

## 선박 거주구역용 소화시스템의 전산 시뮬레이션

정인수,<sup>1</sup> 정희택,<sup>\*2</sup> 한용식<sup>3</sup>

<sup>1</sup>포스코 광양제철소 열연부

<sup>2</sup>경상대학교 기계공학부 및 항공기부품기술연구소

<sup>3</sup>한국기계연구원 에너지플랜트 안전연구실

### COMPUTATIONAL SIMULATION OF FIRE SUPPRESSION SYSTEM FOR CABINS OF SHIPBOARD ENCLOSURE

I.S. Jung,<sup>1</sup> H.T. Chung<sup>\*2</sup> and Y.S. Han<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hot Rolling Department, POSCO Gwangyang Works

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering & Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang Nat'l Univ.

<sup>3</sup>Energy Plant Safety Group, Korea Institute of Machinery and Materials

*The numerical simulation has been performed to predict the performance of the fire suppression system for cabin of shipboard enclosure. The present study aims ultimately at finding the optimal parametric conditions of the mist-injecting nozzles using the CFD methods. The open numerical code was used for the present simulation named as FDS (Fire Dynamics Simulator). Application has been done to predict the interaction between water mist and fire plume. In this study, the passenger cabin was chosen as simulation space. The computational domains for simulation in the passenger cabin were determined following the fire scenario of IMO rules. The full scale of the flow field is  $W \times L \times H = 4 \times 3 \times 2.4 \text{ m}^3$  with a dead zone of  $W \times L \times H = 1.22 \times 1.1 \times 2.4 \text{ m}^3$ . The water mist nozzle is installed in ceiling center of 2.3 m height from the floor, and there are six mattresses and four cushions in the simulation space. The combination patterns of orifices to the main nozzle and the position to install nozzles were chosen as the simulation parameters for design applications. From the present numerical results, the centered-located nozzles having evenly combined orifices were shown as the best performance of fire suppression.*

**Key Words :** 미분무수 노즐(Water Mist Nozzle), 객실(Cabins), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 분무특성(Spray Characteristics), 화재억제시간(Fire Suppression Time)

### 1. 서 론

산업 현장이나 건물의 화재를 진압하기 위한 방법에는 다양한 기법들이 있다. 이 중에서 물을 이용한 스프링클러와 같은 수계소화설비는 화재를 진압하고 제어하기 위한 수단으로 널리 사용되고 있다. 수계소화 설비 중에서 고압의 물을 노즐을 통과시켜 발생하는 미세 물방울을 이용하여 화재를 신속하게 진압하는 미분무수 소화시스템은 기존의 소화설비를 대체하기 위한 새로운 기법으로 주목받고 있다[1].

미분무수를 이용한 소화시스템은 적은 유량을 사용하면서도 기존의 수계소화설비인 스프링클러보다 소화능력이 우수하고 환경오염물질을 내포하고 있는 할론 및 CO<sub>2</sub> 같은 CFC 계통의 소화 약재를 사용한 소화설비를 대체 할 수 있어 현재 이를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Tanner and Knasiak[2]는 화염 억제 노즐의 분무 특성에 관해 다양한 자료를 정리하였다. Kim and Ryou[3,4]는 규격화된 화재 공간에서 노즐의 분무 변수에 대한 실험과 수치해석 등 다양한 연구를 시도하였다. Chung et al.[5]은 CFD기법을 이용하여 소화노즐의 분무 특성을 예측하였으며 Bac et al.[6]은 소방차와 같은 이동식 소화시스템에 적용되는 미분무수 노즐의 성능 향상을 위한 수치 시뮬레이션을 시도하였다. Jung et al.[7]은 기존의 분무 노즐의 실용적인 개선을 위해 형상 변수에 대한 성능 비교를 전산해석기법으로 수행하였다.

