

## 국내에서의 섬유보강 시멘트 복합재료의 적용 현황과 수요 전망

The Present Status of Application and the Demanding Forecasting of  
Fiber Reinforced Cementitious Composites



김규용\*  
Gyu-Young Kim



김영덕\*\*  
Young-Duck Kim



조봉석\*\*  
Bong-Suk Cho



윤현도\*\*\*  
Hyun-Do Yun



김무한\*\*\*\*  
Moo-Han Kim

### 1. 머리말

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 콘크리트 구조물이 대형화·고층화됨에 따라 건설 구조물에 있어서 가장 일반적이고 폭넓게 사용되고 있는 콘크리트 재료에도 고성능·고내구성 및 내화성 등 다양한 성능이 요구되고 있다. 특히 최근에는 단순히 구조재료로의 적용 외에 다양한 2차 제품 및 보수·보강용 재료 등으로 폭넓게 활용되고 있으며, 이에 따라 각 용도에 맞는 특수한 성능들이 요구되고 있다.

그러나 일반적인 콘크리트 등 시멘트계 재료는 주요 원료가 풍부하여 가격이 저렴하고 압축강도, 내구성 및 강성이 우수한 반면, 인장강도 및 휨강도가 낮고 에너지 흡수 능력도 작을 뿐만 아니라 파괴시 취성적인 성질을 나타낸다는 단점이 있으며, 시멘트계 재료의 이러한 치명적인 결함을 개선하기 위해 시멘트 매트릭스를 섬유로 보강하는 방법이 사용되었다.

이러한 섬유보강 기술은 1960년대 강섬유보강 콘크리트에 관한 연구를 시작으로, 유리섬유, 탄소섬유, 합성섬유 등 섬유기술의 발전과 함께 다양한 방향으로 폭넓은 연구가 진행되어 왔다. 특히 보강용 합성섬유기술의 발전에 따라 섬유보강 복합체의 사용 목적에 맞추어 적절한 섬유를 선택하여 사용할 수 있게 되었으며, 최근에는 단섬유에 대한 시멘트·콘크리트와의 보강기구에 관한 연구 및 각종 고성능 단섬유의 개발이 급속히 진행되어 지금까지 없었던 새로운 성능을 갖는 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(high performance fiber reinforced cementitious composite, 이하 HPRFCC 콘크리트)가 연구되고 있는 등, 섬유보강 시멘트 복합재료의 용도 및 적용 분야는 날

이 증가하고 있는 실정이다.

따라서 본고에서는 섬유보강 시멘트 복합재료 및 보강용 섬유에 대한 일반적인 특징을 살펴보고, 구조성능, 내구성, 내폭열성, 콘크리트의 수축 저감 효과 등 섬유의 사용에 의해 얻을 수 있는 다양한 성능 향상 효과에 관한 연구 동향 및 적용 현황을 살펴본 후, 향후 각 분야에서의 수요를 전망하고자 하였다.

### 2. 섬유보강 시멘트 복합재료의 특징

#### 2.1 섬유보강 시멘트 복합재료의 거동

섬유보강 콘크리트가 인장하중을 받을 경우, 취성적인 매트릭스의 파괴시 변형률은 섬유의 변형률보다 현저히 작기 때문에 섬유보강 복합체가 하중을 받으면 섬유가 파단되기 전에 매트릭스에 균열이 발생한다. 이 경우에 섬유보강 복합체의 파괴는 <그림 1>과 같이 ① 매트릭스 균열과 함께 복합체가 즉시 파괴되는 경우, ② 매트릭스 균열 면에서 섬유가 인발하여 균열의 확대에 저항함으로써 복합체의 인성을 증가시키는 경우, ③ 매트릭스 균열 후에도 섬유로 인해 복합체의 인장강도 및 인성이 증가하고 복합균열을 일으키는 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 이러한 섬유보강 콘크리트의 파괴 형태에 영향을 미치는 요소로서 사용되는 섬유 자체의 성질도 중요하지만 매트릭스와 섬유의 상호 작용, 특히 섬유계면과 시멘트 매트릭스의 부착 성능이 매우 중요한 요소이며 섬유강도가 충분한 경우에도 부착 상태에 따라 보강성능을 발휘하지 못할 수 있다.

매트릭스와 섬유의 부착은 크게 기계적 부착과 화학적 부착으로 나눌 수 있다. 기계적 부착은 섬유 표면의 요철 및 잔골재, 혼화재료 등 매트릭스의 구성 재료와 관계되며, 이형철근의 형태에서 유추할 수 있듯이 섬유의 표면에 요철을 두거나 매트릭스의 구성 재료로 거친 형태의 재료를 사용함으로써 향상시킬 수 있다. 반면, 화학적 부착은 섬유의 종류와 관계되며, 특

