

중·고층형 모듈러 벽체의 내화성능 평가

양승조¹, 이재승^{2*}

Evaluation on the Fire Resistance Performance for High-Rise Modular Walls

Seung-Cho Yang¹, Jae-Sung Lee^{2*}

Abstract: The use of modular buildings is increasing because of various advantages of modular buildings. But there are limits to apply modular buildings to medium-rise buildings because the building law provides only the specification criteria of the modular building with respect to the 1 hour fire resistance performance. This study was conducted to investigate 2 hours fire resistance performance of load bearing walls with steel studs in modular buildings by KS F 2257-1 and KS F 2257-4. After full scale tests, load bearing walls ensuring two hours fire resistance performance consist of at least 2 layers of fire resistance plaster boards of 19mm thickness or 3 layer of fire resistance plaster boards of thickness.

Keywords: Modular Building, Bearing Wall, Fire Resistance Performance Test

1. 서 론

모듈러 건축물은 철골조 기반의 공업화 건축 시스템으로 최근 국내외에서 다양한 용도로 적용이 확대되고 있는 추세이다. 국내외 건설시장이 위축되는 최근의 건설 환경에서도 모듈러 건축물의 시장 규모는 꾸준히 증가하고 있으며, 향후 새로운 시장을 창출하고 국내 시장뿐만 아니라 해외 시장을 새롭게 개척할 수 있는 미래 건축기술로 주목받고 있다(Park et al., 2014).

모듈러 건축물은 임시가설물의 개념을 넘어서 구조물로서의 가치를 갖도록 많은 선진국들이 지속적으로 연구를 수행하였고, 모듈러 유닛, 설계기법, 조립방법에서 새로운 공법들이 개발되고 있는 추세이다. 국내에서도 저층형 모듈러 건축물의 적용 사례가 급격히 증가하고 있으며 이와 더불어 중·고층형 건축물에서의 모듈 개발과 최적 세부 설계기술 개발 등으로 확대되고 있는 추세이다. 미국의 경우 뉴욕에 32층 규모의 모듈러 공동주택이 세워졌으며 싱가포르의 경우 40층 규모의 공동주택이 건설되고 있는 중이다(Lee and Park, 2018).

모듈러 건축물을 중·고층 건축물에 적용하기 위해서는 건축법에 의거하여 구조물로서 적합한 성능을 발휘하는지에 대

한 평가 및 성능 검증이 우선적으로 수행되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 국내의 경우 설계기법, 접합부 및 내진성능 등에 대한 모듈러 건축물의 성능 검증 및 평가는 지속적으로 수행되고 있으나, 건축물 내 화재시 구조성능에 대한 내화성능에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

국내 건축법에서는 모듈러 건축물의 부재에 대한 사양적 기준을 따로 제시하지 않고 있으며, 표준 내화구조인 KS F 1611-5[건축 구조부재의 내화성능 표준-제5부:내력용 스틸 스티드 구조]에서 시간 및 용도에 따른 부재의 세부 사양을 제시하고 있다. 그러나 KS F 1611-5의 경우, 내화성능 1시간 미만에 관한 표준내화구조의 사양적 기준만 제시하고 있어 4층(20m) 이상의 중·고층형 모듈러 건축물에 적용하는 것이 불가능하다. 이와 같은 문제점으로 인해 현재 국내에 적용되고 있는 모듈러 건축물의 경우 4층(20m) 이하의 건축물이 대다수를 차지하고 있다. 따라서 모듈러 건축물의 시장 확대 및 적용성 확보를 위해 중·고층형 모듈러 건축물을 개발하는 것이 필요한 것으로 판단된다(Kim et al., 2014).

본 연구에서는 4층(20m) 초과, 12층 이하(50m) 모듈러 건축 건축물에 적용이 가능한 내력 벽체를 개발하기 위해 모듈러 건축물에 적용되는 내벽 및 외벽에 대한 실대형 내화성능 실험을 총 4차례 수행하여 내화성능을 평가/검증하고자 하였으며, 그 결과를 토대로 합리적인 내화피복 두께 및 각형강관의 단면형상을 결정하기 위한 기초 자료를 제시하는 것에 목적이 있다.

¹정회원, 한남대학교 건축공학과, 공학박사, 박사후연구원

²정회원, 한남대학교 건축공학과, 공학박사, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jaesung@hnu.kr

Department of Architectural Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 법규 분석

중·고층 건축물에 모듈러 건축물을 적용하기 위해서는 최소 2시간 이상의 내화성능을 확보해야 한다. 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙-제3조(내화구조)」에는 건축물이 내화성능을 확보할 수 있는 방법에 대한 기준을 제시하고 있다. 첫 번째로 법정내화구조에 해당하는 방법으로 모듈러 벽체가 아닌 철근 콘크리트조 또는 콘크리트조에 해당하여 모듈러 벽체에 적용하는 것이 불가능하다. Table 1은 건축법에서 제시하고 있는 벽체의 내화구조 기준을 나타내고 있다.

