

미세물분무 소화성능에 관한 연구

김 봉 환[†], 김 용 판, 문 철 진*, 홍 철 현**, 이 형 욱***, 최 현 호****
양산대학 기계설비과, *양산대학 자동차과, **부산대학교 대학원 기계공학과, ***CFX Korea(주), ****(주)삼호전설

A Study on the Performance of Water Mist Spray Fire Protection System

Bong-Hwan Kim[†], Yong-Pan Kim, Chul-Jin Moon*,
Chul-Hyun Hong**, Hyoung-Wook Yi***, Hyun-Ho Choi****

Department of Mechanical Equipment System, Yangsan College, Yangsan 626-740, Korea

**Department of Automotive Engineering, Yangsan College, Yangsan 626-740, Korea*

***Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Busan National University, Busan 609-735, Korea*

****CFX Korea Co., Ltd., Seoul 135-912, Korea*

*****SAM HO Electric Co., Ltd., Yangsan 626-230, Korea*

(Received March 27, 2003; revision received May 29, 2003)

ABSTRACT: The present study was numerically and experimentally performed to investigate the fire suppression performance of water mist spray subjected to thermal radiation in closed space. Downward-directed water mist sprays to interact with an under kerosine pool fire were investigated in test facility. The mass mean diameters of water mist droplet were measured by PMAS under various flow conditions. The developed water mist spray nozzle was satisfied to the criteria of NFPA 750, Class 1. The mechanism of the fire suppression by water mist was attributed to the cooling of the fire surface which lead to suppressed of fuel evaporation. It was proved that the water mist spray system under lower pressures could be applied to underground fire protection system.

Key words: Water mist(미세물분무), Nozzle(노즐), Fire suppression(소화)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

d : 노즐의 구경 [mm]

l : 분사거리 [m]

MMD : 질량평균입경 [μm]

P : 물안개 노즐 분사압력 [bar]

Q : 분사유량 [L/min]

t : 분사 소요시간 [s]

T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

θ : 물안개 노즐의 분사각 [$^{\circ}$]

1. 서 론

인간의 안전을 위해 소화설비는 산업시설 및 건물에 있어서 반드시 필요한 만큼 이에 대한 연구 또한 세계 각국에서 매우 활발히 이루어지고 있다. 특히 환경보호차원에서 하론 소화약제의 사용억제로 인한 대안으로서 미세물분무의 사용에 관한 관심이 크게 고조되어 왔으며, 최근에 와서 국제해사기구(International Maritime Organization)는 미세물분무 소화설비를 선박의 기관

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-370-8166; fax: +82-55-370-8265

E-mail address: bhwkim@mail.yangsan.ac.kr

실 및 선실에 2002년 7월 1일부터 설치하도록 의무화하였다.^(1,2) 또한 엄청난 국가적 손실을 야기시켰던 여의도 지하 공동구 화재사건을 볼 때, 스프링클러 설비로서는 지하 공동구 화재 발생시 초기 화재진압에 실패한 것으로 나타났다. 이에 대한 근본 대책으로서 선진국에서는 미세물분무 소화시스템 적용이 대두되고 있다. 미세물분무에 대한 연구는 1955년 Braidech 등에 의해 기본원리에 대한 연구를 시작으로 1994년 FMRC(Fac-tory Mutual Research Corporation)의 가연성 액체화재에 대한 미세물분무 소화설비 적용실험을 최초로 실시하였으며, 이후 외국에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나,⁽³⁾ 국내에서는 아직 초기단계에 있는 실정이다. 미세물분무 소화시스템의 핵심은 미세물분무 입자(200 μm 이하의 입경 99% 이상 : NFPA 규정⁽⁴⁾)를 만들 수 있는 미세물분무 소화노즐에 있다. 물의 미세입자는 화재공간 내에서 단시간 내 완전증발로 화염 주위에 대한 냉각효과와 기화하면서 팽창된 증기가 화염원으로 침투하여 주위의 공기를 차단 시킴으로써 질식효과를 동시에 발휘하게 되며, 또한 화재시 발생한 매연 등으로 오염된 공기를 증기가 세정하는 작용을 하게 된다.⁽⁵⁾ 본 연구는 차세대 소화시스템인 미세물분무 소화시스템의 국산화 및 지하 공동구의 소화시스템에의 적용을 위해서 미세물분무 소화노즐개발과 개발된 노즐의 지하 공동구 화재에의 적용성을 수치해석적 연구와 실험적 연구를 병행하여 규명하고자 한다.