\* 정회원, 충남대학교 건축공학과, 조교수  
gyuyoungkim@cnu.ac.kr

\*\* 정회원, 충남대학교 대학원, 박사과정

\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과, 부교수

\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과, 교수

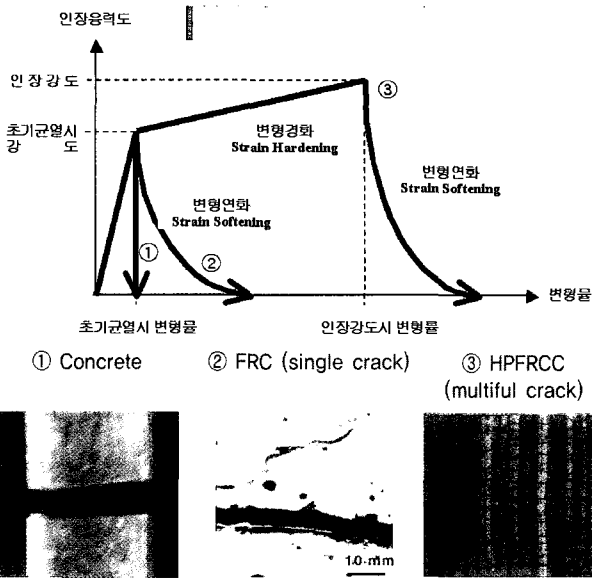


그림 1. 인장응력 하의 재료별 파괴거동

히 섬유유 의 친수성과 소수성에 따라 부착력에 큰 차이를 나타낸다. 최근에는 섬유유 의 표면을 화학적으로 변화시킴으로써 화학적 부착을 목적에 맞도록 인위적으로 조절하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 섬유유 표면을 처리제로 피복함으로써 부착성을 향상시키는 방법도 널리 이용되고 있는 실정이다.

## 2.2 보강용 섬유유 의 종류 및 특성

시멘트 복합재료 및 콘크리트에 사용되는 보강용 섬유유로서는 강섬유, 내알칼리성 유리섬유, 폴리에틸렌섬유, 비닐론섬유, 탄소섬유 등이 있으며, 이 중에 강섬유와 폴리에틸렌섬유는 모르타르 및 콘크리트의 보강용 섬유로서 토목·건축의 구조재료, 내알칼리성 유리섬유, 비닐론섬유, 탄소섬유 등은 페이스트 또는 모르타르의 보강용 섬유로서 건축의 커튼월 등의 2차 부재를 대상으로 개발되고 있다. 이들 각종 보강용 섬유유 의 특성은 <표 1>과 같다.

시멘트·콘크리트용 보강섬유유 는 일반적으로 인장탄성계수가 큰 것이 바람직하며, 인장강도 또한 당연히 큰 것이 바람직하다. 또한 섬유유 계면과 시멘트 매트릭스 의 부착 성능도 중요한 인자가 된다. 섬유유 의 시멘트 내 혼입이 보강이 주목적이 아닐 경우, 예를 들면 균열방지나 매트릭스 의 프레쉬 상태의 유동성 조정, 내화 폭열 방지 등의 용도로 사용할 경우에는 섬유유 의 인장 성능보다도 섬유유 의 형상이 중요한 인자가 된다.

섬유유 의 크기와 길이는 매트릭스 의 보강 효과에 중요하다. 길이는 임의로 절단되면 바람직하지만 단섬유유 의 크기는 섬유유 의 제조법과 깊은 관계가 있으며, 임의로 선택할 수 없는 경우가 많다. 또한 섬유유 의 인장강도도 단섬유유 의 크기에 의해 영향을

표 1. 각종 보강용 섬유유 의 종류 및 기계·화학적 성능

섬유유 종류	기계적 성능					화학적 성능			
	인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)	신율(%)	열팽창계수	푸아송비	내산성	내알칼리성	내용제성	
탄소 섬유유	PAN High strength	3500	200~240	1.3~1.8	(-1.2) to (-0.1)(afrpL)	-0.2	Good	Excellent	Excellent
	PAN High modulus	2500~4000	350~650	0.4~0.8	(-1.6) to (-0.9)(afrpT)		Excellent	Excellent	Excellent
	Pitch Ordinary	780~1000	38~40	2.1~2.5			Excellent	Excellent	Excellent
	Pitch High modulus	3000~3500	400~800	0.4~1.5	(-1.6) to (-0.9)(afrpL)	N/A	Excellent	Excellent	Excellent
유리 섬유유	Steel fiber	490~980	200	N/A	N/A	0.3	Poor	Excellent to Sodium Poor to Brine	Excellent
	E-glass	3500~3600	74~75	4.8	5.0	0.2	Poor	Fair	Excellent
	S-glass	4900	87	5.6	2.9	0.22	Good	Poor	N/A
아라미드	Alkali resistant glass	1800~3500	70~76	2.0~3.0	N/A	N/A	Good	Good	N/A
	Kevlar 129	4210(est.)	110(est.)	-	N/A		-	-	-
	Technora	3500	74	4.6	N/A		Good	Good	Good
	폴리에틸렌	250~700	1.4~2.2	10~15	N/A	N/A	Good	Good	Good
	고장력 폴리에틸렌	2200~4800	70~175	3~6	N/A	N/A	Excellent	Excellent	Excellent
	Polyvinyl Alcohol(PVA)	690~1500	11~36	3~13	N/A	N/A	Good	Good	Good
	고장력 PVA	2000~2600	39~41	5~6	N/A	N/A	Excellent	Excellent	Excellent
기타	폴리프로필렌섬유	300~750	1.4~2.2	10~15	N/A	N/A	Good	Good	Good
	나일론섬유	750~900	3.9~4.9	13~25	N/A	N/A	Good	Good	Good
	아크릴섬유	200~390	2~11	25~45	N/A	N/A	Good	Good	Good
	아스베스트	620	160	-	N/A	N/A	Good	Good	Good
	PBO섬유	5800	180~270	2~4	N/A	N/A	Good	Good	Good

받게 된다. 일반적으로 단섬유의 직경크기는 수 마이크로미터부터 수십 마이크로미터 정도가 제조하기 쉽고 높은 강도의 실현도 용이하다. 일반적으로는 섬유 직경이 크게 되면 섬유강도는 저하하며, 이는 섬유 내부의 균일한 정도의 저하나 강도측정시 섬유파괴의 문제로 인해 측정값이 낮게 평가되기 때문이다. 또한 매우 미세한 직경의 경우에도 섬유강도가 저하하는 것으로 알려져 있다. 시멘트·콘크리트 내에 혼입된 섬유의 강도는 매트릭스에 기인하는 인발시 섬유의 손상용이 정도에 관련되며, 적절한 섬유크기가 존재할 것으로 판단된다.

