

# 고인성 섬유보강 시멘트 복합재료의 복합구성에 의한 휨 특성

## Bending Property of Compositd Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite, DFRCC

김 규용*	손 유신*	양 일승**
Kim, Gyu Yong	Sohn, Yu Shin	Yang, Il Seung
후쿠야마 히로시**	윤 현도***	김 무한***
Hukuyama Hiroshi	Yoon, Hyun Do	Kim, Moo Han

### ABSTRACT

Fiber Reinforced Cementitious Composite, DFRCC has strain hardening property with multiple crack in failed of compressive, tensile, bending force, concrete is not so that. But DFRCC could not use to the building element for which has not structural stiffness only has ductile property. DFRCC is used for repair only in recently.

In that reason, we considered the concrete of light weight concrete, porous concrete, mortar complex with DFRCC. and DFRCC reinforced by fiber net, steel bar. In this study, results of experiment on complex method of concrete and DFRC were shown as follows;

The complex methods of concrete lay on DFRCC, sandwich layer composition were effective for bending force depending on section size each layer, and reinforce DFRCC by fiber net, steel bar was effective method also.

### 1. 서론

섬유보강시멘트 복합재료는 일반 콘크리트의 개념을 뛰어 넘는 새로운 고성능 건설재료로서 주목을 받고 있으며, 이에 대한 연구보고가 미국, 일본 등에서 다수 보고되고 있다. 이에 대한 개념을 그림 1에 나타낸 바와 같이 간단히 기술하면, 섬유보강 시멘트계 재료(Fiber Reinforced Cementitious Composites, FRCC)는 시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합재료 전체의 범위를 의미하고 있고, 그 중에 고인성 시멘트계 복합재료(DFRCC)를 제외한 것들 중에는 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)와 섬유보강모르터 등이 포함되어 있다.

한편, 고인성시멘트복합재료(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites, 이하 DFRCC)는 시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합재료로서 그의 종류가 다양하다고 할 수 있고, 이를 ECC(Engineered Cementitious Composite)재료로 불리운다. 이러한 복합재료의 역학적 특성으로는 그림 2에서 보는 바와 같이 콘크리트에서 보다 휨모멘트 작용 또는 일축인장력 작용하에서도 다수의 균열특성을 발휘하여, 다수균열의 발생 이후에도 응력의 저하가 없고 겉보기 변형의 증가에 역으로 응력이 증가하는 변형경화(Strain

\* 정회원, 삼성건설 기술연구소

\*\* 정회원, 일본 건축연구소 건축생산연구그룹

\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과, 교수·공박

hardening)와 무수한 미세균열이 분산되는 멀티플균열(Multiple Crack)을 나타내는 변형경화형 고인성시멘트 복합재료이다. 그러나, 현재 ECC재료는 아직 개발 단계에 있으며, 차후에도 재료, 구조 및 시공에 관한 다양한 검토와 데이터의 축적이 필요하다. 이를 위해서는 다양한 분야의 기술과 기술자들의 연대가 필요하다.

본 연구는 이러한 ECC재료를 보다 적극적으로 활용하고, 기존의 콘크리트 부재가 가지고 있는 취약적인 역학특성을 보완하기 위하여, PE(Polyethylene)섬유, PVA (Polyvinyl alcohol)섬유, 강섬유(Steel Fiber)를 사용한 ECC재료의 고인성 특성을 경량콘크리트, 모르터, 포러스콘크리트에 각각 복합구성함으로써 그의 휨 특성을 기초적으로 평가하고자 한 것이다. 또한, ECC재료 자체에 철근과 섬유넛트를 보강하여 그의 보강특성도 검토하였다.

## 2. 실험내용 및 방법

### 2.1 각 재료의 복합구성방법

본 연구에서는 각 콘크리트계 재료로와 고인성 시멘트 복합재료로서 ECC재료를 그림 3과 같이 각각 복합구성하였다.

- (1) 적층구성; 부재 단면상 휨 응력을 받을 경우 인장응력을 받는 부분에 ECC재료를 구성하고, 그 위에 경량콘크리트, 포러스콘크리트, 모르터를 각각 구성비율에 맞추어 적층하였다.
- (2) 다층적층구성; 콘크리트계 재료와 ECC재료를 겹층으로 1cm, 2cm의 두께를 번갈아가면서 적층하여 인장축과 압축축의 방향성이 없도록 구성하였다.
- (3) 샌드위치구성; 콘크리트계재료와 ECC재료를 표면재와 심재의 샌드위치 형태로 구성하였고, 그의 두께를 비율에 따라 변화시켰다.
- (4) 철근, 섬유넛트의 보강; 각 섬유의 종류별에 따라 ECC재료에 철근과 섬유넛트로 보강하였다. 상기와 같이 시험체를 제작하여 복합구성에 따른 각각의 휨 특성을 평가하였다.