2. 수치해석 및 결과고찰

2.1 수치해석방법 및 적용모델

미세물분무 소화용 노즐 내의 유동해석과 사각공간 내에서의 유류화재에 대한 미세물분무 소화에 대한 수치해석을 위해 수치해석을 위해 상용 CFD 프로그램인 CFX4(AEA Tecnology)를 사용하였으며, 사용된 모델과 지배방정식은 아래와 같다.^(6,7)

Introduced capability

- Fluid flow with heat transfer
- Eddy dissipation combustion model

- Particle tracking for evaporating water and oil
- Diffusion limit radiation model
- Bossinesque buoyancy model
- k-ε turbulence model

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

운동량방정식

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

에너지방정식

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + Q$$

여기서 $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$

연소방정식

- $C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$
- Property assumption ideal gas
(Compressible) Diffusivity = Viscosity

화학종방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\rho D_{i,i} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \right)$$

2.2 미세물분무 노즐 내 유동해석

본 수치해석의 목적은 저압형 미세물분무 소화노즐개발을 위한 준비단계로 행해졌으며, 스월 생성실(swirl chamber)에서의 압력손실을 최소화하고 출구에서의 분무성능을 높이기 위해 스월 발생기(swirl generator)에서 접선방향의 유입유동

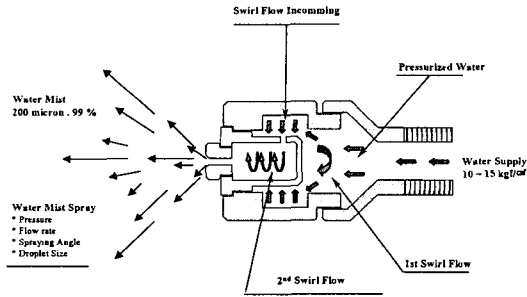


Fig. 1 The structure of water mist nozzle.



Fig. 2 Longitudinal velocity vector.

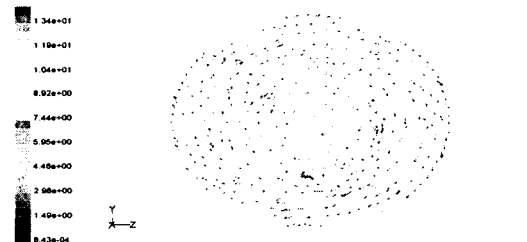


Fig. 3 Axial velocity vector.

에 대한 스윙 생성실 내 내부유동을 수치적으로 해석하였다. Fig.1은 개발된 저압형 미세물분무 노즐 내 스윙 발생기로 유입되는 접선방향의 유동과 분무되는 과정을 간략하게 그림으로 나타낸 것이다.⁽⁸⁾

각각의 유입구가 이루는 각도는 각각 120°이며, 스윙 생성실의 직경은 8.7mm이다.

Fig.2와 Fig.3은 Fig.1의 스윙 생성실에서의 내부유동을 상용코드를 이용하여 해석한 결과로서 X-Y, Y-Z 단면에서의 유속 크기를 나타내고 있다. Fig.2에서 접선방향으로 유입된 유동이 스윙 생성실 내의 벽면에서 나선형 형태의 유동이 생성됨을 알 수 있다. 그리고 Fig.3에서 시계방향의 강한 스윙이 실(chamber)내에 생성됨을 볼 수 있다.

