

## 가스계 다공성 소화 노즐의 방출 특성 연구

김학선\* · 노고섭\*\* · 황인주\*\*\* · 김윤제\*\*\*\*†

### Discharge Characteristics of Gaseous Extinguishing Porous Nozzle

Hak-Sun Kim\*, Go-Sub Noh\*\*, In-Ju Hwang\*\*\*, Youn-Jea Kim\*\*\*\*†

Key Words : CFD(전산유체), Gaseous Extinguishing(가스계 소화), Fire Suppression Nozzle(화재 진압 노즐), Carbon Dioxide Agent(이산화탄소 약제)

#### ABSTRACT

This study examines the discharge characteristics of a CO<sub>2</sub> fire extinguishing agent through fire suppression nozzles. According to fire safety standards in NFSC 107A, the volume fraction of the fire extinguishing agent in the protective area should be maintained above a certain level to achieve rapid fire suppression. For this reason, an effective design of the agent discharge nozzle is essential. The configuration of a high-efficiency nozzle was derived by setting the inlet diameter and the number of outlets as the design parameters. The suppression efficiency of each case was analyzed with commercially available fluid dynamics software (ANSYS CFX 17.1) by investigating velocity distribution at the outlet of the nozzle and the volume fraction of the agent.

#### 1. 서 론

제4차 산업혁명 시대의 도래와 함께 각종 정보산업 및 데이터 저장 관련 산업 규모가 성장함에 따라 HDD(Hard Disk Drive)와 같이 화재 발생 피해 후 복구가 어려운 데이터 저장 장치들의 보관 및 관리가 중요해지고 있다. 이에 따라, 화재발생시 민감 장비들을 보관하는 구역에서는 신속한 화재 진압에 대한 필요성이 증가하고 있다.<sup>(1)</sup> 화재 진압 연구 중 소화 노즐 연구로 Park<sup>(2)</sup>은 분사노즐의 방출각도와 방출속도가 CO<sub>2</sub> 소화약제 농도분포에 미치는 영향을 수치적으로 계산하였는데, 분사속도 증가로 약제가 빠르게 고농도에 도달할 수 있음을 검증하였다. Jeon 등<sup>(3)</sup>은 밀폐된 방호구역과 기계시설 화재에 대하여 천장에 뚫린 개구부 크기가 CO<sub>2</sub> 소화에 미치는 특성 실험을 수행하였는데, 소화 완료 시간은 방호 구역 개구부 단면적의 크기에 비례하며, 면적이 증가하면 소화 시간도 증가한다는 결론을 도출하였다. Park 등<sup>(4)</sup>은 고압조건으로 작동되는 소화 설비로부터의 안정된 방출 압

력을 도출하기 위하여 다양한 직경을 가진 오리피스 모델에 대한 수치해석을 수행하였다. Song 등<sup>(5)</sup>은 오리피스 직경과 배관 길이를 설계 변수로 설정하여 수치적으로 불활성 가스계 약제 방출을 이용한 화재 진압 연구를 수행하였는데, 도출한 최적 형상모델이 심부 화재 진압에 효과적으로 대응할 수 있다는 연구결과를 발표한 바 있다. Park 등<sup>(6)</sup>은 오리피스 관과 노즐 직경비를 조절하여 노즐 내부 및 외부에서 발생하는 유동 특성에 대한 실험 연구를 수행하였다. 기하학적 형상비를 설계 변수로 설정하여 소화 약제 방출에 따른 분포도를 고찰하였는데, 형상비가 커질수록 분사압력이 상승하여 분사속도가 감소하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 소화약제 방출을 통한 화재 진압시 발생할 수 있는 질식 및 냉각효과를 고려하였다. 질식효과는 연소의 3요소인 가연물, 점화원, 산소공급원 중 가연물에 공급되는 공기량을 차단하여 산소결핍에 의한 연소반응을 중단시키는 원리이며, 냉각효과는 점화원을 인화점 이하로 냉각시켜 소화하는 원리이다. Kim과 Do<sup>(7)</sup>은 CO<sub>2</sub> 소화설비에

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

\*\* (주)진화이앤씨(JinHwa Engineering & Construction)

