



FRP로 보강한 비보강 조적 벽체의 전단강도 산정

배백일¹⁾ · 윤효진¹⁾ · 최창식¹⁾ · 최현기^{1)*}

¹⁾한양대학교 건축공학부

Evaluation of Shear Strength of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted by Fiber Reinforced Polymer Sheet

Baek-II Bae,¹⁾ Hyo-Jin Yun,¹⁾ Chang-Sik Choi,¹⁾ and Hyun-Ki Choi^{1)*}

¹⁾Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT Unreinforced masonry buildings represent a significant portion of the existing and historical buildings around the world. Recent earthquakes have shown the need for seismic retrofitting for these types of buildings. Various types of retrofitting materials (i.e., shotcrete, ECC and Fiber Reinforced Polymer sheets (FRPs)) for unreinforced masonry buildings (URM) have been developed. Engineers prefer to use FRPs, because these materials enhance the shear strength of the wall without expansion of wall sectional area and adding weight to the total structure. However, the complexity of the mechanical behavior of the masonry wall and the lack of experimental data from walls retrofitted by FRPs may cause problems for engineers to determine an appropriate retrofitting level. This paper investigate in-plane behavior of URM and retrofitted masonry walls using two different types of FRP materials to determine and provide information for the retrofitting effect of FRPs on masonry shear walls. Specimens were designed to idealize the wall of a low-rise apartment which was built in 1970s in Korea with no seismic reinforcements with an aspect ratio of 1. Retrofitting materials were carbon FRP and Hybrid sheets which have different elastic modulus and ultimate strain capacities. Consequently, this study evaluated the structural capacity of masonry shear walls and the retrofitting effect of an FRP sheet for in-plane behavior. Also, the results were compared to the results obtained from the evaluation method for a reinforced concrete beam retrofitted with FRPs.

Keywords : unreinforced masonry (URM) wall, carbon fiber reinforced polymer sheets, hybrid sheets, shear strength

1. 서 론

조적조 건물은 시공이 간편하고 공사기간이 빠르며 재료를 구하기 쉬울 뿐만 아니라 건립에 특별한 기술이 필요치 않다. 이로 인해 우리나라를 비롯하여 세계 여러 나라 곳곳에 저층건물을 위한 가장 합리적인 건물형태로 간주되고 있다. 조적조 건물은 구조적으로 큰 압축력에 저항하지만 연성이 낮고, 특히 지진과 같은 동하중에 취약한 단점을 갖고 있다. 1933년 발생한 미국 캘리포니아 롱비치 지진의 영향으로 캘리포니아주의 학교건물을 비롯한 공공건물 건립에 비보강 조적조의 사용이 금지되었으며, 지진 피해가 발생할 때마다 조적조 건물들의 심각한 피해상황에 대한 경고가 이어지고 있다. 또한 최근에 일어난 지진은 지진 발생 위험이 상대적으로 낮은 지역

으로 내진 보강 대책이 심각하게 고려되지 않은 지역이었다. 2010년과 2011년 연이어 발생한 뉴질랜드에서의 지진은, 뉴질랜드의 높은 수준의 내진 규정에도 불구하고 큰 인명피해 및 재산피해를 주었다.¹⁻³⁾

우리나라의 경우 지진의 위험성이 존재함에도 불구하고 상당수의 조적조 건물들은 내진설계 및 보강이 전혀 적용되어있지 않는 상태이다. 국내 저층 조적조 건물은 전체 건축물의 30%, 전체 주거용 건축물의 40% 이상으로 대부분이 주거용 건물이며 지진에 매우 취약한 상태이다.⁴⁾ 국내 내진 설계 기준은 1988년 내진 설계안이 처음 제정된 이래로, 적용 범위가 6층 이상의 건축물에서 현재 3층 이상의 구조물로 강화되었지만, 대부분의 주거용 비보강 조적조 건축물은 1970~1990년대에 건설되어 내진설계가 적용되어있지 않는 상태이다. 또한 건물의 열화가 상당수 진행되어 내구성이 약화되어 있는 상태이다.

최근, 국내에서도 지진에 대한 위험이 고조되면서 조적조 건축물과 저층 건축물 등 지진에 취약하며, 지진시 큰 피해를 입을 수 있는 건축물에 대한 내진 성능 평가

*Corresponding author E-mail: chk7796@naver.com

Received February 3, 2012, Revised April 2, 2012,

Accepted April 12, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

및 내진 보강에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{4,5)}

보강 이전의 횡력 저항 성능 파악을 위한 비보강 조적 벽체의 횡하중에 대한 설계방안 및 기존 구조물의 성능 평가는 과거의 연구 결과를 종합하여 FEMA 356⁴⁾에서 제시하고 있다. 또한 손상을 입은 부재 및 부족한 성능을 보강하기 위한 성능 평가 방법도 제시하고 있으며, 비보강 조적 벽체의 보강 방안으로는 슛크리트 및 코팅, 보강코어(reinforced core), 프리스트레스트 코어(prestressed core) 등 다양한 방안을 제안하고 있다. 특히, 비보강 조적벽체의 보강시 모재의 강도가 약해 이에 대한 피해를 최소화하고 추가적인 자중이 발생하지 않도록 하기 위해 FRP 시트(fiber reinforced polymer sheet)가 활발히 사용되고 있다. 이에 대해 ElGawady⁵⁾는 FRP 시트를 이용한 횡강성 보강방안에 대한 실험 연구를 통해 보강 설계안을 제시하였으며, Amir⁶⁾는 손상을 입은 보강 조적벽체에 대한 보강방안으로 FRP 시트의 부착 방법을 제시하였다.

그러나 국내에서 사용하는 조적 요소는 해외에서 사용되는 조적 요소와는 크기 및 강도 등의 재료적 특성이 다르기 때문에 국내 연구진행에 있어 비보강 상태 및 보강 상태에 대한 해외 연구 결과를 적용하기 어려운 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 섬유복합시트를 이용하여 국내 비보강 조적 벽체를 보강하여 내진 성능 향상에 대한 평가를 실험을 통해 평가한 후 적정 보강량을 산정하기 위한 전단강도 산정방법을 제시하고자 한다.

