

## 선박기관구역 미분무수 소화설비 화재진압 성능 평가 The Assessment of Fire Suppression Capability of Water-Mist System for Machinery Engine Room

최병일<sup>†</sup> · 한용식 · 오창보 · 김명배 · 김 창\*

Byung-Il Choi<sup>†</sup> · Yon-Shik Han · Chang-Bo Oh · Myung-Bae Kim · Chang Kim\*

한국기계연구원 에너지기체연구센터, \*(주)WIN  
(2007. 5. 4. 접수/2007. 5. 25. 채택)

### 요 약

IMO MSC/circ. 1165 규정에 따라 미분무수를 이용한 선박 기관구역(20m×15m×10m)에서의 실물화재 소화실험을 수행하였다. K-factor 2.4인 노즐을 사용하였으며 작동압력은 80 bar이다. 미분무수의 화재진압 특성을 수치적으로 예측하기 위하여 FDS를 사용하여 실험과 같은 조건에서의 전산시뮬레이션을 수행하였다. 전산 시뮬레이션 결과 화재 진압 시뮬레이션 기법이 화재소화시간 예측에는 한계를 가지나, IMO MSC/circ. 1165 규정의 공간 내 온도분포 제어 성능의 예측을 위해서 유용하게 활용될 수 있음을 보였다.

### ABSTRACT

Full scale fire suppression test by water mist system were performed in machinery engine room (20 m × 15 m × 10 m) according to IMO MSC/circ. 1165. The K-factor and operating pressure were 2.4 and 80 bar, respectively. To assess the prediction capability of numerical simulation, FDS simulation was performed at the same operating condition with the full scale experiment. It was found that FDS simulation had the limitation for the fire extinguishing time prediction but was able to predict the spatial temperature distribution.

**Keywords :** Water mist, Full scale fire test, Numerical simulation

## 1. 서 론

미세 물분무 화재 진압 설비(Water Mist Fire Fighting System)<sup>1,2)</sup>는 환경친화적 측면과 인명 안전성 측면에 많은 장점이 있어 지금까지 Halon 소화 약제가 주류를 이루고 있는 엔진, 터빈, 항공기, 해상유전시설 및 인화성 액체의 보관시설 등의 소화설비들을 대체하고 있으며, 이외에도 해군 전함, 잠수함, 지하철,<sup>3)</sup> 지상 기계실, 변전소<sup>4,5)</sup> 등의 적용영역을 계속적으로 확장시켜 나가고 있다. 미세 물분무 화재 진압 설비가 가장 적극적으로 활용되고 있는 분야는 선박 분야이다. 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 2005년에 선박용 광역 미세 물분무 화재 진압 설비(water mist system)의 승인가준으로 IMO MSC/circ.

1165<sup>6)</sup>을 개발 하였으며, 선박에 설치되는 광역 미세 물분무 화재 진압 설비(water mist system)는 이 요건을 만족하여야 한다.

선박 기자재의 경우 선박 발주 시 적용되는 해당 선급의 승인된 제품이 아닐 경우 탑재가 불가능하기 때문에, IMO 규정에 따른 해당선급의 성능인정 시험을 제품화 과정에서 반드시 통과해야 한다. 관련규정에 따른 성능평가를 통과한 제품은 바로 상품화가 가능하며 판매가 이루어지는 장점이 있지만 성능인정 시험에 많은 실험적/경험적 노하우가 필요하기 때문에 기술력이 부족한 업체의 경우 기술개발 자체가 어려워 선 개발사가 시장 경쟁력적인 측면에서도 매우 유리한 특징을 가지고 있다. 특히 미분무수 소화시스템의 경우 기존 스프링클러 시스템과는 달리 성능적 기준에 의한 성능평가 방법을 채택하고 있기 때문에 핵심기술개발에 대한 어려움이 많은 실정이다. 미분무수 소화시스템의 성

<sup>†</sup>E-mail: cbisey@kimm.re.kr

능평가와 관련된 핵심기술은 다음과 같다.

