

## 습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능

김윤용 <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 미시간대학 토목환경공학과

(2003년 2월 24일 원고접수, 2003년 5월 22일 심사완료)

## Mechanical and Repair Performance of Sprayed Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite(ECC)

Yun Yong Kim <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 48109, USA

(Received February 24, 2003, Accepted May 22, 2003)

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the potential durability enhancement of infrastructures repaired by a sprayed high ductile fiber-reinforced cementitious composite (ECC). For this study, a PVA-ECC which exhibits sprayable properties in the fresh state and tensile strain-hardening behavior in hardened state was sprayed and tested. The experimental results show that the sprayed ECC exhibits mechanical properties with strain capacity comparable to the cast ECC with the same mix design. During loading, the crack widths of ECC are tightly controlled with an average of  $30\mu\text{m}$ . It is also revealed that when sprayed ECC is used as a repair material, ductility represented by deformation capacity at peak load of repaired beams in flexure are obviously increased in comparison to those of commercial prepackaged mortar (PM) repaired beams. In addition to high delamination resistance, the significant enhancement of energy absorption capacity and crack width control in ECC repair system suggest that sprayed ECC can be effective in extending the service life of rehabilitated infrastructures.

**Keywords :** *sprayed ECC, concrete repair, tensile strain-hardening behavior, crack width control, energy absorption capacity*

### 1. 서 론

Engineered Cementitious Composites(ECC)는 미세역학(micromechanics)을 근거로 하여 개발되는 일종의 고인성 섬유보강 모르타르이다. 미세역학은 ECC의 이론적인 수단이 되며, 이를 이용하여 최소한의 합성섬유(2% 이내)를 혼입함으로써 높은 인장변형성능과 더불어  $100\mu\text{m}$  이하의 미세한 균열폭을 나타내는 고인성의 ECC재료를 만들 수 있다. 최근 미세역학이론에 근거하여 개발된 PVA-ECC를 갖고서 신설구조물, 구조물의 보수보강, 프리캐스트부재 등으로 적용범위를 확대하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1,2)</sup>. ECC를 보수보강재로 활용하는 방안은 Li 등<sup>3,4)</sup>에 의하여 이미 제안된 바 있다. 기존의 연구결과에 따르면 ECC의 고인성 및 균열제어 특성에 의하여 보수보강

된 구조물의 연성 및 내구성이 현저히 개선되는 것으로 나타났다.

기존의 섬유보강 콘크리트(FRC)도 다량의 섬유를 혼입할 경우(체적비 4%~10%), 인장변형경화로 대별되는 고인성의 특성이 나타난다. 그러나, 섬유의 혼입량이 높아질 경우, 섬유에 의하여 작업성이 저하되기 때문에 일반적인 타설법에 의하여 재료를 제작하는 것이 거의 불가능하다. 스프레이공정에 의하여 FRC를 타설할 경우, 굳지 않은 재료가 펌프와 호스를 통하여 노즐로 이동되어야 한다. 이 때에 섬유를 과다하게 혼입할 경우, 섬유와 매트릭스 간의 내부마찰이 상승하여 펌핑성이 급격히 저하된다. 따라서 일반적인 타설법에서의 작업성 뿐만 아니라 스프레이 공정에서의 펌핑성을 고려하여 보면, 현장에서 기존의 고인성 FRC를 타설하기는 거의 불가능하다. 배합재료에 따라 차이는 있지만, 일반적으로 상용중인 섬유를 1% 이상 혼입할 경우 스프레이 펌핑성에 문제가 야기되는 것으로 알려져 있다.

\* Corresponding author

Tel: +1-734-763-6832 Fax: +1-734-764-4292  
E-mail : kim\_yunyong@hotmail.com

이러한 고인성 FRC의 단점을 극복하기 위하여 김윤용 등<sup>5)</sup>에 의하여 스프레이용 고인성 ECC가 개발되었다. 개발된 ECC는 굳기 전에 습식스프레이에 적합한 펌핑성, 점착성 등을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 인장변형경화, 제어된 균열폭 및 고인성의 특성을 나타내었다. 1회의 스프레이 공정에 의하여 타설할 수 있는 최대두께는 수직면과 천장수평면에 대하여 각각 45 mm와 25 mm이었다.

개발된 ECC는 습식스프레이에 적용하게 되는데, 습식 공정은 일반 타설법 또는 건식공정과 비교하였을 때 여러 가지의 장점을 갖고 있다. 우선 거푸집을 제작할 필요가 없고 이로 인하여 효율적인 급속시공이 가능하다. 또한 건식공정에서 나타나는 분진 등의 환경적 위해요소가 제거될 수 있다. 본 연구에서 적용한 스프레이용 ECC는 주로 교량, 암거, 터널, 지하구조물, 빌딩 등 열화된 기존구조물의 보수에 적용될 목적으로 개발되었다. 따라서 재료의 역학적 특성과 보수 이후의 구조물 성능은 보수재를 선정하는 데 있어서 매우 중요한 문제이다.

따라서, 본 연구에서는 습식스프레이 공정에 의하여 타설된 ECC의 우수한 역학적 성능을 증명하고, 보수 이후에 구조물이 갖게 될 잠재적인 내구성 향상에 관하여 검증하고자 한다. 역학적인 우수성을 평가하기 위하여 직접 인장실험과 휨인장실험을 수행하며, 그 결과가 현재 상용화 되어 있는 스프레이용 보수 모르타르(PM)의 실험결과와 비교, 검토된다. 또한 보수성능을 평가하기 위하여 2종류의 콘크리트/ECC 합성보가 스프레이 공정에 의하여 제작되며, 이 결과 또한 콘크리트/PM 합성보의 결과와 비교, 검토된다.