\*\*\* 한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

\*\*\*\* 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

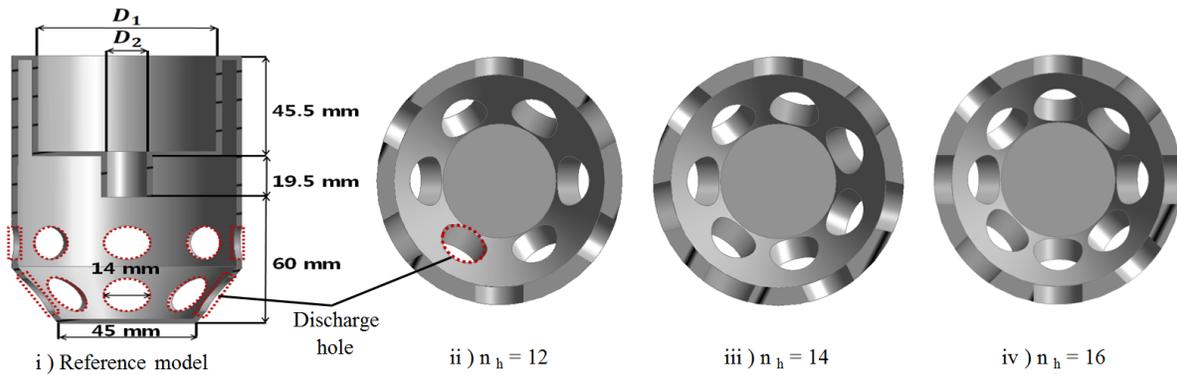


Fig. 1 Schematic of the gaseous extinguishing porous nozzle

서 질식 및 연쇄 반응 평가를 위한 실험연구를 수행하였다. 이를 통해 화재 진압시 질식효과에 적합한 약제 방출시간을 도출하여 화재안전기준(NFPA)에 부합하는 설계 농도를 분석하였다.

Park<sup>(8)</sup>은 가스약제 방출시 방호구역 내 개구부 크기 및 위치와 소화약제 방출시간에 따라 달라지는 유동장 내 약제 농도를 연구하였다. 이를 통해 소화 노즐에서 약제를 방출시키는 출구 면적과 위치 배열이 방호체적 내 약제 농도를 결정하는 설계 인자임을 확인하였다. 대부분의 선행 연구는 가스계 소화노즐의 성능지표인 소화 약제의 체적분율을 향상시키기 위해 오리피스관과 노즐 내부 형상만을 변화하였다. 하지만 소화 노즐의 효율을 향상시키기 위해서는 오리피스관 뿐만 아니라 작동유체 방출시 발생하는 유체 간 간섭효과도 고려해야하기 때문에 유입구와 오리피스 직경비 및 방출구 개수를 모두 고려해야 한다.

본 연구에서는 유입구와 오리피스관 직경비 및 방출구 개수를 설계 변수로 설정하여 가스계 다공성 소화노즐의 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 높은 효율을 갖는 방출구 형상을 도출하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 3차원 형상 설계

수치해석에 사용된 기본 소화노즐 모델을 Fig. 1에 도시하였다. 노즐은 크게 유입구, 오리피스 관, 방출구 등 세 부분으로 구성되는데, 본 연구에서는 국내 J社의 가스계 노즐 STC-36N50을 기본모델로 선정하였다. 기준 모델의 직경비  $\eta (=D_1/D_2)$ 은 3.5이며, 노즐 끝단부 방출영역에는 직경이 같은 8개의 방출구가 배열되어 있다. 유입구 직경비와 방출구 개수가 서로 다른 9개의 해석모델(Table 1 참조)을 이용하여 설계변수가 소화노즐의 성능에 미치는 영향을 파악하였다. 방출 속도 및 압력은 Fig. 1에 도시한 노즐 끝단 영역에서 측정하였으며, 유입구와 오리피스 직경비( $\eta=3.5, 4, 4.5$ ) 및

Table 1 Design parameters for all cases

	diameter ratio (mm/mm), $\eta (= D_1/D_2)$	number of holes, $n_h$
Case 1 (Ref.)	3.5 (60.9 / 17.4)	16
Case 2		14
Case 3		12
Case 4	4 (60.9 / 15.225)	16
Case 5		14
Case 6		12
Case 7	4.5 (60.9 / 13.53)	16
Case 8		14
Case 9		12

Table 2 Boundary conditions in this study

Turbulence model	SST (Shear Stress Transport)
Working fluid	Carbon dioxide (Ideal gas)
Inlet	1 (kg/s)
Outlet	1 (atm)
Wall and bottom	No-slip

홀의 개수( $n_h=12, 14, 16$ ) 변화를 설계변수로 설정하였다.

