

## 강섬유보강샷크리트의 역학적 특성 및 경제성 평가

### Mechanical Properties and Economic Evaluation of Steel Fiber Reinforced Shotcrete

손 영 현\* · 박 우 진\*\*

Young-Hyun Son · Woo-Jin Park

(1997년 12월 8일 접수, 1998년 5월 2일 채택)

#### ABSTRACT

A field experiment was performed to analyze the properties of SFRS(steel fiber reinforced shotcrete) against WMRS(wire mesh reinforced shotcrete) with some experimental parameters. The parameters were reinforcing methods(steel fiber and wire mesh), steel fiber contents(0.5%, 0.75%, and 1.0%), silica fume contents(0.0% and 10.0%), spraying thicknesses of layer(10cm, 8cm, and 6cm), and spraying parts(side wall, shoulder, and crown).

According to the analyzed results, the mechanical properties of SFRS such as compressive strength, flexural strength, and load-carrying capacity after cracks were improved. And the economic evaluation was also performed on the basis of the required thickness of the layer and other researcher's results for rebound ratios.

From the results of this tests, it is found that the traditional WMRS may be substituted by the SFRS in the viewpoint of the economic evaluation as well as the mechanical properties. In additions, the silica fume, even if it is very expensive, can significantly improve the mechanical properties of the shotcrete regardless of mixing with or without the steel fiber.

#### 1. 서 론

구 오스트리아 공법과 대별하여 제시된 NA-

TM(New Austrian Tunnelling Method) 공법에 서는 Shotcrete, Rock Bolt, 지보공 등을 적절히 조합시켜 원지반 자체가 갖는 지지력을 최대한

\* 한양대학교 토목공학과

\*\* 단국대학교 토목환경공학과

발생시킨다는 것을 기본으로 하고 있다.

즉, 암반의 지보력을 충분히 발휘시키기 위해 암반의 상황에 따라 슛크리트탄, 혹은, 슛크리트와 소량의 Rock Bolt를 조합하여 사용하게 된다.

이 중, 슛크리트공법은 모르터 또는 콘크리트를 Hose로 보내 압송공기에 의하여 시공면에 고속도로 뿜어 붙이는 것으로 시공장치가 비교적 소형인 점, 거꾸집이 불필요하다는 점, 타설부위의 시공이 호스끝의 노즐만으로 가능하다는 점, 시공면에 밀착시킬 수 있다는 점 등의 잇점이 있어서 Tunnel의 1차 라이닝에서 뿐만 아니라, 암반이나 법면 등의 보호, 노후한 구조물의 보수, 수로의 라이닝 등에 널리 이용되고 있다.

이러한, 슛크리트 공법은 1910년 Carl Akeley에 의해 Double-Chamber Cement Gun이 건설 분야에 도입된 이래, 1950년대에는 굵은골재를 함유한 건식 Gun, 습식 Shotcrete장비와 연속공급장치인 Rotary Gun이 소개됨으로써 이 공법의 실용성 및 효율성이 증대되기 시작하였다.

한편, 터널내 슛크리트공법에서 기존의 와이어메쉬보강슛크리트(이하 WMRS라 함.)는 Wire Mesh를 암면에 고정시키는데 있어서 과다한 시간소요, 암면형상에 따른 불량한 슛크리트의 타설과 그에 따른 여분의 재료필요, 정확한 압력과 거리를 확보하지 못했을 경우 생기는 Sand Pocket등으로 인한 부착력 감소, 이러한 제반의 문제점으로 인한 전체 공사비의 상승등이 크게 문제시 되고 있다.

그러나, 최근 국내 도로터널 현장에 빈번히 적용되고 있는 강섬유보강슛크리트(이하 SFRS 함.)는 보강층을 빠른 시일내에 형성하여 안정성 증대, 지반변형에 의한 슛크리트층의 변형시에 높은 잔유 내하중성, 불연속적인 강섬유가 콘크리트내에 고르게 퍼져있어 강한 내부식성 발휘 등의 장점을 지니고 있어 WMRS에 대한 대체효과가 기대되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 슛크리트층 보강방법, 강섬유혼입율, 실리카흄혼입율 및 타설부위를 중심으로 SFRS에 관한 현장실험을 수행하였으며, 실험결과로 부터 SFRS의 역학적 특성과 경제성을 기존의 WMRS와 비교분석 하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료 및 배합

본 실험에서 시멘트는 H사제로 비중이 3.15인 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 비중 2.60, 조립률 2.75인 하천사를, 그리고 굵은골재는 최대치수 13mm, 비중 2.62, 조립률 2.75인 쇄석을 각각 사용하였다.

