

반응표면법을 이용한 석탄 화력 보일러 연소특성 예측

신성우 · 김신우 · 이의주*

부경대학교 안전공학과

(2017. 1. 26. 접수 / 2017. 2. 1. 수정 / 2017. 2. 6. 채택)

Prediction of the Combustion Performance in the Coal-fired Boiler using Response Surface Method

Sung Woo Shin · Sin Woo Kim · Eui Ju Lee[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received January 26, 2017 / Revised February 1, 2017 / Accepted February 6, 2017)

Abstract : The experimental design methodology was applied in the real scale coal-fired boiler to predict the various combustion properties according to the operating conditions and to assess the coal plant safety. Response surface method (RSM) was introduced as a design of experiment, and the database for RSM was provided with the numerical simulation of the coal-fired boiler. The three independent variables, high heating value of coal (HHV), overall stoichiometry excess air ratio (OST), and burner-side stoichiometry excess air ratio (BST), were set to characterize the cross section averaged NOx concentration and temperature distribution. The maximum NOx concentration was predicted accurately and mainly controlled by BST in the boiler. The parabola function was assumed for the zone averaged peak temperature distribution, and the prediction was in a fairly good agreement with the experiments except downstream. Also, the location of the peak temperature was compared with that of maximum NOx, which implies that thermal NOx formation is the main mechanism in the coal-fired boiler. These results promise the wide use of statistical models for the fast prediction and safety assessment.

Key Words : plant safety, response surface method (RSM), coal-fired boiler, NOx, high heating value (HHV)

1. 서론

2015년 기준 국내의 전력생산 에너지원을 보면 전체 에너지의 약 65%를 화력발전을 통해 생산하고 있고, 이중 유류나 천연가스 등을 제외한 무연탄 또는 유연탄 등의 석탄이 차지하는 비율이 약 70%로서 전력생산에 석탄이 차지하는 비율은 약 40%에 이르고 있다. 이와 같이 국내 전력생산의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 석탄 화력발전의 경우 운영중 다양한 사고에 의해 발전을 멈추게 되면, 장치산업의 특성상 보수 후 다시 재가동하게 되는 기간이 길기 때문에 사회적 그리고 경제적으로 큰 손실을 가져온다. 이러한 사고의 유형은 보일러, 터빈, 발전기 등 다양한 설비 등의 직접적인 원인과 석탄창고 화재나 기준치 이상의 오염물질 배출과도 같은 환경안전 문제 등의 간접적인 원인으로 나눌 수 있다. 화력발전 설비 중 보일러의 경우에는 이상 고온이나 부식물질 배출 등으로 시스템에 손상을

가할 수 있을 뿐 아니라 질산화합물이나 미세먼지 등의 환경안전문제를 야기하는 직·간접 원인이 된다. 특히 석탄의 경제적이며 안정적인 수급을 위해 저 휘발분의 저급탄 및 다양한 연소물성치의 혼탄 등을 사용하는 경우에는 이러한 사고의 위험이 증가된다. 하지만 발전소의 운영 여건상 실제 대형설비에서 여러 가지의 운전변수에 대한 실제 실험을 수행하기에는 경제적 부담, 설비측면 리스크, 실험조건 구현의 제약 및 화로 내부 측정의 어려움 등 많은 문제점이 있다. 따라서 다양한 탄종 및 운전조건에 대한 연소 시뮬레이션을 통해 설비에 영향성을 예측하여 다양한 정보를 운영자에게 제공하고 발전소 운전이 최적화 될 수 있도록 지원할 수 있다면 안전사고의 위험을 획기적으로 감소시킬 수 있을 것이다.

