

〈논 문〉

수분무를 이용한 순수확산화염의 소화에 관한 실험적 연구

장용재* · 김명배* · 김진국**

(1995년 1월 13일 접수)

Experimental Study of Extinguishment of the Pure Diffusion Flame Using Water Spray

Yong Jae Jang, Myung Bae Kim and Jin Kook Kim

Key Words : Extinguishment (소화), Pure Diffusion Flame (순수확산화염), Water Spray (수분무)

Abstract

This study describes extinguishment mechanism of the purely buoyant diffusion flame using the water spray. Experiments are systematically carried out for the oil pool fire with the six different atomizing nozzles. From the measurement of burning rate which represents the combustion intensity of fire, it is observed that the water spray is able to act to enhance fire rather than to extinguish fire. The air entertainment due to the water spray is visualized to understand this phenomenon, acting to enhance fire. In order to observe effects of droplet size on fire extinguishment, an amount of water which reaches the flame base, fuel surface, and mean diameter of droplets are measured. When water droplets are too small, they do not reach the flame base because they can be deflected, or evaporate by the fire plume. Therefore it is quantitatively shown that the water spray having too small droplets is ineffective for extinguishment of the oil fire.

1. 서 론

물은 몇몇의 특정 화재를 제외하면 대부분의 화재를 진압할 수 있는 소화제로써 널리 사용되고 있다. 화염 속에 공급된 물은 증발에 의하여 산화제의 농도를 감소시키는 질식작용과 화염 및 화염원의 온도를 저하시키는 냉각작용을 통하여 소화작용을 일으키며, 보다 효율적인 소화를 위하여 분무노즐을 이용하여 물을 미립화시켜 사용한다.

이러한 수분무를 이용한 소화장치 설계에서는 미립화된 액적의 크기가 소화에 관련된 중요인자의 하나인데, Wahl⁽¹⁾에 의하면 액적은 0.3~1.0 mm의

크기가 적당하고 너무 작은 액적들은 화염구역내에서 증발하여 화염원에 도달하지 않기 때문에 소화에 유효하지 않은 것으로 보고되고 있다.

Magee⁽²⁾ 등은 플라스틱 화재를 대상으로 수분무를 이용한 소화실험을 수행하였는데, 화재에 외부로부터 가해지는 열유속(Heat flux)과 플라스틱의 연소율(Burning rate)과의 상관관계를 평가하였다.

Mike⁽³⁾ 등은 목재 화재에 대하여 수분무를 이용한 소화연구를 수행하였다. 유류 화재에 대해서는 인화점이 37.8℃ 이상인 유류의 화재진압에 수분무를 이용할 수 있다고 알려져 있으나⁽¹⁾ 실제로 적용한 예를 찾아보기는 어렵다. 그러나 최근의 환경문제와 관련하여 사용이 금지되고 있는 소화제인 Halon을 물로 대체하기 위한 연구가 활성화되고 있으며, 유류 화재에도 적용할 수 있는 수분무 시

* 회원, 한국기계연구원 산업설비연구부

** 한국과학기술원

시스템에 대한 개발이 진행되고 있다.⁽⁴⁾

본 연구는 유류 화재의 진압에도 적합한 수분무 시스템을 설계하기 위한 기본연구로 시작되었으며, 소화과정을 규명하는데 연구의 초점을 맞추었다. 이를 위하여, 부력과 순수한 확산(diffusion)에 의해서만 연료와 산화제가 혼합되는 순수확산화염(pure diffusion flame)을 대상으로 여섯 가지 종류의 분무 노즐을 이용하여 수분무에 의한 실험을 수행하였다. 소화과정의 규명을 위하여 화재의 연소강도(combustion intensity)를 대표하는 물리량인 화염원 연료의 연소율과 분무량과의 관계를 구하고 분무에 의한 공기유입을 가시화하였다. 분무액적의 크기에 따른 소화에의 영향을 관찰하기 위하여 화염구역을 통과하여 연료 표면까지 도달되는 물의 양과 액적의 크기와의 관계를 평가하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

분무수를 이용한 유류화염의 소화실험을 하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치는 크게 분무장치, 연료용기 및 연료, 측정장

