

조적채움벽의 면외보강에 관한 연구

A study on out-of-plane strengthening of masonry-infilled wall

장혜숙^a, 은희창^{b*}

Hye-Sook Jang^a, Hee-Chang Eun^{b*}

^a Department of Architectural Engineering, Graduate School of Industrial Technology, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

^b Department of Architectural Engineering, Kangwon National University, Professor, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

Received 31 August 2021; Revised 25 October 2021; Accepted 25 October 2021

Abstract

Fiber-reinforced polymer reinforcement or polyurea reinforcement techniques are applied to strengthen unreinforced masonry walls (UMWs). The out-of-plane reinforcing effect of sprayed glass fiber-reinforced polyurea (GFRPU), which is a composite elastomer made of polyurea and milled glass fibers on UMW, is experimentally verified. The out-of-plane strengths and ductile behaviors based on various coating shapes are compared in this study. An empirical formula to describe the degree of reinforcement on the out-of-plane strength of the UMW is derived based on the experimental results. It is reported that the peak load-carrying capacity, ductility, and energy absorption capacity gradually improve with an increase in the strengthening degree or area. Compared with the existing masonry wall reinforcement method, the GFRPU technique is a construction method that can help improve the safety performance along with ease of construction and economic efficiency.

Keywords: Glass fiber-reinforced polyurea, Out-of-plane reinforcement, Strengthening, Ductility, Energy absorption capacity, Unreinforced masonry wall

1. 서론

폴리우레아는 높은 신장률과 인장강도를 지닌 폴리머이다. 폴리우레아를 콘크리트 방벽의 후면에 도포하여 폭발이나 충격하중으로 발생하는 파편을 감싸므로 파편에 의한 피해를 줄일 수 있다. 폴리우레아 도포에 의해 보강된 벽체는 면외 뿐만 아니라 면내재하능력을 개선시킨다. 폴리우레아의 인장강도를 보다 개선할 목적으로 분말의 유리섬유를 추가로 혼입하여 인장강도가 개선된 복합 탄성중합체를 활용하여 면외내력을 보강하고자 본 연구를 수행하게 되었다. 이 공법은 높은 인장강도와 신장률의 재료적인 특성과 구조적인 특성 외에 스프레이 도포에 의한 용이한 시공 및 공기단축에 의한 경제성 등의 장점이 있으므로 실무에 적용하기 위한 실내실험에 의

해 검증을 위해 본 연구를 수행하게 되었다.

면외내력을 개선과 관련한 연구는 방폭보강설계로부터 비롯된다. FRP와 폴리우레아 보강법은 면외보강에 활용되는 2개의 주요 보강기법이며, 기타 기법으로는 폴리우레탄, 강판, 알루미늄 폼 기법이 있다^[1]. GFRP (Glass fiber reinforced polymer)로 보강된 폴리우레아는 무보강된 콘크리트 벽돌과 점토블럭의 벽을 보강하기 위한 효율적인 기법임을 실험을 통해 검증하였다^[2]. Myer와 Tanizawa^[3]는 외부보강재로써 폴리우레아와 세장한 (chopped) E 유형의 유리섬유에 의한 복합탄성중합체를 조적채움벽에 코팅하여 보강효과를 검증하는 연구를 실행하였다. Greene과 Myers^[4]는 DFRP코팅에 의한 콘크리트 보에서 휨과 전단의 보강능력과 연성의 증진 효과를 조사하였다. 또한, 폴리우레아에 의한 휨거동을 묘

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6223

fax: +82-33-259-5542

E-mail address: heechang@kangwon.ac.kr (Hee-Chang Eun).

사하는 해석모델을 제시하였다. Wu 등^[5]은 폭발하중에 대해 무보강과 폴리우레아로 보강된 점토벽돌의 벽체에 대해 도포두께와 방법에 따른 보강효과를 실험을 통해 조사하였다.

