Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.37, No.5, pp.251-259, October, 2025

Check for updates
ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2025.37.5.251

표준화재에 노출된 합성강판전단벽의 온도기반 구조화재설계법

정명후[1] · 이창환[2] · 박민재[3*]
[1]석사과정, 국립부경대학교, 건축·소방공학부, [2]부교수, 국립부경대학교, 건축공학과, [3]조교수, 국립부경대학교, 건축공학과

Structural Fire Design Method of Steel-Plate Composite Walls under Standard Fire Based on Temperature Distributions

Jeong, Myeong Hoo[1], Lee, Chang-Hwan[2], Park, Min Jae[3*]
[1]Graduate Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea
[2]Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea
[3]Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

Abstract – In Korea, since no domestic design guidelines have been established for the structural fire design of steel-plate composite walls (SC walls), it is necessary to refer to international design provisions to perform structural fire design. However, existing predictive equations for fire performance are often inefficient for practical use. This study proposes practical methods for fire resistance evaluation by performing finite element analysis and a steady-state thermal resistance model and provide temperature distribution for composite steel-plate walls. The two proposed methods were applied to a structural fire design example, and their results were compared to assess practical applicability in efficient design.
Keywords – Steel-plate composite walls, Structural fire design, Heat transfer analysis, Temperature profile, Prediction equation

1. 서 론

합성강판전단벽(Steel-plate composite walls, SC walls)은 강판 튜브의 내부에 콘크리트가 채워진 CFT (Concrete-filled tube) 형태를 이루는 벽체다. 이는 강판 튜브와 내부 콘크리트의 합성을 위한 전단 스터드(Shear stud) 그리고 강판 사이의 연결과 간격을 유지해주는 타이바(Tie bar)가 일반적으로 하나의 모듈로 공장에서 사전제작된다. 합성강판전단벽은 외부의 강판 튜브를 통해 RC전단벽과 동일한 단면크기에서 더 높은 내력을 가지며, 이와 동시에 강판 튜브가 거푸집 역할을 하여 공사 기간이 대폭 감소된다. 또한, 외부 강판이 내부 콘크리트의 구속효과를 제공하여 콘크리트의 변형을 억제한다. 내부 콘크리트는 외부 강판의 국부좌굴을 억제하여 강판의 안정성을 향상시킨다. 이 장점들을 바탕으로 해외에서는 이미 합성강판전단벽의 설계와 적용이 이루어지고 있다.

해외에서는 합성강판전단벽에 대한 연구가 꾸준하게 이루어져 왔다. 축하중을 받는 벽체에 대해 강-콘크리트 접촉면의 낮은 부착력은 압축강도를 완전히 발현할 수 없음을 확인하였고[1], 부착력 증가를 위해 강-콘크리트 접촉면의 내부 연결재 간격에 대한 연구가 진행되었다[2],[3]. 이 연구를 확장하여, 적절한 내부 연결재 간격이 벽체의 국부좌굴의 저항성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다[4]-[6]. 그리고 해양구조물에 적용된 합성강판전단벽이 빙하 충돌 및 파랑 하중에 대해 횡방향 및 종방향 강도를 실험과 수치해석을 통해 평가하였고[7], 면내 전단거동을 분석하기 위해 실험과 수치해석을 수행하였다[8],[9], 그리고 반복하중 실험을 수행하여 합성강판전단벽의 내진거동을 분석하여 우수한 에너지 소산능력을 확인하였고, 이를 통해 내진 성능을 입증하였다[10],[11]. 이뿐만 아니라, 화재에 취약한 강판이 외부에서 직접적으로 노출되는 특성을 고려하여 합성강판전단벽의 내화 성능을 규명하기 위한 실험과 수치

Note.-Discussion open until April 30, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 17, 2025; revised on August 11, 2025; approved on August 11, 2025.

*Corresponding author.
Tel. +82-51-629-6079 Fax. +82-51-629-7084
E-mail. mjp@pknu.ac.kr

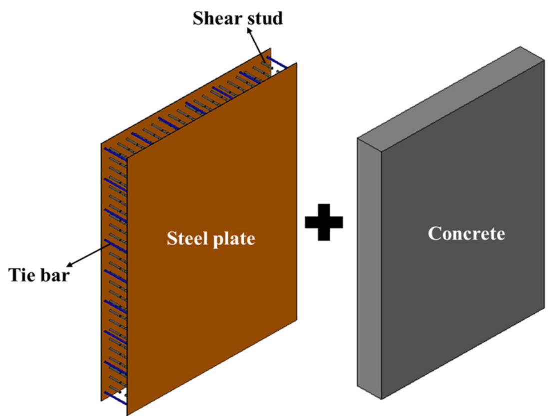


Fig. 1. Components of SC wall

해석이 다양한 변수 조건에서 진행되었으며[12]-[16], 이를 통해 우수한 내화 성능이 입증되었다. 이 연구들을 바탕으로 해외에서는 합성강판전단벽의 설계 지침[17],[18]을 제공하고 있으며, 이 설계 지침은 다양한 분야에서 적용되어 내화피복을 최소화하는 내화설계가 수행되고 있다.

