

Pool 화재의 연소 특성에 관한 연구 A Study on the Characteristics of Pool Fire

오규형[†] · 나선종* · 이성은*

Kyu-Hyung Oh[†] · Sun-Jong La* · Sung-Eun Lee*

호서대학교 소방학과, *호서대학교 대학원 안전공학과
(2004. 7. 5. 접수/2004. 8. 12. 채택)

요 약

Pool 화재의 화염 거동을 알아보기 위하여 산업에서 많이 사용되는 가연성 액체인 아세톤, 메탄올, 헥산, 그리고 헵탄을 직경 50 mm에서 400 mm까지의 용기 내에 넣고 연소실험을 하였다. 용기의 재질은 스테인리스와 구리를 사용하였다. 연소시간과 용기 벽면의 온도 및 열유속 등을 측정하였으며 연소 시 화염의 거동은 비디오키메라를 이용하여 촬영하였다. 실험을 통해서 연소속도와 화염의 높이는 용기 직경의 증가와 함께 증가하였으며 화염의 와류 생성 주기는 용기 직경에 반비례하였다. 또한 pool 화재의 특성은 액체연료의 물리 화학적 성질과 용기의 재질에 의해서도 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This study is intended to understand flame behavior of the pool fire. Liquid fuels were acetone, methanol, hexane and heptane which are used in many industries. Diameter of vessel was varied from 50 mm to 400 mm and the vessel was made by stainless steel and copper. Combustion time, temperature of vessel wall and heat flux of flame were measured, and flame behavior was visualized with video camera. Based on the experiment, it was found that the burning velocity and flame height was increased according to increase of vessel diameter, and vortex shedding frequency was inverse proportion to vessel diameter. And the characteristics of pool fire were affected by physical and chemical properties of liquid fuel and the vessel materials.

Keywords : Pool fire, Burning rate, Heat flux, Flame height

1. 서 론

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 증가되면서 가연성 액체에 의한 대형화재의 위험성이 높아지고 있는 상황이다.¹⁾

일반적으로 유기 용제류는 휘발성이 높고 인화가 용이하며 일단 발화하면 급격하게 화재로 확대될 수 있으며, 특히 밀폐공간에서 발생한 증기는 착화원에 의한 폭발을 일으킬 수도 있으며 실제로 제조, 저장, 취급 및 사용 중의 부주의로 인한 누출사고로 인해 화

재·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 예방 대책을 강구하여야 하며, 특히 가연성 액체의 경우에는 위험성의 지표인 연소특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다.²⁾ 그동안 pool 화재에 대하여 많은 사람들이 연구하였으며 R. Buch, A. Hamins 등은 실리콘유의 pool 화재에 대한 복사열의 영향을 연구하였고³⁾ 일본의 Atsushi Nakakuki는 pool 화재시 열전달에 의하여 고온 영역이 형성되는 현상과 열전달 기구 등을 연구하였으며⁴⁾ H.R. Baum등은 fire plume의 전산 모사 등을 하였고⁵⁾ 캐나다의 E.J. Weckman등은 메탄올 pool 화재에 대하여 난류화염의 구조를 연구하였다.⁶⁾ 또한 J.M. Chatris등은 휘발유와 디젤을 시료로 시간에 따른

[†] E-mail: khoh@office.hoseo.ac.kr

Table 1. Characteristic of flammable liquid fuel

품명	분자식 (분자량)	발열량 [MJ/kg]		B.P [°C]	인화점 [°C]	발화점 [°C]
		고발열량	저발열량			
Methanol	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)

연소속도와 직경에 따른 연소속도 등을 실험하였으며⁷⁾ Hiroshi Hayasaka는 비정상 상태의 pool 화재에서 액체의 온도에 의한 연소속도 등을 연구하였다.⁸⁾

본 연구는 메탄올, 아세톤, 헥산, 헵탄을 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 화재의 연소특성을 고찰하고자 하였다.

