

폐기물 고열분해 동력 보일러의 운전 조건에 따른 연소 및 배출가스 특성에 관한 수치적 연구

임 호[†], 황민영[†], 김규보[‡], 박성룡[§], 전충환^{*}

[†]부산대학교 기계공학부 대학원

609-735 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길2

[‡]부산대학교 화력발전에너지분석기술센터

609-735 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길2

[§]한국에너지기술연구원 열에너지변환연구실

305-343 대전광역시 유성구 가정로152

부산대학교 기계공학부, 화력발전에너지분석기술센터

609-735 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길2

(2014년 2월 7일 접수; 2014년 3월 7일 수정본 접수; 2014년 3월 7일 채택)

Numerical Study on the Combustion and Exhausted Gases for Operating Conditions in a Fast Pyrolysis Power Boiler

Ho Lim[†], Min-Young Hwang[†], Gyu-Bo Kim[‡], Seong-Ryong Park[§], and Chung-Hwan Jeon^{*}

[†]Graduate school of Mechanical Engineering, Pusan National University

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

[‡]Pusan Clean Coal Center(PC3), Pusan National University

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

[§]Thermal Energy Conversion Laboratory, Korea Institute of Energy Research

152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

Department of Mechanical Engineering, Pusan Clean Coal Center(PC3), Pusan National University

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

(Received for review February 7, 2014; Revision received March 7, 2014; Accepted March 7, 2014)

요 약

전 세계적으로 환경 및 자원 위기로 인해 신재생 에너지원으로 폐기물의 에너지화에 대한 관심이 증대되고 있다. 따라서 폐기물 에너지화 기술 중 연소 기술인 동력 보일러 대상으로 연소 안정성과 고효율을 확보할 수 있는 고열분해 방식의 보일러에 대한 기술 개발이 필요하다. 본 연구의 목적은 비성형 플라스틱 폐기물을 연소 시킬 수 있는 고속 열분해 건류 보일러 개발에 앞서 수치해석을 통해 연소성과 환경성을 평가하고 안정적 운전 조건을 도출하여 고속 열분해 보일러의 기술 개발을 위한 설계 및 운전 에 대한 기초 자료를 제공함에 있다. 이를 위해 약 100만개 격자로 구성된 3차원 형상 모델링을 진행하였으며 연료의 상태량 분석을 실시하여 수치해석의 입력 값으로 활용하였다. 또한 상태량을 바탕으로 하여 해석 조건을 수립하였으며, 연료의 발열량과 투입량 변화에 따른 보일러 내 온도 및 연소 및 배출가스 특성을 분석하여 안정적 운전 조건을 제안하였다.

주제어 : 신재생에너지, 고열분해, 동력보일러, 보일러수치해석, 비성형 폐기물 고품연료

Abstract : Numerical study was investigated to obtain the database for developing a fast pyrolysis power boiler by waste fuel. The studies with various conditions were performed using ANSYS FLUENT. Also, the fuel properties was experimentally analyzed to utilize the input parameters for numerical analysis, that were proximate and ultimate analysis, reaction kinetics included pyrolysis and combustion. The results showed that temperature, combustion and exhausted gases was changed with heating value of fuel and feeding rate. Finally, the stable operating condition by analyzing results was proposed.

Keywords : Renewable energy, Fast pyrolysis, Power boiler, Boiler simulation, FRDF

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: chjeon@pusan.ac.kr

doi: 10.7464/ksct.2014.20.1.080

pISSN 1598-9721 eISSN 2288-0690

http://cleantech.or.kr/ct/

1. 서 론

현재 전 세계적으로 환경위기와 자원 위기가 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 국내에서도 저탄소 녹색성장을

화두로 정부 관계부처, 연구단체, 기업체 등이 협력하여 신재생 에너지 보급률을 확대하기 위해 노력하고 있다[1]. 이러한 신재생 에너지 중 특히 폐기물 및 바이오 매스는 저렴한 비용으로 신재생 에너지 공급의 조기 성과 창출이 가능하고 온실가스 감축의무 이행의 유력한 수단으로 부각되고 있다.

정부는 2030년까지 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획에 따라 신재생에너지 비중을 전체 에너지 비율을 10%까지 높이고자 하고 있다. 특히 2012년 신재생에너지 에너지 통계[2]에 따르면 신재생 에너지 공급 비중의 약 68%를 폐기물이 차지하고 있으며 전년 대비 20%가 증가하고 있음을 보고하였다. 이처럼 폐기물을 활용한 에너지 생산 비중은 점차적으로 증가할 것으로 예상된다.

폐기물의 에너지화 기술[3,4]에는 재활용 기술, 생분해처리 및 자원화 기술, 열적처리 및 에너지회수 기술 등이 있다. 이에 따라 폐기물을 통한 고형 연료를 제조, 연소하는 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 폐기물 고형 연료에는 성형(pellet)과 비성형(fluff) 타입으로 구분되며 기술 개발에 있어서 편의성, 경제성 및 기술의 검증성 등이 용이하기 때문에 현재 여러 신재생 에너지 중 국내에서 가장 각광받고 있는 연구 분야 중의 하나이다.

미에너지국(DOE)에서는 Aero project의 일환으로 유동층 보일러를 이용하여 초고온(1,350 °C 이상) 유동층 보일러 개발을 진행하였으며, 프랑스 T.N.E.E. 사에서는 가연성 물질을 소각하기 위하여 순환 유동층 연소로를 개발하였다. 국내의 경우 한국에너지기술연구원에서 1989년부터 고체 입자를 이용한 유동층 열교환기에 대한 연구를 진행해왔다. 또한 1995년 한국과학기술연구소에서 폐 온수로 부터의 폐열회수를 위하여 다관형 순환유동층 열교환기에 대한 실험을 수행하였다[5].

