

纖維補強콘크리트

朴 承 範

忠南大學校 土木工學科 教授

1. 序 論

섬유보강콘크리트는 콘크리트의 인장강도와 균열에 대한 저항성을 높이고 인성을 대폭 개선시킬 목적으로 모르타르 또는 콘크리트속에 금속, 유리 또는 합성수지 등을 원료로 한 강섬유, 유리섬유, 폴리머섬유, 탄소섬유, 석면, 폴리프로필렌섬유 등의 長·短섬유를 고르게 분산시켜 만들어진 복합재료이다.

이러한 섬유보강콘크리트는 고대 이집트인 이 벽돌을 제조하는데에도 이용되리만큼 오래 전부터 이용되어 왔으나, 근래 대표적 섬유보강복합재료는 1900년에 오스트리아인에 의해 발명된 석면스레트를 시작으로 1970년대에 강섬유¹⁻⁵⁾와 내알칼리성 유리섬유⁶⁻⁸⁾ 등이 시멘트·콘크리트의 보강용섬유로서 개발·실용화되었다.

섬유의 종류도 폴리프로필렌섬유⁹⁻¹¹⁾, 폴리에틸렌섬유, 비닐론섬유, 아라미드섬유와 1980년대에 들어서면서 꿈의 섬유로 일컬어지는 PAN계 및 Pitch계 탄소섬유^{12,13)}를 이용한 섬유보강콘크리트의 응용연구가 시작되어 경량, 고강도, 내수성, 내알칼리성, 내화특성과 내열성이 우수하기 때문에 경량·고강도건축 및 고강도 휴관, 해양구조물등에 적용연구가 국내에서도 활발히 수행¹⁴⁻¹⁷⁾되고 있는 실정이므로, 본고에서는 대표적인 섬유보강콘크리트의 특성 및 적용예, 향후 전망등에 관하여 소개하고자 한다.

2. 纖維補強콘크리트의 種類

2.1 短纖維에 의한 纖維補強콘크리트의 種類

최근 단섬유에 의한 시멘트·콘크리트의 보강기구에 관한 연구와 각종 고성능 단섬유의 개발이 급속히 진행되어 지금까지 없었던 새로운 성능을 갖는 섬유보강시멘트·콘크리트가 개발되어 실용화되고 있다. 보강용 섬유로서는 강섬유, 내알칼리성 유리섬유, 폴리에틸렌섬유, 비닐론섬유, 탄소섬유등이 있지만, 이 중에 강섬유와 폴리에틸렌섬유는 모르타르 및 콘크리트의 보강용 섬유로서 토목·건축의 구조재로 주로 이용되며, 내알칼리성 유리섬유, 비닐론섬유, 탄소섬유등은 페이스트 또는 모르타르의 보강용 섬유로서 건축의 커텐월등의 2차부재를 대상으로 개발되고 있다. 이들 각종 보강용 섬유의 특성은 표1과 같다.¹⁸⁾

(1) 강섬유보강콘크리트(SFRC)

SFRC는 종래의 콘크리트에 비하여 각종 역학적 성질이 우수하여 구조부재 및 콘크리트 2차제품에의 적용연구가 1960년대부터 각국에서 진행되어 왔다. 그러나 현재에는 고속도로, 포장 Overlay, 터널 복공등의 토목용도에의 적용이 주이고, 구조물의 보, 교각, 상판등 순구조부재에의 적용에는 적다. 또한 건축물에의 적용에도 칸막이벽, 계단등 2차부재에 적용되고 있으며, 사용되는 강섬유의 재질은 스텐레스강도 비교적 저렴하게 제조·공급될 수 있으

표 1.

각종 보강용 섬유 물리적 성질

섬유의 종류		인장 강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	비 중
강섬유	탄소강	490~980	191~206	7.8
	아연도금강	490~980	191~206	7.8
	스텐레스강	490~980	191~206	7.8
내알칼리성 유리섬유		2450	74	2.8
탄소섬유	Pitch계(저탄성)	784~1078	42	1.63
	PAN계(고탄성)	1960~2940	196~392	1.7~1.9
석 면		549~960	82~137	2.9
아라미드 섬유		3038	74	1.39
비니론 섬유		882~1470	30~36	1.29
콘크리트		0.49~2.45	10~29	1.0~2.3

므로 내구성을 요하는 부분에는 스텐레스강 섬유의 사용이 기대된다.

