

## Pool 화재에서의 표면 냉각에 의한 소화

### Extinguishment by the Cooling Effect of the Fuel Surface with Pool Fires

한 용 식\*

Han, Yong-Shik

김 명 배\*

Kim, Myung-Bae

신 현 동\*\*

Shin, Hyun-Dong

---

#### Abstract

A series of measurements and visualization to investigate the extinguishment of water sprays with pool fires is presented. Fire source is a small-scale pool burner with methanol, ethanol and gasoline. Measurements of temperatures, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and CO concentrations along the plume centerline are carried out to observe pool fire structures without water sprays. Visualization by the Ar-ion laser sheet shows flow pattern of droplets of the sprays above the pool fires. It is observed that in the case of methanol and ethanol, water sprays continuously penetrate into the center of fuel surfaces. The gasoline pool fire allows intermittent penetration of water sprays because of pulsating characteristics of the gasoline flame. To evaluate the cooling effect of the fuel surface by the sprays, the temperature was measured at the fuel surface. As soon as the mists reach the fuel surface of methanol and ethanol, the temperatures of the fuel surface decrease rapidly below the boiling point, and then the fires are extinguished. Due to the application of mist upon the gasoline fire, though the fuel temperature decrease abruptly at the time of the injection, such a rapid decrease do not continue till the extinction point.

Key words : Interaction, Pool Fires, Water Sprays, Extinguishment, Penetration

#### 국문요약

여러 가지 연료를 사용한 작은 규모의 pool 화재에서 분무수에 의한 소화에 관한 연구를 수행하였다. 화염대의 거시적 특성을 관찰하기 위해 화염대 온도와 가스 농도를 측정하였고, 화염 위에 형성되는 분무수의 유동형태를 관찰하기 위해 알곤이온 레이저 시트광을 사용하여 가시화 하였다. 또한 액체연료가 연료표면의 냉각에 의해 소화되는 과정을 관찰하기 위해 연료표면의 온도를 측정하였다.

---

\* 한국기계연구원 산업설비 연구부

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

## 1. 서 언

화재진압 및 제어를 위한 분무수(water mist)의 사용은 할론 1301 대체 방법으로 현재 상당한 주목을 받고 있으며, 실제 aircraft cabin 내의 화재제어에 적용된 예가 보고되고 있다. 화재 진압에 대한 분무수 사용의 장점은 기존 스프링클러에서 보다 사용하는 물의 양을 훨씬 줄일 수 있다는 데 있으며, 물의 사용으로 피해가 예상되는 컴퓨터실과 같은 장소에 적용될 높은 가능성을 가지고 있다.

지금까지 알려진 분무수의 소화 기구에 대한 견해로는 화염과 화재 plume의 냉각, 수증기에 의한 산소부족 및 복사 열전달의 차단 등으로, 이들에 복합적인 작용에 의해 화재가 소화된다. 분무수에 의한 최적의 소화 조건을 도출하기 위해서는 화재와 분무수와의 상호작용에 관한 이해가 특히 중요한데, 이것에 대한 연구는 초기 단계에 있다. 구획공간 내에서의 메탄 화재와 미세 분무수의 상호작용에 관한 연구가 수행되었다<sup>1)</sup>. 이 연구에서는 버너의 중심 축상을 따라 수직방향의 온도 및 O<sub>2</sub>와 CO의 농도가 측정되었으나, 화재영역으로의 수분 침투가 무시될 정도의 실험조건에서 수행되었기 때문에 실제 화재의 소화에 적용은 약간의 거리가 있다. 최근에, 미세 분무수(water mist)를 실제 화재 진압에 적용한 예들이 연구되었고<sup>2~4)</sup>, 가솔린 pool 화재에 대한 소화조건을 도출하였다<sup>4)</sup>. 이들에 의하면, 노즐에서 연료표면까지의 거리와 분사압력 사이의 관계에 따라 두 개의 구별되는 영역, 즉 화염이 강하게 촉진되는 영역(fire enhanced region)과 소화되는 영역(fire extinction region)이 관찰되었고, 소화의 직접적인 원인은 연료표면의 냉각효과 때문이라고 주장하였다.

