

소형 오리멀전 보일러의 연소특성 연구

김혜숙 · 신미수 · 장동순[†] · 최영찬* · 이재구*

충남대학교 환경공학과, *한국에너지기술연구원

(2005년 7월 29일 접수, 2005년 10월 26일 채택)

Study on the Combustion Characteristics of a Small-Scale Orimulsion Boiler

Hey-Suk Kim · Mi-Soo Shin · Dong-Soon Jang[†] · Young-Chan Choi* · Jae-Gu Lee*

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

ABSTRACT : In order to examine the application feasibility of Orimulsion fuel in a commercial boiler using heavy fuel oil, a numerical and experimental research efforts have been made especially to figure out the fundamental combustion characteristics of this fuel in a small-scale boiler. One of the notable combustion features of Orimulsion fuel is the delayed appearance of flame location with the flame shape of rather broad distribution, which is found experimentally and confirmed by numerical calculation. This kind of flame characteristics is considered due to the high moisture content included inherently in the process of Orimulsion manufacture together with micro-explosion by the existence of fine water droplets. In order to investigate the effect on the combustion characteristics of Orimulsion, a series of parametric investigation have been made in terms of important design and operational variables such as injected amount of fuel, types of atomization fluid, and phenomenological radiation model employed in the calculation, etc. The delayed feature of peak flame can be alleviated by the adjustment of the flow rate of injected fuel and the generating features of CO, SO₂ and NO gases are also evaluated in the boiler. When the steam injection as atomizing fluid is used, the combustion process is stabilized with the reduced region of high flame temperature. In general, the calculation results are physically acceptable and consistent but some refinements of phenomenological models are necessary for the better resolution of pollutant formation. From the results of this small-scale Orimulsion boiler, it is believed that a number of useful information are obtained with the working computer program for the near future application of Orimulsion fuel to a conventional boiler.

Key Words : Orimulsion Fuel, Peak Flame Temperature, Delayed Appearance, Numerical Calculation, Micro-Explosion, Atomizing Fluid

요약 : 본 연구에서는 기존에 증유를 사용하는 상용보일러에서 오리멀전 연료의 활용 가능성을 평가하기 위하여 소형 보일러에서 오리멀전 연료의 기본적인 연소특성을 실험과 더불어 수치해석하였다. 오리멀전의 주요 연소특성은 최고 화염온도가 버너로부터 20~30 cm 뒤쪽에 나타나는 화염지연현상과 비교적 넓게 분포하는 화염의 형태로 이는 오리멀전 제조과정에서 포함된 높은 수분함량과 미세한 수분액적으로 인한 미소폭발 현상에 기인한다. 오리멀전 연료의 연소특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 연료공급량, 무화유체의 종류, 그리고 계산에 사용된 현상학적인 복사모델과 같은 중요한 설계 및 운전인자에 대한 일련의 변수연구를 수행하였다. 연소특성인 최고 화염온도 지연현상은 연료공급 속도를 조절함으로써 어느 정도 저감시킬 수 있었으며 연소생성물로 CO와 SO₂ 그리고 NO가스의 연소로 내 발생특성을 평가하였다. 또한 무화용 유체로 증기를 사용하였을 경우 로내 연소상태는 무화용 공기에 비해 안정화 되고 고온영역이 감소되는 결과를 보였다. 일반적으로 본 연구에서 수행한 실험조건에 대한 수치해석 결과는 물리적으로 일관성 있는 결과를 제시하였으나 오염물질 생성농도에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 추후 현상학적인 모델개선을 필요로 한다. 결국 본 연구로부터 개발된 컴퓨터 프로그램은 기존의 상용화 증유 보일러에서 오리멀전 연료로 대체 사용시 개선사항 및 유용한 운전 자료를 제공할 것으로 판단된다.

주제어 : 오리멀전, 최고화염온도, 화염지연현상, 수치해석, 미소폭발현상, 무화용 유체

1. 서론

오리멀전은 Fig. 1의 동베네주엘라 오리노코 벨트의 Cerro Negro 지역에서 나온 역청탄으로부터 생산된 역청탄-물 혼합의 에멀전 상태의 연료이다. 현재 역청탄 매장량은 대략 1.2조 배럴로 전세계 석유 매장량의 50%보다 큰 양이다. 오리멀전은 70% 역청탄과 30% 물 그리고 에멀전 상태를 유지

하기 위한 약간의 첨가제로 구성되어 있다. 결국 오리멀전 연료는 물에 에멀전화된 역청액적과 첨가제로 구성되어 있으며 오리노코(Orinoco)와 에멀전(emulsion) 단어의 합성으로부터 유도되었다.¹⁾

최근 오리멀전은 상용 발전소에서 석탄이나 증유를 대체할 수 있는 연료로 제안되어지고 있으며 캐나다, 덴마크, 이탈리아, 일본 등 9개 발전소에서 현재 사용되고 있다. 특히 증유의 큰 가격차이로 인해 오리멀전의 경제성이 부각되고 있으며 증유를 사용하도록 설계된 대부분의 플랜트들은 중요한 시스템 개조없이 오리멀전 연료로 대체가 가능하다.

