

# Fire Whirl의 한계에 관한 연구

강연옥 · 오규형\* · 이성은

호서대학교 대학원 · \*호서대학교 소방학과

## 1. 서 론

대규모의 화재는 화재시 발생하는 열등에 의하여 fire whirl이 발생하는 경우가 있고 이런 경우 불길이 통상의 화염보다 높아 불티 등의 불씨가 멀리까지 전파되어 화재를 확대시키고 연소속도 또한 증가하면서 높은 연소열로 인한 인명 및 재산의 피해가 확대되었다. 역사적으로 1906년 샌프란시스코와 1923년 관동 대지진에서 수많은 인명해가 발생하였으며 이 대규모 피해의 원인은 지진 자체에 의한 피해보다 fire whirl이 주원인 이었으며 2차대전 당시 함부르크 대화재에도 fire whirl이 발생하여 큰 피해를 발생시켰던 역사기록이 있다.

이러한 fire whirl은 연소현상과 더불어 화염주위의 공기유동 및 주변의 공기유동에 영향을 미치는 기하학적 구조 등이 영향을 미치는 것으로 보인다.

본 연구에서는 4면의 벽면을 이용해 channel을 형성하면 자연적인 상태에서 fire whirl가 발생하는 구조를 만들고, 이때의 벽면 크기, 바닥 면적, 틈새 크기 등을 측정하여 fire whirl 형성에 영향을 미치는 변수들을 연구하여 연소특성과 함께 한계조건을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fire whirl이 생성될 때의 연소특성을 비교하기 위하여 벽면 크기, 바닥 면적, 틈새 크기 등을 통하여 화염높이, 연소속도를 측정하였다. 액체 연료 시료로는 아세톤, 헵탄을 사용하였으며 모든 실험에서 시료 연료는 연소용기의 높이에 반이 되는 1cm의 높이까지 채웠으며 부피로는 78.5cm<sup>3</sup> 이었다.

Fire whirl를 발생시키기 위한 실험장치의 구조는 다음 그림1과 같으며 벽면은 가로 45cm, 높이 1m인 것과 가로60cm, 높이 1m인 것을 각각 사용하였으며 3면은 석고판을 사용하였고 한 면은 화염의 구조를 관찰하고 촬영을 위해 유리를 사용하였다. 바닥면의 넓이와 벽면의 관계가 회오리화염 발생에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가로 45cm인 것은 바닥면적이 30cm×30cm, 40cm×40cm, 50cm×50cm, 60cm×60cm가 되도록 하였고 가로 60cm인 것은 바닥면적이 50cm×50cm, 60cm×60cm, 70cm×70cm, 80cm×80cm가 되도록 하였으며 각 벽면의 틈새는 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm가 되도록 하였다. 연소용기는 직경 10cm, 높이2cm의 스텐레스 용기를 사용하였으며 실험장치의 바닥면 중앙에 위치하

도록 하였다. 화염의 높이와 회오리 화염 형상을 관찰하기 위하여 비디오카메라로 촬영하고 연료의 연소시간을 측정하였다.

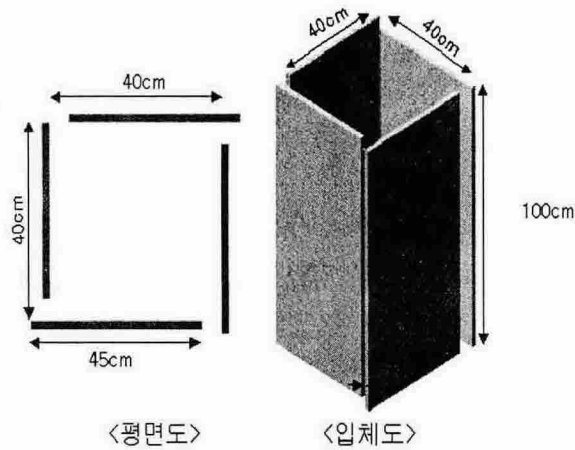


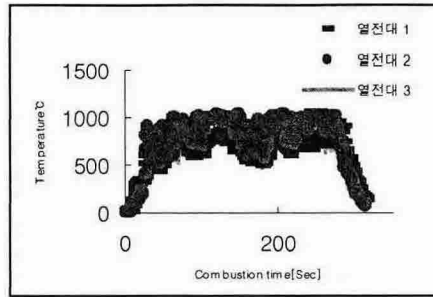
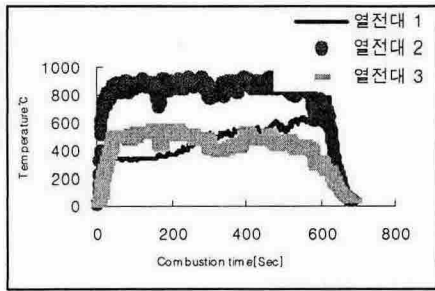
그림 1. 실험장치의 개략도

