

NATM 터널에서 합리적인 강섬유보강 슛크리트 적용방안에 관한 연구

A Study on the Reasonable Application Method of Steel Fiber Reinforced Shotcrete in NATM Tunnel

석종근¹⁾ · 안태봉[†]

Chongken Seok · Taebong Ahn

Received: May 9th, 2014; Revised: May 28th, 2014; Accepted: June 26th, 2014

ABSTRACT : Recently, the proportion of long tunnel has increased for efficient use of land due to limited land area, driving convenience and high speed. RMR and Q-System of empirical methods has been mainly used for tunnel support design in domestic. Although shotcrete is the key to NATM tunnel, the related studies are insufficient. So, steel fiber reinforced shotcrete is applied to II~V grade rocks on domestic and foreign applications. And same amount of shotcrete is equally applied to tunnel roof and wall regardless of the applied rock load. Shotcrete is applied excessively rather than the original proposed value of RMR and Q-System. Thus, this study is to reevaluate the application part of plain shotcrete and steel fiber reinforced shotcrete of tunnel in Daebo granite, and to propose the reasonable application method of steel fiber reinforced shotcrete. Field test and numerical back analysis using measurements were performed to verify stability. According to results, if RMR values are the upper class in the III grade, it can be designed in accordance with upper grade. In addition, if rock condition is good as a mountain tunnel in Daebo granite, it can be applied for plain shotcrete to III grade rocks because there is also no stability problems. And although steel fiber reinforced shotcrete is applied only crown of the tunnel in IV grade rocks, it is possible to secure stability for falling rock by key-block.

Keywords : RMR, Q-System, Plain shotcrete, Steel fiber reinforced shotcrete

요지 : 최근 제한적인 국토 조건, 차량 주행 편의 및 고속화, 국토의 효율적인 이용을 위하여 장대터널 비율이 증가하고 있다. 국내 터널 지보설계 시 RMR 및 Q-System에 의한 경험적 방법을 주로 사용하고 있으나, 슛크리트 지보재가 NATM 터널의 핵심 지보재임에도 불구하고 현재 국내에서는 이와 관련된 연구가 미흡한 관계로 주로 국내외의 터널 적용사례를 바탕으로 충분한 검증 없이 II등급 암반 조건에서부터 강섬유보강 슛크리트를 적용하고 있으며, 작용하는 하중에 관계없이 전단면에 일괄적으로 동일한 슛크리트 지보재를 적용하는 등 RMR 및 Q-System에서 제시하고 있는 기준보다 지보재를 다소 과다하게 적용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존 적용사례에 근거한 지보패턴과는 달리, 연구지역의 지질조건인 대보화강암 기반인 산악터널 조건을 고려하여 일반 슛크리트와 강섬유보강 슛크리트 적용범위를 재평가하여 암반등급별 강섬유보강 슛크리트의 합리적 적용방안을 제시하고자 하였다. 또한 현장시험시공을 통해 계속 및 역해석을 이용한 수치해석을 수행하여 안정성을 검증하였다. 현장시험시공 및 수치해석결과 RMR 값이 동일 등급 내 상위에 분포하는 경우에는 지보패턴을 상위 등급에 준하는 설계가 가능한 것으로 나타났으며, 연구지역과 같이 암반상태가 대체로 양호한 상태인 대보화강암 기반 산악터널에서는 III등급까지 일반 슛크리트가 강섬유보강 슛크리트를 대체하여도 안정성에 문제가 없고, IV등급은 천단부에만 강섬유보강 슛크리트를 적용하여도 Key-block에 의한 낙반에 대한 안정성 확보가 가능한 것으로 평가되었다.

주요어 : RMR, Q-System, 일반 슛크리트, 강섬유보강 슛크리트

1. 서론

터널지보량 결정방법은 경험적 방법, 해석적 방법, 계속에 의한 방법 등이 있으며, 현재 국내 NATM 터널에서는 주로 RMR, Q-System 및 설계·시공 사례 등에 의한 경험적 방법이 널리 사용되고 있다. 경험적 설계방법의 핵심인 RMR 암반분류법은 국내 지질조건을 정확히 반영하지 못하며, 분

류된 5개의 등급은 분류범위가 동일 등급 내 20점으로 범위가 넓고, 등급간 뚜렷한 경계를 나타내지 못하여 보수적인 평가가 이루어질 수 있다(Koo et al., 1994). 그럼에도 불구하고 NATM 터널의 주지보재인 슛크리트의 설계수준은 NATM 공법이 국내에 들어온 초기의 수준을 개선없이 답습하고 있는 상태이며, 충분한 검증과정을 거치지 않고 국내외 적용사례를 근거로한 경험적인 방법을 통해서 일괄적

1) Department of Railway Construction, Woo Song University

† Department of Railway Construction, Woo Song University (Corresponding Author : tbahn@wsu.ac.kr)

용하고 있는 실정이다. 그러므로 터널 안정성 및 경제성을 확보하기 위해 시공 중 막장면 조사(Face mapping) 및 계측 결과를 통해 보다 정밀한 RMR 암반분류를 수행하고 굴착 중 터널 주변 지반의 거동을 정량적으로 평가하여 지반특성에 맞는 합리적인 지보량 계획이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 NATM 공법에서 가장 중요한 지보재 중 하나인 강섬유보강 슛크리트의 합리적인 지보설계를 위하여 기존에 사용된 RMR을 통한 경험적 지보설계방법의 한계점을 조사하여 강섬유보강 슛크리트의 합리적인 적용방안을 제시하고자 하였다. 또한 시험시공 후 계측결과 분석 및 수치해석에 의한 안정성 평가를 통하여 제안방법의 적정성을 검증하였다.

2. 강섬유보강 슛크리트의 특성

강섬유보강 슛크리트(Steel Fiber Reinforced Shotcrete, SFRS)는 강도증가를 포함한 지보능력의 향상을 위해 기존의 일반적인 슛크리트에 철망 대신에 강섬유로 불리는 작은 금속 섬유 조각들이 첨가된 슛크리트를 지칭하며, 현재 터널 건설에 있어 선진국이라 할 수 있는 유럽 등지에서는 격자지보재와 강섬유보강 슛크리트를 터널공사 시 주된 지보재로서 병용해 사용하고 있다. 강섬유보강 슛크리트는 1970년대 초에 처음 소개되었으며, 70년대 말까지 스칸디나비아와 북미지역에서 많이 사용되었고 근래에 와서는 현장시공 및 각종 시험 등을 통해 강섬유보강 슛크리트의 우수성 및 안정성 등이 입증되면서 전 세계적으로 다시 각광을 받고 있으며, 국내에서도 널리 사용되고 있다.

