

ECC의 재료설계, 특성 및 활용

Material Design, Characteristics and Application of Engineered Cementitious Composites



김장호*
Jang-Ho Kim



윤현도**
Hyun-Do Yun

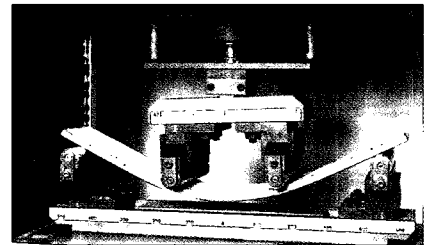
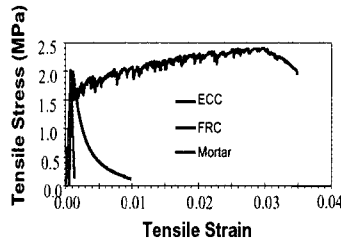
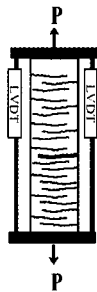


전 에스더***
Esther Jeon

1. 머리말

최근 환경오염 및 자원고갈 등이 주요한 사회문제로 대두되는 현 시점에서 보다 내구적이고 구조 성능이 우수한 건설 신재료(Advanced structural materials)의 개발 및 구조물에의 활용 기술에 관한 연구가 국내외 건설 산업에서 주목 받고 있다. 또한 이러한 건설 신재료는 사회기반시설의 내구연한 시 보수 및 보강에 소요되는 유지관리 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(ductile fiber reinforced cementitious composites, 이하 DFRCC)는 철근부식 및 내진능력이 증시되고 있는 다양한 용도의 철근콘크리트 구조물에 적용 가능성이 높은 신재료로 평가되고 있다^{1,2)}.

DFRCC의 예로는 높은 탄성계수와 형상비(섬유 길이/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(micromechanics)을 근거한 재료설계(material design)개념을 도입하여 높은 인장변형 능력 및 변형경화 특성을 보이는 단섬유 보강 시멘트 복합체이다^{3,4)}. 최근 국내에서도 많은 연구자들에 의해 ECC의 재료적 특성 및 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 연육교 등에 적용된 사례도 있다.



(a) 직접인장하에서 ECC의 특성

(b) ECC 박판의 휨실험 예

그림 1. 고인성 시멘트 복합체의 특성

본고에서는 ECC의 재료설계기법, 특성 및 연구 단계에서 건설 분야의 활용 현황에 대하여 소개함으로써 차세대 건설재료로 평가되는 ECC에 대한 이해를 확대하고 아울러 건설 기술자들이 다양한 분야에 이러한 재료의 적용 촉진을 유도하고자 한다.

2. 섬유보강 시멘트 복합체의 분류

휨모멘트 또는 직접 인장 하에서 균열이 발생된 이후에도 강도의 저하 없이 변형률이 증가됨에 따라 응력이 증가되는 “유사 변형경화(pseudo strain hardening)” 특성과 “다수균열(multiple crack)” 특성을 보이는 시멘트 복합체를 “고인성 시멘트 복합체(DFRCC)”라 정의한다. 이러한 종류의 복합체 중 대표적인 ECC의 경우는 직경 수 ~ 수십 마이크로 폴리에틸렌 (PE) 섬유와 비닐론(PVA) 섬유 등 유기섬유와 강섬유를 체적 1 ~ 2%정도 포함하도록 하여 4 ~ 8%의 변형 능력을 확보한 변형경화 및 다수균열 특성을 보인다. 이러한 재료는 <그림 1>에 나타난 바와 같이 일반적인 콘크리트의 취성적인 성질을 극복하고 있으므로 콘크리트계 구조 요소의 구조 성능과 내구성을 극대화할 것으로 기대할 수 있다. 시멘트계 재료를 대신하여 고성능 보수용 재료, 내충격성 재료, 강재의 피복 재료 및 내진 요소 등 새로운 각종 용도로 활용될 수 있어 콘크리트 분

* 정희원, 세종대학교 토목환경공학과 교수
ijhkim@sejong.ac.kr

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

*** 정희원, 충남대학교 대학원 박사과정

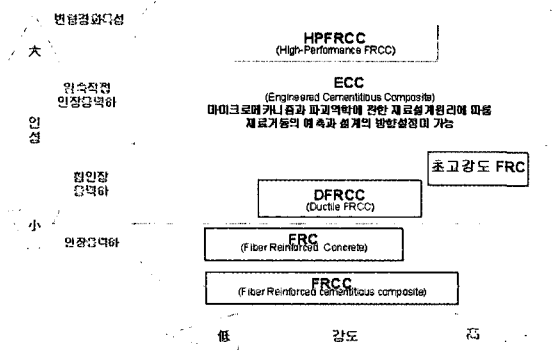


그림 2. 섬유보강 시멘트 복합재료의 분류

야에서 기술 혁신을 일으킬 수 있을 것이다. 본고에서 소개하고자 하는 ECC의 특성 및 적용 사례를 다루기에 앞서 <그림 2>와 같이 고인성 시멘트 복합체는 분류되며 아래와 같이 정의된다. <표 1>은 이러한 섬유보강 시멘트 복합체의 종류에 따른 보강섬유 혼입 범위에 대하여 나타내고 있다.

