

이중 예혼합화염에서 CO₂ 희석이 연소불안정에 미치는 영향

이강엽* · 김형모* · 박부민* · 황오식* · 양수석* · 고영성**†

Effect of CO₂ dilution on Combustion Instabilities in dual premixed flame

Kangyeop Lee* · Hyungmo Kim* · Poomin Park* · Osik Hwang* ·

Sooseok Yang* · Youngsung Ko**†

ABSTRACT

The effects of CO₂-dilution on combustion instability were studied in order to apply biogas in a dual lean premixed gas turbine combustor on a real-scale dual lean premixed burner head which is originally developed for Natural Gas fuel. Combustion instability is reduced by CO₂ dilution effect according to the result of dynamic pressure signal and phase-resolved OH* images. The reason for this is that dilution of CO₂ reduces heat release perturbation and increases flame volume due to reduction of the flame speed and expansion of flame surface.

초 록

최근 대두되고 있는 바이오가스(Biogas)를 이중 희박 예혼합 가스터빈 연소기에 적용하기 위한 연구로써, 기존 개발된 실물형 이중 희박 예혼합 연소기 버너헤드에 바이오가스 조성을 모사한 CO₂ 희석 연료를 사용하여, 가스터빈 연소기의 연소불안정에 미치는 영향을 연구하였다. 이중 스월이 적용된 이중화염에서 연료분배율(Pilot fuel mass fraction)에 따라 화염구조가 상이하며 이에 따라 연소장의 온도분포와 연소불안정 특성이 결정된다. 동압신호와 phase-resolved OH* 이미지를 통해 연료분배율 변화와 CO₂ 희석을 증가에 따른 연소불안정 크기 감소와 그 경향을 알 수 있었다. CO₂ 희석에 의해 열방출 섭동의 크기가 감소하고 화염속도가 감소하며 이에 따라 화염면의 팽창 즉, 체적의 증가로 인해 연소불안정이 감소되는 것을 실험을 통해 확인하였다.

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Biogas(바이오가스), Lean Premixed Combustion(희박예혼합연소), Combustion Instability(연소불안정), CH₄(메탄), CO₂(이산화탄소)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 항공추진기관팀

** 충남대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

최근 환경과 에너지문제에 효과적으로 대처하기 위한 발전방법으로 가스터빈이 각광받고 있

으며 그에 따라 가스터빈 연소에 관한 많은 연구들이 보고되고 있다. 특히, 일본의 대지진에 의한 후쿠시마 원전사고와 국내에서 발생한 정전사고는 그간 현대적 기술의 선봉을 자처하던 원자력발전의 위험과 문제점, 그리고 가스터빈 등을 이용한 소규모 발전의 필요성을 잘 보여주고 있다. 또한, 화석연료를 대체할 수 있는 에너지 변환 및 응용에 많은 연구가 진행되고 있으며 최근에는 친환경 바이오가스를 가스터빈에 적용하기 위한 기초연구가 활발히 진행되고 있다.

바이오가스는 유기성 쓰레기로 부터 혐기성 소화(anaerobic digestion)과정에 의해 생성되는 것으로 메탄과 이산화탄소가 주성분으로 약 60:40의 함량(volume)을 가지고 있다. 따라서 바이오가스는 낮은 발열량을 갖고 불활성가스인 이산화탄소가 약 40%이기 때문에 이산화탄소가 연소에 미치는 영향이 매우 크다.

바이오가스를 가스터빈 연소기에 적용하기 위해 연소측면에서 조성변화에 따라 연소특성이 변화하기 때문에 화염안정영역확보와 저NOx를 구현하고 연소불안정을 회피하기 위한 최적 운전 영역을 찾는 것이 필요하다.