(2) 유리섬유보강콘크리트^{19,20)}(GRC)

GRC는 고강도, 고인성의 불연재료로써 건축물의 내외장재로 사용되기 시작하여 성형성, 의장(意匠)성이 우수하여 Direct Spray법에 의한 내외장재에 많이 사용되어 왔다. 그러나 GRC는 내알칼리성 유리섬유를 사용함에도 불구하고 시간경과에 따른 열화현상이 보고되고 있으나 최근에는 열화현상을 적게하기 위하여 저알칼리성 시멘트와 지르코니아계의 내알칼리성 유리섬유의 조합에 의한 대형박판 커텐 월등에 적용되고 있다.

(3) 탄소섬유보강콘크리트(CFRC)

탄소섬유는 종래 고성능재료이지만 가격이 높기때문에 그 용도는 스포츠용품, 내열재 등에 한하고 건축에의 적용은 고려대상이 되지않고 있었으나, 석유 및 석탄의 피치를 원료로 한 Pitch계 탄소섬유가 저렴한 가격으로 제조·개발됨으로써 모르타·콘크리트에 보강하는 섬유로써 주목을 받고 있다.

Pitch계 탄소섬유는 아크릴섬유를 소성하여 만든 고탄성·고강도 탄소섬유(PAN계)의 1/10 이하의 가격이고 내열성이 풍부하며, 또 시멘

트·모르타의 강알칼리성 중에서도 안정하여 열화현상이 없으며, 인체에 대하여 무해한 점등이 콘크리트용 보강섬유로서 대단히 유망한 성질을 갖고 있다. 금후 섬유가격이 저렴하게 되면 광범위하게 용도가 확대될 것으로 생각된다.

(4) 비니론섬유보강콘크리트²¹⁾(VFRC)

비니론섬유는 합성섬유중에서 가장 방수성이 크고 가격은 저렴하여 유럽에서는 석면대체재로서 주목되어 사용되고 있다. 역학적성질 및 휨·인장강도도 향상되며 충격강도도 우수하여 내충격성이 요구되는 부위에 유리하나, 섬유자체가 가연성이므로 내화성능을 요구하는 부재에는 사용하기 어렵다.

2.2 連續纖維補強콘크리트의 種類

최근 철근콘크리트의 열화문제로 특히 염해 등에 의한 철근의 부식문제가 부각되고 있는 실정이므로 철근대체의 FRP근의 연구가 진행되고 있다. FRP근은 고강도, 고탄성의 PAN계 탄소섬유 및 아라미드섬유의 연속섬유와 에폭시수지등을 3차원적으로 성형시켜 시멘트 매트릭스간의 기계적 부착력이 크고 고인성을 얻을 수 있다. 연속섬유보강콘크리트의 건축부재의 양산기술은 아직 충분히 확립되어 있지 않

으나 금후 내열, 내화, 내구성등의 문제를 해결시킬 수 있는 주요 구조부재에 일반적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 纖維補強콘크리트의 特性

3.1 鋼纖維補強콘크리트(SFRC)

SFRC의 성질에 크게 영향을 미치는 요인은 강섬유의 형상, 치수와 기계적 성질, 섬유 혼입율, 콘크리트매트릭스의 성질등이 있다.

그림1은 휨강도와 섬유혼입율 관계를 나타낸 것이며, SFRC의 휨강도와 섬유혼입율의 관계¹⁸⁾는 그림2, 3과 같이 그림중의 실선은 실험치의 선형회귀식을 나타내고 파선은 섬유배향계수(α)를 3차원($\alpha=0.5$) 및 2차원($\alpha=0.637$)로 하는 경우 식(1)에 나타내는 혼합법칙(Law of mixture)에 의한 추정치를 나타냈다.

