

개구부를 가지는 전단벽의 슛크리트 보강

Shotcrete-Retrofit of Shear Walls with an Opening

최 윤 철* 최 창 식** 김 현 민*** 이 리 형****
Choi, Youn-Cheul Choi, Chang-Sik Kim, Hyun-Min Lee, Li-Hyung

Abstract

Because of the characteristics relating to high tensile ductility, High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) are studied to be adopted in repair and retrofit of buildings. A series of three shear wall specimens was tested under constant axial stress and reversed cyclic lateral loading in order to evaluate the seismic retrofit that had been proposed for the shear wall with the opening. The retrofit involved the use of newly developed ECC and MDF(Macro Defect Free), both of which are sprayed through the high pressure pump, over the entire face of the wall. The results indicate that two difference types of retrofitting strategy make the different effects of a rise in the strength and ductility of each specimen.

요 지

기존 시멘트에 비해 우수한 인장변형성능을 가지는 고인성 시멘트 복합체(HPFRCC)를 보수, 보강에 적용 시키려는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 HPFRCC의 일종인 ECC와 초속경 슛크리트인 MDF의 보강성능을 알아보고자 한다. 실험체는 실존하는 철근콘크리트 구조물의 전단벽을 1/2 축소하여 제작하였으며 개구부를 가지고 있다. 실험결과 WB-MDF, ECC는 WB-0.23에 비해 각각 28.4%, 48.4%의 강도증가를 보였으며, 특히 WB-ECC가 WB-MDF에 비해 연성면에서 우수하게 나타났다.

Keywords : Shear wall, Opening, Remodeling, Shotcrete, ECC

핵심 용어 : 전단벽, 개구부, 리모델링, 슛크리트, 섬유보강콘크리트

* 정희원, 한양대 초대형구조시스템연구센터 연구조교수

** 정희원, 한양대 건축대학 건축공학부 부교수

*** 정희원, 한양대 건축대학 건축공학부 석사과정

**** 정희원, 한양대 건축대학 건축공학부 교수

E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr 02-2220-2371

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 건설업계는 장기화된 불황과 함께 부동산에 관련된 각종 규제의 강화로 신축 혹은 재건축보다 기존의 건축물에 대한 리모델링을 선호하고 있는 실정이다. 이와 더불어 건축물의 리모델링은 재건축과 비교하여 그 비용이 적게 소요되며 폐기물의 배출이 적어 비용적인 측면 뿐 아니라 환경적인 측면에서도 유리한 방법이다.

그러나 철근콘크리트 구조물은 재료적, 시공적, 환경적, 구조적 요인 등으로 인하여 시간이 경과하면서 구조내력이 부족하거나 사용성이 저하하여 리모델링시 보수, 보강 등을 실시하여 안전성을 확보하여야 한다. 특히 사용성의 증가, 내력저하, 각종 하자 발생 등으로 보강을 실시해야 하는데 있어서 중요한 것은 효율적이면서 경제적인 보강이 이루어져야 한다. 특히, 세대병합 리모델링시 기존 벽체에 개구부를 갖는 경우는 필연적으로 발생한다. 따라서 본 연구에서는 세대병합을 위하여 기존 벽체에 개구부를 신설 할 경우 적정 면적비를 위한 선행 연구결과⁽¹⁾를 바탕으로 리모델링시 사용자의 욕구를 충족시키기 위하여 국부적으로 절단(해체)된 철근콘크리트 벽체의 구조성능을 규명하고자 한다. 더 나아가서는 손상부위를 갖는 철근콘크리트 벽체에 슛크리트를 이용한 단면증설 보강효과를 규명하고자 한다.

본 연구에서 선택한 보강재료는 차세대 건설재료로 각광받고 있는 고인성 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, HPFRCCs)와 기존 슛크리트 재료인 MDF 두 가지이다. HPFRCC는 시멘트 복합체에 각종 섬유를 혼입함으로써 철근콘크리트 부재에서 콘크리트의 인장성능을 개선한 재료이다. 최근에는 보수/보강 재료, 내진요소(Seismic device) 및 주요 내진부재에 적용하기 위하여 요구되는 목표성능(인성과 변형능력)을 만족시키는 HPFRCC의 제조기술의 개발 및 성능 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 이상의 연구들은 대부분 HPFRCC의 제조방법과 경화전·후

Table 1 선행연구 결과⁽⁶⁾

구분	개구부 면적비	내력감소율	공동 사항
Prototype Wall	개구부 없음	-	수직철근 : D6@225
Wall I-0.23	23%	30%	수평철근 : D6@225
Wall I-0.30	30%	50%	
Wall I-0.39	39%	70%	

의 재료적 성상에 관하여 연구가 진행되었을 뿐 부재에 적용한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 HPFRCC의 한 종류인 ECC를 부재(벽체)의 보강에 적용함으로써 보강효과를 규명하고 개구부를 갖는 벽체에서 효율적인 단면증설의 보강방법을 기존의 슛크리트 재료인 MDF와의 비교를 통하여 도출하고자 한다.

