한국지반환경공학회 논문집
제12권 제9호 2011년 9월 pp. 47~54

현장 실측자료 분석을 통한 NATM 터널의 숏크리트 투입량에 관한 연구

A Study on Quantity of Shotcrete Sprayed in a NATM Tunnel Based on Field Measurements

이철주†
Lee, Cheol Ju

ABSTRACT : This study has analysed overbreaks, shotcrete rebound and the ratio between the actual quantity of shotcrete sprayed compared to designed quantity measured during a NATM tunnel construction. Based on the measurements of size of the excavated tunnel faces, an average overbreak was about 28.5 cm, which is about 260% of allowable overbreak. The measured shotcrete rebound was about 7.2% in average which is about half the allowable rebound(15%). In addition, due to overbreaks and rebound the actual quantity of shotcrete used in the tunnelling work was about 116.5 % of the designed value. It has been found from the field measurements that the quantity of shotcrete showed some relation with rock mass rating(RMR) and the standard guideline of tunnel supports, but the size of overbreak showed less correlation with RMR and the standard guideline of tunnel supports. Hence, the current tunnel design specifications stating the size of overbreak based entirely on the standard guideline for tunnel supports should perhaps be reestablished. The insight into the design guideline regarding overbreak and actual quantity of shotcrete will be reported and discussed.

Keywords : Shotcrete, Overbreak, Tunnel standard support pattern, NATM tunnel, RMR

요 지 : 본 연구에서는 NATM으로 시공되는 산악터널의 시공과정에서 실측된 여굴, 숏크리트의 리바운드 및 투입율에 대한 분석을 실시하였다. 터널굴착 직후 굴착단면에 대한 여굴 크기를 조사한 결과 평균 여굴의 크기는 약 28.5cm 이며, 허용 여굴의 약 260%의 값을 보였다. 숏크리트의 리바운드는 평균 약 7.2% 정도로 측정되었는데 이는 일반적인 설계규정인 15% 보다 작은 값이다. 여굴 및 숏크리트 타설 중에 발생한 리바운드로 인하여 터널공사에 실제로 투입된 숏크리트 물량은 설계대비 약 116.5%의 값을 보였다. 자료분석에 의하면 숏크리트의 설계대비 실제투입율은 RMR(Rock Mass Rating)이나 터널 표준지보패턴과는 어느 정도 상관관계가 있는 것으로 나타났으나, 이에 비해 여굴은 RMR 값이나 표준지보패턴과는 상관성이 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 표준지보패턴만에 의해 허용 여굴의 크기를 규정하는 현행 터널설계기준에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구결과를 통하여 분석된 여굴 및 숏크리트 투입량에 대한 고찰결과를 보고하고자 한다.

주요어 : 숏크리트, 여굴, 표준지보패턴, NATM 터널, RMR

1. 서 론

NATM 터널의 안정성 확보에 있어 숏크리트(shotcrete)는 일반적으로 가장 큰 역할을 하는 대단히 중요한 터널 지보재이다. 또한 터널 굴착 공사비 가운데 숏크리트 타설은 전체 터널공사비의 50% 이상을 차지할 정도로 매우 중요한 공종으로 최근 터널의 대단면 및 장대화 경향으로 인해, 그 비중은 날로 증가하고 있다. 그러나 터널 굴착 시 발생하는 설계굴착선을 초과하는 여굴(overbreak) 및 숏크리트 타설 시 발생하는 설계규정을 초과하는 리바운드(rebound)로 인하여 설계량을 크게 초과하는 숏크리트가 투입되어 터널공사 시 많은 어려움이 발생하게 된다(조대선 등, 2005). 즉 이러한 현상으로 인해 터널 공사비 및 공사기간이 증가하고, 탈락된 숏크리트로 인한 환경오염 발생 등 터널 시공에 막대한 악 영향을 미치고 있다. 그러나 이런 부분에 대해 기존에 보고된 사례는 국내는 물론이고, 해외에서도 극히 드물기 때문에 그 특성에 대한 체계적인 분석이 실시되지 못하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 NATM 공법에 의해 터널굴착이 종료된 ○○터널 시공현장에서 획득한 숏크리트의 압축강도, 휨강도, 강섬유 혼입율 및 숏크리트 타설 두께 등 숏크리트의 공학적 특성에 대한 분석을 실시하였다. 또한 현장에서 실측된 터널굴착단면의 여굴, 숏크리트의 리바운드 및 투입율에 대한 공학적인 분석을 실시하였다. 이를 통해 NATM 시공현장의 여굴 및 실제 숏크리트 투입물량의 특성분석과 함께 이에 관련된 현행 터널설계기준에 대한 고찰을 실시하

† 정회원, 강원대학교 토목공학과 부교수(E-mail : cj32@kangwon.ac.kr)

고자 한다.

2. 기존연구 분석

일반적으로 숏크리트의 투입물량을 증가시키는 요인은 크게 여굴과 숏크리트 타설 시 발생하는 리바운드로 구분할 수 있다. 따라서 이를 구분하여 기존의 유사연구를 분석하였다.

