

## 발열량의 차이에 따른 Fire Whirl의 유동특성

배승용\* · 성건혁\*\* · 유홍선\*\*\* · 홍기배\*\*\*\* · 김동현\*\*\*\*\*

### Flow Characteristics of Fire Whirl for Different Heat Release Rate

Sung Yong Bae\*, Kun Hyuk Sung\*\*, Hong Sun Ryou\*\*\*, Ki Bae Hong\*\*\*\* and Dong Hyun Kim\*\*\*\*\*

**Keywords :** Fire Whirl(파이어휠), Heat Release Rate(발열량), Flow(유동), FDS

#### Abstract

The fire whirl occurring by the instability of atmosphere is a rare phenomenon, but highly destructive because it has high inhalation and lift force, caused by the rotating velocity. And it is difficult to extinguish the fire, because of increment of the spread rate with the flame height.

In this study, for investigation of the flow characteristic of fire whirl for various heat release rate, numerical analysis is performed in same conditions with experiments, using the FDS which is developed at NIST. For validating of the numerical study, the results are compared with the experiment. The result shows that the relation between the characteristic length and the ratio of circulation versus the buoyancy force is  $z_f/D^* = 0.304(\Omega/\alpha)^2 - 1.334\Omega/\alpha + 5.516$ .

#### 1. 서론

산림화재의 경우 지형 및 기상조건 등의 여러 변수들과 상호작용에 의해 발생하게 되어 인명 및 재산 등의 피해량에 많은 차이를 보이게 된다. 특히 대기의 불안정성에 의해 발생하는 회전유동의 운동량이 화염의 상승유동으로 전이되는 경우 화염의 거동에 많은 영향을 준다. 즉 화원주위에 회전유동이 형성되고, 화염의 회전속도를 증가시켜 화염 길이는 화염의 축 방향으로 급격히 증가하게 되며, 이를 fire whirl 또는 fire vortex라고 정의 한다[1]. Fire whirl은 보기 드문 현상이지만, 화염길이의 증가와 함께 화염전파속도를 증가시켜 원활한 소화작용을 유도하는데 어려움이 있다. 또한 주위와의 압력차로 인하여 큰 흡입력과 양력을 가지게 되어 토네이도와 같이 매우 파괴적이다. 그 대표적인 예로써, 1871년 10월에 발생한 Great Chicago Fire에서는 300여명의 인명피해를 입었으며, 특히 fire whirl에 의해 착화된 지지물들은 화재로부터 600m 떨어진 곳까지 퍼지게 되었다. Musham[2]은 이러한 피해의 원인을 fire whirl으로 설명하였다.

Emmons[3]는 fire whirl의 특성을 분석하기 위하여 회전실린더 스크린을 이용하여 회전이 있는 경우와 없는 경우에 대한 풀화재의 화염거동에 대하여 고찰하였고, fire whirl 발생 시 화염높이와 연소율은 각각 최대 10배, 5배 가량 증가한다는 정성적인 데이터를 제시하였다. Muraszew[4] 등은 fire whirl현상에 대한 수학적 이론모델 및 대형 회전발생 장치를 이용하여 fire whirl의 온도, 코어반지름, 접선방향 및 축방향 속도를 측정함으로써 모델과 실험결과를 통한 상관관계식을 제시하였다.

하지만 Fire Whirl은 도시화재나 산불화재와 같이 광범위한 지형에서 발생하고, 여러 기후 및 환경조건에 따라 다른 많은 차이를 보이므로 실증실험을 통한 fire whirl의 특성을 분석하는 연구는 제한적이고 접근이 어렵다. 그러므로 수치해석을 통해 fire whirl을 해석함으로써 제한적이고 특수한 변수들의 영향에 대한 특성을 파악하고, 이에 대한 열 및 유체역학적 유동구조의 명확한 메커니즘을 규명하는 연구가 요구된다.

