

굴참나무 낙엽의 Fire Whirl 특성에 관한 실험연구

홍기배[†] · 이재하^{*} · 배승용^{*} · 유홍선^{*}

충주대학교 에너지시스템공학과 · *중앙대학교 기계공학부
(2009. 4. 8. 접수 / 2009. 8. 4. 채택)

Experimental Study on the Fire Whirl Characteristics of Oriental Oak Leaves

Ki Bae Hong[†] · Jae Ha Lee^{*} · Seung Yong Bae^{*} · Hong Sun Ryou^{*}

Department of Energy System Engineering, Chungju University

*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received April 8, 2009 / Accepted August 4, 2009)

Abstract : The fire whirl occurring in the urban and/or wildland fire is generated by the instabilities of atmosphere. The fire whirl is a rare phenomenon, but highly destructive because it has high inhalation and lift force. In this study, experimental study is performed with oriental oak leaves, for investigating of the fire whirl characteristics occurred in wildland fire. As a result of experiment, the circulation intensity increases as increasing of the induced air velocity, and then the fire whirl occurs. Also, the heat release rate and flame height increase 22% and 18% in highest circulation.

Key Words : fire whirl, lift force, flame height, heat release rate

1. 서론

산불이 발생할 경우 수목 및 지형, 대기의 불안정성에 의해 화재주변에 회전유동이 발생하게 된다. 회전유동의 운동량이 화염의 상승유동으로 천이될 경우, 화염의 거동에 영향을 주게 되어 화염의 회전속도와 화염길이를 증가시키며, 이를 fire whirl 또는 fire vortex라고 정의 한다¹⁾. Fire whirl은 보기 드문 현상이지만, 화염길이의 증가와 함께 화염전파속도를 증가시켜 원활한 진화하는데 어려움이 발생한다. 또한 fire whirl은 화염 주위와의 압력 차로 인하여 높은 흡입력과 양력을 가지게 되어, 토네이도와 같이 높은 파괴력을 갖는다. fire whirl의 대표적인 예로써, 1871년 10월에 발생한 Great Chicago Fire가 있으며, Musham²⁾은 이 때 발생한 대규모 피해의 원인을 fire whirl 현상으로 설명하였다.

Emmons³⁾는 fire whirl의 특성을 분석하기 위하여 회전실린더 스크린을 이용하여 회전이 있는 경우

와 없는 경우에 대한 풀화재의 화염거동에 대하여 고찰하였으며, fire whirl 발생시 화염의 높이 및 연소율은 각각 최고 10배, 5배 증가한다는 정성적인 데이터를 제시하였다. Satoh 등⁴⁾은 사각수직챔버의 중앙에 위치한 풀화재의 화염주위에 회전유동이 발생할 수 있도록 챔버의 각 모서리에 공기유입구를 설치한 실험 장치를 이용하여 fire whirl의 특성을 고찰하였다. 최근 Battaglia⁵⁾ 등은 LES 난류모델을 적용하여 고정된 발열량의 화원주변에 회전유동을 강제적으로 부여함으로써, 회전강도의 변화가 화염에 미치는 영향을 부력강도와 회전강도의 비로써 나타내는 무차원 매개변수의 변화에 따라 속도장과 온도장을 수치적으로 모사하였다. 국내에서는 최상열 등⁶⁾이 풀화재 및 회전실린더 스크린을 이용하여 fire whirl의 특성을 분석하였으며, fire whirl의 특성화염길이를 부력강도에 대한 회전강도의 비에 대한 관계식으로 나타내었다. 배승용 등⁷⁾은 자연적으로 발생하는 회전유동을 이용한 풀화재의 fire whirl에 대하여 LES 난류모델을 적용하여 부력강도와 회전강도의 비에 대한 특성 화염길이 및 화염주위의 유동 특성에 대한 연구를 실시하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
gbhong@cjnu.ac.kr

