Whirl Fire와 Pool Fire의 화염 거동에 관한 연구

오규형† · 강연옥* · 이성은*
호서대학교 소방학과 · *호서대학교 대학원
(2004. 5. 4. 접수 / 2004. 7. 23. 채택)

A Study on the Flame Behavior of Whirl Fire and Pool Fire

Kyu-Hyung Oh† · Youn-Ok Kang* · Sung-Eun Lee*
Department of Fire Protection Engineering, Hoseo University
*Graduate School of Hoseo University
(Received May 4, 2004 / Accepted July 23, 2004)

Abstract : 4-panel of 1m height and 45cm width were fixed on the 40cm×40cm bottom plate and the opening of the panel corner was 5cm. Diameter of stainless vessel is 10cm and its height is 2cm and it located at the center of the bottom plate. 78mL liquid fuel was filled in the vessel and its depth was 1cm. Flame temperature was measured with K type thermocouple, and radiation heat of flame was measured with heat flux meter. Flame height and its behavior was visualized with video camera. and mass burning rate was measured by fuel combustion time. According to the development of fire, flame swirling was begin. From the experiment the mass burning rate was larger and the height of flame was higher than the usual pool fire flame. Flame temperature and heat flux also increased far more than the pool fire. Consequently the swirling air flow through the openings between the panel and thermal buoyance contribute to increase of heat release rate, flame length and mass burning rate.
Key Words : pool fire, whirl fire, swirling fire

1. 서 론

대규모 도시화재나 울창한 산림화재가 발생하는 경우 이상기류나 화재시 발생되는 열등에 의하여 대규모의 화염회오리가 발생되는 경우가 있고 이런 경우 불길이 통상의 화염보다 높아 불티 등의 불씨가 멀리까지 전파되어 화재를 확대시키고[1] 연소속도 또한 증가하면서 높은 연소열로 인한 인명 및 재산의 피해가 확대되었다. 역사적으로 1923년 관동 대지진에서 수많은 인명피해가 발생하였는데 이 대규모 피해의 원인은 화염회오리가 주요 원인이었으며 2차대전 당시 함부르크 대화재에도 화염회오리가 발생하여 큰 피해를 발생시켰던 것으로 기록되어 있다[1,2].

이러한 화염회오리는 연소현상과 더불어 열 부력에 의한 화염과 주위 기류의 상승이 시작되며 이때 화염주위의 공기유동 및 주변의 공기 유동장 형성에 영향을 미치는 기하학적 구조 등에 의해 화염회오리(선회 화염)를 형성하는 것으로 보인다. 이러한 화염회오리 형성과정은 태풍에 의한 토네이도 생성원리와도 유사한 것으로 볼 수 있다[1]. 실제 규모의 화염회오리나 토네이도 현상의 재현은 불가능하여 실험적으로 유사한 현상을 통하여 유체 역학적인 고찰과 연소학적인 고찰이 H. W. Emmons와[1] K. Satoh[3,5-7] 등에 의해 연구 되어왔다.

본 연구에서는 pool fire에서 이러한 화염회오리(whirl fire)가 발생되는 실험 장치 구조를 구성하여 연소가 시작됨에 따라 자발적으로 화염회오리가 생성되도록 하였으며, 이때의 화염의 높이, 화염의 온도, 연소속도 및 heat flux등을 측정하여 pool fire에서의 화염 주위 유동장의 공기유입에 의한 연소특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Pool fire에서의 연소특성과 화염회오리가 생성될

†To whom correspondence should be addressed.
khoh@office.hoseo.ac.kr

때의 연소특성을 비교하기 위하여 화염의 온도, 화염높이, 연소속도 및 heat flux등을 측정하였다. 액체연료 시료로는 아세톤, 메탄올, 헥산 및 휘발유를 사용하였다. 연소용기는 직경 10cm이고 높이가 2cm인 스텐레스 용기를 사용하였으며, 연소화염과 측정값들의 안정된 값을 얻을 수 있는 연소시간을 갖도록 시료는 78cm^{3}를 취하여 용기의 높이에 반이 되는 1cm의 높이까지 채웠다.

