

# 동축공기 수소 확산화염의 구조 및 화염길이 스케일링

윤상욱\* · 오정석\* · 김문기\* · 윤영빈\*\*†

## Flame Length Scaling and Structure in Turbulent Hydrogen Non-Premixed Jet Flames with Coaxial Air

Sangwook Yun, Jeong seog Oh, Munki Kim and Youngbin Yoon

### ABSTRACT

Many previous works have been performed to provide correlations of flame length, theoretically and experimentally. Most of these results studied were conducted in vertical turbulent flame with no coaxial air condition. The present study analyzes the flame length scaling with coaxial air. In turbulent hydrogen non-premixed jet flames with coaxial air, flame length scaling theoretically proposed so far has been related with the concept of a far-field equivalent source. At high coaxial air to fuel velocity ratio,  $U_A/U_F$ , however, this scaling theory has some difference with experimental flame length data. This difference is understood to be due to the fact that the theory is based on far-field notion, while the effect of coaxial air on jet flame occurs in the region near the nozzle exit. Therefore, we define effective jet density  $\rho_{eff}$  involving the concept of near-field so that effective jet diameter can be extended to the near field region. In this condition, we modify the correlation and compare with experimental data.

### 기 호 설 명

$U_F$	Fuel velocity	$\rho_{eff}$	Effective jet density
$U_A$	Coaxial air velocity	$L_f/d_F$	Normalized flame length
$d_{eff}$	Effective jet diameter		

**Key Words** : Coaxial air, Effective jet diameter, Normalized flame length

### 1. 서 론

난류 제트에서 많은 이전 연구자들은 화염길이에 대해 이론적으로, 실험적으로 중요하게 다루어왔다. Hawthorne [1] 등은 난류 확산화염에서 무차원화 화염길이 스케일링을 제시하였고, Becker 와 Liang [2]은 부력, 또는 운동량이 주가 되는 영역을 정의하여 영역에 따른 관계식을

제시하였다. 그 밖에도 많은 연구자들이 조건에 따른 화염길이 관계식을 제시하고 실험결과와 비교하는 작업을 수행해왔다. 위 연구들은 대부분 동축공기가 없는 단순 제트 화염에서 이루어진 결과들이다. 본 논문에서는 동축공기가 있으며 그 효과로 인해 운동량의 영향이 큰 조건에서 화염길이 스케일링에 대해 알아보도록 하겠다.

많은 실제 연소기에서 동축공기를 사용하는데 그 이유는 간단하고 안전한 구조로 높은 혼합율을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 연료와 동축공기 제트간의 균일한 혼합을 증대로 인해 화염길이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 동축공기가 있는 난류 확산화염에서 화염길이 스케일링에 대한 연구는 현재까지 충분한 연구가 진

\* 서울대학교 대학원

† 윤영빈, ybyoon@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

행되지 못한 상황이다. Broadwell [3]등 은 동축 공기가 화염길이를 저감시킨다는 실험 결과를 얻었고 Dahm [4]등 은 far-field에서 유효제트지름에 대한 식으로 무차원화 화염길이 관계식을 이론적으로 제안하였다.

그러나 Dahm 이 제시한 이론식과 본 연구에서 수행한 화염길이 측정결과가 일치하지 않는다는 점을 발견하였다. 따라서 본 연구에서는 그 원인을 분석하고 새로운 관계식을 정의하여 실험 결과와 비교해 보았다. Dahm 의 화염길이 관계식은 기본적으로 far-field에서 연료와 동축공기를 합쳐 하나의 노즐로 가정하는 유효제트지름(effective jet diameter)으로 표현하고 있는데 노즐 가까이에서는 후류와 달리 혼합이 잘 이루어지지 않은 상태이고 밀도 변화가 심하므로 밀도 변화를 고려한 near-field 개념에서의 유효제트지름을 정의하여 새로운 관계식을 유도하여 보았다.

그리고 수소 또는 수소에 헬륨을 희석한 연료를 사용하여 얻은 화염길이 결과를 수정된 관계식과 비교하여 적용 가능성을 유추해 보기로 하겠다.