현재 국내에서는 합성강판전단벽의 적용 사례가 없으며, 국내 건축물 강-콘크리트 합성구조 설계기준과 건축물 강합성구조 설계기준에도 해당 전단벽에 대한 명확한 설계기준이 마련되어 있지 않다. 특히, 국내에서 합성강판전단벽은 내화설계가 필수적이나, 현재로서는 해외 설계 지침[17],[18]에 의존할 수밖에 없다. ANSI/AISC 360-22[17]에서 제공하는 식 (1)의 내화성능 예측식은 하나의 수식으로 제시되지만, 많은 변수의 정보가 필요하고, 높은 안전율로 인해 비효율적인 설계를 초래할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 많은 변수의 정보 없이도 실무자가 내화설계를 수행할 수 있도록 표준화재에 노출된 합성강판전단벽의 내부 온도 데이터를 제공하고자 한다. 이를 바탕으로, 온도 기반의 강도 산정이 가능하도록 하여 효율적이고 실용적인 구조화재설계법을 제시하는 것을 목표로 한다.

$$R=[-18.5(\frac{P_u}{P_n})^{(0.24-\frac{L/t_{sc}}{230})}+15](\frac{1.9t_{sc}}{200}-1) \tag{1}$$

2. 해석개요

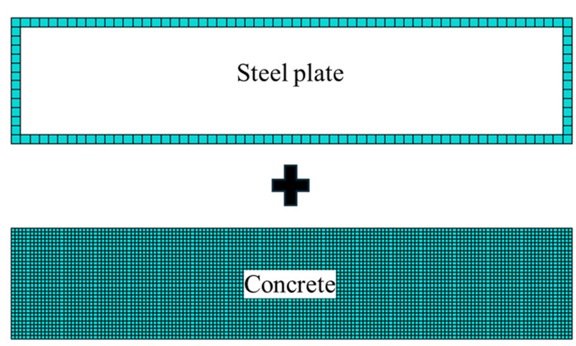
본 연구에서는 ABAQUS/CAE 2024를 활용하여 합성강판전단벽의 열전달 해석을 수행하였다. 해석의 목적은 화재에 노출된 벽체의 단면 온도 분포를 정량적으로 도출하여, 구조 실무자가 해당 데이터를 바탕으로 내화설계를 직접 수행할 수 있도록 지원하는 것에 있다. 유한요소해석 모델링은 선행 내화실험을 참고하여 진행하였고, 재료의 열적 특성과 강-콘크리트 계면 특성을 고려하여 해석을 수행하였다.

2.1 유한요소 모델링

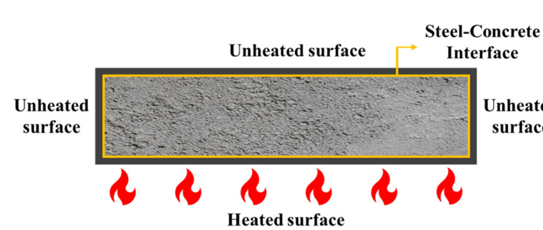
본 연구에서는 화재에 노출된 합성강판전단벽의 내부 온도 데이터를 기반으로 수행된다. 열전달 해석을 통해 시간에 따라 변화하는 벽체 단면의 온도 데이터를 도출하고자 하였다. 따라서 단면의 온도 분포를 효율적으로 파악할 수 있는 2차원 열전달 해석[19],[20]을 진행하였다. 이를 위해 Fig. 2(a)에 나타난 강판과 콘크리트는 4개의 절점을 가진 2차원 Shell 요소(DC2D4)로 모델링하였다.

2.2 재료 특성

열전달 해석은 재료의 열적 특성을 반영하여 수행되므로, 본 연구에서는 재료의 열적 특성만 고려하였다. 열전도율, 열팽창계수, 비열을 정의하였으며, 콘크리트의



(a) Finite element modeling of SC wall



(b) Heated surface and steel-concrete interface

Fig. 2. Modeling of SC Wall

열적 특성은 Eurocode 2 part 1-2[21]를 참고하였고, 강판의 열적 특성은 Eurocode 3 part 1-2[22]를 참고하였다. 이는 온도에 따라 변화하며, 100℃ 간격으로 제공된다.

2.3 대류 및 복사 특성

본 연구의 열전달 해석은 KS F 2257-1(건축부재의 내화실험방법-일반 요구사항)[23]에서 제시하고 있는 내화실험 프로세스[24]를 참고하여 진행되었다. 해당 기준을 따르면, 벽체의 내화실험 프로세스는 벽체의 한 면만을 화재에 노출시키는 조건으로 진행되며, 적용되는 화재는 식 (2)에서 제시하는 표준화재곡선[25]이다. 따라서 본 해석에서는 표준화재곡선을 Fig. 4에 나타난 벽체의 한 면에만 적용하여 열전달 해석을 진행하였다.

