

O₂/CO₂ 혼합조건에 따른 LNG 연소특성해석

김혜숙 · 신미수 · 장동순[†] · 이대근*

충남대학교 환경공학과 · *한국에너지기술연구원

(2007년 1월 4일 접수, 2007년 5월 24일 채택)

Characteristic Study of LNG Combustion in the mixture of O₂/CO₂

Hey-Suk Kim · Mi-Soo Shin · Dong-Soon Jang[†] · Dae-Geun Lee*

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University · *Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT : The ultimate objective of this study is to develop a reliable oxygen-enriched combustion techniques especially for the case of the flue gas recycling in order to reduce the CO₂ emissions from practical industrial boilers. To this end a systematic numerical investigation has been performed, as a first step, for the resolution of the combusting flame characteristics of lab-scale LNG combustor. One of the important parameters considered in this study is the level of flue gas recycling calculated in oxygen enriched environment. As a summary of flame characteristics, for the condition of 100% pure O₂ as oxidizer without any flue gas recycling, the flame appears as long and thin laminar-like shape with relatively high flame temperature. The feature of high peak of flame temperature is explained by the absence of dilution and heat loss effects due to the presence of N₂ inert gas. The same reasoning is also applicable to the laminarized thin flame one, which is attributed to the decrease of the turbulent mixing. These results are physically acceptable and consistent and further generally in good agreement with experimental results appeared in open literature. As the level of CO₂ recycling increases in the mixture of O₂/CO₂, the peak flame temperature moves near the burner region due to the enhanced turbulent mixing by the increased amount of flow rate of oxidizer stream. However, as might be expected, the flue gas temperature decreases due to presence of CO₂ gas together with the inherent feature of large specific heat of this gas. If the recycling ratio more than 80%, gas temperatures drop so significantly that a steady combustion flame can no longer sustain within the furnace. However, combustion in the condition of 30% O₂/70% CO₂ can produce similar gas temperature profiles to those of conventional combustion in air oxidizer. An indepth analyses have been made for the change of flame characteristics in the aspect of turbulent intensity and heat balance.

Key Words : Oxygen Enriched Combustion, Flue Gas Recycling, Turbulent Mixing, Mixture of O₂/CO₂

요약 : 본 연구의 목적은 기존의 산업용 보일러에서 이산화탄소 배출저감을 위하여 연소가스 재순환에 의한 고온 순산소 연소기술을 개발하는데 있다. 이를 위해 실험실 규모의 LNG 연소기에서 연소 화염특성을 평가하기 위한 조직적인 수치해석 연구가 일차적으로 수행되었다. 특히 본 연구에서 고려한 중요한 변수는 산소부화환경에서 계산된 연소가스의 재순환 정도이다. 배기가스 재순환이 없는 100% 순산소 연소환경에서 화염은 고온의 길고 가는 층류형상의 화염을 보였다. 이는 산화제 중에서 질소성분이 감소함으로써 약화된 난류혼합효과와 N₂ 가스에 의한 현열손실의 감소에 기인하는 것으로 판단하였으며 문헌에 발표된 실험과 일치된 결과를 보였다. O₂/CO₂ 혼합가스에서 CO₂ 가스의 재순환율이 증가될수록 산화제의 유량 증가에 따른 강화된 난류혼합으로 인해 최고 화염온도가 버너 근처로 이동한 반면 전반적인 연소가스 온도는 N₂에 비해 CO₂의 높은 비열로 인해 낮아지는 현상을 보였다. 결국 80% 이상 CO₂ 가스를 재순환한 경우 연소가스의 온도가 급격하게 떨어지는 화염소멸 현상을 보여주었다. 그러나 30% O₂/70% CO₂의 혼합 연소조건에서는 기존의 공기연소와 유사한 가스온도를 나타내었다. 이외에도 공기연소와 동일한 유량조건에서 난류강도와 열수지 측면에서 화염특성 변화를 평가하기 위한 면밀한 연구가 수행되었다.

주제어 : 고온 순산소 연소, 연소가스 재순환, 난류혼합, O₂/CO₂ 혼합가스

1. 서론

작금에 지구촌에 발생하고 있는 온난화에 의한 기상이변은 나라와 지역에 따라 정도와 그 양상에는 차이가 있지만 인류의 직접적인 생존문제로 부각되고 있는 상황이다. 구체적으로 이산화탄소와 같은 온실가스의 증가는 범지구적인 기상이변과 해수면 상승 등 생태계의 재앙을 동반하며 사회 및

경제적인 분야에 막대한 영향을 끼치고 있다.¹⁾ 이에 각국은 92년 브라질 리우환경회의에서 지구온난화에 대처하기 위한 유엔 기후변화 협약을 채택하여 국제적인 공동대응을 시작하였다. 그리고 교토 의정서에서 지구온난화는 단순한 환경문제의 차원을 넘어서 새로운 세계 경제 질서를 개편을 예고하는 문제임을 부각시켰다.

