

제한공간에서 비예혼합 난류제트 화염의 부상특성

차민석*, 정석호**

Characteristics of Lifted Flames in Nonpremixed Turbulent Confined Jets

Min Suk Cha*, Suk Ho Chung**

Key Words : nonpremixed jet, infinite domain, finite domain, liftoff, liftoff height, blowout

Abstract

Effects of ambient geometry on the liftoff characteristics are experimentally studied for nonpremixed turbulent jet flames. To clarify the inconsistency of the nozzle diameter effect on the liftoff height, the ambiances of finite and infinite domains are studied.

For nonpremixed turbulent jet issuing from a straight nozzle to infinite domain, flame liftoff height increases linearly with nozzle exit mean velocity and is independent of nozzle diameter. With the circular plate installed on the upstream of nozzle exit, flame liftoff height is lower with plate at jet exit than without, but flame liftoff characteristics are similar to the case of infinite domain.

For the confined jet having axisymmetric wall boundary, the ratio of the liftoff height and nozzle diameter is proportional to the nozzle exit mean velocity demonstrating the effect of the nozzle diameter on the liftoff height. The liftoff height increases with decreasing outer axisymmetric wall diameter. At blowout conditions, the blowout velocity decreases with decreasing outer axisymmetric wall diameter and liftoff heights at blowout are approximately 50 times of nozzle diameter.

1. 서론

가스 터빈 등 각종 연소 기기의 연료 공급은 주로 제트의 형태로 이루어진다. 주어진 연소실에서 고출력을 필요로 하는 경우에 과도한 연료가 공급 되면 화염이 불안정해지고 실화를 유발할 수 있는데, 이 때 실화를 방지하고 안정된 연소를 위해서는 제트 화염의 안정화에 관한 연구가 필수적이다.

노즐을 통하여 순수 연료 제트를 분사할 때 형성되는 화염 중에서 노즐에 부착된 화염은 확산화염의 형태로 연소되는데, 확산과 대류에 의하여 연료와 산화제가 이론적으로 당량비를 이루는 반응지역으로 전달되어 화학반응이 일어난다. 노즐에 부착된 확산화염의 상태에서 유량이 더 증가하게 되면 화염부상(liftoff)이 일어나거나 화염꺼짐(blowoff)이 발생한다. 이러한 현상은 노즐의 직경, 연료의 종류 및 회석 정도 등에 따라 다르게 나타날 수 있다. 화염부상이 일어날 때도 유동 특성에 의해 층류 혹은 난류에서 시작되거나, 층류와 난류 전체에 걸쳐 부상화염이 존재하기도 한다. 부상화염이 형성된 이후에 유량을 더욱 증가시키면 화염이 유동장을

*정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 서울대학교 기계공학과

따라 후류로 밀려가다가 소멸되는 현상인 화염날림 (blowout)이 발생하게 된다.

층류 화염의 부상 특성에 관한 연구는 난류 부상 화염의 특성을 규명하는 기초가 될 수 있는데 이에 대한 연구가 많은 편은 아니다. Savas 와 Gollahalli(1)는 화염날림이 유체역학적 관점으로만 설명이 가능함을 보였고, Chung 과 Lee(2)는 부상 화염 밑면이 과농, 희박 예혼합화염 및 확산화염이 공존하는 삼지화염(tribranchial flame)의 형태임을 관찰하여 이것이 부상화염의 부착 메카니즘과 관계가 있고, 층류 제트이론으로부터 화염 부상높이에 관한 이론식을 유도하여 Schmidt 수가 화염부상에 미치는 영향을 규명하였으며, 화염부상과 화염날림은 노즐 크기에 관계없이 각각 동일한 유속에서 일어나며 이 때의 부상높이는 노즐직경의 제곱에 비례함을 규명하였다.

난류의 경우 화염부상이 일어나는 현상에 대한 해석은 크게 세 가지로 분류되는데, 전파 특성을 갖는 예혼합화염의 개념을 기초로한 연구,^(3,4) 층류 확산 소화염의 소멸(extinction of laminar diffusion flamelet)^(5,6) 및 거대 구조 난류 모형(large scale turbulent model)⁽⁷⁻⁹⁾ 등이 있다.

그리고 Lee 등⁽¹⁰⁾은 질소로 희석한 연료 제트에서의 부상 특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 화염부상과 화염날림이 일어나는 특성을 층류, 난류 등의 유동 특성으로 구분하였으며, 부상높이는 노즐 직경, 희석 정도와 유속 등에 관계가 있음을 밝혔다.