화염회오리를 발생시키기 위한 실험장치의 구조는 다음 Fig. 1과 같으며 넓이 45cm 높이 1m의 석고판 3개와 유리판 1개를 각 판의 틈새 5cm로 유지하며 바닥 면적이 40cm×40cm이 되도록 설치하였다. 연소용기는 실험장치의 바닥면 중앙에 위치하도록 하였으며 용기의 과열을 방지하고 매 실험마다 동일한 외부 온도 조건을 유지하기위해 냉각수를 담은 용기 안에 연료용기를 설치하였고 매 실험 시 마다 냉각수를 교환하였다. 화염 중심부의 온도를 높이에 따라 측정하기 위하여 K형 열전대(thermo-couple : T.C) 3개를 연료 액면, 연료면에서 20cm와 40cm에 각각 설치하였으며 복사열을 측정하기 위한 heat flux 메타는 용기 직경의 2배 떨어져서 연료 면으로부터 20cm 높이가 되는 곳에 화염과 직각으로 설치하였으며 화염의 높이와 화염의 회전하는 형상은 비디오카메라로 촬영하여 분석하였다.

Pool fire에서의 연소특성은 벽면이 없는 상태에서 연소시켰으며 온도를 측정하는 위치를 액면, 액면에서 10cm와 20cm 높이에 각각 설치하였고 복사열측정을 위한 heat flux meter는 용기중심에서 20cm 떨어지고 높이 10cm가 되는 곳에 설치하였다. Fig. 2는 pool fire에서 실험장치를 설치하여 온도와 열유

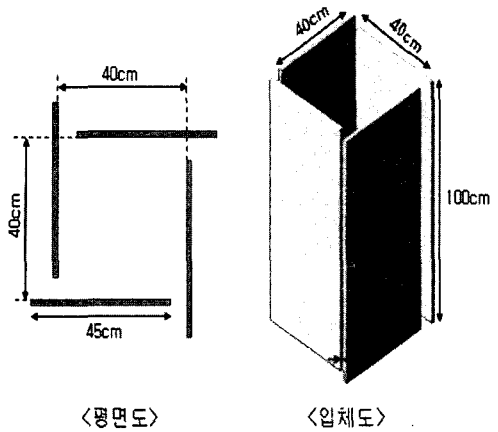


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

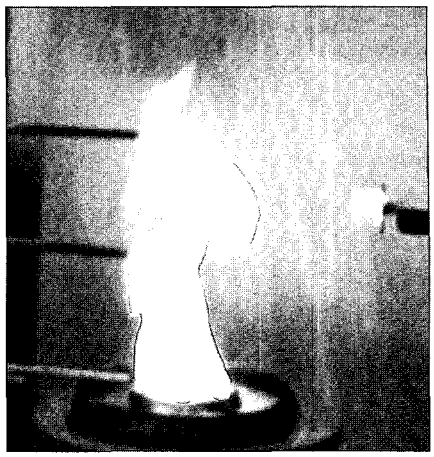


Fig. 2. Photograph of pool fire experiment

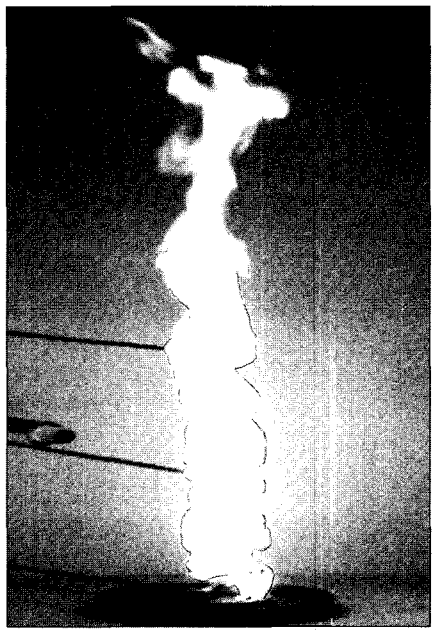


Fig. 3. Photograph whirl fire flame

속을 측정하는 모습을 찍은 사진이다. 다음 Fig. 3은 회오리화염의 화염모습이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화염온도