## 2. 스프레이용 ECC 설계

스프레이용 ECC<sup>6)</sup>는 미세역학이론과 레올로지의 제어에 의하여 개발되었다. 보강섬유로서 8mm의 PVA섬유를 사용하였고, 물-시멘트비(칼슘알루미늄 시멘트(CA) 포함) 46%와 잔골재-시멘트비(CA 포함) 80%를 인장변형경화거동을 부여할 수 있는 최적의 배합비로 결정하였다 (Table 1). 스프레이 공정단계별로 요구되는 굳기 전의 물성을 만족시키기 위하여 셀룰로즈계 분리저감제(HPMC, 0.05%)와 멜라민계 고성능감수제(SP, 0.75%)를 혼화제로, CA(5%)를 혼화제로 각각 첨가하였다. 또한 초기 반응성이 낮고 시멘트 입자와 크기가 유사한 플라이애쉬(FA)를 시멘트량의 30% 첨가하였다.

Table 1 Mix proportion of sprayable ECC

C	W	S	FA	HPMC	SP	CA	Fiber (in volume)
0.95	0.46	0.80	0.30	0.0005	0.0075	0.05	0.02

(C: cement, W: water and S: silica sand)

## 3. 실험방법

### 3.1 사용재료

ECC의 보강섬유로는 미세역학에 의거하여 제작된 PVA섬유가 사용되었다. 제1종 보통포틀랜드 시멘트(평균 입도=11.7±14.8 μm)와 함께 플라이애쉬(평균입도=26.9±6.8 μm)가 주 결합재로 사용되었고, 잔골재로는 평균입도 110 μm의 실리카 골재를 사용하였다. HPMC, SP, CA(평균입도=5.5±1.5 μm) 등이 혼화제로 첨가되었다.

개발된 스프레이용 ECC와의 비교를 위하여 2가지 종류의 보수용 스프레이 모르타르를 도입하였다. 현재 다양한 부류의 보수용 모르타르가 상용화 되어있는데, 그 중에서도 가장 널리 이용되고 있는 것이 제1종 보통포틀랜드 시멘트를 기본재료로 하는 부류이다<sup>6)</sup>. 본 연구에서 사용한 2가지 스프레이 모르타르도 이 부류에 속하는 것으로서 현재 미주지역에서 널리 사용되고 있는 제품이다. PM-1은 폴리머가 첨가된 보수용 스프레이 모르타르이고 PM-2는 약 20 mm길이의 폴리프로필렌 섬유가 혼입되어 있고 실리카폼이 첨가된 보수용 스프레이 모르타르이다.

### 3.2 시험체 제작

#### 3.2.1 스프레이 공정

40리터 용량의 드럼믹서에서 배합된 ECC는 나선형 동력펌프(spiral pump)에 의하여 25 mm 호스를 거쳐 노즐로 운송된다. 재료가 노즐에 이르면, 700 kPa의 공기압으로 분사되어 타설면으로 스프레이 된다. 스프레이 실험중에 펌핑압을 측정하여 펌프 제조회사에서 규정한 최대압력 이상의 과압력(4 MPa 이상)이 발생하면 스프레이 공정을 중지하도록 하였다. 본 연구에서 사용된 펌프는 최대직경 3 mm이하의 액상재료 및 모르타르의 펌핑에 적합한 제품이다.

#### 3.2.2 시험체 형상

수직으로 위치한 나무상자안에 스프레이 타설된 ECC 패널을 다이아몬드 톱으로 재단하는 방법으로 시험체를 제작하였다. 인장시험체의 경우 305 mm×300 mm×13 mm 크기의 패널을 305 mm×76 mm×13 mm의 크기로 재단하여 제작되었다. 한편, 휨시험체는 356 mm×356 mm×51 mm 크기의 패널을 356 mm×76 mm×51 mm의 크기로 재단하는 방법으로 제작하였다. 모든 패널은 타설된지 24시간만에 탈형하여 실험전까지 양생하였다. 상용 모르타르 패널도 ECC와 동일한 방법으로 제작되었으나, PM-2 패널을 타설하는 동안 과도한 펌프압이 발생하여 타설이 중지되었다. 따라서 PM-2 패널은 일반적인 타설법에 의하여 제작되었다. 모든 패널은 타설이후 5일만에 시험체로

제단되었다. 또한, 상이한 시공법이 ECC의 역학적 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 ECC 인장 및 휨시험체를 일반적인 타설법에 의하여 제작되었다. 이 시험체의 형상 및 배합비는 스프레이용 ECC와 동일하였다.

보수성을 평가하기 위하여 제작된 2종류의 콘크리트/보수재 합성패널은 356 mm×356 mm×25.5 mm 크기의 구콘크리트 패널을 미리 담아 둔 356 mm×356 mm×51 mm의 몰드에 스프레이 타설되었다(Fig.1). Fig.1에서 Type B와 같이 구콘크리트/보수재의 경계면과 구콘크리트에 초기균열을 포함하고 있는 패널을 제작할 때에는 2개의 356 mm×178 mm×25.5 mm 크기의 구콘크리트 패널을 나무몰드에 담고 51 mm 폭의 표면을 플라스틱 테이프로 감아 초기 경계면 균열을 형성하였다.

모든 패널은 스프레이에 의하여 보수재가 타설된지 24 시간만에 탈형하여 실험전까지 양생하였고, 재령 5일에 356 mm×76 mm×51 mm 크기의 합성보 시험체로 제단되었다. 다이아몬드 톱에 의하여 수직방향으로 제단(Fig.1의 점선)되었으며, 그 폭은 Fig.1에 나타난 바와 같이 합성보의 폭과 동일한 76 mm이다.

