

# CFD 모델을 이용한 단순 스프링클러 헤드 주위의 액막 유동해석

김성찬

경일대학교 소방방재학과

## Numerical Analysis of a Liquid Sheet Flow around a Simplified Sprinkler Head Using a CFD Model

Sung-Chan Kim

Dept. of Fire Safety, Kyungil Univ.

(Received November 23, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted December 12, 2016)

### 요 약

본 연구는 스프링클러 헤드 근처에서 형성되는 액막의 자유표면 유동에 대해 CFD 모델을 적용하여 해석하고 스프링클러의 초기분무 특성 예측을 위한 기존 이론식의 결과와 비교를 통해 이론 모델의 타당성을 검토하였다. CFD 해석은 상용 해석프로그램인 CFX 14.0을 이용하였으며 노즐과 디플렉터로 이루어진 단순형상에 대해 표준난류모델과 VOF법을 적용하여 해석을 수행하였다. 평판부의 디플렉터 끝단에서 속도분포는 CFD 해석과 경험식이 매우 잘 일치된 결과를 보였으나 기하학적 형상이 복잡한 부분에서는 속도분포의 차이를 보였다. 이론모델에서 예측된 평균액적크기는 실제 스프링클러 헤드에서 측정된 평균액적크기에 대한 이전 연구결과와 큰 차이를 보였다. 그러나 이론 모델은 스프링클러 헤드의 초기 액적형성과정의 메커니즘을 이해하고 실험적 접근이 용이하지 않은 상황에서 분무 액적의 특성을 예측하는데 유용한 도구로 활용될 수 있다.

### ABSTRACT

The present study examined the free surface flow of a liquid sheet near a sprinkler head using a Computational Fluid Dynamics (CFD) model and considered the feasibility of the empirical model for predicting the initial spray characteristics of the sprinkler head through a comparison of the CFD results. The CFD calculation for a simplified sprinkler geometry considering the nozzle and deflector were performed using the commercially available CFD package, CFX 14.0 with the standard k-ε turbulence model and the Volume of Fluid (VOF) method. The predicted velocity of the empirical model at the edge of deflector were in good agreement with that of the CFD model for the flat plate region but there was a certain discrepancy between the two models for the complex geometry region. The mean droplet diameter predicted by the empirical model differed significantly from the measured value of the real sprinkler head. On the other hand, the empirical model can be used to understand the mechanism of droplet formation near the sprinkler head and predict the initial spray characteristics for cases without experimental data.

**Keywords :** CFD, Sprinkler, Spray model, Volume of fluid, Droplet size

## 1. 서 론

스프링클러는 건축물 내 화재의 감지 및 소화에 있어서 가장 널리 적용되는 일반적인 설비로 인식되고 있으며 적용되는 공간의 특성을 고려하여 다양한 형태의 시스템이 개발되어 왔다. 최근 들어 화재위험성 평가를 기반으로 한 다양한 설계방식의 보급이 확대됨에 따라 스프링클러 분무해석을 고려하여 공간 내 화재해석을 수행하고 이를 통해 설비의 유효성을 확인하고자 하는 노력이 증대되고 있

다. 일반적으로 스프링클러 해석에 필요한 인자는 크게 스프링클러에서 방사된 액적의 거동을 해석하기 위한 분무 특성인자와 스프링클러 헤드의 작동시간을 예측하기 위한 헤드반응 인자로 구분할 수 있다. 헤드 반응인자는 작동온도, Response Time Index (RTI) 등 감열부의 열전달 해석에 필요한 인자로 표준화된 시험을 통해 제조사에서 정보를 제공하는 경우가 많다. 그러나 스프링클러 헤드에서 방사되는 분무인자에 대한 정보는 상대적으로 크게 부족하여 실제 해석대상 헤드의 분무특성을 고려한 실질적인 설

