

섬유보강 고인성 시멘트 복합체 패널의 2축 전단 비선형 모델

Nonlinear Biaxial Shear Model for Fiber-Reinforced Cementitious Composite Panels

조 창 근* 김 윤 용†

Cho, Chang-Geun Kim, Yun-Yong

(논문접수일 : 2009년 9월 28일 ; 심사종료일 : 2009년 10월 30일)

요 지

본 연구에서는 철근 보강된 Engineered Cementitious Composite(ECC) 면내요소에 대한 2축응력 상태에서의 면내전단 거동에 관한 예측 모델을 제시하였다. 기존의 철근콘크리트와 상이한 특성, 즉 ECC 요소의 복수미세균열 현상에 의한 높은 연성의 인장 거동, 일반 콘크리트에 비하여 연성적인 압축 연화 거동, 그리고 ECC 균열면에서의 전단전달 거동 특성 등을 모델에 반영하였다. 면내 순수전단거동에 대한 실험 및 해석결과를 통하여 개발된 R-ECC-MCFT 모델은 ECC 면내전단거동 예측에 효과적인 것으로 평가되었다. 또한 철근 보강된 ECC 면내요소는 철근콘크리트 면내요소에 비하여 최대전단강도 및 전단변형률이 증가하기 때문에 면내전단변형에서 높은 연성을 확보하는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 고인성 시멘트 복합체, ECC, 순수전단거동, 수정압축장이론, 비선형 해석

Abstract

The present study has been proposed a model for the in-plane shear behavior of reinforced(Engineered Cementitious Composite(ECC) panels under biaxial stress states. The model newly considers the high-ductile tensile characteristic of cracked ECC by its multiple micro-cracking mechanism, the compressive strain-softening characteristic of cracked ECC, and the shear transfer mechanism in the cracked interface of ECC element. A series of numerical analyses were performed, and the predicted curves were compared with experimental results. The proposed in-plane shear model, R-ECC-MCFT, was found to be well matched with the experimental results, and it was also demonstrated that reinforced ECC panel showed more improved in-plane shear strength and post peak behavior, in comparing with the conventional reinforced concrete panel.

Keywords : *engineered cementitious composites, ecc, pure shear behavior, MCFT, nonlinear analysis*

1. 서 론

첨단 건설 신소재 기술의 발전으로 지난 20세기 후반부터 새로운 고성능 재료의 배합·생산 뿐만 아니라 구조 적용이 가능하게 되어 설계·시공 기술의 발전과 더불어 구조물의 고성능화가 빠르게 실현되어 가는 추세이다. 대표적인 예로서 탄소 섬유 또는 유리 섬유의 제조기술과 폴리머 레진 매트릭스의 제조기술이 복합되어 발전한 Fiber Reinforced Polymer (FRP)의 경우, 콘크리트 구조물의 부재강도 개선과 FRP-콘크리트 합성 부재 적용 기술을 통한 구조시스템 고성능화에 크

게 기여하고 있다(Cho 등, 2005, 2008; 조창근, 2004). 한편 콘크리트의 대표적 취약점인 취성 및 균열 집중 현상의 단점을 개선하기 위하여 개발된 고인성 섬유보강 콘크리트(또는 모르타르)의 제조 기술은 향후 콘크리트 기술 산업과 구조 재료의 고성능화에 크게 기여할 것으로 기대하고 있다(Cho 등, 2008; 김윤용 등, 2004; Kim 등, 2004; Li, 1992; 1993). 그림 1과 같이, 콘크리트의 취성 및 균열 개선을 목적으로 개발된 신소재 섬유혼합에 의한 고인성 시멘트 복합체 (Engineered Cementitious Composites, ECC)의 경우 기존 콘크리트와 비교하여 인장 균열 거동 뿐만 아니라 압축

† 책임저자, 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수
Tel: 042-821-7004 ; Fax: 042-825-0318
E-mail: yunkim@cnu.ac.kr

