

Study on the Multi-Zone Furnace Analysis Method for Power Plant Boiler

발전용 보일러에 대한 다중영역분할 화로해석 기법의 활용성 연구

SeHyun Baek, Donggyu kim, Jang Ho Lee

Abstract

In this study, a multi-zone furnace analysis method that couples a 1D energy and mass balance calculation with a 3D radiative heat transfer calculation is tested in order to verify its reliability. The calculated results for a domestic 500 MW capacity coal-fired boiler furnace were compared with the design data of the boiler manufacturer and CFD analysis, and a good agreement was achieved. Although this calculation method is less sophisticated than the CFD furnace analysis, it has an advantage in terms of calculation time while being able to provide the furnace behavior according to the fuel characteristics and operational variable changes. Therefore, it is expected to be useful for boiler operation diagnosis and daily fuel/operation planning.

본 연구에서는 화력 발전소 보일러에 대한 연소 및 열전달 해석을 위하여 화로 내부를 다중영역으로 나누고 각 영역에서 energy와 mass balance는 1차원으로 계산하고, 복사열전달은 3차원으로 계산하는 다중영역분할 화로해석 기법을 활용하였다. 그리고 적용 기법에 대한 신뢰성 검증을 위하여 국내 500 MW 급 석탄화력 보일러 화로에 대한 계산 값과 보일러 제작사의 설계 데이터를 비교하여 양호함을 확인하였고, 동일한 설비에 대한 CFD 해석과 비교한 결과 유사한 경향을 얻었다. 본 계산 기법은 CFD 화로해석 보다는 덜 상세하지만, 빠른 시간에 연료반응성, 화로형상 및 운전변수에 따른 특성을 계산할 수 있는 장점이 있으므로 발전소 현장에서의 설비감시진단 및 일일 연료/운전 계획 수립 등 활용성 측면에서 유용할 것으로 예상된다.

Keywords: Boiler, Multi Zone Furnace, Heat & Mass Balance

I. Introduction

화력발전소의 운영에서 보일러 화로내의 연소, 열전달 상태에 대한 예측은 매우 중요하며, 그 동안 보일러 화로내부의 연소특성에 대한 분석은 실제 설비에서의 연소실험 또는 수치해석적인 방법을 활용하였다. 그중 실험적인 방법으로 의미 있는 데이터를 얻기 위해서는 상당히 긴 시간의 측정과 많은 비용이 소요되며, 실제 대형 발전설비에서 다양한 운전변수에 대한 시험을 시행하기에는 운영상의 제약이 많다. 아울러 실제로 실험을 시행해도 화로 내부의 고온부는 가스온도, 성상 등의 측정이 어려운 문제점이 있다.

반편 수치해석적인 방법은 실험에 비하여 상대적으로 제약이 덜하면서 극단적인 운전 상황까지도 시뮬레이션 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 기존 방법 중 화로를 1개의 반응기로 모사하는 heat & mass balance 해석은 설비에 대한 상세한 모사가 어려운 단점이 있고, CFD 해석을 기반으로 하는 방법은 계산시간이 많이 소요되고 스텝 측까지 고려하는 계산에는 제약이 있는 문제점이 있다.

본 연구에서는 보일러 화로를 다수의 영역으로 나눈 후 각 영역에서 energy와 mass balance는 1차원 계산을 활용하고 복사열전달은 3차원으로 계산하는 기법을 활용하여 국내 500MW급 발전소 보일러 화로 계산에 적용하고, 그 결과를 설계 데이터 및 CFD 해석과 비교하여 분석하였다.

II. 화로해석기법 개요

A. 화로해석 방법비교

발전용 보일러에 대한 연소 및 heat & mass balance 해석방법은 TABLE 1과 같이 상용 Heat Balance 계산 프로그램 활용 및 CFD 해석, 그리고 본 연구에서 적용한 다중영역분할 화로 계산 기법을 활용할 수 있다.

일반적으로는 상용 Heat Balance 계산 프로그램이 계산 시간의 장점 때문에 발전시스템 성능설계 및 발전소 운영 중 설비상태 진단업무에 많이 사용되고 있으나, 이 방법은 연료반응성, 화로형

Article Information

Manuscript Received March 23, 2020, Revised April 4, 2020, Accepted April 7, 2020, Published online December 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: SeHyun Baek (sehyun.baek@kepcoco.kr)

ORCID: 0000-0003-2761-3619 (S. Baek)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepcoco.kr>.

