

## 물 분무 소화설비 성능검토를 위한 수치해석 연구

김양균<sup>1)</sup> · 유용호<sup>1)\*</sup> · 박진욱<sup>1)</sup> · 박병직<sup>1)</sup> · 김휘성<sup>1)</sup>

### Numerical Study on the Water Monitor Extinction System for Performance Verification

Yangkyun Kim, Yong-Ho Yoo\*, Jin-Ouk Park, Byung-Jik Park, and Hwi-Seong Kim

(Received 28 November 2017; Final version Received 22 December 2017; Accepted 22 December 2017)

**Abstract :** This paper describes numerical simulation on the water jet extinction system for systematical verification of its performance applied in double deck tunnel in great depth underground space. Numerical model applied is 2D Eulerian multiphase model, and its results are validated with the equation of motion and experiment. Simulation results show that water volume fraction is not over 0.5 in whole nozzle inlet pressure applied. Also, water volume fraction on the ground of tunnel is increased according to an increase in jet discharge pressure in case of 0° of jet inclination angle, while water volume fraction on the ground of tunnel is decreased according to an increase in jet discharge pressure in case of 5° and 11° of jet inclination angle.

**Key words :** Water jet extinction system, Eulerian multiphase model, Water volume fraction, Discharge distance, Projection area

**요약 :** 본 연구에서는 대심도 복층터널 방재에 사용되는 물 분무 소화설비의 체계적인 성능검토를 위해 수치해석을 이용하였다. 선택된 수치해석 기법은 2차원 Eulerian 다상유동 모델이고 수치해석 기법의 검증을 위해 운동량 방정식 및 물 분무 실험값을 이용하였다. 수치해석 결과 적용된 모든 노즐 출구 압력에서 물의 체적분율은 0.5를 넘지 않았다. 또한 물의 분사각도가 없는 경우는 노즐의 출구압력이 증가함에 따라 바닥에 퍼지는 물의 체적분율이 증가하였지만 물의 분사각도가 올라가면 노즐의 출구압력이 증가함에 따라 바닥에 퍼지는 물의 체적분율이 감소하였다.

**주요어 :** 물 분무 소화설비, Eulerian 다상유동, 물 체적분율, 분사거리, 분사면적

## 서 론

최근 유럽과 미국 등 선진국에서는 도심지 지하공간을 활용한 교통시설의 건설이 활발히 진행되고 있으며, 국내의 경우도 서울시에서 총 연장 149 km로 6개의 지하도로와 2개의 순환도로망 구축을 골자로 하는 U-Smartway 계획을 발표하는 등 다양한 도심지 대심도 지하 교통시설 활용 방안이 마련되고 있다. 하지만 국내의 대심도 지하도로 건설 기술은 선진국들과 비교하여 관련 핵심기술 부재 및 기술축적이 충분하지 않아 사업이 추진될 경우 많은 어려움이 뒤따를 것으로 예상된다. 무엇보다도 방재의 경우 국내의 기술적·정책적 대안이 부족하여 설계/시공기술 등의 건설핵심기술이 확보된다 하여도 안전의 문제로 사업의 완성

도가 떨어질 것으로 지적된다.

도심지 대심도 지하도로 방재의 핵심은 화재안전기술이다. 국토해양부에서 제시하고 있는 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”을 살펴보면 도로터널에 적용되는 방재시설에서 화재진압은 소화설비, 경보설비, 피난설비 등으로 구성되어 있으며, 터널의 화재발생시 화재 진압을 위한 소화설비는 옥내소화전, 물분무 설비, 소화기가 있다. 소화설비의 경우, 도로터널내 화재시 사용하는 목적으로 설치되고 있으나 터널내 화재에 직접적인 진압으로는 물분무 설비가 유일하다. 이러한 이유로 국토교통기술연구개발 사업으로 진행되고 있는 대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발에서는 물분무 설비를 대심도 복층터널 내에 효과적으로 이용하기 위해 자동 소화 시스템을 개발 중이다(Park *et al.*, 2016).

