B-13

베인 내장형 미분무수 소화 노즐의 분무특성에 관한 수치해석 연구

김한수, 김동춘, 이창언, 장영남*
*인하대학교 기계공학과, (주)우당기술산업 연구소**

A Numerical Analysis on the Spray Characteristics of Water-Mist Fire Suppression Nozzle with Swirl Vane

Han-Soo Kim, Dong-Chun Kim, Chang-Eon Lee, Young-Nam Jang*
Department of Mechanical Engineering, INHA University,
Woodang Technical industry Co., Ltd.,*

1. 서 론

지하공간의 화재제어를 위해 기존에는 Halon 1301 등과 같은 불활성 가스 및 화학약품이 주로 사용되었으나, 오존층 파괴 등의 환경문제로 인하여 이들 소화제의 사용이 제한되었다. 이후 새로운 청정 소화시스템의 개발이 진행되고 있으며, 특히 1990년대 초반부터 화재진압 효율이 높고 지하공간의 피해를 최소화 시킬 수 있는 미세물분부(Fine water spray 또는 Water mist)에 대한 관심이 증가되고 있다. 일반적으로 미세물분무에 의한 화재 억제기구로서 화재 플럼(Plume) 및 연료 표면의 냉각효과와 화염대의 산소농도 저감 및 연료 희석에 의한 효과가 가장 영향이 크다고 알려져 있다.[1] 이외에도 물입자의 열적 방어벽 역할에 의한 화원으로의 복사열전달 감소효과와 화염대에 H_2O의 유입에 의한 화학반응 억제 효과 등이 존재한다.[2]

대표적인 수계화재제어 장치인 스프링클러는 다량의 물분사에 의한 화염의 열적 냉각효과를 이용하는 것이나, 다량의 물 분사량에 의한 2차 피해가 발생되는 단점을 가지고 있다. 반면에 400μm (액체연료 화원 기준) 이하의 크기로 입자를 분사하는 미세물분무는 액체 입자 표면적의 증가로 인한 기화속도의 증가로 인한 냉각효과의 증가, 또 수증기로 기화될 때 급격한 부피팽창으로 인한 산소농도의 감소효과로 인해 스프링클러에 비해 소화효율을 높으며, 물 소모율도 90%정도 저감시킬 수 있다고 알려져 있다.[3]

이러한 미분무수 소화시스템의 핵심 부품은 분무 노즐이다. 선진국의 제작사에서는 자체의 고유모델을 개발하고 이에 대한 설계 및 성능 특성은 거의 공개되지 않고 있는 실정이다. 또한, 대부분의 연구는 실험에 의존하고 있고, 복잡한 노즐 형상과 유동조건으로 이론적 연구는 초보 단계이다.[4] 따라서 노즐 설계에 대한 독자적인 기술을 확보하기 위해서는 분무노즐 내부의 유동특성 및 노즐의 분문특성에 대한 기초적인 자료를 확보하여야 한다.

본 연구는 차세대 소화 시스템으로 각광받는 미세물분무 소화시스템의 국산화를 위하여, (주)우당기술산업에서 독자적으로 개발하고 있는 베인 내장형 미분무수 소화노즐을 지하 공동구의 소화 시스템 적용에 적용한 경우를 대상으로 노즐 내부의 유체역학적 특성 및 분무특성을 검토하여, 이 결과를 설계에 반영하고자 수행한 것이다. 본 연구에서는 범용 열·유동 해석 소프트웨어인 Fluent를 이용하여, 분사압력에 따른 노즐 내부의 압력강하 및 유동특성을 고찰하였으며, 이 노즐 지하 공동구의 소화에 경우의 미부수의 거동을 살펴보았다.

2. 수치해석 기법

2.1 계산 대상

본 연구에서는 노즐 내부의 유동특성 및 분무특성을 검토하기 위해, Fig. 1과 같이, 노즐내부의 비압축성 영역(구역1)과 노즐 외부의 이상유동장(구역2)으로 나누어 유동해석을 하였다. 본 연구 대상인 베인 내장형 미분무수 소화노즐의 형상은 Fig.2 와 같다.

구역1 노즐 내부는 유동은 3차원 비압축성 해석이 필요하다. 이 해석 결과로 구역2의 분무특성 해석의 초기조건으로 사용되며, 또 노즐의 성능(K-factor)를 구하는데 사용된다. 또 구역2의 분무유동장의 해석을 위해서 이상유동 모델(Discrete Phase Model, DPM)을 사용한다.[5,6]

