

화점높이 변화에 따른 Pool Fire의 연소특성

박형주^{1*}, 차종호¹
¹호원대학교 소방행정학과

Combustion Characteristics of Pool Fire by Height of Fire Source

Hyung-Ju Park^{1*} and Jong-Ho Cha¹

¹Department of Fire Service Administration, Howon University

요약 화점높이 변화에 따른 풀 화재의 연소특성을 알아보기 위하여 인화성액체인 메탄올과 노르말 헵탄을 100mm×100mm×50mm 크기의 사각형 용기에 내에 넣고 연소실험을 하였다. 용기의 재질은 스테인레스를 사용하였다. 연소시간, 질량감소속도, 화염온도, 화염높이 및 외부에서 화염으로의 공기유입속도 등을 측정하였으며 연소시 화염의 거동은 비디오카메라를 이용하여 촬영하였다. 실험을 통해서 화점의 높이가 증가할수록 외부에서 화염으로 유입되는 차가운 공기의 유입량이 증가하여 풀 화재의 연소특성이 감소함을 확인 할 수 있었다.

Abstract This study is intended to understand flame behavior of the pool fire by height of fire source. Liquid fuels were methanol and n-Heptane which are used in many studies of pool fire. Size of vessel was 100mm×100mm×50mm and the vessel was made by stainless steel. Combustion time, mass loss rate, flame temperature, flame height and air entrainment rate from the outside to flame were measured, and flame behavior was visualized with video camera. Based on the experiment, it was found that combustion characteristics of pool fire was decreased according to increase of height of fire source because entrainment volume of relative cold air was increased from the outside to flame.

Key Words : Pool fire, Mass loss rate, Flame temperature, Flame height, Air entrainment rate

1. 서론

풀 화재(pool fire)는 전형적인 액체연료의 누출화재 형태로 수평 표면 즉 바닥면에서의 대칭화재의 일반적인 형태의 연소현상의 모사 뿐 아니라 간단한 형상의 축소 화염 실험에 대한 화염 원으로 적용될 수 있다[1]. 실물화재의 경우 그 막대한 실험비용 등으로 인해 적용이 제한적이기 때문에 작은 축소스케일을 이용한 실험이 주된 연구방법으로 적용되고 있다.

풀 화재에 대한 국외의 연구 동향을 살펴보면, 화재 플룸(fire plume)의 전산모사[2], 메탄올 풀 화재에 대한 난류화염의 연구[3], 비정상 상태의 풀 화재에서 액체의 온도에 의한 연소속도[4], 실리콘유류의 풀 화재에 대한 복사열의 영향[5], 풀 화재시 열전달에 의하여 고온 영역이 형성되는 현상과 열전달 기구 등에 대해 연구[6]가 진행되었으며, 국내의 경우 석유류 풀 화재의 열적인 영향[7],

풀 화재의 기본적 특성[8], 풀 화재의 연소 특성[9,10], 회오리화염과 풀 화재의 화염거동[11], 소규모 풀 화재에서의 연기 특성[12] 등에 대해 연구가 진행되었다.

일반적으로 풀 화재는 연소구역(combustion zone)과 플룸(plume) 구역으로 나누어진다. 연소구역에서는 연료가 열을 받아 증발(또는 열분해)되어 주위에서 유입되는 공기와 혼합되어 연소하게 된다. 화염으로부터 발생하는 열의 일부는 연료표면으로 복사, 대류 및 전도에 의해 다시 전달되고, 이 열에 의해 가연성 가스의 생성을 지속시켜 화염이 계속 유지된다. 가연성가스와 화염으로 유입되는 공기의 혼합에 의해 연소가 지속되는 이러한 형태의 화염을 확산화염(diffusion flame)이라 하며, 이들의 연소특성은 가연성 가스와 공기와 혼합구조(mixing structure), 화염으로 유입되는 공기의 온도, 부력의 영향 등에 의해 지배받게 된다[8].

일반적으로 건축물 화재시 건물공간에는 수많은 가연

본 논문은 호원대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음.

