대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 B pp. 508~513 KSME 00F198

실증실험용 저온 플라즈마 반응기의 유동특성에 관한 연구

김유석* • 최석호* • 김정일* • 김태희* • 유정석* • 백민수* • 장길홍*

A Study on the Flow Characteristic of Non-Thermal Plasma Reactor for Demonstration

Y. S. Kim, S. H. Choi, J. I. Kim, T. H. Kim, J. S. Yoo, M. S. Paek and G. H. Jang

Key Words : Demonstration Plant (실증실험용 플랜트), Plasma Reactor (플라즈마 반응기), Flow Characteristic(유동특성), FLUENT, Eccentric Airflow (편향 유동)

Abstract

HANJUNG has developed demonstration plant treating combustion flue gas such as dioxide(SO_2) and nitrogen oxides(NOx). Before operating this system, we tested the inner airflow characteristic of demonstration plant in the front of plasma reactor field 1 and field 2. The experimental results of 25,000Nm^3/hr airflow are compared with the computational results using FLUENT code. It is found that the velocity distribution trends are matched the experimental results with the calculation results. To improve the eccentric airflow in the inlet hood, it is necessary to install the vertical guide vane as well as the horizontal guide vane.

1. 서 론

세계 경제와 산업의 발달로 에너지 소비량은 해마다 늘고 있으며, 아직도 화석연료의 사용은 상당 부분을 차지하고 있다. 급속한 경제성장을 이룩한 우리나라는 1990 년대부터 환경에 대한 인식의 변화로 점진적인 규제강화가 시행되고 있다. 그 중 대기환경 오염원으로 지목되어 온 화력발전소, 소각장 및 대형 산업설비에 대한 오염물질 규제는 2000 년 4 월 환경부에서 입법 예고한 대기환경 보전법 시행규칙 개정령(안)에 의해 더욱 가속될 예정이다. WTO 와 OECD 등의 국제기구에서는 환경과 무역이 연계된 새로운 무역규범에 대한 논의를 주요 관심사로 다루고 있다. 특히 OECD 국가에서는 탄소세・에너지세의 부과, 자동차 연비 강화 등 각종 규제수단을 개발하는 등 대기오염 방지문제가 국가간 무역장벽으로 표면화되고 있다.

국내에서는 대기오염 배출허용기준을 준수하기 위하여 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx)을 제거하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 화력발전소에서 배출되는 황산화물과 질소산화물을 제어하기 위한 방법으로 습식(wet scrubber)과 촉매전환(catalytic converter) 공정이 적용되고 있지만, 습식탈황설비의 폐수에 의한 2 차 오염문제와 고가의 촉매비용 문제로 저온 플라즈마(non-thermal plasma) 공정에 의한 동시처리 연구가 진행 중이다.

저온 플라즈마 형성방법에는 직류/교류 방전(DC/AC discharge), 전자빔 조사(electron beam irradiation) 및 펄스 코로나 방전(pulse corona discharge) 등이 있다. 전자빔 조사법의 경우 석탄화력 연소가스 Pilot 규모의 테스트에서 탈황율 95%, 탈질율 80%의 성능을 입증하였으며 현재 실증단계에 있다. 펄스 코로나 방전법은 전자빔 조사법과 비교하여 설치비가 저렴하고 x-ray 의 발생이 없으며, 탈황/탈질의 동시처리뿐만 아니라 유기성화합물(VOCs) 및 다이옥신 분해 등의 장점으로

* 한국중공업 기술연구원

국내외 대학 및 연구소, 기업체 등에서의 연구가 활발한 편이다.

당 사에서는 1994 년부터 저온 플라즈마(non-thermal plasma)를 이용한 탈황/탈질 기술의 타당성 검토를 시작으로 1996 년에는 발전소 발전용량 0.5MW 급 Pilot Plant(처리가스 유량 1,800Nm³/hr)를 개발하였으며, 10MW 급 실증실험용 Plant(Demo. Plant, 처리가스 유량 35,000Nm³/hr)를 개발하여 국내 화력발전소에 설치를 완료하였고 현재 시운전 중에 있다.