화석연료에 의한 에너지 생산은 전 세계적인 에너지 산업 분야에서 주류를 차지하고 있는 점을 감안할 때 화력발전 등으로부터 배출되는 CO₂와 같은 온실가스의 배출을 줄이거나 제거할 수 있는 방안은 시급하고도 필수적인 문제로 대두

[†] Corresponding author
E-mail: p_dsjang@cnu.ac.kr
Tel: 042-821-6677

Fax: 042-823-8362

되고 있다. 이러한 목적에 부응하기 위한 실용적인 기술로는 CO₂ 가스의 회수 및 저장 기술이 하나의 유망한 대안으로 제시되고 있다. 그러나 주지하다시피 산화제가 공기인 경우 화석연료 연소에서 발생하는 배기가스 중 이산화탄소의 농도는 공기 중 80%를 차지하는 질소기체의 희석효과에 의하여 대략 14~15% 정도에 머무른다. 이러한 낮은 이산화탄소 농도는 배기가스로부터 탄소를 분리하는데 있어 경제적인 어려움을 야기시킨다. 그러나 배기가스 내 이산화탄소를 재순환하는 산소부화 연소기술(Oxygen Enriched Combustion)은 95%까지 농축된 CO₂ 가스를 분리 생산할 수 있다. 따라서 CO₂ 가스의 회수 및 저장을 경제적으로 가능하게 한다. 이와 같은 이산화탄소 재순환에 의한 산소 부화 연소처리기술은 교토의정서 발효에 의한 탄소세 도입 등을 고려할 때 경제성 확보를 위하여 시급히 확보하여야 할 기술로 평가되고 있다.

대부분의 화력발전소에서는 실제로 연소가스 재순환 설비를 갖추고 있지만 재순환되는 이산화탄소의 농도는 소량으로서 오직 로내 온도조절 용도로 사용되고 있다. 그러므로 기술적으로 고농도의 CO₂ 가스를 얻기 위해서는 첫째, 산화제에서 질소기체를 배제하고 산소의 농도를 증가시킨 산소부화연소에서 둘째, 실질적인 연소가스의 재순환이 전제되어야 한다.²⁾ 그러나 O₂/CO₂ 혼합가스로 이루어진 화석연료의 산소부화 연소는 질소기체가 이산화탄소 기체로 대체됨으로써 발생하는 분자량, 유량, 비열, 난류혼합강도 등의 차이에 의하여 화염특성, 연소성능, 열전달 현상, 그리고 연소생성 오염물질 등 기존의 공기연소에서 나타나는 연소특성과 현격한 차이가 예상되므로 이에 대한 조직적인 선행 연구가 필수적이다.

고농도 CO₂ 연소환경에서 화석연료의 연소특성을 평가하는 연구로 1988년 Wang 등은 CO₂ 가스와 산소를 사용하여 선회가 없는 버너에서 미분탄 연소성능에 대한 기본적인 실험을 수행하였다.³⁾ 1989년 Payne 등은 역시 O₂/CO₂ 혼합가스에서 미분탄의 연소특성을 연구한 결과 산소농도를 증가시킨 경우 화염전파속도는 증가하는 결과를 보고하였다.⁴⁾ 반면 질소산화물 생성량은 공기 중 질소가스 부재로 인하여 O₂/CO₂ 연소조건에서 감소된 결과를 보였다. 최근에는 캐나다 CANMET 에너지 기술센터에서 O₂/CO₂ 혼합가스에서 미분탄의 연소특성 규명을 위한 조직적인 변수연구를 수행하고 있으며 국내에서도 화석연료를 지속적인 에너지원으로 활용하기 위하여 이산화탄소 배출저감을 위한 다양한 기술개발을 경주하고 있다.⁵⁻⁸⁾

그러므로 본 연구에서는 일차적으로 산업현장에서 많이 이용되고 있는 5,000 kcal/hr LNG 연소기를 대상으로 하여 연소용 산화제를 O₂/CO₂ 혼합가스로 대체할 경우 나타나는 연소특성 변화를 규명하고자 하였다. 특히 CO₂ 재순환율에 따른 화염안전성과 연소실 내부온도변화 그리고 배기가스의 조성변화를 수치해석적인 연구를 통해 조직적으로 검토하였다.

2. 수치해석방법

2.1. 일반지배방정식과 해법

기상 상태의 LNG 연소반응에 대한 질량, 운동량, 에너지, 난류 및 화학종 농도 등에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S_\phi \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 단위질량당 물리량으로 표현되는 일반종속변수로 속도성분(u,v,w), 압력(p), 엔탈피(h), 화학종의 질량분율($m_{CH_4}, m_{O_2}, m_{CO}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{NO}$) 및 난류에너지와 이의 소멸에너지(k,ε)이다. $\rho, \Gamma_\phi, S_\phi$ 는 밀도, 일반종속변수에 대한 확산계수와 생성항을 각각 나타내며 3차원 축대칭 좌표에서 화학종을 포함한 일반종속변수에 대한 확산계수와 생성항은 기존의 발표된 논문을 참고할 수 있다.⁹⁾

식 (1)과 같이 표현된 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분법과 대류항의 선형화를 위해 power law scheme을 사용하여 식 (2)와 같은 대수방정식 형태의 이산화방정식을 유도하였다.

$$a_p\phi_p = a_E\phi_E + a_W\phi_W + a_N\phi_N + a_S\phi_S + b \quad (2)$$

여기서 a_E, a_W, a_N, a_S 는 각각 동쪽, 서쪽, 북쪽, 남쪽에서 주격자점에 대한 영향력 강도이며 b는 생성·소멸항을 나타낸다. 각 검사체적에 대한 이산화방정식은 형식은 선형이나 내재된 비선형특성으로 인해 Line-by-line TDMA(TriDiagonal Matrix Algorithm)에 의해 반복계산하여 해를 구하였으며 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 난류유동 및 연소반응에 대한 해석적인 해를 얻기 위해 in-house 컴퓨터 프로그램을 사용하였다.¹¹⁾