최근까지 바이오가스를 적용한 가스터빈 연소기는 MGT같이 소형이고 확산화염방식의 연소기를 대상으로 하고 있다. 그러나, DLN 또는 DLE 같은 희박 예혼합 가스터빈 연소기에 대한 연구는 전무한 상황이다. 또한, 화염의 온도를 저감하기 위한 EGR 또는 CO₂ 희석에 대한 연구가 진행되어 왔으며 특히, CO₂ 희석효과에 대해 Kobayashi[1,2]는 예혼합 형태의 가스터빈 연소기에서 EGR이 연소진동을 억제하는데 효과적이라고 보고하고 있다. 그러나 선행연구들은 연소가스 조성에 대하여 1차원 코드를 이용한 해석에 머무는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구는 연소불안정에 취약한 희박 예혼합 연소기에 바이오가스를 적용하기 위한 연구로써, 실물형 이중 희박 예혼합 연소기에 대하여 바이오가스를 모사한 CO₂ 희석연료의 연소불안정 특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 이중 예혼합 연소기

본 모듈연소기는 반경형 스윌러가 안쪽과 바깥쪽에 이중으로 배치되어 있으며 스윌러를 통해 공기가 공급되고 스윌러 배인에 위치한 오리피스를 통해 연료가 공급된다.(Fig. 1) 여기서 안쪽 스윌러와 바깥쪽 스윌러의 조합을 버너헤드라고 하며 각각 메인버너와 파일럿버너의 역할을 하게 된다. 특히 메인버너와 파일럿버너에 공급되는 연료비는 아래와 같은 연료분배율로 정의되며 본 연소기의 연소특성을 결정짓는 주요 인자이다.

$$\text{Pilot Fuel Mass Fraction} = \frac{\text{Pilot fuel flowrate}}{\text{Total fuel flowrate}}$$

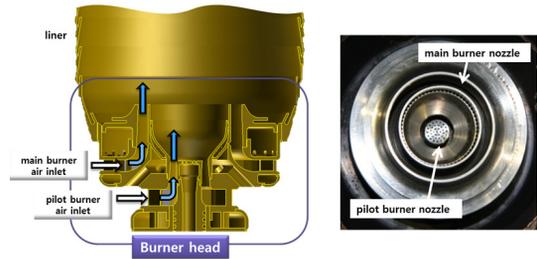


Fig. 1 Burner head schematic and picture

그리고 메인버너와 파일럿버너의 공기비는 버너헤드의 형상에 의해 결정되어, 두 버너의 당량비는 연료분배율에 의해 결정되게 된다. 연료분배율에 따른 저압연소성능(라이너 및 노즐 포함)은 선행연구[3-5]에서 이미 보고되었다.

2.2 실험장치

Figure 2는 버너헤드를 상향식으로 설치한 실험장치 개략도이다. 공기압축기와 전기히터를 통해 고온공기가 공급되며 벤츄리유량계를 통해 공기량을 결정한다. 버너헤드 위에 연소기챔버로서 광학적 접근이 가능하도록 quartz 실린더를 장착하였다. 이 실린더를 통해 화염가시화를 하였으며 특히, OH* chemiluminescence 이미지를 획득하였다.

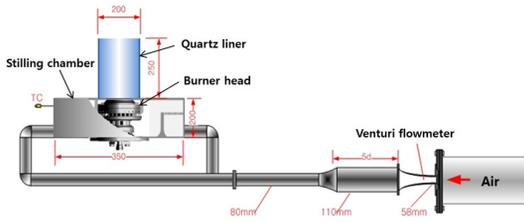


Fig. 2 schematic of burner test configuration

Figure 3은 공기와 연료공급 라인을 도식화한 그림이다. 바이오가스를 모사하기 위해 바이오가스의 주성분인 CH₄와 CO₂를 원하는 혼합비(체적비)로 공급할 수 있도록 MFC와 밸브를 구성하였다. 특히, CO₂는 보배를 통해 공급하게 되는데 특정 연료분배율과 CO₂ 희석률(체적비)에 맞춰 메인버너와 파일럿버너의 공급량을 정확히 컨트롤할 수 있도록 하였다.

