

터널 영구 지보재로서의 슛크리트 고성능화 및 내구성 평가에 관한 연구

이상필^{1)*}, 류종현²⁾, 이상돈³⁾, 전석원⁴⁾, 이정인⁵⁾

Performance Improvement and Durability Evaluation of Shotcrete for Permanent Tunnel Support

Sang-Pil Lee, Jong-Hyun Ryu, Sang-Don Lee, Seokwon Jeon and Chung-In Lee

Abstract Recently, many efforts have been made to construct the first unlined tunnel, without in-situ concrete lining, in Korea. However, the lack of reliability in the performance of shotcrete as permanent tunnel support prevented from its realization. Shotcrete has been regarded to have significant problems in field application and long term performance because of unsatisfactory strength level and durability compared to those of European countries. In this study, the high strength shotcrete satisfying compressive strength over 40 MPa and flexural strength over 4.5 MPa was developed from optimized mix design. The type of accelerators and the amount of silica fume were selected as the main factors in mixing process and the analyses were carried out up to the elapsed time of 2 years. In order to evaluate the short term durability of shotcrete, an array of laboratory test consisting of freeze-thaw, carbonation, chloride penetration and permeability test was performed. For long-term durability tests, specimens have been put in an operated highway tunnel to expose them to the similar environment when they are actually used as an unlined tunnel support. From the strength and durability tests, it was found that only alkali-free based accelerator satisfied the target strength of this study and also, the developed shotcrete showed very high performance in its durability.

Key words unlined tunnel, permanent tunnel support, high strength shotcrete, durability of shotcrete, accelerator, silica fume

초 록 최근 국내 터널 분야에서는 현장타설 콘크리트 라이닝을 생략한, 이른바 무라이닝 터널을 적용하려는 시도가 수차례 있었으나 슛크리트가 영구 지보재로서의 성능을 확보하고 있는지에 대한 의구심으로 인해 시공으로는 이어지지 못하고 있다. 슛크리트는 시공 상 문제뿐만 아니라 강도기준이 유럽에 비해 현저히 낮고 내구성에서도 많은 문제를 내포하고 있는 것으로 파악되고 있다. 본 연구에서는 효율적인 배합개선을 통하여 압축강도 40 MPa, 휨강도 4.5 MPa 이상의 고강도 슛크리트를 개발하였으며 급결제 종류와 실리카폼 첨가량을 주 변수로 하여 최대 2년까지의 성능변화 추이를 분석하였다. 또한 단기 내구성 평가를 위해서는 동결융해, 중성화, 염해에 따른 실험실 촉진 실험과 투수시험을 실시하였으며 장기 내구성 검증을 위해서는 실제 운영 중인 고속도로 터널 내에 시편을 적치하여 복합 환경에 대한 영향을 조사하였다. 분석결과 알칼리프리계만이 유일하게 고강도 목표기준을 만족하였으며, 또한 개발된 고성능 슛크리트가 내구성에 있어서도 매우 우수한 것을 확인하였다.

핵심어 무라이닝 터널, 터널 영구 지보재, 고강도 슛크리트, 슛크리트 내구성, 급결제, 실리카폼

1. 서 론

NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법은 1960년대에 소개된 이래 세계적인 터널 시공법으로 인정받아 왔으며 국내 대부분의 터널도 NATM 개념을 기본으로 시공되고 있다. NATM은 록볼트와 슛크리트를 사용함으로써 지반의 이완을 억제하여 원지반 자체의

¹⁾ GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 팀장

²⁾ GS건설(주) 기술연구소 연구개발2팀 선임연구원

³⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 수석연구원

⁴⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

⁵⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 명예교수

* 교신저자 : splee@gsconst.co.kr

접수일 : 2007년 7월 24일

심사 완료일 : 2007년 8월 23일

지보능력을 최대한 활용하는 공법이며, 특히 슛크리트는 굴착 즉시 타설되어 원지반의 자립력을 극대화시킬 수 있다는 면에서 그 중요성이 부각된다. 국내에는 1980년대 초 지하철 3, 4호선이 NATM 공법으로 시공되면서 터널공사에 본격적으로 슛크리트가 사용되기 시작하였다. NATM 공법에서는 현장타설 콘크리트 라이닝 공정이 필수적인데 이는 공기 및 공사비 면에서 전체 터널공의 약 30% 정도로 큰 비중을 차지하고 있다. 콘크리트 라이닝은 일반적으로 콘크리트 자중과 장기적으로 발생할 수 있는 지반의 이완하중, 그리고 계곡부의 경우 잔류수압에 저항하도록 설계·시공되고 있으며, 이러한 기능 외에도 누수방지, 갱내설비, 미관확보 등의 역할도 수행하고 있다. 그러나 콘크리트 라이닝의 역할에 대한 구체적 설계 개념이 확립되지 않음으로 인하여 그 필요성에 대한 논란이 여전히 계속되고 있다.

유럽, 특히 노르웨이에서는 경제적인 터널을 건설하는 풍토 속에 터널기술의 상당한 발전을 이룰 수 있었는데 현재는 대부분 슛크리트를 영구 라이닝으로 간주하는 무라이닝(unlined) 터널로 시공하고 있다. 슛크리트의 내구성 확보를 위해 1988년부터는 모든 해저터널에서 압축강도 기준을 유럽통합규정(EFNARC, 1996)의 C45 수준(cylinder 강도 36 MPa)으로 상향한 고강도 슛크리트가 적용되고 있다(Davik, 1996). 이는 혼화재료로서 실리카흄(silica fume)과 고성능감수제 등이 보편적으로 사용되고 있고 알칼리프리(alkali-free)계와 같이 고품질 급결제의 적용이 일반화되어 있기 때문에 가능할 수 있었다. 현재 노르웨이에 건설된 도로 터널은 약 700

여가에 달하며 이중 3%의 구간만 현장타설 콘크리트 라이닝이 설치될 정도로 무라이닝 터널공법이 일반화되어 있다. 또한, 2003년 ITA에서 세계 각국의 자료를 취합한 결과에 의하면 무라이닝 터널은 14개국 168개 터널에서 총 610 km가 시공된 것으로 조사되었다(Ono and Tomisawa, 2003). Table 1은 근래에 준공된 터널을 위주로 요약 정리한 것인데, 도로, 철도, 지하철에 이르기까지 적용대상이 다양하며 국가별로 자국 특성에 맞게 적용하고 있다. 체코의 사례에서는 슛크리트의 강도를 증가시키기 보다는 두께를 늘린 경우가 있고 오스트리아의 예처럼 60 MPa 정도의 초고강도를 적용한 경우가 있다.

국내에서는 에너지 비축이나 농수산물 저장에 위한 대규모 지하 cavern이 무라이닝으로 설계, 시공된 사례가 많이 있지만 아직까지 철도, 도로 등과 같은 교통터널에서는 무라이닝 터널공법이 시공된 적은 없다. 2000년대 초 국내에 무라이닝 터널을 적용하려는 시도가 있었으나(정형식 등, 2001; 서영화 등, 2002; 류종현 등, 2005) 시공으로 진행되지는 못하였는데, 이는 록볼트, 슛크리트 등과 같은 터널 1차 지보재가 영구 지보재로서의 성능을 확보하고 있는지에 대한 의구심에 기인한 바가 크다. 특히 시공 단계에서 이러한 지보재의 품질이 명확하게 확인되지 못하고 있는데, 그 중에서도 슛크리트의 경우 많은 문제를 내포하고 있는 것으로 파악되고 있다. 국내 터널에 사용되는 슛크리트의 품질 기준강도는 28일 압축강도 19.6~20.6 MPa이 일반적이며, 강섬유보강 슛크리트의 경우 더 높은 강도를 요구하는 경우도 있다. 시공 중인 일부 도로 터널에서 슛크리트의 압축강도를

Table 1. Typical unlined underground structures in the world

Name	Country	Usage	Year of completion	Length (km)	Cross sectional area (m ²)	Shotcrete thickness (cm)	Compressive strength of shotcrete (MPa)
Subway Line B	Argentina	Subway	2002	0.5	38.2	60	16.7
WMC Leinster Nickel	Australia	Mine	Under Construction	60	25	7.5	44.1
Hall Stadt	Austria	Road	1966	1.1~1.2	24	15	28.4~67.7
BC rail	Canada	Railway	1983	0.6	47	10	39.2
Lo Prado II	Chile	Road	2001	2.8	-	15~30	Over 29.4
Praha	Czech	Subway	1998	0.1	41~61	45	Over 19.6
Taino	Japan	Railway	2000	0.4	-	7	36.3
Y-2	Korea	Storage cavern	1999	1.6	343	5~14	19.6
Freifjord	Norway	Road (subsea)	1992	5.1	65	6.5~14	45
Laerdal	Norway	Road	2001	24.5	48	6~15	40
Disentiser	Switzerland	Railway	1999	0.3	36.9~85.1	30~45	33.7~46.4
Sodra	Sweden	Road	1998	16.6	-	6~9	Over 39.2

확정한 결과, 10~33 MPa 정도로 현장별로 강도 차이가 현저하였으며 기준강도에 미달하는 곳도 많았다. 이런 품질 차이는 슛크리트가 영구 지보재로서의 기능을 수행하는 데에 큰 장애요소가 된다. 또한 슛크리트는 나라마다 재료 및 작업환경이 다르기 때문에 각국의 특성에 맞게 활용되어야 하는데 국내의 경우는 아직 영구 지보재로서 요구되는 고성능 슛크리트에 대한 기준이 없고 슛크리트 자체의 성능 개선과 내구성에 대한 연구도 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 영구적인 터널 지보재로서 요구되는 고성능 슛크리트를 개발하고 단기 및 장기적 성능시험을 통하여 이를 검증하였다.