2.1 여굴

국내의 경우 터널 굴착 시 발생하는 허용 여굴의 크기는 터널표준지보패턴 및 타설부위(측벽부와 아치부)별로 일반적으로 10~30cm 범위에서 규정되어 있다(한국도로공사, 1995; 국토해양부, 2008). 한국도로공사(1995)에 의하면 여굴에 의해 발생하는 추가비용은 터널공사비의 15~18%에 해당된다. 이상돈과 김낙영(2001)은 터널현장의 평균 여굴 크기를 조사하여 반단면에서 41.2cm, 전단면에서 34.5cm로 보고한 바 있다. 또한 이태노 등(2002)은 NATM 공법으로 시공된 터널의 15개소 단면의 내공측정을 통하여 평균 39.5cm의 여굴을 보고한 바 있다(최소: 28.2m, 최대: 47.0cm). 즉 국내에서 측정된 제한적인 자료에 의하면 현장에서 발생하는 여굴의 크기는 일반적으로 설계에서 규정한 허용 여굴을 크게 초과하고 있음을 알 수 있다. 여굴 발생과 관련된 기존의 연구에 의하면 여굴의 크기는 터널시공 주변 암반의 지질학적 특성에도 영향을 받지만, 주로 천공 및 발파에 더 큰 영향을 받는다고 보고되었다. 한국도로공사(1995), 김양균 등(2003), 김양균 등(2005) 및 배상훈 등(2005)은 컴퓨터 제어식 점보드릴을 사용하여 천공 및 발파작업 등의 개선을 통하여 여굴을 감소시킬 수 있음을 보였다. 즉 이러한 연구를 통해 발파굴착을 위한 천공의 정확도, 작업자 교육, 2단 발파, 발파설계에 충실한 장약 작업 등이 여굴 발생을 최소한으로 억제할 수 있다고 보고되었다.

2.2 리바운드

마상준과 최희섭(2008)은 국내 숏크리트 시공에서 가장 큰 문제점은 숏크리트 타설 시의 높은 리바운드율이라고 지적했을 정도로, 리바운드는 터널시공 시 많은 어려움을 제기한다. 이로 인해 터널의 공사비 증가 및 공사기간 연장은 물론 숏크리트의 품질이 저하될 수 있는 문제가 동반하게 된다. 또한 탈락된 숏크리트로 인한 환경오염 발생관련 문제 역시 대두되게 된다. 국내외 관련자료에 의하면 숏크리트를 타설할 때 발생하는 리바운드율은 습식 숏크리트의 경우 보통 5~20% 정도로 알려져 있으며, 국토해양부의 설계기준에 의하면 15%로 규정되어 있다(한국도로공사, 1995; 국토해양부, 2008; US Army Corps of Engineers, 1993; The Institution of Civil Engineers, 1996; Thomas, 2009). 그러나 실제 터널시공 현장에서는 이를 초과하는 리바운드가 발생하는 것으로 알려져 있다(한국도로공사, 1995; 이양규 등, 2001). 그동안 국내에서는 이양규와 권인환(2001), 전준태와 이양규(2003) 등에 의해서 숏크리트의 리바운드 감소 방안에 관한 연구가 실시된 바 있다. 이러한 연구에 의하면 일반적으로 리바운드는 숏크리트의 배합설계(재료특성) 및 숏크리트 타설방법에 영향을 받는다고 알려져 있다.

2.3 숏크리트 투입물량

일반적인 경우 숏크리트 설계물량은 표준지보패턴별로 규정된 숏크리트의 타설두께에 허용 여굴 크기의 1/2을 합산하여 산정한다(국토해양부, 2008). 즉 설계 여굴 크기보다 큰 여굴이 크게 발생하는 경우 설계물량을 초과하는 숏크리트가 투입될 수 밖에 없는 것이 현실이다. 이와 함께 설계규정을 초과하는 리바운드의 발생으로 인하여 국내 NATM 터널시공의 경우 설계물량대비 150~190%의 숏크리트가 투입된다고 알려져 있다(조대선 등, 2005). 표 1은 NATM 공법으로 터널굴착이 완료된 A 터널(길이: 1.56km)의 시공 시 실제로 투입된 숏크리트물량 대비 설계물량의 비를 표준지보패턴별로 나타내고 있다(조대선 등, 2005). 숏크리트의 평균 투입율은 143.3%이며 지보패턴 별로 105.1~165.4%

표 1. NATM 공법으로 시공된 A 터널의 숏크리트 설계 및 실제시공량

표준지보패턴	연장(m)	설계량(m^3)	시공량(m^3)	설계대비(%)	비고
2	792.0	2,223.2	3,124.0	140.5	무지보
3	215.9	946.5	995.0	105.1	
4	202.5	1,269.2	2,099.0	165.4	강지보
5	75.6	561.4	855.0	152.3	
6	67.0	497.5	773.0	155.4	
비상주차대	180.0	1,503.7	2,187.0	145.4	
평균				143.3	

의 값을 보이고 있으며, 지보패턴별로 뚜렷한 경향을 보이지는 않지만 무지보 구간에 비해 강지보 구간의 숏크리트 투입율이 더 높은 것으로 나타났다(무지보 구간: 129.9%, 강지보구간: 154.3%). 또한 유사하게 NATM 공법으로 시공이 종료된 B 터널(길이: 0.8km)의 경우 설계대비 평균 159.3%의 숏크리트가 투입되었다(조대선 등, 2005). 이러한 현상은 국내 터널시공현장에서 일반적으로 발생하고 있으나, 이에 대해 기존에 보고된 연구는 극히 드물다. 이는 현장실측 자료 획득의 어려움과 함께 그동안 연구자들의 주목을 받지 못했기 때문으로 판단된다.

