

폐쇄공간 화재 발생시 온도 및 연소산화물의 분포에 관한 모델 해석

차형석¹⁾ · 이희근²⁾

A Numerical Analysis of the Distribution of Temperature and Combustion Products in case of Compartment Fire

Hyoung-Seog Cha and Hi-Keun Lee

ABSTRACT The first purpose of this study is to verify the application of computer modelling to a enclosed space fire. The second one is to determine temperature distribution for the three different ventilation types in case of a enclosed space fire. The third one is to find out the ventilation direction and ventilation quantity to remove effectively heat and combustion products generated by a fire in variable air volume(VAV) system. Firstly, compared with experimental results of Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), numerical results show good agreements. Secondly, among three different ventilation types, the numerical analyses show the highest temperature distribution in occupied zone (up to 1.8 m from bottom) from firing moment to 100 sec. when supply ducts are placed in ceiling and extract duct is placed close to the bottom on side walls. This is due to disadvantageous position of extract duct in ventilating high temperature air which rise because of buoyancy force. Thirdly, this study finds out effective ventilation direction and ventilation quantity to remove heat and combustion products generated by a fire by using VAV system. CO₂ concentration is used as a fire fume removal index. As soon as a fire happens, ventilation direction is changed in order to gather and drive out fire fumes. In case of three times ventilation quantity of ordinary one, CO₂ concentration and temperature have begun to decrease at 120 sec. after firing, i.e. fire fumes have begun to be removed.

1. 서 론

지하공간과 같이 폐쇄된 공간에서 화재가 일어날 경우에는 방향감각을 상실하기 쉽고, 또 위치확인이 어려워 패닉현상이 발생하기 쉽다. 또한 지하공간은 무창(無窓)의 공간이기 때문에 화재시 지하내부에 연기가 축만하게 되고 용이하게 배출할 수가 없다. 또한 주간 일지라도 지하내부는 암흑상태가 될 수 있다. 창(窓)을 통한 소화 및 구조활동을 할 수 없고 화재의 상황을 파악할 수도 없다.¹⁾

그러므로 복잡·다양화되는 지하생활공간에서 환경 및 방재 안전상의 대책마련을 위해서는 최적 환기 시스템과 첨단방재 안전 시스템의 연구개발이 절실히 요청되고 있다.

본 논문에서는 지하공간 화재 모델링의 기초로서 폐쇄공간 화재에 대한 컴퓨터 모델링의 적용가능성을 검

증하였다. 그리고 폐쇄된 공간에서 화재가 일어난 경우에 환기구의 위치에 따른 온도분포를 모델링하였고, 또한 가변환기 방식에서는 화재시에 발생하는 고온의 열과 연소 산화물을 효과적으로 제거할 수 있는 환기량을 구하고자 하였다.

폐쇄공간 화재시에 시간에 따른 온도의 분포가 환기구의 위치에 따라서 어떻게 달라지는가를 알아보기 위해서

1) 미국 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)에서 실험한 결과를 이용하여 컴퓨터 모델링의 적용 가능성을 검증하였다.

2) 화재시 환기방식에 따른 온도의 분포를 알아보기 위해서 3가지 환기방식을 서로 비교해 보았다.(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 참조)

1) 서울대학교 자원공학과 석사 졸업
2) 서울대학교 자원공학과 교수

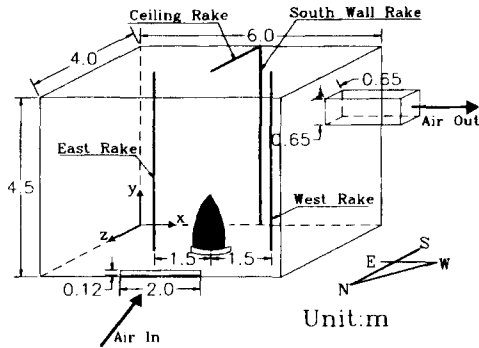


Fig. 1. Schematic diagram of Lawrence Livermore Test Cell

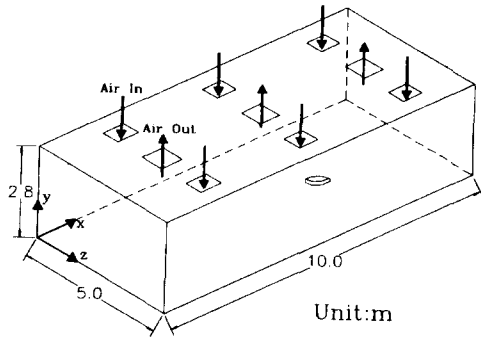


Fig. 4. VAV Ventilation system

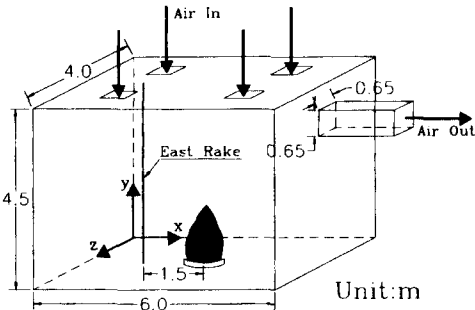


Fig. 2. Schematic diagram of Case 2

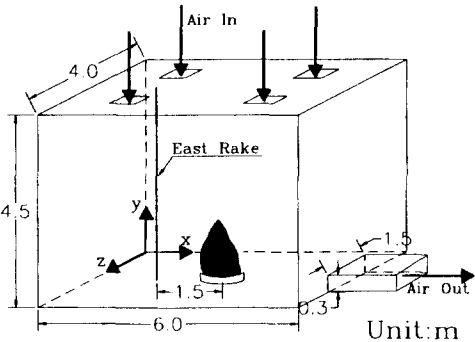


Fig. 3. Schematic diagram of Case 3

다음으로 가변환기 방식에서 화재로 인한 고온의 열과 연소 산화물을 효과적으로 제거할 수 있는 환기량을 구하고자 하였다. 이를 위해서 10.0 m(너비)×2.8 m(높이)×5.0 m(깊이)의 가상의 지하공간(Fig. 4)에서 화재가 발생했을 때에 환기 방향 및 환기량을 조절하여 고온의 열과 연소산화물(CO₂)을 효과적으로 외부로 배출시키는 과정을 모델링하였다. 화재시에 생기는 매연은 연소물질의 종류, 산소의 농도 등에 따라서 달라지게

되는데 본 연구에서는 완전연소를 가정하여 CO₂의 농도를 매연 제거의 지표로 삼았다.

