

미세 물 분무 소화 성능에 관한 연구

· 김 봉 환*, 김 용 판*, 문 철 진**, 홍 철 현***, 이 형 욱****

A study on the Water Mist Fire Suppression Performance

Bong-Hwan Kim, Yong-Pan Kim, Chul-Jin Moon, Chul-Hyun Hong, Hyoung-Wook Yi

- * 양산대학 기계설비과
- ** 양산대학 자동차과
- *** 부산대학교 대학원 기계공학과
- **** CFX Korea(주)

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 concluded to be 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(미세 물 분무), Nozzle(노즐), Fire Suppression(소화)

1. 서론

산업의 첨단화와 사회구조의 정보화는 다양한 재해발생요인을 안고 있으며 또한 재해에 대해 매우 취약한 구조적 특징을 지니고 있다고 할 수 있다. 특히 화재에 의한 재해는 발생원과 대응 시스템이 잘 관리되고 있음에도 불구하고 대표적인 인위적 재해가 되고 있는데 이는 아직도 소화설비에 대한 보완과 개선이 이루어져야 함을 지적하고 있다.

할로겐화합물 소화약제는 화재에 대한 적응성과 소화력이 우수하여 널리 이용되어 온 소화약제이다. 그러나 환경친화적 소화약제의 중요성이 부각되면서 최근 미세 물 분무에 대한 관심이 고조되고 있다. 국제해사기구는 미세 물 분무 소화설비를 선박의 기관실 및 선실에 2002년 7월 1일부터 설치하도록 의무화하였다^[1-2]. 또한 엄청난 국가적 손실을 야기 시켰던 여의도 지하 공동구

화재사건에서 보듯이 기존의 소화시스템은 화재 적응성 면에서 많은 문제점이 드러나고 있어 선진국에서는 미세 물 분무에 의한 소화시스템의 적용을 검토하고 있다.

미세 물 분무 소화 시스템의 핵심은 미세 물 분무입자(200 μ m이하의 입경 99%이상: NFPA규정^[3])를 만들 수 있는 미세 물 분무 소화 노즐에 있다. 물의 미세 입자는 화재공간 내에서 단시간 내 완전증발로 화염주위에 대한 냉각효과와, 기화하면서 팽창된 증기가 화염원으로 침투하여 주위의 공기를 차단시킴으로서 질식효과를 동시에 발휘하게 되며 또한 화재시 발생한 매연 등으로 오염된 공기를 증기가 세정하는 작용을 하게 된다^[4].

본 연구는 차세대 소화 시스템인 미세 물 분무 소화시스템의 국산화 및 지하 공동구에의 적용을 위한 미세 물 분무 노즐개발과 개발된 노즐에 의한 지하 공동구 화재에의 적용성을 수치해석적 연구와 실험적 연구를 병행하여 규명하고자 한다.

2. 수치해석 및 결과 고찰

2.1 수치해석 방법 및 적용 모델

미세 물 분무 소화용 노즐내의 유동해석과 사각공간 내에서의 유류화재에 대한 미세 물 분무 소화에 대한 수치해석을 위해 상용 CFD 프로그램을 사용하였으며, 사용된 모델과 지배방정식은 아래와 같다^[5-6].

◎ 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-e turbulence model

◎ Combustion equations

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

2.2 미세 물 분무 노즐 내 유동해석

본 수치해석의 목적은 저압형 미세 물 분무 노즐개발을 위한 준비단계로 행해졌으며, 스윙 생성실(Swirl chamber)에서의 압력손실을 최소화하고 출구에서의 분무성능을 높이기 위해 스윙 발생기(Swirl generator)에서 접선 방향의 유입 유동에 대한 스윙 생성실내 내부유동을 수치적으로 해석하였다. Fig. 1은 개발된 저압형 미세 물 분무 노즐 내 스윙 발생기로 유입되는 접선방향의 유동과 분무되는 과정을 간략하게 그림으로 나타낸 것이다. 각각의 유입구가 이루는 각도는 각각 120°이며, 스윙 생성실의 직경은 8.7mm이다.

