

화점높이 변화에 따른 메탄올의 소규모 Pool 및 Whirl Fire의 연소특성

박형주

호원대학교 소방행정학과

Combustion Characteristics of Pool and Whirl Fire on Methanol by Height of Fire Source using the Small Scale

Hyung-Ju Park

Dept. of Fire Service Administration, Howon Univ.

(Received April 2, 2012; Revised May 30, 2012; Accepted June 8, 2012)

요 약

화점높이 변화에 따른 풀 화재와 회오리 화염의 연소특성을 알아보기 위하여 인화성 액체인 메탄올을 100×100×50 크기의 스테인레스 재질의 사각형 용기에 넣고 연소실험을 하였다. 연소시간, 질량감소속도, 화염온도, 화염높이 및 외부로부터 화염으로의 공기유입속도 등을 측정하였으며, 연소시 화염의 거동은 비디오카메라를 이용하였다. 모든 실험결과로부터 화점높이 변화에 따른 연소특성은 풀 화재보다는 회오리 화염에 있어서 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This study is intended to understand flame behavior of pool and whirl fire by height of fire source. Liquid fuel was methanol which is used in many studies for pool and whirl fire. Size of vessel was 100 × 100 × 50 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 by height of fire source got a more effect on whirl fire than pool fire.

Keywords : Pool fire, Whirl fire, Height of fire source, Combustion characteristics

1. 서 론

풀 화재(pool fire)는 전형적인 액체연료의 누출화재 형태로 일반적인 형태의 연소현상 모사 뿐 아니라 간단한 형상의 축소 화염 실험에 대한 화염 원으로 적용될 수 있다⁽¹⁾.

일반적으로 풀 화재는 연소구역과 플룸구역으로 나누어진다. 연소구역에서는 연료가 열을 받아 증발 또는 열분해 되고 주위에서 유입되는 공기와 혼합되어 연소하게 되며, 화염으로부터 발생하는 열의 일부는 연료 표면으로의 복사, 대류 및 전도에 의해 재공급되고, 이 열에 의해 가연성 가스의 생성이 지속되고 화염이 계속 유지되게 된다. 이러한 형태의 화염을 확산화염이라 하며, 이들의 연소특성은 가연성 가스와 공기와의 혼합형태, 화염으로 유입되는 공기의 온도, 부력 등에 의해 지배받게 된다⁽²⁾.

회오리 화염(whirl fire)은 대규모 도시화재나 울창한 산림화재가 발생하는 특이한 연소현상으로 대기의 불안정성에 의해 화원의 주위에서 형성된 회전유동이 화염의 상승

기류로 유입됨에 따라 화염주위에는 회전유동이 형성되고 이러한 회전유동의 모멘텀이 화염으로 전이되어 화염의 높이 및 회전속도를 증가시켜 연소속도를 증가시킨다^(3,4). 회오리 화염은 보기 드문 현상이지만 일반적인 화재에 비해 매우 파괴적이며, 화염길이의 증가로 인해 불티 등의 불씨가 멀리까지 전파되어 화재를 확대시키고, 연소속도가 증가하면서 높은 연소열로 인한 원활한 소화활동의 어려움 등으로 인해 인명 및 재산상의 큰 피해를 초래할 수 있다^(4,5).

풀 화재에 대한 연구사례를 살펴보면, 메탄올 풀 화재에 대한 난류화염의 연구⁽⁶⁾, 비정상 상태의 풀 화재에서 액체의 온도에 의한 연소속도⁽⁷⁾, 풀 화재시 열전달에 의하여 고온 영역이 형성되는 현상과 열전달 기구 등에 대해 연구⁽⁸⁾, 풀 화재의 연소 특성^(9,10), 화점높이 변화에 따른 pool fire의 연소특성⁽¹¹⁾ 등에 대한 연구를 진행하였다. 회오리 화염에 대한 연구사례로는 회오리 화염과 일반 풀 화재의 차이점을 명확히 하고 회오리 화염의 연소속도, 화염높이, 화

