

# 상호작용하는 부상화염의 특성에 관한 연구

이 승\*· 이병준\*\*

## Characteristics of Interacting Lifted Flames

Seung Lee and Byeong-Jun Lee

Key Words: Lifted Flame(부상화염), Interaction(상호작용), Flame Stability(화염 안정성), Blowout(화염날림), Flame Height(화염높이), Ltoff Height(부상높이)

### Abstract

The effects of nozzle arrangements, nozzle distances and fuel flowrates on the flame stabilities such as flame length, liftoff height and blowout characteristics are investigated experimentally.

Three nozzle arrangements - diamond 4 nozzle, linear 5 nozzle, cross 5 nozzle- are used. Flame interactions result in the increase of the blowout flowrates and constant turbulent liftoff heights.

The flames separated about 10 nozzle diameters are sustained as nozzle attached flames to the higher fuel flowrates than the other separation cases. Normally flames are extinguished at the lifted states. Blowout flowrates are affected by the nozzle configuration, nozzle separation distance. Blowout flowrates for the diamond- or cross- shaped nozzle arrangements are parabolic function of nozzle distances. Maximum blowout flowrates for the 5 nozzle configuration case except linear one is about 2.9 times that of single equivalent nozzle case. Turbulent liftoff heights are not function of flowrates for the interacting flames.

### 1. 서 론

---

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 영남대학교 기계공학부

환경오염의 심각성과 화석연료의 고갈에 따라 최근의 연소현상에 대한 연구는 연료절감을 위한 희박조건(lean condition)에서의 연소와 매연(Soot), NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등 공해물질의 절감을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한, 가정용 난방기나 보일러 등에서는 크기를 최적화하고 소

음 발생을 최소화하기 위해 화염의 크기를 줄이기 위한 개발이 이루어지고 있다. 이와 같은 이유로 최근의 연소기들은 노즐의 직경을 작게 하고 노즐 수를 증가시키는 방향으로 나아가고 있다. 이러한 다수 노즐에서 발생한 화염들은 서로 근접한 화염간에 영향(화염의 상호작용(flame interaction))을 받기 때문에 단일 화염과는 다른 특성을 나타내게 된다.

화염의 상호작용은 노즐 형상, 노즐 직경, 노즐간의 거리, 연료 유속 등에 따라 열 및 물질전달, 운동량전달에 영향을 주어 화염의 기울어짐, 화염의 합류 및 화염의 길이 변화 등의 가시적인 영향뿐만 아니라,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  농도분포, 온도분포 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 화염의 상호 작용은 단일 화염에서 보다 화염이 꺼지는 유량을 증가시켜 화염을 안정화시키는 효과가 있다.

상호작용하는 화염의 특성은 가스 터빈, 보일러 등의 연소실 설계에서 고려되어야 할 중요한 인자지만, 현재까지 그에 대한 연구는 활발하지 않은 편이다. 이<sup>(1)</sup>는 온도측정을 통해 2개의 원형 노즐에서 분출되는 층류 확산화염의 상호작용에 대한 연구를 수행하여, 유량이 증가할수록 노즐 간격이 줄어들수록 화염 길이가 길어지며, 2개의 노즐이 붙은 경우 단일화염의 약 2배의 화염길이가 됨을 보였다. 김 등<sup>(2)</sup>은 수치계산과 실험을 통하여 난류 사각 노즐 2개에서 형성된 화염 상호작용에 대한 연구에서, 화염간 상호 작용은 운동량 전달기구 상에서 가장 크고 다음 열 전달, 질량전달 순이며, 레이놀즈수가 클수록 운동량 전달의 상호작용은 감소하나 열 및 질량전

달의 상호작용은 증가하며 화염의 폭도 커짐을 보였다. 전<sup>(3)</sup>은 상호작용하의 층류 확산 화염에서  $\text{NO}$ 의 생성에 관한 수치 해석을 통하여, 노즐 간격이 작아서 상호작용이 클수록 화염의  $\text{NO}$  생성량이 커지고, 레이놀즈수가 클수록 열전달 기구상의 상호작용이 커져서 동일 연료량에 대한 화염의  $\text{NO}$  생성량이 커짐을 밝혔다.