강섬유를 혼입하여 타설한 슛크리트의 전단강도는 50~70 % 정도 개선되고, 인장강도나 휨강도는 20~40 % 정도

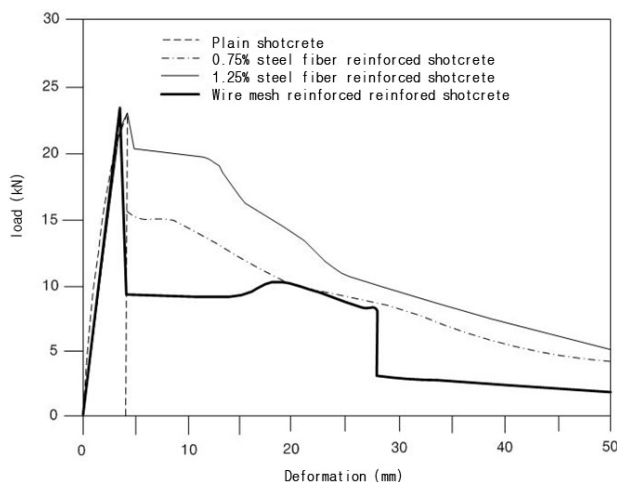


Fig. 1. Comparative evaluation of plain, mesh and steel fiber reinforced shotcrete (Marc Vandewalle, 1996)

로 증가하지만, 압축강도는 거의 개선되지 않는 것으로 보고되고 있다(Park & Son, 1998). 따라서 지보재로서 강섬유를 사용하는 것은 주로 인장강도의 증대를 목적으로 한다.

일반적인 무보강 슛크리트는 무근콘크리트와 같이 인장 응력이나 변형에 대해 취약한 측면을 보이며 취성거동을 나타내게 된다. 강섬유는 이러한 단점을 보완하기 위해 첨가되는 것으로서, 슛크리트의 균열에 대한 저항력이나 연성, 에너지 흡수성, 충격에 대한 저항력 등을 향상시키며, 무보강 슛크리트와 비교하여 볼 때 강섬유가 첨가된 슛크리트는 균열 발생율이 현저하게 낮아진다. 일반적으로 무보강 슛크리트는 철망과 함께 시공되는데, 철망이 사용된 슛크리트와 강섬유보강 슛크리트의 거동에 대한 비교·연구결과를 살펴보면 Fig. 1에 도시한 바와 같이 압축강도에 있어서는 차이가 발생하고 있지 않으나, 항복하중을 초과한 이후나 최초 균열발생 이후에는 큰 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 일반 무보강 슛크리트는 항복하중 이후 급작스런 강도저하 및 파괴형상을 보이고 있으나 철망이나 강섬유가 사용된 슛크리트는 항복 하중을 넘어선 이후에도 어느 정도의 하중 지지력 및 잔류강도를 발휘하고 있는 것으로 나타나고 있으며 강섬유가 사용된 슛크리트의 경우가 철망을 사용한 경우보다 더 탁월한 효과를 보이고 있다(한국건설기술연구원, 2003).

3. 강섬유보강 슛크리트 최적화 방안 제안

3.1 암반분류에 의한 지보재 설계방법

3.1.1 RMR에 의한 지보설계

Bieniawski(1989)는 RMR 값에 따라 Table 1과 같이 지보 선정기준을 제시하였고, 현재 국내 도로터널이나 철도터널의 표준지보패턴의 기본이 되고 있다.

Table 1에서 슛크리트 적용 시 천단부 및 측벽부에 작용하는 하중에 따라 슛크리트 두께를 다르게 적용하며, 천단부에 비해 측벽부에 슛크리트를 적게 적용할 것으로 제안하고 있다. II등급에서는 필요한 천단부에 슛크리트를 타설하고 필요한 구간에만 철망을 통해 슛크리트를 보강하고 있다. III등급에서는 천단부에 철망으로 슛크리트를 보강하고 IV등급부터 터널 전단면에 슛크리트를 보강하는 것으로 제안하고 있다.

RMR로부터 결정되는 지지하중은 Unal(1983)에 의하여 Eq. (1)과 같이 제안되었다.

$$P_v = \left[\frac{100 - R}{100} \right] \cdot \gamma \cdot B \quad (1)$$

Table 1. Guidelines for excavation and support in accordance with the RMR system (Bieniawski, 1989)

Rock mass class	Excavation	Rock bolts	Shotcrete	Steel sets
I-Very good rock RMR: 81 ~ 100	Full face, 3 m advance	Generally no support required except spot bolting		
II-Good rock RMR: 61 ~ 80	Full face, 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
III-Fair rock RMR: 41 ~ 60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50-100 mm in crown and 30 mm in sides	None
IV-Poor rock RMR: 21 ~ 40	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required
V-Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

여기서 P_v = 지지하중, B = 터널폭, γ = 암석의 단위중량, R =RMR이다.

Eq. (1)은 터널 내 작용하는 하중은 RMR에 의한 암반등급이 아니라 실제 RMR 값 자체에 따라 다르게 나타난다 (Koo et al., 1994). 예를 들어 동일 등급 내 “보통의 암반”에 속하는 RMR=60과 RMR=41 사이에는 상당한 차이를 보이기 때문에 5개의 암반 등급만으로 지보패턴을 설계하는 것은 지보량 증가를 초래하므로 보다 세밀한 지보설계가 이루어질 필요성이 있다고 판단된다.

3.1.2 Q-System에 의한 지보설계

Q-System은 6개의 변수를 이용하여 암반의 암질을 정량적인 수치로 평가한다.

6가지 변수는 ①RQD, ②절리군의 수, ③가장 불리한 절리 또는 불연속면의 거칠기, ④가장 약한 절리의 변질 또는 충전 정도, ⑤출수, ⑥응력조건이다.

위의 6개의 변수들을 3개의 그룹으로 나누어서 종합적인 암반암질 Q는 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

계산된 Q값의 범위는 0.001~1,000이다.

절리군 수가 3개 이상일 경우 Q분류의 결과로 결정되는 지보하중 P_{roof} 와 P_{wall} 사이의 관계는 Eq. (3), Eq. (4)로 계산된다(Singh & Goel, 1999).

