

[Research Paper]

## 서브파이프의 유무에 따른 워터노즐의 성능특성연구

이영우 · 임희창<sup>\*†</sup>

부산대학교 기계공학부 대학원생, \*부산대학교 기계공학부 교수

# Effect of the Presence of Sub-pipes on the Performance of Water Nozzle

Young-Woo Yi · Hee-Chang Lim<sup>\*†</sup>

Graduate student, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

<sup>\*</sup>Professor, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received May 9, 2018; Revised June 14, 2018; Accepted July 3, 2018)

### 요 약

본 논문은 화재의 발생 및 전파를 억제하기 위해 방수총의 내부 유체유동특성을 파악하는 것을 목적으로 한다. 본 연구를 위해 개발 중인 워터노즐을 모델링하였고, 필드실험에서 얻은 경계조건(펌프의 가압력 : 4 bar, 방수총 출구압력 : 대기압)을 적용하였으며, 유동에 대한 운동량 지배방정식을 이용하여 방수총 내부 유동에 대한 속도 및 압력분포를 얻었다. 서브파이프의 유무와 길이를 기준으로 방수총 출구의 노즐에서의 성능 특성에 영향을 미치는 2가지 주요 인자로 고려하였다. 해석 결과 기존 모델의 경우에는 서브파이프의 길이가 변하더라도 방수총의 출구영역에서 성능특성에 그다지 영향을 미치지 않았다. 이에 반해서, 서브파이프를 단관형으로 교체한 경우에는 서브파이프의 입구에서 역류가 발생하였고, 이를 제거하기 위해 서브파이프의 길이를 2배로 변화시켜 역류를 제거할 수 있었다.

### ABSTRACT

This paper presents a numerical analysis of flow inside a water nozzle for fire fighting and observes the effect of the variation in primary components on internal flow. In order to observe the performance of water nozzles, they have been systematically designed and modelled, applying boundary conditions obtained from field experiments (inlet pressure at pump : 4 bar, and pressure outlet : atmospheric pressure). In addition, the governing equations were calculated to obtain velocity, pressure inside the nozzle. Two main parameters (the presence and length of sub-pipes) were considered with the aim to observe the detail internal flow characteristics. It is found that the base model is not significant on flow characteristics, but a negative effect (i. e. the reverse flow) at the entrance region of sub-pipe. On the other hand, the reverse flow was vanished when making the length of sub-pipe double.

**Keywords :** Water nozzles, Sub-pipes, Pressure drop, Flow characteristics

## 1. 서 론

화재 시 소화설비의 작동유체로 널리 사용되는 액상의 물은 다른 유체 및 매질들에 비해 화재 진압이 효과적으로 화재 진압에 주로 사용되고 있다. 수분은 열용량이 크기 때문에 불꽃과 연소에 의해 생기는 뜨거운 기화 부산물과 열 발생 표면에서 바로 방출 열을 흡수할 수 있다. 액상의 물에서 기상의 수증기로 변하는 상변화는 열에너지를 흡수에 효과적이며 액상의 물을 분무함으로써 주위 공기의 산소

농도를 떨어뜨려서 화재를 진압할 수 있고 그러한 효과는 화재가 밀폐된 공간에서 발생하였을 때 더욱 커진다<sup>(1)</sup>.

Prasad 등은 큰 밀폐공간에서의 물 분무 소화 시스템의 효과에 대해 수치해석을 통해 분석하였다. 액적의 크기, 주입속도, 분무 주입 밀도 등이 일정할 경우 천장에서 분무하는 경우가 벽의 나머지 위치에서 분무하는 것 보다 효과적이다. 이러한 결과들은 기존의 소규모 밀폐공간에서의 메탄올 화재의 소화진압결과들과 어느 정도 일치한다<sup>(2)</sup>. Yuan과 Smith는 지하 갱도 내의 컨베이어 벨트 화재 시 위

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [hclim@pusan.ac.kr](mailto:hclim@pusan.ac.kr), TEL: +82-51-510-2302, FAX: +82-51-512-5236

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

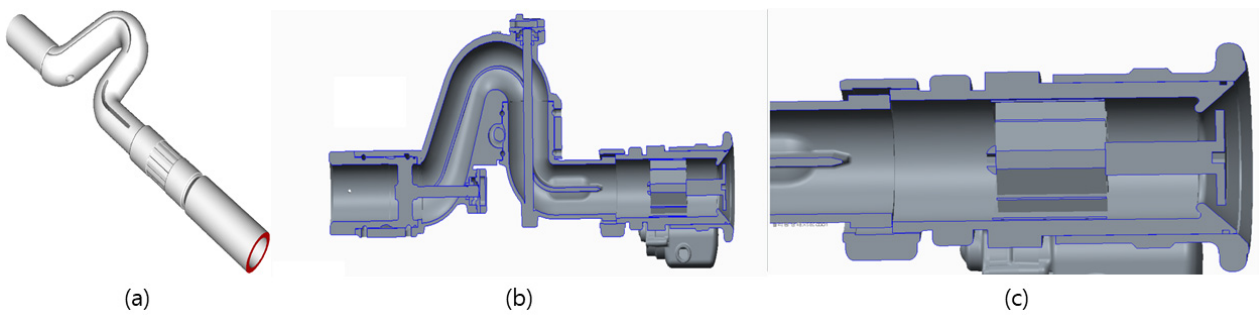


Figure 1. (a) Projection view of ES model, (b) Plane view of internal flow domain, (c) Detailed view of water nozzle.

