

# 회전강도가 Fire Whirl의 특성에 미치는 영향에 관한 실험연구

최상열 · 유홍선<sup>†\*</sup>

중앙대학교 대학원, \*중앙대학교 기계공학부  
(2004. 11 1. 접수 / 2005. 4 12 채택)

## An Experimental Study on the Effect of Rotation Strength on Fire Whirl Characteristics

Sang-Yeol Choi · Hong-Sun Ryou<sup>†\*</sup>

Graduate school of Chung-Ang University

\*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received November 1, 2004 / Accepted April 12, 2005)

**Abstract** : Rotational motion in the atmosphere around a fire may have a profound influence on the fire plume. This process underlies the occurrence of fire whirls. Fire whirls are rare but highly destructive phenomenon which were observed in a large forest, urban and building fires. The present study aims to investigate the effect of rotation strength on the fire whirl characteristics experimentally. Experiments are performed for various sizes of fire source with different rotation strength. From the experimental observations, it is noted that the mean centerline temperature is gradually increased and mean radial temperature is decreased as increases rotation strength. The characteristic mean flame height of fire based on the visible observation is increased as increases of dimensionless swirl parameter,  $\Omega/\alpha$ , represented by swirl induced motion to buoyancy driven motion.

**Key Words** : fire whirl, rotation strength, characteristic pool diameter, characteristic mean flame height

### 기호설명

- $\Omega$  : Angular velocity [ $rad/s$ ]  
 $\Gamma_0$  : Circulation [ $m^2/s$ ]  
 $r_0$  : Radial distance from the centerline, Pool radius [ $m$ ]  
 $\dot{Q}$  : Heat release rate [ $kW$ ]  
 $\dot{Q}^*$  : Dimensionless heat release rate  
 $D^*$  : Characteristic pool diameter [ $m$ ]  
 $\dot{m}_f^*$  : Burning rate of fuel per unit area [ $kg/m^2s$ ]  
 $\Delta H_C$  : Heat of combustion [ $kJ/kg$ ]  
 $A_f$  : Surface area of fuel [ $m^2$ ]  
 $c_p$  : Constant pressure specific heat [ $kJ/kgK$ ]  
 $Z_f$  : Flame height [ $m$ ]  
 $z$  : Vertical distance along the centerline [ $m$ ]

아래첨자

0 : Ambient value

### 1. 서론

화재시 대기의 불안정성에 의해 발생하는 회전 유동이 화염의 상승유동과의 상호작용에 의해 화염 내부로 유입되면 화염의 거동에 많은 영향을 미친다. 즉, 화원 주위에서 형성된 회전유동이 화염의 상승기류로 유입됨에 따라 화염주위에는 회전유동이 형성되게 되고 이러한 회전유동의 모멘텀이 화염으로 전이되어 화염의 회전속도를 증가시킨다. 이 과정동안 화염의 길이는 화염의 상승부력의 축 방향으로 급격히 증가하게 되는데, 화재를 동반한 이러한 유체역학적 보텍스를 Fire whirl 혹은 화이어 보텍스(Fire vortex)라고 일반적으로 정의한다<sup>1)</sup>. Fire whirl은 보기 드문 현상이지만 주위와의 압력 차로 인한 큰 흡입력과 양력을 가지고 있으므로 토

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
cfdmcc@cau.ac.kr

네이도와 같이 매우 파괴적이고, 화염길이의 증가와 함께 화재 전파 속도를 증가시키기 때문에 원활한 소화작용을 유도하는데 어려움이 있어 인명 및 재산의 큰 피해를 초래할 수 있다.