보강재로는 ASTM A 820-Type I인 강섬유와 국내의 터널현장에서 널리 상용화 되어 있는 일반적인 와이어메쉬를 사용하였으며, 혼화제로써는 고분말도의 실리카흄을 적정량 혼입하였다.

본 실험에 적용된 슛크리트 배합표는 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportions of shotcrete

G <sub>max</sub> (mm)	W/ (C+SF) (%)	S/a (%)	Unit Weights (kg/m <sup>3</sup> )				Accer. (%)	Steel Fiber (%)	Silica Fume (%)
			W	C	S	G			
13	42	60	168	400	1045	697	5	0.05, 0.75, 1.0	0.10

\* SF: Silica Fume

다음 Fig. 1은 본 실험에서 사용된 강섬유의 기하학적 형상 및 형상비를 나타낸 것이다.

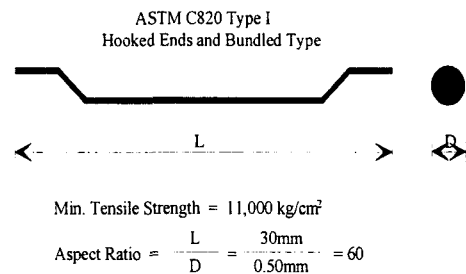


Fig. 1 Geometry and properties of steel fiber

### 2.2 실험방법

각종 시험체를 얻기위해 85cm×85cm×15cm의 목재 Panel를 제작한 후, 현장에서 두께 2~3cm의 모재(母材)콘크리트( $\sigma_{ck}=350\text{kg/cm}^2$ )를 만들고, 그 위에 10cm 이상의 슛크리트층을 형성

하였다.

타설은 평균 1.2m 거리에서 타설부위를 Side Wall, Shoulder, Crown으로 나누어 실시하였으며, 이때의 공기압력은 2.3kg/cm<sup>2</sup>였다.

타설부위가 Side wall인 경우, 판넬은 벽면에 약 70°로 밀착시켜 고정하였으며, Shoulder, Crown인 경우는 바닥에서 평균높이 2.3m와 2.6m되는 위치에 각각 고정시켰다.

역학적 특성을 분석하기위하여, 슛크리트하는 방향에 대해 직각방향으로 (JCI-SF 4 참조) 압축강도용 10cm×20cm의 코아를, 그리고 휨강도 측정용으로 10cm×10cm×40cm의 빔 시험체를 Concrete Cutter로 채취하였다.

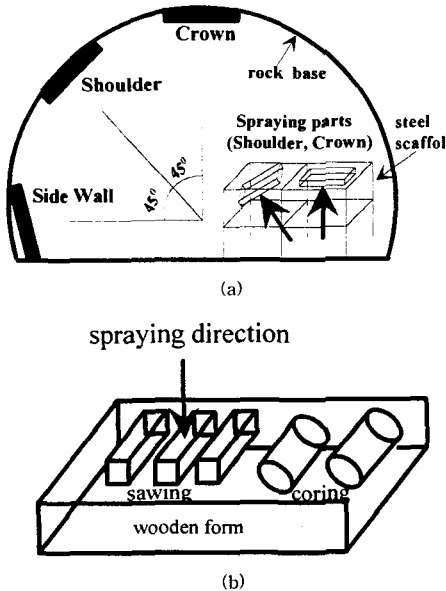


Fig. 2 Spraying, sawing, and coring scheme

### 3. 역학적 성질

#### 3.1 압축강도

JCI SF-3에서 추천하고 있는 방법으로 채취된 Core와 현장에서 타설시 제작된 공시체는 재령별로 수중양생(20±3°C)을 거쳐 200ton 용량의 만능시험기를 이용하여 압축강도시험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

한편, 본 실험에서 설계기준강도는 1일강도 100kg/cm<sup>2</sup>, 28일 강도 200kg/cm<sup>2</sup>으로 본 실험이 수행된 지하철공사 현장의 시방서를 참고하여 정하였다.

