

# 실리카흙을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 내구성에 관한 실험적연구

## An Experimental Study on the Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Silica Fume.

박 승 범\*      홍 석 주\*\*      조 청 휘\*\*      김 부 일\*\*\*  
Park, Seung Bum      Hong, Seok Joo      Cho, Chung Hui      Kim, Boo Il

### ABSTRACT

During recent years, the durability of concrete structures has been considered in concrete practice and material research. To preserve the brittleness of concrete as well as energy absorption and impact resistance, amount of fiber usage has greatly increased in the field of public works. Ultra fine powder, silica fume, mixed into concrete, it reduce void of concrete structure. Especially, there's a great effect for strength improvement of concrete by initial pozzolanic reactions. For these reasons, if silica fume mixed into concrete, it decrease the total void by microfiller effect. Pozzolan reaction, between cement particle and silica powder, can elaborate the micro structure of matrix. And so, in this paper, we deal SFRC for the purpose of efficiently using of industrial by-products(silica fume). Also we performed the test for durability such as freeze-thaw resistance and accelerated carbonation of SFRC using silica fume.

### 1 서론

최근의 국내건설산업발전과 기간산업기술의 발달로 구조물의 대형화 및 고층화에 기인한 콘크리트 구조물의 부재가 좀더 세장됨에 따라 콘크리트의 취성개선은 물론 구조물의 균열발생 및 변형 등 악영향을 방지할 수 있는 치수안정성 및 신뢰성이 우수한 고성능·고품질의 콘크리트의 개발이 크게 요구되고 있다. 그로 인한 사회전반적인 요구를 충족시키기 위하여 콘크리트용 보강재로 강섬유를 보강한 강섬유보강 콘크리트(SFRC)의 적용이 필요하게 되었다. 한편, 초 미분말 입자인 실리카흙을 강섬유보강 콘크리트에 혼입하면 매트릭스와 섬유간의 미세 공극을 충전함으로써 microfiller 효과로 매트릭스의 총공극량을 감소시키고, 시멘트 입자와 미세 입자간의 포졸란 반응으로 미세 구조가 치밀해짐에 따라 섬유 보강의 효과가 향상되어, 역학적 특성의 개선 및 내구성의 증진을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산업부산물의 유효 이용과 강섬유보강 콘크리트의 경제적인 제조를 목적으로 강도 및 수밀성 증진에 대단히 효과적인 것으로 알려진 초미립의 포졸란 재료인 실리카흙을 사용한 강섬유보강 콘크리트의 동결융해저항성, 축진중성화시험등의 내구성에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 박사과정

\*\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 석사과정

## 2 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료

본 시험에 사용된 시멘트는 국내 S사 제품의 비중 3.14의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 금강 상류에서 채취한 비중 2.59, 조립율 2.68의 강모래, 굵은 골재는 충남 금산 H사에서 생산되는 비중 2.65, 조립율 7.01의 최대치수 20mm 부순돌을 사용하였으며, 강섬유는 Belgium B사 제품으로 양단갈고리(Hook)형의 치수  $\phi 0.5 \times 30\text{mm}$ 의 것을 사용하였다. 혼화재료는 호주 Simcoa Operation LTD.사의 초미분말 실리카흄을 사용하였고, AE제는 Vinsol Resin 성분의 AEA 202, 고성능감수제로는 일본 K사 제품의 나프탈렌 설폰산염 고축합물계인 Might-150을 사용하였다.

