

< 기술논문 >

순 산소 연소기 개발을 위한 노즐직경변화에 따른 화염길이 특성

김 호 근* · 김 용 모*

(2004년 12월 10일 접수, 2005년 6월 16일 심사완료)

Flame Length Characteristic for Varying Nozzle Diameter to Develop Oxy-Fuel Combustor

Ho-Keun Kim and Yong-Mo Kim

Key Words: Entrainment(산화제유입), Similarity Formulation(상사식), Buoyancy-Dominated Regime (부력지배영역), Momentum-Dominated Regime(운동량지배영역)

Abstract

In order to develop oxy-fuel combustor, the Flame length characteristic of CH₄ with oxidizer of air and oxygen has been experimentally investigated for the nozzle diameters of 1.6mm, 2.7mm, 4.4mm and 7.7mm. The structure of CH₄ flame with oxidizer of oxygen was sharp in contrast with the CH₄ flame with oxidizer of air. The stability of CH₄ flame with oxidizer of oxygen was higher than CH₄ flame with oxidizer of air. In all CH₄ flames with oxidizer of air and oxygen, the flame length were dependent on the flowrate in laminar flame regime, and in turbulent flame dependent on the initial jet diameter. Using correlation equation of Delichatsios, the flame length has been expected exactly for CH₄ flame with oxidizer of air, but underestimated for CH₄ flame with oxidizer of oxygen. This paper proposed correlation equation of CH₄ flame with oxidizer of oxygen.

기호설명

- L^* : 무차원 화염길이, f_s : 이론 공연비
- L_f : 화염 길이, d_j : 연료노즐직경
- ρ_e : 연료 밀도, ρ_∞ : 산화제 밀도
- v_e : 연료 속도, ΔT_f : 단열화염온도차
- T_∞ : 산화제온도, Fr_f : 화염 Froude 수
- g : 중력가속도

1. 서론

급속한 산업화로 인하여 기상이변 및 대기오염에 정도가 심각한 지경에 이르렀다. 그로 인하여 세계 각국은 환경규제조치를 강화하여 자국에 대기오염 및 후차적인 문제를 제거하기 위한 노력이 한창이다.

대부분의 산업은 연소현상으로부터 에너지를 공급받아 이루어진다고 해도 과언이 아닐 정도로 대부분 산업구조상 연소현상이 주를 이루고 있다.

연소현상에서 주로 배출되는 대기오염물질로는 NOx, SOx, CO, 및 CO₂ 등이며 대부분의 연구자들은 연소를 최대한 제어하여 대기오염물질 줄이기 위한 노력을 기울인데도 불구하고 완전하게 대기오염물질을 제거하는 데는 한계성을 가지고 있다.

최근 *Baukal* 는 순 산소 연소가 시스템의 열효

† 책임저자 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : kimhokeun@hanmail.net
TEL : (042)868-7392 FAX : (042)868-7284

* 회원, 한양대학교 기계공학부

율을 상승시킬 수 있고 NO_x 배출을 완전하게 제어할 수 있으며 온실가스인 CO₂ 처리가 용이하다고 제안하였다.⁽¹⁾

순 산소 연소는 공기 중의 질소 성분이 공급되지 않고 산소만 공급되므로 시스템의 출구에서 배출되는 가스량의 감소로 에너지손실이 그만큼 줄게 되어 열효율 상승을 가져오며 NO_x 성분 발생을 미연에 방지하여 NO_x 배출을 완전하게 제어할 수 있다. 또한 순 산소 연소인 경우 출구에서의 배기가스성분은 CO₂와 H₂O 만으로 구성되는데 분리기술을 이용하여 수분을 제거하고 CO₂를 추출할 수 있게 되는 장점을 가지고 있다.

최근에 순 산소 연소가 주목을 받으면서 이산화탄소 재순환이 순 산소 난류제트 확산화염에 미치는 영향,⁽²⁾ 산소부화연소에서 CO₂ 첨가에 대한 연소 특성,⁽³⁾ 연소용 공기 중 N₂의 CO₂ 대체에 대한 연소특성 해석⁽⁴⁾ 등 많은 연구가 진행되고 있다.

