

Fire whirl의 연소 특성에 관한 연구

오규형 · 이성은*

호서대학교 소방학과 · *호서대학교 대학원

1. 서 론

최근 지난친 도시화 산업화로 인하여 자연재해 및 화재 발생율이 증가되고 이를 통해 귀중한 생명과 막대한 재산 피해가 증대되고 있는 실정이다. 특히 대규모 도시화재나 울창한 산림화재시 이상기류나 화재에서 발생하는 열등에 의하여 대규모의 화염회오리가 발생하는 경우가 있고 이런 경우 불길의 통상의 화염보다 높아 불티 등의 불씨가 멀리까지 전파되어 화재를 확대시키고¹⁾ 연소속도 또한 증가하면서 단시간에 높은 연소열이 발생하여 이로 인한 인명 및 재산의 피해가 확대되었다. 역사적으로 1906년 샌프란시스코 대지진과 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 fire whirl(화염회오리)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 K. Satoh 등에 의해 연구 되어왔다.^{1),3),4)}

본 연구에서는 fire whirl(화염회오리)가 발생하는 실험 장치 구조를 구성하여 연소가 시작됨에 따라 자발적으로 화염회오리가 생성되도록 하였으며, 이때의 화염의 높이, 화염의 온도, 연소속도 및 heat flux등을 측정하여 fire whirl 발생시의 연소특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fire whirl이 생성될 때의 연소특성을 비교하기 위하여 연소용기의 크기, 벽면 크기, 바닥 면적, 틈새 크기 등을 통하여 화염높이, 연소속도를 측정하였다. 액체 연료 시료로는 아세톤과 헵탄을 사용하였으며 모든 실험에서 시료 연료는 연소용기의 높이에 반이 되는 1cm의 높이까지 채웠다.

fire whirl를 발생시키기 위한 실험장치의 구조는 다음 Fig.1과 같으며 벽면은 가로 45cm, 60cm, 90cm 높이 1m, 1.5m인 것을 각각 사용하였으며 3면은 석고판을 사용하였고 한

면은 화염의 구조를 관찰하고 촬영을 위해 유리를 사용하였다. 바닥면의 넓이는 30cm×30cm, 40cm×40cm, 50cm×50cm, 60cm×60cm가 되도록 하였으며 각 벽면의 틈새는 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm가 되도록 하였다. 연소용기는 직경 10cm, 높이 2cm의 스테인레스 용기를 사용하였으며 실험장치의 바닥면 중앙에 위치하도록 하였다. 화염의 높이와 회오리 화염 형상을 관찰하기 위하여 비디오카메라로 촬영하고 연료의 연소시간을 측정하였다.

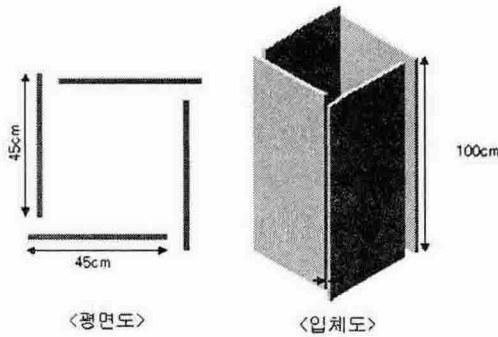


Fig. 1. Schematic diagram of experiment apparatus.

3. 결과 및 고찰

3-1. 연소시간

벽면의 높이가 회오리화염 및 연소속도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 벽면의 높이를 1m과 1.5m으로 하고 벽면의 가로 크기는 앞의 실험과 같이 각각 45cm, 60cm, 90cm로 변경시키면서 연소시간과 화염의 높이를 측정하였다. 이때 벽의 너비가 45cm일 때 바닥면적의 넓이가 30cm×30cm, 40cm×40cm, 50cm×50cm, 60cm×60cm가 되도록 하였고 바닥 면적에 대하여 벽면의 틈새는 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm가 되도록 변경하며 실험하였다. 다음 Fig.2의 시료는 아세톤, Fig.3은 헵탄으로 벽의 너비 45cm일 때 벽면 높이를 비교한 그래프이다.

