

춤이 깊은 데크플레이트 슬래브의 철근 위치에 따른 온도예측 연구

김환진¹ · 최인락² · 최성모^{3*}

¹석사과정, 서울시립대학교, 건축공학과, ²부교수, 호서대학교 건축토목공학부, ³교수, 서울시립대학교, 건축학부

Study of Temperature Prediction Based on Rebar Location in Deep Deck Plate Slabs

Kim, Hwan Jin¹, Choi, In Rak², Choi, Sung Mo^{3*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

²Associate Professor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

³Professor, Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

Abstract - The deck plate construction method is currently widely used in many buildings in Korea, and the application of deep deck plates is increasing due to their economic efficiency, suitability for long-span applications, and ability to reduce floor height. This study aimed to verify the applicability of the temperature prediction equation for steel reinforcement inside the deck plate slab, as outlined in Eurocode EN 1991-1-2 (2005), specifically for deep deck plates. Two types of deck plates with a height of more than 200 mm, which are commonly used in Korea, were selected. Heat transfer analysis was conducted to determine the temperature distribution of the rebar based on its location within the deck plate. The heat transfer analysis model was validated by comparing it with the results of previous fire tests. Subsequently, a new temperature prediction coefficient for Eurocode was proposed through regression analysis of the results. By applying the coefficients from the proposed temperature prediction equation, the average error rate for the two types of deck plates improved to 0.85 % and 1.71 %, respectively. To further improve the accuracy of temperature prediction, additional coefficients need to be considered based on the location of deck forming.

Keywords - Deep deck plate, Heat transfer analysis, Rebar, Temperature prediction equation, Regression analysis

1. 서론

최근 건축물의 바닥공사에는 경제성과 시공성을 확보하고 공기를 단축시킬 수 있는 데크플레이트 공법이 일반적으로 적용되고 있으며, 강구조 건축물이나 강-콘크리트 합성구조를 적용한 건축물에서는 주로 데크플레이트 공법이 적용되고 있다. 데크플레이트 공법은 하부 강판의 구조설계 반영 여부에 따라 거푸집용 데크플레이트와 합성구조용 데크플레이트로 구분되며, 국

내에서는 내화 문제로 인해 일반적으로 얇은 강판을 적용한 거푸집용 데크플레이트를 사용하고 있다. 최근에는 장스팬 구조에 적용할 수 있으면서도 층고절감이 가능한 춤이 깊은 데크플레이트가 개발되어 적용되고 있다^{[1]-[4]}.

국내에서 주로 사용되고 있는 춤이 깊은 데크플레이트는 춤이 200 mm 이상이며, 데크플레이트는 거푸집용도로 사용되어 데크의 골 하부에 철근을 배근하여 장선구조로 설계되고 있다^{[5],[6]}. 즉, 화재 발생 시 화재에 직접 노출되는 강재 데크플레이트는 내력을 발휘하지 못하므로 추가로 배근한 철근이 인장력을 부담하도록 설계된다. 하지만 장선의 폭이 좁기 때문에 화재에 노출된 춤이 깊은 데크플레이트의 화재 시 거동을 정확히 평가하기 위해서는 장선 슬래브 콘크리트 및 철근의 화재 시 온도분포를 정확히 평가하는 것이 필요하다.

춤이 낮은 골을 갖는 데크플레이트 슬래브 내부 철근

Note.-Discussion open until April 30, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 04, 2023; revised on September 22, 2023; approved on September 25, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-3749

E-mail. smc@uos.ac.kr

의 화재 시 온도 분포에 대한 연구는 많이 이루어졌다. Lamont *et al.*^[7]은 데크플레이트 슬래브의 Cardington 실험에 의한 열전달해석모델을 개발하였고, Gille *et al.*^[8]은 고온 환경에서 데크플레이트 슬래브의 거동 분석을 수행하고 모델링의 적합성을 입증하였다. 또한 Piloto *et al.*^[9]과 Pantousa and Mistakidis^[10]은 열전달해석모델과 유로코드 온도예측식에 의한 데크플레이트 슬래브의 온도를 비교하였다. Bolina *et al.*^[11]은 열전달해석모델과 실험결과, 유로코드 온도예측식에 의한 데크플레이트 슬래브의 온도예측식을 비교하였다. 그러나 춤이 깊은 데크플레이트의 화재 시 온도 분포에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

유로코드 EN 1991-1-2(2005)^[12] Annex D에서는 골형 데크플레이트 슬래브 내부에 배근된 철근의 온도예측식을 제시하고 있다. 이 온도예측식은 Both^[13]의 실험결과를 기반으로 보정된 수치해석을 바탕으로 하여 제시되었으며, 이 연구에서 사용된 데크플레이트 춤의 범위는 50 mm–100 mm이다. 따라서, Both의 제안식을 바탕으로 국내에서 주로 사용되는 춤이 200 mm 이상인 데크플레이트의 적용성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 유로코드 EN 1991-1-2(2005)에서 제시하고 있는 골형 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도예측식이 춤이 깊은 데크플레이트에 적용 가능한지 여부를 검증하기 위하여 국내에서 사용되고 있는 춤 200 mm 이상의 데크플레이트에 대해 열전달해석을 진행하였다. 열전달해석을 통해 표준화재에 2시간 노출된 춤이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 위치에 따른 온도분포를 파악하고 유로코드의 온도예측식과 비교하였다. 더불어 열전달해석결과를 바탕으로 회귀분석을 통해 춤 200 mm 이상의 데크플레이트에 적용할 수 있는 유로코드 온도예측식의 계수를 제안하고자 한다.

