

# 단순화된 Micro-modeling 기법을 통한 조적조의 유한요소해석 Numerical Analysis of Masonry Assemblages through Simplified Micro-Modeling

윤동진\* · 임광모\*\* · 이주하\*\*\*

Yoon, Dong-Jin\*, Lim, Kwang-Mo\*\*, and Lee, Joo-Ha\*\*\*

## Abstract

Recently, research focused on preventing the aging of masonry structures, and minimization of damage caused by earthquakes to these structures has gained significant attention. To improve the performance of these structures, an appropriate method is required for their performance evaluation. Generally, the equivalent strut model is employed for the performance evaluation of a masonry wall. However, this method is known to have limitations in implementing reinforced masonry and in reflecting the actual reinforcement effect. Appropriate evaluation techniques should be developed to implement the performance improvement methods developed in the future. Therefore, in this study, analysis methods were developed considering the nonlinear static analysis method for masonry elements. In addition, using these methods, the analysis considering the various reinforced thicknesses and shapes was performed, and the appropriate reinforcement methods were presented for these structures.

**Key words :** Diagonal Tension Masonry, Finite Element Analysis, Nonlinear Static Analysis, Performance Enhancing, Sprayed FRCC

## 요 지

최근 국내 조적조 구조물의 노후화방지 및 경주와 포항에서 발생한 지진으로 조적 구조물에서 발생한 피해를 최소화하기 위한 연구가 지속적으로 관심받고 있다. 조적조의 성능을 향상시키기 위해서는 조적조의 성능을 평가할 수 있는 적합한 방법이 필요할 것이다. 국내에서는 조적조의 성능을 평가하기 위해서 조적벽체를 등가의 응력스트럿으로 치환하는 방법이 가장 보편적으로 사용되어왔다. 다만 이러한 방법은 보강된 조적조를 구현하기에 한계가 있으며 실제의 보강효과를 반영하기에는 한계를 보여왔다. 향후 개발되는 조적조의 보강방법을 반영할 수 있는 적합한 해석기술이 필요할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 조적요소에 대하여 비선형정적해석방법을 적용한 해석기법을 개발하고자 하였다. 또한, 개발된 해석기법을 활용하여 다양한 보강두께, 형태에 대한 해석을 수행하여 보강된 조적요소의 적절한 보강방법을 제시하고자 한다.

**핵심용어 :** 사인장 조적조, 유한요소해석, 비선형정적해석, 조적조의 성능향상, 뿔칠형 FRCC

## 1. 서 론

조적조 구조물은 국내외에서 오래전부터 사용된 전형적인 건축형식 중 하나이다. 조적조 구조물은 재료의 수급성과 시공성이 다른 건축형식과 비교하여 우수한 면을 보여주고 있다. 이러한 장점의 영향으로 인하여 조적조 구조물은

국내 건축물 중에서 약 40% 수준의 많은 비율을 차지하고 있다(NEMA, 2011). 1990년대 이전에 건축된 조적조 구조물의 경우, 약 20년의 시간이 경과함에 따라 노후화가 진행되고 있다. 서울시가 관리하는 재난관리 시설물 중에서 조적조 구조물은 D급 44.6%, E급 85.7%를 차지하고 있으며, 분류된 조적조 구조물은 모두 위험등급을 나타내고 있다

\*정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 석사과정(E-mail: yoondj@suwon.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Suwon

\*\*정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 박사후연구원

Member, Ph.D., Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Suwon

\*\*\*교신저자, 정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 교수(Tel: +82-31-220-2159, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: leejooha@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Suwon

(MLTM, 2010). 이러한 조적조 구조물들은 근래 16, 17년 국내에서 발생한 경주와 포항 지진과 같은 황하중에 대한 저항이 취약한 특성을 보인다. 국내의 지진발생은 계기관측을 시작한 1978년 이후 그 빈도가 시간이 갈수록 늘어나고 있다. 과거 연평균 19회이던 지진발생건은 디지털 관측을 시작한 99년 이후 18년까지 연평균 69회로 상승하였다 (KMA, 2020). 이에 따라 국내에서는 조적조 구조물의 내진 보강 방법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이와 더불어 조적조 구조물의 성능평가 방법에 대한 연구도 이루어지고 있다. 국내 한국시설안전공단(KISTEC, 2019)에서는 기존 시설물에 대한 내진성능 및 평가요령을 제시하고 있으나, 비보강 조적조 구조물에 대한 성능평가가 주를 이루고 있다. 조적조 구조물의 해석에서 등가의 응력스트럿을 사용한 간편한 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있으나, 이러한 해석모델링은 조적조의 역학적인 거동을 상세하게 확인하는 데에는 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 조적조의 해석 모델링기법을 개발하고자 하였다. 개발된 해석기법은 기존에 등가응력스트럿 모델로 구현할 수 없는 조적조의 보강효과 등 다양한 발전이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 해석기법을 활용하여 사인장 조적조요소의 보강형태에 따른 성능을 상세해석 및 비교분석을 통해 적합한 모델링방법과 보강형태를 제시하고자 한다.