두 번째로 KS F 1611-5와 같이 산업표준법에 따른 한국산업표준으로 내화성능이 인정된 구조의 경우 모듈러 벽체로 사용이 가능하나, 상기에서 언급한 바와 같이 KS F 1611-5의 경우 1시간까지 내화성능을 확보한 구조에 대해서만 세부기

Table 1 Fire-resistant standards of walls

Structure type	Fire-resistant standards
RC/SRC	Fire Protection Thickness ≥ 10 cm
Steel	Fire Protection Thickness ≥ 4 cm
Concrete Block	Concrete Block Thickness ≥ 5 cm
ALC	Fire Protection Thickness ≥ 10 cm

Table 2 Fire resistance standard by KS F 1611-5

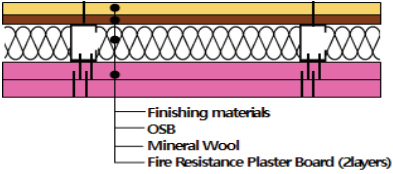
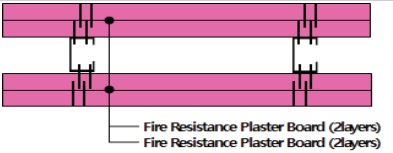
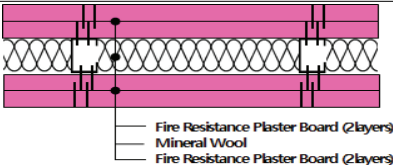
	Section	FRR
External Wall		60 mins
Internal Wall		60 mins
		60 mins

Table 3 Performance standard of fire resistant structures

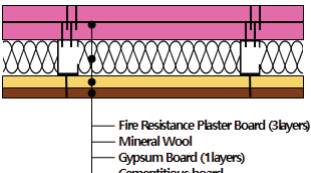
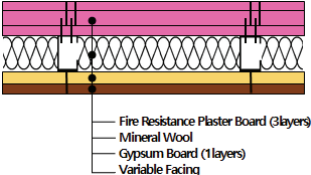
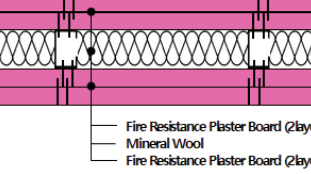
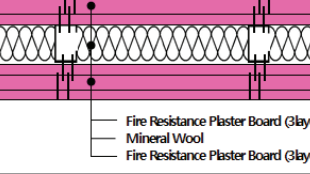
Building Uses	Floor / Height(m)	Bearing Wall [hour]	
		External Wall	Internal Wall
Dwelling Facilities	12 floors / 50m	3	3
	5 ~ 11 floors / 20 ~ 49m	2	2
	1 ~ 4 floor / 1 ~ 19m	1	1

준을 제시하고 있어 중·고층 건축물에 적용하는 것이 불가능하다. Table 2는 KS F 1611-5에서 제시하고 있는 외벽 및 내벽의 구조 단면 및 내화성능을 나타내고 있다.

세 번째로 내화구조인정 기준에 따른 절차에 의거하여 내화성능을 평가받은 경우 해당 구조에 대하여 요구내화성능을 만족하는 것으로 인정하고 있다. Table 3은 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 - [별표 1] 내화구조의 성능 기준」에서 제시하고 있는 주거시설의 요구내화시간을 나타내고 있다. 또한 모듈러 벽체의 내화성능을 평가는 KS F 2257-1 「건축 부재의 내화 시험방법 - 일반 요구사항」 및 KS F 2257-4 「건축 부재의 내화 시험방법 -내력 수직구획 부재의 성능조건」의 시험조건에 의해 시험을 수행하여야 한다.

국외의 경우, 스티드와 방화 석고보드의 형태로 이루어진 벽체에 대하여 내화성능을 인정받아 사용하고 있거나 대표적인 단면을 표준화하여 구조물에 적용하고 있는 추세이다. SFA(Steel Framing Alliance)는 미국의 대표적인 강구조 협회로써 현재 개발되어 상용화된 박판 냉간성형을 벽체, 바닥, 지붕, 구조의 단면에 따른 내화,차음성능 사양을 표준화하여 사용자에게 제공하고 있다. UL(Underwriters Laboratories)는 미국의 안전 규격 개발 기관으로 단면 종류에 따른 각 내력벽체의 개별 시험을 통해 성능에 대한 안전성을 입증하고 있다. Table 4는 현재 UL을 통해 성능이 입증된 내력벽의 2시간 내

Table 4 Fire resistance standard by SFA

	Section	FRR
External Wall [U418]		120 mins
External Wall [U404]		120 mins
Internal Wall [U423]		120 mins
Internal Wall [U425]		120 mins

화구조 현황을 보여준다. Table 4에 나타난 바와 같이 2시간 이상의 내화성을 확보하기 위해서는 가열면에 최소 19T 내화석고보드 2장 또는 15T 내화석고보드 3장이 필요한 것을 확인할 수 있다(Kim et al., 2014).

본 연구에서는 중·고층 건축물에 해당하는 2시간 내화성을 확보하기 위해 내화구조인정 기준에 적합한 절차에 따라 실험용 내화실험을 수행하여 각 구조에 대한 성능을 평가하였다. 최초 시험체인 IW-01과 OW-01의 내화보드 두께는 Table 4의 내/외부 두께를 참고하였으며, 추가적인 구조적 성능확보를 위해 C형 채널을 대체한 각형강관을 적용하여 실험체를 구성하였다.