3. 단섬유보강 시멘트 복합체의 재료설계기법

최근 단섬유보강 시멘트 복합체에 대한 연구 개발 및 활용을 위한 노력이 고조되고 있으며 변형연화(strain softening)재료로부터 변형경화(strain hardening)재료까지 다양하게 제안되고 있다. 이러한 노력의 결과 섬유의 재질, 형상, 매트릭스의 종류 및 특성 등을 조합하여 다양한 성능을 갖는 시멘트 복합체의 개발이 가능하게 되었으며 또한 해당 재료에 요구되는 역학적 특성을 충족하기 위한 합리적인 재료설계기법의 여러 연구자들에 의해 제안되었다. 본 절에서는 시멘트 복합체에 고인성 특성을 부여하기 위한 여러 재료설계기법 중 Naaman 등이 제안한 섬유형상에 근거한 재료설계기법, Li 등에 의한 마이크로 역학에 근거한 재료설계기법 및 Bolander 등에 의한 수치해석에 근거한 재료설계기법을 소개하고자 한다.

3.1 섬유 형상에 근거한 재료설계

3.1.1 섬유보강 콘크리트의 부착응력

최근 다양한 재질과 형상의 단섬유가 개발되어 활용되고 있다. 과거에는 강섬유 뿐만 아니라 PVA, PE 및 PP 등의 유기계 섬유가 주로 활용되었으나 재질에 따라 섬유 길이, 단면적, 형상 등이 다양화되고 있는 추세이다.

Naaman⁵⁾은 일반적인 섬유보강 시멘트 복합체에 고인성 특성을 부여하기 위하여 고려하여야 할 요인을 제안하고 있다. 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 성능은 섬유의 분산성, 섬유의 배향각(경사각) Λ , 부착력 τ , 섬유 혼입률 V_f , 섬유 형상비 L/d 로 표현할 수 있다. 이형단면의 섬유가 인발되는 균열 발생 후 시멘트 복합체의 응력 σ_{pc} 는 식 (1)과 같이 제안하고 있다.

$$\sigma_{pc} = \Lambda/4 \tau V_f FIER \quad (1)$$

여기서, FIER(Fiber Intrinsic Effecting Ratio)은 다음과 같이 표현된다.

$$FIER = \psi L/A \quad (2)$$

여기서, L은 섬유길이, ψ 섬유의 주장, A는 섬유 단면적이다.

그림 3. 섬유단면의 형상에 따른 단면적, 주장에 미치는 영향⁵⁾

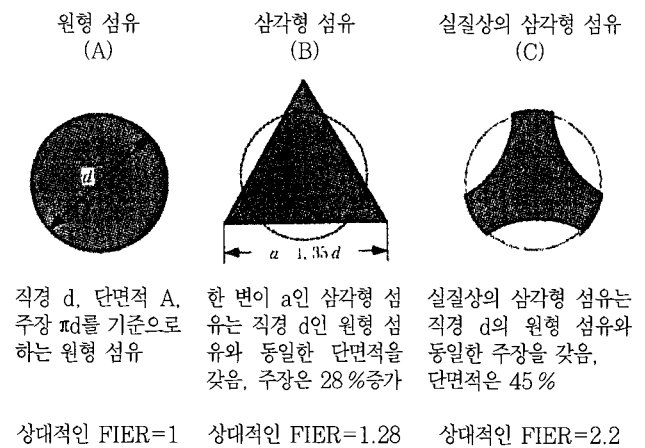


표 1. 섬유보강 시멘트 복합체의 섬유 혼입 범위

재 료	V_f 의 범위
FRC(fiber reinforced concrete)	$V_f \leq 2.0\%$
HPFRCC(high performance fiber reinforced cement composites)	$V_f \geq (V_f)_{critical}$ $V_f \geq 1.0\%$
Shotcrete	$V_f \leq 3.0\%$
Spray	$4.0\% \leq V_f \leq 7.0\%$
SIMCON(강섬유)	$4.0\% \leq V_f \leq 6.0\%$
SIMCON(PVA 섬유)	$V_f \approx 2.0\%$
SIFCON(강섬유)	$4.0\% \leq V_f \leq 15.0\%$

비 고
섬유를 콘크리트 매트릭스 내 미리 혼입된 경우도 있고 비교적 입경이 적은 골재가 필요한 경우도 있다. 인장응력 하에서 변형경화와 다수균열 특성을 보이고 재료설계 개념을 도입하여 한계 섬유량을 2% 이하로 할 수 있다. 터널의 라이닝 또는 단면보강재로 활용된다. 마감재 및 패널보강에 활용된다. Slurry Infiltrated Mat Concrete의 약자로 미리 설치된 섬유매트가 필요하다. 최근부터 활용되고 있다. Slurry infiltrated fiber concrete의 약자로 섬유를 거꾸집 내에 미리 투입하고 시멘트 슬라임을 주입한다.

식 (2)는 이형단면 섬유에 적용 가능한 일반식이며 원형 단면의 섬유에 대해서는 다음식과 같이 단순화될 수 있다.

$$FIER = 4L/d \quad (3)$$

여기서, d 는 섬유 직경을 나타낸다.

3.1.2 섬유 형상과 부착 성능

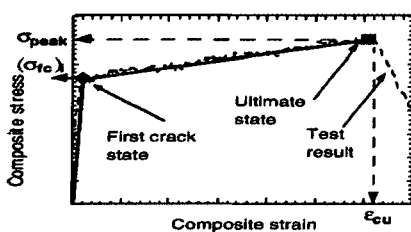
Naaman⁵⁾은 섬유의 단면 형상에 따른 부착응력의 변화를 <그림 3>과 같이 나타내고 있다. 섬유 A는 원형단면의 섬유이며, 섬유 C는 섬유 A와 동일한 주장을 갖는 섬유로 섬유 C는 섬유 A와 비교하여 단면적에 대한 주장비(ψ/A)가 크게 되므로 섬유 혼입량이 동일하면 보다 큰 σ_{bc} 를 나타낸다. 마찬가지로 삼각형 단면의 섬유 B도 원형 단면의 섬유 A에 비하여 상대적으로 양호한 부착력을 갖게 된다. 이를 위하여 섬유 길이 방향으로 섬유를 구부리거나 단부에 후크를 설치하는 방안이 제안되고 있다.