Emmons<sup>2)</sup>는 회전실린더 스크린을 이용하여 회전이 있는 경우와 회전이 없는 경우에 대한 풀화원의 화염의 거동에 대해 고찰하였는데, 화이어 휠(Fire whirl) 발생시 화염의 높이는 최고 10배 가량 증가하고, 연소율은 5배 가량 증가한다는 정성적인 데이터를 제시하였다. Muraszew<sup>3)</sup> 등은 화이어 휠(Fire whirl) 현상에 대한 수학적 이론 모델 및 대형 회전 발생장치를 이용하여 발생한 화이어 휠(Fire whirl)의 온도, 코어 반지름, 접선방향 및 축방향 속도를 측정함으로써 모델과 실험결과를 통한 상관 관계식을 제시하였다. Saito<sup>4)</sup> 등은 역사적으로 일어난 대형화재에서 화이어 휠(Fire whirl)이 발생된 경우를 조사, 세가지 형태의 화이어 휠(Fire whirl)로 나누어 각각의 형태에 대한 축소모델 실험을 수행하고, 실제 스케일과의 차원해석을 통하여 온도 및 접선방향 속도를 예측하였다. 수치해석 연구로서 최근에 Battaglia<sup>5)</sup> 등은 LES 난류모델을 적용하여 고정된 발열량의 화원에 대해 외부에 강제적으로 회전을 부여함으로써 회전강도의 변화가 화염에 미치는 영향을 부력강도와 회전강도의 비로서 나타나는 무차원 매개변수의 변화에 따라, 속도장과 온도장을 수치적으로 모사하였으며, 중심축 온도에 따른<sup>6)</sup> 화염길이의 변화를 예측하였다.

그러나 Fire whirl은 도시화재나 산불화재와 같이 광범위한 지형에서 발생하고, 여러 가지 기후 조건 및 자연환경의 변수도 고려해야 하므로 실제로 크기로 실험연구를 한다는 것은 거의 불가능하다. 또한 중요한 변수인 회전강도의 변화에 대한 정량적인 고찰이 부족한 실정이다. 적절한 크기의 실험장치를 사용하여 화이어 휠(Fire whirl)을 임의로 발생시킴으로써 제한적이고 특정 변수들의 영향에 대한 특성만을 파악하고 있는 실정이며, 이에 대한 열 및 유체역학적 유동구조에 관해 명확한 메커니즘을 규명하기 위한 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 화이어 휠(Fire whirl) 현상을 이해하는 선행적인 연구로서, 회전강도와 부력의 변화에 따른 화염의 온도변화 및 화염길이의 변화에 관한 연구를 실험적으로 수행하여 화이어 휠(Fire whirl)현상 및 특성을 이해하는데 기여하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1. 실험장치

Fig. 1에서 보는 바와 같이 폭 1m, 길이 1m, 높이 1m의 알루미늄 프레임에 전체 외형 고정장치로 설치하였으며, 회전 각속도를 부여하기 위한 장치로서 높이 100cm, 직경 50cm, 두께 0.5cm의 아크릴 원통을 사용하였다. 아크릴 원통을 회전시키기 위한 장치로는 직경 40cm의 고무 타이어 4개를 아크릴 원통의 네 방향에 대하여 원통 축방향과 타이어 축방향이 서로 평행이 되도록 알루미늄 프레임에 각각 고정하였으며, 하나의 고무 타이어의 축에 대해서는 직류가변모터를 사용하여 모터의 토크를 각각의 타이어와 아크릴 표면과의 마찰력으로 인해 아크릴 원통에 충분히 전달하도록 고정하였다. 아크릴 원통 하단부에는 원형 평판을 부착하고 볼 캐스터(Ball caster)를 사용하여 원통과 원형 평판의 회전이 용이하도록 하였으며, 원형 평판 중앙에 구멍을 뚫어 로드셀의 스트레인 게이지(Strain gage)와 저울판이 연결되도록 하였다. 원통의 회전수에 의해 결정되는 각속도는 본 연구에서 중요한 매개변수중의 하나이므로 적절한 방법으로 정확하게 제어할 필요가 있다. 본 실험에서는 직류가변모터의 양극에 걸리는 전압을 디지털 멀티미터를 사용하여 측정하고, 각각의 전압에 상응하는 원통의 회전수를 비디오 카메라를 이용하여 반복 촬영하여 평균 분당 회전수(rpm)를 계산하였다. 회전강도를 나타내는 식으로서 다음의 식을 사용하였으며, 여기서  $\Omega$ 는 즉, 임의의 반지름  $r_0$ 과 회전수가 주어지면 결정되는 각속도이다.

