

첨가제를 함유한 미분무수의 분무특성

박재만, 신창섭
충북대학교 안전공학과

Spray characteristics of water mist containing additives

Jaeman Park, Changsub Shin
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

1. 서론

최근 미분무수의 소화 능력을 향상시키기 위하여 첨가제를 이용한 다양한 연구가 활발히 수행되고 있는데, 첨가제를 함유한 물 액적은 밀도, 점도, 표면장력 등의 물성값이 변함으로써 보다 효과적인 소화를 유도할 수 있다.

첨가제를 함유한 미분무수의 소화특성에 관한 연구는 현재까지 이론적인 측면에서의 고찰, 컵버너(cup burner) 실험을 통한 소화농도 측정, 그리고 단일 액적의 증발특성 분석 등에 치우쳐 있으며 실제 화염에 대한 소화실험의 연구결과는 미흡한 실정이다.

Tapscott은 알칼리 금속염의 열역학적 고찰을 통해 원자량이 증가할수록 소화성능이 증대된다고 보고하였는데, 원자량이 증가하게 되면 원자간 결합력이 약화된다. 결합력이 약화되면 반응을 위한 활성화 에너지가 낮아지게 됨으로써 반응속도가 빨라져 소화성능이 증대된다고 하였다.¹⁾

Madrzykowski는 수계소화약제의 소화성능 평가를 위해서는 수용액의 비열, 액적의 크기, 가연물 표면의 냉각, 가연물에 대한 침투력, 접촉각, 체류시간 등을 측정하는 것이 필요하며 실제 실험을 통해 적절한 첨가제를 함유한 경우 순수물의 1/3의 양으로 똑같은 소화성능을 발휘할 수 있다고 보고하였다.²⁾

본 연구에서는 액적의 체류시간 및 화염에 대한 침투력 등의 분무 특성을 분석함으로써 첨가제를 함유한 미분무수의 소화성능 변화를 관찰하고자 하였다.

2. 이론 및 실험

미분무수의 소화 메커니즘은 주요 요인과 부수적 요인으로 구분할 수 있는데, 주요 요인으로는 냉각, 산소치환, 복사열 차폐가 있으며 부수적 요인으로는 증기/공기 희석 및 역학적 영향으로 구분된다.

고온의 가스 및 화염에 대한 미분무수의 냉각성능은 액적의 체류시간에 의해 결정될 수 있다. 체류시간은 노즐로부터 분무된 액적이 일정 거리까지 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다. 액적의 체류시간이 길어질수록 더 많은 열을 흡수하게 되어 냉각효과가 증대될 수 있다.

액적의 체류시간은 분사된 액적의 초기속도 혹은 압력, 입자 크기, 침투거리 등으로 결정되며 식(1)과 같이 표현된다.

$$t_r = \frac{D\rho_l}{0.33\rho_g U} \quad (1)$$

여기서, D는 액적의 직경(m), ρ_g 와 ρ_l 은 공기 및 액체의 밀도(kg/m³)이며, 액적의 속도 U(m/s)는 다음 식(2)에 의해서 계산할 수 있다.

$$U = \frac{U_0}{\exp\left(\frac{0.33\rho_g L}{D\rho_l}\right)} \quad (2)$$

여기서, U_0 는 액적의 초기 속도(m/s)이며, L은 침투거리(m)이다.

방수압이 동일한 경우, 작은 액적은 큰 액적에 비해서 더 오랜 시간동안 체류하게 되며 방수압이 커짐에 따라 체류시간은 짧아지게 된다.

한편 미분무수의 소화 메커니즘 중 역학적 효과란 분사된 각 액적들의 운동에너지에 의한 소화효과를 뜻한다. 액체 연료 화염의 경우 분사된 물분무에 의해서 때때로 화염이 확대되는 flare-up 현상이 발생하는데, 이 경우 화염의 즉각적인 소화가 이루어지기도 한다.