계가 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

스프링클러 분무를 효과적으로 해석하기 위해서는 헤드에서 방사되는 분무특성에 관한 입력조건 정보가 필요하며 헤드에서 방사되는 분무액적의 크기 및 분포, 분무액적의 속도, 분사각 등의 정보가 기본적으로 제공되어야 한다. 대부분의 입력인자들은 직접 실험을 통해 측정되어지며 스프링클러 헤드별로 데이터베이스화 하는 연구가 진행되었다<sup>(1-3)</sup>. 그러나 헤드에서 분사된 액적들의 크기나 속도 등 동적인 분무특성을 측정하는 과정은 많은 노력이 필요하며 수많은 스프링클러 종류별로 입력인자의 데이터베이스를 모두 구축하는 일은 거의 불가능한 것으로 인식되어 왔다. 이러한 이유로 이론적 모델을 적용하여 실험으로만 측정되어 왔던 분무해석의 입력인자들을 예측하기 위한 연구가 제한적으로 진행되어 왔다. Dundas는 스프링클러에서 생성되는 초기액적의 평균직경을 예측하기 위해 상사해석을 수행하였으며 이를 통해 평균액적직경( $d_m$ )이 웨버수( $We$ , Weber number)에  $-1/3$ 승에 비례하는 다음과 같은 관계식을 제시하였다<sup>(4)</sup>.

$$\frac{d_m}{D_o} = C \cdot We^{-1/3} \quad (1)$$

스프링클러 헤드의 오리피스 직경이 25 mm 이하이고 분사압력이 550 kPa 이하인 경우  $C$ 값은 2.7을 제시하였으며 이 식은 스프링클러의 기본인자를 사용하여 평균액적 크기를 예측할 수 있는 개략식으로 적용되어 왔으나 복잡한 스프링클러 분무 형성 과정을 오리피스의 직경과 유량에 의한  $We$ 수만으로 단순화함으로써 스프링클러의 구조적 특성이 전혀 반영되지 못하는 문제점을 가지고 있다.

최근에는 스프링클러 헤드 근처에서 액적의 형성과정과 관련된 메커니즘을 이해하고 유체역학적 모델을 통해 초기분무특성을 예측하여 이를 해석모델에 적용하기 위한 연구가 진행된 바 있다<sup>(5-7)</sup>. 그러나 이러한 모델에서는 오리피스직경, 디플렉터 직경, 오리피스와 디플렉터 사이거리 등 스프링클러의 치수 인자들에 의해 분무특성이 결정되며 스프링클러의 구조나 기하학적 형상의 영향을 고려하지는 못하고 있다. 특히 스프링클러는 종류에 따라 구성요소의 기하학적 구조가 크게 차이를 보이기 때문에 단순 충돌제트에 의한 액적분열 모델을 적용하는데 한계가 있을 수 있다. 따라서 스프링클러의 형상정보를 고려한 유체역학적 해석을 통해 스프링클러 헤드 근처에서의 유동특성을 파악하고 이러한 정보를 활용한 액적형성모델을 개발하는 것이 보다 실질적인 접근방법이 될 수 있다.

본 연구에서는 스프링클러의 초기 분무특성을 예측하기 위한 사전 연구로 Computational Fluid Dynamics (CFD) 모델을 적용하여 단순 형상의 스프링클러 헤드 근처에서 액막 형성과정을 모델링하고 이를 기존 이론모델과 비교하여 스프링클러 헤드의 초기 분무특성 예측모델에 적용 가능성을 파악하고자 한다. 이러한 연구를 통해 스프링클러

분무해석을 위한 입력인자의 도출 과정을 다양화하고 실제 적용대상 헤드의 분무특성을 고려한 화재해석을 수행하는데 기여하고자 한다.

## 2. 해석모델

### 2.1 이론적 모델

Figure 1은 스프링클러 헤드 근처에서의 액적 형성 메커니즘을 도식적으로 나타낸다. 스프링클러의 오리피스에서 분사된 제트는 디플렉터의 존재에 의해 충돌제트(impinging jet)를 형성하며 반경방향으로의 자유표면을 가진 액막(liquid sheet)으로 발달하게 된다. 반경방향으로의 액막이 진행됨에 따라 자유표면의 불안전성은 증가하게 되고 임계조건에 도달할 경우 액막으로부터 떨어져 원환 형태의 ligament를 형성하게 된다. 이러한 ligament의 추가적인 분열(break up)이 액적형성을 유도하게 되고 이를 1차 분열(primary break up)과정으로 정의하게 된다. 생성된 액적은 주변 기체와의 상호작용 및 공기역학적 힘에 의해 2차 분열(secondary break up)이 발생할 수 있는데 스프링클러 액적의 경우 액적의 운동량이 크지 않아 2차 분열과정보다 1차 분열과정에 의해 초기분무특성이 결정된다.