Menon 등<sup>(4, 5)</sup>은 교차 유동(cross flow)이 있는 경우<sup>(4)</sup>와 없는 경우<sup>(5)</sup>에서 대기중으로 연료를 분사할 때 형성시킨 1, 2, 3, 5개의 층류 화염에 대한 화염날림 영역 연구를 통하여, 단일 화염에 비해 다수의 화염이 형성된 경우가 보다 안정된 화염특성을 나타내고, 노즐 간격이 커지면  $\text{NO}_x$ 는 감소함을 보였다.

이러한 대부분의 연구는 층류화염에 한정되어 있다. 본 연구에서는 상호작용하는 화염에서 층류·난류, 부착·부상의 전영역에서 노즐의 배열형상, 연료유량, 노즐간격(S/D)의 변화에 따라 화염의 안정화 특성에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

부상화염의 상호작용 특성을 살펴보기 위하여 1개, 4개 또는 5개의 노즐을 사용하여 실험을 수행하였다[Fig. 1 참조]. 연료는 99.9%의 프로판을 사용하였다. 유량계 하류에 스테인레스관(외경 25.4mm, 길이 50cm)을 설치하고, 이 관의 등 원주각으로 노즐(내경 0.31 mm)용 관에 부착하여 실험을 수행하였다(Fig. 1참조). 각 노즐로 공급되는 유량

은 스테인레스 관에 공급되는 유량으로부터 계산하였다.

Figure 2와 같이 4가지 형태로 배열된 다수노즐과, 이들과 유사한 노즐 출구면적을 갖는 단일 노즐(내경 0.62mm, 0.74mm, 0.97mm)에 대하여 실험을 수행하였다.

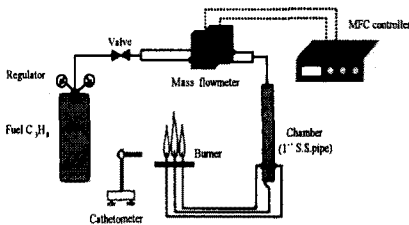


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

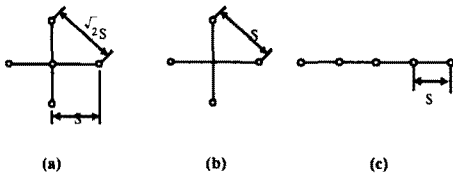


Fig. 2 Nozzle arrangements.  
(a)Cross 5 nozzles, (b)Diamond 4 nozzles, (c)Linear 5 nozzles

외부 유동에 의한 교란을 줄이기 위하여  $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ 의 철망(80 mesh)을 노즐주위에 설치하였다.

각 경우의 가장 근접한 노즐간의 거리로 정의한 노즐간격(s)과 연료유량(Q)을 변화시키며, 화염선단부 높이와 화염부상높이를 Cathetometer를 사용하여 측정하였다. 다수노즐버너에서 화염선단부 높이(Flame height)와 부상높이(Liftoff

height)는 각 노즐에서 전체 화염의 화염선단부 및 화염밑면의 높이로 정의하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

본 연구에서 연료유량은 각 노즐에 개별적으로 유입되는 유량(버너로 유입되는 총 유량을 노즐수로 나눈 값)으로 표시하였다. 단일노즐의 결과를 다수노즐의 결과와 비교할 때에는 단일노즐의 유량을 상응하는 다수노즐의 수로 나눈 값으로 나타내었다.

#### 3.1 단일화염의 부상 특성

내경 0.31mm의 노즐 5개를 갖는 경우의 다수노즐과 동일한 출구단면적을 갖기 위해서는 단일노즐의 직경이 0.69mm 이어야하지만, 구입가능한 관 크기의 한계로 본 실험에서는 이와 근사한 0.62, 0.74mm의 2가지 경우에 대해 실험하여 실험을 수행하였다.

