

Con-heater를 이용한 인화성액체의 연소특성에 관한 연구

박형주* · 김 홍 · 정기창 · 이정윤*

호서대학교 안전시스템공학과 · *호서대학교 안전공학과 대학원

1. 서 론

대부분의 고체와 액체의 연소는 고체의 열분해에 의해 생성되는 가연성 기체나 액체의 증발에 의한 가연성증기가 공기중에 확산되는 형태의 확산연소이다. 이런 확산연소에서 연소속도를 지배하는 요소는 연료와 산화제의 확산속도이며 고체와 액체 연료의 경우 기체상태의 열분해 생성물이나 증기의 생성속도가 연소속도에 영향을 미치는 요소가 된다. 이러한 형태의 연소에서 연료와 산화제의 공급상태에 따라 발열량 및 화염의 형태 등이 영향을 받게 된다. 화재에서 화재의 확대에 영향을 미치는 요소들 중에 화염의 높이와 복사열 에너지 등이 있다.

액체 연료의 연소현상에 대한 연구를 살펴보면 Akita.K, Hirano.T, 등은 메탄올을 이용하여 가연성액체의 온도에 따른 액체표면에서 연소확산 현상들을 연구하였으며, Blinov.V. 등은 Pool fire에서 액면 강하속도와 용기직경과의 관계를 열전달 현상과 관련하여 연구하였다. Nakamura, M, 등은 석유탱크화재에서 화염에 의한 복사열에 의한 열전달 현상들을 연구하였다. 또 B.J.Mccaffiey 와 G.Heskestad 등은 Pool fire 등에서 연소발열량과 화염높이의 상관 관계를 구하고자 연구하여 많은 결과들을 도출하였다. 본 연구에서는 ASTM 1354의 규격을 만족하는 con-heater를 제작하여 외부 복사열량을 $15\sim 35\text{kw/m}^2$ 의 범위내에서 변화시켜 가면서 $\Phi 100\text{mm}\times 20\text{mm}$ 인 스테인레스 재질의 용기 내에 헥산, 헵탄, 아세톤, 메탄올 등의 인화성액체를 일정량(50g) 주입 후 외부 복사열량의 크기와 인화성액체의 종류에 따른 연소특성 (화염의 크기, 연소율, 점화특성 등)을 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1 실험장치

가. 용기

인화성액체의 종류에 따른 연소특성을 측정하기위해 사용된 용기는 직경100mm, 높이 20mm인 스테인레스 재질로 내 표면적은 78.54cm^2 이다. 사용된 인화성액체의량은 매 실험별 50g으로 동일하게 하였다.

나. Con-heater 및 온도조절장치

인화성액체에 일정한 Heat Radiation Flux를 주기위해 ASTM E 1354 6.2항(Conical Heater)과 6.3항(Temperature Controller)에 적합한 Con type의 Heater와 온도조절장치를 이용하여 인화성액체를 담은 용기에 $15\sim 35\text{kW/m}^2$ 의 복사열을 공급하는데 사용하였다.

다. Radiation Heat Flux Sensor

Con-heater로부터 방출되는 복사열을 측정하기 위해 Medtherm 사의 Digital Heat Flux Meter (Model 5H203-DR1)와 Radiation Heat Flux Sensor(측정범위 : 0~100kw/m²)를 사용하였다. Sensor의 위치는 Con-heater의 하부로부터 2.54cm(1 inch)로 온도조절장치에 의해 Con-heater가 설정온도에 도달 후 30분 이상 연속 측정하였다.

라. 기타 실험장치

인화성액체의 연소속도를 측정하기 위해 전자저울을 사용하였으며, 화염 형성 및 크기를 측정하기 위해 비디오카메라를, 그리고 연소시간을 측정하기 위해 Stop-watch를 사용하였다. 또한, 화염의 온도를 측정하기 위해 K-type의 열전대와 온도기록장치를 사용하였다.