## 2. 기존 국내외 연구사례

조적조의 해석에 대한 국외 연구사례를 조사하였다. D'Altri et al. (2018)은 면내하중을 받는 비보강 조적벽체의 역학적 거동을 파악하기 위하여 Micro-modeling 방법을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이때 3D Solid 요소로 벽돌개체를 나타내었으며, 모르타르의 경우 Interface 요소를 사용하였다. 이러한 모델링의 접근법을 통하여 조적조의 거동이 비교적 정확하게 표현될 수 있다는 것을 확인하였다. Abdulla et al. (2017)은 Micro-modeling 방법이 면내 반복하중을 받는 조적조의 3차원 비선형거동을 시뮬레이션으로 나타내는데 효율적인 방법인 것을 확인하였다. 또한 Mesh 크기에 따른 결과를 비교한 후 적절한 Mesh 크기를 선정하여 해석시간을 크게 단축시켰다.

국내의 경우, Hong et al. (2018)의 연구에서는 비보강 조적벽체의 보유내력 평가를 위하여 조적조를 일체화된 모델로 간주하는 Macro-modeling 방법을 채택하였다. 파이버와 전단스프링 요소를 사용한 조적벽체 해석모델은 휨과 전단에 의한 비선형거동을 추정할 수 있는 수단 중 하나가 될 수 있음을 확인하였다. Back et al. (2014)은 조적벽체를 비선형 스프링을 가지는 선형부재로써 일체화된 모델로 모델링하여 반복가력 해석을 수행하였으며, 실험결과와 강도 및 거동 특성에서 비슷한 결과를 확인하였다. Heo

and Lee (2009)는 비보강 조적조 건축물의 내진성능을 파악하고자 유한요소프로그램을 이용하여 비선형정적해석을 수행하였다. 이와 같이 국내에서는 대부분의 조적조에 대한 해석적인 연구는 비보강 조적조에 대하여 주를 이루고 있다.

## 3. 조적조 모델링의 이론적 배경

### 3.1 조적조의 모델링

조적조 구조물의 복잡한 역학적 거동을 이해하며 모델링에 대한 효율적인 방법을 제시하기 위하여 지속적인 연구 수요가 있다. 일반적으로 줄눈 모르타르는 벽돌개체보다 강도가 낮음으로 인하여 파괴 시 줄눈을 따라서 균열이 전파되는 거동을 볼 수 있다. 따라서 조적조 구조물의 구성을 설명하기 위해 두 가지 주요 접근법이 개발되었으며, Fig. 1과 같이 일반적으로 Macro-modeling과 Micro-modeling으로 알려져 있다. Macro-modeling은 벽돌개체와 줄눈을 구별하지 않고 가상의 연속재료를 형성하여 평균적으로 모르타르의 효과를 산출한다(D'Altri et al., 2018). 이러한 접근방식은 실제 대규모 구조물에 필요한 대략적인 이산화할 수 있게 해주었기 때문에 광범위하게 사용되어 왔다. 대안되는 방법인 Micro-modeling은 줄눈 모르타르와 벽돌개체를 개별적으로 구성하여 모델링한다. 어떠한 경우에는 줄눈 모르타르에 대한 두께가 '0'인 Interface요소를 사용하여 단순화된 Micro-modeling을 사용하기도 한다 (Milani et al., 2006). 본 연구에서는 Interface 요소를 사용한 단순화된 Micro-modeling을 사용하여 보강형태에 따른 사인장 조적조요소의 해석을 수행하였다.