Fig. 3의 실험결과에 의하면, 타설부위가 Side wall, Shoulder, Crown순으로 변화될 때, 강도가 점점 감소되는 경향을 보이고 있다.

이것은 타설부위가 Side wall에서 Crown으로 변화될 수록 적절한 타설거리와 타설압력 등의 조절에 따른 슛크리트 층의 치밀성 확보 및 타설 직후 탈락되는 콘크리트의 양을 최소화하기 위한 노즐단부에서의 급결재 및 배합수 투입방법의 개선이 요구됨을 보여주는 것이라 하겠다.

전체적인 실험결과에 있어서, 강섬유 혼입율의 증가에 따라 압축강도 증진효과는 크게 기대할 수 없을 것으로 사료되나, 실리카 흙의 혼입은 압축강도의 증대에 매우 효과적인 방법인 것으로 판단된다.

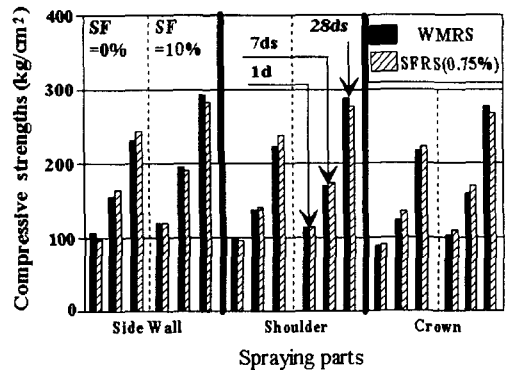


Fig. 3 Variations of compressive strengths

#### 3.2 휨강도

휨강도시험은 3점 휨하중재하법을 이용하였으며, 그 하중재하개략도는 Fig. 4와 같다.

또한, Fig. 5(a)~(c)에 각종 변수에 따른 실험 결과를 나타내었다.

Fig. 5(a)는 강섬유혼입율에 따른 휨강도 변화를 타설부위가 Side wall인 경우에 대해 실리카 흙혼입율 및 재령별로 도시한 것으로서, 동일 재령에서 강섬유혼입율이 증가함에 따라 휨강도

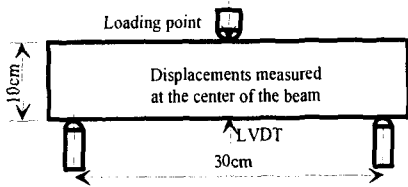


Fig. 4 Flexural loading details

또한 증가하는 현상을 보이고 있다. 특히, 실리카흙의 혼입은 휨강도의 증가에 높게 기여하는 것으로 나타났다.

강섬유혼입율이 0.75%, 타설부위가 Side wall 인 경우에 대해, 타설두께에 따른 휨강도의 변화를 재령별로 나타내고 있는 Fig. 5(b)에서, SFRS의 휨강도는 WMRS와 마찬가지로 타설두께에 관계없이 재령의 증가에 따라 꾸준한 증가 양상을 보이고 있다.

한편, 재령 7일과 28일에서 WMRS 보다 높은 휨강도를 나타내고 있는  $t=10\text{cm}$ ,  $8\text{cm}$ 에 비해,  $t=6\text{cm}$ 인 경우에는 모든 재령에서 SFRS가 WMRS보다 낮은 결과를 나타내었다. 이는 강섬유 혼입에 따라 타설두께를 충분히 감소시킬 수 있음을 시사하는 것이나, 그 한계에 대해서는 추가적인 실험적 검증이 필요한 것으로 판단된다.

강섬유혼입율이 0.75%로 일정할 때, 재령 28일에서의 타설부위에 따른 휨강도의 변화를 Fig. 5(c)에 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있듯이, 타설부위가 Side wall, Shoulder, Crown으로 변화할 수록, 압축강도의 경우에서와 마찬가지로 휨강도 또한 감소되는 경향을 보이고 있으며, 전체적으로 SFRS의 경우가 WMRS에 비해 높은 수준을 유지하고 있다.

