

## 첨가제가 혼합된 미세물분무의 소화특성

이경덕, 신창섭  
충북대학교 안전공학과

### Extinguishing Characteristic of Water Mist with Additives

**Kyoungduck Lee and Changsub Shin**  
*Dept. of Safety Engineering, Chungbuk National University*

#### 1. 서론

할론 1301과 할론 1211 등 CFC 계통의 소화약제는 1960년대 말에 개발되어 최근까지 유류화재와 전기화재 등 화재진압에 사용하고 있다. 그러나 할론계 소화약제는 지구온난화지수와 오존파괴지수가 높으므로 환경문제를 야기하므로 이에 선진국에서는 할론계 소화설비의 단계적 철수 및 환경에 악영향을 주지 않는 청정소화약제의 장점을 가지는 대체기술의 일환으로 연구중이며, 상업용 선박의 소화설비를 개조하려는 국제해사기구(International Marine Organization) 규정으로 인하여 스프링클러 소화설비의 단점인 소화 후 물에 의한 2차적 피해 방지와 유류화재 및 전기화재에 적용 가능하게 하기 위한 방안으로 미세물분무 소화설비의 개발을 촉진하기에 이르렀다.

이에 외국에서는 적용화재에 보다 효과적인 소화를 위하여 분무노즐을 이용한 물을 고압방사시켜 최적의 물입자를 만들려는 연구와 함께 미세물분무의 소화성능을 향상시키고 단점을 보완하기 위한 연구가 진행되고 있다.

미세물분무 소화설비의 소화성능을 향상시키기 위하여 소화제로 사용되는 물에 첨가제를 첨가하여 소화성능을 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 할론소화약제의 단점을 보완한 환경친화적인 소화약제인 미세물분무 소화설비의 소화성능 향상시키기 위하여 순수한 미세물분무의 유류화재의 진압특성과 소화시간을 규명하고자 하며, 첨가제가 혼합된 경우 순수한 미세물분무와의 소화성능을 향상시키고자 한다.

#### 2. 이론

물은 높은 비열과 증발잠열로 인해 다른 소화약제보다도 화재를 억제·소화하기 위한 가장 좋은 물리적 특성을 가지고 있으며, 증발될 때 약 1700배의 증기팽창을 하게 되므로 화염주변에서의 산소농도 희석과 연료로부터 발생하는 증기를 희석시

킨다. 또한, 물을 50~300 $\mu\text{m}$ 로 미립화하여 방사시키면 미세물분무 입자의 표면적이 넓어지므로 물과 화염 표면 사이의 열전달 속도가 증가한다. 이로 인해 물방울은 빠르게 수증기로 바뀌면서 주위의 수증기 함량이 늘어나 화재의 확대가 억제되고, 연소실내의 산소농도 저하, 연료와의 혼합에 의한 회석 및 수증기막 형성에 따른 유입 산소농도를 저하시키는 질식효과에 의해 소화효과를 증대시킨다.

미세물분무의 소화성능에 영향을 미치는 인자는 유량밀도의 분배, 물방울의 크기, 속도, 분무각도, 분무 형태, 운동량 및 분사의 복잡한 특성과 같은 여러 인자들에 의해 그 영향정도가 결정된다. 이들 중 열의 흡수 및 제거와 산소농도의 제거에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 미세물분무의 입자크기와 방사분포 및 화염에 작용되는 유량밀도로 이들은 노즐특성에 좌우된다. 노즐특성 중 방사압력의 증가는 노즐로부터 방사되는 유량, 방사속도와 화염에 작용하는 충격, 즉 타격효과가 증가되는 반면 미세물분무의 입자크기는 감소하게 된다. 또 미세물분무의 표면장력과 점도가 증가함으로써 입자크기는 증가하며, 방사각도는 작아지게 된다.

### 3. 실험장치 및 방법

미세물분무의 유류화재에 대한 소화특성을 실험하기 위하여 소규모 화재 실험장치를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 이때 실험장치는 단면적이 85cm $\times$ 85cm이고 높이가 130cm인 연소실, 가압수조, 미세물분무의 방사분포를 측정하기 위한 채수통으로 구성된다. 이때 화염의 크기는 연료의 형태, 연소용기의 크기에 따라 변할 것으로 판단되어 n-heptane과 ethanol을 100ml 사용하였으며, 연소용기는 단면적이 11cm $\times$ 11cm(pan1), 15.5cm $\times$ 15.5cm(pan2), 19.5cm $\times$ 19.5cm(pan3)와 22cm $\times$ 22cm(pan4)를 사용하여 화염크기에 따른 미세물분무 소화설비의 소화성능을 측정하였다.

