

고인성 시멘트 복합체의 최신기술 : DFRCC의 제조기술 및 특성

- State-of-the-art of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites -
Part 1 : Manufacture Technology and Structural Performance



윤현도*
Yun, Hyun Do



양일승**
Yang, Il Seung



한병찬**
Han, Byung Chan



福山 洋***
H. Fukuyama



諏訪田 晴彦****
H. Suwada

1. 서 언

최근 보다 내구적이고 구조성능이 뛰어난 건설 신재료(advanced structural materials)의 개발 및 구조물에의 활용성에 관한 연구가 국내 건설 산업에서 주목 받고 있다. 건설 신재료의 개발은 환경오염 및 자원고갈 등이 주요한 사회문제로 대두되는 현 시점에서 구조물에 우수한 구조성능을 갖는 신재료의 적용을 통하여 구조물의 장수명화에 기여하고자 하는 것이고, 그 활용성에 관한 연구를 통해 기존의 공법에 갖는 노동집약적, 현장타설 의존성, 구조성능 확보에 대한 신뢰성 확보 등의 문제점을 혁신적으로 개선함으로써 구조물의 성능 개선 및 리모델링 등을 통한 사회 기반시설 비용의 절감을 꾀하고, 고노무비용, 3D업종 기피로 대별되는 건설 산업에 대한 경쟁력을 확보하는 데 의미가 있다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(ductile fiber reinforced cementitious composites, 이하 DFRCC)는 철근부식 및 내진성능이 증시되고 있는 다양한 용도의 철근 콘크리트 구조물에 적용 가능성이 높은 신재료로 평가되고 있다.^{1),2)}

DFRCC의 예로는 높은 탄성계수와 형상비(섬유길이/직경)를 갖는 섬유로 시멘트 복합체를 보강(시멘트 중량비 2% 내외)하여 시멘트 복합체의 인장변형능력을 개선한 ECC(engineered cementitious composites)를 들 수 있다. ECC는 1990년대 초반에 미국 미시건 대학의 Victor Li 교수가 마이크로 역학(micro-mechanics)에 근거한 재료설계(material design) 개념을 도입하여 높은 인장변형 능력 및 변형경화 특성을 보이는 고인성 시멘트 복합체로 개발한 것이다^{3),4)}. 또한, Reinhardt 및 Naaman을 중심으로 1993년부터 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 정기적인 학술교류(proceeding of high performance fiber reinforced cement composites, HPRCC)를 3년마다 개최하며 각 국에서 DFRCC에 관심을 갖고 있는 연구자들의 연구결과를 발표하고, 이를 활용할 수 있는 방안에 대한 지속적인 노력을 기울이고 있다.

일본콘크리트공학협회(JCI)는 2001년 “고인성 시멘트 복합재료의 성능평가와 구조이용연구위원회(高靱性 セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会, Ductile Fiber Reinforced Cementiti-

ous Composite, DFRCC 연구 위원회)”를 구성하여 1년 동안 DFRCC에 대한 국내의 연구사례를 조사하여 2002년 1월 “고인성 시멘트 복합재료를 알고, 만들고, 사용하자(高靱性 セメント複合材料を知る・作る・使う)”라는 연구위원회 연구보고서를 출판하였다¹⁾. 이러한 연구결과를 근거로 DFRCC 위원회 활동 목표를 DFRCC 기술의 보급과 이용으로 설정하고 DFRCC 재료의 제조, 재료성상 평가, 시공, 적용 및 설계, 구조성능, 내구성, 해석기법 등에 대한 정보를 수집하여 DFRCC 기술을 일반화하고자 하였다. 이러한 2년간의 노력에 대한 결실로 2004년 5월 DFRCC 재료의 제조·시공과 특성, 인장성능평가기법, 이용기술과 적용에 따른 장점 및 설계법, 내구성 향상 효과, 해석기술 등을 정리한 DFRCC 연구위원회 보고서(II)를 출판하였다. 현재는 이러한 일련된 자료수집 및 연구결과를 건설산업현장에서 직접 적용할 수 있는 제조 및 시공지침(안) 작성을 JCI DFRCC 연구위원회에서 추진하고 있는 실정이다.

최근 국내에서도 장수명 건설기술에 대한 사회적 요구와 국의 건설기술 연구동향에 힘입어 2003년 건설교통부 건설핵심기술연구개발 사업 연구비 지원으로 DFRCC 관련 연구가 활발히 진행되고 있는 실정에 있다^{2)~3)}. 또한, 국내에서 DFRCC로 건

* 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 일본 독립행정법인 건축연구소 객원연구원

** 정회원, (주)AMS엔지니어링

*** 일본 독립행정법인 건축연구소 구조그룹 상석 연구원

**** 일본 국토교통성 국토기술정책종합연구소 주택연구부 연구원

설된 최초의 구조물인 연육교(프랑스 I사
에서 개발한 DUCTAL 사용)가 건설되면
서부터 많은 관심을 끌고 있으며 국내의
W사 경우 미시건 대학의 Victor Li 교수
에게 연구를 의뢰하여 스프레이형
DFRCC를 이용한 보수보강 기술 등을 개
발하는 등 활발한 움직임을 보이고 있다.
현시점에서 DFRCC에 대한 제조방법 및
그 특성, DFRCC에 대한 기술 현황에 대
한 이해는 콘크리트 관련 연구자뿐만 아니
라 현업에 종사하고 있는 건설기술자에 도
움이 되리라 판단되어 필자가 지난 3개월
간 일본 건축연구소 객원연구원으로 체류
하며 수집한 자료를 토대로 총 3회에 걸쳐
DFRCC의 현황에 관하여 소개하고자 한
다. 본고는 제1보 DFRCC의 특성 및 제
조기술, 제2보 DFRCC의 적용현황, 제3
보 DFRCC의 시험평가기법 및 응용으로
구성하였으며 먼저 DFRCC의 특성 및 제
조기술에 관하여 소개한다.

2. 고인성 시멘트 복합체 개요

휨 모멘트 또는 인장력 하에서 균열이
발생된 이후에도 강도의 저하 없이 변형률
이 증가됨에 따라 응력이 증가되는 "변형
경화(pseudo strain hardening)"특성과
다수의 미세균열이 분포하는 "다수균열
(multiple crack)" 특성을 보이는 시멘트
복합체를 "변형경화형 고인성 시멘트 복합
체"라 정의한다(그림 1). 이러한 종류의
복합체 중 대표적인 ECC의 경우는 직경
수 ~ 수십 마이크로 폴리에틸렌(PE) 섬유
와 비닐론(PVA) 섬유 등 유기섬유와 강
섬유를 체적 1 ~ 2% 정도 포함하도록 함
으로써 4 ~ 5%의 변형능력을 확보한 변
형경화 및 다수균열 특성을 보인다. 이러
한 재료는 <사진 1>에 나타난 바와 같이
일반적인 콘크리트의 취성적인 성질을 극
복하고 있으므로 콘크리트계 구조요소의
구조성능과 내구성을 극대화할 것으로 기

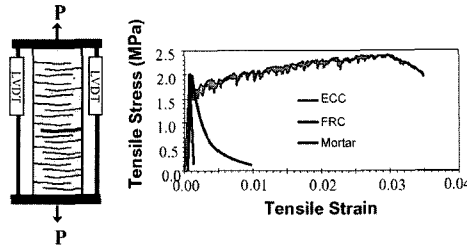


그림 1. 일축인장응력하에서 ECC의 특성

대할 수 있다.