2. 비보강 조적벽체 및 보강된 조적벽체의 성능 평가

비보강 조적벽체의 거동은 보강조적이나 조적채움골조의 조적조와는 전혀 다르다. 특히 FRP 시트는 기본적으로 방향성을 가진 재료로서 보강 대상이 되는 비보강 조적 벽체의 파괴 거동이 매우 중요한 요소가 된다. 또한 보강량의 산정을 위해서는 모재의 보유 내력을 알고 있어야 한다. 이에 이 연구에서는 조적 벽체의 파괴 상황을 네 가지로 구분하였으며, 각 파괴 형태에 대한 강도의 산정은 FEMA 356⁴⁾에 의거하여 산정하였다.

2.1 비보강 조적 벽체의 파괴형태와 이에 따른 강도

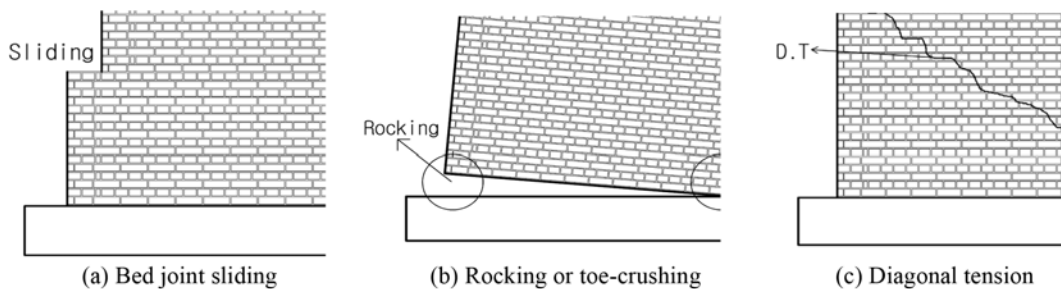


Fig. 1 Failure mode of unreinforced masonry wall

비보강 조적 벽체의 횡하중에 대한 거동은 크게 전단과 휨 두 가지와 각각에 대해 변위 제어형과 하중 제어형 파괴 형태로 나눌수 있다. 파괴 형태는 벽체의 높이에 대한 길이의 비(형상비: L/h)와 압축력의 크기로 결정되며 Fig. 1과 Table 1에 정리하여 나타내었다.

비보강 조적 벽체의 강도는 아래 식 (1)에서 (4)까지 제시되어 있는 FEMA356의 전단강도 산정식에 의해 추정 가능하다.

$$Q_{CE} = V_{bjs} = v_{me}A_n \quad (1)$$

$$Q_{CE} = V_r = 0.9\alpha P_E \left(\frac{L}{h_{eff}} \right) \quad (2)$$

$$Q_{CE} = V_{tc} = \alpha P_E \left(\frac{L}{h_{eff}} \right) \left(1 - \frac{f_a}{0.7f'_m} \right) \quad (3)$$

$$Q_{CE} = V_{dt} = f_{dt}A_n \left(\frac{L}{h_{eff}} \right) \left(1 + \frac{f_a}{f_{dt}} \right) \quad (4)$$

여기서, A_n 은 모르타르의 부착면적, h_{eff} 는 벽체의 높이, L 은 벽체의 길이, P_E 는 벽체에 가해지는 예상축압축력, v_{me} 은 베드 조인트 슬라이딩 전단강도, f'_m 은 벽돌의 압축강도, f_{dt} 는 대각 인장응력, α 는 경계조건 계수로 캔틸레버형일 때에는 0.5, 양단 고정일 경우 1.0을 사용하며, f_a 는 축압축 응력으로 벽체에 작용하는 축하중을 벽체의 면적으로 나눈 값이다.

2.2 FRP 시트의 의한 보강 효과

국내에서는 FRP를 사용한 비보강 조적 벽체의 보강 설계에 대한 연구가 활발히 진행되지 않아 국내 재료를 사용한 조적벽체의 보강 방안에 명확한 평가기준은 제시되어있지 않은 상태이다. 따라서, 이 연구에서는 국외에

Table 1 Failure mode of unreinforced masonry wall by aspect ratio⁴⁾

	Deformation controlled action	Force controlled action
L/h < 1.0	Rocking	Toe-crushing
L/h > 1.5	Bed joint sliding	Diagonal tension

서 진행된 연구를 통해 제시된 강도 산정 방법을 적용하였다.

ElGawady⁷⁾는 FRP 시트로 보강된 비보강 조적 벽체의 전단강도 평가를 위해 Triantafillou⁸⁾의 전단강도 산정모델을 사용하였다. Triantafillou 모델은 철근콘크리트 보의 FRP 시트를 사용한 전단강도 보강식의 수정된 형태로서 FRP 시트의 보유 변형률을 극한값까지 사용하지 않고 유효 변형률로 제한하는 모델이다.

$$P = F_m + F_{FRP} \quad (5)$$

$$F_{FRP} = \rho_h E_{FRP} \varepsilon_{eff} tL \quad (6)$$

$$\rho_h = \frac{A_{FRP}}{Lt} \quad (7)$$

여기서, F_m 은 비보강 조적 벽체의 강도, F_{FRP} 는 FRP의 발현 강도, ρ_h 는 수평방향으로의 보강비, E_{FRP} 는 FRP의 탄성계수, A_{FRP} 는 FRP의 단면적, ε_{eff} 는 FRP의 유효변형률이며 t 는 벽체 두께, L 은 벽체의 길이이다.

FRP 시트의 유효변형률은 기존의 벽체 실험 결과를 바탕으로 한 비선형 회귀분석을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{eff} = \begin{cases} 0.0119 - 0.0205(\rho_h E_{FRP}) + 0.0104(\rho_h E_{FRP})^2 \\ \rightarrow (0 \leq \rho_h E_{FRP} \leq 1 \text{ GPa}) \\ 0.0024 - 0.00065(\rho_h E_{FRP}) \\ \rightarrow (\rho_h E_{FRP} \geq 1 \text{ GPa}) \end{cases} \quad (8)$$

AC125 model은 ICC⁹⁾(international code council)에서 작성된 보고서에서 제시된 하나의 가이드라인으로 비보강 조적 벽체 또는 철근콘크리트 벽체를 섬유복합시트로 한 면만 보강할 경우 섬유복합시트의 횡저항 성능을 산정할 수 있도록 다음 식으로 제안하고 있다.

$$F_{FRP} = 0.75 \rho_h f_j tL \quad (9)$$

$$f_j = 0.004 E_{FRP} \leq 0.75 f_{FRP,u} \quad (10)$$

여기서, $f_{FRP,u}$ 는 섬유복합시트의 극한 인장강도이며, f_j 는 섬유복합시트의 축방향력이다.

