



## 불활성가스 미분무소화설비의 개발 - 화재시험실의 급기에 관한 수치연구 -

정이규 · \*박외철\*

한국해양수산연수원, \*부경대학교 안전공학부  
(2007년 10월 29일 접수, 2008년 3월 4일 채택)

## Development of an Inert Gas Water Mist System - A Numerical Study on Ventilation of the Fire Test Room -

Lee-Gyu Jeong · \*Woe-Chul Park\*

Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 608-080, Korea  
\*Division of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea  
(Received October 29, 2007, Accepted March 4, 2008)

### 요 약

불활성가스 미분무소화설비의 실험용으로 제작된 2.5 m×2.0 m×2.5 m 크기의 화재시험실에 급기부족 여부를 확인하기 위해, 화재시험실 내 프로판가스 풀(pool) 화재에 대한 수치연구를 수행하였다. 결과의 일관성을 확인하기 위해 설계 화재규모인 60 kW와 그 2배인 120 kW에 대하여 창문의 개폐에 따른 온도 및 일산화탄소 농도의 변화를 조사하였다. 두 화재규모에서 모두 창문의 개폐가 온도 및 CO농도의 변화에 미치는 영향이 작음을 확인하였고, 따라서 급기부족의 발생이 없음을 알 수 있었다.

**Abstract** - A Numerical study was carried out for a propane gas pool fire in the fire test room of 2.5 m×2.0 m×2.5 m for testing a inert gas water mist system, to investigate a possible under-ventilation in the fire test room. For the fire sizes of 60 kW and 120 kW, changes in the temperature and CO concentration with and without a window were investigated. It was confirmed that the influence of the window on the distributions of temperature and CO concentration was small in the two fire sizes, and hence the under-ventilation was not occurred in the room.

**Key words:** Fire test room, Fire simulations, Temperature, Carbon monoxide, Under-ventilation

### I 서 론

할론소화약제의 사용이 금지됨에 따라 청정소화약제 소화설비뿐만 아니라 물분무소화설비의 사용도 증가될 것으로 기대된다. 물분무소화설비와 유사한 미분무소화설비는 물 입자가 기류의 영향을 받아 화점에 도달하기 어려운 단점이 있지만, 물분무소화설비에 비해 열전달률이 높고 물의 사용량이 적다. 국내에는 아직 미분무소화설비에 관한 기준이 없으나 NFPA 750[1]에는 기준이 이미 제정되어 있다.

한편, 미분무소화설비에 물 대신 불활성가스와 물을 함께 사용하면, 물의 냉각효과에 Inergen의 질식효과를 추가함으로써 소화효과를 높이고 물 입자에 대한 기류

의 영향을 줄일 수 있을 것이다. 또 미분무소화설비에 비해 더 적은 양의 물로 소화가 가능할 것이다. 그럼에도 불구하고 Reinhardt[2] 외에는 불활성가스 미분무소화설비에 관해 공개된 연구자료가 없는 실정이다. Reinhardt는 항공기 화물적재함용으로 개발된 물-질소 가스 하이브리드(hybrid) 미분무소화설비에 대한 실험을 수행하였다. 질소와 물을 함께 사용할 때, 물이나 할론(halon)을 사용하는 경우보다 화물적재함의 온도가 낮았고, 할론보다 더 적은 양의 물로 소화됨을 확인하였다.

본 연구는 불활성가스 미분무소화설비 개발의 일부로서, 불활성가스 미분무소화설비 시제품의 시험용으로 제작된 화재시험실에 관한 수치연구이다. 화재시험실의 천장에 질소 또는 알곤 가스로 물을 분무하는 노즐을 설치하고, 60 kW의 프로판 가스버너를 화원으로 하였

\*주저자: wepark@pknu.ac.kr

다. 화재시험실에는 상시 개방되어 있는 출입문과 배기구, 그리고 시험실 내부 관촬용으로 닫혀있는 창문이 있다. 여기서 화재시험실의 개구부를 통해 버너에 충분한 산소가 공급되는가를 확인할 필요가 있다. 이전의 연구[3,4]에서 밝혀진 바와 같이 급기부족현상(under-ventilation)이 일어나면 소화실험에 대한 시뮬레이션이 곤란하며, 따라서 추가 개구부를 확보할 수 있도록 화재시험실의 구조를 변경해야 하기 때문이다.

