

# 소화 노즐의 분무 특성 예측을 위한 CFD기법의 적용

정희택\* · 이창효\*\* · 정향남\*\* · 최병일\*\*\* · 한용식\*\*\* · 옥영욱\*\*\*\*

## Application of CFD Technique to Performance Prediction of Spray Characteristics of Fire Suppression Nozzles

H. Chung\*, C. Lee\*\*, H. Jung\*\*, B. Choi\*\*\*, Y. Han\*\*\*, Y. Ohck\*\*\*\*

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

### ABSTRACT

In the present study, 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 in both the internal and external flow region of the spray nozzles. Applications were done to the full cone nozzle for the operation range of the low pressure and high flow-rate. Numerical validation was proved by the comparison of the experimental data. Parametric study of the key design factors was tried to improve the performance.

### 1. 서론

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.<sup>1</sup>

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 연구

가 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우, 김성찬 등<sup>2</sup>은 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향을 수치 기법과 실험을 병행하여 연구하였고, 김호용 등<sup>3</sup>은 분무수 특성이 화염의 소화에 미치는 영향을 실험적으로 수행하였다. NIST에서 개발된 FDS 프로그램<sup>4</sup>은 설비 시스템 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<sup>5</sup>. 독자적인 기술을 확보하기 위해서는 분무노즐에 대한 기본 설계 자료를 확보하여야 한다. 본 연구에서는 CFD기법을 이용하여 미분무수 노즐의 유체역학적 성능 특성을 예측하고 설계에 적용하고자 한다. 범용 열유동 해석 소프트웨어인 FLUENT<sup>6</sup>를 선정하여 전용해석 시스템을 구성하고, 이를 설계된 노즐과 분무시스템에 적용하여 기법의 타

\* 경상대학교 기계항공공학부

\*\* 경상대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

\*\*\*\* (주)원 부설연구소

E-mail : htchung@gsnu.ac.kr

당성을 검정하였다. 아울러, 다양한 운전 범위와 설계 변수에서의 주요 성능 특성을 예측하였다.

## 2. 수치해석 기법

미분무수에 의한 선박용 소화시스템의 유동장은 특성에 따라 Fig. 1과 같이 두 영역으로 대별된다. 노즐 내부의 비압축성 영역(구역1)과 노즐 외부의 이상유동장(구역2)이다.

노즐 내부는 고압과 복잡한 형상으로 3차원 비압축성 해석이 필요하다. 구역1의 해석 결과로 유량과 압력에 따른 노즐의 성능(K-factor)이 결정되고, 출구의 유동 정보는 구역2의 분무유동장 해석의 입력조건이 된다. 노즐 외부의 분무유동장은 노즐에서 분사되는 고속의 3차원 분사수와 대기 중의 공기가 상호작용하는 이상유동장이 된다.

본 연구에서는 이와 같은 유동장 해석을 위해서 범용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 선정하여 노즐의 분무 유동 특성에 맞게 해석 절차를 개발하였다<sup>6</sup>. 분무 유동장의 해석을 위해서 이상유동 모델(DPM)을 사용하였다<sup>7,8</sup>. 이상유동장인 구역2의 입구조건을 설정하기 위해서 비압축성 유동장으로 가정한 구역1의 결과에 분무노즐의 이상유동에 적합한 수정 입력 조건을 산출하였다<sup>9</sup>.

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 비정렬 격자 해석 코드인 FLUENT V6.2를 사용하였다.

