



고온에 노출된 중공슬래브의 잔존성능 추정방법

최현기^{1)*} · 정주홍²⁾ · 최창식²⁾

¹⁾경남대학교 소방방재공학과 ²⁾한양대학교 건축공학과

Estimation Method of Residual Performance for Hollow Slab at Elevated Temperature

Hyun-Ki Choi,^{1)*} Joo-Hong Chung,²⁾ and Chang-Sik Choi²⁾

¹⁾Dept of Fire and Disaster Prevention Engineering, Kyungnam University, Changwon, 631-701

²⁾Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

ABSTRACT Generally, the reinforced concrete slab has great fire resistance performance because concrete has excellent thermal material properties under fire. But, in the case of hollow slab, it will be expected that hollow slabs have different temperature distribution and fire endurance performance compare to reinforced concrete slab. Because hollow slab has internal void space that occurs decreasing regenerative effect of concrete and formation of internal air layer. Evaluation method for fire resistance performance of hollow slabs was proposed using wickström's method. For the casual use of evaluation, simplified method was proposed which was limited to solid slab and donut type hollow slab which was developed by authors of this research paper. Also, verification on proposed method was performed by comparing results of fire experiment for hollow slab and evaluation results. Proposed method of the results of this study was possible to predict the residual strength and temperature distribution of slabs under fire.

Keywords : hollow slab, fire resistance performance, residual strength, deflection

1. 서 론

건축물의 내화설계법은 일정 기준을 만족하도록 의무화된 사양적 내화설계법과, 점차 발전되고 있는 건설 기술을 포괄할 수 있도록 유연도를 갖춘 성능적 내화설계법으로 나눌 수 있으며, 건축물의 공간조건, 가연물, 환기조건, 발화원인 등을 판단하여 효과적인 내화설계 방법을 채택하는 것이 일반적이다. 국내 내화구조는 법정내화구조(사양적구조)와 인정내화구조로 규정하고 있으며, 화재 상황에서 철근콘크리트 구조부재의 내화성능 특성은 철근콘크리트 구조부재의 표준-화재실험(Standard Fire Test)을 통해 표준화재 온도-시간 곡선에 따라 공기를 가열하여 구조 부재의 거동을 평가하고 있다. 그러나 이러한 사양적 내화설계 기준으로는 고온 시 단면 내의 열응력을 고려한 구조물의 거동, 강도 저하 정도, 재하하중의 영향을 정확히 파악하기 어렵다.

Eurocode 내화설계에서는^{1,2)} Tabulated data를 이용하는

방법, Simplified Calculation, Advanced Calculation의 총 3가지 방법을 제시하고 있으며, Tabulated data를 이용하는 방법은 국내의 사양적 내화 설계기준과 유사하게, 요구 내화시간을 만족하기 위한 최소 슬래브 두께의 피복두께를 제시하는 방법이다. Advanced Calculation의 경우 복잡한 형상을 가지거나 합성부재 등에 적용되는 방법으로 전산 해석을 통해 부재의 온도분포를 파악하고 각 재료에 온도를 반영하여 화재 시간에 따른 강도를 예측하는 방법이다. Simplified Calculation의 경우 500°C isotherm method과 Zone method에 따라 각 부재의 깊이별 온도분포를 제안된 식을 통해 산정하여 화재에 대한 부재의 내화성능을 추측하는 방법이다.^{3,4)}

일반적으로 철근콘크리트를 적용한 구조부재의 경우, 다른 구조재료에 비해 콘크리트의 열확산계수가 낮고, 고온에서 완전붕괴에 도달하기까지 에너지 소산능력이 높아 우수한 내화구조로 평가받고 있다. 그러나 중공슬래브와 같이 구조체 중량감소를 위해 별도의 중공형성체를 슬래브에 설치하는 경우, 화재 발생 시 중공형성체(플라스틱, 스티로폼 등) 재료적 특성과 구조적 변화에 의해 열적특성은 일반 RC 슬래브와는 다르다. 중공슬래브는 슬래브 복부에 중공부가 형성되어 슬래브 유효단면 감소로

*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr

Received June 2, 2014, Revised July 3, 2014,

Accepted July 3, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

인한 콘크리트의 축열 효과 감소, 고온 가열 시 중공 내부의 공기층 형성으로 인한 슬래브의 차열성능 증가, 온도 상승 시 중공 내부에 발생된 공기층의 압력으로 인한 폭렬 현상 등 일반 RC 슬래브와는 다른 거동 특성을 보인다. 특히 내부 중공부에 의해 발생하는 중공 슬래브의 온도분포 변화에 대한 영향은 내화설계 시 중요한 변수가 될 것으로 판단된다.^{5,6)} 화재에 노출된 콘크리트 부재의 열적 손상을 평가하는 방법은 노출된 화재의 정도에 따라 정량적인 강도 감소율을 적용한다. 화재로 인한 단면 손실량을 정의하여 부재의 내화성능을 예측하는 방법으로서, 대부분 표준화재조건하에서 산정된 강도 감소율을 정의하고 있다. 그러나 중공 슬래브의 경우 일반 RC 슬래브와는 다른 열적특성으로 인해 그 적용성을 검증해야 한다.

본 연구에서는 중공슬래브의 내화성능 평가 실험을 바탕으로 중공슬래브의 열적변화 특성을 기반으로 휨강도 및 처짐과 같은 구조적 특성을 추정하는 방법을 제안하고자 하였다. 이를 위해 기존 RC 슬래브와는 다른 중공 슬래브의 내부온도분포와 철근의 온도분포 특성을 분석하였으며, 이를 이용하여 Eurocode에서 제안하고 있는 재료의 강도저감계수를 이용하여 화재 시 중공슬래브의 강도 및 처짐을 예측하고자 하였다.

