

# Tunnelling Technology

## 고성능 슛크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례



**배규진**  
정회원  
한국건설기술연구원  
국토지반연구부 연구위원



**장수호**  
정회원  
한국건설기술연구원  
국토지반연구부 선임연구원



**신휴성**  
정회원  
한국건설기술연구원  
국토지반연구부 선임연구원

### 1. 서언

고강도·고내구성의 습식 고성능 슛크리트는 1990년대부터 선진외국을 중심으로 슛크리트와 록볼트를 영구지보재로 활용하는 싱글셸(Single-Shell) 터널공법의 적용, 대단면 터널의 안정성 확보, 그리고 불리한 지반조건에서 터널의 조기안정화 등을 위하여 적용되기 시작하였다.

하지만 일반적으로 고성능 슛크리트를 싱글셸 터널공법의 용도로만 오해하는 경향이 있으나, 일본의 초고속도로인 제2동명·명신고속도로의 터널과 같은 대단면 터널에서 안정성·경제성·시공성을 확보하기 위해서 고성능 슛크리트가 적용되고 있으며, 매우 불리한 지반조건에서 종래의 슛크리트 성능으로 안정성과 시공성을 확보하기 어려운 경우에도 고성능 슛크리트가 활용되고 있다(배규진 등, 2007).

따라서 본 고에서는 고성능 슛크리트 라이닝의 첫 번째 적용분야로서 대표적인 싱글셸 터널공법인 NMT(Norwegian Method of Tunnelling)와 일본의 싱글셸 NATM에서 고성능 슛크리트의 적용 및 활용 개념에 대해 정리하였고, 두 번째로 일본의 제2동명·명신고속도로 대단면 터널에서 고성능 슛크리트가 적용된 배경을 개략적으로 소개하였다. 세 번째로 노르웨이 North Cape 터널에서 고성능 슛크리트의 적용을 통해 불리한 지반조건에서 조기안정화를 확보한 사례를 정리하였으며, 마지막으로 ITA Working Group "Shotcrete Use"에서 정리한 세계 각국의 영구 슛크리트 라이닝(Permanent Shotcrete Lining)의 적용사례를 분석하였다. 이를 통해 향후 국내에서 고성능 슛크리트를 다양한 목적으로 적용하기 위한 기본적인 참고자료를 제시하고자 하였다.

## 2. NMT

노르웨이에서 정립된 NMT는 Q시스템에 의한 지반 분류에 의해 사전에 보강량을 결정하는 실시설계 개념으로서, 고강도의 강섬유보강 슛크리트와 방부식 고성능 록볼트를 터널의 영구지보재로 적용하여 현장타설 콘크리트 라이닝을 생략하는 방법이다.(그림 1)

NMT에서는 슛크리트와 록볼트를 영구지보재로 사용하기 때문에, 고강도·고내구성의 슛크리트와 방부식 CT볼트의 적용이 필수적이다. 또한 NMT에서는 필요한 경우 현장타설 콘크리트 대신 미관이나 방·배수를 위한 마감재로써 프리캐스트 콘크리트 라이닝(PCL, Precast Concrete Lining)을 적용하고 있다.

특히 지반 조건이 불리한 경우에도 록볼트와 강섬유 보강 슛크리트 또는 RRS(Reinforced Ribs of Shotcrete)의 사용으로 기존의 현장타설 콘크리트 라이닝을 대체하고 있는 실정이다(Barton 등, 1992).

NMT는 경암 위주의 지반에 주로 적용되며 빠른 공기와 높은 경제성을 가지고 있어 노르웨이의 지반조건과 유사한 국내에도 충분한 적용성이 있을 것으로 기대되고 있다.

이와 같이 고강도·고내구성의 습식 강섬유보강 슛크리트는 NMT에서 가장 중요한 사항이다. 노르웨이에서는 1984년 이후로 철망보강 슛크리트가 습식 강섬유보강 슛크리트로 모두 대체되었다(British Tunnelling Society, 1995; Barton, 1998).

고강도의 습식 강섬유보강 슛크리트는 팽창성 점토질 지반, 암반파열(Rock Burst) 혹은 압축이 발생하는 조건에서 발생하는 지반하중을 분산시키고 굴착면을 안정시키기 위해 사용된다. 슛크리트의 두께는 지반조건에 따라 달라지며 Q값에 의해 그림 2와 같이 결

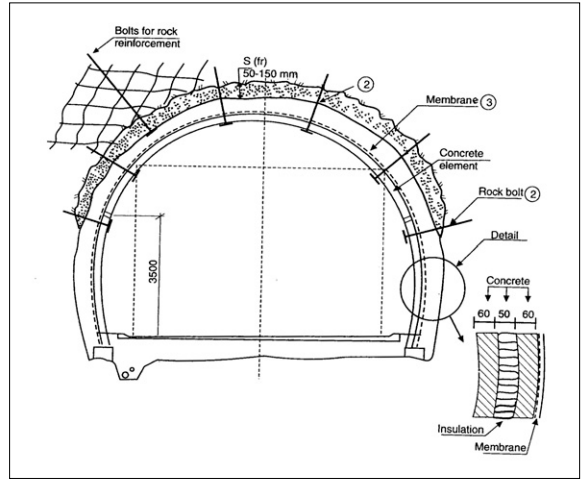
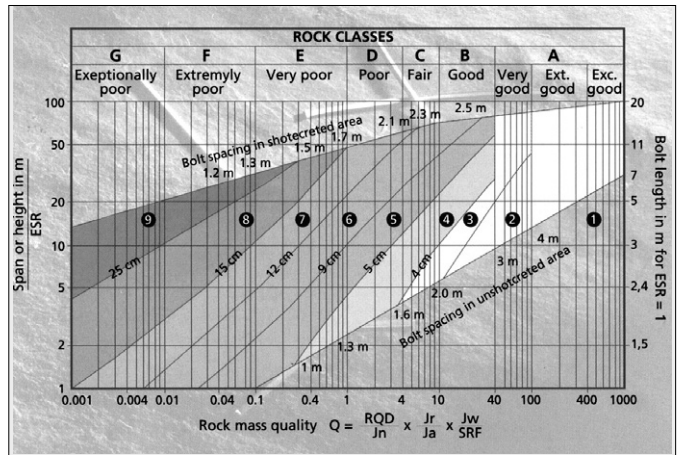


그림 1. NMT터널의 전형적인 구조



번호	NMT 표준지보패턴
①	무지보(Unsupported)
②	SB(Spot Bolting)
③	B(System Bolting)
④	B+s: 시스템볼트+두께 4~10cm의 일반 슛크리트
⑤	S(fr)+B: 강섬유보강 슛크리트(두께 5~9cm) + 시스템볼트
⑥	S(fr)+B: 강섬유보강 슛크리트(두께 9~12cm) + 시스템볼트
⑦	S(fr)+B: 강섬유보강 슛크리트(두께 12~15cm) + 시스템볼트
⑧	S(fr), RRS+B: 강섬유보강 슛크리트(두께 15cm 이상) 혹은 rib보강 슛크리트(RRS) + 시스템볼트
⑨	CCA: 현장타설 콘크리트 라이닝(Cast Concrete Lining)