Battaglia[5] 등은 LES난류모델을 적용하여 고정된 발열량의 화원에 대해 외부에 강제적으로 회전을 부여함으로써 회전강도의 변화가 화염에 미치는 영향을 부력강도와 회전강도의 비로써 나타내는 무차원 매개변수의 변화에 따라 속도장과 온도장을 수치적으로 모사하였으며, 중심축 온도에 따른 화염길이의 변화를 예측하였다. McDonough 등[6]은 STAR-CD를 이용하여 fire whirl을 수치해석을 하였다. 이들은 연소의 상호작용에 주안점을 두어 복잡한 현상을 무시하고, vorticity-buoyancy interaction 만을 해석하였다. 이 두 연구는 이론적 모델링을 통하여 수치적으로 해를 구하고 물리적 현상을 해석하는데 있어서는 중요한 연구이긴 하지만 강제적으로 부여된 회전유동 또는 많은 수학적 가정을 전제로 하고 있어 실제적인 fire whirl 현상 규명에는 무리가 따른다.

그러므로 본 연구에서는 자연적으로 생성되는 회전유동을 통해 발생하는 fire whirl의 기본 특성 및 화염높이를 실험을 통해 도출하였다. 또한 실험 결과를 통하여 화재 전용 수치해석 코드인 FDS를 이용하여 fire whirl의 유동특성을 수치분석하여, 이를 기반으로 fire whirl의 유통특성을 이해하는데 기여하고자 한다.

\* 중앙대학교 대학원, sybzang@wm.cau.ac.kr

\*\* 중앙대학교 기계공학부, ilmare.khs@gmail.com

\*\*\* 중앙대학교 기계공학부, cfdmec@cau.ac.kr

\*\*\*\* 충주대학교 에너지시스템공학부, gbhong@cjnu.ac.kr

\*\*\*\*\* 국립산림과학원 산불연구팀, k3d2h1@forest.go.kr

#### 2. 실험 및 수치해석

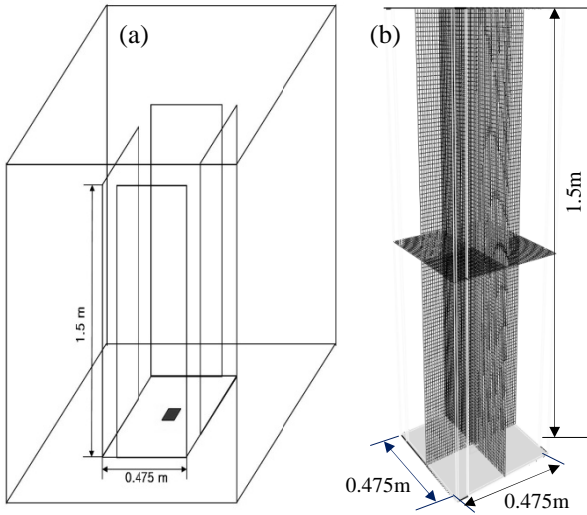


Figure 1 (a) Schematics of experimental set-up (b) Computational domain

### 2.1 실험 조건

Figure 1 (a)은 본 연구에서 사용된 실험장치에 대한 개략도를 나타낸다. 화재실의 크기는  $4\text{m} \times 4\text{m} \times 3.8\text{m}$ 로 강철판재로 제작하였다. 벽의 두께는  $0.1\text{m}$ 로 강철판재 사이에 난연재를 삽입하여 외부로의 열전달을 최소화하였다. Figure 1 (a)에서 보는 바와 같이 화재실 중앙부에  $0.475\text{m} \times 0.475\text{m} \times 1.5\text{m}$ 인 공간의 4면을 두께가  $5\text{mm}$ 인 강화유리로 벽체를 만들고 각 모서리에 각각  $0.05\text{m}$ ,  $0.1\text{m}$ 의 공기유입구를 만들어 화원주변에 회전유동이 발생하도록 구성하였다. 화원은 유리벽체 내 중앙에 위치시켰으며, 화원의 크기는 직경이 각각  $0.04\text{m}$ ,  $0.06\text{m}$ ,  $0.08\text{m}$ ,  $0.1\text{m}$ 인 원형 풀을 사용하였다. 또한 연료로는 헥산( $\text{Hexane } \text{C}_6\text{H}_{14}$ )을 사용하였고, load cell을 이용하여 mass loss rate를 측정하였다.