Ren 등은 Watson<sup>(8)</sup>이 제시한 자유표면 경계층이론과 Dombrowski 등<sup>(9)</sup>이 제시한 액면 안정성 이론을 적용하여 스프링클러 분무 형성에 대한 이론모델을 제시하였으며 액적분열거리(break-up distance)가 디플렉터의 직경에 비해 충분히 긴 경우 평균 액적크기는 다음과 같은 경험식으로 정리된다.

$$d^* = \frac{d_m}{D_o} \approx C(p^*)^{-1/6} \beta(f_o We)^{-1/3} \quad (2)$$

여기서  $d_m$ 은 액적의 평균크기,  $D_o$ 는 오리피스 직경을 의미한다. 이 식은 Dundas의 식과 마찬가지로 액적의 평균직경이 웨버수( $We$ )의  $-1/3$ 승에 비례하고 있음을 보이고

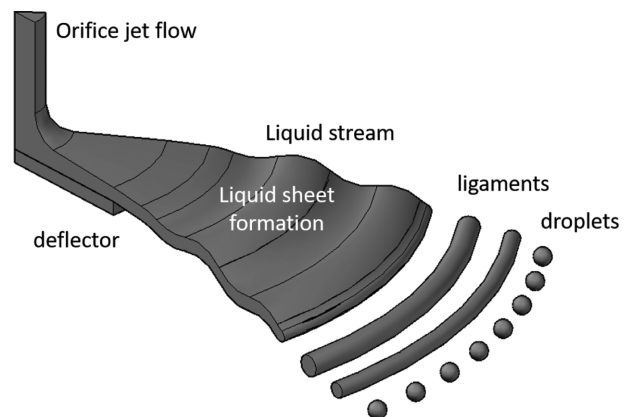


Figure 1. Schematic of the atomization process around the sprinkler head.

있으며 여기서 액상과 기상의 밀도비, 액막두께 인자는 다음과 같이 계산된다.

$$\rho^* = \frac{\rho_{air}}{\rho_{liquid}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{T}{T_0} = \frac{U_{jet}}{U_{sheet}} \quad (4)$$

여기서 T는 임의 위치에서의 액막의 두께, T<sub>0</sub>는 비점성 (inviscid) 상태를 가정한 경우 액막의 두께로서 일반적으로 최소 액막두께로 인식되며 따라서 β는 항상 1보다 큰 값을 가진다. 상수 C는 대부분의 헤드에 대해 일정한 값을 가지는 것으로 알려져 있으나 액체 미립화과정의 복잡성으로 인해 실험적으로 측정되며 연구에 적용된 스프링클러 헤드에 대해 C값은 0.9 정도로 알려져 있다. f<sub>0</sub>는 액막의 파동 성장 무차원수의 임계값으로 Ren 등의 연구에서는 12를 적용하였다. Watson 등은 액막의 점성경계층이 자유표면으로 발달하는 거리(r<sub>l</sub>)에 기초하여 액막 두께 인자를 Re수와 디플렉터 반경에 의해 계산한다.

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.196Re^{-1/5} (r_d/D_o)^{9/5} & (r_d < r_l) \\ 1.022 + 0.179Re^{-1/4} (r_d/D_o)^{9/4} & (r_d > r_l) \end{cases} \quad (5)$$

$$r_l = 0.183D_o Re^{1/3} \quad (6)$$

2.2 CFD 모델

Ren 등이 제시한 이론적 모델의 타당성을 평가하기 위해 CFD 모델을 이용하여 스프링클러 주위 유동특성을 비교분석하였다. Figure 2(a)에서 보는 바와 같이 CFD 해석에서 스프링클러는 오리피스와 디플렉터로 구성된 단순 형상을 고려하였으며 스프링클러의 프레임은 고려하지 않았다. 디플렉터는 평판으로 가정하였으며 단순평판부와 슬

롯(slot)의 원주방향 각도가 5°, 길이가 5 mm인 부분과 13 mm인 부분으로 구분하여 슬롯 크기의 영향을 파악하고자 하였다. 오리피스 직경은 12 mm, 반사판의 직경은 38 mm, 오리피스로부터 반사판사이의 거리는 40 mm로 설정하였다. 디플렉터에서 단순평판부 방향(0°)을 기준으로 반시계 방향 90° 위치에 5 mm 슬롯부, 270° 위치에 13 mm 슬롯부가 위치한다.