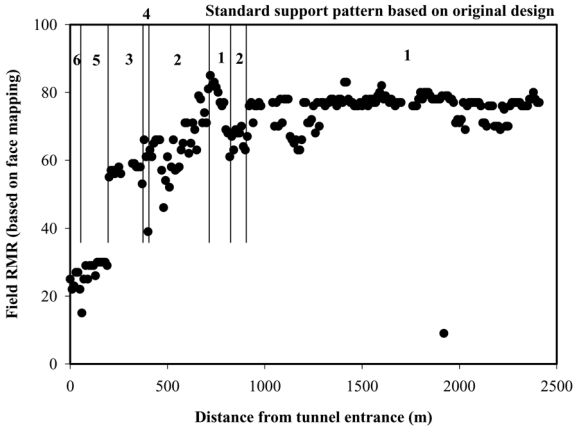


그림 1. 표준지보패턴과 현장에서 측정한RMR의 분포

3. 현장상황

본 연구에서 분석한 ○○터널은 2011년 5월 현재 NATM 공법에 의한 터널굴착이 종료되었고, 현재 콘크리트 라이닝 타설작업이 진행 중에 있다. 터널의 굴착은 각종 물리탐사, 시추조사 및 실/내외시험을 통해서 분석된 RMR 및 Q분류법에 따라 T-1에서 T-6로 구분하여 규정된 표준지보패턴에 따라 실시되었다(표 2).

본 연구에서 분석한 구간의 총 연장은 2,410m 이며 무지보 구간이 전체의 90.4%로 대부분을 차지하고 있다. 터널이 시공되는 암반의 공학적 특성은 비교적 양호하며, 주로 흑운모화강암 및 석류석화강암으로 구성되어 있으며 NS 및 NE 방향의 절리가 우세하게 발달되어 있다. 또한 터널 노선과 평행한 단층대가 터널에서 충분히 이격되어 있어서 지질학적으로 비교적 안정한 편이라고 조사되었다. 한편 터널 굴착공사 시 실시된 막장면 관찰(face mapping)에 의하면 전체굴착구간의 평균 RMR은 63.5 이며 최소 9, 최대 85의 값을 가지며, 설계단계에서 분석한 표준지보패턴과 대체로 유사한 결과를 보이고 있다(그림 1). 갱구부에서 200m 정도까지의 구간을 제외하고는 대부분의 구간에서 RMR 값이 60 이상 정도로 지보패턴 T-1～T-3 으로 분류되는 비교적 양호한 암반상태라고 할 수 있다.

숏크리트에 대한 효율적인 품질관리를 도모하기 위하여 최적의 배합설계를 실시하였으며, 콘크리트 계량 및 혼합 시 자동계량 기록장치를 이용하여 계량오차를 ± 3% 이내로 관리하였으며, 숏크리트 타설 시 최적의 노즐직경 및 압송압력은 시험시공을 통해 결정하였다. 숏크리트 타설 시 적용된 시방배합설계표는 표 3과 같다. 숏크리트 시공 시 슬럼프(slump)가 커지게 되면 리바운드가 커지게 되고, 강섬유 탈락율이 증가하게 됨으로 슬럼프 관리에 유의하였으며(10cm), 숏크리트의 압축강도는 24시간 이내에 10MPa, 28일 강도 21MPa 이상이 될 수 있도록 관리하였다. 또한 현장 숏크리트 기능공에 대한 철저한 교육 및 관리를 통하여 기능공의 기능수준을 향상 시켰고, 숏크리트 타설 시 타설각도(90도) 및 타설거리(1m)를 준수할 수 있도록 하였으며, 5kgf/cm^{2}의 분사압력을 유지하였다. 노즐의 압축공기 압력은 압송거리에 따라 2～5kgf/cm^2 사이에서 유지하였으며, 숏크리트의 타설 두께가 10cm 이상인 경우 숏크리트의 탈락을 방지하기 위하여 2～3개의 층으로 나누어 시공하였다.

발파를 위한 천공위치는 설계굴착선과 오차가 클수록 발파 후 여굴 및 미굴이 증가할 수 있기 때문에 정확한 천공작업(천공착점, 천공장, 천공각)을 도모하기 위하여 모든 구간에서 컴퓨터 내장형 점보드릴을 사용하였다. 또한 2단 발파

표 2. ○○ 터널에 적용된 터널 표준지보패턴

지보패턴	RMR	굴착방법	숏크리트두께 (mm)	강지보	라이닝	구성(%)
T-1	76-100	상/하반 분할굴착	50	무지보	무철근	67.4
T-2	75-61					17.3
T-3	60-51		100			5.7
T-4	50-31		150	강지보	철근	0.6
T-5	30-10		200			6.2
T-6	갱구부	상반링컷	250			2.8

T-1: 일반숏크리트, T2-T6: 강섬유 보강 숏크리트

및 발파설계에 의한 천공위치, 천공각도 및 천공장을 정확히 준수하여 발파효율을 극대화하고, 외곽공에서의 여굴 발생을 최소화하였다. 터널 발파 시 여굴에 큰 영향을 미치는 최외곽공의 경우 표 4에 나타나 있듯이 표준지보패턴에 따라 0～7cm 안쪽으로 천공을 실시하여 여굴의 발생을 최소화하였다. 터널굴착 시 미굴량은 미미하였으며, 미굴 부분에 대해서는 breaker로 굴착을 실시하였다.

4. 숏크리트 리바운드, 여굴 및 숏크리트 투입율 분석

○○현장에서 획득한 숏크리트의 공학적 특성에 대한 각종 시험결과를 분석하고 터널시공 시 측정된 여굴 크기, 숏크리트의 리바운드율 및 숏크리트의 실 투입량에 대한 고찰을 다음과 같이 실시하였다.