자동 소화 시스템은 펌프스테이션, 분사헤드, 위치제어 모터 등으로 구성되어 있으며 소화성능에 직접적인 영향을 미치는 요소로는 분사거리, 분사면적, 그리고 바닥면에 퍼지는 물의 체적분율 등이 있다. 물의 궤적 및 분사거리

1) 한국건설기술연구원 화재안전연구소

\*Corresponding Author(유용호)

E-mail; yhyoo@kict.re.kr

Address; KICT, 64, Mado-ro, 182 beon-gil, Mado-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18544, Korea

는 전통적인 운동 방정식을 통해 얻을 수 있으며(Wahl *et al.*, 2008), 최근에는 시뮬레이션 연구가 진행되었다(Ryu *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016). 하지만 분사면적이나 바닥면에 퍼지는 물의 체적분율의 경우 실험을 통해 정량적인 데이터 획득이 어렵고 마땅한 이론식이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 다상유동 모델을 이용한 수치해석을 실시하여 다양한 분사각도 및 분사압력에 따른 분사거리, 분사면적, 바닥에 퍼지는 물의 체적분율을 얻어 자동 소화 시스템의 체계적인 성능검토가 이루어질 수 있도록 하였다.

## 수치해석 모델 선정

물 분무 소화설비 수치모사를 위해 적절한 수치해석 모델을 찾고자 하였다. 일반적으로 기체의 상에 액체 상태의 분무를 할 경우, 분사거리가 늘어날수록 분무액적이 차지하는 부피 비율이 커지며 공기저항이 증가한다. 특히 고밀도 유체가 차지하는 부피비율이 큰 유동의 경우 입자수의 증가로 인해 수치해석에 어려움이 있다. 다상유동에 주로 사용되고 있는 VOF(Volume of Fluid) 모델의 경우 단일 Navier-Stokes 방정식과 체적분율의 수송방정식을 계산하여 상 경계(phasic interface) 움직임을 추적하는 데 초점을 둔다(Hirt and Nichols, 1981). 이는 해석 격자 하나가 상 경계를 계산하여 전체 유체의 형태를 도출하는 방식이다. 따라서 VOF 모델은 유체의 체적분율을 양분하는 경계를 계산할 수 있는 조건에서는 좋은 모델이지만 유체의 체적분율을 양분할 수 없고 이상 유체(two phase flow)가 섞여있는 조건에서는 적용이 적합하지 않다(Darwish and Moukalled, 2006). Eulerian 모델의 경우 2개의 Navier-Stokes 방정식과 체적분율 수송방정식을 이용하여 2개의 상을 연속체처럼 간주하여 계산이 진행되며 이상(two phase)이 섞여있는 복잡한 현상에 보다 효과적인 계산이 가능해진다(Bowen, 1976). 따라서 본 연구에서는 Eulerian 모델을 적용하여 물 분무 분사궤적 수치모사를 실시하였다.

## 지배방정식

난류 다상유동을 해석하기 위해 Navier-Stokes 방정식을 풀었다. 문제 해결을 위해 선택한 모델은 Eulerian 다상유동 모델이며, 난류유동을 풀기위해 교환계수  $k$ 를 이용하여 물과 공기간의 점성과 항력을 고려하였다. 물과 공기의 상호간 물질, 열 및 운동량의 간섭이 없다는 가정 하에 연속 방정식은 식 (1), (2)와 같이 표현된다(Anderson and Jackson, 1967).

$$\frac{\partial(\alpha_w \rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \vec{v}_w) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_a \rho_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_a \rho_a \vec{v}_a) = 0 \quad (2)$$

여기서  $\vec{v}_w$ 와  $\vec{v}_a$ 는 물과 공기의 속도를 나타내며,  $\alpha_w$ 와  $\alpha_a$ 는 각각 검사체적에서의 물과 공기의 체적분율(volume fraction)을 나타내며, 그 정의는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_a &= 0, \text{ 공기} \\ 0 < \alpha_a < 1, \text{ 상경계면} \\ \alpha_a &= 1, \text{ 물} \end{aligned} \quad (3)$$

운동량방정식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_w \rho_w \vec{v}_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \vec{v}_w \vec{v}_w) = \\ -\alpha_w \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau_w}} + \alpha_w \rho_w \vec{g} - k_{wa} (\vec{v}_w - \vec{v}_a) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $P$ 와  $\vec{g}$ 는 각각 압력과 중력가속도를 나타내며,  $\overline{\overline{\tau_w}}$ 와  $\overline{\overline{\tau_a}}$ 는 물과 공기의 응력-변형 텐서(stress-strain tensor)를 나타낸다. 마지막 항,  $k_{wa}$ (interphase momentum exchange coefficient)는 물과 공기간의 운동량 전달을 나타내는 계수로 식 (5)와 같다.

