

고온에서 메가 SRC 기둥의 온도특성

황선웅, 최병정*
경기대학교 일반대학원 건축공학과

Temperature Characteristics of Mega SRC Columns at High Temperature

Sun-Woong Hwang, Byong-Jeong Choi*
Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School

요약 화재로 인한 초고층건물의 큰 피해를 예방하기 위해 적절한 내화설계를 수행하기 위해서는 선행적으로 온도분포를 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 하지만, 초고층건물에서 많이 사용되는 단면크기 1,000 mm × 1,000 mm 이상의 메가(mega) SRC(steel reinforced concrete)기둥의 온도분포에 대한 연구는 진행되고 있지 않다. 따라서 본 연구는 비재하 가열실험을 통해 실제 사용되고 있는 단면크기 1,219 mm × 1,219 mm의 메가 SRC 기둥에 대한 깊이별 온도분포 특성을 도출하였다. 화재실험은 메가 SRC 기둥을 화재시간 1, 2, 3시간에 따라 비재하 가열실험을 수행하여 기둥 중앙 높이에서 최대 깊이 432 mm까지 온도분포를 도출하였다. 또한, 화재실험 실험값은 온도 예측식(Wickström, Kodur), 기준 온도프로파일(Eurocode2, ACI216), 유한요소해석 온도 값과 비교하여 온도특성을 검증하였다. 실험 결과, 깊이 150 mm 이하 구간에서 온도는 급격하게 감소하였으며, 깊이 150 mm 초과구간에서는 열이 균일하게 분포되는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구를 통해 온도 예측식(Wickström, Kodur)과 기준 온도프로파일(Eurocode2, ACI216)로 도출한 온도 값보다 유한요소해석으로 도출한 온도 값이 실험결과와 가장 유사한 것을 확인하였다.

Abstract Appropriate fire design is necessary to prevent damage to high-rise buildings due to fire. In addition, it is very important to accurately predict the temperature distribution to carry out fire design accurately. However, studies on the temperature distribution of mega SRC columns with a cross-section of 1,000 mm×1,000 mm or more are not actively conducted. Therefore, through a fire test, this study derived the temperature distribution characteristics by depth for mega SRC columns with a cross-section of 1,219 mm×1,219 mm. As part of the fire test, the temperature distribution was derived from the central height of the column to the maximum depth of 432 mm by heating the mega SRC column according to fire times of 1, 2, and 3 hours, respectively. Also, the temperature characteristics from the fire test were verified by comparing them with the temperature equation, the code temperature profile, and the finite element analysis temperature. The result of the test suggests that the temperature rapidly decreased below a depth of 150 mm, and heat was uniformly distributed at depths more than 150 mm. In addition, it was confirmed that the temperature derived from the finite element analysis was more similar to the test than the temperature derived from the temperature equation and the design temperature profile.

Keywords : Mega SRC Columns, Unstressed Fire Test, Temperature Distribution, Finite Element Analysis, Temperature Prediction Equation, Temperature Profile

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 20161510400110), 2021학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Byong-Jeong Choi(Kyonggi Univ.)

email: bjchoi@kyonggi.ac.kr

Received October 15, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised November 18, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

최근 국내 초고층 건물의 화재가 빈번하게 발생하고 있다. 화재와 같이 고온에 장시간 노출되는 환경에서는 구조물에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 재료 손상이 발생하며, 이는 인명 및 재산피해와 직결된다[1]. 특히 초고층 건물은 층고가 높고, 중력에 대한 수직하중 부하가 크기 때문에 화재에 매우 취약하다. 화재로 인한 초고층건물의 큰 피해를 예방하기 위해 적절한 내화설계를 하는 것이 필수적이다. 내화설계를 수행하기 위해서는 선행적으로 부재내부의 온도분포를 확인하여 온도에 따른 재료의 강도 저감을 파악하는 것이 매우 중요하다[2].

초고층 건물은 높은 하중지지력, 강성과 우수한 내화 성능을 가진 철골철근콘크리트(SRC) 기둥과 단면크기 1,000 mm × 1,000 mm 이상인 메가 기둥(mega column)을 주로 사용한다[3-6]. 기존 SRC 기둥의 내화 연구는 화재실험 및 유한요소해석연구를 통해 온도분포를 파악하는 연구가 진행되고 있다[3-8]. Yu[3]은 단면크기 200 mm × 200 mm인 SRC 기둥의 온도분포와 내화 성능을 파악하기 위해 화재실험 및 유한요소해석을 수행하였다. Chen[4]은 화재 후 단면크기 300 mm × 300 mm인 SRC기둥의 내화 성능을 확인하기 위해 유한요소 해석을 이용하여 온도분포를 파악하였다. Mao[5]는 단면크기 350 mm × 250 mm와 300 mm × 300 mm인 SRC기둥을 3, 4면 화재실험을 통해 온도분포 및 내화 성능을 확인하였다. Han[6]은 단면크기 300 mm × 300 mm인 SRC 기둥을 유한요소해석을 통해 온도예측을 수행하여 가열 실험을 통해 유한요소해석 검증을 수행하였다. Zhang[7]은 단면 둘레 1,000 ~ 2,000 mm인 SRC 기둥을 단면크기, 종횡비, 철골 및 철근비를 변수로 두어 열전달해석을 수행하여 온도분포를 파악하였다. 이처럼 기존 연구는 단면크기 500 mm × 500 mm 이하인 SRC기둥에 대해서만 연구가 진행되고 있다. 따라서, 실제 화재시 단면크기 1,000 mm × 1,000 mm 이상인 메가 SRC기둥 내부의 깊이별 온도분포를 확인하기 위해 메가 SRC기둥에 대한 연구가 필요하다.

깊이별 온도분포 예측 연구로는 Wickström[9]과 Kodur[10]의 연구가 있다. Wickström[9]과 Kodur[10]은 실험과 유한요소해석을 통해 콘크리트 부재의 온도분포를 예측할 수 있는 간단한 식을 제시하였다. Wickström[9]은 Fig. 1과 같이 1차원 열전달과 2차원 열전달에 대해서 각각 Eqs. (1),(2)를 제시하였다.

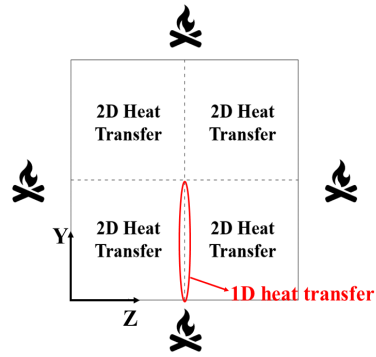


Fig. 1. 1D & 2D heat transfer

$$\theta_y = \eta_y \eta_w \theta_f \quad (1)$$

$$\theta_{zy} = [\eta_w (\eta_z + \eta_y - 2\eta_z \eta_y) + \eta_z \eta_y] \theta_f \quad (2)$$

Where, θ_y denotes the temperature at depth y from the surface exposed to fire from one side, η_y denotes the coefficient of heat transfer included through the surface exposed to fire, η_w denotes the ratio between fire temperature and surface temperature, θ_f denotes the standard fire curve temperature, θ_{zy} denotes the temperature at depth z and y from the surface exposed to fire from two side, η_z and η_y denotes coefficient of heat transfer induced by each side of fire exposure.

Kodur[10]은 Fig. 1과 같이 1차원 열전달과 2차원 열전달에 대해서 각각 Eqs. (3),(4)를 제시하였다.

$$\theta_y = c_1 \eta_z (at^n) \quad (3)$$

$$\theta_{zy} = c_2 [-1.481(\eta_z \eta_y) + 0.985(\eta_z + \eta_y) + 0.017](at^n) \quad (4)$$

Where, c_1 and c_2 denotes the coefficients depending on the type of concrete, η_z and η_y denotes the heat transfer coefficients due to y and z side fire exposure, a denotes the factor representing the standard fire curve.

이처럼 Wickström[9]과 Kodur[10]의 제안식은 간단한 방법으로 온도 예측이 가능하며, 부재의 크기에 대한 제한없이 사용할 수 있다. 그러나, Wickström[9]과 Kodur[10]의 예측식은 메가 SRC기둥에 적용이 가능한 지에 대해서는 검증되지 않았다.