이처럼 폐기물을 이용한 유동층 보일러나 스토커식 소각로와 폐열 보일러[6] 등이 운전되고 있으나 비성형 고형연료(fluff refuse derived fuel, FRDF)를 이용한 고열분해 연소기 방식의 증기 보일러(동력 보일러)에 대한 기술은 전무한 실정이다. 고열분해 연소기의 경우는 폐열을 회수하여 고온의 연소용 공기를 공급하여 고형 폐기물 연료의 열분해 현상을 통한 안정적 연소와 친환경성을 확보할 수 있는 기술이다.

그러나 현재 폐기물을 이용한 고속 열분해 건류 보일러 연소 기술에 대한 연구는 전무한 상태이며 특히 비성형 폐플라스틱을 연료로 이용한 기술은 고형 연료화한 폐기물을 이용하는 기술에 비해 에너지 소비 비용을 절감할 수가 있다.

이에 본 연구에서는 다양한 비성형 플라스틱 폐기물을 연소시킬 수 있는 고속 열분해 건류 보일러를 개발 전에 있어서 수치해석을 통해 보일러에서의 연소성과 환경성을 평가하고 안정적 운전 조건을 도출해내어 고속 열분해 건류 보일러에 대한 기술 개발에 설계 및 운전에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다. 수치해석을 수행함에 앞서 연료의 물성 및 동특성(kinetic)을 실험적으로 도출하여 수치해석의 입력 값으로 적용하였다. 또한 연소특성 및 환경적 특성, 운전 최적화를 위해 연료량과 연료의 발열량에 따라 특성을 분석하였다.

2. 동력 보일러 모델링

2.1. 지배 방정식

보일러 내부 해석을 위해 사용된 상용 코드는 유한 체적법을 기초로 하는 FLUENT를 사용하였다. 연료로 사용되는 폐기물은 고체 연료이며, 이는 탄화 수소 계열이 포함된 휘발분과 일부 탄소 분의 발열량을 통해 보일러의 출력을 예측할 수 있다. 보일러 내부에서 휘발분과 탄소의 연소 현상이 발생하게 된다. 고체 연료를 사용하는 보일러의 내부 해석을 위해서 탈휘발 반응 속도 상수와 탄소 성분의 반응 속도 상수를 선정하는 것이 매우 중요하다. 고체 연료가 산화제와 함께 고온에 노출되면, 탈휘발 반응 속도 상수에 의해 휘발분이 시간에 따라 기체 상으로 방출되며 산화제와 반응하여 기체 연소가 일어나게 된다. 안정화된 보일러 내부에서는 기체상인 휘발분 연소 반응이 아주 빠르게 일어난다. 휘발분을 통한 기체상의 연소는 확산이 대부분 지배하는 반응이다. 이를 바탕으로 보일러 내부 해석을 위해서는 확산을 통한 반응이 고려된 eddy-dissipation 연소 모델을 선정하여 기상 연소 반응식을 풀게 된다. 탈휘발 속도 상수는 two-competing rate 모델을 사용하여 입자가 겪게 되는 온도 영역에 따라 보정된 탈휘발율을 고려하였다. 다른 한편으로 고온 상태에서 탄소분의 연소가 일어나며 CO₂를 발생하는 연소가 진행된다. 이 때 저온에서는 확산의 영향이 지배적인 반응률을, 고온 영역에서는 입자 표면에서의 반응이 지배적인 반응률을 보인다. 본 연구에서는 이 두 가지 반응율을 모두 고려하는 동특성 확산(kinetic/diffusion) 모델을 선정하였다.

또한, 연소시 발생하는 NO_x를 예측하기 위하여 NO_x 모델을 적용하여 해석하였으며 열적(thermal) 및 연료적(fuel) NO_x만 고려하였다. 고체 연소에서 열적 및 연료적 NO_x가 지배적으로 나타나기 때문이다. 연료적 NO_x는 연료 성분 중 질소를 고려하여 예측되며 열적 NO_x는 고온에서 N₂와 O₂간의 반응을 통해 예측 되어 진다[7].

보일러 내에 고체 연료가 투입되기에 기체상과 고체상 간의 질량 및 에너지 전달 해석이 가능한 모델을 적용하여야 한다. 대상 보일러는 기체상의 부피에 비해 고체연료의 비율이 작을 때(10% 미만) 적절한 오일러-라그랑지(Euler-Lagrangian)방법을 통해 해석이 가능한 입자 분산 모델(discrete phase model, DPM)을 적용하였다.

적용된 모델을 바탕으로 질량 보존, 모멘텀 보존, 에너지 보존, 화학종 보존에 관한 방정식을 고려하였다[8]. 보일러 해석에서 가장 중요한 복사 모델은 계산 시간의 소모를 최소화 하면서 결과를 얻을 수 있는 복사 모델 P-1을 이용하였다. 본 해석에 사용된 수치해석 방정식을 Table 1에 정리하였다.

2.2. 보일러 3차원 모델링

폐기물 고열분해 동력 보일러는 연료 투입구로 공급된 연료가 고열분해 영역에서 고온의 산화제에 의해 빠르게 열분해를 수행한다. 이후 주연소실을 통해 연소를 마치게 되며 고온의 가스는 수열부에서 열 교환을 통해 스팀을 생산하게 된다.