### 2.2 사용재료

콘크리트로서는 경량골재를 사용한 경량콘크리트 및 경량포러스콘크리트를 제조하였으며, 모르터는

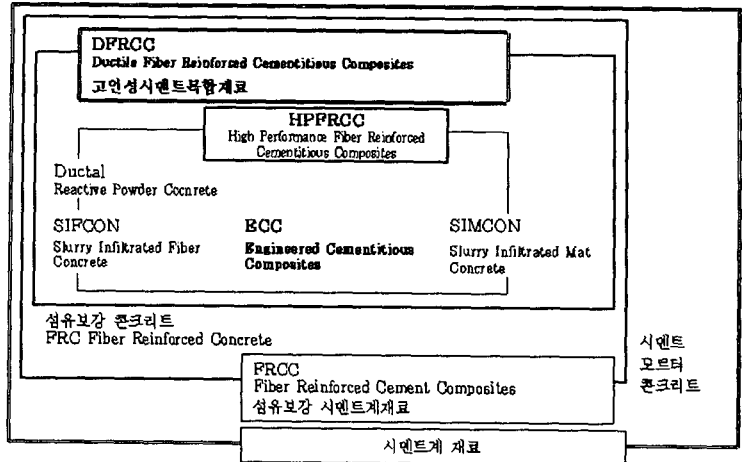


그림 1 섬유보강시멘트계 재료의 종류와 범위

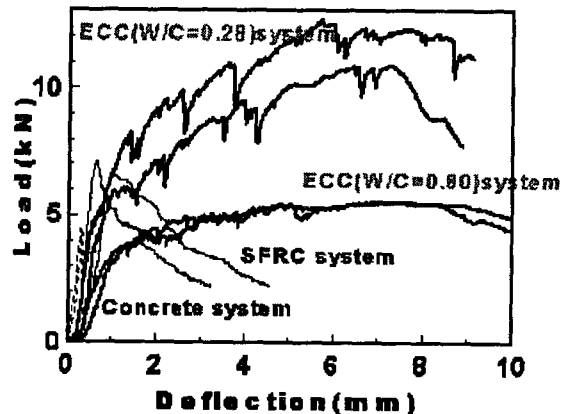


그림 2 각종 콘크리트재료의 하중변위 곡선

시멘트와 모래를 1:3의 비율로 제조하였다. 섬유 종류는 폴리에틸렌(PE)섬유, 폴리비닐알콜(PVA)섬유, 폴리에틸렌섬유와 강섬유를 혼입하여 사용한 PE+SC의 혼합섬유를 사용하였다.

### 2.3 시험체 제작 및 휨시험

시험체의 제작은 100×100×400mm의 휨 시험체로 제작하였으며, 이 때 하나의 몰드에 콘크리트재료와 ECC재료를 복합구성하기 위하여 부재의 단면치수에 따른 용적을 증량으로 계량하여 각각 타설하였다. 서로 다른 재료의 일체화를 위하여 1~2시간의 간격을 두고 하면부에서부터 차례로 타설하였다.

휨 시험은 JIS, KS 규격에 준하여 실시하였고, 휨 시험체의 변형을 측정하기 위하여 LVDT고정용 프레임을 설치하였다. 양생은 20±2℃의 표준수중양생으로 실시하였고, 측정 은 재령 28일에서 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 ECC와 콘크리트와의 적층구성

그림 4는 각 기준시험체의 휨 특성을 나타낸 것으로 PVA-ECC와 비교하여 경량콘크리트와 포러스콘크리트는 휨강도가 약 1/3로 낮고, 각 최대 응력에서의 휨 변형량은 PVA-ECC가 약 30~45배 큰 것으로 나타났다.

