SNG 연료의 화염구조에 관한 연구
Part I : 화염후류간 상호작용

심근선* · 이기만**†

A Study on Flame Structure of SNG Fuel
Part I : Interaction between Flames Downstream

Keunseon Sim*, Keeman Lee**†

ABSTRACT

A combined experimental and numerical study has been conducted to investigate the downstream interaction between simulated SNG-air premixed flames in fuel composition of 91% CH_4 + 6% C_3H_8 + 3% H_2. In this study, the effects of fuel molar concentration(lean-rich) and strain rate(a_g) were major parameters. A main focus is to investigate flames behavior and chemical interaction at flames downstream. The numerical results were calculated by OPPDIF application. The reaction mechanism adopted was USC-II model including C3 reaction.

Key Words : Synthetic Natural Gas(SNG), Downstream interaction, Strain rate, Mole fraction, Flame structure

합성천연가스(Synthetic Natural Gas, SNG)는 미래 LNG의 대체 연료로서 CH_4를 다량 함유한다는 관점에서는 기존의 LNG 연료와 동일하나 같이 함유된 C_3H_8, H_2에 의해 화염의 거동이나 연소 반응이 상이할 것으로 판단된다. 이에 따라 SNG연료의 상용화를 위한 기존의 발전용 가스터빈 기기 등에 관한 호환성 연구는 필수적이다.

Choi 등은[1] 이중선회 가스터빈 단일 모델 연소기에서의 화염의 안정성에 관한 연구를 통하여 SNG연료의 조성비 변화에 따른 가연한계의 확장성에 관하여 보고한바 있으며, Kim등은[2] SNG연료의 물리적 특성을 파악하고자 층류연소속도 측정에 관한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

이러한 관점에서 SNG를 이용한 가스터빈연소기에서 발생하는 화염간의 상호작용에 관한 연구는 중요한 요소이지만 거의 수행되지 않고 있다. 본 연구에서는 이러한 예혼합된 화염 사이에서 발생하는 화염간의 상호작용에 관해 파악하기 위하여 모사 SNG 예혼합 화염사이에서 발생하는 후류상호작용에 대해 연구하고자 한다.

* 순천대학교 대학원 우주항공공학과
** 순천대학교 기계·우주항공공학부
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : (061)750-3828 FAX : (061)750-3820

SNG 예혼합화염 사이의 후류상호작용은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 대향류 유동의 구조에서 연구된다. 화염의 거동은 실험을 통하여 확인하며, 내부의 화학 반응은 수치해석을 통하여 확인된다.

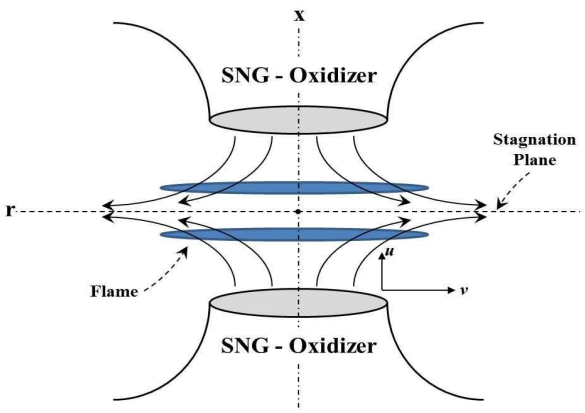

Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

Table 1 Experimental and Numerical conditions

Fuel	CH_4, C_3H_8, H_2 (99.999%)
Oxidizer	Air
Composition ratio	CH_4 : C_3H_8 : H_2 91 : 6 : 3
Diameter of nozzle(d)	14mm
Distance between nozzle(L)	15mm

변수로 사용된 기호 Ω는 혼합물중 CH_4의 몰분율(mole fraction)를 나타내며, 첨자 U, L은 각각 상부(upper)와 하부(lower) 노즐을 나타내며, 화염의 전체 신장률(global strain rate, a_g)은 상□하 노즐의 출구 속도(V_U, V_L)와 버너간의 거리(L)에 의해 식(1)으로 정의된다.