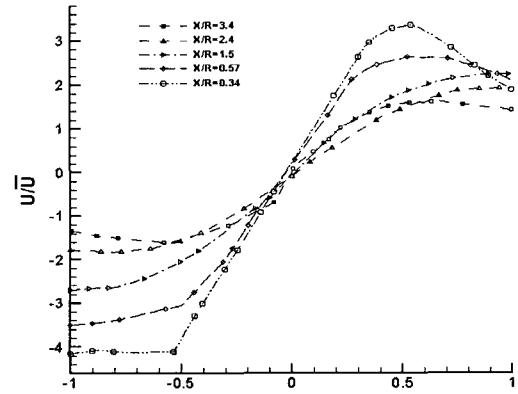


Fig. 4 Radial velocity distributions in swirl chamber of water mist nozzle.

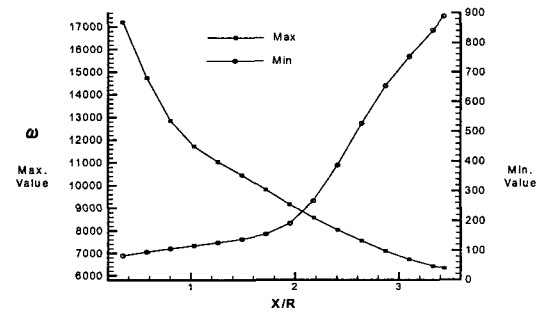


Fig. 5 Max. and Min. vorticity values.

Fig. 4는 스윙 발생기로부터 $X/R=0.34, 0.57, 1.5, 2.4, 3.4$ 의 각 단면에서의 축 방향 속도분포를 나타내고 있다. 출구 쪽으로 갈수록 초기 생성된 나선형 유동이 실내 벽면에서의 마찰과 출구 쪽의 내경 감소로 인한 영향으로 축 방향 속도가 감소되는 것으로 나타났다.⁽⁹⁾ Fig.4에서 보여주듯이 Y-Z 단면에서의 축 방향 속도분포가 감소하면서 나선형 유동이 점차 평활화가 되어 가고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig.5에서는 최대와도(maximum vorticity)와 최소와도(minimum vorticity)값의 변화를 나타내고 있다. Fig.5에서 초기 입구 쪽에서의 최대와도값은 출구 쪽으로 갈수록 급격히 감소하고 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 출구 쪽으로 갈수록 벽면의 마찰로 인한 축 방향의 속도 감소와 최고와도 값이 감소하고 있는 것을 보여주고 있다. 반대로 최저와도 값은 점차 상승하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 입구 쪽에서는 유입된 초기 유동이 실내에서 충분히 성장하지 못

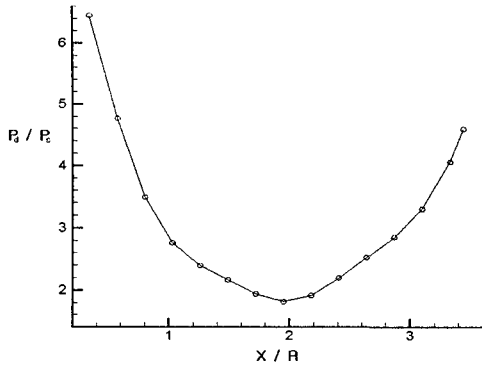


Fig. 6 Dynamic and static pressure ratio.

한 상태이며 출구 쪽으로 갈수록 차츰 성장해 가고 있는 것으로, 단면에서의 전체적인 최고와도 값은 감소하지만 최소와도 값은 증가함을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 6에서의 압력분포(동압/정압; P_d/P_s) 곡선에서도 보여주고 있다.

2.3 유류화재에 대한 미세물분무 소화성능해석

실험조건과 맞추기 위해 95초 동안 3리터의 케로신(heptane)이 연소하며, 5초간 물이 분사되는 것으로 하였으며, 밀폐된 공간이라고 가정하였다. 벽은 단열(insulation)되어 있고 밀폐상태로 하였으며 유동을 발생시키는 주 요인은 부력이기 때문에 부력 항을 넣어서 계산하였다.