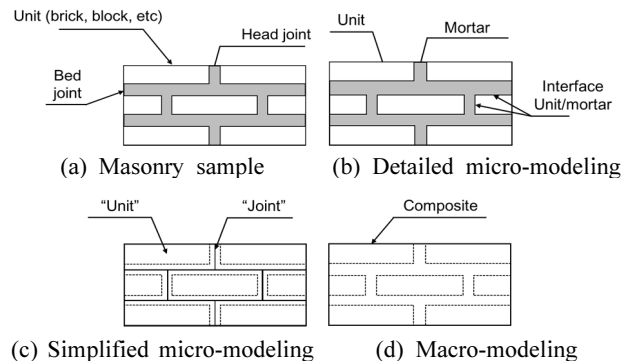


Fig. 1. Masonry Modeling Approach

### 3.2 조적조의 재료모델링

일반적으로 유한요소해석에서는 선형 탄성 해석의 제한성을 극복하기 위한 균열모델로써 Discrete crack (이하, 분리균열) 모델과 Smeared crack (이하, 분포균열) 모델을 사용한다. 분포균열모델은 Macro-modeling과 연관되는 균열모델로써 일반적인 조적벽체를 해석 시 벽체를 하나의

요소로 보고 모델링한다. 균열은 요소 내에서 주인장응력에 따라서 균일하게 분포되는 것으로 간주된다. 따라서 Mesh의 사이즈가 작을수록 균열을 자세하게 나타낼 수 있다. 한편, 분리균열모델에서는 Interface 요소를 사용하여 경계면을 중심으로 한 균열을 묘사하였다. 이때, 경계면 균열묘사는 재료의 인장강도가 초과되었을 때 경계면 부근에서 분리 또는 미끄러짐이 일어나게 된다(Kang, 2010). 즉, 조적벽체에서의 균열은 벽돌개체보다는 줄눈 모르타르에서 일어나는 현상이라고 할 수 있다. 이에 일반적으로 조적벽체의 재료 모델링 시 벽돌은 선형 탄성으로 모델링하며, 줄눈 모르타르는 비선형 모델로 모델링한다. 본 연구에서는 분리균열모델을 사용한 Interface 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 이러한 모델은 벽돌개체와 줄눈 모르타르를 각각 고려해주어야 하므로 모델링 소요시간 등 합리적이지 못한 부분이 존재하지만, 벽돌개체와 줄눈 모르타르를 각각 고려함으로써 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있음에 이점이 있다(Kim and Kwon, 2002). 벽돌개체의 재료구성모델은 Total strain-based 모델을 사용하였다. 취성재료인 벽돌개체의 재료적 성질을 나타내기 위하여 다음 Fig. 2와 같은 응력-변형을 관계 모델들을 사용하였다. Total strain-based 모델의 인장영역 거동 모델은 취성거동으로 가정하여 일정 인장응력을 초과시 취성적인 거동을 하도록 나타내었다. 벽돌개체의 압축영역 거동을 나타내기 위하여 포물선형 함수의 경화/연화거동(Hardening/Softening)을 가정하였다.

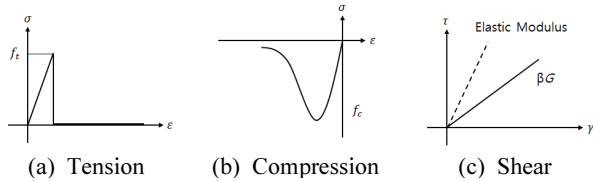


Fig. 2. Material Model of Brick Unit

줄눈 모르타르 Interface 요소의 비선형적인 성질을 나타내기 위하여 Discrete cracking 모델을 사용하였다. 줄눈 모르타르 Interface 요소의 강성계수를 나타내기 위하여 Lourenço and Rots (1997)에서 제시한 강성계수 산정 Eqs. (1)~(2)를 사용하였다.

$$k_n = \frac{E_{brick} E_{mortar}}{h_{mortar} (E_{brick} - E_{mortar})} \quad (1)$$

$$k_t = \frac{G_{brick} G_{mortar}}{h_{mortar} (G_{brick} - G_{mortar})} \quad (2)$$

Eq. (1)에  $k_n$ 은 Normal stiffness modulus를 나타낸다.  $E_{brick}$ 과  $E_{mortar}$ 은 각각 벽돌 단위개체와 줄눈 모르타르의 Elastic modulus를 나타내며,  $h_{mortar}$ 는 줄눈 모르타르의 실제 높이를

나타낸다. Eq. (2)에  $k_t$ 은 Shear stiffness modulus를 나타낸다.  $G_{brick}$ 과  $G_{mortar}$ 는 각각 벽돌 단위개체와 줄눈 모르타르의 Shear modulus를 나타낸다. 이러한 강성계수 제안식으로 모델링된 줄눈 모르타르 Interface 요소는 Discrete-crack 모델로 모델링 하였다.