폴리우레아의 인장강도를 개선시키고자 분말형의 유리섬유를 혼합한 GFRPU로 보강된 철근콘크리트 보와 기둥에 대한 보강효과^[6-9]와 조적채움벽의 면내보강효과^[10]를 검증하는 실험들이 행해졌다. 이들 연구에서는 GFRPU에 의해 최대내력 및 연성이 크게 증가하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 이 연구의 연장선에서 GFRPU에 의한 조적채움벽의 면외보강에 대해 실험을 통해 보강방법 및 보강정도에 대해 평가한다.

2. 조적벽체의 면외실험

2.1 재료실험

1) 점토벽돌의 압축강도

조적벽체의 면외실험에는 건물의 외부 마감에 사용되는 붉은색의 점토벽돌이 사용되었다. 점토벽돌에 대한 압축강도는 KS F 4004의 벽돌 압축강도 시험에 관한 기준에 따라 실험을 실시하였다. 벽돌의 가압 양면을 벽돌의 세로축에 직각이 되도록 평활하게 마무리한 후에 2시간 이상 맑은 물속에 담가 흡수시켜 시험한다. 가압속도는 매 재하단계 시에 약 0.2 ~ 0.3N/mm²가 되도록 한다. 가력은 만능시험기에 의해 가력하여 압축강도를 측정하였다. 측정된 압축강도를 Table 1에 나타냈으며, 평균 압축강도는 53.9 MPa인 것으로 측정되었다.

Table 1 Compressive strength of clay brick

NO.	Compressive strength(MPa)	Average compressive strength(MPa)
1	53.5	53.9
2	55.5	
3	53.3	
4	53.1	
5	53.9	

2) GFRPU의 인장강도

분말의 유리섬유와 폴리우레아를 혼합한 복합탄성중합체인 GFRPU의 물성치를 실험을 통해 얻었다. 첨가된 유리섬유가 폴리

우레아 내에 일정하게 분포되는지를 확인할 수 없기에 실험값의 편차를 줄이기 위하여 인장강도 측정용 시험체를 20개 제작하여 실험을 실시하였다. 분말의 유리섬유를 첨가한 양을 폴리우레아에 대한 중량비가 약 5% 정도일 때, 인장강도 발현에 최적의 배합량을 관찰하였다. 본 연구에서는 5% 중량비의 분말형 유리섬유를 혼합한 폴리우레아의 물성치를 측정하였다.

유리섬유 첨가에 의해 인장강도가 22.73 MPa에서 30.96 MPa로 약 36% 정도 증가시켰으며, 탄성계수 또한 99.89 MPa에서 143.9 MPa로 약 44% 증가되었다. 즉, 유리섬유의 첨가가 GFRPU의 인장강도와 탄성계수를 증가시키는 요인으로 작용하는 것을 볼 수 있다. 반면에 유리섬유의 첨가는 GFRPU 내에 폴리우레아를 대신하게 되므로 신장률이 418%로부터 362%로 저감시키는 요인으로 작용하는 것으로 관찰되었다. 이는 최대 인장강도 이후에 파단까지 인장변형이 조금 감소되는 것으로 해석된다. 인장강도와 신장률이 우수한 폴리우레아에 인장강도를 증진시키고자 유리섬유를 첨가할 경우에 인장강도 및 탄성계수를 증가시키는 반면에 신장률은 조금 감소되는 것으로 관찰되었다. 유리섬유의 첨가로 폴리우레아에 의한 신장률과 연성이 조금 감소되는 것으로 나타났다. 결과적으로 작은 양의 신장률 감소에도 불구하고 보강되는 구조체의 파단이나 탈락 등을 제어할 수 있는 정도의 신장률을 보유하며, 인장강도 및 탄성계수는 증가하는 물성치를 보였다.

3) 모르타르 압축강도

조적채움벽에서 조적벽돌 사이에 부착을 위해 사용되는 모르타르의 압축강도를 측정하였다. 비록 모르타르 마감두께는 조적채움벽의 면내 강성 산정에 포함하지 않는다 할지라도 벽돌의 프리즘 실험이나 가로줄눈의 파괴 등과 관련이 되므로 모르타르의 압축강도가 이들 실험값에 영향을 미칠 수 있다.