염온도의 상관관계를 평가하기 위해 실험적인 방법에 의해 광범위하게 조사⁽¹²⁾하였으며, 약한 회오리 화염의 화염 길이에 대한 연소속도의 영향과 축대칭 실험실 규모 회오리 화염의 화염 높이에 관한 이론적 및 실험적 연구^(13,14), 직경 5 cm의 메탄올 풀 화재에서 발생하는 회오리 화염의 모델링과 소규모 회오리 화염의 화염높이와 화염 형상 예측^(15,16), 고정 프레임 형태의 회오리 화염에 대한 실험적 연구⁽¹⁷⁾, 회오리 화염의 연소특성에 관한 연구와 회오리 화염의 연소특성과 FDS를 이용한 회오리 화염 해석에 관한 연구^(18,19), 화점높이 변화에 따른 whirl fire의 질량감소 및 공기유입속도에 관한 연구⁽²⁰⁾를 진행하였다.

지금까지의 풀 화재 및 회오리 화염에 대한 연구는 평면상의 연소 확대에 대한 연구가 주를 이루고 있는 반면에 화원의 입체적인 배치 변화에 따른 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 또한 풀화재와 회오리 화염의 연소특성은 국내외적으로 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되나 있으나 동일한 시료를 이용한 풀 화재와 회오리 화염의 연소특성에 대한 비교연구는 미진한 편이다.

본 연구에서는 가연성 액체인 메탄올을 이용한 small scale의 pool fire와 whirl fire에서 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 측정하여 화원의 높이 변화가 가연성 액체의 pool fire와 whirl fire의 연소특성에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시료

본 연구에서 사용된 시료는 인화성 액체의 pool fire와 whirl fire의 연소특성 연구에 자주 이용되고 있는 메탄올으로 국내 시판중인 제품을 별도의 정제없이 사용하였다. 1회 실험 당 시료의 양은 100 g을 기준으로 하였으며, 이를 부피로 환산하면 128.3 ml이다. 시료에 대한 특성은

Table 1. Characteristic of Methanol⁽²⁰⁾

Characteristics		Methanol
Molecular formula		CH ₄ O
Molecular weight		32.04
Concentration (%)		99.5
Heating value (MJ/kg)	Higher	22.68
	Lower	19.94
Boiling point (°C)		64.7
Flash point (°C)		12.0
Ignition point (°C)		463.4

Table 1에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

회오리 화염의 실험장치 구성도는 Figure 1과 같으며, 풀 화재 실험의 경우 Figure 1의 실험장치 구성도에서 4개 측면의 격벽을 제거한 상태에서 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 시료용기의 재질은 1.0 mm 두께의 스테인레스강으로 100 mm * 100 mm * 50 mm 크기의 사각형 용기로 제작하여 사용하였다. 화점높이의 변화는 바닥면을 기준으로 0 cm, 15 cm, 30 cm로 변화를 주었으며, 각 조건에서 3회 이상 반복 실험을 실시하였다.

화염온도와 화염주변의 온도변화는 Ø1.0 mm의 K-type 열전대를 바닥면을 기준으로 15 cm의 간격으로 8개씩 총 16개를 설치하여 연소시간 동안 측정하였다. 화원 주변의 공기유입속도 변화는 다점풍속측정기(Kanomax system 6242, multichannel anemomaster Model 1550)을 화원로부터 35.35 cm의 거리에서 바닥면을 기준으로 10, 30, 60 그리고 90 cm의 높이로 4개를 설치하여 측정하였다. 질량감소속도는 0.01 g의 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

