

工學碩士學位論文

發火點 位置와 出入門 開閉 與否에
따른 火災 舉動 시뮬레이션



安全工學科

李東寬

工學碩士學位論文

發火點 位置와 出入門 開閉 與否에
따른 火災 舉動 시뮬레이션

指導教授 朴 外 哲

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2010年 2月

釜慶大學校 産業大學院

安全工學科

李東寬

李東寬의 工學碩士 學位論文을 認准함

2010年 02月 日



主 審 工學博士 李來雨 (印)

委 員 工學博士 崔載旭 (印)

委 員 工學博士 朴外哲 (印)

목 차

1. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향 및 목적	3
2. 수치모사 방법	9
2.1 지배방정식	9
2.2 계산방법	10
3. 결과 및 고찰	14
3.1 CASE I	14
3.2 CASE II	30
3.3 CASE III	46
3.4 CASE IV	62
3.5 발화점 위치에 따른 온도, 연기, 이산화탄소의 비교	78
3.6 출입문 개폐 여부에 따른 온도, 연기, 이산화탄소의 비교	84
4. 결론	90
참고문헌	92
Abstract	94
감사의 글	97

기 호 설 명

D	: 확산계수(m^2/s)
g	: 중력가속도(9.81m/s^2)
h	: 엔탈피(J/kg)
p	: 압력(N/m^2)
T	: 온도(K)
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)
f	: 힘 벡터(N)
k	: 열전도 계수($\text{W/m}\cdot\text{k}$)
\dot{m}'''	: 단위체적당 생성률
τ	: 전단응력텐서(N/m^2)

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 10년간의 화재는 매년 평균 2.3%씩 증가하여 2005년도에는 1996년도 대비 12.8%가 증가하였으며 전체화재중 건축물화재가 평균 82%, 차량화재가 17.7%를 차지하고 있다. 건축물화재는 1996년도 23,106건에서 매년 평균 2.3%의 증가율을 보여 2005년도에는 26,370건이 발생하여 1996년도 대비 14.1%가 증가한 것으로 나타났다. 1)

소방방재청의 '2008년도 전국화재현황분석결과'를 살펴보면 2008년 일어난 화재는 총 40,631건이며 이는 전년 대비 3.7% 증가한 추세이다. 이로 인한 인명피해는 2,716명으로 전년 대비 10.5% 증가했으며 재산피해는 3,831억 4,100백만으로 전년 대비 무려 54.2% 증가하였다.

재산 피해가 늘어난 가장 큰 사유는 송레문 화재와 이천물류 창고 등 대형화재의 발생로 인한 것이라 하더라도 전체적인 화재 발생건수와 인명 피해가 증가하는 것으로 보아 화재 예방은 이제 생활화가 되어야하며 그 기준의 확립과 연구 활동이 지속적으로 필요하다고 생각된다.

화재를 천재지변과 비교하여 인재라는 말을 사용한다. 인재의 사전적 의미는 사람에 의하여서 일어나는 재난을 천재에 상대하여 이르는 말인데, 이는 사람이 조금만 조심하고 예방한다면 일어나지 않을 수 있다는 의미이기도 하다. 이를 뒷받침해 주듯이 2008년 발화요인별 화재발생현황을 살펴보면 부주의가 48.5%(24,052건)로 가장 높은 발생률을 보였고, 다음으로 전기적

요인 22.8%(11,308건), 방화와 방화의심 8.5%(4,240건), 기계적요인 7.2%(3,550건), 화학적 요인 0.5%(252건), 가스누출 0.5%(236건) 순으로 발생하였다. 부주의로 인한 화재발생현황을 살펴보면 담배꽂초 방치 7,223건(30%), 음식물조리중 3,417건(14.2%), 쓰레기소각 3,127건(13.0%), 불씨·불꽃·화원방치 2,600건(10.8%), 불장난 2,194건(9.1%), 용접·절단·연마 1,779건(8.4%), 논·임야 태우기 1,077건(7.4%) 가연물근접방치 754건(3.1%), 빨래 삶기 209건(0.9%), 유류 취급중 126건(0.5%), 폭죽놀이 58건(0.2%) 순으로 나타났다. 2)

오늘날 화재는 규모가 대형화, 세분화되고 있고 여러 가지 요인들로 인하여 예측이 불가능한 상황이 자주 발생함에 따라 많은 인명 피해와 재산 피해를 가져온다. 따라서 화재의 본질적인 개념을 이해하고 능동적인 대처를 하기 위한 준비와 기술력을 향상시켜 피해를 최소화 시키는 것이 우리에게 주어진 시대적 과제이다.

최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 실제화재와 거의 유사한 상황을 모사함으로써 화재시 안전한 대피경로 확보와 인명 및 재산의 피해를 줄일 수 있는 건축물의 설계에 응용되고 있다.

1.2 연구 동향 및 목적

2008년 화재장소별 발생순서는 비주거가 35.5%(17,642건), 주거가 24.8%(12,258건) 순이지만, 인명피해발생순서는 주거(41.8%), 비주거(40.2%)로 2008년 49,631건의 화재 중 판매시설과 공장·창고·음식점 등 비주거용 건물에서 17,643건의 화재가 발생하여 143명이 사망하였고, 주거용 건물에서는 12,285건의 화재가 발생하여 220명이 사망하였다. 이러한 결과를 분석하여 보면 주거용 건물을 비주거용 건물과 비교했을 때 동일건수(1,000건) 대비 사망률이 2.2배나 높은 것으로 분석된다.

실내화재는 화재의 발생위치에 따라 중심형 화재(화원이 벽에 접하지 않고 바닥의 중심부근에서 발생), 벽체형 화재(화원에 벽이 한 개 접함), 모서리형 화재(화원에 벽이 두 개 접함)로 나눌 수 있다. 화재규모가 같더라도 화재의 발생 위치에 따라 높이와 개구부에서 형성되는 연층의 두께가 다르게 나타나는데, 이것은 화재가 벽과 인접하여 발생하였을 때 화염에 유입되는 공기의 양과 열 유속이 변하기 때문이다. ³⁾

화재가 발생한 공간에 출입문이 있는 경우, 이 출입문을 통한 공기의 흐름으로 강제대류와 자연대류의 조합대류가 일어난 공기의 흐름은 공간 내와 천장의 온도분포에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 출입문이 있는 공간의 유동 및 온도분포에 대한 수치해석은 화재의 모사, 특히 화재감지기를 설치할 때 적절한 위치선정을 하는데 중요하다.

이 두 가지 사실로 미루어보아 주택에서 처음 화재가 발생할 당시 그 발

화점 위치와 발화 주변 환경에 따라, 출입문의 위치와 개폐 여부에 따라, 화재의 확산 방향이나 성장 속도가 각각 다를 것이라고 생각되어진다. 이 연구에서는 화재 발화점 위치와 출입문 개폐여부에 따른 화재의 생성이 어떻게 다른지 알아보려고 하였다. 화재가 가장 빈번하게 일어나는 거실 공간을 설정하여, 2008년 최초 착화물별 발생현황에서 27.8%로 가장 높은 발생률을 차지하는 가연물은 종이·목재이고 전기·전자에 의한 원인은 17.3%로서 주위 환경에 있는 발화점을 두 개 지정하여, 출입문의 개폐 여부에 따른 화재 시나리오를 만들어 각기 상황에서 화재 발생을 가정하여 실험 하였다.

실물 실험을 행하면 결과가 보다 명확하겠지만 위험요소가 많기 때문에 이 연구에서는 FDS를 이용한 가상적인 시뮬레이션으로 실험해 보고자 한다.

김서영 등 ⁴⁾은 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 건물 상부로 이동하는 부력 유동을 확인하였다.

문종윤 등 ⁵⁾은 실험과 수치시뮬레이션의 결과 비교연구에서 연소시간과 내부 온도 변화 양상은 유사하게 나타났으나 실제의 가연물과 FDS 데이터베이스(Data Base, DB)의 연소시간이 차이가 남을 확인하였다.

추병길과 조성곤 6)은 시스템 내에 열원이 존재하고 부분 개방된 2차원 밀폐공간내의 화재에 의해 만들어진 연소가스의 유동현상을 자연대류와 복사열전달을 고려하여 수치적으로 해석하였다. 화재발생시 자연대류와 복사를 고려한 복합열전달은 자연대류만을 고려한 경우보다 유동장 및 온도장에 모두 영향을 미치는 것을 확인하였다.

노재성 등 7)은 한 변의 길이가 25.2m인 정육면체인 아트리움 공간을 중심으로 화재발생시 연기거동에 대한 수치 해석적 연구에서 연기 유동과정을 수치법으로 모사한 결과 연기층의 높이에 따른 피난시간을 확인하였다.

정진용 등 8)은 1.8m×1.8m×1.38m크기의 실내 공간에서 메틸알콜 화재에 대한 실험을 수행하여 화염구조와 연기거동을 화염의 위치에 따라 조사하였다. 화재가 커질수록 중심형 화재는 평균온도가 증가하였고, 개구부의 중립면 높이와 정상상태 도달시간은 감소하는 것으로 나타났다. 또 중심형 화재보다 벽면형과 모서리형 화재의 경우, 화원의 위치가 수직벽에 인접하므로 중립면의 높이와 평균온도가 높고, 정상상태 도달시간도 빠르게 나타났다.

정진용 등 9)은 열 분포 및 연기거동을 조사하기 위하여 계단으로 연결되어 있는 밀폐 지하공간에 화재가 발생했을 때 상부층으로 확산되는 실험을 수행한 결과, 스프링클러 시스템이나 화재 감지기를 계단 상부에 설치할 때 계단의 기울기를 고려해야 한다는 것을 확인했다.

정진용 등 10)은 연기거동에 미치는 복사영향을 알아보기 위해서 3차원

실내공간내의 화재를 자체개발한 SMEP(Smoke Movement Estimating Program) 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였고 화재 해석에 있어서 복사는 반드시 고려되어야 된다는 것을 확인하였다.

O. Vauquelin과 O. Megret ¹¹⁾는 환기 시스템에 따른 연소 연기의 배출효율 터널화재 축소실험을 통하여 측정하여 본 결과 덕트의 위치가 벽보다 천정에 설치할 때 효율이 더 높은 것으로 밝혀냈다. 그리고 덕트의 배출효율과 위치와의 관계는 크게 영향이 없는 것으로 나타났다.

박외철 ¹²⁾은 대형 개구부가 있는 공간의 화재와 제연을 조사하기 위해 지하철역과 유사한 구조의 4m×1m×1.5m 크기의 축소 공간 내 50kw의 폴리우레탄 화재에 대한 수치모사를 수행하였다. 화재 발생 후 5초부터 세 가지 기계 제연방식(급배기방식, 배기방식, 급기방식)을 비교한 결과, 급배기방식의 제연성능이 가장 우수한 것을 확인했다.

박외철 ¹³⁾은 제연방식과 풍량에 따른 실내에 유입된 연기의 제연성능을 조사하기 위하여 급기구와 배기구, 개구부가 있는 크기 2m×2m×2.4m의 실내에 기계 제연방식을 가동하였을 때 실내에 분포한 입자의 감소율을 조사하여 대형 개구부가 많은 지하철 역 등에는 급기방식 대신 급배기방식 또는 배기방식의 제연설비를 사용해야한다는 것을 밝혔다.

박외철 등 ¹⁴⁾은 개구부유동이 대류에 미치는 영향에 관한 수치연구에서 개구부에서 유입되는 공기는 천장의 온도를 형성하는데 영향을 주었고 공기의 유입이 빠를수록 온도는 감소하고 최고온도의 형성 위치가 유출되는

개구부 쪽으로 이동하는 것을 밝혔다.

박외철 등¹⁵⁾은 청정실 화재에 대한 화재시뮬레이션을 수행하여 제연설비와 스프링클러설비의 필요성과 연기의 확산가능성을 확인하였다. 그 결과 제연설비로 연기를 안전하게 배출할 수 있는 것으로 나타났고, 제연설비가 작동하면 연기가 청정실 내의 다른 구역으로 양음을 알 수 있었으며 스프링클러의 역할은 연기의 발생을 억제하고 화재확산을 방지하는 역할을 하는 것으로 확인하였다.

또 박외철 등¹⁶⁾¹⁷⁾은 FDS를 이용한 실내화재 시뮬레이션의 문제점을 파악하기위해 메틸알콜 화재를 모사하여 중심형 화재, 벽면형 및 모서리형 화재를 측정치와 비교하였는데, 개구부 수직중심선과 모서리 부근에서의 정상상태의 온도와 고온공기층 두께, 개구부의 중립면 높이는 측정치와 비교적 잘 일치하였으나 실험에 비해 화재성장을 지나치게 빨리 예측하는 것으로 나타나 화재의 성장과정을 규명해야하는 실내화재 모사에는 중대한 결점이 있는 것으로 지적되었다.

이상과 같이 화재관련연구에서 FDS를 사용한 시뮬레이션이 활발하게 이어지고 있다. 실내화재 성장예측에 있어서 FDS의 결점에도 불구하고 정상상태의 온도분포는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 연구의 목적은 화재가 최초로 발생하는 발화점 위치와, 출입문의 개폐 여부에 따라, 온도와 연기, 이산화탄소 발생 등을 분석 비교하여, 이후 화재 예방설비, 화재대응설비, 피난시 피난 시뮬레이션과 연계하여 피난 시스템

에 반영되길 바라며, 또는 열과 연기, 이산화탄소의 피해를 최대한 줄일 수 있는 공간 설계를 하는데 참고가 되길 바란다.



2. 수치모사 방법

2.1 지배방정식

3차원 공간 내 화재에 대한 유동 및 열전달, 연소의 지배 방정식은 다음과 같다.

질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

화학종 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{v} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i'' \quad (2)$$

운동량 보존 방정식

$$\rho \frac{D \mathbf{v}}{Dt} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{v} = \frac{Dh}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i$$

(4)

이상기체의 상태방정식

$$P = \rho RT \quad (5)$$

여기서, $\frac{Dh}{Dt}$ 는 $\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla h$ 이고, 시간에 대한 압력의 물질도함수를 나타낸다.

2.2 계산방법

화재 시뮬레이션 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator)는 미국 표준 기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발되었다. FDS는 화재에 의한 유동을 해석하기 위한 소프트웨어로써 사용하기 편리하므로 많이 이용되고 있으며, 화재확산과 연기거동의 예측 등 다양한 화재 연구에 사용되고 있다. 편미분방정식 (1)~(5)의 해를 구하는데 FDS를 사용한다.

FDS는 난류 모델로 large eddy simulation를 사용하고 연소는 연료와 산소의 반응이 무한히 빠르다고 가정하는 혼합분율 모델을 사용한다. 또한 에너지 방정식의 복사열전달에는 유한 체적법을 사용한다.

본 연구는 Fig. 1과 같이 주택의 일부인 거실을 가상으로 설정하여, 시뮬레이션을 수행하였다. 거실의 크기는 4.0m×3.0m×2.5m이고, Table 1과 같이 각각 한 개의 출입문 및 개구부가 있다. 출입문의 중심을 지나는 수직축을 따라 0.3m간격으로 $P_1 \sim P_8$ 지점에서, 열전대(thermocouple)를 배열하였다. 이 열전대는 화재발생 후 시간경과에 변화하는 온도와 연기, 이산화탄소의 체적농도를 기록하도록 하였다.

열방출율은 발화점의 위치에 따라서 각각 80kW로 설정하고, 이 두 경우를 180초(3분)동안 시뮬레이션을 수행한 결과를 비교 분석하였다. 화재 발생 순간부터($t=0s$)부터 계산종료($t=180s$)까지 값을 계산했다. 또 $y=1.5m$ 의 $x-z$ 평면과, $z=1.5m$ 의 $x-y$ 평면에서의 온도 및 연기, 이산화탄소량 등의 변

화를 살펴보고, 수직축에 대한 평균 온도와 연기, 이산화탄소를 측정하여 비교 분석하였다.

본 연구에서 발화점의 위치와 출입문의 개폐여부를 Table 1과 같이 시뮬레이션을 수행한 4가지 경우를 Table 2와 같이 CASE I, II, III, IV로 표시하였다.

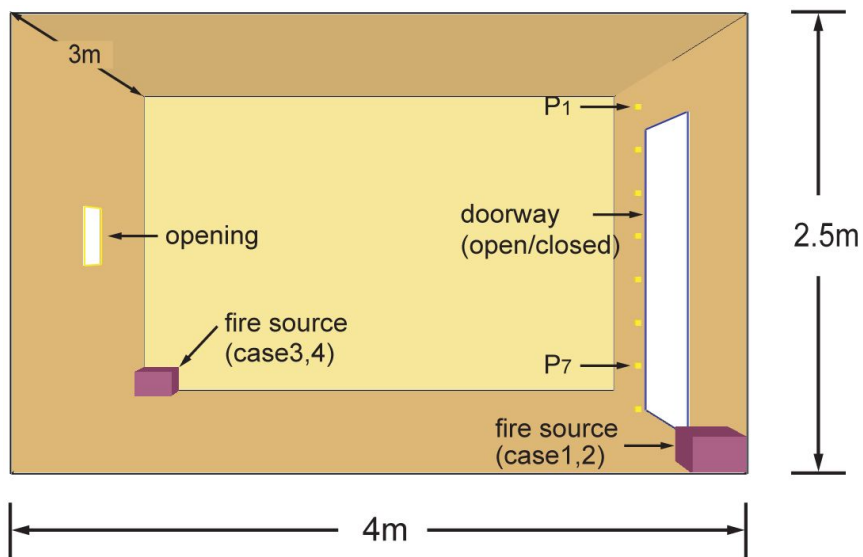


Table 1. Dimension and location of vents

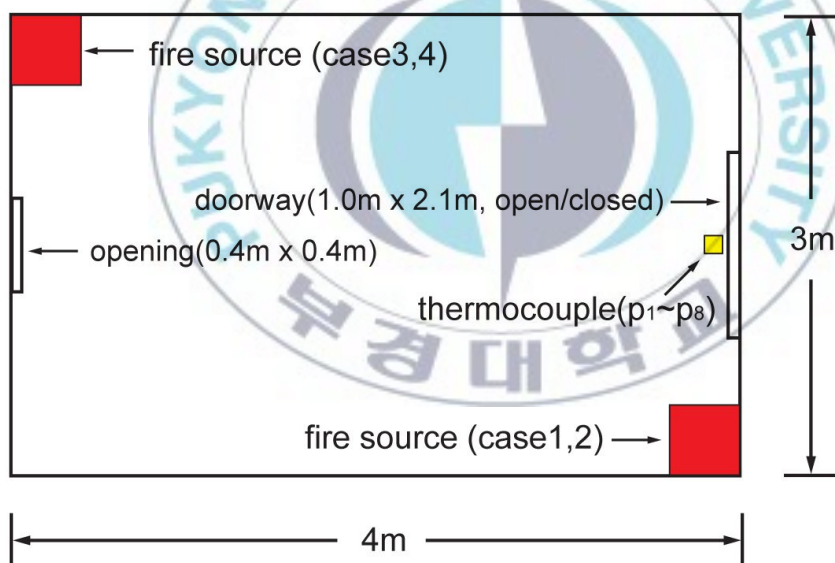
Vent No.	Dimension	Location of center	Remark
1	1.0m×2.1m	4.0m, 1.5m, 1.05m	Doorway [Open/Closed]
2	0.4m×0.4m	0.0m, 1.5m, 1.25m	[Open]

Table 2. Combination of parameters

		Fire size	Doorway
상황 1 (출입문에서 가까운 발화점)	Case I	80kW	Open
	Case II	80kW	Closed
상황 2 (출입문에서 먼 발화점)	Case III	80kW	Open
	Case IV	80kW	Closed



(a) Elevation view



(b) Plan view

Fig. 1 Computational domain and configuration.

3. 분석 및 고찰

3.1 CASE I (출입문에서 가까운 발화점 및 출입문 개방)

3.1.1 P₁~P₈의 온도, 연기, 이산화탄소의 변화

출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 2에 비교하였다. P₄ ~ P₈까지는 온도가 20℃ 정도로 거의 같게 유지되지만, P₁ ~ P₃에서는 40(초)까지 온도가 급격하게 상승해 이후 그 온도가 유지되는 것을 알 수 있다. 연기와 이산화탄소도 이와 비슷한 양상을 보이는데 P₁과 P₂의 변화가 비슷하여 거의 동일하다 라고 할 수 있는 것과 달리 특히 변화의 경계라 볼 수 있는 P₃ 지점이 가장 다양하게 변화한다고 볼 수 있다.