- 1) 적용 공간 및 화재 특성에 적합한 분사 노즐 설계 기술
- 2) 노즐 Grid 배치, 부식, 막힘 특성 및 배관설계 특성 등을 해석하는 시스템 해석기술
- 3) 소화시스템의 소화성능을 적용 규정의 화재시나리오에 따라 실물화재 실험을 수행하는 시스템 성능평가 기술

상기한 핵심기술 중 1)과 2)의 경우 기술개발이 이루어지면 설계변경에 따라 해당기술을 활용할 수 있지만, 3) 시스템 성능평가의 경우 반복된 실물화재 성능시험을 통해 매 제품 개발마다 성능평가기준에서 정한 다양한 화재시나리오의 진압 성능을 확인하여야 하기 때문에 막대한 비용이 들며 많은 개발시간이 필요하다.

본 연구에서는 IMO MSC/circ. 1165 규정에 따라 미분무수를 이용한 선박 기관구역(20m×15m×10m)에서의 실물화재 소화실험을 수행하고, 미분무수의 화재진압 특성을 수치적으로 예측하기 위하여 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하여 실험과 같은 조건에서의 전산시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

선박의 기관실에 적용되는 전역방출 미분무수 소화시스템을 개발하기 위해 IMO MSC/circ. 1165 규정에 의거하여 실물화재 진압실험을 수행하였다.

### 2.1 실험 장치 및 미분무수 시스템

실험공간(Fig. 1)은 가로 20 m, 세로 15 m, 높이 10 m의 선박 기관실을 모형화한 밀폐공간으로 시험공간의 크기는 3,000 m<sup>3</sup>이다. 시험공간에는 화재 시 선박 기관실의 열린 문을 통한 공기의 공급을 고려하여 2 m×2 m의 개구부를 두었다. 시험장 중앙에 선박엔진의 mockup을 IMO 규정에 따라 제작 설치하였다. 실물화재 소화 시험에 사용된 미분무수 노즐은 (주)WIN에서 개발된 노즐<sup>7)</sup>로, 천장부에 A type(hollow cone 형식, k-factor = 2.4, 6.6 m×6.6 m Grid, total 9개) 노즐을, 개구부의 공기유동 차단(doorway protection)을 위해 B type(solid cone type, k-factor = 0.103, 3개)노즐을 사용하였다. 미분무수 분사 압력은 80 bar로 천장부에 설치된 노즐의 총 미분무수 방출 유량은 212 l/min이다.

### 2.2 실물화재 실험 시나리오

엔진실 화재진압시험용 화재시나리오는 8개의 소화시험 시나리오(Table 1, Table 2)로 구성되어 있다. 화재시나리오는 선박 엔진에서 발생 가능한 분무(spray) 화재 (시나리오 No. 1~4), 고임(pool)화재(시나리오 No. 5), 흐름(cascade)화재(시나리오 No. 6), 심부화재(시나리오 No. 7), 잠열에 의한 재점화(시나리오 No. 8)를 모사하고 있으며, 정확한 화원의 위치는 Fig. 2와 IMO MSC/circ. 1165<sup>6)</sup>에 나타나 있다.

또한 IMO MSC/Circ. 1165에는 화재 소화 실험용 시나리오와 별도로 미분무 소화시스템의 화재 공간 냉각 특성을 평가하기 위한 Thermal management 시험용 시