Table 2. Wall factor (Q_w) by Q value (Barton et al., 1974)

Range of Q	Wall Factor Q_w
> 10	5.0Q
0.1 ~ 10	2.5Q
< 0.1	1.0Q

$$P_{roof} = \frac{0.2}{J_r} Q^{-1/3} \quad (3)$$

$$P_{wall} = \frac{0.2}{J_r} Q_w^{-1/3} \quad (4)$$

절리군 수가 3개 미만이면 Eq. (5)와 Eq. (6)의 관계식을 이용한다.

$$P_{roof} = \frac{0.2 \cdot J_n^{1/2}}{3 \cdot J_r} Q^{-1/3} \quad (5)$$

$$P_{wall} = \frac{0.2 \cdot J_n^{1/2}}{3 \cdot J_r} Q_w^{-1/3} \quad (6)$$

여기서 P_{roof} = 천단부 극한 지보압력, P_{wall} = 측벽부 극한 지보압력, Q_w = Wall factor이다.

Q_w (wall factor)은 Table 2와 같이 Q값의 범위에 따라 Q값에 곱해져서 구해진다.

위의 관계식에서 Q값이 0.1 미만일 경우는 천단부와 측벽부에 작용하는 지보압력이 동일하나 0.1 이상일 경우 측벽부에 천단부에 비해 작용하는 지보압력이 적음을 알 수 있다.

따라서 터널의 지보설계 시 Q값이 양호한 지반에서는 현재 국내 지보설계에서 적용하는 전단면에 동일한 슛크리트 지보설계보다는 천장부에 비해 터널 내 하중이 적게 작용하는 측벽부 구간에 지보량 축소가 가능하므로 구간별 지보재를 차등 적용하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

3.2 암반등급별 합리적인 강섬유보강 슛크리트 적용 방안 제안

국내 지보패턴 설계 시 경험적 설계방법인 RMR에 의한 지보설계를 적용하고 있으나 슛크리트 두께 결정 시 천장부와 측벽부에 동일하게 적용하고 있고 있으며, 암반등급 II등급부터 철망이나 강섬유를 통한 슛크리트를 보강하고 있는 등 지보설계 시 기준이 되고 있는 Bieniawski의 제안과는 달리 안전측 수준으로 다소 과다하게 지보재를 적용하고 있는 실정이다. 따라서 RMR에 의한 경험적 설계방법 적용 시 기존 제안값에 대한 시험시공 및 충분한 검증절차를 통해 보다 안정성과 경제성 확보가 가능한 터널 지보설계가 이루어져야 할 필요성이 있다고 판단된다.

또한 Q-System에 의한 지보설계법에서는 Q값이 양호한 지반에서는 현재 국내 지보설계에서 적용하는 전단면에 동일한 슛크리트 지보설계보다는 천장부에 비해 터널 내 하중이 적게 작용하는 측벽부 구간에 지보량 축소가 가능하므로 구간별 지보재를 차등 적용하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

본 논문은 터널 지보재인 슛크리트에 대하여 RMR 지보설계 방법을 바탕으로 국내 지반 조건 및 현장 여건을 고려하여 일반 슛크리트와 강섬유보강 슛크리트 타설범위를 재평가 하여 암반등급별 강섬유보강 슛크리트를 최적화하고, 현장시험시공을 통해 계측 및 역해석을 통해 안정성을 검증하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 국내 지반특성을 고려한 합리적인 슛크리트 적용 방안 제안은 Table 3과 같다.

터널의 효율적이고 안전한 설계를 위해 지반의 역학적 특성 및 지질구조를 파악하는 것은 매우 중요하며 설계단계에서 수행되는 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사를 통해 획득한 정보만으로 복잡한 지질변화 특성을 정확하게 예측

하기 어려우므로 본 논문에서 제시하고 있는 합리적인 강섬유보강 슛크리트 적용 방안은 현장 계측 및 막장관찰조사를 통해 지보패턴 변경이 이루어져야 할 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 낙반사고의 발생가능성이 높은 III등급은 현장조사 결과에 의해 Key-block에 의한 안정성이 우려되는 경우는 록볼트의 간격을 축소하거나 슛크리트의 두께를 두껍게 적용하고, 강섬유로 보강하는 등 추가적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

4. 현장시험시공을 통한 적용성 검증

4.1 연구지역 지형 및 지질

본 연구대상 지역은 지형학적으로 중년기의 양상을 보이며, 험준한 산악지대가 형성되어 있다. 한반도 중부의 옥천 습곡대에 해당되며, 중생대 유라기에 생성된 화강암류가 넓게 분포하고 있다. 연구지역인 ○○○터널 노선은 마그마가 지하심부에서 서서히 냉각하여 굳어 생성된 화성암인 심성암으로 분류되며, 지각운동과 같은 지질구조 작용이 적어 변성암과 퇴적암에 비하여 암질이 비교적 신선한 대보화강암으로 구성되어 있다. 또한 ○○○ 터널은 조립질 화강암, 반상 화강암, 복운모 화강암이 넓게 분포하고 있으며, 화강암의 경우 조립질로 결정이 치밀한 경우 압축강도 크고, 지반공학적 특성 또한 다소 유리한 조건을 가지고 있는데(신희순 등, 2000), 연구지역의 대보화강암류가 이에 해당될 수

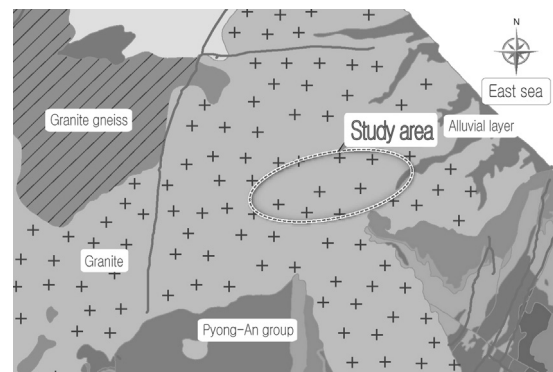


Fig. 2. Geological map (1:250,000)

Table 3. The steel fiber reinforced shotcrete optimization

Classification		I	II	III	IV		V	
					Crown	Wall	Crown	Wall
Original	Shotcrete type	P	S					
	Thickness (cm)	5	5	8	12		16	
Propose	Shotcrete type	P	P	P	S	P	S	
	Thickness (cm)	5	5	8	12	12	16	
Note		P: Plain shotcrete, S: Steel fiber reinforced shotcrete						

있다. Fig. 2는 1:250,000 지질도를 나타낸 것이다.

