

## 파괴모드를 고려한 비보강 조적벽체의 비선형 해석모델

### Nonlinear Analysis Model Considering Failure Mode of Unreinforced Masonry Wall

백은림<sup>1)</sup>      김정현<sup>2)</sup>      이상호<sup>3)</sup>      오상훈<sup>4)\*</sup>  
Eun-Lim Baek      Jung-Hyun Kim      Sang-Ho Lee      Sang-Hoon Oh

#### Abstract

The final purpose of this study is to evaluate the seismic performance of unreinforced masonry (URM) building more accurately. For that, shear strength and hysteresis model considering failure mode of the URM wall were discussed. The shear strength of URM wall without openings could be calculated by determining on the minimum value between the rocking strength suggested by domestic research and the sliding strength suggested by FEMA. The wall having openings could be predicted properly by the FEMA method. And the nonlinear hysteresis models for flexural and shear behaviors considering failure mode were proposed. As the result of the nonlinear cyclic analysis that carried out using suggested models, these analysis models were proper to represent the seismic behavior of URM walls.

Keywords : URM, Nonlinear analysis, Hysteresis model, Failure mode

#### 1. 서론

비보강 조적조 건축물은 구조가 간단하고 시공이 편리하여 전 세계적으로 저층 주거시설 및 공공시설 등의 구조형식으로 주로 이용되고 있다. 국내의 경우에도 전체 저층 건축물의 약 45%가 비보강 조적조로, 최근에는 신축되는 조적조 건축물이 거의 없음에도 불구하고 많은 비율을 차지하고 있다. 이들 조적조 건축물은 내진설계가 적용되지 않았으며, 사용연수가 거의 20~40년 가량으로 대부분이 노후화되어 내진성능이 매우 부족할 것으로 판단되고 있다. 또한, 최근 외국에서 발생한 대규모 지진으로 인해 낙후된 지역의 많은 비보강 조적조 건축물이 붕괴되어 막대한 인명 및 재산피해가 발생함에 따라 국내에서도 이에 대한 관심이 증대되고 있다.

비보강 조적조의 내진성능 확보를 위해서는 우선 내진성능 평가가 선행되어야 하며, 이를 위해 재료 및 구조적 성능이 정밀하게 평가되어야 한다. 조적개체 및 조적방법 등은 각국의 여건에 따라 다소 차이가 있으며, 특히 이러한 변수

들은 조적조의 구조적 성능에 크게 영향을 미친다. 따라서 각국에서는 그 나라의 실정에 맞는 조적조의 성능에 관한 연구가 이루어지고, 적절한 평가방법 등이 제시되어 있다. 국내의 경우, Yi et al. (2006)은 형상비 및 개구부 유무를 변수로 한 조적벽체의 실험을 통하여 파괴모드 국내 실정에 적합한 파괴모드 및 강도식을 제안하였으며, National Disaster Management Institute (2008)는 FEMA에서 제안된 소성인지 속성을 이용하여 해석적 연구를 수행하고 국내 건축물에 대한 취약도 함수를 연구하였다. 또한, Heo and Lee (2009)는 유한요소해석을 수행하여 기존 비보강 조적조 건축물의 내진성능을 평가하였으며, Kim (2013)은 기존의 조적벽체 강도식을 비교·평가하여 이를 바탕으로 비선형 이력모델을 제안하고 지진응답해석을 수행하여 국내 조적조 건축물의 붕괴 취약도를 도출하였다. 한편, 일부 기존연구에서 제안된 비보강 조적조의 성능평가를 위한 소성인지 및 제안된 이력곡선은 조적조의 다양한 파괴모드에 따른 이력거동 특성을 반영하기 어려운 점이 있다. 또한 푸시오버 (Push-over) 해석

1) 정회원, 부산대학교 건축공학과 박사과정  
2) 정회원, 부산대학교 건축공학과 석사과정  
3) 정회원, 부산대학교 건축공학과 교수  
4) 정회원, 부산대학교 건축공학과 부교수, 교신저자

\* Corresponding author : osh@pusan.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

에서 주로 사용되는 FEMA 소성힌지의 경우, 반복하력에 의한 이력특성이 반영되지 않아 흡수에너지 및 유효감쇠의 고려시 다소 과대평가되는 문제점이 있다.

이에 본 연구에서는 기존에 수행되었던 비보강 조적벽체 실험결과 및 전단강도 제안식을 바탕으로 파괴모드에 따른 이력특성을 반영할 수 있는 비선형 해석모델을 제시하고, 이를 실험결과와 비교하여 검증하고자 한다.

