

# 플라이애쉬를 이용한 강섬유보강 콘크리트의 내구성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Durability of SFRC Using Fly Ash

박 승 범\*      오 광 진\*\*      이 태 우\*\*      권 혁 준\*\*\*  
Park, Seung Bum      Oh, Kwang Jin      Lee, Taek Woo      Kwon, Hyuk Joon

## ABSTRACT

During recent years the durability of concrete structures has attracted considerable interest in concrete practice, material research and long-term deformation. To preserve the brittleness of concrete as well as energy absorption and impact resistance, amount of fiber usage has greatly increased year to year in the field of public works. When fly ash, fine powder, mixed into concrete, it condensed the void of concrete structure. Especially, there's a great effect for strength improvement of concrete by initial pozzolanic reactions. Pozzolan reaction, between cement particle and fly ash, can elaborate the micro structure of matrix. So it was able to improve the effect of fiber reinforced by increased adhesion between cement paste and steel fiber. And so, in this paper, we dealt SFRC for the purpose of efficiently using of industrial by-products and its economical manufacturing. Also we performed the test for durability such as chemical resistance, freeze-thaw resistance and accelerated carbonation of SFRC using fly ash.

## 1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화함에 따라 재료적인 측면에서 내구성과 장기변형에 관한 관심이 점차 고조되고 있으며, 이에 더하여 콘크리트의 취성적 성질을 보완함과 아울러 균열구속성능, 에너지 흡수능력, 내충격성, 내마모성, 내진성등이 월등히 우수한 것으로 보고되고 있는 강섬유보강 콘크리트는 선진국의 경우 토목·건축구조물에 그 사용량이 점차 증대되고 있는 실정이다. 인공포졸란 재료인 플라이애쉬를 강섬유보강 콘크리트에 혼입하면 실리카물질이 석회와 물에 의해 상온에서 서서히 반응을 일으켜 안정된 불용성 화합물을 생성하게 된다. 시멘트 입자와 플라이애쉬 입자간의 포졸란 반응으로 미세 구조가 치밀해지고 시멘트 페이스트와 강섬유 등의 부착력을 향상시켜 섬유보강의 효과가 향상되어, 역학적 특성의 개선 및 내구성의 증진을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산업부산물의 유효 이용과 강섬유 보강 콘크리트의 경제적인 제조를 목적으로 강도 및 수밀성 증진에 효과적인 것으로 알려진 미립분의 포졸란 재료인 플라이애쉬를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 화학저항성, 동결융해저항성, 촉진중성화시험등의 내구성에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

- 1) \* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수
- 2) \*\* 정희원, 충남대학교 대학원 박사과정
- 3) \*\*\* 정희원, 충남대학교 대학원 석사과정

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

본 시험에 사용된 시멘트는 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 금강 상류에서 채취한 강모래, 굵은 골재는 충남 금산 H사에서 생산되는 최대치수 20mm의 부순돌을 사용하였으며, 강섬유는 Belgium B사 제품으로 양단갈고리(Hook)형의 치수  $\phi 0.5 \times 30\text{mm}$ 의 것을 사용하였다. 혼화재료는 보령 화력발전소에서 부산된 유연탄 플라이애쉬를 사용하였고, 그 화학적 성질 및 물리적 성질은 표 1과 같다. AE제는 Vinsol Resin 성분의 AEA 202, 고성능감수제로는 일본 K사 제품의 나프탈렌 설폰산염 고축합물제인 Mighty-150을 사용하였다.

표 1 플라이애쉬의 화학적 조성 및 물리적 특성

Chemical Composition (%)								Physical Properties		
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	Specific Gravity	Blaine's (cm <sup>2</sup> /g)	Particle size(mm)
65.3	23.4	4.25	1.20	0.98	0.21	1.03	3.63	2.1	4,453	$<4.2 \times 10^{-2}$

### 2.2 시험방법

#### 2.2.1 화학저항성 시험

강섬유보강 콘크리트의 화학저항성을 검토하기 위하여  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주공시체를 제작하여 시험 재령까지 1% 황산용액, 10% 황산마그네슘 용액, 10% 황산나트륨 용액에 침지시켜 각 재령별로 중량변화율을 측정함과 아울러 표면상태를 자세히 관찰하였으며 재령 6개월까지의 내화학성을 고찰하였다.