* 종신회원 · 조선대학교 건축학부 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

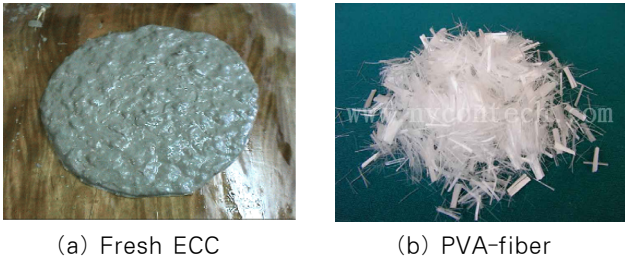


그림 1 Fresh ECC and Reinforcing Fiber

및 전단 등의 역학적 특성에서도 보다 향상된 또다른 재료 역학적 거동을 나타내는 특징이 있다(Kim 등, 2005; 김윤용 등, 2006). ECC 재료의 장점으로 인해 구조 부재의 성능개선, 리모델링 및 보수보강 재료(김윤용, 2003)로서 그 적용성이 점차적으로 확대되고 있는 것에 비하여, ECC 재료의 역학적 특성에 관련된 구성관계 모델링 연구는 국내·외적으로도 아직 미비한 실정이다. 이와 관련된 기존의 연구들은 ECC 재료의 역학적 특성으로서 인장 거동과 그 연성 증가 효과의 측면에서 연구되어 왔으며(Fukuyama 등, 2003; Kim 등, 2005), 일부 연구자들이 부재 규모에서의 전단거동에 관해서 연구를 수행한 바 있다(Hakuto 등, 2001; Mikame 등, 1998; Nagai 등, 2002; Kim 등, 2005). ECC 재료의 고인성 거동 특성은 2축전단거동 상태 하에서도 역학적 장점으로 작용하게 된다. 그로 인하여 전단강도 및 전단거동능력 측면에서 콘크리트에 비하여 매우 유리한 거동 특성을 나타내며, 2축전단거동을 하는 콘크리트 부재 및 구조 시스템에 ECC를 적용할 경우 전반적인 구조 성능을 향상시키는 효과를 갖게 된다. 이러한 장점이 있음에도 불구하고 ECC 재료에 대한 2축응력상태에서의 전단거동에 관한 역학적 특성 및 구성관계 모델링에 관한 연구는 국내외적으로 거의 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 이 연구는 2축응력 하에서 ECC 재료의 면내 순수 전단거동에 관한 구성관계 모델을 제시하는데 그 목적이 있다. 기존의 철근콘크리트 면내 전단거동 문제와 달리, 이 연구에서는 ECC에 대하여 3가지 모델변수를 고려한다. 첫째로 ECC의 복수미세균열 특성에 의한 고인성 인장균열 거동, 둘째로 콘크리트와는 상이한 ECC의 인장응력, 그리고 인장균열 하에서 압축거동 특성을 나타내는 압축연화거동, 마지막으로 ECC에서 발생한 균열면에서 전단전달거동 특성 등이다. 2축응력상태에서 철근 보강된 ECC(R-ECC) 패널의 면내전단거동을 모델링하기 위하여 기존 철근콘크리트(RC) 패널에 대한 수정압축장이론(Modified Compression Field Theory, MCFT)의 알고리즘에 기초하여(Vecchio 등, 1986), 앞에서 언급한 ECC의 3가지 모델변수를 반영함으로써 구체적인 ECC-MCFT의 면내전단거동에 관한 모델을 제시하였다. 수정압축장이론은 전단철근의 양에 관계없이 혹은 전단철근

이 전혀 없는 경우에도 실제적인 콘크리트 부재의 전단거동을 비교적 잘 예측하는 특징이 있다. 따라서 콘크리트에 비하여 큰 연성을 갖고 있는 ECC에 적용할 때에 보다 정확한 결과를 제공해 주는 이점이 있을 것이다. 이 연구에서 제시한 모델의 타당성을 검토하기 위하여 R-ECC 패널에 대하여 수행된 면내순수전단 실험 결과와 비교·검토하였다.

2. 면내전단거동 문제의 적합 및 평형조건

2.1 면내 적합조건

그림 2(a)의 R-ECC 패널에서 철근과 ECC가 일체로 거동한다고 가정하면, 동일한 위치에 있는 2개 재료의 변형률은 같으므로, 두 수직변형률은 각각 다음 식과 같게 된다.

$$\epsilon_{sx} = \epsilon_{cx} = \epsilon_x \tag{1}$$

$$\epsilon_{sy} = \epsilon_{cy} = \epsilon_y \tag{2}$$

한편, 그림 2(b)의 변형률에 관한 모아원에 의해 면내 전단변형률 γ_{xy} 는 주변형률 ϵ_1, ϵ_2 및 주변형률 방향 θ 로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

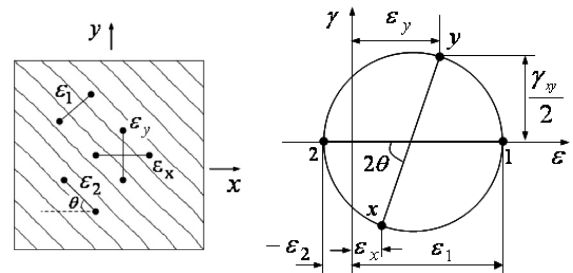
$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_x - \epsilon_2)}{\tan\theta} \tag{3}$$

$$\epsilon_x + \epsilon_y = \epsilon_1 + \epsilon_2 \tag{4}$$

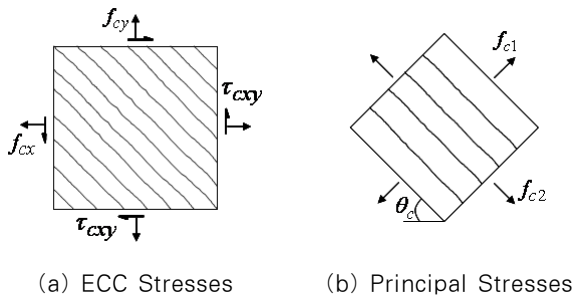
$$\tan^2\theta = \frac{(\epsilon_x - \epsilon_2)}{(\epsilon_y - \epsilon_2)} = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_y)}{(\epsilon_1 - \epsilon_x)} = \frac{(\epsilon_x - \epsilon_2)}{(\epsilon_1 - \epsilon_x)} = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_y)}{(\epsilon_y - \epsilon_2)} \tag{5}$$

2.2 면내 평형조건

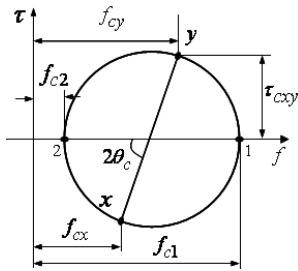
그림 3(a)의 ECC 면내 요소에 x 및 y 방향 철근비 ρ_{sx}, ρ_{sy} 를 고려할 경우, x 및 y 방향 평형관계로부터 면내 요소의 x 및 y 방향 수직응력 및 전단응력이 다음과 같이 유도된다.