이 연구에서는 비보강 조적 벽체의 보강에 사용된 FRP 시트의 보강 효과를 정량화하기 위하여 FRP 시트가 일방향 및 단면으로 보강된 조적벽체에 대한 연구를 진행하였다.

3. FRP 시트의 보강효과 산정을 위한 실험 계획

비보강 조적 벽체의 보강에 사용된 FRP 시트의 보강성능을 정량화하기 위하여 세 가지의 실험체를 계획하였다. 실험체의 형상은 저축력에서의 rocking 현상을 모사할 수

있도록 형상비 L/h가 1에 가깝게 계획하였다. 보강효과의 산정을 위해 비보강 조적 실험체와 큰 탄성계수를 가진 탄소섬유보강 폴리머 시트(CFRP sheet), 비교적 낮은 탄성계수와 큰 변형 능력을 가진 하이브리드시트(hybrid sheet)를 사용하여 보강한 두 개의 실험체로, 총 세 개의 실험체를 제작하였다.

3.1 보강 재료 및 비보강 조적벽체의 재료 특성

비보강 조적 벽체의 전단 저항 성능을 향상시키기 위하여 사용된 보강 재료는 철근콘크리트 보에 적용되어 많이 사용되고 있는 탄소섬유시트와 최근 새로 개발이 이루어진 하이브리드시트를 사용하였다.

하이브리드시트는 GFRP와 아라미드(aramid)를 혼합하여 제작된 것으로 두 종류의 섬유시트의 장점만을 도입하여 제작한 섬유복합시트이다. 하이브리드시트는 최근 개발된 보강 재료로 아직 시중에는 널리 사용되고 있지는 않지만 두 종류의 섬유시트를 혼합함으로써 우수한 성능을 가지고 있으며 기계적 특성은 Table 2에 나타내었다. 탄소섬유시트의 경우 하이브리드시트에 비해 섬유의 인장강도 및 탄성계수가 높지만 극한 변형률이 낮다. 반면 하이브리드시트의 경우 탄소섬유에 비해 섬유의 인장강도와 탄성계수는 작지만 극한변형률이 높은 서로 다른 재료적 특성을 지니고 있다. 그러나 두 보강 재료의 극한변형률이 각각 0.017, 0.034로 비보강 조적 벽체의 변형 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며 각각의 섬유복합시트의 응력-변형률 곡선은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2 Material properties of FRP

Type	W_{frp} (g/m ²)	f_t (MPa)	E (GPa)	ε (%)
CFRP sheet	93	2,800	165	1.7
Hybrid sheet	145	2,414	71	3.4

W_{frp} : Unit mass of FRP, f_t : Tensile strength of FRP, E : Elastic modulus of FRP, ε : Ultimate strain of FRP

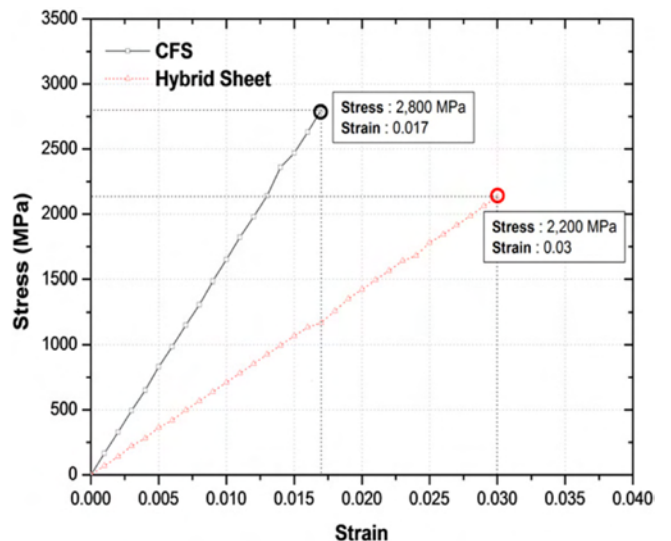


Fig. 2 Stress-strain relationship of FRP sheet

Table 3 Material properties of URM

Compressive strength of cement brick (MPa)	Compressive strength of mortar (MPa)
15.7	8.4

실험체는 1:1 스케일로 만들어졌기 때문에 시중에서 판매하는 190 × 90 × 57 (mm)의 표준형 시멘트 벽돌이 사용되었고 줄눈은 10 mm로 하였으며, 1.0B 쌓기를 통해 시공하였다. 벽돌의 강도는 KS F4004에 의해 시험되었으며, 평균 압축 강도는 15.7 MPa이었다.

실험체 제작에 사용된 모르타르는 시중에 판매되는 보통의 모르타르를 사용하였고 시멘트와 모래의 배합은 1:1로 하였으며 50 mm 큐브 공시체를 제작하여 압축강도를 시험한 결과 평균 8.4 MPa의 압축강도를 나타내었다. 이러한 재료시험 결과는 Table 3에 정리하였다.

3.2 FRP를 사용한 비보강 조적 벽체의 보강

저압축력과 형상비에 의한 조기 휨 파괴를 방지하기 위해 벽체와 베이스 사이에 수직방향으로 FRP를 사용하여 보강하였다. 휨에 대한 보강량은 Fig. 3과 같이 철근 콘크리트벽체에 사용하는 방법과 같은 단면해석 방법을 적용하였으며, 조적벽돌은 압축력에만 저항하며, FRP는 인장력에만 저항한다는 가정을 사용하여 결정하였다. 압축응력 블록의 형태는 ACI318¹⁰⁾에 의해 가정했다.

FRP 시트의 전단 저항능력에 대한 정량적 산정을 위하여 전면에 걸쳐 한 겹의 FRP 시트를 부착하였으며 각

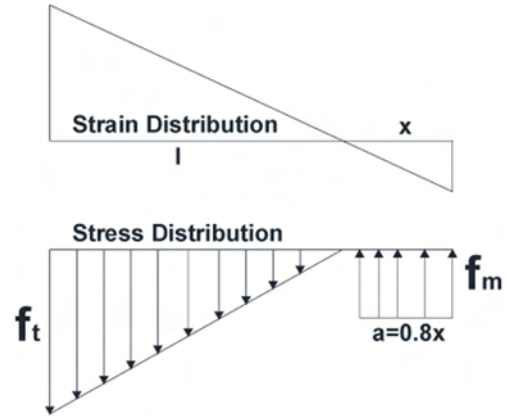


Fig. 3 Flexural strength calculation of retrofit specimen

각에 대한 보강량은 Table 4, 실험체의 형상 및 보강 형태는 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 실험체의 설치 및 하중 재하 방법

Fig. 5에 실험체의 설치상황을 나타내었다. 조적 벽체는 프리캐스트 RC 베이스 위에 제작되었으며 이는 실험실 내의 strong frame에 고정되어 설치되었다. 실험체에 적용된 압축력은 대상 벽체가 저축력(3층 이하를 대상으로) 상태임을 고려하여 자중 및 가력용 철골 보를 통한 최저의 압축력이 작용하도록 하였으며, 횡력은 실험체의 상부에 조립 부착된 철골 가력보에 연결된 1,000 kN 용량의 액추에이터를 통해 가력하였다. 또한 벽체가 면의 방향의 좌굴을 방지하기 위해 좌굴 방지용 프레임을 설치하였다.