펄스 코로나 방전법에 의한 탈황 및 탈질율은 저온 플라즈마 영역에 의해 지배되므로, Demo. Plant 내부의 유동은 균일한 속도분포로 플라즈마 반응기를 통과하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 발전소 현지에 설치된 실증실험용 Plant 내부의 플라즈마 반응기 유속분포와 전산해석에 의한 유속분포에 대하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

당 사의 플라즈마 탈황탈질 시스템은 크게 5 부분으로 구분된다. 저온 플라즈마를 형성하는 플라즈마 반응기, 펄스형태의 전원을 발생시키는 펄스 전원공급장치(pulse generator), 열화학 반응과 heterogeneous chemical reaction 에 의해 형성된 부산물을 포집하는 전기집진기 및 전기집진기의 전원공급장치(Si-TR)와 첨가제 설비로 이루어져 있다. Fig. 1 은 국내 화력발전소에 설치된 Demo. Plant 로 발전소 실가스 35,000Nm³/hr 를 처리할 수 있는 규모이다.

플라즈마 반응기는 wire-plate 와 wire-cylinder 의 조합형인 방전극(+극)과 접지극(-극)으로 구성되어 있다. 상용 전기집진기의 방전극과 집진판의 배열 형태와 유사하며 2 field 로 제작되었다. 발전소 실가스가 유입되는 입구 덕트(inlet duct)는 1000 × 1000mm 의 사각형이며, 입구 후두(inlet hood) 앞의 굴곡부위 내부 중앙에 guide vane 이 설치되어 있다. 입구 후두 안쪽에도 유동의 급확대에 따른 backflow 형성을 방지하기 위해 600mm 길이의 guide vane 3 개가 수평 및 상·하 방향 40° 간격으로 설치되어 있다. 또한, 3 열의 pipe 로 구성된 열교환기가 입구 후드와 Demo. Plant 본체와의 연결부위 안쪽에 설치되어 있다.

2.2 실험방법

플라즈마 반응기 주위의 유속분포 측정을 위해

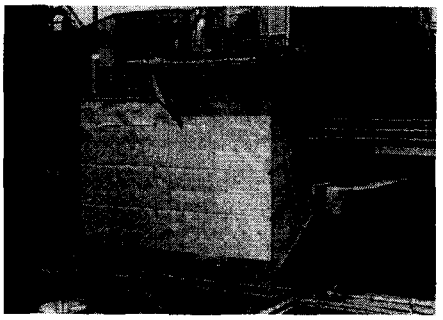

Fig. 1 Non-Thermal Plasma DeSOx & DeNOx System for Demonstration

Table 1 Experimental positions

(unit : mm)

dir.	measuring points
x	300, 3400 (0 is the intersection point between inlet hood and Demo. Plant main body.)
y	5000, 6000, 7500, 9000, 10000 (0 is the earth.)
z	-1200, -800, -400, 0, 400, 800, 1200 (0 is the center of Demo. Plant.)

I.D. Fan 을 구동하여 입구 덕트에 설치된 맨홀을 통해 25,000Nm³/hr 의 외부공기를 유입하였다. Table 1 은 플라즈마 반응기 주위의 x, y, z 축 방향에 대한 유속분포 측정위치를 나타낸 것이다. 주 유동 방향을 x 축으로 설정하여 입구 후드와 Demo. Plant 본체와의 교차점이 x 축 방향의 기준점이며, y 축 방향은 지표, z 축 방향은 Demo. Plant 의 중앙이 기준점이다. 유속계는 KANOMAX 사의 DIGITAL ANEMOMETER 를 사용하였다.

3. 유동해석

3.1 지배방정식 및 경계조건

입구 덕트 및 플라즈마 반응기 내부의 유동은 3 차원 난류 정상상태 비압축성 유동으로 가정하였으며, 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (1)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (2)$$

난류 운동에너지 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}+G-\rho\varepsilon \quad (3)$$

난류 운동에너지 소산율 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} +\frac{\varepsilon}{k}(C_1 G-C_2\rho\varepsilon) \quad (4)$$

여기서 u, p, ρ, μ, κ 및 ε은 각각 공기의 속도, 압력, 밀도, 층류 점성계수, 난류 운동에너지 및 난류 운동에너지 소산율이며 전단응력 τ_{ij}는 다음과 같다.

$$\tau_{ij}=-(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (5)$$

본 연구에서는 standard k-ε 난류모델을 도입하였으며, 이 식들에 포함된 난류 점성계수, 난류 생성항 G 및 난류 상수값들(C_1, C_2, $C\mu$, σ_k, σ_ε)은 각각 다음과 같다.

$$\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$G=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

C_1=1.44, C_2 = 1.92, $C\mu$ = 0.09
σ_k = 1.0, σ_ε = 1.3 (8)

Demo. Plant 의 입구 덕트 유입 조건으로 균일속도 7.45m/s 와 유입 난류 운동에너지의 난류강도를 5%로 가정하였으며, 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)과 벽함수(wall function)를 사용하였다. 또한, 플라즈마 반응기 전단에 설치된 열교환기의 특성을 유동해석에 반영하기 위해 이 부분을 공극률 18.3%의 porous 영역으로 가정하였다.