(a) Strains (b) Mohr's Circle for Strains
그림 2 Compatibility of Cracked ECC Panel



(a) ECC Stresses (b) Principal Stresses



(c) Mohr's Circle for Stresses

그림 3 Stresses of Cracked ECC Element

$$f_x = f_{cx} + \rho_{sx} \cdot f_{sx} \quad (6)$$

$$f_y = f_{cy} + \rho_{sy} \cdot f_{sy} \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{cxy} + \rho_{sx} \cdot \tau_{sx} \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{cxy} + \rho_{sy} \cdot \tau_{sy} \quad (9)$$

여기서, $f_{cx}, f_{cy}, \tau_{cxy}$ 는 x 및 y 방향 콘크리트면 수직응력 및 전단응력, $f_{sx}, f_{sy}, \tau_{sx}, \tau_{sy}$ 는 x 및 y 방향 철근요소의 수직응력 및 전단응력이다. 이 경우 그림 3(b)의 ECC 요소의 주응력 f_{c1}, f_{c2} 와 그림 3(c)의 모어원을 이용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$f_{cx} = f_{c1} - \tau_{cxy} / \tan \theta_c \quad (10)$$

$$f_{cy} = f_{c1} - \tau_{cxy} \cdot \tan \theta_c \quad (11)$$

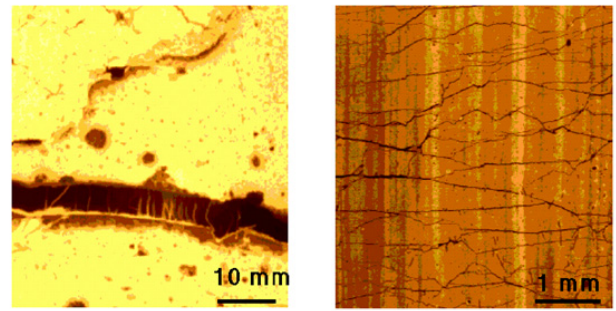
$$f_{c2} = f_{c1} - \tau_{cxy} \cdot (\tan \theta_c + 1 / \tan \theta_c) \quad (12)$$

위 관계는 수정압축장이론에서의 일반적인 콘크리트의 경우와 같이 ECC 요소의 주응력방향 θ_c 와 주변형률방향 θ 이 서로 일치한다고 가정하였다.

3. 균열을 고려한 R-ECC 패널의 구성관계

3.1 다중미세균열을 동반한 ECC의 고인성 거동

그림 4와 같이 콘크리트의 경우 인장응력이 증가하면 균열 발생 후 국부지역에서 균열폭이 급격히 증대되는 취성적인



(a) Concrete (b) ECC

그림 4 Comparison between Localized Concrete Cracking and Multiple ECC Cracking

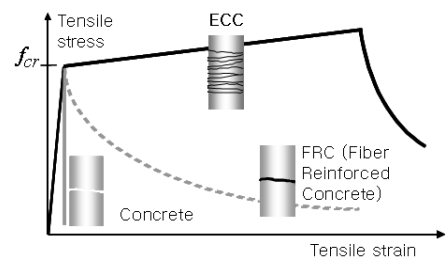


그림 5 High-Performance Strain-Hardening Behavior of ECC in Uniaxial Tension

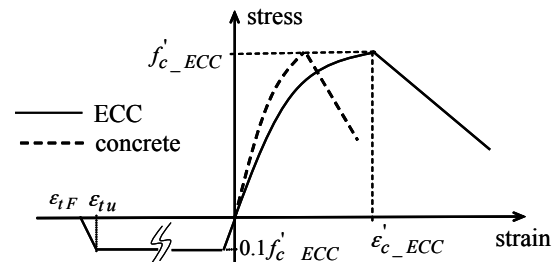


그림 6 Uniaxial Stress-Strain Behavior of ECC

거동이 나타나는 반면, ECC 재료는 인장응력이 증가하면 균열 면에 위치한 보강 섬유는 브리지 작용으로 인하여 균열이 국부적으로 진전되지 않고 미세균열에 의해 넓게 확산되는 다중미세균열 거동을 나타낸다(Kim 등, 2004; Li, 1993). 이러한 다중미세균열 거동에 의해 그림 5와 같이 ECC 재료의 인장 거동 특성은 일반 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트에 비해서 인장 균열 발생 이후에도 높은 인성을 발휘하게 되는데, 섬유재료 및 배합상태에 따라서 2% 내외의 높은 인장변형률에 도달할 때까지 인장응력이 감소되지 않고 발휘할 수 있게 된다. 그림 6과 같이 최대압축응력에 대응하는 압축변형률 역시 일반 콘크리트 보다 높은 0.4% 내외의 변형률 값을 갖는 특징이 있다(Kim 등, 2004; Li, 1993).

이 연구에서는 2축응력 면내전단거동 모델을 제안하기 위하여 1축응력 하에서 다중 미세균열을 동반한 ECC의 고인

성 거동 특성 외에도 균열이 발생 ECC의 압축 연화현상과 균열 면에서 전단전달거동 특성에 대하여도 고려한다.

3.2 균열발생 ECC의 압축연화모델

Vecchio(1992)에 의하면, 일반콘크리트의 경우에 그림 7(a)와 같이 압축력에 직각방향으로 높은 인장변형률을 받고 있는 균열 콘크리트는 일축압축강도에 비해 압축강도가 감소하는 압축연화거동을 나타낸다.