#### 2.2.2 동결융해저항성 시험

내동해성을 파악하기 위하여  $75 \times 75 \times 355\text{mm}$ 의 각주공시체를 제작하여 배합조건별로 ASTM C 666-2 및 KS F 2456[급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험방법]에 준하여  $-18^{\circ}\text{C} \sim +14^{\circ}\text{C}$ 에서 1일 6~8사이클로 상대동탄성계수가 60%이하로 될 때까지와 그 이상의 경우는 1000사이클까지 실시하였으며, 공시체의 중량과 1차 공명주파수의 변화를 조사함과 아울러 표면상태를 관찰하여 내동해성을 파악하였다.

동결융해저항성 시험에서는 양생온도의 영향이 크기 때문에 항온수조에서  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 28일간 수증양생을 실시한 후 시험을 시작하였다.

#### 2.2.3 중성화깊이 측정

현재까지는 국내에는 중성화시험에 관한 구체적인 규격이 정립되어 있지 않아, 본시험에서는 JIS K 8006의 페놀프탈레인법에 따라  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주형공시체를 제작하여 재령28일까지  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  수증양생을 실시한 후, 일본 A사 제품의 중성화 시험장치를 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도 10%, 상대습도 30~35%, 온도 35~40 $^{\circ}\text{C}$ 에 중성화가 촉진되도록 공시체를 노출하여 재령 1, 2, 3, 4주에 공시체를 할렬인장한 후 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 나타난 각 부분의 중성화 깊이를 측정하고 그 평균값을 산정하여 중성화 속도를 평가하였다.

### 2.3 배합

플라이애쉬를 이용한 강섬유보강 콘크리트의 내구성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 플라이애쉬를 시멘트 대체재료로 하여 10, 20, 30%로 변화시켰으며, 그 각각에 대해 강섬유를 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 vol.%로 혼입하여 시험하였다. 그 배합에는 다음 표 2와 같이 하였다.

표 2 플라이애쉬를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 배합

No.	W/B (%)	S/a (%)	V <sub>f</sub> (%)	Fly Ash (%)	Air (%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )						H.W.R.A (C×wt.%)
						W	C	S	G	Steel Fiber	Fly Ash	
1	50	57	0	0	5±1	200	400	919	709	0	0	C×0.25
2				10			360	910	702		40	
3				20			320	901	695		80	
4				30			280	891	688		120	
5			0.5	0		200	400	912	704	39.25	0	
6				10			360	902	697		40	
7				20			320	893	689		80	
8				30			280	884	682		120	
9			1.0	0		200	400	904	698	78.5	0	
10				10			360	895	691		40	
11				20			320	886	684		80	
12				30			280	876	677		120	
13			1.5	0		200	400	897	692	117.75	0	
14				10			360	888	685		40	
15				20			320	878	678		80	
16				30			280	869	671		120	
17			2.0	0		200	400	890	687	157	0	
18				10			360	880	679		40	
19				20			320	871	672		80	
20				30			280	862	665		120	

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 화학저항성

플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 재령 6개월까지 1% 황산용액, 10% 황산마그네슘용액, 10% 황산나트륨용액에 침지시켜 각 재령별 시험결과는 그림 1~3에 나타낸바와 같다.

황산 1% 용액에 침지한 경우에는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우 Plain이나 강섬유 혼입률 1.0%의 경우 재령 60일까지는 중량이 점차 증가한 후 그 이후에서 지속적인 중량감소를 나타내었다. 한편 강섬유혼입률 1.0%일 때, 플라이애쉬 혼입량이 10%인 경우 재령 90일까지 중량이 증가하였으며, 그 이후 서서히 감소하여 재령 6개월에서 2.15의 감소율을 나타내었고, 20%와 30%의 경우는 120일까지 중량증가를 보였으며, 그 이후는 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

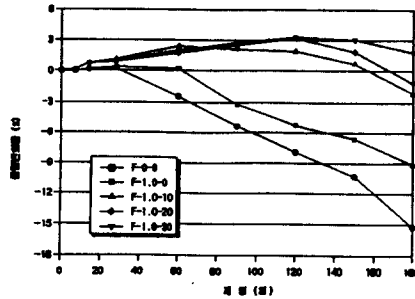


그림 1 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 화학저항성 (1% 황산용액)

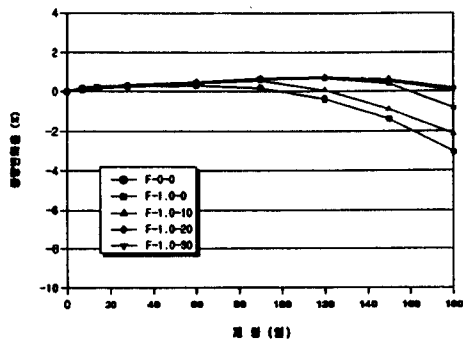


그림 2 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 화학저항성 (10% 황산나트륨용액)