$$k_{aw} = \frac{\rho_w f}{6\tau_w} d_w A_i \quad (5)$$

여기서  $A_i$ 는 물과 공기간의 상경계 면적,  $f$ 는 물의 항력함수(drag function),  $\tau_w$ 는 특정 이완 시간(particular relaxation time)을 나타낸다. 항력( $f$ )은 식 (6)의 Schiller and Nauman의 모델을 이용하여 계산을 하였다(Schiller and Naumann, 1935).

$$f = \frac{C_D Re}{24}, \text{ where } C_D = 0.44 \quad (6)$$

여기서 항력 계수값( $C_D$ )은 높은 레이놀즈수에 적용하는 0.44를 채택했고( $Re \geq 1000$ ), 레이놀즈수는 식 (7)과 같이 계산한다.

$$Re = \frac{\rho_w |\vec{v}_a - \vec{v}_w| d_w}{\mu_w} \quad (7)$$

난류모델은  $k-\epsilon$  standard 기반의 mixture 난류 모델을 적용하였고 이는 식 (8), (9)와 같다(Yakhot and Orszag, 1986).

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m k \vec{v}_m) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \epsilon \vec{v}_m) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) \quad (9)$$

여기서  $\rho_m$ 은 혼합밀도(mixture density),  $\vec{v}_m$ 은 혼합속도(mixture velocity)이다. 난류점성(turbulent viscosity,  $\mu_{t,m}$ )과 난류에너지의 생성항(production of turbulent kinetic energy,  $G_{k,m}$ )은 식 (10), (11)과 같이 계산된다.

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) \quad (11)$$

난류모델에 사용되는 고정값( $C_{1\epsilon}=1.44$ ,  $C_{2\epsilon}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\epsilon=1.3$ )은 기본 유체흐름에 사용되는 일반

적인 값을 사용하였다(Launder and Spalding, 1972). 물 분무 계산은 유동과 벽면의 마찰이 중요하지 않기 때문에 벽 함수는 표준(Standard) 벽함수를 이용한다.

### 계산조건

지배방정식을 차분화하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method)이 사용되었다. 시간에 대한 차분화를 위하여 1차 Implicit Euler법이 사용되었으며, 공간에 대해서는 2차 풍상차분법을 사용하였다. 압력과 속도 커플링은 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다. 지배방정식의 수렴 조건은  $10^{-5}$ 이며, 1회의 시간간격당 최대 40번의 반복계산이 실시되도록 하였다. 시간항을 적분하기 위한 시간간격(time step)은  $1.0^{-4}$ 이며 계산에 사용된 총 CPU시간은 3.2GHz의 인텔프로세서에서 평균 30시간 정도 소요되었다.

Fig. 1은 수치해석 도메인과 경계조건을 보여준다. 해석 도메인은 길이가 50 m이고 총고가 3.75 m인 복층터널로 구성하였다. 분사노즐 입구의 직경은 20 cm이며 노즐은 바닥으로부터 170 cm 높이에 위치시켰다. 노즐의 각도는 바닥면으로부터 수직인 면에서 0~15°로 각도의 변화를 주었다. 여기서 분사노즐의 형태는 복잡하기 때문에 고려하지 않았다. 초기조건으로 해석 도메인의 물 체적분율( $\alpha_w$ )과 공기 체적분율( $\alpha_a$ )을 각각 0과 1로 주어 터널이 공기로 가

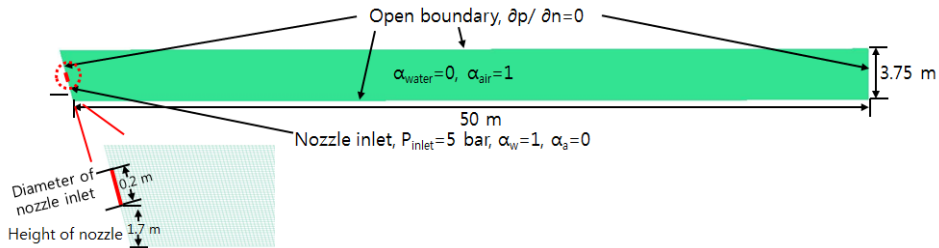


Fig. 1. Computational domain and boundary condition.