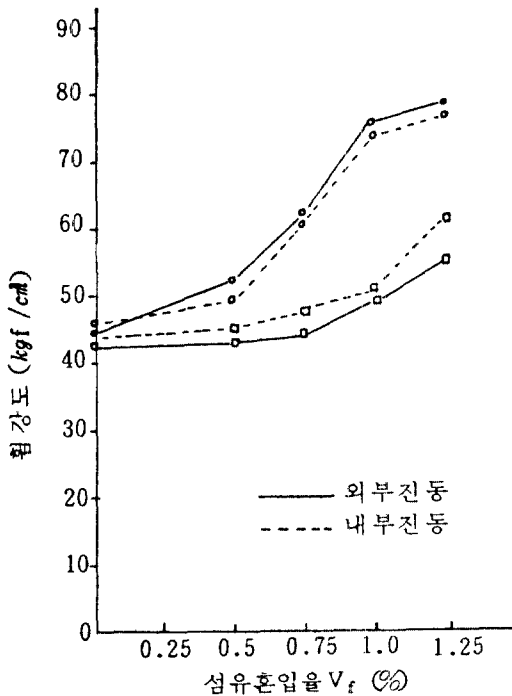


그림 1. SFRC의 휨강도와 섬유혼입율과의 관계

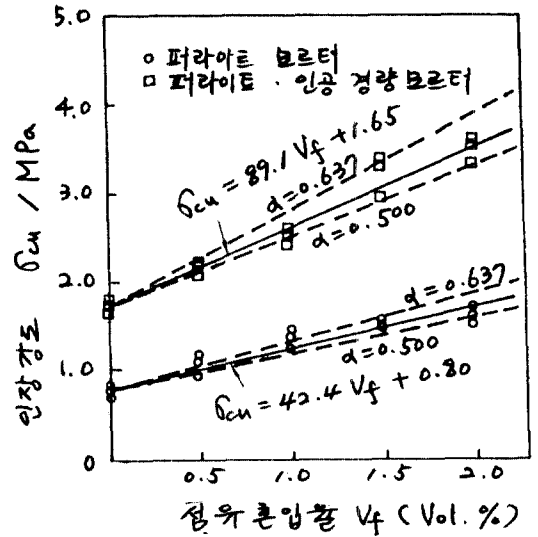


그림 2. SFRC의 인장강도(σ_{cu})와 섬유혼입율(V_f)와의 관계

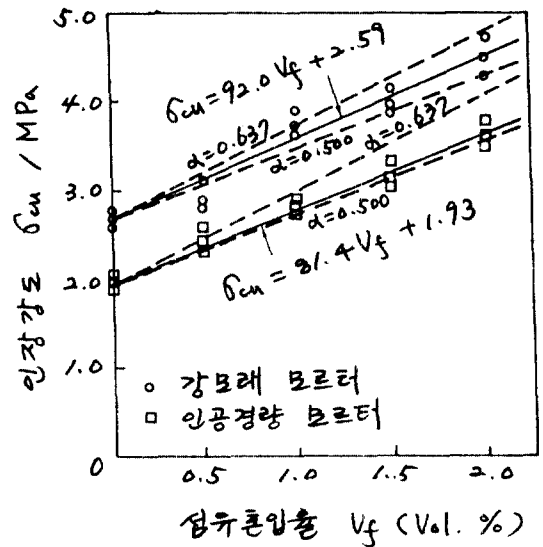


그림 3. SFRC의 인장강도(σ_{cu})와 섬유혼입율(V_f)와의 관계

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu}(1 - V_f) + \alpha \cdot V_f \cdot \tau \quad (1)$$

여기서, σ_{cu} , σ_{mu} : SFRC 및 매트릭스의 인장강도

V_f : 섬유혼입율

α : 섬유배향계수

τ : 강섬유와 매트릭스의 부착강도

l/d ; 섬유길이 / 섬유직경

이들 결과로부터 SFRC의 인장강도 실험치는 V_f 의 증가에 따라 거의 직선적으로 증대하며 또 σ_{cu} 와 V_f 의 線形관계를 나타내는 상관계수(r_{xy})는 0.96~0.98로 고도의 상관성을 나타냈다.

3.2 유리纖維補強시멘트(GRC, GFRC)

Majumdar²⁰⁾와 Nurse등에 의해 영국의 건축

연구소(BRE)에서 실용적인 내알칼리성 유리 섬유를 연구개발하면서부터 GFRC는 단면이 얇은 5~20mm 정도의 박판부재의 공장제품에 한정사용되고 있다. 표준적인 GF의 혼입율은 Direct Spray법으로 4~6% 첨가사용된다.

그림4는 GFRC의 응력-변형 곡선을 나타낸 것으로 비례한도까지는 탄성적으로 거동하며 매트릭스의 성질에 의존하고, 비례한도를 초과하여 파괴에 이르기까지는 GF가 받는 영역으로 흡수능력이 크기 때문에 휨, 인장, 충격강