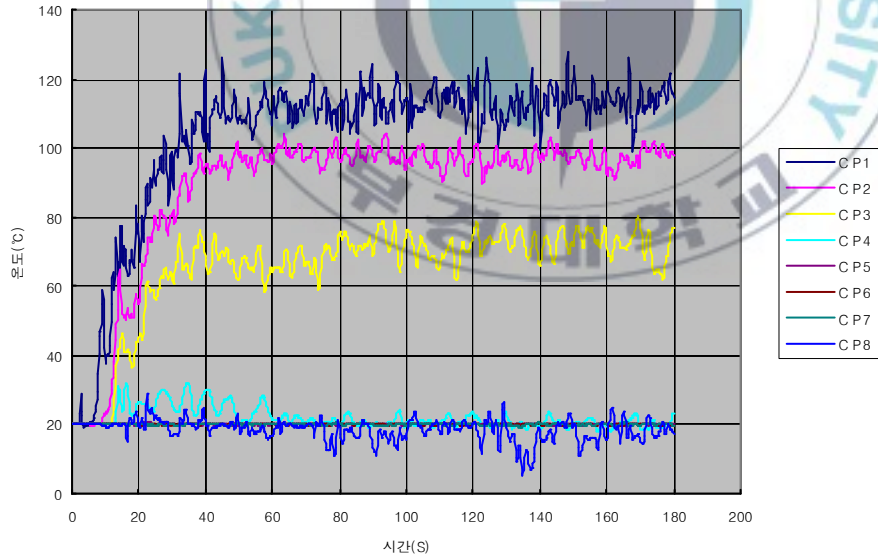


Fig. 2 Temperature variation with time

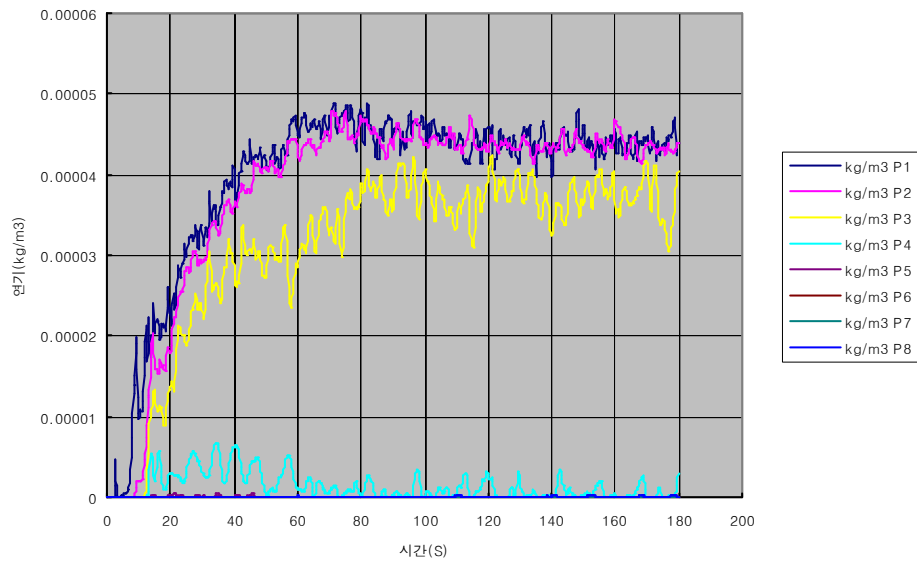


Fig. 3 Soot variation with time

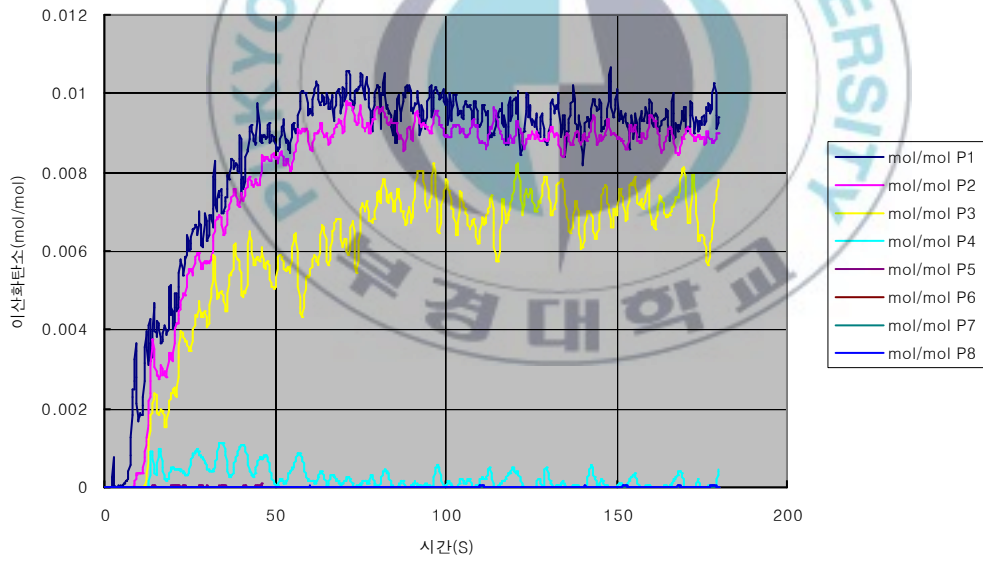
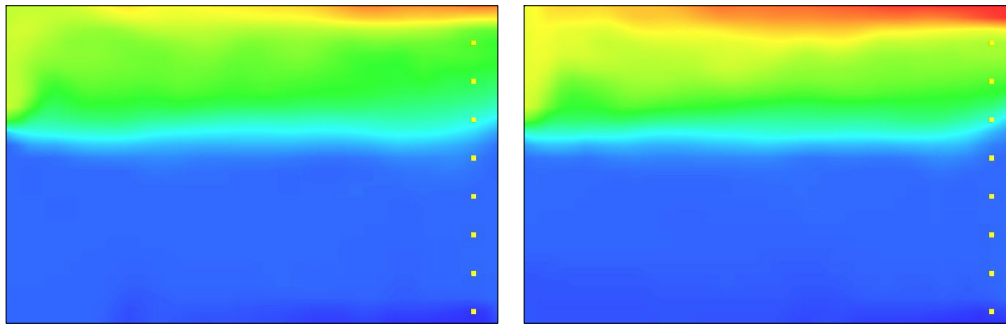


Fig. 4 Carbon dioxide variation with time

3.1.2 $y=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

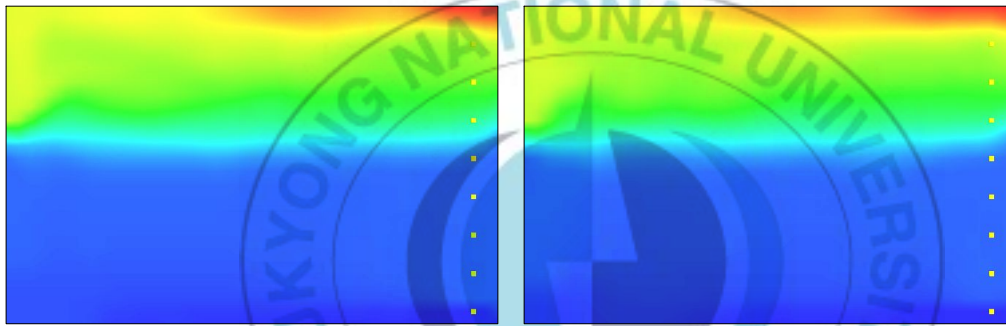
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 온도 분포는 Fig. 5의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 각 시간대별로 큰 차이점이 나타나진 않았으며, 시간이 지나면서 상층부의 온도가 130°C 까지 올라가나 출입문이 개방되어 있는 상층부가 부분적으로 160°C 까지 올라가는 것으로 나타났다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

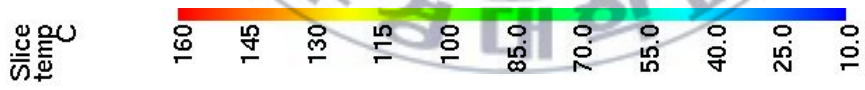
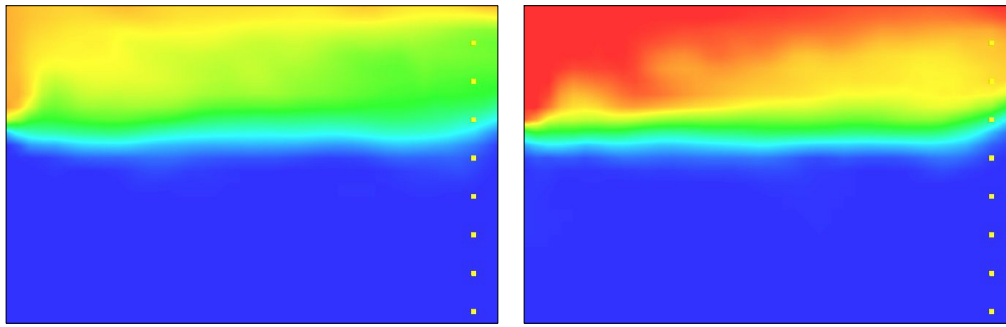


Fig. 5 Temperature distribution at $y=1.5m$ (doorway open)

3.1.3 y=1.5m의 연기 분포

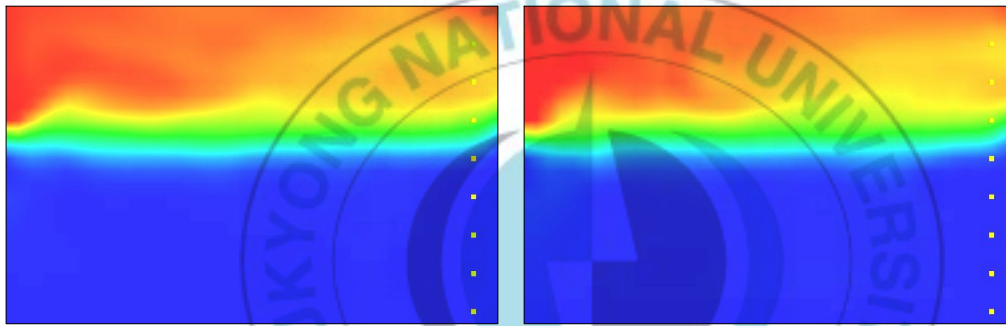
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, y=1.5m의 x-z평면에서의 연기 분포는 Fig. 6의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 화재 초반 30(초)에서 60(초) 사이에 연기의 농도가 급격하게 증가하여 $3.85 \times 10^{-5} \text{kg/m}^3 \sim 4.4 \times 10^{-5} \text{kg/m}^3$ 에서 $5.5 \times 10^{-5} \text{kg/m}^3$ 까지 상승하였으나 60(초) 이후 연기 농도에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 좌측의 개구부가 개방되어 있는 부분으로 다른 부분에 비하여 짙은 농도의 연기가 밀집되어 빨려나가는 듯한 형상으로 나타났다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s

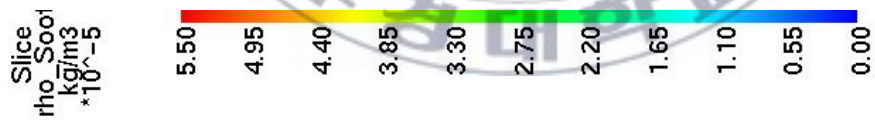
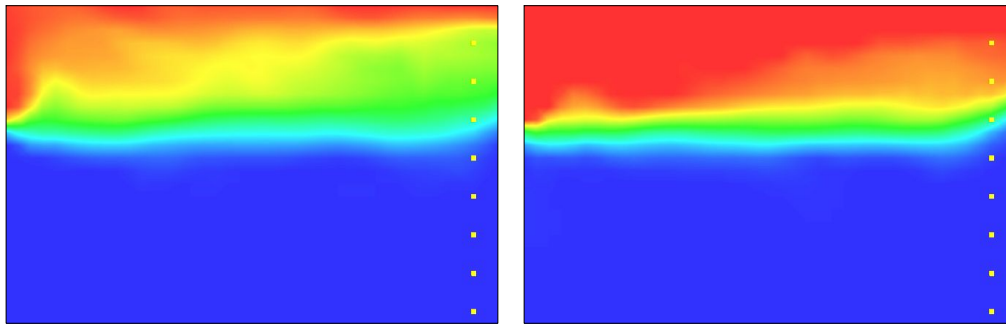


Fig. 6 Soot distribution at y=1.5m (doorway open)

3.1.4 $y=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

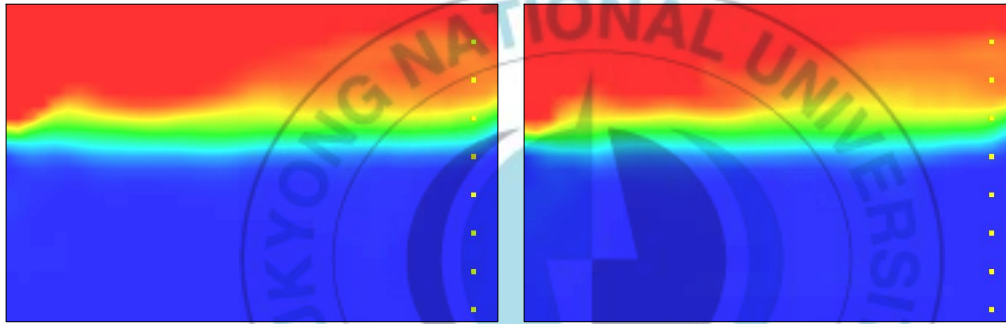
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 7의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 화재 초반 30(초)에서 60(초) 사이에 이산화탄소의 농도가 급격하게 증가하였으나 60(초) 이후 이산화탄소 농도에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 좌측의 개구부가 개방되어 있는 부분을 중심으로 이산화탄소의 농도가 짙어져 점차 확산되어 가는 형상이 나타났다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

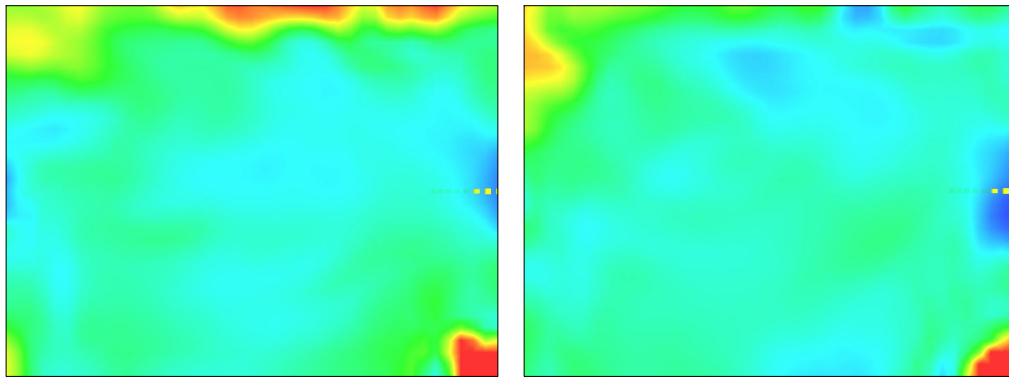


Fig. 7 Carbon dioxide distribution at $y=1.5m$ (doorway open)

3.1.5 $z=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

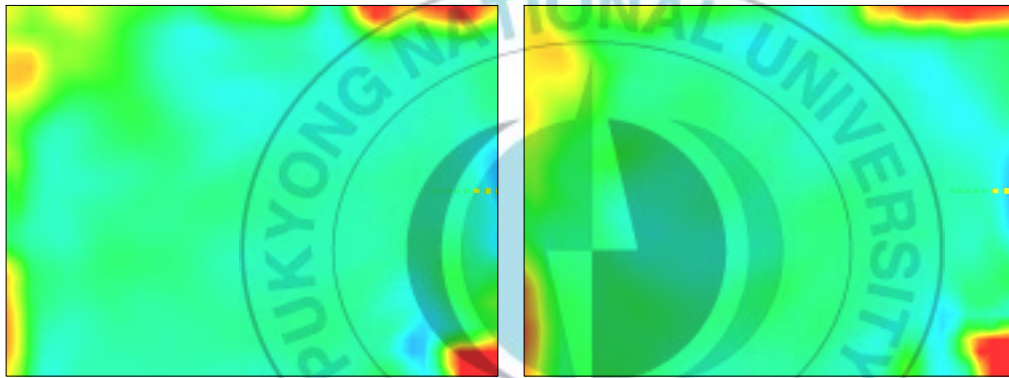
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 온도 분포는 Fig. 8의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 실 안의 온도가 전반적으로 균일하게 나타났으며 시간이 경과해도 큰 변화가 나타나지 않았다. 좌측의 개구부가 있는 벽면의 온도가 다른 부분에 비해 시간이 경과하면서 온도가 상승하는 것이 보이며, 발화점과 마주보는 벽에 부분적으로 온도가 높게 나타났다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

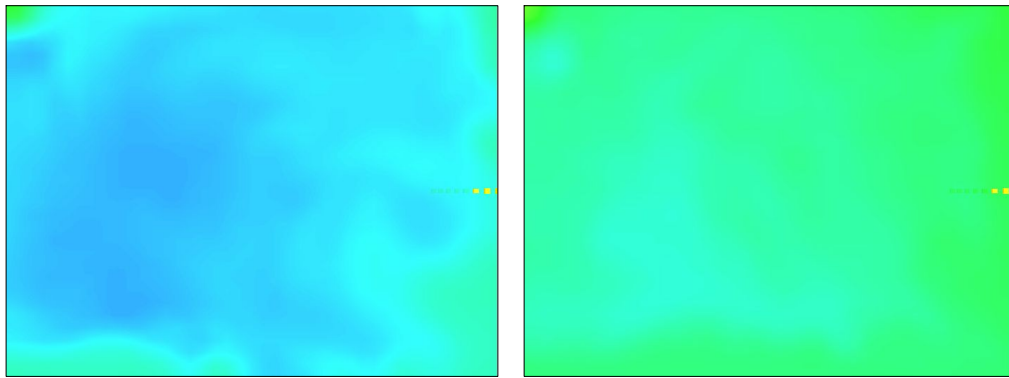


Fig. 8 Temperature distribution at $z=1.5m$ (doorway open)

3.1.6 $z=1.5\text{m}$ 의 연기 분포

출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 연기 분포는 Fig. 9의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 연기의 농도가 시간이 경과하면서 점차 짙어지며, 특히 좌측의 개구부가 위치한 벽면과 발화점과 마주한 벽 쪽의 연기 농도가 더 짙은 것으로 나타났다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s

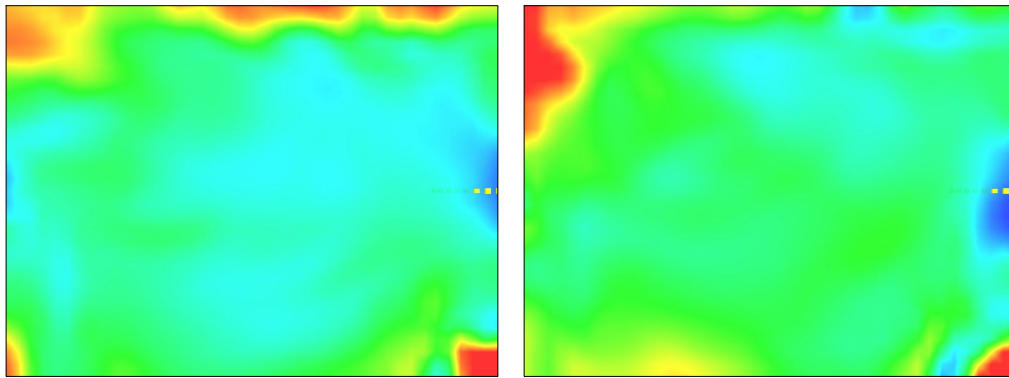


Fig. 9 Soot distribution at z=1.5m (doorway open)

3.1.7 $z=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

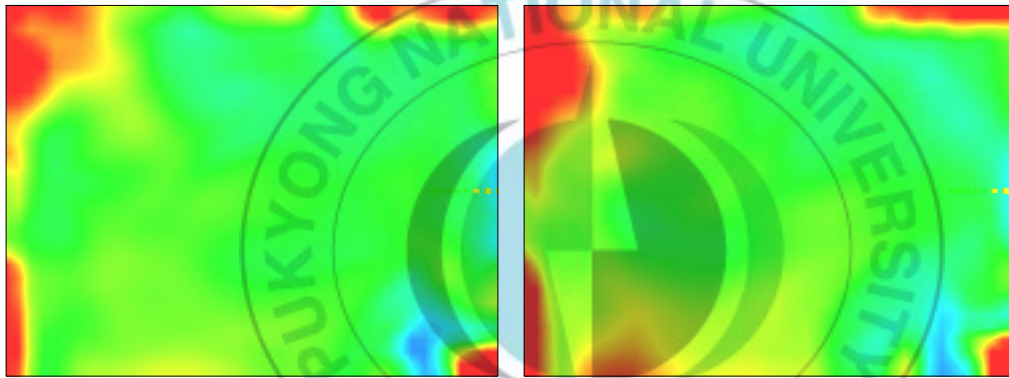
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 10의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 이산화탄소의 농도가 시간이 경과하면서 점차 짙어지며, 벽면 부분의 농도가 더 짙어 지는 것을 볼 수 있다. 특히 발화점과 대각선 방향으로 마주보는 모서리 부분의 농도가 짙은 것으로 나타났다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s



Fig. 10 Carbon dioxide distribution at z=1.5m (doorway open)

3.1.8 평균온도, 평균연기, 평균이산화탄소의 변화

$P_4 \sim P_8$ 에서 평균 온도는 20°C 로 유지되다가 P_3 지점에서 65°C 까지 급격하게 상승해 P_1 지점에서는 최고 100°C 이상까지 상승했다. 연기의 발생도 온도와 비슷하게 $P_4 \sim P_8$ 에서 $0\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 연기가 발생하지 않았다가 P_3 지점에서 연기가 $0.0003\text{kg}/\text{m}^3$ 이상까지 발생하여 P_1 지점에서는 $0.0004\text{kg}/\text{m}^3$ 에 근접하게 상승했다. 이산화탄소도 $P_4 \sim P_8$ 에서 $0\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 이산화탄소가 발생하지 않았다가 P_3 지점에서 이산화탄소가 $0.006\text{mol}/\text{mol}$ 까지 발생하여 P_1 지점에서는 $0.008\text{mol}/\text{mol}$ 이상까지 상승했다.

온도, 연기, 이산화탄소 모두 변화 양상이 같게 나타나는데 이 사실로 미루어 실의 높이 1.3m 까지는 변화가 없다가 $1.3\text{m} \sim 1.6\text{m}$ 사이에서 급격하게 증가하여 천장까지 증가하는 양상이 보인다.