2. 철근콘크리트 구조물의 열적특성

2.1 콘크리트의 강도감소

ACI 216⁷⁾에서는 온도증가에 따른 압축강도의 변화는 콘크리트에 사용된 골재의 종류에 따라 규정하고 있다. 압축강도의 변화는 화재로 인한 온도가 냉각된 이후에 대한 것으로 화재로 인해 발생하는 최대온도에 따라 압축강도를 추정할 수 있다. Fig. 1(a)는 규산질 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도 변화로서 내화시험 중 압축강도비에 따른 하중 재하의 영향을 평가하였으며, 대기 상태로 냉각시킨 후 압축강도를 초기 압축강도의 변동 특성을 규정하였다.

Eurocode 2²⁾에서는 화재 손상을 받은 콘크리트의 압축강도는 골재 종류별 발생온도 크기에 따른 감소계수를 반영하여 식 (1)에 의해 결정하도록 하고 있다. 발생온도에 따른 압축강도 감소계수의 분포는 Fig. 1(b)와 같다.

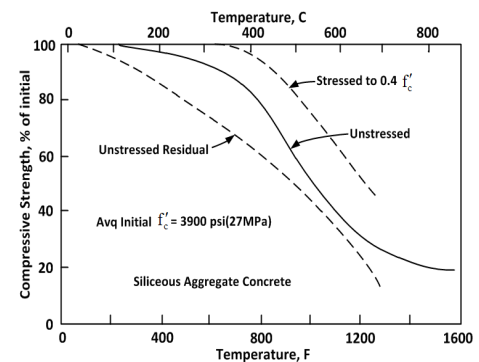
$$f_{c,\theta} = K_c(\theta) f_{ck} \quad (1)$$

여기서, $f_{c,\theta}$ 는 발생온도가 θ ℃일 때의 콘크리트 압축강도, f_{ck} 는 20℃에서 콘크리트 압축강도, $K_c(\theta)$ 는 발생온도에 따른 콘크리트 강도의 감소계수이다.

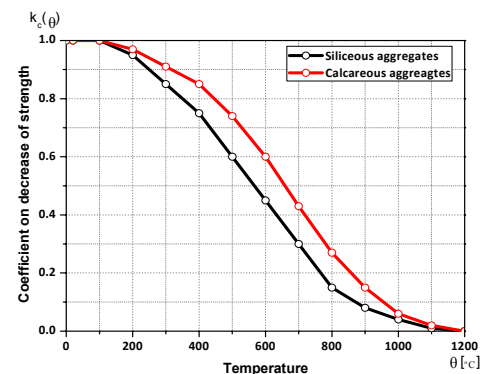
2.2 철근의 항복강도

ACI 216⁷⁾에 제시된 온도증가에 따른 철근 항복강도의

변화로 Fig. 2(a)와 같이 제시하고 있으며, 최대 및 최소 값의 규정을 사용하고 있다. Eurocode 2²⁾에서 규정하는

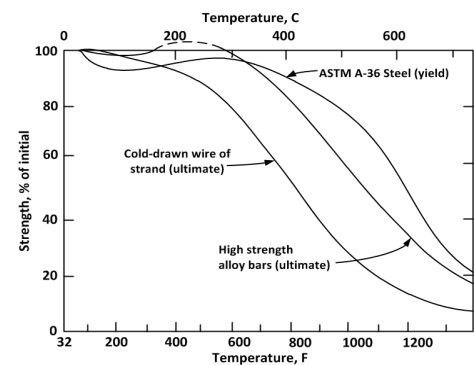


a) ACI 216

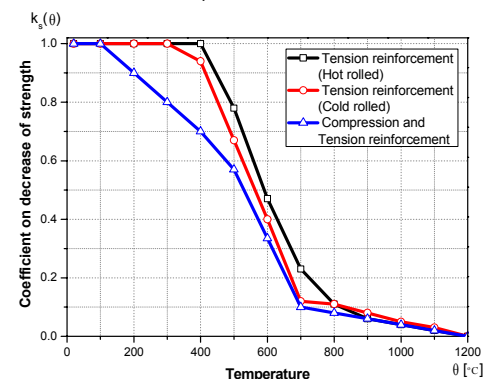


b) Eurocode

Fig. 1 Strength of certain concrete at high temperatures



a) ACI 216



b) Eurocode

Fig. 2 Strength of certain steels at high temperatures

발생온도에 따른 철근의 항복강도 감소계수는 Fig. 2(b)와 같다. 항복강도 감소계수가 결정되면 화재로 인한 발생온도 크기에 따른 손상된 철근의 항복강도는 식 (2)에 의해서 산정된다.

$$f_{y,\theta} = K_s(\theta) f_y \quad (2)$$

여기서, $f_{y,\theta}$ 는 발생온도가 $\theta^\circ\text{C}$ 일 때의 철근의 항복강도이며, f_y 는 20°C 에서 철근의 항복강도, $K_s(\theta)$ 는 발생온도에 따른 철근 항복강도의 감소계수이다.

2.3 온도분포 추정

고온에서의 철근 콘크리트 부재의 거동 및 잔존 강도를 평가하기 위해서는 부재단면의 온도분포 산정이 필수적이다. ACI 및 Eurocode에서는 부재의 형태에 따라 단면내의 온도분포를 규정하고 있으며, 철근 콘크리트 부재의 온도 분포 추정식은 경험식으로써 Wickström 및 Hertz가 제안한 방법을 기초로 화재 시 콘크리트 부재의 깊이별 온도를 산정할 수 있는 간략한 식을 제시하고 있다.