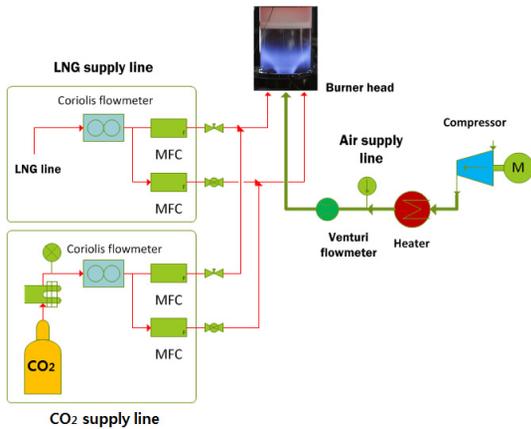


Fig. 3 Schematic diagram of test apparatus

2.3 실험방법

실제 가스터빈 연소기의 적용성을 위해 발열량을 고정(CH₄ 유량 고정)하였으며 CO₂ 희석률(volume, %)을 전체유량에 대해 환산하여 공급하였다. 결국, CO₂ 희석률이 증가하면 전체연료 유량(CH₄+CO₂)이 증가하게 된다.

본 연소기의 주요 인자인 연료분배율에 따라 CO₂ 희석률을 0~40%까지 변화시키며 실험하였다. 실험조건을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Test conditions

Test Parameters	Test Conditions
Volume flow rate[m ³ /s]	0.162
Overall equivalence ratio (CH ₄ 기준)	0.58 (CH ₄ 2.55g/s)
Pilot fuel mass fraction (PF)	0 ~ 0.5
CO ₂ dilution rate[%]	0 ~ 40
Inlet air temperature[K]	653
Chamber Pressure	Ambient

연소불안정 현상이 발생하는 조건에서 CO₂ 희석률(volume, %)을 증가시키며 동압 및 phase-resolved OH* 이미지를 측정하였다. 동압센서는 Kulite의 XCE-062 모델을 사용하였으며 측정범위는 1bar, 샘플링은 5,000~10,000Hz로 획득하였다. 또한, 이 동압신호를 트리거로 하여 ICCD로 한주기 동안 308nm 필터를 통과한 OH* 라디칼 자발광을 관찰하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 화염구조 변화와 연소불안정

Figure 4는 연료분배율이 0.1일 때 연소불안정이 발생하는 화염이 CO₂ 희석률을 증가시켜 40%에 이르자 연소불안정이 감소되어 안정한 화염이 된 모습을 촬영한 직접사진이다.

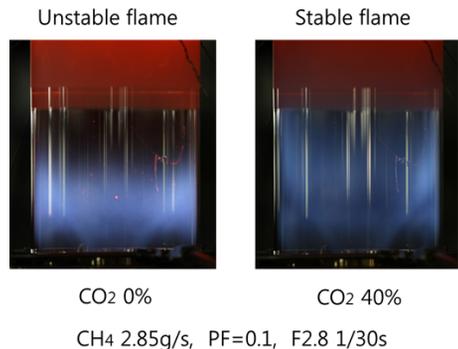


Fig. 4 Photographic images of unstable (non-dilution) and stable(CO₂ dilution) flames

CO₂가 희석되었을 때 화염의 분포가 챔버 전

영역으로 확장되고 화염의 강도가 감소되는 것을 관찰할 수 있다.

Figure 5는 연소불안정이 발생하는 조건에서 연료분배율과 CO₂ 희석률 변화에 대한 OH* chemiluminescence 평균 이미지를 나열한 것이다. 연료분배율에 따라 화염구조는 상이하며 각각의 연료분배율에서 CO₂를 희석하였을 때 화염의 기본구조는 변화 없으나, 화염강도 즉, 열방출(heat release)이 감소하여 연소불안정을 감소시키는 것을 관찰할 수 있다. 특히, CO₂ 희석률이 증가하면서 연료분배율에 따라 희석되어 감쇄되는 정도가 다른 것은 연료분배율에 따라 화염구조가 다르고, 이에 따라 연료가 희석되기 이전의 연소불안정 강도가 다르기 때문이다. 즉 0.1에서 연소불안정 강도가 가장 작았기 때문에 작은 CO₂ 희석에도 연소불안정이 빨리 감쇄되는 것이다.

