	1459.4	2.69	0.01	-1.49	2.16
1430.0	1425.4	8.83	9.89	-9.38	0.01
1420.0	1415.4	4.13	10.00	-14.86	0.01
1390.0	1389.4	3.44	7.16	-4.01	1.38
1370.0	1367.8	20.67	9.98	-5.20	0.01
1360.0	1359.4	49.96	4.99	-0.62	4.25
1350.0	1351.4	4.33	5.75	-4.97	0.01
1340.0	1339.4	14.05	0.11	-0.59	4.20
1330.0	1329.4	8.78	0.03	-0.18	4.89
1320.0	1319.4	50.00	1.77	-0.30	5.00
1310.0	1307.4	40.70	0.90	-0.30	5.00
1300.0	1299.4	10.67	0.03	-0.42	5.00
1290.0	1287.4	17.70	9.92	-5.90	0.01
1280.0	1279.4	10.22	0.07	-0.77	5.00
1270.0	1269.4	7.80	0.11	-0.64	5.00
1260.0	1257.4	12.84	0.01	-4.73	0.01
1230.0	1227.4	3.91	0.28	-1.13	5.00
1220.0	1219.4	1.82	0.42	-0.85	5.00
1210.0	1213.4	2.95	0.04	-0.48	5.00
1190.0	1187.4	3.04	0.04	-5.09	1.31
1170.0	1167.4	7.97	10.00	-7.57	0.16
1150.0	1149.4	16.62	0.13	-1.32	5.00
1140.0	1141.4	23.89	0.01	-1.05	1.77
1125.0	1125.4	44.32	0.40	-1.32	5.00
Average		11.13	3.01	-3.56	2.73

널 STA.1+695~STA.1+800 구간의 천단부 변위의 내  
공이력을 분석한 예이다. 각각의 내공변위 분석은 초기

계측 후 약 100일 동안의 이력을 분석한 것이다. Table 1  
은 전체구간의 내공변위 function parameter 값의 변화

를 표로 나타낸 것이며, Fig. 2는 해당 구간의 X, T, C, m 값의 변화를 보여주고 있다.

전체적인 function parameter의 변화양상을 굴착관계 상수인 X와 C, 그리고 시간의존적 상수인 T, m으로 구분하여 살펴보면, T와 m값이 상대적으로 작은 값을 보여 시간 의존적인 거동보다는 막장 굴착에 의한 내공변위의 영향이 큰 것으로 나타났다. X값의 분포를 살펴보면 전체 구간의 평균은 11.13 정도로 나타났으며, STA.1+320에서 50으로 가장 큰 값을 나타내고 있고, STA.1+485에서 1.34로 가장 작은 값을 나타내고 있다. 즉 전체적으로 터널 직경(약 10 m)을 D로 했을 때, 1D에서 5D까지 굴착에 의한 영향이 내공변위 거동에 작용하는 것으로 나타났다. T값은 전체구간 평균은 3.01로 나타났으나 스테이션별 편차가 크게 나타났으며, STA.1+350~STA.1+430 구간에서 상대적으로 큰 값을 나타냈다. 이밖에 C값은 평균 -3.56이고 m값은 2.73의 평균값을 나타냈다.

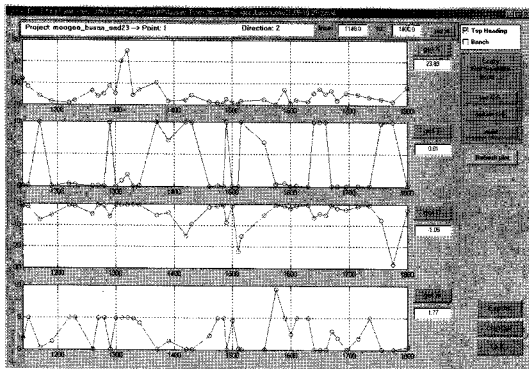


Fig. 3. Change aspect of function parameters (X, T, C, m).

