

외부 회전강도의 변화에 따른 화염의 온도장 변화에 관한 실험연구

최상열 · 유홍선*

중앙대학교 대학원 · *중앙대학교 기계공학부

기호설명

I_0 : Circulation

\dot{m}_f'' : Burning rate of fuel per unit area [kg/m^2s]

ΔW : Fuel weight variation [kg]

A_f : Surface area of fuel [m^2]

\dot{Q} : Heat release rate [kW]

ΔH_C : Heat of combustion [kJ/kg]

\bar{D} : Characteristic pool diameter [m]

C_p : Constant pressure specific heat [kJ/kgK]

아래첨자

0 : Ambient value

1. 서론

화재 시 대기의 불안정성에 의해 발생하는 회전유동이 화염의 상승유동과의 상호작용에 의해 화염 내부로 유입되면 화염의 거동에 많은 영향을 미친다^[1,2]. 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 축방향으로 급격히 증가하게 되는데, 화재를 동반한 이러한 유체역학적 보텍스를 화이어 휠(Fire whirl) 혹은 화이어 보텍스(Fire vortex)라고 일반적으로 정의한다^[1]. 화이어 휠(Fire whirl)은 보기 드문 현상이지만 주위와의 압력차로 인한 큰 흡입력과 양력을 가지고 있으므로 토네이도와 같이 매우 파괴적이고, 화염길이의 증가와 함께 화재 전파 속도를 증가시키기 때문에 원할한 소화작용을 유도하는데 어려움이 있어 큰 인명 및 재산 피해를 초래할 수 있다.

Emmons^[3]는 아세톤 풀 화원에 회전실린더 스크린을 이용하여 회전이 있는 경우와 회전이 없는 경우에 대한 화염의 거동에 대해 고찰하였다. Muraszew^[2]등은 대형 회전발

생장치를 이용하여 발생한 화이어 휠(Fire whirl)의 온도, 코어 반지름, 접선방향 및 축방향 속도를 측정하였다. Saito등⁴⁾은 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 연구로서는 Battaglia등⁵⁾이 정상상태, 비점성의 이론적인 수학적 모델을 제시하여 임의로 부여된 회전강도에 따른 화염의 상승부력과 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. 또한 최근에 Battaglia등⁶⁾은 외부에 강제적으로 회전을 부여하여 회전강도의 변화가 화염에 미치는 영향에 대한 연구로서 속도장과 온도장을 수치적으로 모사하고 중심축 온도에 따른⁷⁾ 화염길이의 변화를 예측하였다.

그러나 화이어 휠(Fire whirl)에 관한 메커니즘은 아직도 명확히 규명되지 않았으며, 도시화재나 산불화재와 같이 광범위한 지형에서 주로 발생하므로 실제 크기로 실험연구를 한다는 것은 거의 불가능하다. 또한 화이어 휠(Fire whirl)에 대한 열 및 유체역학적 유동구조를 정량적으로 파악한 연구결과도 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화이어 휠(Fire whirl) 현상을 이해하는 선행적 연구로서, 회전강도와 부력의 강도에 따른 화염의 온도변화에 관한 연구를 실험적으로 수행함으로써, 화염의 온도장 및 화염길이의 변화를 예측하는데 실제적인 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 회전발생장치

Fig.1 (1)에서 보는 바와 같이 폭 1m, 길이 1m, 높이 1m의 알루미늄 프레임을 전체 외형 고정장치로 설치하였다. 회전각속도를 부여하기 위한 장치로서 높이 100cm, 직경 50cm, 두께 0.5cm의 아크릴 원통을 사용하였다. 직경 40cm의 고무 타이어를 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 하였다. 아크릴 원통 하단부에는 원형 평판을 부착하고 볼캐스터(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 회전각속도는 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 Ω 는 즉, 임의의 반지름 r_0 과 회전수가 주어지면 결정되는 각속도이다.

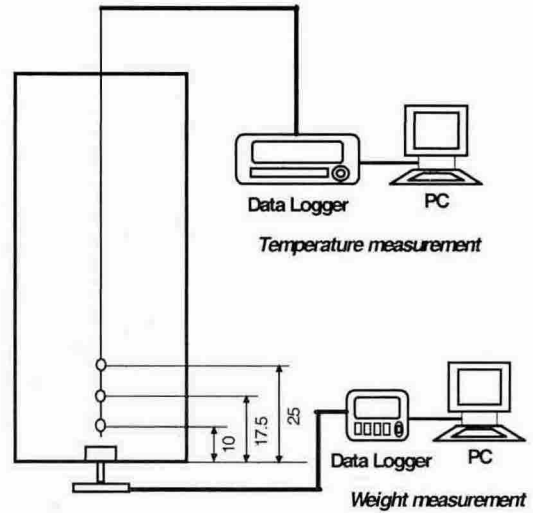
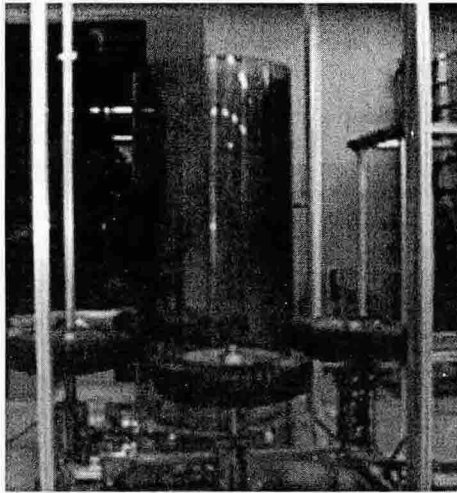
$$\Omega = \Gamma_0 / 2\pi r_0^2 \quad (1)$$