### 3. 결과 및 고찰

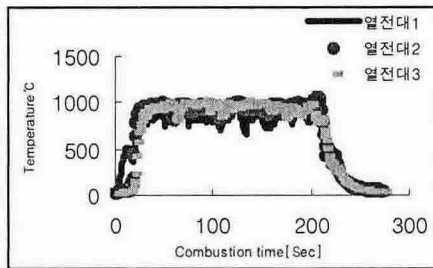
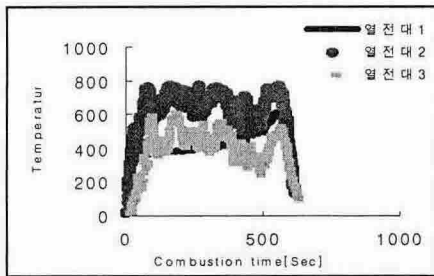
#### 3-1. pool fire와 fire whirl의 연소특성 비교

##### 3-1-1. 화염온도

그림. 2와 그림 3은 acetone과 heptane의 화염 온도를 비교한 것으로 a)는 pool fire에서의 화염온도를 측정한 결과이고 b)는 fire whirl 발생 상태에서 화염온도를 측정한 결과로서 열전대 1은 용기의 연료면 부근이고 열전대 2는 화염의 중간 높이이고 열전대 3은 화염의 끝부분의 온도를 측정한 것이다. a)의 pool fire에서의 주기적인 vortex shedding과 난류 화염으로 온도가 불안정 하며 b)의 화염회오리가 발생한 경우도 온도불안정한 현상을 보이고 있다. Acetone 화염의 최대온도는 pool fire에서 최고 온도의 평균은 약  $900^{\circ}\text{C}$  정도인데 비해서 화염회오리 발생시 약  $1000^{\circ}\text{C}$ 로 더욱 높은 것을 볼 수 있고 그림. 3의 헵탄 연소에서는 pool fire에서는 약  $750^{\circ}\text{C}$ 를 fire whirl에서는 약  $1000^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었으며 이 결과로부터 fire whirl 발생시 연료에 따라 약  $100^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$  정도 높은 온도를 나타내었다. 이는 회오리 발생에 의해 화염으로의 air entrainment 속도가 증가하여 증발된 연료와 공기와의 혼합속도가 빨라지고 연소속도를 증가시키며 화염의 높이가 증가함으로 화염에서 연료 면으로의 복사열도 증가하여 pool fire에 비해 에너지 방출속도가 크게 되기 때문으로 생각된다.



a) 아세톤 Pool Fire에서의 온도 측정    b) 아세톤 fire whirl의 온도 측정  
 그림. 2 아세톤의 pool fire와 fire whirl의 온도 비교



a) 헵탄 Pool Fire에서의 온도 측정    b) 헵탄 fire whirl의 온도 측정  
 그림. 3 헵탄의 pool fire와 화염회오리의 온도 비교

또한 열전대의 위치에 따른 온도의 비교에서 연료면에 설치한 온도를 비교하면 fire whirl이 발생된 경우 화염이 회전하면서 연료면에 더욱 근접하여 연소하므로 온도가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3-1-2. 연소속도 및 화염 높이

다음 표1은 각 연료의 pool fire와 fire whirl 발생시 연소시간과 화염 높이를 비교한 것으로 fire whirl이 발생된 경우가 경우 보통의 pool fire에 비하여 연소속도는 약 2.5 배 정도 빠르며 화염 높이도 2배 이상 큰 것을 볼 수 있다. 또 fire whirl이 발생된 경우 유입되는 공기의 swirling에 의한 연료 증발속도의 증가와 공기와의 빠른 혼합으로 연소속도가 증가하고 이에 따라 에너지 방출속도가 증가하며 연료의 기화속도를 증가시키고 증발된 연료가 유동하는 공기와 함께 더 높은 위치까지 이동하며 연소하는 현상의 순환과정으로 볼 수 있다. 이 결과 fire whirl 발생시 화염의 온도가 높고 복사열 유속이 크게 될 것을 예상할 수 있으며, 더욱 높은 곳까지 빠른 속도로 열전달이 가능하여 실제 화재에서 fire whirl이 발생할 경우 화재전파속도가 증가와 함께 피해가 확대될 것을 예측할 수 있다.

