

회전유동이 화염의 거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

최상열, 유홍선*

중앙대학교 기계공학부 대학원, *중앙대학교 기계공학부

The effect of rotating flow on the fire plume

Sang-Yeol Choi, Hong-Sun Ryou*

Graduate School, Chung-Ang University,

*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

1. 서론

화재시 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 비대칭적인 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 원활한 소화작용을 유도하는데 어려움이 있다.

Emmons[3]는 아세톤 풀 화원에 회전실린더 스크린을 이용하여 강제적으로 회전을 부여함으로써 실린더의 회전이 있는 경우와 회전이 없는 경우에 대한 화염의 거동에 대해 고찰하였다. Muraszew[2]등은 대형 회전발생장치를 이용하여 발생한 화이어 휠(Fire whirl)의 온도, 코어 반지름, 접선방향 및 축방향 속도를 측정하였다. Saito등[4]은 역사적으로 일어난 대형화재에서 화이어 휠(Fire whirl)이 발생한 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. Satoh[5][6]등은 사각 수직 채널의 각 모서리에 비대칭 틈을 만들고 중앙에 화원을 두어 자연적으로 화염에 유입되는 회전유동이 화염의 거동에 미치는 영향에 대한 실험 및 수치해석 연구를 수행하였다. 수치해석 연구로서는 Battaglia등[7]이 정상상태, 비점성의 이론적인 수학적 모델을 제시하여 임의로 부여된 회전강도에 따른 화염의 상승부력과의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다.

Farouk등[8]은 Satoh 실험장치 형태의 화이어 휠(Fire whirl)에 대해 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 수치해석 연구를 수행하였다. 최근에 Battaglia등[9]은 FDS를 이용하여 실린더 내부 중앙에 고정된 발열량의 화원을 두고 외부에 강제적으로 회전을 부여함으로써 회전강도의 변화가 화염에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Battaglia의 연구에 의하면, 일정한 회전강도 이하에서는 회전이 부여되지 않았을때 보다 오히려 화염의 길이와 수직방향 온도가 감소하는 경향을 보여주었다.

그러나 화이어 휠(Fire whirl)에 관한 메커니즘은 아직도 명확히 규명되지 않았으며, 도시화재나 산불화재와 같이 광범위한 지형에서 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 회전속도에 따른 화이어 휠(Fire whirl) 현상을 이해하는 선행적인 연구로서, 회전강도에 따른 화염 길이의 변화를 측정함으로써 회전유동이 화염의 거동에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

2. 실험개요

2.1 실험장치

Fig.1에서 보는바와 같이 회전 각속도를 부여하기 위한 실험장치로서 높이 1m, 직경 0.5m, 두께 0.5cm의 아크릴 원통을 사용하였다. 아크릴 원통을 회전시키기 위한 장치로는 직경 0.4m의 고무 타이어 4개를 아크릴 원통의 네방향에 대하여 원통 축방향과 타이어 축방향이 서로 평행이 되도록 폭 1m, 길이 1m, 높이 1m의 알루미늄 프레임에 각각 고정하였으며 하나의 고무 타이어의 축에 대해선 직류 모터를 사용하여 모터의 토크를 각각의 타이어에 의해 고정된 아크릴 원통에 충분히 전달하도록 고정하였다. 또한 아크릴 원통 하단부에는 원형 평판을 부착하고 볼케스터를 사용하여 회전이 용이하도록 하였으며, 원형 평판 중앙에 구멍을 뚫고 지면으로부터 지지대를 세워 화원이 고정되도록 하였다.

2.2 실험방법

회전유동이 화염에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 회전의 강도를 6가지의 경우로 각각 변화시키며 실험을 수행하였다. 회전의 강도를 나타내는 대개변수를 정의하기 위해 특성 화원 직경과 부력 속도를 사용하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_{P,0} T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

$$v_B = \sqrt{gD^*} \quad (2)$$

화원의 강도에 대한 회전강도를 나타내는 무차원 매개변수는 다음과 같이 정의하였다[9].

$$\Omega/\alpha = (\Gamma_0/2\pi r_0^2)/\alpha \quad (3)$$

여기서, Ω 는 임의의 반지름 r_0 과 회전수가 주어지면 결정되는 각속도이고, α 는 부력에 의해 상승되는 화염의 특성시간척도의 역수로서 다음과 같이 정의하였다.