2. 해석 모델

2.1 모델의 선정

3차원 폐쇄공간 내의 열전달과 화학종의 발생량을 예측하기 위해서 난류 연소반응 모델(Eddy Breakup model)을 이용하였고, 난류 모델은 표준 k-ε 모델을 이용하였다. 화학 반응식은 아이소프로필 알콜의 일단계 완전 연소를 가정하였다.

기상에서의 지배 방정식은 질량 보존식, 운동량 보존 방정식, 엔탈피 보존 방정식을 기초로 하여 난류에 의한 운동량의 전달과 물질확산을 고려하였다. 기체 유동에서 압력과 부피 상관 관계식은 이상기체 상태 방정식을 적용하였다. 복사모델로는 DTRM(Discrete Transfer Radiation Model)을 사용하였다.

수치해석을 위해서 상업적 유체역학 코드인 Fluent 4.31(Field Model)을 사용하였으며 3차원 모델링을 수행하였다.

2.2 실험과 수치해석 결과의 비교(검증 단계)

우선 화재의 컴퓨터 모델링을 검증하는 단계로서 LLNL에서 실험한 결과를 수치해석의 결과와 비교하였다. LLNL의 Alvares는 연료와 환기량을 변화시키면서 여러 가지의 실험을 하였는데 여기서는 그 중에서 Mod 8 이라고 명명된 실험을 수치해석의 대상으로 하였다.⁹⁾

측벽 하부에 위치한 급기구를 통하여 공기가 들어가고, 이곳에서의 압력은 대기압이다. 천정에 가까운 벽쪽에 위치한 배기구에서 팬(fan)을 이용하여 방안의 공

기를 배출하고 있다.(Fig. 1. 참조)

실험실 바닥 한가운데에 위치한 지름 0.91 m의 철제 접시(steel pan)의 한가운데에 있는 제트 노즐(jet nozzle)로부터 아이소 프로필 알콜(isopropyl alcohol)의 스프레이(spray)가 생성되어서 나온다. 이 액상의 스프레이는 곧바로 기화해서 연소하게 된다. 연료의 주입속도는 13.1 g/sec로 일정하고, 완전 연소를 가정하면 400 kW의 일정한 연소열이 생성된다. 즉, 방 한가운데에 위치한 철제 접시에서 연료가 일정하게 연소해서 400 kW의 열과 연소 산화물이 생성되고, 벽면이나 방바닥으로 화재가 확산되지는 않는다.

화재가 일어나서 약 20분 후에 어느 정도 정상상태(quasi-steady state)에 이르렀을 때에 배기구에서 팬을 통한 공기 배출량은 400 (liter/sec.)가 되었다.

위의 실험을 수치해석으로 모델링하기 위해서 다음과 같이 하였다.

공기를 공급하는 급기구는 Velocity Inlet(즉 공기가 일정한 속도를 갖고 방으로 들어온다)으로 하였으며 공기의 속도는 0.883286(m/s), 온도는 290 K로 하였다. 즉 212 liter/sec(257 g/sec)의 공기가 급기구를 통하여 들어온다.^{3,4)} 배기구는 Outlet(fully developed flow)으로 하였다.⁴⁾

화재를 모델링하기 위해서 아이소 프로필 알콜(isopropyl alcohol)의 일단계 완전연소를 가정하였다.

2.3 화재시 환기 방식에 따른 온도 분포에 관한 모델링

• Case 1 > 급기구의 위치가 방의 하부에 있고 배기구는 방의 상부에 위치하는 경우

Case 1에 대한 모델링에서 모델의 형상 및 크기는 위의 검증단계에서 사용한 것과 동일하다.(Fig. 1. 참조)

시간에 따른 온도 변화를 살펴보기 위하여 초기 조건으로는 화재가 일어나지 않은 상태, 즉 공기의 흐름만 있는 상태(cold flow)로 하였다.

온도를 측정할 곳은 화재지점에서 동쪽으로 1.5 m 떨어진 east rake(x=1.5 m, y=0.0~4.5 m, z=2.0 m)에서 측정하였다.(Fig. 1. 참조) 사용한 경계조건과 물성치는 위 검증단계에서 사용한 것과 동일하다.

• Case 2 > 급기구, 배기구 모두 방 상부에 위치하는 경우

천정에 위치한 4개의 급기구로부터 공기가 공급되고, 배기구의 위치는 Case 1에서의 위치와 같이 측벽 상부

에 위치하고 있다. 온도를 측정할 곳은 Case 1의 경우와 같이 화재지점에서 동쪽으로 1.5 m 떨어진 east rake(x=1.5 m, y=0.0~4.5 m, z=2.0 m)에서 측정하였다.(Fig. 2. 참조)

• Case 3 > 급기구는 방 상부에, 배기구는 방 하부에 위치하는 경우

천정에 위치한 4개의 급기구로부터 공기가 공급되고, 배기구의 위치는 측벽 하부에 위치하고 있다.(Fig. 3. 참조) 온도를 측정할 곳은 Case 1, 2의 경우와 같다.