그림 5는 시험체 전단면 100×100mm에서 콘크리트계 재료(경량콘크리트, 포러스콘크리트)와 PVA-ECC의 단면치수를 각각 8cm:2cm, 4cm:6cm 8cm:2cm로 하여 적층한 시험체의 휨 특성을 나타낸 것이다. 인장축과 압축축의 단면치수 비율에 따라서는 인장축의 ECC 단면치수를 중립축 이상 5cm 이상을 확보한 8cm, 6cm의 경우에는 기준 ECC시험체와 거의 유사한 휨 특성을 나타내고 있으나, 인장축의 ECC 단면치수가 2cm인 경우에는 기준 ECC시험체에 비해 약 60~65%정도로 저하되었다. 또한, 적층구성된 시험체의 휨 특성은 압축축 콘크리트 종류에 관계없이 단면의 적층구성비율이 그대

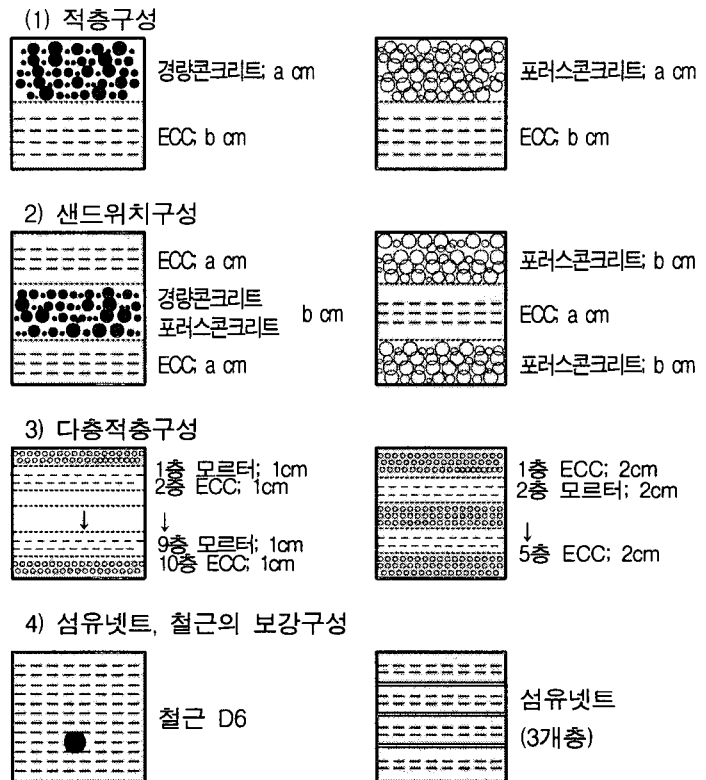


그림 3 각 재료의 복합구성 방법 (시험체; 100×100×400mm의 휨시험체)

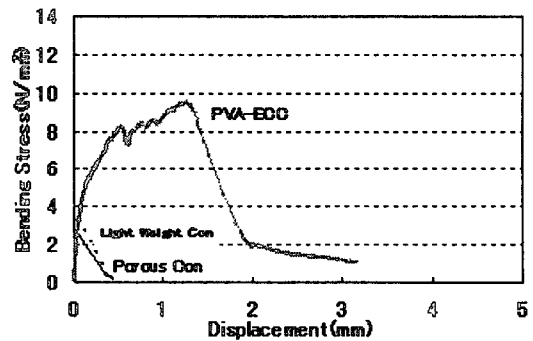
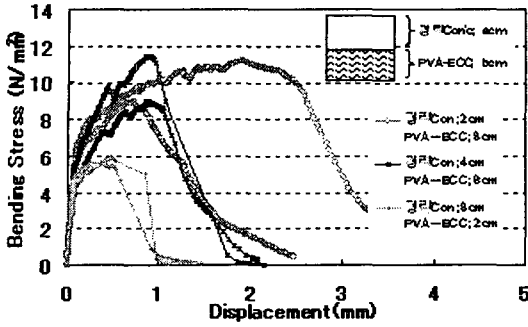
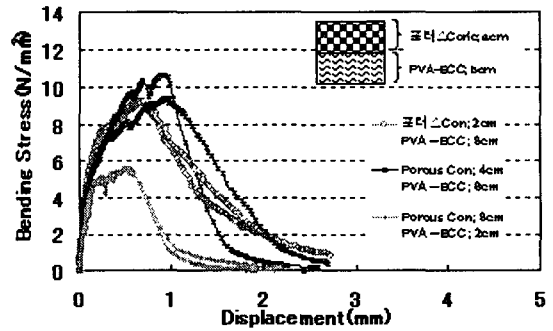


그림 4 각 기준 시험체의 휨 특성



(a) 경량콘크리트와 PVA-ECC와의 적층구성



(b) 경량포러스콘크리트와 PVA-ECC와의 적층구성

그림 5 콘크리트계 재료와 PVA-ECC와의 적층구성에 따른 휨 특성

로 반영되었다고 할 수 있다.

