

# 공기층을 포함한 이중층 강판의 열전달 특성에 대한 실험 및 해석적 연구

이충열<sup>1</sup> · 강성묵<sup>1</sup> · 김진국<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 서울과학기술대학교, 건설시스템공학과, <sup>2</sup>부교수, 서울과학기술대학교, 건설시스템공학과

## Experimental and Analytical Study on Heat Transfer of Double-Layer Steel Plates with an Air Layer

Lee, Chung-Yeol<sup>1</sup>, Kang, Seong-Mook<sup>1</sup>, Kim, Jin-Kook<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student(Master Course), Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

<sup>2</sup>Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

**Abstract** - In this study, a non-load heating experiment was performed to determine the effect of air layer application and surface emissivity within the air layer on the heat transfer of steel plates, the temperature change trend for each specimen was also analyzed through heat transfer analysis. Furthermore, the temperature of the non-heating surface was predicted by performing variable analysis according to the air layer ratio of the total thickness and the change in surface emissivity within the air layer. About the predicted temperature, the heat transfer of the steel plates with and without an air layer was quantified using an equivalent temperature coefficient, and an optimal air layer structure that minimizes heat transfer was proposed. In the proposed optimal air layer structure, the heat transfer of the double-layer steel plates were established through the equivalent temperature coefficient function according to the change in surface emissivity within the air layer.

**Keywords** - Steel plate, Air layer, Heat transfer, Emissivity, Equivalent temperature coefficient

### 1. 서론

구조물에 화재가 발생할 때, 기둥 및 보와 같은 주요 구조부재에 고온의 열이 전달되어 재료의 강성 및 강도가 저하될 수 있으며, 이들의 붕괴로 인한 인명 피해 등 사회경제적으로 큰 손실이 발생할 수 있다<sup>[1]-[4]</sup>.

구조물의 열전달은 재료의 열적 특성에 따른 부재 내 온도 차로 인해 열에너지가 고온부에서 저온부로 전달되는 현상을 말하며, 전도, 복사, 대류의 3가지 방식으로 전달된다. 재료의 열적 특성에서 열전도율은 온도구배에 대한 열 유동률의 비<sup>[5],[6]</sup>를 말하며, 열전도율이 높을수록 부재 내 열이 더 빠르게 전달된다. 또한,

재료의 표면 방사율은 열에너지의 일부를 흡수하고 일부를 반사하는 회색체이므로 0과 1 사이의 값을 가지며, 표면 상태에 따라 달라지는데<sup>[7]</sup>, 표면 방사율이 낮을수록 열흡수율이 낮아지고 반대로 열반사율은 높아져 복사로 인한 열전달을 감소시킬 수 있다.

강구조물의 경우, 콘크리트 등의 재료에 비해 높은 열전도율·표면 방사율 등의 열적 특성으로 인해 더 빠르게 열이 전달될 뿐만 아니라 강재의 온도가 400 °C에 도달한 이후부터 강도 감소가 급격하게 나타나는 고온에서 특히 취약한 특징을 갖고 있다<sup>[8],[9]</sup>. 이처럼 부재 내 열전달은 재료의 열적 특성에 따라 구조물의 내화성능에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 열전달 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Jirku *et al.*<sup>[10]</sup> 및 Bihina *et al.*<sup>[11]</sup>은 아연도금 처리한 강재의 표면 방사율이 강재의 온도 상승에 미치는 영향을 확인하기 위하여 내화시험 및 해석적 연구를 수행하였고, 시험 및 해석 결과를 통해 강재에 아연도금 처리를 하는 것이 강재의 온도 증가율을 낮춤으로써 열전달을 감소시키는 것을 확인하였다. Der *et al.*<sup>[12]</sup>은

Note.-Discussion open until June 30, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 05, 2023; revised on November 18, 2023; approved on November 23, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-970-6578 Fax. +82-2-948-0043

E-mail. jinkook.kim@seoultech.ac.kr

아연도금 강재의 표면 방사율에 대한 표준 설계를 제안하기 위하여 아연도금 강재의 내화시험을 참고하여<sup>[10],[11]</sup> 방사율 측정시험 및 해석적 연구를 수행하였으며, 아연도금 강재의 온도가 500 °C 이하일 때 아연도금 강재의 표면 방사율 값으로 0.35를 제안하였다.

Kang *et al.*<sup>[13]</sup> 및 Hwang and Choi<sup>[14]</sup>는 유리 사이에 공기층을 적용한 이중층의 열전달 특성에 대해 해석적 연구를 수행하였고, 공기층 내 공기의 낮은 열전도율과 공동복사 현상으로 인해 창호를 통과하는 열의 양인 열관류율이 줄어들어 열전달을 감소시키는 효과가 있음을 확인하였다. Alam *et al.*<sup>[15]</sup>은 층고 절감을 위해 설계된 강함성 슬림플로어 보(fabricated slim floor beam)의 제작 시, H형강과 바닥 강판의 측면부 용접으로 인해 발생하는 공극이 부재의 열적 거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 해석적 연구를 수행하였고, 강판 사이의 미세한 공극에서 공기의 열적 특성 및 공동복사 현상으로 인해 부재의 열전달을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

이처럼 공기층을 강구조 부재에 적용함으로써 다양한 강구조물의 두께 및 열전달을 감소시키는 효과를 기대할 수 있다. 일반적으로 공기층 내부의 열은 공기의 전도 및 대류와 공기층 내 공동복사의 합으로 전달되며, 공기층의 두께가 얇을수록 공기층 내 공기의 열전도 및 공동복사가 지배적이고, 공기층의 두께가 증가하면 대류의 영향이 증가한다<sup>[14]</sup>. 이때, 공기층의 두께가 과도하게 증가하면 대류 열전달이 지배적인 상황이 되므로 공기층의 최적 두께를 설정하는 것은 매우 중요하다<sup>[14],[16]</sup>. 그러나 공기층 적용 강구조의 열전달 특성에 따른 온도 및 열전달 감소 효과에 대한 정량적 지표는 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 강판의 공기층 적용 및 공기층 내 표면 방사율이 다를 때의 열전달 특성을 확인하기 위하여 비재하 가열실험을 수행하였고, 실험체와 동일한 제원으로 모델링한 열전달해석모델을 통해 타당성을 검증한 후, 각 실험체별 시간에 따른 온도 변화 경향을 분석하였다. 나아가, 전체 두께에서의 공기층 비율과 공기층 내 표면 방사율 변화에 따른 변수 해석을 수행하여 비가열부 표면의 온도 변화를 평가하고, 최적의 공기층 비율을 적용한 이중층 강판의 열전달 특성을 등가온도계수(equivalent temperature coefficient, *k*)를 통해 정립하고자 한다.

## 2. 공기층 내 열전달 이론

### 2.1 레일리 수를 고려한 공기층 두께 결정

공기층 내에서 열이 발생할 때 열에 의한 공기의 대류 발생 여부를 결정하는 경험식인 레일리 수(Rayleigh Number)는 공기의 부력과 점성력 사이의 비율을 의미하는 무차원 수로, 임계값( $Ra = 1708$ ) 이하에서 공기의 점성에 의해 입자가 정지 상태를 유지하고 공기는 유동이 없는 순수 전도 상태에 있게 된다. 공기층 내 공기의 열전달 형태를 결정하는 레일리 수 경험식은 다음과 같다<sup>[17]</sup>.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_f^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (1)$$

여기서,  $Ra$ : 유체층 내 유체의 레일리 수,

$g$ : 중력 가속도( $m^2/s$ ),

$\beta$ : 유체의 체적 팽창계수( $1/K$ ),

$\Delta T$ : 유체층 내 온도 차( $K$ ),

$L_f$ : 유체층의 두께( $m$ ),

$\nu$ : 유체의 운동 점성계수( $m^2/s$ ),

$\alpha$ : 유체의 열확산계수( $m^2/s$ ).