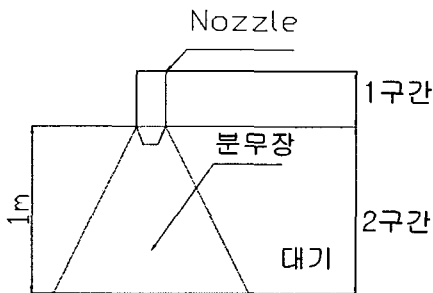


Fig. 1 Definition of flow region

## 3. 적용 결과

본 연구에서 적용된 대상은 swirler가 내장된 full cone형 노즐이다. 작동범위는 10 bar 내외의 저압에서 주로 사용된다. Fig. 2는 적용대상 노즐의 내부 형상을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 세 가지 관점에서 수치해석을 수행하였다. 우선, 기본 형상 조건 (단위노즐형)에서의 유동해석을 통하여 실험 결과와 비교하고 기법의 타당성을 검정하고자 한다. 둘째로, 노즐을 다중으로 부착했을 때(다중분사형)의 분무 특성을 예측하였다. 마지막으로, 노즐의 주요 형상변수(형상변경형)에 대한 성능 특성 영향을 분석하여 노즐의 성능을 향상할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

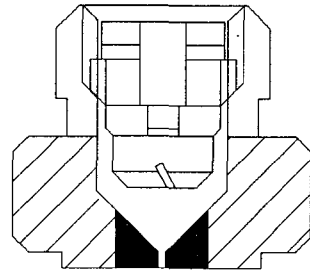


Fig. 2 Sectional view of single nozzle

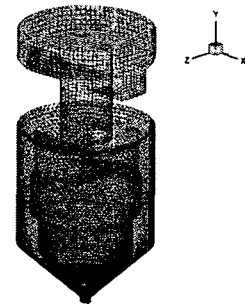


Fig. 3 Computational grids for zone 1

### 3.1. 단위 노즐의 성능 특성 예측

단위 노즐은 몸체(body)에 하나의 노즐이 부착된 경우로, 2개의 swirler가 내장돼 있고, 분사 오리피스스 한 개로 직경이 0.4 mm로 설계되었다. 운전범위는 유량 1.0 lpm 정도로 예측하였다.

Fig. 3은 내부 유동장(구역1)을 해석하기 위한 계산 격자점 분포이다. 설계 기준의 예상유량치인 1.0 lpm에

서의 노즐 내부의 압력 분포와 속도 분포는 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 유량범위를 설계 기준으로 50 ~ 200 % 운전에서 성능 예측한 결과는 Fig. 6과 같다. K-factor는, 식 (1)과 같이 정의되며 분무노즐의 주요 성능 변수이다. Fig. 6의 성능곡선에서  $n = 0.5$ 가 적합하고, 이때의 K-factor는  $K_{0.5} = 0.098$ 의 결과를 얻었다. 본 수치 시뮬레이션의 결과 예상유량치 1.0 lpm에서는 압력이 120 bar로 너무 크고, 분사각도 작으며 입자 반경도 크다. 따라서, 예상유량치는 0.2 ~ 0.4 lpm 정도로 낮추고 상응하는 압력 조건은 10 bar 내외로 조정할 필요가 있다.

$$K_n = Q/(\Delta P)^n \quad (1)$$

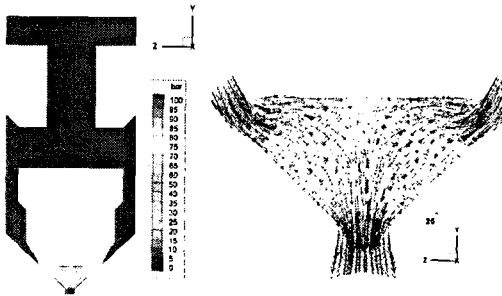


Fig. 4 Pressure distribution Fig. 5 Velocity fields

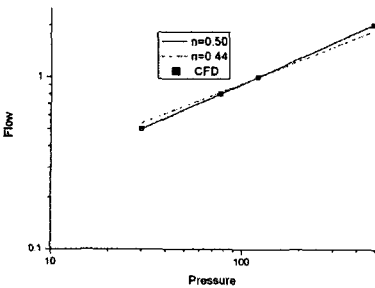


Fig. 6 Performance curve of single nozzle

단일노즐의 분무 유동 특성을 분석하고 실험 결과와 비교하기 위해서 실험과 동일 조건인 노즐 입구 압력 10 bar(상응유량은 0.31 lpm)에서 3차원 비정상 이상유동을 수치해석하였다. Fig. 7은 노즐 외부의 분무 유동장 해석을 위한 계산격자점 분포를 나타낸 것이다. 분무 유동 특성인 분무각과 제트 폭, 입자 반경을

