

# 정량적 위험성평가를 위한 배출 오염물질 분포 예측

이의주<sup>†</sup>

부경대학교 안전공학과

(2016. 3. 31. 접수 / 2016. 7. 1. 채택)

## Prediction of Pollutant Emission Distribution for Quantitative Risk Assessment

Eui Ju Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received March 31, 2016 / Accepted July 1, 2016)

**Abstract :** The prediction of various emissions from coal combustion is an important subject of researchers and engineers because of environmental consideration. Therefore, the development of the models for predicting pollutants very fast has received much attention from international research community, especially in the field of safety assessment. In this work, response surface method was introduced as a design of experiment, and the database for RSM was set with the numerical simulation of a drop tube furnace (DTF) to predict the spatial distribution of pollutant concentrations as well as final ones. The distribution of carbon dioxide in DTF was assumed to have Boltzman function, and the resulted function with parameters of a high  $R^2$  value facilitates predicting an accurate distribution of  $CO_2$ . However, CO distribution had a difference near peak concentration when Gaussian function was introduced to simulate the CO distribution. It might be mainly due to the anti-symmetry of the CO concentration in DTF, and hence Extreme function was used to permit the asymmetry. The application of Extreme function enhanced the regression accuracy of parameters and the prediction was in a fairly good agreement with the new experiments. These results promise the wide use of statistical models for the quantitative safety assessment.

**Key Words :** response surface methodology (RSM), drop tube furnace (DTF), distribution of pollutant emission

### 1. 서론

최근의 화력발전의 동향은 원자력이나 신재생에너지 등 다른 전기생산설비에 대하여 경제적인 우위를 지속적으로 가져가기 위해 효율향상과 연료의 다변화를 이용하고 있다. 에너지 획득을 위한 연소효율 향상은 주로 초임계 등 높은 압력에서 보일러를 운영하고, 사용하는 석탄은 기존에 사용하지 않았던 저급 아역청탄 등을 연료로 다른 석탄과 섞어서 사용하고 있다. 이러한 새로운 경제성 향상 방법의 도입은 화력발전의 운전 중 예기치 못하던 여러 가지의 설비중심의 사고나 고장을 발생시킬 수 있는데 이러한 운영중 안전사고를 예방하기 위해서는 다양한 운전조건에서 오염물질 등 위험환경요인을 예측할 수 있는 기법이 위험성평가에 필수적으로 요구된다. 특히 가격적인 측면에서 석탄수입처의 다변화는 매우 다른 특성을 가지는 석탄

을 빈번히 교체하여 사용하여야하기 때문에 적절한 운전정보가 존재하지 않아 발전 중 온도상승에 인한 폭발이나 이산화탄소, 일산화탄소, 질산화합물, 매연 등 다양한 유해물질 등이 극단적으로 다량 배출될 수 있어 운전을 지속할 수 없는 등 예측이 불가능한 상황 때문에 비정상적으로 설비가 운영되고 이에 따라 안전사고가 발생된다. 따라서 보일러 내의 온도나 오염물질의 분포를 예측하는 것은 설비운영에 있어 가장 중요한 문제이고, 화력발전소의 정량적 위험성평가(risk assessment)를 위해 필수적인 사항이라고 할 수 있다. 하지만 화력발전소의 규모를 고려하면 실험을 통해서 운전조건에 대한 보일러 내 물리량을 예측할 수 없을 뿐 아니라 CFD 등의 수치해석을 수행하여도 계산시간이 매우 오래 걸리므로 즉각적인 대처가 불가능하다. 따라서 변화하는 상황에서 위험성평가와 안전한 운전 조건 결정을 위해서는 정확하면서도 신속한 예측기법

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

이 개발될 필요성이 있다.