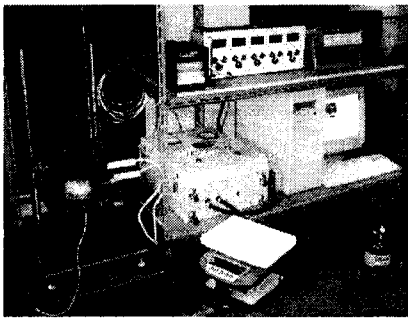


Fig. 1. Experimental Apparatuses

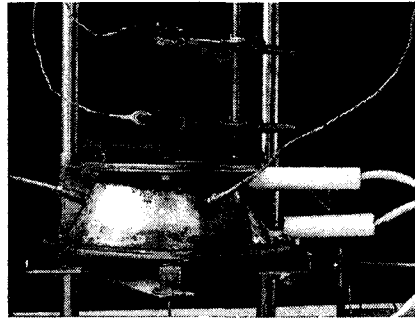


Fig. 2. Con-heater and Heat Flux Sensor

2-2 실험시료

본 연구에서 사용된 인화성액체에 대한 종류 및 특성은 Table 1.과 같다.

Table 1. Characteristic of flammable liquid

품 명	분자식	발열량(MJ/Kg)		B.P (°C)	인화점 (°C)	발화점 (°C)	비 중
		고발열량	저발열량				
Methyl Alcohol	CH ₄ O	22.68	19.94	64.8	11	385	0.79
Hexane	C ₆ H ₁₄	48.31	44.74	68.7	-22	233.9	0.66
Heptane	C ₇ H ₁₆	48.07	44.56	98.4	-6	412	0.69
Acetone	C ₃ H ₆ O	30.83	28.56	56.5	-17.7	537.8	0.80

2-3 실험방법

가. 인화성액체의 pool fire 실험

실험시료를 100mm 용기에 50g를 넣고, pilot flame으로 점화 시킨 후 전자 저울로 연소시간에 따른 시료의 중량 변화를 2초 간격으로 측정하고, 용기의 표면으로부터 상부로 10cm, 20cm 지점에 K-type의 열전대를 설치하여 화염의 온도를 2초 간격으로 측정

하였다. 또한, 화염의 크기를 측정하기 위해 비디오카메라를 이용하여 연소시간동안 촬영한 후 영상편집기를 이용하여 화염의 크기를 측정하였다.

나. Con-heater를 이용한 인화성액체의 pool fire 실험

Con-heater 온도 조절장치를 이용하여 Con-heater를 설정온도까지 상승 시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사 열량을 Medtherm 사의 Digital Heat Flux Meter (Model 5H203-DR1)와 Radiation Heat Flux Sensor를 이용하여 측정한 후 50g의 실험시료를 담은 100mm 용기의 상부가 Con-heater 하부로부터 25.4mm(1 inch) 위치에 놓고, 각 설정온도에서의 발화개시 시간과 연소시간, 시료의 중량변화를 2초 간격으로 측정하였다.

이때 K-type의 열전대를 시료용기의 상부에 1개, Con-heater의 상부로부터 10cm, 20cm 위치에 각각 1개씩을 설치하여 복사열과 화염으로부터 방출되는 온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 인화성액체의 종류에 따른 연소시간

직경이 100mm인 실험용기에 Table 1.에 나타난 시료를 50g씩 담은 후 실온 (23℃, 습도 70%), 실내(풍속 0.01m/s)에서 pilot flame을 이용하여 착화 시킨 경우와 Con-heater를 이용하여 각 설정온도에서의 외부 착화원이 없이 복사열에 의해 자연발화 시킨 경우의 연소시간을 측정결과는 Table 2.와 같다.

Table 2. Burning times according to external heat flux

품 명	pilot flame 으로 착화	복사열에 의한 발화의 경우(kW/m ²)			
		16.6	21.8	26.6	35.3
Methyl Alcohol	548	286	242	210	178
Hexane	360	미발화	104	86	72
Heptane	367	미발화	112	98	84
Acetone	445	미발화	미발화	122	102

Table 2.의 연소시간으로부터 실온, 실내에서 pilot flame과 복사열을 이용하여 pool fire 실험을 진행하였을 때 연소시간이 Table 1.에 명시된 인화성 액체의 고발열량 및 진발열량과 깊은 관계가 있음을 알 수 있다.

