

화재 시 하중 재하 조건에 따른 중공슬래브의 내화거동 및 잔존성능

최현기¹, 배백일², 정형석³, 최창식⁴, 정주홍^{5*}

Fire Resistance Behavior and Residual Capacity of Voided Slab Subjected to Fire According to Loading Condition

Hyun-Ki Choi¹, Back-Il Bae², Hyung-Suk Jung³, Chang-Sik Choi⁴, Joo-Hong Choi^{5*}

Abstract: This study presents experimental investigation on the residual capacity of fire-damaged voided slabs according to loading conditions. In this study, two voided slab specimens were fabricated, and heated by ISO standard fire during 120 minutes with different loading conditions of presence of loading. These specimens were cooled down to room temperature, and the residual capacity of fire-damaged voided slabs was investigated. Based on test results, thermal distribution of voided slab through the depth of concrete sections is different by the loading conditions. The temperature of loaded specimen is rapidly elevated through the whole depth of concrete sections compared to the unloaded specimen. The residual strength of fire-damaged voided slab specimens are 60% and 66% of that of voided slab specimen without fire damage, and the residual stiffness of fire-damaged voided slab specimens decreases by 15%~23% of that of voided slab specimen without fire damage. In case of voided slab specimens subjected ISO standard fire, the loaded specimen shows the decrease of 10% in the residual strength and the decrease of 15% in the residual stiffness compared to the unloaded specimen. It seems to result from higher temperature of bottom reinforcements in the loaded specimen due to the cracks, and more extensive damage on concrete cover of reinforcements by spalling process according to load level.

Keywords: Voided slab, Residual capacity, Thermal distribution, Loading condition

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 국내 건축물이 고층화 대형화됨에 따라 재해 및 재난에 따른 구조물의 안전성 확보가 중요해 지고 있다. 특히 화재로 인한 구조물의 피해는 매년 약 30,000건 이상인 것으로 보고되고 있다. 철근 콘크리트 구조는 콘크리트의 우수한 축열 효과 및 낮은 열전도율 등에 의해 우수한 내화구조로 평가되고 있으며, 이에 따라 화재 이후에도 빈번히 재사용 되고 있는 실정이다. 따라서 화재 후의 철근콘크리트 구조물의 재사용 여부를 판단하고, 붕괴 위험성 등을 평가하기 위하여 화재를 입은 건축물에 대한 구조물의 잔존 성능에 대한 연구가 활발히 지속되고 있다(ACI 216, 1989; Harmathy, 1970).

기존 연구에 따르면, 고온에 노출되어 화재를 입은 철근콘크리트 구조물의 잔존성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 화재 발생 시 구조재료의 고온 노출 시간 및 온도인 것으로 보고되고 있으며, 이에 따른 구조재료의 강도 저감을 고려하여 철근콘크리트 구조물의 잔존성능을 평가하는 방법에 대한 연구가 진행되었다(Mohamedbhai, 1986; Lee and Heo, 2001).

일반적으로 중공슬래브의 경우 국내 철근콘크리트 설계기준에서 제시하고 있는 2시간 요구내화시간을 만족하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2011; Chung et al., 2012). 그러나 중공슬래브의 경우 기존 철근콘크리트 슬래브와는 상이한 열적거동을 보이는 것으로 나타났으며, 이러한 중공슬래브의 내화성능에 피복두께, 슬래브 경간, 적재 하중의 크기 등이 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Cho et al., 2011).

본 연구에서는 재하하중의 크기가 중공슬래브의 내화성능에 영향을 미치는 것에 주목하였다. 중공슬래브의 경우 적재하중의 크기에 따라 균열이 슬래브 내부의 중공부를 조기에 관통할 수 있기 때문에 적재 하중의 크기가 화재 시 중공슬래브 내부의 온도분포를 변화 시킬 것으로 판단하였으며, 이는 중공슬래브의 잔존강도에 영향을 미칠 것이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 하중재하 조건이 다른 중공슬래브가

¹정회원, 경남대학교 소방방재공학과, 교수

²정회원, 한양대학교 산업과학연구소, 연구교수

³정회원, 가톨릭관동대학교 건축공학과, 교수

⁴정회원, 한양대학교 건축공학과, 교수

⁵정회원, 한양대학교 산업과학연구소, 연구교수, 교신저자

*Corresponding author: lordy0422@hotmail.com

Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Seoul, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

고온에 노출 되었을 때의 온도 분포 변화를 파악하고자 하였으며, 이를 바탕으로 하중재하 여부가 중공슬래브의 잔존 성능에 미치는 영향에 대하여 평가하고자 하였다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 하중재하 조건에 따른 중공슬래브의 온도분포를 파악하기 위하여, 하중재하 여부를 변수로 하여 내화 실험을 수행하였다. 또한, 화재를 입은 중공슬래브의 잔존 성능을 평가하기 위하여, 고온으로 가열된 후 상온으로 냉각한 상태의 중공슬래브 실험체에 대한 휨 실험을 수행하여 중공슬래브의 잔존 성능을 평가하였다.