그림 2. Q 시스템 분류에 의한 NMT의 표준지보패턴

고성능 숏크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례

표 1. 노르웨이의 숏크리트 강도 기준(Norwegian Concrete Association, 1992)

Characteristic (MPa)	C25 LC25	C35 LC35	C45 LC45	C55 LC55	C65 LC65	C75 LC75	C85 LC85	C95	C105
Cube Strength	25	35	45	55	65	75	85		
Cylinder Strength	20	28	36	44	54	64	74	84	94
Design Strength	16.8	22.4	28.0	33.6	39.2	44.8	50.4	56.0	61.6
Tensile Strength	2.10	2.55	2.95	3.30	3.65	4.00	4.30	4.60	4.90
Design Tensile Strength	1.40	1.70	2.00	2.25	2.50	2.60	2.70	2.70	2.70

표 2. 숏크리트와 타설 전 콘크리트 강도등급 사이의 관계

숏크리트 강도 등급	C30	C35	C40	C45	C50	C55
타설 전의 콘크리트 최소 강도 등급	C38	C43	C48	C54	C60	C65

표 3. 강섬유보강 숏크리트의 휨강도 등급

숏크리트 강도 등급	C30	C35	C40	C45	C50	C55
휨강도(MPa)	3.8	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0

정된다(Barton, 1998). 숏크리트 특성과 관련하여 지반의 변위가 크게 발생할 우려가 있을 경우에는 숏크리트의 휨강도(Flexural Strength)와 인성지수(Toughness Index)가 중요한 요소로 고려되며, 지반의 변위가 작은 경우에는 숏크리트의 압축강도가 가장 중요한 요소가 된다.

특히 노르웨이에서는 숏크리트의 영구지보재화를 위해 압축강도 기준이 1980년대의 25MPa에서 현재는 45MPa로 상향조정되었다.(표 1) 여기서 Cube Strength는 표준 양생된 15cm×15cm×15cm의 정육면체 공시체로 구한 압축강도이며, 반면 Cylinder Strength는 표준 양생된  $\phi$ 15×30cm의 원주형 공시체로 구한 압축강도를 의미한다.

또한 타설 전의 콘크리트 강도와 타설 후 숏크리트 강도 사이의 관계는 표 2와 같다(Norwegian Concrete Association, 1992).

노르웨이에서 적용되는 강섬유보강 숏크리트의 휨강도는 압축강도 등급별로 구분되며 정리하면 표 3과 같다.

노르웨이에서 사용되고 있는 습식 강섬유보강 숏크리트

의 전형적인 배합설계는 다음과 같다(British Tunnelling Society, 1995).

- 시멘트 : 450~550kg/m<sup>3</sup>
- 골재 : 1,500kg/m<sup>3</sup>(골재크기: 0~10mm)
- 실리카 폼 : 시멘트 중량의 3~10%
- 유동화제(plasticizer) : 시멘트 중량의 0.3~1.0%
- 고성능감수제(superplasticizer) : 시멘트 중량의 0.3~1.0%
- 강섬유 : 50kg/m<sup>3</sup>(길이 : 21~39mm)
- 물/(시멘트+실리카 폼) 비율 : 0.40~0.45
- 슬럼프 : 15~18cm
- 공기량 : < 4%
- 온 도 : 15~20℃

기존에는 물유리계 실리케이트 급결제를 사용하였으나, 최근 들어 조기강도 및 장기강도의 확보, 그리고 환경적인 측면을 고려하여 시멘트 중량의 6~9%로 알칼리 프리계(Alkali-Free) 급결제가 적용되고 있다.

고성능 슛크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례

표 4. 노르웨이 라에르달 터널에서의 슛크리트 배합조건

배합설계	설계사양
시멘트(CEM 42.5)	439 kg/m <sup>3</sup>
골재(크기: 0 ~ 8 mm)	1,670 kg/m <sup>3</sup>
실리카 흙(Microsilica)	30 kg/m <sup>3</sup>
고성능감수제	2.7 kg/m <sup>3</sup>
Concrete Improver	5 kg/m <sup>3</sup>
강섬유(Dramix 30/50)	44 kg/m <sup>3</sup>
물/시멘트 비	0.42
슬럼프	20 ~ 22 cm
타설두께	10 ~ 15 cm
알칼리프리게 급결제	7.5 %
리바운드	< 5 %

표 5. 노르웨이 Frøya 터널에서의 슛크리트 배합조건

배합설계	설계사양
시멘트(CEM 42.5)	480 kg/m <sup>3</sup>
골재(0 ~ 10 mm)	1,530 kg/m <sup>3</sup>
실리카 흙(Microsilica)	33 kg/m <sup>3</sup>
고성능감수제	1.8 kg/m <sup>3</sup>
Concrete Improver	5 kg/m <sup>3</sup>
강섬유(Dramix 30/50)	44 kg/m <sup>3</sup>
물/시멘트 비	0.38
슬럼프	16 ~ 17 cm
타설두께	15 ~ 25 cm
알칼리프리게 급결제	7.5 %
리바운드	5 ~ 6 %

위의 배합비에서 고강도·고내구성을 위하여 미분말 혼화재인 실리카 흙(Silica Fume)이 사용되고 있으며, 작업성을 개선하고 단위수량의 저감을 통해 슛크리트 강도를 향상시키기 위하여 유동화제와 고성능감수제가 적용되고 있음을 확인할 수 있다.

또한 최근에는 물/시멘트 비율을 0.4 이하로 하여 공극률과 투수성이 낮은 고강도 슛크리트를 배합설계하고 있다. 이러한 배합설계에 이외에도 자동화 슛크리트 타설장치와 급결제 투입을 위한 장비 노즐부의 설계가 중요하게 고려되고 있다.

NMT로 시공된 총 연장 24.5km의 세계 최장 도로터널인 라에르달(Lærdal) 터널과 연장 7km의 해저 도로터널인 Frøya 터널에서 사용된 슛크리트의 배합설계 조건은 각각 다음의 표 4 및 표 5와 같다(Melbye, 2000). 라에르달 터널의 경우에 타설 후 30분 경과시의 압축강도는 0.8~0.9MPa로서 높은 조기강도를 달성하였으며, 재령 28일의 압축강도는 약 42MPa로 나타났다. Frøya 터널에서도 조기재령 15~20분 강도가 1MPa에 달하였으며, 재령 28일에 현장 코어로 측정된 압축강도는 47MPa 이었다.