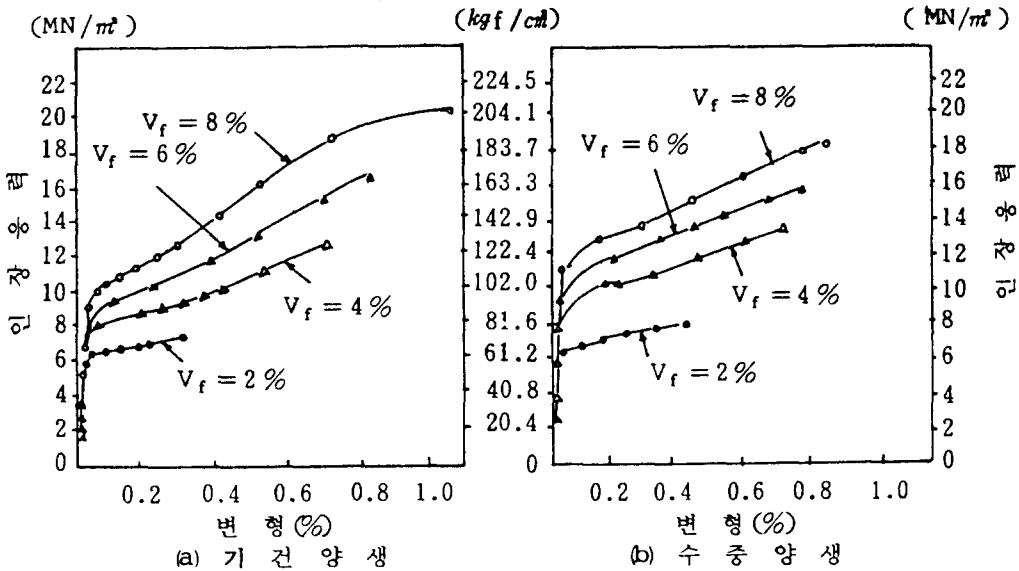


그림 4. GFRC의 인장응력-변형곡선(FL=30mm의 경우)

도가 대단히 큰 bi-linear 형태의 응력-변형 곡선을 나타낸다.

3.3 炭素纖維補強시멘트(CFRC)

1880년 미국의 Thomas A. Edison에 의해 최초로 탄소섬유가 발명된 이래 1970년대에 들어서 석유나 석탄의 핏치에서 저가격의 CF를 제조하는 기술이 미국, 일본등지에서 개발되어 1980년대부터 고성능 시멘트계 복합재료로의 활용연구가 급속히 진행되고 있다.

그림5는 CFRC의 응력-변형 곡선을 나타낸 것으로 V_f 의 증가에 따라 인장도 상당히 증가

함을 알수 있으며, 저자의 연구결과에 의하면 W/C=30%, S.P. 6%, CF(Pitch) 3%, 고순도 실리카분말을 사용한 경우(그림 6, 7, 8) 압축강도는 약 1,000kgf/cm²(실리카흙을 사용한 경우는 1,200kgf/cm²), 인장강도 150kgf/cm², 휨강도 250kgf/cm² 정도의 매우 높은 고강도이면서 인장파괴시 변형은 시멘트매트릭스의 30~40배로 연성적 성질을 나타내었다.