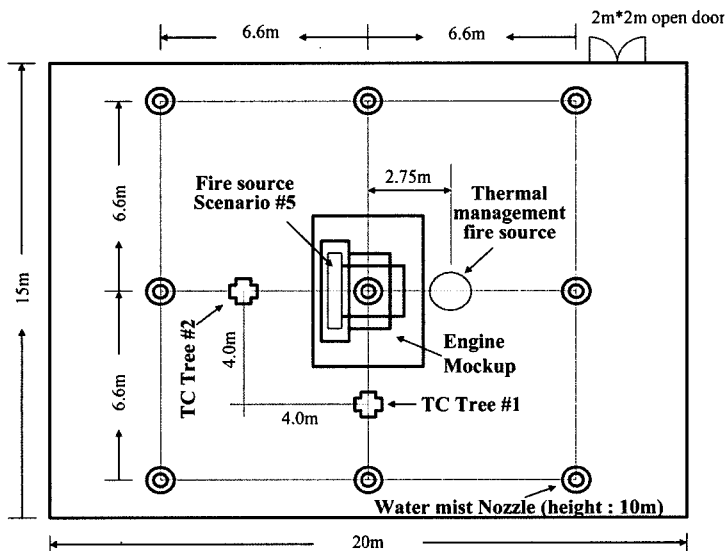


Fig. 1. Configuration of test enclosure, fire scenario and extinguishing system.

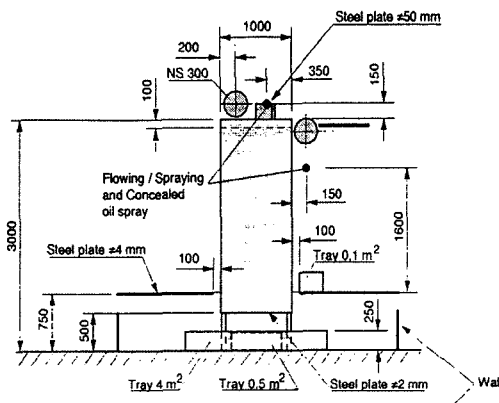
**Table 1.** Fire scenario for machinery engine room (IMO MSC/Circ. 1165)

Test no.	Fire scenario	Test fuel
1	Low pressure horizontal spray on top of simulated engine between agent nozzles.	Commercial fuel oil or light diesel oil
2	Low pressure spray in top of simulated engine centred with nozzle angled upward at a 45° angle to strike a 12-15 mm diameter rod 1 m away.	Commercial fuel oil or light diesel oil
3	High pressure horizontal spray on top of the simulated engine.	Commercial fuel oil or light diesel oil
4	Low pressure concealed horizontal spray fire on the side of simulated engine with oil spray nozzle positioned 0.1 m in from the end of the engine and 0.1 m <sup>2</sup> tray positioned on tope of the bilge plate 1.4 m in from the engine end at the edge of the bilge plate closest to the engine.	Commercial fuel oil or light diesel oil
5	Concealed 0.7 m×3.0 m fire tray on top of bilge plate centred under exhaust plate.	Heptane
6	Flowing fire 0.25 kg/s from top of mock-up	Heptane
7	Class A fires wood crib in 2 m <sup>2</sup> pool fire with 30 s preburn. The test tray should be positioned 0.75 m above the floor	Heptane
8	A steel plate (30 cm×60 cm×5 cm) offset 20° to the spray is heated to 350°C by the top low pressure spray nozzle positioned horizontally 0.5 m from the front edge of the plate. When the plate reaches 350°C, the system is activated. Following system shutoff, no reignition of spray is permitted.	Heptane

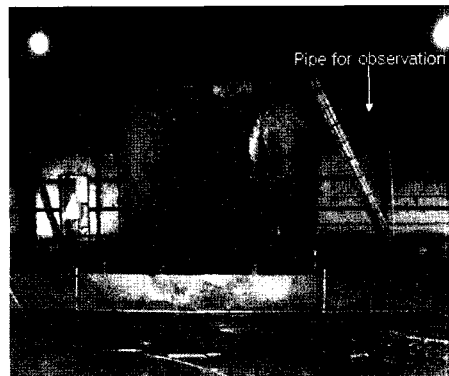
**Table 2.** Spray fire test parameters

Fire type	Low pressure	High pressure
Spray nozzle	Wide spray angle (120° to 125°) full cone type	Standard angle (at 6 bar) full cone type
Nominal fuel pressure	8 bar	150 bar
Fuel flow	0.16±0.01 kg/s	0.050±0.002 kg/s
Fuel temperature	20±5°C	20±5°C
Nominal heat release rate	5.8±0.6 MW	1.8±0.2 MW