Table 1. Govern and reaction equations for simulation[8]

Govern equation	
<p>Mass</p> $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m$	<p>Momentum</p> $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F}$
<p>Energy</p> $\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_i h_i J_i \right) + S_h$	<p>Species</p> $\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + r_i + S_i$
Reaction kinetic	
<p>Devolatilization</p> $\frac{m_v(t)}{(1-f_{w,o})m_{p,o} - m_{ash}} = \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) \exp\left(-\int_0^t (k_1 + k_2) dt\right) dt$ $k_1 = A_1 e^{-(E_1/RT_p)} \quad k_2 = A_2 e^{-(E_2/RT_p)}$	<p>Combustion</p> $\frac{dm_p}{dt} = -A_p P_{ox} \frac{D_o k}{D_o + k}$ $D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p}, \quad C_2 e^{-(E_0/RT_p)}$

Figure 1에 수치해석을 위해 고열분해 보일러의 3D 형상을 모델링하여 나타내었다. 고열분해 보일러는 평균 6,500 kcal/kg의 열량을 가진 폐기물 연료를 30 ton/day를 처리할 수 있는 스팀 동력 보일러이다. 이를 기준으로 형상 모델링을 진행하였으며, 전체 높이는 약 15 m이며, 길이는 약 13 m이다. 형상 모델링 시에 유체 유동과 연소 현상이 일어나는 내부 체적만을 고려하여 진행하였다. 형상 모델링과 격자 생성을 위해서 GAMBIT 2.3을 사용하였다. 화학반응을 고려한 열전달을 해석하기 위해 수렴성이 좋은 육각형의 격자로 하여, 전체 격자의 개수는 약 100만개로 형성하였다.

Figure 1에 나타난 것처럼 1개의 연료 투입구와 4개의 고온산화제 투입구로 구성되었으며, 보일러 내부 수열부 영역도 고려하였다. 이를 3차원 형상 모델을 바탕으로 폐기물 연료의 연소에 따른 보일러 내 온도 특성과 배출가스 특성을 분석하여 시운전을 위한 기초 자료를 제공하고 설계의 안정성을 평가하고자 한다.

2.3. 보일러 해석 조건

실제 보일러에 공급되는 연료는 혼합되어 있기 때문에 공급시간에 따라 개별 연료의 비율이 달라진다. 그러나 해석시 개별 연료에 대해 설정하는 것이 불가능하다. 따라서 여러 가지 개별 연료들의 평균값을 취하여 하나의 연료가 공급되는 것으로 가정하였다. 이 때, 여러 가지 개별 연료의 공업 및 원소분석을 수행 후 평균값을 취하였으며, 평균화한 원소분석 값을 이용하여 보일러에 투입되는 공기량을 결정하였다.

실제 해석은 보일러 설계 조건에서만 진행하지 않고 연료 및 운전 특성을 알아보기 위해 다양한 조건에서 실시하였다. 보일러 설계 조건인 6,500 kcal의 연료를 30 ton/day의 용량을 기준 해석 조건으로 선정하였고 이 조건에서의 총 공급열량을 기준으로 해서 연료의 열량을 5,000 kcal/kg으로 낮추고 공급량은 39 ton/day 변경한 조건과 5,000 kcal/kg의 연료를 30 ton/day로 공급량을 변경한 세가지 조건으로 해석을 진행하였다. 이는 개별 연료의 발열량 특성과 운전 부하에 따른 특성을 보기

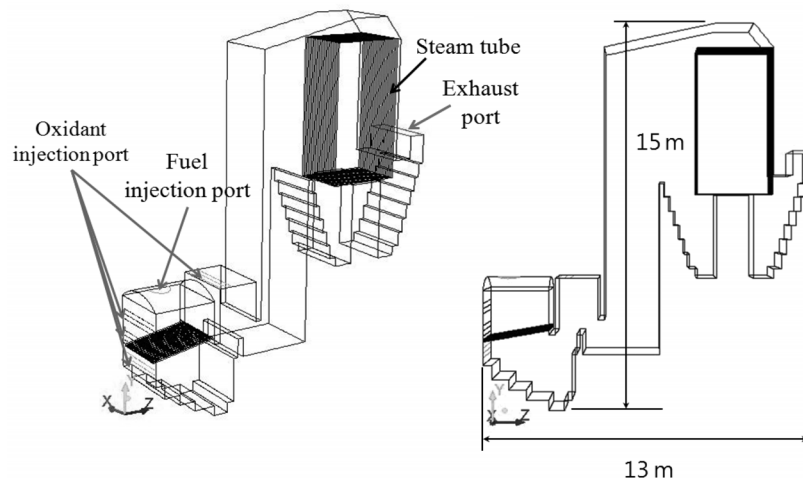


Figure 1. 3D geometry of boiler for the numerical study.

Table 2. Numerical conditions to investigate the combustion characteristics in the boiler

Item	Numerical conditions
Case	6500-30, 5000-30, 5000-39
Heating value (kcal/kg)	5,000, 6,500
Feeding rate (ton/day)	30, 39
Excess air ratio (E.A)	1.2, 1.4, 1.6, 1.9

위함이다. 이 때, 각 조건들의 표기를 용의하게 하기 위해 각각 6500-30, 5000-39, 5000-30로 나타내었다. 그리고 각 조건에서 공기비(excess air ratio, E.A) 변화를 통해 보일러 효율, 연소 및 배출가스 특성을 확인하기 위해 공기비를 1.2, 1.4, 1.6, 1.9로 나누어 해석을 진행하였다. 각 조건에 따른 보일러 해석 조건은 Table 2에 나타내었으며 이를 바탕으로 수치해석을 진행하였다. 이 때 투입되는 연료의 크기는 5 cm로 설정하였다.