3. 내화성능 실험 및 평가

3.1 실험 계획

본 연구에서는 국내 기준에 적합한 2시간 이상 모듈러 내화벽체를 실제 건축물에 적용하기 위해 실험용 내화성능 실험을 수행하고 이를 분석하였다. 평가 대상 실험체는 내벽 및 외벽으로 구분되며 변수로는 벽체의 구조적 역할을 하는 각형강관의 두께 및 내화보드의 두께 및 개수로 설정하였다. 선행 연구의 경우 C형 스티드를 구조체로 적용하여 2시간 이상의 내화성을 확보하였으나, 4층 이상의 중고층형 모듈러 벽체로 활용하기에 상온에서 구조적 성능확보에 무리가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 C형 스티드를 각형강관으로 대체하여 모듈러 벽체의 내화성을 평가·분석하였다(Kim et al., 2014).

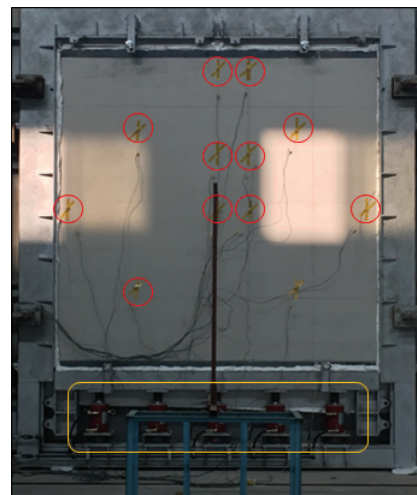
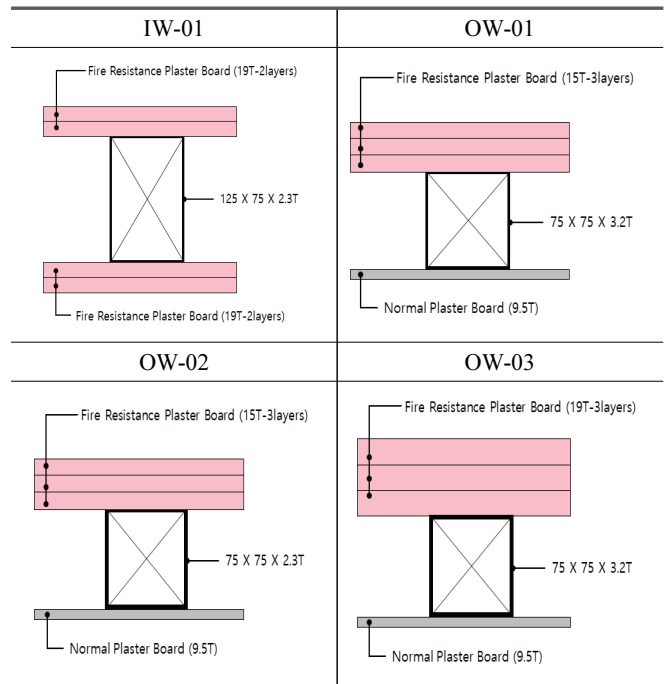
Table 5는 실험체 명 및 실험 변수를 나타내고 있다. 모듈러 건축물의 내벽에 해당되는 IW-01의 경우 가열면과 비가열면 모두 19T 방화석고보드 2장을 적용하여 화재로 인한 강관의 온도 상승을 차단하였으며 구조체 역할을 하는 각형강관의 단면은 125×75×2.3T이다. 모듈러 건축물의 외벽에 해당되는 OW-01의 경우 비가열면에는 9.5T 일반석고보드 1장을 적용하였으며 가열면에는 15T 방화석고보드 3장을 적용하였으며 구조체 역할을 하는 각형강관의 단면은 75×75×2.3T이다. OW-02의 경우 OW-01의 실험체에서 각형강관의 두께를 0.9T 증가시킨 3.2T를 사용하였으며, OW-03의 경우 OW-02의 실험체에서 방화석고보드의 두께를 증가시켜 가열면에 19T 방화석고보드 3장을 적용시켰다. Table 6은 본 연구의 대상 실험체 단면을 나타내고 있으며, Fig. 1은 실험체 설치 및 열전대 설치 등을 나타내고 있다.

평가 대상 실험체는 크게 구조적 역할을 하는 각형강관과 화재로 인한 온도 상승을 차단하는 방화석고보드, 외부 마감 역할을 하는 일반 석고보드로 구성되어 있다. 본 연구의 실험

Table 5 Transcription methods

Specimens	Fire Resistance Time	Building Component
IW-01	120 mins	Bearing Interior Wall
OW-01		Bearing Exterior Wall
OW-02		
OW-03		

Table 6 Section of specimens



- Installation of Thermocouple
- Load cell & Compression Jig

Fig. 1 Installation of specimens

계획은 2시간 이상의 내화성을 갖는 모듈러 벽체의 최적 단면을 도출하고자 방화석고보드의 두께 및 각형강관의 두께를 변수로 하여 내화실험을 수행하였다.