2.2 화원 및 발열량

화원의 크기에 따른 발열량과 무차원 특성 화원지름이 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 LabView를 이용하여 실시간으로 데이터가 저장되었다.

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

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



(1) Photograph of experimental set up (2) Schematic view of experimental set up

Fig.1 Experimental apparatus and Schematic view

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

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_{P,0} T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4)$$

2.3 온도 측정

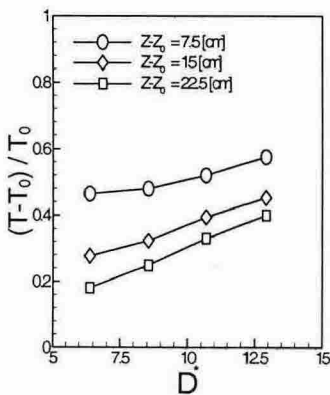
실린더 내부의 화염과 화염주위의 온도는 0.6mm K-타입 열전대(Thermocouple)를 설치하여 측정하였다. 열전대의 위치는 화원의 연료 표면 중심으로부터 높이 방향으로 7.5cm, 15cm, 22.5cm의 세 곳에 설치하여 화염의 중심축의 높이에 따른 화염 온도를 측정하였다. Fig.1 (2)는 열전대의 설치 위치를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

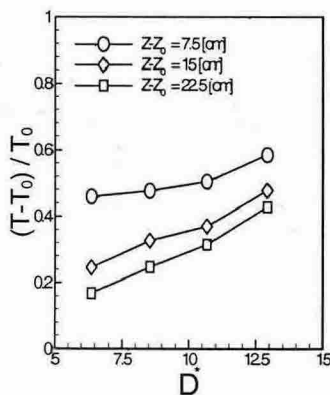
네 가지 크기의 화원에 대해 각각 회전이 없는 경우에서부터 다섯 단계로 회전각속도를 변화시키며 발열량 및 중심축에서의 온도를 측정하였다. 실험 결과, 회전강도에 따라서 연소율의 변화는 없었다. 따라서, 화원의 크기에 대해서만 각각 평균 연소율을 적용하여 무차원 특성화원지름을 계산하였다. Table.1은 화원의 크기에 대해 측정된 무차원 특성화원지름과 적용된 회전수를 나타내고 있다.

Table.1 화원의 크기에 따른 무차원 특성화원지름 및 회전각속도

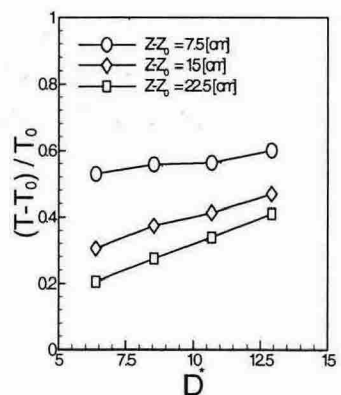
Pool size [cm]	D^* [cm]	Ω [rad/s]
4	6.37	0.000
6	8.54	2.094
		3.953
8	10.68	5.523
		7.086
10	12.92	7.670



