

# 지진하중을 고려한 비보강 조적조의 재료특성 평가에 관한 실험연구

## Experimental Study on the Material Properties of Unreinforced Masonry Considering Earthquake Load

김희철\*  
Kim, Hee Cheul

김관중\*\*  
Kim, Kwan Jung

박진호\*\*  
Park, Jin Ho

홍원기\*\*\*  
Hong, Won Kee

### 국문요약

본 논문은 국내의 비보강 조적조에 대한 내진성능을 조사하기 위하여 재료특성 평가를 위한 실험연구를 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 조적용 모르터의 압축강도식을 제안하였다. 또한 조적용 모르터의 배합비에 따른 조적조 프리즘의 압축강도 특성을 비교하였다. 조적조 프리즘의 압축강도로써 조적조의 탄성계수를 구할 수 있는 약산식을 제시하였으며, 약산식은 사인장 조적조 실험을 통하여 구한 전단탄성계수값과 비교하여 볼 때 타당성을 가지고 있다고 판단된다. 실험결과로써 나온 재료특성 값을 바탕으로 2층 조적조 다세대 주택에 대한 유사동적해석을 수행하였다. 해석결과로 얻은 전단응력과 전단파괴가 나타난 사인장 조적조의 허용전단응력은 유사한 것으로 확인되었다.

주요어 : 비보강 조적조, 조적조 프리즘, 사인장 조적조, 유사동적해석법

### ABSTRACT

Some sets of test were accomplished in order to get better insight of the basic material properties of masonry under the earthquake load. An equation of compression strength calculation for mortar was proposed according to the test results. Also, the compression strength characteristics of masonry prism were compared according to the mixing ratio of a mortar. The equation for obtaining approximate elastic modulus of masonry was suggested and it was verified through the value obtained from shear modulus of elasticity test result. The quasi-dynamic analysis was performed to the 2 story masonry building by introducing the material properties obtained from this test. It was observed that the allowable shear stress of a masonry was similar to those obtained from analysis.

Key words : unreinforced masonry(URM), masonry prism, diagonal tension masonry, quasi-dynamic analysis

## 1. 서론

비보강 조적조(URM) 건물은 기존에 지어진 주택의 대부분을 차지하고 있는 형식의 구조물이다. 그러나 시공시 주로 현장 조적공들의 경험에 의하여 축조되고 있기 때문에 건물의 품질을 보장할 수 없는 것이 현실이다. KS F 4004 규정에는 콘크리트 벽돌의 압축강도 실험법과 한계치가 명시되어 있으나 조적조 재료에 대한 특성을 나타내기에는 미흡한 상태이다.

국내에서의 비보강 조적조에 대한 연구는 수행된 적이 있으나 해석적 연구에 국한되어 있었다.<sup>(14)-(16)</sup> 해석적 접근을 위하여 사용한 재료 물성치는 미국과 유럽에서 수행한 재료 실험 결과에서 얻은 값을 사용하였다. 그러나 그들이 제시하고 있는 재료값을 적용하여 우리나라의 비보강 조적조 건물의 지진에 대한 하중저항 능력과 변형특성을 평가하는 데에는 무리가 있다고 판단된다. 우리나라에서 생산되는 모르터와 콘크리트 벽돌에 의하여 구성되는 조적조의 재료특성은 서구의 재료특성과는 차이가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 비보강 조적조의 내진성능 평가를 위한 기초자료로써 국내 현실에 맞는 재료특성 값을 규명하기 위한 것이다.

## 2. 연구 방법

우리나라에서 조적조는 최대 벽두께와 최대 벽 높이라는 경험적 요구에 바탕을 둔 건축법에 의하여 시공되었다. 하지만 유럽과 미국 등에서는 diaphragm action을 고려한 합리적인 구조해석에 의한 내력벽 설계에 근거하여 설계하고 있다. 그 결과로서 3개 층 이상의 건축물을 조적조로 축조할 수 있게 되었다. 이와 같은 경우 내력벽을 형성하고 있는 조적벽체의 강도가 한층 중요하게 된다.

줄눈 모르터의 강도를 높이는 것은 조적벽체의 강도를 높이는 것과 상관관계가 있다고 볼 수 있다. 조적용 모르터와 콘크리트의 주성분이 거의 같은 이유로 구조물에 사용되는 콘크리트와 똑같이 조적용 모르터를 만들면 조적벽체의 강도를 높일 수 있는 것으로 생각하는 경향이 있다. 조적용 모르터의 주요 기능은 조적 개체를 단일 요소로 결합해 주는 역할을 하지만, 콘크리트는 그 자체가 구조요소로써 기능을 한다. 이 때문에 콘크리트의 주요한 물리적 성질은 강도특성(특히, 압축강도)이지만, 조적용 모르터의 그것은 개체를 강하고 내구적으로 결합하는 것이다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서는 모르터와 콘크리트 벽돌 개체에 대한 강도 특성 실험, 모르터와 콘크리트 벽돌의 조합에 의하여 구성되는 조적조에 대한 실험을 수행하여 일반적인 조적조의 재료 특성을 파악하고자 한다. 시험체 제작 시에는 시공현장에서

\* 정회원 · 경희대학교 건축공학과, 부교수(대표저자 : kimhc@khu.ac.kr)

\*\* 경희대학교 건축공학과, 석사과정

\*\*\* 삼성중공업 건축사업본부, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

조적공의 경험에 의한 배합비(1:4.8)와 기준에서 명시하고 있는 표준 배합비(1:3)와의 시멘트 함유량 차이를 변수로 사용하였다.

본 연구에서 수행한 실험은 아래의 4가지이다.

- (1) 배합비 차이와 혼화재 사용에 따른 모르터의 압축강도 실험
- (2) 콘크리트 벽돌의 압축강도 실험
- (3) 모르터와 콘크리트 벽돌의 조합인 조적조 프리즘 압축강도 실험
- (4) 사인장 조적조 실험

### 3. 이론적 배경

조적조는 콘크리트 벽돌과 콘크리트 벽돌들을 서로 연결시켜주는 줄눈재료인 모르터에 의하여 구성된다. 기본적으로 조적조는 고정하중과 적재하중 같은 수직하중을 받는다. 이것은 조적조가 저항하는 기본적인 하중조건이 일축 압축임을 뜻한다. 일반적으로 콘크리트 벽돌의 포아송비는 0.1 내외이고 모르터 줄눈의 포아송비는 0.2 정도이다. 포아송비의 차이로 인해 수직하중이 작용할 때 모르터는 수평방향으로 콘크리트 벽돌보다 많이 팽창하려고 하게 된다.

콘크리트 벽돌에 작용하는 응력은 수직으로 압축이 작용하고 수평의 2축으로 인장이 작용하게 된다(C-T-T). 반면에 모르터는 콘크리트 벽돌의 작용에 의해 3축 압축이 작용하게 된다(C-C-C).<sup>(3)</sup> 콘크리트 벽돌과 모르터 줄눈에 3축 응력 상태가 발생한다는 것은 Hilsdorf(1965)<sup>(6)</sup>에 의해 증명되었으며 그림 1에 그 결과를 표현하였다. 또한 콘크리트 벽돌 사이에 들어가는 줄눈재료의 강도에 의해 조적조 강도에 상이한 차이가 나타나게 된다.