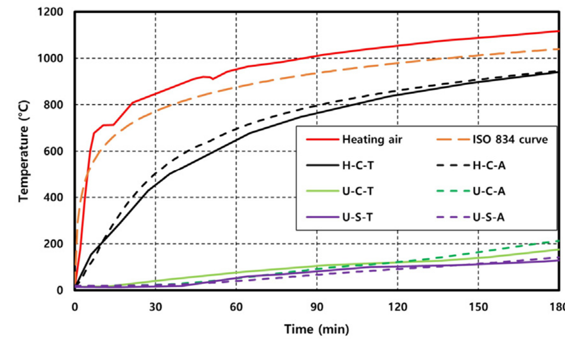
Eurocode 1 part 1-2[26]에서는 화재 노출 조건 하에서의 강재 표면의 복사율(ϵ)과 대류열전달계수(h_c)에 대한 기준값을 제공하고 있다. 이 기준들을 바탕으로 본 연구의 열전달 해석에서는 강재 표면의 복사율을 0.7로 적용하였으며, 가열면과 비가열면에 대한 대류열전달계수는 각각 25 W/m^{2}K와 4 W/m^{2}K를 적용하여 해석을 수행하였다.

$$T = 20 + 345\log(8t+1) \tag{2}$$

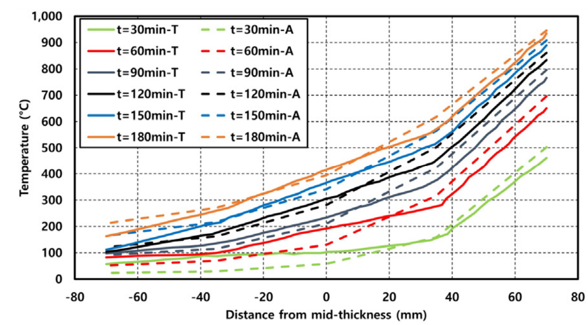
여기서, T는 시간에 따른 표준화재의 온도이며 t는 시간을 의미한다.

2.4 강-콘크리트 계면 특성

화재 시 가열면으로부터 전달되는 열은 외부 강판을 거쳐 내부 콘크리트로 전달된다. 이때 강판과 콘크리트의 계면에서는 전도에 의한 열전달이 발생한다. 두 재료 간의 계면은 완전한 접촉 상태로 가정할 수 있지만, 실제로는 계면의 불균일한 표면과 내부 공극으로 인해 계면에서 열저항이 생성되어 온도가 감소하는 현상이 발생한다. 이를 고려하기 위해 본 연구에서는 Fig. 2(b)의 강판과 콘크리트의 계면에 대해 열접촉전도(Thermal contact conductance)[27]를 입력하여 정의하였다. 입력한 열접촉전도는 CFT 기둥의 내화해석에서 가장 자주 사용되는 250W/m^{2}K를 사용하였다[28].



(a) Comparison of time-temperature curve



(b) Comparison of temperature distribution

Fig. 3. Comparison between test and numerical analysis result

2.5 신뢰성 검증

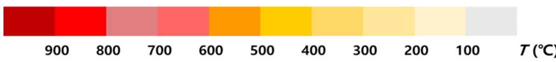
합성강판전단벽의 열전달해석을 수행하기 전, 본 연구에서 진행한 방법론에 대해 신뢰성 검증이 이루어져야 한다. 신뢰성 검증은 합성강판전단벽에 대해 공학적이고 합리적인 내화실험을 최초로 수행한 선행연구[13]의 실험 결과와 비교하여 진행하였다. 신뢰성 검증에 사용된 실험 데이터는 KS 기준처럼 1면 가열이 적용된 SCW9의 실험 결과이다.

Fig. 3는 실험 결과와 해석 결과의 비교를 보여주며, 실험 결과와 해석 결과가 매우 일치하는 것으로 판단된다. 이를 통해 본 연구에서 진행한 방법론은 충분한 신뢰성을 보여주는 것으로 판단되며 이를 바탕으로 합성강판전단벽의 열전달해석을 수행하였다.

3. 온도 데이터

3.1 열전달 해석 결과

Fig. 4는 열전달 해석을 통해 도출된 결과로, 표준화재에 노출된 시간에 따른 콘크리트 내부의 온도 분포를



Steel plate thickness (mm)	Temperature (℃)				
4	715.88	376.17	203.53	112.52	
6	697.43	369.10	198.79	110.04	
8	685.51	362.97	194.36	107.75	
10	676.88	357.07	189.97	105.53	
12	669.96	351.25	185.68	103.43	
14	663.71	345.57	181.61	101.53	
16	657.63	339.71	177.48		
18	651.50	333.76	173.43		
20	645.13	327.67	169.44	Below 100℃	
22	638.29	321.59	165.67		
24	630.02	315.41	161.95		
26	620.86	309.31	158.40		
28	610.79	303.29	154.98		
30	600.09	297.36	151.68		
34	578.81	285.87	145.47		
38	557.94	274.90	139.78		
Depth (mm)	0	25	50	75	100	125

