

# 반응표면법을 이용한 DTF의 석탄 연소 안전성 평가

이의주<sup>†</sup>

부경대학교 안전공학과

(2014. 12. 1. 접수 / 2015. 1. 27. 수정 / 2015. 2. 16. 채택)

## Assessment of Coal Combustion Safety of DTF using Response Surface Method

Eui Ju Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received December 1, 2014 / Revised January 17, 2015 / Accepted February 16, 2015)

**Abstract :** The experimental design methodology was applied in the drop tube furnace (DTF) 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 set with the numerical simulation of DTF. The dependent variables such as burnout ratios (BOR) of coal and CO/CO<sub>2</sub> ratios were mathematically described as a function of three independent variables (coal particle size, carrier gas flow rate, wall temperature) being modeled by the use of the central composite design (CCD), and evaluated using a second-order polynomial multiple regression model. The prediction of BOR showed a high coefficient of determination (R<sup>2</sup>) value, thus ensuring a satisfactory adjustment of the second-order polynomial multiple regression model with the simulation data. However, CO/CO<sub>2</sub> ratio had a big difference between calculated values and predicted values using conventional RSM, which might be mainly due to the dependent variable increases or decrease very steeply, and hence the second order polynomial cannot follow the rates. To relax the increasing rate of dependent variable, CO/CO<sub>2</sub> ratio was taken as common logarithms and worked again with RSM. The application of logarithms in the transformation of dependent variables showed that the accuracy was highly enhanced and predicted the simulation data well.

**Key Words :** response surface methodology (RSM), drop tube furnace (DTF), multiple regression model

### 1. 서론

에너지 소비의 증가에 따라 석탄, 석유 그리고 천연가스 등과 같은 기존의 화석연료의 사용 뿐 아니라 최근에는 상대적으로 친환경적인 원자력과 풍력, 태양열과 같은 신재생 에너지의 이용을 세계적으로 장려하고 있다. 하지만 원자력발전의 경우 일본의 후쿠시마 원전사고 이후에 더 이상 안전성을 보장할 수 없다는 인식과 더불어 노후원전의 철거 비용을 고려하면 경제적으로나 환경적으로나 큰 장점이 없어 많은 선진국에서는 더 이상 증설을 꺼려하고 있는 실정이다. 또한 신재생에너지의 경우 지난 수 십년간 많은 기술적 발전이 있었지만 경제적 비용이 아직 충족되지 않아 많은 전력을 생산을 필요로 하는 개발도상국의 경우 에너지

수급원으로서 채택하기가 어려운 실정이다. 따라서 발전을 위해서는 화력발전이 미래에도 가장 중요한 위치를 차지할 것으로 보이면서 최근 다시 석탄연소에 대한 고효율, 친환경 기술개발을 위해 새롭게 노력하고 있다.

화석연료 중 에너지의 주공급원인 석탄은 천연가스, 석유와 같은 타 에너지 자원보다 수급이 안정적이라는 장점 하에 오랜 시간동안 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 중국과 인도의 급격한 석탄 사용증가에 따른 전 세계적인 석탄소비량 증가, 석유값 인상 등으로 석탄 가격이 지속적으로 상승하며 공급 부족 현상까지 발생하고 있다. 따라서 운영적 측면에서 크게 두 가지 관점에서 화력 발전을 계획하고 있다. 첫 번째로는 연소보일러 내의 압력을 증가시켜 연소효율을 증가시키는 방

<sup>†</sup> 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 608-737, Korea

법이다. 압력의 증가는 보일러 내 안전문제를 야기 할 수 있지만 반응속도 및 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 두 번째는 석탄 종류의 변경이다. 기술적으로 발전 원가에서 차지하는 비중이 높은 연료비의 급격한 상승으로 인해 최근 가격이 저렴하고 저발열량인 아역청탄의 사용 빈도가 높아지고 있으며, 연료 공급의 다변화로 인해 다양한 공급처로부터 연료가 공급되고 있는 상황이다. 이러한 연료의 변경으로 열량이 낮은 석탄이 공급됨에 따라 발전소 운전시 발전효율 및 성능을 유지하기 위해서는 운전최적화 지원이 필수적으로 요구된다.