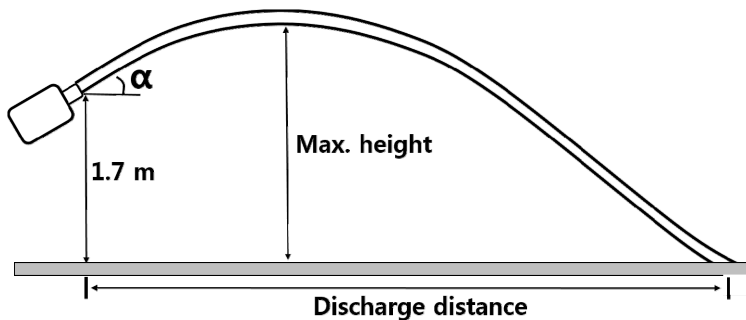


Fig. 2. Schematic description of jet trajectory from nozzle with angle,  $\alpha$ .

특 차계 구성하였다. 경계조건으로 노즐 입구에서는 물 체적분율( $\alpha_w$ )과 공기 체적분율( $\alpha_a$ )을 각각 1과 0으로 주었으며 고정압력을 통해 물을 분사하게 하였다. 노즐을 제외한 모든 경계는 경계면에서 수직인 압력의 구배가 0이 되도록 하여 해석 도메인을 출입하는 유체의 흐름에 압력구배가 없게 하였다. 계산은 2차원 비정상유동을 풀었으며, 물 분무 궤적이 더 이상 변하지 않을 때까지 계산을 충분히 수행하였다.

### 계산방법 검증

수치해석 계산방법의 검증은 간단한 운동 방정식(Fig. 2)에서 얻은 값과 물 분무 실험 값을 이용하여 진행하였다. x-y 좌표를 이용한 운동 방정식은 다음과 같다(Park *et al.*, 2017).

$$y_0 = x \tan(\alpha) - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2(\alpha)} \tag{12}$$

$$Z_{max} = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{(v_0)_x^2}{2g} \tag{13}$$

$$(v_0)_x = v_0 \cos(\alpha) \tag{14}$$

여기서 x와  $y_0$ 는 분사거리와 초기 노즐의 높이이고, g,  $v_0$ ,  $(v_0)_x$ , 그리고  $\alpha$ 는 각각 중력가속도, 분사속도, x방향 분사속도, 그리고 분사각도를 나타낸다. 검증을 위한 수치해석 조건으로 분사노즐 입구의 압력은 5 bar를 사용하였다. Fig. 3은 분사각도에 따른 물 분무 최대 높이(왼쪽)와 물 분무 거리(오른쪽)를 나타낸다. 여기서 검은색 굵은선, 가는 회색선, 그리고 굵은 점은 각각 수치해석값, 운동 방정식값, 그리고

실험 측정값을 나타내며, 적용된 복층터널의 층고가 3.75 m 이기 때문에 분사 최대높이는 복층터널 천장과 간섭을 받지 않는 3.75 m 이하를 기준으로 한다. 11° 분사각도에서 운동 방정식, 물 분무 실험 실험, 그리고 수치해석에서 얻은 최대 분사높이는 각각 3.56, 3.18, 그리고 3.72 m이다. 수치해석에서 얻은 분사높이는 실험 실험값과 비교하였을 때 약 14% 정도 높게 예측 되었지만 운동 방정식에서 얻은 값과 비교하였을 때 4.4%의 오차밖에 보이지 않았다. 11° 분사각도에서 운동 방정식, 물 분무 실험, 그리고 수치해석에서 얻은 최대 분사거리는 각각 37.52, 43.0, 그리고 45.56 m이다. 최대 분사높이와 마찬가지로 수치해석에서 얻은 최대 분사거리는 실험 실험값과 비교하였을 때 약 14% 정도 높게 예측되었지만 운동 방정식에서 얻은 값과 비교하였을 때 5% 정도의 작은 차이를 보였다. 이러한 이유는 실험 실험값이 이론과 수치계산의 값에 포함되지 않은/간소화된 공기의 저항값과 바람 등의 영향을 받아 낮게 나타난 것으로 생각된다. 본 연구에서는 실험실험과 운동 방정식에서 얻은 값과 비교하였을 때 허용 가능한 범위의 오차를 보이고 분사각도에 따른 최대 분사높이와 분사거리의 경향을 잘 따라가기 때문에 수치해석 계산방법이 신뢰성을 얻었다고 판단된다.