## 2. 실험 장치 및 조건

### 2.1 실험 장치

실험 장치는 연료노즐, 동축공기 노즐, 주위공기 등으로 구성되는 유동 공급부와 가시화 창으로 구성된 시험부 연소 후 생성된 가스를 배출하는 배기부로 구성되어 있으며 Fig. 1에 나타내었다. 연소기 시험부의 단면은 20 x 20cm의 정사각형이며, 높이는 80cm 이다. 연료는 수소가 사용되었으며 가운데 내경 3mm의 노즐을 통해 나온다. 동축공기 노즐은 연료 노즐과 동심이며 내경이 15mm로 하였고, 당량비를 0.25로 일정하게

표 1 Experimental conditions

Test Case	$U_F$ [m/s]	$U_A$ [m/s]	$U_A/U_F$	
I	1	105-489	10.0	0.021-0.095
	2	105-489	20.0	0.041-0.191
	3	105-489	30.0	0.061-0.287
II	4	105-279	21.5-57.3	0.205
	5	105-349	14.3-47.7	0.137
	6	105-419	10.7-42.9	0.103
	7	105-489	7.2-33.4	0.068
	8	105-419	5.4-21.5	0.051
III	9	105 Re=3000	3.0-45.0	0.029-0.430
	10	140 Re=4000	3.0-50.0	0.021-0.357
	11	175 Re=5000	3.0-50.0	0.017-0.287
	12	244 Re=6000	3.0-50.0	0.012-0.205

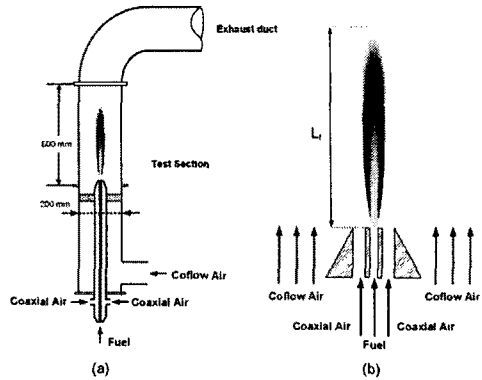


Fig. 1 (a)combustor (b)nozzle geometry

유지하기 위해서 주위 공기의 유량을 조절하였다. 이 때 주위공기 속도는 화염 특성에 영향을 끼치지 않도록 유속을 0.1m/s 이하로 유지하였다. 동축공기와 주위류는 honeycomb과 glass bead를 이용하여 동축공기와 주위류의 유동이 균일하도록 하였다.

### 2.2 실험 조건

실험 조건은 3가지 경우로 나누었다. 첫 번째 조건은 동축공기 유속을 10m/s 로 고정하고 연료 유속을 증가시킨 경우이며(Case I), 두 번째는 유속비( $U_A/U_F$ )가 일정한 상태에서 연료와 동축공기 유속을 증가시키는 경우(Case II)이고, 세 번째 조건은 연료 유속이 175m/s 로 고정된 상태에서 동축공기의 유속을 증가시킨 경우(Case III)이다. 자세한 실험조건을 표 1에 나타내었다. 연료 제트의 레이놀즈 수는  $Re = U_F d_F / \nu$  로 정의하고  $\nu$ 는 동점성계수이다. 화염 길이는 고해상도의 Kodak ES1.0 CCD 카메라(1008 x 1018 pixels)로 획득한 이미지를 평균하여 구했다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 이론식과 실험결과 비교

Figure 2에서 세 가지 경우에 대해 연료 노즐이 3mm 이고 동축공기 노즐이 15mm 인 단순확산 화염의 직접사진을 확인할 수 있다. Fig. 2(a)는 동축공기가 없는 단순확산화염의 경우이다. 레이놀즈 수가 큰 경우 운동량의 영향이 큰 영역이므로 익히 알려진 바와 같이 연료 유속이 증가하더라도 화염길이 거의 일정함을 알 수 있다. Case I에서 동축공기 유속이 고정된 상태에서

