하중재하에 의한 모듈러 건축물의 슬라브 2시간 내화성능에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Two-Hour Fire Resistance Performance of Slabs in Modular Buildings under Loads

손승문* · 이재승** · 나옥빈***

Son, Seung-Mun*, Lee, Jae-Sung**, and Na, Ok-Pin***

Abstract

For a floor of a building with no less than four stories and no more than twelve stories, the two-hour fire resistance performance should be satisfied. In the case of slabs with steel studs, no two-hour fire resistance performance has been proposed in Korea. In this study, the two-hour fire resistance performance of slabs with steel studs performing as structural elements of modular buildings was evaluated. These specimens were redesigned based on the typical slab used in Europe and North America by modifying the 45 mm fire-resistant board to achieve two-hour fire resistance. The experimental results showed that the FR-001 specimens with 140 mm mineral wool applied to the lower slab and the FR-002 specimens containing 100 mm lower-slab glass wool and 150 mm upper-slab mineral wool did not satisfy the two-hour fire resistance performance, owing to the rapid deformation of the specimens after 75 and 110 min, respectively. However, the FR-003 specimens containing 100 mm glass wool, 150 mm mineral wool in the upper slab, and concrete in the slab satisfied the two-hour fire resistance performance requirement.

Key words : Modular Buildings, Load-Bearing Slabs, Fire Resistance Performance Test

요 지

건축물에서 4층 이상 12층 이하 슬라브의 경우, 2시간 내화성능을 만족하여야 한다. 모듈러 건축물에서 스틸 스티드가 적용된 슬라브의 2시간 내화성능에 관한 연구는 국내에서 발표된 사례가 없다. 본 연구는 모듈러 건축물의 구조적 요소로서 스틸 스티드를 사용한 슬라브의 2시간 내화성능을 평가하기 위하여 수행되었다. 시험체는 유럽과 북미에서 사용되는 전형적인 슬라브를 기초로 재설계되었으며, 45 mm 내화 보드를 활용하여 내화성능을 확보할 수 있도록 제작하였다. 실험결과 하부슬라브에 미네랄울 140 mm를 적용한 FR-001 시험체와 하부슬라브 글라스울 100 mm, 상부슬라브 미네랄울 150 mm를 적용한 FR-002 시험체의 경우, 각각 75분과 110분에 시험체의 급격한 변형으로 인해 시험이 조기 종료되어 2시간 내화성능을 만족하지 못하였으나, 하부슬라브에 글라스울 100 mm, 상부슬라브에 미네랄울 150 mm, 슬라브에 콘크리트를 적용한 FR-003 시험체의 경우 2시간 내화성능을 만족하였다.

핵심용어 : 모듈러 건축물, 하중재하 슬라브, 내화성능 시험

*정회원, 반도건설 건축팀 대리(E-mail: ssm860901@bando.co.kr)

Member, Assistant Manager, Architecture Team, Bando E&C

**교신저자, 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-42-629-7528, Fax: +82-42-629-7552, E-mail: jaesung@hnu.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Hannam University

***정회원, 현대건설 기술연구소 건축주택연구팀 과장 · 공학박사(E-mail: okpin.na@hdec.co.kr)

Member, Ph.D., Manager, Building & Housing Research Team, Hyundai E&C Technology Research Center

1. 서 론

1.1 연구의 배경

모듈러 공법은 공장에서 기본 골조와 전기 배선, 온돌, 현관문, 욕실 등 전체 공정의 80% 이상을 제작해 현장에서 내외장 공사로 마무리되는 조립형 주택을 말한다. 따라서 해체와 조립이 용이하고, 공기단축, 인건비 저감, 건축 재료의 재사용이 가능한 장점이 있다. 국내에는 20년 전부터 모듈러 건축물의 내화성능에 관한 연구가 시작되었으며, Kwon and Jee (2003)는 1시간 내화성능 확보가 가능한 스틸 스테드 및 조이스트에 의한 조립식 공법을 제안하였고 Lee et al. (2008)은 방화석고보드를 적용한 MCO (Modular Construction Optimized Beam)보의 내화공법에 관한 연구를 수행하였다. Choi et al. (2011)은 비내력 천장구조의 내화성능을 평가하기 위해 건축물에 적용 가능한 1~2시간의 내화성능을 지닌 비내력 천장구조에 대한 연구를 수행하였으며, Yeo et al. (2011)은 모듈러 건축물에 사용되는 방화석고보드, 텍스, 압면에 대한 열전도율을 측정하는 실험을 진행하였다. Kim et al. (2014)은 모듈러 건축물의 주요 구조부재 중 내력벽만을 대상으로 2시간 내화성능을 확보하기 위한 연구를 수행하였다.

