

## 전산유체역학을 이용한 목재펠릿보일러 연소모델 정립 및 검증

오광철<sup>†</sup> · 어승희 · 오재현 · 김대현\*

강원대학교 바이오시스템공학과, \*국립산림과학원 산림생산기술연구소  
(2014년 3월 14일 접수, 2014년 8월 20일 수정, 2014년 8월 22일 채택)

### Simulation and Model Validation of Combustion in a Wood Pellet Boiler Using Computational Fluid Dynamics

Kwang Cheol Oh · Seung Hee Euh · Jae Heun Oh<sup>†</sup> · Dae Hyun Kim\*

Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, South Korea,

\*Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon, South Korea

(Received 14 March 2014, Revised 20 August 2014, Accepted 22 August 2014)

#### 요약

본 연구에서는 목재펠릿보일러의 연소현상에 대하여 이론적으로 분석하고 예측 값과 실제 실험 데이터를 비교하여 분석했다. 목재펠릿보일러의 개발과정에 있어서 연소실험상, 투입 공기의 속도, 연료의 양, 온도 및 연료특성 등에 따라 다양한 문제점이 발생됨에 따라 여러 방향의 연구 개발이 이루어지고 있으며 이에 많은 시간과 비용이 소모되고 있다. 따라서 해석모델의 개발을 통한 수치해석 방법이 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 모의실험(Simulation)을 통하여 목재펠릿의 종류 및 구성 원소의 변화에 따른 목재펠릿보일러의 연소실 출구온도 및 배기가스의 구성성분을 예측하고자 하며 그 결과를 바탕으로 목재펠릿 연소 특성을 파악하여 최적의 이용 및 활용방법을 제시하고자 한다. 예측값과 실험값은 : CO<sub>2</sub> 0.60 % O<sub>2</sub> 0.73 % 오차를 나타내었다.

주요어 : 목재펠릿보일러, 고체연소, 전산유체역학, 모의실험

Abstract - In this study, combustion behaviour were to analyze by comparing experimental data against predicted values. In developing pellet boiler performance, various factors such as combustion chamber shape, input air velocity, the amount of fuel, temperature, and fuel characteristics need to be analyzed. Analytical model using a numerical method is useful to overcome time and cost consuming by practical experiment. By controlling feeding rate of fuel, flue gas composition and temperature distribution obtained form experiment were compared with predicted values using FLUENT(ANSYS, Inc., Southpointe). Measurement were in good agreement with model predictions : with 0.60 % for CO<sub>2</sub> 0.73% for O<sub>2</sub> when compared with independent data sets.

**Key words** : Wood pellet Boiler, Solid Combustion, Computational Fluid Dynamics, Simulation

### 1. 서 론

최근 불안한 화석연료 공급체계와 에너지소비량의

지속적인 증가에 따라 환경오염 및 온실 가스 감축에 대한 논의가 활발하게 이루어지고 있다. 이는 대체에너지의 개발 및 이용확대에 대한 필요성을 크게 부각시켰다. 특히 대한민국의 에너지 공급구조는 수입에 크게 의존하고 1992년 93.6 %에서 2012년 96.4 %로 꾸준히 증가(에너지통계연보 에너지경제연구원, 2013)

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, South Korea  
Tel : 033-250-6496 E-mail : daekim@kangwon.ac.kr

하고 있으며 그 규모는 전체 수입액의 약 32.9 %(한국무역협회, 2012)를 차지하고 있다. 따라서 자급자족 가능한 청정에너지의 개발 필요성이 증대되고 있다.

1.1 목재 펠릿의 이점

바이오에너지는 특히 태양광·열, 풍력과 같은 기존의 청정에너지와 다르게 기상여건과 상관없는 화석연료와 동일한 방식으로 이용이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 연소 시 발생하는 이산화탄소가 경유의 1/12수준이며, 배출된 이산화탄소는 다시 나무의 성장에 소비되어 최종적인 탄소발생은 0 (zero)이다. 이런 특성을 바탕으로 2006년 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)에서 ‘탄소중립연료(Carbon Neutral)’로 인정되었고, 2005년 발효된 교토의정서(Kyoto Protocol)에 따른 탄소 배출권에 대하여 이용이 자유로운 연료(산림과 임업 동향에 관한 연차보고서 산림청, 2009)이다.

