

NATM 산악터널의 슛크리트 투입율에 관한 연구

A study on Actual Quantity of Shotcrete Sprayed in a NATM tunnel

이 철 주* 김 성 윤** 김 동 건*** 유 남 재****
Lee, Cheol-Ju Kim, Sung-Yun Kim, Dong-Gun Yoo, Nam-Jae

Abstract

This study has analysed actual overbreak, shotcrete rebound and the ratio between the actual quantity of shotcrete to designed shotcrete measured during a NATM tunnel construction. The measured shotcrete rebound was about 7.2% in average which was about half the allowable rebound (15%), showing shotcrete spraying was performed well. Based on the measurement of excavated tunnel shape, average overbreak was about 28.5 cm after tunnel excavation by drill and blasting method. This was about 260% of allowable overbreak. In addition, due to the rebound and overbreak actual amount of shotcrete used in the tunnelling work was about 116.5 % of the designed value. According to the field measurement the ratio of actual shotcrete to designed value showed some relation with standard support pattern, but the size of overbreak did not show the correlation with standard support pattern. Hence current design specifications stating the size of overbreak based entirely on standard support pattern should perhaps be reestablished. The insight into the design guideline regarding overbreak and shotcrete

키워드 : 슛크리트, 여굴, 표준지보패턴, NATM 터널

Keywords : shotcrete, overbreak, tunnel standard support pattern, NATM tunnel

1. 서론

일반적으로 터널공종이 포함된 공사는 전체 토목공사에서 50% 이상을 차지하며, 특히 강원도의 경우 산악지역이 많은 관계로 그 비율은 더 높으며 국내에서 터널의 개소 및 연장이 가장 길다(그림 1). 최근 들어 도로의 고속화 및 직선화로 인해 터널시공 물량이 급증하고 있으며, 경부고속철도의 경우 총 412km 구간 중 터널이 189 km (46%)를 차지하였다. 또한 3차선 이상의 대단면을

가진 터널이 최근 5년간 약 100% 증가 하였다. 즉 터널의 대단면 및 장대화 경향이 두드러지고 있다. 조만간 강원도 인제에서 시공예정인 전체 길이 약 10km의 인제터널이 그 대표적인 예라고 할 수 있다. 또한 현재 건설공사가 진행 중인 경춘고속도로의 경우 총 41개소의 터널이 시공되고 있으며, 원주-강릉간 철도 공사 시 다수의 터널공사가 예상되는 등 강원도에 있어서 터널은 국내 그 어느 지역보다 중요한 사회기반 시설이라 할 것이다.

강원도 산악지역에서 시공되는 터널공사에 일반적으로 적용되는 NATM 터널의 시공에서는 터널의 안정성 확보를 위하여 고성능의 슛크리트(shotcrete)를 사용하는 것이 가장 중요하다(그림 2). 슛크리트는 매우 고가이며, 실제로 사용되는 물량이 설계량을 크게 초과하는 게 일반적인 현실이다. 또한 터널 굴착 공사비 가운데 슛크리트 공사비는 전체 터널공사비의 약 55%를 차지할 정도로

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

** (주)홍익기술단 부장

*** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

****강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

대단히 중요한 공종으로, 숏크리트가 터널공종에서 차지하는 비중은 날로 증가하고 있다. 그러나 터널공사 중 발생하는 리바운드, 여굴 및 작업자의 숙련도 등으로 인해서 설계물량을 크게 초과하는 숏크리트가 투입되어 공사비 및 공사기간이 급증하고, 터널의 안정성에 막대한 악 영향을 미치는 등 많은 문제가 있는 실정이다. 또한 탈락된 숏크리트로 인한 환경오염 증가 및 품질 경쟁력 저하 등 많은 문제가 있다.