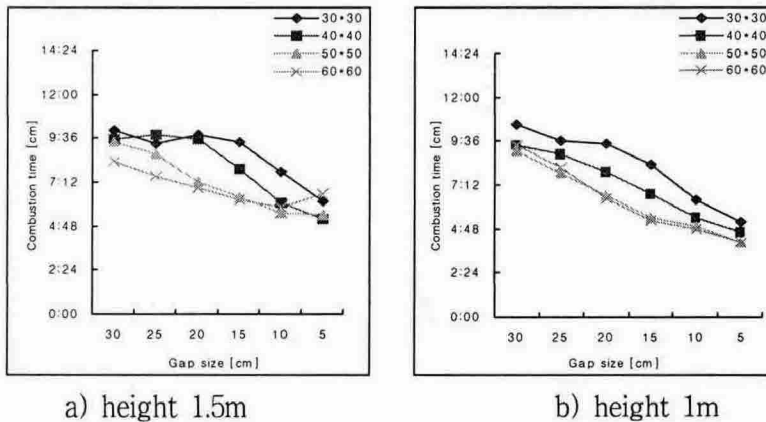
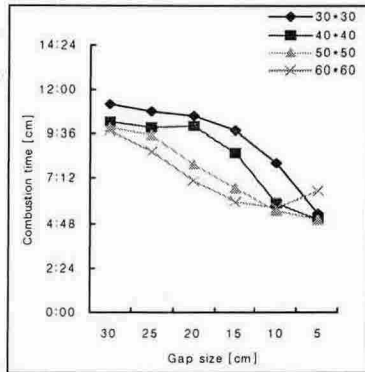
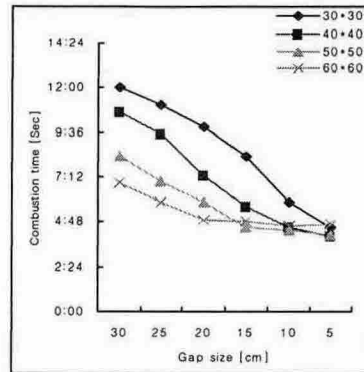


Fig. 2. Combustion time of acetone whirl fire according to the gap size [width:45cm]



a) height 1.5m

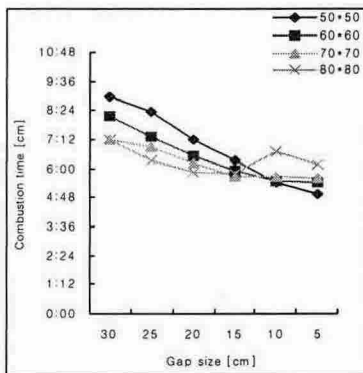


b) height 1m

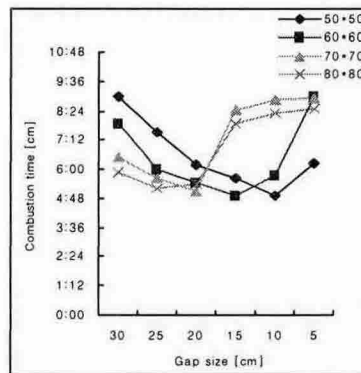
Fig. 3. Combustion time of heptane whirl fire according to the gap size [width:45cm]

Fig.2와 3은 벽의 높이에 따른 연소시간이 뚜렷한 변화 없이 유사한 경향을 보이고 있으나 벽면의 틈새 크기가 작아질 경우 유입되는 공기의 channeling이 잘되지 않아 회오리화염의 형성이 어려웠었던 것에 비하여 벽면의 높이가 높은 경우 열부력에 의한 회오리화염의 형성이 보다 용이해졌음을 보여주고 있다.

Fig.4는 벽의 너비가 60cm일 때 벽면 높이를 비교한 아세톤이고 Fig.5는 헵탄을 나타낸 것이다. 또한 Fig.6과 7은 벽면 너비 90cm를 나타낸 것으로 뚜렷한 변화 없이 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 Fig.6은 아세톤에 대하여 그리고 Fig.7은 헵탄에 대하여 벽면 높이에 따른 연소시간을 측정한 결과들을 나타낸 것이다.