본 연구에서는 화재 plume과 분무수와의 상호작용을 조사하고, 몇 종류의 연료에 대해 연료표면의 냉각효과에 의한 화재 소화(fire extinguishment)를 구체적으로 기술하는 것이다. 액체연료는 증발과정을 거쳐 연소하는데, 연료

의 대부분이 상온보다 높은 끓는 점(boiling point)을 가진다. 따라서 연료가 증발하기 위해서는 열원(heat source)을 필요로 하게 되며, 이 열원은 연소과정에서 얻어진다. 터인(open) 공간에 직경이 150mm인 액체 pool 버너가 화원(fire source)으로 사용되었고, pool 화재의 거시적인 특성을 기술하기 위해 직접사진, 비디오 녹화 및 온도 및 농도의 측정의 방법이 사용되어졌다. Ar-Ion 레이저 시트광에 의해 pool 화재 위에서 일어나는 분무입자와 plume의 상호작용에 의한 유동형태의 가시화를 수행하였고, 화재의 발열량에 따른 소화특성을 관찰하였다. 이때의 분무수 유동형태는 분무수의 운동량과 plume의 부력에 의해 결정될 것이다. 터인 공간에서 소화 기구를 기술하기 위한 일반적이고도 직접적인 물리량인 연료 표면온도를 측정하므로써 연료표면의 냉각에 의한 소화과정을 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

소규모 액체 가솔린, 메탄올 및 에탄올의 pool fire 실험이 수행되었다. 장치의 구성은 Fig. 1에 주어진다. 연료는 내경이 150mm이고, 높이가 40mm인 원통형 스테인리스 팬에 채워져 있으며, 실험의 전과정을 통하여 공급되지 않는다. 주변의 영향들은 최소화하기 위해 pool 을 바닥으로부터 높이가 600mm인 철제 스탠드 위에 고정시켰다. 분무를 위해 단공 오리피스 슐리드 콘 노즐이 사용되었다.

생성된 연소가스를 바깥으로 배출하기 위한 자연 배기 후드 장치가 연료 팬과 노즐의 중심 위 천정에 설치되어 있다. 외기의 영향을 최소화하기 위해 스크린을 사용하여 실험장치를 차폐하였다. 이러한 설치가 비록 실제 화재상황과 약간의 차이가 있지만 연소에 필요한 공기의 유입을 장애할 만한 것은 아닐 것이다. 물은 고압 펌프에 의해 가압되며, 분사를 조절하는 슬레노이드 밸브를 경유하여 노즐에서 분사된다. 펌프의 압력변동을 최소화 하기 위해 surge tank를 유로계의 중간에 설치하였다.

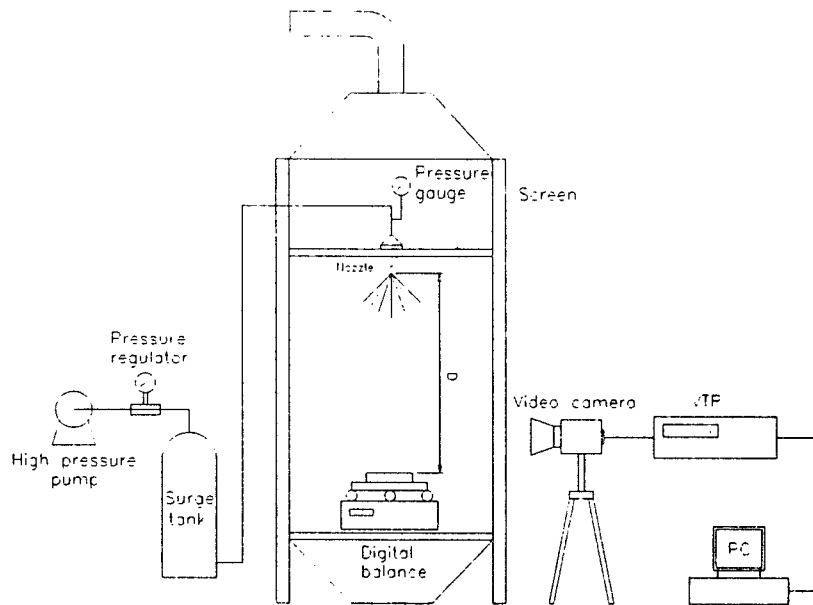


Fig. 1. A schematic of the experimental apparatus.

본 연구에서는 연료 표면으로부터 1m 높이에 노즐을 설치하였고, 분무압력은  $8\text{kgf/cm}^2$ 로 가솔린의 소화에 필요한 최소 분사압력을 초과하는 압력이다. 최소 분사압력(minimum injection pressure)에 대해서는 전의 연구에서 언급되었다<sup>4)</sup>.