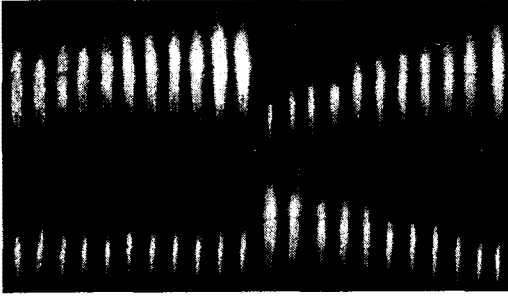


Fig. 2 Variation of instantaneous flame length: (a) increasing  $U_F$  simple jet with coaxial air, (b) increasing  $U_F$  at fixed  $U_A = 10\text{m/s}$ , (c) increasing  $U_A$  and  $U_F$  at fixed  $U_A/U_F = 0.103$ , (d) increasing  $U_A$  at fixed  $U_F = 244\text{ m/s}$

연료 유속에 증가함에 따라 화염길이도 증가한다. (Fig. 2(b)) Case II (Fig. 2(c))에서는 유속비를  $U_A/U_F = 0.103$ 로 일정하게 유지한 상태에서 연료와 동축공기 유속을 증가했을 때 화염길이도 일정하게 유지되는 것을 관찰하였다. 이는 단순 확산화염 제트에서와 비슷한 경향성을 보였다.[6] Case III에서는 연료 유속이 고정된 상태에서 동축공기 유속이 증가함에 따라 화염길이도 감소하는 것을 알 수 있다.(Fig 2(d)) Figure 2의 결과에서 화염길이는 연료와 동축공기의 유속비의 함수로 표현될 수 있다. Dahm [4]등은 동축공기가 연료를 당량비에 이르도록 희석시키는 공기의 유입량을 감소시킨다는 점을 분석하여 다음과 같은 무차원화 화염길이식을 얻어 냈다.

$$\frac{L_f}{d_F} = \frac{15(1+f_s)(\rho_F/\rho_A)^{1/2}}{\left[1 + \frac{\rho_A U_A^2 (d_A^2 - d_{F0}^2)}{\rho_F U_F^2 d_F^2}\right]^{1/2}} \quad (1)$$

$f_s$  는 연료와 공기의 당량비이고  $d_{F0}$ ,  $d_F$ 는 각각 연료 노즐의 바깥쪽, 안쪽 지름을 나타낸다. 위 식에서 동축공기 유속이 증가할수록 무차원화 화염길이 ( $L/d_F$ )는 감소함을 알 수 있다. 무차원화 화염길이는 EINOx 측정이나 화염의 구조를 파악하는데 있어 중요한 요소이므로 실험을 통해 얻은 화염길이를 식(1)과 비교하여 실험결과와 차이를 발견할 수 있었다. (Fig. 3) 특히  $U_A$ 가 0.2 보다 큰 영역에서 차이점이 두드러진

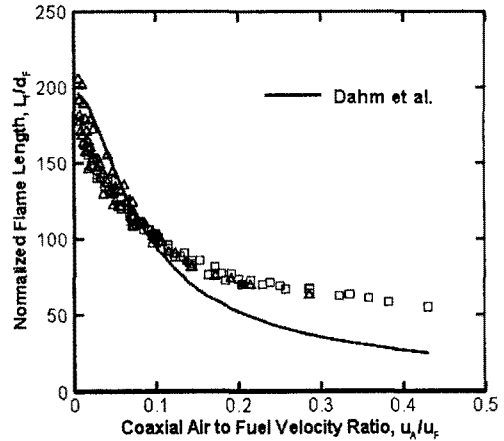


Fig. 3 Comparison of  $L_f/d_F$ , between measured and calculated by Dahm et al. [4] with  $U_A/U_F$

다. Feikema [7]등의 연구에서도 식 (1)과 실험결과를 비교하였는데 동축공기가 큰 영역에서 차이점이 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이론식과 실험결과가 일치하지 않는 원인을 규명하여 이를 수정해 보기로 하였다.

