

# 개구형상을 고려한 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도에 관한 연구

## Effect of Shape on the Temperature of an Opening Jet Plume at the Bottom of a Horizontal Member

강승구\*

Kang, Seunggoo\*

### Abstract

In this study, combustion tests, in which the opening condition of a fire source was changed using a large-scale compartment and horizontal member, were conducted. The inner temperature, temperature distribution under the horizontal member, external flame shape, and neutral zone height of the compartment were measured under various opening conditions. The results were analyzed using the temperature prediction equation for the opening jet plume at the bottom of a horizontal member, proposed by the Architectural Institute of Japan (Building fire load and design fire property guideline (draft)), and a review was deemed necessary.

**Key words** : Large Scale, Temperature, Horizontal Member, Balcony (Soffit), Opening Jet Plume

### 요 지

본 연구에서는 개구분출화염이 발생할 수 있도록 실규모 화재구획실과 수평부재를 이용하여 화원조건을 설정하고 개구조건을 변화시켜 연소실험을 실시하였다. 그 결과, 화원조건에 따른 구획실의 내부온도와 수평부재 밑면의 온도분포, 화염형상, 중성대높이를 수집하였고, 또한, 일본건축학회 ‘건축물의 화재하중 및 설계화재성상지침(안)’에서 제안되고 있는 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도예측식을 이용하여 본 실험값을 검토한 결과 과소평가되어 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 실규모, 온도, 수평부재, 발코니(차양), 개구분출열기류

## 1. 서 론

건축물 개구주위에는 수평부재의 발코니와 공용통로(복도)가 설치되어 있다. 발코니는 일사 및 빗물에 대한 환경면의 배려로 주로 사용되며, 공용통로는 건물사용자의 이동경로의 용도로 사용된다. 이러한 발코니는 화재시 출화실의 상부층 연소방지 대책으로 이용이 가능하며, 공용통로는 화재 초기화재에 피난경로로써 이용할 수 있다. 이러한, 건축물에서 화재발생시 플래시오버 이후의 최성기화재로 성장하면 창문과 현관 등의 개구를 통해서 고온의 분출열기류 및 화염(이후, 개구분출열기류)이 분출하며, 출화 건물의

외벽이나 출화실에 연결된 공용통로 등을 통하여 상부층연소 및 인접공간과 인접건물로의 연소확대에 대한 위험성이 크다. 한편, 지금까지 개구형상의 변화에 의한 개구분출열기류의 성상에 대한 연구는 다양하게 보고되어 왔다. Yokoi (1960)는 1950년대에 배기시스템이 구축되어 있지 않은 열악한 상황에서 선구적으로 개구분출열기류의 연구를 주도적으로 수행하였다. 개구 아스펙트비  $n = 2W/H$  1~6.4의 개구조건 범위에 대해서 축소모형과 실규모모형을 이용하여 연소실험을 수행한 결과, 개구 아스펙트비가 낮아질수록 중심축온도가 파사드면으로부터 멀어지는 현상을 보고하였다. 또한, 개구면적을 등가변경한  $r_o = \sqrt{WH/2\pi}$  와 Froude

\*교신저자, 정회원, 강원도립대학교 소방환경방재과 조교수(Tel: +82-33-660-8182, Fax: +82-33-660-8182, E-mail: kangseunggoo86@naver.com)  
Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Fire and Environment Prevention, Dr.Eng, Gangwon State University

수를 이용하여 무차원온도  $\theta$ 와 무차원길이  $z/r_o$ 의 상관관계를 통해 개구분출열기류의 중심축온도에측식을 제안하였으며, 추가적으로 상부층 연소확대에 기인하는 스펠드럴 높이, 차양길이(0 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm)에 대해서도 검토를 수행하였다. Yamaguchi et al. (1998)와 Ohmiya et al. (2001)는 스케일이 다른 시험체에 수평부재를 설치하고 연소실험을 통하여 개구형상에 따라 개구분출열기류의 중심축온도 위치가 상이한 점을 보고하였다. Law (1986)는 실규모모형을 이용하여 멀티 쇼펄몰을 가정한 연소실험을 수행하였으며, 개구 폭을 변화시킨 경우의 개구분출열기류의 온도변화에 대해 보고하고 있다. Park and Lee (2016)는 발코니 유무와 개구조건에 변수를 두어 출화실의 플룸 및 연기의 전개양상을 통해 상부층연소의 위험성을 분석하였다. 그러나 과거 연구에서는 수평부재의 화재성에 착안한 연구성과는 현저히 부족한 실정이며, 실규모를 대상으로 발코니와 같은 길이가 긴 수평부재를 고려한 연구는 부족한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 개구형상을 고려한 실규모 수평부재면 아래의 개구분출열기류 성상에 착안하여 수평부재 밑면의 개구분출열기류의 온도를 정량적으로 수집하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험장치