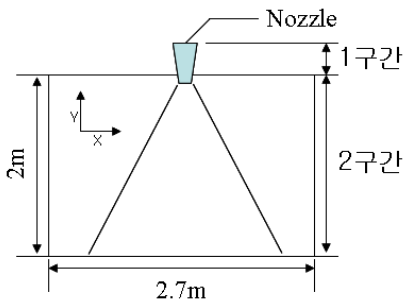


Fig. 1 Definition of calculation region

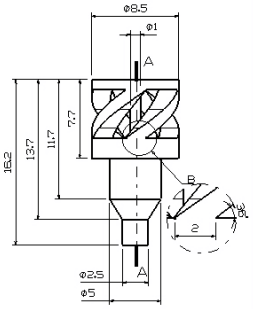


Fig. 2 Schematic of water-mist nozzle with swirl vane

2.2 지배방정식

3차원 비정상 유동장의 지배 방정식을 총괄적으로 표현하면 식(1)과 같이 임의의 검사체적 V에 대한 Cartesian 적분형태의 Navier Stokes 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \vec{W}dV + \oint [\vec{F} - \vec{G}] \cdot dA = \int_V \vec{H}dV \qquad (1)$$

여기서 벡터 $\vec{W}$는 유동변수 이고, $\vec{F}$는 대류항, 그리고 $\vec{G}$는 점성항을 나타낸다. $\vec{H}$는 각 보존식의 생성항을 나타낸다. 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다.[7] 분무 유동장 해석은 DPM 모델을 이용하여 입자거동을 해석하였다.

2.3 계산방법 및 경계조건

계산격자점 생성은 Gambit V2.2를 사용하였으며, 노즐 내부 해석 격자점은 약 45만개로 구성하였다. 2구간의 분무 유동장은 가로 2.7m, 세로 2.7m, 높이 2m의 해석공간을 대상으로 총 격자 100만개의 등간격 정렬형 격자를 사용하였다. 본 노즐의 작동범위는 약 10bar 공급압력에서 사용된다. 우선, 본 연구에서는 분사유량 성능을 확인하기 위해, 공급압력을 5bar, 10bar, 20bar, 30bar로 변화시켜 보았다. 이때 노즐성능과 관련된 K-factor의 지수 n을 0.5로 가정하였다. 유동장의 해석은 범용 열·유동 해석 코드인 FLUENT V6.2를 사용하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 노즐 내부 유동특성

Fig. 3은 개발 노즐의 X-Y,단면에서의 유속크기를 나타내고 있다. 접선방향으로 유입된 유동이 Vane을 거치면서 스월이 생성됨을 알 수 있다. 이때 vane에서 나온 유동이 스월 생성실에서 정체되어있음을 확인할 수 있으며 압력손실이 일어난다. Fig. 4는 노즐 운전시의 노즐 단면 평균 내부 압력 분포를 나타낸 것이다. 압력 강하는 vane에서 약 10%가 발생하고, vane 출구와 출구 오리피스 사이의 공간에서 약 20%, 출구 오리피스에서 약 20%를 차지하였다.

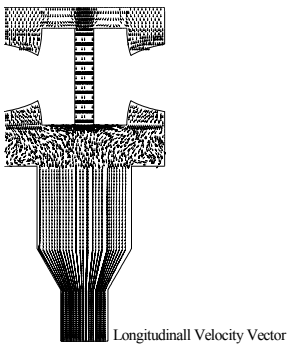


Fig. 3 Longitudinal velocity vector within the nozzle operating at supply pressure 10bar

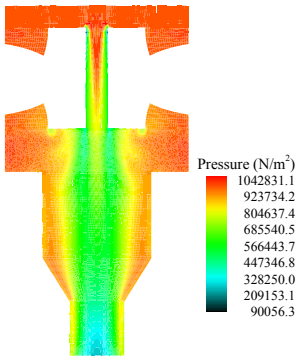


Fig. 4 Pressure contour (right) within the nozzle operating at supply pressure 10bar

Fig. 5는 오리피스 출구에서의 내부 속도 분포를 도시한 것이다. 여기서 X축은 오리피스 출구 하단의 단면을 나타내며 출구 속도의 대칭현상을 잘 보여주고 있다. 오리피스 출구 벽면에서 유속이 점점 하강하며 출구 가운데에서 유속이 W자형을 이루는데, 이는 vane을 통과한 물이 swirl을 일으켜 출구에 영향 주기 때문이다. 또한 그림 (b)는 노즐출구의 축방향 속도분포를 나타내고 있다. 출구에서 대칭적으로 나선형 유동이 생성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

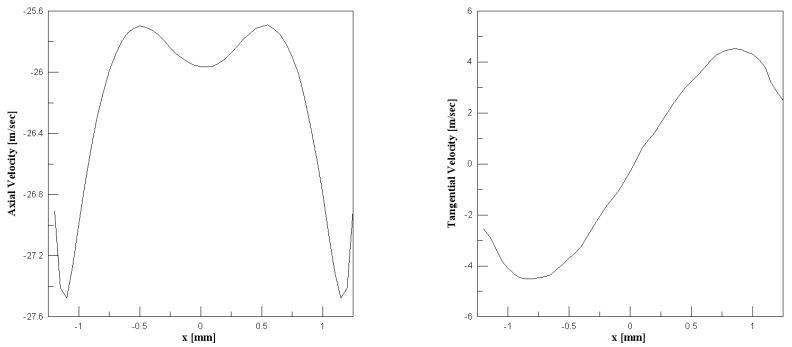
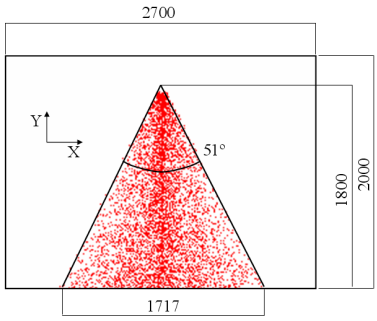