나리오를 규정하여 화원에서 발생한 열을 효과적으로 냉각, 방호공간 내 온도를 일정온도 이하로 유지시킬 수 있는 능력을 확보하도록 하고 있다. 이는 화재시나리오의 화원 주변에 많은 수의 미분무수 헤드를 설치하여 화재진압성능평가를 통과하는 사례를 방지하기 위한 것으로 소화시스템은 방호공간의 크기에 따라 정의된 화원에서 발생한 열을 효과적으로 냉각시켜 공간 내 온도를 일정온도 이하로 유지시킬 수 있어야 한다. 현재 규정은 3,000 m<sup>3</sup>까지만 규정되어 있으며, 화원은 화재진압시험 시나리오 No.7의 Wood crib 위치에 설치된다. 화재의 크기와 화원의 위치는 Table 3과 Fig.



(a) Drawing



(b) Photographs

**Fig. 2.** Engine mockup.

**Table 3.** Fire source for thermal management test

No.	Test volume	Fuel	HRR	Pool area	Pool diameter
1	1,000 m <sup>3</sup>	heptane	2.0 MW	0.99 m <sup>2</sup>	1.12 m
2	1,500 m <sup>3</sup>	heptane	3.0 MW	1.45 m <sup>2</sup>	1.36 m
3	3,000 m <sup>3</sup>	heptane	6.0 MW	2.81 m <sup>2</sup>	1.89 m

1에 도시되어 있으며, 실험 시 미분무수에 의한 화재 발열량의 감소를 막기 위하여 화원 상부에 차폐막을 두도록 하고 있다.

**2.3 실험방법 및 판정기준**

헵탄 화재와 분무화재의 경우 15초 예연소 후 미분무수 소화시스템이 가동되며, 소화성을 인정받기 위해서는 모든 시나리오에 대하여 소화시스템 가동 후 15분 이내에 화재가 소화되고, 재발화가 발생하지 않아야 한다.

큰 공간에서의 실험이지만 본 화재시나리오와 같은 대규모 실물화재실험에서는 화재에 의해 생성된 연기가 실험공간을 가득 채우게 되어 육안으로 소화여부를 관찰하는 것이 매우 어렵게 된다. 본 연구에서는 화원 주변에 K-type 열전대들을 설치하여 화염의 온도를 기준으로 소화여부를 판단하였다. 이와는 별도로 화원 근처까지 화재를 관찰하기 위한 관측용 파이프를 설치하였다.

Thermal management test의 경우 화재공간 3,000 m<sup>3</sup>에서는 6 MW급 화재에 대해 화재 점화 후 6분 동안 화재 공간 내 최고온도(60초 평균)가 100°C를 초과하지 않아야 한다. 공간 내 온도측정은 Fig. 1의 열전대 tree #1과 #2에서 이루어지며, 각 tree에는 높이 0.50, 2.75, 5.00, 7.25, 9.50 m 위치에 열전대가 설치되어 온도를 측정한다. 온도 측정시 미분무수 입자의 직접냉각에 의한 효과를 제거하기 위하여 미분무수가 열전대에 직접 도달하지 못하도록 열전대를 차폐하였다.

Thermal management 시험 시에는 0.5 mm 이하 열전대를 사용하도록 규정되어 있는데 본 실험에서는 0.3 mm K-type 열전대를 사용하였다. 이외에 연료 분사압력 및 미분무수 분사압력 측정을 위한 압력계를 설치하였으며, 계측된 온도, 농도 및 압력 자료들은 PC에서 실시간으로 모니터링 되면서 기록 장치에 저장된다.