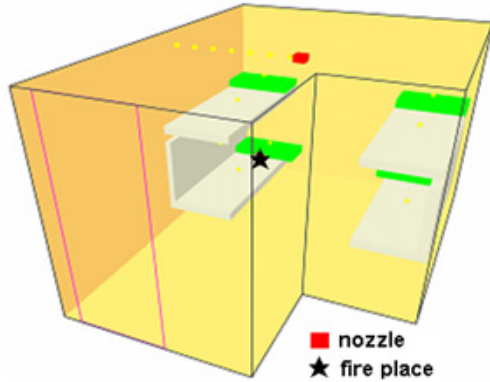
Received: October 11, 2016, Revised: November 21, 2016,

Accepted: November 21, 2016.

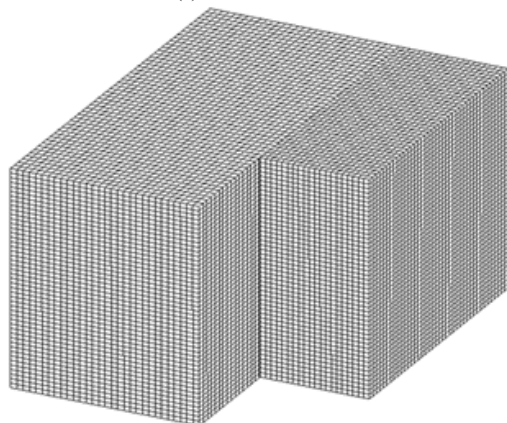
\* Corresponding author, E-mail: htchung@gnu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.4.040>

© KSCFE 2016



(a) Schematic view



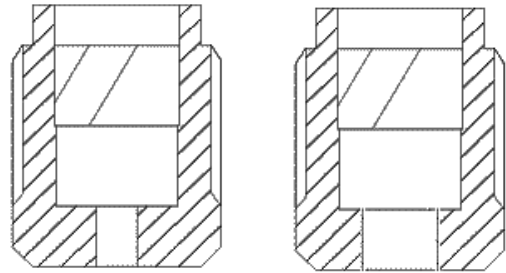
(b) Grid system

Fig. 1 Schematic view and grid system for simulation in the passenger cabin

이러한 미분무수 소화시스템의 연구는 단일 노즐 위주로 진행되고 있는 실정으로 여러 개의 노즐이 사용되는 실제화재 공간에 적용되는 연구는 미미한 실정이다. 여객선이나 화물선 등 대형 선박에서 거주 공간에는 환경과 안전 등을 이유로 미분수 소화설비가 적용되는 추세이다. 본 연구에서는 전산해석기법을 이용하여 노즐의 형상과 배치 등에 의한 소화 특성을 분석하고자 한다. 소화가 적용되는 공간은 국제해사기구(International Maritime Organization; IMO)에서 규정하는 화재 시나리오[8]를 준수하였으며 해석기법은 NIST에서 개발된 FDS 프로그램[9]을 사용하였다.

## 2. 적용 모델 및 수치 기법

본 연구의 수치해석에 사용된 해석공간은 선박의 일반 객실로 Fig. 1(a)과 같이  $W \times L \times H = 4 \times 3 \times 2.4 \text{ m}^3$ 의 공간에  $W \times L \times H = 1.22 \times 1.1 \times 2.4 \text{ m}^3$  크기의 데드존을 가진 모델이다



(a) type-A(d = 1.5 mm)

(b) type-B(d = 2 mm)

Fig. 2 Schematic diagram of mist orifice

[8]. 객실내부에는 6개의 매트리스와 4개의 쿠션이 있다. 미분무수 노즐은 객실 바닥으로부터 2.3 m 높이로 천장 중앙에 설치되었으며 노즐 성능에 따른 소화특성을 측정하기 위하여 천장 부근에 열전대를 설치하고 시간에 따른 객실 내부의 온도변화를 관찰하였다. 객실의 한쪽 하부 매트리스로부터 0.05 m의 높이에  $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ 의 면적을 가진 화원을 설치하였으며, 단위면적당 발열량  $400 \text{ kW/m}^2$ 의 화재강도를 초기조건으로 주었다. 연소열량이  $26.8[\text{MJ/kg}]$ 인 액체 에탄올을 연료로 사용하였다[10].

