

플 화재의 연소 특성에 관한 연구

오규형, 나선중, 이성은
호서대학교 소방학과 소방학과

A Study on the Characteristics of Pool Fire

Kyu-hyung Oh, Sun-jong La, Sung-eun Lee
Dept. of Fire protection Eng. Hoseo Univ.

1. 서론

현대사회는 공업과 기술의 발달로 생활의 편리함을 누릴 수 있는 반면 이로 인한 재난·재해의 피해 또한 피하기 어려운 실정이다. 특히 석유화학공업의 성장과 발전에 따라 사회전반에 걸쳐 탄화수소 및 유기용제의 사용이 크게 증가 되어서 가연성 액체에 의한 대형화재의 위험성이 높아지고 있는 상황이다.

일반적으로 유기 용제류는 휘발성이 높고 인화가 용이하고 일단 발화하면 급격하게 화재로 확대될 수 있으며, 밀폐공간에서 발생된 증기는 착화원에 의해 폭발을 일으킬 수도 있으며 실제로 제조, 저장, 취급 및 사용 중의 부주의로 인해 대기 중 누출사고가 많고 이로 인한 화재·폭발 사고 등이 자주 발생하고 있는 실정이다. 이와 같은 가연성 액체의 화재 및 폭발 사고를 예방하기 위해서는 현장에서 취급하고 있는 위험성 물질에 관한 기본적인 물성치를 정확하게 파악하여 근본적인 예방대책을 강구하여야 하며, 특히 가연성 액체의 경우에는 위험성의 지표인 연소특성을 파악하는 것은 대단히 중요하다. 연소의 특성을 평가하기 위한 주요 변수로는 연소속도(Combustion velocity), 화염전파속도(Flame propagation velocity), 화염도달시간(Flame arrival time), 화염온도(Flame temperature) 등이 있다.¹⁾ 또한 연소현상을 분류하는 방법은 연료와 산화제의 혼합형태에 따라 예혼합 연소와 확산연소로 나눌 수 있으며 확산연소에서 연소속도를 지배하는 요소에는 연료와 산화제의 확산속도가 있고, 연소에서 연료와 산화제의 공급 상태에 따라 발열량 및 화염의 형태 등이 영향을 받으며, 또한 화재 시 화재의 확대에 영향을 미치는 요소 중에는 화염의 높이와 복사열에너지 등이 있다.²⁾

본 연구는 메탄올, 아세톤, 헵탄, 헥산을 시료로 용기의 크기(직경) 및 재질(스테인레스, 동), 연료의 종류에 따른 연소속도, 화염높이, 화염의 공기 유입에 따른 플룸의 와류 생성 주기 등의 변화를 측정하고 해석하여 가연성 액체 Pool fire의 연소특성을 고찰하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험 시료

본 연구에 사용한 시료는 Table 1과 같이 인화성이 강하고 발열량이 커서 화재의 위험성이 큰 4종류의 인화성 액체를 선택하여 사용하였다.

Table 1. Characteristic of flammable liquid fuel

품명	분자식(분자량)	발열량 [MJ/Kg]		B.P[°C]	인화점[°C]	발화점[°C]
		고발열량	저발열량			
Methyl Alcohol	CH ₄ O (32.04)	22.68	19.94	64.8	11(52°F)	385
Acetone	C ₃ H ₆ O (58.09)	30.83	28.56	56.5	-17.7	537.8
Hexane	C ₆ H ₁₄ (86.17)	48.31	44.74	68.7	-22	233.9
Heptane	C ₇ H ₁₆ (100.2)	48.07	44.56	98.4	-6(21°F)	412(774°F)

2.2. 실험장치

실험에 사용한 용기는 Table 2와 같이 5종류로 각각 동과 스테인레스로 제작하였다. 용기부분의 온도변화 값을 측정하기 위하여 K type의 열전대를 사용하였고, 열전대에서 측정되는 온도의 변화 값은 Tempscan (software + hardware)를 사용하여 측정하였다. 또한 용기 내 연소 화염이 유지되고 있는 동안 방출되는 복사열을 Heat flux를 사용하여 측정하였고, 비디오카메라로 화염을 촬영한 후 이 영상 자료를 근거로 화염의 높이와 플룸의 와류 생성 주기를 분석하였다.