3. 연료 특성 분석

3.1. 연료 상태량

본 연구의 수치해석에 적용하기 위해 여러 가지 폐기물 개별 연료의 공업분석(proximate analysis)과 원소분석(ultimate analysis)을 실시하였다. 사용된 샘플은 페플라스틱 및 고품연료(RDF), 생활 폐기물 등 7가지이며, 공업 분석은 Leco사의 TGA-701 장비를 사용하였으며, 본 연구를 위해서 3회에 걸쳐 공업 분석을 진행하였다. 공업 분석을 통해 각 연료의 수분, 휘발분, 고정탄소, 회 성분의 비를 획득하였다. 또한, 원소 분석은 황(sulfur) 측정이 가능한 Leco사의 TruSpec[®] Micro CHNS를 사용하였으며, 공업 분석과 동일하게 3회에 걸쳐 분석을 진행하였다. 투입되는 폐기물 연료의 발열량은 원소 분석 결과를 기준으로 Dulong equation[9,10]을 활용하여 도출하였다. 공업, 원소 분석 및 발열량을 Table 3에 나타내었다.

3.2. 반응 동특성

보일러의 수치해석을 수행하기 위해 연료의 물성치 중 탈휘발 및 연소 동특성(kinetic) 값을 실험적으로 도출하였으며, 다양한 폐기물 샘플들에 대한 평균값을 취하여 수치해석에 적용하였다. 폐기물 샘플 동특성 값의 도출을 위해 TGA-DSC

Table 3. Waste fuel properties

Ultimate analysis (DAF ^a , wt%)		Proximate analysis (wt%)	
Carbon	48.05	Moisture	0.4
Hydrogen	9.15	Volatile matter	91.46
Oxide	40.46	Fixed carbon	2.46
Nitrogen	1.01	Ash	5.68
Sulfur	1.33		
Heating value (MJ/kg)		27.3	

^aDry ash free

Table 4. The kinetic constants of pyrolysis and combustion for numerical analysis

	Pyrolysis		Combustion
	First	Second	
Pre-Exponential factor (1/s)	3.16×10^{18}	6.16×10^{18}	4.82×10^{16}
Activation energy (J/kmol)	2.75×10^8	4.56×10^8	2.62×10^8

(SDT-Q600, TA Ins.)을 사용하였다. 일반적으로 고체 연료의 반응 속도는 탈휘발 과정과 연소 과정에 따른 두 가지로 나눌 수 있다. TGA-DSC를 이용한 탈휘발 및 연소 동특성 도출 실험시 샘플의 질량은 15 mg으로 하였으며, 탈휘발을 위해서는 질소 분위기, 연소를 위해서는 공기 분위기 내에서 측정하였다. 이 때, 샘플 주위로 투입되는 가스의 유속은 100 mL/min로 설정하였다. 폐기물 혼합연료 내에 남아있는 수분의 제거하기 위해 107 °C에서 1시간 동안 등은 상태를 유지한 후 탈휘발 실험을 수행하였다. 탈휘발 실험시 승온 속도는 5, 10, 20 °C/min의 세 가지 조건으로 하여 107 °C부터 1,000 °C까지 승온하여 진행하여 온도 변화에 따른 질량 감소량을 획득하였다.

동특성 분석을 위해 적분법을 이용한 Coats-Redfern[11] 방법을 사용하였다. 이 방법은 근사법을 사용하여 임의의 반응 차수에 대해 활성화 에너지를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 일반적으로 고체 물질의 열분해에 대한 비등온 동역학 방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{da}{(1-a)^n} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT \quad (1)$$

여기서 a는 시간에 따라 변하는 연료의 양을 나타내며, n은 반응 차수, β는 가열속도 계수, T는 온도를 나타낸다. 식 (1)을 적분하여 치환법을 적용하면 다음과 같은 식 (2)를 도출할 수 있다. 이 때 직선의 기울기(-E_a/R)로 부터 활성화 에너지, E_a를 결정할 수 있으며, 활성화 에너지 값의 절편에 대입하여 선인자 함수(pre exponential factor), A가 결정되어 진다.

$$\ln \left[\frac{\ln(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \left(\frac{E_a}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (2)$$

Table 4에 TGA-DSC를 통해 도출되어진 폐기물 샘플의 반응 속도 상수들의 평균 값을 나타내었으며, 동력 보일러 수치해석시 반응 속도 입력 값으로 사용된다.

4. 수치해석 결과

기준 운전 조건은 설계 조건이 되는 발열량 6,500 kcal/kg 연료에 대한 30 ton/day 공급 (6500-30) 기준이며 연료의 발열

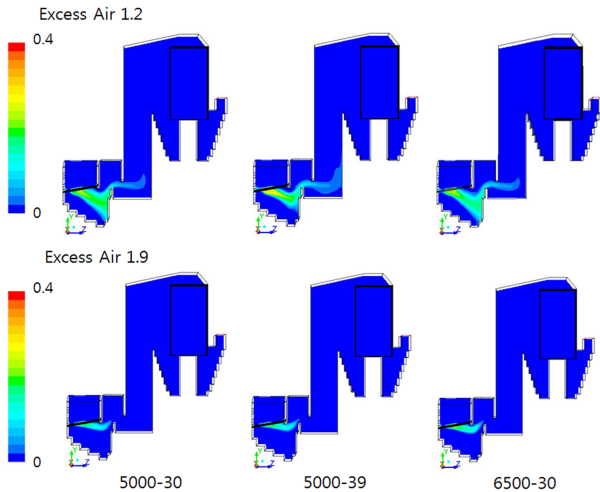


Figure 2. Volatile distribution with various conditions in boiler.

