

가솔린 화재의 소화를 위한 수분무의 특성에 관한 실험적 연구

Characteristics of Water Spray for Extinguishment of Gasoline Pool Fire

장 용 재*
Jang, Yong-Jae
김 명 배*
Kim, Myung-Bae
김 유**
Kim, Yu

Abstract

This study describes characteristics of water spray for extinguishment of gasoline fire. Experiments are carried out for the gasoline pool fire with the atomizing nozzles. Droplet size, spray pressure, amount of water which reaches the flame base and velocity of water spray are measured to find extinguishment conditions. Air entrainment due to the water spray and extinguishing process of gasoline fire by water spray are visualized. Boundary conditions of water spray for extinguishment of gasoline pool fire is quantitatively shown. As the result of experiments, it is found that the velocity of entrainment air and sprayed water are almost same and the water droplets size having small diameter under $40\mu\text{m}$ can not extinguish the fire because too small droplets does not reach the fuel surface.

Key Word : Water spray(수분무)
Extinguishment(소화)
Gasoline pool fire(가솔린 화재)

1. 서 론

화재에 대한 일반적인 소화방법으로서는, 점화원의 냉각과 산화제 농도의 감소에 의한 화염의 질식등 여러 가지 방법들이 있다. 질식작용에 의한 소화방법은 주로 물을 사용하기가 어렵다고 생

각되었던, 화학성분을 점화원으로 하는 화재나 유류화재 또는 전기장치 등의 화재구역에서 효과적으로 사용되어 왔으며, 그때 사용되는 소화제가 Halon등 CFC 계통의 환경오염물질을 내포하고 있는 화학물질이다. 그러나 지구온난화지수 및 오존파괴지수등이 높은 CFC계 소화제는 환경오염방지 차원에서 전세계적으로 그 사용이 중단되고 있으며, 이의 대체 소화기술로서 수분무(Water spray)에 의한 소화기술의 관심이 더욱 높아지고

1995년 9월 20일 접수, 10월 24일受理

* 한국기계연구원, 산업설비연구부
** 충남대학교

있다.

물은 몇몇 특정 화재를 제외하면 대부분의 화재를 진압할 수 있는 소화제로서 널리 사용되고 있다. 화염 속에 공급된 물은 증발에 의하여 산화재의 농도를 감소시키는 질식작용과 화염원의 온도를 저하시키는 냉각작용을 통하여 소화작용을 일으키며, 보다 효율적인 소화를 위하여 분무노즐을 이용하여 물을 미립화시켜 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 수분무를 이용한 소화장치의 설계에서는 미립화된 액적의 크기가 소화에 관련된 중요인자의 하나인데, Wahl¹⁾에 의하면 액적은 0.3-1.0mm의 크기가 적당하고, 너무 작은 액적들은 화염구역내에서 쉽게 증발하여 화염원에 도달하기가 어렵기 때문에 소화에 유효하지 못한 것으로 보고되고 있다.

Magee²⁾ 등은 플라스틱화재를 대상으로 수분무를 이용한 소화실험을 수행하였는데, 화재에 외부로부터 가해지는 열유속(Heat flux)과 플라스틱의 연소율(Burning rate)과의 상관관계를 평가하였고 Mike³⁾ 등은 목재화재에 대하여 수분무를 이용한 소화연구를 수행하였다. 유류화재에 대해서는 인화점이 37.8℃ 이상인 유류의 화재 진압에 수분무를 이용할 수 있다고 알려져 있으나¹⁾ 실제로 적용한 예를 찾아보기는 어렵다.

본 연구는 유류화재의 진압에 적합한 수분무시스템을 설계하기 위한 연구로 시작되어 1차적으로 가솔린화염이 수분무에 의하여 소화되는 과정을 규명하였으며⁴⁾, 여기에서는 가솔린화염의 소화를 위한 수분무의 조건들을 밝히고자 하는데 연구의 초점을 두었다. 이를 위하여 선정된 한 개의 분무노즐을 이용하여 수분무에 의한 실험을 수행하고, 소화에 중요한 영향을 미치는 분무수 주위의 공기 유입현상을 가시화 하여 분무수가 지나는 각 위치에서의 속도를 계산하였으며, 소화에 필요한 분무수의 유량, 입경, 압력 및 속도 등의 상호관계를 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