*교신저자 : 박형주(sandelf@howon.ac.kr)

접수일 10년 08월 06일

수정일 (1차 10년 11월 03일, 2차 10년 11월 18일)

게재확정일 10년 11월 19일

물이 존재하고 다양한 형태로 배치되기 때문에 화염의 연소 확대방향에 차이가 발생하게 되며, 화원이 평면상뿐만 아니라 입체적으로 존재한다는 것을 알 수 있다. 따라서 화원이 입체적으로 존재하는 경우 화재성상, 화재의 성장과정에 어떠한 영향을 미치는가를 아는 것이 중요하다고 하겠다.

지금까지의 건축물 화재 및 폴 화재의 연구는 평면상의 연소 확대에 대한 연구가 주를 이루고 있는 반면에 화원의 입체적인 배치 변화에 따른 연구는 상대적으로 미비한 실정이다.

본 연구에서는 연소성상과 연소속도를 정상적으로 갖는 것이 용이한 소형 폴화재를 이용하여 화원의 높이를 변화시켰을 경우의 연소특성 즉, 연소시간(combustion time), 질량감소속도(mass loss rate), 화염온도(flame temperature), 화염높이(flame height) 및 외부로부터 화염으로의 공기유입속도(air entrainment rate) 등의 변화를 측정하고 해석하여 화원의 높이 변화가 가연성 액체 폴화재의 연소특성에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시료

본 연구에 사용된 시료는 선행 연구자들에 의해 폴화재의 연소특성 연구에 자주 이용되고 있는 메탄올(methanol)과 노르말 헵탄(n-Heptane)으로 국내 시판 중인 제품을 별도의 정제 없이 사용하였다. 1회 실험당 시료의 양은 각각 100g을 기준으로 하였으며, 이를 부피로 환산하면 메탄올 128.3ml, 노르말 헵탄 147.1ml이다. 각 시료에 대한 분자식(량), 농도, 비중, (고위/저위)발열량, 기화열, 끓는점, 인화점, 발화점은 표 1에 나타내었다.

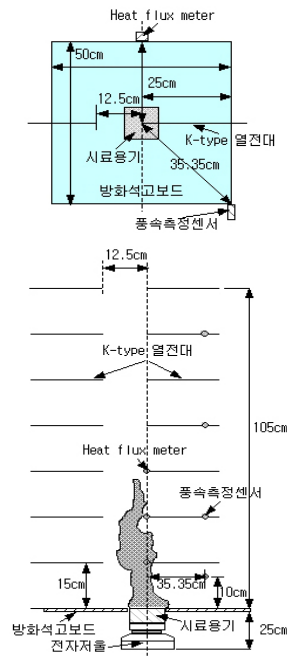
[표 1] 인화성액체 연료의 특성[13, 14]

Characteristic	Flammable liquid fuel	
	Methanol	n-Heptane
Molecular formula	CH ₄ O	C ₇ H ₁₆
Molecular weight	32.04	100.20
Concentration(%)	99.5	95.0
Specific gravity	0.79	0.68
Heating value (MJ/kg)	Higher	22.68
	Lower	19.94
Evaporation heat (kJ/mol)	39.2	36.0
Boiling point (°C)	64.7	98.0
Flash point (°C)	12.0	- 4.0
Ignition point (°C)	463.4	412.0

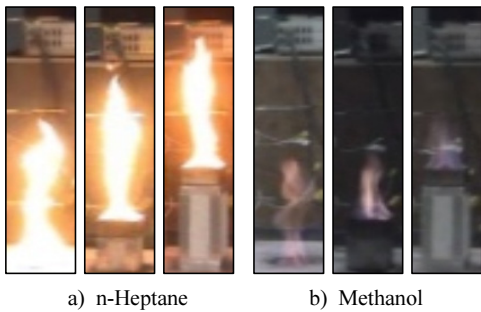
2.2 실험장치 및 방법

실험장치의 구성도는 그림 1과 같으며 실험에 사용된 시료용기의 재질은 1.0mm 두께의 스테인레스강으로 100mm×100mm×50mm 크기의 사각형 용기로 제작하여 사용하였다. 화점높이의 변화는 바닥면을 기준으로 0cm, 5cm, 15cm, 30cm 그리고 50cm의 높이로 변화를 주었으며, 각 조건에서 3회 이상 반복 실험을 실시하였다.