TABLE 1
보일러 화로 수치해석 기법비교

구분	상용 Heat Balance 계산 프로그램	CFD 해석	다중영역분할 화로계산기법
화로모사 방법	1차원 반응기	<ul style="list-style-type: none"> 이산화된 3D grid cell 들에서 연소, 열전달, 유동, 입자 CFD 계산 	<ul style="list-style-type: none"> 1D (energy, mass balance) 및 3D (복사열전달) 계산 융합
비교	<ul style="list-style-type: none"> 연료반응성, 화로형상 및 버너위치별 특성 모사불가 화로의 입출구값만 확인 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 연료반응성, 화로형상 및 운전변수에 따른 특성 모사가 가능 화로내부에 대한 상세 결과값 확인 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 연료반응성, 화로형상 및 운전변수에 따른 특성 일부 모사 가능 화로높이에 따른 결과 확인 가능
계산시간 예시	약 20초 이내	1일 이상	약 3분 이내

상 및 버너위치별 특성분석이 불가하며 화로 입출구 값만 확인이 가능한 단점이 있다.

최근에는 연구소나 학계에서 CFD 해석 기반의 화로해석도 많이 시행하고 있으나, 계산시간이 오래 걸리는 문제점이 있기 때문에 매일 빈번하게 연료 및 운전조건이 변하는 발전소 현장에서는 효과적으로 활용되기 어려운 실정이다. 그 외에도 CFD 화로 해석은 화염 측에 국한되며 보일러 튜브 증기 측을 고려한 완전한 연계해석은 아직은 잘 구현되지 못하고 있다.

한편 다중영역분할 화로계산 기법은 CFD 보다는 단순하지만 Heat Balance 계산보다는 실질적인 화로해석이 가능한 방법으로서 계산시간이 빨라서 온라인 설비감시 진단에도 활용할 수 있는 장점이 있다.

B. 다중영역 화로해석 기법

발전용 보일러의 화로는 evaporator 역할을 하는 water wall 로 구성된 사각박스 형태로 제작되며 연소를 통해 발행된 열은 주로 복사 열전달을 통해 전달된다.

이에 대한 수치해석 모델링은 화로의 높이에 따라 여러 개의 영역으로 나눌 수 있으며 각각의 영역은 well mixed reactor로 처리하고 미분탄 입자 및 연소가스의 성질은 균질한 것으로 가정할 수 있다. 이때 가스온도, 가스밀도, 평균 유속, 복사흡수계수, 방사율 및 입자의 복사흡수계수에 대한 계산을 하게 되며, 이때 미분탄 입자들은 연소가스 생성물과 동일한 속도를 가진다고 가정된다. 그리고 계산 설정에서 여러 높이에 대한 석탄 및 연소용 공기 주입 위치를 정한다. 화로에 주입된 미분탄에 포함된 수분 및 휘발분은 빠른 시간에 가스상으로 변하지만 char 성분은 상대적으로 반응이 느리다. 이런 현상을 모사하기 위해서는 다음과 같이 어떤 입자가 주입된 화로의 높이에서 상부 방향으로 거리에 따라 입자의 전환 비율을 exponential 함수로 가정할 수 있다.

$$X = 1 - e^{-k\Delta y} \tag{1}$$

이때 Δy 는 미분탄 입자의 수직방향 이동 거리이며, k 는 미분탄 입자의 반응성을 모사하기 위한 상수로서 95%의 전환율이 만족되는 이동거리로서, 유사한 화로 및 석탄에 대한 CFD 해석 경험

값 등을 활용할 수 있다.

$$k = -\frac{\ln 0.05}{\Delta y_{95}} \tag{2}$$

화로 각각의 영역별로 energy 및 mass balance 계산을 하며, 중간 중간에 주입된 미분탄에 대해서는 휘발분, 수분 등 가스상 및 char, ash 등 고체상을 분리하여 합하며, 입자를 포함한 연소가스의 온도, 밀도, 복사 특성 등은 국부적 평형상태로 가정하여 계산한다.

화로 각각의 영역에서 energy 및 mass balance는 일반적인 1D 계산을 적용하는 반면, 복사열전달은 3D discrete ordinate model의 사용하는데, 이를 위하여 화로 내부의 유동장에 대한 3D grid Hexa mesh를 생성 후 각각의 cell에서 Radiation 강도를 계산한다.