2. 유로코드 온도예측식

2.1 골형 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도예측식

유로코드 EN 1991-1-2(2005)가 제시하는 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도예측식을 식 (1)에 나타냈다. 데크플레이트의 형상과 철근의 위치에 따른 5개의 변수와 목표 내화시간에 따른 6개의 계수를 바탕으로 철근의 온도를 예측한다. Table 1에 목표 내화시간에 따른 계수를 나타냈다. 또한 리브 내부 철근의 위치를 결정하는 계수 z 를 식 (2)에 나타냈다. Fig. 1에는 각각의 변수를 데크플레이트 형상과 함께 나타냈다.

$$T_s = c_0 + c_1 \frac{u_3}{h_2} + c_2 z + c_3 \frac{A}{L_r} + c_4 \alpha + c_5 \frac{1}{l_3} \quad (1)$$

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad (2)$$

여기서, T_s : 리브 내 철근의 온도,

u_1, u_2 : 좌우 플랜지까지의 거리(mm),

u_3 : 하부 플랜지까지의 거리(mm),

h_2 : 리브 높이(mm),

z : 철근 위치 계수($\text{mm}^{-1/2}$),

A : 리브의 콘크리트 면적(mm^2/m),

L_r : 리브의 노출 길이(mm/m),

l_3 : 상부 플랜지 폭(mm),

α : 웨브 각도(deg.).

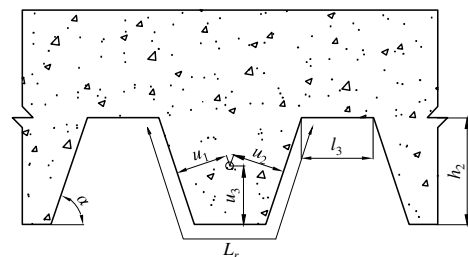


Fig. 1. Parameters for temperature prediction

Table 1. Coefficients for determination of the temperatures of the rebars in the rib

Fire resistance time (min)	c_0 (°C)	c_1 (°C)	c_2 (°Cmm ^{0.5})	c_3 (°Cmm)	c_4 (°C/°)	c_5 (°Cmm)
60	1,191	-250	-240	-5.01	1.04	-925
90	1,342	-256	-235	-5.30	1.39	-1,267
120	1,387	-238	-227	-4.79	1.68	-1,326

2.2 기존 선행연구 분석

Piloto *et al.*^[9]은 춤이 73 mm로 낮은 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도를 예측하기 위한 3차원 유한요소해석모델을 제안하였다. 해석에는 상용 유한요소해석프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 강재와 콘크리트의 완벽한 열 접촉을 고려하여 총 208개의 데크플레이트 슬래브 모델에 대해 표준화재에 1시간 노출된 경우를 가정하여 해석을 진행하였다. 해석결과를 바탕으로 데크플레이트의 하부 플랜지와 슬래브 내부 철근의 온도를 유로코드 온도예측식과 비교한 결과, 유로코드의 온도예측식이 골 내부에 위치한 철근의 온도를 수치해석모델에 비해 상당히 낮게 평가하여 철근의 온도를 보수적으로 평가하지 못하는 것을 확인하였다. 또한 이러한 해석결과를 바탕으로 유로코드 온도예측식의 계수를 새롭게 제안하였다.

Pantousa and Mistakidis^[10]는 춤이 73 mm로 낮은 데크플레이트 슬래브의 비선형성을 고려한 3차원 열해석모델을 개발하였다. 상부와 하부 플랜지, 웹, 데크플레이트 슬래브 내부 철근이 표준화재에 60분, 90분, 120분 노출된 경우 각각의 온도를 유로코드 온도예측식과 비교하였다. 비교 결과 모든 지점에서 해석결과가 60분, 90분, 120분 경과 시의 온도를 유로코드 온도예측식보다 0.42%~23.4% 높게 평가하는 것으로 나타났다. 이 연구에서도 마찬가지로 유로코드 온도예측식이 데크플레이트 내부 온도를 보수적으로 평가하지 못하는 것으로 나타났다.

Bolina *et al.*^[11]은 화재 시 춤이 75 mm인 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도 분포를 실험과 해석모델, 유로코드 온도예측식으로 평가하였다. 데크플레이트 슬래브 내부에 위치한 직경 6.3 mm, 10 mm 철근에 대한 온도를 비교한 결과 표준화재에 60분, 90분, 120분 노출 시 모든 경우에서 유로코드 온도예측식이 실험결과와 해석모델보다 온도를 높게 평가하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 유로코드 온도예측식이 가장 안전한 측으로 데크플레이트 내부의 온도를 평가하고 있는 것으로 나타났다.