Wickström⁸⁾은 화재 시 일반 철근 콘크리트 부재의 내부온도 추정을 Eurocode의 Parametric 곡선 및 ISO의 표준 화재곡선을 바탕으로 비선형 열 해석 결과를 분석하였으며, 다음과 같이 부재 내부온도 추정 식 (3), (4)를 제시하였다.

Uniaxial Heat Flow의 경우,

$$\theta_x = n_x n_w \theta_f \quad (3)$$

Biaxial Heat Flow의 경우,

$$\theta_{xy} = (n_w(n_x + n_y - 2n_x n_y) + n_x n_y) \theta_f \quad (4)$$

여기서, n_w ($n_w = 1 - 0.0616t^{-0.88}$)의 경우 부재의 가열표면의 온도 계수를 나타내는 함수이며, n_x ($n_x = 0.18 \ln u_x - 0.81$)는 부재 내부 온도 분포 계수를 나타내는 것으로 재료의 특성에 따라 달라지는 열적특성을 고려한 함수이다.

3. 중공슬래브의 내화실험 및 결과

3.1 실험개요

본 연구에서는 배합강도 30 MPa의 콘크리트와 플라스틱(PP)재질의 도넛형 중공형성체를 적용하여 중공슬래브의 두께(210 mm, 250 mm) 및 중공형성체와 하부철근 사이의 피복두께(0 mm, 12 mm)를 실험변수로 하여 Table 1과 같이 내화실험체를 계획하였다. 내화실험이 수행된 도

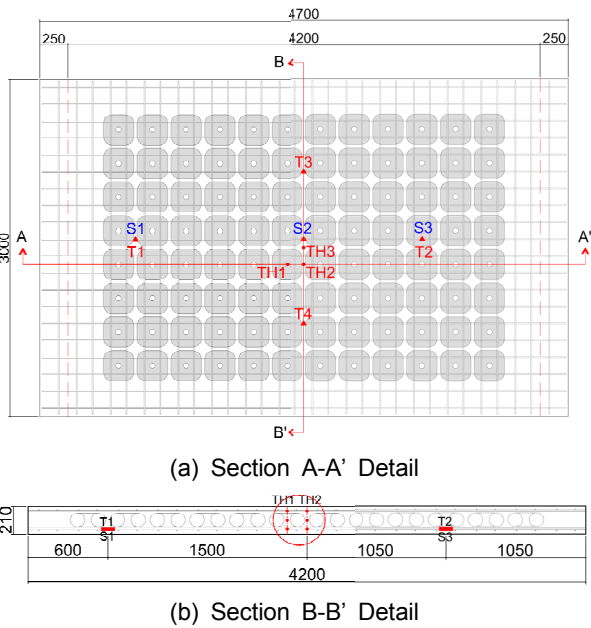


Fig. 3 Details of specimen

Table 1 Specimen properties and parameter

Specimen	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Clear Span (mm)	Concrete cover thickness of voids		Void-shaper			Cover thickness of bottom rebar (mm)		
					Top (mm)	Bottom (mm)	Shape	Material	height (mm)			
GB210-100	4700	3000	210	4200	52	58	Donut	Poly- propylene	100	33		
GB210-120			210		44	46			120			
GB250-140			250		52	58			140			
Specimen	Material properties				Mix proportion of concrete							
	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Top Rebar	Bottom Rebar	Design strength (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Weight ratio (kg/m^3)				
								Water	Cement	Sand	Coarse Aggregate	Admixture
GB210-100	35.2	400	D10	D13	40	42.1	171	193	406	817	942	2.44
GB210-120												
GB250-140												

Table 2 Results of fire test

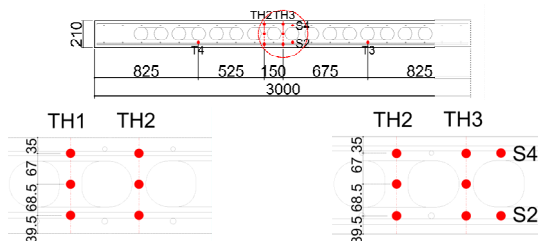
Specimen	Displacement (mm)		Rate of displacement (mm/min)		The increase of temperature at unheated surface (°C)		Fire resistance (minutes)
	Limitation	Measured	Limitation	Measured	Average	Maximum	
GB210-100	210	117.4	9.33	2.8	63.2	88.3	120
GB210-120	210	58.3	9.33	2.8	7.06	18.1	36
GB250-140	176.4	100.2	7.8	8.5	67.4	78.9	120

넛형 이방향 중공슬래브 실험체 형상은 Fig. 3 및 Table 1과 같이 양쪽 각각 250 mm의 지지대 부분을 포함하여 4700 mm × 3000 mm 크기의 직사각형 형태로 제작되었다. 내화실험은 KS F 2257-5 건축부재의 내화시험 방법에 규정된 조건에 따라 수행하였다. 가열 온도의 경우 ISO 834 표준시간-가열온도곡선에 따라 슬래브 하부면을 120분 동안 가열하였다.

3.2 실험결과

중공슬래브에 대한 내화실험을 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 실험체 모두 $L/30=140$ mm의 기준을 초과하지 않았기 때문에 변형률을 제외한 변형량에 대해서만 내화성능을 평가하였다.