2. 내화 실험

2.1 실험체 상세 및 양생조건

본 연구에서는 슬래브 실험체의 중공을 형성하기 위하여, Fig. 1과 같은 스티로폼 재질의 중공형성체를 제작하여 적용하였다. 중공은 40 mm의 간격으로 배치하였으며, 중공슬래브의 두께는 250 mm로 설정하였다. 실험체는 KS F 2257-5 수평 내력 구획 부재의 내화 시험방법에 규정된 조건에 따라 Fig. 2 및 Table 1과 같이 제작하였다. 실험체의 크기는 지지대 부분을 포함하여 4700 mm x 3000 mm 직사각형에 형태로 제

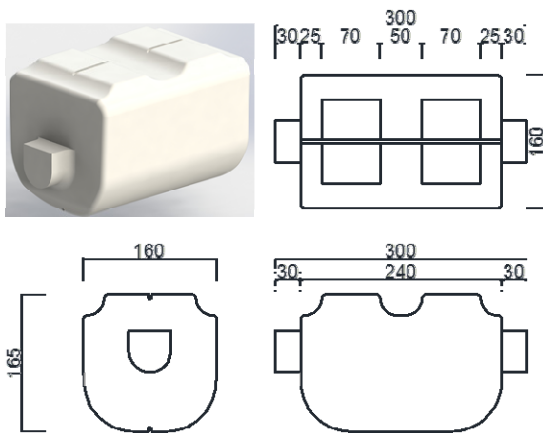


Fig. 1 Details of Void shaper

작하여, 순경간 4200 mm를 확보할 수 있도록 계획하였다.

내화 실험체는 120일간 양생함으로써 콘크리트의 수화반응이 충분히 일어나도록 하여 수분함유량을 일반적인 사용조건과 부합되도록 하였으며, 기건 상태에서 내화 실험을 수행하였다.

2.2 사용재료

본 실험체는 콘크리트의 배합강도 24 MPa의 규산질 콘크리트를 사용하여 제작하였으며, 콘크리트 배합비는 Table 2에 나타내었다. 실험체 타설 시 콘크리트의 슬럼프 및 공기량을 측정하였으며, KS F 2405에 따라 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원통형 공시체를 5개 제작하여 실험체와 동일한 조건으로 양생하였다. 강도시험은 120일 강도로 내화 실험 직전에 만능시험기를 이용하여 실시하였으며, 콘크리트 공시체의 평균 압축강도는 26.3 MPa로 배합강도인 24 MPa 보다 다소 높게 나타났으며, 슬럼프 값은 평균 120 mm의 값을 보여주고 있다.

철근은 SD500의 D10을 상·하부 보강근으로 사용하였으며, 인장시험편 제작은 KS D 3504의 규정에 따라 만능시험기를 통하여 인장강도평가를 수행하였다. 철선의 항복강도는 550.2 MPa이며, 인장강도는 663.6 MPa로 나타났으며, 철근의 인장강도, 연신율, 탄성계수 실험결과는 Table 3과 같다.

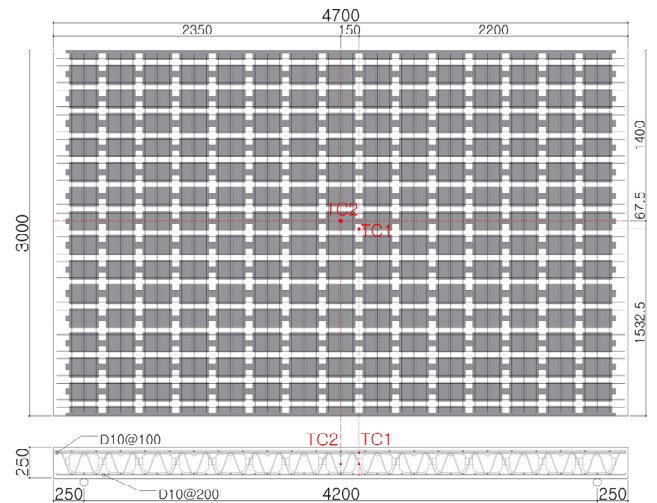


Fig. 2 Details of Specimen

Table 1 Properties of Specimen

Specimen ID	Thickness (mm)	Effective depth (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Clear Span (mm)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Rebar Arrangement		Cover thickness of bottom rebar (mm)	Subjected Load (kN/m ²)
								Top	Bottom		
VS-L	250	225	4700	3000	4200	24	500	15-D10	30-D10	20	3.52
VS-UL											0

Table 2 Average concrete strength and mix proportion

Average Strength	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kgf/m ³)				
			W	C	S	G	Admix.
26.3	48	47	168	298	414	338	2.11

Table 3 Mechanical properties of rebar

Specimen	Nominal Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Elastic Modulus (GPa)
D10 rebar	500	550.18	663.61	8.81	155.05