최근 섬유보강 시멘트 복합체의 고인성화에 따라 섬유의 직경을 감소시켜 매트릭스와 부착력을 증가시키는 경향이 있다. 과거 강섬유 길이는 25 ~ 60 mm, 직경이 0.4 ~ 0.8 mm 정도로 형상비가 100이하가 대부분이다. 최근 강섬유는 직경 0.1 ~ 0.25 mm정도 길이 10 m 정도의 steel cord등이 이용되고 있으며 유기계 섬유는 길이 10 mm정도, 직경 10 ~ 40 μ m 정도로 형상비 100이상의 섬유가 주로 사용되고 있다.

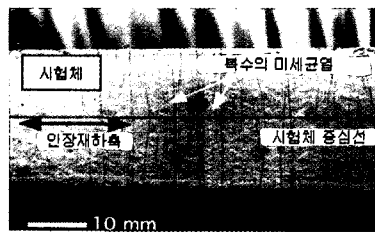
3.1.3 섬유 혼입량과 부착 성능

Naaman⁵⁾은 일반적인 섬유보강 시멘트 복합체를 대상으로 시공방법에 따른 섬유 혼입량을 <표 1>과 같이 제안하고 있다. 과거 섬유보강 시멘트 복합체는 2%이하의 섬유 혼입률을 나타내고 있으며 스프레이형 시멘트 복합체에서는 3 ~ 4% 범위의 섬유로 보강되었음을 알 수 있다. 한편 변형경화화 다수균열 특성을 보이는 고인성 시멘트 복합체에서는 2% 이하의 섬유가 혼입됨을 알 수 있다. 이는 3.2절에 소개되는 Li^6 교수의 마이크로 역학에 근거한 재료설계기법에서도 나타나고 있다.

3.2 마이크로 역학에 의한 재료설계



(a) 변형경화(하중-변위 관계)



(b) 다수균열

그림 4. 변형경화형 ECC

3.2.1 변형경화형 섬유보강 시멘트 복합체

Li^6 는 파괴역학적인 재료설계기법을 확립하고 <그림 4>에 나타난 바와 같은 변형경화형 시멘트 복합체 ECC의 개발하였다. 재료설계기법에 의해 섬유보강 효과를 정량적으로 평가할 수 있으며 섬유보강 시멘트 복합체의 고인성화를 위한 효율적인 재료설계가 가능하게 되었다.

3.2.2 마이크로 역학에 근거한 ECC의 설계

Li^6 등은 선형파괴역학을 근거로 이론이 수립된 섬유보강 복합체의 설계기법(연속섬유 대상을 3차원 단섬유로 보강된 시멘트 복합체에 대하여 적용할 수 있도록 발전시키고 ECC를 개발하였다. 특히 균열을 억제하는 섬유효과에 대하여 가교 구성모델(fiber bridging law), 즉 균열 폭과 섬유의 가교응력 관계를 모델화하는 것이 특징이라 할 수 있다. 매트릭스 내 단섬유에서 하중과 인발량의 관계(단섬유의 하중-인발관계)를 구한 후 복합체의 균열을 가교하는 단섬유 매입길이와 각도를 확률적으로 고려하여 섬유 가교 구성모델을 구하게 된다. 이 재료설계기법의 기본 개념은 PDDA⁷⁾(performance driven design approach)라 제안되어 있다. PDDA에서는 ① 섬유, 시멘트 매트릭스 및 섬유-매트릭스 계면의 성능을 나타내는 마이크로 역학의 변수를 정량화하고 ② 섬유의 특성, 매트릭스의 특성 및 매트릭스의 계면 특성의 상호작용을 파괴역학을 이용하여 모델화하는 점에 특징이라 할 수 있다. 또한 ① 및 ②를 고려하여 ③ 변형경화거동을 확보하기 위한 조건의 충족여부로 고인성 시멘트 복합체의 재료설계를 한다. ①에 있어서 섬유 부착은 화학적 부착과 마찰 부착으로 대별되고 특히 화학적 부착은 재료의 종류에 따라 좌우된다고 알려져 있으나 섬유 표면의 개질 등에 따라 부착강도를 향상시키는 것도 가능하다. Li 및 Kanda 등은 매트릭스 내 섬유의 인발 실험에 의해 섬유의 부착강도뿐만 아니라 섬유의 매립각(배향각)에 따른 강도증진 효과(배향각이 증가됨에 따라 인발하중 증가, 역으로 배향각의 증가에 따른 섬유강도의 저하(각도가 증가되면 섬유의 강도가 감소 등도 고려할 수 있는

설계식을 제안하였다. ②에 있어서 통상 시멘트 복합체에서의 균열 부위의 결합응력은 균열폭의 증가에 따라 감소되는 경향을 보이거나 섬유보강 시멘트 복합체의 경우 균열폭이 작은 영역에 있어서 결합응력이 증가되는 것으로 모델화되고 있다. 특히 ECC에서는 이상승하는 부분에 대하여 이용하고 있다고 할 수 있다. ③에 있어서는 변형경화거동을 확보하기 위하여 다음 조건을 만족할 필요가