원목 자체를 그대로 이용하는 임산연료의 사용량은 꾸준히 감소되어 왔으며, 본격적으로 우드 칩(Wood chip)과 목재펠릿(Wood pellet)으로 가공 후 이용하기 시작한 2010년부터 더욱 급격하게 감소되었다. 여기서 우드 칩은 임산연료를 연소하기 쉬운 칩 형태로 잘게 만들어 열병합발전 원료로 사용하는 것으로서 최근 3년간 이용률이 8배 증가되었다. 목재펠릿은 나무를 톱밥과 같은 작은 입자형태로 분쇄, 건조, 압축하여 작은 알갱이 형태로 성형한 제품이며 부피의 축소(우드칩의 4배)와 보관 및 운송의 용이, 균질, 규격화를 통한 자동보일러에도 사용가능한 장점이 있다. 하지만 목재펠릿의 이용과정에 있어서 연소실형상, 투입 공기의 속도, 연료의 양, 온도 및 연료특성 등에 따라 다양한 문제점이 발생됨에 따라 이를 보완하기 위하여 많은 시간과 비용을 소모하며 연구 개발이 이루어지고 있다. 따라서 해석모델의 개

발을 통한 수치해석방법이 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서는 목재펠릿의 연소현상을 화학반응식을 이용한 1차원 해석을 통하여 생성되는 배기가스 성분을 예측하였다. 또한 전산유체역학 프로그램을 이용, 3차원 해석모델을 정립하여 펠릿보일러의 연소실 내부가스 생성 및 열 유동에 대한 메커니즘을 예측하였다. 이후 실제 가정용보일러를 가동 후 얻은 데이터와 시뮬레이션 후 얻은 데이터의 비교·검증을 실시하였다.

2. 이론적 고찰

펠릿보일러 내부의 펠릿 연소현상에 대하여 완전연소화학식(1-D)과 3차원 시뮬레이션(3-D)을 이용하여 고찰하였으며, 각 내용은 다음과 같다.

2.1 목질계 바이오 매스의 연소

목재펠릿의 연소반응(건조, 탈휘발 및 숯 연소)단계는 Fig. 1과 같이 나타 나타낼 수 있다. 목재의 탄화 속도는 열분해와 열 발생의 상호작용에 영향을 받으며 이는 목재의 종류, 밀도, 함수율, 열 침투성, 열적특성과 같은 많은 변수들의 함수이다. 고체연료는 대부분 연소를 통해 소각하여 열을 이용하고 있는데 목질계 바이오매스는 석탄과 비교하면 상대적으로 수분이 많다. 따라서 초기 펠릿이 온도가 증가되면 증발이 일어나 건조수분이 발생되고, 이후 분해연소를 통하여 휘발분이 발생되며 남은 펠릿은 최(Char)로 변한다. 다음 최종단계로 표면연소를 통하여 최는 재(Ash)로 변하고 휘발분은 연소가스로 변한다. 여기서 표면연소는 다시 완전, 불완전 연소 및 기상연소로 나누어 일어나게 된다<sup>12)</sup>.

2.2 연소화학식(1-D) 연소해석

연소에 의해 다량의 열을 발생하는 성분원소는 주로 수소(H), 탄소(C), 황(S)이며, 일반적으로 발열에



Fig. 1. Combustion reaction step for wood pellet

대하여 고려할 경우 이 3원소에 대하여 분석한다.

이들 가연 원소의 연소에 대한 기본적인 화학 방정식은 다음 식 [1], [2], [3], [4], [5]와 같다.

$$C + O_2 = CO_2 + 407MJ/kmol \quad [1]$$

$$C + \frac{1}{2}O_2 = CO + 123MJ/kmol \quad [2]$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O(g) + 241MJ/kmol \quad [3]$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O(l) + 286MJ/kmol \quad [4]$$

$$S + O_2 = SO_2 + 297MJ/kmol \quad [5]$$

현재 우리 주위에서 사용되고 있는 연료는 대부분이 화석연료로 그 주성분은 탄소와 수소이다. 이와 같은 완전연소 시키기 위한 일반 반응식<sup>3)</sup>은 식 [6]과 같다.

$$C_xH_y + (x + \frac{y}{4})O_2 \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + Heat \quad [6]$$

고체연료 중 탄소, 유효수소, 황성분은 연소하여 연소가스가 된다. 또한 질소는 연소열에 의해 기화되고 산소분, 수분은 수증기로 변화한다. 이 총합이 바로 연소가스량이 된다. 따라서 이론 습연소가스량은 다음 식 [7]과 같이 계산한다.