Figs. 1(a), (b)와 같이, 실험장치는 화재실을 상정한 구획과 수평부재를 구성하였다. 구획의 내부치수는 폭 2 m × 길이 2 m × 높이 2 m로 하였고, 구획 주벽의 재료와 수평부재는 ALC 75 mm 판넬을 이용하였다.

실험장치로써 구획 천정부에서 하부방향 0.5 m 위치에 개구를 1개소 설치하였다. 구획내부 바닥면의 중앙에는 6연속 가스버너를 설치하였다. 또한, 기체연료는 도시가스를 이용하였으며 연료공급은 가스유량계를 이용하였다.

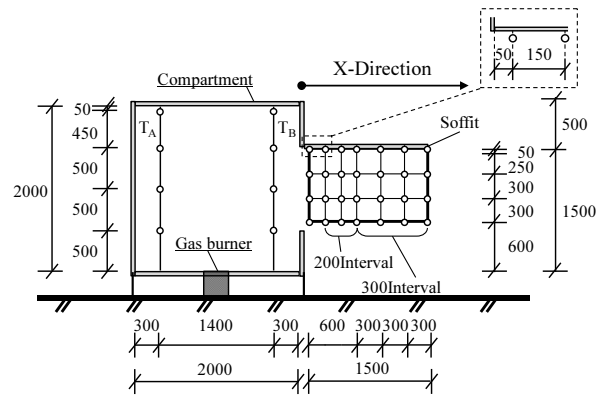
### 2.2 측정항목

#### 2.2.1 구획내부 온도

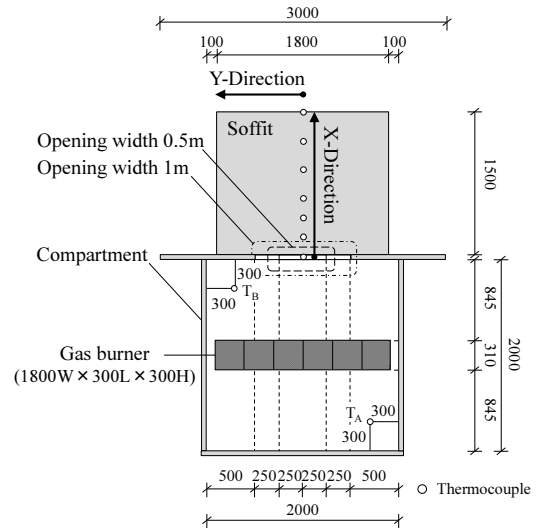
Figs. 1(a), (b)에 나타난 바와 같이, 구획내부의 안쪽 근방과 개구 근방의 대각선 방향 2개소에 대해 벽면에서 300 mm 떨어진 위치에 바닥면부터 천정면 방향으로 500 mm, 1,000 mm, 1,500 mm, 1,950 mm 합계 10점의 온도 측정하였다. 열전대는 시스형 K-type ( $\phi 3.2$  mm)을 이용하였다.

