

고성능 숏크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

# Tunnelling Technology

## 고성능 숏크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준



**배규진**  
정회원  
한국건설기술연구원  
국토지반연구부 연구위원



**장수호**  
정회원  
한국건설기술연구원  
국토지반연구부 선임연구원



**김동규**  
정회원  
한국건설기술연구원  
국토지반연구부 선임연구원

### 1. 서론

숏크리트와 록볼트를 주지보재로 사용하여 지반의 이완을 억제함으로써 원지반의 지보능력을 최대한 활용하는 NATM(New Austrian Tunnelling Method) 개념이 본격적으로 1980년대부터 지하철 현장에 도입된 후로 숏크리트가 널리 적용되고 있다. 초창기 국내의 숏크리트 타설은 건식공법에 의해 주로 이루어져 왔으나, 숏크리트 작업환경의 개선 및 품질관리 등의 이유로 현재는 습식공법이 주로 사용되고 있다.

이러한 NATM 개념의 터널공사에서는 숏크리트와 같은 터널 지보재 이외에 2차 콘크리트 라이닝을 타설하고 있다. 콘크리트 라이닝의 적용 초기에는 구조적 역할이 아닌 시설공간 확보 및 미관확보에 주안점을 두었으나, 최근에 들어서 2차 라이닝은 장기적인 지반이완, 배수시

설의 장기적인 기능저하에 따른 잔류수압 등 장기적으로 나타나는 불확실한 요소에 대한 안전율을 증가시키도록 설계·시공되고 있다. 그러나 현재까지 이러한 콘크리트 라이닝의 설치에 따른 정확한 목적 및 타당성이 확립되어 있지 않으며, 현장타설시 공기지연, 품질관리의 문제점, 균열발생 등의 문제점을 노출시키고 있다. 또한 장기적인 터널 유지관리면에서 숏크리트 면을 감싸고 있어 터널 안전진단 및 유지보수에 지장을 초래하는 문제를 발생시키고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 최근에 국내·외에서는 콘크리트 라이닝을 타설하지 않고 숏크리트와 록볼트를 영구지보재로 적용하는 싱글셸(single-shell) 터널공법에 대한 연구가 진행되고 있다.

싱글셸 터널공법의 적용 이외에도 터널의 내구년한을 향상시키고 불리한 지반조건에서 터널의 안정성을 향상시키기 위해서 고강도·고내구성의 고성능 숏크리트가

고성능 숏크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

급속시공의 도모	시공성/경제성 향상	터널의 안정성 향상
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 양호한 지반조건에서 고강도 숏크리트에 의한 싱글셀 터널공법 적용가능</li> <li>· 3차선 이상의 대단면 터널에서 고강도/고강성 숏크리트에 의한 숏크리트 라이닝의 박육화(薄肉化)(예: 일본 제2동명·동신고속도로)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 숏크리트 라이닝의 박육화(숏크리트 두께 저감)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 타설량 감소</li> <li>→ 시공 사이클 향상</li> <li>→ 시공비 절감</li> </ul> </li> <li>· 고강도 숏크리트에 의한 터널 내구년한 향상                             <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 터널 수명향상으로 인한 경제성 증대</li> </ul> </li> <li>· 리바운드 감소에 의한 경제성 향상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 불리한 지반조건에서 산악터널공법 적용시, 고강도 숏크리트에 의한 터널 안정성 급속 확보(예: 고지압 조건, 토사지반, 도심지 주변의 고결도 낮은 지반 등)</li> <li>· 대단면 터널의 급속안정화 가능</li> <li>· 조기/장기재령에서 터널 붕괴/붕락 사고 방지</li> <li>· 터널 교차부 등 응력 집중부의 급속 안정화</li> <li>· 부착성능 향상으로 인한 숏크리트 제 기능 확보</li> </ul>

그림 1. 고성능 숏크리트의 필요성

적용될 수 있다(한국건설기술연구원, 2006). 또한 일본의 초고속도로인 제2동명·명신고속도로의 대단면 터널에서는 고성능 숏크리트를 적용하여 숏크리트 타설두께를 저감시킴으로 인해 경제성과 시공성의 향상을 도모하였다(일본터널기술협회, 1996).

이상과 같은 고성능 숏크리트의 필요성과 적용 분야를 정리하면 그림 1과 같다(한국건설기술연구원, 2006).

하지만 현재 국내에서 시공되고 있는 숏크리트의 강도나 내구성은 주지보재 또는 영구지보재로 활용하기에는 매우 낮아 숏크리트의 재료 및 배합기법에 대한 전반적인 연구가 필요한 실정이다. 또한 터널의 설계·해석시에도 지반과 숏크리트 라이닝의 상호작용을 정확하게 고려하지 못하고 있다.

따라서 본 고에서는 숏크리트의 고성능화를 위한 필수적인 숏크리트 신재료에 대한 최신 연구 및 활용 동향을 소개하였다. 또한 선진 외국에서 적용하고 있는 숏크리트의 제반 설계기준과 품질관리 시험방법들을 정리하였다.

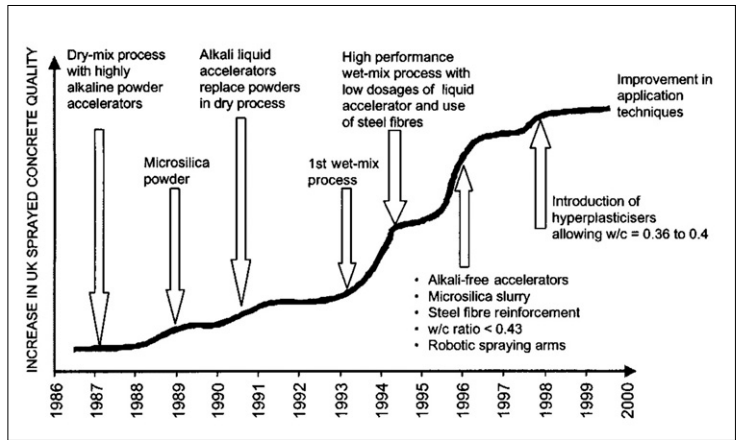


그림 2. 유럽에서 숏크리트 발전단계

이상으로부터 숏크리트 라이닝의 고성능화를 위한 기초자료와 향후 발전방향을 제시하고자 하였다.

## 2. 고성능 숏크리트의 개발 동향

1910년대에 최초로 광산에 숏크리트가 적용된 이후에 많은 발전이 이루어져 왔다. 특히 숏크리트는 과거의 목

고성능 숯크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

표 1. 전세계적인 숯크리트 적용 동향(Melbye & Dimmock, 2001)

국가/지역	건식 비중(%)	습식 비중(%)	타설량(m <sup>3</sup> /year)	최근 경향
호주	0	100	> 50,000	습식
이탈리아	0	100	700,000	습식
스칸디나비아	0	90	250,000	습식
프랑스	10	90	250,000	습식
일본	10	90	2,000,000~3,000,000	습식
스위스	10	90	300,000	습식
영국	10	90	> 50,000	습식
아시아/태평양	20	80	> 1,000,000	습식
브라질	20	80	400,000	습식
독일	20	80	500,000~1,000,000	습식
인도/네팔	20	80	300,000	습식
스페인	20	80	300,000	습식
그리스	30	70	200,000	습식
홍콩	30	70	100,000	습식
콜롬비아	40	60	200,000	습식
라틴아메리카	40	60	> 300,000	습식
중국	60	40	> 1,000,000	습식
미국	70	30	500,000	습식
오스트리아	80	20	250,000	습식

재지보(timbering)를 대체하게 되었고 이로 인하여 터널의 주지보재로서 NATM이 제안되게 한 계기가 되었다. 특히 오스트리아의 Rabcewicz 박사가 터널 지보재로서 목재지보를 숯크리트로 대체하는 “shotcrete method”를 NATM(New Austrian Tunnelling Method)로 명명하기에 이르렀다. 이로써 숯크리트는 록볼트와 함께 NATM의 주 지보부재로서 사용되게 되었다(Kovari, 2003).

최근에는 고성능 숯크리트의 개발로 인해 현장 타설 콘크리트 라이닝을 설치하지 않고 숯크리트 라이닝을 영구 지보 및 영구 라이닝으로 설치하는 각종 싱글셀 터널공법들이 제안되고 있다. 대표적인 싱글셀 터널공법으로는 노르웨이 터널공법(NMT, Norwegian Method of Tunnelling)을 들 수 있다.

재료적인 측면에서 1980년대 중반 이후 유럽의 숯크리트 발전동향을 정리하면 그림 2와 같다. 그림과 같이 국

외에서 분말형 급결제를 사용하는 건식 숯크리트는 1980년대 중반까지 사용되었으며 숯크리트의 고강도화와 고내구성화에 뛰어난 성능을 가지고 있는 마이크로실리카(microsilica), 즉 실리카 흙(silica fume)은 1980년대 후반부터 사용되었다. 1990년대 초에는 건식 숯크리트에서 분말형 급결제가 액상형 급결제로 대체되었으며 그 이후에 습식 숯크리트와 강섬유가 일반화되었다. 현재 전세계적으로 시공되고 있는 숯크리트 가운데 습식 숯크리트의 비중은 70~80%에 달하며 그 비중이 급격히 증가하고 있는 실정이다(표 1). 또한 국내보다 일찍 1990년대 중반에 알칼리프리계 급결제를 사용하기 시작했으며 실리카 흙의 사용이 일반화되었다. 1990년대 후반에는 고성능감수제의 성능이 향상되면서 물/시멘트비를 0.36~0.4까지 낮추어 숯크리트의 고강도/고내구성화를 꾀하고 있다.