그러나 연소기를 개발하게 위해서는 화염길이를 정확하게 예측할 필요가 있는데 만약 화염길이가 길게 되면 화염이 연소실 벽면을 부딪치게 되어 연소로에 손상을 가져오게 된다. 따라서 과거 많은 연구자들로부터 지금까지 화염길이를 정확하게 예측하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

Delichatsios는 난류화염에서의 질량보존방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 유동함수로 유도하여 화염길이에 대한 상사특성을 보였으며 화염에 작용하는 운동량 플럭스와 부력과의 관계를 화염 Froude 수(Fr_f)로 정의하고 무차원 화염길이에 대한 관계식을 식 (1), (2)로 나타내었다. 그 결과로 부력 지배 영역에서는 식 (3)으로 나타나고 운동량 지배 영역에서는 식 (4)로 나타난다고 하였다.⁽⁵⁻⁷⁾

$$L^* = \frac{L_f f_s}{d_f (\rho_e / \rho_\infty)^{1/2}} \quad (1)$$

$$Fr_f = \frac{v_e f_s^{3/2}}{(\rho_e / \rho_\infty)^{1/4} (\Delta T_f / T_{og} d_f)^{1/2}} \quad (2)$$

부력 지배영역

$$L^* = 13.5 Fr_f^{0.4} \quad (Fr_f < 5) \quad (3)$$

운동량 지배영역

$$L^* = 23 \quad (Fr_f \geq 5) \quad (4)$$

이외에도 많은 연구자들에 의해 화염길이를 정확하게 예측하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는데도 불구하고 대부분의 연구는 수학적 모델링을 이용하여 상사식을 만들고 거기에 공기화염에 대한 실험결과를 비교하여 성립된 식으로 실제 순 산소 화염의 화염길이를 과소평가하였다.

따라서 본 논문은 연료노즐직경 변화에 따른 순 산소 화염과 공기 화염의 화염길이 및 화염형상 특성을 보였으며 산화제가 순산소인 경우에 화염길이를 예측할 수 있는 관계식을 도출하고 순 산소 연소기를 개발하기 위한 설계기본조건 도출을 목적으로 하고 있다.

2. 실험 장치 및 방법

화염길이에 대한 특성 실험을 하기 위하여 Fig. 1과 같이 입구부가 300mm이며 화염가시화를 위하여 내경 300mm, 길이 1200mm의 석영관으로 연소실을 구성하였다. 연소기 입구의 허니콤 중앙에 스테인리스 관을 삽입하여 허니콤 출구 면에서 약 50mm 도출된 구조로 제작하였다.

산화제의 유속을 일정하게 하기 위하여 70mm 두께의 직경 3mm 쇠구슬 층과 셀 크기 3mmX3mm, 외경 300mm, 두께 100mm 인 허니콤을 이용하였다. 연료공급관의 길이는 관내에서 충분히 발달되도록 800mm로 하였다.

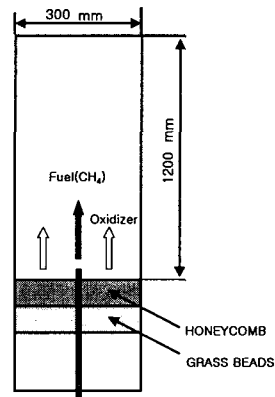


Fig. 1 Schematic of combustor

화염길이를 정의하는 방법으로는 산소농도가 0%인 점, 화염온도가 가장 높은 점, 가시화염의 끝 점등이 있다. 가시화염의 끝 점을 화염의 길이로 정의하는 방법을 제외하고는 측정장치를 화염에 직접 접촉하여 측정하게 되는데 순 산소 화염의 경우 단일화염온도가 높아 측정하기가 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 본 저자는 비디오카메라를 이용하여 일정시간동안 가시화염의 길이를 촬영하고 난류로 인한 변동폭에 중간 값을 화염길이라고 정의하였으며 공기화염의 경우 화염부상구간이 존재하게 되는데 노즐의 선단으로부터 화염의 끝점까지를 화염길이라고 정의하였다.

연료는 메탄(99.9%)을 사용하였으며 연료를 정량 공급하기 위하여 보정된 최대 100 lpm 까지 공급할 수 있는 질량유량계(MFC)를 사용하였다.

연료노즐직경은 1.6mm, 2.7mm, 4.4mm, 7.7mm로 각각 바뀌가면서 산화제가 공기일 때, 산화제가 순 산소일 때 화염형상 및 화염길이 특성을 확인 하였다. 연료 노즐은 산업용 배관으로 많이 사용되는 규격을 기준으로 선정하였다.