터 스프링클러의 위치, 유량, 스프링클러 작동온도에 따른 화재 진화 효과를 CFD를 사용하여 확인하고자 하였다. 그 결과 스프링클러의 위치와 작동온도는 화재 진화에 큰 영향을 주는 반면 유량은 두 가지 요인에 비하면 작은 영향을 미친다<sup>(3)</sup>.

Jenft 등은 실제 크기의 공간에서 35 cm 직경의 실린더 풀에서 발생한 유류화재를 진화하기 위해 사용한 물 분무에 의한 화재진압 효과와 화재시뮬레이션 소프트웨어(Fire Dynamics Simulator, FDS)를 통한 결과를 비교하였다. 발달된 화재에 물 분무가 뿌려질 경우에는 작은 물방울들이 뜨거운 환경에 의해 빠르게 증발하였고 그로인해 연료의 냉각이 빨라지고 비활성 효과가 일어나 10초 정도에 화재가 진압되었다. 반면에 발달과정에 있는 화재에 분무가 닿을 경우 화재의 크기가 성장하는 것을 조절할 수 있으나 진화하는 데는 1분 이상이 걸렸으며 오직 화염의 온도와 격실의 온도가 감소하는 것만을 확인할 수 있었다<sup>(4)</sup>.

Yinshui 등은 노즐의 분무 원추각을 바꾸어 가며 닫힌 공간에서의 분무형 소화 시스템의 성능을 실험적으로 평가하였다. 화재 진압 시간은 분무 원추각의 크기가 커지고 유량과 작동 압력이 감소할수록 증가한다. 반대로 온도 감소율은 분무 원추각의 크기가 작아지거나 유량이 커지면 증가한다. 화재 진압 시간이 길어지는 경우에는 산소의 농도가 감소하고 일산화탄소와 이산화탄소의 농도가 증가한다. 반면 방수총의 작동시간이 화재 진압 시간보다 길 경우에는 방수총의 작동시간은 가스 농도에 영향을 미치지 않는다<sup>(5)</sup>.

화재 진압에 사용되는 방수총은 기존에 소방관창이나 노즐형태로 일부 연구가 이루어져왔다<sup>(6-8)</sup>. 특히, 방수총 내에 있는 서브파이프(혹은 유동안정기)는 주로 화재진압용 노즐에서 분출되는 분무유체의 작동범위를 안정화시키고 성능을 향상시키기 위해서 사용된다<sup>(9)</sup>. 펌프로 인해 만들어진 난류 유동을 안정화시키는 주요한 방법들은 금속와이어 메쉬, 하니콤(Honeycombs) 그리고 수축부를 사용하는 방법들이 있다<sup>(10)</sup>. 그러나, 화재진압용에서 사용되는 방법으로 서브파이프와 수축부를 혼합해서 사용하는 것이 일반적이라고 할 수 있다. 특히, 서브파이프의 경우 원형 혹은 다각형 단면형상으로 수 개의 파이프들을 배치하고 유동을 안

정화시켜 성능향상과 관련된다.

기존연구에서는 방수총의 노즐만으로 방출된 유체유동과 그로 인한 화재진압과의 상관관계 등에 주 초점이 맞추어져 있었다. 따라서, 기존연구에서는 방수총의 노즐과 연결된 상류 파이프의 구조에 의한 내부유동손실에 대한 고려가 충분하지 않았고, 실제 방수총의 성능에 적절히 예측되지 않는 문제점이 존재한다. 본 연구에서는 기본 모델과 벤치마크 모델의 다양한 곡관 및 밸브, 수축부들을 고려하고, 노즐 상류에 위치한 서브파이프 길이와 그 유무로 인한 방수총 내부 및 출구속도에 미치는 변화를 알고자 하였다.

기본 모델의 경우에는 6개의 원형 서브파이프를 유로내부에 사용했으며, 벤치마크 모델의 경우에는 두 가지 형태의 서브파이프를 조합하여 하니콤형상과 같은 구조로 사용할 수 있도록 하였다. 특히 방수총 노즐에서 방출되기 전 출구 근처에서의 내부 유체 유동영역에서 유동 및 압력특성을 파악하였다. 또한 서브파이프 길이의 변화에 따른 성능 특성의 변화를 확인하고 서브파이프의 유무에 따른 성능 변화를 파악하였다.

## 2. 모니터 유로 모델링과 수치해석

### 2.1 모니터 유로 해석 및 모델링

본 기본모델에 대한 성능연구와 관련하여 벤치마크 모델로 사용하는 ES모델은 최대 유량이 2600 LPM (최대 압력 17 bar 조건)인 제품이다. 하지만 기본모델과의 비교를 위하여 입구 압력 조건을 4 bar로 하였다. 분석을 위하여 ES모델과 기본 모델들을 수정하여 비교해 보았다.