Discrete ordinate mode 모델은 각각 cell의 매체의 성질, 화로 wall 온도 및 emissivity에 따라 방향별 Radiation 강도를 계산하는데, 가스온도, 가스의 흡수계수, 입자 흡수계수 등이 고려된다. 가스의 흡수계수 k_{ag} 는 ϵ_g (emissivity)와 L_m (화로평균길이)의 관계식에서 계산할 수 있다.

$$k_{ag} = -\frac{\ln(1 - \epsilon_g)}{L_m} \tag{3}$$

가스의 emissivity는 온도, 압력, 화학종 농도 (CO₂, H₂O) 및 화로 평균길이의 함수이다. 그리고 기체 흡수 계수에 soot의 존재에 따른 영향도 포함된다. 한편 soot의 부피비는 각각 영역에서의 당량비와 가스상 탄소성분의 질량비에 따라 계산된다. 그리고 입자의 흡수 계수는 입자 크기 분포, 입자 밀도, 입자별 흡수율과 관련이 있는데, 이 흡수율은 Mie 이론을 통해 입자의 complex refractive index와 입자크기를 가지고 결정될 수 있다. 이때 최산화 반응에 의해 입자 크기는 변하지 않고, 또한 크기 분포도 변하지 않는다고 가정하였다. 입자 각 사이즈 빈의 수밀도는 입자수 유속과 입자 상향 속도로 평가된다.

각 영역별 복사열전달 특성이 계산된 후 그 값들은 각 영역의 모든 셀에 같이 적용된다. 경계벽면의 ϵ_w 는 사용자가 가정한 값을 적용하며, 각 경계면의 벽면의 표면 내부온도는 열유속 $q_{es, wall}$ 방사율, water wall의 유체온도 T_b , 벽면 저항 r_w 에 따라 반복계산을 통해 구해진다. 벽면 온도계산을 위한 방정식은 Eq. (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon_w(q_{es} - \sigma T_w^4) = \frac{T_w - T_b}{r_w} \tag{4}$$

열유속은 hemisphere solid angle에 따른 근처 셀의 복사 강도를 통해 구해지며 3D discrete ordinate model의 계산을 통해 각 셀과 각 경계면의 복사열전달 값을 얻을 수 있으며 각 영역별 열전달은 그 영역의 각 셀에 계산된 열전달량을 합하여 구할 수 있다. 이 때 계산된 값은 에너지 평형과 배기가스의 성상 값을 변경 시켜준다.

전체 계산 절차는 다음과 같다. 사용자가 입력한 조건에 맞추어 화로를 여러 개의 영역으로 나누고 3D grid를 생성하는데, 화로 내부의 일부 복사열전달 구역에 설치되는 과열기 등은 격자 내부에서 별도의 벽면을 생성한다. 다음은 화로에 주입되는 미분탄의 char conversion 및 mass balance가 각 영역별로 계산된다. 이 후 단열조건으로 각 영역에서의 에너지 평형계산을 통한 연소가스의 온도 및 성상이 계산된다. 그 다음 각 영역별 복사특성이 계산되어

TABLE 2

Design Specification of Domestic 500 MW Coal-Fired Power Plant [2]			
Description	unit	Specification	
Boiler	Type	-	Super critical, Tangential firing
	Evaporation	T/h	1,720 at BMCR
	SH press.	kg/cm ²	255
	SH temp.	°C	541
	RH press.	kg/cm ²	40.7
	RH temp.	°C	541
Turbine	Type	-	Reheat Condensing
	output	MW	500
	HP press	kg/cm ²	246
	HP temp	°C	538
	RH press.	kg/cm ²	538
	RH temp.	°C	40
	Extraction	-	8
Vacuum	mmHg	722	

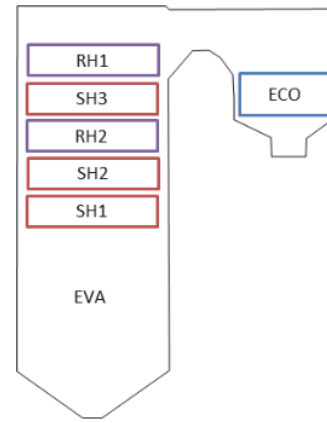


Fig. 1. Heating surface arrangement of 500 MW standard power plant.