이전의 연구에서 간단한 형태의 석탄 반응로인 DTF (drop tube furnace)에서 석탄연소를 수치해석한 결과를 얻었다<sup>1)</sup>. DTF는 연소특성 평가를 위한 모사 연소로로 많이 사용되고 있는데, 그 이유는 실제 보일러에서의 가열속도와 온도를 모사할 수 있어 실제와 가장 유사한 반응특성 결과를 얻어낼 수 있다<sup>2)</sup>. 운전조건에 대한 예측과 안전성평가를 위한 방법론으로서 반응표면법 (response surface method, RSM)을 적용하였다. 결과로서 버너 출구에서에서 배출되는 BOR(burn out ratio)와 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 매우 정확히 예측할 수 있었다.

본 연구에서는 석탄연소에서 운전환경의 예측과 위험성평가를 위한 정량적 방법론으로서 실험계획법의 한 종류인 반응표면법의 사용범위를 넓이기 위하여 한 위치에서의 값이 아닌 전체 연소기에서의 분포 (distribution)를 예측하는 방법을 개발하는 것을 목적으로 하였다. DTF를 이용하여 위험성평가에 사용되는 환경오염물질로서 이산화탄소와 일산화탄소를 선정하였고, 각 농도분포를 개발된 방법을 통해 DTF 내에서 예측하여 위험성평가 기법의 도구로서 사용가능함에 대하여 조사하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 분포모사 방법

일반적으로 실험계획법 중 반응표면법으로 실험결과 값을 예측하거나 최적화하는데 사용하는데 반해 본 연구의 목적은 공간에서 평균물리량의 분포곡선을 구하기 위해 RSM 방법을 도입하여 미지의 입력조건이 주어진 경우에 정확하면서도 즉각적인 분포 (distribution)를 제공하는 것이다. 이러한 방법론은 기존에 많이 사용하지 않아 유사한 이전연구를 찾아볼 수 없었고, 본 연구에서 개발하여 사용한 방법론은 다음과 같다. 먼저 실험계획법 중 변수의 특성 및 범위 등을 고려하여 가장 적합한 방법을 선택하여 실험횟수 및 조건을 결정한다. 본 연구에서는 모든 경우 DOE로서 반응표면법(RSM)을 사용하였고, 요인을 결정할때는 중심합성법으로 결정하였다. 실험이 모두 수행되면 조건별 실험결과 데이터를 독립변수에 대해 표시하여 곡선의 형태를 파악하여 모사함수의 형태와 식을 결정한다. 이러한 모사함수는 Log, Exponential, 확률밀도함수 등 다양한 형태를 가질 수 있으며, 함수를 결정하는데 있어서는 가능한 한 모든 실험세트의 결과를 확인하고 유사함을 체크하여야 한다. 또한, 가능한 한 파라미터의 수가 적은 것이 좋고, 각 파라미

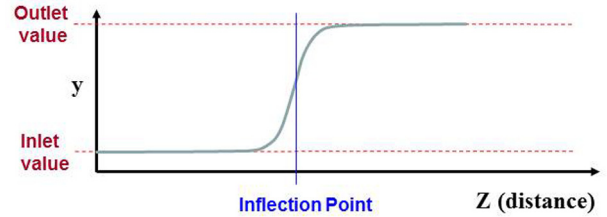


Fig. 1. Parameters to define a function.

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

Variables	-1	0	+1
Psize, A	80	100	120
Cgas, B	0.05	0.06	0.07
Wtemp, C	1100	1200	1300

터 변수들이 독립적이면 보다 효과적인 분포예측이 가능하다. 함수가 결정되었으면 실험을 통해 획득한 데이터를 피팅(fitting)하고, 함수 형태를 결정하는 파라미터의 값을 RSM을 통해 변수의 다항식으로 추정하여 구성한다.

예를 들어 Fig. 1과 같은 경우 입구값은 경계조건으로 실험자체에서 제공될 가능성이 있고, 출구값과 변곡점 위치와 같은 파라미터는 RSM으로 추정할 수 있다. 최종적으로 얻은 파라미터의 P-value 등과 같은 통계적 유의성을 검사하여 파라미터의 적합성을 결정한다. 최종적으로 얻어진 파라미터의 다항식들을 이용하여 새로운 다양한 입력조건을 통해 분포를 예측하는 타당성을 검증한다.