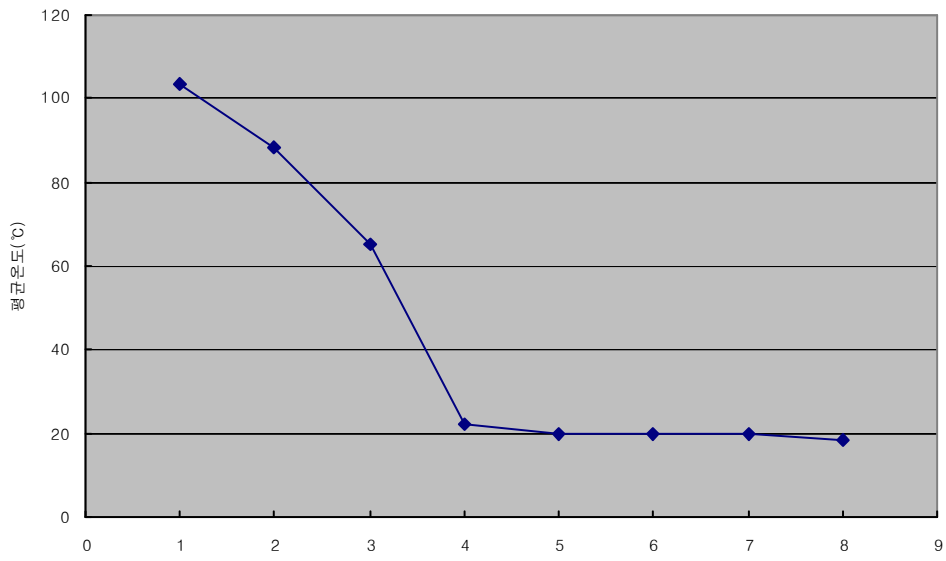


Fig. 11 Average temperature at P₁~P₈ (doorway open)



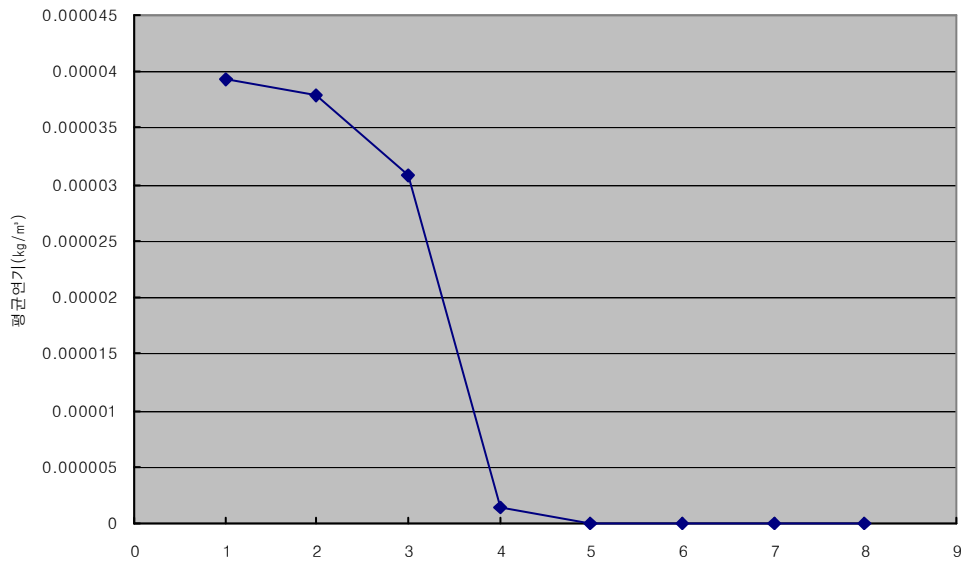


Fig. 12 Average soot at P₁ ~ P₈ (doorway open)

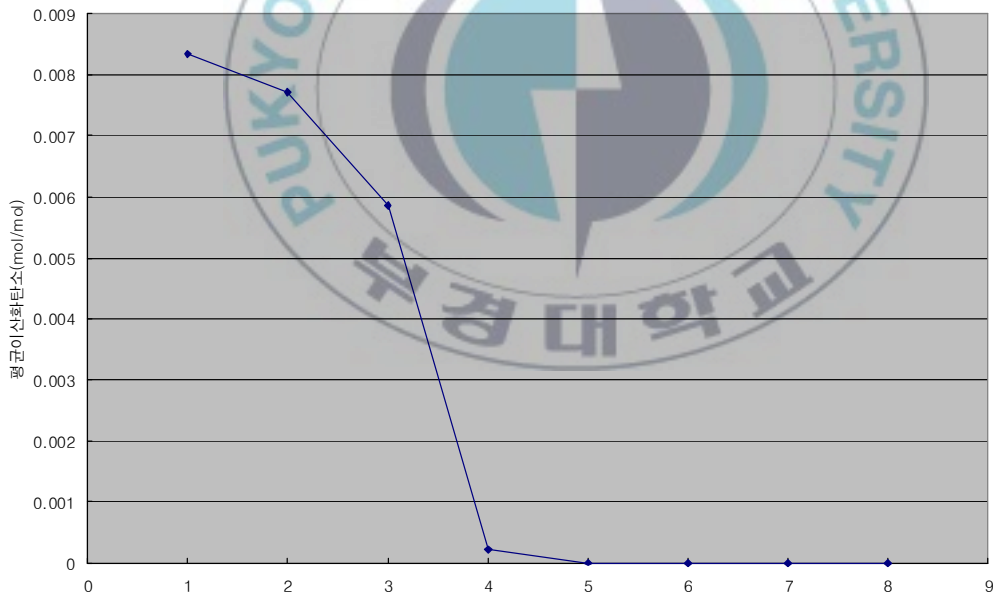


Fig. 13 Average carbon dioxide at P₁ ~ P₈ (doorway open)

3.2 CASE II (출입문에서 가까운 발화점 및 출입문 폐쇄)

3.2.1 P₁~P₈의 온도, 연기, 이산화탄소의 변화

출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 14에 비교하였다. P₆~P₈에서는 일정시간 온도가 20℃ 정도로 유지되다 상승하고, P₁~P₅에서는 바로 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. P₁~P₄는 그 변화의 폭이 거의 동일하게 나타나고 있다. 연기와 이산화탄소도 이와 비슷한 양상을 보이는데 온도와 차이점이 있다면 온도는 일정시간 온도가 상승하다 어느 시점에서 안정권에 접어들어 더 이상 온도가 크게 상승하지 않는 반면, 연기와 이산화탄소는 계속 증가상태를 유지한다는 점이다.

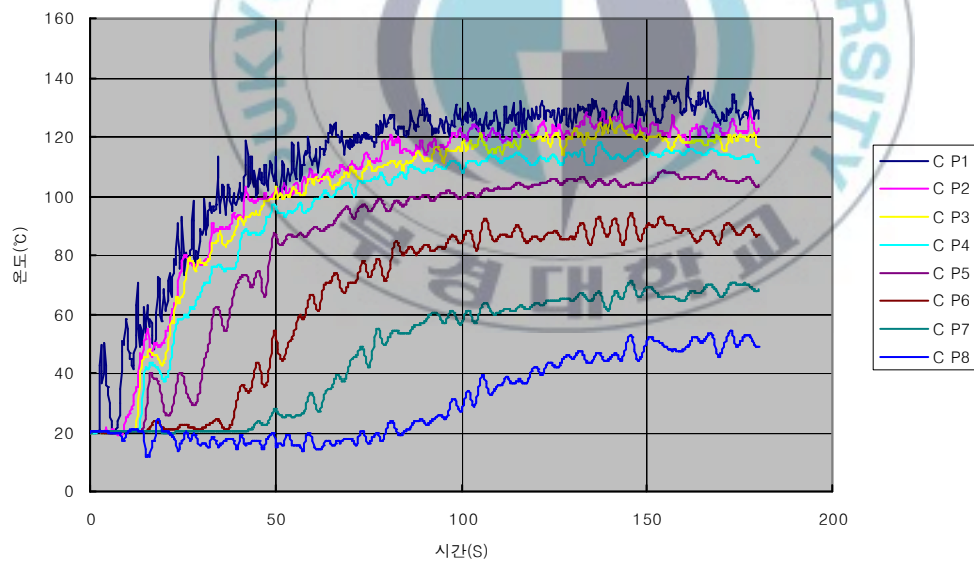


Fig. 14 Temperature variation with time

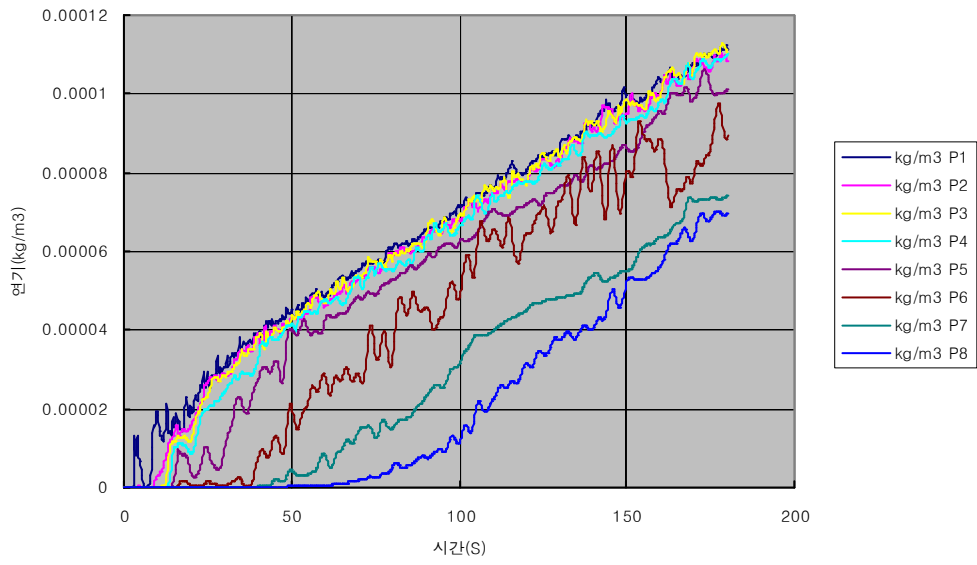


Fig. 15 Soot variation with time

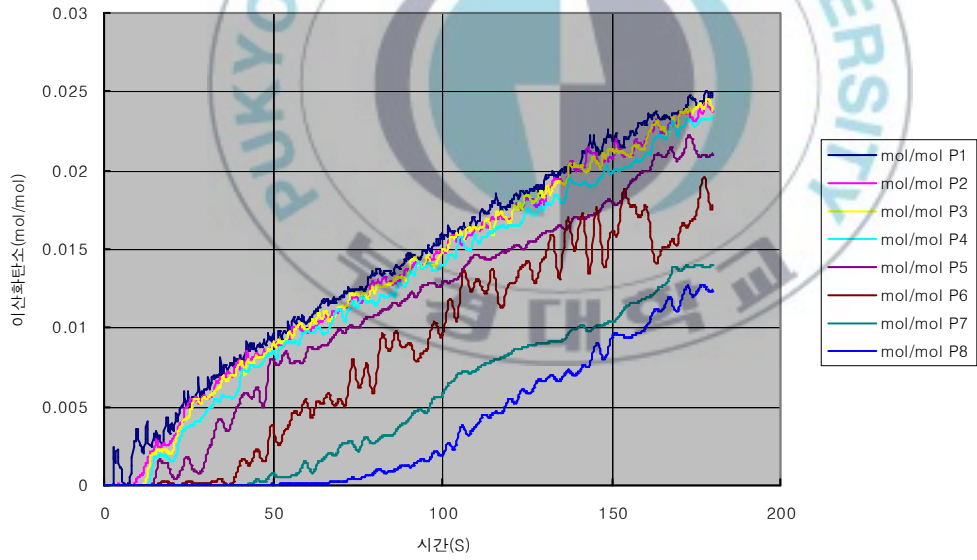
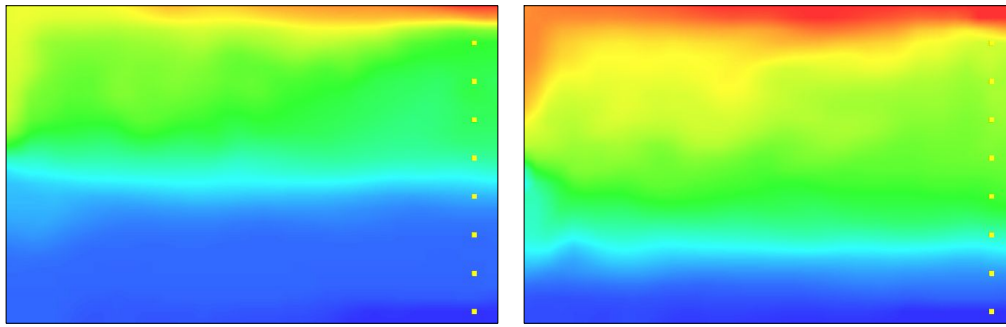


Fig. 16 Carbon dioxide variation with time

3.2.2 $y=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

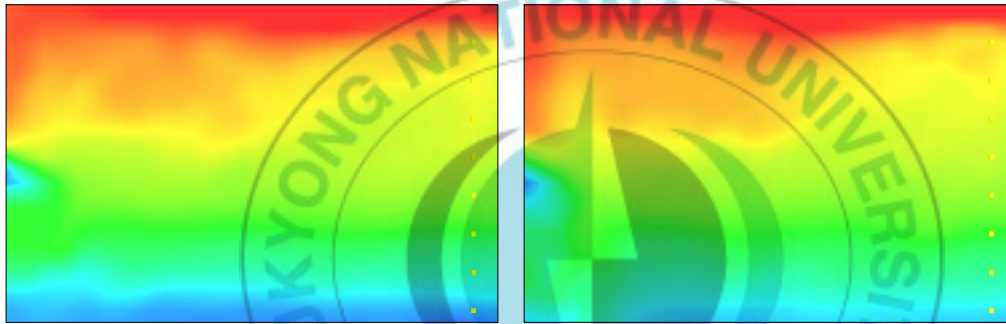
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 온도 분포는 Fig. 17의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 시간이 경과하면서 실의 온도가 전체적으로 상승하는 것으로 나타났다. 좌측의 개구부를 중심으로 다른 부분에 비해 온도가 더 높으며 개구부가 개방되어 있어 개구부가 있는 부분의 온도가 부분적으로 낮게 나타났다.





(a) $t=30\text{s}$

(b) $t=60\text{s}$



(c) $t=120\text{s}$

(d) $t=180\text{s}$

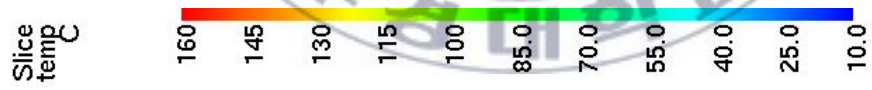
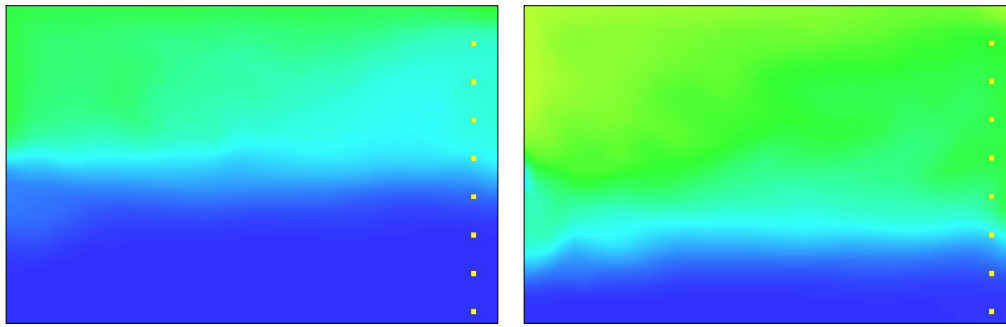


Fig. 17 Temperature distribution at $y=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.2.3 $y=1.5\text{m}$ 의 연기 분포

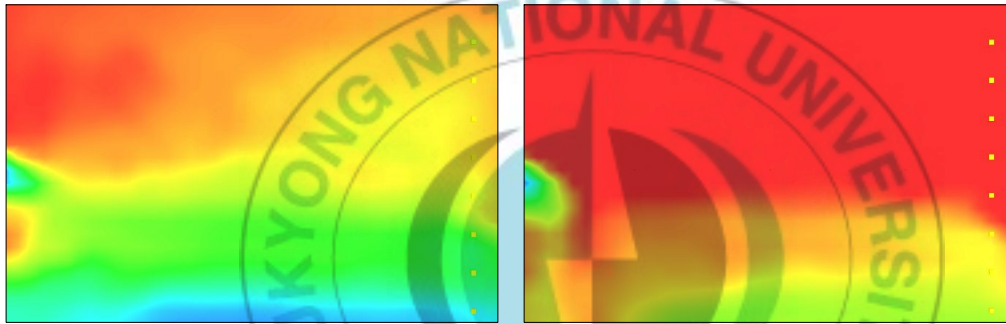
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 연기 분포는 Fig. 18의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 온도 분포와 동일하게 시간이 경과하면서 실의 연기농도가 전체적으로 상승하는 것으로 나타났다. 좌측의 개구부를 중심으로 다른 부분에 비해 연기의 농도가 더 짙으며 개구부가 개방되어 있어 개구부가 있는 부분의 연기 농도는 부분적으로 낮게 나타났다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s

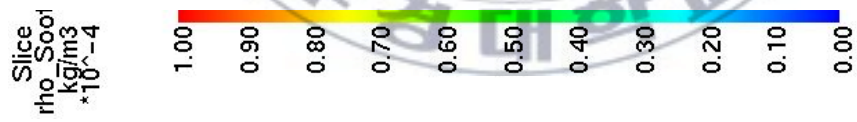
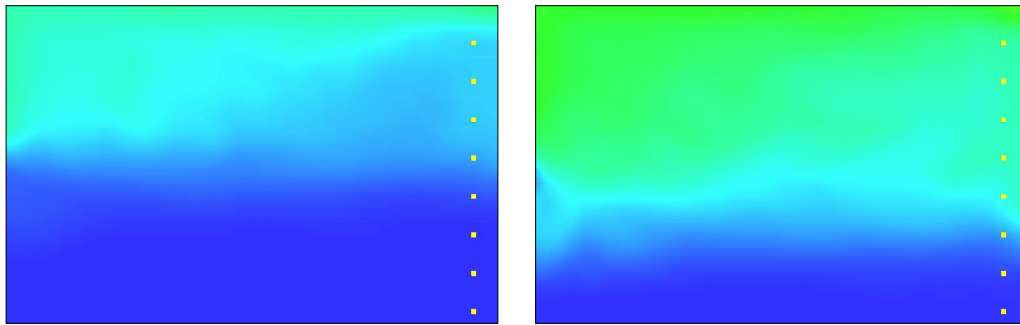


Fig. 18 Soot distribution at $y=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.2.4 $y=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

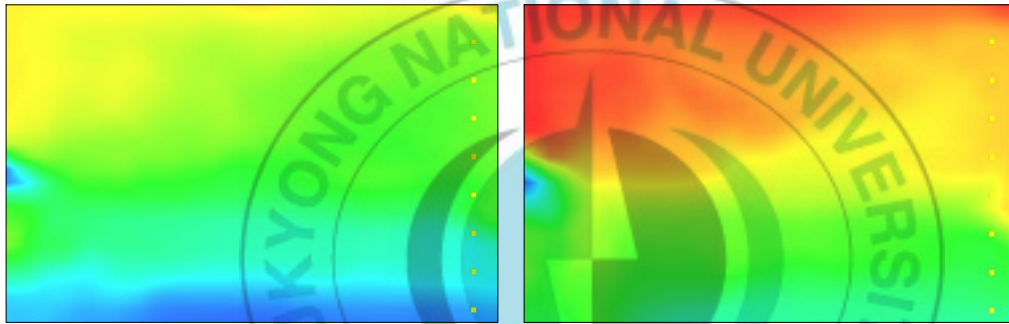
출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 19의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 온도, 연기 분포와 동일한 양상으로 시간이 경과하면서 실의 이산화탄소 농도가 전체적으로 상승하는 것으로 나타났다. 좌측의 개구부를 중심으로 다른 부분에 비해 이산화탄소의 농도가 더 짙으며 개구부가 개방되어 있어 개구부가 있는 부분의 이산화탄소 농도는 부분적으로 낮게 나타났다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s

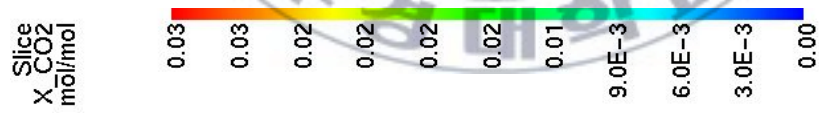
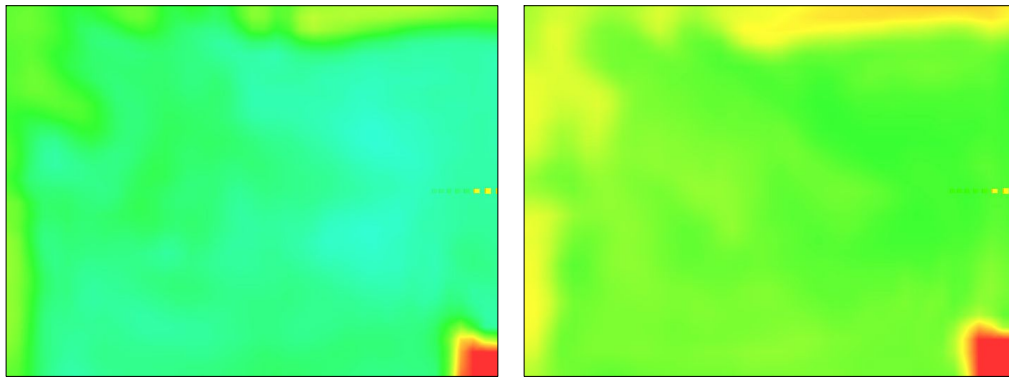


Fig. 19 Carbon dioxide distribution at $y=1.5m$ (doorway closed)

3.2.5 $z=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 온도 분포는 Fig. 20의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 실 전체적으로 균일하게 온도가 상승하였으며, 발화점과 마주하는 벽과 좌측의 개구부가 위치한 벽면의 온도가 비교적 높게 나타났다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

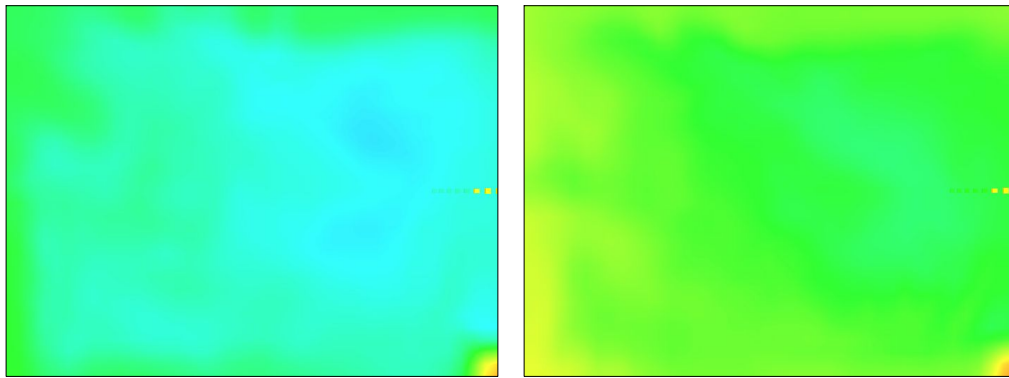


Fig. 20 Temperature distribution at $z=1.5m$ (doorway closed)

3.2.6 $z=1.5\text{m}$ 의 연기 분포

출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 연기 분포는 Fig. 21의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 우측의 출입문에 위치한 벽을 제외한 나머지 3면의 벽에 연기의 농도가 높게 나타나 180(초)에서는 전체적으로 균일한 농도를 보이는 것으로 보아 세 벽면에서 부터 연기가 차기 시작하여 실 전체에 확산이 된 것으로 보인다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s



Fig. 21 Soot distribution at z=1.5m (doorway closed)

3.2.7 $z=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

출입문에서 가까운 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 22의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 전반적으로 연기와 비슷한 양상으로 우측의 출입문에 위치한 벽을 제외한 나머지 3면의 벽에 이산화탄소의 농도가 높게 나타나는 것으로 보아 세 벽면에서 부터 이산화탄소의 농도가 짙어지기 시작하여 실 전체에 확산되는 모습이 보인다.



