

화점높이 변화에 따른 Whirl Fire의 질량감소 및 공기유입속도 Mass Loss and Air Entrainment Rate of Whirl Fire by Height of Fire Source

박형주

Hyung-Ju Park

호원대학교 소방행정학과
(2011. 2. 7. 접수/2011. 4. 8. 채택)

요 약

화점높이 변화에 따른 회오리 화염의 질량감소속도와 공기유입속도를 알아보기 위하여 회오리 화염 연구에서 많이 사용되고 있는 인화성 액체인 메탄올과 노말 헵탄을 사용하였다. 용기의 재질은 스테인레스로 100mm × 100mm × 50mm 크기의 사각형으로 제작하여 연소실험에 사용하였다. 외부로부터 화염으로의 공기유입속도는 화점의 높이를 0cm에서 30cm로 변화시켰을 때, 0cm의 높이에서 가장 빠른 공기유입속도를 나타냈으며, 동일한 화점의 높이에서는 다점풍속기의 높이가 30cm인 경우에 가장 빠른 평균 공기유입속도와 최대 공기유입속도를 나타내었다. 또한 메탄올과 노말 헵탄의 회오리 화염의 결과로부터 질량감소속도는 노말 헵탄이 메탄올에 비해 1.33~1.58배, 외부로부터 화염으로의 공기유입속도는 노말 헵탄이 메탄올에 비해 4.38~5.44배 각각 빠름을 알 수 있었다. 결론적으로, 회오리 화염에서 질량감소속도와 외부에서 화염으로의 공기유입속도는 화점의 높이가 증가할수록 감소하며, 같은 실험조건에서 시료의 고위/저위 발열량이 높을수록 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

This study is intended to understand mass loss rate and air entrainment rate of the whirl fire by height of fire source. Liquid fuels were methanol and n-Heptane which are used in many studies of whirl fire. Size of vessel was 100 mm × 100 mm × 50 mm and the vessel was made by stainless steel. When height of fire source changed from 0 cm to 30 cm, air entrainment rate showed the fastest in case of 0 cm. And in the same height of fire source, average and maximum air entrainment rate showed the fastest in 30 cm of anemometer. From the results of whirl fire for methanol and n-Heptane, mass loss rate and air entrainment rate of n-Heptane was found to faster 1.33 to 1.58 times and 4.38 to 5.44 times compared with methanol, respectively. Consequently, mass loss rate and air entrainment rate in whirl fire was able to identified decrease as height of fire source increases and the higher the heating value, increases the that's value.

Key words: Whirl fire, Mass loss rate, Air entrainment rate, Methanol, N-heptane

1. 서 론

회오리 화염(whirl fire)은 대규모 화재에서 발생하는 특이한 현상으로 대규모 도시화재나 울창한 산림화재가 발생하는 경우 대기의 불안정성에 의해 화원의 주위에서 형성된 회전유동이 화염의 상승기류로 유입됨에 따라 화염주위에는 회전유동이 형성되게 되고 이러

한 회전유동의 모멘텀이 화염으로 전이되어 화염의 높이 및 회전속도를 증가시켜 연소속도를 증가시킨다.^{1,2)}

일반적으로 회오리 화염은 직경이 1m 미만이고 회전강도가 10m/s 보다 작은 것부터 직경이 3km이고 회전강도가 50m/s 이상인 것까지의 범위를 갖는다.³⁾ 따라서 회오리 화염은 보기 드문 현상이지만 주위와 압력차로 인한 큰 흡입력과 양력을 가지고 있으므로 일반적인 화재에 비해 매우 파괴적이며, 화염길이의 증가로 인해 불티 등의 불씨가 멀리까지 전파되어 화재

E-mail: sandelf@howon.ac.kr

를 확대시키고, 연소속도가 증가하면서 높은 연소열로 인한 원활한 소화활동의 어려움 등으로 인해 인명 및 재산상의 큰 피해를 초래할 수 있다.^{2,4)}

회오리 화염과 관련된 많은 실험과 이론적 연구는 과거 회오리 화염에 의한 재해를 기초로 하여 발생 원인에 대한 메커니즘을 밝히기 위해 실시되었다. 그러나 회오리 화염은 도시화재나 산불화재와 같은 광범위한 지형에서 발생하고, 여러 기상조건 및 자연환경과 같은 다양한 변수들을 고려해야 하기 때문에 실제 크기로 연구를 진행한다는 것은 거의 불가능하며 회오리 화염의 특성과 발생메커니즘을 명확히 정의내리기는 어려운 실정이다.⁴⁾