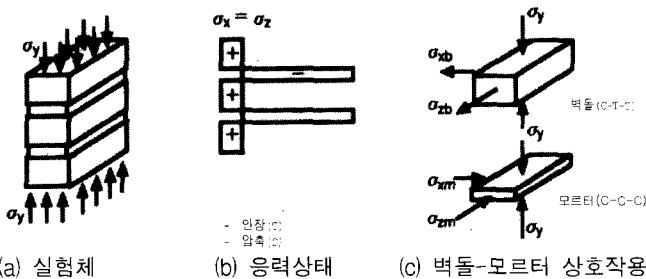


그림 1 조적조 프리즘에 작용하는 응력

### 4. 실험 계획

#### 4.1 사용 재료

##### 4.1.1 모래

본 실험에서 사용한 모래는 일반적으로 공급되는 모래를 KS A 5101<sup>(17)</sup>에 의해 규정된 방식에 의한 체가름 시험을 실시하여 입도곡선을 파악하였다. 기존의 비보강조적조 구조물의 성능평가라는 연구 목적에 의해서 ASTM에서 규정하고

있는 상한선과 하한선의 범위 안에 들어가도록 입도를 조절하지는 않았다. 본 실험에 사용한 모래의 입도곡선은 그림 2의 E에 해당된다.

#### 4.1.2 시멘트

국내 S사에서 생산한 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 화학적 조성 및 물리적 성질은 표 1, 표 2와 같다.

#### 4.1.3 콘크리트 벽돌

본 실험에서 사용한 콘크리트 벽돌은 KS F 4004에서 규정하고 있는 보통 골재를 사용한 C종 1급 벽돌로써 크기는 190mm×57mm×90mm이며, 허용오차는 ±2%이다.

#### 4.1.4 혼화재

섬유보강재는 일반 콘크리트를 사용하는 시공현장에서 와이어 매쉬의 대체재료로 사용되는 경우가 많다. 섬유보강재는 수축균열과 균열확산을 억제하는 특성을 가지고 있으며, 표준사용량은 모르터 1m<sup>3</sup>당 0.9kg을 사용한다.

섬유 보강재의 물성치는 표 3에 나타난 바와 같이 실리카 함은 시멘트 1 입자 당 100,000개의 입자가 균기 전의 콘크리트내의 물이 차지하는 공극부분을 차지하고, 시멘트 수화 반응에서 생긴 수산화칼슘과 반응하여 규산칼슘염을 형성, 일반 시멘트에 비하여 시멘트풀의 강도를 높이므로 일반 콘크리트와 비교하여 경화 전, 후의 콘크리트의 물성에 현격한 차이를 나타낸다.

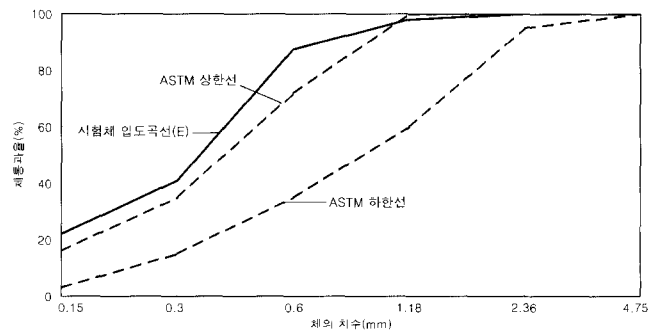


그림 2 ASTM의 표준입도곡선과 사용모래의 입도곡선

표 1 시멘트의 화학적 조성

성분	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ig loss
조성비 (%)	21.4	2.9	60.8	3.1	1.7	7.0	0.72	0.12	1.2

표 2 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응 결(h:m)		안정성	Flow (mm)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		초결	종결			3일	7일	28일
3.15	2140	3:45	7:20	양호	110	210	280	376

표 3 섬유 보강재의 물성치

재 질	흡수율	비중	용해점 (°C)	내산성	내알칼리성	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )
Homopolymer polypropylene	0	0.91	162	불활성	불활성	2600	35000

4.2 시험체 제작

4.2.1 모르터

모르터의 압축강도를 측정하기 위한 공시체는 ASTM C 109 test method for compressive of hydraulic cement mortars (using 2-in, or 50mm cube specimens)를 참고로 하여, KS L 5105 시멘트 모르터의 압축강도 시험방법에 준하여 시험체를 제작하였다.

기준에서 규정하고 있는 모르터의 시멘트와 모래의 배합비는 1:3 이다. 현장 시공 시에 조적공은 정확한 배합비에 의해 모르터를 배합하기보다는 경험에 의한 배합비를 사용하고 있다. 본 실험에서 사용된 시험체는 그림 3, 4와 같이 조적공에 의해 제작되었다. 표준배합비에 의한 시험체는 1:3의 배합을 정확히 계량하여 사용하였으며, 현장배합비는 조적공이 사용하는 배합비(1:4.8)를 사용하였다.

조적공의 경험에 의한 배합비는 사람에 따라 조금씩 차이가 발생할 수 있다. 따라서 배합비 차이에 의한 모르터의 강도 곡선을 산출하기 위하여 모르터 압축강도 시험체를 1:2.45, 1:3, 1:3.5, 1:4, 1:4.5, 1:5의 6가지 배합비에 따라 각각 6개의 시험체를 제작하였다.

혼화재 사용에 따른 강도곡선의 변화를 관찰하기 위하여 1:3, 1:4, 1:5의 모르터 배합비에 보강 섬유를 첨가하였다. 또한 1:3, 1:4, 1:5의 모르터 배합비에 실리카 흙을 전체 중량비에 대하여 5% 첨가하여 제작하였다.

4.2.2 조적조 프리즘

우리나라의 기준에서는 조적조의 공시체에 대한 크기가 명시되어 있지 않다. 따라서 조적조 프리즘 시험체의 형상은 Hendry, A. W.<sup>(3),(4)</sup>의 제안에 준하여 시험체를 제작하였다.

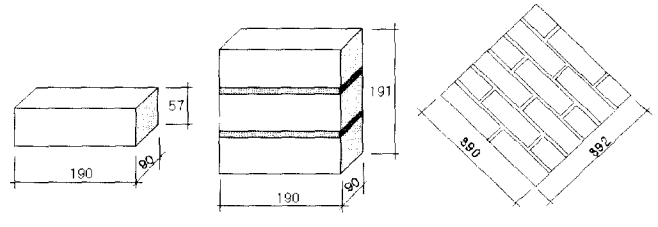
현장에서 사용하고 있는 배합비인 현장배합비와 기준에서 명시하고 있는 표준배합비에 따른 조적조 프리즘의 강도를 비교하기 위하여 현장 배합비(1:4.8)와 표준배합비(1:3)에 따라 각각 10개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 형상은 그림 5(b)와 같다.