Fig. 7에서 Fig. 10은 수치해석결과를 나타낸다. 벽은 단열(insulation)되어 있고 밀폐상태이기 때문에 산소 양은 시간이 갈수록 감소하고, 산소의 양이 가장 빨리 감소하는 oil pan 부근은 온도가 중간에 내려갔다 올라갔다 하는 경향이 나타났다. 그림을 보면 온도는 처음에 위로 퍼졌다가 그 다음에 사방으로 전파되어 나가는데 이것은 유동을 발생시키는 주 요인이 부력이기 때문이며 현상 자체가 타당하다고 판단된다. Fig. 9와 Fig. 10으로부터 물분무 후에 온도가 급격히 내려감을 알 수 있으며, 5초 동안에는 화염꺼지는 것으로 판단되나, 주위의 높은 온도는 5초 이내에 완전히 내려가지는 않았다. 이러한 현상은 실제 실험과 수치해석과의 가정에서 차이가 있는 것으로 여겨지는데, 본 수치해석에서는 완전 밀폐로 하였으나, 실제로는 실험장치의 문 틈새로 공기가 들어간 것으로 확인되었다. 수치해석을 통하여 미세물분무에 의해 화재가 진압됨을 확인하였으며, 미

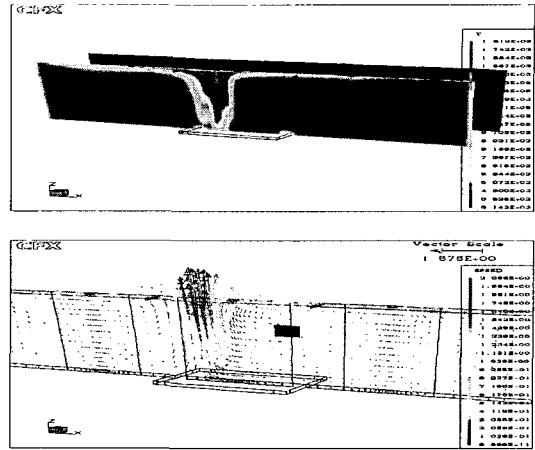


Fig. 7 Temp. and velocity profiles at $t=10$ sec.

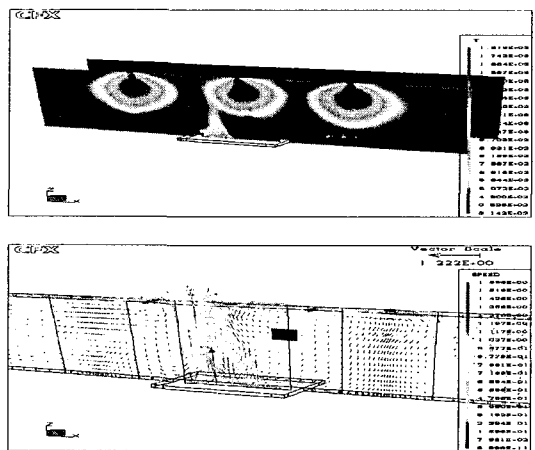


Fig. 8 Temp. and velocity profiles at $t=91$ sec.

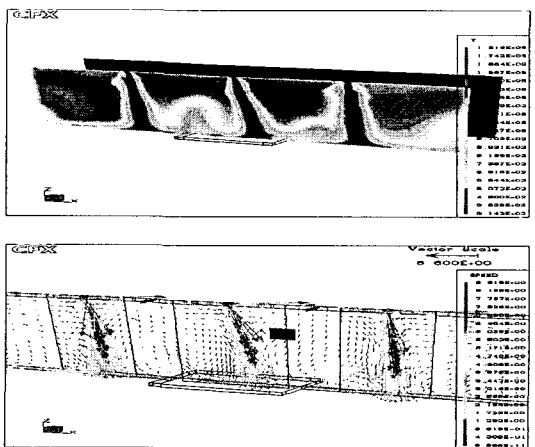


Fig. 9 Temp. and velocity profiles at $t=95$ sec.

