

CO₂ 저감을 위한 순산소 연소시 LNG 연소특성 해석

조진영, 김혜숙, 신미수, 최준호, 장동순*
 충남대학교 환경공학과
 (p_dsjang@cnu.ac.kr*)

**Combustion Characteristic Study of LNG fuel
 in the Oxygen Enriched Environment for the reduction of CO₂**

Jin-young Cho, Hey-suk Kim, Mi-soo Shin, Jun-ho Choi, Dong-soon Jang*
 Department of Environmental Engineering, Chungnam National University
 (p_dsjang@cnu.ac.kr*)

1. 서론

지구 온난화의 표본인 알래스카는 과거 빙하의 무너지는 모습을 보기 위해선 세네시간씩 기다려야 했지만 최근 들어 빙하 조각이 무너지는 횟수는 평균 10분에 한번으로 사정이 크게 달라지고 있다. 빙하가 녹아내림으로써 알래스카 주변의 온도가 높아지고, 주변 생태계의 변화를 초래하고 있다. 이와 같은 지구온난화의 문제는 화석연료 사용에 따른 온난화와 직접적으로 결부되어 있어 에너지 분야의 산업계와 연구기관의 주된 관심사는 청정 에너지 생산 및 에너지 효율의 제고를 위한 다양한 연구와 구체적인 기술개발로 집약되고 있다.

현재 에너지 산업에 광범위하게 사용하고 있는 석탄은 가장 풍부한 자원이며 가까운 장래에도 여전히 비중이 높은 에너지원임에 분명하나 석탄연소과정에서는 지구온난화의 중요한 역할을 하는 이산화탄소가 연간 19.6Gt(ETP 2050, 2006년 IEA)이 배출된다. 이러한 이산화탄소의 양은 인위적으로 배출된 전체 이산화탄소량의 80%를 차지하는 양으로서 석탄연료의 지속적인 사용에 커다란 장애요인으로 대두되고 있다. 이러한 상황에서 비추어 볼 때 화석연료를 지속적인 에너지원으로 활용되기 위해서는 화석연료의 연소효율 향상을 통한 에너지 효율의 제고와 함께 이산화탄소 배출 저감을 위한 활발한 연구가 수행되어야 한다.

순산소 연소는 산화제로서 공기 대신 산소를 사용하여 공기 중 79%를 차지하는 질소 가스 존재에 의해 발생하는 thermal NO_x의 양을 원천 제어하거나 최소화 할 수 있다. 또한 연료와 산화제의 혼합촉진과 질소가스에 의한 현열 손실의 배제에 의한 화염의 온도의 상승에 따른 연소효율이 향상된다. 순산소 연소의 경우 배기가스의 주요성분이 이산화탄소와 물이므로 이산화탄소 저감을 위한 CO₂ 가스의 회수비용을 줄일 수 있다.

그러나 산소를 산화제로 사용할 경우 공기량의 감소에 따른 로내의 전반적인 유동장 패턴의 변화, 화염온도의 상승에 따른 로내 벽의 열손상과 공기의 유입 및 연료 내 N₂가 있는 경우 고온연소에 의한 NO_x 발생의 우려가 있다. 순산소 산화제 사용에 따른 위와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 우선적으로 로내의 전반적인 유동패턴과 운전변수 파악, 그리고 배기가스 중의 CO₂ 재순환에 따른 화염의 온도변화와 유동패턴을 파악되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 순산소 연소에 따른 LNG의 화염특성과 배기가스 재순환에 따른 연소특성을 수치해석 하였다.

2. 수치해석 방법

기상의 난류반응에 질량, 운동량, 에너지, 난류 및 화학종 농도 등에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \phi}{\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} + OER \frac{\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \phi}{\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} = \frac{\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \phi}{\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} (\Gamma_\phi \frac{\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \phi}{\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}) + \frac{1}{r} \frac{\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \phi}{\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} (\Gamma_\phi \frac{\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \phi}{\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}) + S_\phi$$

여기서 ϕ 는 단위질량당 물리량으로 표현되는 일반중속변수로 속도성분(u,v,w), 압력(p), 엔탈피(h), 화학종의 질량분율($m_{C,H}, m_{O_2}, m_{CO}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{NO}$) 및 난류에너지와 이의 소멸에너지(k, ϵ)이다.