량 변화 및 부하에 변화를 나타내기 위해 5,000 kcal/kg의 연료를 39 ton/day (5000-39) 및 30 ton/day (5000-30)으로 구분하여 수치해석을 진행하였다. 또한 주어진 연료 공급 조건에서 운전 최적화를 판단하기 위한 과잉 공기 조건별로 비교, 분석하였다. 반응 과정 중 연료에 포함된 휘발분 등이 방출과 반응이 주연소부에서 완전 연소되었음을 입자 거동 해석 결과를 통해 확인할 수 있었으며 그 결과의 일부인 과잉공기비 1.2, 1.9의 결과를 Figure 2에 나타내었다. 다른 조건에서도 동일한 결과를 확인하였다.

4.1. 운전 조건에 따른 보일러 내 가스 온도 특성

운전 조건에 따른 보일러 효율 특성을 살펴보기 위해 수치 해석을 실시하여 결과를 나타내었다.

Figure 3에 6500-30의 해석 결과를 나타내었다. 과잉공기비가 1.2일 경우에는 고온 영역의 분포가 고열분해 영역과 주연

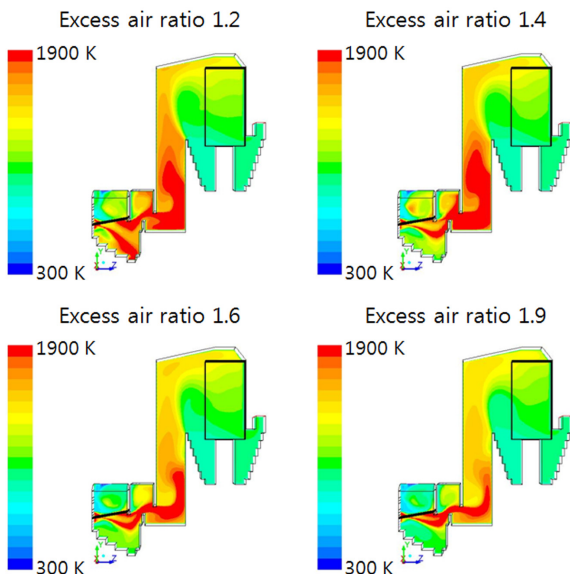


Figure 3. Temperature distribution in boiler at 6500-30 condition.

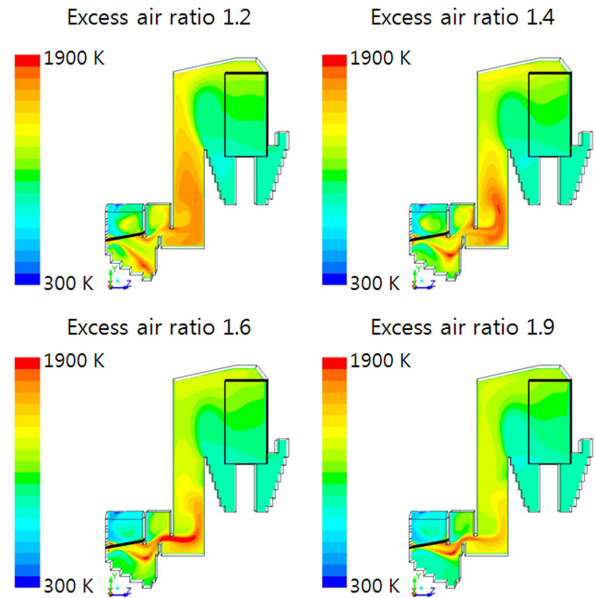


Figure 4. Temperature distribution in boiler at 5000-30 condition.

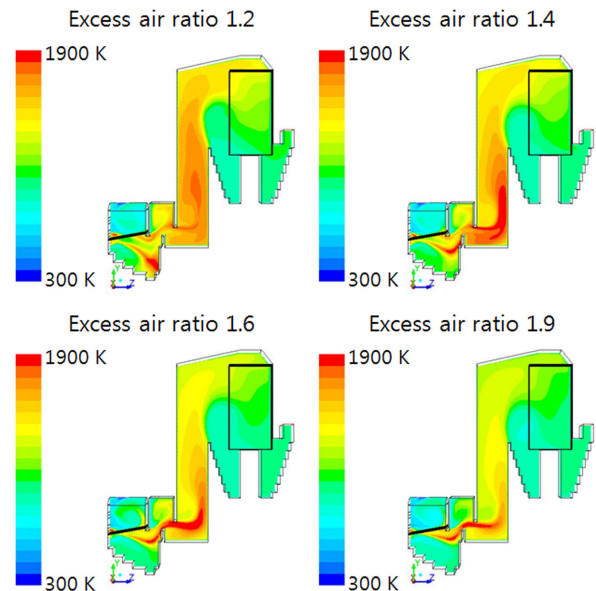


Figure 5. Temperature distribution in boiler at 5000-39 condition.