2.4 가변환기 방식을 이용하여 화재시 발생하는 고온의 열과 연소 산화물을 제거하기 위한 모델링

Fig. 4와 같은 가상의 지하공간에서 화재가 발생했을 경우에 연소 산화물과 고온의 열을 효과적으로 제거하기 위한 환기량을 구하고자 하였다.

화재는 x=6.0 m, y=0.1 m, z=2.5 m인 지점에서 아이소프로판올 1.703 g/sec이 완전 연소하여 52 kW의 열과 5.57 g/sec의 연소 산화물(H₂O와 CO₂)이 발생한다고 가정하였다. 연소 산화물로서 CO 대신에 CO₂를 대상으로 삼은 이유는 폐쇄공간 화재 모델링에서 CO 발생을 나타내는 불완전 단단계 반응을 나타내는 데에 어려움이 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 CO₂의 농도를 매연제거의 지표로 삼았다.

화재는 시간 t=0에 발생하여 일정하게 열과 연소 산화물을 발생시킨다고 가정하였다. 즉, 화재가 바닥이나 벽을 통해 번져 나가지 않고 일정하게 열과 연소 산화물을 발생시킨다고 가정하였다.

수치해석은 3가지 경우에 대해서 실시하였다.(Table 1 참조)

두번째(VAV-2)와 세번째(VAV-3)의 경우에 화재 발생과 동시에 환기 방향을 Fig. 4에서 Fig. 5로 바꾸는 이유는 x=6.0 m, y=0.1 m, z=2.5 m에서 발생한 화재로 인한 고온의 열과 연소 산화물을 지하공간의 한쪽으

Table 1. 3 Cases of numerical analyses

Case	Ventilation Method		Air Quantity of Ventilation	
	Before Fire	After Fire	Before Fire	After Fire
VAV-1	Fig. 4	Fig. 4	300 l/sec	300 l/sec
VAV-2	Fig. 4	Fig. 5	300 l/sec	300 l/sec
VAV-3	Fig. 4	Fig. 5	300 l/sec	900 l/sec

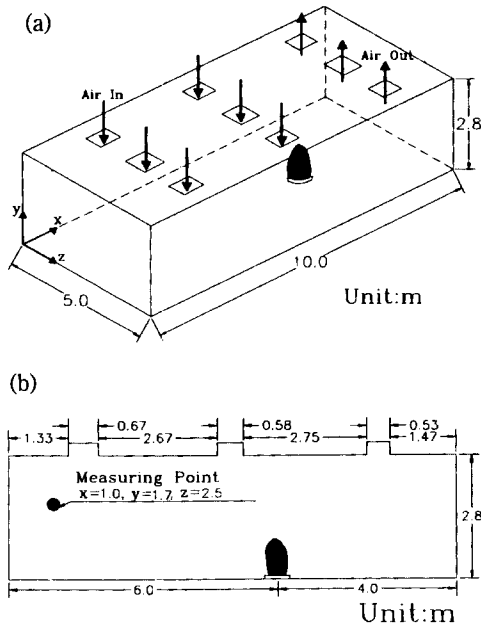


Fig. 5. VAV Ventilation system
(a) Isometric view, (b) Cross section of $z=2.5$ m

로 몰아서 배출시키기 위함이다.¹⁰⁾

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 검증의 결과(LLNL의 실험결과와 수치해석 결과의 비교)

LLNL의 Alvares의 실험에서 온도를 측정한 곳은 남쪽 벽(급기구의 맞은편 벽)과 천정, 그리고 화재지점에서 동쪽으로 1.5 m 떨어진 곳(east rake)과, 화재 지점에서 서쪽으로 1.5 m 떨어진 곳(west rake)이다.(Fig. 1. 참조)

실험에서 측정한 값과 수치해석 결과를 비교한 것이 Fig. 6부터 Fig. 9 까지이다. 전체적으로 수치해석 결과가 실험값과 잘 부합하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(a)는 $z=2.0$ m 단면에서 수치해석으로 예측된 온도 분포도이다. Fig. 10(b)는 $x=3.0$ m 단면에서 수치해석으로 예측된 온도 분포도이다. Fig. 10(b)를 보면 공기가 북쪽벽 하부에 위치한 급기구에서 공급되므로 온도분포(혹은 불꽃(flame))가 뒤(남쪽)로 약간 기울어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 10(a)의 불꽃 높이가 Fig. 10(b)의 불꽃 높이보다 약간 낮음을 알 수 있다.

Fig. 11(a)는 $z=2.0$ m 단면에서 수치해석으로 예측된 CO_2 분포도이다. Fig. 11(b)는 $x=3.0$ m 단면에서

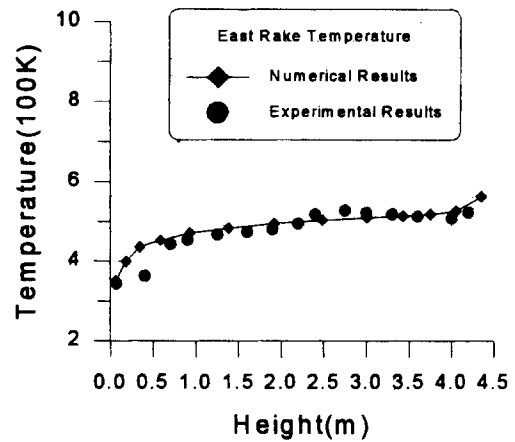


Fig. 6. Temperature of east rake located at $x=1.5$ m, $y=0.0$ m~4.5 m, $z=2.0$ m