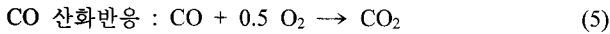
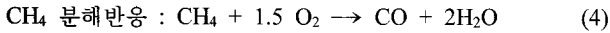
2.2. 난류 연소반응 모델

LNG 연소반응은 연료의 화학반응시간이 매우 빠르기 때문에 연료와 산화제가 혼합되면서 이와 동시에 연소가 이루어지므로 전체 반응속도는 일차적으로 난류혼합속도에 의해 영향을 받는다고 가정하였다. 이때 연료와 산화제의 혼합시간은 난류에 의한 붕괴속도인 k/ϵ 에 비례하며 Magnussen과 Hjertager가 제안한 난류연소모델을 사용하여 화학반응속도와 혼합속도를 고려하였다.¹²⁾

$$w_{fu} = \text{MIN} \left[\bar{\rho} A \bar{m}_{fu} \epsilon / k, \bar{\rho} A (\bar{m}_{ox} / i) \epsilon / k, \bar{\rho} A (\bar{m}_{pr} / 1 + i) \epsilon / k \right] \quad (3)$$

여기서 i는 연료의 단위질량당 화학양론적인 산화제의 질량분율을, m_{fu} 와 m_{ox} 는 연료와 산화제의 질량분율, m_{pr} 은 생성물의 질량분율, 그리고 A는 Lockwood 등이 제시한 경험상수이다.¹³⁾

LNG 연소에 대한 불완전 중간생성물인 CO를 고려하기 위한 비가역 2단계 연소반응식은 다음과 같이 표현될 수 있다.



CO의 평형 산화속도는 Dryer와 Glassmann이 제안한 반응 기작에 근거를 두고 있다.¹⁴⁾

$$\frac{d[\text{CO}]}{dt} = A[\text{CO}]^a[\text{H}_2\text{O}]^b[\text{O}_2]^c \exp[-E_a/RT] \quad (6)$$

여기서 [CO], [H₂O]와 [O₂]는 몰분율을 나타내며, A, E_a, R 그리고 T는 지수상수, 활성화 에너지, 가스상수, 온도를 각각 나타내며 a, b, c는 경험적으로 결정된 상수들이다. 1,150 K 이상의 온도에서 CO종의 산화는 상대적으로 빠르므로 화학적 평형상태로 접근한다고 가정할 수 있다. 그러나 975~1,150 K의 온도범위에서 CO 산화는 느려지고 975K 이하의 온도에서는 산소가 존재함에도 불구하고 CO 산화는 일어나지 않게 된다.¹⁵⁾ 그러므로 본 연구에서는 Dryer와 Glassmann이 제안한 화학평형모델을 개선하여 온도에 의한 CO 산화속도를 고려하여 계산하였다.

2.3. 화염 열복사 모델

모든 화염을 강력하게 복사에 참여하는 화염으로 설명하는 것은 적절하지 않으나 화염으로부터 열복사가 NO 생성속도에 영향을 줄 정도로 충분히 국부온도를 낮출 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 로내 전체화염을 열방출과 복사의 균일한 공급원이고 화염이 시각적으로 얇다고 가정하여 화염으로부터 복사에너지 손실속도를 식 (7)과 같이 근사하였다. 특히 본 연구에서 고려한 LNG 연소로의 경우 소형장치이므로 화염복사에 의한 열손실은 미비할 것으로 예측되었다.

$$Q(T, \text{species}) = \sum \text{SUM}\{p_i \cdot a_{p,i}\} \sigma (T^4 - T_b^4) \quad (7)$$

여기서 σ = 스테판-볼츠만 상수, 5.669E-8 W/m² K⁴

SUM{ } = 복사 계산에 포함된 화학종들의 총합

p_i = 연소시스템에서 화학종 i의 부분압력

$a_{p,i}$ = 화학종 i의 Plank 평균흡수 계수

T = 국부화염온도(K)

T_b = 주변온도(K)

화염으로부터 복사열손실을 결정하는 중요한 요인 중의 하나는 CO₂와 H₂O 가스의 복사참여이며 CO, SO₂, NO, N₂O와 같은 가스들은 일반적으로 부차적인 중요성을 갖는다. Jay Gore는 층류 화염 계산에서 CO₂와 H₂O 가스가 복사에 관여했을 때 최고화염온도가 대략 50 K까지 감소한다고 보고하고 있다.¹⁶⁾ 그러므로 본 연구에서는 화염온도와 Plank 흡수

계수 그리고 화학종 사이의 내부적인 상관관계를 복사에 대한 고도 근사를 위해 고려하였다.

2.4. 경계조건

본 연구에서 고려한 연소기는 일반 산업용으로 많이 사용되는 연소기로 Fig. 1에서와 같이 중심부에서 연료가 분사되고 연료 외부 원주를 통해 산화제가 공급되며 산화제 출구 부에는 화염안정성을 도모하기 위해 선회수 0.77을 갖는 선회기가 설치되어 있다.⁶⁾ 연소실 길이는 800 mm이고 직경은 100 mm의 3차원 축대칭 형상을 가지며 계산영역에 대한 민감도 분석 결과 25×80 격자를 생성하여 사용하였다. 사용된 연료는 일반 상용화 LNG로 시간당 5,000 kcal 용량을 가지며 산화제 조성은 기준 연료량에 있어 이론 공기량의 1.3배인 경우 포함된 순산소량을 기준으로 CO₂ 재순환율에 대한 수치해석을 수행하였다.