그림 3 시험체 제작 모습



그림 4 줄눈모르터 시공



(a) 콘크리트 벽돌 (b) 조적조 프리즘 (c) 사인장 조적조

그림 5 시험체의 형상 (단위 : mm)

4.2.3 사인장 조적조

ASTM E 519-81(standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages)에 명시되어 있는 내용을 참조하여 사인장 조적조 시험체를 제작하였다. 또한 조적조 프리즘과 마찬가지로 배합비에 따른 강도 변화를 관찰하기 위하여, 표 4와 같이 현장 배합비(BNP-01~10)와 표준 배합비(BSP-01~10)에 따라 모르터의 배합비를 달리하여 각각 10개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 형상은 그림 5(c)와 같다.

표 4 시험체 일람표

일 반 모르터	Masonry unit			Masonry			
	번형모르터		콘크리트 벽돌	조적조 프리즘		사인장 조적조	
	실리카흙	섬유 보강재		현장	표준	현장	표준
NM2.5							
NM3.0	MMS3	MMF3					
NM3.5	MMS4	MMF4	BO	BNT	BST	BNP	BSP
NM4.0	MMS5	MMF5	-	-	-	-	-
NM4.5	-	-	10개	10개	10개	10개	10개
NM5.0	각6개	각6개					
-	각6개						

5. 실험 방법

5.1 모르터

ASTM C 109와 KS L 5105 수경성 모르터의 압축강도 실험방법에 준하여 압축강도 실험을 실시하였다. 모르터의 압축강도 실험시에 가압면은 몰드에서의 양측면으로 하였으며, 공시체의 중심축이 가압판의 중앙에 오도록 놓은 후, 매초 2~3kgf/cm<sup>2</sup>의 일정한 속도로 가압하였다. 모든 시험체에 대해 수직 변위 측정을 위하여 가압판 상부에 50mm 자동변위측정기(L.V.D.T)를 설치하여 data logger에 연결 후 실험을 진행하였다.

5.2 콘크리트 벽돌과 조적조 프리즘

콘크리트 벽돌에 대한 압축강도 시험은 KS F 4004규정에서 양상이 끝난 후 7일 이상 보존한 것을 시험체로 하며 압축방향은 실제로 하중을 받는 방향으로 하고 전체면에 고르게 가압하였다. 실험장비의 세팅모습은 그림 6과 같다.

### 5.3 사인장 조적조

사인장 조적조 시험체에 대해서는 시험체의 상하에 V형 구좌를 설치하여 시험체를 고정하였다. 설치모습은 그림 7 과 같다. 가력방법은 시험체 중앙부를 가력하여 완전히 파괴 시까지 하중을 가하였다. 가압 방식은 단위 면적당 매초 약  $2\text{kgf/cm}^2$ 의 속도로 가압하였다. 예상 파괴하중의 1/2까지는 하중조절 방식을 사용하였고, 이후에는 변위량에 따라 가력 속도를 조절하였다.

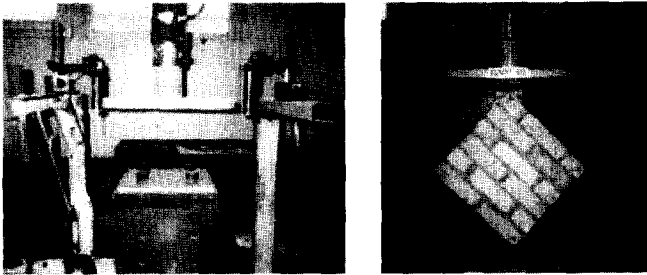


그림 6 조적조 프리즘 실험세팅      그림 7 사인장 조적조 실험세팅

## 6. 실험 결과 및 고찰

### 6.1 모르터 압축강도 실험

모르터 압축 강도실험은 표 5와 같이 배합비를 1:2.45, 1:3, 1:3.5, 1:4, 1:4.5, 1:5로 배합비를 세분한 것(NM)과 표 6과 같은 모르터 1:3, 1:4, 1:5 배합비에 각각 보강섬유를 첨가한 것(MMF) 그리고 모르터 1:3, 1:4, 1:5 배합비에 실리카 흙을 첨가한 것(MMS)의 3종류로 나누어 수행하였다.

표 5 배합비를 세분한 모르터의 압축강도 (단위 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

명칭 번호	NM2.45	NM3	NM3.5	NM4	NM4.5	NM5
01	163.2	135.3	115.9	96.0	80.0	74.3
02	150.6	141.1	112.4	105.1	85.5	82.9
03	154.6	128.3	114.5	108.5	106.0	78.3
04	150.7	117.1	113.8	101.8	89.8	78.5
05	159.3	133.7	110.0	108.1	89.0	76.5
06	155.8	119.0	109.4	93.1	78.5	78.1
평균강도	155.7	129.1	112.7	102.1	88.1	78.1

표 6 혼화제사용에 따른 모르터 압축강도 (단위 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

명칭 번호	MMF3	MMF4	MMF5	MMS3	MMS4	MMS5
1	157.8	95.9	59.5	145.3	72.4	65.9
2	142.1	88.1	55.9	135.8	76.3	71.8
3	154.0	84.7	53.5	152.2	75.2	74.2
4	152.2	94.0	57.3	166.3	79.0	72.4
5	165.1	87.1	71.6	158.0	78.0	63.2
6	163.4	88.4	61.9	161.3	79.1	69.6
평균강도	155.8	89.7	59.95	153.15	76.7	69.5

일반 모르터의 파괴양상을 살펴보면, 대부분 균열이 시작 되는 순간에 파괴가 발생하였다. 파괴후의 형태는 이상적인 콘형의 모습을 나타내었다. 실리카 흙을 첨가한 모르터 시험체는 일반 모르터와 거의 동일한 파괴를 나타내었으며, 파괴 형상은 그림 8과 같다.

섬유 보강재를 혼합한 모르터 시험체는 일반 모르터의 파괴양상보다 천천히 진행되는 모습을 나타내었다. 즉, 육안으로 확인되는 균열이 나타난 후에도 느리게 파괴가 진행되었다. 이것은 첨가한 섬유 보강재가 모르터 입자를 서로 연결 하는 작용을 하여 균열이 지연된 것으로 판단된다. 파괴 후에도 일반 모르터와 실리카 흙을 첨가한 시험체와는 달리 원래 형태를 어느 정도 유지하였다. 파괴 후 형상은 그림 9 와 같다.

배합비 차이에 따른 모르터의 압축강도 실험결과를 고찰 해 보면 일반 모르터의 배합비별 강도변화는 직선의 비례관계가 나타났다. 하지만 혼화제를 첨가한 모르터의 배합비에 따른 압축강도는 비례관계를 나타내지는 않았다.