그림 7(b)와 같이 ECC도 압축연화거동을 나타내지만 콘크리트와는 크게 차이가 있는 것으로 실험 결과 알려졌다 (Fukuyama 등, 2003). 그림 8은 기존 콘크리트와 ECC 재료에 대한 인장변형률 ϵ_1 의 증가에 따른 압축강도 실험으로부터 압축연화계수 β_{ECC} 관계의 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 ECC의 압축연화효과는 Vecchio 등(1986)이 제시한 콘크리트 압축연화효과와는 크게 다르므로, 이 연구에서는 ECC의 압축연화효과에 대한 실험 결과로부터 ECC 재료의 압축연화계수를 다음 식 (13)과 같이 제안하였다. 제안된 식에 의하여 예측된 값과 실험값을 콘크리트의 경우와 함께 비교하여 그림 8에 도시하였다.

$$\beta_{ECC} = \frac{1.0}{0.68 + 0.45 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon'_c} + 0.13 \right)^{0.36}} \leq 1.0 \quad (13)$$

여기서, ϵ'_c 는 1축압축강도에 대응하는 압축변형률이다.

따라서, 그림 9에서 처럼 압축연화효과를 고려하지 않은

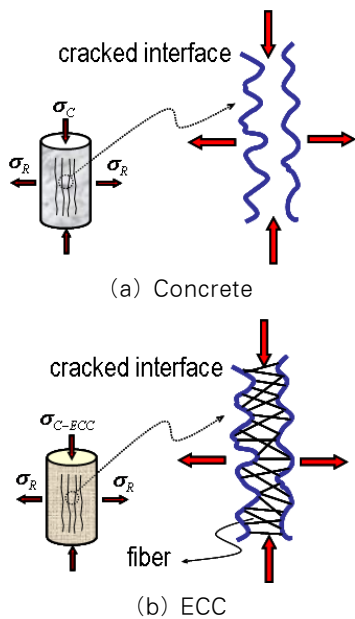


그림 7 Axial Compression under Lateral Cracks

ECC의 1축압축강도 f'_{cECC} 및 이에 대응하는 1축압축변형률 ϵ'_{cECC} 에 대해 균열에 의한 압축연화효과를 고려한 경우 ECC 재료의 최대압축응력과 이에 대응하는 압축변형률은 각각 다음 식 (14)와 식 (15)로 정의된다.

$$f_p = \beta_{ECC} \cdot f'_{cECC} \quad (14)$$

$$\epsilon_p = \beta_{ECC} \cdot \epsilon'_{cECC} \quad (15)$$

이 식들로부터 압축상태에서의 ECC 재료의 응력 및 변형률 관계는 최대응력점을 기준으로 다음과 같이 고려하였다.

a) 최대 압축응력 이전의 상태 ($\epsilon_2 < \epsilon_p$)

$$f_{c2} = f_p \cdot \left[2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_p} \right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_p} \right)^2 \right] \quad (16)$$

b) 최대 압축응력 이후의 상태 ($\epsilon_2 \geq \epsilon_p$)

$$f_{c2} = f_p + \frac{f_u - f_p}{\epsilon_u - \epsilon_p} \epsilon_2 \quad (17)$$

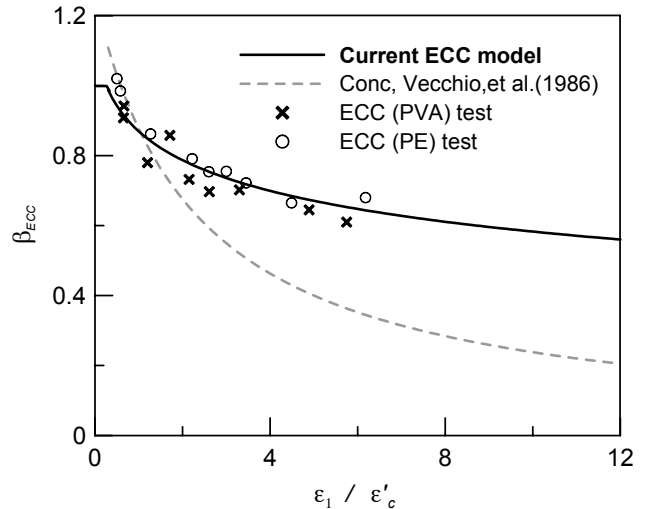


그림 8 Reduction Factor of Compressive Strength of ECC(Cho 등, 2008)

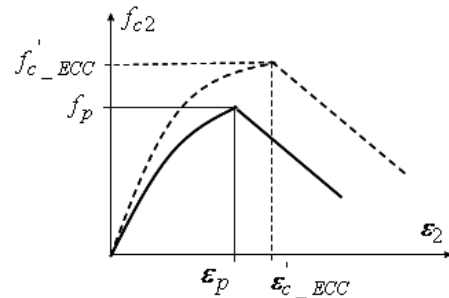


그림 9 Compressive Softening of ECC after Peak Stress

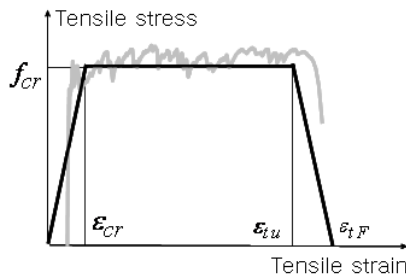


그림 10 Tensile Stress-Strain Curve of ECC

3.3 ECC 재료의 균열 후 고인성 거동 모델

일반콘크리트의 경우, 평균 주인장 응력과 평균 주인장 변형률 사이의 관계는 균열 전에는 거의 선형이며, 균열 이후에는 인장변형률의 증가에 따라 인장응력이 급격히 감소한다. 반면, ECC는 균열이 발생한 후에도 다중미세균열 특성이 나타나는 고인성의 인장거동 특성을 나타낸다(그림 5). 이러한 ECC의 특성을 반영하기 위하여 이 연구에서는 1축 인장 하에서 그림 10과 같은 응력-변형률 관계를 적용하였다. 균열강도 이후 인장응력이 바로 감소되지 않고 대략 2% 내외의 인장변형률에 도달될 때 까지 인장강도를 유지하다가 2%이상에 도달한 후 응력이 선형으로 감소하는 형태를 고려하였다. 이 모델은 다음의 식 (18), 식 (19), 식 (20)과 같이 표현된다.