## 2. 비보강 조적벽체의 파괴모드 및 전단강도

### 2.1 파괴모드

비보강 조적벽체의 구조적 성능 및 거동은 조적개체 및 모르타르의 강도, 시공방법 뿐 아니라, 벽체의 구속조건, 형상비, 축하중의 크기 등에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 조적벽체의 주된 파괴모드는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 강제회전 파괴 (Rocking), 양단부 압축파괴 (Toe Crushing), 수평줄눈 미끄러짐 전단파괴 (Sliding), 사인장파괴 (Diagonal Tension)로 구분된다. 강제회전 파괴는 벽체가 휨거동을 함에 따라 벽체의 높이방향 양단부에 줄눈이 파괴되어 벽체의 강제회전이 발생하는 형태로, 강도의 증가 및 감소현상이 두드러지지 않으며 큰 변형을 발생시킨다. 양단부 압축파괴 역시 벽체의 휨거동에 의한 것으로, 압축력이 작용하는 벽체의 모서리에 국부파괴가 발생하며 이력거동 특징은 강제회전 파괴와 유사한 형태를 나타낸다. 반면, 수평줄눈 미끄러짐 전단파괴 및 사인장파괴 모드는 벽체에 작용하는 전단력에 의해 각각 줄눈 및 줄눈과 개체가 전단파괴 되는 유형이다. 미끄러짐 전단파괴의 경우 벽체가 균열이 발생한 줄눈을 따라 미끄러지면서 파괴가 진행되고 비교적 안정적이 이력루프를 형성하면서 거동하는 특징이 있다. 사인장파괴는 벽체가 전단거동을 하면서 인장응력이 발생하는 대각방향으로 균열이 발생·진전되는 파괴 성상을 보이며, 제하 (Unloading) 및

재제하시 (Reloading) 강도저하, 핀칭 (Pinching) 거동의 특징을 나타낸다. 국내 조적벽체의 경우, 주로 3층 이하의 저층 건축물인 점과 하중조건, 평균 벽량 및 벽의 길이 등을 고려할 때, 주로 강제회전 및 양단부 압축파괴가 발생한다는 연구결과가 있다 (Yi et al., 2006).

### 2.2 전단강도

#### 2.2.1 FEMA 356

미국의 FEMA에서는 조적벽체의 4가지 파괴모드 (Rocking, Toe Crushing, Sliding, Diagonal Tension)에 따라 식 (1) ~ 식 (4)와 같이 강도식을 제안하고 이 중 가장 작은 값을 전단강도로 규정하고 있다. 또한 개구부가 있는 경우, 개구부를 제외한 Pier (개구부 사이 벽체)만이 횡하중에 저항하는 것으로 가정하고, 식 (5)와 같이 유효길이 (Kingsley, 1995)를 산정하여 강도식에 따라 파괴모드 및 전단강도를 도출하도록 하고 있다.

$$\text{Sliding} : V_s = v_{me} A_n \quad (1)$$

$$\text{Rocking} : V_r = 0.9 \alpha P \left( \frac{L}{H} \right) \quad (2)$$

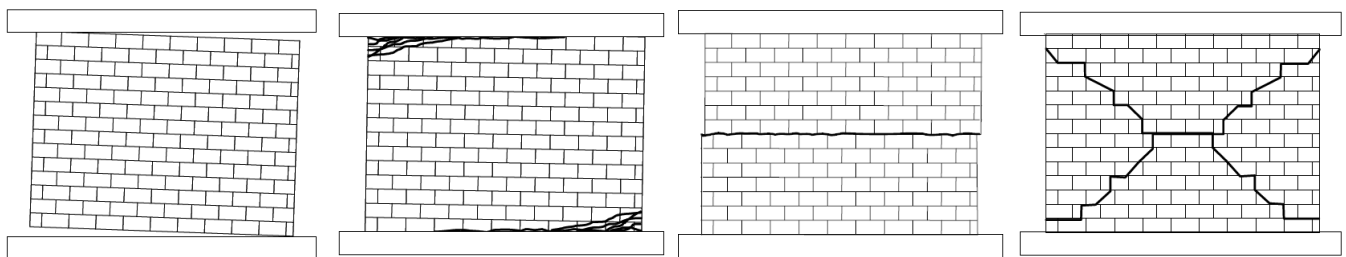
$$\text{Toe Crushing} : V_{tc} = \alpha P \left( \frac{L}{H} \right) \left( 1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right) \quad (3)$$

$$\text{Diagonal Tension} : V_{dt} = f_{dt} A_n \left( \frac{L}{H} \right) \sqrt{1 + \frac{f_a}{f_{dt}}} \quad (4)$$

여기서,  $v_{me}$  : 수평줄눈 미끄러짐 전단강도 (MPa),

$A_n$  : 벽체 단면적 ( $\text{mm}^2$ ),  $P$  : 축하중 (N),

$L$  : 벽체길이 (mm),  $H$  : 벽체높이 (mm),



(a) Rocking

(b) Toe Crushing

(c) Sliding

(d) Diagonal Crushing

Fig. 1 Failure Modes of URM (Yi et al., 2006)

$f'_m$  : 조적조 압축강도 (MPa),  $f_a$  : 축응력 (MPa),  
 $f_{dt}$  : 대각인장응력 (MPa,  $0.05f'_m$ ),  
 $\alpha$  : 경계조건 (고정단 : 1.0, 자유단 : 0.5)

$$h_{eff} = h' + \frac{1}{3} \left( \frac{h_s}{h'} - 1 \right) L \quad (5)$$

여기서,  $h_{eff}$  : Pier의 유효높이 (mm),  
 $h'$  : 개구부 상부에서 Pier 방향으로 30°를 적용한 대각선의 중심과 개구부 최하단부의 중심과의 거리 (mm),  
 $h_s$  : Pier의 순높이 (mm),  $L$  : Pier의 폭 (mm)

### 2.2.2 한국시설안전공단 (KISTEC)

국내에서도 여러 연구자에 의해 국내 여건에 부합되는 강도식을 제안하였다. 특히, Lee (2008)은 조적벽체의 형상비, 축력비 및 개구부 유무 등을 변수로 한 조적벽체의 실험을 수행하여 국내 순수 조적벽체의 파괴모드를 강제회전파괴와 양단부 압축파괴가 복합적으로 발생하는 것으로 규명하였으며 전단강도를 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$V_{r,tc} = 180 \alpha \sqrt{P} \left( \frac{L}{H} \right) \left( 1 + \frac{f_a}{0.5f'_m} \right) (kgf) \quad (6)$$

여기서, 식의 각 기호는 식 (3)과 동일하다.