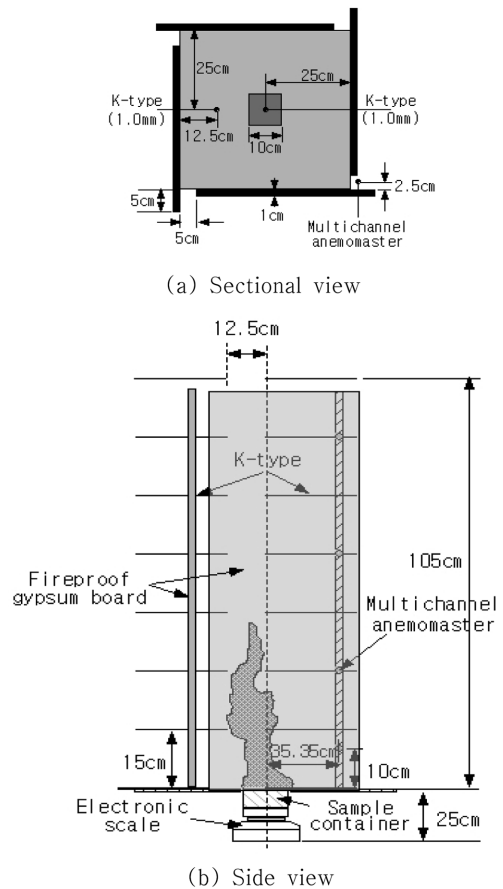


Figure 1. Schematic diagram of experiment apparatus⁽²⁰⁾.

화염의 형상과 높이 그리고 와류(vortex shedding) 생성주기를 분석하였다. 연소시간 동안 화염온도와 화염주변의 온도변화, 화원 주변의 공기유입속도 변화 그리고 질량연소속도는 매 1초 간격으로 측정하였으며, 이 모든 데이터는 data logger를 이용하여 컴퓨터에 자동 저장되도록 한 후 분석에 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소시간(Combustion time)

메탄올의 화점높이 변화에 따른 풀 화재와 회오리 화염의 연소시간은 같은 조건하에서 3회 반복 시험한 결과에 대한 평균값으로 Table 2와 Figure 2에 나타내었다. 화점의 높이가 0 cm 일 때 가장 낮은 연소시간을 나타낸 반면 화점의 높이가 증가할수록 연소시간이 증가함을 알 수 있었다.

이는 화점의 높이가 증가할수록 화염으로부터 바닥부분 및 주변 공기에 대한 예열량 감소에 따른 부력 현상의 감소와 화염으로부터 연료로의 열 피드백 감소 등에 영향을 받은 것으로 판단된다.

3.2 질량감소속도(Mass loss rate)

화점높이 변화에 따른 메탄올의 풀 화재와 회오리 화염에서의 단위면적당 평균질량감소속도는 Table 3과 Figure 3에 나타내었다.

평균질량감소속도는 초기 연료의 연료량이 전부 연소되는데 걸린 시간으로부터 분석하였으며, 화점높이가 0 cm

Table 2. Average Combustion Time

Height of fire source [cm]	Combustion time [sec]	
	Pool fire	Whirl fire
0	578.6	361.3
15	777.1	641.6
30	800.4	876.1

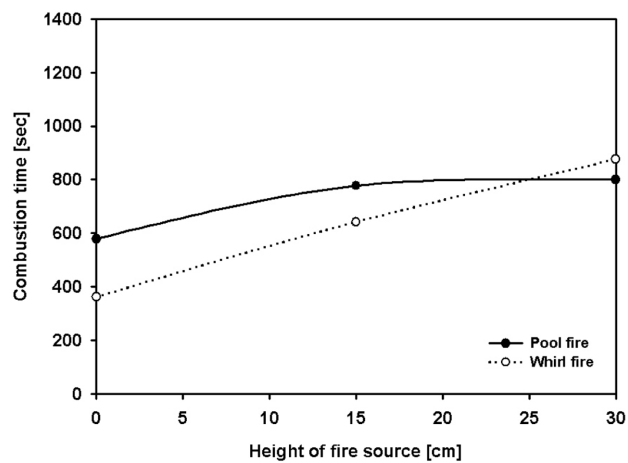


Figure 2. Height of fire source vs. average combustion time.