운전최적화 지원이 부족한 경우에 화력발전의 안전에 큰 영향을 받게 된다. 대표적인 사고는 보일러 내부의 이상고온이다. 석탄 연소에 대한 사전평가 없이 운전을 하게 되면 효율저하에 따라, 또는 환경오염물질이 다량 배출되면 산화제의 조건을 변화하게 되고 이는 노내 국부적 온도의 상승의 원인이 될 수 있다. 이러한 온도상승은 화재나 폭발을 발생시킬 수 있으며 최소한 시스템 복구를 위한 정지가 필수적이다. 실제 우리나라 발전소 사고의 20% 이상이 이러한 열적인 원인으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 따라서 화력발전에서 새로운 기술과 다양한 종류의 석탄을 이용하기 위해서는 연소조건과 운영에 앞서서 보일러 폭발 또는 반응 중단 등 다양한 변수에 대한 안전성 평가가 이루어져야 한다. 이러한 안정성 평가는 제작중인 보일러에서 실험적으로 구현하기는 불가능하므로 일반적으로 수치해석을 통해서 다양한 운전 데이터를 수집하고 이를 통해 운전조건의 예측과 안전성 평가를 수행한다.

본 연구에서는 DTF(Drop Tube Furnace)에서 석탄연소를 수치해석한 결과를 얻었다. 본 연구에 사용된 DTF는 연소특성 평가를 위한 모사 연소로 많이 사용되고 있는데, 그 이유는 실제 보일러에서의 가열속도와 온도를 모사할 수 있어 실제와 가장 유사한 반응특성 결과를 얻을 수 있기 때문이다<sup>2)</sup>. 또한 이 데이터를 통해 운전조건의 예측과 안전성평가를 위한 방법론으로서 반응표면법(response surface method, RSM)을 적용하여 보았다. 일반적으로 설계변수가 여러 개일 경우, 이들의 반복해석을 최소화(Minimize)하고 설계변수 간의 상호작용을 평가하기 위한 방법으로 대표적인 것이 반응표면법(Response Surface Method, RSM)이다. 반응표면법은 1950년대에 Box와 Willson과 여러 연구자에 의해 통계분야에서 처음으로 개발된 이후 통계분야에서 반응표면을 구성하기 위한 다양한 연구가 진행되었다<sup>3)</sup>. 이러한 연구를 통해 향후 실제 석탄 보일러에서의 수치해석을 수행하고 RSM을 통해 운전조건에

대한 안정성 평가에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

### 2.1 DTF 및 수치해석

본 연구에 사용된 DTF 설비의 전체적인 개략도는 Fig.1에 나타내었다. 연료 및 연소용 공기 공급계통, 반응부, 배기시스템, 그리고 온도 및 농도 등의 계측부로 구성된다. 주반응로는 1300℃까지 승온이 가능하고, 석탄 공급장치는 공급량에 따라 Screw feeder와 Syringe feeder를 선택하여 사용할 수 있다. 예열된 반응가스가 주반응기로 유입될 때, 층류 유동장을 형성하도록 flow straightener를 설치한다. DTF 하부에는 CO나 CO<sub>2</sub>등의 가스분석 및 회(ash)성분의 포집 등을 할 수 있다.