그림 10과 같이 일반 모르터와 혼화제를 첨가한 모르터의 강도실험 결과를 비교해 볼 때 가장 특이한 사항은 섬유 보강재와 실리카 흙을 첨가한 시험체는 1:3의 표준배합에서만 일반 모르터보다 향상된 강도를 나타내고 있다. 이것은 혼화재로 사용한 실리카 흙과 섬유 보강재는 모르터에 첨가되어 자체적으로 시멘트 풀의 성능을 나타내는 것이 아니라, 시멘트와의 상호작용으로 모르터 강도를 향상시키는 작용을 한다. 따라서 시멘트의 양이 줄어들수록 같은 배합비의 일반모르터보다 강도가 저하된다. 혼화제를 첨가한 모르터는 표준 시멘트-모래비(1:3) 이상에서만 강도증진의 효과가 나타난다고 판단된다.

일반 모르터 압축강도 실험결과를 바탕으로 선형 회귀법을

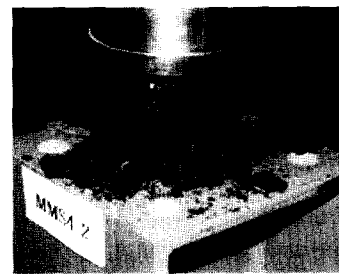


그림 8 MMS4의 파괴형태

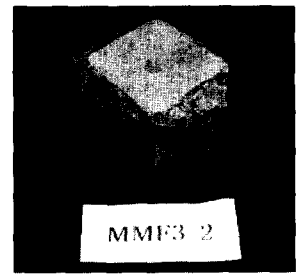


그림 9 MMF 파괴형태

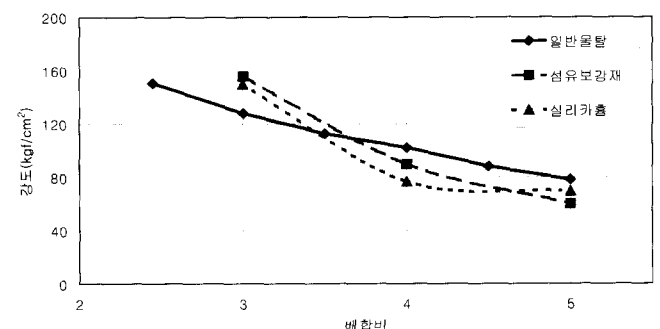


그림 10 배합비와 혼화제 사용에 따른 모르터 압축강도 비교

사용하여 일반 모르터의 배합비 차이에 따른 강도식을 도출하였다. 강도식은 식 (1)과 같으며, 강도식을 기준으로 일반 모르터의 실험결과 분포를 그림 11에 나타내었다.

$$f'_{mortar} = 214.1 - 27.8M_c \quad (1)$$

여기서,

$f'_{Mortar}$  : 모르터의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$M_c$  : 모르터의 배합비

KS규준에서는 조적용 모르터의 28일 강도는 110kgf/cm<sup>2</sup> 이상일 것을 규정하고 있으며, 레미탈을 사용했을 경우 조적용 모르터의 압축강도는 165kgf/cm<sup>2</sup>이다. 식 1 에서 1:3 배합일 경우의 모르터의 압축강도는 130kgf/cm<sup>2</sup>이다. 이 값은 KS의 하한 값을 상회하고 있으며, 레미탈이라는 이상적인 재료보다는 작은 값을 가진다. 따라서 본 식은 현장에서 사용되는 조적용 모르터의 강도특성을 표현하는데 적합하다고 판단된다.

혼화재를 첨가한 모르터의 압축강도 실험결과를 바탕으로 비선형 회귀법을 사용하여 혼화재를 사용한 모르터의 압축강도식을 도출하였다. 강도식은 식 (2)와 같으며, 강도식을 기준으로 한 압축강도 실험결과와 분포를 그림 12에 나타내었다.

$$f'_{Modi Mortar} = \frac{2030.77}{x^2} + 27.22x - 152.59 \quad (2)$$

여기서,

$f'_{Mortar}$  : 모르터의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$M_c$  : 모르터의 배합비

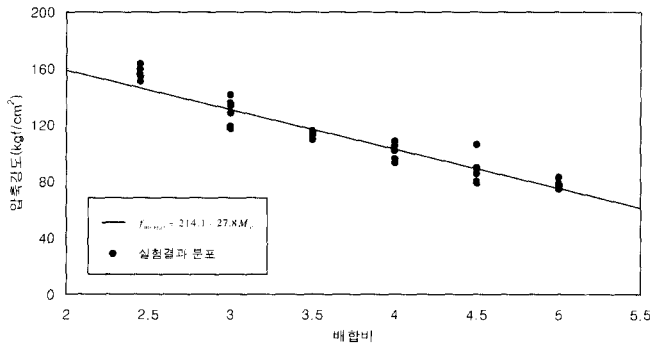


그림 11 일반 모르터 압축강도 실험결과 분포와 강도곡선

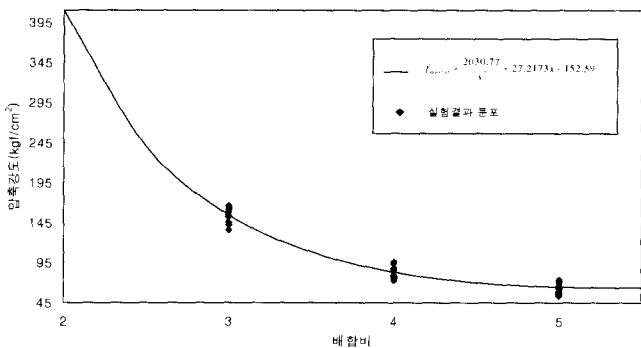


그림 12 혼화재를 첨가한 모르터 실험결과 분포와 강도곡선

## 6.2 콘크리트 벽돌

콘크리트 벽돌의 평균 최대가력하중은 34tonf이며 평균 압축강도는 200kgf/cm<sup>2</sup>, 최대하중에 대한 평균 변형율은 6.6×10<sup>-2</sup>로 나타났다. 이에 따른 탄성계수는 3400kgf/cm<sup>2</sup>로 조사되었다.

콘크리트 벽돌의 파괴 거동은 매우 취성적인 파괴양상을 나타내었다. 하지만 동일한 재료로 구성되는 콘크리트의 압축강도 실험과 비교해 볼 때 상당히 큰 변형율을 가진다. 이것은 콘크리트 벽돌은 많은 공극을 가지고 있으므로 파괴 거동시에 많은 변형을 흡수할 수 있는 특성을 지니고 있기 때문이라고 판단된다.

## 6.3 조적조 프리즘

### 6.3.1 현장 배합비 조적조 프리즘

현장 배합비에 따른 조적조 프리즘의 평균 최대 가력하중은 11tonf 이며 평균 압축강도는 63kgf/cm<sup>2</sup>, 최대하중에 대한 평균 변형율은 1.26×10<sup>-2</sup>로 나타났으며 이에 따른 평균 탄성계수는 5600kgf/cm<sup>2</sup>로 조사되었다. 현장배합비 조적조 프리즘의 실험결과는 표 7에 나타내었다.