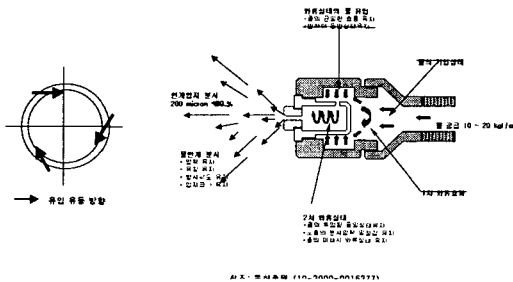


Fig. 1 The structure of water mist nozzle

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.

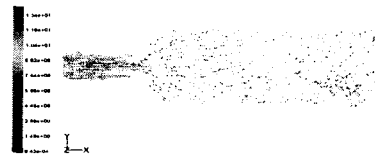


Fig. 2 Longitudinal velocity vector

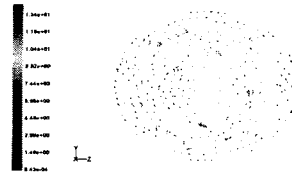


Fig. 3 Axial velocity vector

Fig. 4는 스윙 발생기로부터 X/R=0.34, 0.57, 1.5, 2.4, 3.4의 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^[7]. Fig. 4에서 보여 주듯이 Y-Z 단면에서의 축 방향 속도분포가 감소하면서 나선형 유동이 점차 평활화가 되어가고 있는 것을 볼 수 있다.

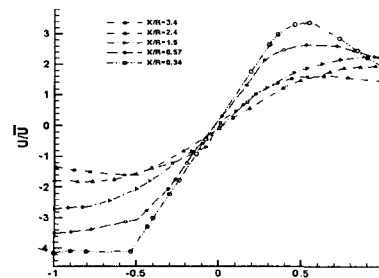


Fig. 4 Radial velocity distributions in swirl chamber of water mist nozzle

Fig. 5에서는 최대와도(Maximum vorticity)와 최소와도(Minimum vorticity) 값의 변화를 나타내고 있다. Fig. 5에서 초기 입구 쪽에서의 최대와도 값은 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 못한 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;Pd/Ps) 곡선에서도 보여주고 있다.

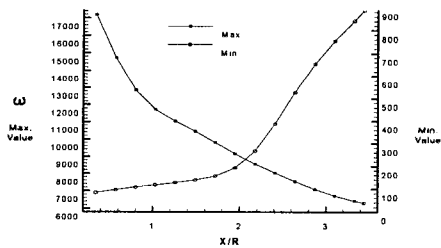


Fig. 5 Max. and Min. vorticity values

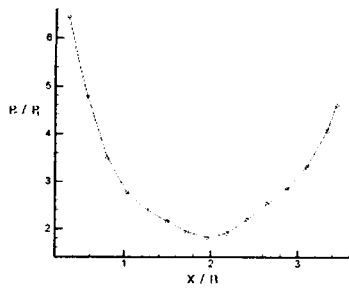


Fig. 6 Dynamic and static pressure ratio

2.3 미세 물 분무 노즐 내 유동해석

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 수치해석 결과를 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 물 분무 후에 온도가 급격히 내려감을 알 수 있으며, 5 초 동안에는 화염은 꺼지는 것으로 판단되나, 주위의

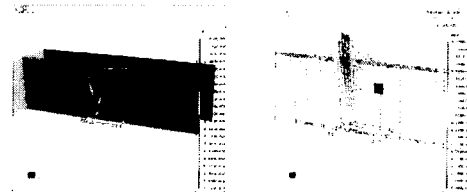


Fig. 7 Temp. and velocity profiles at t=10sec

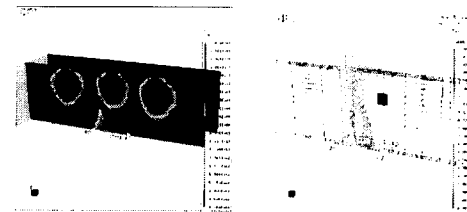


Fig. 8 Temp. and velocity profiles at t=91sec

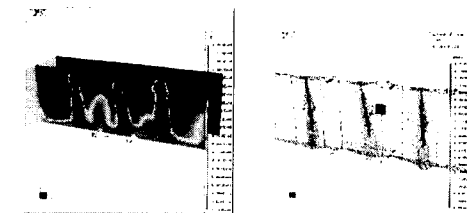
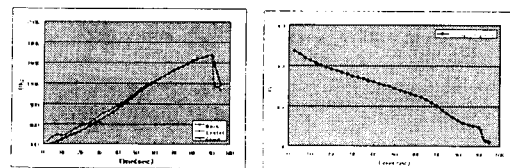