**3. 전산 해석**

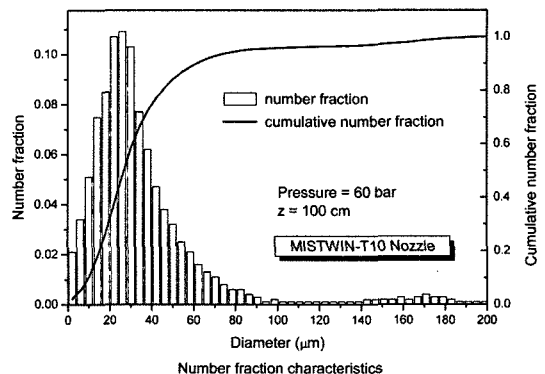
실물화재 실험과 같은 조건에서 전산수치해석을 통하여 실물화재 진압 성능 및 thermal management 여부

를 해석하고 실험과 비교하였다.

노즐의 소화특성 예측에 있어 이용된 수치해석 코드는 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발한 FDS V.4.0<sup>8-10)</sup>을 사용하였다. FDS 프로그램은 난류모델은 LES(Large Eddy Simulation) 모델을 그리고 연소모델은 혼합분율연소(mixture fraction combustion)모델을 사용하며, 복사열전달을 고려하여 연소유동장을 해석한다. 미분무수의 거동은 Lagrangian 방법을 사용하여 해석되며, 미분무수와 화재와의 상호작용은 주로 미분무수의 증발에 의한 주변온도 냉각, 화원면에 도달한 미분무수에 의한 화원 면 냉각, 미분무수의 증발에 의한 산소희석, 그리고 기화된 수증기의 복사차단 효과를 통해 이루어진다. 이러한 효과는 미분무수의 주요 화재진압 특성<sup>11)</sup>과 일치한다. 다만 계산 영역이 너무 커서, 화염대의 두께에 비해 매우 큰 그리드 간격을 줄 수밖에 없으므로, 미분무수가 화염면에 직접적으로 미치는 화학적 영향, 화염면 냉각 등은 다룰 수 없는 한계를 가지고 있다.

계산은 실험과 동일한 공간, 노즐 특성 및 배치, 동일한 화재시나리오를 적용하였다. 소화성능 simulation 과정 중에 반드시 필요한 노즐 입력자료는 분무특성 계측<sup>7)</sup>에서 얻어진 결과를 활용하였다. 대표적인 입력 자료는 입경분포 및 노즐 분사각, 미분무수입자의 유속이다. FDS 해석에서의 입력조건인 평균입경(Dv0.5)은 81.6 μm, 분사각은 40~50°, 분사 유속은 10 m/sec이다. 입자의 측정위치는 분사축을 따라서 노즐선단으로부터 1 m 떨어진 지점이다. Fig. 3은 해석에 사용된 A type 노즐의 입경특성을 보여준다.

화원은 liquid heptane pool fire로 주었다. liquid fire의 경우 FDS에서는 주변과의 열전달을 고려하여 액체 연료의 증발량을 구하고, 이를 토대로 화원의 발열량이 결정된다.



**Fig. 3.** Diameter characteristics of A type nozzle.

계산 격자는 가로 100, 세로 75, 높이 50개로 총 375,000개로 구성하였다.

본 논문에서는 화재규모가 상대적으로 큰 소화시험 화재시나리오 #5와 시스템 개발의 가장 중요한 요소인 thermal management test에 대하여 실험과 전산해석 결과를 비교하였다.

### 4. 실험 및 전산해석 결과

Table 4에 실물화재 진압실험 결과를 나타내었다. 모든 화재 시나리오에서 소화시스템 가동 후 15분 이내에 화재가 소화되고 재점화가 발생하지 않아, IMO MSC/Circ. 1165 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

화재시나리오 #5의 경우(Fig. 4) 미분무수 소화시스템 가동 후 541초(화재 점화 후 556초)에 소화되는 것으로 나타났다.