선행연구들에서 데크플레이트의 형상과 해석방법, 열 특성 등 평가 시 고려하는 요소에 따라 온도예측 결과가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 결론적으로, 유로코드 온도예측식은 기존의 춤이 낮은 데크플레

이트에 대해 정확한 온도를 제공하지 못하며 춤이 깊은 데크플레이트의 적용성에 대한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

3. 춤이 깊은 데크플레이트의 열전달해석

식 (1)에서 데크플레이트 슬래브 내부의 온도예측에 사용된 변수는 총 5가지이며, 이는 데크플레이트의 형상에 따라 달라진다. 춤이 낮은 데크플레이트와 춤이 깊은 데크플레이트의 가장 큰 차이점은 데크의 춤이다. 식 (1)의 5가지 변수 중 데크플레이트의 춤에 따라 크게 달라질 수 있는 변수는 u_3/h_2 와 z , α 이다. 데크플레이트의 춤이 증가할수록 u_3/h_2 는 작아지고 z 가 가질 수 있는 값의 범위가 커진다. 또한 데크플레이트의 춤이 증가함에 따라 웹의 각도 α 도 증가하게 된다. 따라서 춤이 깊은 데크플레이트에 기존 유로코드 온도예측식의 적용 가능 여부를 평가하기 위해서 온도예측식의 계수를 분석할 필요가 있다.

이 연구에서는 춤이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 위치에 따른 온도를 확인하기 위해 열전달해석을 수행하였다. 열전달해석은 범용 유한요소해석프로그램 ABAQUS^[14]를 이용하여 수행하였다. 데크플레이트 형상은 국내에서 주로 사용되는 2가지 종류의 데크플레이트를 단순화하여 적용하였으며, 데크플레이트 하단이 표준화재에 2시간 노출된 것을 가정하여 해석을 진행하였다. 또한, 해석모델의 검증은 위하여 선행 연구의 실험결과와 비교하였다.

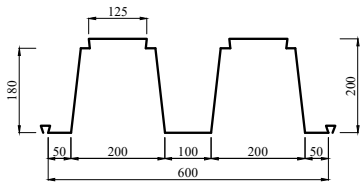
3.1 유한요소모델링

3.1.1 데크플레이트 형상

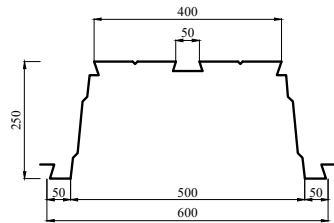
해석에 사용된 춤이 깊은 데크플레이트는 국내에서 주로 사용되는 데크플레이트 중에서 2가지 타입을 선정하여 적용하였다. 이 연구에서는 데크플레이트 춤이 200 mm인 A 타입^[3]과 250 mm인 B 타입^[1] 2가지를 선정하였다. 해석에 사용된 데크플레이트의 타입별 상세 형상은 Fig. 2에 나타났다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 해석에 사용된 춤이 깊은 데크플레이트는 형상은 모두 절곡부를 다수 포함하고 있으며, 하부 플랜지 연결부에서도 리브가 존재한

다. 유로코드의 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도 예측식에서는 이러한 절곡의 영향을 상세하게 반영하지 못하고 있기 때문에, 이 연구에서는 춤이 깊은 데크플레이트에 기존의 온도예측식 적용 가능성을 확인하기 위하여 데크의 절곡을 단순화하고 하부 플랜지의 리브를 생략하여 해석모형을 구성하였다. 데크의 형상을 단순화하여 적용한 데크플레이트 해석모형을 Fig. 3에 나타냈다.

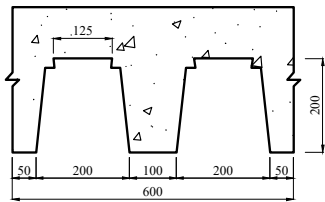


(a) A type

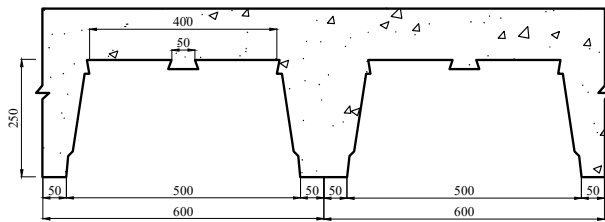


(b) B type

Fig. 2. Shape of deep deck plate (Unit: mm)



(a) A type



(b) B type

Fig. 3. Simplified shape of deep deck plate slab (Unit: mm)

3.1.2 열전달해석모형

열전달해석모형은 강재 데크플레이트와 콘크리트로 나누어 구성하였다. 모든 구성 요소는 2차원 3절점 열전달요소인 DC2D3 요소를 사용하였고 열전달해석은

2D로 수행하였다. 강재와 콘크리트의 밀도와 고온 시재료의 열적 특성은 유로코드 EN 1991-1-2(2005)^[12]의 제안값을 사용하였고, 슬래브 콘크리트의 함수율을 고려하기 위해 3 % 함수율을 가정하여 비열값을 적용하였으며 적용한 열적 특성을 Table 2에 나타냈다. 강재 데크플레이트와 콘크리트 경계면은 면과 면의 Contact 조건을 통해 열이 전달되도록 모델링하였다.