3.2 실험 방법 및 성능판정 기준

3.2.1 실험 방법

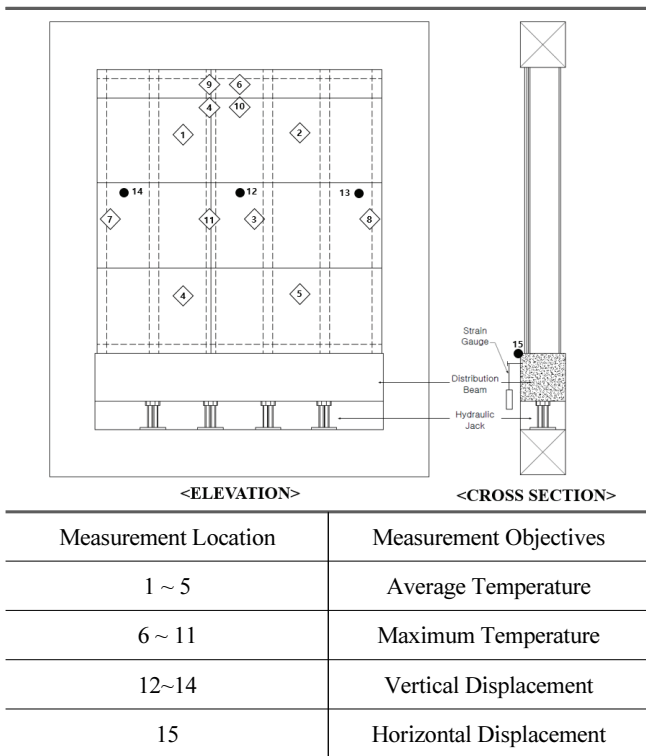
대상 실험체의 내화성능 평가하고자 KS F 2257-1 「건축 부재의 내화 실험방법 — 일반 요구사항」 및 KS F 2257-4 「건축 부재의 내화 실험방법 — 내력 수직 구획 부재의 성능 조건」에서 제시하고 있는 성능 평가 방법을 적용하여 내화성능 실험을 수행하였다.

각 실험체 크기는 3,000mm x 3,000mm(유효면적 : 3000mm x 2,920mm)이며, 가열실험 동안 실험체에 작용하는 하중의 크기는 Table 7에 제시하였다. 하중 산정에는 탄성 좌굴하중 및 KBC 2012기준에 따른 설계 압축강도를 계산하여 적용하였으며, 각형강관 1개소에 대한 허용 하중 및 시험체 하중은 Table 7과 같다.

Table 7 Apply load for specimens

Allowable load per stud [Ton]	Number of studs [EA]	Self load [Ton]	Test Load [Ton]
5.58	4	1.68	24.00

Table 8 Temperature measurement position



차열성능을 측정하기 위하여 Table 8과 같이 실험체의 비가열면 석고보드에 5개의 열전대(1~5)를 설치하여 평균온도를 측정하였으며, 최고온도를 측정하기 위하여 차열 성능이 취약할 것으로 판단되는 석고보드의 조인트 부위에 6개의 열전대(6~11)를 추가로 설치하였다. 하중지지력에 대한 성능평가를 위하여 LVDT를 사용하여 실험체 중앙 및 좌우측에서의 수직 변위(12~14)를 측정하였다.

3.2.2 성능 판정기준

모듈러 벽체의 내화성능 판정기준은 KS F 2257-1에서 제시하는 하중지지력, 차열성능, 차열성능에 의해 결정된다. 하중지지력에 의한 판정기준은 축변형 및 축변형률에 의해 결정된다. 본 실험체의 유효 높이(2,920mm)에 의해 축변형 기준은 29.2mm, 축변형률 기준은 8.8(mm/min)으로 평가 기준이 결정된다. 차열성능의 경우, 실험체의 비가열면에 면패드를 설치하여 비가열면의 착화발생 시간을 측정하거나, 균열게이지를 사용하여 실험체의 균열이 기준 이상으로 벌어진 시간을 측정하는 방법, 비가열면에 10초 이상 지속적인 화염이 발생한 시간 등의 방법으로 결정된다. 차열성능은 실험체 비가열면의 초기온도에서 평균온도가 140°C 이상 증가하거나, 최대온도가 초기온도로부터 180°C 이상 증가했을 때의 시간으로 결정된다. 최종 성능판정은 상기에서 언급된 3가지 평가기준 중 한 가지라도 해당 성능기준을 만족하지 못하는 최초의 시간으로 결정된다. Table 9는 내화성능 평가기준을 나타내고 있다.

Table 9 Fire resistance performance evaluation criteria

	Evaluation Criteria
Integrity	This is the elapsed time for which the test specimen continues to maintain its separating function during the test without either a) Causing the ignition of a cotton pad b) Permitting the penetration of a gap gauge c) Resulting in sustained flaming on the unexposed surface
Insulation	This is the elapsed time for which the test specimen continues to maintain its separating function during the test without developing temperatures on its unexposed surface which either a) Increase the average temperature above the initial average temperature by more than 140 K; or b) Increase above the initial temperature at any location (including the roving thermocouple) by more than 180 K
Load bearing	• Axial contraction(mm) : h/100 or • Rate of axial contraction(mm/min) : 3h/1000 h : the initial height(mm)

3.3 실험 결과

3.3.1 차열성능

KS F 2257-1 및 KS F 2257-4에 의한 실험 조건에 의해 모틀러 내력벽체의 내화성능을 수행하였으며, 내화성능 판정기준 중 차열성능에 관한 각 실험체의 특이사항은 Table 10과 같다.