### 6.3.2 표준배합비 조적조 프리즘

표준배합에 따른 조적조 프리즘의 평균 최대가력하중은 15tonf 이었으며, 평균 압축강도는 82kgf/cm<sup>2</sup>, 최대하중에 대한 평균 변형율은 1.09×10<sup>-2</sup>이며 이에 따른 평균 탄성계수는 8600kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 표준 배합비의 조적조 프리즘의 실험결과는 표 8과 같다.

조적조 프리즘의 파괴형상을 살펴보면, 압축강도 실험시에 모르터와 콘크리트 벽돌의 층진이 양호하고 부착력이 좋은 경우에는 그림 13에서 나타난 것처럼 모르터와 콘크리트 벽돌이 일체로 작용하여 이상적인 콘형의 파괴 형태가 나타났다. 그러나 모르터 줄눈부분에 공극이 존재하여 모르터의 층진과 부착력이 불량한 경우에는 그림 14와 같이 조적조 프리즘의 파괴하중에 도달하기 전에 모르터 줄눈 부분에 균열이 발생하였다.

UBC-97에서는 조적조 프리즘의 압축강도에 계수를 곱하여

표 7 현장 배합비의 조적조 프리즘의 실험결과

시험체명	최대하중 (tonf)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	최대변형율	Em (kgf/cm <sup>2</sup> )
BNT-01	11.74	68.54	1.44×10 <sup>-2</sup>	5053.12
BNT-03	11.20	65.50	1.25×10 <sup>-2</sup>	5407.42
BNT-04	10.30	60.23	1.02×10 <sup>-2</sup>	6082.79
BNT-05	9.67	56.55	1.26×10 <sup>-2</sup>	5413.09
BNT-06	7.97	46.61	1.16×10 <sup>-2</sup>	4732.87
BNT-07	13.65	79.83	1.48×10 <sup>-2</sup>	5881.33
BNT-10	11.25	65.79	1.22×10 <sup>-2</sup>	6780.55
평균	10.82	63.30	1.26×10 <sup>-2</sup>	5621.59

표 8 표준 배합비의 조적조 프리즘의 실험결과

시험체명	최대하중 (tonf)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	최대 변형율	Em (kgf/cm <sup>2</sup> )
BST-02	18.80	109.94	1.27 × 10 <sup>-2</sup>	9286.86
BST-03	13.62	79.65	1.27 × 10 <sup>-2</sup>	6336.84
BST-04	12.60	73.68	0.86 × 10 <sup>-2</sup>	8354.17
BST-05	15.05	88.01	1.13 × 10 <sup>-2</sup>	8370.15
BST-06	12.45	72.81	0.98 × 10 <sup>-2</sup>	8525.98
BST-07	13.95	81.58	0.94 × 10 <sup>-2</sup>	8102.57
BST-09	14.87	86.96	0.98 × 10 <sup>-2</sup>	9110.25
BST-10	20.45	119.59	1.33 × 10 <sup>-2</sup>	9502.92
평균	15.23	89.06	1.09 × 10 <sup>-2</sup>	8448.72

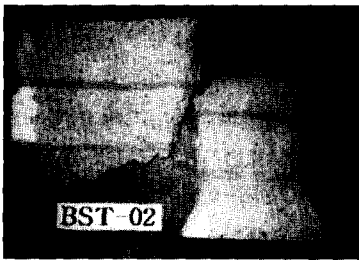


그림 13 조적조 프리즘의 콘형파괴      그림 14 모르타 줄눈의 파괴

조적조의 탄성계수를 구할 수 있는 약산식을 제시하고 있다.<sup>(7)</sup>

$$E_m = 750 f'_m < 210930 \text{ kgf/cm}^2 \quad (3)$$

식 (3)을 본 실험에서 구한 표준배합 조적조 프리즘에 대한 80%를 포함하는 강도인 8000kgf/cm<sup>2</sup>를 적용하면, 탄성계수값은 60000kgf/cm<sup>2</sup>로 실험결과에서 구한 탄성계수 8100kgf/cm<sup>2</sup>와는 7배정도의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 미국의 콘크리트 벽돌은 우리나라 방화벽돌과 같이 입자가 매우 세밀한 것으로 재료가 서로 다르기 때문에 UBC-97에서 제시하는 약산식을 적용할 수 없다고 판단된다. 따라서 우리나라의 재료에 맞는 약산식을 표준배합 조적조 프리즘 실험결과를 바탕으로 식 (4)와 같이 제시한다.

$$E_m = 100 f'_m \quad (4)$$

Hendry, A. W.는 조적조의 강도는 콘크리트 벽돌간의 충전재료, 즉 줄눈의 사용재료에 따라서 변한다고 하였다. 줄눈의 재료가 철관일 때는 단위 콘크리트 벽돌 압축강도의 1.4배, 합판일 경우 1.15배, 충전재가 없을 경우에는 0.93배, 일반 모르타일 경우는 0.35배이다.<sup>(8)</sup>

일반 모르타를 사용할 경우에 조적조 프리즘의 압축강도는 콘크리트 벽돌 압축강도의 35%가 나타난다고 가정할 수 있다. KS에서 규정하고 있는 콘크리트 벽돌의 하한 압축강도는 163kgf/cm<sup>2</sup>이다. 따라서 조적조 프리즘의 하한 압축강도는 벽돌의 하한 압축강도의 35%인 57kgf/cm<sup>2</sup> 이상이어야 하며, 조적조 프리즘의 하한압축강도는 그림 15에서 파선으로 표시되어 있다. 실험결과와 비교해 보면, 현장배합비에 의한 조적

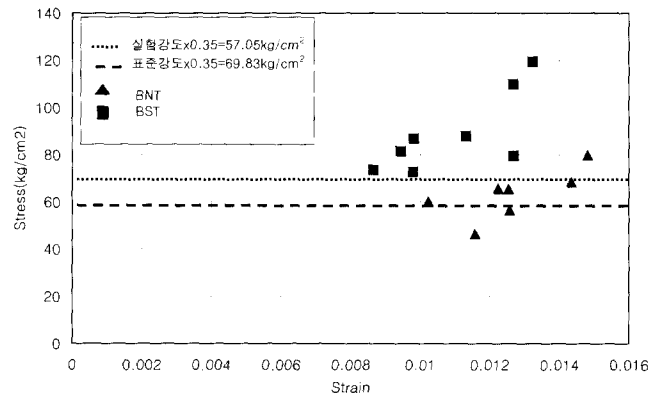


그림 15 벽돌 압축강도에 대한 조적조 프리즘 강도비교

조 프리즘의 평균 압축강도는 63kgf/cm<sup>2</sup>이며 표준배합비를 적용한 조적조 프리즘의 평균압축강도는 82kgf/cm<sup>2</sup>로써 예상되는 조적조 프리즘의 하한강도인 57kgf/cm<sup>2</sup>를 초과하고 있다.