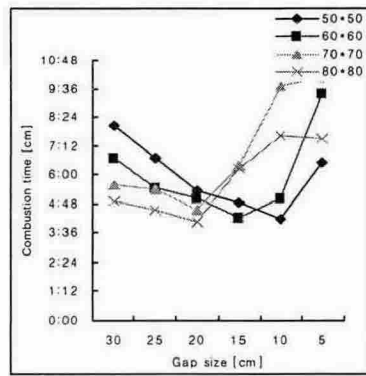
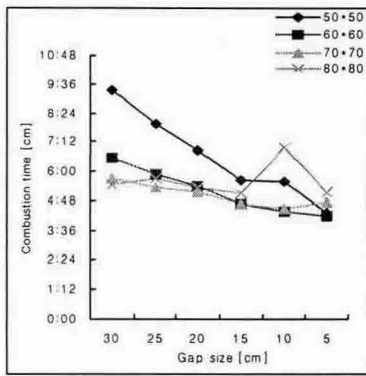


a) height 1.5m



b) height 1m

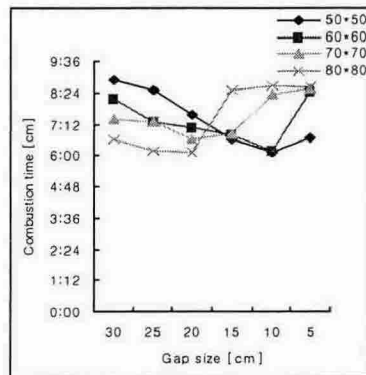
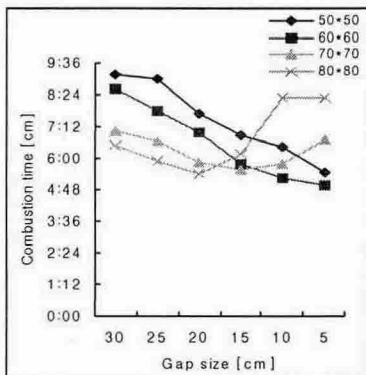
Fig. 4. Combustion time of acetone whirl fire according to the gap size [width:60cm]



a) height 1.5m

b) height 1m

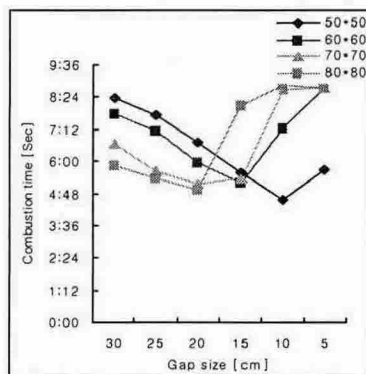
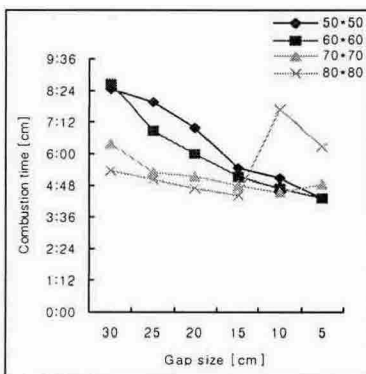
Fig. 5. Combustion time of heptane whirl fire according to the gap size [width:60cm]



a) height 1.5m

b) height 1m

Fig. 6. Combustion time of acetone whirl fire according to the gap size [width:90cm]



a) height 1.5m

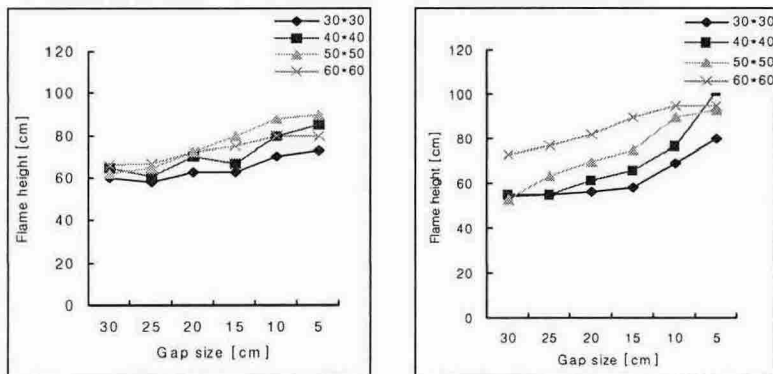
b) height 1m

Fig. 7. Combustion time of heptane whirl fire according to the gap size [width:90cm]

3-2. 화염높이

Fig.8과 9는 벽면의 높이가 1.5m인 경우 화염의 높이를 측정된 결과로서 틈새의 감소에 따라 화염 높이가 증가 하였으며 Fig.3에서 보여준 연소시간과 반비례하는 경향이 있음을 알 수 있으며 벽면의 가로가 45cm인 경우는 연소시간과 같이 벽면의 높이에 따른 큰 차이를 보이지 않으나 벽의 너비가 60cm와 90cm에서는 벽면의 틈새가 작은 경우에도 열 부력에 의한 회오리 화염의 생성으로 화염의 길이가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 벽면의 높이를 높여서 연소 시간과 화염 높이를 측정된 결과 화염 둘레의 벽면의 높이가 높은 경우 열 부력에 의한 연돌효과로 회오리화염의 생성이 용이하게 됨을 확인할 수 있었다.