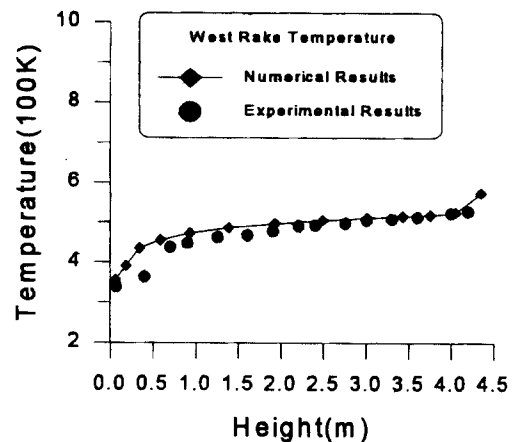


Fig. 7. Temperature of west rake located at $x=4.5$ m, $y=0.0$ m~4.5 m, $z=2.0$ m

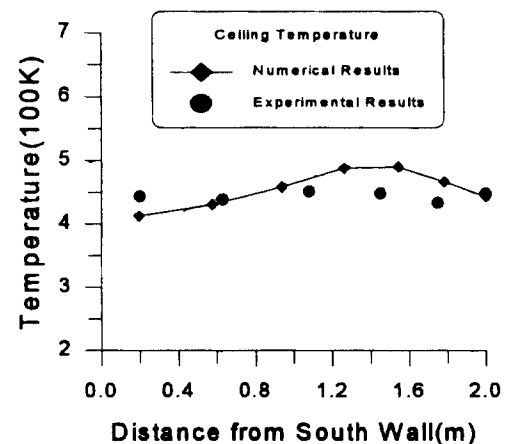


Fig. 8. Ceiling rake temperature from $z=0.0$ m to $z=2.0$ m.

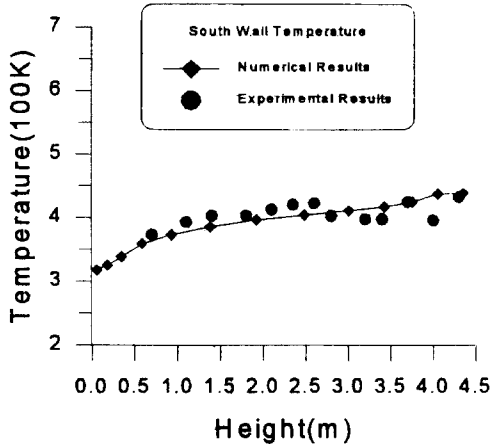


Fig. 9. South wall rake temperature located at x=3.0 m, y=0.0 m~4.5 m, z=0.0 m

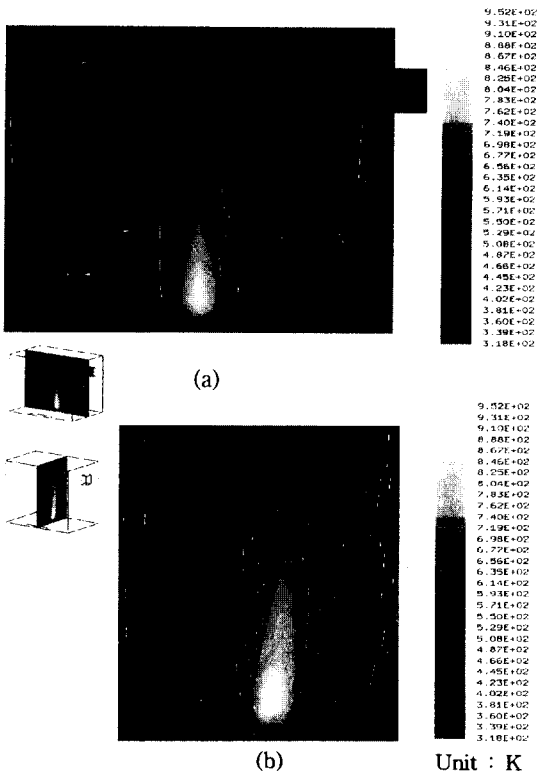


Fig. 10. Contour of temperature at z=2.0 m (a) and x=3.0 m (b)

수치해석으로 예측된 CO₂ 분포도이다.

Table 2는 실험과 수치해석 결과를 비교한 것이다. 실험에서 급기구를 통하여 방으로 들어간 공기의 무게가 배기구를 통하여 나간 공기의 무게보다 큰 것은 방

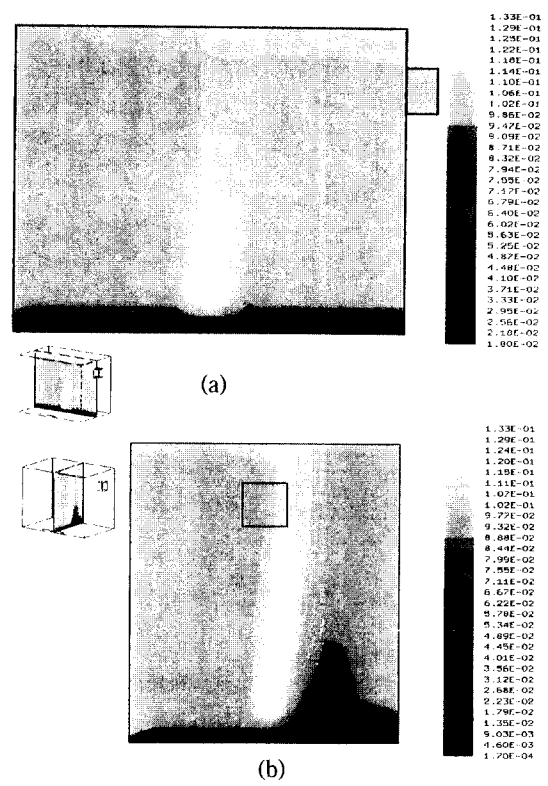


Fig. 11. Contour of CO₂ mass fraction at z=2.0 m (a) and x=3.0 m (b)

