

산소부화 조건에 따른 LNG 연소특성 연구

김혜숙 · 신미수 · 장동순[†] · 이대근*

충남대학교 환경공학과 · *한국에너지기술연구원

(2006년 9월 5일 접수, 2006년 12월 27일 채택)

Combustion Characteristic Study of LNG Flame in an Oxygen Enriched Environment

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 oxygen-enriched combustion techniques applicable to the system of practical industrial boiler. To this end the combustion characteristics of lab-scale LNG combustor were investigated as a first step using the method of numerical simulation by analyzing the flame characteristics and pollutant emission behaviour as a function of oxygen enrichment level. Several useful conclusions could be drawn based on this study. First of all, the increase of oxygen enrichment level instead of air caused long and thin flame called laminar flame feature. This was in good agreement with experimental results appeared in open literature and explained by the effect of the decrease of turbulent mixing due to the decrease of absolute amount of oxidizer flow rate by the absence of the nitrogen species. Further, as expected, oxygen enrichment increased the flame temperatures to a significant level together with concentrations of CO₂ and H₂O species because of the elimination of the heat sink and dilution effects by the presence of N₂ inert gas. However, the increased flame temperature with O₂ enriched air showed the high possibility of the generation of thermal NO_x if nitrogen species were present. In order to remedy the problem caused by the oxygen-enriched combustion, the appropriate amount of recirculation CO₂ gas was desirable to enhance the turbulent mixing and thereby flame stability and further optimum determination of operational conditions were necessary. For example, the adjustment of burner with swirl angle of 30~45° increased the combustion efficiency of LNG fuel and simultaneously dropped the NO_x formation.

Key Words : Pollutant Emission, Oxygen-Enriched Combustion, Turbulent Mixing, Thermal NO_x, Burner Swirl

요약 : 본 연구의 목적은 산업용 보일러에서 적용할 수 있는 실질적인 산소부화 연소기술을 개발하는데 있다. 일차적으로 실험실 규모의 연소기에서 연소용 산화제를 공기에서 산소로 대체할 경우 화염특성 및 배출 오염물질의 특성변화를 수치해석을 통해 조직적으로 연구하였다. 첫 번째로 증가된 산소부화량의 결과로 나타나는 화염은 길고 가는 층류형상의 화염모양을 보여주고 있는데 이것은 산화제 중에서 질소성분이 감소함으로써 약화된 난류혼합효과에 기인하는 것으로 판단하였으며 문헌에 발표된 실험결과와 그 경향이 일치하였다. 그리고 산소부화효과는 N₂ 가스에 의한 현열손실과 희석효과를 감소시키므로 연소로 내 화염온도를 실질적으로 크게 증가시키고 또한 CO₂와 H₂O 농도분율을 증가시킨다. 그러나 100% 순산소 연소가 아닌 경우 산소부화량 증가에 의한 화염온도의 증가는 thermal NO_x 발생을 크게 증가시키는 결과를 초래하였다. 이러한 산소부화에 따른 고온 특성에 의한 질소산화물의 생성문제와 산화제의 유량 감소에 따른 화염의 안정성 문제를 해결하기 위해서는 발생한 이산화탄소를 적절하게 재순환시키는 문제와 기타 운전 조건의 조절에 의한 방법이 필요할 것으로 판단되었다. 예를 들어 화염의 버너선회와 형상변화가 연소특성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 버너의 선회각을 변화하여 수치해석을 수행한 결과 30~45°의 버너 선회는 LNG 연료의 연소효율을 증가시키고 동시에 NO_x 발생량을 저감시켰다.

주제어 : 오염물질 발생, 산소-부화연소, 난류혼합, Thermal NO_x, 버너 선회

1. 서론

현재 국내의 경제에 대한 주된 관심사 중의 하나는 국제적인 원유가의 등락과 공급의 불안정에 의한 에너지 위기와 함께 매년 가시적으로 증폭되면서 일상화되고 있는 기상이변의 문제라 할 수 있다. 이 중 기상이변의 문제는 화석연료 사용에 따른 온난화와 직접적으로 결부되어 있어 에너지 분야

의 산업계와 연구기관의 주된 관심사는 청정에너지 생산 및 에너지 효율의 제고를 위한 다양한 연구와 구체적인 기술개발로 집약되고 있다. 현재 에너지 산업에 광범위하게 사용하고 있는 화석연료는 가장 풍부한 자원이며 가까운 장래에도 여전히 비중이 높은 에너지원임에는 분명하나 화석연료 연소과정에서는 지구온난화의 중요한 역할을 하는 이산화탄소가 연간 59억 톤(1992년 통계)이 배출된다. 이러한 이산화탄소의 양은 인공적으로 배출된 전체 이산화탄소 양의 4분의 3을 차지하는 양으로서 지속적인 화석연료의 사용에 커다란 장애요인으로 대두되고 있다.¹⁾