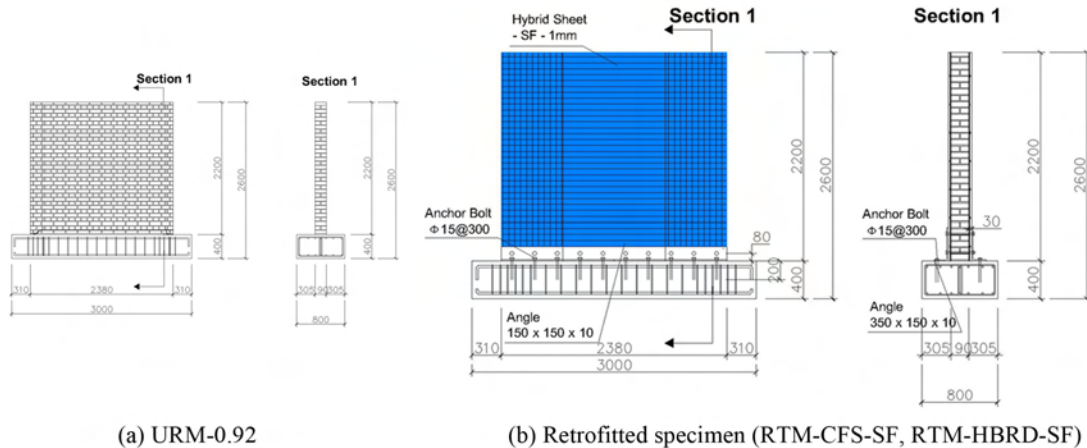


Fig. 4 Specimens dimensions (unit: mm)

Table 4 List of specimen

Specimen	H (mm)	L (mm)	Aspect ratio	t_{URM} (mm)	Retrofit material	t_{FRP} (mm)	FRP sheet layer	Brick element (mm)	Vertical reinforcement (mm)
URM-0.92	2380	2400	0.92	190	-	-	-	190×90×57	-
RTM-CFS-SF					CFRP sheet	0.16	1		60
RTM-HBRD-SF					Hybrid sheet	0.17	1		45

H: height of specimen, L: length of specimen, t_{URM} : URM thickness, t_{FRP} : FRP thickness

4. 실험 결과

4.1 파괴양상 및 하중-변위 관계

각 실험체에 대한 파괴 양상은 Fig. 7에 나타내었으며, 하중-변위 관계는 Fig. 8에 나타내었으며 결과는 Table 5에 요약하여 나타내었다.

비보강 조적 벽체인 URM-0.92 실험체는 부재각 +0.2%에서 최대 하중 23 kN을 나타내었다. 앞서 기술한 파괴 상황에 따르면 초기 균열 이후 벽체와 베이스 사이의 모르타르 면에서의 균열로 인해 더 이상의 하중 전달이 벽체와 기초 사이에서 존재하지 않게 되는데 이는 벽체의 들림 현상 때문이다. 또한 부재각 0.5% 이후 더 이상의 하중 증가 없이 변위만이 증가하는 것으로 보아 균열 상부의 벽체가 회전한 것으로 판단된다. 최종파괴는 최대 하중이 발생한 지점 이후 부재각 0.4%에서의 들림에 의한 것으로 나타났다.

RTM-CFS-SF 실험체의 최대 하중은 부재각 +0.69%에서 99 kN으로 나타났다. RTM-CFS-SF는 보강 조적 벽체에 비해 매우 우수한 강도 상승효과를 나타내고 있다. 그러나 최대하중을 발현한 이후 급격히 하중이 감소하는 현상을 보이고 있다. 최대강도 발현시점에 큰 소리와 함께 벽체와 베이스 사이에 보강되었던 섬유시트의 파괴가 발생하였다. 실험체가 최대하중에 도달하기 이전부터 벽체로부터 섬유의 탈락이 발생하였는데 탈락된 부분에서의 응력집중 현상으로 인한 결과로 판단된다. 이후 들림 현상에 지배되어 섬유 시트의 파괴가 진전되었으며 벽체 하단부 벽돌의 압괴가 발생하면서 최종 파괴되었다.

하이브리드시트로 보강한 RTM-HBRD-SF의 최대하중은 부재각 +1.31%에서 139 kN으로 비보강 조적 벽체와 탄소섬유시트에 비해 매우 우수한 강도 상승효과를 나타낸다. 또한 RTM-CFS-SF와는 다르게 최대하중을 발현한 이후에도 지속적인 하중 지지능력을 보이며 완만한 하중 감소 현상을 보여주었다. CFS와 비교하였을 때 재료 특성에 따라 탄성계수가 낮고 극한변형률이 커 벽체와 베이스 사이에서 섬유의 파괴가 발생하지 않았다. 그러나