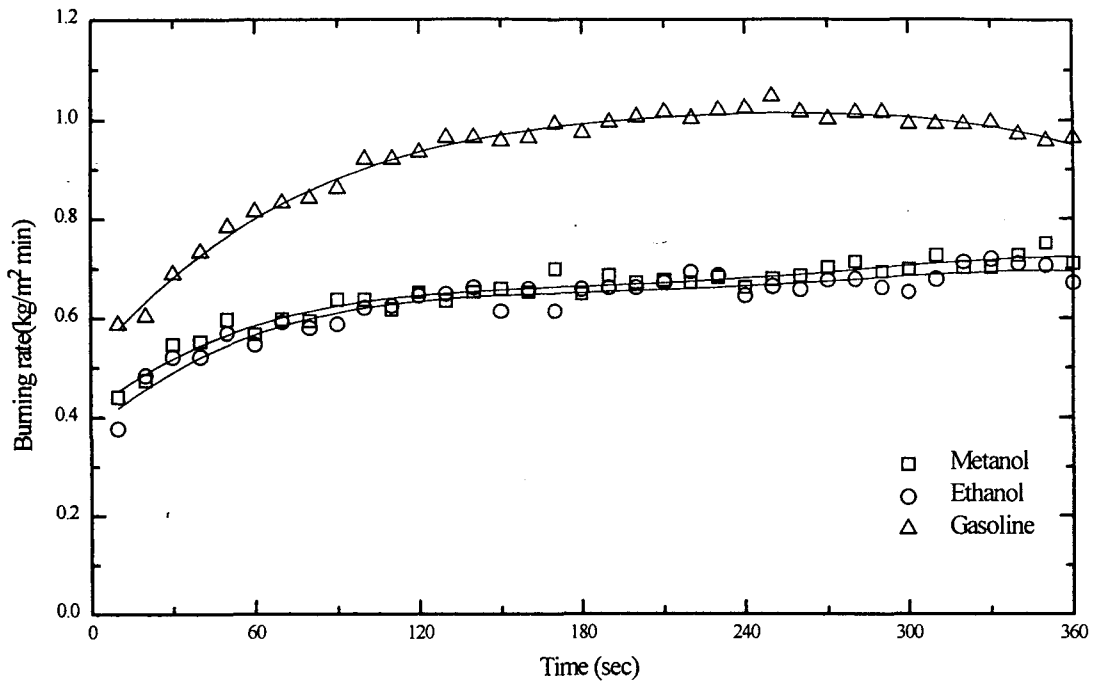
각 실험의 경우, 연료 팬에 새 연료를 30mm 높이로 채웠다. 물분사 전에 준정상(quasi-steady) 연소상태를 만들기 위해 120초 동안 자연 연소(freely burning)시켰다. 점화 후 시간에 따른 자연 연소율(freely burning rate)과 열발생율(heat release rate)이 Fig. 2에 나타내어져 있다. 열발생율은 연소율과 각 연료의 연소열(heat of combustion)의 곱으로, 연소효율을 고려하였다<sup>5)</sup>. Fig. 2로부터 메탄올의 경우, 3.5kW, 에탄올의 경우, 5.0kW, 그리고 가솔린의 경우, 10.0kW의 화재하중을 가지는 화원(fire source)으로 생각할 수 있음을 보여준다. 직경이 0.025mm의 R-형 열전대를 사용하여 화염 중심에서 초기 연료표면으로부터 10mm 떨어진 위치에서 화염의 온도를 측정하였다. 또한 분무시에 연료표면의 온도변화를 관찰하기 위해 초기 연

료 표면 2mm 아래에 0.1mm의 K-형 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 자연 연소 상태에서 화염구조를 관찰하기 위해, 초기 연료표면으로부터 40mm 떨어진 위치에서 CO, CO<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. CO와 CO<sub>2</sub> 가스농도 측정에는 IR형 분석기가 사용되었고, O<sub>2</sub> 가스의 농도 분석에는 상자성 방식의 분석기를 사용되었다. Pool 화재 위에 분사되는 분무수의 제적을 가시화하기 위해 Ar-Ion 레이저 시트(sheet) 광이 사용되었다. 이 레이저 시트광은 plume의 중심축을 지나간다.

