



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工 學 碩 士 學 位 論 文

室內火災에서 開口部の 影響에 대한
實驗的 研究



2007年 8月 日

釜 慶 大 學 校 產 業 大 學 院

安 全 工 學 科

許 魯 旭

工 學 碩 士 學 位 論 文

室內火災에서 開口部の 影響에 대한
實驗的 研究

指導教授 朴 外 哲

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007年 8月 日

釜慶大學校 産業大學院

安全工學科

許魯旭

許魯旭의 工學碩士 學位論文을 認准함

2007年 8月 日



主 審 工學博士 李 義 周



委 員 工學博士 張 聖 錄



委 員 工學博士 朴 外 哲



목 차

1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	4
2. 연구방법	8
2.1 개요	8
2.2 실험장치	8
2.3 실험방법	11
2.4 수치법	13
3. 결과 및 분석	14
3.1 CASE I	14
3.2 CASE II	21
3.3 CASE III	28
3.4 개구부 개폐에 따른 온도비교	35
3.5 화염의 높이	40
4. 결론	42
참고문헌	43

기 호 설 명

L	: mean flame height(m)
Q	: total heat release rate(kW)
Q_c	: convective heat release rate(kW)
d	: diameter(m)
z_o	: height of virtual origin above top of combustible(m)
z	: height above top of combustible(m)
T_∞	: ambient temperature(K)
T	: mean temperature(K)
ΔT	: $T - T_\infty$, mean temperature rise above ambient(K)
k	: 열전도 계수(w/m · k)
\dot{m}''	: 단위체적당 생성률
t	: 시간(sec)
U	: 개구부 중심선의 x방향 평균유속(m/s)
u	: 속도벡터(m/s)
w	: 단위체적당 화학종 생성률(-)
Y	: 질량분율(-)
ρ	: 밀도(kg/m ³)

An Experimental Study on Effects of Vent in a Room Fire

No-Wook Huh

Department of Safety Engineering,

Graduate School of Industry,

Pukyong National University

Abstract

From an experiment on propane fire depending on the opening and closing of the opening part in fire laboratory of 2.5m x 2.0m x 2.5m size, this research reached the following conclusion.

1) The temperature right above the fire source when the opening part was open(case1 and case2) was slightly higher due to rich oxygen than when closed(case3).

2) When oxygen supply is sufficient, the flame heights of calculation result and experiment result were similar to each other, and formed stable flames.

3) The temperature distribution measured at points other than plume area displayed similar tendency to the numeric simulation result.

4) When vent is shaped long from top to bottom (with door open), where oxygen is richly supplied, the average temperature was higher than when the vent is shaped wide in the center (with window open).

5) As a result, when oxygen supply is sufficient, the plume area temperature distribution calculated with Haskestad equation was similar to the experiment result.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

인간은 유사 이래 불과는 불가분의 관계를 가지고 생활해 왔으며 불을 사용하고 제어할 수 있었기에 오늘날의 고도화된 산업사회를 만들었다고 할 수 있다. 그러나 불의 잘못된 사용으로 인하여 화재가 발생하면 인적인 피해는 물론 재산상의 손실과 역사적 문화적 건축물의 파손 등 막대한 대가를 계속 강요해 오고 있다.

건물화재시 피해를 최소화하고 대피를 용이하게 하기 위하여 건축관련법에는 복도, 계단 및 건물내장재 등에 대해 규제하고 있으며, 소방법규상에도 건축물의 규모에 따른 소방시설을 설치하도록 강제하고 있다.

법규중심의 화재영향평가방법은 지난 십수 년 간의 축적된 경험으로 건축물의 안전을 담당해 왔다. 이러한 경험을 바탕으로 작은 규모의 건축물의 경우 법규중심의 화재영향평가를 수행해도 큰 무리가 없는 것으로 국내외적으로 평가되어 왔다. 그러나, 나날이 발전하는 기술과 건축물용도의 복잡성으로 더이상 법규만으로 건축물의 안전을 확보하기 어렵게 되었다. 따라서 대형 건축물과 다중이용시설 등에 대해서는 법규에 의한 평가와 성능위주평가방법을 동시 수행하고 이를 비교분석하여 보다 효율적이고 경제적인 위험대응의 필요성이 대두되었다.¹⁾

성능위주의 설계 및 화재영향평가는 실내공간의 화재로 생성되는 연기 및 유독가스의 흐름을 효율적으로 예측하고 제어한다면 인명피해를 줄일

수 있고, 화재영역의 확산을 방지할 수 있기 때문에 많은 관심의 대상이 되어왔다.

화재성장을 예측하고 화재발생으로 인한 연기거동을 이해하고 제어할 수 있는 방법은 직접 화재공간에 대하여 실험을 하는 것이나 화재발생의 위험성과 공간상의 제약으로 인하여 많은 어려움이 따르고 실험을 할 수 있다고 하더라도 경제적인 비용을 감수해야 한다. 이러한 이유로 화재에 대한 실험적 연구는 축소공간에서 이루어지고 있으며, 화재현상을 해석하는데 있어서 전산유체역학을 이용한 수치해석법이 널리 이용된다.

화재공간을 해석하는 수치해석법으로는 Zone 모델과 Field 모델이 있다. Zone 모델은 여러 개의 방을 가진 건축물에서의 온도, 가스농축, 연기층 높이에 대한 특정한 불의 영향을 예측하는 모델이다. 화재 영역을 두개의 상부 더운 연기층과 하부 차가운 공기층으로 나누어 각층 내에서 중요한 변수들의 성질이 균일하다고 가정하여 여러 방정식을 상미분 방정식으로 풀어낸다. 이러한 이유로 다양한 불의 표현이 가능하고, 환기시스템의 모델링이 가능하며 물질의 데이터베이스가 포함되어 있어 계산시간에 있어서 Field 모델에 비해 매우 경제적이다. 그러나 평균적인 개념의 계산결과를 얻어내므로 국부적으로 자세한 정보를 얻을 수 없다는 한계를 가지고 있다.

Field 모델은 화재발생 영역에 대하여 격자를 형성하여 유동장을 지배하고 있는 여러 보존방정식들을 경계조건에 의해 비선형 편미분 방정식을 다양한 수치해석적인 방법에 의해 직접 해를 풀어낸다. 따라서 Field 모델은

화재영역의 연기 층에 대한 평균적인 정보뿐만 아니라 국부적으로 자세한 값을 얻을 수 있으나 각 계산 격자망에 대하여 보존방정식을 직접 풀어내야 하므로 계산시간에 있어서 대용량의 컴퓨터를 필요로 한다.

미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발된 화재시뮬레이션 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator)²⁾를 이용하여 실제화재와 거의 유사한 상황을 모사함으로써 안전한 피난경로확보와 인명 및 재산의 피해를 줄일 수 있는 건축물의 설계에 응용되고 있다. 그러나 FDS는 산소농도가 충분한 연료지배형 모델에서는 실험결과와 잘 일치하지만 환기지배형 모델에서는 실험결과와 일치하지 않았으며 또한, 대류만을 고려했을 경우보다는 대류와 복사를 함께 고려했을 경우의 수직온도분포가 실험결과와 잘 일치함을 보였다.⁶⁾ 또한 FDS는 간단한 복사표면만을 고려하고 있어 국부적인 곳에서 실험적인 결과와 많은 오차를 보이고 있는 실정이다.

본 연구는 일정한 크기의 개구부가 있는 3차원 실내공간에서 프로판을 화원으로 하여 개구부의 개폐여부에 따른 온도 변화를 실험하여 유사한 선행연구의 수치시뮬레이션 결과와 비교함으로써 화재와 관련된 물리적 이해를 증진시키고 FDS를 이용한 실내화재 시뮬레이션의 결과에 대한 분석에 정성적인 자료를 제공 할 수 있을 것이다.

1.2 연구 동향

화재역학은 연소, 연소 매카니즘에서 열에너지 이동, 발화, 화염확산, 연소속도, 연소생성물, 연기의 이동에 대하여 공학적으로 분석하는 것으로 열전달, 유체역학등 공학적 원리의 적용이 필요한 화재양상을 표현하는 것이다. 이러한 화재의 현상은 건물구조, 환기 및 풍압과 같은 외부요인과 열 및 질량전달, 화학반응이 포함된 물리적 현상 때문에 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 특히 실내화재에 있어서 화원의 크기와 발생 위치에 따라 확산화염의 구조와 연기거동은 매우 다르게 나타날 수 있다. 따라서 화재크기, 화원크기 그리고 공간의 형태에 따른 화재특성을 분석하는 연구가 이뤄지고 있다.

박외철³⁾은 대형 개구부가 있는 공간의 화재에서 제연의 문제점을 분석하였다. 이를 위해 지하철역과 유사한 크기의 축소공간에서 50KW의 폴리우레탄 화재에 대한 수치모사를 수행하여 1종, 2종, 3종 기계제연방식의 화재영향을 비교하였다.

정이규⁴⁾는 미분무 소화설비용 소규모 화재실험실에서 FDS를 이용하여 프로판 화재발생시 개구부 개폐에 따른 화재에 미치는 영향을 분석하여 화재규모에 상관없이 개구부가 열려있는 경우가 닫혀있는 경우보다 최고온도가 높게 나타남을 확인하였다.

박준⁵⁾은 FDS를 사용한 실내 화재모사에 있어서의 문제점을 파악하기 위해 개구부가 있는 환기통제하에 공간의 프로판화재에 대한 시뮬레이션을

수행하였다. 측정치와 비교한 결과 FDS의 계산결과가 실험에 비해 훨씬 더 낮게 나타났으며 연소에 필요한 공기가 충분히 공급되지 못하는 경우에는 시뮬레이션 결과의 타당성에 대한 검토가 필요함을 확인하였다.

정진용⁶⁾은 일정한 크기의 개구부가 있는 3차원 실내공간에서 메탄올을 화원으로 하여 발열위치에 따른 화염의 구조와 연기거동을 조사하였다. 그 결과 개구부가 있는 실내공간에서 화재발생시 벽 영향으로부터 자유로운 바닥 중심부근에서 발생하는 중심형 화재는 모서리형 화재나 벽체형 화재에 비하여 천정부근의 온도 및 평균온도는 낮지만 연기의 확산 및 하강시간이 가장 빠름을 확인 하였다. 이는 평균화염높이는 감소하나 화염으로 공기유입량이 증가하기 때문이다. 또한, 대류만을 고려했을 경우보다는 대류와 복사를 함께 고려했을 경우의 수직온도분포가 실험결과와 잘 일치함을 보였다.