Table 3. Average Mass Loss Rate

Height of fire source [cm]	Mass loss rate [g/secm ²]	
	Pool fire	Whirl fire
0	17.36	27.69
15	12.99	15.71
30	12.61	11.36

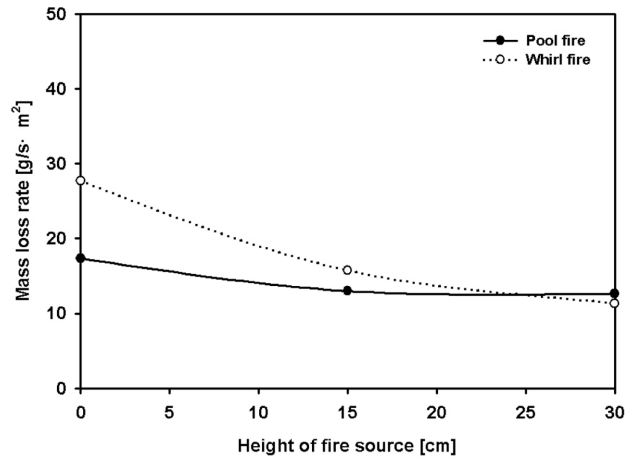


Figure 3. Height of fire source vs. average mass loss rate.

일 때 풀 화재의 경우 17.36 g/secm², 회오리 화염의 경우 27.69 g/secm²로 최대값을 나타낸 후 화점높이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. Figure 3에서 알 수 있듯이, 화점높이 변화에 따른 질량감소속도는 풀 화재보다는 회오리 화염에서 더 많은 영향을 받음을 알 수 있는데 이는 실험장치내에서 형성되는 부력에 의한 기류변화에 기인한 것으로 판단된다.

3.3 화염온도(Flame temperature)

Figure 4, 5은 화점높이 변화에 따른 메탄올의 화염중심

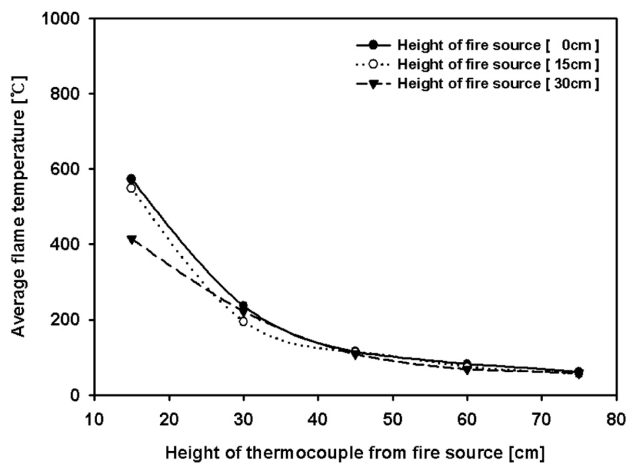


Figure 4. Height of fire source vs. average fire temperature in pool fire.

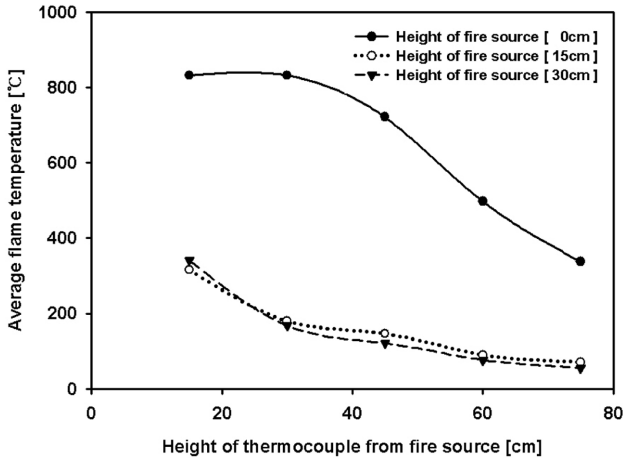


Figure 5. Height of fire source vs. average fire temperature in whirl fire.