#### 2.2.2 수평부재 밑면의 온도

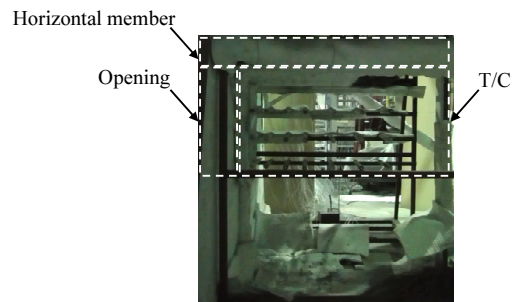
Figs. 1(a), (b), (c)에 나타난 바와 같이, 수평부재 폭을 기준으로 중앙부 밑면에 개구로부터 수평부재 선단방향으로 50 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 900 mm, 1,200 mm, 1,500 mm의 위치에 대해서 수평부재 천정면부터 하부방향으로 50 mm, 300 mm, 600 mm, 900 mm에 합계 28점의



(a) Side view



(b) Plan view



(c) Experiment apparatus picture (Side view)

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus [Unit : mm]

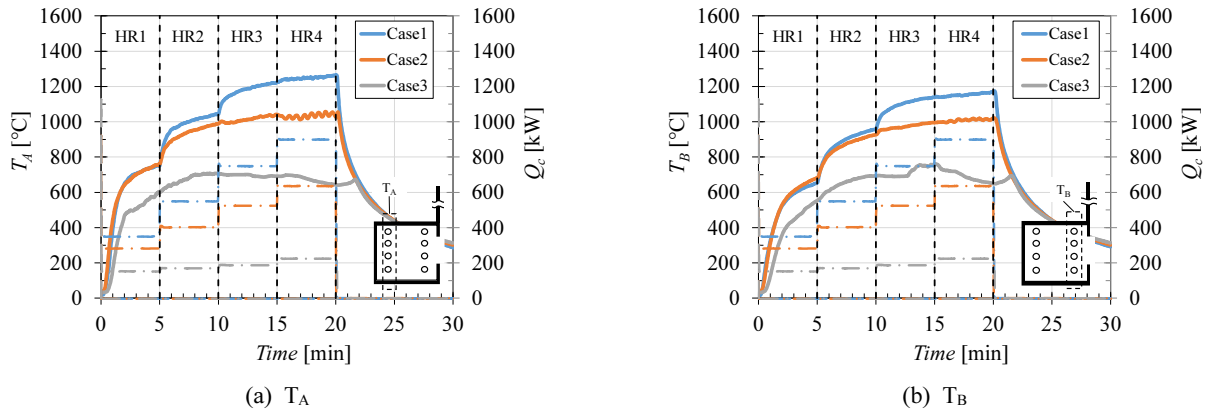
온도를 측정하였다. 열전대는 시스형 K-type ( $\phi 3.2$  mm)을 이용하였다.

### 2.3 실험조건 및 방법

Table 1에 나타난 바와 같이, 개구조건(아스펙트비  $n = 2W/H$ ) 및 수평부재 조건, 회원조건을 설정하였다. 회원조건은 Ohmiya and Hori (2001)가 제안한 분출화염 발생한계 열량  $Q_{verit}$  (HR1), 구획내에서 산소가 완전연소하는 열량  $1500A\sqrt{H}$

**Table 1.** Experimental Conditions

	Opening conditions				Soffit conditions			Fire source conditions			
	Width	Height	Aspect ratio	Opening factor	Spandrel wall	Soffit length	Soffit width	$Q_{\text{crit}}$	$(Q_{\text{crit}} + 1500) / (A\sqrt{H})/2$	$1500 / (A\sqrt{H})$	$1800 / (A\sqrt{H})$
	W	H	n	$A\sqrt{H}$	$H_w$	$L_s$	$W_s$	HR1	HR2	HR3	HR4
	[m]	[m]	[m]	$[m^{5/2}]$	[m]	[m]	[m]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
Case1	0.5	1	1	0.50	0	1.5	2	350	550	750	900
Case2	1	0.5	4	0.35				284	407	530	636
Case3	1	0.25	8	0.13				153	170	188	225



**Fig. 2.** Variation of  $T_A$ ,  $T_B$  and  $Q_c$  as a Function of Time

(HR3), 구획내에서 목재가 연소하는 열량  $1800A\sqrt{H}$  (HR4), HR1과 HR3의 합을 2로 나눈 열량 값 HR2로 설정하여 연소시험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 구획내부온도

Fig. 2에 시간경과에 따른 구획내에서 측정한 안쪽 근방온도  $T_A$ 와 개구부 근방온도  $T_B$ 를 나타내었다. 여기서 좌측 세로축에는  $T_A$ 와  $T_B$ 의 온도는 바닥면에서 천정면까지 수직으로 설치한 열전대에서 측정한 평균값을 이용하였고, 우측 세로축에는 각 실험조건의 화원 열방출률을 나타내었다.