소 영역에 고르게 분포하면서 고열분해 반응을 유지하며 지속적인 연소가 이루어질 수 있으나 1.2 이상의 조건에서는 고열분해 영역에서의 온도가 감소하고 주연소실에서 주로 반응을 일으키기 때문에 고열분해의 효과를 감소시킬 것으로 사료되며 고열분해 영역의 수관벽에 충분한 열을 공급하지 못하여 스팀 생산에 있어서도 효율이 감소될 것으로 사료된다. 또한 Figure 4에 출력 기준 대비 연료의 열량만을 변경(5000-30)시킨 해석 결과를 나타내었다. 이는 투입되는 연료 투입량이 고정된 상태에서 연료의 열량 변화가 보일러 내에 미치는 영향을 알아보기 위해 실시하였다. 전체적으로 6500-30에 비해서 보일러 내의 온도가 낮아진 것을 볼 수 있다. 그리고 6500-30

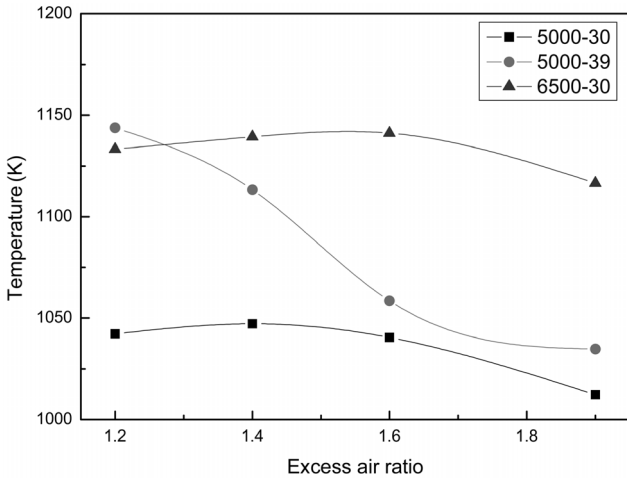


Figure 6. Temperature of steam tube with excess air ratio.

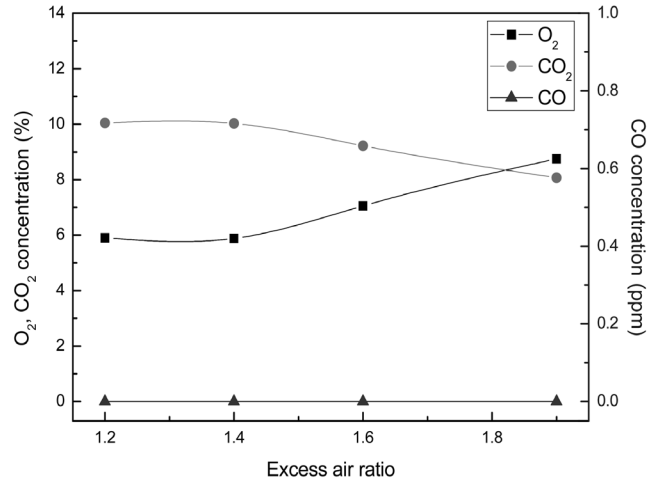


Figure 7. Gas concentration with excess air ratio at 6500-30

의 경우와 유사하게 과잉공기비가 증가함에 따라 고열분해 영역의 온도는 감소로 인해 주연소실에서 주로 반응이 일어날 것으로 사료된다.

투입되는 연료의 열량을 낮추고 투입량을 증가하여 총열량을 6500-30과 동일하게 한 조건인 5000-39의 해석 결과를 Figure 5에 나타내었다. 전체 열량이 증가하였기에 5000-30 경우보다는 내부 온도가 전체적으로 증가하였으나 6500-30 보다는 낮은 것을 확인할 수 있다.

각 해석 결과에서 수열부 직전의 가스 온도를 도출하여 Figure 6에 나타내었다. 5000-39의 과잉공기비 1.2에서 가장 높은 온도를 보이고 있다. 그러나 과잉공기비가 증가할수록 온도가 급격히 떨어져 5000-30의 온도와 거의 유사함을 보이고 있다. 이와 달리 6500-30과 5000-30의 조건에서는 과잉공기비 변화에 따른 온도 변화가 크지 않으며 운전 범위가 넓게 형성되고 있다. 하지만 5000-30은 수열부 직전의 온도가 1,050 K 아래에서 형성되기에 동력 보일러 운전 조건으로는 적합하지 않다. 하지만 보일러 설계 조건인 6500-30에서는 1,150 K 아래에서 형성되고 있어서 설계치인 1,123 K를 만족하고 있는 것으로 나타났으며, 이를 적용한 실제 보일러 운전시 설계 단계에서 예상한 스팀량을 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 운전 조건에 따른 연소 및 배출가스 특성

운전 조건에 따라 발생하는 연소 및 배출가스 특성을 알아보기 위해 O₂, CO₂, CO 그리고 NO_x 생성물 농도로 나누어 결과를 분석하였다. 연소 및 배출가스는 보일러 출구단에서의 평균 값을 취하였다. 6500-30의 결과를 Figure 7에 나타내었다. 전체적으로 과잉공기비가 증가할수록 O₂의 농도는 증가하는 반면 CO₂는 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 과잉공기비가 1.4 이상에서 확연히 드러나고 있다. 이는 과잉공기비가 증가함에 따라 반응에 참여하지 않은 산소의 농도가 점차 증가하고 그로 인해 CO₂의 농도가 상대적으로 감소하였기 때문이다. 이러한 현상은 냉각 효과도 일으킴으로 보일러 내의 온도를 낮추게 된다. 그리고 불완전 연소가 일어났을 경우 발생하는