본 연구에서 DTF를 수치해석하기 위해서는 전산유체해석 프로그램인 CFS를 사용하였다<sup>4),5)</sup>. CFS는 현재 개발중인 USC 연소최적화 시뮬레이터로서 발전소의 일반 사용자들도 쉽게 활용 가능한 시뮬레이터 형식으로 개발됨은 물론 정밀도를 높이기 위하여 화염측과 스팀측이 연계된 해석기법을 사용하고, 신개념 석탄해석 기법을 통해 구축되는 석탄 DB의 자료를 기반으로 해석이 시행하기 때문에 기존 기술대비 경쟁력을 가지고 있다. 본 프로그램은 연소적인 관점에서는 탈휘발과 최연소 등 두 가지 단계의 완전화학반응으로 구성되어 있고, Drop Tube Furnace내의 입자의 체류시간,

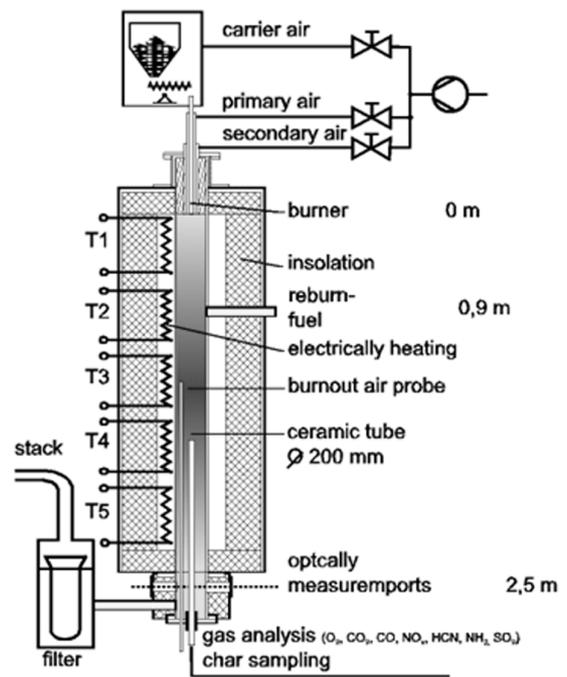


Fig. 1. Schematic of DTF.

열분해율, 운동방정식, 에너지방정식으로 입자 온도의 정확한 예측, 입자의 체류시간, 속도 등을 구하도록 구성되어 있다. 계산에 사용된 탄종의 물성치는 참고문헌의 값을 이용하였다<sup>6,7)</sup>.

**2.2 중심합성설계와 반응표면분석**

반응 표면의 추정이 2차 회귀모형 (2nd order regression model)으로 적절하다고 판단하는 경우 3k형 요인배치법, 3수준설계의 일부 실시법, 중심합성계획법 (CCD, central composite design), 회전계획 (rotatable design), Box-Behnken법 등이 있다. 이들 방법 중 공학분야에는 중심합성계획법과 Box-Behnken법이 많이 이용된다. Box-Behnken법은 인자의 수가 k개인 경우에 3k형 요인배치법보다 실험점의 수가 많지 않으면서도 직교 블록 (orthogonal blocking)을 만들기 용이하고, 2차 회귀방정식을 구할 수 있기 때문에 반응표면 분석에서 흔히 사용된다. 하지만 설계인자와 같이 실험 조건 변경이 용이하지 않을 때 선정된 실험인자의 설정 범위 내에서 실험을 행하기 때문에 인자의 변경이 어려운 설계 인자 등의 최적화에 사용된다.

반면 중심합성계획법은 적은 실험 횟수로 2차 다항 모형의 회귀계수를 추정할 수 있는 효율적인 실험설계법으로 운전 범위를 벗어나는 점에서의 실험도 포함되기 때문에 실험 범위의 변경이 용이한 운전 인자변화에 대한 최적화에 적합한 실험계획법으로 2차 모형의 제공 항들을 효율적인 추정이 가능한 것으로 알려져 있다. 중심합성계획법은 중심점을 포함한 요인배치 실험점(꼭짓점)과 축점으로 이루어진다. 독립변수의 수가 k라면 요인 실험점의 수가 2<sup>k</sup>, 축점의 수가 2k이고, 중심점에서의 반복횟수가 (n<sub>c</sub>)인 경우 총 실험횟수는 2<sup>k</sup> + 2k + n<sub>c</sub>가 된다<sup>8)</sup>.