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

Fax: 042-823-8362

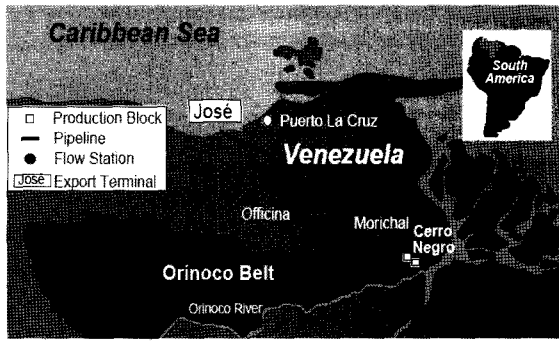


Fig. 1. Orinoco region of Venezuela.¹⁾

국내에서는 1998년부터 미래의 잠재적 연료로 검토를 착수하였으며 현재 영남화력발전소에서 부분적으로 사용되고 있다. 이외 울산 3 ton/d급 상용보일러에서 오리멸전을 연료로 하여 성공적으로 운전하고 있다. 에너지 생산을 위한 연료로써 오리멸전은 다음과 같은 다양한 장점을 가지고 있다. 천연연석탄의 매장량이 풍부하고 국제적으로 거래되고 있는 연료에 비해 경제적이며 연료의 생산, 운반, 취급 및 저장이 비교적 용이하다. 또한 착화가 잘되며 비교적 안정적인 연소 특성을 나타내고 중요한 설비개조 없이 석탄이나 중유를 사용하도록 설계된 발전소에 적용이 가능하다는 점이다.²⁾

그러나 오리멸전은 황, 바나듐, 니켈 등의 원소 함유량이 높으므로 연소 시 SO₂와 중금속 물질 등과 같은 대기오염물질을 배출하므로 이의 보편적 사용에 부정적인 영향을 주고 있다.³⁾ 결국 미래의 경제적인 에너지원으로 오리멸전을 사용하기 위해서 환경적 영향을 최소화 할 수 있도록 탈황기술과 고온부식 방지를 위한 첨가제 개발, 중금속 물질의 효율적 제거를 위한 연구들이 선진국을 중심으로 활발히 수행되고 있다.

오리멸전은 중유와 비교하여 볼 때 다른 화합물의 존재로 인해 비교적 상이한 연소특성을 나타낸다. 특히 오리멸전이 포함하고 있는 물은 연소온도와 반응원결에 필요한 전반적인 반응시간에 영향을 준다. 이는 화학적으로 비활성 물질인 물의 실질적인 질량을 추가함으로써 보일러 열효율에 중요한 영향을 주며, 결과적으로 상당한 수준의 열이 보일러로부터 빠져나갈 수 있다. 그러므로 보일러 운전 전에 전체적인 영향을 최소화하기 위해서는 보일러 열전달 표면적의 변화가 필요하다.^{4,5)}

발전소나 산업용 보일러의 연료로 오리멸전은 앞서 언급한 장점과 다른 화석연료와 비교할 때 대기오염물질 배출한다는 점에서 단점을 가지고 있다. 그러나 예멸전화된 연료인 오리멸전은 물의 미소폭발현상(micro-explosion)으로 비교적 낮은 CO, NO 그리고 미연탄소를 발생할 것으로 예측되나 청정연료의 입자성물질보다 작은 분진을 발생할 것으로 기대된다. 게다가 연료의 수분함량 증가와 열발생 특성의 변화로 인해 보일러 열효율이 낮아질 것으로 보인다.⁴⁾

결국 오리멸전을 화석연료를 태우는 기존의 보일러에 적용하기 위해서는 오리멸전의 연소특성을 실험과 수치해석을 통해 조직적으로 평가하여야 한다. 그러므로 본 연구에서는 오

리멸전의 난류 다상 연소반응을 위한 컴퓨터 모델을 개발하여 기존의 중유보일러에서 중유에 대한 오리멸전의 대체 가능성을 소형보일러 실험과 더불어 수치해석적으로 오리멸전의 연소특성을 평가하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법⁶⁾

2.1. 실험장치

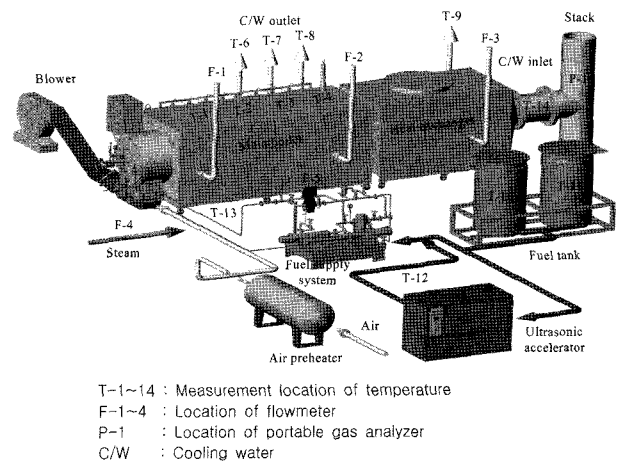
오리멸전의 연소특성을 평가하기 위해 일련의 연소실험이 한국에너지기술연구소에서 수행되었다. 본 연구에서 사용한 100 L/hr 소형보일러는 오리멸전과 중유를 동시에 사용할 수 있는 실험용 스케일의 보일러로 자체 개발한 저 NO 버너를 가지고 있고 무화용 유체로 공기와 스팀을 선택적으로 사용할 수 있다. Fig. 2는 실험장치의 구성을 나타낸 것으로 보일러 후단에 열교환기를 설치하여 대기로 배출되는 연소가스의 온도를 조절하였다. 보일러 중심부에는 일정간격으로 열전대(R-type)와 가스 채취구를 설치하여 연소가스의 성분을 분석(Alpha Electronics Plc.: MAESTER 2000)하였으며 열교환기를 통과한 연소가스는 굴뚝을 통해 대기 중으로 배출된다.

버너로 공급되는 연료와 무화용 공기 및 스팀 주입속도에 따른 연소조건을 평가하기 위해 유량계와 온도계를 설치하여 기록하였으며 버너건 옆과 보일러 중간 지점에 관측창을 설치하여 연소상태를 육안으로 관측할 수 있도록 하였다. 버너로 공급되는 오리멸전은 연소효율의 증가를 위해 초음파 가속기에 의해 미립화하였다.