모르타르시험편은 조적벽체 실험에서 사용된 모르타르의 압축강도를 측정하기 위해 제작한 압축강도 시험용 시험체는 조적벽체 채움벽 시공과 동시에 제작하였으며, 콘크리트와 마찬가지로 제작 후 28일 간 양생을 진행하였다. 압축강도 시험은 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법 KS L 5105 표준^[11]을 따라 3개 시험체의 평균압축강도값을 구했으며, 그 결과 모르타르의 압축강도는 약 10.4MPa로 나타났다.

4) 조적프리즘 압축강도

조적벽돌의 압축강도를 측정하는 방법에는 2가지가 있다. 단위벽돌에 대해 압축강도를 측정하는 경우와 조적프리즘을 측정하는 방법이 있다. 이 연구에서는 조적프리즘의 압축강도를 사용하였다. 단위강도 측정법은 개별 재료의 압축강도를 의미하며, 이 정보로

부터 합성체의 압축강도를 결정하며 테이블화하여 사용한다. 테이블이 존재하지 않는다면 프리즘을 제작하여 설계용 압축강도를 결정하게 된다. 시험편은 ASTM C1314 (Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms)^[12]에 따라 실험실에서 제작되었다. 28일 후에 실험을 실시하여 조적벽들의 강도를 측정하였다.

측정된 압축강도는 형상비에 대해 보정을 실시하였다. 즉, 측정된 압축강도에 Table 2에 주어진 보정계수를 곱하여 압축강도를 결정하였다. 4개의 프리즘 시험체를 제작하여 실험을 실시한 평균 프리즘 압축강도는 18.77 MPa인 것으로 측정되었다.

Table 2 Correction factor according to shape ratio

shape ratio (h_p/t_p)	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
correction factor	0.75	0.86	1.0	1.04	1.07	1.15

h_p and t_p indicate the height of prism and smaller dimension of prism section, respectively.

2.2 실험체 제작 및 가력방법

면외내력에 대한 실험체는 건물의 외벽에 시공된 조적벽체로 가정하여 치장용 점토벽돌을 사용하였으며, 이에 대한 보강을 고려하였다. GFRPU는 벽체면을 표면처리한 후에 부착성능을 향상시키기 위하여 프라이머를 도포한 후 24시간이 경과된 후에 스프레이로 도포하였다. 폴리우레아와 분말의 유리섬유를 혼합하는 기계적 장치를 제작하여 혼합하였으며, 혼합된 GFRPU를 스프레이로 실험체면에 도포하였다.

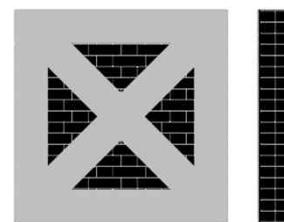
면외내력에 대한 GFRPU에 의한 보강을 검증하기 위하여 정적실험을 실시하였다. 지진이나 동하중에 의한 파괴를 대신하여 정적하중에 대한 안정성을 확보여부를 검토하였다. 면외방향으로 작용하는 하중은 집중하중 보다는 동일한 크기의 일정한 하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 길이가 1300 mm, 높이가 1300 mm, 1B 쌓기로 두께는 190 mm인 벽체를 용이하게 시공하기 위하여 그림 2, 3에서와 같이 철제의 프레임 내부에 시공하였다. 그럼에도 불구하고 프레임과 조적벽체가 일체되지 않으므로 가력은 받침대를 제외한 1100×1000mm 영역에서 이루어졌다. 실험체의 4변은 수평방향으로 100mm, 수직방향으로 150mm가 받침대에 의해 지지되도록 실험체를 제작하여 조적벽체는 여분의 길이의 단부에 부착 및 정착이 이루어지도록 하였다. 수평으로 놓힌 후에, 중력방향으로 일정한 하중이 작용하도록 계획하였다. 또한 무보강 실험체는 급격한 파괴에 의한 취

성적인 파괴를 감안하여 실험을 대신하여 설계식을 사용하였다.