내력벽체의 차열성능은 비가열면에 발생한 구멍이나 화염에 면패드 접촉시 착화되지 않고 균열개이지가 해당 구멍을 관통하지 않고 실험체 이면에 화염이 발생하지 않는 조건에 의해 결정된다. IW-01 및 OW-03 실험체의 경우 2시간 이상의 충분한 차열성능을 갖는 것으로 나타났으나 OW-01 및 OW-02 실험체의 경우 면외 변위가 크게 발생하여 보드가 탈락하거나 화염이 발생하는 현상이 나타났다. 이는 온도상승으로 강재의 강도가 저하되어 상온시 발생하지 않았던 좌굴이 각형강관에 발생하여 보드가 탈락한 것으로 분석되었다.

내벽 벽체인 IW-01 실험체의 경우 비가열면과 가열면에 2겹의 19T내화 석고보드가 적용된 내력벽체로서 내화성능

120분 동안 차열성 측정기준인 면패드 착화 및 균열 발생 등이 발생하지 않았다. 그러나 실험 시작 후 약 60분 경과 후 약간의 면외 좌굴이 발생하기 시작하였으나 이로 인한 실험체 손상은 발생하지 않았다. Fig. 2(a)는 IW-01 실험체의 실험 종료 후 가열면을 나타내고 있으며 내화석고보드가 실험체로부터 탈락되지 않은 것을 확인할 수 있다.

외벽 벽체인 OW-01 실험체의 경우 비가열면에 9.5T 일반 석고보드, 가열면에 3겹의 15T 내화석고보드, 75x75x2.3T의 각형강관으로 구성된 실험체로써 실험 시작 50분 경과 후 비가열면에 면외 변위가 발생하여 비가열면 보드가 탈락하여 관통부가 발생하는 현상이 발생하였다. 이는 온도상승으로 인한 각형강관의 급격한 강도 저감 현상 따른 좌굴 발생에 의한 것으로 나타났다. Fig. 2(b)는 OW-01 실험체의 실험 종료 직전 비가열면을 나타내고 있으며 비가열면의 일반 석고보드가 탈락과 화염이 실험체 외부 및 전체로 확산되는 것을 확인할 수 있다.

OW-02 실험체는 비가열면에 9.5T 일반 석고보드, 가열면에 3겹의 15T 내화석고보드, 75x75x3.2T의 각형강관으로 구성된 실험체로써 OW-01 실험체에 비해 구조적 성능을 향상시키기 위해 각형강관의 두께를 0.8mm 증가시켜 실험을 수행하였다. 그러나 실험 결과 OW-01 실험체와 유사하게 실험 시작 후 115분 경과 후 실험체 중심부에서 좌굴이 발생하였으며, 이로 인해 비가열면의 석고보드가 탈락하여 관통부가 발생하여 실험이 종료되었다. Fig. 2(c)는 실험 종료 후 OW-02 실험체의 구조체인 각형강관 좌굴을 나타내고 있다.

OW-03 실험체는 비가열면에 9.5T 일반 석고보드, 가열면에 3겹의 19T 내화석고보드, 75x75x3.2T의 각형강관으로 구성된 실험체로 차열성능을 향상시키기 위하여 19T-3겹의 방화 석고보드를 적용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 OW-01 및 OW-02에서 발생한 좌굴현상은 나타나지 않았으며 비가열면의 그을음 및 급격한 온도상승도 발생하지 않았다. OW-03 실험체의 경우, 2시간 이상의 충분한 내화성능을 확보한 것으로 평가되었다. Fig. 2(d)는 OW-03 실험체의 실험 종료 후 가열면을 나타내고 있으며 내화석고보드가 실험체로부터 탈락되지 않은 것을 확인할 수 있다.

Table 10 Results of integrity for specimens (unit: min)

Results	IW-01	OW-01	OW-02	OW-03
Start	0	0	0	0
Smoke on the surface	88	50	52	85
Out-of plane buckling	60	90	95	-
Soot on the surface		103	109	-
Penetration occurs	-	114	115	-
END	125	114	115	130
Time for Integrity	120	114	115	120



(a) IW-01

(b) OW-01



(c) OW-02

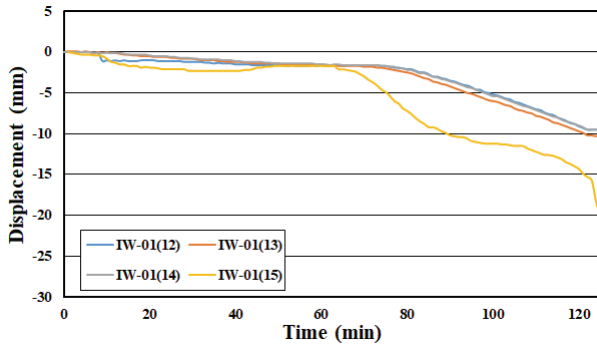
(d) OW-03

Fig. 2 Specimens after experiments

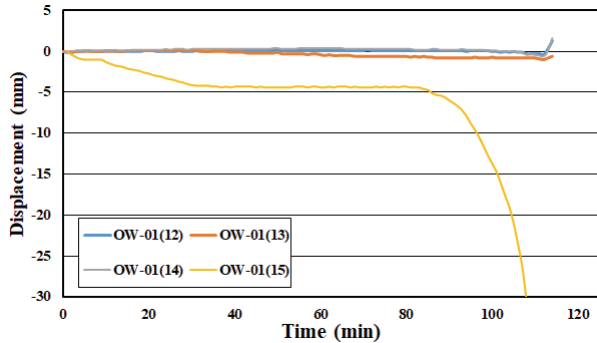
3.3.2 하중지지력

내력벽체의 하중지지력은 KS F 2257-1 기준에 따라 변형량과 변형율 측정으로 평가되며, 변형량은 실험체 중앙과 양측면 3개소에서 측정하였다. 측정된 변형량과 변형율의 결과는 측정 부위 3개소 중 최대 변형량이 발생한 부위를 기준으로 하였으며 실험체별로 Fig. 3(a)는 IW-01 실험체의 수직/수평변위, Fig. 3(b)는 OW-01 실험체의 수직/수평변위, Fig. 3(c)는 OW-02 실험체의 수직변위, Fig. 3(d)는 OW-03 실험체의 수직/수평