식 (1)에서 공기층 내 공기의 운동 점성계수( $m^2/s$ ) 및 열확산계수( $m^2/s$ )의 값은 Incropera *et al.*<sup>[18]</sup>에 따라 적용하였고, Fig. 1과 같이 비재하 가열 실험체에 대해 대류가 발생하지 않는 공기층의 두께를 산정하였다. 즉, 공기층의 두께가 6 mm 이하일 때, 공기층 내 공기의 열은 유동이 없는 순수 전도로 전달되므로 대류로 인한 추가 열전달은 발생하지 않는다고 가정할 수 있다.

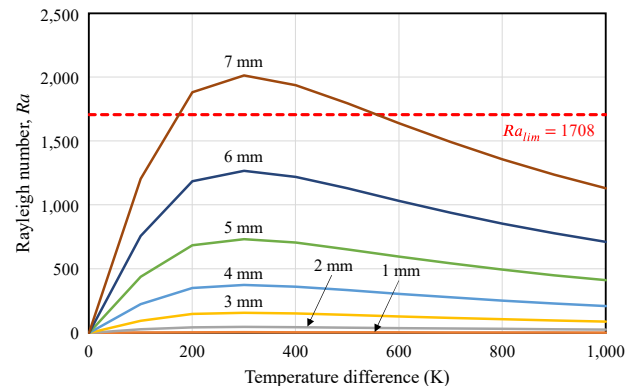


Fig. 1. Decision of air layer thickness according to Rayleigh number

## 2.2 공기층 내 열전도 및 공동복사

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 두께가 6 mm 이하일 때, 공기의 열전도와 공기층 내 표면의 공동복사로 열이 전달된다고 가정하였다. 열전도는 입자 간의 상호작용에 의해 높은 에너지를 가진 입자에서 낮은 에너지를 가진 입자로 에너지가 전달되는 방식을 의미하며, 온도에 따른 재료의 열전도율과 열전달 부재의 두께에 따라 전도로 전달되는 열의 양이 달라질 수 있다. 공동복사는 공기층으로 생성된 내부 표면 간의 열에너지가 매질 없이도 전자기파의 형태로 전달되는 방식을 의미하며, 회색체의 표면 방사율 및 표면의 형상에 따라 열흡수율이 달라질 수 있다. 공기층 내 공기의 열전도 및 공동복사는 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>[5],[6],[19]</sup>.

$$q_{cond} = k_a \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L_a} \quad (2)$$

여기서,  $q_{cond}$ : 공기층 내 공기의 전도 열전달(W),

$k_a$ : 공기의 열전도율(W/m·K),

$A$ : 전도 단면적(m<sup>2</sup>),

$\Delta T$ : 공기층 내부의 온도 차(K),

$L_a$ : 공기층의 두께(m).

$$q_{rad} = \epsilon_s \cdot X_{i,j} \cdot A_i \cdot (E_{bi} - E_{bj}) \quad (3a)$$

$$= \epsilon_s \cdot X_{j,i} \cdot A_j \cdot (E_{bi} - E_{bj})$$

$$\epsilon_s = \frac{1}{1 + X_{i,j} \left( \frac{1}{\epsilon_i} - 1 \right) + X_{j,i} \left( \frac{1}{\epsilon_j} - 1 \right)} \quad (3b)$$

$$E_{bi} = \sigma \cdot T_i^4 \quad (3c)$$

$$E_{bj} = \sigma \cdot T_j^4 \quad (3d)$$

여기서,  $q_{rad}$ : 공기층 내 공동복사에 의한 열전달(W),

$\epsilon_s$ : 공기층 내 시스템의 방사율,

$X_{i,j}$ :  $i$  표면에서  $j$  표면까지의 형상계수,

$X_{j,i}$ :  $j$  표면에서  $i$  표면까지의 형상계수,

$A_i, A_j$ :  $i$  표면 및  $j$  표면의 단면적(m<sup>2</sup>),

$\epsilon_i, \epsilon_j$ : 회색체  $i$  표면 및  $j$  표면의 방사율,

$E_{bi}, E_{bj}$ : 단위 시간 및 면적당  $i$  표면 및  $j$  표면의 열에너지(W/m<sup>2</sup>),

$T_i, T_j$ :  $i$  표면 및  $j$  표면의 온도(K),

$\sigma$ : 흑체 복사에 대한 슈테판-볼츠만 상수( $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>).

## 3. 비재하 가열실험

### 3.1 실험개요

본 연구에서는 비재하 가열실험을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 2 kW 용량을 가진 세라믹 히터와 컨트롤러 및 세라믹 보드, 내화벽돌 등의 내화재료를 사용하여 실험체의 길이와 폭인 500 mm에 맞게 전기저항식 수평가열로를 제작하였다. 수평가열로의 상부에 실험체를 설치하고 실제 가열부 표면의 가열면적은 길이와 폭이 모두 305 mm인 상태의 1면 노출 및 비재하 조건에서 400 °C의 고온으로 설정하여 30분간 가열실험을 수행하였다. 하지만 실험 수행 시, 제작한 수평가열로의 컨트롤러는 승온 속도를 조절하지 못하는 한계로 인해 각각의 실험체 가열부 표면 방사율에 따라 Fig. 3와 같이 가열곡선이 모두 다르게 나타났다<sup>[20]</sup>.