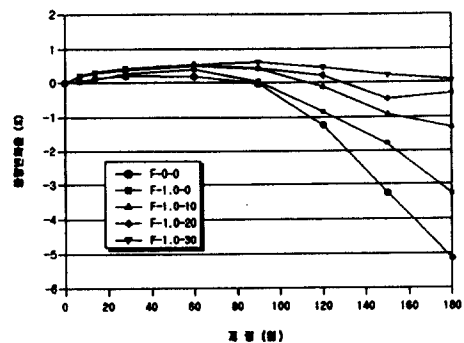


그림 3 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 화학저항성 (10% 황산마그네슘용액)

황산마그네슘 10%용액에 침지한 경우에는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우, Plain과 강섬유 혼입률 1.0%인 경우는 재령 60일까지 중량이 증가한 다음 중량이 감소하여 재령 6개월에서는 5.14%까지 감소하는 것으로 나타난 반면, 섬유율 1.0% 혼입한 경우 플라이애쉬를 0, 10, 20% 혼입한 경우는 재령 90일에서 중량이 감소되기 시작하였으며 혼입률 30%인 경우 재령 120일에서부터 중량이 감소되는 것으로 나타났다. 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 황산마그네슘에 대한 저항성은 강섬유의 혼입과 플라이애쉬 30%를 혼입한 경우에 화학저항성이 증진되는 것으로 나타났다.

황산나트륨 10%용액에 침지한 경우에는 전 공시체에서 중량감소율이 적게 나타났으며 강섬유의 혼입과 플라이애쉬 혼입량이 증가함에 따라 화학저항성이 약간씩 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.2 동결융해저항성

플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 동결융해저항성 실험후의 상대동탄성계수와 중량변화율의 시험결과는 다음 그림 4~5에 나타낸 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 강섬유혼입률 1.0%인 경우 플라이애쉬 혼입률에 따른 내동해성은 AE제를 혼입하지 않은 경우에는 큰 효과를 기대할 수 없었으나, AE제를 첨가한 경우에는 플라이애쉬 10%, 20% 혼입함에 따라 1000사이클에서의 상대동탄성계수는 68.2%,

75.2%, 중량감소율은 17.3%, 15.5%로 나타났으나 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우에는 상대동탄성 계수는 58.7%, 중량감소율은 19.6%로 나타나 플라이애쉬 혼입률 20%까지는 내동해성의 개선에 현저한 효과를 나타내었다 그 이상의 혼입량에서는 개선효과가 저감되는 것으로 나타났다.

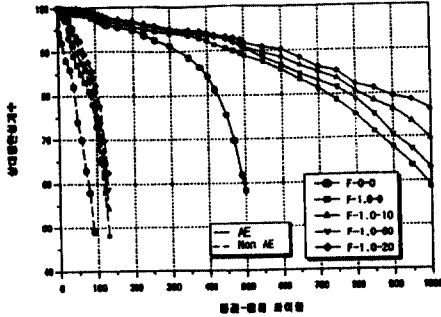


그림 4 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 동결융해 시험결과 (상대동탄성계수)

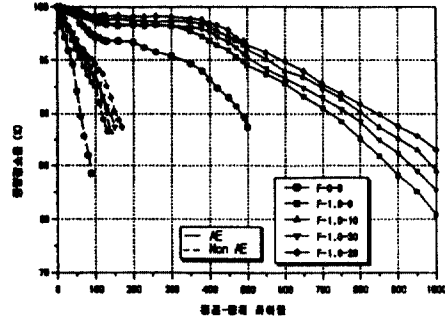


그림 5 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 동결융해 시험결과 (중량변화율)

### 3.3 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 중성화시험

SFRC의 강섬유 혼입율에 따른 중성화 촉진시험 결과는 표 3과 그림 6에 나타낸 바와 같다.

플라이애쉬 혼입에 의한 영향은 플라이애쉬 혼입률이 증가함에 따라 중성화가 가속화되는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입률 1.0%의 경우에 7.3mm의 중성화 깊이를 나타낸 반면 플라이애쉬 혼입률이 10, 20, 30%로 혼입률이 증가할수록, 각각 강섬유 1.0%, 플라이애쉬 0%에 비하여 35.6%, 38.4%, 78.1%의 중성화가 촉진되는 것으로 나타났다.