1.2 ECC 재료 특성

HPFRCC는 직접 인장응력 하에서 초기 인장균열 발생이후에도 균열을 가교(Bridge)하는 섬유에 의해 균열 인접부위 매트릭스에 인장응력을 재분배하여 시

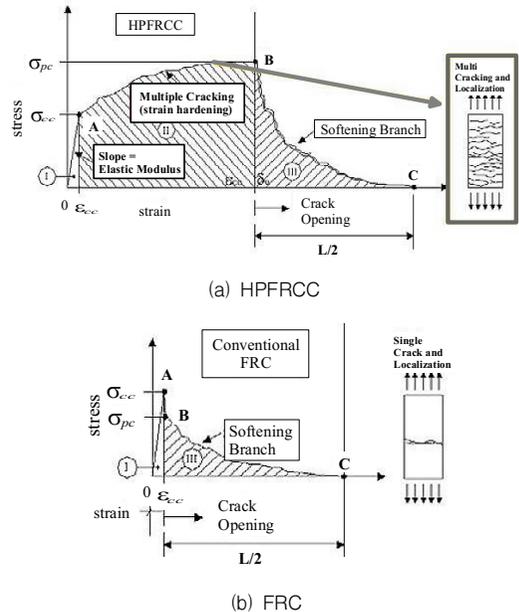


Fig. 1 HPFRCC와 FRC의 인장거동 특성

멘트 매트릭스 내에서 다수의 미세균열(Multiple crack)을 폭 넓게 분산함으로써 취성적인 특성을 갖는 시멘트 복합체에 Fig. 1(a)과 같은 유사 변형경화(Pseudo strain hardening)특성을 부여한 새로운 차세대 건설재료라 할 수 있다.⁽¹²⁾ 반면, Fig. 1(b)는 일반 섬유보강 콘크리트인 FRC(Fiber Reinforced Concrete)의 인장거동 특성을 나타낸 것으로서 변형경화 특성을 찾아볼 수 없다.

ECC (Engineered cementitious composite)는 HPFRCC의한 종류로 섬유 혼입률을 체적의 2%내외로 하며, 다른 고인성 시멘트 복합체에 비해 인장강도는 크지 않으나 인장변형 능력이 3%이상으로 크게 개선된 재료로 평가되고 있다. 최근 국내에서도 이러한 고인성 시멘트 복합체에 대한 관심이 증가되어 2002년 후반부터 다수의 연구결과가 발표되고 있다. 김윤용⁽³⁾ 등은 국내에서 상용중인 재료를 사용하고 마이크로 역학을 근거로 고인성 섬유 복합 모르타르의 제조방법을 소개하였다. 김무한⁽⁴⁾ 등은 PP(Polyethylene) 및 PVA(Polyvinylalcohol) 등과 같은 마이크로 섬유와 PVA 및 SF(Steel Fiber)와 같은 매크로 섬유로 보강된 하이브리드 HPFRCC의 휨성상을 규명하고자 하였다. 윤현도⁽⁵⁾ 등은 물시멘트비 45%인 시멘트 복합체에서 시멘트 체적비 1.5%의 합성섬유 PE만을 혼입한 경우와 PE(polyethylene) 및 PVA와 같은 마이크로 섬유와 매크로 섬유인 꼬인 5연선 강섬유(Twisted five steel fibers, 이하 SC)를 각각 0.75%, 총 1.5%의 섬유를 혼입하여 제조된 HPFRCC의 인장강도를 평가하였다. PE만을 혼입한 경우 평균인장강도와 변형능력이 각각 2.78MPa 및 1.25%로 나타났으며 부착성능 및 휨강성이 우수한 SC와 합성섬유인 PE를 하이브리드한 HPFRCC(Hybrid)의 인장강도 및 변형능력은 각각 3.35MPa 1.49%로 PE만으로 보강된 HPPFRCC(PE)에 비하여 인장강도 및 변형능력이 각각 27% 및 19% 향상되었다. 압축강도는 HPFRCC(Hybrid)가 46.7MPa HPPFRCC(PE)가 44MPa로 같은규격의 콘크리트(54MPa)에 비해 낮은 강도를 보였다. 결국, ECC는 압축 성능 보다는 인장변형능성이 획기적으로 개선된 시멘트계 복합 재료라 할 수 있다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

본 연구를 위한 대상건물은 1980년도 초반 대한주택공사에서 임대주택으로 설계 및 시공한 18평 벽식아파트를 대상으로 하였으며 실험대상 부위 벽체는 세대간 벽을 이상화하였다. 실험체는 1/2 축소모델로 제작하였으며, 콘크리트 압축강도는 21MPa, 사용된 철근은 SD400으로 실험체를 설계하였다. 벽체의 배근된 철근비는 실제 연구 대상 부위에 대한 철근비 및 간격을 반영하여 계획하였다.

본 연구에서 계획된 실험체는 개구부의 크기가 폭 1,800mm, 높이 2,100mm인 실물 크기를 1/2로 축소하였으며 이는 개구부 면적비가 23%로서 보강하지 않은 기준 실험체 WB-0.23과 기준 실험체를 일반 숏크리트 재료인 MDF로 단면증설한 WB-MDF, 기준 실험체를 ECC로 단면증설한 WB-ECC로 총 3개로 계획하였다.