### 2.2 수치해석 및 RSM

석탄연소 수치해석을 위해 DTF를 대상으로 하였고 반응표면법적용을 위한 독립변수는 미분탄 입자의 직경(Psize,  $\mu m$ ), 유도 가스(Cgas,  $m^3/min$ )의 유량 그리고 DTF의 벽면 온도(Wtemp,  $^{\circ}C$ )를 선정하였다. 각 변수의 중심점과 변화한계를 Table 1에 나타내었다. 또한 이러한 변수조건에서 DTF의 오염물질 농도 등을 결정하기 위해서는 전산유체해석 프로그램인 CFS를 사용하였고<sup>4,5)</sup>, 탄종의 물성치는 참고문헌의 값을 이용하였다<sup>6,7)</sup>. 기본적으로 사용된 RSM은 중심합성설계를 이용하였고<sup>8)</sup>, 통계분석에는 Minitab을 이용하였다<sup>9)</sup>.

## 3. 실험결과 및 토의

RSM을 이용한 실험계획법에 의해 3개의 독립변수에 대해서 수치해석을 수행하였고, 그 결과로서 다양한 종속변수(response)를 얻었는데 본 연구에서는 가장

일반적이며 중요한 일산화탄소와 이산화탄소에 대하여 노내 분포예측에 대하여 해석하였다.

### 3.1 이산화탄소의 DTF 내 분포

DTF의 축방향 길이(x)에 따라 계산에서 얻어진 이산화탄소의 농도를 도시하여 함수형태를 관찰한 결과 식 (1)과 같이 S자형 함수(sigmoidal curves) 중에서 Boltzmann 함수의 형태가 가장 적합하여 선택하였다.

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2 \quad (2)$$

Boltzmann 함수 형태는 초기에 매우 천천히 증가하다가 급격히 증가율이 커지고 후에 특정값에 접근하는 특성을 가지고 있다. 일반적인 함수형태는 모두 4개의 파라미터(A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, x<sub>0</sub>, dx)를 가지고 있는데, Fig. 3에서

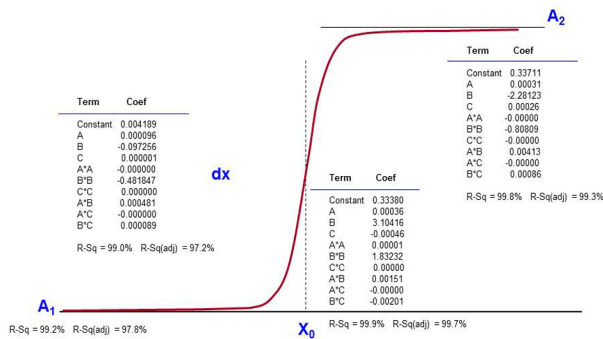


Fig. 2. Schematic form of Boltzmann function.

Table 2. Acquired parameters of Boltzmann function for CO<sub>2</sub> distribution

	Psize	Cgas	Wtemp	A1	A2	x0	dx
1	66.36414	0.06	1200	-0.00447	0.45418	0.12931	0.00937
2	120	0.07	1300	-0.00317	0.45129	0.16903	0.00993
3	100	0.06	1368.179	-0.00518	0.465	0.134	0.0104
4	80	0.05	1100	-0.00322	0.45841	0.14207	0.00902
5	100	0.043182	1200	-0.00408	0.47057	0.13626	0.00937
6	80	0.07	1300	-0.00478	0.45146	0.13441	0.01002
7	100	0.076818	1200	-0.00251	0.44057	0.17054	0.00947
8	80	0.05	1300	-0.00606	0.46977	0.11814	0.01001
9	120	0.05	1300	-0.00382	0.46792	0.14971	0.0097
10	100	0.06	1200	-0.00332	0.45543	0.15366	0.00952
11	120	0.07	1100	-0.00113	0.43744	0.20613	0.00934
12	100	0.06	1031.821	-8.60E-04	0.44104	0.18337	0.00889
13	133.6359	0.06	1200	-0.00213	0.45252	0.19023	0.00966
14	80	0.07	1100	-8.07E-04	0.43503	0.16823	0.00851
15	120	0.05	1100	-0.00199	0.45589	0.18061	0.0093