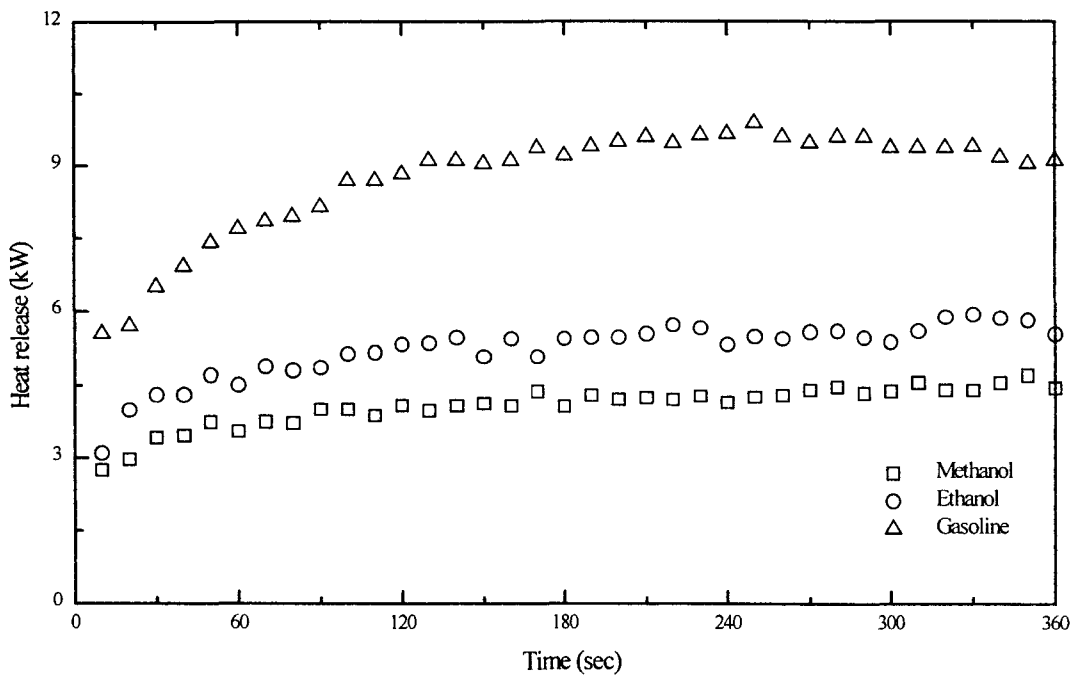
### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 자연 연소(freely burning)

Pool 화재의 가시 화염형상(visible flame shape)은 Fig. 3에서 보여지는 것처럼 연료에 따라 달라진다. 비데오 녹화의 관찰에 의하면, 메탄올과 에탄올의 화염형상이 시간에 따라 확연하게 변화되는 것이 관찰된다. 메탄올과 에탄올의 경우, 얇은 화염 편들이 파형 형태로 연료



(a) (a) Freely burning rate of fuels



(b) (b) Heat release of the fuels

Fig. 2. Freely burning rate and heat release of the fuels.

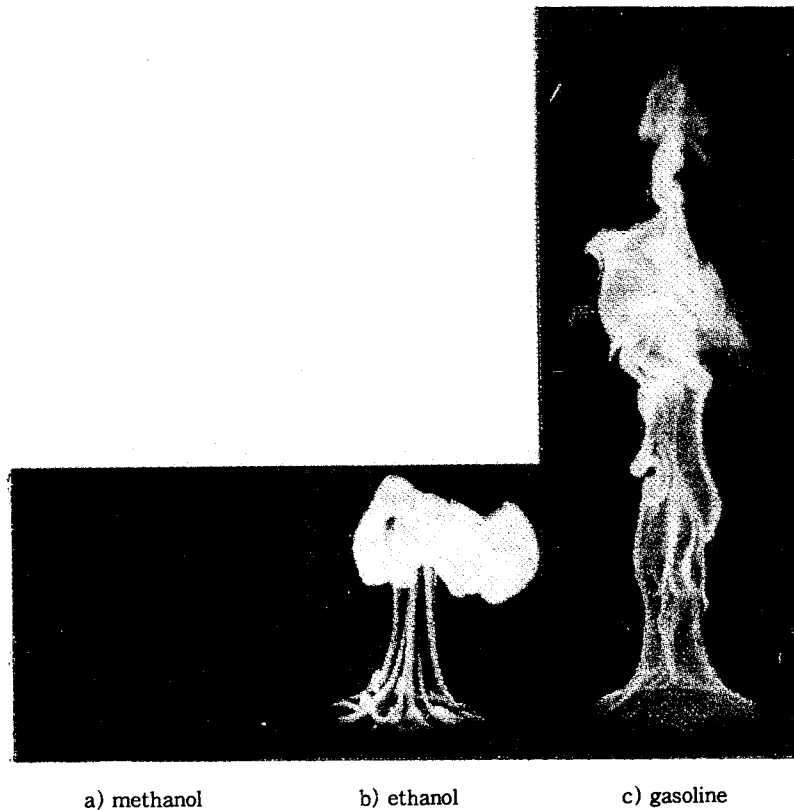


Fig. 3. Flame shape of the fuels.

표면을 가로질러 반경방향으로 주기적으로 움직이는 것이 관찰되며, 비데오 녹화분석에서 얻어진 변동주기는 3Hz 근방으로, 이전의 연구와 잘 일치한다<sup>6)</sup>. 가솔린의 화염 형상은 다른 연료들과는 다른 형상을 가지는 것이 관찰되었다. 연소 초기에는 가솔린 화재 역시 메탄올과 에탄올의 경우처럼 변동을 하지만 정상상태에서는 Fig. 3의 형상과 같이 화염대의 기부가 pool의 림(rim)에 부착되었다.