Fig. 4의 (a)는 pool fire에서의 아세톤의 화염온도를 측정한 결과이고 (b)는 화염회오리 발생 장치에서 화염온도를 측정한 결과로서 열전대 1은 용기의 연료면 이고 열전대 2는 연료면에서 10cm로 화염의

중간부분이고 열전대 3은 연료면에서 20cm 높이로 화염의 끝부분의 온도를 측정한 것으로 (a)의 pool fire에서의 주기적인 vortex shedding과 난류 화염으로 온도의 편차가 발생하지만 (b)의 화염회오리가 발생한 경우 온도의 편차는 더욱 커지는 현상을 보이고 있으나 화염의 최대온도는 pool fire에서 최고온도의 평균은 약 900℃ 정도인데 비해서 화염회오리 발생시 약 1000℃로 더욱 높은 것을 볼 수 있는데 이는 회오리 발생에 의해 화염으로의 공기흡인속도가 증가하여 증발된 연료와 공기와의 혼합속도가 빨라져서 연소속도를 증가시키며 화염의 높이가 증가함으로 화염에서 연료 면으로의 복사열도 증가하여 pool fire에 비해 에너지 방출속도가 크게 되기 때문으로 생각되는데 이는 뒤에 설명하는 연소속도의 증가와 복사 열유속의 증가를 통해 알 수 있다. 또한 열전대의 위치에 따른 온도의 비교에서 연료면에 설치한 온도를 비교하면 회오리화염이 발생된 경우 화염이 회전하면서 연료면에 더욱 근접하여 연소하므로 온도가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 메탄올에 대한 pool fire에서 화염의 온도와 회오리 화염에서의 온도 측정결과로 최고온도 값이 약 800℃ 인데 비하여 회오리화염에서는 약 1000℃ 정도가 됨을 보여주고 있다. 또 Fig. 6은 헥산에 대한 실험 결과로 pool fire에서는 약 750℃를 회오리 화염에서는 약 1000℃를 나타내었으며 Fig. 7의 가