개구부 면적비는 선행 연구결과⁽⁶⁾를 반영하였다. 선행연구결과는 Table 1과 같으며, 결국 노후주택의 리모델링시 개구부 면적비 30%이상인 경우는 구조적으로 많은 문제를 야기시키며, 목표강도까지 보강하는 것도 비현실적인 것으로 판단되었다.

기존 벽체를 부분적으로 절단하여 설치되는 개구부는 실험체가 1/2 규모로 축소 제작됨에 따라 벽체의 두께가 100mm로 절단장비를 이용하여 벽체의 부분적인 절단시 예상되는 충격 및 진동에 의하여 벽체가 손상을 받을 것으로 예상되어 실험체 제작시 미리 소요의 개구부가 확보될 수 있도록 거푸집을 조립하였다. 또한, 개구부가 설치되는 부위는 기존 벽체를 부분적으로 절단하여 설치되는 개구부를 가정하여 특별한 철근 보강을 하지 않았다.

MDF 및 ECC는 Table 2와 같이 개구부가 없는 벽체(Prototype)의 횡 중구강도인 695kN를 만족하기 위해 벽체 양면에 30mm두께로 총 60mm두께만큼 숏크리트 방식으로 보강되었다. 또한 MDF와 ECC의 양생 시 수축균열 방지를 목적으로 가로, 세로 방향으로 10cm 간격이 되도록 와이어메쉬를 겹친

Table 2 단면 증설량 검토

Specimen	V_C	V_S	V_{ECC}	V_{MDF}	THE V_n
Prototype ⁽⁷⁾	427	268	-	-	695
WB - 0.23	336	188	-	-	524
WB - ECC	336	188	184	-	708
WB - MDF	336	188	-	184	708

V_{ECC}, V_{MDF} : ECC, MDF가 부담하는 전단내력 (kN)
 THE $V_n = V_C + V_S + V_{ECC, MDF}$ (kN)

Table 3 실험체 일람

구분	개구부 면적비	보강 방법	공통 사항
WB - 0.23	23% (900×1050)	무	수직철근 :
WB - MDF		MDF(단면증설)	D6@225 수평철근 :
WB - ECC		ECC(단면증설)	D6@225

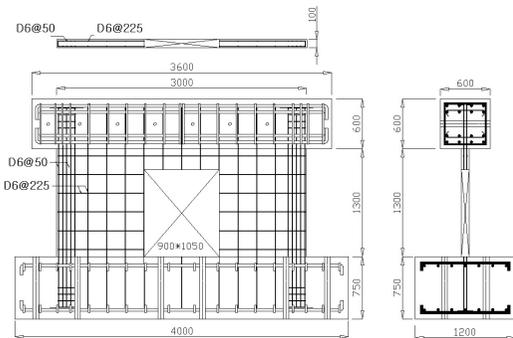


Fig. 2 실험체 상세 (단위 : mm)

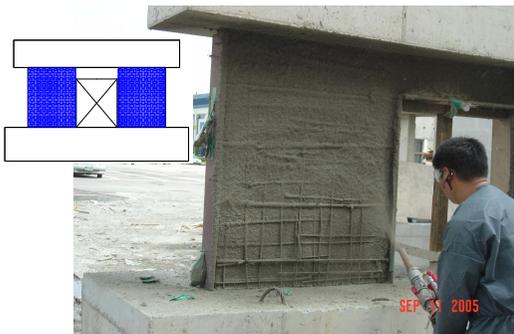


Fig. 3 보강부위 및 슛크리트 시공사진

후 벽면에 고정시켜 뿔칠 하였다. 실험체는 형상비가 0.5인 전단지배 장방형 전단벽체이며, 실험체의 일람은 Table 3, 실험체 상세 및 제원은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3는 보강부위 및 시공모습이다.

2.2 재료시험

실험체에 사용된 콘크리트의 설계 압축강도는 21 MPa ($210kgf/cm^2$)로 계획하였다. 공시체는 KS F 2404에 따라 실린더형 몰드를 사용하였으며, 실험체와 동일한 조건하에 양생시켰다. 콘크리트 압축강도의 시험결과는 Table 4과 같다. 실험체에 사용된 철근의 재료적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장 시험편)의 '라'호 규정에 따라 시험편을 제작하여 KS B 0802의 금속재료 인장시험방법에 따라 시험을 실시하여 평가하였다. 인장 시험결과는 Table 5에 나타내었다. 또한 ECC, MDF, PVA 특성은 Table 6~9와 같다.