한편, 고강도 강섬유보강 슛크리트의 일반적인 타설 두께로도 지반 하중을 견디기가 불충분한 경우에는 리

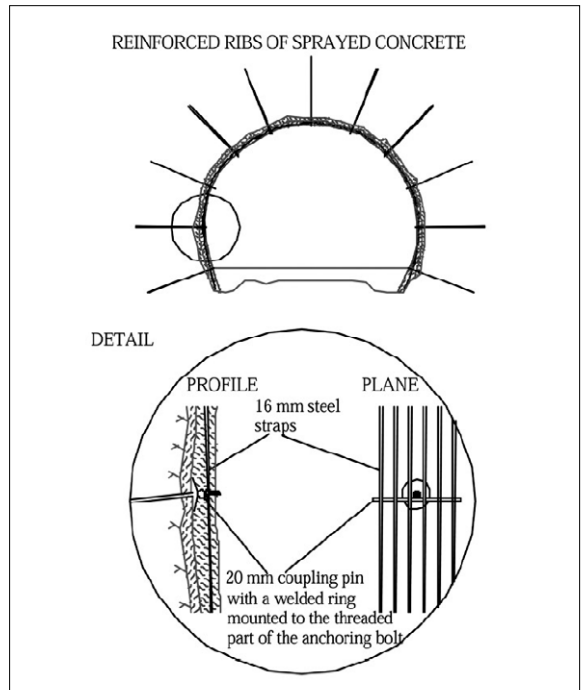


그림 3. RRS의 시공방법(Hølmøy & Aagaard, 2002)

브보강 슛크리트(RRS, Reinforced Ribs of Sprayed concrete)가 적용된다(Barton 등, 1992). 이 방법은 발파에 의해 굴착면이 불규칙하게 형성된 암반을 보강하는 경우에도 효과적이다.

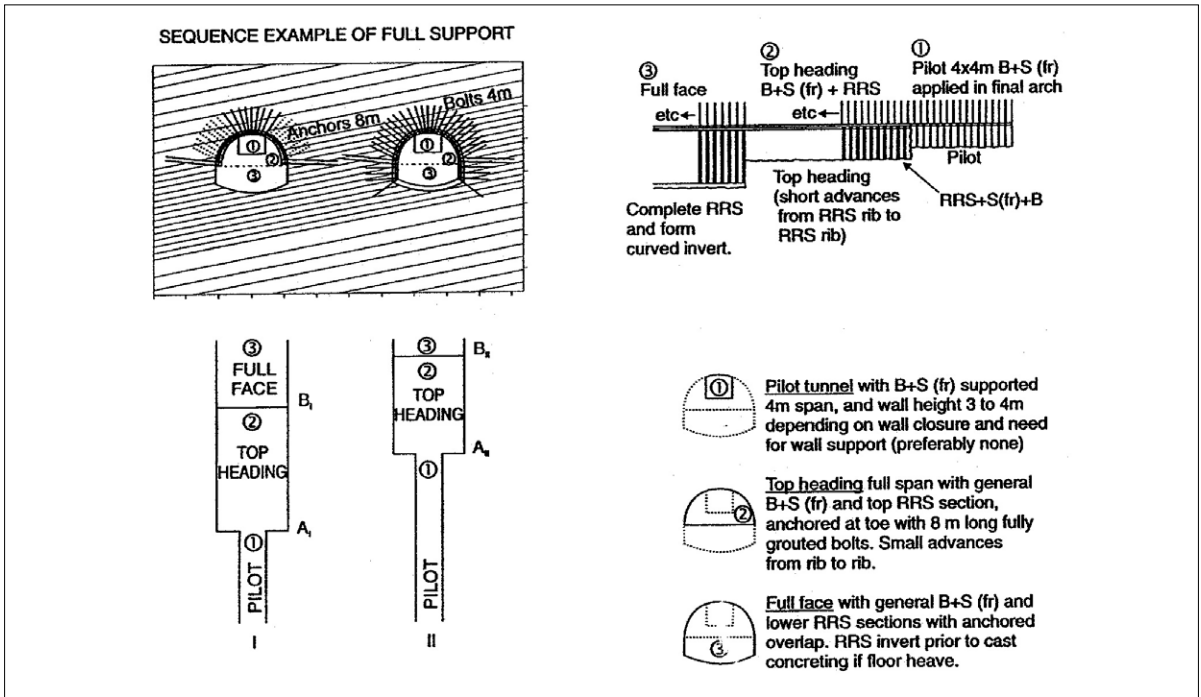


그림 4. NMT터널에서 분할굴착시 RRS의 사용예

그림 3과 같이 RRS는 철근의 두께와 간격이 필요에 따라 조정될 수 있는 신축적인 보강방법이다. Q값이 0.001에서 0.1인 매우 불량한 지반에서는 막장면에 선진시추, 공경의 변화를 관측하여 지반의 등급을 판단하는 것이 효율적이다. 강지보 대신 RRS를 사용할 경우 지반제어가 훨씬 효과적이며 슛크리트의 두께를 대폭 줄일 수 있다. 따라서 RRS는 강성이 높은 NMT용 격자지보로 고려될 수 있다. 그러나 여굴이 발생할 경우 단면 모양에 맞게 설치하기가 더 용이하며, 규칙적으로 록볼트를 추가로 설치할 수 있어 격자지보보다 몇 배 더 강성이 크게 시공이 가능하다(Barton, 1998).

Q가 0.1보다 작은 매우 불량한 지반에서는 적어도 2단 분할 굴착을 하는 것이 일반적이며 필수적이다. 이는 RRS가 상부 굴착면에서 하부 굴착면까지 연장되어 결국 인버트(Invert)까지 연결되어야 함을 의미한다. 그림

4는 하부 벤치 굴착 시 RRS의 끝부분이 충분히 정착되도록 RRS가 겹치는 부분을 8m 길이의 앵커로 보강한 예를 보여준다. 이때 이 앵커들은 하부 벤치 굴착 이전에 반드시 설치되어야 한다(Chryssanthakis 등, 1998).