이상의 결과에서 강섬유를 적정량 혼입함으로써 휨강도의 증진뿐만 아니라 동일한 휨강도를 얻는데 필요한 소요 숏크리트 라이닝 두께를 기존의 WMRS에 비해 충분히 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이는 터널내 지보공으로서의 숏크리트에만 국한된 것이 아니라, 최종 라이닝콘크리트가 숏크리트 층과 구조적으로 유사한 거동을 하는 것으로 볼 때, 이에 강섬유를

혼입할 경우 두께를 충분히 감소시킬 수 있음을 시사하는 것으로 터널 공사시 공사비용, 공시기간 등의 단축이 가능한 것으로 판단된다.

뿐만 아니라, 실리카흙의 혼입은 높은 휨강도증진 효과를 부여한다는 측면에서 경제성을 최대한 고려하여 그 사용이 적극 추천된다.

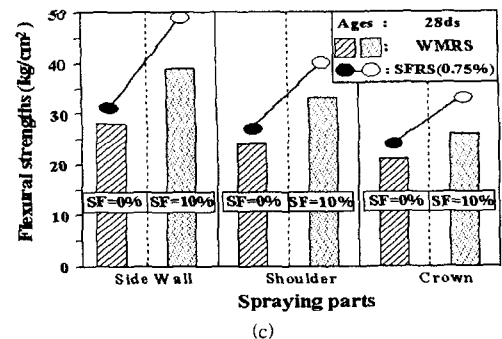
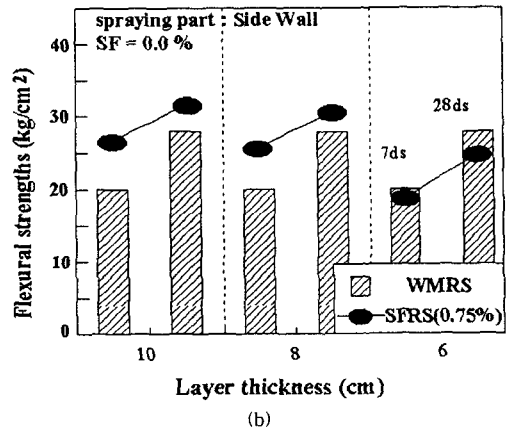
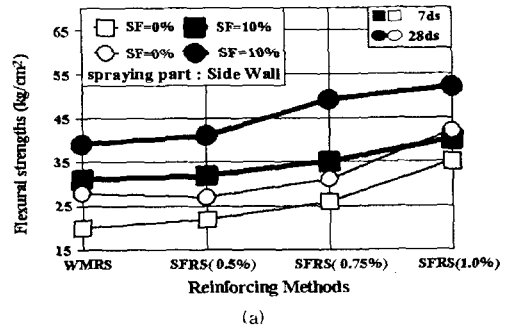


Fig. 5 Variations of flexural strengths

### 3.3 후균열저항성

실리카흙을 혼입한 SFRS를 WMRS의 성능과 비교하기 위하여 본 연구에서는 ASTM C 1018에서 제안하고 있는 인성지수를 이용하여 후균열저항성을 비교하였다.

ASTM C 1018에서 규정하고 있는 인성지수  $I_N$ 을 구하는 방법은 다음과 같은 일반식으로 표현될 수 있다.

$$I_N = \frac{\int_0^{m\delta_c} P(\delta) d\delta}{\int_0^{\delta_c} P(\delta) d\delta} \dots\dots\dots (1)$$