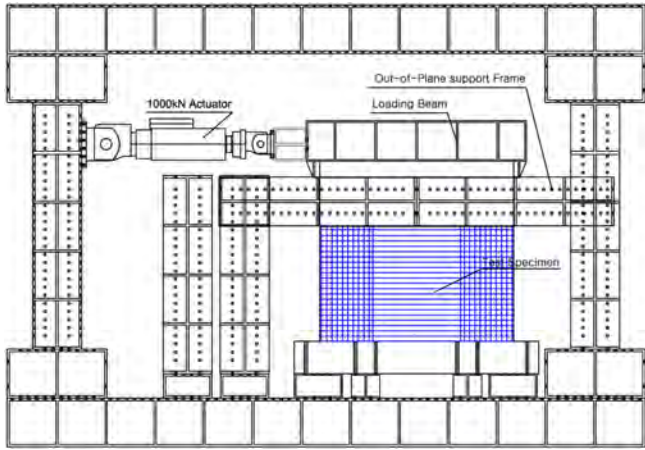


Fig. 5 Test set-up

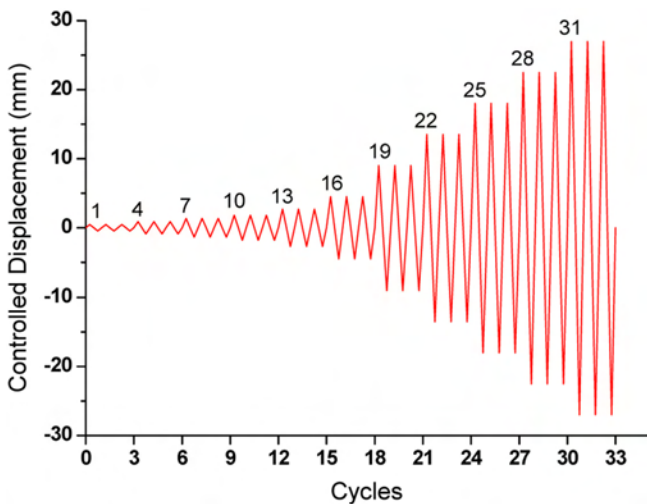


Fig. 6 Applied displacement history

가력 방식은 변위제어방식을 취하였다. 제어되는 변위는 실험체의 회전각을 기준으로 제어되었으며 횡력의 가력 방식은 Fig. 6과 같이 가력시 발생하는 변위를 가력점의 높이로 나누어준 부재 회전각을 0.1% 단위로(0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) 증가시키며 제어하였다. 각 사이클별로 3회씩 정부가력으로 반복가력하였다.

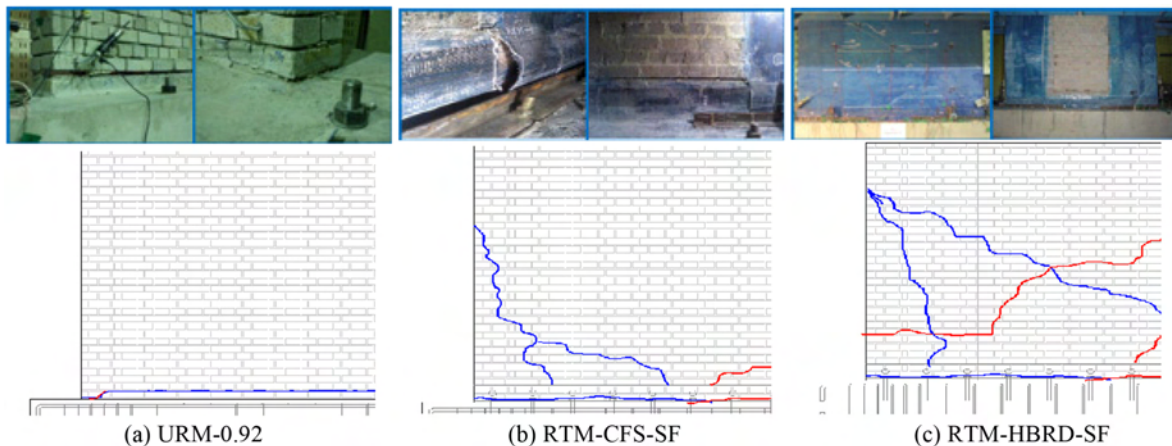


Fig. 7 Crack pattern and failure mode

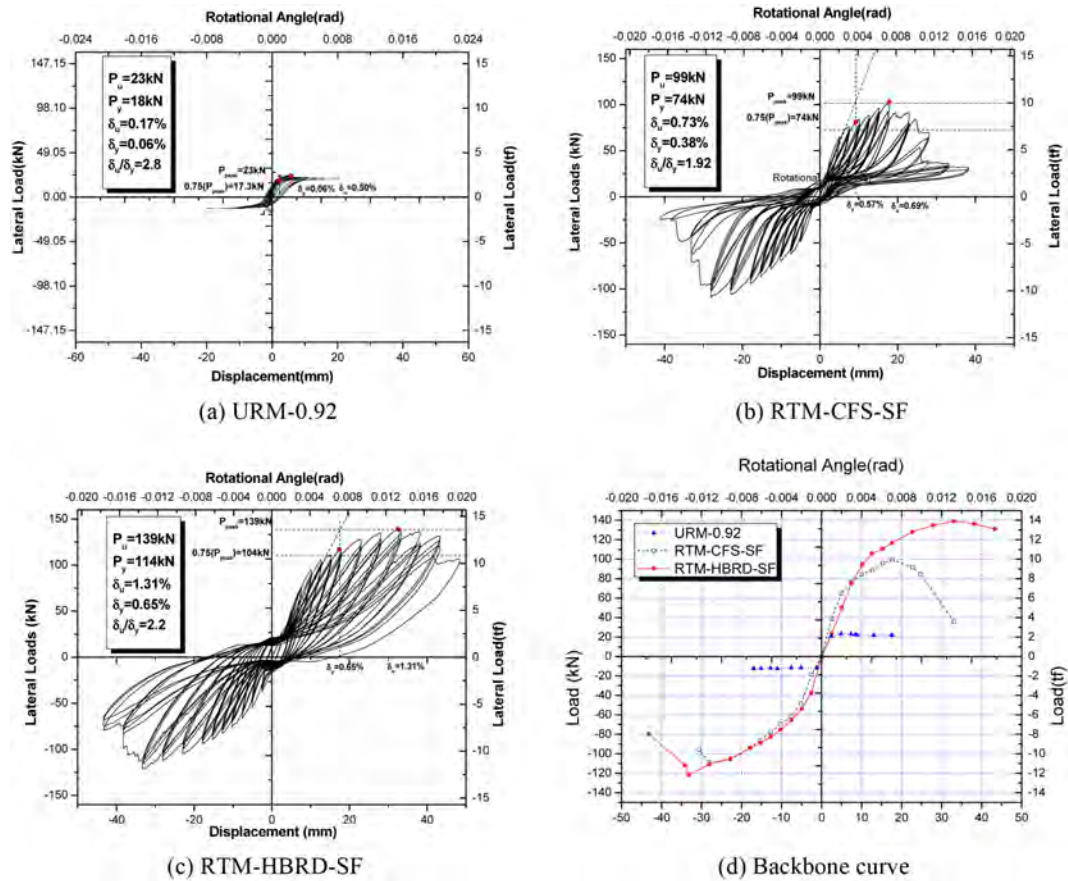


Fig. 8 Load-displacement relationship

Table 5 Test result

Specimens		P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	$\delta_{failure}$ (mm)	θ_y (%)	θ_{max} (%)	μ_{max}	$\frac{P_{u(retrofit)}}{P_{u(URM)}}$
URM-0.92	Pos	13	18	23	1.47	2.83	12.6	0.06	0.5	2.8	-
	Neg	-5	-9	-12	-1.78	-9.8	-9.8	-0.08	-0.10	1.25	-
RTM-CFS-SF	Pos	74	74	99	14.3	17.7	33.1	0.57	0.7	1.2	4.3
	Neg	-54	-81	-108	-19	-28.1	-33	-0.94	-1.3	1.5	9
RTM-HBRD-SF	Pos	63	104	139	17.6	32.8	43.4	0.65	1.3	1.8	6
	Neg	-49	-90	-121	-22.6	-33.2	-43.3	-0.92	-1.4	1.5	1.2