Fig. 9 Temp. and velocity profiles at t=95sec



(a) temp. vs time (d) O₂ vs time
Fig. 10 Temperature and O₂ vs time

높은 온도는 5 초 이내에 완전히 내려가지는 않았다. 이러한 현상은 실제 실험과 수치해석과의 가정에서 차이가 있는 것으로 여겨지는데, 본 수치해석에서는 완전 밀폐로 하였으나, 실제로는 산소가 공급되는 곳이 있을 것으로 예상된다. 계속적인 연구를 통하여 이러한 문제점은 보완되리라 기대된다. 수치해석을 통하여 미세 물 분무에 의해 화재가 진압됨을 확인하였으며, 미세 물 분무 소화 시스템의 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 사료된다⁶⁾.

3. 실험장치 및 방법

3.1 미세 물 분무 노즐 성능실험

미세 물 분무노즐의 분무특성인 분사압력, 분사유량, 분사각, 분사거리 그리고 입경분포 특성을 규명하기 위해 분무특성 시험장치를 제작 설치하여 실험을 수행하였다. 노즐에서 분사되는 미세 물 분무 입자의 입경분포를 측정하기 위해 PMAS(Particle Motion Analysis System)를 사용하였다. PMAS는 일정한 체적 속에 존재하는 유체 내 입자의 2차원적인 분포도와 속도를 계속하는 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, CCD카메라로 획득한 영상을 받아들이는 영상획득장치와 실시간 화상처리장치로 구성된다.

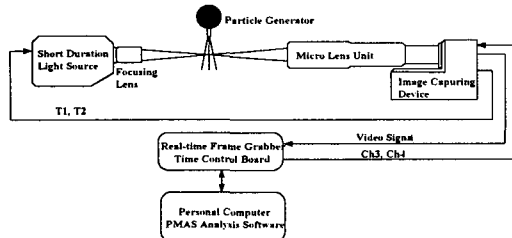


Fig. 11. The schematic diagram of PMAS

3.2 화재 실험장치

저압용 미세 물 분무노즐의 화재진압 메커니즘을 규명하기 위해 지하 전력구내의 실제상황을 재현한 시험장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 본 실험장치는 미세 물 분무소화에 따른 온도특성을 파악하기 위해 시험장치의 각 부위에 열전대를 설치하였으며 측정값은 PC로 온라인 처리하였다. Fig. 12는 화재실험장치의 개략도와 시험장치 내에서의 실제 미세 물 분무 분사장면을 나타낸다.

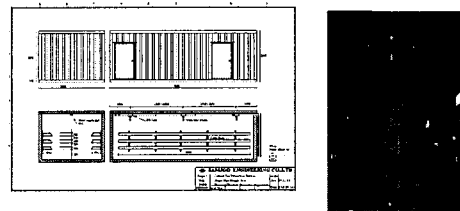


Fig. 12 Fire suppression test facility

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미세 물 분무 노즐 성능실험

노즐의 분사압력을 10에서 15 Bar까지 변화시켰을 경우, 분무특성을 Fig. 13에 나타내었다. 실험결과를 살펴보면 압력이 증가할수록 유량과 분사거리는 증가하였으나 분사각과 미세 물 분무입자의 평균입경은 감소하였다. 압력이 증가할수록 더욱 미세한 물 분무입자가 멀리 있는 화원에 도달할 수 있게 되어 화재진압에 효과적인 것으로 판단된다. 10 Bar에서도 목표로 하는 유량인 6 l/min와 분사각 90°를 초과하는 것으로 나타났다. 분사압력이 15 Bar일 경우, 미세 물 분무입자의 입경분포 및 입자형상에 대한 실험결과를 Fig. 14에 나타내었다.