Yang 등은 액적의 운동에너지를 정량화하기 위해 충돌에너지를 의미하는 무차원수인 웨버수를 이용하였다.^{3,4,5)}

$$We = \frac{\rho_l U^2 D}{\sigma} \quad (3)$$

여기서, σ 는 표면장력(N/m)이다.

소화실험은 스테인리스강 재질의 환기가 원활한 연소실 (0.75 m × 0.75 m × 1.3 m)에서 수행되었다. 연소실의 전면은 소화현상을 관찰할 수 있도록 강화유리로 제작하였으며, 좌우 하부에 개구부(0.5 m × 0.1 m)를 설치하여 0.58 m³/s의 유량으로 상온의 주변공기가 유입될 수 있도록 하였다.

연료팬(0.15 m × 0.15 m × 0.05 m)은 연소실 바닥의 중앙에 위치하였고, 화염의 온도를 측정하기 위해 연료팬 상부 5 cm 높이에 K-type 열전대를 설치하였으며 A/D 컨버터를 통해서 PC로 1초마다 화염의 온도가 저장되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적의 체류시간

순수물 및 첨가제를 함유한 액적의 체류시간을 계산하기 위해 액적의 초기 속도, 입자 크기, 침투거리 등을 결정하여 식(1)에 의해 계산된 값을 Fig. 1~4에 나타내었다.

Fig. 1에는 순수물의 체류시간을 나타냈는데, 보통 $100\ \mu\text{m}$ 이하의 액적은 유류 화재 진압에 적당치 않은 입자 크기로 알려져 있으므로 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 사이의 입자에 대해 고려하였다.

일반적으로 동일 입자크기에서 방수압력이 낮을수록 체류시간은 길어지며, 또한 동일 압력에서 작은 액적은 큰 액적에 비해서 더 오랜 시간동안 체류하게 된다. 체류시간이 길면 그만큼 연소가스로부터 발생되는 고온의 열을 흡수하는 시간이 길어지므로 화염의 냉각이 보다 효과적으로 이루어진다.

Fig. 2, 3, 4는 칼륨염을 함유한 수용액의 체류시간을 나타낸 것으로 식(1)에서 알 수 있듯이 속도가 일정하면 수용액의 밀도가 커질수록 체류시간은 길어질 것으로 예상할 수 있다. 그러나 식(2)에서 표현하였듯이 액적의 속도는 밀도가 증가함에 따라 빨라지게 되고 결국 체류시간은 짧아지게 되는 것이다.

그러나 체류시간이 길다고 해서 항상 소화작용에 있어서 긍정적인 면만을 제공하는 것은 아니다. 체류시간은 액적의 화염에 대한 침투력(penetration)과도 관련이 있는 것으로 체류시간이 오래 걸린다는 뜻은 다시 말하면 액적이 침투할 수 있는 거리가 상대적으로 짧아지는 것을 뜻하며, 또한 그만큼 액적의 무게가 가볍기 때문에 공기 중에 오랫동안 부유하는 것을 의미한다.

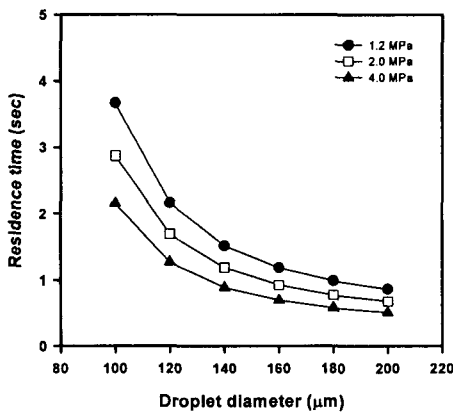


Fig. 1. Residence time of water without additive.