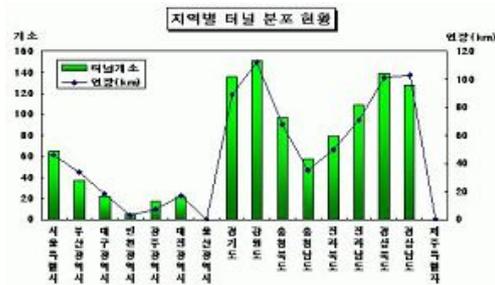


그림 1. 국내 지역별 터널 분포 현황



그림 2. 숏크리트 타설 전경

이철주(2008)가 조사한 자료에 의하면 국내 산악터널의 시공 시 설계대비 약 150-200%의 숏크리트가 투입되고 있다. 그러나 이러한 현상에 대하여 국내에서 보고된 사례는 극히 드물다. 이는 이러한 사실이 알려지는 것을 꺼리는 터널시공 관계자들의 소극적인 태도에 기인한다고 할 수 있으며, 이로 인해 품질시공이 어려워져 궁극적으로는 산악터널의 안정성이 저감되어 대형사고가 발생할 수 있는 위험성이 항상 존재한다. 이에 본 연구에서는 강원도 산악지역에서 현재 시공이 진행 중인 터널공사 현장에서 획득한 관련 자료를 검토하여 숏크리트의 투입율 및 터널의 안정성에 대한 분석을 실시할 것이다. 이를 통해 현행 산악터널 시공의 문제점을 파악하고, 이에 대한 개선방안을 제시할 것이다.

2. 기존연구 분석

앞서 언급한 바와 같이 국내 NATM 터널시공의 경우 설계물량을 크게 초과하는 150 - 200%의 숏크리트가 투입된다고 알려져 있다 (이철주 2008). 그림 3은 NATM공법으로 시공이 완료된 A 터널의 시공시 투입된 숏크리트의 설계대비 실제 물량의 비를 나타내고 있다 (개인적 자료수집). 숏크리트의 평균 투입율은 143.3%이며 지보패턴 별로 105.1 - 165.4 %의 값을 보이고 있으나, 지보패턴별로 뚜렷한 경향을 보이지는 않지만 무지보 구간에 비해 강지보 구간의 숏크리트 투입율이 더 높은 것으로 판단할 수 있다. 또한 유사하게 NATM 공법으로 시공이 종료된 B 터널의 경우 설계대비 평균 159.3 %의 숏크리트가 투입되었다 (개인적 자료수집).

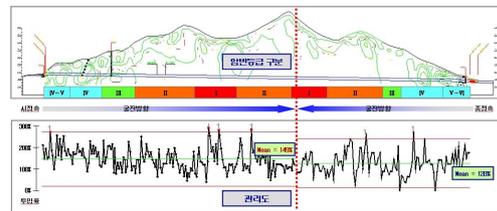


그림 3. A터널 숏크리트 타설 물량

2.1 리바운드 울

숏크리트를 타설할 때 발생하는 리바운드는 습식 숏크리트에 대하여 보통 5-20 % 정도로 알려져 있으며, 국토해양부의 설계기준에 의하면 15 %로 규정되어 있다 (그림 4) (US Army Corps of Engineers, 1993; The Institution of Civil Engineers, 1996; Schlumpf & Höfler, 2004 한국도로공사 1995; 국토해양부 2008). 그러나 실제 터널시공 현장에서는 이를 초과하는 리바운드가 발생하는 것으로 알려져 있다 (한국도로공사 1995; 이양규 & 권인환 2001). 이로 인해 터널의 공사비 및 공사기간의 연장은 물론 숏크리트의 품질이 저하되는 문제가 동반하게 된다. 또한 탈락된 숏크리트로 인한 터널 환경이 감소하는 문제 역시 발생하게 된다. 그동안 국내에서는 임주영 등 (2004), 이양규 & 권인환 (2001), 전준태 & 이양규(2003) 등에 의해서 숏크리트의 리바운드 감소 방안에 관한 연구가 실시된 바 있다. (그림5)

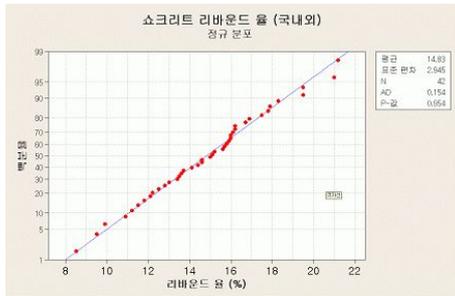
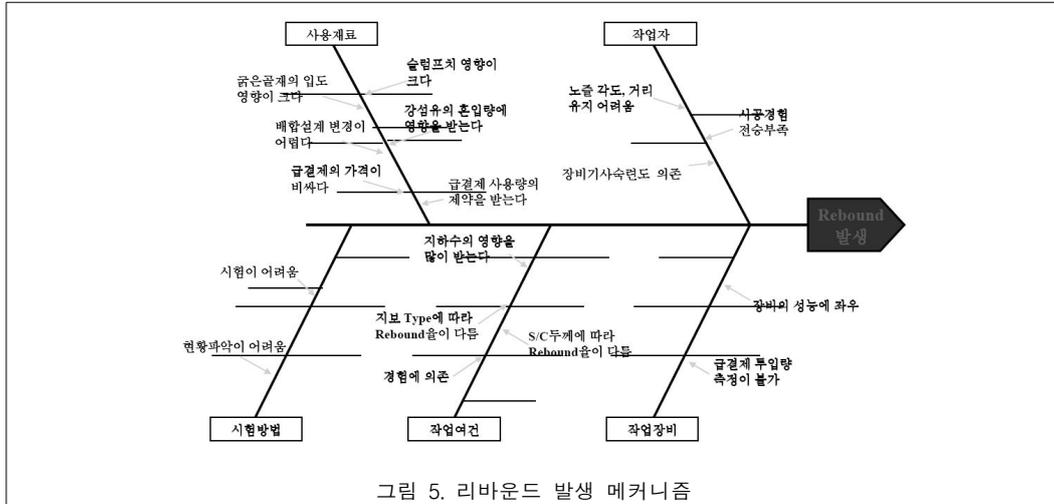