a) 균열발생 이전의 상태($\epsilon_1 \leq \epsilon_{cr}$) :

$$f_{cl} = E_c \cdot \epsilon_1 \tag{18}$$

b) 균열발생 이후의 상태($\epsilon_{cr} \leq \epsilon_1 < \epsilon_{tu}$) :

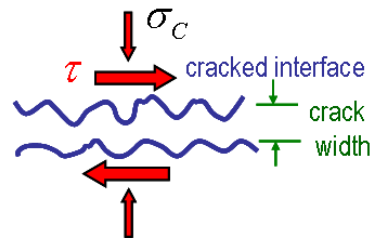
$$f_{cl} = f_{cr} \tag{19}$$

c) 균열발생 이후의 상태($\epsilon_{tu} \leq \epsilon_1 < \epsilon_{tF}$) :

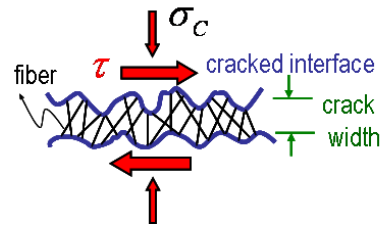
$$f_{cl} = f_{cr} - \frac{f_{cr}}{\epsilon_{tF} - \epsilon_{tu}} (\epsilon_1 - \epsilon_{tu}) \tag{20}$$

3.4 ECC 균열면의 전단전달 모델

기존의 연구 결과(Vecchio 등, 1986; Walraven, 1981)에 따르면, 균열이 발생한 콘크리트의 균열면에서는 어느 정도의 전단전달능력이 있는 것으로 알려졌다. 그림 11(a)와 같이 압축응력을 받는 콘크리트의 균열 표면에서도 골재맞물림 등에 의하여 전단응력의 일부를 전달할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 일반 콘크리트의 경우, 균열 면의 전단응력 τ_{ci} 에 대한 균열폭 w 와 균열면에 수직으로 작용하는 압축응력 f_{ci}



(a) Shear in Cracked Concrete



(b) Shear in Cracked ECC

그림 11 Shear Transfer in Cracked Interface

간의 관계가 실험적으로 연구되어 왔는데, 압축응력과 균열면의 전단응력의 관계는 골재 맞물림 등과 같이 골재의 영향이 주된 요인인 것으로 판명되었다. 하지만, 그림 11(b)와 같이, ECC의 경우, 균열면의 전단전달능력이 균열면에 위치한 골재의 영향보다는 혼입된 섬유역의 역할이 주된 요인일 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 ECC 재료의 균열면에서의 전단전달능력을 고려하기 위하여 균열면에 수직으로 작용하는 압축응력에 대한 함수로서 골재맞물림 효과 및 섬유의 분포특성을 반영한 균열면의 전단전달에 관한 매개변수 a_{c1}, a_{c2}, a_{c3} 의 실험 매개변수를 고려하여 다음 식과 같이 제시하였다.

$$\tau_{ci} = a_{c1} \tau_{ci \max} + a_{c2} f_{ci} + a_{c3} \frac{f_{ci}^2}{\tau_{ci \max}} \tag{21}$$

여기서, ECC 재료 균열면에서의 최대전단응력은 골재의 최대치수 a , 균열폭 w , 그리고 ECC 재료의 최대전단강도에 관한 매개변수 α_{s1} 에 의해 다음 식과 같이 정식화하였다.

$$\tau_{ci \max} = \frac{\alpha_{s1} \sqrt{-f'_{cECC}}}{0.31 + 24w/(a+16)} \tag{22}$$

위 식에서 w 는 주인장변형률 ϵ_1 과 균열간격 s_θ 의 곱에 의해 얻어질 수 있다.

$$w = \epsilon_1 \cdot s_\theta \tag{23}$$

$$s_{\theta} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{s_{mx}} + \frac{\cos\theta}{s_{my}}} \quad (24)$$

여기서, s_{mx}, s_{my} 는 각각 x 및 y 방향 보강근에 따른 균열 제어 특성값이다.

4. R-ECC 패널의 면내전단거동 예측모델

ECC의 면내전단거동과 관련된 구성관계의 정식화를 앞장에서 제시하였다. R-ECC 패널을 구성하는 또 하나의 요소인 철근의 경우, 축방향 응력이 철근의 축방향 변형률에만 의존하며, 철근에 수직인 평면에 작용하는 평균전단응력은 0으로 가정하는 것이 일반적이다. 따라서 철근의 인장 및 압축 축에서의 응력-변형률 관계는 그림 12와 같이 고려하여, 항복이후 완전소성 거동을 하다가 일정 변형률 증가 후에는 변형률 경화 거동을 하는 것으로 가정하였다.