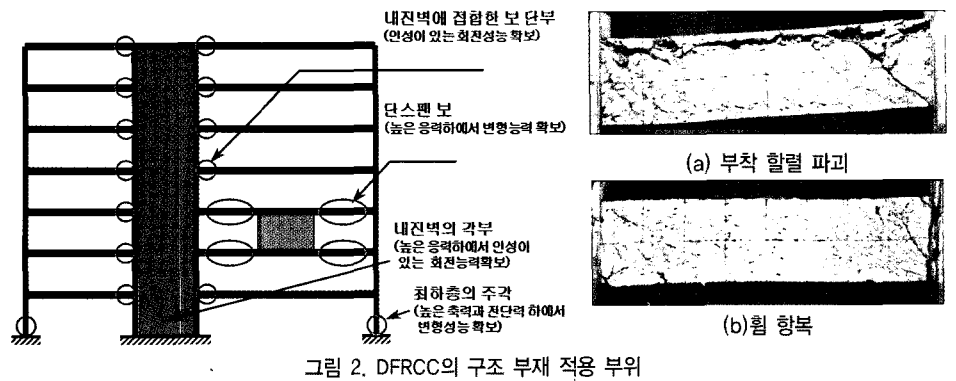


그림 2. DFRCC의 구조 부재 적용 범위

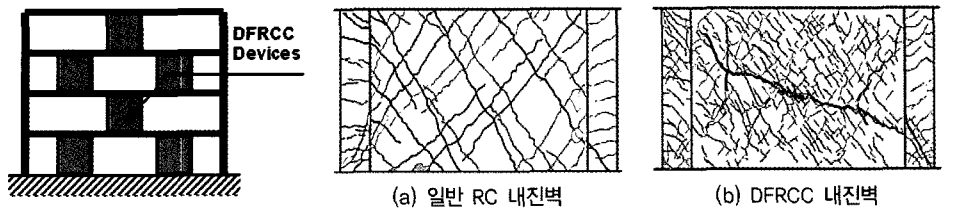


그림 3. DFRCC를 이용한 내진벽의 내진 성능

### 3. 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능에 따른 용도

#### 3.1 휨·인장강도 및 인성의 증가

일반적인 시멘트 및 콘크리트 재료의 가장 큰 단점으로 휨·인장성능 및 인성의 취약함을 들 수 있다. 따라서 기존 콘크리트 구조물의 경우 인장력이 작용하는 부분에는 항상 철근의 보강이 이루어졌고, 공장에서 제작하는 2차 제품 역시 휨 및 인장에 의한 파괴에 대하여 별도의 대책이 필요했으며, 특정 부재에 있어서는 콘크리트 재료의 적용에 한계가 있었다. 이와 같은 콘크리트의 단점을 극복하기 위해 휨강도 및 인성을 향상시키는 것이 실제 섬유보강 콘크리트의 개발 배경이자 가장 큰 목적이었다고 할 수 있으며, 이미 장기간 폭넓은 연구가 진행되어 다양한 종류의 섬유보강 콘크리트가 개발되었다.

이와 같이 강섬유 및 합성섬유를 대량 혼입하여 구조적 성능을 대폭 향상시킨 신재료로서 DFRCC(ductile fiber reinforced cementitious composite) 개발이 이루어지고 있다. 이러한 DFRCC는 매트릭스와 섬유의 적절한 상호작용에 의해, 휨 모멘트 또는 인장력하에서 매트릭스에 최초균열이 발생된 후 섬유의 가교작용에 의해 변형경화 및 다수균열(multiple crack)특성을 나타내며 뛰어난 인성을 가지는 고인성 시멘트 복합체이다. DFRCC를 RC구조에 적용할 경우, <그림 2 및 3>와 같이 기존 구조 부재의 접합부 및 응력 전달부에 사용되어 구조 성능 및 내진 성능 등을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

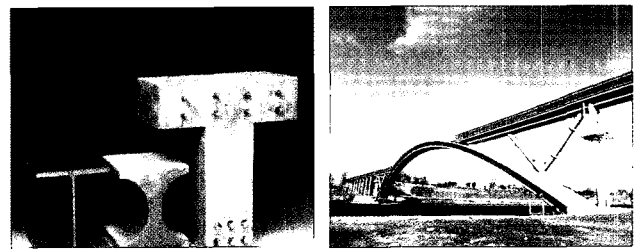


사진 1. Ductal의 적용 사례

섬유보강에 의해 콘크리트의 휨·인장성능 및 인성을 향상시킨 DFRCC 대표적인 예로 Ductal이라는 제품이 있다. Ductal은 DSP(densified system containing homogeneously arranged ultra-fine particle : 시멘트와 초미립자 혼합을 통하여 경화체 공극을 감소시켜 압축강도를 증진시키는 원리) 개념과 섬유 첨가에 의한 연성의 증가를 기본 개념으로 하여 제조되어진 콘크리트로서 이러한 두가지 개념을 상호보완 함으로써 압축강도 160~230 MPa, 휨강도 30~50 MPa의 콘크리트를 제조 할 수 있으며, 섬유의 혼입과 양생 방법에 따라 800 MPa까지도 가능하게 된다<sup>1)</sup>.