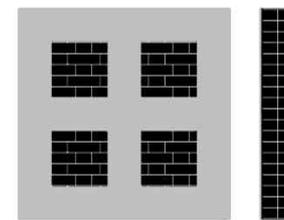
GFRPU의 보강방법에 따른 영향을 비교하고자 GFRPU를 벽체의 일면에 ‘X’, ‘+’, ‘A’ 과 같은 3가지 형태로 보강하였다 (Fig. 1). 여기서, ‘X’ 는 크로스형태를, ‘+’ 는 십자가 형태를 ‘A’ 는 전면도포를 각각 나타낸다. GFRPU에 의해 포함된 유리섬유는 중량비로 5%이며, 모든 시험체의 도포두께는 5 mm로 일정하게 인장측 일면에 도포하였다. 실험체 제작에 사용된 모르타르의 강도 측정용 시험편이 별도로 제작되었다. 실험체에 사용된 각 재료의 물성치들을 실험에 의해 얻을 수 있었다.

가력은 한양대학교에 소재한 철제가력프레임으로 실시하였으며, 변위제어방식으로 이루어졌다 (Fig. 2). 실험체를 가로방향으로 놓고 그 상단에 가력용 강철플레이트를 설치하여 그 상단에서 작용하는 하중이 조적벽체 위에 일정하게 작용하도록 설치하였다. 여기서 상단이라 함은 GFRPU가 도포되지 않은 압축면을 나타낸다. 매 변위의 증분 단계에서 균열이나 처짐 등과 같은 조적벽의 변형형상을 관찰하는데 어려움이 있었다. GFRPU의 도포로 인하여 균열의 양상을 육안으로 관찰할 수 없었으며, 처짐 또한 측정할 수 있는 공간이나 확인할 수 있는 방법이 없었기 때문이다. 단지, 변위제어에 의한 가력장치에 의해 하중과 변형관계를 얻을 수 있었다.

실험체에 변위 증분에 따라 하중을 증가시켰으며, 예상되는 파괴에 도달하였을 때 가력을 중단하였다. 가력을 하는 동안 실험체의 손상이나 균열양상을 상세하게 관찰할 수는 없었으나, 역학적 인 거동을 관찰하였다.



(a)



(b)

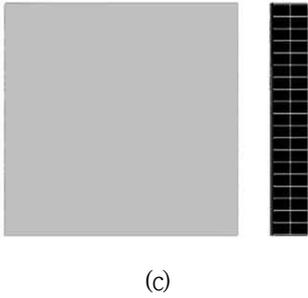


Fig. 1 Shape of test specimens according to spraying type:
(a) X-type, (b) +type, (c) entire spraying