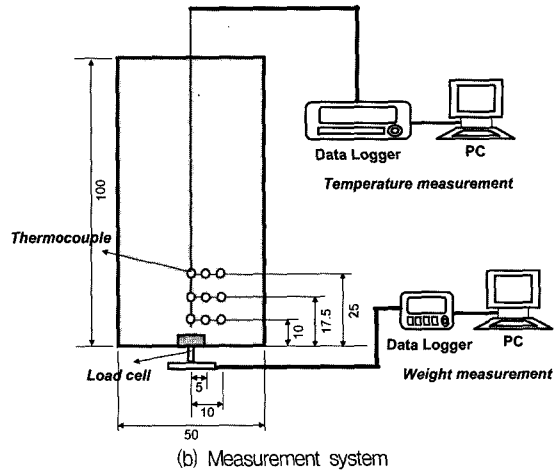
$$\Omega = \Gamma_0 / 2\pi r_0^2 \quad (1)$$

### 2.2. 화원 및 발열량

화원의 크기에 따른 발열량과 무차원 특성 화원 지름이 또한 중요한 변수이므로 표면적이 각기 다른 4개의 원형 풀을 화원으로 사용하였다. 실험에 사용된 풀의 크기는 지름이 각각 4cm, 6cm, 8cm, 10cm이고, 높이가 2.5cm이다. 연료의 증발량을 측정하기 위한 장치로서 로드셀(Load Cell)을 사용하였다. 시간에 따른 연소량 변화를 저장하기 위해 인디케이터의 출력부에서 발생된 신호는 RS-232 케이블을 통해 PC로 전송되며, 전송된 신호는



(a) Photograph of experimental set up



(b) Measurement system

Fig. 1. Experimental apparatus and Schematic view

LabView를 이용하여 실시간으로 데이터가 저장되었다.

사용된 연료는 아세톤(Acetone,  $C_3H_6O$ )이며, 연료의 연소율 및 발열량, 무차원 발열량, 무차원 특성 화원지름은 다음의 식으로 각각 계산되었다.

$$\dot{m}_f'' = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot A_f} \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_f'' \Delta H_C A_f \quad (3)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_{p,0} T_0 \sqrt{g D D^2}} \quad (4)$$

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_{p,0} T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (5)$$

### 2.3. 온도측정

실린더 내부의 화염과 화염주위의 온도는 0.6 mm K-타입 열전대(Thermocouple)를 설치하여 측정하였다. 열전대의 위치는 화원의 중심으로부터 높이 방향으로 7.5cm, 15cm, 22.5cm의 세 곳에 설치하여 화염의 중심축의 높이에 따른 화염 온도를 측정하였으며, 화원의 중심축을 기준으로 온도분포는 대칭을 이룬다는 가정하에 중심축으로부터 반지름 방향으로 5cm, 10cm의 위치에 각각 열전대를 설치하였다. Fig. 1(b)는 열전대의 설치 위치를 나타내고 있다.