부의 평균온도를 나타낸 것으로 시료용기의 표면에서 수직방향으로 15, 30, 45, 60 그리고 75 cm의 위치에 설치한 Ø1.0 mm의 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 평균 화염온도는 전체 연소시간 동안에 측정된 온도 중에서 화염이 안정화되는 50% 구간을 기준으로 측정된 결과이다.

Figure 4의 풀 화재에서 화점 높이가 30 cm인 경우, 15 cm 높이의 화염온도를 제외하고는 거의 유사한 온도 분포를 나타낸 반면, Figure 5의 회오리 화재에서는 화점 높이가 0 cm인 경우에 있어서 상대적으로 높은 온도 분포를 나타내었다. 이는 풀 화재의 경우 화염의 높이는 낮으나 안정된 화염이 형성된 반면에 회오리 화재의 경우 화점의 높이가 0 cm일 때 비교적 화염의 안정성과 화염의 크기가 상대적으로 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 화염높이(Flame height)

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

화점높이 변화에 따른 화염의 최대높이는 0 cm일 때 가

Table 4. Flame Height

Height of fire source [cm]	Pool fire			Whirl fire		
	0	15	30	0	15	30
Average	20.5	15.4	14.6	38.8	18.8	16.9
Max.	41.7	31.4	26.9	60.4	43.6	36.8
Min.	10.6	6.9	6.4	13.1	4.6	4.5
Variance	29.7	17.7	14.6	82.4	83.1	41.9
Standard deviation	5.4	4.2	3.8	9.1	9.1	6.5

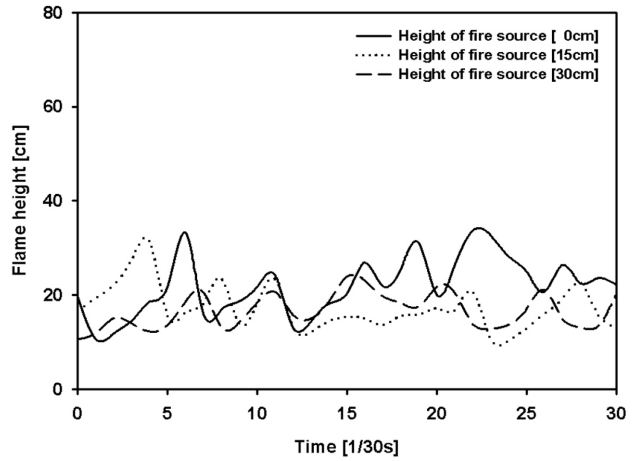


Figure 6. Flame height by fire source in pool fire.

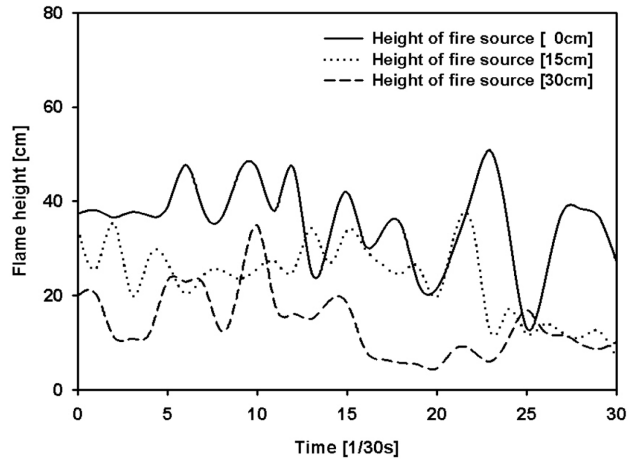


Figure 7. Flame height by fire source in whirl fire.

장 높으며 화점이 높아질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 화염으로 유입되는 공기의 온도와 유입량의 차이에 의한 결과로 판단된다. 화점의 높이가 0 cm일 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.