본 연구의 목적은 화재시험실에 설치된 60 kW의 화재규모와 출입문-배기구로 구성된 개구부에 대해 급기부족 여부를 확인하는 것이다. 수치 시뮬레이션 결과 급기가 충분하다면 미분무소화설비의 개발에 유체역학 모델을 수정하지 않고 그대로 사용할 수 있다. 이를 위해 Fire Dynamics Simulator[5]를 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 화재시험실과 같은 조건에서 화재규모가 각각 60 kW와 120 kW일 때, 창문의 개폐에 따른 화재시험실 내부의 온도와 일산화탄소 농도의 분포를 조사하였다.

## II. 연구방법

화재시험실은 Fig. 1과 같이 크기가 2.5 m×2.0 m×2.5 m이고, 3개의 개구부, 즉, 출입문(0.8 m×1.7 m)과 배기구(1.8 m×0.45 m), 그리고 창문(1.6 m×2.0 m)이 설치되어 있다. 각 개구부의 위치는 Table 1에 주어져 있다. Fig. 2는 이들 개구부의 모습을 찍은 사진이다. 화원은 화재시험실 중앙의 프로판 가스버너로, 크기가 0.3 m×0.4 m, 높이 0.8 m이며, 화재규모는 60 kW이다. 상시 개방되어 있는 출입문과 배기구를 통한 급기부족 여부는 상시 닫혀 있는 창문(Table 1의 vent 1)의 개폐

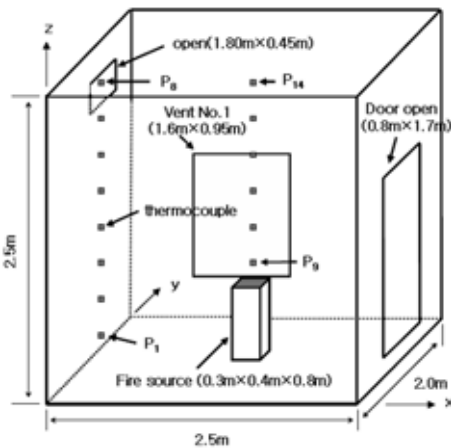


Fig. 1. Computational domain and configuration.

Table 1. Dimensions and locations of vents.

Vent	Dimension	Location of center	Remarks
1	0.8 m×0.95 m	1.25 m, 0.0 m, 1.43 m	open/closed
2	0.8 m×1.7 m	2.5 m, 1.0 m, 0.90 m	open
3	0.9 m×0.45 m	0.0 m, 1.0 m, 2.08 m	open



(a) Window (vent 1) and doorway (vent 2)



(b) Exhaust (vent 3)

Fig. 2. Vents of the fire test room.

에 따른 공간 내 온도 등의 변화를 조사하면 된다. 또한 결과의 신뢰성을 높이기 위해 화재규모 60 kW보다 훨씬 큰 화재에 대해서도 확인할 필요가 있다. 이에 따라 60 kW와 120 kW의 프로판 화재에 대하여 창문(이하 vent로 표시)의 개폐에 따른 온도와 일산화탄소(CO) 농도를 비교하였다. 연기, 산소, 이산화탄소의 농도와 가시거리 등은 그 경향이 온도 및 CO농도와 유사하였기 때문에, 본 논문에는 온도와 CO농도만 제시하였다.

온도와 CO농도의 측정지점은 배기구의 중앙과 버너의 중앙을 지나는 수직선을 따라 각각 P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>, P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub>의 총 14개소(Fig. 1에 thermocouple로 표시)이며, 0.27 m의 등간격으로 배열하였다.

수치모사에는 미국 표준기술연구소(NIST)에서 개발한 Fire Dynamics Simulator(FDS) version 4[5]를 사용

**Table 2.** Combination of parameters.

Case no.	Fire size (kW)	Vent (window)
I	60	open
II	60	closed
III	120	open
IV	120	closed

하였다. FDS는 유체역학모델로 직접수치모사(direct numerical simulation)와 대와동모사(large eddy simulation, LES)가 포함하고 있는데, 본 연구에서는 LES를 사용하였다. 또 연소와 복사열전달 계산에는 혼합분율 연소모델과 복사 유한체적법을 그대로 사용하였다. 스마고린스키 상수, 벽면의 방사율, 난류 프란틀수 등 그 밖의 기본값(default)도 수정하지 않고 그대로 사용하였다. FDS에 관한 자세한 내용은 참고문헌에 기술되어 있다.