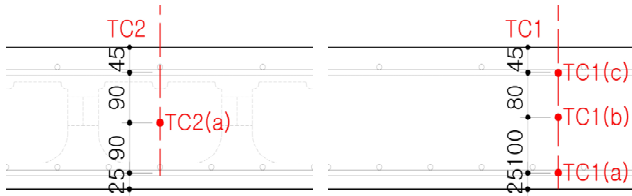


Fig. 3 Location of Thermocouples

2.3 슬래브 온도분포 측정계획

중공슬래브의 단면 온도분포 변화에 대한 특성을 파악하기 위하여, K형 열전대를 설치하여 슬래브의 단면 내 위치별 온도변화를 측정하였다. 열전대는 Fig. 3과 같이 슬래브 중앙부에 위치한 하부 주인장철근, 슬래브 두께의 1/2 지점 콘크리트, 중공체 내부, 상부 주인장철근에 설치하였다. 슬래브 비가 열면 온도의 경우 5개의 열전대를 슬래브 상부면에 추가적으로 설치하여 평균온도를 측정하였다.

2.4 실험방법 및 재하조건

내화실험은 KS F 2257-5에 규정된 조건에 따라 수행하였다. 슬래브 실험체는 ISO 834 표준시간-가열온도곡선에 따라 슬래브 하부면을 식 (1)과 같은 가열속도로 120분 동안 가열하였다.

$$T(t) = 345 \times \log(8t + 1) + T_0 \quad (1)$$

T_0 : 대기 온도(20°C)

$T(t)$: 가열시간에 따른 가열로 내 평균온도(°C)

t : 가열시간(min)

중공슬래브 실험체의 내화성능은 하중지지력, 차열성, 차염성의 3가지 조건을 통해 평가하였다. 하중지지력의 경우 변형량과 변형률을 통해 판단하였으며, 실험체의 변형량과 변형률이 식 (2) 및 식 (3)을 통해 산정한 한계 변형량과 허용변



Fig. 4 Loading condition for VS-L

형률을 초과하였을 경우 하중지지력을 상실한 것으로 판단하였다. 차열성의 경우 이면온도의 상승폭이 140K를 초과할 경우 차열성능에 부적합한 것으로 판단하였으며, 차염성의 경우 육안을 통해 확인하였다.

$$D = \frac{L^2}{400d} \quad (2)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \quad (3)$$

D : 한계 변형량(mm)

dD/dt : 허용 변형률(mm/min)

L : 슬래브 순경간(mm)

d : 슬래브 유효깊이(mm)

재하 조건은 실험체를 공동 주책 주열대에 위치한 슬래브로 가정하여 고정하중 2.28 kN/m² 및 활하중 2.47 kN/m²로 산정하였다. 화재 시 하중 조합은 Eurocode 내화설계 방법을 준용하였으며, 고정하중의 100%와 활하중의 50%를 기준으로 산정하였다. 총 3.52 kN/m²의 등분포 하중이 가해지도록 계획하였다.

재하 실험체의 하중은 Fig. 4와 같이 총 6개의 모래함을 실험체 비가열면에 위치시킴으로써 등분포 하중을 모사하여 재하 하였다. 비재하 실험체의 경우 추가적으로 하중을 재하하지 않았으며, 슬래브의 자중만을 고려하여 내화 실험을 수행하였다. 각 실험체의 총 재하하중의 크기를 Table 1에 나타내었다.

3. 내화 실험 결과 및 분석

3.1 중공슬래브의 내화 성능

재하 및 비재하 중공슬래브 실험체에 대한 내화실험 결과를 Fig. 5 및 Table 4에 나타내었다. 재하 및 비재하 실험체는

Table 4 Fire resistance performance of voided slab specimens

Specimen	Maximum Deflection at mid-span(mm)	Deflection rate(mm/min)		Elevated temperature at top surface(°C)	Fire resistance (min)
		Max	Average		
VS-L	190.0	4.5	1.6	28.2	120
VS-UL	144.8	4.0	1.2	21.3	120
$\frac{VS-L}{VS-UL}$	1.31	1.13	1.33	1.32	1.0