CFD 해석에 적용된 모델은 ANSYS사의 CFX 14.0 이며 표준 k-ε 난류모델과 벽법칙을 적용하여 헤드 근처의 난류유동을 해석하였다<sup>[10]</sup>. 유체유동은 비압축성, 등온상태를 가정하여 에너지방정식은 고려하지 않는다. 스프링클러 오리피스에서 방사되는 물과 공기사이의 다상유동 및 자유표면유동을 해석하기 위해 Volume of Fluid (VOF)법을 적용하였고 VOF법에서 밀도(ρ)와 체적분율(α)은 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \quad (7)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\mathbf{u}) + \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha)\mathbf{u}_r) = 0 \quad (8)$$

여기서 ρ<sub>l</sub>과 ρ<sub>g</sub>는 액상과 기상의 밀도를 나타내며 u<sub>r</sub>은 경계면에 수직방향의 속도를 의미한다. Figure 2(b)는 해석격자를 나타내며 해석영역의 크기는 직경 200 mm, 높이 100 mm이고 해석에 적용된 격자수는 약 1,000,000개 정도이다.

3. 결 과

Figure 3은 Ren 등이 제시한 이론 모델에 의해 계산된 유량에 따른 평균액적크기와 중심축에서 분무의 형성이 시작되는 액적분열 지점까지의 거리를 비교하여 나타낸다. Figure 3(a)에서 액적크기는 오리피스 직경이 작고 분사유량이 커질수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 일반적

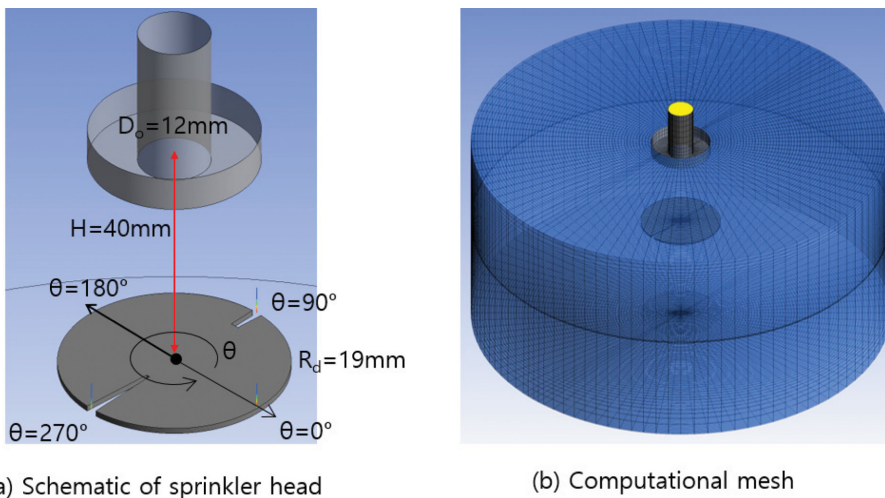
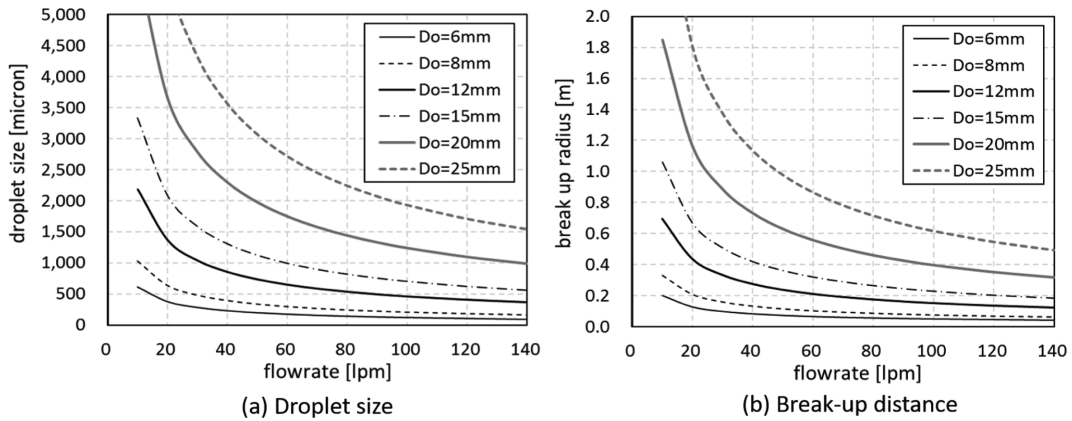


Figure 2. Schematic and computational domain of a simplified sprinkler head for the CFD model.