창문의 개폐와 화재규모에 따라 Table 2와 같이 Case I, II, III, IV의 네 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 계산 시작 후 400초에서 각 측정점의 온도와

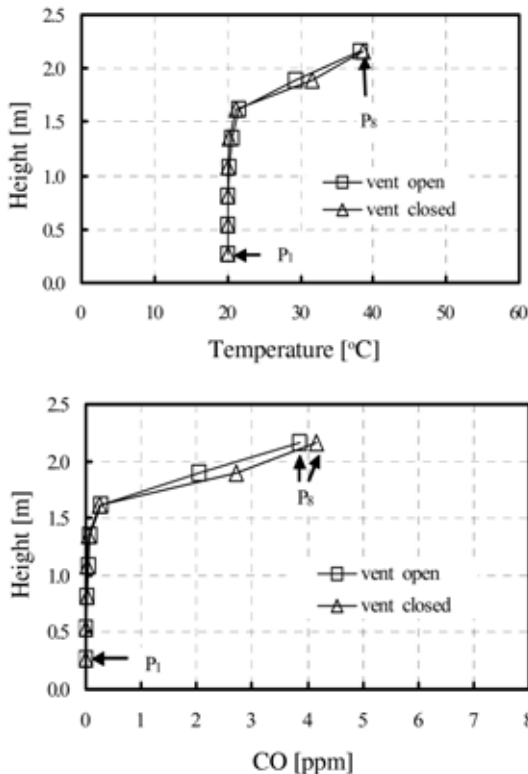
CO농도가 준정상상태에 도달하므로 계산시간을 600초로 하였다. 각 측정지점의 온도 및 CO농도의 시간평균값은 400초부터 600초까지의 순시값으로부터 구하였다. 격자의 크기는 예비계산을 통해 격자크기에 따른 결과의 차이가 거의 없는 5 cm의 균일격자를 선택하여, 격자수를 50×40×50개로 하였다.

### III. 결과 및 분석

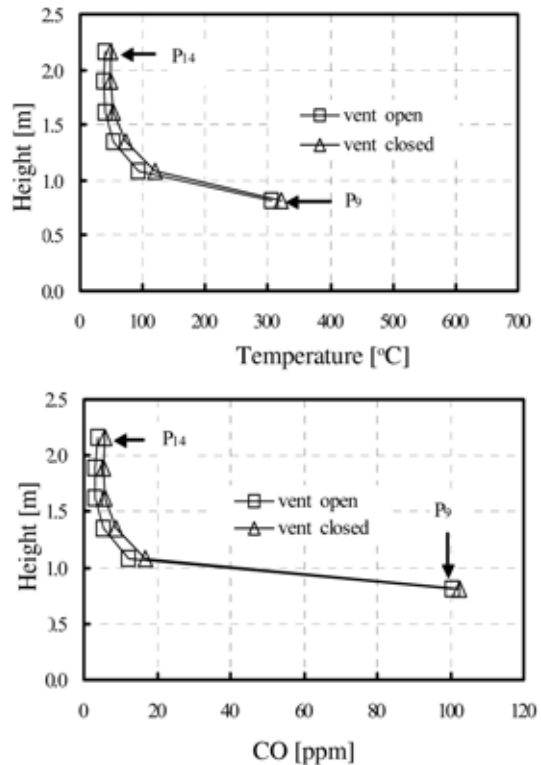
화재규모가 60 kW이고 창문이 열린 경우(Case I)와 닫힌 경우(Case II)에 각각 측정점 P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>에서의 평균온도와 CO농도를 Fig. 3에 비교하였다. 기류변화가 거의 없는 P<sub>1</sub>~P<sub>3</sub>까지는 외기온도와 같은 20°C이고, 배기구에 인접한 P<sub>6</sub>부터 온도가 올라가 배기구의 중심인 P<sub>8</sub>에서 약 39°C로 나타났다. 배기구에서의 온도는 창문의 개폐에 관계없이 거의 같음을 알 수 있다.