TABLE 3

Design and Range Coal of 500 MW Coal-Fired Power Plant			
Coal Analysis		Design coal (bituminous)	sub-bituminous coal
Total Moisture (% as-fired)		10	23.4
Moisture		5	14.6
Ash		15	5.3
Proximate, Wt. %	Volatile Matter	28	39.5
	Fixed Carbon	52	40.4
	Total	100	100
HHV, kcal/kg (as-fired)		6,080	5,090
Carbon		69	68.29
Hydrogen		4.3	5.09
Oxygen		8.7	18.31
Ultimate, Wt. %	Sulfur	0.8	0.23
	Nitrogen	1.4	1.03
	Ash	15.8	6.76
	Total	100	100

(Fig. 2. is on the following page.)

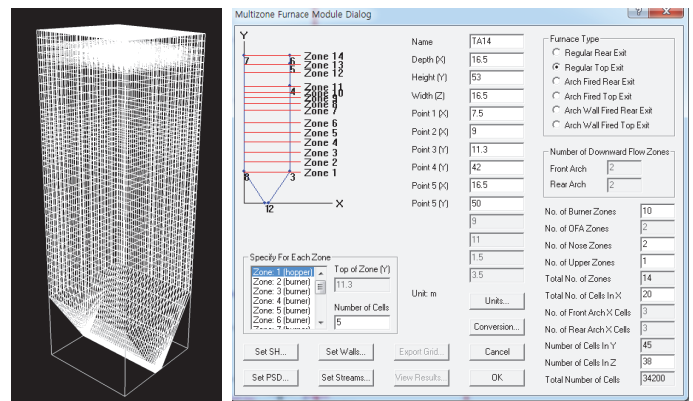


Fig. 3. Furnace grid setup

각 영역별 cell에 할당된다. 그 후 3차원 DO 모델에 의한 복사 전 열 계산이 되고 경계벽면 온도가 갱신되는데 현재는 벽면에 접합 셀에서의 대류열전달은 고려되지 않고 복사현상에 의한 열전달만 반영되었다. 마지막으로 각 영역의 열전달이 계산되며 에너지 평형 계산에 열전달을 반영하여 반복 계산을 시행 후 수렴기준에 도달 하면 계산을 종료할 수 있다 [1].

III. 다중영역분할 화로해석 기법 적용결과

A. 모델링 방법

다중영역 화로기법에 대한 유용성 분석을 위해 모델링한 발전소는 500 MW급 초임계압 발전소이며 주요 설비 규격은 TABLE 2과 같다.

적용된 보일러의 형식은 초임계압 관류, 원-패스형이며, 접선 연소 방식을 채용하였고, 폭 16.5 m 길이 16.5 m 높이 86.91 m의 대용량 보일러이다. 1개 호기의 보일러에는 6대의 미분기가 있으며 각 미분기의 출구는 4개의 코너에 위치한 버너로 보일러 노에 연결되어 있다. 타워형 구조이므로 높이가 높고, 전열면의 튜브들은 가스의 흐름 방향에 대하여 수직방향으로 설치되어 있다. 버너계통의 구조는 보일러의 각 코너에 설치된 윈드박스에서 화로 중심부 측으로 버너 및 공기노즐이 각각 50°(39°)의 각도로 배치되어 화

로 중심부에 회전하는 화구(fireball)를 형성시키는 방식이며 [3], 설계탄(역청탄) 및 범위탄 예시(아역청탄) 성상은 TABLE 3과 같다. 보일러 내부 전열면의 배치는 Fig. 1과 같다

Fig. 2는 전력연구원의 프로세스 해석프로그램(Visual C++ 및 Microsoft Foundation Classes 라이브러리 활용)으로 보일러 계통 시스템 전체에 대한 모델링 결과이며 보일러 화로 상부의 과열기 재열기 및 송풍기, 공기예열기 등 보일러 보조설비들은 일반적인 heat & mass balance 모델링 기법을 적용하여 모사하였다.

다중영역분할 화로해석 기법을 활용하여 보일러 화로를 높이에 따라 하부 Hopper에서 시작하여 버너지역 및 첫 번째 복사과열기 까지를 14개 영역으로 구분하여 모델링하였다. 각 영역은 hexa 형태의 cell로 나누어서 총 34,200개를 생성하였으며, zone 숫자와 같은 멀티존 화로 계산을 수행하게 된다. Fig.3은 보일러의 화로 부위에 대한 영역 분할 및 grid 설정에 대한 예시이다.