Figure 1은 ES 모델의 유로에 대한 3차원 모델 및 유체 영역에 해당하는 설계도 상 단면도를 나타내고 있다. 특히, Figure 1 (c)는 해석결과를 관찰할 영역인 방수총 노즐의 구체적인 형상을 단면도로 보여주고 있다.

본 연구에서 사용하는 기본모델의 3차원 형상모델 및 단면 설계도는 Figure 2에 나타내었다. 기본 모델의 형상은 Figure 2 (a)에서 볼 수 있듯이 방수총 내의 유동이 노즐에 도달할 때까지 여러 개의 곡관을 통해 복잡한 형상을 가지므로 인해 원활한 유동흐름을 방해할 가능성이 크다고 판

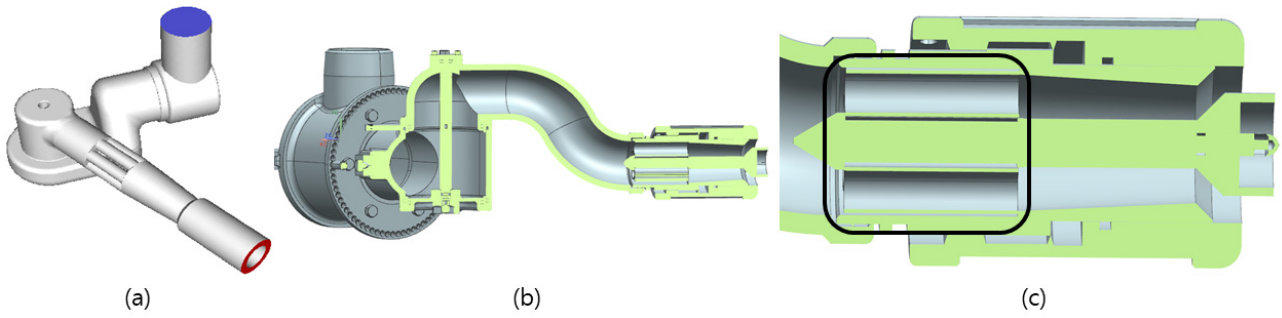


Figure 2. (a) Projection view of base model, (b) Plane view, (c) Detailed view (internal black solid line shows the sub-pipes of base model).

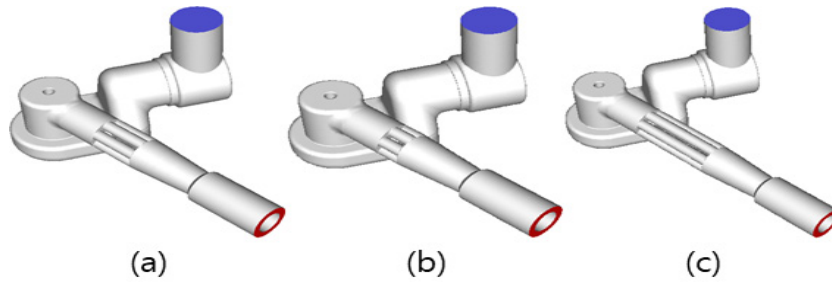


Figure 3. Projection view of base model (a) Without any change, (b) With a half-length sub-pipe, and (c) With a double-length sub-pipe.

단된다. 이 부분은 차후 개선이 추가적으로 필요할 것으로 보인다. Figure 2 (b)는 설계도상에서 방수총의 단면을 보여주고 있으며, 유체와 고체영역부분을 나타내고 있다. Figure 2 (c)는 결과를 추출할 부분인 출구 노즐과 그 내부에 있는 서브파이프들의 구체적인 형상을 보여주고 있다.

Figure 3에는 개발 중인 기본모델과 함께 기본 모델을 수정하여 서브파이프들의 길이를 1/2로 축소한 모델과 2배로 확대한 모델을 함께 비교하여 나타내었고, 서브파이프의 길이에 따른 형상특성을 나타내었다. 이와 함께, Figure 4와 같이 서브파이프들을 하나의 단관형 파이프로 변경하여, 방수총에서 서브파이프로 인한 관내 유동특성의 변화를 확인하였다.

### 2.2 유동해석 난류모델 및 경계조건

본 연구에서 모니터 내부의 유체유동해석을 위해 상용 유동해석 프로그램인 Ansys Fluent를 사용하였고, 지배방정식의 해석을 위해 난류 모델은 레이놀즈응력모델(Reynolds Stress Model, RSM)을 사용하였다. 적용된 모델은 속도, 압력, 온도 등의 유동 특성들을 시간에 대해 평균하여 유로해석을 위한 지배 방정식에 사용하는 레이놀즈평균 나비에-스톡스 방정식(Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)에서 유도되는 레이놀즈 응력텐서(Reynolds Stress Tensor)를 수송방정식에 적용하여 직접 계산하는 기법이다. 레이놀즈 응력모델은 많은 유선과 유동의 회전이 있는 복잡한 3D 난류 유동에 적합하지만 해석모델이 더욱 복잡해진다. 또한, 에디점성모델보다 수렴성이 떨어지고 CPU 사용 시간이 길

며 많은 메모리가 필요하다<sup>(11)</sup>. 따라서 본 계산을 위해 병렬컴퓨터를 이용하여 대용량의 계산이 가능하도록 하였으며, 각 수치해석에 대해 체계적인 계산을 수행하였다.