박경연⁷⁾은 일정한 크기의 개구부가 있는 3차원 실내공간에서 실험을 수행하여 상호 비교한 결과 벽체형 화재가 연기이동속도가 가장빠름을 확인 하였으며 출입구 개폐여부에 따라 연층이 1.5m 높이까지 도달하는데 걸리는 시간이 변화함을 밝혔다.

한원희⁸⁾는 여객선의 연회장을 1/10로 축소하여 만든 모형에서 모서리형 화재가 열유속의 증가와 함께 화염의 높이가 증가하게 되어 열확산이 증가하고 온도가 상승함을 보였다. 또한 외부로부터 공기유입이 없는 벽체형 화재의 경우 연층의 이동속도가 중심형 화재에 비해 약 1.5배 빠름을 확인하

였다.

김서영과 강병하⁹⁾는 건물 화재시 화염의 성장과 독성 연소가스의 확산을 예측하기 위하여 화재에 의한 연소가스의 개구부유동에 관한 내용을 조사하였다. 건물화재는 초기발화 후 가스의 팽창에 의한 압력상승으로 유동이 발생하고 화염의 성장과 함께 고온의 연소가스가 여러 가지 형태의 개구부를 통해 건물상부로 이동하는 부력유동을 확인하였다.

박외철¹⁰⁾은 제연방식과 풍량에 따른 실내에 유입된 연기의 제연성능을 조사하기 위하여 급기구와 배기구, 개구부가 있는 크기 2m×2m×2.4m의 실내에 기계제연방식을 가동하였을 때 실내에 분포한 입자의 감소율을 조사하여 대형 개구부가 많은 지하철역 등에는 급기방식 대신 급배기방식 또는 배기방식의 제연설비를 사용해야 한다는 것을 밝혔다.

박외철과 이경아¹¹⁾는 개구부유동이 대류에 미치는 영향에 관한 수치연구에서 개구부에서 유입되는 공기는 천장의 온도를 형성하는데 영향을 주었고 공기의 유입이 빠를수록 온도는 감소하고 최고온도의 분포가 개구부 쪽으로 이동하는 것을 밝혔다.

문종윤 등¹²⁾은 실험과 수치시뮬레이션의 결과 비교연구에서 연소시간과 내부온도의 변화가 유사하게 나타났으나 실제의 가연물과 FDS 데이터 베이스의 연소시간에 차이가 남을 밝혔다.

추병길과 조성곤¹³⁾은 시스템 내에 열원이 존재하고 부분 개방된 2차원 밀폐공간내의 화재에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 자연대류와 복사를

고려한 복합열전달은 유동장 및 온도장에 모두 영향을 미치는 것을 확인하였다.

노재성 등¹⁴⁾은 한 변의 길이가 25.2m인 정육면체의 아트리움 공간을 중심으로 연기거동에 대한 수치연구에서 연기층의 높이에 따른 피난시간을 확인하였다.

고경찬과 박외철¹⁵⁾은 FDS를 이용한 실내화재 시뮬레이션의 문제점을 파악하기 위해 매탄올 화재를 모사하여 중심형 화재, 벽면형 및 모서리형 화재를 측정치와 비교하였다. 개구부 수직중심선과 모서리 부근에서의 정상상태의 온도와 고온공기층 두께, 개구부의 중립면 높이는 측정치와 비교적 잘 일치하였으나 실험에 비해 화재성장을 지나치게 빨리 여측하는 것으로 나타나 화재의 성장과정을 규명해야하는 실내화재 모사에 대한 수치법의 결점을 지적하였다.

2. 연구방법

2.1 개요

화재에 대한 실험연구는 실제화재로 발생할 수 있는 화재성상을 관찰하고 측정함으로써 복잡한 화재의 물리적 현상을 이해하고 제어할 수 있는 가이드를 제공할 수 있는 가장 좋은 방법이다. 본 연구에서는 프로판 화재에 있어서 플럼영역의 온도와 화염의 높이를 측정하고 실험식의 결과와 비교하였으며 본 실험과 유사한 선행연구⁴⁾의 수치시뮬레이션 결과와 비교하였다.

2.2 실험장치

Fig. 1~4는 본 연구에서 수행된 실내화재 실험실의 모양과 3개의 개구부와 화원의 위치 등을 보여주고 있다. 실험실의 크기는 2.5m×2.0m×2.5m이고, 모양과 위치가 다른 세 개의 개구부가 있다. 연료는 LPG(연소열=12,000 kcal/kg)를 사용하였으며, 버너의 가스소비량은 0.51 kg/h이며, 버너의 노즐(0.8mm, 1.2mm)에서의 분출압력(2.7 kPa)을 디지털압력계로 측정하여 계산하였다. 발열량 7.1kW는 연소열과 가스소비량을 이용하여 계산하였다. 실내화재의 온도측정을 위하여 testoterm 0593/106을 연결하여 testo 900(측정범위 : -40~1200℃)의 온도계를 사용하였다.



Fig. 1 A side view of experimental configuration



Fig. 2 A front View of experimental configuration



Fig. 3 Photograph of the thermocouple and burner



Fig. 4 View of the experimental apparatus

2.3 실험방법

본 연구에서 Table 1은 3개의 개구부의 위치와 크기를 보여주고 있으며 개구부의 개폐여부에 따라 Table 2와 같이 Case I, II, III의 세 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

Table 1. Dimensions and locations of vents

<i>Vent No.</i>	<i>dimensions</i>	<i>locations of centers</i>	<i>remark</i>
<i>1</i>	1.6m×0.95m	1.25m, 0.0m, 1.43m	open/close
<i>2</i>	0.8m×1.7m	2.5m, 1.0m, 0.9m	open/close
<i>3</i>	1.8m×0.45m	0.0m, 1.0m, 2.08m	open

Table 2. Combination of Parameters

	<i>vent No. 1</i>	<i>vent No. 2</i>	<i>vent No. 3</i>
<i>case I</i>	open	open	open
<i>case II</i>	close	open	open
<i>case III</i>	open	close	open

No.3 개구부의 중심을 지나는 수직축을 따라 P1에서 P8, 가스버너 중앙의 수직축을 따라 P9에서 P14를 각각 0.27m 간격으로 온도를 측정하여 매 30초간격으로 600초까지 순간온도를 기록하였다. 평균온도는 실내온도가 정상상태로 되는 200초부터 600초까지의 값을 평균하였다.

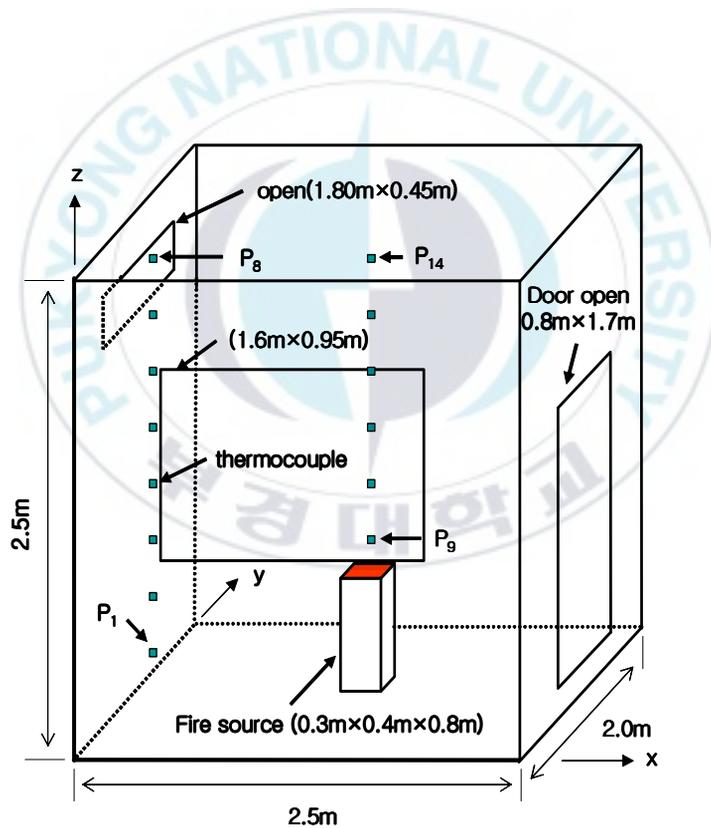


Fig. 5 Experimental arrangement and configuration

2.4 수치법

본 연구에서 사용되어진 지배방정식은 다음과 같다.

노즐에서의 가스분출량(Q)

$$Q = 0.009 \times D^2 \times \left(\frac{h}{d}\right)^{0.5} \quad (1)$$

가스버너의 노즐에서의 압력을 측정하여 (1)식에 의해 가스버너의 가스소비량을 계산하였다.

Flame Height Equation(L)

$$L = 0.235 Q^{2/5} - 1.02D \quad (2)$$

개구부의 특성에 따른 화염의 높이를 실험과 비교하기 위하여 (2)식에서 계산하였다.

Virtual Origin Equation(Z_o)

$$z_o = 0.083 Q^{2/5} - 1.02D \quad (3)$$

Plume 상부의 어떤지점에서의 온도(ΔT_0)를 측정하기 위하여 가상의 Virtual Origin을 (3)식에 의해 계산하였다.

Haskestad Equation(ΔT_0)

$$\Delta T_0 = T - T_\infty = 25 \cdot \left(\frac{Q_c^{2/5}}{z - z_o}\right)^{5/3} \quad (4)$$

Plume 상부의 어떤 지점에서의 온도를 실험값과 비교하기 위하여 (4)식에 의해 Haskestad¹⁷⁾¹⁹⁾ Equation(ΔT_0)을 계산하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 CASE I

3.1.1 P₁~P₈ 의 실험결과

실험을 통하여 모든 개구부가 열려있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 6에서 비교하였다. P₁에서 P₅까지는 온도가 상온과 거의 비슷하게 유지되지만, 이보다 상부에 위치한 P₆에서 P₇까지는 상온보다 5℃에서 8℃ 정도 높게 나타났고, 가장 높은 위치에 있는 P₈의 온도는 40~50℃를 유지함을 볼 수 있다. 이는 No.3 개구부를 통해 고온공기가 배출되기 때문이다. 특히, P₈의 온도차이가 15℃정도로 높게 나타난 것은 외부 바람의 영향 때문이다.