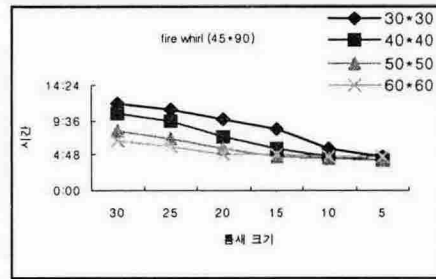
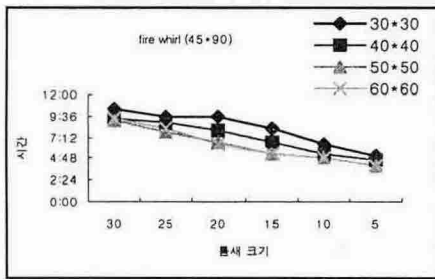
표1. pool fire와 fire whirl 발생시 연소시간 및 화염 높이 비교

	연소 시간		화염 높이	
	아세톤	헵탄	아세톤	헵탄
pool fire	11분	14분3초	46	56
회오리화염	5분16초	6분15초	92	118

### 3-2. fire whirl의 한계조건

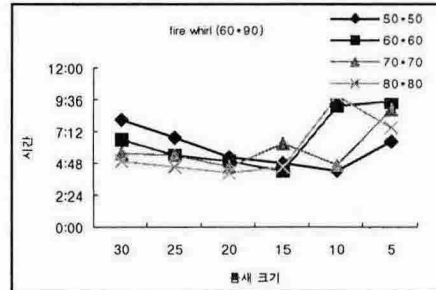
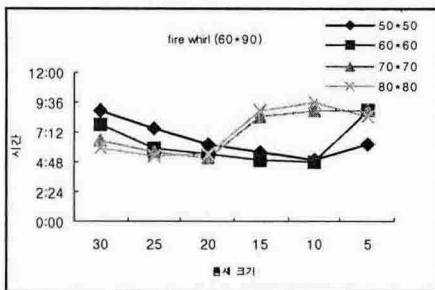
#### 3-2-1. 틈새 크기에 따른 연소시간

다음 그림. 4와 그림 5는 벽면의 가로가 각각 45cm인 것과 60cm 인 경우 바닥면적을 변화시키면서 틈새 크기에 따라 연소시간을 측정한 결과를 비교한 것이다.



a) 아세톤 fire whirl에서의 틈새 크기  
그림. 4 틈새 크기에 따른

b) 헵탄 fire whirl의 틈새 크기  
연소시간 (벽면의 넓이: 45cm)



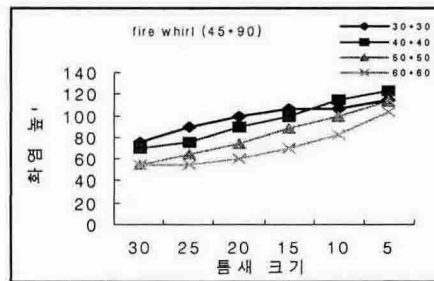
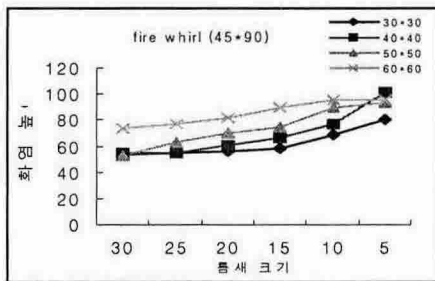
a) 아세톤 fire whirl에서의 틈새 크기  
그림. 5 틈새 크기에 따른

b) 헵탄 fire whirl의 틈새 크기  
연소시간 (벽면의 넓이: 60cm)