위 식과 같이 표현된 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분법과 대류항의 선형화를 위해 power law scheme을 사용하여 이산화방정식을 유도하였다. 각 검사체적에 대한 이산화방정식의 형식은 선형이나 내재된 비선형특성으로 인해 line by line TDMA에 의해 반복 계산하여 해를 구하였으며 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 산소부화율에 따른 화염특성

산화제 조성은 기준 연료량에 있어 이론 공기량의 1.3배인 경우 포함된 산소량을 기준으로 산소부화율에 대한 수치해석을 수행하였다. 여기서 산소부화율은(Oxygen-Enriched Ratios, OER)은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{산소부화율(\%)} = \frac{O_2 \text{유량}}{\text{공기중의 } O_2 \text{유량} + O_2 \text{유량}} \times 100$$

Fig. 1에서 산화제로 순산소 100%를 사용한 경우 절대유량의 감소로 인해 화염의 길이가 길어지는 것을 볼 수 있으며 버너 선단에서 약간 떨어진 곳에서 최고온도가 나타났다. 이는 산화제 유량 감소로 인한 산화제와 연료의 혼합지연으로 판단되며 로내 온도가 전반적으로 증가된 것을 알 수 있다. 특히 로내 최고 화염온도는 공기를 사용한 1500K 으로부터, 50% 순산소에서 2100K 그리고 100% 순산소에서 3500K으로 급격히 증가한 것을 볼 수 있다. 결국 공기와 순산소 혼합비율이 적합하지 않을 경우 오히려 상당량의 thermal NOx 발생이 우려될 것으로 판단되어진다.

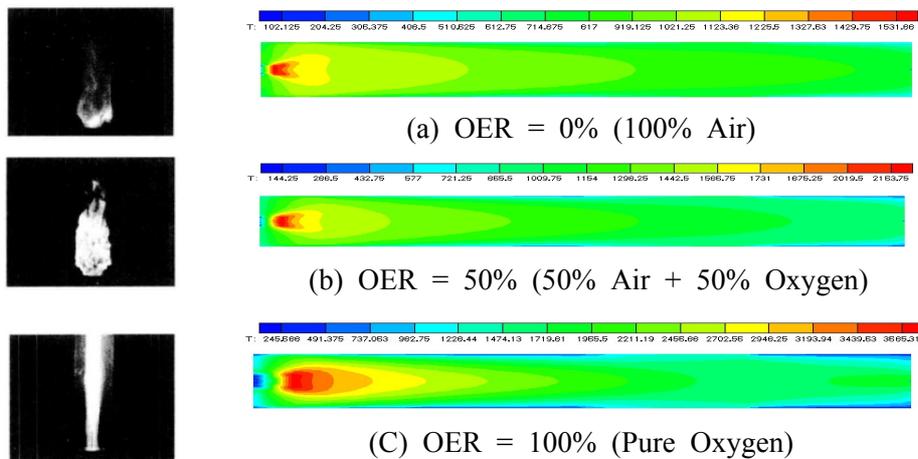


Fig. 1 Flame temperature of LNG fuel in an oxygen enriched environment.

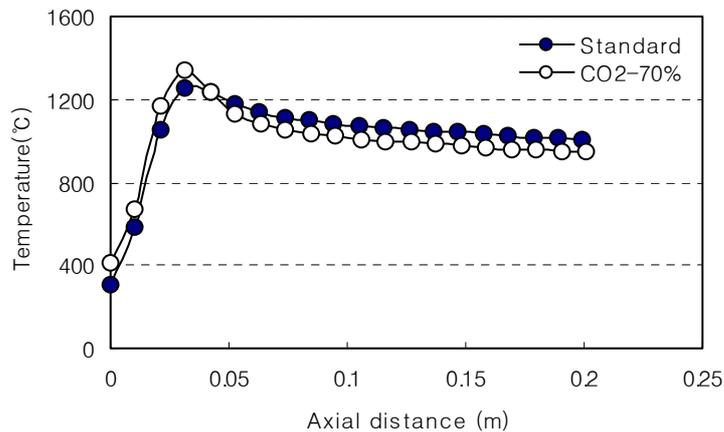
3.2 CO₂ 재순환 비율

CO₂ 재순환은 순산소 연소에 따른 연소실 벽의 열손상과 산화제 유속저하로 인한 화염의 불안정 현상을 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있으나 CO₂의 높은 비열로 인한 화염의 온도저하가 우려된다.