오리멸전의 예멸전 상태는 연료공급시스템에 의해 영향을 받을 수 있으므로 펌프, 파이프 등에서의 전단력을 가능한 한 최소화 하였으며 공급되는 연료의 온도가 40~60°C 되도록 유지하였다.

2.2. 연소실험

오리멸전 연소시 배출가스 조성과 온도는 연소조건 및 버너설계인자에 따라 측정되었으며 이는 본 연료의 연소특성과



T-1~14 : Measurement location of temperature
 F-1~4 : Location of flowmeter
 P-1 : Location of portable gas analyzer
 C/W : Cooling water

Fig. 2. Experimental rig for the small-scale Orimulsion boiler.

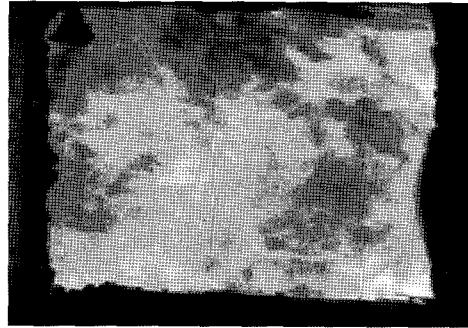
보일러 효율을 평가하는데 있어 매우 유용한 자료로 이용되었다. 오리멀전 연료의 최적 운전조건 및 버너 설계자료를 도출하기 위해 매 시험마다 연소조건을 조절하여 실험하였으며 그 다음 실험에 최적의 조건을 적용하여 연소변화를 관찰하였다. 보일러 내부 온도는 Fig. 2에 설치된 열전대(T-1~T-4)에 의해 실험기간 동안 지속적으로 측정하여 Fig. 3(a)와 같이 기록하였다. 버너로 공급되는 연료의 양과 온도, 그리고 스팀의 양은 Fig. 3(b)와 같으며 스팀유량이 측정되지 않은 12000~15000sec 동안은 오리멀전의 연소안정성을 평가하기 위해 스팀을 대신하여 무화용 공기를 공급한 경우이다.

Fig. 4는 보일러 관측창을 통해 찍은 보일러 내부 화염구조를 나타낸 사진으로 무화용 공기량이 지나치게 많은 Fig. 4(a)의 경우 오리멀전 액적이 타지 않고 휩쓸려 날려가는 미연탄소 입자의 궤적을 보였다. 반면 무화용 공기량이 오리멀전 연소시 필요로 하는 최적의 공연비로 공급된다면 Fig. 4(b)와 같이 미연탄소 입자의 궤적이 화염 내에서 사라지고 전체적으로 균일한 확산화염의 형태를 나타내었다.

연소용 공기는 완전연소를 위한 최적의 O₂ 농도를 공급하기 위해 계산된 이론공기량과 굴뚝에서 측정된 O₂ 농도로부터 판단하여 조절하였다. 그러나 무화용 공기압의 변동으로 인해 실험이 진행되는 동안 소형보일러에서 일정한 O₂ 농도를 유지하기란 쉽지 않다. 배출가스 조성은 실험기간동안 최대한 일정한 O₂ 농도를 유지하도록 한 후에 측정하였으며 추후에 본 연구에서 개발한 연소반응 수치해석모델의 연소반응생성물인 CO, SO₂, 그리고 NO 발생량을 검증하는데 사용하였다.



(a) Unburned droplet strike



(b) Stable flame

Fig. 4. Flame structure observed in a combustion test.

2.3. 수치해석방법

2.3.1. 일반지배방정식과 해법

무화된 오리멀전의 휘발가스, NO와 SO₂의 난류반응에 대한 기상지배방정식은 Eulerian 방법을, 그리고 오리멀전 액적의 거동에 따른 휘발화 과정은 Lagrangian 방법을 사용하여 계산하였다. 기상 상태에 대한 질량, 운동량, 에너지, 난류 및 화학종 농도 등에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 ϕ 는 단위질량당 물리량으로 표현되는 일반종속변수로 속도성분(u,v,w), 압력(p), 엔탈피(h), 화학종의 질량분율($m_{C,H_2}, m_{O_2}, m_{CO}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{SO_2}, m_{NO}$) 및 난류에너지와 이의 소멸에너지(k,ε)이다. $\rho, \Gamma_\phi, S_\phi, S_{\phi,p}$ 는 밀도, 일반종속변수에 대한 확산계수와 생성항 그리고 기상이 아닌 액적휘발로부터 야기되는 화학종과 엔탈피 생성항을 각각 나타낸다. 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 구하였으며 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연

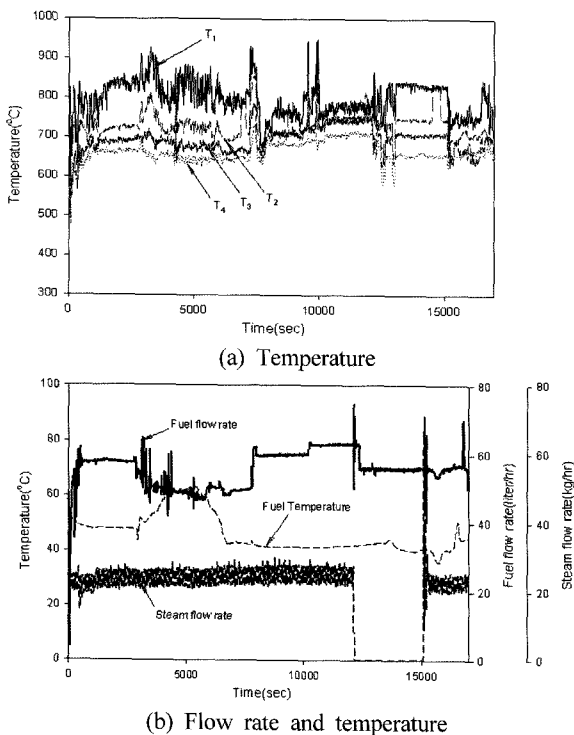


Fig. 3. Measurement data in a small-scale Orimulsion boiler.