### 2.2 수치해석 모델

수직사각채널의 각 모서리 틈을 통해 유입되는 공기의 속도에 의해 자연적으로 발생하는 회전유동을 이용하여 생성되는 fire whirl의 유동특성을 수치해석적으로 분석하기 위하여 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) ver. 4.0을 사용하였다[7]. 난류유동장의 해석은 LES(Large Eddy Simulation) 모델을 적용하였으며, 연소모델은 혼합분율모델(mixture fraction combustion model)을 적용하였다. 또한 부력에 의해 발생하는 와류(vorticity)를 고려하여 수치분석을 실시하였다. Baroclinic Vorticity를 고려할 경우 압력을 구하는 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \frac{\nabla \bar{p}}{\rho} = \nabla \cdot \frac{\nabla \bar{p}}{\bar{\rho}} + \nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\bar{\rho}} \right) \nabla \bar{p} \quad (1)$$

여기서  $\bar{\rho}$ 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\bar{\rho} = \frac{2\rho_{\min}\rho_{\max}}{\rho_{\min} + \rho_{\max}} \quad (2)$$

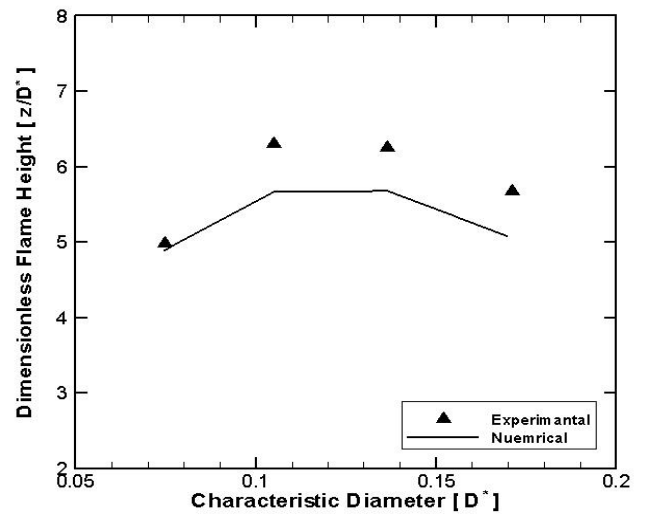


Figure 2 Dimensionless heights versus characteristic diameter

### 2.3 수치해석 조건

Figure 1 (b)는 수치해석에 사용된 계산도메인은 나타낸 것으로, 화재실 내부조건을 외기조건으로 가정하였고, 강화유리로 만들어진 사각수직채널 내부만을 계산영역으로 설정하였다. FDS코드는 사각격자를 기본으로 하며, 본 수치해석에서는 총  $300,000(50 \times 50 \times 120)$ 개의 격자를 이용하여 계산을 실시하였다. FDS를 이용한 fire whirl의 수치해석을 위하여 실험 결과를 이용하여 화원의 발열량을 사용하였다. 발열량 산정은 측정된 mass loss rate와 다음 식을 통해 계산되며, Table 1은 각 경우에 따른 발열량을 나타낸다.

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

$$\dot{m}_f = \frac{\Delta W}{\Delta T A_f} \quad (4)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 화염높이

화염의 형상 및 길이는 화재성장과 위험도를 예측하는데 있어서 중요한 파라미터로 작용한다. 일반적으로 화염 높이는 가시적으로 구별되는 화염의 발광 부분(Luminescence)의 경계로 정의된다[8]. 또한 Zukoski[9]는 화염길이에 대한 정의로 시간에 따른 화염의 간헐부분의 50% 높이로 정의하였다. 즉, 난류확산화염의 특성에 의한 맥동(Pulsation)이 일어날 때 수치해석 결과를 비교분석 한 것이다. 실험 및 수치해석을

Table 1 Heat release rate of each cases

Diameter (cm)	Heat Release Rate (kJ/s)	
	5 cm	10 cm
4	1.857	1.829
6	4.357	4.717
8	8.435	11.622
10	14.829	19.615