3.4 其他

아라미드섬유는 인장강도, 탄성율등의 역학적 특성이 핏치계CF보다 더욱 우수하며 내열

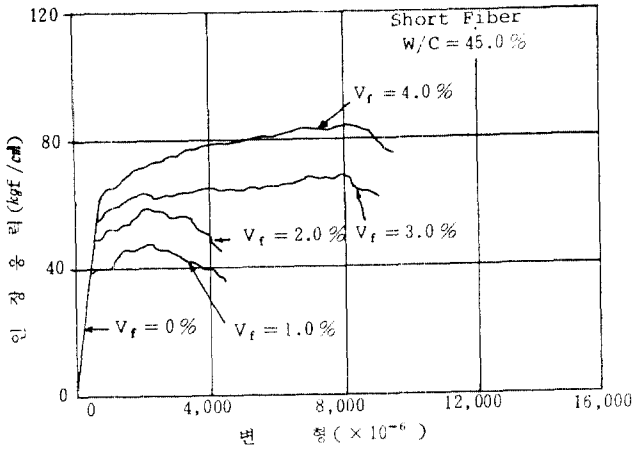


그림 5. CFRC의 인장응력-변형곡선형과 크리프 변형

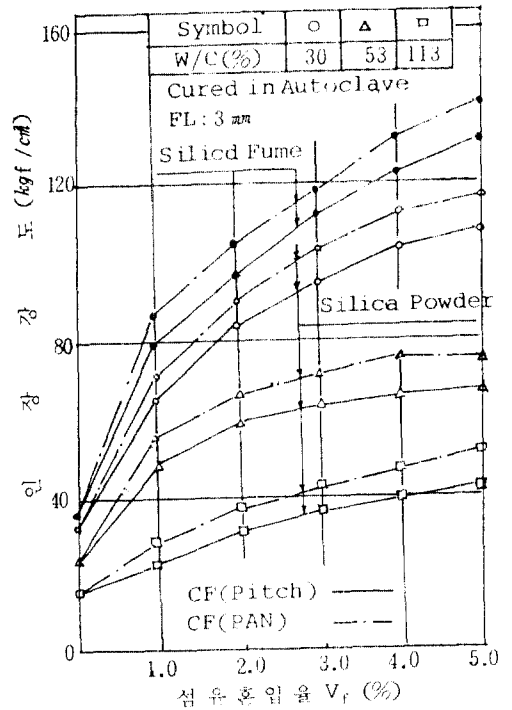


그림 7. CFRC의 인장강도와 섬유혼입율과의 관계

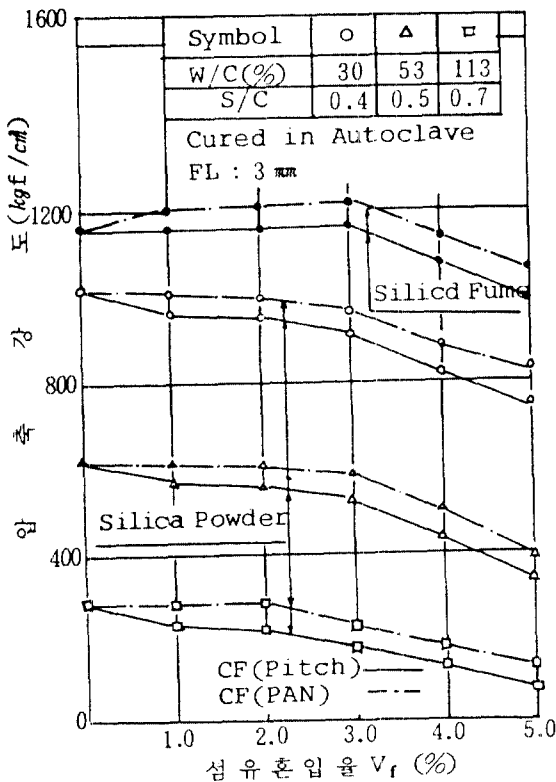


그림 6. CFRC의 압축강도와 섬유혼입율과의 관계

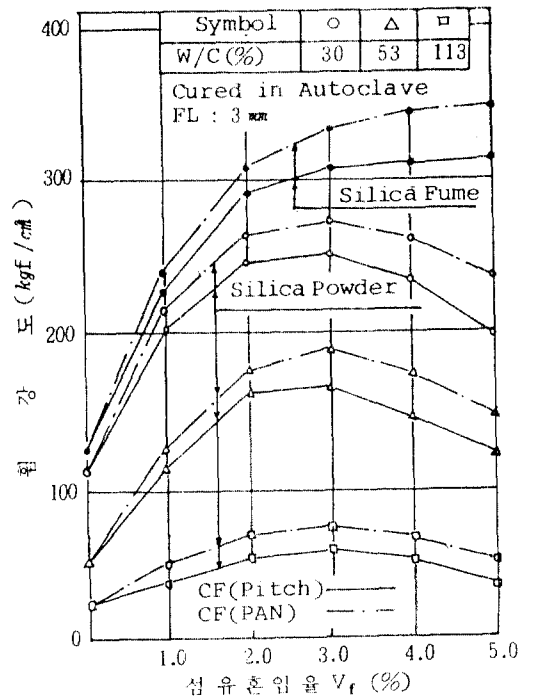


그림 8. CFRC의 휨강도와 섬유혼입율과의 관계

성, 내약품성도 우수한 것으로 알려져 있다. 아라미드섬유보강시멘트는 일정한 V_f 에서 응력-변형 곡선이 bi-linear형태로 되고 압축강도는 보통콘크리트에 비해 크게 증가하지 않는다.

한편, 1962년 S.Goldfein에 의해 유기섬유를 이용한 연구는 보강재로 사용할 경우 가격저렴과 강도증가, 파괴변형증가, 충격강도개선, 건조수축 균열억제 및 시멘트 알칼리침식제거 등에 양호한 결과를 보이니, 온도, 햇빛등 환

경조건에 의한 강도 및 변형거동이 크게 좌우되고 내화성, 내열성이 없으며 지속하중하에서 균열이나 변형이 확대될 가능성이 많으며, 섬유와 매트릭스간의 부착력이 약하여 섬유의 인장응력을 충분히 발휘하지 못하는 문제점이 지적되고 있다.

지금까지 나타난 유기섬유보강 FRC의 강도 특성 주요치는 표2에 나타내었으며, 폴리에틸렌을 이용한 PFRC의 인장응력-변형 곡선은 그림9와 같다.