이상과 같이 앞 장들에서 소개된 면내요소에 대한 적합조건과 평형조건, ECC 면내요소의 균열에 따른 거동특성을 반영한 구성관계, 그리고 철근의 재료특성을 함께 고려하여, R-ECC 면내요소에 대한 2차원 면내 전단거동 예측모델을 제시하였다. 전체적인 면내 전단거동 예측 알고리즘은 수정 압축장이론에 근거한 기존 철근콘크리트 면내요소의 철차에 기초하고 있으며 (Vecchio 등, 1986), 본 연구에서 제시한 ECC 면내요소들의 다중미세균열거동에 따른 3가지 구성관

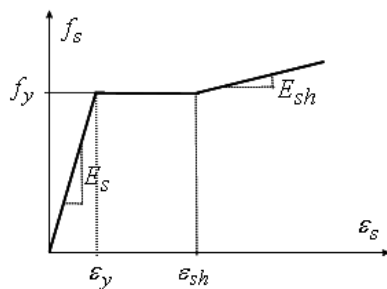


그림 12 Stress-Strain Curve of Steel Bars

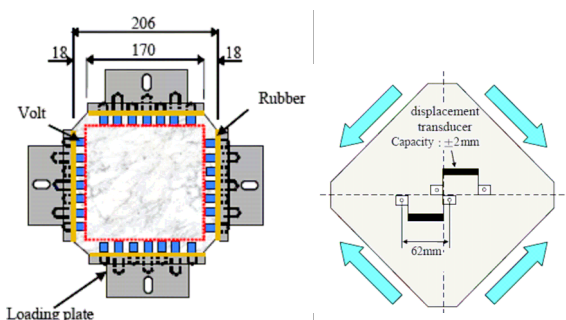
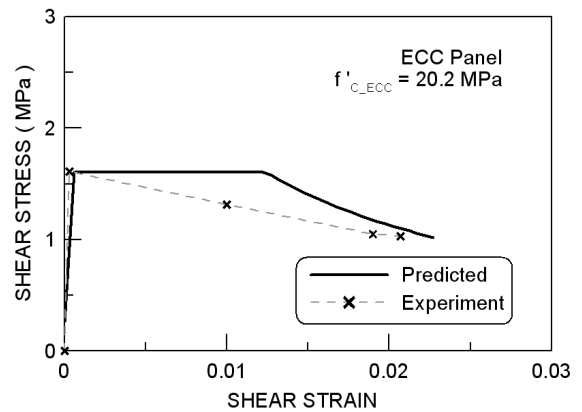


그림 13 Specimen Geometry Employed for Pure Shear Test (Hisabe 등, 2005)

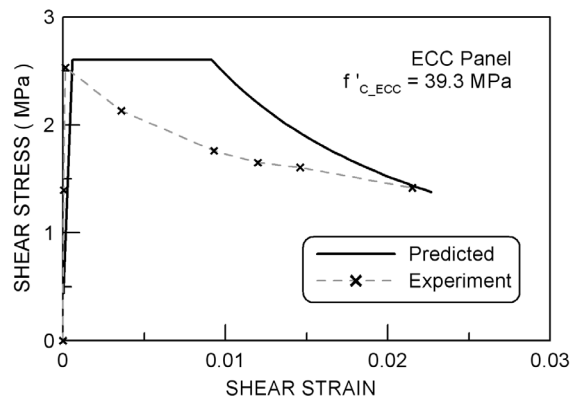
계 특성을 새롭게 정식화하여 R-ECC 패널에 대한 R-ECC-MCFT 방법을 제시하였다.

5. R-ECC 패널의 면내전단거동 해석 예

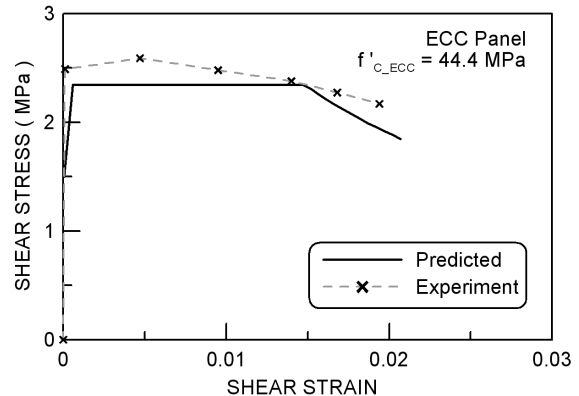
앞 장들에서 제시된 R-ECC-MCFT 면내 전단거동 예측 모델의 알고리즘 및 프로그램을 적용하여 ECC 패널에 대한 면내전단거동 실험결과와 비교·분석하였다. 대상 실험은 철