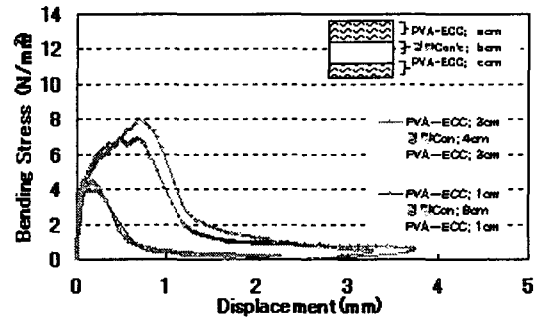
### 3.2 ECC와 콘크리트와의 샌드위치 구성

그림 6은 경량콘크리트와 경량포러스콘크리트에 대하여 PVA-ECC를 각각 표면재와 심재로 한 샌드위치 복합구성에 대한 휨 특성을 나타낸 것이다. 그림6의 (a)의 경우 PVA-ECC를 표면재로 하고, 경량콘크리트를 심재로 하여 각각의 단면치수를 2cm:4cm:2cm 및 1cm:8cm:1cm로 한 것으로 표면재의 단면두께에 따라 휨 강도와 최대 변형능력이 결정되었다. 또한 (b)의 경우 심재를 포러스콘크리트로, 표면재를 PVA-ECC로 단면치수는 (a)와 동일하게 하였다. 휨 강도는 심재가 경량콘크리트인 (a)의 경우보다 다소 낮고, 최대하중에서의 변형량도 작았다. (c)의 경우는 (b)와 반대로 심재를 PVA-ECC로, 표면재를 경량포러스콘크리트로 한 것으로, 휨 강도와 최대하중에서의 변형은 가장 낮게 평가되었다.

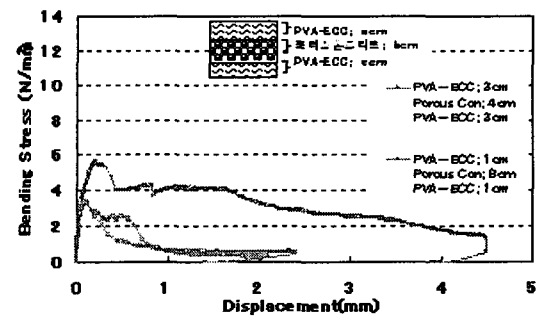
그러나, 이와 같은 샌드위치 구성에 의한 복합구성은 비구조부재료로서의 활용 가능성에 대하여도 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 ECC와 모르타의 다층적층구성

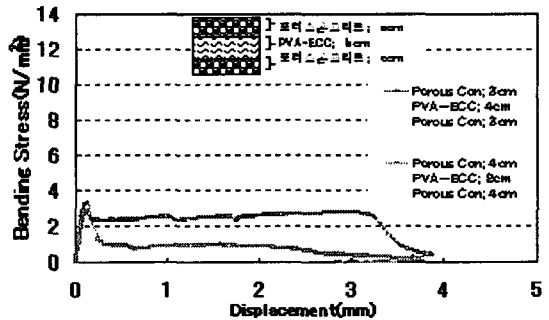
그림 7은 모르타와 PVA-ECC를 각각 1cm, 2cm 씩 차례로 적층하여 10층 적층과 5층 적층으로 한 복합구성의 휨 특성을 나타낸 것이다. 기준 모르타의 휨 특성은 ECC의 보강에 의해 향상된 것으로



(a) 경량콘/PVA-ECC/경량콘의 샌드위치 구성



(b) PVA-ECC/경량콘/PVA-ECC의 샌드위치 구성



(c) 경량포러스/PVA-ECC/경량포러스의 샌드위치 구성  
그림 6 각 재료의 샌드위치 구성에 따른 휨 특성

보이지만, 각 적층단면두께에 따른 변화는 없으므로 판단된다. 다층의 적층복합구성체는 휨 하중에 대한 방향성이 없는 것이 특징으로, 향후 상하 반복 하중 및 진동하중에 대한 휨 거동특성에 대하여 검토의 필요성이 있다.