Figure 6과 7은 총 연소시간의 중심에서 1초 동안 화점높이 변화에 따른 화염높이의 변화를 나타낸 것으로 화점높이가 증가할수록 풀 화재 보다는 회오리 화재에서의 화염높이의 진폭과 와류의 형성이 증가함을 알 수 있다.

3.5 외부로부터 화염으로의 공기유입속도(Air entrainment rate)

다점풍속측정기(Kanomax system 6242, multichannel anemomaster Model 1550)을 Figure 1과 같이 화원으로부터 35.35 cm의 거리에서 바닥면을 기준으로 10, 30, 60 그

Table 5. Average Air Entrainment Rate [Unit: mm/s]

Type	Height of anemometer [cm]	Height of Fire Source[cm]		
		0	15	30
Pool fire	10	12.80	22.32	29.31
	30	39.75	36.68	28.71
	60	0.00	0.00	0.00
	90	0.00	0.00	0.00
Whirl fire	10	84.04	70.48	63.80
	30	174.94	113.79	101.44
	60	0.13	0.00	0.00
	90	0.39	0.00	0.00

리고 90 cm의 높이로 4개를 설치하여 외부로부터 실험 장치내로의 공기유입속도를 연소시간동안 측정 한 결과는 Table 5에 나타내었다.

메탄올의 풀 화재의 경우 화점높이가 증가할수록 바닥면으로부터 10 cm 위치에서의 풍속은 12.80 mm/s에서 29.31 mm/s로 증가한 반면, 30 cm 위치에서는 풍속은 39.75 mm/s에서 28.71 mm/s로 감소하였다. 또한 회오리 화염의 경우에는 10 cm 위치에서 풍속은 84.04 mm/s에서 63.80 mm/s로, 30 cm 위치에서는 174.94 mm/s에서 101.44 mm/s로 감소하였다.

Table 5에 나타낸바와 같이 회오리 화염의 경우 외부로부터 화염으로의 공기유입속도는 화점의 높이를 0 cm에서 30 cm로 변화시켰을 때, 0 cm의 높이에서 가장 빠른 공기유입속도를 나타내었다. 또한, 동일한 화점의 높이에서는 다점풍속기의 높이가 30 cm인 경우에 풀 화재와 회오리 화염에서 가장 빠른 평균 공기유입속도를 나타냈었다.

이 결과는 화점의 높이가 증가할수록 질량감소속도가 감소하는 경향과 일치함을 알 수 있는데, 이는 질량감속도가 감소할 경우 화염으로부터 방출되는 열에너지의 량도 감소하게 되고 이에 따라 실험 장치내의 대류에 의한 상승 기류의 발생 또한 감소하게 되어 외부로부터 유입되는 공기의 속도가 감소하게 된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 가연성 액체 연료인 메탄올을 시료로 하여 화점높이의 변화에 따른 풀 화재와 회오리 화염의 연소 시간, 질량감소속도, 화염온도, 화염높이 및 외부로부터 화염으로의 공기유입속도를 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

동일한 화점높이에서, 화점높이 30 cm일때를 제외하면 메탄올의 풀 화재 보다 회오리 화염에서의 연소시간이 평균 1.41배 짧았으며, 질량감소속도는 평균 1.40배 빠름을 알 수 있었다.

화염의 온도는 풀 화재의 경우 거의 유사한 분포를 나타

낸 반면, 회오리 화염에서는 화점의 높이가 0 cm일 때 가장 높은 온도 분포를 나타내었다.