하중지지력 평가 시 목표 내화시간인 2시간 동안 실험체 GB210-100의 경우 변형량 117.4 mm, 변형률 2.8 mm/min로 허용변형량 210 mm를 초과하지 않았으며, GB250-140의 경우 변형량 100.2 mm, 변형률 8.5 mm/min으로 허용변형량 176.4 mm의 기준을 초과하지 않았다. 이면상승온도 또한 GB210-100의 경우 평균 63.2°C, 최고 88.3°C, GB250-140의 경우 평균 67.4°C, 최고 78.9°C로 이면상승온도 기준을 초과하지 않았다. 또한 GB210-120의 경우 평균 7.06°C 최고 18.1°C로 기준을 초과하지 않았다.



(a) Section A-A' (center) (b) Section B-B' (center)

Fig. 4 Location of thermocouple

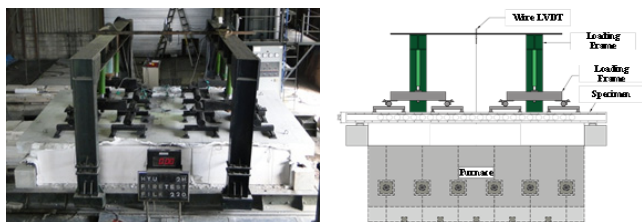


Fig. 5 Test set-up

이와 같이 내부피복두께 12 mm를 확보한 도넛형 이방향 중공슬래브 GB210-100 실험체와 GB250-140 실험체의 경우 내화실험 수행결과 변형량과 이면상승온도의 기준치를 초과하지 않으며 수평부재의 내화성능인 120분의 내화성능을 만족하였다. 반면에 내부피복이 없이 철근과 중공면이 맞닿아있는 GB210-120 실험체의 경우 실험이 진행되는 동안 각각의 기준치를 초과하지는 않았지만 수평부재의 필요 내화성능인 120분의 내화성능을 만족하지 못하고 36분에 콘크리트 하부면의 폭렬현상 발생으로 추가적인 가열 없이 실험을 종료하였다.⁶⁾

4. 중공슬래브의 온도분포

4.1 중공슬래브의 온도 분포 추정방법 제안

완전하게 시험이 종료된 두 실험체를 대상으로 Fig. 6에 Wickström 제안식을 적용하여 도넛형 중공슬래브의 하부철근 온도분포를 비교하여 나타내었다. 가열 시간 2시간일 때 중공슬래브의 내화 실험결과와 Wickström 제안식과 비교 시 16%의 오차가 발생하였으며, 실험결과에 비해 낮은 온도분포를 예측하는 것으로 나타났다. 이는 일반 철근콘크리트 슬래브와 달리 내부 중공형성체의 공기층 형성으로 인해 공기층에 의한 열확산계수와 콘크리트의 열확산계수의 차이로 판단된다.

이에 중공슬래브 공기층 형성에 의한 단열현상을 내화성능평가에 적용하기 위하여 재료의 열확산 특성 반영을 Fig. 7과 같이 가정하였다. 공기층을 가지고 있지 않는 일

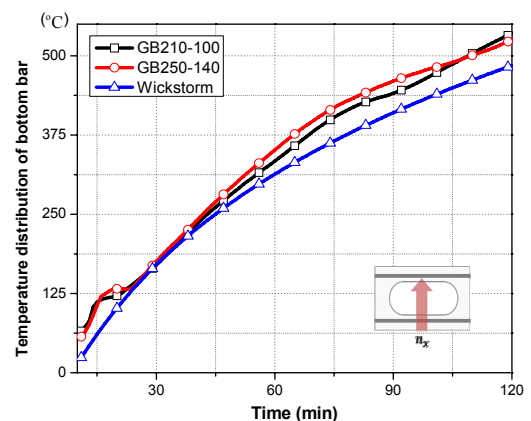


Fig. 6 Comparison of fire test and Wickström's Method

반 슬래브의 경우 Fig. 7(a)와 같이 열확산이 하부 가열면에서 상부면으로 진행된다고 설정하였으며, 확산함수 n_x 로 나타내었다.

반면, Fig. 7(b)와 같이 내부에 공기층을 가지고 있는 중공슬래브의 경우 기본적인 열확산은 화재에 노출된 하부면에서 상부면으로 진행(정방향)된다고 설정하였으나, 공기층의 존재가 콘크리트의 열확산을 방해하는 것으로 가정하여 상부면에서 하부면으로(역방향) 열확산 정도를 표현하였다. 두 경우를 고려하여, 정방향 확산 함수는 $n_{x,bottom}$ 으로, 역방향 확산 함수는 $n_{x,top}$ 으로 가정하였다. 이러한 가정 사항을 기반으로 중공슬래브의 온도 분포 추정방법은 Fig. 8와 같이 $n_{x,bottom}$ 함수의 경우, 일반 철근콘크리트 슬래브와 같다고 가정하여, Wickström 제안식을 따라 산출하였으며, $n_{x,top}$ 함수는 중공슬래브 단위 모델을 대상으로 범용 유한요소 해석프로그램인 Ansys를 사용하여 열전달해석을 수행하였다. 상기 해석을 바탕으로 실험 시 설치된 열전대 값과 비교하여 중공슬래브 하부면에서 상부면으로 향하는 높이에 따른 회귀분석을 통해 산출하였다. 슬래브의 하부면에서 상부면으로 향하는 높이에 따라 내부온도분포를 통하여 산출하였다. 앞서 $n_{x,top}$ 함수와 $n_{x,bottom}$ 함수를 통해 산정된 콘크리트 및 공기의 열확산을 모두 고려하기 위하여 제시한 두 함수를 합성한 함수 $n_{x,sum}$ 를 통하여 중공슬래브 내부온도분포를 구체적으로 산출할 수 있도록 하였다.