치 및 촬영장치 등으로 구성된다. 분무장치는 가압장치, 노즐 그리고 솔레노이드 밸브로 구성되어 있다. 일반적으로 분무압력을 높이기 위하여 펌프를 사용하는데, 이 경우에는는 압력변동이 존재하여 분무유량의 변동성분이 존재하게 될뿐만 아니라 고압을 얻기가 어렵다. 따라서 본 실험의 경우는 고압질소통과 압력조절기를 이용하여, 수조(Water tank)에 일정한 압력을 유지시켜 일정한 분무량을 얻을 수 있도록 하였다. 분무 노즐은 일반적으로 널리 사용되는 경유 버너용 분무 노즐을 사용하였으며, 그 사양은 Table 1에 나타내었다. 분무수의 공급과 차단을 용이하게 하기 위하여 노즐 상단에 솔레노이드 밸브를 설치하였고, 분무압력의 조절 및 측정을 위하여 압력계를 함께 부착하였다. 분무 거리를 자유롭게 조절하기 위하여 연료용기를 지지하는 버팀대를 상·하로 움직일 수 있도록 제작하였다.

연료용기는 스테인리스강(SUS 304)을 사용하여 내경 100 mm, 내부 높이 10 mm, 두께 1.5 mm로 제작하였다. 연료는 Y사의 옥탄가 95인 무연 가솔린을 사용하였다. 연료의 연소율 측정 및 분무유량 측정 등을 위하여 전자저울과 비디오 카메라 및 1/

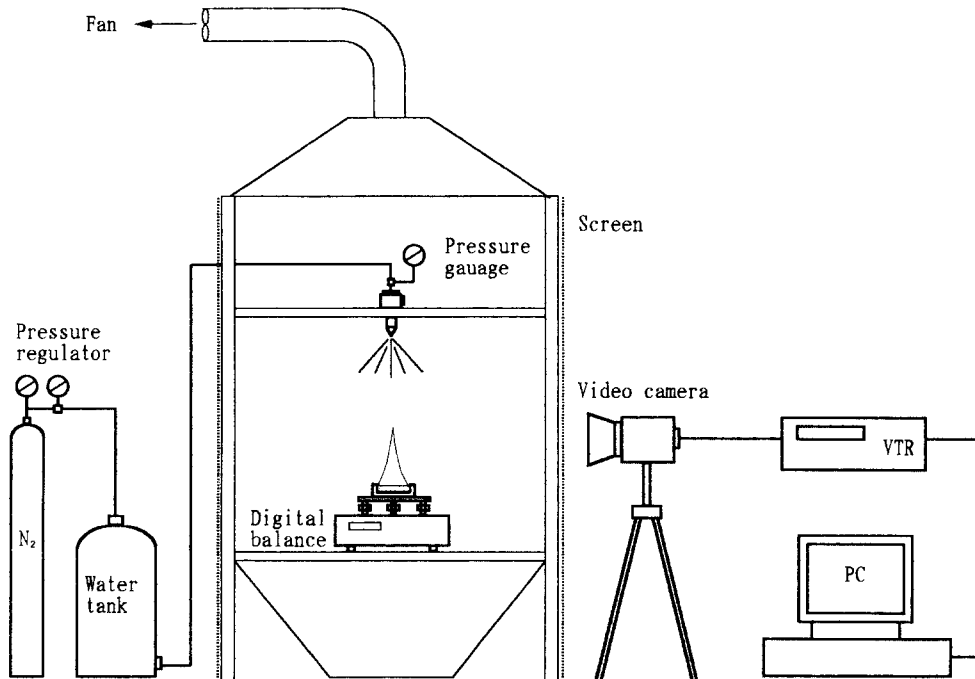


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Nozzles used in experiments

	Flow rate (gl/hr)	Spray angle (°)	Type
A	0.5	60	Hollow cone
B	1.5	80	Solid cone
C	2.25	60	Solid cone
D	2.75	80	Solid cone
E	5.5	80	Solid cone
F	10.0	60	Solid cone

30초 간격의 정지화면 탐색기능을 가진 VTR을 사용하였다. 분무수의 평균입경(SMD)은 Malvern 2600 모델의 Particle size analyzer로 측정하였고, 실험 장치 주위에 스크린을 설치하여 주위류에 의한 교란을 차단하였다.