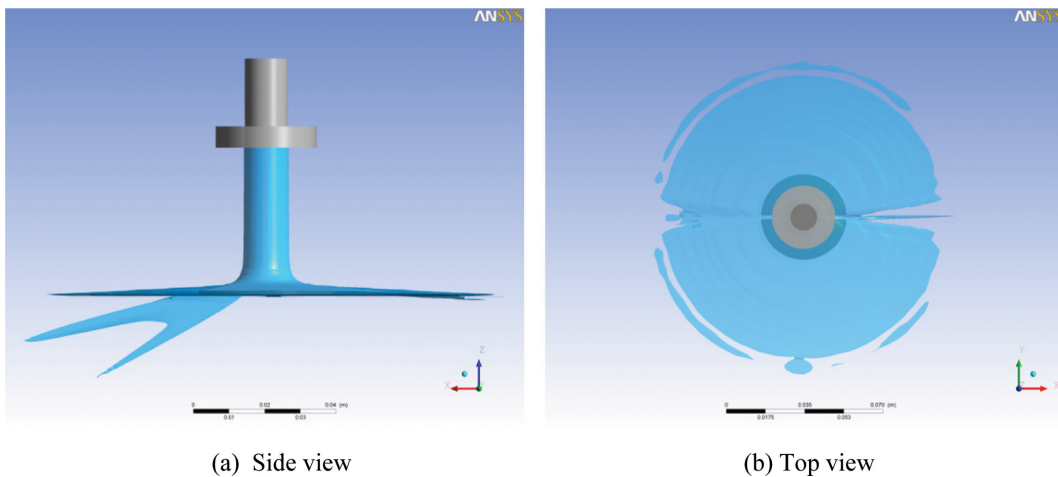
**Figure 3.** Comparison of droplet size and break-up radius as a function of flow rate for different size of orifice diameter predicted by the empirical model.

으로 잘 알려진 바와 같이 오리피스 직경이 작아질수록 노즐에서 분사되는 제트의 속도가 증가하여  $We$ 수는 증가하고 디플렉터 부근에서 점성의 영향에 비해 관성의 영향이 크게 증가하기 때문에  $\beta$  값이 감소하여 액적크기는 감소하는 경향을 보이게 된다. 또한 동일 오리피스 직경에 대해 분사유량이 증가할수록 액적크기가 작아지는 것도 동일 이유로 해석된다. Figure 3(b)에서 액적분열거리는 오리피스 직경이 크고 분사유량이 작을수록 길어지는 경향을 보인다. 액적분열거리 또한  $We$ 수와 디플렉터에서의 액막 두께에 지배적인 영향을 받게 되는데 오리피스 크기가 감소하고 분사유량이 증가할수록 충돌제트의 속도가 증가하여  $We$ 수는 증가하고 액막두께는 감소하여 액적분열거리는 감소하게 된다.

Figure 4는 CFD 해석에서 VOF 모델을 사용하여 계산된 액상의 자유표면 유동을 측면과 평면방향으로 나타낸다. 슬롯이 없는 평판 방향( $\theta = 0^\circ$ 와  $180^\circ$ )으로는 앞서 Figure 1에서 설명한 바와 같이 디플렉터에 충돌한 제트가 반경방향으로 퍼져나가며 액막을 형성하고 있으며 중심축에서

약 2~3  $D_o$ (오리피스 직경)정도 떨어진 위치에서 ligament를 형성하는 과정을 보여준다. 한편 평판에 슬롯이 존재하는 방향( $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ )에서는 반경 방향으로 진행되는 충돌제트가 슬롯으로 유입되어 다시 수직방향의 액막을 형성하게 되는데 액막의 형성에 있어서 슬롯의 폭과 슬롯의 길이는 수직방향 액막 형성에 중요한 인자로 판단된다. Figure 4(a)에서 보는 바와 같이 슬롯의 길이가 5 mm인 방향( $\theta = 90^\circ$ )의 경우 제트의 관성에 의해 수직방향의 액막 형성이 미미했으나 슬롯의 길이가 13 mm인 방향( $\theta = 270^\circ$ )의 경우 수직방향의 액막 형성이 매우 활발히 일어남을 볼 수 있다. 따라서 슬롯의 존재는 디플렉터 직하방향으로의 액적형성을 활성화하여 하류에서 보다 균일한 분무 패턴을 얻는데 기여할 것으로 판단되며 수평방향으로 형성되는 충돌제트에 교란을 부가하여 액적형성에 기여하는 것으로 생각된다.