산소부화율(Oxygen-Enriched Ratio, OER)이 100%인 순수 산소 연소의 경우 산화제 속도는 3.08 m/s로 공기연소에 비해 입구에서의 절대유량이 80% 정도 감소하나 연소가스 재순환율에 따라 입구 절대유량을 증가한다. CO₂ 재순환율은 이론 공기량의 1.3배인 경우 포함된 질소량을 기준으로 다음과 같이 정의한다.

$$\text{CO}_2 \text{ 재순환율}(\%) = \frac{\text{첨가한 CO}_2 \text{ 유량}}{\text{기준 공기 중의 N}_2 \text{ 유량}} \times 100$$

이와 같은 CO₂ 재순환율은 기준 공기 중의 N₂ 유량에 대한 CO₂ 유량의 부피비(속도비)를 기준으로 설정하였으며 산화제 유속은 CO₂ 재순환율에 따라 Fig. 2와 같이 변화한다. 이와 같은 절대유량의 증가는 순수 산소 연소시 발생했던 산화제와 연료의 혼합지연현상 등의 문제를 해결할 것으로 판단되었다. 그러나 CO₂의 분자량이 N₂에 비해 크고 비열 또한 높으므로 화염구조 및 온도, 배기가스 특성에 직접적으로 영향을 줄 것으로 예상된다.

Fig. 3은 질소를 대신하여 이산화탄소가 재순환될 경우 일정 발열량(5,000 kcal/hr)을 기준으로 화염온도에 어떤 영향을 줄 것인지 평가하기 위해 N₂와 CO₂ 가스의 온도에 대한 비열을 나타낸 것이다. Fig. 3으로부터 로내 온도가 1,000 K 이상에서 CO₂의 비열이 N₂에 비해 높아지며 2,000 K 이상에서는 1.2배 이상의 차이를 보인다. 결국 이와 같은 비열의 차이는 동일한 질량의 가스온도를 올리는데 필요한 에너지가 N₂에 비해 CO₂가 1.2배 정도 크므로 로내 화염온도의 저하가 예상된다. 이외에도 화염열복사에 관여하는 주요 가스인 H₂O, CO₂, CO의 평균 플랭크 흡수계수 역시 CO₂ 가스가 가장 크다. 결국 CO₂ 가스가 N₂ 가스를 대신하여 재순환될 경우 비열과 화염열복사로 인해 로내 화염특성에 큰 영향을 줄 것으로 판단되므로 Table 1에서와 같이 CO₂ 재순환율에 따른 로내 연소특성에 대하여 수치해석을 수행하였다.

Table 1은 LNG 연소로의 표준 연소조건과 형상, 그리고 수치해석을 수행한 주요변수를 보여준다.

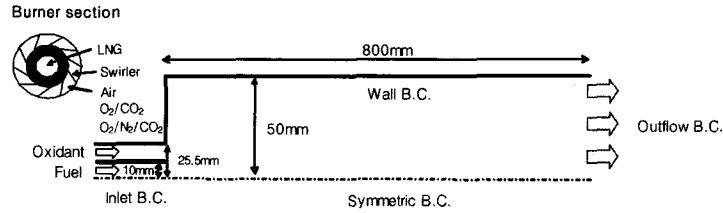


Fig. 1. Schematic of the LNG combustor.

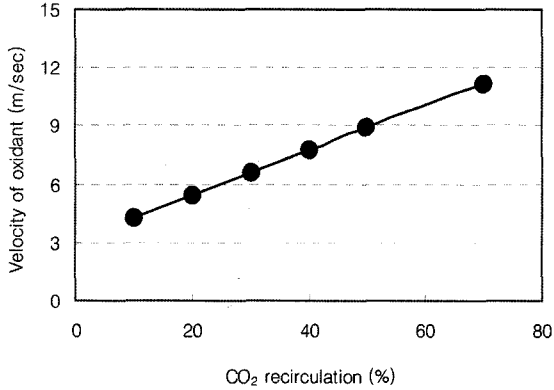


Fig. 2. Oxidant velocity as CO₂ recycling ratio.

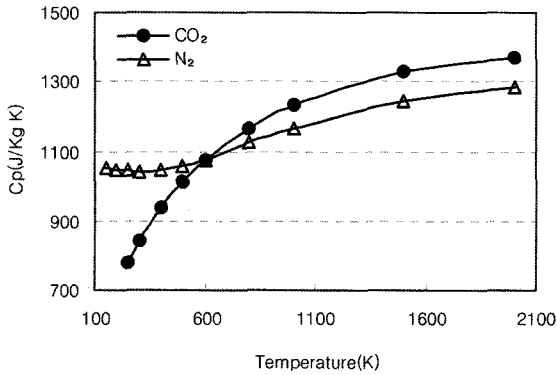


Fig. 3. Specific heat of N₂ and CO₂ gases.