그러나 fire whirl은 대규모 산림화재에서 주로 발생하며 기존 액체연료를 이용한 fire whirl 특성 연구는 산림화재의 주 연료인 낙엽 및 초본 등 보다 높은 발열량을 갖게 되어 산림화재에서 발생하는 fire whirl의 연소 특성을 분석하기에는 어려움이 발생한다. 그러므로 본 연구에서는 산림 화재에서 발생하는 fire whirl의 특성에 대해 알아보기 위하여 굴참나무의 낙엽을 화재 연료로 사용하고, 연소가 시작됨에 따라 자연적으로 회전유동이 발생하도록 장치를 구성하여 fire whirl의 특성에 대해 실험 연구를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치 및 개략도를 나타낸다. 화재실의 크기는 폭 4m, 길이 4m, 높이 3.8m로 강철판재로 제작하였다. 벽의 두께는 0.1m로 강철판재 사이에 난연재를 삽입하여 외부로의 열전달을 최소화하였다. 개략도에 나타난 바와 같이 화재실의 중앙부에 폭 0.475m, 길이 0.475m, 높이 1.5m의 알루미늄 프레임 고정장치의 4면을 두께가 5mm인 강화유리로 외벽을 구성하였으며, 실험장치의 각 모서리에 각각 0.05m, 0.1m, 0.15m의 공기유입구를 설치하여 화원주변에 회전유동이 발생하도록 하였다. 실험장치의 바닥면 중앙부에 구멍을 뚫어 로드셀(load cell)의 스트레인 게이지와 저울판이 연결되도록 하였으며, 화원 중심으로부터 0.2m 떨어진 부분의 바닥면에 구멍을 뚫어 L자형 피토투브(pitot tube)와 데이터로거가 연결되도록 하였다.

2.2. 화원 및 발열량

화원(Fig. 1(b))은 직경 0.275m의 바닥판에 높이 0.25m의 철망을 용접하여 원형꼴의 형태로 제작하였다. 연료로는 완전 건조된 굴참나무의 낙엽을 사용하였고, 국내 산림의 평균 용적밀도(bulk density, 22.5kg/m³)를 만족하기 위하여 부피가 0.0148m³(직경 0.275m, 높이 0.24m)인 원통형 연료풀에 낙엽의 양을 약 300g으로 설정하였다. 연료의 감소량을 측정하기 위하여 로드셀을 사용하였으며, 시간에 따른 연소량 변화를 저장하기 위하여 인디케이터의 출력부에서 발생된 신호는 RS-232 케이블을 통해 PC로 전송되었다. 연료의 연소율(\dot{m}_f'') 및 발열량(\dot{Q}), 무차원 발열량(\dot{Q}^*), 화원특성 지름(D^*)은 각각 다음의 식으로 각각 계산되어진다.

$$\dot{m}_f'' = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot A_f} \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_f'' \Delta H_c A_f \quad (2)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{C_{p,0}} T_0 \sqrt{g D} D^2} \quad (3)$$

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

여기서, ΔW 는 단위시간 ΔT 동안 연료의 질량 감소량, Δt 는 시간변화, A_f 는 화원의 면적, ΔH_c 는 연소열, ρ_0 는 공기의 밀도, $C_{p,0}$ 는 공기의 정압비열, T_0 는 외기온도, g 는 중력가속도를 나타낸다.

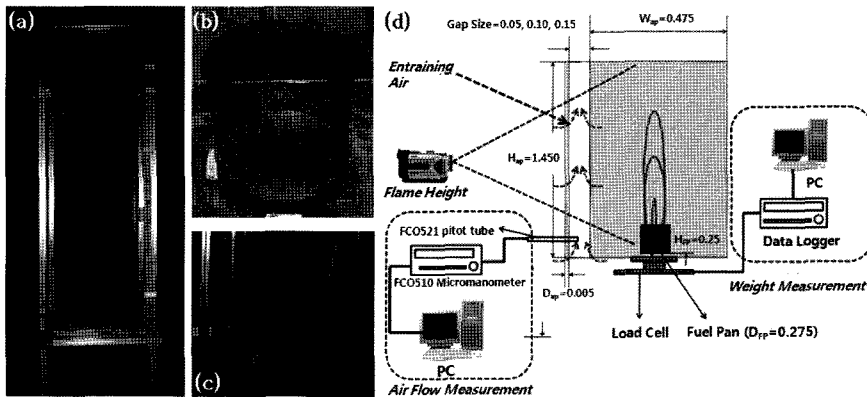


Fig. 1. Apparatus and Schematics for fire whirl experiment (a) Experimental Apparatus, (b) Fuel pan, (c) Pitot Tube, (d) Schematics of experiment