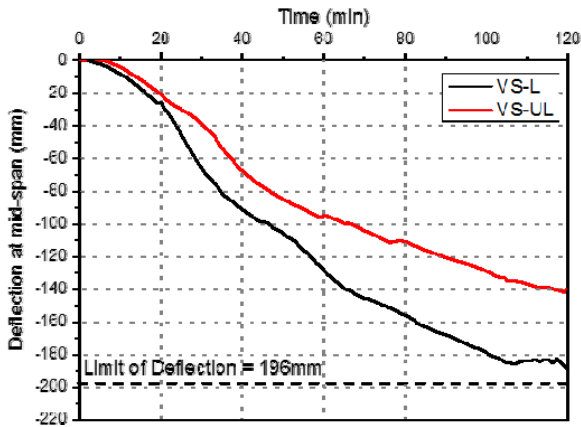


Fig. 5 Deflection of specimens

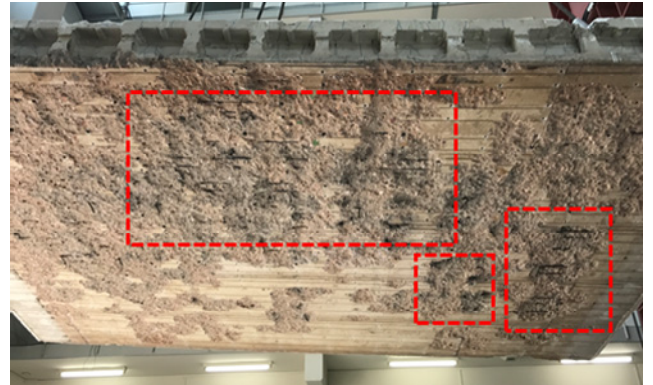
재하하중의 크기에 상관없이 120분의 가열시간 동안 한계 변형량 196 mm 및 허용 변형률 8.7 mm/min를 초과하지 않았다. 또한, 이면온도 상승폭 측면에서도 120분의 내화성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

재하 여부에 따른 중공슬래브의 내화성능 변화를 비교하여 Table 4에 나타내었다. 재하 실험체의 경우 최대 변형량 190 mm를 보이며, 비재하 실험체의 최대 변형량 144.8 mm에 비해 약 31% 증가한 것을 확인 할 수 있다. 최대 변형률의 경우 재하 실험체가 최대 4.5 mm/min을 보이며 비재하 실험체의 최대 변형률 4.0 mm/min에 비해 13% 높게 나타났다. 평균 변형률의 경우 재하실험체가 2.0 mm/min을 보이며 비재하 실험체의 평균 변형률 1.2 mm/min에 비해 33% 상승하였으며, 더 빠른 속도로 변형되는 것으로 나타났다. 또한 이면상승 온도의 경우 재하 실험체 28.2°C, 비재하 실험체가 21.3°C로 나타났으며, 재하 실험체가 비재하 실험체에 비해 약 32% 상승한 것을 확인하였다.

이러한 결과를 살펴볼 때, 재하 조건이 슬래브의 내화성능에 영향을 미치며, 재하 될 경우 내화성능에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.2 중공슬래브의 손상상태

고온 가열에 의한 중공슬래브 실험체의 슬래브 하부면 콘크리트의 손상 상태를 Fig. 6에 나타내었다. 두 실험체 모두 콘크리트 박리에 의한 하부면의 손상이 넓은 면적에 걸쳐 관측



(a) VS-L



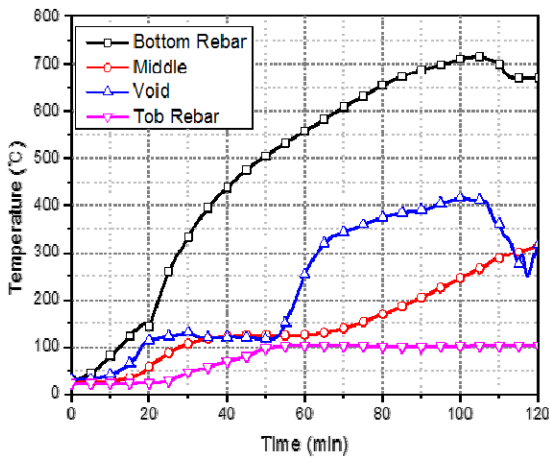
(b) VS-UL

Fig. 6 Spalling of concrete on bottom surface by fire exposure

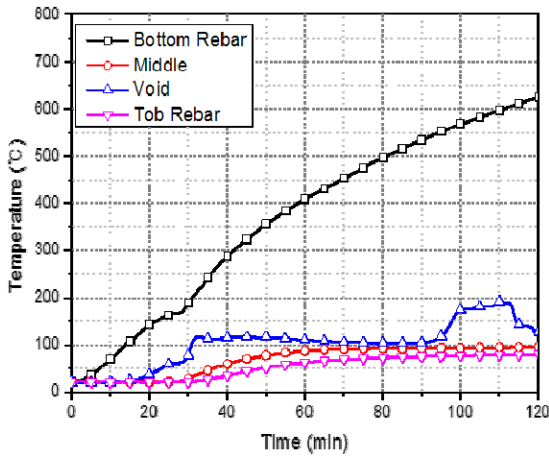
되었다.

관측 결과, 재하 실험체의 경우 비재하 실험체에 비해 더 심한 손상을 입은 것으로 나타났다. 재하 실험체의 경우 넓은 면에서 하부 주인장 철근이 육안으로 관측 될 정도로 콘크리트 박리가 깊이 진행 된 반면, 비재하 실험체의 경우 철근이 관측 될 정도로 콘크리트 박리가 깊게 진행 된 부분이 일부 구간에만 발생한 것으로 관측 되었다.