Table 2. Classification of poor fire size

용기직경 [mm]	50	100	200	300	400
표면적 [cm ²]	20	79	314	707	1,257
연료량 [ml]	10	40	157	354	629

2.3. 실험 방법

본 연구에서는 Pool fire에서 용기를 중심으로 용기의 온도변화, 연소시간, 열전달현상, 와류의 생성주기(Vortex shedding), 화염의 높이 등을 측정하기 위하여 다음과 같은 방법으로 실험을 하였다.

실험하기 전 실험실 내의 온도와 습도를 측정 기록하고, 실험 변수로는 용기의 직경, 시료의 종류를 선택하였으며, 용기의 직경 및 시료를 변화시켜 가면서 연소실험을 하였

다. 시료의 양은 액체 연료 층의 두께가 5 mm가 되도록 하였는데 이는 연료가 많아지는 경우 그을음의 발생이 너무 많아 처리가 어렵고 이 정도의 시료를 이용하여 안정된 상태의 값을 얻을 수 있을 것으로 기대하였기 때문이다. 시료를 용기에 넣은 다음 화염지속시간을 측정하고, 온도기록계 및 Data acquisition system을 작동하여 컴퓨터로 온도 및 열유속을 기록하였으며, 또한 비디오카메라로 촬영하여 촬영된 화염영상을 컴퓨터 프로그램을 이용하여 화염의 크기 및 와류생성주기를 분석할 수 있도록 하였다. 화염 높이 및 vortex shedding주기 측정 방법은 비디오카메라와 컴퓨터를 연결하여 화염영상을 캡처해서 화면의 픽셀을 통하여 화염의 크기를 측정하였고, 같은 장비를 이용하여 1frame을 1/30초로 분할하여 화염의 와류생성주기를 측정하였다.

Heat flux meter 설치 및 측정방법은 화염으로부터 용기직경에 1d되는 지점에 설치높이는 직경에 1d와 2d로 구분하여 2개($10[\text{w}/\text{cm}^2]$, $50[\text{w}/\text{cm}^2]$)의 센서를 사용하여 화염으로부터 방출되는 Heat flux를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 연소속도

가. 직경에 따른 연소속도(액면 강하 속도)

다음 Fig. 1은 헵탄과 헥산에 대한 용기직경에 따른 연소속도를 나타낸 것으로, 직경이 증가할수록 연소속도가 증가하는 현상을 보여주고 있는데 이것을 다르게 표현하면 용기의 직경이 증가할수록 액면 강하속도가 증가하였다고 할 수 있다. 이러한 현상은 직경이 작을 때는 용기벽면을 통한 전도의 영향이 크지만 직경이 클수록 복사열량의 영향이 커져 복사열의 증가로 인한 연소 속도증가를 알 수 있고, 직경이 증가할수록 벽면으로의 전도에 의한 열전달의 비율은 복사에 의한 열전달 비율에 비하여 감소하지만 연소속도가 증가하는 것은 직경 증가에 따라 난류정도가 커져 복사열의 전달량이 증가하기 때문인 것으로 보인다. Fig. 2에서 아세톤과 메탄올에 대한 연소속도에서는 직경의 증가에 따라 300[mm]와 400[mm]에서 약간 감소하는 현상은 헵탄이나 헥산과는 달리 화염의 복사열이 적고 용기의 직경에 비해 용기 벽면을 통한 열전달량이 적기 때문으로 생각된다.

나. 용기재질에 따른 연소속도

용기의 재질에 따른 연소속도를 알아보기 위해서 용기의 재질을 스텐레스 스틸 (STS)와 동(Cu)을 사용하여 4종류의 시료 연료에 대하여 실험한 결과도 Fig.1과 Fig.2에 나타내었는데 재질이 동인 경우 직경이 작을수록 연소속도가 스텐레스 스틸보다 빠른 것은 동이 스텐레스 스틸에 비해 열전도도가 크기 때문에 용기 벽을 통한 열전달의 영향 때문으로 생각된다. 이러한 현상은 Fig. 3에서 시료의 연소 중 동일한 용기의 동일한 부분에서 온도를 측정한 결과를 통해 확인 할 수 있다.