P_{cr} : crack load (measured), P_y : yield load (park method), P_{max} : peak load (measured), δ_y : yield displacement (park method), δ_{max} : peak displacement (measured), δ_f : failure displacement (measured), θ_y : drift ratio at yield load (park method), θ_{max} : drift ratio at peak load, μ_{max} : ductility (δ_{max}/δ_y), $P_{u(retrofit)}/P_{u(URM)}$: strength increased ratio

조적 벽체의 모르타르 면을 따라 대각 균열이 발생하여 최대 하중 이후 부재강 +1.5%를 경험한 뒤 섬유시트가 모재로부터 탈락되는 현상을 보였다.

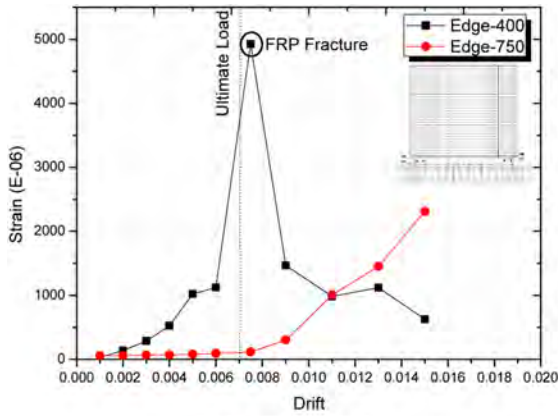
4.2 FRP 시트의 변형 성능 평가

FRP 시트의 전단강도 상승에의 기여도를 평가하기 위해 수직, 수평 방향으로 보강된 FRP 시트의 변형률을 측정하였다.

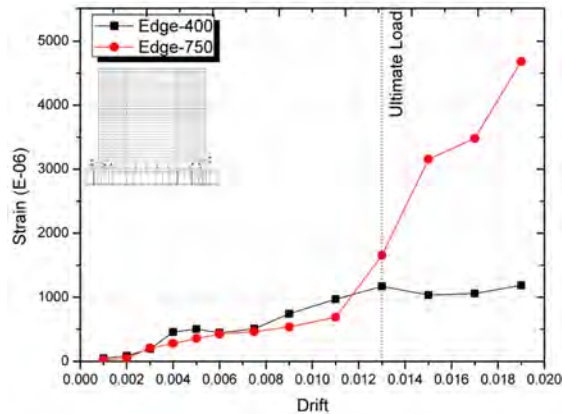
Fig. 9에는 수직 방향으로 보강된 FRP 시트의 변형률을 단부에서부터 400 mm, 750 mm 떨어진 지점에서 벽체와 베이스 사이의 접합면으로부터 200 mm 떨어진 지

점(URM 실험체의 휨균열 발생지점)을 기준으로 변형률을 측정된 결과를 나타내었다. CFS 보강 실험체의 경우 최대 하중시 매우 큰 응력 집중 현상이 벽체 하부에서 발생하였음이 나타났다. 이후 하중 지지능력이 급격히 감소한 것으로 보아, 수평 방향으로 보강된 FRP 시트는 전단강도 상승에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 반면에 하이브리드 보강 실험체의 경우 원만하며 지속적으로 상승하는 변형률의 변화를 보여, 수평 방향으로 보강된 FRP 시트의 보강 효과가 크게 나타날 것으로 예상할 수 있었다.

수평 방향으로 보강된 FRP 시트의 보강 효과를 판단하기 위해 Fig. 10에는 수평 방향으로 측정된 FRP 시트



(a) RTM-CFS-SF



(b) RTM-HBRD-SF

Fig. 9 FRP sheet strain (vertical direction)

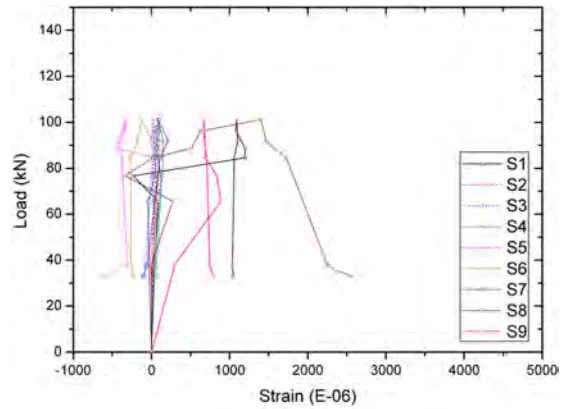
의 변형률을 나타내었다. 측정 지점은 예상되는 균열을 따라 결정되었다. CFRP 시트보강 실험체의 경우 최대하중의 경험과 함께 변형률의 증가가 멈추는 현상이 나타났다. 대략적으로 대각균열 발생면에서 0.001 정도의 변형률을 가지고 있는 것으로 나타나, CFRP의 보강 효과는 크지 않을 것으로 판단되었다.

반면, 하이브리드시트의 경우 최대 하중 발생 이후 지속적인 변형률 증가가 관찰되었다. 실험체의 파괴를 지배한 대각균열면에 대한 변형률은 대략 0.003에 가깝게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

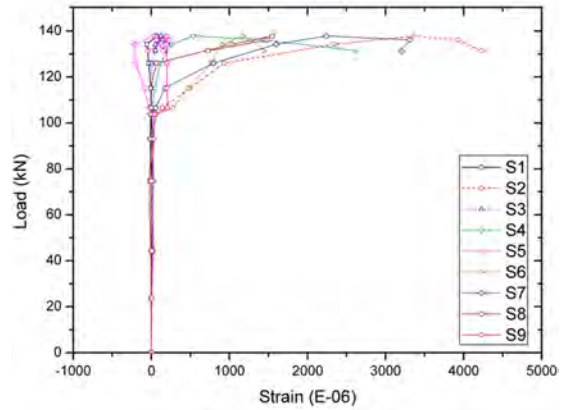
5. FRP 시트의 전단 보강 능력 평가

5.1 보강에 따른 전단 저항 성능 평가

보강된 RTM-CFS-SF와 RTM-HBRD-SF의 실험체들에 대하여 실험 전 보강 실험체에 대한 전단강도 예측값과 실험 결과값을 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. RTM-CFS-SF의 경우 전단강도에 대해 예측값이 실험값의 523%, RTM-HBRD-SF는 311%로 예측값이 더 높게 측정되었다. 이는 실험 결과에서 나타난 바와 같이 최대 강도 발현 시 섬유 변형률이 기존의 식 및 섬유의 극한 변형률에 비해 낮게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.