2.2 실험 방법

가솔린 화염의 소화에 영향을 줄 수 있는 요소로는 수분무의 평균입경, 분무유량, 분무압력 등을 들 수 있다. 소화에 영향을 미치는 유효 분무유량은, Fig. 2의 실험 장치와 같이 노즐에서 분사되는 총유량 중에서 연료용기에 도달되는 유량으로써 정의하였으며, 각 노즐에 따라 압력별로 측정하였다.

분무특성에 따른 연소특성을 비교하기 위하여, 수분무가 없는 경우의 가솔린에 대한 연소특성을 조사할 필요가 있다. 따라서 전자저울 위에 연료용기를 두고 점화한 후, 시간경과에 따른 가솔린의 연소량을 측정하였다. 수분무가 존재하는 경우의 연소율 측정은, 점화 후 20초를 기준으로 분무를 시작하여 약 10초 후 강제로 소화시키고, 일정시간 경과 후 그 동안 소모된 연료량으로부터 연소율을 계산하였다. 노즐 선단과 연료용기 사이의 분무 거리를 45cm로 하고 분무압력을 $1 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 연소율을 정확히 측정하기 위하여, 소화 후 용기에 남아 있는 분무수의 양을 측정하고, 또한 분무수가 용기에 충돌하여 생기는 충격력과 저울의 늦은 응답시간으로 인하여 저울에 가솔린 양의 과대값이 나타나게 되므로 일정한 시간경과를 두어 그 시간 동안의 가솔린 증발량을 측정하였다. 전자저울의 지시값은 분무상태 및 화염상태와 함께 비디오 카메라에 녹화한 후,

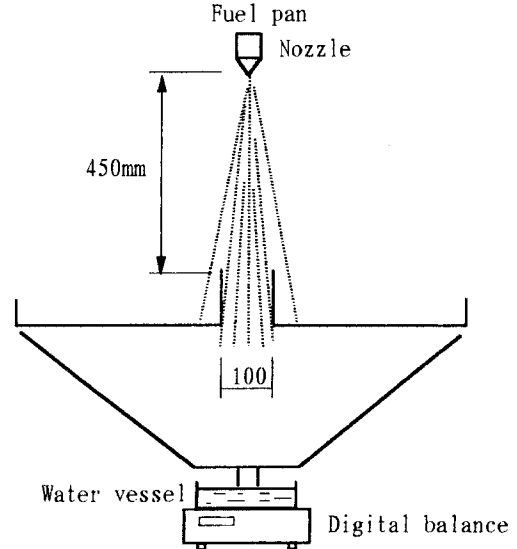


Fig. 2 Effective flux measuring unit

VTR의 쇼그서틀 기능을 이용하여 읽을 수 있다. 따라서 측정시간 오차는 최대 1/30초로 생각할 수 있으며, 연소율의 계산식은 아래와 같다.

$$\text{연소율} = \frac{W_1 - \{(W_2 + W_b) - W_w\}}{(T_2 - T_1)A}$$

여기서 A 는 연료용기의 단면적, W_1 와 T_1 는 연료용기에 분무수가 최초로 떨어질 때의 저울 지시값과 그 때의 시각이며, W_2 와 T_2 는 저울의 안정된 지시값 및 화염 소화시의 시각이다. W_b 는 시각

Table 2 Validation of measuring method of water weight with medicine dropper

Given Weighten (g)	With medicine dropper (g)	Error (g)
0.05	0.09	0.04
0.09	0.13	0.04
0.17	0.20	0.03
0.25	0.27	0.02
0.40	0.42	0.02
0.62	0.63	0.01
0.78	0.79	0.01
0.94	0.96	0.02

T_2 로부터 저울이 안정화될 때까지의 연료의 자연 증발량이고, W_w 는 연료용기에 도달되는 분무수의 무게이다.

2.3 오차 보정

2.3.1 연료용기에 도달되는 분무수의 무게 측정 및 오차 보정

화염존재시 분무된 유량은 화염에 의하여 일부가 증발되고 나머지가 가솔린 표면에 도달한다. 연료 속에 내포되어 있는 분무수 무게는, 실험 직후 스포이드(medicine dropper)를 사용, 용기내의 연료를 걸러내어 측정하였다. 오차량의 측정은 먼저 일정량의 물을 용기에 받아 그 무게를 측정하고, 거기에 일정량의 연료를 부은 다음, 스포이드로 그 연료를 걸러내어 처음의 무게와 비교하는 방법으로 하였다. 그 결과를 Table 2에 나타내었으며, 측정

오차는 실험시 연료의 연소량(10초간 약 1~2g)에 비하여 미소한 값을 갖는다.