(a) 1 hour fire exposure

Steel plate thickness (mm)	Temperature (℃)						
4	892.02	553.31	355.78	231.06	149.01	101.98	
6	889.54	549.76	352.46	228.25	146.92	100.71	
8	886.97	546.10	349.11	225.49	144.92		
10	884.24	542.19	345.61	222.68	142.93		
12	881.33	538.05	342.0	219.84	140.99		
14	878.19	533.68	338.34	217.08	139.18		
16	874.71	528.92	334.50	214.26	137.37		
18	870.77	523.79	330.57	211.48	135.64		
20	866.11	518.20	326.52	208.72	133.96	Below 100℃	
22	860.53	512.23	322.50	206.09	132.40		
24	853.67	505.80	318.45	203.51	130.88		
26	845.25	499.10	314.50	201.06	129.44		
28	834.97	492.17	310.70	198.71	128.07		
30	822.70	485.17	307.08	196.48	126.75		
34	792.17	471.74	300.57	192.35	124.25		
38	754.96	460.65	295.06	188.55	121.91		
Depth (mm)	0	25	50	75	100	125	150	175

(b) 2 hours fire exposure

Steel plate thickness (mm)	Temperature (℃)							
4	971.68	654.20	452.17	317.94	223.91	156.66	113.24	
6	970.21	652.09	450.05	315.98	222.15	155.19	112.15	
8	968.70	649.97	447.95	314.07	220.49	153.87	111.34	
10	967.15	647.79	445.79	312.10	218.76	152.46	110.34	
12	965.57	645.56	443.60	310.14	217.07	151.14	109.54	
14	963.95	643.31	441.42	308.18	215.38	147.80	108.61	
16	962.28	640.98	439.15	306.17	213.67	147.33	107.85	
18	960.57	638.57	436.82	304.11	211.92	147.14	106.93	Below 100℃
20	958.79	637.08	434.43	302.03	210.19	145.87	106.19	
22	956.96	636.52	432.0	299.92	208.43	144.53	105.28	
24	955.07	630.86	429.50	297.79	206.70	143.30	104.60	
26	953.10	628.10	426.93	295.61	204.92	141.98	103.69	
28	951.06	625.24	424.30	293.43	203.21	140.81	103.07	
30	948.9	622.24	421.58	291.19	201.41	139.51	102.19	
34	944.25	615.81	415.89	286.64	197.89	137.12	100.74	
38	938.88	608.68	409.86	281.99	194.40	134.84		
Depth (mm)	0	25	50	75	100	125	150	175	200

(c) 3 hours fire exposure

Fig. 4. Result of heat transfer analysis

나타낸다. 콘크리트는 강재에 비해 열전도율이 낮고 비열이 크기 때문에, 화재 시 온도 상승 속도가 느리며, 이에 따라 합성강판전단벽의 내화성능은 콘크리트의 온도 분포에 의해 주로 결정된다. 이러한 특성을 고려하여, 본 연구에서는 열전달 해석을 통해 가열면으로부터 콘크리트의 깊이에 따라 내부 온도 데이터를 정량적으로 도출하였다. 그리고 KS[23]에서 제시하는 차열성 기준을 바탕으로 평가한 결과, 콘크리트 두께가 250 mm 이상인 벽체는 모두 차열성능 3시간 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

3.2 온도 데이터 단순화

Fig. 4에 제시된 온도 분포 데이터는 열전달 해석을 통해 도출된 값으로, 화재에 노출된 합성강판전단벽 단면의 온도 분포를 정확한 수치 형태로 제공한다. 그러나 해당 데이터는 매우 세밀한 온도 분포를 포함하고 있어, 실무자가 이를 기반으로 고온에서의 재료 특성을 고려한 강도 산정을 수행하기에는 복잡하고 비효율적일 수 있다고 판단하였다. 이에 따라 본 연구에서는 실무자의 효율적인 강도 산정을 지원하기 위해, Fig. 4의 온도 데이터를 100℃ 단위로 상향 보정하여 재구성한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 이 데이터는 콘크리트 깊이 25 mm 간격을 하나의 구간(layer)으로 나누고, 각 구간에서 발생한 최대 온도를 대푯값으로 제시하였다. 이렇게 정리된 온도 분포는 화재에 노출된 벽체 내부의 온도 변화를 시각적으로 명확히 파악할 수 있도록 하며, 향후 강도 산정에 직접 활용 가능한 실용적인 자료로 활용될 수 있다.

3.3 온도데이터 수식화

Fig. 5를 통해 제시된 합성강판전단벽의 내부 온도데이터를 활용하여 내화설계를 수행할 수 있으나, 실무자가 해당 데이터에 접근하는데에 있어 한계가 있을 것으로 판단되었다. 그래서 온도 데이터와 직류 열저항 모델을 활용하여 온도 데이터가 없어도 내부 콘크리트의 온도를 예측할 수 있는 식을 도출하였다. 식 (3)-식 (5)는 도출된 콘크리트 내부 온도 예측식이다.