본 실험에서는 독립변수의 종류와 변화 한계(variation limits)는 일반적인 DTF에서 석탄연소의 기초연구로부터 선정하였다. 중심합성계획법 설계에서 3개의 독립변수를 선택할 경우 중심점을 포함하여 꼭짓점과 축점을 포함하면 총 15회의 결과가 필요하고, 수치해석의 경우에는 실험과 달리 자체의 변동이 주어지지 않으므로 중심점에서 반복데이터가 필요 없다. 사용된 독립변수는 미분탄 입자의 직경, 유도 가스(carrier gas)의

**Table 1.** Actual values of the variables for the coded values.

Variables	-1	0	+1
Psize, x1	80	100	120
Cgas, x2	0.05	0.06	0.07
Wtemp, x3	1100	1200	1300

유량 그리고 DTF의 벽면 온도를 선정하였고, 각각의 중심점과 변화한계는 아래 Table 1에 나타내었다. 이때 사용한 축점을 나타내는 α값은 독립변수의 수가 3개 이므로 1.682로 설정하였다.

실험 자료는 Minitab 소프트웨어를 사용하여 분석한 후 아래의 2차 다항식으로 구하였다<sup>9)</sup>. 식 (1)은 종속변수와 독립변수 사이의 상관관계를 얻기 위해 적용한 2차 다항식이다.

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

식 (1)에서 Y는 예측 응답 (response), X<sub>i</sub>는 독립변수, b<sub>0</sub>는 상수 계수 (constant coefficient), b<sub>i</sub>, b<sub>ii</sub>와 b<sub>ij</sub>는 교호작용 계수 (interaction coefficient)이다. 다항식 모형의 적합도의 질(quality of fit)은 상관관계 계수 (correlation coefficient, R<sup>2</sup>)로 표현할 수 있고, 각 인자들의 종속변수에 대한 유의성은 P-value로 판단할 수 있다.

**3. 실험결과 및 토의**

RSM을 이용한 실험계획법에 의해 3개의 독립변수에 대해서 수치해석을 수행하였고, 그 결과로서 3가지의 종속변수(response)를 얻었다. Burn-out ratio(BOR)는 DTF로 유입된 석탄 중 로내에서 연소된 비율을 의미하고 석탄연소에서 가장 중요한 종속변수라 할 수 있다. 그리고 DTF 출구에서의 온도는 전체 연소 발열량과 관련이 있으며 일반적으로는 BOR과 밀접한 관계에

**Table 2.** Calculated dependent variables for DTF.

	Psize	Cgas	Wtemp ℃	Burnout ratio	Temp ℃	CO/CO <sub>2</sub>
1	66.36	0.06	1200	0.7575	1186.8	2.05E-01
2	120	0.07	1300	0.7632	1259.5	6.43E-01
3	100	0.06	1368.2	0.7718	1323.9	1.63E+00
4	80	0.05	1100	0.7538	1105.9	5.47E-02
5	100	0.0432	1200	0.763	1192.4	2.31E-01
6	80	0.07	1300	0.7632	1262.7	6.64E-01
7	100	0.0768	1200	0.7553	1174.2	1.89E-01
8	80	0.05	1300	0.7684	1274.1	7.81E-01
9	120	0.05	1300	0.7662	1271.1	7.57E-01
10	100	0.06	1200	0.7593	1184	2.00E-01
11	120	0.07	1100	0.7453	1094.7	5.21E-02
12	100	0.06	1031.8	0.7407	1045	2.27E-02
13	133.64	0.06	1200	0.7558	1183.1	1.97E-01
14	80	0.07	1100	0.7416	1095.8	5.34E-02
15	120	0.05	1100	0.751	1104.8	5.40E-02