### 3.2.3 구콘크리트의 표면처리

본 연구에서는 제1종 보통포틀랜드 시멘트를 결합재로 하고, 골재로는 강모래와 최대골재크기 10 mm의 부순자갈을 배합하여 구콘크리트 패널을 제작하였다. 구콘크리트는 스프레이 타설 약 28일전에 제작되었으며, 휨실험시(재령 56일)의 압축강도는  $42.83 \pm 1.90$  MPa로 측정되었다. 일반적으로 기존 구조물의 보수시에는 이미 열화된 콘크리트 부위를 치핑 등으로 제거한 후 철근과 구콘크리트의 표면을 샌드 블라스트로 처리한다. 본 연구에서는 현장에서의

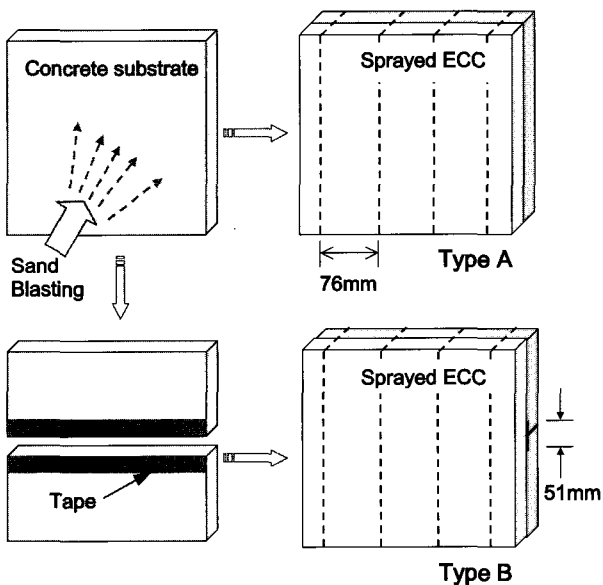


Fig. 1 Composite panels produced by spray process

조건과 유사한 표면조건을 만들기 위하여 구콘크리트 패널을 타설할 때에 표면의 마감을 거칠게 하고, Fig. 1에 도시한 바와 같이 재령 28일경에는 샌드 블라스트를 하였다.

### 3.3 굳은 후의 ECC의 비중실험

스프레이 공정에 의하여 제작된 ECC의 품질을 평가하기 위하여 스프레이된 ECC패널에서 채취된 입방체 시편(약 40 mm×50 mm×50 mm)의 비중을 측정하였다. 시편을 제단할 때에는 스프레이 표면과 몰드에 접한 부분의 영향을 없애기 위하여 패널의 내부에서 시편을 채취하였다.

또한 동일한 크기의 시험체가 일반적인 타설법에 의하여 제작되어 스프레이된 시편과 비교, 검토되었다. 모든 시험체는 시험직전까지 수조에서 보관되어 완전포화상태를 유지하고 있었으며, 재령 28일에 실험을 수행하였다. 실험 직전에 표면에 묻은 수분을 제거한 후, 공기 중에서의 중량과 수중에서의 중량을 각각 측정하였다. 공기 중으로 내부의 수분이 증발하는 것을 방지하기 위하여 수조에서 시험체를 꺼낸 이후 측정까지의 소요시간이 1분을 초과하지 않도록 하였다. 이와 같이 측정된 값을 토대로 비중이 계산되었는데, 이 때에 물의 비중은 1.0으로 가정되었다.

### 3.4 직접인장 및 휨실험

스프레이 공정에 의하여 제작된 ECC의 역학적 특성을 평가하기 위하여 스프레이된 패널에서 제단된 시편과 타설에 의하여 제작된 시험체에 대하여 직접인장과 휨실험을 수행하였다. 직접인장실험은 MTS 810 실험기에서 변위제어에 의하여 수행되었고 2개의 LVDT가 시험체의 양측에 부착되어 180 mm의 계측길이에 대한 변위를 측정된 후, 변형률로 환산되었다. 재령 28일에 실험이 수행되었고, 응력-변형률 관계와 함께 균열강도, 인장강도, 극한변형률(인장변형능력) 등이 측정되었다.

휨실험은 4점휨의 조건으로 재령 28일에 수행되었으며, 실험의 결과 하중-처짐곡선과 함께 휨강도, 보 중앙점에서의 극한처짐 등이 측정되었다. 스프레이용 ECC가 현장에 타설되었을 경우, 타설면의 상부가 부재 내에서 인장연단 또는 압축연단에 놓이게 된다. 이러한 상반되는 하중조건을 고려하기 위하여 Fig. 2에서 도시한 바와 같이 2개의 보는 타설면의 상부가 인장측에 놓이도록 하였고, 나머지 2개의 보는 하중방향을 반대로 두어 타설면의 상부가 압축측이 되도록 실험을 수행하였다. PM보와 일반적인 타설법에 의하여 제작된 ECC보를 추가로 실험하여 스프레이 공정에 의하여 제작된 보의 휨성능과 비교, 검토하였다.

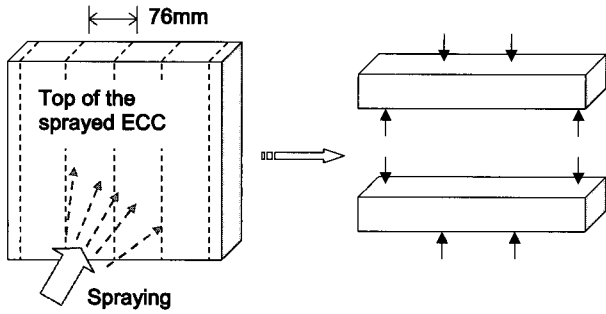


Fig. 2 Sprayed ECC panel and loading direction applied on beams sawn from ECC panel