Fig. 5에 thermal management test 결과를 나타내었다. 열전대 tree #1, #2 모두 천장부분(높이 9.5 m)에서

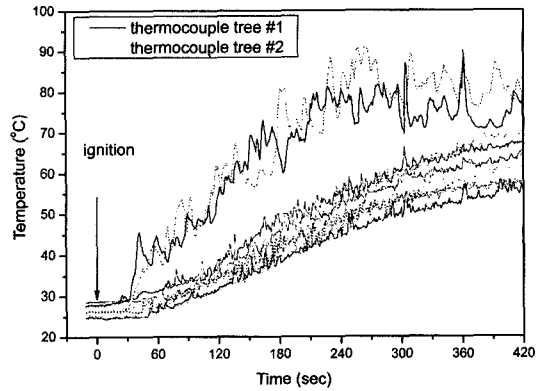


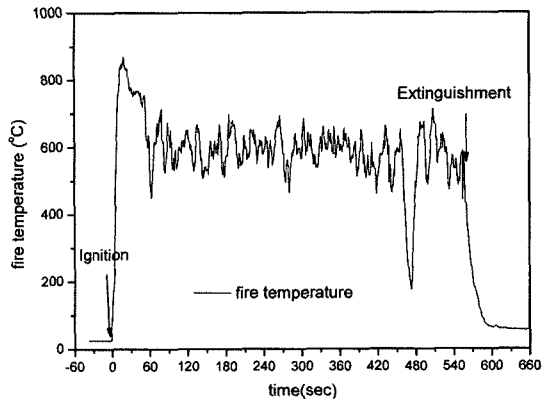
Fig. 5. Spatial temperature distribution for thermal management test.

Table 4. Test results of the fire-extinguishing test

Test scenario	Time (s)								Spent time for extinguishment from system activation (s)
	Fuel tray Ignition	Class A fire Ignition	Fuel spray Ignition	Heptane fire Ignition	System activation	Extinguishment	System deactivation	Fuel supply stop	
#1			0		15	387	402	418	372
#2			0		15	213	237	255	198
#3			0		15	64	80	95	49
#4	0		120		135	651	665	684	516
#5				0	15	556	583		541
#6				0	15	717	753	769	702
#7	0	0			30	503	552		473
#8	0			631	753	1142	1214	1252	389



(a) Photograph



(b) Ignition and extinguishment data

Fig. 4. Fire source and extinguishing record for fire scenario #5.

최고 온도를 보이며 온도는 대략 70~90°C 사이의 값이다. 화재시나리오 #5의 화재크기가 대략 5MW 이상으로 예측되는데, 주변 공간의 온도가 천장부에서 70~90°C 사이의 값이라는 사실은 미분무수가 가진 뛰어난 전역화재 진압 능력을 보여주는 결과이다.

Fig. 6에 FDS 시뮬레이션에 의한 화재시나리오 #5의 화재 발열량 변화를 나타내었다. 화재는 초기에 6.5 MW 정도까지 이르고 화재발생 약 250초 후부터 화재발열량이 감소하기 시작한다. 화재발생 후 556초에 화재크기는 최저 2~4 MW 정도까지 약화되지만 완전한 소화에 이르지 못하는 것이다.

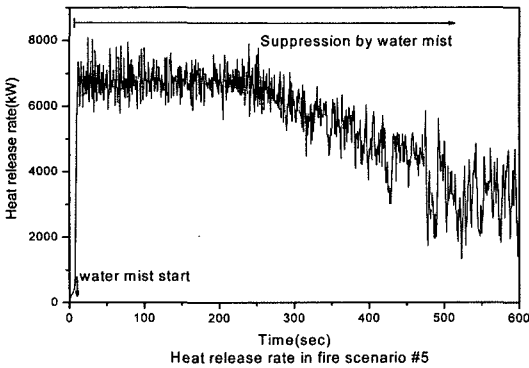


Fig. 6. Heat release rate of FDS simulation for fire scenario #5.