2.3.2 전자저울 안정화에 따른 증발량 W_v 의 측정

연소율 측정시 분무수의 충격량이 없다면, 강제 소화하는 순간에 저울의 지시값을 읽어 연소율을 계산하면 비교적 간단해진다. 그러나 분무압이 클수록 충격력이 크게 되고 이 값이 저울의 지시값에 포함되어 나타나게 된다. 따라서 이 값을 보정하기 위해서는, 화염을 소화하고, 저울의 지시값이 안정된 후에 그 값을 읽어야 한다. 안정화된 지시값의 기준은 지시값의 변화율이 0.01g/s 미만인 경우로 하였다. 강제소화 순간에서부터 안정화된 지시값을 나타낼 때까지 발생하는 연료의 자연증발량(W_v)은 강제소화 후 저울이 안정화되었을 때와 같은 온도로 가열한 연료와 용기를 저울 위에 놓고, 자연

Table 3 The amount of gasoline evaporation

Evaporation time(s)	Evaporated Weight (g)				
	Fuel temperature 50°C	Fuel temperature 53°C	Fuel temperature 55°C	Fuel temperature 57°C	Fuel temperature 59°C
10	0.03	0.06	0.07	0.08	0.08
12	0.05	0.08	0.09	0.09	0.10
14	0.07	0.09	0.11	0.11	0.12
16	0.08	0.10	0.12	0.13	0.14
18	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16
20	0.10	0.12	0.14	0.16	0.17
22	0.11	0.13	0.16	0.17	0.18
24	0.12	0.14	0.17	0.19	0.20
26	0.13	0.15	0.18	0.21	0.22
28	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24
30	0.15	0.17	0.20	0.23	0.25
32	0.16	0.19	0.21	0.24	0.27
34	0.17	0.20	0.22	0.26	0.29
36	0.18	0.21	0.23	0.28	0.31
38	0.19	0.22	0.25	0.29	0.33
40	0.19	0.23	0.26	0.30	0.35

적으로 증발되는 연료의 양을 시간경과에 따라 측정하여 Table 3과 같이 제시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

수분무에 의한 소화를 정량적으로 표현하기 위하여는 몇 가지의 실험 변수들이 필요하게 된다. 화재의 연소강도를 나타내는 물리량인 연료의 연소율은 이미 이전의 연구자들^(5,6)에 의하여 사용되었으나, 수분부와 Oil pool 화재의 상호관계를 규명한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 연소율과, 수분부를 결정짓는 물리량인 분무압력과 분무유량 그리고 분무된 액적의 평균직경 등을 변수로 하여, 수분부에 의한 화재의 소화를 정량적으로 제시하고자 한다.

Fig. 3의 노즐로부터 분사되는 전체유량 중에서 연료용기에 도달되는 분무량을 분무압력에 따라, 각 노즐별로 측정된 결과를 제시하였다. 연료용기에 도달되는 분무량을 유효분무유량 W_e 로 표기하였는데, 노즐에서 분사된 유량 전체가 소화에 직접 관여하지 않을 수 있기 때문이다. Fig. 3으로부터 압력변화에 따라 유효분무유량이 크게 변화하지 않고 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 노즐의 전체 분무유량은 분무압력의 증가에 따라 커지지만, 상대적으로 분무단면적도 넓어지기 때문일 것으로 생각된다.

Fig. 4(a)는 분무수가 없는 자연연소 상태에서의 시간 경과에 따른 연소량을 나타내고 있으며, 시간 좌표에서의 0은 점화시각을 의미한다. 이를 기초로

Fig. 4(b)에 자연연소 상태에서의 연소율을 시간 경과에 따라 표시하였는데, 점화 초기에는 급격한 증가를 보이지만, 일정시간 경과 후에는 거의 일정