### 3.5 구콘크리트/ECC 합성보의 휨실험

일반적으로 구조물의 보수 전에는 외부하중, 동결융해, 유해물질 침투, 건조수축 등에 의하여 열화되어 있는 부위를 제거하여야 한다. 그러나, 접근의 용이성에 따라 보수 부위가 제한될 수도 있다. 예를 들면, 암거 또는 터널과 같은 지하구조물의 경우 일반적으로 성토부 또는 지반과 접한 외측부를 제외하고 내측부만을 보수하게 된다. Fig. 3과 같은 암거에 환경요인에 의한 열화와 함께 상재하중과 토압에 의하여 발생한 횡방향 인장균열만을 고려한다면, 그 균열 및 열화의 패턴은 Fig. 3에 나타난 것과 같을 것으로 예상된다. 성토부와 접한 외측부를 제외하고 내측부만을 ECC로 보수한다고 가정하면, 슬래브와 벽체의 스패너중양부는 기존의 열화부위가 제거되고 ECC에 의하여 성공적으로 보수시공이 될 것이다(Fig. 3의 단면A-A). 반면, 단면B-B와 같은 경우에는 기존에 발생되었던 열화부위가 제거되지 못하기 때문에 구콘크리트의 인장균열 및 열화가 그대로 남아 있게 된다. 더욱이, 구콘크리트와 새로 타설된 ECC와의 수축거동 차이에 의하여 구콘크리트의 기존 인장균열을 시점으로 하여 구콘크리트/ECC 경계면에서 균열이 발생할 가능성이 매우 높다(Fig 3의 단면B-B).

이와 같이 상이한 보수 결과에 따른 부재의 성능을 검증하기 위하여 2종류의 구콘크리트/ECC 합성보(356mm×76mm×51mm)에 대한 휨실험을 수행하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 단면A-A에 해당되는 합성보는 성공적인 보수시공이 이루어진 단면으로서 Fig. 1의 Type A와 같은 방식으로 스프레이 타설되었다. 한편, 단면B-B에 해당되는 합성보는 구콘크리트와 경계면에 초기균열을 갖고 있는 경우로서 Fig. 1의 Type B에 해당된다. ECC를 이용한 콘크리트 구조물의 보수성능을 평가한 기존의 연구결과<sup>3,4)</sup>에 따라, 51mm가 초기 경계면 균열길이로서 적절한 것으로 판단하여 이를 도입하였다. 합성보에 대한 휨실험은 4점휨의 조건으로 재령 28일에 수행되었다. 실제 구조물에서는 B-B 단면 상부에 위치한 부모멘트 철근이 부식 이후에도 어느 정도의 인장력을 저항하지만, 본 연구에서는 철근이 없는 시험체의 휨거동만을 비교, 평가하였다.

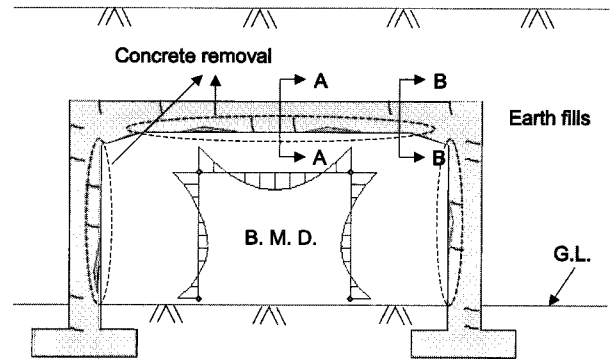
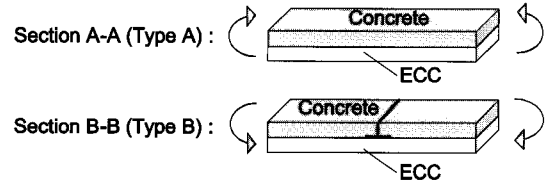


Fig. 3 Conceptual illustration of potential crack and damage pattern developed in the plane of cross section of a culvert and possible loading on composite members after repair.



## 4. 결과 및 분석

### 4.1 스프레이된 ECC의 비중

스프레이 공정이 만족스럽게 수행되었는지를 판단하기 위하여 스프레이된 ECC패널에서 채취된 4개의 입방체 시편과 일반적인 타설법에 의하여 제작된 4개의 시험체에 대하여 각각 비중을 측정하였다. 실험결과, 스프레이된 시편의 비중(2.093±0.005)이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 시험체의 비중(2.067±0.003)에 비하여 약 1.3% 정도 높게 나타났다. 스프레이 타설 시 공기압으로 ECC를 분사하기 때문에 일반 타설 중에 시행하는 진동에 비하여 다소 우수한 다짐효과를 부여하기 때문에 이같이 상대적으로 큰 비중이 측정된 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Austin 등<sup>6)</sup>에 의하여 수행된 스프레이용 상용 모르타르에 관한 연구결과에서도 나타난다. 스프레이된 시편의 비중이 일반 타설된 시험체의 비중에 비하여 유사 또는 다소 크게 나타난 점을 미루어 보아, 본 연구에서 수행된 스프레이 공정이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

### 4.2 스프레이된 ECC의 1축인장거동

ECC 고유의 특성인 인장변형경화거동에 미치는 스프레이 시공법의 영향을 살펴보고, 상용중인 스프레이 모르타르의 역학적 특성과 비교하기 위하여 직접인장실험이 수행되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 ECC와 PM의 인장 변형성능은 현저히 다르다. ECC의 극한변형률은 1.5~2.5

%인 것으로 추정되어 PM-1( $0.03 \pm 0.008\%$ )과 PM-2( $0.029 \pm 0.005\%$ )에 비하여 50~100배 큰 연성을 갖는 것으로 나타났다. 스프레이된 ECC의 균열강도와 인장강도의 평균값은 각각 3.21 MPa와 4.41 MPa로서 PM-1 (2.85 MPa) 또는 PM-2 (2.73 MPa)의 평균인장강도와 비교하여 볼 때, 약 60% 정도 높은 인장강도를 갖고 있다.