화염의 높이는 풀 화재와 회오리 화염에서 모두 화점의 높이가 증가할수록 감소하였으며, 외부로부터 화염으로의 공기유입속도는 풀 화재의 경우 화점의 높이 증가에 따라 풍속측정기의 위치가 0 cm일 때는 증가하고 30 cm일 때는 감소한 반면, 회오리 화염의 경우에는 화점의 높이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

모든 실험결과로부터 화원의 높이 변화에 따른 연소특성은 풀 화재보다는 회오리 화염에 있어서 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2012년도 호원대학교 교내학술연구비지원사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. K. H. Oh, D. L. Kim, W. H. Kim, Y. S. Kim, I. S. Oh, S. C. Woo, S. K. Lee, S. J. In and D. M. Choi, "Principles of Fire Behavior", DongHwa Technology, Korea (2004).
2. M. B. Kim, "On Basic Characteristics of A Pool Fire", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 55-64 (1997).
3. K. Matsuyama, N. Ishikawa, Y. Ohmiya, S. Tanaka, F. Tanaka and Y. Hayashi, "A Study on Generation and Development Mechanisms of Fire Whirls, Part 1 Experimental Analysis using the Reductive Scale Model", Fire Science and Technology Special Issue, Vol. 26, No. 4, pp. 297-302 (2007).
4. S. E. Lee, "A Study on the Characteristics of Whirl Fire and Computational Modeling", Doctoral Dissertation, The Graduate School of Safety Engineering, Hoseo University (2006).
5. S. Y. Choi and H. S. Ryou, "An Experimental Study on the Effect of Rotation Strength on Fire Whirl Characteristics", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 20, No. 2, pp. 11-17 (2005).
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, pp. 245-266 (1996).
7. H. Hayasaka, "Unsteady Burning Rates of Small Pool Fires", Fire Safety Science, Proceedings of 5th Int. Symp., pp. 499-510 (1996).
8. A. Nakakuki, "Heat Transfer in Hot Zone Forming Pool Fires", Combustion and Flame, Vol. 109, pp. 353-369 (1997).

9. K. H. Oh, S. J. La and S. E. Lee, "A Study on the Characteristic of Pool Fire", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 39-44 (2004).
10. S. J. Ra, "A Study of The Flame Behavior of Pool Fire", Master's thesis, The Graduate School of Safety Engineering, Hoseo University (2003).
11. H. J. Park and J. H. Cha, "Combustion Characteristics of Pool Fire by Height of Fire Source", *Korea Academia-Industrial cooperation Society Review*, Vol. 11, No. 11, pp. 4671-4672 (2010).
12. Lei, J. Liu, N. Zhang, L. Chen, H. Shu, L. Chen, P. Deng, Z. Zhu, J. Satoh, K. de Ris and J. L., "Experimental Research on Combustion Dynamics of Medium-scale Fire Whirl", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, No. 2, pp. 2407-2415 (2011).
13. K. Kuwana, S. Morishita and R. Dotashi, "The Burning Rate's Effect on the Flame Length of Weak Fire Whirls", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, No. 2, pp. 2425-2432 (2011).
14. K. Kazunori, M. Satoshi and D. Ritsu, "Theoretical and Numerical Study on Flame Height of Axisymmetric Laboratory-Scale Fire Whirls", *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol. 51, No. 155, pp. 56-62 (2009).
15. K. H. Chuah, K. Kuwana and K. Saito, "Modeling a Fire Whirl Generated over a 5-cm-diameter Methanol Pool Fire", *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 9, pp. 1828-1833 (2009).
16. K. H. Chuah and G. Kushida, "The Prediction of Flame Heights and Flame Shapes of Small Fire Whirls", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 2599-2606 (2007).
17. K. Matsuyama, T. Kobayashi and Y. Ohmiya, "An Experimental Study on a Fixed-frame Type Fire Whirl", *Fire Science & Engineering, Interflam 2007*, pp. 1403-1408 (2007).
18. S. E. Lee and K. H. Oh, "A Study on the Analytical of Whirl Fire using the FDS and Combustion Characteristics of Whirl Fire", *Proceeding of 2007 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 332-337 (2007).
19. S. E. Lee and K. H. Oh, "A Study on the Combustion Characteristics of Whirl Fire", *2005 AIK General Meeting and Autumn Conference, the Korean Society of Safety*, pp. 114-120 (2005).
20. H. J. Park, "Mass Loss and Air Entrainment Rate of Whirl Fire by Height of Fire Source", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 126-131 (2011).