한편, CO농도는 배기구 중심(P<sub>8</sub>)에서 약 4 ppm이고, 창문이 닫혀 있을 때 약간 더 높지만, 창문의 개폐가 CO농도에 미치는 영향은 매우 작다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 경우에 측정점 P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub>에서의



**Fig. 3.** Comparison of average temperature and CO concentration at P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub> (60 kW).



**Fig. 4.** Comparison of average temperature and CO concentration at P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub> (60 kW).

온도와 CO농도의 평균값을 창문의 개폐에 따라 비교한 그림이다. P<sub>9</sub>는 버너의 화염 속에 위치하여 측정점 중에서 온도가 가장 높고 평균온도가 300°C를 약간 넘으며, P<sub>14</sub> 지점까지 위로 올라감에 따라 온도가 급격히 떨어진다. 창문이 닫혔을 때에 열린 경우보다 온도가 약간 더 높지만, 버너의 위쪽에 위치한 P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub>에서도 창문의 개폐에 따른 온도차이는 매우 작음을 알 수 있다.

P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub>에서의 CO농도분포도 온도분포와 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, 화염 속에 위치한 P<sub>9</sub>에서의 평균 CO농도는 약 100 ppm이고 그 위쪽의 측정점에서는 급격히 떨어진다. 온도와 마찬가지로 창문이 닫혔을 때 CO농도가 약간 더 높고, 창문의 개폐에 따른 CO농도 차이가 작음을 알 수 있다.

화재시험실에 설치된 프로판 가스버너는 60 kW이지만, Fig. 3과 4에 나타난 온도 및 CO농도의 변화의 일관성을 확인하기 위해 화재규모가 2배인 120 kW에 대해 조사하였다. Fig. 5에는 화재규모가 120 kW일 때 창문이 열린 경우(Case III)와 닫힌 경우(Case IV)에 대해

P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>에서의 온도와 CO농도를 비교하였다. 60 kW의 경우와 마찬가지로 배기구의 아래쪽에 위치한 P<sub>1</sub>~P<sub>5</sub>에서는 온도의 상승이 거의 없는데 비해 배기구 중심에서의 온도는 약 50°C이다. 창문의 개폐에 따른 온도변화가 작고, 창문이 닫혀 있을 때가 약간 더 높으며, CO농도의 분포도 온도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 창문개폐의 영향이 작고 앞의 60 kW의 경우와 일관된 것은 출입문과 배기구를 통해 급기가 충분히 이루어짐을 나타낸다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 경우에 버너의 상부에 위치한 P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub>에서의 온도와 CO농도를 비교한 그림이다. 60 kW의 경우와 같이, 창문이 열려있을 때에 비해 닫혀 있을 때가 온도와 CO농도가 조금 더 높으며, 그 차이가 크지 않아 창문 개폐의 영향이 크지 않다.

산소가 충분히 공급되지 않는 공간의 화재 시뮬레이션[4]에서는 화재규모를 증가시켜도 온도와 CO농도의 계산결과가 상승하지 않는 경우가 발생하였고, 이것은 FDS의 연소모델이 급기부족을 예측할 수 없기 때문이다. 본 연구에서 60 kW와 120 kW의 두 화재규모에 대

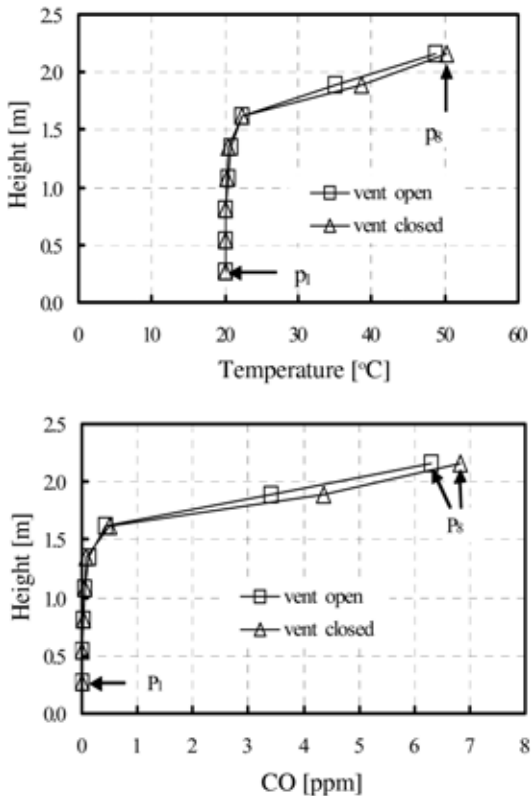


Fig. 5. Comparison of average temperature and CO concentration at P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub> (120 kW).