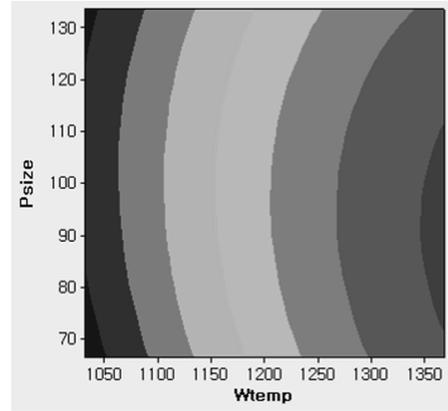
있다. 마지막 종속변수인 CO/CO<sub>2</sub> 비율은 석탄 연소반응이 완전반응이 일어난 정도를 의미하고 있을 뿐 아니라 배출되는 주요 오염물질인 일산화탄소의 농도를 전체 화학반응양을 나타내는 CO<sub>2</sub> 농도에 대한 상대적으로 제시하는 변수이다. 이 비율이 크면 불완전 연소가 발생했다고 볼 수 있으므로 실제 운전 조건에서는 이 비율을 줄이도록 설계하고 운영해야 한다. 각 계산 조건에서 얻어진 종속변수의 결과를 Table 2에 나타내었다.

먼저 Table 2에서 얻은 자료로부터 최소자승법을 이용하여 DTF 결과 중 가장 중요한 석탄 연소율(BOR)에 대한 코드화하지 않은 실제 독립변수 관계식을 얻었고 식(2)에 나타내었다. 이 경우에 일차 항은 석탄입자직경(x<sub>1</sub>), 제곱항은 Cgas(x<sub>2</sub>) 그리고 교류항은 Psize와 Wtemp(x<sub>2</sub>x<sub>3</sub>)를 제외하고는 P-value가 0.005이하의 값을 가지므로 3개의 독립 변수를 모두 사용하였다. 또한 R2값은 99.3%로 모형이 다항식 적합도를 잘 만족하는 것으로 나타났고, 조정 R2값은 98.1%로 앞에서 설명하였던 높은 P-value의 항들에 의해서 발생하였다고 볼 수 있다.

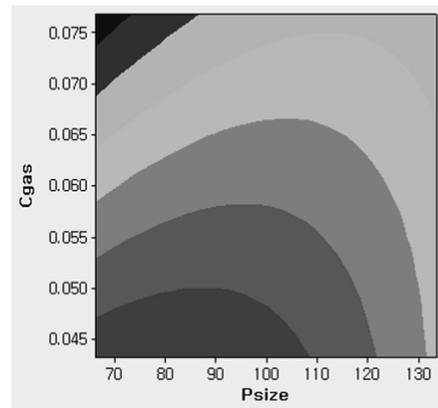
$$\begin{aligned}
 BOR = & 0.5523 + 0.000445x_1 - 2.0158x_2 + \\
 & 0.000335x_3 - 2.7699 \times 10^{-6}x_1^2 - 2.241x_2^2 - \\
 & 1.2494 \times 10^{-7}x_3^2 + 0.00544x_1x_2 - \\
 & 1.938 \times 10^{-7}x_1x_3 + 0.00121x_2x_3
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

이러한 결과에서 BOR에 대한 독립변수들 간의 관계를 보다 명확히 보기 위해 Fig. 2에 등고선도(contour plot)를 도시하였다. 이 때 고정된 독립변수는 모두 중심값을 채택하였다. Fig. 2(a)의 석탄입자직경과 벽면온도에 따른 BOR을 살펴보면 입자크기는 거의 영향이 없으며 교호작용이 크지 않음을 볼 수 있다. Fig. 2(b)의 입자크기와 유도가스 유량의 영향에서는 크기와 유량이 작을수록 높은 BOR을 보이고 있지만, 최대 BOR은 안부점(saddle point)처럼 입자 크기에 따라 적절한 유도가스 유량이 존재하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 2(c)에서와 같이 유도가스 유량에 비해 벽면온도가 더 큰 영향을 BOR에 주지만 전체적인 형태는 단조적인 경향으로 나타난다.

