

CH₄/O₂/N₂ 예혼합화염에서 산소부화에 따른 화염구조

이기용* · 남태형* · 유현석** · 최동수**

The Flame Structure of CH₄/O₂/N₂ Premixed Flames on the O₂ Enrichment

Ki Yong Lee, Tae-Hyoung Nam, Hyun Seok You, Dongsoo Choi

Key Words: flame speed, O₂ enrichment level, premixed flame

Abstract

Experimental measurements are conducted to investigate the structure of flat CH₄/O₂/N₂ premixed flames. The flames are simulated using a detailed chemical kinetic mechanism. Four flames established at equivalence ratio = 0.55 are studied with the different O₂ enrichment level, $\Omega = 0.21, 0.25, 0.30, \text{ and } 0.35$. The measured flame speed and species composition profiles are compared with the calculations. Whereas there is overall good agreement between the measurements and predictions, it appears that as the O₂ enrichment level is increased the position of the flame is moved toward the exit of the burner and the rapid temperature rise happens near the exit of the burner, and some areas of further refinement in the kinetic mechanism are identified.

1. 서론

산소 부화 연소(Oxygen Enhanced Combustion, OEC)는 공기에 존재하는 산소의 함량 비율보다 더 많은 산소의 함량 비율을 갖는 산화제(산소와 질소)를 공급하여 연료를 연소시키는 방법이

다[1]. 예로서 산화제에 포함된 산소의 비율을 21%이상 최대 100%까지 유지된 상태에서 연료를 연소시키는 방식이다. 산소 부화 연소는 전통적으로 사용하던 연료/공기 연소 방식보다도 더 높은 화염 온도, 이용할 수 있는 에너지 증대, 낮은 점화 온도와 에너지 요구, 적은 배출가스의 양 등의 장점을 갖고 있다[1]. 그래서 1400K 이상의 배기가스 온도를 요구하는 공정, 열전달의 제한 때문에 낮은 열효율을 유지하는 공정, 제품의 질에 영향을 주지 않고 추가적인 열전달

* 국립안동대학교 기계공학과

** 한국가스공사 연구개발원

이 요구되는 공정, 오염된 배기가스 배출량 제한을 갖는 공정 등에 적용하면 큰 이점을 얻을 수 있다[1].

미국에서는 알루미늄 합금 생산에 소요되는 에너지를 절약하기 위해 DOE (Department of Energy) 주관으로 산학연 합동 팀을 구성하여 산소 부화 연소 기술을 이용한 고효율, 고성능, 저 NO_x 발생 연소 시스템을 연구하고 있다[2]. 이 연구는 연소에 사용하는 공기에 산소 비율이 약 35-50%(체적비) 되게 산소를 첨가하여 약 30%의 생산력 증가와 California 주에서 규정한 NO_x 배출 규제치 이하로 NO_x 생성을 유지시키는데 목표를 두고 있다. 또한 이러한 기술을 바탕으로 타 에너지 다 소비 업종에 접목시킬 예정이다.

산소 부화 연소 방식으로 형성된 화염 구조는 질소의 함량 비율 및 화염 내에서 화염 온도 변화가 발생하기 때문에 기존의 연료/공기로부터 형성된 화염 구조와 다른 면을 나타낼 것이다[3]. 따라서 산소 부화 화염의 기초 자료를 얻기 위한 작업이 요구된다.

본 연구에서는 산소부화율 변화에 대한 CH₄/O₂/N₂ 예혼합 평면 화염의 구조를 조사하기 위해 화염의 화염 속도, 온도 분포, 중요한 화학종 등을 측정하였다. 실험 결과는 수치해석에서 필요한 상세한 화학 반응 메커니즘을 개발하기 위한 자료로 이용될 것이다.

2. 실험 방법

2.1 평면 화염 버너

평면 화염 버너의 재질은 스테인레스이고, 형태는 동심상의 2개 원통으로 구성되어 있다. 내부 원통의 내경은 61 mm 이지만 원통 내부의 단면적 축소로 인하

여 실제 형성된 화염 직경은 46mm이다. 내부 원통 내에 혼합기의 균일한 유동을 형성시키기 위해 스틸 울(steel wool)과 스크린(screen)을 각각 버너의 혼합기 입구와 내부 원통의 중간에 설치하였다. 균일한 유동 상태에 있는 혼합기는 버너 출구(또는 내부 원통의 출구)에 설치된 세라믹 허니컴(ceramic honeycomb)을 통과하면서 좀 더 균일한 층류 유동 상태로 유출된다. 이러한 유동 상태에서 버너 출구 바로 위에 평면 화염을 형성시켰다. 사용한 세라믹 허니컴(동서 세라컴(주))의 셀 밀도(cell per square inch)는 300이다. 화염으로부터 생성된 배기가스는 버너 위에 설치한 후드(hood)를 통해 실험실 밖으로 배출되었다.