(a) RTM-CFS-SF



(b) RTM-HBRD-SF

Fig. 10 FRP sheet strain (horizontal direction)

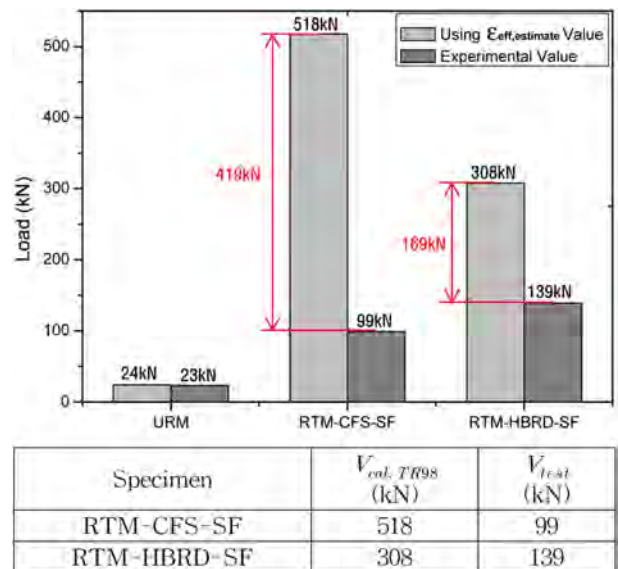


Fig. 11 Evaluation of shear strength

5.2 비선형 회기 분석을 통한 전단강도 산정식

섬유 복합시트로 보강되었을 때의 전단 저항성능을 보다 정확하게 판단하기 위하여 Triantafillou model⁸⁾에서 중요한 변수로 작용되는 유효변형률을 수정하고자 하였

다. Triantafillou model⁸⁾에서 유효변형률은 기존의 실험 결과를 바탕으로 회귀분석을 실시하여 제안한 것으로, 전단강도 산정식의 형태를 유지하기 위해 이 연구에서도 비보강 조적 벽체를 섬유복합시트로 보강한 실험 데이터를 바탕으로 비선형 회귀 분석을 실시하였다.

Triantafillou⁸⁾가 제안하고 있는 유효변형률은 식 (8)과 같이 구간별로 산정되는 방법이 다르다. 식 (8)의 경우 각각의 구간을 그래프로 표현하면 포물선의 형태와 직선 형태의 그래프가 나타나 서로 연결되면서 지수함수 형태의 그래프가 나타난다.

조적 벽체에서 나타나는 응력 집중현상과 FRP 시트의 조기 파괴를 고려하기 위해 ElGawady,¹¹⁾ Calvi,¹²⁾ Hernan¹³⁾ 과 Seki¹⁴⁾의 이 연구와 유사한 형태로 보강된 실험체가 사용된 기존 연구 결과를 수집하였다. Calvi의 실험체를 제외한 대부분의 실험체는 형상비가 1 이하인 실험체였으며 탄소섬유보강 시트를 사용한 실험체였다. 보강비에 따른 유효 변형률의 분포 형태를 나타낸 결과, Fig. 12에 나타난 바와 같이 분포 범위에는 변화가 있지만 분포 형태는 Triantafillou model의 지수함수 형태를 따르고 있음이 나타났다.

이에 따라 하나의 지수함수 형태인 식 (11)을 사용하여 비선형 회귀 분석을 실시하여 조적벽체에 사용될 수 있는 유효 변형률 산정식을 도출할 수 있었다.

$$\epsilon_{eff} = ae^{(-x/b)} + c$$

$$\epsilon_{eff} = 0.11683e^{(-\rho_h E_{FRP}/0.016)} + 0.001 \quad (11)$$

비선형 회귀분석을 통해 새롭게 도출된 유효변형률을

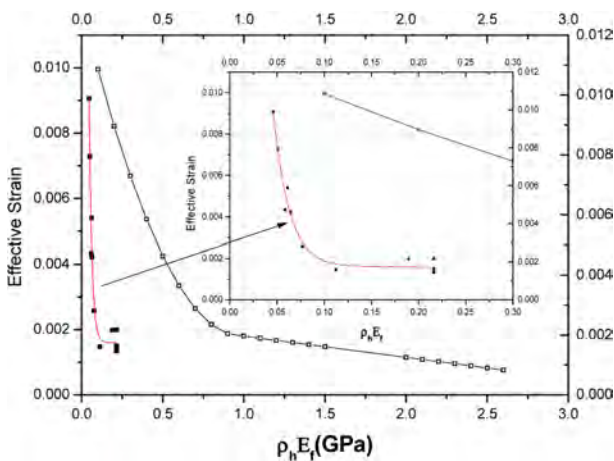


Fig. 12 Effectiveness strain distribution according to the retrofit ratio

Table 6 Evaluation of proposed equation

Specimen	V_{cal} (kN)		V_{test} (kN)
	$\epsilon_{eff,estimate}$	$\epsilon_{eff,regression}$	
RTM-CFS-SF	518	80	99
	308	130	
RTM-HBRD-SF			139

식을 실험체에 적용해본 결과 보강 실험체의 전단강도에 대한 예측값과 실험값의 차이가 모두 10% 내외로 매우 유사하였다. 보다 정확한 수치는 Table 6에 나타내었다. 하이브리드시트 보강 실험체보다 CFRP 시트 보강 실험체가 정확도가 더 떨어지는 이유는 전술한 바와 같은 수직으로 보강된 FRP 시트의 응력 집중으로 인한 조기 파괴 때문인 것으로 판단된다.