표 2. 유기섬유를 사용한 FRC의 강도

연구자	모르타르의 중량 배합(C:S:W)	사 용 섬 유		휨 강 도(kg/cm ²)	
		종 별	혼입율(무게%)	Plain	FRC
S.Goldfein	1:0:0.4	나일론	2.46	650(Psi)	1,890(Psi)
森, 河野	1:0:1	PVA	3	28.1	37.6
大岸大澤	1:2:0.6	PP	2	22.0	27.9
久保田, 板根	1:3:0.7	PP(라잔)	5	5	39

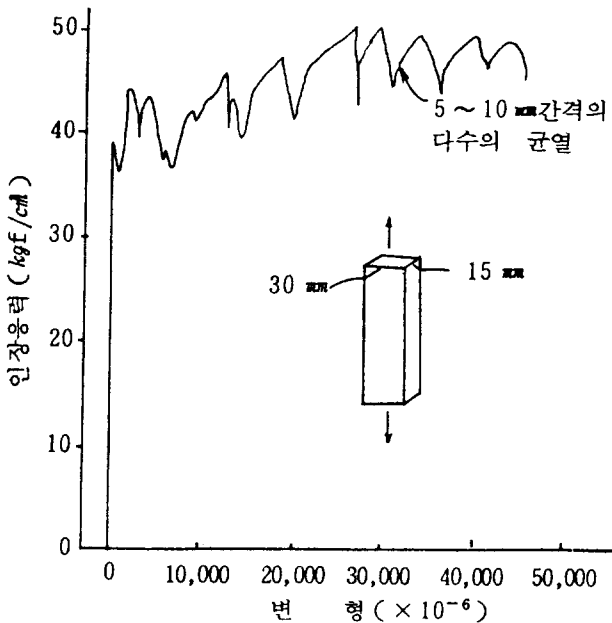


그림 9. PFRC의 인장응력-변형곡선($V_f=2.3\%$ 의 경우)

4. 纖維補強콘크리트의 適用例

콘크리트의 결점인 인장강도와 균열에 대한 저항성, 충격저항성등을 개선시킬 목적으로 현재 많이 사용되고 있는 FRC의 응용분야를 살펴보면 표3과 같다.

4.1 鋼纖維補強콘크리트

SFRC는 구조부재나 구조물에 적용하는 경우, ① 콘크리트 구조물의 성능개선을 위한 포장, 터널의 라이닝, 여수로, 수로의 라이닝등 수리구조물, 법면 보호공, ② RC부재의 대체용인 원심력성형 콘크리트관등 2차제품, ③ RC와 병용하여 RC부재의 성능을 향상시키는 내진벽, 기둥, 보접합부등의 전단보강을 위한 이용형태로 분류할 수 있다.

한편, SFRC의 특성과 적용분야는 그림10과 같이 균열에 대한 저항성, 인성, 인장, 휨, 전단강도등의 특성을 이용하는 적용분야⁹⁾가 많음을 알 수 있다.

표 3.

섬유보강콘크리트의 응용분야 (예)

섬유보강콘크리트의 종류	응용 분야
강섬유보강콘크리트 (SFRC)	프리카스트 콘크리트 : 해양구조물용 패널, 파이프, 맨홀뚜껑, 슬래브, 내화구조물, 칸막이벽 등 현장 콘크리트 : 고속도로, 공항 활주로등 포장, 원자력 발전소, 플랜트 설비의 바닥구조물, 암벽 및 콘크리트 보수공사, 뿔철공사, 터널공사, 방폭구조물 등
유리섬유 보강 시멘트 콘크리트 (SFRC)	내알칼리 유리섬유 : 물탱크, 해양구조물, Cladding패널, 방열용 코팅, 골조공사, 영구형틀, 홈관 및 파이프 등 E형 유리섬유 : 물탱크 내부방수제, 얇은 셸, 캔틸레버식 천장패널 등 콘크리트내 유리섬유 : 파이프, 포장, 지방재, 슬래브 등
탄소섬유보강콘크리트 (CFRC)	건축용 패널, 셸, 돔구조물, 경량구조재, 초고층 빌딩용 커튼월, 영구형틀, 부교및 해양구조물, 내식성 및 내마모성 포장판, 고강도 홈관 등
폴리프로필렌섬유보강 콘크리트(PFRC)	커트된 필름형태 섬유 : 파일, 셸, Cladding패널, 물탱크, 복공 등 커트된 모노형태 섬유 : 맨홀, 목재 대체재, 시트제품, 장식외장패널 등
석면섬유보강콘크리트	보온내화재, 슬레이트, 패널, 압력관 및 비압력관, 압거 및 장식용 제품 등