회오리 화염에 대한 최근 국외의 연구 동향을 살펴 보면, Lei 등⁵⁾은 회오리 화염과 일반 풀 화재(fuel fire)의 차이점을 명확히 하고 회오리 화염의 연소속도, 화염높이, 화염온도의 상관관계를 평가하기 위해 실험적인 방법에 의해 광범위하게 조사하였으며, Kuwana 등^{6,7)}은 약한 회오리 화염의 화염길이에 대한 연소속도의 영향과 축대칭 실험실 규모 회오리 화염의 화염 높이에 관한 이론적 및 실험적 연구, Chuah 등^{8,9)}은 직경 5cm의 메탄올 풀 화재에서 발생하는 회오리 화염의 모델링과 소규모 회오리 화염의 화염높이와 화염 형상 예측, Matsuyama 등¹⁰⁾은 고정 프레임 형태의 회오리 화염에 대한 실험적 연구 등을 진행하였다.

국내의 경우 배승용 등¹¹⁾은 굴참나무 낙엽의 회오리 화염 특성에 관한 실험 및 수치해석 연구, 이성은 등^{12,13)}은 회오리 화염의 연소특성에 관한 연구와 회오리 화염의 연소특성과 FDS를 이용한 회오리 화염 해석에 관한 연구, 최상열 등⁴⁾은 회전강도가 회오리 화염의 특성에 미치는 영향에 관한 실험연구, 강연옥 등^{14,15)}은 회오리 화염의 한계에 관한 연구와 회오리 화염과 풀 화재의 화염거동에 관한 연구 등을 진행하였다.

본 연구에서는 풀 화재에서 회오리 화염이 발생하는 실험 장치를 구성하여 연소가 진행됨에 따라 자발적으로 회오리 화염이 생성되도록 하였으며, 인화성 액체인 메탄올과 노말 헵탄을 시료로 사용하여 화점의 높이에 따른 회오리 화염의 질량감소속도(mass loss rate) 및 외부로부터 화염으로의 공기유입속도(air entrainment rate) 등의 변화를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시료

본 연구에 사용된 시료는 선행 연구자들에 의해 회오리 화염의 연소특성 연구에 자주 이용되고 있는 메

Table 1. Characteristics of Flammable Liquid Fuels

Characteristics	Flammable Liquid Fuels	
	Methanol	n-Heptane
Molecular Formula	CH ₄ O	C ₇ H ₁₆
Molecular Weight	32.04	100.2
Concentration (%)	99.5	95.0
Density	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

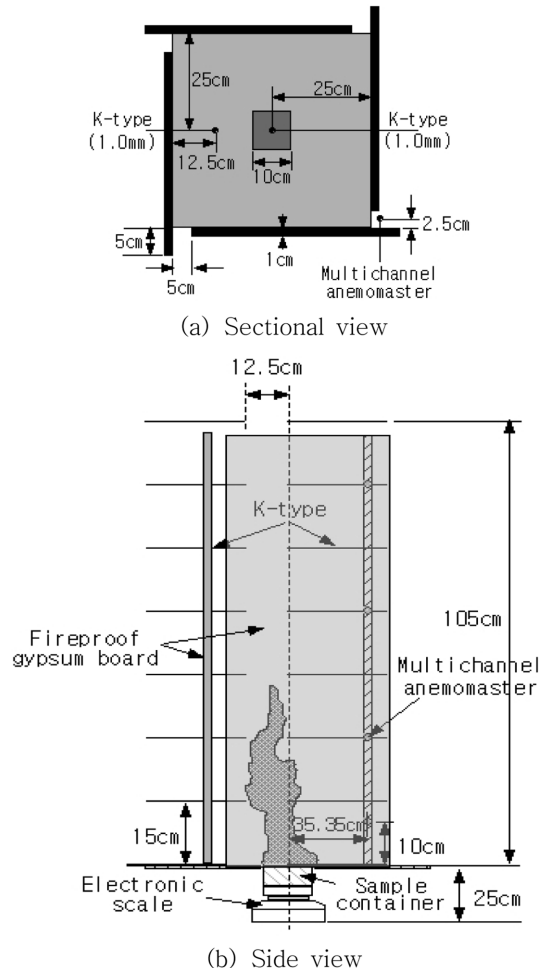


Figure 1. Schematic diagram of experiment apparatus.

