

# 소화노즐의 분무특성에 대한 설계 변수 영향의 수치해석적 연구

이창호\* · 정희택† · 최병일\*\* · 한용식\*\* · 김 창\*\*\*

## Numerical Study on the Effects of Design Parameters on the Spray Characteristics of Fire Suppression Nozzles

C. H. Lee, H. T. Chung, B. I. Choi, Y. S. Han and C. Kim

**Key Words:** Water mist(미분무수), Fire suppression nozzle(소화 노즐), Spray characteristics(분무 특성), CFD(전산유체역학), Design parameter(설계변수), Performance(성능)

### Abstract

Numerical investigation has been performed to simulate the spray characteristics in mist-spray fire suppression nozzles in sense of design parameters. Two key shape factors in nozzle orifices. i.e. diameter and length are chosen as simulation parameters. Commercial softwares, FLUENT and FDS with the proper modelings were applied as numerical tools. Main performances of nozzles, i.e., K-factors, spray angles, droplet size, jet velocities and fire suppression time are analyzed for each parameter to find optimal design conditions.

### 1. 서 론

고압의 물을 노즐을 통해 분사시켜 발생되는 1000 μm 미만의 미세 물방울을 이용하여 화재를 신속하게 진압하는 미분무수 소화시스템은 현재 할론 및 CO<sub>2</sub> 소화설비를 대체할 새로운 소화 설비 시스템으로 많은 관심을 받고 있다. 예로 선박의 경우 기관실에 설치되는 할론 및 CO<sub>2</sub> 소화시스템과 주거 공간 및 공공장소에 설치되는 스프링클러 소화시스템의 대체 소화시스템으로 개발되고 있다<sup>(1)</sup>.

이러한 미분무수 소화시스템의 핵심부품은 분무 노즐이다. 분무 노즐의 연구 및 설계는 대부분 실험적 방법에 의해 진행되고 각 제작사의 고유모델로 공개되지 않고

있다<sup>(2)</sup>. CFD 기법의 적용은 유체기계류의 기본 설계기술을 효율적으로 확보하는데 유용한 수단이 된다. 이창호 등<sup>(3)</sup>은 범용 열유동 해석 소프트웨어인 FLUENT<sup>(4)</sup>를 이용하여 미분무수 노즐의 성능 및 분무 특성을 해석하고 성능시험과 비교하였으며, 김성찬 등<sup>(5)</sup>은 NIST에서 개발된 FDS 프로그램<sup>(6)</sup>을 소화 특성 예측에 적용하였다.

본 연구에서는 범용 열유동 해석 소프트웨어를 이용하여 미분무수 노즐의 유체역학적 성능과 소화특성을 예측하는 전용해석 시스템을 구성하고, 초기 설계 조건에 적용하여 기법의 타당성을 검증하였다. 노즐의 주요 설계 변수인 출구 오리피스스의 길이와 직경에 대한 분무 및 소화 특성을 수치 시뮬레이션 하여 최적 설계 조건을 산출하였다.

(2006년 8월 29일 접수 ~ 2006년 10월 13일 심사완료)