가열 시간에 따른 수평가열로의 내부 온도를 나타내는 가열곡선은 가열로 내부에 설치된 컨트롤러의 센서

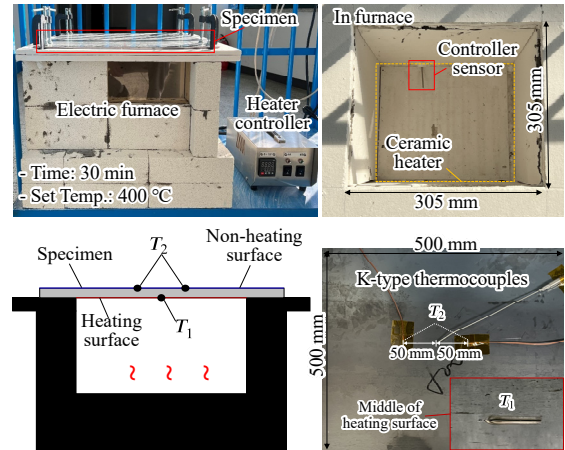


Fig. 2. Schematic of non-load heating experiment

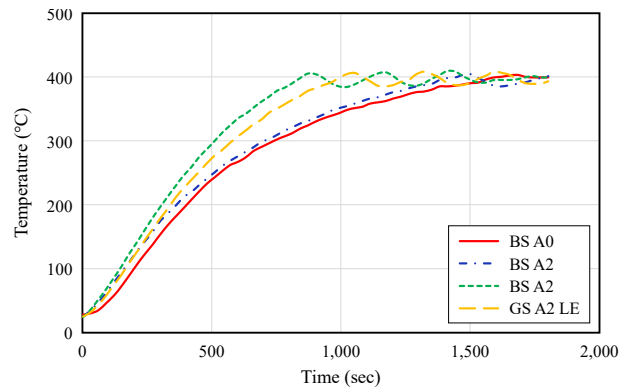


Fig. 3. Heating curves of non-load heating experiment

를 통해 30초 간격으로 측정하였고, 실험체의 가열부 및 비가열부의 표면에는 KS C 1602: 2009<sup>[21]</sup> 및 KS F 2257-1: 2019<sup>[22]</sup>에서 규정하고 일반적으로 내화시험에 사용되는 K-type 열전대를 총 3개 설치하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 가열부 표면의 열전대는 실험체의 중앙부에, 비가열부 표면의 열전대는 중앙부에서 양쪽으로 50 mm의 간격을 둔 지점에 설치하였고, 각각의 위치에서 가열곡선과 동일한 간격으로 온도 T1 및 T2를 측정하였다.

### 3.2 실험체 제작

비재하 가열실험 수행을 위한 실험체는 총 4개를 제작하였다. Fig. 2 및 Fig. 4와 같이 길이와 폭이 500 mm로 동일한 강판에 공기층의 영향을 확인하기 위하여 공기층이 없는 두께 4 mm의 강판 실험체 BS A0와 두께 2 mm의 상판 및 하판 사이에 동일한 두께 및 재료의 간격재를 설치하여 공기층을 적용한 강판 및 아연

도금 강판 실험체 BS A2, GS A2를 제작하였다. 또한, 공기층 내 표면 방사율의 영향을 확인하기 위하여 공기층 내부에 두께가 0.035 mm이고 표면 방사율 0.05인 저방사 불연 알루미늄 시트를 부착한 아연도금 강판 실험체 GS A2 LE를 제작하였다.

### 3.3 실험결과

길이와 폭이 500 mm로 동일하고, 강판 및 아연도금 강판으로 제작한 총 4개 실험체에 대해 고온(400 °C)에서 30분간 가열실험을 수행하여 Table 1과 같은 결과를 도출하였다. Fig. 5(a)와 같이 두께가 4 mm인 공기층이 없는 실험체 BS A0의 경우, 가열부 및 비가열부 표면의 최고 온도가 각각 280.5 °C 및 260 °C로 측정되었으며, 온도 차가 약 8.6 % 수준으로 적게 나타났다. 하지만 Fig. 5(b)와 같이 공기층을 적용한 실험체 BS A2의 경우, 공기층 내 공동복사 및 공기의 열전도로 인해 가열부 및 비가열부 표면의 최고 온도가 각각

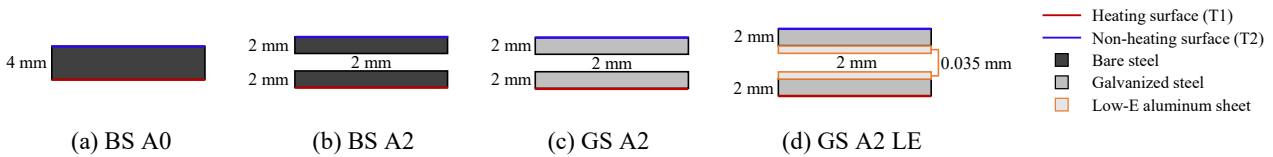


Fig. 4. Types of non-load heating experiment specimens

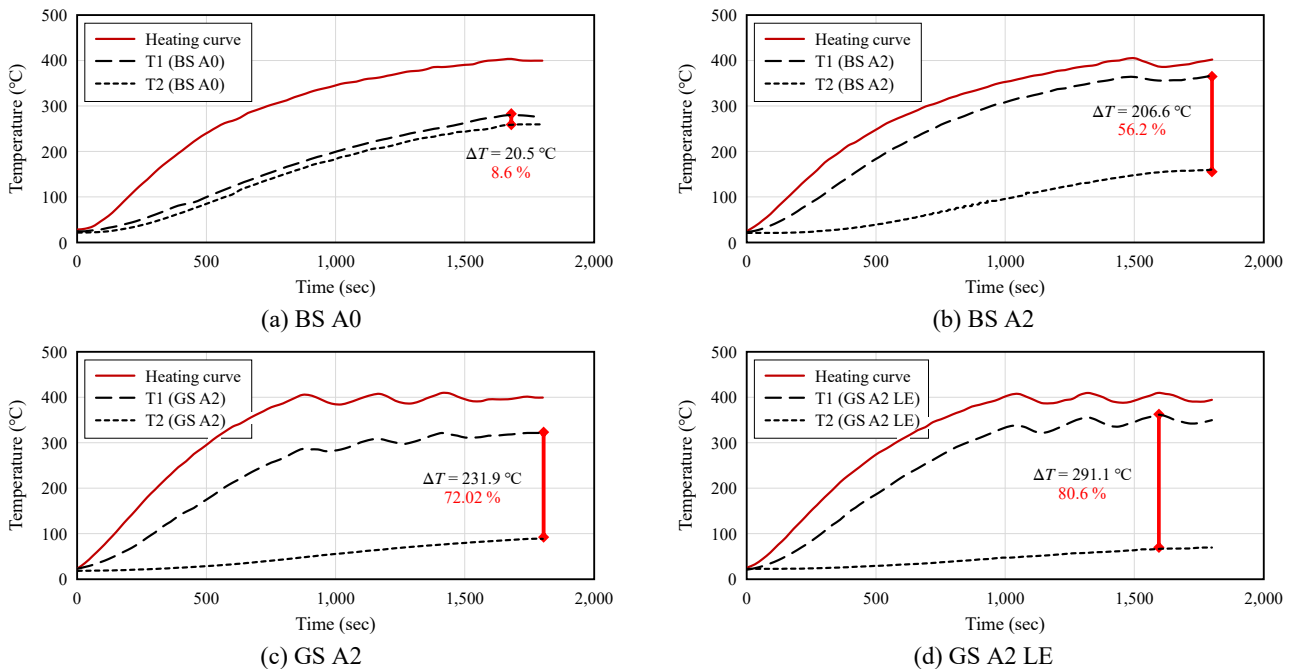


Fig. 5. Time-temperature curves of non-load heating experiment specimens

367 °C 및 160.4 °C로 측정되었으며, 화재에 취약한 열적 특성을 가진 강재에 공기층을 적용함으로써 가열부와 비가열부 표면 간의 온도 차가 약 56.2 %로 크게 나타났다. Fig. 5(c) 및 Fig. 5(d)에서 아연도금 강판 실험체 GS A2 및 GS A2 LE는 각각의 가열부 및 비가열부 표면의 최고 온도가 322 °C, 90.1 °C 및 349 °C, 72.3 °C로 측정되었으며, 가열부 및 비가열부 표면 간의 온도 차가 약 72 %, 80.6 %로 매우 크게 나타났다. 이는 강재에 비해 표면 방사율이 낮은 재료들을 사용함으로써 비가열부 표면으로 전달되는 열의 양을 감소시켜 가열부와 비가열부 표면 간의 온도 차가 크게 나타난 것으로 판단된다.