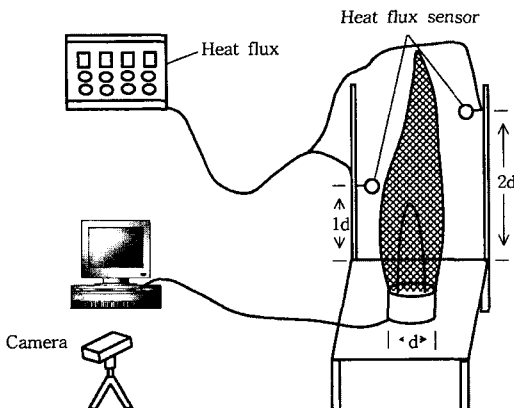
2. 실험장치 및 방법

2.1 시료

본 연구에 사용한 시료는 Table 1과 같이 인화성이 강하고 발열량이 커서 화재의 위험성이 큰 4종류의 인화성 액체를 선택하여 사용하였다. 이들 4종류의 시료를 선택한 이유는 발열량, 인화점, 비점 및 복사열이 pool 화재에 어떤 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 이들 특성이 다른 4종류를 선정하였다.

2.2 실험장치

실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같으며 그림에서 용

**Fig. 1.** Schematic diagram of experiment apparatus.**Table 2.** Classification of pool fire vessel size

용기직경[cm]	5	10	20	30	40
표면적[cm ²]	20	79	314	707	1,257
연료량[m]	10	40	157	354	629

기의 윗부분 격자무늬는 화염을 뜻한다. 실험에 사용한 용기는 동과 스테인리스강으로 제작하였으며 Table 2와 같이 총 5종류를 사용하였다. 용기는 직경 90 cm 까지 준비하였으나 실험실의 제약으로 40 cm까지만 실험하였다. 용기부분의 온도 변화 값을 측정하기 위하여 K type의 열전대를 사용하였고, 열전대에서 측정되는 온도 변화 값을 Tempscan(software + hardware)을 사용하여 측정된 실험값을 data화 하였다. 또한 용기 내 연소 화염이 유지되고 있는 동안 방출되는 복사열을 heat flux meter를 사용하여 측정하였고, 비디오카메라로 화염을 촬영한 후 이 영상 자료를 근거로 화염의 높이와 와류(vortex shedding)의 생성주기를 분석하였다.

2.3 실험 방법

본 연구에서는 pool 화재에서 용기를 중심으로 용기의 온도변화, 연소시간, 열전달현상, 와류(vortex shedding)의 생성주기 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 하였다. 시료의 양은 액체 연료층의 두께가 0.5 cm가 되도록 하였는데 이는 연료가 많아지는 경우 그을음의 발생이 너무 많아 실내에서 실험이 어렵고 이 정도 시료의 양으로 안정된 실험값들을 얻을 수 있었기 때문이다. 시료를 정확히 다음 스위치를 사용하여 화염지속시간을 측정하고, 온도기록계 및 data acquisition system을 작동하여 컴퓨터에 데이터 값을 기록하였으며, 화염 높이 및 와류의 주기 측정방법은

비디오카메라로 촬영한 영상을 컴퓨터와 연결하여 화염영상을 순간 포착해서 화면의 픽셀을 통하여 화염의 크기와 와류 생성주기를 분석하였다. 이때 1 frame을 1/30초로 분할하여 화염의 높이와 와류생성 주기를 정확하게 측정하도록 하였다.

Heat flux meter 설치 및 측정방법은 용기 외측으로부터 용기 직경만큼 떨어진 곳에서 높이는 직경에 1배와 2배되는 곳에 각각 1개의 센서를 설치하여 화염으로부터 방출되는 복사열의 heat flux를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소속도

3.1.1 직경에 따른 연소속도

다음 Fig. 2는 헵탄과 헥산에 대한 용기직경에 따른 연소속도를 나타낸 것으로, 직경이 증가할수록 연소속도가 증가하는 현상을 보여주고 있다. 본 연구에서 연소속도는 단위 시간당 연료의 액면이 강하하는 것으로 나타내고 있다. 즉 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 복사열 전달량이 증가하기 때문인 것으로 보인다. Fig. 3은 아세톤과 메탄올에 대한 연소속도로 직경의 증가에 따라 30 cm와 40 cm에서 감소하는 현상은 헵탄이나 헥산과는 달리 화염의 복사열이 적고 용기의 직경에 비해 용기 벽면을 통한 열전달량이 적기 때문으로 생각된다.