화염대의 위치는 연료의 이론공연비(stoichiometric air-fuel ratio)와 관련이 있을 것이다<sup>7)</sup>. 큰 이론공연비를 가지는 가솔린의 경우, 연소의 초기에는 연료의 증발율이 작아서 작은 양의 연소용 공기가 사용되기 때문에 메탄올과 에탄올의 화염형상과 유사하게 유지되나, 시간이 경과함에 따라 연료의 온도가 상승하고, 연료의 증발량이 또한 증가되어 많은 연소 공기량이 필요하

게 되어서, 화염대 위치가 연료팬 중심으로부터 바깥쪽으로 이동된다. 이와는 반대로 적은 이론공연비를 가지는 다른 연료의 경우, 화염이 연료 표면에 매우 가깝게 위치하고 있다. 화염의 위치에 관한 정보는 pool의 중심에서 초기 연료표면보다 10mm 상부의 위치에서 화염온도 측정으로부터 관찰될 수 있다. Fig. 4는 메탄올과 에탄올의 화염온도가 평균값이 800℃인 근방에서 변동하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이 위치에 화염대가 존재하고 있음을 확인시켜준다. 반면에 가솔린의 온도는 점화 후 70초 지난 후에 200℃근방에서 일정하게 되는 것을 보여준다. 이것은 가솔린 화염이 윗쪽으로 움직였다는 것을 의미한다. 이러한 화염대의 위치에 대한 사실은 농도 측정으로부터 또한 확인된다. Fig. 5에서 보이는 것처럼, 메탄올과 에탄올의 O<sub>2</sub> 농도가 가솔린의 것보다 높다. 메탄올과 에탄올의 경우 연소공기가

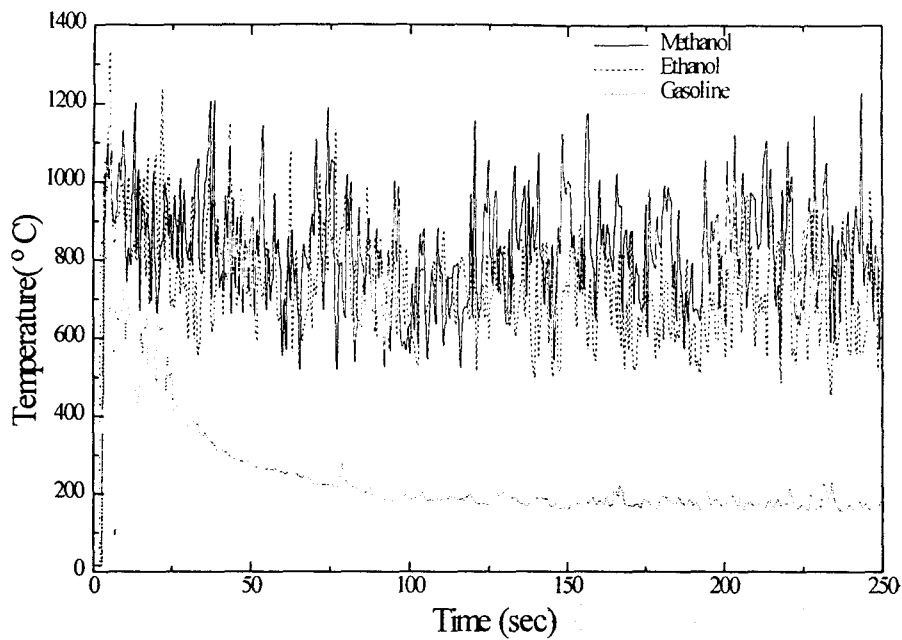


Fig. 4. Flame temperature at 10mm above the initial surface.