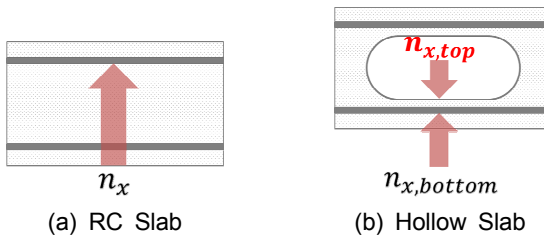


Fig. 7 Assumption of heat flow

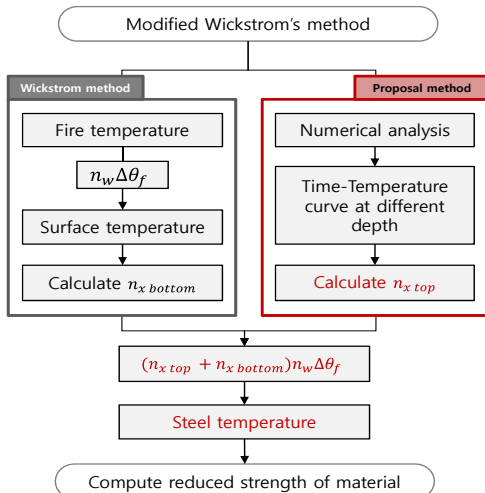


Fig. 8 Comparison between calculate methods in Wickström's method and proposed method

4.2 제안된 온도 분포 산정법의 적용성

제안된 중공슬래브의 온도분포 추정방법을 적용하기 위하여 중공슬래브 단위모델을 대상으로 열전달해석⁵⁾과 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 확산 함수 $n_{x,bottom}$, $n_{x,top}$, $n_{x,sum}$ 을 산출하였으며, 구체적인 결과는 Fig. 9와 같다. 이는 n_x 가 가열시간과 재료의 열적특성의 함수이므로 가열시간에 따른 함수값의 변화를 구체적으로 보여주고 있다. 이방향 중공슬래브의 공기층을 고려하여 산출된 역방향 함수인 $n_{x,top}$ 은 식은 다음과 같다.

$$n_{x,bottom} = 0.18 \ln u_x - 0.81 \quad (5)$$

$$n_{x,top} = 0.033 \ln u_x - 0.109 \quad (6)$$

산출된 함수인 식 (5), (6)를 적용하여 제안된 방법의 신뢰성을 확보하기 위해 도넛형 이방향 중공슬래브의 내화실험결과와 제안된 온도추정방법을 비교하였다. Fig. 10은 Wickström's method⁸⁾와 제안된 방법을 대상으로 화재 노출 시 하부철근의 내부 온도변화를 산출하였으며, 중공슬래브의 내화 실험결과와 비교하였다.

공기층을 고려하여 제안된 온도추정방법의 결과와 Wickström's method⁸⁾의 결과 비교 시 평균 10% 오차율을 나타냈다.

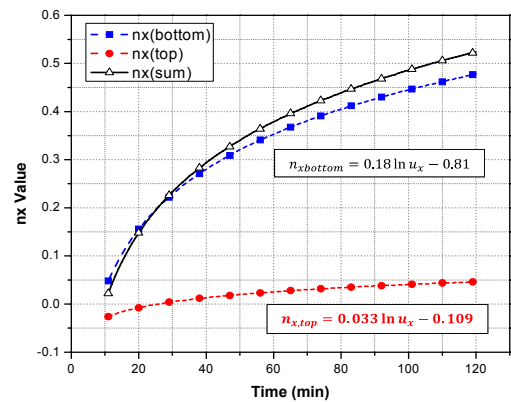


Fig. 9 Influence of thermal diffusivity n_x

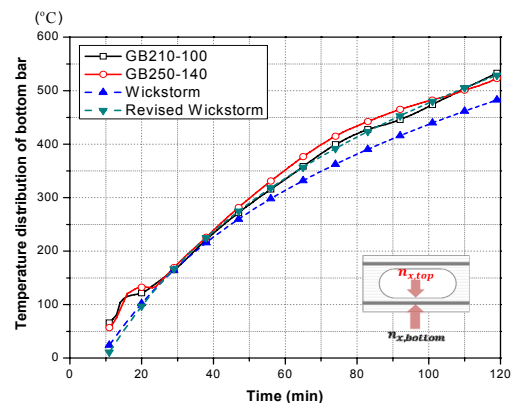


Fig. 10 Temperature distribution of bottom rebar

또한 제안된 방법의 결과와 내화 실험결과 비교 시 평균 0.84% 오차율을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다. 따라서 화재 시 중공부의 공기층을 고려한 중공 슬래브의 내부 온도 추정식에 대한 신뢰성을 확보하였다고 판단된다.