### 3.2 이론식 수정 및 결과 분석

Dahm [4]등은 질량 플럭스가 변하지 않고 유효제트지름이 축방향을 따라 연료 농도가 far-field 조건에서 자기상사성을 띤다고 하였다.

$$c(x) \approx (x/d_{eff})^{-1} \quad (2)$$

화염 길이 ( $L$ )을 연료노즐에서 화염끝단의 stoichiometric 조건까지의 거리라고 정의하면 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c(L) \approx \frac{m_F}{m_F + m_A} \approx \frac{1}{1+f_s} \quad (3)$$

$f_s$  는 균일한 연료 혼합물의 당량비이며  $m_F$ 는 연료의 질량유량,  $m_A$ 는 공기의 질량 유량을 나타낸다. 수소 단일연료의 경우는  $f_s = f_s$  이다. 이 식은 다음과 같이 되고,

$$L_f \approx (1+f_s)d_{eff} \quad (4)$$

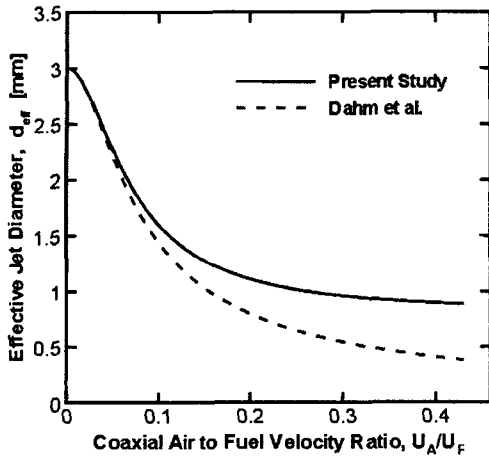


Fig. 4 Comparison of  $d_{eff}$ , between near field Eq. (11) and far-field Eq. (1) with  $U_A/U_F$ .

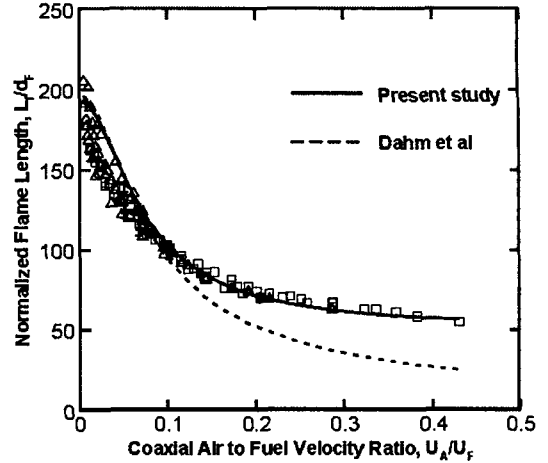


Fig. 5 Comparison of  $L_f/d_f$ , between measured, calculated by present study Eq. (11) and the calculated by [4] with  $U_A/U_F$  in pure hydrogen

유효제트지름  $d_{eff}$  은 화염길이 스케일링에 있어 유용하게 쓰이는 개념으로 노즐 출구에서 여러 종류의 가스의 성질을 단순화 시킬 수 있다. 이는 Thring 과 Newby [5]에 의해 소개되었으며  $d_{eff} = 2m_0/(J_0)^{1/2}$  로 정의된다.  $m_0$ 는 연료와 동축공기의 총 질량 유량이며  $J_0$ 는 총운동량을 나타낸다.

$$m_0 = \rho_F U_F \left( \frac{\pi}{4} d_F^2 \right) + \rho_A U_A \left[ \frac{\pi}{4} (d_A^2 - d_{F,0}^2) \right]$$

$$J_0 = \rho_F U_F^2 \left( \frac{\pi}{4} d_F^2 \right) + \rho_A U_A^2 \left[ \frac{\pi}{4} (d_A^2 - d_{F,0}^2) \right] \quad (5)$$

위의 식 (5)에서 동축공기의 질량유량을 무시하고  $m_0 = \rho_F U_F \left( \frac{\pi}{4} d_F^2 \right)$  항만을 대입하여 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{L_f}{d_f} = \frac{c(1+f_s)(\rho_F / \rho_A)^{1/2}}{\left[ 1 + \frac{\rho_A U_A^2 (d_A^2 - d_{F0}^2)}{\rho_F U_F^2 d_F^2} \right]^{1/2}} = \frac{(L/d_f)_{no\ coax\ air}}{\left[ 1 + \frac{\rho_A U_A^2 (d_A^2 - d_{F0}^2)}{\rho_F U_F^2 d_F^2} \right]^{1/2}} \quad (6)$$