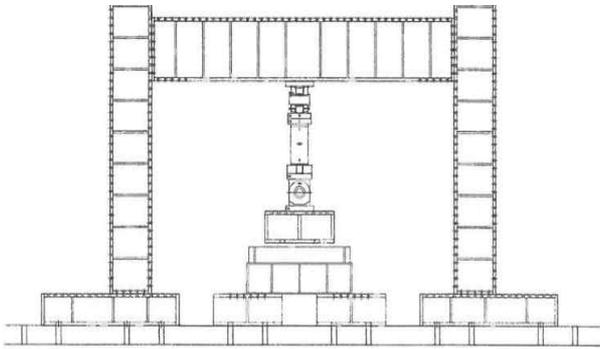


Fig. 2 Loading apparatus

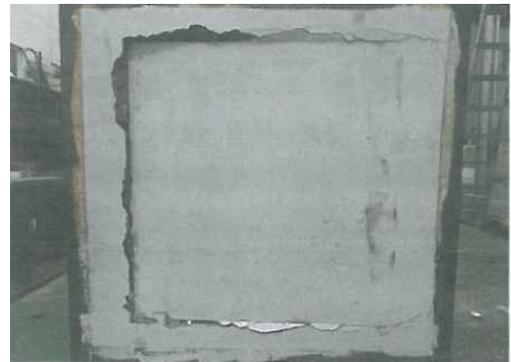
2.3 파괴양상

Fig. 3에 실험을 마친 후 각 실험체의 파괴양상을 나타냈다. 모든 실험체는 push-out 실험과 유사하게 장재지지면과 접하는 면을 따라 균열이 발생한 후에 파괴되었다. 만약 GFRPU에 의한 보강이 실시되지 않았다면 가력면의 외곽면을 따라 균열과 함께 급격하게 파괴되므로 외벽에 시공된 경우를 가정하면 조적벽들이 탈락하여 피해가 발생할 수 있을 것이다. 그러나 보강이 된 실험체의 경우에 최종 파괴에도 불구하고 보강된 면에서는 균열이나 파단현상을 관찰할 수 없었으며, 단지 단부 모서리에서 GFRPU이 판단되었으며, 실험을 마친 후에 파단면으로부터 GFRPU가 조적벽체로부터 박리된 것으로 관찰되었다. 즉, 우수한 GFRPU의 신장률에 의해 조적벽면이 유지되거나 탈락을 지연시킬 수 있었다. 파괴 이전에는 균열이나 박리와 같은 현상이 GFRPU가 조적벽체의 인장면을 구속하는 것으로 해석된다. GFRPU는 신장률이 우수하므로 최대 하중 이후에도 신장률에 의해 파단이 일어나지 않고 GFRPU에 의한 구속에 의해 조적벽체의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다. 보강면에서 균열양상은 도포된 GFRPU로 인하여 좀처럼 확인할 수 없었다. 가력면을 따라 추가적인 보강이나 정착을 통해 재하능력을 증가시킬

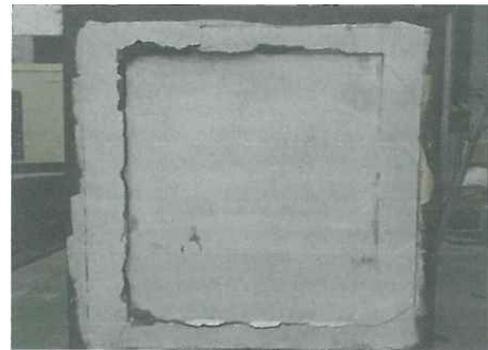
수 있을 것이며, 외벽에 적용할 경우에 급격한 탈락에 의한 피해를 방지할 수 있음을 실험을 통해 검증되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Failure modes: (a) X-type, (b) +type, (c) entire spraying

2.4 하중과 처짐

Table 3에 실험체의 최대내력과 변위를 나타냈다. 무보강된 시험체의 면외내력은 기준 식^[13]을 사용하여 산정하였다. 이 표에 의하면 GFRPU에 의한 보강으로 최대면외내력이 16% ~ 50%까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, GFRPU에 의한 보강효과를 확인할 수

있으며, 정량적으로 보강정도를 설정할 필요가 있다. 변위는 하중-처짐관계 곡선으로부터 연성이 증진되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4에 3개의 실험체 각각에 대한 면외방향으로 작용하는 하중과 이때에 발생하는 처짐과의 관계를 나타냈다. 재하를 시작한 후에 X자형 보강 시험체의 초기강성이 가장 크게 나타났으며, 전면도포와 +자형 보강 순서로 초기강성이 작아지는 것을 볼 수 있다. 전면보강과 +자형보강 시험체의 경우에 초기하중 작용 시에 작용점이 하중이 증가함에 따라 하중의 작용점이 미끄러지는 현상에 의해 강성이 저하한 것으로 추정된다. 도포된 시험체의 형상에서 보듯이 비록 X자형과 +자형으로 구분을 하였지만 스프레이로부터 분사된 GFRPU가 분산되어 실제로 도포가 되지 않은 면적이 작으므로 전면도포된 시험체와 비교할 때에 큰 차이가 없는 점을 감안하면 하중의 작용점이 미끄러지려 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