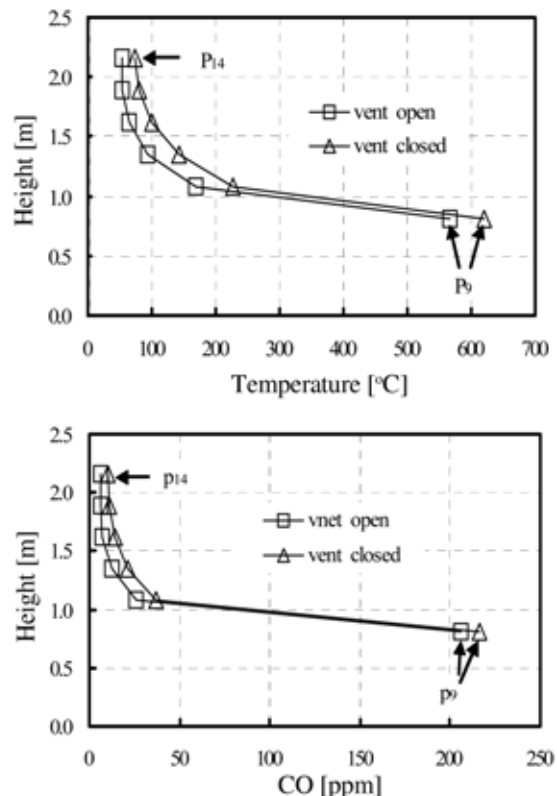


Fig. 6. Comparison of average temperature and CO concentration at P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub> (120 kW).

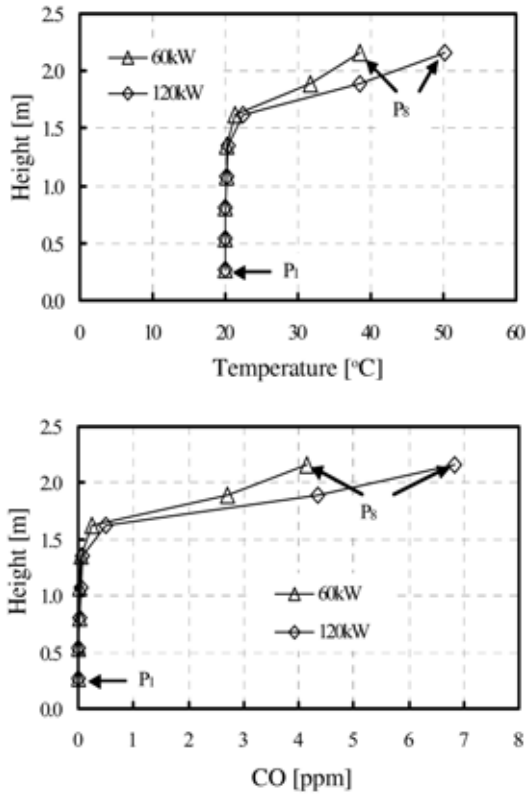


Fig. 7. Comparison of average temperature and CO concentration at P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub> for fire sizes (vent closed).

한 온도와 일산화탄소 농도의 분포를 비교하였다.

Fig. 7은 배기구 중심을 지나는 수직선상에 위치한 P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>에서의 온도와 일산화탄소 농도를 나타낸 그림이다. 화재규모가 크게 달라도 P<sub>1</sub>~P<sub>5</sub>에서는 온도와 일산화탄소 농도가 거의 같은 것은 앞에서 언급한 바와 같이 이들 지점이 배기구의 아래쪽 벽에 위치하여 기류의 변화가 거의 없기 때문이다. 그러나 배기구 중심에 위치한 P<sub>8</sub>에서는 온도가 올라가 120kW의 경우가 60kW의 경우보다 큰 폭으로 상승해 약 11°C가 높다. 한편, CO농도도 온도와 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 화재규모의 증가에 따른 온도와 CO농도의 증가는 창문의 폐쇄에도 불구하고 출입문과 배기구를 통해 산소공급이 원활함을 나타낸다.