3.2 수치해석 방법

본 연구에서는 Demo. Plant 내부에 설치된 플라즈마 반응기의 양극(+극) 방전극과 음극(-극) 접지극에 의한 반응기 내부의 유속분포를 예측하기 위해 상용 CFD 코드인 FLUENT V5 를 사용하였다. 대류항을 계산하기 위해 멱승 도식(Power Law Scheme)을 사용하였으며, 속도장을 얻기 위해 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)알고리즘을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 운동량 유수의 합과 연속방정식에서의 유수의 합이 모두 10^{-3} 미만일 때로 정하였다.

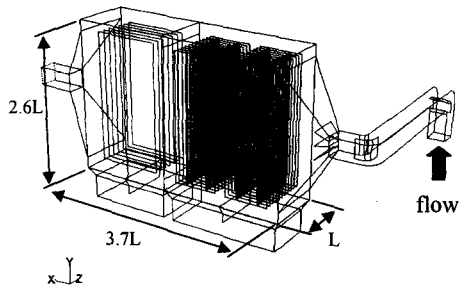

Fig. 2 Computational domains for investigation

Demo. Plant 내부의 유동장을 모사하기 위해 Fig. 3 과 같이 계산영역을 설정하였다. 그 중 플라즈마 반응기의 접지극(-극)은 평면으로, 방전극(+극)은 60 × 60 × 7000mm 의 육면체로 모델링하여 실제 내부 구조물과의 유사성을 반영하였다. 이때 사용된 계산격자는 hybrid 형태이며 셀(cell)의 수는 약 260,000 개 이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 플라즈마 반응기 FIELD 1 전단에서의 유속분포 특성

Fig. 3 부터 Fig. 7 까지는 플라즈마 반응기 field 1 전단에서의 유속분포를 나타낸 것이다. 실험결과 z 축 방향에 따른 최대 유속(Max. velocity)과 최소 유속(Min. velocity)의 비율은 Fig. 4(y=7500mm)에서 최소 1.7 배, Fig. 7(y=10000mm)에서 최대 4.4 배가 차이 나는 것으로 측정되었다. y 축 방향에 따른 최대 유속과 최소 유속의 비율은 z=800mm 에서 최소 1.7 배, z=0mm 에서 최대 3.5 배의 유속편차를 나타내었다. 상대적으로 z 축의 일정 지점에서 y 축 측정위치 변화에 따른 유속편차가 y 축 방향 일정 지점에서의 z 축 방향에 따른 유속편차보다 작은 까닭은 앞쪽에 설치된 열교환기가 y 축 방향에 대해 일정부분 가스 분배판(gas distributor)의 역할을 하고 있는 것으로 사료된다. 입구 후두로 진행하는 유동은 입구 후두 직전에서 90° 회전된 입구 덕트를 지나게 된다. 이때 발생하는 원심력에 의해 급확대 영역인 입구 후두 내에서 -z 축 방향으로 편향된 유속분포를 나타내고 있다. 또한, Fig. 3(y=5000mm)과 Fig. 7(y=5000mm)에서 가장 빠른 유속분포를 나타내고 있으므로 입구 후두에 설치된 상 · 하 guide vane 의 각도 변화에 대한 검토

가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

전산해석을 통한 유속분포는 실험결과와 절대값의 차이는 있지만 Fig. 3 과 Fig. 4 및 Fig. 6 에서 동일한 유속분포 경향을 보이고 있다. Fig. 5 와 Fig. 7 에서 실험결과와 전산해석 결과의 오차발생 원인은 실험시의 측정오차와 전산해석시 열교환기의 특성을 위해 적용한 porous 모델에 의한 해석오차인 것으로 사료된다. 전산해석 결과 각각의 y 축 측정위치의 유속분포는 평균 1m/s 로 균일한 분포를 나타내고 있지만, Fig. 5 에서 이산형태의 속도분포를 나타내고 있다. 이 부분은 입구 덕트 및