(1) $\Omega=0.0$



(2) $\Omega=2.094$



(3) $\Omega=3.953$

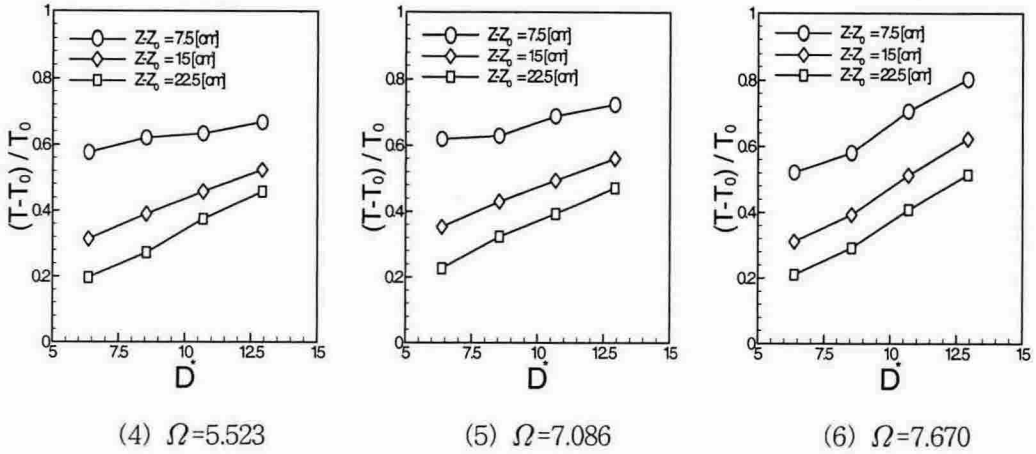


Fig.2 Mean centerline temperature versus D^* for fixed Ω

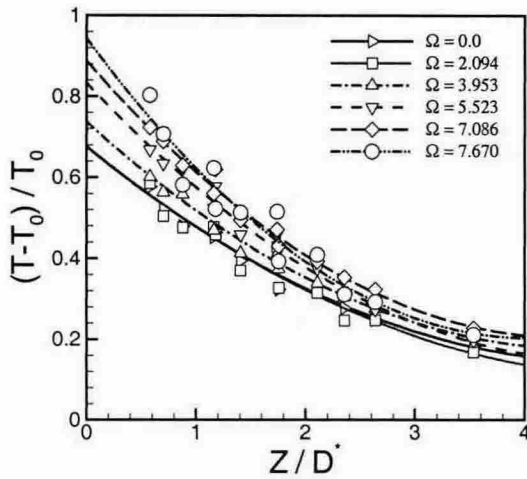


Fig.3 Mean centerline temperature profile versus dimensionless vertical distance for various circulation

Fig.2는 고정된 회전각속도에 대해서 특성화원지름이 변화하였을 때 화원의 중심축 방향의 특정한 높이에 대한 온도변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 고정된 회전각속도에 대해 특성화원지름이 커질수록 중심축의 온도는 증가한다는 것을 보이고 있다. 이 결과들에 대한 상관관계를 얻기 위해 Fig.2에서 얻어진 결과를 바탕으로 특성화원지름에 대해 무차원화된 수직높이에 따른 중심축의 온도변화와 이에 따른 데이터의 커브핏(Curve fit)을 Fig.3에서 나타내었다. 즉, 동일한 부력의 강도에 대해 회전강도가 증가할수록 화염 중심축의 온도는 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 수직높이에 대해 회전강도가 증가할수록 중심축의 온도는 높아지며, 회전강도에 따른 수직높이에

대한 중심축 온도는 2차식의 형태로 나타내어짐을 알 수 있었다. 또한 온도변화는 회전 각속도가 0일때 와 2.094[rad/s]일 때는 거의 일치하는 반면에, 5.523[rad/s] 이후부터 좀 더 큰 폭을 보이고 있다.

4. 결 론

본 실험연구는, 화이어 휠(Fire whirl)의 메커니즘을 이해하기 위한 연구로서 회전유동이 화염의 거동에 미치는 영향에 대하여 회전강도의 변화에 따른 화염의 온도변화를 측정하였으며, 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 일정한 부력의 강도에 대해 회전강도가 증가할수록 중심축에서의 화염온도는 증가한다.

(2) 회전강도가 증가할수록 동일한 수직높이에 대한 화염의 중심축의 온도는 증가하였으며, 5.523[rad/s] 이후부터 좀 더 크게 증가하였다.

(3) 중심축의 온도가 회전강도에 따라 증가하는 것을 미루어 보았을때, 화염길이 또한 회전강도가 증가함에 따라 더 길어짐을 예측할 수 있다.

참고문헌

1. F.A.Williams, "Urban and wild fire phenomenology", *Progress in Energy Combustion Science*, Vol.8, pp.317-354, 1982.
2. A.Muraszew, J.B.Fedele and W.C.Kuby, "The fire whirl phenomenon", *Combustion and Flame*, Vol.34, pp.29-45, 1979.
3. H.W.Emmons and S.J.Ying, "The fire whirl", *Proceedings of the 11th International Symposium on Combustion* (Combustion Institute, Pittsburgh, PA), pp.475-488, 1967.
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, R.G.Rehm and H.R.Baum, "The fluid mechanics of fire whirls: An inviscid model", *Physics of Fluid*, Vol. 12, No.11, pp.2859-2867, 2000.
6. 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.
7. Bernard J.McCaffrey, "Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results", NBSIR 79-1910:49p, October 1979, Combustion Institute/Estern States Section, Chemical and Phisics Processes in Combustion.