4.1 숏크리트의 공학적 특성 측정

지속적인 숏크리트의 품질관리를 도모하기 위하여 실/내외 시험을 통하여 숏크리트의 공학적 특성에 대한 분석을 실시하였다. 여기에는 압축강도, 휨강도, 강섬유 혼입율 및 숏크리트의 타설두께가 포함된다. 압축강도 시험결과 숏크리트의 평균 압축강도는 25.0MPa이며, 모든 시험에서 허용압축강도 기준인 21.0MPa을 초과하였다. 휨강도 역시 평균 5.4MPa로 허용휨강도인 4.5MPa을 모든 구간에서 초과하여 숏크리트 강도에 대한 품질관리가 양호하게 실시되었음을 알 수 있었다. 숏크리트에 포함된 강섬유 혼입율 시험결과 평균 96.8%로 분석되어 설계혼입율 95.0%을 초과하여 숏크리트가 안정적으로 타설되었다고 할 수 있다. 한편 타설된 숏크리트 두께는 표준지보 패턴별로 다소의 차이를 보이기는 하지만 현장측정 결과 설계기준치를 상회하는 것으로 측정되어(설계대비 107.8%) 숏크리트 타설이 양호하게 실시된 것으로 나타났다.

4.2 여굴

터널굴착이 진행되는 동안 모든 굴착단면에 대하여 여굴크기를 측정하였다. 여굴의 산정은 내공측량방법으로 실시하였으며, 각 단면당 20～50개의 측점에 대하여 여굴 크기를 측정하고 이에 대한 평균 여굴 크기를 산정하였다. 표 5는 평균 여굴 크기 및 여굴율을 지보패턴별로 구분하여 보여주고 있다. 이때 여굴율(overbreak ratio)은 실측 여굴 크기를 설계허용 여굴 크기로 나눈 값이다. 한편 그림 2는 전체구간에서 측정된 여굴 크기(2a) 및 설계허용 여굴 대비 여굴율(2b)를 보여주고 있다. 연구 대상 현장에서 실측된 여굴 크기의 전체 평균은 28.5cm이며 평균 여굴율은 259.9%로서, 설계허용 여굴인 10～25cm 기준을 초과하고 있다. 또한 무지보 구간(T-1～T-3)의 경우 평균 249.3%의 여굴율을 보이는 반면, 강지보 구간(T-4～T-6)은 186.3%의 여굴율을 보

표 3. 숏크리트 시방배합 설계표

압축강도 (MPa)	굵은골재 최대지수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물-시멘트비 W/C (%)	절대 잔골재율 S/A (%)	단위 수량 (kg/m^2)	단위 시멘트량 (kg/m^2)	단위 잔골재량 (kg/m^2)	단위굵은 골재량 (kg/m^2)	유동화제 (kg/m^2)	강섬유 (kg/m^2)
21	13	10	2.5	46	65	211	456	1,056	578	4.56	40

* note: 6～11% 의 급결재 투입

표 4. 터널 지보패턴 별 최외곽공 천공위치 조절기준(내측)

지보패턴	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	비 고
기준 (cm)	0-2		2-5	5-7			내측으로 조절

표 5. 지보패턴별 평균 여굴 량

지보패턴	설계허용 여굴(cm)	평균 여굴(cm)	여굴율(%)
T-1	10	27.0	270
T-2	10	29.1	291
T-3	15	28.0	187
T-4	20	47.2	236
T-5	20	37.8	189
T-6	25	33.5	134
계		28.5	259.9

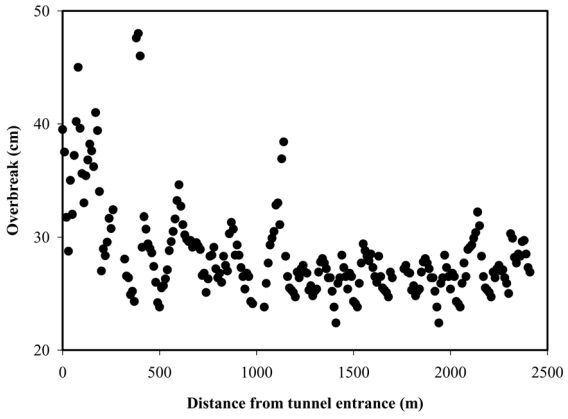
이고 있다. 전체적으로 볼 때 갱구부 부근에서 30cm를 초과하는 여굴이 발생하고 있으며, 터널의 굴착이 진행될수록 여굴이 감소하여 갱구부 인근을 제외한 대부분의 구간에서 30cm 미만의 여굴이 발생하였으나, 일부 구간에서는 keyblock의 발생으로 인해 이를 초과하는 큰 여굴이 발생하였다. 한편 여굴율의 값은 갱구부에서 터널 안쪽으로 굴착이 진행될수록 점진적으로 증가하여 약 260% 이내의 값을 보이고 있으나, keyblock 발생구간의 경우 이를 크게 초과하는 값이 산정되었다.