각 버너 및 연소용공기는 보일러 도면을 참고하여 실제 높이에 모사하였으며, 화로 wall에 대한 조건을 설정하였다. 연료 및 운전조건은 발전소 100% 부하 설계조건을 적용하였다.

95% 전환율이 만족되는 이동거리는 유사한 화로 및 석탄에 대한 CFD 해석 경험 및 시험연소로 실험 경험을 고려하여 10 m를 가정하였다. 향후 다양한 탄종 및 화로형태에 대한 char 성분의 반

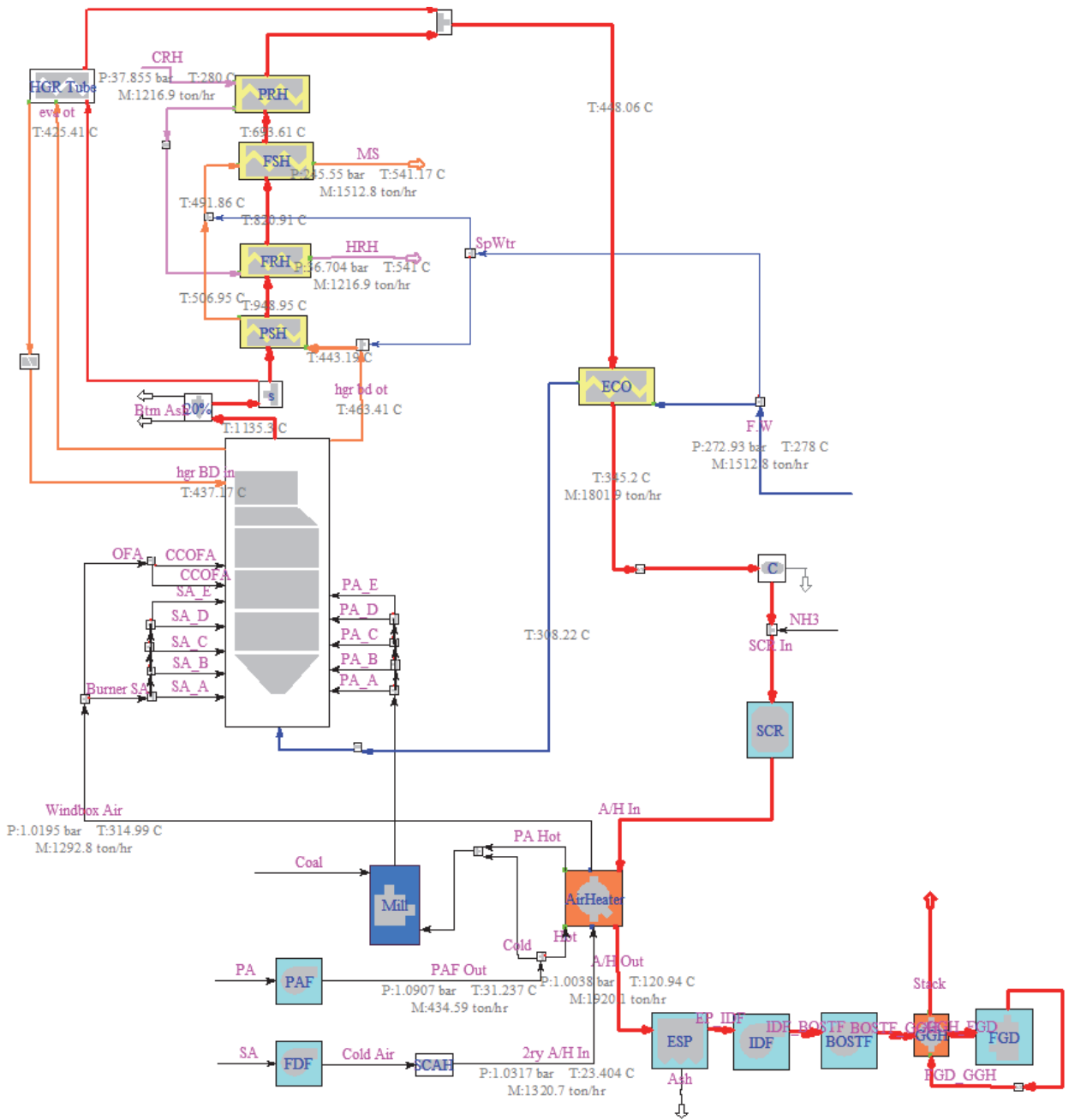


Fig. 2. Boiler system modeling result.