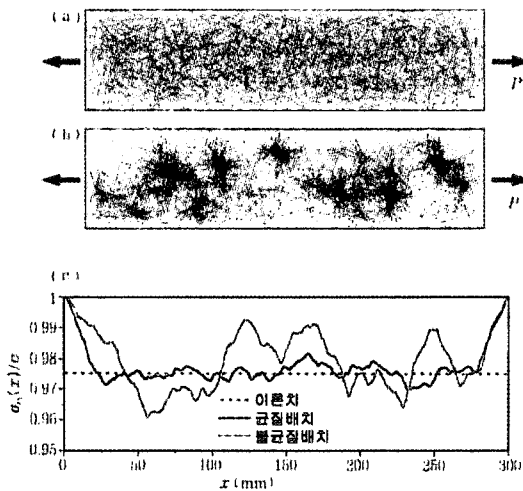


그림 6. 섬유 분산을 위한 매트릭스 응력에 관한 영향
(a) 섬유가 잘 분산된 상태, (b) 섬유가 충분히 분산되지 못한 상태, (c) 매트릭스의 응력분포

있다는 것이 Li 및 Marshall 등에 의해 규명되었다.

$$\sigma_{peak} \geq (\sigma_c)_i \tag{4}$$

$$J_b' \geq J_{tip} \tag{5}$$

여기서, $(\sigma_c)_i$ 는 초기균열강도, σ_{peak} 는 섬유에 의한 가교응력 σ_c 의 최대값, J_{tip} 는 균열 선단의 매트릭스 파괴인성, J_b' 는 σ_c - δ 곡선의 보상에너지(Complementary energy)이다. 즉, 매트릭스의 인장강도가 섬유의 가교응력의 최대값을 상회하지 않고 매트릭스의 균열진전에 필요한 에너지가 σ_c - δ 곡선에서 구한 보상에너지를 초과하지 않는다는 조건이다.

3.3 수치해석에 의한 재료설계

3.3.1 이산모델에 의한 수치해석

섬유보강 시멘트 복합체의 고인성화를 위한 재료설계기법의 다른 한 방법으로 섬유, 매트릭스 및 섬유와 매트릭스의 부착 등 역학적 특성을 묘사할 수 있는 수치해석 구성모델을 구축하여 섬유보강 시멘트 복합체의 성능을 추정하는 방법이 모색되

고 있다. 섬유를 분산하여 모델화 하고 섬유의 배향성 등에 따라 섬유보강 시멘트 복합체의 역학성능을 수치해석 하여 고인성화를 갖도록 하는 재료의 조합이 가능하다.

3.3.2 섬유의 배향성과 그 모델화

Bolander⁹⁻¹¹⁾ 등은 강체 스프링 모델(rigid-body-spring network, RBSN)을 이용하여 섬유인 인발실험을 모델화한 해석을 수행하였다. Cox¹²⁾에 의한 이론치와 비교한 결과, 해석치와 이론치가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이 모델을 이용하여 공시체 규모의 시험체에 대한 해석을 수행하였으며 다양한 섬유보강 시멘트 복합체에 대한 검토도 수행하고 있다.

[참고문헌 9]에 의하면 섬유 분산성의 차이가 매트릭스에 유발되는 응력분포에 대하여 해석적으로 검토하고 있다. <그림 6(a), (b)>에 장방향 공시체 모델에 단섬유를 혼입한 결과를 나타내고 있으며 (a)는 섬유가 잘 분산된 상태이고 (b)는 섬유가 충분히 분산되지 못한 상태(群效果)를 모델화한 것이다. 두 시험체에 대한 인장실험을 모델화하여 해석하면 매트릭스의 인장축방향 응력 분포를 <그림 6(c)>에 나타내었다. 이러한 결과에 따르면 충분히 섬유가 분산되지 않은 경우 매트릭스의 응력은 극히 증대되는 부분이 발생되어 결과적으로 약한 부위가 발생하는 것으로 나타났다.

또한, <그림 7>에 섬유와 매트릭스의 부착정도(τ/σ_{mu} , 부착강도 τ 를 매트릭스의 인장강도 σ_{mu} 로 무차원화)와 다수균열을 유발하기 위한 섬유 혼입량($(V_f)_{cr}$)의 관계를 나타내었다. <그림 7>에서 정열배치는 주응력방향으로 섬유를 배치한 것으로 전체적으로 균질하게 배치된 상태(그림 6(a) 참조)이다. 이에 따르면 부착이 양호한 만큼 섬유량을 감소시킬 수 있으며 랜덤(random)하게 배치된 섬유로는 유효하게 작용하는 섬유량이 감소함으로 섬유가 가장 감소되는 영역에서 파괴가 유발되므로 정열배치된 경우에 비하여 많은 섬유 혼입이 요구된다는 것을 알 수 있다.