Steel plate thickness (mm)	Temperature (℃)				
4	800	400	300	200	
6	700	400	200	200	
8	700	400	200	200	
10	700	400	200	200	
12	700	400	200	200	
14	700	400	200	200	
16	700	400	200		
18	700	400	200		
20	700	400	200		
22	700	400	200	Below 100℃	
24	700	400	200		
26	700	400	200		
28	700	400	200		
30	700	300	200		
34	600	300	200		
38	600	300	200		

Depth (mm) 0 25 50 75 100 125

(a) 1 hour fire exposure

Steel plate thickness (mm)	Temperature (℃)						
4	900	600	400	300	200	200	
6	900	600	400	300	200	200	
8	900	600	400	300	200		
10	900	600	400	300	200		
12	900	600	400	300	200		
14	900	600	400	300	200		
16	900	600	400	300	200		
18	900	600	400	300	200		
20	900	600	400	300	200	Below 100℃	
22	900	600	400	300	200		
24	900	600	400	300	200		
26	900	500	400	300	200		
28	900	500	400	200	200		
30	900	500	400	200	200		
34	800	500	400	200	200		
38	800	500	300	200	200		

Depth (mm) 0 25 50 75 100 125 150 175

(b) 2 hours fire exposure

Steel plate thickness (mm)	Temperature (℃)							
4	1000	700	500	400	300	200	200	
6	1000	700	500	400	300	200	200	
8	1000	700	500	400	300	200	200	
10	1000	700	500	400	300	200	200	
12	1000	700	500	400	300	200	200	
14	1000	700	500	400	300	200	200	
16	1000	700	500	400	300	200	200	
18	1000	700	500	400	300	200	200	Below 100℃
20	1000	700	500	400	300	200	200	
22	1000	700	500	300	300	200	200	
24	1000	700	500	300	300	200	200	
26	1000	700	500	300	300	200	200	
28	1000	700	500	300	300	200	200	
30	1000	700	500	300	300	200	200	
34	1000	700	500	300	200	200	200	
38	1000	700	500	300	200	200		

Depth (mm) 0 25 50 75 100 125 150 175 200

(c) 3 hours fire exposure

Fig. 5. Simplified temperature profile

$$T(x,y)=\frac{1}{1-\alpha}(T_c-\alpha T_o)+T_e \tag{3}$$

$$T_e=M_c\times\frac{t_e}{t_c}\times\frac{L_v}{c_p} \tag{4}$$

$$\alpha=\frac{R_c}{1/h_o+R_s+1/h_{ct}+R_c} \tag{5}$$

여기서, x는 콘크리트 깊이이며 y는 강판의 두께다. $T(x,y)$는 강판 두께가 y 벽체의 콘크리트 깊이 x에서의 온도를 의미한다. T_c는 강-콘크리트 계면에서 콘크리트의 온도이며 T_o는 외기 온도로 표준화재곡선에 따른 화재 온도를 의미한다. T_e는 콘크리트 내부 수분이 기화 시 잠열을 고려하여, 기화 시 흡수되는 열에너지에 의해 감소되는 온도를 반영한 것이다. 여기서 M_c 는 콘크리트의 함수량이며 본 연구에서는 3 %로 고려하였다. t_e는 가열면으로부터 콘크리트의 온도가 100℃ 이상인 영역의 폭이며, t_c는 콘크리트의 두께이다. L_v는 수분의 기화 시 잠열 에너지이며 c_p는 콘크리트의 비열로, 본 연구에서는 Eurocode를 참고하여 900 J/kg℃를 적용하였다. α는 구조체의 전체 열저항에 대한 콘크리트의 열저항이다. 여기서 h_o는 가열면의 대류열전달계수로, 열전달 해석에 적용된 값과 동일한 25 W/m^2℃를 적용하였다. h_{ct}는 강-콘크리트 계면에 발생하는 전도에 대한 열전달계수로, 계면에서 발생하는 열저항을 고려하였으며 동일하게 열전달 해석에 적용된 값인 250 W/m^2℃를 적용하였다. R_s는 강판의 열저항으로, 가열면의 강판은 고온에 노출되기 때문에 고온에서의 열전도율 27.3 W/m^2℃을 적용하여 계산하였다. R_c는 콘크리트의 열저항으로, 콘크리트는 온도에 열저항 값이 달라지게 되는데, 이는 실무에서 다소 복잡한 계산 과정을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실무의 효율성을 고려해, 콘크리트의 열전도율을 고온에서 보수적으로 고려할 수 있는 0.9 W/m^2℃의 단일값으로 설정하였다.

Fig. 6는 식 (3)의 온도 예측식과 열전달 해석 결과로부터 도출된 온도 데이터를 비교한 결과를 나타낸다. 각 그래프는 화재 노출 시간이 각각 1시간, 2시간 그리고 3시간일 때 콘크리트 단면 깊이에 따른 온도 분포를 나타낸다. 예측식으로 도출된 내부 온도는 전반적으로 열전달 해석 결과보다 다소 보수적인 온도 분포를 보이

Table 1. Example of strength calculation

(a) Using temperature profile

List	Layers of material							
	Steel		Concrete					
Depth (mm)	-		0–25	25–50	50–75	75–100	100–125	Over 125
Temperature (℃)	1000	100	900	600	400	300	200	100
P_{no} per layer (N/mm)	170.4	4,260	60	112.5	562.5	637.5	712.5	5250
P_{no} (N/mm)	10856.4							

(b) Using equation (3)