한국시설안전공단에서는 개구부가 없는 순수벽체에 한하여 Lee (2008)가 제안한 식 (6)의 전단강도 및 파괴모드를 수용하여 성능평가에 이를 적용하도록 제안하였다. 또한 개구부가 있는 벽체에 대해서는 개구부를 무시한 순수벽체로 가정하여 FEMA에서 제안된 파괴모드에 따른 전단강도식에 식 (7)과 같이 개구부율을 고려하여 강도를 저감시켜 평가하도록 제안하였다.

$$V = \min(V_r, V_{tc}, V_s, V_{dt}) \times R \quad (7)$$

여기서,  $R$  : 강도저감계수  
 $(1 - l_o/l_w, l_o$  : 개구부 길이,  $l_w$  : 벽체길이)  
 $V_r, V_{tc}, V_s, V_{dt}$  : FEMA 356 제안 강도식

### 2.3 제안식에 의한 전단강도 비교 평가

본 연구에서는 개구부의 유무 및 형상비에 따라 국내의 기존에 수행되었던 실험체에 대하여 상기의 제안식을 적용하여 조적벽체의 전단강도를 비교·평가하였다.

Table 1에 기존의 실험적 연구 (KISTEC, 2008)에서 사용된 실험체의 개요 및 실험결과를 간단히 나타낸다.

상기 2.2절에서 서술한 FEMA 및 한국시설안전공단 (KISTEC)에서 제안된 식을 이용하여 실험체의 전단강도를 예측한 결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 2에 나타낸다. 조적조의 압축강도는 각 실험에서 수행한 재료실험에 따라 1.2W-NO, 1.8W-NO, 2.7W-NO의 경우 6.3MPa를, 그 외의 실험체는 8.8MPa를 적용하였다. 줄눈의 미끄러짐 전단강도의 경우, 미끄러짐 전단 파괴가 지배적으로 발생한 5.4W-NO 실험체의 실험결과에서 유추하여 0.25MPa로 가정하였으며, 이는 기존 연구 (Yi et al., 2006)에서 제안한 0.2MPa보다 1.25배 큰 값이며, FEMA 계산식에 따른 결과 ( $v_{me}$ , 0.38MPa)에 비하여는

Table 1 Specimen Information and Test Results

Specimen	L [m]	Aspect Ratio [L/H]	Opening	Shear Strength [kN]	Failure Mode
1.2W-NO	1.2	0.44	-	36.6	R
1.8W-NO	1.8	0.67	-	70.8	R, TC
2.7W-NO	2.7	1.00	-	138.8	R,TC
3.6W-NO	3.6	1.33	-	199.7	R, TC, S
4.1W-NO	4.1	1.50	-	180.0	TC, S
5.4W-NO	5.4	2.00	-	273.8	S
2.7W-D	2.7	1.00	door 1	47.9	R
2.7W-W	2.7	1.00	window 1	44.7	R

\* H : Height (2.7m), L : Length,  
Failure Mode : R (Rocking), TC (Toe Crushing), S (Sliding)

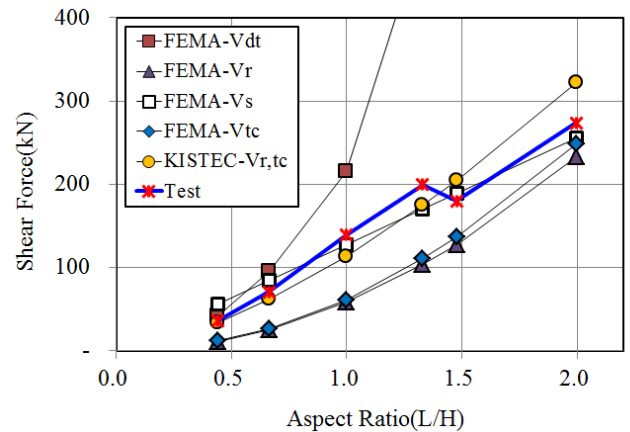


Fig. 2 Shear Strength of Wall Specimens according to Equations

약 35% 가량 작은 값이다.

FEMA의 제안식에 따라 예측한 결과, 모든 무개구부 실험체는 강체회전 및 양단부 압축 파괴 거동에 의해 전단강도가 결정되며, 이들 예측 결과는 실험결과의 0.3~0.7배 수준으로 과소평가되었다. 반면, 한국시설안전공단에서 제안한 강체회전 강도는 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있으나, 형상비 (L/H)가 1.5 이상인 경우에는 잘 맞지 않는 결과를 나타내었다. 이는 형상비 (L/H)가 1.5 이상인 경우, 단면적이 증가함에 따라 작용하는 축력도 증가하게 되어 휨내력이 증가하고 따라서 벽체는 상대적으로 약한 전단강도로 인해 미끄러짐 전단파괴에 의해 지배되기 때문이라 생각된다.