6. 결 론

섬유복합시트를 통한 비보강 조적 벽체의 보강효과를 평가하기 위하여 보강에 관한 실험을 통해 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 섬유복합시트는 비보강 조적 벽체의 일체성을 높여 주게 되어 탄소섬유시트와 하이브리드시트로 보강한 경우 비보강 조적 벽체에 비해 각 4.3배, 6배의 강도증진효과를 보였다.
- 2) 섬유복합시트로 보강할 경우 섬유의 파괴와 면외 탈락 현상은 보강된 부재의 횡저항 성능을 감소시키는 중요한 요인으로 작용한다. RTM-CFS-SF의 경우 섬유의 파괴 및 면외 탈락 현상이 급격하게 발생하여 현저한 강도감소 현상을 보인 반면 RTM-HBRD-SF의 경우 섬유의 파괴가 발생하지 않았기 때문에 최대 강도가 발현된 이후에도 급격한 강도감소 현상이 발생하지 않았다.
- 3) Triantafillou의 강도 산정 방법을 사용하여 기존 연구 결과를 평가한 결과와 이 연구에서 수행된 실험 결과를 통해, 비보강 조적 벽체에 적용된 섬유보강 시트는 콘크리트 구조물보다 작은 변형률에서 파괴됨을 알 수 있었다. 이에 주요 설계 변수는 유효 변형률 계수임을 판단할 수 있었다.
- 4) 비선형 회귀분석을 실시하여 섬유시트로 보강하였을 때 전단 저항 성능 평가방안을 제안하였다. 그 결과 보강된 조적 벽체의 전단강도 예측값과 실험을 통해 얻은 전단강도값과 10% 내외로 매우 유사한 결과를 보였다. 그러나 회귀분석 시 사용된 실험 데이터의 수가 많지 않기 때문에 회귀분석을 통해 얻은 결과의 적용은 신중하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No. 20120000723).

참고문헌

1. United States Geological Survey (USGS), www.usgs.gov.
2. 박병철, 이정환, 김혜원, 김진선, 조적조 건축물의 내진

- 보강기법 실태분석에 관한 연구, 국립방재교육연구원, 방재연구소, 2009, 181 pp.
3. 권기혁 외, 조적조 건물에 대한 내진 보강방안, 서울시립대학교부설 지진방재연구소, 2000, 263 pp.
 4. Applied Technology Council (ATC), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, (FEMA-356), Federal Emergency Management Agency, 2000, pp. 7~1, 7~32.
 5. ElGawady, M., Lestuzzi, P., and Badoux, M., "A Review of Conventional Seismic Retrofitting Techniques for URM," *Proceedings of 13th International Brick and Block Masonry Conference*, Amsterdam, 2004, Paper No. 89, 10 pp.
 6. Fam, A., Musiker, D., Kowalsky, M., and Rizkalla, S., "In-Plane Testing of Damaged Masonry Wall Repaired with FRP," *Advanced Composites Letters*, Vol. 11, No. 6, 2002 pp. 275~281.
 7. ElGawady, M., Lestuzzi, P., and Badoux, M., "A Review of Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls Using Composites," *Proceedings of 13th IB2MC*, Amsterdam, 2004, Paper No. 90, 10 pp.
 8. Triantafillou, T., "Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP laminates," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 2, 1998, pp. 96~104.
 9. ICBO Evaluation Service, Inc., "Acceptance Criteria for Concrete and Reinforced and Unreinforced Masonry Strengthened Using Fiber-Reinforced Polymers (FRP)," Composite Systems, AC125, 2001, 9 pp.
 10. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-08)*, American Concrete Institute, 2008, 473 pp.
 11. ElGawady, M. A., "Seismic In-Plane Behavior of URM Walls Upgraded with Composites," PhD. Dissertation, EPFL, 2004, 167 pp.
 12. Calvi, G. and Magenes, G., "Experimental Results on Unreinforced Masonry Shear Walls Damaged and Repaired," *10th IB2MaC*, Calgary, Canada, 1994, pp. 509~518.
 13. Hernan Santa-Maria, Pablo Alcaino, and Carl Luders, "Experimental Response of Masonry Walls Externally Reinforced with Carbon Fiber Fabrics," *Proceeding of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, Paper No. 1402, 2006.
 14. Seki, M., Vacareanu, R., Saito, T., Cotofana, D., Lozinca, E., Popa, V., and Chesca, A. B., "Cyclic Shear Tests on Plain and FRP Retrofitted Masonry Walls," *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, Paper No. 12-01-0068, 2008.

요 약 비보강 조적조 건축물은 전세계적으로 기존의 건물 및 역사 건축물의 많은 부분을 차지하고 있다. 특히, 최근 지진이 전세계적으로 빈번하게 나타남에 따라 비보강 조적조 구조물에 대한 내진 보강 대책이 요구되고 있다. 현재 비보강 조적조의 보강방법으로는 슛크리트, ECC jacketing, FRPs(fiber reinforced polymer sheet) 등이 개발되어 사용되고 있다. 특히 많은 엔지니어들이 FRPs를 사용한 보강방법을 채택하는 경향이 보이는데 이는 슛크리트나 ECC jacketing과는 달리 벽체의 두께 확장에 따른 구조물 자중 증가 문제없이 비보강 조적조의 전단강도를 향상시킬 수 있기 때문이다. 그러나 비보강 조적 벽체의 복잡한 역학적 거동과 FRPs를 사용한 실험 데이터의 부족은 아직까지도 적절한 보강량을 산정하는데 어려움을 주고 있다. 이 연구는 비보강 조적조의 면내 거동을 확인하고 두 가지의 다른 특징을 가진 FRPs를 사용한 보강 효과에 대한 정보를 주기 위해 수행되었다. 실험체는 1970년대 한국에서 빈번하게 지어진 저층형 연립주택의 내벽을 대상으로 하고 있으며 별도의 내진 설계는 되어있지 않은 상태이다. 실험체의 형상비는 실제 상황을 반영하기 위해 1에 가깝게 설정되어 있다. 보강 재료로는 탄소섬유보강 시트와 하이브리드 시트를 사용하였으며 이들은 각각 다른 극한 강도와 탄성계수 및 극한 변형률을 보유하고 있다. 연구 결과 비보강 조적 벽체의 면내 전단력 저항 성능을 확인하였으며 FRPs가 사용된 내진 보강 방안의 특성을 분석할 수 있었다. 또한 FRPs를 사용한 보의 전단보강 방법에 착안하여 비보강 조적조에 대한 FRPs의 보강 설계안을 도출할 수 있었다.

핵심용어 : 비보강 조적 벽체, 탄소섬유시트, 하이브리드시트, 전단강도