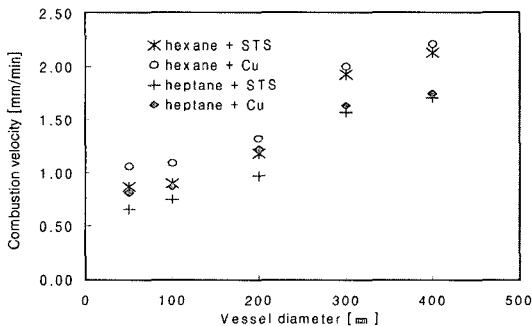


Fig. 2. Combustion velocity according to vessel diameter and material.

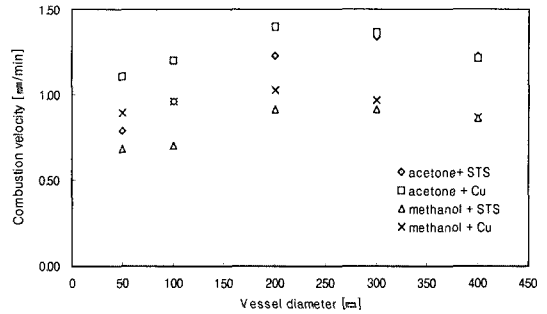


Fig. 3. Combustion velocity according to vessel diameter and material.

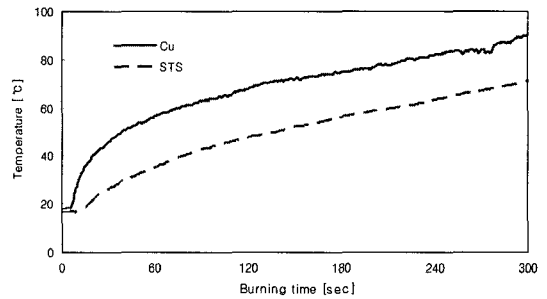


Fig. 4. Temperature profile according to vessel material.

3.1.2 용기재질에 따른 연소속도

용기의 재질에 따른 연소속도를 알아보기 위해서 용기의 재질을 스테인리스강 (SUS)과 동(Cu)을 사용하여 4종류의 시료 연료에 대하여 실험한 결과도 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었는데 재질이 동인 경우 직경이 작을수록 연소속도가 스테인리스강보다 빠른 것은 동이 스테인리스강에 비해 열전도도가 크기 때문에 용기 벽을 통한 열전달의 영향 때문으로 생각된다. 이러한 현상은 Fig. 4에서 아세톤을 시료로 직경 20 cm의 용기의 높이 중간 부분에서 연소 시에 측정 한 온도결과를 통해서도 확인할 수 있었다.

3.1.3 발열량 및 비점에 따른 연소속도

다음 Fig. 5는 직경 20 cm의 용기에서의 각 시료 연료의 연소열과 연소속도를 비교한 것이다. 유사한 탄화수소 계열로 연료 중에 산소 원자가 있어 복사열이 적은 메탄올과 아세톤을 비교해 볼 때 연소열은 적고 비점은 높으며 인화점도 높은 메탄올의 연소속도가 낮았고, 같은 포화 탄화수소인 헥산과 헵탄의 경우도 연소열은 거의 비슷하나 인화점과 비점이 높은 헵탄이 연소속도가 낮은 것을 볼 수 있다. 이 결과 연소열이 적은 경우 연소 시에 화염으로부터 연료로 전달되는 복사 및 대류에 의한 열전달량과 용기 벽면을 통한 열

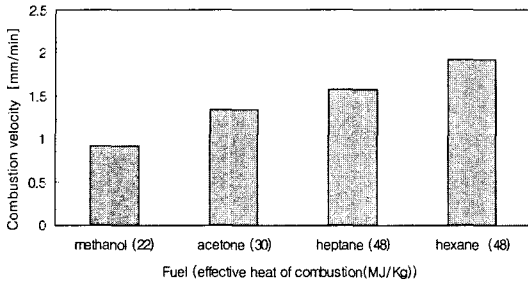


Fig. 5. Combustion velocity according to effective heat of combustion.