최근 섬유 재질 및 섬유의 형상이 상이한 두 종류 이상의 섬

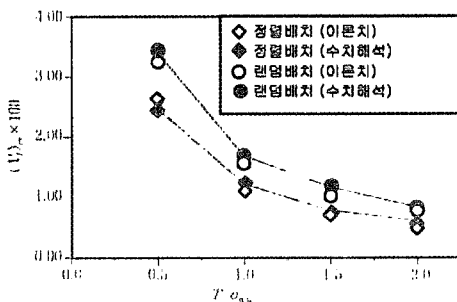


그림 7. 부착강도-섬유의 배향 관계

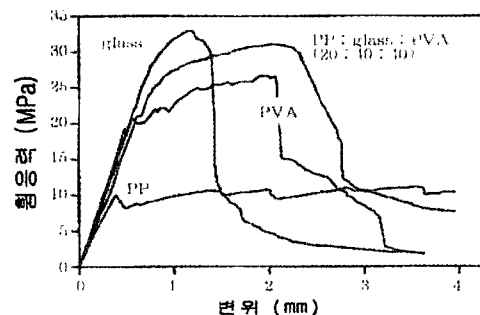
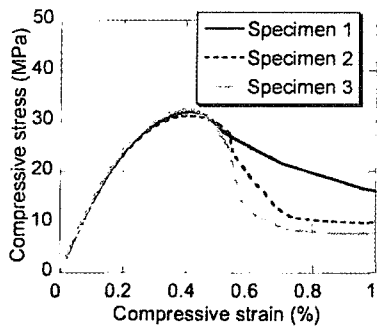
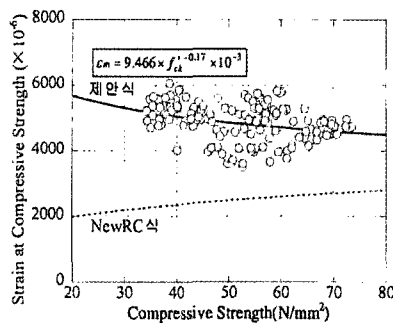


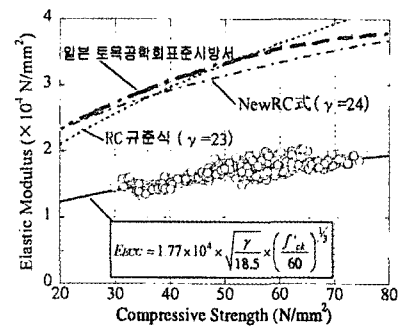
그림 8. 하이브리드 섬유혼입 모델의 결과 (100mm×25mm×4mm의 판상 공시체)



(a) 압축응력-변형도 관계

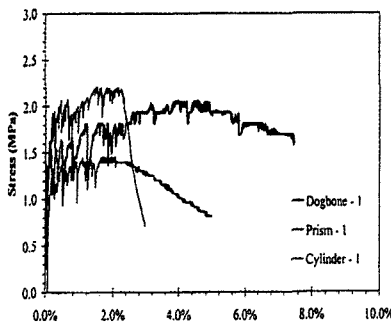


(b) 압축강도-압축강도시 변형도 관계

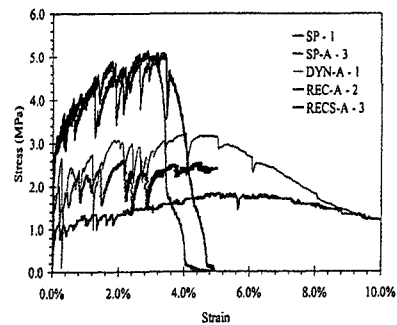


(c) 압축강도-탄성계수 관계

그림 9. ECC의 압축거동 특성



(a) 시험체 형상별 응력-변형도 관계



(b) 섬유 종류별 응력-변형도 관계

그림 10. ECC의 인장응력-변형도 관계

유로 보강된 하이브리드화(예를 들면 강섬유와 PVA 섬유를 혼입)에 의해 섬유보강 시멘트 복합체의 고인성화가 시도되고 있다. 섬유 단일체의 인발거동은 규명되었으나 개개의 섬유가 혼입됨에 따라 단일 섬유가 보강된 경우와 다르게 나타나는 개선된 성능을 실험적인 시행오차에 의해 평가하고 있는 실정이다. <그림 8>은 Cry 등에 의해 수행된 PP(길이 13 mm, 직경 0.05 mm), 유리섬유(길이 6 mm, 직경 0.014 mm) 및 PVA(길이 2 mm, 직경 0.014 mm)인 각각의 단일섬유로 보강된 시멘트 복합체에 대한 휨응력-변위관계 및 각 섬유를 20:40:40의 비율로 혼입된 하이브리드 시멘트 복합체의 휨응력-변위곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 하이브리드 섬유보강된 시멘트 복합체는 휨강도 및 최대응력시의 변위가 비교적 증가되는 경향을 보였으며 사용된 개개 섬유의 장점을 활용할 수 있는 것으로 나타났다. Bolander¹¹⁾ 등은 섬유의 인발거동의 차이를 모델화하고 이를 수치해석 구성모델로 이용하여 각종 섬유를 조합한 경우의 성능 추정 가능성을 입증하였다. 이와 같은 해석은 2차원적으로 수행됨으로 정성적인 특성을 보이고 있으나 각 재료의 역학적 특성을 정확히 파악한다면 수치해석에 의해 시멘트 복합체의 역학적 성능을 용이하게 추정할 수 있는 기술로 평가된다. 단순히 섬유의 인발시험 결과를 근거로 구축된 해석기법을 이용한 새로운 재료 개발의 가능성도 제시하고 있다.