수분무에 의한 소화실험을 하기 위하여 Fig. 1

과 같이 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 크게 분무장치, 연료 Pan 및 연료, 측정장치 및 촬영장치로 구성된다. 분무장치는 가압장치, 노즐(Nozzle), 압력게이지(Pressure gauge)와 솔레노이드밸브(Solenoid valve)로 구성되었다. 가압장치로는 비교적 압력변동이 적은 왕복식 플런저 펌프(Plunger pump)를 사용하고 미소의 압력변동을 막기 위하여 수조(Water tank)를 사용하여 일정한 압력과 분무유량을 얻을 수 있도록 하였다. 분무노즐은 경유버너용으로 사용되고 있는 분무각 80°의 Solid형을 사용하였다. 분무수의 공급과 차단용 용이하게 하기 위하여 노즐 상단에 솔레노이드밸브를 설치하였고, 분무압력의 조절 및 측정을 위하여 압력계를 함께 부착하였다. 분무거리를 자유롭게 조절하기 위하여 노즐지지대를 모터(Motor)에 의하여 상, 하로 움직일 수 있도록 제작하였다. 연료 Pan은 스테인레스강(SUS 304)을 사용하여 내경 150mm, 내부높이 10mm, 두께 1.5mm로 제작하였으며, 연료는 Y사의 옥탄가 95인 무연가솔린을 사용하였다. 분무수의 유량과 유속, 연료의 연소율 측정 등을 위하여 전자저울(Digital balance)과 비디오카메라(Video camera) 및 1/30초 간격의 정지화면탐색기능을 가진 VTR을 사용하였다. 분무수의 평균입경(SMD)을 측정하기 위하여 Malvern 2600 모델의 Particle size analyzer로 측정하였다.

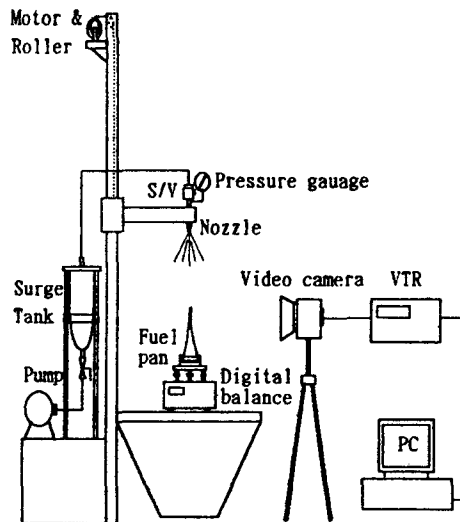


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

2.2 실험방법

가솔린 화염의 소화에 영향을 줄 수 있는 요소로는 분무수의 입경, 압력 및 유속 그리고 주위공기의 유입 등을 들 수 있다. 소화에 영향을 미치는 유효분무량은 Fig. 2의 실험장치와 같이 노즐에서 분사되는 총유량 중에서 연료 Pan에 도달되는 유량으로써 정의하였으며, 각 압력에 따라 분무거리별로 측정하였다.

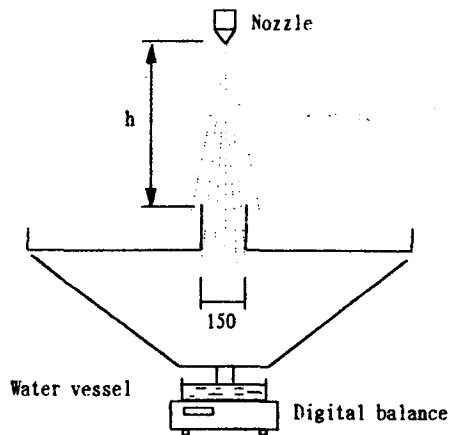


Fig. 2. Effective flux measuring unit

일반적인 가솔린의 연소특성을 알아보고 소화 실험시의 분무시작점의 기준을 정하기 위하여 수분무가 없는 경우 가솔린의 연소율을 측정할 필요가 있다. 따라서 전자저울위에 연료 Pan을 놓고 점화한 후, 시간경과에 따른 가솔린의 연소율을 측정하였다.

수분무에 의하여 소화가 이루어질 때 소화에 영향을 미치는 주요인자들의 상호관계를 규명하기 위하여 분무수의 평균입경, 분무거리별 소화순간의 분무압력 및 유속을 측정하였다.