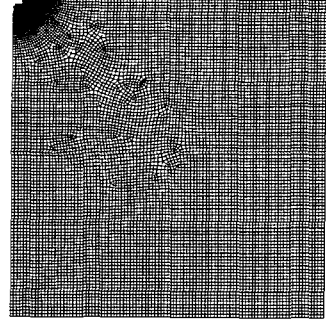


Fig. 7 Computational grids for zone 2

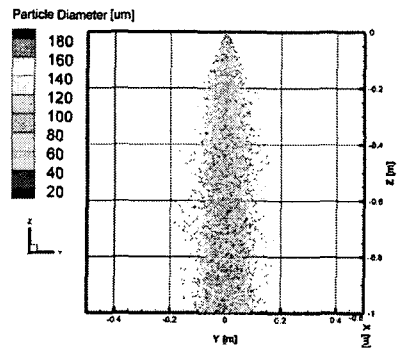


Fig. 8 Spray trajectory(P=10 bar)

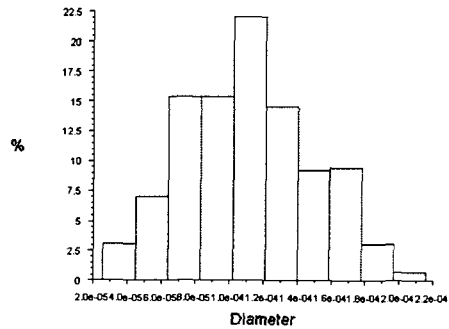


Fig. 9 Particle distribution

Table 1 Comparison of CFD with experiment

	실험	CFD
K-factor	0.1	0.098
SMD [ $\mu m$ ]	116.3	111.0
입자속도 [m/s]	6.03	5.07
분사각	70°	68°

반경과 축방향에서 2차원으로 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 9는 축방향  $z = 100$  mm에서 분무 입자 반경의 분포를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 동일조건과 동일지점에서 PDA로 측정된 실험결과와 유사한 양상을 보여주었다.

실험 결과와 비교하면 Table 1과 같이 정리할 수 있다. 노즐 성능특성 관점에서 K-factor는 실험의 경우 0.1이며 수치해석 결과는 0.098로 예측되었다. 출구 아래 100 mm 위치에서의 평균 입경속도는 6.03 m/s(실험), 5.07 m/s(수치해)이고, SMD로 정의한 평균 입자 크기는 116.3  $\mu\text{m}$ (실험), 111.0  $\mu\text{m}$ (수치해)로 거의 유사한 결과를 보였다. 노즐 바로 밑  $z = 100$  mm에서의 분사각도 70°(실험), 68°(수치해)로 거의 유사하였다. 이 결과로부터 본 연구에서 채택한 수치기법의 타당성은 검증되었다고 사료된다.

### 3.2. 다중분사 구조의 분무 특성 시뮬레이션

하나의 몸체(body)에 단일노즐을 여러 개 부착하면 동일 압력 조건에서 유량이 증가하여 노즐 성능을 증가시키는 효과가 있다. Fig. 10은 5 개의 단위 노즐이 clustering된 구조의 예이다. 노즐의 분무 특성은 Fig. 11로 정의되는 노즐 부착각도  $\alpha$ 에 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 다섯 개의 노즐을 Fig. 10과 같이 부착한 경우에 대해서 부착각도에 의한 분무 특성을 분석하였다. 다중분사 유동장 해석을 위한 계산격자점은 Fig. 7과 유사하다. 최종해는 약 50,000번 반복계산 후의 결과를 이용하였다.