### 노즐입구 분사압력에 따른 분사궤적

Fig. 4는 노즐 분사각도와 분사압력이 다를 때 분사궤적을 가시화하기 위해 물의 체적분율( $\alpha_w$ )을 나타냈다. 여기서 물 체적분율의 정의는 계산격자 안에 물의 가득찬 정도를 나타낸다. 예를 들어, 계산격자에서  $\alpha_w = 0$ 은 계산격자에 공기가 가득 차 있음을 뜻하고,  $\alpha_w = 1$ 은 물이 가득 차 있음을 나타낸다. 만약 계산격자의 물 체적분율이  $0 < \alpha_w < 1$

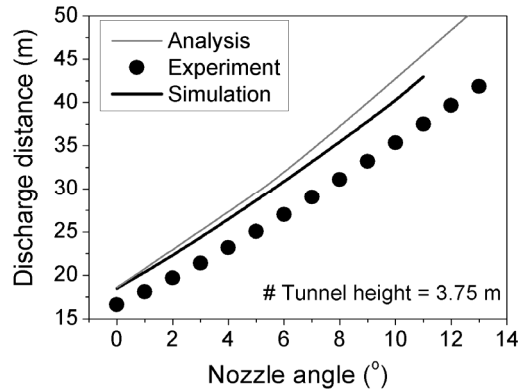
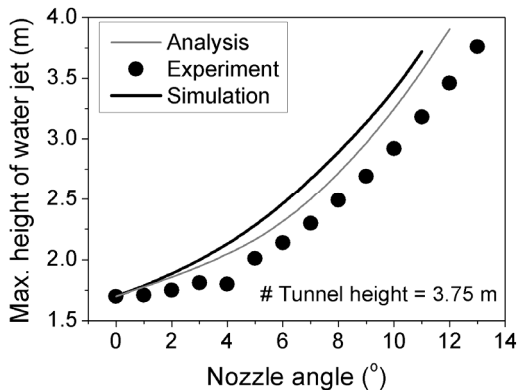
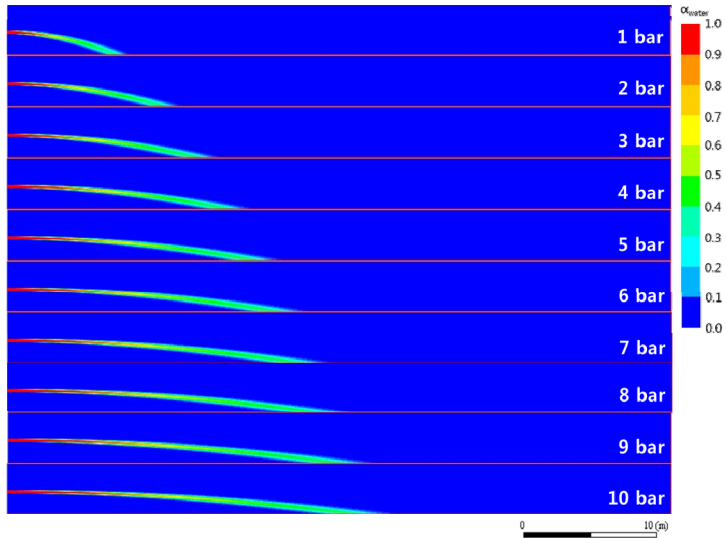
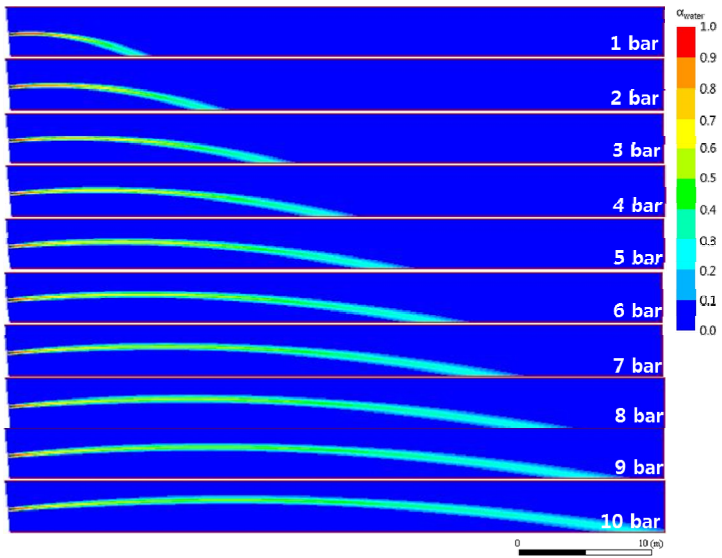


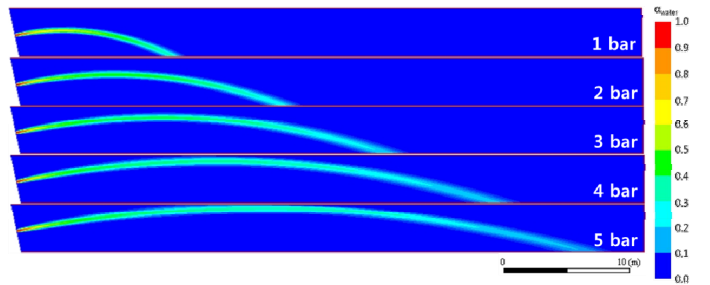
Fig. 3. Discharge distance and maximum discharge height of water jet in accordance with various nozzle angles.