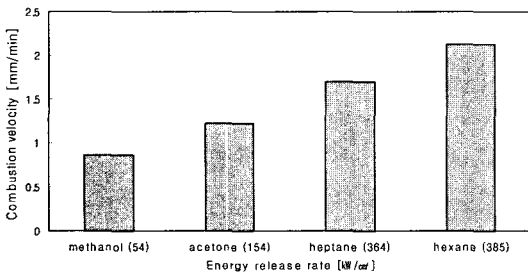


Fig. 6. Combustion velocity according to energy release rate.

전달량이 작으며 인화점과 비점이 높을수록 액체 연료의 증발 속도가 낮아지고 따라서 연소시간 길어지기 때문에 생각할 수 있다. 아세톤과 헵탄을 비교할 때 아세톤이 인화점과 비점이 헵탄 보다 낮지만 연소열량이 적기 때문에 연소속도가 낮은 것으로 보인다. Fig. 6은 직경 40 cm에서 에너지 방출 속도에 따른 연소속도를 비교한 것으로 에너지 방출속도가 클수록 연소속도가 큰 것을 보여주고 있다. 이는 액체의 증발 잠열을 L 이라 하고 액면으로의 heat flux를 q 라고 하면 heat flux q 는 연소에 의한 에너지 방출속도 \dot{Q} 에 비례할 것이고 질량연소속도 m 은 다음식과 같이 계산할 수 있으며 질량 연소속도는 곧 액면 강하속도(연소속도)에 비례한다.

$$m = q/L \tag{1}$$

따라서 연소속도에 크게 영향을 미치는 요소는 연료의 연소열과 연소시 발생하는 에너지의 방출속도임을 알 수 있었다.

3.2 화염높이 및 와류생성주기

3.2.1 직경에 따른 화염높이

본 절에서는 용기직경에 따른 화염의 높이를 분석하기 위해 용기의 재질 및 용기직경에 따른 화염의 높이

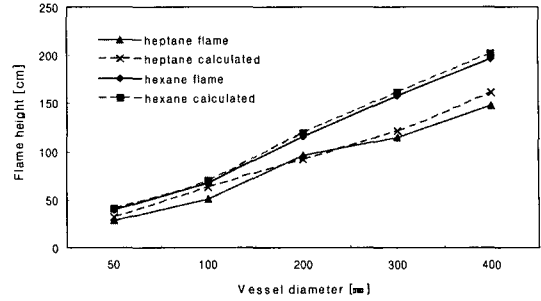


Fig. 7. Flame height according to vessel diameter of heptane and hexane.

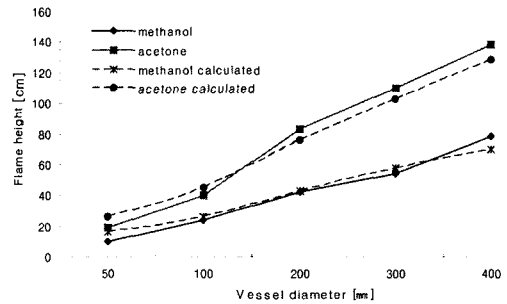


Fig. 8. Flame height according to vessel diameter of acetone and methanol.

를 측정하였다. 4가지 시료 연료의 용기 직경에 따른 화염의 높이를 측정한 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. 각각의 Fig. 7에서 보는 바와 같이 용기의 직경이 증가할수록 화염의 높이가 증가하는 경향을 보여주고 있으며 이 결과들은 Heskestad등이 연구한 결과 Froud 수가 크지 않은 pool 화재에서 화염높이에 대한 다음 실험식으로⁹⁾ 계산한 값과 거의 유사함을 나타내었다.

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

따라서 화염의 높이 L_f 는 연소시 에너지 방출속도 \dot{Q} 와 용기의 직경 D 에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 화염의 높이는 에너지 방출속도 \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 방출속도의 영향이 크기 때문인 것으로 볼 수 있다. 각 연료의 에너지 방출속도에 따라 화염 높이가 영향을 받는 것은 Fig. 9와 Fig.