표 3 플라이애쉬를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 중성화깊이 (단위 : mm)

Steel Fiber Contents (%)	Fly Ash Content (%)	재 령(주)			
		1	2	3	4
0	0	3.1	5.7	7.7	8.6
	0	2.7	4.1	6.4	7.3
	10	3.3	5.2	8.6	9.9
	20	4.5	5.6	9.0	10.1
	30	6.1	9.3	10.8	13.0

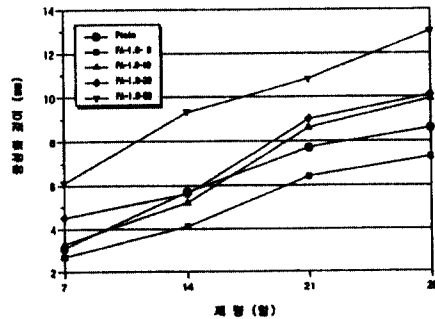


그림 6 촉진중성화시험에 의한 플라이애쉬를 혼입한 SFRC의 중성화 깊이

#### 4. 결 론

1) 황산 1%용액에 침지시킨 경우, 강섬유 혼입률이 1.0%이고, 플라이애쉬의 혼입률이 10%인 경우 재령 90일까지 중량이 약간 증가하였고, 그 이후 서서히 감소하여 재령 6개월에서 2.15%의 감소를 나타내었으며, 플라이애쉬 혼입률이 20%, 30%로 증가함에 따라 120일까지는 다소의 중량증가경향을 보였으나, 120일 이후에는 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

황산마그네슘 10%용액과 황산나트륨 10%용액에 침지한 경우에는 황산용액 1%용액에 침지한 경우보다 중량감소율이 감소하였고, 강섬유의 혼입과 플라이애쉬의 혼입률이 증가할수록 감소되는 경향을 나타내었으며, 황산마그네슘 10%용액에 침지한 경우 플라이애쉬 혼입률이 30%인 경우 재령 120일에서부터 중량이 감소되는 것으로 나타났다. 이와 같이 적정량의 플라이애쉬 혼입에 의해 화학저항성이 증진되는 것은 플라이애쉬의 포졸란반응 때문에 황산염 등의 침투로 인한 칼슘알루미늄이트 수화물이 에트링가이트로 변화될 때의 팽창압을 다소 완화시켜주기 때문인 것으로 판단된다.

2) 동결융해저항성은 AE제를 사용하지 않은 경우는 AE제를 사용하여 AE연행공기를  $5\pm 1\%$ 로 연행시킨 경우에 비하여 내동해성이 현저히 저하하는 것으로 나타났다. AE제를 혼입하지 않은 경우는 상대동탄성계수가 60% 이하로 될 때까지 소요 사이클은 보통 콘크리트의 경우 82사이클이 소요된 반면 AE제를 첨가한 경우는 약 500사이클이 소요되어 현저한 내동해성을 나타내었다. 또한 강섬유 혼입에 의한 영향은 AE제를 혼입하지 않은 경우에는 내동해성이 크게 영향을 주지 못하나 AE제를 혼입한 경우는 보통 콘크리트에 비하여 상대동탄성계수가 60%이하가 될 때까지 사이클 수를 비교하면 약 2배정도 크게 개선되는 것으로 나타났다.

3) 플라이애쉬 혼입한 SFRC에 있어 촉진중성화는 시멘트 대체제로 과다 혼입하였을 때, 매트릭스내의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 농도가 감소함으로 인한 콘크리트의 알칼리도가 저하되어 콘크리트의 중성화가 촉진되는 것으로 판단되므로 중성화에 대한 영향을 고려하여 적정량의 플라이애쉬 사용량을 사용함이 요망되는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 박승범 외, "산업부산물을 활용한 섬유보강시멘트 복합체의 역학적 특성", 한국콘크리트학회 봄학술 발표회논문집, Vol. 5, No. 1, pp. 93-98, 1993
2. Malhotra, V. M., "Fly Ash, Silica Fume, Slag and the Mineral By-Products in Concrete", ACI SP-79, 1983
3. 岸谷, 西澤, "콘크리트 구조물의 내구성 시리즈[중성화]", 技報堂 出版, pp.1-7, 1986
4. Nishibayashi, S., Yamura, K., Inoue, S., "Durability of Concrete in Seawater : Method of Accelerated Testing and Evaluation", ACI SP 65-20, pp.351-378, 1979
5. Nixon, P. J., Gaze, M. E., "The Effectiveness of Fly Ashes and Granulated Blastfurnace Slags in Preventing AAR", Pro. 6th Int. Conf. Alkalis in Concrete, Copenhagen, pp.61-68, 1983
6. Metha, P. K., "Pozzolanic and Cementitious by - Products as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review : Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by - Products in Concrete", ACI SP-79, Detroit, pp.1~46, 1983