또한 미세물분무의 소화성능을 향상시키기 위하여 불소계 계면 활성제를 주성분으로 하는 AFFF와 선박에서 발생하는 화재의 경우 손쉽게 구할 수 있는 2.5wt% NaCl이 첨가된 미세물분무의 소화시간을 측정하였다.

본 실험에서 일정한 분무량을 얻기 위하여 고압질소로 수조를 3kg/cm $^2$ ~10kg/cm $^2$ 로 가압하여 분무하였으며 노즐은 압력형 풀콘(full cone)노즐을 사용하였으며, 실험에 사용된 노즐은 Table 1과 같은 특성을 가지고 있다. 이때 노즐과 화염과의 거리는 1m로 하여 미세물분무를 방사하였다.

평균입자크기(SMD : Sauter Mean Diameter)는 Malvern 2600모델의 입자분석계를 사용하여 분사압력에 따라 순수한 미세물분무의 평균입경과 입경분포를 측정하였으며, 방사 밀도분포를 측정하기 위해 동일한 크기의 채수통을 노즐 중심으로부터 1m 떨어진 위치에 설치하여 3kg/cm $^2$ , 6kg/cm $^2$ , 8kg/cm $^2$ , 10kg/cm $^2$ 로 1분간 방사후 각 채수통의 평균방사량을 측정하였다.

또한, 소화·억제효과를 확인하기 위해 열전대를 연소 pan으로 부터 10cm 간격으로 4개를 설치하였으며, 화염주위와 연소실 벽면에서의 온도분포를 측정하기 위해 바닥으로부터 25cm, 55cm, 85cm의 위치에 열전대를 설치하였다. 이를 A/D convertor를

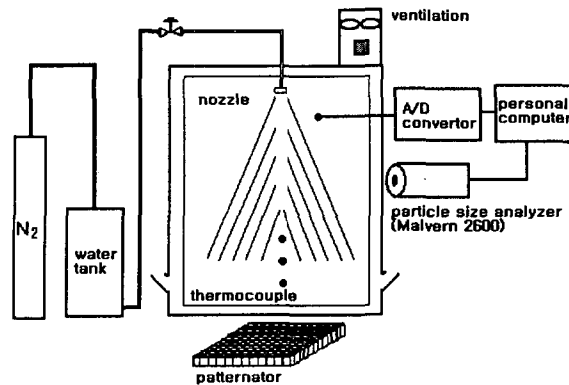


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus

이용하여 화염온도를 2초 단위로 측정하였다. 소화는 미세물분무를 방사 후 20초 이내 화염이 소멸되는 것을 소화로 간주하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Malvern 2600모델의 입자분석계를 이용하여 방사압력이 3kg/cm<sup>2</sup>, 6kg/cm<sup>2</sup>, 8kg/cm<sup>2</sup>, 10kg/cm<sup>2</sup>인 경우 각 노즐의 입자 크기(SMD)를 측정한 결과이다. TG2 노즐은 분무압력 3kg/cm<sup>2</sup>에서 분무유량은 1.5 l/min이고 SMD는 195.2μm이며 10kg/cm<sup>2</sup>인 경우 1.3 l/min이고 119μm이었다. 또한, 7개의 오리피스로 이루어진 7N3 노즐은 오리피스로 부터 1m의 높이에서 미세물분무를 방사하는 경우 직경 1m안에 미세물분무의 총 분포밀도의 65%를 차지하며, 직경 1.7m 안에 전체분포의 약 35%를 차지하는 노즐로 3kg/cm<sup>2</sup>에서 방사유량은 1.4 l/min이며 SMD는 134μm를 나타냈다. Fig. 2에서 방사압력이 증가할수록 SMD는 선형적으로 감소하였다.

미세물분무의 소화특성에 영향을 미치는 인자는 방사압력, 유량밀도, 입자크기이며, 또한 연소팬의 크기, 즉 화염의 크기 변화에 따른 미세물분무의 소화특성은 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ethanol과 n-heptane 100ml를 연소시킨 경우 식(1)을 이용하여 연소 pan의 크기에 따른 열방출량을 계산하였다.

$$RHR = H_c \times m'' \times A \quad (1)$$

여기서 A는 연소면적(m<sup>2</sup>), H<sub>c</sub>는 연소열(MJ/kg), m''는 질량손실율(kg/m<sup>2</sup> s)이다.

Fig. 3은 ethanol과 n-heptane 100ml의 연소시 크기가 다른 연소 pan에서 발생하는 열방출량을 계산한 결과이다. 이때 ethanol pan1에서의 열방출량은 4.86 kW, pan4에서는 19.46kW였으며, n-heptane은 pan1에서 6.21kW이며, pan 4는 46.86kW로 열방출량은 ethanol보다 n-heptane이 크게 나타났다.