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

Variables	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Axial Momentum	u	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Radial Momentum	v	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2\mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{x} - \frac{\partial p}{\partial r}$
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	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{K} (C_1 C_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$
Specific Enthalpy	h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$\dot{w}_{fu} H_{fu} - L_{H_2O} \dot{w}_{vol} - H_{rad}$
Fuel Mass Fraction	m_{fu}	Γ_{fu}	$-\dot{w}_{fu}$
Oxygen 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}	$\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} M_{H_2O} n_{H_2O} + \dot{w}_{vol} (1 - x_{H_2O})$
SO ₂ Mass Fraction	m_{SO_2}	Γ_{SO_2}	S_{SO_2}
NO Mass Fraction	m_{NO}	Γ_{NO}	$S_{Thermal-N} + S_{Fuel-N}$

\dot{w}_ϕ = Volumetric generation rate, \dot{w}_{vol} = Devolatilization rate, x_{H_2O} = Mass fraction of H₂O
 $S_{thermal-N}$ = Volumetric thermal NO generation, S_{fuel-N} = Volumetric fuel-NO generation
 S_{SO_2} = Volumetric SO₂ generation, L_{H_2O} = Heat of water evaporation, H_{rad} = radiation heat loss

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

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

계는 SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다.⁷⁾ 본 연구에서는 난류유동 및 연소반응에 대한 해석적인 해를 얻기 위해 자체 개발한 컴퓨터 프로그램을 사용하였다.

2.3.2. 연소반응 생성모델

오리멸전 연료의 연소반응에서 가연성 물질은 모두 C_xH_yO_z (H₂O)의 조성을 갖는 가스상태의 연료로 휘발화 된다고 가정하였다. 오리멸전의 연소반응은 연료의 화학반응시간이 매우 빠르기 때문에 연료와 산화제가 혼합되면서 이와 동시에 연소가 이루어지므로 전체 반응속도는 일차적으로 난류 혼합

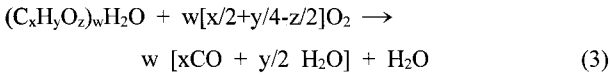
속도에 의해 영향을 받는다고 가정하였다. 이때 연료와 산화제의 혼합시간은 난류에디의 붕괴속도인 k/ϵ 에 비례하며 Magnussen과 Hjertager가 제안한 난류연소모델을 사용하여 화학반응속도와 혼합속도를 고려하였다.⁸⁾

w_{fu} = minimum of

$$\left[\bar{\rho} A \bar{m}_{fu} \epsilon / k, \bar{\rho} A (\bar{m}_{ox} / i) \epsilon / k, \bar{\rho} A (\bar{m}_{pr} / 1 + i) \epsilon / k \right] \quad (2)$$

여기서 i 는 연료의 단위질량당 화학양론적인 산화제의 질량분율을, m_{ox} 는 산화제의 질량분율, m_{pr} 은 생성물의 질량분율, 그리고 A 는 Lockwood 등이 제시한 경험상수이다.⁹⁾

예비연구에서 제안된 초기모델에서는 오리멀전의 연소를 기본적으로 일단계 비가역반응으로 가정하였다.¹⁰⁾ 그러나 본 연구에서는 오리멀전 연소에 대한 불완전 중간생성물인 CO를 고려하여 이단계 연소반응으로 확장하였으며 이단계 연소 반응식은 다음과 같이 표현될 수 있다.



CO의 평형 산화속도는 Dryer와 Glassmann (1972)이 제안한 반응기작에 근거를 두고 있다.¹¹⁾

$$\frac{d[CO]}{dt} = A[CO]^a[H_2O]^b[O_2]^c \exp[-E_a/RT] \quad (5)$$

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. 1150K 이상의 온도에서 CO종의 산화는 상대적으로 빠르므로 화학적 평형 상태로 접근한다고 모델화할 수 있다. 그러나 975~1150K의 온도범위에서 CO 산화는 느려지므로 제한속도 동력학으로 모델화되어야 하며 975K 이하의 온도에서는 산소가 존재함에도 불구하고 CO 산화는 일어나지 않게 된다.¹²⁾ 그러므로 본 연구에서는 Dryer와 Glassmann이 제안한 화학 평형모델을 개선하여 온도에 의한 CO 산화속도를 고려하여 계산하였다.¹³⁾

난류연소모델이 주요 화학종에 대한 전반적인 양상을 예측하는데 있어 성공적인 도구로 사용되고 있으나 국지적인 화염소멸을 구제화할 수 없고 난류혼합 뿐 아니라 화학적 동력학이 중요한 역할을 하는 SO₂와 NO와 같은 소량의 오염물질에 대해서는 잘 예측하지 못하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 SO₂와 NO의 생성반응에 대한 화학적 동력학을 난류연소모델에 포함시켜 전체 반응속도는 연속적인 두 단계의 조화평균에 의해 계산된다고 가정하였다.¹⁰⁾ SO₂는 오리멀전에 함유된 황으로부터 대부분 생성되므로 fast chemistry 가정하여 식 (2)의 난류연소모델을 사용하였으며 연소온도에 민감하게 반응하는 NO의 경우 Fuel NO와 Thermal NO에

대한 동력학을 모두 고려하였다. 이때 다상의 오리멀전 액적의 휘발화에 따른 연소지연 현상에 대한 영향을 SO₂와 NO의 생성반응에 포함시키기 위해 실험값과 비교를 통해 경험 상수를 조정하였다.¹³⁾

2.3.3. 화염열복사 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 다상의 난류연소반응 프로그램에 포함시키는 것은 계산상의 작업을 가중시킨다. 만약 로내 전체 화염을 열방출과 복사의 균일한 공급원이 고 화염이 시각적으로 얇다고 가정한다면 화염으로부터 복사에너지 손실 속도는 식 (6)과 같이 근사할 수 있다.