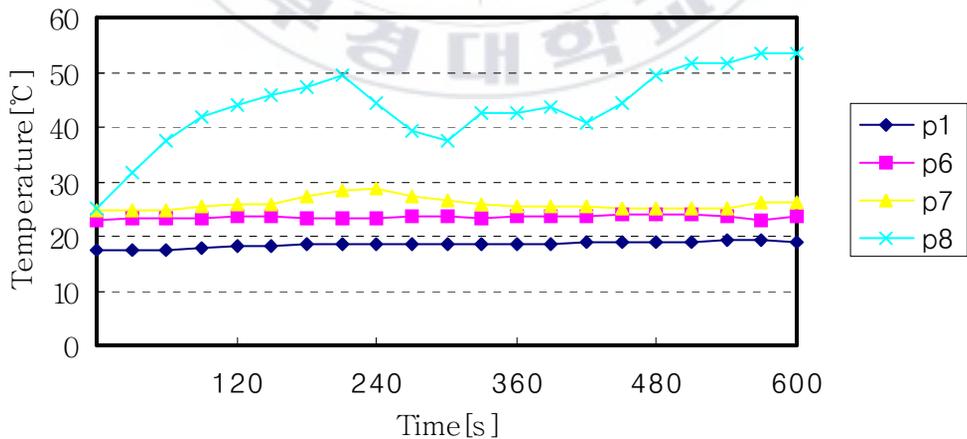


Fig. 6 Comparison of temperature variation at P₁~P₈ (case 1-exp., 7.1kw)

3.1.2 $P_1 \sim P_8$ 의 수치시뮬레이션 결과

수치시뮬레이션을 통하여 모든 개구부가 열려있는 경우, $P_1 \sim P_8$ 위치에서의 온도변화를 Fig. 7에서 비교하였다. P_1 에서 P_6 까지는 온도가 상온과 거의 비슷하게 유지되지만, 이보다 상부에 위치한 P_7 에서는 400초 이후에는 상온보다 조금 높은 온도를 나타냈으며, 가장 높은 위치에 있는 P_8 의 온도는 약 35°C 내외를 유지함을 볼 수 있다. P_8 의 온도가 다른 지점에서 보다 높은 온도를 보이는 것은 No.3 개구부를 통해 고온공기가 배출되기 때문이다.

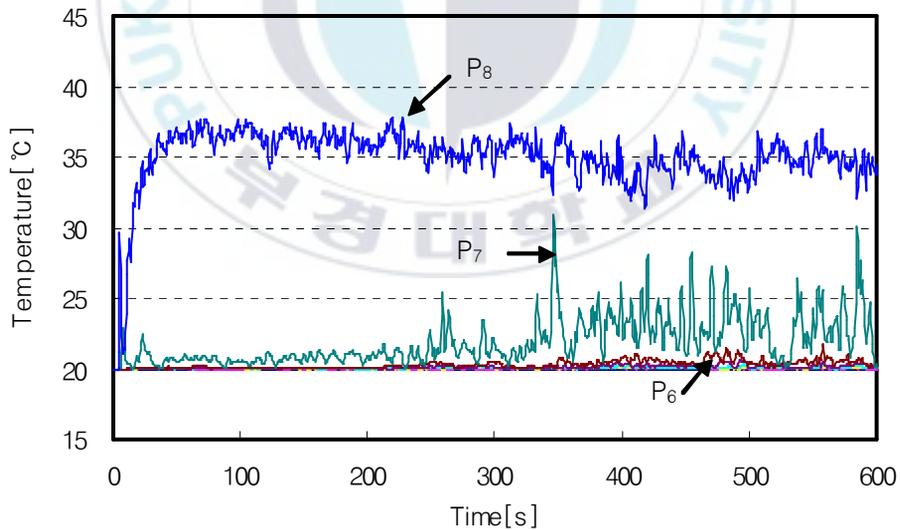


Fig. 7 Comparison of temperature variation
at $P_1 \sim P_8$ (case 1-sim., 59.5kw)

3.1.3 P₉~P₁₄의 실험결과

실험을 통하여 모든 개구부가 열려있는 경우, 공간의 중심을 지나가는 수직 선상의 P₉~P₁₄ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 8에 비교하였다. P₉는 화염 내부에 위치하고 있기 때문에 다른 위치보다 온도가 월등히 높아 600~800°C를 유지함을 알 수 있다. P₁₀의 온도는 화염의 끝부분에 위치하기 때문에 400°C전후에서 형성되고 있으며 화염의 중심에서 벗어날수록 온도가 낮아지며, P₁₁~P₁₄는 150~50°C정도를 유지하고 있다. 특히, P₁₂의 온도는 90°C정도로 case 2, case 3에 비해 25°C이상 높은 것으로 나타났다.

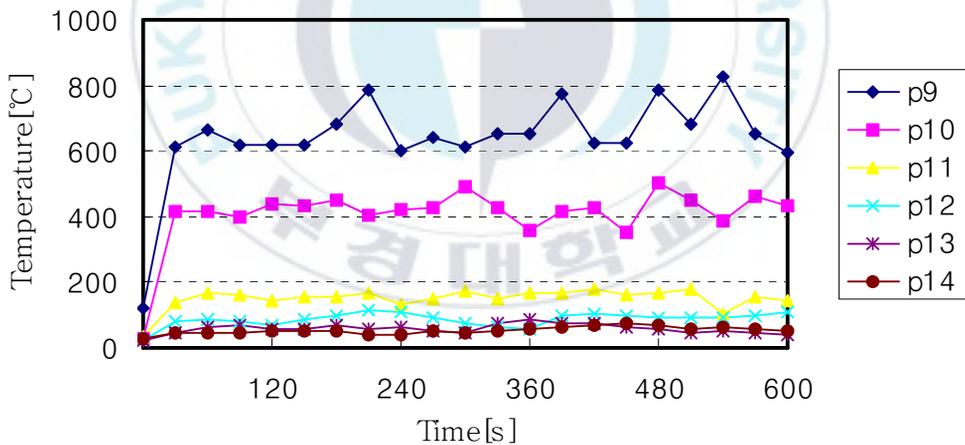


Fig. 8 Comparison of temperature variation at P₉~P₁₄ (case 1-exp., 7.1kw)

3.1.4 $P_9 \sim P_{14}$ 의 수치시물레이션 결과

수치시물레이션을 통하여 모든 개구부가 열려있는 경우, 공간의 중심을 지나가는 수직선상의 $P_9 \sim P_{14}$ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 9에 비교하였다. $P_{10} \sim P_{14}$ 는 화염의 중심에서 벗어나 있기 때문에 100°C 전후 이지만 P_9 의 온도는 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 를 유지함을 알 수 있다. P_9 는 화염의 근처에 위치하고 있기 때문에 다른 위치보다 온도가 월등히 높다.

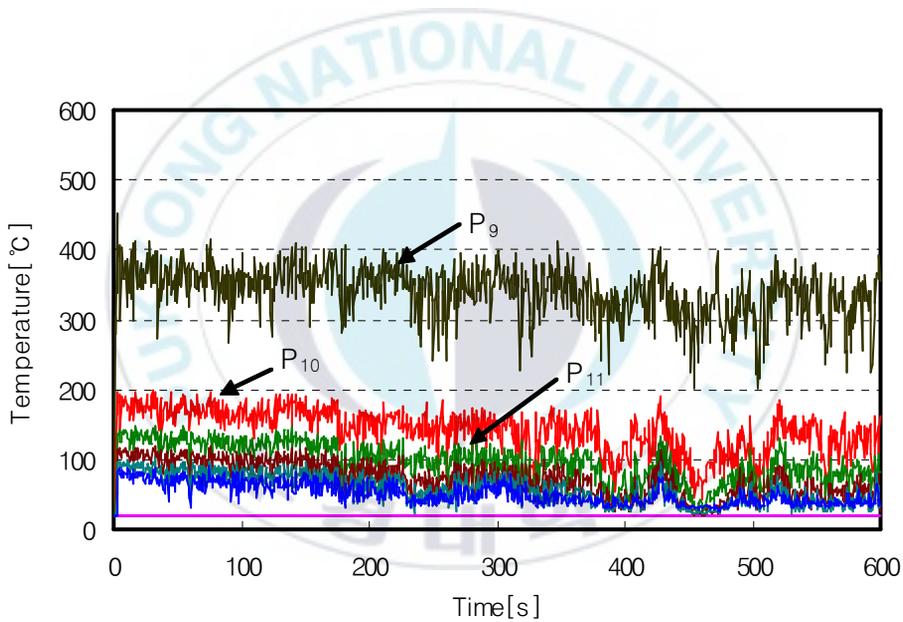


Fig. 9 Comparison of temperature variation at $P_9 \sim P_{14}$ (case 1-sim., 59.5kw)

3.1.5 평균온도

실험을 통하여 모든 개구부가 열려있는 경우, P₁~P₁₄의 위치에서 평균온도를 측정하기 위하여 30초 간격으로 600초 동안 순간온도를 측정하여 정상상태가 되는 200초 이후부터 600초까지의 평균값을 구했다. Fig. 10과 같이 P₇은 온도상승이 적었으며 P₈의 온도보다 20℃ 정도 낮게 나타났다. 0.8m 높이에 위치한 P₉의 온도는 679℃이고, P₁₀~P₁₂의 지점에서는 화염의 영향을 많이 받았으며 P₁₃~P₁₄ 지점에서는 중심부에서 상승하는 열거동이 제트(jet)를 형성하여 50~60℃를 나타냈다.

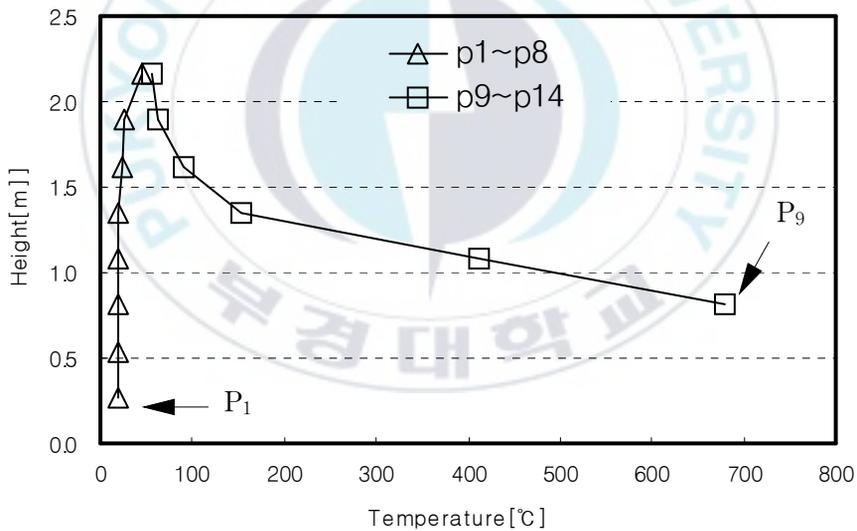


Fig. 10 Comparison of average temperature
at P₁~P₁₄ (case 1-exp., 7.1kw)

수치시뮬레이션을 통하여 모든 개구부가 열려 있는 경우(CASE I), P₁~P₁₄의 위치에서 평균온도를 측정하기 위하여 온도가 거의 정상상태가 되는 400초부터 600초까지의 평균값을 구했다. Fig. 11와 같이 P₉ 지점인 0.8m 높이에 321°C 이고, P₁₀~P₁₁의 지점에서는 화염의 영향을 받았으며 P₁₂~P₁₄ 지점에서는 화염의 영향이 적었다. P₉~P₁₄의 온도가 화재의 중심 및 상부에 위치하기 때문에 높게 나타났다. P₈에서는 고온공기의 배출로 인해 35°C 정도를 나타냈으나 그 외의 지점에서는 외기온도인 20°C에 가깝다.