표준지보패턴별 평균 여굴 크기 및 여굴율을 분석하기 위하여 그림 3에 나타낸 결과, 여굴 크기와 표준지보패턴과의 상관성은 낮지만(그림 3(a)) 여굴율과 표준 지보패턴 사이에는 일정한 상관관계가 있는 것으로 나타났다(그림 3(b)). 이는 실측된 여굴의 크기가 표준지보패턴과 크게 관련이 없음에 비해, 허용 여굴의 크기는 표준지보패턴별로 10~25cm의 크기를 가지기 때문에 설계허용 여굴의 크기가 비교적 작게 규정된 경우(T-1, T-2 & T-3) 여굴율이 크게 산정되기 때문인 것으로 분석된다. 2.1절에서 언급한 여굴에 대한 기존의 연구 및 본 연구에서 분석한 바와 같이 터널굴착 시 발생하는 여굴이 일반적으로 설계허용 여굴을 크게 초과하는 것을 감안할 때, 현행 설계 기준이 다소 엄격한 것으로 볼 수 있어 향후 이에 대한 심도 있는 검토가 필요할 것으로 판단된다.

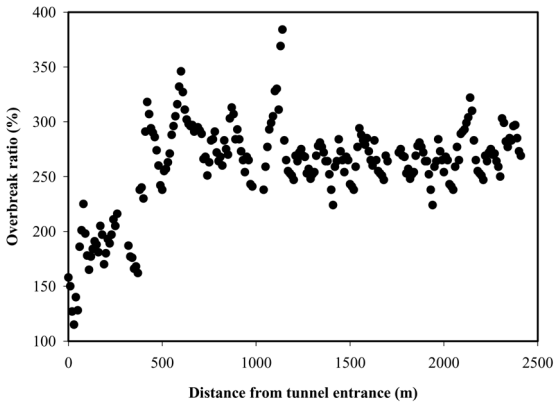
Keyblock이 발생한 구간의 총 길이는 149m 로서 전체 연장의 약 6.2%이며 주로 지보 패턴 T-1 및 T-2에서 발생하였다(지보패턴T-1: 40.3%, 지보패턴 T-2: 57.0%, 지보패턴 T-3: 2.7%). Keyblock발생 구간의 경우 평균 여굴 크기는 36.2cm이며, 여굴율은 350.1%로 산정되었다.

4.3 리바운드율

터널 굴착이 진행되는 동안 지속적으로 숏크리트 리바운드 측정 시험을 실시하였다. 숏크리트의 타설 시 터널바닥에 비닐을 깔아서 숏크리트 타설 중 탈락된 숏크리트를 수거하여 그 중량을 측정하였다. 시험결과 6.3~8.7%의 리바운드율이 측정되었으며, 리바운드율에 대한 전체 평균은 7.2%로 이는 설계기준인 15%의 약 절반에 해당되는 값으로 리바운드 관리가 적절히 수행되었다고 할 수 있다. 그러나 이는 실험목적으로 실시된 것으로 실제 터널시공 시 이보다는 다소 큰 리바운드가 발생했을 것으로 예상된다.

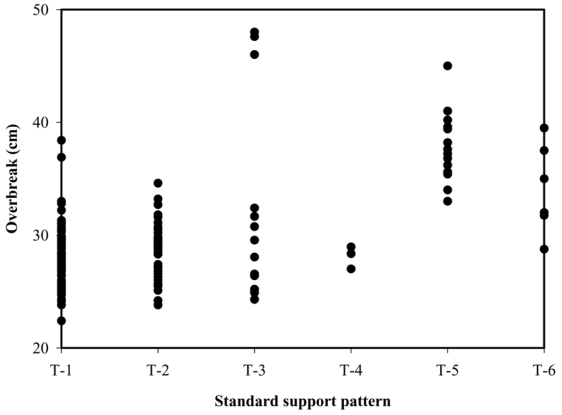


(a) 여굴 크기 분포

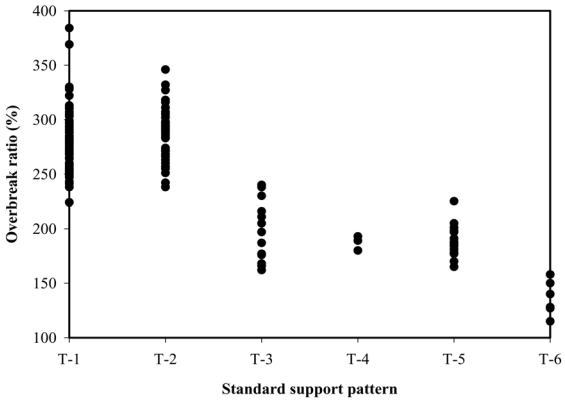


(b) 여굴율 분포

그림 2. 여굴 크기 및 여굴율 분포



(a) 표준지보패턴과 여굴 크기와의 관계



(b) 표준지보패턴과 여굴율과의 관계

그림 3. 표준지보패턴과 여굴 크기, 여굴율과의 관계

4.4 숏크리트 및 라이닝 투입율

여굴 측정의 경우와 유사하게 터널굴착 동안 모든 굴착 단면에 대하여 투입된 숏크리트의 물량을 산정하여 숏크리트 투입율(shotcrete ratio)을 산정하였다, 여기서 숏크리트 투입율은 실제로 투입된 숏크리트의 물량을 설계물량으로 나눈 값을 의미한다. 그림 4는 전체구간에서 측정된 숏크리트의 투입율의 분포를 보여주고 있다. 다소의 차이는 있지만 갱구부에서 비교적 큰 숏크리트 투입율이 산정되었고, 터널의 굴착이 진행될수록 약간 감소되어 대체로 어느 정도 일정한 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 분석한 ○○터널의 경우 전체구간에서 평균 숏크리트 투입율이 116.5%인 것으로 나타났는데, 이는 당초현장시공 관리목표치인 140%보다 작은 값으로 숏크리트 투입이 비교적 양호하게 관리되었음을 보여주고 있다. 또한 이러한 값은 앞서 언급한 국내 NATM 시공현장에서 일반적으로 측정된 숏크리트의 투입율인 150～200% 정도에 비해서는 매우 낮은 값이라 할 수 있다. 그러나 keyblock이 발생한 구간의 경우 평균 157.5%의 숏크리트 투입율이 산정되어, keyblock의 규모 및 그 발생 빈도가 전체 숏크리트 투입율에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