지배방정식인 나비에-스톡스 방정식 해석을 위해 레이놀즈평균을 사용하였다. 즉, 유속 및 압력을  $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ,  $p = \bar{p} + p'$ 의 두 성분으로 나누는데 여기서,  $u'$ 는 섭동 속도,  $p'$ 는 섭동 압력이며 나비에-스톡스 방정식에 대입하면 아래 식(1), (2)와 같이 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

레이놀즈 응력 텐서를 풀기 위해서 본 연구에서 사용한 방법이 RSM이다.

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \bar{U}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} - \frac{\partial C_{ijk}}{\partial x_k} + \nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k x_k} \tag{3}$$

$$P \equiv -(\tau_{ik} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_k} + \tau_{jk} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_k}) \tag{4}$$

$$\Pi_{ij} \equiv p' \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \tag{5}$$

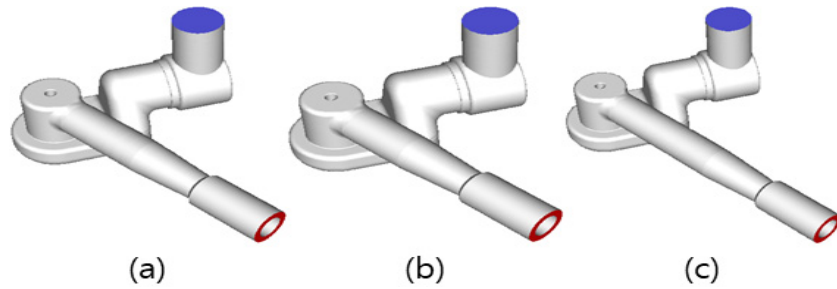


Figure 4. Projection view of base model without sub-pipe (a) Having original length, (b) Having a half-length, (c) Having a double-length.

$$\epsilon_{ij} \equiv 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (6)$$

$$C_{ijk} \equiv \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p u'_i \delta_{jk}} + \overline{p u'_j \delta_{ik}} \quad (7)$$

식 (3)은 좌측 항이 의미하는 레이놀즈 응력의 부분적인 변화와 대류 수송에 의한 변화의 합과 식 (4)~(7)에서 표현한 각 항들의 합인 우측 항의 균형을 의미하며, 각각 레이놀즈 응력 생성 텐서(Reynolds-stress production tensor), 압력-변형률 상관 텐서(Pressure-strain correlation tensor), 소산을 상관 텐서(Dissipation rate correlation tensor), 난류 확산 상관 구배(Gradient of the turbulent diffusion correlation) 식이다. 이 중 레이놀즈-응력 텐서와 점성 수송항은 식을 풀기 위한 별도의 모델링을 필요로 하지 않지만 나머지는 모델링 과정에서 수정이 필요하다<sup>(12)</sup>.

본 논문에서는 실제 현장필드실험에서 사용한 조건들을 경계조건으로 사용하였다. 방수총의 입구에 압력 4 bar를 가하는 압력 입구조건을, 방수총의 출구는 대기압 조건을 구하여 사용하였다. 입구에 가한 4 bar 압력 조건은 현장 실험에서 구한 압력 조건을 기반으로 하였다. 현장필드 실험에서의 압력조건에 따라 유동특성이 크게 변하기 때문에 실험과 유사한 조건을 수치해석상의 경계조건으로 부과하였다. 그리고 출구에 대해서는 방수총 내부의 유체가 대기 중으로 방사되므로 대기압 조건을 사용하였다. 따라서 유동내부의 해석을 통해 노즐 출구에서의 속도를 구하게 되며, 그 속도의 크기가 빠르다는 것은 방수총의 방사거리가 길어지고 성능이 향상된다는 것을 의미한다.

### 2.3 격자 의존성

본 논문에서는 방수총 내부의 유동해석을 수행하기 위하여 격자의 크기 및 밀집도에 따라 유동특성이 달라지지 않도록 다양한 내부 형상에 대해 수차례 격자의존성을 평가하였다. 특히, RSM은 2-방정식 난류모델에 비해 수렴성은 떨어지고, 비용적 측면에서 고가이지만 물리적으로 복잡한 3차원유동을 해석하는데 적절한 모델이다.

본 연구에서는 격자의존성을 판단하기 위하여, 해석 초기에 도메인의 벽면  $y^+$ 의 값을 대부분 300 이하로 설정될

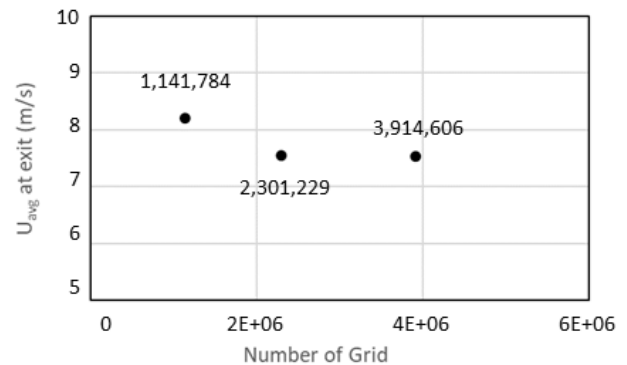


Figure 5. Evaluation of grid independence for ES model.