List	Layers of material								
	Steel		Concrete						
Depth (mm)	-		0–25	25–50	50–75	75–100	100–125	125–150	Over 150
Temperature (℃)	1000	100	900	700	600	500	400	200	100
P_{no} per layer (N/mm)	170.4	4,260	60	225	337.5	450	562.5	712.5	4500
P_{no} (N/mm)	10250.78								

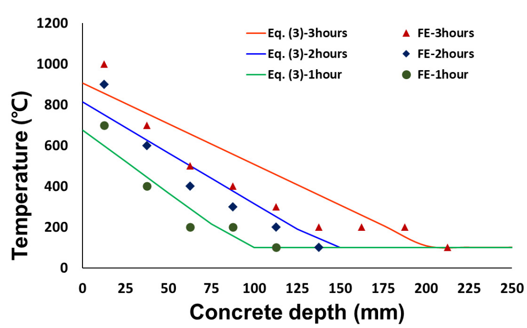


Fig. 6. Comparison between analysis and the equation

며, 이는 실무 설계 시 안전율 확보 측면에서 긍정적인 결과로 해석될 수 있다. 특히 2시간 및 3시간 화재 노출 조건에서는 두 결과 간의 차이가 상대적으로 작게 나타나, 예측식이 온도 데이터를 안정적으로 근사하고 있음을 보여준다. 반면, 1시간 화재 노출 시에는 예측식과 해석 결과 간의 온도 차이가 비교적 크게 나타났으며, 1시간 수준의 짧은 화재 노출 조건에서 예측식을 적용할 경우 보수적인 해석으로 인한 과대평가가 될 수 있음을 고려하여 추가적인 안전율 적용이 필요할 것으로 판단된다. 온도 데이터와 예측식의 결과를 종합적으로 고려할 때, 제안된 예측식은 전체적으로 충분한 신뢰성을 가지며, 특히 2–3시간 화재 노출 조건에서 실무에 적용 가능한 수준의 신뢰성를 보이는 것으로 판단된다.

4. 설계 예제

실무자는 열전달 해석을 통해 도출한 Fig. 5의 온도 데이터와, 직류 열저항 모델 기반의 식 (3)에서 제시한 온도 예측식을 활용하여, 화재에 노출된 합성강판전단벽의 내화설계를 수행할 수 있다. 두 방법론은 모두 표준화재 시나리오를 전제로 적용 가능한 방식이며, 본 연구에서는 두께 12 mm의 항복강도 355 MPa 강판과 두께 300 mm, 압축강도 30 MPa의 콘크리트로 구성된, 좌굴 영향을 받지 않는 높이의 합성강판전단벽에 대해 2시간 내화성능을 검토하는 설계 예제를 제시한다. 실무자는 이와 같은 온도 분포를 기반으로, 단면을 25 mm 간격의 layer로 구분하고 각 layer의 온도에 따라 고온에서 저하된 재료 강도를 적용하여, 모든 layer의 강도를 합산함으로써 고온 조건에서의 전체 벽체 강도를 산정할 수 있다. 이러한 계산 방식은 AISC Design Guide 38[18]에서 제시된 고온 강도 산정식을 기반으로 하며, 본문 식 (6)에 해당한다. 이는 벽체 높이가 좌굴에 의해 영향을 받지 않는 조건에서 사용된다. 한편, 타이바의 직경 및 간격 등 세부 변수는 AISC[17],[18]에 제시되어 있으나, 본 연구의 열전달 해석에서는 이를 고려하지 않았기 때문에 제외하였다. 내화설계 예제는 Fig. 7에 제시된 내화설계 절차를 기반으로 수행되었다.

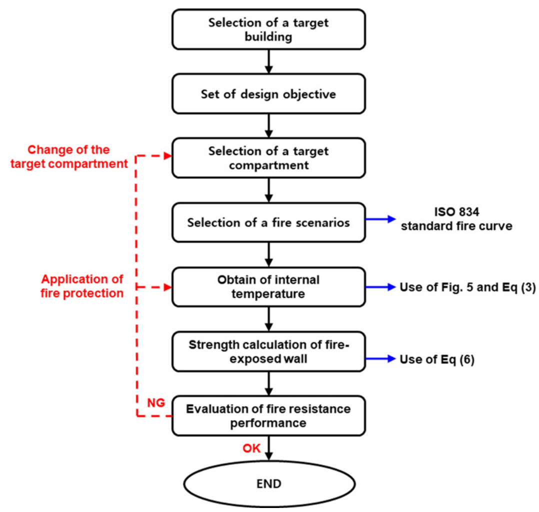


Fig. 7. Process of structural fire design

$$P_{no}(T) = A_s F_y(T) + \sum_{i=layer} 0.85 A_c f_{ck}(T_i) \tag{6}$$

여기서 $P_{no}(T)$는 온도 T에 대한 화재에 노출된 합성강판전단벽의 압축강도이며, A_s는 강판의 단면적, $F_y(T)$는 온도 T에서 강재의 항복강도다. A_c는 콘크리트의 단면적이며 $f_{ck}(T_i)$는 콘크리트 layer(i)의 온도에 대한 콘크리트의 압축강도다.