먼저 효율적인 배합개선을 통하여 시공성을 확보할 수 있으면서 압축강도 40 MPa(EFNARC 기준 C50에 해당), 휨강도 4.5 MPa 이상인 고강도 슛크리트를 개발하였다. 이를 위해 총 987개의 시험체를 제작하였고 재령 3일부터 2년까지의 강도변화를 확인하여 배합변수에 따른 시간이력별 성능변화 추이를 분석하였으며, 아울러 압축강도, 휨강도 및 휨인성시험 결과에 따른 항목별 상관성에 대한 분석을 실시하였다. 이를 토대로 목표 성능을 만족할 수 있는 최적 배합기준을 결정하였다. 또한, 영구 지보재로서의 슛크리트는 강도 증진과 더불어 터널 내구연한에 따른 내구성 확보가 중요한데 총 434개의 시험체를 추가 제작하여 이를 실험적으로 검증하였다. 단기 내구성 검증을 위해서는 실험실에서 인위적으로 열악한 환경 조건을 조성한 후 촉진 실험을 통하여 동결융해, 중성화, 염해에 대한 저항성을 평가하였으며 내구성에 있어서 가장 큰 영향요소인 수밀성을 분석하고자 슛크리트에 대한 투수시험을 실시하였다. 장기 내구성 검증을 위해서는 실제 운영 중인 도로터널 내에 시편을 적치하여 복합 환경에 대한 영향을 평가하였다.

2. 슛크리트 성능평가 방법

스�크리트의 역학적 성능을 평가하는 기본적인 시험항목으로는 압축강도시험, 휨강도 및 휨인성시험 등이 있으며, 압반과의 부착강도(bond strength), 슛크리트 투수성 등에 대한 시험방법도 EFNARC에 소개되어 있다. 이외에도 슛크리트 재료 등에 대한 품질관리 방법들이 한국도로공사 기준에 잘 제시되어 있다(한국도로공사, 2001). 압축강도시험은 KS F 2405에 제시되어 있으며, EFNARC에는 슛크리트 구조물이나 시험패널에서 회수된 코어 시편에 대해 EN 4012에 의해 압축강도 시험을 실시하도록 하고 있다. 휨강도는 보(beam) 공시체를 이용한 휨인성시험 시 측정할 수 있으며, ASTM, JSCE, EFNARC 그리고 한국도로공사 등에 시험법이

규정되어 있다. 슛크리트의 균열 발생 후 인성특성을 나타내는 방법으로는 에너지 흡수능력을 절대값으로 나타내는 방법, 에너지 흡수능력과 관련하여 무차원의 지수로 나타내는 방법 그리고 균열 발생 후 임의 처짐까지의 등가휨강도(equivalent flexural strength)로 나타내는 방법 등이 있다. 유럽통합규정인 EFNARC, 호주의 RTA, 일본의 JCI, 미국의 ASTM 및 ACI에서는 에너지 흡수능력으로써 슛크리트 성능을 평가하는 방법을 제시하고 있으며, 일본의 JSCE에서는 등가휨강도를 이용한 성능평가 방법을 이용하고 있다. Table 2에서 보듯이 휨인성시험을 위한 시험체 형상은 보, 사각패널(square panel), 원형패널(round determinate panel) 등이 있다.

2.1 보를 이용한 시험법

ASTM에서는 인성지수(toughness index)를 이용하여 휨인성을 평가하고 있는데, Fig. 1은 LOP(limit of proportional point)까지는 완전탄성체이고, LOP 이후는 완전소성체라고 가정했을 때의 하중-변위곡선이다. OAB에 의한 삼각형 면적을 초기균열처짐 δ_{LOP} 의 면적으로 간주하며 이때 OB를 δ 로 하여 3δ , 5.5δ , 10.5δ 인 D, F, H점을 잡아 각각의 인성지수를 구하여 인성평가의 기준으로 사용하고 있다. 인성지수 I_5 , I_{10} , I_{20} 에서의 침지는 이론적인 인성지수가 각각 5, 10, 20임을 의미하며 아래 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

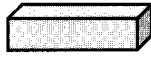
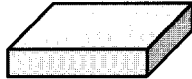

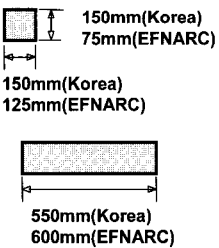
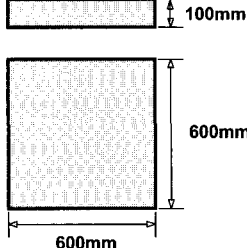
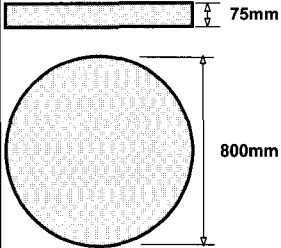
$$\begin{aligned} I_5 &= \frac{\text{OACD의 면적}}{\text{OAB의 면적}} \\ I_{10} &= \frac{\text{OAEF의 면적}}{\text{OAB의 면적}} \\ I_{20} &= \frac{\text{OAGH의 면적}}{\text{OAB의 면적}} \end{aligned} \quad (1)$$

일본 JSCE에서는 등가휨강도(f_e)를 통하여 휨인성을 평가하고 있다. 등가휨강도는 하중-변위곡선에서 일정한 처짐($l/150$, l 은 시간길이)까지의 에너지 흡수능력 T_b 를 계산하여 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 등가휨강도는 최대하중에 도달한 후 일정한 변위까지의 휨인성계수(flexural toughness factor)로서 평균강도의 개념을 가진다.

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (2)$$

여기서, T_b : 기준처짐까지의 휨인성
 δ_{tb} : 기준처짐($l/150$)으로 시간길이 30 cm인 경우 2 mm, 45 cm인 경우 3 mm
 l, b, h : 시편의 시간길이, 폭, 높이

Table 2. Overview of flexural toughness tests for different types of specimen

Types	Beam	Square panel	Round determinate panel
			
Dimensions	 150mm(Korea) 75mm(EFNARC) 150mm(Korea) 125mm(EFNARC) 550mm(Korea) 600mm(EFNARC)	 100mm 600mm 600mm	 75mm 800mm
Max. deflection (mm)	3 (length / 150)	25	40
Max. deflection rate (mm/min)	0.3	1.5	10
Loading geometry	Line load	Square plate (100×100 mm)	Hemisphere plate (100 mm)
Boundary condition	Both ends simple supported	4 sides supported	3 point supported
Characteristics	Low level of crack width 1D shear bending Offset of crack location	High level of crack width 2D bending Support variation	High level of crack width 2D bending Determinate support
Regulations	ASTM, JSCE, EFNARC, Korea Highway Corp.	EFNARC (Europe)	RTA (Australia)

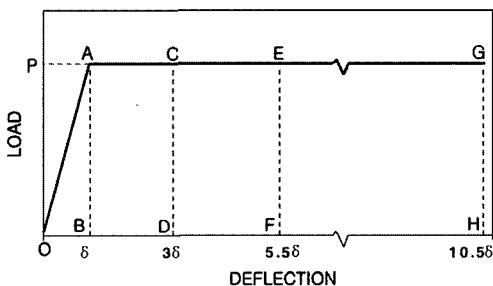


Fig. 1. Load-displacement curve of perfect elastic material

이것은 콘크리트에서 휨인장 균열이 발생한 이후의 강섬유에 의한 휨인성을 일정 차원을 갖는 수치로 나타낸다는 장점이 있다. 현재 한국도로공사의 경우 일본 JSCE의 휨인성 평가 개념을 그대로 이용하고 있는데, 이 등가 휨강도는 차원을 갖는 값이므로 시편의 크기 및 형상에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 시험방법은 외부 처짐을 배제한 순수처짐을 구하기 위하여 Yoke 방식을 이용하며, 하중의 재하속도는 //1500~//3000 mm/min로 일정한 속도를 유지하여야 한다. 이 방법은 하중-변위곡선이 일정하지 않기 때문에 배합과 강섬유 혼입량, 강섬유 종류에 따른 변화를 정확하게 파악하기가 쉽지 않은 단

점이 있다.

2.2 패널을 이용하는 시험법

EFNARC에서는 일정 처짐까지 하중-변위곡선의 면적을 절대적으로 평가한 방법을 사용하고 있다. 시험에 이용하는 패널은 가로×세로가 600×600 mm인 사각형상에 높이가 100 mm규격이다. 패널의 4변을 지지하여 시험하기 때문에 터널에서 숏크리트 라이닝이 실제로 거동하는 형태와 유사하다는 장점이 있는 반면에 하중재하 시험 시 경계조건이 바뀔 수 있으므로(모서리 부분에서 숏음이 발생) 균열의 패턴이 일정하지 않고 중앙에서의 균열폭이 큰 경우 중앙부 최대처짐을 측정하는 것이 불가능하다는 단점이 있다. 재하시험은 패널의 중앙에 100×100 mm의 재하판을 두고 일정한 속도(1.5 mm/min)로 하중을 재하하게 된다. 이때 중앙점의 최대처짐을 측정하여 25 mm가 될 때까지 시험을 실시하며, 하중재하 방향은 터널에서 실제로 작용하는 하중을 모사할 수 있도록 타설된 반대방향으로 한다.

사각패널에 대한 시험에서는 불규칙한 균열형태가 나타나 시험결과와 분산성이 높은 단점이 있다. 이러한 점을 보완한 것이 호주의 RTA에서 규정하고 있는 원형패널이다. 원형패널은 3점지지 형식이기 때문에 균열이

3. 고성능 슛크리트 개발과 단기 및 장기적 성능

3.1 고성능 슛크리트 정의

고성능 슛크리트는 각 나라의 특성과 목적 구조물의 용도에 따라 그 기준이 다를 수 있지만 터널 내구연한까지 장기적 내구성이 확보되어야 한다. 슛크리트를 영구 라이닝으로 간주하여 터널을 마감하고 있는 노르웨이에서는 도로국(NPRA)을 중심으로 기 시공된 터널의 열화상태를 조사하였으며 이를 바탕으로 1988년 이후부터 모든 터널을 EFNARC에서 제시된 강도등급(Table 4)에서 C45를 기준으로 시공하고 있다(Davik, 1996). 따라서 본 연구에서는 고성능 슛크리트의 성능 기준을 C50에 준하여 압축강도 40 MPa, 휨강도 4.5 MPa 이상으로 정의하였다.