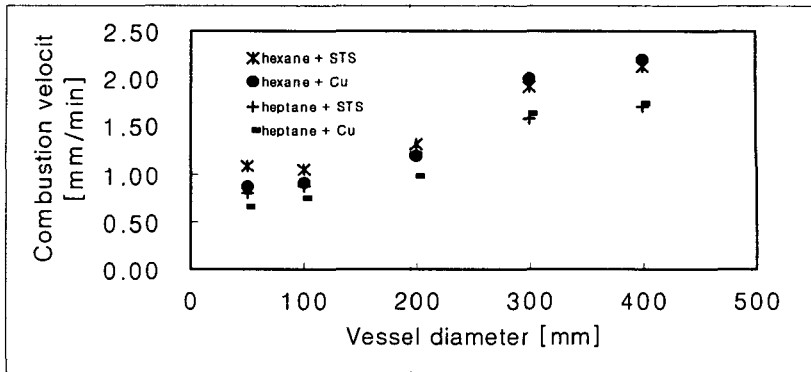


Fig. 1 Combustion velocity according to vessel diameter.

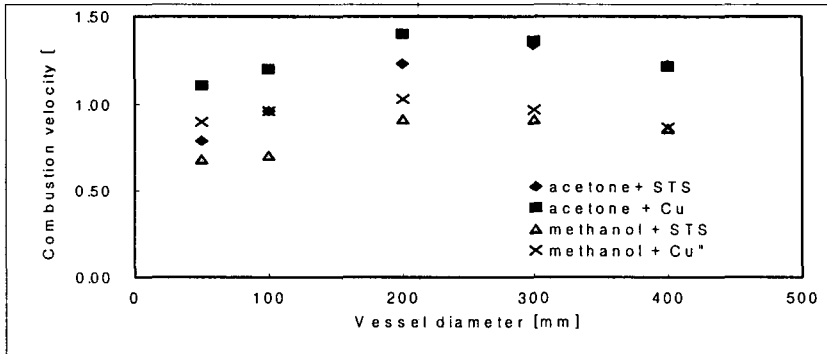


Fig. 2 Combustion velocity according to vessel material.

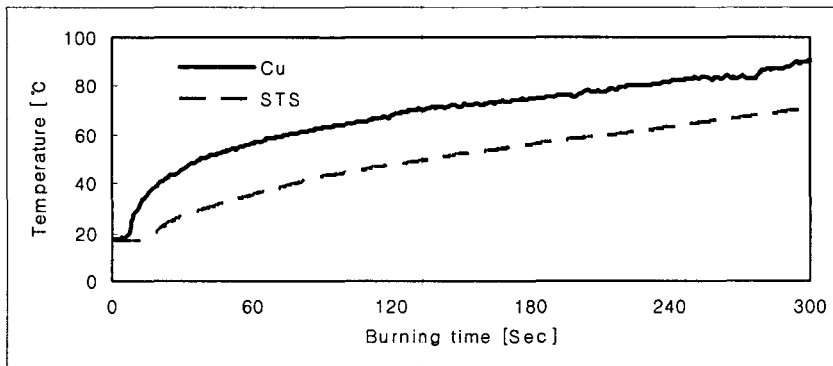


Fig. 3 Temperature change according to vessel material.

다. 발열량 및 비점에 따른 연소속도

다음 Fig.4는 직경 200mm의 용기에서의 각 시료 연료의 연소열과 연소속도를 비교한 것이다. 유사한 탄화수소 계열로 연료중에 산소 원자가 있어 복사열이 적은 메탄올과 아세톤을 비교해 볼때 연소열이 적은 메탄올의 연소속도가 낮고, 같은 포화 탄화수소인 헥산과 헵탄의 경우도 발열량이 약간 작은 헵탄이 연소속도가 낮은 것을 볼 수 있다. 이는

발열량이 적은 경우 연소시에 화염으로부터 연료로 전달되는 복사 및 대류에 의한 열전달량과 용기 벽면을 통한 열전달량이 작기 때문에 액체 연료의 증발 속도가 낮아지고 따라서 연소시간 길어지기 때문으로 생각할 수 있다. 또헵탄의 연소속도가 헥산보다 적은 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 연료의 비점도 관계가 있는 것으로 생각할 수 있는데 이는 헵탄과 헥산의 비교에서 두 연료간의 연소열 차이는 아주 적으나 비점은 헵탄에 비해 헥산이 약 30[°C] 정도 낮기 때문으로 생각된다.