본 실험에 의한 콘크리트 벽돌의 강도는 200kgf/cm<sup>2</sup>이다. 따라서 본 실험에서 구한 콘크리트 벽돌강도로써 예상되는 조적조 프리즘의 강도는 200kgf/cm<sup>2</sup>의 35%인 70kgf/cm<sup>2</sup>이며, 조적조 프리즘의 기대강도 70kgf/cm<sup>2</sup>는 그림 15에서 점선으로 표시되어 있다. 기대강도 70kgf/cm<sup>2</sup>를 기준으로 표준배합비의 조적조 프리즘과 현장배합비의 조적조 프리즘의 실험결과 값을 비교하면 표준배합비의 조적조 프리즘만이 기대강도 70kgf/cm<sup>2</sup>를 초과하였다.

#### 6.4 사인장 조적조

사인장 조적조 시험체의 파괴양상은 항상 취성적인 형태로 나타났다. 하중 가력중에는 육안으로 관찰되는 외형적인 균열의 모습도 보이지 않으며, LVDT에서 측정되는 변위의 갑작스런 증가도 나타나지 않고 순간적으로 파괴가 발생하였다. 파괴 형태는 사인장 파괴, 전단 파괴, 복합파괴의 3가지 모드로 나타났다. 각각의 파괴형태는 그림 16, 그림 17, 그림 18에 표현되어 있다.

표 9는 사인장 조적조의 수직/수평 변형률 특성을 나타낸다. 현장 배합비에 의한 사인장 조적조 시험체의 평균 전단응력은 4.5kgf/cm<sup>2</sup>이다. 최종 파괴형태를 복합파괴, 사인장 파괴, 전단파괴로 분류하면, 55.6%의 시험체가 복합파괴 거동을 보이며, 44.4%의 시험체는 사인장균열 파괴거동을 한다. 단지 1개의 시험체만이 전단 파괴를 나타내었다. 표준배합비에 따른 시험체의 평균 전단응력은 5.6kgf/cm<sup>2</sup>이다. 최종 파괴형태는 60%의 시험체가 사인장균열 파괴거동을 하며, 30%의 시험체가 복합파괴 거동을 하였으며, 단 1개의 시험체만이 전단파괴를 나타내었다.

표준배합비에 의한 조적체에서는 모르타의 부착강도가 충분히 발휘되어서 사인장 조적조 시험체의 모르타와 콘크리트 벽돌이 일체로 거동을 하여 사인장 파괴 형태가 지배적인 반면, 현장 배합비의 시험체는 부착강도가 저하되어 전단과 사인장 파괴의 형태가 함께 나타나는 복합균열파괴가 지배적인 형태로 발생한 것으로 판단된다. 또한 전단균열 파

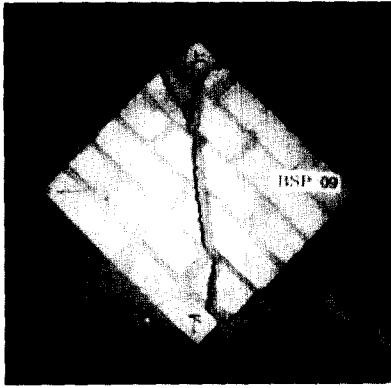


그림 16 사인장 파괴

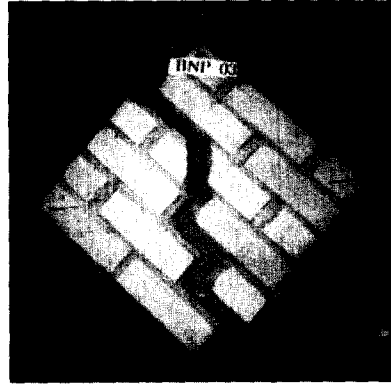


그림 17 복합 파괴

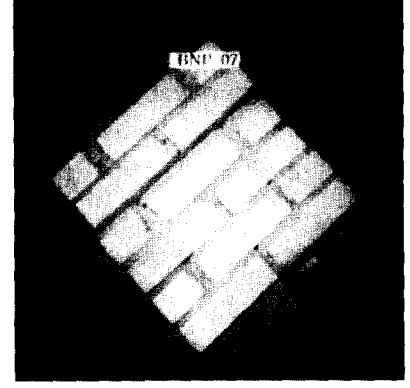


그림 18 전단 파괴

표 9 사인장 조적조의 변형률 특성

현장배합 사인장 조적조				표준배합 사인장 조적조			
시험체	하중 (tonf)	수직 변형률 ( $\times 10^{-3}$ )	수평 변형률 ( $\times 10^{-3}$ )	시험체	하중 (tonf)	수직 변형률 ( $\times 10^{-3}$ )	수평 변형률 ( $\times 10^{-3}$ )
BNP-02	1.32	3.59	0.9	BSP-01	1.33	3.45	0.86
BNP-03	1.07	4.03	1.01	BSP-02	0.79	1.55	0.39
BNP-04	1.58	4.12	1.03	BSP-03	1.24	3.33	0.83
BNP-05	1.35	3.97	0.99	BSP-04	1.56	2.93	0.73
BNP-06	1.00	2.42	0.61	BSP-05	1.62	2.90	0.73
BNP-07	1.04	2.56	0.64	BSP-06	2.00	3.04	0.76
BNP-08	1.27	3.24	0.81	BSP-07	1.81	4.59	1.15
BNP-09	1.33	3.06	0.76	BSP-08	1.57	4.04	1.01
BNP-10	1.57	4.17	1.04	BSP-09	1.92	4.21	1.05
				BSP-10	1.79	5.58	1.40

표 10 사인장 조적조의 전단특성

현장배합 사인장 조적조				표준배합 사인장 조적조			
시험체	전단 변형률 ( $\times 10^{-3}$ )	전단 응력 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Gm ( $\text{kgf/cm}^2$ )	시험체	전단 변형률 ( $\times 10^{-3}$ )	전단 응력 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Gm ( $\text{kgf/cm}^2$ )
BNP-02	4.49	4.75	3525.90	BSP-01	4.31	4.76	3680.80
BNP-03	5.04	3.84	2543.56	BSP-02	1.93	2.83	4872.54
BNP-04	5.14	5.65	3662.43	BSP-03	4.17	4.46	3569.47
BNP-05	4.97	4.84	3245.61	BSP-04	3.66	5.59	5088.37
BNP-06	3.02	3.59	3962.00	BSP-05	3.63	5.80	5329.73
BNP-07	3.20	3.73	3886.32	BSP-06	3.80	7.17	6295.32
BNP-08	4.05	4.57	3762.01	BSP-07	5.74	6.48	3761.44
BNP-09	3.82	4.76	4154.51	BSP-08	5.05	5.63	3717.23
BNP-10	5.21	5.63	3600.31	BSP-09	5.26	6.87	4357.74
				BSP-10	6.97	6.40	3060.93

과거동을 한 시험체는 모르타와 콘크리트 벽돌이 밀실하게 충전되지 못하고 공극이 존재하였다. 따라서 이에 의한 콘크리트 벽돌과 모르타의 부착면적의 감소로 인하여 부착강도가 저하되어 전단파괴가 발생한 것으로 판단된다.