$$G_w = 8.88C + 32.3(H - \frac{O}{8}) + 3.33S + 0.8N \quad [Nm^3/kg_f] \quad [7]$$

$$+ 1.4O + 12.5W$$

또한 연소생성 수증기를 뺀 가스인 이론건조가스량은 다음 식 [8]과 같이 계산한다.

$$G_d = G_w - W \quad [Nm^3/kg_f] \quad [8]$$

과잉공기비를 적용한 실제 입력되는 공기량은 이론공기량을 이용하여 다음과 같은 식<sup>4)</sup> [9]를 통하여 구할 수 있다.

$$O_{Ex} = m \cdot O_o \quad [Nm^3/kg_f] \quad [9]$$

또한 실제 공기의 조성은 일반적으로 건조공기의 경우 질소 79 mol%(76.8 wt%), 산소 21 mol%(23.2 wt%)이

기 때문에 실제 배기가스 내 과잉공기로 인한 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>의 추가 발생량은 다음과 식 [10]과 같이 나타난다.

$$O_{2Ex} = 0.21(m-1)O_{Ex} \quad [Nm^3/kg_f] \quad [10]$$

$$N_{2Ex} = 0.79(m-1)O_{Ex}$$

최종적인 배기가스의 구성은 다음 식<sup>4)</sup> [11]을 이용하여 구할 수 있다.

$$O_{2flue} = 0.21 \cdot (O_{Ex} - A_o)$$

$$N_{2flue} = (0.79 \cdot O_{Ex}) + (0.8 \cdot l) \quad [Nm^3/kg] \quad [11]$$

$$CO_{2flue} = 1.87 \cdot C$$

$$H_2O_{flue} = (11.2 \cdot H) + (1.87 \cdot l)$$

위식을 살펴보면 실제 배기가스의 이산화탄소의 배출은 목재펠릿을 구성하고 있는 탄소의 성분에 관여되어 있다. 반응에 직접적으로 참여하지 않는 질소의 배출은 실제 입력되는 과잉공기와 목재펠릿을 구성하고 있는 질소 성분의 영향을 받는다. 또한 산소는 실제 과잉공급된 공기에서 연소반응 후 이산화탄소나 수분으로 반응되는 이론공기비만큼 감소된 후 배출된다. 마지막으로 수분의 경우 실제 목재펠릿을 구성하고 있는 수분과 수소가 연소반응 후 생성되는 수분이 합산되어 배출된다.

### 2.3 전산유체역학(3-D) 연소해석

기본적으로 화염은 층류 예혼합화염, 층류확산화염, 난류 예혼합화염, 난류 비예혼합화염으로 나뉜다. 이중 고체연소는 난류 비예혼합화염이며 불균일반응(Heterogeneous Reaction)으로 구분<sup>5)</sup>된다. 불균일반응이란 다른 물리적 상태로 존재하는 화학종이 연루되는 반응, 즉 가스-액체 또는 가스-고체사이의 반응을 뜻한다. 따라서 난류 모델(Standard k-ε)<sup>6)</sup>을 고려하였으며, 복사모델은 복사열전달 방정식(Radiative transfer equation, RTE)을 바탕으로 세워진 Discrete Ordinate<sup>7)</sup>을 이용하였다. 마지막으로 연소반응은 보존 스칼라(Conserved Scalar)개념을 바탕으로 둔 Mixture fraction PDF 모델<sup>8)</sup>을 이용하였다.