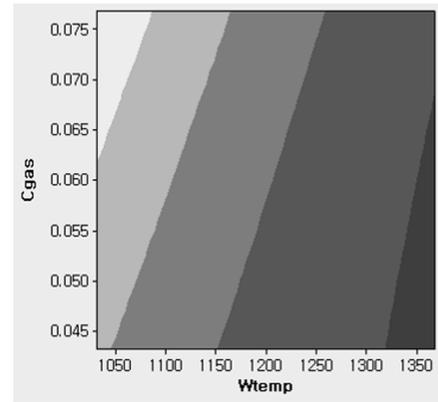
이상의 RSM부터 얻은 모델결과로부터 독립변수들의 설정영역 내에서 3가지 조건에 대해서 예측정도를 비교하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 3가지 모든 경우에 대해서 1% 이내로 정확히 예측함을 볼 수 있었고, 이는 R2값의 정확도에서 높은 신뢰도 모형이 구축됨을 확인할 수 있었다. 또한 RSM 모형을 얻기위



(a) Contour plot of BOR vs. Psize and Wtemp. BOR range is 0.740-0.770



(b) Contour plot of BOR vs. Cgas and Psize. BOR range: 0.750-0.7625



(c) Contour plot of BOR vs. Cgas and Wtemp. BOR range is 0.740-0.770

Fig. 2. Contour plot of BOR.

Table 3. Case study for comparison between the real and predicted values.

Sample	Psize	Cgas	Wtemp	Calculated BOR	Predicted BOR
case1	85	0.05	1200	0.7628	0.7625
case2	95	0.06	1150	0.7554	0.7546
case3	105	0.07	1250	0.7611	0.7612

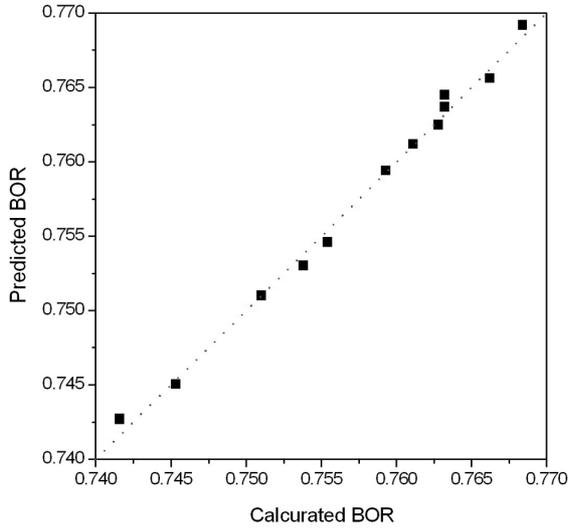


Fig. 3. The actual and predicted plot for BOR.

한 꼭지점을 제외한 데이터와 Table 3의 새로운 조건에 대해서 실제 BOR 계산값과 식 (2)에 의해서 얻어진 예측값을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에서 보듯이 DTF의 BOR은 계산값과 RSM을 통한 예측치가 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

다른 종속변수인 DTF 출구에서의 배기온도는 대체적인 특성이 BOR의 경우와 일치하므로 RSM을 통한 해석 또한 정성적으로 일치한다. 따라서 본 결과에는 포함시키지 않았고 마지막 종속변수인 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 RSM 해석을 하였다.

먼저 3개의 독립변수 모두를 사용하여 식(1)과 같이 2차 다항식으로 표현하였을 경우에 R2값은 97% 이지만 조정된 R2값은 91.7%로 유의하지 않은 변수들이 포함되어 있음을 알 수 있다. 실제 각 항들의 P-value를 조사해보면 0.05 이하의 유의한 항들은 Wtemp의 1차 항과 제곱항만이 포함된다. 따라서 독립변수요인 즉, 차수를 감소시켜 다시 해석하기 위해 Wtemp만으로 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 예측해 보았다. 이 경우 R2값은 96.5% 이지만 조정된 R2값은 95.9%로 얻어져 전체적으로는 유의한 결과를 얻을 수 있었다고 판단되었다. 다음 절차로 이렇게 얻어진 모형결과들이 계산에서 얻어진 실

제값을 잘 예측하는지를 판단하기 위해 Table 3에서의 3가지 경우에 대해서 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 비교하였고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

위 두가지 경우 모두 case 2와 같이 온도가 낮은 경우에는 실제값과 비교하여 50% 이상의 오차가 발생됨을 확인할 수 있었고, 벽면온도 만을 변수로 사용한 경우에는 오차(deviation)의 정도가 더 커짐을 확인할 수 있다. 따라서 현재의 모델로는 종속변수로서 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 정확히 예측하는 것이 불가능하다고 판단되고 다른 새로운 방법을 통해 종속변수의 예측이 요구되었다.

