

## 미분무수 소화 노즐의 분무 특성 예측을 위한 CFD기법의 적용

정희택,<sup>\*1</sup> 이창효,<sup>2</sup> 최병일,<sup>3</sup> 한용식,<sup>3</sup> 옥영욱<sup>4</sup>

### APPLICATION OF CFD TECHNIQUE TO PERFORMANCE PREDICTION OF SPRAY CHARACTERISTICS OF WATER-MIST FIRE SUPPRESSION NOZZLES

H.T. Chung,<sup>\*1</sup> C.H. Lee,<sup>2</sup> B.I. Choi,<sup>3</sup> Y.S. Han<sup>3</sup> and Y.W. Ock<sup>4</sup>

*Numerical simulation has been performed to investigate the characteristics of the mist flow through the fire suppression nozzles. The commercial CFD software, FLUENT with the proper modeling was applied for analyzing both the internal and external flow of the spray nozzles. Computations were made for the full cone nozzle in the operation range of the low pressure and high flow-rate. To validate the present computational procedure, numerical results are compared with measurements in terms of K-factor, SMD, axial spray velocity and spray angles. Numerical results suggested that the present numerical model can be used as an adequate tool for a design purpose of mist-spray nozzles.*

**Key Words :** 분무유동(Mist Flow), 소화 노즐(Fire Suppression), 성능곡선(Performance Curve), 전산유체역학 기법(CFD Method), 분사각(Spray Angle)

### 1. 서 론

대형 설비에 사용되는 소화시스템은 적용 대상에 따라 기법이 다르다. 엔진기관실과 같은 비주거 공간에는 할론이나 CO<sub>2</sub> 소화시스템이 사용되고, 주거 공간 및 공공장소에는 주로 스프링클러가 소화시스템으로 사용되고 있다. 최근에는 환경 규제가 강화되고 설비의 소손을 방지하기 위해서 미분무수에 의한 소화설비의 사용이 증가되고 있는 추세이다[1].

미분무수 소화시스템은, 고압의 물을 노즐을 통해 분사시킬 때 발생하는 미세한 물방울(<1,000 μm)로 화재를 신속하게 진압하는 기술이다. 미분수 소화 기법은 기존의 주류를 이루는 수계소화설비인 스프링클러보다 소화 특성이 우수하므로 현재 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우, 김성찬 등[2]은 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는

영향을 수치기법과 실험을 병행하여 연구하였고, 김호용 등[3]은 분무수 특성이 화염의 소화에 미치는 영향을 실험적으로 수행하였다. NIST에서 개발된 FDS 프로그램[4]은 설비시스템 전체의 소화 특성 예측에 주로 사용되고 있다.

이러한 미분무수 소화시스템의 핵심 부품은 분무 노즐이다. 선진국의 제작사에서는 자체의 고유 모델을 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[5]. 독자적인 기술을 확보하기 위해서는 분무노즐에 대한 기본 설계 자료를 확보하여야 한다.

본 연구에서는 CFD기법을 이용하여 미분무수 노즐의 유체역학적 성능 특성을 예측하고 설계 과정에 적용하고자 한다. 범용 열유동 해석 소프트웨어인 FLUENT[6]를 선정하여 전용 해석 시스템을 구성하고, 이를 설계된 노즐과 분무시스템에 적용하여 기법의 타당성을 검증하였다.

### 2. 수치해석 기법

미분무수에 의한 소화시스템의 유동장은 특성에 따라 Fig.

접수일: 2006년 8월 30일, 심사완료일: 2006년 11월 7일.