표 6및 그림 5는 지보패턴별 숏크리트의 투입율을 보여주고 있다. 숏크리트의 투입율은 지보패턴별로 뚜렷한 경향을 보이고 있지는 않지만, 대체적으로 암반의 조건이 불량할수록 투입율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 무지보 구간(T-1～T-3) 및 강지보 구간(T-4～T-6)의 경우 평균 숏크리트 투입율은 각각 109.8% 및 143.4%로 나타났다. 이러한 경향은 앞서 설명한 A 터널의 사례와 유사하다고 할 수 있다(숏크리트 투입율, 무지보 구간: 129.9%, 강지보구간: 154.3%, 표 1 참조). ○○현장의 경우 116.5%의 매우 낮은 숏크리트 투입량이 측정되었는데 이는 3 장에서 언급한 숏크리트 품질 관리, 타설관리 및 천공관리 등의 영향도 있겠지만 무엇보다 무지보 구간이 차지하는 비율이 높기 때문인 것으로 분석할 수 있다(전체의 90.4%). 이는 강지보의 존재 여부에 크게 좌우되는 것으로 추정되며, 강지보재의 설치 유무가 숏크리트 투입율에 큰 영향을 미치는 요소임을 보여주고 있다. 즉 강지보가 설치되는 경우 여굴 크기와 관계없이 지보재가 숏크리트로 완전히 피복될 때까지 숏크리트를 타설해야 하기 때문에 숏크리트의 투입물량이 증가하게 된다. 한편 무지보 구간의 경우 숏크리트의 타설은 설계에서 규정된 타설 두께를 준수하면 되기 때문에, 숏크리트의 투입율이 강지보 설치 구간에 비해 상대적으로 감소할 수 있

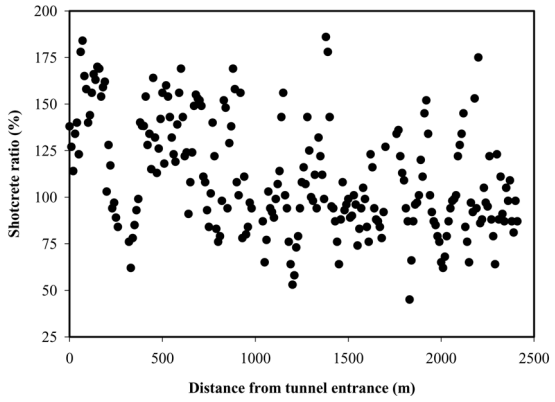


그림 4. 숏크리트 투입율 분포

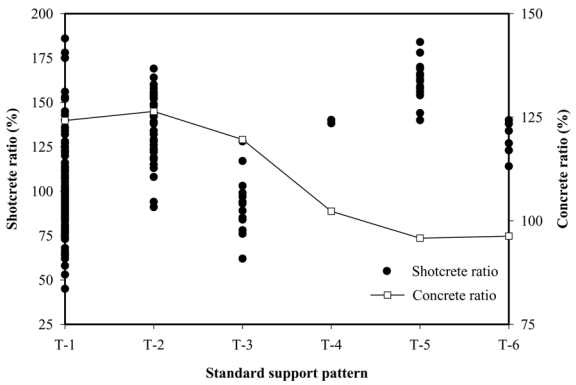


그림 5. 표준지보패턴별 숏크리트 및 콘크리트 투입율

표 6. 지보패턴별 평균 숏크리트 투입율

지보패턴	숏크리트			라이닝 콘크리트
	설계량(m^3)	타설량(m^3)	투입 율(%)	예상투입 율#(m^3)
T-1	5,224.5	5,205.0	99.6	124.2
T-2	1,341.0	1,837.0	137.0	126.4
T-3	781.7	725.0	92.7	119.6
T-4	116.6	162.0	138.9	102.3
T-5	1,465.0	2,373.0	162.0	95.8
T-6	775.1	1,002.5	129.3	96.3
계	9,703.9	11,304.5	116.5#	123.2