Figure 3은 노즐직경 0.62, 0.74, 0.97mm의 단일노즐을 사용할 때의 화염선단부와 부상높이를 나타낸다. 부착화염의 경우 화염선단부는 유량증가에 따라 노즐 직경과 무관하게 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 이러한 경향은 Roper등[6,7]의 이론 및 실험적 사실과 일치한다. 천이과정(Transition)에서 화염선단부 높이가 감소한 후 난류부상화염 영역에서는 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 난류화염길이는, Froude 수( $=u^2/gd$ )가  $10^5$ 보다 작은 부력우세(buoyancy dominant) 영역에서는 유량증가에 따라 증가하고,  $10^5$ 보다 큰 운동량

우세(momentum dominant) 영역에서는 유량증가와 무관하게 일정하다는 Peters 등의 연구와 일치함을 볼 수 있다. 화염 날림은 노즐직경에 따라 각각 400, 700, 1575 [ml/min]의 유량에서 일어났다. 천이 영역에서 화염이 부상하여 난류영역으로 감에 따라 부상 높이는 감소함을 볼 수 있다. Kalgatghi 등의 연구[9]와 동일하게 난류 영역에서의 부상높이는 노즐 출구속도에 선형적으로 비례하여 증가함을 볼 수 있다.

### 3.2 다수화염의 부상 특성

본 실험 장치에서 각 노즐로 분배되는 유량의 차이를 확인하기 위하여 5개의 노즐 각각에 대하여 층류 화염 선단부의 길이변화를 Fig. 4에 나타내었다.

5개의 노즐들을 임의로 center, front, back, left, right로 구분하고, 서로 영향을 받지 않도록 멀리 위치시킨 후 한 노즐에만 화염을 형성하여 유량에 따른 노즐 부착화염의 화염 선단부 높이를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 층류노즐부착화염의 길이는 공급유량에 선형적으로 증가[6]하므로 본 그림의 높이 차이는 각 노즐로 분배되는 유량의 차이에 해당한다. 따라서 본 실험장치의 분배 유량 차이는 최대 4.7%임을 알 수 있다. 60 ml/min (출구 유속 13.2 m/sec)에서 화염부상이 일어났으며, 약 80 ml/min (출구 유속 17.7 m/sec)에서 5개 모두 화염 날림이 일어났다.

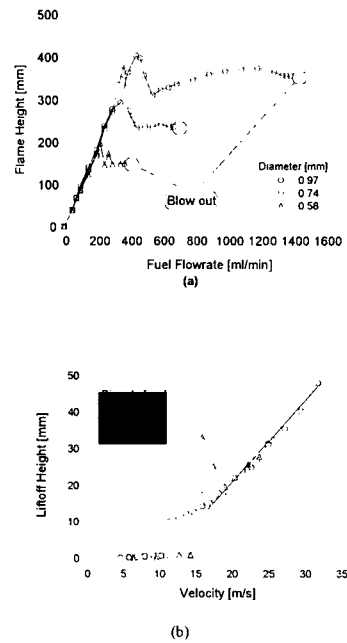


Fig. 3 Flames characteristics on single nozzles. (a)Flame height, (b)Liftoff height

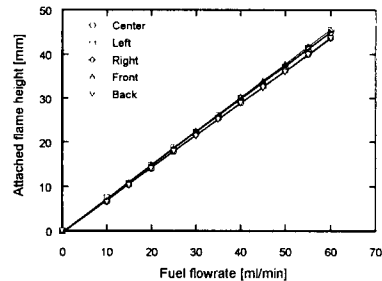


Fig. 4 Effects of flowrate on laminar nozzle attached flame length.

Figure 5는 노즐당 연료유량 30ml/min ( $Re=485.6$ )에 대하여 무차원

노즐간격( $s/d$ ) 변화에 따른 노즐부착  
 종류화염 사진이다. 무차원 노즐간  
 격이 줄어들면, 화염들이 서로 개별  
 적으로 존재하는 화염( $s/d=40$ )으로부  
 터, 화염들 상호간의 열 및 물질 전  
 달과 공급공기량의 감소로 가운데화  
 焰이 커지면서 서로 합쳐지는 화염으  
 로 발전함을 볼 수 있다. 노즐 간격  
 이 더욱 작아지는 경우에 화염들이  
 하나의 화염을 형성함도 볼 수 있다.