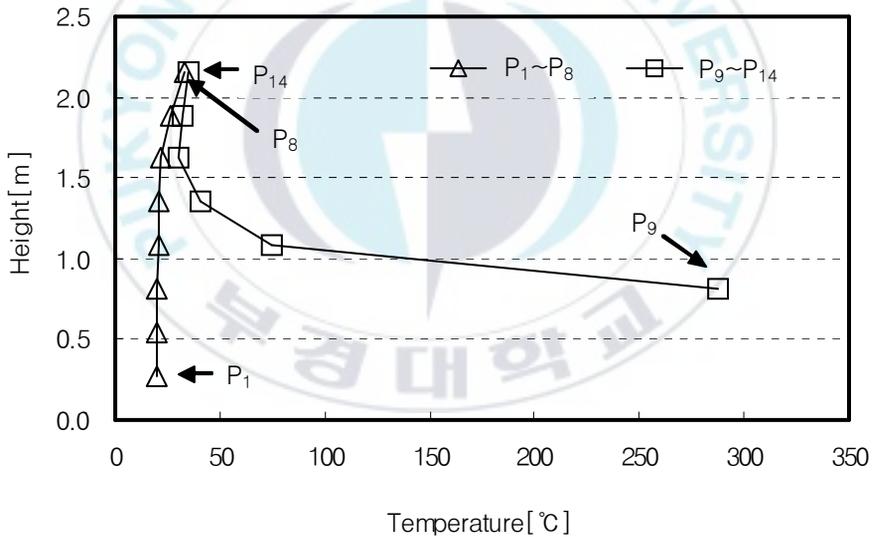


Fig. 11 Comparison of average temperature at P₁~P₁₄ (case 1-sim., 59.5kw)

3.1.6 실험결과 검증

Fig. 12와 같이 P₁₀~P₁₄의 온도를 살펴보면 화염에서 0.27m 떨어져 있는 P₁₀은 간헐화염영역으로 412℃를 나타내었으며 화염에서 멀어질수록 온도가 감소하였다. 실험결과가 계산온도(369℃)보다 약간 높게 나타났다. P₁₁~P₁₄은 0.54m이상 떨어진 화염이 존재하지 않는 부력풀럼영역으로 화염에서 멀어질수록 온도가 지속적으로 감소하였다. 이 영역에서는 실험온도와 계산온도는 정확히 일치하였다. 이는 case 1의 경우 실외화재와 같이 산소공급이 충분함을 알 수 있다.

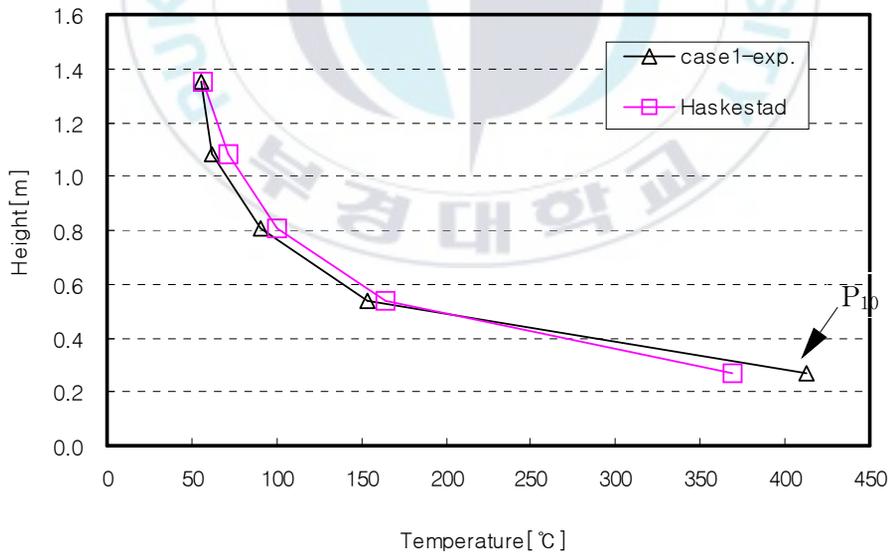


Fig. 12 Comparison of average temperature at P₁₀~P₁₄ (case 1, 7.1kw)

3.2 CASE 2

3.2.1 $P_1 \sim P_8$ 의 실험 결과

Fig. 13은 창문이 닫혀있는 경우(case 2)에 대한 $P_1 \sim P_8$ 에서의 온도변화를 비교한 그림이다. P_1 에서 P_7 까지는 온도가 상온과 거의 비슷하게 유지되거나 5°C정도 상승하는 것으로 나타났지만, 최상부의 P_8 의 온도는 40~50°C 정도를 유지하면서 지속적으로 증가함을 볼 수 있다. 전체적으로 case 1과 case 3의 경우보다 온도가 높게 나타났다. 이는 출입문에서 신선한 공기가 충분히 공급되기 때문에 닫혀진 창문이 실내온도에 큰 영향을 미치지 않았으며 오히려 열의 축적을 용이하게 한 결과이다. 또한 고온공기의 배출경로가 P_8 로 제한되었기 때문이다.

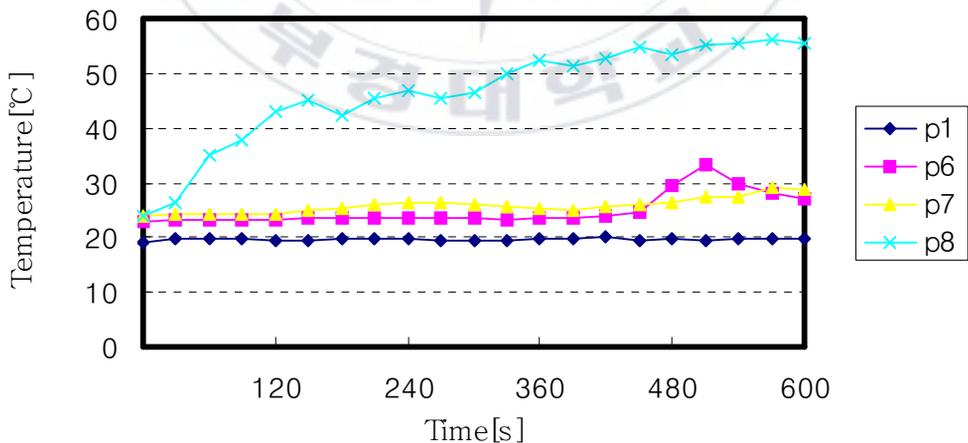


Fig. 13 Comparison of temperature variation at $P_1 \sim P_8$ (case 2-exp., 7.1kw)

3.2.2 P₁~P₈의 수치시뮬레이션 결과

수치시뮬레이션을 통하여 창문이 닫혀있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 14에서 비교하였다. P₁에서 P₆까지는 온도가 상온과 거의 비슷하게 유지되지만, P₇에서는 150초부터 온도가 상승하기 시작하여 200초이후 정상상태로 된다. 이 지점에서 온도상승이 창문이 열려있는 경우 보다 빠른 것으로 나타났다. P₈의 온도는 33℃ 정도를 유지함을 볼 수 있다. 또한 창문이 열려있는 경우 보다 온도가 조금 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 전체적으로 창문이 열려있는 경우보다 온도가 낮게 나타났다.

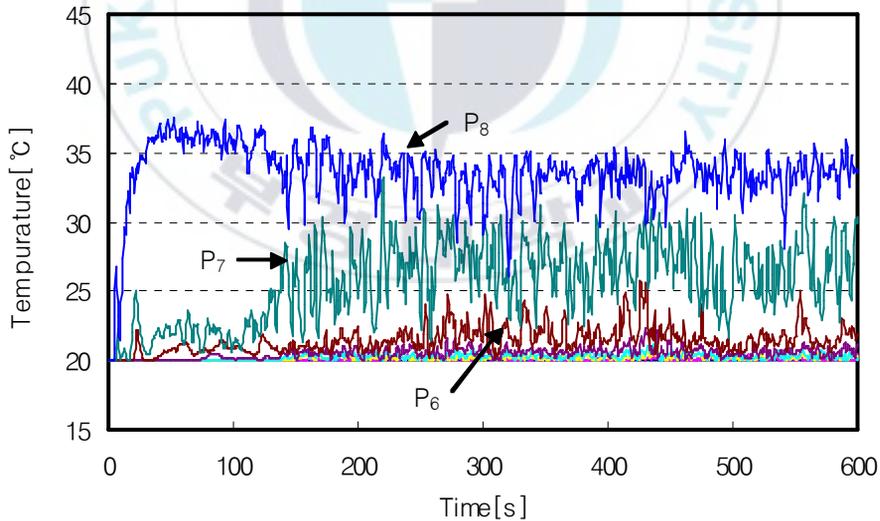


Fig. 14 Comparison of temperature variation at P₁~P₈ (case 2-sim., 59.5kw)

3.2.3 P₉~P₁₄의 실험 결과

창문이 닫혀있는 경우, 공간의 중심을 지나는 수직선상의 P₉~P₁₄ 위치에서의 온도변화를 Fig. 15에 비교하였다. P₉는 화염의 중심에 위치하고 있기 때문에 660℃ 정도를 유지함을 알 수 있다. 그러나 창문이 열려있는 경우 보다는 다소 낮은 것으로 나타났다. P₁₀의 온도는 화염의 끝부분에 위치하기 때문에 450℃ 전후를 유지하고 있으며, P₁₁은 180℃ 전후로 형성되고 P₁₂~P₁₄는 화염의 중심보다 높은 위치에 있기 때문에 60℃ 전후로 온도가 형성되고 높이에 따른 온도변화가 적었다. 또 전체적으로 case 1과 case 3 경우보다 온도가 높게 나타났다.