Fig. 2(a)의 결과에 대해서 착화 5분, 착화 10분, 착화 15분, 착화 20분의 온도 값을 보면, Case1의 경우, 750.5 °C, 1,043.8 °C, 1,224.6 °C, 1,263.5 °C로 나타났다. Case2의 경우, 761.5 °C, 988.4 °C, 1,040.6 °C, 1,027 °C로 나타났으며, Case3의 경우, 605.6 °C, 705.6 °C, 691.9 °C, 642.6 °C로 나타났다. Fig. 2(b)의 결과에 대해서 착화 5분, 착화 10분, 착화 15분, 착화 20분의 온도 값을 보면, Case1의 경우, 653.5 °C, 958.6 °C, 1,141.4 °C, 1,167.7 °C로 나타났다. Case2의 경우, 682 °C, 926.3 °C, 994.9 °C, 1,020.8 °C로 나타났다. Case3의 경우, 553.6 °C, 694.1 °C, 761.2 °C, 649.3 °C로 나타났다. Figs.

2(a)와 (b)의 결과에 대해서, Case1과 Case2의 경우  $T_B$ 보다  $T_A$ 의 온도가 높은 경향이 나타났다. 반면, Case3의 경우 착화 15분부터  $T_A$ 보다  $T_B$ 의 온도가 높은 경향이 나타났다.

#### 3.2 수평부재 밑면의 온도분포

Fig. 3에 시간경과에 따른 수평부재 밑면의 온도분포  $T_s$ 를 나타내었다. 여기서  $T_s$ 는 축상온도를 대상으로 수평부재로부터 하부방향으로 50 mm의 온도를 나타내었다. 또한, 범례의 x는 개구부로부터 수평부재 선단까지의 수평방향 길이이다.

Fig. 3(a)의 Case1 결과에 나타난 바와 같이, 착화 10분까지는  $x = 0.2\sim 0.6$  m 구간의 현저한 온도차이는 없었다. 반면,  $x = 0.9\sim 1.5$  m의 구간에서는 개구부로부터 수평부재 선단까지 멀어질수록 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 착화 10분 이후는  $x = 0.2\sim 1.5$  m 구간에서 개구부부터 수평부재 선단까지 멀어질수록 온도가 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 3(b)의 Case2 결과에 나타난 바와 같이, 착화 10분까지는  $x = 0.2\sim 0.4$  m 구간에서 온도차이가 거의 일정하였다. 반면,  $x = 0.6\sim 1.5$  m 구간에서는 개구부로부터 수평부재 선단까지 멀어질수록 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 착화 10분 이후는  $x = 0.2\sim 1.5$  m 구간에서 개구부부터 수평부재 선단까지 멀어질수록 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 한편, 착화 15분 이후  $x = 0.9\sim 1.5$  m 구간에서