## 4. 조적조 해석 모델링

### 4.1 재료모델

조적벽체 모델링에 사용된 벽돌 단위개체는  $190 \times 90 \times 57$  mm의 점토벽돌을 대상으로 한다. 유한요소해석에 적용된 재료의 성질은 Table 1을 통해 나타내었다. 벽돌 단위개체는 점토벽돌의 Elastic modulus를 사용하였다(Kyriakides et al., 2012; Abdulla et al., 2017). 벽돌 단위개체와 줄눈 모르타르의 Poisson's ratio는 0.15로 설정하였다(Lourenço and Rots, 1997). 벽돌 단위개체의 압축강도는 KS L 4201 (2019) 기준에 따라서 산정하였으며, 인장강도는 해석에 사용된 점토벽돌 압축강도 30.6 MPa의 약 10% 수준인 3.6 MPa로 설정하였다(Beall, 2004). 전단유지계수는 0.2 수준으로 설정하였다. 줄눈 모르타르 Interface 요소의 강성계수는 Eqs. (1)과 (2)를 이용하여 도출하였다. 보강재로 모델링한 재료로서는 섬유보강 시멘트복합체(Fiber reinforced cement composite, 이하 FRCC)와 줄눈 모르타르와 동일한 모르타르를 사용하였다. FRCC는 실험을 통해 얻은 실험결과를 사용하였으며, 모르타르의 인장강도는 KS L 5220 (2018)에 따라서 도출한 압축강도의 약 10% 수준인 1.86 MPa를 적용하였다. FRCC와 같은 보강재가 보강된 조적조의 성능을 파악하기 위하여 계면에 interface 요소를 적용하였으며, 부착특성은 줄눈 모르타르와 같은 값을 입력하였다(Kyriakides et al., 2012).

Table 1. Material Properties

Properties	Value	Unit
<b>Clay Brick</b>		
Elastic modulus	13,000	MPa
Poisson' ratio	0.15	-
Compressive strength	30.6	MPa
Tensile strength	3.6	MPa
Shear retention factor	0.2	-
<b>Mortar Joint</b>		
Mortar joint thickness	10	mm
Normal stiffness modulus	458.7	N/mm <sup>3</sup>
Shear stiffness modulus	199.0	N/mm <sup>3</sup>
Tensile strength	1.86	MPa
Bond strength	0.4	MPa
<b>FRCC Reinforcement</b>		
Tensile strength	6.0	MPa

## 4.2 해석변수 및 모델링

본 연구에서는 범용성 해석프로그램인 MIDAS FEA를 사용하여 비선형 정적해석을 수행하였다. 조적요소의 사인장 거동 및 하중-변위 곡선을 파악하기 위하여 재료 및 기하 비선형을 고려한 3차원 해석을 수행하였다. 벽돌개체는 3차원 Solid 요소를 사용하였으며, 줄눈 모르타르 부분은 Interface 요소를 사용하였다. 해석은 Fig. 3과 같이 조적요소의 최하단을 구속한 상태에서 수직하중을 점증적으로 증가시키는 형태로 수행하였다.

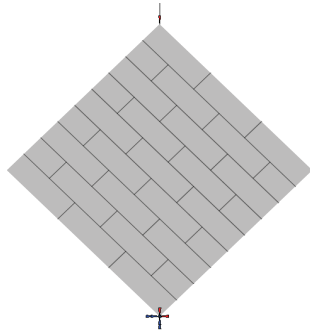


Fig. 3. Modeling of Diagonal Tension Masonry

해석변수는 Table 2와 같이 설정하였다. 모든 해석대상은 Running bond 형식(0.5B 쌓기)에 9켜로 쌓은 사인장 조적요소를 대상으로 하며, 해석모델의 크기는 비보강 해석모델을 기준으로  $590 \times 90 \times 593$  mm이다. Table 2에서 UN은 비보강 조적벽체를 의미하며, MS는 Mortar로 단면(Single)보강된 형태를 의미한다. 그리고 FS, FD는 각각 FRCC로 단면, 양면(Double-section)보강된 형태를 의미하며 뒤의 숫자는 보강두께를 의미한다.

Table 2. Modeling Variables

Variables	Reinforced Type	Note
UN-0	Unreinforced	Plane
MS-10	Mortar-10 mm	Single-Section Reinforced
FS-10	FRCC-10 mm	
FS-15	FRCC-15 mm	
FS-20	FRCC-20 mm	
FS-25	FRCC-25 mm	
FS-30	FRCC-30 mm	
FD-10	FRCC-10 mm	Double-Section Reinforced
FD-15	FRCC-15 mm	
FD-20	FRCC-20 mm	

## 4.3 해석검증

본 연구에서는 보강된 사인장조적요소에 대한 유한요소 해석을 수행하기 이전, 실험데이터와의 비교를 통해 해석 모델링에 대한 검증을 하고자 하였다.

