

대공간에서의 수치계산을 통한 미분무수 소화설비 화재진압성능 예측

최병일*, 한용식*, 오창보*, 김명배*, 김창**, 김민수**

*한국기계연구원, **(주)WIN

Numerical Prediction of Fire Suppression Capability of Water-Mist System in Large Enclosure

B.I. Choi*, Y.S. Han*, C.B. Oh*, M.B. Kim*, C. Kim**, M.S. Kim**

*Korea Institute of Machinery and Materials, **WIN CO.

1. 서 론

미세 물분무 화재 진압 설비(Water Mist Fire Fighting System)^{1,2)}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, 지하철³⁾, 지상 기계실, 변전소^{4,5)} 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 승인기준으로 IMO MSC/circ. 1165⁶⁾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 선개발사가 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 성능평가와 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 성능적 기준에 의한 실물화재 실험을 통과하여야 하기 때문에 매 제품 개발마다 성능평가기준에서 정한 다양한 화재시나리오의 진압 성능을 확인하여야 하기 때문에 막대한 비용이 들며 많은 개발시간이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 긴 개발시간과 막대한 비용이 소요되는 실물화재 성능평가의 개발시간 단축 및 비용의 절감을 위해 전산수치해석을 활용하는 방법을 개발하고자 하였다. IMO MSC/circ. 1165⁶⁾ 규정에 따라 미분무수를 이용한 대공간(20m*15m*10m)에서의 실물화재 소화실험을 수행하고, 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.

2. 실험

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

실험공간 (Fig. 1)은 가로 20m, 세로 15m, 높이 10m로 시험공간 크기가 3,000m³이다. 시험공간에는 2m*2m의 개구부를 두었다. 시험에 사용된 노즐은 (주)WIN에서 개발된 노즐로, 천장부에 MISTWIN - T-10 (hollow cone 형식, k-factor = 2.4, 6.6m*6.6m Grid, total 9개) 노즐을, 개구부의 공기유동 차단(doorway protection)을 위해 MISTWIN MISS-5 (k-factor = 0.103, 3개)노즐을 사용하였다. 미분무수 분사 압력은 80 bar로 사용된 총 분무량은 212 l/min이다.

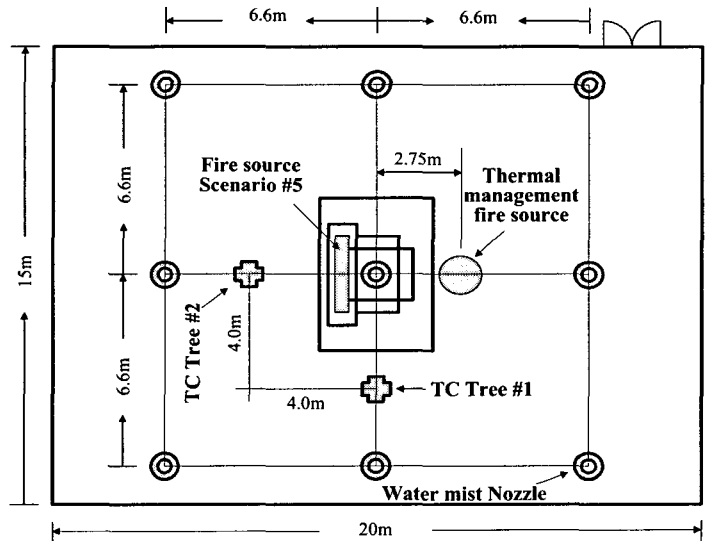


Fig. 1 Configuration of test enclosure, fire scenario and extinguishing system

엔진실 화재진압시험용 화재시나리오는 8개의 소화시험 시나리오 (Table 1)로 구성되어 있다.