탄올(methanol)과 노말 헵탄(n-Heptane)으로 국내 시판 중인 제품을 별도의 정제없이 사용하였다. 1회 실험 당 시료의 양은 각각 100g을 기준으로 하였으며, 이를 부피로 환산하면 메탄올 128.3ml, 노말 헵탄 147.1ml이다. 각 시료에 대한 분자식(량), 농도, 밀도, (고위/저위) 발열량, 기화열, 끓는점, 인화점, 발화점은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

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

질량감소속도는 0.01g의 분해능을 갖는 전자저울을 이용하여 측정하였으며, 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. 연소시간 동안 질량감소속도와 화원 주변의 공기유입속도 변화는 매 1초 간격으로 측정하였으며, 이 모든 데이터는 data logger를 이용하여 컴퓨터에 자동 저장되도록 한 후 분석에 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 질량감소속도(mass loss rate)

화점높이 변화에 따른 메탄올과 노말 헵탄의 회오리 화염에 있어서 단위면적 당 평균질량감소속도는 Table 2와 Figure 2에 나타내었다. 평균질량감소속도는 초기 각 연료의 연료량이 전부 연소되는데 걸린 시간으로부터 분석하였으며, 화점높이가 0cm일 때 메탄올의 경우 27.69g/m²·sec, 노말 헵탄의 경우 43.76g/m²·sec로 최대값을 나타낸 후 화점높이가 증가할수록 감소하는 경

Table 2. Average Mass Loss Rate of Flammable Liquid Fuels by Height of Fire Source

Height of Fire Source [cm]	Mass Loss Rate [g/m ² · sec]	
	Methanol	n-Heptane
0	27.69	43.76
15	15.71	18.14
30	11.36	15.10

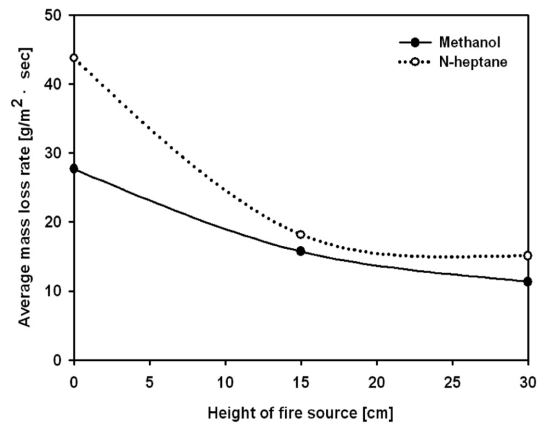


Figure 2. Relationship between the height of fire source and average mass loss rate.

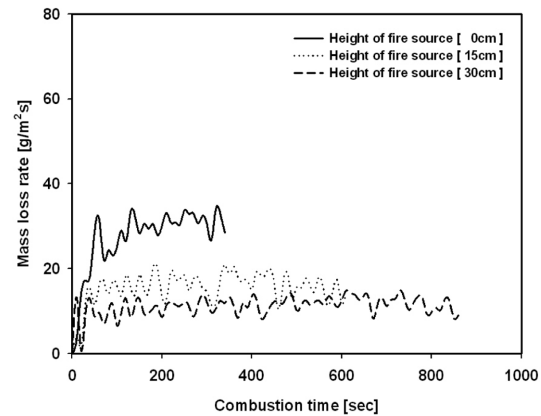


Figure 3. Variations of mass loss rate in methanol whirl fire.

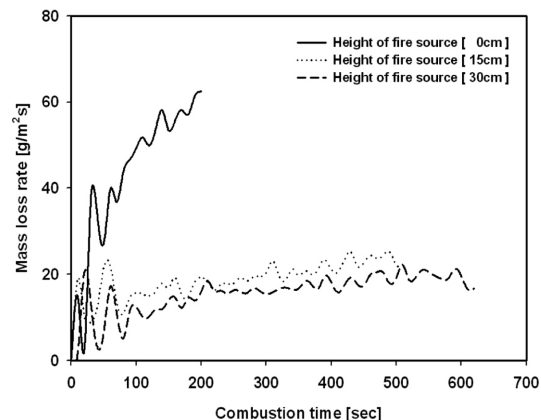


Figure 4. Variations of mass loss rate in n-Heptane whirl fire.