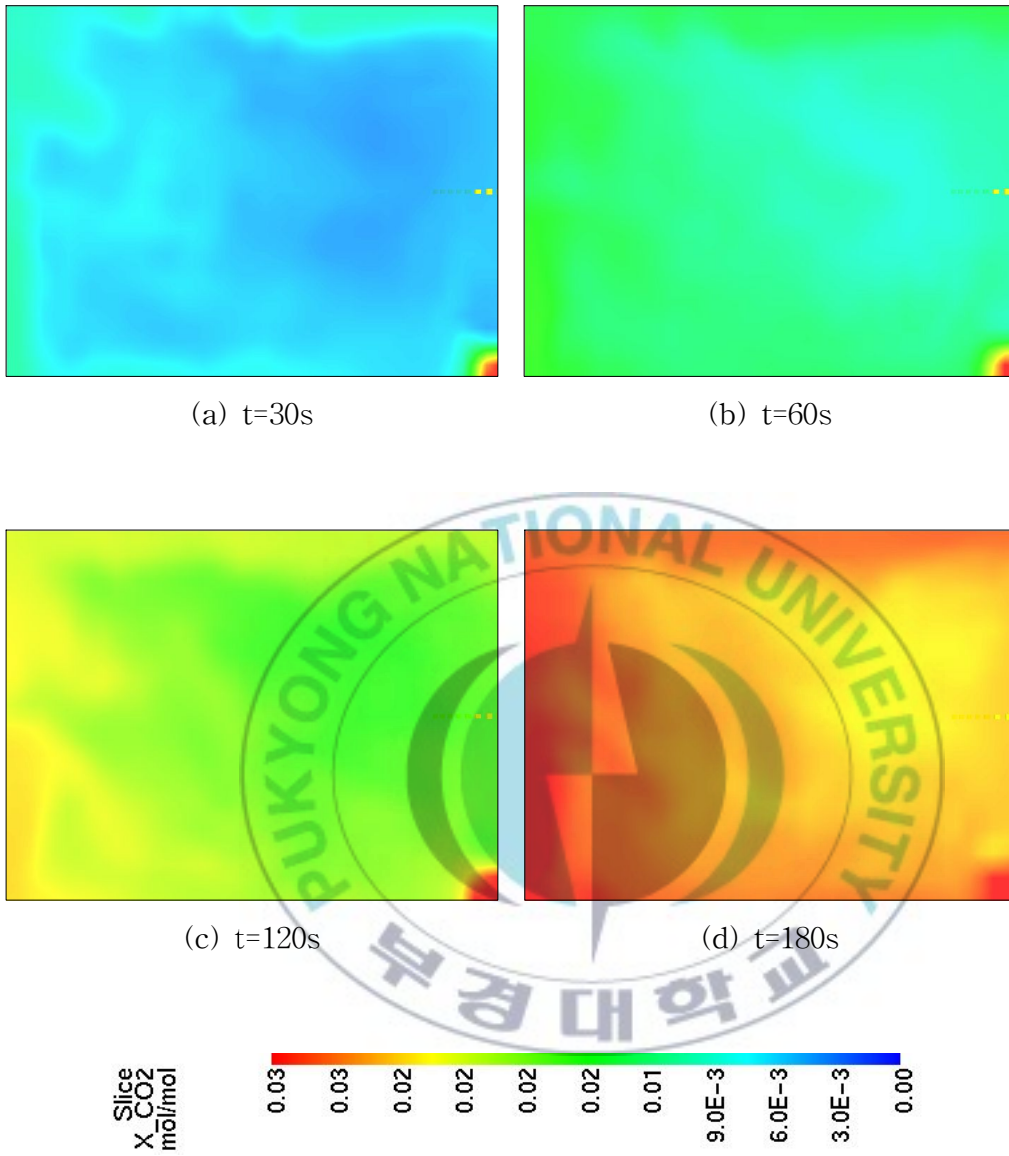


Fig. 22 Carbon dioxide distribution at $z=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.2.8 평균온도, 평균연기, 평균이산화탄소의 변화

온도는 P_8 에 30℃에서 P_1 에 최고 110℃까지 상승하였다. 연기는 P_8 에 0.00002kg/m³에서 P_1 에 최고 0.00006kg/m³이상 증가하였다. 이산화탄소는 P_8 에 0.004mol/mol이하에서 P_1 에 최고 0.014mol/mol까지 증가하였다.

온도, 연기, 이산화탄소 모두 변화 양상이 같게 나타나는데 $P_1 \sim P_8$ 까지 꾸준한 증가세가 보이는데, 기울기가 P_5 지점 이후 완만하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 사실로 미루어 실의 높이 1.0m까지는 급격하게 변화하다가 1.0m이후 완만하게 증가하는 양상이 보인다.



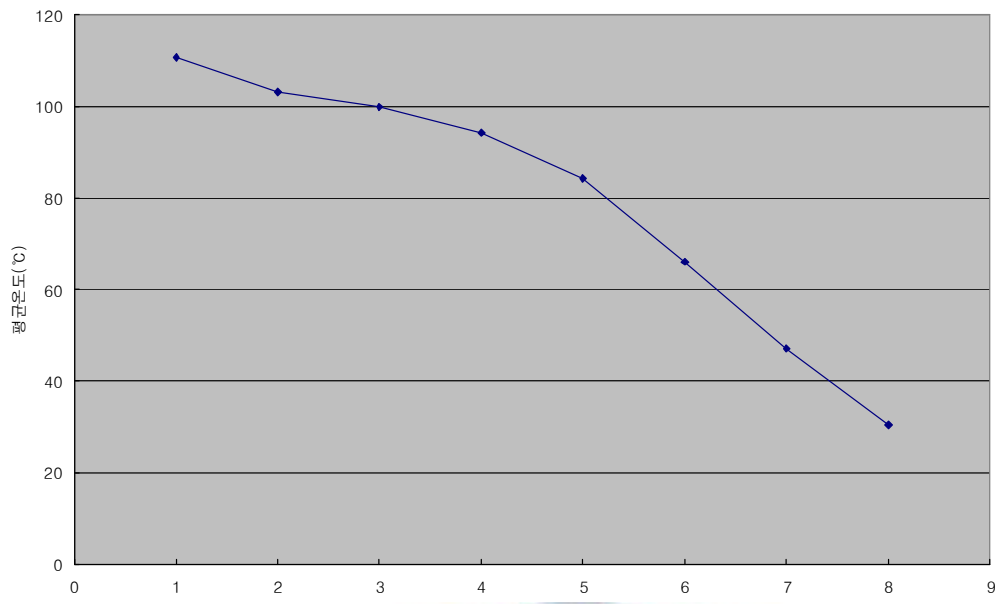


Fig. 23 Average temperature at P₁ ~ P₈ (doorway closed)



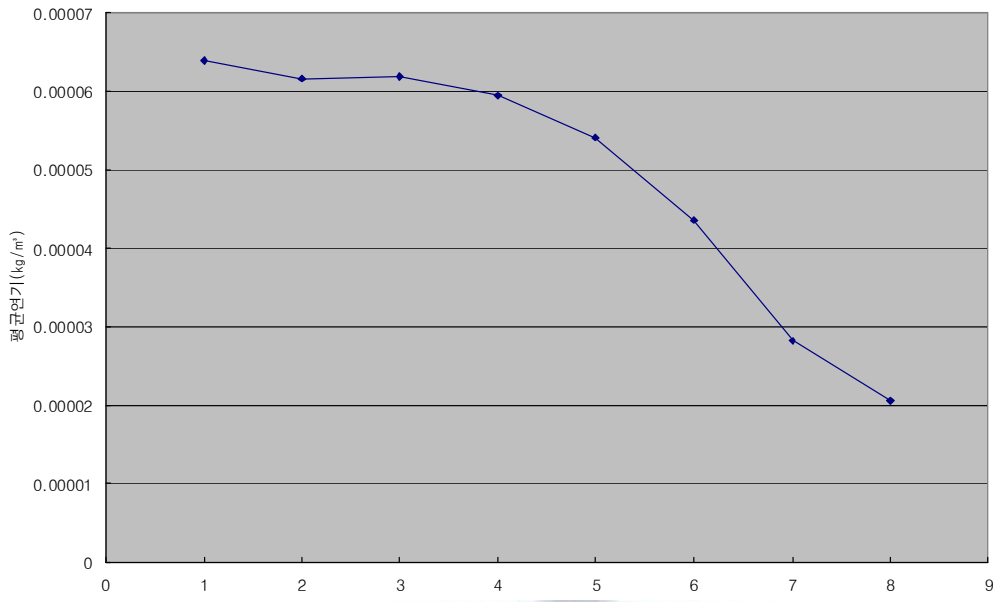


Fig. 24 Average soot at P₁ ~ P₈ (doorway closed)

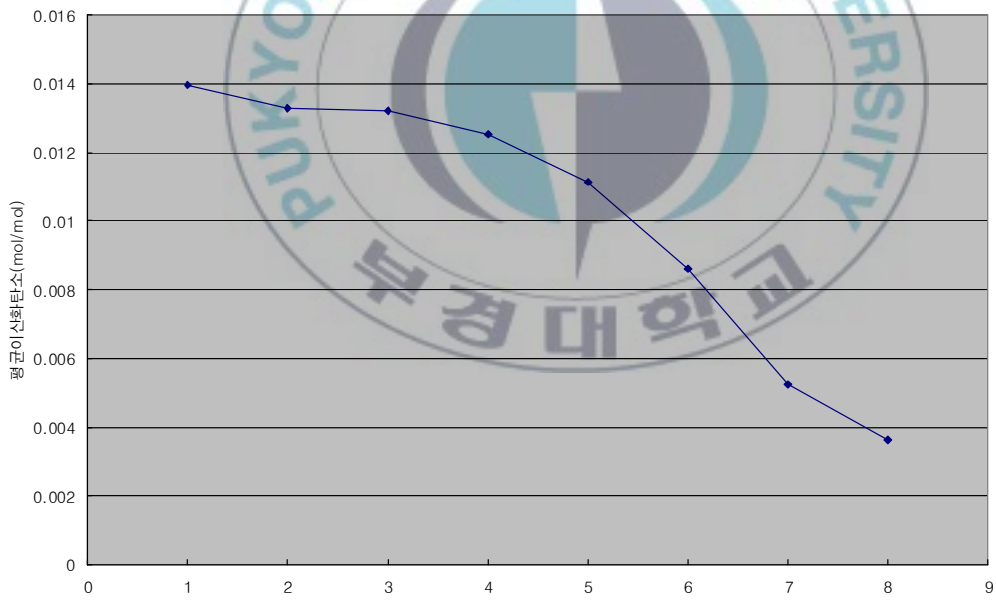


Fig. 25 Average carbon dioxide at P₁ ~ P₈ (doorway closed)

3.3 CASE III(출입문에서 먼 발화점 및 출입문 개방)

3.3.1 P₁~P₈의 온도, 연기, 이산화탄소의 변화

출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 26에 비교하였다. P₄~P₈까지는 온도가 20℃ 정도로 같게 유지되지만, P₁~P₃에서는 40(초)까지 온도가 급격하게 상승해 이후 온도가 큰 변화 없게 나타난다. 연기와 이산화탄소도 온도와 비슷한 양상을 보이는데 P₃에서 P₁으로 갈수록 그래프가 점차 차분해지는 것으로 미루어 보면 상층부로 갈수록 온도, 연기, 이산화탄소의 변화가 약하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 아울러 CASE I의 발화점 개방과 비슷한 양상으로 그래프가 나타나는 것으로 보아 발화점의 위치가 전체 실의 변화에 크게 작용하지 않는다는 것을 짐작할 수 있다.

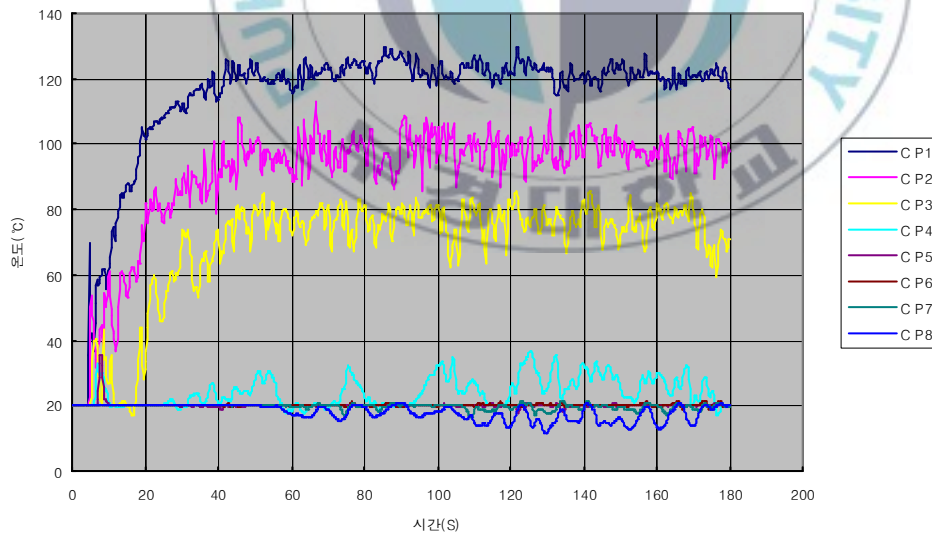


Fig. 26 Temperature variation with time

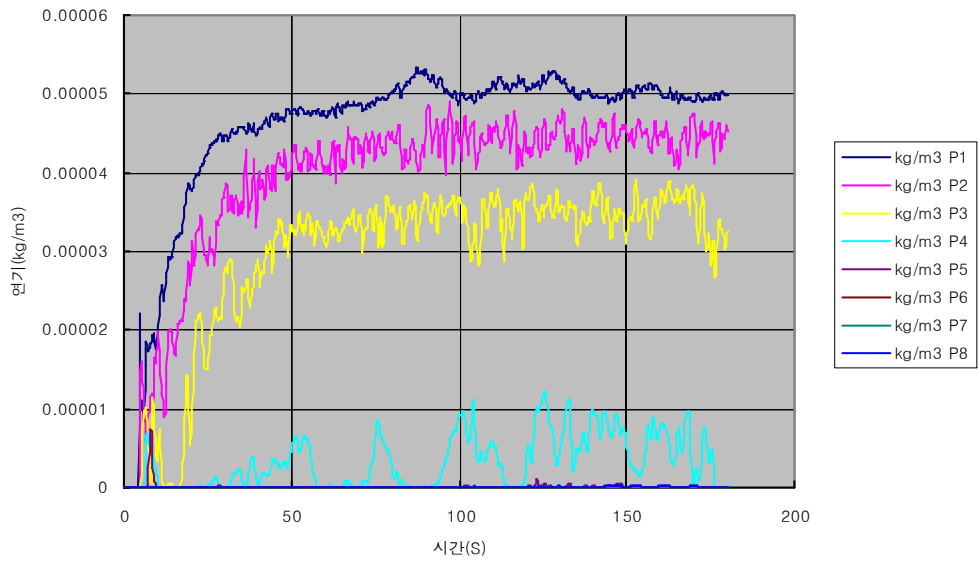


Fig. 27 Soot variation with time

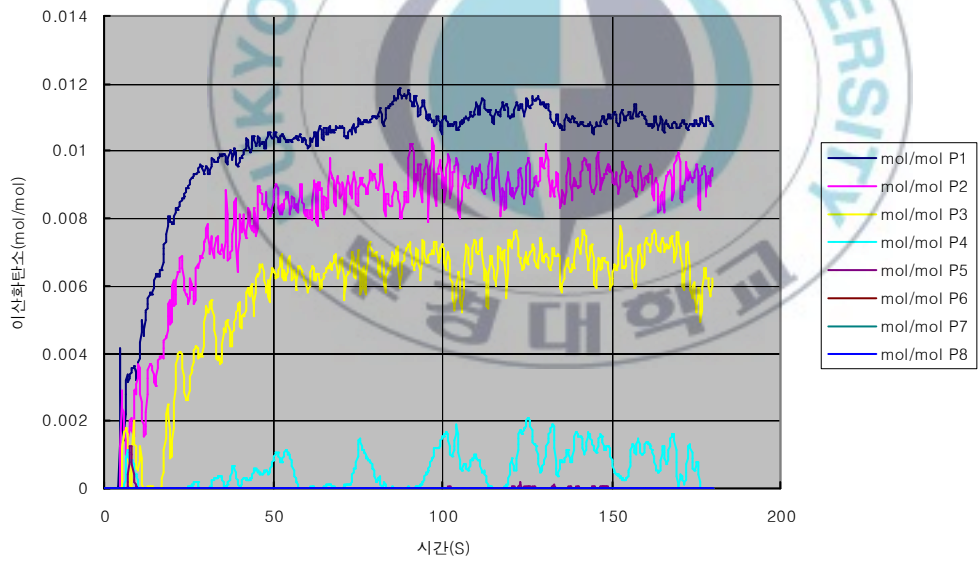
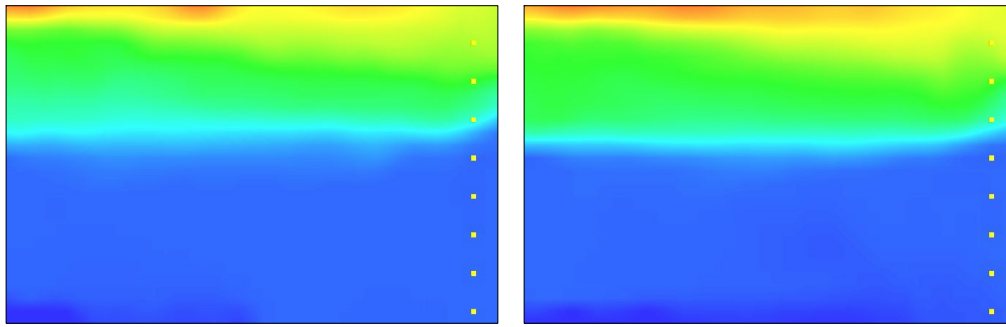


Fig. 28 Carbon dioxide variation with time

3.3.2 $y=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

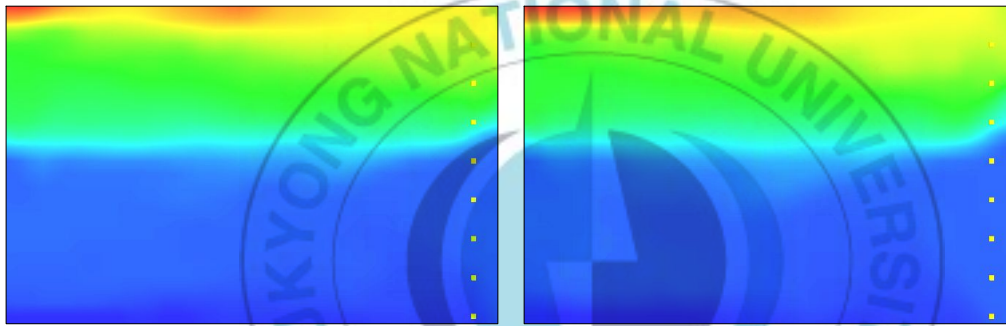
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 온도 분포는 Fig. 29의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 각 시간대별로 큰 차이점이 나타나진 않았으며, 시간이 지나면서 상층부의 온도가 130°C 까지 올라가나 좌측의 개구부가 개방되어 있는 상층부가 부분적으로 160°C 까지 올라가는 것으로 나타났다. 또 우측의 출입문이 개방되어 있는 부분은 온도가 낮게 나타났다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

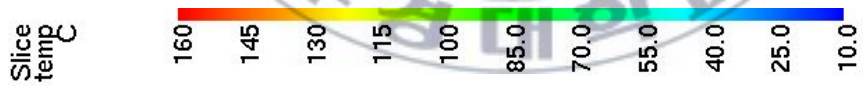
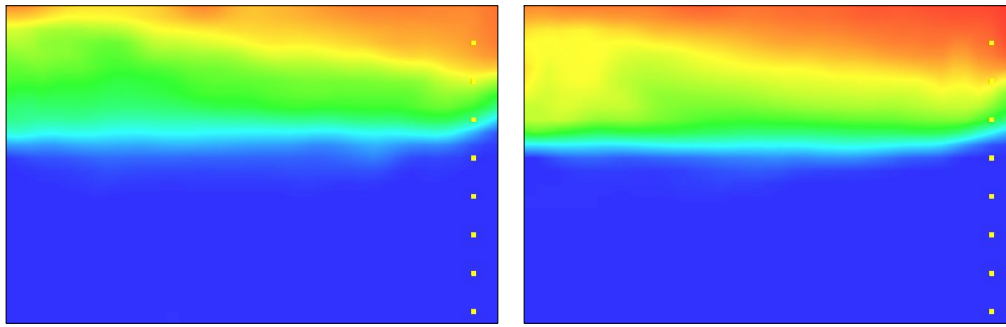


Fig. 29 Temperature distribution at $y=1.5m$ (doorway open)

3.3.3 $y=1.5m$ 의 연기 분포

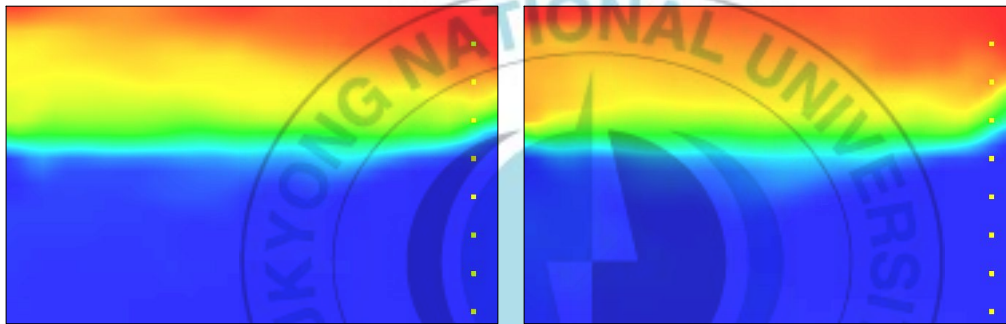
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $y=1.5m$ 의 $x-z$ 평면에서의 연기 분포는 Fig. 30의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 시간이 지나도 하층부의 연기 농도는 변화가 없으나 상층부의 연기 농도가 점차 상승하는 것으로 나타났다. 우측의 출입문이 개방되어 있는 부분의 상층부로 올수록 점차적으로 짙은 농도의 연기가 더 두꺼운 층을 이루고 있다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s

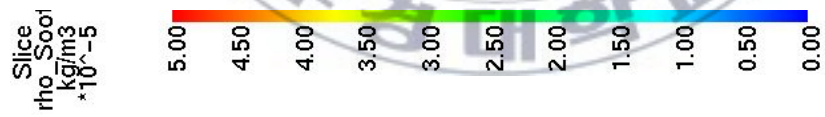
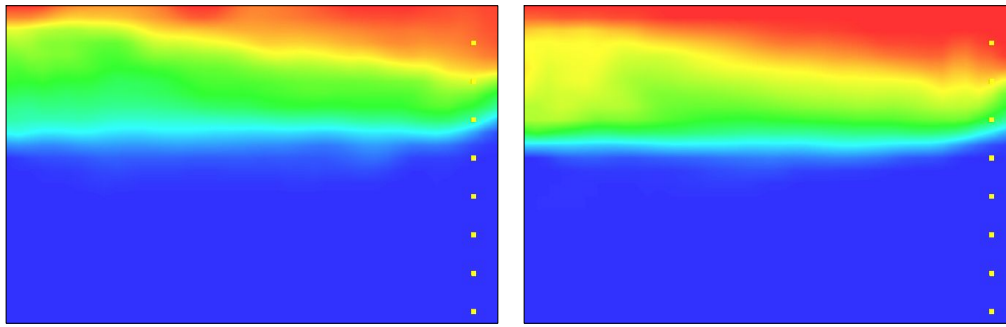


Fig. 30 Soot distribution at y=1.5m (doorway open)