해석모델에 사용된 격자 시스템은 Fig. 1(b)과 같이 직교격자계로 117,600개로 구성되어있다. 화염원과 미분무수 부근에는 격자가 세밀하게 분포되고 그 외에는 균일 간격이다. 본 해석모델의 시뮬레이션 시간은 발화 후 자연연소 150초 미분무수 분사 후 600초를 포함하여 총 750초 동안 진행하였다. 해석모델 내의 유동장 해석에는 소화 성능 예측 전용 소프트웨어인 FDS를 적용하였다[8]. 이에 대한 이론적 설명은 Bac et al.[6]에 기술되어 있다.

해석에 사용된 컴퓨터는 일반 데스크 탑 PC로 Pentium VI 이고 CPU는 3 GHZ, 64 bit로 1개가 사용되었다. CFL수는 최대 1.0으로 설정하였고 1초 간격으로 데이터를 획득하였다. 사용된 총 계산시간은 약 20시간 정도 소요되었다.

본 연구에 사용된 단위노즐(unit nozzle)의 오리피스 형상은 Fig. 2와 같이 출구 오리피스 직경이 1.5 mm인 A-type과 2 mm인 B-type의 두 가지 형태로 나눌 수 있다. Table 1에 표시한 노즐의 분무 특성은 열 유동해석 소프트웨어인 Fluent[11]

Table 1 Orifice performances used in the simulation

| Type            | A          | B    |
|-----------------|------------|------|
| Pressure (bar)  | 10         |      |
| Spray pattern   | Solid cone |      |
| K-factor        | 1.07       | 1.72 |
| SMD (µm)        | 156        | 169  |
| Velocity (m/s)  | 31.6       | 29.8 |
| Spray angle (°) | 83         | 114  |

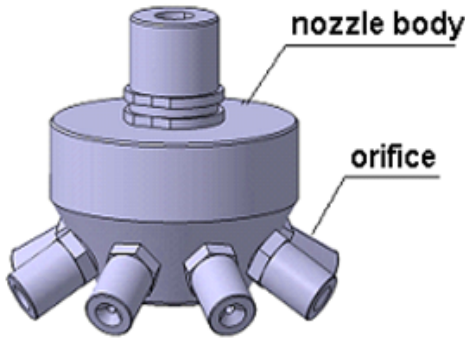


Fig. 3 Configuration of nozzle

를 이용한 해석의 결과이며 이는 본 시뮬레이션의 미분무수의 소화 성능 특성으로 경계조건으로 사용된다[7,12].

### 3. 해석 결과

본 연구에서는 2장에서 전술한 화재 시나리오 공간에 적합한 조건을 도출하기 위해서 노즐의 형상과 배치 등 2가지 변수에 대해 소화 성능 특성을 분석하였다.

#### 3.1 노즐의 형상에 따른 성능 특성

선박객실에 사용되는 미분무수 노즐은 단일 노즐로 사용되지 않고 효과적인 화재 진압을 위해 여러 개의 노즐을 Fig. 3와 같이 클러스터 바디에 조합하여 사용한다[7]. 본 연구에서 사용한 미분무수 노즐 A-type과 B-type의 조합은 Table 2와 같이 5가지 유형이며 각 유형별 분사유량은 분사압력이 10 bar로 일정할 때의 값으로 type-B와 같은 직경이 큰 오리피스가 많은 경우가 분사 유량이 많다.

본 시뮬레이션은 화재발생 후 150초 동안의 자연연소 후 미분무수를 분사하기 시작하였다. Fig. 4는 미분무수 분사 후 250초에 화염의 모습을 나타낸 것이다. C2에서 가장 억제된 화염의 모습을 확인할 수 있어 소화성능이 다른 유형에 비해 우수하다. 반면 C1에서는 화염이 양쪽 침대까지 번져 좋지 못한 소화 성능을 보이고 있다.