(a) Compressive Strength 20.2MPa

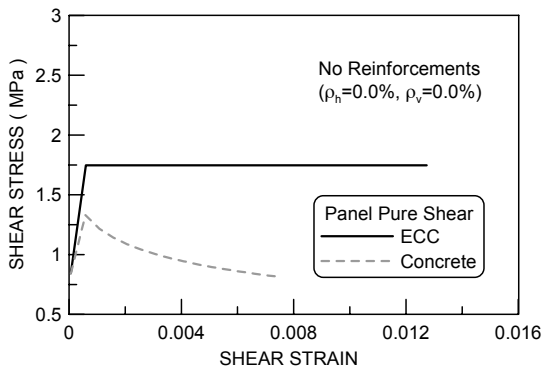


(b) Compressive Strength 39.3MPa

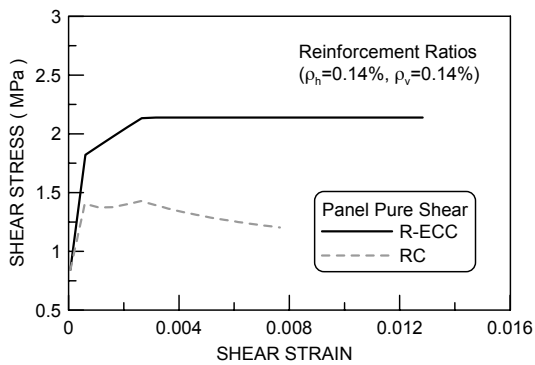


(c) Compressive Strength 44.4MPa

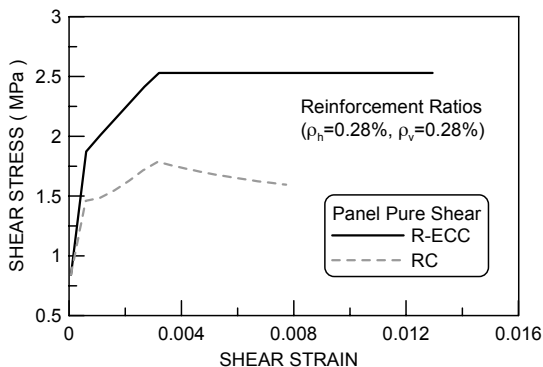
그림 14 Comparison of Pure Shear Behavior between Experimental and Predicted Analysis (1.0% fiber)



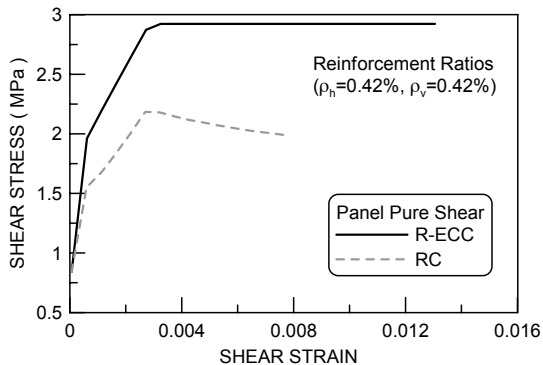
(a) No Reinforcement



(b) Reinforcement Ratio of 0.14 %



(c) Reinforcement Ratio of 0.28 %



(d) Reinforcement Ratio of 0.42 %

그림 15 Predicted Pure Shear varying with Reinforcement Ratios(1.0% fiber)

근이 보강되지 않은 시험체로서 일반적인 면내 순수전단 실험을 수행한 것이다(Hisabe 등, 2005).

대상 실험체의 강도 변수는 물시멘트비 및 배합조건에 따라서 1축압축강도가 각각 20.2MPa, 39.3MPa, 그리고 44.4MPa이다. 그림 13과 같이 제작된 순수전단 실험체의 치수는 206mm×206mm×100mm이다. 균열 면에서 전단전달능력과 관련한 실험 변수들은 선행 실험결과에 기초하여(Kim 등, 2007; Walranven, 1981), 매개변수 α_{gt} 와 a_{c1} , a_{c2} , a_{c3} 는 각각 1.15, 0.18, 1.64, 그리고 -0.82로 고려하였다.

개발된 R-ECC-MCFT 모델에 의한 대상 시험체의 면내 전단거동에 대한 해석을 수행한 결과를 시험체의 압축강도가 20.2MPa, 39.3MPa, 그리고 44.4MPa에 대하여 각각의 실험결과와 비교하여 그림 14에 나타내었다. 제안 모델은 최대전단응력의 예측에서 실험결과와 비교적 잘 일치하였는데, 특히 압축강도 20.2MPa 및 39.3MPa의 경우는 해석 결과가 최대전단응력의 실험값을 거의 일치하는 값으로 예측하였다. 최대전단응력 이후에는 전단변형률 증가에 따라 전단응력이 감소하는 경향은 실험결과에 비하여 해석결과가 보다 완만하게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 전단변형률이 증가함에 따라 해석값이 점차로 실험값에 근접하게 예측되는 경향을 나타내었다.

1축압축강도가 20.2MPa인 ECC 면내요소와 비교하기 위하여 순수전단거동을 하는 동일 압축강도의 콘크리트 RC 면내요소와 비교 해석을 수행하였다. RC 면내요소는 기존의 수정압축장이론에 기초하고 있다. 수직 및 수평 방향 철근비로서 각각, 0, 0.14%, 0.28%, 그리고 0.42% 인 경우를 고려하여 RC 면내요소와 R-ECC 면내요소에 대한 순수전단 거동을 비교·검토하였다. 각각의 수직 및 수평 철근비 변화에 따른 RC 및 R-ECC 요소의 순수전단거동을 예측한 해석의 결과를 그림 15에 나타내었다.

그림 15에서 비교한 바와 같이, R-ECC 면내요소의 순수 전단거동은 모든 철근비에서 RC 요소에 비하여 높은 최대전단강도를 갖는 것으로 평가되었다. 최대전단응력에 도달한 후에 전단변형률이 증가함에 따라 RC 요소의 전단응력이 급격하게 감소하는 것으로 나타났으나, R-ECC 요소의 경우는 전단변형률이 증가하여도 최대전단강도에 대응하는 전단응력을 지속적으로 유지하는 것으로 평가되었다. 철근비 증가에 따른 전단강도 증가 경향은 RC 요소 및 R-ECC 요소 모두에서 두드러지게 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 철근 보강된 ECC 면내요소에 대한 2축

력상태에서의 면내전단거동에 관한 예측 모델을 제시하였다. 기존 RC 면내전단거동 모델과 비교하여 본 연구는 새롭게 ECC 요소의 복수미세균열 특성과 그로 인한 고인성 인장균열 거동, 균열 상태에서 나타나는 압축연화거동, 그리고 균열면에서의 전단전달거동 특성 등을 모델에 반영하여 R-ECC-MCFT 모델을 개발하였다.