대상 조적조는 FS-15와 동일한 단면을 갖도록 제작하였다.  $190 \times 90 \times 57$  mm의 점토벽돌을 9단으로 Running bond 형태로 쌓기를 실시하였다. 조적벽체를 3일간 양생 후 FRCC를 뿔칠하여 보강을 실시하였다. Fig. 4와 같이 시험체를 ASTM E519 시험법을 기준으로 준비하였으며, 시험법을 참고하여 지그를 제작 후 재령 28일에 사인장 전단강도 실험을 실시하였다.

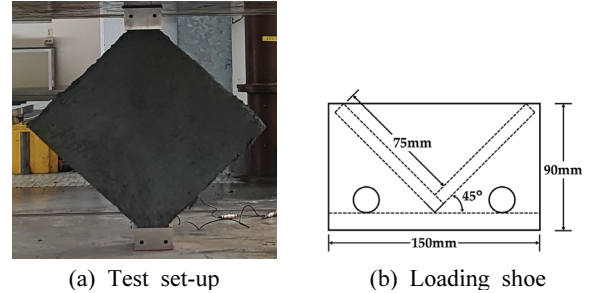


Fig. 4. Diagonal Tension Experiment

실험결과와 해석결과에 따라 파괴형상을 Fig. 5에 나타내었다. 시험체의 파괴형상은 실험과 해석에서 조적벽체균열의 형태 중 Diagonal tension이 동일하게 발생하고 있다. Fig. 6에서는 최대하중과 변위를 비교하였다. 해석과 실험의 오차는 최대하중과 변위를 기준으로 각각 2.36%, 8.11%의 오차범위가 확인된다. 다만, 해석결과와 곡선상에서 변곡점이 발견되었다. 이는 조적조의 줄눈 균열/파괴 이후 FRCC보강면만이 저항하기 시작하는 구간으로 판단되었다.

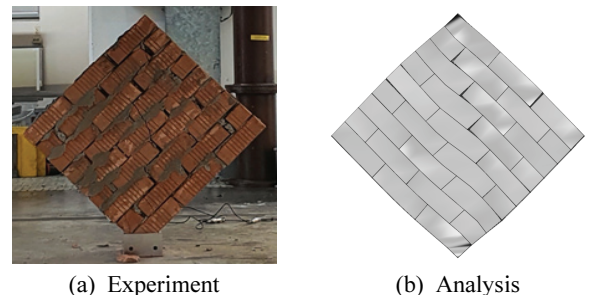


Fig. 5. Comparison of Experiment and Analysis Result

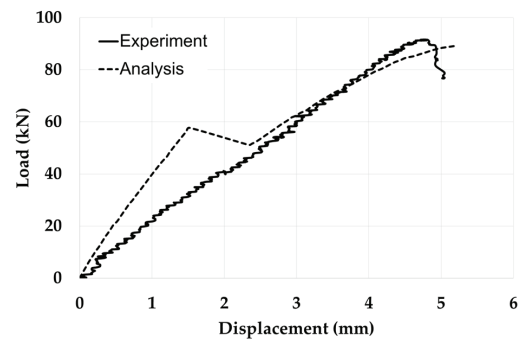


Fig. 6. Analysis Verification Model



## 5. 결과 및 분석

### 5.1 조적조의 사인장 전단강도 및 파괴모드

조적조의 사인장 전단강도에 대한 시험기준은 ASTM E519-15 (2015)를 기준으로, 제안된 조적조의 사인장 전단강도식을 사용하여 해석모델의 전단강도를 도출하고자 한다.

$$A_n = \left( \frac{W+h}{2} \right) t \quad (3)$$

$$\tau = \frac{0.707P}{A_n} \quad (4)$$

여기서,  $A_n$ 은 조적요소의 단면적을 말한다.  $W$ 는 조적요소의 폭,  $h$ 는 조적요소의 높이,  $t$ 는 조적요소의 두께를 의미한다.  $\tau$ 는 전단응력을 나타내며,  $P$ 는 재하하중을 의미한다.