화력발전의 보일러측 자세한 연소 수치해석(CFD)은 석탄의 종류, 3차원 형상 및 크기 등을 고려하면 간단한 모델링을 사용하는 경우에도 결과를 얻는데 매우

[†] Corresponding Author : Eui Ju Lee, Tel : +82-51-629-6471, E-mail : ejlee@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

많은 시간이 소요되므로 실시간 연소특성을 얻을 수 없다. 따라서 빠른 데이터 제공 및 타당한 결과의 요구를 충족할 수 있는 방법론이 필요로 하게 되었고, 본 연구에서는 통계적 기법으로서 반응표면법(RSM)을 적용하여 보일러 반응장의 특성을 예측하였다^{1,2)}. 이러한 연구는 기존에 기초실험용 석탄 연소기인 DTF(drop tube furnace)에 적용하여 성공적으로 해석되었지만^{3,4)}, 실제 규모의 발전 보일러에의 적용 예는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 관심 연소 물리량을 실시간 제공하기 500 MW급 석탄 연소 수치해석을 수행하여 CFD 결과를 데이터베이스로 구축하였고, 결과 예측을 위해 반응표면법을 통해 가장 효율적인 실험계획을 설립하였다. 이렇게 개발된 방법을 통해 실규모 석탄 보일러 내에서 연소 물성치를 예측하여 보일러의 종합적인 안전 사고를 예측할 수 있는지에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 연구방법

보일러의 운영중 안전인자로서는 출구에서의 최종 물리량 뿐 아니라 노내 분포가 요구될 수 있다. Fig. 1에 이러한 개념적인 방법론을 실제 보일러에 어떻게 적용하는지에 대한 전체 개요도를 도시하였다. 보일러에서 연소 후 배출되는 출구값의 예측은 기존의 반응표면법을 이용하였고³⁾, 공간 분포예측을 위해서는 먼저 실험계획법에 따라 적합하게 실험을 수행하고 결정된 모사함수의 파라미터의 값을 RSM을 통해 입력변수의 다항식으로 추정하여 구성하였다⁴⁾.

본 연구에서 실규모 보일러 석탄연소를 수치해석하기 위해서 전산유체해석 프로그램인 CFS를 사용하였다^{5,6)}. CFS는 기존의 Fluent와 유사하게 개발중인 연소 최적화 시뮬레이터로서 연소적인 관점에서는 탈 휘발과 좌 연소 등 두 가지 단계의 완전화학반응으로 구성

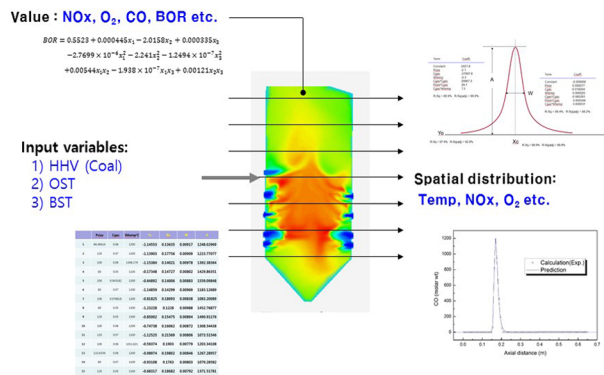


Fig. 1. RSM approach for real scale boiler.

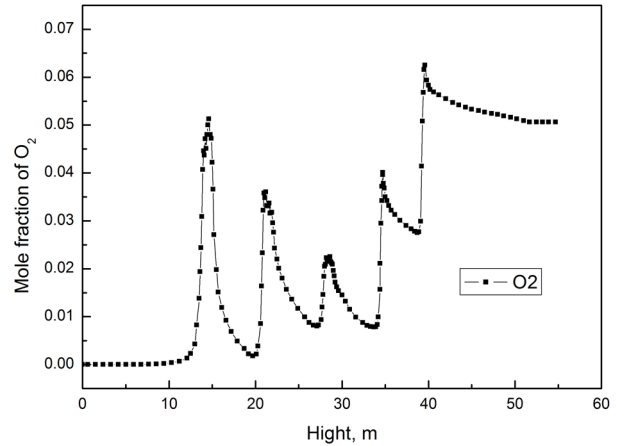


Fig. 2. Cross section averaged oxygen concentration in the real scale boiler.