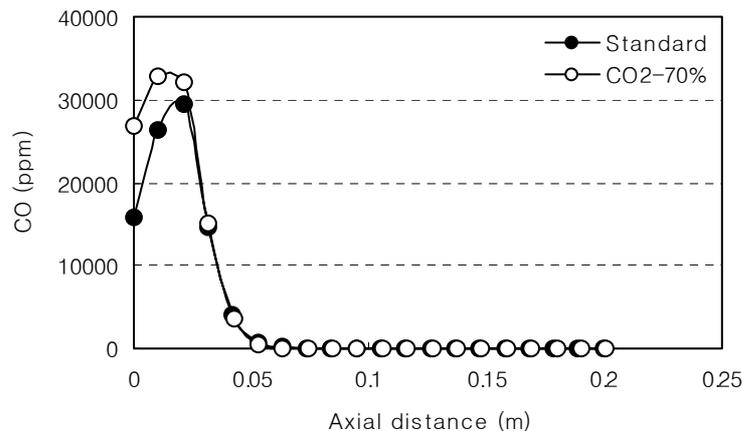
CO₂ 재순환율은 이론 공기량의 1.3배인 경우 포함된 질소량을 기준으로 다음과 같이 정의한다.

$$\text{CO}_2\text{재순환율}(\%) = \frac{\text{첨가한 CO}_2\text{유량}}{\text{기준공기중의 CO}_2\text{유량}} \times 100$$

이와 같은 CO₂ 재순환율은 기준공기에 대한 속도, 질량유량 그리고 운동량을 기준으로 계산할 수 있으나 현재는 기준 공기량에 대한 CO₂ 유량의 부피비(속도비)를 기준으로 설정하여 CO₂ 재순환율 10%~90%에 대한 산화제 유속을 4.25~13.54m/s로 변화하여 로내 연소특성을 계산하였다. 수치해석 결과 LNG-공기 연소와 유사한 화염특성을 나타내는 CO₂ 재순환율은 대략 70%로 Fig. 2에 화염온도와 CO 농도를 표준연소상태인 공기연소와 비교하여 나타내었다. 로내 화염전파속도는 O₂/N₂ 연소조건에 비해 O₂/CO₂ 연소조건에서 약간 높게 나타났으며 이는 CO₂와 N₂의 질량차이로 인한 입구 운동량 크기의 차이로 사료되나 추후 이것에 대한 조직적인 연구가 필요하다.



(a) Temperature



(b) CO concentration

Fig. 2 Combustion characteristics as the CO₂ recirculation in LNG combustor.

4. 결 론

본 연구에서는 산소부화율 증가와 CO₂ 재순환에 따른 LNG 연소특성을 수치해석을 통해 평가하였다. 주요 연구결과를 요약하여 나타내면 다음과 같다. 산소부화율이 증가할수록 로내 화염온도가 급격히 증가하였으며 이에 따른 thermal NO_x의 생성이 우려되었다. 그러나 산화제로 순산소 100%를 사용한 경우 N₂ 배제에 의한 thermal NO_x의 생성을 원천적으로 억제할 수 있었다. 특히 순산소 연소의 경우 절대유량 감소로 인한 산화제와 연료의 혼합지연으로 최고화염 온도가 버너선단에서 떨어진 곳에 위치하고 비교적 길고 좁은 장화염을 형성하였다. 이와 같은 절대유량 감소에 의한 혼합지연현상을 최소화하기 위해 CO₂ 를 재순환 했을 경우 연소실 벽의 열손상과 화염의 불안정 현상을 최소화 할 수 있었으며 CO₂ 재순환율이 70% 일 때 공기연소와 유사한 결과를 보였다. 결국 수치해석기법을 이용한 연소특성 해석은 에너지 이용효율 향상과 순산소 연소시 나타날 수 있는 화석연료의 연소특성 해석에 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Charles, E. B., "Oxygen-enhanced Combustion", Ph.D, CRC Press, 1988
2. Han, J. W. and Lee, C. E., "Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristic in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames", The 3rd Asia-Pacific Conference on combustion, 2001, pp. 607-610.
3. Kim, K. L., Kim, H. J. and Ryu, J. I., "The combustion characteristics of LNG-Oxygen Enriched Combustion in swirl flame", 25th KOSKO Symposium, pp. 41-46
4. 김한석, 김호근, 안국영, 김용모., "산소부화연소에서 CO₂ 첨가에 대한 연소 특성", 대한기계학회 논문집 B권 제 28권 제 1호, pp.9~15, 2004