통해 가장 작은 화염의 가지길이와 가장 큰 화염 가지길이에 대해 맥동시간의 50%를 차지하는 시간에 존재하는 화염의 높이로 볼 수 있다. Figure 2는 FDS를 이용한 수치해석적 결과의 신뢰도를 평가하기 위하여 화재실험을 통해 도출해낸 화염높이와 해 얻어진 화염높이는 화염특성 지름으로 나누어 무차원화 하였으며, 이를 화원특성 지름에 대하여 나타내었다. 화원 특성지름( $D^*$ )을 구하는 식은 다음과 같다.

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

Figure 2를 통해 FDS code를 이용한 fire whirl에 대한 수치분석은 실험결과에 비하여 다소 낮게 예측하고 있지만, 화염높이는 실험결과와 유사한 경향을 통해 변화함을 알 수 있다.

### 3.2 유입속도

대부분의 fire whirl에 대한 실험 및 수치해석적 연구는 강제적으로 부여된 회전유동을 통하여 이루어져 왔으나, 본 연구에서는 위와 같은 화재 및 연소의 기본 현상을 통해 회전유동이 자연적으로 발생되도록 실험장치를 구성하였다. 이를 통해 발생하는 fire whirl은 gap을 통해 유입되는 공기의 속도에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 수치해석을 통해 gap의 중앙에서 수직방향으로 유입되는 공기의 속도를 측정하였고, Fig. 3는 수치해석을 통해 측정된 평균 유입속도를 나타낸 것이다.

Figure 3에서 보는 바와 같이 gap을 통해 유입되는 공기의 속도는 임의의 높이까지 일정하게 나타나지만, 이 지점 이후에는 유입공기량이 줄어든다. 이는 높이가 높아짐에 따라 유입되는 공기의 속도에 비해 연소반응을 통해 발생된 연소산화물이 gap을 통해 배출되는 속도가 높아져 평균 유입속도가 줄어들게 되는 것이다.

수치해석적으로 도출된 결과의 타당성을 검증하기 위하여 pool pan의 지름 및 gap의 크기가 모두 10cm인 경우의 gap의 중앙에서 수직방향으로 유입되는 공기의 속도를 실험을 통해 측정하였다. 실험을 통해 측정된 값은 높이가 0.8m 이상인 경우만을 나타내고 있으며, 높이가 낮은 경우에는 화염에 의한

부력 및 복사열의 영향에 의하여 측정이 불가하고, 측정 결과의 불확실성(uncertainty)이 높아져 그래프에서 제외하였다. 실험을 통해 측정된 결과와 동일한 조건의 수치해석 결과를 보면, 수치분석의 결과가 실험에 비해 다소 낮게 측정이 되었지만 gap을 통해 유입되는 속도분포의 경향은 일치한다.

### 3.3 챔버 내 회전유동

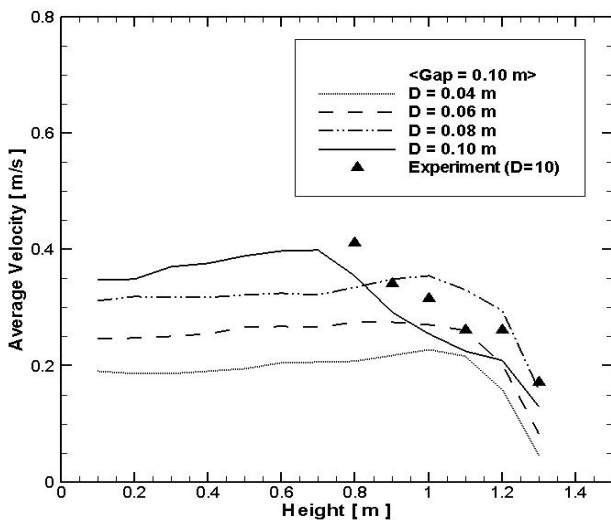
Figure 4는 수직 사각채널의 모서리에 설치되어있는 gap을 통해 유입되는 공기의 속도에 의해 발생하는 회전유동의 수직 속도 분포를 나타낸다. 상기에서 공기의 유입속도 분포에 대해 살펴본 바와 같이 공기의 유입량은 임의의 높이까지 일정하게 유입되며, 연소가스의 배기가 적은 구간에서 유입되는 공기의 속도가 fire whirl 형성에 지배적인 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 사각 챔버 내의 수평방향 속도성분을 높이 방향으로 0.1m 간격으로 측정하였고, 연소가스의 배기가 적은 0.6m 이하 위치에서의 평균 속도분포를 도출하였다.