유럽, 미국, 일본과 같은 국외의 경우, 모듈러 공법을 지속적으로 연구하여 주택 및 학교를 비롯한 군 시설물, 사무소 건물 등 다양한 건물에 폭넓게 사용하고 있다. 모듈러 공법에 사용되는 슬라브는 크게 조이스트를 사용하는 방법과 프리캐스트 콘크리트를 사용하는 방법, 콘크리트를 타설하는 방법으로 분류된다. 슬라브에 조이스트를 사용하거나 프리캐스트 콘크리트를 사용하는 경우에는 건식공법이 사용되므로 공장생산이 용이하며, 부재의 조립만으로 모듈의 제작이 가능하여 시공상 유리한 점이 있지만, 외 충격음과 진동의 경우 콘크리트를 타설한 경우에 비해 주거성능이 취약하다는 단점이 있다. 반면에 슬라브에 콘크리트를 타설한 경우 주거성능이 향상되고, 프리캐스트 콘크리트와 비교해 공사비를 낮출 수 있다는 장점이 있다.

한편, 건축물이 고층화됨에 따라 모듈러 건축물도 고층화에 대한 필요성으로 인해 건축물의 용도 및 규모에 따라 요구되는 내화성능의 확보는 필수적이라 할 수 있다.

1.2 연구의 목적

화재안전에 관한 연구는 유럽을 중심으로 1600년대 중반부터 시작되었으며, 개별국가에서 발생한 다양한 대규모 화재들을 분석하여 이에 대응할 수 있는 요소기술 및 평가기준을 개발하고 있다. 국내 및 국외의 경우, 대부분의 연구가 주요 구조부재 중심의 연구가 대부분이지만, 화재에 대한 구조물의 전체적인 거동을 파악하기 위한 연구가 국외에서 일부 수행되었다. Churchill 화재실험(영국, 1986), Brogate 화재연구(영국, 1991), Collin street 화재실험(호주, 1992),

William street 화재실험(호주, 1994) 등과 같은 화재실험이 그 대표적인 연구로서, 기존에 예상하지 못했던 구조물의 역학적 거동 및 하중경로의 변화 등을 분석하여 구조물의 내화성능 향상을 위한 기술개발에 활용되었다. 영국의 BRE에서는 Cardington에 합성구조로 8층(45 m × 21 m) 규모의 실제건물을 대상으로 7차에 걸친 대형화재실험을 수행하였으며, 그 실험들로부터 획득된 데이터를 통해 관련기술 및 성능적 내화설계의 수준을 크게 향상시켰다.

국내의 경우, 유닛건축물의 실험형 화재 실험을 한국건설기술연구원과 RIST (포항산업과학연구원)가 함께 협업하여 국내 최초로 수행하였으나(Kim et al., 2009), 여전히 화재에 관한 건축물 전체 시스템에 관한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 유닛 건축물의 경우 그 공법이 일반적인 RC 구조물이나 철골 구조물 등과 다르게 적층 및 확장에 의한 공법을 적용한 OFF-SITE 방식으로 공기단축이라는 장점을 최대한 활용할 수 있는 내화 및 화재확산 방지 등에 대한 전략이 요구된다.

본 연구에서는 현행 건축법에 따라 4층 이상 12층 이하 규모의 중·고층 주거용 건축물에서 요구되는 2시간 내화성능을 고려하여 과 천장을 일체형 구조로 설계한 모듈러 건축물의 슬라브에 대한 2시간 내화성능 실험을 수행하였다. 시험체는 KS F 1611-5(건축구조부재의 내화성능 표준-제5부: 내력용 스틸 스테드 구조)에서 제시한 내력용 스틸 스테드/천장 구조와 유럽 및 북미지역을 중심으로 현장에서 적용되고 있는 모듈러 건축물의 대표적인 슬라브의 단면을 고려하여 국내실정에 맞게 재설계하여 제작하였다.

2. 시험계획 및 방법

2.1 시험체 계획

본 연구에서는 상기에 언급된 KS F 1611-5(건축 구조부재의 내화성능 표준-제5부: 내력용 스틸 스테드 구조)에서 제시한 내력용 스틸 스테드 구조/천장에 스틸 스테드 구조를 추가하여 2시간 내화성능을 만족하는 슬라브를 재설계하였다. 시험에서 사용된 화재 시나리오는 건축물의 내부 화재로 KS F 2257-1에서 제시된 표준가열곡선을 사용하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 시험체의 시험변수를 정리한 것이며, Table 2는 시험체 사양을 보여준다.