산화제를 공급하면서 보정된 질량유량계(MFC)를 사용하였으며 산화제유속조건은 순 산소인 경우와 공기인 경우 모두 0.095m/s로 유량 400 lpm을 똑같이 공급하였다. 위 산화제 유속조건은 산화제가 공기인 경우에도 실험영역에서 연료가 완전 연소하는데 충분한 산소량이 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 형상

연료노즐직경이 2.7mm인 경우에 공기화염과 순 산소화염의 형상을 비교하였다.

Fig. 2는 산화제가 공기이며 연료노즐직경이 2.7mm 일 때 연료량을 증가시켜가면서 화염형상을 나타낸 것이다. Fig. 3은 산화제가 순 산소이고 연료노즐직경이 2.7mm일 때를 나타낸 것이다. 그림에서 층류구간, 천이구간, 난류구간으로 정의하였는데 연료노즐출구에서의 레이놀즈수로 층류구간은 레이놀즈수 2000이하로, 천이구간은 레이놀즈수 2000부터 4000까지, 그 이상의 구간을 난류구간으로 정의하였다.

연료는 연료노즐로부터 후류로 갈수록 초기 연료 운동량이 점점 감소하게 되고 연소로 인한 부력의 운동량이 증가하게 된다. 이때 연소반응이

끝나는 화염 끝점이 연료 운동량이 주를 이루는 영역에 존재하는 경우를 운동량 지배영역이라 정의하며 부력에 의한 운동량이 주를 이루는 영역에 존재하는 경우를 부력 지배 영역이라 정의하게 된다.

Fig. 2의 공기화염을 보면 Fig. 3의 순 산소 화염에 비하여 같은 연료속도에서 화염길이가 길게 나타나고 있으며 화염 끝점의 화염형태가 순 산소 화염과는 다르게 몽툰한 화염모양을 나타내고 있다. 이는 공기화염인 경우 운동량 지배 영역에서 연료가 충분히 연소하지 못하고 부력 지배영역으로 천이 된 부력화염의 형태를 띠게 되면서 나머지 연료가 산화제 측으로 확산반응하게 되어 몽툰한 화염형태를 나타내게 된다.

그에 비하여 Fig. 3의 순 산소 화염의 경우 운동량 지배 영역에서 충분히 화학반응하고 공기 화염에 비하여 단일화염온도($T_a = 3056K$)가 높기 때문에 부력이 증가되므로써 운동량의 증가로 산화제 유입을 증가시켜 화염에 끝 부분이 뾰족한 형태의 부력화염을 보여주고 있다.

난류구간에서는 공기화염의 경우 부상화염에 형태를 띠는데 부상화염에 대한 다양한 이론이 있으나 아직까지 명확하게 규명되지 못한 실정이다. 그러나 여러 이론의 바탕이 되고 있는 것은 부상되는 거리동안에 주변의 산화제 유입으로 예혼합되어 부상화염의 뿌리부분은 예혼합 화염 또는 부분 예혼합 화염의 특성을 나타낸다고 알려져 있다.⁽⁸⁾

따라서 Fig. 2의 난류구간을 보게 되면 화염이 부상하면서 휘도가 떨어지게 되는데 이는 예혼합 화염의 형태를 띠게 되면서 나타나는 특성으로 생각된다. 연소기를 설계하기 위해서는 전체 화염길이를 알아야 할 필요가 있기 때문에 화염길이를 연료노즐선단으로부터 화염 끝점까지로 정의하였다.

Fig. 2의 공기화염인 경우 천이구간에서 화염길이가 줄었다가 일정해지는 경향을 볼 수 있는데 화염이 층류 부력화염에서 난류 부력화염으로 천이 되어 나타나는 현상이다. 그에 비하여 Fig. 3의 순 산소 화염인 경우 공기화염에서 나타나는 천이현상이 관찰되지 않고 층류구간부터 천이구간까지 연료량이 증가하면서 화염길이가 길어지다가 난류구간에서 일정해지는 경향을 보였는데 이부분에 대해서는 추후 연구가 필요하다고 생각