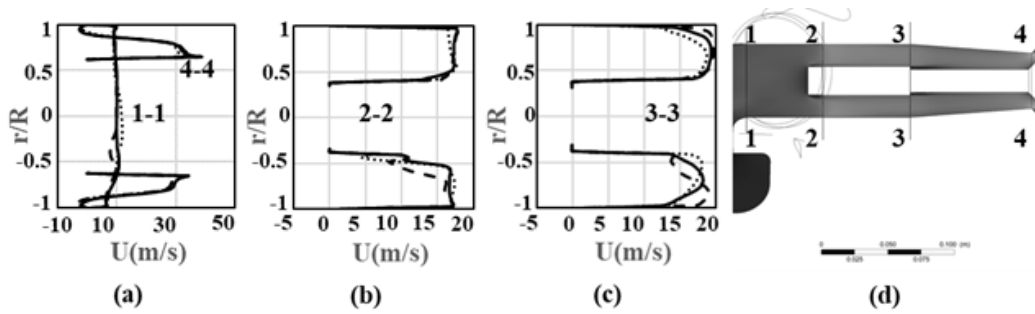
수 있도록 해석하였으며, 300 이상으로 나올 경우, 벽면 근처의 격자를 더욱 조밀하게 수정하여 재해석을 수행하였다. Figure 5는 본 기본모델과의 벤치마크 비교를 위한 ES 모델에 대해 노즐 부분에서의 격자의존성을 평가하기 위해 최적의 격자 크기 및 수에 대한 특성을 확인한 결과이다. 그림에서는 격자의존성에 대해 방수총 노즐 내부에서의 격자 수 대비 노즐출구에서의 평균속도를 서로 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 격자의 수에 따라 출구에서의 평균 속도가 떨어지다가 약 2백만 개의 격자수에서 수렴하였다. 이는 격자수가 적은 경우, 벽면 근처에서도 그 수가 줄어들어, 전단류의 특성변화를 제대로 표현하지 못했기 때문이라 판단된다. 본 연구에서는 격자의 수가 약 2백만 개를 넘은 경우에는 평균속도에 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 격자의 크기를 격자의 수가 2백만 개 이상일 경우를 기준으로 각 모델에 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 위치별 유동특성

#### 3.1.1 기본 모델

본 절에서는 서브파이프의 길이에 따른 기본모델의 내부 유동특성을 보고자 한다. 즉, 서브파이프의 길이를 원래의 1/2배로 축소한 모델과 2배로 확장한 모델을 기본 모델의 유동해석결과와 비교하여 어느 경우가 더 좋은 성능을



**Figure 6.** Streamwise velocity of base model with sub-pipes of the monitor nozzle at (a) Sections 1-1 and 4-4, (b) Section 2-2, (c) Section 3-3 (solid line : base model w/o change, dashed line : base model w/ half-length sub-pipes, dotted line : base model w/ double-length sub-pipes), (d) The contour of the monitor nozzle (section 1-1 : the inlet of monitor nozzle, section 2-2 : the entrance of sub-pipes, and section 3-3 : the exit of sub-pipes, section 4-4 : the outlet of monitor nozzle).

보이는지 보고자 하였다. 이를 확인하기 위해 모니터 노즐의 4곳의 위치(모니터 노즐의 입·출구, 서브파이프 입·출구)에서 유동의 속도와 압력을 추출하였다.

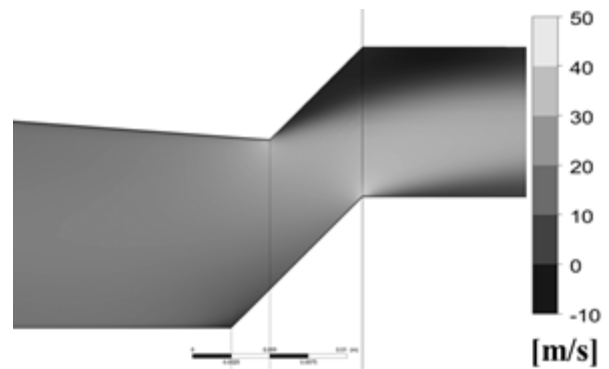
Figure 6은 서브파이프가 있는 기본 모델과 서브파이프의 길이를 원 길이의 0.5 배와 2배로 바꾼 모델들의 관로 내의 유동방향 속도를 나타내고 있으며, 특히 Figure 6 (d)는 유동특성 결과를 추출한 단면번호를 나타낸다. Figure 6 (a)는 모니터 노즐의 입·구에서의 유동방향 속도에 대한 결과이다. Figure 6 (b)-(c)는 각각 서브파이프의 입·출구에서의 유동방향 속도분포를 나타내고 있다.

Figure 6 (a)에서 볼 수 있듯이 서브파이프의 길이에 따른 모니터 노즐의 입·출구에서의 속도 차이는 거의 없는 것으로 보인다. 또한 모니터 노즐의 출구에서는 외곽부분에서 유동박리가 일어나는 것을 확인할 수 있는데 이는 Figure 7에서와 같이 출구에서의 유로 확장으로 인해 역압력구배로 인한 유동박리가 발생했다고 판단된다<sup>(13)</sup>. Figure 6 (c)에서는 서브파이프의 길이가 어느 정도 이상의 크기에 도달할 경우, 유동방향 속도에 큰 차이를 주지 못하는 것을 알 수 있었다.