Table 2 Combination pattern and Flow-rate of nozzle

| Combination pattern | Number of orifice |        | Flow-rate (LPM) |
|---------------------|-------------------|--------|-----------------|
|                     | A-type            | B-type |                 |
| C1                  | 8                 | 0      | 27.2            |
| C2                  | 6                 | 2      | 31.46           |
| C3                  | 4                 | 4      | 35.72           |
| C4                  | 2                 | 6      | 39.98           |
| C5                  | 0                 | 8      | 44.24           |

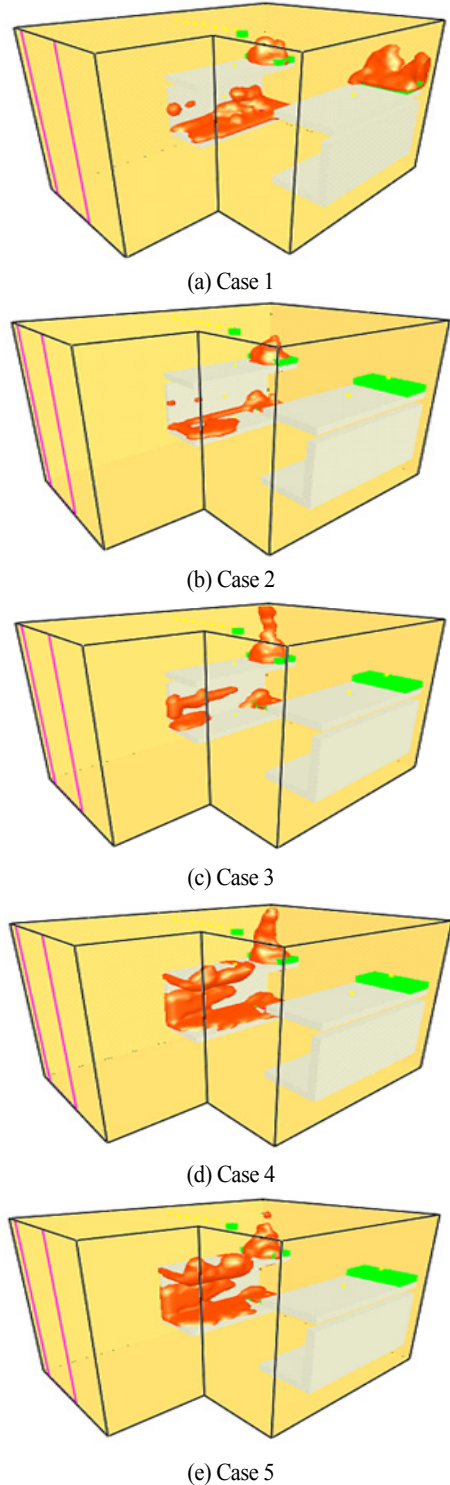


Fig. 4 Distribution of heat release rate inside the cabin after 250 seconds of mist injection

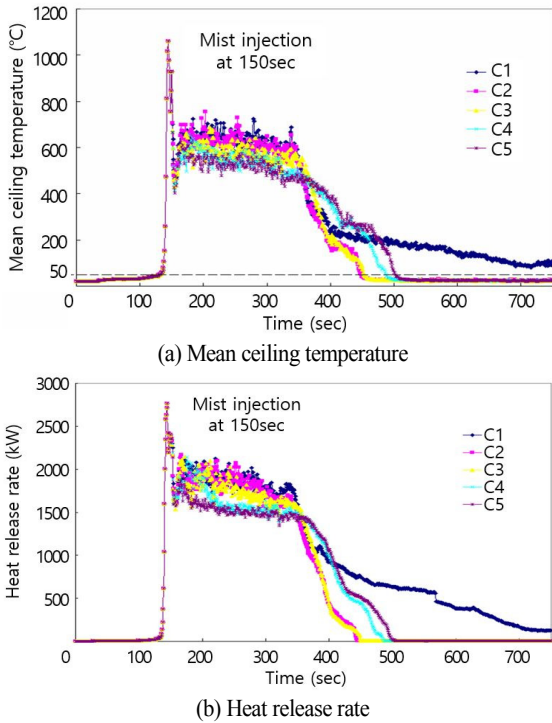


Fig. 5 Temporal distributions of mean ceiling temperature and heat release rate in the passenger cabin