### 2.2 지배방정식 및 경계조건

다공성 소화노즐의 방출구 형상 변화에 따른 소화약제의 유동특성을 고찰하기 위해 지배방정식으로 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 이용하였는데, 상용코드인 ANSYS CFX-ver 17.1를 이용하여 해를 구하였다.<sup>(9)</sup> 유동장은 비정상 상태로 가정하였으며, 총 방출 시간을 5초로 설정하였다. 또한, 벽면 근처 유동 모사에 장점이 있는 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 적용하였다.

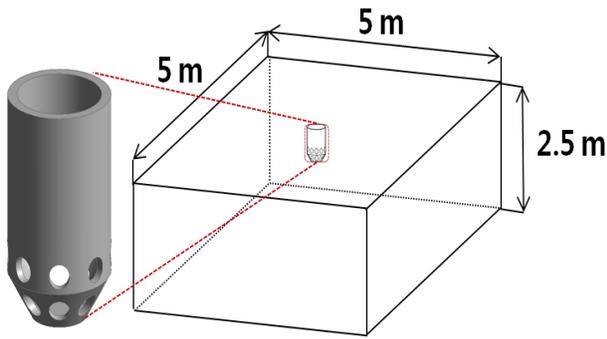


Fig. 2 Description of the modeled space

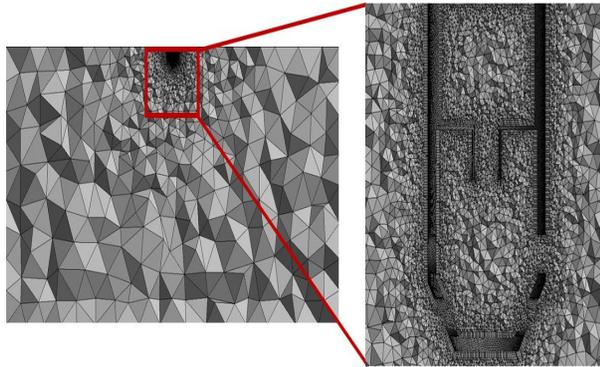


Fig. 3 Grid systems applied in this study

- 연속 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_j}(p) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i u_j \right] \end{aligned} \quad (2)$$

- 에너지 방정식:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho h_t) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h_t) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho u_j h_t \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_i (\tau_{ij} - \rho u_i u_j)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$h_t = h + \frac{1}{2}(u_i u_j) \quad (4)$$

여기서  $h_t$ 는 총 엔탈피를 의미하는데, 정적 엔탈피( $h$ )와

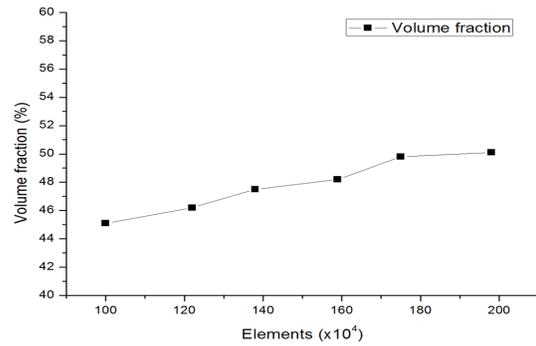


Fig. 4 Grid dependency test

단위 질량당 운동에너지로 표현된다.

본 연구에서 적용한 가스계 소화 노즐은 화재안전기준 (NFSC 106)에 적시된 전역방출방식을 따르며 25℃ 온도조건에서 1 kg/s이상의 소화 약제량을 방출하는 기준 조건에 부합하도록 해석조건을 설정하였다.<sup>(10)</sup>

또한, 가상의 화재 공간은 총 체적 62.5 m<sup>3</sup>으로 화재안전기준에 적합하게 구축하였다. 유동장 내부는 대기와 같은 1atm이며, 천장에서 환풍이 된다는 가정하에 opening 경계조건을 적용하였다. Figure 2는 1개 노즐의 작동 범주에 해당하는 유동장을 형상화 한 것인데, 인접한 각 유동장에서도 동일 조건으로 소화 기능이 수행된다고 가정하여 측면 경계조건으로 대칭(symmetric) 조건을 적용하였다. 이를 통하여 가스계 소화 노즐의 직경비( $\eta$ )와 방출구 개수( $n_b$ ) 변화를 통해 방출된 유동장 내 소화약제의 속도 분포와 체적분율(volume fraction)을 산출하였다.