난류 화염부상 특성에 관한 연구는 다양한 연료, 노즐 직경, 연료의 희석, 동축 분류 유동장 사용 등의 변화에 대하여 주로 이루어져 왔으나 제한된 공간에서의 화염 안정화와 관련된 연구는 결여되어 왔다. 실제 연소기의 경우 거의 대부분 제한된 공간에서 연소가 일어나기 때문에 실제 연소기에서의 화염 안정화를 결정하기에는 부족한 점이 많다. 한편 기존의 연구는 서로 다른 실험 장치의 구조 및 실험 조건의 차이에 따라서 결과 또한 상이하게 나타날 수 있는데, 제트의 형태로 분출되는 유동의 노즐 내부에서의 유동형태, 노즐 출구의 형상, 그리고 제트가 분출되는 공간의 형태에 따라 서로 다른 결과가 예측된다. 이와 관련되어 난류 제트에서의

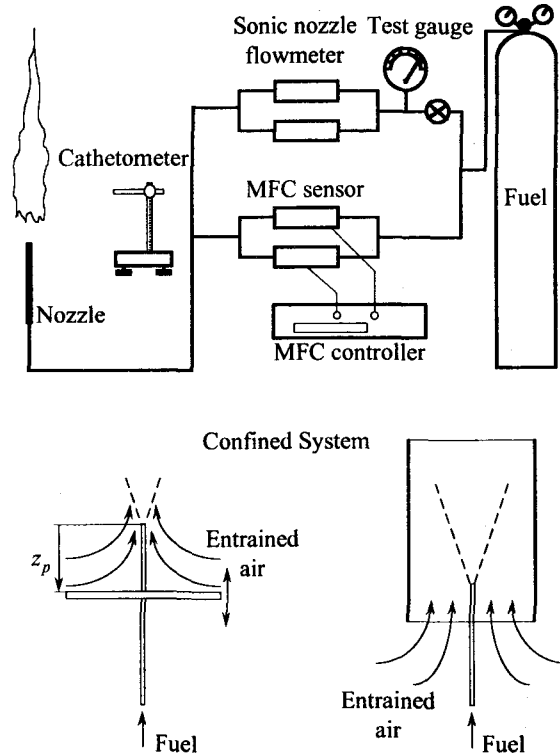


Figure 1. Schematic diagram of experimental setup.

화염부상 특성에 대한 연구 중 Kalghatgi⁽⁴⁾는 화염 부상높이가 노즐 직경에 관계 없이 유속에만 선형적으로 비례한다는 결과를 보고하였고, 이와는 상반되게 Lee 등⁽¹⁰⁾은 부상높이와 노즐 직경의 비가 유속에 비례한다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 이와 같이 상이한 결과가 나오게 된 원인을 규명하기 위하여 유동장을 노즐 내에서 완전 발달된 형태로 만들고, 분출되는 공간에 변화를 주어 실험하였으며, 화염부상 특성의 변화를 고찰하였다.

2. 본 문

2.1. 실험 장치 및 실험 방법

실험 장치는 노즐부, 유량 조절부, 화염 관측부로 구성되어 있다(Fig.1 참조). 노즐은 내경 d 가 0.84, 1.62, 2.10 및 2.58mm이고 두께가 각각 0.13, 0.19, 0.20, 0.16mm인 스테인레스 관을 사용하였으며, 실험 전 영역에서 관내부 완전 발달 유동을 얻기 위하여 노즐의 길이는 70cm로 하였다.

노즐 출구의 수직 하방향에 직경 36cm의 원형판

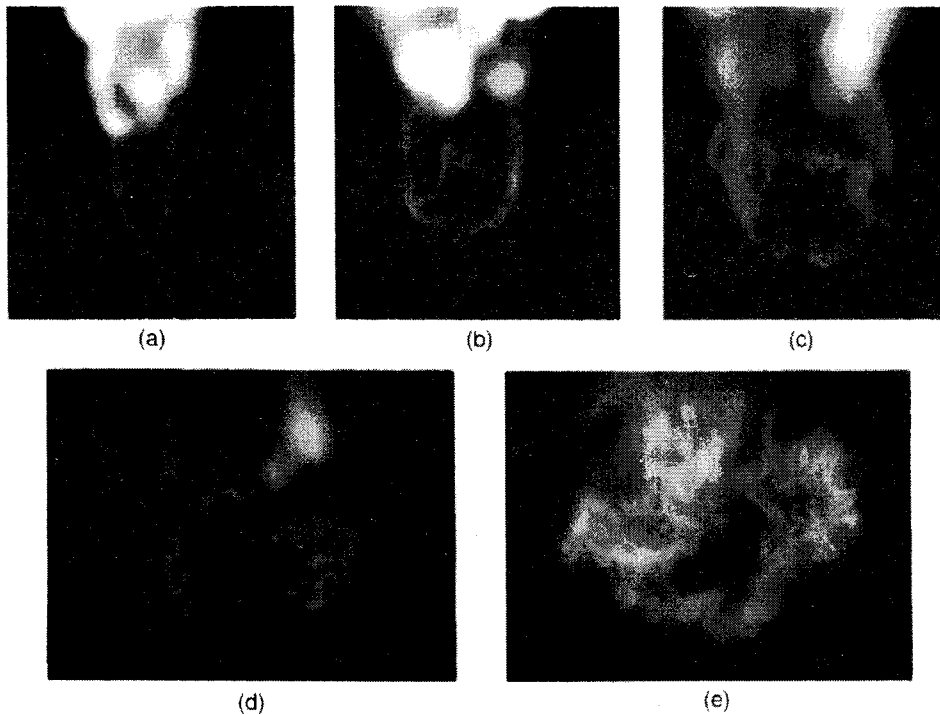


Figure 2. Photographs showing the flame base with free boundary condition for $d=2.10\text{mm}$; (a) $U_0=9.91$, (b) 20.07, (c) 27.81, (d) 35.70 and (e) 49.12m/s.