Table 2. Thermal properties of concrete and steel at high temperatures

Temp. (°C)	Density (kg/m ³)		Specific heat (J/kg·K)		Thermal conductivity (W/m·K)	
	Con'c	Steel	Con'c	Steel	Con'c	Steel
20	2,300	7,850	900	439.8	1.95	53.3
100			900	487.6	1.77	50.7
200			2,020	529.8	1.55	47.3
300			1,000	564.7	1.36	44.0
400			1,050	605.9	1.19	40.7
500			1,100	666.5	1.04	37.4
600			1,100	760.2	0.91	34.0
700			1,100	1,008.2	0.81	30.7
800			1,100	803.3	0.72	27.3
900			1,100	650	0.66	27.3
1,000			1,100	650	0.62	27.3
1,100			1,100	650	0.60	27.3
1,200	1,100	650	0.60	27.3		

유로코드는 표준화재 노출면에 대해 25 W/m²·K의 대류계수를 제시하고 있으나, 해석모형에서는 데크플레이트 골의 형상을 고려하여 연속된 웹 사이 빈 공간에서의 열 유속 감소율을 반영하기 위해 상부 플랜지와 웹, 하부 플랜지에 각각 다른 대류계수를 적용하였다. 상부 플랜지와 웹에는 15 W/m²·K의 대류계수를 적용하였으며, 화재에 더 근접하여 노출되는 하부 플랜지에는 25 W/m²·K의 대류계수를 적용하였다^[15]. 또한 화재 노출면인 데크플레이트 하부면의 방사율은 유로코드에서 0.7의 보수적인 값을 제시하고 있으나, 선행연구결과를 참고하여 데크플레이트 아연 도금층의 열화에 의한 고온에서의 온도 상승 지연을 반영하도록 0.4를 적용하였다^[16]. 화재에 비(非)노출면인 상부 콘크리트 면에 대해서 유로코드는 방사의 영향을 고려

할 경우 4 W/m²·K, 고려하지 않을 경우 9 W/m²·K의 방사율을 제시하고 있으나, 본 연구에서는 선행연구를 참고하여 8 W/m²·K의 대류계수와 0.78의 방사율을 적용하였다^[17]. 유로코드에서 제시하는 값과 본 연구에서 적용한 값을 Table 3에 나타냈다. 데크플레이트의 하단에 ISO 834 표준화재에 2시간 노출된 것으로 가정하였으며, 해석결과에 따른 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도를 확인하였다.

Table 3. Convection coefficient and emissivity in Eurocode and applied in this study

Category		Convection coefficient (W/m ² ·K)	Emissivity
Eurocode	Exposed	25	0.7
	Unexposed	4 or 9	0.7
This study	Exposed	15* or 25**	0.4
	Unexposed	8	0.78

*Top flange and web
**Bottom flange

3.1.3 해석 변수

춤이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 위치에 따른 온도를 비교하기 위해 철근의 높이를 변수로 설정하였다. 국내에서 사용되는 춤이 깊은 데크플레이트 슬래브를 참고하여 철근은 골 내부에서 좌우 웹까지의 거리 u_1 과 u_2 가 같은 중심에 위치하도록 하였으며, 철근의 높이를 하부 플랜지 기준으로 10 mm에서부터 170 mm까지 5 mm 단위로 증가시키며 열전달해석을 진행하였다. 데크플레이트 타입별로 철근의 높이를 변경하여 각각 33개의 위치에서 온도를 측정하였으며 측정 위치를 Fig. 4에 나타냈다. 여기서, 철근의 직경은 보수적으로 13 mm를 가정하여 해석을 진행하였다.

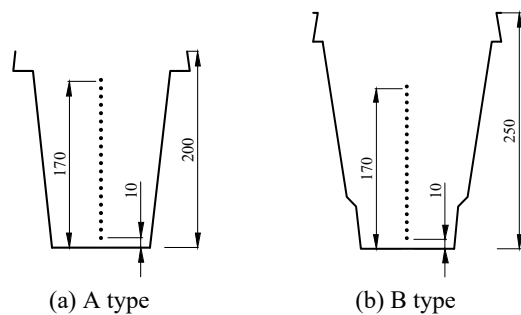


Fig. 4. Location of temperature measurement (Unit: mm)

3.2 열전달해석모델 검증

본 연구의 열전달해석모델을 검증하기 위해 선행연구^{[18],[19]}의 골형 데크플레이트 화재실험결과와 비교하였다. 먼저, 뉴질랜드 BRANZ(Build Research Association of New Zealand)의 합성 슬래브 화재실험결과^[18]와 비교하였다. 이 실험에 사용된 골형 데크플레이트는 춤이 55 mm이며, 콘크리트 토핑은 75 mm를 적용했다. 데크플레이트의 형상은 Fig. 5에 나타냈다. 데크플레이트 골의 하단으로부터 0 mm, 60 mm, 110 mm 떨어진 A, B, C 세 위치에서의 콘크리트 온도를 비교하였다. Fig. 6에 BRANZ 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타냈다. Fig. 6에 나타낸 것과 같이 본 연구의 해석모델을 적용한 결과 실험결과에 의한 온도분포를 비교적 유사하게 예측할 수 있었으며, 화재 노출 2시간 경과 후에 예측 온도의 최대 오차는 2% 이내로 나타났다.