이러한 슬래브 하부면의 손상상태의 차이는 재하 여부에 따른 최대 변형량과 변형속도의 차이 때문인 것으로 판단된다. 재하 실험체의 경우 하중 재하에 따라 변형이 빠른 속도로 발생하여 큰 변형을 발생시킴으로써, 콘크리트 박리 현상이 심화된 것으로 사료된다.



(a) VS-L



(b) VS-UL

Fig. 7 Temperature of voided slab according to fire exposure time

Table 5 Temperature distribution of voided slab specimens

Specimen	Bottom rebar(°C)	Void (°C)	Middle of Concrete(°C)	Top rebar(°C)
VS-L	715.5	415.0	314.6	103.1
VS-UL	625.1	192.3	95.1	80.6
$\frac{VS-L}{VS-UL}$	1.14	2.16	3.31	1.28

3.3 중공슬래브의 단면 내 온도 분포

하중조건에 따른 중공슬래브의 단면내 온도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 실험결과 재하 실험체의 경우 비재하 실험체보다 전단면에 걸쳐 온도가 빨리 상승하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 일반 솔리드 철근콘크리트 슬래브의 온도 분포와는 달리 중공슬래브의 경우 특징적으로 중공체가 녹으면서 발생하는 중공 공기층의 온도상승 지연구간이 나타났으며, 재하 실험체에서 더 이른 시간에 온도상승 지연구간이 발생하였다.

각 실험체의 120분 가열 시 단면 내 최대 온도를 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다. 두 실험체 간 가장 큰 온도 차이는 슬래브 단면 중앙부 콘크리트 및 중공 공기층에서 발생한 것으로 나타났다. 중앙부 콘크리트 온도의 경우 비재하 실험체에 비해서 재하 실험체에서 3.31배 높게 나타났으며, 중공 공기층의 온도의 경우 재하 실험체가 2.16배 높게 나타났다. 이는 재하실험체의 경우 휨 균열이 조기에 중공부 까지 진전되어 중공내부 공기층이 직접 가열되기 때문인 것으로 사료된다. 재하 실험체의 중앙부 콘크리트 온도 상승 경향을 살펴보면, 공기층의 온도가 급격히 상승하는 54분 이후부터 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 재하실험체의 중앙부 콘크리트의 경우 콘크리트의 열전도에 의해 온도가 상승하는 것이 아니라 휨 균열을 통해 직접 가열된 공기층에 의해 온도가 상승된 것으로 판단된다.

하부철근 온도의 경우, 재하 실험체가 최대 715.5°C 까지 상승하였으며, 이는 비재하 실험체의 625.1°C에 비해 14% 높은 온도이다. 또한, 상부철근 온도의 경우, 재하 실험체가 최대 103.1°C 까지 상승하였으며, 비재하 실험체의 80.6°C에 비해 28% 높게 나타났다. 평균 이면상승 온도를 통해 슬래브 압축연단 콘크리트의 온도를 비교한 결과, 재하 실험체가 28.2°C, 비재하 실험체가 21.3°C로 나타났으며, 재하 실험체가 비재하 실험체에 비해 약 32% 상승한 것을 확인하였다.

이러한 결과를 살펴볼 때, 재하 조건이 중공 슬래브의 온도 분포에 큰 영향을 미치며, 재하 될 경우 슬래브의 온도를 상승시키는 것으로 나타났다. 특히, 재하 됨에 따라 중공슬래브의 잔류강도에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 하부 주인장철근의 온도와 슬래브 상부 압축연단의 콘크리트 온도가 증가되기 때문에 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 성능 또한 영향을 받을 것으로 사료된다.

4. 잔존성능 평가

4.1 실험체 상세 및 초기조건

본 연구에서는 고온으로 가열 된 중공슬래브 실험체를 상온으로 냉각 후 잔존강도를 평가하였다. 이를 위해 고온으로 가열 된 중공슬래브를 90일간 상온에 보관하여 자연 상태에서 천천히 냉각하였다.

실험체는 고온에서 발생한 변형이 냉각 과정에서 고착화되면서 영구 처짐이 발생하였다. 재하 실험체의 경우 슬래브 중앙부에서 15 mm의 영구 처짐이 관측되었으며, 비재하 실험체의 경우 슬래브 중앙부에서 9 mm의 영구 처짐이 관측되었다. 이러한 차이는 고온으로 가열 시 재하 실험체에서 더 큰

변형이 발생하였기 때문인 것으로 사료되며, 재하 실험체의 하부 주인장 철근 온도가 더 오랜 시간 철근의 잔존성능에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는 600°C 이상으로 가열 되어 철근의 물성치 변화가 더 컸기 때문인 것으로 사료된다.