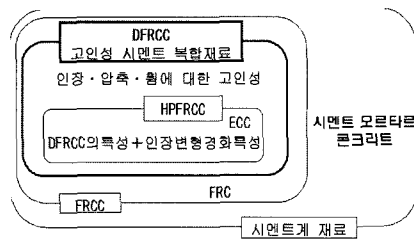
더욱이 이러한 재료는 종래의 시멘트계
재료를 대신하여 고성능 보수용 재료, 내
충격성 재료, 강재의 피복재료 등 새로운
각종 용도로 활용될 수 있어 콘크리트 분
야에서 기술혁신을 일으킬 수 있을 것이
다. DFRCC의 제조기술을 다루기에 앞서
이와 관련된 용어 정의 및 각종 DFRCC
에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

2.1 고인성 시멘트 복합체(DFRCC)

시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합체
로써 휨응력하에서 다수의 미세균열 특성
을 보이며 휨, 인장, 압축파괴시의 인성이
크게 개선된 재료로 정의되며 DFRCC중
에는 일축인장응력하에서 미세한 다수균열
특성을 보이고 변형경화 특성을 보이는 고
성능 시멘트 복합체(high Performance
fiber reinforced cementitious compo-
sites, HPRCCs)가 있다.

2.2 고성능 시멘트 복합체(HPRCC)

A. E. Naaman과 H. W. Reinhardt



포함관계 : DFRCC > HPRCC > ECC

그림 2. DFRCC의 범위

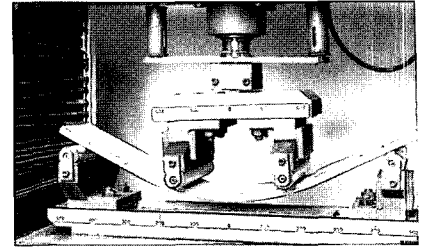


사진 1. DFRCC 박판의 휨실험 예

에 의해 정의된 HPRCC는 일축 인장응
력하에서 다수균열특성과 변형경화특성을
보이는 섬유보강 시멘트 복합체를 지칭하
며 <그림 2>와 같이 전술한 DFRCC는
HPRCC를 포함하는 광범위한 재료로
정의된다.

3.3 섬유보강 시멘트 복합체(Fiber Reinforced Cement Composite, FRCC)

시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합체
전체로 정의되며 DFRCC외에 섬유보강
콘크리트(fiber reinforced concrete,
FRC)와 섬유보강 모르타르를 포함한다.
DFRCC는 휨인장 시 인성특성을 보이는
재료로부터 일축인장 시 강재와 같은 변형
경화특성을 갖는 재료에 이르기까지 다양
하다. 이중 대표적인 몇 가지를 살펴보면
다음과 같다.

ECC는 미시건대학 Victor C. Li 교수
에 의해 개발된 재료로 일축 인장응력하에
서 변형경화특성을 보이고 미세한 다수균
열을 형성하는 것으로 최대 인장변형률이
8%에 달하기도 한다. ECC는 마이크로역
학과 파괴역학을 설계원리로 재료거동의
예측과 설계가 가능하다. 이러한 특성을
활용한 적용 예로는 내진요소(devices),
보수/보강용 재료(단면복구, 단면증설),
강재 피복재료 등이 있다.

SIFCON⁵⁾(Slurry Infiltrated Fiber
CONcrete)은 D. R. Lankard에 의해
1984년 제안된 재료로써 강섬유를 미리

주1) 오병환, "마이크로-매크로 하이브리드 복합섬유를 이용한 콘크리트 보수·보강 신재료 개발, 산학연 공동 연구개발사업, 서울대, 2003~2006
주2) 김진근, "고인성, 고내구성 신섬유 복합재료를 이용한 구조물 보수/보강법의 개발", 산학연 공동 연구개발사업, KAIST, 2003~2006
주3) 윤현도, "플루오르화에 의해 부착능력이 개선된 고인성 복합섬유보강 콘크리트 제조기술개발, 산학연 공동 연구개발사업, 충남대, 2003~2005

표 1. PVA-ECC 배합 예

W/B	단위수량(kg/m ³)	S/B	수축저감제(kg/m ³)	섬유 혼입률(%)	공기량(%)
0.46	364	0.64	15	2	10

- 1) 플라이 애쉬 첨가량은 바인더 중량의 0.3,
- 2) 팽창제 모래중량의 10% 투여

표 2. PVA 섬유 물성

길이(mm)	직경(μmm)	탄성계수(GPa)	인장강도(MPa)
12	37	40	1,600

거푸집내에 투여하고 여기에 시멘트 슬러리를 침투시켜 제조함으로써 섬유 혼입률은 최대 20%까지 가능하다. 다량의 섬유에 의한 구속효과로 인하여 압축강도는 210 MPa에 달하고 또한 가교효과에 의해 인장응력하에서 경화특성을 보인다. 적용 예로는 내진/방공 구조물, 보수/보강용 재료, 프리캐스트 구조물 등이 있다. SIMCON(slurry infiltrated mat concrete)는 SIFCON의 강섬유 대신 강섬유 매트를 이용하여 제조된 복합체이다.

섬유보강 RPC(reactive powder concrete)⁶⁾는 반응성 분체 콘크리트 개념으로 개발된 무기계 복합재료로 최밀충진이론에 근거하여 개발된 시멘트계 매트릭스에 금속섬유를 혼입한 초고강도 + 고인성이라는 신개념하에서 P. Richard에 의해 1994년에 개발되었다. 그 특성은 초고강도(압축 240 MPa, 휨 45 MPa), 고내구성(동결융해 저항성지수 100), 유동성(플로우 값 250 mm)이고 적용 예로는 도로교, 방음판넬 등이 있다.

3. 고인성 시멘트 복합체의 제조기술 및 특성

DFRCC에 사용되는 섬유로는 폴리비닐알콜(PVA), 고강도 폴리에틸렌(PE), 강섬유가 일반적으로 사용되고 있다. 통상 이러한 단일 섬유가 사용되지만 각 섬유별 특성을 이용하기 위하여 2종류의 섬유 조합(hybrid)하여 사용하는 예도 있다. 콘크리트 관련 논문집 및 연구 보고서 등에 발표된 내용을 근거로 전술한 각 섬유를 사용하여 DFRCC를 제조하기 위한 배합, 제조 및 시공방법, 특성을 소개하면 다음

과 같다.

3.1 PVA-DFRCC⁷⁾

PVA-DFRCC는 시멘트 매트릭스의 보강재 PVA 섬유가 사용된 고인성 복합체로 현재까지 보고된 PVA-DFRCC에는 PVA-ECC, PVA-HFRCC, PVA-Spray-ECC, PVA-압출성형-DFRCC 및 PVA 매트 충전-DFRCC 등이 있다. 각 재료의 제조방법 및 특성은 다음과 같다.

3.1.1 PVA-ECC

PVA-ECC는 현재까지 많은 연구자에 의해 다수의 연구결과가 발표되고 있으며 이는 PVA 섬유의 우수한 성능을 갖고 있으면서 가격이 다른 섬유에 비하여 저렴

한 장점 때문이라 할 수 있다. PVA-ECC는 물, 시멘트, 세골재 및 PVA 섬유로 구성된 섬유보강 모르타르이며 필요 시 플라이 애쉬 등과 같은 혼화재와 건조수축을 억제하는 혼화재료를 포함하는 경우도 있다. <표 1>은 대표적인 배합 예로 증점제가 사용되었으며 ECC의 플래쉬(fresh)성상은 유동성을 부여하여 시공성을 증대시키기 위함이다. 또한 ECC는 부배합이므로 단위수량이 증대되어 건조수축이 크므로 건조수축을 제어하기 위하여 혼화제를 첨가하고 보통 콘크리트와 대등한 건조수축 저항성을 갖도록 하였다. <표 2>는 사용된 PVA 섬유의 물성을 나타낸다.

<사진 2>는 PVA-ECC를 옴니믹서를 이용하여 비빔하는 예이며 이때 사용된 믹서는 실제 PC 공장에서 설치된 설비로 1 m³의 비빔용량을 갖는다. <사진 2>의 우측 사진은 실제 PC 부재에 PVA-ECC를 타설하는 것으로 플로우 값이 600 mm로 유동성이 높아 시공성이 우수한 것으로 평가되고 있다.