EN1992-1-2[11]와 ACI216.1M-14[12]은 Fig. 2와 같이 각각 단면크기 300 mm × 300 mm, 305 mm × 406 mm 기둥의 온도 프로파일(temperature profile)을 제시하고 있다. 이처럼 기준(Eurocode2[11], ACI216[12])에서 제시하는 온도프로파일은 최대 300 mm × 406 mm 초과하는 기둥에 대한 온도분포를 제시하고 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 실제 건물에 사용되고 있는 단면 크기 1,219 mm × 1,219 mm인 메가 SRC 기둥에 대해서 비재하 가열실험을 수행하여 깊이별 온도분포를 도출하였다. 실험을 통해 얻은 실험값을 바탕으로 기존 온도예측식(Wickström[9], Kodur[10])과 기준 온도 프로파일(Eurocode2[11], ACI216[12]) 깊이 150 mm까지를 비교분석하여 온도 예측식(Wickström[9], Kodur[10])과 온도프로파일(Eurocode2[11], ACI216[12]) 온도분포 특성을 검증하였다. 또한, 유한요소해석프로그램 ANSYS(2021 R1)을 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 도출된 해석 온도값과 실험 온도값을 비교분석하여 온도분포 특성을 검증하였다.

2. 메가 SRC기둥 비재하가열실험

2.1 실험체 계획

비재하 내화실험을 수행하기 위해 동일한 시험체를 Table 1과 같이 화재시간(1, 2, 3시간)에 따라 각각 2개씩 총 6개 실험체 제작하였다. 실험체명은 SRC-X-Y로 X는 화재시간을 나타내며, Y는 동일한 화재시간에 실험 받는 실험체들을 구분하기 위한 숫자이다. 실험에 사용한 메가 SRC기둥은 약 60,000 kN을 받는 부재로 재하가열 실험을 통한 부재의 거동 확인이 불가하였다. 실험체는 수평가열로 실험실 조건을 고려한 크기로 Fig. 3과 같이 단면 가로 1,219 mm, 세로 1,219 mm, 높이 1,500 mm 및 피복두께 51 mm로 제작하였다. H형강은 Fig. 3과 같이 H-467×406×41×41 규격을 사용하였다. 사용된 H형강의 강종은 ASTM A572 Gr.50이며, 항복강도는 345 MPa이다(Table 1). 직경 36 mm인 길이방향 철근은 Fig. 3과 같이 20개 배근하였으며, 직경 16 mm인 띠철근은 280 mm 간격으로 배근하였다. 사용된 철근의 강종은 ASTM A615 Gr.60이며, 항복강도는 414 MPa이다(Table 1). 콘크리트는 규산계 골재를 사용하였으며, 설계압축강도는 Table 1과 같이 35 MPa이다.

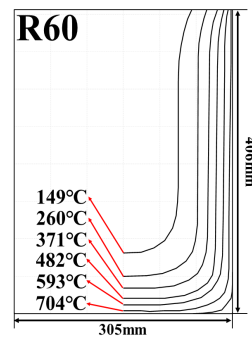
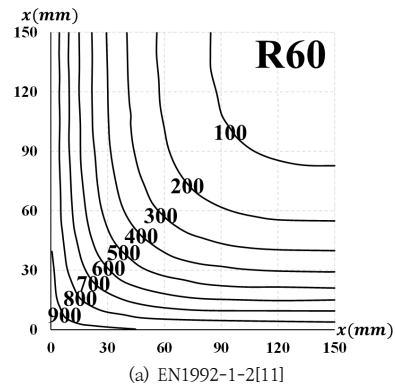


Fig. 2. Temperature profile

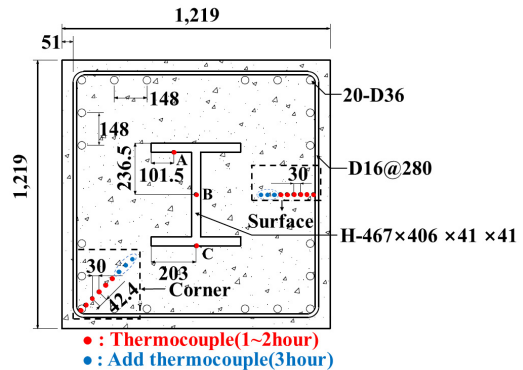


Fig. 3. Specimen details

온도측정을 위해서 기둥 중앙 높이(750 mm)에 열전대를 설치하였다. 열전대는 EN1992-1-2[11]의 온도프로파일에서 제시한 등온선 위치에 배치하여 가열실험 결과와 위치별 온도의 분포가 일치하는지 여부를 확인하였다. 이에 따라 열전대의 간격은 Fig. 3과 같이 30 mm로 설정하였다. 표면부 깊이별 온도측정은 가열시간이 짧은 1시간, 2시간은 띠철근(깊이 67 mm)으로부터 깊이 150

Table 1. Test Specimen

No.	Specimen	Size (mm)	Material			Standard fire curve	Heating time (hour)
			H-Steel	Rebar	Concrete		
1	SRC-1-1	1,219×1,219×1,500	ASTM A572 Gr.50	ASTM A615 Gr.60	Silica concrete	ASTM E119[13]	1
	SRC-1-2						
2	SRC-2-1		f_y (MPa)		f_{ck} (MPa)		2
	SRC-2-2						
3	SRC-3-1		345	414	35		3
	SRC-3-2						

mm까지 설치하였으며, 3시간 가열등급의 경우 띠철근으로부터 240 mm까지를 측정범위로 설정하였다(Fig. 3). 모서리부 깊이별 온도측정은 표면부와 마찬가지로 1시간, 2시간은 길이방향철근(깊이 67 mm)으로부터 깊이 150 mm까지 설치하였으며, 3시간 가열등급은 길이방향 철근으로부터 240 mm까지를 측정범위로 설정하였다(Fig. 3). 또한, H형강의 온도를 확인하기 위해 웹브와 플랜지 부분에 Fig. 3와 같이 열전대를 설치하였다.

2.2 실험 방법

비재하 내화실험은 기본적으로 ASTM E119[13]에 따라 방재시험연구원(FILK) 수평가열로에서 실시하였다. 비재하 내화실험은 Fig. 4와 같이 화재시간 조건에 따라 2개씩 실험체를 설치하였으며, 동일한 가열조건이 되도록 열전대를 설치한 표면부와 모서리부가 수평가열로 내 화구를 향하도록 배치하였다. 비재하 내화실험은 ASTM E119[13]의 표준화재곡선에 따라 4면 가열실험을 수행하였다. 실험체는 재령 28일이 지난 후 운반을 실시하였으며, 비재하 내화실험은 재령 50일에 실시하였다.

3. 유한요소해석

3.1 모델링

열전달 해석을 수행하기 위해 유한요소해석프로그램 ANSYS(2021 R1)을 사용하였다. 모델링은 Fig. 5와 같이 모델링을 수행하였다. 길이방향 철근과 띠철근은 해석 정확성을 높이기 위해 Fig. 5와 같이 원형에서 정사각형으로 치환하였다. 철근은 단면 2차모멘트와 단면적을 비교하여 한 변의 길이를 산정하였으며, 길이방향철근(D36)은 31 mm, 띠철근(D16)은 14 mm로 설정하였다.

열전달해석을 수행하기 위해 ANSYS(2021 R1)에서 제공하는 대칭(symmetry)기능을 사용하였다. 대칭 기능

은 해석시간을 감소시키기 위해 해석 시 모델을 단순화하는 방법이다. 대칭 기능은 전체를 단순화한 후에 관심 영역에 메쉬(mesh)를 더 조밀하게 하면 해석 시간을 크게 늘리지 않으면서 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.