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

Fax: 042-823-8362

이러한 상황에 비추어 볼 때 화석연료가 지속적인 에너지 원으로 활용되기 위해서는 연소효율 향상을 통한 에너지 효율의 제고와 함께 이산화탄소 배출저감을 위한 다양한 기술 개발이 필수적인 현안과제라 할 수 있으며 최근 연소용 공기 중에 산소를 첨가하여 연소하는 산소부화 연소와 순산소 만으로 연소시키는 방법에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다.²⁻⁵⁾

산소부화연소(Oxygen Enriched Combustion)는 연료와 산화제의 혼합축진과 질소가스에 의한 현열손실의 배제에 의한 화염온도의 상승에 따른 연소효율의 향상이 예측된다. 순산소연소의 경우 매우 높은 고온의 화염을 얻을 수 있으며 공기 성분의 79%를 차지하고 있는 질소가스 존재에 의해 발생하는 thermal NO_x의 양을 원천제어하거나 최소화 할 수 있다. 그러나 산소부화 연소시에는 화염온도 상승에 의한 질소산화물의 발생량이 증가하는 결과를 초래할 수 있으므로 이를 줄일 수 있는 저 NO_x 버너 및 연소방법을 강구하여야 한다. 이외에도 투입되는 산화제 양의 감소와 고온연소에 따른 연소로내의 전반적인 유동장 패턴과 난류 혼합강도의 변화에 따른 제반 연소특성의 변화를 설계 및 운전변수에 따라 구체적으로 평가하여야 한다.

그러므로 본 연구에서는 일차적으로 산업현장에서 많이 이용되고 있는 연소기(LNG, 5,000 kcal/hr)에서 연소용 산화제를 산소로 대체할 경우 연소특성 변화를 산소부화율에 따른 화염 안전성과 연소실 내부 온도 및 배기가스 특성변화를 수치해석을 통해 조직적으로 연구하였다.

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. ρ , Γ_ϕ , S_ϕ 는 밀도, 일반종속변수에 대한 확산계수와 생성항을 각각 나타내며 Table 1은 3차원 축대칭 좌표에서 화학종을 포함한 일반종속변수에 대한 확산계수와 생성항을 나타낸 것이다.

식 (1)과 같이 표현된 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분법과 대류항의 선형화를 위해 power law scheme을 사용하여 이산화방정식을 유도하였다. 각 검사체적에 대한 이산화방정식은 형식은 선형이나 내재된 비선형특성으로 인해 Line-by-line TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm)에 의해 반복계산하여 해를

Table 1. Γ_ϕ and S_ϕ expression for 3-D axi-symmetric coordinate system

Variables	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Axial Momentum	u	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Radial Momentum	v	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r}) - 2\mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho v^2}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}$
Tangential Momentum	w	μ_{eff}	$-\left(\frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{\rho v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r}\right)w$
Kinetic Energy	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{k1} - \rho\epsilon$
Kinetic Energy Dissipation rate	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{\kappa}(C_1 C_{k1} - C_2 \rho\epsilon)$
Specific Enthalpy	h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$\dot{w}_{fu} H_{fu} - H_{rad}$
Fuel Mass Fraction	m_{fu}	Γ_{fu}	$-\dot{w}_{fu}$
O ₂ Mass Fraction	m_{O_2}	Γ_{O_2}	$-\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} \cdot M_{O_2} \cdot n_{O_2}$
CO Mass Fraction	m_{CO}	Γ_{CO}	$\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} M_{CO} n_{CO} - \frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} M_{CO_2} n_{CO_2}$
CO ₂ Mass Fraction	m_{CO_2}	Γ_{CO_2}	$\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} M_{CO_2} n_{CO_2}$
H ₂ O Mass Fraction	m_{H_2O}	Γ_{H_2O}	$\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} M_{H_2O} n_{H_2O}$
NO Mass Fraction	m_{NO}	Γ_{NO}	$S_{Thermal-N} + S_{Fuel-N}$

where $\mu_{eff} = \mu_l + \mu$, H_{rad} = radiation heat loss
 $S_{Thermal-N}$ = Volumetric thermal NO generation,
 S_{Fuel-N} = Volumetric fuel NO generation

$$G_{k1} = 2\mu_{eff} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{v}{r}\right)^2 \right] + \mu_{eff} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \right]$$

$C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.92$, $\sigma_k = 0.9$, $\sigma_\epsilon = 1.22$

구하였으며 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다.⁶⁾ 본 연구에서는 난류유동 및 연소반응에 대한 해석적인 해를 얻기 위해 다음 각 절에서 설명하고 있는 세부모델을 포함하는 in-house 컴퓨터 프로그램을 사용하였다.