**Table 1.** Results of non-load heating experiments

Specimen	T1 (max.) (°C)	T2 (max.) (°C)	$\Delta T$ (°C)
BS A0	280.5	260	20.5
BS A2	367	160.4	206.6
GS A2	322	90.1	231.9
GS A2 LE	349	72.3	276.7

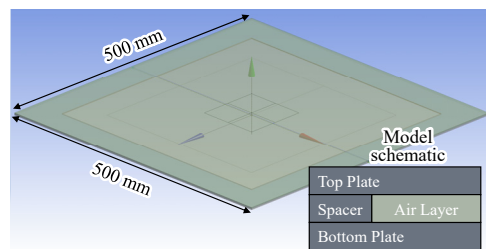
## 4. 열전달 해석

### 4.1 열전달 해석 모델링

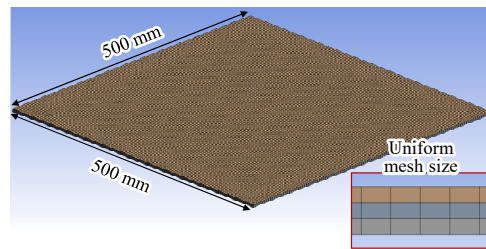
본 연구에서는 시간 경과에 따라 온도가 변화하는 비재하 가열실험에서 공기층을 적용한 실험체에 대해 공기층 내 공기의 열전도를 고려하기 위해 공기의 유체 모델링 및 해석모델의 시간에 따른 온도 변화를 확인할 수 있는 해석프로그램 ANSYS Transient-thermal Analysis Tool<sup>[23]</sup>을 기반으로 열전달 해석을 수행하였다.

공기의 열전도를 고려한 열전달 해석 모델은 Fig. 6(a)와 같이 실험체와 동일한 제원으로 강판의 상판 및 하판과 간격재는 3D Solid로 모델링하였고, 강판 사이의 공기층 내부 공기는 3D Fluid로 모델링하였다. 열전달 해석 모델의 요소는 Fig. 6(b)와 같이 수치 해석의 오류를 줄이기 위해 모든 part의 요소를 다중 구역으로 분할하여 균일하게 요소를 나눌 수 있는 Multizone Method를 적용하였고, 요소의 크기는 해석의 정확도를 고려하여 10 mm로 설정하였다. 각 3D model에 적용할 온

도에 따른 재료의 열적 특성에 대해 공기는 Incropera *et al.*<sup>[18]</sup>에 따라 적용하였고, 강재는 Eurocode 3<sup>[24]</sup>에 따라 적용하였다. 3D model의 표면에 적용하는 대류 열 전달계수는 Eurocode 1<sup>[25]</sup>에 따라 Fig. 7과 같이 가열부 표면에 25 W/m<sup>2</sup>·K, 비가열부 표면에 9 W/m<sup>2</sup>·K를 적용하였다. 강재의 열적 특성을 적용한 3D model의 표면 상태에 따른 표면 방사율은 Eurocode 3<sup>[24]</sup> 및 Der *et al.*<sup>[12]</sup>에 따라 0.7과 0.35를 적용하였고, 저방사 불연 알루미늄 시트는 0.05를 적용하였다. 해석 모델의 가열곡선은 Fig. 3와 같이 30분간 수행된 가열 실험에서 각각의 실험체로부터 도출된 가열곡선을 적용하였다.

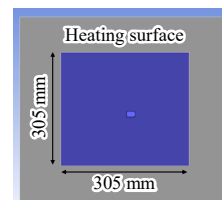


(a) FEM model for heat transfer analysis

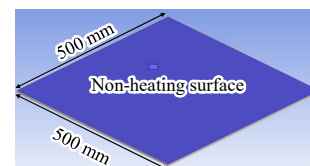


(b) Uniform mesh size for the analysis model

**Fig. 6.** Modeling of ANSYS transient-thermal analysis



(a) Heating surface



(b) Non-heating surface

**Fig. 7.** Applied surface of convective heat transfer coefficient and emissivity

### 4.2 타당성 검증

본 연구에서는 비재하 가열실험 수행을 위해 제작한 수평가열로의 승온 속도를 컨트롤러로 조절하지 못하는 한계로 Fig. 3와 같이 각각의 실험체에 대한 가열곡선이 다르게 나타났다. 이로 인해 실험결과만으로 실험체별 온도 변화의 경향성을 분석하는 것은 어렵다고 판단하였기 때문에 각 실험체별 온도 변화에 대한 경향성 분석 및 추가 변수 해석 수행을 위하여 비재하 가열실험에 대한 해석의 타당성을 검증하였다. Fig. 8 및 Table 2와 같이 실험의 가열곡선을 적용한 열전달해석결과와 비재하 가열실험결과를 비교하였을 때, 가열부 및 비가열부 표면의 온도가 실험 종료 시점을 기준으로 각각 평균 97.6 %, 94.0 %의 높은 정

확도를 보이므로 실험결과와 온도 증가율에 대한 경향이 유사한 것으로 판단하였다.

### 4.3 실험체 경향 분석

본 연구에서는 비재하 가열실험에서 실험체의 가열곡선이 모두 다르기 때문에 열전달해석을 통해 실험에 대한 해석의 타당성을 검증하였다. 타당성 검증 이후, 각 실험체별 시간에 따른 온도 변화 경향을 분석하기 위해 모든 열전달해석모델의 가열곡선을 Fig. 9(a)와 같이 30분 동안의 ISO 834 화재곡선으로 적용하였다<sup>[22]</sup>. 적용한 ISO 834 화재곡선은 Fig. 3와 같이 실험의 가열곡선과 다르게 가열 온도의 감소 없이 시간 경과에 따라 증가한다. 따라서 해석 종료 시점의 온도가

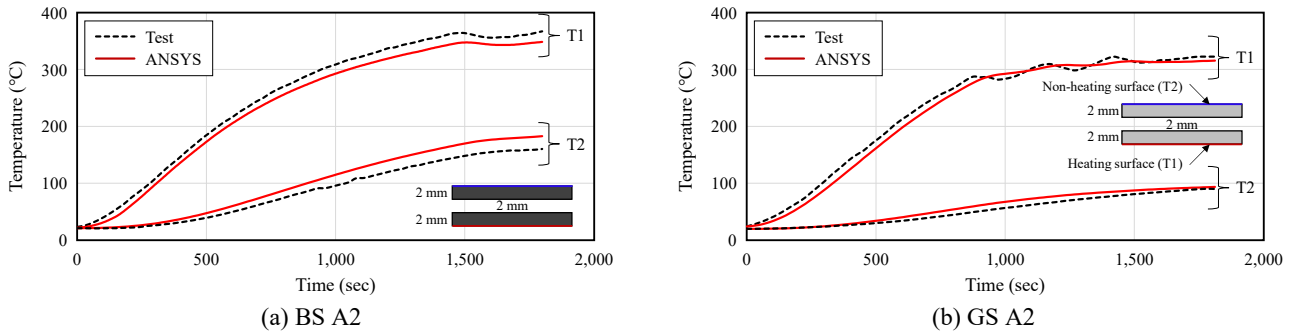


Fig. 8. Verification of validity between non-load heating experiments and heat transfer analysis

Table 2. Comparison of accuracy between heat transfer analysis and non-load heating experiment