4.2 잔존성능 평가 실험방법

화해를 입은 중공슬래브의 잔존 휨 성능을 평가하기 위하여 Fig. 8과 같이 4점 휨 실험을 수행하였다. 기존의 화해를 입지 않은 중공슬래브 휨 강도와 비교를 위하여, 실험체의 순경간을 기존 휨 실험체(Reference)와 동일하게 3300mm로 계획하였다. 휨 파괴를 유도하기 위하여 전단경간비를 6.7로 설정하였다. 가력은 실험체의 중앙에서 양단부 방향으로 150 mm 떨어진 부분에 위치한 Rigid Beam을 통해 가력하여 슬래브 폭 방향으로 균등하게 가력 될 수 있도록 하였다. 액츄에이터(Actuator)를 사용하여 0.1 mm/min 속도의 변위제어를 통해 재하 하였으며, 실험체의 처짐은 7개의 LVDT를 통해 측정하였다.

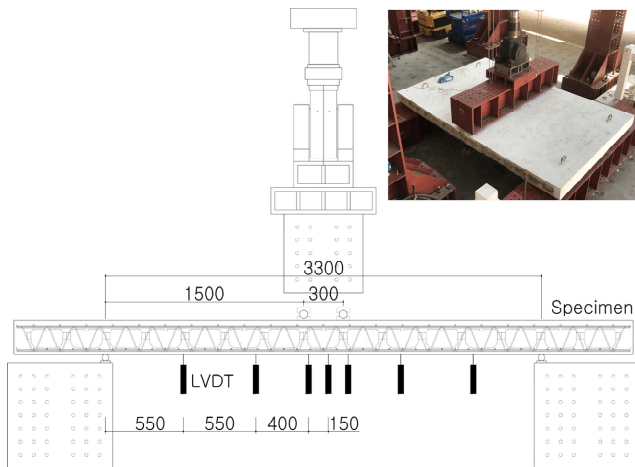


Fig. 8 Test set-up for residual flexural strength

5. 잔존강도 평가 실험 결과 및 분석

5.1 파괴거동 및 균열양상

화해를 입은 중공슬래브의 잔존강도 실험결과를 Table 6 및 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 모멘트-곡률 곡선을 살펴보면, 모든 실험체가 전형적인 휨 거동을 보이며 휨 파괴 되는 것을 확인 할 수 있다. 특징적으로, 화해를 입은 중공슬래브의 경우 고온에서 이미 휨 균열이 발생한 상태이기 때문에 초기균열에 의한 휨 강성 저감이 관측되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

실험체의 휨 균열의 진행 상태를 살펴보기 위하여, 슬래브 중앙부의 균열 상태를 확인하였으며, 휨 균열은 재하여부와 상관없이 유사한 양상을 보임을 확인 할 수 있다. 가력 초기에는 기존에 발생한 휨 균열이 진전되는 경향을 보였다. 하중이 증가됨에 따라 Fig. 10과 같이 추가적인 휨 균열이 발생 하였으며, 기존의 균열폭이 증가하며 최종 파괴되었다.

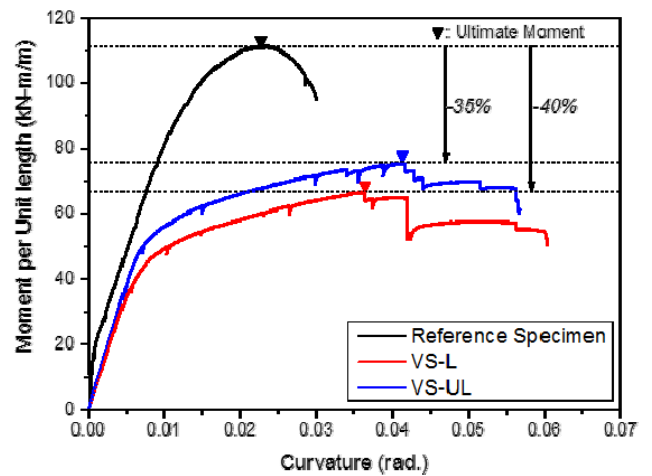


Fig. 9 Moment-curvature curve

Table 6 Temperature distribution of voided slab specimens

Specimen	M_{nf} (kN·m/m)	P_u (kN·m/m)	δ_u (mm)	M_u (kN·m/m)	Curvature (radian)	Flexural Stiffness (S) [(kN·m/m)/rad.]	$\frac{M_{nf}}{M_{nf,Ref}}$	$\frac{M_u}{M_{u,Ref}}$	$\frac{M_u}{M_{nf}}$	$\frac{S}{S_{Ref}}$
Reference	92.8	148.4	37.6	111.3	314.6	8880	1.00	1.00	1.20	1.00
VS-L	86.2	88.9	59.7	66.7	0.036	6510	0.93	0.60	0.77	0.73
VS-UL	92.6	100.4	68.1	75.3	0.041	7549	0.99	0.68	0.81	0.85

Reference : Reference specimen of voided slab unexposed to fire

M_{nf} : Nominal flexural strength per unit length with the reduction of material strength