### 3. 싱글셸 NATM

현행 NATM에서 슛크리트 및 록볼트 등의 지보재는 재료의 불균질성이나 부식 등과 같은 불확실한 요소를 내포하고 있어, 영구 지보재로서의 신뢰성이 확인되지 않고 있다. 따라서 일반적으로 터널구조물로서의 최종 안전을 확보하기 위하여 2차 라이닝이 설치되고 있다. 그러나 일본에서 제안된 개념인 싱글셸 NATM은 NATM과 같이 슛크리트 및 록볼트 등을 주요 지보재로

고성능 숏크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례

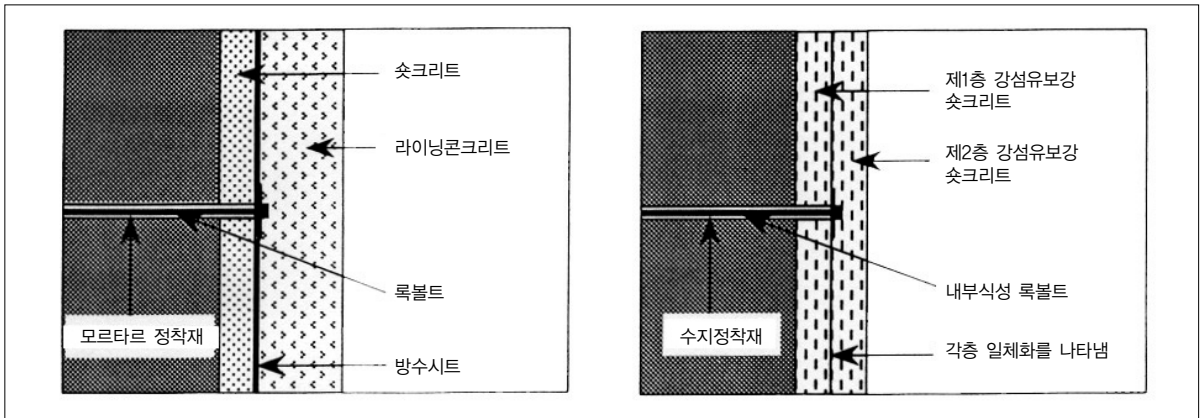


그림 5. NATM과 싱글셀 NATM에서 적용되는 지보구조의 모식도

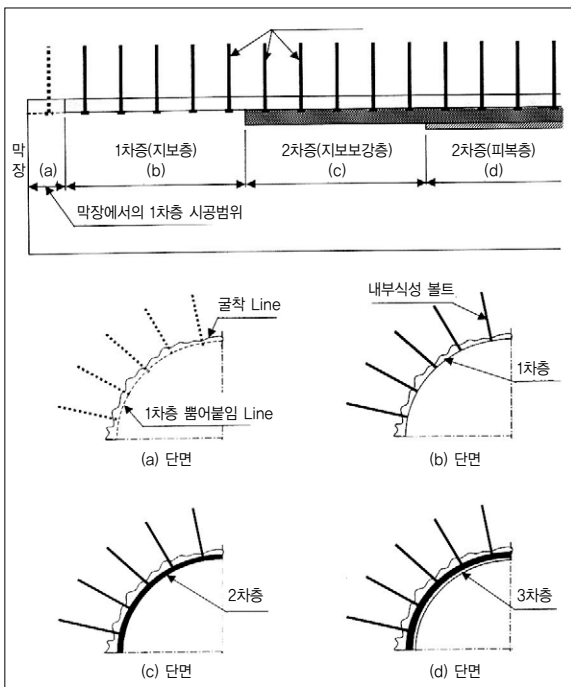


그림 6. 싱글셀 NATM의 지보구조

사용하지만, 개선된 고품질의 지보재를 사용함으로써 영구 구조물화하고 NATM에서 행하는 2차 라이닝을 생략한다는 점에서 노르웨이의 NMT와 유사한 싱글셀 터널공법이다(ジェオフロント研究会, 2001). NATM과 싱글셀 NATM에서의 지보구조를 비교하면 다음의 그림 5

와 같다.

앞서 설명한 바와 같이 싱글셀 NATM은 고품질의 숏크리트와 록볼트를 영구지보재로 사용하여 NATM의 2차 라이닝 대신 지반조건과 계측결과에 따라 여러 층의 숏크리트를 타설하여 일체화시키는 공법으로 기타 사항은 NATM과 동일하다. 싱글셀 NATM에서 사용되는 숏크리트는 지보와 라이닝 기능을 동시에 갖춘 고품질 숏크리트이어야 하며 일본에서는 노르웨이의 숏크리트 설계기준과 유사하게 적용하고 있다. 또한 록볼트는 영구 지보재로 사용될 수 있도록 고내력·내부식성의 록볼트이어야 하며 일본의 경우에는 FRP 록볼트를 적용할 것을 제안하고 있다. 일본에서는 지반등급을 6가지로 분류하고 있으며, Q 시스템을 일본 실정에 맞게 수정하여 적용하고 있다. 한편 싱글셀 NATM에서는 기존 NATM의 콘크리트라이닝 및 NMT의 PCL(Precast Concrete Lining) 등은 설치하지 않는 것을 원칙으로 하고 있다.

싱글셀 NATM의 지보구조는 그림 6과 같이 1차층(지보층), 2차층(지보보강층) 및 3차층(피복층)의 3층 구조를 기본으로 한다. 단, 지반이 양호한 경우에는 3차층을 시공하지 않는 경우도 있다. 이와 같은 싱글셀 NATM의 각 층별 목적 및 그에 따른 지보재의 요구성능을 정리하면 표 6과 같다.

표 6. 싱글셀 NATM의 각 층별 목적 및 적용 지보의 요구성능

구 분	1차층(지보층)	2차층(지보보강층)	3차층(피복층)	
시공시기	굴착직후	막장굴착 Cycle에 영향이 없는 시기(변위수렴 상황에 따라 유연하게 대응한다)	변위가 거의 수렴한 시기	
뿔어붙임의 목적	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 막장에서의 표면탈락이나 붕락을 막는다.</li> <li>② 조기에 터널의 안정성을 확보한다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 장기적인 지보의 안정성을 확보한다.</li> <li>② 용수개소는 특별히 선정하여 대처한다.</li> <li>③ 응력집중의 완화 및 공용성을 확보하기 위해 1차지보의 요철을 없애고 평탄성을 확보한다.</li> <li>④ 1차층에 시공된 록볼트의 두부를 피복한다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 전면을 피복하고 외부환경으로부터 지보층을 보호한다.</li> <li>② 지보보강층에 발생한 균열 등을 보수한다.</li> <li>③ 최종 마무리(3차층을 시공하지 않는 경우는 2차층이 최종 마무리면)</li> </ol>	
적용 지보와 목적	고품질 강섬유보강 숏크리트	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 급결제의 사용량을 최소한도로 적게하여, 장기강도와 품질의 안정화를 도모한다.</li> <li>② 물리·화학적 작용에 대해 열화가 적고, 장기간 지보 기능을 유지한다.</li> <li>③ 높은 방수성을 갖는다.</li> <li>④ 지보강성을 높여 터널 변형의 수렴에 기여시킨다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 급결제의 사용량을 최소한도로 적게하고 장기강도와 품질의 안정화를 도모한다.</li> <li>② 높은 방수성을 갖는다.</li> </ol>	
	내부식성 Bolt	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 조기에 타설하여 숏크리트와의 상호작용에 따라 지보효과를 발휘시킨다.</li> <li>② 고내력의 내부식성 Bolt의 채택으로 타설간격을 넓게하고, 시공성을 향상시킨다.</li> <li>③ 수지에 의한 전면 접착방식에 따라 조기에 지보효과가 기대된다.</li> </ol>		
압축강도	조기강도	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 재령3시간 1.0~3.0 N/mm<sup>2</sup></li> <li>② 재령1일 10.0N/mm<sup>2</sup></li> </ol>	터널이 비교적 안정한 시기에 시공하므로 높은 조기 재령강도는 필요로 하지 않는다.	높은 조기 재령강도는 필요로 하지 않는다.
	장기강도	36.0N/mm <sup>2</sup> 이상	36.0N/mm <sup>2</sup> 이상	36.0N/mm <sup>2</sup> 이상
휨인성 전단강도	질리·균열의 거동에 저항하기 위하여, 휨인성·전단강도의 높은 고품질 강섬유보강 숏크리트로 한다.			
장기내구성	물리적·화학적 작용에 대해 숏크리트 자체의 열화가 적고, 록볼트나 보강섬유의 기능이 장기간 유지할 수 있도록 보호할 기능이 필요			
부착강도	싱글 셀의 구조적인 우위성이나 박락에 대한 저항성을 확보하기 위해 암반 및 숏크리트 각 층간의 부착강도를 높일 필요가 있다.			