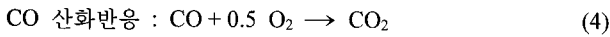
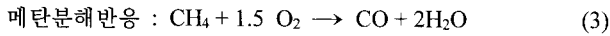
2.2. 난류 연소반응 모델

LNG 연소반응은 연료의 화학반응시간이 매우 빠르기 때문에 연료와 산화제가 혼합되면서 이와 동시에 연소가 이루어 지므로 전체 반응속도는 일차적으로 난류혼합속도에 의해 영향을 받는다고 가정하였다. 이때 연료와 산화제의 혼합시간은 난류에디의 붕괴속도인 k/ϵ 에 비례하며 Magnussen과 Hjertager가 제안한 난류연소모델을 사용하여 화학반응속도와 혼합속도를 고려하였다.⁷⁾

$$w_{fu} = \text{minimum of } \left[\bar{\rho} \bar{A} m_{fu} \epsilon / k, \bar{\rho} \bar{A} (m_{ox} / i) \epsilon / k, \bar{\rho} \bar{A} (m_{pr} / (1+i)) \epsilon / k \right] \quad (2)$$

여기서 i 는 연료의 단위질량당 화학양론적인 산화제의 질량 분율, m_{ox} 는 산화제의 질량분율, m_{pr} 는 생성물의 질량분율, 그리고 A 는 Lockwood 등이 제시한 경험상수이다.⁸⁾

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



CO의 평형 산화속도는 Dryer와 Glassmann(1972)이 제안한 반응기작에 근거를 두고 있다.⁹⁾

$$\frac{d[\text{CO}]}{dt} = A[\text{CO}]^a [\text{H}_2\text{O}]^b [\text{O}_2]^c \exp[-E_a/RT] \quad (5)$$

여기서 $[\text{CO}]$, $[\text{H}_2\text{O}]$ 와 $[\text{O}_2]$ 는 몰분율을 나타내며, A , E_a , R 그리고 T 는 지수상수, 활성화 에너지, 가스상수, 온도를 각각 나타내며 a , b , c 는 경험적으로 결정된 상수들이다. 1,150 K 이상의 온도에서 CO 종의 산화는 상대적으로 빠르므로 화학적 평형상태로 접근한다고 가정할 수 있다. 그러나 975~1150 K의 온도범위에서 CO 산화는 느려지므로 제한적인 화학반응속도가 모델화되어야 하며 975 K 이하의 온도에서는 산소가 존재함에도 불구하고 CO 산화는 일어나지 않게 된다.¹⁰⁾ 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 국부 온도를 낮출 수 있다. 기존의 세부적인 복사열전달 모델을 난류연소반응 프로그램에 포함시키는 것은 계산상의 작업을 가중시키므로 본 연구에서는 로내 전체화염을 열방출과 복사의 균일한 공급원이 고 화염이 시각적으로 얇다고 가정하여 화염으로부터 복사 에너지 손실속도를 식 (6)과 같이 근사하였다. 특히 본 연구에서 고려한 LNG 연소로의 경우 소형장치이므로 화염복사에 의한 열손실은 미비한 것으로 계산되었다.

$$Q(T, \text{species}) = \sum \text{SUM}\{p_i \cdot a_{p,i}\} \sigma (T^4 - T_b^4) \quad (6)$$

여기서 σ = 스테판-볼츠만 상수, $5.669\text{E}-8 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
 $\text{SUM}\{ \}$ = 복사 계산에 포함된 화학종들의 총합
 p_i = 연소시스템에서 화학종 i 의 부분압력
 $a_{p,i}$ = 화학종 i 의 Plank 평균흡수 계수
 T = 국부화염온도(K)
 T_b = 주변 온도(K)

화염으로부터 복사열손실을 결정하는 중요한 요인 중의 하나는 CO_2 와 H_2O 분자의 복사 참여이다. 일반적으로 CO , SO_2 , NO , N_2O 와 같은 다른 가스종들은 부차적인 중요성을 갖는다. Jay Gore는 층류 화염 계산에서 CO_2 와 H_2O 의 복사가 관여했을 때 최고화염 온도가 대략 50 K까지 감소한다고 보고하고 있다.¹¹⁾ 그러므로 본 연구에서는 화염온도와 Plank 흡수 계수 그리고 화학종 사이의 내부적인 상관관계를 복사에 대한 고도 근사를 위해 고려하였다.¹²⁾