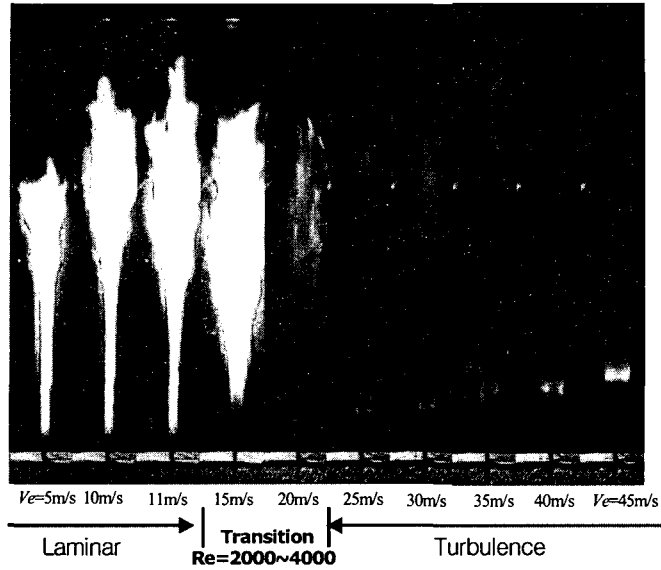


Fig. 2 Direct photos of CH₄ -air flames for varying fuel velocity on air($d_j = 2.7 \text{ mm}$)

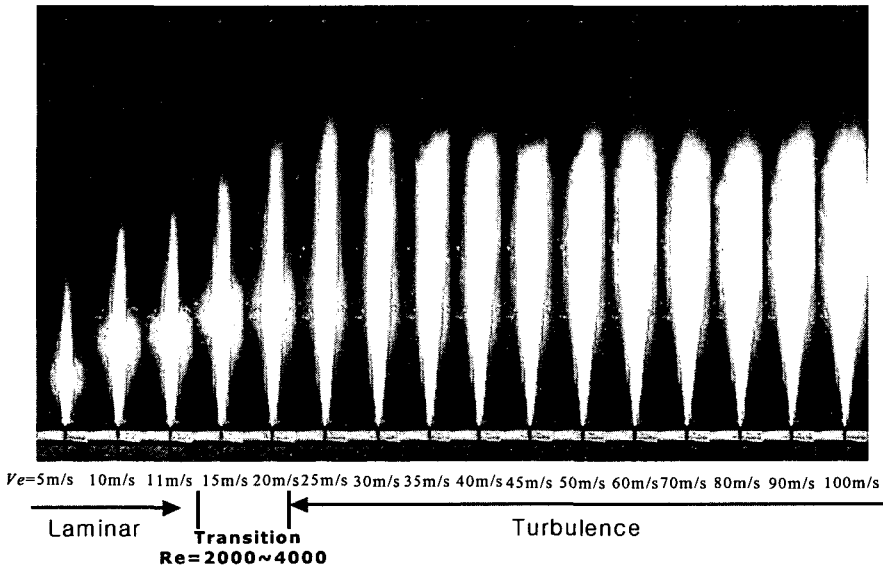


Fig. 3 Direct photos of CH₄ - O₂ flames for varying fuel velocity on oxygen($d_j = 2.7 \text{ mm}$)

된다.

화염부상은 화염전파속도와 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다.⁽⁸⁾ 순 산소 화염의 모든 실험조건에서 화염부상은 발생하지 않았다. 이는 당량

비 1 조건에서의 화염전파속도를 비교해보면 공기화염의 화염전파속도는 37cm/s 인데 비하여 순 산소 화염의 화염전파속도는 320cm/s 로 공기화염의 화염전파속도보다 빠르기 때문이며 공기화

염에 비하여 순 산소 화염이 화염안정성이 높다는 것을 알 수 있다.

순 산소 화염의 Fig. 3을 보게 되면 화염의 휘도가 공기화염에 비하여 높게 나타나는데 이는 화염온도가 높아 기체와 매연 등으로 인한 복사 특성이 강해지기 때문으로 생각된다.

Fig. 2와 Fig. 3의 화염길이를 비교해보면 공기 화염길이가 순 산소화염길이에 비하여 길지만 많은 차이를 보이지 않음 알 수 있다. 이를 정량적으로 계산해 보면 순 산소 화염길이는 공기화염길이를 기준으로 층류구간에서는 약 60%이며 난류구간에서는 약 90%에 해당된다.