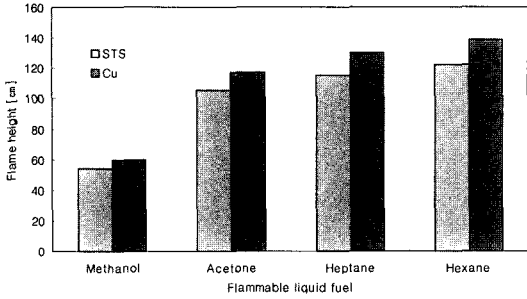


Fig. 9. Flame height according to vessel material at the diameter of 30 cm.

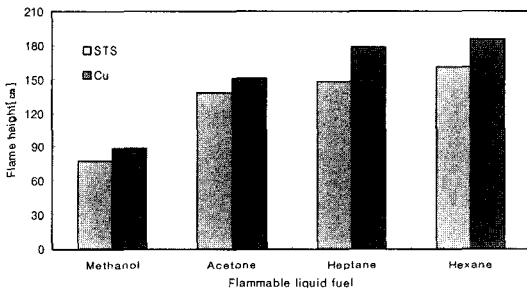


Fig. 10. Flame height compare according to vessel material at the diameter of 40 cm.

10에서도 볼 수 있는데 에너지 방출속도가 가장 작은 메탄올이 가장 낮고 아세톤 헵탄 헥산의 순서로 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 재질에 따른 화염높이

다음 Fig. 9와 Fig. 10에서 각각 직경이 30 cm와 40 cm인 용기에서 용기의 재질이 열전달이 잘되는 등의 경우 스테인리스강 용기보다 화염의 높이가 약간 증가하는데 이는 앞에서 설명한 것처럼 용기 벽면으로의 열전달에 의해 연료의 증발량이 많아 연소 반응을 완결하는 데는 더 많은 시간이 필요하고 이와 함께 화염의 길이가 증가하게 됨을 나타내는 것으로 생각된다. 결국 식 (1)을 통해 연소속도가 증가하면 Q가 증가하게 될 것이고 증가하면 식 (2)에서 화염 높이가 증가하게 됨을 알 수 있다.

3.2.3 와류 생성주기

이 실험에서 용기직경에 따른 와류생성주기를 측정하여본 결과 모든 시료에서 직경이 증가할수록 와류생성주기가 증가하는 현상을 보여주고 있는데 이러한 현상은 다음의 식

$$f = \frac{1}{T} = 1.5/\sqrt{D} \quad (3)$$

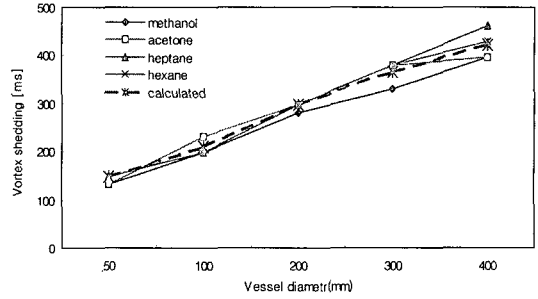


Fig. 11. Vortex shedding time according to diameter and liquid fuel.

에서와 같이 와류 생성의 주파수는 생성 주기에 반비례하고 생성 주기는 직경의 제곱근에 반비례하는데 본 연구에서 실험결과와 비교적 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 11은 용기의 직경에 대한 와류생성주기를 위 식에 의해 계산한 것과 실험에서 측정된 결과를 비교한 것으로 용기직경 증가에 따라 와류생성 시간이 증가하여 주기는 감소하는 경향을 발견할 수 있으며 계산 값과 실험값이 거의 일치됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 용기의 직경이 증가할수록 연료 표면으로부터의 증발량이 증가하고 기화된 연료와 공기와의 혼합시간이 길어지고 따라서 기화된 연료의 연소에 의한 소전 시간이 증가하기 때문이며 열부력에 의한 화염주위의 공기 유입 시에 용기의 직경이 증가할수록 화염주위의 공기와 증발된 연료와의 혼합에 시간이 걸리기 때문인 것으로 해석된다.