되어 있고, 보일러 내의 입자의 체류시간, 열분해율, 운동방정식, 에너지방정식으로 입자 온도의 정확한 예측, 입자의 체류시간, 속도 등을 구하도록 구성되어 있다. 대상 보일러는 500 MW급 표준보일러로서 크기는 높이가 60 m이고, 계산에서 사용된 격자의 크기는 1 cm이다. 계산결과는 3차원 적인 정보를 가지고 있어 이를 먼저 단면 평균하여 가스 농도 등의 정보를 얻을 수 있었다. 하지만 보일러 내 전체적인 분포는 Fig. 2와 같이 일반적으로 매우 불규칙 또는 변곡점이 많은 데이터가 형성된다. 이러한 변화는 주로 보일러에 위치해 있는 버너와 산화제 공급포트에 의해 발생하고 따라서 관련되어 있는 온도 등의 물리량도 모두 유사한 경향을 보인다.

위와 같은 분포를 모두 정확히 모사하기 위해서는 각 부분을 구분하여 각 구역의 분포를 모사하는 방법이 있지만, 그러한 정보보다는 전체적인 평균 분포가 중요한 경우가 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 보일러 측 분포를 얻기 위해서 높이별 구역(zone)을 설정

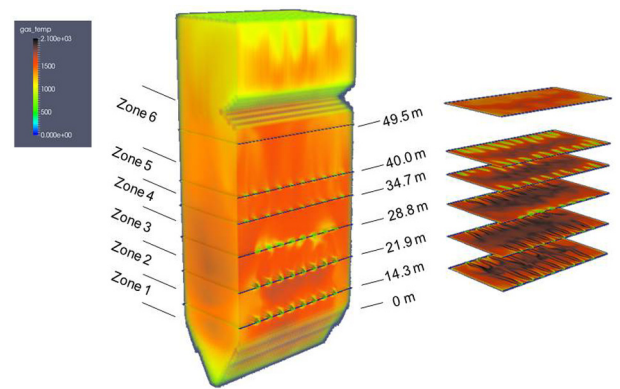


Fig. 3. Schematics of coal-fired boiler.

Table 1. The coal composition used in the coal-fired boiler simulation

Composition (Ultimate)	wt%	Composition (Proximate)	wt%
C	59.91	H ₂ O	14.0
H	4.12	Volatile	32.26
O	12.06	Fixed carbon	44.96
N	0.95	Ash proximate	8.75
S	0.42	Sum	100.0
Ash	8.50		
Moisture	14.0	HHV (kcal/kg)	5600
Total	100.0		

Table 2. The coal kinetics used in the coal-fired boiler simulation

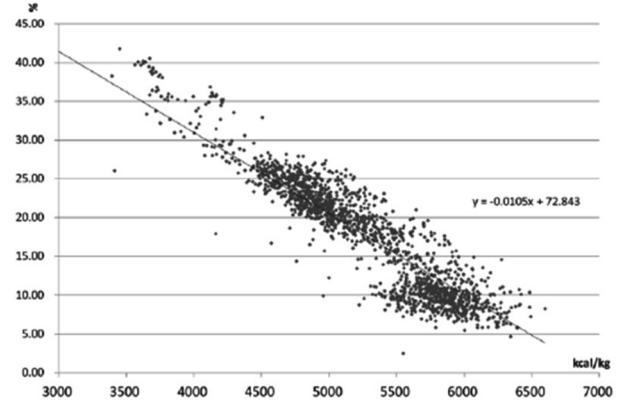
Variables	Values
Devolatilization	
Y1	0.398
Y2	0.796
A1(1/s)	370000
A2(1/s)	1.46E+13
E1(kcal/mol)	23
E2(kcal/mol)	59.9
Char oxidation	
n	1
Ac(KgC/sm ² PaO ₂ n)	0.9
Ec(kcal/mol)	30

하여 각 구역에서의 평균값에 대한 분포를 예측하였다. 구역의 구분은 버너의 위치 및 보일러의 기하학적 형상을 고려하여 결정하였고 자세한 형상 및 위치는 Fig. 3에 도시하였다.