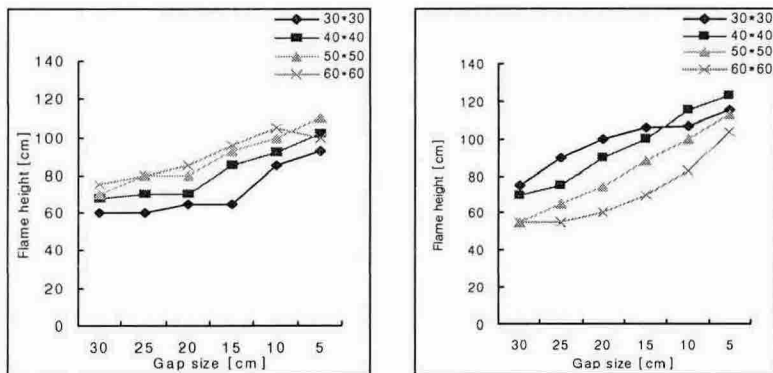
Fig.10과 11은 벽의 너비 60cm에서의 아세톤과 헵탄의 whirl fire에서 화염높이를 나타낸 것이고 Fig. 12와 13은 벽의 너비 90cm에서의 화염높이를 나타낸 것들로서 틈새 크기가 감소할수록 화염높이가 증가하는 경향이 있으나 벽면의 배치에 따라 공기의 유입통로가 Channeling 현상이 발생되지 않는 경우는 whirl fire의 한계현상으로 연소시간이 증가하였고 화염높이는 감소하였다.



a) height 1.5m

b) height 1m

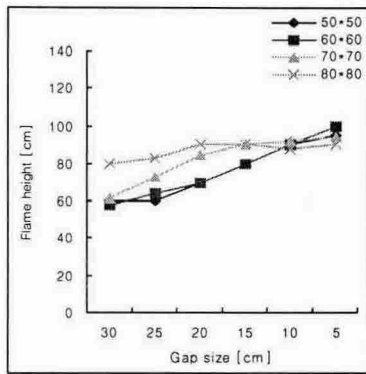
Fig. 8. Flame height of acetone whirl fire according to the gap size [width:45cm]



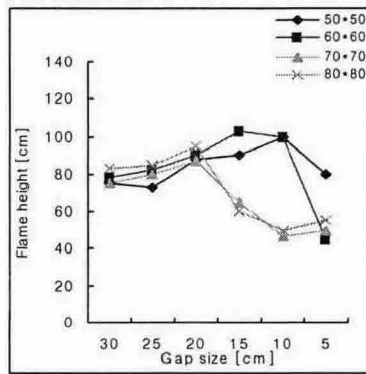
a) height 1.5m

b) height 1m

Fig. 9. Flame height of heptane whirl fire according to the gap size [width:45cm]

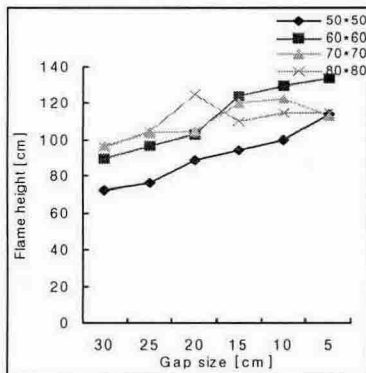


a) height 1.5m

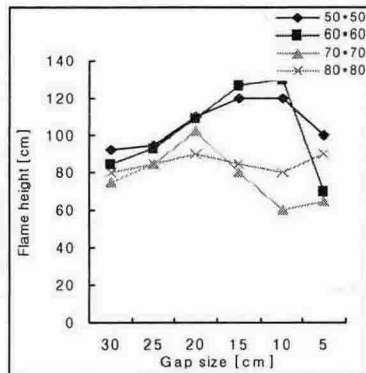


b) height 1m

Fig. 10. Flame height of acetone whirl fire according to the gap size [width:60cm]