#: 숏크리트 타설 후 단면의 크기를 고려하여 추정한 라이닝 콘크리트의 물량

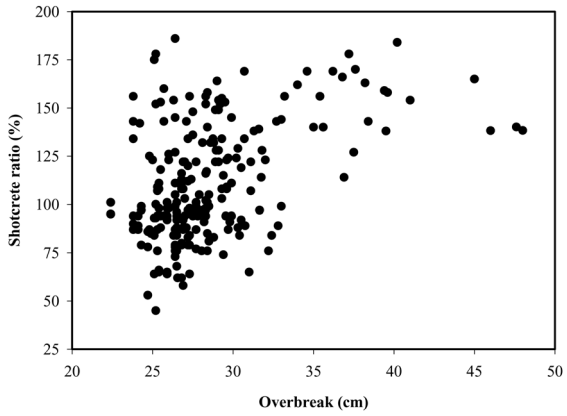


그림 6. 여굴 크기 및 숏크리트 투입율의 상관관계

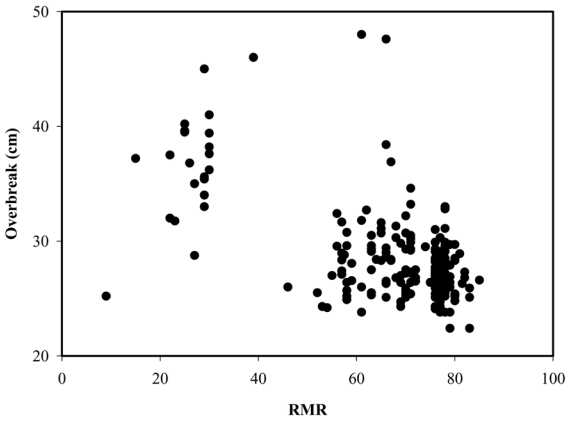
는 것으로 분석된다. 즉 터널 표준지보패턴에 따라 허용 여굴 두께의 50% 만을 숏크리트의 물량으로 인정하는 현행의 설계기준은 실제로 발생하는 여굴의 크기나 숏크리트 타설 시의 작업성을 고려하면 매우 엄격한 기준이라고 판단된다.

한편 숏크리트의 타설이 종료된 터널의 단면 형상을 고려하여 추정한 라이닝 콘크리트의 물량은 평균 123.2%를 보이고 있으며, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 강지보의 설치유무에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉 강지보가 설치된 구간의 경우 비교적 숏크리트가 많이 타설되어 라이닝 콘크리트의 물량이 감소하게 되며, 무지보 구간의 경우 상대적으로 숏크리트가 덜 타설되어 라이닝 콘크리트의 물량이 증가하기 때문인 것으로 파악된다(무지보 구간 평균: 123.4%, 지보구간 평균: 98.1%).

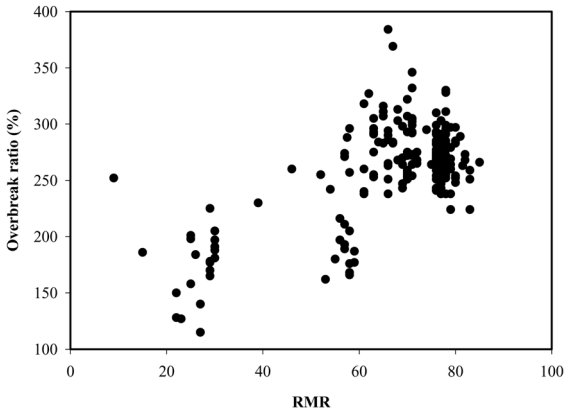
그림 6은 여굴의 크기와 숏크리트 투입율에 대하여 보여주고 있다. 대체적으로 여굴이 증가할수록 숏크리트 투입율도 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 여굴 발생을 최소화하는 것이 숏크리트 투입율을 가장 효과적으로 감소시킬 수 있는 최선의 방법임을 알 수 있다. 그러나 숏크리트의 투입율은 단순하게 여굴 크기만에 의해 결정되는 것이 아니라 앞에서 언급한 바와 같이 표준지보패턴 및 강지보재 설치여부에도 영향을 받기 때문에 이를 동시에 고려해야 할 것이다.

4.5 RMR과 여굴 크기 및 숏크리트 투입율과의 관계

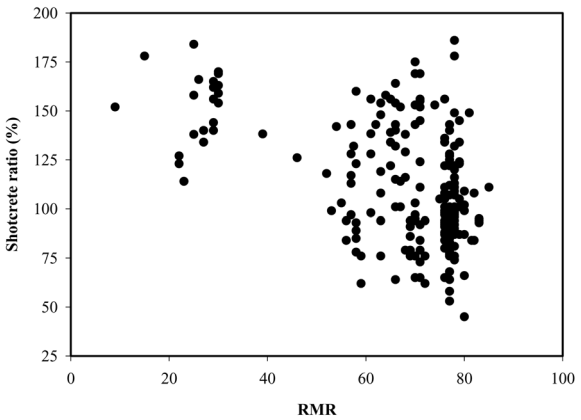
그림 7(a)~7(b)는 RMR과 여굴 크기 및 여굴율의 상관관계를 보여주고 있다. 앞서 언급한 표준지보패턴/지보재 설치유무와 여굴 크기/숏크리트 투입율에 대한 분석과 유사하게 RMR 값은 여굴 보다는 여굴율과 더 높은 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 즉 RMR 값이 높을수록 여굴율도 대체로 증가하는 경향을 보인다. 이는 앞서 설명한 것처럼 여굴 크기는 RMR과는 상대적으로 낮은 상관성을 보이지만, RMR이 증가할수록 설계허용 여굴이 작아지기 때문에



(a) RMR과 여굴 크기의 상관관계



(b) RMR과 여굴율의 상관관계



(c) RMR과 숏크리트 투입율의 상관관계

그림 7. RMR과 여굴 크기, 여굴율 및 숏크리트 투입 율과의 관계

결국 여굴율이 증가하게 되는 것으로 판단된다.

한편 그림 7(c)는 RMR 값과 숏크리트 투입율에 대하여 보여주고 있다. RMR 값이 증가할수록 숏크리트 투입율은 감소하고 있음을 알 수 있는데 이는 앞서 언급한 지보재의 존재유무와 관련이 있는 것으로 보인다. 즉 RMR이 높은 경우 보통 무지보로 시공이 되기 때문에 비교적 적은 양의 숏크리트만이 타설되었다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 NATM 공법으로 시공된 ○○터널 시공현장에서 실측된 여굴, 숏크리트의 리바운드 및 투입율에 대한 분석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 터널굴착면에 대하여 실측된 여굴 크기의 전체 평균은 28.5cm로 이는 설계에서 규정한 허용 여굴 크기의 평균 약 260%에 해당되는 값이다.