한편, 한국시설안전공단의 강체회전 강도식과 FEMA의 미끄러짐 전단 강도식을 비교해 보면, 형상비 (L/H)가 1.0 이하인 1.2W-NO, 1.8W-NO, 2.7W-NO 실험체에서는 강체회전 파괴모드에 지배되고, 형상비 (L/H)가 1.0~2.0 사이인 3.6W-NO, 4.1W-NO 실험체에서는 두 강도식에 의한 전단강도가 비슷한 수준으로 예측되었다. 또한 형상비 (L/H)가 2.0인 5.4W-NO 벽체에서는 미끄러짐 전단 파괴모드에 지배되는 결과를 나타내어, 두 강도식을 종합하였을 때 실험결과와 같이 형상비에 따른 파괴모드를 잘 반영하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 국내의 순수 조적벽체의 전단강도를 한국시설안전공단에서 제안한 식 (6)의 강체회전 전단강도  $V_{r,tc}$ 와 식 (1)과 같이 FEMA에서 제안한 미끄러짐 전단강도  $V_s$  중 작은 값으로 결정된다고 가정하였다.

출입문 및 창문 형태의 개구부를 가지는 벽체 실험체의 전단강도 예측결과를 Fig. 3에 나타낸다. 한국시설안전공단에서 제안한 바와 같이 개구부를 무시한 순수 조적벽체에 개구부율을 고려하여 강도를 저감하여 예측한 경우, 전단강도는

실험결과와 약 10% 가량의 차이를 보이며 거의 근사하게 예측되었지만 강체회전 파괴가 발생한 실험결과를 모사하지 못하고 미끄러짐 전단의 파괴모드에 지배되는 결과를 나타내었다. 이는 실제 횡하중을 지지하는 Pier 벽체의 대부분이 형상비 (L/H)가 1.0 이하로써, 주로 강체회전 및 양단부 압축 파괴가 발생하게 되는데, 이를 순수벽체로 가정할 경우 형상비가 실제보다 증가하게 되므로 형상비가 큰 벽체가 미끄러짐 전단 파괴에 지배되는 경향에 따라 파괴모드의 예측에 오류가 발생할 것으로 판단된다. 또한 한국시설안전공단에서 순수 조적벽체에 대해 강도 및 파괴식으로 제안한 이정한의 강체회전 강도식을 적용한 결과, 실험값에 비해 약 1.5~1.7배 정도 과대평가됨에 따라 이는 상하부가 모두 구속되어 있는 Pier 벽체의 예측에는 유용하지 않은 것으로 판단된다. 반면, FEMA에 따라 Pier의 유효높이를 산정한 후 이를 이용하여 파괴모드에 따른 전단강도를 예측한 결과, 두 실험체 모두에서 강체회전 파괴모드에 지배되며 전단강도의 크기도 실험결과와 매우 근사한 수준으로 예측되었다.

국내의 일반적인 조적조 주택의 경우, 외벽은 주로 출입문 및 창문 등의 개구부가 거의 필연적으로 존재하므로 이들 벽체의 내진성능 평가시에는 FEMA의 제안식에 따라 개구부를 제외한 Pier 벽체로 분리하여 평가하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다. 반면 내력벽의 경우 개구부가 없는 순수벽체가 대부분이므로 이러한 경우에는 한국시설안전공단에서 제안한 바와 같이 이정한의 강체회전 강도식을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

### 3. 비보강 조적벽체의 반복가력 해석

#### 3.1 해석모델

본 연구에서는 기존 연구에서 수행되었던 형상비 (L/H) 및 개구부 유무에 따른 조적벽체 실험체를 대상으로 비선형 반복가력해석을 수행하였다. 조적벽체는 Fig. 4와 같이 부재의 양단부 및 중앙부에 휨, 전단, 축거동을 하는 비선형 스프링을 가지는 선형부재로 모델화하였다. 개구부를 가지는 벽체에서는 2.3절에서 각 제안식을 비교·평가한 결과를 바탕으로 FEMA에서 제안한 바와 같이 개구부 상부 및 하부의 벽체는 무시하고 개구부간 Pier 벽체만을 모델링하였다. 또한 개구부 상하부 벽체의 구속효과를 고려하여 Pier 벽체의 단부에 Rigid Zone으로 가정하였으며, Rigid Zone의 길이는 전체 벽 높이에서 전술한 식 (5)의 유효높이를 제외한 값으