### 2.3 격자계 구성

노즐 내 오리피스 형상과 방출구 개수에 따른 약제 방출 특성을 고찰하기 위하여 사면체(tetrahedron)격자를 이용하여 격자계를 구성하였다 (Fig. 3 참조). 특히 노즐 벽면에서는 수치해의 수렴성 확보를 위하여 1.2배로 격자크기가 증가하는 5겹의 계산 중첩층(inflation layer)으로 격자계를 구성하였다. 또한 격자 의존성을 테스트하기 위하여, 약 100만개부터 200만개까지 격자수를 늘려가면서 소화 약제의 방출속도 및 체적분율 변화를 고찰하였다. 그 결과 격자수가 약 180만개 보다 많은 경우 이들에 대한 격자 의존도가 줄어드는 경향을 보였다(Fig. 4 참조). 이에 따라 모든 Case에 대한 격자계는 약 180만개 요소로 구성하여 수치해석을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 속도 분포

소화노즐에서 방출되는 소화약제의 방출 속도를 증가시키

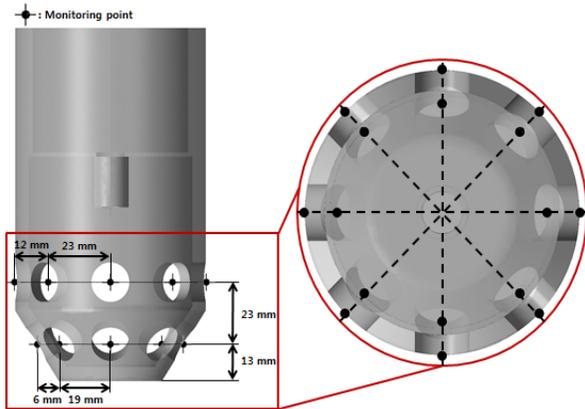


Fig. 5 The monitoring points of the extinguishing nozzle

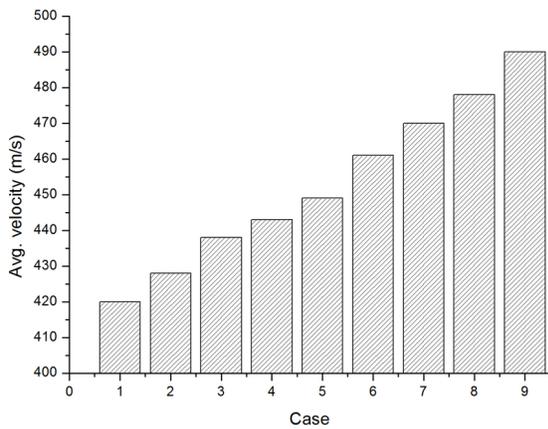


Fig. 6 Avg. velocity at the exit of the extinguishing nozzle for each case

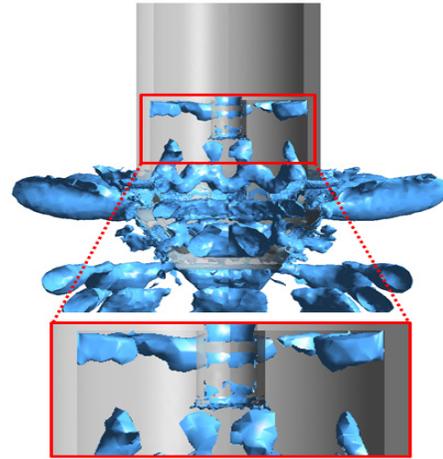
기 위해 동일 직경 및 유입 질량유량 1 kg/s를 설정하여 수치 해석을 수행하였다. 방출구 영역 관측점을 정면도와 평면도로 구분하여 Fig. 5에 도시하였다. 기준 모델(Case 1)의 평균 방출속도는 약 420 m/s이며, 9가지 Case 중 최대 속도를 나타낸 Case 9은 약 490 m/s로 기준 모델보다 70 m/s 증가하였다(Fig. 6 참조).

수치해석을 통해 동일한 직경비에서 방출속도에 많은 영향을 미치는 부분은 방출구의 개수임을 알 수 있었다. 또한, 직경비가  $\eta=3$ 인 모델에서는 오리피스 끝단에서 최대 마하수 (Mach number)  $M \approx 1.4$ 인 방출속도가 나타났다.