4. ECC의 역학적 및 내구 성능

4.1 역학적 특성

4.1.1 압축거동

<그림 9(a)>는 직경 100 mm × 높이 200 mm인 원주형 공시체를 이용한 ECC(PVA 2%)의 압축강도 시험 결과로 압축강도 변형도는 0.4% 정도를 보이고 있으며 압축강도 이후 강도저하는 섬유의 횡구속에 따라 보통 콘크리트에 비하여 다소 안정된 강도저하 특성을 보이는 것이 ECC의 압축거동 특성이라 할 수 있다. <그림 9(b)>는 압축강도에 따른 압축강도시 변형도(ϵ_m)를 나타낸 것으로 압축강도가 증가됨에 따라 ϵ_m 은 감소되는 경향을 보이고 있으나 0.4%를 초과하고 있다. <그림 9(c)>는 ECC의 압축강도에 따른 탄성계수로 그림에 나타난 바와 같이 보통 콘크리트의 1/2 ~ 2/3정도 나타났다.

4.1.2 인장거동

ECC는 압축성능보다는 인장변형성능이 획기적으로 개선된 시멘트계 복합 재료이며 <그림 10>은 보강섬유의 종류 및 시험체의 형상에 따른 인장응력-변형도 관계를 비교하여 나타낸 것이다. <그림 10(a)>에 나타난 바와 같이 시험체의 형상에 따라 ECC 보강섬유가 방향성을 갖고 경계조건이 상이하게 됨에 따

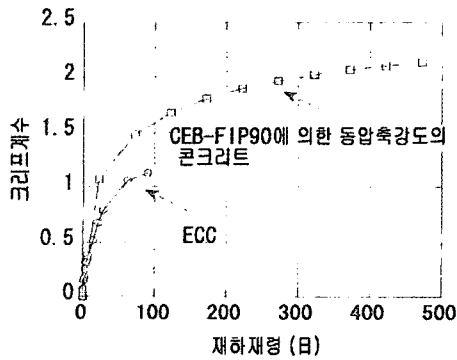


그림 11. ECC의 크리프 특성

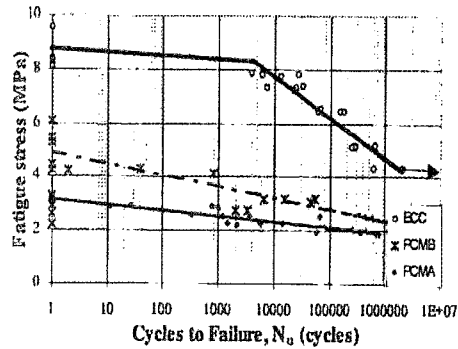


그림 12. ECC의 피로성능

PCMA와 PCMB는 일반적인 폴리머시멘트 모르타르

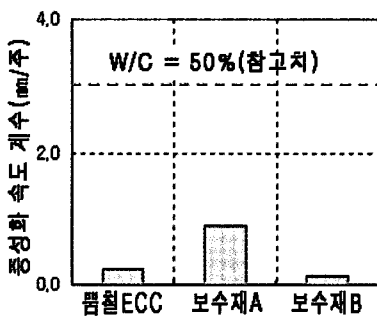
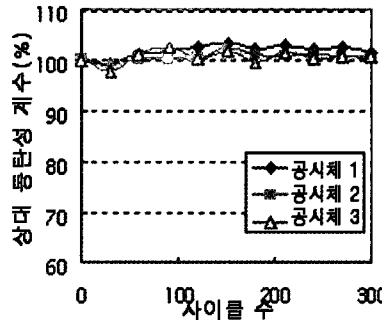
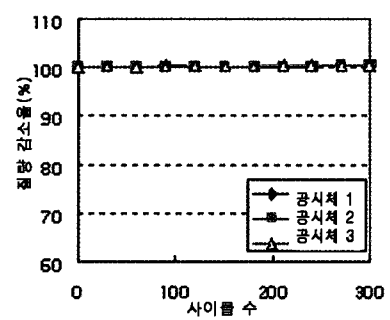


그림 13. 중성화 저항성



(a) 상대동탄성계수



(b) 질량 감소율

그림 14. PVA-Spray-ECC의 동결융해실험

라 동일한 ECC에 대하여 인장강도 및 변형 능력이 다르게 나타나고 있다.

〈그림 10(b)〉는 Dogbone 시험체의 인장 실험 결과로 보강 섬유 종류에 따라 인장거동 특성이 상이하게 나타나고 있으며 이는 섬유의 재질, 표면 상태 및 형상비 등과 같은 다양한 요인의 영향에 따른 것으로 알려져 있다.

4.1.3 크리프 특성

〈그림 11〉은 직경 100 mm × 높이 200 mm의 원주형 공시체에 대하여 재령 28일시 압축강도의 1/4에 해당되는 하중의 재하시 기전 상태에서 재하시간에 따른 크리프계수를 나타낸 것으로 크리프 시험조건은 20 °C, 60 %RH이며 그림에 나타난 바와 같이 ECC의 크리프 계수는 동일 압축강도인 보통 콘크리트의 3/4 정도로 나타났다.

4.1.4 피로 성능

〈그림 12〉는 ECC의 휨인장 피로강도를 나타낸 것으로 ECC의 휨인장 피로강도는 피로 사이클수 N_f 를 로그좌표로 표현할 경우 Bilinear로 이상화할 수 있으며 피로 재하시 휨인장 응력과 정적휨강도의 비가 0.5 이하인 경우에는 피로 사이클수 200만회에서 피로파괴 될 수 있는 것으로 평가되었다.