3.3.4 $y=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

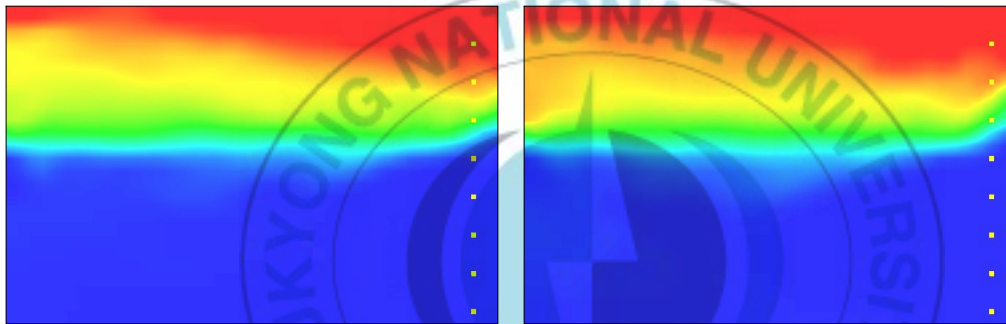
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 31의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 연기와 비슷한 양상으로 나타나며, 시간이 지나도 하층부의 이산화탄소 농도는 변화가 없으나 상층부의 이산화탄소 농도가 점차 상승하는 것으로 나타났다. 우측의 출입문이 개방되어 있는 부분 상층부로 올수록 점차적으로 짙은 농도의 연기가 더 두꺼운 층을 이루고 있다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

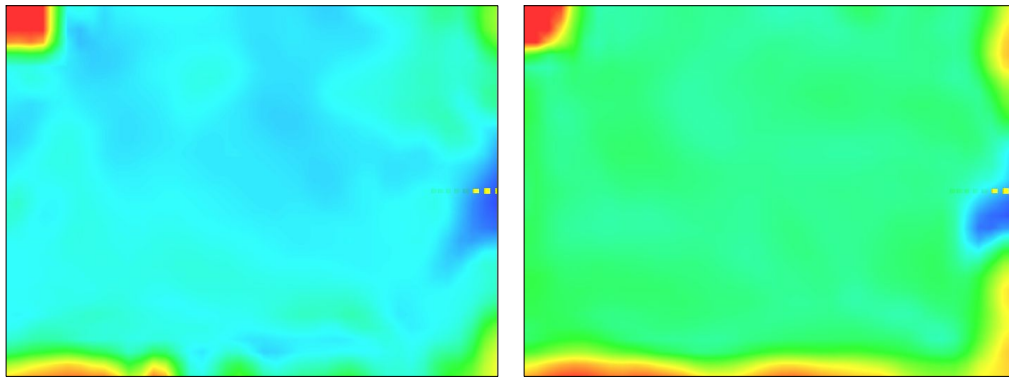


Fig. 31 Carbon dioxide distribution at $y=1.5m$ (doorway open)

3.3.5 $z=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

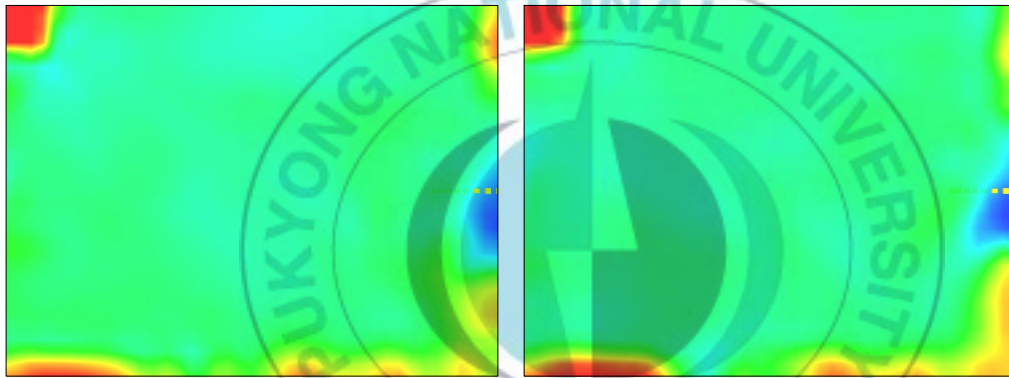
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 온도 분포는 Fig. 32의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 실 내부 전체적으로 온도의 변화가 크게 나타나지 않는 것으로 나타났다. 단 발화점과 발화점에서 대각선으로 마주보고 있는 두 벽면의 온도가 다른 부분에 비해 온도가 높게 나타났으며 개방되어 있는 우측의 출입문 주위는 다른 부분보다 온도가 낮게 나타났다.





(a) $t=30\text{s}$

(b) $t=60\text{s}$



(c) $t=120\text{s}$

(d) $t=180\text{s}$

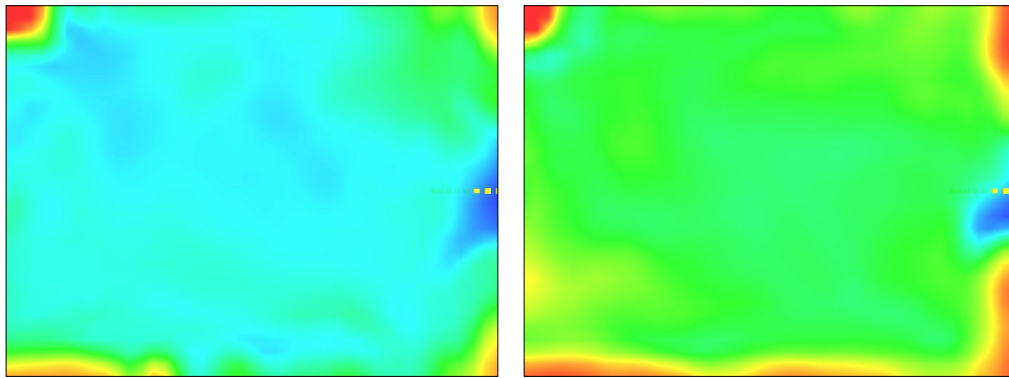


Fig. 32 Temperature distribution at $z=1.5\text{m}$ (doorway open)

3.3.6 $z=1.5\text{m}$ 의 연기 분포

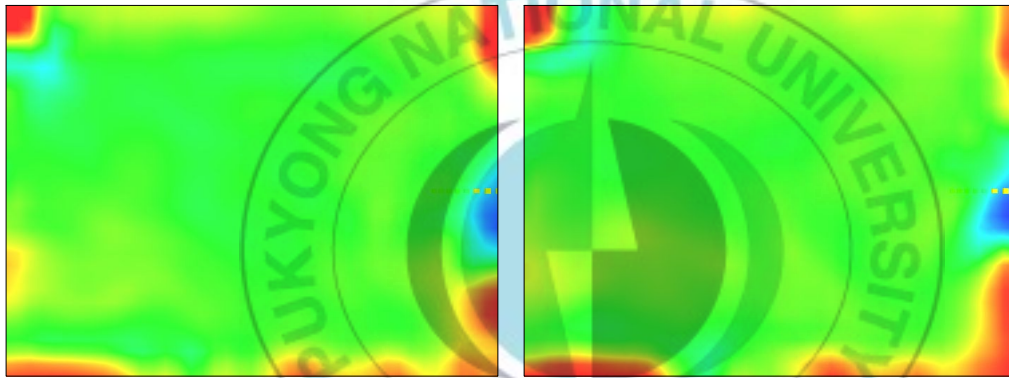
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 연기 분포는 Fig. 33의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 온도 분포와 비슷한 양상으로 실 전체적으로 연기의 농도가 균일하게 상승하였으며, 그 농도의 차이가 크게 나타나지 않았다. 단 발화점과 발화점에서 대각선으로 마주보고 있는 두 벽면의 연기의 농도가 다른 부분에 비해 짙게 나타났으며 개방되어 있는 우측의 출입문 주위는 다른 부분보다 연기의 농도가 연하게 나타났다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(d) t=180s



Fig. 33 Soot distribution at z=1.5m (doorway open)

3.3.7 $z=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 개방되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 34의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 온도, 연기의 분포와 비슷한 양상으로 전체적으로 이산화탄소의 농도가 균일하게 상승하였으며, 그 농도의 차이가 크게 나타나지 않았다. 단 발화점과 발화점에서 대각선으로 마주보고 있는 두 벽면의 이산화탄소의 농도가 다른 부분에 비해 짙게 나타났으며 개방되어 있는 우측의 출입문 주위는 다른 부분보다 이산화탄소의 농도가 연하게 나타났다.



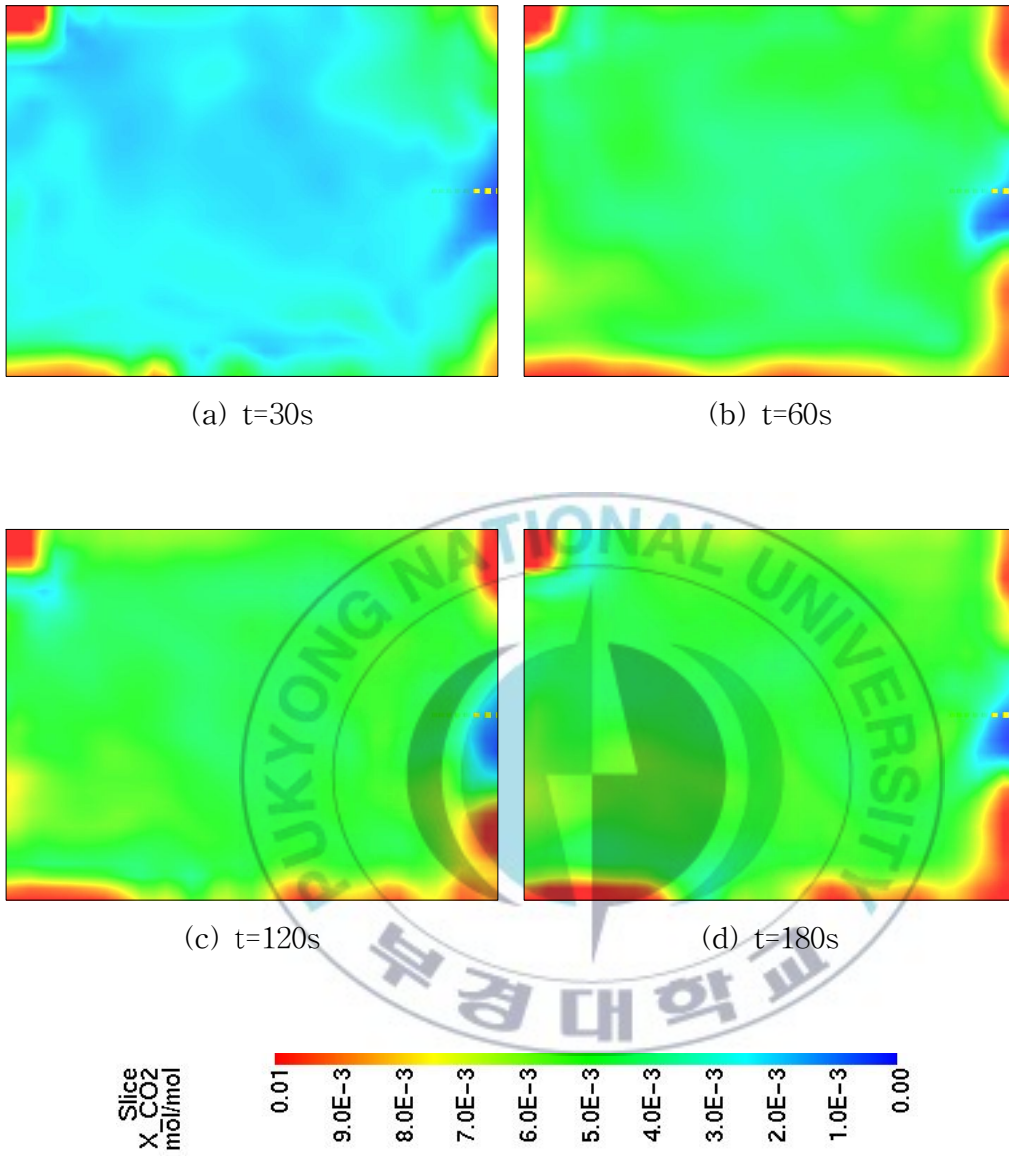
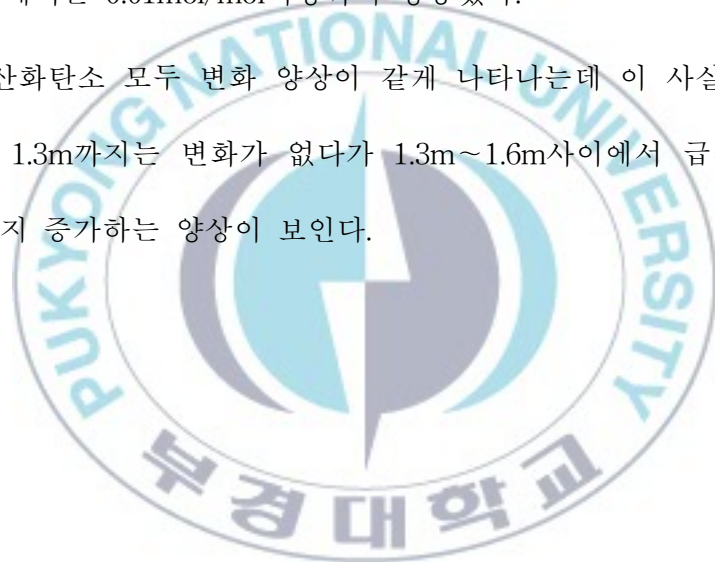


Fig. 34 Carbon dioxide distribution at $z=1.5\text{m}$ (doorway open)

3.3.8 평균온도, 평균연기, 평균이산화탄소의 변화

$P_4 \sim P_8$ 에서 평균 온도는 20°C 로 유지되다가 P_3 지점에서 70°C 까지 급격하게 상승해 P_1 지점에서는 최고 110°C 이상까지 상승했다. 연기도 온도와 비슷하게 $P_4 \sim P_8$ 에서 $0\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 연기가 발생하지 않았다가 P_3 지점에서 연기가 $0.0003\text{kg}/\text{m}^3$ 이상까지 발생하여 P_1 지점에서는 $0.00045\text{kg}/\text{m}^3$ 이상까지 발생했다. 이산화탄소도 $P_4 \sim P_8$ 에서 $0\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 이산화탄소가 발생하지 않았으나 P_3 지점에서 이산화탄소가 $0.006\text{mol}/\text{mol}$ 까지 발생하여 P_1 지점에서는 $0.01\text{mol}/\text{mol}$ 이상까지 상승했다.

온도, 연기, 이산화탄소 모두 변화 양상이 같게 나타나는데 이 사실로 미루어 실의 높이 1.3m 까지는 변화가 없다가 $1.3\text{m} \sim 1.6\text{m}$ 사이에서 급격하게 증가하여 천장까지 증가하는 양상이 보인다.



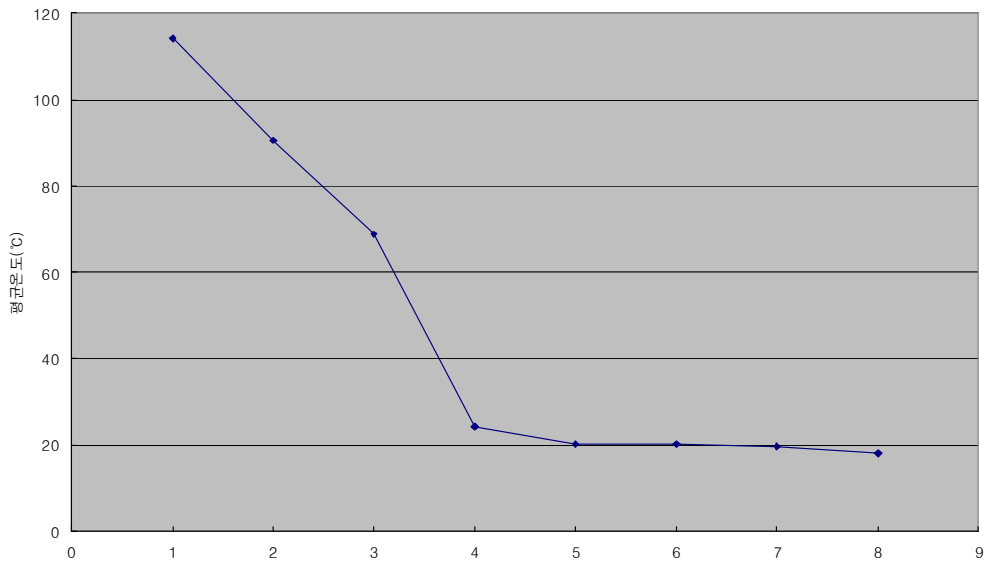


Fig. 35 Average temperature at P₁ ~ P₈ (doorway open)



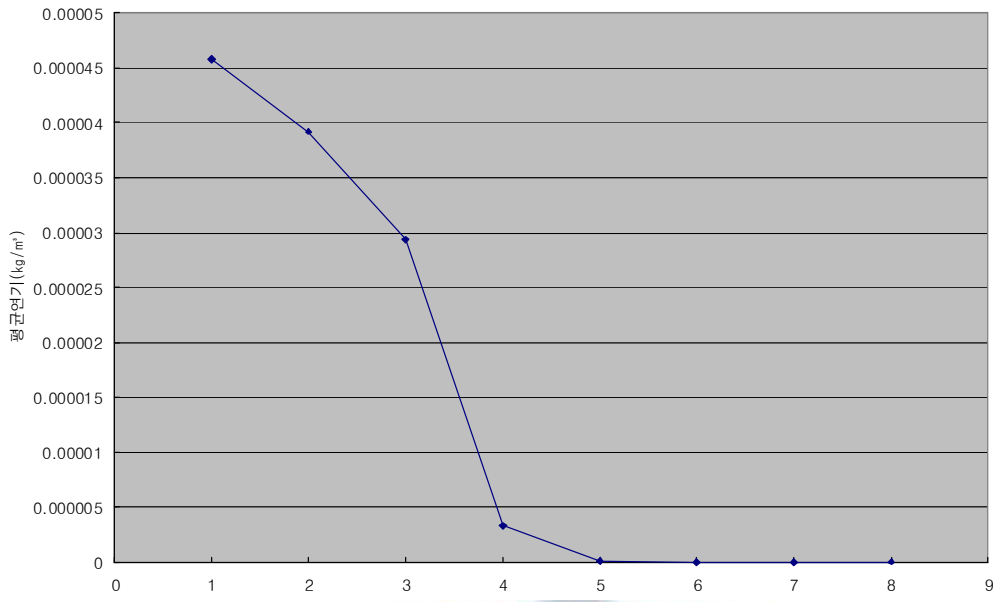


Fig. 36 Average soot at P₁ ~ P₈ (doorway open)

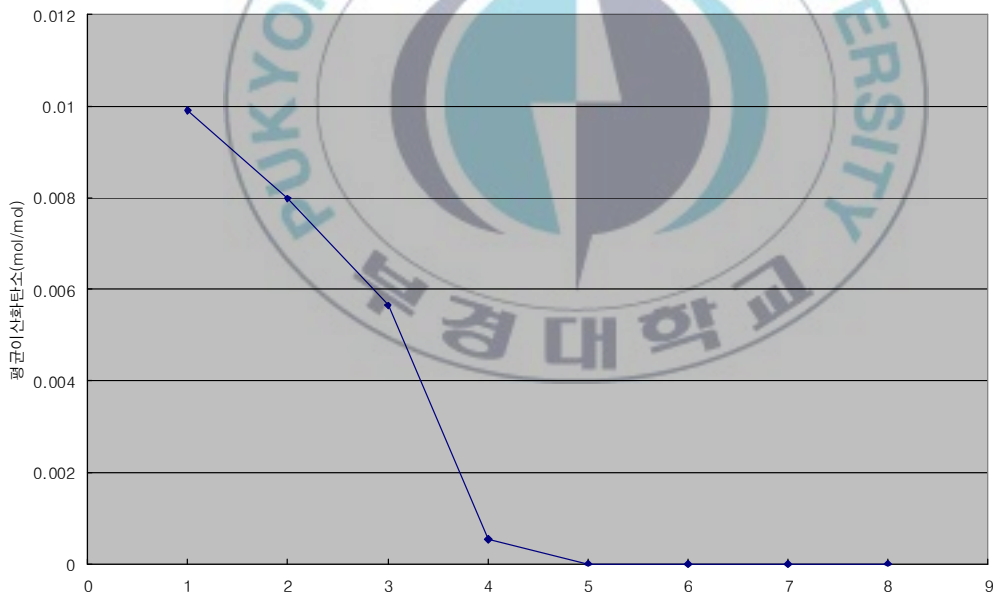


Fig. 37 Average carbon dioxide at P₁ ~ P₈ (doorway open)

3.4 CASE IV(출입문에서 먼 발화점 및 출입문 폐쇄)

3.4.1 P₁~P₈의 온도, 연기, 이산화탄소의 변화

출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, P₁~P₈ 위치에서의 온도 변화를 Fig. 38에 비교하였다. P₅~P₈에서는 일정시간 온도가 20℃ 정도로 유지되다 상승하는 하고, P₁~P₄에서는 바로 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. P₄의 변화 폭이 가장 격렬하게 나타나고 있다. 연기와 이산화탄소도 이와 비슷한 양상을 보이는데 온도와 차이점이 있다면 온도는 일정시간 온도가 상승하다 어느 시점에서 안정권에 접어들어 더 이상 온도가 크게 상승하지 않는 반면, 연기와 이산화탄소는 계속 증가상태를 유지한다는 점이다. 또 P₇ 지점에서 140(초)이후 연기와 이산화탄소가 상승했다가 다시 줄어드는 등의 변화가 크게 나타나고 있다.