4.1 온도 데이터를 이용한 내화설계

Table 1(a)는 온도 데이터를 이용한 내화설계 과정이다. 가열면 강판의 온도는 식 (2)의 표준화재곡선을 통해 도출하고, 콘크리트의 내부 온도는 2시간 표준화재에 노출된 합성강판전단벽의 온도 데이터인 Fig. 5(b)를 참고하여 각 구간(layer)에 해당하는 온도를 적용한다. Eurocode[22],[23]를 참고하여 해당 온도에 도달한 재료의 강도 저하율을 적용해 각 구간에 해당하는 재료의 강도를 산정한다. 그리고 AISC에서 제시하는 식 (6)을 이용해 구간별로 도출한 강도를 합산한 후 벽체의 길이를 반영하여 2시간 표준화재에 노출된 합성강판전단벽의 최종 강도(P_{no})를 도출한다. 도출된 강도가 설계 요구 강도 이상을 만족도록 함으로써, 온도 데이터를 통한 내화설계를 수행할 수 있다.

4.2 온도 예측식을 이용한 내화설계

Table 1(b)는 온도 예측식을 이용한 내화설계 과정이다. 가열면 강판의 온도는 동일하게 식 (2)를 통해 도출하고, 콘크리트의 온도는 식 (3)을 통해 도출한다. 그리고 도출된 온도는 100℃ 단위로 상향 보정한다. 온도 데이터를 활용한 내화설계 과정과 동일하게, Eurocode를 참고하여 해당 온도에 도달한 재료의 강도를 산정한다. 그리고 식 (6)을 이용해 구간별로 도출한 강도를 합산한 후 벽체의 길이를 반영하여 2시간 표준화재에 노출된 합성강판전단벽의 최종 강도(P_{no})를 도출한다. 도출된 강도가 설계 요구 강도 이상을 만족도록 함으로써, 온도 예측식을 통한 내화설계를 수행할 수 있다.

5. 결 론

합성강판전단벽은 뛰어난 구조적 성능이 입증되었고 국외에서는 이미 설계 기준과 지침이 마련되어있으며 적용 사례가 많다. 합성강판전단벽의 설계 지침이 마련되지 않은 한국에서는 국외 지침을 참고하여 합성강판전단벽의 설계를 진행하게 된다. 특히 한국에서 합성강판전단벽의 내화설계는 필수이기 때문에 본 연구에서는 실무자의 원활한 내화설계를 수행할 수 있도록 화재에 노출된 합성강판전단벽의 내부 온도 데이터를 제공하고 이를 기반으로 온도 예측식을 도출하여 구조화재설계법을 제안한다.

(1) 화재에 노출된 합성강판전단벽의 내부 온도 데이터는 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/CAE 2024를 활용한 열전달 해석을 통해 수행되었으며 Eurocode와 선행 연구를 참고하여 유한요소해석 모델을 개발하고 실험 결과와 해석 결과의 비교를 통해 신뢰성을 입증하였다.

(2) 강판과 콘크리트의 두께를 변수로 하여 열전달 해석을 수행하였고 확보한 해석 결과를 실무자의 효율적인 설계를 위해 100℃ 단위로 단순화하여 합성강판전단벽의 온도 데이터를 제공해 화재에 노출된 합성강판전단벽의 강도 산정법을 제시하였다.

(3) 실무자의 온도 데이터 접근 및 확보에 대한 한계를 고려하여 온도 데이터와 직류 열저항 모델을 활용하여 온도 데이터가 없는 상황에서도 합성강판전단벽의 내부 온도를 예측할 수 있는 예측식

을 도출하였으며 예측식과 온도 데이터를 비교한 결과, 예측식은 온도 데이터보다 안전율 확보 측면에서 유리하며 특히 2–3시간 화재 노출 조건에서 전반적으로 실무에 적용 가능한 수준의 신뢰성을 보였다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00416604, RS-2025-00558843)을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌(References)

[1] Wright, H.D., and Gallocher, S.C. (1995) The Behaviour of Composite Walling under Construction and Service Loading, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.35, No.3, pp.257–273.

[2] Rafiei, S., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Behdinan, K., and Anwar, M.S. (2013) Finite Element Modeling of Double Skin Profiled Composite Shear Wall System under In-plane Loadings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.56, pp.46–57.

[3] Rafiei, S., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., and Behdinan, K. (2015) Profiled Sandwich Composite Wall with High Performance Concrete Subjected to Monotonic Shear, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.107, pp.124–136.

[4] Zhang, K., Varma, A.H., Malushte, S.R., and Gallocher, S. (2014) Effect of Shear Connectors on Local Buckling and Composite Action in Steel Concrete Composite Walls, *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, Vol.269, pp.231–239.

[5] Liang, Q. Q., Uy, B., Wright, H. D. and Bradford, M. A. (2004) Local Buckling of Steel Plates in Double Skin Composite Panels under Biaxial Compression and Shear, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.130, No.3, pp.443–451.

[6] Qin, Y., Shu, G.-P., Zhou, G.-G., Han, J.-H. and Zhou, X.-L. (2019) Truss Spacing on Innovative Composite Walls under Compression, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.160, pp.1–15.

[7] Link, R.A., and Elwi, A.E. (1995) Composite Concrete-steel Plate Walls: Analysis and Behavior, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.260–271.