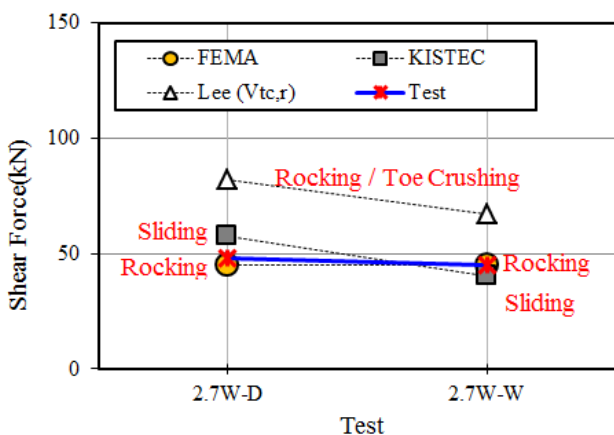


Fig. 3 Shear Strength of Wall with Opening Specimens according to Equations

≡ : Axial spring, ⊙ : Flexural spring, ≡ : Shear spring

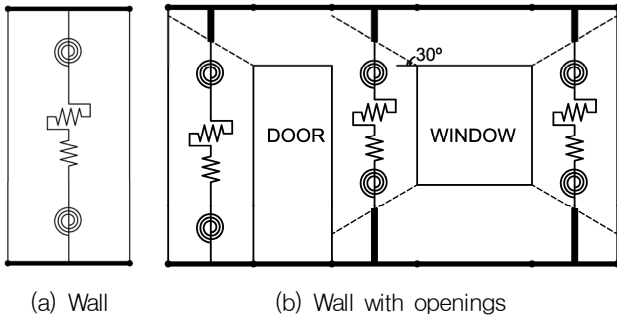


Fig. 4 Analysis Models

로 설정하였다. 개구부 양쪽의 두 벽체는 Rigid Link로 가정하였으며, 축 스프링은 탄성, 휨 스프링은 강체회전, 전단 스프링은 미끄러짐 전단과 사인장 강도 중 작은 값으로 적용하였다.

조적벽체의 거동을 나타내는 이력곡선 모델은 2.1절에서 전술한 바와 같이 각각의 파괴모드에 따른 이력특성을 고려하여 Fig. 5와 같은 복원력 모델로 가정하였다.

조적벽체의 휨거동은 선형 부재의 양단에 위치하는 휨 스프링으로 가정하였으며, 휨거동에 의해 조적벽체의 양단부에 줄눈을 따라 균열이 발생하면 벽체는 추가하중을 지지하지 못하고 변형만 증가하는 강체회전 파괴가 발생하게 된다. 강체회전 파괴가 발생하고 난 후에는 벽체의 강체회전만이 발생하기 때문에 에너지 소산기구가 거의 존재하지 않고, 반복 가력시 Slip 거동이 나타나 이력거동에 의한 에너지 흡수는 거의 발생하지 않는다. 따라서 Fig. 5의 (a)와 같은 Bi-linear의 골격곡선을 가지며 반복가력시 Slip 거동을 반영하는 것으로 가정하였다. 한편, 실험결과에서 제하시에 Slip 거동이

Table 2 Properties of hysteresis loop

	Rocking Toe Crushing	Sliding	Diagonal Tension
$\alpha$	-	0.05	-
$\beta$	0.01	0.01	0.01
$\theta$	-	0.7	0.5
$\xi$	0.1~0.3	-	1
$\lambda$	0.8	-	-
$\gamma$	-	0.5	-
$\phi$	-	1	-

후 강성이 크게 감소하는 경향이 있으나, 이는 해석상에 구현된 이력모델을 적용하기 위해 제하시 강성저감은 무시하였다.

조적벽체에서 전단거동에 의한 파괴모드는 미끄러짐 전단과 사인장의 두 가지로 규정하고, 내력식에 의한 전단강도를 이력거동에서 항복점으로 설정하고 반복가력시 이전 가력스텝의 최대 하중점을 향하는 복원력 모델을 적용하였다. 미끄러짐 전단의 경우, Fig. 5의 (b)와 같이 제하시에 강성이 유지되며 재재하시에도 항복강도의 일정비율 ( $\theta f_y$ )만큼 강성이 유지되는, 비교적 안정적으로 거동하는 모델로 가정하였다. 사인장의 경우 Fig. 5의 (c)에 나타난 바와 같이 전단강도에 도달한 이후 균열이 증가하고 다른 균열과 연결됨에 따라 제하 및 재재하시에 강성이 크게 감소하는 특징을 반영하는 복원력 모델을 적용하였다. 각 복원력 모델의 특성값은 실험결과를 반영하여 가정하였으며, 이를 정리하여 Table 2에 나타낸다.