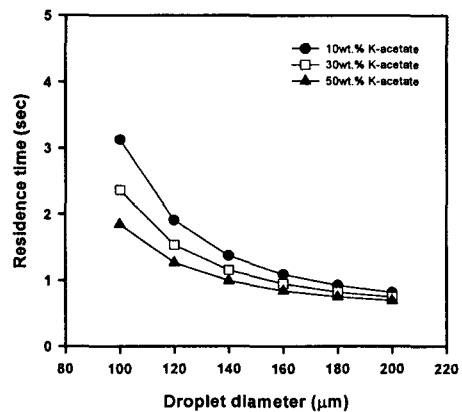


Fig. 2. Residence time of K-acetate solution at discharge pressure of 1.2 MPa.

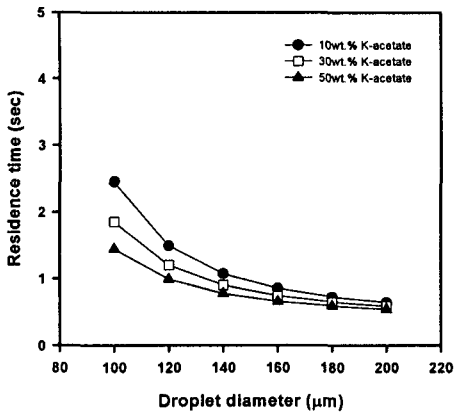


Fig. 3. Residence time of K-acetate solution at discharge pressure of 2 MPa.

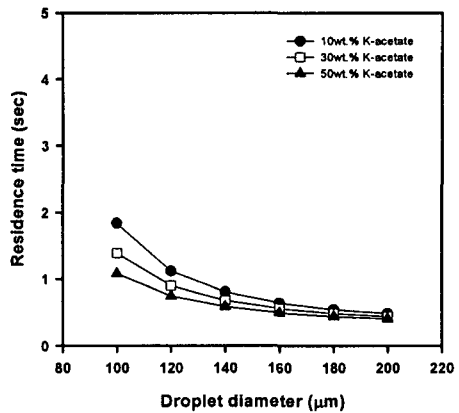


Fig. 4. Residence time of K-acetate solution at discharge pressure of 4 MPa.

실제적인 분무시 액적의 체류시간은 훨씬 짧아지게 되는데, 그 이유는 최초 분무된 액적들에 뒤따르는 액적에는 주변 공기로 인한 항력이 줄어들기 때문이며 이로 인해 액적들의 침투 깊이는 훨씬 더 늘어나게 된다.

첨가제의 농도가 높아질수록, 또한 방수압이 높아질수록 각 액적 크기별 체류시간의 차이는 줄어든다. 즉 분무되는 대부분의 액적들이 화염 깊숙이 침투할 수 있다는 뜻이며 그만큼 증발되는 액적들의 수가 증가함에 따라 냉각효과 및 첨가제에 의한 화학적 소화효과가 증대될 것으로 예상할 수 있다.

3.2 화염에 대한 침투력

액적의 충돌에너지는 앞에서 언급하였듯이 웨버수로 정량화 할 수 있다. 기존의 연구에서는 액체 및 고체 표면에서 액적의 충돌에너지를 분석함으로써 splashing 여부를 판단하기 위해 웨버수의 개념을 이용하였다.

본 연구에서는 화염을 억제(suppression) 혹은 소화(extinguishment)시키기 위한 액적 충돌에너지의 임계값이 존재한다는 가정을 하였다. 즉 노즐로부터 분사된 액적의 충돌에너지가 어느 값 이상일 때 화염의 소화·억제가 가능한지 분석하였다.

Table 1에 정리한 웨버수는 화염이 존재하는 조건에서의 액적의 웨버수이다. 이때 윗첨자 a)는 연소가 지연된 경우를 의미하며, 윗첨자 b)는 화염이 억제된 경우, c)는 화염이 소화된 경우를 나타낸다.

이때 노즐로부터 분무된 액적이 화염과 접하는 기준 높이는 노즐로부터 30 cm이며, 이 거리는 화염의 높이가 육안 관찰을 통했을 때 대략 70 cm 정도까지 치솟기 때문에 30 cm로 설정하였고, 그 지점에서의 화염의 온도를 약 700 °C로 산정하여 공기의 밀도를 보정하였다.