Table 1. Standard condition for the LNG combustion in the mixture of O₂/CO₂

Flow conditions	Fuel	Oxidizer
Composition	CH ₄	Air, O ₂ /CO ₂ *
Temperature(K)	343	343
Flow rate(Nm ³ /h)	0.58	7.18*
Velocity(m/s)	2.06	14.6*
Swirl number		0.77

* numerical parameters

3. 수치해석 결과 및 토론

3.1. 화염특성

Fig. 4는 기존에 발표된 실험논문으로부터 산소부화율에 따른 화염구조를 가시화한 사진과 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다.⁶⁾ Fig. 2로부터 산소부화율이 증가된 경우 상대적인 공기 첨가량의 감소로 인해 연료/산화제의 혼합감소로 고온의 화염이 좁고 길게 형성된 것을 볼 수 있다. 반면 공기를 산화제로 사용한 경우 산화제의 질소유량 증가로 인해 산화제의 유속이 증가되며 이에 따른 연료/산화제의 혼합증가로 인해 화염이 비교적 짧고 안정적으로 형성되었다.^{2,4)}

Fig. 5는 CO₂ 재순환율에 따른 화염구조를 가시화하여 나타낸 결과이다. CO₂ 재순환율이 증가될수록 로내온도는 낮아

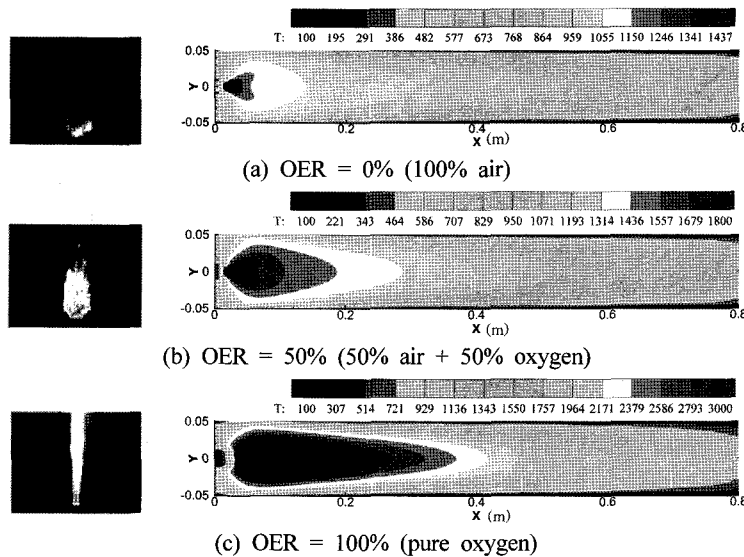


Fig. 4. Flame temperature of LNG fuel in the oxygen enriched environment.⁶⁾

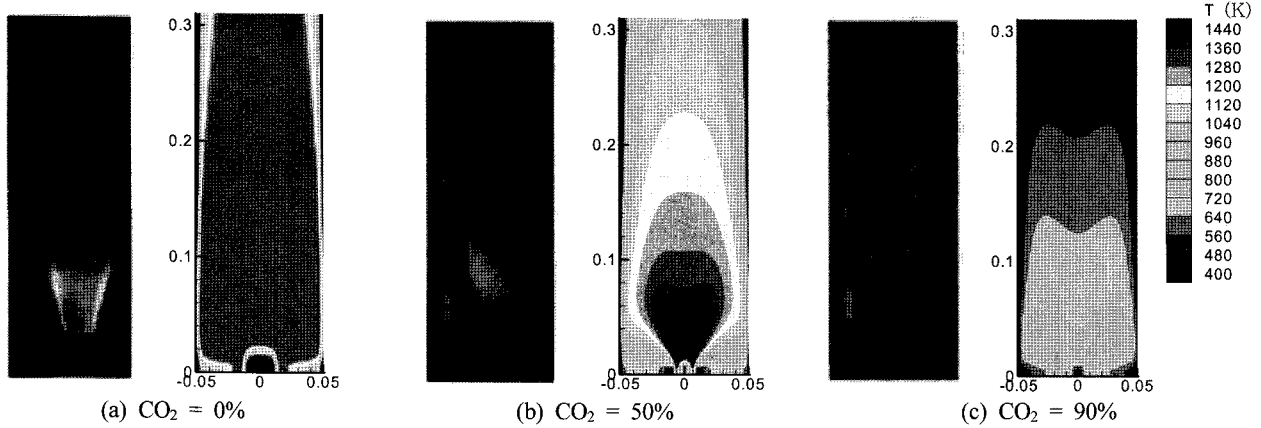


Fig. 5. Experimental photographs and numerical temperature contours of flame with various CO₂ recycling ratios.⁸⁾

지나 절대유량 증가에 의한 혼합증가로 버너 근처의 화염온도가 높아지는 것을 볼 수 있다.⁸⁾ 그러나 CO₂ 재순환율이 90%에서는 로내온도가 급격하게 감소하고 있으며 로내에 화염이 지속적으로 형성되고 있지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 CO₂ 비열이 N₂에 비하여 크고 복사효과가 크기 때문에 CO₂ 재순환율이 증가할수록 연소영역의 온도가 감소된 것으로 판단된다.

3.2. CO₂ 재순환율

Fig. 6은 산화제로 산소를 사용하고 기준 공기 중의 N₂ 유량에 대한 CO₂ 재순환율에 따른 연소실 중심부의 축 방향에 대한 온도분포와 CO 농도를 나타낸다. Fig. 6(a)로부터 CO₂ 재순환율이 증가될수록 절대유량 증가에 따른 혼합효과로 인해 화염이 버너 선단으로 가까워지거나 로내 연소가스 온도는 떨어지는 경향을 나타내었다. 이는 앞에서 제시한 CO₂ 가스의 비열과 화염의 복사 열손실에 기인한다. Fig. 6(b)는 연소실 중심부의 축 방향에 대한 CO 농도를 나타낸 것으로 CO₂ 재순환율이 증가될수록 CO 가스의 최고 농도가 버너 근처에서 나타나고 있으나 생성된 CO 농도는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 절대유량 증가에 따른 CO 몰비의 감소에 기인한다. 또한 CO₂ 재순환율 증가에 따라 강화된 난류 혼합효과로 인해 CO가 CO₂로 빠르게 완전

산화 하는 것을 볼 수 있다.