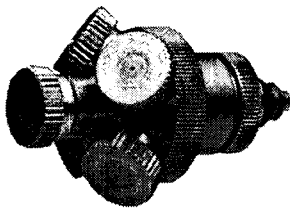


Fig. 10 Example of nozzle clustering

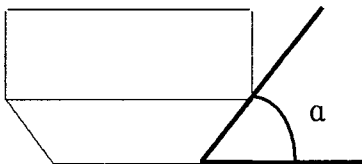


Fig. 11 Definition of clustering angle

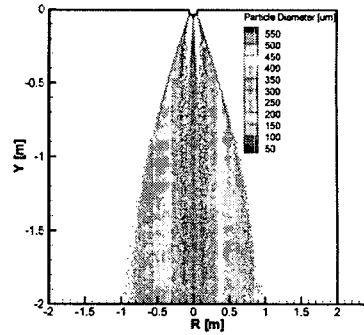


Fig. 12 Spray trajectory( $\alpha = 30^\circ$ )

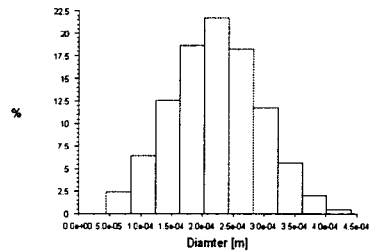


Fig. 13 Particle distribution at  $z = 1$  m( $\alpha = 30^\circ$ )

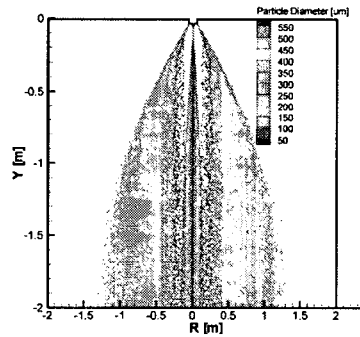


Fig. 14 Spray trajectory( $\alpha = 45^\circ$ )

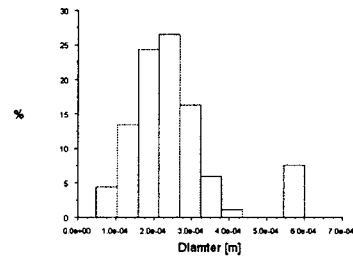


Fig. 15 Particle distribution at  $z = 1$  m( $\alpha = 45^\circ$ )

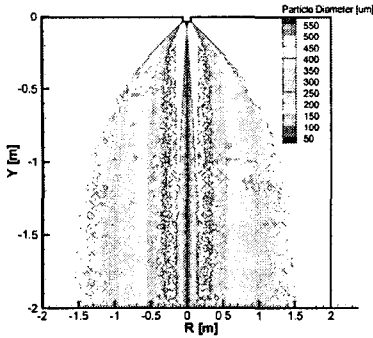


Fig. 16 Spray trajectory( $\alpha = 60^\circ$ )

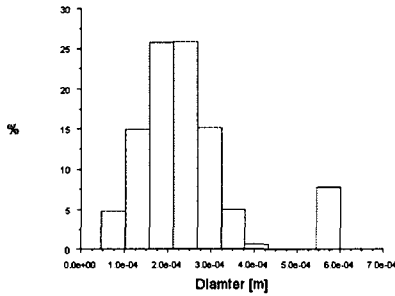


Fig. 17 Particle distribution at  $z = 1$  m( $\alpha = 60^\circ$ )

$\alpha = 30^\circ$  인 경우, Fig. 12에 나타난 바와 같이 분사각도는  $z = 0.1$  m에서  $82^\circ$ 이고 분사유효면적은  $z = 1$  m에서  $1.54 \text{ m}^2$ 이다. 단일 노즐인 경우(분사각  $68^\circ$ , 분사면적  $0.09 \text{ m}^2$ )와 비교하면 분사각은  $14^\circ$ , 분사면적은 17 배 증가하였다. Fig. 13과 같이  $z = 1$  m에서의 평균입자 반경은  $220 \mu\text{m}$ 로 단일노즐 분사와 차이가 거의 없다.

$\alpha = 45^\circ$  인 경우, Fig. 14에 나타난 바와 같이 분사각도는  $z = 0.1$  m에서  $127^\circ$ , 분사유효면적은  $z = 1$  m에서  $2.54 \text{ m}^2$ 이다. 단일 노즐인 경우와 비교하면 분사각은  $59^\circ$ , 분사면적은 28 배 증가하였다. Fig. 15와 같이  $z = 1$  m에서의 평균입자 반경은  $250 \mu\text{m}$ 로 약간 증가하였다.