국제터널협회(ITA, International Tunnelling

## 고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

Association)에서는 “Working group on Shotcrete Use”를 1989년에 설립하였으며 첫 번째 사업으로 “Shotcrete in Tunnelling - Status Report 1991”과 “Shotcrete for Ground Support: Guidelines and Recommendations - A complication”의 보고서를 작성하였다. 이들 보고서는 Franzen(1992)과 Malmberg(1993)의 논문에 잘 정리되어 있다. 첫 번째 보고서는 슛크리트의 세계적인 동향을 정리하였으며, 특히 안전성과 비용 절감 측면에서 강섬유에 중점을 두어 설명하였다. 두 번째 보고서에서는 슛크리트의 재료적인 측면에서 세계 각국의 배합설계, 품질기준, 시험방법 등의 방대한 내용이 잘 소개되어 있다. 또한 1996년에는 슛크리트가 인체의 건강과 안전성에 미치는 영향에 대한 보고서가 공개되었다(Ono, 1996). 이 보고서에는 각국의 슛크리트 현황, 분진이 인체에 미치는 영향, 분진과 관련된 각국의 기준과 지침, 분진을 감소시키기 위한 방법, 작업자를 분진으로부터 보호하기 위한 방법 그리고 이를 해결하기 위한 연구과제에 대한 수요조사가 정리되어 있다. 그 이후로 ITA working group에서는 슛크리트를 터널의 영구 라이닝(permanent lining)으로 적용하는데 필수적인 문제인 슛크리트의 내구성에 중점을 두고 있다. 이에 대해 2003년에 공개된 working group 보고서에는 슛크리트 내구성과 관련된 자료를 처리하기 위한 지침과 세계 각국에서 슛크리트를 영구 라이닝으로 적용한 151개의 사례가 정리되어 있다(Franzen 등, 2001).

1989년 설립된 유럽의 EFNARC에서는 1991년에 슛크리트 기술위원회(Sprayed Concrete Technical Committee)를 발족하였고 유럽통합기준인 “European Specification for Sprayed Concrete”를 작성하였다(EFNARC, 1996). 이 기준에는 슛크리트의 구성재료, 내구성에 대한 기준, 배합설계, 슛크리트 타설, 품질기준과 각종 시험방법 그리고 인체의 건강과 안전성에 미치는 영향 등이 제시되어 있다. 또한 1999년에는 유럽통합기준

에 대한 지침도 제시하였다(EFNARC, 1999).

프랑스의 AFTES(Association Française de Travaux en Souterrain)에서는 강섬유보강 슛크리트에 대한 권고사항을 제정하였다. 여기에서는 강섬유보강 슛크리트의 원리와 타설장비, 슛크리트 재료, 품질기준과 시험방법 등을 다루고 있다(AFTES Working group No. 6, 1996).

스�크리트와 관련된 최신 연구개발 동향은 매 3년마다 열리는 “International Symposium on Sprayed Concrete - Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support”와 역시 매 3년마다 ASCE 주최로 열리는 “International Conference on Shotcrete for Underground Support”를 통해 잘 파악할 수 있다. 이들 심포지움에서 발표된 최근 논문들을 분석해보면 슛크리트를 영구 라이닝으로 적용하는 싱글셀 터널공법, 슛크리트의 내구성, 알칼리프리게 급결제와 실리카 흙 등의 고성능 슛크리트 재료 및 최신 슛크리트 타설장비에 대한 연구가 주류를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

Garshol(1999)은 노르웨이에서 적용되고 있는 싱글셀 터널공법을 위주로 습식 슛크리트를 영구 라이닝을 적용하는 방안을 설명하였다. Pöttler & Klapperich(1999)와 Dimmock(1999)은 각각 오스트리아, 독일 그리고 영국에서 적용된 싱글셀 터널공법을 소개하였다.

또한 국내 연구와는 달리 국외에서는 1990년대 초부터 슛크리트의 내구성에 큰 관심을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다. Grønhaug(1996)는 1960년대 초반에 건설된 노르웨이의 도로터널에서 슛크리트의 열화, 누수 및 동결로 인한 손상 등을 조사하였고, Davik(1996)은 노르웨이의 해저 터널에서 슛크리트 열화현상과 강섬유 부식 등을 관찰하고 해저터널과 같은 불리한 환경조건에서는 내구성 확보를 위해 강도기준을 향상시킬 필요가 있다고 지적하였다(그림 3 및 그림 4). Reknes & Mørch(1996)은 강섬유보강 슛크리트에서 실리카이트계 급결제의 사용량이

고성능 숯크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

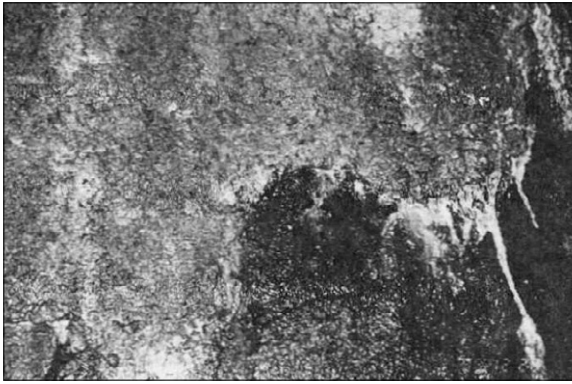


그림 3. 숯크리트의 열화현상



그림 4. 강섬유의 부식현상

내구성에 미치는 영향을 조사하였고 그 결과 급결제의 사용량이 증가할수록 동결/융해에 대한 숯크리트의 내구성은 감소하는 반면 물의 침투와 모세관 흡수작용이 증가하고 또한 균열이 더 많이 발생한다는 것을 관찰하였다. 또한 Garshol(2002)은 숯크리트의 내구성에 영향을 미치는 혼화재료들을 검토하였고 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 감수효과가 있는 혼화제는 워커빌리티를 유지하면서 40%까지 물 사용량을 줄일 수 있다. 물/시멘트비는 가장 중요한 내구성의 변수이므로 가능한 낮은 값을 사용해야 한다. 낮은 물/시멘트비는 모든 내구성 척도에 긍정적인 영향을 끼친다.
- 수화제어 혼화재료는 시멘트의 수화 그리고 강도 및 급결제와의 반응성의 감소 없이 어느 때든지 숯크리

표 2. 유럽의 숯크리트 발전 동향 및 향후 예상

변수	1980년대	2000년대	2020년대
압축강도	25 MPa	40 MPa	40 MPa
리바운드	30 %	10 %	5 %
급결제	물유리계 실리케이트 급결제	알칼리프리계 급결제	안전하고 작업성이 좋은 급결제
생산성	6 m <sup>3</sup> /hr	8 m <sup>3</sup> /hr	10 m <sup>3</sup> /hr
비용(\$)	100	125	75
인성 (round panel)	200 J	400 J	1,000 J
유해성 및 안전성	나쁨	우수	훨씬 좋음

트 타설을 가능토록 한다.

- 알칼리프리계 급결제는 시멘트 중량의 10%까지 사용할 수 있으며 급결제를 사용하지 않는 동일한 배합의 콘크리트와 비교할 때 압축강도의 감소가 거의 없다. 반면 기존 급결제 종류는 30~50%까지 강도를 감소키는 것으로 보고되고 있다.
- 양생 혼화재료(curing admixture)는 암석에 대한 접착성을 향상시킬 뿐만 아니라 모든 내구성 변수들을 향상시킨다. 각 layer간의 강도는 1.0 MPa에서 2.0 MPa로 향상된 것으로 보고되고 있다.
- 실리카 흡은 숯크리트의 밀도, 강도, 황산염에 대한 저항성을 향상시키고 공극율을 감소시킬 수 있는 혼화재료로서 널리 알려져있다. 실리카 흡과 낮은 물/시멘트비를 사용하면 숯크리트의 열화를 크게 감소시킬 수 있다.

이상과 같은 유럽을 중심으로 한 숯크리트의 발전 동향은 다음의 표 2와 같이 정리할 수 있으며, 특히 내구성을 고려하여 1980년대 이후로 숯크리트의 압축강도 기준이 40 MPa 정도로 규정되고 있다(Clements, 2002).

반면 1990년대 중반까지만 해도 국내의 숯크리트 관련 연구는 대부분 건식 숯크리트에만 중점을 두었으며 주로 강섬유 숯크리트에 대한 연구와 리바운드 측정 위주로 수

고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

행되었다. 최근 들어 슛크리트의 장기 내구성과 환경적인 측면을 고려하여 알칼리프리기 급결제와 시멘트 광물계 급결제 등과 같은 슛크리트 신재료에 대한 관심이 증대되고 있다. 또한 실리카 흙과 같은 고분말 재료를 혼입하는 경우에는 강도 특성뿐만 아니라 리바운드 감소에도 탁월한 효과가 있는 것으로 밝혀져 있음에도 불구하고, 전량 수입에 의존해야 하며 고가라는 문제 때문에 국내 적용실적이 없다. 이와 같이 현재까지 슛크리트의 고성능화를 위한 국내 연구는 외국 기술을 답습하고 있는 초기 단계에 머무르고 있는 실정이다.

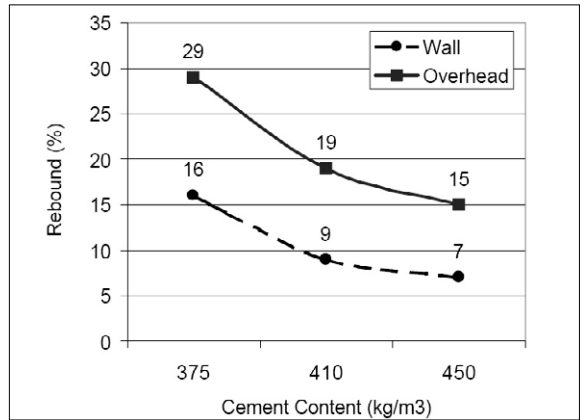


그림 5. 시멘트 사용량과 리바운드의 상관관계  
(Melbye & Dimmock, 2001)

### 3. 슛크리트의 고성능화를 위한 배합설계 및 재료

스�크리트는 고압의 압축공기에 의해 뽑아 불임 형태로 시공되기 때문에 일반적인 콘크리트와 다르다고 할 수 있으나, 슛크리트에 요구되는 제반 성능이 발현되기 위해서는 콘크리트와 마찬가지로 슛크리트를 구성하는 재료와 배합설계에 대해 세심한 검토와 분석이 필요하다.