응속도에 대한 경험치를 DB 형태로 구축한다면 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

석탄의 모든 성상은 as-fired 기준으로 변환하여 미분기 모델에 입력되는데, 이후 1차 공기에 의해 수분의 증발이 처리된 후 화로 모델에 연결된다. 화로에서 휘발분의 반응은 각 zone에서 국부산화제 농도에 따라 계산되므로 당량비가 1 이하인 버너 지역에서 CO가 생성된다.

B. 결과고찰

1) 보일러 시스템 Heat balance 계산 결과 검증

연구에 적용한 다중영역 분할 화로해석 기법에 대한 신뢰성

검증을 위하여 국내 500 MW 급 석탄화력 보일러 화로에 대한 계산 값과 보일러 제작사의 design data [4]와 비교하였다.

TABLE 4 및 TABLE 5는 보일러의 100% 부하조건에서 보일러 water & steam 측 및 gas 측의 온도에 대한 제작사의 설계 데이터와 계산 값을 비교한 결과로서 비교적 양호하게 일치됨을 확인하였다.

2) CFD 해석결과와 다중영역분할 화로해석 결과 비교

Fig. 4는 Boiler 화로 벽면에서의 Heat flux 에 대하여 선행연구의 CFD 해석결과와 다중영역분할 화로해석기법의 계산결과 [5]를 비교한 그림이다.

두 결과 모두 보일러 버너주변의 연소가 활발하게 이루어지

TABLE 4
Comparison of Design Value with Calculation Result
for Steam Temperature

Steam side location	Design value(°C)	Calculation result(°C)	Deviation (°C)
Eco in	278	278	0
Ecoout (Eva in)	308	308.2	0.2
Furnaceout (SH1in)	428	425.4	-2.6
SH1 out	469	463.4	-5.6
SH2 in	448	443.2	-4.8
SH2 out	507	506.9	-0.1
SH3 in	492	491.8	-0.2
SH3 out	541	541.2	0.2
RH1 in	280	280	0
RH1out (RH2 in)	449	442.1	-6.9
RH2 out	541	541	0

TABLE 5
Comparison of Design Value with Calculation Result
for Gas Side Temperature

Gas side location	Design value (°C)	Calculation result (°C)	Deviation (°C)
Eva out (SH2 in)	1126	1135	9
SH2out (RH2 in)	948	949	1
RH2out (SH3 in)	819	821	2
SH3out (RH1 in)	688	693	5
RH1out (Eco in)	446	448	2
Eco out	347	345	-2

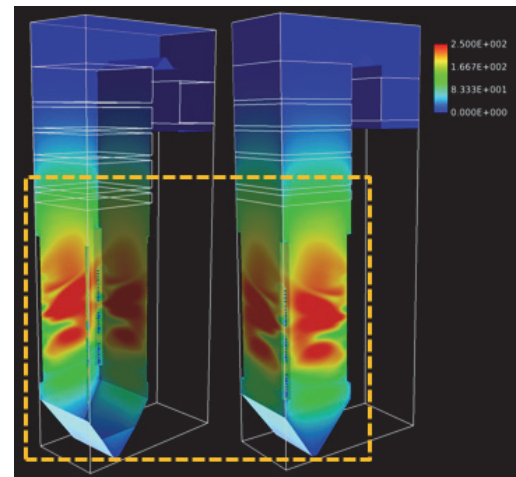
는 구역에서 높은 열유속을 나타내고 있으며, 다중영역분할 화로 해석 기법으로 CFD와 유사한 3차원 형태의 경향을 얻을 수 있음을 확인하였다. 한편 CFD에서는 점선연소의 특징인 fire ball의 회전에 의한 영향으로 수냉벽의 중앙부위에서 좌측으로 약간 떨어진 위치가 가장 높은 값을 나타내는 반면, 다중영역분할 화로 해석 기법에서는 CFD와 같은 정교한 모사에는 한계가 있었다.