$$a_g = \frac{V_U + V_L}{2L} \quad (1)$$

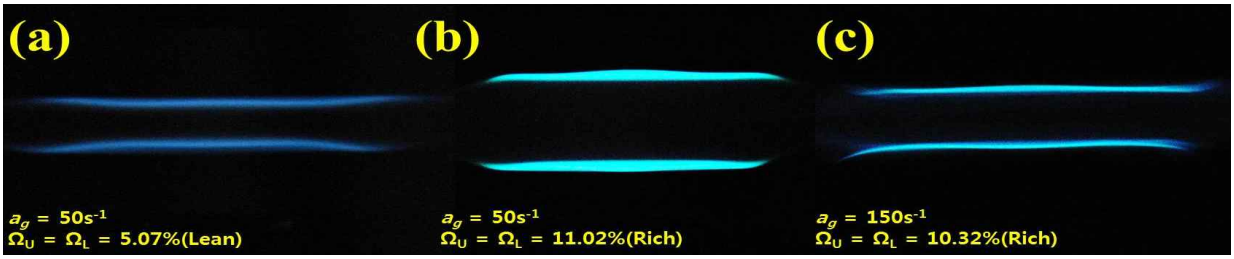

Fig. 3 Flame behavior with condition at counterflow

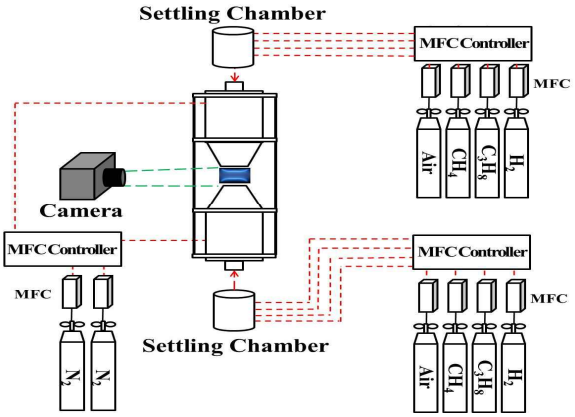

Fig. 2 Experimental set-up

본 연구에 사용된 실험 및 계산조건은 Table 1에 요약하여 나타내었다. 실험장치의 구성은 Fig. 2에 나타낸바와 같이 대향류 유동장을 모사하기 위해 상부 및 하부의 버너가 대칭되게 설치되며, 예혼합된 SNG-공기 혼합물은 버너의 상·하 내부 노즐에서 분사되고, 외부 교란의 영향을 차단하기 위해 상·하 외부 노즐에서는 N_2를 분사하여 차단유동(curtain flow)을 형성하였다.

수치해석은 Fig. 1에 나타낸 대향류 유동장의정체점에서 유효 상사성(similarity variable)을 갖고, 1차원으로 표현되는 상미분 지배 방정식은 Kee 등[3]에 의해 개발되었고 Lutz 등[4]에 의해 보완된 OPPDIF-code를 사용하였다. 상세 화학반응기구로는 SNG 예혼합 화염의 실험 및 계산 연구[2]에 사용된 연소 모델 중 C3 화학반응을 포함하는 USC-Ⅱ 모델[5]을 사용하였다.

SNG 예혼합 화염의 후류상호작용에 따른 화염의 거동을 알아보기 위해 우선적으로 대칭되는 유동의 조건(V_U=V_L)에서 혼합물의 연료 몰농도 또한 대칭(Ω_U=Ω_L) 되게 하여 연구를 진행하였다.

실험 및 수치해석은 동일한 a_g에서 희박(lean) 영역과 과농(rich)영역, 과농한 영역에서 a_g에 따른 화염의 거동을 취득하여 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 a_g=50 s^{-1}에서 희박조건(a)의 화염이 과농한 조건(b)으로 바뀌면서 화염사이의 거리가 멀어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 과농한 조건이 희박 조건에 비해 높은 층류연소속도(S_L)를 갖기 때문에 나타나는 현상으로 보인다[2]. 과농한 조건에서 a_g가 증가 하면서 화염사이의 거리가 좁아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상들 수치해석을 통해 얻은 데이터를 통하여 다시 한 번 확인할 수 있다.