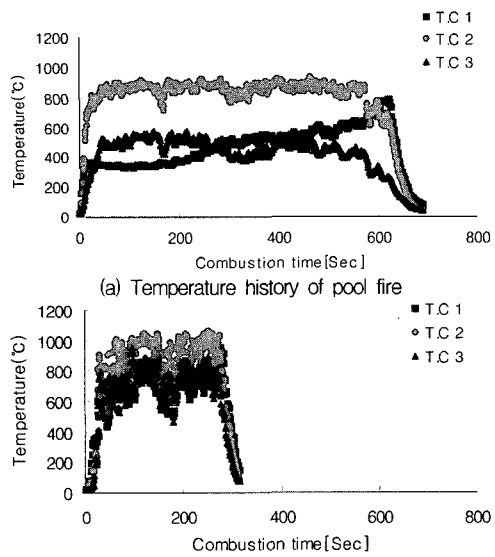


Fig. 4. Temperature history of pool fire and whirl fire of acetone

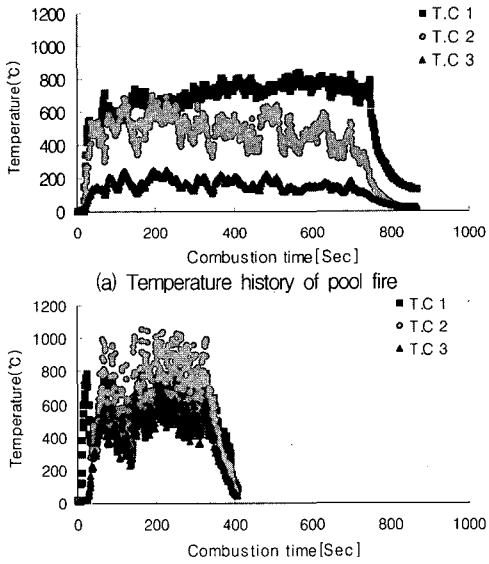


Fig. 5. Temperature history of pool fire and whirl fire methanol

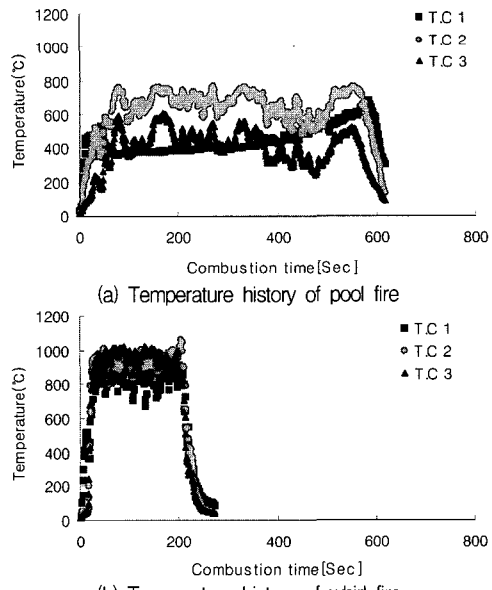
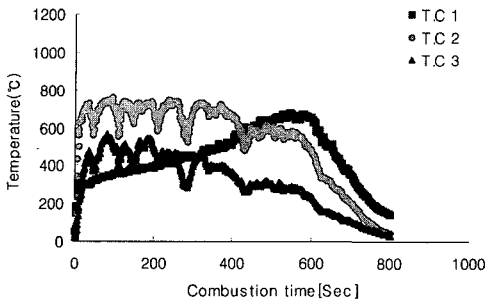


Fig. 6. Temperature history of pool fire and whirl fire of hexane

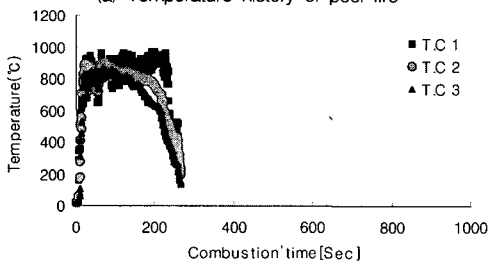
솔린의 경우 전자는 약 750℃ 그리고 후자는 약 950℃를 나타내었다. 이 결과로부터 화염 회오리 발생시 연료에 따라 약 100℃~250℃ 정도 높은 온도를 나타내었다.

3.2. 연소속도

다음 Table 1은 각 연료의 pool fire와 회오리화염



(a) Temperature history of pool fire



(b) Temperature history of whirl fire

Fig. 7. Temperature history of pool fire and whirl fire of gasoline

발생시 연소시간을 비교한 것으로 실험 조건은 동일한 용기에 동일한 연료량을 가지고 동일한 연료 온도 및 실온에서 실시하였다. 회오리화염의 경우 보통의 pool fire에 비하여 약 2.5배정도 빠른 것을 볼 수 있다. 따라서 단위시간당 많은 연료가 연소하므로 화염의 온도가 높고 복사열유속이 크게 증가할 것을 예상할 수 있으며 이 결과 화염회오리 발생시 피해가 확대될 것을 예상할 수 있다. 연료 용기 면적과 연소시간의 곱으로 연료의 질량을 나누어 평균 질량연소속도를 계산한 결과는 다음 Table 2와 같다. Table 2에서 pool fire의 연소속도는 문헌치에 나오는 최대 연소속도와 비교하면 50%~20%정도인데 이는 용기의 직경에 따른 연소속도에서[9] 최소값에 해당되는 직경부분의 평균값이기 때문으로 생각된다. 그러나 회오리화염이 발생된 경우는 동일한 조건에서 실험한 pool fire에 비해서는 약 2~3배정도 큰 것을 볼 수 있다. 평균 연소속도에서 각 연료의 에너지 방출속도를 비교하면 다음 Table 3과 같으며 역시 회오리 화염에서의 에너지 방출 속도가 2~3배정도 큰 것을 볼 수 있다.