3.2 시험체 제작 및 시험

3.2.1 변수선정 및 배합설계

실험변수로는 강섬유(종류, 형상), 급결제(종류, 첨가량), 혼화재료(혼화제 또는 혼화재의 종류, 첨가량), 그리고 물/시멘트/골재의 배합(물/시멘트비, 단위시멘트량, 단위수량, 굵은골재 최대치수, 잔골재율) 등이 있으나, 본 연구에서는 국내외 실험 및 연구 결과를 분석하여 연구의 효율을 기하고자 주 변수로는 급결제 종류와 실리카폼 함량을 선정하였다.

시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 혼화재의 첨가량에 따라 단위시멘트량을 조정하였다. 일반적으로 굵은골재 최대치수가 클수록 슛크리트의 강도가 증가하나 시공성은 떨어지게 되는데 본 연구에서는 시공성 향상을 위해 기존 13 mm에서 10 mm로 하향 적용하였다. 강섬유는 시공성과 성능이 가장 우수한 것으로 입증된 직경 0.5 mm, 길이 30 mm인 후크(hooked ends) 형상을 선정하였고, 혼입량은 시공성을 고려하여 40 kgf/m³로 하였다. 급결제는 국내 터널에서 사용하고 있는 표준 첨가량에 근거하여 알칼리프리계 첨가량 8%를 기준으로 하였고, 비교실험을 위해 알루미늄이네이트(aluminate)계 첨가량 5%와 실리카이트(silicate)계 첨가량 10%를 실험변수로 추가 적용하였다. 단위시멘트량은 480 kgf/m³를 기준으로 하였고 물/시멘트비는 43%로 하였다. 장기 강도 증진과 내구성 향상을 위해 실리카폼을 주 변수로 하여 시멘트 중량의 0, 4, 7, 10%를 치환하면서 실험하였다. 유동성 확보를 위하여 최근 고강도 콘크리트에 많이 사용되고 있는 폴리카복산계(polycarboxylate derivatives) 고성능감수제 1% 첨가를 기준으로 하였으며 실리카폼 첨가 시에는 미세분말로 인한 뭉침 현상을 방지하기 위해 실리카폼의 첨가량이 증가함에 따라 고성능감수제도 0.2%씩 증가시켰다. 각 재료별 배합에 대한 기준은 Table 5와 같이 설정하였다.

3.2.2 시험체 제작

시험체는 압축강도 측정을 위한 실린더, 휨강도 및 휨

Table 4. Strength classes for shotcrete

Strength standard		C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
Compressive strength (MPa)	Cube	30	35	40	45	50	55	60
	Cylinder	24	28	32	36	40	44	48
	Core	20.5	24	27	30.5	34	37.5	41
Flexural strength (MPa)		3.4	-	-	4.2	-	4.6	-

Table 5. Shotcrete mixing specification at design

Test no.	Sump (cm)	W/C ratio (%)	Fine aggregate ratio (%)	Weight (kgf/m ³)							
				Water	Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Steel fiber	Silica fume	Super-plasticizer	Accelerator
1	12 ± 3	43.1	65	207	480	566	1008	40	0 (0%)	4.8 (1%)	AF (8%)
2	12 ± 3	43.1	65	207	480	566	1008	40	0 (0%)	4.8 (1%)	AL (5%)
5	12 ± 3	43.1	65	207	480	566	1008	40	0 (0%)	4.8 (1%)	SL (10%)
3	12 ± 3	43.1	65	207	461	564	1004	40	19 (4%)	5.76 (1.2%)	AF (8%)
4	12 ± 3	43.1	65	207	446	562	1000	40	34 (7%)	6.72 (1.4%)	AF (8%)
6	12 ± 3	43.1	65	207	432	560	997	40	48 (10%)	7.68 (1.6%)	AF (8%)

AF: Alkali-free, AL: Aluminate, SL: Silicate

인성을 측정하기 위한 보, 그리고 흡수에너지 측정을 통해 휨인성을 확인하기 위한 유럽통합규정의 사각패널과 호주 RTA의 원형패널 등이 있다. 실린더와 보 공시체는 시험규격에 맞는 몰드를 이용하여 제작하거나, 큰 box 형태 (400×650×200 mm)로 만든 다음 재령 3일 이상 경과 후 각 시험규격에 맞게 코어링(coring) 또는 커팅(cutting) 하여 제작하였다. 패널은 사전에 준비된 거치대를 이용하여 패널몰드에 뽑아 붙여 제작하거나 바닥에 몰드를 설치한 후 콘크리트를 부어서 제작하였다. 이렇게 제작된 총 시험체 수는 987개였다. Table 6은 종류별 제작계획이며 타설작업은 2003년 10월 현풍~김천간 고속도로 현장에서 수행되었다. Fig. 2는 현장에서 시험체를 제작하는 장면이며 타설작업은 크레인과 인력을 동원하여 야외에서 진행하였다. 장비는 슛크리트 타설량 및 급결제 투입량을 자동으로 정확하게 제어할 수 있는 시험용 슛크리트 머신인 Meyco Suprema을 사용하였다.

3.2.3 시험개요

스�크리트는 굴착 후 지반에 뽑아 붙여지는 지보재로서 부착성과 시공성이 양호해야 하며 조기에 강도가 발현되어 지반의 초기 안정에 기여할 수 있어야 한다. 하지만 국내에서는 아직 1일 이내의 초기강도에 대한 기준이나 이를 측정하기 위한 시험법이 정해져 있지 않다.

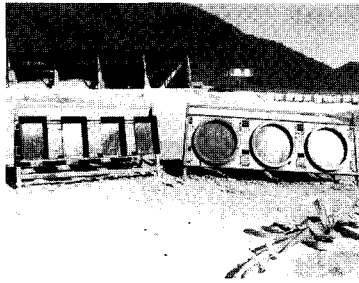
본 연구에서는 초기재령에 대한 시험 data는 확보하지 못하였으나 향후 추가적인 연구가 필요한 부분이며, 배규진 등(2004)에 의해 소개된 여러 가지 간접적인 시험법 등으로 현장조건을 반영한 지속적인 시험자료의 확충을 통해 초기재령에 대한 슛크리트의 공학적인 특성규명이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 슛크리트는 시간경과에 따른 소요 강성이 확보되어야 하며, 특히 영구 지보재로서의 슛크리트는 터널의 내구연한까지 장기적인 기능이 유지되어야 한다. 본 연구에서는 슛크리트의 성능 향상과 장기적 성능 검증에 초점을 두어, 재령 3일 이후부터 7일, 28일, 3개월, 6개월, 1년 그리고 2년까지의 단기 및 장기강도에 대한 시험을 실시하였다.

급결제 종류에 따른 시험에서 압축강도는 재령 1년까지, 휨강도는 재령 28일까지 실시하였으며 실리카폼 첨가량에 따른 시험에서는 압축강도 및 휨강도를 각각 재령 2년까지 실시하였다. 사각패널과 원형패널에 대한 휨인성시험은 재령 28일을 기준으로 하였다. 결과의 신뢰도를 높이기 위해 동일한 조건에서 6개를 1개 조로 시험한 후, 최대 및 최소치를 제외한 나머지의 평균치를 분석 시 적용하였다. 코어링을 할 경우에는 EFNARC에 근거하여 plain 공시체와 비교를 위해 강도감소계수 0.85를 적용하였다. Fig. 3은 시험 장면을 나타낸 것이다.

Table 6. Overview of test specimens

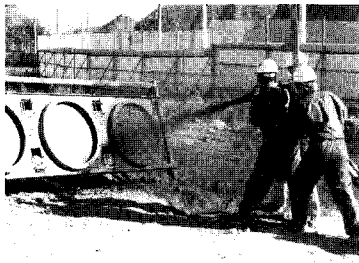
Silica fume	Accelerator	Steel fiber	Coring (Box)	Pouring	Spraying		Pouring		Cutting (Box)	Spraying	Pouring	Spraying	Pouring	Manufacturing date (Test no.)	
			Cylinder	Cylinder	Beam	Beam	Beam	Square	Square	Round	Round				
			Aging	Aging	Aging	Pin	Aging	Pin	Aging	28D	28D	28D	28D		
0%	PL	40	18(3)	21	-	-	18	2	-	-	3	-	3	10/15 (1)	
			AF	42(7)	-	12	2	-	-	30(15)	6	-	6		-
			Sum	60(10)	21	14	20	30(15)	6	3	6	3			
	AL	40	-	21	-	-	18	2	-	-	-	-	-	10/17 (2)	
			AF	42(7)	-	12	2	-	-	6(3)	-	-	-		-
			Sum	42(7)	21	14	20	6(3)	-	-	-	-			
	SL	40	-	21	-	-	6	2	-	-	-	-	-	10/22 (5)	
			AF	42(7)	-	12	2	-	-	6(3)	-	-	-		-
			Sum	42(7)	21	14	8	6(3)	-	-	-	-			
4%	PL	40	42(7)	42	-	-	36	2	-	-	3	-	3	10/19 (3)	
			AF	42(7)	-	12	2	-	-	30(15)	6	-	6		-
			Sum	84(14)	42	14	38	30(15)	6	3	6	3			
7%	PL	40	18(3)	42	-	-	36	2	-	-	3	-	3	10/21 (4)	
			AF	42(7)	-	12	2	-	-	30(15)	6	-	6		-
			Sum	60(10)	42	14	38	30(15)	6	3	6	3			
10%	PL	40	18(3)	42	-	-	36	2	-	-	3	-	3	10/23 (6)	
			AF	42(7)	-	12	2	-	-	30(15)	6	-	6		-
			Sum	60(10)	42	14	38	30(15)	6	3	6	3			
Total sum			348(58)	189	84	162	132(66)	24	12	24	12	987			