3-2 인화성액체의 종류에 따른 연소속도

직경이 100mm인 실험용기에 Table 1.에 나타난 시료를 50g씩 담은 후 실온(23℃, 습도 70%), 실내(풍속 0.01m/s)에서 pilot flame을 이용하여 착화 시킨 경우와 Con-heater를 이용하여 각 설정온도에서의 외부 착화원이 없이 복사열에 의해 자연발화 시킨 경우의 연소속도를 측정결과는 Table 3.와 같다.

Table 3. Burning rate according to external heat flux

품 명	pilot flame 으로 착화	복사열에 의한 발화의 경우(kW/m ²)			
		16.6	21.8	26.6	35.3
Methyl Alcohol	5.5	10.5	12.4	14.3	16.9
Hexane	8.3	미발화	28.8	34.9	41.7
Heptane	8.2	미발화	26.8	30.6	35.7
Acetone	6.7	미발화	미발화	24.6	29.4

Table 3.의 연소속도로부터 실온, 실내에서 pilot flame과 복사열을 이용하여 pool fire 실험을 진행하였을 때 연소속도도 연소시간과 마찬가지로 인화성 액체의 고발열량 및 진발열량과 깊은 관계가 있음을 알 수 있다.

3-3 복사열에 의한 발화시간

Con-heater를 이용한 발화 실험을 2.3항 나.의 방법에 따라 측정한 결과는 Table 4.와 같다.

Table 4. Auto-ignition time according to external heat flux

품 명	복사열(kW/m ²)			
	16.6	21.8	26.6	35.3
Methyl Alcohol	22	10	4	2
Hexane	미발화	20	4	0
Heptane	미발화	24	8	0
Acetone	미발화	미발화	18	2

복사열을 이용한 인화성액체의 발화 실험의 결과로부터 알 수 있는 것은 발화시간이 대체적으로 발화점의 높고 낮음과 연관됨을 알 수 있으나, 특이한 점은 Methyl Alcohol이 Hexane보다 발화점이 높으나 복사열을 이용한 실험에 있어서는 더 낮은 복사열에서 발화가 시작됨을 알 수 있었다. 또한 복사열이 35.5kW/m²에서는 인화성 액체의 종류에 관계없이 즉시 발화가 발생함을 알 수 있었다.

3-3 복사열과 중량변화와의 관계

Fig. 3~ Fig. 6는 복사열의 증가에 따른 각 인화성액체의 중량변화 곡선을 나타낸 것으로 Fig. 3의 Methyl Alcohol과 Fig. 6의 Acetone의 경우 복사열의 증가에 따라 중량 감소율이 일정한데 비해 Fig. 4의 Hexane과 Fig 5.의 Heptane은 연소초기에는 완만한 감소를 보이다가 어느 정도 시간이 지나면 중량변화가 급격하게 일어남을 알 수 있다. 이는 각 인화성액체의 B.P의 특성에 의해 좌우되는 것으로 판단된다.