Gap을 통해 유입된 공기에 의해 발생하는 회전유동은 화원의 중심으로부터 직경 내에서는 반지름에 비례하여 선형적인 증가를 하고, 반지름 이후에는 중심으로부터의 거리에 반비례하여 감소하며, Rankine vortex 유동 특성에 준하여 발달한다. 따라서 본 연구에서는 사각 챔버 내의 회전유동에서 선형적인 증가를 하는 화원의 직경 내부의 회전강도를 측정하였고, 부력강도에 따른 회전강도의 비를 나타내는  $\Omega/\alpha$ 로 나타내었다. 여기서  $\Omega/\alpha$ 는 다음 식에 의해 구해진다.

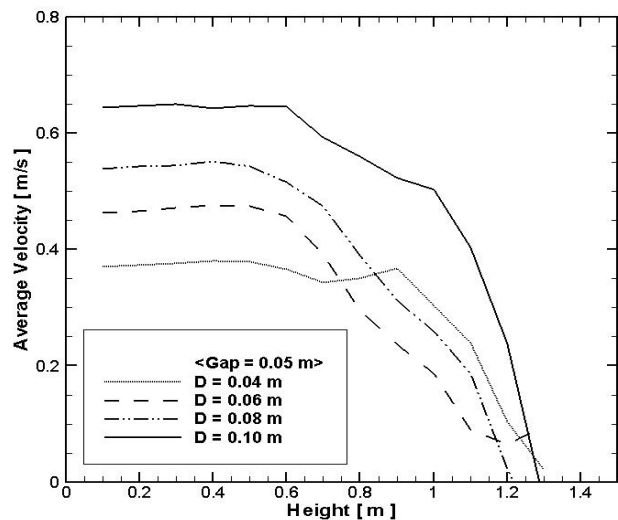
$$\Omega/\alpha = (\Gamma_0 / 2\pi r_0^2) / \sqrt{g/D^*} \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 는 부력에 의해 상승되는 화염의 특성 시간척도의 역수로써 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = \sqrt{g/D^*} \quad (7)$$