Figure 6은 노즐간격을 28로 고정하  
 고, 연료유량이 증가할 때의 부상화염모  
 습을 나타낸다. (a)는 종류 부상화염으로  
 Fig.5의 상호작용이 있는 화염의 모습과  
 유사하게 주위화염이 가운데로 기울어있  
 으며, 넓은 매연영역을 가진 중앙부의  
 화염이 커져있는 것을 볼 수 있다. 이  
 는 가운데 화염으로의 산소 공급이 주위  
 화염에 의하여 제한되어 매연의 생성이  
 많아진 것으로 사료된다. (b)는 천이영  
 역, (c)는 난류영역, (d)는 화염날림직전  
 화염의 모습으로 화염의 밑면 면적이 총  
 류에비하여 많이 증가였으며, 유량증가  
 에 따라 화염면의 면적이 더욱 증가함을  
 볼 수 있다. 난류화염의 바깥쪽 화염 외  
 측부가 들려 올라가있으며, 유속증가에  
 따라 외부화염면과 수평선이 이루는 각  
 도가 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한  
 외부 화염은, 연료제트의 안쪽까지 유입  
 된 공기에 의하여 혼합된 중앙화염에 의하  
 여 안정화되는 것으로 사료된다.

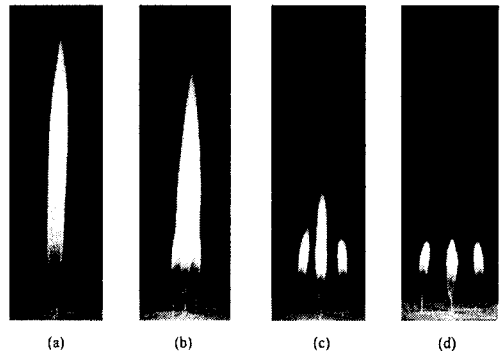


Fig. 5 Effect of nozzle separation on the  
 nozzle attached flame shapes for cross 5  
 nozzle configurations at  $Q = 30\text{ml/min}$  and  
 (a)  $s/d= 4$ , (b) 16, (c) 28, (d) 40.

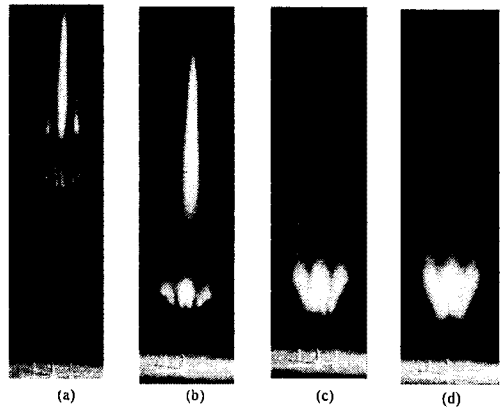


Fig. 6 Effect of fuel flowrates on the  
 lifted flame shapes for cross 5  
 nozzle configurations at  $s/d=28$   
 and (a)  $Q= 75\text{ml/min}$ , (b) 115, (c)  
 300, (d) 400.

Figure 7은 십자형으로 배열된 5개 노즐  
 을 사용한 경우에 대하여 노즐 간격에 따  
 른 중앙화염선단부 높이와 부상높이의  
 변화를 나타낸다. 부상높이가 0근처인  
 노즐부착 화염의 경우에, 중앙화염의 선  
 단부 높이가  $S/D$ 감소에 따라 증가하는 것  
 을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와같이  
 중앙으로의 열 및 물질전달과 유입공기

차단에 기인하는 것으로 사료된다. Froude수가  $10^5 \sim 10^6$  근처의 영역이지만 화염의 선단부 높이는 증가함을 볼 수 있다.  $s/d$ 가 작은 4의 경우에는 화염이 서로 근접하여 단일 노즐과 같이 행동하고,  $s/d=36$ 인 경우는 화염이 멀리 떨어져 있기 때문에 노즐 사이에서 화염을 안정화시켜 줄 영역이 존재하지 않아서 부상 화염이 일찍 날아가나,  $s/d$ 가 20과 28인 경우는 화염의 상호작용에 의하여 부상 화염이 넓은 영역에서 안정화 되어있는 것으로 사료된다. 단일노즐 경우의 난류부상 높이는 유량증가에 따라 선형적으로 증가하지만, 본 실험의 경우  $s/d=20, 28$ 에서는 부상높이가 유량증가에 따라 일정함을 볼 수 있다. 이는 부상화염이 서로가 열, 물질 및 유동장에 영향을 미치는 것과 화염밀면에 유입되는 공기량 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