#### 1) 시뮬레이션 방법

연소실 모델의 3차원 설계에는 Workbench(2.0 ANASYS Inc, USA) 및 CAD(2012 AutoDesk Inc,

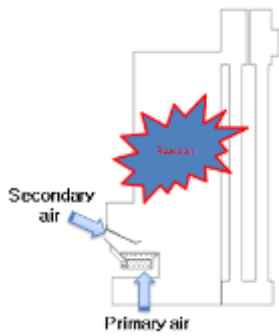


Fig. 2. Air inlet direction of the pellet boiler

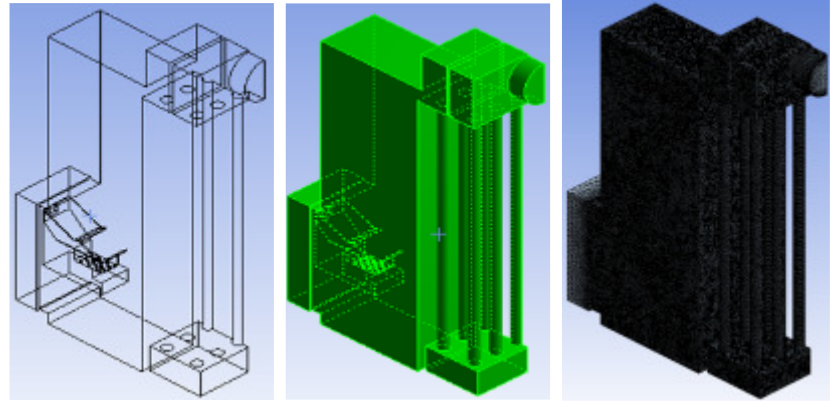


Fig. 3. Modeling and mesh generation

USA)를 사용하였으며 연소해석에는 FLUENT(14.0, ANSYS Inc, USA)를 사용하였다.

본 연구는 실제 사용되고 있는 20,000J급의 가정용 펠릿보일러가 이용되었으며 Fig. 2는 대칭면을 기준으로 한 2차원 단면도이다. 우측상단의 배풍기가 공기를 밀어내면 1차 공기는 버너 하단, 2차 공기는 버너상부의 연료투입구에서 동시에 공급된다. 이후 버너 주변 및 상단에서 분해연소가 일어나며 연소실을 중심으로 표면연소가 발생한다. 그 뒤 연소 가스는 열 교환을 통해 배출된다.

## 2) 격자생성

좌우대칭으로 시스템이 구성되어 있기 때문에 해석속도를 높이기 위하여 대상 연소실 형상을 최대한 단순화시켜 모델링하여 대칭 형태로 분석을 진행하였다. 연소현상을 파악하기 위하여 보일러 내부 연소 공기의 유동부분만 모델링하였다. 생성하는 격자의 품질은 해의 수렴성과 정확한 해석결과를 위해 매우 중요하며, 격자의 비틀림을 나타내는 왜도(Skewness)는 질이 나쁠수록 0에 가깝고 질이 좋은 격자일수록 1에 가깝다. 직교품질(Orthogonal Quality)은 0.01보다 커야하며 평균값은 0.2보다 높아야 한다. 본 연구에 이용된 격자의 품질은 왜도 평균값 0.2570 직교품질 평균값 0.8463이며, 총 382,116의 노드와 1,642,574개의 격자로 구성되었다(Fig 3).

## 3) 시뮬레이션 가정

시뮬레이션 분석을 위하여 다음과 같은 조건을 적용하여 분석하였다. 첫째로 재료로 사용되는 폐목재나 나무의 성분, 그리고 제조공정에 따라 변화되는

목재펠릿의 특성을 하나의 평균값을 이용하여 적용하였으며, 둘째로 분석속도의 향상을 위하여 연소반응 후 연소실 내부에서 발생된 열은 외부와의 열 교환이 없다는 가정을 통하여 진행하였다. 마지막으로 실제 연소 시 발생하는 산소와 이산화탄소를 제외한 클링커 및 재 등의 추가생성물의 발생을 생략 후 진행하였다.

## 3. 실험방법

본 시스템은 정상상태에서의 연소현상에 대하여 분석하기 위한 실험을 실시하였으며 Fig. 4에서의 보일러와 열교환기 사이의 내부 환수(작동유체, 물)를 80 °C 까지 도달시킨 후 부하를 입력하여 열 교환 후 배출시켰다. 이 과정에서 보일러 내부순환수의 입·출수 온도 차이는 20±1 °C로 2시간 이상 유지하였을 때 정상상태라 판단 후 데이터를 수집하여 분석에 이용하였다.