### 2.4. 화염길이

일반적으로 화염길이(Flame height)는 가시적으로 구별이 되는 화염의 발광부분(Luminescence)의 경계로 정의된다<sup>7)</sup>. 기존 연구에서, 난류화산화염의 평균 화염길이에 대한 계측으로서 가시적인 관측에 의존하였다. Zukoski<sup>8)</sup>는 특성 화염길이에 대한 정의로 시간에 따른 화염의 간헐부분의 50%의 높이를 사용하였다. 즉, 난류화산화염의 특성에 의한 맥동(Pulsation)이 일어날 때 가장 작은 화염의 가시 길이와 가장 큰 화염의 가시길이에 대해 맥동시간 주기의 50%를 차지하는 시간에 대해 존재하는 화염의 높이라고도 할 수 있다. 또한 Zukoski 및 Heskestad<sup>9)</sup>는 이것을 무차원 발열량  $\dot{Q}^*$ 의 함수로 표현되는 상관식으로 제시하였다. Zukoski나 Hekestad가 제시한 화염길이에 대한 상관식은 화재연구에서 많이 인용되는 상관식으로서, 본 연구에서의 실험방법과 측정된 화염길이는 Zukoski의 상관식에 기준하여 그 타당성을 입증하였다. Zukoski가 제시한 화염길이에 대한 무차원 발열량과의 상관식은 다음과 같다.

$$Z_f/D = 3.3(\dot{Q}^*)^{2/3} \text{ for } \dot{Q}^* < 1 \quad (6)$$

$$Z_f/D = 3.3(\dot{Q}^*)^{2/5} \text{ for } \dot{Q}^* \geq 1 \quad (7)$$

화염길이는 비디오 카메라 동영상을 이용하여 측정되었다. 우선, 측정방법의 타당성을 검증하기 위해 외부 유동이 없는 공간에서 아세톤에 대해 지름 10cm 풀화원을 이용하여 발열량을 측정하고, 활

영된 동영상에서 초당 25프레임의 정지영상을 10 초간 250개의 샘플링 이미지로 추출하였다. 그 중 아래위 11개의 샘플 데이터를 제거하고 전체 샘플 수의 95.6%에 해당하는 신뢰할 수 있는 샘플 데이터의 이미지를 읽은 후 이 값들 중 최대값과 최소값의 차이의 50%의 길이에 해당하는 값을 특성 화염길이  $Z_f$ 로 결정하였다. Table 1은 본 실험에서 적용된 다양한 평균방법에 의한 화염길이를 나타내고 있다. 여기서  $Z_a$ 는 산술평균에 의한 화염길이,  $Z_f$ 는 도수분포의 평균에 대한 화염길이를 나타내며  $Z_f$ ,  $Z_a$ ,  $Z_{fr}$  세 값이 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다.  $Z$ 는 Zukoski가 제시한 상관식에 의해 계산된 화염길이를 나타내는데, Zukoski는 상관식을 얻어내는 과정에서 약 10%의 불확실도와 다소의 데이터 값에 대해서는 0.7~3배의 범위의 오차율을 허용하였다. 본 실험의 측정방법에서 측정의 불확실도는 약 2.0~2.5%이며, Zukoski 상관식에 대해서 화염길이가 다소 높게 측정되었으나 평균을 취하는 각 방법에 대해서도 측정값이 거의 동일하고 Zukoski 상관식의 불확실도나 오차율 범위를 고려했을 경우, 이는 충분히 신뢰할 수 있다고 하겠다. 최종적으로, 이러한 화염길이는  $D^*$ 에 대해 무차원화 시킴으로써 무차원 특성 화염길이로서 표현하였고, 또한 이 값을 부력강도에 대한 회전강도의 비를 나타내는  $\Omega/\alpha$ 로 나타내었다. 따라서,  $\Omega/\alpha$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Omega/\alpha = (F_0/2\pi r_0^2)/\sqrt{g/D^*} \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$ 는 부력에 의해 상승되는 화염의 특성 시간척도의 역수로서 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = \sqrt{g/D^*} \quad (9)$$

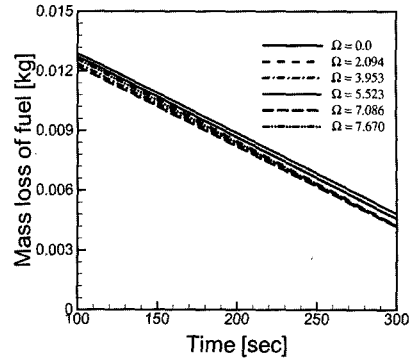
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 발열량 및 온도장