Specimen	T1 (°C)		T2 (°C)		Accuracy (%)	
	Test	ANSYS	Test	ANSYS	T1	T2
BS A0	280.5	279.6	260	273.7	99.6	94.9
BS A2	367	348.5	160.4	172.3	95.0	93.1
GS A2	322	314.9	90.1	93.2	97.8	96.7
GS A2 LE	349	341.4	72.3	80.0	97.8	90.4

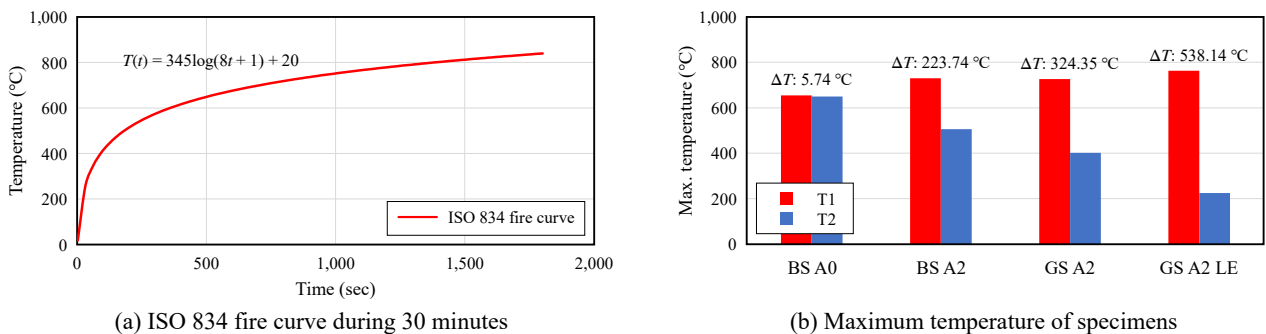


Fig. 9. Trend analysis between non-load heating experiment specimens

각 실험체의 최고 온도가 되므로 해석결과는 Fig. 9(b)와 같이 실험체별 가열부 및 비가열부 표면의 최고 온도를 나타냈다.

공기층이 없는 강판 실험체 BS A0의 가열부 및 비가열부 표면 온도 예측 결과는 각각 655.1 °C, 649.3 °C로 나타났고, 두 표면 사이 온도 차는 5.74 °C로 0.8 %의 매우 작은 차이를 보였다. 공기층을 적용한 이중층 강판 실험체 BS A2는 가열부 및 비가열부 표면의 온도 예측 결과가 각각 729.9 °C, 506.2 °C로 나타났고, 두 표면 사이 온도 차는 223.7 °C로 30.7 %의 차이를 보였다. 비재하 가열실험 결과의 경향과 유사하게 공기층의 영향으로 인해 비가열부 표면의 온도는 실험체 BS A2가 실험체 BS A0에 비해 약 22 % 감소하였고, 가열부 표면의 온도는 약 11.4 % 증가한 경향을 보였다. 이는 공기층이 없는 실험체 BS A0의 높은 열전도율 및 표면 방사율을 가진 강재의 연속성으로 인해 가열부 및 비가열부 표면의 온도 차가 크지 않은 반면, 공기층을 적용한 강판 실험체 BS A2의 공기층 내 공기의 낮은 열전도율과 공동복사 현상으로 공기층 내 표면 사이에서 반사된 열이 가열부로 전달되어 비가열부로 전달되는 열의 양이 줄어들었기 때문에 비가열부 표면의 온도가 감소한 것으로 판단된다.

공기층 내 표면 방사율의 영향에 대해 아연도금 강판 실험체 GS A2는 재료의 표면 방사율이 0.35으로 강판(0.7)보다 낮기 때문에 가열부 표면으로부터 흡수하는 열의 양이 감소한다. 따라서 비가열부 표면의 온도 예측 결과는 402.4 °C로 강판 실험체 BS A2에 비해 약 20.5 % 더 감소된 것을 확인하였다. 아연도금 강판의 공기층 내 저방사 불연 알루미늄 시트를 부착한 실험체 GS A2 LE의 온도 예측 결과는 225.1 °C로 도출되었다. 이는 실험체 GS A2 LE의 공기층 내 표면

방사율이 강판 및 아연도금 강판에 비해 매우 낮은 값을 가지기 때문에 공기층 내 공동복사 현상으로 비가열부에 전달되는 열의 양이 현저히 줄어들어 비가열부 표면의 온도가 강판 실험체 BS A2에 비해 55.5 % 더 감소된 것으로 판단하였다. 따라서 모든 해석모델의 시간에 따른 온도 변화 경향을 확인하였을 때, 공기층 내 공동복사 및 공기의 열전도 현상으로 인해 공기층이 없는 실험체 BS A0 대비 공기층을 적용한 실험체 BS A2, GS A2, GS A2 LE의 비가열부 표면의 온도가 각각 22 %, 38 %, 65.3 % 감소하였다. 또한, 공기층 내 방사율이 가장 높은 실험체인 BS A2에 비해 실험체 GS A2 및 GS A2 LE의 비가열부 표면 온도는 각각 20.5 %, 55.5 % 감소하였고, 비재하 가열실험과 유사하게 공기층 적용 및 공기층 내 표면 방사율이 감소함에 따라 비가열부 표면의 온도 또한 감소하는 경향이 나타났다.

## 5. 변수해석

### 5.1 변수 설정

본 연구에서는 공기의 열전도를 고려한 열전달해석 모델에 대해 변수해석을 수행하여 공기층을 적용한 이중층 강판의 열전달 특성에 따른 온도 감소 효과를 등가온도계수( $k$ )로 확인하였다. Table 3과 같이 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )가 각각 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm 일 때, 상판과 하판의 두께가 같고, 가열부 및 비가열부에 대한 표면 방사율이 0.7로 동일한 조건에서 공기층 비율 및 공기층 내 표면 방사율을 조합하여 변수로 설정하였다. 이때, 등가온도계수( $k$ )는 강판의 공기층 유무에 따른 비가열부 표면 온도의 비이므로, 이중층 강

**Table 3.** Information of variable analysis models

Model	$L^*$ (mm)	Surface emissivity in air layer	Air layer ratio (mm/mm)					
			Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
BS-L3 series	3	0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
BS-L6 series	6							
BS-L9 series	9							
BS-L12 series	12							

\*Total thickness of double-layer steel plates

판의 전체 두께( $L$ )에 대한 공기층의 비율이 0일 때 1의 값을 가지고 비율이 증가함에 따라 1보다 작은 값으로 나타난다. 따라서 등가온도계수( $k$ )의 값이 최소일 때 온도 감소 효과가 최대인 최적의 공기층 구조를 갖게 되며, 등가온도계수( $k$ )는 다음의 식으로 산정된다.

$$k = \frac{T_2(L)}{T_2(x)} \quad (4)$$

여기서,  $k$ : 등가온도계수,

$L$ : 공기층을 포함한 이중층 강판의 전체 두께 (mm),

$x$ : 공기층이 없는 강판의 전체 두께(mm),

$T_2(L)$ : 공기층을 포함한 이중층 강판의 전체 두께에 따른 비가열부 표면의 온도( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_2(x)$ : 공기층이 없는 강판의 전체 두께에 따른 비가열부 표면의 온도( $^{\circ}\text{C}$ ).