그림 4 국내의 리바운드 측정자료 분석

2.2 여굴 크기

국내의 경우 터널의 굴착 시 일반적으로 허용여굴의 크기는 지보패턴 및 타설부위별 (측벽부 & 아치부)로 10-30 cm범위에서 규정되어 있다 (한국도로공사 1995; 국토해양부 2008). 한편 한국도로공사 (1995)에 의하면 여굴에 의해 발생하는 추가비용은 터널공사비의 15-18%에 해당된다. 이상돈 & 김낙영 (2001)은 터널현장의 평균 여굴크기를 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 (최소평균: 28.2 cm, 최대평균: 47.0 cm). 즉 국내에서 측정된 제한적인 자료에 의하면 현장에서 발생하는 여굴의 크기는 설계에서 허용한 여굴의 크기를 크게 초과하고 있음을 알 수 있다. 여굴발생과 관련된 기존의 연구에 의하면 여굴크기는 암반의 지질학적 특성에도 영향을 받지만 주로 친공작업 및 발파방법에 영향을 받는다고 보고되었다. 한국도로공사 (1995), 김양균 등 (2003), 김지훈

(2004) 및 배상훈 등 (2005)은 컴퓨터 제어식 점보드릴 사용 등 최신장비의 활용, 천공방법 및 발파작업 등의 개선을 통하여 여굴을 감소시킬 수 있음을 보였다. 즉 발파굴착을 위한 천공의 정확도, 작업자 교육, 2단 발파, 발파설계에 충실한 장약작업 등이 터널의 여굴 감소에 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.(그림 6)

2.3 숏크리트 투입 물량

이러한 현상은 국내 터널시공현장에서 일반적으로 발생하는 것으로 실무기술자들 사이에서는 널리 알려져 있는 사실이다. 그러나 이에 대해 기존에 보고된 사례는 극히 드물기도 하거니와 지금까지 기초적인 자료조차 알려져 있지 않다. 이는 시공자의 잘못으로 인식될 것을 우려한 기술자들이 자료의 공개를 꺼리는데 기인한 것으로 추정된다고 볼 수 있다. 이로 인해 터널의 품질시공이 어려워져 궁극적으로는 터널의 안정성이 저감되어 대형사고가 발생할 수 있는 위험성이 항상 존재한다고 할 수 있다.(그림 7)

3. 현장 상황

본 연구에서 분석한 00터널은 2009년 6월 현재 NATM 공법에 의해 터널굴착이 진행 중에 있다. 본 연구에서는 여굴 및 숏크리트 투입물량에 대한 자료정리가 종료된 구간에 대하여 분석을 실시할 것이다. 터널의 시공은 각종 물리탐사, 시추조사 및 실내외시험을 통해서 분석된 RMR 및 Q분류법에 따라 표준지보패턴을 T-1에서 T-6까지 구분하여 이에 따라 터널굴착이 실시되고 있다.(표 1)