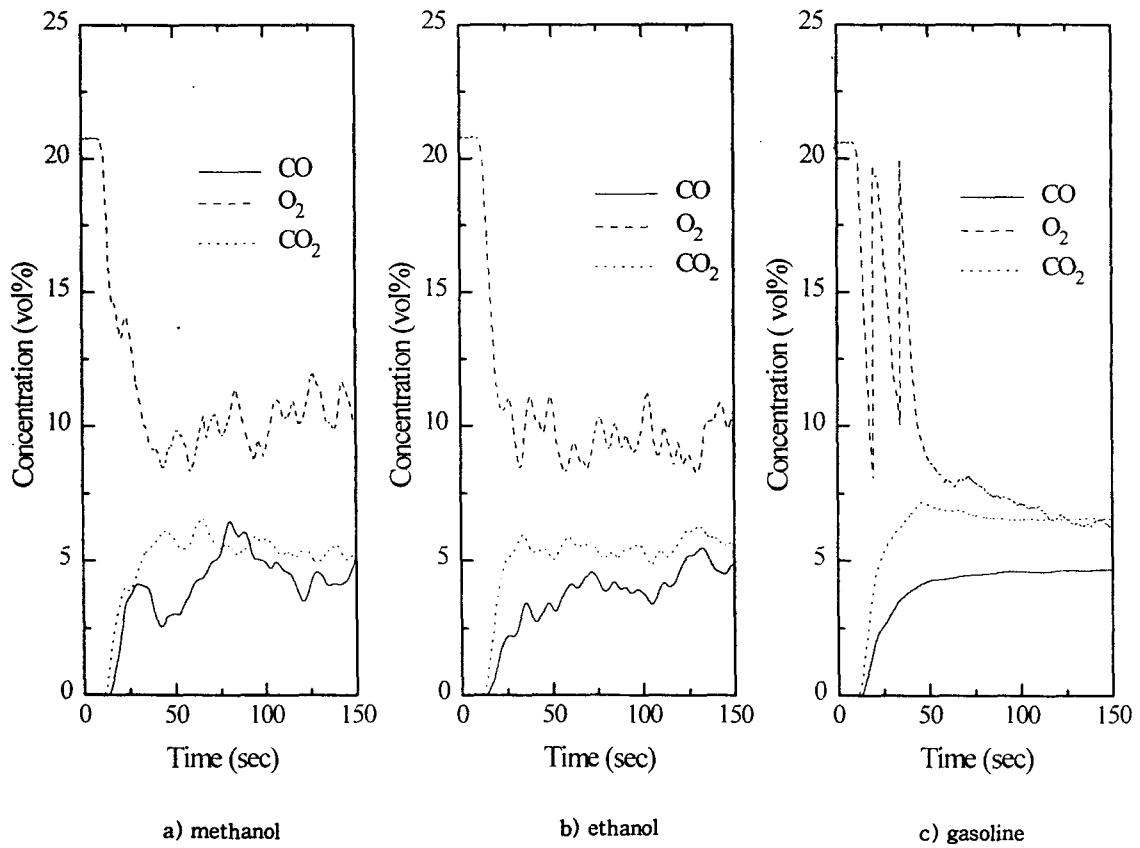
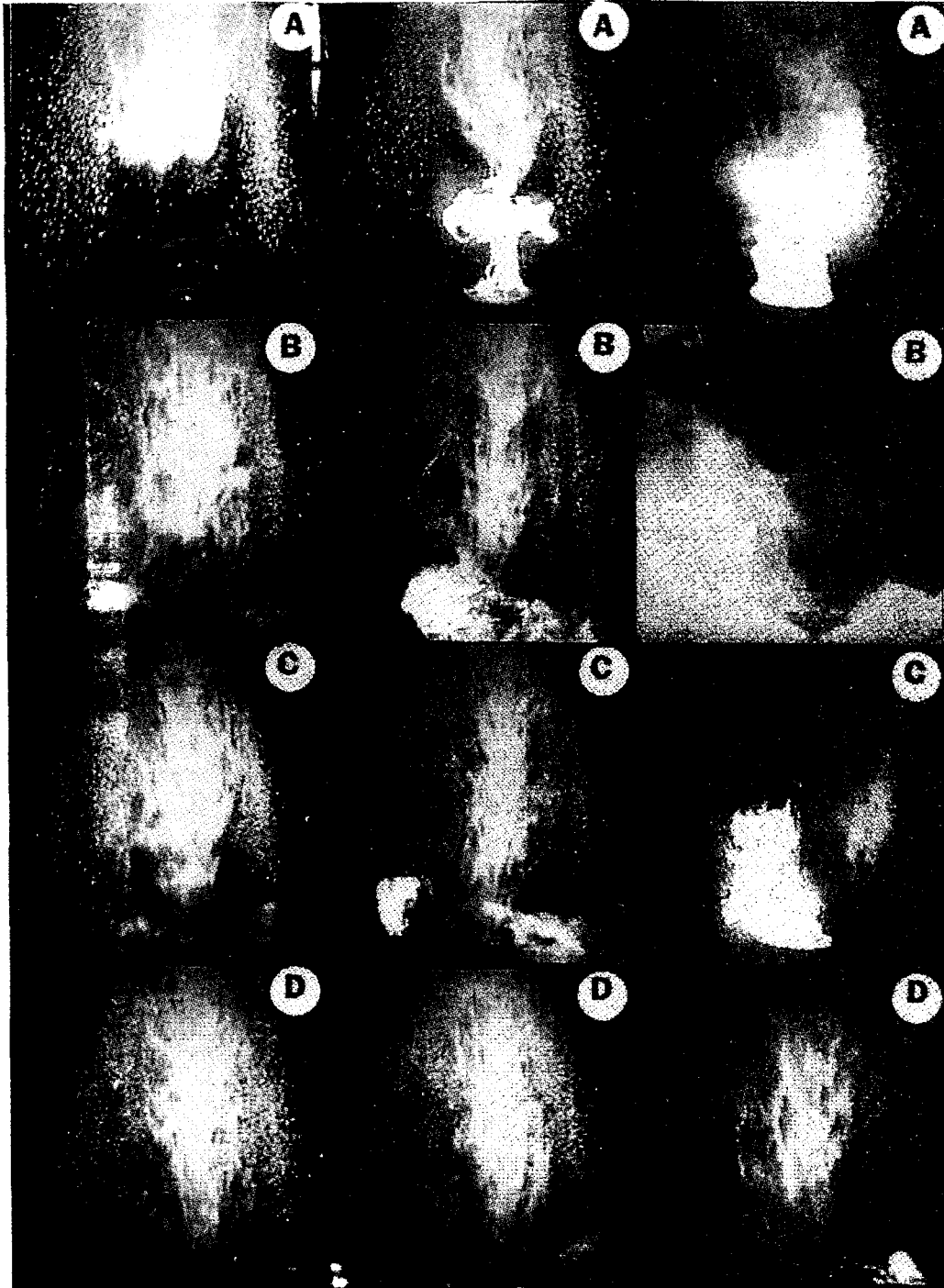