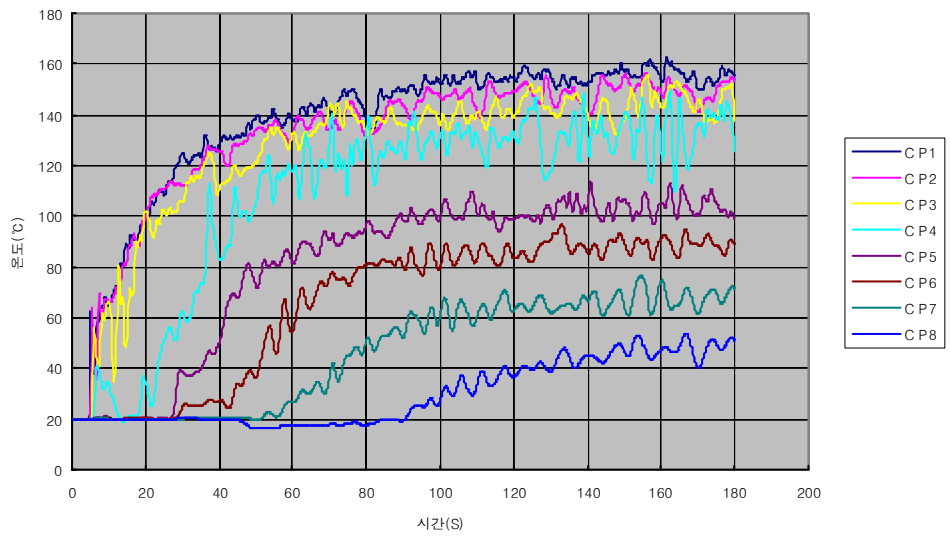


Fig. 38 Temperature variation with time



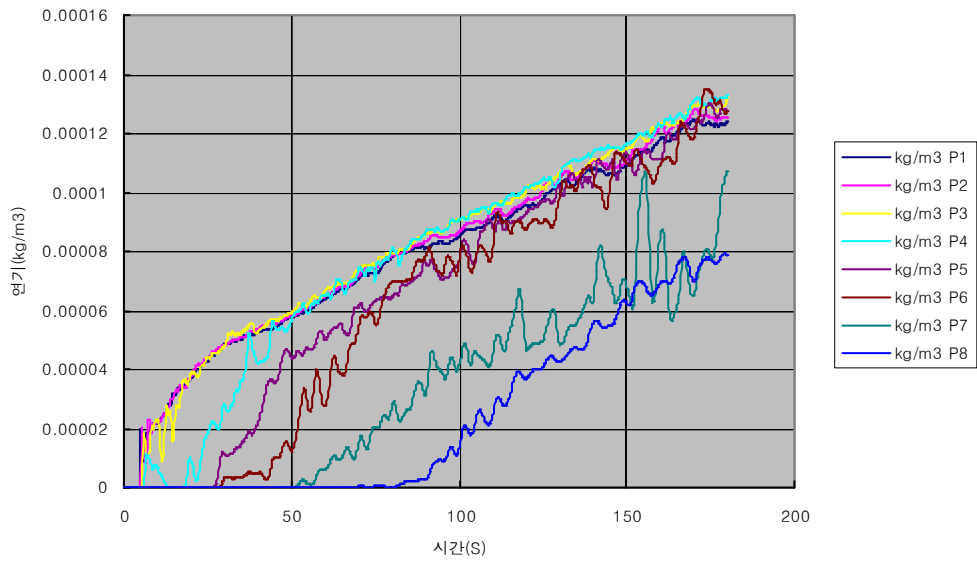


Fig. 39 Soot variation with time

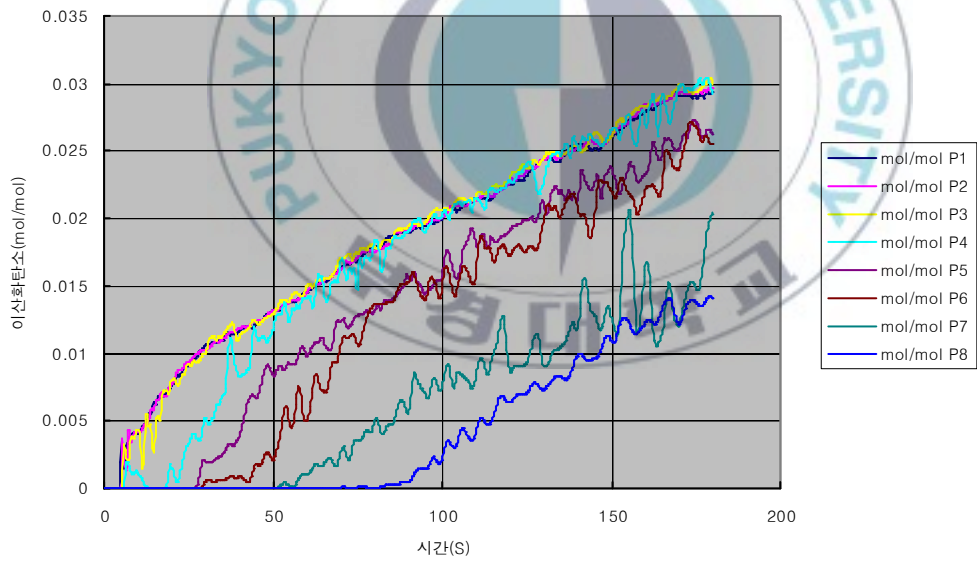
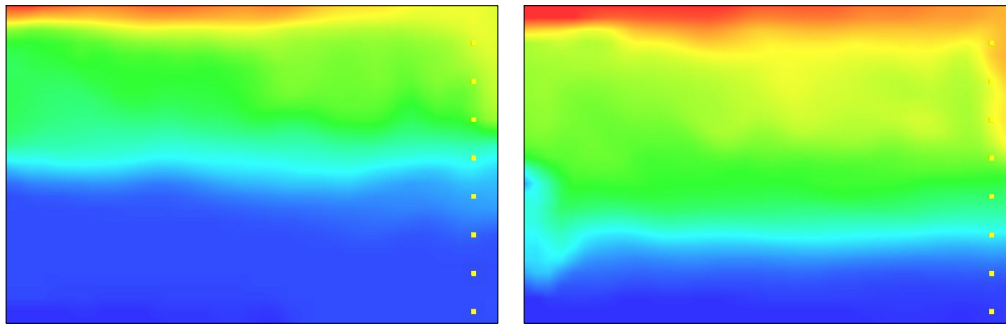


Fig. 40 Carbon dioxide variation with time

3.4.2 $y=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

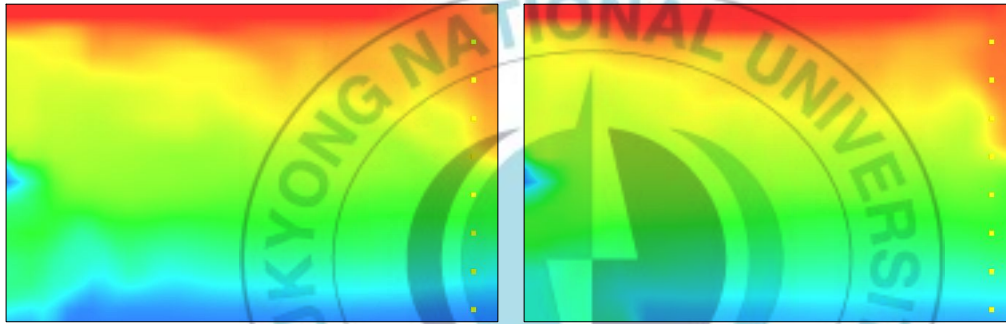
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 온도 분포는 Fig. 41의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 시간이 경과하면서 실 전체적으로 온도가 상승하였으며, 좌측의 개구부가 있는 부분은 전체의 온도가 상승하더라도 온도에 변화가 없다. 우측의 출입문이 개방되어 있는 부분 상층부로 올수록 점차적으로 두꺼운 층을 이루고 다른 부분보다 높은 온도층을 형성하고 있다.





(a) $t=30\text{s}$

(b) $t=60\text{s}$



(c) $t=120\text{s}$

(d) $t=180\text{s}$

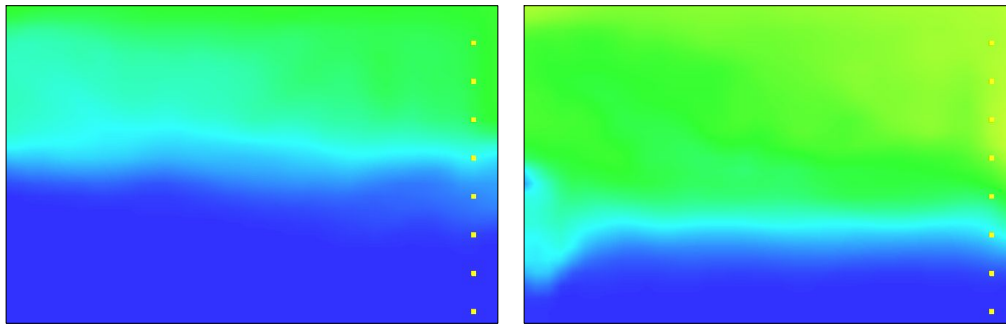


Fig. 41 Temperature distribution at $y=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.4.3 $y=1.5m$ 의 연기 분포

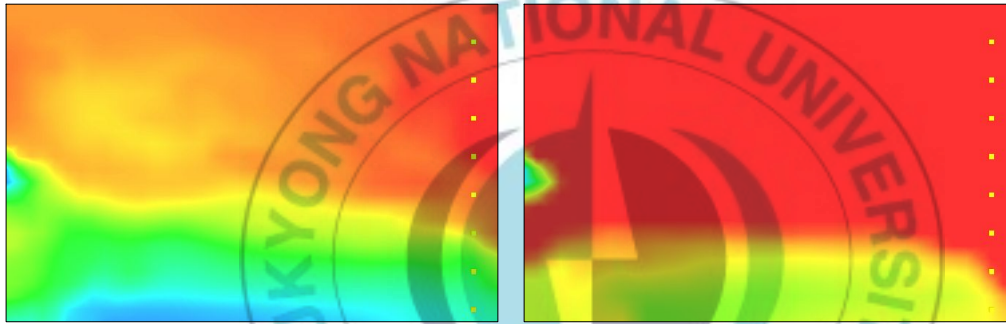
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $y=1.5m$ 의 $x-z$ 평면에서의 연기 분포는 Fig. 42의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 전체적으로 연기의 농도가 증가하다가 60(초)에서는 좌측의 개방되어 있는 개구부 부분을 제외하고 농도가 변화한 것을 볼 수 있다. 120(초)에서는 좌측의 개구부를 기점으로 아래의 연기 농도가 더 낮게 나타났으며, 시간이 지나면서 개구부가 위치한 부분만 빼고 연기의 농도가 균일해 지는 것을 알 수 있다.





(a) t=30s

(b) t=60s



(c) t=120s

(a) t=180s

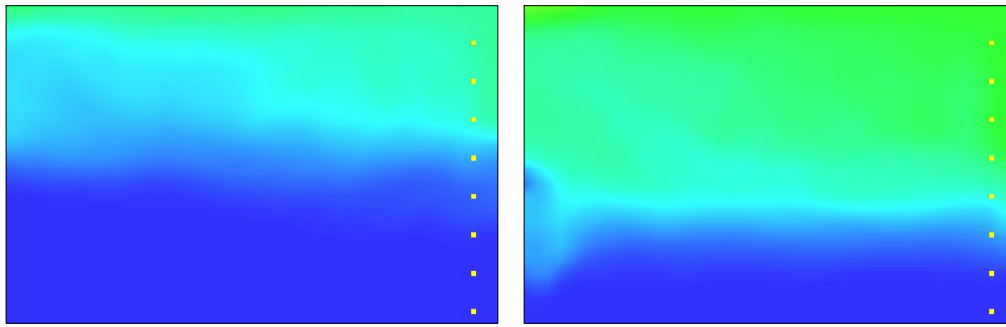


Fig. 42 Soot distribution at y=1.5m (doorway closed)

3.4.4 $y=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

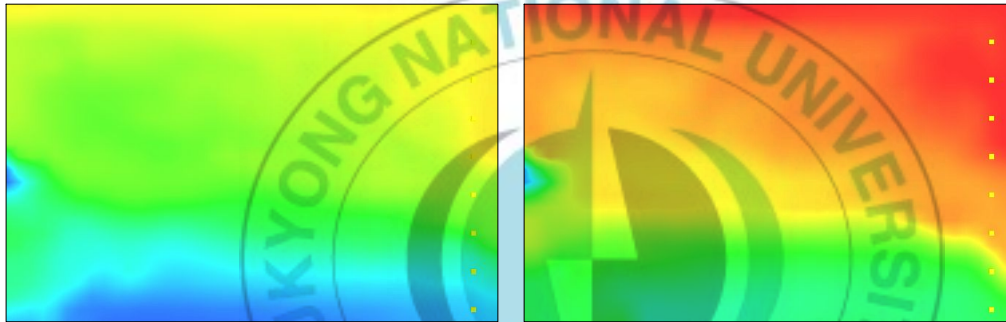
출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $y=1.5\text{m}$ 의 x - z 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 43의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 연기의 분포 상황과 아주 유사한 양상을 보이는데, 전체적으로 이산화탄소의 농도가 증가하다가 60(초)에서는 좌측의 개방되어 있는 개구부 부분을 제외하고 농도가 변화한 것을 볼 수 있다. 120(초)에서는 좌측의 개구부를 기점으로 아래의 연기 농도가 더 낮게 나타났으며, 시간이 지나면서 개구부가 위치한 부분만 빼고 이산화탄소의 농도가 균일해 지는 것을 알 수 있다.





(a) $t=30s$

(b) $t=60s$



(c) $t=120s$

(d) $t=180s$

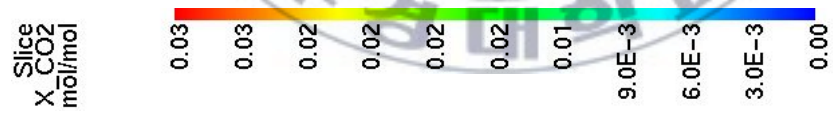
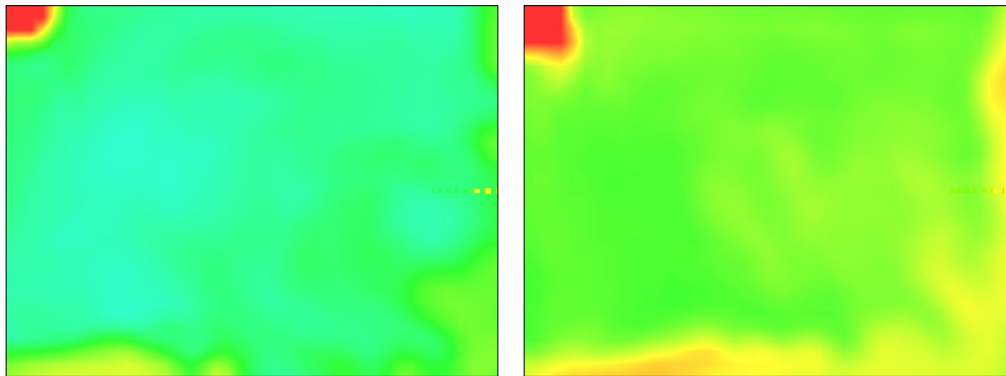


Fig. 43 Carbon dioxide distribution at $y=1.5m$ (doorway closed)

3.4.5 $z=1.5\text{m}$ 의 온도 분포

출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 온도 분포는 Fig. 44의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 상황1과 발화점의 위치만 달라졌을 뿐 그 결과는 아주 유사하게 나타났으며 전체적으로 균일하게 온도가 상승하며 특히 발화점 대각선 방향의 두 벽면의 온도가 다른 부분보다 높게 나타났다.





(a) $t=30\text{s}$

(b) $t=60\text{s}$



(c) $t=120\text{s}$

(d) $t=180\text{s}$



Fig. 44 Temperature distribution at $z=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.4.6 $z=1.5\text{m}$ 의 연기 분포

출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 연기 분포는 Fig. 45의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났으며 전체적으로 연기의 농도가 짙어지는 것을 알 수 있다. 특히 벽면 쪽으로 먼저 농도가 짙어지는 것으로 보다 벽 쪽으로 먼저 연기가 차고 점차 실 중앙으로 번져 나간다는 것을 알 수 있다.



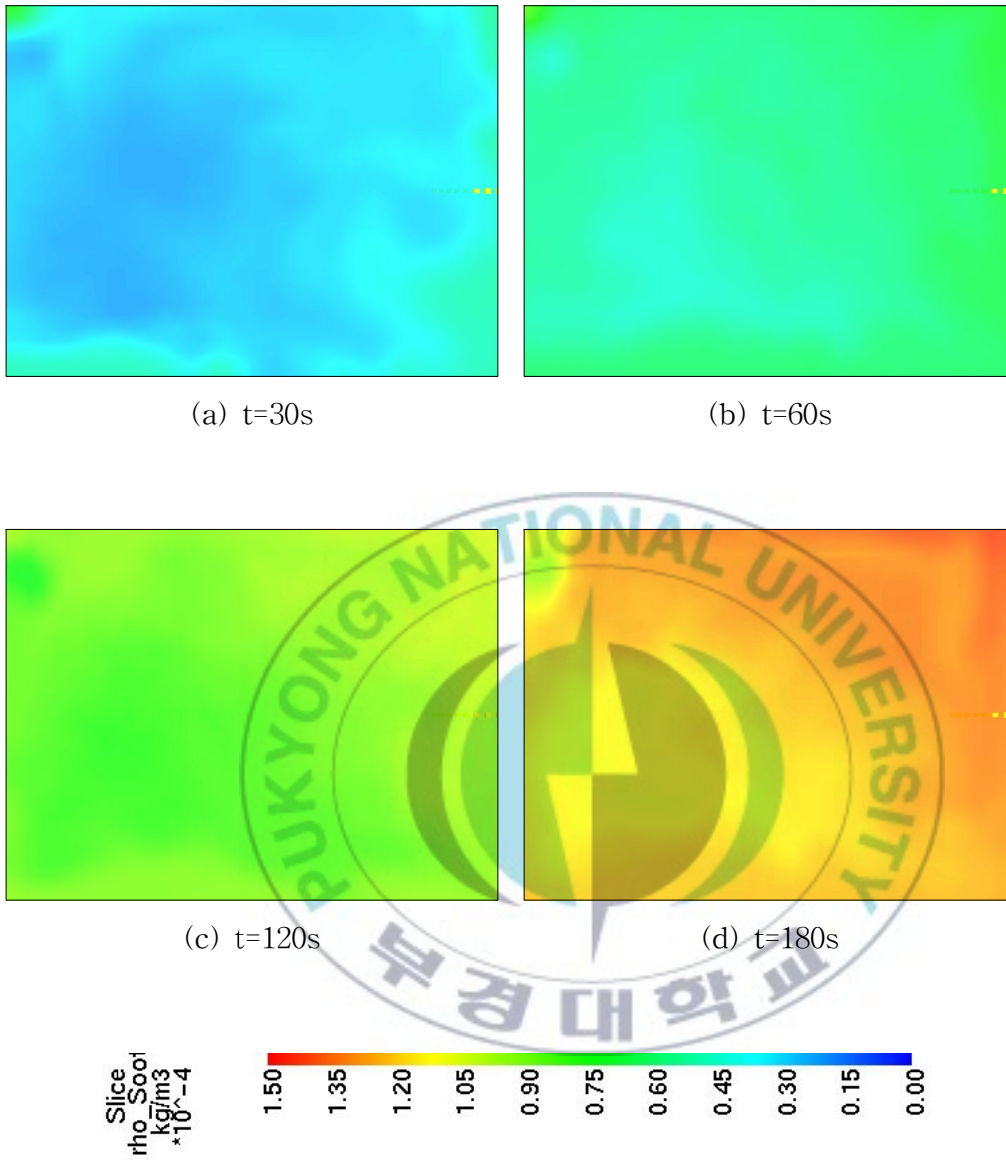


Fig. 45 Soot distribution at $z=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.4.7 $y=1.5\text{m}$ 의 이산화탄소 분포

출입문에서 먼 발화점 및 출입문이 폐쇄되어 있는 경우, $z=1.5\text{m}$ 의 x - y 평면에서의 이산화탄소 분포는 Fig. 46의 (a)~(d)에서 보는 것과 같이 나타났다. 온도, 연기와 유사한 양상으로 나타나는데 실 전체적으로 이산화탄소의 농도가 짙어지는 것을 알 수 있다. 특히 벽면 쪽으로 먼저 농도가 짙어지는 것으로 보다 벽 쪽으로 먼저 이산화탄소가 차고 점차 실 중앙으로 번져 나간다는 것을 알 수 있다.



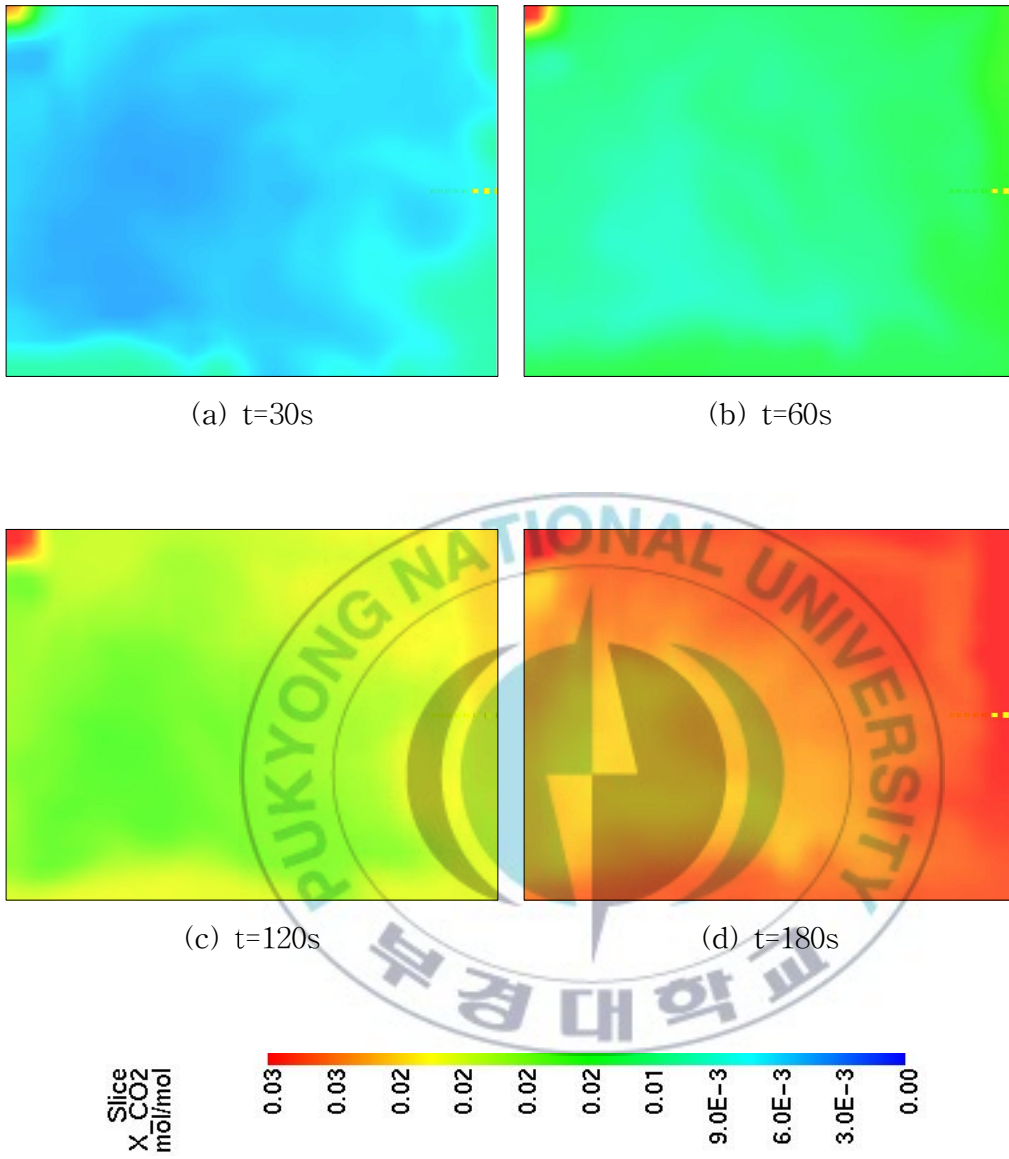


Fig. 46 Carbon dioxide distribution at $z=1.5\text{m}$ (doorway closed)

3.4.8 평균온도, 평균연기, 평균이산화탄소의 변화

온도는 P_8 에 30℃에서 P_1 최고 140℃에 근접하게 상승하였다. 연기는 P_8 에 0.00002kg/m³이상에서 P_3 에 최고 0.00008kg/m³까지 증가하다 P_1 까지 약간 감소한다. 이산화탄소는 P_8 에 0.004mol/mol에서 P_3 에 최고 0.018mol/mol이상 증가하다 P_1 까지 약간 감소한다.