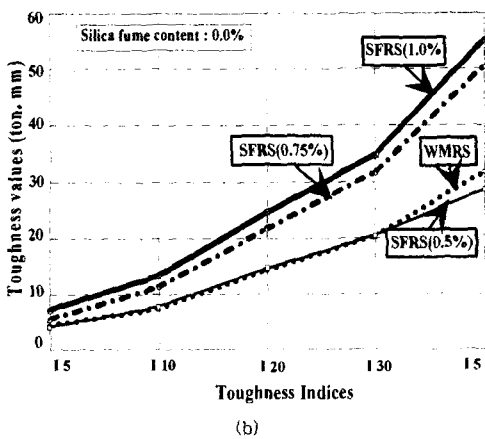
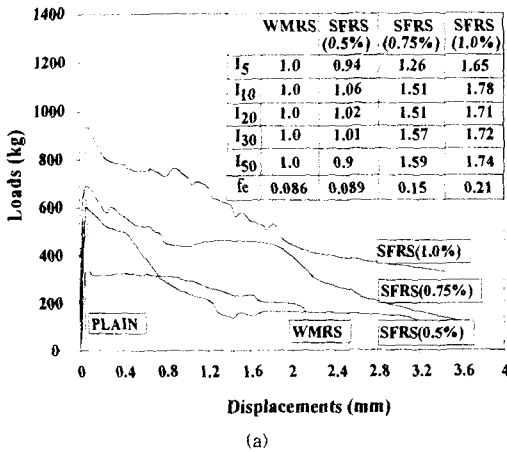


Fig. 6 Load-displacement curve and toughness index (SF=0.0%)

여기서,  $m=(0.5 \times N + 0.5)$ ,  $\delta_c$ 는 초기균열처짐을 나타낸다.

위의 Eq. 1을 이용하여 본 연구에서 얻은 WMRS와 SFRS의 하중-처짐선도와 인성지수의 변화를 Fig. 6(a), Fig. 6(b), Fig. 7(a), Fig. 7(b)에 나타내었다.

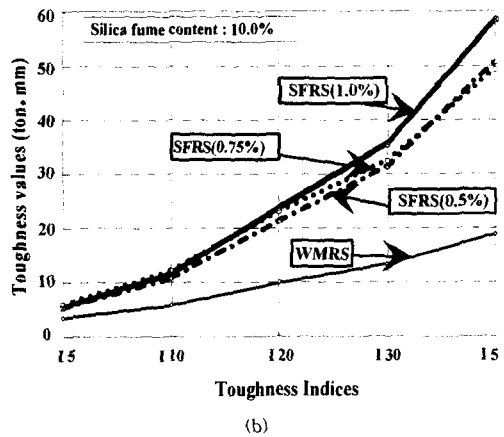
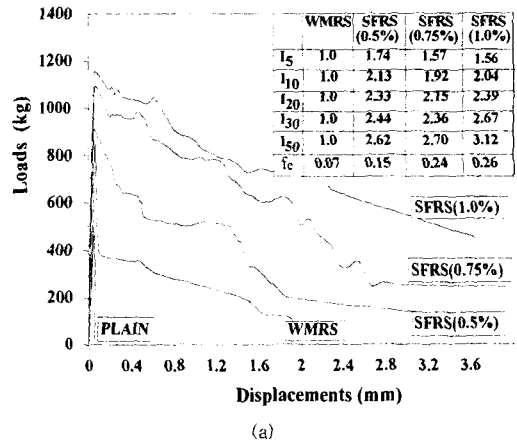


Fig. 7 Load-displacement curve and toughness index (SF=10.0%)

Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)의 하중-처짐선도에서, 처짐량 2mm 근처에서 wire mesh의 파단과 동시에 급작스런 휨 시험체의 파괴가 발생하는 WMRS의 경우와는 달리, SFRS의 경우는 시험체 중앙부 처짐이 지속적으로 증가되고 있다.

이것은 중앙부위에 발생된 휨균열이 시험체

전체높이까지 진전되는 완전한 파괴단계에 있어서도 강섬유의 브리지효과가 지속적으로 발휘되고 있기 때문이다. 그러나, 강섬유혼입율이 높을수록 휨강도의 증대는 기대되지만, 이러한 브리지효과는 강섬유혼입율의 증가에 의한 효과라기 보다는 균등한 섬유 분산에서 얻어지는 효과일 것이다.