2.2 시험방법 및 성능판정 기준

2.2.1 시험방법

본 연구에서는 KS F 2257에 따라 시험을 수행하였다. 시험체는 시험체 틀에 맞게 제작하여 설치한 후 방화석고보드 설치부를 가열면으로 하여 가열면적 3 m × 4 m인 수평 가열로에 고정시켰다. 재하하중은 전체 2,967 kg-f의 하중을 가열면에 Fig. 1과 같이 가력하였다.

Table 1. Experimental Variable

Material		Type		
		FR-001	FR-002	FR-003
Joist	Size	180 × 50 × 20 × 1.6	180 × 50 × 20 × 1.0	
	Interval	@600		
Stud	Size	140 × 40 × 20 × 1.6	90 × 40 × 20 × 1.0	
	Interval	@600		
Insulation	Mineralwool	140T	150T	
	Glass wool	-	100T	
runner	Upper	184 × 40 × 40 × 1.0	184 × 40 × 40 × 1.0	
	Lower	142 × 40 × 40 × 1.0	90 × 40 × 20 × 1.0	
Finishing Material	Ceiling	Fire protection gypsum board 15T		
	Floor	OSB 11T		Concrete 70T

Table 2. Specifications for Experiments

Type	Specifications
FR-001
FR-002
FR-003

Fig. 1. Slab Test Set-Up

차열성능을 측정하기 위하여 Table 3과 같이 시험체의 OSB 표면에 5개의 열전대(No. 11-15)를 설치하여, 이면의 평균온도와 최고온도를 측정하였고 가열 중 슬라브판 조인트의 온도측정을 위해 시험체 이면 조인트에 2개의 열전대(No. 16-17)를 설치하였다. 또한, 슬라브의 내화성능 및 구조성능을 평가하기 위하여 Table 4와 같이 하부 스티드와 상부 스티드의 플랜지 하부와 상부, 웹 중앙부에 열전대 6개를 추가적으로 설치하여 온도를 측정하였다. 하중지지력에 대한 성능평가를 위해 주변위계를 이용하여 시험체 중앙부에서 변형량을 측정하였으며, 차열성능 평가를 위해 시간에 따른 시험체의 변형을 관찰하였다. Fig. 1은 내화성능 시험을 위한 시험체 Set-up을 보여준다.

2.2.2 성능판정기준

KS F 2257에서 제시한 수평 내력구획 부재의 성능평가 기준은 하중지지력, 차열성, 차열성 세 가지로 나누어진다. 국내 기준은 미국(ASTM)과 영국(BS)의 기준과 다르며, Table 5에 국내, 미국, 영국의 슬라브의 내화성능기준을 나타내었다. 국내의 하중지지력 평가의 경우 변형량과 시간에 따른 변형률을 모두 초과하는 시간을 내화성능 시간으로

Table 3. Locations of Thermocouples

No.	Measurement value	Installation position
11 - 15	Non-heated surface average temperature measurement	Four-definition central part
16 - 17	Non-heated surface maximum temperature measurement	High temperature expected site
Thermocouple Position

Table 4. Positions of Thermocouples on Studs

No.	Installation position
18 - 25	Upper slab - Web, Flange (Upper, Lower) Lower slab - Web, Flange (Upper, Lower)
Thermocouple Position

결정한다. 차염성의 경우 시험체의 비가열면에 면패드를 설치하여 내부 화염에 의한 외부에서의 착화발생 시간을 측정하는 방법과 균열 게이지를 사용하여 시험체의 균열이 기준 이상으로 벌어진 시간을 측정하는 방법, 비가열면에 10초 이상 지속적인 화염이 발생한 시간 등의 방법으로 결정된다. 이 중 한 가지라도 만족하지 못하는 시간을 내화성능 평가 기준으로 본다. 차열성의 경우 시험체의 비가열면의 초기온도에서 평균온도가 140 °C 이상 증가하거나, 최대온도가 180 °C 이상 증가했을 때로 하며. 이 중 한 가지라도 만족하지 못하는 시간을 내화성능 평가기준으로 본다. 최종 내화성능판정은 상기에서 언급된 3가지 평가기준인 하중지