화염온도와 화염주변의 온도변화를 측정하기 위해 Ø 1.0mm의 열전대(K-type)를 바닥면을 기준으로 15cm의 간격으로 8개씩 설치하여 연소시간 동안 측정하였다. 화원 주변의 공기유입속도 변화는 다점풍속측정기(Kanomax system 6242, multichannel anemomaster Model 1550)을 화원으로부터 35.35cm의 거리에서 바닥면을 기준으로 10, 30, 60 그리고 90cm의 높이로 4개를 설치하여 측정하였다. 질량감소속도는 0.01g의 분해능을 갖는 전자저울을 이용하여 측정하였으며, 연소시간은 초시계를 이용하여 착화 후 연소 종료까지의 시간을 측정하였다. 또한 비디오 카메라를 이용하여 화염을 촬영한 후 이 영상 자료를 근거로 화염의 형상과 높이 그리고 와류(vortex shedding) 생성주기를 분석하였다. 연소시간 동안 화염온도와 화염주변의 온도변화, 열방출율, 화원 주변의 공기유입속도 변화 그리고 질량연소속도는 매 1초 간격으로 측정하였으며, 이 모든 데이터는 데이터 이력 기록장치(data logger)를 이용하여 컴퓨터에 자동 저장되도록 한 후 분석에 사용하였다.



[그림 1] 실험장치의 구성도



[그림 2] 화점높이 변화에 따른 풀 화재의 화염영상

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소시간(combustion time)

메탄올과 노르말 헵탄의 화점높이 변화에 따른 풀 화재의 연소시간은 표 2와 그림 3에 나타내었다. 화점의 높이가 0cm 일 때 가장 낮은 연소시간을 나타낸 반면에 화점의 높이가 증가할수록 연소시간이 증가하였다가 일정 시간에 수렴함을 알 수 있었다.

일반적으로 풀 화재의 연소구역에서는 연료가 열을 받아 증발 또는 열분해되고 주위에서 유입되는 공기와 혼합되어 연소하게 된다. 열의 일부분은 연료표면으로 복사, 대류 및 용기를 통한 전도에 의해 다시 전달되어 가연성 가스의 생성을 지속시켜 화염이 계속 유지된다.

따라서 화점의 높이가 증가할수록 화염으로부터 방출되는 열이 복사, 대류 및 용기의 벽면을 통한 전도에 의한 연료로의 피드백(feedback)이 감소할 뿐만아니라 외부에서 화염으로 유입되는 차가운 공기의 예열대의 범위가 좁아져 상대적으로 차가운 공기의 유입량이 많아졌기 때문에 연소시간이 증가한 것으로 판단된다.

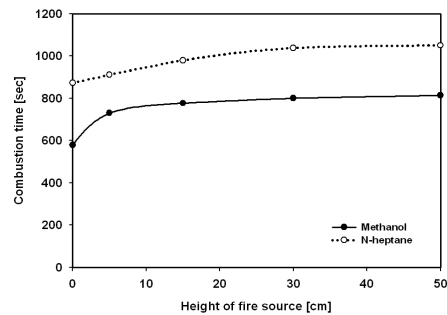
외부에서 화염으로의 공기유입속도를 다점풍속기를 이용하여 측정한 결과 메탄올의 경우 화점높이가 증가할수록 바닥면으로부터 10cm 위치에서의 풍속은 12.80mm/s에서 29.64mm/s로 증가한 반면, 30cm 위치에서는 풍속은 39.75mm/s에서 29.64mm/s로 감소하였다. 노르말 헵탄의 경우 화점높이가 증가할수록 바닥면으로부터 10cm 위치에서의 풍속은 9.88mm/s에서 29.54mm/s로 증가한 반면, 30cm 위치에서는 풍속은 75.30mm/s에서 22.31mm/s로 감소하였다. 따라서 화점의 높이가 증가할수록 바닥부분으로부터 유입되는 공기의 양이 증가함을 알 수 있었다.