Figure 8은 무차원 노즐 간격과 유량에 따른 화염의 상태변화를 나타낸다. 화염의 상태는 각각 노즐 부착화염 (nozzle attached flame), 층류 부상화염 (laminar lifted flame), 천이구간 (transition region), 난류 부상화염 (turbulent lifted flame)으로 구분하였다. 여기서 천이과정은 층류화염에서 난류에 의한 교란 (disturbance) 또는 화염떨림 (fluctuation)에 의해 화염이 급격히 변화하는 구간을 의미하며, 화염이 다시 안정화되어 일정한 부상높이를 유지하는 구간을 난류 부상화염으로 정의하였다. 노즐간격이 좁은  $s/d=4$ 의 경우는 각각의 노즐들이 매우 근접한 경우로 화염의 성장과정이 직경이 큰 단일노즐의 변화와 유사한 모습은 보였다.  $s/d=8\sim 12$ 의 구간은 특이한

경우로 층류부상이 존재하지 않고, 부착 화염의 상태에서 층류 부상화염을 거치지 않고, 바로 난류 부상화염을 형성하였다. 이때의 화염이 노즐 부착 화염형태로 가장 큰 유량까지 지속됨을 볼 수 있다.  $s/d=16\sim 32$ 의 경우는 매우 안정된 형태로 화염이 존재하였으며, 유량 증가에 따른 화염의 형태도 노즐부착·층류 부상·천이·난류부상으로 명확하게 구분되면서 변화하였다. 단  $s/d=28$ 과 36의 경우는 천이과정 중 층류 부상화염의 상태에서 화염날림 (blowout)이 일어나기도 했지만, 유량을 더욱 증가시켜 난류부상 화염으로 발전된 후에는 다시 재착화 (reignition)되어 넓은 유량범위에서 안정된 난류부상화염을 유지하였다. 이와 같은 현상은 유량이 증가함에 따라 화염간의 상호작용이 증가하고, 난류에 의해 공기와 연료의 혼합이 증가되어 화염의 안정성이 커지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.  $s/d=36\sim 44$ 의 경우에는 층류 부상화염에서 화염날림이 일어난 후 유량을 더욱 증가시켜 난류로 발전하여도 안정된 부상화염이 나타나지 않았다. 이 경우의 화염은 개별적인 거동을 하며, 각각의 화염은 내경 0.31mm의 단일화염과 거의 동일한 형태를 나타내었다.

Figure 9는 십자형으로 5개의 노즐을 배치한 경우, 중심노즐을 제거한 4개의 경우 및 선형으로 배치한 5개 노즐에 대한 화염날림 유량을 노즐간격( $s/d$ )에 따라 나타낸 그림이다. 선형 배치가 아닌 경우의 화염날림 유량은 노즐간격에 대하여 2차원 포물선 형태임을 볼 수 있다

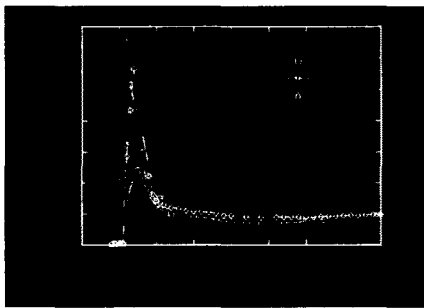
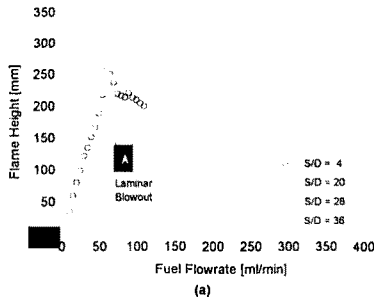


Fig. 7 Effect of separation distance(S/D) and fuel flowrate on (a)flame height, (b)liftoff height for cross 5 nozzles.