Fig. 4. Fire test set-up of specimen

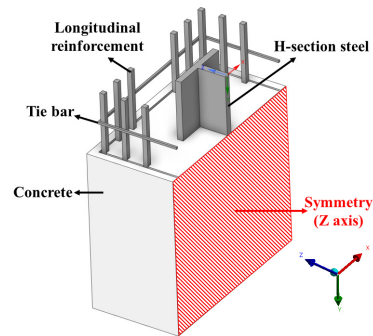


Fig. 5. Finite element analysis modeling

3.2 재료의 열적특성

열전달 해석을 수행하기 위해 재료의 열적특성을 지정해야 한다. 열적특성은 열전도율, 밀도, 비열에 대해서 지정했다. 온도에 따른 콘크리트의 열적특성은 EN1994-1-2[14]와 ASCE1992[15]에서 제시하는 특성을 사용하였다. 열전도율은 Fig. 6(a)와 같이 EN1994-1-2[14]가 190 ~ 870 °C 까지 ASCE1992[15]보다 높으며, 그 외 구

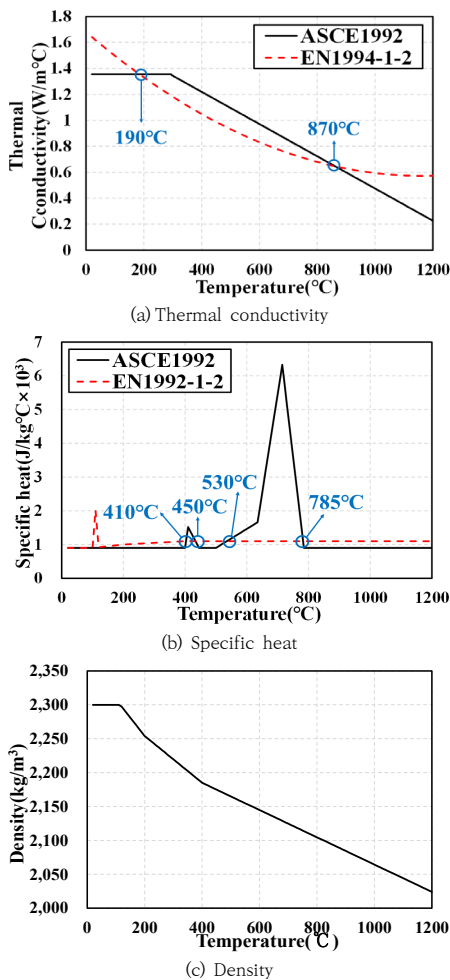


Fig. 6. Thermal property of concrete

Table 2. Thermal property of steel

Property	EN1994-1-2[14] Equation	Range(°C)
Density (kg/m^3)	7,850	All
Specific heat (J/kgK)	$C_s = 425 + 0.773T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3$	$20 \leq T < 600$
	$C_s = 666 - \left(\frac{13,002}{T-738} \right)$	$600 \leq T < 735$
	$C_s = 545 + \left(\frac{17,820}{T-731} \right)$	$735 \leq T < 900$
	$C_s = 650$	$900 \leq T < 1200$
Thermal conductivity (W/mK)	$k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2}T$	$20 \leq T < 800$
	$k_s = 27.3$	$800 \leq T < 1200$

간에서는 낮은 값을 나타낸다. 비열은 Fig. 6(b)와 같이 410 ~ 450 °C, 530 ~ 785 °C까지 ASCE1992[15]가 EN1994-1-2[14]보다 높은 값을 나타낸다. 밀도는 Fig. 6(c)와 같이 EN1994-1-2[14]의 밀도변화를 사용하였다. 철골과 철근은 EN1994-1-2[14]에 따라 설정하였으며, 각 열적특성을 Table 2에 나타냈다.

3.3 열전달 해석조건

열전달 해석은 ANSYS(2021 R1)에서 제공하는 전이 열 해석(transient thermal)을 이용하여 수행하였다. 전이 열 해석은 시간에 따라 온도가 상승하는 표준화재곡선 같은 조건을 해석할 때 유용하게 쓰인다[1].

기둥의 4면 가열을 구현하기 위해 Fig. 7과 같이 한 면은 대류(convection)기능, 나머지 3면은 온도(temperature) 기능을 설정하였다. 그 이유는 Fig. 7과 같이 두 가동이 맞닿은 면은 직접적으로 가열을 하지 못하기 때문에 대류조건을 부여하여 화재상황을 동일하게 가정하였다. 대류기능은 시간, 온도, 대류계수의 설정을 포함하고 있다. 시간과 온도는 ASTM E119 화재곡선[13]에 따라 설정하였고, 대류계수는 EN1991-1-1[16]에 따라 25 W/m²°C로 설정하였다. 깊이별 온도를 확인하기 위해 사용자가 직접 좌표계를 설정할 수 있는 좌표계(coordinate system) 기능을 활용하여 Fig. 8과 같이 중앙부 온도를 확인하였다.

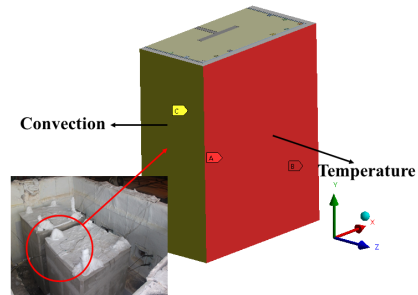


Fig. 7. Thermal boundary condition

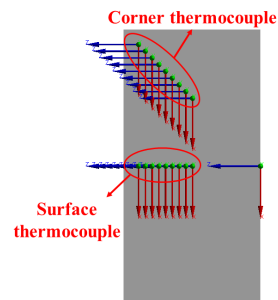


Fig. 8. Coordinate system

4. 결과 및 비교분석

4.1 화재실험 깊이별 온도결과

모든 실험체는 Fig. 9과 같이 ASTM E119[13]의 표준화재곡선에 따라 실험체를 가열하였다. 실제 가열로 내의 온도는 ASTM E119[13]의 표준화재곡선과 비교했을 때 화재시간 10분까지 평균 12 %의 차이가 발생했지만, 그 이후에는 약 1 % 내외로 표준화재곡선과 매우 유사한 것을 확인하였다.

비재하가열실험의 내부 온도분포는 열전대를 통해 측정하여 Table 3와 Fig. 10에 정리하였다.

SRC-2-2 실험체 모서리 부분 306 mm와 SRC-3-2 실험체 모서리부분 137 mm, 222 mm는 열전대에 오류가 발생하여 제외하였다. 실험체 온도는 Table 3와 같이 부재의 깊이가 깊어질수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. SRC-1-1와 SRC-3-2 실험체의 띠철근 온도(깊이 67 mm)는 다른 실험체들과 비교했을 때 각각 평균 3.8, 2.1배 높은 온도가 상승하였다. 이는 SRC-1-1와 SRC-3-2 실험체가 Fig. 10과 같이 약 67 mm까지 폭열이 발생하였기 때문이다.

화재실험으로 도출된 온도 데이터를 평균값(SRC-average)으로 산출하여 화재시간에 따른 깊이별 온도분포를 Table 3에 정리하였다. 실험 평균값은 폭열이 발생한 SRC-1-1와 SRC-3-2 표면부 온도결과를 제외시켜 평균을 산정하였다. 또한, 기존 연구[3-8]와 기준(EN1992-1-2[11], ACI216.1M-14[12])은 깊이 150 mm 이하까지만 온도 분포를 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 3와 같이 150 mm 이하구간에서 모서리부는 A그룹, 표면부는 A'그룹, 150 mm 초과구간에서는 모서리부는 B그룹, 표면부는 B'그룹으로 분류하여 온도 특성을 비교분석하였다.

화재시간에 따른 모서리부분의 깊이별 온도특성은 다음과 같다.

모서리부분 깊이별 최대온도는 길이방향철근 위치에서 발생하였으며, 화재시간 1시간일 때 143 ℃, 화재시간 2시간일 때 310 ℃, 화재시간 3시간일 때 455 ℃가 나타났다(Table 3, Fig. 10). 모서리부분 깊이별 최소온도는 표면으로부터 가장 깊은 열전대 위치에서 발생했으며, 화재시간 1시간일 때 30 ℃, 화재시간 2시간일 때 80 ℃, 화재시간 3시간일 때 95 ℃가 나타났다(Table 3, Fig. 10). 이와 같이 표면으로부터 깊어질수록 온도가 감소하는 것을 확인하였다.