향을 나타내었다.

Figure 3과 4는 화점의 높이를 0cm, 15cm 그리고 30cm로 변화시켰을 때의 연소시간의 경과에 따른 질량감소속도를 나타낸 것으로 화점의 높이별로 메탄올의 경우 $34.2\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$, $21.0\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$, $14.9\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$, 노말 헵탄의 경우 $62.5\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$, $25.3\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$, $22.1\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$ 의 최대값을 각각 나타내었다.

일반적으로 회오리 화염이 발생되는 경우 외부에서 화염의 중심부로 유입되는 공기의 소용돌이 현상에 의해 가연성액체의 표면에서 증발된 연료와 유입된 공기의 빠른 혼합으로 확산 연소속도가 증가하게 되고 이로 인해 외부로의 에너지 방출속도가 증가하게 된다. 또한 외부로 방출된 에너지는 복사, 대류 및 용기의 벽면을 통한 전도에 의한 연료로의 피드백이 증가하고 실험장치 내부의 공기 온도를 상승시켜 대류에 의한 상승기류가 형성되어 외부로부터 유입되는 공기의 량을 증가시켜 연료의 확산 연소속도를 가속화시키는 역할을 한다. 따라서 화점의 높이가 증가할수록 평균질량감소속도와 최대질량감소속도가 감소하는 현상은 화점의 높이가 증가할수록 외부로부터 화염으로의 공기 유입속도와 화염으로부터 방출되는 열에너지의 피드백 효과의 감소에 의한 것으로 판단된다.

3.2 외부로부터 화염으로의 공기유입속도

다점풍속측정기(Kanomax system 6242, multichannel anemomaster Model 1550)을 Figure 1(b)와 같이 화원으로부터 35.35cm의 거리에서 바닥면을 기준으로 10, 30, 60 그리고 90cm의 높이로 4개를 설치하여 외부로부터 실험 장치내로의 공기유입속도를 연소시간동안 측정된 결과는 Table 3~4와 Figure 5~8에 나타내었다.

Table 3~4와 Figure 5~8에 나타낸 바와 같이 외부로

Table 3. Average Air Entrainment Rate of Whirl Fire
[Units: mm/sec]

Fuels	Height of Anemometer	Height of Fire Source		
		0 cm	15 cm	30 cm
Methanol	10[cm]	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
n-Heptane	10	189.51	154.20	110.95
	30	766.54	484.08	346.13
	60	52.78	0.42	0.29
	90	44.96	0.0	0.0

Table 4. Maximum Air Entrainment Rate of Whirl Fire
[Units: mm/sec]

Fuels	Height of Anemometer	Height of Fire Source		
		0 cm	15 cm	30 cm
Methanol	10 cm	120	90	70
	30 cm	250	150	140
	60 cm	30	0	0
	90 cm	0	0	0
n-Heptane	10 cm	270	200	150
	30 cm	1360	710	520
	60 cm	140	20	10
	90 cm	130	0	0

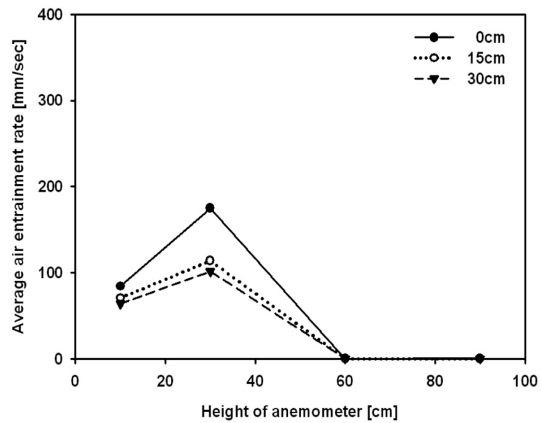


Figure 5. Average air entrainment rate in methanol whirl fire by height of fire source.