이러한 PVA-ECC의 압축특성은 <그림 3(a)>에 나타난 바와 같이 압축강도는 30 MPa 정도이며 이때 사용된 압축강도용 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm이다. <그림

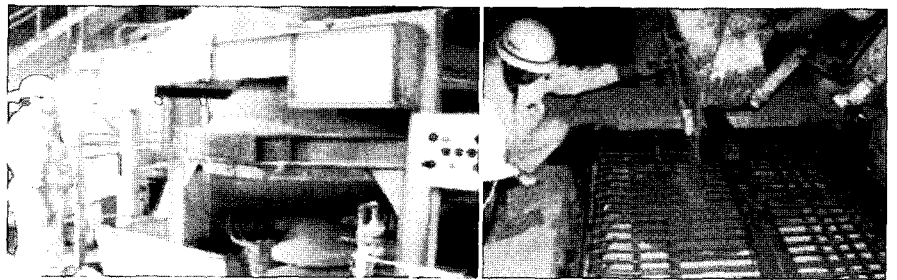


사진 2. PVA-ECC 비빔 및 타설 상황

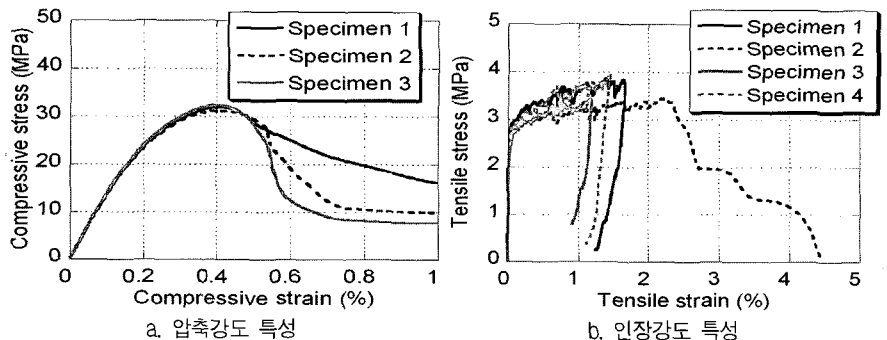


그림 3. PVA-ECC의 재료 역학적 특성

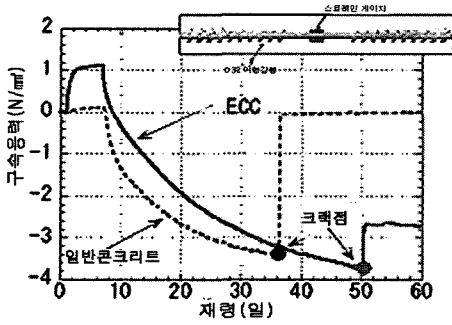
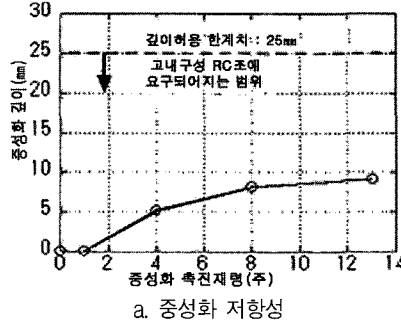
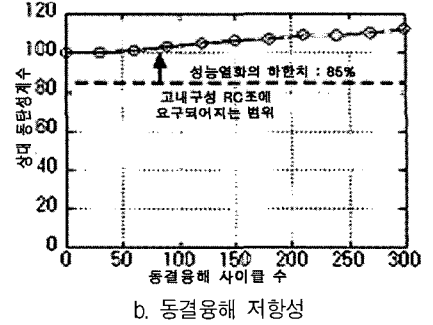


그림 4. PVA-ECC의 수축균열 저항성



a. 중성화 저항성



b. 동결융해 저항성

3(b))는 인장특성을 나타내고 있으며 인장강도 시험편은 60×100mm 단면의 Dogbone 형태를 사용하였고 인장 변형 능력은 1% 이상 확보하고 있는 것으로 평가되고 있다.

ECC는 단위수량이 일반 콘크리트에 비하여 매우 높고 매트릭스의 구성도 콘크리트와 달리 시멘트와 규사로 구성되므로 건조수축에 의한 균열 발생이 현저하다. 따라서 이러한 균열을 제어하기 위해서는 건조수축을 저감시키는 혼화재료를 첨가함으로써 어느 정도 해결할 수 있다. <그림 4>는 철근 D32를 섬유보강 시멘트 복합체 및 보통 콘크리트 내에 매립하여 수축을 구속하여 수축균열 저항성을 비교한 실험결과로써 매립된 철근의 변형률로부터 산정된 콘크리트의 인장응력과 재령의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 보통 콘크리트에서는 3.3 MPa의 인장응력하에서 균열이 발생된 시점은 재령 35일이고 ECC에서는 3.5 MPa에 도달하는 재령 50일에 균열이 발생되어 콘크리트에 비하여 낮지 않은 균열저항성능을 보이고 있다. <그림 5(a)>는 일본건축학회 표준시험방법에 준하여

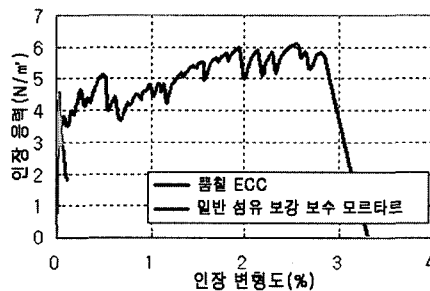
실시된 ECC의 중성화 촉진실험결과로 고내구성 철근 콘크리트 구조에 요구되는 26주 중성화 깊이 25mm보다 낮은 10mm 정도로 높은 중성화 저항성능을 보이고 있다. <그림 5(b)>는 ECC에 대한 JIS A 1148에 준하여 실시한 동결융해 저항성능을 나타낸 것으로 고내구성 철근 콘크리트 구조에 요구되는 85%를 상회하고 있는 것으로 나타나 내구성능이 우수한 것을 알 수 있다.

3.1.2 PVA-Spray-ECC^(8),9)

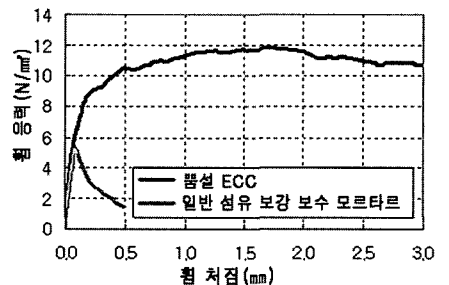
PVA-Spray-ECC는 현장에서 ECC의 제조가 가능하고 워커빌리티가 우수하여 콘크리트 구조물의 보수 및 보강재료로써

적용이 기대된다. PVA-Spray-ECC를 구성하는 주요한 재료는 시멘트 혼화재, 세플래, PVA 섬유, 증점제, 물 및 액상 혼화제 등을 들 수 있으며 대표적인 배합으로는 물-결합체비(W/B) 32%, 모래-결합체비(S/B) 41.3%, 단위수량(W) 360 kgf/m³ 및 섬유체적비(Vf) 2%로 배합되는 PVA-Spray-ECC의 인장변형률, 시공시 및 시공 후 부착성능 등을 고려하여 결정된 배합이다.