3.2 공기 화염길이

공기화염의 화염길이에 대한 특성을 알아보기 위하여 연료노즐직경이 2.7mm, 4.4mm, 7.7mm 일 때 각각 화염길이를 측정하고 Fig. 4에 나타내었다. 연료노즐직경 1.6mm가 실험결과에 빠져있는데 초기점화시의 연료노즐에 공급되는 연료량에 비하여 공급되는 공기량이 많게 되어 메탄의 화염가연한계로 점화되지 않은 결과이다. 연료노즐 직경 7.7mm인 경우 13m/s 까지만 실험이 수행되었는데 화염길이가 연소실 실험범위를 초과하여 이상의 조건에서는 수행할 수 없었다.

Fig. 4를 보게 되면 연료속도가 증가하면서 화염길이가 길어지다가 천이되어 작아지고 난류구간에서 화염길이가 일정하거나, 화염길이 증가율이 점차 감소하면서 증가하게 된다.

공기화염에 대한 Fig. 4의 결과를 연료유량에 대한 화염길이로 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의

실험결과와 Wohl⁽⁹⁾ 등의 실험결과를 비교해보면 거의 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 참고문헌⁽¹⁰⁾에 의하면 층류화염이 나타나는 저유량 조건에서 화염길이는 초기 제트 지름에 무관하고 단지 유량에 의해 좌우되며 난류 화염에서는 초기제트 지름에 의존한다고 하였다.

Fig. 5를 보게 되면 모든 실험조건에 대하여 층류구간에서 명확하게 기울기가 일치하지는 않으나 거의 유사한 특성을 보여주고 있어 연료 유량에 대한 화염길이 의존성을 확인할 수 있고 난류구간에서는 유량이 증가하면서 화염길이가 일정하거나, 화염길이 증가율이 점차 감소하면서 증가하게 되고 각각의 연료노즐직경에 따른 화염길이 의존성을 확인할 수 있다.

따라서 공기 연소기를 설계하는데 있어서 층류 화염은 유량으로 화염길이 예측이 가능하게 되고 난류화염은 연료노즐직경으로 화염길이 예측이 가능하게 된다. 그리고 난류구간에서 2.7mm 이상의 연료노즐직경의 경우 유량이 증가하면서 화염길이 증가율이 감소하면서 길어지고 있는데 연료 혼합율이 산화제유입보다 감소하기 때문이다.

3.3 순 산소 화염길이

산화제가 순 산소에서 연료노즐직경이 1.6mm, 2.7mm, 4.4mm, 7.7mm 일 때 연료 속도에 따른 화염길이를 Fig. 6에 나타냈으며 연료노즐직경이 7.7mm인 경우 화염길이가 연소실 실험범위 초과로 인하여 연료 속도 25m/s 이상에서의 조건은 수행하지 못했다.

Fig. 6을 보면 층류구간에서 천이구간까지 연료

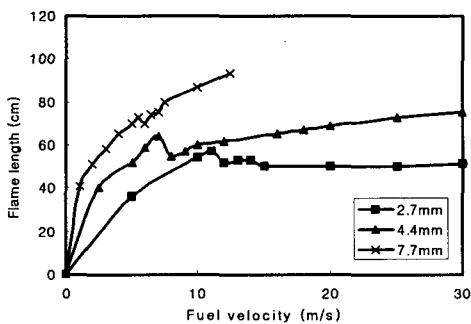


Fig. 4 Flame lengths according to the various fuel velocities for air oxidant

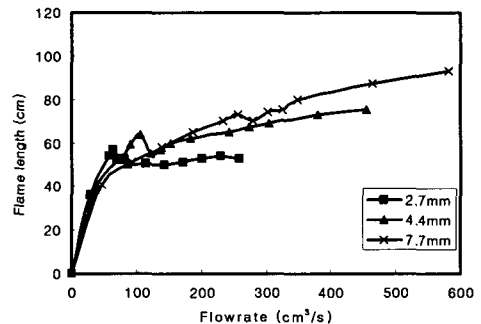


Fig. 5 Flame lengths according to the various fuel flowrates for air oxidant

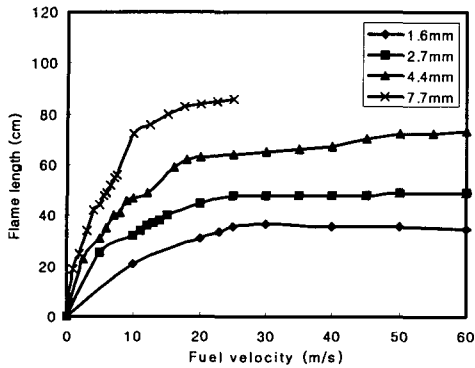


Fig. 6 Flame lengths according to the various fuel velocities for pure oxygen oxidant