$\alpha = 60^\circ$  인 경우, Fig. 16에 나타난 바와 같이 분사각도는  $z = 0.1$  m에서  $150^\circ$ , 분사유효면적은  $z = 1$  m에서  $6.16 \text{ m}^2$ 이다. 단일 노즐인 경우와 비교하면 분사각은  $14^\circ$ , 분사면적은 68 배 증가하였다. Fig. 17과 같이  $z = 1$  m에서의 평균입자 반경은  $240 \mu\text{m}$ 로 약간 증가하였다.

### 3.3. 노즐의 형상 변수에 의한 분무 특성 시뮬레이션

분무노즐의 성능을 향상하기 위한 최적 설계 변수 도출을 목적으로 형상변수에 의한 노즐 성능과 분무 특성을 검토하였다. 본 연구에서는 세 개의 주요 형상 변수에 대한 영향을 검토하였다. 즉, 스윌러(swirler)의 개수, 오리피스의 개수와 크기, 노즐의 몸체 직경 등이다. 각 변수별로 해석한 결과로부터 얻어진 노즐의 성능과 분무특성을 정리하면 다음과 같다.

#### 3.3.1. 스윌러 개수의 영향

분무 노즐의 내부에 장착된 스윌러는 난류 유동을 활성화 시켜 분무의 형성을 촉진시키는 구실을 한다. 단위 스윌러의 형상은 변화시키지 않고 개수만 2개, 4개, 8개 등 3가지 경우에서 전산해석 하였다. 이에 따른 노즐의 성능 특성 변화는 Table 2와 같다. 일정 유량인 경우 스윌러의 개수 증가로 유로가 커짐에 따라 압력강하는 감소되었다. 따라서 K-factor는 0.098에서 0.18로 약 2배 증가하였다.

노즐 내부의 압력강하는 대부분 스윌러와 오리피스 부근에서 이루어진다. Fig. 18에는 노즐 내부의 압력분포를 스윌러 4개인 경우에 대해 도시되어 있다. 유동이 스윌러 통과시에는 총 압력 강하의 약 28 %가 이루어지고, 오리피스 통과시 약 67 %가 진행되었다. 스윌러의 다양한 형상에 대한 연구도 필요할 것 같다.

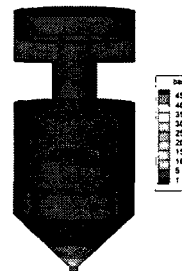


Fig. 18 Pressure contours(4 swirler)

Table 2 Effects of swirler number

Swirler	2	4	8
$\Delta P$ (bar)	120	48	33
$Q$ ( $\text{lpm}$ )	1	1	1
$V_{Out}$ ( $\text{m/s}$ )	72.0	67.7	66.0
K-factor	0.09	0.14	0.18

### 3.3.2. 오리피스의 개수와 크기의 영향

오리피스는 유동이 노즐에서 대기로 방출되는 부분이다. 스월러와 챔버를 통과하면서 복잡한 유로와 압력 강하를 통해 형성된 3차원 유동이 오리피스의 급격한 압력차로 분무 생성이 가속화 되는 부분이다. 본 연구에서는, 3.3.1절에서 얻어진 스월러 8개 형태의 노즐을 근거로, 오리피스의 개수 등을 변경했을 때의 영향을 살펴보고자 한다.