표 1 혼화제의 화학적·물리적성질

실리카흄	Chemical Components(%)					Physical Properties		
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Ig. loss	Specific Gravity	Blaine's (cm <sup>2</sup> /g)	Particle Size(Aver.)
	92.5	1.68	2.51	0.56	0.31	2.21	263,000	1.36 $\mu$
Admixture	Mighty-150		Appearance	Specific Gravity	pH		Solid Contents (%)	
			Dark Brown Liquid	1.20	7~9		41~45	

### 2.2 배합 및 시험방법

#### 2.2.1 실리카흄을 사용한 SFRC의 배합 및 믹싱

믹싱은 강섬유의 랜덤한 균등분산과 밀실한 콘크리트의 제조를 위하여 일본 C사 제품의 섬유분산용 Omni-mixer(용량 30ℓ)를 사용하였고, 믹싱은 재료분리 및 Fiber-ball이 발생하지 않도록 먼저 잔골재와 굵은골재를 혼합하고 일정한 속도로 믹서에 강섬유를 투입하여 혼합한 다음 시멘트, 혼화제와 물을 투입한 후 혼화제는 후 첨가하였으며, 다음 표 2와 같이 배합하였다.

#### 2.2.2 시험방법

##### (1) 압축강도 시험

강섬유 형상별 SFRC의 배합조건별 압축강도의 측정은 KS F 2405 [콘크리트의 압축강도 시험방법]에 준하여 재령 7일 및 28일에 일본 M사 제품의 용량 100t의 유압식 만능시험기를 사용하여 측정하였다.

##### (2) 인장강도 시험

강섬유 형상별 SFRC의 배합조건별 인장강도는 콘크리트 원주공시체를 할렬시키는 방법인 KS F 2423 [콘크리트의 인장강도 시험방법]에 준하여 실시하였으며, 이때 인장강도시험을 위하여 일본 S사의 B-Type Auto-Graph를 이용하였다.

##### (3) 휨강도 및 휨인성 시험

강섬유보강 콘크리트의 배합조건별 휨강도 및 휨인성 시험은 15×15×55cm의 보 공시체를 제조하여 재령 28일에서 나타낸 시험장치를 설치하여 JCI-SF4의 섬유보강 콘크리트의 휨강도 및 휨인성 시험방법에 준하여 일본 S사 제품의 용량 25t의 B-Type Auto-Graph를 이용하여 하중-처짐 곡선을 구한 다음, 휨인성을 평가하였다.

표 2 실리카흙을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 배합

No.	W/B* (%)	S/a (%)	V <sub>f</sub> (%)	S.F (%)	Air (%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )						H.W.R.A (C×wt.%)
						W	C	S	G	Steel Fiber	S.F	
1	50	52	0	0	5±1	196	392	847	800	0	0	C×0.25
2				10			352.8	840	794		39.2	
3				15			333.2	837	790		58.8	
4				20			313.6	833	787		78.4	
5			0.5	0		196	392	841	794	39.25	0	
6				10			352.8	834	787		39.2	
7				15			333.2	830	784		58.8	
8				20			313.6	826	781		78.4	
9			1.0	0		196	392	834	788	78.5	0	
10				10			352.8	827	781		39.2	
11				15			333.2	823	778		58.8	
12				20			313.6	820	774		78.4	
13			1.5	0		196	392	827	781	117.75	0	
14				10			352.8	820	775		39.2	
15				15			333.2	817	771		58.8	
16				20			313.6	813	768		78.4	
17			2.0	0		196	392	820	775	157	0	
18				10			352.8	813	768		39.2	
19				15			333.2	810	765		58.8	
20				20			313.6	806	761		78.4	

[Note] \* B : 결합제로서 시멘트+실리카흙

(4) 동결융해저항성 시험

강섬유보강 콘크리트의 동결융해저항성을 파악하기 위하여 75×75×355mm의 각주공시체를 제작하여 배합조건별로 ASTM C 666-2 및 KS F 2456[급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법]에 준하여 -18℃~+4℃에서 1일 6~8사이클로 상대동탄성계수가 60%이하로 될 때는 실험을 중지하고, 공시체가 건전한 경우는 1000사이클까지 실시하였다.