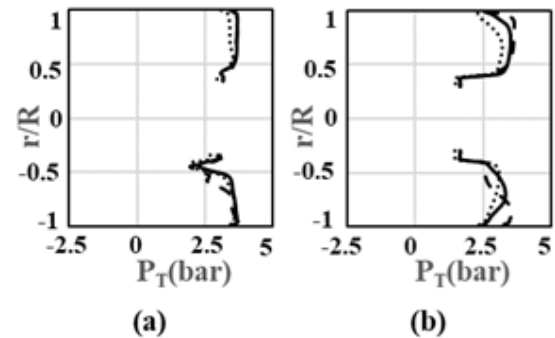
Figure 8은 서브파이프의 입·출구에서의 전압( $P_T$ , Total pressure)의 변화 특성을 나타내고 있다. 특히, Figure 8 (a)에서 전 모델의 서브파이프 입구 하부 안쪽 유로영역에서 주위보다 급격한 압력 강하가 이루어졌다. 이는 유로의 급격한 변경으로 인한 것으로 판단된다. 또한, Figure 8 (b)에서 볼 수 있듯이 서브파이프의 길이 변화는 전압에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있었다. 본 결과를 통해 서브파이프 길이의 증가는 모니터 관로 내의 유동에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

### 3.1.2 벤치마크 모델

기본 모델에 대한 벤치마크 비교를 위한 ES 모델에서도 기본 모델과 같은 위치에서 유사한 조건을 부과하여 속도와 압력을 추출하였다. Figure 9 (a)는 기본 모델에서와 마찬가지로 모니터 노즐의 입·출구에서의 속도 분포를 나타내고 Figures 9 (b)-(c)는 각각 서브파이프 입·출구에서의 속도 분



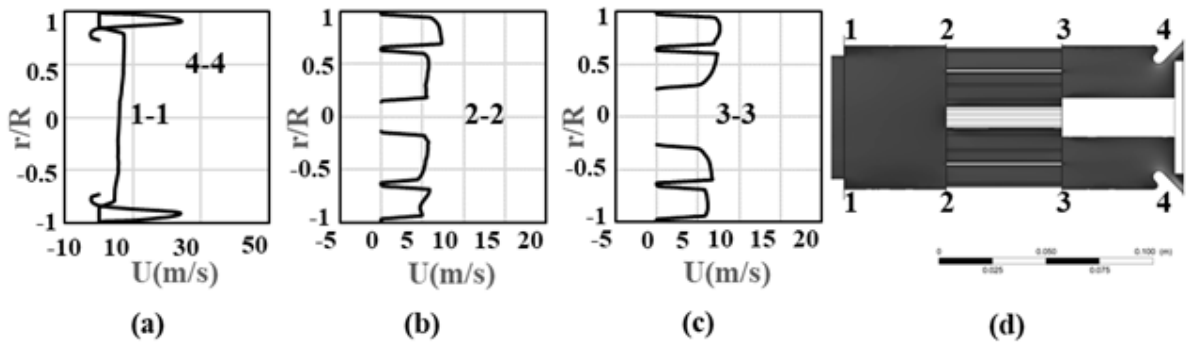
**Figure 7.** Streamwise velocity contour in the proximity of base model outlet.



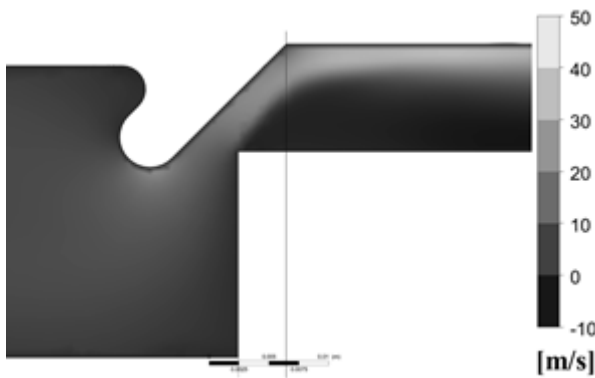
**Figure 8.** Total pressure of base model with sub-pipes of the monitor nozzle at (a) the entrance of sub-pipes, (b) the exit of sub-pipes.

포를 나타낸다. Figure 9 (d)는 유동특성 결과를 추출한 단면번호를 나타낸다. 노즐 출구에서의 유동방향 속도분포는 Figure 9 (a)에서 볼 수 있듯이 다른 위치에서의 속도에 비해서는 매우 크지만 기본 모델에 비하면 상대적으로 낮은 값을 가진다. 기본 모델과는 다르게 출구 유로의 안쪽에서 역류가 발생하였는데 이는 Figure 10에서 볼 수 있듯이 유로에 있는 Edge 구조로 인해 유동의 박리가 발생하였기 때문이다<sup>(13)</sup>.