또한 IMO MSC/Circ. 1165에는 분무노즐의 화재 공간 냉각특성을 평가하기 위한 Thermal management 시험용 화재 시나리오가 있어 방호공간의 크기에 따라 정의된 화원에서 발생된 열을 효과적으로 냉각시켜 공간 내 온도를 일정온도 이하로 유지시킬 수 있는 능력을 확보하도록 하고 있다. 이 공간 내 냉각특성 성능실험은 IMO MSC/Circ. 1165 규정에서 가장 통과하기 어려운 부분으로, 충분한 소화능력을 갖추지

못한 노즐을 소화시나리오 화원 주변에 집중적으로 배치하여 소화시험을 통과하는 경우를 막고자 개발된 성능 규정으로 선박 기관실용 전역방출 시스템의 개발에 있어 가장 중요한 부분이다. 화원의 위치와 공간 내 온도측정 위치는 Fig. 1에 도시되어 있다. 공간 내 온도측정은 열전대 tree #1과 #2에서 이루어지며, 각 tree 에는 높이 0.50, 2.75, 5.00, 7.25, 9.00m 위치에 열전대가 설치되어 온도를 측정한다.

Table 1 IMO MSC/Circ. 1165 소화시험용 화재시나리오

Test No.	Fire Scenario	Test Fuel
1	엔진 상부 저압 수평분무화재	경유
2	엔진상부 길이 1m, 직경 15mm인 봉에 45°방향으로 저압수평분무화재	경유
3	엔진 상부 고압분무화재	경유
4	엔진 측면 저압 분무화재 + 0.1m ² pool 화재	경유
5	엔진 측면 0.7m×3.0m Pool fire	헵탄
6	0.25kg/s 흐름화재	헵탄
7	Class A 목재화재+2m ² pool 화재 (30초간 예연소)	헵탄
8	재발화 방지 성능평가, 저압 헵탄 분무 화재	헵탄

헵탄 화재의 경우 15초 예연소 후 미분무수 소화시스템이 가동되며, 소화성능을 인정받기 위해서는 모든 시나리오에 대하여 소화시스템 가동 후 15분 이내에 화재가 소화되어야 한다. Thermal management test의 경우 화재공간 3,000m³에서는 6MW급 화재에 대해 화재 점화 후 후 6분 동안 화재 공간 내 최고온도(60초 평균)가 100℃를 초과하지 않아야 한다.

3. 전산 해석

실물화재 실험과 같은 조건에서 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 이용하여, 화재 진압 성능 및 thermal management 여부를 예측하였다.

노즐의 소화특성 예측에 있어 이용된 수치해석 코드는 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발한 FDS V.4.0을 사용하였다. FDS 프로그램^{7,8,9)}은 난류모델은 LES(Large Eddy Simulation)모델을 그리고 연소모델은 혼합분율 모델을 사용하며, 복사열전달을 고려하여 해석한다. 미분무수의 거동은 Euerian-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 효과에 의해 이루어진다. 이러한 효과는 미분무수의 주요 화재진압 특성¹⁰⁾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 계측에서 얻어진 결과를 활용하였다. 대표적인 입력자료는 입경분포 및 미분무수입자의 유속이다. Dv 0.5 는 81.6 μm, 분사 유속은 10 m/sec이다. 입자의 측정위치는 분사축을 따라서 노

졸선단으로부터 1m 떨어진 지점이다.

화원은 liquid heptane pool fire로 주었다. liquid fire의 경우 FDS에서는 주변과의 열 전달을 고려하여 액체 연료의 증발량을 구하고, 액체를 사용하여

계산 격자는 가로 100 세로 75 높이가 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 2에 실물화재 진압실험 결과를 나타내었다. 화재시나리오 #5의 경우 미분무수 소화시스템 가동 후 541초(화재 점화 후 556초)에 소화되는 것으로 나타났으며, 모든 화재 시나리오에서 소화시스템 가동 후 15분 이내에 화재가 소화되어 IMO MSC/Circ. 1165 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 2 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

Fig. 2에 thermal management test 결과를 나타내었다. 열전대 tree #1, #2 모두 천장부분(높이 9.5m)에서 최고 온도를 보이며 온도는 대략 70~90 °C 사이의 값이다. 화재시나리오 #5의 화재크기가 대략 5M 이상으로 예측되는데, 주변 공간의 온도가 천장부에서 70~90 °C 사이의 값이라는 사실은 미분무수가 가진 뛰어난 전역화재 진압 능력을 보여주는 결과이다.