Fig. 5는 시간에 따른 선박 객실 천장 부근의 평균 온도 분포와 화재강도의 크기를 나타낸 것이다. 화재발생 후 150초에 미분무수를 분사 후 모든 타입의 노즐에서 온도가 순간적으로 낮아졌다가 일정한 온도 범위를 유지한 다음 점점 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 이때 온도가 순간적으로 낮아지는 원인은 온도를 측정하기 위해 천장에 설치한 열전대들이 미분무수 노즐 근처에 있기 때문이다. 이때 온도 감소는 화제가 억제된 것이 아니라 미분무수에 의한 직접적인 온도 감소이다. 또한 일정범위의 온도가 유지되는 것은 화재강도가 억제될 때까지 미분무수와 화염 사의 상호작용 과정으로 보인다.

Fig. 5와 같이 미분무수 분사 후 약 200초부터 객실의 평균 온도와 화재강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이때 C2의 노즐 조합이 가장 우수한 화재소화 성능을 보이고 있고 다음으로 C3, C4, C5, C1의 순서이다. C2의 경우는 작은 직경의 오리피스가 6개이고 상대적으로 큰 오리피스가 2개인 조합이다. 본 저자들의 선행연구[6]에 의하면 작은 직경의 미세한 미분수가 큰 직경의 주유동에 빨려 들어가는 분사 형태가 분무 특성이 좋은 결과를 보여주었다. 이와 같이 직경이 다른 오리피스를 적절한 비율로 조합하면 유량이 다소 적더라도 분무 특성이 우수할 수 있다.

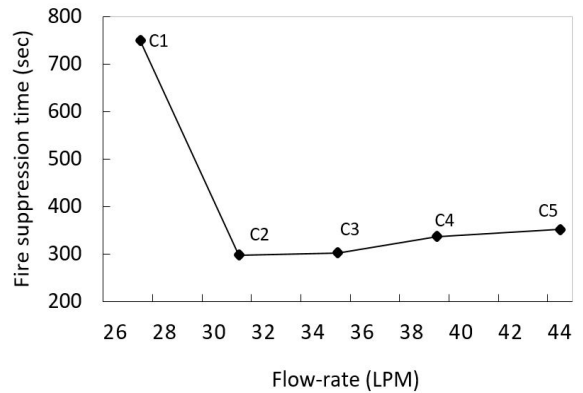


Fig. 6 Fire suppression time according to variation of flow rate

본 시뮬레이션에서는 객실 상부의 평균온도가 50°C 이하가 되면 소화가 이루어졌다고 판단하였다. Fig. 6는 평균온도 50°C가 화재진압 시점으로 보고 노즐 조합의 유량에 따른 화재 진압 시간을 나타낸 것이다. 이때 분무 유량이 가장 적은 C1은 750초의 시뮬레이션 시간 내에 화염을 진압하지 못하는 결과를 보였다. 반면 분무 유량이 가장 많았던 C5는 시뮬레이션 시간 내에 화염을 진압하기는 하였으나 시간은 다른 유형의 노즐에 비해 오히려 오래 걸렸다. 이는 분무 유량뿐만 아니라 오리피스의 조합에 의한 노즐 유형이 미분무수 소화 시스템의 성능에 중요한 영향을 나타냄을 보여준다.

### 3.2 노즐의 배치에 따른 성능 특성

3.1절에서 A-type 오리피스 6개와 B-type 오리피스 2개로 구성된 C2 노즐이 분무 특성이 가장 우수한 결과를 나타냈다. C3 노즐은 A-type과 B-type의 오리피스 개수가 4개씩이고 분무 유량이나 소화특성이 다른 4개에 비해 비교적 C2와 유사한 결과를 보여주었다.