2.3. 회전속도

Fire Whirl은 화염주위에 발생하는 회전력에 의해 일어나는 현상으로써, 회전속도는 Fire Whirl의 특성을 예측하는데 있어 중요한 파라미터이다. Fire whirl 발생 시, 화원으로 운동량을 전달하는 회전 유동은 화원의 높이에서 지배적으로 발생하므로⁸⁾, L자형 피토투브(pitot tube)를 화원과 같은 높이이고 화원의 중심으로부터 0.2m 이격시킨 위치에 설치하여 회전속도를 측정하였다. 시간에 따른 속도 변화를 저장하기 위하여 인디케이터의 출력부에서 발생된 신호는 RS-232 케이블을 통해 PC로 전송되었다. Fig. 1(c)는 본 연구에서 사용된 L자형 피토투브의 설치위치 및 형상을 나타내고 있다.

2.4. 화염길이

화염길이는 화재성장과 위험도를 예측하는데 있어 중요한 파라미터로써, 일반적으로, 가시적으로 구별되는 화염 발광부분의 경계로 정의된다⁹⁾. 또한 Zukoski¹⁰⁾는 화염의 puffing 특성을 고려하여 시간에 따른 화염의 간헐부분의 50% 높이를 특성화염길이라고 정의하였다. 본 연구에서는 fire whirl의 화염 영상을 비디오카메라로 촬영하고, 촬영된 동영상에서 초당 30프레임의 정지영상을 10초간 300개의 샘플링이미지를 추출하였으며, 샘플링이미지를 이용하여 Zukoski가 정의한 특성 화염길이를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 발열량

Fig. 2는 공기유입구의 크기를 변화시키며 측정된 시간변화에 따른 연료감소량을 나타내고 있다. 발화 이후 40초는 fire whirl이 발생하게 되어 정상상태로 도달하는 단계로서, 공기유입구의 크기 변화에 관계없이 감소량이 유사하게 나타나고 있다. 이후 공기유입구가 작아짐에 따라 회전강도가 높아지며 fire whirl 현상이 발생하게 되어 연료 감소율이 증가한다. 식 (1)~(4)를 이용하여 계산된 각 경우에 대한 연소율 및 발열량, 무차원발열량, 특성화원지름을 Table 1에 나타내었다. 연소율은 fire whirl의 연료감소율이 정상상태로 도달한 40~50초 사이의 평균값을 사용하였으며, 발열량 산정 시 필요한 완전 건조된 굴참나무 낙엽의 연소열(ΔH_c)은 산림과학원의 ISO 5660 콘칼로리미터(con-calorimeter)를 이용하여 측정하였다¹¹⁾.

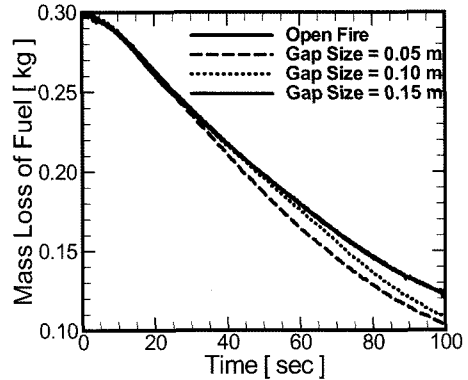


Fig. 2. Mass Loss of Fuel.