(a) angle of nozzle inlet = 0°



(b) angle of nozzle inlet = 5°



(c) angle of nozzle inlet = 11°

Fig. 4. Discharge distance of water jet according to different inlet pressure.

이면 격자 안에는 공기와 물의 섞여 있음을 나타낸다. 적용된 분사각도는 0°, 5°, 11°이고 분사압력 범위는 1-10 bar이다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯 분사각도가 0°일 경우 적용된 최대 분사압력인 10 bar에서도 분사거리가 30 m를 채 넘지 못했다. 하지만 분사각도가 5°일 경우 적용된 최대 분사압력인 10 bar에서 분사거리가 50 m에 다다랐고, 분사각도가 11°일 경우 충고(3.75 m) 때문에 분사압력은 5 bar까지 계산되었다.

### 노즐입구 분사각도에 따른 분사계적

Fig. 5는 노즐 분사각도와 분사압력이 다를 때 터널 바닥면에서의 순간 물 체적분율 (instant volume fraction)을 나타냈다. 여기서 적용된 분사각도는 0°, 5°, 11°이고 분사압력 범위는 1-10 bar이다. 분사압력이 높은 경우는 액적의 분열(break-up) 및 미립화(atomization)가 심화되며 액주(liquid column)의 길이가 급격하게 변하는 등 물분사의 물리학적 특징이 크게 변한다(Aliseda *et al.*, 2008; Lasheras *et al.*, 1998). 하지만 본 연구에서는 액적단위의 크기 등 미소 규모의 거동을 고려하지 않은 Eulerian 방법으로 해석을 진행하여 거시적인 현상만을 관찰하였다.

적용된 모든 분사각도에서 물 체적분율은 0.5 이하였다. 특히 분사각도가 5°, 11°일 경우 분사압력이 증가함에 따라 물 체적분율은 감소하였으나 분사각도가 0°일 경우 분사압력이 증가함에 따라 물 체적분율이 증가하는 경향을 보였다. 분사각도가 0°일 경우는 다른 분사각도의 경우와는 달리 중력에 대한 저항이 적어 물의 분열 및 미립화가 상대적으로 심화되지 않으며 그 결과 바닥으로 퍼지는 면적이 좁아졌다. 따라서 상대적으로 분사유량(분사압력)이 물 체적분율에 선형적으로 증가하였다. 좀 더 자세히 알아보기 위해 분사각도 0°, 5°, 11°에서 노즐 출구 압력에 따른 물이 닿는 바닥면적과 물 체적분율을 Fig. 6에 나타냈다. 여기서 물이 닿는 바닥면적은  $0.05 < \alpha < 1$ 일 때 면적으로 정의된다. 물이 닿는 바닥면적은 노즐 분사각도가 크고 초기 분사압력이 높을수록 넓었다. 작은 분사각도(0°)에서 물의 체적분율은 분사압력이 높을수록 커졌지만 분사각도가 커지면 분사압력이 높을수록 물의 체적분율은 작아졌다. 이는 작은 분사각도(0°)에서는 분사압력이 높아지더라도 분사되는 물의 유량이 충분해서 바닥면에 퍼지는 물의 면적이 증가하더라도 체적분율이 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 높은 분사높이에서는 분사압력이 증가하면 바닥면에 퍼지는 물의 면적이 상대적으로 크게 증가하여 물의 유량이 넓어진 물의 바닥면적을 높은 체적분율로 감싸지 못하는 것으로 판단된다. 결국 낮은 각도에서 분사압력을 높여 분사거리를 늘리는 것은 바닥면에 퍼지는 물의 면적이 상대적

으로 크게 증가하지 않아 소화지점에 보다 높은 물 체적분율과 함께 많은 양의 물을 전달 할 수 있지만 높은 각도에서 분사압력을 높여 분사거리를 늘리는 것은 바닥면에 퍼지는 물의 면적이 상대적으로 크게 증가하여 소화지점에 상대적으로 낮은 물 체적분율과 함께 물을 전달하게 된다. 특히 높은 분사각도에서 분사압력을 높일 경우 물의 체적분율이 급