(5) 촉진중성화 시험

본시험에서는 JIS ; 콘크리트의 촉진중성화시험에 따라 Ø10×20cm의 원주형 공시체를 제작하여 재령28일까지 23±2℃ 수중양생을 실시한 후, 일본 A사 제품의 중성화 시험장치를 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도 10%, 상대습도 30~35%, 온도 35~40℃에 중성화가 촉진되도록 공시체를 노출하여 재령 1, 2, 3, 4주에 공시체를 할렬인장한 후 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 나타난 각부분의 중성화 깊이를 측정하고, 그 평균값을 산정하여 중성화 속도를 평가하였다.

3 시험결과 및 고찰

3.1 압축강도 시험

실리카흙의 혼입에 의하여 초기강도가 개선되는 것으로 나타났으며, 재령이 경과할수록 그리고 실리카흙의 혼입량이 많아질수록 압축강도의 증가가 이루어지고 있는 것을 확인하였으며, 실리카흙 혼입률 20%까지 계속적으로 강도가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 섬유혼입률의 증가에 따른 압축강도는 섬유혼입률 1.5%혼입까지는 증가하는 양상을 나타내었으나, 2.0%이상에서는 오히려 저하하는 경향을 나타내었는데, 이는 섬유혼입률 증대로 인한 워커빌리티의 저하로 밀실한 콘크리트의 제

조가 곤란하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 인장강도 시험

실리카흙의 혼입은 강섬유 혼입률에 관계없이 초기 인장강도를 증진시키고 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 실리카흙의 혼입량이 증가함에 따라 더욱 증진되는 것으로 나타났고, 재령 180일에서 최고 17%의 인장강도의 증진을 나타내었다. 또한 섬유 혼입률이 증대됨에 따라 섬유혼입률 1.5%까지 증가하는 경향을 보였고, 특히 최대하중이후 보통콘크리트에서 일으키는 취성과파괴의 특성이 현저히 개선된 것을 관찰할 수 있었다.

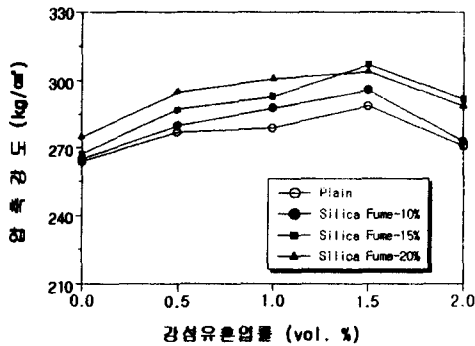


그림 1 실리카흙을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 압축강도

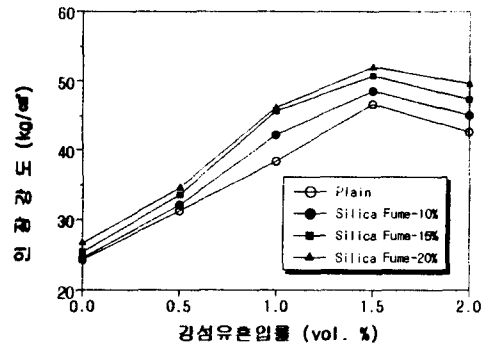


그림 2 실리카흙을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 인장강도

### 3.3 휨강도 및 휨인성 시험

휨강도는 인장강도의 영향을 받고 있으므로 인장강도 시험결과와 유사하게 실리카흙을 혼입함에 따라 휨강도는 대체로 15%까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한 실리카흙의 시멘트 대체율에 관계없이 재령이 증가할수록 강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 실리카흙의 대체율 15%까지인 경우가 20%를 혼입한 경우에 비해 휨강도가 크게 나타났다. 한편 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 휨강도는 섬유의 콘크리트 매트릭스와의 부착강도 증진에 의해 현저히 증가하는 것으로 나타났다.

또한 강섬유혼입률이 증가함에 따라 휨인성은 크게 증가되었고, 실리카흙을 15% 혼입한 경우 강섬유혼입률 2.0%인 경우 실리카흙을 혼입하지 않은 보통 콘크리트에 비하여 약 13배까지 증가한 것으로 나타났다.