### 3.2 해석방법

본 연구에서는 3차원 해석 프로그램인 CANNY를 사용하

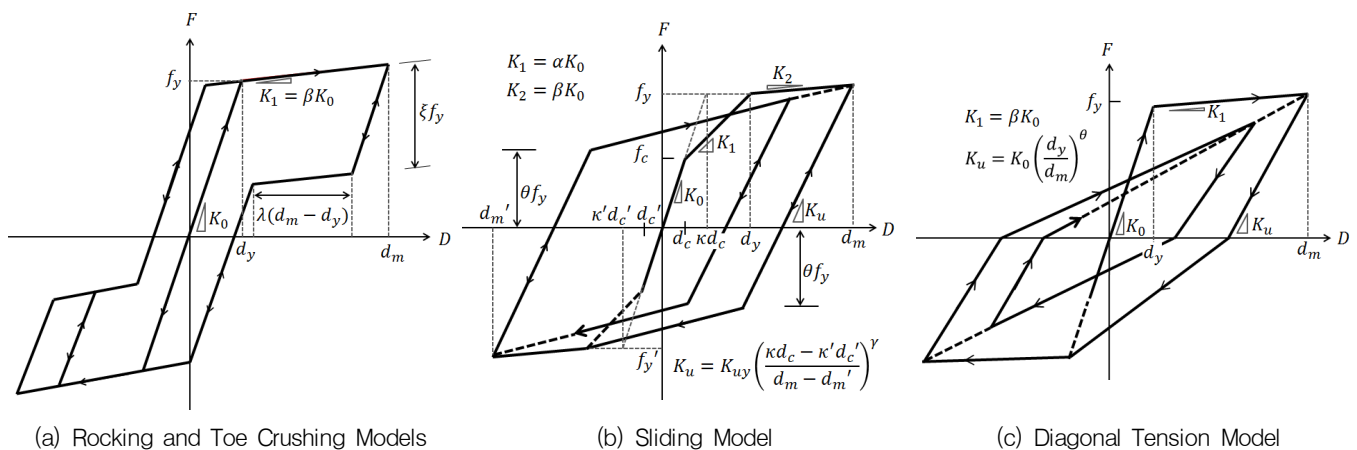


Fig. 5 Hysteresis Models of Nonlinear Spring according to Failure Mode

여 비선형 반복가력해석을 실시하였다. 해석에서의 반복가력은 실험과 동일하게 조적벽체 높이 (H=2700mm)에 대한 부재각을 0.125% 씩 증가시키며, 해석모델의 최상부에 변위제어로 가력하였다.

### 3.3 해석결과

실험 및 해석에 의한 각 실험체별 하중 및 강성 결과를 Table 3에 나타낸다. 본 연구의 방법에서 정해진 전단강도식을 적용한 결과, 해석결과는 실험결과의 전단강도 및 파괴모드를 전반적으로 유사하게 예측하는 것으로 나타났다. 개구부 벽체 및 형상비가 커 미끄러짐 전단파괴가 발생한 순수벽

Table 3 Analysis results compared with test results

Specimen	Failure Mode*		Shear Strength [kN]			Ki ** [kN/mm]
	Test	Analysis	Test	Analysis	Analysis / Test	
1.2W-NO	R	R	36.6	32.5	0.89	2.4
1.8W-NO	R, TC	R	70.8	61.6	0.87	7.0
2.7W-NO	R,TC	R	138.8	114.7	0.83	18.7
3.6W-NO	R, TC, S	R, S	199.7	170.9	0.86	34.2
4.1W-NO	TC, S	R, S	180.0	191.7	1.07	41.7
5.4W-NO	S	S	273.8	256.7	0.94	69.4
2.7W-D	R	R	47.9	45.9	0.96	12.8
2.7W-W	R	R	44.7	44.3	0.99	13.8

\* Failure Mode : R (Rocking), TC (Toe Crushing), S (Sliding)

\*\* Ki : Initial Stiffness (Analysis)

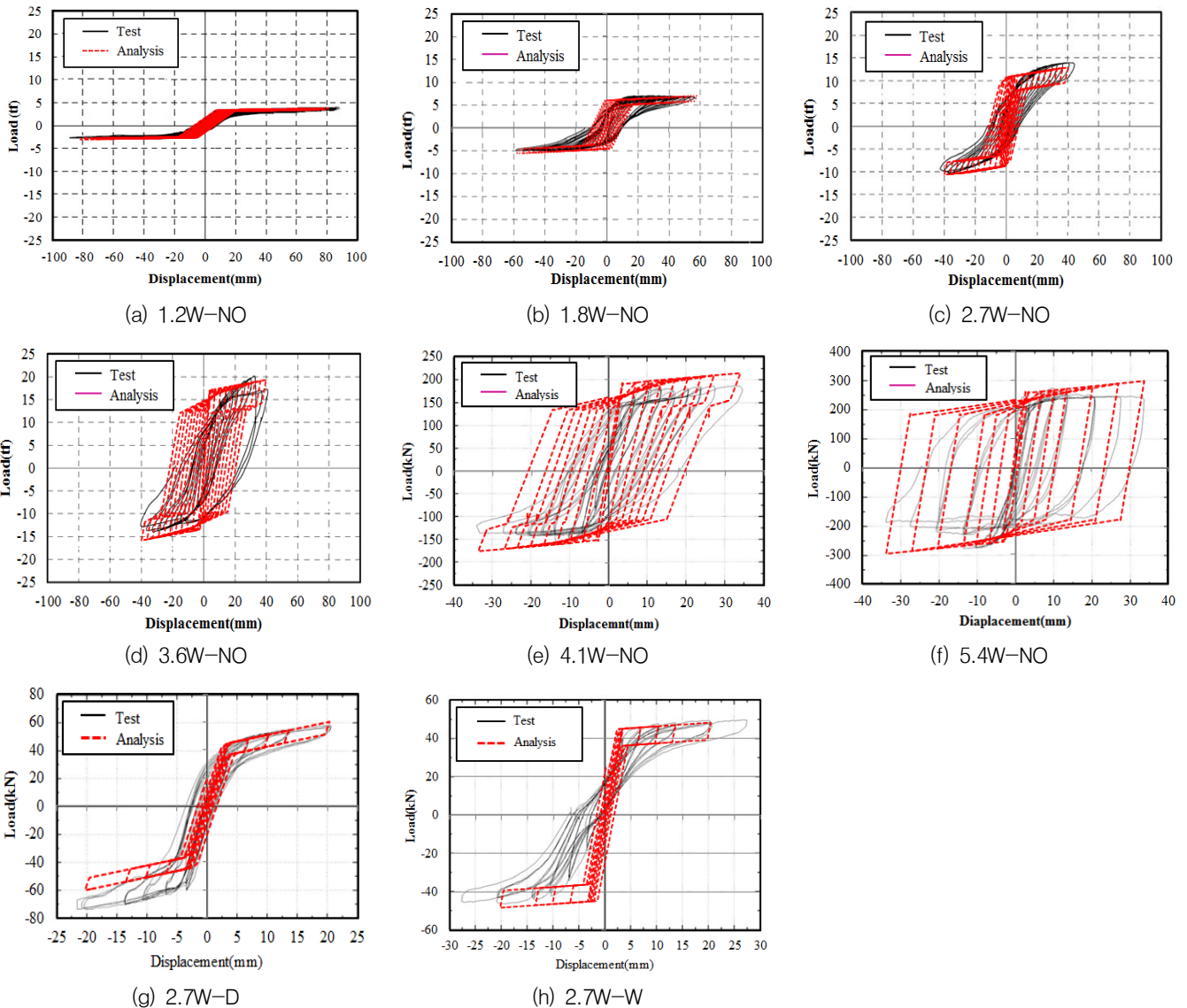
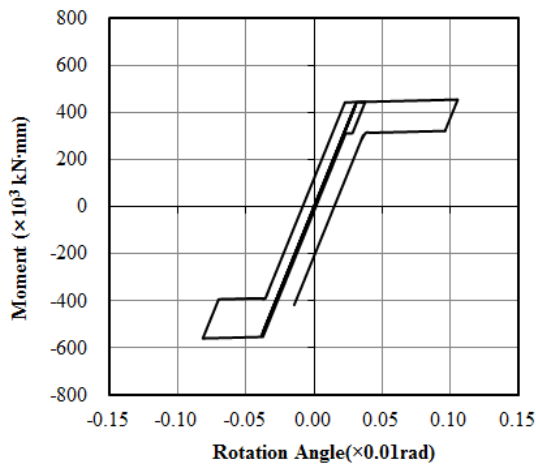
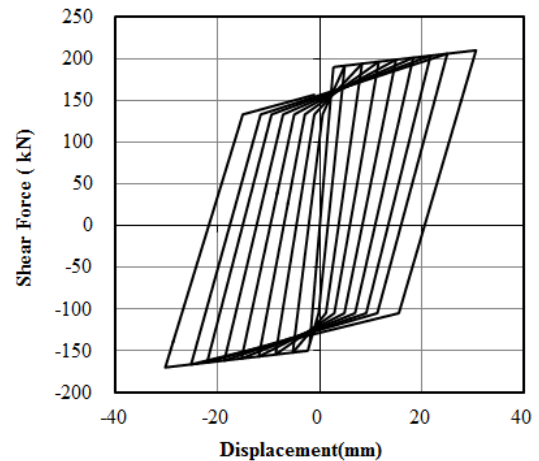