Ductal에는 강섬유 및 PVA섬유가 혼입되는데, 이러한 복합체의 파괴시 일반 콘크리트에서 보기 힘든 우수한 연성을 보여 주게 된다. 특히 강도 특성에 있어서는 일반 콘크리트 및 고성능 콘크리트의 한계를 넘어서 steel 재료와 유사한 수준으로, 기존 steel 재료를 사용하는 부분 중 일부를 대체할 가능성도 충분하다. 이러한 Ductal 제품은 이미 교량 및 지붕재 등 다

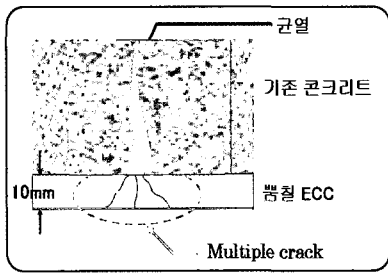


그림 4. DFRCC 보수재료에 의한 균열 제어

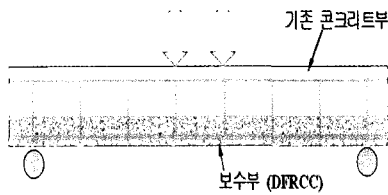


그림 5. DFRCC를 이용한 보부재의 보수 예

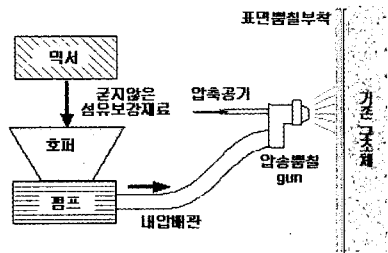


그림 6. DFRCC의 빔철 보수재료로의 적용

표 2. 보수재료의 성능 비교

성능	에폭시계 폴리머모르타르	폴리머시멘트 모르타르	빔철 PVA-ECC (HPFRCCs)
압축강도(MPa)	55~110	10~80	20~60
탄성계수(GPa)	0.5~20	1.0~30	10~20
휨강도(MPa)	20~50	6~15	10~30
인장강도(MPa)	9~20	2~8	2~7
파단시 신율(%)	0~15	0~5	1~5
열팽창계수( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	25~30	8~20	5~15
흡수율(%) (25℃, 7일간)	0~1	0.1~0.5	5~15
강도 발현 시간	6~48시간	1~7일	1~4주간

양한 부재에 적용되었으며, 국내에서도 <사진 1>와 같이 선유도 연육교에 적용되었다.<sup>2)</sup>

### 3.2 콘크리트의 균열 저감 및 균열 제어

매트릭스와 섬유와의 적절한 상호작용에 의해, 휨 모멘트 또는 인장력 하에서 매트릭스에 최초 균열이 발생된 후 섬유의 가교

작용에 의해 “다수균열(multiple crack)”특성을 나타내며 뛰어난 변형성능을 가지는 고인성 시멘트 복합체의 제조가 가능하다. DFRCC가 가지는 균열분산효과는 RC구조물에 필연적으로 발생하는 균열을 <그림 4>와 같이 다수의 미세균열로 분산 시킴으로써 큰 폭의 단독균열에 비해 외부 열화인자의 침투를 억제하여 내구성을 향상시킬 뿐만 아니라 균열에 의한 외관상의 문제를 해결 할 수 있다. 그러나 다량의 섬유를 사용함으로써 발생하는 경제성 및 시공성의 문제로 인해 구조체에 직접 적용하는 경우는 드물며, <그림 5>과 같이 기존 콘크리트의 균열·박락부위에 보수·보강용으로 사용하기위한 시도가 활발히 진행중이다<sup>3)</sup>.

DFRCC를 이용한 보수·보강 공법은 다음과 같은 장점을 가진다.

- ① 무기질 시멘트를 기초로 한 재료로 간편하게 스프레이 시공이 가능
- ② 점도가 우수하고 흘러내리거나 처지지 않으며 구체와의 접착강도가 매우 우수
- ③ 기존 보수재료보다 인성이 우수하여 구조물의 보수보강에 적합
- ④ 섬유복합구조로 뛰어난 연성 특성 발휘
- ⑤ 구조물의 사용 중에 발생하는 충격이나 진동 및 건조수축에 의한 균열저항성 우수
- ⑥ 탁월한 변형성능으로 계면부착이 우수

이러한 DFRCC의 대표적인 예로는 미세 역학을 기반으로 개발된 ECC(engineered cementitious composites)를 들 수 있다. ECC는 이미 보수재료로서의 연구가 상당히 진행된 상태로 <그림 6>과 같이 빔철형 보수재료로도 적용되고 있으며, 기존 보수재료 및 ECC를 사용한 보수재료의 성능비교 결과를 <표 2>에 나타내었다. 기존에 많이 적용되고 있는 폴리머 모르타르는 폴리머의 선택에 따라 성능의 범위가 비교적 넓고, 조직이 치밀하며, 비교적 고강도여서, 유해물질의 침투, 흡수에 의한 열화에 대해 저항성이 높다. 그러나 이러한 재료들은 폴리머의 함유량이 많은 경우는 열팽창계수가 콘크리트와 큰 차이를 보이며, 기존 콘크리트와 이질재료로 거동하고 재료비도 비교적 비싸다.