Table 4 콘크리트 압축강도 시험 결과

압축강도 fcu (MPa)	탄성계수 Ec (GPa)	변형률 ($\times 10^{-6}$)	포아송비
21.23	21.92	1,956	0.15

Table 5 철근의 인장 강도 시험 결과

철근의 종류	항복강도, fy (MPa)	항복변형률, ey ($\times 10^{-6}$)	인장강도, fu (MPa)
D6	291.19	1923.08	375.01

Table 6 ECC 압축강도 시험 결과

압축강도, fcu (MPa)	탄성계수, Ec (GPa)	변형률 ($\times 10^{-6}$)	포아송비
45	15.33	3,900	0.167

Table 7 ECC 인장 강도 시험 결과

시편형태	변형능력	인장강도, fu (MPa)
4×4cm 바벨형	3.5%	2.8

Table 8 PVA특성

비중	길이 (mm)	직경	형상비	인장강도	탄성 계수	파단신률 (%)
1.3	12	39um	300	1850	40	5

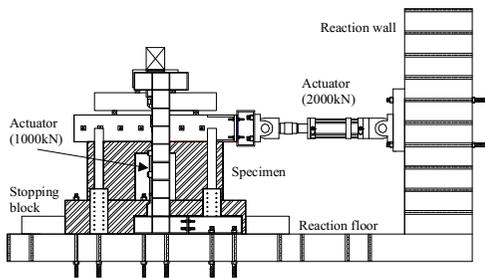
Table 9 MDF 압축강도 시험 결과

압축강도, f_{cu} (MPa)	탄성계수, E_c (GPa)	변형률 ($\times 10^{-6}$)	포아송비
45	20.82	2.150	0.12

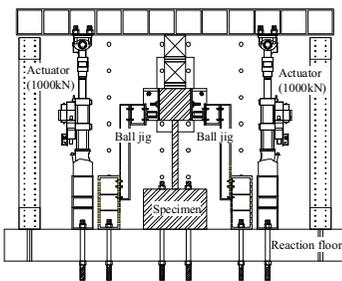
2.3 실험체 설치상황

실험체 설치 상황은 Fig. 4와 같다. 수평하중은 실험체의 가력보와 동일한 높이의 반력벽에 설치된 2000kN 용량의 Actuator에 의하여 가력하였다. 또한, 축력은 실험체 상부 프레임에 연결되어 있는 2대의 1000kN 용량의 Actuator를 사용하여 실험체 단면적의 10% ($0.1f_{ck}A_g$)로 실험 종료시까지 일정하게 가력하였다. 이 때 벽판의 내외 좌굴을 방지하고, 실제 건물에서 각층 슬래브의 격막작용(Diaphragm) 효과를 고려하기 위하여 실험체 상부 횡가력보에 좌굴 방지용 볼 지그(Ball jig)를 설치하였다.

실험체에 적용된 하중이력은 부재각 0.15%간격으로 점증 반복가력 하였으며, 각각 3 사이클씩 반복가력하면서 부재각에 따른 변위 제어 방식으로 가력하였다.



(a) 측면



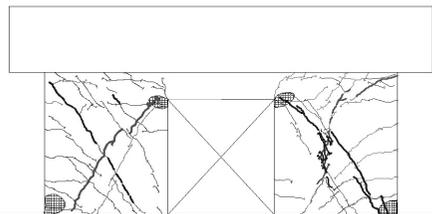
(b) 정면

Fig. 4 실험체 설치 상황

3. 실험 결과 및 분석

3.1 균열 및 파괴상황

모든 실험체에서 벽체의 휨 파괴 보다는 전단 파괴가 주요 파괴모드로 나타났으며 각 실험체의 파괴형상은 Fig. 5와 같다. 그림에서와 같이 초기 횡가력시 응력이 집중되는 우각부 주위에 초기 경사 균열이 발생했으며, 점차 균열 폭이 증가하면서 벽체 단부의 밑단에 압괴에 의한 콘크리트 박리가 일어났다.



(a) WB-0.23



(b) WB-MDF



(c) WB-ECC

Fig. 5 최종파괴상황

특히, 실제 시공상황을 고려하여 개구부 윗부분인 인방보 부위는 보강부위에서 제외되어 균열이 이 부분에서 집중적으로 발생했다. 실험체별 부재각에 따른 파괴 상황을 살펴보면, WB-0.23의 경우 부재각 0.0015rad에 우각부 초기균열이 발생하였으며 부재각 0.003rad이후 개구부를 중심으로 벽체의 양 복부에 대칭으로 사인장 균열이 발생하였으며, 단부에 미세한 휨균열이 발생하였다. 이후 사인장 균열의 폭이 약 3mm 이상까지 벌어지며 벽체 하부까지 진전되었고, 대각균열을 따라 상부벽체가 미끌리며 벽체 단부의 압괴와 함께 최종 파괴 되었다.

WB-MDF의 경우 부재각 0.003rad에 우각부의 초기균열을 시작으로 부재각 0.0046rad에서 벽체 단부에 휨균열이 발생 하였다. 부재각 0.006rad에서 슛크리트와 벽체의 계면(interface)에 처음으로 균열이 발생하였으며, 벽체 복부에 대각선 균열이 발생했다. 부재각 0.0077rad에서 복부에 발생했던 균열은 진전되지 않은 반면, 단부에서 발생한 계면균열이 진전되어 실험체 밑단에서 벽체높이의 2/3이상까지 진전되었다. 부재각 0.009rad에서 복부의 균열폭 진전과 함께 슛크리트가 모체로부터 떨어지는 것 같은 소리가 여러번 났다. 결국 두 번째 정가력에서 벽체 단부 밑단이 압괴되며, 슛크리트가 벽체 복부로부터 완전히 떨어져 최종 파괴 되었다.