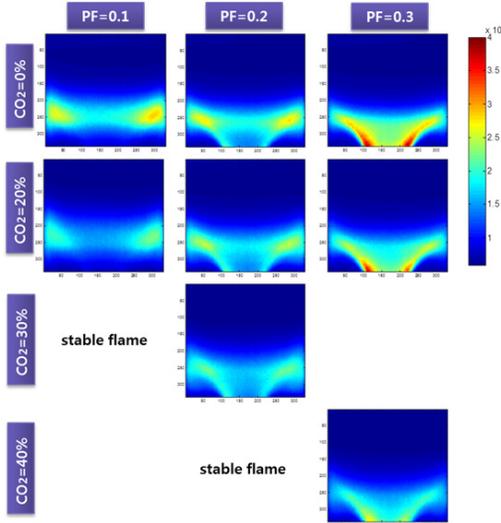


Fig. 5 Average OH* images of unstable flames with CO₂ dilution on the pilot fuel mass fraction 0.1, 0.2, 0.3

3.2 연소불안정 강도 및 주파수 변화

본 모듈연소기는 한쪽이 열린 튜브에 대한 음향학적 모드와 주파수를 가지게 되며 결국 형상과 음속(온도)에 의해 주파수가 결정된다. 연소기 내 가스온도가 1900K라

고 가정했을 때 주파수는 382Hz이다.

그러나 본 연소기의 경우, 이중 화염이 존재하고 연료 분배율에 따라 이중 화염의 구조와 연소기 내부 온도분포가 다르다. 또한, 희석률 증가에 따른 희석효과도 상이하어 온도감소 및 연소불안정 강도변화도 상이하게 나타난다.

Figure 6은 연료분배율 0.2에서 CO₂ 희석률 증가에 따른 주파수 스펙트럼 변화를 보여주고 있으며 CO₂ 희석 조건 모두 4L 모드 이상으로 뚜렷한 하모니를 나타낸다. 온도분포에 의해 연소불안정 발생 주파수가 결정되기 때문에 연료분배율과 CO₂희석에 따른 해당 주파수와 연소불안정 강도의 변화는 Fig. 7에 나타나 있다. 희석률 증가에 따라 온도감소 즉, 주파수가 감소하고 열방출의 감소로 연소불안정 크기도 감소하게 된다. 연료분배율 0.1

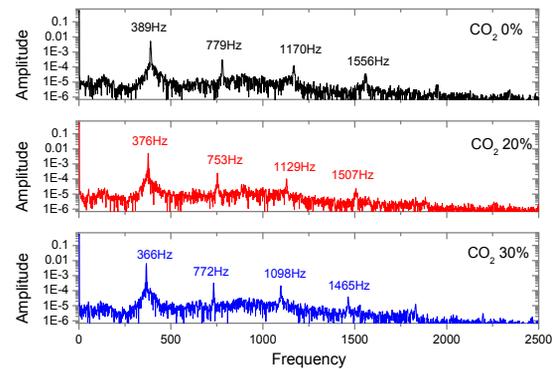


Fig. 6 Frequency spectrum with CO₂ dilution rate(PF=0.2)

일 때 희석률 30%에서 연소불안정이 감쇄되어 안정한 화염이 되었으며, 연료분배율 0.2에서는 희석률 40%에서 연소불안정이 감쇄되어 발생하지 않았다. 연료분배율 0.3에서는 희석률 40%에서도 연소불안정이 발생하였다.

3.3 CO₂ 희석률과 열방출율

2차원 자발광 이미지에 나타나는 자발광 강도는 2차원 열방출을 나타낸다.[6] Phase-synchronized OH* 이미지를 연료분배율 0.3, CO₂ 희석률 20%일 때 획득하여 한 주기기 동안의 열방출율의 변화를 관찰하였다. 이러한 열방출율의 섭동을 line-of-sight로 표현하면 Fig. 8과 같은 화염구조 변화를 관찰할 수 있다.