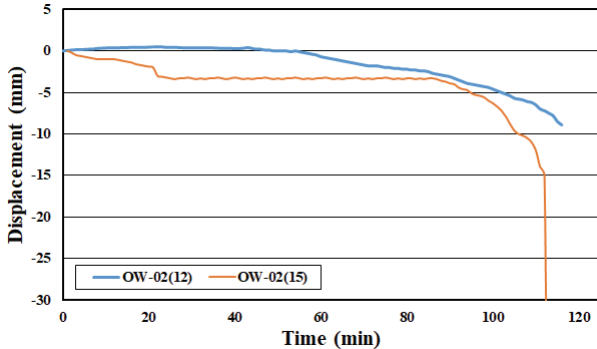
변위를 나타내고 있다. Fig. 3에서 (12)는 실험체 중앙위치의 변형량을 나타내며 (13)은 좌측, (14)는 우측의 변형량을 나타낸다. 추가적으로 수평 변위를 측정하기 위해 실험체 중앙부에



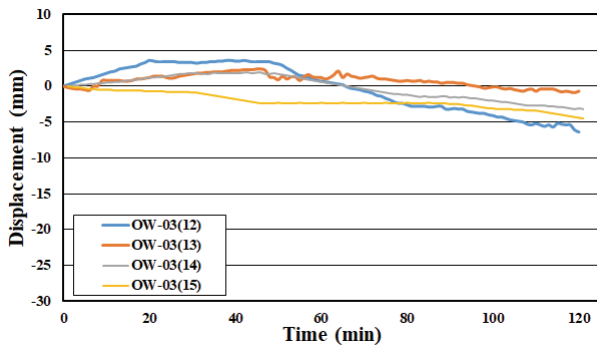
(a) IW-01



(b) OW-01



(c) OW-02



(d) OW-03

Fig. 3 Vertical and horizontal displacement of Specimens

LVDT를 설치하였다. 단, OW-02 실험의 경우 온도상승으로 인해 보드가 탈락하여 중앙부 변위만을 나타내었다.

총 4가지 실험체의 2시간 재하가열 실험 결과, 실험체 모두 내화실험 시간 동안 하중 지지력 성능 기준을 초과하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 상기에서 언급한 바와 같이 각 실험체 별로 면의 좌굴현상이 발생하였으며 특히 OW-01 실험체와 OW-02의 경우 실험 시작 80분 이후 급격한 변위가 발생하여 차열성능에 영향을 준 것으로 분석되었다.

3.3.3 차열성능

비가열면에 부착된 열전대를 통해 차열성능 평가 기준인 평균온도 및 최대온도를 측정하였다. IW-01 실험체의 경우 2시간 재하가열 실험 결과 최대온도 및 평균온도 기준을 초과하지 않아 120분의 차열성능을 갖는 것으로 나타났다. 이는 IW-01 실험체의 방화 석고보드가 충분한 차열성능 갖고 있어 구조체의 변형 및 석고보드 손상 등을 최대한 방지하는 것으로 판단할 수 있다.

OW-01 실험체의 경우 급격한 Fig. 3(b)에서 나타난 바와 같이 각형강관의 수평 변위가 실험 시작 80분 경과 후 발생하였으며 실험 시작 114분에는 각형강관의 좌굴 현상으로 인해 비가열면의 일반 석고보드가 탈락하여 관통부가 발생하였으며, 관통부를 통해 열기가 노출되어 차열성능 기준인 최고온도를

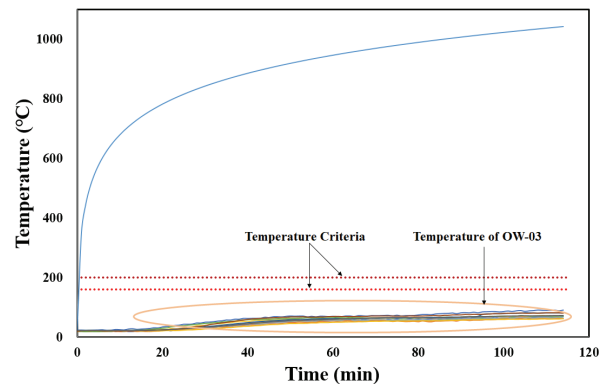


Fig. 4 Surface temperature of OW-03

Table 11 Results of insulation for specimens

Specimens	Insulation		Performance time
	Mean Temperature (Measured value /Criteria)	Max Temperature (Measured value /Criteria)	
IW-01	40°C/165°C	57°C/205°C	120 mins
OW-01	90°C/165°C	286°C/205°C	114 mins
OW-02	85°C/165°C	266°C/205°C	115 mins
OW-03	71°C/165°C	82°C/205°C	120 mins

초과하는 결과를 나타내었다. 추가적으로 OW-02 실험체의 경우 OW-01 실험체와 유사한 결과 값이 나타났다.