Table 5. Fire Resistance Test Method and Performance Evaluation Criteria

Type	KS, ISO	ASTM	BS
Experimental size	3 m × 4 m	16 m ²	3 m × 4 m
Thermocouple	1EA/1.5 m ²	9EA	1EA/1.5 m ²
Load bearing	<ul style="list-style-type: none"> Deflection ($l^2/400d$ mm) Deflection Rate ($l^2/9,000d$ mm/min) 	<ul style="list-style-type: none"> Load application Subject Surrender Status 	<ul style="list-style-type: none"> Deflection ($l/20$ mm) Deflection Rate ($l^2/9,000d$ mm/min)
Thermal Insulation	Avr		
	140 °C+ T_0	139 °C+ T_0	140 °C+ T_0
	Max		
	180 °C+ T_0	181 °C+ T_0	180 °C+ T_0
Differential inflammatory	<ul style="list-style-type: none"> Cotton pad Gap gauge (6 mm, 25 mm) 	Cotton pad	<ul style="list-style-type: none"> Cotton pad Gap gauge (6 mm, 25 mm)

지력, 차염성, 차열 성능기준을 만족하지 못하는 최초의 시간으로 결정된다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 시험결과

KS F 2257에서 제시한 수평 내력구획 부재의 내화성능을 수행하였으며, 내화성능에 관한 시험결과는 Table 6과 같다.

Fig. 2는 각 시험체의 시험 전과 후의 가열면을 나타내고 있으며, 가열면의 재료 손실 및 슬라브의 전체적인 처짐 및 변형 여부를 확인하였다. Fig. 2(a) FR-001 시험체는 가열 16분 경과시, 이면 OSB 접합부위에서 연기(수증기)가 발생되기 시작하였으며, 25분에 시험체의 상부슬라브 OSB합판의 처짐이 발생하기 시작하였다. 72분에 이르러 변형량이 급격

Table 6. Test Results

Type		FR-001	FR-002	FR-003
Experimental Time		74min	110min	120min
Load bearing	Axial Deflection ($l^2/400d$ mm)	19.4	121.3	62.7
	Axial Deflection Rate ($l^2/9,000d$ mm/min)	3.9	7.3	4.8
Thermal Insulation		O	O	O
Differential Inflammatory		O	O	O

히 증가하여 시험실의 안전을 위해 74분에 가열 시험을 종료하였다. Fig. 2(b) FR-002 시험체는 가열 14분 경과시, 이면 OSB 접합부에서 연기(수증기)가 발생되기 시작하였으며, 36분에 시험체의 상부슬라브 OSB합판의 처짐이 발생하기 시작하였다. 110분에 이르러 슬라브면에 화염이 급격히 발생하여 시험을 종료하였다. Fig. 2(c) FR-003 시험체는 가열 16분 경과 시, 이면 콘크리트 접합부에서 연기(수증기)가 발생되기 시작하여 시험 종료 시까지 계속되었으며, 시험 종료 시까지(120분) 다른 특이사항은 발생하지 않았다. Fig. 3(a) FR-001 시험체의 경우 상부슬라브의 중공층에 의한 내화 성능 효과를 파악하기 위하여 하부슬라브 스테드와 상부슬라브 스테드의 하부플랜지, 웨브, 상부플랜지에 설치된 각각의 열전대로부터 얻어진 시간에 따른 온도 변화를 보여준다. Figs. 3(b)와 3(c)는 상부슬라브, 하부슬라브에 각각 미네랄울과 글라스울이 보강된 시험체인 FR-002, FR-003 시험체의 상부슬라브 스테드의 플랜지 하부, 웨브, 플랜지 상부에 설치된 열전대로부터 얻어진 각 위치별 시간에 따른 온도 변화를 나타내었다. Fig. 4는 시험체의 온도상승과 시험체 변형에 대한 연관성을 살펴보기 위하여 각 시험체의 스테드에서 측정된 평균온도를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. Figs. 5와 6은 변형량 및 변형률 그래프를 보여주며, Figs. 7과 8은 비가열면의 평균온도와 최대온도를 보여준다.

Fig. 2. Photos for Experiment Result

Fig. 3. Stud Measurement Temperature

Fig. 4의 스테드의 평균온도와 Fig. 7의 시험체 변형량은 서로 유사한 경향을 보였으며, 이는 각 시험체의 스테드 온도가 상승함에 따라 석고보드의 성능저하로 인한 스테드의 변형에 기인한 것으로 분석되었다. FR-002 시험체가 FR-003 시험체보다 변형량이 높은 원인은 FR-002 시험체는 상부슬라브의 슬라브면에 11 mm OSB합판이 FR-003 시험체의 상부 슬라브 70 mm 콘크리트보다 구조적 성능이 약하여 FR-002 시험체가 변형이 많이 발생하였기 때문으로 판단된다.

FR-001 시험체의 경우 74분 동안 변형량이 크게 발생되지는 않았지만 시험체의 급격한 처짐으로 인해 시험이 종료되었으며, 2시간 성능평가를 진행하지 못하여 내화성능을 만족하지 못하였다.