본 연구에서는 이전의 BOR과 달리 CO/CO<sub>2</sub> 비율은 변화의 폭이 독립변수 영역에서 크게는 100 배의 차이가 난다는 점에 착안하여 먼저 종속변수를 상용로그 값으로 바꾸어 2차 회귀분석을 수행하였고, 나온 결과를 분석하여 유의한 항들만으로 구성된 다항식을 다시 역함수를 취하여 본래의 종속변수를 표현하였다. 상용로그 값으로 변환하여 2차 회귀분석을 수행한 결과 유의한 p-value는 상수, 1차항인 Cgas, Wtemp 그리고 교류항인 Cgas\*Wtemp에서만 나타났고 위 4개의 항만으로 다시 회귀분석을 통하여 다항식 모형을 얻었다. 이때 R2값은 99.9%이고 조정된 R2값 역시 99.9%로 큰 폭으로 신뢰성이 커짐을 볼 수 있다. 이렇게 얻어진 식을 독립변수에 대해서 역함수를 취해 변환된 형태는 식 (3)과 같다.

$$CO/CO_2 = 10^{polynomial} \tag{3}$$

$$Polynomial = -8.291 + 15.006x_2 + 0.00644x_3 - 0.0144x_2x_3$$

식 (3)의 관계식으로부터 앞의 Table 4에 3가지 경우에 대하여 상용로그 변환을 통해 예측된 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 나타내었다. 변환을 하지 않고 원래변수를 사용한 회귀분석에서는 Case 2와 같이 50% 차이를 보이던 예측값이 함수변환을 통해서 10% 정도로 오차가 감소함을 확인할 수 있다. 또한 전체적인 경향은 로그함수 변환을 통하여 종속변수 값의 폭이 줄어들음을 알 수 있었다.

전체적으로 로그함수의 변환이 RSM 모형 신뢰성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 꼭지점을 제외한 데이터와 Table 4의 3가지 새로운 조건에 대해서 실제 CO/CO<sub>2</sub> 비율 계산값을 함수변환 없이 모든 변수를 사용한 경우와 식 (3)에 의해서 얻어진 예측값을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서 보듯이 DTF의 CO/CO<sub>2</sub> 비율은 로그함수변환을 통한 RSM 예측치가 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 또한 기존의 3개의 변수를 2개의 변수로 줄여 결국 차수감소를 가능하게

Table 4. Case study for the effectiveness of log transform of dependent variable.

Sample	Calculated CO/CO <sub>2</sub>	Predicted with All variables	Predicted only with Wtemp	Predicted with log transform
case1	0.217	0.220	0.185	0.208
case2	0.118	0.065	0.044	0.104
case3	0.390	0.409	0.434	0.351

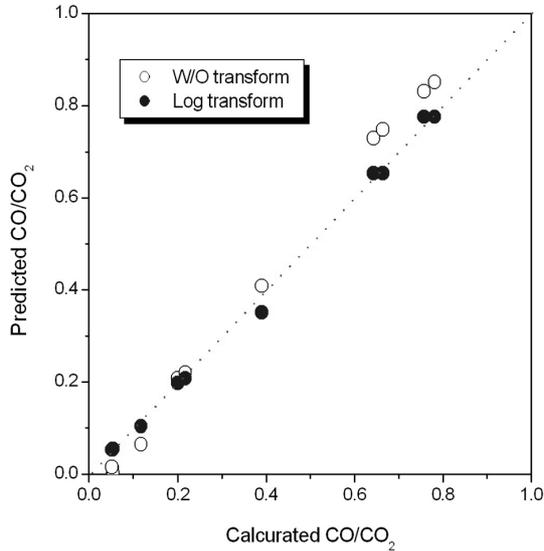


Fig. 4. The actual and predicted plot for CO/CO<sub>2</sub>.