3.3. 공기연소와 O₂/CO₂ 혼합 연소 특성

Fig. 7은 세 개의 서로 다른 산화제 혼합조건에서 계산된 로내 온도곡선과 CO 농도분포를 나타낸다. 연소공기를 대신한 21% O₂/79% CO₂ 혼합 연소조건에서, 즉 질소에 해당되는 농도를 모두 CO₂로 대체하였을 경우 로내온도가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 공기연소 환경에서 산소 농도와 동일한 21% O₂ 혼합조건에서 질소에 비해 높은 CO₂의 비열이 낮은 화염온도를 유발시킨 것으로 판단된다. 또한 N₂와 CO₂ 가스의 분자량 차이로 인한 입구 운동량 증가로 고온의 화염위치가 버너 근처로 이동한 것을 알 수 있다.

CO₂ 재순환에 따른 로내 연소가스 온도는 O₂/CO₂ 혼합가스 내 산소농도를 증가시킨 경우 연소가스온도가 점차적으로 증가하였다. O₂/CO₂ 혼합연소시 로내 화염온도가 공기 연소 조건과 유사한 화염온도를 얻기 위해서는 산소농도를 30% 이상 증가시켜야 한다. 결국 Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 30% O₂/70% CO₂ 혼합조건에서 공기연소와 유사한 화염온도곡선을 나타내었다. Fig. 7(b)는 연소로 중심에서 축방향으로 계산된 CO 농도곡선으로 입구 운동량 차이로 인해 버너근처에서 CO 농도에 큰 차이를 보였으나 전체적인 보일러 연소효율에는 큰 차이를 나타내지 않았다.

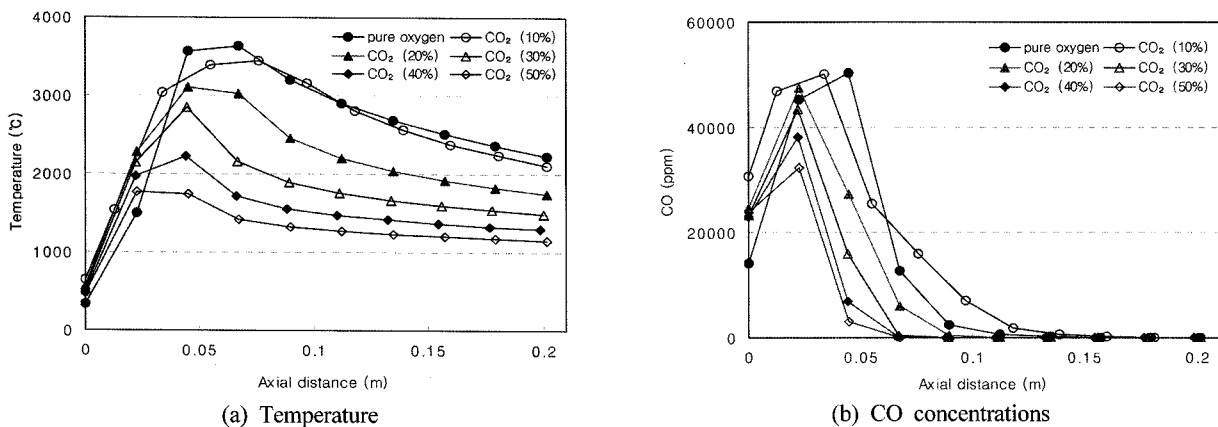


Fig. 6. Combustion characteristics for the various CO₂ recycling ratio.

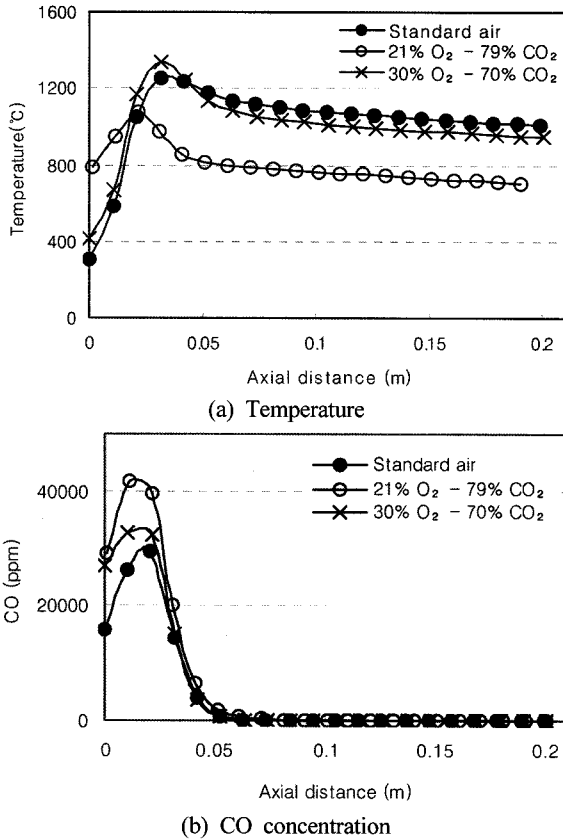


Fig. 7. Combustion characteristics of LNG in the mixture of O₂/CO₂.