(a) Setting for spraying specimen



(b) Setting for plain specimen

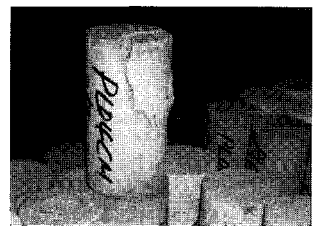
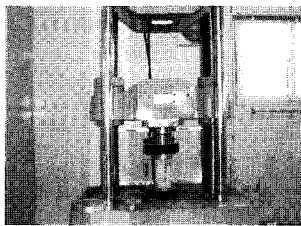


(c) Spraying

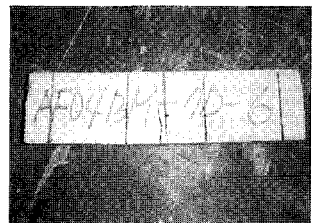
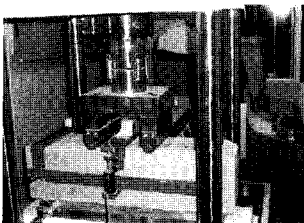


(d) Pouring

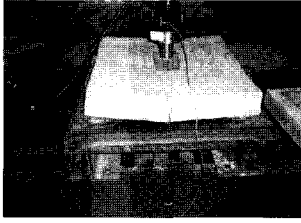
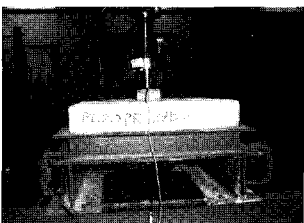
Fig. 2. Preparation of test specimens



(a) Pin test and compressive strength test

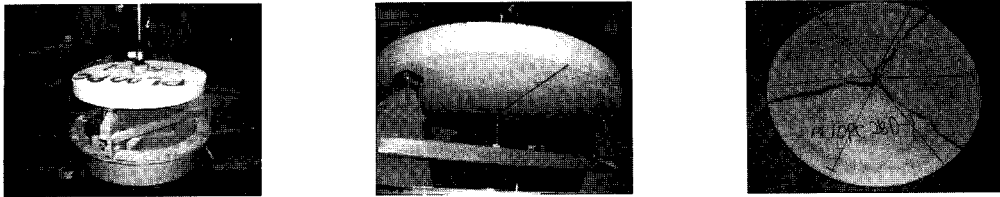


(b) Flexural strength and toughness test



(c) EFNARC panel test

Fig. 3. Various types of shotcrete test (continue)



(d) RTA panel test

Fig. 3. Various types of shotcrete test

3.3 강도 및 휨인성시험 결과

3.3.1 급결제 종류에 따른 강도시험 결과

급결제는 종류별로 성분 및 작용원리가 다르므로 적정 기능을 발휘하기 위해서는 첨가량을 각각 다르게 적용하게 된다. 본 연구에서는 국내 터널공사에서 일반적으로 사용하고 있는 급결제별 표준 첨가량을 기준으로 슛크리트의 강도 특성을 서로 비교하였다.

재령에 따른 압축강도 시험결과를 Table 7과 Fig. 4에 나타내었다. 3가지 급결제 중 알칼리계만이 유일하게 재령 28일부터 재령 1년까지 지속적으로 40 MPa 이상을 유지하는 것으로 나타났다. 재령 3일에서 재령 7일까지 가장 큰 증가율을 보였으며, 이후 3개월까지 완만하게 강도가 증진되다가 재령 6개월일 때 최고점을 기록한 후 1년 경과 시는 강도가 약간 떨어지는 양상을 나타냈다.

휨강도 시험결과는 Table 8 및 Fig. 5와 같다. 실리카이트계를 제외하고 모든 경우에 휨강도 4.5 MPa 이상을 만족하였다. 재령 7일에서 28일로 진행됨에 따라 휨강도가 약간 증가한 결과를 나타냈다.

3.3.2 실리카폼 첨가량에 따른 강도시험 결과

Table 9와 Fig. 6에는 실리카폼의 첨가량에 따른 재령별 압축강도 시험결과를 나타내었다. 실리카폼 첨가량의 다소와 상관없이 재령 28일에 모두 40 MPa 이상의 강도가 발현되었고 재령 2년까지 지속적으로 40 MPa 이상이 유지되었다. 대체적으로 실리카폼을 첨가했을 경우는 10% 첨가 시를 제외하고는 첨가하지 않았을 경우에 비해 압축강도가 2.4~19.0% 증가하는 경향을 나타냈다. 첨가량의 다소에 따라서는 뚜렷한 경향은 찾아볼 수 없었으나 10% 첨가의 경우는 오히려 강도 발현이 늦어지는 현상이 나타났다.

2년 결과에서는 재령 1년에 비해 평균적으로 4.7~15.5% 강도가 감소하는 현상이 나타났는데 콘크리트 수화반응 지속기간(약 20~30년)을 고려할 때 강도 저하 현상이 시작되었다고 결론을 내리기는 어려우며, 향후 보다 많은 시험 및 data 분석을 통해 2년 이후의 장기 강도에

Table 7. Compressive strength of shotcrete with different types of accelerators

Accelerator \ Aging	Averaged compressive strength (MPa)			
	Plain	Alkali-free	Aluminate	Silicate
3 days	24.1	23.5	18.6	15.7
7 days	36.3	32.1	25.5	18.8
28 days	49.8	43.7	32.2	20.8
3 months	52.9	49.2	41.6	22.9
6 months	54.8	51.0	40.4	20.8
1 year	51.8	47.1	38.8	21.0

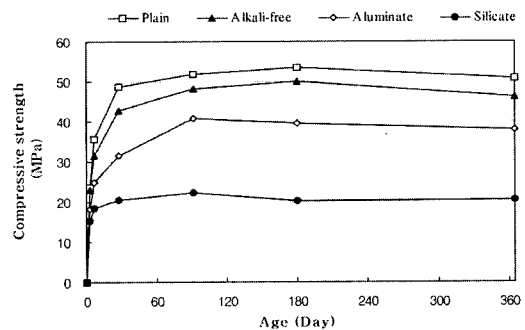


Fig. 4. Compressive strength of shotcrete with different types of accelerators and aging time

Table 8. Flexural strength of shotcrete with different types of accelerator

Aging	Averaged flexural strength (MPa)			
	Plain	Alkali-free	Aluminate	Silicate
7 days	4.8	5.7	5.3	3.3
28 days	5.7	5.1	6.1	4.4

대한 변화 추이를 연구해 볼 필요가 있다.

일반적으로 시멘트 분체량이 많을수록 콘크리트의 초기 경화가 빨리 진행되는데, 실리카폼이 다량 첨가되면

실리카폼의 포졸란 반응이 본격화되기까지는 오히려 콘크리트의 경화가 늦어져 초기강도 발현이 떨어질 수가 있다. 본 시험에서 실리카폼 10% 첨가 시는 초기재령에서는 다른 경우보다 강도가 작게 나타났는데 이의 영향이라 추정할 수도 있으며, 재령 28일부터는 다른 경우보다 강도 증가율이 높아졌고 2년경과 시는 다른 첨가량과 동등한 수준의 강도를 나타냈다. 따라서 숏크리트에서 실리카폼은 강도의 증진효과보다는 틈새충전과 포졸란 반응을 통해 숏크리트의 수밀성을 향상시킴으로써, 수십 년 이후의 장기적 강도저하 방지와 내구성을 증진시키는 효과가 더 크다고 판단된다.

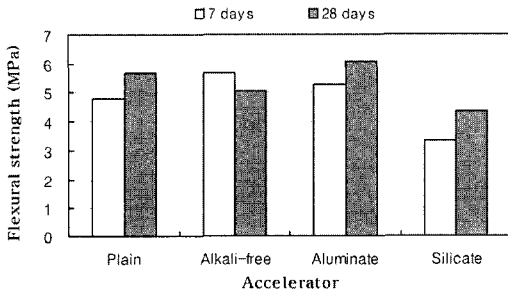


Fig. 5. Histogram of flexural strength of shotcrete with different types of accelerator

또한, 첨가량에 있어서도 EFNARC에서는 15% 이내로 제한하고 있듯이 과다 사용 시는 초기강도에 오히려 불리하게 작용할 수 있으므로 실리카폼 첨가가 보편화되어 있는 노르웨이(5~7% 적용) 등 사례를 참고할 때, 경제성과 효과를 고려하여 수밀성 개선을 위한 최소량(4~7%) 혼입이 적절할 것으로 판단된다.

재령 2년까지의 휨강도 결과를 Table 10과 Fig. 7에 나타내었다. 휨강도는 재령 2년까지 꾸준히 증가하는 양상을 보였고, 재령 2년에는 6 MPa에 달하였다. 상대적으로 실리카폼 7%의 휨강도가 약간 컸으나 실리카폼 첨가

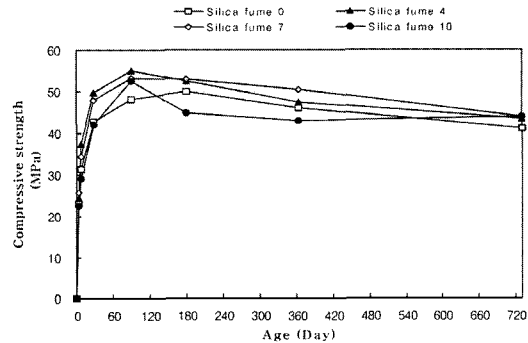


Fig. 6. Compressive strength of shotcrete with different silica fume amounts and aging time

Table 9. Compressive strength of shotcrete with different silica fume amounts

Aging	Accelerator	Averaged compressive strength							
		Silica fume 0%		Silica fume 4%		Silica fume 7%		Silica fume 10%	
		Strength (MPa)	Strength (MPa)	Ratio (%)	Strength (MPa)	Ratio (%)	Strength (MPa)	Ratio (%)	
3 days	Plain	24.1	27.0	12.0	28.4	17.6	21.4	-11.2	
	Alkali-free	23.5	25.0	6.3	26.5	12.8	23.0	-2.1	
7 days	Plain	36.3	38.0	5.6	38.4	5.7	33.6	7.4	
	Alkali-free	32.1	38.2	19.0	35.1	9.3	29.8	-7.2	
28 days	Plain	49.8	55.4	11.2	52.5	5.4	50.7	1.8	
	Alkali-free	43.7	50.8	16.2	49.0	12.1	43.1	-1.4	
3 months	Plain	52.9	57.6	8.9	58.2	10.0	56.7	7.2	
	Alkali-free	49.2	56.3	14.4	54.4	10.6	53.6	8.9	
6 months	Plain	54.8	57.0	4.0	60.0	9.4	58.7	7.1	
	Alkali-free	51.0	53.5	4.9	54.1	6.1	45.8	-10.2	
1 year	Plain	51.8	49.5	-4.4	59.8	15.4	42.8	-17.3	
	Alkali-free	47.1	48.5	3.0	51.6	9.6	43.9	-6.8	
2 years	Plain	-	-	-	-	-	-	-	
	Alkali-free	41.1	43.5	2.4	43.6	6.1	43.9	6.8	

Ratio means compressive strength ratio compared to that at silica fume 0%

량의 다소와 휨강도의 뚜렷한 상관성은 찾을 수가 없었다. 실리카폼을 첨가한 경우는 실리카폼을 첨가하지 않았을 때보다 휨강도가 0.2~11.2% 범위에서 증가하는 것으로 나타났다.