(2) 터널시공 중 실제로 타설된 숏크리트는 설계량(9,703m^3)대 실제투입량(11,304m^3)으로 평균 116.5%의 투입율을 보이는 것으로 분석되어 국내의 일반적인 값에 비해서는 비교적 양호한 결과를 보였다. 이는 숏크리트에 대한 철저한 품질관리, 타설관리 및 천공관리 등의 영향도 있겠지만 무엇보다 무지보 구간이 전체 분석구간의 90.4%로 터널굴착 구간의 대부분을 차지했기 때문인 것으로 분석되었다.

(3) 강지보가 설치되지 않은 구간은 강지보가 설치된 구간에 비해 약 70～80% 수준의 숏크리트가 투입되어 강지보의 설치유무가 숏크리트 투입율에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 강지보 설치구간의 비중이 높은 길이가 짧은 터널의 경우 평균 숏크리트 투입율이 증가할 것이고, 산악터널의 경우 갱구부를 제외하고는 대체로 암반의 상태가 양호하다고 추정할 때 무지보 구간의 비중이 높아 숏크리트 투입율이 높지 않을 것으로 예상된다.

(4) Keyblock이 발생한 구간의 경우 평균 36.2cm의 여굴이 발생하였으며, 157.5%의 숏크리트 투입율이 산정되었다. 즉 keyblock의 발생여부가 숏크리트 투입율에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

(5) 평균 여굴의 크기는 표준지보패턴 및 RMR에 대하여 비교적 상관성이 낮은 것으로 분석되었다. 이에 비해 여굴율과 숏크리트의 투입율은 표준지보패턴 및 RMR과 상대적으로 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 여굴의 크기는 암반의 공학적 상태와 큰 관련이 없음에 비해, 설계허용 여굴은 암반이 양호할수록 작아지고 또한 암반이 양호한 경우 강지보를 적용하지 않기 때문으로 분석되었다.

(6) 향후 터널굴착 시 발생하는 여굴의 크기 및 숏크리트 투입율에 대한 현장실측자료에 대한 지속적인 축적이 필요할 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 현행 터널설계기준에 재검토가 필요할 것으로 보인다. 본 연구는 제한적인 자료를 바탕으로 수행되었기 때문에 이를 통해 최종적인 결론을 도출하는 것은 무리가 있겠으나, 현행 국내 터널설계기준에서 규정된 설계허용 여굴의 크기는 다소 엄격한 것으로 분석되었다. 또한 허용허굴 두께의 50% 만을 숏크리트의 물량으로 인정하는 현행의 설계기준 역시 강지보 설치유무를 고려하여 재검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부(2008), *국도건설공사 설계실무 요령*, pp. 415～416.
2. 김양균, 김형철, 유정훈(2003), 터널발파 작업 시 여굴 저감을 위한 천공방법 연구, *화약발파*, Vol. 21, No. 2, pp. 1～13.
3. 김양균, 김인호, 유정훈, 김성민(2005), 터널발파 시 천공상태 평가를 통한 여굴 저감방안 연구, *가을학술발표회논문집*, 한국지반공학회, pp. 198～209.
4. 마상준, 최희섭(2008), 새로운 숏크리트 공법개발을 위한 국내 건설현장의 숏크리트 시공실태 파악, *자연과 문명의 조화*, Vol. 56, No. 2, pp. 37～44.
5. 배상훈, 김대상, 김무일(2005), 터널에서의 여굴 저감에 대한 연구, *화약발파*, Vol. 23, No. 1, pp. 41～46.
6. 이상돈, 김낙영(2001), 여굴 최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구, *제 18회 도로기술 연구성과 발표회 논문집*, 한국도로공사, pp. 71～109.
7. 이양규, 권인환,(2001), Shotcrete 리바운드량 감소를 위한 실험적 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 21, No. 4D, pp. 499～508.
8. 이태노, 김동현, 서영화(2002), 터널굴착면 여굴 최소화를 위한 발파암 분류 (안) 및 공법 개발연구, *화약발파*, Vol. 20, No. 3, pp. 25～38.
9. 전준태, 이양규(2003), 습식 shotcrete 리바운드량 감소량에 대한 실험적 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 23, No. 1D, pp. 89～95.
10. 조대선, 김종만, 이재연, 류남열, 이철주(2005), *터널 숏크리트 초과투입량 저감을 통한 원가경쟁력 향상*, 삼성중공업 건설사업부, 미출간 내부보고서.
11. 한국도로공사(1995), *고속도로 터널설계 실무 자료집*, 한국도로공사, pp. 225.
12. US Army Corps of Engineers(1993), *Standard Practice for Shotcrete*, Engineer Manual, No. 1110-2-2005, Washington, DC, pp. 6～8.
13. The Institution of Civil Engineers(1996), *Sprayed Concrete Linings (NATM) for Tunnels in Soft Ground*, ICE Design and Practice Guides, Thomas Telford, London, p. 67.
14. Thomas, A. (2009), *Sprayed Concrete Lined Tunnels,* Taylor & Francis, New York, p. 70.

(접수일: 2011. 6. 3 심사일: 2011. 6. 8 심사완료일: 2011. 6. 29)