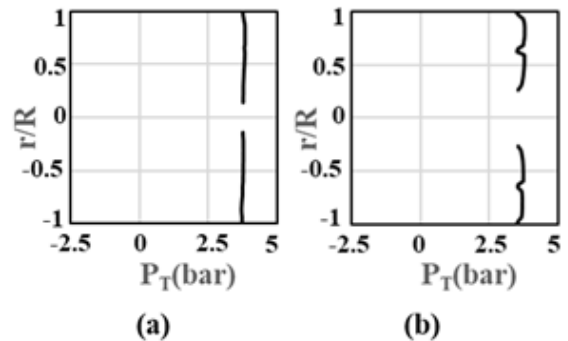
Figure 11은 서브파이프의 입구와 출구에서의 전압 분포



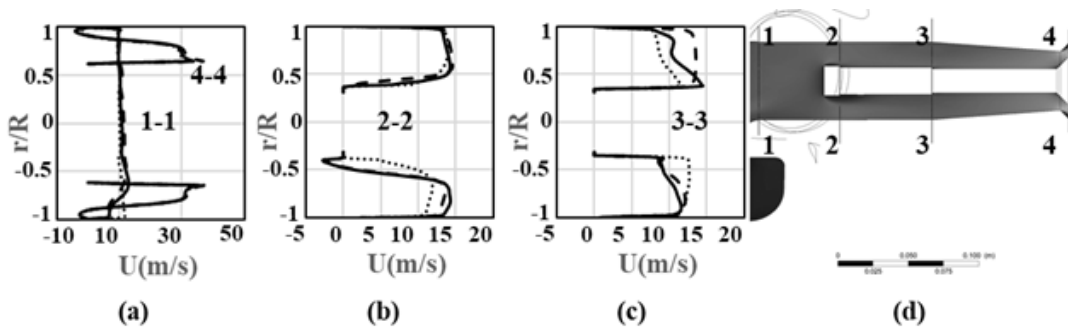
**Figure 9.** Streamwise velocity of base model with sub-pipes of the monitor nozzle at (a) Sections 1 and 4, (b) Section 2, (c) Section 3 (solid line : ES model), (d) The contour of the monitor nozzle (section 1 : the inlet of monitor nozzle, section 2 : the entrance of sub-pipes, section 3 : the exit of sub-pipes, and section 4 : the outlet of monitor nozzle).



**Figure 10.** Streamwise velocity contour in the proximity of ES model outlet.



**Figure 11.** Total pressure of ES model with sub-pipes of the monitor nozzle at (a) The entrance of sub-pipes, (b) The exit of sub-pipes.



**Figure 12.** Streamwise velocity of base model without sub-pipe of the monitor nozzle at (a) Sections 1 and 4, (b) Section 2, (c) Section 3 (solid line : base model w/o change, dashed line : base model w/ half-length sub-pipe, dotted line : base model w/ double-length sub-pipe), (d) The contour of the monitor nozzle (section 1 : the inlet of monitor nozzle, section 2 : the entrance of sub-pipes, section 3 : the exit of sub-pipes, section 4 : the outlet of monitor nozzle).

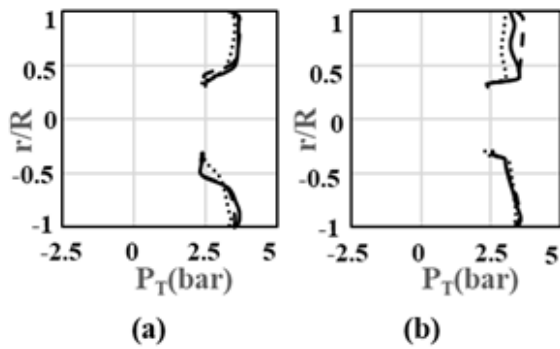
를 나타내고 있으며, Figure 11에서 볼 수 있듯이 서브파이프가 전압의 변화에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 유로 내부에서의 압력 손실은 벤치마크 모델이 더 적은 것으로 판단된다.

### 3.2 서브파이프 효과(단관형 기본모델)

본 장에서는 기본모델들의 다관형 서브파이프들을 하나

의 큰 파이프로 변경하고, 이로 인해 발생하는 유동 특성을 확인하였다. 서브파이프가 있는 모델들과 같은 위치에서 유동방향 속도와 전압을 추출하였다.

Figure 12는 서브파이프들을 하나의 큰 파이프로 변경한 모델들의 유동방향 속도에 대한 그래프이다. Figures 12 (a)와 (c)에서 볼 수 있듯이 서브파이프의 길이의 변화가 대부분의 위치에서의 유동 방향 속도에 큰 변화를 주지 못한



**Figure 13.** Total pressure of base model without sub-pipe of the monitor nozzle at (a) The entrance of sub-pipe, (b) The exit of sub-pipe.

것을 알 수 있다. 하지만, Figure 12 (b)에서 볼 수 있듯이 기본 서브파이프 길이 모델과 서브파이프 길이 1/2 축소 모델의 서브파이프 입구에서 역류가 발생하는 것이 확인하였다. 이는 서브파이프를 교체하면서 유동이 불안정해진 것으로 판단된다. 그러나 서브파이프 길이가 2배로 확대된 모델에서는 역류가 발생하지 않았다. 이는 서브파이프의 길이가 길어지면서 유동이 안정된 것이라 생각된다.