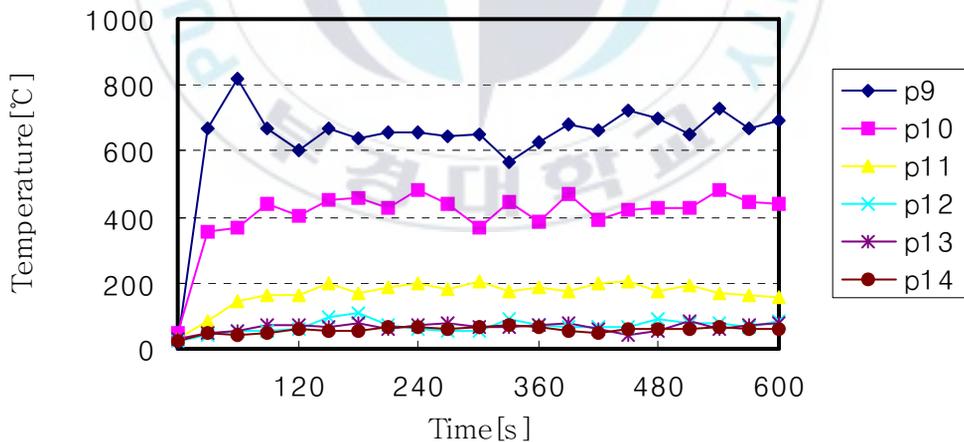


Fig. 15 Comparison of temperature variation at P₉~P₁₄(case 2-exp., 7.1kw)

3.2.4 $P_9 \sim P_{14}$ 의 수치시물레이션 결과

창문이 닫혀있는 경우, 공간의 중심을 지나는 수직선상의 $P_9 \sim P_{14}$ 위치에서의 온도변화를 Fig. 16에 비교하였다. $P_{11} \sim P_{14}$ 는 화염의 중심보다 높은 위치에 있기 때문에 40°C 전후로 온도가 형성되지만, P_9 의 온도는 300°C 정도를 유지함을 알 수 있다. 이는 화염의 중심에 위치하고 있기 때문에 다른 위치보다 온도가 매우 높다. P_{10} 은 화염의 가장자리에 위치하고 있기 때문에 약 70°C 로 나타났으나, 창문이 열려있는 경우보다 온도가 낮았다.

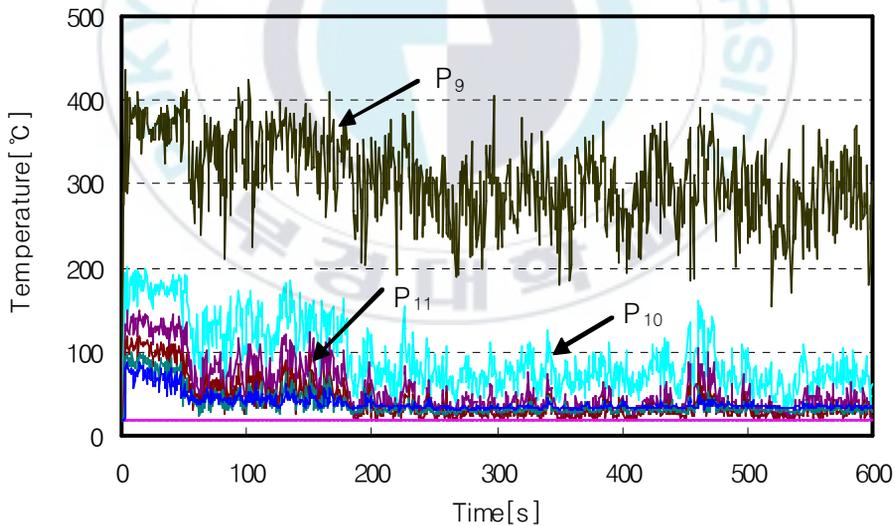


Fig. 16 Comparison of temperature variation at $P_9 \sim P_{14}$ (case 2-sim.,59.5kw)

3.2.5 평균온도

실험을 통하여 창문이 닫혀있는 경우, P₁~P₁₄의 위치에서 평균온도를 측정하기 위하여 30초 간격으로 600초 까지 순간온도를 측정한 값 중에서 정상상태 구간인 200초에서 600초까지의 값을 평균하였다. Fig. 17과 같이 P₇은 온도상승이 적었으며 P₈의 온도보다 25℃정도 낮게 나타났다. 0.8m높이에 위치한 P₉의 온도는 664℃이고, P₁₀~P₁₁의 지점에서는 화염의 영향을 많이 받았으며 P₁₂~P₁₄ 지점에서는 중심부에서 상승하는 열거동이 제트(jet)를 형성하여 60℃정도를 나타내었다. 전지점에서 온도가 매우 높았다.

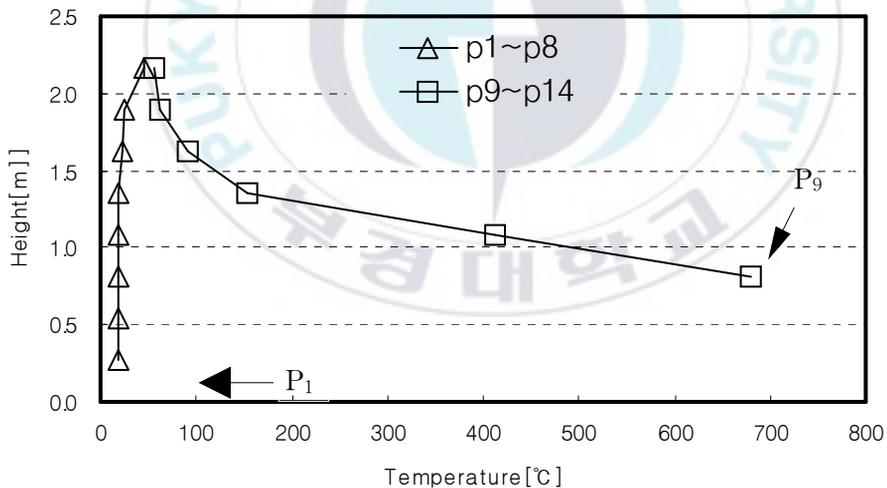


Fig. 17 Comparison of average temperature

at P₁~P₁₄ (case2-exp., 7.1kw)

창문이 닫혀있는 경우(CASE II), P₁~P₁₄의 위치에서 평균온도를 측정하기 위하여 온도가 정상상태가 되는 400초부터 600초까지의 평균값을 구했다. Fig. 18와 같이 P₉ 지점인 0.8m 높이에서 288℃ 이고, P₁₀ 지점에서 75℃ 이고 그 외의 지점에서는 온도변화가 매우 낮았다.

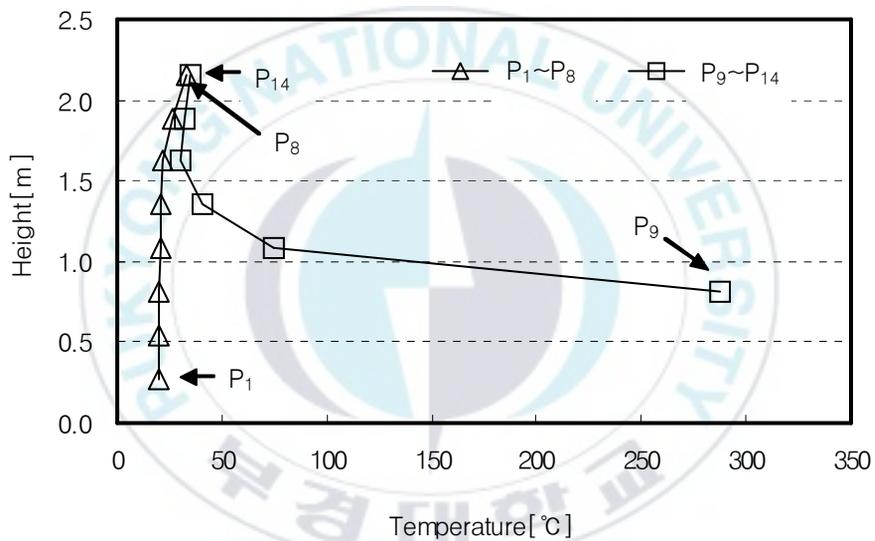


Fig. 18 Comparison of average temperature at P₁~P₁₄ (case2-sim., 59.5kw)

3.2.6 실험결과 검증

Fig. 19와 같이 P₁₀~P₁₄의 온도를 살펴보면 화염에서 0.27m 떨어져 있는 P₁₀은 간헐화염영역으로 450℃를 나타내었으며 화염에서 멀어질수록 온도가 감소하였다. 실험결과가 계산온도(369℃)보다 높게 나타났다. P₁₁~P₁₄은 0.54m이상 떨어져있어 화염이 존재하지 않는 부력풀럼영역으로 화염에서 멀어질수록 온도가 지속적으로 감소하였다. 이 영역에서는 실험값과 계산값은 P₁₂ 지점에서 약간의 차이를 보였으나 비교적 비슷하였다.

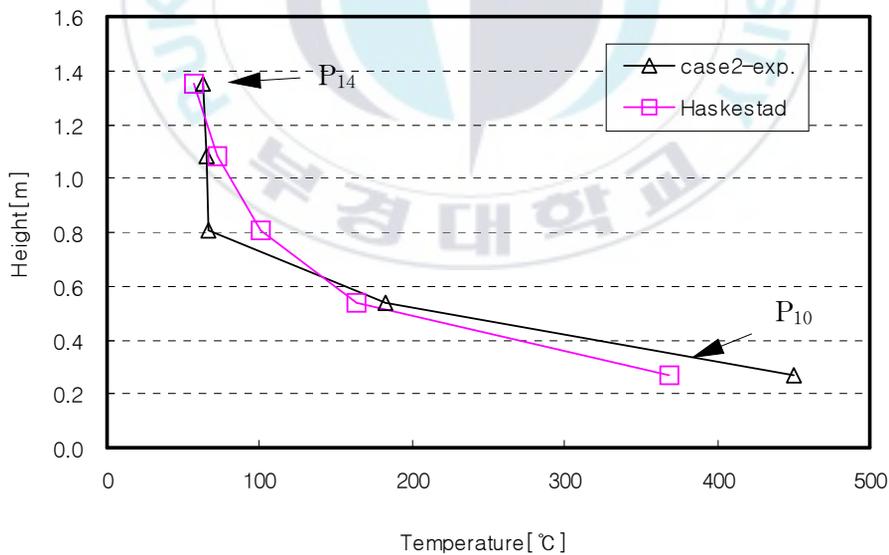


Fig. 19 Comparison of average temperature at P₁₀~P₁₄ (case 2, 7.1kw)

3.3 CASE 3

3.3.1 P₁~P₈의 실험 결과

Fig. 20는 출입문이 닫혀있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도변화를 비교한 그림이다. P₁에서 P₆까지는 온도가 상온과 거의 비슷하게 유지되거나 5~10℃정도 상승하는 것으로 나타났지만, P₇의 위치에서는 30℃ 전후에서 안정적인 온도를 나타냈다. 이 지점에서는 case 1, case 2에 비해 높은 온도를 형성하였다. P₈의 온도는 40~50℃ 정도를 유지하면서 안정적으로 증가함을 볼 수 있다. 이는 No.3 개구부를 통해 고온 공기가 배출되기 때문이다. 전체적으로 case 1의 경우보다 온도가 높았으며 case 2의 경우보다 온도가 낮게 나타났다.