재료적인 측면에서 슛크리트의 품질에 영향을 미치는 주요 영향인자는 다음과 같이 정리할 수 있다(Melbye & Dimmock, 2001).

- 시멘트
- 골재
- 급결제
- 첨가재(실리카 흙 등)
- 혼화재료
- 양생조건
- 섬유
- 타설장비
- 정확한 슛크리트 타설

본 장에서는 슛크리트의 고성능화를 위해 필수적인 이상의 재료적인 항목들에 대해 살펴보고자 한다.

#### 3.1 시멘트

스�크리트에 사용되는 시멘트는 사용목적을 고려할 때 초기강도가 크고 균질한 것이 요구되며 KS L 5021, EN

197, ASTM C 150, ASTM C 595 기준에 적합한 포틀랜드 시멘트가 주로 사용된다.

특히 슛크리트 강도와 내구성 규정에 부합하도록 시멘트의 종류와 사용량을 결정해야 한다. 시멘트 양은 일반적으로 건식 슛크리트의 경우 350~450 kg/m<sup>3</sup>이며 습식 슛크리트의 경우는 400~500 kg/m<sup>3</sup>이다. 초결시간은 충분한 작업성을 가질 만큼 길어야 하지만 안전한 지보재료 작용하기 위해 필요한 초기 강도 발현을 방해할 만큼 길어서는 안 된다. 일반적으로 초결은 입자 조밀도가 350 m<sup>2</sup>/kg 이상인 시멘트의 경우 1.5~3.5시간 사이이다(EFNARC, 1999).

또한 과거 초속경 시멘트를 사용할 경우, 1 m<sup>3</sup>당 재료 비용을 저감시킬 수 있다는 측면에서 유리하게 고려된 적이 있었다. 하지만 이 경우 리바운드가 크고(>30%), 분진이 많이 발생하며 시멘트 품질에 대한 민감도가 크다는 단점이 발생하게 되었다(Melbye & Dimmock, 2001). 따라서 슛크리트에 대한 초속경 시멘트의 적용은 타당하지 않은 것으로 고려할 수 있다.

스�크리트의 고성능화와 워커빌리티(workability)를 유지하고 슬럼프 로스(slump loss)를 방지하기 위해서는, 시멘트 최소 사용량은 450 kg/m<sup>3</sup>이 되어야 한다(Melbye

## 고성능 숏크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

& Dimmock, 2001). 시멘트 사용량이 작을 경우에는 물/시멘트비가 0.5 이상이 되어 품질이 떨어지며 조기 및 장기 강도가 감소하게 된다. 무엇보다도 시멘트 사용량이 감소하면 그림 5와 같이 리바운드는 급격하게 증가하게 된다. 리바운드 이외에도 시멘트 사용량이 적은 경우 물/시멘트비가 높기 때문에 급결제의 사용량이 증가한다는 문제가 있다.

### 3.2 골재

골재는 체적과 중량 측면에서 숏크리트의 주요 부분을 구성한다. 골재를 선택하는데 있어, 규정된 숏크리트 강도 이외에도 리바운드와 접착성과 같은 측면을 고려해야 한다. 골재의 형상, 크기 및 입도 이외에 조직, 습윤량, 세척방식 및 유기질 함유량 등을 고려해야 한다. 알칼리-실리카 반응이 발생할 가능성이 있는지도 조사해야 한다.

굳지 않은 숏크리트(fresh shotcrete) 및 굳은 숏크리트(hardened shotcrete)의 성능과 관련하여 골재의 품질이 매우 중요하다. 앞서 타설된 숏크리트의 손상과 리바운드를 최소화하기 위하여, 크기가 8mm 이상인 골재비율은 10%를 넘지 않아야 한다. 12mm가 넘는 골재는 노즐을 막히게 하고 상당한 리바운드를 야기할 수 있기 때문에 사용하지 않아야 한다. 이로 인해 유럽통합기준에서는 습식 숏크리트에 사용되는 골재의 최대직경을 일반적으로 8~10mm의 범위로 규정하였으며, 이는 국내에서 통상 사용되고 있는 최대골재크기보다 작다(EFNARC, 1996).

### 3.3 급결제

급결제(accelerator)는 숏크리트의 조기강도를 확보하기 위해 사용되는 혼화재로서 가장 중요한 숏크리트 재료 중의 하나이다. 그러나 급결제를 과다하게 사용하게 되면 숏크리트의 장기강도가 감소한다는 단점을 가지고 있다.

실리ケート계(silicate) 급결제는 조기강도 발현이 취약하며 리바운드와 분진량이 과다하기 때문에, 장기강도를 유지하기 위해서 알루미늄네이트계(aluminate) 급결제가 도입되었으나 pH가 약 14정도로 작업자 화상의 위험이 있다. 이와 같은 기존 급결제의 단점을 보완하는 환경 친화적인 새로운 급결제로서, 유럽에서 1990년대 중반 이후로 널리 적용되고 있는 알칼리프리계(alkali-free) 급결제와 일본에서 개발된 시멘트 광물계 분말 급결제를 들 수 있다.

알칼리프리계(alkali-free) 액상형 급결제는 조기 및 장기강도 발현이 우수하고 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 각광받고 있다. 하지만 아직까지 국내에서 시공실적이 많지 않고 비교적 단가가 높고 압송관 등에서 부식이 발생할 수 있으며, 일부 제품의 경우 용수부위에서 조기강도의 발현이 다소 늦어지는 단점들도 보고되고 있다.

한편 일본에서는 1960년대부터 강알칼리의 액상형 급결제를 사용해 왔으며 그 후 시멘트 광물계(calcium aluminate 또는 calcium sulfo-aluminate)의 분말형 급결제가 개발되어 1980년대부터 분말형 급결제에 대한 사용 비율이 점차 증가하고 있다. 시멘트 광물계 급결제는 시멘트 중에 존재할 수 있는 급결성 광물을 별도로 합성하여 분쇄한 분말형 급결제로서 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이기 때문에 특수시멘트가 발달한 일본에서는 급결제 시장의 90% 이상을 점유하고 있다(Ishida 등, 2002). 시멘트 광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 강하기 때문에 용수부위에서 숏크리트 타설이 용이하며 장기강도의 손실이 극히 적다는 점이다. 이러한 장점에 의해 리바운드량의 감소와 함께 장기 강도를 높이기 위해 시멘트량을 절감할 수 있다. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 pH특성을 보이고 있어 환경오염 및 유해성이 적으며 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화가 적어 현장에서 숏크리트의 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 광물계 급

고성능 숯크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

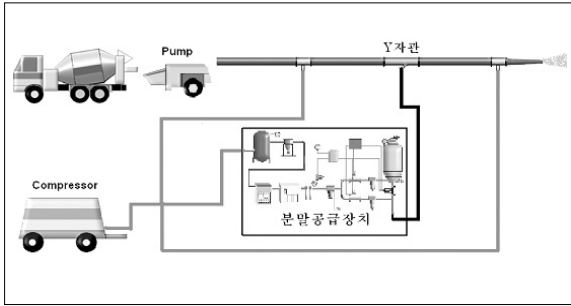


그림 6. 시멘트광물계 급결제 공급 시스템

결제는 분말이기 때문에 현재 사용되는 액상급결제의 시공장비로는 시공이 힘들며 그림 6과 같은 별도의 분말 전용 공급장치를 필요로 한다(배규진 등, 2004b).

EFNARC(1996)에서는 액상형 급결제의 최대 사용량을 시멘트 중량의 8%로 규정하고 있으며, 20% 이상의 강도 감소를 허용하지 않고 있다. 하지만 아직까지 국내에서는 급결제 사용량에 대한 규정이 마련되어 있지 않은 실정이다.

### 3.4 첨가제

숯크리트에 사용되는 첨가제(additive)로는 숯크리트의 고강도·고내구성화를 위해 사용되는 실리카 흙을 대표적인 사례로 들 수 있다.

일반적으로 분말 형태가 많으며 실리카 흙, 메타카올린(metakaolin), 고로슬래그(ground granulated blastfurnace slag), 플라이애쉬(fly ash), 기타 실리카질 혼화재 등이 포함된다. 이들 첨가제는 표 3과 같이 서로 다른 특성을 가지고 있다.

시멘트뿐만 아니라 이상의 첨가제도 결합제(binder)에 포함되므로 EFNARC(1999)에서는 표 4와 같은 K 요소를 고려하여 숯크리트의 혼화재의 사용량을 계산할 것으로 추천하고 있다.

예를 들어 시멘트 외에 첨가제로서 플라이애쉬와 실리카 흙을 사용하고 급결제 사용량이 5%인 경우(1 m<sup>2</sup>당),

표 3. 숯크리트 혼화재의 입자크기, 비표면적 및 형상

혼화재	평균입자크기 (μm)	비표면적 (m <sup>2</sup> /g)	입자형상
Carbon black	0.05	44	구형
실리카 흙	0.10	20	구형
고반응성 메타카올린	< 2.5	10	판상
플라이 애쉬	10	0.5	구형
시멘트 (비교대상)	50	0.3	엷은 조각모양

표 4. 숯크리트 혼화재 사용량 계산시 각 결합제별 K 요소

Binder	K 요소
시멘트	1
실리카 흙	2(사용량 < 8%) 1(사용량 < 8~15%)
플라이애쉬	0.5
고로슬래그	0.5

표 5. 숯크리트 혼화재의 최대 사용량(중량비)

혼화재	최대 사용량
실리카 흙	15% × 포틀랜드 시멘트 30% × 포틀랜드 시멘트
플라이애쉬	15% × 포틀랜드/플라이 애쉬 시멘트 20% × 고로슬래그 시멘트
고로슬래그	30% × 포틀랜드 시멘트

시멘트 300 kg(K 요소: 1) = 급결제 15.0 kg  
 플라이애쉬 100 kg(K 요소: 0.5) = 급결제 2.5 kg  
 실리카 흙 20 kg(K 요소: 2) = 급결제 2.0 kg  
 가 되어 숯크리트에 사용되는 급결제의 총 사용량은 19.5 kg/m<sup>2</sup>로 계산된다.