Fig. 3에 FDS 시뮬레이션에 의한 화재시나리오 #5의 화재 발열량 변화를 나타내었다. 화재는 초기에 6.5MW 정도까지 이르고 화재발생 약 150초 후부터 화재발열량이 감소하기 시작한다. 화재발생 후 556초에 화재크기는 최저 2 MW 정도까지 약화되지만 완전한 소화에 이르지 못한다. 이러한 화재 크기의 감소는 FDS에 채택된 Fig. 4와 같은 화재의 소화 mechanism^{7,8)}에 의해 설명된다. 실험 및 계산 공간의 개구부는 2m*2m로 화재 크기에 비해 상대적으로 작아 산소의 공급이 원활하지 못하다. 따라서 화재 진행

시간이 길어지면 화재공간 내의 산소농도가 감소하게 된다.(Fig. 4) 여기에 미분무수의 증발에 의한 산소 희석 효과가 더해진다. 또한 미분무수의 작용에 의해 화염대 주변의 온도가 냉각되어 가연 한계의 범위를 더욱 줄이게 된다.

이러한 산소 감소와 온도 감소는 Fig. 5의 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(20cm)이 큰 차이가 나기 때문에 발생한다. 실제 화염대에 미치는 미분무수의 영향을 정확히 파악하고자 하면 화염대두께보다 작은 그리드 간격이 요구된다. 그러나 화재와 같은 대규모 공간에서의 현상을 해석하기 위해서는 현실적으로 수 십 cm의 그리드 간격을 사용할 수밖에 없다. FDS 해석의 정확도 향상을 위해 이러한 차이를 극복하기 위한 많은 노력이 현재 진행 중이나, 아직까지 뚜렷한 대안을 제시하고 있지는 못한 상황이다.

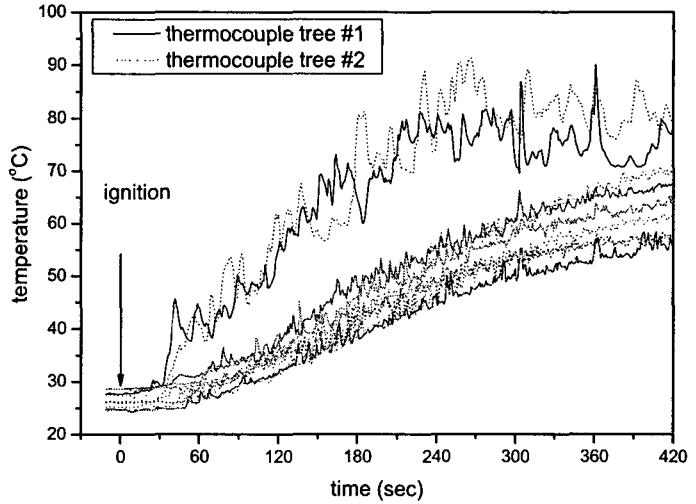


Fig. 2 Spatial temperature distribution for thermal management test

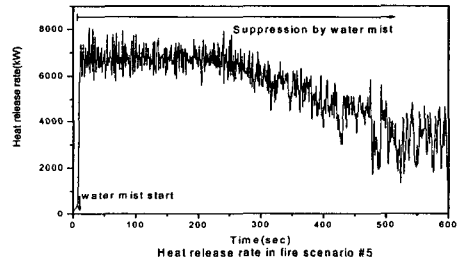


Fig. 3 Heat release rate for fire scenario #5

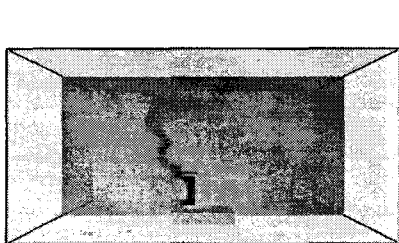


Fig. 4 Oxygen concentration at 556 sec after the fire ignition (fire scenario #5) implemented in FDS