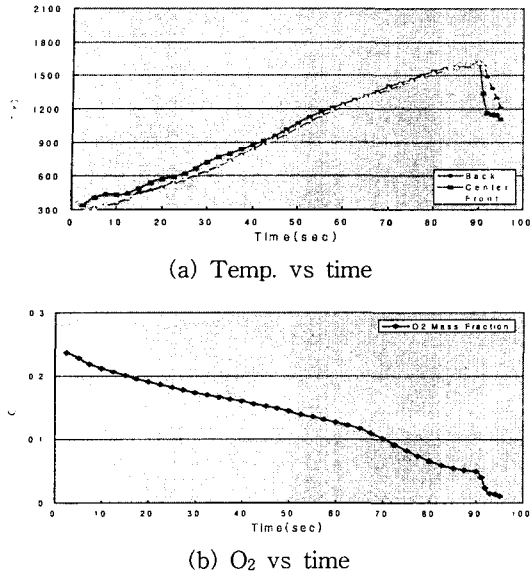


Fig. 10 Temperature and O₂ variation curves according to the change of time.

세물분무 소화시스템의 경제적 설계를 위해서는 모든 경우에 대해서 실험을 수행하기에는 시간과 비용이 엄청 소요되기 때문에 CFD를 이용하여 전산모사를 해서, 여러 가지 경우에 대한 결과를 얻어 설계함이 필수적이라 사료된다.⁽⁷⁾

3. 실험장치 및 방법

3.1 미세물분무 노즐 성능시험

미세물분무 소화노즐의 분무특성인 분사압력, 분사유량, 분사각, 분사거리, 그리고 입경분포 특성을 규명하기 위해 분무특성 시험장치를 제작 설치하여 실험을 수행하였다. 노즐에서 분사되는 미

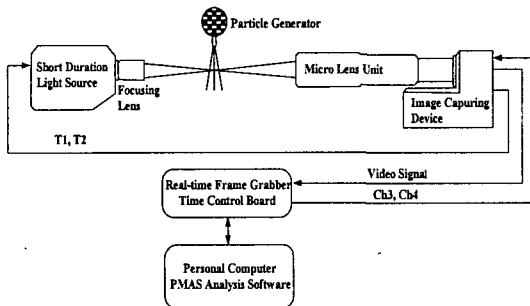


Fig. 11 The schematic diagram of PMAS.

세물분무 입자의 입경분포를 측정하기 위해 PMAS (Particle Motion Analysis System)를 사용하였다. PMAS는 일정한 체적 속에 존재하는 유체 내 입자의 2차원적인 분포도와 속도를 계측하는 장치로 높은 반복률을 가진 이중광원을 이용하여 직진성 분무의 거시적인 해석과 미세한 입자들의 정성적이고 정량적인 해석을 할 수 있다. Fig. 11은 PMAS의 개략도를 나타낸다. PMAS의 하드웨어 구성은 짧은 반복률을 가지는 이중광원과 다양한 확대비를 가지는 마이크로 렌즈, CCD 카메라로 획득한 영상을 받아들이는 영상확대장치와 실시간 화상처리장치로 구성된다.

3.2 미세물분무 소화실험

국내에 설치된 지하 전력구는 일반적으로 직사각형 단면과 타원형 단면이 사용되는데, 직사각형 단면으로는 2.2mW×2.3mH와 3.2mW×2.3mH가 많이 사용된다. 따라서 저압용 미세물분무 소화노즐의 화재진압 메커니즘을 규명하기 위해