Table 3. Coefficients of RSM analysis for parameters of Boltzmann function

	A1	A2	x0	dx
Constant	0.027507	0.33711	0.3338	0.004189
A	-0.00012	0.00031	0.00036	0.000096
B	0.360531	-2.28123	3.10416	-0.09726
C	-0.000052	0.00026	-0.00046	0.000001
A*A	0	0	0.00001	0
B*B	0.289903	-0.80809	1.83232	-0.48185
C*C	0	0	0	0
A*B	-0.00136	0.00413	0.00151	0.000481
A*C	0	0	0	0
B*C	-0.00017	0.00086	-0.00201	0.000089

보듯이 A<sub>1</sub>과 A<sub>2</sub>는 각각 입구 및 출구의 값을 의미하고, x<sub>0</sub>는 변곡점, dx는 대략적으로 변곡점에서의 미분값의 크기를 결정한다. 즉, 시간의 함수라면 시상수(time constant)의 의미를 가지고 있다. Boltzmann 함수의 대략적인 형태를 Fig. 2에 도시하였고, 실험계획법에 의한 계산을 통해 얻은 결과를 Boltzmann 함수로 피팅하여 얻은 각 파라미터를 Table 2에 나타내었다.

Boltzmann 함수를 형성하는 4개의 파라미터를 RSM를 통해 해석하면 각각의 2차 다항식을 얻을 수 있고, 그 계수를 Table 3에 나타내었다. 이 때 각계수의 신뢰성을 나타내는 P-value는 변수의 종류에 따라 5% 보다 큰 경우가 있었지만 변수를 제외시킬 수 있도록 모든 항에 큰 경우는 없었기 때문에 변수의 개수는 감소시키지 못하였다.

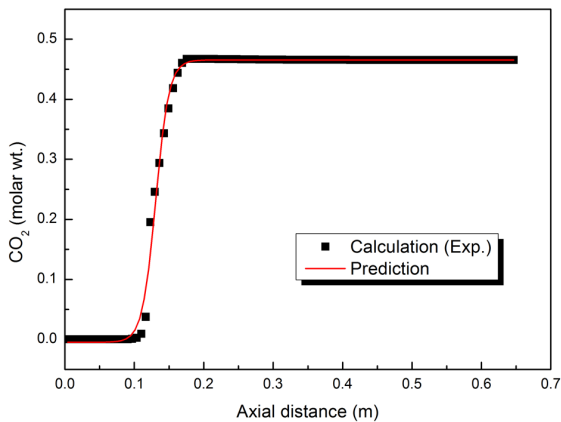
위와 같은 절차로 얻어진 이산화탄소 분포 RSM 모형이 계산에서 얻어진 실제값을 잘 예측하는지를 판단하기 위해 새로운 3개의 조건에서 계산을 수행하여 Boltzmann 함수를 구성하는 4개의 파라미터를 실제값과 계산값에 대해 Table 4에 나타내었다. 3가지 새로운 조건 모두에서 각 파라미터의 오차가 1% 미만으로 예측됨을 확인할 수 있었고, 통계적으로는 CO<sub>2</sub> 분포에 대한 파라미터는 매우 잘 예측할 수 있었다고 판단된

Table 4. Case study for comparison between the real and predicted values

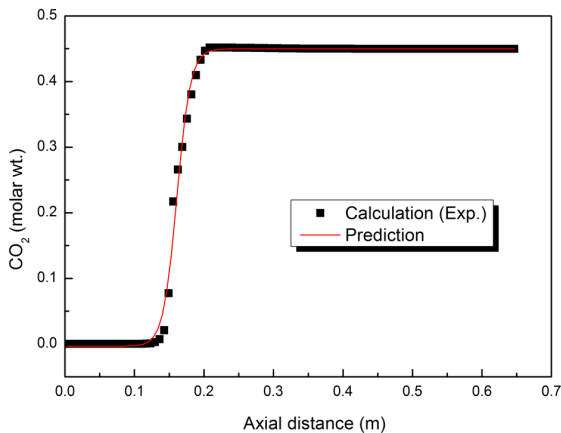
Sample	Psize	Cgas	Wtemp	values	A1	A2	x0	dx
case1	85	0.05	1200	Exp.	-0.0047	0.46544	0.1307	0.00962
				Pred.	-0.0045	0.4652	0.1312	0.0095
case2	95	0.06	1150	Exp.	-0.003	0.45243	0.1563	0.00944
				Pred.	-0.0028	0.4518	0.1571	0.0093
case3	105	0.07	1250	Exp.	-0.0033	0.44974	0.16103	0.00977
				Pred.	-0.0033	0.4498	0.1607	0.0098