본 연구의 두 번째 변수는 노즐의 배치 특성이다. Fig. 7과 같이 7가지 유형의 배치 유형을 설정하였다. 이를 위해서는 각 노즐 당 동일한 유량과 노즐을 사용하여야 한다. 예를 들어 case VII의 4개의 노즐이 합치면 case I의 노즐이 된다. 이런 제약 조건으로, 3.2절에서는 3.1절의 C3 노즐을 채택하였다. 따라서 case VII에서는 Table 1의 A-type 오리피스와 B-type 오리피스가 각각 1개로 구성되는 노즐이 Fig. 7(g)와 같은 형태로 배치된다. Case I의 경우는 Table 2의 C3 노즐이 Fig. 1(a)와 같이 화재 공간의 중간에 배치된다. 모든 경우에 유량은 35.72 LPM, 분사압력은 10 bar로 3.1절의 C3 유형과 동일하다.

화제억제시간을 Fig. 6와 같은 방법으로 정하면 Table 3와

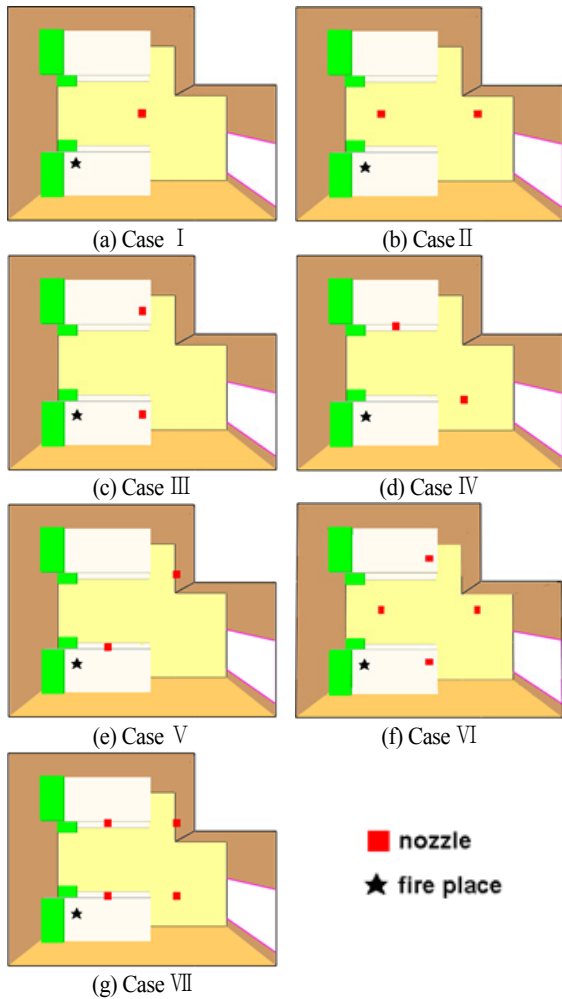


Fig. 7 Position of water mist nozzles in the passenger cabin

Fig. 8과 같은 결과를 보였다. 노즐 1를 중앙에 배치한 Case I이 가장 우수한 결과를 나타내었다. 노즐 2개를 4 가지 유형으로 배치한 경우에는 배치 형태에 따라 화재 억제 시간에 차이를 보였다. 노즐 4개의 경우에는 배치에 따른 차이가 훨씬 큰 결과를 보였다. 2개의 경우에는 Fig. 7(b)의 case II가 가장 우수하였고 억제시간도 case I과 비슷하였다. 노즐이 4개로

Table 3 Fire suppression times according to the cases

| Number of nozzle | Case | Fire suppression time(s) |
|------------------|------|--------------------------|
| 1                | I    | 303                      |
| 2                | II   | 309                      |
|                  | III  | 432                      |
|                  | IV   | 366                      |
|                  | V    | 371                      |
| 4                | VI   | 387                      |
|                  | VII  | 550                      |