**RMR과 변위 거동분석 결과의 비교**

Fig. 4는 B터널 STA.1+125~STA.1+805 구간의 RMR 변화 추이를 나타내고 있다. STA.1+100~STA.1+350 구간에서는 RMR이 평균 47정도의 비교적 균질한 분포를 보이다가 점점 증가하면서 STA.1+450~STA.1+510 구간에서 RMR 65 정도의 비교적 높은 값을 형성하고 있다. 그 후 STA.1+600까지 급격히 암반 상태가 불량해졌다가(RMR 30 초반) STA.1+650~STA.1+720까지 RMR 55~58 정도의 비교적 양호한 수준을 보이고 있다. 그 후 STA.1+800까지는 다시 불량한 암반상태를 보이고 있다.

암반 상태와 function parameter와의 상관성을 살펴보기 위하여 표준편차가 적고, 가장 광범위한 분포를 보인 X 값에 대하여 RMR값과 비교해 보았다(Fig. 5). 계측값의 오류 및 막장평가 과정에서의 주관적 요소로 인한 오류

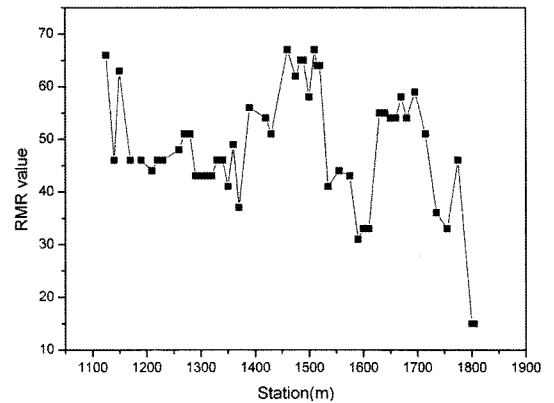


Fig. 4. Distribution of RMR value of B tunnel (STA.1+125~STA.1+805).

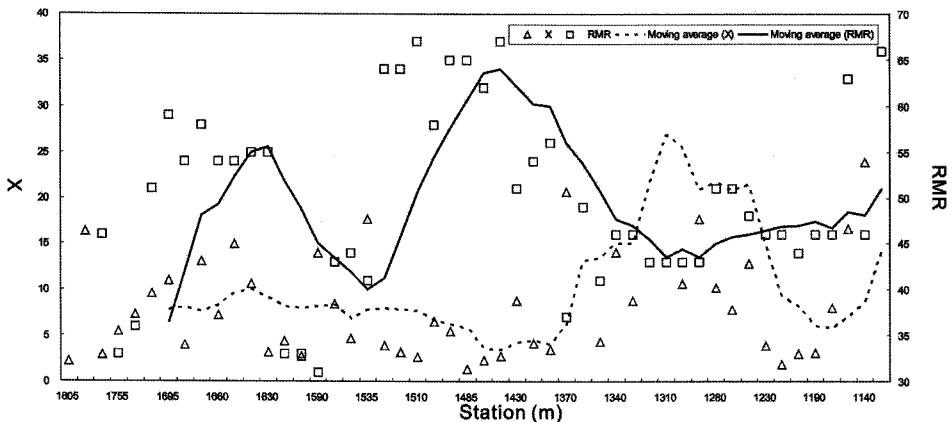


Fig. 5. Distribution of function parameter X and RMR.

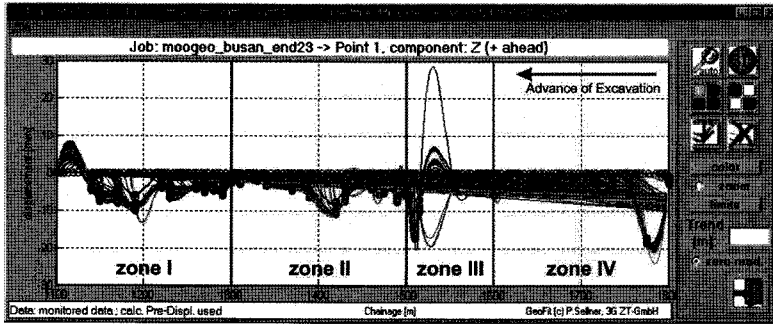


Fig. 6. Trend line of B tunnel (STA.1 + 125~STA.1 + 805).