Fig. 19는 5개의 오리피스를 장착한 노즐에 대한 내부유동 해석용 계산격자점을 나타낸 것이다. 노즐 몸통의 주직경은 변화가 없고 스월러는 8개를 유지하였다. 오리피스는 총 5개이며, 노즐의 중심에 직경 0.8 mm인 오리피스 1개, 원주에 직경 0.4 mm인 오리피스 4개를 90°씩 배열시켰다. 오리피스의 단면적은 기본형과 비교하여 총 8배가 증가한 경우이다. 이에 대한 노즐의 주요 성능 특성은 Table 3과 같다. 유량이 같은 조건( $Q = 1$  lpm)에서의 성능을 비교해 보면 오리피스가 1개인 경우에는 압력강하가 33 bar이며 오리피스가 5개인 경우에는 5.7 bar로 운전 요구압력이 약 5.7배 감소하였다. 즉, K-factor는 2.3배 증가하였다. 반면에, 분무유동장을 형성시키는 출구유속은 감소하였다.

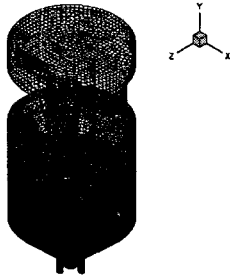


Fig. 19 Computational grids for 5-hole-orifice nozzle

Table 3 Performance with 5-hole-orifice nozzle

Flow rate (lpm)	$Q = 1$	$Q = 2$	$Q = 3$	$Q = 4.3$
$\Delta P$ (bar)	5.7	22.7	50.9	105.7
$V_{Out}$ (m/s)	22.0	45.7	50.8	73.6
K-factor	0.42	0.42	0.42	0.42

### 3.3.3. 노즐 주직경 영향

노즐의 몸체(body)의 주직경을 증가시키면 단면적의 증가로 노즐의 성능이 향상된다. 스월러의 개수는 8개로 고정하고 노즐의 전체 부피를 2배로 증가시켰다.

이 경우 몸체의 주직경은  $2^{1/3}$ 배 증가되는 효과를 가진다. Table 4에는 오리피스 1개인 경우와 5개인 경우의 노즐 특성을 동일 유량조건( $Q = 2$  lpm)에서 비교하였다. 오리피스의 개수 증가에 의한 K-factor는 1.8배 증가한다. 이는 3.3.2절의 경우(K-factor는 2.3배 증가)와 비교해서 증가의 폭이 둔화되었다.

단일노즐(single nozzle)을 기준으로, 스월러의 개수 증가(8개), 오리피스의 개수 증가(5개), 몸체의 주직경 증가( $2^{1/3}D_b$ )인 경우를 형상변경형 노즐(design-improved nozzle)로 정의하기로 한다. 설계목표 압력인 10 bar 부근에서의 분무특성을 도시하면 Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22와 같다. 초기설계 형상인 단일노즐형의 결과(3.1절의 Fig.8, Fig. 9)와 비교해 보면 입자의 평균 직경이 약간 줄어들고 유효분사면적도 증가하여 전반적으로 분무 특성이 향상됨을 알 수 있다.

Table 4 Performance with  $2^{1/3}D_b$  nozzle

Orifice	1	5
$\Delta P$ (bar)	36.7	10.9
$V_{Out}$ (m/s)	69.5	37.3
$Q$ (lpm)	2	2
K-factor	0.33	0.61

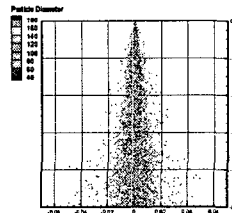


Fig. 20 Spray trajectory at 10.9 bar with design improved nozzle

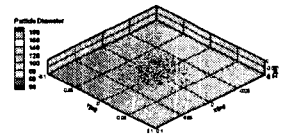


Fig. 21 Sectional view of particle distribution at  $z = 0.1$  m

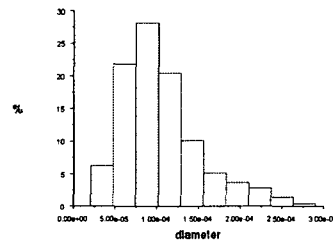


Fig. 22 Histogram of particle distribution at  $z = 0.1$  m

### 3.3.4. 형상변수에 따른 분무노즐의 성능 특성

본 연구에서는 세 가지 유형의 설계변수에 대하여 노즐의 분무 특성을 전산시뮬레이션하였다. 즉, 단위노즐형(3.3.1절), 다중분사형(3.3.2절) 및 형상변경형(3.3.3절)의 경우에 대한 노즐 성능, 분무특성 등을 변수별로 분석하였다. 이를 설계목표압력인 10 bar 부근의 조건에서 정리하면 Table 5와 같은 결과가 얻어진다.