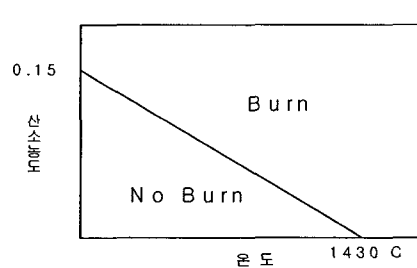


Fig. 5 Fire extinction mechanism

Fig. 6은 thermal management test에 대한 FDS 해석 결과(공간내의 온도 분포)를 보여준다. 실험 결과인 Fig. 2와 비교해 보면 시간에 따른 온도 상승, 높이에 따른 온도 값, 최고온도 측면에서 모두 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 화원 발열량이 적절히 모사된다면 FDS에 의한 전산해석이 화염대 주변이 아닌 공

간에서의 온도분포 예측에 활용될 수 있음을 보여주고 있으며, 기존연구^{11,12)}에서도 입증된 바 있다.

5. 결론

IMO MSC/circ. 1165 규정에 따라 미분무수를 이용한 대공간(20m*15m*10m)에서의 실물화재 소화실험을 수행하고 미분무수의 화재진압 특성을 수치적으로 예측하기 위하여 FDS를 사용하여 실험과 같은 조건에서의 전산시물레이션을 수행하였다. 전산 시물레이션 결과 전산시물레이션이 화재소화시간 예측에는 한계를 가지나, 화염대 주변이 아닌 공간내 온도분포 제어 성능의 예측에는 만족할 결과를 도출하였다. 이들 결과를 토대로 미분무수 소화시스템의 개발시간 단축 및 개발비용 절감에 전산해석 방법이 유효하게 활용될 수 있음을 알았다.

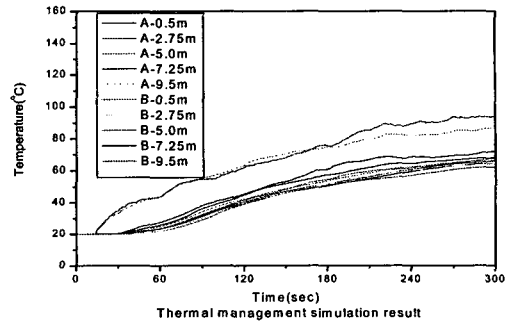


Fig. 6 Simulation results of thermal management test of 3000m³ enclosure

6. 후기 : 본 연구는 산업자원부 지역산업개발사업 및 건설교통부 철도중합안전기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

7. 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 - 소화 특성을 중심으로(Part 1), 한국화재소방학회논문지, 제19권 4호, pp.32-36, 2005
5. 최병일, 한용식, 김명배, 변압기실 화재에 대한 미분무수 소화시스템의 적용 -냉각특성을 중심으로(Part 2), 한국화재소방학회논문지, 제19권4호, pp.37-41, 2005
6. IMO MSC/Circ. 1165, ALTERNATIVE ARRANGEMENTS FOR HALON FIRE-EXTINGUISHING SYSTEMS IN MACHINERY SPACES AND PUMP-ROOMS, 2005
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale, "Fire Suppression by Water Spray", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp, 79-130, 2000
11. 노재성, 양승신, 김동현, 정우성, 장용준, 유희선, 중저압 물분무를 이용한 객차내 화재진압에 관한 실험 및 수치해석적 연구, 한국철도학회논문집, 제9권 3호, pp.291-297, 2006
12. Sung Chan Kim, Hong Sun Ryou, The Effect of Water Mist on Burning Rates of Pool Fire, *Journal of FIRE SCIENCE*, Vol.22, pp.305-323, July, 2004.