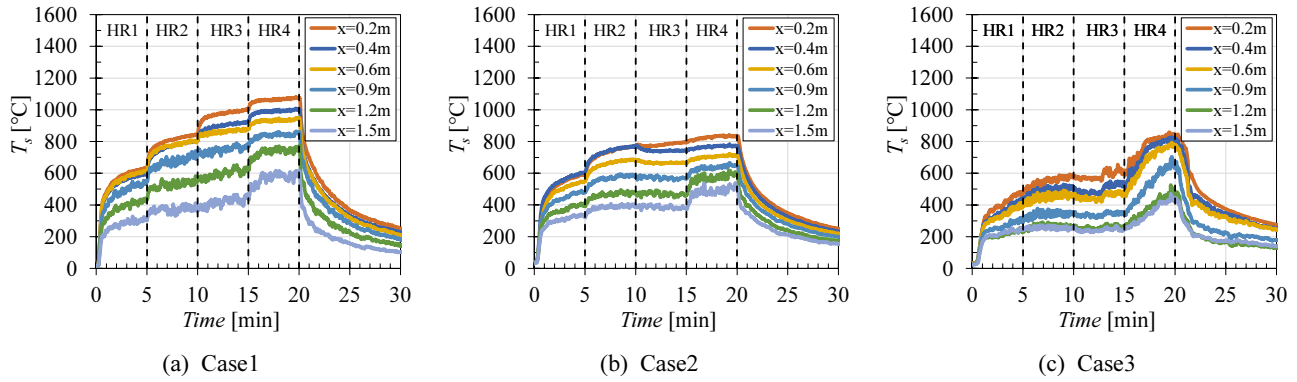


Fig. 3. Variation of  $T_s$  as a Function of Time

온도가 급격히 상승하는 경향이 나타났다. 이러한 이유는 착화 15분 이후부터 분출화염이 거세게 발생하였기 때문에 온도가 급격히 상승했다고 사료된다.

Fig. 3(c)의 Case3 결과에 나타난 바와 같이, 착화 15분까지는  $x = 0.2 \sim 1.5$  m 구간에서 개구부로부터 수평부재 선단까지 멀어질수록 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 한편, 착화 15분 이후부터  $x = 0.2 \sim 1.5$  m 구간에서 전체적으로 온도가 급격히 상승하는 경향이 나타났으며, 상기 Case2와 같이 분출화염 외력의 영향이 관여했다고 사료된다.

### 3.3 수평부재 밑면의 화염형상과 중성대높이

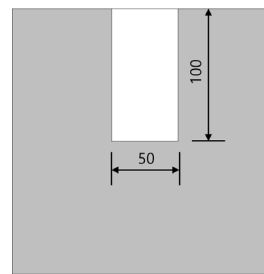
Fig. 4에 실험시 비디오로 촬영한 화염형상을 나타내었다. 여기서 화염형상은 실험종료 직전의 사진이다. 전 실험조건에서 연기를 동반하여 분출화염이 발생하는 것을 알 수 있었으며, 개구부에서 수평부재 선단까지 화염이 늘어나는 형상을 확인할 수 있었다. 실험시 육안으로 관찰된 분출화염의 발생시간은 Case1의 경우 10분6초, Case2의 경우 7분20초, Case3의 경우 16분20초로 확인되었다.

한편, Fig. 4에 나타난 화염형상의 사진을 이용하여 중성대 위치를 도출한 결과, Case1의 경우 약 39.8 cm (중성대높이/개구높이 = 0.4), Case2의 경우 약 19.7 cm (중성대높이/개구높이 = 0.39), Case3의 경우 약 10.6 cm (중성대높이/개구높이 = 0.42)로 확인되었다. 이러한 결과를 토대로 본 실험조건에서의 개구 아스펙트 1, 4, 8에서는 중성대 높이가 개구부의 약 1/2, 2/3에 위치하고 있다는 것을 알 수 있었다.

## 4. 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도 예측식 검토

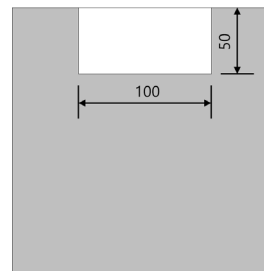
본 연구에서는 일본건축학회의 ‘건축물의 화재하중 및 설계화재성장지침(안)’에 기재되어 있는 Yokoi (1960)가 제안한 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도예측식을 이용하여 수평부재 밑면의 온도예측식을 검토하도록 한다.

Opening shape (elevation view)

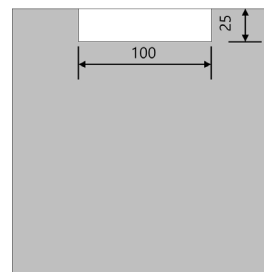


(a) Case1 (n = 1)

External flame shape (side view)



(b) Case2 (n = 4)



(c) Case3 (n = 8)



Fig. 4. Opening External Flame Shape [Unit : cm]

### 4.1 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도 예측식

Yokoi는 상부층방향과 발코니(수평부재)를 구성시켜 다양한 개구분출열기류의 실험을 수행하였으며, 개구부로부터

터 분출되는 열방출률에 대해서 Froude수를 이용하여 무차원 온도 Eq. (1)을 제안하였다.

$$\theta = \frac{\Delta T_s r_o^{5/3}}{\sqrt[3]{Q_e^2 T_\infty / c_p^2 \rho_e^2 g}} \quad (1)$$