보일러 내부순환수의 온도 측정을 위해 K-type 열전대를 보일러와 열교환기를 순환하는 보일러 입, 출구와 열교환기의 입, 출구 각각 4개소에 설치하였으며, 데이터 로거(GL800, Graphtech, Japan)를 이용하여 1초 간격으로 데이터를 기록하였다. 연소 후 발생하는 배기가스를 가스측정 장치(350XL, TESTO, USA)를 이용하여 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

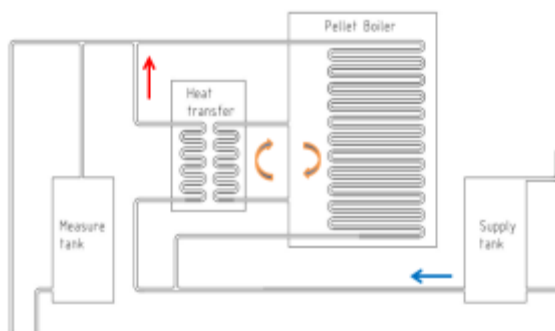
실험은 1급 여주 흥나모 펠릿(산림조합중앙회 목재유통센터, 여주군)을 이용하였으며 원소 및 공업분석은 한국에너지기술연구원(접수번호 제10-0859호)에서 이루어졌다. 데이터는 Table 1과 같다.

**Table 1.** Pellet components analysis

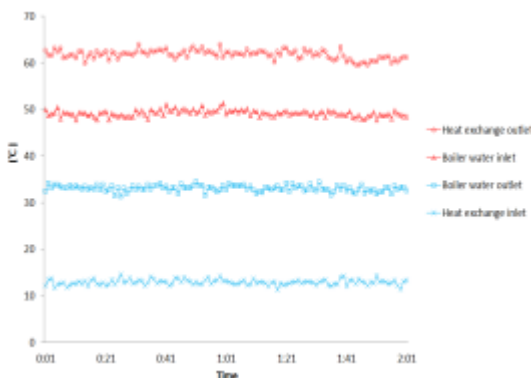
Technical analysis (wt%)		Elementary analysis (wt%)	
Water content	9.73	Carbon (C)	46.9
Volatile	72.3	Hydrogen (H)	6.6
Ash	0.56	Nitrogen (N)	0.1
Fixed carbon	17.5	Oxygen (O)	45.9
-	-	Sulfur (S)	0.5
High heating value (MJ/kg)		Low heating value (MJ/kg)	
19.60		17.92	

4.1.1 1-D 연소 계산 결과

실제 펠릿 성분을 이용한 1차원 연소 계산결과는 Fig. 5와 같다. 먼저 공기비가 증가에 따라 배출되는 산소는 증가되고 이산화탄소는 감소된다. 이산화탄소가 발생하는 질량 분율은 동일하지만 공기비 증가에 따른 산화제양의 증가에 따른 결과로 사료된다. 특히 기본적인 화학식만 이용하여 완전연소만 가정한 결과로 공기비 1에서의 산소배출량은 0(zero)로 나타났다. 질소 또한 산화제인 공기비 증가에 따라서 증가되며 공기비



**Fig. 4.** Schematic diagram for the boiler output experiment



**Fig. 5.** Experiment result (temperature)

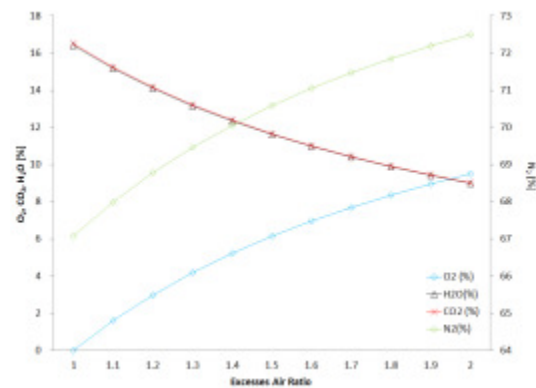
증가와 관련 없는 수분 또한 감소되는 추세를 나타낸다.

따라서 1차원 연소 계산을 통한 분석대상인 여주 펠릿의 성분에 가장 이상적인 공급 공기비는 1.7 ~ 2.0 인 것으로 판단된다.

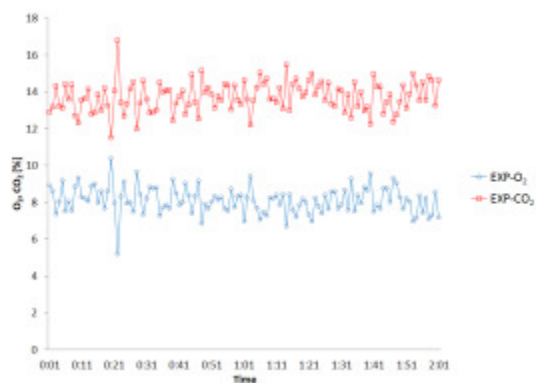
4.1.2 보일러연소 실험 결과

2012년 11월 4일 가정용 펠릿보일러의 연소 실험이 수행되었으며 결과는 Fig. 6, Fig 7과 같다. 실험을 통해 보일러내부 순환수 온도, 입력부하 및 공기의 양, 열교환후 배출온도, 배기가스의 온도 및 성분을 수집하였으며 펠릿 소비량은 5.75 kg/h 시간평균 풍량은 39.2 m3/h이다.