또한, 메탄올과 노르말 헵탄에 있어서 화점높이 변화에 따른 연소시간은 모든 높이에서 노르말 헵탄이 메탄올에 비해 높은 연소시간을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 선행연구와는 반대되는 결과로 연구에 사용된 시료량의

기준 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 시료량은 질량(gram) 단위로 이를 부피단위(volume)로 환산하면 두 시료의 밀도차이에 의해 메탄올보다 노르말 헵탄의 양이 상대적으로 많아지기 때문이다.

[표 2] 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 연소시간

Height of fire source [cm]	Combustion time [sec]	
	Methanol	n-Heptane
0	578.6	873.5
5	729.8	911.2
15	777.1	979.4
30	800.4	1038.0
50	814.1	1050.1



[그림 3] 화점높이 변화와 연소시간과의 관계

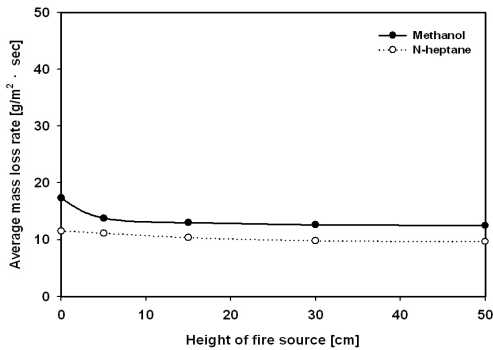
3.2 질량감소속도(mass loss rate)

화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 단위면적당 평균질량감소속도는 표 3과 그림 4에 나타내었다. 평균질량감소속도는 화점높이가 0cm 일 때 메탄올의 경우 17.36g/m²·sec, 노르말 헵탄의 경우 11.53g/m²·sec로 최대값을 나타낸 후 화점높이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

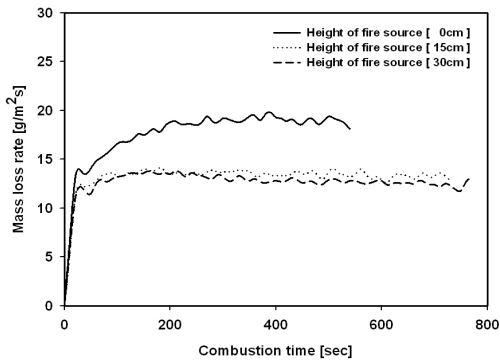
그림 5와 6은 연소시간 동안 메탄올과 노르말 헵탄의 질량감소속도를 나타낸 그래프로 메탄올의 경우 화점높이가 0cm 일 때 가장 높은 질량감소속도를 나타내고 화점높이가 증가할수록 질량감소속도는 감소하나 큰 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다. 헵탄의 경우 연소초기에는 화점높이가 0cm 일 때 질량감소속도가 증가하다가 연소가 진행되는 과정에서 화점높이 변화에 따른 질량감소속도의 차이는 미비한 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 연소시간의 결과에서 화점높이가 0cm 일 때 가장 빠른 연소시간을 나타내고 화점높이 증가에 따른 연소시간에 있어 큰 차이가 발생하지 않은 것에서 그 원인을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

[표 3] 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 평균질량감소속도

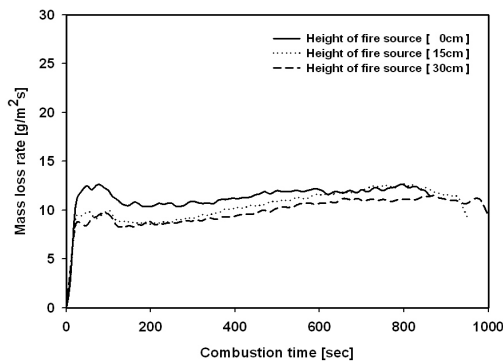
Height of fire source [cm]	Mass loss rate [g/m ² ·sec]	
	Methanol	n-Heptane
0	17.36	11.53
5	13.78	11.13
15	12.99	10.37
30	12.61	9.80
50	12.50	9.68