4.2 막장관찰 결과 분석

현장 시험시공 구간인 서원기(현) 100 km820.1~101 km031.1 까지의 구간에 대하여 굴진진행별 굴진면 조사를 통한 RMR 평가결과를 수행하였으며, I~V등급으로 암반이 분포하고 있다. II등급은 14 %, III등급은 68 %로 주를 이루고 있으나, 연구지역에 분포하고 있는 II, III등급의 암반은 각각 같은 등급 내 우수한 RMR 값을 나타내는 것으로 나타났다. 연구 지역 RMR 분포 현황은 Fig. 3과 같다.

I등급 RMR은 90이고, II등급은 68과 76의 RMR이 주로 나타나며, III등급은 57, 58, 59로 II등급인 “양호한 암반”에 가까운 값으로 같은 등급인 III등급의 암반의 RMR에 비해 상대적으로 양호하게 평가되고 있다.

Bieniawski는 “양호한 암반”과 “보통의 암반”의 범주 사이에 위치하고 있는 RMR 값 59인 경우는 설계 및 시공 초기단계에서는 보수적으로 “보통의 암반” 등급으로 지보설계를 할 것으로 제안하였다. 하지만 시공 중 안정화에 대한 문제가 없다면 점차적으로 지보량 감소가 가능하며, “양호한 암반” 등급으로 지보설계가 가능하다. 추가로 “양호한 암반”에서는 굴착이 짧은 시간에 안정화가 되면 지보재를 축소하여 비용을 절감할 것을 제안하였다(Bieniawski, 1989). 본 연구대상 지역의 대보화강암 지역은 막장관찰조사 결과 등급간 경계에 근접하게 RMR이 상당수 분포하여 Bieniawski의 제안과 같이 굴착 후 터널계측을 통해 지보패턴 상향 조정이 가능할 것으로 판단된다.

4.3 현장 시험시공

4.3.1 시험개요 및 방법

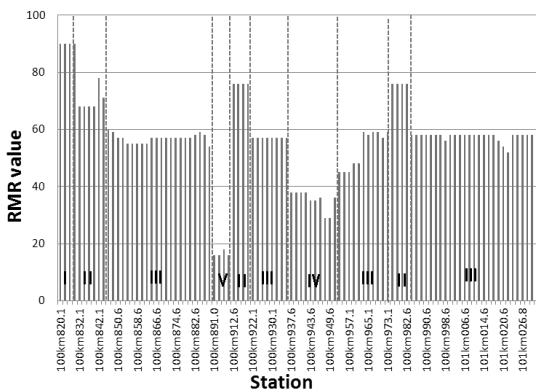
현장 시험시공은 서원기(현) 100 km820.1~101 km031.1,

연장 210 m 구간의 II, III, IV등급 구간에 대하여 수행되었으며, II등급 구간은 2개소(L=32.5 m), III등급 구간은 2개소(L=50.0 m), IV등급 구간은 하반기 1개소(L=15.0 m)에 대하여 수행하였다. 시험시공 구간의 안정성 평가를 위해 각 시험구간에 변위계를 설치하여 터널 천단 및 내공변위를 계측하였고, 일반 슛크리트 타설 후 일정기간 동안 주기적으로 터널 천단 및 좌·우 측벽구간에 대하여 균열발생구간, 균열폭, 균열깊이 등을 조사하였다. 또한 일반 슛크리트 타설구간에 대하여 압축강도(재령 1일, 재령 28일), 코아 압축강도를 통하여 슛크리트 품질을 평가하였다.

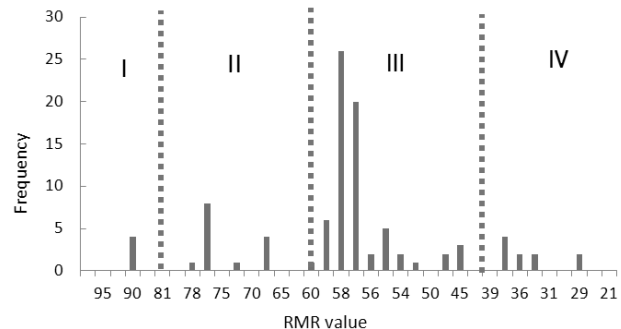
4.3.2 현장 시험시공 결과

현장에서 배합설계가 이루어진 슛크리트에 대하여 실내 시험을 통한 압축강도시험(재령 1일, 재령 28일)이 수행되었고, 일반 슛크리트 타설구간에 대하여 암반등급별 3공의 코아를 채취하여 코아압축강도 시험을 수행하여 슛크리트의 품질을 평가하였다. 또한 일반 슛크리트가 타설된 시험시공 구간에 일반 슛크리트 타설 후 일정기간 동안 주기적으로 터널 천단 및 좌·우 측벽구간에 대하여 균열발생구간, 균열폭, 균열깊이 등을 조사하여 안정성을 평가하였다. 시험 및 조사결과는 Table 4와 같다.

압축강도 시험결과 재령1일 압축강도는 10.8~12.3 MPa로 나타나 슛크리트 품질기준인 10 MPa에 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 재령 28일 압축강도는 22.4~24.1 MPa로 품질기준인 21 MPa를 모두 만족하는 것으로 나타나 연구대상 슛크리트의 품질은 양호한 것으로 평가되었다. 또한 일반스�크리트 시험타설 구간에 대한 코아 압축강도 시험 결과 18.3~24.5로 측정되어 품질기준인 17.0 MPa를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 코아 압축강도 측정결과는 압축강도시험(재령 28일)결과와 차이를 보이지 않으므로 타설된 일반 슛크리트는 충분히 품질확보가 되어있는 것으로 판



(a) Distribution of RMR by test section



(b) RMR frequency by rock grade

Fig. 3. Distribution of RMR by rock grade

Table 4. Results of strength test and crack survey at area of plain shotcrete

Field test section	Rock grade	Compressive strength (MPa)		Core Compressive strength (MPa)	Crack		
		1 day	28 day		Number	Width	Depth
100 km827.1~ 100 km844.6 100 km905.1~ 100 km920.1	II	11.6 12.0 10.8	23.2 23.5 22.4	22.2 22.5 22.2	none	none	none
100 km854.6~ 100 km888.6 100 km920.1~ 100 km936.1	III	12.3 11.6 11.9	22.5 24.1 22.5	18.3 24.5 23.2	none	none	none
100 km936.1~ 100 km951.1	IV (wall)	11.7 11.0	22.5 23.2	22.6 23.4	3 (transverse)	0.3 mm	1.0 mm

단된다.