을 설치하여 노즐 주위의 형상에 따른 화염 부상 특성을 고려하였으며, 이는 노즐 축을 따라 판위치 z_p 를 0-500mm까지 자유롭게 조정할 수 있는 수직 이송장치에 고정시켰다.

제트 유동에서 유입(entrainment)의 영향을 파악하기 위해 제트의 후류 쪽에 설치한 원통은 높이 150cm, 내경 $D=30, 40, 50, 75$ 및 100cm로 상하가 모두 열려있는 실린더 형태로 제작하였다. 이 원통과 노즐 축은 동축을 이루고 있으며 이 때 노즐은 원통의 속으로 들어가 있는 형태로 노즐의 출구와 원통 밑부분과의 거리가 35cm가 되도록 시스템을 구성하였으며, 이 거리는 실험중 변화시키지 않았다. 원통 아래 쪽에서는 외부 공기의 흐름이 자유롭게도록 시스템을 이루는 구조물 이외에 어떤 장애물도 두지 않았다.

연료로는 C.P.등급의 프로판(C_3H_8)을 사용하였다.

유량 조절부는 습식가스미터(wet test gas meter)로 교정된 질량유량계센서(Datametrics model 825) 2조와 소닉노즐 유량계(sonic nozzle flowmeter) 2조를 병렬로 연결하여 구성하였다.

화염의 부상높이는 카세토미터(cathetometer)를 이용하여 측정하였다. 난류 화염의 경우 화염 밑면의 요동이 심하여 육안관찰에 의한 평균 부상높이를 화염 부상높이로 하였다.

전체 시스템의 외부에는 외부 유동장의 영향을 막기 위하여 메쉬를 이용하여 $2\text{m}\times 2\text{m}\times 2\text{m}$ 인 막을 설치하였다.

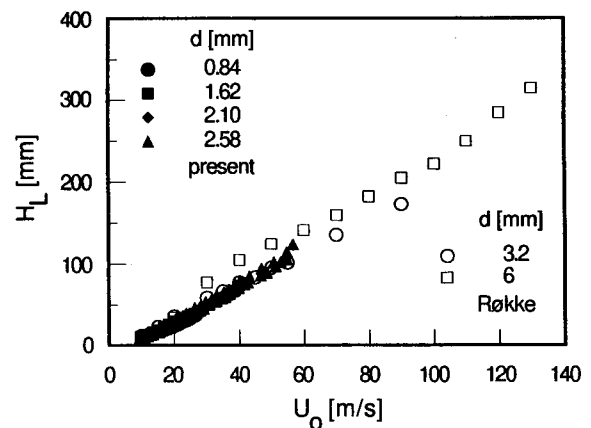


Figure 3. Lift-off heights with U_0 for free boundary.

2.2. 결과 및 검토

2.2.1. 무한 공간에서의 화염부상 특성

Figure 2는 무한 공간으로 연료 제트가 분출될 때 형성되는 부상화염의 밑면에 대한 직접사진(Nikon FM2, 75mm 렌즈, 1/500s)인데, 노즐 출구 직경 $d=2.10\text{mm}$ 인 경우로 노즐 출구 평균 속도 U_0 의 변화에 따른 부상화염 밑면의 변화를 알 수 있다. $U_0=9.91\text{m/s}$ 에서(a) 화염부상이 일어나는데 화염 밑면의 모양이 속이 비어있는 원형을 이루고 있음을 알 수 있다. 유속 증가에 대하여 부상높이는 증가하게 되고 화염 밑면의 넓이는 넓어지게 되며(b-e), 이에 따라 화염 밑면의 굴곡 정도가 심해진다. (e)의 경우는 화염날림이 일어나기 직전의 사진으로 이 때도 화염 밑면은 속이 비어 있는 원형 모양을 유지하고 있다.

Figure 3은 무한 공간으로 분출되는 연료 제트에서 노즐로부터 부상화염 밑면까지의 높이 H_L 과 U_0 와의 관계를 $d=0.84, 1.62, 2.10, 2.58, 3.2$ 및 6.0mm 인 경우에 대하여 나타내었다. 여기서 $d=3.2, 6.0\text{mm}$ 의 자료는 Røkke⁽¹¹⁾ 등이 보고한 순수 프로판 제트에 대한 것이다. 이 결과들로부터 화염의 부상높이는 사용한 노즐 직경과는 무관하게 유속에 선형적으로 변하고 있음을 알 수 있으며, 이는 난류 제트에서 화염의 부상높이가 노즐 직경에 무관하게 U_0 에 선형적으로 비례한다는 Kalghatgi⁽⁴⁾의 실험 결과 및 예측과 부합되고 있다.