WB-ECC의 경우 부재각 0.0046rad에 이를 때 까지 벽체 복부에 균열이 발생하지 않았으며, 단면증설을 하지않은 개구부 윗부분(인방보)에 균열이 집중되었다. 부재각 0.0077rad에서 벽체 단부 밑면에 수평 균열이 발생하며 그 균열의 폭이 1mm까지 진전 되는 것을 확인 하였다. 전체적으로 WB-MDF실험체에 비해 복부균열은 거의 발생하지 않았으며 이는 ECC 내에 있는 고인성 섬유가 초기균열 발생 시점을 지연 시킨 것으로 사료 된다. 이후 부재각 0.01rad에서 벽체 복부에 대각선 방향으로 미세균열이 발생하였으며, 중국에는 보강재인 ECC와 벽체의 계면에 발생했던 균열이 보강진 벽체의 면내방향으로 진전되어 단부 압괴로 최종 파괴되었다.

결국, 단면증설 실험체인 WB-MDF, ECC 모두 기존 벽체와 보강재의 계면이 박리되는 파괴양상을 나타

냈으나 WB-MDF의 경우 기존 벽체와 보강재가 완전 분리되어 중국파괴 되는 반면, WB-ECC의 경우 균열이 기존 벽체의 면내 방향으로 진전되며 보강재가 기존 벽체와 함께 탈락하는(Rip-off) 파괴양상을 나타내었다.

3.2 하중-변위 관계

본 연구에서 측정된 실험체에 대한 정적 반복 가력의 하중-변위 곡선은 Fig. 6과 같다. 변위는 벽체의 가력 지점에서 측정한 값이다.

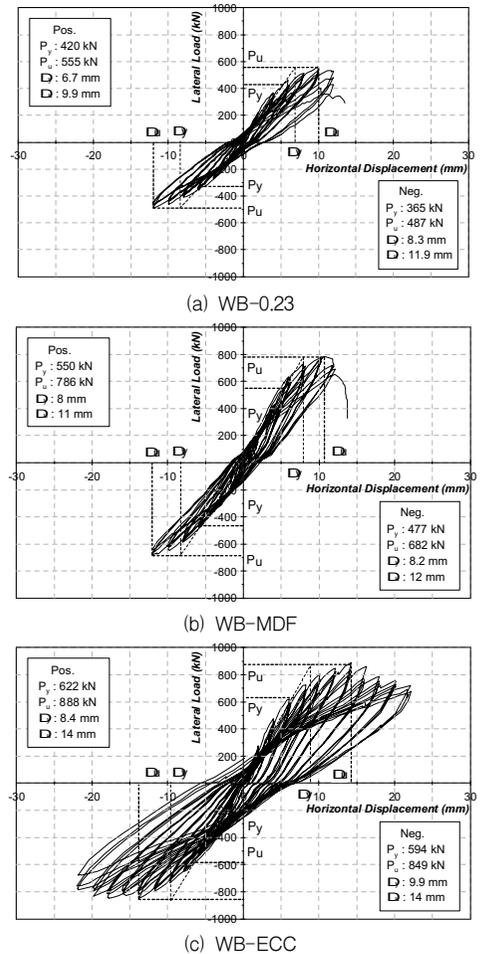


Fig. 6 하중-변위 관계곡선

그림에서와 같이 개구부 면적비가 23%이며 보강하지 않은 WB-0.23의 경우 555kN의 최대내력을 보였고 최대내력 이후 급격한 강도저하는 보이지 않았다. 또한 단면증설 실험체인 WB-MDF와 WB-ECC의 경우 최대 내력이 각각 786kN 및 888kN으로 나타나 보강하지 않은 기준 실험체에 비해 각각 48% 및 67%의 강도증가를 보였다. 또한 최대강도 이후 내력 저하율을 살펴보면 보강된 두 실험체에서 차이가 나타나고 있다.

WB-MDF의 경우 부재각 0.0077rad에서 최대강도를 나타낸 후 부재각 0.009rad에서 약 9.4%의 내력 감소되었고 부재각 0.01rad으로 정가력하는 도중 내력이 급감하며 취성적인 파괴강성을 나타내었다. 반면, WB-ECC의 경우 부재각 0.01rad에서 최대강도를 나타낸 후 부재각 0.017rad에 이를 때 까지 평균 5%의 내력 감소율을 나타내며 WB-MDF에 비해 연성적인 거동을 나타내었다.

3.3 강도비교

Table 10은 각 실험체의 계산된 전단 내력, 보강재(ECC, MDF)에 의해 향상된 전단강도와 실험값을 나타내고 있다. 보강하기 전 실험체 WB-0.23의 사인장 파괴를 고려한 전단내력(V_n)은 식(1)과 같다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

여기서 V_c 는 V_n 의 콘크리트 기여분으로 (ACI 318-05⁽¹¹⁾ Eq. 11-29)식에서 식(2)를, V_s 는 V_n 의 전단보강철근 기여분으로 (ACI 318-058) Eq.