표 6. 싱글셸 NATM의 각 층별 목적 및 적용 지보의 요구성능(계속)

구분	1차층(지보층)	2차층(지보보강층)	3차층(피복층)
수밀성	터널의 기능성 확보와 콘크리트층의 성분 유출에 의한 열화방지를 위해 수밀성을 확보한다		
시공성	시공능력	전체 사이클에 미치는 영향이 크므로 높은 시공능력을 확보하는 것이 요구된다	
	반발률	소요품질을 확보함과 더불어 경제성 및 자원절약의 관점에서 반발율의 저감을 도모한다	
	양호한 부착의 확보	양호한 부착력이 얻어지도록 굴착면이나 뿔붙인면을 세정, 고압수세정이나 Air Flashing하여, 박리가 없게 충진성이 높은 숏크리트를 시공한다	
	작업환경의 개선	작업환경 개선의 관점에서 분진량의 저감을 도모하며 pH가 낮은 급결제를 사용함으로써 인체에 악영향을 적게 한다	

표 7. 일본 싱글셸 NATM의 고품질 강섬유보강 숏크리트 기준 (1차층 기준)

압축강도(MPa)			휨강도 (MPa)	부착강도 (MPa)
재령 3시간	재령 1일	재령 28일	재령 28일	재령 28일
1.0~3.0	10	36	4.5	0.5이상

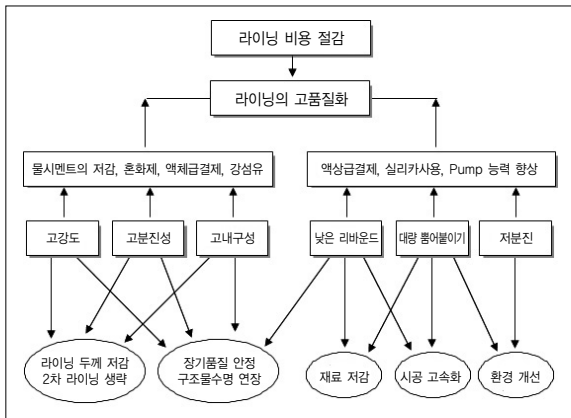


그림 7. 일본 싱글셸 NATM에서 숏크리트 라이닝의 고품질화로 인한 기대효과

이상과 같이 싱글셸 NATM에 적용되는 숏크리트는 지보와 라이닝의 기능을 함께 갖추어야 한다. 또한 각 층별로 적용되는 숏크리트의 재령 28일 강도는 36MPa로서 같지만, 적용 목적에 따라 각 층별로 요구되는 숏크리트의 초기강도 기준은 상이하다. 예를 들어 1차 지보층의 경우에는 터널의 초기 안정화를 위하여 재령 3시간 강도기준이 1~3MPa로 되어 있으나(표 7), 2차 및 3차층의 경우에는 숏크리트가 터널의 안정성이 확보된

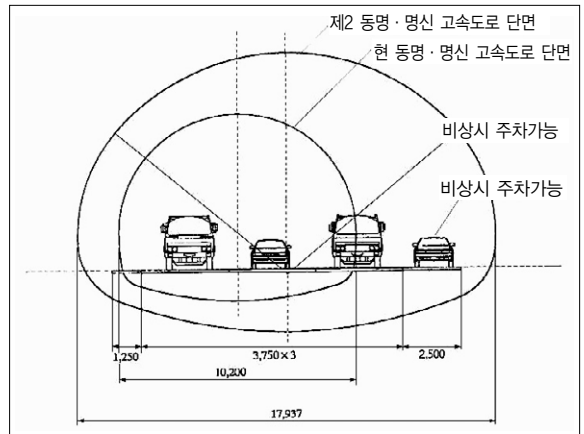


그림 8. 제2동명·명신고속도로와 기존 고속도로 터널 단면 크기 비교(이흥규 등, 2005)

이후에 타설되므로 높은 초기강도 기준 대신에 장기강도와 품질의 안정성이 더욱 중요하게 고려된다.

싱글셸 NATM에 사용되는 고품질 강섬유 보강 숏크리트는 종래의 숏크리트와 비교하여 고강도이며 강섬유로 인해 휨인성이 개선된 장기적인 품질 및 안전성의 확보를 목적으로 하고 있다. 또한 Life Cycle의 관점에서 보면, 지보능력의 향상(고강도, 고인성, 고내구성) 및 시공능률의 향상(낮은 반발률, 대량의 숏크리트 작업, 저분진)이라는 고품질화에 따라 전체 시공비의 저감효과를 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 그림 7은 싱글셸 NATM에서 사용되는 숏크리트 라이닝의 고품질화의 효과에 대한 흐름도이다.



표 8. 제2동명·명신고속도로 대단면 터널의 주된 검토사항 및 검증 내용

검토 항목	검토 목적	검증 내용
단면 형상	• 안정성과 경제성을 고려한 단면(중횡비, 형상)의 결정	• 중횡비를 0.65로 한 단면형상의 결정
지보 구조	• 안정성, 경제성, 시공성을 고려한 표준지보패턴의 결정	• 고강도 숏크리트, 고내력 록볼트, 고규격 강지보 등을 이용한 지보패턴의 검증
라이닝 구조 (인버트 포함)	• 내구성, 경제성, 시공성을 고려한 라이닝 두께 및 구조의 결정 • 인버트 시공 지반의 결정	• 라이닝두께의 검증 • 고강도화에 대한 박육화(薄肉化)의 검토 • 라이닝 구조(섬유보강콘크리트 및 철근콘크리트)의 검증 • 양질지반에 있어서의 인버트 생략에 대한 검증
굴착 공법	• 합리적인 시공법 및 분할 굴착 등의 결정	• TBM선진도강 후 확폭굴착공법, 선진공법, CD공법 등의 적용성 검증 • 시공기계, 시공법을 고려한 분할굴착의 검증
보조 공법	• 지반 상황 및 굴착 공법을 고려한 보조공법의 결정	• 천단, 막장, 각부의 효율적인 안정대책 • 용수대책의 검증
기타	• 시공 관리수법의 확립	• 품질 및 관리방법의 확인

#### 4. 일본 제2동명·명신고속도로의 대단면 터널

일본의 제2동명(東名)·명신(名神)고속도로는 설계속도 140km/h를 확보하기 위한 편도 3차선(왕복6차선)과 완만한 구배( $i=2\%$ 이하)가 주된 특징이다.