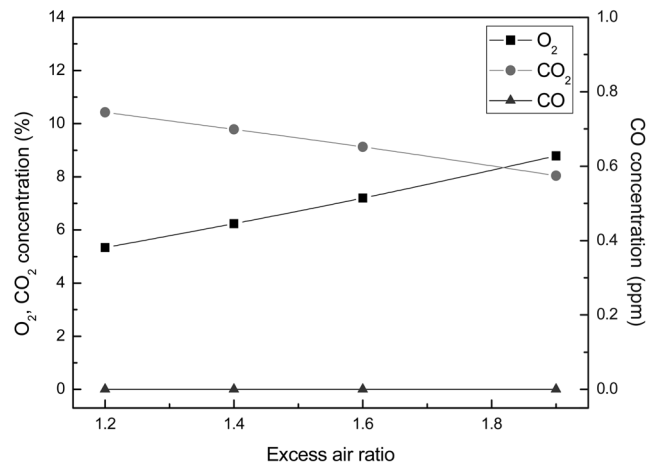


Figure 8. Gas concentration with excess air ratio at 5000-30

CO의 농도는 거의 나타나지 않는 것으로 보아 보일러 내 완전 연소가 일어나고 있음을 보여주고 있다. Figure 8에 5000-30의 해석 결과를 나타내었다. 6500-30의 경우와 유사하게 과잉공기비가 증가할수록 O₂는 증가하고 CO₂는 감소하는 것을 보이며, 역시 CO의 발생도 거의 나타나지 않는 완전 연소가 일어났음을 확인하였다.

5000-39의 결과는 Figure 9에 나타내었는데 전체적인 경향은 위의 두 결과와 유사하나 산소의 농도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 특히 1.2인 조건에서는 배출되는 O₂가 2%로 나타나고 있다. 이는 다른 두 조건에 비해 투입량이 30% 증가로 연소에 필요한 산소량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

조건 변화에 따라 출구에서의 NO_x 값을 Figure 10에 정리하여 나타내었다. 각 조건에 따라 투입되는 연료 내의 질소(N)는 동일하게 설정되었다. 수치해석 조건 중 6500-30일 경우 NO_x가 가장 높게 나타나며 5000-30과 5000-39의 조건에서는 NO_x 발생이 유사하게 나타나고 있다. NO_x 발생은 연료적 NO_x와 열적 NO_x에 의해 결정된다. 앞에서 나타내었던 연료의 질소(N) 함량은 동일(연료 N 영향은 동일)하기에 NO_x

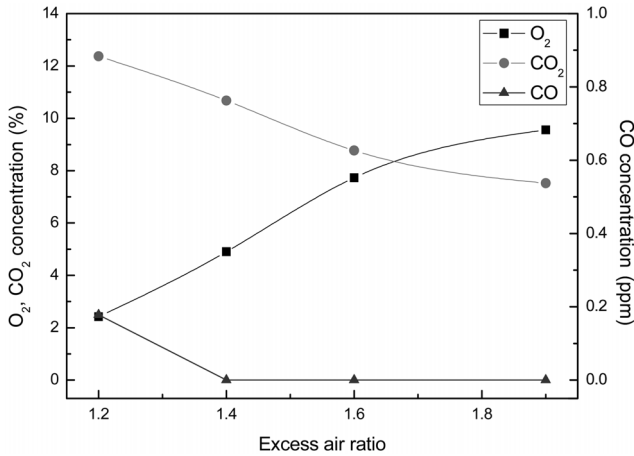


Figure 9. Gas concentration with excess air ratio at 5000-39.

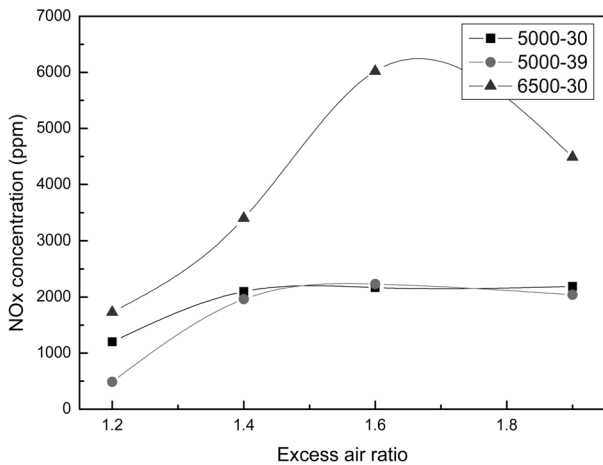


Figure 10. NO_x concentration as a function of excess air ratio.

생성은 고온의 N₂와 O₂에 따라 나타나는 열적 NO_x에 지배적으로 나타날 것이다. Figure 2~4를 통해 확인하였듯이 보일러 내의 온도가 가장 높은 조건인 6500-30에서 NO_x 농도가 가장 높게 나타났으며, 과잉공기비가 1.6일 때 약 6,000 ppm의 NO_x 발생량을 보이고 있다. 온도는 1.4일 때가 가장 높으나 공기량은 이보다 1.6의 경우에 더 많이 투입되고 고온에 노출되는 N₂와 O₂가 많아지기 때문에 가장 높은 NO_x가 발생하는 것으로 판단된다. 그리고 1.9의 경우는 공기량이 가장 많으나 냉각 효과가 가장 큰 조건이기에 고온 영역이 상대적으로 낮기 때문에 NO_x 발생량이 감소하게 된 것으로 사료된다. 이와 달리 보일러 내의 온도 분포가 유사한 5000-30과 5000-39는 NO_x 발생량이 유사하게 나타나고 있다.