3.4. 산화제 유입조건

공기 연소시 산화제 유량과 동일한 절대유량에서 CO₂ 재순환에 따른 산화제 조성변화가 미치는 화염특성 변화에 대하여 수치해석하였다. CO₂ 재순환율에 따른 산화제 유량의 변화는 로내 난류강도에 영향을 미치며 이는 직접적으로 연소반응에 영향을 준다. 그러므로 표준 공기조건과 동일한 유량조건에서 O₂/CO₂/N₂ 혼합비에 따른 화염특성을 평가하였다. 특히 이 경우 CO₂ 비열차이로 인한 에너지소모를 고려하여 입구 산소공급농도를 증가시켜 수치해석을 수행한 결과 O₂ 농도가 30%인 조건에서 공기연소와 유사한 로내 화염온도를 나타내었다.

Fig. 8은 O₂/CO₂/N₂ 혼합비가 30%/25%/45%인 산화제 공급조건에서 연소로 중심 축방향으로 계산한 온도와 CO 농도 분포를 나타낸다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 최고 화염온도는 공기연소 조건과 동일하였으나 CO₂ 가스의 재순환에 따른 입구 운동량의 증가로 인해 최고 화염온도가 버너 근처로 가까워진 것을 볼 수 있다. 특히 동일한 절대유량에서 CO₂ 첨가에 따른 에너지 손실을 감안하여 증가시킨 O₂ 농도는 질소와 반응하여 NO_x 발생량을 공기 연소시 계산된 27 ppm에서 120 ppm까지 증가시켰다. 그러나 CO₂ 가스를 재순환시킨 경우 산소부화 연소조건인 30% O₂/ 70% N₂ 혼합연소에서 발생된 질소산화물 농도 180 ppm에 비해 감소된 결과를 보였다.

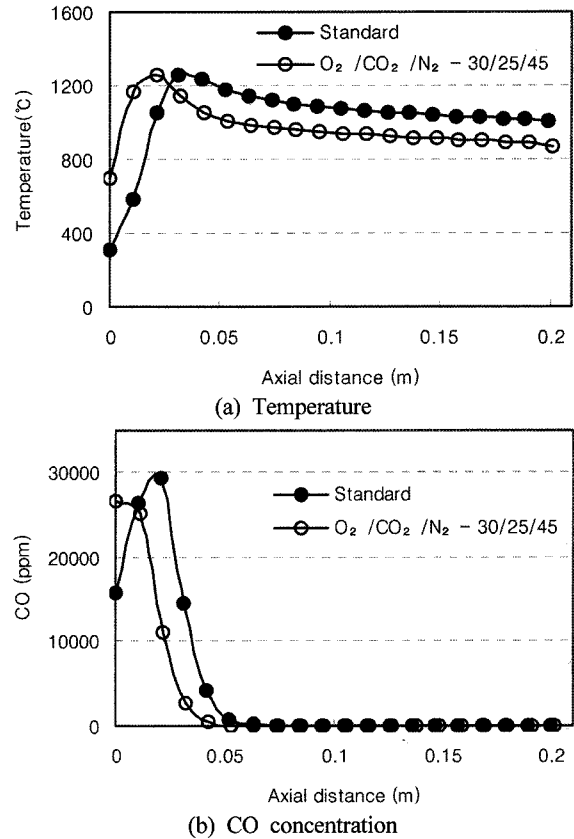


Fig. 8. Combustion characteristics of LNG-air combustion compared with LNG-O₂/CO₂/N₂ combustion for the same oxidant flow rate.

일반적으로 산소부화를 증가에 따른 NO_x 발생량은 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으므로 산소부화량을 증가하여 화석연료를 연소할 경우에는 Fig. 8과 같이 연소가스의 재순환을 고려하여 로내온도를 안정화하고 절대유량 감소로 인한 혼합지연효과를 최소화하여 화염대의 고온 집중화 현상을 저감하여야 한다. Fig. 8(b)는 CO 농도를 나타낸 것으로 CO₂ 재순환시 최고 CO 농도 역시 버너근처에서 발생하였으며 연소가 진행될수록 급격하게 감소하는 양상을 보였다.

4. 결론

본 연구는 대표적 온실가스인 이산화탄소를 효과적으로 저감시킬 수 있는 고온 순산소 연소기술을 개발하는 일차적인 연구로 실험실 규모의 LNG 연소기에서 산화제를 공기에서 O₂/CO₂ 혼합가스로 대체할 경우 일어날 수 있는 화염특성 및 배기가스 특성변화를 기존의 실험자료를 바탕으로 수치해석하였다. 주요 연구결과를 요약하여 나타내면 다음과 같다.