다. 4개의 파라미터 중 실제 함수의 분포결정에 중요한 역할을 하는 것은 A2와 x0이고 두 파라미터의 오차는 매우 작음을 확인할 수 있다.

통계적 결과 이외의 실제 분포를 예측하는데 있어서는 전체의 값을 비교하는 것이 전체 정확성 평가하는 하나의 중요한 방법이다. 왜냐하면 통계적 절차가 아니라 함수의 피팅 등에서 오차가 발생할 경우 통계적으로는 오차가 거의 없는 것처럼 보이지만 실제 물리량의 분포에서는 차이가 발생할 수 있기 때문이다. Fig. 4에 Table 4의 두 조건인 Case 1과 Case 3에 대해서 계산한 값과 예측된 분포곡선을 함께 도시하였다. 두 곡선은 대체적으로 일치하는 형태를 보이지만 Boltzmann 함수로 예측하는 경우에 실제 CO<sub>2</sub> 농도 증가 시작점과 초기 증가율이 모두 지연됨을 볼 수 있다. 이러한 오차는 Boltzmann 함수의 특성에 기인하고 보다 정확한 분포예측을 위해서는 새로운 파라미터의 추가가 필요하다고 판단된다.



(a) Case 1



(b) Case 3

Fig. 3. Validation of the Boltzmann function assumed by RSM model for distribution of CO<sub>2</sub> concentration.

### 3.2 일산화탄소의 DTF 내 분포

앞에서는 일반적으로 탄화수소 연료가 완전연소가 될 때 생성되는 대표적인 물질인 이산화탄소 농도의 DTF 내부의 분포를 예측하였고, 이번 절에서는 불완전 연소시 생성되는 일산화탄소 농도의 분포에 대해 DOE 중에서 RSM으로 예측해 보려 한다. RSM을 통한 수치 해석 결과는 앞장과 함께 얻었고 나온 CO 농도를 DTF 길이에 따라 살펴보니 계산된 모든 경우에서 중앙부분에서 가장 농도가 높은 확률밀도함수의 형태를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 CO 농도 분포를 묘사하는 함수로서 Gaussian peak 함수로서 결정하였고, Gaussian function의 여러형태 중 상수가 지수함수 앞에 진폭(amplitude)처럼 곱해져 있는 식 (3)과 같은 형태를 선택하였다. 식 (3)에는 y<sub>0</sub>, A, X<sub>c</sub>, w 등 모두 4개의 파라미터가 존재하고, y<sub>0</sub>는 기준값(offset value), A는 중앙 최대값, X<sub>c</sub>는 최대값 위치 그리고 w는 가우시안 함수의 폭을 각각 의미하고 있다.

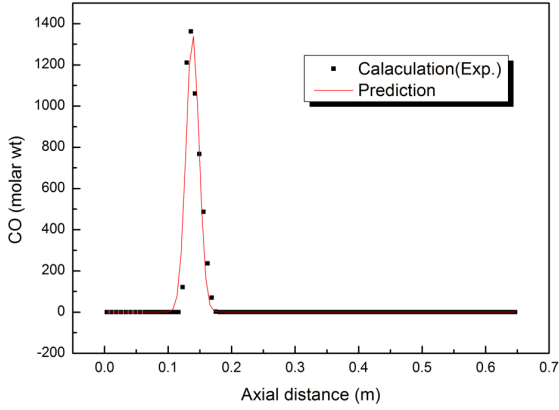
$$y = y_0 + A e^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}} \quad (3)$$