Fig. 5. Concentration of gases at 40mm above the initial fuel surface.



a) methanol

b) ethanol

c) gasoline

Fig. 6. Extinguishment process of the fuels with the mists.

변동운동에 의해 plume의 중심으로 계속적으로 공기가 유입되기 때문이다. 반면에 가솔린의 경우 산소를 공급하는 변동운동이 없기 때문에 낮은 산소 농도를 가지는 것으로 생각된다.

### 3.2 분무수와 plume의 상호작용

Fig. 6은 분무수에 의한 각 연료의 소화과정을 보여주고 있다. Fig. 6 a)와 b)는 메탄올과 에탄올의 경우로, 소화과정의 전과정 동안 분무수가 유동 경로에 왜곡없이 연료표면 까지 도달되고 있음을 보여주고 있으며, 화재는 곧 소화된다. Fig. 6 c)에서 보여진 가솔린의 경우, 다른 연료와는 달리 분무입자의 궤적이 많이 왜곡된 것이 관찰된다. 분무수의 연료표면의 도착은 분무되는 분무수의 운동량과 plume의 부력 관계에서 결정될 것이다. 실험에서 분무수의 운동량이 일정하기 때문에 plume의 부력이 분무수의 연료표면 쪽으로 관통을 결정하는 지배변수가 된다. 실험에 사용된 연료 가운데 가솔린의 열발생율이 가장 큰 값을 가지므로 가장 큰 부력을 가진다. 따라서, 가솔린 경우 강한 부력이 분사되는 물입자의 왜곡을 일으켜 연료표면의 직접적인

냉각을 지연시키는 역할을 하고, 연료에 물입자의 축적에 의한 냉각으로 화재가 소화되는 것으로 이해된다.

분무수로부터 연료표면의 냉각효과를 관찰하기 위해 초기 연료표면 보다 2mm아래의 위치에서 온도를 측정하였다. Fig. 7에서 보는 것처럼 연료온도가 시간에 따라 천천히 증가되어 끓는 점(boiling point)에 도달된다. 메탄올과 에탄올의 경우, 분무수가 연료표면에 도착하자마자 연료의 온도가 끓는 점 아래로 급격하게 떨어지고, 화재가 소화되는 것이 나타난다. 가솔린 화재에 분무수가 분사될 경우 연료의 온도가 비록 감소하지만 소화점까지의 신속한 감소는 관찰되지 않는다. 즉, 분무수의 관통력과 plume의 부력의 상호관계에 의해 분무수가 연료표면으로 간헐적으로 도착되며, 분무수가 도달되면 온도의 신속한 감소가 이루어진다. 이러한 현상은 연료표면에 도달되는 유효 분무수 flux가 액체연료의 pool 화재 소화에 중요한 요소이고, 연료표면의 냉각에 의해 소화되는 것을 보여주고 있다. 연료가 가솔린인 경우, 연료 팬과 노즐사이의 거리가 멀어질수록 연료 표면 상에 유효 분무수 flux의