5. 중공슬래브의 잔존성능 평가

5.1 휨 성능추정

철근콘크리트 부재가 화재로 인한 온도증가에 의해서 열손상을 받는 경우, 단면의 저항모멘트는 Eurocode의 내화 설계방법에 의해서 산정이 가능하다. 그러나 Eurocode에서 제안하고 있는 방법은 부재의 정확한 온도 산정을 기반으로 하고 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 중공슬래브의 경우 제안된 방법으로는 정확한 온도 산정이 불가능하다.^{2,10)}

수행된 내화실험 대상 실험체⁶⁾는 단순 지지된 중공 슬래브로서 단면 내에 상부철근과 하부 철근이 배근된 복철근 단면이다. 화재로 인한 온도하중의 영향을 받은 위치는 Fig. 11과 같이 인장 철근이 위치하는 정모멘트가 발생하는 표면부이다. 부재의 압축영역이 고온에 노출되지 않고 인장영역이 고온에 노출되었다고 가정 한다면, 화재 시 인장철근에 의해 부재의 강도저감이 발생한다. 이때 부재의 내화설계방법은 다음과 같다.

$$M_{fire}^* \leq M_f \quad (7)$$

$$M_f = A_s f_{y,T} (d - a_f / 2) \quad (8)$$

$$a_f = A_s f_{y,T} / 0.85 f'_c b \quad (9)$$

여기서, A_s 는 철근의 단면적, $f_{y,T} (=k_{y,T} f_y)$ 는 온도변화에 따른 감소된 철근의 항복강도, d 는 부재단면의 유효깊이, a_f 는 화재에 의해 감소된 응력블록 깊이, f'_c 는 콘크리트의 압축강도, b 는 보나 슬래브 부재의 폭을 나타낸다.

화재로 인한 손상을 입은 복철근 단면의 저항모멘트 (M_f)는 화재 후의 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도에 의해서 결정되는데, 철근의 항복강도 및 콘크리트의 압축강도는 화재로 인한 발생온도의 영향을 크게 받는다.

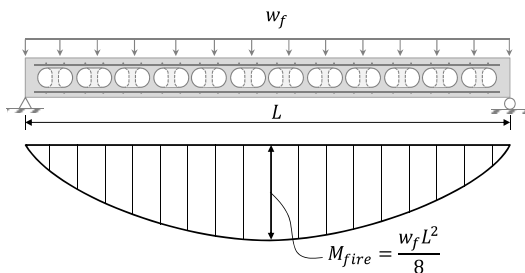


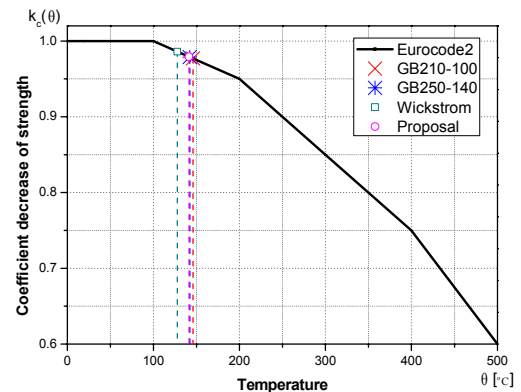
Fig. 11 Moment of hollow slab at high temperatures

화재로 인한 손상 단면의 저항 모멘트는 식 (10)과 같다.

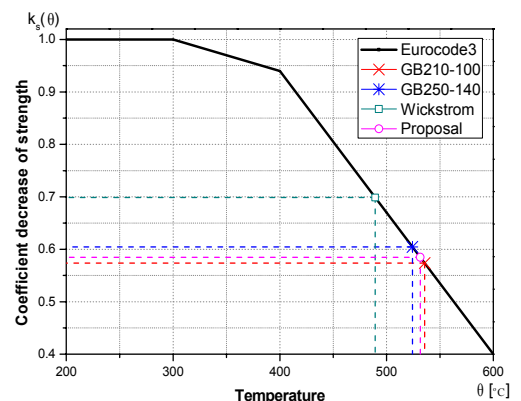
$$\begin{aligned} M_{n,\theta} &= C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \\ &= (A_s - A_s') f_{y,\theta} \left(d - \frac{a_\theta}{2} \right) + A_s' f_{y,\theta} (d - d') \\ &= 0.85 f_{c,\theta}' a_\theta b \left(d - \frac{a_\theta}{2} \right) + (E_{s,\theta} \epsilon_s') A_s' (d - d') \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $f_{c,\theta}'$ 는 최대발생 온도가 θ 일 때 콘크리트의 압축강도, $f_{y,\theta}$ 는 최대발생 온도가 θ 일 때 철근의 항복강도, $E_{s,\theta}$ 는 최대발생 온도가 θ 일 때 철근의 탄성계수, a_θ 는 최대발생 온도의 영향을 고려하여 결정되는 등가블록의 깊이, b 는 단면의 폭이다.

제안된 온도추정식을 이용하여 Eurocode에 명시되어 있는 고온 시 콘크리트 압축강도 감소계수와 철근의 인장강도 감소계수를 적용하여 휨강도를 산정하였다. 콘크리트의 경우 내화 설계 시 압축영역 상부의 압축강도를 이용하여 설계하지만 보수적인 평가를 위해 중앙부 콘크리트의 온도를 기준으로 Fig. 12(a)와 같이 고온에 따른 콘크리트의 압축강도계수를 산정하였다. 그 결과 2시간 일 때의 콘크리트 강도 저감율은 Wickström's Method의 경우와 제안된 방법, 각 실험체의 실측값을 비교하였을 경우 약 2%내외의 오차율로 비교적 정확히 예측할 수 있



(a) Strength reduction ratio of concrete



(b) Strength reduction ratio of steel

Fig. 12 Strength reduction ratio of concrete and steel

는 것으로 나타났다.