[8] Nie, J.-G., Ma, X.-W., Tao, M.-X., Fan, J.-S. and Bu, F.-M. (2014) Effective Stiffness of Composite Shear Wall with Double Plates and Filled Concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.99, pp.140–148.

[9] Hu, H.-S., Nie, J.-G., and Eatherton, M.R. (2014) Deformation Capacity of Concrete-filled Steel Plate Composite Shear Walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.103, pp.148–158.

[10] Eom, T.-S., Park, H.-G., Lee, C.-H., Kim, J.-H., and Chang, I.-H. (2009) Behavior of Double Skin Composite Wall Subjected to In-plane Cyclic Loading, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.135, No.10, pp.1239–1249.

[11] Nie, J.-G., Hu, H.-S., Fan, J.-S., Tao, M.-X., Li, S.-Y., and Liu, F.-J. (2013) Experimental Study on Seismic Behavior of High-strength Concrete Filled Double-steel-plate Composite Walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.88, pp.206–219.

[12] Zhang, K., Varma, A., and Malushte, S. (2013) Local Buckling of SC Composite Walls at Ambient and Elevated Temperatures, *Proceedings of the 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, SMiRT-22, USA.

[13] Wei, F., Fang, C., and Wu, B. (2017) Fire Resistance of Concrete-filled Steel Plate Composite (CFSPC) Walls, *Fire Safety Journal*, Elsevier, Vol.88, pp.26–39.

[14] Du, E.-F., Shu, G.-P., Qin, L., Lai, B.-L., Zhou, X.-L. and Zhou, G.-G. (2022) Experimental Investigation on Fire Resistance of Sandwich Composite Walls with Truss Connectors, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.188, 107052.

[15] Anvari, A.T., Bhardwaj, S.R., Sharma, S. and Varma, A.H. (2022) Performance of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (C-PSW/CF) under Fire Loading: A Numerical Investigation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.271, 114883.

[16] Liu, C., Su, J., Li, Z., Luan, K., and Zhou, G. (2023) Study on the Post-fire Axial Compressive Performance of the Lightweight Ceramsite Foamed Concrete Sandwich Composite Shear Wall, *Structures,* Elsevier, Vol. 58, 105589.

[17] American Institute of Steel Construction. (2022) *Specification for Structural Steel Buildings*,

ANSI/AISC 360-22, AISC, USA.

[18] American Institute of Steel Construction (2023) *SpeedCore Systems for Steel Structure*, Design Guide 38, USA.

[19] Lim, Y.H., Kang, S.D., Oh, M.H., Kim, M.H., and Kim, S.D. (2006) Analytical Study on the Fire Resistance of iTECH Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.5, pp.655–664 (in Korean).

[20] Won, D.H., Han, T.H., Park, J.S., and Kim, Y.J. (2009) Analytical Study on the Fire Resistance of Internally Confined Hollow CFT Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.5, pp.461–470 (in Korean).

[21] European Committee for Standardization. (2004) *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, EN 1992-1-2:2004, CEN, Belgium.

[22] European Committee for Standardization. (2005) *Eurocde 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, EN 1993-1-2:2005, CEN, Belgium.

[23] Korean Agency for Technology and Standards. (2019) *Methods of Fire Resistance Test for Element of Building Construction – Part 1: General Requirements*, KS F 2257-1:2019, Korean Standards Association (in Korean).

[24] Kim, S.B., Choi, S.K., Lee, C.N., and Kim, S.S. (2006) Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.1, pp.113–122 (in Korean).

[25] Ahn, J.K., and Lee, C.H. (2014) Evaluation of Fire Resistance of Unprotected Concrete-filled Rectangular Steel Tubular Columns under Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.323–334 (in Koeran).

[26] European Committee for Standardization (2002) *Eurocode 1: Actions on Structures –Part 1-2: General Actions –Actions on Structures Exposed to Fire*, EN 1991-1-2:2002, CEN, Belgium.

[27] Lee, C.-Y., Kang, S.-M., and Kim, J.-K. (2023) Experimental and Analytical Study on Heat Transfer of Double-Layer Steel Plates with an Air Layer, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.385–396 (in Korea).

[28] Ding, J., and Wang, Y.C. (2008) Realistic Modelling of Thermal and Structural Behaviour of Unprotected Concrete Filled Tubular Columns in Fire, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.64, No.10, pp.1086–1102.

요　　약 : 국내 합성강판전단벽의 설계 기준 및 지침의 부재로, 구조화재설계 시 해외 설계 지침을 참고하여 수행되어야 한다. 그러나 기존 예측식은 실무 적용에 비효율적인 한계가 있어, 본 연구에서는 유한요소 해석과 직류 열저항 모델을 통해 합성강판전단벽의 온도 데이터를 제시하고, 실무자가 활용 가능한 내부 온도 예측식을 제안하였다. 도출된 두 방법론을 활용한 내화설계 예제를 통해 결과를 비교하고, 효율적인 내화설계를 위한 실무 적용 가능성을 검토하였다.

핵심용어 : 합성강판전단벽, 내화설계, 열전달 해석, 온도 데이터, 온도 예측식