또한 혼화재의 사용량은 표 5에 규정된 비율을 넘지 않도록 추천된다(EFNARC, 1999).

#### 3.4.1 실리카 흙

실리카 흙은 실리콘 금속이나 실리콘 합금의 제조과정에 사용되는 전기 아크 용광로에서 나오는 산업부산물로서 무



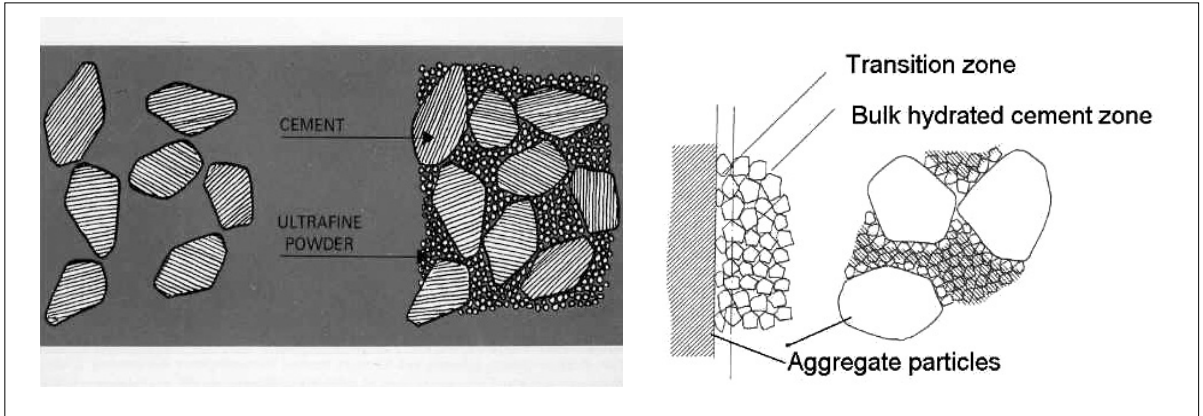


그림 7. 실리카 흙으로 인한 콘크리트 개선 효과

정질 상태의 실리카를 80% 이상 함유하고 있으며 매우 미세하면서도 구형의 입자인 고도의 포졸란성 재료이다.

실리카 흙의 화학조성은 실리콘 함금의 종류에 따라 다른데  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 많으며 대부분 비정질로 되어 있어서 알칼리 용액 중에서 쉽게 용해되는 특징이 있다. 실리카 흙의 입자 크기는 시멘트 입자의 1/25 정도로 미세하기 때문에, 시멘트 입자의 공극을 충전하는 마이크로 필러(micro-filler) 효과가 있으며, 또한 입자 모양이 구형으로 되어 있어서 볼 베어링 역할을 하기도 한다(그림 7).

양질의 실리카 흙을 사용하고 적절한 배합, 타설, 양생을 실시하면 실리카 흙의 포졸란 반응은 수화초기부터 시작되어 공극 충전 효과에 따른 강도 증진과 투기/투수성을 감소시키므로 콘크리트의 각종 물리적, 역학적 성질을 시킬 수 있다. 그러나 실리카 흙을 콘크리트에 다량으로 사용하면 일반적으로 동일한 반죽질기를 얻기 위해 단위수량이 증가하기 때문에 여러 가지 나쁜 영향을 끼쳐 초기 균열을 발생시키기도 하고 실리카 흙을 혼합한 경우 블리딩이 작기 때문에 보유수량이 많게 되어 결과적으로 건조수축이 크게 되므로 고성능 감수제(super-plasticizer)를 사용한 경우 균열발생이 크기 때문에 사용시 주의가 필요하다.

숏크리트에서 실리카 흙의 일반적인 사용량은 시멘트

중량의 3~10%로 보고되고 있으나 EFNARC에서는 포트랜드 시멘트의 건조중량비로 3~8%를 사용할 것을 추천하고 있다. 더 많은 양을 사용할 경우에는 숏크리트의 수축을 최소화하기 위한 주의가 필요하기 때문이다. 또한 다음의 표 6과 같은 조건을 만족할 것을 제시하고 있다(EFNARC, 1999). 특히 사용량에 따라 굳지 않은 콘크리트의 작업성이 변화하므로 사전에 충분한 시험을 거친 후 최적을 사용량을 결정해야 한다.

실리카 흙은 숏크리트의 최상의 품질을 얻는데 있어 많은 장점을 가지고 있으나, 조밀성으로 인해 실리카 흙을 분산시키기 위해 항상 높은 비율의 유동화제나 고성능감수제를 사용하는 것이 필수적이다. 실리카 흙을 사용하지 않는 숏크리트와 비교할 때 혼화재료의 첨가량이 대략 20% 정도 증가하는 것으로 보고되고 있다(Melbye, 2000). 또한 실리카 흙의 생산에 전력이 많이 소요되므로 인해 경제적인 측면에서 국내 생산이 어려운 실정이다. 상대적으로 전력비용이 저렴한 북유럽, 체코 또는 이집트에서 생산된 제품을 전량 수입하고 있어 비용이 고가이다. 이상과 같이 숏크리트의 성능에 미치는 실리카 흙의 장, 단점을 정리하면 표 7과 같다(배규진 등, 2004a).

### 3.4.2 메타카올린

고성능 숯크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

**표 6. 숯크리트용 실리카 흙에 대한 추천사항**

특징/규정	출처
추천 사용량(습식) 3~5%(터널 지보) 4~8%(영구지보로서 PFA 시멘트와 사용할 경우) 6~10%(영구지보로서 포틀랜드 또는 SR시멘트와 사용할 경우) 8~13%	노르웨이 콘크리트 협회(1992) 노르웨이 콘크리트 협회(1992) 노르웨이 콘크리트 협회(1992) Morgan(1992)
사용량의 허용 한계(습식): 3~15% 표면적: $\geq 1,800 \text{ m}^2/\text{kg}$ (densified) 표면적: $\geq 1,200 \text{ m}^2/\text{kg}$ (BET) 입자크기: 평균 0.2 micron SiO <sub>2</sub> 함유량: $\geq 85\sim 90\%$ 탄소 함유량: $\leq 5\%$ 총 알칼리: $\leq 1\%$ 용해성 SO <sub>3</sub> : $\leq 1\%$ 연소손실: $\leq 4\%$ 염화물 함유량: $\leq 0.1\%$ 자유 CaO: $\leq 1.0\%$ 수리 유효성(hydraulic effectiveness): 100% 활동지수(activity index): $\geq 95\%$ (재령 28일)	노르웨이 콘크리트 협회(1992) SANCOT(1991) EFNARC(1992) 노르웨이 콘크리트 협회(1992) SANCOT(1991), EFNARC(1992) SANCOT(1991) SANCOT(1991) 오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC(1992) EFNARC(1992) EFNARC(1992) 오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC(1992)

**표 7. 숯크리트 성능에 대한 실리카흙의 장·단점**

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>① Pumpability의 향상</li> <li>② 접착성이 향상되어 급결제 사용 감소</li> <li>③ 각 layer 사이의 접착강도 증가</li> <li>④ 강도 및 내구성 증가</li> <li>⑤ 알칼리-골재반응에 대한 저항성 향상</li> <li>⑥ 투수계수의 감소</li> <li>⑦ 리바운드의 감소</li> <li>⑧ 황산염에 대한 저항성 향상</li> <li>⑨ 강섬유의 조기 혼합</li> <li>⑩ 강섬유의 리바운드 감소</li> <li>⑪ 시멘트 기질과 강섬유 사이의 접착성 향상</li> <li>⑫ 해수에 대한 저항성 향상</li> <li>⑬ 굳지 않은 콘크리트의 재료분리 저항성 증진</li> <li>⑭ 굳지 않은 콘크리트의 블리딩(bleeding) 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 사용량에 따른 작업성의 변화가 발생하므로 일정한 작업성을 확보하기 위하여 적정량의 유동 화제 또는 고성능감수제를 사용해야 함</li> <li>② 타설후 양생과정에서 수축이 발생할 수 있으므로 주의해야 함</li> <li>③ 매우 미세한 미립자이므로 장시간 작업시에 방진 마스크를 반드시 착용</li> <li>④ 국내 생산이 이루어지 않고 있음</li> <li>⑤ 고가의 단가</li> </ul>

오늘날까지 콘크리트의 성능을 향상시키기 위해 사용되는 포졸란 재료는 플라이 애시, 슬래그, 실리카 흙과 같은 산업 부산물이 주를 이루어왔다. 그러나 그 출처에 따

라 각각의 재료는 그 성능이 약간씩 다를 수가 있다. 이에 비해 메타카올린은 다른 광물질 혼화재와는 달리 양호한 관리 통제에 의해 생산되기 때문에 물리·화학적 특성에

고성능 숏크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

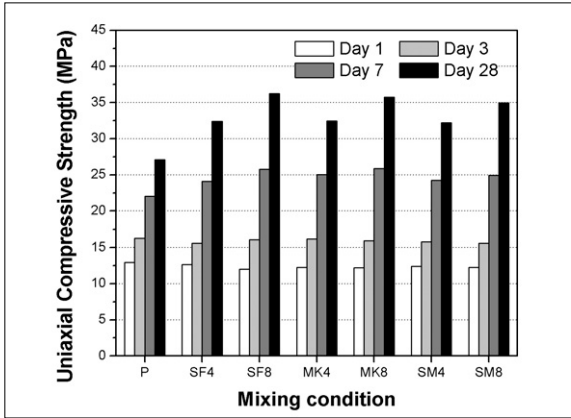


그림 8. 메타카올린과 실리카 흙을 혼입한 숏크리트의 재령별 압축강도

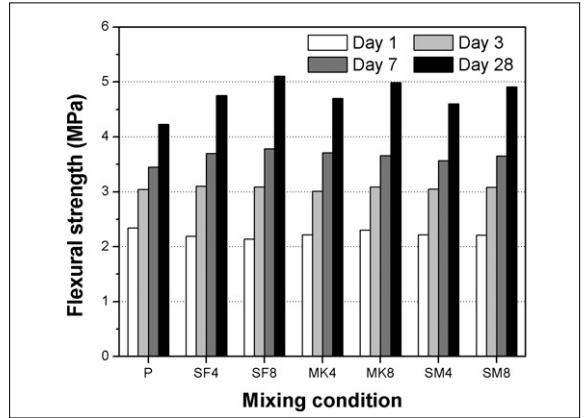


그림 9. 메타카올린과 실리카 흙을 혼입한 숏크리트의 재령별 휨강도

있어서 그 변화가 매우 적으며 메타카올린은 다른 광물질 혼화재와는 달리 산업화 과정에서 나오는 부산물이 아니라 특정온도(650~800℃) 내에서 양질의 카올린을 열적으로 활성화함으로써 제조되는데, 결과물인 무수물의 알루미늄 규산염( $Al_2Si_2O_7$ )은 고도의 반응성인 인공 포졸란으로 거동하는 비정질의 재료이다.