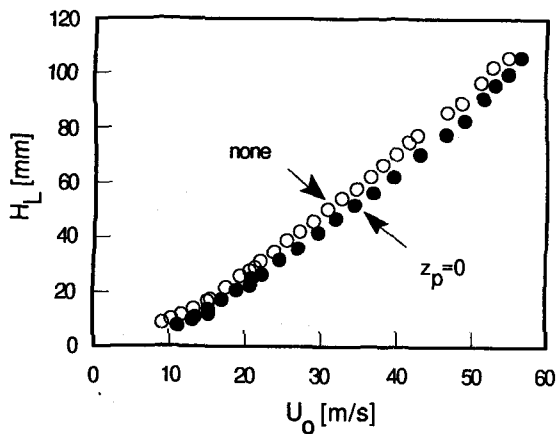


Figure 4. Graph showing the circular wall effect on the liftoff characteristics for $d=2.10\text{mm}$.

2.2.2. 원형관이 화염부상에 미치는 영향

본 절에서는 제트축을 따라 제트 유동장 상류에 설치한 원형관이 화염부상에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다(Fig. 1 참조).

원형관과 연료 제트 출구를 일치시켜($z_p=0$) 이때 U_0 의 증가에 따른 부상높이의 변화를 측정하여 $d=2.10\text{mm}$ 에 대하여 무한 공간에서의 화염부상 특성과 비교한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. $z_p=0$ 에 원형관을 설치한 경우 원형관의 영향으로 동일한 U_0 에 대한 부상높이는 무한 공간에서의 부상높이보다 낮아졌으나 U_0 에 대한 부상높이의 변화율은 유사하였다. 노즐 출구 아래 쪽에 위치한 벽경계는 제트에 의하여 유입되는 제트 상류 쪽의 유동장을 방해하게 되어 주위 공기의 유입은 제트의 옆 쪽을 통해서만 가능하게 된다. 이로 인하여 제트에 의하여 형성되는 유동장과 연료/공기 혼합지역 특성이 달라지게 되어서 화염이 부착되는 위치는 보다 아래로 조정된 것으로 판단된다.

Figure 5에는 $z_p=0$ 인 경우의 U_0 에 대한 부상높이의 변화를 각 노즐 직경에 대하여 나타냈다. Fig. 3에 나타난 특성과 유사하게 부상높이는 노즐 직경에 무관하게 U_0 에 대해 선형적으로 변하고 있음을 알 수 있다. 이를 근거로 노즐 출구 하류쪽에 벽경계가 존재할 때는 노즐직경의 변화가 부상높이에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

반무한 공간과 무한 공간에서의 부상 특성이 상

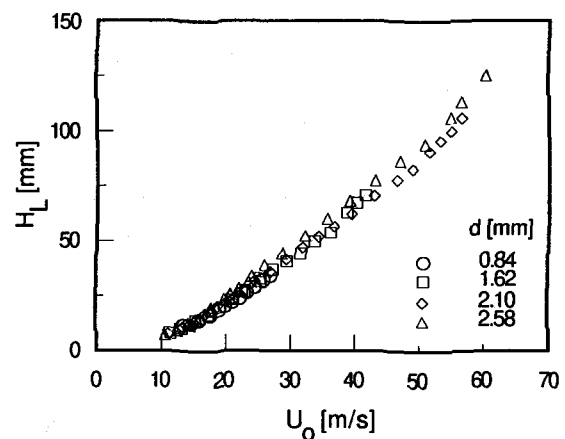


Figure 5. U_0 versus Liftoff heights with circular wall at nozzle exit.

이함에 따라 원형관의 위치에 따른 부상 특성을 고찰하였다.

$d=2.10\text{mm}$ 에 대하여 U_o 를 고정시키고 z_p 를 0에서 50cm까지 변화시켜 가며, 이때에 관찰되는 부상 높이의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 원형관의 위치를 노즐 끝에서부터 아래로 변화시키면 화염의 부상 높이는 점차로 증가하다가 더 이상 변화가 없게됨을 알 수 있다. 여기서 부상높이가 점근하는 높이는 실험장치의 구조상 무한 공간에서의 부상높이(H_o)로 유추할 수 있으며, 이런 경우에는 부상높이에 대한 원형관의 영향을 무시할 수 있다.

그래프에서 보는 바와 같이 원형관이 화염 부상 높이에 영향을 줄 수 있는 범위가 존재하는데, 여

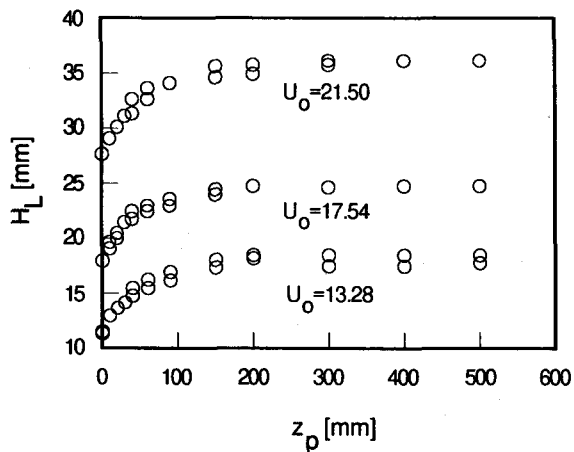


Figure 6. Liftoff heights by the variation of circular wall position from the nozzle exit, $d=2.10\text{mm}$.