Table 1. Burning Rate, Heat Release Rate, Dimensionless Heat Release Rate, and Characteristics Diameter versus gap size

	Open	gap 5cm	gap 10cm	gap 15cm
Burning Rate (kg/s·m ²)	0.0315	0.0384	0.0334	0.0315
Heat Release Rate(kW)	24.93	30.42	26.41	24.91
Dimensionless Heat Release Rate	0.564	0.688	0.598	0.564
Characteristic Diameter(m)	0.219	0.237	0.224	0.219

Table 1을 통해 연소율 및 발열량은 fire whirl 발생 시 최대 22% 상승함을 알 수 있으며, fire whirl이 발생하게 되면 일반화재에 비해 높은 발열량을 갖게 되어 더욱 많은 피해를 야기할 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 회전속도 및 화염길이

화재가 발생할 경우, 화염의 부력으로 인하여 주변의 공기를 빨아들이게 된다. 본 연구에서는 이러한 화재의 특성을 이용하여 화원주위에 회전유동을 발생시켰으며, 각 경우에 따른 화재특성 연구를 위해 회전속도를 측정하였다. 피토투브를 이용하여 측정된 화염주위의 회전속도는 속도 요동을 갖으며, 측정위치에서의 회전강도는 시간평균(Time Averaging)을 통해 도출된 평균 회전속도를 이용하

Table 2. Flame Height, Dimensionless Flame Height and Circulation/Buoyancy versus gap size

	Open	gap 5cm	gap 10cm	gap 15cm
Flame Height (m)	0.828	0.981	0.847	0.830
Dimensionless Flame Height	3.786	4.141	3.796	3.799
Circulation/Buoyancy (Ω/α)	0	0.543	0.306	0.0421

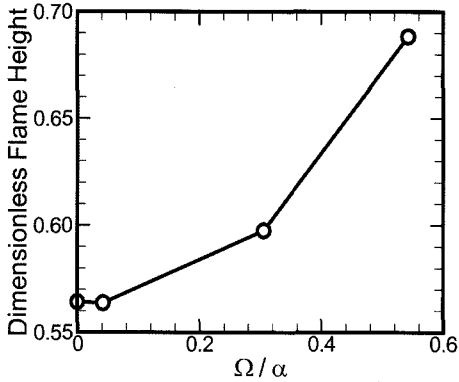


Fig. 3. Dimensionless Flame Height versus Ω/α .

여 계산하였다. 각 경우에 따른 회전강도는 Table 2에 나타내었으며, 부력강도에 대한 회전강도는 아래의 식으로 계산되어진다.

$$\Omega/\alpha = (\Gamma/2\pi r^2) / \sqrt{g/D^*} \quad (5)$$

(where, $\alpha = \sqrt{g/D^*}$)

여기서 Ω 는 입의 회전유동의 회전각속도로서, Ω 를 구하는 식에 포함된 Γ 는 회전유동의 Circulation 값을 나타내며 아래의 식을 통해 계산되어진다.

$$\Gamma = \int \omega_\theta dr dx \quad (6)$$

Fig. 3(a)는 공기유입구의 변화에 따른 화염주위의 회전강도를 나타낸 것으로, 공기유입구가 넓어짐에 따라 회전강도는 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 공기유입구의 크기가 작아지게 되면 외부로부터 화원으로 유입되는 공기유입구의 넓이가 작아지게 되어 유입속도가 증가하게 되고, 이로 인해 회전속도가 증가하는 것이다. 이러한 현상으로 인하여 공기유입구의 크기가 5 cm일 경우 연소율 및 발열량이 가장 높게 나타나고 있으며, 회전강도가 거의 없는 15 cm일 경우에는 일반화재와 연소율 및 발열량 등의 차이를 보이지 않는다.

또한 Fig. 5는 부력강도에 대한 회전강도에 따른 화염길이 변화를 나타낸 것으로써, 회전강도가 높아짐에 따라 화염으로 공급되는 운동량이 많아지게 되어 화염길이가 일반화재에 비해 증가하게 된다. 하지만 회전강도가 0.3일 때 발열량이 높아짐에도 불구하고 화염길이가 다소 낮아지는 결과를 보이게 된다. 이는 회전강도가 0.3 이하일 경우, 회전유동에 의해 화염주변에는 횡방향의 압력구배가

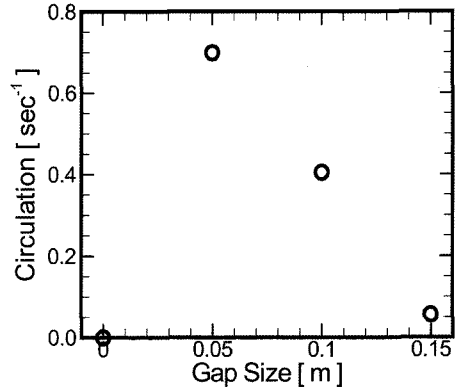


Fig. 4. Circulation versus gap size.