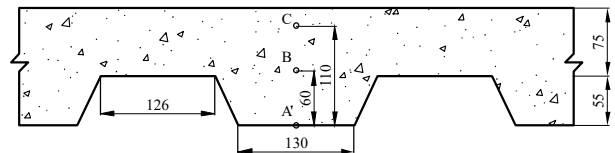


Fig. 5. Shape of Dimond Hibond deck (Unit: mm)

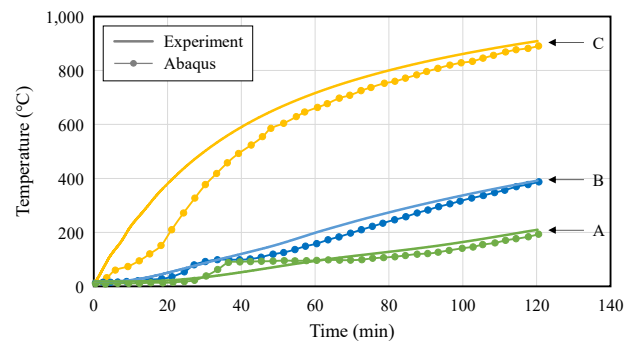


Fig. 6. Comparison of fire test and analytical results (BRANZ)

두 번째로 Hamerlinck^[19]의 화재실험결과를 해석결과와 비교하였다. 이 실험에 사용된 데크플레이트는 춤이 73 mm이며 콘크리트 토핑은 70 mm를 적용했다. 첫 번째 실험결과보다 상대적으로 춤이 깊고 골이 좁은 데크플레이트로, 데크플레이트의 형상은 Fig. 7에 나타냈다. 골의 하단으로부터 0 mm, 20 mm, 43 mm, 68 mm, 97 mm, 122 mm, 143 mm인 A, B, C, D, E, F, G 위치에서 표준화재에 110분 노출된 콘크리트의 온도를 비교하였다. Fig. 8은 실험결과와 해석결과를 비교한 그래프

이다. 열전달해석결과와 비교 결과 첫 번째 실험과 마찬가지로 각 위치별 유사한 온도 변화 양상을 보였으며, 화재시간 110분에서 최대 5.5 %의 오차를 보였다.

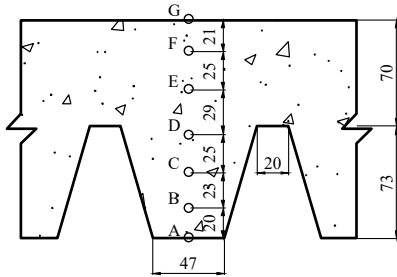


Fig. 7. Shape of Prins PSV 73 deck (Unit: mm)

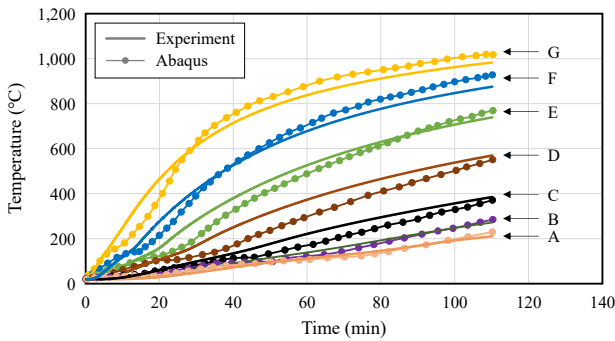


Fig. 8. Comparison of fire test and analysis results (Hamerlinck^[19])

선행연구의 실험결과와 비교한 결과 본 연구의 열전달해석모델이 실험결과를 근사적으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 이와 동일한 모델링 방법을 굵 200 mm 이상의 데크플레이트에 적용하여 열전달해석결과를 유로코드의 온도예측식과 비교하였다.

3.3 열전달해석결과 비교

표준화재에 2시간 노출된 경우, 굵이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부의 온도분포를 Fig. 9에 나타냈다. 또한 슬래브에 위치한 철근의 데크 하단으로부터 높이에 따른 온도를 Tables 4-5에 나타냈다. 기존의 유로코드 온

도예측식에 의한 온도(T_s)와 Abaqus 열전달해석에 의한 온도(T_a)를 비교하고 그에 대한 오차율을 나타냈다.

해석 결과 굵 200 mm인 A 타입 데크플레이트의 경우 철근의 높이별 온도는 404.3 °C에서 904.8 °C로 예측되었고 유로코드 온도예측식과 비교했을 때 1.3 %~10.5 %의 오차를 나타냈다. 굵 250 mm인 B 타입 데크플레이트의 경우 철근의 높이별 온도는 357.1 °C에서 881.9 °C로 예측되었고 유로코드 온도예측식과 비교했을 때 2.5 %~23.8 %의 오차를 보였다. A 타입과 B 타입 모두 유로코드의 온도예측식을 적용한 철근의 높이별 온도는 열전달해석결과보다 낮게 나타난 것을 확인할 수 있다. 즉, 유로코드 온도예측식은 굵이 깊은 데크플레이트 내 철근의 온도를 안전측으로 예측하지 못하고 있으며, 이러한 경향은 데크플레이트의 굵이 커질수록 증가하였다. 따라서 유로코드의 온도예측식을 굵 200 mm 이상 데크플레이트에 적용하려면 별도의 계수 조정을 위한 회귀분석 연구가 필요한 것으로 나타났다.

4. 굵이 깊은 데크플레이트의 온도예측식 개선

유로코드 EN 1991-1-2(2005)에 제시된 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도예측식은 식 (1)의 5가지 변수와 6가지 계수를 포함한다. 이 중 c_0 와 해석의 주요 변수인 철근의 높이에 따른 온도 변화를 반영하는 변수의 계수인 c_1 과 c_2 , 굵이 깊은 데크플레이트의 특성을 반영하는 변수의 계수인 c_4 에 대해 회귀분석을 진행하였다.