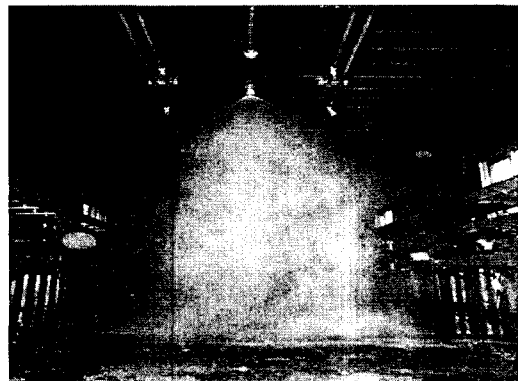
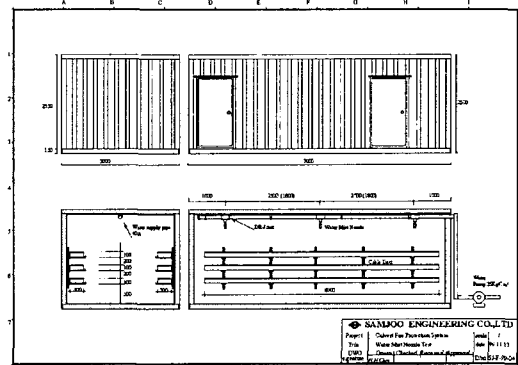


Fig. 12 Fire suppression test facility.

지하 전력구 내의 실제상황을 재현한 콘테이너형 시험장치(3.0mW×2.5mH×7.0mL)를 제작하여 실험을 수행하였다. 본 실험장치는 미세물분무 소화에 따른 온도특성을 파악하기 위해 시험장치의 각 부위에 열전대를 설치하였으며 측정값은 PC로 온라인 처리하였다. Fig. 12는 화재실험장치의 개략도와 시험장치 내에서의 실제 미세물분무 분사장면을 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미세물분무 노즐 성능실험

노즐의 분사압력을 10~15 Bar까지 변화시켰을 경우, 분무특성을 Fig. 13에 나타내었다. 실험결과를 살펴보면 압력이 증가할수록 유량과 분사거리 는 증가하였으나 분사각과 미세물분무 입자의 평

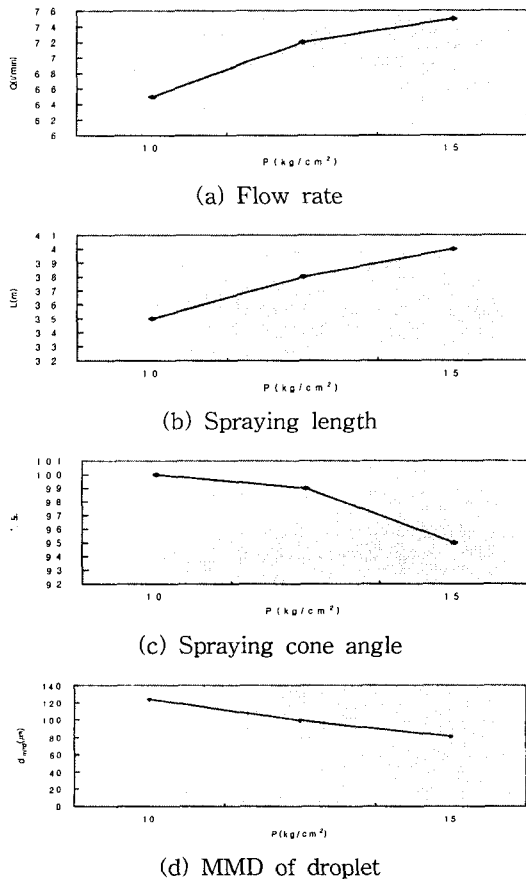


Fig. 13 The spraying nozzle test results.

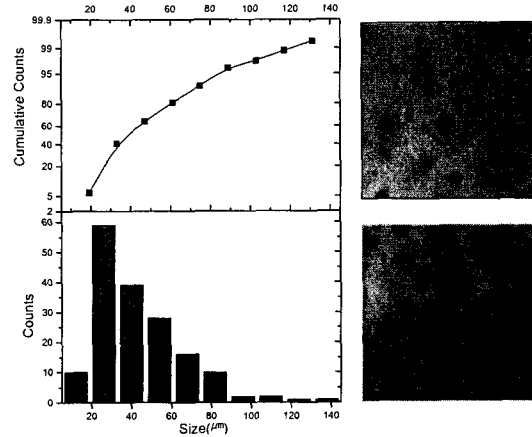


Fig. 14 Mist droplet diameter ($MMD=81.55\ \mu\text{m}$).