Türkmen et al. (2019)에 따르면 조적요소의 사인장 전단강도 실험의 결과에서 확인할 수 있는 파괴형태는 Fig. 7과 같이 슬라이딩 파괴, 전단 파괴, 사인장 파괴, 단부 압괴파괴로 구분된다. 슬라이딩 파괴는 벽돌과 모르타르 사이의 부착파괴로 인하여 가로 줄눈 모르타르를 따라 발생하는 파괴를 의미한다. 전단파괴는 계단배열 형식에서 벽돌과 모르타르 사이의 부착파괴로 인해 발생하는 파괴양상을 의미한다. 사인장파괴는 전단력과 압축력의 조합에 의해 발생하는 주인장응력이 조적요소의 인장강도에 도달할 때 발생한다. 단부 압괴파괴는 가장자리의 최대응력이 조적요소의 압축강도를 초과하면 발생할 수 있는 파괴양상이다.

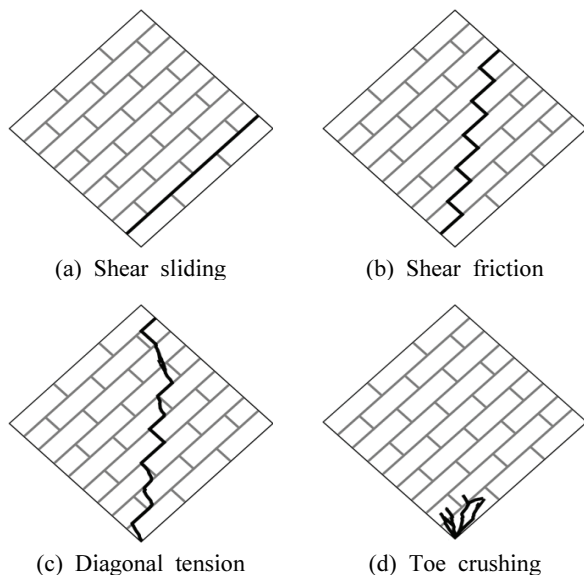


Fig. 7. Failure Modes of Masonry

Table 3은 사인장 조적요소 해석모델의 전단강도와 파괴모드를 나타내었다. 비보강조적요소인 UN-0은 Shear friction 형태로 파괴되었으며, MS-10에서는 Toe crushing의 파괴형태가 확인되었다. 또한, FRCC로 보강된 모든 조적요소에서는 Diagonal tension 파괴형태가 발생함이 확인된다. 전단응력의 경우, 양면보강 해석모델인 FD-10, FD-15, FD-20이 다른 해석모델과는 다르게 비교적 높게 나온 것을 확인하였다. 동일한 두께 변수에 대하여 단면보강에 비해 양면보강이 강도향상에 크게 기여하는 것을 확인하였다. 특히, FD-10의 경우 단면보강 FS-30보다 적은 보강 두께로 더 높은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Table 3. Failure Modes of Model

Variables	Maximum load (kN)	Shear strength (MPa)	Failure mode*
UN-0	38.74	0.51	SF
MS-10	49.39	0.66	TC
FS-10	73.03	0.97	DT
FS-15	89.35	1.19	DT
FS-20	105.11	1.40	DT
FS-25	106.66	1.42	DT
FS-30	111.23	1.48	DT
FD-10	112.98	1.50	DT
FD-15	143.47	1.91	DT
FD-20	170.35	2.26	DT

Note: \* SS: Shear sliding, SF: Shear friction, DT: Diagonal tension, TC: Toe crushing

### 5.2 사인장 조적요소의 거동분석

본 연구에서는 보강형태에 따른 사인장조적요소의 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 대한 결과는 Table 4를 통하여 나타내었다.

Table 4. Analysis Results

Variables	Maximum load (kN)	Displacement (mm)
UN-0	38.74	1.56
MS-10	49.39	1.79
FS-10	73.03	5.53
FS-15	89.35	5.22
FS-20	105.11	4.71
FS-25	106.66	4.64
FS-30	111.23	3.86
FD-10	112.98	8.35
FD-15	143.47	8.44
FD-20	170.35	9.08

Fig. 8은 사인장조적요소에서 서로 다른 보강재에 대하여 비교할 수 있도록 하중변위 곡선으로 나타낸 것이다. 단면보강 해석모델인 FS-10의 최대하중은 73.03 kN으로 나타났다. 이는 UN-0, MS-10와 비교하여 최대하중에서 많은 차이를 보이고 있다. FS-10의 경우 비보강, 모르타르보강 시험체와 비교하여 유사한 하중경로를 보이다가, 약 1.5 mm에서 변곡점을 갖는다. 이러한 경향은 약 1.5 mm 이후의 영역에서는 조적조는 파괴되어 더 이상 저항성능을 발휘하지 못하며, 보강재가 저항성능을 발휘하고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 일반 모르타르로 보강하는 경우에는 성능향상을 크게 기대할 수 없으며, 사인장 조적요소에서 성능향상을 위해서는 FRCC와 같은 보강재를 통한 보강방법이 적절할 것으로 판단할 수 있다.