\*경상대학교 대학원 기계공학과

\*\*한국기계연구원 에너지기계연구센터

\*\*\*(주)원 부설연구소

†책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : htchung@gsnu.ac.kr

TEL : (055)751-6165

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 노즐의 설계 변수 조건

본 연구에서 적용된 대상은 Pressure-swirl 노즐<sup>(7)</sup>로

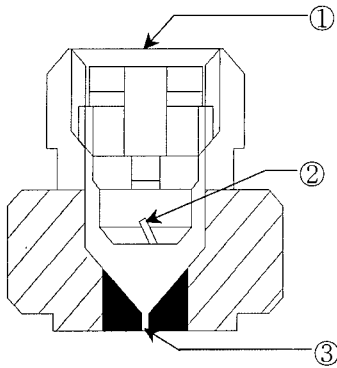


Fig. 1 Sectional configuration of mist nozzles

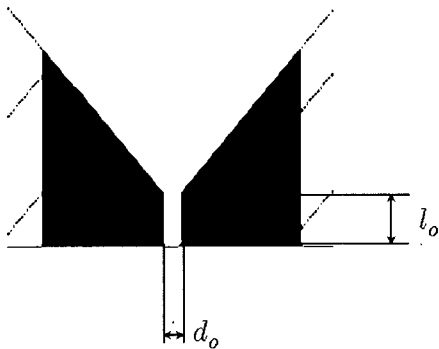


Fig. 2 Definition of design parameters

스윌러(Swirl)가 내장된 스윌러 분사형이다. 작동 범위는 10 bar 내외의 중저압에서 주로 사용된다. Fig. 1은 적용 대상 노즐의 내부 형상을 나타낸 것이다. ①은 노즐의 입구 부분이며, ②는 Swirl을 발생시키는 구간인 스윌러이며, ③은 노즐의 출구, 즉 노즐 분사구이다.

본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 출구 오리피스의 직경  $d_o$ 와  $l_o$ 길이 등 두 가지를 설계 인자로 채택하였다. 초기의 설계 기준은, 직경이  $d_o = 0.5 \text{ mm}$ 이고 길이는  $l_o = 0.3 \text{ mm}$ 이다.

직경에 대해서는  $d_o = 0.2, 0.5, 0.8 \text{ mm}$  등 세 가지 경우에 대해서 비교하고, 길이에 대해서는  $l_o = 0.1, 0.3, 0.6 \text{ mm}$  등 세 가지 경우에 대해서 수치해석을 수행하여 최적 조건을 산출하고자 한다.

2.2 성능 해석 기법

본 연구에서는 미분무수에 의한 소화시스템의 유동장은 특성에 따라 Fig. 3과 같이 세 영역으로 나누어 수치 해석을 수행하였다. 노즐 내부의 비압축성 영역(1구간)과 노즐 출구 부근의 이상유동장(2구간), 화재원과 미분

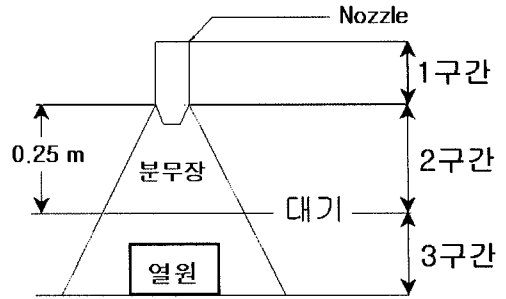


Fig. 3 Domain of flow fields

무수의 소화현상이 일어나는 유동장(3구간)이다.

노즐 내부와 출구 부근의 유동장인 1구간과 2구간 해석에는 범용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 노즐의 분무 유동 특성에 맞게 해석 절차를 개발하여 적용하였다. 분무 유동장의 해석을 위해서 이상유동 모델(Discrete Phase Model, DPM)을 사용하였다<sup>(8, 9)</sup>. 이상유동장인 2구간의 입구조건을 설정하기 위해서 비압축성 유동장으로 가정된 1구간의 결과에 분무노즐의 이상유동에 적합한 수정 입력 조건을 산출하여야 한다. 본 연구에서는 노즐 출구의 분무 각도 계산을 위해서 Schmidt 등에 의해 제안된 분사각 예측 모델을 사용하였다<sup>(10, 11)</sup>. 적용된 모델의 이론과 수식에 내용은 참고문헌<sup>(3)</sup>에 기술되어 있다.

미분무수에 의한 소화유동장인 3구간에는 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발한 FDS프로그램<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 난류모델은 LES(Large Eddy Simulation)모델이 적용되었고 연소모델은 혼합분율 모델을 사용하였으며 분무수에 대한 액적의 거동은 Eulerian-Lagrangian 방법이 사용되었다. 이에 대한 이론적 배경은 참고문헌<sup>(5)</sup>에 기술되어 있다.