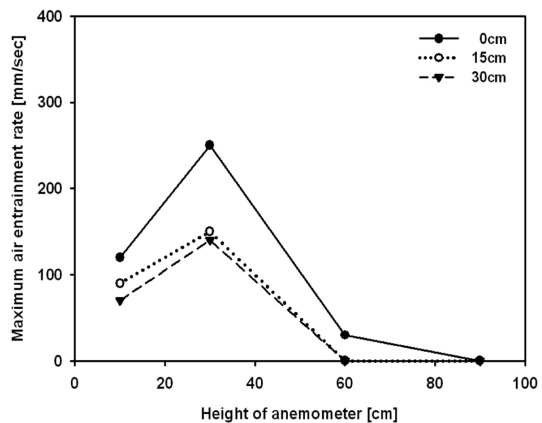


Figure 6. Maximum air entrainment rate in methanol whirl fire by height of fire source.

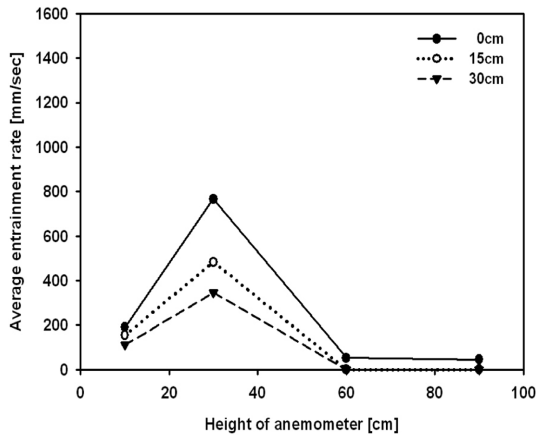


Figure 7. Average air entrainment rate in n-Heptane whirl fire by height of fire source.

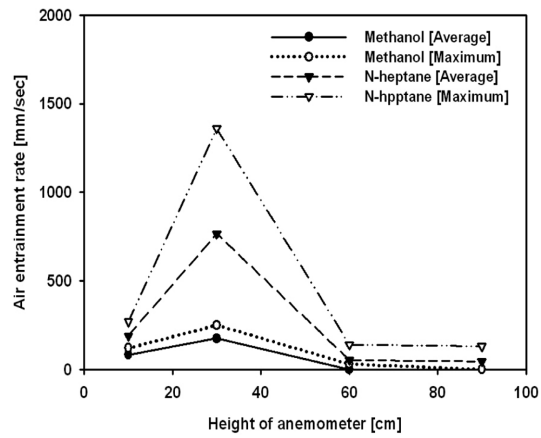


Figure 9. Comparison of average and maximum air entrainment rate in whirl fire.

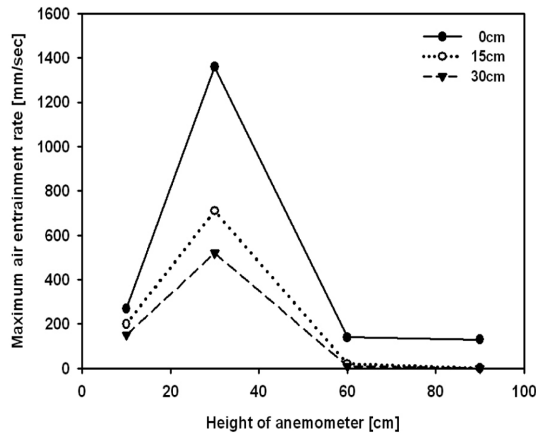


Figure 8. Maximum air entrainment rate in n-Heptane whirl fire by height of fire source.

부터 화염으로의 공기유입속도는 화점의 높이를 0cm에서 30cm로 변화시켰을 때, 0cm의 높이에서 가장 빠른 공기유입속도를 나타내었다. 또한, 동일한 화점의 높이에서는 다점풍속기의 높이가 30cm인 경우에 가장 빠른 평균 공기유입속도와 최대 공기유입속도를 나타냈으며, 다점풍속기의 높이가 증가할수록 공기유입속도가 감소함을 알 수 있었다.

다점풍속기의 높이가 30cm일 때, 화점의 높이 변화에 따라서 평균 공기유입속도는 메탄올의 경우 174.94mm/sec에서 101.44mm/sec로, 노말 헵탄의 경우 766.54mm/sec에서 346.13mm/sec로 각각 감소하였다. 또한, 최대 공기유입속도는 메탄올의 경우 250mm/sec에서 140mm/sec로, 노말 헵탄의 경우 1360mm/sec에서