초기설계 형상인 단일 노즐형의 경우 평균 직경은 111  $\mu\text{m}$ 로 만족스러우나 K-factor가 0.1 정도로 분무 유량이 기대치를 밑돈다. 다중분사구조를 채택함으로써 유량을 증가시킬 수 있고, 분사각도 향상되었다. 몸체의 직경, 스윌러의 수, 오리피스 배열 등을 변경함으로써 K-factor와 분사각을 개선할 수 있었다.

두 가지 유형을 조합하면, 설계목표 압력 조건(10 bar 부근)에서 운전가용 유량은 10 lpm, K-factor는 3.0 정도가 예측되고 평균입자가 110  $\mu\text{m}$  정도, 분사속도가 20 m/s 인 분무수를 생성할 수 있는 노즐을 설계할 수 있다. 이는 초기 설계인 단일 노즐에 비교하여, 형상이 복잡해지고 부피나 무게가 증가하는 단점이 있다. 노즐의 최적화 과정은 전체 소화시스템을 고려하여야 한다. 이에 대해서는 추후 연구되어야 할 내용이다.

Table 5 Comparison of nozzle performance

Design factor	Nozzle performance	Spray characteristics (at z = 0.1 m)
Single nozzle · Basic body ( $D_b$ ) · 2 swirlers · 1 orifice	P=10.0 [bar] $V_j=27.0$ [ m/s] Q=0.31 [ lpm] K-factor=0.098	$D_{10.5}=111$ [ $\mu\text{m}$ ] $V_{av}=5.1$ [m/s] Spray angle=68°
Multi-clustering · 5 single-nozzles · $\alpha=45^\circ$	P=15.8 [bar] $V_j=28.46$ [ m/s] Q=2 [ lpm] K-factor=0.49	$D_{10.5}=107$ [ $\mu\text{m}$ ] $V_{av}=10.3$ [m/s] Spray angle=127°
Design-improved · $2^{1/3} \times D_b$ · 8 swirlers · 5 orifices	P=10.9 [bar] $V_j=37.3$ [ m/s] Q=2 [ lpm] K-factor=0.61	$D_{10.5}=104$ [ $\mu\text{m}$ ] $V_{av}=22.9$ [m/s] Spray angle=90°

## 4. 결론

미분무수계 소화시스템의 핵심 부품인 분무 노즐의 기본 설계 기술을 확립하기 위해서 CFD기법을 적용하였다. 전용해석 시스템을 구성하고, 이를 설계된 노즐과 분무시스템에 적용하여 기법의 타당성을 검증하였다. 아울러, 다양한 운전 범위와 설계변수에서의 주요

성능 특성을 예측하였다.

범용 열유동 해석 소프트웨어인 FLUENT를 선정하여, 분무시스템의 유동장 특성에 적합하게 전처리 모듈, 유동장 해석, 후처리 모듈 등 전용 사용법을 개발하여 설계된 도면과 운전 조건하에서 성능 특성이 분석되도록 해석절차를 구성하였다.

위의 해석 절차에 따라, 기존에 설계된 노즐에 적용하여 K-factor 등의 노즐 성능 특성과 분무 유동장의 예측 결과를 설계치와 실험 결과와 비교하여 기법의 타당성을 검증하였다. 아울러, 주요 설계 변수에 대한 노즐의 성능 특성과 분무 특성을 예측하여 설계의 개선을 도모하였다.

## 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 춘계 학술대회 논문집, pp. 1703-1708.
- (3) 김호영 외, 2004, "분무수 분무특성이 액체연료 Pool 화염의 소화에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 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 Nonspherical Particles," Powder Technology, Vol. 58, pp. 63-70.
- (9) Lefebvre, A., 1989, "Atomization and Sprays," Hemisphere Pub.