PVA-Spray-ECC의 인장 및 휨특성은 <그림 6>에 나타난 바와 같이 인장강도 3 MPa, 인장변형률 1% 이상을 확보하고 있으며 이러한 특성을 구조설계시 반영할 수 있다고 판단된다. 참고적으로 기존 콘



a. 직접인장거동 특성



b. 휨거동 특성

그림 6. PVA-Spray-ECC의 직접인장 및 휨거동 특성

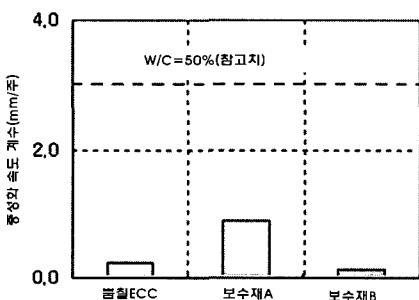
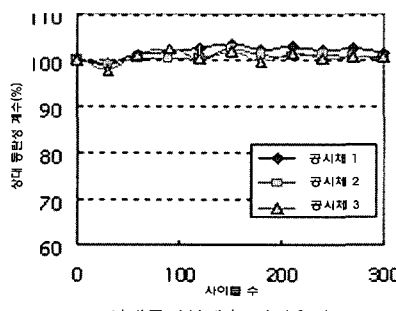
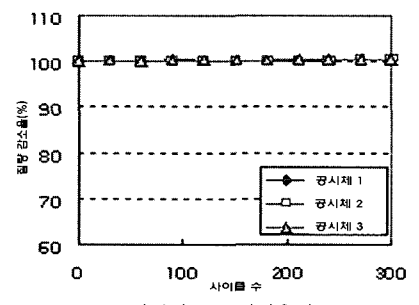


그림 7. PVA-Spray-ECC의 중성화 저항성



a. 상대동탄성계수 변화추이



b. 질량감소율 변화추이

그림 8. PVA-Spray-ECC의 동결융해실험

크리트에 대한 부착강도도 2.5 MPa 정도라 보고 되고 있다. 이러한 PVA-Spray-ECC의 증성화 저항성을 살펴보기 위하여 일본건축학회 「고내구성 철근 콘크리트 구조설계지침(안)·동해설의 부록 1」에 소개된 증성화 촉진조건하에서 실시한 촉진 증성화 실험결과를 <그림 7>에 나타내었다.

<그림 7>에 나타난 바와 같이 PVA-Spray-ECC는 다른 보수재료(폴리머 시멘트 모르타르)와 대등한 증성화 저항성을 보유하고 있는 것으로 나타났으며 그림 내의 참고값은 보통 콘크리트의 증성화 촉진 실험결과이다. 동결융해저항성은 JIS A 1148에 준하여 동결융해실험(수중동결 수증용해)을 실시하였으며, 그 결과는 <그림 8>과 같다. 300사이클 진행시점에서의 상대 동탄성계수 및 질량 감소율을 저하되지 않는 높은 내동결융해성능을 확보하고 있는 것으로 보고 되고 있다.

3.1.3 PVA-압출성형-DFRCC^(10,11)

PVA-압출성형-ECC의 압출성형 방법은 시멘트, 세골재, 단섬유, 성형조제, 물을 믹서로 혼합하여 압출성형기로 일정 단면을 연속적으로 압출 성형하여 부재를 생산하는 방법으로 판상, 구형 또는 팔판 등과 같은 복잡한 형태의 단면을 갖는 부재의 생산도 가능하다. 사용된 PVA 섬유는 직경 0.0379 mm, 길이 6 mm, 인장강도 1,650 MPa, 탄성계수 43.7 GPa이며 압출성형 복합체의 표준배합은 <표 3>과 같다. 압출성형에는 성형조제 등의 배합비율이 높기 때문에 일반적인 콘크리트 배합에 비하여 물-시멘트비가 높고 3% 이상의 PVA 섬유 혼입률로 다수균열에 따른 변

표 3. PVA-압출성형-ECC(중량비)

보통 포틀랜드 시멘트	석분	메틸셀로로스	광물섬유	펄프	물
1.0	0.6	0.3	0.5	0.1	0.6

표 4. PVA-HPFRCC 배합 예

W/C(%)	S/C(%)	V _f (vol.%)	SP/C(%)	증점제/W(%)	소포제/C(%)
45	40 ~ 50	1.5 ~ 2.0	0.1	0.35	0.01

형경화특성을 보였다.

3.1.4 PVA-HPFRCC

PVA-HPFRCC는 보통포틀랜드시멘트, 규사(7호), 고성능 AE 감수제, 증점제, 소포제(消泡劑), PVA 섬유로 구성되며 배합조건은 섬유의 분산성, 유동성 등을 고려하여 모르타르 매트릭스의 점성을 적절하게 제어할 필요가 있으며 이러한 점을 감안하여 결정된 배합 예는 <표 4>와 같다. 비법은 20ℓ 모르타르 및 100ℓ 팬믹서를 사용하였으며 팬에 섬유가 끼어 섬유의 일부가 뭉쳤지만 모르타르의 점성을 관리하면 이러한 현상은 어느 정도 방지할 수 있다. 비법순서는 적정한 점성을 갖는 모르타르를 먼저 제조하고 이후 섬유를 투입하여 PVA-HPFRCC를 제조한다. 구조 부재 등의 제작을 위한 시공성은 섬유 혼입률 1.7% 이하에서 양호하지만 1.7%를 초과하는 경우에는 양호하지 않은 것으로 평가되고 있다. 인장강도 시험은 <사진 3> 및 <그림 9>와 같은 방법을 적용하였으며 시험결과는 <그림 10>과 같다. 시험편은 압축강도용 원주형 공시체와 동일한 시험편을 사용함으로 기존의 Dog-bone, Plate 형태의 인장 시험편에 비하여 낮은 0.75% 정도의 인장 변형능력을 보이고 있는 것으로 평가되고 있다.

3.1.5 PVA 매트(mat) 충전-DFRCC

PVA 매트 충전 DFRCC는 콘크리트 구조물의 보수·보강공법에 적용을 위하여 개발된 재료이다. 보수·보강 대상으로서 기존 콘크리트 표면에 배치된 PVA 섬유 매트에 시멘트 페이스트와 같은 그라우트를 충전하여 경화시킴으로써 보강층을 성형시키는 것이고 터널 라이닝 콘크리트 보강을 주요 보강대상으로 한다. PVA 섬유 매트<사진 4>는 섬유직경 0.1 ~ 0.3 mm, 섬유길이 129 mm의 PVA 섬유로 이루어진 아크릴계 부직포 매트으로써 단위면적당 중량은 700 g/m² 이상을 규격치로 한다. 배합은 압축강도, 휨강도, 인성 및 내구성 등 경화성능뿐만 아니라 밀실하게 충전되도록 유동성, 재료분리저항성 및 워커빌리티 등을 고려하여 결정된다. <그림 11 및 12>는 직접인장강도 시험을 위한 시험편 및 실험결과로 시험편은 100×100×400 mm의 강재형틀 내에 타설면과 직교방향으로 PVA 섬유 매트를 두겹으로 배치하고 윗면에서부터 그라우트를 충전하여 제작되었다.

휨특성 평가를 시험편<그림 13>은 직접 인장강도시험편과 동일한 방법으로 제작되었으며, <사진 5> 및 <그림 14>는 휨거동 특성을 나타낸 것으로 균열발생 후에도 응력은 증가되고 처짐 약 3mm에 달한 시