(a) Gap size = 5 cm



(b) Gap size = 10 cm

Figure 3 Entrained normal velocity profile versus the height of the gap

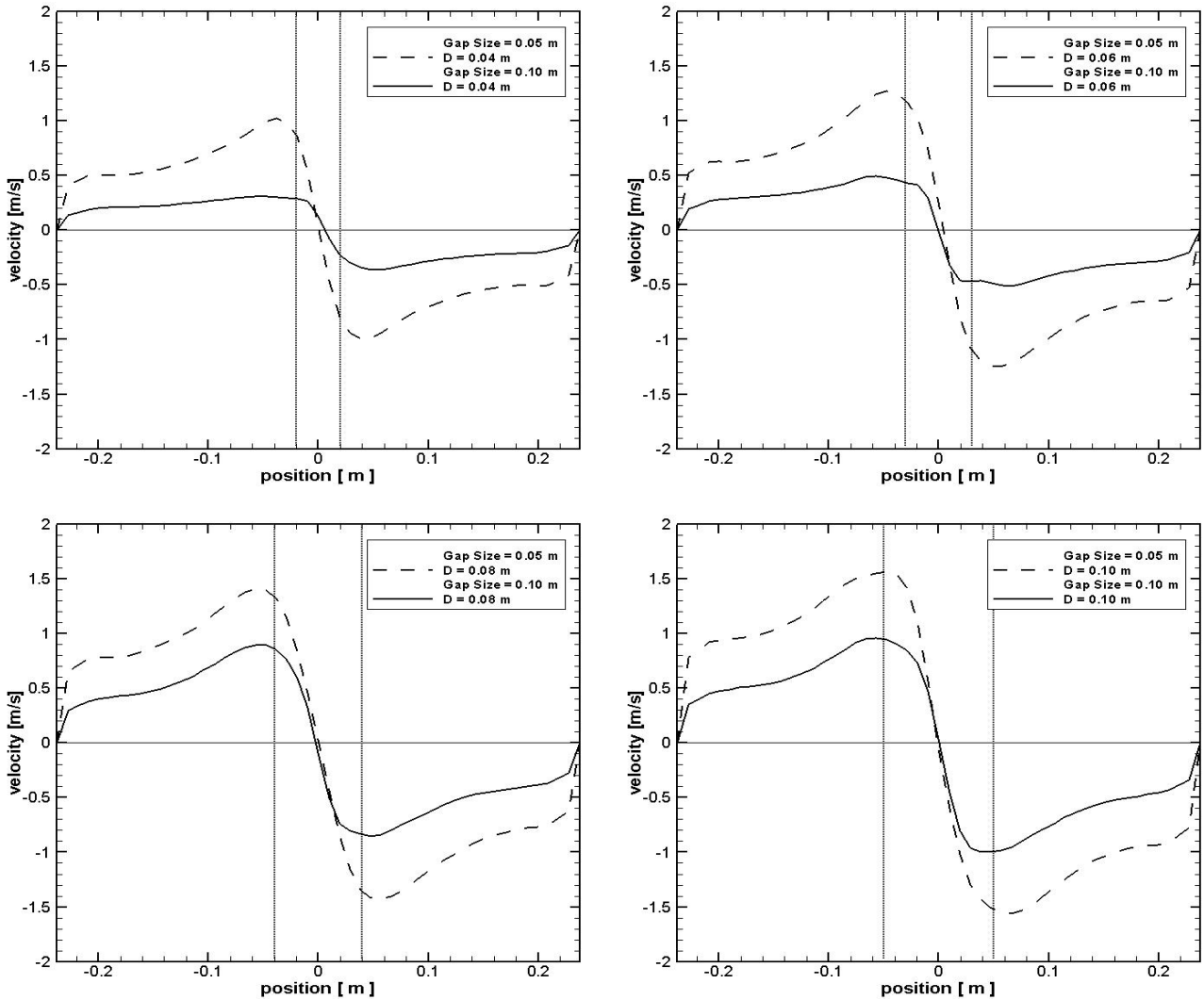


Figure 4 Tangential velocity profile in the vertical square chamber, (a) diameter : 4cm, (b) diameter : 6cm, (c) diameter : 8cm, (d) diameter : 10cm

Figure 5는 위의 과정을 통해 도출된 부력강도와 회전강도의 비에 따른 특성 평균화염길이를 나타내고 있다. 그래프를 통해 평균화염길이는  $\Omega/\alpha$ 에 대하여 일정한 경향을 나타내고 있으며, 커브피팅(curve fitting) 결과 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Z_f/D^* = 0.304(\Omega/\alpha)^2 - 1.334(\Omega/\alpha) + 5.916 \quad (8)$$

이를 통해 부력의 크기에 비해 회전강도의 크기가 증가할 경우 부력에 대한 회전강도의 비( $\Omega/\alpha$ )가 2보다 작을 경우 평균화염의 길이는 감소하는 경향을 보이고, 이보다 커지게 되면 증가하는 추세를 보인다. 하지만 이 결과는 8가지의 경우를 이용하여 얻어낸 결과로써 이를 기반으로 하여 더욱 다양한 수치해석적 연구를 수행하고, 높은 정확도를 갖는 추세곡선을 얻어야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 fire whirl의 유동특성을 분석하기 위한 선행 연구로써, 대표적 화재시물레이션인 FDS를 이용한 fire whirl의 수치분석 가능성을 분석하였다. 또한 화염주위에 자연적으로 생성되는 회전유동을 통하여 화염주위에 형성되는 유동의 특성을 파악하고 부력의 크기에 대한 회전강도의 비에 따른 무차원 화염길이의 변화에 대하여 실험적 수치해석적 분석을 실시하였다. 따라서 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. FDS를 이용한 수치분석을 통해 얻어진 화염의 높이 및 gap을 통해 유입되는 공기의 속도는 실험결과에 비해 다소 낮게 예측되었으나, 유입공기 속도분포 및 화염높이 변화 경향은 동일하다. 따라서 FDS를 이용한 fire whirl의 유동특성을 분석하는데 적합한 것으로 사료된다.
2. 부력에 대한 회전강도의 비( $\Omega/\alpha$ )에 따른 평균화염의 길이 변화는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Z_f/D^* = 0.304(\Omega/\alpha)^2 - 1.334(\Omega/\alpha) + 5.916$$