1 정희원, 경상대학교 기계항공공학부

2 학생회원, 경상대학교 대학원 기계공학부

3 한국기계연구원 에너지기계연구센터

4 (주)원 부설연구소

\* Corresponding author, E-mail: htchung@gsnu.ac.kr

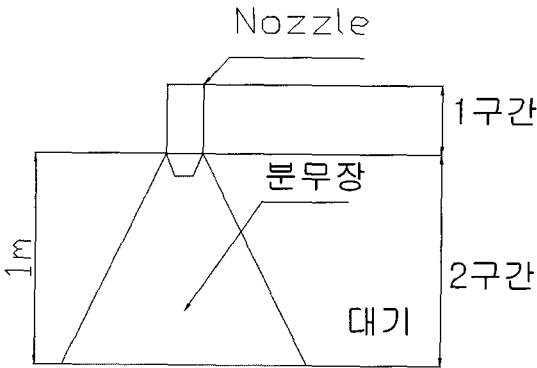


Fig. 1 Definition of water mist flow fields

1과 같이 두 영역으로 나눌 수 있다. 1구간은 노즐 내부 영역이고, 2구간은 노즐 출구에서 분무가 형성되는 외부 유동 영역이다.

노즐 내부는 고압과 복잡한 형상으로 3차원 유동장 해석이 필요하다. 1구간의 해석 결과로 유량과 압력에 따른 노즐의 성능(K-factor)이 결정되고, 출구의 유동 정보는 2구간의 분무 유동장 해석의 입력조건이 된다. 노즐 외부의 분무 유동장은 노즐에서 분사되는 고속의 3차원 분사수와 대기 중의 공기가 상호작용하는 이상유동장이 된다.

본 연구에서는 이와 같은 유동장 해석을 위해서 범용 유동 해석 프로그램인 FLUENT[6]를 선정하여 노즐의 분무 유동 특성에 맞게 해석 절차를 개발하였다. 분무 유동장의 해석을 위해서 이상유동 모델(Discrete Phase Model, DPM)을 사용하였다[7,8]. 이상유동장인 2구간의 입구조건을 설정하기 위해서 비압축성 유동장으로 가정한 1구간의 결과에 분무노즐의 이상유동에 적합한 수정 입력 조건을 산출하기 위하여 다상유동 모델인 Volume of Fluid Model(VOF)을 사용하였다[9].

노즐 출구 오리피스 내부에서는 액체의 미립화가 시작되는 부분이다. VOF모델을 적용하여 상세한 유동 정보를 얻을 수 있다. 2구간에서는 액체의 미립화가 완성되어 대기와 상호 작용하는 영역으로 DPM 모델로 분무와 공기에 의한 이상유동 특성을 예측할 수 있다.

적용된 모델의 이론과 수식을 약술하면 다음과 같다.

3차원 비정상 유동장의 지배 방정식은 다음과 같이 미분면적  $dA$ 와 함께 임의의 검사체적  $V$ 에 대한 Cartesian 적분형태의 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \bar{w} dV + \oint [\bar{F} - \bar{G}] \cdot dA = \int_V \bar{H} dV \quad (1)$$

여기서 벡터  $\bar{w}$ 는 유동변수이고,  $\bar{F}$ 는 대류항, 그리고  $\bar{G}$

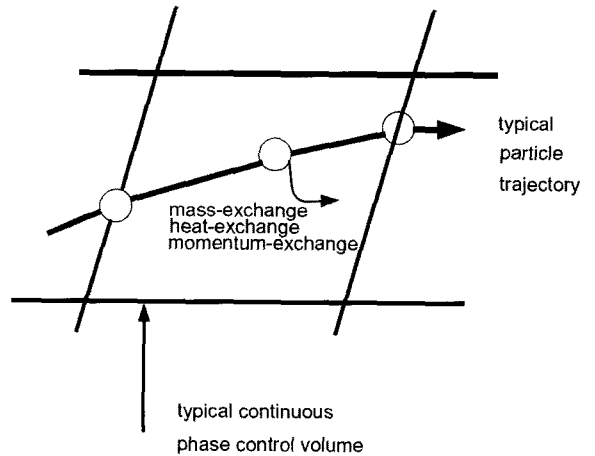


Fig. 2 Conceptual diagram for DPM model

는 점성항을 나타낸다.  $\bar{H}$ 는 체적력과 에너지 소스항을 포함한다. 난류모델로는 표준  $k-\epsilon$  모델을 채택하였다.