3. 적용 결과 및 고찰

3.1 초기설계 조건에서의 노즐 성능특성 해석

노즐 출구 오리피스의 초기 설계 조건은 직경이  $d_o = 0.5 \text{ mm}$ 이고 길이는  $l_o = 0.3 \text{ mm}$ 이다. 작동 압력은 10 bar로 설계되었다. 유량과 압력의 함수관계는 노즐의 성능을 규정하는 주요 변수로서 식(1)과 같이 정의되는 K-factor 로 표시된다.

$$K = Q / \sqrt{\Delta P} \tag{1}$$

1구간의 해석에서는 총 30만개의 비정렬 격자를 사용

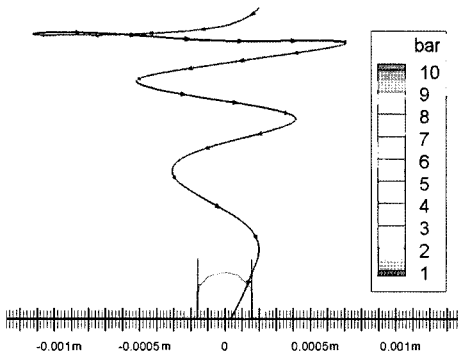


Fig. 4 Particle path and pressure fields inside nozzles at initial design conditions

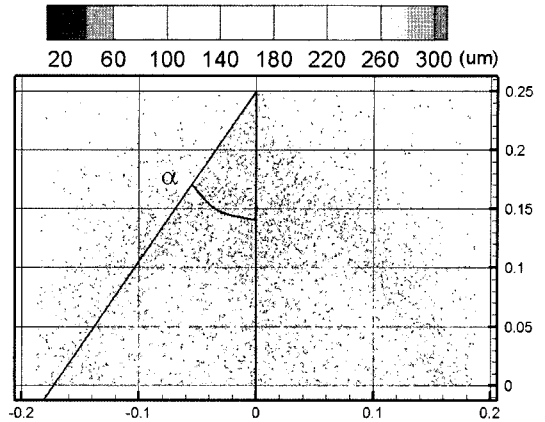


Fig. 5 Numerical pictures of mist spray flow-fields

하여 노즐 내부의 3차원 유동장을 해석하였다. 수치해석의 결과에 구해진 노즐 성능계수는  $K_{CFD} = 0.095$ 로 실험치인  $K_{EXP} = 0.1$ 와 비교하면 5% 오차범위의 정확도를 보여 준다<sup>(12)</sup>.

Figure 4는 출구 오리피스 부근의 유동장을 나타낸 것이다. 오리피스 출구의 중심부에는 대기보다 낮은 음압구간이 발생한다. 이 부분을 void로 가정하고 나머지 액체 두께,  $h_0$ 를 산출하면 분무유동장인 2구간 영역 해석을 위한 초기 분무 각도,  $\alpha_0$ 를 식(2)로 결정할 수 있다<sup>(10, 11)</sup>.

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \frac{0.00805 \cdot FN \cdot \sqrt{\rho}}{d_o \cdot h_0} \times 2 \quad (2)$$

여기서  $FN = \frac{\dot{m}}{\sqrt{\rho \Delta P}}$ 이며  $d_o$ 는 오리피스 직경,  $h_0$ 는 출구 오리피스 끝단의 liquid sheet 두께이다.

2구간의 분무 유동장 해석에는, 가로 0.3 m, 세로 0.3 m, 높이 0.25 m의 해석공간을 설정하고, 가로 40개, 세로 40개, 높이 40개 등 총 64000개의 정렬 격자를 구성하였다. 분무 유동장에서의 입자의 분포와 궤적을 가시화하면 Fig. 5와 같다. 수치해석의 결과는 Fig. 6의 노즐 성능 시험 사진<sup>(12)</sup>과 비슷한 형상을 보여준다. 수치해석에 의한 분무 각도는 69.8°로 실험값인 70.0°와 거의 유사한 결과를 보여 주었다.