한편, ASTM방법에 의해 인성을 평가한 결과 (Fig. 6(b), Fig. 7(b)), 실리카흙을 혼입하지 않은 경우, 0.75%이상의 강섬유혼입율을 갖는 SFRS는 WMRS에 비해 초기균열이 발생된 후 높은 연성거동을 예상할 수 있으나, 강섬유 혼입율 0.5%에서는 연성의 증대를 크게 기대하기 어려운 것으로 나타났다.

그러나, 실리카흙을 10.0% 혼입한 경우는 전체적으로 WMRS에 비해 뚜렷하게 인성이 증가되는 결과를 얻었다. 특히, 0.5%의 강섬유 혼입율에서 SFRS는 실리카흙을 혼입하지 않은 SF-RS보다 크게 인성이 증진되는 결과를 보였다.

이상의 결과로부터, 실리카흙을 혼입하지 않을 경우는 강섬유 혼입율을 0.75%, 실리카흙을 10.0% 혼입할 경우는 강섬유 혼입율을 0.5%로 하는 것이 연성거동을 유도하는데 보다 효과적일 것으로 판단된다.

### 3.4 소요 라이닝 두께

JCI SF-4 방법을 이용하여 등가휨강도( $f_e$ )를 계산하고, 그 결과를 이용하여 WMRS에 대한 SFRS의 등가 타설두께를 산정하여 타설두께의 감소효과를 검토하였다.(Fig. 6(a), Fig. 7(a))

JCI SF-4에서는  $\delta=L/150$ 까지의 하중-처짐선도 아래의 면적을 이용하여 다음과 같은 등가휨강도를 제안하고 있다.

$$f_e = \frac{E_{L/150} \cdot L}{(L/150) \cdot bh^2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $E_{L/150}$ 은  $\delta=L/150$ 까지의 하중-처짐선도 아래의 면적을 나타낸다.

본 연구에서는 설계 WMRS 라이닝 두께를 20cm으로 하여 앞에서 구한 등가휨강도에 의해 소요 SFRS 라이닝두께를 계산하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

이 결과에서 강섬유혼입율을 증가시킴에 따라

Table 2 Reduction effect of required lining thicknesses

Silica Fume (%)	Required thickness of SFRS( $T_{SFRS}$ ) Designed thickness of WMRS( $T_{WMRS}$ )			
	WMRS	SFRS (0.5%)	SFRS (0.75%)	SFRS (1.0%)
0	1.0 (20cm)	0.98 (19.5cm)	0.82 (16.4cm)	0.69 (13.8cm)
10	1.0 (20cm)	0.82 (16.3cm)	0.65 (12.9cm)	0.61 (12.2cm)

숯크리트의 소요 라이닝 두께를 점점 감소시킬 수 있으며, 특히, 강섬유혼입율이 0.75%가 될 때, 비교적 감소 폭이 크지만, 그 이후는 감소경향이 둔화되고 있는 것으로 판단할 수 있다.

이러한 측면에서 라이닝 두께의 감소효과는 강섬유 혼입율이 0.5%~0.75% 임을 알 수 있다.

## 4. 경제성 검토

강섬유보강숯크리트의 현장적용성 여부를 검토할 때, 상기의 역학적인 측면 뿐만 아니라, 경제적으로 잇점이 있는가 하는 것이 평가되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 SFRS와 WMRS의 단위  $m^3$ 당 타설비를 검토하기 위해, 본 현장실험의 결과를 토대로 경제성 평가를 실시하였다.

단위  $m^3$ 당 타설비를 산출하기 위하여, 서울 지하철 7호선 A공구(PD-4: 연암, Type-B: 복선 기준)의 단위타설비 산출내역을 근거로 택하였다. 또한, 1회발파당 굴진장은 0.8m를 기준으로 하여 산출하였다.

단위타설비는 강섬유 혼입율, 실리카흙 혼입율, 소요 라이닝 두께의 변화(Table 2)등을 고려하여 재료비, 장비사용비, 노무비로 나누어 계산하였다.

단위타설비 산출시 강섬유는 kg당 1,500원으로 계산되었으며, 실리카흙은 kg당 600원으로 계산하였다. 한편, 시멘트의 경우는 관급자재임을 고려하여 산출자료에서 제외하였다.