2구간 분무 유동장 해석을 위해 사용된 DPM 모델은 Fig. 2에서와 같이 입자들의 체적을 계산할 때 입자와 대기 중 공기와 상호교환 계산을 하게 된다. 이때 Particle trajectory 의 계산은 식 (2)와 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p + F_z \quad (2)$$

여기서  $F_D$ 는 각 단위 입자 질량에 대한 항력이고  $F_z$ 는 외력이다. 그리고  $u$ 는 유체 상의 속도,  $u_p$ 는 입자의 속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도,  $D_p$ 는 입자의 직경이다.

식 (1)의 유동 방정식과 난류 모델 및 DPM 모델의 방정식은 검사체적기법(FVM)으로 이산화하여 수치적으로 해가 구해진다. FLUENT에서는 위의 지배방정식이 식 (3)과 같이 각 검사 체적의 통합된 지배방정식으로 구성된다.

$$\sum_f^{N_{faces}} v_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n A_f + S_\phi V \quad (3)$$

유동해석 절차는 3단계로 구성된다. 설계된 도면을 이용하여 유동장 해석을 위한 계산격자점을 구성하는 전처리 과정, FLUENT에 의한 내부 유동장의 해석 과정, 성능곡선, 분무 특성 등 주요 결과의 분석을 위한 후처리 과정 등이다. 계산격자점 생성은 Gambit V2.2를 사용하였고, 유동장의 해석은 범용 열유동 해석 코드인 FLUENT V6.2를 사용하였다.