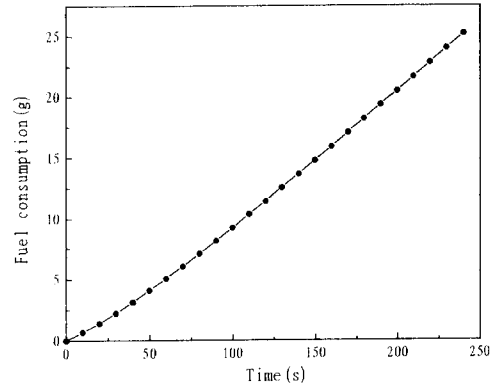


Fig. 4(a) Gasoline consumption rate without the water spray

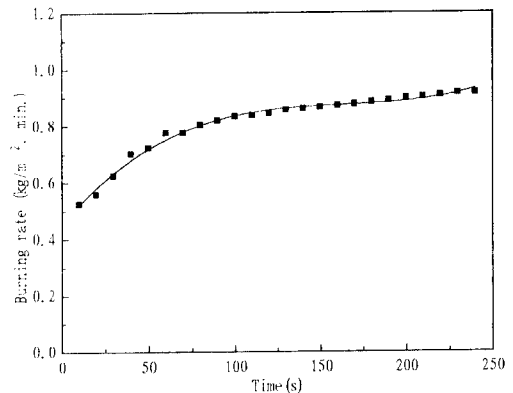


Fig. 4(b) Burning rate of the fuel without the water spray

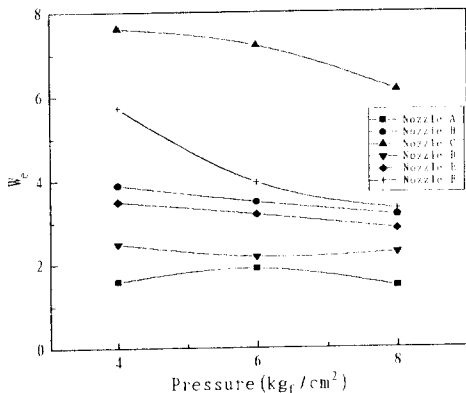


Fig. 3 Effective flux, W_e on the pan versus the spray pressure

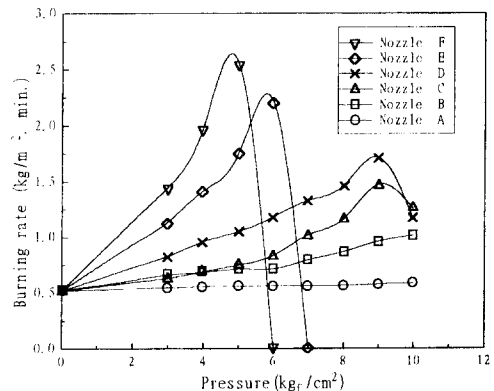


Fig. 5 Burning rate with the water spray (Spray pressure : 7 kgf/cm^2 , Nozzle type : F)