Figure 5는 분사유량에 따라 디플렉터의 끝단에서 높이 방향으로 반경방향 속도분포를 비교하여 나타낸다. 여기서 기호표시는 CFD 모델에서 계산된 결과를 나타내고 실선



**Figure 4.** Iso-contour of the calculated water volume fraction of 0.5.

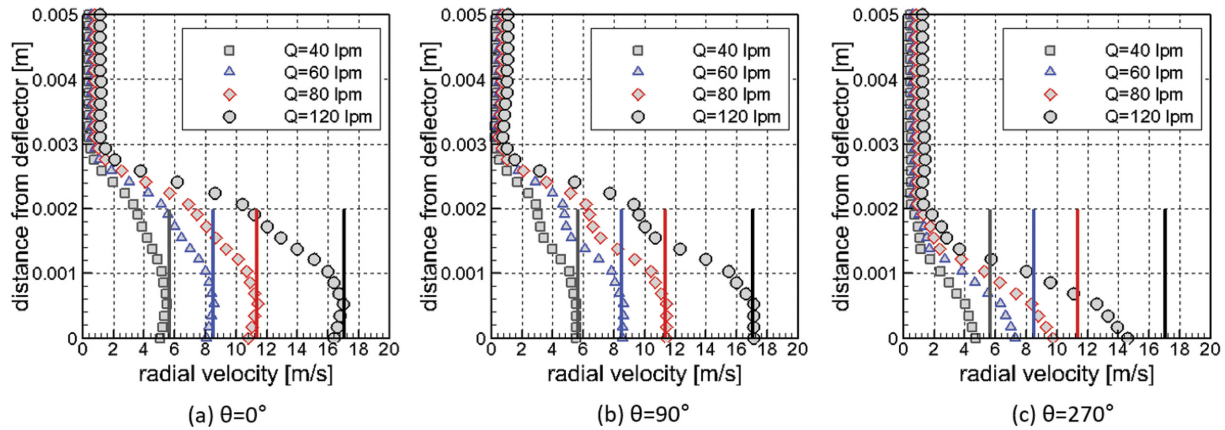


Figure 5. Comparison of the radial velocity profile between the CFD model and empirical model at the edge of deflector.

으로 표시된 부분은  $Re_{n}$  등이 제시한 이론 모델에 의해 계산된 값을 나타낸다. 일반적으로 액적형성과정에서 액막의 두께와 속도는 액막의 불안전성을 야기하는 주요인자로 알려져 있다.  $Re_{n}$  등의 이론모델에서는 디플렉터의 크기정보외에 형상정보를 고려하지 못하기 때문에 크기정보가 동일한 경우 분사유량에 따라 디플렉터 끝단에서의 속도는 동일한 값을 나타낸다. 그러나 CFD 해석에서는 디플렉터의 기하학적 형상을 고려하여 자유표면 유동을 해석하기 때문에 디플렉터의 형상에 따른 끝단에서의 속도 분포를 예측할 수 있다.

Figure 5(a), (b)에서 보는 바와 같이 슬롯이 없는 단순평판 방향( $\theta = 0^\circ$ 와  $180^\circ$ )이나 슬롯의 길이가 5 mm인 방향( $\theta = 90^\circ$ )의 경우, 디플렉터의 끝단에서 CFD 해석에 의한 속도분포의 최대값은  $Re_{n}$  등의 이론 모델의 예측값과 매우 잘 일치된 결과를 보여준다. 한편 슬롯의 길이가 13 mm인( $\theta = 270^\circ$ ) 방향에서의 반경방향속도는 CFD 해석결과와 이론모델이 다소 차이를 나타내며 액막의 두께도 슬롯의 존재에 의해 크게 감소함을 보여준다. 이는 슬롯의 존재에 의해 수직방향으로의 액막이 형성됨에 따라 슬롯을 통해 빠져나간 유량만큼 반경방향 유량이 감소하고 이로 인해 슬롯의 길이가 13 mm인 방향( $\theta = 270^\circ$ )의 끝단에서 반경방향속도와 액막 두께가 크게 감소는 것으로 판단된다.