OW-03 실험체의 경우 2시간 재하가열 실험 결과 최대온도 및 평균온도를 초과하지 않아 120분의 차열성능을 갖는 것으로 나타났다. 이는 가열면의 방화석고보드의 두께를 증가시켜 구조체 및 비가열면으로 전달되는 열을 최대한 방지한 것으로 분석되었다. 그러나 Fig. 4와 같이 OW-03 실험체의 비가열면 온도가 평가 기준인 평균, 최고온도의 절반에 그쳐 보다 합리적인 내화피복 두께를 확보하는 것이 추가적으로 필요한 것으로 판단하였다.

3.3.4 내화성능 종합

중고층형 모듈러 건축물에는 2시간 이상의 내화성능을 확보한 벽체가 사용되어야 하며 이에 따라 본 연구에서는 KS F 2257-1 및 KS F 2257-4의 기준에 의거하여 2시간 재하가열 실험을 수행하였다. 하중지지력, 차열성능, 차열성능을 분석하여 각 실험체의 최종 내화성능을 평가하면 Table 12와 같다.

Table 12 Fire resistance performance time of specimens

Specimens	Load bearing	Integrity	Insulation	Performance time
IW-01	120	120	120	120 mins
OW-01	120	114	114	114 mins
OW-02	120	115	115	115 mins
OW-03	120	120	120	120 mins

IW-01 실험체는 모듈러 건축물의 내부에 사용되는 벽체로써 가열면과 비가열면에 19T 방화석고보드 2겹과 125x75x2.3T 각형강관으로 구성되어 있다. 재하가열 실험결과, 실험 시작 60분 경과 후 면외 좌굴이 발생하였으나 하중지지력, 차열성능, 차열성능의 성능기준을 초과하지 않아 2시간의 내화성능을 확보한 것으로 평가하였다.

OW-01 실험체는 모듈러 건축물의 외부에 사용되는 벽체로써 가열면에 15T 방화석고보드 2겹, 비가열면에 9.5T 일반 석고보드 1겹과 75x75x2.3T 각형강관으로 구성되어 있다. 재하가열 실험결과, 실험 시작 80분 경과 후 면외 좌굴이 급속도로 발생하여 114분 후 수평변위에 의해 비가열면 보드에 관통부가 발생하여 실험이 종료되었으며 이로 인해 120분의 내화성능을 확보하지 못한 것으로 평가되었다.

OW-02 실험체는 OW-01 실험체와 같은 방화 석고보드 두께로 구성되어 있으나, 구조적인 성능을 확보하고자 각형강관의 두께를 약 0.8T 증가시켰다. 재하가열 실험 결과 OW-01 실험체와 유사하게 실험 시작 90분 경과 후 면외 좌굴이 급속도로 발생하였으며 115분 후 수평변위에 의해 비가열면 보드

에 관통부가 발생하여 실험이 종료되었다. 이러한 결과는 각형강관의 두께를 증가시켜 구조적인 성능을 보완하였으나, 가열면 석고보드의 차열성능 부족으로 인해 각형강관에 열전달이 빠르게 진행되었고 이로 인해 강도가 급격히 저감되어 면외 좌굴이 발생한 것으로 분석되었다.

OW-03 실험체는 가열면에 19T 방화석고보드 3겹, 비가열면에 9.5T 일반 석고보드 1겹, 75x75x3.2T 각형강관으로 구성되어 있다. OW-02 실험체 평가 결과, 가열면 방화석고보드의 차열성능이 부족한 것으로 판단하여 방화석고보드의 두께를 약 12T 증가시켰다. 2시간 재하가열 실험결과 실험 종료 전까지 급격한 면외 좌굴이 발생하지 않았으며 내화성능 평가 기준인 하중지지력, 차열성능, 차열성능의 성능기준을 초과하지 않아 최종적으로 2시간의 내화성능을 확보한 것으로 나타났다.

4. 결론

모듈러 건축물은 공기단축 및 재사용이 가능한 건축물로써 다양한 용도로 적용되고 있으며 이에 대한 수요가 급증하고 있는 추세이다. 국내 건축법에는 표준 내화구조인 KS F 1611-5에서 모듈러 건축물에 대한 내화성능 1시간 미만에 관한 표준내화구조의 사양적 기준만 제시하고 있어 모듈러 건축물을 중·고층에 적용하기 위해서는 한계가 있다. 따라서 내화성능 평가를 통해 2시간 인정을 받은 모듈러 구조에 한하여 중·고층 건축물에 적용이 가능함으로 본 연구에서는 KS F 2257-1 및 KS F 2257-4의 실험 방법 및 평가 기준에 의거하여 실대형 내화실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 외부 벽체인 OW-01, OW-02 실험에서는 내화 피복의 성능이 부족하여 강재의 온도 상승을 유발하였으며 면외 좌굴에 의한 수평변위로 비가열면이 손상되고 관통부가 생기는 현상이 발생되었다. 해당 실험을 통한 모듈러 벽체의 손상 메커니즘을 분석한 결과, 총 6단계로 구분하는 것이 가능하다. 가열면의 석고보드 온도상승, 석고보드와 체결부를 통한 각형강관으로 열전달, 가열면 석고보드 손상에 따른 각형강관 온도 급증, 각형강관 온도 500℃ 도달에 따른 강도 저하 및 면외 좌굴 급증, 면외 좌굴에 의한 수평변위 증가 및 비가열면의 보드 변형 발생, 비가열면 보드 변형에 따른 관통부 발생 및 내화성능 한계점 도달로 구분된다. 따라서 2시간 이상의 내화성능을 확보한 모듈러 벽체는 내화피복의 충분한 차열성능 및 체결부로 인한 열전달 차단을 확보하여 각형

강관에 발생하는 좌굴을 최대한 방지하여야 한다.