2.4. NO_x 생성모델

난류연소모델이 주요 화학종에 대한 전반적인 양상을 예측하는데 있어 성공적인 도구로 사용되고 있으나 국지적인 화염소멸을 구체화할 수 없고 난류혼합 뿐 아니라 화학적 동력학이 중요한 역할을 하는 NO와 같은 소량의 오염물질에 대해서는 정확한 예측이 불가능하므로 모델링시 특별한 처리를 필요로 한다.¹³⁾

그러므로 본 연구에서는 NO의 생성과 소멸에 대한 화학적 동력학을 난류연소모델에 포함시켜 전체 반응속도는 연속적인 두 단계의 조화평균에 의해 계산된다고 가정하였다. 우선 반응물들 간에 난류혼합이 이루어지고 그 다음 화학반응이 일어나므로 전체반응속도는 화학적 동력학을 난류연소모델에 포함시켜 다음과 같이 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Overall reaction rate} \approx 1 / (1 / \text{turbulent mixing rate} + 1 / \text{chemical reaction rate})$$

연소 시스템에서 NO는 연료의 성상과 시스템의 설계, 운전변수 등의 복잡한 공정에 의해 형성된다. NO 형성과정은 복잡한 반응 연속성을 갖고 있기 때문에 연소시설로부터 정확하게 NO 발생량을 예측하기란 쉽지 않다. NO 생성과 소멸에 대한 화학적 동력학을 난류반응모델에 포함하기 위해 이 공정에 대해 간략하게 언급하면 다음과 같다.

연소과정에서 NO는 연소공기 내 질소의 열적산화에 의한 thermal NO와 연소물질에 포함된 질소의 전환에 의한 fuel NO로 생성된다. 연소가스가 1,800 K 이상의 온도에서 충분한 시간동안 체류할 때 thermal NO는 연소공기 내 질소로부터 생성되며 다음의 Zeldovich mechanism으로 표현된다. quasi-steady 가정을 사용하면,



Thermal NO의 화학반응속도는 다음의 Arrhenius 반응식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = A \exp(-E/RT) [\text{N}_2] [\text{O}_2] \quad (8)$$

화학종 농도는 몰 농도로 표현하며 지수상수인 $A = 1.84 \times 10^{14}$, 활성화 에너지 $E = 9,140 \text{ kcal/mole}$, T 는 화염온도를 각

각 나타낸다.¹⁴⁾ 결국 연소가스의 화염온도, 체류시간 그리고 과잉산소의 농도가 증가할수록 thermal NO의 농도는 증가하게 된다. Fuel NO의 경우 LNG 연료에 질소성분이 없으므로 이에 대한 생성기작은 고려하지 않았다.

2.5. 경계조건

본 연구에서 고려한 연소기는 일반 산업용으로 많이 사용되는 연소기로 Fig. 1에서와 같이 중심부에서 연료가 분사되며 외부의 산화제 출구부에는 화염 안정성을 도모하기 위해 선회수 0.77을 갖는 선회기가 설치되어 있다. 연소실 길이는 800 mm이고 직경은 100 mm의 3차원 축대칭 형상을 가지며 사용된 연료는 일반 상용화 LNG로 시간당 5,000 kcal 용량을 가진다.²⁾ 계산영역에 대한 민감도 분석 결과 25 × 80 격자를 생성하여 사용하였으며 산화제 조성은 기준 연료량에 있어 이론 공기량의 1.3배인 경우 포함된 산소량을 기준으로 산소부화율에 대한 수치해석을 수행하였다. 여기서 산소부화율(Oxygen-Enriched Ratio, OER)은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{산소부화율(\%)} = \frac{\text{O}_2 \text{ 유량}}{\text{공기중의 O}_2 \text{ 유량} + \text{O}_2 \text{ 유량}} \times 100$$

연료량 5,000 kcal/hr을 기준으로 하여 산화제의 산소부화율을 증가시킨 경우 입구에서 절대유량은 감소되며 OER이 50%인 경우 산화제 속도는 8.82 m/s, 100%인 경우 3.08 m/s의 속도로 계산된다. 이와 같은 절대유량의 감소는 로내 난류혼합강도의 변화를 유발하여 화염구조 및 온도, 배기가스 특성에 영향을 줄 것으로 판단된다.

Table 2는 LNG 연소로의 표준 연소조건과 형상, 그리고 수치해석을 수행한 주요변수를 보여준다.