3.3.3 휨인성시험 결과

1) 보 시험

재령 28일에 대한 휨인성시험 결과는 Table 11과 같다. 등가휨강도비는 64.2~84.3% 범위로 대부분 70% 이상의 값을 가지나 재령 7일의 등가휨강도비(75.1~89.6%) 보다는 다소 저하된 결과를 보였다. 등가휨강도비가 재령에 따라 저하되는 원인은 시간경과에 따른 수화반응으로 인해 강성은 지속적으로 증가하나 강섬유에 의한 휨인성 증진효과는 초기에 대부분 반영되어 재령에 따라 큰 변화가 없기 때문인 것으로 추정된다. 슛크리트의 휨인성 수준을 ASTM과 ITA 기준(Table 3 참조)에 따라 평가한 결과 ASTM 기준으로는 대부분 II~III등급

에 해당하였고, ITA 기준으로는 III~IV등급으로 평가되어 보통 내지는 우수한 등급으로 평가되었다. ASTM 방법은 초기균열하중 위치에 따라 인성지수의 변화가 심했으므로 초기균열하중 선정에 신중을 기해야 하며 대

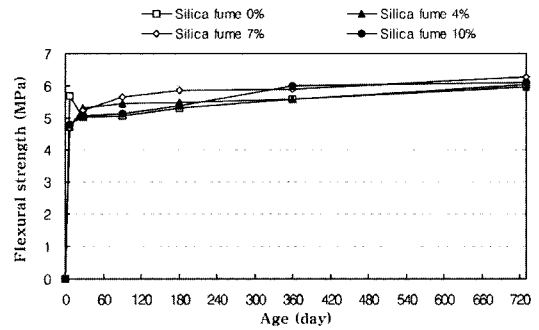


Fig. 7. Flexural strength of shotcrete with different silica fume amounts and aging time

Table 10. Flexural strength of shotcrete with different silica fume amounts

Aging	Averaged flexural strength							
	Silica fume 0%		Silica fume 4%		Silica fume 7%		Silica fume 10%	
	Strength (MPa)	Strength (MPa)	Ratio (%)	Strength (MPa)	Ratio (%)	Strength (MPa)	Ratio (%)	
7 days	5.70	4.73	-17.0	4.70	-17.5	4.80	-15.8	
28 days	5.05	5.30	5.0	5.23	3.6	5.06	0.2	
3 months	5.08	5.44	7.1	5.65	11.2	5.15	1.4	
6 months	5.31	5.48	3.2	5.87	10.5	5.38	1.3	
1 year	5.60	5.60	0.0	5.90	5.4	6.00	7.1	
2 years	6.05	5.97	-1.3	6.26	3.5	6.12	1.2	

Ratio means flexural strength ratio compared to that at silica fume 0%

Table 11. Flexural strength of shotcrete at elapsed time of 28 days

Silica fume	Accelerator	Averaged flexural strength (MPa)	Averaged equivalent flexural strength (MPa)	Equivalent flexural strength ratio (%)
0%	Plain	5.7	4.1	71.9
	Alkali-free	5.1	3.7	72.5
	Aluminate	6.1	4.6	75.4
	Silicate	4.4	3.6	81.8
4%	Plain	5.8	4.6	79.3
	Alkali-free	5.3	3.4	64.2
7%	Plain	5.4	4.2	77.8
	Alkali-free	5.2	4.0	76.9
10%	Plain	6.8	5.7	83.8
	Alkali-free	5.1	4.3	84.3

체적으로 압축 및 휨강도의 증진에 비해 휨인성이 떨어지는 것으로 나타났는데 이는 강섬유의 강성 부족에 그 원인이 있을 것으로 추정된다.

2) EFNARC 패널 시험

시험결과는 Table 12와 같다. 최대하중은 6.9~9.1 tonf의 범위이며, 흡수에너지는 788~1,250 J의 범위로 EFNARC 인성등급(Table 3 참조)은 b 또는 c에 해당하는 양호한 수준을 나타냈다. 각 배합에 따라 1조로 제작된 6개 패널에 대한 변동성을 분석한 결과, 변동계수는 8~18%였다. 부어서 제작된 plain 패널과 뽑아 붙여 제작된 알칼리프리계 패널의 변동계수 차이가 거의 없는 것으로 판단할 때 변동성은 타설방법 보다는 지점조건 및 하중재하 방법 등과 같은 시험방법에 기인한 것으로 판단된다.

3) RTA 패널 시험

Table 13에서 보듯이 최대하중은 3.2~4.9 tonf의 범위이며 흡수에너지는 283~442 J의 범위에 있다. EFNARC 패널의 결과와 비교해 보면, 최대하중은 EFNARC 패널의 40~62%, 흡수에너지는 28~41%의 범위이다. 변동

계수 값은 4~12%로 EFNARC 패널에 비해 비교적 안정된 변동성을 보이고 있다. 이는 3점 지지틀 함으로써 시험 종료 시까지 지지조건의 변화가 없기 때문인 것으로 판단된다.

3.3.4 성능시험 결과에 대한 상관성 분석

1) 압축강도 - 휨강도 상관성

Fig. 8은 plain과 알칼리프리계에 대한 재령 28일까지의 압축강도와 휨강도와의 상관관계를 분석한 것인데 결정계수(R^2)가 0.88로 일련의 상관성이 있음을 확인하였다. 콘크리트의 경우와 유사하게 고성능 스폿크리트의 경우에는 압축강도와 휨강도 간에 일련의 상관성이 있을 것으로 판단되며 향후 각종 배합조건에 따른 추가시험을 통해 분석할 필요성이 있다.

2) 휨강도 - 휨인성 상관성

시험결과, 재령에 따라 휨강도는 증가하나 등가휨강도비(등가휨강도/휨강도)는 작아지는 양상을 나타냈다(Fig. 9). 콘크리트는 시간경과에 따라 강도가 증가되고 콘크리트 매트릭스에 있는 강섬유 앵커력 또한 증진되지만

Table 12. Results of EFNARC panel test at elapsed time of 28 days

Silica fume	Accelerator	First peak load (tonf)	Absorption energy (J)	Toughness class	Coefficient of variation (%)
0%	Plain	8.2	1026.9	c	11.2
	Alkali-free	7.6	925.6	b	8.0
4%	Plain	8.0	1120.5	c	10.8
	Alkali-free	8.1	870.7	b	17.7
7%	Plain	7.9	787.5	b	18.1
	Alkali-free	6.9	811.2	b	10.1
10%	Plain	9.1	1249.8	c	11.5
	Alkali-free	7.7	1014.4	c	11.6

Table 13. Results of RTA panel test at elapsed time of 28 days

Silica fume	Accelerator	First peak load (tonf)	Absorption energy (J)	Coefficient of variation (%)
0%	Plain	4.1	429.4	8.1
	Alkali-free	3.7	299.4	10.7
4%	Plain	4.7	418.3	5.4
	Alkali-free	4.2	282.9	8.2
7%	Plain	4.9	287.5	3.5
	Alkali-free	4.4	295.6	9.3
10%	Plain	4.6	441.7	10.9
	Alkali-free	3.2	283.2	11.7

강섬유 자체의 인장강도는 그대로 유지되며 강섬유의 인장강도가 충분하지 못하면 강섬유가 끊어지는 현상도 나타나게 된다. 따라서 등가휨강도의 증진이 휨강도 증진보다 낮아 등가휨강도비가 작아질 수밖에 없다. 유럽의 경우 휨강도가 4.5 MPa 이상일 경우 강섬유의 굵기를 0.55 mm 이상을 사용하거나 고강도의 강선을 사용한 강섬유를 투입하는 경우가 많다. 국내의 경우 강섬유의 인장강도가 686 MPa 정도로서 고성능 슛크리트를 위해서는 인장강도를 증가시킬 필요가 있다.

3) 등가휨강도 - 흡수에너지 상관성

보 시험에서 구한 등가휨강도와 EFNARC 패널 및 RTA 패널 시험에 의해 구한 흡수에너지와의 상관관계를 분석한 결과(Fig. 10), 등가휨강도와 EFNARC 패널의 흡수에너지와의 결정계수는 0.80으로서 RTA 패널의 0.47보다 높은 상관성을 나타내었다. 이는 EFNARC 패널의 파괴 메커니즘이 보의 경우와 마찬가지로 휨인장 파괴와 관련되어 있기 때문이라 판단된다.