2.2 화염 온도 및 화학종 농도 측정

"R" type(Pt/13%Rh-Pt, Dia. = 0.008 in, Omega Ltd)의 열전대를 사용하여 화염 온도를 측정하였다. 버너 출구부터 상방향으로 2mm(12지점)까지 스텝 모터가 장착된 미세 이송 장치로 열전대를 이동시켰고, 데이터 획득 장치(Das-1801ST/AO board w/EXP-1800, Keithley Inc.)를 통해 열전대에서 나오는 입력 신호를 저장 및 분석하였다. Omega 회사에서 공급하는 "R" type 전압-온도 관계표에 근거하여 신호(또는 전압)를 온도로 변환시켰다.

석영 가스 샘플 탐침기(probe)를 사용하여 화염으로부터 가스를 추출하였다. 추출된 가스는 수증기를 포함하고 있고, 이 수증기가 물로 응축될 때 가스에 함유된 NO를 용해시킨다. 이러한 현상을 방지하기 위해 샘플 탐침기와 가스 건조기를 연결하고 있는 튜브에 열 선

(Heating Pad)을 감아주었고, 샘플 가스의 온도를 약 140°C로 유지했다. 샘플 가스의 온도는 가스 건조기 (Gas Dryer, GD-10, Madur Elec.) 내에서 4°C까지 강하되기 때문에 수증기는 물로 응축되고, 응축된 물은 펌프에 의해 건조기 밖으로 배출된다. 수증기가 제거된 샘플 가스는 건조기에 장착된 필터들(5 μ m)을 통과한 후 가스 분석기(Gas Chromatography, 모델명 600D, 영린 기기)로 공급된다.

가스 분석기를 사용하여 화염에서 추출한 연소 생성물(CO, CO₂, O₂, N₂)의 농도를 측정하였다. 이동가스(Carrier Gas)는 헬륨(Helium)가스를 사용하였고, 약 30ml/min의 유량을 가스 분석기 내로 공급하였다. 배기가스를 분리시키기 위해 컬럼(Column)으로서 CTR I(Alltech)을 사용하였고, 표준시료 가스(모델명 Soctty II Mix 218 Alltech)를 주입하여 보정(Calibration)하였다. 오븐 내에서 컬럼의 온도는 35°C를 유지시켜 주었다. 10 포트 단일 슬롯 밸브에 장착된 샘플 루프(Sample Loop, 2.0 ml)를 사용하여 일정한 양의 샘플가스가 컬럼과 TCD (Thermal Conductivity Detector) 검출기로 흐르도록 하였다.

2.3 화염 조건

예혼합 산소부화화염의 화염속도는 희박 조건에서 당량비에 비례하고, 또한 같은 당량비 조건에서는 산화부화율에 비례한다. 평면 화염 버너에 예혼합 화염을 형성시키기 위해서는 너무 높지 않는 화염 속도를 갖는 화염을 선택하여야 한다. 왜냐하면 높은 화염 속도를 갖는 화염은 화염으로부터 혼합기로 열전달이 발생하

여 역화의 가능성이 존재하기 때문이다. 또한 이러한 현상이 매우 짧은 시간에 이루어지기 때문에 화염을 일정하게 유지시키면서 실험을 수행하는 것은 불가능하다. 따라서 낮은 당량비와 적당한 산소부화율을 갖는 화염에 대해 실험을 수행했다. 본 실험에서는 당량비(ϕ)를 0.55로 유지하고, 산소부화율을 0.21, 0.25, 0.30 및 0.35를 갖는 4종류의 화염에 대한 화염 속도, 화염 온도, 안정된 화학종의 농도를 조사하였다. 여기서 산소부화율($\Omega = [O_2]/([O_2]+[N_2])$)은 산화제에서 산소의 체적비로 정의하였다. 산소부화율 변화에 대한 화염 속도를 좀 더 상세하게 조사하기 위해 당량비를 0.55로 유지하고, 산소부화율 0.23, 0.28, 및 0.32를 갖는 3종류의 화염을 추가로 형성시켰다. 또한 당량비를 0.6으로 유지하고, 산소부화율 0.21, 0.25, 0.30 및 0.35를 갖는 4종류의 화염에 대해 화염 속도를 조사하였다. 여기서 산소부화율 0.21은 산화제(산소와 질소의 혼합기)로 공기를 사용한 경우와 같은 조건을 의미한다.