보일러 내부 환수 및 부하의 온도 변화(Fig. 6)를 살펴보면 정상상태라 판단할 수 있지만 실제 배기가스 성분(Fig. 7)은 약 평균 ±2.0 %의 변동을 보인다. 이것은 실제 불균일 고체연소반응 및 일정주기(Step type)의 펠릿연료 공급방식의 특성에 따른 결과라 사료된다. 또한 산소와 이산화탄소의 배출량은 반비례 관계를 가지는데 이는 1-D 분석과 동일한 결과를 나타내고 있다.



**Fig. 5.** 1-D calculation results of flue gas



**Fig. 7.** Experiment result (flue gas components)

**Table 2.** Model validation with uncertainty analysis

조건	풍량 (m <sup>3</sup> /h)	연료 투입량 (kg/h)	O <sub>2</sub> 배출량 (%)	CO <sub>2</sub> 배출량 (%)
CFD	39.20	5.750	8.20 (Mean)	14.30 (Mean)
CASE1	44.20	5.175	8.80 (Max)	13.70 (Min)
CASE2	34.20	6.325	7.60 (Min)	15.03 (Max)

**Table 3.** Simulation verification

조건	풍량 (m <sup>3</sup> /h)	연료 투입량 (kg/h)	O <sub>2</sub> 평균 배출량 (%)	CO <sub>2</sub> 평균 배출량 (%)
1-D	39.20	-	6.85 (±1.24)	10.84 (±2.86)
3-D	39.20	5.75	8.20 (±0.71)	14.30 (±0.60)
Exp	39.20	5.75	8.09 (±0.00)	13.70 (±0.00)

4.2 시뮬레이션 결과 검증

1) 시뮬레이션 검증

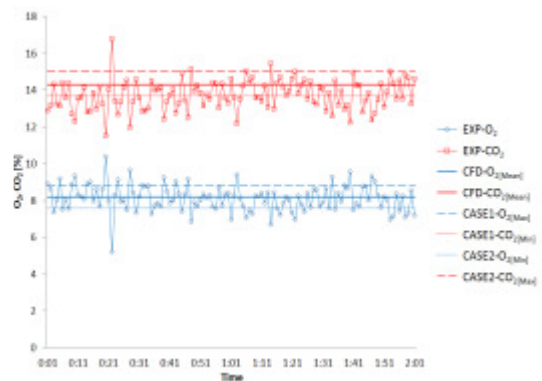
먼저 펠릿의 구성 성분을 이용하여 연소화학식 (1-D)으로 목재펠릿의 연소특성을 파악하였으며, 실험을 수행하여 보일러의 기본운전조건, 정상상태로 수렴된 실험결과와 데이터를 이용하여 3-D연소해석 방법을 통한 시뮬레이션분석이 진행되었다. 배기가스의 산소와 이산화탄소의 평균값이 실험값과 동일하게 도출하는 모델 및 입력 변수를 설정하여 Table 3의 결과를 도출하였다. 1-D해석방법은 단순한 화학식을 이용한 계산으로서 실제 연소 시 발생하는 가스량의 경향을 파악할 수 있었으며 실제 실험에서의 측정된 평균값과 비교하여 산소 1.24 %, 이산화탄소 2.86 %의 오차를 나타냈다. 3-D시뮬레이션으로 예측된 결과와 실험으로 측정된 평균값은 산소 0.71 %, 이산화탄소 0.60 %의 오차로 1-D분석에 비하여 실험값에 부합되는 일치결과를 나타냈다.

2) 데이터 불확도 보정

실험결과와 불확도를 일으키는 요인인 풍량(±5 m<sup>3</sup>/h)과 연료공급량(±0.575 kg/h)을 변동 폭을 이용하여 연료투입량이 최대, 풍량이 최소에서 산소가 가장 많이 발생하는 경우의 CASE1과 반대의 경우에서 이산화탄소가 최대 생성되는 조건을 CASE2로 설정하여 분석하였다(Fig 8). 그 결과 Table. 2를 보면 산소는 7.6 ~ 8.2 %로 발생하며 이산화탄소는 13.7 ~ 15.03 %로 발생이 예측되었다.