특히 메타카올린은 실리카 흙과 같이 포졸란 반응을 하는 재료로서 콘크리트의 강도와 내구성을 저하시키는 산화칼슘을 감소시키는 효과가 있다.

그리고 분말도가 200,000 $cm^2/g$ 이나 되는 실리카 흙에 비해 상대적으로 분말도(100,000~150,000 $cm^2/g$ )는 작지만 메타카올린이 작업성과 마무리성 등에서 더 좋은 성능을 발휘하는 것으로 보고되고 있다(원종필 등, 2002).

메타카올린의 원료인 카올린이 풍부한 우리나라의 경우, 대량 생산설비가 갖추어진다면 자체생산이 가능하여 전량 수입에 의존하는 실리카 흙을 대체할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

그리고 이상에서 살펴본 바와 같이 메타카올린은 수산화칼슘과 빠르게 반응하여 조기강도를 상당히 증진시키고 양호한 유동성을 나타내며, 수화열, 압축강도, 투수계수, 동결융해 저항성 등에 있어서는 실리카 흙과 큰 차이

를 보이지 않고 있다. 또한 색상이 흰색을 띄기 때문에 대부분 색상이 어두운 실리카 흙에 비하여 미관상 좋게 보일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나 메타카올린이 최근에 개발된 관계로 메타카올린 관련 기존 연구는 모두 콘크리트나 모르타르를 대상으로 하였다. 이와 같은 기존 연구로부터 콘크리트에서와 마찬가지로 메타카올린으로부터 실리카 흙과 거의 동일한 숏크리트 성능을 얻을 수 있는 것으로 보고되었다.

이와 같이 실리카 흙의 대체 재료로서 메타카올린이 매우 유망함에도 불구하고 현재까지 숏크리트, 특히 습식 숏크리트에 메타카올린을 적용하기 위한 기초 연구가 이루어지지 않고 있다.

배규진 등(2006)은 숏크리트에서 실리카 흙을 대체하기 위한 메타카올린의 적용성 평가와 관련된 연구를 수행하였다. 그 결과, 혼입량이 동일한 경우 메타카올린 혼입 숏크리트는 실리카 흙을 혼입한 경우와 동등한 성능을 보이는 것으로 나타나 고가의 실리카 흙을 대체하기 위한 메타카올린의 적용 가능성을 확인할 수 있었다(그림 8 및 그림 9). 그러나 다양한 현장 조건에 따른 메타카올린의 적용성과 메타카올린에 의한 내구성 증진효과에 대한 추가적인 연구가 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다.

**표 8. 플라이애쉬에 대한 추천사항**

특성	추천사항	출처
허용가능한 최대사용량	≤ 15%	오스트리아 콘크리트 학회(1990)
포틀랜드 시멘트	≤ 30%	ITA(1991), EFNARC(1992)
PFA 시멘트	≤ 15%	EFNARC(1992)
고로슬래그 시멘트	≤ 20%	오스트리아 콘크리트 학회(1990), EFNARC(1992)
비표면적	≥ 450m <sup>2</sup> /kg(BS3892)	오스트리아 콘크리트 학회(1990), SANCOT(1991)
탄소 함유량	≤ 5%	SANCOT(1991)
SO <sub>3</sub> 함유량	≤ 2.5% (시멘트 내의 총 SO <sub>3</sub> + PFA ≤ 4%)	SANCOT(1991)

### 3.4.3 플라이애쉬

플라이애쉬는 미세한 무기질의 포졸란 재료로서 소성 또는 경화상태의 물성을 향상시키기 위해 사용될 수 있다. 특히 시멘트량을 감소시키고 배합시 워커빌리티(workability)를 향상시키며, 염해 및 알칼리-골재 반응에 대한 저항성을 증진시킨다. 하지만 초기강도 발현이 지연되는 현상이 나타나므로 주의해야 한다.

오스트리아 콘크리트 학회에 의하면 최대 사용량을 포틀랜드 시멘트에 대해 15% 그리고 고로슬래그 시멘트에 대해서는 20%로 규정하고 있다(표 8).

콘크리트의 고강도/고내구성화를 위해서는 사용된 실적이 많으나 아직까지 숏크리트에 플라이애쉬를 적용하는 것은 일반적이지 않으며 적용 실적도 드물다.

### 3.4.4 고로슬래그

고로슬래그는 용광로에서 철광석으로부터 선철을 만들 때 생기는 슬래그이다. 고로슬래그는 미세한 입상 수경성 결합재료로서 소성 또는 경화상태의 물성을 향상시키기 위해 사용될 수 있다. 특히 고로슬래그 미분말은 잠재수경성이 있는데, 즉 그 자체는 경화하는 성질이 취약하지만 포틀랜드 시멘트와 혼합한 경우는 수산화칼슘과 황산염의 작용으로 경화가 촉진되어 포틀랜드 시멘트만을 단독으로 사용했을 경우보다 수화열 감소, 장기강도

향상 및 수밀성 증대 등 우수한 품질을 얻을 수 있다.

그러나 플라이애쉬와 마찬가지로 아직까지 숏크리트에 고로슬래그를 적용한 실적은 매우 드물다. EFNARC(1999)에서는 고로 슬래그의 최소 비표면적을 450±25 m<sup>2</sup>/kg로 추천하고 있다.

## 3.5 혼화재료

숏크리트의 대표적인 혼화재료(admixture)로는 유동화제(plasticizer)와 고성능 감수제(super-plasticizer)를 들 수 있으며, 단위수량을 감소시켜 부착성과 강도를 향상시키며 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 작업성을 향상시킨다. 일반적으로 물/시멘트비의 저감과 고강도화 목적으로 사용할 때는 고성능 감수제라 하며, 동일한 물/시멘트비에서 콘크리트/숏크리트 품질의 변동없이 작업성을 향상시킬 때는 유동화제라고 한다.

성분에 따라 멜라민계(melamine), 나프탈렌계(naphthalene) 및 폴리카르복실계(polycarboxylic)로 구분할 수 있다.

멜라민계는 성능이 떨어져 최근에 적용사례가 감소하고 있으며 나프탈렌계는 효율은 떨어지지만 저렴하므로 많이 적용되고 있다. 나프탈렌계와 멜라민계를 사용할 경우 콘크리트의 유동성은 약 20~90분까지의 제한된 시간

고성능 숏크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

동안 유지될 수 있으며 과도하게 사용할 경우에는 점착력을 감소시키고 재료 분리를 야기할 수 있다(Melbye & Dimmock, 2001).

최근 들어 국외에서는 기존 멜라민계나 나프탈렌계와 비교하여 상당한 감수효과와 부착력 상승효과를 가진 폴리카르복실계의 고성능감수제가 일반화되고 있으나 국내에서는 단가문제로 적용 실적이 매우 적은 실정이다. 폴리카르복실계는 종래의 고성능감수제보다 뛰어난 감수효과를 가지고 있을 뿐만 아니라 적은 사용량으로도 콘크리트의 워커빌리티를 유지할 수 있다. 따라서 폴리카르복실계 고성능감수제를 “hyper-plasticizer”로 부르기도 한다. 특히 40% 이상의 감수효과를 가지고 있는 폴리카르복실계 고성능감수제에 의해 슬럼프를 15~20 cm로 유지하면서 물/시멘트비를 0.38정도로 낮추는데 효과적이다. 이와 같이 숏크리트에서 물/시멘트비를 저감시킴으로부터 인해서 얻을 수 있는 장점들은 다음과 같다.

- 숏크리트 내구성의 향상
- 원활한 슬럼프 유지
- 빠른 응결
- 조기강도 향상
- 장기강도 향상
- 리바운드 저감
- 급결제 사용량 저감 가능

유동화제와 고성능 감수제의 사용량에 따른 숏크리트 물/시멘트비의 저감 동향은 그림 10과 같다(Melbye & Dimmock, 2001). 이상과 같이 가까운 미래의 고성능 숏크리트에 대한 폴리카르복실계 고성능감수제의 활용성이 더욱 증대될 것으로 기대할 수 있다.

이외에도 숏크리트에 사용될 수 있는 혼화재료로서 수화제어제(hydration control admixture)를 들 수 있다. 수화제어제는 아직 국내에 적용된 적은 없으나 장대터널과 같이 배합부터 타설까지 상당히 시간이 요구되는 경우에 굳지않은 콘크리트의 품질을 유지하기 위하여 외국에서 개발·적용되고 있다.