520mm/sec로 각각 감소하였다. 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 상승기류의 발생 또한 감소하게 되어 외부로부터 유입되는 공기의 속도가 감소하게 된다는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 화원의 높이가 0cm일 때, 메탄올과 노말 헵탄의 회오리 화염에서의 평균 및 최대 공기유입속도를 비교한 것으로 다점풍속기의 높이가 30cm인 경우에 있어 노말 헵탄이 메탄올에 비해 평균 및 최대 공기유입속도가 4.38배, 5.44배 각각 빠름을 알 수 있다. 이는 Table 1에 나타난 바와 같이 노말 헵탄의 고위/저위 발열량이 48.07MJ/kg, 44.56MJ/kg으로 메탄올의 고위/저위 발열량인 22.68MJ/kg, 19.94MJ/kg보다 높기 때문에 연소 시 보다 많은 열에너지가 방출되고 이에 따라 실험 장치내의 온도를 상승시켜 대류에 의한 상승기류가 보다 더 잘 형성되어 외부로부터 유입되는 공기의 유입속도가 상승된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 인화성 액체 연료인 메탄올과 노말 헵탄을 시료로 하여 화점높이의 변화에 따른 회오리 화염의 질량감소속도와 공기유입속도를 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

평균 질량감소속도에 있어서 화점의 높이가 0cm일 때 메탄올의 경우 $27.69\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$, 노말 헵탄의 경우 $43.76\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}$ 로 최대값을 나타낸 후 화점높이가 증

가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 외부로부터 화염으로의 공기유입속도는 화점의 높이를 0cm에서 30cm로 변화시켰을 때, 0cm의 높이에서 가장 빠른 공기유입속도를 나타냈으며, 동일한 화점의 높이에서는 다점풍속기의 높이가 30cm인 경우에 가장 빠른 평균 공기유입속도와 최대 공기유입속도를 나타내었다. 또한 메탄올과 노말 헵탄의 회오리 화염의 결과로부터 질량감소속도는 노말 헵탄이 메탄올에 비해 1.33~1.58배, 외부로부터 화염으로의 공기유입속도는 노말 헵탄이 메탄올에 비해 4.38~5.44배 각각 빠름을 알 수 있었다.

결론적으로, 회오리 화염에서 질량감소속도와 외부에서 화염으로의 공기유입속도는 화점의 높이가 증가할수록 감소하며, 같은 실험조건에서 시료의 고위/저위 발열량이 높을수록 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 호원대학교 교내학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Ken Matsuyama, Naohisa Ishikawa, Yoshifumi Ohmiya, Shu-ichi Tanaka, Futoshi Tanaka, and Yoshihiko 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)
2. 이성은, "회오리 화염의 연소특성과 수치해석에 관한 연구", 호서대학교대학원 박사학위논문, pp.1-6(2006).
3. D.W. Goens, "Fire Whirls", NOAA Technical Memorandum NWS WR-129, Missoula, MT(1978).
4. 최상열, 유흥선, "회전강도가 Fire Whirl의 특성에 미치는 영향에 관한 실험연구", 한국안전학회지, Vol.20, No.2, pp.11-17(2005).
5. Jiao Lei, Naian Liu, Linhe Zhang, Haixiang Chen, Lifu Shu, Pu Chen, Zhifeng Deng, Jiping Zhu, Kohyu Satoh and John L. de Ris, "Experimental Research on Combustion Dynamics of Medium-scale Fire Whirl", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33, No.2, pp.2407-2415 (2011).
6. 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).
7. Kuwana Kazunori, Morishita Satoshi, and Dobashi 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)
8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. 배승용, 유흥선, 홍기배, "굴잡나무 낙엽의 Fire Whirl 특성에 관한 실험 및 수치해석 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.3, pp.73-78(2009).
12. 이성은, 오규형, "회오리 화염의 연소특성과 FDS를 이용한 회오리 화염 해석에 관한 연구", 한국화재소방학회 2007년도 춘계학술논문발표회 논문집, pp.332-337(2007).
13. 오규형, 이성은, "Fire whirl의 연소특성에 관한 연구", 한국안전학회 2005년도 추계학술발표 논문집, pp.114-120(2005).
14. 강연옥, 오규형, 이성은, "Fire Whirl의 한계에 관한 연구", 한국안전학회 2004년도 추계학술 발표회, pp.96-101(2004).
15. 강연옥, 오규형, 이성은, "Whirl Fire와 Pool Fire의 화염 거동에 관한 연구", 한국안전학회지, Vol.19, No.3, pp.45-50(2004).