변수해석모델에서 전체 두께에 대한 공기층 비율은 Fig. 1과 같이 두께에 따라 산정한 레일리 수를 기준으로 공기층 내 대류가 발생하지 않는 두께 내에서의 비율인 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 설정하였다. 공기층 내 표면 방사율은 아연도금 및 저방사 불연 알루미늄시트 부착 표면과 같이 재료의 표면 상태에 따라 달라지기 때문에<sup>[7]</sup> 그 영향을 확인하고자 0.1, 0.3, 0.5, 0.7

로 설정하여 Fig. 9(a)의 조건에서 변수해석을 수행하였다. 공기층의 비율은 전체 두께에서 공기층이 차지하는 비율에 따라 비가열부 표면의 온도 및 강판의 두께 산정에 영향을 미치고, 재료의 표면 상태에 따라 달라지는 공기층 내 표면 방사율은 공기층 내부 표면에서 발생하는 공동복사 현상에 영향을 미친다. 최적의 공기층 비율과 그 비율에서의 공기층 내 표면 방사율의 감소는 화재 상황에서 가열부에서 비가열부 표면으로 전달되는 열을 감소시켜 화재에 직접적으로 노출되지 않는 비가열부 표면이 더 높은 온도에 도달하는 것을 방지하기 때문에 내화성능을 더 향상시킬 것으로 예측된다.

### 5.2 공기층 비율의 영향

공기의 열전도를 고려한 열전달해석모델에 대해 전체 두께에 대한 공기층 비율에 따른 열전달 특성을 정량화하기 위하여 변수해석결과를 Fig. 10과 같이 공기층 비율-등가온도계수( $k$ ) 곡선으로 나타냈다. 강판에 공기층을 적용함으로써 공기층을 적용하지 않은 강판에 비해 비가열부 표면 온도가 감소하여 열전달이 감소한 것을 확인할 수 있다. 모든 해석결과에서 등가온도계수( $k$ )는 공기층 비율이 0-0.2인 구간에서 감소하는 경향을 보이고, 0.2-0.3인 구간에서 다시 증가하는

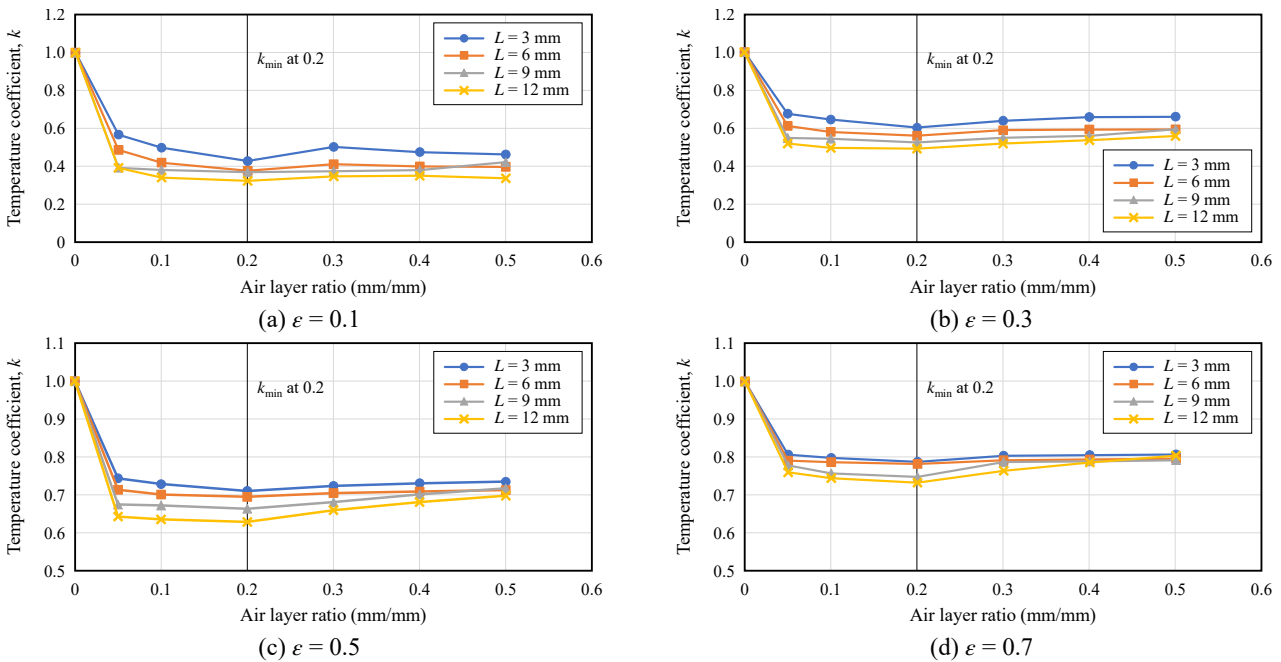


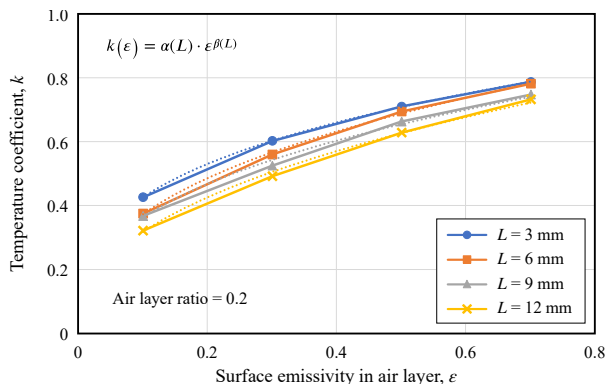
Fig. 10. Air layer ratio-temperature coefficient( $k$ ) curves of variable analysis models



경향을 보인다. 즉, 공기층의 비율이 0.2일 때 등가온도계수( $k$ )는 최솟값을 가지며, 공기층을 적용한 이중층 강판에 대한 비가열부 표면 온도가 가장 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 강판의 상판 및 하판의 두께가 동일한 조건에서 공기층 비율에 따른 등가온도계수( $k$ ) 값의 경향을 통해 공기층 비율이 0.2일 때, 각각의 방사율에 따라 공기층이 없는 강판 대비 열전달 특성에 따른 온도 감소 효과가 21.2%~67.8% 향상될 수 있다.

### 5.3 최적 공기층 구조 내 표면 방사율의 영향

Fig. 10과 같이 공기층의 비율이 전체 강판 두께의 0.2배일 때, 등가온도계수( $k$ )의 값이 최소가 된다. 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )에서 0.2의 최적 공기층 비율일 때, 공기층 내 표면 방사율의 영향을 정량화하기 위하여 Fig. 11과 같이 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )별 등가온도계수( $k$ ) 값을 공기층 내 표면 방사율 변화에 따라 나타냈다.