계산에 사용된 탄종의 물성치는 기존에 국내에서 많이 사용되는 아역탄 탄종에 대한 기본적인 값을 이용하였고, 조성(composition)과 반응속도(kinetics)는 각각 Table 1과 2에 나타내었다.

본 연구에서 변수 중 하나인 탄종은 실제로 매우 다양할 뿐 아니라 각 탄종별 반응속도에 관계되는 상수 또한 다르므로 이를 모두 고려한다는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 탄종의 변화를 발열량(HHV)으로 대표하였다. 이 때 HHV에 따른 구성원소의 조성에 대한 정보가 요구되는데, 기존의 연구에 의하면 아역청탄 석탄의 성상분포의 결과가 Fig. 4와 같이 열량과 수분함량이 반비례하는 결과를 보임을 이용하였다.⁷⁾

본 연구에서는 변수 중 하나인 발열량을 바꾸는 경우에 수분함량을 논문에서 제시한 식 (1)로서 결정하였

Fig. 4. Total moisture of coal vs heating value⁷⁾.

고, 그 외에 Table 1에 나타나있는 원소(C,H,O,N,S) 그리고 재(ash)의 함량을 같은 비율로 조정하였다.

$$H_2O(\%) = -0.105 \times HHV(kcal/kg) + 72.843 \quad (1)$$

본 실험에서는 독립변수의 종류와 변화 한계 (variation limits)는 일반적인 상용 보일러 운전조건으로부터 선정하였다. 중심합성계획법 설계에서 3개의 독립변수를 선택할 경우 중심점을 포함하여 꼭지점과 축점을 포함하면 총 15회의 결과가 필요하고, 수치해석의 경우에는 실험과 달리 자체의 변동이 주어지지 않으므로 중심점에서 반복데이터가 필요 없다. 사용된 독립변수는 석탄 고준위 발열량(high heating value (kcal/kg), HHV)와 두 개의 당량비인 전체 과잉 공기비(overall stoichiometry excess air ratio, OST)와 버너측 과잉 공기비(burner-side stoichiometry excess air ratio, BST)를 선정하였고, 각각의 중심점과 변화범위는 아래 Table 3에 나타내었다. 이 때 사용한 축점을 나타내는 α 값은 독립변수의 수가 3개 이므로 1.682로 설정하였다.

실험 자료는 Minitab[®] 소프트웨어를 사용하여 분석한 후 2차 다항식으로 구하였고, 다항식 모형의 적합도의 질(quality of fit)은 상관관계 계수(correlation coefficient, R^2)로 표현할 수 있고, 각 인자들의 종속변수에 대한 유의성은 P-value로 판단하였다.

Table 3. Actual values of the variables for the coded values. HHV (kcal/kg) means a high heating value. OST and BST indicate the overall and burner-side stoichiometry (excess air ratio), respectively

Variables	-1	0	+1
HHV, X ₁	5200	5600	6000
OST, X ₂	1.05	1.15	1.25
BST, X ₃	0.8	0.9	1.0

3. 연구결과 및 토의

3.1 보일러 내의 NOx 최대 단면평균값

일반적인 NOx 생성은 잘 알려진 바와 같이 생성 기구에 따라 크게 Thermal NOx, Prompt NOx, Fuel NOx 등 3가지로 구분할 수 있다⁹⁾. Thermal NOx인 경우에는 온도에 민감해서 생성속도를 살펴보면 온도에 지수함수적으로 비례함이 알려져 있다. Prompt NOx의 경우는 탄화수소 반응기에 의해 생성되어 연료과잉 상태와 비교적 낮은 온도에서 생성되며 지속시간이 상대적으로 작은 특성이 있다. Fuel NOx의 경우는 연료자체에 고정되어 있는 질소의 상태와 구성에 관련되어 있어 일반적인 탄화수소계열의 연료에서는 중요하지 않지만 연구대상인 석탄의 경우에는 다른 메카니즘과 더불어 중요하게 고려해야된다. 따라서 뒤 절에서는 석탄의 질소성분 구성비율을 하나의 변수로 하여 연소시 NOx의 생성에 대해 조사하였다. 하지만 본 연구에서는 이러한 영향을 모두 종합하여 연구가 수행되었다.