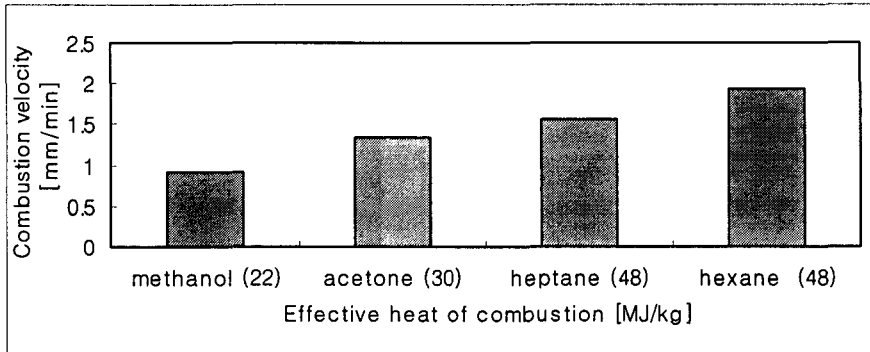


Fig. 4 Combustion velocity according to effective heat of combustion.

3.2. 화염높이 및 와류생성주기

가. 직경에 따른 화염높이

본 절에서는 용기직경에 따른 화염의 높이를 분석하기 위해 재질의 종류 및 용기직경에 따른 화염의 높이를 측정하였다. 4가지 시료 연료의 용기 직경에 따른 화염의 높이를 측정한 결과는 Fig.5와 Fig.6에 각각 나타내었다. 각각의 Fig.에서 보는 바와 같은 용기의 직경이 증가할수록 화염의 높이가 증가하는 경향을 보여주고 있으며 이 결과들은 Heskestad등이 연구한 결과 Pool fire에서 화염높이에 대한 실험식으로 계산한 값과 거의 유사함을 나타내었다. Heskestad는 Fr수가 크지 않은 Pool fire의 경우

$$L_f = 0.225 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D$$

따라서 화염의 높이 L_f 는 연소시 에너지 방출량 \dot{Q} 와 용기의 직경D에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 화염의 높이는 연소열량 \dot{Q} 가 작은 경우 직경의 증가에 따라 감소하지만 \dot{Q} 가 큰 경우는 직경보다 발열량의 영향이 증가하게 됨을 예측할 수 있다. 본 연구에 사용된 시료는 용기의 직경이 증가할수록 화염높이가 증가하였는데 이는 직경에 의한 영향보다 용기의 직경 증가에 따른 에너지 방출량의 영향이 크기 때문인 것으로 볼 수 있다. Fig.14에서도 각 연료의 에너지 방출량에 따라 화염 높이가 영향을 받는 것을 볼 수 있는데 에너지 방출량이 가장 작은 메탄올이 가장 낮고 아세톤 헵탄 헥산의 순서로 증가함을 알 수 있다.

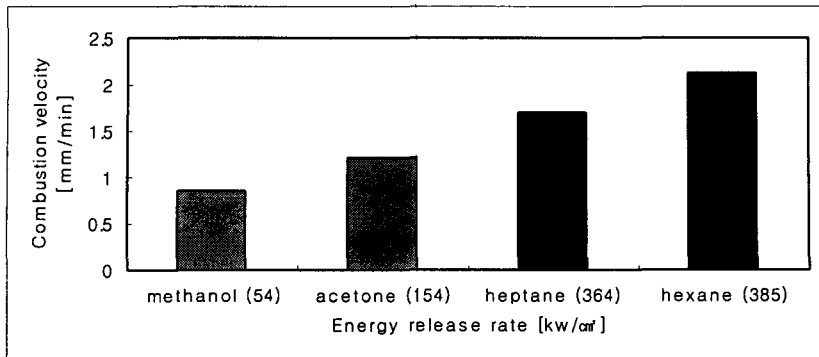


Fig. 5 Combustion velocity according to energy release rate.

나. 재질에 따른 화염높이

용기의 재질에 따라서 열전달이 잘되는 등의 경우 스텐레스 용기보다 화염의 높이가 약간 증가하는데 이는 열전달에 의한 연료의 증발 속도등 발열양이나 기화열등 보다 복잡한 변수가 화염의 높이에 관계가 있음을 뜻하는 것으로 생각된다.