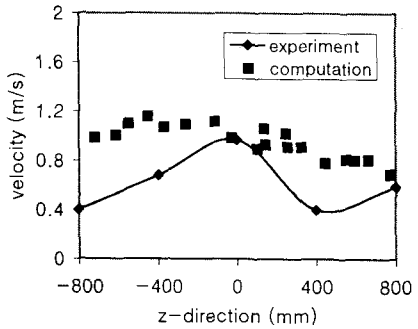

Fig. 3 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 1 (x=300mm, y=5000mm)

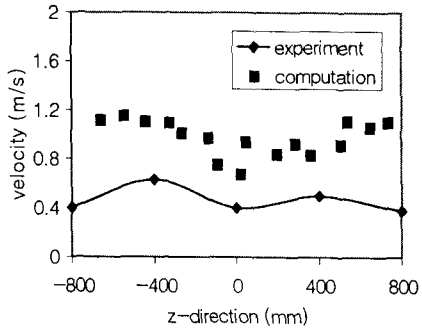

Fig. 4 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 1 (x=300mm, y=6000mm)

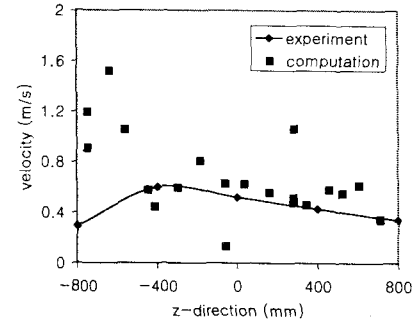

Fig. 5 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 1 (x=300mm, y=7500mm)

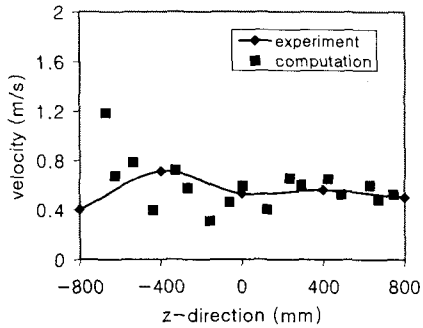

Fig. 6 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 1 (x=300mm, y=9000mm)

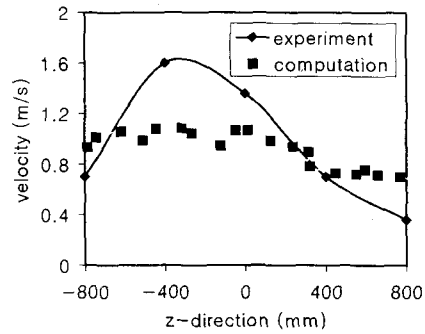

Fig. 7 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 1 (x=300mm, y=10000mm)

입구 후두로부터 진행되는 유동의 중앙 부분으로 상대적으로 압력이 높아졌기 때문인 것으로 사료된다.

4.2 플라즈마 반응기 FIELD 2 전단에서의 유속분포 특성

x=3400mm 지점은 플라즈마 반응기 field 1 과 field 2 의 중간 지점이다. Fig. 8 부터 Fig. 12 까지의 y 축 유속분포 측정위치는 Fig. 3 부터 Fig. 7 까지의 측정위치와 동일하며, z 축 측정위치는 좌우 2 곳을 추가하였다.

Fig. 8 부터 Fig. 12 까지의 실험결과는 0.4m/s 이하의 균일한 유속분포를 나타내고 있다. Fig. 8 은 z=800mm 와 z=1200mm 사이에서 유속변화의 비율이 5.2 배, z= -1200mm 와 z= -800mm 사이에서는 2.1 배의 변화 비율이 측정되었다. 이러한 원인은 플라즈마 반응기 밑에 설치된 유로(path line) 차단벽의 위치가 측정위치(y=5000mm)와 인접하여 플라즈마 반응기 전단 field 의 바닥으로 진행하던 유로가 유동방향에 수직으로 설치된 벽에 의해 위로 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