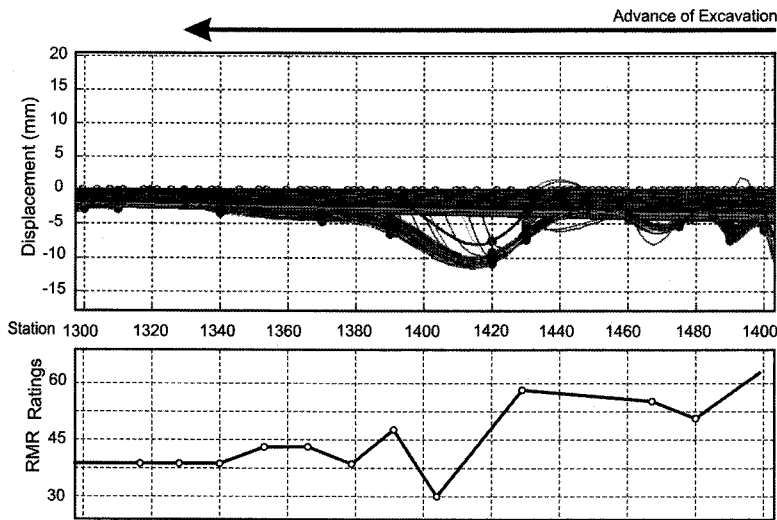


Fig. 7. Trend line of zone II ( STA.1 + 300~STA.1 + 500).

를 줄이기 위하여 약 20 m 정도의 구간평균으로 경향을 살펴보았다. RMR값이 감소하는 구간에서 X값이 증가하고, RMR값이 증가하는 구간에서 X값은 상대적으로 감소하는 경향을 보였다. 즉, 암반 상태가 불량한 구간에서는 터널 굴착에 의한 영향이 크게 나타나고, 암반상태가 양호한 구간에서는 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 STA.1 + 125~STA.1 + 805 구간의 계측결과 중 영향선을 그려본 것이다. 영향선의 형태를 기준으로 전체구간을 4개의 구간으로 나누었다. 각 구간별로 Zone I(STA.1 + 200), Zone II(STA.1 + 420), Zone III(STA.1 + 510), Zone IV(STA.1 + 790)와 같이 변위가 급격히 증가한 구간이 나타났다. 이 구간들에서는 최종변위가 10 mm에서 20 mm까지 구간 별 최대를 나타내고 있다. 이 결과를 앞서 제시한 동일 구간의 RMR과 비교해 보면 해당 구간에서 RMR값이 상대적으로 작은 구간에서

변위가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 두 번째 구간(Zone II: STA.1 + 300~STA.1 + 480)과 네 번째 구간(Zone IV: STA.1 + 600~STA.1 + 800) 구간의 영향선을 좀 더 자세히 그려본 것이며 각각의 경우에 RMR변화 추이와 비교해 보았다. 각각의 결과에서 보듯이 암반이 양호한(RMR 수치가 높은) 암반에서 불량한(RMR 수치가 낮은) 암반으로 굴착을 할 때 3차원 내공변위의 영향선이 변화함을 알 수 있다. Zone II의 경우 STA.1 + 440 구간 이전부터 변위가 점점 증가하면서 STA.1 + 410 지점에서 가장 큰 변위값을 나타내고 있다. 또한, Zone III의 경우도 STA.1 + 780 부근에서 가장 큰 구간 변위를 나타내고 있으며, 다음 막장에서는 변위가 급격히 수렴함을 알 수 있다. RMR의 변화 추이 역시 비슷한 경향을 나타내고 있다.

터널 시공 중 막장 관찰을 통해 평가된 RMR 지수는

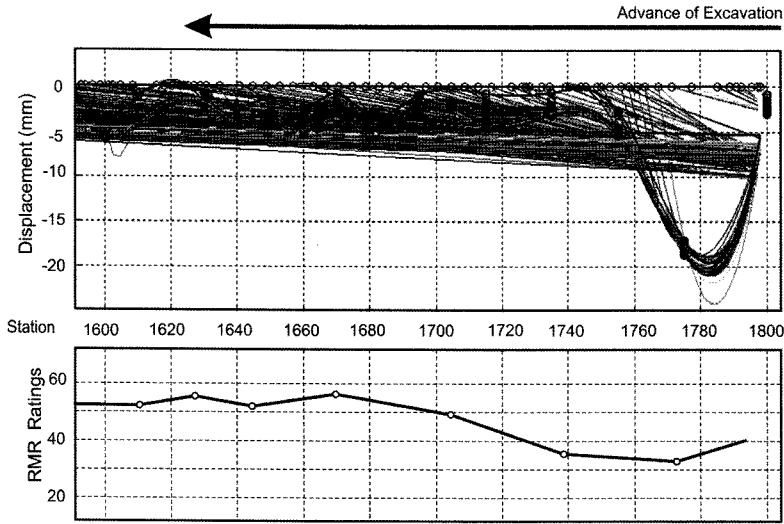


Fig. 8. Trend line of zone IV ( STA.1 + 600~ STA.1 + 800).