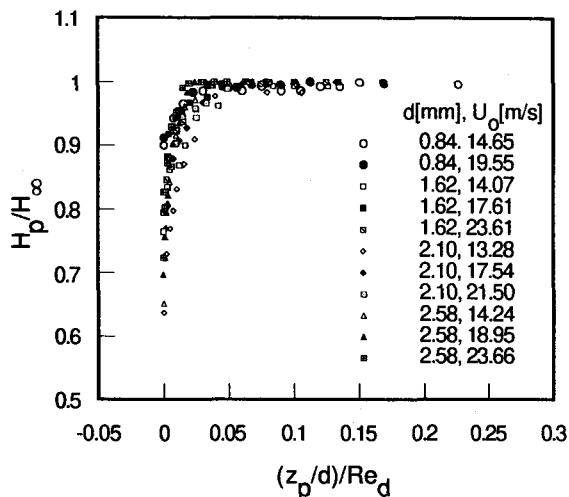


Figure 7. Relation between dimensionless circular wall position and normalized lift-off heights for various d and U_o .

기서 이 현상을 결정짓는 인자가 d , z_p , U_o 및 동점성계수 ν 라고 가정하고 차원해석을 수행하면 원형관이 있을 때의 부상높이와 무한 공간에서의 부상높이의 비인 H_p/H_o 가 z_p/d 와 $Re_d(=U_o d/\nu)$ 의 함수로 나타나게 된다.

Figure 7은 여러 노즐직경과 U_o 에 대한 부상 높이의 변화를 독립변수로서 $(z_p/d)/Re_d$ 를 사용하여 나타낸 결과이다. 여기서 ν 는 $1.56 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 로 공기의 값을 이용하였다. 넓은 범위의 d 및 U_o 에 대하여 비교적 동일한 특성을 보이고 있으며, 이 결과로부터 프로판의 경우 $(z_p/d)/Re_d \approx 0.025$ 이상에서는 부상높이에 미치는 원형관의 영향을 무시할 수 있음을 유추할 수 있다. 원형관을 사용한 실험이외의 실험장치에서는 노즐 출구 하방향에 장애물이 없는 길이가 70cm이므로 $(z_p/d)/Re_d$ 가 최소한 0.03 이상이어서 노즐 하방향 장애물의 영향은 무시할 수 있다.

2.2.3. 제한공간이 화염부상에 미치는 영향

본 절에서는 제트 후류에 설치된 원통이 화염부상 특성에 미치는 영향에 관하여 논의한다(Fig. 1 참조). 노즐 출구와 원통 밀면 사이의 위치는 실험 중 변화시키지 않았으며 이 위치의 차이에 따른 화염부상 특성의 변화는 고려하지 않았다.

Figure 8은 무한 공간으로 제트가 분출될 때의 화염부상 특성과 제트 후류에 설치한 원통 직경의 변화에 따른 부상높이를 비교한 그래프이다. 원통

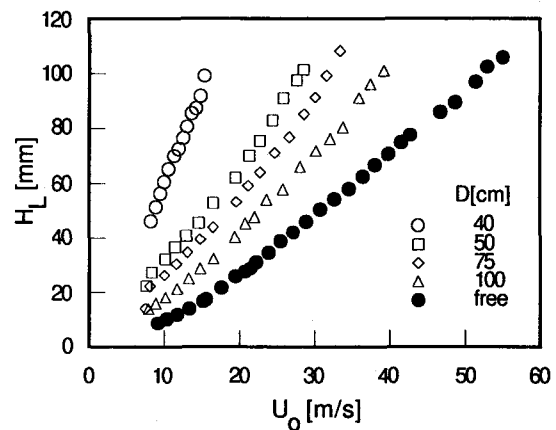


Figure 8. Effect of outer cylindrical wall on the lift-off heights, $d=2.10\text{mm}$.

의 영향으로 인해 동일한 U_o 에 대하여 무한 공간에서의 부상높이보다 원통이 있는 경우의 부상높이가 더 높아지게 된다. D 가 작아질수록 H_L 이 증가하며, U_o 에 대한 H_L 의 변화율또한 증가함을 알 수 있다.

$D=40\text{cm}$ 에서는 $d=0.84\text{mm}$ 인 경우에 안정된 부상화염을 발견하지 못했다. 즉, 노즐 부착화염의 형태에서 화염부상과 동시에 화염꺼짐이 일어나게 된다. 이러한 현상은 $D=30\text{cm}$ 인 경우에는 실험에 사용한 모든 노즐에 대하여 발견되었기 때문에 이에 해당하는 화염부상에 관계된 자료가 없다. 그리고 $D=50$ 및 75cm 에서는 $d=0.84\text{mm}$ 의 노즐에 대하여 화염부상이 $Re_d = 2000\text{-}3000$ 사이인 층류에서 난류로의 천이상태에서 일어나게 된다. 층류 삼지화염의 형태로 화염부상을 시작하여 유량의 증가에 따라 부상높이가 낮아지고 있는데 이는 Lee 등⁽¹⁰⁾의 연구에서도 보고된 바 있는 현상이다. 따라서 본 연구에서 다루는 영역에서 벗어나기 때문에 논의에서 제외하였다.