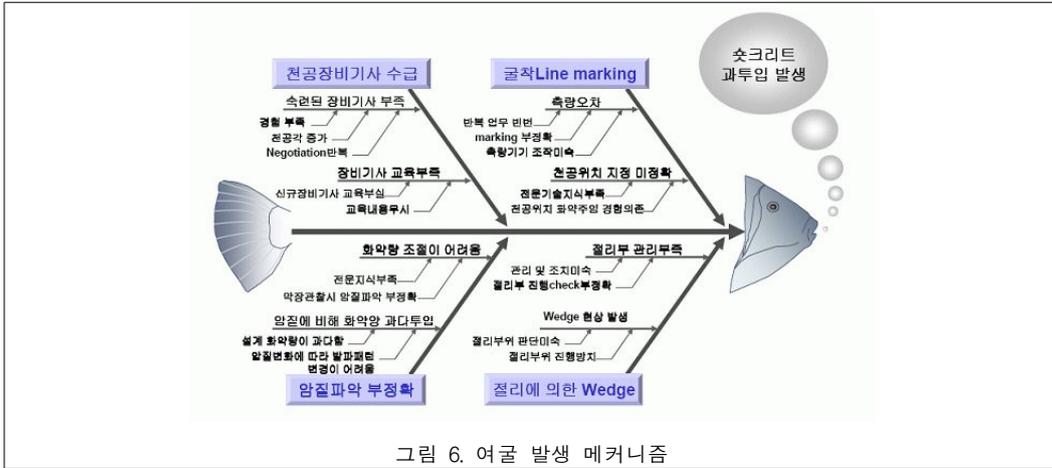


그림 6. 여굴 발생 메커니즘

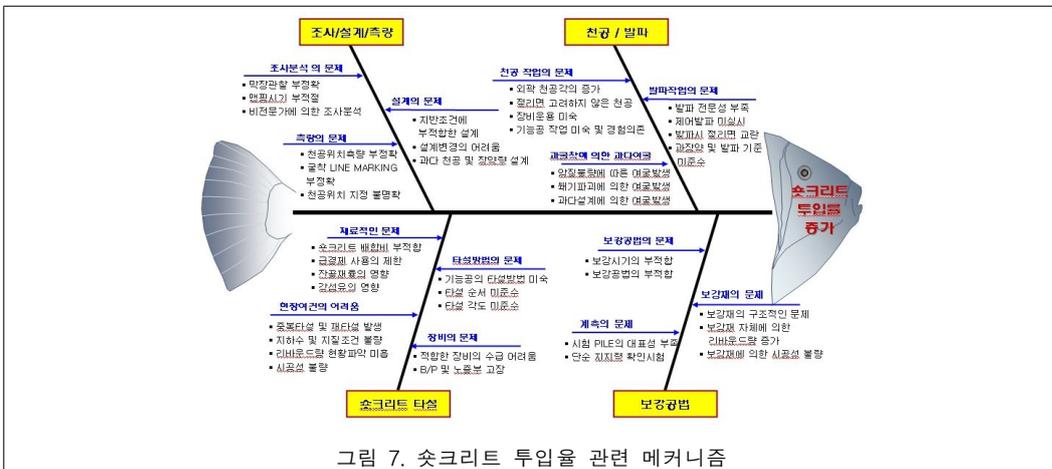


그림 7. shotcrete 투입율 관련 메커니즘

표 1. 00 터널에 적용된 터널 표준지보패턴

지보패턴	RMR	굴착방법	shotcrete	강지보	라이닝
T-1	76-100	상하반 분할굴착	일반 강섬유 보강	무지보	무철근
T-2	75-61				
T-3	60-51				
T-4	50-31				
T-5	30-15				
T-6	15이하	상반링컷		강지보	철근

설계단계에서 조사된 바에 의하면 본 연구에서 분석한 구간은 무지보 구간이 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 일반적인 경우에 비해서는 지질학적으로 비교적 안정한 편이라고 조사되었다. 한편 터널 굴착공사 시 실시된 막장면 관찰 (face mapping)에 의하면 RMR 평균값은 63.5 이며 최소 9, 최대 85의 값을 가지며, 설계단계에서 분석한 표준지보패턴과 대체로 유사한 결과를 보이고 있다.

효율적인 shotcrete의 타설을 도모하기 위하여 최적의 배합설계를 실시하였으며, 콘크리트 계량 및 혼합 시 자동계량 기록장치를 이용하여 설치계량오차를 ± 3% 이내로 관리하였으며 shotcrete 타설시 최적의 노즐직경 및 압송압력을 시험시공을 통해 결정하였다. shotcrete 타설시 적용된 시방배합설계표는 표 2와 같다. 지보패턴 1을 제외하고 전 구간에서 강섬유로 보강된 shotcrete를 타설하였으며, 40 kg/m³의 강섬유를 포함시켰다. shotcrete 시공 시 슬럼프 (slump)가 커지게 되면 리바운

드가 커지게 되고, 강섬유 탈락율이 증가하게 됨으로 슬럼프 관리에 유의하였다(8-10 cm).