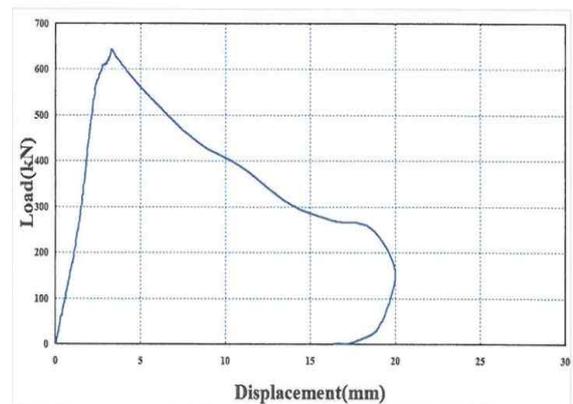
조적벽체가 지닌 면외방향의 최대하중의 경우에 X자형, 전면 그리고 +자형보강된 시험체의 순서로 점차 감소되는 것으로 나타났다. 최초로 전면보강된 시험체가 가장 큰 재하능력을 나타낼 것으로 예상했으나, X자형보강이 더 큰 재하능력을 나타냈다. 전술한 바와 같이 X자형 시험체와 전면보강 시험체 사이에 도포면적이 큰 차이가 없는 이유에서 비롯된 것으로 설명되며, 한편으로는 스프레이 도포가 도포면적 위에 일정하게 유리섬유가 분산되었지 않았기 때문이라고도 부분적으로 추정된다. 반면에 +자형으로 도포된 시험체의 재하능력은 다소 떨어지는 것을 볼 수 있다. 면내하중이 작용할 때에 스트럿에 의해 저항하는 방향으로 보강을 실시하였을 경우에 면외내력의 증가를 예상할 수 있는 것으로 해석된다. 초기재하단계에 +자형과 전면보강된 시험체에 미끄러짐에 의한 변형이 발생한 결과로 최대하중 시에 변위가 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

최대하중 이후에 폴리우레아에 의한 신장성으로 인하여 연성적인 거동을 나타내고 있다. 이 그림에서 +자형 시험체의 경우에 최대하중이 상대적으로 낮음에도 불구하고 보다 연성적인 가동을 나타내는 것을 볼 수 있다. X자형 시험체는 가장 큰 최대하중의 재하능력을 보였지만 상대적으로 작은 연성능력을 나타냈다. 전면을 보강 시험체는 최대하중 및 연성도 최대에 가까운 특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 즉, 도포면적의 차이가 크지 않음을 감안하면 보강을 전면에서 실시할 경우에 최대내력과 향상된 연성능력을 지닐 수 있음을 알 수 있다. 단지 사용된 GFRPU의 양이 조금 증가할지라도 정밀한 시공에 민감하지 않은 장점으로 전면도포에 의한 보강이 적절하며, 면내내력 보강에도 적절할 것으로 판단된다.

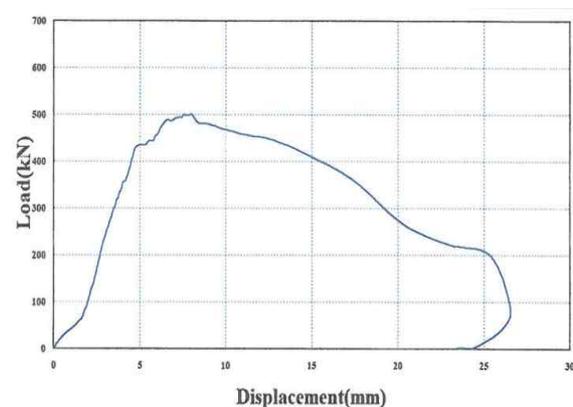
Table 3 Peak load and displacement of test specimens

specimen	Peak load (kN)	Load ratio with respect to peak load at unreinforcement	Ratio with respect to peak load after correcting the end conditions	Displacement at peak load (mm)
X-type	643.7	1.87	1.5	3.30
+type	500.2	1.45	1.16	7.56
entire	627.3	1.82	1.46	6.48

※여기서, 무보강 시에 최대강도는 기준 식에 따라 산정된 344.4kN 이다.