Figure 9에는 노즐 직경이 $d=1.62, 2.10$ 및 2.58mm 인 경우에 각각의 외부 원통의 직경 D 에 대하여 U_o 에 따른 화염의 부상높이를 d 로 무차원화하여 나타내었다. 무한공간에서의 화염 부상특성과는 상이하게 부상높이가 노즐 직경에 의존하고 있다. 주어진 원통 직경에 대하여 U_o 에 대한 부상높이와 노즐 직경의 비가 선형적으로 변화하고, H_L/d 의 U_o 에 대한 변화율은 외부 원통 직경의 증

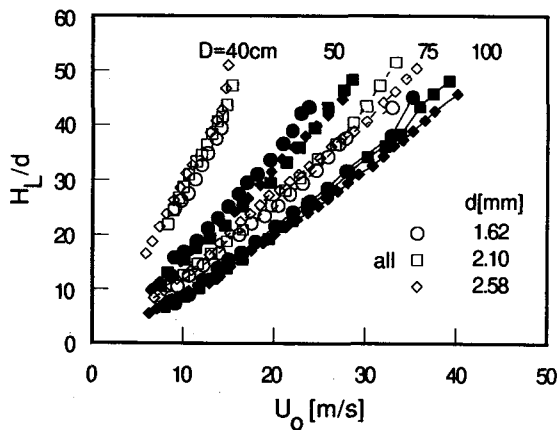


Figure 9. Dimensionless liftoff heights for various d and D .

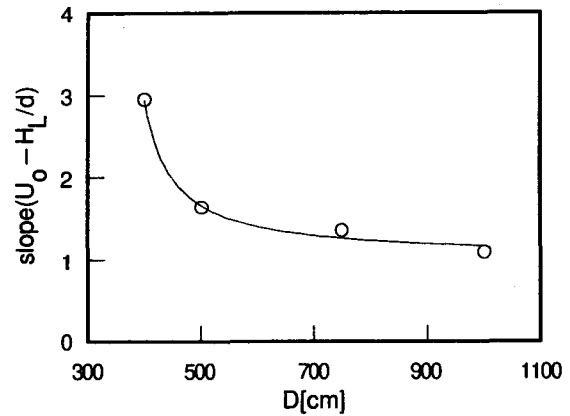


Figure 10. Slopes of Fig. 9 as a function of D .

가에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다.

동일한 원통 직경에서 여러 노즐에 대한 무차원 부상높이 H_L/d 가 U_o 에 비례하는 것에 착안하여, 각각의 원통 직경에 대한 $d=1.62, 2.10$ 및 2.58mm 의 자료를 하나의 세트로 취급하여 U_o 에 대한 H_L/d 의 변화율을 직선으로 곡선맞춤한 기울기를 D 에 따라 나타낸 것이 Fig. 10이다. $D=30\text{cm}$ 에 대하여는 부상되어 안정된 화염이 관측되지 않았으므로 이것을 무한대 기울기인 경우로 생각한다면 기울기와 관련된 이 그래프도 원통의 직경에 대한 제한값이 존재할 것으로 예측된다. 따라서 이들 기울기의 자료를

$$\text{slope} = a + \frac{b}{D-c} \quad (1)$$

의 형태로 곡선 맞춤하여 그래프에 실선으로 나타

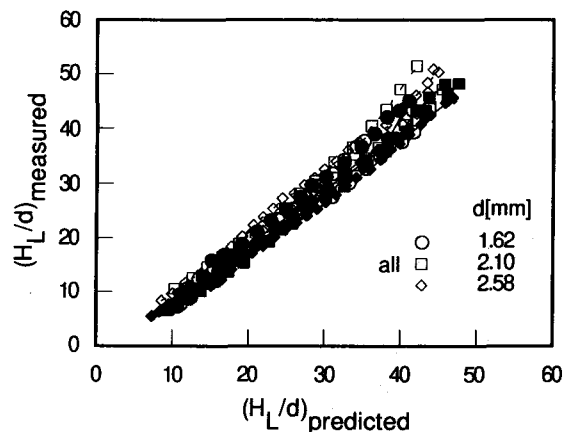


Figure 11. Correlation of normalized liftoff heights including the effect of D .

내었다. 단위를 가지고 있는 상수 a, b, c 는 곡선 맞춤한 결과 $a=1.02s/m, b=9.76s, c=35.0cm$ 이다. 여기서 c 는 D 의 임계값에 해당하는데, 그 값이 35cm이므로 원통의 직경이 35cm가 되면 연료의 유속에 대한 무차원 부상높이가 무한대가 되기 때문에 부상되어 안정된 화염을 기대할 수 없게됨을 뜻하며 이는 실험 결과와도 일치한다.

위의 관계식은 $U_o-(H_L/d)$ 의 관계에서 얻은 것이므로 H_L/d 를 식(1)을 이용하여 정리하면

$$\frac{H_L}{d} = U_o \times \left(1.02 + \frac{9.76}{D-35} \right) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있고, 이 식에 의하여 실험자료를 정리하여 Fig. 11에 나타냈다. 이 결과를 보면 무차원 부상높이가 상관관계식과 잘 일치함을 알 수 있다.