Fig. 4. Stud Average Temperature

Fig. 8. Non-heated Surface Maximum Temperature Measurement (Max. from Thermocouple 16-17)

Fig. 5. Experimental Deflection

Fig. 6. Experimental Deflection Rate

Fig. 7. Non-heated Surface Average Temperature Measurement (Aver. from Thermocouple 11~15)

FR-002 시험체의 경우 84분 이후 변형량이 급격하게 증가하였으며, 시험체의 처짐이 증가하여 110분에 시험을 종료하였다. 시험체의 변형량이 84분 이후 급격하게 증가한 원인으로 상부스터드의 온도증가에 따른 구조적 성능이 저하되어 변형이 증가한 것으로 판단되며, FR-002 시험체도 2시간 성능평가를 진행하지 못하여 내화성능을 만족하지 못하였다.

FR-003 시험체의 경우 100분 이후에 변형량이 증가하였으나, 이는 다른 시험체와 동일하게 스터드의 온도가 상승함에 따라 스터드의 구조적 성능이 저하되어 변형량이 증가한 것으로 판단된다. 그러나 FR-003 시험체는 하중지지력, 차열성, 차열성 평가 기준을 만족하여 2시간 내화성능을 만족하였다.

4. 결 론

모듈러 건축물의 4층 이상 12층 이하 규모의 2시간 슬라브 내화성능을 확보하기 위하여 슬라브와 천장이 일체형 구조인 슬라브에 대한 2시간 내화성능을 확보하기 위해 KS F 2257-5의 시험방법 및 평가 기준에 의거하여 실험형 슬라브 내화시험을 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) FR-001, FR-002, FR-003 시험체 스터드의 시간에 따른 열전대의 평균 상승온도와 시험체의 변형률은 유사한 추이를 보였다. 이는 온도 상승에 따른 하부스터드의 내화성능이 저하되어 하부슬라브의 지지력이 감소함에 따라 상부슬라브의 처짐이 발생한 것으로 판단된다.
- (2) 하중지지력 평가 시 FR-001, FR-002 시험체의 경우 하중지지력 기준인 127.2 mm를 초과하지 않았지만 75분, 110분에 시험체의 급격한 처짐으로 인하여 시험을 조기 종료하여 내화성능 기준을 만족하지 못하였다. FR-003 시험체의 경우, 2시간 경과 시 슬라브의 처짐은 62.7 mm로 평가 기준인 97.3 mm를 하회하여

하중지지력 평가를 만족하였다.

- (3) FR-003 시험체는 비가열면 평균온도의 성능기준인 140 °C를 초과하지 않았으며, 최대온도의 성능기준인 초기온도 180 °C를 초과하지 않아 차열성 평가를 만족하였고, 120분 성능시험 종료 후 이면에 화염이 발생하지 않아 차염성 평가기준 또한 만족하였다.
- (4) 본 연구에서 수행된 스틸 스티드 슬라브의 경우 미네랄 울과 중공층으로 이루어진 FR-001 시험체보다 미네랄 울과 글라스울로 이루어진 FR-002, FR-003 시험체가 내화성능확보에 유리한 것으로 평가되었고, 상부 11 mm OSB합판으로 이루어진 FR-002 시험체보다 상부 70 mm 콘크리트로 구성된 FR-003 슬라브가 변형능력에서도 우수한 것으로 평가되었다.

향후, 시공성과 경제성을 고려하여 모듈러 공법에 최적화된 내화재료의 개발과 그 적용을 통해, 슬라브의 내화성능을 향상시킬 수 있는 공법개발이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Choi, D.H., Dea, D.H., and Park, S.Y. (2011). An experimental study on fire resistance performance test of non-loadbearing ceiling systems. *Fire Science and Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 22-27.
- 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*, Vol. 30, No. 4, pp. 3-10.
- Kim, H.Y., Lee, J.S., Yoo, Y.H., Cho, B.H., and Kim, H.J. (2009). A study on the fire experiment of medical modular block for the structure behavior and deformation under fire load condition. *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 25, No. 12, pp. 21-30.
- Kwon, I.K., and Jee, N.Y. (2003). Study on the fire resistant performance of load-bearing walls using light gauge steels and gypsum boards. *Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 8, pp. 83-90.
- 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*, Vol. 24, No. 11, pp. 93-100.
- Yeo, I.H., Cho, B.Y., Min, B.Y., and Kim, H.Y. (2011). Experimental study on the thermal properties of materials for fire resistive ceiling structure at high temperature. *Fire Science and Engineering*, Vol. 2011, No. 2011, pp. 334-339.

Received	February 9, 2021
Revised	February 9, 2021
Accepted	March 8, 2021