7N3노즐의 방사압력 변화에 따른 pan1과 pan2에서 ethanol 화염의 소화시간을 Fig. 4에 나타내었다. 방사압력이 증가함에 따라 SMD는 선형적으로 증가하였으며, 소화

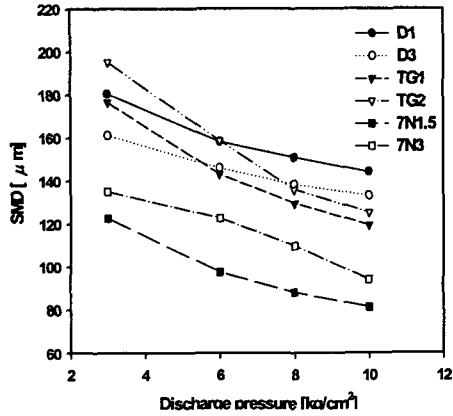


Fig. 2. Droplet size of water mist by the change of discharge pressure

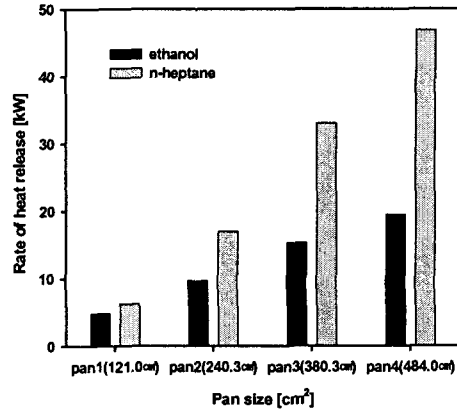


Fig. 3. Heat release rate of ethanol and n-heptane pool fire

시간은 pan1의 경우 5kg/cm<sup>2</sup> 이상에서 pan2는 6kg/cm<sup>2</sup> 이상에서 소화의 성공을 나타냈다. 이는 방사압력이 증가함에 따라 미세물분무의 momentum 증가와 화염면에서의 타격효과의 증가로 인해 소화시간이 짧아진 것으로 판단된다.

Fig. 5는 3kg/cm<sup>2</sup>에서 입자크기가 비슷하고 유량밀도가 다른 경우 소화시간을 비교한 결과이다. 이때 ethanol 화염의 경우 유량밀도가 0.47ml/cm<sup>2</sup>·min인 TG1노즐의 소화시간이 3초였으며, 0.22ml/cm<sup>2</sup>·min의 유량밀도를 나타내는 D1노즐의 소화시간은 1분 59초였다. 또한 n-heptane 화염의 경우 소화시간은 TG1이 19초이며 D1이 2분 29초였다. 이는 비슷한 입자크기라 하더라도 화염면에 작용하는 미세물분무의 유량밀도가 큰 경우 화염면에 도달되는 미세물분무가 많아짐으로써 연료표면의 냉각작용과 함께 화염의 냉각작용이 빨라져 소화시간이 짧아짐을 알 수 있다.

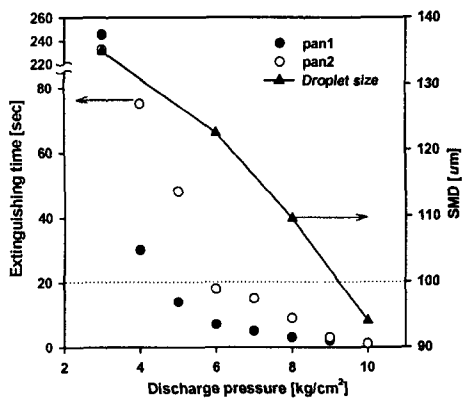


Fig. 4. Extinguishing time and droplet size by changing the discharge pressure for 7N3 nozzle

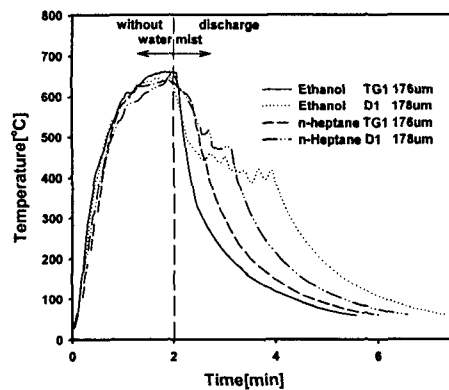


Fig. 5. Flame temperature profiles of ethanol and n-heptane pool fire by changing the flow density at the same droplet size