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

- 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 = 주변 온도 (K)

화염으로부터 복사열손실을 결정하는 중요한 요인 중의 하나는 CO₂와 H₂O 분자의 복사 참여이다. 일반적으로 CO, SO₂, NO, N₂O와 같은 다른 가스종들은 부차적인 중요성을 갖는다. Jay Gore는 층류 화염 계산에서 CO₂와 H₂O의 복사가 관여했을 때 최고화염 온도가 대략 50K 까지 감소한다고 보고하고 있다.¹⁴⁾ 그러므로 본 연구에서는 화염온도와 Plank 흡수 계수 그리고 화학종 사이의 내부적인 상관관계를 복사에 대한 고도 근사를 위해 고려하였다. H₂O, CO₂와 CO 가스에 대한 Plank 평균 흡수계수는 300~2500K 사이에서 온도의 함수로 나타나며 이 범위 밖에서는 부정확한 값을 나타낸다.¹³⁾

2.3.4. 경계조건

Fig. 5는 본 연구에서 고려한 3차원 축대칭 형상의 소형 오리멀전 보일러 도식도이다. 원통형 버너를 가진 3차원 장

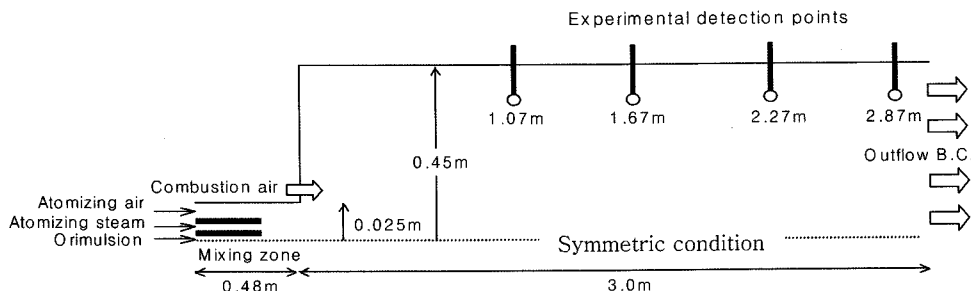


Fig. 5. Schematic of a small-scale Orimulsion boiler.

방형 형상의 소각로는 동일한 면적을 가지는 3차원 축대칭 형상으로 가정하였다. 이는 IFRF(International Flame Research Foundation)나 기타 우수한 국제연구논문에서도 흔히 사용되는 방법으로 연소로 직경과 노즐 직경 사이의 큰 비율 차이로 인해 연소현상에 나타나는 중요한 물리적 특성을 손상시키지 않으며 3차원 수치 해석상에서 야기되는 불필요한 계산상의 어려움을 극복하기 위한 효율적인 방법의 하나로 선택하였다.¹⁵⁾

이류체 F-켓 타입의 개선된 버너가 예비실험에서 나타난 화염지체 현상과 이격된 화염거리를 최소화하기 위해 사용되었다.⁶⁾ 특히 개선된 버너는 무화용 유체인 공기나 스팀을 선택적으로 사용할 수 있으므로 이를 수치해석 모델에 고려하여 계산하였다. 계산영역에 대한 40×60과 40×80 격자의 민감도 분석결과 큰 차이를 나타내지 않았으므로 계산시간을 단축하기 위하여 40×60 격자를 생성하여 사용하였다. Table 2는 소형 오리털전 보일러의 표준 연소조건을 나타낸 것으로 수치해석시 입력조건으로 사용하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

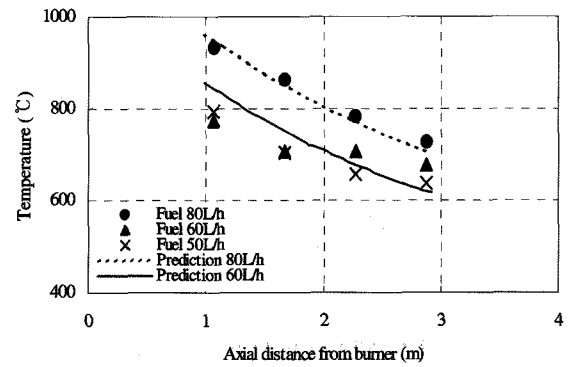
3.1. 모델검증

Fig. 6(a)는 연료투입량 변화에 따른 보일러 중앙부에서 축방향으로 화염온도 곡선을 보여준다. 표준조건에서 측정된 화염온도는 버너근처에서 최고화염 온도를 나타낸 후 선형적으로 감소하여 출구에서 650℃를 나타내었다. 이와 같이 비교적 낮은 화염온도는 결과적으로 NO 발생량의 감소를 유도하였다. 수치해석의 경우 80 L/hr에서 60 L/hr로 연료 공급량의 감소는 축방향으로 100℃의 일정한 온도감소를 나타내었다. 반면 실험에서는 보일러 중반부까지 연료 공급량에 따라 온도차이를 나타내다가 출구에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 60 L/hr에서 50 L/hr로 연료 공급량이 감소된 경우 버너근처에서는 온도차이를 나타내지 않다가 출구에서 약간의 차이를 보였다. 이와 같이 실험적 현상과 계산 결과의 차이에 대한 정확한 해석은 현 상태에서 쉽지 않으나 실험 수행시 순간적으로 변동되는 연소조건과 보일러 내부에서 일어나는 복잡한 열전달 현상에 기인한다고 판단된다.