4) EFNARC 패널 - RTA 패널 상관성

Fig. 11은 25 mm 치짐까지 구한 EFNARC 패널의 흡

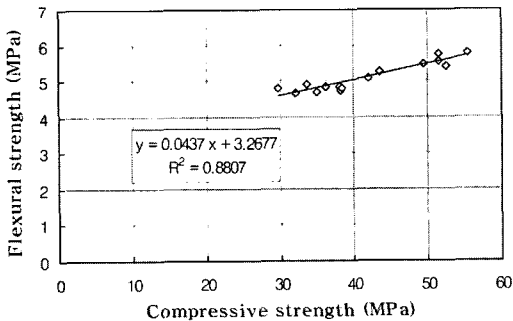


Fig. 8. Relationship between compressive strength and flexural strength of shotcrete

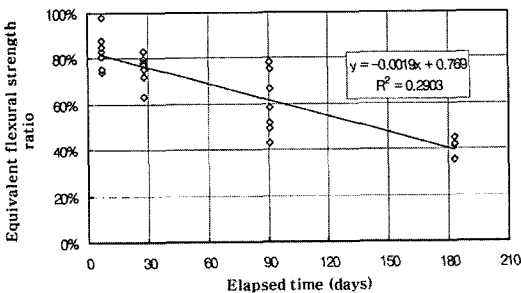


Fig. 9. Variation of equivalent flexural strength ratio with elapsed time

수에너지와 40 mm 치짐까지 구한 RTA 패널의 흡수에너지 사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 그림에는 비교를 위해 Bernard(1999)가 1998년부터 1999년까지 수행한 시험결과를 같이 나타내었는데 Bernard는 강섬유 종류 및 혼입량을 변화시키면서 총 34가지 경우에 대해 시험하였다. 본 연구의 시험결과는 data 수가 적어 정확한 상관식으로 표현하기는 어렵지만 Bernard의 시험결과와 거의 유사한 범위에 분포하는 것을 알 수 있다. Bernard의 시험결과에 의하면 EFNARC 패널의 흡수에너지 1,000 J은 RTA 패널의 흡수에너지 400 J에 해당하였으며 이때의 결정계수는 0.89로서 선형성이 매우 높은 것으로 나타났다.

4. 고성능 슛크리트 내구성

4.1 내구성시험 개요

스�크리트의 내구성이란 슛크리트가 보유하고 있는 성능이 저하되는 것에 대해 견딜 수 있는 특성을 말하는 것

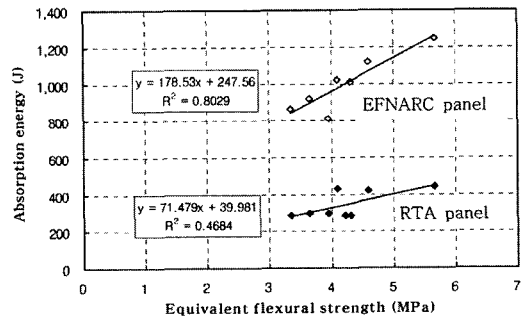


Fig. 10. Relationship between equivalent flexural strength and absorption energy of shotcrete

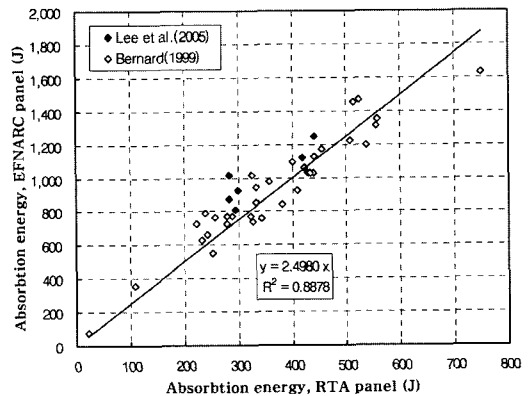


Fig. 11. Correlation between absorption energy of RTA and EFNARC panels

으로서, 지반조건, 콘크리트 재료, 기후조건, 노출환경, 그리고 시공상태 등에 의해 영향을 받는다. 터널에서의 슛크리트는 내부로 스며든 지하수의 저온철 온도차에 의하여 발생할 수 있는 동결융해, 자동차 배기가스에 의한 중성화, 제설재 포설에 따른 염해 등에 의해 내구성이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 위에서 언급한 세 가지의 내구성 저하요인을 중심으로 실험을 수행하였다.

2004년 6월 서울외곽순환고속도로 사패산터널 공사 현장에서 약 2주간에 걸쳐 총 434개의 시험체를 제작하였는데 터널공사에서 실제 사용되고 있는 AMV 장비를 이용하였다. 제작 변수는, 본 연구를 통해 개발된 고성능 슛크리트인 HSFS(high performance steel fiber reinforced shotcrete) 배합과 현재 현장에서 사용되고 있는 일반 슛크리트인 SFS(steel fiber reinforced shotcrete) 배합이며, 이외에도 고성능 슛크리트와 동일한 배합을 가지면서 부어서 만든 고성능 콘크리트인 HSFC(high performance steel fiber reinforced concrete)도 비교실험을 위하여 추가하였다. HSFS에서는 알칼리프리기 급결제를 사용하였고 실리카폼 4%를 첨가하였다. SFS에서는 알루미늄이트계 급결제를 투입하였고 배합은 현재 터널 시공 조건과 동일하게 하였다. HSFC에서는 HSFS와 동일한 배합에서 급결제만 제외하였다.

시험 항목은 압축강도, 휨강도, 휨인성, 투수계수, 동탄성계수, 중성화 깊이, 염해 깊이 그리고 XRD(X-Ray diffractometer) 분석 등이었다. 현재 국내외에서는 동결융해실험을 제외하고는 슛크리트 내구성에 대한 실험법이 규정되어 있지 않기 때문에 본 연구의 단기 내구성실험에서는 각 내구성 항목에 대한 환경 조건을 인위적으로 열악하게 조성하여 실험을 실시하였다. 장기 내구성 검증을 위해서는 국내 처음으로 실제 운영 중인 도로터널 내에 시험을 적치하여 복합 환경에 대한 영향을 평가하였다.

4.2 내구성실험 방법

4.2.1 동결융해실험

ASTM C 666에서는 콘크리트 공시체를 수중 또는 기중에서 300 cycle의 급속한 동결융해 순환에 노출시키는 실험법을 소개하고 있다. 동결융해실험은 온도측정용 중심 공시체의 온도가 4°C에서 -18°C를 거쳐 다시 4°C에 도달하는 과정을 1 cycle(약 4시간 소요)로 하여 300 cycle까지 반복하거나 매 30 cycle에서 측정된 동탄성계수로부터 상대동탄성계수를 계산하여 상대동탄성계수가 60% 미만인 경우 실험을 종료하게 된다. 상대동탄성계수의 계산은 기준값(초기 동탄성계수)에 대한 각 cycle에서의 동탄성계수의 비를 나타낸다. Fig. 12는 본

연구를 위한 실험 장면이다.

4.2.2 중성화실험

중성화 실험방법은 국내외에 통일된 규정이 없기 때문에 온도와 습도조건, CO₂ 농도 조건을 가혹한 조건으로 일정하게 유지하여 실험하였다. 원주형 시편을 제작하여 수중에서 재령 28일까지 표준양생한 후 1면을 제외한 원주면과 나머지 면은 폴리우레탄 수지로 코팅하여 1방향으로 중성화가 일어나도록 조치하였다. 표면이 코팅된 시편을 CO₂ 농도 5%, 상대습도 60%, 온도 30°C가 유지되는 촉진 중성화 실험기(Fig. 13)에 넣고 약 2개월간 촉진 중성화시켰다. 중성화된 시편은 중앙부를 할렬하여 1% 페놀프탈레인 시험액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였다. 또한 중성화 부위와 미중성화 부분의 분말을 채취하여 XRD 분석을 실시하였다.

4.2.3 염해실험

염해실험은 아직 국내외에 실험기준이 통일되어 있지 않다. 각주형 슛크리트 시편을 재령 28일 동안 수중양생 후 염소이온이 1방향으로 침투되도록 나머지 5개 면

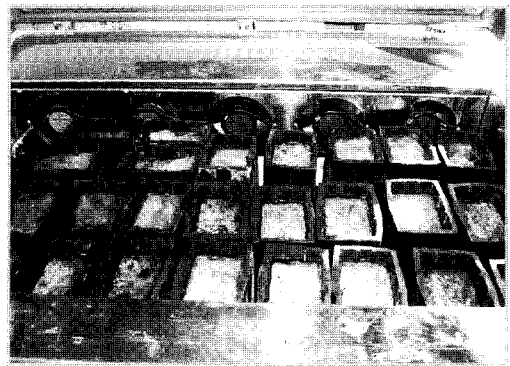


Fig. 12. Freeze-thaw test



Fig. 13. Equipment for accelerated carbonation test

을 에폭시로 코팅한 후 3.0% NaCl 용액에 침지하였으며, 염소이온의 침투를 촉진시키기 위하여 24시간을 1 cycle로 12시간 침지, 12시간 건조의 건습을 반복하였다. 시편은 40 cycle에서 커팅하여 표면에 0.1 N의 AgNO₃ 용액을 분무하였다. 이때 시편 표면에 분무된 시약은 염소이온과 반응하여 은색의 AgCl을 침전시키며 염소이온이 없는 부위에서는 갈색으로 변한다. 따라서 표면에 서부터 은색으로 변하는 지점까지의 깊이를 염소이온의 침투깊이로 간주하였다.

4.2.4 투수성 시험

스�크리트의 투수시험은 KS F 2322(흙의 투수시험 방법)에 근거하여 변수위 투수시험 방법을 적용하였다.