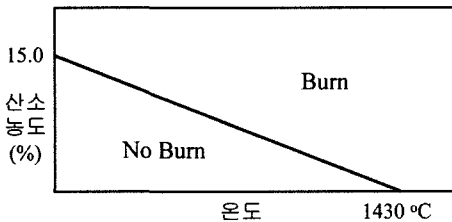


Fig. 7. Fire extinction mechanism implemented in FDS.

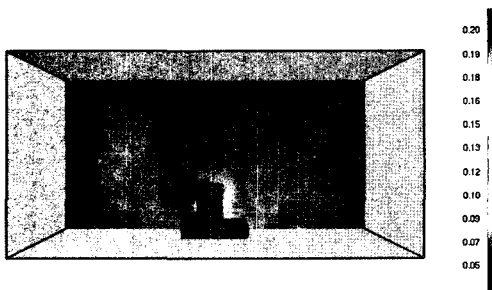


Fig. 8. Oxygen concentration at 556 sec after the fire ignition (fire scenario #5).

이러한 화재 크기의 감소는 FDS에 채택된 Fig. 7과 같은 화재의 소화 mechanism<sup>7,8)</sup>에 의해 설명된다.

실험 및 계산 공간의 개구부는 2 m×2 m로 화재 크기에 비해 상대적으로 작아 산소의 공급이 원활하지 못하다. 따라서 화재 진행시간이 길어지면 화재공간 내의 산소농도가 감소하게 된다(Fig. 8). 여기에 미분무수의 증발에 의한 산소 희석 효과가 더해진다. 또한 미분무수의 작용에 의해 화염대 주변의 온도가 낮아져 가연 한계의 범위를 더욱 줄이게 된다.

이러한 산소 감소와 온도 감소는 Fig. 7의 소화기구에서 화염이 존재하는 영역을 감소시켜 결과적으로 화재 발열량을 떨어뜨리게 된다.

그러나 실험의 경우 화재는 화재발생 556초에 완전히 소화된다. 이러한 실험과 계산의 차이는 실제 발열이 일어나는 화염대의 두께(수 mm 이하)와 계산에 사용된 그리드의 간격(20 cm)이 큰 차이가 나기 때문에 발생한다. 실제 화염대에 미치는 미분무수의 영향을 정확히 파악하고자 하면 화염대 두께보다 작은 그리드 간격이 요구된다. 그러나 화재와 같은 대규모 공간에서의 현상을 해석하기 위해서는 현실적으로 수 십 cm의 그리드 간격을 사용할 수밖에 없다. 현재 FDS 시뮬레이션 중 화재소화 해석의 정확도 향상을 위해 화

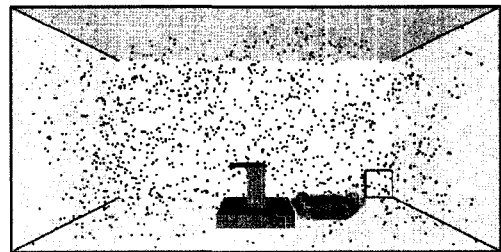


Fig. 9. Water-mist discharge in thermal management test.

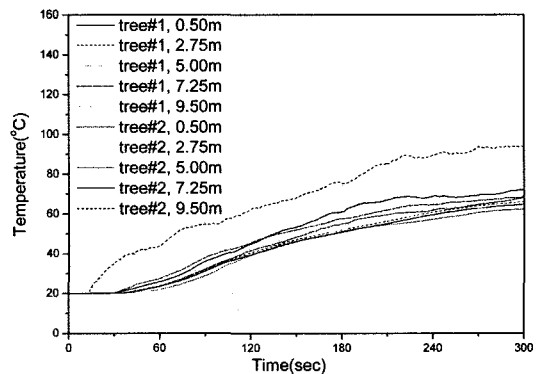


Fig. 10. Simulation results of thermal management test of 3000 m<sup>3</sup> enclosure.