3.3 용기의 직경에 따른 Heat flux의 변화

다음 Fig. 12와 Fig. 13은 용기의 직경이 각각 10 cm 일 때와 40 cm일 때 헵탄 연료화염의 복사열을 측정된 결과이다. 두 그림에서 보는 바와 같이 직경이 증가에 따라 heat flux가 증가하게 되는데 이는 표면적이 커지면서 화염의 난류도가 증가하여 에너지 방출량이 증가

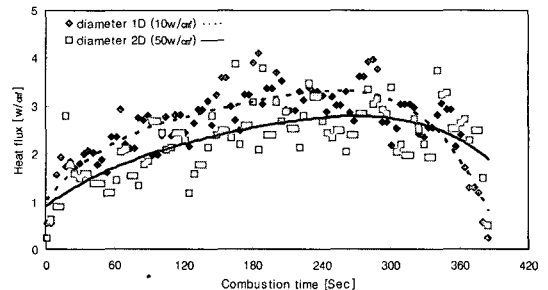


Fig. 12. Heat flux of heptane at the vessel diameter of 10 cm.

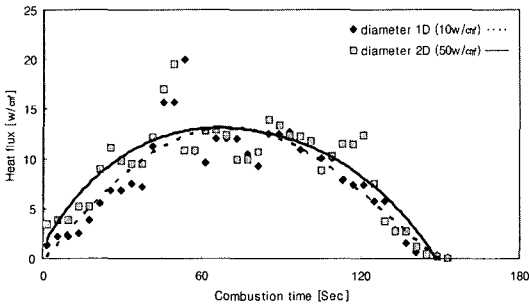


Fig. 13. Heat flux of heptane at the vessel diameter of 40 cm.

하게 되고 연료로의 열의 피드백이 증가하여 증발량이 증가하고 또 다시 연소에 의한 열전달의 증가로 복사열이 증가한 것으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 용기의 직경이 증가할수록 연소속도가 증가한 것을 뒷받침하는 이유로 생각된다.

4. 결 론

가연성 액체 연료인 메탄올, 아세톤, 헥산, 헵탄을 시료로 하여 스테인리스강과 구리 재질로 만든 용기를 사용하여 pool 화재 실험을 수행하였으며 연소시간과 용기벽면의 온도 및 복사 열유속을 측정하고 가시화된 연소 화염의 영상 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용기의 직경이 증가할수록 연소속도가 증가하는 이유는 용기 벽면으로의 열전달보다 난류확산화염에 의한 복사열의 증가에 기인한다.
2. 액체 연료의 연소속도는 연료의 물성과 깊은 관계가 있으며 비점과 인화점이 낮을수록 그리고 연소열량이 클수록 연소속도는 증가한다.
3. 화염의 높이는 용기의 직경이 증가할수록 에너지

방출속도의 증가와 함께 증가하였으며, 용기의 재질에 따라라도 크게 영향을 받는다.

4. 액면연소에서의 와류생성주기는 용기직경에 반비례하는 특성을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 平野敏右 著, 김 홍, 오규형, 양희준, 인세진 譯, “연소학”, 동화기술, pp92-202(1997).
2. 나선중, 오규형 외, “플 화이어의 화염 거동에 관한 연구”, 한국 화재 소방학회 2002년도 추계 학술대회 논문집, pp40(2002).
3. R. Buch, A. Hamins, K. Konish, and D. Mattingly, “Radiative Emission Fraction of Pool Fires Buring Silicone Fluids,” Combustion and Flame Vol. 108, pp118-126(1997).
4. Atsushi Nakakuki, “Heat Transfer in Hot- Zone-Forming Pool Fires”, Combustion and Flame, Vol. 109, pp353-369(1997).
5. H. R. Baum, K. B. McGrattan, and R. G. Rehm, “Three Dimensional Simulations of Fire Plume”, Fire Safety Science, Proceedings of 5th Int. Symp., pp511-522(1996).
6. E. J. Weckman and A. B. Strong, “Experimental Investigation of the Turbulence Structure of Medium-scale Methanol Pool Fires”, Combustion and Flame, Vol. 105, pp245-266(1996).
7. J. M. Chartis, J. Quintela, and J. Casal *et al.*, “Experimental Study of Burning Rate in Hydrocarbon Pool Fires”, Combustion and Flame, Vol. 126, pp1373-1383(2001).
8. Hiroshi Hayasaka, “Unsteady Burning Rates of Small Pool Fires”, Fire Safety Science, Proceedings of 5th Int. Symp. pp499-510(1996).
9. James G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Delmar Publishers. pp101-147(1998).