전산해석 결과는 Fig. 10 과 Fig. 11 및 Fig. 12 에서 실험결과와 유사한 속도분포 경향을 나타내며,

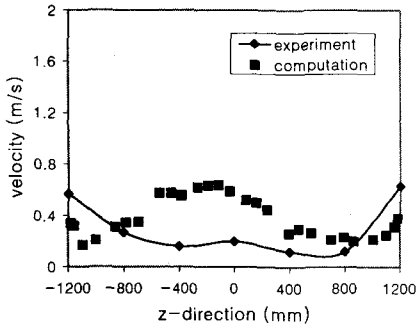

Fig. 8 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 2 (x=3400mm, y=5000mm)

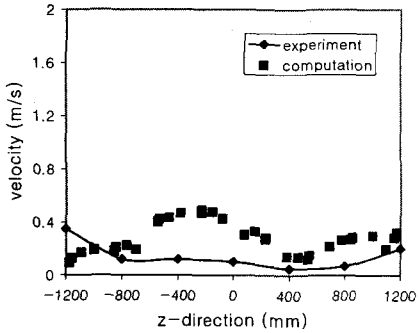

Fig. 9 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 2 (x=3400mm, y=6000mm)

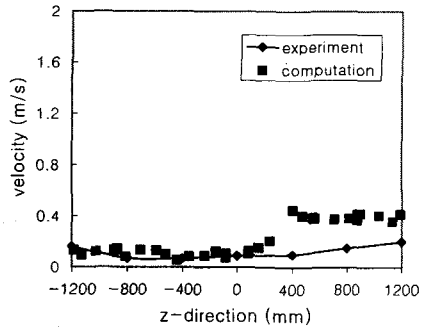

Fig. 10 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 2 (x=3400mm, y=7500mm)

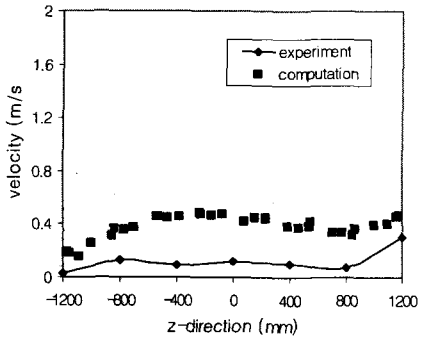

Fig. 11 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 2 (x=3400mm, y=9000mm)

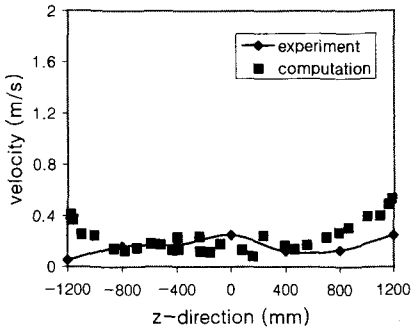

Fig. 12 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 2 (x=3400mm, y=10000mm)

플라즈마 반응기 field 1 전단에서 발생한 -z 축으로의 유동 편향현상이 대부분 해소되었음을 보여주고 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 에서는 실험결과와는 달리 z 축 방향에 대해 불균일한 유속분포를 형성하며, 특히 z= -400 ~ 0mm 의 영역에서 가장 빠른 속도분포를 나타내었다. 이러한 오차의 발생은 플라즈마 반응기의 방전극(+극)을 모델링하면서 단순화에 따른 반응기 내부의 압력이 낮아졌기 때문인 것으로 사료된다.

4.3 입구 덕트 및 입구 후두 내의 GUIDE VANE 수정에 따른 유속분포의 예측

플라즈마 반응기 field 1 전단과 field 2 전단에서의 유속분포를 실험결과와 전산해석을 통해 고찰하였다. 현재 Demo. Plant 에 설치되어 있는 guide vane 으로는 field 1 전단에서의 유속 편향을 방지하기 어려우므로 수정된 guide vane 의 형상을 전산해석에 반영하여 각각의 위치에 대한 유속분포를 비교하였다. 입구 덕트 내부의 굴곡부위에 설치된 입구쪽 guide vane 은 길이 224mm 만큼 확장하고 26.5 ° 만큼 왼쪽으로 기울여 유입 유량을 다르게 하였다. 또한, 출구쪽 guide vane 은 입구 후두까지 연장하여 유동의 편향을 방지하였다. 입구 후두 내부에 설치된 길이 600mm 의 수평 guide vane 은 1500mm 로 확장하였으며, 동시에 수직 guide vane 도 모델링에 반영하였다.