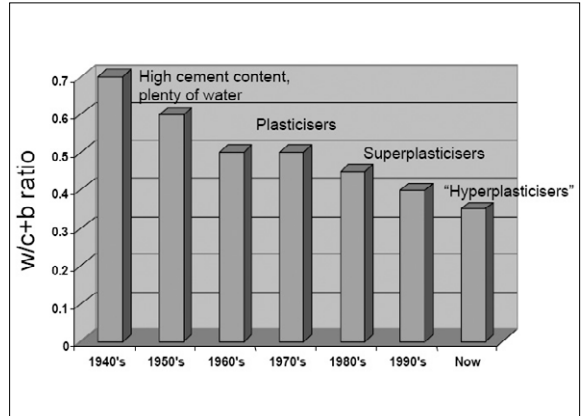


그림 10. 고성능감수제의 발전에 따른 숏크리트의 물/시멘트비 변화 동향

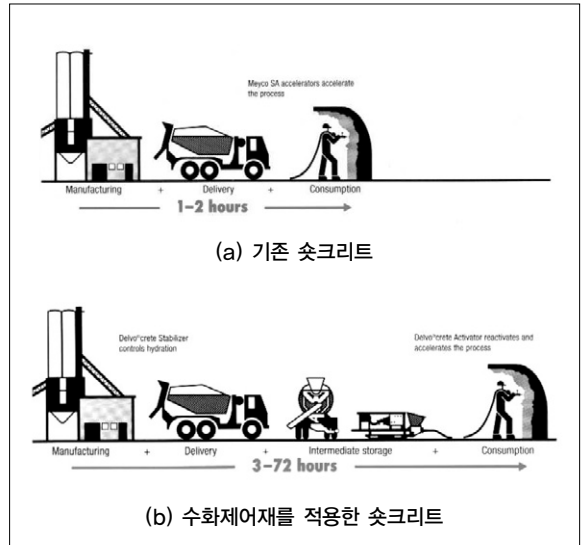


그림 11. 숏크리트의 유동성 및 품질 확보를 위한 수화제어

수화제어제를 사용하지 않은 습식 숏크리트의 경우에는 1~2시간 이상 유동성과 콘크리트의 품질을 유지하지 어려우나, 수화제어제를 사용할 경우에는 사용량에 따라 3~72시간까지 유동성과 품질을 유지할 수 있는 것으로 보고되고 있다(그림 11).

일례로 Melbye & Dimmock(2001)에 따르면 그림 12와 같이 수화제어제를 사용하여 숏크리트 타설 후 회수된

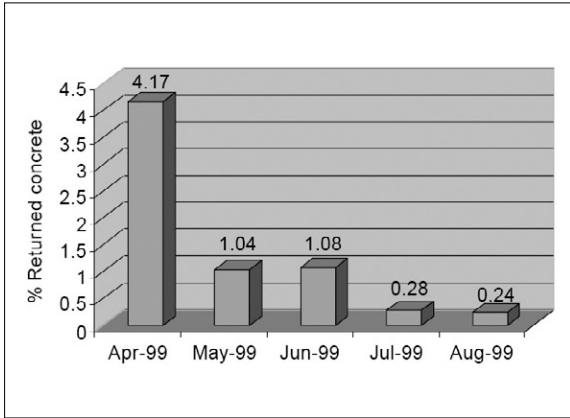


그림 12. 수화제어제에 의한 콘크리트 회수량의 저감 사례

콘크리트량을 대폭 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.6 섬유

시공성을 향상시키고 리바운드를 감소시키기 위하여 기존의 철망(wire mesh)은 대부분 강섬유로 대체된 실정이다. 그러나 강섬유의 부식으로 인한 장기 내구성의 감소가 발생할 수 있기 때문에 내구성을 향상시키기 위하여 폴리프로필렌(polypropylene) 섬유 등에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 아직까지 강섬유와 비교할 때 폴리프로필렌의 인성이 다소 취약한 면이 있으므로 휨인성을 향상시키기 위해 보강용 합성섬유에 대한 연구도 국외에서 수행 중에 있다.

이상과 같은 숏크리트용 섬유에 대한 제반 특성을 정리하면 다음의 표 9와 같다(SK건설, 2001).

## 4. 숏크리트의 고품질화를 위한 품질기준 검토

건설교통부에서 제정한 터널표준시방서(1999)와 터널설계기준(1999)에 따르면, 숏크리트는 필요한 강도와 내구성이 확보되고 부착성과 시공성이 양호하며 재령 1일

압축강도가 100kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 재령 28일 강도가 180 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 되도록 배합하여야 한다고 규정하고 있다(표 10). 숏크리트의 최소두께는 사용목적, 지반조건, 단면크기 등을 고려해서 정하되 3~5 cm로 할 것을 규정하고 있다. 그러나 휨강도 및 휨인성 등에 대한 규정이 제시되어 있지 않으며 또한 숏크리트 재료에 대한 정량적인 지침도 부족한 실정이다.

한국도로공사(2002)에서는 숏크리트의 압축강도, 휨강도, 휨인성, 강섬유혼입량 등에 대한 기준을 제시하고 있으며 이를 정리하면 표 11과 같다. 그러나 외국의 고성능 숏크리트에 대한 기준과 비교할 때는 아직까지 다소 낮은 수준이며 숏크리트 재료 및 제반 품질관리 시험에 대한 규정이 부족한 실정이다.

특히 최근에 큰 문제로 대두되었던 숏크리트 강섬유에 대해서도 외국과 같이 휨강도나 휨인성과 같은 성능기반(performance-based) 기준보다는 강섬유 혼입량에 근거하여 관리하고 있는 한계를 내포하고 있다(표 12).

반면 국내 기준과 비교할 때 선진 외국에서는 표 13과 같이 숏크리트에 대해 비교적 고강도의 기준을 적용하고 있다(Malmberg, 1993). 특히 노르웨이에서는 숏크리트의 영구지보재화를 위해 압축강도 기준이 1980년대의 25 MPa에서 현재에는 45 MPa로 상향조정되었다(표 14).

일본의 일반 숏크리트 강도 기준은 국내와 매우 유사하다고 할 수 있으나, 앞서 설명한 바와 같이 제2동명·명신고속도로와 같은 초고속도로와 싱글셀 터널에 대해서는 고강도의 기준을 별도로 마련하여 적용하고 있다(표 15 및 표 16).

오스트리아에서는 장기강도 이외에도 그림 13과 같이 조기재령의 숏크리트 강도 기준을 별도로 마련하여 관리하고 있는 실정이다. 하지만 국내에서는 재령 1일 이전의 조기강도에 대한 기준뿐만 아니라 조기강도를 측정하기 위한 시험방법도 검토되지 못하고 있다. 이를 위해 외국에서는 인발시험, 침 관입시험, 화약의 폭발력을 이용하는 pin 관입시험, 슈미트해머 시험 등을 적용하고 있으

표 9. 슛크리트 보강재 비교

구분		Wire mesh	Steel Fiber	Polypropylene Fiber	High Performance Polymer Fiber
물성	재질	Steel	Steel	Polypropylene	Polyolepine
	내산성	불량	불량	우수	우수
	내알칼리성	보통	보통	우수	우수
	내구성	불량 (부식작용으로 crack 및 박리현상 발생)	불량 (부식작용으로 crack 및 박리현상 발생)	우수	우수
사용효과		1. 균열확산 억제 2. 평면적 보강	1. 수축균열 억제 2. 균열확산 억제 3. 충격파손 억제 4. 강도 증대 5. 인성 증가 6. 입체적 보강	1. 수축균열 억제 2. 균열확산 억제 3. 충격파손 억제 4. 내구성 증대 5. 인성 취약 6. 입체적 보강 7. 부착력 증가	1. 수축균열 억제 2. 균열확산 억제 3. 충격파손 억제 4. 내구성 증대 5. 인성 증가 6. 입체적 보강 7. 부착력 증가
작업성	분포성		혼합시 balling 현상이 발생되기도 하며 균등분포가 어려움	다량 혼합시 작업성 저하	다량 혼합시 작업성 저하
	시공성 및 안전성	1. 자재 취급이 불편 2. 설치장소까지 소운반 3. 설치작업 여건이 불편 4. 안전에 유의를 요함 5. 적정피복이 어려움	1. 작업이 간편 2. 슛크리트 작업시 호스 파열 또는 강섬유의 bound로 작업인원의 인체에 위해	1. 작업이 간편 2. 자재취급/시공중 안전	1. 작업이 간편 2. 자재취급/시공중 안전
	장비의 마모, 손상		스�크리트 장비 및 호스의 마모손상	장비의 마모, 손상에 영향을 끼치지 않음	장비의 마모, 손상에 영향을 끼치지 않음

표 10 국내 슛크리트 설계기준 강도(재령 28일, 단위: kgf/cm<sup>2</sup>)

구분	건설교통부	한국도로공사	서울시지하철건설본부
압축강도	180	200	210

나, 시험과정이 어렵거나 측정가능한 강도범위가 낮고 시험결과의 신뢰성이 떨어지는 등의 문제점을 가지고 있다 (Iwaki, 2001). 이 가운데 화약의 폭발력을 이용하는 pin 관입시험은 단순하며 낮은 강도에서 고강도까지 슛크리트 강도를 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 화약을 사용하기 때문에 pin 관입시험을 수행하기 위해서는 총포화약류 면허를 소지해야 하며 사용상 위험한 상황

이 발생할 수 있다. 이러한 단점들을 보완하고자 일본에서는 화약의 폭발력 대신 고압의 압축강도를 사용하는 공기압식 pin 관입시험법(pneumatic pin penetration test)이 제안되었고, 현재 일본도로공단의 슛크리트 강도 시험법으로 규정되어 있다(그림 14). 이러한 배경에 근거하여 이석원 등(2003)은 초기재령의 슛크리트 압축강도를 현장에서 쉽고 빠르게 측정하기 위한 공기압식 pin 관입시험의 적용성을 평가한 결과, 초기재령의 슛크리트 강도를 실제 압축강도와 유사하게 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