[그림 4] 화점높이 변화와 질량감소속도와와의 관계



[그림 5] 연소시간에 따른 메탄올의 질량감소속도



[그림 6] 연소시간에 따른 노르말 헵탄의 질량감소속도

3.3 화염온도(flame temperature)

그림 7과 8은 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 화염중심부의 평균온도를 나타낸 것으로 시료용기의 표면에서 수직방향으로 15, 30, 45, 60 그리고 75cm의 위치에 설치한 $\varnothing 1.0\text{mm}$ 의 열전대(K-type)를 이용하여 측정하였다. 평균 화염온도는 전체 연소시간 동안에 측정된 온도 중에서 화염이 안정화되는 50% 구간을 기준으로 측정한 결과이다.

메탄올의 경우 화점높이 변화에 따른 화염 중심부의 높이별 평균 화염온도는 15cm를 제외하고는 큰 차이를 보이지 않은 반면에 노르말 헵탄의 경우 화점의 높이가 0cm 일 때 상대적으로 낮은 화염온도를 나타내었다. 이는 시료의 점화 후 화염의 형상과 와류생성주기 및 화염의 안정성에 기인한 것으로 메탄올에 비해 노르말 헵탄의 화염높이가 큰 반면에 안정성에 있어서는 낮음을 알 수 있다. 또한 메탄올과 노르말 헵탄이 평균 화염온도의 비교에 있어서 노르말 헵탄의 화점높이 0cm의 화염중심 15cm를 제외하고 모든 화점높이에서 온도가 높음을 알 수 있는데 이는 노르말 헵탄이 메탄올에 비해 화염으로부터 방출되는 열량이 많다는 것을 알 수 있다.

3.4 화염높이(flame height)

표 4는 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 화염높이를 비디오 카메라로 화염의 형상을 촬영한 후 이 영상자료를 근거로 측정된 것으로 각 시료의 총 연소시간의 중간에서 6초 동안 1/30s의 시간단위로 측정된 평균, 최대, 최소의 화염높이를 나타낸 것이며, 평균 화염높이에의 분산과 표준편차를 산출하였다.

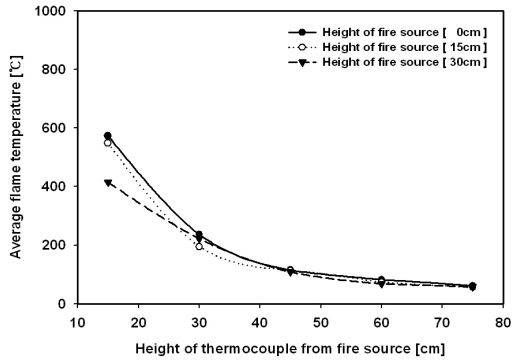
화점높이 변화에 따른 화염의 높이는 0cm일 때 가장 높으며 화점이 높아질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 화염으로 유입되는 공기의 온도와 유입량의 차이에 의한 결과로 판단된다. 화점의 높이가 0cm일 경우 화염으로부터 방출되는 복사열량에 의해 바닥부분이 가열되고, 이 부분에서 화염으로 유입되는 공기의 온도가 예열되는 범위가 넓어지는 반면에 화점이 높아짐에 따라 그 예열대의 범위가 좁아지기 때문에 상대적으로 차가운 공기의 유입으로 화염형성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

화염높이의 표준편차의 산출결과에서 알 수 있듯이 메탄올과 노르말 헵탄의 경우 화점높이가 증가할수록 표준편차가 감소하는 경향을 나타냄에 따라 화염의 안정성이 증가함을 알 수 있다.