4.2 내구 특성

PVA-Spray-ECC의 중성화 저항성을 살펴보기 위하여 일본 건축학회 고내구성 철근콘크리트구조설계지침(안)·동해설의 부록 1에 소개된 중성화 촉진조건 하에서 실시한 촉진 중성화 실험 결과를 〈그림 13〉에 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 PVA-Spray-ECC는 다른 보수재료(폴리머시멘트모르타르)와 대등한 중성화 저항성을 보유하고 있는 것으로 나타났으며 그림내의 참고값은 보통 콘크리트의 중성화 촉진 실험 결과이다. 동결융해저항성은 JIS A 1148에 준하여 동결융해실험(수중동결 수중융해)을 실시한 결과는 〈그림 14〉와 같다. 300사이클 진행시점에서의 상대 동탄성계수 및 질량 감소율을 저하되지 않는 높은 내동결융해 성능을 확보하고 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 ECC의 균열폭 및 중성화 억제 효과를 평가하기 위하여 균열 제어용의 D6철근을 배치한 일반적인 휨시험체를 제작한 후 최대균열폭이 0.4 mm에 이를 때까지 단조재하 하였다. 그 후 10 mm두께의 ECC를 뿔칠시공 하였으며 다시 단조재하를 하였다.

〈그림 15〉와 같이 무보강 시험체와 ECC로 뿔칠된 시험체의 중성화깊이를 비교한 결과, 구조물의 표면에 ECC를 이용할 경우, 중성화를 억제하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

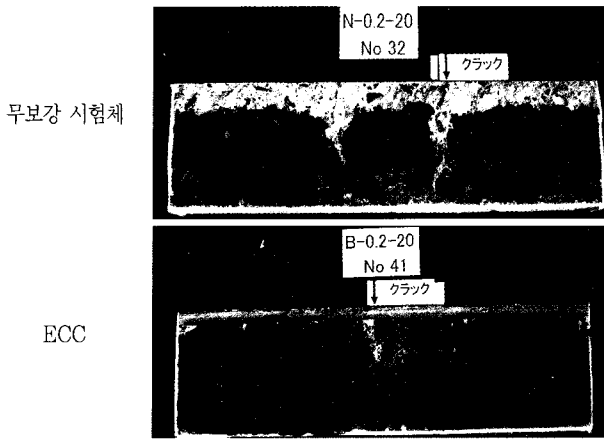


그림 15. ECC의 중성화 저항성능(균열폭 0.2 mm)

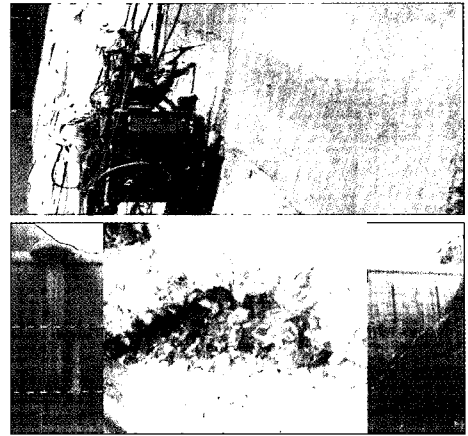
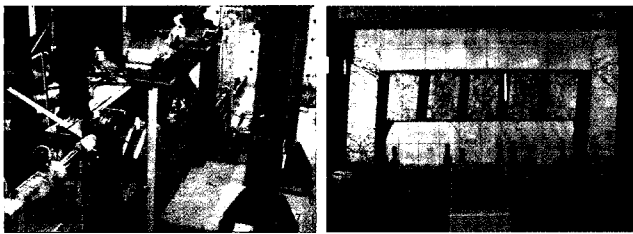


그림 18. Mitaka중력댐의 손상정도 및 보수상황



(a) ECC 댐퍼 (b) ECC damage fuse

그림 16. ECC의 내진요소의 적용 사례



(a) RC 방호벽 (b) ECC 방호벽

그림 17. ECC의 방호벽으로 적용된 사례

5. ECC의 활용 현황

본 절에서는 연구 단계에서 실용화 단계로 전환되고 있는 ECC의 활용 현황에 대하여 내진요소, 방폭 요소, 단면 보강 및 이외의 기타 다양한 부위에 적용된 사례를 소개하고자 한다.

5.1 Damper 및 damage fuse

ECC의 높은 에너지 흡수 및 손상제어능력(damage tolerance capacity)을 적극 활용하기 위하여 필로티 건축물의 저층부에서 지진에너지 흡수 장치인 댐퍼로 활용하고자 하는 것이 시도되고 있다. ECC 내진 요소는 저항복점 강, 마찰, 점탄성체, 점성유체 등을 이용한 기존의 제진 댐퍼에 비교해서 저렴하다. <그림 16>은

철근콘크리트 골조에서 ECC 댐퍼의 내진보강 성능을 평가하기 위하여 일본 건축연구소와 내진보강용 철골가새의 중앙부에 지진 에너지 흡수를 위한 damage fuse로 ECC의 적용 가능성을 평가하기 위하여 일본 국토건설성에서 수행된 실험 예를 나타낸 것이다. 실험 결과로부터 ECC를 사용한 내진 요소는 철근콘크리트 골조 및 철골가새의 지진응답 특성을 효율적으로 개선하는 것으로 규명되어 일본에서는 기존 구조물의 내진보강을 위한 요소로 ECC가 적용될 예정인 것으로 보고되고 있다.

5.2 방폭 요소

ECC는 각종 방호시설의 재료로 활용하고자 하는 연구도 일본 자위대, 싱가포르 및 덴마크 등지에서 다양하게 진행되고 있으며 일본 및 싱가포르에서는 아직 연구단계에 있으나 덴마크에서는 이미 상용화된 제품이 출시되어 <그림 17>과 같이 테러 등에 대비하기 위한 중요시설물의 방호벽에 ECC를 적용하고자 시도되고 있다.