**Fig. 11.** Surface emissivity in air layer-temperature coefficient( $k$ ) curves of variable analysis models

최소 두께인 3 mm의 강판은 공기층 내 강재의 표면 방사율이 0.7에서 0.1로 감소함에 따라 등가온도계수( $k$ )가 45.8% 감소하는 것으로 나타났으며, 최대 두께인 12 mm의 강판은 56% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 공기층 내 표면 방사율이 0.1일 때, 최소 두께 3 mm와 최대 두께 12 mm 강판의 등가온도계수( $k$ ) 간 차이는 24.5%로 나타났으며, 공기층 내 표면 방사율이 0.7로 증가하면서 등가온도계수( $k$ ) 간 차이가 6.9%까지 감소하였다. 이는 설정한 모든 두께에서 공기층 내 표면 방사율이 증가할수록 등가온도계수( $k$ )가 증가하는 경향은 유사하게 나타났으나, 이중층 강판의 전

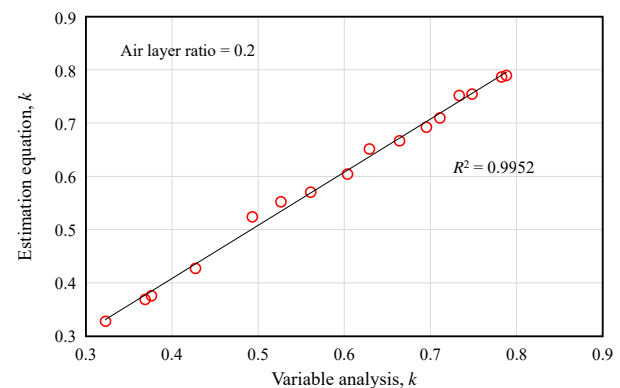
체 두께( $L$ ) 차이로 발생하는 전도의 영향에 비해 공기층 내 표면 방사율의 영향이 더 커지기 때문에 비가열부 표면으로의 열전달에서 공기의 열전도보다 공동 복사 현상에 의한 영향이 더 증가하여 나타난 경향으로 판단된다.

최적 공기층 비율을 가진 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )에서 공기층 내 표면 방사율 변화로 인한 열전달 특성을 정립하기 위해 각각의 두께 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm에 대한 추세선 식을 Fig. 11에 나타난 바와 같이 등가온도계수( $k$ )와 공기층 내 표면 방사율의 거듭제곱 함수로 각각 산정하였다. Table 4와 같이 거듭제곱 함수에서 공기층 내 표면 방사율 값에 곱해지는 계수 및 지수에 대하여 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )에 따른 보정계수  $\alpha(L)$ ,  $\beta(L)$ 을 나타냈다. 이중층 강판의 각각의 두께 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm에 대한 보정계수  $\alpha(L)$ ,  $\beta(L)$ 의 결정계수  $R^2$ 는 1, 0.9991, 0.9948, 0.9972로 매우 높은 정확도로 도출되었다. Fig. 12는 Fig. 11 및 Table 4에 나타난 등가온도계수( $k$ )의 함수에 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )에 대한 보정계수  $\alpha(L)$ ,  $\beta(L)$ 과 공기층 내 표면 방사율 값을 대입하여 나타난

**Table 4.** Correction factor of double-layer steel plates

$L^*$ (mm)	Correction factor		$R^2$
	$\alpha(L)$	$\beta(L)$	
3	0.8827	0.3154	1
6	0.8958	0.379	0.9991
9	0.8449	0.3658	0.9948
12	0.8403	0.4208	0.9972

\*Total thickness of double-layer steel plates



**Fig. 12.** Comparison of accuracy for equivalent temperature coefficient( $k$ ) between estimation and variable analysis

등가온도계수( $k$ ) 값을 변수해석결과로 도출한 등가온도계수( $k$ )의 값과 비교한 그래프이며, 두 값에 대한 정확도는 결정계수  $R^2$ 가 0.9952로 도출되어 매우 높은 정확도를 나타냈다.

따라서, 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )가 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm일 때, 최적 공기층 비율에서 공기층 내 표면 방사율에 따른 열전달 특성을 등가온도계수( $k$ )의 함수로써 정립하였고, 이를 통해 공기층 내 표면이 일반적인 강재 표면일 때에 비해 감소한 저방사 표면일 때의 비가열부 표면의 온도를 예측할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 강판의 공기층 적용 및 공기층 내 표면 방사율이 다를 때의 열전달 특성에 대해 확인하기 위하여 비재하 가열실험을 수행하였다. 실험체와 동일한 제원으로 모델링한 열전달해석모델에 대해 타당성 검증 후, 30분 동안의 ISO 834 화재곡선을 적용하여 실험체별 시간에 따른 온도 경향을 분석하였다. 나아가, 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )에서 상판과 하판의 두께가 같을 때, 공기층 비율과 공기층 내 표면 방사율 변화에 따른 변수해석을 수행하여 비가열부 표면의 온도를 예측하였다. 예측한 비가열부 표면 온도를 통해 공기층의 유무에 따른 강판의 열전달 특성을 공기층 비율-등가온도계수 곡선, 공기층 내 표면 방사율-등가온도계수 곡선으로 정립하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 비재하 가열실험 결과에서 공기층을 적용하지 않은 실험체 BS A0의 가열부 및 비가열부 표면의 온도 차는 매우 작게 나타난(8.6 %) 반면, 공기층을 적용한 실험체 BS A2의 가열부 및 비가열부 표면의 온도 차는 크게(56.2 %) 나타났다. 공기층 내 표면 방사율이 다른 실험체 GS A2 및 GS A2 LE는 가열부 및 비가열부 표면의 온도 차는 각각 72 %, 80.6 %로 나타났다. 따라서 공기층 적용 및 공기층 내 표면 방사율이 감소함에 따라 비가열부 표면 온도가 감소한 것으로 판단된다.
- (2) 가열부 및 비가열부 표면 온도에 대해 공기의 열전도를 고려한 열전달해석 및 비재하 가열실험 결과는 각각 평균 97.6 %, 94.0 %의 높은 정

확도를 보이므로, 열전달해석모델이 가열실험 결과의 온도 증가율에 대한 경향을 충분히 묘사하고 있다고 판단된다.

- (3) 열전달해석모델의 시간에 따른 온도 변화 경향을 살펴보면, 공기층이 없는 실험체 BS A0에 비해 공기층을 적용한 실험체 BS A2, GS A2, GS A2 LE의 비가열부 표면 온도는 각각 22 %, 38 %, 65.3 % 감소하였다. 공기층을 적용한 실험체 간 비가열부 표면 온도는 공기층 내 표면 방사율이 가장 높은 실험체 BS A2에 비해 실험체 GS A2 및 GS A2 LE가 각각 20.5 %, 55.5 % 감소하였다. 따라서 각 실험체별 온도 변화 경향은 공기층의 적용 및 공기층 내 표면 방사율이 감소할수록 비가열부 표면으로 전달되는 열의 양도 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 전체 두께가 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm일 때, 각 두께에 대한 공기층 비율은 모두 0.2의 값에서 등가온도계수( $k$ )가 최솟값을 가지기 때문에, 이중층 강판의 전체 두께( $L$ )에 대한 공기층 비율이 0.2배일 때 최적의 공기층 구조를 가지는 것으로 판단된다.
- (5) 전체 두께가 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm일 때, 공기층 비율이 0.2인 최적의 공기층 구조에서 공기층 내 표면 방사율이 감소함에 따라 최소 두께 및 최대 두께인 3 mm, 12 mm 강판의 등가온도계수( $k$ ) 값은 각각 45.8 %, 56 % 감소하였고, 공기층 내 표면 방사율이 증가할수록 이중층 강판 전체 두께( $L$ )의 차이로 발생하는 공기의 열전도의 영향은 미미한 것으로 나타났다.
- (6) 본 연구에서는 강판 상·하판의 두께가 동일한 조건에서 공기층을 포함한 이중층 강판의 온도 감소 효과를 나타내는 등가온도계수( $k$ ) 값을 통해 최적의 공기층 구조에 대해 전체 두께에서의 공기층 비율을 0.2로 제안하였다. 또한, 이중층 강판의 공기층 내 표면 방사율 변화에 따른 열전달 특성을 등가온도계수( $k$ )의 함수로 정립하여 이중층 강판의 비가열부 표면 온도를 예측하였지만, 향후 강판의 상판과 하판의 두께가 다를 경우에 대한 두께 조건을 변수로 확장하는 추가 연구를 통해 더 다양한 두께 조건에서 최적의 공기층 구조를 제안할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1 074002)