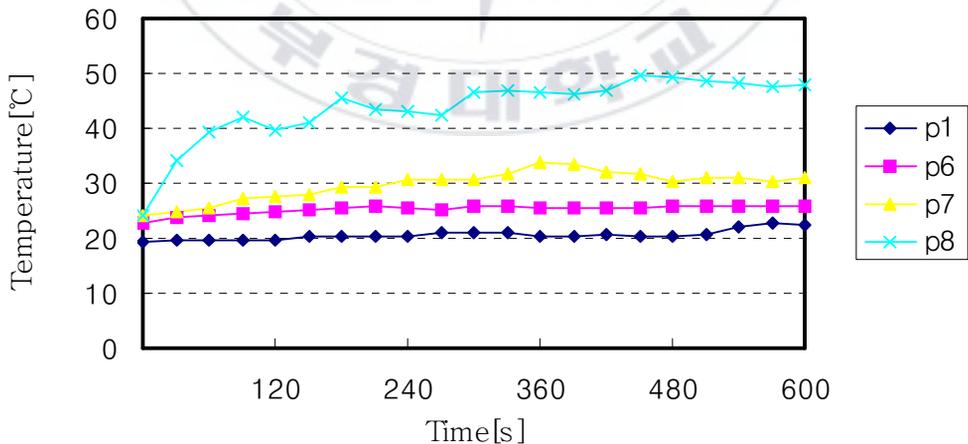


Fig. 20 Comparison of temperature variation at P₁~P₈ (case3-exp.,7.1kw)

3.3.2 $P_1 \sim P_8$ 의 수치시뮬레이션 결과

Fig. 21는 출입문이 닫혀있는 경우, $P_1 \sim P_8$ 위치에서의 온도변화를 비교한 그림이다. P_1 에서 P_6 까지는 온도가 상온과 거의 비슷하게 유지되지만, P_8 의 온도는 37°C 정도를 유지함을 볼 수 있다. P_7 측의 위치에서는 100초부터 온도가 상승하기 시작하여 30°C 정도에서 정상상태로 된다. 전체적으로 case 1, case 2의 경우보다 온도가 높게 나타났다.

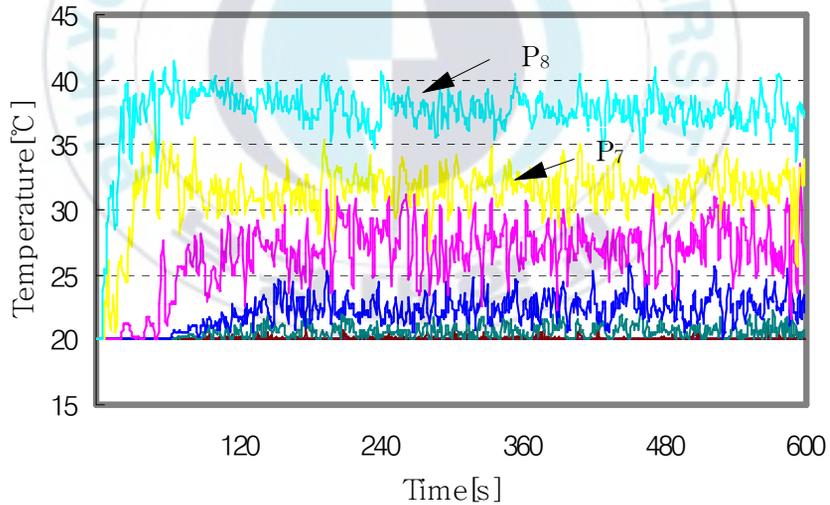


Fig. 21 Comparison of temperature variation at $P_1 \sim P_8$ (case 3-sim.,59.5kw)

3.3.3 $P_9 \sim P_{14}$ 의 실험결과

No.2 개구부가 닫혀있는 경우(case 3), 공간의 중심을 지나는 수직선상의 $P_9 \sim P_{14}$ 위치에서의 온도변화를 Fig. 22에서 비교하였다. P_9 는 화염의 중심에 위치하고 있기 때문에 다른 위치보다 온도가 매우 높았다. 특히, case 1과 case 2의 경우보다 100°C 이상 높게 형성되었다. $P_{10} \sim P_{11}$ 는 $100 \sim 300^\circ\text{C}$ 에서 형성되어 있으나 case 1과 case 2의 경우보다 온도가 상당히 낮았다. $P_{12} \sim P_{14}$ 의 경우도 다른 case에 비해서 온도가 낮게 형성되었다. 이는 No.2 개구부가 높은 위치에 있어 신선한 공기의 공급과 연기의 배출이 원활하게 이루어지지 않기 때문이다.

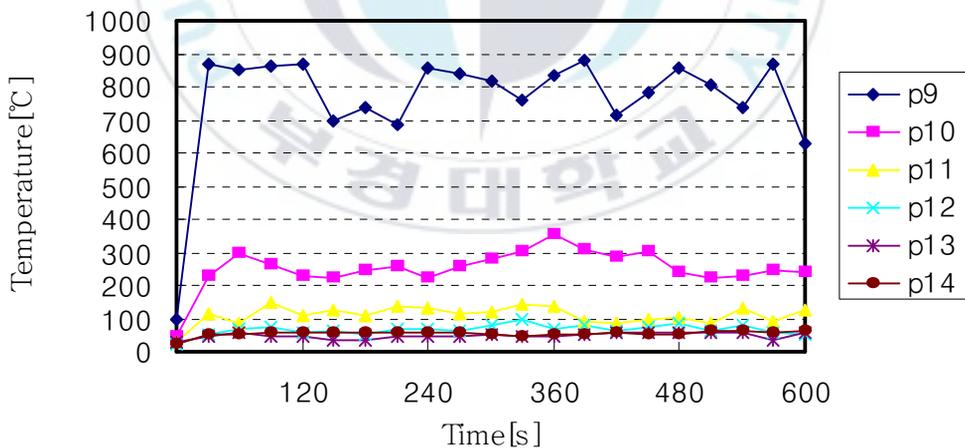


Fig. 22 Comparison of temperature variation at $P_9 \sim P_{14}$ (case3-exp.,7.1kw)

3.3.4 $P_9 \sim P_{14}$ 의 수치시물레이션결과

출입문이 닫혀있는 경우, 공간의 중심을 지나가는 수직선상의 $P_9 \sim P_{14}$ 위치에서의 온도변화를 Fig. 23에 비교하였다. 초기에 산소가 공급되는 경우에 P_9 의 온도는 350°C 였으나 산소공급이 부족한 150초를 전후해서 약 200°C 를 유지하였다. $P_{10} \sim P_{14}$ 는 화염의 중심보다 높은 위치에 있기 때문에 약 50°C 로 나타났지만, 최상부에서는 약 40°C 를 유지함을 보였다. 특히, P_{14} 에서의 온도가 $P_{10} \sim P_{14}$ 보다 비교적 높게 나타났으며 전체적으로 case 1, case 2의 경우보다 낮게 나타났다.

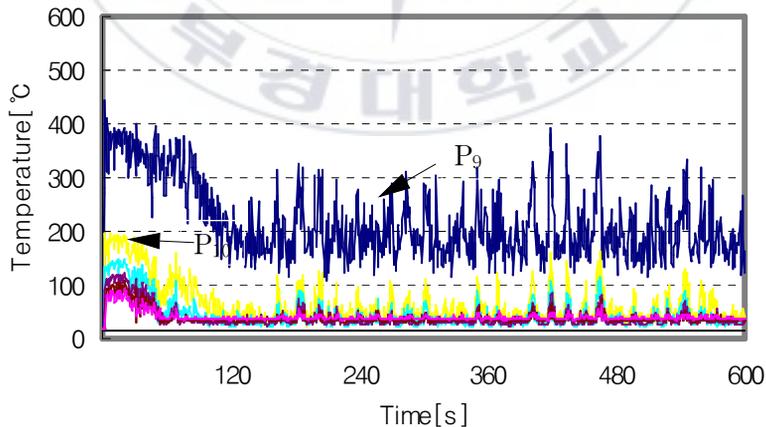


Fig. 23 Comparison of temperature variation at $P_9 \sim P_{14}$ (case3-sim.,59.5kw)

3.3.5 평균온도

실험을 통하여 출입문이 닫혀있는 경우(case 3), P₁~P₁₄의 위치에서 평균 온도를 측정하기 위하여 30초 간격으로 600초까지 순간온도를 측정한 값 중에서 정상상태 구간인 200에서 600초까지의 값을 평균하였다. Fig. 24과 같이 P₇은 온도상승이 적었으며 P₈의 온도보다 약15℃ 낮게 나타났다. 0.8m 높이에 위치한 P₉의 온도는 790℃로 매우 높았으며, P₁₀~P₁₁의 지점에서는 화염의 영향을 많이 받았으며 P₁₂~P₁₄ 지점에서는 약50℃로 나타났다. 화염의 중심을 제외한 전 지점에서 다른 경우에 비해 온도가 매우 낮았다.

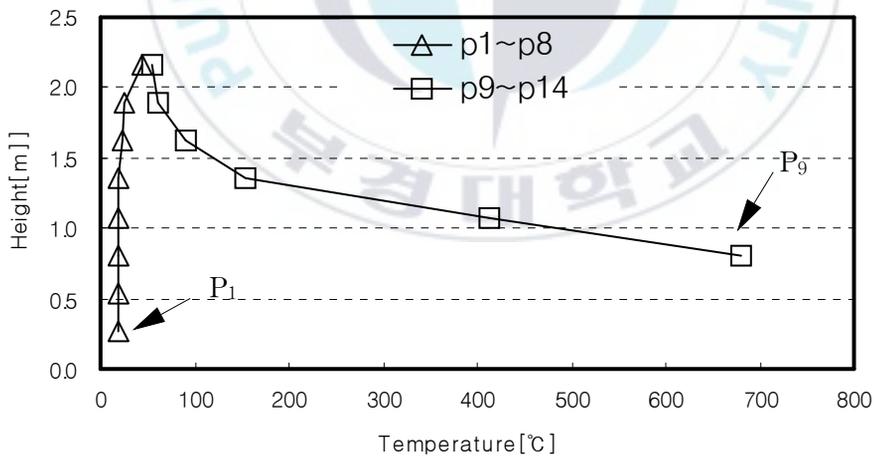


Fig. 24 Comparison of average temperature at P₁~P₁₄ (case 3-exp.,7.1kw)

출입문이 닫혀있는 경우(case 3), P₁~P₁₄의 위치에서 평균온도를 측정하기 위하여 온도가 정상상태가 되는 400초부터 600초까지의 평균값을 구했다. Fig. 25와 같이 P₉ 지점인 0.8m 높이에서 197℃이고, 그 외의 지점의 평균 온도는 약 30~50℃로 나타났다.