Table 1. Combustion time of pool fire and whirl fire (sec)

	Acetone	Methanol	Hexane	Gasoline
pool fire	660	847	605	764
whirl fire	316	382	233	210

Table 2. Mass burning rate of pool fire and whirl fire ($g/m^2 \cdot s$)

		Acetone	Methanol	Hexane	Gasoline
pool fire	Experiment	13.1	10.0	12.5	10.6
	Literature[8]	40	22	70~80	50~60
whirl fire		30.7	24.4	37.7	32.4

Table 3. Heat release rate of pool fire and whirl fire(Kw)

	Acetone	Methanol	Hexane	Gasoline
pool fire	3.17	1.56	4.3	3.64
whirl fire	7.43	3.79	12.97	11.12

Table 4. Maximum flame height of pool fire and whirl fire (단위 : cm)

	Acetone	Methanol	Hexane	Gasoline
pool fire	46	23	55	48
whirl fire	92	47	120	101

3.3. 화염의 높이

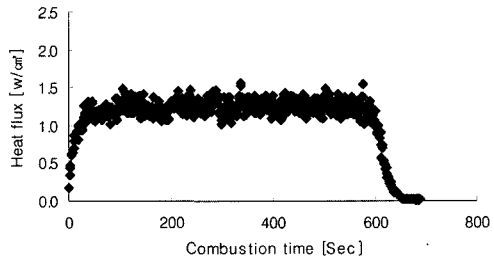
다음 Table 4는 각 연료의 pool fire에서와 화염회오리 발생시의 최대화염의 높이를 비교한 것이다. Table 4에서 보여주는 것처럼 화염회오리가 발생되는 경우 일반적인 pool fire보다 약 2배 이상의 화염 높이가 되는 것을 볼 수 있는데 이는 유입되는 공기의 swirling에 의한 연료 증발속도의 증가와 공기와의 빠른 혼합으로 확산 연소속도가 증가하고 이에 따라 에너지 방출속도가 증가하고 다시 용기액면으로의 열전달 양이 증가하여 연료의 기화속도를 증가시키고 증발된 연료가 유동하는 공기와 함께 더 높은 위치까지 이동하며 연소하는 현상의 순환과정으로 볼 수 있는데 Heskestad의 계산식과 비교할 때 에너지방출속도가 증가하면 화염의 높이가 증가하는 것과 같다. Table 4의 화염 높이는 Table 2나 Table 3의 데이터를 적용하지 않고 문헌에 나오는 최대 질량연소속도 값을 넣어 Heskestad의 계산식에[8] 의해 계산 한 값과 비교할 때 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데 이는 순간적인 최대 연소속도는 평균 연소속도에 비하여 훨씬 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 실제 화재에서 화염회오리가 발생할 경우 더욱 높은 곳까지 빠른 속도로 열전달이 가능하여 화재전파속도가 증가하게 됨을 예상할 수 있다.

3.4. Heat Flux

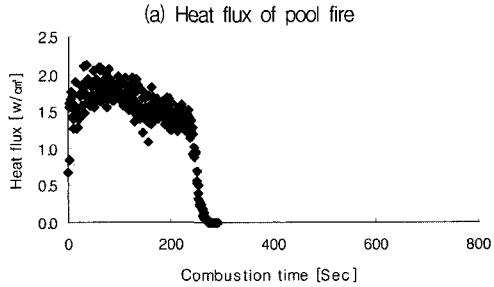
다음 Fig. 8의 (a)는 아세톤의 pool fire에서 heat flux를 측정한 결과이고 (b)는 회오리화염 발생시의 heat flux 측정결과이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이

화염회오리에서 heat flux의 측정값이 pool fire의 약 1.5배정도 크게 나타났으며 헥산이나 가솔린의 경우는 약 2배정도로 높게 측정되었다. 이러한 현상은 이미 앞에서 설명한 연소특성에서 예측할 수 있었으며 실제 측정결과도 유사한 경향을 나타내었다.