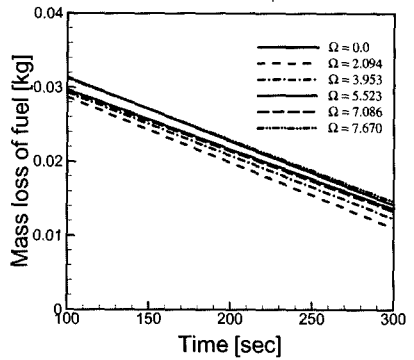
네 가지 크기의 화원에 대해 각각 회전이 없는 경우에서부터 다섯 단계로 회전속도를 변화시키며 발열량 및 온도장, 화염길이를 측정하였다.

Table 1. Measured flame height for various averaging methods

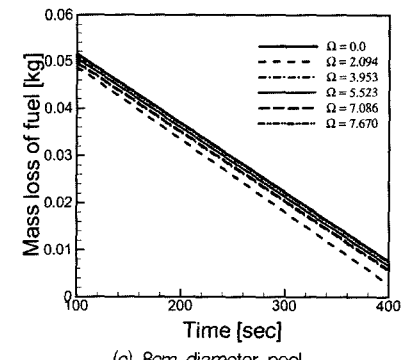
No. of Sample	Sampling data	$Z_f$	$Z_a$	$Z_{fr}$	$Z_l$
250	239(95.6%)	31.68	32.12	31.90	26.92



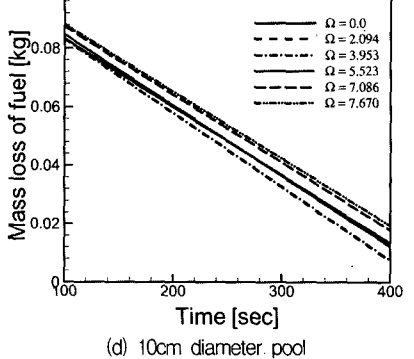
(a) 4cm diameter pool



(b) 6cm diameter pool



(c) 8cm diameter pool



(d) 10cm diameter pool

Fig. 2. Mass loss of fuel with time

Fig. 2는 각각의 화원에 대해서 회전강도를 변화시키며 시간변화에 따른 연료 증발율을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 아세톤의 경우는 화원 크기에 관계없이 회전강도 변화에 따라 연료 증발율은 거의 동일하게 나타나고 있다. 이는 아세톤의 연료 특성에 기인된 것으로 사료된다. 따라서 화원의 크기에 대해서만 각각 평균 연소율을 적용하여 무차원 특성화원지름을 계산하였다. Table 2는 화원의 크기에 대해 측정된 무차원 특성화원지름과 적용된 회전각속도를 나타내고 있다.

Fig. 3은 화원의 크기에 관계없이 특성화원지름에 대해 무차원화된 중심축 높이에 따라 온도분포를 나타낸 것이다. 온도를 비교한 결과,  $z/D^*$ 가 1이하의 동일한 영역에서 회전강도가 증가할수록 온도는 증가하는 것을 볼 수 있는데, 회전 각속도가 5.523 이전에는 거의 미세한 차이를 보이지만 상대적으로 5.523 이후부터 뚜렷한 경향을 보임을 알 수 있다. 이 결과는 회전강도가 증가할수록 연속화염영역(Continuous flame region)이 증가한다는 것을 의미하고, 이는 곧 화염길이 증가함을 의미한다.