버너의 위쪽에 위치한 P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub>에서의 온도와 CO농도가 Fig. 8에 나타나 있다. 모든 점에서 60kW에 비해 120kW일 때의 온도가 높고, 특히 화염의 내부에 위치한 P<sub>9</sub>에서는 294°C가 더 높다. 이 온도상승은 앞의 P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>에서와 같이 120kW에서도 산소공급이 충분함을 의미한다. 일산화탄소 농도도 온도와 유사한 경향을 나

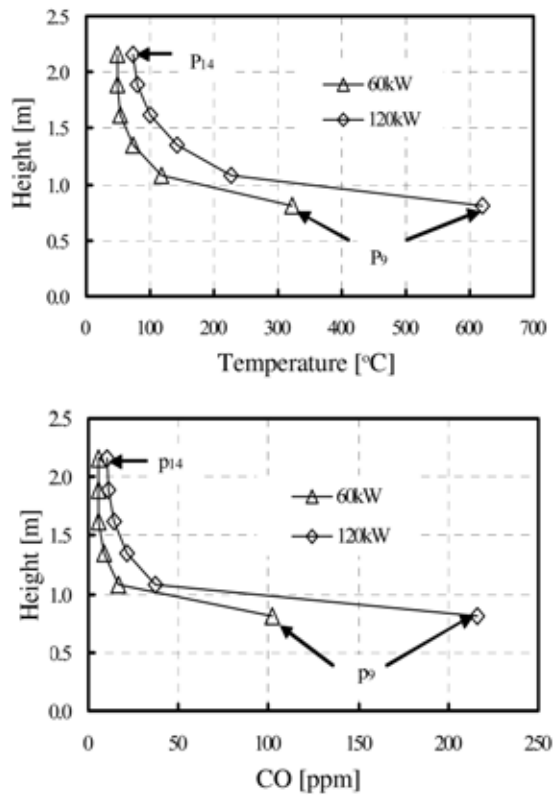


Fig. 8. Comparison of average temperature and CO concentration at P<sub>9</sub>~P<sub>14</sub> for fire sizes (vent closed).

타내고 있다. 본 연구에서는 급기부족 상태에서 나타났던 온도 및 CO농도의 예측불능은 발생하지 않았다.

#### IV. 결 론

불활성가스 미분무소화설비의 시험용으로 제작한 2.5 m×2.0 m×2.5 m 크기의 화재시험실에 급기부족 여부를 확인하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 각각 60kW와 120kW의 프로판 버너가 공간의 중앙에 위치할 때, 창문의 개폐에 따른 온도 및 일산화탄소 농도의 분포를 비교하였다. 창문의 개폐가 실내온도와 일산화탄소 농도의 변화에 미치는 영향이 작고 화재규모에 따라 그 경향이 일관됨을 알 수 있었다. 또한 창문이 닫힌 상태에서 화재규모가 증가했을 때 온도와 일산화탄소 농도가 일관되게 상승하였다. 이 결과로부터 화재시험실에 급기부족현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 이에 따라 현재의 화재시험실을 이용한 미분무소화설비의 개발에 있어서 급기부족현상에 대한 수정 없이 FDS를 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2005학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] NFPA 750 Water Mist Fire Protection Systems, (2003)
- [2] Reinhardt, J.W. "The Evaluation of Water Mist With and Without Nitrogen as an Aircraft Cargo Compartment Fire Suppression System", DOT/FAA/AR-01/121, FAA, (2002).
- [3] Wen, J.X. and L.Y. Huang, "CFD Modelling of Confined Jet Fires Under Ventilation-Controlled Conditions", *Fire Safety J.*, **34**, 1-24, (2004).
- [4] 박준, "환기통제하의 실내화재 시뮬레이션", 부경대학교 산업대학원 석사학위논문, (2006)
- [5] McGrattan, K.B., ed., Fire Dynamics Simulator (version 4.05) User's Guide, NIST, U.S.A. (2005)