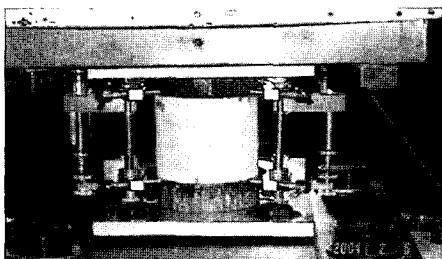


사진 3. 직접인장시험 전경

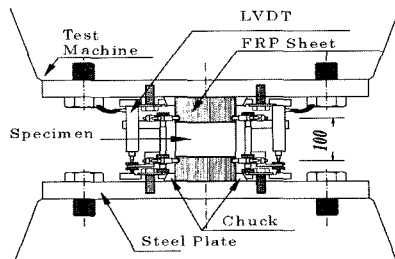


그림 9. 직접인장 시험 Set-up

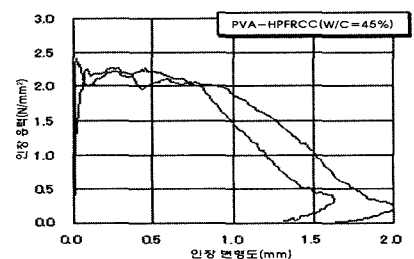


그림 10. PVA-HPFRCC의 직접인장 특성

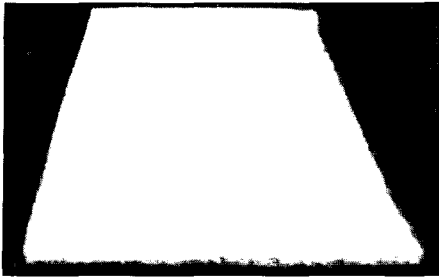


사진 4. PVA 섬유 매트 형태

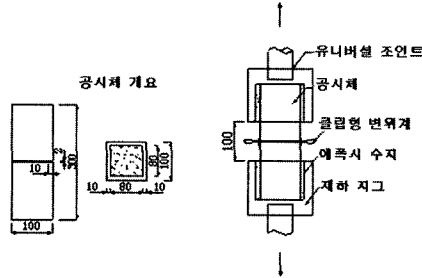


그림 11. 시험편 및 시험방법

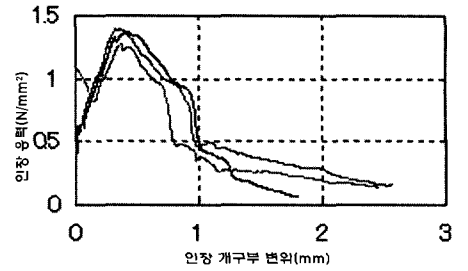


그림 12. 직접인장시험 결과

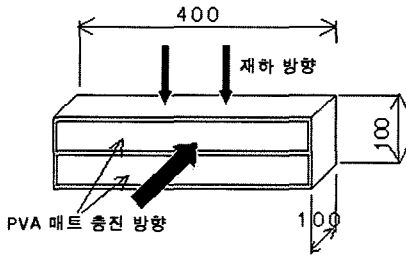


그림 13. 휨시험편

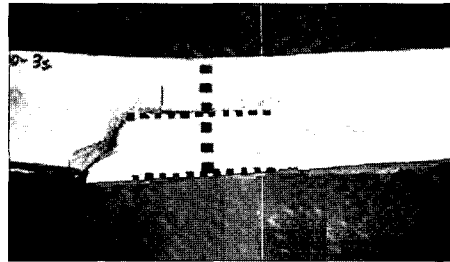


사진 5. 휨시험 시 파괴형상

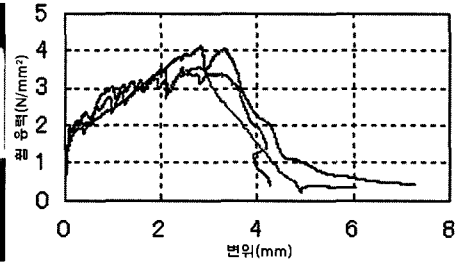


그림 14. 휨시험 결과

점에서 급격히 저하되고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 PE-DFRCC

PE-DRFCC는 시멘트 매트릭스의 보강재로 사용되는 PVA 섬유에 비하여 강도 및 탄성계수가 높은 고장력의 PE 섬유가 사용된 고인성 복합체로 현재까지 보고된 PE-DFRCC에는 PE-ECC 및 PE-HPFRCC가 있다. 각각의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

3.2.1 PE-ECC

PE-ECC는 기본적으로 연구용으로 개발되었으며 이때 사용된 고강도 폴리에틸렌(PE)의 기본적인 성질은 <표 5>와 같이 인장강도가 2,580 MPa로 PVA 섬유에 비하여 매우 큰 것을 알 수 있다. 그러나 고강도 PE 섬유는 PVA 섬유에 비하여 부착력이 적다는 단점을 갖고 있다.

PE를 이용한 PE-ECC의 예시적인 배합조건은 물-시멘트비 30%, 모래-결합재비(S/C) 31.3%, 단위수량 342 kg/m³ 및 섬유체적비 1.5%로 굳지 않은 복합체의 공기량은 관리되지 않았지만 경화 후 중량으로부터 산정된 공기량은 약 12%로 예상되었다. PE의 사용 시 매트릭스와 부

표 5. PE 섬유 물성

길이(mm)	직경(μmm)	탄성계수(GPa)	인장강도(MPa)
12	12	73	2,580

착강도가 문제가 되므로 매트릭스의 강도를 확보하기 위하여 물-시멘트비가 30%가 되도록 한다. 또한, 시멘트량이 많으므로 수화열 저감을 목적으로 혼화재의 치환도 고려되어야 하지만 섬유와 매트릭스의 부착력 확보를 위해서는 많은 양의 치환은 불가능한 것으로 보고되고 있다.

굳지 않은 PE-ECC의 플로우 값은 140~160 mm 범위로 나타났으며 경화 후 단위용적중량은 1.9~2.0 g/cm³ 범위, 압축강도는 약 70~80 MPa를 보인다. 물론 이렇게 높은 압축강도를 이용한 사례는 없지만 섬유를 혼입함으로써 급격하게 파괴되는 특성을 보이는 동일한 강도의 콘크리트에 비하여 최대내력 이후 안정된 거동 특성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 휨거동 특성은 <그림 15> 및 <사진 6>과 같이 변형경화 및 다수균열 특성을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 양단부에 철근을 매입하여 복합체에 인장력을 도입하는 인장시험법을 적용한 1축 인장특성은 <그림 16> 및 <사진 7>과 같다. 보통 콘크리트 및 일반적인 섬유보강 콘크리트에 매립된 철근에 비하여 PE-ECC에 매립된

철근에서는 낮은 변형이 유발되는 것을 알 수 있다. 이는 PE-ECC의 인장저항능력이 보통 시멘트 복합체에 비하여 우수하다는 것을 나타낸다. <사진 8>은 인장실험 후 시험체 단부의 균열발생현황을 나타낸 것으로 PE-ECC에서는 국부적으로 집중된 균열이 나타나지 않고 다수균열이 철근 주변에 균등하게 발생하는 특성을 보이고 있다.

3.2.2 PE-HPFRCC

PE-HPFRCC는 보통포틀랜드시멘트, 규사(7호), 고성능 AE 감수제, 증점제, 소포제(消泡劑), PE 섬유로 구성되며 배합조건은 섬유의 분산성, 유동성 등을 고려하여 모르타르 매트릭스의 점성을 적절하게 제어할 필요가 있으며 이러한 점을 감안하여 결정된 배합 예는 <표 6>과 같다. 구조부재 등의 제작을 위한 시공성은 섬유 혼입률 1.0% 이하에서 양호하지만 1.0%를 초과하는 경우에는 양호하지 않은 것으로 평가되고 있다. 인장 시험결과는 <그림 17>과 같다.