이러한 결과는 pool fire에서 공기유입에 의해 화염회오리를 형성하면서 연소속도가 증가하고 화염의 온도가 높아지며 열방출속도가 커져서 주위 가연물 존재시 복사열 유속의 증가와 수직 상승면으로의 열전달 등이 증가하여 화재 전파 속도에 크게 영향을 미치게 됨을 예측할 수 있으며 산불화재나 대도시 화재에서 발생했던 회오리 화염에 의한 대규모 피해 현상을 이해할 수 있다.

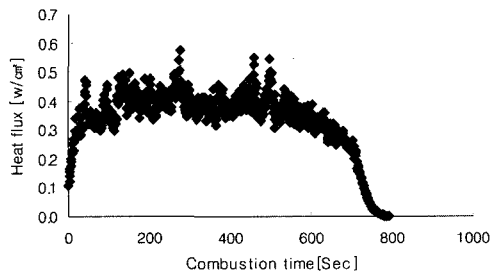


(a) Heat flux of pool fire

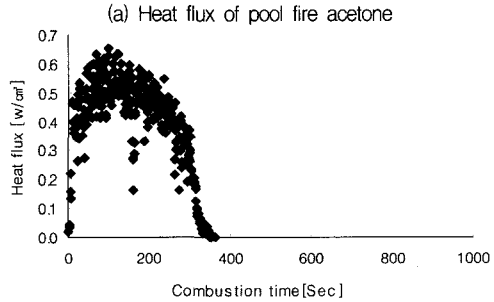


(b) Heat flux of whirl fire

Fig. 8. Heat flux of pool fire and whirl fire of acetone

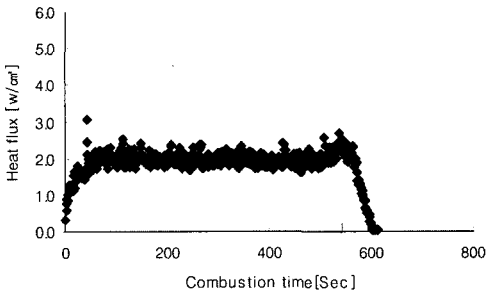


(a) Heat flux of pool fire acetone

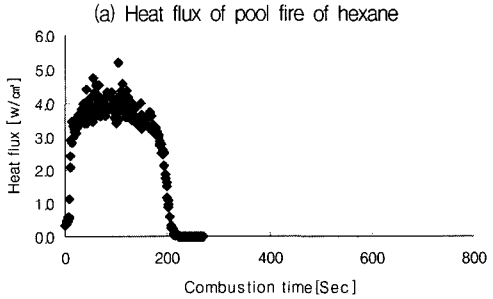


(b) Heat flux of whirl fire of acetone

Fig. 9. Heat flux of pool fire and whirl fire of methanol

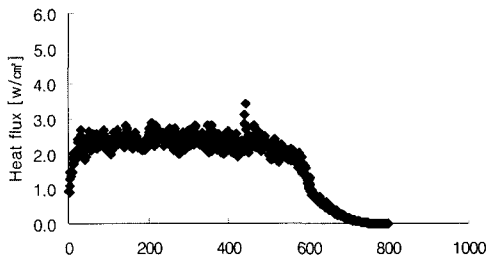


(a) Heat flux of pool fire of hexane

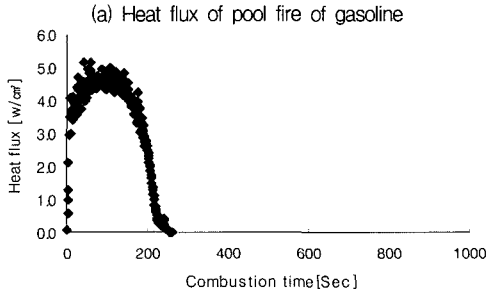


(b) Heat flux of whirl fire of hexane

Fig. 10. Heat flux of pool fire and whirl fire of hexane



(a) Heat flux of pool fire of gasoline



(b) Heat flux of whirl fire of gasoline

Fig. 11. Heat flux of pool fire and whirl fire of gasoline

Fig. 9는 메탄올에 대한 복사열 측정결과로 OH기를 갖기 때문에 청색 화염을 나타내 화염으로부터의 복사열이 비교적 낮은 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 헥산에 대한 복사열의 측정 결과이고 Fig. 11은 가솔린에 대한 복사열측정 결과로 두 시료 모두 연소열이 비슷하며 복사열도 비슷한 값을 나타내었으며 아세톤이나 메탄올에 비해서는 높은 복사 에너지를 방출함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 용기내 액체 연료의 액면연소인 pool fire에서 화염회오리가 발생되는 구조를 통해 화염회오리 발생시 연료의 연소 형태와 거동 및 화염의 온도와 복사열유속, 연소속도, 화염높이 등을 측정 비교함으로서 회오리화염의 특성을 살펴보았으며 화염 주위의 벽면에 의한 공기의 유입 조건과 열 부력 현상에 의한 회오리(whirl)발생으로 인해 일반적인 pool fire에서 보다 연소속도의 현저한 증가, 연소화염 온도의 상승, 화염높이의 증가, 복사열 유속이 크게 증가하였다.

결국 이러한 회오리 화염의 발생은 연소 특성을 크게 증가시켜 화재 전파속도의 증가와 화재 범위의 확대로 화재 시 손실에 더욱 치명적인 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