가정된 함수에 대해서 앞의 이산화탄소의 경우와 같이 실험계획법에 의해 설계된 조건에서 얻은 CO 농도 분포를 위의 Gaussian peak 함수로 피팅하여 4개의 파라미터를 각 조건에 대해서 얻을 수 있었고 그 결과는 2차 다항식으로 구성할 수 있다. 이와 같이 얻은 결과의 정확성을 검증하기 위해서는 새로운 입력조건에서 분포예측이 잘되고 있는지에 대하여 조사하여야 한다. 따라서 보다 직접적인 검증을 위해 앞의 3가지 새로운 입력조건에서 수치해석을 수행하여 CO 농도 분포를 얻었고, 그 결과를 예측하기 식 (3)의 가우시안 함수로 결정된 결과의 새로운 실험조건에서의 각 파라미터는 Table 5와 같이 정해진다.

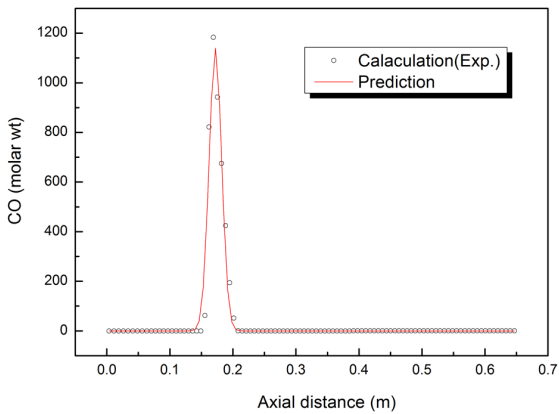
새로운 조건에서의 실험결과와 Gaussian peak 함수 모사를 통한 DTF 내 CO 분포를 Table 5의 Case 1과 Case 3에 대해서 Fig. 4에 도시하였다. 그 결과를 보면 전체적인 경향성은 일치하지만 CO 농도의 peak 지점

Table 5. Case study for comparison between the real and predicted distribution

Sample	Psize	Cgas	Wtemp	Y0	Xc	W	A
case1	85	0.05	1200	0.5026	0.1390	0.0101	1362.39
case2	95	0.06	1150	0.4225	0.1666	0.0095	1210.98
case3	105	0.07	1250	0.2459	0.1721	0.0099	1143.19



(a) Case 1



(b) Case 3

Fig. 4. Validation of the Gaussian peak function assumed by RSM model for distribution of CO concentration.

이나 급격히 농도가 높아지거나 낮아지는 두 위치 중 한 곳은 적절히 모사가 되지 않는다. 이러한 이유는 실제 CO의 농도가 피크값을 중심으로 비대칭이기 때문에 판단되어 비대칭성 모사가 가능한 Gaussian 함수가 분포 모사 함수로서 요구된다. 즉, 보다 정확한 CO 농도 분포예측을 위해서는 하기 위해 비대칭성을 가진 Gaussian function의 모사함수 선택이 요구되었고, 본 연구에서는 식 (4)와 같이 Extreme 함수를 도입하여 CO 분포와 같은 비대칭 피크함수를 모사하였다.

$$y = y_0 + A e^{(-e^{-z} - z + 1)}$$

where  $z = (x - x_c)/w$  (4)

Extreme 함수도 Gaussian 함수와 같이  $y_0$ , A,  $x_c$ , w 등 4개의 파라미터로 구성되어 있지만, 지수에 포함되어 있는 비대칭 모사항에 의해 비대칭 피크함수 모사가 가능해진다. 이때 피크값의 위치는 CO 분포의 극대값(local maximum)위치에서 발생하므로 미분해보면