평균분무입경은 노즐을 수평으로 설치하여 분무하도록 하고 노즐선단에서 100mm 떨어진 지점에서 각 압력별로 측정하였다.

소화순간의 분무압력은 분무거리를 조정하고 Fig. 6에서 가솔린의 일반연소율이 일정하게 나타나는 시각 즉, 가솔린을 점화한 후 100초가 경과한 시각에서 낮은 분무압력부터 분무실험을 반복하여 소화가 이루어지는 분무압력을 측정하였다.

연료 Pan 면적을 지나는 분무수입자의 속도 측정은 노즐에서 분무가 시작되는 최초분무수가 낙하거리별로 지나는 과정을 가시화하여 측정하는 방법과, 화염이 없는 상태에서 분무수가 연료 Pan에 부딪히는 충격력을 측정하여 계산하는 두 가지 방법으로 하였다. 이것은 최초분무수의 낙하속도가 공기의 저항에 의하여 연속적으로 분무되는 과정에서의 속도와 다를 수 있기 때문이다. 가시화에 의한 최초분무수의 낙하속도는 분무수 뒷편에 눈금판을 설치하고 분무수가 낙하하는 과정을 비디오 카메라로 촬영하여 각 거리별로 1/30초 동안 분무수의 이동거리를 측정하는 방법으로 하였다. 충격력 측정에 의한 연속분무시의 유속을 계산하기 위하여, 전자저울위에 연료 Pan을 올려 놓고 Pan 외부로 떨어지는 분무수가 저울에 영향을 주지 않도록 하기 위한 차단판을 Pan 주위에 설치하였다. 분무거리와 압력을 조절한 후, 분무수를 일정시간 분무하여 비디오카메라로 실험내용을 촬영하고 VTR의 1/30초 정지신호탐색기능을 이용하여 분무시간내에 나타난 최대지시값과 저울의 지시치가 안정되었을 때의 값을 읽어 이 두값의 차 즉, 분무수와 분무수를 따라 유입된 주위공기에 의한 충격력을 구하면, 운동량유속(Momentum flux)과 충격력(F)에 관한 식을 (1)과 같이하여 분무수의 속도(V_{w1})를 구할 수 있다.

$$F = (\rho QV)_{w1} + (\rho QV)_{w2} + (\rho QV)_{a1} + (\rho QV)_{a2} \quad (1)$$

여기서, Q는 연료 Pan에 떨어지는 분무수 및 유입공기의 양(m^3/s)이며, V는 속도(m/s), ρ 는 밀도(kg/m^3)이다. 또, 하첨자 $w1$ 과 $a1$ 은 연료 Pan내에 떨어지는 분무수와 유입공기의 항이고, $w2$ 와 $a2$ 는 연료 Pan내에 떨어진 후 튀어 나가는 분무수와 유입공기의 항이다. 충격력 F는 분무수 및 유입공기의 수직방향 속도와 유량에 의하여 나타난 힘으로써 수직방향의 속도를 구하는데 있어서 분무수의 낙하각도는 고려하지 않아도 된다. Q_{w1} 과 Q_{w2} 는 이미 측정하여 알고 있는 유효분무량과 분무후 Pan내에 남아 있는 유량을 측정하여 알 수 있다. 분무수에 유입된 공기는 Pan에 부딪힌 후