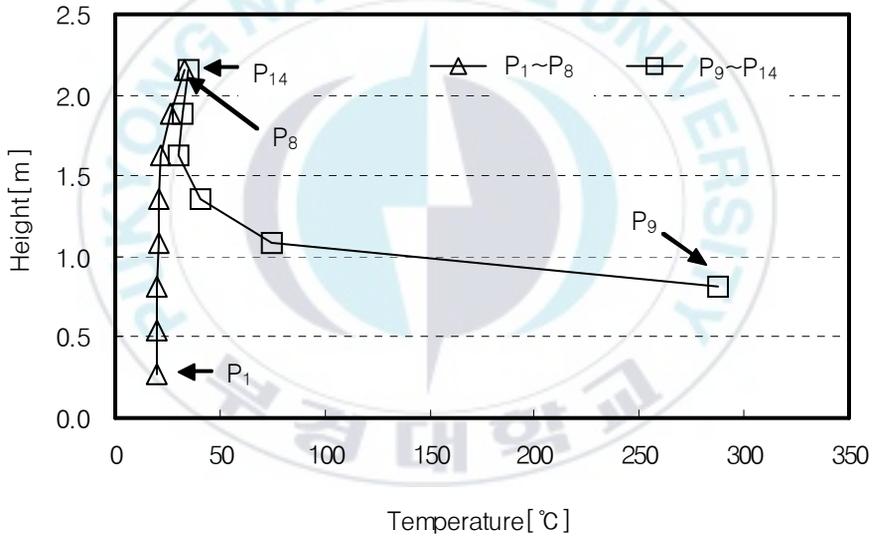


Fig. 25 Comparison of average temperature at P₁~P₁₄ (case 3-sim.,59.5kw)

3.3.6 실험결과 검증

Fig. 26와 같이 $P_{10} \sim P_{14}$ 의 온도를 살펴보면 화염에서 0.27m 떨어져 있는 P_{10} 은 간헐화염영역으로 262°C를 나타냈으며 화염에서 멀어질수록 온도가 감소하였다. 실험결과가 계산온도(369°C)보다 낮게 나타났다. $P_{11} \sim P_{14}$ 은 0.54m이상 떨어진 어느 지점에서나 화염이 존재하지 않는 부력풀림영역으로 화염에서 멀어질수록 온도가 지속적으로 감소하였다. 이 영역에서는 실험값보다 계산값이 높게 나타났다. 이는 계산값은 실외화재를 가정한 계산식이므로 환기통제하에서의 온도는 낮게 나타났다.

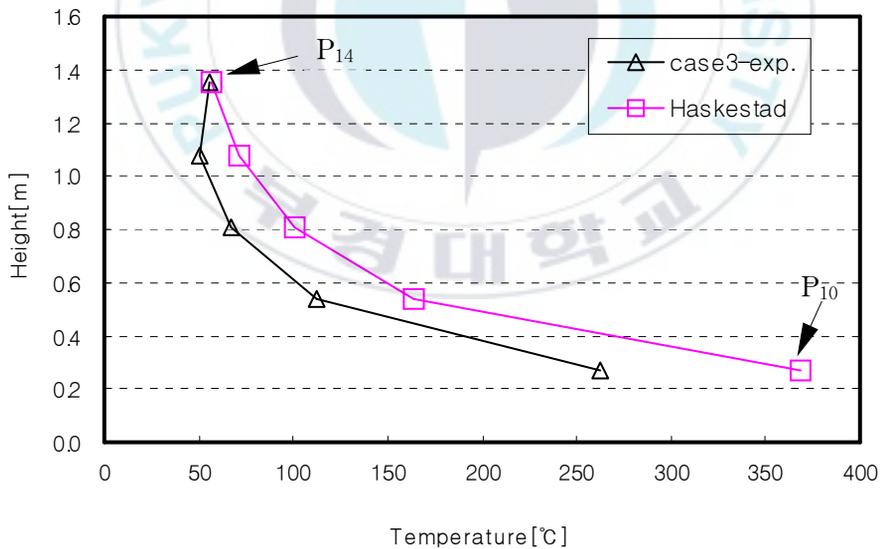


Fig. 26 Comparison of average temperature
at $P_{10} \sim P_{14}$ (case 3-exp., 7.1kw)

3.4 개구부개폐에 따른 온도비교

3.4.1 $P_1 \sim P_8$ 의 온도변화

$P_1 \sim P_8$ 의 온도변화를 Fig. 27에서 비교하였다. 화염에서 1.2m 떨어진 위치에서 No.3 개구부의 중심에 위치한 $P_1 \sim P_8$ 의 온도변화는 $20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 전후이다. P_7 의 경우 case3-exp.이 높은 온도를 보였으나 그 이외의 지점에서는 P_8 에서는 case2-exp.가 가장 높은 값을 나타 내었다.

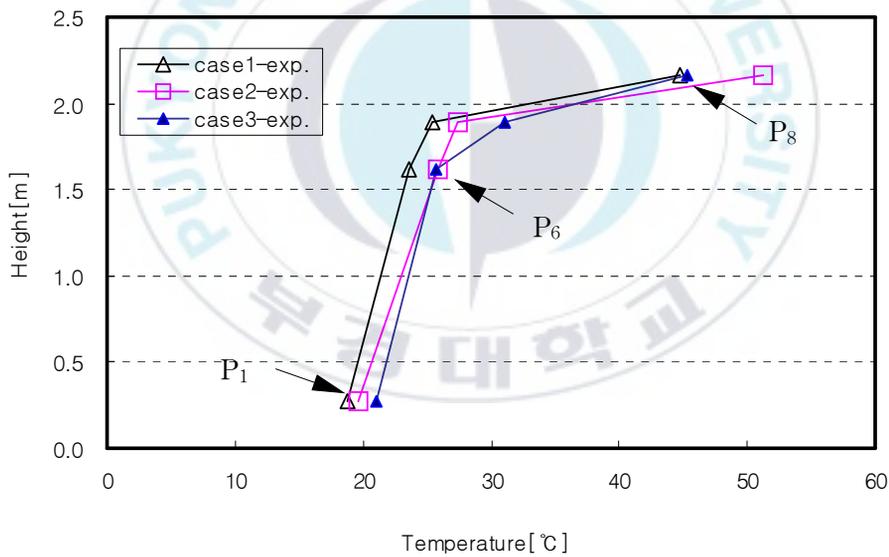


Fig. 27 Comparison of average temperature
at $P_1 \sim P_8$ (exp., 7.1kw)

수치시물레이션의 P₁~P₈의 온도변화를 Fig. 28에서 비교하였다. P₁~P₈의 모든 지점에서 case 3의 경우가 최고온도를 나타내었다. 특히, P₆~P₇에서의 온도는 다른 경우에 비해 매우 높게 나타났다. 또한 개구부가 모두 열려있는 경우의 온도는 고온공기의 배출이 용이하여 가장 낮게 나타났다.

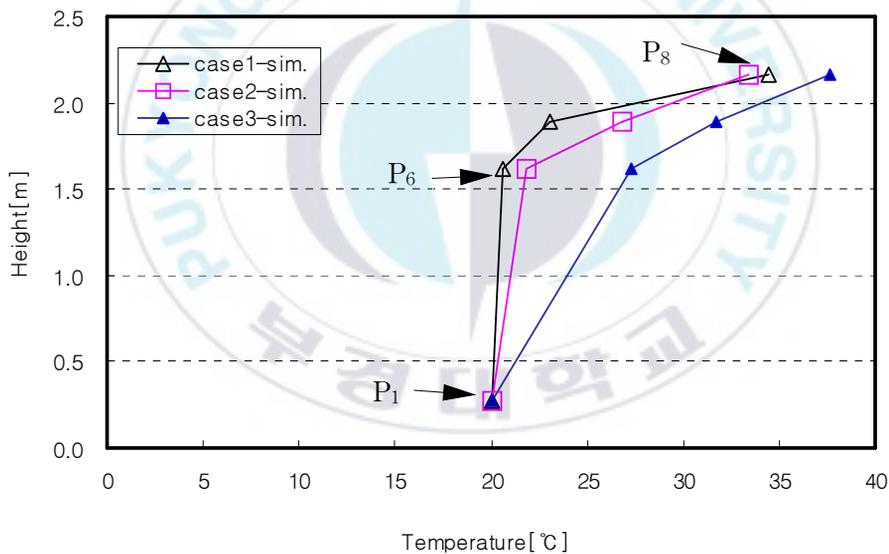


Fig. 28 Comparison of average temperature
at P₁~P₈(sim., 59.5kw)

3.4.2 $P_9 \sim P_{14}$ 의 온도변화

공간의 중심을 지나는 수직선상의 $P_9 \sim P_{11}$ 의 온도변화를 Fig. 29과 Fig. 28에서 비교하였다. 실험결과 화염의 중심에 위치한 P_9 의 온도는 case 3에서 가장 높게 나타났으며 기타의 경우는 비슷한 값을 나타내었다. 수치시물레이션에서는 case 1이 가장 높았으며 case 3은 매우 낮았다.