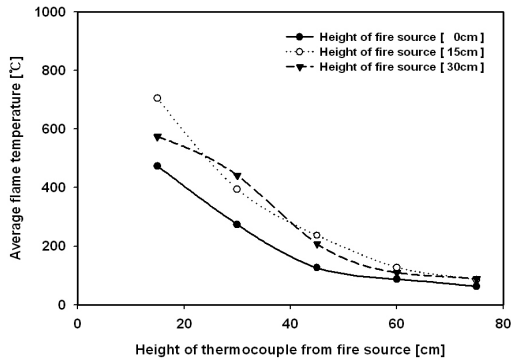
그림 9와 10은 총 연소시간의 중심에서 1초 동안 화점높이 변화에 따른 화염높이의 변화를 나타낸 것으로 화점높이가 증가할수록 화염높이의 진폭과 와류의 형성이

감소함을 알 수 있다.

그림 11은 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 최대화염높이에서의 화염형상을 나타낸 것으로 메탄올의 경우 화점높이가 증가함에 따라 화염의 폭에는 큰 변화 없이 화점높이가 감소한 반면에 노르말 헵탄의 경우 화점높이가 증가함에 따라 화염높이와 화염의 폭이 감소하는 경향을 나타내었다.



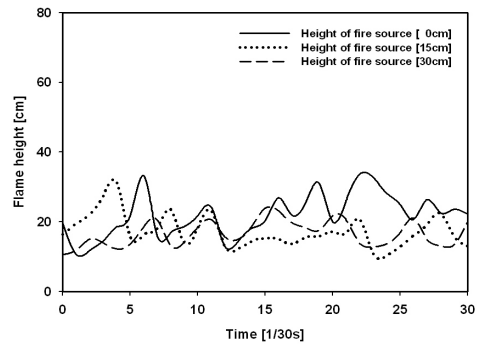
[그림 7] 메탄올의 화점높이 변화에 따른 평균 화염온도



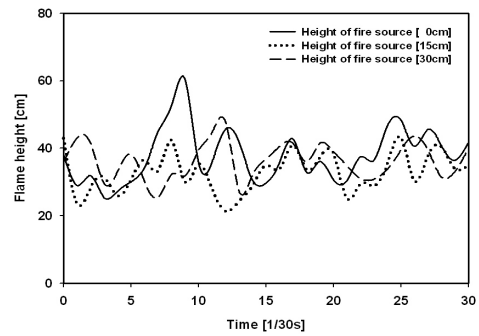
[그림 8] 노르말 헵탄의 화점높이 변화에 따른 평균 화염온도

[표 4] 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 화염높이

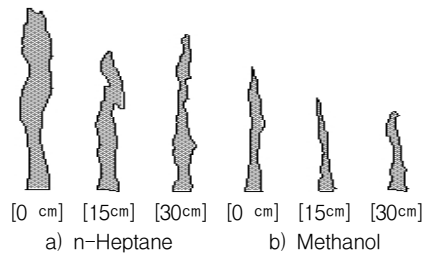
Flame height [cm]	Methanol			n-Heptane		
	0	15	30	0	15	30
Average	20.5	15.4	14.6	35.0	34.1	37.8
Max.	41.7	31.4	26.9	60.6	46.8	52.6
Min.	10.6	6.9	6.4	17.5	20.3	22.8
Variance	29.7	17.7	14.6	53.1	31.3	31.5
Standard deviation	5.4	4.2	3.8	7.3	5.6	5.6



[그림 9] 메탄올의 화점높이 변화에 따른 화염높이의 변화



[그림 10] 노르말 헵탄의 화점높이 변화에 따른 화염높이의 변화



[그림 11] 화점높이 변화에 따른 메탄올과 노르말 헵탄의 최대화염높이에서의 화염형상

4. 결론

본 연구에서는 인화성 액체 연료인 메탄올과 노르말 헵탄을 시료로 하여 화점높이의 변화에 따른 풀 화재 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

화점높이가 증가할수록 연소시간은 증가하였다가 일정 시간에 수렴한 반면에 평균질량감소속도는 감소하는 경향을 나타내었다. 평균 화염온도의 경우 메탄올에 있어서는 화염 중심부의 수직거리 15cm를 제외하고는 큰 차