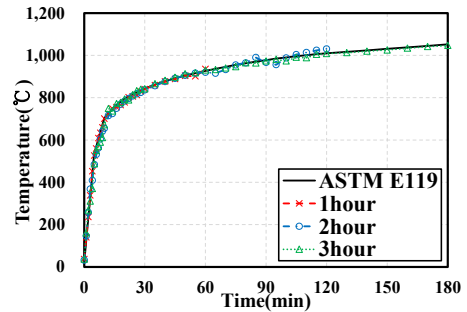


Fig. 9. Comparison of furnace temperature with ASTM E119[13]

모서리부 A구간(깊이 150 mm 이하)에서의 최대 온도 차이는 화재시간 1시간일 때 58 ℃, 화재시간 2시간일 때 206 ℃, 화재시간 3시간일 때 326 ℃ 차이가 발생하면서 급격한 온도 감소가 나타났다(Table 3, Fig. 10). 이는 기존 연구[7]와 같이 표면부에서 깊어질수록 온도가 급격하게 감소하는 경향과 동일했다. 그러나 B구간(깊이 150 mm 초과)에서의 최대 온도차이는 화재시간 1시간일 때 24 ℃, 2시간일 때 17 ℃, 3시간일 때 11 ℃ 차이가 발생했다(Table 3, Fig. 10). 이처럼 깊이 B구간에서는 더 깊은 곳까지 열이 균일하게 분포되는 것을 확인할 수 있다.

화재시간에 따른 표면부분의 깊이별 실험 온도특성은 다음과 같다.

표면부분 깊이별 최대온도는 띠철근 위치에서 발생하였으며, 화재시간 1시간일 때 129 ℃, 화재시간 2시간일 때 279 ℃, 화재시간 3시간일 때 373 ℃가 나타났다(Table 3, Fig. 10). 표면부분 깊이별 최소온도는 표면으로부터 가장 깊은 열전대 위치에서 발생했으며, 화재시간 1시간일 때 30 ℃, 화재시간 2시간일 때 79 ℃, 화재시간 3시간일 때 57 ℃가 나타났다(Table 3, Fig. 10). 이와 같이 표면으로부터 깊어질수록 온도가 감소하는 것을 확인하였다.

표면부 A'구간에서의 최대 온도 차이는 화재시간 1시간일 때 75 ℃, 화재시간 2시간일 때 178 ℃, 화재시간 3시간일 때 261 ℃ 차이가 발생하면서 급격한 온도 감소가 나타났다(Table 3, Fig. 10). 이는 기존 연구[7]와 같이 표면부에서 깊어질수록 온도가 급격하게 감소하는 경향과 동일했다. 그러나 B'구간에서의 최대 온도차이는 화재시간 1시간일 때 24 ℃, 2시간일 때 22 ℃, 3시간일 때 55 ℃ 차이가 발생했다(Table 3, Fig. 10). 이처럼 깊이 B'구간에서는 더 깊은 곳까지 열이 균일하게 분포되는 것을 확인할 수 있다.

Zhang[7]은 SRC기둥의 단면크기가 증가하면 화재표면으로부터 깊어질수록 온도가 급격하게 저감된다고 제시했다. 하지만, 본 연구에서는 깊이 150mm 초과 구간(B, B' 구간)에서 급격한 온도 저감은 보이지 않았으며, 더 깊은 곳까지 열이 균일하게 분포되는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 Zhang[7]의 연구와는 다른 경향을 확인할 수 있으며, 깊은 곳까지 열이 분포되기 때문에 내력 산정

시 영향을 끼칠 수 있다.

화재시간에 따른 H형강 온도는 다음과 같이 Table 4에 정리하였다. A, B, C는 Fig. 3와 같이 플랜지와 웨브의 열전대 위치이다. 평균 H형강 온도는 1시간일 때 평균 26.3 °C, 2시간일 때 평균 31.2 °C, 3시간일 때 평균 48.3 °C로 나타났다. H형강은 충분히 콘크리트에 매설되어 있어 화재에 따른 영향을 크게 받지 않았다. 또한, 화재

Table 3. Temperature distribution

Comparison	Time (hour)	Temperature(°C)																	
		Depth from corner(mm)									Depth from surface(mm)								
		A			B						A'			B'					
		67	97	127	157	187	217	247	277	307	67	97	127	157	187	217	247	277	307
SRC-1-1	1	131	94	74	44	33	32	-			490	289	133	97	72	42	-		
SRC-1-2	1	180	119	89	65	43	29				113	85	73	44	32	30			
SRC-2-1	1	130	94	86	54	35	28				137	113	82	58	38	31			
	2	312	133	100	90	76	70				270	193	125	106	83	67			
SRC-2-2	1	164	103	73	47	35	-				128	102	85	62	41	31			
	2	320	144	112	103	88	-				284	126	101	99	95	95			
SRC-3-1	1	124	102	97	59	39	31				137	102	77	63	52	28			
	2	289	115	102	99	97	95				284	151	117	99	91	76			
	3	432	194	129	114	107	103	102	101	94	373	218	142	112	101	95	86	72	57
SRC-3-2	1	131	-	93	-	32	28	-			462	120	91	62	38	29	-		
	2	318	-	103	-	79	75				696	264	147	106	99	90			
	3	477	-	129	-	107	103	103	98	95	779	372	222	139	105	99	97	79	72
SRC average*	1	143	102	85	54	36	30	-			129	101	79	54	44	30	-		
	2	310	131	104	97	85	80				279	157	114	101	90	79			
	3	455	194	129	114	107	103	103	100	95	373	218	142	112	101	95	86	72	57
Wickström	1	262	51	25	25	25	25	-			141	26	25	25	25	25	-		
	2	483	279	109	25	25	25				280	151	56	25	25	25			
	3	618	421	254	110	25	25	25	25	25	371	234	134	56	25	25	25	25	25
Kodur	1	278	123	25	25	25	25	-			152	57	25	25	25	25	-		
	2	450	312	188	74	25	25				277	172	93	29	25	25			
	3	550	424	307	199	97	25	25	25	362	250	166	98	41	25	25	25	25	25
ANSYS-E*	1	162	85	58	34	26	25	-			150	92	48	30	25	25	-		
	2	336	188	107	68	44	32				305	177	102	64	41	32			
	3	439	277	175	110	74	52	35	30	25	391	244	154	99	67	48	36	29	25
ANSYS-A*	1	247	126	61	35	26	25	-			232	181	59	35	25	25	-		
	2	393	259	163	99	60	39				362	236	148	91	56	38			
	3	474	340	243	166	110	73	50	36	29	430	305	216	148	99	67	47	35	28
Eurocode2*	1	244	103	55	Non-available						157	83	47	Non-available					
	2	471	282	143							249	160	97						
ACI216*	1	268	150	80							200	120	66						
	2	431	297	231							345	259	224						
	3	578	429	320							467	359	295						

*SRC average: Average of test data, ANSYS-E: Eurocode4[14] based finite element analysis, ANSYS-A: ASCE1992[15] based finite element analysis, Eurocode2: Eurocode2[11] temperature profile, ACI216: ACI216[12] temperature profile