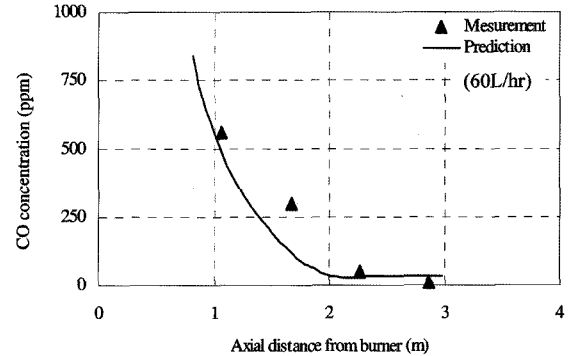
Fig. 6(b)~(d)는 Table 2에서 제시한 표준조건에서의 CO, SO₂, NO 농도를 각각 나타낸다. 고온의 화염영역에 형성된

Table 2. Standard condition employed in a small-scale Orimulsion boiler

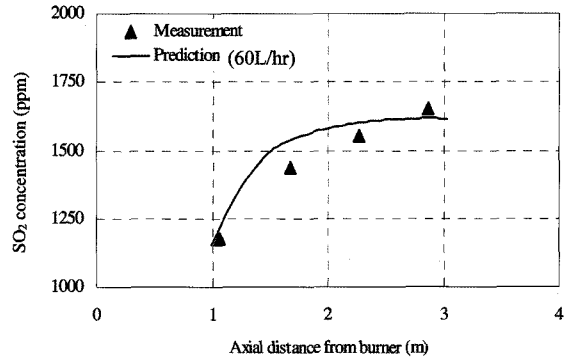
Fuel feeding rate	60~80 L/hr
Oxidizer	21% O ₂ + 79% N ₂ Air
Excess Oxygen	1.05
Injection Pressure	2.0 kg/cm ²
Atomizing Gas	Steam/Air
Droplet diameter	30 μm
Swirl Number	0.25



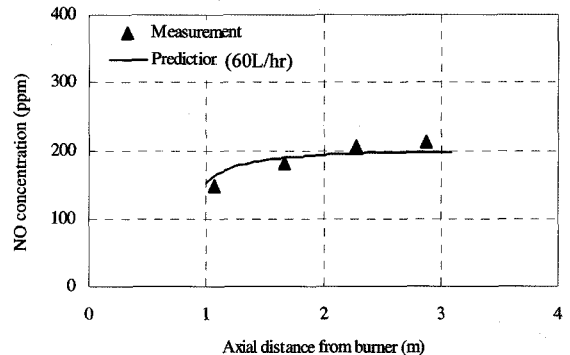
(a) Temperature



(b) CO concentration for 5% excess O₂



(c) SO₂ concentration for 5% excess O₂



(d) NO concentration for 5% excess O₂

Fig. 6. Comparison of temperature and flue gas concentration predictions with measurements.

CO 가스는 출구로 갈수록 연소가 진행되어 완전 연소되고 있다. 출구에서 계산된 평균 CO 농도는 5% 과잉산소에서 50 ppm정도를 나타내어 오리털전 연료의 비교적 좋은 연소성

을 보여주고 있다. Fig. 6(c)는 SO₂ 농도를 비교하여 나타낸 것으로 오리멀전의 연소가 진행됨에 따라 연료에 포함된 황이 산화하여 SO₂를 형성하였으며 출구에서 대략 1700 ppm의 농도를 나타내었다. 반면 NO가스의 경우 SO₂와 달리 실험과 계산결과에서 모두 비교적 편평한 생성곡선을 나타내었다. 이는 화염온도에 민감한 NO가스가 고온의 화염이 위치한 버너 근처에서 생성된 후 출구로 갈수록 온도가 감소됨에 따라 추가적으로 NO가 더 생성되지 않고 일정한 농도를 유지한 것으로 판단된다. 특히 로내 온도가 비교적 낮기 때문에 발생된 NO 가스는 대부분이 fuel-NO이며 thermal NO의 영향은 크지 않은 것으로 계산되었다. 출구에서 계산된 평균 NO 농도는 181 ppm으로 실제 측정된 NO 농도인 200 ppm와 유사한 결과를 나타내었다. 결국 본 연구에서 개발한 수치해석 모델은 연소조건 변화에 따른 대기오염물질인 CO, SO₂와 NO 가스 발생량을 비교적 정확하게 예측하였다. 특히 CO와 NO 가스는 보일러에 형성된 화염온도 조건과 밀접한 상관관계를 가진다.

3.2. 연소특성

Fig. 7은 오리멀전 연료의 연소반응장을 나타낸 것으로 온도장과 CO 농도, SO₂ 농도, 그리고 NO 농도를 각각 보여준다. 보일러 내부 온도분포를 나타내는 Fig. 7(a)의 경우 최고화염 온도는 버너에서 약간 떨어진 지점에서 나타나고 있으며 출구로 갈수록 화염온도는 열복사 손실에 의해 서서히 감소되고 있음을 알 수 있다. CO 농도는 최고화염이 위치한 지점에서 최고농도를 나타내다가 연소가 진행되면서 신속히 CO₂로 완전연소하였다. 오리멀전 연소시 발생하는 주요 대기오염물질인 SO₂와 NO 농도의 경우 연소가 진행됨에 따라 점차적으로 증가하여 보일러 출구에서 대략 1700 ppm과 200 ppm의 농도를 나타내었다. 이와 같이 출구에서 계산된 평균 SO₂와 NO 농도는 실험시 측정된 값과 유사하였다. 특히 오리멀전을 연료로 사용할 경우에는 환경기준을 만족하기 위해 고농도로 발생하는 SO₂를 처리할 수 있는 탈황설비를 설치하여 90% 이상 SO₂를 제거하여야 한다. NO의 경우 로내 화염온도나 연소조건에 의해 NO 발생량이 영향을 받으므로 연소조건 개선과 더불어 후단 방지시설을 통해 제거하여야 한다.