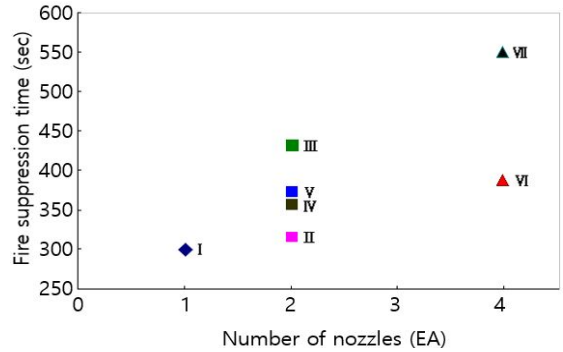


Fig. 8 Fire suppression times according to the cases

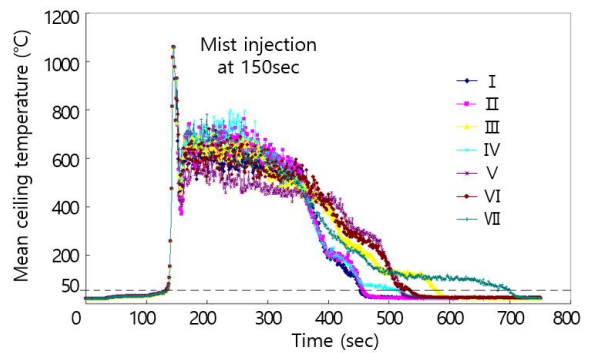


Fig. 9 Temporal distributions of mean ceiling temperature in the passenger cabin

분산된 경우에는 공간에 고르게 미분수가 형성되어 유리할 것 같지만, 특정지역에서 화재가 발생하는 경우에는 case I과 같이 중앙에서 집중적으로 분사되는 경우보다 불리한 결과를 나타내었다.

Fig. 9은 공간의 상부인 천장에서의 평균 온도 변화를 나타낸 것이다. 분사 초기에는 Fig. 7(d) case IV의 온도 강하가 가장 낮지만 시간이 경과함에 따라 Fig. 7(g) case VII의 온도 감소가 급격히 둔해져서 최종 화재 억제 온도에 도달하는 시간이 가장 오래 소요되었다.

Fig. 10-12는 화염이 억제되는 양상을 화재 발생 지역 부근을 중심으로 온도 분포로 나타낸 것이다. 각 그림에서 (a)는 화염원에서 발열량 400 kW/m<sup>2</sup>의 화재강도로 150초 동안 화재를 발생시킨 후로 분사 직전이다. 분사가 100초를 경과한 후인 그림(b)에서는, 중앙에서 단일 분사인 case I의 경우가 다른 두 경우보다 화염원 부근의 온도가 낮아져 화염의 크기나 강도가 작음을 알 수 있다. 그림(c)의 경우는 미분무수 분사가 250초 경과한 후이다. 노즐이 4개로 분사 배치한 경우라도 Fig. 7(f)의 case VI는 화염원을 포함하여 전반적으로 온도가 균일해졌으나 Fig. 7(g)의 case VII는 화염원 부근에서 여전히

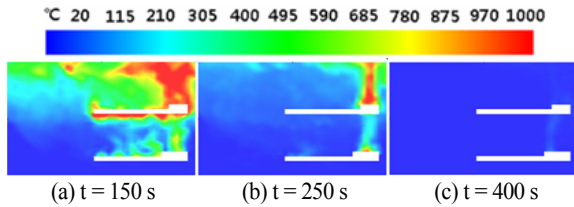


Fig. 10 Sectional view of temperature in the case I

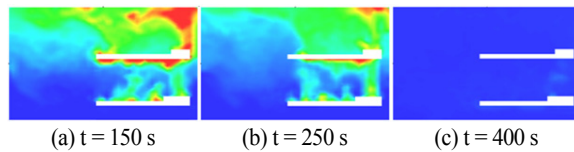


Fig. 11 Sectional view of temperature in the case VI

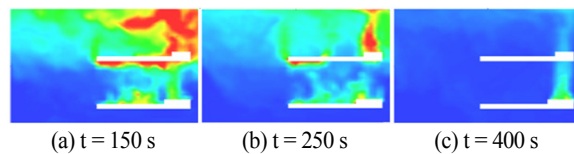


Fig. 12 Sectional view of temperature in the case VII

히 화염의 흔적이 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구는 선박의 객실에 설치되는 미분무수 소화 시스템의 성능을 예측하기 위하여 CFD 기법을 이용하여 가상의 공간에 화재를 발생시키고 분사 노즐의 조건에 따른 소화 성능과의 상관관계에 대하여 해석을 수행하였다. 소화해석 전용 프로그램인 FDS를 사용하였고 국제해사기구의 화재 시나리오의 규정에 따라 해석공간을 선정하였다.