이에 비해 빔철 ECC는 파단시의 변형 능력이 높고 열팽창계수가 일반적인 콘크리트와 거의 같다. 파단시의 변형 능력이 높아서 외력의 재하, 온냉 그리고 건습의 반복에 의해 발생하는 응력에 대해 유효하다. 또한, 열팽창계수가 모재와 비슷하기 때문에 온냉의 반복에 의한 열응력이 작으며, 기존 콘크리트와의 계면에 생기는 전단응력이 현저히 작게 된다. 또한, 코스트

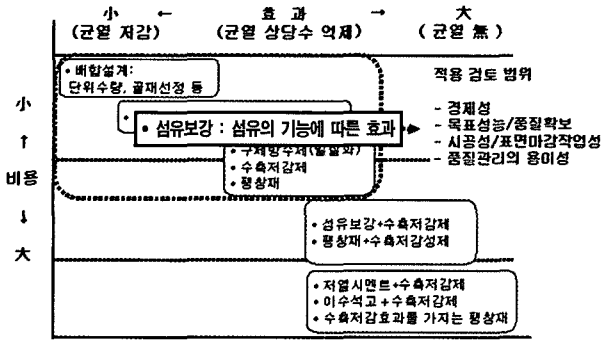


그림 7. 콘크리트의 균열 제어 효과와 비용의 관계

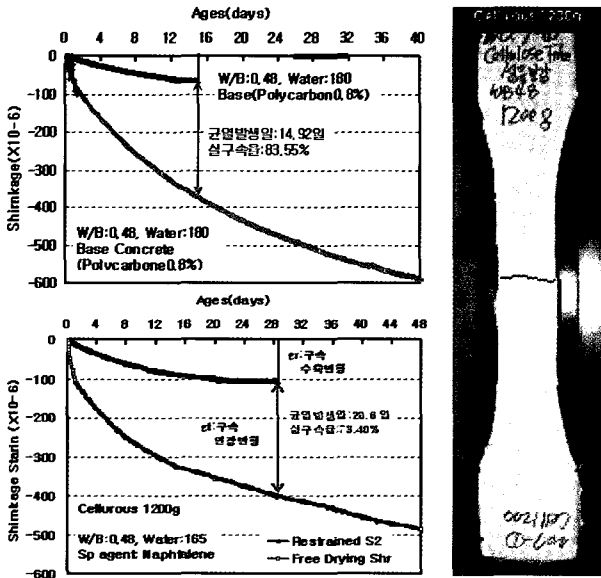
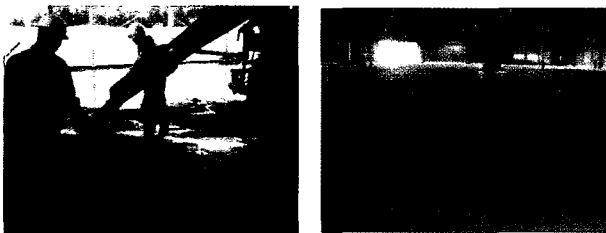


그림 8. 섬유보강에 의한 균열강도 향상 및 구속시의 균열 억제 효과



(a) 섬유보강 콘크리트의 타설      (b) 시공 후

사진 2. 섬유보강 콘크리트를 활용한 바닥판 시공

표 3. 다양한 섬유혼입에 의한 균열제어 효과

섬유 종류	구속형 슬래브모형 거푸집	Plan	C.F 1.2kg/m <sup>3</sup>	P.P 1.2kg/m <sup>3</sup>	P.V.A 0.9kg/m <sup>3</sup>
균열 상황					
균열 감소율	-	0%	79%	72%	86%

에 있어서도 대량의 폴리머를 함유하지 않은 ECC가 폴리머모르타르와 폴리머시멘트모르타르에 대해 유리하다. 이와 같이 뿔칠 ECC는 기존 재료에 비교해 뛰어난 특성을 갖고 있어, 향후 보수 용도로의 적용이 확대되어지리라 기대된다<sup>4)</sup>.

### 3.3 수평부재 등에서의 균열저항성(초기균열 강도) 향상

콘크리트에 섬유를 사용하는 중요한 목적 중 하나는 섬유를 소량 혼입하여 균열저항성을 향상시킴으로써 콘크리트 타설 초기 발생하는 균열(소성수축균열, 온도균열 등)을 억제하여 내구성 및 사용성을 향상시키는 것이다.

일반적으로 콘크리트의 균열을 줄이는 방법으로는, 단위수량, 골재 등 배합 조절, 수축저감제 및 구체방수성재료 등 혼화재료 사용 및 섬유를 사용하는 방법이 있으며, 각 방법들을 복합적으로 사용하여 더 뛰어난 효과를 얻을 수 있다.

그러나 성능이 우수할수록 비용도 증가하는 면이 있으며, 이러한 콘크리트의 수축저감 효과와 비용의 관계를 <그림 7>에 나타내었다.

섬유를 사용한 콘크리트의 균열저감 효과는 <그림 8>과 같이 콘크리트의 인장력을 증진시켜 균열에 대한 저항성을 높이는 원리로서, 이때 보강섬유는 최대한으로 초기 균열을 억제하면서도 작업성, 경제성 등에 큰 영향을 미치지 않는 혼입률을 고려하여야 한다. 이러한 섬유보강 콘크리트는 주로 슬래브나 바닥 콘크리트에 적용되며, 그 일례를 <사진 2>에 나타내었다.

현재 세계적으로 콘크리트의 초기균열 제어를 목적으로 사용하는 섬유는 PP섬유(polypropylene fiber, 이하 PP섬유)로서 일반적으로 혼입률 0.1%(0.9kg/m<sup>3</sup>)를 사용한다. 균열 제어용으로 PP섬유를 사용हे은 이유는 섬유가 콘크리트 내에서 분산성이 뛰어나고, 경제성이 우수한 장점이 있기 때문이다<sup>5)</sup>. 그러나 이에 반해 탄성계수가 작고, 표면이 소수성으로 콘크리트와 부착력이 낮은 단점을 가지고 있어 최근 친수성인 셀룰로오스 섬유 및 PVA 섬유 등 다양한 섬유를 이용한 콘크리트의 수축저감에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며,

섬유 종류에 따른 수축저감효과 연구 결과의 한 예를 <표 3>에 나타내었다<sup>6)</sup>.