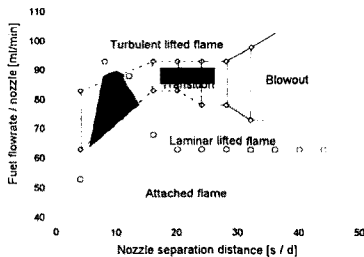


Fig. 8 Flame zones for cross 5 nozzles.

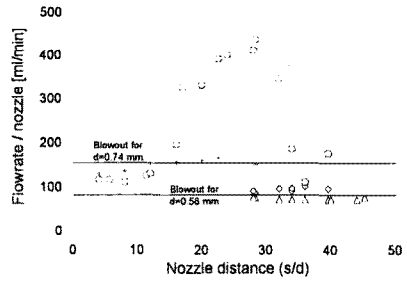


Fig. 9 Effect of nozzle separations on blowout flowrate (open symbol : 4 nozzle cases, closed symbol: 5 nozzle cases, cross : linear 5 nozzle cases, circle : turbulent blowout, diamond : reignition, triangle: laminar blowout) .

즉, 부상한 화염이 특정한 노즐간격에서 안정성이 매우 증가하는 것을 볼 수 있다.  $s/d = 20 \sim 32$ 의 구간에서 화염안정성이 매우 높으며,  $s/d = 28$ 의 경우에 내경 0.74mm의 단일노즐에 비해 최대 2.9배의 유량까지 화염날림이 일어나지 않았다. 이는 화염의 상호작용과 유동적 특성에 의하여 화염이 단일화염에 보다 안정하게 유지됨을 의미한다. 이에 대한 연구가 향후 필요하다.

#### 4. 결론

근접한 다수노즐의간격, 연료유량 및 노즐 배열형태 변화에따른 화염의 안정화 특성 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상호작용이 있는 경우 화염날림특성은 선형적으로 배열하지않은 경우, 노즐간격이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 2차원 포물선 분포를 나타내었다.

(2) 상호작용을하는 5개의 노즐을 사용

하고, 노즐직경의 28~32배로 노즐 간격을 유지한 경우에 화염날림이 일어나는 연료유량이 동일 면적의 단일 노즐의 경우보다 약 2.9배 증가하였다.

(3) 다수 노즐의 경우 난류 부상 높이는 유량과 무관하게 일정하였다.

(4) 부상이 시작되는 유량은 노즐간격이 노즐 직경의 8배 부근에서 최대가 되었다.

### 참고문헌

- (1) 이종철, 1986, "2개의 원형 노즐에서 분출되는 층류 확산화염의 상호작용에 한 연구," 공학석사학위논문, 고려대학교.
- (2) 김호영, 전철균, 1991, "기체확산 화염간의 상호작용," 대한기계학회논문집 제 15권 제 1호, pp. 355~365.
- (3) 전 철균, 1993, "상호작용하의 층류 확산 화염에서 NO의 생성," 대한기계학회논문집, 제 17권 제 1호 , pp 190~199.
- (4) Menon R. and Gollahalli S. R., 1985, "Multiple Jet Gas Flames in Still Air." *In Heat Transfer in Fire and Combustion Systems. ASME publication HTD Vol. 45, pp 127~136.*
- (5) Menon R. and Gollahalli S. R., 1988, "Combustion Characteristics of Interaction Multiple Jets in Cross Flow.," *Combustion. Science and Technology.* Vol. 60, pp 375~389.
- (6) Burke, S. P. and Schumann, T. E. W., 1928, "Diffusion flames," *Industrial and Engineering Chemistru*, v. 20, No. 10, pp. 998~1004.
- (7) Roper, F. G., 1977, "The Prediction of Laminar Jet Diffusion flame Size: Part I. Theoretical Model," *Combust. Flame*, v. 29, pp. 219~226.
- (8) N. Peters and J. Gottgens., 1991, "scaling of Buoyant Turbulent Jet Diffusion Flames," *Combust. Flames*, v. 85, pp. 206~214.
- (9) Kalghatgi, G. T., 1984, "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combust. Sci. Tech.*, 41, pp. 17~29