또한 위 상관식에 의하면,  $\Omega/\alpha$ 가 2보다 작을 경우

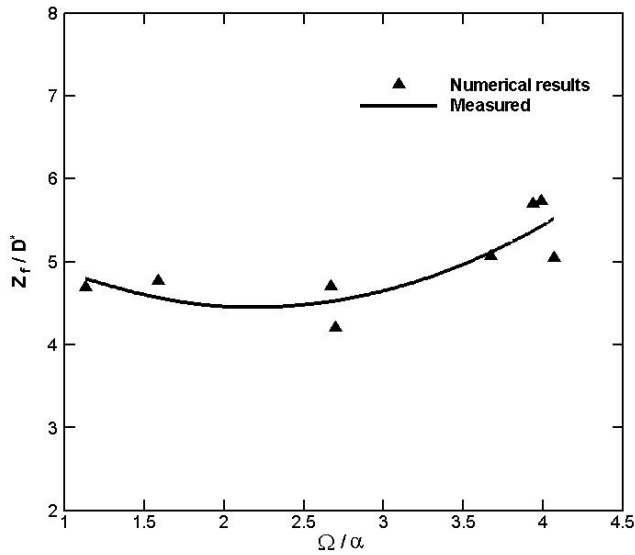


Figure 5 Characteristic mean flame height versus ratio of swirl induced motion to buoyancy driven motion

$\Omega/\alpha$ 가 증가함에 따라 평균화염길이는 미미한 감소추세를 보이고, 2 보다 클 경우는 증가한다.

#### 후 기

본 논문은 국립산림과학원 연구과제에 의해 수행되었으며

관계제위께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] F.A. Williams, "Urban and wild fire phenomenology", Process in Energy Combustion Science, Vol. 8(1982), pp.317-354.
- [2] Meroney R.N., "Fire Whirls and Building Aerodynamics", International Conference on Wind Engineering(2003), pp.2257-2266.
- [3] Emmons H.W. and Ying S.J., "The Fire Whirl", Proceedings of the 11th International Symposium on Combustion (Combustion Institute, Pittsburgh, PA)(1967), pp.475-488.
- [4] Muraszew A., Fedele J.B. and Kuby W.C., "The Fire Whirl Phenomenon", Combustion and Flame, Vol. 34, 1979, pp.29-45.
- [5] Bataglia F.B. et al., "Simulating Fire Whirls", Combustion Theory and Modeling, Vol. 4, 2000, pp.122-138.
- [6] McDonough J.M., Andrew L., "Simulation of Vorticity-Buoyancy Interactions in Fire-Whirl-Like Phenomena", ASME Summer Heat Transfer Conference, July 21-23, 2003.
- [7] NIST(2004), "Fire Dynamics Simulator (version 4.0) - Technical Reference Guide", Fire Research Division, Building fire Research Laboratory.
- [8] A.Hamins, T. Kashiwagi, R. Buch, "Characteristics of pool fire Burnings", Fire Resistance of Industrial Fluids, ASTM Special Technical Publication, Vol. 1284(1995), pp.15-41.
- [9] E.E. Zukoski, T.Kubota, B.M.Cetegen, "Entrainment in fire plumes", Fire Safety Journal, Vol.3(1981), pp.107-121.