숏크리트의 압축강도는 24시간 이내에 100kgf/cm², 28일 강도 210kgf/cm²이상 유지하도록 관리하였다. 또한 현장 기능공에 대한 철저한 교육 및 관리를 통하여 기능공들의 기능수준을 향상 시켰고, 숏크리트 타설시 타설각도 (90 도) 및 타설거리 (1m)를 준수할 수 있도록 하였으며 5kgf/cm²의 분사압력을 유지하였다. 노즐의 압축공기 압력은 압송거리에 따라 2-5kgf/cm²사이에서 유지하였으며, 숏크리트 두께가 10cm이상인 경우 숏크리트의 탈락을 방지하기 위하여 2-3개의 층으로 나누어 시공하였다.

을 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%를 초과하여 안정적으로 숏크리트가 타설되었다고 할 수 있다. 한편 타설된 숏크리트 두께는 표준지보 패턴별로 상이하나 현장측정 결과 설계기준치를 상회하는 것으로 측정되어(설계대비 107.8%) 숏크리트 타설이 양호하게 수행된 것으로 나타났다(그림 8).

표 2. 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)	단위 굵은골재량 (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

발파를 위한 천공위치는 설계굴착선과 오차가 클수록 발파 후 여굴 및 미굴이 증가할 수 있기 때문에, 정확한 천공작업을 도모하기 위하여 컴퓨터 내장형 점도드릴을 사용하였다. 또한 2단 발파 및 발파설계에 의한 천공위치, 천공각도 및 천공장을 정확히 준수하여 발파효율을 극대화하고, 외곽공에서의 여굴발생을 최소화하였다. 이를 통해 발파설계에 의한 천공위치, 천공각도 및 천공장을 정확히 준수하여 발파효율을 극대화 할 수 있도록 하였다. 또한 터널 발파 시 여굴에 큰 영향을 미치는 최외곽공의 경우 표 3에 나타나 있듯이 표준지보패턴에 따라 0-7cm 안쪽으로 천공을 실시하여 여굴의 발생을 최소화 하였다. 미굴량은 매우 미미하였으며, 미굴 부분에 대해서는 breaker로 굴착을 실시하였다.

4. 여굴, 리바운드 및 숏크리트 투입율 분석

4.1 숏크리트의 공학적 특성 측정

지속적인 숏크리트의 품질관리를 도모하기 위하여 실내의 시험을 통하여 숏크리트의 공학적 특성에 대한 분석을 실시하였다. 여기에는 압축강도, 휨강도, 강섬유 혼입율, 숏크리트의 타설 두께 및 리바운드가 포함된다. 압축강도 시험결과 숏크리트의 평균 압축강도는 25.0MPa 이며, 모든 시험에서 허용압축강도 기준인 21.0MPa 을 초과하였다. 휨강도 역시 평균 5.4MPa 로 허용휨강도인 4.5MPa

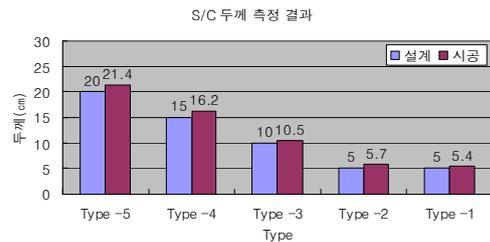


그림 8. 지보패턴 별 숏크리트 타설두께

4.2 리바운드

터널 굴착이 진행되는 동안 지속적으로 숏크리트 리바운드 측정 시험을 실시되었다. 숏크리트의 타설 시 터널의 바닥에 비닐을 깔아서 숏크리트 타설시 탈락된 숏크리트를 수거하여 그 중량을 측정하였다. 숏크리트에는 6-11%의 급결제를 투입하였으며, 6.3-8.7%의 리바운드율이 측정되었으며, 리바운드율에 대한 전체 평균은 7.2%로 이는 설계 기준인 15%의 약 절반에 해당되는 값으로 리바운드 관리가 잘 실시되었다고 할 수 있다. 그러나 이는 실험목적으로 실시된 것으로 실제 터널시공 시는 이보다는 다소 큰 리바운드가 발생했을 것으로 판단된다.

4.3 여굴

터널굴착 동안 모든 굴착면의 단면을 측정하여 평균 여굴량을 산정하였다. 여굴의 산정은 내공측

량방법으로 실시하였으며, 1889회의 측정을 실시하였다. 그림 9는 여굴 측정 단면을 보여주고 있다.