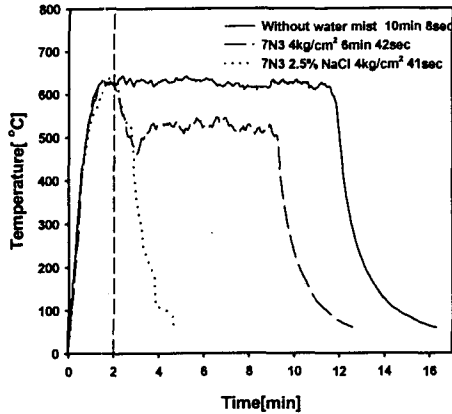


Fig. 6. Effect of 2.5% NaCl additive for the n-heptane fire

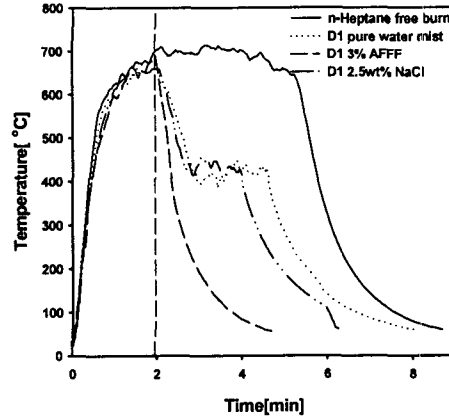


Fig. 7. Effect of 0.3% AFFF and 2.5wt% NaCl additive for the n-heptane pool fire at pan2

본 연구에서는 미세물분무의 소화성능을 향상시키기 위하여 미세물분무에 불소계 계면활성제인 0.3% AFFF와 2.5wt% NaCl를 첨가하여 순수한 미세물분무의 소화성능과 비교하였다.

Fig. 6은 pan1에서 n-heptane을 연소시켜 2.5% NaCl을 첨가하여 7N3노즐을 이용한 미세물분무를 방사한 경우 소화시간을 나타내었다. 이때 방사압력은 4kg/cm<sup>2</sup>이며, 순수한 미세물분무의 소화시간은 6분 42초였으며, 2.5%NaCl를 첨가한 경우 소화시간은 41초로 짧아졌다.

n-Heptane을 pan2에서 연소시켜 0.3% AFFF와 2.5wt% NaCl이 혼합된 미세물분무를 방사하였을 때 화염의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 미세물분무를 방사하지 않은 경우 n-heptane 화염의 소멸시간은 6분 8초 동안 지속되었으며, 순수한 미세물분무의 경우 4kg/cm<sup>2</sup>에서 소화시간은 2분 29초, 2.5wt% NaCl를 첨가한 미세물분무는 1분 57초였으며, 0.3% AFFF는 18초로 순수한 미세물분무 보다 소화시간은 짧아졌다.

## 5. 결론

본 연구에서는 ethanol과 n-Heptane 화염에 대한 미세물분무의 소화성능 향상을 위해 0.3%AFFF와 2.5wt%NaCl를 첨가한 미세물분무의 소화성능을 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 방사압력이 증가함에 따라 미세물분무의 momentum 증가와 화염면에서의 타 효과의 증가로 인해 소화시간이 짧아졌으며, 비슷한 입자크기라 하더라도 화염면에 작용하는 미세물분무의 유량밀도가 큰 경우 화염면에 도달되는 미세물분무가 많아지므로서 연료표면의 냉각작용과 함께 화염의 냉각작용이 빨라져 소화시간이 짧아졌다.

(2) n-Heptane 화염을 연소시켜 2.5% NaCl을 첨가한 미세물분무를 방사한 경우 소화시간은 7N3노즐 방사압력 4kg/cm<sup>2</sup>에서 순수한 미세물분무의 소화시간은 6분 42초였으며,

2.5%NaCl를 첨가한 경우 소화시간은 41초로 순수한 미세물분무의 소화시간보다 89.9% 짧아졌다.

(3) n-Heptane을 pan2에서 연소시켜 0.3% AFFF와 2.5wt% NaCl이 혼합된 미세물분무를 D1노즐을 이용하여 방사하였을 때 순수한 미세물분무의 경우 4kg/cm<sup>2</sup>에서 소화시간은 2분 29초, 2.5wt% NaCl를 첨가한 미세물분무는 1분 57초였으며, 0.3% AFFF는 18초로 순수한 미세물분무보다 소화시간은 짧아졌다.

### 참고문헌

1. Z.G. Liu, A.K. Kim, "A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part I - Fundamental Studies", *J of Fire Protection Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 32~50, (2000)
2. Z.G. Liu, A.K. Kim, J.Z. Su, "Examination of the extinguishment performance of a water mist system using continuous and cycling discharges", *Fire Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 336~361, (1999)
- 3.鈴木弘昭, 敏 "ウァ-タ-ミス(マイクロフォグ)による 消火に関する研究開発(その1)", 消防検定協會, Vol. 7, 20-23, (1997)
- 4.鈴木弘昭, 敏 "ウァ-タ-ミス(マイクロフォグ)による 消火に関する研究開発(その2)", 消防検定協會, Vol. 7, 23-27, (1997)
5. A. Jones, P.F. Nolan, "Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression", *J. Loss Prev Process Ind*, Vol. 8, No. 1, pp. 17~22, (1995)