모두 흩어져 방출되므로 $Q_{a1}=Q_{a2}$, $V_{a2}=0$ 으로 하였다. 따라서 식 (1)은,

$$F = \rho_w \{ (QV)_{w1} + (QV)_{w2} \} + (\rho AV^2)_a \quad (2)$$

로 쓸 수 있다. 한편, 분무수의 속도 V_{w1} 을 구하기 위해서는 유입공기가 연료 Pan내에서 차지하는 면적 A_a 를 알아야 하는데, 그 값을 구하기가 쉽지 않으므로 연료 Pan내에서 분무수가 차지하는 면적을 알아 볼 필요가 있다. 만약, 분무수의 면적이 연료 Pan의 면적에 비하여 극히 미소하다면 A_a 는 연료 Pan의 면적으로 하여 계산할 수 있기 때문이다. 분무수의 면적은 $(Q=AV)_{w1}$ 의 식으로 구할 수 있다. 분무유량 Q_{w1} 과 유속 V_{w1} 을 Fig. 4의 유효분무유량 측정결과와 Fig. 6의 가시화에 의한 최초분무수의 속도 측정결과를 이용하여 연료 Pan과 분무수면적의 비율을 구해 보면 약 1.2~2 만분의 1이 된다. 즉, 연료 Pan내에서 분무수가 차지하는 면적은 연료 Pan 면적에 비하여 극히 미소하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 연료 Pan내에서 유입공기가 차지하는 면적 A_a 는 연료 Pan의 면적 A_{pan} 으로 하였다. 유입공기의 속도 V_a 의 분포를 알아보기 위하여 그 흐름과정을 Fig. 3과 같이 가시화 하였다. 연기발생장치는 홍색 연막탄을 사용하였으며, 각 분무압력별로 분무되는 분무수에 연기를 자연유입시켜 유입된 연기가 연기의 유입 없이 최초로 분무되는 분무수와 설정거리 1.5m 지점까지 도달되는 시간과정을 비교하였다. Fig. 3의 결과에서 두 경우의 속도는 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 V_a 는 최초분무수의 속도 값으로 하였다.

식 (2)에서 V_{w1} 이 최대와 최소가 되는 V_{w2} 의 조건은 $V_{w2}=0$ 과 $V_{w2}=V_{w1}$ 인 경우이다. 그러나 Q_{w2} 는 Q_{w1} 보다 매우 적은 값을 가지므로 실제로 분무수의 최대 및 최소속도를 구해 보면 거의 동일한 값이 나타난다.

3. 실험결과 및 고찰

수분무에 의한 소화에 영향을 미치는 주요인자

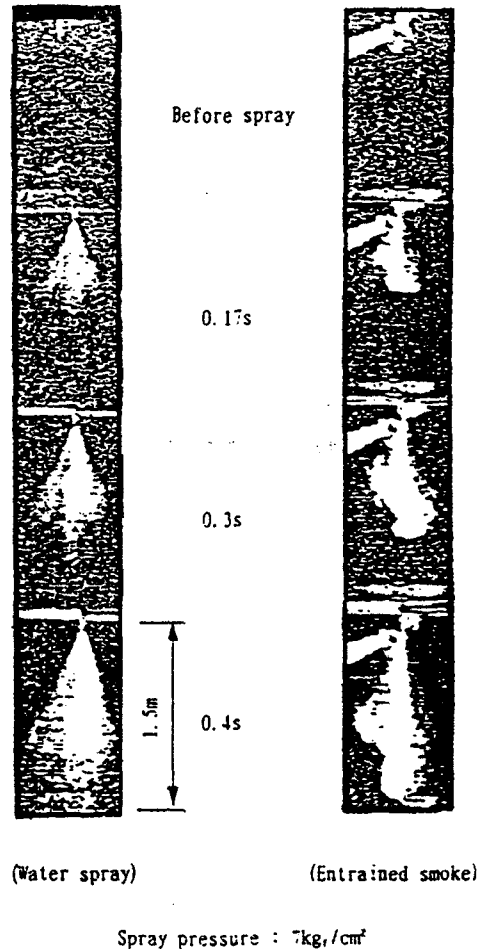


Fig. 3. Flow status of the initial spray water and entrained smoke during the spray

들의 상호관계를 정량적으로 나타내기 위해서는 몇 가지의 실험변수들이 필요하다.

화재의 연소강도(Combustion intensity)를 나타내는 물리량인 연료의 연소율(Burning rate)은 이미 이전의 연구자들^{5,6)}에 의하여 사용되었으나 수분무와 Oil pool 화재의 상호관계를 규명한 연구결과는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 가솔린 화염의 소화를 결정짓는 수분무의 물리량인 분무압력, 입경, 유량 및 유속의 상호관계를 정량적으로 제시하고자 한다.