철근의 경우 안전 측으로 평가하기 위하여 하부철근의 최고온도를 기준으로 Fig. 12(b)와 같이 산정하였다. 내화 실험이 수행된 2시간동안 Wickström's Method의 경우 30% 까지 강도가 저감되었으며, GB210-100 실험체의 경우 42%, GB250-140 실험체의 경우 39%, 제안된 방법의 경우 40%의 강도 저감을 나타내고 있다. 제안된 평가방법과 Wickström's Method의 결과 비교 시 평균 11%의 오차율을 나타내었다. 또한 제안된 평가방법과 중공슬래브의 내화실험 결과 비교 시 평균 2.7% 오차율을 나타내고 있다. 따라서 제안된 방법을 이용하여 화재 시 도넛형 이방향 중공 슬래브의 휨강도평가를 수행할 경우(Fig. 13) Wickström's Method 보다 정확한 휨강도평가가 가능한 것으로 판단된다. 또한, 콘크리트와 철근의 강도 저감율로 미루어 보아 화재 시 콘크리트의 압축강도보다 철근의 인장강도에 의해 부재의 강도감소에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

5.2 중공슬래브의 처짐 평가

화재 시 중공슬래브의 사용성 평가에 대한 정량적인 평가를 위해 기존의 역학적 처짐법과 중첩법을 이용하여 처짐 평가 방법을 제안하였다. 화재 노출 시 휨 부재의 처짐 발생의 원인으로는 크게 재하하중에 의한 처짐($\nu_{M,me}$)과 열하중에 의한 처짐($\nu_{\phi,th}$)으로 나누어진다. 본 연구에서는 Fig. 14와 같이 각각의 처짐을 단일요소로 가정하여

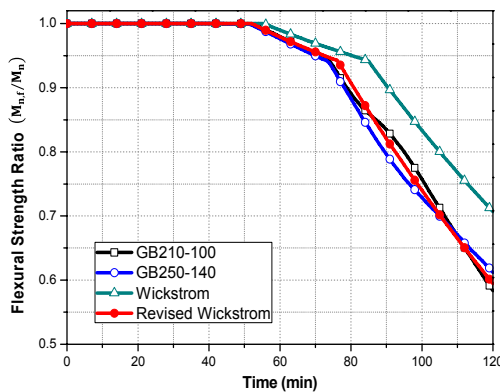


Fig. 13 Moment ratio of hollow slab ($M_{n,f}/M_n$)

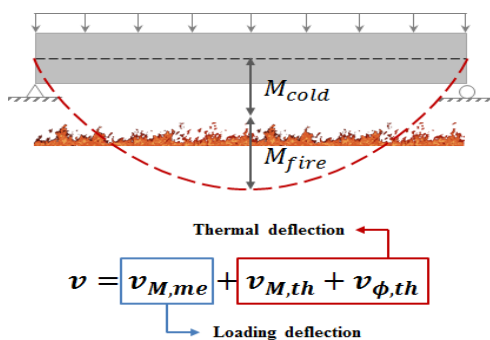


Fig. 14 Assumption of deflection

재하하중에 의한 처짐과 열 하중에 의한 처짐을 산정 후 합하는 형태로 처짐 평가 방법을 산정하였다.

각 산정식을 살펴보면, 재하하중에 의한 처짐($\nu_{M,me}$)의 경우 $k=M/EI$ 의 기본적인 이론에서 접근하여 적분을 통해 처짐을 산정하였고, 열 하중에 의한 처짐의 경우, 두 가지의 가정 사항을 통해 산정하였다. 첫 번째는 열 하중에 의한 처짐이 단부에 모멘트 의해 발생한 것으로 가정한 것이다. 단순 부재에 휨이 발생했을 경우로 일반적인 곡률유도 과정에 따라 식을 산정하였다. 그에 따른 처짐 산정식은 다음과 같다.

$$\nu_{\phi,th} = -\frac{\phi_{th}}{2}x^2 + \frac{\phi_{th}}{2}lx \quad \phi_{th} = -\frac{\epsilon_{total}(T)}{h} \quad (11)$$

$$\epsilon_{total}(T) = \epsilon_{th} + \epsilon_{creep} \quad (12)$$

$$\nu_{\phi,th} = \frac{2l}{\pi} \sqrt{\epsilon_{total}(T) + \frac{\epsilon_{total}(T)^2}{2}} \quad (13)$$

여기서, ϕ_{th} 는 열하중에 의한 곡률, x 는 부재의 단부에서 중심까지의 거리, l 은 부재의 길이, $\epsilon_{total}(T)$ 는 열 하중에 의한 변형률, h 는 측정된 온도변화의 깊이를 나타낸다. 두 번째는 열 하중에 의한 처짐이 단부에 축력에 의해 발생한 것으로 가정한 것이다. 열 하중에 의한 부재 전체에 의한 처짐이 아닌 주철근의 변형증가에 따른 처짐으로 추정하고 축력에 따른 처짐식을 산정하였다. 열 변형률의 경우 Eurocode^{1,2)}에 제시되어 있는 철근의 열 변형률을 적용하였으며, 크리프에 의한 변형률에 경우 선행연구 제안식⁹⁾을 적용하였다.