Table 4에는 계산에서 사용한 3개의 변수(HHV, OST, BST)를 이용하여 실험계획법에 의해 모두 15개의 실험 조건에서 계산을 수행하였고, 이로부터 얻은 NOx의 최대값과 최대값의 위치를 정리하였다. 앞에서도 언급한 바와 같이 모든 데이터는 계산된 3차원 데이터를 단면 평균한 값으로 오직 보일러 높이(Y)에 대한 함수로 재구성하였다. Table 6에서 얻은 자료로부터 최소자승법을 이용하여 NOx의 최대값에 대한 코드화 하지 않은 실제 독립변수 관계식을 얻었고 식 (3)에 나타내었다.

Table 4. Calculated dependent variables for real scale boiler

	HHV	OST	BST	NOx_max (ppm)	Y_max (m)
1	5600	1.318179	0.9	3.56E+02	22.4657
2	5600	1.15	1.068179	6.53E+02	11.1711
3	5200	1.05	0.8	3.21E+02	14.7295
4	6000	1.05	1	4.83E+02	11.1711
5	5200	1.25	1	4.03E+02	11.1711
6	6000	1.25	1	4.63E+02	10.2922
7	5600	1.15	0.731821	3.61E+02	21.7332
8	5600	1.15	0.9	3.52E+02	21.5312
9	5600	0.981821	0.9	3.61E+02	21.7332
10	6272.717	1.15	0.9	3.78E+02	14.5312
11	5200	1.05	1	3.99E+02	22.4657
12	6000	1.25	0.8	3.26E+02	14.7295
13	4927.283	1.15	0.9	3.47E+02	21.7332
14	5200	1.25	0.8	3.23E+02	14.7295
15	6000	1.05	0.8	3.69E+02	14.7295

이 경우에 변수인 BST(X₃)를 포함한 항을 제외한 다른 변수인 HHV(X₁)와 OST(X₂) 항들은 P-value가 0.005이상의 높은 값을 보였다. 또한 R²값은 92.8%로 모형이 다항식 적합도를 잘 만족하는 것으로 나타났고, 조정 R²값은 79.8%로 앞에서 설명하였던 HHV와 OST 변수의 항과 같이 높은 P-value의 항들에 의해서 발생하였다고 볼 수 있다.

$$NOx (ppm) = 2508.89 + 0.27x_1 + 1194.67x_2 - 9904.65x_3 - 0.01 \times 10^{-4}x_1^2 - 485.35x_2^2 + 4764.91x_3^2 - 0.22x_1x_2 - 0.29x_1x_3 + 312.50x_2x_3 \quad (3)$$

NOx의 최대값에 대한 독립변수들 간의 관계를 도시하지는 않았지만 표면도(surface plot)와 등고선도(contour plot)를 채택하여 조사하였다. 그 결과 NOx의 최대값은 OST와 HHV에 비해 BST의 NOx 생성에 대한 영향이 매우 큼을 알 수 있었으며, BST에 대해 NOx 값을 최소화하는 극소값이 존재하였다.