상호 작용하는 대칭의 희박 예혼합 화염의 조건에서 a_g=50 s^{-1}일 때 주요한 화염의 구조를 나타낸 Fig. 4를 보면 두 개의 뚜렷한 피크점을 갖는 OH, O, H 라디칼과 정체점(stagnation point)

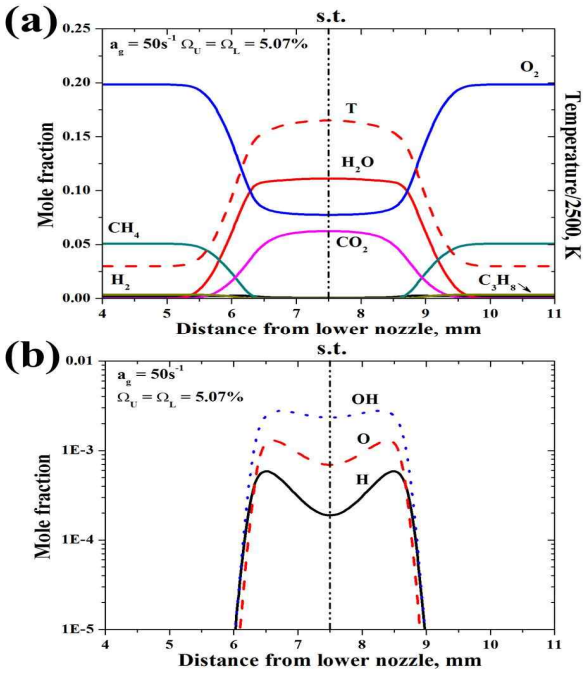

Fig. 4 Flame structure on the symmetric lean condition(Ω_U = Ω_L = 5.07%) at a_g = 50 s^{-1}

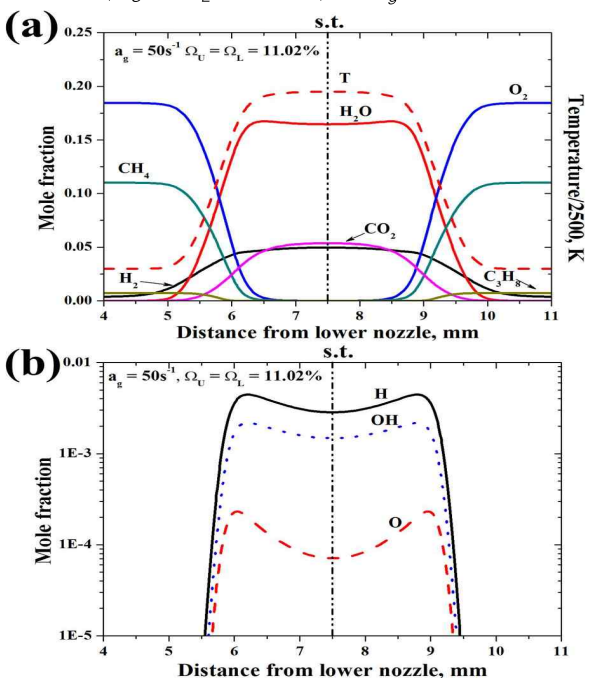

Fig. 5 Flame structure on the symmetric rich condition(Ω_U = Ω_L = 11.02%) at a_g = 50 s^{-1}