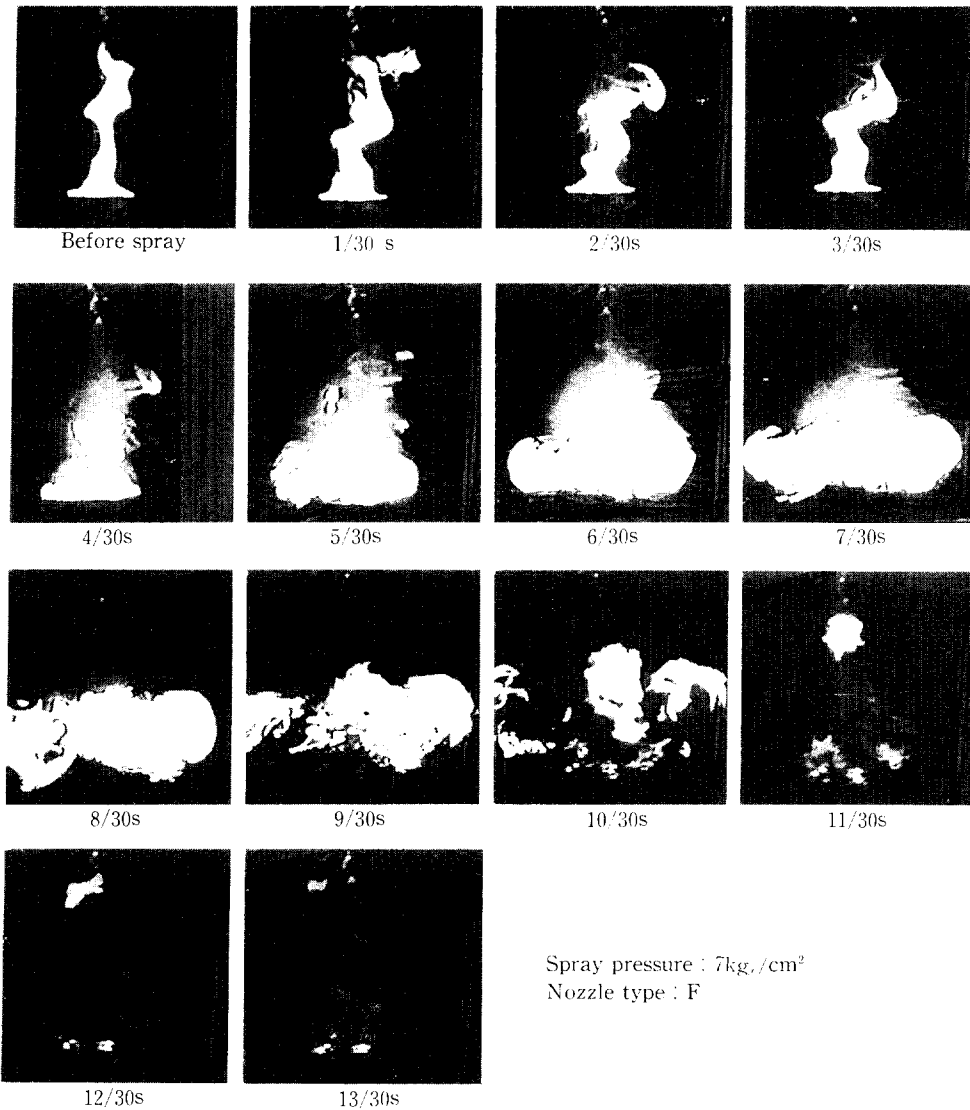
한 값을 갖게 된다. 이러한 현상은, 점화 초기에는 화염열에 의하여 연료 및 연료용기의 온도가 상승하나, 일정한 시간이 지나면 화염 및 용기와 주위의 열평형이 이루어져 인소율이 더이상 급격하게 증가하지 않기 때문이다.

Fig. 5에는 분무상태에서의 연소율을 각 노즐의 분무압력에 따라 표시하였는데, 분무압력 0은 자연연소시의 연소율을 의미한다. 실험에 사용된 노즐 E, F에 대하여는 연소율이 분무압력에 따라 특정 값까지 증가하다가 소화가 일어나게 되는 것을 알 수 있다. 이때의 최대 연소율값은 자연연소시의 세



(Spray pressure : 7kg./cm², Nozzle type : F)

Fig. 6 Air entrainment visualization



Spray pressure : 7kg./cm²
Nozzle type : F

Fig. 7 Fire extinguishment process by the water spray

배 이상에 해당되는 양으로, 수분무가 오히려 가솔린의 연소를 촉진한 결과이다. 노즐 B, C, D의 경우에는 분사압력 $10 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 까지 소화가 일어나지 않았으며, 노즐 E, F와 마찬가지로 자연연소상태의 연소율보다 높은 값을 가진다. 이상에서 관찰된, 수분무에 의한 화재의 연소촉진현상을 이해하기 위하여 분무수를 따라 유입되는 공기의 가시화 및 소화과정의 촬영 등을 수행하였다.

Fig. 6의 가시화 사진과 같이 분무수를 따라 유입된 공기는, Fig. 7의 사진에 나타난 모양과 같이 화염을 반경방향으로 흐트러지게 한다. 소화가 이루어지지 않을 때에는 Fig. 7에서의 7/30~9/30초와 같은 상태가 지속되는데, 이로부터 수분무에 의한 연소촉진 원인 중의 하나는, 산화제인 공기와 연료와의 혼합이 자연연소상태에 비하여 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 순수한 확산에 의하여 연료와 산화제가 혼합되는 자연연소상태에 비하여, 수분무에 의하여 공기가 유입되며, 이로 인하여 반경방향으로 흐트러진 화염과 공기와의 접촉면적이 증가하기 때문일 것이다. 한편, 물 자체가 연소과정의 연쇄반응(Chain reaction)을 제어하여 연소가 촉진될 수 있으나, 본 연구에서는 이 부분을 대상으로 하지 않았다.