Fig. 5 Profiles of axial velocity and tangential velocity at the nozze exit.

3.2 분무 유동장 해석

분무 유동 특성인 분무 각도, 제트의 폭, 입자 분포를 보기위해서는 Fig. 6과 같은 2차원 단면도가 편리하다. 본 연구에 사용된 노즐의 공급압력 10bar에 대한 초기 분무 각도는 51°이며 그에 따른 분포면적은 약 $2.32m^2$이다. Fig.7은 입자 직경에 따른 분포를 가시화한 것이다. 노즐 출구와 중심에서는 50~150μm의 입자가 주류를 이루나 미분무수의 외곽에서는 200 μm 이상의 굵은 입자가 발견되는 것을 확인할 수 있다. 또한 미세물분무 입자의 질량평균 직경이 1000㎛ 이상인 입자가 없음을 보여주었으며, 아울러 NFPA 750, Class 1을 만족함을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통하여 적용된 미세물분무 소화노즐은 실제 화재진압에 적용 가능할 것이라는 결론을 얻었다.



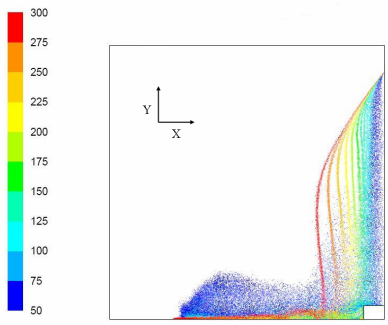


Fig. 6 Spray angle and distribution Fig. 7 Distribution of droplet dimeter

본 연구에서 고려된 노즐 설계 기준을 50~300% 운전 조건으로 성능 예측한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Nozzle performance for Pressure

	5 bar	10 bar	20 bar	30 bar
출구 속도 $(m/\sec)$	18.36	26.2	36.69	44.62
Q $(L/\min)$	5.38	7.67	10.75	13.07
K-factor $(lpm/bar^{0.5})$	3.2	3.2	3.2	3.15
초기분무각도 (dgr)	61	51	45	43
분포면적 (m^2)	3.53	2.32	1.75	1.58

4. 결론

본 연구는 (주) 우당기술산업에서 독자적으로 개발하고 있는 베인 내장형 미분무수 소화노즐을 대상으로 노즐 내부의 유체역학적 특성 및 분무특성을 검토하였다.

1. 개발한 노즐은 저압인 10Bar에서 NFPA 750, Class1을 만족하는 미세물분무 소화용 노즐임을 확인하였다.
2. 노즐의 스월 생성실에서 유동이 정체되며 압력손실 확인하였다. 압력손실을 줄이기 위해서는 스월 생성실의 형상 변화가 필요할 것으로 사료된다.
3. 분무액적의 크기는 분무중심에서 외각으로 갈수록 크게 나타났으며 액적의 크기분포는 액적크기가 작은 영역에서 밀집도가 높게 나타났다.
4. 본 연구에 사용된 노즐의 적용 공간 및 화재에 따라 다중분사 및 형상변형이 필요할 것으로 사료되며 이에 대해서는 추후 연구되어야 하겠다.

참고문헌

1. R. Wighus, "Engineering Relations for Water Mist Fire Suppression Systems", Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, p397(1995).
2. J. R. Mawhinney, B. Z. Dlugogorski and A. K. Kim, "A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist", Fire Safety Science - Proceedings of Fourth International Symposium, pp47-60(1994).

3. Z. Liu and A. K. Kim, "A Review of Water Mist Fire Suppression Systems - Fundamental Studies", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 3, pp32-50(2000).
4. Goeoff Tanner and Keith F. Knasiak, 2003, "Spray Characterization of Typical Fire Suppression Nozzles," 3rd Int. Water Mist Conf., Madrid.
5. FLUENT Inc., 2001, "Fluent 6 User's Guide," Fluent Inc. Lebanon.
6. Morsi, S. A. and Alexander, A. J., 1972, "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems," J. Fluid Mech., Vol. 55(part2), pp. 193-208.
7. George, V.H,. KIM, A. and Knil, K., 1995, Physical and Numerical Modelling of the Interaction Between Watersprays and a Fire Plume, Patent Application Number 10-2000-0016277.