균입경은 감소하였다. 압력이 증가할수록 더욱 미세한 물분무 입자가 멀리 있는 화원에 도달할 수 있게 되어 화재진압에 효과적인 것으로 판단된다. 10 Bar에서도 목표로 하는 유량인 6L/min와 분사각 90°를 초과하는 것으로 나타났다. 분사압력이 15 Bar일 경우, 미세물분무 입자의 입경분포 및 입자형상에 대한 실험결과를 Fig. 14에 나타내었다. 이때 미세물분무 입자의 질량평균직경(MMD)이 $81.55\ \mu\text{m}$ 이며 $200\ \mu\text{m}$ 이상인 입자가 없음을 보여주었으며, 아울러 NFPA 750, Class 1을 만족함을 확인하였다.

따라서 본 연구를 통하여 적용된 미세물분무 소화노즐은 실제 화재진압에 적용 가능할 것이라는 결론을 얻었으며, 다음에 언급되는 실제 화재진압 시험을 통하여 확인할 수 있었다.

4.2 미세물분무 소화실험

노즐의 분무실험을 통하여 확인된 미세물분무 노즐로 직접 화재진압을 한 실험결과를 Fig. 15에 나타내었다. 화재진압 시험결과로부터 미세물분무 개시 후 거의 5초 이내에 화재가 진압이 되었

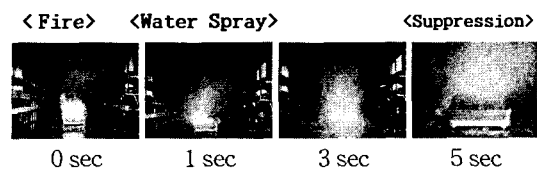


Fig. 15 The visualization of fire suppression.

으며, 분사한 지 37초 정도 경과 후 거의 냉각이 다 되는 것으로 나타났다. 미세물분무는 화재의 진압뿐만 아니라 냉각에도 큰 효과가 있음을 확인하였다.

5. 결 론

미세물분무 소화의 성능규명을 위한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발한 노즐은 비교적 저압인 10~15 Bar에서 NFPA 750, Class 1을 만족하는 미세물분무 소화용 노즐임을 확인하였다.

(2) 분사압력이 증가할수록 미세물분무 입자의 평균입경이 더 작아지며 분사유량은 증가하였다.

(3) 수치해석 및 화재시험을 통하여 개발한 노즐의 미세물분무로서 5초 이내 완전히 소화되어졌으며, 특히 실험결과로서 화재진압 후 냉각효과와 집진 세정력이 뛰어났다.

(4) 미세물분무 소화설비의 개발을 위한 성능평가 시스템을 구축하였으며, 앞으로 지하 공동구 및 터널의 소화설비의 실용화를 이룰 수 있는 계기를 마련하였다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단(과제번호: KRF-2001-003-E00469)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. IMO MSC Cir. 913, Local application water-based fire extinguishing system.
2. IMO MSC Cir. 668/728. Total flooding water-based fire extinguishing system.
3. Liu, Z. G. and Kim, A. K., 2000, A review of the research and application of water mist fire suppression systems-fundamental studies, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 32-50.
4. NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 1996 Edition, pp. 1-40.
5. Rosanderand, M. and Giselsson, K., 1984, Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes, Fire, pp. 43-46.
6. CFX4 Introductory Training, AEA Technology, December, 1977.
7. George, V. H., Kim, A. and Knil, K., 1995, Physical and Numerical Modelling of the Interaction Between Watersprays and a Fire Plume, Phenomena in Combustion, pp. 1-12.
8. Korean Patent Application Number 10-2000-0016277.
9. Komori, S. and Ueda, H., 1985, Turbulent flow structure in the mean field of a swirling round free jet, Physics Fluids, Vol. 28, pp. 2075-2082.