**표 11. 한국도로공사 슛크리트 관련 품질기준(2002)**

구 분		당 초
배합비	기준	지반특성, 강섬유 혼입 등을 고려하여 구분 적용
압축강도 *일반스�크리트	기준	재령 28일 강도=200kgf/cm <sup>2</sup> , 재령 1일 강도=100kgf/cm <sup>2</sup> ⇒ 패널코어강도 85%, 최소 72%이상
	빈도	1회/200m <sup>2</sup> 이상 또는 1일 1회 이상
휨강도	기준	재령 28일 $f_{28bk} = 45\text{kgf/cm}^2$ , 재령 1일 $f_{1bk} = 21\text{kgf/cm}^2$
	빈도	B/P당 1회/200m <sup>2</sup> 또는 1회/일 이상
휨인성	기준	휨인성계수 평균 68%, 최소 58% 이상 (몰드규격 : 50×50×12.5cm, 15×15×55cm 병용 가능)
	빈도	휨몰드 사용시 1회/1,000m <sup>2</sup> 및 휨인성패널 1회/3,000m <sup>2</sup> 이상
강섬유 혼입량시험	기준	투입 기준량의 90% 이상
	빈도	1회/1000m <sup>2</sup> 이상(굳지 않은 콘크리트) 구간내 임의위치 1회(6공)이상/50m (스�크리트 타설면에서 코어 채취)
두께측정	기준	평균: 설계 이상, 최소: 설계 75% 이상
	빈도	검사공 : 1회(7공)/20m 이상 및 강섬유혼입량 코어시료 등
코어압축 강도(28일)	기준	재령 28일 $f_{28} = 170\text{kgf/cm}^2$ (일반스�크리트) 재령 28일 $f_{28} = 200\text{kgf/cm}^2$ (강섬유스�크리트)
	빈도	구간내 임의위치 3공/20m

**표 12. 국내 슛크리트 강섬유 관련 시방 및 기준**

관련 시방 또는 기준	강섬유 혼입량	휨강도(MPa)	등가휨강도/휨강도(%)
철도공사 전문시방서	용적비 : 0.5~1.5%	-	-
철도설계편람	용적비 : 1~2%	-	-
	중량비 : 3~6%	-	-
고속철도공사 전문시방서	40 kg/m <sup>3</sup> 이상	-	68 이상
도로설계편람	용적비 : 1~2%	-	-
	중량비 : 3~6%	-	-
도로설계요령	용적비 : 0.5~1.5%	-	-
도로공사 표준시방서	40 kg/m <sup>3</sup> 이상	4.5	68 이상
고속도로공사 전문시방서	40 kg/m <sup>3</sup> 이상	4.4	68 이상

또한 EFNARC에서는 슛크리트에 사용되는 시멘트, 혼화재료, 골재, 첨가재, 급결제 등에 대한 상세한 추천사항을 제시하고 있다(EFNARC, 1996; EFNARC, 1999).

그리고 슛크리트의 인성(toughness)을 잔류강도등급(빔 시험)이나 에너지흡수등급(평판 시험)으로 규정하고 있다(EFNARC, 1996). 슛크리트에 대한 총 5개의 잔류강도등급(residual strength class)은 빔 응력/처짐 곡선의 형태에 근거하여 그림 15와 같이 정의된다. 에너지흡수등

급(energy absorption class)은 규정된 평판시험을 수행한 뒤 표 17에 제시된 기준들에 근거하여 평가될 수 있다.

ASTM C1116-89에 따르면 슛크리트의 다양한 성능수준에 대한 인성값들은 표 18과 같다(ASTM, 1989). 일반적으로 I~III 등급을 적용하며 IV등급은 표면이 변형되어 있거나 끝부분에 anchorage가 있는 섬유가 많은 경우에만 적용한다.

기타 문헌에 제시되어 있는 휨인성 값들을 정리하면 표



고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

표 13. 국외의 슛크리트 압축강도 기준

양생일수	압축강도(MPa)	출처
8시간	5	Wood(1992)
1일	5	일본 터널협회(1991)
	7	오스트리아(J1기준)
	8*	AFTES(1992), 영국
	9	오스트리아(J2기준)
	10	EFNARC(1992) 등
3일	20	Wood(1992)
7일	17*	AFTES(1992)
	25	EFNARC(1992)
	30	Morgan(1991), Wood(1992)
28일	18	일본 터널협회(1991)
	25**	AFTES(1992)
	30	JCI(1991), EFNARC(1992)
	35	영국, 스웨덴 스톡홀름 교통국(1990)
	35***	Maidl(1992)
	38	오스트리아(J1기준)
	40*	Maidl(1992)
	40	오스트리아(J2기준), Morgan(1991) 등
45	스웨덴 철도청(1991)	
90일	35	EFNARC(1992)

\* 산술평균      \*\* 특성강도(characteristic strength)      \*\*\* 단일수치

EFNARC: European Specification for Sprayed Concrete

AFTES: French Tunnelling Association

JCI: Japan Concrete Institute

표 14. 노르웨이의 슛크리트 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 15. 일본의 슛크리트 강도 기준

양생일수	3시간 (MPa)	24시간 (MPa)	28일 (MPa)
표준배합	-	5	18
고품질배합(신간선터널)	1.5	8	18
고강도 강섬유보강 배합(고속도로 터널)	2	10	36

표 16. 일본의 고품질 강섬유보강 슛크리트 기준(싱글셀 터널)

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

고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

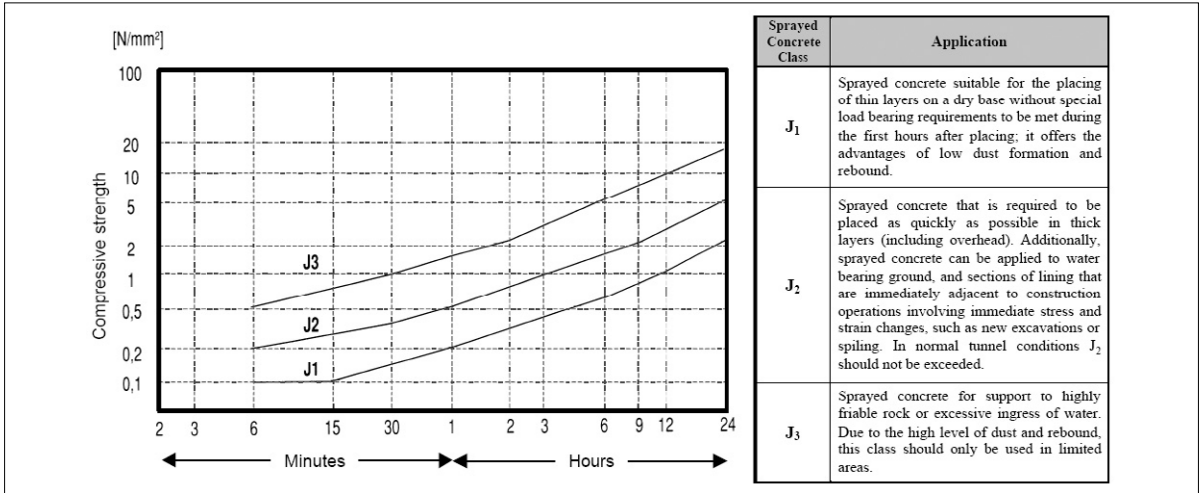


그림 13. 조기재령 슛크리트 강도 기준(Austrian Sprayed Concrete Guideline, 1999)



그림 14. 공기압식 pin 관입시험에 의한 슛크리트 강도 추정

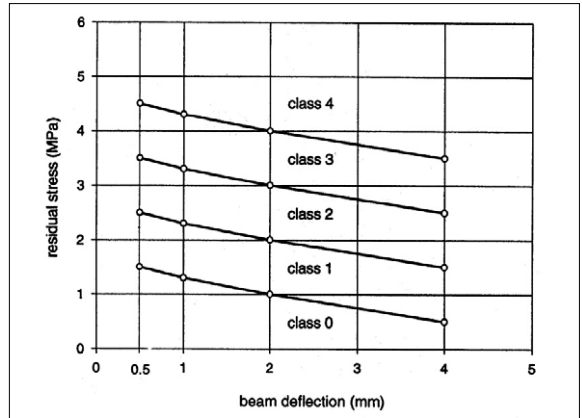


그림 15. EFNARC의 잔류강도등급

표 17. EFNARC의 에너지흡수등급

인성 분류	25mm까지의 처짐에 대한 에너지 흡수(J)
a	500
b	700
c	1000

표 18. ASTM의 슛크리트 휨인성 기준

등급	인성지수, I <sub>5</sub>	인성지수, I <sub>10</sub>
	규정치	규정치
I	2.7	5.4
II	3.6	7.2
III	4.5	9.0
IV	5.4	10.8

19와 같으며, 많은 현장시험 등을 통해 Vandewalle (1991)이 제안한 기준은 표 20과 같다.

이와 같은 압축강도, 휨강도 및 인성 기준 이외에도 국

외에서는 고성능 슛크리트에 대한 부착력, 투수계수, 동결저항 등의 규정이 제시되어 있다.