Figure 6은  $Re_{n}$  등의 이론모델 결과와 CFD 해석에서 계산된 디플렉터 끝단에서 반경방향속도를 각 방향으로 비교하여 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 슬롯이 없는

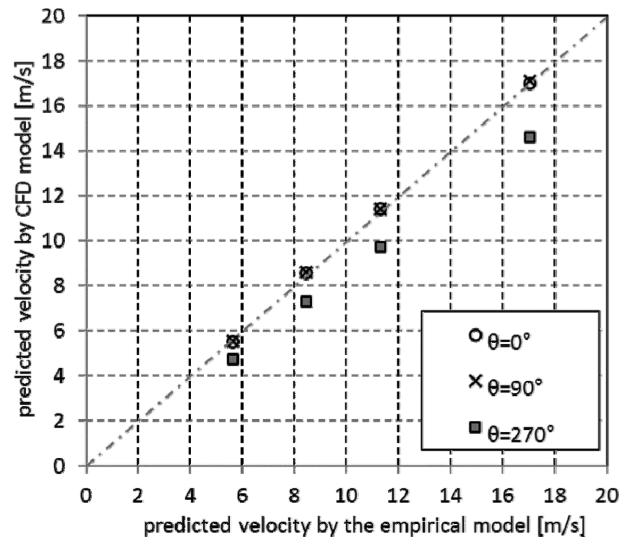


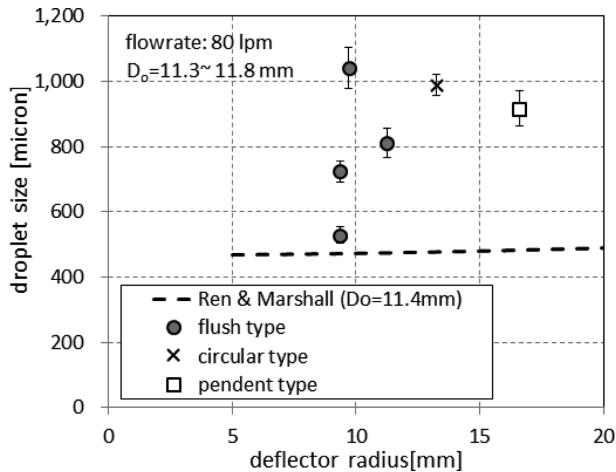
Figure 6. Comparison of radial velocity at the edge of the deflector between the CFD model and the empirical model.

평판 방향( $\theta = 0^\circ$ 와  $180^\circ$ )이나 슬롯의 길이가 5 mm인 방향( $\theta = 90^\circ$ )의 경우  $Re_{n}$  등의 이론모델과 CFD 해석결과가 매우 잘 일치함을 나타낸다. 그러나 슬롯의 길이가 13 mm인 방향( $\theta = 270^\circ$ )의 경우  $Re_{n}$  등이 제시한 이론 모델이 CFD 해석에 비해 15% 정도 상향 예측된 반경방향속도를 보여준다. 스프링클러의 디플렉터외에 슬롯이나 프레임등 추가적인 형상정보는 스프링클러 분무의 비대칭적인 특성을 야기하는 주요 요인으로 판단되며 향후 구조

Table 1. Measured Mean Droplet Diameter for Residential Sprinkler Head<sup>(3)</sup>

	SP#01	SP#02	SP#03	SP#04	SP#05	SP#06
Sprinkler type	Flush	Flush	Flush	Flush	Circular	Pendent
$d_o$ [mm]	11.4	11.4	11.3	11.3	11.8	11.4
$r_d$ [mm]	9.4	9.4	9.7	11.3	13.3	16.6
$D_{v,50}$ [ $\mu$ m]	$723 \pm 33$	$529 \pm 24$	$1041 \pm 64$	$812 \pm 45$	$989 \pm 32$	$916 \pm 55$





**Figure 7.** Comparison of the measured and calculated mean droplet diameter for different type of sprinkler head.

적 인자가 분무형성과정에 미치는 영향 등을 파악할 필요가 있다.

Table 1은 국내에서 널리 사용되는 주거용 스프링클러 헤드의 형태에 따라 측정된 평균액적크기( $D_{v,50}$ )에 대한 이전 연구의 결과를 정리하여 나타낸다<sup>(3)</sup>. 스프링클러 헤드의 오리피스 직경은 종류에 관계없이 11.3~11.8 mm 정도의 유사한 크기를 보였으나 디플렉터의 반경은 9.4~16.6 mm까지 큰 차이를 보였는데 디플렉터가 프레임 내부에서 돌출되는 플러쉬형 헤드의 경우 비교적 작고 디플렉터가 프레임 외부에 고정되는 펜던트형 헤드의 경우가 상대적으로 크다. 측정된 평균액적크기는 530~1040  $\mu\text{m}$  정도로 측정되었으며 오리피스 직경이나 반사판의 크기에 따른 특별한 경향은 파악되지 않는다.