Table 2. Comparison of some integral properties

Property	Experiment results	Numerical analyses results
Mass inflow rate(kg/s)	0.30	0.257
Mass outflow rate(kg/s)	0.24	0.2701
Exit CO ₂ concentration (Volume %)	5.5	7.1

안의 누기(leakage)때문이다.⁴⁾ 수치해석에서는 실험에서의 입기량(0.30 kg/sec)과 배기량(0.24 kg/sec)을 고려하여 입기량을 0.257 kg/sec로 하였다.⁴⁾ 배기구를 통하여 나간 공기중의 CO₂(Exit CO₂ Concentration)의 부피비(volume percent)와 실험값과의 차이는 실제 실험에서는 다단계 반응을 통하여 반응이 일어나는데 비하여 수치해석에서는 일단계 완전 연소를 가정하였기 때문이라고 판단된다.⁴⁾

3.2 화재시 환기 방식에 따른 온도 분포에 관한 모델링(위 2.3에 대한 결과)

Q=400 kW, 방의 높이 H=4.5 m인 경우에 대해 3가지 환기 방식(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3. 참조)을 비교하였다.

Fig. 12부터 Fig. 14까지는 3가지 경우에 대해서 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 온도를 측정 한 지점은 화재가 발생한 곳에서 동쪽으로 1.5 m 떨어진 곳(east rake)이다.(x=1.5 m, y=0~4.5 m, z=2.0 m. Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3. 참조)

Fig. 12부터 Fig. 14에서 알 수 있듯이 Case 3의 경우가 모든 시간(t=0~100 sec)에서 거주역(바닥에서부터 약 1.8 m 이하)에서의 온도가 제일 높음을 알 수 있다. 이는 Case 3의 경우에는 배기구가 방 하부에 있음

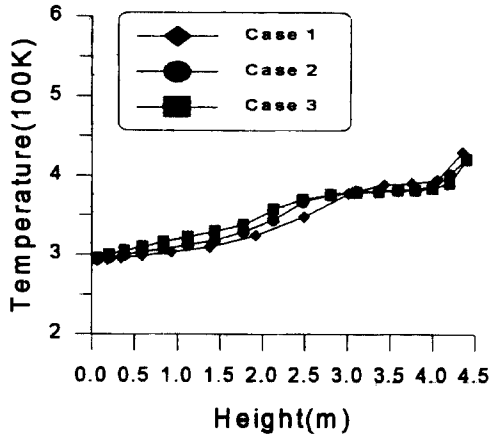


Fig. 12. Temperature at east rake (Q=400 kW, H(room height)=4.5 m, time=20 sec)

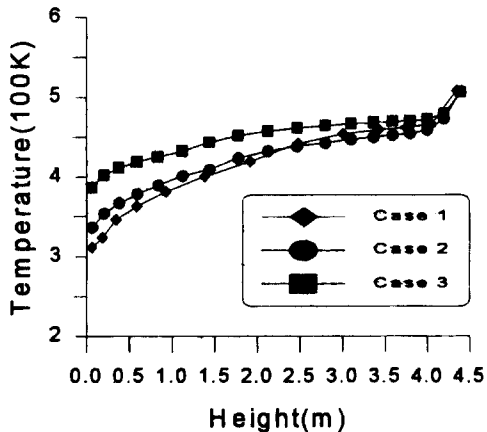


Fig. 13. Temperature at east rake (Q=400 kW, H(room height)=4.5 m, time=60 sec)

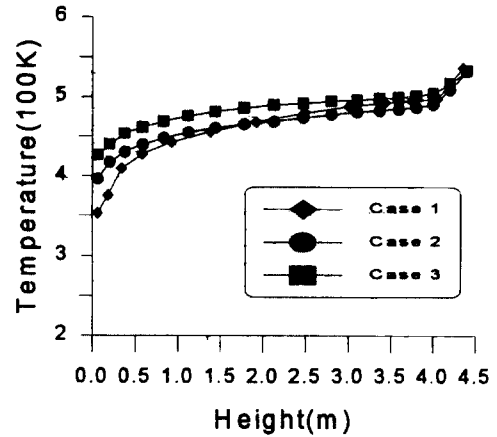


Fig. 14. Temperature at east rake (Q=400 kW, H(room height)=4.5 m, time=100 sec)

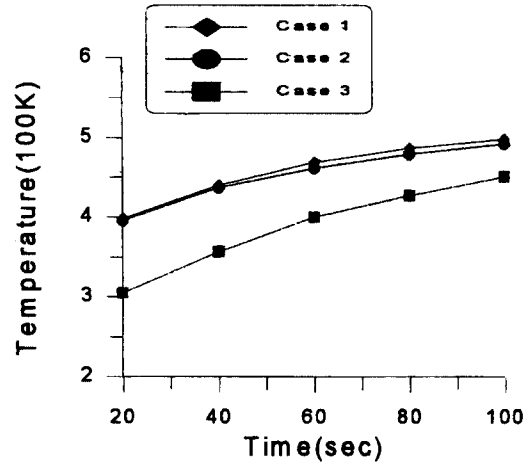


Fig. 15. Outlet temperature vs. time (Q=400 kW, H(room height)=4.5 m)

으로 해서 화재로 뜨거워진 공기가 밖으로 효율적으로 배출되지 못하기 때문이라고 판단된다. Fig. 15는 배기 구에서 배출되는 공기의 평균온도를 시간에 따라 나타 낸 그림이다. 화재시에 뜨거운 공기는 방 상부로 올라 가게 되는데 Case 3의 경우에는 배기구가 방 하부에 있음으로 인해서 화재로 뜨거워진 공기를 효과적으로 배출하지 못하고 있음을 알 수 있다.