3. 결과 및 논의

3.1. 화염 속도 결과

당량비 0.55와 0.6에서 산소부화율 변화에 대한 화염 속도를 Fig. 1과 2에 각각 나타냈다. Fig. 1에서 삼각형은 본 실험을 통해 측정된 화염 속도이고, 점과 선으로 나타낸 것은 자유롭게 전파하는 CH₄/O₂/N₂ 예혼합 화염에 대해 수치해석[4,5]으로 계산한 화염 속도를 나타낸다. 산소부화율 0.21과 0.35인 화염의 경우 실험과 수치해석에서 얻어진 화염 속

도는 매우 잘 일치한다. 그러나 산소부화율이 0.21과 0.35 사이에 존재하는 화염인 경우 실험에서 측정된 화염 속도는 수치해석에서 계산한 화염 속도 보다 낮은 값을 갖고, 산소부화율 0.3 근처에서 약 10 cm/s의 화염 속도 차이를 나타낸다. 실험과 계산 결과 사이에 이러한 차이의 원인은 불분명하다. 원인 중 하나는 실험에 의한 에러가 존재하거나, 또 다른 하나는 계산에 사용한 반응 메커니즘에 있어서 에러가 존재할 가능성이 있다. 그렇지만 본 실험에서 산소부화율이 제일 높은 화염($\Omega=0.35$)과 제일 낮은 화염($\Omega=0.21$)에 대하여 실험과 계산에서 얻어진 화염 속도는 정확하게 일치한다. 실험에서 산소부화율이 0.21에서 0.35로 증가함에 따라 당량비 0.55인 화염의 화염속도는 각각 7 cm/s에서 49 cm/s로 증가한다.

당량비 0.6인 화염에서 산소부화율 변화에 대한 화염 속도를 Fig. 2에 나타냈다. 실험에서 얻어진 화염 속도는 계산 결과보다 약간 낮은 값을 나타내지만, 측정된 산소부화율 전 범위($\Omega = 0.21 - 0.35$)에서 실험 결과는 수치해석 결과는 잘 일치한다. 당량비 0.55인 화염과 마찬가지로 당량비 0.6인 화염의 화염속도는 산소부화율이 0.21에서 0.35로 증가함에 따라 각각 8 cm/s에서 56 cm/s로 증가한다.

3.2. 화염 온도 결과

고온에서 온도를 측정할 때 열전대 접합부(bead)에서 복사열 손실이 발생하기 때문에 이러한 손실을 고려해야 화염의 정확한 온도를 예상할 수 있다. 다음의

식들[3]을 통해 복사열 손실을 고려하였고, 온도 보정을 수행하였다.

$$T_g = T_t + \Delta T_{rad}$$

$$\Delta T_{rad} = \frac{1.25\epsilon\sigma d^{0.75}}{\lambda Re_d^{0.25}} [T_t^4 - T_0^4]$$

여기서 T_g 는 복사열 손실을 고려한 가스 온도, T_t 는 열전대로 측정된 온도, T_0 는 실내 온도(300K), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ϵ 는 총 방사율($Pt=0.15$), λ 는 전도 열전달 계수, Re_d 는 Reynolds number, 및 d 는 열전대 접합부 직경(0.4 mm)이다.

윗 식은 열전대 접합부에서 대류 열전달과 복사열 손실 사이의 열 평형을 고려하여 구한 것이다. $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 버너 안정화 화염에 대한 수치해석[4,5]을 수행하였고, 그 결과로부터 Reynolds number 및 전도 열전달 계수를 계산하였다. 복사열 손실에 대한 보정 온도는 윗 식을 통해 얻어졌고, 그 결과를 버너 안정화 화염 수치해석에서 요구하는 입력 데이터로 사용하였다.

당량비 0.55에서 4종류의 산소부화율을 갖는 화염들에 대한 온도 분포를 Fig. 3에 나타냈다. 심볼은 열전대를 사용하여 화염으로부터 측정된 온도, 실선은 보정 온도를 사용하여 수치해석에서 얻어진 온도 분포를 나타낸다. 산소부화율 변화에 관계없이 화염 온도는 버너 표면 근처에서 급격한 상승을 갖고, 화염 하류로 갈수록 완만한 상승을 보여준다. 이러한 이유는 평면 화염이 버너 출구 바로 위에서 형성되기 때문이다. 같은 당량비에서 산소부화율의 증가는 산화제에 포함된 질소 성분의 감소를 의미하기 때문에 산소부화율이 높은 화염일수록 측

정 전 구간에서 높은 화염 온도를 갖는다.