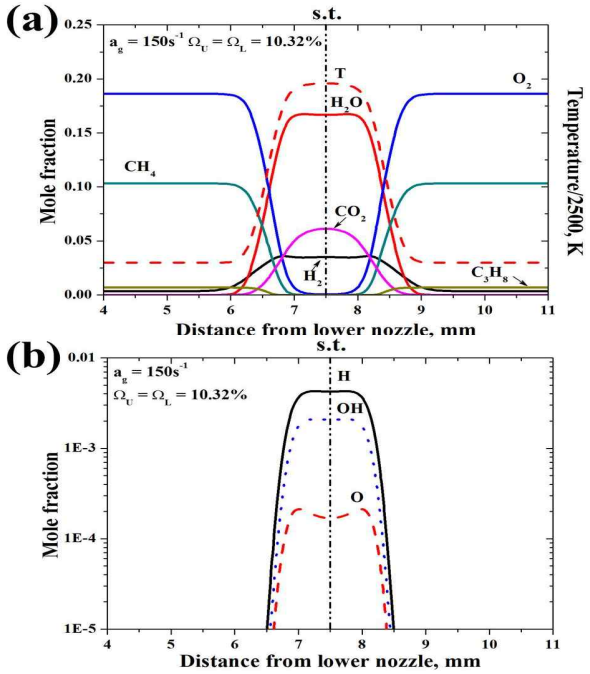

Fig. 6 Flame structure on the symmetric lean condition(Ω_U = Ω_L = 10.32%) at a_g = 150 s^{-1}

부근에서 최대점을 나타내는 온도, H_2O, CO_2, 희박한 조건으로 화염대에서 완전 반응하지 못한 O_2의 농도 프로파일을 볼 수 있다.

과농한 화염의 구조를 나타낸 Fig. 5를 보면 희박 조건에 비해 *OH, O, H* 라디칼이 증가하고 노즐 쪽으로 이동하는 현상을 볼 수 있으며, *H*가 희박영역과는 다르게 *O, OH*를 역전하는 현상이 나타난다. 화염의 온도는 평지구간이 존재 하며, CO_2는 정체점에서 최대점이 나타내고, H_2O의 경우 두 개의 피크점이 나타나며 정체점 부근에서 소비되는 경향을 나타냈다. H_2의 경우 화염대를 통과한 이후 지속적으로 증가 되는 경향을 나타냈다.

과농한 조건에서 a_g를 150 s^{-1}까지 증가시킨 경우 Fig .3-(c)의 이미지와 같이 화염사이의 간격이 좁아지며 그에 따른 화염의 구조는 Fig. 6에 나타내었다. *OH, O, H*라디칼의 Fig. 5와 동일하게 두 번의 피크를 나타내지만, *H, OH*의 경우 그 구분이 불분명 해지는 것을 볼 수 있다. 온도, H_2O, CO_2 모두 간격은 좁아지지만 Fig .5와 동일한 경향을 나타내지만, H_2의 경우 화염대가 존재하는 정체점 부근에서 소비되는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 대칭조건에서의 후류상호작용에 대해 조사하였으며, 차후 지속된 연구를 통하여 a_g에 따른 SNG연료의 소염한계(extinction limit) 및 루이스 수(Lewis number, *Le*)에 따른 과농(희박)-과농(희박) 연소반응에 관해 규명 하고자 한다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(과제번호 : 2013-2010-101860)

참고 문헌

[1] I. C. Choi, K. M Lee, "An Experimental Study on Combustion Instability in Model Gas Turbine Combustor using Simulated SNG Fuel", J. Korean Soc. Combust. Vol. 20(1), 2015, pp. 32-42.
[2] D. C. Kim, K. S. Sim, K. M. Lee, "A Comparison Study on Laminar Burning Velocity Measurement Method of SNG Fuel" KOSCO Symposium, 2015, 5, pp. 83-86.
[3] Kee R.J., Miller J.A., Evans G.H., Dixon-Lewis G., "A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flame". Proc Combust Inst, Vol. 22, 1988, pp. 1479-94.
[4] Lutz A.E., Kee R.J., Grcar J.F., Rupley F.M., "A fortran program for computing opposed-flow diffusion flames", Sandia National Laboratories Report. SAND 96-8243; 1997.
[5] Hai Wang, Xiaoqing You, Ameya V. Joshi, Scott G. Davis, Alexander Laskin, Fokion Egolfopoulos & Chung K. Law, USC Mech Version II. High-Temperature Combustion Reaction Model of H2/CO/C1-C4 Compounds. http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm, May 2007.