Table 2. Standard conditions of LNG combustion in an oxygen enriched environment

Flow conditions	Fuel	Oxidizer
Composition	CH ₄	Air / O 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*
Geometry		
Fuel radius(mm)	10	
Oxidizer inner radius(mm)	20	
outer radius(mm)	25.5	
Furnace radius(mm)	100	
Furnace length(mm)	800	

* numerical parameters

3. 수치해석 결과 및 토론

3.1. 화염특성

Fig. 2는 기준에 발표된 실험 논문으로부터 산소부화율에 따른 화염구조를 가시화하여 나타낸 사진이다.²⁾ Fig. 2로부터 산소부화율이 증가된 경우 상대적인 공기 첨가량의 감소로 인해 연료/산화제의 혼합감소로 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. 3은 실험과 동일한 조건에서 수치해석한 결과로 연소로 내부 화염온도를 나타낸 것이다. 산화제로 순산소 100%를 사용한 경우 절대유량의 감소로 인해 화염의 길이가 길어지는 것을 볼 수 있으며 버너 선단에서 약간 떨어진 곳에서

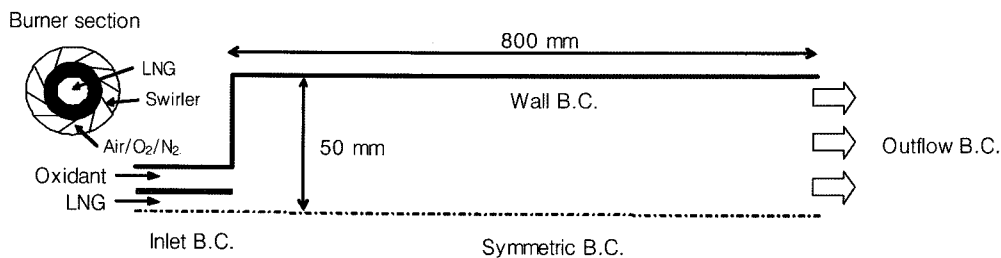


Fig. 1. Schematic of the LNG combustor.

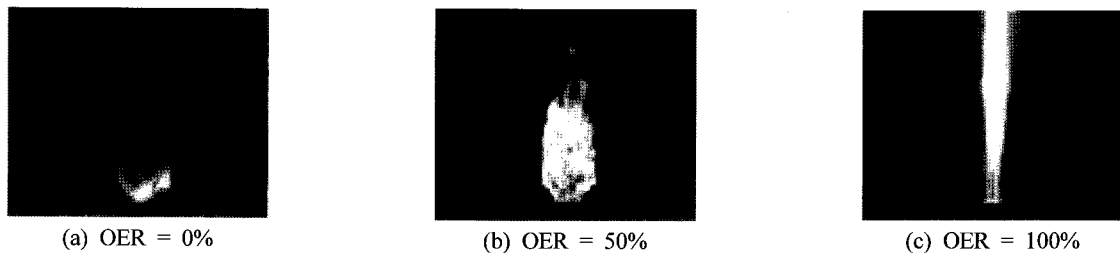


Fig. 2. The images of the oxygen-enriched flame.

최고온도가 나타났다. 이는 산화제 유량 감소로 인한 산화제와 연료의 혼합지연으로 판단된다. 반면 공기를 사용한 경우에는 비교적 짧은 화염이 버너 선단에 형성되어 위의 실험결과에서 제시한 화염특성과 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 4는 로내 혼합특성에 영향을 주는 난류에너지를 가시화하여 나타낸 것으로 절대유량이 감소할수록 난류 에너지가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 즉 순산소 100%에서 난류에너지는 공기연소인 Fig. 4(a)에 비해 난류강도가 1/10 정도로 감소하였고 이것이 산화제와 연료의 혼합효과를 지연시켜 길고 가는 층류형태의 화염을 형성하였다.

특히 로내 최고화염온도는 산소부화율이 증가할수록 공기를 사용한 1,500 K으로부터, 50% 순산소에서 2,100 K, 그리고 100% 순산소에서 3,500 K으로 급격히 증가되었다. 결국 공기와 순산소 혼합비율이 적합하지 않을 경우 로내의 급격한 온도상승으로 인해 오히려 상당량의 thermal NO_x 발생이 우려될 것으로 판단되었다.

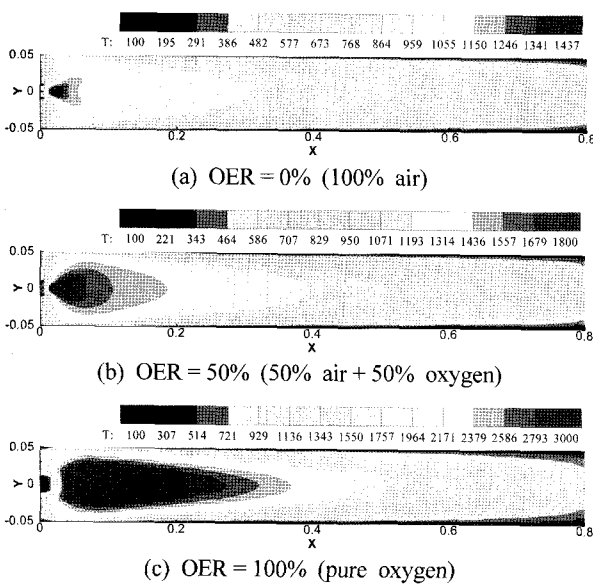


Fig. 3. Flame temperature of LNG fuel in the oxygen enriched environment.