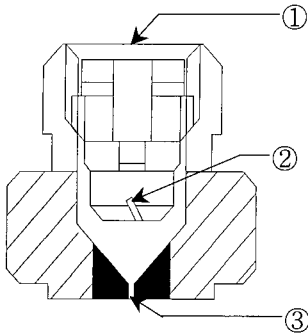


Fig. 3 Sectional configuration of mist nozzles

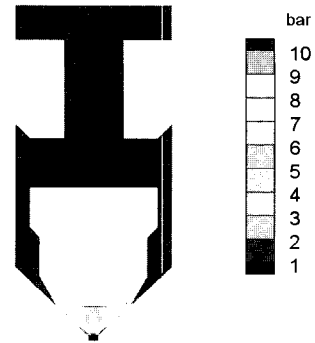


Fig. 5 Pressure fields inside nozzles

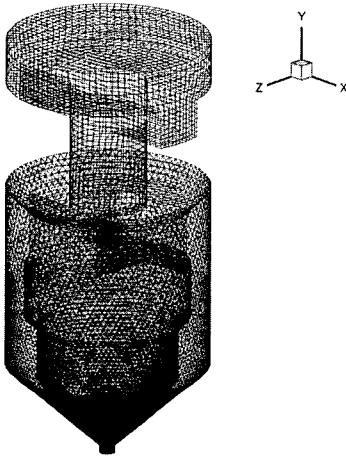


Fig. 4 Computational meshes inside nozzles for zone 1

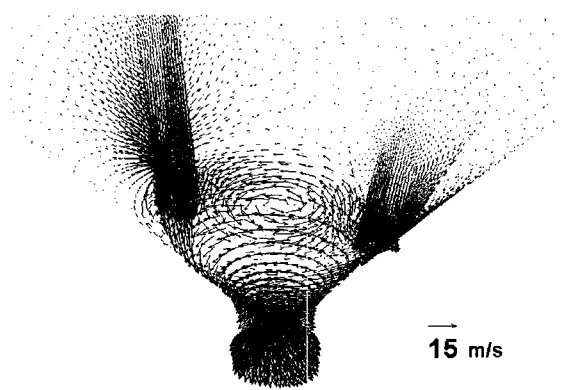


Fig. 6 Velocity fields inside nozzles

### 3. 적용 결과 및 고찰

#### 3.1 노즐의 성능특성 예측

본 연구에서 적용된 대상은 Pressure-swirl 노즐[10]로 스월러(Swirlter)가 내장된 스월러 분사형이다. 작동 범위는 10bar 내외의 중·저압에서 주로 사용된다. Fig. 3은 적용 대상 노즐의 내부 형상을 나타낸 것이다. ①은 노즐의 입구 부분이며, ②는 Swirl을 발생시키는 구간인 스월러이며, ③은 노즐의 출구, 즉 노즐 분사구이다. 계산격자는 Fig. 4와 같이 비정렬 격자를 약 30만개로 구성하였다.

단일 노즐의 설계 기준은 작동 압력  $\Delta P$ 이 10bar이며 유량은 0.316lpm이다. Fig. 5은 설계 조건에서 계산된 노즐 내부의 압력분포를 나타낸 것이다. 압력 강하는 스월러에서 약 30%가 발생하고, 스월러 출구와 출구 오리피스 사이의 공간에서 약 60%, 출구 오리피스에서 약 10%를 차지하였다. 스월러와 출구 오리피스 사이의 공간에는 Fig. 6과 같이 복잡한 스월 유동이 형성된다.

K-factor는 노즐의 성능을 결정하는 주요 변수 중 하나로 식 (4)와 같이 유량과 압력강하의 관계를 나타낸다.

$$Q = K_n (\Delta P)^n \tag{4}$$

본 연구의 적용대상과 같은 오리피스형 노즐에서는 일반적으로 지수는  $n=0.5$ 가 적용된다[5]. 압력범위를 설계 기준에서 50~400% 운전 조건으로 노즐의 성능 예측한 결과는 Table 1과 같다.  $Q_{CFD}$ 는 수치해석 결과값이고, 이를 식 (4)에 대입하면 각 압력별로 K-factor를 구한 값이 Table 1에 나타나 있다. Fig. 7과 같이 유량  $Q_{CFD}$ 과 압력  $\Delta P$ 의 관계를 도시하고 최적의 기울기를 구하면 노즐의 K-factor의 대표값을 구할 수 있다. 본 연구에서는 0.095이다. 이 값으로 유량을 역산하여 구한  $Q_{0.5}$  값은 2% 오차범위이므로 CFD 해석결과로 도출된 분무 노즐의 K-factor = 0.095는 신뢰성을 가진다.