소화에 영향을 미치는 주요인자 중의 하나는 분무된 물입자의 직경으로, 이를 평가하기 위하여 Fig. 8과 같이 각 노즐에 대하여 분무압력에 따른 평균분무입경을 측정하였다. Fig. 9에는 분무압력에 따른 분무입경과 분무수가 연료표면에 도달되는 비율과의 상관관계를 제시하였다. 분무 입경이 클수록 연료 표면에 도달하는 분무수의 비율이 증가

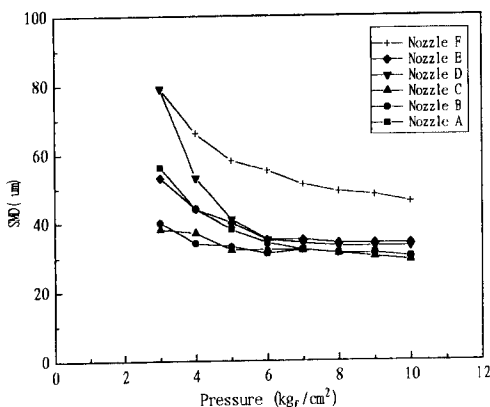


Fig. 8 Water spray droplet size

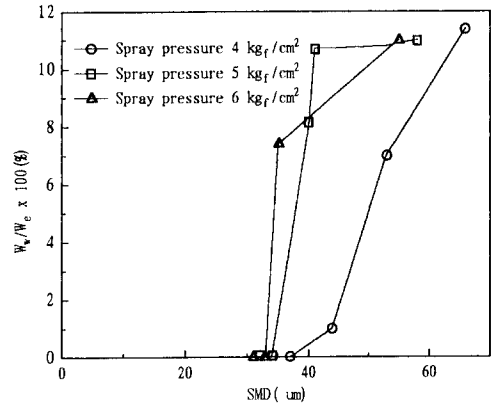


Fig. 9 The amount of water to reach the flame base versus droplet mean diameter

되는 것을 명백하게 알 수 있게 된다. 따라서 Fig. 5에 나타난 것처럼 노즐 A, B, C, D 등이 분사압력 $10 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 정도에서도 화염을 소화시킬 수 없는 원인 중의 하나는, 그 노즐로부터 분무되는 액적들의 평균입경이 약 $38 \mu\text{m}$ 이하로서 분무수 도달률이 극히 적어 연료의 표면을 급속히 냉각시킬 수 없기 때문이다. 그러므로 본 연구와 같은 조건에서 화재의 소화는 화염 자체의 냉각이나 질식보다는 화염원 연료의 냉각에 의한 연료증발 억제현상에 기인함을 알 수 있다.

4. 결 론

가솔린 화재의 소화과정을 규명하기 위하여, 부력과 순수확산에 의해서만 연료와 산화제가 혼합되는 순수확산화염을 대상으로 수분무에 의한 소화실험을 체계적으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수분무는 특정 조건에서 수분무가 없을 때인 자연연소상태에 비하여 더 높은 값의 연소율을 가지게 되어, 오히려 화재의 연소를 촉진하게 된다.
- (2) 수분무시 연소율은 자연연소상태보다 더 높은 값으로 증가하다가 어느 순간 연료표면의 냉각 조건이 충분히 이루어지면 소화가 일어나게 된다.
- (3) 수분무에 의해 유입되는 공기는 분무 자체와 함께 화염을 반경방향으로 흐트러지게 함으로써 연료와 공기와의 접촉면적을 증대시켜 연소를 촉진하는 반면, 분무수가 연료 표면에 쉽게 도달할 수 있도록 하여 연료 표면을 보다 잘 냉각시키게 된다.

즉 주위공기의 유입은 연소율의 증가 및 감소에 영향을 미친다.

(4) 본 실험조건에서는, 분무수의 입경이 약 40 μm 이하인 액적들은 화염구역내에서 증발하거나 그 경로가 바뀌어 연료 표면에 도달되지 못하기 때문에 소화에 유효하지 못함을 발견하였다.

(5) 본 연구와 같이 주로 냉각작용에 의하여 화염이 소화되는 경우에는, 화염 자체의 냉각효과 보다는 연료표면의 냉각에 의한 효과가 지배적임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (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. p. 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 Developed 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 유류 화재의 소화에 관한 연구," 제12회 한국연소학회논문집, 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.