여기서  $c$ 는 비례상수이다. 연료의 유속이 동축공기 보다 매우 크고 연료의 밀도가 큰 경우에 동축공기 질량유량을 무시할 수 있지만 본 실험에서는 수소 또는 수소에 헬륨을 희석시킨 연료를 사용하므로 동축공기 질량유량을 포함시켜 유효제트지름을 구해보았다.

$$d_{eff} = \frac{\rho_F U_F d_F^2 + \rho_A U_A (d_A^2 - d_F^2)}{\left[ \rho_A (\rho_F U_F^2 d_F^2 + \rho_A U_A^2 (d_A^2 - d_F^2)) \right]^{1/2}} \quad (7)$$

이것을 식 (4) 에 대입하여 무차원화 화염길이를 구하면

$$\frac{L_f}{d_f} = c(1+f_s)(\rho_F / \rho_A)^{1/2} \frac{\left( 1 + \frac{U_A}{U_F} K \right)}{\left( 1 + \left( \frac{U_A}{U_F} \right)^2 K \right)^{1/2}}$$

$$\text{단, } K = \frac{\rho_A (d_A^2 - d_{F0}^2)}{\rho_F d_F^2} \quad (8)$$

식 (8)과 같이 표현된다. 식(8)은 유속비  $U_A/U_F$  가 증가함에 따라 무차원화 화염길이가 증가함을 알 수 있다. 이것은 실험결과와 반대되는 현상이며 far-field 관점에서 동축공기 질량유량의 추가가 오히려 유효제트지름을 증가시키게 된다. 따라서 새로운 관점에서 접근할 필요가 있다. 식 (8)은 far-field에서 유효제트지름으로 정의되는데 후류에서 밀도가 주위공기의 밀도로 근사된다. 노즐 출구의 near-field 영역에서는 운동량의 영향이 크고 밀도 변화가 심하게 일어나기 때문에 운동량의 영향을 반영하는 유효제트밀도를 포함하는 유효제트지름을 정의할 필요가 있다. [8]

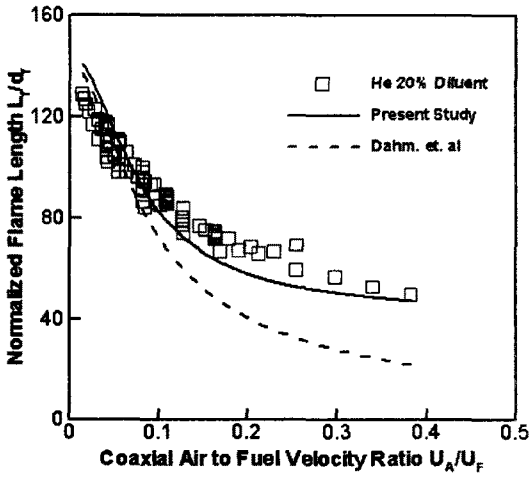


Fig. 6 Comparison of  $L_f/d_F$ , between measured, calculated by present study Eq. (11) and the calculated by [4] with  $U_A/U_F$  in 20% Helium diluent hydrogen

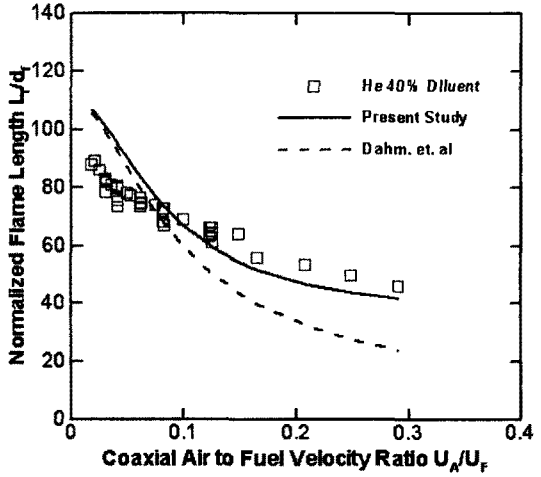


Fig. 7 Comparison of  $L_f/d_F$ , between measured, calculated by present study Eq. (11) and the calculated by [4] with  $U_A/U_F$  in 40% Helium diluent hydrogen

$$\rho_{eff0} = \frac{J_0}{\pi/4[d_F^2 U_F^2 + (d_A^2 - d_F^2) U_A^2]} \quad (9)$$