3구간에서 노즐의 소화특성을 예측하기 위해서 가로 1.2 m, 세로 1.2 m, 높이 1.2 m의 해석공간을 설정하고, 화재원의 열량은 10 kW로 주었다. 분사 지점을 1 m 지점에 두고 2구간의 해석결과를 입력조건으로 사용하여 FDS프로그램을 적용하였다. 가로 25개, 세로 25개, 높이 50개 등 총 31250개의 정렬 격자를 구성하였다. 소

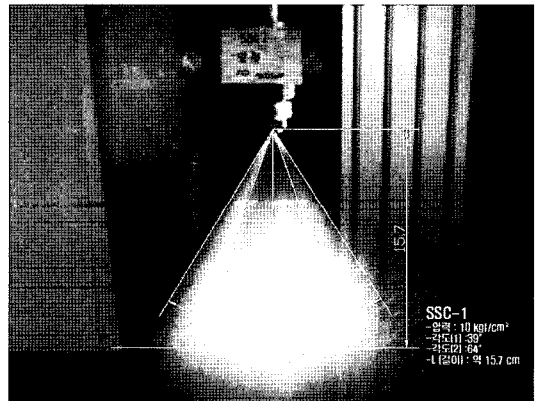
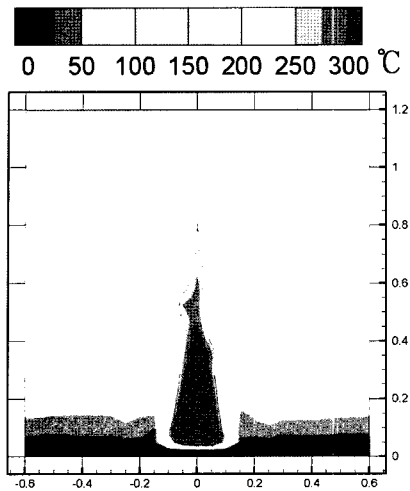


Fig. 6 Experimental pictures of mist spray flow-fields

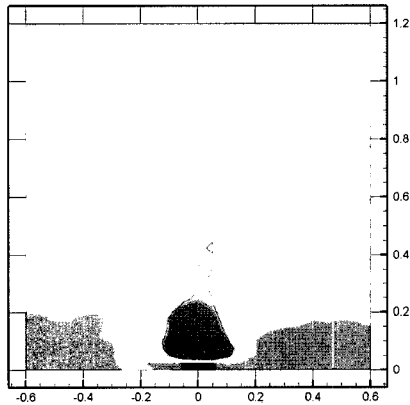
화 성능의 기준으로는, 소화 판단 자료로서 화염원 부근의 온도 뿐만 아니라 소화 공간의 평균 온도 변화도 고려되고 있는 추세이다<sup>(12)</sup>. Fig. 7은 화재 발생 후 30초 후에 미분무수를 분사한 경우의 화재 공간 내부의 온도 변화를 나타낸 것이다. 화염부에서의 300°C 이상의 고온 영역이 분무의 소화 작용으로 약 100 sec 이후에는 발견되지 않았다. 분사 노즐이 설치된 천정부근의 온도는 분사 직전에는 150°C 이상이 형성되었으나 300 sec 이후에는 50°C 이하로 유지되었다.

### 3.2 설계변수에 의한 노즐 특성 영향

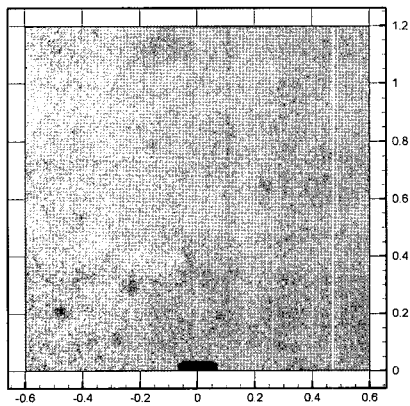
출구 오리피스의 초기설계 조건을 기준으로, 직경과 길이의 변화에 의한 노즐의 분무 및 소화 특성을 분석하여 최적 설계 조건을 산출하고자 한다. 각 경우에 대해서 3.1절과 같은 절차로 수치해석을 수행하고 주요 성능치를 도출하였다.