한편 Case 1의 경우에는 차가운 바깥의 공기(outdoor air)가 방하부에서 들어옴에 따라서 방 하부의 온도는 3가지 경우 중에서 가장 낮음을 알 수 있다.

Case 2는 급기구의 위치가 방 천정에 있음으로 해서 방 하부의 온도는 Case 1의 경우보다 높지만 방 상부

의 온도는 Case 1의 경우보다 낮음을 알 수 있다.

방의 높이가 온도 분포에 미치는 영향을 알아보기 위

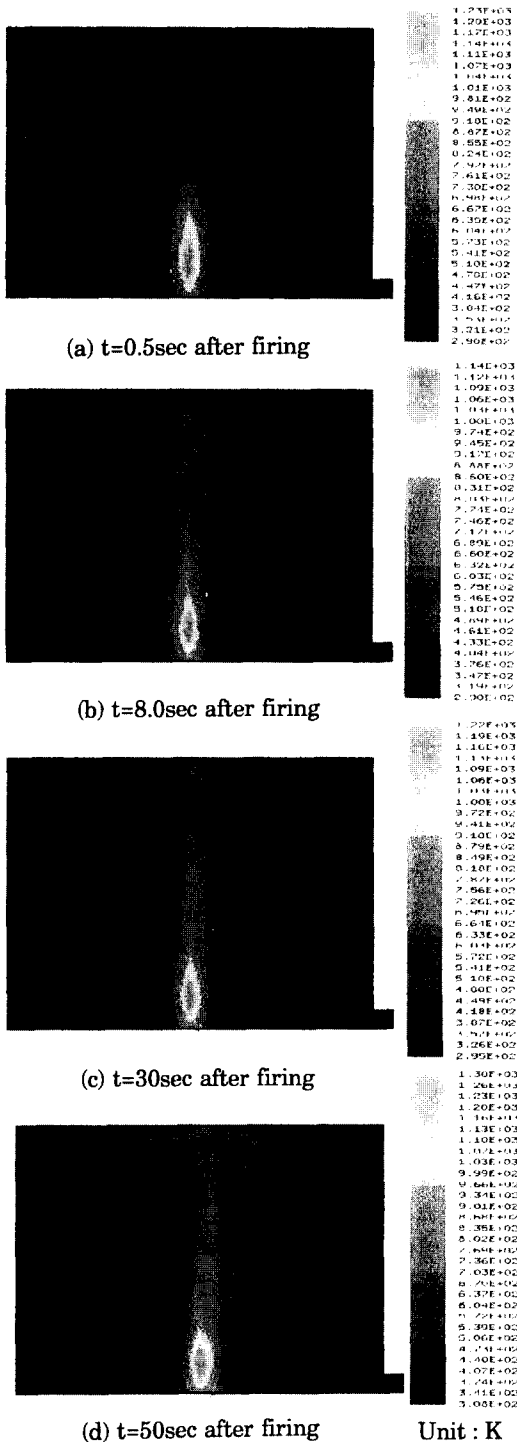


Fig. 16. Temperature distribution after firing

해서 방의 높이 H 를 4.5 m에서 3.0 m로 낮추어 보았다. 결과의 경향은 방의 높이 $H=4.5$ m 일때와 같음을 알 수 있었다.

화재의 규모(Q 의 크기)가 온도 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해서 화재의 규모를 $Q=400$ kW에서 $Q=200$ kW로 줄여서 3가지 환기 방식에 대해서 결과를 얻었다(즉 화재의 규모 $Q=200$ kW, 방의 높이 $H=3.0$ m). 결과의 경향은 위 400 kW의 경우와 같은 결과를 보였다.

Fig. 16은 시간에 따른 온도 변화를 $z=2.0$ m 단면에서 나타낸 그림이다.(화재의 규모 $Q=400$ kW, 방의 높이 $H=4.5$ m. 즉 Case 3, Fig. 3. 참조)

$t=0$ sec에서 화재가 발생하였고, 뜨거운 공기는 천정에 도달할 때까지 계속 상승하고, 천정에 도달한 후에는 수평으로 이동하게 되는 흐름(Ceiling Jet)이 형성되고 있음을 알 수 있다. 시간이 흐름에 따라서 이러한 뜨거운 공기층은 점차 하강하게 되어 거주자로 하여금 패닉현상을 야기 시킬 뿐만 아니라 인체에 직접적인 위험을 주게 된다.

3.3 가변환기 방식을 이용하여 화재시 발생하는 고온의 열과 연소 산화물을 제거하기 위한 모델링(위 2.4에 대한 결과)

Fig. 4와 같은 가상의 지하공간에서 화재가 발생했을 경우에 연소 산화물과 고온의 열을 효과적으로 제거하기 위한 환기량을 구하고자 하였다. 본 연구에서는 연소물질의 완전연소를 가정하여 CO_2 의 농도(질량분율)를 매연 제거의 지표로 삼았다.

Fig. 17은 각 경우(VAV-1, VAV-2, VAV-3)에 대해서 화재후 120초 일때 CO_2 의 농도(질량분율)를 $z=2.7$ m 단면에 대해서 나타낸 것이다.