3.3. 연료 공급량

Fig. 8은 연료공급량 60 L/hr와 80 L/hr에 대하여 보일러 축방향으로 화염온도 예측결과와 비교하여 나타낸 것이다. 연료공급량이 80 L/hr인 경우 최고화염온도는 버너로부터 20~30 cm 떨어진 부분에 위치하였으나 연료공급량을 60 L/hr로 감소시킨 경우 이와 같은 화염지연현상이 약간 감소되었다. 이는 예비 실험에서도 이미 확인된 것으로 연소공급량 감소에 따른 부피유량속도의 감소는 화염 지연현상을 어느 정도 저감시킬 수 있었다.¹⁰⁾ 이외에도 버너의 설계 개선을 통해 버터팁으로부터의 이격현상을 최소화 할 수 있었다.⁶⁾

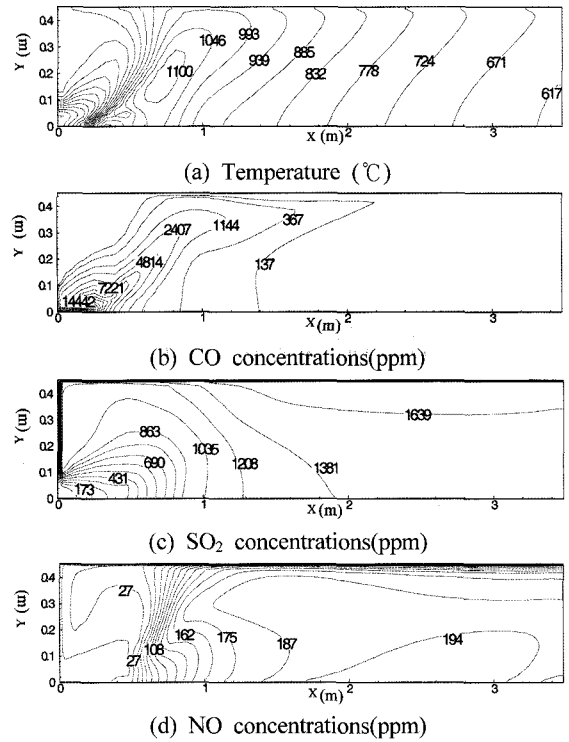


Fig. 7. Combustion characteristics of Orimulsion fuel in a small-scale boiler.

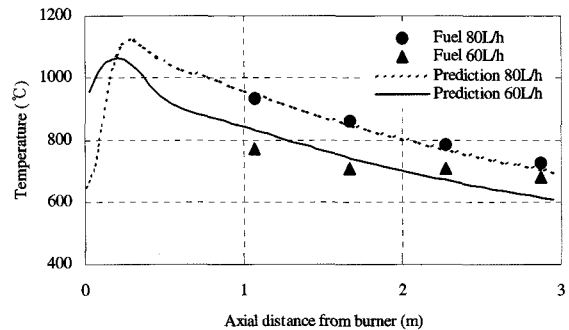


Fig. 8. Temperature profiles along the axial distance from burner.

로내 온도의 경우 보일러 외벽에 설치된 열교환기로 인해 전반적으로 화염온도가 낮았으며 출구에서 600~700℃ 정도의 온도를 보였다. 특히 연료공급량에 따른 화염 온도의 차이는 출구로 갈수록 점차적으로 감소한 반면 일정한 화염열복사를 가정한 계산결과에서는 버너근처를 제외하고는 보일러 출구방향으로 동일한 온도차이를 나타내었다. 결국 Fig. 8의 결과로부터 복잡한 열전달현상이 발생하고 있는 보일러에서 오리멀전 연료의 공급량을 최소로 하면서 최대의 열효율을 얻을 수 있는 보일러 운전방안이 강구될 수 있을 것으로 사료된다.

3.4. 무화용 유체

무화용 유체의 타입은 오리멀전의 연소특성에 영향을 주므로 보일러 내부 화염형성에 미치는 영향을 평가하기 위해 수

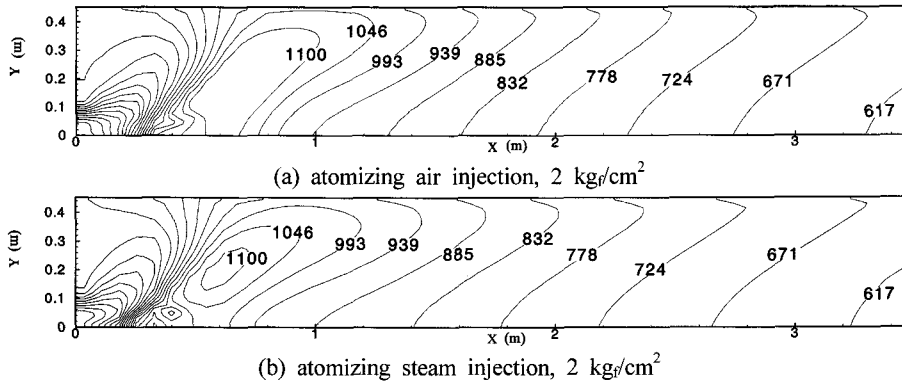


Fig. 9. Flame characteristics by atomizing fluid type in the furnace (°C).