(a) After 30 sec



(b) After 100 sec



(c) After 350 sec

Fig. 7 Evolution of temperature fields after mist injections

3.2.1 출구 오리피스의 직경

초기 설계값인  $d_o=0.5$  mm를 기준으로  $d_o=0.2$  mm,

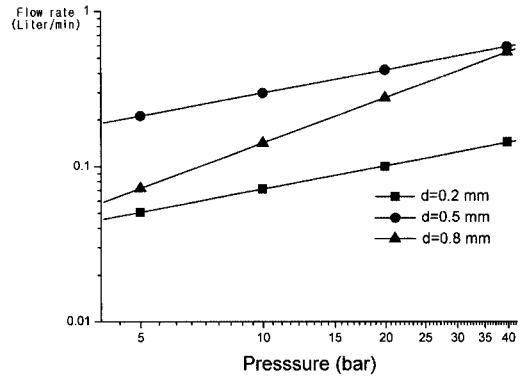


Fig. 8 Nozzle performance for diameter,  $d_o$

Table 1 Spray characteristics for diameter,  $d_o$

	$d_o=0.2$ mm	$d_o=0.5$ mm	$d_o=0.8$ mm
Film thickness, $h_o$ (mm)	0.55	0.95	1.8
Initial spray angle (°)	58.4	65.2	69.6
SMD ( $\mu$ m)	54.1	111.6	112.8
Axial velocity*1 (m/s)	1.19	6.08	5.87
Spray Angle (°)	51.2	69.8	71.5

\*1 : computed of spray at  $z = 0.1$  m

$d_o=0.8$  mm 등 세 경우에 대해 비교하였다. Fig. 8은 압력과 유량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 성능곡선의 기울기가 K-factor가 된다. 이론적으로 예측할 수 있듯이 직경이 클수록 K-factor는 커지므로 동일 분사량에 대해 요구압력이 작아져서 운전조건에는 유리해진다. 노즐 직경에 따른 분무특성은 Table 1에 정리하였다. 분무입자의 직경이 작고 분사각이 크며 축방향 분사 속도가 클수록 소화 작용에 유리하다<sup>(12)</sup>. 노즐직경이 클수록 분무각은 증가하여 유리하나, 분무 입경이 증가하여 소화에는 불리한 특성을 갖는다. 노즐 직경이 감소할수록 초기 분사속도는 커지만 입자 직경이 작아서 축 방향으로 제트가 진행되면서 마찰에 의한 손실로 입자 속도는 급격히 떨어진다. 분무 선단 도달거리와 관계되는 분무 속도와 출구 오리피스 직경의 관계는 추가적인 연구가 필요하다. Fig. 9는 분사 노즐에서 0.5 m 아래에 위치한 단면의 평균 온도 변화를 나타낸 것이다.  $d_o=0.2$  mm의 경우는 다른 두 경우보다 소화특성이 열악하다. Table 1에 나타난 바와 같이 직경이 작은 경우 미분무수의 분사 영역이 좁고 분무 선단 도달거리가 감소하여 소화 능력이 떨어짐을 유추할 수 있다.