M_u : Ultimate flexural strength per unit length

P_u : Ultimate flexural load per unit length

δ_u : Deflection of center of specimen at P_u

S : Slope of moment-curvature curve from the origin point to $0.6P_u$

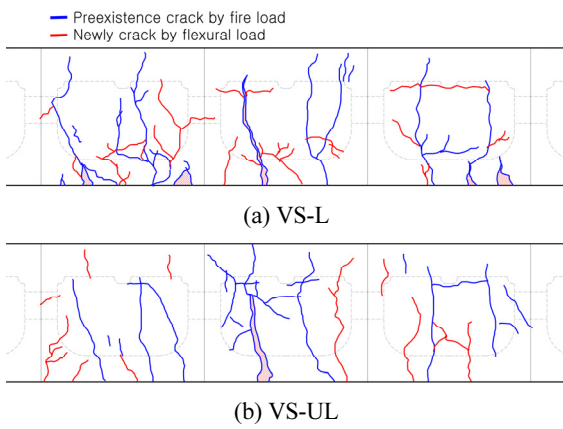


Fig. 10 Crack pattern of mid-span of slab specimen

5.2 잔존 휨 강성

화해를 입은 중공슬래브의 잔존 휨 강성을 평가하기 위하여, 사용하중 상태에서의 휨 강성을 비교하였다. 사용하중은 극한 휨강도의 60%로 가정하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 휨 강성 비교 결과, 화해를 입은 중공슬래브의 경우 화해를 입지 않은 중공슬래브에 비해 약 23%~27%의 강성 저감이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 재하 여부에 따른 휨 강성 저감을 비교해 보았을 때, 재하 실험체가 비재하 실험체에 비해 약 15%의 강성이 저하되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결과로 보았을 때, 재하여부가 화해를 입은 중공슬래브의 휨 강성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

5.3 잔존 휨 강도

화해를 입지 않은 중공슬래브 실험체(Reference)와 화해를 입은 재하 및 비재하 중공슬래브의 잔존 휨 강도를 Table 5에 나타내었다. 실험결과 화해를 입은 중공슬래브의 경우 화해를 입지 않은 중공슬래브에 비해 60%~66% 수준으로 휨 강도가 큰 폭으로 감소되는 것을 확인 할 수 있다.

재하 여부에 따른 잔존 휨 강도를 비교한 결과, 재하 실험체의 잔존 휨 강도가 비재하 실험체의 잔존 휨강도에 비해 11% 저하되는 것을 확인 할 수 있으며, 재하 하중이 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 휨 강도에 부정적인 영향을 주고 있는 것을 확인 할 수 있다.

화해를 입은 중공슬래브 실험체의 잔존 강도 저하 원인을 분석하기 위하여, 기존의 화해를 입은 재료의 잔존응력 모델을 적용하여 잔류 휨 강도를 평가하였다. 화해를 입은 콘크리트 및 철근의 잔존 강도 산정을 위해 허은진이 제안한 식(4)~식(7)의 잔존 강도 예측식을 적용하였으며, 내화실험을 통해 측정된 상부 압축측 콘크리트 및 하부 주인장 철근의 최대 온도를 사용하였다(Lee and Heo, 2001).

$$f_{cT} = r_{cT} \times f_{ck} \quad (4)$$

$$r_{cT} = 1.005 - \left(\frac{2.868 + 0.0351H}{10^4} \right) T + \frac{6.67}{10^5} H \quad (5)$$

(for $20 < T < 400$)

$$f_{yT} = r_{sT} \times f_y \quad (6)$$

$$r_s = \begin{cases} 1.0 & (20 \leq T \leq 600) \\ 1.0 - \frac{T-600}{1600} & (600 < T) \end{cases} \quad (7)$$

f_{cT} : 온도 $T^\circ\text{C}$ 에서의 콘크리트 응력

r_{cT} : 온도 $T^\circ\text{C}$ 에서의 콘크리트 압축강도 잔존율

f_{yT} : 온도 $T^\circ\text{C}$ 까지 가열 후 냉각된 철근 항복강도

r_{sT} : 온도 $T^\circ\text{C}$ 까지 가열 후 냉각된 철근 항복강도 잔존율

T : 가열온도($^\circ\text{C}$)

H : 가열시간(min)

분석결과, 고온에 노출된 재료의 잔존 강도를 통해 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 휨 강도를 평가하는 방법의 경우, 실제 중공슬래브의 잔존 휨 강도를 과대평가 하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 재하 실험체에서 더 높게 나타나고 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 화해에 의한 슬래브 하부면 콘크리트의 박리에 의한 것으로 판단된다. 슬래브와 같이 피복두께가 상대적으로 얇은 부재의 경우, 하부면 콘크리트 박리에 따른 하부 주인장 철근의 피복두께 손실로 인하여 부착성능 저하가 매우 클 것으로 사료된다. 특히, 중공슬래브의 경우 재하에 따라 하부면 콘크리트 박리 현상이 심해지는 것을 확인하였기 때문에, 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 성능을 평가하기 위해서는 고온 노출에 의한 재료 강도의 저감 뿐만이 아니라, 손상에 의한 철근의 부착성능 저하 현상 또한 고려해야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 재하 조건에 따른 중공슬래브의 내화 거동을 확인한 후, 이를 토대로 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 성능을 평가 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고온에 노출된 중공슬래브의 경우 하중 재하에 따라 슬래브 온도가 전 구간에 걸쳐 상승하는 것으로 나타났으며, 이는 하중재하에 따라 휨 균열이 조기에 중공 공기층을 관통

하기 때문인 것으로 판단된다.