순수한 재료비만을 고려하여 타설비를 비교한 Table 3에서 1회 굴진당 총타설비가 강섬유만을 혼입하였을 경우 약 1.4~1.9배까지 상승되고, 실리카흙을 동시에 혼입하였을 경우, 약 1.6

~2.1배까지 상승됨을 알 수 있는데, 이는 강섬유와 실리카 흙이 타설비의 상승을 주도하고 있다.

Table 3 Placing cost considering only material cost (unit : won)

Reinforcing Methods	WMRS	SFRS			
Steel Fiber Contents(%)	0.0	0.5	0.75	1.0	
Placing Depth in Side Wall(cm)	20	20	20	20	
Silica Fume Contents (0.0%)	Material	34,540	101,014	139,283	177,551
	Equipment Rental	97,827	97,827	97,827	97,827
	Worker	25,901	22,847	22,847	22,847
	Total	158,268	221,688	259,957	298,225
Silica Fume Contents (10.0%)	Material	34,540	132,214	170,483	208,750
	Equipment Rental	97,827	97,827	97,827	97,827
	Worker	25,901	22,847	22,847	22,847
	Total	158,268	252,888	291,157	329,425

이러한 순수한 재료비의 상승에 따른 전체 타설비의 상승이 지금까지 현장에서 상기와 같은 고가의 재료들을 사용하는데 큰 장애요소가 되어 왔던 것이 사실이다.

한편, D.I. Chang 등(1996)의 연구결과에 따르면, 강섬유 및 실리카흙의 혼입은 슛크리트의 리바운드율을 현격히 감소시키는 효과를 발휘한다고 하였다.

따라서, Table 2에 나타난 본 연구의 실험결과와 D.I. Chang 등(1996)의 연구결과를 토대로 강섬유 및 실리카 흙 혼입효과를 고려하여 경제성을 검토하였으며, 그 결과는 다음 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

Table 4와 Table 5에서, SFRS의 타설비는 WMRS의 타설비보다 강섬유만 혼입한 경우(0.5%, 0.75%) 약 1.1배의 상승이 발생하였으나, 강섬유혼입율이 1.0%인 경우는 오히려 약 8% 정도 낮은 타설비를 보이고 있다. 또한 실리카흙을 10% 혼입한 경우, 타설비의 상승은 거의 없었으며 오히려 0.75%와 1.0%에서는 각각 9%, 14%정도의 타설비 저감효과를 볼 수 있어 실리카흙의 혼입과 강섬유의 혼입에 의한 총 타설비

면에서 충분히 경제적인 측면을 확인할 수 있다.

Table 4 Placing cost considering the reinforcing effects (SF=0%) (unit : won)

Reinforcing methods	WMRS	SFRS			
Steel Fiber Contents(%)	0.0	0.5	0.75	1.0	
Placing Depth in Side Wall(cm)	20	19	16.4	13.8	
Rebound Ratios in Side Wall(%)	26.0	20.0	18.1	17.3	
Silica Fume Contents (0.0%)	Material	34,540	79,297	93,720	78,573
	Equipment Rental	97,827	75,700	64,805	54,331
	Worker	25,901	17,680	15,135	12,689
	Total	158,268	172,678	173,660	145,593

Table 5 Placing cost considering the reinforcing effects (SF=10.0%) (unit : won)

Reinforcing methods	WMRS	SFRS			
Steel Fiber Contents(%)	0.0	0.5	0.75	1.0	
Placing Depth in Side Wall(cm)	20	16.3	12.9	12.2	
Rebound Ratios in Side Wall(%)	26.0	8.1	6.2	6.0	
Silica Fume Contents (10%)	Material	34,540	81,044	82,770	78,203
	Equipment Rental	97,827	63,287	49,290	46,571
	Worker	25,901	14,781	11,512	10,877
	Total	158,268	159,111	143,572	135,651

또한, 경제성 평가 결과에 의하면, 리바운드율의 감소는 단면감소로 인한 타설비 감소에 추가적으로 실리카흙 무혼입시 약 19%, 실리카흙 10% 혼입시 약 22%의 타설비 저감효과를 발생시키는 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

기존의 WMRS에 대한 SFRS의 대체가능성을 검토하기 위해 일련의 현장실험을 수행하였다.