한 장점과 더불어 다항식의 개수를 10개에서 4개로 줄인 보다 효율적인 예측방법을 제시하였다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

석탄연소에서 운전조건의 예측과 안전성평가를 위한 방법론으로서 반응표면법(response surface method, RSM)을 DTF에 적용하여 보았다. 차수감소모델로서 RSM은 설계변수가 여러 개일 경우, 이들의 반복해석을 최소화(Minimize)하고 설계변수 간의 상호작용을 평가하기 위한 방법으로 대표적인 방법이다. 이 연구를 통해서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) DTF의 3개의 독립변수에 대해서 얻어진 BOR은 계산값과 RSM을 통한 예측치가 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있었고 매우 높은 신뢰도의 예측 다항식을 얻을 수 있었다.

2) CO/CO<sub>2</sub> 비율의 예측을 3개의 독립변수 모두를 사용한 경우에 조정된 R2값은 91.7%로 유의하지 않은 변수들이 포함되어 있음을 알 수 있다. P-value가 0.05 이하인 유의한 변수인 Wtemp로 다시 해석한 결과 조정된 R2값은 95.9%로 얻어져 전체적으로는 유의한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 3가지 새로운 조건에서 테스트 결과 두경우 모두 온도가 낮은 경우에는 실제값과 비교하여 50% 이상의 오차가 발생됨을 확인할 수 있었고, 현재의 모델로는 종속변수로서 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 정확히 예측하는 것이 불가능하다고 판단되었다.

3) 보다 정확한 모델 개발을 위해 종속변수를 상용 로그 값으로 변환하여 2차 회귀분석을 수행한 결과 유

의한 p-value를 가지는 변수와 항을 구별할 수 있었고, 향상된 99.9% R2값과 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 모델이 매우 정확히 예측함을 확인하였다. 이 결과는 변수로 줄여 결국 차수감소를 가능하게 한 효율적인 예측방법을 제시하였다고 할 수 있다.

4) 이와 같은 RSM을 이용하면 매우 짧은 시간에 정성적인 결과예상을 통해 안전성 평가가 가능하므로 발전소 보일러의 안전성 확보를 위한 방법론으로서 사용 가능하다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2012학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음 (PS-2012-0909)

#### References

- 1) Y. K. Park, S. K. Chun, B. B. Kim, Y. K. Kim and C. W. Jung, "A Case Study on Human Errors in Thermal Power Plant", IE Interfaces, Vol. 21, No. 3, pp. 247-253, 2008.
- 2) 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.
- 3) G. Box and K. Wilson, "On The Experimental Attainment of Optimum Condition," Journal of Royal Statical Society, Ser. B, Vol. 13, pp. 1-45, 1951.
- 4) A. Rushdi, A. Sharma and R. Gupta, "An experimental study of the effect of coal blending on ash deposition", Fuel, Vol. 83, pp. 495-506, 2004.
- 5) H. Namkung and L. H. Xu, "Study on deposition tendency of coal ash under various gasification environments through DTF", Fuel, Vol. 117, pp. 1274-1280, 2013.
- 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) N. Spitz, R. Saveliev, E. korytni, M. Perelman, E. Bar-Ziv and B. Chudnovsky, "Prediction of Performance and Pollutant Emission form Pulverized-coal Utility Boilers." In: Electric Power: Generation, Transmission and Efficiency. Nova Science Publishers, Inc. ; 2007, p.121-170.
- 8) R. H. Myers, D. C. Montgomery, C. M. Anderson-Cook, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", 3rd Edition, ISBN: 978-0-470-17446-3, Wiley, 2008.
- 9) 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.