#### 3.2 분무 유동장 해석을 위한 입구조건인 산출

2구간의 분무 유동장을 수치 해석하기 위해서는 노즐 출구에서의 초기 분무 각도가 입력조건으로 필요하다. 기존의 수

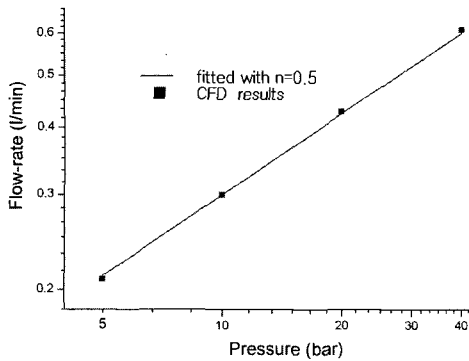


Fig. 7 Performance curve of nozzles

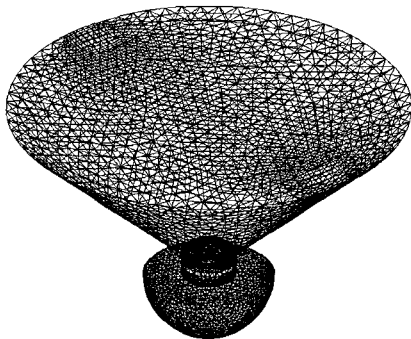


Fig. 8 Computational meshes inside nozzles for application of VOF model

치해석에서는 노즐의 형상변수와 유동조건에 따라 경험식이나 실험데이터에 의존하였다. 다상유동모델인 VOF를 이용하면 초기 분무 각도를 직접 산출할 수 있다[9]. 노즐 내부의 스월러 출구부터 노즐 외부의 축길이  $z=0.5$  mm 부근까지를 해석공간으로 설정하였다. 스월러 출구인 입력부에서는 3.1절에의 비압축성 해석 결과를 이용하고 노즐 출구 외부는 대기 조건으로 둔다. 계산 격자계는 Fig. 8과 같이 비정렬형으로 약 10만개로 구성하였다.

VOF모델로 비정상 해석을 하면 Fig. 9와 같이 노즐 출구 부근에서 물과 공기의 이상유체가 존재를 발견할 수 있다. 노

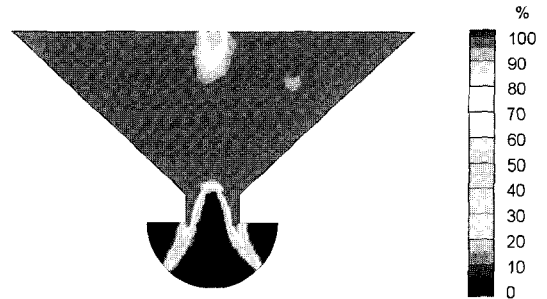


Fig. 9 Distribution of water fraction by application of VOF model

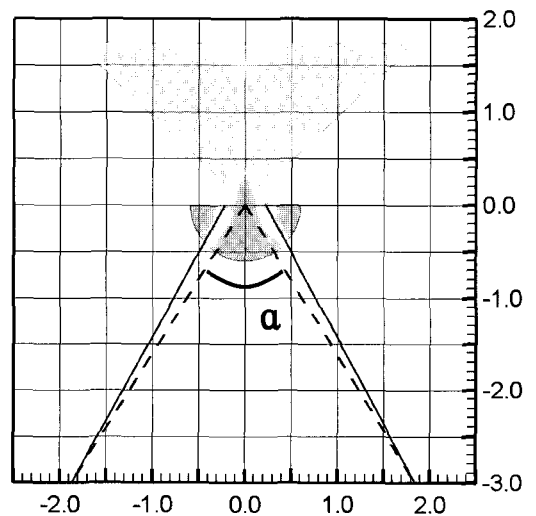


Fig. 10 Determination of initial spray angles as input for zone 2

즐 분사구에서 유체(물)은 얇은 필름(Film)으로 분사되어 각도를 이루며 미립화 되는 현상[8]을 관찰할 수 있다. 분사각도의 측정은 일반적으로 정의 되어있는 기준이 매우 불명확하다.

본 연구에서는 이러한 Film의 각도를 초기 분사각도로 정의하고 구간2의 이상유동장 해석 (3.3절)의 초기값으로 산출하였다. Fig. 10에서의 같이 액체 필름의 연장선과 노즐 출구 중심의 연장선을 접선으로 나타내고 접선의 각도  $\alpha$ 를 분사

Table 1 Nozzle performance for K-factors

	$\Delta P = 5 \text{ bar}$	$\Delta P = 10 \text{ bar}$	$\Delta P = 20 \text{ bar}$	$\Delta P = 40 \text{ bar}$
$Q_{CFD}$ (lpm)	0.209	0.300	0.428	0.610
K-factor (lpm/ $\text{bar}^{0.5}$ )	0.0935	0.0949	0.0957	0.0964
$Q_{0.5}$ (lpm)	0.212	0.300	0.425	0.601
Percent error (%)	1.4	0.0	-0.7	-1.5

Table 2 Comparison of CFD results with experimental data

	Experiment	CFD
K-factor (lpm/ $\text{bar}^{0.5}$ )	0.1	0.095
SMD ( $\mu\text{m}$ )	116.28	115.50
Axial velocity of mist spray (m/s)	6.03	5.85
Spray Angle ( $^\circ$ )	70	68.4