- 2) 고온에 노출된 중공슬래브는 하중재하에 따른 변형량 및 변형속도의 증가에 의해 슬래브 하부면 콘크리트 박리 현상이 심해지는 것으로 나타났으며, 부분적으로 하부 주인장 철근이 노출 되었다.
- 3) 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 휨 강성의 경우, 화해를 입지 않은 중공슬래브에 비해 약 23%~27% 감소하였으며, 하중재하에 따라 하중을 재하하지 않은 경우에 비해 15%의 강성이 저하되는 것을 확인하였다.
- 4) 화해를 입은 중공슬래브의 잔존 휨 강도의 경우, 화해를 입지 않은 중공슬래브에 비해 약 34%~40% 감소하였으며, 하중재하에 따라 하중을 재하하지 않은 경우에 비해 11%의 강성이 저하되는 것을 확인하였다.
- 5) 기존의 잔존 강도 평가방법은 중공슬래브의 잔존강도를 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 철근의 피복 콘크리트 손상에 의한 철근의 부착성능 저하를 고려하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2016R1C1B1012618, NRF-2015R1D1A1A01059989)

References

- ACI 216R-89 (1989), Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements, ACI Committee 216, ACI.
- Cho, B. Y., Yeo, I. H., Kim, H. Y., Kim, H. J., and Kwon, I. K. (2011), A Study on the Fire Resistance Performance of RC Structure Void Slab Using The Lightweight Hollow Sphere, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, KIFSE, 25(6), 89-97.
- Chung, J. H., Cho, H. J., Lee, S. C., Choi, H. K., and Choi, C. S. (2012), An Experimental Study on the Fire Resistance Performance for the Donut Type Biaxial Hollow Slab, Journal of Korea Architectural Institute, AIK, 28(12), 3-10.
- Harmathy, T. Z. (1970), Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperature, Journal of Material, JMLSA, 5(1), 47-74.
- Kim, H. Y., Kim, H. J., Cho, B. Y., Yeo, I. H., and Kwon, I. K. (2011), An Experimental Study on the Fire Behavior of Concrete Void Slab under Standard Fire with Loading Condition, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, KIFSE, 25(6), 64-72.
- KSD 3504 (2016), Steel bar for concrete reinforcement, Korean Agency for Technology and Standards, 1-31.
- KS F 2257-1 (2014), Methods of fire resistance test for elements of building construction, Korean Agency for Technology and Standards, 1-25.
- KS F 2405 (2010), Standard test method of test for compressive strength of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 1-6.
- Lee, S. H., and Heo, E. J. (2001), Numerical Study on Flexural Strength of Reinforced Concrete Members Exposed to Fire, Journal of the Korea Concrete Institute, KCI, 13(3), 195-205.
- Mohamedbhai, G. T. G. (1986), Effect of Exposure Time and Rates of Heating and Cooling on Residual Strength of Heated Concrete, Magazine of Concrete Research, MCR, 38(136), 151-158.

Received : 08/22/2017

Revised : 09/04/2017

Accepted : 09/11/2017

요 지 : 본 연구는 하중 조건에 따른 화해를 입은 중공슬래브의 잔류성능에 대한 실험적 연구이다. 이를 평가하기 위하여, 하중조건을 변수로 하는 2개의 중공슬래브 실험체를 제작하여 ISO 834 표준화재 곡선에 따라 120분간 가열하였으며, 이를 상온으로 냉각하여 잔류 휨 성능을 평가하였다. 실험결과 하중조건에 따라 중공슬래브의 온도분포가 상이한 것으로 나타났으며, 재하 실험체가 비재하 실험체에 비해 전단면에 걸쳐 온도가 빠르게 상승하는 경향을 보임을 확인하였다. 고온으로 가열 후 냉각한 중공슬래브의 잔류 휨 강도의 경우 화해를 입지 않은 중공슬래브에 비해 34%~40% 감소하는 것으로 나타났으며, 휨 강성의 경우 15%~23% 감소하는 것으로 나타났다. 하중을 재하 한 중공슬래브의 경우 재하하지 않고 가열한 중공슬래브에 비해 약 10%의 강도 저감이 발생하였으며, 휨 강성의 경우 15% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 하중 재하에 따른 휨 균열에 의해 슬래브의 하부 주인장 철근의 온도가 비재하 실험체에 비해 높아지며, 하부철근 피복의 박리현상이 가속화되기 때문인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 중공슬래브, 잔류성능, 온도분포, 하중조건