파괴형태를 보면 ECC와 PM의 차이를 더욱 뚜렷이 알 수 있다. ECC의 경우 응력이 증가하여 균열강도에 도달하면 첫 균열이 발생하고, 그 이후 다수의 미세균열이 형성(multiple cracking)되면서 인장변형을 경화거동을 나타낸다. 응력이 상승하는 변형경화구간에서는 평균  $30\mu\text{m}$  폭의 미세균열이 매우 좁은 간격으로 다수 발생한다 (Fig.5). 변형경화구간 이후, 인장강도에 도달하면 파괴면으로 변형이 집중되어 PVA섬유의 파단과 함께 응력이 감소하면서 파괴에 도달한다. ECC와는 달리, PM의 경우에는 균열강도에 도달하여 1개의 균열이 발생하고 변위의 증가에 따라 이 균열로 변형이 집중되면서 응력이 감소하는 변형연화현상을 보인다.

한편, 스프레이된 시편의 1축인장거동이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 시편체와 거의 동일하다(Fig. 4). 이는 스프레이 분사시 가해진 높은 공기압이 스프레이된 시편체에 충분한 다짐효과를 주었기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 상이한 방식으로 타설된 ECC가 일관된 1축인장거동을 보이는 것은 ECC의 스프레이 타설이 성공적으로 수행되었음을 의미하는 또 다른 결과이다.

균열폭을 미세하게 제어(평균  $30\mu\text{m}$ )하는 ECC의 특성이 구조물의 내구성을 증진시키는 효과는 콘크리트의 균열로 유해물질이 침투할 가능성을 갖고서 간접적으로 평가할 수 있다. Fig. 6은 Wang 등<sup>7)</sup>에 의하여 실험적으로 결정된 투수계수를 균열폭의 함수로 나타낸 것으로서 그림의 점선은 외삽법에 의하여 선형으로 연장한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 PVA-ECC의 균열폭( $30\sim 50\mu\text{m}$ )에 해당되는 투수계수는 약  $10^{-11}\text{m/s}$ 이다. 이 값을 콘크리트의 건조수축균열의 폭( $700\mu\text{m}$ , Li 등<sup>8)</sup>)에 해당되는 투수계수(약  $10^{-3}\text{m/s}$ )와 비교하여 보면, ECC가 약  $10^8$ 배 적은 투수성을 갖는다. 이는 ECC에서 나타나는 미세균열로 유해물질이 침투할 가능성과 양이 콘크리트에 비하여  $10^8$ 배 적다는 것을 의미한다. 따라서, 유해환경에 노출되어 있는 지하구조물, 해양구조물, 교량구조물 등의 보수에 ECC를 적용할 경우, 구조물의 내구성 향상에 크게 기여할 것으로 예상된다.

### 4.3 스프레이된 ECC의 휨거동

스프레이된 ECC의 휨성능을 평가하기 위하여 4점휨의 조건으로 실험을 수행하였다. Fig. 7의 세로축은 계측된 하중을 갖고서 보의 중앙점 인장연단에서 계산한 휨응력

을 나타내고, 가로축은 보의 중앙점에서 계측된 처짐이다. PM의 경우에는 처짐이 증가함에 따라 최고응력(휨강도)까지 응력이 증가하다가 약  $0.25\text{mm}$ 의 처짐에 이르러 급작스럽게 응력이 감소한다. 이러한 거동은 콘크리트와 같은 유사취성재료에서 흔히 나타나는 휨거동 특성이다. 반면 ECC의 경우, 휨균열강도 이후에 다수의 미세균열이 발생하면서 휨강도까지 서서히 응력이 증가하는 거동을 보이고 있다.

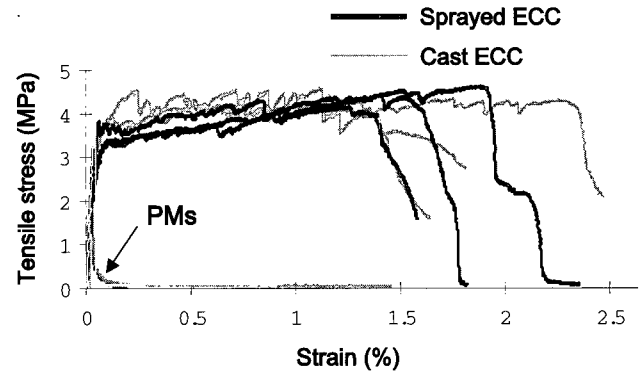


Fig. 4 Uniaxial tensile stress vs. strain curves of ECC and PMs at 28 days

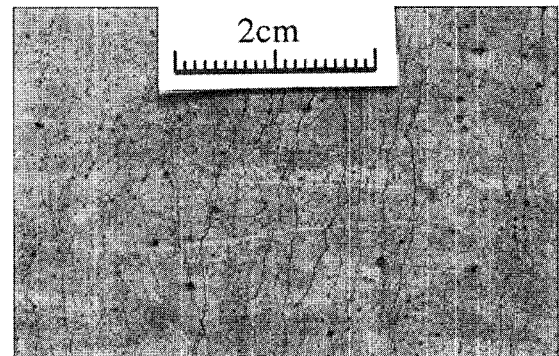


Fig. 5 Multiple microcracks developed in ECC tensile specimen

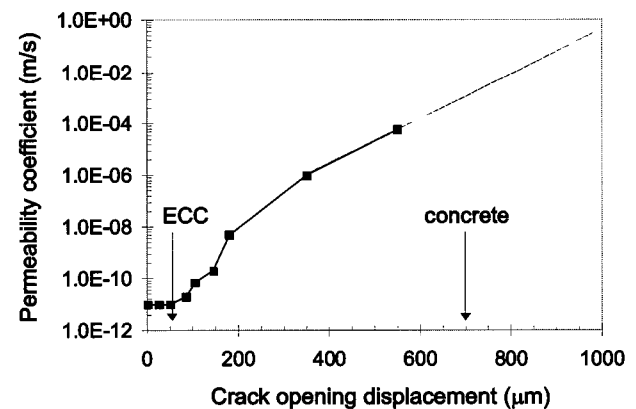


Fig. 6 Permeability coefficient as a function of crack width (adapted from Wang et al<sup>7)</sup>)