4.2.5 현장 적치 실험

현장 적치 실험은 슛크리트의 장기 내구성을 검증하는 방법으로서 Fig. 14와 같이 실제 운영중인 터널 내에 시편을 적치하여 대기 중에 노출시켜 4년 이상까지의 내구성을 평가하는 실험이다. 영동고속도로 대관령 터널(길이는 1.2 km) 내부에 있는 피난연락갱(터널 입구에서 약 600 m 위치) 안에 설치하여 차량에서 나온 배기가스 중 CO₂에 의한 중성화, 내·외부 온도 차이에 의하여 슛크리트 내부에 유입된 지하수에 의한 동결융해, 제설작업에 사용되는 염화칼슘이나 염화나트륨에 의한 염해 등 복합적인 환경영향을 평가하게 된다. 이 시편은 2004년도 10월말에 적치되었으며, 1년, 2년, 3년, 4년 그리고 4년 이후로 나누어서 침투 염분량, 중성화 깊이, 동결융해에 대한 저항성 그리고 강도와 휨인성 저감률을 측정할 계획이다.

4.3 내구성실험 결과

4.3.1 동결융해실험 결과

Fig. 15는 SFS 및 HSFS의 경우에 대한 동결융해실험 결과로서, SFS 배합에서는 표면 scaling 현상이 발생하였음에도 불구하고 상대동탄성계수는 평균 105.1%로 약간 증가하여 동결융해에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다. HSFS 배합의 경우에도 상대동탄성계수가 평균 111.9%로 동결융해에 대한 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

4.3.2 중성화실험 결과

중성화 깊이는 시간에 따라 증가하였으나 그 증가는 완만하게 감소하였다. 71일 경과 시 SFS는 13.60 mm, HSFS는 5.35 mm, HSFC는 2.20 mm로 측정되어 SFS가 HSFS보다 약 2.5배 정도 중성화가 더 많이 진행된 것으로 나타났다. Fig. 16은 중성화 속도계수를 나

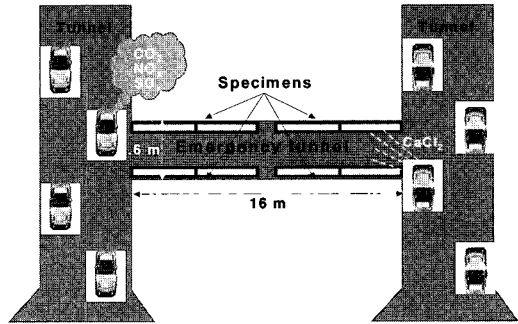
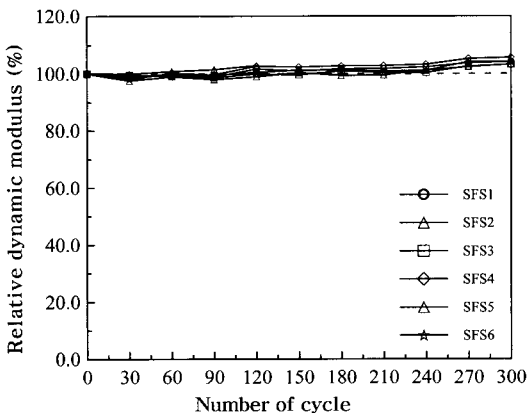
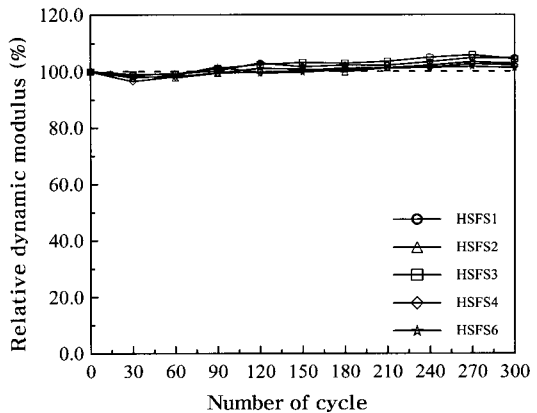


Fig. 14. Layout for field exposure test of shotcrete in tunnel



(a) SFS



(b) HSFS

Fig. 15. Change in relative dynamic modulus of shotcrete

타낸 것이다. SFS는 $1.76 \text{ mm}/\sqrt{\text{day}}$, HSFS는 $0.71 \text{ mm}/\sqrt{\text{day}}$, HSFC는 $0.26 \text{ mm}/\sqrt{\text{day}}$ 정도로 측정되어 SFS가 HSFS보다 약 2.5배 정도 속도계수가 큰 것으로 나타났다. 이것은 HSFS가 상대적으로 중성화에 대한 저항성이 SFS보다 약 2.5배 정도 우수한 것을 의미한다.

또한, Fig. 17과 Fig. 18은 각각 SFS와 HSFS에 대하여 미중성화 영역과 중성화 영역에서 각각 시료를 채취하여 XRD 분석을 실시한 것이다. 미중성화 영역에서, HSFS는 실리카폼 첨가로 인해 포졸란 반응이 촉진되어 숏

리트의 강성에 불리한 수산화칼슘(P)이 SFS에 비해 많이 소진된 것으로 나타났으며, 중성화 영역에서는 SFS가 중성화 진행으로 인해 탄산칼슘(C)이 크게 증가한 반면 HSFS에서는 약간 증가한 것으로 확인되었다. 이것은 고성능 숏크리트에서는 실리카폼과 같은 포졸란 재의 첨가로 인해 숏크리트의 장기 강도가 증진될 수 있으며 중성화에 대한 저항성을 높여 주어 내구성 확보가 가능하다는 것을 의미한다.

4.3.3 염해실험 결과

염소이온의 침투 깊이는 SFS가 평균 35.9 mm로 가장 컸으며 HSFS 25.0 mm, HSFC 18.6 mm 순으로 나타났다. 이를 확산계수비로 환산하여 나타낸 결과, SFS를 기준으로 HSFS는 48.5%, HSFC는 26.8%로 염소이온 확산계수가 작은 것으로 추정되었다. 이러한 결과는 SFS의 경우 일반 숏크리트인데 비해 HSFC 및 HSFS는 실리카폼이 혼합된 고성능 콘크리트 및 숏크리트로서 수화 조직이 포졸란 반응에 의하여 치밀해진 영향이라 판단된다.

4.3.4 투수성 시험 결과

숏크리트의 내구성능 좌우하는 가장 큰 요소 중의 하나가 수밀성, 즉 투수성이다. 투수성이 크면 상대적으로

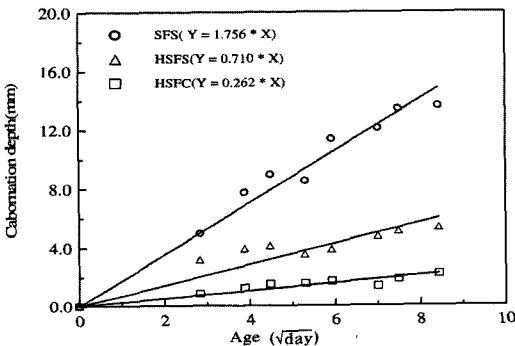


Fig. 16. Carbonation velocity factor for different shotcrete and concrete mixtures

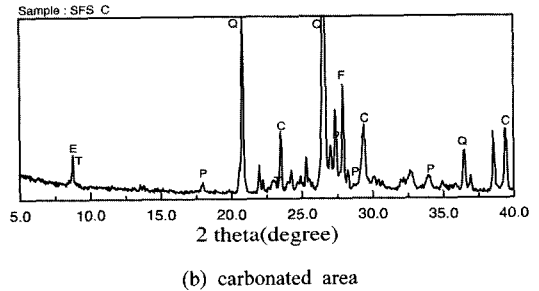
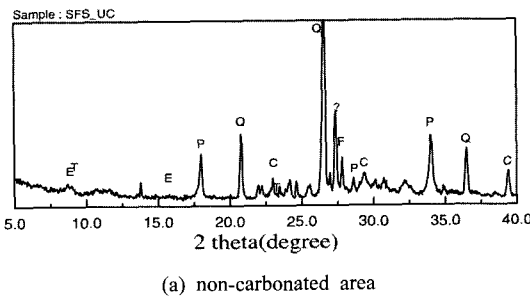


Fig. 17. XRD patterns of SFS

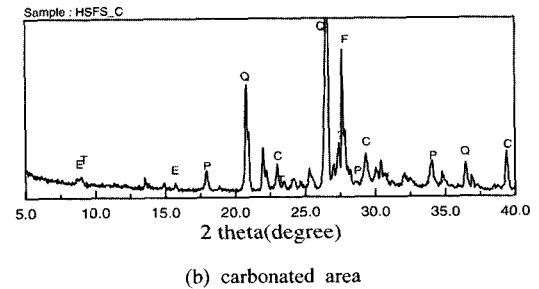
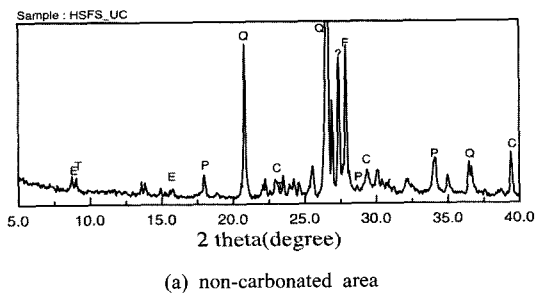


Fig. 18. XRD patterns of HSFS

염분 침투나, CO₂ 가스에 의한 중성화 가능성이 높게 된다. EFNARC에서는 투수계수가 1×10^{-10} cm/sec 보다 작을 경우 water-tight 숯크리트로 간주하고 있다. 국내 대부분 연구는 강섬유를 배제한 상태에서 염소이온 투과 시험으로 숯크리트의 투수성을 평가하였는데 본 연구에서는 변수위 투수계수 측정법을 이용하여 직접 투수계수를 측정하였다. 측정결과, SFS의 경우에는 1.73×10^{-9} cm/sec, HSFS는 0.99×10^{-9} cm/sec로 나타나 HSFS가 수밀성면에서 더 우수한 것으로 나타났으며 두 가지 배합 모두 EFNARC의 water-tight 수준에 근접하는 우수한 수밀성을 나타냈다.