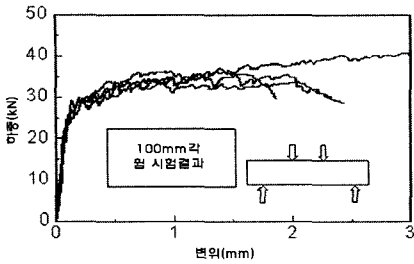


그림 15. PE-ECC의 휨시험 결과

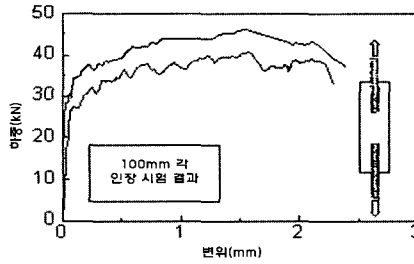


그림 16. 인장시험법을 적용한 1축 인장특성

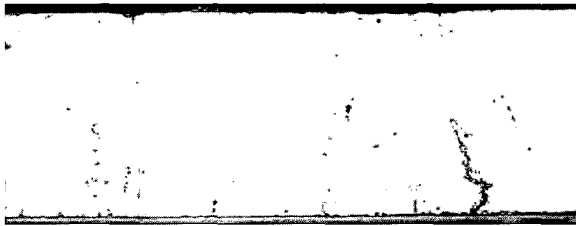


사진 6. 균열 형태(multi-cracks)

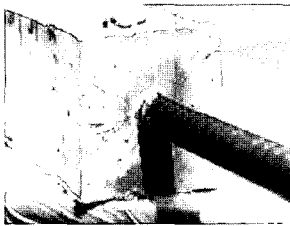


사진 7. 단부의 균열상황

표 6. PE-HPFRCC 배합 예

W/C(%)	S/C(%)	V _f (vol.%)	SP/C(%)	증점제/W(%)	소포제/C(%)
45	40	1.0-1.5	0.3	0.35	0.01

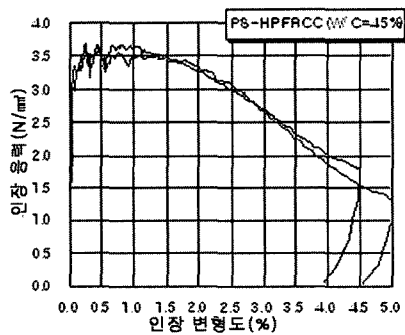


그림 17. PE-HPFRCC의 직접인장 시험결과

3.3 Hybrid-DFRCC

일반적으로 마이크로 단섬유로 보강된 시멘트 복합체는 휨 또는 인장력 작용하에서 <그림 18>에 나타난 바와 같이 매트릭스에 초기균열이 발생한 이후에도 마이크로 섬유들의 가교작용(bridging action)에

의해 주변의 매트릭스로 미세균열이 진전되어 멀티플크랙(multiple crack)이 발생하게 된다. 그러나 이 경우 최대응력 이후에 마이크로 섬유의 파단 또는 인발에 의해 응력이 비교적 급격히 저하하는 특징을 가지고 있다. 반면, 마이크로 섬유에 매크로 섬유를 하이브리드(hybrid)화 함으로써 <그림 19>에 나타난 바와 같이 마이크로 섬유의 파단 또는 인발 이후에도 길이와 직경이 큰 매크로 섬유에 의해 지속적으로 응력을 부담할 수 있을 뿐만 아니라 균열의 국소화를 지연시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 섬유의 장점을 살려 섬유의 단점을 보완하기 위하여 두 개 이상의 섬유를 혼입하여 제조되는 Hybrid-DFRCC에는 Hybrid-Spray-DFRCC와 Hybrid-HPFRCC가 있다.

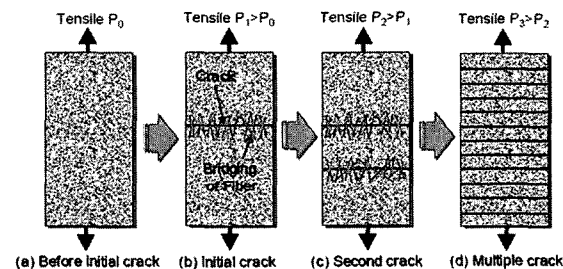


그림 18. 단섬유로 보강된 시멘트 복합체의 멀티플크랙 메커니즘

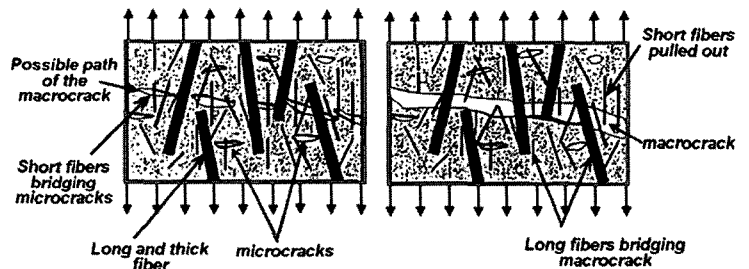


그림 19. 마이크로 및 매크로 섬유의 하이브리드화에 의한 균열면 섬유가교

3.3.1 Hybrid-Spray-DFRCC

Hybrid-Spray-DFRCC는 프리믹스트 모르타르, PVA, 고강도 PE 및 고성능 AE 감수제로 구성되며 사용된 섬유 물성은 <표 7>과 같다. Hybrid-Spray-DFRCC의 기본적인 배합조건은 중량비로 모르타르 100, 섬유 1.0(PVA 0.8, PE 0.2), 고성능 AE 감수제 0.4, 물 19 이다. 휨인장응력 및 1축인장하에서 인성 향상을 위하여 PVA 및 고강도 PE를 혼입하였다. <사진 8(a)>는 복합체의 비빔, <사진 8(b)>는 시공과정을 나타내고 있다. 굳지않은 복합체의 플로우값은 118 mm, 공기량은 7%, 경화된 복합체의 압축강도는 36 MPa로 평가되었다. 휨시험체를 이용한 휨거동 특성은 20×100×900 mm를 이용하였으며 휨시험 결과를 <그림 20>에 나타내었다. 또한 40×40×160 mm 각주형 1축 인장강도 시험편에 대한 인장시험결과는 <그림 21>과 같다. 그림에 나타나 있는 것과 같이 휨 및 인장 거동 시 변형경화 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 Hybrid-HPFRCC

Hybrid-HPFRCC는 보통포틀랜드, 규사(7호), 고성능 AE 감수제, 증점제(2% 수용액 점도 3,000~6,000), 소포제, PE 및 Steel Cord 등을 사용하여 제조된다. 사용된 섬유의 물성은 <표 8>과 같고 본고에서 소개하고자 하는 Hybrid-HPFRCC의 배합 예는 <표 9>와 같다.

20ℓ 모르타르 믹서의 사용 시 먼저 점성이 높은 모르타르를 제조 후 합성섬유(PE)를 1/2씩 투입하고 이후 다시 Steel



a. 비빔 전경 b. spray 형의 타설 전경
사진 8. Hybrid-Spray-DFRCC의 비빔 및 타설 전경

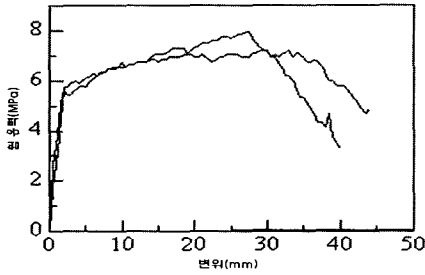


그림 20. 휨시험 결과

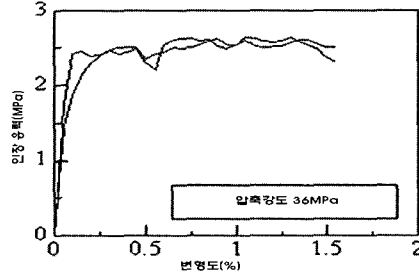


그림 21. 인장시험 결과

표 7. Hybrid-Spray-DFRCC에 사용된 섬유 물성

섬유종류	길이(mm)	직경(μmm)	인장강도(MPa)	신율(%)	탄성계수(GPa)
PVA	6	26	1,590	7.6	37.3
PE	9	12	2,600	3.5	88.0

표 8. Hybrid-HPFRCC에 사용된 섬유 물성

섬유종류	길이(mm)	직경(μmm)	인장강도(MPa)	신율(%)	탄성계수(GPa)
SC	32	405	2,700	13.0	37.3
PE	15	12	2,600	3.5	88.0

표 9. Hybrid-HPFRCC 배합 예

W/C(%)	S/C(%)	V _f (vol.%)	SP/C(%)	증점제/W(%)	소포제/C(%)
45	40	PE = 1 SC = 1	0.1	0.35	0.01

Cord를 1/3씩 균등하게 투입하여 복합체를 제조할 수 있으며, 100ℓ의 팬 믹서의 사용 시 섬유는 1회에 투입하여 제조한다. 이렇게 제조된 고인성 복합체를 구조 부재에 적용하기 위해서는 시공성에 대한 개선의 여지가 있다고 보고 되고 있다.