3.2. 선회수

버너의 선회가 화염과 배기가스 성분에 미치는 영향을 알아보기 위하여 선회수 0.77을 갖는 표준 연소기에 대해 선회각(swirl angle)을 0°, 15°, 30°, 45°로 변화하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 5는 선회각에 따른 1,000℃의 화염구조를 나타낸 것으로 선회가 없는 경우 연료와 산화제의 혼합지연으로 인해 버너에서 떨어진 부분에 좁은 화염이 형성되었다. 결국 버너에 선회가 없는 경우 로내 화염온도가 비교적 낮고 연소효율이 선회가 있는 경우에 비해 떨어지는 것을 예측할 수 있다. 선회각이 15°로 증가한 경우 1,000℃의 화염이 커지는 것을 볼 수 있으며, NO_x 발생량 역시 증가하였다. 선회각이 30°인 경우 화염은 버너 선단에서 형성되고 화염이 상하 방향으로 넓고 짧게 분포하는 것을 볼 수 있다. 특히 45°의 선회각에서는 화염이 버너 선단 벽쪽으로 치우쳐서 형성하고 있으므로 연소로 측벽과 버너선단의 열손상이 우려된다. 결국 Fig. 5로부터 연소로에서 버너의 선회각은 화염구조에 직접적으로 영향을 주며 또한 대기오염물질을 포함한 연소가스의 조성과 관계가 있다.

Fig. 6은 선회각에 따른 연소로 출구에서 NO_x 발생량을 예측한 것으로 표준 선회수 0.77보다 큰 선회를 준 경우 NO_x 발생량이 감소하였다. 그러나 지나친 선회류는 버너선단에 화염을 형성하고 열효율을 감소시킬 수 있으므로 연소로 형상에 맞는 최적의 선회각을 결정하여 버너를 설계하여야 한다. 이와 같은 버너의 설계로부터 저 NO_x 버너(low NO_x burner)를 개발할 수 있으며 연소개선에 의한 NO_x를 조절할 수 있는 대표적인 방법 중의 하나이다. 본 연구에서 사용한 소형 LNG 연소기의 선회각은 대략 30~45° 범위가 적당할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각각 연소로 중심에서 측방향으로 로내 온도분포와 CO 농도를 나타낸다. 선회각이 클수록 최고화염온도가 버너 선단으로 가까워지는 것을 볼 수 있으며 선회각이 없는 경우 연소효율 저하에 의해 화염온도가 가장 낮게 나타났다. CO 농도 역시 선회각이 클수록 버너 근처에서 최고 농도를 나타내다가 연소가 진행되면서 CO₂로 완전산화하여 높은 연소효율을 보였다. 그러나 선회각이 없는 경우 연료와

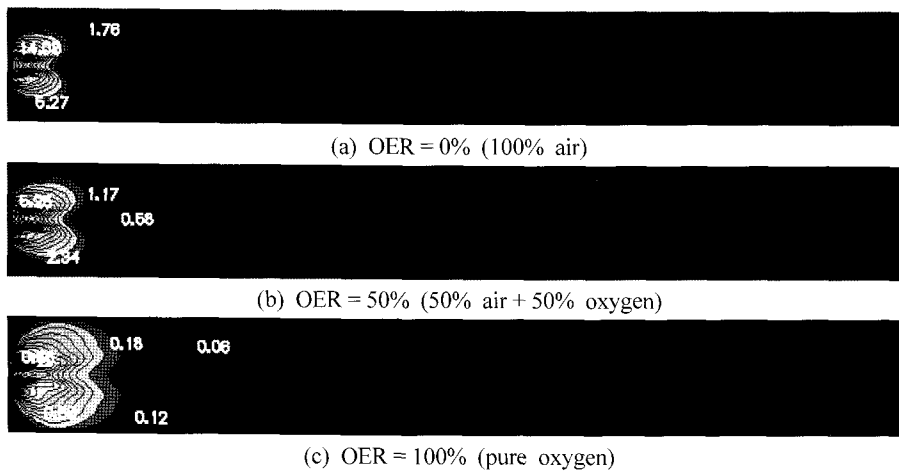


Fig. 4. Turbulent kinetic energy of LNG fuel in the oxygen enriched environment.