4.3.5 현장 적치 장기 내구성실험 결과

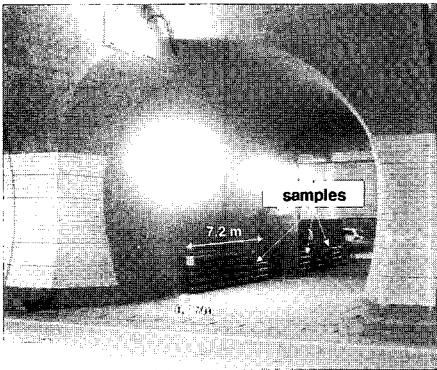
장기 내구성실험은 Fig. 19와 같이 현재 운영 중인 터널 내에 위치하는 피난연락통 안에 설치하여 4년 이상까지의 내구성을 평가하는 실험이다. 1년이 경과된 상태에서 중성화 깊이를 측정된 결과, SFS에서는 5.8 mm, HSFS에서는 3.0 mm로 측정되었다. HSFS의 중성화

진행 깊이가 SFS의 약 50%정도밖에 되지 않아 HSFS가 SFS보다 내구성이 우수한 것으로 판단되었다. 향후 약 4년 이후까지 매년 주기적으로 염분 침투량 및 깊이, 중성화 깊이, 동결융해 저항성, 강도 및 휨인성 변화를 측정할 예정이다.

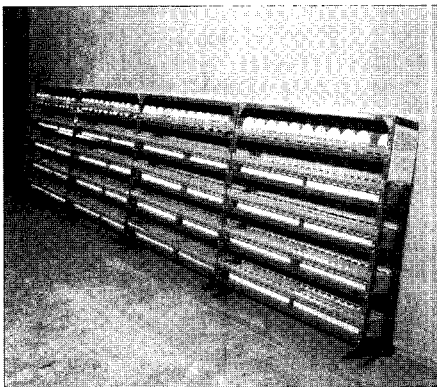
5. 결 론

본 연구에서는 무라이닝 터널의 국내 적용을 위하여 영구적인 터널 지보재로서 요구되는 고성능 숯크리트를 개발하고 단기 및 장기적 내구성실험을 통하여 이를 검증하였다. 먼저 효율적인 배합개선을 통하여 고강도 숯크리트를 개발하였으며 급결제 종류와 실리카폼 첨가량을 주 변수로 하여 최대 2년까지의 성능변화 추이를 분석하였다. 또한 단기 내구성 검증을 위해서 동결융해, 중성화, 염해에 따른 실험실 촉진 실험과 투수성 시험을 실시하였으며, 장기 내구성 검증을 위해서는 실제 운영 중인 도로터널 내에 시편을 적치하여 복합 환경에 대한 영향을 조사하였다. 이 연구에서 얻어진 주요 결과들은 다음과 같다.

- 1) 급결제 종류에 따른 강도시험 결과 알칼리프리게, 알루미늄네이트계 그리고 실리케이트계 급결제 중 알칼리프리게만이 유일하게 목표기준(압축강도 40 MPa, 휨강도 4.5 MPa)을 달성하여 고성능 숯크리트에서는 알칼리프리게 급결제가 사용되어야 하는 것으로 나타났다. 실리카폼을 첨가했을 경우 압축 및 휨강도가 약간 증가하였으나 첨가량의 다소에 따른 뚜렷한 경향은 없었으며, 특히 다량 투입시는 오히려 초기강도 발현이 늦어지는 것이 확인되었다. 따라서 실리카폼은 강도 증진보다는 수밀성 개선을 통하여 장기적인 강도저하를 방지하는 목적으로 첨가되어야 하며 경제성과 효과를 고려하여 4~7% 정도를 혼입량 기준으로 설정하는 것이 적절하다.
- 2) 숯크리트가 고강도화 됨에 따라 재령이 진행될수록 숯크리트의 휨강도는 증가하는데 반해 휨인성은 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 강섬유의 강성부족이 주원인이라 판단되며 따라서 고성능 숯크리트에서는 강섬유의 직경을 현재(직경 0.5 mm)보다 증가시키거나 고강도의 강선을 사용해야 할 필요가 있다. 숯크리트 시험항목의 상관성에 있어서는 재령 28일까지의 압축강도와 휨강도($R^2=0.88$), 보의 등가휨강도와 사각패널의 흡수에너지($R^2=0.80$)가 높은 상관성을 나타냈다.



(a) Specimens exposed in cross passage of tunnel



(b) Enlarged view of stacked specimens

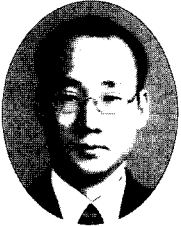
Fig. 19. Specimens for field exposure test in tunnel

- 3) 슛크리트는 뿔어 붙이는 특성으로 인해 동결융해 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 다만 SFS의 경우에는 표면에 scaling 현상이 발생되어 HSFS가 SFS보다는 상대적으로 동결융해에 대한 저항성이 더 높았다.
- 4) 중성화실험 결과, 71일 경과 시 중성화 깊이는 SFS, HSFS의 경우 각각 13.60 mm, 5.35 mm로 측정되었으며, 중성화 속도계수도 SFS, HSFS의 경우 각각 $1.76 \text{ mm}/\sqrt{\text{day}}$, $0.71 \text{ mm}/\sqrt{\text{day}}$ 정도로 나타났다. 이것은 HSFS가 SFS보다 약 2.5배 정도 중성화 저항성이 우수한 것을 의미한다. XRD 분석 결과, HSFS의 경우에는 실리카폼 첨가로 인한 포졸란 반응으로 강도 면에서 불리하게 작용하는 수산화칼슘이 많이 소진된 것이 확인되었으며, SFS는 중성화가 더 많이 진행되어 탄산칼슘이 크게 증가한 것으로 나타났다. 이것은 고성능 슛크리트에서는 실리카폼과 같은 포졸란 재의 첨가로 인해 슛크리트의 장기강도가 개선되고 중성화에 대한 저항성을 높여 주어 내구성 확보가 가능하다는 것을 의미한다.
- 5) 염해실험 결과, 염소이온의 침투 깊이는 SFS는 35.9 mm로 HSFS의 25.0 mm보다 크게 나타났다. 이를 확산계수비로 환산한 결과 HSFS는 SFS의 48.5% 정도 밖에 되지 않아 HSFS가 SFS보다 염해 저항성이 더 우수한 것으로 나타났다. 이것은 HSFS는 실리카폼 첨가로 인한 포졸란 반응으로 조직이 치밀해진 효과라 판단된다.
- 6) 슛크리트의 내구성능을 좌우하는 가장 큰 요소 중의 하나가 수밀성, 즉 투수성이다. 투수성이 크면 상대적으로 염분 침투나, CO₂ 가스에 의한 중성화 가능성이 높게 된다. 투수계수 측정결과, SFS의 경우에는 $1.73 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$, HSFS의 경우에는 $0.99 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$ 로 산정되어 HSFS가 수밀성면에서 약간 우수한 것으로 나타났으나 두 경우 모두 EFNARC의 water-tight 수준($1 \times 10^{-10} \text{ cm/sec}$)에 근접하는 우수한 수밀성을 가지는 것으로 평가되었다.

- 7) 현장 적치 내구성실험은 현재 초기단계이며 1년 정도가 경과된 상태에서 중성화 깊이를 측정한 결과 SFS에서는 5.8 mm, HSFS에서는 3.0 mm로 측정되었다. HSFS의 중성화 진행 깊이가 SFS의 약 50% 정도 밖에 되지 않아 HSFS가 SFS보다 내구성능이 더 우수한 것으로 확인되었다. 이 실험은 향후 약 4년 이후까지 매년 주기적으로 염분 침투량 및 깊이, 중성화 깊이, 동결융해 저항성, 강도 및 휨인성 변화 등을 측정할 예정이다.

참고문헌

1. 류종현, 김동현, 이상필, 2005, 무라이닝 터널과 조립식 라이닝 공법, 한국콘크리트학회지, 제17권, 제2호, pp. 42-47.
2. 배규진, 장수호, 이석원, 박해균, 이명섭, 김재권, 2004, 고성능 슛크리트 라이닝의 설계 및 시공기술 분석, 터널과지하공간, 한국암반공학회지, 제14권, 제1호, pp. 1~15.
3. 서영화, 나승훈, 지동한, 홍은수, 이인모, 2002, 무라이닝 공법 국내 적용을 위한 지보재의 안정성, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp. 204~216.
4. 정형식, 배규진, 이상덕, 2001, 경춘선 복선전철 본선터널의 PCL공법 적용 타당성에 관한 연구(제7공구), 대한터널협회.
5. 한국도로공사, 2001, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준정립(II).
6. Bernard, E.S., 1999, Correlations in the performance of fibre reinforced shotcrete beams and panels, University of Western Sydney.
7. Davik, K.I., 1996, Durability of sprayed concrete in subsea road tunnels, Proceedings of the 2nd International Symposium on Sprayed Concrete, Norway, pp. 333-344.
8. EFNARC, 1996, European specification for sprayed concrete, United Kingdom.
9. Lee, S.P., Kim, D.H., Ryu, J.H., Yu, J.Y., Lee, S.D., Han, S.H., Choi, M.S. and Park, C., 2005, An experimental study on the development of high performance shotcrete for permanent tunnel support, Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, Istanbul, Turkey, Vol. 1, pp. 455-461.
10. Ono, K. and Tomisawa, N., 2003, Additional lists of permanent shotcrete lining, ITA working group report.



이 상 필

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사
Tel: 02-2005-9220
E-mail: splee@gconst.co.kr
현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀
팀장



류 중 현

1998년 명지대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2000년 명지대학교 대학원 토목공학과
공학석사
Tel: 031-329-4622
E-mail: ryujh7@gconst.co.kr
현재 GS건설(주) 기술연구소 연구개발2팀
선임연구원



이 상 돈

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 031-371-3370
E-mail: sdlee@freeway.co.kr
현재 한국도로공사 도로교통기술원 지반
연구그룹 수석연구원



전 석 원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템
공학부 부교수



이 정 인

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과
공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학과 공학
석사
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대학원
자원공학과 공학박사
Tel: 02-880-7221
E-mail: cilee@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템
공학부 명예교수