## 참고문헌(References)

- [1] Lee, D.H., and Yoo, B.T. (2018) A Study on Fire-proofing Application by Fire Magnitude, *Journal of the Korean Institute of Gas*, KIGAS, Vol.22, No.5, pp.46-52 (in Korean).
- [2] Heo, S.J., Yoh, K.Y., and Kim, J.K. (2022) Design of Large Capacity Water Tank with Stainless Corrugated Panel Wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.5, pp.55-66 (in Korean).
- [3] Lu, J., Liu, H., and Chen, Z. (2017) Post-Fire Mechanical Properties of Low-Relaxation Hot-Dip Galvanized Prestressed Steel Wires, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.136, pp. 110-127.
- [4] Kim, S.H., Kyung, K.S., and Park, J.E. (2019) Evaluation of Critical Temperature in Flexural Member Using Fire Resistant Steels Based on Analytical Method, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.6, pp.401-412 (in Korean).
- [5] Kim, D.-J., Kang, S.-G., Kwon, Y.-J., Lee, J.-Y., and Harada, K. (2012) An Experimental Study on the Thermal Properties of High Strength Concrete Exposed to High Temperature, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.12, No.6, pp.87-92 (in Korean).
- [6] Kang, S.-M., and Kim, J.-K. (2023) Prediction of the Moment Capacity of FRP-Strengthened RC Beams Exposed to Fire Using ANNs, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol.27, No.8, pp.3471-3483.
- [7] Lim, H.M., Kwon, T., Kim, D.S., Lee, S.-Y., Kang, D.-P., and Lee, S.-H. (2009) Heat Resistant Low Emissivity Oxide Coating on Stainless Steel Metal Surface and Characterization of Emissivity, *Korean Journal of Materials Research*, Material Research Society of Korea, Vol.19, No.12, pp.649-656 (in Korean).
- [8] Kim, J.H., Kang, C.K., and Choi, B.J. (2020) The Effect of Temperature Characteristics Toward Composite Beams with Fire Conditions Subjected Vertical Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.189-200 (in Korean).
- [9] Kodur, V.K., Aziz, E.M., and Naser, M.Z. (2017) Strategies for Enhancing Fire Performance of Steel Bridges, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.131, pp.446-458.
- [10] Jirku, J., and Wald, F. (2015) Influence of Zinc Coating to a Temperature of Steel Members in Fire, *Journal of Structural Fire Engineering*, Emerald Publishing, Vol.6, No.2, pp.141-146.
- [11] Bihina, G., and Zhao, B. (2021) Hot-Dip Galvanizing of Steel Structural Members: An Alternative to Passive Fire Insulation?, *ce/papers - Proceedings in Civil Engineering*, John Wiley & Sons, Vol.4, pp. 1317-1324.
- [12] Der, B., Raszková, S., Wald, F., Bihina, G., Gaigl, C., Rus, V., and Malaska, M. (2022) Emissivity of Hot-Dip Galvanized Surfaces in Future Development of EN 1993-1-2, *Journal of Structural Fire Engineering*, Emerald Publishing, Vol.13, No.4, pp.535-557.
- [13] Kang, E.-Y., Oh, M.-W., and Kim, B.-S. (2009) A study on the Heat Transfer Phenomenon Through the Glazing System, *Proceedings of KSES 2009 Autumn Annual Conference*, The Korean Solar Energy Society, pp.32-37 (in Korean).
- [14] Hwang, H.J., and Choi, H.G. (2005) Numerical Analysis of Optimum Air-Layer Thickness in a Double Glazing Window, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, Vol.17, No.2, pp.191-199 (in Korean).
- [15] Alam, N., Nadjai, A., Maraveas, C., Tsarvdaridis, K., and Kahanji, C. (2019) Effect of Air-Gap on Response of Fabricated Slim Floor Beams in Fire, *Journal of Structural Fire Engineering*, Emerald Publishing, Vol.10, No.2, pp.155-174.
- [16] Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Cherier, M.K., Hamdani, M., Yaiche, M.R., and Benamrane, N. (2013) Thermal Resistances of Air in Cavity Walls and Their Effect Upon the Thermal Insulation Performance, *International Journal of Energy and Environment*, International Energy and Environment

- Foundation, Vol.4, No.3, pp.459-466.
- [17] Holland, K.G.T., Raithby, G.D., and Konicek, L. (1975) Correlation Equations for Free Convection Heat Transfer in Horizontal Layers of Air and Water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, Vol.18, pp.879-884.
- [18] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., and Lavine, A.S. (1996) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th Ed.), John Wiley & Sons, USA, pp. 255-927.
- [19] Du, Y., Sun, Y.-K., Jiang, J., and Li, G.-Q. (2019) Effect of Cavity Radiation on Transient Temperature Distribution in Steel Cables Under ISO834 Fire, *Fire Safety Journal*, Elsevier, Vol.104, pp.79-89.
- [20] Švantner, M., Honnerová, P., and Veselý, Z. (2016) The Influence of Furnace wall Emissivity on Steel Charge Heating, *Infrared Physics & Technology*, Elsevier, Vol.74, pp.63-71.
- [21] Korean Agency for Technology and Standards (2009) *Thermocouples* (KS C 1602: 2009), Korea (in Korean).
- [22] Korean Agency for Technology and Standards (2019) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements* (KS F 2257-1: 2019), Korea (in Korean).
- [23] ANSYS Inc. (2021) *ANSYS Thermal Analysis Guide Release 12.0*, USA.
- [24] European Committee for Standardization (2003) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design* (Draft, prEN 1993-1-2: 2003), Belgium.
- [25] 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), Belgium.

---

**요약**: 본 연구에서는 공기층 적용과 공기층 내 표면 방사율이 강판의 열전달에 미치는 영향을 확인하기 위해 비재하 가열실험을 수행하였고, 열전달해석을 통해 시험체별 온도 변화 경향을 분석하였다. 나아가, 전체 두께에서의 공기층 비율과 공기층 내 표면 방사율 변화에 따른 변수해석을 수행하여 비가열부 표면 온도를 예측하였다. 예측한 비가열부 표면 온도에 대해 공기층 유무에 따른 강판의 열전달 특성을 등가온도계수로 정량화하여 열전달을 최소화하는 최적의 공기층 구조를 제안하였다. 제안한 최적의 공기층 구조에서 공기층 내 표면 방사율 변화에 따른 등가온도계수 함수를 통해 공기층을 포함한 이중층 강판의 열전달 특성을 정립하였다.

**핵심용어**: 강판, 공기층, 열전달, 방사율, 등가온도계수

---