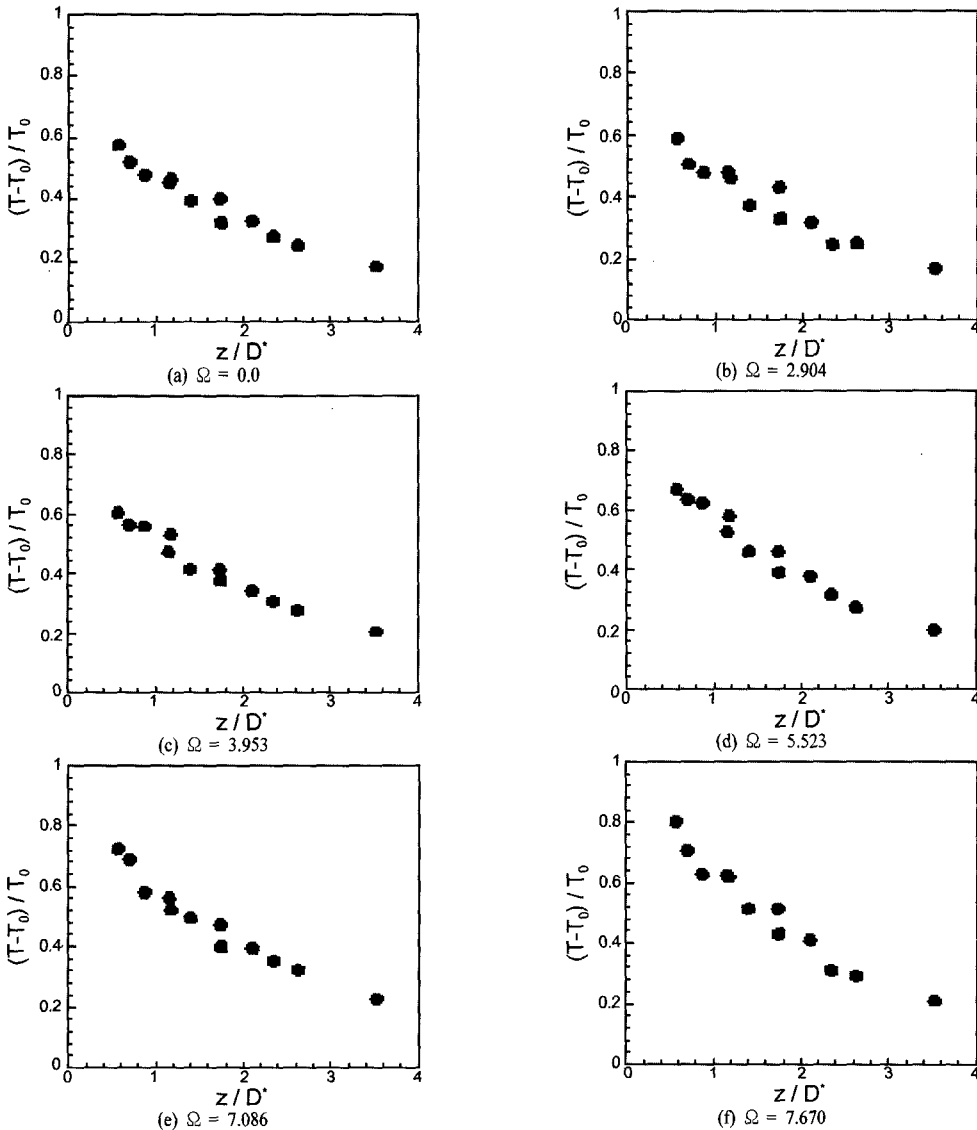
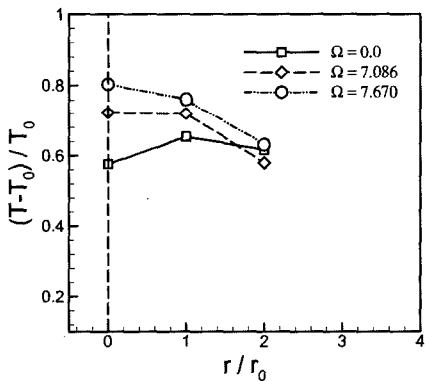