Fig. 4에서 노즐로부터 분사되는 전체 유량 중에서 연료 Pan에 도달되는 분무유량을 유효분무

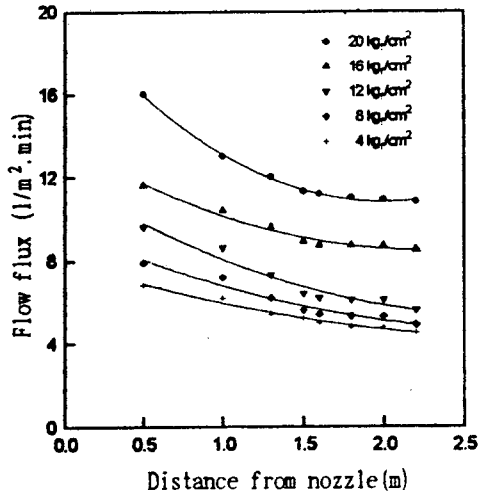


Fig. 4. Effective flux on the pan versus the spray pressure

유량으로 표기하였는데, 노즐에서 분사된 유량 전체가 소화에 직접 관여하지 않을 수 있기 때문이다. 유효분무유량은 분무압력이 높고 분무거리가 짧을수록 증가하고 있다.

Fig. 5는 분무수가 없는 자연연소상태(Freely burning condition)에서의 시간경과에 따른 연소량을 나타내고 있으며, 시간좌표에서의 0은 점화 시각을 의미한다. 연소율은 점화 초기에 급격한 증가를 보이다가 일정시간 경과 후에는 거의 일정한 값을 유지하게 되다가 연료가 소모됨에 따라 감소하게 된다. 이러한 현상은, 점화 초기에 화염

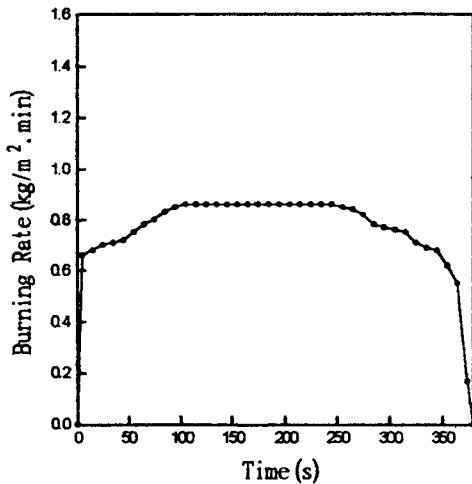


Fig. 5. Brning rate of the gasoline

열에 의하여 연료 및 연료 Pan의 온도가 상승하나, 일정한 시간이 지나면 서로의 열평형이 이루어져 연소율이 더 이상 증가하지 않기 때문이다.

Fig. 6과 7은 분무수의 최초낙하속도와 연속분무시의 유속 측정결과로서, 최초분무수의 속도는 연속분무시의 유속보다 약간의 작은 값을 보이고 있는데, 이것은 최초분무수의 경우 낙하시 공기에 대한 부력저항의 영향으로 생각할 수 있으나 그 차이는 아주 미소한 것으로 나타나고 있다. 따라서 Fig. 3의 결과로부터 분무수를 따라 유입되는