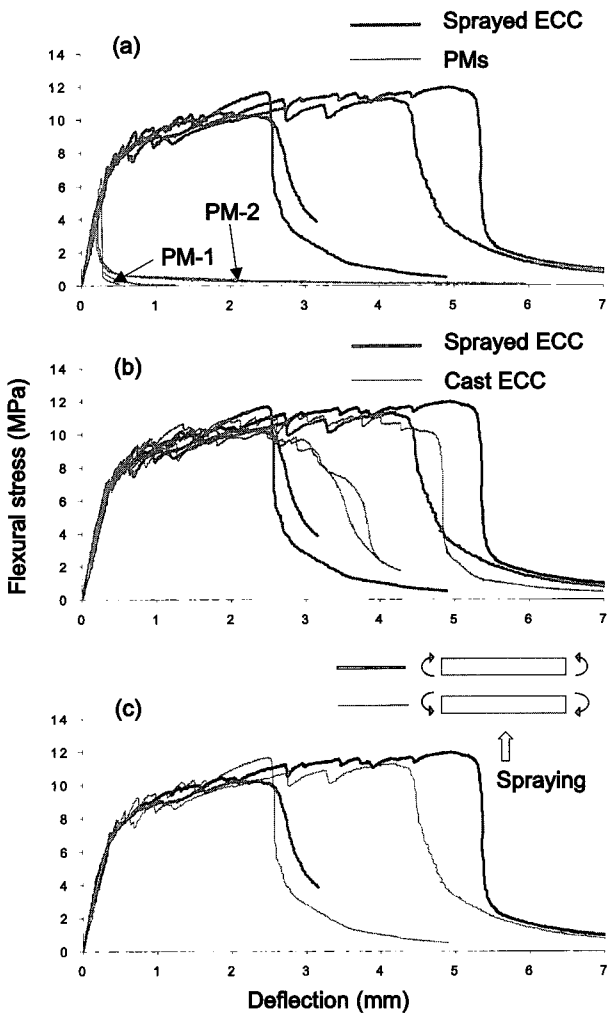


Fig. 7 Flexural stress vs. deflection curves of ECC and PMs at 28 days

Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 스프레이된 ECC보의 극한처짐(휨강도에서의 처짐)은 평균 3.65 mm이다. 그 때의 휨강도는 평균 11.12 MPa로서 PM-1( $5.70 \pm 1.15$  MPa), PM-2 ( $4.35 \pm 0.26$  MPa)와 비교하여 2배 가량 큰 값이다. 휨응력-처짐 곡선의 면적, 즉 휨인성의 차이를 보면 스프레이된 ECC가 PM에 비하여 수십배의 휨인성을 갖고 있음을 쉽게 알 수 있다. PM-2의 경우 파괴면에 분산된 폴리프로필렌 섬유가 휨균열의 열림에 저항하기 때문에 최고응력 이후의 곡선이 PM-1에 비하여 상대적으로 길다. 그러나, 연성의 증진에는 거의 기여하지 못하는 것으로 나타났다. 한편, ECC 보의 파괴형태를 살펴 보면 다음과 같다. 처짐의 증가에 따라 휨응력이 빠르게 증가하다가 휨균열강도에 이르러 첫 균열이 발생한다. 그 이후 휨응력이 서서히 증가하면서 다수의 추가 미세균열이 보 중앙부근의 인장연단에 형성된 후, 휨인장강도에 도달하면 최종 파괴면의 균열로 변형이 집중되면서 PVA섬유의 파단과 함께 응력이 감소하고 파괴에 도달한다.

완전취성재료의 경우 휨강도비(휨강도/1축인장 균열강도)가 1.0이고, 콘크리트 또는 PM과 같은 유사취성재료의 휨강도비는 1.0~3.0이다<sup>9)</sup>. 여기서 휨강도비의 상한값인 3.0은 이상적인 완전탄소성(elastic-perfectly plastic)재료가 갖고 있는 값이다. 스프레이된 ECC의 휨인장강도(11.12 MPa)를 1축인장 균열강도(3.21 MPa)로 나누었을 때, 휨강도비는 약 3.5로 계산되며, 이는 스프레이된 ECC가 인장변형경화거동을 하는 재료임을 재확인하는 결과이다. 한편, 계산된 PM의 휨강도비는 평균 1.8이었다.

Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 스프레이된 ECC의 휨거동이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 ECC와 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는 4.1, 4.2절에서 기술한 바와 마찬가지로 스프레이 타설이 성공적으로 이루어졌음을 의미한다. 또한 3.4절에서 설명한 바와 같이 상반되는 하중조건에 의하여 휨실험을 수행하였는데, Fig. 7(c)에 도시한 바와 같이 2가지 경우 모두 유사한 휨거동을 나타내었다. 이는 구조물의 보수를 위하여 ECC가 스프레이 타설될 경우, 하중의 방향에 상관없이 일관된 휨성능을 갖게 될 것임을 보여주는 결과이다.