3) 3-D시뮬레이션 결과분석

3-D시뮬레이션의 결과를 통하여 내부특성을 살펴보면 먼저 산소분포(Fig. 9(a))는 1, 2차 공기의 산화제의 공급으로 연소실 버너 상단부에서부터 연소 일



**Fig. 8.** Model validation with uncertainty analysis

어나 산소분포가 0(제로)인 영역이 버너 우측에 분포하고 있다. 또한 이 영역에 이산화탄소분포(Fig. 9(b))가 약 23.8 %로 가장 높게 나타나며, 온도분포(Fig. 9(c))를 보면 2,300 °C로 가장 높게 나타난다. 따라서 연소반응이 이 영역에서 가장 활발하게 일어나는 것을 예측할 수 있다. 또한 속도분포(Fig. 9(d))를 살펴보면 연소실내부에서는 버너상단부에서의 속도가 약 6.8 m/s로 가장 빠르며 연소실에서 배출되어 연통을 통과할 때 평균 약 9 m/s로 가장 빠르게 나타났다. 따라서 실제보일러에 열효율을 증가시키기 위해서 연통을 통과하는 배기가스를 감속시켜야 하며 이를 위하여 추가적인 구조물(baffle)이 설치되어 있다.

5 결론

본 연구는 실제 사용하고 있는 20,000J 급 가정용 펠릿보일러의 연소실 내부 연소현상을 전산유체역학 관점에서 해석하여 그 과정의 흐름과 특성을 분석하여 시뮬레이션 후 검증하였다. 이를 이용하여 주어진 시스템에 대한 최적의 연소조건을 도출하고 이후 보일러의 설계에 있어서 시간과 비용의 최소화하기 위한 모델 정립