다. 와류생성주기 및 Entrainment 현상

용기직경에 따른 와류생성주기를 측정하여본 결과 Fig. 6와 같이 직경이 증가할수록 와류생성주기가 증가하는 현상을 보여주고 있는데 생성 주기는 직경의 제곱근에 반비례하는데 본 연구에 실험결과와 비교적 일치하였다 이러한 현상은 용기의 직경이 증가할수록 연료 표면으로부터의 증발량이 증가하고 기화된 연료와 공기와의 혼합시간이 길어지고 따라서 기화된 연료의 연소반응 시간이 증가하기 때문이며 열부력에 의한 화염주위 공기의 entrainment 시에 용기의 직경이 증가할수록 화염주위의 공기와 증발된 연료와의 혼합에 시간이 걸리기 때문인 것으로 해석된다.

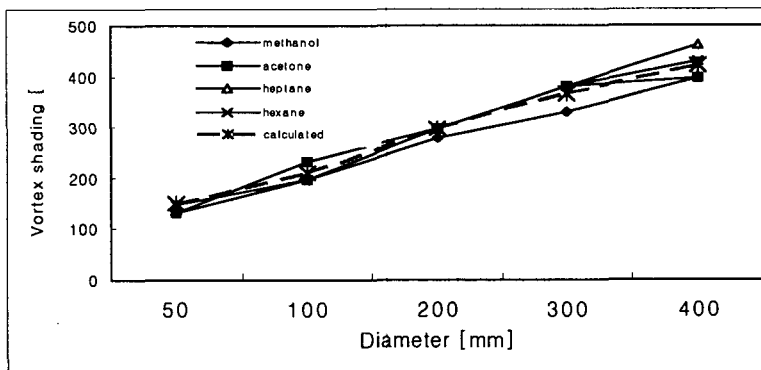


Fig. 6 Vortex shading frequency according to diameter and liquid fuel.

4. 결론

용기 내 가연성 액체 연료연소에 대한 Pool fire 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용기의 직경이 증가할수록 용기 벽면으로의 열전달보다 난류확산화염에 의한 복사열의 증가로 연소속도가 증가한다.
2. 화염의 높이는 용기의 직경이 증가할수록 증가하였으며, 재질의 종류에 따라서도 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.
3. 직경이 증가할수록 연소속도는 용기의 직경보다는 복사열에 영향을 미치는 발열량에 따라 큰 변화가 있었다.
4. 액면연소에서의 와류생성주기는 용기직경에 반비례하는 특성을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 平野佑敏저 오규형 역, : 연소학, pp 92 ~ 202 동화기술, 3. 1997
- [2] James G. Quintiere : Principles of fire behavior, p101 ~ p147, Delmar Publishers ITP , 1998
- [3] G, Heskestad, F. Safety J., 5, 103 (1983)
- [4] Akita, K., Yumoto, T.: 10th Symposium (International) on Combustion, p.943, The Combustion Institute (1965)
- [5] Nakamura, M., Koda, S., Akita K.:19th Symposium (International) on Combustion, p. 1395, The Combustion Institute. (1982)
- [6] Dougal Drysdale : An Introduction th Fire Dynamics, p114~p151, A Wiley-interscience Publication, Oct. 1996

4. 결론

용기 내 가연성 액체 연료연소에 대한 Pool fire 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용기의 직경이 증가할수록 용기 벽면으로의 열전달보다 난류확산화염에 의한 복사열의 증가로 연소속도가 증가한다.
2. 화염의 높이는 용기의 직경이 증가할수록 증가하였으며, 재질의 종류에 따라서도 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.
3. 직경이 증가할수록 연소속도는 용기의 직경보다는 복사열에 영향을 미치는 발열량에 따라 큰 변화가 있었다.
4. 액면연소에서 와류생성주기는 용기직경에 반비례하는 특성을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 平野佑敏저 오규형 역, : 연소학, pp 92 ~ 202 동화기술, 3. 1997
- [2] James G. Quintiere : Principles of fire behavior, p101 ~ p147, Delmar Publishers ITP , 1998
- [3] G, Heskestad, F. Safety J., 5, 103 (1983)
- [4] Akita, K., Yumoto, T.: 10th Symposium (International) on Combustion, p.943, The Combustion Institute (1965)
- [5] Nakamura, M., Koda, S., Akita K.:19th Symposium (International) on Combustion, p. 1395, The Combustion Institute. (1982)
- [6] Dougal Drysdale : An Introduction th Fire Dynamics, p114~p151, A Wiley-interscience Publication, Oct. 1996