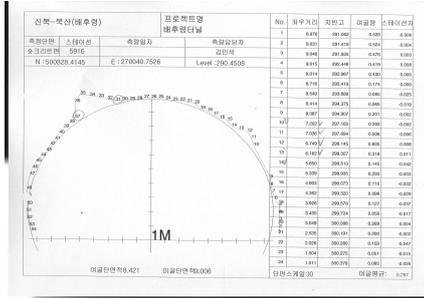


그림 9. 여굴측정 단면

그림 10, 11은 전체구간에서 측정된 여굴크기 및 설계대비 여굴율을 보여주고 있다. 이때 여굴율(overbreak ratio)은 실측여굴 크기를 허용여굴크기로 나눈 값이다. 전체적으로 볼 때 갱구부 부근에서 30cm 를 초과하는 여굴이 발생하고 있으며, 터널의 굴착이 진행될수록 30cm 내외의 여굴이 발생하였으나 일부 구간에서는 40cm 를 초과하는 여굴이 발생하였다. 한편 표 3은 지보패턴별 평균여굴크기 및 여굴율을 지보패턴별로 구분하여 보여주고 있다. 연구 대상 현장에서 실측된 여굴은 전체 평균은 28.5cm 로서 이는 앞서 언급한 일반적인 허용여굴기준을 크게 초과하고 있다.

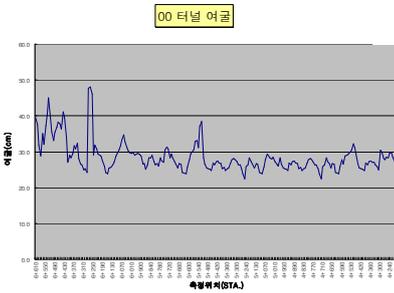


그림 10. 여굴크기 분포

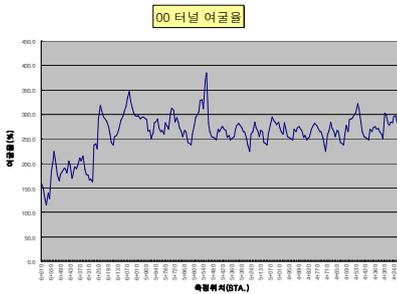


그림 11. 여굴율 분포

표 3. 지보패턴별 평균여굴량

지보패턴	허용여굴 (cm)	평균여굴 (cm)	현장시공 관리목표치 (cm)	여굴율 (%)
1	10	27	22	270
2	10	29.1	22	291
3	15	28	33	187
4	20	47.2	44	236
5	20	37.8	44	189
6	25	33.5	55	134
계		28.5		259.9

#: 현장 시공관리 목표치 (220 %)

지보패턴별 평균여굴크기 및 여굴율을 분석하기 위하여 그림 12에 나타난 결과 여굴크기와 지보패턴과의 상관성은 낮지만, 여굴율과 지보패턴 사이에는 일정한 관계가 있는 것으로 판단된다. 이는 실제로 발생한 여굴의 크기는 지보패턴과 크게 관련이 없음에 비해, 허용여굴의 크기는 지보패턴에 크게 좌우되기 때문에, 설계여굴의 크기가 비교적 크게 규정된 경우 (T-1, T-2 & T-3) 여굴율이 작게 산정되기 때문인 것으로 분석된다.

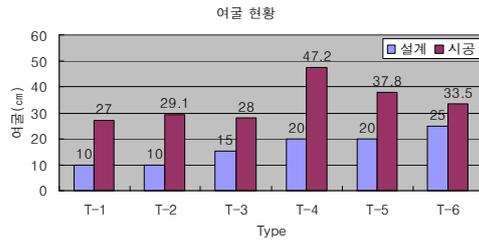


그림 12. 여굴

Key block 이 발생한 구간의 총 길이는 149m 로서 전체 연장의 약 6.2% 이며 주로 지보 패턴 1-2 에서 발생하였다 (지보패턴1 : 40.3%, 지보패턴 2 : 57.0%, 지보패턴 3 : 2.7%). Keyblock구간의 경우 평균 여굴 크기는 36.2cm이며, 여굴율은 350.1% 로 산정되어 keyblock발생은 터널여굴에 대단히 큰 악 영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