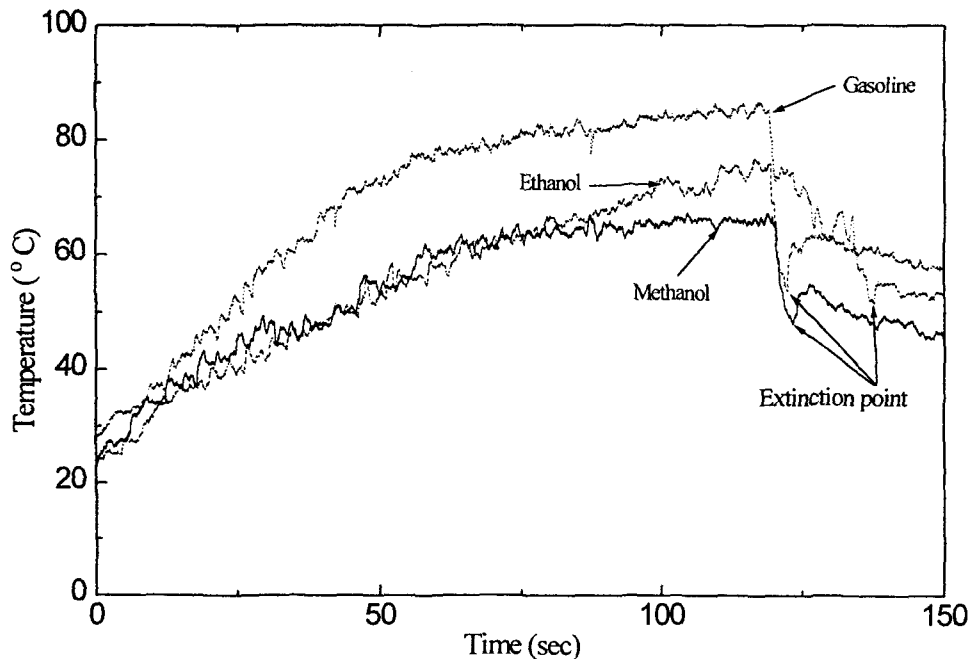


Fig. 7. Temperature of the fuel surfaces.



양이 많이 요구된다는 사실이 알려져 있다<sup>4)</sup>. 가솔린과 물의 혼합물이 분리되는 성질을 이용한 유효 분무수 flux의 측정 방법을 메탄올 및 에탄올과 물의 혼합물에는 적용할 수 없지만<sup>4)</sup>, 연료 표면 온도 측정의 결과에서 연료의 종류에 의해서도 유효 분무수 flux의 양이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 또한 터인 공간 내에서 pool 화재 소화 기구가 액체연료 표면의 냉각에 의해 이루어지므로 연료표면의 온도가 소화효율을 나타내는 직접적이고도 일반적인 측정치로 사용될 수 있다는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 언

본 연구에서는 화재 plume과 분무수와 의 상호 작용을 조사하기 위해 메탄올, 에탄올 및 가솔린의 연료에 대해 여러 가지 측정과 가시화를 수행하였고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 가솔린 화염은 pool의 rim에 위치하는 반면에 다른 연료들은 연료표면 근처에 부착되어 있다. 이러한 현상은 화염대의 위치가 이론공연비(stoichiometric air-fuel ratio)에 의존하는 것으로 사료된다.
2. 화재 plume을 관통하는 분무수의 상태가 화재의 heat release에 따라 달라지는 것을 가시화된 사진으로부터 확인할 수 있었다.
3. 연료 표면의 냉각이 증발을 억제시켜 화재의 소화를 야기하는 것을 확인하였다.
4. 소화 효율의 척도로써, 연료 표면 온도가 터인 공간 내에서 pool 화재 소화를 설명하는 직접적이고도 일반적인 측정치로 사용할 수 있다.

#### REFERENCES

1. B. Downie, C. Polymerpoulos and G. Gogos, "Interaction of a Water Mist with a Buoyant Methane Diffusion Flame", Fire Safety Journal 24. (1995) pp359-381.
2. M.B. Kim, Y.J. Jang and J.K. Kim, "Burning rate of a pool fire with a buoyant methane diffusion flame", Fire Safety Journal 28. (1997) pp37-48.
3. M.B. Kim, Y.J. Jang and J.K. Kim, "Experiments of the interaction between water sprays and fire plumes", In The Proceedings of the International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hawaii, Vol.2, 1995, pp529-536.
4. M.B. Kim, Y.J. Jang and M.O. Yoon, "Extinction Limit of a Pool Fire with a Water Mist", Fire Safety Journal 28. (1997) pp295-306.
5. C. Ndubizu, D.E. Rammarker, P.A. Tatem and F.W. Williams, "A Model of Freely Burning Pool Fires", Combustion Science and Technology 31. (1983) pp233-247.
6. A. Hamins, J.C. Yang and T. Kashwagi, "An Experimental Investigation of the Pulsation Frequency of Flames", 24th Symposium on Combustion, (1992) pp1695-1702.
7. A. Hamins, M.E. Klassen, J.P. Gore, S.J. Fischer and T. Kashwagi, "Heat Feedback to the Fuel Surface in Pool Fires", Combustion Science and Technology 97. (1994) pp37-62.