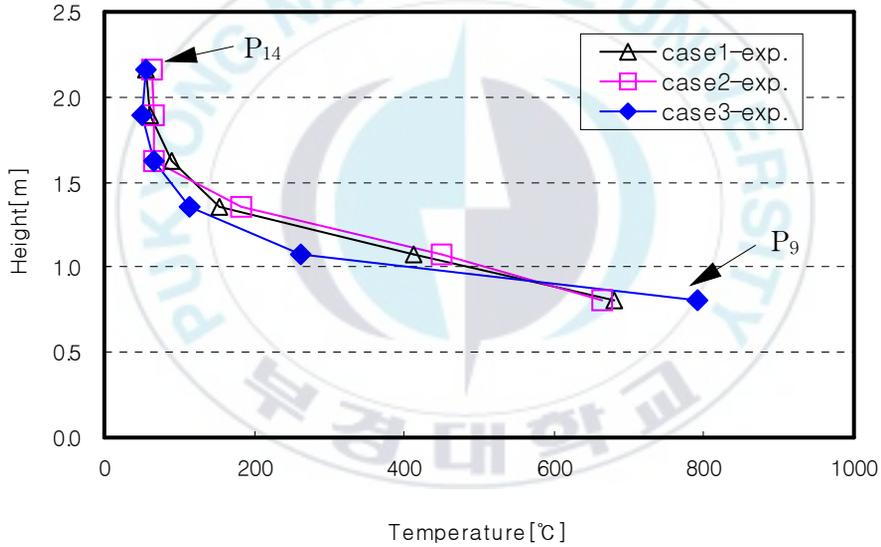


Fig. 29 Comparison of average temperature
at $P_9 \sim P_{14}$ (exp., 7.1kw)

실험에 의하면 P₁₀~P₁₁의 온도는 case 2에서 가장 높게 나타났으며 case 3의 경우 가장 낮은 온도를 보였다. 수치시뮬레이션에서는 case 1이 가장 높았으며 그 외의 경우는 비슷한 값으로 나타났다.

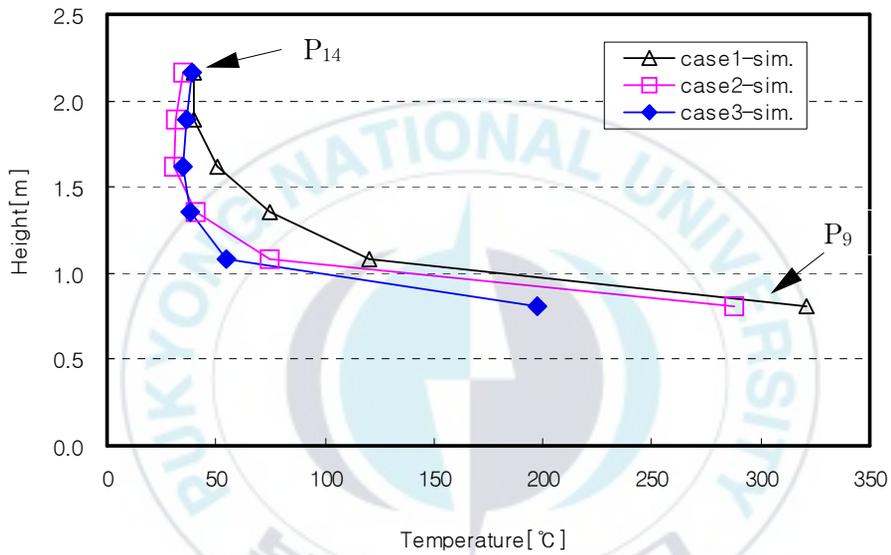


Fig. 30 Comparison of average temperature
at P₉~P₁₄(sim., 59.5kw)

3.4.3 결과비교

실험결과 $P_{10} \sim P_{14}$ 의 온도는 case 2에서 가장 높게 나타났으며 case 3의 경우는 가장 낮은 값을 나타내었다. case 1, case 2의 경우 충분한 산소가 공급됨을 알 수 있다. 특히, case 1과는 매우 유사한 특징을 나타내었다. 이는 case 1, 2는 충분한 개구부를 통하여 공기가 공급됨으로 실외화재와 유사한 온도특성이 나타났다. 따라서 개구부의 영향에 따른 온도는 case 1과 case 3의 비교를 통해 이루어 졌다.

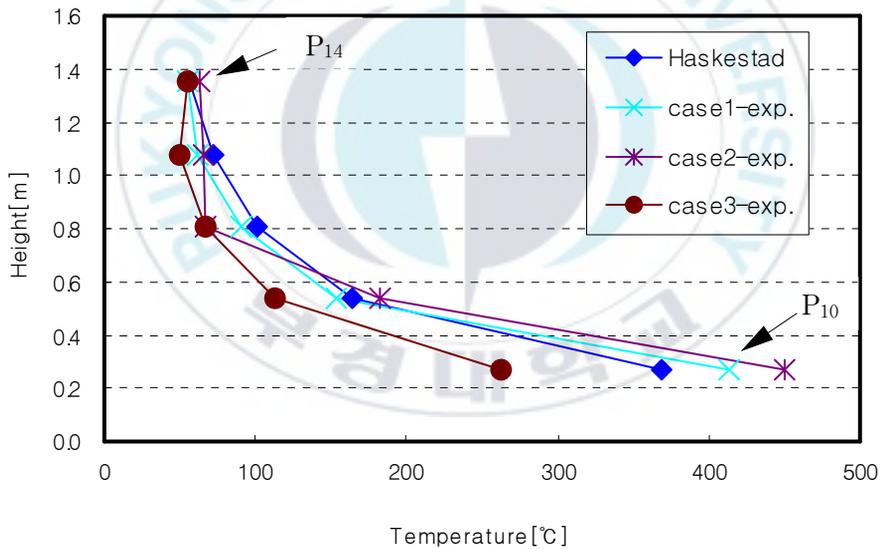


Fig. 31 Comparison of average temperature

at $P_{10} \sim P_{14}$

3.5 화염의 높이(Flame Height)

(2)식에 의해 화염의 높이를 계산하면 다음과 같다

$$L_f = 0.235Q^{2/5} - 1.02D \quad (2)$$

$$= 0.235 \cdot 7.1^{2/5} - 1.02 \times 0.2 = 0.3m$$

McCaffrey¹⁸⁾는 화재플럼은 지속적으로 화염이 존재하고 연소가스의 흐름을 가속시키는 연속화염영역과 간헐적으로 화염의 존재와 소멸이 반복되는 간헐화염영역과 높이에 따라 유속과 온도가 감소되는 부력플럼영역이 있음을 보여주었다. 화염의 높이를 측정된 결과 연속화염영역은 0.2m였으며 간헐화염영역은 0.3m로 평균화염높이는 0.25m로 나타났다. Fig. 32는 case 1, case 2, case 3의 화염높이를 측정된 사진이다. 화염의 높이는 case 2의 경우 가장 안정적인 화염특성을 보였으며, 산소공급이 충분하지 못한 case 3의 경우 화염이 가장 불규칙적이었으며 화염의 높이는 비교적 낮은 것으로 나타났다.



Fig. 32 Photographic of flame for fire size 7.1kw

4. 결 론

본 연구는 2.5m×2.0m×2.5m 크기의 화재실험실에 개구부의 개폐에 따라 프로판 화재에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화원의 바로 위쪽의 온도는 개구부가 열린 경우(case 1, case 2)에 산소 공급이 많아 닫힌 경우(case 3)보다 조금 높았다.
- 2) 산소의 공급이 충분한 경우 화염의 높이는 계산결과와 실험결과가 비슷하게 나타났으며 안정적인 화염을 형성하였다.
- 3) 플럼영역이외의 지점에서 측정된 온도분포는 수치시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 나타내었다.
- 4) vent가 상부에서 하부로 길게 형성된 경우(door open)가 중앙에서 넓게 형성된 경우(window open)보다 산소공급이 원활하여 평균온도가 높게 나타났다.
- 5) 플럼영역의 온도분포를 Haskestad 방정식으로 계산한 결과 산소공급이 충분한 경우에는 실험결과와 비슷하게 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 서울대학교 안전 및 방재연구센터, 삼성건설 건축기전팀, “성능위주 소방설계기술기준”, 도서출판 함무라비, pp. 7~69, 2005.
- 2) K. B. McGrattan, ed., Fire Dynamics Simulator(version 4.05) User’s Guide, NIST, U.S.A., 2005.
- 3) 박외철, “큰 개구부가 있는 공간의 화재와 제연의 대와류모사”, 한국화재소방학회 논문지, 제17권 제3호, pp. 7~12, 2003.
- 4) 정이규, “실내화재에서 개구부의 영향에 대한 수치적 연구”, 부경대학교 산업대학원 안전공학과 석사학위논문, 2007.
- 5) 박준, “환기통제하에서 실내화재 시뮬레이션”, 부경대학교 산업대학원 안전공학과 석사학위논문, 2006.
- 6) 정진용, “실내화재에서 화원의 크기 및 발열 위치에 따른 연기거동에 대한 연구”, 중앙대학교 대학원 기계공학과 박사학위논문, 2002.
- 7) 박경연, “선박의 대형공간화재에서 화원의 크기 및 위치에 따른 연기거동에 관한 연구”, 목포해양대학교 대학원 기관공학과 석사학위논문, 2001.
- 8) 한원희, 조대환, “선박 실내공간에서 화재의 크기 및 위치에 따른 연기거동 특성”, 해양환경안전학회 논문지, 제11권 제1호, pp. 53~59, 2005.
- 9) 김서영, 강병하, “건물화재시 연소가스의 유동”, 공기조화냉동공학회 논문지, 제26권 제6호, pp 507~515, 1997.
- 10) 박외철, “제연방식과 풍량에 따른 제연성능의 수치적 연구”, 한국화재소

- 방학회 논문지, 제 17권 제2호, pp. 56~61, 2003.
- 11) 박외철, 이경아, “개구부 유동이 대류에 미치는 영향에 관한 수치연구”, 산업안전학회지, 제 15권 제3호, pp. 52~56, 2000.
- 12) 문종윤, 진봉경, 이정윤, 김정훈, 정기창, 김홍, “실제실험과 화재시뮬레이션 결과 비교연구, 한국안전학회 창립20주년 기념 학술발표회 논문집”, pp. 527~532, 2006.
- 13) 추병길, 조성곤, “밀폐공간내 화재에 의해 생성된 연소가스 분석 및 유동에 관한 연구”, 산업안전학회지, 제12권 제1호, pp. 77~93, 1997
- 14) 노재성, 유홍선, 정연태, “화재 발생시 연기 거동에 대한 수치해석적 연구”, 산업안전학회지, 제13권, 제1호, pp. 70~76, 1998
- 15) 고경찬, 박외철, “FDS를 이용한 실내화재 모사의 문제점 - I. 중심형 화재”, 산업안전학회지, 제19권, 제1호, pp. 18~22, 2004.
- 16) 고경찬, 박외철, “FDS를 이용한 실내화재 모사의 문제점 - II. 벽면형 및 모서리형 화재”, 산업안전학회지, 제19권, 제3호, pp. 9~13, 2004.
- 17) Gunnar Heskestad, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (third edition) NFPA Quincy, Massachusetts, pp. 2-1~2-17, 2002.
- 18) 하정호, 이창욱, 차순철, “최신핵심소방기술 상권” 도서출판 호태, 2005.
- 19) Arthur E. Cote, Fire Protection Handbook (Nineteenth Edition) NFPA Quincy, Massachusetts, pp. 3-131~3-145, 2003.