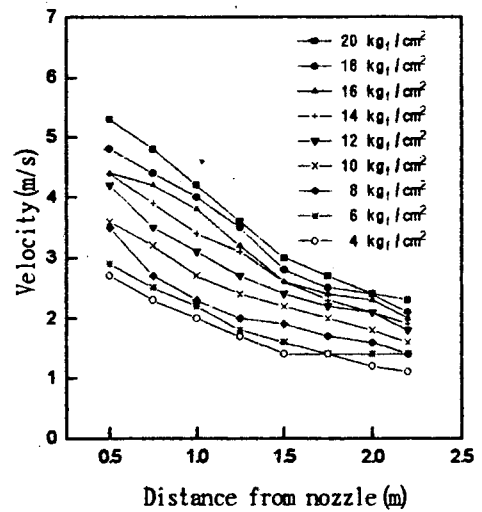


Fig. 6. Velocity of initial water spray passing each point

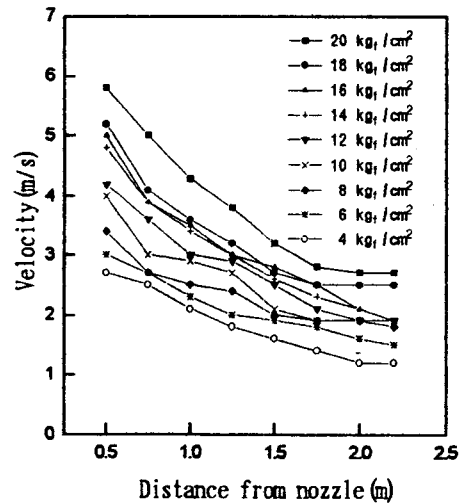


Fig. 7. Velocity of water spray passing each point

공기는 분무수의 속도와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 분무수인자들인 분무압력, 유효분무유량, 분무수의 속도에 대하여 소화에 필요한 경계 점을 분무거리별로 나타낸 결과이다. 분무거리가 높아질수록 소화에 필요한 분무압력은 증가하지만, 그때의 연료 표면에 도달되는 순간의 분무유속은 어떤 조건에서도 2.3m/s 전후의 비교적 일정한 값을 나타내고 있다. 분무유량이 충분히 많아도, Fig. 9와 같이 유입공기가 화염을 흐트러지게 하여 화염구역을 좁아지게 함으로써 분무수의 증발을 감소시키고 연료표면에 쉽게 도달되게 하여 냉각작용을 할 수 있도록 하기 위한 조건을 만족시키지 못하면 소화가 이루어지지 않게 되는데, 이 그래프상의 값이 소화를 위한 분무유속의 경계 조건이 된다고 할 수 있다. 연료 표면에서 분무수의 유속이 분무높이와 압력에 상관없이 동일하다는 것은, 각 경우에 연료 표면에 미치는 분무압력의 영향이 같다는 것을 의미한다. 이와 같은 경우에서 분무입경이 압력의 변화에 상관없이 일정한 크기를 갖는다면, 소화를 하기 위한 유효분무유량도 분무 높이와 압력의 변화에 상관없이 일정해야 할 것이다. 그러나 Fig. 8에서 소화에 필요한 유효분무유량이 분무높이 0.5-1.5m에서 6.5-50

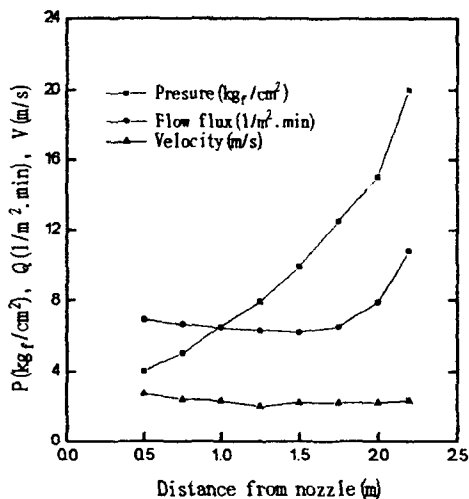


Fig. 8. Boundary conditions of spray pressure, flow flux and velocity bumping to fuel surface for extinguishment of gasoline pool fire

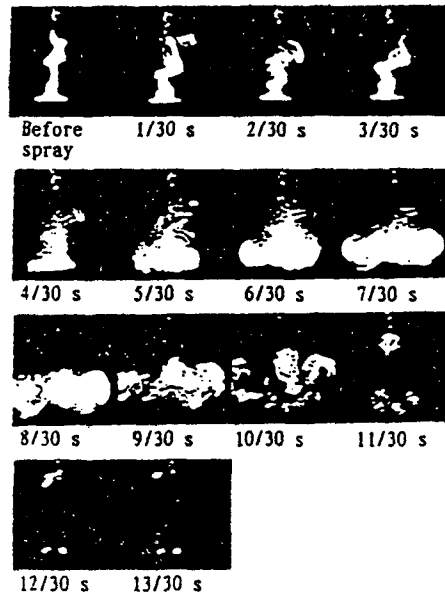


Fig. 9. Fire extinguishment process by the water spray

/m²·min로 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 분무입경은 Fig. 9에서와 같이 분무압력이 증가 할수록 감소하고 있다. 그러므로 소화를 위한 분무압력이 증가할 때 연료 표면에서 유속의 변화가 거의 없는 상태에서 유효유량이 감소한다는 것은 분무수 입경의 변화로 생각 할 수 있다. 즉, 분무입경이 작아지면 화염구역내에서 분무액적의 증발속도가 빨라지게 되어 연료 표면의 냉각을 보다 가속화시키기 때문이다. 그러나 본 연구의 실험조건인 평균분무입경 40-75μm의 크기를 가지는 액적은 Fig. 8에서의 소화를 위한 유효분무유량을 크게 변화시키지 않고 있기 때문에 소화변수로서의 중요성에 있어서 다른 인자들에 비하여 그 상대가치가 적다고 할 수 있다. 한편, 분무높이 2m (분무압력 14kgf/cm²)에서 소화에 필요한 유효분무유량이 급격히 증가하고 있는데, 이것은 Fig. 9에서 분무압력이 14kgf/cm² 이상이 되면 분무수의 평균입경이 40μm 이하로 되고, 이러한 작은 입경을 가진 분무수는 화염구역내에서 쉽게 증발함으로써 연료 표면까지 도달하지 못하여 냉각작용을 하기가 어렵기 때문이다⁴⁾.