Fig. 3. Measured mean centerline temperature for normalized height

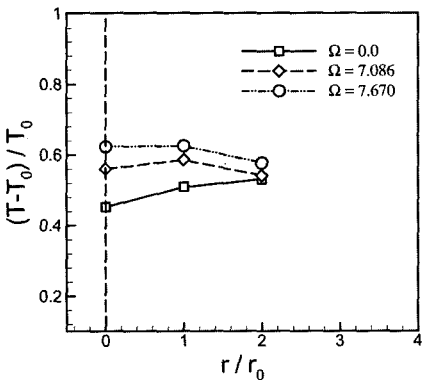
Table 2. Characteristic pool diameter and angular velocity

Pool Size [cm]	$D^*$ [cm]	$\Omega$ [rad/s]
4	6.37	0.0
6	8.54	2.094
8	10.68	3.953
10	12.92	5.523
		7.086
		7.670

Fig. 4는 회전이 없는 경우와 회전이 주어진 경우에 대해서 화염주위의 온도분포를 나타내고 있다. 반지름 방향의 온도의 경우, 각 화원의 크기에 관계없이 무차원화 시켜 나타내기에는 무리가 있으므로 생략하였고, 10cm 지름의 화원의 두 높이에 대해서만 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 회전이 없는 경우에 대해서 회전이 주어질 경우 반지름 방향에 대한 온도 구배가 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 화염주위에 회전유동이 야기되어 화염의 폭이 줄어들음을 의미한다. 즉, Fig. 2와 Fig. 3의 결과를 종합해 보았을때, 화염 주위에 회



(a) at  $z/r_0 = 1.5$



(b) at  $z/r_0 = 3.0$

Fig. 4. Mean temperature profile without fire whirl and with fire whirl : 10cm diameter pool

전유동이 야기되어 화이어 휠(Fire whirl)이 발생할 경우, 회전유동과 부력과 상호작용으로 인해 보텍스 스트레칭(Vortex stretching)과 같이 부력 유동의 상승 축방향으로 화염이 스트레칭 되며 길어지는 현상으로 설명될 수 있다. 이러한 물리적 현상은 다음 절에 나오는 가시 화염길이 측정에 대한 결과로서도 입증된다.

### 3.2. 화염길이

화염의 형상 및 길이는 화재의 성장과 위험도를 예측하는데 있어서 중요한 파라미터로 작용한다<sup>7)</sup>. 즉, 화염길이는 복사 열전달과 관련된 주요한 인자로서 화염 근처로의 직접적인 열전달에 관여하여 이로 인한 부차적이고 파생적인 주위 가연물로의 화재전파를 일으키게 하는 원인이 되므로 화재 성장이나 전파에 많은 영향을 미친다. 따라서 화원의 크기 및 연료의 종류 등에 따른 화염길이의 측정과 특성, 온도와의 상관관계 등에 관한 많은 연구가 화재 연구자들 사이에서 진행되어 왔다<sup>6,8,9)</sup>. 이러한 화염길이는 화이어 휠(Fire whirl) 현상에 관한 연구에서도 매우 중요한 특성이므로 적절한 파라미터에 대해 정확히 묘사할 필요가 있다. Fig. 5는 화원의 부력강도에 대한 회전강도의 비로서 나타나는 무차원 매개변수  $\Omega/\alpha$ 에 대한 특성 평균화염길이를 나타내고 있다. 그림에서 특성 평균화염길이는  $\Omega/\alpha$ 에 대하여 일정한 경향이 나타남을 알 수 있다. 즉, 부력강도에 대한 회전강도의 비에 대해 상관관계가 있음을 알 수 있고, 커브핏 결과 다음과 같은 식으로 표현되었다.

$$H = 0,9394\xi^2 - 0.0334\xi + 1.9273 \quad (10)$$

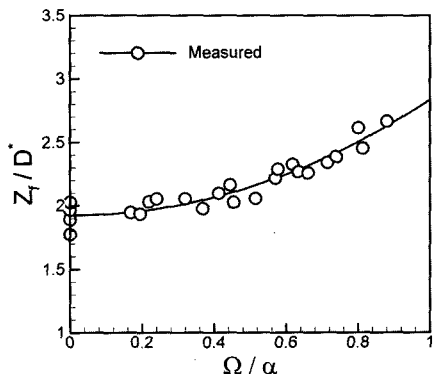


Fig. 5. Characteristic mean flame height versus ratio of swirl induced motion to buoyancy driven motion