이와 같은 NOx 최대값에 대한 결과 및 해석을 통해 문제에서 사용한 변수의 수를 줄일 수 있는 가능성을 찾을 수 있었다. 즉, 변수의 개수는 차수(order)이므로 차수를 감소할 수 있는 새로운 모델을 제시할 수 있다. 반응표면법 해석을 통해 각 1차 및 2차 회귀분석 계수에서 변수 BST를 제외하고는 모두 P-value가 0.05 이상이므로 상관관계가 매우 적다는 사실을 얻을 수 있었고, 따라서 BST의 항(term)만 고려하면 R²값은 92.8%에서 86.3%로 낮아지지만 조정 R²값은 크게 향상되어 차수를 감소시킬 수 있다. 이와 같이 BST 변수만을 고려한 2차 다항식으로 표현하면 아래의 식 (4)와 같다.

$$NOx (ppm) = 3871 - 8490 \times BST + 5083 \times BST^2 \quad (4)$$

차수감소모델의 결과 값이 계산에서 얻어진 실제값을 잘 예측하는지를 판단하기 위해 같은 조건에서 모든 변수를 고려한 식(3)과 BST 변수만을 고려한 차수감소모델 식 (4)의 경우에 대해서 NOx 최대값을 비교하였고, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 값 자체는 모

Table 5. Estimation of NOx peak value with reduced order model

Model	HHV	OST	BST	NOx (ppm)
Simulation(Exp.)				352.0
All terms	95	0.06	1150	357.2
Reduced Order				346.7

든 항을 고려하였을 때 실제값보다 크고, 차수 감소모델의 경우 작게 예측됨을 볼 수 있었지만, 발생하는 오차는 1.5% 내외로 차수감소모델 또한 NOx 최대값을 정확히 예측하는 것이 공학적측면에서 충분하다고 결론내릴 수 있다.

3.2 보일러 구역 최대온도 분포

본 연구는 보일러 내부의 대략적인 온도분포를 예측하기 위해 앞의 Fig. 3에서와 같이 보일러 구역(zone)을 6개의 영역으로 구분하여 각 구역의 최대온도 분포를 계산하고 반응표면법을 통해 이를 예측하였다. 이 때 구역의 최대온도는 각 구역에서 최대 온도가 기록되는 단면의 온도를 분포로서 형성하였고, 평균적 온도가 아닌 Thermal NOx처럼 최고온도가 전체특성에 영향을 미치는 경우에 유용하게 사용할 수 있는 분포이다.

개발된 분포 예측의 방법론은 앞의 DTF 연구를 통해 자세히 기술하였고 그 절차는 간단히 다음과 같다. 먼저 일반적인 방법과 같이 변수와 그 변화 영역을 정해서 RSM의 실험계획법에 따라 실험횟수 및 조건을 결정한다. 다음에 실험(본 연구에서는 자세한 수치해석) 결과를 그래프로 작성하여 모든 조건에서 유사한 형태를 가지는 곡선의 함수를 결정한다. 결정된 함수에 대해서 결과를 피팅하고 함수식을 구성하는 파라미터의 값을 각각 얻는다. 이후 각 파라미터에 대해서 RSM 해석을 하여 파라미터의 다항식을 얻는 절차로 구성된다. 이러한 경우 가장 중요한 점은 가능한 한 파라미터의 수가 적은 것이 좋고, 각 파라미터 변수들이 독립적이면 보다 효과적인 분포예측이 가능하다.

온도분포에 영향을 주는 보일러 운전변수는 앞과 동일하게 HHV, OST, BST를 선정하였고 그 변화영역 또한 동일하게 구성하였다. 계산을 통해 얻은 보일러의 구역 최대온도는 대체적으로 포물선(parabola)형태를 가지고 있으며 따라서 식 (5)와 같이 구역최대평균온도를 가정하였다.

$$y = A + Bx + Cx^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 포물선 함수를 구성하기 위해서는 A, B, C 3개의 파라미터가 요구되고, 각각의 파라미터는 $y = C(x-b)^2 + a$ 형태로 변형될 수 있으므로 파라미터 A, B, C가 서로 독립적이라고 할 수 있다. 실험계획법에 의한 계산을 통해 얻은 결과를 포물선 함수로 피팅하여 얻은 각 파라미터를 Table 6에 나타내었고, 각 파라미터를 RSM를 통해 해석하여 얻은 2차 다항식의 계수와 P-value를 Table 7에 나타내었다.