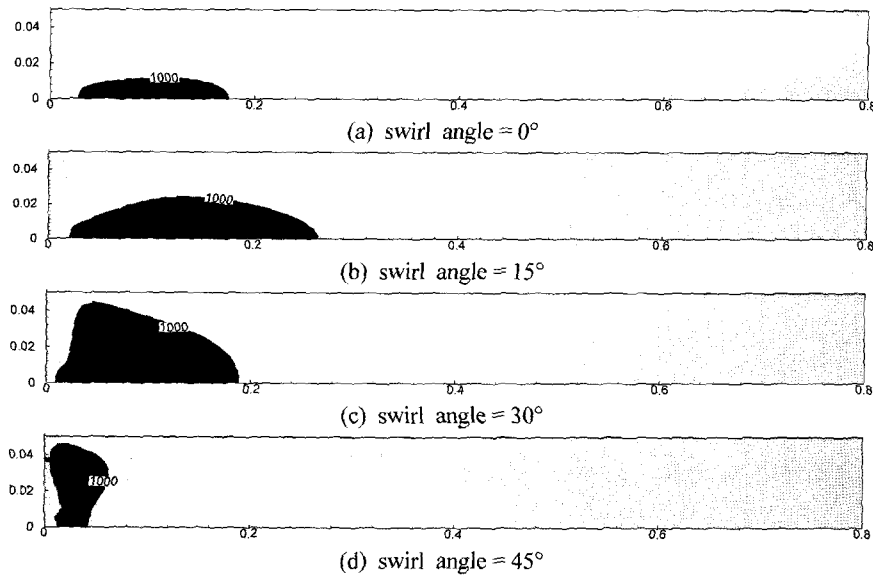


Fig. 5. Structures of 1,000°C flame as the swirl angle of burner.

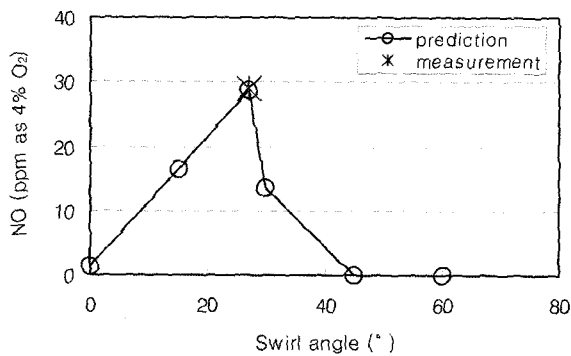


Fig. 6. Average NO concentrations at the exit of LNG combustor.

산화제의 혼합지연으로 인해 CO 가스의 최고농도가 낮게 나타났으며 서서히 완전연소되는 경향을 보였다.

3.3. NO_x 발생 특성

Fig. 8은 산소부화율에 따른 NO_x 발생량을 연소로 출구에서 4% O₂를 기준으로 하여 평균하여 나타낸 것이다. 공기

연소시 thermal NO_x 발생량이 29 ppm이었던 것이 산소부화율이 증가할수록 급격하게 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3에서와 같이 산소부화율이 증가함에 따라 thermal NO_x 발생기작에서 제한요소로 작용하는 O₂의 농도가 높아지고 로 내 화염온도 역시 1,800 K 이상으로 높아지므로 thermal NO_x 발생량이 급격히 증가한 것으로 판단된다. 특히 50% 산소부

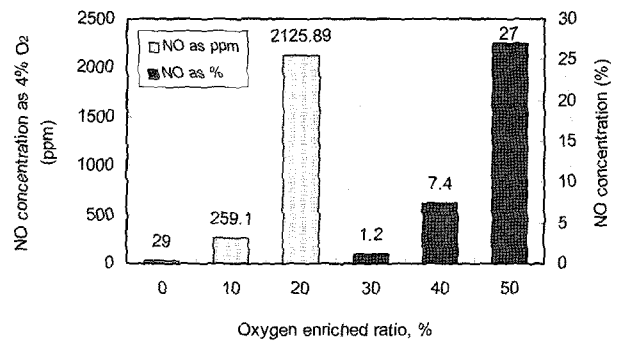


Fig. 8. Thermal NO_x generations as the O₂ enriched combustion air.

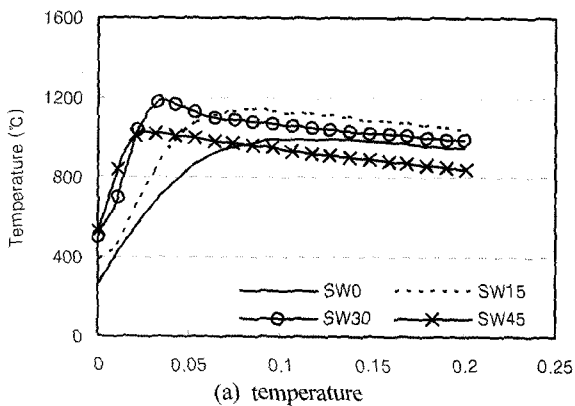


Fig. 7. Combustion characteristics as the swirl angle of burner.