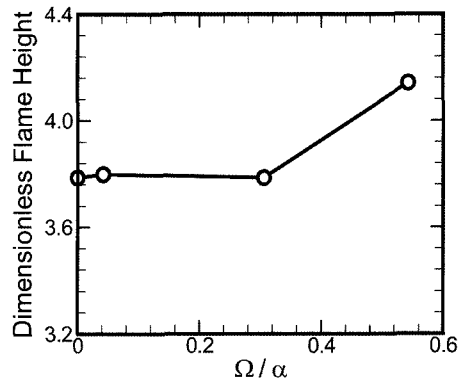


Fig. 5. Dimensionless Flame Height versus Ω/α .

형성되고, 이는 화염너비를 증가시키게 되어 화염길이가 다소 감소하게 되며, Battaglia 등⁵⁾의 연구에서도 이와 같은 결과가 도출되었다.

Table 2와 Fig. 5를 통해 회전속도가 증가함에 따라 화염길이는 최대 18% 증가하고, 공기유입구의 너비가 15cm인 경우에는 회전강도가 충분하지 않아 fire whirl 현상이 발생하지 않으며 일반화재의 화염길이와 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 산림화재에서 발생하는 fire whirl의 특성에 대해 알아보기 위하여 굴참나무 낙엽을 이용한 실험연구를 실시하였다. 실험 결과 공기유입구가 작아짐에 따라 유입공기의 속도 및 회전강도가 높아지게 되며, 발열량 및 화염길이는 일반화재에 비해 각각 최대 22%, 18% 증가한다. 하지만 공기유입구의 너비가 15cm인 경우, 회전강도가 충분하지 않아 fire whirl 현상이 발생하지 않는다.

감사의 글 : 본 연구는 충주대학교 학술진흥재단으로부터 2006년 6월부터 2007년 5월까지 학술연구과제로 지원을 받아 연구되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) F.A. Williams, "Urban and Wild Fire Phenomenology", *Process in Energy and Combustion Science*, Vol. 8, pp. 317~354, 1982.
- 2) H.A. Musham, "The Great Chicago Fire", *Papers in Illinois State History and Transaction*, pp. 69~189, 1941.
- 3) H.W. Emmons and S.J. Ying, "The Fire Whirl", *Proceedings of the 11th International Symposium on Combustion*, pp. 475~488, 1967.
- 4) K. Satoh and K.T. Yang, "Experimental Observations of Swirling Fires", *ASME Heat Transfer Division 335*, pp. 393~400, 1996.
- 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) 최상열, 유홍선, "회전강도가 Fire Whirl의 특성에 미치는 영향에 관한 실험연구", *한국안전학회지*, 제20권, 제2호, pp. 11~17, 2005.
- 7) 배승용, 성건혁, 유홍선, 홍기배, 김동현, "발열량의 차이에 따른 파이어휠(Fire Whirl)의 유동특성", *한국유체공학학술대회*, pp.609-613, 2008.
- 8) A.Y. Snegirev, J.A. Marsden, J. Francis, G.M. Makhviladze, "Numerical studies and experimental observations of whirling flames", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 12-13, pp. 2523~2539, 2004.
- 9) A. Hamins, T. Kashiwagi and R. Buch, "Characteristics of Pool Fire Burnings", *Fire Resistance of Industrial Fluid*, ASTM Special Technical Publication, Vol. 1284, pp. 15~41, 1995.
- 10) E.E. Zukoski, T. Kubota and B.M. Cetegen, "Entrainment in Fire Plumes", *Fire Safety Journal*, Vol. 3, pp. 107~121, 1981.
- 11) D.H Kim, T. Tanaka, M.B. Lee, "A Numerical Study of Flame Tilt by Slope and Wind Added", *International Wildfire Management Conference*, 2009.