Fig. 6 Comparison of Load-Displacement Relationships between Test and Analysis Results





(a) Flexural behavior



(b) Shear behavior

Fig. 7 Hysteresis behaviors of the specimen 4.1W-NO

체의 경우 오차 (해석결과/실험결과)가 10% 이하로 비교적 정확한 반면, 강제회전 파괴에 지배되는 순수벽체의 경우 오차가 다소 큰 것으로 나타났다. 이는 Pier 벽체와 미끄러짐 전단강도 평가시에 적용한 FEMA 제안식 및 전단응력 (0.25MPa)은 국내 여건에 적절히 적용할 수 있으며, 국내 기존 제안식인 강제회전 강도식은 벽체의 구속조건에 따라 다소 오차가 있는 것으로 판단된다.

실험 및 해석에 의한 각 실험체별 하중-변위 관계를 비교하여 Fig. 6에 나타내며, 해석결과는 전반적으로 실험결과와 유사한 거동을 나타내었다. 형상비 1.0 이하의 순수 조적벽체 (Fig. 6(a)~(c))에서는 휨거동에 지배되어 강제회전 파괴모드가 발생하는 것이 잘 반영되었으며, Fig. 6의 (d), (e)에 나타난 형상비 1.3~1.5의 벽체는 강제회전과 미끄러짐 전단파괴가 혼재되어 발생하였다. 또한 형상비 2.0의 5.4W-NO 실험체에서는 미끄러짐 전단파괴만 발생함에 따라 조적벽체의 형상비가 커질수록 미끄러짐 전단파괴 모드에 지배되는 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히, 형상비가 1.33인 3.6W-NO 실험체에서는 약 167kN으로 강제회전 강도에 먼저 도달한 이후, 2차 강성 (약 0.43kN/mm)에 의해 강도가 약 4kN 가량 증가하여 미끄러짐 전단강도에 도달한 반면, 형상비 1.5인 4.1W-NO 실험체에서는 두 파괴모드가 역전되어 나타났으며, 이를 Fig. 7에 나타난 4.1W-NO 실험체의 휨 및 전단 이력거동에서 확인할 수 있었다.