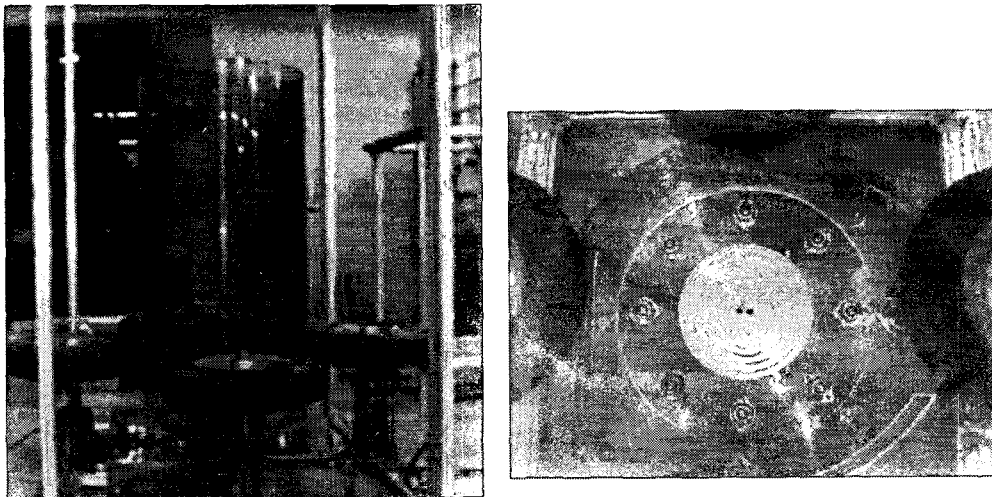


Fig. 1. Experimental apparatus.

$$\alpha = \sqrt{g/D^*} \quad (4)$$

아크릴 원통의 각속도를 제어하기 위한 방법으로 모터의 양 극에 걸리는 전압을 측정하여 각각의 회전수를 조정하였다. 실험에 사용된 연료로는 아세톤(C_3H_6O), 헥산(C_6H_{14})이며, 아세톤에 대하여 직경 10cm, 헥산에 대하여 직경 5cm 화원을 사용하였다. 연료에 대한 발열량과 무차원 발열량은 다음의 관계식에 의해 계산되었다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \Delta H_c A_f \quad (5)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_{P,0} T_0 \sqrt{g} D D^2} \quad (6)$$

Table.1은 본 연구에서 사용된 화원과 발열량, 화원의 강도에 대한 회전의 강도를 나타내는 무차원 매개변수를 나타내었다.

Table. 1 Experimental case

Fuel type	Pool diameter [m]	Ω/α
Acetone	0.10	0.000
		0.250
		0.472
		0.660
		0.847
		0.916
n-Hexane	0.05	0.000
		0.238
		0.449
		0.628
		0.805
		0.872

3. 결과 및 고찰

각각의 경우에 대해 비디오 카메라 동영상을 이용하여 화염의 가시길이를 측정하였다 [10]. 측정 데이터는 초당 25프레임의 정지영상을 추출하여 시간평균하였다. Fig.2는 회전 강도에 따른 화염의 무차원 가시길이를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 회전이 없는 경우에 대해서 원통 내부에서의 화염과 개방된 공간에서의 화염의 길이는 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 원통 내부에서의 화염의 거동이 원통의 회전이 없는 경우나 회전이 있는 경우 모두에 대해서 불안정함이 원인이라고 할 수 있으며, 동일한 조건에서의 실험을 고려하면 화염에 미면 원통의 각속도가 증가함에 따라 화염의 길이는 Battaglia의 결과와 달리 뚜렷한 임계점이 존재하지 않음을 볼 수 있었다. 또한 Battaglia가 제시한 Ω/α 의 무차원 매개 변수는 연료에 따라

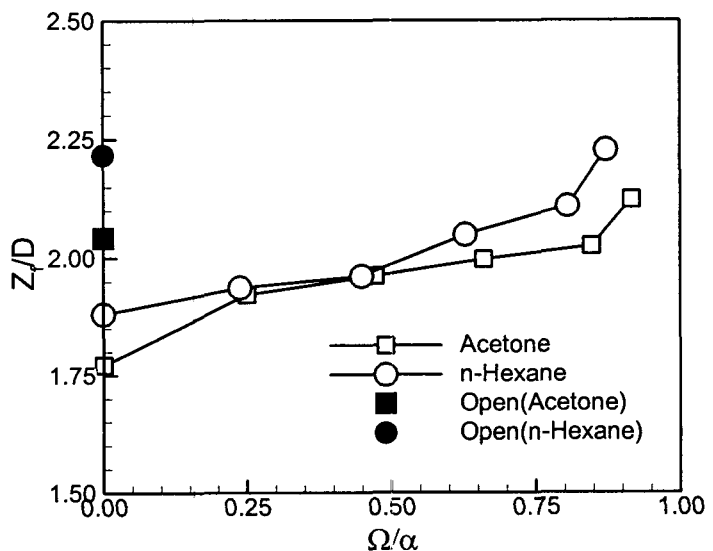


Fig. 2. Non dimensional flame height for swirl to buoyancy ratio.