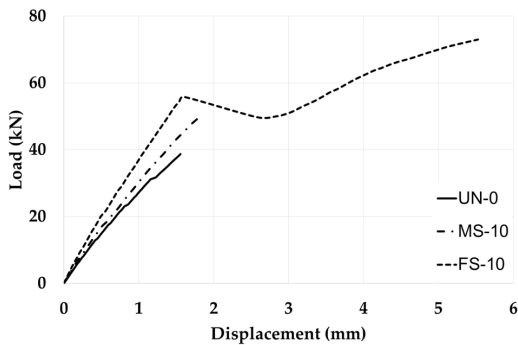


Fig. 8. Comparison by Reinforced Type

사인장 조적요소의 보강두께에 따른 결과를 Figs. 9 및 10에서 비교하고 있다. Fig. 9는 단면으로 보강을 한 모델들의 해석결과를 하중-변위 곡선으로 나타내었다. 전체적으로 보강재의 두께가 늘어날수록 최대하중도 점점 증가하는 것을 해석을 통해 확인할 수 있다. FRCC 30 mm 단면보강 모델인 FS-30의 최대하중이 112.98 kN인 것을 확인하였다. FS-30 모델보다 작은 두께를 가지는 모델과 비교하여 FS-10, FS-15, FS-20, FS-25보다 최대하중은 각각 1.54배, 1.26배, 1.06배, 1.04배 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 사인장조적요소의 양면에 보강을 한 해석모델의 결과를 하중-변위 곡선으로 나타낸 것이다. 양면보강을 하였을 때 두께가 증가함에 따라서 최대하중이 증가하는 것을 해석을 통해 알 수 있다. 해석모델 FD-10, FD-15, FD-20의 경우, 단면보강 모델인 FS-10, FS-15, FS-20과 비교하여 각각 1.55배, 1.61배, 1.62배가 증가한 것을 확인하였다.

양면보강 해석모델의 경우, 단면보강과 비교하여 파괴 시 변위가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 단면으로 보강된 조적조의 경우에 보강되지 않은 조적조의 파괴가 심각하게 발생하여 보강면이 성능을 온전히 발휘하지 못한 것으로 판단된다. 특히, 단면보강 해석결과인 Fig. 9에서 보강두께가 증가할수록 최대하중은 증가하지만, 최대 변위는 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 10의 양면보강은 보강두께가 증가할수록 최대하중과 변위가 모

두 증가하고 있다. 단면보강에서는 시험체가 최대의 성능을 발휘하지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 조적조의 성능향상을 위한 뿔칠형 보강은 양면으로 수행되는 경우에 보강재의 효과를 온전히 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