보정 온도는 Fig. 3에서 나타난 것처럼 낮은 화염 온도보다 높은 화염 온도에서 더 크게 고려된다. 산소부화율 0.35인 화염의 0.002m 지점에서 복사열 손실을 고려한 온도(2268K)와 복사열 손실을 고려하지 않은 온도(1912K) 차이가 최대로 발생하고, 그 차이는 약 356K이다.

3.3 안정된 화학종 농도 분포

당량비를 0.55로 유지하고, 산소부화율 0.21, 0.25, 0.30 및 0.35를 갖는 4종류의 화염에 대하여 4종의 안정된 화학종의 농도(CH_4 , O_2 , CO , 및 CO_2)를 측정하였고, 산소부화율 0.25와 0.35에 대한 결과를 Figs. 4-5에 나타냈다. 그림에서 심층은 실험을 통해 측정된 결과이고, 실선은 보정 온도에 근거하여 버너 안정화 화염에 대해 수행한 수치해석[4,5] 결과를 나타낸다.

메탄이 거의 완전히 소비되는 지점을 화염 위치로 가정하여 화염 상류와 화염 하류로 구분하였다. 화염에서 실험을 통해 측정된 주요 반응물인 메탄과 산소의 농도는 화염 상류에서는 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하고, 화염 하류에서는 수치해석 결과와 약간 벗어난다.

산소부화율이 0.35인 화염에서 메탄이 거의 완전히 소비되는 지점과 산소 농도가 화염 하류에서 점점 감소하다가 일정한 농도를 갖는 지점은 두 결과가 거의 일치한다. 산소부화율이 0.25에서 0.35로 증가함에 따라 언급한 지점의 위치는 버너 출구로 이동한다. 따라서 산소부화율이 높은 화염일수록 버너 출구에 가까운 곳에 화염이 형성됨을 알 수 있으며, 이

것은 온도 분포(Fig. 3 참조)에서도 잘 나타나있다.

실험을 통해 측정된 주요 생성물인 CO_2 과 CO 의 농도 분포는 수치해석 결과와 정량적 차이를 나타내지만, 이러한 화학종의 농도 분포 경향은 두 결과(실험과 수치해석)가 비슷함을 보여준다. 특히 산소부화율이 0.35인 화염에서 이러한 화학종의 농도 분포 경향은 실험 결과와 매우 잘 일치한다. 화염 상류에서 CO_2 의 농도가 높게 나타나고, 또한 화염 하류에서 CO 의 농도가 높게 나타나는 이유는 좀 더 조사가 필요하다. 산소부화율 증가는 화염의 위치를 화염 상류로 이동시키기 때문에 CO 의 최대 농도값 위치도 화염 상류로 이동되고, 또한 이 값의 증가를 가져온다.

4. 결론

평면 화염 버너를 사용하여 당량비 0.55인 조건에서 서로 다른 산소부화율을 갖는 4종류의 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 에혼합 화염($\Omega=0.21, 0.25, 0.30$ 및 0.35)을 형성하였고, 각 화염들에 대한 화염 속도, 화염 온도, 안정된 화학종(CH_4 , O_2 , CO , 및 CO_2)의 농도를 측정하여 산소부화율 변화에 대한 화염의 구조 변화를 조사하였다. 추가적으로 당량비 0.6인 조건에서 서로 다른 산소부화율을 갖는 4종류의 화염에 대하여 화염 속도만을 측정하였다. 언급한 화염 조건을 갖는 버너 안정화 화염 또는 자유롭게 전파하는 화염에 대한 수치해석을 수행하였고, 그 결과를 실험 결과와 비교하였다.

1. 당량비 0.55와 0.6인 화염에서 산소부화율을 0.21에서 0.35로 증가함에 따

라 화염속도는 증가하고, 실험 결과는 자유롭게 전파하는 화염에 대해 수행한 수치해석 결과와 비교적 잘 일치한다.

2. 대류 열전달과 복사열 손실 사이의 열평형을 고려하여 열전대를 통해 측정된 온도를 보정하였다. 같은 당량비에 산소부화율의 증가는 산화제에 포함된 질소 성분의 감소를 의미하기 때문에 산소부화율이 높은 화염일수록 측정 전 구간에서 높은 화염 온도를 갖는다.
3. 산소부화율이 0.25에서 0.35로 증가함에 따라 메탄이 거의 완전히 소비되는 지점 또는 산소 농도가 화염 하류에서 점점 감소하다가 일정한 농도를 갖는 지점은 화염 상류로 이동한다. 산소부화율이 높은 화염일수록 화염 위치가 버너 출구 가까운 곳으로 이동되어, CO 화학종의 최대 농도값 위치도 화염 상류로 이동한다.