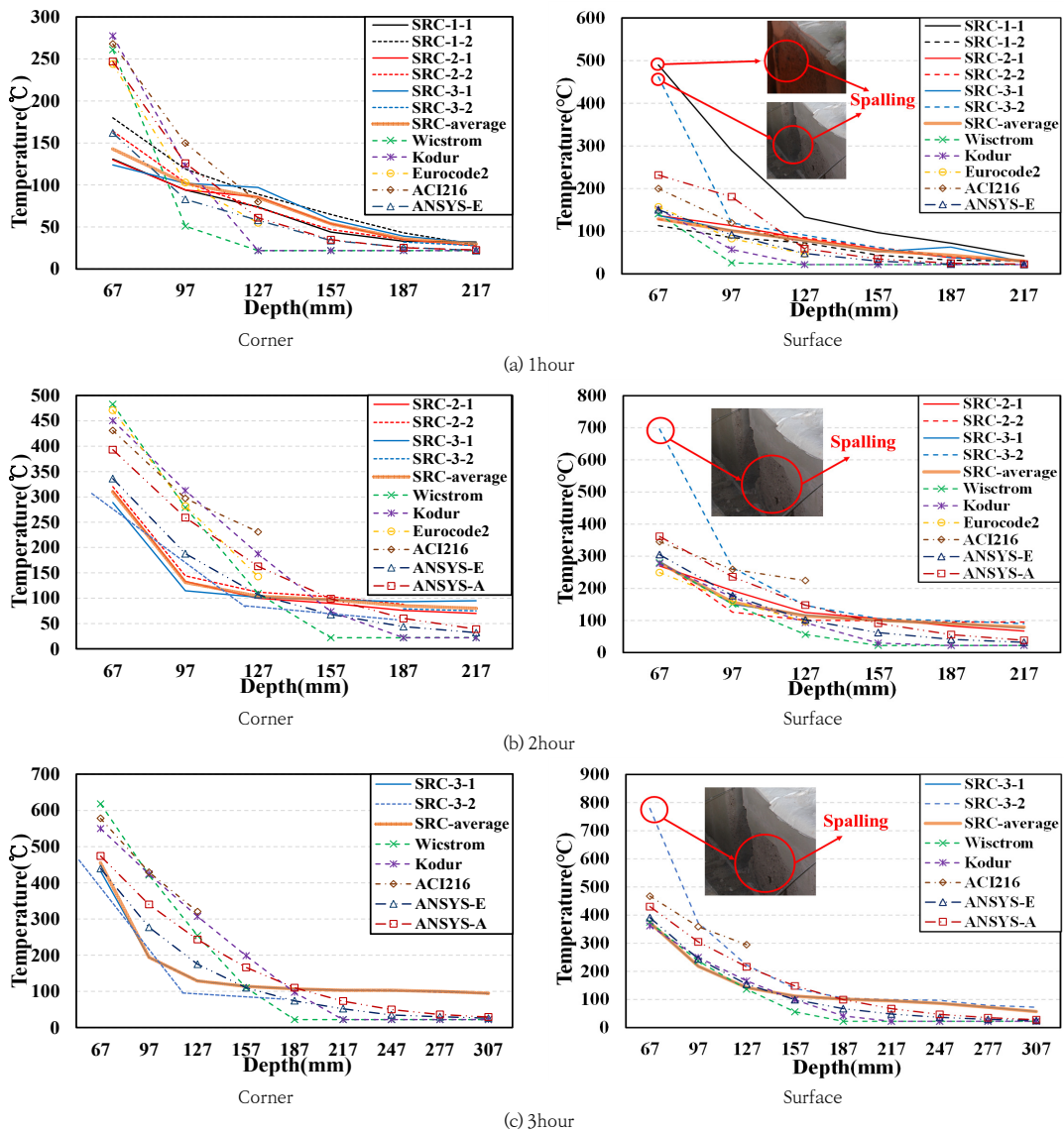


Fig. 10. Temperature distribution due to depth

시간별 평균 온도가 100 °C 이하이기 때문에 강재의 강도 저감이 나타나지 않는다고 판단했다.

4.2 실험결과와 온도예측식의 온도비교분석

Wickström[9]과 Kodur[10]의 깊이별 온도는 각각 Eqs. (1),(2)와 Eqs. (3),(4)를 사용하여 도출하였으며, Table 3와 Fig. 11에 정리하였다. 또한, 실험 평균값과 기존 온도결정식[9, 10]의 깊이별 온도 차이를 Table 5에 정리하였으며, 도출된 깊이별 온도 차이를 절대값 평균하였다.

Table 4. Temperature of H-section steel

	Temperature(°C)								
	1hour			2hour			3hour		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
SRC-1-1	26	25	25	-			-		
SRC-1-2	25	26	26						
SRC-2-1	28	25	28	39	20	30			
SRC-2-2	26	27	25	36	30	32			
SRC-3-1	26	26	28	29	28	29	41	42	42
SRC-3-2	26	27	28	33	30	38	54	53	58
Average	26	26	27	34	27	32	48	48	50
Overall average	26.3			31.2			48.3		

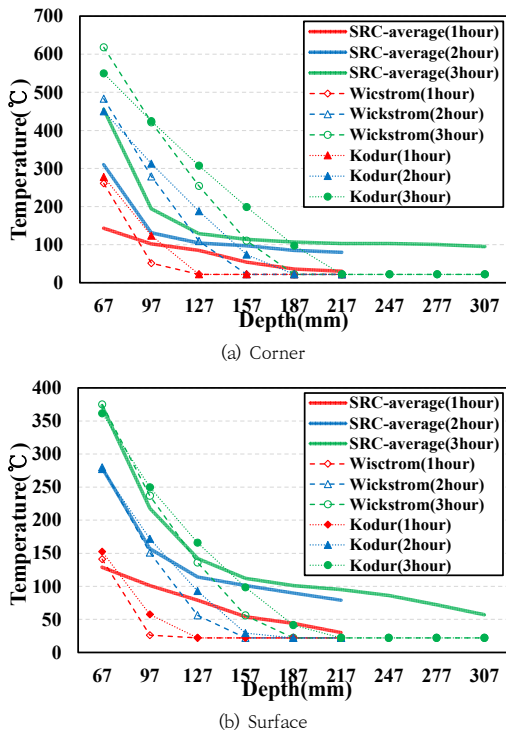


Fig. 11. Comparison of test and temperature determination equation

Wickström[9]온도결정식의 모서리부분과 표면부분 깊이별 온도와 실험 온도의 차이를 비교분석하였다.

모서리부분은 A구간에서 최대 152 °C, 최소 63 °C 온도 차이를 나타냈으며, B구간에서 최대 78 °C 온도 차이가 발생하면서 실험과 큰 차이를 보였다(Table 5, Fig. 11(a)). 표면부분은 A'구간에서 최대 41 °C, 최소 5 °C 차이를 나타내며 실험과 유사하였으나, B'구간에서 최대 64 °C 온도 차이를 나타내며 실험과 큰 차이를 보였다(Table 5, Fig. 11(b)). 또한, Wickström[9]온도결정식 모서리 및 표면부분 깊이별 온도는 화재실험과는 다르게 초기온도(25 °C)에 일찍 도달하는 것을 확인할 수 있다(Table 3, Fig. 11). 따라서, Wickström[9]온도결정식은 표면부분 150 mm 이하 구간에서의 온도 예측 시 활용할 수 있으며, 실제실험과 비교했을 때 Wickström[9]온도결정식은 깊은 곳의 콘크리트 항복강도, 탄성계수를 실험보다 더 높게 판단하여 내력 산정시 영향을 끼칠 수 있다.

Kodur[10]온도결정식의 모서리부분과 표면부분 깊이별 온도와 실험 온도의 차이를 비교분석하였다.

모서리부분은 A구간에서 최대 144 °C, 최소 107 °C 온도 차이를 나타냈으며, B구간에서 최대 78 °C 온도 차

이가 발생하면서 실험과 큰 차이를 보였다(Table 5, Fig. 11(a)). 표면부분은 A'구간에서 최대 34 °C, 최소 12 °C 차이를 나타내며 실험과 유사하였으나, B'구간에서 최대 64 °C 온도 차이를 나타내며 실험과 큰 차이를 보였다(Table 5, Fig. 11(b)). 또한, Kodur[10]온도결정식 모서리 및 표면부분 깊이별 온도는 화재실험과는 다르게 초기온도(25 °C)에 일찍 도달하는 것을 확인할 수 있다(Table 3, Fig. 11). 이는 Kodur[10]온도결정식은 300 ~ 800 °C 온도 범위의 정확도가 주요목표이기 때문에 제안된 방정식을 사용한 예측은 20 ~ 300 °C 범위일 때 상대적으로 큰 오차가 발생할 수 있다[10]. 따라서, Kodur[10]온도결정식은 표면부분 150 mm 이하 구간에서의 온도 예측 시 활용할 수 있으며, 실제실험과 비교했을 때 Kodur[10]온도결정식은 깊은 곳의 콘크리트 항복강도, 탄성계수를 실험보다 더 높게 판단하여 내력 산정시 영향을 끼칠 수 있다.

4.3 실험결과와 유한요소해석의 온도비교분석

Eurocode4[14]재료모델 기반 유한요소해석 결과인 ANSYS-E와 ASCE1992[15]재료모델 기반 유한요소해석 결과인 ANSYS-A의 온도분포를 Table 3과 Fig. 12에 정리하였다. 또한, 실험 평균값과 유한요소해석의 깊이별 온도 차이를 Table 5에 정리하였으며, 도출된 깊이별 온도 차이를 절대값 평균하였다.

ANSYS-E의 모서리부분과 표면부분 깊이별 온도와 실험결과의 차이를 비교분석하였다.