Tables 4-5의 열전달해석에 의한 온도(T_a)를 회귀분석하여 도출된 온도예측식의 계수를 Table 6에 나타냈다. 도출된 온도예측식의 계수를 적용하여 Fig. 3의 굵이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도를 다시 예측한 결과를 Table 6에 나타냈다(T_p 참조). 회귀분석 결과를 통해 도출된 온도예측식 계수를 적용한 결과 오차율은 A 타입 데크의 경우 4.8 % 이내로 나타났으며,

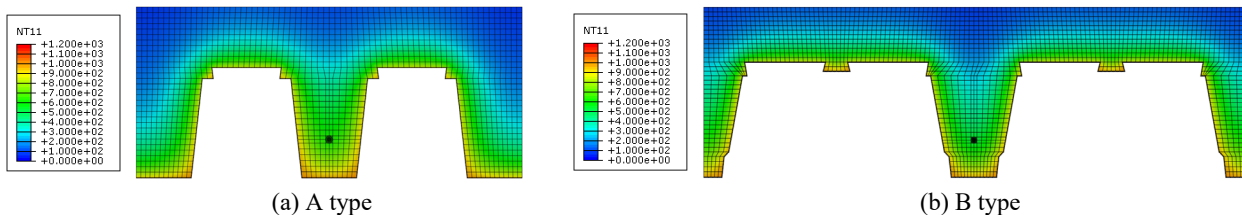


Fig. 9. Temperature distribution of deep deck plate

Table 4. Result of heat transfer analysis (A type)

Deck type	Height of rebar (mm)	T_s (°C)	T_a (°C)	Error rate of T_s and T_a (%)	T_p (°C)	Error rate of T_p and T_a (%)
A	10	893.1	904.8	1.31	911.7	0.76
	15	845.0	865.8	2.47	861.9	0.45
	20	808.6	831.4	2.81	824.9	0.78
	25	778.9	800.5	2.78	795.0	0.69
	30	753.2	772.9	2.61	769.6	0.43
	35	730.5	749.4	2.58	747.5	0.26
	40	709.9	727.4	2.47	727.5	0.02
	45	690.8	708.8	2.60	709.3	0.07
	50	673.0	691.7	2.77	692.5	0.11
	55	656.2	676.0	3.01	676.7	0.11
	60	640.2	660.8	3.21	661.8	0.15
	65	624.9	647.7	3.64	647.7	0.00
	70	610.2	634.8	4.03	634.2	0.10
	75	595.9	622.5	4.47	621.2	0.22
	80	582.1	610.8	4.93	608.7	0.35
	85	568.6	599.5	5.42	596.5	0.49
	90	555.5	588.5	5.94	584.7	0.63
	95	542.6	577.7	6.48	573.2	0.78
	100	530.0	567.2	7.03	562.0	0.91
	105	517.6	556.8	7.58	551.1	1.03
110	505.4	546.4	8.12	540.4	1.11	
115	493.5	535.7	8.56	529.9	1.08	
120	481.7	525.5	9.11	519.6	1.14	
125	469.9	514.9	9.57	509.3	1.08	
130	458.5	504.0	9.92	499.4	0.91	
135	447.1	492.8	10.23	489.5	0.67	
140	435.8	481.3	10.43	479.8	0.31	
145	424.7	469.3	10.51	470.2	0.19	
150	413.6	457.1	10.51	460.7	0.78	
155	402.6	444.6	10.42	451.2	1.50	
160	391.8	431.3	10.07	442.0	2.48	
165	381.0	418.1	9.73	432.8	3.52	
170	370.3	404.3	9.18	423.7	4.78	
Mean	-	-	-	6.20	-	0.85
SD	-	-	-	3.17	-	0.99

Table 5. Result of heat transfer analysis (B type)

Deck type	Height of rebar (mm)	T_s (°C)	T_a (°C)	Error rate of T_s and T_a (%)	T_p (°C)	Error rate of T_p and T_a (%)
B	10	831.7	881.9	6.03	869.0	1.47
	15	785.1	839.4	6.92	820.2	2.28
	20	750.2	801.7	6.87	784.3	2.18
	25	721.8	767.4	6.31	755.4	1.56
	30	697.6	737.6	5.73	731.1	0.87
	35	676.3	710.5	5.07	709.9	0.09
	40	656.9	686.5	4.50	690.9	0.63
	45	639.2	664.2	3.91	673.6	1.41
	50	622.6	644.3	3.48	657.6	2.07
	55	608.2	623.7	2.54	643.9	3.25
	60	591.3	606.2	2.52	627.5	3.52
	65	573.5	587.9	2.51	610.2	3.80
	70	555.0	571.6	2.99	592.0	3.58
	75	535.7	556.3	3.85	573.1	3.02
	80	515.8	541.4	4.96	553.5	2.23
	85	495.5	527.7	6.50	533.4	1.08
	90	476.2	514.3	8.02	514.4	0.01
	95	463.1	501.9	8.37	502.2	0.06
	100	450.3	489.8	8.78	490.2	0.09
	105	437.7	478.4	9.30	478.6	0.04
110	425.3	467.3	9.89	467.1	0.05	
115	413.1	456.8	10.57	455.9	0.20	
120	401.1	446.6	11.34	444.9	0.40	
125	389.3	436.8	12.21	434.0	0.65	
130	377.6	427.3	13.15	423.3	0.93	
135	366.0	418.0	14.19	412.7	1.25	
140	354.6	408.9	15.31	402.3	1.61	
145	343.3	400.0	16.52	392.0	2.00	
150	332.1	391.2	17.79	381.9	2.39	
155	321.0	382.6	19.18	371.8	2.82	
160	310.0	374.1	20.64	361.9	3.25	
165	299.2	365.6	22.20	352.1	3.69	
170	288.4	357.1	23.81	342.4	4.11	
Mean	-	-	-	9.57	-	1.71
SD	-	-	-	6.03	-	1.29