Figure 7은 실험에서의 평균액적크기 측정결과와 Ren 등의 이론모델의 계산결과를 디플렉터 반경에 따라 비교하여 나타낸다. 이론 모델에 적용된 오리피스 직경은 11.4 mm이다. 전체적으로 이론모델은 측정값에 비해 상대적으로 낮은 액적크기를 예측하고 있으며 주어진 조건에 대해 액적크기는 약 500  $\mu\text{m}$  정도로 20~100% 정도 낮게 예측된 결과를 제공하였다. 따라서 실제 스프링클러에서는 헤드의 단순 크기정보외에 기하학적 형태에 따라 액적의 형성이 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

본 연구는 CFD 모델에 기초하여 단순 스프링클러 헤드 근처에서 형성되는 액막의 다상 및 자유표면유동을 VOF 법을 적용하여 직접 해석하고 기존의 이론식에서 제시된 결과와 비교분석하여 이론모델의 타당성과 향후 모델개발 과정의 접근방법을 제시하였다. Ren 등의 이론 모델은 단순 평판에서 대해서 CFD 해석에서 계산된 속도분포와 잘 일치된 결과를 보였으나 슬롯이 포함된 부분에서는 예측

결과가 CFD 결과와 다소 차이를 보였다. 또한 이론 모델에서 스프링클러의 크기정보에 기초하여 예측된 평균액적크기는 실제 국내에서 널리 적용되는 스프링클러의 실험 결과와 큰 차이를 보여 평균액적크기는 헤드의 단순 크기 정보외에 기하학적 형태에 따라 액적의 형성이 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

따라서 스프링클러 분무에 대한 이론 모델은 유체역학적 이해를 바탕으로 분무형성과정에서 주요 인자에 대한 이해를 도모하는데 기여할 수 있으나 스프링클러 헤드의 기하학적 형태를 고려하지 못함으로 인해 제시된 스프링클러 헤드의 초기 분무특성 예측은 실험결과와 다소 차이를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 실험적 접근이 어려운 상황에서 분무액적의 특성을 예측하는데 있어서 부가적인 도구로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 스프링클러 헤드의 기하학적 형태를 고려하기 위해서는 CFD 모델을 이용하여 헤드 근처에서 액막의 유체역학적 특성을 해석하고 디플렉터 끝단에서 계산된 액막의 두께, 액막의 속도 등의 유동특성 정보를 활용한 초기분무특성 예측모델에 대한 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다.

### 후 기

본 논문은 2016년도 국민안전처의 소방안전 및 119구조구급기술 연구개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사 드립니다.

### References

1. A. D. Putori, D. Everest and A. Atreya, "Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity in Large Scale Sprinkler Flows Using Particle Tracking and Laser-Induced Fluorescence", NIST GCR-03-852 (2003).
2. D. T. Sheppard, "Spray Characteristics of Fire Sprinklers", Ph.D Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Northwestern University (2002).
3. S. C. Kim and J. Y. Kim, "An Experimental Study on the Droplet Size Distribution of Sprinkler Spray for Residential Building", Journal of ILASS-Korea, Vol. 20, No. 3, pp. 175-180 (2015).
4. P. H. Dundas, "The Scaling of Sprinkler Discharge: Prediction of Droplet Size", FMRC Series No. 18792, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA (1974).
5. D. Wu, D. Guillemin and A. W. Marshall, "A Modeling Basis for Predicting the Initial Sprinkler Spray", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 283-294 (2007).
6. N. Ren, "Advances in Characterizing Fire Sprinkler Sprays", Ph. D. Thesis, Dept. of Fire Protection Engineering, Univ. of Maryland (2010).
7. N. Ren and A. W. Marshall, "Characterizing the Initial Spray from Large Weber Number Impinging Jets", Inter-

- national Journal of Multiphase Flow, Vol. 58, pp. 205-213 (2014).
8. E. J. Watson, "The Radial Spread of a Liquid Jet over a Horizontal Plane", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 20, pp. 481-499 (1964).
  9. N. Dombrowski and W. R. Johns, "The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets", Chemical Engineering Science, Vol. 18, pp. 203-214 (1963).
  10. ANSYS Co., ANSYS Ver.14 (2012).