굴착된 해당 막장만의 정보를 가지고 있다. 상기 결과에서도 나타났듯이 3차원 내공변위 계측을 통해 내공변위의 영향선을 파악하면, 막장전방의 연약대 및 지반 상태의 변화에 대한 경향성을 파악할 수 있기 때문에 막장전방 예측의 중요한 인덱스로 활용할 수 있다.

**지질조건에 따른 초기 계측 변위량**

위와 같은 터널 내공변위의 영향선은 계측값이 충분히 많을 경우 더 많은 정보를 제공하게 된다. 하지만, 실제 터널 시공 중에는 지질 구조가 급변하여 양호한 압반을 통과하는 도중 급격히 막장전방의 연약대/파쇄대가 존재할 경우 충분한 계측변위 값을 확보하지 못한채 위험한 상황

을 직면할 가능성이 있다. 이러한 경우 인공지능을 이용한 순수예측법(PPM: Pure Prediction Method)을 활용할 수도 있지만, 순수예측법은 충분한 양의 양질의 데이터가 확보되어야 가능하기 때문에 본 연구에서는 급변하는 지반 조건하에 초기 계측값이 전체적인 터널 내공의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 확인해 보고자 하였다.

Fig. 9는 B터널의 STA.1 + 125~STA.1 + 805구간의 터널 천단부의 초기변위와 최종 변위를 나타내고 있다. 터널의 최종변위가 큰 경우 초기변위 역시 크게 나타남을 알 수 있다. RMR의 값이 낮은 즉, 불량한 지반에서는 초기 변위가 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 10은 최종변위로 정규화 시킨 초기변위와 RMR

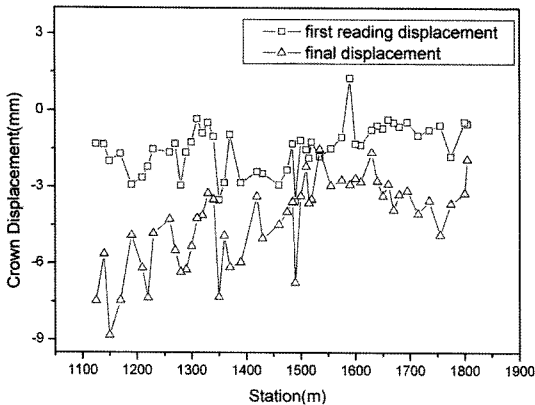


Fig. 9. The first reading and the final reading of crown displacements.

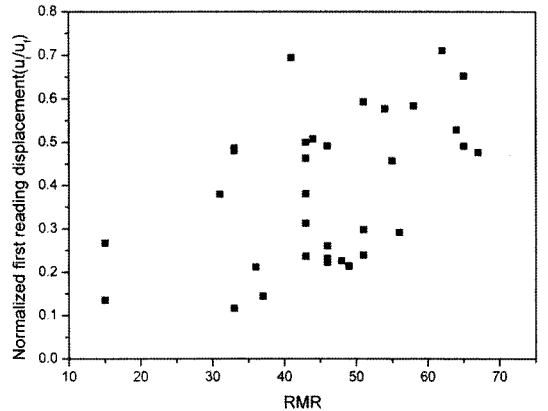


Fig. 10. Relationship between normalized crown displacement and RMR.

과의 관계를 나타내고 있다. RMR값이 높을수록 정규화된 초기변위가 비례하여 증가하는 양상을 보여주고 있다. 즉, 양호한 암반일수록 전체 최종변위에서 초기변위가 차지하는 비율이 커진다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 불량한 암반일수록 시간 의존적 거동양상을 더 많이 보이기 때문에 최종변위의 시간에 따른 증가율이 양호한 암반의 경우보다 크기 때문일 것으로 판단된다.