균열조사 결과 II, III등급 구간에서는 균열이 발생하지 않았으며, IV등급 하반 구간 격자지보 설치방향으로 횡방향 균열이 3개소 발생한 것으로 나타났다. 이는 격자지보면에 슛크리트 타설두께 부족으로 인한 균열 발생으로 판단되며, 균열의 추가 진행성은 나타나지 않는 것으로 조사되었다.

그러므로 II, III, IV등급(하반) 구간에 일반 슛크리트를 타설하여도 충분한 조기강도 및 장기강도가 발현되며, 터널 내 작용하는 외력에 따른 국부적인 균열에 대한 저항성이 충분히 발휘되는 것으로 판단된다.

4.4 현장 계측결과 분석

4.4.1 계측위치별 변위 발생 현황

계측은 일반 슛크리트와 강섬유보강 슛크리트 적용구간의 터널의 변위특성을 파악하고자 기 굴진된 구간(L=1,800 m)에 대하여 수행되었다. 계측지점은 총 50개소이며, 일반 슛크리트 타설이 적용된 구간의 계측지점은 8개소이고, 강섬유 보강 슛크리트가 적용된 구간의 계측지점은 42개소이다. 각 계측지점별 측정된 최종 내공변위 및 천단침하의 크기는 Fig. 4와 같다.

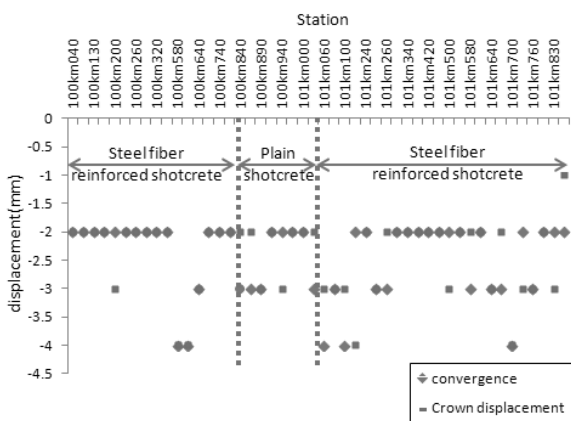


Fig. 4. Displacements by measurement location

일반 슛크리트 적용구간 및 강섬유보강 슛크리트 적용구간 모두 내공변위는 2.0~4.0 mm가 발생하여 현장 계측관리 기준치 1차(안전) 기준치 9.6 mm에 대하여 만족하는 것으로 나타났으며, 천단침하의 경우에도 1.0~4.0 mm로 기준치 12.8 mm에 대하여 만족하는 것으로 나타났다. 이것은 설치된 지보재가 변위를 일정수준으로 제어하고 있는 것으로 판단된다.

4.4.2 암반등급 및 슛크리트 조건별 경시변화 분석

스�크리트 조건별 경시변화 파악을 위해 동일한 암반등급 구간에 대하여 내공변위 및 천단침하 발생 경향 및 크기에 대하여 분석을 수행하였다. 암반등급에 따른 슛크리트 조건별 경시변화는 Table 5와 같다.

암반등급에 따른 슛크리트 조건별 경시변화 분석 결과 일반스�크리트 및 강섬유보강 슛크리트 적용구간의 동일 암반등급 내 변위는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았고, 내공변위 및 천단침하는 1.0~4.0 mm 발생하여 두 조건 모두 암반등급에 관계없이 최대변위가 계측기준치 1차(안전)에 대하여 만족하며, IV등급 구간을 제외한 모든 구간에서 굴착 후 5일 이내에 변위가 수렴하는 것으로 나타났다. 이것은 연구지역과 같이 절리상태가 양호하고 Key block에 의한 낙반의 우려가 적은 암반조건은 일반 슛크리트가 지보재로서의 역할을 충분히 발휘하고 있는 것으로 판단된다.

5. 역해석을 통한 안정성 검증

5.1 해석 개요 및 조건

본 논문에서는 강섬유보강 슛크리트를 일반 슛크리트로 대체 가능 타설 범위를 파악하기 위해 현장시험시공 구간인 암반등급 III, IV등급 구간에 대하여 수치해석을 수행하였다. 현장 계측자료를 통하여 역해석으로 주변지반 물성치를