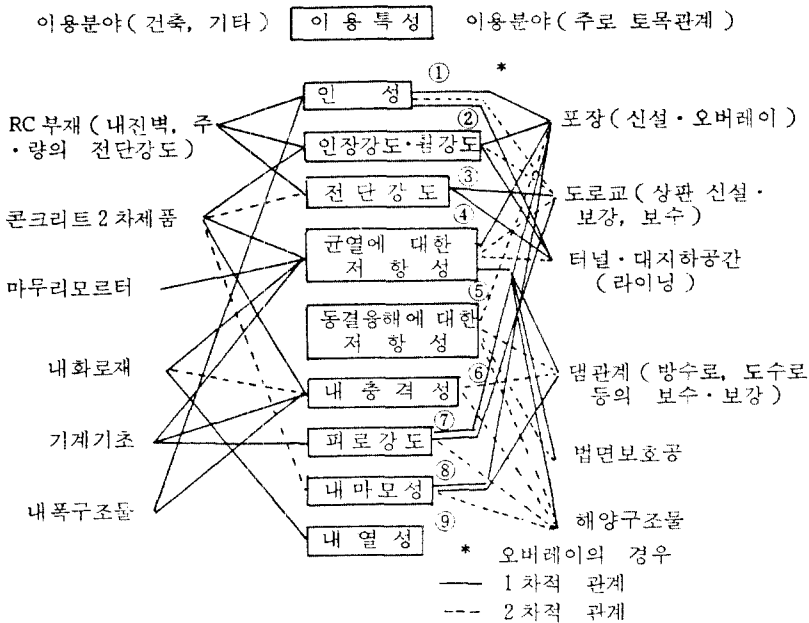


그림 10. SFRC의 특성과 적용 분야

4.2 유리纖維補強시멘트·콘크리트

유리섬유보강시멘트·콘크리트의 용도는 토목구조물에서의 콘크리트 바닥판, 탱크나 사이로등에의 이용예가 있고, 방음벽, 도로표지, 케-블닥트, 측구, 옹벽등에 이용되며, 건축구조

물에서의 커튼월 패널, 창틀, 칸막이벽, 계단, 베란다, 난방용 닥트, 목재 대체재등으로 이용되고 콘크리트제품에서도 이용되고 있다. 제품은 주로 "Spray up" 공정으로 만들어지며 두께 약 9.5~13mm 정도의 패널이 미국 여러건물

에 사용되었는데 경량박판이면서도 보에서의 휨강도가 120~250kgf/cm, 압축강도 500kgf/cm²이상의 물성을 갖는다.

4.3 炭素纖維補強콘크리트

선진국에서 건설용 첨단소재로서 다방면으로 용도전개를 서두르고 있으며, 대표적 응용에는,

① 이라크 바그다드시의 AL shaheed monument의 돔-CFRC최초의 대규모 적용사례로서, 대형 돔구조물의 외장용 프리캐스트패널로 경량CFRC(비중 1.0, ALC양생)를 적용, ② 초고층 빌딩용 CFRC커텐월-일본 동경의 ARK 빌딩(지상 37층)의 CFRC적용으로서 32,000m²의 커텐월이 사용되었다. 여기에 사용된 CFRC는 건조비중이 1.3인데 종래 경량1종 콘크리트제 커텐월보다 외벽중량을 60% 줄일 수 있었고, 지진하중에 대해서도 12%의 감소효과와 약 4,000톤의 철골량을 절감할 수 있었다.

이외에도 CFRC는 경량·고강도·고내구성이며 신뢰성이 높은 고성능 건축용 시멘트 복합재로서 경량판넬, 커텐월, 상공법 시스템, 고강도합판, 해양구조물등 구조 및 비구조부재등에 활용연구가 진행되고 있다.

4.4 其他

폴리프로필렌섬유보강콘크리트는 1970년대 초 영국에서 사용된 이래 덴마크를 중심으로 콘크리트관, 외장판넬, 부유유니트, 보도블록, 호안보수용, 목재대체재, 맨홀, 시멘트박판제품, 기와, 수조, 터널의 부공등 상당히 많은 분야에서 사용되고 있으며, 천연섬유를 이용한 보강콘크리트는 주로 동남아 개발도상국에서 심각한 주택난과 저렴하게 건축할 수 있다는 장점에서 많이 실용화되었는데, 코코넛, 옥수수, 나무, 사이잘삼, 대나무등을 많이 이용하여 방글라데시, 인도에서는 마나 대나무질 섬유를 이용해 FRC시트나 패넬을 제작해 주택건설의 공비절감에 상당한 효과를 보이고 있다.