이번의 연구는 이러한 화염회오리 발생을 방지하기 위한 한계 조건을 연구하기 위한 선행 연구로서 향후 실험장치와 연소용기의 무차원화 및 열방출속도와 실험장치의 구조와의 관련성 등을 계속 연구할 것이다.

참고문헌

1) Howard W. Emmons, Shuh-jing Ying, "The Fire Whirl", 11th Symp. on Combustion 1966, The Combustion Institute, pp. 475~488, 1967.

2) A. Muraszew, J. B. Fedele, and W. C. Kuby, "The Fire Whirl Phenomenon", 1976 Fall meeting, Combustion Institute. Oct. 1976.

3) Satoh, K. and Yang, K. T., "Experimental Observations of Swirling Fires", Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress Exhibition, Atlanta, GA, USA, ASME HTD-Vol. 335, 400, 1996.

4) Satoh, K., Yang, K. T. and Kuwahara K., "Comparison between Experimental and Numerical Simulations due to a Single flame in a Sqtuare Channel with Corner Gaps", 4th Asia Oceanian Symp. on Fire Science and Technology, Tokyo Japan, pp. 577~586, 2000.

5) Satoh, K. and Yang, K. T., "Simulations of Swirling Fires Controlled by Channeled Self-Generated Entrainment Flows", Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp. 201~212, 1997.

6) Satoh, K. and Yang, K. T., "Study of Swirling Fires in a Vertical Channel with a Single Gap", Proceedings of the 35th National Heat Transfer Symposium of Japan, Nagoya, Paper No. B321, 1998.

7) Satoh, K. and Yang, K. T., "Experiments and Numerical Simulations of Swirling Fires due to 2× 2 Flames in a Channel with a Single Gap", Proceedings of the 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA, ASME HTD-Vol.2, pp. 49~56, 1998.

8) James G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior", Delmar Publisher, pp70-140, 1997

9) 平野敏右 著: 김홍, 오규형, 양희준, 인세진 譯, "연소학", 동화기술, pp. 92~202, 1997.