다소 차이를 보였다. 즉, 연료가 가지고 있는 연소열(Heat of combustion)이 클수록 화염의 길이가 Ω/α 의 값에 대하여 다소 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다. Fig.3은 앞서 언급한 회전유동과 화염의 상승 부력의 상호작용으로 일어나는 화이어 휠(Fire whirl)의 형상을 보여주고 있다. 안정적으로 오랜시간 현상이 지속되지는 않지만 회전 각속도가 증가할수록 화이어 휠(Fire whirl)의 발생빈도는 잦아지며 발생시 최고 화염 높이는 약 0.9~1m에 이르렀다.

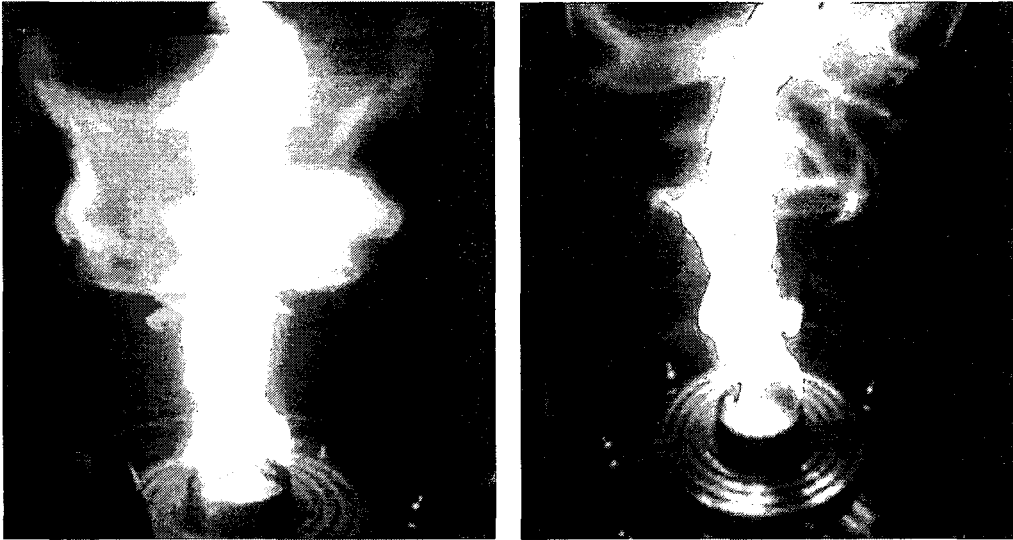


Fig. 3. Photograph of fire whirl.

4. 결론

본 실험연구에서는, 화이어 휠(Fire whirl)의 메커니즘을 이해하기 위한 앞선 연구로서 회전유동이 화염의 거동에 영향에 대하여 각각의 회전 각속도의 변화에 따른 화염의 길이의 변화를 계측하였으며, 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 화염 외부에 임의의 회전이 주어졌을때, 각속도가 증가할수록 화염의 가시길이는 선형적으로 증가하였다.
- (2) Ω/α 무차원 매개변수에 대한 화염의 길이는 연료에 따라 다소 차이를 보이며, 연소열이 큰 연료가 회전 각속도에 대해 화염의 길이가 더 길어짐을 알 수 있다.
- (3) 회전유동과 화염의 상호작용에 의한 화이어 휠(Fire whirl)이 발생할 경우, 화염의 길이는 평균 화염길이에 최고 약 3.5~4배 증가하였다.

Nomenclature

Γ_0 : Circulation

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

\dot{Q}^* : Dimensionless heat release rate

ΔH_C : Heat of combustion [kJ/kg]

A_f : Surface area of fuel [m^2]

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

D^* : Characteristic burner diameter [m]

C_P : Constant pressure specific heat [kJ/kgK]

Z_f : Flame height [m]

Subscript

0 : Ambient value

Acknowledgement

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업(03-안전22)의 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

Reference

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. K.Satoh and K.T.Yang, "Experomental observations of swirling fires," Proceedigs ASME Heat transfer Division, Vol.335, pp.393-400, 1996.
6. K.Satoh and K.T.Yang, "Simulation of swirling fires controlled by channeled self generated entrainment flows," Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science, pp.201-212, 1997.

7. 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.
8. B.Farouk, K.B.McGrattan and R.G.Rehm "Large eddy simulation of naturally induced fire whirls in a vertical square channel with corner gaps, " *Proceedings of IMECE*, Vol. 366, No. 5, pp.73-80, 2000.
9. 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.
10. J.L.Dupuy, J.Marechal and D.Morvan, "Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties," *Combustion and Flame*, Vol.135, Issues 1-2, pp.65-76, 2003.
11. G.Cox, "Combustion fundamentals of fire," ACADEMIC PRESS, 1995.