11-31)식에서 식(3)을 이용했다. 또한 ECC와 MDF의 기여분은 현행 ACI와 국내에 특별한 기준이 마련되어 있지 않아 재료시험을 통해 얻은 압축강도(f'_c)를 고려하여 식(2)에 적용하였다.

$$V_c = 3.3 \sqrt{f'_c} h d + \frac{N_u d}{4 l_w} \quad (2)$$

여기서, f'_c : 콘크리트 압축강도 h : 벽두께
 d : $0.8 \times l_w$ l_w : 벽길이 N_u : 축력

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (3)$$

여기서, A_v : 수직간격 s내의 수평철근의 단면적
 s : 수평전단보강근의 수직간격
 f_y : 철근의 항복강도

보강실험체(WB-ECC, WB-MDF)의 전체 전단내력은 식(4)과 같다.

$$THE V_n = V_c + V_s + V_{ECC, MDF} \quad (4)$$

그 결과 Table 10에서와 같이 실험값 V_{exp} 이 설계값 $THE V_n$ 에 비해 10~20% 높게 나타난 것을 확인 할 수 있다.

3.4 강성 및 연성

Fig. 6은 정·부가력시 최대하중·변위점을 연결하는 직선의 기울기로 평가되는 각 부재각에 대한 강성값을

Table 10 강도비교

Specimen	h (mm)	l_w (mm)	V_c (kN)	V_s (kN)	V_{ECC} (kN)	V_{MDF} (kN)	$THE V_n$ (kN) ($V_n + V_{ECC, MDF}$)	V_{exp} (kN)	$\frac{V_{exp}}{THE V_n}$ (%)
WB - 0.23	100	2100	336	188	-	-	524	555	106
WB - ECC	160				163	-	708	786	111
WB - MDF	160				-	163	708	888	125

V_n : 보강전 전단내력 V_{ECC} , V_{MDF} : ECC, MDF가 부담하는 전단내력 $THE V_n$: 최대내력(계산값) V_{exp} : 최대내력(실험값)
 h : 벽체 두께 l_w : 벽체 길이

나타내었다.

그림에서와 같이 부재각 0.0015rad에서 실험체 WB-0.23, MDF, ECC의 초기강성을 살펴보면, 각각 91.9kN/mm, 118kN/mm, 136.4kN/mm로 WB-0.23 기준으로 WB-MDF는 약 28.4%, WB-ECC는 약 48.4% 높게 나타났다. 단면증설 실험체인 WB-MDF와 WB-ECC의 경우 보강 후 초기강성은 높게 나타나고 있으며, Fig. 7에서와 같이 실험체의 항복 횡변위(WB-MDF는 횡변위 5.2mm WB-ECC는 횡변위 7.5mm)이후에도 기울기의 변화가 거의 없어 강성감소율이 낮아지지 않은 것을 확인할 수 있다.

이는 단면증설 실험체의 경우 모체와 보강재의 콘크리트가 어느정도 일체화를 유지함으로써 모체와 보강재에 동시에 균열이 발생해 보강재료의 응력 재분배가 효과적으로 일어나기 때문으로 사료된다.

특히 동일한 단면증설 두께에도 불구하고 WB-ECC의 초기 강성이 WB-MDF에 비해 15%높게 나타나고 있는데 이는 ECC의 혼합재료 중 고인성 섬유에 의해

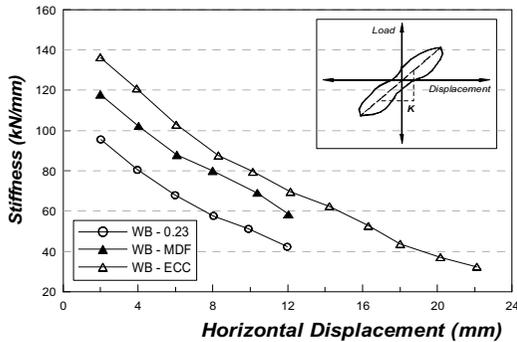


Fig. 7 실험체의 강성 비교

발현된 인장강도에 의한 것으로 사료된다.

변위연성도(Table 11의 μ)는 최대변위를 항복변위로 나눈 값으로 정의된다. 이때 항복변위는 벽체 수준의 항복시점과 유사하게 평가되는 최대하중의 75%점을 지나는 WB-0.23 실험체의 전단변형이 가장 크게 나타나고 있다는 Secant stiffness line의 교점이 하중-변위 곡선과 만났을때의 변위로 정의하였다. Table 11에서 알 수 있듯이 정, 부가력에서 실험체 WB-0.23, MDF, ECC의 변위연성비는 평균 1.45, 1.6, 2.4로 WB-ECC가 가장 높게 나타났으며, 이는 기준실험체인 WB-0.23에 비해 약 65%, WB-MDF에 비해 50% 높게 나타난 것이다.

3.5 전단변형

Fig. 8은 부재각에 따른 실험체별 전단변형량을 표시한 것으로 개구부 주위의 라인 LVDT에 의해 측정된 전단변형각을 이용하여 횡변위를 산출한 것이다.