Figure 13에서는 서브파이프의 입·출구에서의 전압을 비교한 것이다. Figure 13 (a)에서 볼 수 있듯이 서브파이프의 기본 서브파이프 길이 모델과 서브파이프 길이 1/2 축소 모델의 서브파이프 입구에서 큰 압력강하가 일어난 것을 확인할 수 있다. 이에 반해, 서브파이프 길이가 2배로 확대된 모델에서는 서브파이프 입구에서 압력이 완만하게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서도 서브파이프 길이가 길어지며 유동이 안정화된 것이라 생각된다.

이러한 결과들을 통해 서브파이프들을 하나의 파이프로 변경하였을 때, 내부 유동이 불안정해진다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 모니터 노즐 출구근처에서의 내부 유체 영역에 대한 수치해석을 통해 성능 및 유동특성을 파악하고, 모니터의 최적화를 목표로 하였다. 이를 위해 기본 모델의 유체역학적 특성을 우선 파악하였다. 그리고 이의 개선과 관련된 인자로 서브파이프의 길이와 다관형 서브파이프의 유무에 따른 유동특성을 파악하고 그 성능을 확인하였다. 벤치마크를 위한 모델로 ES 모델을 선정하였고, 그 유동특성도 확인하였다. 또한, 다관형 서브파이프를 단관형으로 교체한 경우 그 유동특성을 확인하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

기본모델 및 수정모델들은 대부분 출구 근처에서 유로의 급격한 확장으로 인해 출구 유로의 바깥쪽에서 역류가 발생하였다.

다관형 서브파이프들을 단관형 서브파이프로 교체한 경

우 유동특성이 대부분 불안정해졌다.

단관형 서브파이프의 길이가 2배로 커진 기본 모델의 경우, 역류나 급격한 압력 강하가 일어나지 않았으며 이 모델의 경우 유체역학적으로 가장 뛰어난 성능을 가졌다.

벤치마크를 위해 사용된 ES 모델은 기본 모델과는 달리 출구 유로 내부 가장자리에서 구조적인 특성 상 유로 내부에 역류가 발생하였다.

본 연구에서는 출구 유동에 큰 영향을 미치는 2가지 주요 인자들을 설정하여 성능에 대한 수치해석을 수행하였으나, 그 결과로 출구 유동의 효율에는 큰 영향을 미치지 않았다. 이에 반해, 서브파이프의 유무는 내부 유동이 불안정해지는 특성을 확인할 수 있었다. 향후 모니터의 출구에서 유동특성에 영향을 미칠 수 있는 모니터 노즐의 형상 및 서브파이프의 형상들을 체계적으로 변경하여, 보다 효율 및 성능개선에 도움이 될 수 있도록 지속적으로 연구를 수행할 예정이다.

#### 후 기

2016년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20164030201230). 이 논문은 또한 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B1013820). 본 연구는 국민안전처 소방안전 및 119구조·구급 기술 연구개발 사업(MPSS-2015-79)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. G. Grant, J. Brenton and D. Drysdale, "Fire Suppression by water sprays", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 79-130 (2000).
2. K. Prasad, G. Patnaik and K. Kailasanath, "A Numerical Study of Water Mist Suppression of Large Scale Compartment Fires", *Fire Safety Journal*, Vol 37, No. 6, pp 569-589 (2002).
3. L. Yuan and A. C. Smith, "Numerical Modeling of Water Spray Suppression of Conveyor Belt Fires in a Large-scale Tunnel", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 95, pp. 93-101 (2015).
4. A. Jenft, A. Collin, P. Boulet, G. Pianet, A. Breton and A. Muller, "Experimental and Numerical Study of Pool Fire Suppression using Water Mist", *Fire Safety Journal*, Vol. 67, pp. 1-12 (2014).
5. L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan and L. Xiaohui, "Experimental Research on the Water Mist Fire Suppression Performance in an Enclosed Space by Changing the Characteristics of Nozzles", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.

- 52, pp. 174-181 (2014).
6. D. M. Lee, "A Study on the Flow Characteristics of the Spray Nozzle", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol 17, No. 3, pp. 55-60 (2003).
  7. D. M. Lee, Y. R. Kim and S. O. Park, "A Study on the Spray Characteristics of Nozzle for Fire Engine", Proceedings of 2003 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 135-141 (2003).
  8. D. M. Lee, Y. R. Kim and S. O. Park, "A Study on the Development of Spray Nozzle for Fire Suppression used Laser", Proceedings of 2003 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 157-162 (2003).
  9. Q. Xiang, Z. Shi and H. Li, "Structure Analysis of a New Type of Flow Straightener used in Fire Fighting Water Cannon", Proceedings of the International Symposium, 6<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, pp. 1-6 (2014).
  10. C. G. Li, J. C. K. Cheung and Z. Q. Chen, "Effect of Square Cells in Improving Wind Tunnel Flow Quality", Proceedings of the International Symposium, 7<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (2009).
  11. A. Fluent, "Fluent 14.0 User's Guide", ANSYS FLUENT Inc. (2011).
  12. G. Alfonsi, "Reynolds-averaged Navier-stokes Equations for Turbulence Modeling", Applied Mechanics Reviews, Vol. 62, No. 4, pp. 040802-1-040802-20 (2009).
  13. B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch and A. P. Rothmayer, "Fundamentals of Fluid Mechanics", 7<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, NJ (2014).