Table 6. Acquired parameters of Extreme function for CO distribution

	Psize	Cgas	Wtemp °C	Y0	Xc	W	A
1	66.36	0.06	1200	-1.14553	0.13635	0.00917	1248.0
2	120	0.07	1300	-1.13903	0.17756	0.00909	1223.7
3	100	0.06	1368.18	-1.15384	0.14021	0.00978	1392.3
4	80	0.05	1100	-0.17348	0.14727	0.00802	1429.8
5	100	0.0431	1200	-0.64892	0.14006	0.00883	1559.0
6	80	0.07	1300	-1.14859	0.14299	0.00969	1183.1
7	100	0.0768	1200	-0.81825	0.18093	0.00838	1083.2
8	80	0.05	1300	-1.23228	0.1228	0.00988	1452.7
9	120	0.05	1300	-0.85002	0.15475	0.00894	1490.9
10	100	0.06	1200	-0.74738	0.16062	0.00872	1308.5
11	120	0.07	1100	-1.12525	0.21569	0.00806	1073.5
12	100	0.06	1031.82	-0.59374	0.1903	0.00779	1203.3
13	133.63	0.06	1200	-0.98974	0.19802	0.00846	1267.2
14	80	0.07	1100	-0.93108	0.1763	0.00803	1079.2
15	120	0.05	1100	-0.68317	0.18682	0.00792	1371.5

식 (4)의  $x_c$  임을 확인할 수 있다. 설계된 실험조건에서 수행한 수치해석 결과를 Extreme 함수로 모사하여 각 경우에 파라미터를 얻으면 Table 6과 같다. 이 경우에 기준값인  $y_0$ 의 경우 일반적으로 입구조건에서는 반응이 없으므로 0의 값을 가져야하므로 데이터에서는 피팅에 따른 오차로 볼 수 있고 1% 이하이다.

Extreme 함수를 형성하는 4개의 파라미터를 RSM를 통해 해석하면 각 파라미터의 2차 다항식을 얻을 수 있고 그 계수를 Table 7에 나타내었다.

각 파라미터의 다항식을 산정한 결과인  $R^2$  값을 보면 통계적으로 유의하게 파라미터 값을 모사할 수 있었고, 보다 직접적인 검증을 위해 앞의 Table 5와 같은 3가지 조건에서 수치해석을 수행하여 CO 농도 분포를

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

	Y0	Xc	W	A
Constant	9.444	0.30925	-0.00784	2817.1
A	-0.022	0.00046	0.00007	-3.2
B	-160.639	3.06198	0.053425	-39099.9
C	-0.005	-0.00042	0.000014	-0.1
A*A	0	0.00001	0	0
B*B	22.382	2.1783	-0.49197	36232.9
C*C	0	0	0	0
A*B	-0.036	0.00154	0.000294	34.4
A*C	0	0	0	0
B*C	0.124	-0.00186	-2.4E-05	14

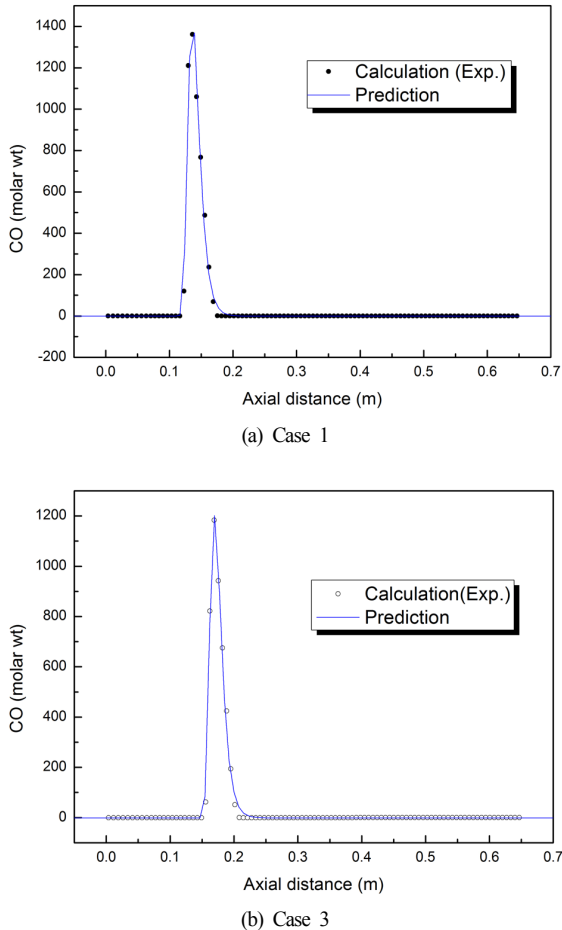


Fig. 5. Validation of the Extreme function assumed by RSM model for distribution of CO concentration.