제안된 방법을 적용하여 도넛형 이방향 중공슬래브의 처짐 평가를 수행하기 위해 실험체 GB210-100의 하부철근 온도를 이용하였다. 이는 이방향 중공 슬래브의 처짐에 대해 보수적인 평가를 하기위해 하부철근의 최대 온도값을 이용하였다. 부재 단부의 모멘트와 축력을 고려하여 제안된 방법에 따라 처짐 산정 결과 Fig. 15와 같이

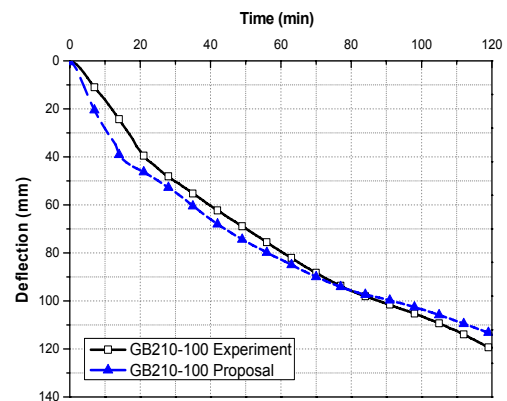


Fig. 15 Comparison with test and proposed method for deflection

나타났다. 제안된 평가방법과 내화실험에 따른 결과 비교 시 온도하중을 모멘트나 축력으로 변화시키는 것에 관계없이 2시간일 때 평균 4.0%의 오차율을 보였다. 반면 2시간동안의 제안된 평가방법과 내화실험결과에 따른 처짐 산정결과 비교 시 휨모멘트에 의한 처짐 산정의 경우 선형분포의 결과를 나타내었으며, 축력에 의한 처짐 산정의 경우 내화실험과 유사한 온도분포를 나타내고 있다. 이에 따라 중공슬래브의 처짐 평가 시 제안한 처짐 평가 방법이 더 적합한 것으로 판단된다.

6. 결 론

중공슬래브를 Wickström's Method에 적용하여 온도추정을 수행해 본 결과, 중공슬래브의 내화성능에 대해 과대평가하는 경향을 보이고 있었다. 이는 Wickström's Method가 중공의 영향을 고려하지 못하고 콘크리트 재료에 대한 영향만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다. 이에 중공부의 단열효과를 고려한 온도 추정식을 제안하였으며, 중공슬래브를 제안된 온도 추정식을 바탕으로 강도평가 방법에 따라 수행하였다.

그 결과 상온에서보다 40%의 강도 저감이 발생하였으며, 제안된 방법과 실험결과와 비교 시 2.7% 오차로 제안된 방법을 통해 신뢰성 있는 강도평가가 가능한 것으로 판단된다. 또한 제안된 처짐 평가방법에 따라 수행한 결과, 제안된 처짐 평가방법과 실험결과와 비교 시 4.0%의 오차율이 발생하였으며, 축력에 의한 처짐 평가방법이 더 적합한 것으로 판단된다.

다만, 중공슬래브의 중공형성에 있어 공기층이 형성되지 않을 경우, 중공부변화(중공체형상, 중공부의 크기, 위치 등)에 대한 적용을 위해서는 추가적 연구가 필요하다.

References

1. CEN(European Committee for Standardization) Eurocode 1, Actions on Structures - Part 1-2:Generalactions-Actions on

- structures exposed to fire, 2002.
2. CEN(European Committee for Standardization) Eurocode 2, Design of Concrete Structures - Part1 -2: Generalrules-Structural fire design, 2004.
3. Anderberg, Y. and Thelandersson, S., Stress and Deformation Characteristics of Concrete, 2-Experimental Investigation and Material Behavior Model, Bulletin No. 54, University of Lund, Sweden, 1976.
4. Hertz, K., Simple Temperature Calculations of Fire Exposed Concrete Constructions, Report No 159, Institute of Building Design, 1981.
5. Choi, H. K. and Choi, C. S., "Analysis Study on Thermal Properties of Hollow Slab at Elevated Temperature," *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, in review.
6. Chung, J. H., Cho, H. J., Lee, S. C., Choi, H. K., and Choi, C. S. "An Experimental Study on the Fire Resistance Performance for the Donut Type Biaxial Hollow Slab," *Journal of Korea Architectural Institute*, Vol. 28, No. 12, 2012, pp. 3-10.
7. ACI 216R-07, Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, ACI, 2007, pp. 1-48.
8. Wickström, A Very simple method for estimating temperature in fire exposed concrete structures, Fire technology Technical report, 46, 1986.
9. Lee, T. G., "Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Members with Vapor Pressure and Creep Models," *Journal of Korea Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 24, No. 4, 2010, pp. 33-40.
10. Yeo, I. H., "Estimation of Residual Strength and Analysis of Fire Resistant Performance Affecting Elements for Fire Damaged Reinforced Concrete Column," *Journal of Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 6, 2013, pp. 83-89.

요 약 일반적으로, 철근콘크리트 슬래브는 재료의 열적특성에 의해 높은 수준의 화재 저항 성능을 보유하고 있다. 그러나, 중공슬래브의 경우 일반 철근콘크리트 슬래브와는 다른 온도분포 및 화재 저항 성능을 보유하고 있을 것으로 예상된다. 중공슬래브는 콘크리트의 축열 효과를 발생시키는 공기층을 만들어내는 중공을 보유하고 있기 때문이다. 이에 연구에서는 중공슬래브의 화재 저항 성능을 평가하는 방법을 Wickstorm이 제안한 방법을 사용하여 제안하였다. 이 연구에서는 본 연구의 연구자가 제안한 도넛형 중공을 보유한 중공슬래브의 화재저항성능에 대한 단순화된 평가 방안을 제시하였다. 또한, 제안된 방법은 중공슬래브에 대한 화재실험을 통해 검증하였다. 이 연구의 결과를 통해 제안된 방법은 화재 발생 이후 중공슬래브의 잔존강도 추정이 가능함을 확인하였으며, 슬래브에 분포되는 온도의 특성을 정확하게 파악할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 중공슬래브, 내화성능, 잔존강도, 처짐