### 3.4 동결융해저항성

초기 사이클에서부터 실리카흙을 혼입한 경우에는 보통 콘크리트보다 현저하게 큰 폭으로 저하되었으나, 실리카흙을 시멘트 대체율로 10% 혼입한 경우 보통 콘크리트의 경우 상대동탄성계수가 60이하로 떨어지는 500사이클을 지나서도 동결융해 저항성을 보이다가 약 900 사이클에서 상대동탄성계수가 60이하로 떨어져 실리카흙을 10%혼입시는 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 특히 실리카흙의 혼입이 20%일 때에는 약 300사이클에서 심각한 표면박리가 나타났다.

### 3.5 실리카흙을 혼입한 SFRC의 중성화시험

촉진중성화 시험 개시후 4주에서 실리카흙을 혼입하지 않은 강섬유보강 콘크리트의 경우 7.3mm의 중성화 깊이를 나타낸 반면 실리카흙 혼입률을 10, 15, 20% 혼입량이 증가함에 따라 중성화가 촉진되는 것으로 나타났는데, 이러한 경향은 전술한 플라이애쉬를 혼입한 SFRC와 마찬가지로 콘크리트

에 혼입된 실리카흄이 포졸란 반응에 의하여 콘크리트중의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 농도가 감소하는 것에 의해 콘크리트의 알칼리도가 저하되어 콘크리트의 중성화가 촉진되는 것으로 판단된다.