Table 6. Coefficients for determination of the temperatures of the reinforcement bars in the rib by regression analysis

Fire resistance time (min)		c_0 (°C)	c_1 (°C)	c_2 (°Cmm ^{0.5})	c_3 (°Cmm)	c_4 (°C/°)	c_5 (°Cmm)
120	Original	1,387	-238	-227	-4.79	1.68	-1,326
	Regression	1,054	-158	-247	-4.79	6.24	-1,326

B 타입 데크의 경우에도 4.1 % 이내로 감소하였다.

철근의 위치별 오차율을 비교하기 위하여 기존 유로 코드 온도예측식에 의한 온도(T_s)와 Abaqus 열전달 해석에 의한 온도(T_a), 회귀분석으로 제안된 온도예측식에 의한 온도(T_p)를 무차원화하여 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10에서 볼 수 있는 것과 같이 제안한 온도예측식의 계수를 적용할 경우 B 타입 데크플레이트는 철근의 높이 40 mm–80 mm 사이에서 오차율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 B 타입 데크 하단의 절곡부를 온도예측식에서 고려하지 못하는 영향으로 판단된다. 또한, 두 타입 모두 철근의 높이 140 mm 이상에서 다시 오차율이 증가하는 것으로 나타났으며 이는 두 타입 모두 데크 상단의 절곡부를 온도예측식에서 고려하지 못하는 영향으로 판단된다. 하지만, 전체적인 오차율은 기존의 유로코드에 의한 온도예측결과보다 감소하는 것을 볼 수 있다. 제안한 온도예측식의 계수를 적용한 결과 A 타입 데크의 평균 오차율은 0.85 %, 표준편차는 0.99 %로 나타났으며, B 타입 데크의 경우 평균 오차율은 1.71 %, 표준편차는 1.29 %로 나타났다.

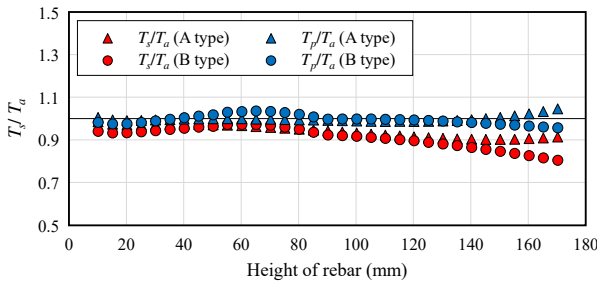


Fig. 10. Comparison of regression analysis results

5. 결론

본 연구에서는 국내에서 주로 사용되는 층 200 mm 이상의 데크플레이트에 대해 화재 시 거동을 평가하기 위하여 필요한 철근의 높이별 화재 시 온도를 예측할 수 있는 제안식에 대해 연구를 진행하였다. 열전달 해석을 통해 층이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근 높이에 따른 온도를 확인하였고 회귀분석을 통해 유로코드 EN 1991-1-2(2005)의 온도예측식과 비교하였으며, 예측의 정확도를 향상시키기 위해 회귀분석을 통해 새로운 온도예측계수를 제안하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 데크플레이트 슬래브에 적용 가능한 열전달 해석 모델을 두 가지 실험결과로 검증하였고 층이 깊은 데크플레이트에 적용하였다. 표준화재 2시간 노출 열전달 해석결과와 유로코드의 철근 온도예측식을 비교했을 때 A 타입은 1.3 %–10.5 %, B 타입은 2.5 %–23.8 %의 오차를 보였다.
- (2) 모든 구간에서 층이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근에 대한 유로코드의 온도예측식이 온도를 더 낮게 평가하였으며 이러한 경향은 층이 커질수록 증가하였다. 기존 유로코드 온도예측식은 층이 깊은 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도를 안전측으로 예측하지 못하고 있다.
- (3) 층이 깊은 데크플레이트 슬래브의 열전달 해석 결과를 회귀분석하여 기존 유로코드 온도예측식의 계수를 새롭게 제안하였다. 제안한 계수를 층이 깊은 데크플레이트 슬래브에 적용했을 때 오차 범위는 4.8 % 이내(A 타입), 4.1 % 이내(B 타입)로 감소하였으며, 전체 평균 오차율과 표준편차는 각각 0.85 %, 0.99 % (A 타입), 1.71 %, 1.29 % (B 타입)를 나타내 정확도가 향상되었다.
- (4) 회귀분석 결과 전체 평균과 표준편차의 정확도가 상승하였으나 A 타입 데크플레이트는 140 mm 이상에서, B 타입 데크플레이트는 40 mm–80 mm 와 140 mm 이상에서 오차율이 다소 증가하였다. 이는 유로코드의 온도예측식이 데크 상·하단 절곡부의 존재에 따른 온도 상승을 적절히 고려하지 못하기 때문인 것으로 판단되며, 이를 고려하기 위한 추가적인 계수 도입이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2021R1A4A1031201). 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Jeil Technos (2003) *Structural Design Guide for Floor-Height-Saving Composite Floor Method Using Composite Deep Deck Plate*, Korea (in Korean).
- [2] Park, K.Y., Nam, Y.S., Choi, Y.H., Kim, Y.H., and