압축강도가 20.2MPa, 39.3MPa, 그리고 44.4MPa이고 각각 1%의 강섬유가 혼입된 ECC 패널의 순수전단 시험체의 실험에 대해 해석을 수행한 결과 최대전단응력 예측값이 각각 0.4%, 1.2%, 및 8.9% 정도의 오차를 보였고, 최대전단응력 이후에는 전단변형률 증가에 따른 전단응력 감소는 실험에 비해 비교적 완만하게 나타났으나 전단변형률이 증가함에 따라 점차로 실험값에 근접한 예측의 경향을 보였다.

동일조건 RC 면내요소와 비교하여 R-ECC 면내요소의 순수전단거동을 예측한 결과 철근비가 0%, 0.14%, 0.28%, 및 0.42%인 경우 최대전단력이 각각 25%, 50%, 43%, 및 32%씩 상회하였으며, 최대전단응력 이후 전단변형률 증가에 따른 전단응력 저하 현상도 격감하여 RC 요소에 비해 R-ECC 요소는 면내전단강도 및 면내전단변형능력 확보에도 우수한 것으로 평가되었다.

향후에는 ECC 요소에 대한 면내전단거동의 실험 데이터 확보, 적용되는 섬유의 종류 및 특성에 따른 효과, 인장 및 압축 거동에 미치는 변수, 반복하중 등에 관한 다양한 실험 및 검토를 통하여 이 연구에서 제시한 예측 모델이 개선·확장될 수 있도록 추가 연구를 수행하여야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김윤용 (2003) 습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능, 한국콘크리트학회 논문집, 15(3), pp.462~469.

김윤용, 박연동 (2004) 거더교의 슬래브 연속화를 위하여 도입한 ECC 연결슬래브의 설계개념 및 적용방안, 대한토목학회 논문집, 24(6A), pp.1151~1158.

김윤용, 조창근, 하기주, 배수호 (2006) 고성능 섬유복합재료 HPRCC의 개발전략, 콘크리트학회지, 18(3), pp.82~86.

조창근 (2004) FRP 콘크리트 복합구조 부재시스템의 휨 및 전단 거동예측, 대한건축학회 구조계 논문집, 20(8), pp.35~42.

Cho, C.G., Ha, G.J., Kim, Y.Y. (2008) Nonlinear Model of Reinforced Concrete Frames Retrofitted by In-Filled HPRCC Walls, *Structural Engineering and Mechanics*, 30(2), pp.211~223.

Cho, C.G., Kwon, M. (2004) Development and Modeling of Frictional Wall Damper and Its

Applications in R/C Frame Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(7), pp.821~838.

Cho, C.G., Kwon, M. (2008) Prediction of Nonlinear Bending Behavior for FRP Concrete Beams Based on Multi-Axial Constitutive Laws, *Engineering Structures*, 30, pp.2311~2320.

Cho, C.G., Kwon, M., Spacone, E. (2005) Analytical Model of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes based on Multi-axial Constitutive Laws, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131(9), pp.1426~1433.

Fukuyama, H., Suwada, H. (2003) Basic Test on Compressive Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(Part 2 Biaxial Loading Test), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, *Architectural Institute of Japan*, pp.421~422.

Hakuto, S., Ozawa, J., Watanabe, K., Nakamura, H. (2001) Test on structural walls using fiber reinforced cement composite, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ*, C-2, pp.53~54(in Japanese).

Hisabe, N., Yoshitake, I., Tanaka, H., Hamada, S. (2005) Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Concrete Element Subjected to Pure Shearing Stress, *Int. Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, pp.1~7.

Kim, J.K., Kim, J.S., Ha, G.J., Kim, Y.Y. (2007) Tensile and fiber Dispersion Performance of ECC (Engineered Cementitious Composite) Produced with Slag Particles, *Cement and Concrete Res.*, 37(7), pp.1096~1105.

Kim, Y.Y., Fischer, G., Li, V.C. (2004) Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composite(ECC), *ACI Structural Journal*, 101(6), pp.792~801.

Kim, Y.Y., Kim, J.S., Kim, J.K. (2007) Diverse Constructability of ECC Designed with Ground Granulated Blast Furnace Slag, *International J. of Concrete Structures and Materials*, 1(1), pp.11~19.

Kim, Y.Y., Kim, J.S., Ha, G.J., Kim, J.K. (2005) Influence of ECC Ductility on the Diagonal Tension Behavior(Shear Capacity) of Infill Panels, *Int. Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*.

- Li, V.C.** (1992) Post-Crack Scaling Relations for Fiber Reinforced Cementitious Composites, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(1), pp.41~57.
- Li, V.C.** (1993) From Micromechanics to Structural Engineering-The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE*, 10(2), pp.37~48.
- Mikame, A., Fukuyama, H., Suwada, G., Satoh, Y.** (1998) Study on ductile cement composite for structural elements(Part III Shear test of structural walls), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of AIJ, C-2, pp.935~936(in Japanese).
- Nagai, S., Kanda, T., Maruta, M., Miyashita, T.** (2002) Shear Capacity of Ductile Wall with High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, Proceedings of the 1st fib Congress, pp.767~774.
- Vecchio, F.J., Collins, M.P.** (1986) The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, 83(2), pp.219~231.
- Vecchio, F.J., Emara, M.B.** (1992) Shear Deformations in Reinforced Concrete Frames, *ACI Journal*, 89(1), pp.46~56.
- Walraven, J.C.** (1981) Fundamental Analysis of Aggregate Interlock, Proceedings, *ASCE*, 107(ST11), pp.2245~2270.