Hybrid-HPFRCC의 압축특성은 앞에서 살펴보았던 합성섬유만을 사용한 고인성 복합체에 비하여 최대강도 이후 안정된 강도저하 특성을 보이고 있으며 (그림 22)와 같은 지름 100mm, 길이 200mm의 원주형 공시체에 대한 직접인장강도 실험결과로부터 인장변형률 약 1.0% 까지 변형경화 특성을 보이고 있는 것으로 나타났다. Hybrid-HPFRCC의 인장특성

은 유사한 조건의 합성섬유(PVA 또는 PE)만을 사용한 복합체에 비하여 높은 변형능력과 인장강도 특성을 보였다.

3.4 PP-압출성형-DFRCC¹²⁾

PP-압출성형-DFRCC는 RPC 프리믹스트, 전용감수제, 전용 증점제 및 전용 섬유로 구성된다. RPC 프리믹스트는 시멘트, 석영질 미분말, 규사 등으로 구성된 미분말 혼합체이고, 미분말을 구성하는 입자가 밀실하게 매트릭스를 충전할 수 있도록 분말도가 조정된다. 표준적인 PP-압출성형-DFRCC 배합은 중량비로 RPC 프리믹스트가 100이라면 물이 7.1~10.0,

감수제 0.09~0.22, PP 단섬유 첨가량은 3~5 vol %이고 이러한 배합비는 제조 시 압출성형 및 경화체의 강도물성을 고려하여 결정한다. PP-압출성형-DFRCC의 제조과정은 배합 원재료를 가소성 모르타르로 비빈 후 (사진 9)와 같이 압출성형기로 연속성형하고 증기양생과 오토클레이브 양생하여 제품으로 생산하게 된다. PP-압출성형-DFRCC의 압축강도는 (표 10)과 같고, 정탄성계수는 압출방향 45.1 GPa, 두께방향 44.7 GPa로 각각 나타났다. (사진 10) 및 (그림 23)은 각각 압축강도 실험상황과 시험결과를 나타내고 있다.

PP-압출성형-DFRCC의 휨강도 실험장면 및 실험결과는 (사진 11 및 (그림 24)와 같다. (사진 12)에 나타난 바와 같이 휨인장측면 하부에 휨인장 균열은 휨모멘트 작용 구간(150mm)내에서 평균 균열간격 약 10mm로 폭넓게 확산되는 특성을 보이고 있다.

3.5 Steel Fiber-RPC¹³⁾

RPC는 반응성 미분말인 미분말의 시멘트 복합체이고 적절하게 섬유로 보강하여 초고강도, 고내구성이 더해져 우수한 인성을 갖게 된다. 또한, 유동성이 우수하여 자기충전이 가능하다. RPC는 매트릭스

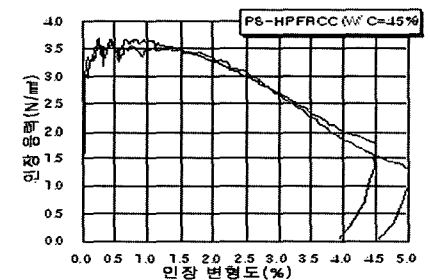


그림 22. Hybrid-HPFRCC의 직접인장시험 결과

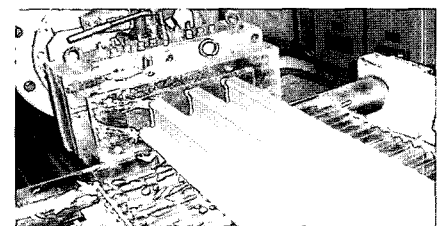


사진 9. 압출성형기에 의한 연속 성형 전경

표 10. 압축강도 일람

재하방향	압출방향		압출직각방향		두께방향
실험체치수	30 mm × 30 mm				
실험체 높이	H = 60 mm	H = 30 mm	H = 60 mm	H = 30 mm	H = 30 mm
압축강도	117.2 MPa	115.5 MPa	104.2 MPa	119.7 MPa	175.7 MPa

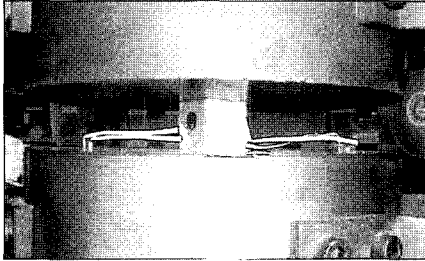


사진 10. 압축시험 전경

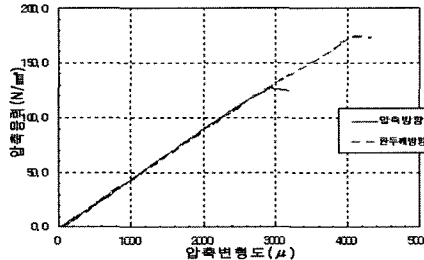


그림 23. 압축강도 시험결과

구성, 적절한 섬유보강, 매트릭스의 구성입자 모두를 효율적으로 분산시키는 고성능 감수제의 기반기술로부터 시작된 재료기술이라 생각할 수 있다. RPC 매트릭스는 시멘트, 석영질 미분말, 규사 등으로 구성되며 이러한 분체의 혼합비율은 최대밀실충전이론을 근거로 결정되고 RPC의 높은 유동성, 강도특성 및 내구성에 중요한 역할을 한다. 보강용 섬유는 강섬유 또는 PVA 섬유가 이용되고 기계적인 특성이 증시되는 경우는 강섬유를 사용하고 미관·외장성 등 증시하는 경우는 PVA가 이용된다. 강섬유는 직경 0.2mm, 길이 15mm의 단섬유이고, 강섬유는 경화 매트릭스와의 인장저항을 고려하고 특수한 가공을 한다. 특히, 기계적 특성이 우수한 강섬유를 혼입하여 섬유의 가교효과와 매트릭스의 보강효과를 얻을 수 있고 RPC의 인성 및 균열저항성을 향상시킬 수 있다.

표준적인 강섬유보강 RPC-FM의 배합 조건은 물 180 kg/m³, 프리믹스트 분말 2,297 kg/m³, 강섬유 157 kg/m³(2vol

%), 전용 감수제 20 ~ 30 kg/m³이고 RPC는 200 MPa 이상의 압축강도를 확보하기 위하여 극히 적은 물-시멘트비 0.22로 배합된다. 이러한 최대밀실충진화된 프리믹스 분말과 전문 감수제의 상승효과에 의해 실현된 것이고 강섬유의 표준사용량은 157 kg(2vol %)이지만 RPC의 모르타르는 적절한 점성을 가지므로 섬유 분산성은 양호하다. 또한, 감수제는 단위수량의 일부로서 20 ~ 30 kg/m³ 정도 첨가된다. RPC-FM의 플레쉬 성상은 플로우 실험에 의한 플로우 값을 관리지표로 한다. 표준적인 플로우 값은 220 ~ 270 mm 정도이고 이 범위에서 우수한 충전성을 갖는다. RPC의 압축강도는 매우 높고, 탄성계수도 일반 고강도 콘크리트와 비교하여 크다. <그림 25>는 압축강도 시험시 얻어진 응력-변형률 관계곡선이고 이때 사용된 공시체 치수는 $\phi 50 \times 100$ mm이다. 그림에 나타난 바와 같이 압축강도는 238 MPa, 탄성계수 550 GPa, 포아송비는 0.22로 보고 되고 있다. 휨강도 측

면에서도 <그림 26>과 같이 RPC는 높은 휨강도를 보이며 인성도 우수한 것으로 나타났다. 시험체 치수는 40 × 40 × 160 mm로 초기휨균열강도는 25 MPa, 최대 휨강도는 45 MPa까지 증가되었으며 이는 보통 콘크리트의 5 ~ 19배에 해당된다. RPC의 경화체 조직은 극히 밀실함으로 <그림 27>에 나타난 바와 같이 염해에 대하여 우수한 저항성을 보이며 사용 후 50년 및 100년에 강재부식발생한계농도(1.2 kg/m³)에서 침투깊이 추정값은 14 mm 및 20 mm이고 이것은 표기된 보통 콘크리트(W/C = 45%)의 약 1/10 ~ 1/12의 깊이이다.