- 2) 외부 벽체인 OW-01, OW-02 실험체는 동일한 내화석고 보드가 적용되어 있으며 구조체인 각형강관의 두께가 다르게 적용되었다. 실험 결과 각형강관의 두께 증가와 무관하게 면외 좌굴이 발생하여 2시간 이하의 내화성능을 확보하였다. 한면이 화재에 노출된 내화석고보드의 단면 온도는 시간이 지남에 따라 내/외부가 균형을 이뤄 높은 온도를 지닌 매개체가 된다. 내화석고보드와 맞붙어 있는 각형강관의 경우 높은 열전도성을 가진 재료이므로 내화석고보드의 온도 상승과 거의 유사한 온도 거동을 나타내게 되며, 이로 인해 강재의 온도가 약 550°C 증가하는 경우 실제 강도에 1/2정도 수준으로 저하되어 구조적인 불안전성을 갖게 된다. 따라서 각형강관의 두께가 증가하여 상온에서 구조적인 성능을 추가적으로 확보하였지만 강재의 높은 열전도성을 인해 높은 온도 노출시 급격한 강도 저감을 보여 내화성능에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단되었다.
- 3) IW-01 실험체의 경우 모듈러 내부에 사용되는 벽체로서 2시간 이상의 내화성능을 확보하였으나, 실험 시작 후 60분 이후 각형강관 좌굴에 의한 수평 변위가 증가하기 시작하였다. 그러나 실험시작 120분 이후까지 비가열면에 내화성능 평가기준을 초과하는 특이사항이 발생하지 않았음으로 2시간 이상의 내화성능을 갖는 모듈러 벽체로 적합한 것으로 분석되었다. OW-03 실험체의 경우 모듈러 외부에 사용되는 벽체로서 IW-01과 같이 2시간 이상의 내화성능을 확보하였으며 비가열면의 온도상승은 평가기준의 약 1/2 상승한 것으로 나타났다. 그러나 OW-03의 차열성능 실험 결과와 같이 가열면에 과도한 피복을 형성하는 경우 실사용자의 사용면적 축소 및 재료비 증가에 영향을 주기 때문에 이에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원 (과제번호 : 19AUDP-B100356-05)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kim, J. Y., and Lee, J. K. (2014), A Basic Study on the Application of Modular Construction - Focused on the Analysis of Case Study -, *Journal of The Korean Housing Association*, 25(4), 39-46.
2. Kim, G. D., Lee, J. S., Son, S. M., and Lee, B. S. (2014), An Experimental Study on 2 Hours Fire Resistance Performance of Load Bearing Walls Used in Modular Buildings, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 30(4), 3-10.
3. An, J. H., Yeo, I. H., and Park, J. S. (2018), A Experimental Study on Fire Resistance Performance of Board Encased, *Journal of The Society of Hazard Mitigation*, 15, 223-229.
4. Lee, J. S., Kim, H. Y., Cho, B. H., Kim, H. J., and Kim, G. D. (2008), Fire Resistance System of MCO Beam Using Fireproof Board, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 24(11), 93-100.
5. Kim, H. Y., Lee, J. S., Yoo, Y. H., Cho, B. H., and Kim, H. J. (2009), *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 25(12), 21-30.
6. Lee, S. S., and Park, K. S. (2018), A Experimental Study on Structural Behavior of Hybrid Precast Concrete Panel, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 34(9), 11-18 (8).

Received : 11/01/2018

Revised : 12/10/2018

Accepted : 02/27/2019

요 지 : 국내 건축법에는 표준 내화구조인 KS F 1611-5에서 1시간 내화성능을 갖는 각형강관에 대한 사양적 기준만을 제시하고 있어 각형강관에 적용되는 모듈러 건축물을 중·고층에 적용하기 위해서는 한계가 있다. 따라서 내화성능 평가를 통해 2시간 인정을 받은 모듈러 구조에 한하여 중·고층 건축물에 적용이 가능하다. 본 연구에서는 KS F 2257-1 및 KS F 2257-4 기준에 의거하여 실험실 내화실험을 수행하였다. 평가결과 OW-01 및 OW-02 실험체의 경우 각형강관의 온도상승 및 강도 저하로 인해 면외좌굴이 발생하여 2시간 내화성능을 확보하지 못하였으나, 피복 및 각형강관 두께를 보완한 IW-01 및 OW-03 실험체의 경우 충분한 차열성능으로 인해 2시간 내화성능을 확보하여 중고층 모듈러 건축에 적용하는 것이 가능한 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 모듈러 건축물, 내력벽, 내화성능 실험