실험결과를 기초로 하여, 역학적 특성 및 경

제성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강섬유 혼입은 숏크리트의 압축강도 발현에 큰 효과를 기대할 수 없으며, 오히려 WMRS보다 강도가 저하될 수도 있다.  
그러나, 실리카흙을 적정량 혼입함으로써 높은 압축강도를 얻을 수 있다.
- 2) 휨실험에서 구한 하중-처짐선도에 따르면, SFRS는 WMRS보다 초기 휨균열발생 후 약 1.5~2배 정도 높은 인성에 따른 연성거동을 유지하였다.  
이러한 측면에서 숏크리트 층의 급작스런 붕락등의 위험에 대해 충분한 시간을 갖고 대비할 수 있는 안전성을 확보할 수 있다.
- 3) 소요 라이닝의 두께는 강섬유와 실리카흙의 혼입으로 크게 감소될 수 있다.
- 4) 숏크리트에 있어서 0.5%~0.75%의 강섬유혼입율이 휨강도, 후균열저항성 및 소요 라이닝 두께의 감소측면에서 최대 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) SFRS의 타설비는 WMRS에 비해 순수한 재료비 측면에서 약 1.4~2.1배 정도까지 상승한다.  
그러나, 강섬유와 실리카흙의 혼입에 따른 기대효과를 고려할 때, 오히려 타설비를 최대 14%정도까지 절감할 수 있는 것으로 나타났다.  
따라서, 경제적인 측면에서도 충분한 현장 적용성이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) SFRS의 휨강도와 후균열저항성등의 증진으로 WMRS에 비해 Rock Bolt의 간격을 상당히 넓힐 수 있을 것으로 판단되며, 이로써 강섬유혼입에 따른 기타 공정의 단축으로 추가적인 타설비 절감을 기대할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) 건설교통부, 콘크리트 표준시방서, 1996.
- 2) 건설교통부, 터널공사 표준시방서, 1988.
- 3) 안상기, "숏크리트의 리바운드 감소에 대한 재료개발 연구시험", 콘크리트학회지, 제5권, 제1호, pp. 54~61, 1993.
- 4) 한국수자원공사, 숏크리트의 설계 및 시공, 1993.
- 5) 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 1992.
- 6) 山本康弘, "吹付けコンクリート", 콘크리트工學, 第19卷, 第5號, pp. 66~67.
- 7) 日本コンクリート工學協會, 纖維補強コンクリートの試験方法に關する規準, 1984.
- 8) 日本トンネル技術協會, スチールハファイバーコンクリートに關する調査研究報告書-SFRCの設計施工指針, 1980.
- 9) 田澤雄二郎, "吹付けコンクリートの技術現狀と今後の課題", 콘크리트工學, Vol. 30, No. 6, pp. 18~26, 1992.
- 10) 中村敏夫, 横澤和夫, "トンネルの吹付けコンクリート", 콘크리트工學, Vol. 31, No. 3, pp. 56~60, 1993.
- 11) ACI Committee 506, "Guide to Shotcrete", ACI Manual of Con. Practice Part 5, 1994.
- 12) ACI Committee 506.1, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete", ACI Manual of Con. Practice Part 5, 1994.
- 13) ACI Committee 506.2, "Spec. for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete", ACI Manual of Con. Practice Part 5, 1994.
- 14) D.I. Chang, W.K. Chai, K.I. Kim and Y. H. Son, "Analysis of the Properties on Steel Fiber Reinforced Shotcrete against Wire Mesh Reinforced Shotcrete", 21st Conference on OWICS, Vol. XV, pp. 85~91, 1996.
- 15) D.J. Hannant, Fibre Cements and Fibre Concretes, JOHN WILEY & SONS, 1978.
- 16) Norwegian Concrete Association-Committee Sprayed Concrete, Sprayed Concrete for Rock Support-Technical Spec. and Guidelines, Norwegian Concrete Association Publication nr. 7, 1993.
- 17) Marc Vandewalle, Tunnelling the World with 7 Reference Projects, N.V. BEK-AERT S.A., pp. 127~135, 1996.