사인장 조적조에 작용하는 전단응력을 평가하기 위하여 본 실험의 결과를 ASTM E 519에 나와있는 전단응력에 대한 평가방법을 사용하여 검토하였다. 사인장 조적조는 파괴의 정확한 시점을 파악하기가 힘들다. 따라서 전단탄성계수를 구하기 위해 사용한 재하하중은 최대하중의 70%를 취하여 구하였다.

UBC의 제안식에 본 실험에서 제안한 탄성계수인  $8000\text{kgf/cm}^2$ 을 대입하게 되면, 전단탄성계수값은  $3200\text{kgf/cm}^2$ 이 산출된다. 이 값은 표준배합비 사인장 조적조의 90%를 포함하는 전단탄성계수값인  $3500\text{kgf/cm}^2$ 과 거의 유사한 수치를 가진다. 따라서 본 연구결과로써 제안한 우리나라 조적조의 탄성계수값인  $8000\text{kgf/cm}^2$ 이 타당성을 가지고 있음을 알 수 있다.

UBC에서는 콘크리트 벽돌을 사용한 전단벽에서 최대 허용전단응력을  $2.4\text{kgf/cm}^2$ 로 보고 있다. 이것은 허용응력설계를 근거로 한 것이기 때문에 본 실험에서 나온 극한전단응력과는 차이가 발생하였다. 따라서 허용전단응력을 규명하기 위하여 본 실험에서 표 10과 같이 구한 극한전단응력의 30%를 취하여 허용전단응력으로 간주하였다.

실험결과를 살펴보면 현장배합비에 따른 사인장 조적조의

허용전단응력은  $4.5\text{kgf/cm}^2$ 이며 표준배합비 사인장 조적조의 허용전단응력은  $5.6\text{kgf/cm}^2$ 으로 약  $1.1\text{kgf/cm}^2$ 의 차이가 나타났다. 하지만 전단파괴가 나타난 시험체에서 허용전단응력은  $2.83\text{kgf/cm}^2$ 으로 상당한 차이가 나타났으며, UBC에서 규정하고 있는 최대 허용전단응력과 거의 비슷한 값을 나타내었다.

## 7. 실험결과를 바탕으로 한 3차원 동적해석

### 7.1 유사동적 해석법<sup>(16)</sup>

3차원 동적해석을 위하여 사용한 방법은 유사동적해석법이다. 유사동적해석법은 동적선형이론에 근거하여 작성된 방법이다. 3차원의 구조물에 대한 동적응답은 남북 방향 및 동-서 방향에 대하여 각각을 2차원 불연속 동적모델(discrete dynamic model)로 치환하고 이에 대한 동적해석의 결과를 중첩시켜 얻을 수 있게 된다. 유사동적해석법의 과정은 다음과 같이 5단계로 구분되어 수행된다.

- (1) 3차원의 구조물을 2개의 주방향에 대하여 각각 2차원 불연속 동적모델로 치환한다.
- (2) 각 주방향에 대하여 설정된 모델 벽체의 면내 방향으로

- 지진가속도를 작용시켜 시간이력해석을 수행한다.
- (3) 주관심 시간에서 불연속 동적모델의 각 절점에 나타나는 가속도를 산출한다.
  - (4) 각 절점에 구속되는 바닥판(diaphragm)의 면적에 관한 질량과 가속도의 곱으로써 각 위치에서의 등가정적하중을 구한다.
  - (5) 3차원 유한요소모델의 각 절점에 등가정적하중을 작용시켜 정적해석을 수행한다.

유사동적해석법은 밀면 전단력의 경우 3차원 시간이력해석법에 비하여 해석 결과 발생하는 오차는 1.8%정도 과대평가 되지만, 등가정적해석법은 31.9%나 과소평가 되어있기 때문에 비보강조적조건물에 이를 적용하기에는 위험한 것으로 나타났다. 또한 시간이력 해석법에 비해 경제적인 장점이 있으며 현행 내진규준에 명시된 등가정적해석법에 비하여 동적 거동을 잘 표현하여 보다 신뢰할 수 있는 해석결과를 얻을 수 있다고 발표되었다.

### 7.2 해석 모델

전산해석에 사용한 조적조 건물의 모델은 1999년 4월 13일 한국지진공학연구센터와 현대건설 기술연구소에서 진동대 실험을 수행한 2층의 다가구 주택으로 선정하였다. 이 건물은 그림 19에서 보는 바와 같이 높이 5.6m, 경간 4.5m로써 우리나라에서 일반적으로 지어지고 있는 URM 건물의 유형이다.

### 7.3 전산해석 기본자료

3차원 전산해석을 위하여 사용한 프로그램은 ANSYS 5.3을 이용하였다. ANSYS 5.3에서 사용한 요소는 Shell 63이다. 이 요소는 3차원 모델링이 가능하면서도 4 절점으로 정의될 수 있으며 두께를 자유로이 줄 수 있기 때문에 적은 절점으로 정확한 결과를 얻을 수 있다. 동적해석시 사용된 solver는 Newmark-β방식을 사용하고 있으며 이 때 적용한 계수인  $\gamma$ 는 0.5,  $\beta$ 는 0.25이다. 본 실험결과를 바탕으로 한 조적조

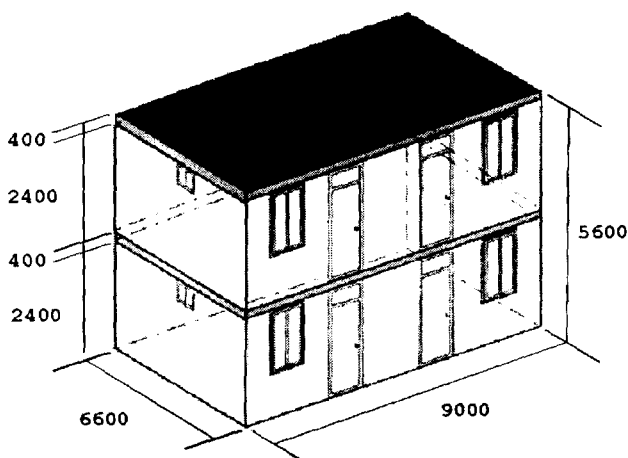


그림 19 해석 모델(단위 : mm)

의 물성치는 표 11에 나와 있다. 유사동적 해석시에 사용한 입력 지진하중은 1940년 El Centro에서 발생한 남북성분 지진과의 최대 지반가속도를 본 연구 수행당시의 우리나라 기준에 따라 0.12g로 조절하여 적용하였다.