## 고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

표 19. 국외의 제반 슛크리트 인성 기준

힘인성지수	양생일수	값	출처
I <sub>5</sub>	7	3.5	SANCOT(1991)
	—*	3.5	Morgan(1991)
	28	5.0	JCI(1991)
I <sub>10</sub>	7	5.0	SANCOT(1991)
	—*	5.0	Morgan(1991)
	—*	7.0(C25인 경우)	EFNARC(1992)
	28	7.0	Swedish National Rescue Services Board
	28	8.0	JCI(1991)
I <sub>20</sub>	—*	10.0 (C25, 35, 45인 경우)	EFNARC(1992)
I <sub>30</sub>	—*	14.0	Morgan(1991)
	28	19.0	JCI(1991)
	28	21.0	Swedish National Rescue Services Board
$\frac{R_{5,10}}{100} \times f_s$	—*	4.0 MPa**	스웨덴 철도청(1991)
$\frac{R_{10,30}}{100} \times f_s$	—*	2.5 MPa**	스웨덴 철도청(1991)

\* 규정되어 있지 않음

\*\* 일반적인 시험에 대한 요구조건

SANCOT: South African National Council on Tunnelling

표 20. Vandewalle(1991)이 제안한 강섬유보강 슛크리트의 인성 등급

분류	등급	I <sub>10</sub>	I <sub>30</sub>	R <sub>30/10</sub>
I	최저	< 4	< 12	< 40
II	보통	4	12	40
III	우수	6	18	60
IV	매우 우수	8	24	80

표 21. EFNARC의 부착력 기준(최소 기준)

부착 유형	콘크리트에 대한 최소 부착력(MPa)	암석에 대한 최소 부착력(MPa)
비구조적 기능	0.5	0.1
구조적 기능	1.0	0.5

EFNARC에서는 슛크리트와 암석 사이의 부착력에 대해 표 21에 제시된 값들을 규정하고 있다. 이 표에 제시된 값들은 재령 28일에서 3개의 시료로부터 얻어진 평균값들이며, 어떠한 값도 기준값의 75%보다 작아서는 안 된

다(EFNARC, 1996). 기타 문헌들에 제시되어 있는 부착력들에 대한 추천사항들을 정리하면 표 22와 같다.

수밀 슛크리트가 요구되는 경우, 슛크리트의 수밀성(water-tightness)은 투수계수를 측정하여 결정될 수 있다. 슛크리트는 투수계수가 10~12 m/s보다 작을 때 수밀성을 가지는 것으로 고려된다(EFNARC, 1996).

이외에도 내구성의 지표로서 동결저항을 품질기준으로 사용할 수 있다. 염분이 없는 보통 정도의 포화상태에서 동결 및 융해과정에 놓인 슛크리트에 대해 동결저항시험을 수행할 수 있다.

이상과 같이 고성능 슛크리트에 요구되는 다양한 성능 기준을 평가하기 위해 적용되고 있는 국외의 품질시험 방법과 항목을 정리하면 다음의 표 23과 같다.

고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

표 22. 슛크리트 부착력에 대한 추천사항들

접착유형	추천사항	출처
스�크리트/암석	0.5 MPa 이상 0.5 MPa 이상(구조적 기능) 0.1 MPa 이상(비구조적 기능) 견고한 건조 화강암의 경우, 가능하면 1.4 MPa까지	Swedish Railroad Dept.(1991) EFNARC(1992)  Vandewalle(1991)
	0.5 MPa 이상(재령28일, 구조적기능) 0.1 MPa 이상(비구조적 기능) 1.0 MPa 이상 2.0 MPa 이상(재령28일)	EFNARC(1992)  Swedish Railroad Dept.(1991) AFTES(1992)

표 23. 국외의 슛크리트 품질시험 항목

Ages		Test items		Europe	Japan	
Fresh concrete	Wet-mix	Consistency		○	○	
		Air content		○	△	
		Specific gravity		○	○	
	Dry-mix	Water/Cement ratio		○	○	
		Steel fiber reinforced	Fiber content		○	□
			Slump		○	○
Air content			○	△		
Specific gravity			○	○		
< 24 hours	Compressive strength	Pull-out test		○	○	
		Schmidt hammer test		○	△	
		Compression test by beam specimens		-	○	
		Modified penetration test		○	-	
		Pin penetration test		○	-	
		Pneumatic pin penetration test		-	○	
> 24 hours	Quality control	Compressive strength	Boring core	○	○	
			Beam mould	-	○	
	Mechanical properties	Tensile strength	Indirect tensile test	○	△	
			Direct tensile test	○	-	
		Bond test		○	-	
		Flexural strength		○	□	
		Flexural toughness		○	□	
		Shear strength		-	△	
	Others	Frost resistance		○	-	
		Density		○	○	
		Chemical resistance		○	-	
Permeability		○	-			

Note) ○: General, △: Rare, □: Only for high strength and steel fiber reinforced shotcrete -: None

## 5. 결언

본 고에서는 터널의 급속시공과 안정성 향상을 도모하고 향후 싱글셀 터널공법을 적용하기 위해 필수적인 고강도·고내구성의 고성능 숏크리트에 대한 제반 재료와 관련 품질기준들을 살펴보았다.

특히 싱글셀 터널공법 등의 적용 목적 이외에도 터널의 내구년한과 품질 향상을 위해 고성능 숏크리트의 사용이 세계적인 추세임을 알 수 있었다.

이러한 숏크리트의 고성능화를 위해서는 다양한 고성능 재료의 검토·선정과 배합설계 기술이 중요함에도 불구하고, 아직까지 국내에서는 외국의 고성능 숏크리트에 대한 기술을 답습하는 수준으로서 대부분의 연구는 급결제나 실리카 흙의 적용 연구 등에 국한되어 있다.

더욱이 숏크리트 품질에 대한 제반 성능기준과 시험방법도 체계적으로 규정되어 있지 못하여 고성능 숏크리트의 적용이 어려운 실정으로서 숏크리트 관련 시방·기준 등의 개정시 이에 대한 보완이 필요한 시점이다.

마지막으로 국외의 고성능 숏크리트 기술을 그대로 받아들이기 보다는 국내 실정을 고려하여 고성능 숏크리트를 개발하려는 노력이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있겠다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 건설교통부, 1999, 터널설계기준, 구미서관.
2. 건설교통부, 1999, 터널표준시방서, 구미서관.
3. 배규진, 장수호, 박해균, 원종필, 2006, 시멘트 광물계 급결제와 메타카올린에 의한 숏크리트의 고성능화에 대한 실험적 연구, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권 제3호, pp. 237~247.
4. 배규진, 장수호, 신휴성, 박해균, 이명섭, 김재권, 2004, 숏크리트의 고성능화를 위한 미분말 혼화재의 활용, 한국터널공학회지, 제6권 제4호, pp. 28~39.
5. 배규진, 장수호, 이석원, 박해균, 이명섭, 김재권, 2004, 고성능 숏크리트 라이닝의 설계 및 시공기술 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, pp. 1~15.
6. SK건설, 서울대학교, 2001, 습식 숏크리트 공법 고성능화 연구, 1999년 산·학·연 공동연구개발사업 최종보고서, 건설교통부·한국건설기술연구원.
7. 원종필, 권연성, 이준자, 2002, 고반응성 메타카올린을 사용한 고성능 콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회 논문집, 제14권 제3호, pp. 349~356.
8. 이석원, 배규진, 장수호, 박해균, 이명섭, 김재권, 2003, 숏크리트의 압축강도를 추정하기 위한 공기압식 pin 관입시험의 적용성 평가, 2003년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 4723-4728.
9. 한국건설기술연구원, 2006, IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(제4세부) - 급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발 1차년도 연차보고서.
10. 한국도로공사 도로교통기술원, 2002, 터널지보공 관련 품질기준 개정(잠정) 및 시공시 유의사항.
11. AFTES Working Group No. 6, 1996, AFTES Recommendations on Fibre-Reinforced Sprayed Concrete Technology and Practice, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 205~214.
12. Austrian Concrete Society, 1990, Guideline on shotcrete.
13. Clements, M.J., 2002, The Future of Fibre Reinforced Sprayed Concrete, Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, 73-81.

## 고성능 슛크리트 라이닝 - (I) 재료 및 품질기준

14. Davik, K.I., 1996, Durability of sprayed concrete in subsea road tunnels, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Norwegian Concrete Association, pp. 333~344.
15. Dimmock, R.H., 1999, Permanent Sprayed Concrete for UK Tunnels, Proc. of the 3rd Int. Symp. on Sprayed Concrete – Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, pp. 186~195.
16. EFNARC, 1996, European Specification for Sprayed Concrete.
17. EFNARC, 1999, European Specification for Sprayed Concrete – Guidelines for Specifiers and Contractors.
18. Franzen, T., 1992, Shotcrete for Underground Support: a State-of-the-art Report with Focus on Steel-fibre Reinforcement, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 383~391.
19. 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.
20. Kovari, K., 2003, History of the sprayed concrete lining method – part I: milestones up to the 1960s, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 57~69.
21. Kovari, K., 2003, History of the sprayed concrete lining method – part II: milestones up to the 1960s, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 71~83.
22. Garshol, K.F., 1999, How to Use Modern Wet Mix Shotcrete Technology for Single Shell Permanent Tunnel Linings, Proc. of the 8th Int. Conf. on Shotcrete for Underground Support VIII, ASCE, pp. 46~56.
23. Garshol, K.F., 2002, Admixtures and other factors influencing durability of sprayed concrete, Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, 123~129.
24. Grønhaug, A., 1996, Performance of shotcrete linings in road tunnels, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Norwegian Concrete Association, pp. 345~358
25. Ishida, A., Takahashi, M., Hirano, K., 2002, New accelerator for shotcrete development of slurry type accelerator, Proc. of Int. Conf. on Shotcrete for Underground Support IX, Kyoto University, pp. 79~88.
26. Iwaki, K., Hirama, A., Mitani, K., Kaise, S., Nakagawa, 2001, A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test, NDT & E International, 34, 395~402
27. Malmberg, Bo, 1993, Shotcrete for Rock Support: a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries, Tunnelling and Underground Space Technology, 8.4, 441~470.
28. Melbye, T.A. & Dimmock, R.H., 2001, Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete, International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Keynote lecture, Tasmania, Australia.
29. Ono, Koichi, 1996, Health and Safety in Shotcreting: ITA working group report, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 391~409.
30. Pöttler, R. & Klapperich, H., 1999, Single-Shelled Shotcrete Lining Aspects and Application in Central Europe, Proc. of the 8th Int. Conf. on Shotcrete for Underground Support VIII, ASCE, pp. 174~192.
31. Reknes, K., Mørch, A., 1996, Production of Steel Fibre Reinforced Sprayed Concrete and the Influence of Setting Accelerator Dosage on Durability, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Sprayed Concrete, pp. 277~285.