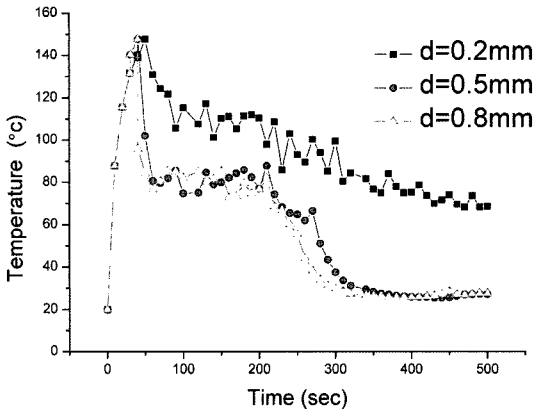


Fig. 9 Mean ceiling temperature for diameter,  $d_o$

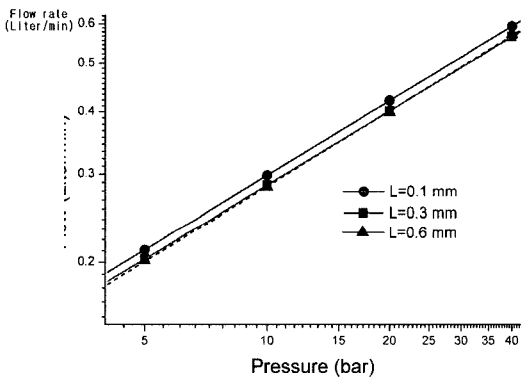


Fig. 10 Nozzle performance for length,  $l_o$

### 3.2.2 출구 오리피스의 길이

초기 설계값인  $l_o = 0.3 \text{ mm}$ 를 기준으로  $l_o = 0.1 \text{ mm}$ ,  $l_o = 0.6 \text{ mm}$  등 세 경우에 대해 비교하였다. Fig. 10은 압력과 유량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 성능곡선의 기울기가 K-factor가 된다. 오리피스의 길이 관점에서만 보면 길수록 압력 손실이 증가하겠지만, 길이가 너무 짧으면 노즐 내부의 스웰 유동이 안정화 되는 구간이 짧아져 오히려 압력이 증가하는 경향이 발생한다. 본 변수에서는 중간 크기인  $l_o = 0.3 \text{ mm}$ 에서 압력손실이 가장 적게 -즉, K-factor가 가장 크게 나타났다. Table 2에는 분무 특성이 비교되어 있다. 길이가 클수록 분무각이 증가하고 분무 직경이 작아지나 분무 속도는 줄어든다. Fig. 11은 분사 노즐에서 0.5 m 아래에 위치한 단면의 평균 온도 변화를 나타낸 것이다. 길이에 따른 소화특성은 비슷한 경향을 보여주나 길이가 가장 짧은  $l_o = 0.1 \text{ mm}$ 에서 약간 우수하였다. 길이가 작은 경우 Table 2에 나타난 바와 같이, 미분무수의 분사각은 작지만 침투력

Table 2 Spray characteristics for length,  $l_o$

	$l_o = 0.2 \text{ mm}$	$l_o = 0.5 \text{ mm}$	$l_o = 0.8 \text{ mm}$
Film thickness, (mm)	0.80	0.95	0.95
Initial spray angle (°)	36.4	65.2	68.8
SMD ( $\mu\text{m}$ )	126.7	111.6	111.1
Axial velocity*1 (m/s)	11.35	6.08	5.55
Spray Angle (°)	37.6	69.8	71.4

\*1 : computed of spray at  $z = 0.1\text{m}$

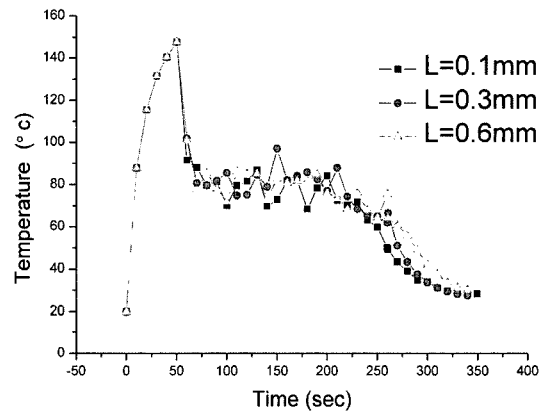


Fig. 11 Mean ceiling temperature for length,  $l_o$

이 커서 최종적인 소화 능력에는 유리함을 유추할 수 있다. 즉, 분무 특성의 제반 인자 중에 침투력과 관련 있는 분사 속도가 소화 작용에 가장 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

### 3.2.3 최적 조건의 산출

분무 유량과 화재 열원이 동일한 경우, 분무 노즐의 성능은 두 가지 관점에서 결정된다. 운전 비용 관점에서 요구압력, 즉 K-factor와 화재 진압의 효용성 관점에서 소화 요구 시간이다. 이는 노즐의 형상에 따라 나타나는 분무의 특성치 -분사각, 입자 직경, 분사 속도 등과 밀접한 관계를 가진다.