5. 결론

폐기물 고열분해 동력보일러의 운전 조건에 따른 연소 및 배출가스 특성을 알아보기 위해 수치해석을 실시하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 수치해석을 위하여 3차원 형상 모델링을 진행하였으며, 투입되는 연료 분석을 진행하여 입력 값으로 사용하였다. 연료 분석은 여러 가지 단일 연료 샘플에 대한 공업, 원소 분석과 탈휘발, 연소 동특성 측정을 진행하여 이들의 평균값을 취하여 적용하였다.

2) 투입되는 연료의 발열량과 투입량을 변화(6,500 kcal/kg 연료를 30 ton/day 용량 기준) 시켜 운전 조건에 따른 보일러 내 온도 특성을 확인하였다. 6500-30이 보일러 내 가장 높은 온도를 나타내고 있으며, 수열부 직전의 온도도 과잉공기비 변화에 따른 변화를 보이지 않고 있으며, 보일러 설계 조건인 1,123 K를 만족하고 있는 것을 확인하였다.

3) 동력 보일러의 환경적 측면을 고려하기 위해 다양한 운전 조건에 따른 연소 및 배출가스 특성을 확인하였다. 모든 해석 조건에서 CO 발생이 나타나지 않는 완전 연소가 진행됨을 확인하였으며, 과잉공기비가 증가할수록 O₂는 증가, CO₂는 감소함을 보였다. 그리고 NO_x는 열적 NO_x에 의해 발생하며, 보일러내 온도가 높은 6500-30의 경우 가장 높게 나타나고 있음을 확인하였다.

위와 같은 결론을 통해 보일러 설계 기준인 6500-30 조건으로 제작, 운전되었을 때, 효율 측면에서는 좋은 특성을 보이거나 NO_x 발생을 줄이기 위해서 탈진 처리 장치가 필요한 것으로 예상된다.

감사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20103040100050-12-2-100).

기호설명

- A : Surface area (m²)
- D_0 : Diffusion rate coefficient
- d : Diameter (m)
- E : Total energy (J)
- E_a : Activation energy (J/kmole)
- F : Body force (N)
- f : Mixture fraction (dimensionless)
- g : Gravitational acceleration (m/s²)
- h : Species enthalpy (J/mole)
- J : Mass flux (kg/m³·s)
- k : Kinetic rate (kg/m²·s)
- m : Mass (kg)
- P_{ox} : Partial pressure of oxidant
- p : Pressure (Pa)
- r_i : Production rate (kg/m³·s)
- S_h : Chemical reaction heat (J·kg/m³·s)
- S_i : The rate of creation (kg/m³·s)

- S_m : Source term of mass ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)
- T : Temperature (K)
- t : Time (s)
- v : Velocity (m/s)
- Y : Mass fraction
- α : Yield factor
- ρ : Density (kg/m^3)

아래첨자

- i : Specie
- w : Moisture
- p : Particle
- v : Volatile matter

References

1. Hong, J. S., and Kim, H. G., "Analysis of R&D Investment of Waste Reduce, Recycle and Energy Recovery Technology," *J. Energy Eng.*, **22**(3), 112-119 (2013).
2. New & Renewable Energy Center, New & Renewable Energy Statice 2012 (2013 Edition), KEMCO, Dec., 2013.
3. Korea Boiler Engineering Association, "Alternative Energy(4) - Renewable Waste Energy," *J. Boiler*, **122**, 116-122 (2004).
4. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., and Baeyens, J., "Recycling and Recovery Routes Plastic Solid Waste (PSW): A Review," *Waste Manage.*, **29**, 2625-2643 (2009).
5. Park, S. I., Cho, K. B., Park, K. H., and Ko, C. B., "Study on Commercialization Technology Support for Waste Heat Boiler with Similar Circulating Fluidized Bed," MKE, Final report, Nov., 2008.
6. Nho, N. S., Kim, K. H., Shin, D. H., Kim, D. C., Lee, K. H., Jeon, G. G., and Ohm, T. I., "A Study on Development of High-Efficiency Combustion Boiler for RDF," MKE, Final Report, Dec., 2002.
7. Lee, B. H., Song, J. H., Kim, R. G., Kim, S. G., Kim, Y. G., Chang, Y. J., and Jeon, C. H., "Simulation of the Influence of the Coal Volatile Matter Content on Fuel NO Emissions in a Drop-Tube Furnace," *Energy Fuels*, **24**, 4333-4340 (2010).
8. Ansys Inc., Ansys Fluent User's Guide, Nov., 2011.
9. Othman, N., Mohd Sidek, L., Ahmed Basri, N. E., Muhd Yunu, M. N., and Othmans, N. A., "Electronic Plastic Waste Management in Malaysia: The Potential of Waste To Energy Conversion," Proceedings of ICEE, Dec. 7-8, Malacca, Malaysia (2009).
10. Felder, R. M, and Rousseau, R. W., Elementary Principles of Chemical Processes, 3rd ed., Wiley, New York, 2000.
11. Coats, A. W., and Redfern, J. P., "Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data," *J. Polym. Sci.*, **3**(11), 917-920 (1965).