모서리부분 A구간에서 최대 52 °C 온도 차이가 발생하면서 실험과 유사하였으나, B구간에서 깊이가 깊어질수록 온도 차이가 증가하면서 최대 온도 차이 70 °C로 실험과 큰 차이를 보였다(Table 5, Fig. 12(a)). 표면부분 A'구간에서 최대 22 °C 온도 차이를 나타냈으며, B'구간에서 최대 50 °C 온도 차이를 보이면서 실험과 유사한 것을 확인하였다(Table 5, Fig. 12(b)). ANSYS-E는 화재실험과 다르게 150 mm 이상에서도 깊어질수록 온도가 급격하게 저감되는 것을 확인할 수 있다(Table 3, Fig. 12). 이러한 차이는 화재실험 중에 콘크리트 내부의 복잡한 수분이동 및 증발소산으로 인해 발생한다[4]. 유한요소해석은 현재 수분 이동과정을 정확하게 시뮬레이션하기 어렵기 때문에 차이가 발생하였다고 판단했다. 따라서, ANSYS-E는 모서리부분 150 mm 이하 구간 및 표면부분 온도 예측 시 활용할 수 있으며, 실제실험과 비교했을 때 ANSYS-E는 깊은 곳의 콘크리트 항복강도, 탄성계수를 실험보다 더 높게 판단하여 내력 산정시 영향을

Table 5. Temperature deviation

Comparison	Time (hr)	Temperature(℃)																	
		Depth from corner(mm)									Depth from surface(mm)								
		A			B						A'			B'					
		67	97	127	157	187	217	247	277	307	67	97	127	157	187	217	247	277	307
$T_{Average}$ - T_W^*	1	119	-51	-60	-29	-11	-5				12	-74	-57	-32	-22	-8			
	2	173	149	5	-72	-60	-55				1	-6	-58	-79	-68	-60			
	3	164	227	125	-4	-82	-78	-78	-75	-70	-2	16	-8	-56	-79	-73	-64	-50	-35
Absolute average		152	142	63	35	51	46	78	75	70	5	32	41	56	56	47	64	50	35
$T_{Average}$ - T_K^*	1	134	21	-60	-29	-11	-5				24	-43	-57	-32	-22	-8			
	2	141	182	83	-24	-60	-55				-2	15	-21	-72	-68	-60			
	3	95	230	178	85	-10	-78	-78	-75	-70	-11	32	24	-14	-60	-73	-64	-50	-35
Absolute average		123	144	107	46	27	46	78	75	70	12	30	34	39	50	47	64	50	35
$T_{Average}$ - T_{EA}^*	1	19	-17	-27	-20	-10	-5				21	-9	-31	-24	-21	-8			
	2	26	57	3	-29	-41	-48				26	20	-12	-39	-49	-50			
	3	-16	83	46	-4	-33	-51	-68	-70	-70	18	26	12	-13	-34	-47	-50	-43	-32
Absolute average		20	52	25	17	28	34	68	70	70	22	10	18	25	34	35	50	43	32
$T_{Average}$ - T_{AA}^*	1	104	24	-24	-19	-11	-5				103	81	20	-19	-19	-7			
	2	83	128	59	2	-25	-41				83	79	34	-10	-33	-44			
	3	20	146	114	52	3	-30	-53	-64	-66	57	87	74	36	-2	-28	-39	-37	-29
Absolute average		69	99	66	24	13	25	53	64	66	81	82	43	22	18	26	39	37	29
$T_{Average}$ - T_{EN}^*	1	101	1	-30							28	-18	-32						
	2	161	151	39							-30	3	-17						
	Absolute average		131	76	35							29	11	25					
$T_{Average}$ - T_{ACI}^*	1	125	48	-5							71	20	-13						
	2	121	166	127							66	102	110						
	3	124	235	191							94	141	153						
Absolute average		123	150	108							77	88	92						

* K : kodur[9], W : Wickstrom[10], EA : Eurocode4 based finite element analysis, AA : ASCE1992 based finite element analysis, EN : EN1992-1-2[11], ACI : ACI216.1M-14[12]

끼칠 수 있다.

ANSYS-A의 모서리부분과 표면부분 깊이별 온도와 실험결과의 차이를 비교분석하였다.

모서리부분 A구간에서 최대 99 ℃, 최소 66 ℃ 온도 차이가 나타났으며, B구간에서 깊이가 깊어질수록 온도 차이가 증가하면서 최대 온도 차이 66 ℃로 실험과 큰 차이를 보였다(Table 5, Fig. 12(a)). 표면부분 A'구간에서 최대 82 ℃, 최소 43 ℃ 온도 차이가 발생하면서 실험과 큰 차이를 보였으며, B' 구간에서 최대 39 ℃ 온도 차이를 보이면서 실험과 유사한 것을 확인하였다(Table 5, Fig. 12(b)). ANSYS-A는 화재실험과 다르게 150 mm 이상에서도 깊어질수록 온도가 급격하게 저감되는 것을 확인할 수 있다(Table 3, Fig. 12). 이러한 차이는 ANSYS-E와 마찬가지로 유한요소해석이 현재 수분 이동 과정을 정확하게 시뮬레이션하기 어렵기 때문에 차이가 발생하였다고 판단했다[4]. 따라서, ANSYS-A는 표면부분 150 mm 이상 구간 온도 예측 시 활용할 수 있으며, 실제실험과 비교했을 때 ANSYS-A는 깊은 곳의 콘크리트 항복강도, 탄성계수를 실험보다 더 높게 판단하여 내력 산정시 영향을 끼칠 수 있다.