Fig. 17에서 (a)와 (b)를 비교해 보면 (a)는 화재 전과 화재 후의 환기 방식(Fig. 4)이 같고 환기량(300 l/sec)도 화재 전과 화재 후가 같은 경우(VAV-1)로서 연소 산화물인 CO_2 가 폐쇄공간의 전 범위에 걸쳐 확산되어 있음을 알 수 있다. 이에 비해서 (b)는 CO_2 가 폐쇄공간의 한쪽으로 몰려 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 $y=2.61$ m 단면에 대해서 CO_2 의 질량분율을 나타낸 그림인 Fig. 18을 보면 더욱 확실해진다.

Fig. 17에서 (b)와 (c)를 비교해 보면 (c)는 (b)보다 환기량이 3배인 900 l/sec인 경우로서 CO_2 가 차지하는 질량분율(mass fraction)이 (b)보다 작음을 알 수 있다.

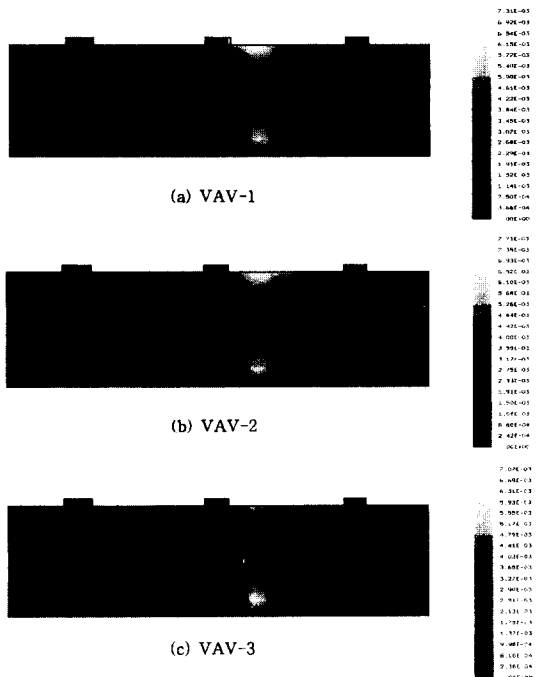


Fig. 17. CO₂ mass fraction contour at 120 sec after fire (cross section of z=2.7 m)

Fig. 19와 Fig. 20은 $x=1.0\text{ m}$, $y=1.7\text{ m}$, $z=2.5\text{ m}$ 지점의 시간에 따른 온도 및 CO₂ 질량분율의 변화를 나타낸 것이다.(Fig. 5(b) 참조) 온도 및 CO₂ 질량분율의 측정점을 $x=1.0\text{ m}$, $y=1.7\text{ m}$, $z=2.5\text{ m}$ 지점으로 한 이유는 화재가 나면 폐쇄된 공간속의 사람들은 최대한 화재가 난 곳에서 멀리 떨어져 있으려 하기 때문이다. 그리고 사람 키를 약 1.7m로 보았다. VAV-1인 경우와 VAV-2인 경우는 $t=180\text{ 초}$ 까지 온도 및 CO₂ 질량분율이 계속 증가하고 있음을 알 수 있다.(즉 매연의 농도가 계속 증가하고 있다고 판단할 수 있다.) 그러나, VAV-3의 경우에는 CO₂의 질량 분율이 $t=120\text{ 초}$ 일 때 0.12%를 정점으로 그 이후에는 조금씩 감소함을 알 수 있다.(즉 매연이 제거되고 있음을 알 수 있었다.) 온도도 $t=120\text{ 초}$ 일 때를 최고 온도(약 39°C)로 하여 그 이후에는 조금씩 감소하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

지하공간과 같은 폐쇄된 공간에서 화재가 발생한 경우에는 매연과 고온의 열을 효율적으로 외부로 배출시킴으로써 인명 및 재산 피해를 최소화 해야 한다. 이를

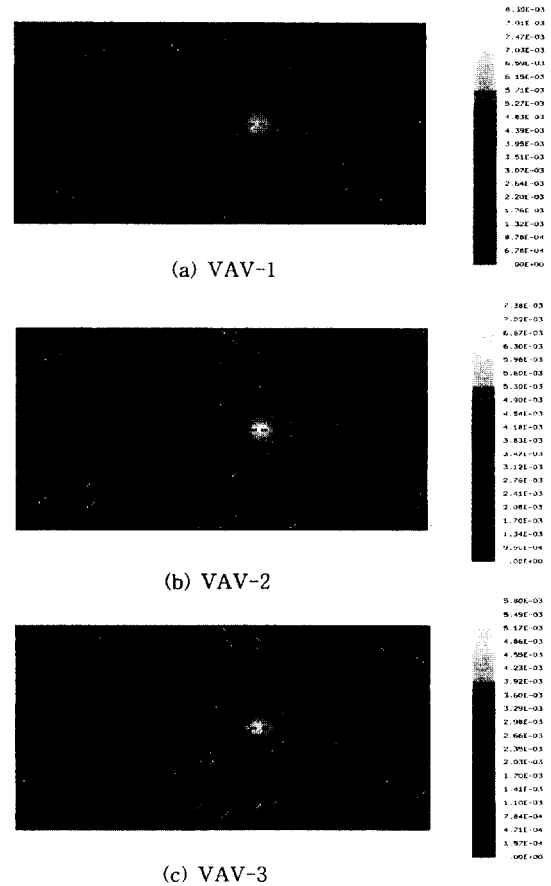


Fig. 18. CO₂ mass fraction contour at 120 sec after fire (cross section of y=2.61 m)