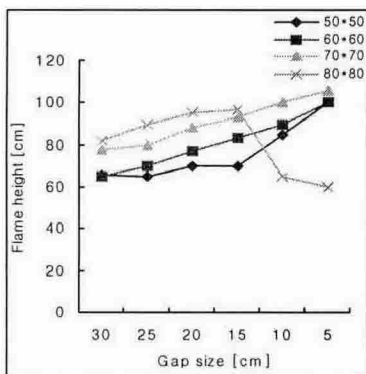


a) height 1.5m

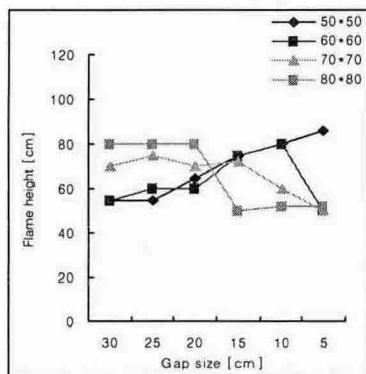


b) height 1m

Fig. 11. Flame height of heptane whirl fire according to the gap size [width:60cm]



a) height 1.5m



b) height 1m

Fig. 12. Flame height of acetone whirl fire according to the gap size [width:90cm]

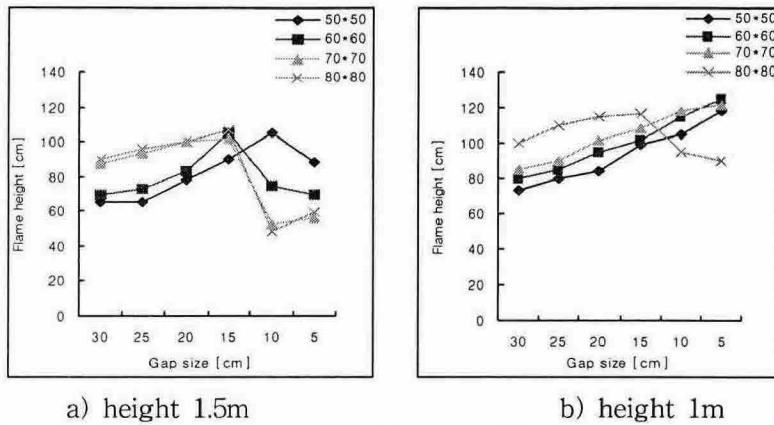


Fig. 13. Flame height of heptane whirl fire according to the gap size [width:90cm]

4. 결론

본 연구에서는 용기내 액체 연료의 화염회오리 발생시 연료의 연소 형태와 거동 및 화염의 온도와 연소속도, 화염높이 등을 측정 비교함으로써 회오리화염의 특성을 살펴 보았으며 화염 주위의 벽면에 의한 공기의 유입 조건과 열 부력 현상에 의한 회오리 (whirl)발생으로 인해 연소속도의 현저한 증가, 연소화염 온도의 상승, 화염높이의 증가, 복사열 유속이 크게 증가하였다.

또한 회오리화염의 실험을 통하여 벽면이 존재할 때 기하학적 형태에 따라 회오리화염의 생성되기 어려운 한계조건을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

벽면의 높이가 높은 경우 열 부력 효과가 증가하여 회오리화염의 형성이 용이하며 연소속도와 열방출속도가 증가한다.

회오리화염 발생은 화염길이의 증가 및 열방출속도의 증가로 화재 확대속도의 증가와 화재 범위의 확대로 화재시 더욱 치명적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Howard W. Emmons, and Shuh-jing Ying. The Fire Whirl, 11th Symp. on Combustion 1966, The Combustion Institute 1967 pp475-488
2. A. Muraszew, J. B. Fedele, and W. C. Kuby., The Fire Whirl Phenomenon, 1976 Fall Fall meeting, Combustion Institute. Oct. 1976
3. Satoh, K. and Yang, K. T., 1996, Experimental Observations of Swirling Fires. Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress Exhibition, Atlanta, GA, USA, ASME HTD-Vol. 335, 400.
4. Satoh, K. and Yang, K. T., 1997, "Simulations of Swirling Fires Controlled by Channeled Self-Generated Entrainment Flows", Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp201-212.