### 3.4 화재시 섬유의 고온용해에 의한 콘크리트 폭열 억제

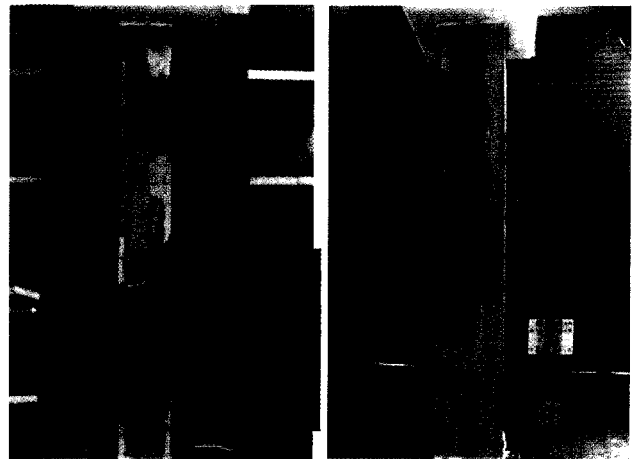
현재, 국내의 경우에도 건축물의 고층화에 관한 많은 연구와 시행이 이루어져 설계기준강도 80 MPa급의 고강도콘크리트를 적용한 건축물이 등장하고 있다. 이에 따라 고층화에 따른 건축물의 사용안전성에 관한 문제점은 누차 지적되고 있으며, 특히 화재에 의한 고온 수열로 발생하는 콘크리트의 성능하는 시급히 해결해야 할 문제점이다.

콘크리트 부재의 내화성능은 화재성상이나 경과시간 등의 많은 요인에 의해 좌우되지만 일반적으로 콘크리트의 종류에 관계없이 500 °C 이상의 고온에서 현저한 성능 저하를 보인다. 특히, 최근 사용이 증가하고 있는 고강도콘크리트는 밀실한 미세 구조로 인해 수증기압에 의한 폭열의 발생이 쉬우므로, 소정의 피복두께를 유지하여 철근의 온도 상승을 제어했던 기존의 내화 성능을 기대하기 힘들어 이에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다<sup>7)</sup>.

콘크리트 부재의 폭열을 줄이기 위한 방법으로는 화재시의 콘크리트 중의 수분 이동을 용이하게 하여 수증기압의 생성을 저감하는 방법이 있다. 이 때 합성섬유의 혼입이 주로 논의되며 사용되는 합성섬유로는 PP섬유, EVA섬유가 이용되며 일반적으로 PP섬유가 널리 쓰인다. 높은 수증기압 및 열응력에 의한 파괴 등의 성능저하를 보강하기 위해 PP섬유를 혼입함으로써, 화재시 PP섬유가 용해된 공간으로 수증기나, 수분, 가스 등이 빠져나갈 수 있는 미세경로를 만들어 주는 방법이다.

일반적으로 PP섬유의 용해점은 약 170 °C 정도로 콘크리트 내의 온도가 PP섬유의 용해점을 초과하면 용해한다. PP섬유 및 분말을 혼입한 HSC는 혼입하지 않은 경우보다 더 많은 미세경로가 관찰되며 대체적으로 약 1 μm 이하로 상당히 크기가 작고 잔골재나 굵은골재 사이에서 매우 조밀하게 형성된다<sup>8)</sup>.

이와 같이 합성섬유를 이용하여 고강도콘크리트의 폭열을 억제하는 공법으로써 내폭열 콘크리트가 있다. 내폭열 콘크리트는 PP섬유를 혼입하며 설계기준강도 80 ~ 120 MPa의 범위에서 실용화되었다. 전술한 바와 같이 화재시에 섬유가 용해 소실하여 콘크리트의 미세경로를 형성함으로써 열팽창력 및 수증기압을 완화하는 역할을 하여 <사진 3>과 같이 표층부의 폭열을 방지하게 된다. 최근에는 150 MPa급 초고강도 콘크리트의 적용시 PP섬유의 다량 혼입에 따른 문제점들을 해결하기 위해 EVA섬유의 사용이 연구되고 있다.



(a) 플레인 콘크리트 (b) 내폭열 콘크리트  
사진 3. 내화 시험을 통한 내폭열 콘크리트의 폭열 억제 성능

### 3.5 그밖에 섬유의 종류 및 보강에 따른 콘크리트 성능 개선

콘크리트 등 시멘트계 재료에 섬유를 혼입할 경우, 전술한 바와 같은 구조 성능의 향상효과 이외에도 내마모성, 표면박리 저항성 및 동결융해저항성 등 다양한 성능을 향상시킬 수 있다. 특히 섬유를 통한 콘크리트의 성능의 향상은 건축 및 토목 분야에서 기존 콘크리트가 사용되고 있던 다양한 부재에 그대로 적용이 가능하다는 점이 큰 장점으로 꼽을 수 있다.

건축 분야에 있어 일반적인 철근콘크리트 구조체에 섬유보강 콘크리트를 적용할 경우 인장강도 및 인성의 증가로 내진성능을 향상시킬 수 있으며, 2차 제품에 적용함으로써 콘크리트제품을 판재로 이용할 수 있다. 또한 토목 분야의 경우에는 균열 저항성, 동결융해저항성 등의 향상에 의한 내구성의 향상으로 공용연수를 연장시킬 수 있으며, 내충격성 및 내마모성의 향상은 콘크리트의 도로포장 적용에 더욱 유리한 조건을 만들 수 있다.