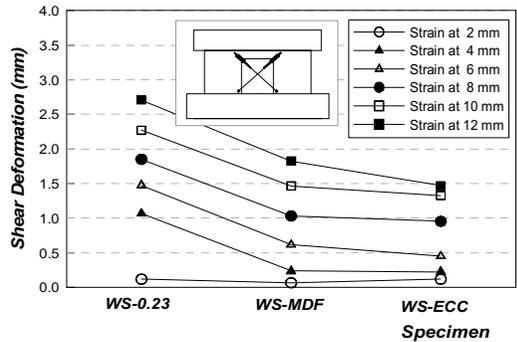


Fig. 8 부재각에 따른 실험체별 전단변형

Table 11 실험결과

실험체		P_y (kN)	P_u (kN)	S_y (kN/mm)	S_u (kN/mm)	Δy (mm)	Δu (mm)	μ
WB - 0.23	정가력	420	555	84	56	7	10	1.5
	부가력	365	487	44	41	8	12	1.4
WB - MDF	정가력	550	786	94	73	8	14	1.7
	부가력	477	682	81	57	8.2	12	1.5
WB - ECC	정가력	622	888	104	62	8.4	22	2.6
	부가력	594	849	86	62	9.9	22	2.2

P_{cr} : 초기균열하중, P_y : 항복하중 P_u : 최대하중 S_y : 항복강성 S_u : 극한강성 Δy : 항복변위 Δu : 최대변위 μ : 변위연성비

WB-0.23의 경우 상부 횡변위의 21%가 전단변형에 의한 것으로 측정되었으며, WB-MDF, ECC의 경우 각각 상부 횡변위의 10.4% 및 9.4%가 전단변형에 의한 것으로 측정되었다. 결국 동일 변위에서 보강을 하지 않은 WB-0.23 실험체의 전단변형이 가장 크게 나타나고 있으며, WB-0.23에 비해 WB-MDF, ECC 실험체의 전단변형이 약 50% 정도 작게 나타났다. 특히 ECC 단면증설 실험체의 전단변형이 MDF 단면증설 실험체 보다 작게 나타나 있는데 이는 ECC재료가 전단력에 보다 효과적으로 저항하기 때문인 것으로 사료된다.

3.6 에너지소산 특성

철근 콘크리트 부재의 주요한 주기 거동 특성중의 하나인 에너지 소산 능력을 확인하고자 하중-변위의 주기곡선으로 둘러싸인 부분의 면적을 산정하였다. Fig. 9는 해당 사이클까지 소산된 에너지량을 정량적으로 합산하여 나타내었다.

누적에너지 소산량을 살펴보면, 그림에서와 같이 모든 실험체가 가력초기부터 12사이클까지 거의 동일한 소산응력을 발휘하였다. 이후 WB-0.23 실험체의 실험이 종료된 18사이클까지의 누적 에너지 소산량을 비교하면 WB-0.23가 25,220kN·mm였으며, WB-MDF 및 WB-ECC가 33,407kN·mm, 36,926kN·mm을 나타냄으로써 WB-0.23에 비해 각각 32% 및 46% 높은 에너지 소산능력을 보였다. 또한 WB-ECC는 우수한 연성능력에 의해 33사이클까지 150,000kN·mm의 누적 에너지 소산량을 나타냄으로써 WB-0.23 및 WB-MDF에 비해 상당히 높게 나타났다.

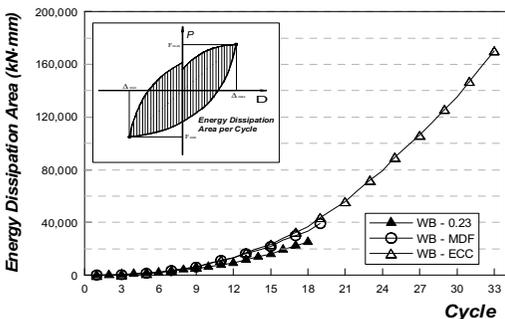
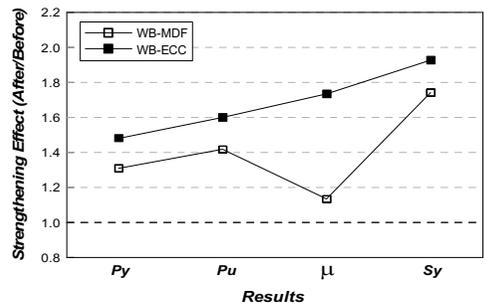


Fig. 9 에너지소산 특성

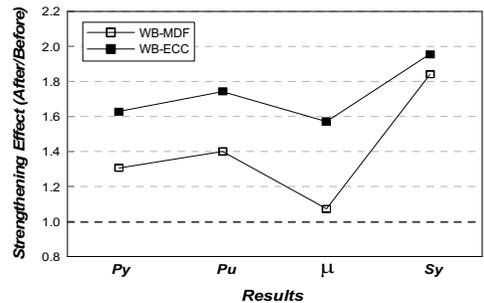
3.7 종합 평가

본 연구는 단면증설법을 이용하여 손상을 입은 전단벽의 강도 및 변형능력을 회복 또는 증진시키는 것에 목적이 있다. 이를 위하여 하중-변위 곡선, 최대강도, 항복강성, 연성 및 에너지 소산능력을 비교하여 보았다.