### 3.4 섬유 종류별 복합구성에 따른 휨 특성

그림 8은 폴리에틸렌(PE)섬유, 폴리비닐알콜(PVA)섬유, 폴리에틸렌+강섬유(PE+SC)에 의한 ECC의 휨 특성을 나타낸 것이다. 기존의 유기계 섬유를 사용한 ECC는 PE, PVA에 따라 거의 유사한 수준이나, 강섬유와 폴리에틸렌섬유를 혼합하여 사용한 ECC의 휨 강성이 크게 향상되었다.

PE+SC-ECC는 강섬유만을 사용하였을 경우 강섬유의 비중이 크기 때문에 섬유가 침하되어 균일한 섬유의 분산이 어려웠다. 이를 해결하기 위하여 강섬유와 폴리에틸렌섬유를 동시에 혼합함으로써 강섬유가 침하되는 것을 억제할 수 있다.

그림 9는 섬유의 종류별 모르타르와의 적층복합구성에 의한 휨 특성을 나타낸 것이다. 그림 9(a) PE-ECC의 경우 모르타르와의 적층단면비율에 따라 ECC의 단면치수가 높을수록 휨강도와 변형능력이 크게 나타나고 있다. 또한, 모르타르와 PE-ECC의 단면치수 3cm:7cm에 섬유네트를 보강한 경우 동일 단면치수의 시험체와 거의 유사한 특성을 보이고 있어 섬유네트의 보강 효과는 보이지 않았다.

한편, 그림 9(b)의 PE+SC의 경우 PE-ECC보다 휨 특성이 크게 향상되었으며, 각 단면치수에 따른 휨강도와 최대하중시의 변형능력이 뚜렷하게 구별되어 나타났다. 또한, PE+SC/섬유네트의 시험체는 동일 단면 치수의 시험체에 비하여 휨 특성이 향상

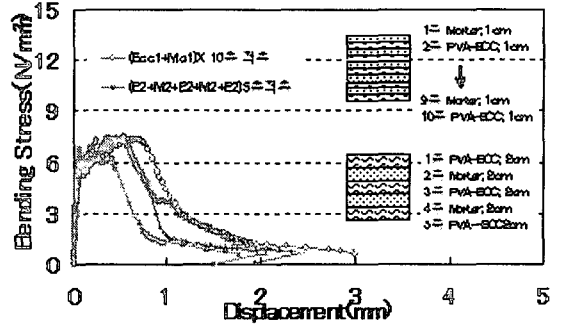


그림 7 모르타르와 PVA-ECC와의 다층적층구조에 의한 휨특성

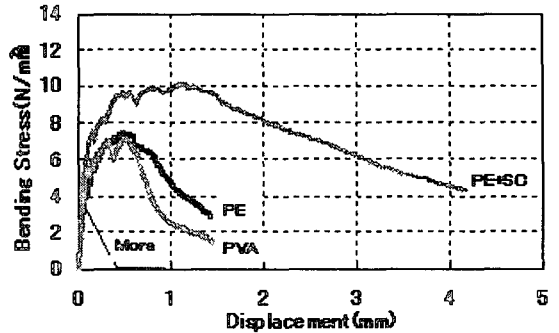
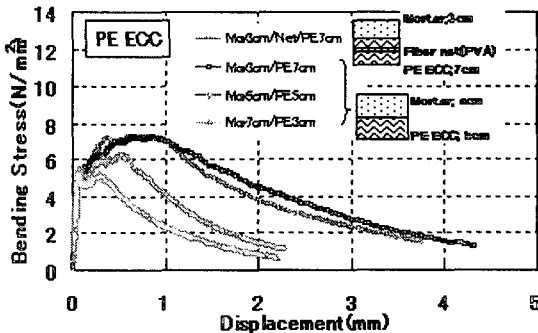
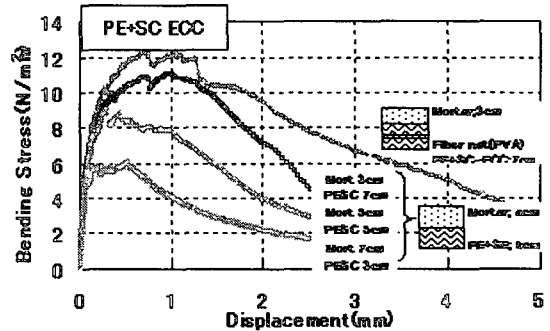