이를 보이지 않은 반면에 노르말 헵탄에 있어서는 화점 높이가 0cm 일 때 화점높이가 15, 30cm에 비해 상대적으로 낮은 화염온도를 나타내었다. 화염높이의 경우 화점이 높아질수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 화염의 안정성은 증가함을 알 수 있었다. 또한, 화점의 높이가 증가할수록 화염높이의 진폭과 와류의 형성이 감소하였으며, 화염의 폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 외부에서 화염으로 유입되는 공기유입속도는 바닥면으로부터 10cm 위치에서는 증가한 반면, 30cm의 위치에서는 감소함을 알 수 있었다.

결국 화점의 높이가 증가할수록 외부에서 화염으로 유입되는 차가운 공기의 유입량이 증가하여 풀 화재의 연소특성이 감소함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] 오규형, 김동일, 김운형, 김유식, 오인석, 우성천, 이수경, 인세진, 최돈목 공역, "화재공학원론", 동화기술, pp. 150-152, 2004.

[2] H. R. Baum, K. B. McGrattan, and R. G. Rehm, "Three Dimensional Simulations of Fire Plume", Fire Safety Science, Proceedings of 5th Int. Symp., pp. 511-522, 1996.

[3] E. J. Weckman and A. B. Strong, "Experimental Investigation of the Turbulence Structure of Medium-scale Methanol Pool Fires", Combustion and Flame, Vol. 105, pp. 245-266, 1996.

[4] Hiroshi Hayasaka, "Unsteady Burning Rates of Small Pool Fires", Fire Safety Science, Proceedings of 5th Int. Symp., pp. 499-510, 1996.

[5] R. Buch, A. Hamins, K. Konish, and D. Mattingly, "Radiative Emission Fraction of Pool Fires Burning Silicone Fluids", Combustion and Flame, Vol. 108, pp. 118-126, 1997.

[6] Atsushi Nakakuki, "Heat Transfer in Hot Zone Forming Pool Fires", Combustion and Flame, Vol. 109, pp. 353-369, 1997.

[7] 정국삼, 강민호, 이덕영, "석유류 POOL FIRE에 있어서 열적인 영향(I)", 한국산업안전학회지, 제 11권, 제1호, pp. 75-83, 1996.

[8] 김명배, "Pool fire의 기본적 특성에 관하여", 한국화재소방학회지, 제11권, 제1호, pp. 55-64, 1997.

[9] 오규형, 나선중, 이성은, "Pool 화재의 연소 특성에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, 제18권, 제3호, pp. 39-44, 2004.

[10] 나선중, "액면화재의 화염거동에 관한 연구", 호서대

학교 대학원 석사학위논문, 2003.

[11] 오규형, 강연옥, 이성은, "Whirl Fire와 Pool Fire의 화염 거동에 관한 연구", 한국안전학회지, 제19권, 제3호, pp. 45-50, 2004.

[12] 이의주, 안찬술, 신현준, 오광철, 이은도, "작은 풀화재에서의 연기 특성", 한국화재소방학회 논문지, 제19권, 제3호, pp. 58-63, 2005.

[13] 물질안전보건자료(MSDS), "Methyl Alcohol", Samchun Chemicals, <http://www.samchun.com/images.service.msds/67561.pdf>

[14] 물질안전보건자료(MSDS), "n-Heptane", Samchun Chemicals, <http://www.samchun.com/images.service.msds/142825.pdf>

박 형 주(Hyung-Ju Park)

[정회원]



- 1997년 2월 : 호서대학교 안전공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 호서대학교 안전공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 소방행정학과 교수

<관심분야>
화재공학, 소방약제

차 종 호(Jong-Ho Cha)

[정회원]



- 2005년 9월 : 소방기술사취득
- 2006년 2월 : 서울시립대학교 방재공학과(공학석사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 소방행정학과 교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 재난공학과 박사과정

<관심분야>
소방설비, 화재공학