4.4 슛크리트

여굴측정의 경우와 유사하게 터널굴착 동안 모든 굴착면에 대하여 투입된 슛크리트의 물량을 산정하여 슛크리트 투입율 (shotcrete ratio)을 산정하였다. 여기서 슛크리트 투입율은 설계물량대비 실투입물량의 비를 의미한다. 일반적인 경우 슛크리트 설계물량은 표준지보패턴별 규정된 슛크리트의 두께와 허용여굴크기의 1/2을 합산하여 산정한다(국토해양부 2008). 그림 13은 전체구간에서 측

정된 숏크리트의 투입율의 분포를 보여주고 있다. 다소의 차이는 있지만 갱구부에서 비교적 큰 숏크리트 투입율이 산정되었고, 터널의 굴착이 진행될수록 평균적으로는 어느 정도 일정한 경향을 보이고 있다. 한편 표 4는 지보패턴별 숏크리트의 투입율을 지보패턴별로 보여주고 있다. 본 연구에서 분석한 00 터널의 경우 평균 숏크리트 투입율이 116.5% 인 것으로 나타났는데, 이는 현장시공 관리목표치인 140% 보다 작은 값으로 숏크리트 투입이 비교적 양호하게 관리되었음을 보여주고 있다. 또한 이러한 값은 국내에서 일반적으로 알려진 숏크리트의 실제 투입율인 150~200% 정도에 비해서는 매우 낮은 값이라 할 수 있다.

표 4. 지보패턴별 평균 숏크리트 투입율

지보 패턴	숏크리트		
	설계량 (m3)	타설량 (m3)	투입율 (%)
1	5,224.5	5,205.0	99.6
2	1,341.0	1,837.0	137.0
3	781.7	725.0	92.7
4	116.6	162.0	138.9
5	1,465.0	2,373.0	162.0
6	775.1	1,002.5	129.3
계	9,703.9	11,304.5	116.5#

#: Keyblock발생구간의 숏크리트 투입율 (157.5%)

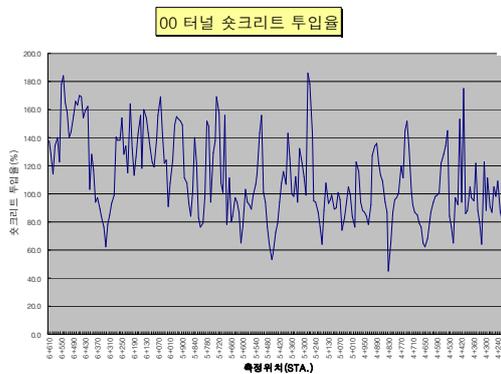


그림 13. 숏크리트 투입율

숏크리트의 투입율은 지보패턴별로 뚜렷한 경향을 보이고 있지는 않지만, 대체적으로 암반의 조건이 불량할수록 투입율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 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 보여 무지보 구간에서의 숏크리트 투입율이 더 높을 것으로 예상되나 실제로

는 이와 반대의 경향을 보이고 있다. 그러나 무지보 구간 및 강지보 구간의 경우 평균 숏크리트 투입율은 각각 109.8% 및 143.4%로 나타났다. 이는 강지보의 존재 유무에 크게 관계되는 것으로 추정된다. 즉 강지보체의 설치유무가 숏크리트 투입율에 큰 영향을 미치는 요소임을 보여주고 있다고 할 수 있다. 즉 강지보가 설치되는 경우 여굴크기와 관계없이 지보체가 숏크리트로 피복될 때까지는 숏크리트를 타설해야 하기 때문에 이 경우 숏크리트의 타설이 증가하게 되는 반면, 무지보 구간의 경우 숏크리트의 타설은 규정된 타설 두께를 준수하면 되기 때문에 숏크리트의 투입율이 상대적으로 감소할 수 있기 때문으로 분석된다.

그림 14는 여굴의 크기와 숏크리트 투입율에 대하여 보여주고 있다. 대체적으로 여굴이 증가할수록 숏크리트 투입율도 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 여굴을 최소화하는 방법이 숏크리트 투입율을 가장 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 숏크리트의 투입율은 단순하게 여굴의 크기만에 의해 결정되는 것이 아니라 위에서 언급한 바와 같이 지보패턴에도 큰 영향을 받기 때문에 이를 동시에 고려해야 할 것이다.

본 연구를 통해서 숏크리트의 투입율을 감소시키기 위한 방안으로 아래와 같은 시공 프로세스를 제안하고자 한다.