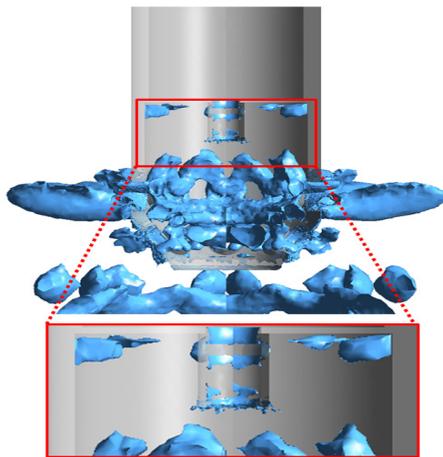
### 3.2 와동 구조와 스월 강도

각 Case별 노즐 근방에 생성된 와동구조를 정량적으로 비교하기 위해 스월 강도를 계산하였다.<sup>(11)</sup>

$$v_1 = \sqrt{u_x^2 + u_z^2} \cos\left(\arctan\left(\frac{z}{x}\right) - \arctan\left(\frac{u_z}{u_x}\right)\right) \quad (5)$$



i) Case 1(ref.)



ii) Case 9

Fig. 7 Comparison results of vortex structure between the reference model and Case 9

$$v_2 = \sqrt{u_x^2 + u_z^2} \sin\left(\arctan\left(\frac{z}{x}\right) - \arctan\left(\frac{u_z}{u_x}\right)\right) \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{v_2^2}{(v_1^2 + v_2^2)}} \quad (7)$$

여기서,  $v_1$ 은 노즐 내부 중심으로부터의 반경 방향속도,  $v_2$ 은 노즐 내부로부터의 접선 방향속도, 그리고  $S$ 은 스월 강도를 의미한다.

노즐 내 벽면에서 생긴 와동 구조를 Fig. 7에 도시하였다. Case 1은 내부 챔버 상단에서 와동 발생이 두드러지게 나타났으며, 유동장에서의 회전강도는  $8765.80 \text{ s}^{-1}$ 로 계산되었다. Case 9은 벽면 근처에서의 와동현상이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한, 회전강도가  $8267.84 \text{ s}^{-1}$ 로 약 5% 줄어들어 완화된 와동현상을 확인하였다. 이 같은 초음속 제트유동은 노즐 내부에 강한 와동을 생성하고 내부 유동에 영향을 끼칠 수 있다.