#### 4.4 구콘크리트/ECC 합성보의 휨거동

스프레이된 ECC/구콘크리트 합성보의 휨거동은 Fig. 8에 도시한 바와 같다. Fig. 8에서 세로축은 계측된 하중을 갖고서 합성보의 중앙점 인장연단에서 계산한 휨응력에 해당되는 값(향후 '휨응력'으로 간략히 기술)으로서 (a)의 경우 2층의 재료가 완전히 합성된 것으로 보고, 전단면을 기준으로 계산하였다. 한편, Fig. 8(b)에서 나타난 휨응력-처짐관계는 보 중앙의 구콘크리트와 경계면에 초기균열이 있는 합성보의 실험 결과이다. 이 경우에는 구콘크리트의 중앙에 수직으로 놓인 초기균열에 의하여 구콘크리트 층이 하중전달 능력을 상실하였기 때문에 보수층(ECC 또는 PM)의 단면만이 유효한 것으로 보고 휨응력을 계산하였다. Fig. 8의 처짐은 보 중앙점에서 계측된 값이다.

Type A(Fig. 8(a)), 즉 초기 균열이 없는 구콘크리트와 ECC의 합성보인 경우, ECC의 휨거동과 유사한 휨응력-처짐관계를 나타내는데, 그 파괴형태를 살펴보면 다음과 같다. 휨균열강도 이후에 휨응력이 증가함에 따라 다수의 미세균열이 합성보 중앙부근의 인장연단에 발생한다. 그 이후 휨강도에 가까이 도달하게 되면, 구콘크리트 층의 하면에 균열이 발생하여 집중되다가 ECC층에서 발생한 미세균열 중의 하나와 연결이 된다. 이와 같이 연결된 균열에 의하여 파괴에 도달하는데, 휨강도에 이르렀을 때의 극한처짐은 평균 3.28 mm로 측정되었다. 이 값을 PM-1( $0.32 \pm 0.01$  mm)과 PM-2( $0.24 \pm 0.02$  mm)의 극한처짐과 비교하여 보면, 약 10배 이상 큰 값이다. 구콘크리트/PM 합성보의 경우도 마찬가지로 PM보의 휨거동과 유사한 경향을

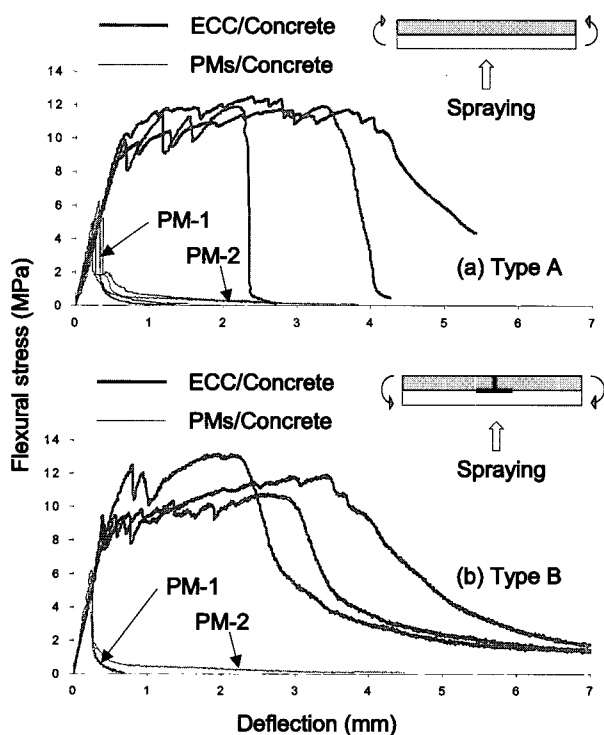


Fig. 8 Flexural stress vs. deflection curves of repaired composite beams at 28 days

보이고 있다. 즉, 최고하중에 도달한 이후 급작스런 균열 집중과 함께 파괴에 도달하였다.

Type A ECC 합성보의 휨강도( $12.03 \pm 0.40$  MPa)는 PM-1 합성보( $5.69 \pm 0.52$  MPa), PM-2 합성보( $5.07 \pm 0.10$  MPa)의 2배 이상이며, 휨응력-처짐 곡선의 면적을 고려한다면 ECC 합성보의 에너지 흡수능력은 PM 합성보에 비하여 수십배에 해당한다. 교량, 암거 등과 같이 유해환경에 노출되어 있으면서, 트럭하중과 같은 활하중에 지속적으로 영향을 받는 구조물의 경우에는 건조수축, 유해환경 등에 의하여 발생된 비구조 균열이 활하중과 지점침하 등의 하중에 의하여 구조균열로 발전될 가능성이 크다. 따라서, 건조수축균열에 대한 ECC의 제어능력과 더불어 ECC 합성보의 탁월한 휨변형능력, 에너지 흡수능력 등은 보수된 구조물의 내구성 향상에 큰 이점으로 작용하게 될 것이다.

앞에서 기술한 바와 같이, 합성보의 파괴는 구콘크리트에서 ECC로 연결되어 집중된 휨균열에 의하여 일어났으며, 경계면의 부착파괴는 발생하지 않았다. 이러한 실험 결과는 스프레이된 ECC와 구콘크리트의 부착성능이 합성작용을 하는 데 문제가 없을 만큼 충분하다는 것을 간접적으로 증명한다. 이처럼 양호한 구콘크리트/ECC의 부착성능은 향후 보수 시공에 ECC가 사용될 경우에 구조물의 내구성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Type B(Fig. 8(b)), 즉 초기 균열이 있는 구콘크리트에