분무특성이 다른 2 종류의 오리피스 개수의 조합의 경우 동일한 개수로 구성된 경우가 유량이 다소 적어도 미분무수가 화염을 충분히 도포하여 우수한 화재 억제 성능을 나타내었다. 분사 노즐의 설치 위치에 따른 소화 특성 해석 결과는 노즐이 화재 시나리오 공간의 정중앙에 밀집하여 설치되었을 때 화재 억제 시간이 가장 짧았다.

본 연구 결과는 소화 노즐의 오리피스 배열 방법, 노즐의 최적 배치 등 선박 객실용 소화시스템의 기본 설계 과정에 유용한 정보로 활용되기를 기대한다.

#### References

[1] 2000, Kim, M.B., "A State of the Art for Water Mist Fire

Protection Systems and Introduction of NFPA 750," (in Korean) *J. Korean Inst. of Fire Science & Eng.*, Vol.1, No.2, pp.2-5.

[2] 2003, Tanner, G. and Knasiak, K.F., "Spray Characterization of Typical Fire Suppression Nozzles," *Proc., 3rd Int. Water Mist Conf. Madri*, pp.103-109.

[3] 2003, Kim, S.C. and Ryou, H.S., "Effect of Spray Angle of Water Mist Nozzle on Temperature Field of Compartment Fire," (in Korean) *Proc. KSME Spring Meetings*, pp.1703-1708.

[4] 2004, Kim, S.C. and Ryou, H.S., "The Effects of Water Mist on the Compartment Fire," *Int'l J. Air Conditioning and Refrigeration*, Vol.12, No.1, pp.30-36.

[5] 2006, Chung, H.T., Lee, C.H., Choi, B.I., Han, Y.S. and Ock, Y.W., "Application of CFD Technique to Prediction of Spray Characteristics of Water-Mist Fire Suppression Nozzles," (in Korean) *J. Compt. Fluids Eng.*, Vol.11, No.4, pp.56-61.

[6] 2009, Bae, K.Y., Chung, H.T., Kim, H.B., Jung, I.S. and Kim, C., "Numerical Simulation on Fire Suppression Characteristics through Mobile Mist Spray Nozzles," (in Korean) *J. Korean Soc. for Power System Eng.*, Vol.13, No.5, pp.25-33.

[7] 2010, Jung I.S., Park, T.K. and Chung, H.T., "Parametric Study on Water Mist Fire Suppression System Based on CFD Methods," (in Korean) *J. ILASS-Korea*, Vol.15, No.3, pp.12-130.

[8] 2008, Maritime Safety Committee, "Amendments to the Revised Guidelines for Approval of Sprinkler Systems Equivalent to that Referred to in SOLAS Regulation II-2/12," *IMO Resolution MSC.*, 265(84).

[9] 2000, NIST, "Fire Dynamic Simulator, Technical Reference Guide," NIST, U.S.A.

[10] 2007, Bae, K.Y., Chung, H.T. and Kim, H.B., "Numerical Analysis on Interaction between Fire Flame and Water Mist according to the Variation of Nozzle Performance," (in Korean) *Proc. KSME Spring Meetings*, pp.2522-2527.

[11] 2001, FLUENT Inc., "Fluent 6 User's Guide," FLUENT Inc., U.S.A.

[12] 2006, Lee C.H., Chung, H.T., Choi, B.I., Han, Y.S. and Kim, C., "Numeric Study on the Effects of Design Parameters on the Spray Characteristics of Fire Suppression Nozzles," (in Korean) *J. ILASS-Korea*, Vol.11, No.4, pp.199-204.