- Choi, S.M. (2013) Improvement of Flexural Performance for Deep-Deck Plate Using Cap Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.555-567 (in Korean).
- [3] Heo, I., Han, S.-J., Choi, S.-H., Kim, K.S., and Kim, S.-B. (2019) Experimental Study on Structural Behavior of Double Ribbed Deep-Deck Plate Under Construction Loads, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.23, No.7, pp.49-57 (in Korean).
- [4] Moon, B.C., Kim, S.S., Kim, S.B., and Kang, M.J. (2022) Seismic Performance Evaluation of Wide HyFo Beam-to-Column Connections with Double Rib Deck Plate (D-Deck), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.331-340 (in Korean).
- [5] Choi, I.R., Lee, G.R., Jeon, S.H., and Kyung, J.H. (2021) Deflection Performance Evaluation of New Deep Deck with 300 mm Depth During Construction Loads, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.5, pp.305-313 (in Korean).
- [6] Choi, I.R., Lee, G.R., Jeon, S.H., and Kyung, J.H. (2021) Flexure and Shear Performance Evaluation of New Deep Deck with 300 mm Depth, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.5, pp.295-303 (in Korean).
- [7] Lamont, S., Usmani, A.S., and Drysdale, D.D. (2001) Heat Transfer Analysis of the Composite Slab in the Cardington Frame Fire Tests, *Fire Safety Journal*, Elsevier, Vol.36, No.8, pp.815-839.
- [8] Gillie, M., Usmani, A., Rotter, M., and O'Connor, M. (2001) Modelling of Heated Composite Floor Slabs with Reference to the Cardington Experiments, *Fire Safety Journal*, Elsevier, Vol.36, No.8, pp.745-767.
- [9] Piloto, P.A.G., Balsa, C., Ribeiro, F.F., and Rigobello, R. (2021) A New Calculation Method for the Temperature of the Components of Composite Slabs Under Fire, *Journal of Computational Applied Mechanics*, College of Engineering of University of Tehran, Vol.52, No.2, pp.206-214.
- [10] Pantousa, D., and Mistakidis, E. (2013) Advanced Modeling of Composite Slabs with Thin-Walled Steel Sheeting Submitted to Fire, *Fire Technology*, Springer, Vol.49, pp.293-327.
- [11] Bolina, F., Tutikian, B., and Rodrigues, J.P.C. (2021) Thermal Analysis of Steel Decking Concrete Slabs in Case of Fire, *Fire Technology*, Elsevier, Vol.121, 103295.
- [12] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1994-1-2: 2005), Belgium.
- [13] Both, C. (1998) *The Fire Resistance of Composite Steel-Concrete Slabs*, Ph.D. Dissertation, Delft University, Netherlands.
- [14] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2022) *Abaqus Analysis User's Manual*, USA.
- [15] Jiang, J., Main, J.A., Weigand, J.M., and Sadek F.H. (2018) Thermal Performance of Composite Slabs with Profiled Steel Decking Exposed to Fire Effects, *Fire Technology*, Elsevier, Vol.95, pp.25-41.
- [16] Nguyen, M.-P., Nguyen, T.-T., and Tan, K.-H. (2018) Temperature Profile and Resistance of Flat Decking Composite Slabs in- and Post-Fire, *Fire Technology*, Elsevier, Vol.98, pp.109-119.
- [17] Hamerlinck, R., Twilt, L., and Stark, J.W.B. (1990) A Numerical Model for Fire-Exposed Composite Steel/Concrete Slabs, *CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1971-2018)*, University of Missouri, Rolla, USA, pp.115-130.
- [18] Lim, L.C.S. (2003) *Membrane Action in Fire Exposed Concrete Floor Systems*, Ph.D. Dissertation, University of Canterbury, New Zealand.
- [19] Hamerlinck, A.F. (1991) *The Behaviour of Fire-Exposed Composite Steel/Concrete Slabs*, Ph.D. Dissertation, Eindhoven University of Technology, Netherlands.

요약: 데크플레이트 공법은 현재 국내 많은 건축물에 사용되고 있으며 경제성, 장스팬 적용, 층고 절감을 위해 층이 깊은 데크플레이트 적용이 증가하고 있다. 본 연구에서는 EN 1991-1-2(2005)에서 제시하는 데크플레이트 슬래브 내부 철근의 온도예측식을 층이 깊은 데크플레이트에 적용 가능한지 여부를 검증하였다. 국내에서 주로 사용되는 층 200 mm 이상의 데크플레이트 두 가지 타입을 선정하고 철근의 위치에 따른 온도분포를 파악하기 위하여 열전달해석을 진행하였다. 열전달해석모델은 선행연구의 화재실험결과와 비교하여 검증하였으며, 해석결과를 회귀분석하여 유로코드의 온도예측식 계수를 새롭게 제안하였다. 제안한 온도예측식의 계수를 적용하여 두 가지 타입의 데크에서 평균오차율이 각각 0.85 %와 1.71 %로 향상되었다. 온도예측의 정밀도를 높이기 위해서는 데크 절곡부의 위치에 따른 추가적인 계수 적용이 필요하다.

핵심용어: 층이 깊은 데크플레이트, 열전달해석, 철근, 온도예측식, 회귀분석