치해석을 수행하였다. 연소실험에서는 무화용 공기를 대신 하여 스팀을 사용했을 경우 더욱 안정된 화염이 형성된 것을 관찰하였다.

Fig. 9는 무화용 유체에 따른 보일러 내부 온도분포를 나타낸 것이다. 스팀이 무화용 유체로 주입된 Fig. 9(b)의 경우 출구 연소가스 온도는 공기를 사용한 Fig. 9(a)와 유사한 값을 나타내었으나 버너 근처의 고온영역이 감소된 것을 볼 수 있었다. 결국 감소된 고온의 화염영역은 무화용 공기에 비해 출구에서 1/2 정도의 NO를 생성하였으며 NO 발생량을 감소시키는 역할을 하였다. 또한 무화용 공기에 비해 출구에서 계산된 낮은 CO 농도는 열용량이 공기에 비해 큰 스팀에 의해 안정적인 화염이 형성되어 불완전 연소물질인 미연탄소물질의 생성을 최소화한 것으로 판단되었다.

4. 결론

기존 상용화급 보일러에서 대체연료로써 오리멀전 연료의 사용 가능성을 평가하기 위해 소형 보일러에서의 연소특성 실험과 더불어 수치해석적 연구를 수행하였다. 개발된 컴퓨터 프로그램은 소형 보일러에서 측정된 온도와 CO, SO₂, 그리고 NO와 같은 가스농도와와의 비교를 통해 성공적으로 검증하여 운전조건 변경에 따른 연소현상을 예측하였다. 주요 연구결과를 요약하여 나타내면 다음과 같다.

오리멀전은 다량의 수분을 함유하고 있으므로 최고 화염 온도가 버너로부터 약간 떨어진 지점에서 나타났으나 연료 공급 속도가 감소됨에 따라 버너로부터 최고 화염온도가 위치한 지점까지의 거리는 감소되었다. CO 가스의 경우 화염근처에서 최고농도를 나타내다가 연소가 진행되면서 CO₂ 가스로 완전 연소한 반면 SO₂와 NO가스의 경우는 연소가 진행됨에 따라 점차적으로 증가하여 보일러 출구에서 1700 ppm과 200ppm 정도의 농도를 각각 나타내었다. 오리멀전 연료의 공급속도를 80 L/hr에서 60 L/hr로 감소시킨 경우 수치해석결과와 더불어 실험에서 관측된 최고화염온도 지연현상은 어느 정도 감소하였으나 출구에서 측정된 화염온도는 연료공급량 감소에도 불구하고 큰 차이를 나타내지 않았다. 또한 본 연구에서 평가된 실험조건에서 무화용 유체로 공기를 대신하여 스팀을 사용한 경우 화염이 비교적 안정적으로 형

성되었으며 동시에 로내 온도 저감효과로 인해 NO 발생량을 저감시킬 수 있었다.

이와 같이 소형 보일러에서 수치해석을 이용한 오리멀전의 연소특성 연구는 기존의 상용화급 중유 보일러에서 오리멀전 연료로 대체 사용시 개선사항 및 유용한 운전 자료를 제공할 것으로 판단되었으며 이를 위하여서는 다상 난류 반응장의 복잡한 현상학적인 모델 개선과 조직적인 변수연구가 향후 필요할 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 산업자원부 “에너지자원기술개발사업(청정에너지)”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

기호설명

ϕ	일반종속변수
Γ_ϕ	ϕ 에 대한 확산계수
S_ϕ	ϕ 에 대한 생성항
$S_{\phi,p}$	입자에 의한 생성항
μ_{eff}	유효점성계수
k, ϵ	난류운동에너지, 난류소멸에너지
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	난류 Prandtl/Schmidt 수
σ_s	Schmidt 수
$\bar{m}_{fu}, \bar{m}_{ox}, \bar{m}_{pr}$	연료, 산소, 생성물의 평균질량분율
$m_{C,H}, m_{O_2}, m_{CO}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{SO_2}, m_{NO}$	화학종의 질량분율

참고문헌

1. Bitor America, Physical and chemical characterization of Orimulsion-100 fuel, its constituents and byproducts of combustion, Bitor America, Boca Raton, FL(1997).
2. John, L., “Environmental briefing-an alternative fossil fuel,” Electric Association(2000).
3. Allen, J. W. and Beal, P. R., The evaluation and application of Orimulsion by International Combustion Ltd.,

- in *Proceedings of the 21st International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems*, Clearwater, FL, March 18~21, 723~732(1996).
4. Miller, C. A. and Srivastava, R. K., The combustion of Orimulsion and its generation of air pollutants, *Progress in Energy and Combustion Science*, **26**, 131~160(2000).
 5. Meisingset, L., Mller, W., and Pedersen, P. H., "Experience from conversion of a 640 MW coal-and oil fired unit into Orimulsion," *Proceedings of the 22nd International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems*, Clearwater, FL, 461~472(1997).
 6. 최영찬, 이재구, 김재호, 홍재창, 김용구, "오리멀전의 연소특성에 관한 연구," 한국화학공학회 춘계학술발표회 논문집, 공주대학교, pp. 23~24(2004).
 7. Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill Company(1980).
 8. 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).
 9. 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).
 10. 김혜숙, 신미수, 장동순, 최영찬, 이재구, "소형 연소로 오리멀전 연소특성의 수치해석 연구," *대한환경공학회지*, **26**(4), 499~500(2004).
 11. Dryer, F. L. and Glassman, I., "High-temperature oxidation of CO and H₂," *14th symposium on combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA(1972).
 12. 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).
 13. Kim, Hey-Suk, "Numerical modeling of SS separation, thermal drying and incineration pollutant abatement in a sludge and waste-related combined treatment system," Ph.D. Thesis, Chungnam National University(2005).
 14. 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).
 15. 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).