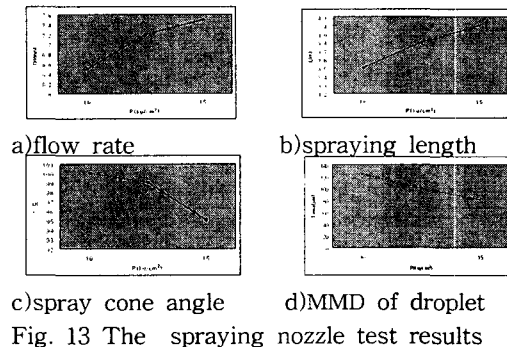


Fig. 13 The spraying nozzle test results

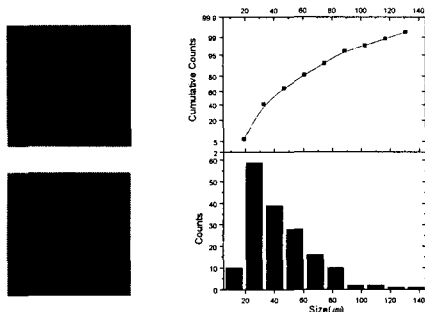


Fig. 14 Mist droplet diameter(MMD=81.55 μm)

이때 미세 물 분무입자의 질량평균직경(MMD)이 81.55 μm 이며 200 μm 이상인 입자가 없음을 보여주었으며, 아울러 NFPA 750, Class 1을 만족함을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통하여 적용된 미세 물 분무노즐은 실제 화재진압에 적용 가능할 것이라는 결론을 얻었으며 다음에 언급되는 실제 화재진압 시험을 통하여 확인할 수 있었다.

4.2 화재실험

노즐의 분무실험을 통하여 확인된 미세 물 분무노즐로 직접 화재진압을 한 실험결과를 Fig. 15에 나타내었다. 화재진압 시험결과로부터 미세 물 분무개시 후 거의 5 초 이내에 화재가 진압이 되었으며, 분사한지 37 초 정도 경과 후 거의 냉각이 다 되는 것으로 나타났다. 미세 물 분무는 화재의 진압뿐만 아니라 냉각에도 큰 효과가 있음을 확인하였다.

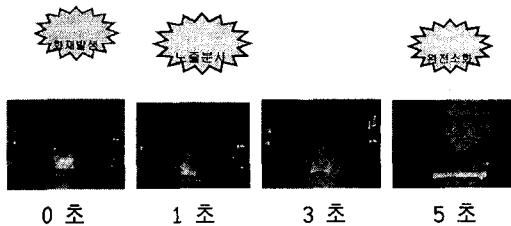


Fig. 15 The visualization of fire suppression

4. 결론

미세 물 분무소화의 성능규명을 위한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개발한 노즐은 비교적 저압인 10~15 Bar에서 NFPA 750, Class 1을 만족하는 미세

- 물 분무소화용 노즐임을 확인하였다.
- (2) 분사압력이 증가할수록 미세 물 분무입자의 평균입경이 더 작아지며 분사유량은 증가하였다.
- (3) 수치해석 및 화재시험을 통하여 개발한 노즐의 미세 물 분무로서 5 초 이내 완전히 소화되어졌으며, 특히 실험결과로서 화재진압 후 냉각효과와 집진 세정력이 뛰어났다.
- (5) 미세 물 분무소화설비의 개발을 위한 성능평가 시스템을 구축하였으며, 앞으로 지하공동구 및 터널의 소화설비로의 실용화를 이룰 수 있는 계기를 마련하였다.

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] NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 1996 Edition, pp.1-40
- [4] M. Rosanderand, K. Giselsson, "Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes", Fire, pp. 43-46, 1984
- [5] CFX 4 Introductory Training, AEA Technology, December, 1977
- [6] V. H. George, A. Kim and K. Knil, "Physical and Numerical Modelling of the Interaction Between Watersprays and a Fire Plume", Phenomena in Combustion, pp. 1-12, 1995
- [7] S. Komori and H. Ueda, "turbulent flow structure in the mean field of a swirling round free jet", Physics Fluids, Vol. 28, pp. 2075-2082, 1985