배기가스 재순환이 없는 100% 순산소 연소환경에서 화염은 고온의 길고 가는 층류형상의 화염을 보였다. 이는 산화제 중에서 질소성분이 감소함으로써 약화된 난류혼합효과와 N₂ 가스에 의한 현열손실의 감소에 기인하는 것으로 판단하였으며 문헌에 발표된 실험과 일치된 결과를 보였다. 난류혼

합효과를 증가시키기 위해 연소가스인 CO₂ 가스의 재순환을 증가시킨 경우 절대유량 증가에 따른 난류혼합으로 최고 화염온도가 버너근처에서 나타난 반면 최고 화염온도는 N₂에 비해 CO₂의 높은 비열로 인해 낮아지는 현상을 보였다. 결국 80% 이상 CO₂ 재순환에서는 가스의 온도가 급격하게 떨어지는 화염소멸 현상을 보여주었다. O₂/CO₂ 혼합가스 연소시 21% O₂/79% CO₂ 연소조건에서는 연소가스 온도가 공기연소에 비해 낮았으나 30% O₂/70% CO₂의 연소조건에서는 공기연소와 유사한 가스온도를 나타내었다. CO₂ 재순환에 따른 산화제 유량의 변화는 로내 난류강도에 영향을 미치며 이는 직접적으로 연소반응에 영향을 준다. 그러므로 공기연소와 동일한 유량조건에서 O₂/CO₂/N₂ 비에 따른 화염특성을 평가한 결과 O₂ 농도를 30% 이상 증가시킨 경우 공기연소와 유사한 화염온도를 나타내었으나 NOx 발생량은 공기연소에 비해 다소 높게 계산되었다.

일반적으로 본 연구에서 수행한 실험조건에 대한 수치해석 결과는 물리적으로 일관성 있는 결과를 제시하였다. 이와 같은 수치해석 기술은 에너지 이용효율 향상과 고온 순산소 연소기술 개발시 나타날 수 있는 화석연료의 연소특성 해석에 유용한 정보를 제공할 것으로 판단되며 추후 필요한 실험변수 설정과 상용화에 따른 scale-up 연구에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

기호설명

ϕ	일반종속변수
Γ_ϕ	ϕ 에 대한 확산계수
S_ϕ	ϕ 에 대한 생성항
μ_{eff}	유효점성계수
k, ϵ	난류운동에너지, 난류소멸에너지
$\overline{m_{fu}}, \overline{m_{ox}}, \overline{m_{pr}}$	연료, 산소, 생성물의 평균질량분율
$m_{CH_4}, m_{O_2}, m_{CO}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{NO}$	화학종의 질량분율
σ	스테판-볼츠만 상수
p_i	연소시스템에서 화학종 i의 부분압력
$a_{p,i}$	화학종 i의 Plank 평균흡수 계수
T	국부화염온도(K)
T _b	주변 온도(K)
A	지수상수
E _a	활성화 에너지

참고문헌

1. 이산화탄소저감 및 처리기술개발 사업단, “더워지는 지

구, 그 원인과 대책,” www.cdrr.re.kr(2004).
 2. Hau, L., Ramlan, Z., and Bernal, M. G., “Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O₂/CO₂,” *Fuel*, **84**, 833~840(2005).
 3. Wang, C. S., Berry G. F., Chang, K. C., Wolsky, A. M., “Combustion of pulverized coal using waste carbon dioxide and oxygen,” *Combustion and Flame*, **72**, 301~310 (1988).
 4. Payne, R, Chen, S. L., Wolsky, A. M., Richter, W. F., *Combustion Science and Technology*, **67**, 1~16(1989).
 5. Chui, E. H., Majeski, A. J., Douglas, M. A., Tan, Y., Thanbimuthu, K., “Numerical investigation of oxy-coal combustion to evaluate burner and combustor design concepts,” *Energy*, **29**, 1285~1296(2004).
 6. 김한석, 김호근, 안국영, 김용모, “산소부화연소에서 CO₂ 첨가에 의한 연소특성,” 대한기계공학회는문집, **28**(1), 9~15(2004).
 7. 김경래, 김혁주, 류정인, “LNG-산소부화 선회류연소특성,” 제25회 KOSCO Symposium 논문집, 41~47(2005).
 8. 김한석, 안국영, 김호근, 이윤원, 이창언, “연소용 공기 중 N₂의 CO₂ 대체에 대한 연소특성해석,” 한국연소학회지, **7**(4), 29~35(2002).
 9. 김혜숙, 신미수, 장동순, 이대근, “산소부화 조건에 따른 LNG 연소특성 연구,” 대한환경공학회지, **29**(1), 1~8(2007).
 10. Patankar, S. V., “Numerical heat transfer and fluid flow,” McGraw-Hill Company(1980).
 11. Jang, D. S., “Single-and two-phase reacting flow predictions-modeling of nonequilibrium effects, turbulent particle dispersion and nitrogen oxide formation in pulverized coal combustion,” Ph D. Thesis, Louisiana State Univ.(1987).
 12. Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., “On mathematical modeling of turbulence combustion with special emphasis on soot formation and combustion,” *16th symposium on the Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 719~729(1977).
 13. Lockwood, F. C., Salooja, A. P., and Syed, S. A., “A prediction method for coal-fired furnace,” *Combustion and Flame*, **38**(1), 1~15(1980).
 14. Dryer, F. L. and Glassman, I., “High-temperature oxidation of CO and H₂,” *14th symposium on combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA(1972).
 15. Suwa, Y., Yamamoto, T., Aoki, H., and Miura, T., “Unsteady state numerical simulation on the high temperature air combustion by the nongray radiative analysis,” *Proceedings of 2000 international joint power generation conference*, Miami Beach, Florida, July 23~26(2000).
 16. Zhu, X. L., Gore, J. P., Karpetis, A. N., and Barlow, R. S., “The effects of self-adsorption of radiation on an opposed flow partially premixed flame,” *Combustion and Flame*, **129**(3), 342~345(2002).