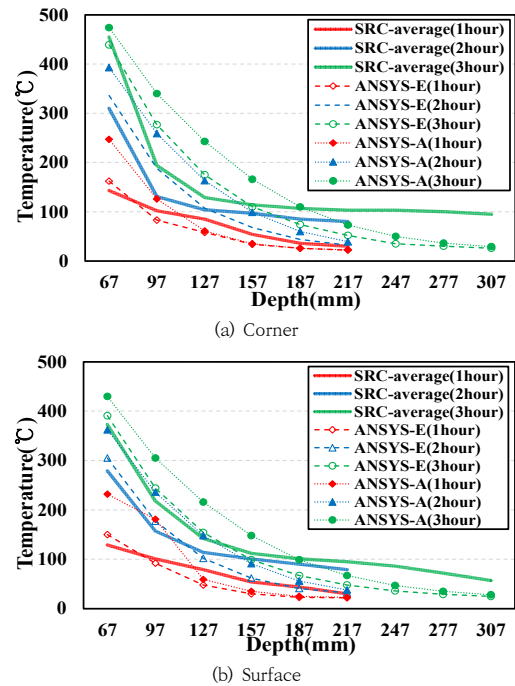


Fig. 12. Comparison of test and FEA

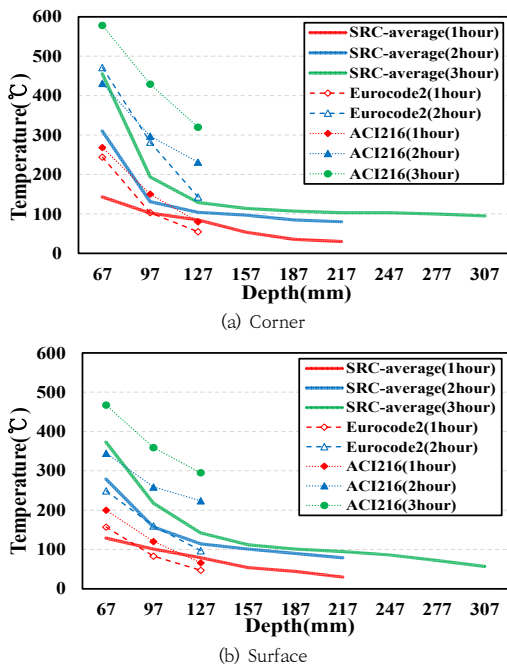


Fig. 13. Comparison of test and temperature profile

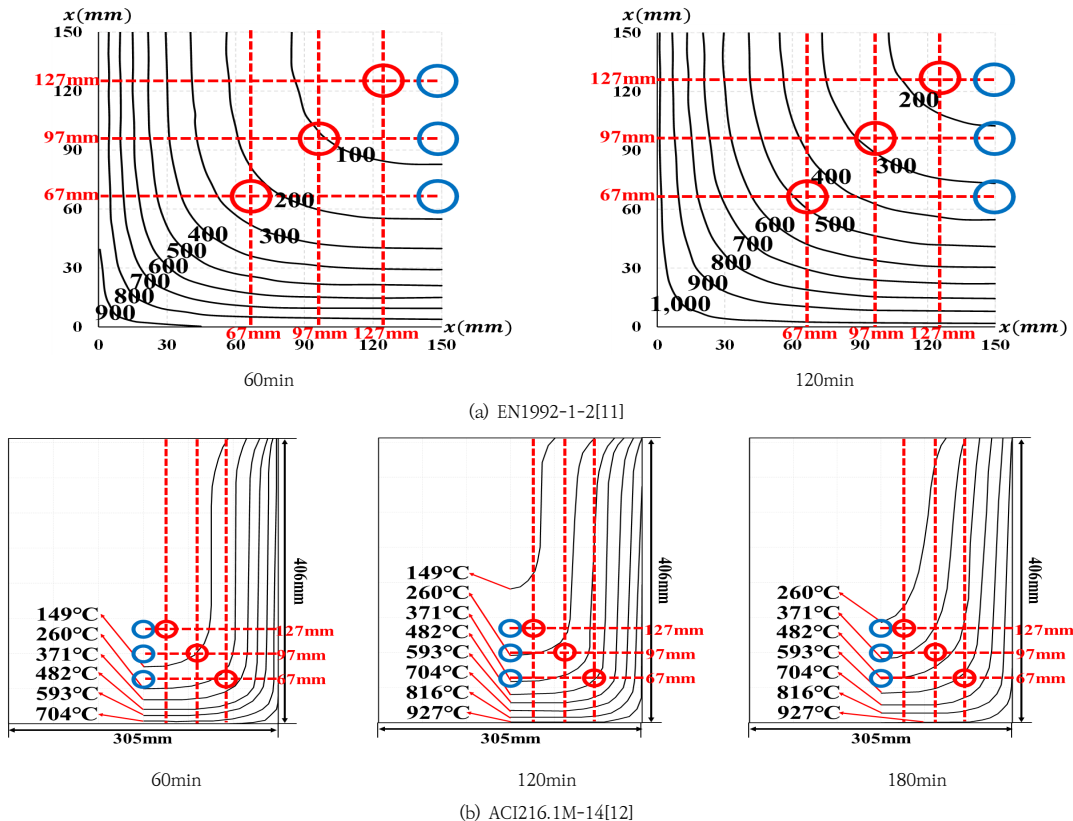


Fig. 14. Temperature derivation due to temperature profile

4.4 실험결과와 기준 온도분포 비교분석

EN1992-1-2[11]에서 제시하는 온도프로파일 결과와 ACI216.1M-14[12]에서 제시하는 온도프로파일 결과를 Table 3와 Fig. 13에 정리하였다. EN1992-1-2[11]와 ACI216.1M-14[12]은 Fig. 14와 같이 단면크기 제한(깊이 150 mm 이하)이 있어 모서리부분과 표면부분의 깊이별 온도는 깊이 150 mm 이하까지만 도출했다. 또한, 실험 평균값과 기준 온도프로파일의 깊이별 온도 차이와 함께 깊이별 온도 차이를 절대값 평균하여 Table 5에 정리하였다.

EN1992-1-2[11]온도프로파일의 모서리부분과 표면 부분 깊이별 온도와 실험결과의 차이를 비교분석하였다.

모서리부분 A구간에서 최대 131 °C 온도 차이가 발생하면서 실험온도와 큰 차이가 나타났으며(Table 5, Fig. 13(a)), 표면부분은 A'구간에서 최대 29 °C 온도 차이가 발생하면서 실험온도와 유사한 것을 확인할 수 있다 (Table 5, Fig. 13(b)). 따라서 EN1992-1-2[11]은 화재 실험값과 비교했을 경우 모서리부분에서 보수적으로 평

가하고 있었으며, 표면부분에서는 실험과 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 이는 EN1992-1-2[11] 온도프로파일에서 철근의 위치나 배근을 고려하지 않기 때문에 철근의 열용량(thermal capacity)은 고려되지 않는다. 표면 부분에서는 실험과 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 이는 EN1992-1-2[11] 온도프로파일에서 철근의 위치나 배근을 고려하지 않기 때문에 철근의 열용량(thermal capacity)은 고려되지 않는다. 따라서 EN1992-1-2[11] 온도프로파일은 철근의 열용량을 고려하지 않고 온도분포 특성을 제시하고 있기 때문에 실험값보다 보수적으로 평가된다고 판단했다. 또한, EN1992-1-2[11] 온도프로파일은 150 mm 초과인 깊이는 온도를 확인할 수 없기 때문에 메가 합성기둥의 적절한 내화설계를 수행하기 어려우므로 유한요소해석을 통해 온도예측을 하는 것이 필수적이다.

ACI216.1M-14[12] 온도프로파일의 모서리부분과 표면부분 깊이별 온도와 실험결과의 차이를 비교분석하였다.

모서리부분 A구간에서 최소 108 °C 온도 차이가 발생했으며(Table 5, Fig. 13(a)), 표면부분 A'구간에서 최소 77 °C 온도차이가 발생하면서 실험온도와 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있다(Table 5, Fig. 13(b)). 따라서 ACI216.1M-14[12] 온도프로파일은 모서리부분, 표면부분 모두 화재실험값보다 보수적으로 평가하고 있다. 이는 EN1992-1-2[11]와 같이 ACI216.1M-14[12] 온도프로파일은 철근의 위치나 배근을 고려하지 않기 때문에 실험값보다 보수적으로 평가된다고 판단했다. ACI216.1M-14[12]은 150 mm 초과인 깊이에서의 온도를 확인할 수 없기 때문에 메가 합성기둥의 적절한 내화설계를 수행하기 어려우므로 유한요소해석을 통해 온도예측을 하는 것이 필수적이다.

5. 결론

본 연구는 비재하 내화실험 결과, 연구자별 온도결정식(Wickström[9], Kodur[10]), 국외기준(EN1992-1-2[11], ACI216.1M-14[12]) 및 유한요소해석을 이용하여 깊이별 온도를 도출하였다. 각 조건별 도출한 온도를 이용하여 메가 SRC기둥 중앙부에서의 깊이별 온도를 비교분석하였다.

1) 실험체의 깊이별 온도는 깊이가 깊어질수록 감소하

였다. 모서리부분 및 표면부분에서 깊이 150 mm 이하 구간에서는 급격한 온도 감소가 나타났으며, 깊이 150 mm 초과인 구간에서는 열이 균일하게 분포되는 것을 확인하였다. 그러나 기존 Zhang[7]의 연구는 단면크기가 증가하면 화재표면으로부터 깊어질수록 온도가 급격하게 저감된다고 주장하였다. 따라서 본 연구는 기존 Zhang[7]의 연구와는 다른 경향을 확인할 수 있으며, 깊은 곳까지 열이 균일하게 분포되기 때문에 내력 산정시 영향을 끼친다고 판단했다.

2) Wickström[9] 온도결정식의 모서리부분은 깊이 150 mm 이하 구간에서 실험과 최대 152 °C, 최소 63 °C 온도 차이를 나타냈으며, 150 mm 초과 구간에서 실험과 최대 78 °C 온도 차이를 보이며 실험과 큰 차이를 보였다. Wickström[9] 온도결정식의 표면부분은 150 mm 이하 구간에서 실험과 최대 41 °C 온도 차이를 나타내며 실험과 유사하였으나, 150 mm 초과 구간에서 실험과 최대 64 °C 온도 차이를 보이며 실험과 큰 차이를 보였다. 이처럼 Wickström[9] 온도결정식은 표면부분 깊이가 150 mm 이하 온도 예측 시 활용할 수 있다. Kodur[10] 온도결정식의 모서리부분은 깊이 150 mm 이하에서 실험과 최소 107 °C 온도 차이를 나타냈으며, 150 mm 초과구간에서 실험과 최대 78 °C 온도 차이가 발생하면서 실험과 큰 차이를 보였다. Kodur[10] 온도결정식의 표면부분은 150 mm 이하 구간에서 실험과 최대 34 °C 온도 차이를 나타내며 실험과 유사하였으나, 150 mm 초과 구간에서 실험과 최대 64 °C 온도 차이를 나타내며 실험과 큰 차이를 보였다. 이처럼 Kodur[10] 온도결정식은 표면부분 깊이가 150 mm 이하 온도 예측 시 활용할 수 있다. 온도결정식(Wickström[9], Kodur[10])은 화재실험보다 빠르게 초기온도에 도달하였다. 이는 실제 실험과 비교했을 때 온도결정식은 깊은 곳의 콘크리트 항복강도, 탄성계수를 실험보다 더 높게 판단하여 내력 산정시 영향을 끼칠 수 있다.