Table 5. Shotcrete classification elapsed time by rock grade

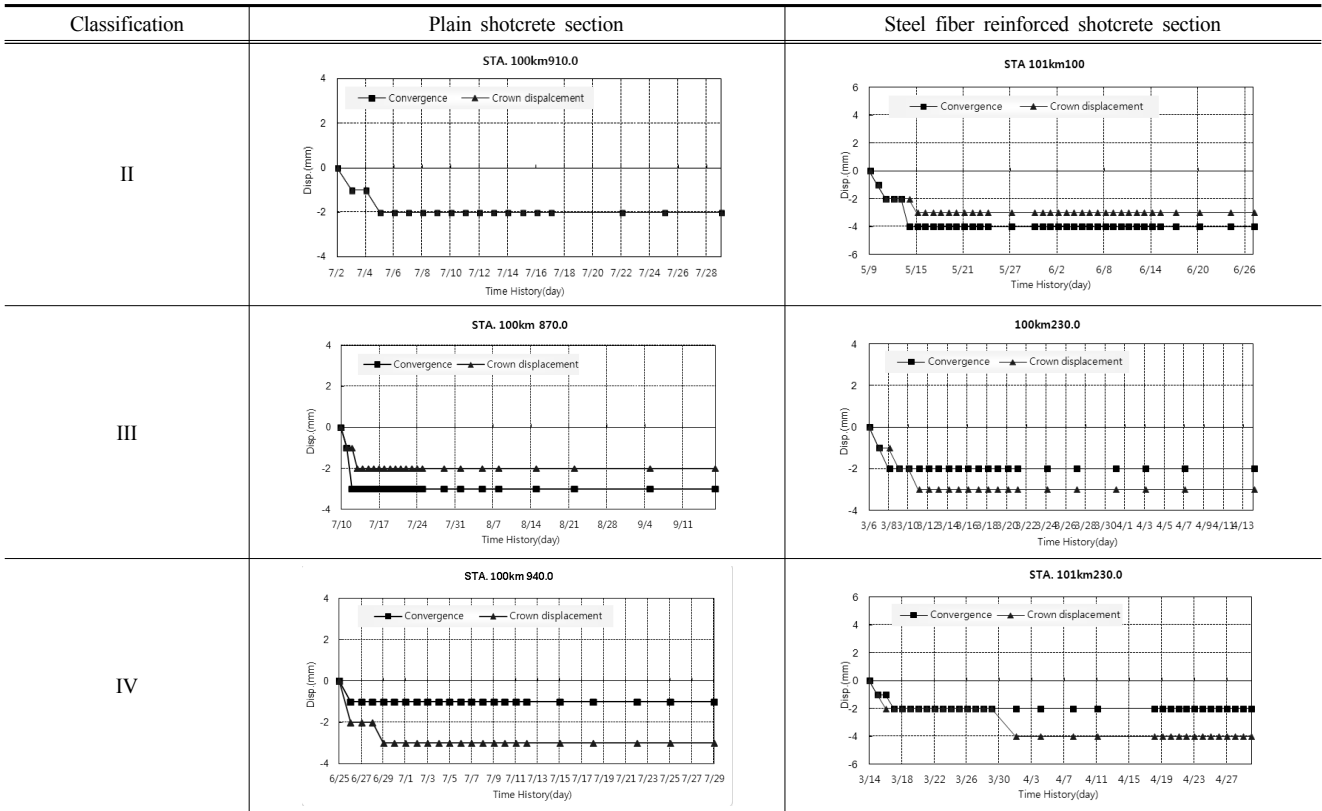


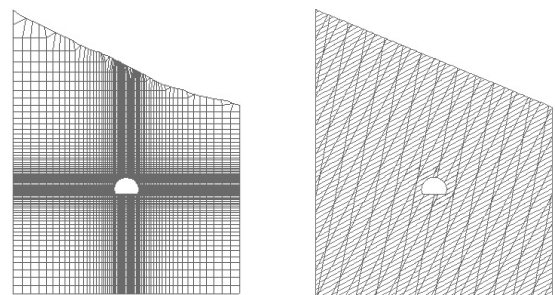
Table 6. Analysis by construction stage and load distribution factor

Construction stage	III grade		IV grade	
	Construction detail	Load distribution factor (%)	Construction detail	Load distribution factor (%)
Step-1	Initial stress	100	Initial stress	100
Step-2	Full face excavation	70	Upper excavation	55
Step-3	Soft S/C+R/B	5	Upper soft S/C+R/B	20
Step-4	Hard S/C	25	Upper hard S/C	25
Step-5	-	-	Lower excavation	55
Step-6	-	-	Lower soft S/C+R/B	30
Step-7	-	-	Lower hard S/C	15

재산정하였으며, 재평가된 물성치를 적용하여 안정성을 검토하였다. 또한 수치해석은 연속체 및 불연속체 해석을 수행하였고, 불연속체 해석은 막장관찰 결과를 활용하여 III, IV등급 암반의 절리를 고려하였다. 수치해석 시 사용된 프로그램은 연속체해석은 FLAC-2D, 불연속체해석은 UDEC-2D를 사용하였다.

터널의 형상은 현재 설계 및 시공되고 있는 표준단면도를 적용하였고 굴착 방법 및 지보설계는 III등급은 전단면 굴착, IV등급 암반은 상·하반 분할굴착하는 것으로 적용하였다. 연속체 및 불연속체 해석 모델링은 Fig. 5와 같다.

경계조건은 기존 설계 적용 및 연구 사례를 통하여 굴착 후에도 지반의 응력 및 변위 등의 결과가 일정하게 유지되는 4D로 좌우 측벽 및 하부경계를 설정하고 모델링하였다.



(a) Finite difference modelling (b) Distinct element modelling

Fig. 5. Analysis modelling

암반등급별 하중분담율은 Table 6과 같으며, 적용된 측압계수는 현장 계측결과를 통해 1.0을 적용하였다.

해석 시 적용한 지반 물성치는 지반특성상 변수가 많아 정확

한 측정은 곤란하나, 지반조사를 수행하여 얻은 결과와 계측결과를 이용한 역해석 결과를 가지고 Table 7, 8과 같이 적용하였다. 또한 수치해석 시 적용한 지반 모델은 Mohr-coulomb의 파괴조건으로 수행하였다.

5.2 해석 결과

5.2.1 연속체 해석결과

(1) **-shotcrete 휨압축응력 및 전단응력 발생 경향 분석 결과**
해석구간의 발생된 shotcrete의 휨압축응력 및 전단응력으로 안정성을 평가하였고, III, IV등급 구간의 천단부 및 측

벽부 구간별 shotcrete의 응력 발생 경향을 분석하였다. 터널 내 작용하는 shotcrete 휨압축응력 및 전단응력 검토결과는 Fig. 6과 같으며, 휨압축응력의 크기는 측벽부에 비해 천단부에서 응력이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 측벽부가 천단부에 비해 작용하는 지보압력이 적은 것으로 사료되며, Q-System에 의한 지보설계방법에서 제시한 P_{roof} 와 P_{wall} 과의 관계와 일치하는 것으로 나타났다.

(2) 변위 발생 경향 분석 결과

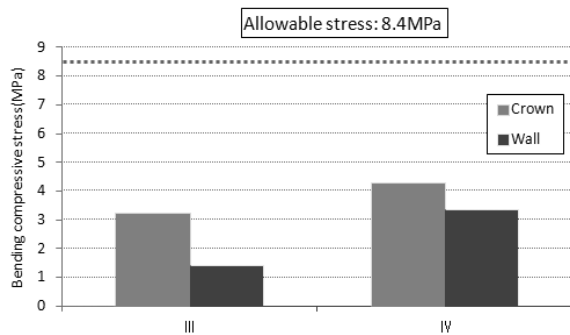
최종 굴착 시 발생 변위는 천단부 구간에서 최대변위가 발

Table 7. Input parameters of ground

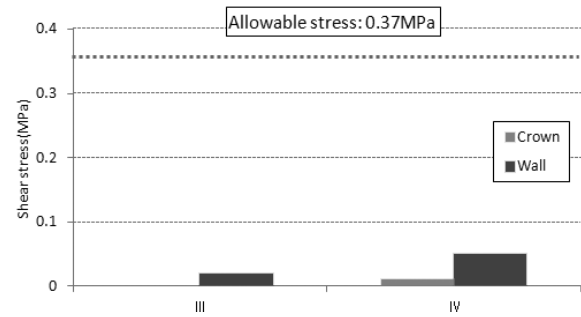
Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Poisson's ratio	Elastic modulus (GPa)
III grade	25.0	1.0	38.0	0.23	Results of inverse analysis
IV grade	23.0	0.4	32.0	0.28	Results of inverse analysis