그림 14. 숏크리트 시공개선 제안

여기서, p1) 최적 발파공법 설계, p2) 막장관찰 후 안정해석, p3) 최외곽공 측량 및 마킹, p4) 천공 정확도 향상을 위한 시공기준 준수, p5) 여굴 측량

/분석 후 관리대책 수립, p6) 슛크리트 타설시 시공기준 준수, p7) 리바운드율 측정 및 관리대책 수립, p8) 천공기사/기능공 교육 실시이다.

5. 결론

본 연구에서는 00 국도 건설공사의 일부로 실시된 NATM 터널 시공현장에서 실측된 슛크리트의 리바운드, 여굴 및 투입율에 대한 분석을 실시하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 터널굴착 동안 내공측량을 통해 평균 여굴 크기 측정을 1899회를 실시하였다. 실측된 여굴은 전체 평균 28.5cm로 이는 허용 여굴의 약 260%에 해당되는 값이다.

2. 터널시공 중 실제로 타설된 슛크리트는 설계량(9703m³) 대 투입량(11304m³)으로 116.5%의 투입율을 보이고 있다. 이는 국내의 일반적인 슛크리트 투입율인 150-200%에 비해서는 대단히 양호한 값이라고 할 수 있어 슛크리트의 시공이 비교적 양호하게 관리되었음을 보여주고 있다.

3. Keyblock구간이 발생한 경우 평균 36.2cm의 여굴이 발생하였으며, 157.5%의 슛크리트 투입율이 산정되어 여굴부를 채우기 위해 다량의 슛크리트가 타설된 것을 알 수 있다.

4. 여굴의 크기는 표준지보패턴과 별다른 상관이 없는 것으로 분석되었다. 한편 슛크리트의 투입율은 표준지보패턴과 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다.

5. 여굴 크기를 감소시키기 위해서는 암반의 공학적 상태에 따라 굴착선공의 공간격을 변화시키는 것이 효율적이며 공간격을 RMR 기준으로 한 등급당 5-10cm정도씩 증가하는 것도 바람직한 것으로 분석되었다. 또한 표준지보패턴별로 허용여굴의 크기를 규정하는 현행설계기준에 강지보의 설치유무도 고려할 수 있는 방안을 수립하는 것이 필요할 것으로 분석되었다.

6. 감사의글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(과제번호#08지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 국토해양부, *국도건설공사 설계실무 요령*, 2008.
- [2] 김경훈, “터널굴착 시 천공 및 발파조건이 여굴의 크기에 미치는 영향”, *강원대학교 지구시스템공학과 석사학위 논문*, 2004.
- [3] 김양균, 김형철, 유정훈, “터널발파 작업시 여굴 저감을 위한 천공방법 연구”, *대한화약발파공학회*, 21 (2), 1-13, 2003.
- [4] 배상훈, 김대상 & 김무일, “터널에서의 여굴 저감에 대한 연구”, *대한화약발파공학회*, 23 (1), 41-46, 2005.
- [5] 이상돈, 김낙영, “여굴 최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구”, *제18회 도로기술 연구성과 발표회 논문집*, 한국도로공사, 71-109, 2001.
- [6] 이양규 & 권인환, “Shotcrete 리바운드량 감소를 위한 실험적 연구”, *대한토목학회 논문집*, 21 (4D), 499-508, 2001.
- [7] 이태노, 김동현 & 서영화, “터널굴착면 여굴 최소화를 위한 발파암 분류(안) 및 공법 개발 연구”, *대한화약발파공학회*, 20 (3), 25-38, 2002.
- [8] 이철주, “NATM 터널의 설계 및 시공과 관련된 몇 가지 생각들”, *대한토목학회지*, 56 (2), 83-87, 2008.
- [9] 임주영, 박해균, 이명섭 & 조남섭, “강섬유보강 습식 슛크리트의 리바운드 저감대책”, *한국철도학회 추계학술대회 논문집*, 2004.
- [10] 전준태 & 이양규, “습식 shotcrete 리바운드량 감소량에 대한 실험적 연구”, *대한토목학회 논문집*, 23 (1D), 89-95, 2003.
- [11] 한국도로공사, *고속도로 터널설계 실무 자료집*, 한국도로공사, 1995.
- [12] Schlumpf, J. & Höfler, J., *Shotcrete in tunnel construction*, Putzmeister AG, 2004.
- [13] The Institution of Civil Engineers, “Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground”, *ICE Design and Practice Guides*, Thomas Telford, 1996.
- [14] US Army Corps of Engineers, *Standard practice for shotcrete*, Engineer Manual, 1993.