이 때 유효제트지름은 다음과 같다.

$$d_{eff0} = d_F \left( \frac{\rho_F}{\rho_{eff0}} \right)^{1/2} \quad (10)$$

아래첨자 0은 near-field 영역에서 정의됨을 의미한다. 이것을 식[4]에 대입하여 다음과 같은 수정된 식을 얻을 수 있다.

$$\therefore \frac{L_f}{d_F} = c(1+f_s) \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{U_A}{U_F}\right)^2 \frac{(d_A^2 - d_{F0}^2)}{d_F^2}}{1 + \left(\frac{\rho_A}{\rho_F}\right) \left(\frac{U_A}{U_F}\right)^2 \frac{(d_A^2 - d_{F0}^2)}{d_F^2}}} \quad (11)$$

Figure 4에서 기존의 far-field 개념에서의 유효제트지름과 near-field 개념에서 새로 정의된 유효제트 지름이 유속비에 따라 변하는 경향 나타내었다. Figure 5는 수소를 연료로 사용했을 때 실험결과와 기존의 Dahm의 식 (1)과 식 (11)을 비교한 결과를 나타낸다. 식(11)이 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 동축공기

유속이 큰 영역에서 수정된 이론식이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 수소에 헬륨을 20과 40% 씩 희석 시켰을 경우에도 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다. (Fig. 6, Fig. 7) 이를 통해 밀도가 다른 연료에서도 식 (11)의 적용이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

동축공기 수소 확산화염에서 화염길이를 스케일링한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, Dahm [4]등 이 제안한 무차원화 화염길이 관계식은 부력의 영향이 큰 경우에 잘 일치하는 경향이 있고 동축공기의 운동량 효과가 큰 본 실험 결과와 차이점을 나타낸다. 이것은 far-field에서 유효제트지름을 통해 정의되는데 동축공기의 혼합효과를 잘 반영하지 못함을 의미한다. 둘째, 노즐 출구에서 운동량에 의한 혼합 효과를 반영하는 유효제트밀도를 정의하여 새로 식을 수정하였다. 셋째, 수정된 식 (11)을 near-field에서의 연료와 주위 공기의 혼합된 밀도를 통해 정의된 것으로 수소만을 썼을 때 또한 수소에 헬륨을 희석시킬 때에도 실험 결과와 비교하여 보았다. 그 결과 수정된 식은 실제 실험 데이터와 비교적 잘 일치하고 있다. 특히 헬륨을 희석시킨 경우에도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 연료의 밀도가 다른 경우에도 스케일링한 식 (11) 적용

이 가능하다는 것을 의미한다.

### 참고문헌

1. W.R. Hawthorne, D.S. Weddell, H.C. Hottel, *Proc. Combust. Inst.* 3, (1948), 266-288.
2. H.A. Becker, D. Liang, *Combust. Flame* 32, (1978), 115-137
3. J.E. Broadwell, W.J.A. Dahm, M.G. Mungal, *Proc. Combust. Inst.* 20, (1985,) p.303.
4. W.J.A. Dahm, A.G. Mayman, *AIAA Journal Vol.* 28, No. 7, (1990), 1157-1162.
5. M.W. Thring, M.P. Newby, *Proc. Combust. Inst.* 4, (1952), 67-74.
6. S.H. Kim, Y. Yoon, I.S. Jeung, *Proc. Combust. Inst.* 28, (2000), 463-471.
7. D. Feikema, R.H. Chen, J.F. Driscoll, *Combust. Flame* 86, (1991), 347-358.
8. J.C. Sautet, D. Stepowski, *Phys. Fluids* 7 (11), (1995), 2796-2806.