Fig. 5는 보일러 내부 gas temperature에 대하여 CFD 해석 결과와 다중영역분할 화로 해석 기법의 계산결과를 비교한 그림이며 고온부의 위치 및 온도 분포 등 전반적인 경향은 유사하였다. 그러나 3차원 결과를 얻을 수 있는 CFD와는 달리, 다중영역분할 화로 해석 기법은 연소가스의 energy 및 mass는 화로높이에 따른 1차원 계산으로 처리하기 때문에 화로내부에서는 높이별로 평균값을 나타내는 등 한계가 있었다.

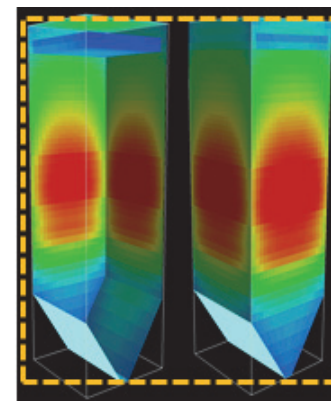
3) 탄종 및 운전변수 영향 모사결과 고찰

Fig. 6은 역청탄 종류인 Design coal (6,080 kcal/kg)과 아역청탄 종류인 range coal LOAJANAN (5,090 kcal/kg)을 각각 100% 단탄 연소하는 경우에 대한 화로 높이별 평균 heat flux를 나타낸 결과이다. 그 결과 아역청탄 연소시에는 상대적으로 벽면 열유속이 감소되는 것으로 예측되었는데, 일반적인 발전소에서의 운영 경험 및 탄종별 시험연소로 실험 [6]에서 관찰된 경향과 유사하다. 이런 현상은 회분함량 저하, 연료중의 수분증발에 의한 화염온도 저하 및 CO₂ 대비 낮은 H₂O의 방사율에 따른 복사열전달 감소의 영향으로 판단된다.

Fig. 7은 과잉공기에 변화에 따른 영향을 비교한 결과로, 아역청탄 연소 시 기본조건(공기에열기 입구기준: 유량 1,930 t/h, O₂ 2.9%)에서 연소용 공기유량을 변경조정(유량 1,751 t/h, O₂ 2%)하는 경우에 화로 벽면 열유속이 증가되는 것으로 예측되었으며, 선행 연구에서 수행된 연소용 공기공급 변화에 따른 화로 해석 결과

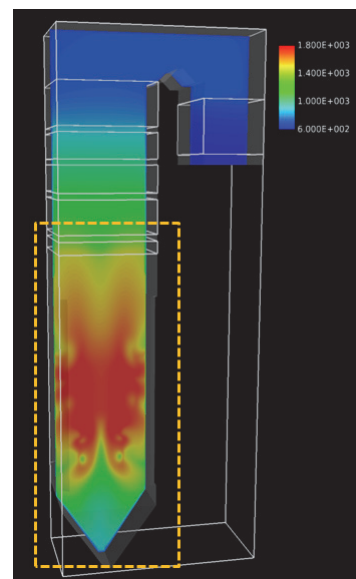


(a)

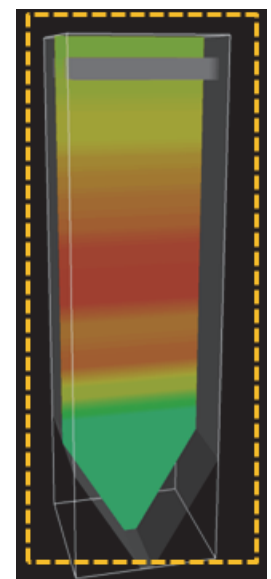


(b)

Fig. 4. Comparison of CFD with Multi zone method for furnace heat flux calculation. (a) CFD method. (b) Multi zone method.



(a)



(b)

Fig. 5. Comparison of CFD with Multi zone method for gas temperature. (a) CFD method. (b) Multi zone method.