무한공간에 대한 화염 부상높이의 예측관계식들^(9,12)을 살펴보면, 냉간제트의 유동 특성이 지배적인 역할을 함을 알 수 있다. Pitts⁽¹²⁾는 유동장과 농도장의 유사성을 이용하여 난류 화염 전파 속도와 유동속도의 균형점을 2차원으로 예측하였는데, 이 계산을 위하여 제트의 국부직경이나 중심속도 감소율 등과 관계있는 Gaussian 함수의 상수값을 부상높이의 실험결과와 부합하도록 정해주었다. Miake-Lye등⁽⁹⁾도 거대구조의 스트레인을 결정짓는 제트의 국부직경을 난류제트에서 알려진 축방향거리에 상수비례하는 관계식을 사용하였다.

일반적으로 알려진 제트의 유입은 축방향과 반경 방향을 통하여 이루어지게 되는데, 제한된 제트에서는 반경방향의 유입이 차단되어 축방향을 통해서

만 유입이 일어나게 된다. 그 유량은 제트의 운동량에 비례할 것으로 생각되며 유입되는 공기의 유동장은 벽에서의 경계층 부분을 제외하고는 균일함을 알 수 있다. 원통안에서 압력손실을 무시하면 제트의 운동량은 보존되어야 하며, 연속방정식 또한 만족되어야 한다. 이런 유동특성의 차이로 인하여 부상높이가 d 와 D 의 함수로 나타난 것으로 판단된다. 실제로 Becker 등⁽¹³⁾은 주위에 속도가 상수인 유동이 있고 원형 덕트에 의하여 제한된 경우의 제트에서는 노즐과 외부 덕트의 직경 그리고 유속에 관계있는 Craya-Curtet 수에 의하여 중심속도의 감소율이나 제트의 국부직경이 달라짐을 보였다.

2.2.4. 화염부상과 화염날림

Figure 9에서 각 원통에서의 화염부상이 시작되는 유속이 비슷하고 화염날림이 H_L/d 가 유사한 지점에서 일어남을 알 수 있는데, 본 절에서는 무한공간으로 연료 제트가 분출될 때와 원통이 있을 때의 화염부상과 날림에 대하여 고찰하였다.

Figure 12는 화염부상이 시작될 때의 유속 U_L 과 노즐 직경의 관계를 나타낸 그림이다. 무한공간으로 연료 제트가 분출될 때 화염 부상시의 U_L 은 d 에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 이와는 달리 외부 원통이 있는 경우 부상이 시작되는 U_L 은 감소하였는데 원통 직경이 작아질수록, 노즐 직경이 증가할수록 U_L 이 감소하는 경향을 보인다. 그러

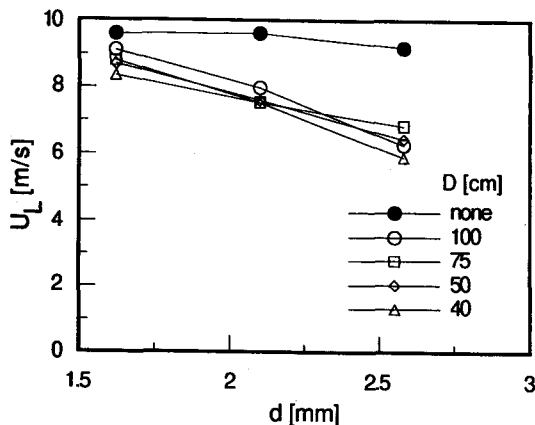


Figure 12. Flame lifts off velocities for various d and D .

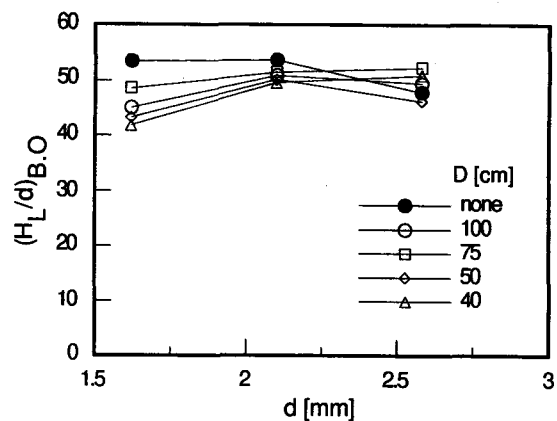


Figure 13. Dimensionless liftoff heights at blowout.

나 원통이 존재하는 경우 원통 직경의 영향은 미소하다.

Figure 13에는 화염날림이 일어날 때의 부상높이 $(H_L/d)_{BO}$ 와 노즐 직경의 관계를 나타내고 있는데, 자료들이 산재해 있기는 하지만 화염날림이 일어날 때 화염 밑면의 요동이 심한 것을 고려한다면 비교적 부상 높이와 노즐 직경의 비가 50 근처에서 일정함을 알 수 있다. 이것은 제트의 거대구조를 고려할 때, d 의 약 50배되는 지점의 거대구조 특성과 화염날림이 관계가 있을 것으로 생각된다.