화에서는 질소산화물의 농도가 27% 이상으로 예측되었으나 이는 추후 실험자료와의 정확한 비교가 필요하다.

산소부화농도가 증가함에 따라 NO_x 농도가 증가하는 이유는 NO_x 생성 공급원인 질소의 양이 비록 감소하기는 하나 산소분자와 반응하여 NO_x를 생성시킬 수 있는 충분한 량의 질소가 존재하고, Fig. 3과 같이 화염온도의 상승과 고온영역의 증가로 인하여 thermal NO_x 반응이 촉진되기 때문이다. 또한 산화제 공급 속도 감소에 의한 고온의 화염영역에서 연소가스 체류시간이 길어져 NO_x 발생량을 증가시킨다.

결국 산소부화율 증가에 따른 NO_x 발생량은 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으므로 산소부화량을 증가하여 화석 연료를 연소할 경우에는 연소가스의 재순환을 고려하여 로내 온도를 안정화하고 절대유량 감소로 인한 혼합지연효과를 최소화하여 화염대의 고온 집중화 현상을 저감하여야 한다. 이외에도 산화제를 단계적으로 공급하거나 최적의 선화를 갖는 저 NO_x 버너를 설계하여 연소 개선에 의한 NO_x 발생량을 감소하여야 한다.

4. 결론

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

증가된 산소부화량은 N₂ 가스에 의한 현열손실과 회석효과를 감소시키므로 로내 화염온도를 증가시키고 H₂O와 CO₂ 농도를 증가시킨다. 특히 100% 순산소 연소 환경에서는 배기가스 성분이 CO₂와 H₂O만 발생하므로 수분을 응축하여 제거할 경우 CO₂의 분리회수가 가능하게 되고 대기오염물질인 NO_x의 발생이 없는 장점을 가진다. 그러나 100% 순산소 연소를 제외한 산소부화량의 증가는 오히려 화염온도를 급격하게 증가시켜 thermal NO_x 발생을 증가시키는 결과를 초래하였다. 버너선화와 형상변화가 연소특성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 버너의 선화각을 변화하여 수치해석을 수행한 결과 30~45°의 버너 선화는 LNG 연료의 연소효율을 증가시키고 동시에 NO_x 발생량을 저감시켰다.

일반적으로 본 연구에서 수행한 실험조건에 대한 수치해석 결과는 물리적으로 일관성 있는 결과를 제시하였으나 thermal NO_x 생성농도에 대한 정확한 예측을 위해서는 추후 모델에 대한 보다 면밀한 검증이 필요하다. 본 연구에서 개발하고 있는 컴퓨터 프로그램은 에너지 이용효율 향상과 순산소 연소시 나타날 수 있는 화석연료의 연소특성 해석에 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

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
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	난류 Prandtl/Schmidt수
σ_s	Schmidt수
$\bar{m}_{fu}, \bar{m}_{ox}, \bar{m}_{pr}$	연료, 산소, 생성물의 평균질량분율
$m_{C_2H_2}, m_{O_2}, m_{CO}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{NO}$	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	활성화 에너지

참고문헌

1. 이산화탄소저감 및 처리기술개발 사업단, 더워지는 지구, 그 원인과 대책(2004).
2. 김한석, 김호근, 안국영, 김용모, "산소부화연소에서 CO₂ 첨가에 의한 연소특성," 대한기계공학회논문집 **28**(1), 9~15(2004).
3. 김경래, 김혁주, 류정인, "LNG-산소부화 선화류 연소특성," 제 25회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 41~47(2005).
4. 김한석, 안국영, 김호근, 이윤원, 이창언, "연소용 공기중 N₂의 CO₂ 대체에 대한 연소특성해석," 한국연소학회지, **7**(4), 29~35(2002).
5. 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).
6. Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill Company(1980).
7. 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, pp. 719~729(1977).
8. 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).
9. Dryer, F. L. and Glassman, I., "High-temperature oxidation of CO and H₂," *14th symposium on combustion*, The

- Combustion Institute, Pittsburgh, PA(1972).
10. 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).
 11. Zhu, X. L., Gore, J. P., Karpetsis, 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).
 12. 김혜숙, 신미수, 장동순, 최영찬, 이재구, "소형 오리멸전 보일러의 연소특성해석," *대한환경공학회지*, **27**(10), 1081~1089(2005).
 13. 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).
 14. Michel, J. B. and Payne, R., "Detailed measurement of long pulverized coal flames for the characterization of pollutant formation," IFRF document number F09/a/23(1980).