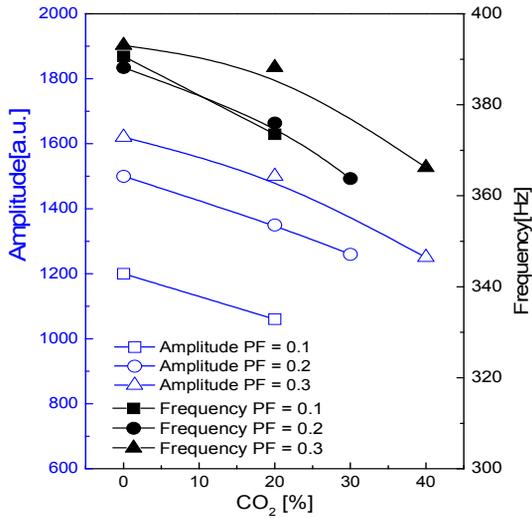


Fig. 7 Frequency and amplitude distribution with CO₂ dilution rate on the PF=0.1, 0.2 and 0.3(CH₄=2.85g/s)

Figure 8은 시간(phase)에 따른 열방출의 변화를 보여 주고 있으며 희석률 증가에 따라 현격히 열방출이 감소하고 있다. 특히, 화염의 최대강도가 감소하나 열방출 영역이 상하로 넓게 확장되는 것을 알 수 있다. 즉 화염의 체적이 증가하는 것이다. 희석률이 증가할수록 화염의 강도가 약해지면서 화염높이가 커지는 것이다. 즉, 연소 불안정 강도가 작아지고 있다. 이러한 연소불안정에 관한 CO₂ 희석 효과는 CO₂의 열용량(heat capacity)에 의한 효과와 복사열전달 효과로 나눌 수 있고, 선행연구에서 1차원 코드로 CO₂ 희석효과를 해석하여 증류화염속도, 단열화염온도 감소와 복사열전달의 중요성을 보고되고 있다.[7,8] 특히, Kobayashi [1,2]는 CO₂ 희석 영향으로 난류화염의 체적이 증가한다고 보고하고 있는데 난류화염의 체적증가와 국부적인 연소강도 감소, 느린 열방출로 인해 연소진동을 억제할 수 있다고 하였다. 따라서 본 논문에서의 이러한 열방출 감소와 화염 팽창, 그리고 연소불안정의 감쇄는 선행연구의 결과를 실제 예혼합연소에서 잘 보여주고 있다.

4. 결 론

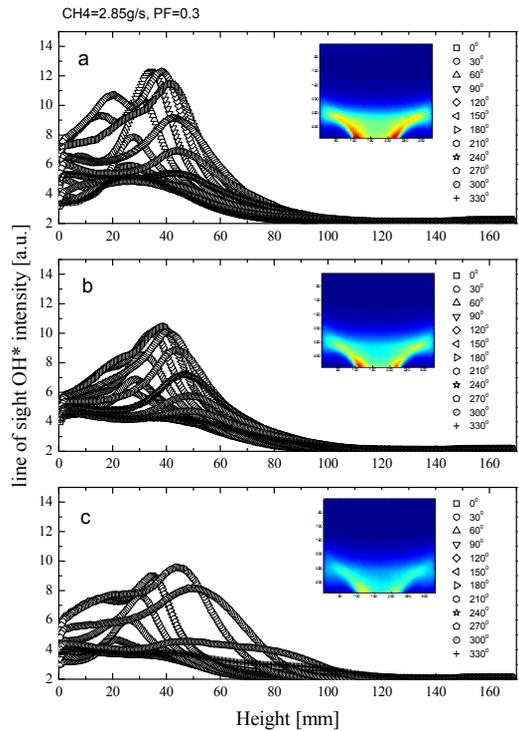


Fig. 8 Line-of-sight of OH* intensity with combustor chamber height from phase-resolved OH* images(PF=0.3, a: CO₂ 0%, b: CO₂ 20%, c: CO₂ 40%)

본 연구는 연소불안정에 취약한 희박 예혼합 연소기에 바이오가스를 적용하기 위한 연구로써, 실물형 이중 희박 예혼합 연소기에 대하여 바이오가스를 모사한 CO₂ 희석연료의 연소불안정 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CO₂가 희석되었을 때 화염의 분포가 챔버 전 영역으로 확장되고 화염의 강도가 감소되는 것을 관찰할 수 있었다. 특히, 연료분배율에 따라 화염구조가 상이하며 각각의 연료분배율에서 CO₂를 희석하였을 때 화염의 기본구조는 변화 없으나, 화염강도 즉, 열방출(heat release)이 감소되며 연소불안정 강도가 감소되는 것을 알 수 있었다.
- 2) 또한, 연료분배율에 따라 화염구조 즉, 열방출율의 분포 및 크기가 상이하며, 희석 정도에 따라 연소불안정 감쇄 크기가 상이함을 알 수

있었다.