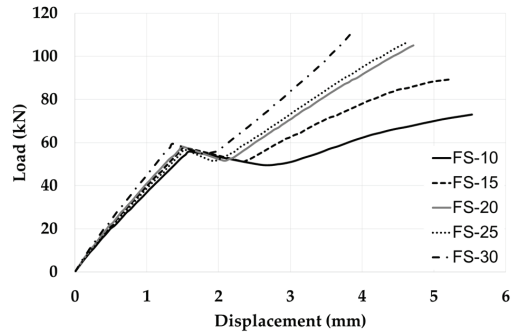


Fig. 9. Single-section Reinforced Masonry

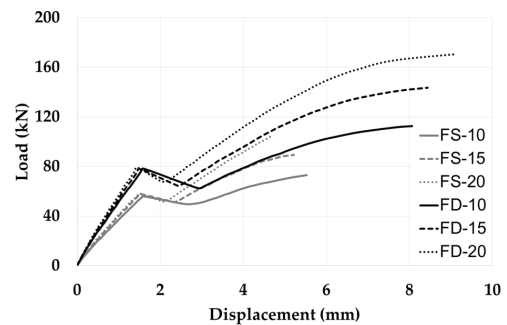


Fig. 10. Double-section Reinforced Masonry

## 6. 결론

본 연구에서는 사인장조적요소의 보강형태에 따른 유한 요소해석을 수행하였으며, 이에 따른 적절한 해석모델과 보강방법을 제시하고자 성능평가 및 비교분석을 실시하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 보강형태에 따른 사인장조적요소의 성능을 평가하기 위한 해석기법을 수립하였다. 해당 기법으로는 기존의 등가응력스트럿으로 구현할 수 없는 조적조의 보강을 모델링 할 수 있는 특징이 있다. 개발된 모델링 기법과 실험데이터의 검증을 실시하였으며, 최대하중 및 변위의 오차범위가 10% 이내로 발생하여 적용된 해석기법이 적합함을 확인하였다.
- (2) 비보강조적조와 비교하여 모르타르로 보강된 경우에는 보강효과를 기대할 수 없었다. 다만, FRCC로 보강된 조적조의 성능은 약 1.9배로 큰 폭 향상되었다. 특히, 파괴 시의 변위는 약 3.5배 증가하여 조적조의 성능을 크게 향상시킨 것으로 판단된다. 따라서, 조적조의 성능을 확보하기 위해서는 FRCC와 같은 보강재

의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

- (3) 보강두께가 증가할수록 조적조의 최대하중과 전단응력이 증가하는 양상을 확인하였다. 또한, 단면보강과 비교하여 양면보강은 성능이 크게 향상되고 있었다. 최대하중이 증가하였으며 파괴 시 변위도 크게 증가한 것을 확인하였다. 특히, 단면보강으로 30 mm 보다 양면 10 mm 보강된 경우가 더 높은 성능을 보이고 있음이 확인되었다. 따라서 양면보강이 조적조의 성능을 효율적으로 향상시키는 것으로 판단된다.
- (4) 전체적으로 조적조의 보강을 한 경우에 성능이 크게 향상된 것을 확인할 수 있다. 향후 추가적인 연구로 다양한 변수에 대한 검토를 수행하여 보강두께, 형태 등을 포함한 최적의 조적조 보강방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C152069-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Abdulla, K.F., Cunningham, L.S., and Gillie, M. (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, Vol. 151, pp. 349-365.
- ASTM E519-15. (2015). *Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages*. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Baek, E.R., Kim, J.H., Lee, S.H., and Oh, S.H. (2014). Nonlinear analysis model considering failure mode of unreinforced masonry wall. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 4, pp. 33-40.
- Beall, C. (2004). *Masonry design and detailing: For architects, engineers, and contractors* (5th ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- D'Altri, A.M., de Miranda, S., Castellazzi, G., and Sarhosis, V. (2018). A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels. *Computers and Structures*, Vol. 206, pp. 18-30.
- Heo, J.S., and Lee, S.H. (2009). Analytical study on the seismic capacity for existing masonry building in Korea. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 13, No. 6, pp. 75-87.
- Hong, J.M., Shin, D.H., and Kim, H.J. (2018). Nonlinear analytical model of unreinforced masonry wall using fiber and shear spring elements. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 31, No. 6, pp. 283-291.
- Kang, W.J. (2010). *Nonlinear finite element analysis of unreinforced masonry walls under shear and compression*. Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology.
- Kim, J.H., and Kwon, K.H. (2002). Analysis on in-plane behavior of unreinforced masonry walls. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 6, No. 3, pp. 1-10.
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISTEC). (2019). *Research on the previous facilities (building) seismic performance evaluation and improvement methods*.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2020). *A total of 88 earthquakes occurred in Korea in 2019* (February 28, 2020, Press release).
- KS L 4201. (2019). *Clay brick*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS).
- KS L 5220. (2018). *Dry ready mixed cement mortar*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS).
- Kyriakides, M.A., Hendriks, M.A.N., and Billington, S.L. (2012). Simulation of unreinforced masonry beams retrofitted with engineered cementitious composites in flexure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 506-515.
- Lourenço, P.B., and Rots, J.G. (1997). Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 7, pp. 660-668.
- Milani, G., Lourenço, P.B., and Tralli, A. (2006). Homogenised limit analysis of masonry walls, Part I: Failure surfaces. *Computers & Structures*, Vol. 84, No. 3-4, pp. 166-180.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2010). *20 Points for seismic reinforcement of small-scale buildings*.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2011). *For masonry buildings, seismic reinforcement against earthquakes* (February 9, 2011, Press Release).
- Türkmen, Ö.S., De Vries, B.T., Wijte, S.N.M., and Vermeltoort, A.T. (2019). In-plane behaviour of clay brick masonry wall retrofitted with single-sided fabric-reinforced cementitious matrix and deep mounted carbon fibre strips. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 725-765.

Received	October 19, 2020
Revised	October 19, 2020
Accepted	November 2, 2020