3) ANSYS-E의 모서리부분은 깊이 150 mm 이하 구간에서 실험과 최대 52 °C 온도차이가 발생하면서 실험과 유사하였으나, 깊이 150 mm 초과 구간에서 깊이가 깊어질수록 실험과 온도 차이가 증가하면서 최대 온도 차이 70 °C 로 실험과 큰 차이를 보였다. ANSYS-E의 표면부분은 깊이 150 mm 이하 구간에서 실험과 최대 22 °C 온도차이를 나타냈으며, 깊이 150 mm 초과 구간에서 실험과 최대 50 °C 온도 차이를 보이며 실험과 유사한 것을 확인하였다. 이처럼 ANSYS-E는 모서리부분 깊이 150 mm 이하 구간 및 표면부분 온도 예측시 활용할 수

있다. ANSYS-A의 모서리부분은 깊이 150 mm 이하 구간에서 실험과 최소 66 °C 온도차이를 나타냈으며, 깊이 150 mm 초과 구간에서 깊이가 깊어질수록 온도 차이가 증가하면서 실험과 최대 온도 차이 66 °C 로 실험과 큰 차이를 보였다. ANSYS-A의 표면부분은 깊이 150 mm 이하 구간에서 실험과 최대 82 °C, 최소 43 °C 온도 차이를 나타내 실험과 큰 차이를 보였으며, 깊이 150 mm 초과 구간에서 실험과 최대 39 °C 온도 차이를 보이며 실험과 유사한 것을 확인하였다. 이처럼 ANSYS-E는 모서리 부분 깊이 150 mm 이상 온도 예측시 활용할 수 있다. 유한요소해석(ANSYS-E, ANSYS-A)은 실제실험과 비교했을 때 깊은 곳의 콘크리트 항복강도, 탄성계수를 실험보다 더 높게 판단하여 내력 산정시 영향을 끼칠 수 있다.

4) EN1992-1-2[11]온도프로파일의 모서리부분 온도는 150 mm 이하에서 최대 76 °C 온도차이가 발생하면서 실험 온도와 큰 차이가 나타났으며, 표면부분 온도는 실험과 최대 29 °C 온도 차이가 발생하면서 실험 온도와 유사한 것을 확인할 수 있다. ACI216.1M-14[12]온도프로파일의 모서리부분 온도는 깊이 150 mm 이하에서 실험과 최소 108 °C 온도차이가 발생했으며, 표면부분은 실험과 최소 77 °C 온도차이가 발생하면서 실험온도와 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 EN1992-1-2[11] 표면부분 온도만 실험 온도 값과 유사하였으며, 나머지 (EN1992-1-2[11] 모서리부분, ACI216.1M-14[12] 표면, 모서리 부분)는 실험값보다 보수적으로 평가하고 있었다. 이는 EN1992-1-2[11]과 ACI216.1M-14[12] 온도프로파일에서 철근의 위치나 배근을 고려하지 않기 때문에 철근의 열용량은 고려되지 않는다. 따라서 EN1992-1-2[11]과 ACI216.1M-14[12] 온도프로파일은 철근의 열용량을 고려하지 않고 온도분포 특성을 제시하고 있기 때문에 실험값보다 보수적으로 평가된다고 판단했다. 또한, 기준 온도프로파일(EN1992-1-2[11], ACI216.1M-14[12])은 150 mm이상의 깊이는 온도를 확인할 수 없기 때문에 메가 SRC기둥의 적절한 내화설계를 수행하기 어려우므로 유한요소해석을 통해 온도예측을 하는 것이 필수적이다.

Reference

- [1] Y. S. Kim, B. J. Choi, "An Analytical Study on Encased Steel Composite Columns Fire Resistance According to Axial Force Ratio", *Research in the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.24, No.1, pp.97-107, February 2019.
DOI: <https://doi.org/10.11112/iksmi.2020.24.1.97>
- [2] J. Y. Lee, B. C. Han, J. H. Kim, Y. S. Shin, Y. J. Kwon, "The Needs and Countermeasure of Performance Based Structure and Fireproof Design for High-Strength Concrete", *Research in Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.5, pp.33-42, September 2008.
DOI: <https://doi.org/10.22636/MKCI.2008.20.5.33>
- [3] J. T. Yu, Z. D. Lu, Q. Xie, "Nonlinear Analysis of SRC Columns Subjected to Fire", *Research in Fire Safety*, Vol.42, pp.1-10, June 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.06.006>
- [4] J. H. Chen, C. Ma, J. H. Li, Q. Qian, "Temperature Field Analysis of Steel Reinforced Concrete Column in Fire", *Research in Applied Mechanics and Materials*, Vols.351-352, pp.615-618, August 2013. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.615>
- [5] X. Mao, V. K. R. Kodur, "Fire Resistance of Concrete Encased Steel Columns Under 3-and 4-side Standard Heating", *Research in Constructional Steel Research*, Vol.67, pp.270-280, March 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.006>
- [6] L. H. Han, Q. H. Tan, T. Y. Song, "Fire Performance of Steel Reinforced Concrete Columns", *Research in Structural Engineering*, Vol.141, No.4, April 2015.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001081](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001081)
- [7] Q. Zhang, "Application of ABAQUS on the Research of the Thermal Field of SRC Columns", *IOP Conference series : Earth and Environmental Science*, Nanchang, China, Vol.719, pp.1-7, January 2021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/719/2/022055>
- [8] Z. F. Huang, K. H. Tan, W. S. Toh, G. H. Phng, "Fire Resistance of Composite Columns with Embedded I-section Steel Effects of Section Size and Load Level", *Research in Constructional Steel Research*, Vol.64, No.3, pp.312-325, July 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.07.002>
- [9] U. Wickström, "A Very Simple Method for Estimating Temperature in Fire Exposed Concrete Structures", *Research in Applied Science*, pp.186-194, 1986.
- [10] V. K. R. Kodur, Y. Bu, M. M. S. Dwaikat, "A Simplified Approach for Predicting Temperature in Reinforced Concrete Members Exposed to Standard Fire", *Research in Fire Safety*, Vol.56, pp.39-51, February 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.12.004>
- [11] European Committee for Standardization (2005) Eurocode 2:Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules-Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings(EN1992-1-2:2005), Belgium, pp.63-71.
- [12] American Concrete Institute (2017) Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies(ACI

216.1M-14), USA.

- [13] ASTM International (2015) Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Material(ASTM E119), USA.
- [14] European Committee for Standardization (2005) Eurocode 4 :Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design(EN1994-1-2:2005), Belgium, pp.25-36.
- [15] American Society of Civil Engineers (1992) Structural Fire Protection Manual 78(ASCE1992), USA.
- [16] European Committee for Standardization (2002) Eurocode 1 :Actions on Structures, Part 1-2: General Actions Actions on Structures Exposed to Fire(EN1991-1-2:2002), Belgium, pp.23-25.

황 선 웅(Sun-Woong Hwang)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 2012년 2월 : 영생
고등학교 졸업
- 2014년 3월 ~ 2020년 2월 : 경기
대학교 건축공학과(학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 경기대학교
일반대학원 건축공학과(석사과정)

〈관심분야〉

건축, 건축구조

최 병 정(Byong-Jeong Choi)

[정회원]



- 1999년 1월 ~ 1999년 3월 :
(미)BSW ARCHITECT
(Engineering Specialist)
- 1999년 4월 ~ 2000년 12월 :
(미) HARZA ENGINEERING
COMPANY (구조설계부)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 경기대학교
(정교수)

〈관심분야〉

건축, 토목