특히 제2동명·명신고속도로에서 계획·시공되고 있는 터널은 굴착 폭이 약 18m이고 굴착단면적은 약 190m<sup>2</sup>인 편평 대단면 터널로서, 기존의 일본 고속도로 터널과 비교할 때 굴착 폭은 약 2배, 그리고 굴착단면적은 약 2.5 배가 된다(그림 8). 이러한 대단면 터널을 도로구간에 시공한 사례가 없기 때문에, 굴착공법, 지보 구조, 단면 형상, 장기 안정성 등과 같은 기술적 과제들을 검토할 필요가 있었다.

이러한 기술적 과제에 대해 일본터널기술협회를 중심으로 한 위원회에서 검토가 이루어 졌고, 지질이 상이한 3개 터널에서의 시험시공을 통하여 검증을 하였다(社團法人日本トンネル技術協會, 1996; 財團法人高速道路技術センター, 2000).

제2동명·명신고속도로의 대단면 터널에 대한 주요 기술적 검토사항과 검증 내용은 다음의 표 8과 같다(財團法人高速道路技術センター, 2000).

특히 대단면 터널의 안전성, 시공성, 경제성을 향상시킬 목적으로 고강도 섬유보강 숏크리트가 중요한 지보 부재로 검토되게 되었다. 특히 대단면 터널에서 강지보 또한 대형화되기 때문에 시공이 어려우며 작업에 있어서도 상당한 위험이 발생할 수 있다. 따라서 고강도 섬유보강 숏크리트에 의한 강지보의 생략 가능성을 검토하게 되었다. 또한 종래의 숏크리트를 적용할 경우, 대단면 터널에서 숏크리트의 두께와 타설량이 증대되어 부착성의 저하, 반발률의 증가, 작업성의 저하, 시공시간의 증대 등과 같은 많은 문제점이 발생하게 된다. 이로 인해 고강도·고품질의 숏크리트를 적용하여 숏크리트를 타설 두께를 저감시킬 수 있는 가능성에 대해서도 검토하게 되었다.

이와 같은 고강도 강섬유보강 숏크리트의 제안패턴은 다음의 표 9와 같다(社團法人日本トンネル技術協會, 1996).

고성능 슛크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례

표 9. 고강도 강섬유보강 슛크리트의 제안패턴

지반등급	고강도 슛크리트 적용시의 타설두께(cm)	기존 슛크리트 적용시의 타설두께(cm)	고강도 슛크리트 적용시의 강지보	기존 슛크리트 적용시의 강지보
B	10	15	생략	H-150
C I	12.5	20	생략	H-200
C II	15	25	생략	H-200
D I	20	30	H-200	H-200
D II	20	30	H-200	H-200

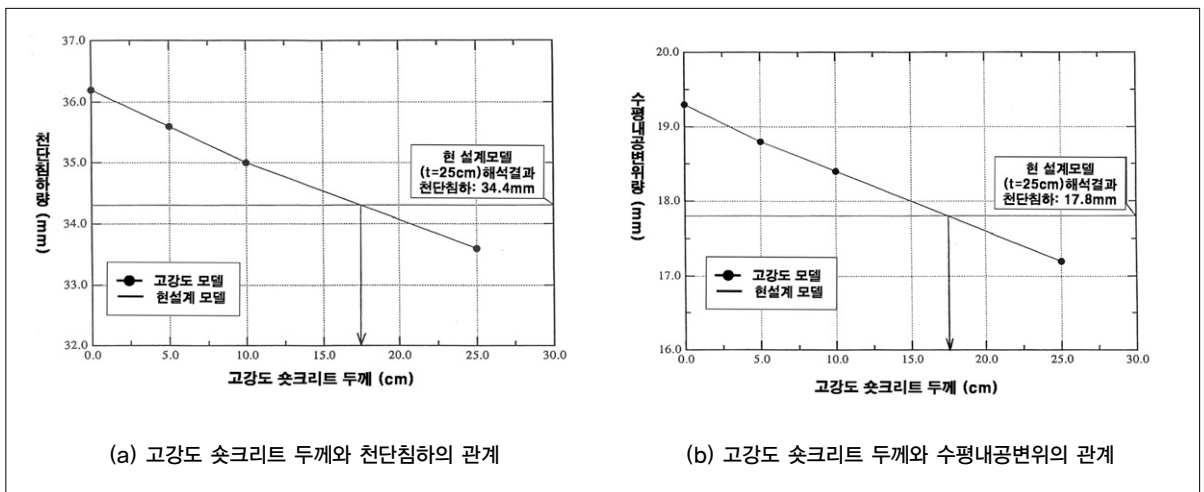


그림 9. 고강도 슛크리트의 타설 두께와 터널 변위와의 관계

표 10. 고강도 슛크리트의 설계강도 기준

종 류	1일 강도	28일 강도	비 고
고강도 슛크리트	10MPa	36MPa	2MPa(3시간 강도) 0.5~1.0MPa(부착강도)
기존 슛크리트	5MPa	18MPa	-

표 11. 강섬유보강 고강도 슛크리트의 배합조건

배합 단위	28일 강도 (MPa)	C (kg/m³)	W (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	혼화제 (%)	금결제 (kg/m³)	강섬유 (kg/m³)
기존 슛크리트	18	360	194	1,161	624	-	25.2	-
고강도 슛크리트	36	450	202.5	1,052	567	1.60	45	-
강섬유보강 고강도 슛크리트	36	450	202.5	1,114	478	1.76	48	78.5

표 12. Shimizu 제3터널에서 고강도 슛크리트와 강지보의 검증 조건

지보패턴	스�크리트	강지보공	록볼트
기존 설계 표준패턴	t = 20 cm (기존 18MPa)	H-200 (종래 SS400)	설계 내력 18 tonf L = 6.0m, @ = 1.2m
CASE 1	t = 20cm (고강도 36MPa)	H-154 (고규격 HT590/SS540)	설계 내력 18 tonf L = 6.0m, @ = 1.2m
CASE 2-1	t = 15cm (고강도 36MPa)	H-154 (고규격 HT590/SS540)	설계 내력 18 tonf L = 6.0m, @ = 1.2m
CASE 3-1	t = 20cm (고강도 섬유보강 36 MPa)	-	설계 내력 18 tonf L = 6.0m, @ = 1.2m
CASE 3-2	t = 15cm (고강도 섬유보강 36MPa)	-	설계 내력 18 tonf L = 6.0m, @ = 1.2m

이때 그림 9와 같이 지반등급에 따른 사전 수치해석 등을 통해, 기존 슛크리트 강도와 설계두께를 적용할 경우에 발생하는 변위와 동일한 변위가 발생하는 경우의 두께를 고강도 슛크리트의 설계두께로 설정하였다(社團法人日本トンネル技術協會, 1996).