그림 8 보강섬유의 종류별 ECC의 휨 특성



(a)PE-ECC와 모르타르의 적층, 섬유네트 보강



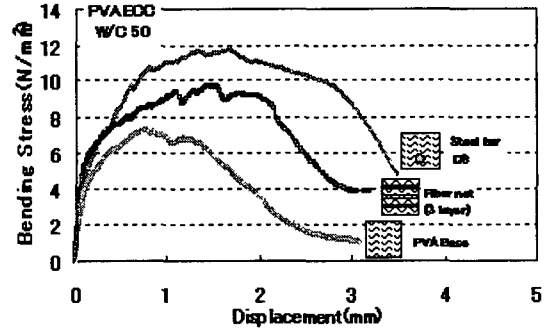
(b)PE+SC ECC와 모르타르의 적층, 섬유네트보강

그림 9 보강섬유의 종류별 모르타르와의 복합구성에 따른 휨 특성

됨으로써 섬유넛트의 보강효과가 확인되었다.

### 3.5 ECC의 섬유넛트 및 철근의 보강효과

그림 10은 PVA-ECC에 PVA계섬유넛트와 철근을 보강한 복합시험체의 휨특성을 나타낸 것이다. 그림 10 (a)에서 W/C50의 기준PVA-ECC시험체에 대하여 섬유넛트를 3개층에 걸쳐 보강한 것과 D6의 철근을 보강함에 따라 휨 특성이 크게 향상되었다. 또한, (b)에서 W/C40의 기준PVA-ECC시험체에 있어서도 섬유넛트 3개층과 철근의 보강에 따른 향상이 확인되었다. 단, W/C에 따른 인성파괴거동이 다소 다르게 나타나고 있는데, W/C 50인 경우가 변형경화의 고인성의 특성을 나타내고 있다. 이는 매트릭스 강도의 향상에 따라 섬유의 인장력 한계와의 관계로서 매트릭스의 강도가 클수록 섬유에 의한 고인성파괴의 특성에 대하여 보다 심도있는 검토가 필요할 것으로 사료된다.

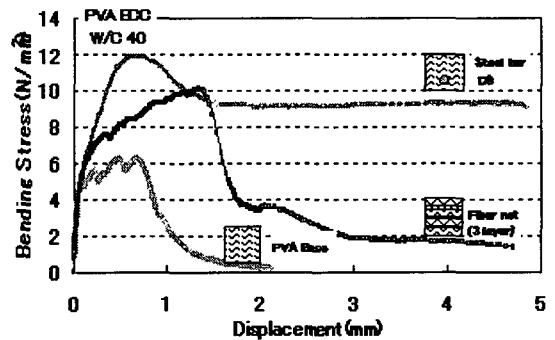


(a)W/C50 PVA-ECC의 섬유넛트, 철근의 보강

## 4. 결론

고인성시멘트 복합재료의 기본적인 특성과 이를 콘크리트계 재료와의 복합구성에 대한 검토를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트계 재료는 ECC재료와의 적층복합구성에 따라 그의 휨특성 향상과 파괴에너지가 향상됨에 따라 적층복합구성방법이 유효함이 확인되었다.
- 2) PE+SC에서 강섬유만을 사용했을 경우 강섬유가 침전되는 것이 억제되었으며, 기타 유기계 섬유를 사용한 경우보다 휨특성이 향상됨이 확인되었다.
- 3) ECC재료 자체에도 섬유넛트와 철근의 보강으로 구조부재로서의 구조성능을 시사하고 있어 이에 대한 추가 검토 필요성이 있다고 사료되며, 건설생산현장에 경제적이고 쉽게 시공될 수 있도록 여러 방면에서 상호 연계된 실험과 연구가 필요하다.



(b)W/C40 PVA-ECC의 섬유넛트, 철근의 보강

그림10 물시멘트비40,50 PVA-ECC의 섬유넛트, 철근의 보강에 따른 휨 특성

### 참고문헌

1. 福山 洋, 倉本 洋; 스마트콘크리트, 一高じん性콘크리트一, 콘크리트工学協会, 콘크리트工学, Vol.39, No.1., 2001.1.
2. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H./ Structural Performance of Engineered Cementitious Composite Elements, Composite and Hybrid structures, Proceeding of 6th ASCCS Conference, ASCCS-6 Secretariat, pp.969~976, 2000.3.
3. 윤현도, 福山 洋, 외2인; 자기손상저감성 고성능 섬유보강시멘트 복합재료, 한국구조물진단학회, 제6권 제2호, pp.34~43, 2002, 4