위에서 논의한 U_L , $(H_L/d)_{BO}$ 의 특성과 Fig. 9에서 D 가 감소함에 따라서 H_L/d 의 유속에 대한 변화율이 증가하고 있음을 함께 고려해 보면 원통이 있을 때 화염이 부상된 형태로 안정될 수 있는 영역이 한정됨을 알 수 있다. 화염부상이 시작된 후의 유동속도에서 H_L/d 가 약 50보다 작은 지역에서 화염이 형성될 수 있는 조건이라면 이 때의 화염은 안정될 수 있지만, 화염부상이 일어나는 유속에서 화염이 안정될 수 있는 위치가 H_L/d 의 임계값보다 크다면 화염부상과 동시에 화염날림이 일어난다고 할 수 있다. 즉, 원통 직경이 어느 한계보다 작으면 안정된 부상화염의 형태를 이룰 수 없다는 것을 설명할 수 있다. 이것은 앞서 $U_o-(H_L/d)$ 의 기울기와 D 의 관계를 논의할 때 얻어진 결론과 상통하는 결과이다.

3. 결론

본 실험에서는 난류 축대칭 비예혼합 제트에 대하여 제트가 분출되는 공간에 제한을 두어 실험을 수행하여 무한 공간으로 제트가 분출될 때의 화염 부상 특성과 비교 검토하였다.

프로판을 연료로 사용한 난류 축대칭 비예혼합 제트에서 무한 공간으로 제트가 분출될 때의 화염 부상 특성은 부상높이가 노즐 직경과는 무관하게 유속에만 비례함을 확인할 수 있었다. 노즐 출구 아래쪽에 원형판을 설치하여 제트에 의한 축방향의 유입을 차단한 경우, 동일한 유속에서의 화염 부상높이는 무한 공간에 대한 부상높이보다 낮아짐

을 관찰했고, 노즐 직경에 관계없음을 확인하였다. 한편, 연료 제트 후류쪽에 동축 원통을 설치한 결과 무한 공간에서의 부상 특성과는 달리 노즐 출구 직경에 따른 의존성이 나타났다. 주어진 원통의 직경에 대하여 부상높이와 노즐 직경의 비가 유속에 비례함 $(H_L/d \sim U_o)$ 을 확인하였으며 이 때 H_L 과 d , D , U_o 의 상관관계식을 도출하였다. 안정된 부상 화염이 생길 수 있는 임계 원통 직경이 35cm임을 유추하였고, 화염날림이 일어나는 유속은 원통 직경이 줄어들수록 감소하였으며 그 때의 화염 부상 높이는 노즐 직경의 약 50 배임을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 터보동력기계연구센터(TPMRC)를 통한 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

4. 참고문헌

- (1) Savas, Ö., and Gollahalli, S. R., 1986, "Stability of Lifted Laminar Round Gas Jet Flame," *J. Fluid Mech.*, v.165, pp. 297-318.
- (2) Chung, S. H. and Lee B. J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Non-premixed Jet," *Combust. Flame*, v.86, pp. 62-72.
- (3) Vanquickenborne, L., and van Tigglen, A., 1969, "The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames," *Combust. Flame*, v.10, pp. 59-69.
- (4) 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.
- (5) Peters, N., and Williams, F. A., 1983, "Liftoff Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames," *AIAA J.*, v.21, pp. 423-429.
- (6) Sanders, J. P. H., and Lamers, A. P. G. G., 1994, "Modeling and Calculation of Turbulent Lifted Diffusion Flames," *Combust. Flame*, v.96, pp. 22-33.
- (7) Broadwell, J. E., Dahm, W. J., and Mungal, M. G., 1984, "Blowout of Turbulent Diffusion Flames," *Twentieth Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 303-310.
- (8) Dahm, W. J. A., and Dibble, R. W., 1988,

- "Coflowing Turbulent Jet Diffusion Flame Blowout," *Twenty Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute pp. 801-808.
- (9) Miake-Lye, R. C. and Hammer, J. A., 1988, "Lifted Turbulent Jet Flames : A Stability Criterion Based on the Jet Large-Scale Structure," *Twenty Second Symposium (International) on combustion*, The Combustion Institute, pp. 817-824.
- (10) Lee, B. J. Kim, J. S. and Chung, S. H., 1994, "Effect of Dilution on the Liftoff of Nonpremixed Jet Flames.", *Twenty fifth Symposium (International) on combustion*, The Combustion Institute, pp. 1175-1181
- (11) Røkke, N. A., Hustad J. E. and Sønju, O. K., 1994, "A Study of Partially Premixed unconfined Propane Flames," *Combust. Flame*, v.97, pp. 88-106.
- (12) Pitts, W. M., 1989, "Importance of Isothermal Mixing Processes to the Understanding of Lift-Off and Blowout of Turbulent Jet Diffusion Flames", *Combust. Flame*, v76 pp. 197-212
- (13) Becker, H. A., Hottel, H. C. and Williams, G. C., 1963, "Mixing and Flow in Ducted Turbulent Jets", *Ninth Symposium (International) on combustion*, The Combustion Institute, pp. 7-20
- (14) Kalghatgi, G. T., 1981, "Blow-out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames. Part I: In Still Air," *Combust. Sci. Tech.*, 26, pp. 233-239.