표 11 전산 해석에 사용한 물성치

재 료	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	단위 중량 (kgf/cm <sup>3</sup> )	포아 송비 ( $\nu$ )	압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	전단 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
조적조	8000	$2.05 \times 10^{-3}$	0.25	80	2.7	4.5
R·C	210000	$2.40 \times 10^{-3}$	0.176	210		

### 7.4 전산해석 결과

해석모델의 전산해석결과로써 나온 최대 전단응력이 작용하는 부분은 개구부 주위와 개구부와 개구부 사이의 벽체였다. 최대전단응력 값은 2.2~3.5kgf/cm<sup>2</sup>사이였다. 그림 20은 해석결과로써 나온 전단응력의 contour를 보여주고 있다. UBC에서 규정하고 있는 최대 허용전단응력 2.4kgf/cm<sup>2</sup>과 유사한 값을 나타내고 있으며, 본 실험결과에서 나온 현장배합비의 사인장 조적조의 허용전단응력인 4.5kgf/cm<sup>2</sup>보다는 약간 작은 값을 가지고 있다.

본 연구에서 전단파괴가 나타난 사인장 조적조의 허용 전단응력은 2.8kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 따라서 모르터 줄눈에서 미끄러짐에 의한 전단 파괴거동을 고려하면, 해석결과 나타난 2.2~3.5kgf/cm<sup>2</sup>의 전단응력은 간과할 수 없다고 판단된다.

### 8. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 비보강 조적조 건물의 내진 성능 평가를 위한 기초자료를 얻기 위하여 조적조 재료실험을 수행하였다. 일반 모르터와 변형 모르터에 대한 압축강도 실험, 콘크리트벽돌 압축강도 실험, 현장배합비와 표준배합비에 따른 조적조 프리즘, 사인장 조적조에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 일반 모르터의 배합비에 따른 강도는 선형적인 비례관계가 나타났다. 모르터의 배합비에 따른 강도식을 아래와 같이 제안하였다.

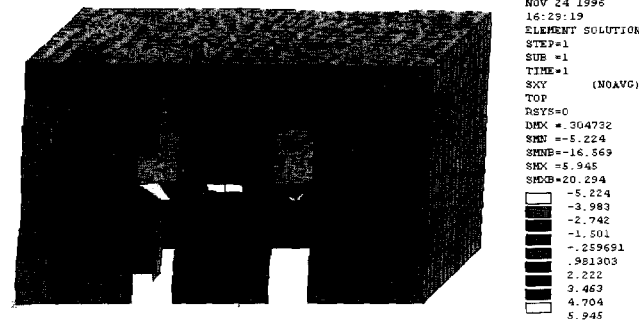


그림 20 해석모델의 전단응력 분포



$$f'_{mortar} = 214.1 - 27.8M_c$$

- (2) 우리나라 규준에 명시되지 않은 콘크리트 벽돌의 탄성계수 값은 약 3400kgf/cm<sup>2</sup>으로 조사되었다.
- (3) 조적조의 프리즘 압축강도로써 조적조의 탄성계수를 산출할 수 있는 약산식을  $E_m = 100 f'_m$ 으로 제시한다.
- (4) 사인장 조적조 시험체는 사인장 파괴, 전단파괴, 복합파괴의 3가지 거동을 나타내며, 모르터의 부착강도에 의해 파괴형태가 결정되었다. 또한 조적조의 전단탄성계수값은 3500kgf/cm<sup>2</sup>으로 조사되었다.
- (5) 유사동적해석법에 의한 조적조 건물의 해석결과에서 최대전단응력은 2.2~3.5kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이는 전단파괴가 나타난 사인장 조적조의 허용전단응력 2.8kgf/cm<sup>2</sup>과 유사한 값이 나타났다.

조적조는 지진하중에 의해 벽체의 전단 파괴거동과 함께 회전거동에 의한 벽체 상부·하부의 국부적인 파괴 거동이 예상된다. 회전거동에 의해서는 모르터와 벽돌의 부착강도가 상당히 중요하게 된다. 따라서 조적조 프리즘의 모르터 전단실험을 통하여 부착강도를 조사하는 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. Costley, A. C. and Abrams, D. P., "Dynamic response of unreinforced masonry building with flexible diaphragms," *Technical Report NCEER-96-001*, National Center For Earthquake Engineering Research, 1996.
2. American Society for Testing and Materials, *Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards*, Philadelphia, Pa. ASTM, Vol. 04. 05, 1996.
3. Hendry, A. W., *Structural Brickwork*, John Wiley & Sons, pp. 12-61, 1981.
4. Hendry, A. W., "Testing methods in masonry engineering," *Fourth North American Masonry Conference*, Vol. 2, pp. 49-1~49-13, 1987.
5. Dialer, C. P., "Basic behaviour of masonry: case studies, alternative approaches and modelling hints," *Technology*

- Law and Insurance*, Vol. 4, pp. 131-136, 1999.
6. Focardi, F. and Manzini, E., "Diagonal tension tests on reinforced and non-reinforced brick panels," *Eighth world conference on earthquake engineering*, Vol. 5, No. 2, Prentice-hall, pp. 839-846, 1984.
7. UBC, *International Conference of Building Officials*, Vol. 2, pp. 214-235, 1997.
8. Zanrnic, R., Bokan-Bosiljkov, V., Bosiljkov, V., and Dujic, B., "Influence of modified mortar on mechanical properties of masonry," *Proceedings of the Fourth International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry*, E&FN Spon, 1998, pp. 177-184.
9. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Willey & Sons, pp. 564-567.
10. 건설교통부, 건축물의 구조내력에 관한 기준, 건설교통부 고시 제 1996-43호, pp. 40-51, 1996.
11. 김문한, "벽돌 조적조의 접착강도에 영향을 미치는 mortar의 성질에 관한 연구", *대한건축학회지* 29권 124호, pp. 50-57, 1985.
12. 김태섭, 오창희, "혼화재를 사용한 모르터의 압축강도 특성에 관한 실험적 연구", *대한건축학회논문집*, 제9권, 제 8호(통권 제58호), pp. 153-182, 1993.
13. 김문한, 정일영, 홍성목, "콘크리트 벽돌 벽체의 강도에 영향을 미치는 벽돌과 모르터의 시공성에 관한 연구", *대한건축학회논문집*, 제3권, 제1호(통권 제9호), pp. 131-139, 1987.
14. 김희철, 정상훈, 김관중, "비보강 조적조 건물의 등가 정적 해석에 관한 연구", *한국지진공학회논문집*, 제4권, 제 3호(통권 제15호), pp. 1-10, 2000.
15. 김희철, 이경훈, "2층 조적조의 지진하중에 의한 거동 해석 및 균열 평가", *한국지진공학회논문집*, 제2권, 제4호, pp. 179-190, 1998.
16. 김희철, 김관중, "건물의 탄성거동을 고려한 비보강조적조의 유사동적해석법" *대한건축학회논문집*, 제16권, 제2호, pp. 17-22, 2000.
17. 한국공업표준협회, 한국공업표준, 한국공업표준협회, 제 F권, 1982.