Table 6. Acquired parameters for parabola function

	HHV	OST	BST	A	B	C
1	5600	1.318	0.9	1602.201	20.19004	-0.42905
2	5600	1.15	1.068	1688.817	13.07992	-0.27749
3	5200	1.05	0.8	1645.501	10.92585	-0.24536
4	6000	1.05	1	1668.682	13.04675	-0.25279
5	5200	1.25	1	1549.349	17.78346	-0.37401
6	6000	1.25	1	1592.67	19.57912	-0.39612
7	5600	1.15	0.731	1692.541	11.39861	-0.25004
8	5600	1.15	0.9	1632.465	17.03831	-0.36481
9	5600	0.981	0.9	1692.541	11.39861	-0.25004
10	6272.7	1.15	0.9	1657.191	17.65954	-0.36272
11	5200	1.05	1	1717.282	6.07385	-0.15561
12	6000	1.25	0.8	1630.127	15.1961	-0.30382
13	4927.3	1.15	0.9	1592.34	14.92534	-0.33666
14	5200	1.25	0.8	1655.804	11.0979	-0.25635
15	6000	1.05	0.8	1580.444	19.43861	-0.37248

Table 7. Coefficients and P-value from RSM analysis for parameters of parabola function

Term	A		B		C	
	Coef	P-value	Coef	P-value	Coef	P-value
Constant	1004.15	0.86	-301.62	0.34	6.39	0.27
HHV	-0.04	0.96	0.078	0.21	-0.0015	0.18
OST	1227.45	0.75	69.45	0.73	-1.72	0.64
BST	400.09	0.90	77.52	0.67	-2.37	0.47
HHV*HHV	0	0.52	0	0.60	0	0.44
OST*OST	-153.02	0.91	-57.13	0.46	1.430	0.31
BST*BST	1378.15	0.36	-182.82	0.05	4.109	0.025
HHV*OST	0.41	0.22	-0.03	0.11	0.00048	0.14
HHV*BST	0.27	0.41	-0.012	0.47	0.00017	0.56
OST*BST	-3799.13	0.02	278.90	0.007	-5.24	0.006

통계적 결과 뿐 아니라 실제 새로운 조건에서의 구역 최대온도 예측의 타당성을 평가하기 위하여 HHV=5600, OST=1.15, BST=0.9의 조건에서 계산한 값과 예측된 분포곡선을 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5의 분포예측은 보일러 하류에서 실제값과 상대적으로 큰 오차를 보이고 있지만 전체적인 경향성은 잘 일치한다.

식 (3)으로 예측된 NOx 최대 단면평균값은 대부분의 질산화합물이 Zeldovich의 열적 생성기구에 의존함을 상기하면 Fig. 5의 보일러 내의 단면 최대온도분포와 밀접한 관계가 있다고 판단된다. 실제 Fig. 5의 변수 조건들과 같은 조건에서의 NOx 최대값을 Table 4에서 찾으면 21.5 m 임을 알 수 있고, Fig. 5의 온도분포에서 최대온도는 약 24 m에서 얻어지는데 이는 버너가 위치

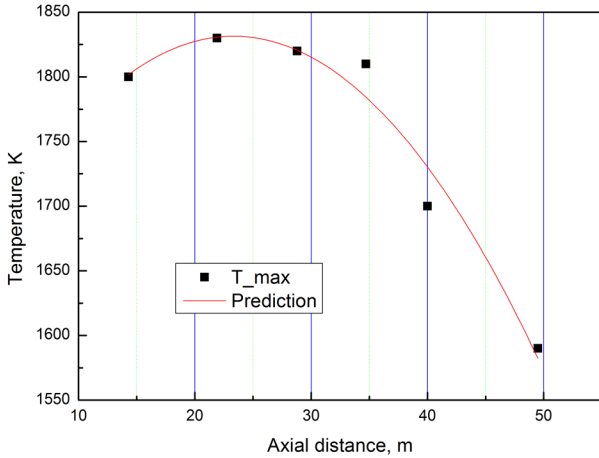


Fig. 5. Validation of the sine function assumed by RSM model for distribution of zone averaged temperature, simulation is run at HHV=5600, OST=1.15 and BST=0.9.