또한 실제 화염이 존재하는 조건에서는 챔버내 공기의 밀도가 감소하기 때문에 액적의

속도는 증가하게 되고, 그 결과 액적의 충돌에너지인 웨버수도 증가하게 된다.

Table 1. Weber number at 0.3 m from nozzle

	1.2 MPa	2 MPa	4 MPa
water	39.11 ^{a)}	63.81 ^{b)}	113.45 ^{c)}
10 wt.% K-acetate	41.36 ^{a)}	67.47 ^{c)}	119.96 ^{c)}
30 wt.% K-acetate	47.22 ^{c)}	77.03 ^{c)}	136.95 ^{c)}
50 wt.% K-acetate	56.16 ^{c)}	91.63 ^{c)}	162.90 ^{c)}

a) combustion delayed

b) fire suppressed

c) fire extinguished

순수물의 경우 웨버수가 약 63에서 화염 억제제의 여부가 판단되는 경계에 놓이게 되며, 웨버수 113 정도에서는 소화가 되는 것으로 판단할 수 있다.

칼륨염의 경우 웨버수 47 이상이 되면 소화가 되는 것으로 나타났는데, 이는 액적의 충돌에너지가 이 값 이상이 되어야 화염의 플럼을 뚫고 화염내로 침투할 수 있음을 뜻한다.

정리하면 순수물의 경우 화염의 소화를 위해서는 첨가제를 함유한 수용액 보다 더 높은 에너지를 지닌 액적이 분무되어야 함을 알 수 있고, 첨가제를 함유한 액적은 알칼리 금속염의 화학적인 작용에 의해서 순수물에 비해 낮은 에너지 수준에서도 소화가 되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉각성능을 결정하는 요소인 액적의 체류시간과 화염에 대한 침투력을 의미하는 충돌에너지, 즉 웨버수 계산을 통해서 미분무수의 분무특성에 관한 다음과 같은 결론을 얻었다.

액적의 크기가 작을수록 또한 첨가제의 함유량이 낮을수록 체류시간은 길게 나타났다. 체류시간이 길면 그만큼 열을 흡수하는 시간이 길어지므로 화염의 냉각이 보다 효과적으로 이루어질 것으로 일반적으로 판단할 수 있다.

그러나 체류시간이 길다고 해서 항상 소화작용에 있어서 긍정적인 면만을 제공하는 것은 아니다. 체류시간은 액적의 화염에 대한 침투력(penetration)과도 관련이 있는 것으로 체류시간이 오래 걸린다는 뜻은 다시 말하면 액적이 침투할 수 있는 거리가 상대적으로 짧아지는 것을 뜻한다.

화염이 존재하는 분위기에서 액적의 웨버수 계산을 통해 순수물의 경우 113, 칼륨염의 경우 47의 웨버수를 25 kW급 *n*-heptane 화염의 소화가 가능한 임계값으로 추정할 수 있다.

참고문헌

- 1) Tapscott, R.E., and J.D. Mather(2002), "Thermodynamics of metal agent fire extinguishment," Halon Options Technical Working Conference, 1—7.
- 2) Madrzykowski, D.(1998), "Water additives for increased efficiency of fire protection and suppression," Proceedings of Fire Fighting Future 50th Session, 1—6.
- 3) Manzello, S.L., and J.C. Yang(2002), "An experimental study of a water droplet impinging on a liquid surface," Experiments in Fluids, 32, 580—589.
- 4) Manzello, S.L., and J.C. Yang(2002), "An experimental study of high Weber number impact of methoxy-nonafluorobutane C₄F₉OCH₃ (HFE-7100) and n-heptane droplets on a heated solid surface," International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 3961—3971.
- 5) Manzello, S.L., and J.C. Yang(2002), "On the collision dynamics of a water droplet containing an additive on a heated solid surface," Proceedings of Royal Society, 458, 2417—2444.