4. 결론 및 향후 연구방향

지금까지 DFRCC의 현황에 관한 소개 중 제 1보로써 PVA 섬유, PE 섬유, PP 섬유 및 강섬유를 이용한(또는 이를 Hybrid 한) DFRCC의 제조기술 및 특성에 관하여 살펴보았다. 이상을 혼입된 섬유의 종류별로 정리하면 다음과 같다.

- PVA 섬유 사용 : PVA-DFRCC
 - PVA-ECC
 - PVA-HPFRCC
 - PVA-Spray-ECC
 - PVA-압출성형-DFRCC
 - PVA 매트 충전-DFRCC
- 고강력 PE 섬유 사용 : PE-DFRCC
 - PE-ECC
 - PE-HPFRCC
- 섬유를 하이브리드 한 경우 :
 - Hybrid-DFRCC
 - Hybrid-Spray-DFRCC

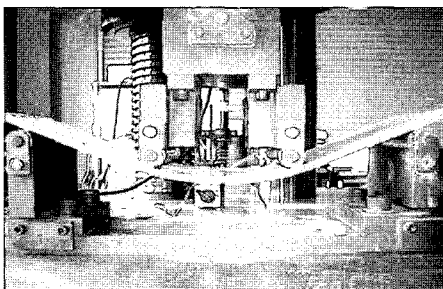


사진 11. 휨 시험 전경

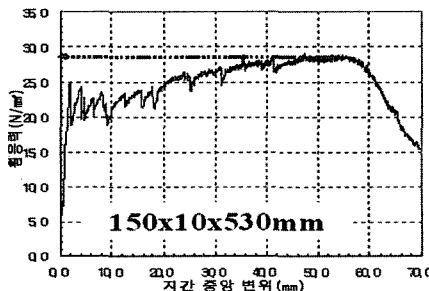


그림 24. 휨 시험 결과

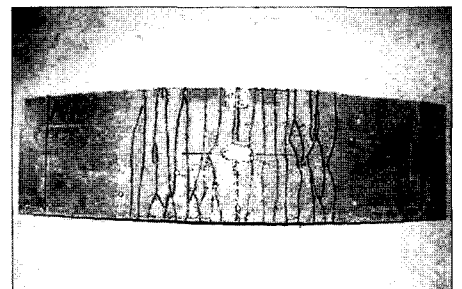


사진 12. 인장부위 균열 분산 특성

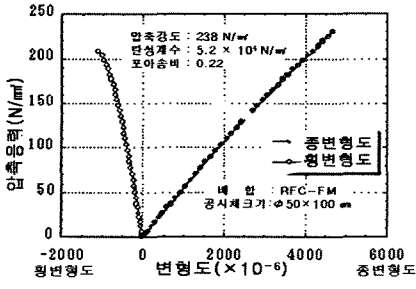


그림 25. RPC-FM의 압축 특성

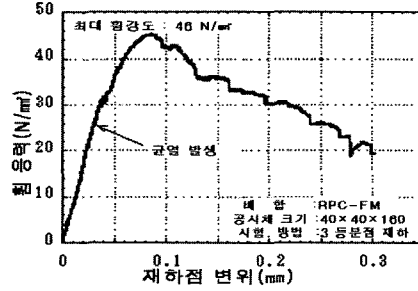


그림 26. RPC-FM의 휨 특성

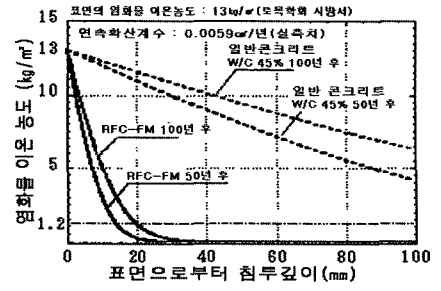


그림 27. RPC-FM의 내구 특성

- Hybrid-HPFRCC
- PP 섬유를 사용한 경우
 - PP-압출성형-DRFRCC
- 강섬유 혼입 반응성 분체
 - Steel Fiber-RPC¹³⁾

앞에서 살펴본 여러 DFRCC는 각 재료가 적용되는 부재 또는 사용기법에 따라 요구되는 적절한 성능을 만족하도록 충분한 휨 및 인장 강도와 변형능력, 그리고 워커빌리티를 확보하고 있으며, 특히 DFRCC가 갖는 유사변형경화 특성 및 다수 균열 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 내구성 측면에서도 시멘트 복합체가 갖고 있는 과도한 자기수축, 건조수축 등의 체적 변화 요인에 대한 개선 및 대응책이 빠른 속도로 연구되고 있다는 것도 알 수 있었다. 선진 외국에서는 이미 각각의 DFRCC에 대하여 제조기술 능력을 확보하고 이를 실용화하는데 연구를 주력하고 있으며, 일부에서 실제로 시공된 사례가 보고 되고 있는 실정이다. 그러므로 국내에서도 최성적인 시멘트계 복합체의 성능을 획기적으로 개선한 DFRCC에 대한 보다 적극적인 관심과 연구가 필요할 것으로 판단되며, 특히 시멘트 복합재료의 특성이용방법에 대한 개발뿐만 아니라 재료, 구조 및 시공에 관한 전반적인 검토와 데이터의 축적이 시급하다고 사료된다. 제2보에서 실제 선진외국에서 적용하고 있는 DFRCC에 대한 적용 사례 및 특성을 소개하겠다는 약속을 드리며 본고를 마감한다. □

참고문헌

1. 高引性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会, “高引性セメント複合材料を知る作る使う”, 日本コンクリート工學協會, 2002. 1/
2. 윤현도, 김규용, 양일승, 손유신, Fukuyama, 김무한, “고인성 섬유보강 시멘트 복합재료의 복합구성에 의한 휨 성능”, 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 15권 1호, pp.367~372.
3. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W. “Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites,” HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC2), 1996, pp.1~23.
4. Li, V. C., “From Micromechanics to Structural Engineering, The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications,” J. Struct. Mech. Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol.10, No.2, pp.37~48.
5. Reinhardt, H. W. and Fritz, C., “Optimization of SIFCON Mix,” Fibre Reinforced cements and Concretes, Recent Developments, 1989, pp.11~20.
6. 鶴澤正美・山田一夫, “RPCおしした超高强度・高引性コンクリートの開發動向”, 콘크리트工學, Vol.39, No.2, 2001, pp.53~56.
7. Li, V. C., Kanda, T., “Engineered Cementitious Composites for St-

- uctural Applications,” ASCE J. Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.2, May 1998, pp.66~69.
8. 平石剛紀, 閑田徹志, “吹付けECCの引長性能の信頼性に關する實驗的研究”, 日本コンクリート工學協會, 高靱性セメント複合材料に關するシンポジウム論文集, 2003. 12, pp.119~124.
9. 김운용, “미세역학이론과 레올로지 제어에 의한 습식스프레이용 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 개발”, 콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.4, 2003, pp.557~565.
10. Y. Shao, S. Marikunte, S. P. Shah, “Extruded Reinforced Composites,” Concrete International, April 1995, pp.48~52.
11. Y. Shao, S. P. Shah, “Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced Cement Composites Fabricated by Extrusion Processing,” ACI Materials Journal, Vol.94, No.6, 1997, pp.555~564.
12. K. Yamada, S. Ishiyama et al., “Role of additives in cement composites for extrusion molding process,” Proceedings of the NOCAMAT/3-Vietnam 3rd conference on non-conventional materials and technologies, Vietnam Institute for Building Science and Technology, March, 2002, pp.265~271.
13. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書, 施工編, 2002.