여기서, Eq. (1)의  $Q_e$ 는 개구분출열기류의 엔탈피량으로 나타낼 수 있으며, Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_e = c_p 0.5A \sqrt{H} (T_f - T_\infty) \quad (2)$$

또한, Eq. (1)의  $r_o$ 는 개구부의 등가반경으로써, Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_o = \sqrt{\frac{WH}{2\pi}} \quad (3)$$

Yokoi는 상기의 무차원 온도  $\theta$ 와 개구상부의 높이와 개구부의 등가반경을 변수로 설정하여  $z/r_o$ 의 상관관계를 제안하였으며, 이를 회귀분석하면 다음 Eq. (4) 개구분출열기류의 온도예측식을 도출할 수 있다.

$$z/r_o = \{-4\ln(2\theta)\}^{5/4} \quad (4)$$

#### 4.2 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도예측식 검토

Fig. 5에  $\theta$ 와  $z/r_o$ 의 상관관계를 나타내었다. 그래프 안의 빨간 실선은 상기 개구분출열기류의 온도예측식 Eq. (4)를 나타내었다. 또한, 실험 값의 흰색 플롯은 분출화염 발생 전의 값이며, 색이 들어간 플롯은 분출화염 발생 후의 값이다.

Fig. 5에 의해, 전체의 실험 값이 개구분출열기류의 온도예측식 Eq. (4)를 상회하는 결과 값이 나타났다. 이러한 결과는 개구분출열기류의 온도가 과소평가되고 있다는 것을 의미

하고 있다. 향후, 실규모 연소실험의 수평부재 밑면의 온도데이터를 중점적으로 수집하고, 화재확산에 미치는 다양한 인자들에 대해 재검토할 필요가 있다고 사료된다.

한편, 본 실험범위의 조건에 대해서 개구조건에 따라 회귀분석을 수행하면, Case1 (개구 아스펙트비  $n = 1$ )의 경우  $y = 0.5666e^{-0.076x}$ , Case2 (개구 아스펙트비  $n = 4$ )의 경우  $y = 0.6116e^{-0.067x}$ , Case3 (개구 아스펙트비  $n = 8$ )의 경우  $y = 0.9286e^{-0.082x}$ 가 도출되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 개구형상을 고려한 실규모 수평부재 밑면의 개구분출열기류에 착안하여 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도를 정량적으로 수집하는 것과 일본에서 사용되는 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도 예측식에 대한 검토를 수행하였으며, 얻어진 주요 내용을 아래에 서술한다.

#### (1) 구획내부온도

- Case1과 Case2의 경우  $T_B$ 보다  $T_A$ 의 온도가 높은 경향이 나타났다. 반면, Case3의 경우 착화 15분부터  $T_A$ 보다  $T_B$ 의 온도가 높은 경향이 나타났다.

#### (2) 수평부재 밑면의 온도분포

- 화원 열방출률이 증가할수록 수평부재 밑면의 온도는 완만히 상승하였으며, 분출화염이 거세게 발생 한 시점부터 수평부재 밑면의 온도가 급격히 상승하는 경향이 나타났다.

#### (3) 수평부재 밑면의 화염성상과 중성대높이

- 실험시 비디오로 촬영한 화염성상을 토대로 중성대 높이를 확인한 결과, 본 실험조건인 개구 아스펙트비 1, 4, 8에서는 중성대 높이가 개구부의 약 1/2, 2/3에 위치하고 있다는 것을 알 수 있었다.