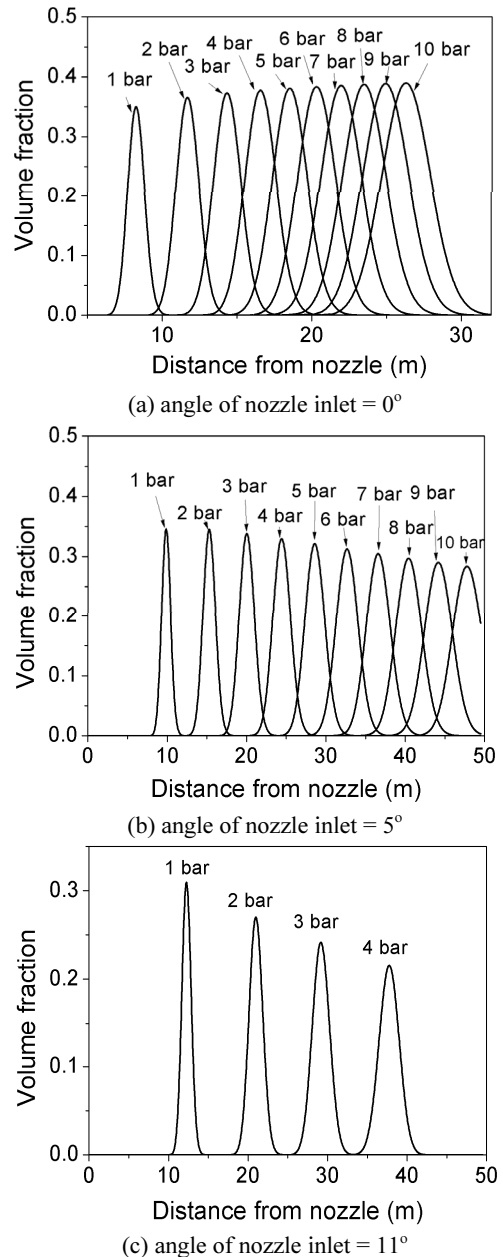


Fig. 5. Volume fraction according to different inlet pressure.

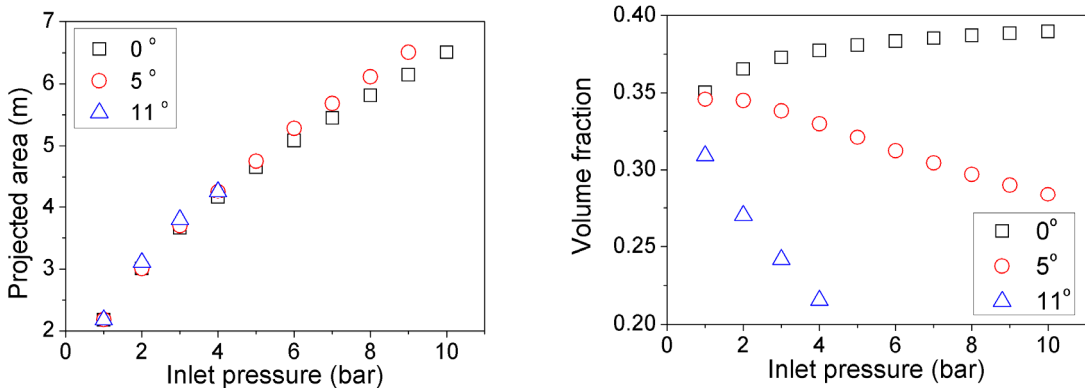


Fig. 6. Projected area and maximum discharge height of water jet in accordance with nozzle angle.

격하게 떨어지기 때문에 적절한 분사각도를 유지시켜야 직접소화가 가능한 물의 체적분율이 확보될 것으로 사료된다.

### 결론

본 연구에서는 대심도 복층터널 화재안전 시스템으로 사용되는 물 분무 소화설비의 체계적인 성능검토를 위해 2차원 Eulerian 다상유동 모델이 적용된 질량방정식, 운동량 방정식, 체적 수송방정식을 계산하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. Eulerian 다상유동 모델은 물 소화설비의 분사 유동을 예측하기에 적합한 수치해석 모델이다.
2. 수치해석에 적용된 모든 노즐 출구 압력과 노즐 분사각도에서 물의 체적분율은 0.5를 넘지 않았다.
3. 모든 물의 분사각도에서 노즐의 출구압력이 증가하면 물이 바닥에 퍼지는 면적은 증가하였다.
4. 물의 분사각도가 없는 경우는 노즐의 출구압력이 증가함에 따라 바닥에 퍼지는 물의 체적분율이 증가하였지만 물의 분사각도가 올라가면 노즐의 출구압력이 증가함에 따라 바닥에 퍼지는 물의 체적분율이 감소하였다. 특히 높은 분사각도에서 노즐 출구 압력을 높일 경우 물의 체적분율은 급격하게 감소하였다.