본 연구에서 검토한 설계변수에 대한 소화 노즐의 주요 특성치를 정리하면 Table 3과 같다. 소화 특성의 관점에 따라 최적 조건은 다르지만, 운전조건과 소화 시간을 위주로 평가해 보면 직경은  $d_o = 0.8 \text{ mm}$ 에서, 길이는  $l_o = 0.1 \text{ mm}$ 가 최적 조건으로 유추된다. 초기 설계와 비교해 보면 출구 오리피스의 형상은 직경은 증가시키고

Table 3 Summaries of nozzle performances for optimal design conditions

Performance	initial conditions* <sup>1</sup>	optimal diameter	optimal length
K-factor	0.095	0.119 at $d = 0.8$ mm	0.095 at $l = 0.3$ mm
Spray angle	34.90°	35.75° at $d = 0.8$ mm	35.70° at $l = 0.6$ mm
SMD	111.6 $\mu$ m	54.1 $\mu$ m at $d = 0.2$ mm	111.1 $\mu$ m at $l = 0.6$ mm
Jet velocity* <sup>2</sup>	6.08 m/s	6.08 m/s at $d = 0.5$ mm	11.35 m/s at $l = 0.1$ mm
Fire suppression time* <sup>3</sup>	273 sec	257 sec at $d = 0.8$ mm	250 sec at $l = 0.1$ mm

\*1:  $d = 0.5$  mm;  $l = 0.3$  mm

\*2: axial velocity of spray at  $z = 0.1$  m

\*3: duration time for mean ceiling temperature = 60°C

길이는 감소하는 방향으로 설계의 수정이 필요하다고 사료된다.

#### 4. 결 론

미분무수 소화시스템의 핵심 부품인 분무 노즐의 설계과정에 CFD 기법을 적용하였다. 범용 해석프로그램을 이용하여 전산해석 시스템을 구축하고 이를 초기 설계조건에 적용하여 기법의 유용성을 검토하였다. 출구 오리피스의 직경과 길이 등 두 가지 설계변수에 대한 분무 및 소화 특성을 수치 시뮬레이션 하여 최적 설계조건을 도출하였다

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업 “선박용 첨단 수계 소화시스템 개발” 과제의 일부로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참고문헌

- (1) 김명배, “미분무수 소화설비의 기술동향 및 NFPA 750의 소개,” 화재소방학회지, 제1권, 제2호, 2000, pp. 2~5.
- (2) Goeff Tanner and Keith F. Knasiak, “Spray Charac-

terization of Typical Fire Suppression Nozzles,” 3rd Int. Water Mist Conf. Madrid, 2003.

- (3) 이창효 외, “FLUENT를 이용한 미분무수 소화시스템의 유동장 CFD해석,” 경상대학교 공학연구원 논문집, 21권, 2005, pp. 199~204.
- (4) FLUENT Inc., “Fluent 6 User's Guide,” Fluent Inc. Lebanon, 2001.
- (5) 김성찬 외, “물분무노즐의 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2003, pp. 1703~1708.
- (6) NIST, “Fire Dynamic Simulator, Technical Reference Guide,” NIST, U.S.A., 2000.
- (7) Lefebvre, A., “Atomization and Sprays,” Hemisphere Pub, 1989.
- (8) Morsi, S. A. and Alexander, A. J., “An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems,” J. Fluid Mech., Vol. 55(part2), 1972, pp. 193~208.
- (9) Haider, A. and Levenspiel, O., “Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Non-spherical Particles,” Powder Technology, Vol. 58, 1989, pp. 63~70.
- (10) Schmidt D. P., Nouar I., Senecal P. K., Rutland C. J., Martin J, K, and Reitz R. D., “Pressure-Swirl Atomization in the Near Field,” SAE Paper, 01-0496, 1999.
- (11) Lacava, P. T., Pimenta, A. P., Bastos-Netto, D., “Design Procedure and Experimental Evaluation of Pressure-Swirl Atomizers,” 24Th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.
- (12) 김종진 외, “선박용 첨단 수계 소화시스템 개발,” 지역산업기술개발사업 1차년도 보고서, 2005.