#### (4) 수평부재 밑면의 개구분출열기류 온도 예측식 검토

- 일본에서 사용되는 수평부재 밑면의 개구분출열기류

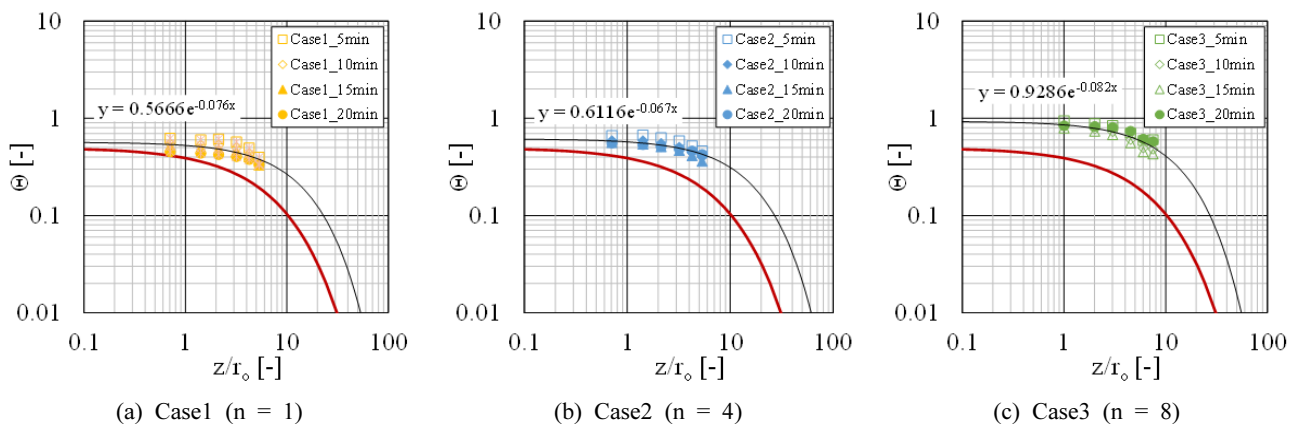


Fig. 5. Relationship between  $\theta$  and  $z/r_o$

온도예측식을 이용하여 수평부재 밑면의 온도예측식을 검토한 결과, 실험 값이 개구분출열기류 온도예측식 Eq. (4)에 과소평가되었으며 향후 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

## 사용기호

$W$ : 개구폭 [m],  $H$ : 개구높이 [m],  $n$ : 아스펙트비 [m],  $A\sqrt{H}$ : 개구인자 [ $m^{5/2}$ ],  $H_w$ : 스펠드럴 높이 [m],  $L_s$ : 수평부재 길이 [m],  $W_s$ : 수평부재 폭 [m],  $Q_{crit}$ : 분출화염 발생한계 열량 [kW],  $Q_c$ : 화원 열방출율 [kW],  $T_A$ : 구획 안쪽 근방 평균온도 [ $^{\circ}C$ ],  $T_B$ : 구획 개구 근방 평균온도 [ $^{\circ}C$ ],  $T_s$ : 수평부재 밑면 온도 [ $^{\circ}C$ ],  $\Delta T_s$ : 수평부재 밑면 상승온도 [K],  $r_o$ : 개구 등가반경 [ $m^2$ ],  $Q_e$ : 개구분출열기류의 엔탈피량 [kW],  $T_{\infty}$ : 초기온도 [K],  $c_p$ : 비열 [kJ/kgK],  $\rho_c$ : 밀도 [ $kg/m^3$ ],  $\theta$ : 무차원온도 [-],  $T_f$ :  $T_A$ 와  $T_B$ 의 평균온도 [K],  $z$ : 개구상단부터 수평방향으로의 높이 [m]

## References

- Law, M. (1986). A note on smoke plumes from fires in multi-level shopping malls. *Fire Safety Journal*, Vol. 10, No. 3, pp. 197-202.
- Ohmiya, Y., and Hori, Y. (2001). Properties of external flame taking into consideration excess fuel gas ejected from fire compartment. *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, Vol. 66, No. 545, pp. 1-8.
- Ohmiya, Y., Yusa, S., Matsuyama, K., and Harada, K. (2001). Prediction method of opening jet plume behavior in the presence of an opening soffit. *Proceedings of 5th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, pp. 171-185.
- Park, H.J., and Lee, Y.J. (2016). A study on positioning & structure of an emergency stay shelter for increasing evacuation performance in the balcony-expanded apartment. *J. Korean soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 3, pp. 7-16.
- Yamaguchi, J., Iwai, Y., Tanaka, T., Harada, K., Ohmiya, Y., and Wakamatsu, T. (1998). Applicability of nondimensional temperature for scaling the temperatures of window jet plume. *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, Vol. 513, pp. 1-7.
- Yokoi, S. (1960). *Study on the prevention of fire-spread caused by hot upward current*. BRI Report No. 34, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan.

---

Received	November 22, 2021
Revised	November 23, 2021
Accepted	April 11, 2022