- 3) 결론적, CO₂ 희석률 증가에 따른 연소불안정 감소를 확인하였고, 이것은 희석에 의해 열방출 섭동 크기가 감소하고 화염속도 감소에 따른 화염면의 팽창 즉, 체적의 증가로 인해 연소불안정이 감소되는 것이다.

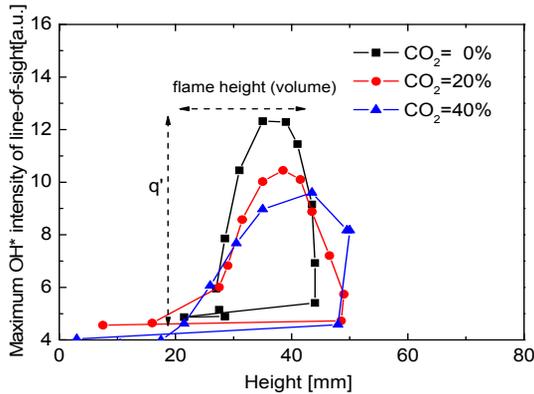


Fig. 10 Variation in OH* intensity and flame height to CO₂ dilution rate (Pilot fuel mass fraction=0.3)

참 고 문 헌

1. Hideaki Kobayashi, Hirokazu Hagiwara, Hdeaki Kaneko, Yasuhiro Ogami, "Effects of CO₂ dilution on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature," Proceedings of the Combustion Institute 31, 2007
2. S. Kato, T. Fujimori, A.P. Dowling, H. Kobayashi, "Effect of heat release distribution on combustion oscillation", Proceedings of the Combustion Institute 30, 2005
3. 박부민 외, "가스터빈 연소기 성능시험", 제 35회 KOSCO Symposium, 2007
4. 김형모 외, "5MW급 가스터빈 엔진용 저공해 연소기 개발시험기술", 한국항공우주학회 추계학술대회, 2007
5. 김호근 외, "5MW급 바이오 가스터빈 연소

- 기 연소 특성", 제42회 KOSCO Symposium, 2011
6. J. G. Lee and D. A. Santavicca, "Experimental Diagnostics for the Study of Combustion Instabilities in Lean Premixed Combustors," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003
7. Jeong Park et. al. "Flame characteristics in H₂/CO synthetic gas diffusion flames diluted with CO₂: Effects of radiative heat loss and mixture composition," international journal of hydrogen energy 33, 2008
8. Halter, et al., "Effect of Dilution by Nitrogen and/or Carbon Dioxide on Methane and Iso-Octane Air Flames," Combust. Sci. and Tech., 181: 813 - 827, 2009
9. 김형모, "이중 희박 예혼합 가스터빈 연소기의 NO_x 발생 특성 연구," 충남대학교 대학원, 2011
10. S.S. Shy, S.I. Yang, W.J. Lin, R.C. Su, "Turbulent burning velocities of premixed CH₄/diluent/air flames in intense isotropic turbulence with consideration of radiation losses," Combustion and Flame 143, 2005
11. JIONGMING RUAN, HIDEAKI KOBAYASHI and TAKASHI NIIOKA, "Combined Effects of Nongray Radiation and Pressure on Premixed CH₄/O₂/CO₂ Flames," COMBUSTION AND FLAME 124, 2001
12. T. Lieuwen, "Modeling Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions: A Review," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003
13. Seonghyeon Seo, "Parametric study of lean premixed combustion instability in a pressurized model gas turbine combustor," The Pennsylvania State University, 1999