한편, 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능은 섬유관련 기술 및 다양한 혼화제의 발전과 함께 꾸준히 향상되어 왔으며, 현재는 단순히 기존 콘크리트의 단점을 개선하는 수준을 넘어 기존의 콘크리트 재료와는 전혀 다른 성능을 갖춘 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(HPFRCC)가 개발되고 있는 상황이다. <표 4>는 섬유보강의 단계에 따른 시멘트계 재료들의 특성을 나타낸 것으로서, HPFRCC는 기존 시멘트계 재료의 특징인 취성 및 준취성 파괴가 아닌 연성파괴거동을 나타내며, 파괴시 미세한 균열이 분산되어 나타난다.

이러한 HPFRCC는 기존의 섬유보강 재료에 비해 다양한 섬유가 혼입되며, 섬유의 종류 및 혼입량에 따라 상이한 특성을 보인다. <표 5>는 섬유 종류 및 혼입량에 따른 HPFRCC의 각

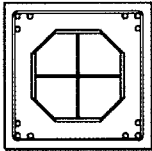
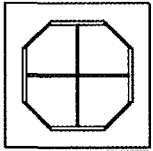
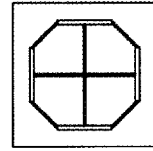
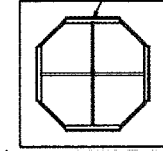
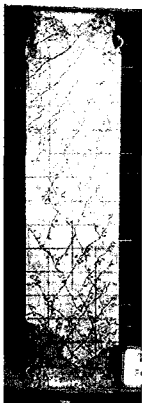



표 4. 섬유보강의 단계에 따른 콘크리트의 재료적 특성

재료 특성	시멘트	콘크리트	고인성 시멘트 복합재료 (DFRCC)	
	모르타르	FRC	HPFRCC	
과파거동 변형경화/연화 균열성장(휨)* 균열성장(인장)	취성 -	準취성 변형경화	準취성 변형경연화/경화 Multiple crack 국소화(局所化)	연성 변형경화 Multiple crack Multiple crack
	국소화(局所化) 국소화(局所化)	국소화(局所化) 국소화(局所化)	국소화(局所化)	

표 5. 섬유보강에 의한 시멘트 매트릭스의 성능 개선율

HPFRCC의 특성	체적혼입물 및 섬유 종류(%)	개선율(%)	HPFRCC의 특성	체적혼입물 및 섬유 종류(%)	개선율(%)
초기균열 강도	PE섬유-2	10~40	압축영계수	강섬유-12	10~50
	PVA섬유-4	100		PE섬유-2	50
	탄소섬유-3	80		압축강도	아라미드 섬유-1
인장강도	PE섬유-2	20~200	압축변형	강섬유-12	150~300
	강섬유-12	500		PE섬유-2	40~100
	강섬유-12	400		강섬유-12	300
초기균열시 변형	PE섬유-2	40	터프니스 (Toughness)	PE섬유-3	150,000
	탄소섬유-3	60		강섬유-12	600,000
	PE섬유-2	20,000		강섬유-6	170,000
인장강도시 변형	강섬유-12	2,900	휨강도	PE섬유-2	500
	PVA섬유-4	7,900		강섬유-14	150~950
	PP섬유-7	10,000		강섬유-5~20	40~160
	강섬유-6	1,750		탄소+mesh-8	2,000
	-	-		강섬유-6	350

표 6. 구조부재로의 적용 (철골 콘크리트 구조)

구조 종류	SRC	CRS	ECCRS1	ECCES2
단 면				
구조형식 콘크리트 추가 보강	일반 콘크리트	Concrete encased steel		PVA-ECC Wire mesh
파괴시 균열성장				

종 특성을 나타낸 것으로서, 플레인 매트릭스에 비해 휨·인장강도는 수백 배, 변형 및 터프니스는 수천에서 수만 배까지 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

현재 HPFRCC의 한 종류로서 Ductal, SIFCON, SIMCOM, ECC 등이 개발되어 적용되고 있으며, 이와 같은 신재료들은 내진/내폭 구조물, 강제 피복재료, 지진에너지 흡수 디바이스, 박판 판넬 등 기존 콘크리트는 사용될 수 없던 다양한 분야에 섬유보강 시멘트 복합체의 적용 가능성을 넓혀가고 있다. 한편, HPFRCC를 기존 구조부재에 적용했을 경우의 실험 예를 <표 6>에 나타내었다.

#### 4. 섬유보강 시멘트 복합재료의 수요 예측

전술한 바와 같이, 현재 다양한 종류의 섬유보강 복합재료가 개발되고 있으며 실험실 수준의 연구에서 우수한 성능을 검증받고 실제 적용을 기다리고 상황이다.

그러나 이러한 고성능의 신재료들의 경우 다량의 섬유를 혼입함으로써 경제성 및 시공성에 문제가 발생하는 것이 현실이며, 성능에 있어서도 기존의 재료들과의 경쟁력 검증이 이루어지고 있는 상황으로, 아직까지 고성능의 섬유보강 복합재의 적용실적은 많지 않다.

따라서 향후 섬유보강 시멘트 복합체의 적용을 활성화하기 위해서는 ① 언제 어디서나 사용할 수 있도록 재료 제조 및 설계의 일반화, ② 성능의 안정화를 통한 재료·시공품질의 신뢰성 향상, ③ PCa, 현장타설 시스템 등 다양한 적용 방법 개발, ④ 공통된 시험방법에 의한 재료성능평가의 일반화, ⑤ 사회적 요구를 만족할 수 있는 적용성, ⑥ 기술의 보급촉진 등이 요구된다.