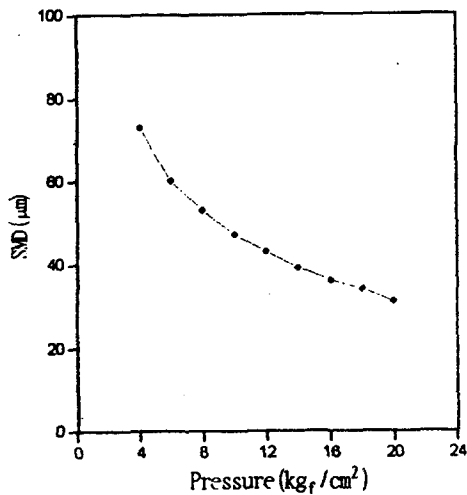


Fig. 10. Water spray droplet size

4. 결 론

가솔린 화재의 소화를 위한 수분무의 조건을 규명하기 위하여 분무노즐에 의한 소화실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 노즐을 이용한 미립 분무장치에서 분무수를 따라 유입된 공기의 흐름속도는 분무수와 거의 동일한 속도를 갖는다는 것을 발견하였다.

2) 본 실험조건인 평균분무입경 40-75μm의 범위에서는 가솔린 화재의 소화과정에서 액적의 크기가 소화를 위한 변수로서 크게 작용하지 않는다.

3) 본 실험조건과 같은 가솔린 화재의 소화를 위한 분무압력은 연료 표면에서의 분무수 속도가 화염이 없는 상태를 기준으로 2.7m/s 이상이 될 수 있는 조건을 가져야 하며, 이 조건에서 화염면적에 떨어지는 유효분무유량은 약 6.5ℓ / m² · min 이상이어야 한다.

3) 평균분무입경이 40μm 이하의 분무수는 화염 구역내에서 증발하거나 그 경로가 바뀌어 연료 표면에 도달되기가 어렵기 때문에 소화에 유효하지 못하다.

참 고 문 헌

1. Wahl, A. M., 1991, "Water and Water

Additives for Fire Fighting", Fire Protection Handbook(Edited by Cote, A. E. and Linville, J. L.), R. R. Donnelly & Sons, New York, pp. 5.

2. Magee, R. S. and Reitz, R. D., 1975, "Extinguishment of Radiation Augmented Plastic Fires by Water Sprays," Fifteenth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp. 337-347.

3. Mike, J. A., Evans, D. D., and Hayes, W., 1988, "Water Spray Suppression of Fully ped Wood Crib Fires in a Compartment" NBSIR 88-37453, National Institute of Standards and Technology, Gaithersberg, MD.

4. 장용재, 김명배, 김진국, 1994, "Water Spray를 이용한 유류화재의 소화에 관한 연구", 제12회 한국연소학회 논문집, pp. 35-42.

5. Nakakuki, A., 1994, "Heat Transfer in Small Scale Pool Fires", Combustion and Flame, 96, pp. 311-324.

6. Rouhafid, A., Vantelon, J. P., Joulain, P., and Fernandez-Pello, A. C., 1988, "On the Flame Structure at the Base of a Pool Fire", 22nd Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp. 1291-1298.

기 호

A : 단면적(m²)

F : 연료 Pan에 떨어지는 분무수 및 유입공기의 충격력(N)

Q : 연료 Pan에 떨어지는 분무수의 양(m³/s)

V : 속도

ρ : 밀도(kg / m³)

하첨자

a : 공기

a1 : 연료 Pan에 떨어지는 유입공기 항

a2 : 연료 Pan에 떨어진 후 흩어지는 유입공기 항

pan : 연료 Pan

w1 : 연료 Pan에 떨어지는 분무수 항

a2 : 연료 Pan에 떨어진 후 흩어지는 분무수 항