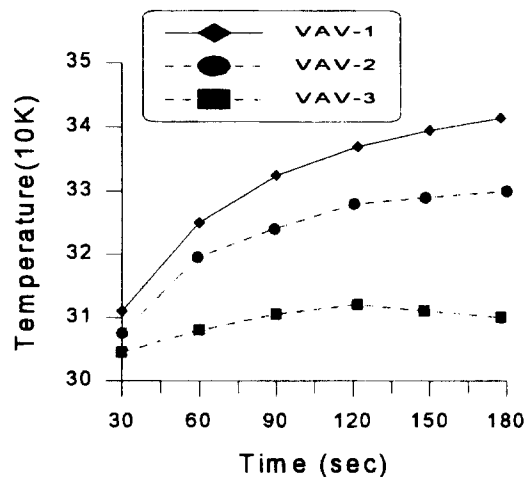


Fig. 19. Temperature at $x=1.0\text{ m}$, $y=1.7\text{ m}$, $z=2.5\text{ m}$

위해서 본 연구에서는 첫째, 유체 및 열전달 해석 프로

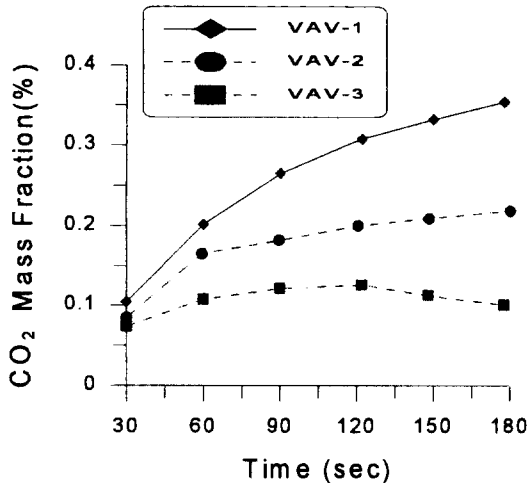


Fig. 20. CO₂ mass fraction(%) at x=1.0 m, y=1.7 m, z=2.5 m

그램인 FLUENT의 화재 모델링에의 적용가능성을 검증하였다. 둘째, 폐쇄된 공간에서 화재 발생시에 환기구 위치에 따라 시간에 따른 온도 분포가 어떻게 달라지는가를 모델링하였다. 셋째, 가변환기 시스템을 이용하여 폐쇄된 지하공간의 화재시에 발생하는 고온의 열과 연소산화물을 효율적으로 제거하기 위한 환기량을 구하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수치해석으로 얻어진 결과와 LLNL의 Alvares의 실험결과를 비교한 결과 유체 및 열전달 해석 프로그램인 FLUENT를 화재 모델링에 적용 가능함을 알 수 있었다.

2) 폐쇄된 공간에서 화재 발생시에 환기구 위치에 따라 시간에 따른 온도 분포가 어떻게 달라지는가를 모델링하였다. 수치해석의 3가지 경우 중에서 급기구는 천정에, 배기구는 측벽 하부에 위치(Case 3, Fig. 3. 참조)하는 경우가 화재 발생 직후부터 100초 사이에 거주역(바닥에서부터 약 1.8 m 이하)에서의 온도가 가장 높게 나타났다. 이는 화재시에 발생하는 고온의 뜨거운 공기는 위로 상승하는데 배기구는 방 하부에 있기 때문에 고온의 열을 효과적으로 외부로 배출시키는 데에 불리하기 때문이라고 판단된다.

3) 화재 발생 후 뜨거워진 고온의 공기는 천정에 도

달할 때까지 계속 상승하고, 천정에 도달한 후에는 수평으로 이동하게 되는 흐름(Ceiling Jet)이 형성되고 있음을 알 수 있었다. 시간이 흐름에 따라서 뜨거운 공기층의 두께는 두꺼워지고 이러한 뜨거운 공기층은 점차 하강하게 됨을 알 수 있었다.

4) 화재시에 발생하는 고온의 열과 연소 산화물을 가변환기 시스템을 이용하여 제거하는 모델링을 3가지 경우로 나누어서 하였다. 본 연구에서는 완전연소를 가정하여 CO₂의 농도(질량분율)를 매연제거의 지표로 삼았다.

화재 발생과 동시에 환기방향을 변화시키고(Fig. 4의 환기방식에서 Fig. 5의 환기방식으로 바꾼다.) 환기량을 화재전의 3배로 늘인 경우에 화재발생 후 120초 일 때를 정점으로 그 이후에는 CO₂의 농도와 온도가 낮아짐을 알 수 있었다. 즉, 매연이 제거되고 있다고 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, 1994, 지하생활공간 개발 요소 기술 연구(환기 및 방재 기술분야).
2. 서승직, 1996, 건축설비, 일진사.
3. N. J. Alvares, K. L. Foote, P. J. Pangi. 1984, Forced Ventilated Enclosure Fires. Combustion Science and Technology, Vol. 39, pp. 55-81.
4. G. Cox, S. Kumar. 1987, Field Modelling of Fire in Forced Ventilated Enclosures. Combustion Science and Technology, Vol. 52, pp. 7-23.
5. B. F. Magnussen, B. H. Hjertager. 1976, On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion With Special Emphasis On Soot Formation And Combustion. 16th Symposium (International) on combustion. The Combustion Institute, pp. 719-729.
6. H. K. Versteeg, W. Malalasekera. 1995, An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Longman scientific & Technical.
7. G. Cox. 1995, Combustion Fundamentals of Fire. Academic Press.
8. Suhas V. Patankar. 1980, Numerical Heat transfer and Fluid Flow. McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
9. P. L. Martin, D. R. Oughton, 1995, Heating & Air Conditioning of Buildings, Butterworth Heinemann.
10. Raymond L. Sterling and John Carmody, 1993, Underground space design, VAN NOSTRAND REINHOLD.