스프레이된 ECC 합성보의 휨응력-처짐관계를 PM 합성보의 곡선과 비교하여 보면, ECC 합성보의 우수한 휨변형능력을 알 수 있다. 또한 그 에너지 흡수능력은 PM 합성보의 수십배에 해당한다. 이와 같이 ECC 합성보가 우수한 에너지 흡수능력을 보이는 이유는 경계면에 형성된 부착균열에 의하여 ECC층의 인장연단에서 미세균열이 발생되었기 때문이다. 이러한 실험결과는 열화부위를 제거하지 못하고 보수를 실시한 경우에도 구콘크리트의 균열을 중심으로 형성되는 경계면 균열의 kink-crack trapping 균열 발생기구<sup>39</sup>에 의하여 ECC 합성보가 충분한 에너지 흡수능력을 갖게 됨을 보여주고 있다. 반면 PM 합성보의 경우, ECC 합성보와는 달리 PM층의 인장연단에 집중된 1개의 휨균열에 의하여 휨강도 직후 응력이 감소하고 파괴에 이르는 유사취성재료의 전형적인 휨거동이 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 스프레이용 ECC를 콘크리트 구조물의 보수에 적용함으로써 구조물의 내구성 향상에 기여할 수 있음을 검증하였다. 이를 위하여 구콘크리트/ECC 합성패널에서 재단된 합성보에 대한 휨실험을 하였다. 또한 스프레이된 ECC의 역학적 특성을 파악하고 스프레이 공정의 적용성을 검증하기 위하여 비중, 직접인장, 휨실험 등을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 스프레이된 ECC의 비중은 일반 타설된 ECC의 비중에 비하여 1.3% 크게 측정되었다. 이는 스프레이시에 가해진 공기압에 의하여 충분한 다짐이 되었기 때문인 것으로 판단되며, 이는 본 연구에서 수행된 스프레이 타설이 성공적으로 수행되었음을 의미한다.
- 2) 직접인장실험의 결과, 스프레이된 ECC의 인장변형능력이 PM에 비하여 50~100배 큰 것으로 측정되었고, ECC의 균열폭은 평균  $30 \mu\text{m}$ 로 제어되었다. 휨실험을 통하여 ECC의 휨인성은 PM에 비하여 수십배에 해당되는 것으로 나타났으며, 상반되는 하중조건에서도 유사한 휨거동을 나타냈다. 따라서, ECC가 스프레이공법에 의하여 보수재로서 시공될 경우, 하중의 방향에 상관없이 동일한 고인성의 특성을 갖게 될 것으로 예측된다. 고인성, 제어된 균열폭 등의 ECC 고유의 재료적 특성은 보수 시공에 적용될 경우, 구조물의 내구성 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.
- 3) ECC합성보의 에너지 흡수능력은 PM합성보에 비하여 수십배에 달하였으며, 구콘크리트와의 부착성능도 양호한 것으로 나타났다. 또한 열화부위를 갖고 있는 구콘크리트를 보수한 경우, 즉 초기균열이 있는 ECC합성보의 경우에도 우수한 에너지 흡수능력이 측정되었

다. ECC 고유의 균열제어능력과 더불어 ECC합성보, 즉 보수된 부재의 탁월한 휨변형능력, 에너지 흡수능력 등은 구조물의 내구성을 증진하는데 큰 이점으로 작용하게 될 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원비와 (주)원하중합건설로부터 University of Michigan으로 지원된 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. 또한 공동연구를 수행한 University of Michigan의 V.C. Li 교수와 본 연구와 관련하여 도움을 준 연세대학교의 임윤목 교수에게도 감사드립니다.

### 참고문헌

1. V.C. Li, "Advances in ECC Research," ACI Special Publication on Concrete: Material Science to Applications, SP 206-23, 2002, pp.373-400.
2. V.C. Li, "Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites(ECC)," Proc. of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)-Application and Evaluation, Takayama, Japan, Oct, 2002. pp.1-21.

3. Y.M. Lim and V.C. Li, "Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites," *Journal Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp.373-385.
4. T., Kamada, and V.C. Li, "The Effects of Surface Preparation on the Fracture Behavior of ECC/Concrete Repair System," *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol.22, No.6, 2000, pp.423-431.
5. 김윤용, "미세역학이론과 레올로지 제어에 의한 습식스프레이용 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 개발", 한국콘크리트학회논문집, 게재심사중, 2003.
6. S.A. Austin, P.J. Robins, and C.I. Goodier, "The performance of hardened wet-process sprayed mortars," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 52, No. 3, June, 2000, pp.195-208.
7. K. Wang, D.C. Jansen, and S. Shah, "Permeability study of cracked concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.3, 1997, pp.381-393.
8. V.C. Li, Y.Y. Kim, G. Fischser, and M. Weimann, "3rd Progress Report on Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites," Michigan Department of Transportation, Dec, 2002. 24pp.
9. M. Maalej and V.C. Li, "Flexural/Tensile Strength Ratio in Engineered Cementitious Composites," *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.6, No.4, Nov., 1994, pp.513-528.

### 요 약

본 논문에서는 습식스프레이 공법에 의하여 타설되는 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)을 구조물의 보수에 적용함으로써 구조물의 내구성을 증진시키는 효과에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 굳지않은 상태에서는 스프레이 공정에 적합한 유동특성을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 인장변형경화거동을 나타내는 ECC를 스프레이 공법으로 타설하여 시험체를 제작하여 실험하였다. 실험 결과, 스프레이된 ECC의 역학적 특성(인장 및 휨거동)이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 ECC와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 이 때에 ECC의 균열폭은 평균  $30\mu\text{m}$ 로 제어되었다. 구콘크리트/ECC 합성보의 에너지 흡수능력은 구콘크리트/상용 스프레이 모르타르(PM) 합성보에 비하여 매우 우수한 것으로 나타났으며, 경계면의 부착성능도 양호한 것으로 평가되었다. ECC 고유의 균열제어능력과 더불어 보수된 부재(구콘크리트/ECC 합성보)의 탁월한 휨변형능력, 에너지 흡수능력 등은 구조물의 내구성을 증진하는데 큰 이점으로 작용하게 될 것이다.

**핵심용어 :** 습식스프레이용 ECC, 콘크리트 보수, 인장변형경화거동, 균열폭 제어, 에너지 흡수능력