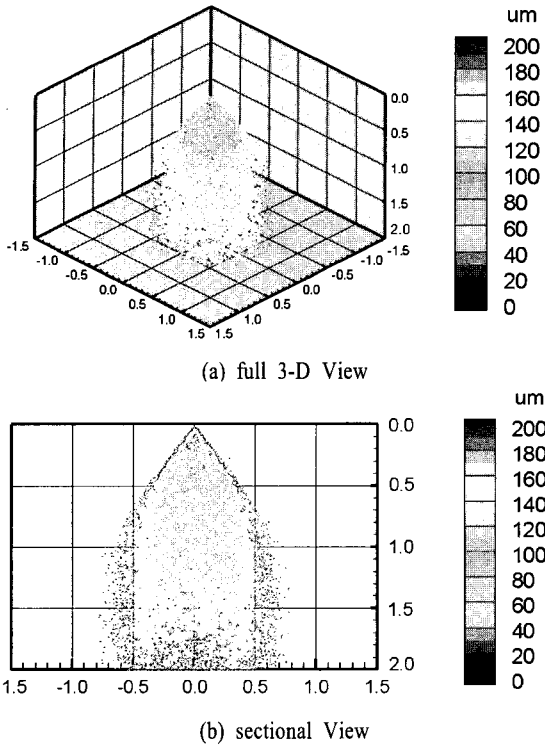


Fig. 11 Trajectory of mist spray

각도라 정의하였다. VOF 모델을 적용한 수치 결과로부터 산출된 초기분무 각도는 64.8°이다.

### 3.3 분무 유동장 해석

2구간의 분무 유동장에는 가로 3m, 세로 3m, 높이 2m의 해석 공간을 설정하고, 가로 90개, 세로, 90개 높이 70개 등 총격자 567000개의 정렬형 격자를 구성하였다. Fig. 11은 미분무수의 궤적을 가시화한 것이다. 분무 유동 특성인 분무 각도, 제트의 폭, 입자 직경의 분포를 보기 위해서는 Fig. 11(b)와 같은 2차원 단면도가 편리하다. 노즐 출구와 중심에서는 100~150  $\mu\text{m}$ 의 입자가 주류를 이루나 미분무수의 후반부와 외곽에서는 200  $\mu\text{m}$  이상의 굵은 입자가 발견된다. 같은 분무 궤적을 나타내었다. Fig. 12는 노즐 출구를 기준으로 축 방향 0.1m 아래에서 분무입자 반경의 분포를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 100  $\mu\text{m}$  부근에서 분무 입자가 밀집됨을 알 수 있다. Fig. 13은 노즐의 실험 사진과 수치해석에 의한 입자 가시화를 합성한 그림이다. 분무궤적과 분사각도가 실험결과[12]와 큰 차이점이 없는 것을 알 수 있다.