본 수치해석은 2차원으로 이루어져 3차원 효과가 고려되지 않았고 유체간의 저항에 대한 식이 간소화되었기 때문에 해석방법 검증에서 실험실험값과 차이를 나타냈다. 따라서 운동량 방정식에서 유체간의 저항을 고려한 모델링을 추가하여 3차원 해석을 진행 중이며 이는 본 연구에서 진행한 2차원 해석 결과와 비교하여 보고될 예정이다.

### 사사

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### References

Aliseda, A., Hopfinger, E. J., Cashes, J.C., Kremer, D.M., Berchielli, A., and Connolly, E. K., 2008. Atomization of viscous and non-newtonian liquids by a coaxial, high-speed gas jet. Experiments and droplet size modeling. *International J. of Multiphase flow*, 34, 161-175.

Anderson, T.B. and Jackson, R., 1967. Fluid mechanical description of fluidized beds. equations of motion. *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 6(4), 627-539.

Bowen, R.N., 1976. Theory of Mixtures, Continuum Physics, Academic Press, New York, USA, 127p.

Darwish, M. and Moukalled, F., 2006. Convective schemes for capturing interfaces of pfree-surface flows on unstructured grids. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 49, 19-42.

Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. of Computational Physics*, 39(1), 201-225.

Lasheras, J.C., Villermaux, E., and Hopfinger, E.J., 1998. Break-up and atomization of around water jet by a high-speed annular air jet. *J. of Fluid Mechanics*, 357, 351-379.

Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972. *Lecture in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, UK, 169p.

Lee, Y.H., Ryu, Y.C., Seung, J.H., and Park, Y.C., 2016. Numerical investigation of the effect of flow passage variation on the projection distance of the foam monitor. *J.*

- of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 17(1), 224-251.
- Pak, B.J., Yoo, Y.H., Shin, H.J., Park, J.O., and Kim, H.S., 2016. Introducing very long subsea tunnel & great depth double deck tunnel fire safety technology research group. *Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 28(1), 806-809.
- Park, J.O., Yoo, Y.H., Pak, B.J., Kim, H.S., and Kim, Y., 2017. Fire suppression test using the automatic monitor system for double-deck tunnel. *Fire Science and Engineering*, 31(6), In Press.
- Ryu, Y.C., Seo, B.K., Seung, J.H., Lee, Y.H. and Park, Y.C., 2014. Study of computational fluid dynamics for projection distance prediction of the foam monitor. *J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15(10), 5939-5944.
- Schiller, L. and Naumann, A., 1935. A drag coefficient correlation. *Z. Ver. Deutsch. Ing.*, 77, 318-320.
- Wahl, T.L., Frizell, K.H. and Cohen, E.A., 2008. Computing the trajectory of free jets. *J. of Hydraulic Engineering*, 134(2), 256-260.
- Yakhot, V. and Orszag, S.A., 1986. Renormalization Group Analysis of Turbulence:1. Basic Theory. *J. of Scientific Computing*, 1(2), 1-51.



### 김 양 균

2007년 순천대학교 공과대학 기계항공  
공학과 공학사  
2009년 순천대학교 대학원 기계공학과  
공학석사  
2013년 북해도대학교 대학원 기계우주  
공학과 공학박사

현재 한국건설기술연구원 화재안전연구소 실물화재팀 전임연구원  
(E-mail: yangkyunkim@kict.re.kr)

### 유 용 호

현재 한국건설기술연구원 화재안전연구소 실물화재팀 연구위원  
(本學會誌 第53卷 第3号 参照)

### 박 병 직

현재 한국건설기술연구원 화재안전연구소 실물화재팀 신진연구원  
(本學會誌 第53卷 第3号 参照)

### 박 진 욱

현재 한국건설기술연구원 화재안전연구소 실물화재팀 신진연구원  
(本學會誌 第53卷 第3号 参照)

### 김 휘 성

현재 한국건설기술연구원 화재안전연구소 실물화재팀 신진연구원  
(本學會誌 第53卷 第3号 参照)