5.3 단면 복구 및 보강

ECC는 균열폭을 감소시켜 물의 투과를 최소화하는 방수성능이 매우 우수하다. 2003년 Hiroshima에 있는 Mitaka중력댐에서는 농업용 수원 확보를 목적으로 열화된 구 콘크리트표면의 방수성능을 향상하는 보수공사를 시작하였다. 균열 분산성 및 동결융해 방지를 위해 30 m³ 물량의 ECC를 댐의 강하류 측면에 30 mm의 두께로 시공하였다.

2003년 4월에 Gifu사회기반연구소에서는 용벽표면 보수재로 ECC적용성 검토를 위해 균열이 발생한 중력식 콘크리트 용벽을 대상으로 ECC의 뿔칠재(두께 50~70 mm 정도) 표면 보수를



그림 19. ECC에 의한 중력식 콘크리트 응벽표면 보수 사례

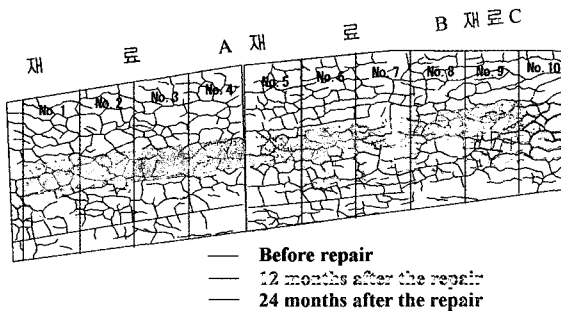


그림 20. 균열패턴 상황

실시했다. 보수재료A로는 ECC뿔칠 모르타르로 PVA+고강도 PE를 Volume 1.5%, 보수재료B는 ECC뿔칠 모르타르로 고강도 PVA를 Volume 2.1%, 보수재료C로는 보수용 뿔칠 모르타르를 사용하여 비교하였다. <그림 19>는 균열이 발생한 콘크리트 응벽의 보수단계를 나타낸 것이며, <그림 20>은 균열보수 후, 시간의 경과에 따른 균열패턴을 나타낸 것으로 ECC가 일반 보수재료에 비해 균열폭을 효과적으로 제어하는 것으로 평가되었다.

5.4 교량

일본 Hokkaido의 Mihara Ohasi교는 철골 플레이트와 ECC를 합성하여 보통 철골-콘크리트 부재보다 세장한 단면으로 보다 큰 휨저항력을 갖도록 설계되었다. 교량의 길이는 972m, 최대스팬은 340m이며, 데크의 강성과 하중저항성을 증가시키기 위하여 ECC를 40mm 두께로 보강하였으며 그 물량은 800m³, 시공 면적은 약 20,000m²에 이른다.

6. 맺음말

21세기에 접어들면서 모든 기술 분야에 있어서 자원 절약, 에너지 절감, 지구환경 부하 저감 등의 키워드가 전제조건이 되어 토목·건축 구조물에 있어서도 요구되는 새로운 기술에 대하여는 안전하고, 안심할 수 있는 성능을 보유하며, 지구환경에 친화적인 구조물이 개발 목표가 될 것으로 사료된다. 즉, 보다 높

은 안전성(인명의 보존), 구조물 자체 손상(훼손)의 자기 제어, 사용성(기능 유지) 등의 확보와 장기 내구성을 가지는 구조물을 최적으로 실현시키는 기술이 요구될 것이다. 다양화, 고도화하는 사회의 요구에 부응할 수 있는 콘크리트계 재료의 한 가지로서 높은 인성과 자기손상저감성(自己損傷低減性)을 갖추고, 구조물의 안전성, 수복성 그리고 내구성 등을 크게 향상시킬 수 있는 고인성 시멘트 복합체(DFRCC)가 주목을 받고 있다. 그러므로 국내에서도 취성적인 시멘트계 복합체의 성능을 획기적으로 개선한 DFRCC에 대한 보다 적극적인 관심과 연구가 필요할 것으로 판단되며, 특히 시멘트 복합체의 특성이용 방법에 대한 개발뿐만 아니라 재료, 구조 및 시공에 관한 전반적인 검토와 데이터의 축적이 시급하다는 작은 연구 방향을 언급하며 본고를 마감한다. □

참고문헌

1. 高靱性セメント複合材料の性能評價と構造利用研究委員會, “高靱性セメント複合材料を知る作る使う”, 日本コンクリト工學協會, 2002.1.
2. 윤현도, 김규용, 양일승, 손유신, Fukuyama, 김무한, “고인성 섬유보강 시멘트 복합재료의 복합구성에 의한 휨 성능”, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 15권 1호, 2003, pp.367~372.
3. Naaman, A.E. and Reinhardt, H. W., “Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites”, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC2)*, 1996, pp.1~23.
4. A. E. Naaman, “Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites”, *J. of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, 2003, pp.241~252.
5. V. C. Li., “Engineered Cementitious Composites(ECC)-A Review of the Material and Its Applications”, Vol.1, No.3, 2003, pp.215~230.
6. J. Bolander, “Spring Network Model of Fiber-Reinforced Cement Composites”, *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(HPFRCC3)*, *Proc. of the 3rd Int. RILEM Workshop*, 1999, pp.341~350.
7. H. Cox., “The Elasticity and Strength of Paper and Other Fibrous Materials”, *British J. of Applied Physics*, Vol.3, 1952.