온도, 연기, 이산화탄소 모두 변화 양상이 같게 나타나는데 $P_1 \sim P_8$ 까지 꾸준한 증가세가 보이는데, 기울기가 P_5 지점 이후 완만하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 사실로 미루어 실의 높이 1.0m까지는 급격하게 변화하다가 1.0m이후 완만하게 증가하는 양상이 보인다.



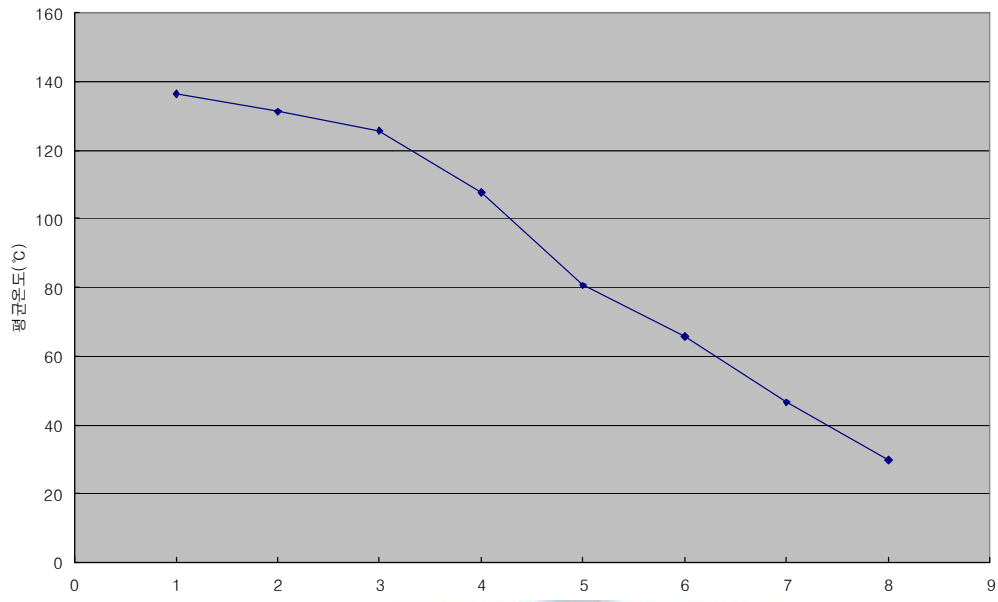


Fig. 47 Average temperature at P₁ ~ P₈ (doorway closed)



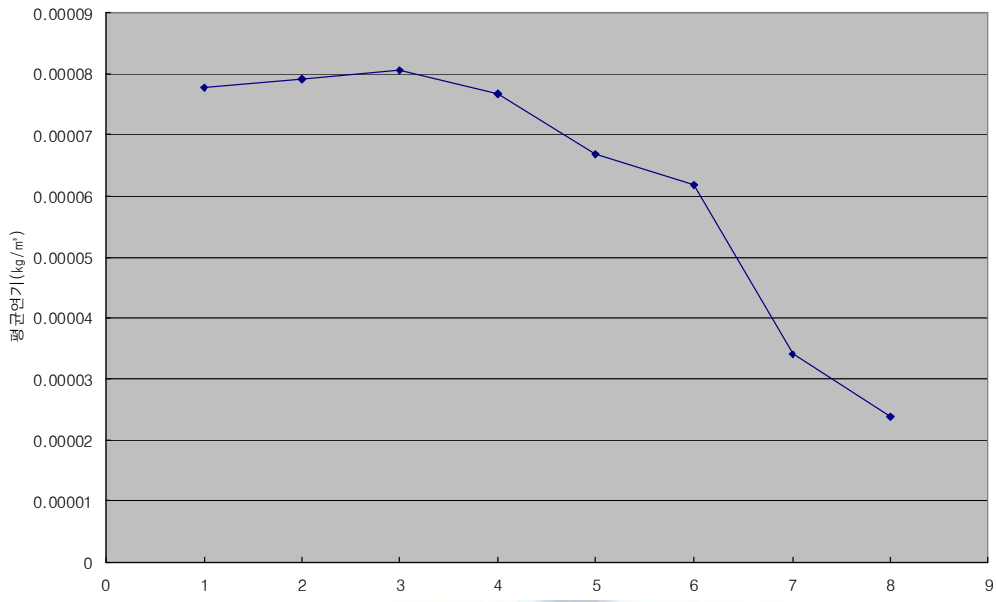


Fig. 48 Average soot at P₁ ~ P₈ (doorway closed)

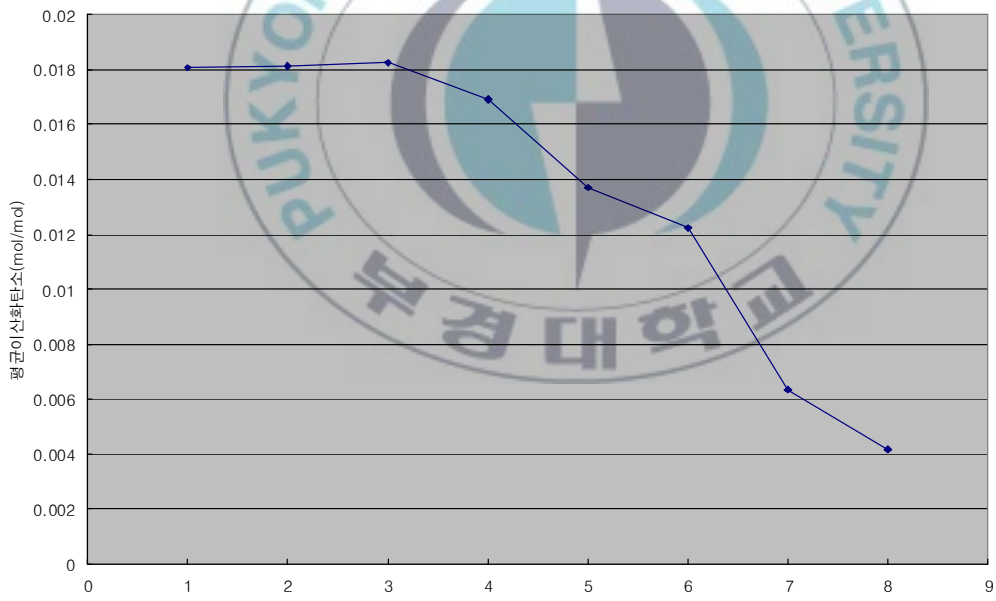


Fig. 49 Average carbon dioxide at P₁ ~ P₈ (doorway closed)

3.5 발화점 위치에 따른 온도, 연기, 이산화탄소의 비교

3.5.1 온도

출입문이 개방되어 있고 발화점의 위치만 다른 CASE I 과 CASEⅢ을 비교하면 별다른 차이 없이 비슷하게 나타났다. 개구부에서 발화점이 가까운 경우 평균온도가 최고 100℃이상이면 발화점이 먼 경우 110℃ 이상으로 개구부에서 발화점이 멀었을 때 온도가 더 높게 나타났다.

출입문에서 발화점이 가까울 때는 P₁에서 온도의 변화가 격렬하게 나타났으나 개구부에서 발화점이 멀었을 때는 P₁에서는 온도 변화가 크게 나타나지 않고 P₃와 P₃에서 격렬하게 나타났다.



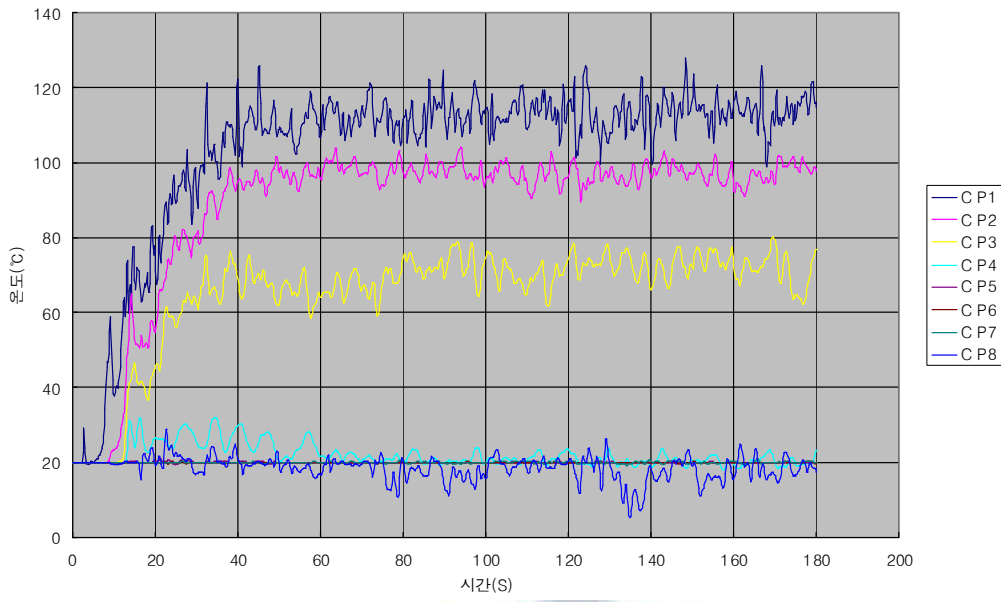


Fig. 50 Temperature variation with time (CASE I)

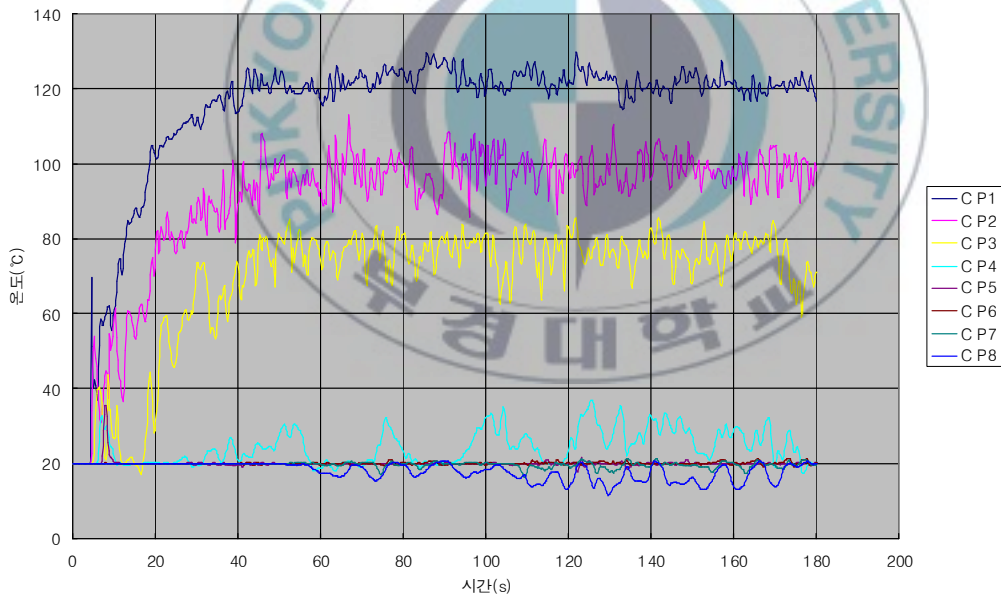


Fig. 51 Temperature variation with time (CASEIII)

3.5.2 연기

출입문이 개방되어 있고 발화점의 위치만 다른 CASE I 과 CASEⅢ을 비교하면 초반 연기의 농도가 상승하다. 이후 완만해지는 것은 같으나 출입문에서 발화점이 가까울 때 연기 농도가 $0.00005\text{kg}/\text{m}^3$ 이하이면 출입문에서 멀 때는 $0.00005\text{kg}/\text{m}^3$ 이상까지 나타난다. 높이 1.3m의 P_4 지점에서 CASE I 은 거의 변화가 없는 반면 CASEⅢ은 연기의 농도에 변화가 생긴 것을 알 수 있다. 또 CASE I 은 P_1 와 P_2 에서의 연기 농도가 거의 유사하지만 CASEⅢ에서는 $P_1 \sim P_3$ 사이에 일정한 간격으로 연기의 농도가 나타나는 것을 볼 수 있다.



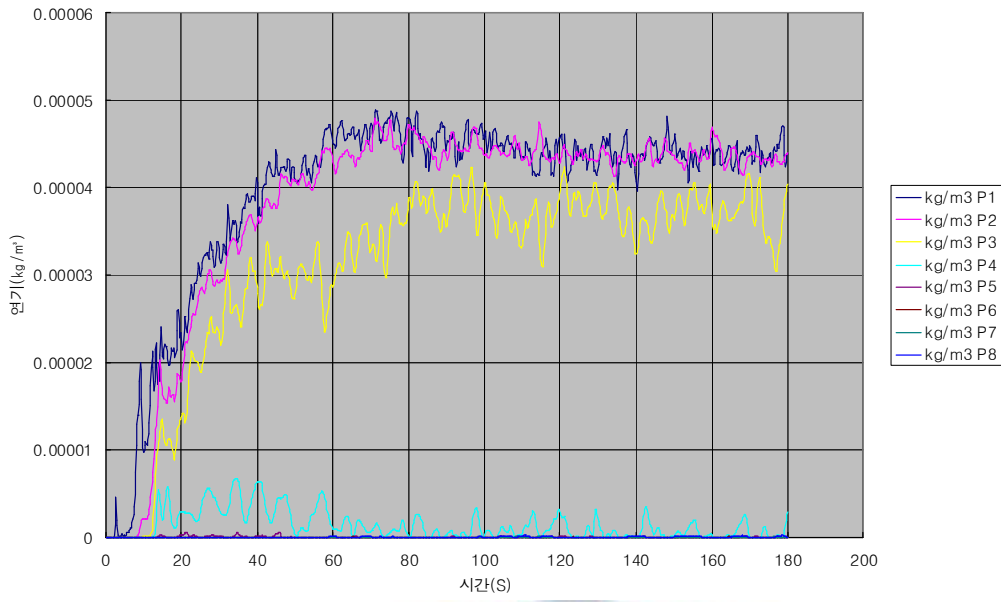


Fig. 52 Soot variation with time (CASE I)

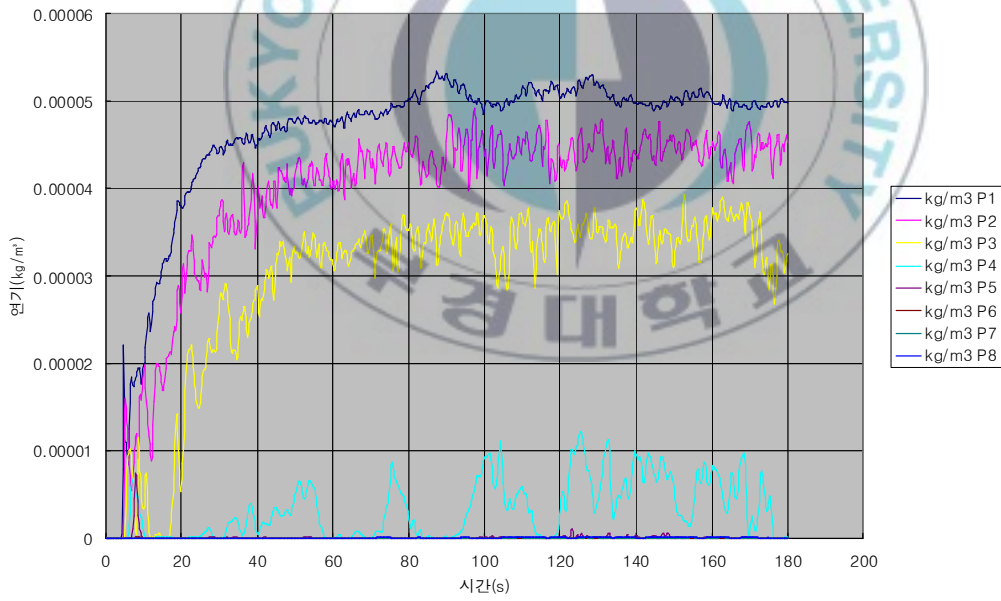


Fig. 53 Soot variation with time (CASE III)

3.5.3 이산화탄소

출입문이 개방되어 있고 발화점의 위치만 다른 CASE I 과 CASEⅢ을 비교하면 초반 이산화탄소의 농도가 상승하다 이후 완만해지는 것은 같으나 개구부에서 발화점이 가까울 때 이산화탄소 농도가 0.01mol/mol이면 출입문에서 멀 때는 0.012mol/mol까지 나타난다. 높이 1.3m의 P₄ 지점에서 CASE I 은 거의 변화가 없는 반면 CASEⅢ은 이산화탄소의 농도에 변화가 생긴 것을 알 수 있다. 또 CASE I 은 P₁ 와 P₂ 에서의 이산화탄소 농도가 거의 유사하지만 CASEⅢ에서는 P₁ ~P₃ 사이에 일정한 간격으로 이산화탄소의 농도가 나타나는 것을 볼 수 있다.



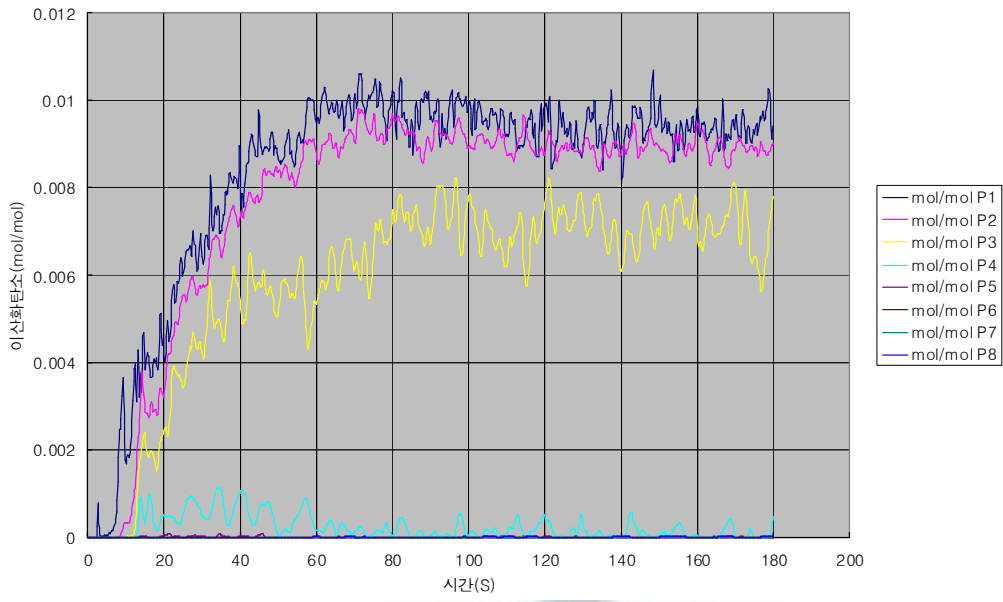


Fig. 54 Carbon dioxide variation with time (CASE I)

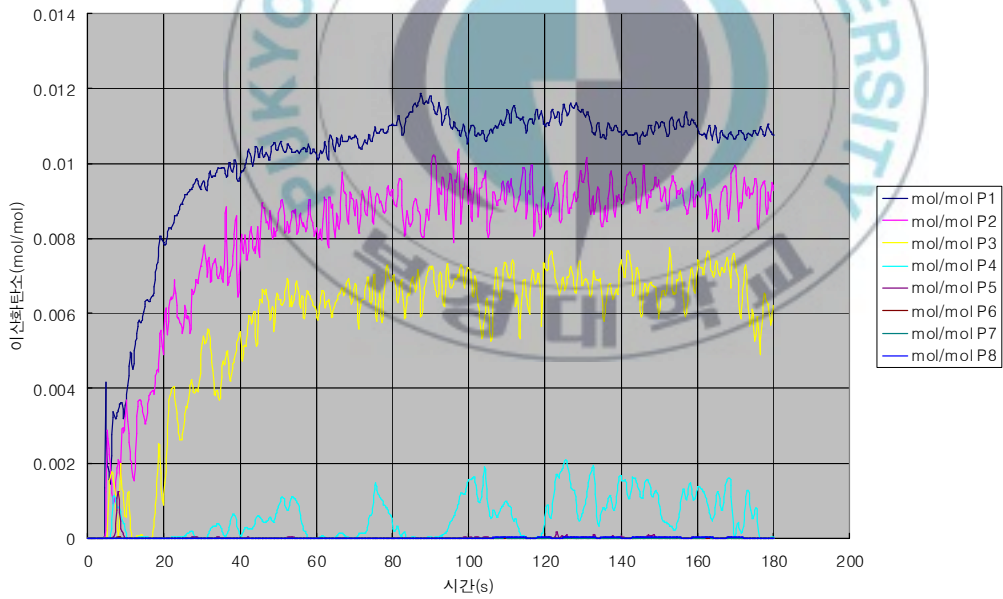


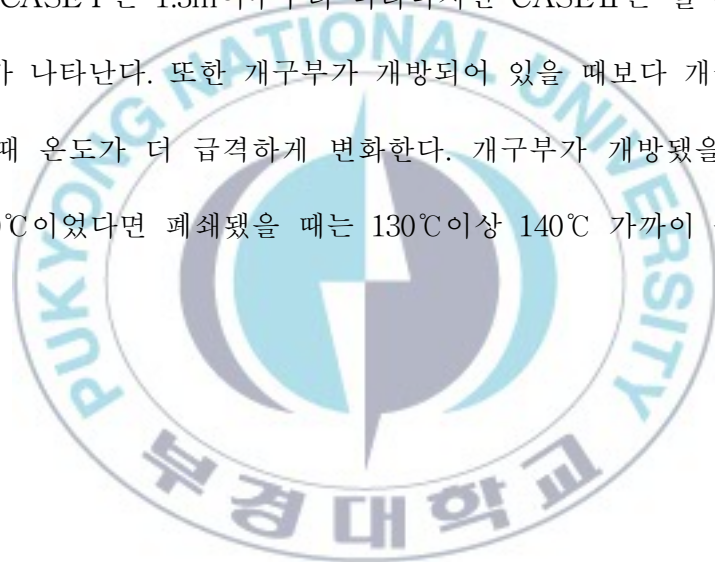
Fig. 55 Carbon dioxide variation with time (CASE III)

3.6 출입문 개폐 여부에 따른 온도, 연기, 이산화탄소 비교

3.6.1 온도

발화점의 위치가 같고 출입문의 개폐 여부가 다른 CASE I 과 CASE II 을 비교하면 CASE I 에서는 $P_4 \sim P_8$ 에서는 온도 변화가 거의 없고 $P_1 \sim P_3$ 에서 40(초)까지 온도가 급격히 상승하다 이후 비교적 비슷한 온도를 유지한다. CASE II 의 경우는 P_8 지점부터 온도 변화가 나타나며 일정한 간격으로 온도가 달라지다 $P_4 \sim P_8$ 에서는 온도가 거의 같게 나타난다.