이상과 같이 슛크리트의 고강도·고품질화를 통해 타설두께를 감소시켜, 휨모멘트의 발생을 억제할 수 있고 조기강도의 발현에 의해 안정성을 향상시킬 수 있으며 사이클 타임의 단축에 의해 시공성·경제성을 향상시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다. 제2동명·명신고속도로의 대단면 터널에 적용되는 고강도 슛크리트의 설계강도 기준과 대표적인 배합조건은 각각 표 10 및 표 11과 같다(財團法人高速道路技術センター, 2000). 1일 강도와 28일 강도 모두 종래와 비교하여 2배로 증대되었으며, 특히 대단면 터널의 조기 안정성을 확보하기 위하여 3시간 강도를 2MPa로 규정하고 있다.

일본도로공단에서는 대단면 터널에 대한 기본적인 굴착공법과 지보구조를 설정하고 검증할 목적으로, 清水(Shimizu)제3터널, 静岡(Shizuoka)제2터널, 栗東(Rittou)터널의 3터널에서 시험시공을 실시하였다(財團法人高速道路技術センター, 2000). 그 가운데 Shimizu 제3터널의 대표적인 지반등급인 C I에서 고강도·고품

질의 새로운 지보구조의 성능을 검증하였다.

특히 표 12와 같이 슛크리트와 강지보의 4개 조합에 대해 검증하였다. 이때 록 볼트는 당초 설계의 표준 패턴과 동일하게 적용되었다. 그리고 이 검증작업은 본 터널 굴착이 선행된 상행선에서 실시된 사항이다.

검증 결과, 어느 경우에서도 변위 및 지보재 발생응력은 큰 차이가 없었다. 예를 들어 전반적으로 고강도 슛크리트 두께에 따른 예측 결과에는 큰 차이가 없었다. 또한 강지보를 시공한 경우와 강섬유 보강 슛크리트로 대체한 경우 모두에서, 슛크리트에 발생하는 응력은 거의 같은 경향을 나타내었다. 따라서 최종적으로는 고강도의 강섬유보강 슛크리트를 적용하여 타설두께를 얇게 하면서 강지보를 생략하는 것이 가능한 것으로 판정되었다. 그리고 4개의 시험조건 가운데 암반등급 C I에서는 CASE 3-2가 가장 합리적인 지보구조인 것으로 판명되었다.

## 5. 기타 적용사례

고성능 슛크리트 라이닝은 2차 콘크리트 라이닝을 생략하는 싱글셀 터널과 대단면 터널 이외에도 불리한 지

고성능 슛크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례

표 13. 노르웨이 North Cape 터널에서의 슛크리트 배합설계 및 재령별 강도

배합설계	설계사양
시멘트(CEM I 52, 5R)	520 kg/m <sup>3</sup>
골재(0 ~ 8 mm)	1,700 kg/m <sup>3</sup>
실리카 흙(Microsilica)	25 kg/m <sup>3</sup>
유동화제(lignosulphonate계)	2.5 kg/m <sup>3</sup>
고성능감수제	4 ~ 5 kg/m <sup>3</sup>
수화제어용 혼화제	2 kg/m <sup>3</sup>
Concrete Improver	5 kg/m <sup>3</sup>
강섬유(EE 25mm)	50 kg/m <sup>3</sup>
물/시멘트 비	0.45
슬럼프	20 ~ 21 cm
타설두께	25 ~ 50 cm
알칼리프리게 급결제	8 %
반발률	8 %
재령	압축강도(MPa)
1시간	> 2
4시간	> 7
24시간	> 30
28일	> 40

반조건에서 터널의 조기 안정화를 위해 적용될 수 있다.

일례로 노르웨이 North Cape 터널에서는 시공구간의 50%가 매우 불리한 조건의 세일 구간인 관계로 많은 여굴이 발생하였고 터널의 안정성에도 큰 위협이 되었다. 이로 인해 당초에는 매 Round 마다(Round 길이는 2 m) 평균 두께 1 m 이상의 현장타설 콘크리트 라이닝을 설치하려 하였다. 하지만 두께 1 m 이상의 콘크리트 라이닝의 설치는 공사비와 공사비용 측면에서 사실상 불가능한 작업이었다. 따라서 현장타설 콘크리트 라이닝 대신 장기강도뿐만 아니라 조기강도가 향상된 평균 25 cm 두께의 고성능 슛크리트를 적용하여 성공적인 안전 시공을 실시하였다(표 13). 특히 재령 1일에 30 MPa 이상의 고강도를 달성한 점이 주지할 사항이다(Melbye, 2000).

또한 ITA WG No. 12인 "Shotcrete Use"에서는 전

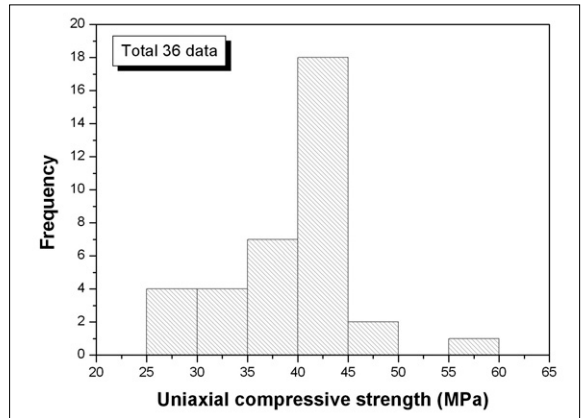


그림 10. 영구 라이닝으로 적용된 슛크리트의 압축강도 분포 (1990년 이후)

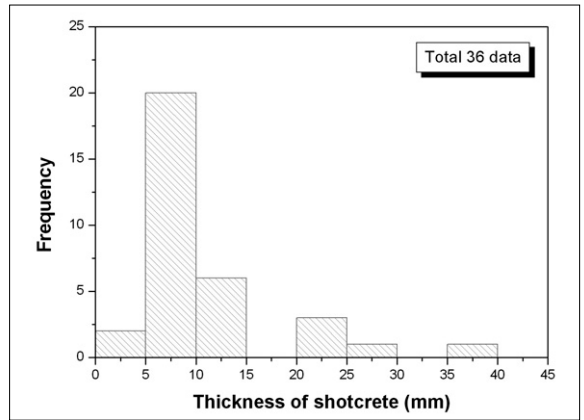


그림 11. 영구 라이닝으로 적용된 슛크리트의 타설두께 분포 (1990년 이후)