5. 纖維補強콘크리트의 展望

FRC는 균열에 대한 저항성, 인성 및 내충격성, 연성능력과 에너지흡수능력이 대단히 우수하다는 점에서 종래 취성재료로서의 콘크리트 이미지를 크게 개선하였고, RC 또는 PC의 출현에 필적할만한 콘크리트공학상의 획기적인 진보라 하겠다. FRC의 개발단계는 현재 기초 연구에서 실용화로 이행하는 단계이고 각방면에서 활발하게 추진되고 있는데, 이미 GFRC는 건축분야에 폭넓게 사용되고 있고 SFRC는 토목·건축구조물등의 여러 분야에서 많이 사용되고 있으며 근래에는 CFRC나 AFRC등의 개발 및 응용으로 FRC계의 복합화 특성으로 인하여 Plain과는 판이하게 다른 놀라운 특성과 용도전개가 기대된다.

한편 국내의 FRC의 현장시공예는 그리 많지 않으나 '88올림픽을 전후로 포장 및 터널, PC제품, 독립기념관, 각종 경기장 및 스포츠 시설등에의 적용과 건축재의 커텐월, 외장판넬, 칸막이벽, 천정재 및 지붕엘리먼트, 블록포장등에의 응용이 시도되고 있다. 또한 제철화학등에서 연간 200톤규모의 탄소섬유가 생산되기 시작하였고, 매년 10,000 B.P.D.S.의 석유핏치와 400,000톤의 콜탈핏치가 부산되고 있음을 감안할 때 이런 저렴한 부산물에 의한 부가가치가 높은 CFRC의 연구개발 및 아라미드 섬유등의 개발응용은 인체에 심각한 유해물질인 석면의 대체효과와 함께 관련산업에의 파급효과는 물론 수입대체, 에너지 절약에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

1. Swamy, R.N., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of RC Beams made with Steel Fiber Concrete", ACI J., Sept ~ Oct., 1981, pp.395~405.

2. 文濟吉, “섬유보강콘크리트의 特性과 利用”, J of KSCE, Vol.35, No.1.
3. 趙力采等, “鋼纖維補強콘크리트의 初期ひびわれ強度ならびに伸び能力”, 生産研究, Vol.28, No.8, 1976, pp.39~42.
4. 小林一輔, “鋼纖維補強콘크리트のひびわれ拘束性能”, 生産研究, Vol.30, No.5, 1978, pp.2.
5. ACI Committee 544, “Guide for Specifying, Mixing, Placing, and Finishing SFRC”, J. of ACI, Mar-Apr., 1984, pp. 140~148
6. Biryukovich, K.L., “Glass-Fibre-Reinforced Cement”, Published by Budivel'nik, Kiev, 1964, CERA Translation, No.12, Nov., 1965
7. S.P.Shah, “New Reinforcing Materials in Concrete”, J. of ACI, May, 1974.
8. 小林一輔, “纖維補強콘크리트”, オーム社, 1981, pp.162, 233.
9. 小林一輔等, 콘크리트工學, Vol.17, No.9, 1979.
10. 小林一輔等, 土木學會論文報告集, No.330, 1980.
11. 小林一輔, “纖維補強콘크리트特性と應用”, オーム社, 1981, p.233.
12. Majumdar, A.J., “Carbon Fibre Reinforcement of Cement”, Cement and Concrete Research, Vol.2, No.2
13. Akihama. S., et al., “Mechanical Properties of CFRC”, Cement Concrete, No. 449, 1984, pp.38~47.
14. 朴承範, “炭素纖維補強시멘트복합체의 開發과 應用”, J. of KSCM, Vol.1, No.1, 1988, pp.34~42.
15. 朴承範, “섬유보강이 콘크리트의 力學的 特性과 鐵筋콘크리트의 균열성상에 미치는 영향”, J. of KSAE, Vol.20, No.2, 1978, pp.17~59.
16. 朴承範, “炭素纖維를 懸탁한 Cement Slurry의 Rheological Behavior”, J. of KSCM, Vol.1, No.1, 1988, pp.61~66
17. 朴承範, “炭素纖維補強 시멘트複合材의 工學的 特性(I)”, J. of KCI, Vol.1, No.1, 1989, pp. 95~104.
18. 秋濱繁幸, 末永龍夫, 坂野正, “纖維補強콘크리트とその利用”, 建築技術, 1981, 11.
19. 入江正教, “ガラス纖維補強セメントの特性と應用”, 콘크리트工學, Vol.15, No. 3, 1977, pp.26~30.
20. A.J. Majumdar, ACI SP-44, 1974, pp.351~362.
21. 大岸佐吉, “有機纖維を用いた콘크리트”, 콘크리트工學, Vol.15, No.3, 1977, pp.36~39.
22. Seunyg Bum Park, “Mechanical Properties and Applications of CFRC”, International symposium on the Development and Applications of Carbon Fiber, CNU, ROK, March 19, 1990.