온도의 변화가 CASE I 은 1.3m 이후부터 나타나지만 CASE II 는 실 전체적으로 온도 변화가 나타난다. 또한 개구부가 개방되어 있을 때보다 개구부가 폐쇄되어 있을 때 온도가 더 급격하게 변화한다. 개구부가 개방됐을 때는 최고 온도가 120℃ 이었다면 폐쇄됐을 때는 130℃ 이상 140℃ 가까이 올라갔다.



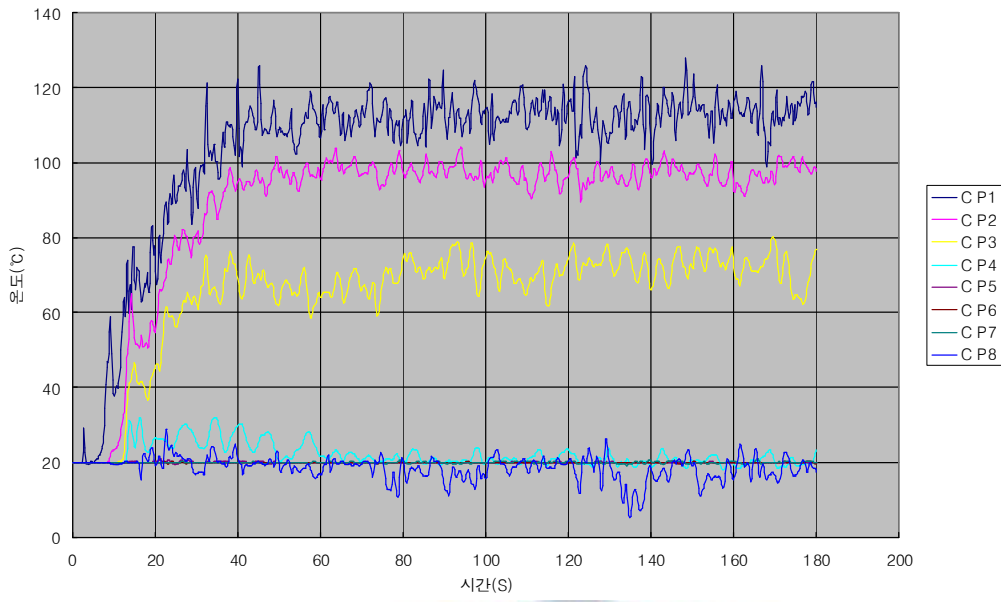


Fig. 56 Temperature variation with time (CASE I)

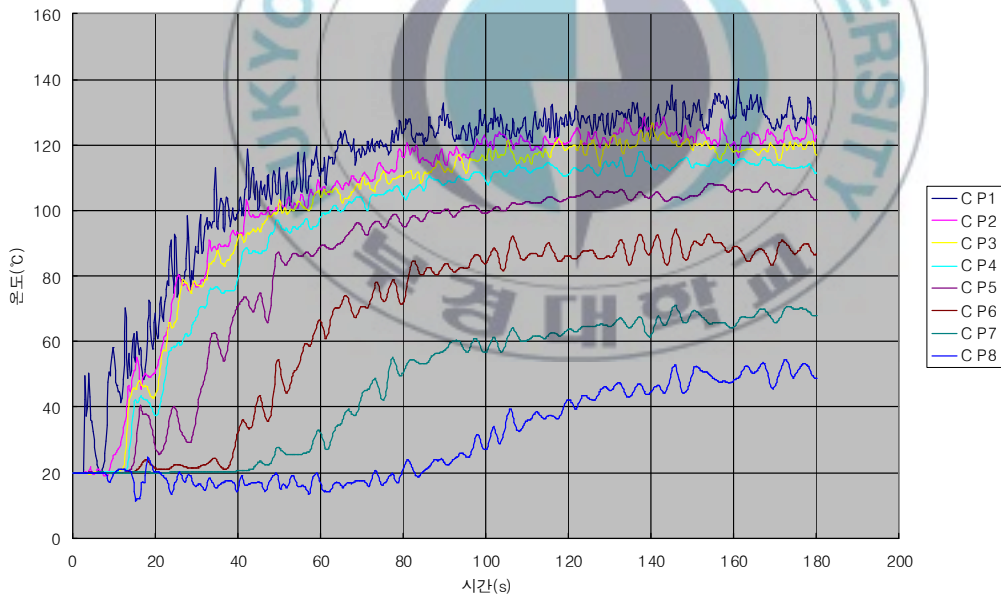


Fig. 57 Temperature variation with time (CASE II)

3.6.2 연기

발화점의 위치가 같고 출입문의 개폐 여부가 다른 CASE I 과 CASE II 을 비교하면 CASE I 에서는 $P_4 \sim P_8$ 에서는 연기농도의 변화가 거의 없고 $P_1 \sim P_3$ 에서 60(초)까지 연기가 급격히 발생하다 이후 비교적 비슷한 연기 농도를 유지한다. CASE II 의 경우는 P_8 지점부터 연기농도의 변화가 나타나며 $P_4 \sim P_8$ 에서는 연기농도가 거의 같게 나타난다.

연기의 농도가 CASE I 은 1.3m이후부터 변하지만 CASE II 는 실 전체적으로 연기가 발생한다. 또한 개구부가 개방되어 있을 때는 연기의 농도가 상승하다 어느 시점에서 일정한 농도로 유지되는데 개구부가 폐쇄되어 있을 때는 실 전체적으로 지속적으로 증가한다. 개구부가 개방됐을 때는 연기의 농도가 0.00005kg/m^3 가까이 상승하지만 개구부가 폐쇄되었을 때는 0.00011kg/m^3 이상까지 상승한다. 개구부가 개방되어 있을 때는 연기가 실 밖으로 빠져나가기 때문에 결과가 다르게 나타난다고 볼 수 있다.

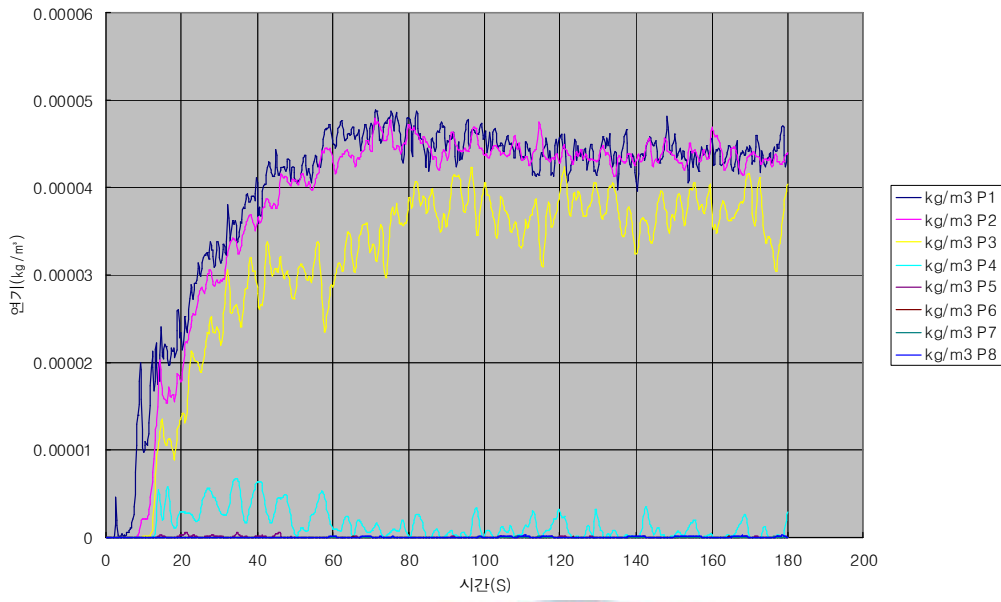


Fig. 58 Soot variation with time (CASE I)

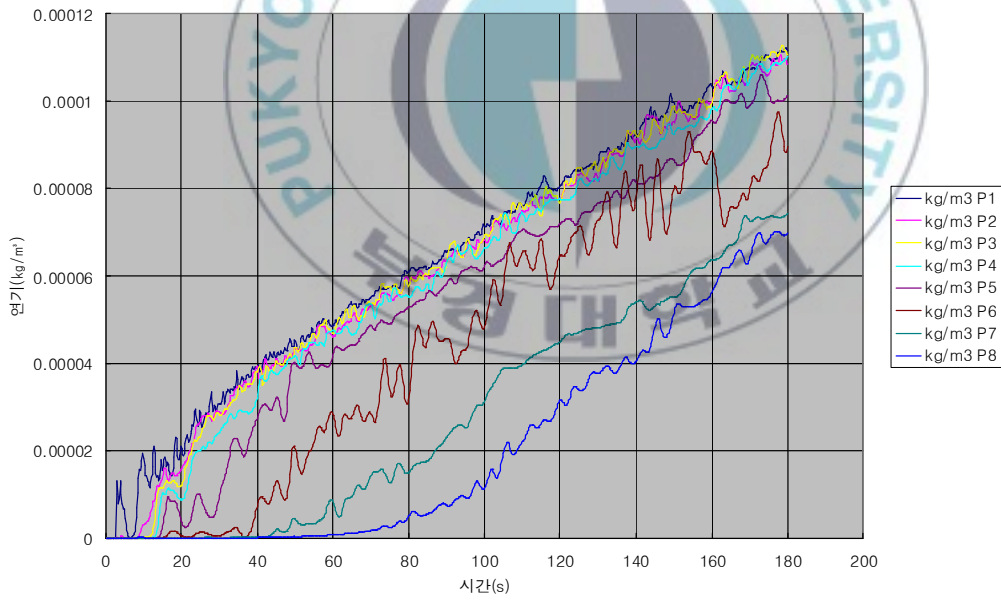


Fig. 59 Soot variation with time (CASE II)

3.6.3 이산화탄소

발화점의 위치가 같고 출입문의 개폐 여부가 다른 CASE I 과 CASE II 을 비교하면 CASE I 에서는 $P_4 \sim P_8$ 에서는 이산화탄소의 농도 변화가 거의 없고 $P_1 \sim P_3$ 에서 60(초)까지 이산화탄소가 급격히 발생하다 이후 비교적 비슷한 이산화탄소 농도를 유지한다. CASE II 의 경우는 P_8 지점부터 이산화탄소의 농도 변화가 나타나며 $P_4 \sim P_8$ 에서는 이산화탄소의 농도가 거의 같게 나타난다.

이산화탄소의 농도가 CASE I 은 1.3m 이후부터 변하지만 CASE II 는 전체적으로 이산화탄소가 발생한다. 또한 개구부가 개방되어 있을 때는 이산화탄소의 농도가 상승하다 어느 시점에서 일정한 농도로 유지되는데 개구부가 폐쇄되어 있을 때는 전체적으로 지속적으로 증가한다. 개구부가 개방됐을 때는 이산화탄소의 농도가 0.01mol/mol 이상 상승하지만 개구부가 폐쇄되었을 때는 0.025mol/mol 까지 상승한다. 개구부가 개방되어 있을 때는 이산화탄소가 실 밖으로 빠져나가기 때문에 결과가 다르게 나타난다고 볼 수 있다.

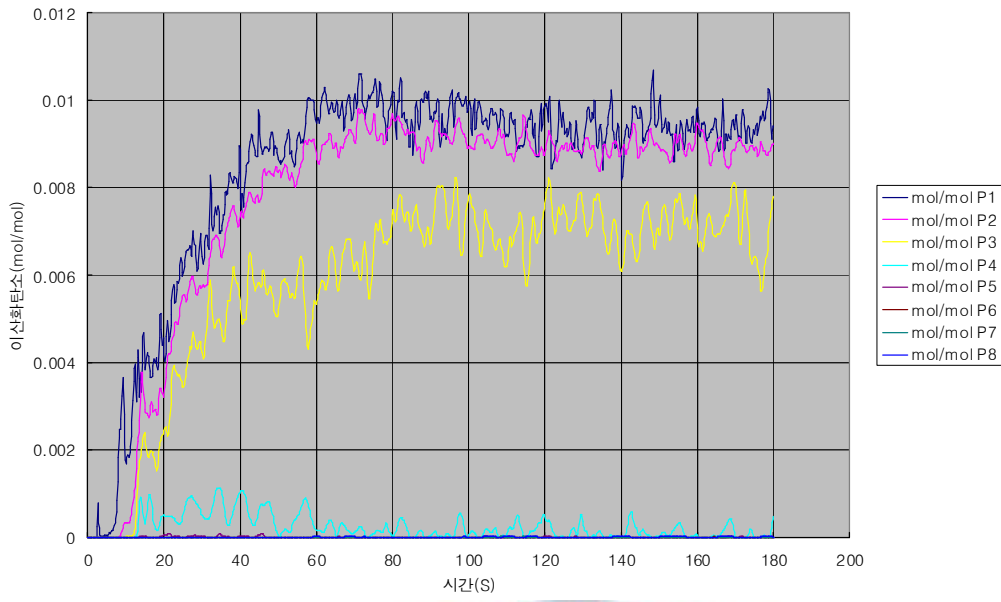


Fig. 60 Carbon dioxide variation with time (CASE I)

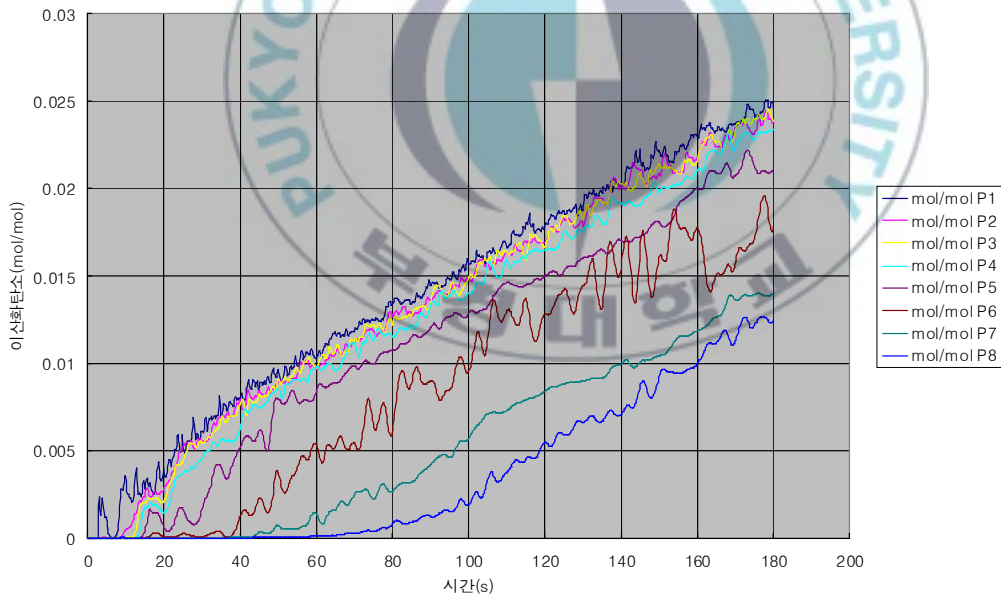


Fig. 61 Carbon dioxide variation with time (CASE II)

4. 결 론

본 연구는 발화점의 위치와 출입문의 개폐 여부에 따라 4.0m×3.0m×2.5m 크기의 가상 거실을 설정하고, 거실 내 화재발생시 시간의 변화에 따른 온도, 연기, 이산화탄소 상태변화를 알아보고, 발화점 위치와 출입문 개폐 여부의 화재 거동 관계를 알아보고자 가상 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 발화점의 위치에 따른 온도와 연기, 이산화탄소의 변화 양상이 유사하게 변화 하였고, 온도와 연기, 이산화탄소의 농도도 큰 변화가 없었다.
- 2) 출입문의 개폐 따른 경우는 출입문이 개방 되었을 때 보다 폐쇄 되었을 때가 실 전체적으로 온도 분포가 높게 나타났으며, 또한 연기, 이산화탄소의 농도도 높게 나타났다.
- 3) 출입문이 개방 되었을 때 보다 출입문이 폐쇄 되었을 때가 실 전체 퍼지는 온도와 연기, 이산화탄소의 분포 속도가 빨랐다.
- 4) 발화점 위치에 따른 경우와 출입문 개폐 여부에 따른 경우를 분석한 결과 이산화탄소 농도 분포는 연기 농도 분포와 유사하게 나타났다.

5) 시뮬레이션 시험 결과 네 가지 화재에서 발화점의 위치에 따른 온도와 연기, 이산화탄소 농도 변화가 거의 없었으며, 반면 출입문의 개폐 여부에 따른 온도와 연기, 이산화탄소의 농도는 큰 변화를 보여 화재의 양상이 다르게 나타났다. 그중에서도 발화점 위치가 출입문에서 멀고 출입문이 폐쇄되었을 때의 온도가 제일 높았으며 또한 연기, 이산화탄소의 농도도 제일 높게 나타났다.



참 고 문 헌

- 1) 소방방재청, “2005년도 전국화재통계자료 2”, pp. 48~56, 2006.
- 2) 소방방재청 방호조사관 “2008년도 전국화재현황분석결과”
- 3) 정진용, 유홍선, 이재하, 홍기배, “실내공간에서 화재 발생위치에 따른 연기거동에 대한 실험연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제5호, pp. 703~709, 2002.
- 4) 김서영, 강병하, “건물화재시 연소가스의 유동”, 공기조화냉동공학 제26권, 제6호, pp 507~515, 1997.
- 5) 문중윤, 진봉경, 이정운, 김정훈, 정기창, 김홍, “실제실험과 화재시물레이션 결과 비교연구, 한국안전학회 창립20주년 기념 학술발표회 논문집”, pp.527~532, 2006.
- 6) 추병길, 조성근, “밀폐공간내 화재에 의해 생성된 연소가스 분석 및 유동에 관한 연구”, 산업안전학회지, 제12권, 제1호, pp. 77~93, 199
- 7) 노재성, 유홍선, 정연태, “화재 발생시 연기 거동에 대한 수치해석적 연구”, 산업안전학회지, 제13권, 제1호, pp. 70~76, 1998.
- 8) 정진용, 유홍선, 이재하, 홍기배, “실내공간에서 화재 발생위치에 따른 연기거동에 대한 실험연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제5호, pp. 703~709, 2002.
- 9) 정진용, 홍기배, 이재하, 유홍선, “지하계단 화재에서 유동에 대한 실험연구”, 설비공학논문집, 제15권, 제10호, pp. 821~823, 2003.

- 10) 정진용, 유홍선, 홍기배, “실내화재에서 연기거동에 미치는 복사영향에 대한 수치해석적 연구”, 한국화재·소방학회지, 제14권, 제3호, pp, 2000.
- 11) O. Vauquelin, O. Megret, “Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel”, Fire Safety Journal, Vol. 37, pp. 525~533, 2002.
- 12) 박외철, “큰 개구부가 있는 공간의 화재와 제연의 대와류모사”, 한국화재 소방학회논문지, 제17권, 제3호, pp. 7~12, 2003.
- 13) 박외철, “제연방식과 풍량에 따른 제연성능의 수치적 연구”, 한국화재·소방학회, 제 17권, 제2호, pp. 56~61, 2003.
- 14) 박외철, 이경아, “개구부 유동이 대류에 미치는 영향에 관한 수치연구”, 한국산업안전학회지, 제 15권 제3호, pp. 52~56, 2000.
- 15) 박외철, 고경찬, 정이규, “청정화재시물레이션”, 한국안전학회 창립20주년 기념 학술발표회 논문집, pp. 197~202, 2006
- 16) 고경찬, 박외철, “FDS를 이용한 실내화재 모사의 문제점 - I. 중심형 화재”, 산업안전학회지, 제19권, 제1호, pp. 18~22, 2004.
- 17) 고경찬, 박외철, “FDS를 이용한 실내화재 모사의 문제점 - II. 벽면형 및 모서리형 화재”, 산업안전학회지, 제19권, 제3호, pp. 9~13, 2004.

The fire conduct simulation which it follows in burning point location and doorway opening and shutting

Dong-Kwan Lee

*Department of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

The research which it sees according to opening and shutting yes or no of location and the doorway of burning point set the imagination living room of 4.0m×3.0m×2.5m sizes, the s0m×3.and aandrbon dioxide changaandrstate, the tem, tae re which it follows in changaandriving room within fire occ rrenc3.at the the andrh te, it esaeined it knew it saw and aaperson imagination simulation and aasaee conclusion the fire conduct ranationship of burning point location and doorway opening and shutting yes or no and it accom,lished with afterwords it got.

1) The change aspect of the temperature which it follows in location of burning point and performance and the carbon dioxide similar, it was

under changing, there was not change where also the consistency of temperature and performance and the carbon dioxide is big.

2) Opening and shutting the doorway the case which it follows compared to, when being closed, when the doorway is opened, the thread the temperature distribution appeared whole highly, also the consistency of the smoke and the carbon dioxide appeared highly.

3) When the doorway is opened, when compared to the doorway is closed, the thread whole the distribution speed of the temperature which spreads out and performance and the carbon dioxide was quick.

4) The resultant carbon dioxide consistency distribution which analyzes the case which it follows in the case which it follows in burning point location and doorway opening and shutting yes or no smoke consistency distribution and similar, it appeared.

5) There was not a temperature which from simulation test result four kind fire it follows in location of burning point and performance and carbon dioxide consistency change almost, the consistency of the

temperature which it follows in opening and shutting yes or no of the other side doorway and performance and the carbon dioxide seemed big change and the aspect of fire appeared different. When among those the burning point location the doorway is closed distantly from the doorway, temperature first also to be high also the consistency of the smoke and the carbon dioxide appeared first highly.



감사의 글

먼저 본 논문이 나오기까지 부족한 저에게 아낌없이 열의와 성의를 다해
지도해주신 박외철 지도 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

아울러 논문이 완성되기까지 부족한 점을 보완해 주시고 더욱더 좋은 논문
이 나올 수 있도록 아낌없이 지도 심사해 주신 이내우 교수님과 최재욱 교
수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 같이 근무하는 정으로 배움의 기회를 준 직장 동료들에게도 감사드
리며 고마운 마음을 전합니다.

또한 끊임없는 사랑과 믿음으로 격려해 주시는 어머니, 작은아버지, 작은어
머니, 장모님께 감사드리며 이쁜 우리 딸 은서와 현서 그리고 힘든 생활
중에 무거운 짐을 묵묵히 나누어 짊어져준 나의 아내에게 이 작은 기쁨을
나누고자 합니다.

끝으로 이 논문을 무사히 끝낼 수 있도록 뒤에서 지켜봐 주신 모든 분들께
정말 감사드립니다.

2010년 02월 일

이 동 관