## 결과 토의

이론적으로 function parameter는 균질한 구간에서는 비슷한 값을 가지며, 그 구간을 대표할 수 있는 인자로 활용될 수 있다. 하지만, 본 구간과 같이 암질이 급격히 변화하는 구간이나 연약대/파쇄대 등이 존재하여 영향을 미치는 경우 그 값은 계속 변화하게 된다. Function parameter는 지반상태의 변화에 따라 상관성을 보이며 변화하기 때문에 막장 전방의 지반조건을 예측할 수 있는 좋은 인덱스로 활용될 수 있으리라 판단된다. 본 분석 구간의 경우 연약대/파쇄대 등의 존재와 방향성, 규모 등의 정량적인 파라미터의 부족으로 이와 연관된 분석을 수행하기 어려웠으며, 이는 향후 DB가 지속적으로 구축되고 연약대/단층대 구간에 대한 정보가 정확하게 입력될 경우 보다 심도 있게 분석 될 수 있을 것이다.

터널의 지질 조건 변화는 내공변위 양상에 반영되어 나타나게 된다. 하지만, 국내 대부분의 터널 현장에서는 계측변위와 막장관찰 분석 결과를 피드백하여 시공에 반영하는 과정이 제대로 이루어지지 못하고 있다. 막장관찰에 대한 정확한 가이드라인이 아직까지 분명히 제시되지 못하고 있으며, 계측의 신뢰도 및 분석방법 미흡이 이러한 정보화 시공을 저해하고 있다. 막장관찰 결과는 대상 암반에 대한 직접적인 관찰이 가능하기 때문에 단기 지반 거동 예측에 효율적으로 활용될 수 있으며, 내공변위 계측결과는 굴착 전방의 선행변위를 포함한 복합적 거동으로 나타나기 때문에 장기 지반거동 예측을 위해 필수적인 정보가 된다. 본 연구에서는 RMR 지수와 내공변위 중 천단 침하 이력만을 고려한 분석을 수행하였지만, 국내외 많은 연구자들에 의해 막장관찰 결과와 3차원 내공변위의 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

암반분류도 RMR과 같이 막장 전체를 단순히 하나의 지수로 표현하여 정량화 하는 것보다 대상 암반의 지질학적 특성에 따른 차별화된 분류 방법들이 지속적으로 연구되고 있으며, 최근에는 디지털 영상 계측 기술, 열

화상 이미지 프로세싱 등 다양한 방법들을 통해 막장면을 보다 정량적이고 객관화된 정보(불연속면 분석, 지하수 상태 평가 등)로 분석하기 위한 시도가 활발히 진행되고 있다.

국내의 다양한 지질조건에서의 이러한 분석 결과들이 데이터베이스화 된다면 보다 합리적이고 안전한 굴착 및 지보 설계가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

## 결론

터널 시공 중 지질변화가 터널의 내공변위에 미치는 영향을 살펴보기 위해 퇴적암 기반의 국내 터널에서 현장 계측 및 막장관찰 결과를 통해 분석하였다. 각 계측 지점에서의 시간에 따른 변위 이력을 다양한 기법을 이용하여 분석하였으며, 이를 대표적 암반분류법인 RMR 분류 결과와 비교 분석하였다.

1) 막장면과 계측지점사이에서 발생하는 변위를 계측하기 위해서는 시간과 거리에 따른 함수를 사용하는 것이 가장 일반적이며, 이를 위해 시간 의존적 거동과 굴착에 따른 거동을 모두 고려할 수 있는 변위함수식을 이용하였다.

2) 각 계측지점별 내공변위의 이력을 통해 영향선과 경향선을 구할 수 있으며, 영향선의 변화를 통해 굴착 전방의 지질변화 등의 예측이 가능하다. B터널의 RMR 변화 추이와 영향선과 비교분석 결과 급격한 지질변화 등이 영향선에 반영될 수 있음을 확인하였다.

3) 변위함수 파라메터인 X, T, C, m은 계측 구간의 지질을 대표할 수 있는 인자로 활용될 수 있다. 또한, 이러한 파라메터가 RMR의 변화에 따라 상관성을 보이며 변화하는 양상을 나타내었다.