Table 8. Input parameters of tunnel

Classification		Unit weight (kN/m ³)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Note
Shotcrete	Soft	24	-	5,000	-
	Hard	24	-	15,000	-
Rock bolt		78.5	350	210,000	-

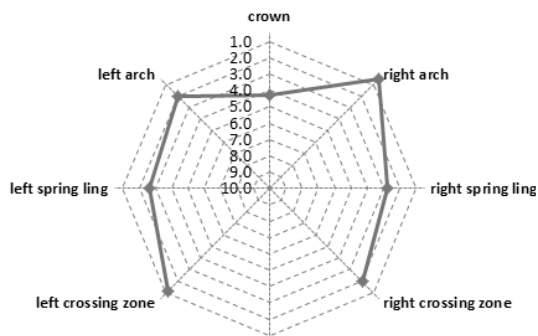


(a) Bending compressive stress

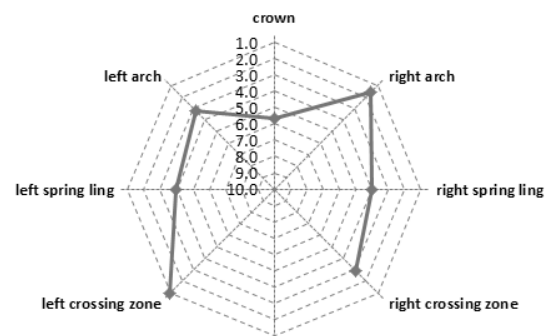


(b) Shear stress

Fig. 6. Bending compressive stress and shear stress of shotcrete



(a) Crown and convergence displacements for III grade



(b) Crown and convergence displacements for IV grade

Fig. 7. Crown and convergence displacements in tunnel

생하는 것으로 나타났고, 측벽부가 천단부에 비해 67~75 % 적게 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 현장 계측결과와 유사한 결과를 보이며, III, IV등급 구간의 터널 구간별 변위 발생 경향은 Fig. 7과 같다.

-shotcrete 휨압축응력 및 전단응력, 변위 발생 경향 분석 결과 측벽부가 천단부에 비해 응력과 변위 모두 적게 나타났으며, 이는 현재 국내에서 적용하고 있는 III, IV등급 구간 강섬유보강 shotcrete를 일반 shotcrete로 대체가 가능하다고 판단되나, RMR 값이 낮은 IV등급 구간은 지반의 불확실성 및 Key block에 의한 낙반의 우려가 발생되므로 강섬유보강 shotcrete를 적용하는 것이 터널 안정성 확보에서 다소 유리할 것으로 판단된다.

5.2.2 불연속체 해석결과

(1) shotcrete 휨압축응력 및 전단응력 발생 경향 분석

III, IV등급 구간 불연속체해석 결과 shotcrete 휨압축응력 및 전단응력 모두 허용값을 만족하는 것으로 나타났다. IV등급 구간의 shotcrete 휨압축응력은 측벽부가 천단부에 비해 다소 크게 나타났다. 이는 IV등급 측벽부 구간에 발달된 절리의 영향인 것으로 판단되나, 측벽부 구간의 응력값이 허용값인 8.4 MPa에 대하여 45 % 정도의 안전율을 확보하여 안정성은 문제가 없을 것으로 판단된다. 불연속체 해

석에 의한 shotcrete 휨압축응력 및 전단응력 검토 결과는 Fig. 8과 같다.

(2) 변위 발생 경향 분석

불연속체 해석결과 발생 변위는 III, IV등급 구간 모두 천단부 구간에서 최대변위가 발생하는 것으로 나타났고, 측벽부가 천단부에 비해 41~72 % 적게 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 현장 계측결과와 유사한 경향을 보이며, 불연속체 해석에 의한 III, IV등급 구간의 터널 구간별 변위 발생 경향은 Fig. 9와 같다.

일반 shotcrete 대체 시 III, IV등급 구간에 대한 불연속체 해석결과 IV등급 구간의 shotcrete 휨압축응력은 측벽부가 천단부에 비해 다소 크게 나타났으나 허용값을 만족하며, 전단응력 및 변위는 연속체 해석결과와 유사한 경향을 나타냈다.

6. 결 론

본 논문에서는 shotcrete 지보재 설계방법에 대하여 고찰한 후, 강섬유보강 shotcrete의 최적화 방안을 제시하였고, 그 적정성 검증을 위해 대보화강암 기반인 산악터널에서 수