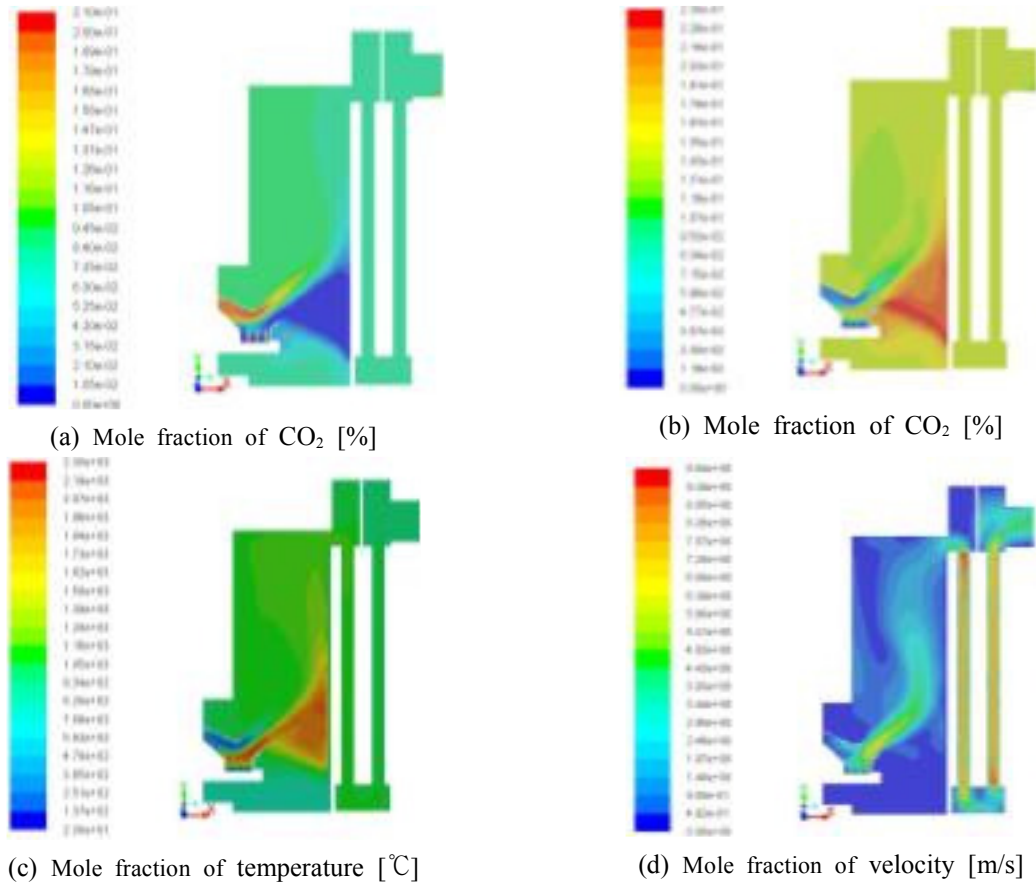


Fig. 9. Simulation results

이 수행되었으며, 구체적인 검증 방법은 다음과 같다.

1) 연소화학식(1-D) 연소해석방법을 통하여 분석에 이용된 목재펠릿의 연소특성을 파악하였으며 측정된 실제 실험결과의 평균값과 비교하여 산소 1.24 %, 이산화탄소 2.86 %의 오차를 나타냈다.

2) 보일러 연소실험을 수행하여 기본운전조건, 정상상태의 입력 조건 데이터를 얻은 후 전산유체역학 프로그램을 이용하여 3-D 시뮬레이션을 수행하였다. 측정된 평균값과 비교하여 산소는 0.71 % 이산화탄소는 0.60 %의 오차를 나타냈다.

3) 시뮬레이션 결과를 통하여 온도, 속도, 산소, 이산화탄소, 분포를 통하여 실제 연소실 내부의 연소현상을 파악하였으며, 이 분석방법은 실제 보일러 개발에 있어서 지금까지보다 효율적인 방법으로서 이용될 수 있을 것이라 사료된다.

4) 시뮬레이션을 통한 분석은 여러 변수에 따라 모든 실제 현상을 100 % 묘사하는 것은 불가능하다<sup>9)10)</sup>. 본 연구에서 이루어진 시뮬레이션은 앞서 기술한 세 가지 가정을 통하여 분석을 진행되었으며, 앞으로 시뮬레이션의 보안을 통하여 보다 더 정확한 분석이 필요하다.

본 연구를 통해 실제 사용되고 있는 펠릿 보일러의 실험과 연소 시뮬레이션이 실시되었으며, 산소와 이산화탄소의 생성에 대한 결과의 비교를 통하여 검증되었다. 향후 분석 모델의 보안을 통하여 대기오염가스로 주목 받고 있는 일산화탄소와 질소산화물의 발생을 예측할 수 있는 시스템을 개발해야 할 것이다. 더 나아가 펠릿에 한정적이지 않고, 폐기물이나 고품분뇨 등의 모든 고체연소에 적용 가능한 모델 개발을 통하여 현재, 그리고 미래에 사용하는 모든 연료가 효율적으로 사용될 수 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 국립산림과학원의 연구비 지원(과제번호 : C1009461-01-01) 및 2014년도 강원대학교 학술연구 조성비(과제번호 : 120140390)로 수행되었습니다.

## References

1. Sim, B. S., Kim, H. J., Park, H. C., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., 2010, "Combustion Characteristics of a Wood Pellet," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, pp. 276-278, 2012.
2. Ahn, J., Kim, J. J., Park, B. S., 2011, "Combustion and Heat Transfer Characteristics inside the Combustion Chamber of a Wood Pellet Boiler," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Winter Conference, pp. 363-366, 2011.
3. Song, K. K., Choi, B. C., 2007, "Combustion," pp. 30-46, Cheongmoo-gak
4. Lee, S. G., Choi, K. R., 2009, "New Combustion," pp. 67-70, Donghwa
5. No, S. Y., Gu, J. Y., Moon, H. J., Lee, C. J., Jo, Y. S., "An Introduction to Combustion Concepts and Applications," pp. 551-553, McGraw-Hill Korea
6. Launder, B. E., and D. B., 1972, "Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence," Academic Press
7. Modest, M. F., 1993, "Radiative Heat Transfer," Series in Mechanical Engineering McGraw-Hill
8. ANSYS. inc, 2009, ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, [http://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/main\\_pre.htm](http://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/main_pre.htm)
9. Kim, J. Y., 2012, "Design Modeler & Meshing for CFD users," pp. 23-24, Guilin
10. Myoung, H. K., 2002, "Introduction to CFD." pp. 4-21, Monundang