4) 계측 상황에 따라 충분한 데이터를 확보하지 못하는 경우 초기 계측치의 중요성이 커지게 된다. 최종 변위량으로 정규화한 초기 계측변위는 RMR과 상관성을 나타내었다. 암반이 불량한 경우 정규화된 초기 계측변위도 작게 나타나며, 이는 암반등급이 낮을수록 시간이력에 의한 변위량이 증가하여 최종변위량이 상대적으로 크게 됨을 나타낸다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부의 2008년 첨단도시개발사업인 "입체복합 공간을 위한 인접구조물 변위억제 굴착공법 개발" 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.



참 고 문 헌

김광엽, 2007, 터널 막장 전방 단층대 예측을 위한 3차원 절대변위 계측 및 분석에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.

김광엽, 김창용, 임성빈, 윤현석, 서용석, 2006, 국내 터널시공 중 막장지질조사의 문제점 및 개선방안에 관한 연구, 대한지질공학회지, 16(3), 265-273.

김광엽, 김창용, 홍성완, 배규진, 서용석, 전제성, 2003, 수평경사계를 이용한 터널내 선행변위 측정에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회논문집, 4878-4883.

김기선, 김영섭, 유광호, 박연준, 이대혁, 2003, 터널 3차원 내공변위 해석을 통한 막장전방 진반상태변화 예측, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 13(6), 476-485.

김창용, 김광엽, 홍성완, 배규진, 2003, 터널 내공변위 Function Parameter 결정에 관한 연구, 대한토목학회 추계 학술발표회 논문집, 4872-4877.

김창용, 홍성완, 김광엽, 백승한, 2004, 터널 내공 변위 거동 분석에 관한 연구, 한국터널공학 학술논문집, 터널기술, 6(3), 183-197.

서용석, 김창용, 김광엽, 이현우, 2005, 정준상관분석을 이용한 막장등급평가 수량화기법 연구, 대한지질공학회지, 15(4), 463-473

위용근, 노상립, 윤지선, 2000, 다변량 분석을 이용한 터널에서의 효율적인 암반분류에 관한 연구, 한국터널공학회 터널기술논문집, 2(2), 41-49.

이승, 안태훈, 유오식, 2004, 다변량 관별분석을 통한 터널 설계시 암반분류 연구, 한국터널공학회 터널기술 논문집, 6(3), 237-245.

이인모, 강기돈, 박광준, 1998, 3차원 절대내공변위를 이용한 터널 막장전방의 지반변화 예측기법, 지반, 한국지반공학회지, 14(4), 17-32.

임성빈, 서용석, 김창용, 김광엽, 2007, 수량화방법 I을 이용한 퇴적암 터널의 지질 인자별 변위 영향도 분석, 대한지질공학회지, 17(2), 263-270.

Bieniawski, Z. W., 1973, Engineering Classification of Jointed Rock Mass, The Civil Engineer in South

Africa, 15, 335-344.

Bieniawski, Z. W., 1976, Rock Mass Classification in Rock Engineering, Proc. of the Sym. on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, 97-106.

Guenot, A., Panet, M. Sulem, J., 1985, A New Aspect in Tunnel Closure Interpretation, 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, 455-460.

Lauffer, H., 1988, Zur Gebirgsklassifizierung bei Frastvortrieben, felsbau, 6(3), 137-149.

Schubert, W., Vavrovsky, G. M., 1994, Interpretation of monitoring results, World Tunnelling, 351-356.

Sellner, P. J., & Steindorfer A. F., 2000, Prediction of Displacements in Tunnelling. in Felsbau, 18(2), 22-26.

Steindorfer, A., 1998, Short term Prediction of Rock Mass Behaviour in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data, Doctoral Thesis at Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Techn. Univ. Graz, Austria.

Sulem, J., Panet, M., Guenet, A., 1987, An Analytical Solution for Time-dependent Displacement in a Circular Tunnel, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 24(3), 155-164.

Vavrovsky, G. M., Ayaydin, N., 1988, Bedeutung der vortriebsorientierten Auswertung geotechnischer Messungen im oberflächennahen Tunnelbau, Dsseldorf: Alba Fachverlag Forschung Praxis, 32, 125-131.

2008년 11월 21일 원고접수, 2008년 12월 16일 게재승인

김광엽

한국건설기술연구원 지하구조물연구실

411-712, 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190

Tel: 031-910-0224

Fax: 031-910-0211

E-mail: kykim@kict.re.kr