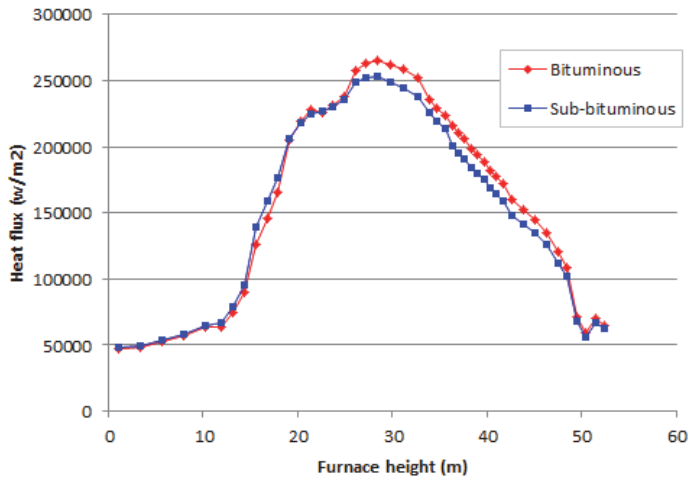


Fig. 6. The effect of fuel properties on wall average net heat flux.

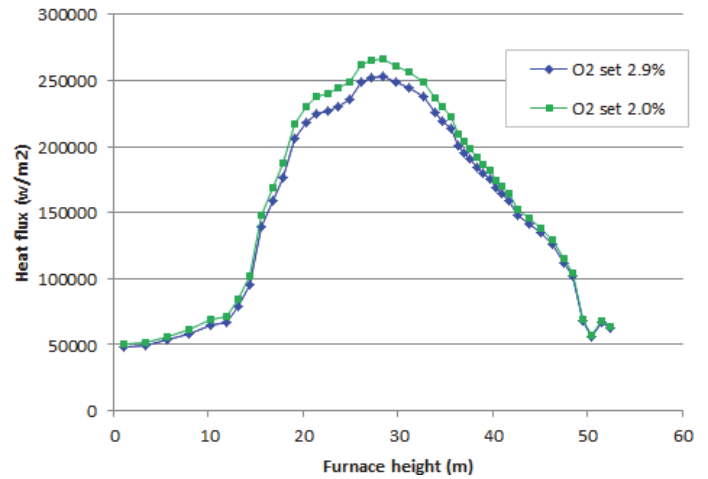


Fig. 7. The effect of combustion air mass flow on wall average net heat flux.

[7]와 같은 경향을 보였다.

다중영역분할 화로해석 기법을 활용한 계산 결과는 경향은 실제 발전소에서 나타나는 현상과 유사하며, 연료성상 및 운전변수 변화에 따른 영향예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. Conclusion

다중영역분할 화로해석 기법에 대한 적정성 분석을 위해 500 MW 급 석탄화력 보일러에 대한 계산을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었으며, 향후 다른 형상, 규모의 화로에 대한 해석들을 통해 신뢰성을 보완할 계획이다.

- 1) 다중영역 분할 화로해석 기법은 CFD와 같은 상세한 계산에는 한계는 있으나, 전반적으로 유사한 열전달 분포, 고온부의 위치 및 온도결과 값을 얻을 수 있었다.
- 2) 탄종 및 운전변수 변화에 따른 화로내부 거동변화 예측이 가능하다.
- 3) 빠른 시간에 연료 및 운전변수에 따른 화로내부 특성을 계산할 수 있는 장점이 있으므로, 설비감시진단 및 일일 연료/운전 계획 수립 등 활용성 측면에서 유용할 것으로 예상된다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R17GA12.

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 자체 연구과제(과제번호: R17GA12)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Baek S.H, Ko S.H., "100 MWe oxyfuel power plant boiler system process design and operation parameters sensitivity analysis," J. Korean Soc. Combust., V18 Issue 4, 2013.
- [2] KEPCO, "Dang-jin thermal power plant unit 1,2 data book," pp.10-35, 1997.
- [3] Baek S.H, KIM. H.H, Park. H.Y, "Empirical study on water wall tube corrosion mechanism for tangential type coal fired power plant boiler," J. Energy engineering, Vol23, No.4, pp.49-55, 2014.
- [4] KEPCO, "Dang-jin thermal power plant 1,2 boiler performance data sheet," 2014.
- [5] KEPCO, "해외발전사업 지원 주기기 검증 시스템 개발 중간보고서," 2017.
- [6] "Combustion characteristics of imported bituminous & subbituminous coal in a pilot scale test facility," J. Energy engineering, V23, No.4, pp.207 - 214, 2014.
- [7] Park. H.Y, "Combustion characteristics of coal-fired boiler depending on the variations in combustion air supply method," J. Energy engineering, V18, No.3, pp.156-162, 2010.