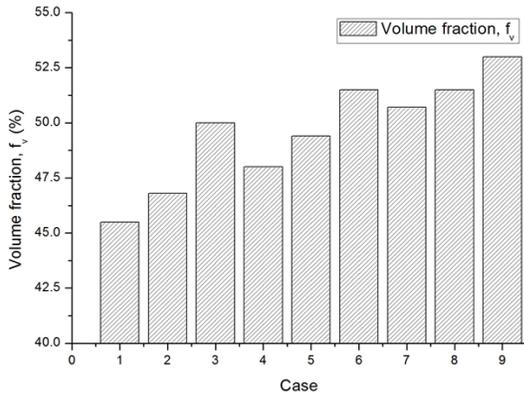


Fig. 8 Volume fraction of CO<sub>2</sub> for each case

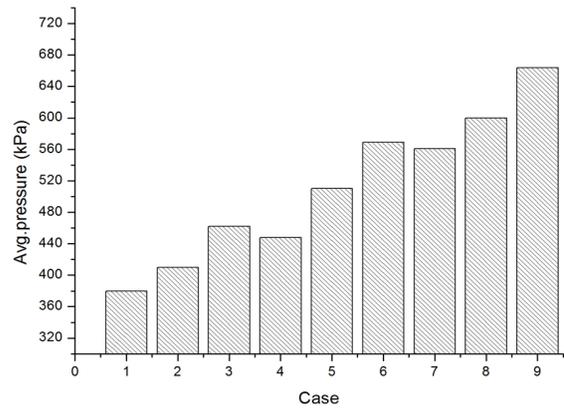


Fig. 10 Avg. pressure at the exit of the extinguishing nozzle for each case

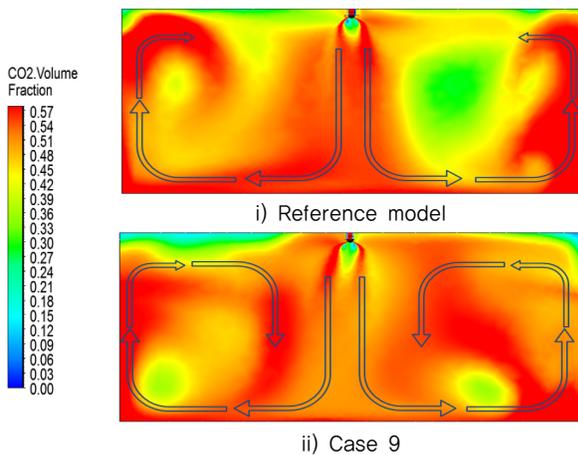


Fig. 9 Comparison results of CO<sub>2</sub> concentration between the reference model and Case 9

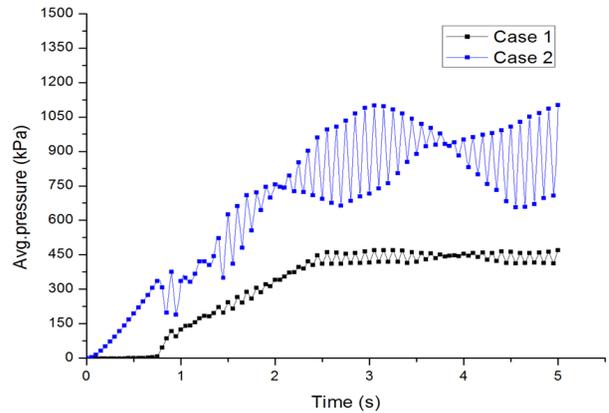


Fig. 11 Comparison results of pressure distribution between the reference model and Case 9

### 3.2 체적분율

화재 공간 내 산포된 소화약제(CO<sub>2</sub>)의 체적분율( $f_v$ )을 산정하기 위해 기준 모델에서 직경비 및 방출구 개수를 변화시켰다. 체적분율은 다음과 같이 전체 유동장 공간대비 분출된 CO<sub>2</sub> 체적으로 산출할 수 있다.

$$f_v = \frac{\bar{V}_c}{\bar{V}} \times 100 \quad (8)$$

여기서,  $\bar{V}$ 는 유동장 내 공기 체적,  $\bar{V}_c$ 는 유동장 내 CO<sub>2</sub> 체적을 의미한다. 체적분율은 방출시간이 5초일 때, 유동장 62.5 m<sup>3</sup>내 공기의 체적 대비 방출된 CO<sub>2</sub> 체적을 계산하여 유동장 내 CO<sub>2</sub> 체적분율을 계산하였다. 기준 모델의 경우 체적분율은  $f_v \approx 50.9\%$ 이며, 해석 모델 중 가장 체적분율이 높은 노즐은 직경비  $\eta=4.5$ , 방출구 개수  $n=12$ 인 Case 9 형상이며,  $f_v \approx 53\%$  체적분율을 나타내었다.

소화약제의 분포도를 살펴보면 분출된 유동으로 인해 유

동장 바닥면에서 벽면으로 상승하는 기류현상을 볼 수 있다 (Fig. 9 참조). 소화 약제의 방출 속도가 빠른 Case 9에서는 바닥면으로 향하는 기류와 벽면으로 상승하는 현상이 나타났다.

### 3.3 압력 분포

각 Case별 관측점에서 측정된 평균 압력을 Fig. 10에 도시하였는데, 속도분포 결과로부터 유추할 수 있듯이 직경비와 방출구 수에 따라 각 지표마다 압력값이 높은 경향을 확인할 수 있다. 직경비  $\eta=4.5$ 인 Case 9은 속도 분포 결과와 유사한 경향으로 측정점에서 유체의 높은 압력 값이 계산되었다(Fig. 11 참조). 이는 기준 모델 대비 방출구 개수가 감소함에 따라 방출하는 소화 약제의 평균 압력이 증가한 것에 기인한다고 할 수 있다.

Case 1은 평균압력이 약 379 kPa이며, Case 9은 약 664 kPa로서, 약 285 kPa 압력이 상승하여 효과적인 소화약제의 방출 특성을 확인하였다.