Fig. 13 은 플라즈마 반응기 field 1 전단(x=300mm)에서의 유속분포에 대한 전산해석 결과이다. 각각의 y 축 측정위치에 대하여 평균 0.8m/s 의 균일한 유속분포를 형성하고 있지만, y=7500mm 높이에서는 좌우로 큰 유속편차를 보이고 있다. Fig. 14 는 field 2 전단(x=3400mm)에서의 전산해석 결과로 y 축 측정위치에 대하여 평균 0.3m/s 의 균일한 유속분포를 나타내고 있다. 따라서, guide vane 의 형상 수정작업으로 유속편향 문

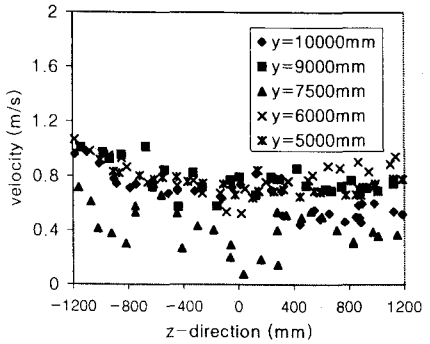

Fig. 13 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 1 with modified guide vane (x=300mm)

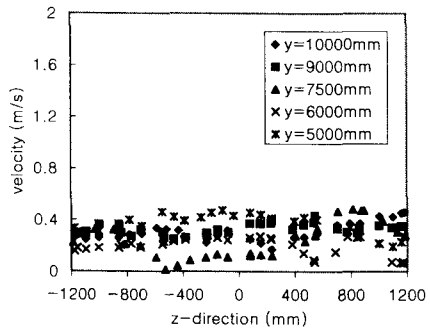

Fig. 14 Velocity distributions in the front of plasma reactor field 2 with modified guide vane (x=3400mm)

제의 해결이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실증실험용 저온 플라즈마 탈황탈질 시스템의 발전소 현지 설치에 따른 내부 유속분포 측정 실험결과와 상용 CFD 코드인 FLUENT를 이용한 유동해석 결과를 상호 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실증실험용 저온 플라즈마 탈황탈질 시스템 내부의 유속분포 측정 실험결과와 유동해석 결과의 비교를 통하여 실험시 측정오차와 전산해석시의 모델링 방법에 따른 해석오차가 일부 있었지만, 플라즈마 반응기 field 1 전단에서는 지표로부터 y=6000mm 이하의 영역에서, field 2 전단에서는 y=7500mm 이상의 영역에서 서로 유속분포 경향이 일치함을 확인하였다.

2. 실증실험용 저온 플라즈마 탈황탈질 시스템으로 유입되는 유속의 편향현상을 방지하기 위해서는 수평 방향의 guide vane 뿐만 아니라, 입구 후두 내부의 와류형성을 최소화하기 위한 수직 방향 guide vane 의 설치가 필요함을 알 수 있었다.

3. 입구 후두 내부에 설치된 열교환기는 주유동 방향(x 축)에 대하여 z 축 방향보다는 y 축 방향으로 일정부분 유동을 분배하는 가스 분배판(gas distributor)의 역할을 하였다.

참고문헌

(1) *FLUENT 5 User's Guide*, 1998, Fluent Incorporated
(2) Leibacher, U., 1996, "Improving Heavy Dust Laden Airflow in Electrostatic Precipitators," *World Cement.*
(3) White, F. M., 1994, *"Fluid Mechanics,"* New York, McGraw-Hill.
(4) Civitano, L., 1993, "Industrial Application of Pulsed Corona Processing to Flue Gas," *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control : Part B*, pp. 103-130.
(5) 장길홍, 백민수, 유정석, 김태희, 1999, "석탄 화력발전소 실증실험을 위한 플라즈마 탈황탈질 설비 개발," 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, pp. 262-263.
(6) 김유석, 최석호, 유정석, 백민수, 장길홍, 2000, "플라즈마 탈황탈질 공정의 부산물 특성," 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, pp. 233-234.
(7) 장길홍, 백민수, 유정석, 김태희, 장인갑, 1998, "저온 플라즈마를 이용한 탈황탈질 특성," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 721-726.
(8) S. H. Choi, Y. S. Kim, J. I. Kim, T. H. Kim, J. S. Yoo, M. S. Paek, G. H. Jang, 2000, "Removal of SO_2 and NOx from Combustion Flue Gas by Pulsed Corona Discharge," *International Conference on Combustion, Incineration / Pyrolysis and Emission Control (ICIPEC)*, pp. 425-434.