여기서,  $H = Z_f / D^*$ ,  $\xi = \Omega / \alpha$ 이다. 이 결과로서, 동일한 부력의 크기에 대해 회전강도가 증가할수록 화염의 길이는 길어짐을 알 수 있고, 반대로 동일한 회전강도일 경우, 화원의 크기나 연료가 가지고 있는 고유한 발열량의 함수로 나타나는  $\alpha$ 의 값에 따라서 화이어 휠(Fire whirl)이 발생하게 되는 가능성과 강도가 달라지게 된다는 것을 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 실험연구는 Fire whirl의 메커니즘을 이해하기 위한 선형연구로서, 화염 주위의 외부 회전강도와 부력의 변화에 따른 화염의 온도장 및 화염길이를 측정하고 화염 특성의 변화를 실험적으로 고찰하였다. 따라서 결론을 정리하면 다음과 같다.

회전강도가 증가할수록 화염의 중심축 온도는 상승하였으며, 회전이 없는 경우에 대하여 화염 주위에 회전유동이 야기되면 화염의 폭은 줄어들을 수 있었다. 이러한 현상은 화염주위의 회전유동과 부력유동과의 상호작용으로 인해 화염길이가 늘어남을 의미하고 있으며, 특성 평균 화염길이는  $\Omega/\alpha$ 의 무차원 매개변수에 대해 다음과 같은 2차식으로 나타내었다.

$$H = 0,9394\xi^2 - 0.0334\xi + 1.9273$$

여기서,  $H = Z_f / D^*$ ,  $\xi = \Omega / \alpha$ 이다.

추후 연구로서 연료 특성이 다른 탄화수소계열 연료를 사용하여 실험을 수행할 예정이며, 이에 대해 기존의 난류확산화염의 화염길이 및 온도와의 상관관계에 대해 계속 비교연구함으로써 Fire whirl이 발생하는 임계조건 및 억제 방안도 모색할 것이다.

감사의 글 : 이 논문은 2004년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것이며, 관계제위께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) F. A. Williams, "Urban and wild fire phenomenology", Progress in Energy Combustion Science, Vol. 8, pp. 317~354, 1982.
- 2) H. W. Emmons and S. J. Ying, "The fire whirl", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Combustion (Combustion Institute, Pittsburgh, PA), pp. 475~488, 1967.
- 3) A. Muraszew, J. B. Fedele and W. C. Kuby, "The fire whirl phenomenon", Combustion and Flame, Vol. 34, pp. 29~45, 1979.
- 4) S. Soma and K. Saito, "Reconstruction of fire whirls using scale models", Combustion and Flame, Vol. 86, pp. 269~284, 1991.
- 5) F. Battaglia, K. B. McGrattan, R. G. Rehm and H. R. Baum, "Simulating fire whirls", Combustion Theory and Modelling, Vol. 4, pp. 122~138, 2000.
- 6) Bernard J. McCaffrey, "Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results", Report No. NBSIR 79-1910, 1979.
- 7) A. Hamins, T. Kashiwagi, R. Buch, "Characteristics of pool fire burnings", Fire Resistance of Industrial Fluids, ASTM Special Technical Publication, Vol. 1284, pp. 15~41, 1995.
- 8) E. E. Zukoski., T. Kubota., B. M. Cetegen, "Entrainment in fire plumes", Fire Safety Journal, Vol. 3, pp. 107~121, 1981.
- 9) G. Heskestad, "Luminous heights of turbulent diffusion flames", Fire Safety Journal, Vol. 5, pp. 103~108, 1983.