(a)



(b)

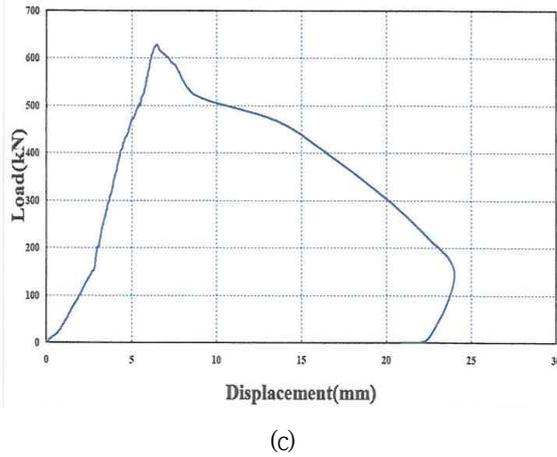


Fig. 4 Load-displacement curve of specimens:
(a) X-type, (b) +type, (c) entire spraying

2.5 GFRPU에 의한 면외내력 보강식

기준에서는 조적벽체가 관성력 이상의 면외내력을 보유하도록 설계를 규정하고 있다. GFRPU에 의한 보강을 고려하여 조적벽의 압축강도를 증가시키고 전면보강에 의한 보강효과를 고려하였다. 본 연구에서 수행한 실험은 지지대가 조적벽을 지지하는 지점으로 작용하므로 지점에 의한 반력의 영향이 큰 것을 감안하여 최대하중의 80%만을 저항하는 것으로 가정하였다. 이 가정과 Table 3의 실험결과값을 사용할 때에 기준에서 제안한 식의 약 1.5배 정도의 최대내력을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이를 조적벽의 압축강도의 증가로 나타내면 설계기준의 식을 다음으로 수정하였다.

$$Q_{CL} = \frac{1.05f'_m\lambda_2}{(h_m/t_m)} A_{in} \quad (1)$$

여기서,

- Q_{CL} : 조적체움벽의 면외강도 (N)
- q_{in} : 조적체움벽의 단위면적당 면외강도 (MPa)
- A_{in} : 조적체움벽 입면의 면적 (mm^2)
- f'_m : 조적체움벽의 공칭압축강도
- λ_2 : 벽체의 높이 대 두께비에 대한 계수

위의 식은 GFRPU로 보강된 조적벽의 면외내력을 나타내고 있다. 단, 이 식은 분말의 유리섬유가 중량비로 5% 첨가된 GFRPU가 5 mm로 도포되었을 경우에 국한되므로 두께에 대한 영향이 추가로 검토되어야 할 것이며, 무보강된 시험체와 지점에 따른 영향을 보정하는 실험들이 추가되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 위의 식은

GFRPU에 의한 일반적인 보강을 나타내는 식으로, 현장에 적용이 가능하다고 판단된다.

3. 결론

본 연구는 조적벽체의 면외내력을 개선하고자 GFRPU로 보강을 실시하였을 경우에 보강정도를 보강형태에 따른 영향을 비교하고 보강정도에 대한 정량적인 값을 제안하였다. 보강형태에 따라 X자형, +자형, 전면도포된 3개의 조적벽체를 제작하여 면외방향으로 정하중을 가력하여 이때에 하중과 처짐관계, 파괴양상 등을 조사하여 GFRPU가 보강제로써 우수성을 입증하는 실험을 실시하여 다음과 같은 결과들을 얻었다.

첫째, GFRPU는 조적벽체의 면외보강을 실시하였을 경우에 보강효과가 있는 것으로 나타났으며, 최대내력과 연성이 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 면내하중이 작용할 때에 스트럿에 의해 저항하는 방향으로 보강을 실시하였을 경우에 면외내력의 증가를 예상할 수 있다.