개구부가 있는 벽체의 경우, 해석결과에서 모두 강제회전 파괴모드에 지배되는 것으로 나타났다. 실험결과에서는 출입문이 있는 경우와 창문이 있는 경우 이력거동 형태가 다소 상이한 결과가 나타났는데, 출입문이 있는 경우 Fig. 6(g)에

나타난 바와 같이 전형적인 강제회전 거동이 뚜렷이 나타나는 반면, 창문이 있는 경우에는 Fig. 6(h)에서와 같이 재재하시에 강성이 이전 싸이클 강성의 약 20% 가량 저감되는 것으로 나타났다. 하지만 전반적인 거동의 형태가 강제회전에 가까우며 에너지 흡수면적이 크지 않고 Slip 거동의 형태가 나타나는 점을 고려하면 해석결과가 이를 비교적 잘 묘사하는 것으로 생각되어진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 형상비 및 개구부의 유무에 따른 비보강 조적벽체의 전단강도를 예측하기 위하여 기존의 제안식에 대한 적용성을 분석하였다. 또한 비보강 조적벽체의 파괴모드에 따른 이력거동의 특성을 반영하여 복원력 모델을 제시하고 기존 연구의 실험체에 대한 비선형 반복가력 해석을 수행하여 실험결과와 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 개구부가 없는 순수벽체의 경우, 국내 기존 연구에서 제안된 강제회전 및 양단부 압축 강도식과 FEMA의 미끄러짐 전단강도식을 비교하여 작은 값을 전단강도로 평가할 수 있다.
- (2) 개구부가 있는 벽체의 경우, FEMA에서 제안한 방법과 같이 개구부를 무시하고 Pier의 유효길이를 반영하여 각 파괴모드별 강도식에 따라 예측할 수 있다.
- (3) 본 연구에서 제안된 이력모델을 적용하여 반복가력 해석을 실시한 결과, 실험결과와 강도, 강성 및 이력거동

특성 면에서 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 적용된 조적 벽체의 전단강도 평가식은 개구부의 유무에 따라 각각 다른 방법으로 가정되었는데, 이는 제안식들을 변수에 관계없이 공통적으로 적용하였을 때 일관된 예측 결과가 도출되지 않았기 때문이다. 그 이유는 기존 연구에서의 제안식 등이 특정 실험결과를 분석하여 얻은 회귀식인 경우가 많은데, 조적벽체의 다양한 실험결과들 자체가 의도하지 않은 변수들과 복합적인 파괴요인으로 인해 다소 일관성이 결여되어 있기 때문으로 판단된다. 이에 개구부의 유무에 관계없이 포괄적이고 종합적으로 예측이 가능한 강도식 및 파괴모드를 규명하기 위한 연구가 향후 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 ‘화산성 지진으로 인한 국내 피해 예측 기술 개발’ [NEMA-백두산-2012-1-4]과제의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

1. Calvi, G. M., Kingsley, G. R., Magenes, G. (1996), Testing of masonry structures for seismic assessment, *Earthquake Spectra*, 12(1), 145-162.
2. Federal Emergency Management Agency (2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, American Society of Civil Engineer (ASCE).
3. Heo, J. S., Lee, S. H. (2009), Analytical study on the seismic capacity for existing masonry building in Korea, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 13(6), 75-87 (in Korean, with English abstract).

4. Kim, H. C., Kim, K. J., Park, J. H., Hong, W. K. (2001), Experimental study on the material properties of unreinforced masonry considering earthquake load, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 5(2), 93-101 (in Korean, with English abstract).
5. Kim, J. H., Kwon, K. H. (2002), Analysis of in-plane behavior of unreinforced masonry walls, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 6(3), 1-10 (in Korean, with English abstract).
6. Kim, M. H. (2012), Study of Hysteresis of masonry wall structural, master thesis, Seoul, University of Seoul, Department of Architectural Engineering (in Korean, with English abstract).
7. Kim, T. W., Min, C. K., Lee, H. M. (2011), Seismic performance evaluation of unreinforced masonry buildings by using a three-step procedure, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 12(3), 57-64 (in Korean, with English abstract).
8. Kingsley, G. R. (1995), Evaluation and retrofit of unreinforced masonry buildings, *Proceedings of the Third National Concrete and Masonry Engineering Conference*.
9. Li, K. (2009), CANNY Manual.
10. Magenes, G., Calvi, G. M. (1997), In-Plane Seismic Response of Brick Masonry Walls, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 1091-1112.
11. National Disaster Management Institute (2008), Development of the seismic fragility function for unreinforced masonry buildings, National Disaster Management Institute (in Korean).
12. Park, J., Towashiraporn, P., Craig, J. I., Goodno, B. J. (2009), Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures, *Engineering Structures*, 31(1), 125-137.
13. Yi, W. H., Lee, J. H., Oh, S. H., Yang, W. J., Kang, D. E. (2006), A study on evaluation of shear capacity of unreinforced masonry wall, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 21(10), 3-10 (in Korean, with English abstract).

Received : 12/19/2013  
Revised : 02/27/2014  
Accepted : 03/21/2014

#### 요 지

본 연구는 비보강 조적조 건축물의 정밀한 내진성능 평가를 위한 기초 연구로써, 조적벽체의 형상비 및 개구부 유무에 따른 파괴모드를 고려하여 기존의 전단강도 제안식을 비교·평가하고, 이를 반영한 복원력 특성모델을 제안하였다. 개구부가 없는 조적벽체의 전단강도는 국내 기존 연구에서 제안된 강제회전 및 양단부 압축파괴 강도와 FEMA의 미끄러짐 전단강도 중 작은 값을, 개구부가 있는 벽체의 경우 Pier 벽체만을 고려하여 강도를 예측하는 것이 적절한 것으로 평가되었다. 또한 파괴모드를 고려하여 휨 및 전단거동의 복원력 특성 모델을 제시하였으며, 이를 적용하여 비선형 반복가력 해석을 수행한 결과, 강도 및 이력 거동 면에서 실험과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

**핵심 용어** : 비보강조적조, 비선형해석, 이력모델, 파괴모드