후기

본 연구는 한국가스공사 2000년 대학협력과체의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Baukal, C.E., (1998), "Oxygen-enhanced combustion", CRC.
2. "Oxygen-enhanced Combustion System Developed" in *Metallurgia*, (1998), p. 287.
3. Glassman, I., (1996), *Combustion*, 3rd Ed., Academic.
4. Rogg, B., (1993), "*RUN-1DL: The Cambridge Universal Laminar Flamelet Computer Code*", in: *Reduced Kinetic Mechanism for Applications in Combustion Systems*, Appendix C, N. Peters and B. Rogg (Eds.), Springer-Verlag.
5. Rogg, B., (1994), "*RUN-1DL: The Universal Laminar Flame and Flamelet Computer Code*", User Manual.
6. Kaskan, W.E., (1957), *Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 134.

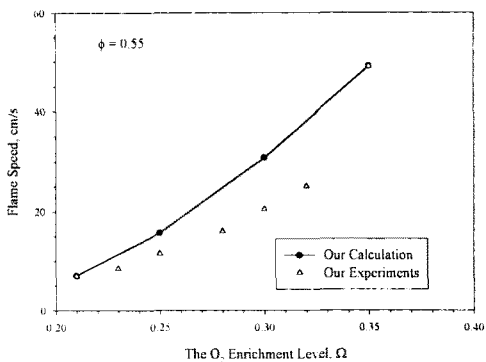


Fig. 1 A comparison of flame speeds for a $\phi = 0.55$ flame.

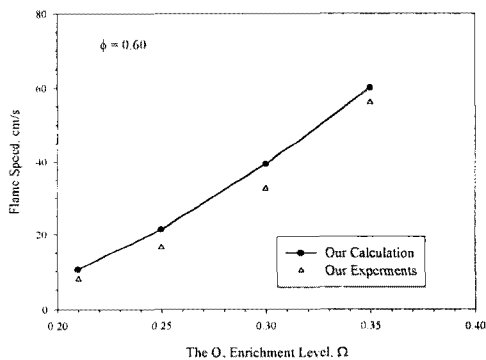


Fig. 2 A comparison of flame speeds with respect for a $\phi = 0.6$ flame.

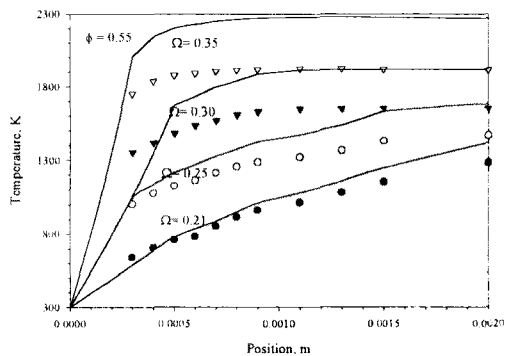


Fig. 3 Spatial temperature profiles for a $\phi = 0.55$ flame with the different O_2 enrichment levels.

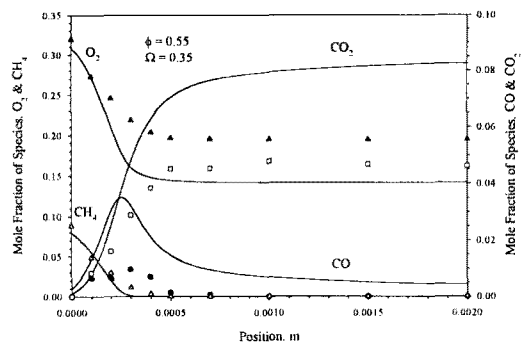


Fig. 4 Species concentration profiles of some species for a $\phi = 0.55$ flame with the 25% O_2 enrichment level.

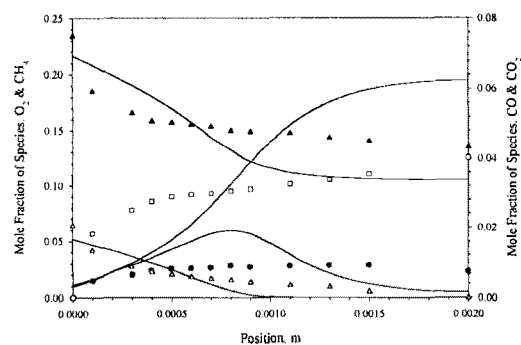


Fig. 5 Species concentration profiles of some species for a $\phi = 0.55$ flame with the 35% O_2 enrichment level.