또한, 섬유보강 시멘트계의 복합재료는 <그림 9>과 같이 섬유보강의 종류와 형태에 따라 재료의 성능을 다양하게 설계할 수 있어 건설 분야에서 재료설계에 대한 자유도를 크게 향상시켜줄 수 있을 것으로 예상되고 있다.

이러한 상황에서 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능 향상은 섬유관련 기술의 발전과 함께

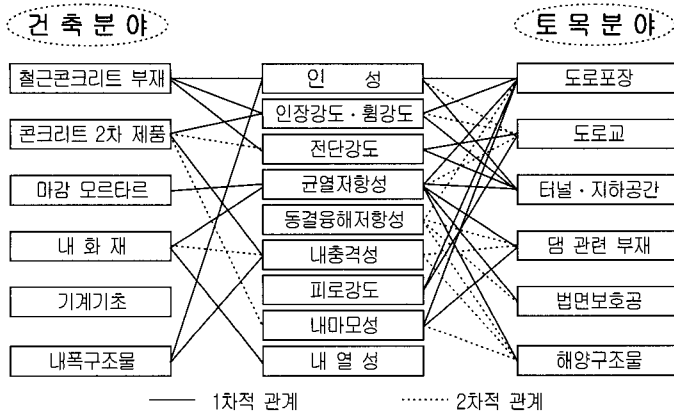


그림 9. 섬유보강 콘크리트의 특성 및 적용 분야

더욱 폭넓은 분야에서 꾸준히 진행되어 현재는 단순히 콘크리트의 단점을 보완하는 수준이 아닌, 기존의 콘크리트 재료와는 비교할 수 없는 성능을 갖춘 각종 섬유보강 시멘트계 복합재료가 Ductal, SIFCON, SIMCOM, DFRCC, ECC 등 다양한 신재료 형태로 개발되고 있는 상황이다.

### 5. 맺음말

<그림 10>에 나타난 바와 같이 향후의 건설 구조물은 최소성을 법적으로 규정하고 있는 표준시방서 규정에서 벗어나 요구 사항에 따라 목표성능이 구체적이고 다양하게 대응하는 성능 설계를 중심으로 전환될 것이며 이에 대응하는 비용의 수준도 다양하게 구성될 것으로 예상된다. 또한 <그림 11>과 같이 미래의 건축은 미래의 신기능, 고성능 건축재료의 발달이 전제되어야 하며, 건축소비자의 성능에 대한 수요 증가와 경제적 효과에 의해 신재료의 개발이 향후 활발히 전개될 것으로 예상된다. 국내에서도 이에 관련한 많은 연구가 진행되고 있는 만큼 다양한 건설 분야에서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 수요확대와 대응이 활발하게 전개될 것으로 기대하며 본고를 마치고자 한다. □

### 참고문헌

1. Ductal, <http://ductal.com>
2. 변운주 외, "초고강도 콘크리트 Ductal을 이용한 선유도연결 보행 전용교량의 설계와 시공", 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, Vol.13, No.2, 2001, pp.607~614.

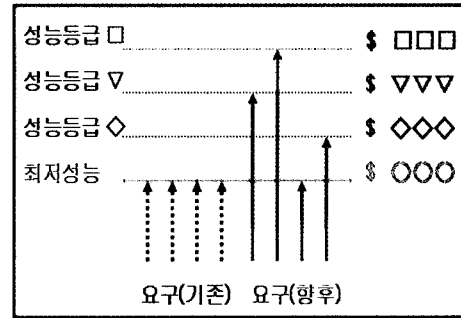


그림 10. 향후 건설 분야에서 성능의 수요형태와 비용과의 관계

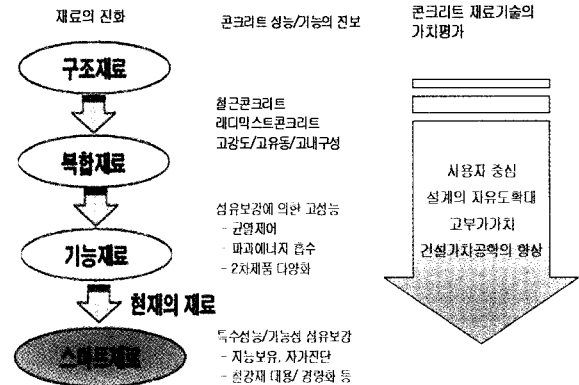


그림 11. 미래 건설재료의 발전·진화 방향

3. Li, V.C., H. Horii, P. Kabele, T. Kanda, and Y. M. Lim, "Repair and Retrofit with Engineered Cementitious Composites", *Int'l J. of Engineering Fracture Mechanics*, Vol.65, No.2-3, 2000, pp.317~334.
4. ECC의 보수재료 활용 및 전망, <http://eng-ams.com/>
5. 원종필 외, "섬유 혼입률 및 길이 변화에 따른 친수성 PVA 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능 및 초기 균열 특성", 대한토목학회논문집 A, Vol.25, No.1, 2005, pp.1~9.
6. 박성우 외, "셀룰로스 섬유의 소성수축균열 저항성과 현장적용에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol.16, No.2, 2004, pp.699~702.
7. 日本コンクリート工學協會, "コンクリート構造物の火災安全性研究委員會報告書", 日本コンクリート工學協會, 2002.
8. Pierre Kalifa, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers From spalling to microstructure," *Cement and Concrete Research*, June 2001, pp.1487~ <http://www.kci.or.kr>