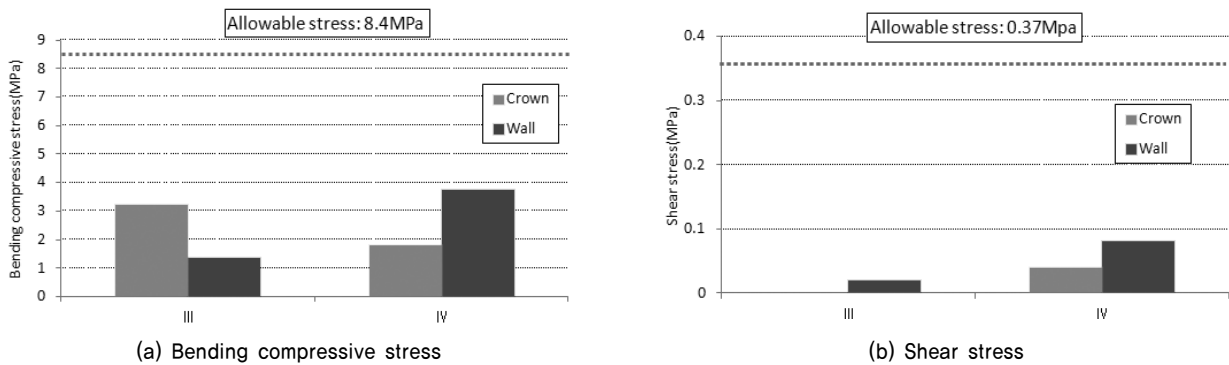


Fig. 8. Bending compressive stress and shear stress of shotcrete

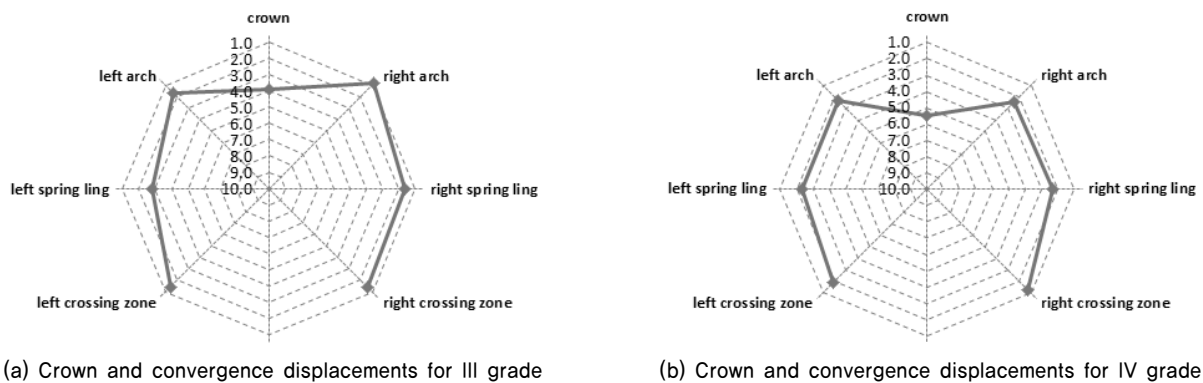


Fig. 9. Crown and convergence displacements in tunnel

행한 현장시험시공과 계측값을 활용한 수치해석 기법인 역 해석을 통하여 제안된 방법의 적정성을 확인하였다. 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내 지보패턴 설계 시 주로 적용되는 RMR 및 Q-System 은 암반상태에 따라 천단부와 측벽부에 작용하는 암반 하중에 의해 슛크리트 지보재를 차등적으로 적용할 것을 제안하고 있으며, 암반등급 III등급부터 슛크리트 보강을 제안하고 있다. 그러나 현재 지보패턴 설계는 원래의 제안내용과 달리 암반등급 II등급부터 강섬유보강 슛크리트를 적용하고, 천단부와 측벽부에 동일한 두께를 적용하는 등 다소 안전측 수준으로 지보재를 과도하게 적용하는 경향이 있는 것으로 판단된다.
- (2) RMR 암반분류는 등급별 범위가 넓고, 경계가 애매한 한계점 때문에 기존 제안자인 Bieniawski는 등급 내 RMR 값이 상위 범주 내에 위치하고 있는 구간에 대하여 시공 중 안정화에 대한 문제가 없다면 상위 등급 지보패턴에 준하여 지보재 설치가 가능하다고 제안했으나, 현재 국내에서는 RMR 암반등급에 의하여 지보패턴을 계획하고 있어, 암반상태가 양호한 구간에 대해서는 다소 안전측의 보수적인 평가가 이루어지고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 따라서 기존의 II등급 암반부터 강섬유보강 슛크리트를 적용했던 것을 I~III등급은 일반 슛크리트를 적용하며 IV등급은 천장부만 강섬유보강 슛크리트를 적용하고 측벽부는 일반 슛크리트를 적용하는 방안을 제안하였다.
- (4) 현장시험시공구간에 타설된 일반 슛크리트는 압축강도 및 코어 압축강도가 국내 설계기준에 만족하여 충분히 품질확보가 된 것으로 판단되고, 일반 슛크리트 타설구간에 대하여 주기적인 현장조사결과 슛크리트에 균열이 발생하지 않아 일반 슛크리트가 터널 내 작용하는 외력에 대한 저항성이 충분히 발휘되는 것으로 판단된다.
- (5) 암반등급에 따른 타설 슛크리트 종류별 계측 경시변화 분석 결과 일반 슛크리트 및 강섬유보강 슛크리트 적용구간의 동일 암반등급 내 변위는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았고, 굴착 후 조기에 변위가 수렴하는 등 대보화강암 기반인 산악터널에서는 III등급 암반에 일반 슛크리트가 지보재로서의 역할을 충분히 발휘하고 있는 것으로 판단된다.
- (6) 수치해석 결과 슛크리트 휨압축응력 및 변위는 측벽부

에 비해 천단부에서 크게 발생하는 것으로 나타났고, 이는 측벽부가 천단부에 비해 작용하는 지보압력이 적은 것으로 사료되며, Q-System에 의한 지보설계방법에서 제시한 P_{roof} 와 P_{wall} 과의 관계와 일치하는 경향을 나타내 상대적으로 하중이 작게 작용하는 측벽부 구간에 강섬유보강을 생략하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 비교적 암반상태가 양호한 대보화강암 기반 산악터널에서는 기존에 II등급 암반에서부터 강섬유보강 슛크리트를 적용했던 것과는 달리 IV등급부터 천장부에 적용하고, II등급과 III등급 구간은 일반 슛크리트가 강섬유보강 슛크리트 대체가 가능할 것으로 판단된다. 또한 터널 하중에 따라 천단부와 측벽부에 지보재를 차등 적용하는 것이 효율적일 것으로 판단된다. 그러나 본 연구결과는 지질 조건의 불확실성 및 암반의 역학적 거동특성의 복잡성 등의 문제로 모든 터널에 일반화하기에는 다소 무리가 있으므로 정밀한 지반조사 결과에 근거하여 적용여부를 판단해야 한다. 따라서 향후 국내 지질조건이 고려된 암반분류 방법과 그에 따른 지보패턴 설계가 이루어질 수 있도록 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

1. 신희순, 선우춘, 이두화 (2000), 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관, pp. 491.
2. 한국건설기술연구원 (2003), 국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구, pp. 567~582.
3. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, Springer-Verlag, Vol. 6, pp. 189~236.
4. Bieniawski, Z. T. (1989), Engineering rock mass classification, John Wiley & Sons, N.Y., pp. 162~169.
5. Koo, H. B., Bae G. J., Moon, H. D. and Hong, S. W. (1994), An evaluation of rock mass rating system as design aids in Korea, Journal of KGS FALL '94 National Conference. pp. 209~216 (in Korean).
6. Marc Vandewalle (1996), Dramix tunnelling the world, N. V. Bekaert S. A., pp. 121~135.
7. Park, W. J. and Son, Y. H. (1998), Mechanical properties and economic evaluation of steel fiber reinforced shotcrete, Journal of KIIS, Vol. 13, No. 2, pp. 122~129 (in Korean).
8. Singh, B. and Goel, R. K. (1999), Rock mass classification, Elsevier, Oxford, U.K., pp. 43~74.
9. Unal, E. (1983), Design guidelines and roof control standards for coal mine roof. Ph. D. dissertation, Pennsylvania State University, University Park, p. 355.