미분무수 노즐의 주요 성능 변수로는, 운전조건으로서 유량과 압력의 관계를 나타내는 K-factor와 소화 작업에 영향을

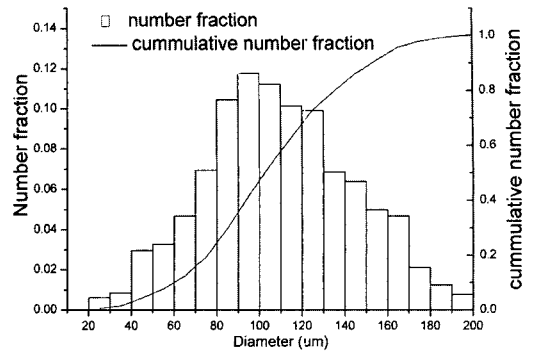


Fig. 12 Histogram of particle distributions at z=0.1m

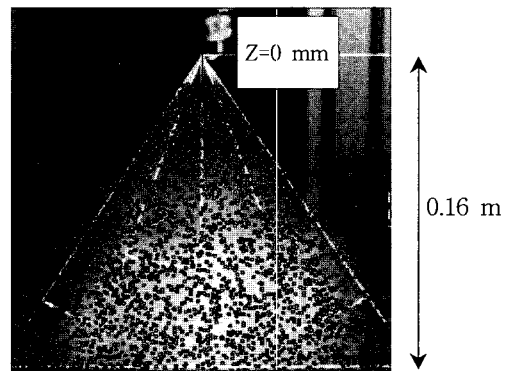


Fig. 13 Experimental pictures of mist spray flow-fields overlapped with CFD results

주는 분무 특성인 입자 직경, 제트 속도, 분사각도 등이다. 이 관점에서 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하면 Table 2에서와 같다. 본 연구의 CFD 해석결과와 실험 결과는 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 본 전산기법은 노즐의 성능 예측에 유용함을 알 수 있고 설계의 초기단계에 적용하여 제품 개발의 효율성을 증가할 수 있다.

## 4. 결 론

미분무수계 소화시스템의 핵심 부품인 분무 노즐의 기본 설계 기술을 확립하기 위해서 CFD기법을 적용하였다. 범용 열유동 해석 소프트웨어인 FLUENT를 선정하여, 분무시스템의 유동장 특성에 적합하게 전처리 모듈, 유동장 해석, 후처리 모듈 등 전용 사용법을 개발하여 설계된 도면과 운전 조건 하에서 성능 특성이 분석되도록 해석절차를 구성하였다.

위의 해석 절차에 따라, 기존에 설계된 노즐에 적용하여 K-factor 등의 노즐 성능 특성과 분사각, 입자 직경 분포, 분무의 분사 속도 등 미분무수 유동장의 주요 특성을 실험 결

과와 비교하여 기법의 타당성을 검증하였다.

노즐 내부와 외부의 이상 유동장 특성을 상세히 모사함으로써 소화 분무 조건에 대한 자세한 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서 개발된 전산시스템은 미분무수 노즐의 주요 설계 변수에 대한 성능과 분무 특성을 예측하여 설계 과정을 개선하는 도구로 유용할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업 '선박용 첨단 수계 소화시스템 개발' 과제에 일부로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- [1] 김명배, 2000, "미분무수 소화설비의 기술동향 및 NFPA 750의 소개," *화재·소방학회지*, 제1권, 제2호, pp.2-5.
- [2] 김성찬 외, 2003, "물분무노즐의 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향," *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp.1703-1708.
- [3] 김호영 외, 2004, "분무수 분무특성이 액체연료 Pool 화염의 소화에 미치는 영향," *대한기계학회논문집 B권*, 제28권, 제12호, pp.1591-1599.
- [4] NIST, 2000, "Fire Dynamic Simulator, Technical Reference Guide," *NIST*, U.S.A.
- [5] Goeff Tanner and Keith F. Knasiak, 2003, "Spray Characterization of Typical Fire Suppression Nozzles," *3rd Int. Water Mist Conf.*, Madrid.
- [6] FLUENT Inc., 2001, "Fluent 6 User's Guide," *Fluent Inc. Lebanon*.
- [7] 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.
- [8] Haider, A. and Levenspiel, O., 1989, "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Non-spherical Particles," *Powder Technology*, Vol.58, pp.63-70.
- [9] Hirt C.W. and Nichols B. D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, 39: pp.201~225.
- [10] Lefebvre, A., 1989, "Atomization and Sprays," *Hemisphere Pub.*
- [11] Schmidt D. P., Nouar I., Senecal P. K., Rutland C. J., Martin J, K, and Reitz R. D., 1999, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," *SAE Paper*, 01-0496.
- [12] 김종진 외, 2005, "선박용 첨단 수계 소화시스템 개발," *지역산업기술개발사업 1차년도 보고서*.