재의 소화모델에 관한 많은 노력이 현재 진행 중이나, 아직까지 뚜렷한 대안을 제시하고 있지는 못한 상황이다.

Fig. 9과 10은 thermal management test에 대한 FDS 해석 결과를 도시하고 있다. Fig. 9는 화재공간 및 엔진의 모형, thermal management test의 화원, 그리고 화재초기 미분무수의 분사 상태를 보여준다. Fig. 7은 공간내의 온도 분포 결과를 보여준다. 실험 결과인 Fig. 5와 비교해 보면 시간에 따른 온도 상승, 높이에 따른 온도값, 최고온도 측면에서 모두 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 화원 발열량이 적절히 모사된다면 FDS에 의한 전산해석이 화원대 주변이 아닌 공간에서의 온도분포 예측에 활용될 수 있음을 보여주고 있으며, 기존연구<sup>11,12)</sup>에서도 입증된 바 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 IMO MSC/circ. 1165 규정에 따라 미분무수를 이용한 선박 기관구역(20 m×15 m×10 m)에서의 실물화재 소화실험을 수행하고, 미분무수 소화시스템의 대공간 화재진압능력을 검증하였다. 미분무수의 화재진압 특성을 수치적으로 예측하기 위하여 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하여 실험과 같은 조건에서의 전산시뮬레이션을 수행하였다. 전산 시뮬레이션 결과 화재소화시간 예측에는 한계가 있으나, IMO MSC/circ. 1165 규정에서 개발의 가장 큰 제한 요소가 되는 공간 내 온도분포 제어 성능의 예측을 위해서 전산시뮬레이션 기법이 활용될 수 있음을 보였다. 따라서 긴 개발시간과 막대한 비용이 소요되는 대공간 미분무수 실물화재 성능평가의 개발시간 단축 및 비용의 절감을 위해 전산수치해석 방법이 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지역산업개발사업 및 건설교통부 철도중합안전기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Protection

Systems, 2000 ed., NFPA.

2. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd edition, NFPA(2002).

3. G. Santos, "Water Mist Technology for Under Ground Transportation Systems", International Water Mist Conference(2003).

4. 한용식, 최병일, 김명배, "변압기실 화재에 대한 미분무수 소화시스템의 적용 - 소화특성을 중심으로(Part 1)", 한국화재소방학회논문지, Vol. 19, No. 4, pp.32-36(2005).

5. 최병일, 한용식, 김명배, "변압기실 화재에 대한 미분무수 소화시스템의 적용 - 냉각특성을 중심으로(Part 2)", 한국화재소방학회논문지, Vol. 19, No. 4, pp.37-41(2005).

6. Imo Msc/circ. 1165, Alternative Arrangements for Halon Fire-Extinguishing Systems in Machinery Spaces and Pump-rooms(2005).

7. 지역산업기술개발사업 중간보고서, "선박용 첨단 소화시스템의 소화성능평가 및 설계해석기술개발", 산업자원부(2006).

8. K.B. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July (2004).

9. K.B. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's Guide", NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July(2004).

10. G.P. Forney and K.B. McGrattan, "User's Guide for Smokeview Version 4", NIST Special Publication 1017, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July(2004).

11. G. Grant, J. Brenton, and D. Drysdale, "Fire Suppression by Water Spray", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26, pp.79-130(2000).

12. 노재성, 양승신, 김동현, 정우성, 장용준, 유홍선, "중저압 물분무를 이용한 객차내 화재진압에 관한 실험 및 수치해석적 연구", 한국철도학회논문집, Vol. 9, No. 3, pp.291-297(2006).

13. S.C. Kim and H.S. Ryou, "The Effect of Water Mist on Burning Rates of Pool Fire", Journal of Fire Sciences, Vol. 22, pp.305-323(2004).