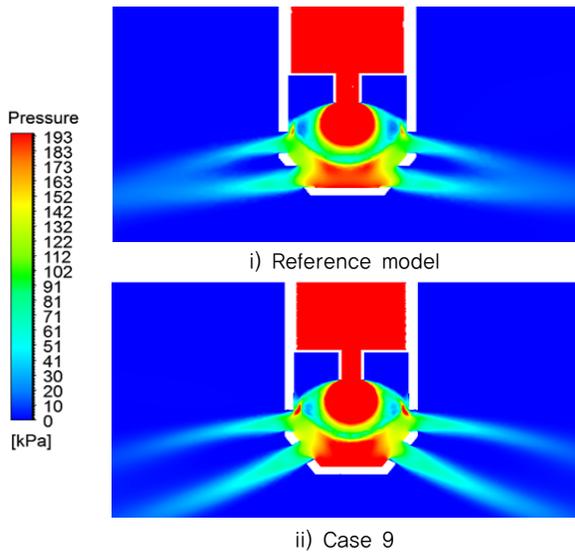


Fig. 12 Pressure distribution of the reference model and Case 9

#### 4. 결 론

본 연구에서는 화재 공간내 소화약제의 방출 성능을 향상 시키고자 노즐 유입구와 오리피스 관의 직경비, 방출구 개수를 설계인자로 하여 총 9가지 모델에 대한 수치해석을 수행 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

직경비 증가와 방출구 개수가 감소함에 따라 작동유체의 방출 속도를 상승시켜 유동영역 내에서 CO<sub>2</sub> 체적분율이 증가함을 확인하였다. 결과적으로 설계변수 중 직경비가 증가 하고, 방출구 수가 감소한 모델은 내부챔버에서 와동이 저감 됨에 따라 방출 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 고려한 여러 모델 중 Case 9은 최대 방출 속 도와 CO<sub>2</sub> 체적분율이 각각 495 m/s, 53%로 성능지표가 가 장 높아 해석 모델 중 화재 진압에 가장 적합한 형상임을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통기술사업화지원사업의 연구비 지원 (17TBIP-C127226-01)에 의해 수행되었습니다.

#### References

(1) Siemens, Silent Extinguishing-disruptions to Hard Disk

Drives Caused by Inert Gas Extinguishing System Analysis and Measures for the Safe Operation of Storage Systems, 2016., pp. 1~12

(2) Park, C. S., 2006, "A Numerical Simulation of the Effect of the Injection Angle and Velocity of the CO<sub>2</sub> Agent Nozzle on the Characteristics of CO<sub>2</sub> Concentration Distribution," Fire Science and Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 44~53 (in Korean).

(3) Jeon, H. K., Choi, Y. S. and Park, J. T., 2008, "The Effects of the Area of Openings on the Performance of a CO<sub>2</sub> Extinguishing System -The CFD Simulations of the Oil Surface Fire in a Machine Room-, " Fire Science and Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 1~9 (in Korean).

(4) Park, B. R., Yun, K. J., Jang, K. N., Choi, J. U. and Baek, E. S., 2012, "A Study on the Decompression Performance by the Orifice Diameter," Fire Science and Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 57~63 (in Korean).

(5) Song, E. S., Kim, J. D. and Park, Y. W., 2005, "Discharge and Fire Extinguishing Test of Inert Gas Clean Agent," Fire Science and Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 29~36 (in Korean).

(6) Park, S. H., Suh H. K. and Lee, C. S., 2007, "Effects of Nozzle Orifice Shape and Nozzle Length-to-Diameter Ratio on Internal and External Flow Characteristics of Diesel and Biodiesel Fuel," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 31, No. 3, pp. 264~272 (in Korean).

(7) Kim, W. K. and Do, K. S., 2013, "Theoretical Investigation on the Release Rate of Gas in Fire Extinguishing System Release test (I)," Fire Science and Engineering, Vol. 37, pp. 69~70 (in Korean).

(8) Park, S. M., 2000, "A Study on the Agent Compensation for the Leakage through Openings and Unsealed Enclosure Leakage Areas for the Gaseous Extinguishing System," Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 2~9 (in Korean).

(9) ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc., 2013.

(10) NFSC 106, 2017, "National Fire Safety Code for Carbon Dioxide Extinguishing Systems," Ministry of Public Safety and Security, Vol. 1, pp. 1~6 (in Korean).

(11) Lim, S. G., Lee, S. H. and Kim, H. G., 2010, "Benchmark and Parametric Study of a Passive Flow Controller (fluidic device) for the Development of Optimal Designs using a CFD Code." Nuclear Engineering and Design, Vol. 240.5, pp. 1139~1150.