얻었고, 그 결과를 Fig. 5에 Extreme 함수 모사를 통한 DTF 내 CO 분포와 함께 도시하였다. 그 결과를 보면 전체적인 경향성은 일치할 뿐 아니라 앞에서 Gaussian peak함수의 문제점으로 지적되었던 CO의 비대칭성이 Extreme 함수를 통해 표현될 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, CO농도가 급격히 변하는 위치가 양 쪽 모두 적절히 모사가 되었을 뿐 아니라, 전체적인 회귀법 오차가 줄어들면서 피팅시 피크값 또한 Gaussian 함수보다 정확히 표현함을 Fig. 4와 비교하면 명확히 볼 수 있다.

#### 4. 결론

석탄연소에서 운전환경의 예측과 위험성평가를 위한 정량적 방법론으로서 실험계획법의 한 종류인 반응 표면법을 사용하였고, 정량적 위험성평가를 위해서는 폭넓은 예측을 위하여 특정 위치에서의 값이 아닌 전체 연소기에서의 공간 분포를 예측하는 방법을 개발하였다. DTF를 이용하여 위험성평가에 사용되는 환경오

염물질로서 이산화탄소와 일산화탄소를 선정하였고, 각 농도분포를 개발된 방법을 통해 DTF내에서 예측하여 위험성평가 기법의 도구로서 사용가능한지에 대하여 조사하였다. 이 연구를 통해서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 분포예측을 위해서 먼저 실험계획법에 적합하게 실험을 수행하고 그 조건별 실험결과 데이터를 독립변수에 대해 표시하여 곡선의 형태를 파악하여 모사함수의 형태와 식을 결정한다. 독립적인 변수들에 대해 실험을 통해 획득한 데이터를 피팅하고, 함수 형태를 결정하는 파라미터의 값을 RSM을 통해 입력변수의 다항식으로 추정하여 구성한다. 최종적으로 얻어진 파라미터의 다항식들을 이용하여 새로운 다양한 입력조건을 통해 분포를 예측하는 타당성을 검증한다. 이와 같은 절차를 통해 분포에 대한 예측을 수행할 수 있다.

2) 이산화탄소의 DTF 내 분포를 위의 방법에 따라 예측하였다. 계산결과에 따라 이산화탄소의 농도분포는 Boltzmann 함수의 형태가 가장 적합하여 선택하였다. 예측분포 RSM 모형의 신뢰성을 판단하기 위해 새로운 3개의 조건의 분포와 비교하였을 때 3가지 조건 모두에서 각 파라미터의 오차가 1% 미만으로 예측됨을 확인할 수 있었고, 피팅 오차를 고려하면 분포를 정확하게 예측하였다.

3) 일산화탄소의 경우 실험결과를 Gaussian peak 함수 모사를 통하여 분포예측을 수행하였다. 그 결과 전체적인 경향성은 일치하지만 CO 농도의 peak 지점이 일치하지 않았다. 비대칭성 모사가 가능한 Extreme 함수를 모사함수로서 다시 도입하여 해석한 결과 CO농도가 급격히 변하는 위치가 적절히 모사가 되었을 뿐 아니라, 전체적인 회귀법 오차가 줄어들면서 피팅시 피크값의 예측 정확도가 크게 향상하였다.

4) 이와 같은 RSM을 이용하여 매우 짧은 시간에 2차원 이상의 분포예측을 위해 개발된 방법론은 피팅의 정확성과 모사함수의 선택이 적절하다면 예측성능이 매우 좋으므로 향후 다양한 시스템의 안전성 확보를 위한 평가방법론으로서 사용할 수 있다.

감사의 글 : 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

#### References

1) 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.

- 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 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.
- 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.