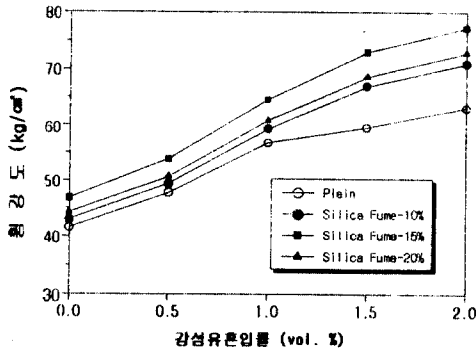


그림 3 실리카흄을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 휨강도

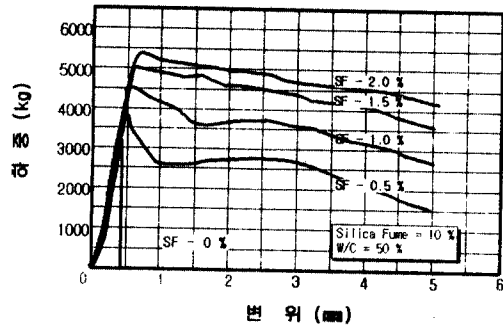


그림 4 실리카흄을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 하중 - 변위곡선

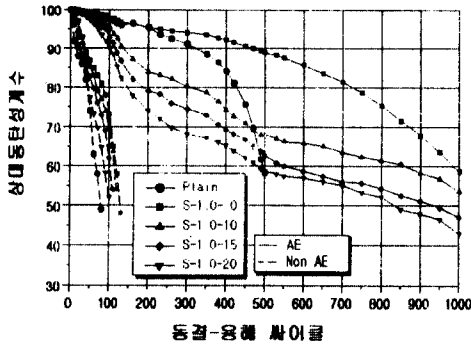


그림 5 실리카흄을 혼입한 SFRC의 동결융해에 따른 상대동탄성계수

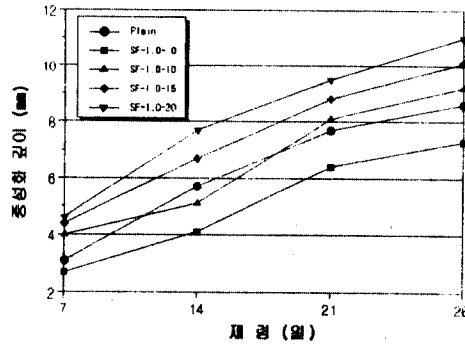


그림 6 촉진중성화시험에 의한 실리카흄을 혼입한 SFRC의 중성화 깊이

## 4. 결론

### 4.1 강도특성

- ① 재령이 경과할수록 그리고 실리카흄의 첨가량이 많아질수록 압축강도의 증가를 나타내었으나, 장기강도의 증진효과는 폴리아에쉬를 혼입한 SFRC의 증가율에 비하여 상당히 둔화되는 것으로 나타났다. 섬유혼입률의 증가에 따른 압축강도는 섬유혼입률 1.5%혼입까지는 증가하는 양상을 보였으나, 2.0%이상에서는 오히려 저하하는 경향을 나타내었다.
- ② 강섬유의 혼입률이 증대됨에 따라 1.5%까지 인장강도가 경향을 보였고, 특히 최대하중이후 보통 콘크리트에서 일으키는 취성파괴의 특성이 현저히 개선되었다. 그러나 강섬유혼입률 2.0%이상에서 인장강도는 저하하는 것으로 나타나 적절한 강섬유 및 실리카흄을 혼입하면 강섬유보강 콘크리트의 인장강도 개선에 효과적인 것으로 사료된다.
- ③ 실리카흄을 혼입한 SFRC의 휨강도는 인장강도와 마찬가지로 실리카흄 혼입률이 15%까지 실리카흄 혼입률 증대에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 20%혼입한 경우에는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 휨인성은 강섬유혼입률 1.0%인 경우 실리카흄을 10, 15, 20% 혼입함에 따라 혼입하지 않은 경우에 비해 각각 6.2%, 22%, 12%증진되었으나 15%인 경우에 가장 큰 휨인성

증가율을 나타냈다.

#### 4.2 동결융해저항성

같은 물·시멘트 비일지라도 AE제를 혼입한 경우가 혼입하지 않은 경우에 비해 동결융해 저항성인 우수한 것으로 나타났다. 강섬유를 일정하게 혼합한 상태에서 실리카흙의 혼입률 증대에 따른 경향은 일정한 공기량이 확보되더라도 실리카흙의 혼입률이 증대될수록 상대동탄성계수는 현저히 저하하는 것으로 나타났다. 내동해성을 증진시키기 위해서는 AE제의 사용과 강섬유의 혼입, 그리고 실리카흙의 사용량을 10%이하로 제한해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.3 촉진중성화

실리카흙을 혼입한 SFRC는 실리카흙 혼입률이 증가함에 따라 중성화가 가속화되는 것으로 나타나, 촉진중성화 시험 개시후 4주에서 실리카흙을 혼입하지 않은 강섬유보강 콘크리트의 경우 7.3mm의 중성화 깊이를 나타낸 반면 실리카흙 혼입률을 10, 15, 20% 혼입함에 따라 각각 7.7, 10.1, 11.0mm의 중성화 깊이를 나타내 실리카흙을 혼입한 SFRC의 중성화 속도는 같은 배합의 실리카흙을 혼입한 경우에 비하여 중성화가 다소 가속화되는 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. Ohama, Y., " Durability and Long - Term Performance of FRC ", Proc. of the International Symposium of FRC, pp.5.3~5.16, 1987.12
2. Wei Ling lin, "Toughness Behavior of Fibre Reinforced Concrete," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Edited by R. N. Swamy, RILEM, 1992.
3. 鳥居和之, 川村滿紀, "フライアッシュ, シリカフェュームの使用によるモルタルの耐硫酸鹽性の改善効果", セ技年報 42, pp.124-127, 1989
4. 笠井英志, "蒸氣養生を施したシリカフェューム混入コンクリートの強度特性", 第46回セメント技術大會講演集, pp.866~871, 1972
5. 岸谷, 西澤, "コンクリート構造物の耐久性シリーズ[中性化]", 技報堂 出版, pp.1-7, 1986
6. Malhotra, V. M., "Fly Ash, Silica Fume, Slag and the Mineral By-Products in Concrete", ACL Publication, SP-79, 1983