둘째, 실험에 의하면 최대하중은 X자형, 전면 그리고 +자형보강된 시험체의 순서로 점차감소되는 것으로 나타났다. 전면보강된 시험체가 가장 큰 재하능력을 나타낼 것으로 예상했으나, X자형보강이 더 큰 재하능력을 나타낸 것은 X자형 시험체와 전면보강 시험체 사이에 도포면적이 큰 차이가 없으며, 도포면적 위에 일정하게 유리섬유가 분산되지 않은 시공오차에 기인하는 것으로 추정된다. 도포면적의 차이가 크지 않음을 감안하면 보강을 전면에서 실시하여 최대내력과 향상된 연성능력을 확보할 수 있는 것으로 조사되었다.

셋째, 기준에서는 조적벽체가 관성력 이상의 면외내력으로 설계를 규정하고 있다. 기준에서 제안한 면외내력과 관련한 식을 GFRPU에 의한 보강정도를 지점에 의한 반력의 영향을 감안하여 보정하고 GFRPU로 보강된 조적벽의 면외내력을 산정하는 실험식을 수정하여 제안하였다.

넷째, 면외내력을 추정하는 식은 분말의 유리섬유가 중량비로 5% 첨가된 GFRPU가 5 mm로 도포되었을 경우에 국한되므로 향후의 연구에서는 두께에 대한 영향이 추가로 검토되어야 할 것이며, 무보강된 시험체와 지점에 따른 영향을 보정하는 실험들이 추가되어야 할 것이다.

References

[1] Lantz L., Maynez J., Cook W., Wilson C.M.D., 2016, Blast protection of unreinforced masonry walls: A state-of-the art review, *Advances in Civil Engineering*, Article ID 8958429, doi.org/10.1155/2016/8958429.

[2] RB²C, 2005, Strengthening of infill masonry walls using bondo grids with polyurea, Research results.

[3] Myers J.J., Y. Tanizawa, 2010, In-plane behavior of alternaive masonry retrofitted with polyurea membranes, *Structural Faults and Repair (SF&R 2010)(CD-ROM)*, Edinburgh, Scotland, UK.

[4] Greene, C. E., 2010, Compressive behavior of concrete cylindersstrengthened with a discrete fiber reinforced polymer system, M.S. thesis, Missouri Univ. of Science and Technology, Rolla, MO.

[5] Wu G., Ji C., Wang X., Gao F., Zhao C., Liu Y., Yang G., 2021, Blast response of clay brick masonry unit walls unreinforced and reinforced with polyurea wlastomer, *Defence Technology* 11, (in press).

[6] Song, J.H., Lee, E.T., Eun, H.C., 2019, A Study on the Improvement of Structural Performance by Glass Fiber-Reinforced Polyurea (GFRPU) Reinforcement, *Advances in Civil Engineering*.

[7] Song, J.H., Lee, E.T., Eun, H.C., 2020, Shear strength of reinforced concrete columns retrofitted by glass fiber reinforced polyurea, *Civil Engineering Journal*, 6(10) 1852-1863.

[8] Song, J.H., Lee, E.T., Eun, H.C., 2020, A study on the strengthening performance of concrete beam by fiber-reinforced polyurea (FRPU) reinforcement, *Advances in Civil Engineering*.

[9] Song, J.H., Eun, H.C., 2021, Improvement of flexural and shear strength of RC beam reinforced by glass fiber-reinforced polyurea(GFRPU), *Civil Engineering Journal*.

[10] 손승환, 2021, 유리섬유와 폴리우레아의 합성재료에 의한 조적벽의 면내방향 보강효과에 관한 연구, 강원대학교 석사학위논문.

[11] 한국산업표준, 2007, 시멘트 모르타르 압축강도 시험방법 (KS L 5105) 한국표준협회.

[12] ASTM C1314, 2014, Standard test method for compressive strength of masonry prisms, ASTM International, West Conshohocken, PA

[13] 한국시설안전공단 시설관리본부, 2019, 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령, 한국시설안전공단.