세계 주요각국의 영구 슛크리트 라이닝의 현황을 정리 하였다(Franzen 등, 2001). 여기에는 1960년부터 2001년까지 시공된 총 151개의 자료가 포함되어 있다. 본 고에서는 최근의 영구 슛크리트 라이닝 동향을 살펴보기 위하여 1990년 이후의 총 36개 자료에 대해서 분석을 실시하였다. 단, 여기서는 22개의 체코자료를 제외하였다. 그 이유는 체코에서 영구 라이닝으로 적용한 슛크리트 압축강도 기준은 모두 20MPa에 불과하며, 이로 인해 슛크리트 타설두께가 대부분 20~40cm에 달하여 타 국가의 최신 동향과는 차이를 보였기 때문이다.

## 고성능 슛크리트 라이닝 - (II) 적용 분야 및 사례

이상과 같이 분석한 결과를 정리하면 다음의 그림 10 및 그림 11과 같다. 영구 지보재로 적용된 슛크리트의 강도분포를 정리하면 그림 10과 같이 35~45MPa인 전체의 약 69%로서 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 여기서 슛크리트 강도는 재령 28일에 측정된 압축강도 또는 규정된 최소 강도기준이다. 특히 40~45MPa의 강도 범위가 전체의 50%로서 가장 큰 비중을 차지하였다. 강도가 45MPa인 이상인 경우도 일부 보고되었으나 3건에 불과하여 아직까지 45MPa 이상의 고강도 슛크리트는 일반적이지 않음을 알 수 있다. 분석된 현황 자료(Franzen 등, 2001)에 영구 슛크리트 라이닝이 적용된 지반조건이 포함되어 있지 않아 정량적이고 신뢰적인 분석은 어려우나 적용된 슛크리트 타설 두께를 개략적으로 살펴본 결과, 5~15 cm가 전체의 72%로서 거의 대부분을 차지하며, 5~10 cm가 적용 사례가 20건으로 가장 많아 전체의 약 56%를 차지하였다. 보다 상세한 내용은 ITA working group 보고서인 “Sprayed Concrete for Final Linings”을 참고하기 바란다(Franzen 등, 2001).

## 6. 결론

본 고에서는 고성능 슛크리트의 주된 적용분야인 싱글셀 터널공법, 대단면 터널, 불리한 지반조건에서 터널의 조기안정화 등에 관한 국외의 개념과 사례를 살펴보았다.

특히 싱글셀 터널공법 이외에도 대단면 터널 및 불리한 지반조건 등에서 종래의 지보재를 고성능 슛크리트 라이닝으로 대체하여 터널의 안정성과 경제성을 향상시키기 위한 사례들이 증가되고 있다. 이외에도 터널의 내구년한과 품질향상을 위해 고성능 슛크리트의 사용이 세계적인 추세임을 알 수 있다.

또한 전세계적으로 1990년부터 2001년까지 적용된 영구 슛크리트 라이닝 사례를 분석한 결과, 영구 라이닝

으로 적용되는 슛크리트의 기준강도가 35~45MPa인 경우가 전체 사례의 70% 가까이 차지하는 것으로 나타났다. 또한 지반조건에 따른 상세 분석은 어려웠으나, 영구 슛크리트 라이닝의 두께는 5~15 cm인 경우가 가장 큰 비중을 차지하였다.

신소재의 개발 등으로 인하여 근미래에는 보다 저렴하고 안전하며 작업성이 좋은 고성능 슛크리트가 널리 활용될 것이 자명하다. 특히 앞서 살펴본 바와 같이 고성능 슛크리트를 적용함으로써 얻을 수 있는 많은 장점들로 인해 싱글셀 터널을 비롯한 다양한 지반 및 시공 조건에 적용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

하지만 싱글셀 터널공법, 대단면 터널 등에서 고성능 지보재의 적용은 현재까지 각국의 실정에 적합하게 제안된 것으로서 이들 기술들을 국내에 도입하기 위해서는 충분한 사전 검토와 보완이 필요할 것이다. 또한 슛크리트 재료의 고성능화를 위해 필요한 일부 재료를 수입에 의존해야 하거나 재료단가가 고가인 관계로 고성능 슛크리트의 적용이 저해되고 있는 실정이다.

따라서 국내 실정에 적합한 고성능 슛크리트 라이닝의 적용방법과 적용분야를 사전에 상세하게 검토하고, 안정성과 경제성을 모두 확보할 수 있는 저렴한 고성능 슛크리트 재료를 개발하기 위한 노력이 필요하다고 할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 CTRM 과제인 “TT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발 - 제4세부: 급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 배규진, 장수호, 김동규, 2007, 고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준, 한국터널공학회지, 제9권 제1호, pp. 68~89.
2. 이흥규, 박석호, 김훈, 2005, 일본 제2동명·명신고속도로 터널 건설 현황, 제6차 터널 기계화 시공기술 심포지엄 논문집, 한국터널공학회, pp. 103~120.
3. 社團法人日本トンネル技術協會, 1996, 第二東名神トンネルの合理的支保構造に関する検討報告書.
4. 財團法人高速道路技術センター, 2000, 第二東名神トンネルに関する技術講演會検討講演集.
5. ジェオフロンテ研究會 シングルシェル分科會, 2001, シングルシェルトンネルのケーススタディ報告書, 日本ジェオフロンテ研究會.
6. Barton, N., 1998, Norwegian Method of Tunnelling - The Theory and Practice of NMT, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd., Bau Consultant, Nick Barton and Associates.
7. Barton, N., Grimstad, E., Aas, G., Opsahl, O.A., Bakken, A., Pedersen, L., Johansen, E.D., 1992, Norwegian method of tunnelling, WT Focus, World Tunnelling, June/August.
8. British tunnelling society, 1995, Norwegian tunnelling methods, Tunnels & Tunnelling, June, pp. 32~34.
9. Chryssanthakis, P., Barton, N., Luet, F., Dallas, A., Mitsotakis, K. 1998, Application of Norwegian Method of Tunnelling(NMT) in weak rocks in Western Greece, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 35, No. 4-5, Paper No. 129.
10. Franzen, T., Garshol, K.F., Tomisawa, N., 2001, Sprayed concrete for final linings: ITA working group report, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp. 295~309.
11. Holmøy, K.H., Aagaard, B., 2002, Spiling bolts and reinforced ribs of sprayed concrete replace concrete lining, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17, pp. 403~413.
12. Melbye, Tom, 2000, Sprayed Concrete for Rock Support, MBT International Underground Construction Group.