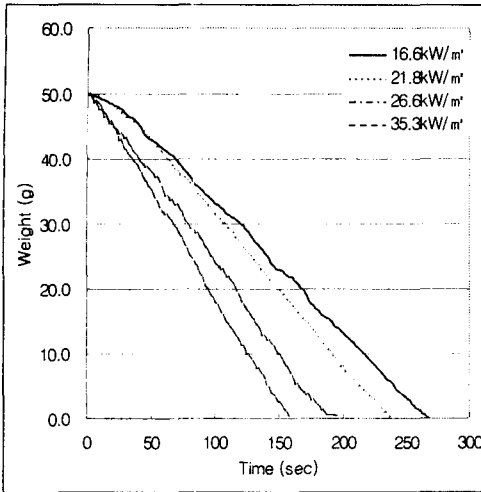


Fig. 3 Mass loss rate of Methyl Alcohol with external heat flux

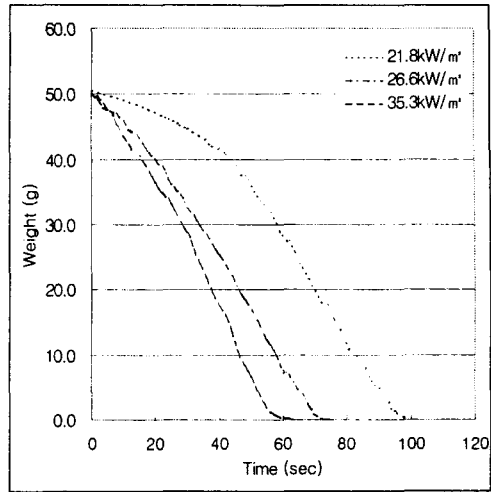


Fig. 4 Mass loss rate of Hexane with external heat flux

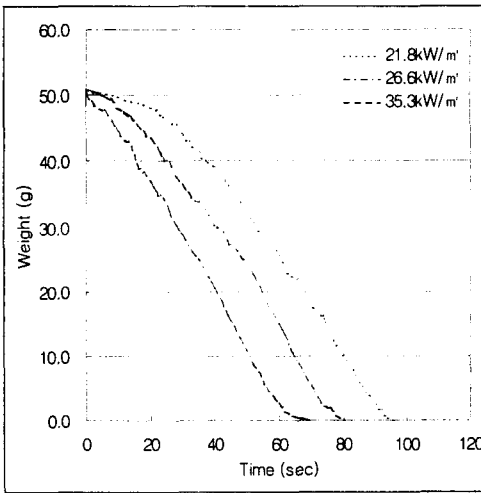


Fig. 5 Mass loss rate of Heptane with external heat flux

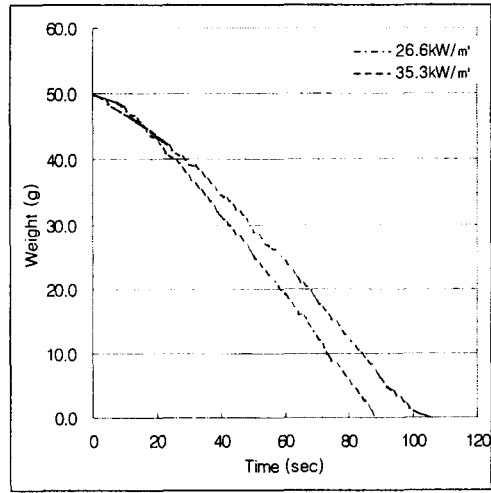


Fig. 4 Mass loss rate of Acetone with external heat flux

4. 결론

외부 복사열량의 크기와 인화성액체의 종류에 따른 연소특성(화염의 크기, 연소율, 점화특성 등)을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 외부 복사열의 세기에 따른 인화성액체의 시간은 각 인화성 액체의 고발열량 및 진발열량과 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
2. 자연발화를 유발시키는 초기 복사열에서의 연소시간은 pilot flame에 의한 대기 중 pool fire에 의한 연소시간 보다 약 3배 이상 빠름을 알 수 있었다.

3. 인화성액체중 Hexane의 경우 B.P가 가장 높지만, 연소속도가 가장 빠른 이유는 연소시 발생하는 발열량이 크기 때문에 용기를 통한 열전달 및 액체내부로의 복사열 전달이 크기 때문인 것으로 판단된다.
4. 외부 복사열이 35.5kW/m^2 이상에서는 인화성액체의 종류에 관계없이 즉시 발화가 발생함을 알 수 있었다.
5. 외부 복사열에 의한 질량감소는 Methyl Alcohol과 Acetone의 경우 거의 일정한 반면 Hexane과 Heptane의 경우에는 연소가 진행됨에 따라 급격히 감소함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter, ASTM E 1354-92
- 2) V. I. Blinov and G. N. Khudyakov, T-1490 a-c, U.S. Army R&D Laboratories, Fort Belvoir, 1961.
- 3) G, Heskestad, F. Safety J., 5, 103, 1983
- 4) B.J. McCaffrey, Momentum Diffusion Flame Characteristics and the Effect of water Sprays, NBSIR 86-3442, National Bureau of Standards, Washington, 1986.
- 5) B.J. McCaffrey and D.D.Evans, Very Large Methane Jet Diffusion Flames, 21st Combustion Symposium, Munich, 1986.
- 6) Blinov, V.I., Khudyakov (reviewed by Hottel, H. C.): Fire Research Abstracts Revs., 1, 41, 1959.
- 7) Akita, K., Yumoto, T. : 10th Symposium (International) on Combustion, p. 943, The Combustion Institute, 1965.