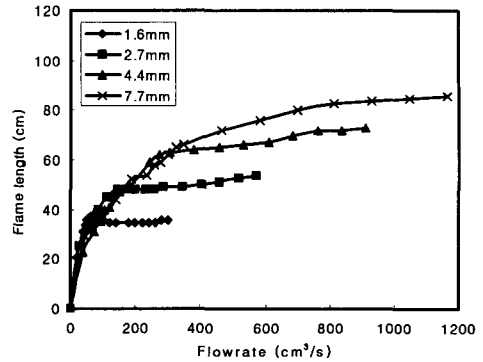


Fig. 7 Flame lengths according to the various fuel flowrates for pure oxygen oxidant

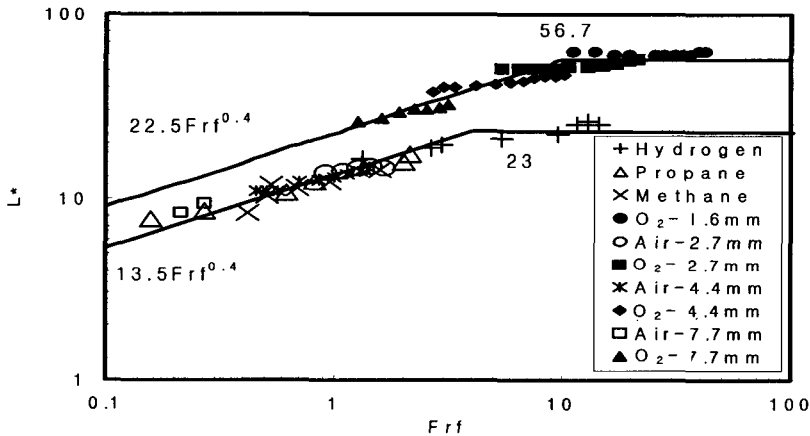


Fig. 8 Flame lengths for jet flames correlated with flame froude number

속도가 증가하면서 화염길이가 길어지게 되고 난류구간에서는 연료속도가 증가하면서 화염길이가 일정하거나 화염길이가 증가율이 감소하면서 길어지고 있다. 공기화염과는 다르게 천이구간에서 화염길이가 짧아지지 않고 계속 길어지는 특성을 확인할 수 있다.

순 산소 화염에서 화염의 길이를 결정하는 인자를 알아보기 위하여 Fig. 6 결과를 연료 유량에 따른 화염길이를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 보게 되면 공기화염에서와 마찬가지로 층류화염은 유량에 의존성을 확인할 수 있으며 난류화염은 연료노즐직경에 의존성을 확인할 수 있다. 따라서 공기 화염의 경우와 마찬가지로 순 산소 연소기를 설계하는데 있어서 층류화염의 경우 연료

유량으로 난류화염인 경우 연료노즐직경으로 화염길이 예측이 가능하다는 것을 알 수 있다.

3.4 순 산소화염에 대한 화염길이 관계식

연소기를 개발하기 위해서는 화염길이 예측은 중요한 요소이다. 그러나 순 산소에 대한 화염길이를 예측할 수 있는 관계식이 제안된 적은 없다. 또한 기존의 공기화염에 대한 관계식은 순 산소 화염길이를 과소평가하는 경향을 보였다.

따라서 일반적인 산업용 연소기의 화염 형태는 대부분 난류화염의 형태를 띠게 되는데 Delichatsios⁽⁷⁻⁹⁾의 난류화염에 대한 식 (1), (2)의 관계식을 이용하여 순 산소 화염길이에 대한 관계식을 찾으려 하였다.

Fig. 8는 Delichatsios 가 제안한 화염길이에 관한 무차원 파라미터를(Fr_f, L^*) 이용하여 산화제가 공기일 때와 산화제가 순 산소 일 때 본 연구의 난류구간 실험결과를 그래프로 나타낸 것이다. 여기에서 수소 프로판 메탄은 Kalghatgi⁽¹¹⁾의 화염길이에 대한 실험결과로 산화제는 공기이다.