한 보일러의 대략적인 상류부근의 위치이다. 따라서 온도에 매우 민감한 thermal NOx를 고려하면 최대 NOx 농도와 온도의 위치가 일치하는 것이 타당하고 본 연구결과를 통해 검증할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 500 MW급 실규모 석탄연소 수치해석을 수행하여 그 결과를 데이터베이스로 구축하였고, 결과 예측을 위해 반응표면법을 통해 가장 효율적인 실험계획을 설립하였다. 이렇게 개발된 방법을 통해 실규모 석탄 보일러 내에서 온도 또는 오염물질 배출 농도를 예측하여 보일러의 종합적인 사고 예방이 가능한지에 대한 타당성을 조사하였다. 이 연구를 통해서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 세가지 독립변수에 대한 NOx의 최대값은 OST와 HHV에 비해 BST의 NOx 생성에 대한 영향이 매우 클 수 있었으며, BST에 대해 NOx 값을 최소화하는 극소값이 존재하였다. 또한 BST 만으로 NOx 농도를 예측하는 차수감소모델을 제시하였고 높은 정확성을 보였다.

2) 보일러 구역의 최대 온도 분포예측은 보일러 하류에서 실제값과 상대적으로 큰 오차를 보이고 있지만 전체적인 경향성은 잘 일치한다. 보다 정확한 구역 온도분포를 얻기 위해서는 다른 형태의 함수를 가정하거나 영역을 나누어 해석할 필요가 있다.

3) thermal NOx는 온도에 매우 민감하므로 보일러 내에서 최대 NOx 농도와 최대온도의 위치가 서로 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 검증을 위한 조건에서

살펴보면 NOx 최대값과 최고온도의 위치가 상류 20-25 m 사이에서 일치함을 볼 수 있어 모사방법의 물리적인 타당성을 확인할 수 있다.

4) 실규모 석탄보일러에서 RSM을 이용하여 실시간으로 배출 물리량 및 2차원 이상의 분포예측이 가능하며, 향후 복잡한 시스템의 안전 확보를 위한 예측 및 평가방법론으로서 사용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글 : 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) R. H. Myers, D. C. Montgomery and C. M. Anderson-Cook, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments", 3rd Edition, ISBN: 978-0-470-17446-3, Wiley, 2008.
- 2) G. Box and K. Wilson, "On The Experimental Attainment of Optimum Condition," Journal of Royal Statistical Society, Ser. B, Vol. 13, pp. 1-45, 1951.
- 3) E. J. Lee, "Assessment of Coal Combustion Safety of DTF using Response Surface Method", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No.1, pp. 8-13, 2015.
- 4) E. J. Lee, "Prediction of Pollutant Emission Distribution for Quantitative Risk Assessment", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No.4, pp. 48-54, 2016.
- 5) A. Williams, M. Pourkashanian, J. M. Jones, "Combustion of Pulverised Coal and Biomass", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 27, No. 6, pp. 587-610, 2001.
- 6) E. Korytnyi, R. Saveliev, M. Perelman, B. Chudnovsky and E. Bar-Ziv, "Computational Fluid Dynamic Simulations of Coal-fired Utility Boilers: An Engineering Tool", Fuel, Vol. 88, pp. 9-18, 2009.
- 7) S. H. Back, H. Y. Park and S. H. Ko, "Economic Evaluation of Coals Imported in Last 3 Years for Power Plant Based on Thermal Performance Analysis", Journal of the Korean Society of Combustion, Vol. 18, No.3, pp. 44-53, 2013.
- 8) Arend and N. Dominic, Choices (Version 4.0) [Computer software]. Champaign, IL: U.S. Army Corps of Engineers Research Laboratory. (CERL Report No.CH7-22510), 1993.
- 9) I. Glassman and R. A. Yetter, "Combustion", 4th Edition, ISBN: 9780120885732, Academic Press, 2008.