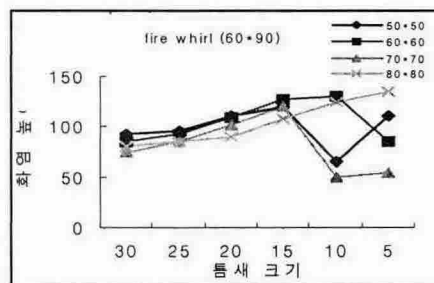
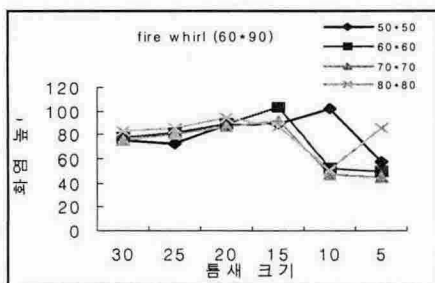
그림. 4에서 두 시료 모두 틈새크기가 증가할수록 연소시간이 증가하는 것을 볼 수 있으며 틈새크기가 30cm 정도 증가할 경우 회오리 화염의 발생이 지연되거나 아주 약한 상태로 발생되어 pool fire의 연소시간과 거의 같아지는 것을 볼 수 있다. 그림5에서는 틈새 크기가 작아짐에도 불구하고 화염회오리가 발생되지 않아 연소시간이 증가하는 부분이 있음을 나타내고 있어 fire whirl이 발생되지 않는 한계점이 있음을 보여 주었다.

### 3-2-2. 틈새 크기에 따른 화염높이

다음 그림. 6과 그림 7은 바닥면적을 변화시키면서 틈새 크기에 따라 화염높이를 측정 한 결과를 비교한 것이다. 그림 6에서는 틈새 크기가 감소할수록 fire whirl이 활발하게 발생되면서 연소속도가 빠르기 때문에 에너지 방출량이 증가하여 Heskstad의 화염



a) 아세톤 fire whirl에서의 틈새 크기      b) 헵탄 fire whirl의 틈새 크기  
그림. 6 틈새 크기에 따른 화염 높이 (벽면의 넓이450cm)



a) 아세톤 fire whirl에서의 틈새 크기      b) 헵탄 fire whirl의 틈새 크기  
그림. 7 틈새 크기에 따른 화염 높이 (벽면의 넓이:60cm)

높이 계산식에서 에너지 방출량이 증가할수록 화염 높이가 증가하는 것과 일치함을 볼 수 있다. 한편 그림 7에서는 틈새 크기가 15cm까지는 틈새크기가 감소하면서 회오리

화염의 생성에 의해 화염의 높이가 증가하고 있으나 10cm 부근에서 화염 높이가 감소하는 현상을 보이며 경향성이 흐트러지는 것을 볼 수 있다. 따라서 틈새크기에 따라서 회오리 화염이 발생되지 않는 한계가 존재함을 알 수 있으며 추후 무차원 해석을 통해 기하학적인 형태와 비에 따른 한계 조건을 규명할 계획이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 용기내 액체 연료의 액면연소인 pool fire에서 fire whirl 발생되는 구조를 통해 fire whirl 발생시 일반적인 pool fire에서 보다 연소속도의 현저한 증가, 연소화염 온도의 상승, 화염높이가 증가하여 화재 발생시 위험성이 훨씬 커지게 됨을 예측할 수 있었다. 이 실험을 통해서 틈새의 크기에 따라서 틈새가 큰 경우에 작은 경우보다 연소시간이 길었고 틈새의 크기가 작은 경우에 fire whirl이 일어나지 않는 한계점을 찾을 수 있었다. 이는 회오리 발생에 의한 화염으로의 air entrainment 속도가 벽면의 크기와 틈새의 크기 사이의 비율에 따라서 틈새 크기가 작음에도 불구하고 fire whirl이 일어나지 않음을 예측할 수 있었다.

이번 연구를 통해서 화염회오리 발생시의 한계가 존재함을 알 수 있었으며 한계조건에 대해서 연소용기의 무차원화 및 열방출속도와 실험장치의 구조와의 관련성을 계속 연구할 것이다.

#### 참고문헌

1. 平野敏右 著, 김홍·오규형·양희준·인세진 譯 : 연소학, p92 ~ p202 동화기술, 3. 1996
2. 장철현·채재우·김순호 공역, 연소공학, 동화기술 pp 39-54
3. Emmons, H. W. and S. J. Ying, "The Fire Whirl, "Eleventh Symposium on Combustion on Combustion (1966), The Combustion Institute, 1967, ppl 475-488.
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, 201-212.
5. Satoh, K. and Yang, K. T., 1998, "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.
6. Satoh, K. and Yang, K. T., 1998, "Experiments and Numerical Simulations of Swirling Fires due to 2x2 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, 49-56