물리적으로 화염 Froude 수(Fr_f)는 운동량플럭스와 부력에 비를 나타내고 있으며 Fig. 8의 왼쪽 부분이 부력이 주도하는 영역을 나타내고 오른쪽 부분의 평행한 부분은 운동량플럭스가 주도하는 영역을 말하고 있다.

Delichatsios는 이론적으로 상사해를 얻어 Kalghatgi⁽¹¹⁾의 공기화염길이 실험결과와 비교하였고 식 (3), (4) 결과를 제시하였다. Fig. 8에서 보면 본 연구의 공기화염 실험결과와는 잘 일치하는 반면 순 산소화염에 경우에는 일치하지 않음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 8에 표시한 것과 같은 순 산소화염에서의 화염길이에 대한 기존식 계수를 수정 제시하였으며 다음과 같다.

$$L^* = 22.5Fr_f^{0.4} (Fr_f \leq 10) \quad (5)$$

$$L^* = 56.7(Fr_f)^{10} \quad (6)$$

4. 결 론

순 산소 연소기 개발을 목적으로 설계 기본 조건을 도출하기 위하여 공기화염과 순산소 화염의 형상을 비교하였으며 노즐직경변화에 따른 화염길이 특성 실험을 수행하고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 공기화염은 뿔뿔한 화염구조를 나타내는 반면 순 산소 화염은 뾰족한 형태를 띠게 되며 공기화염에 비하여 순 산소 화염이 화염안정성이 높다.

(2) 공기화염길이를 기준으로 순 산소 화염길이는 층류구간에서 약 60%, 난류구간에서 약 90%이다.

(3) 순 산소 화염은 공기화염과 마찬가지로 층류화염에서는 연료유량으로 난류화염에서는 연료 노즐직경으로 화염길이 예측이 가능하다.

(4) Delichatsios가 제안한 무차원 파라미터를 이용하여 난류구간에서의 순 산소 화염길이에 대한 기존식 계수를 수정 제시하였다.

참고문헌

- (1) Charles, E. Baukal, 1998, "Oxygen-Enhanced Combustion," *CRC Press*, Ph.D.
- (2) Cha, M.S., Kim, H.K., Kim, H.S. and Ahn, K.Y., 2003, "Effects of CO₂ Recirculation on Turbulent Jet Diffusion Flames with Pure Oxygen," *KOSCO SYMPOSIUM*, the 26, pp. 255~260.
- (3) Kim, H.S., Kim, H.K., Ahn, K.Y. and Kim, Y.M., 2004, "Characteristics for Effects of CO₂ Addition to Oxygen-Enriched Combustion," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 1, pp. 9~15.
- (4) Kim, H.S., Ahn, K.Y., Kim, H.K., Lee, Y.W. and Lee, C.E., 2003, "A Study on the Characteristics of Combustion for Substituting CO₂ for N₂ in Combustion Air," *Journal of KOSCO*, Vol. 7, pp. 29~34.
- (5) Delichatsios, M.A., 1981, "String Turbulent Buoyant Plumes. 1. Similarity," *Combustion Science and Technology*, Vol. 24, pp. 191~195.
- (6) Delichatsios, M.A., 1988, "On the Similarity of Velocity and Temperature Profiles in String (Variable Density) Turbulent Buoyant Plumes," *Combustion Science and Technology*, Vol. 60, pp. 253~266.
- (7) Delichatsios, M.A., 1993, "Transition from Momentum to Buoyancy-Controlled Turbulent Jet Diffusion Flames and Flame Height Relationships," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 349~364.
- (8) Pitts, W. M., 1988, "Assessment of Theories for The Behavior and Blowout of Lifted Turbulent Jet Diffusion Flames," *22th symposium on combustion*, pp. 809~816.
- (9) Wohl, K., Gazley, C. and Kapp, N., 1949, "Diffusion Flame," *Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena*, pp. 288~299.
- (10) Turns, S.R., 2000, "An Introduction to Combustion," *McGraw-Hill, New York*, p. 316.
- (11) Kalghatgi, G.T., 1983, "Personal Communication-Flame Height Raw Data," *the 9th International Colloquium on Gas dynamics of Explosion and Reactive Systems*, Poitiers, France.