이러한 결과들을 정량적으로 비교하고자 WB-0.23의 항복강도(P_y), 최대강도(P_u), 변위연성비(μ), 및 항복강성(S_y)을 1로 가정하고 이에 따른 보강효과를 가력 방향별로 정리하여 Fig. 10에 나타내었다. 실험 결과 정, 부가력에서 비슷한 경향이 나타났으며, 단면증설 보강방법인 ECC와 MDF 모두 효과적인 것으로 판단되었다. 특히, 모체에 보강재를 부착하는 단면증설 보강방법에서 ECC는 계면에서 발생된 균열이 모체로 진전됨으로써 응력 재분배가 효과적으로 나타나고 있으며 변위연성비 또한 기준 실험체와 MDF에 비해 각각 65%, 50% 높게 나타남으로써 연성면에서 우수한 것으로 판단된다.



(a) 정가력



(b) 부가력

Fig. 10 보강효과의 종합적 평가

4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 모체에 보강재를 부착하는 단면증설 보강방법에서 최종 파괴상황을 살펴보면, WB-ECC는 계면에서 발생된 균열이 모체로 진전됨으로써 응력 재분배가 효과적으로 나타났다.
- 2) 보강실험체인 WB-MDF, WB-ECC는 보강하지 않은 WB-0.23에 비해 각각 48% 및 67%의 강도증가를 보였으며 최대강도 이후 각각 9.4% 및 5%의 강도저감율을 나타냄으로서 WB-ECC가 WB-MDF에 비해 연성면에서 우수했다.
- 3) WB-MDF, WB-ECC는 WB-0.23에 비해 각각 28.4%, 48.4% 높은 초기강성을 보였지만, 이후 부재각 이 증가함에 따라 눈에 띄는 강성저하율의 감소가 없었다.
- 4) 동일 부재각에서 전단변형에 의한 횡변위를 살펴본 결과, WB-ECC 실험체의 전단변형이 가장 적은 것으로 나타났다. 따라서 MDF 보다 ECC가 전단력에 효과적으로 저항함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업(과제번호:R11-2005-056-03002-0) 및 2005년도 건설핵심기술개발사업 노후공동주택 연구비 지원에 의해 수행(과제번호:C105A1050001-05A0505-00210)되었으며, 2007년 정부(교육인적자원부)의 지원을 받아 수행된 연구임(지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단).

참고문헌

1. 윤현도, 최창식, “고강도 콘크리트 전단벽의 전단강도”, 대한건축학회논문집, 제19권 5호, 2003, 05, pp. 53-60.

2. 특허, “변형경화형 시멘트복합체를 사용한 RC구조물의 보수보강공법”, (주)AMS엔지니어링 (<http://www.eng-ams.com>)
3. 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주, “마이크로 역학에 의하여 설계된 고인성 섬유복합 모르타르의 1축 인장거동”, 한국콘크리트학회학술발표회 논문집, 16(1), 2004, pp. 284-287.
4. 김재환, 이의배, 김영선, 김영덕, 주지현, 김무한, “마이크로 및 매크로 섬유를 사용한 하이브리드 HPFRCC의 역학적 특성에 관한연구”, 한국콘크리트학회학술발표회논문집, 16(1), 2004, pp. 276-279.
5. 윤현도, 양일승, 한병찬, 전에스터, 福山洋, 문연준, “Steel Cord 및 PVA 혼합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장강도 특성”, 한국콘크리트학회 학술발표대회 논문집, 16(1), 2004, pp. 18-21.
6. 윤현도, 최창식, “개구부를 갖는 철근콘크리트 바렐형 전단벽의 전단강도와 변형능력”, 대한건축학회 논문집, 제 21권 3호, 2005. 3, pp. 11-18.
7. 최현기, 최윤철, 최창식, 이리형, “개구부 설치를 위해 인위적 손상을 가한 전단벽의 구조성능 평가”, 구조물 전단학회 논문집, 제11권 3호, 2007. 5, pp. 77-86.
8. 한병찬, 김재환, 임승찬, 森井直治, 권영진, “균열제어형 DFRCC를 사용한 RC 구조물 보수공법”, 한국콘크리트학회지 제18권 1호 동권90호, 2006. 1, pp. 56-61.
9. 小野正行, “鐵筋コンクリート造有開口耐震壁の弾塑性性狀に關する研究”, 近畿大覺 博士學位論文, 2000.
10. Darwin, D. and Nmai, C. K., “Energy Dissipation in RC Beams under Cyclic Load.” Journal of Structural Div, ASCE, Vol. 112, No. 8, Aug. 1986, pp. 1829-1846.
11. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318 R-05)”, American Concrete Institute, Michigan, 2005.
12. A. E., Naaman, “Toughness, Ductility, Surface Energy and Deflection-Hardeninf FRC Composites,” Proc. of JCI International Workshop on DFRCC, Oct. 2002, pp. 33-57.

(접수일자 : 2006년 2월 10일)