침적 입자를 고려한 유동해석을 통한 신형 탈황설비용 GGH 요소 최적화

Optimization of the Gas-Gas Heater Element for Desulfurization Equipment through Fluid Analysis of considering Deposition Particles

오 부 진*. 류 봉 조†. 이 영 신**. 김 중 호****. 백 수 곤****

B. J. Oh, B. J. Ryu, Y. S. Lee, J. H. Kim and S. G. Baek

(2010년 3월 4일 접수 ; 2010년 6월 4일 심사완료)

Key Words : GGH Panel Element(GGH 요소패널), Desulfurization Equipment(탈황설비), Deposition Particle(침적입자), Fluid Analysis(유동해석)

ABSTRACT

The paper deals with the proper design of GGH(gas-gas heater) panel elements of desulfurization equipments in a thermoelectric power plant. When fossil fuels such as coal, petroleum et cetera are burnt to ashes, sulfur oxide compounds are produced, and calcareous sludges are deposited at GGH panel elements. In this case, operation of a power plant equipments is interrupted, and a tremendous economic loss comes into existence. One of the purposes of the paper is to find flow velocity distributions and regions of depositions when calcareous sludges pile up on the GGH panel elements through the fluid analysis. In the fluid analysis, flow velocity and position distributions of particles between GGH panel elements are demonstrated according to time variation for ammonia and calcium hydroxide particles.

1. 서 론

탈황설비는 화석연료 중에 포함되어 있는 유황성분이 보일러에서 연소되어 배출될 때, 황산화물을 제거하는데 필요한 설비로서 Fig. 1에 보이는 바와 같다. 탈황설비 시설 중 GGH(gas-gas heater) 요소는 대체적으로 주름 패널 모양의 적층 구조로 되어 있는데, 주로 보일러 연소에서 NOx, SOx 발생물을 걸러주는 작용을 하게 되며, 이를 흡수탑에서 흡수하여 NOx와 SOx를 제거하게 된다.

이러한 GGH 요소에 재(ash) 및 석회의 분말이 침적되어 GGH의 흡을 막아 발전소 운전을 방해하게 되면 발전설비 가동 중단에 따른 막대한 경제적 손실을 가져오게 되므로 이 패널 요소는 매우 중요한 역할을 하게 된다. 통상적으로 탄소강(carbon steel)으로 제작되는 GGH 요소의 적층구조 사이로 가스가 인입되는 동안 패널 요소에 석회가 쌓여 통로가 좁아지게 되므로 이에 대한 구조적 변경이나 형상변화를 통한 최적의 패널 요소 형태를 제작하는 것이 당면 문제들 중의 하나이다.

현재 운영 중인 화력발전소의 탈황계통에 설치된 GGH는 흡수탑을 지난 연소가스가 연돌로 유입될 때, 다뤄지지 않은 가스와의 열 교환을 통해 재열시킴으로써 에너지 효율을 증가시키는 장치로서, 일부 운전 중인 발전소에서는 GGH로 인입되는 석고

† 교신저자 ; 정회원, 한밭대학교 기계공학부
E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr

Tel : (042)821-1159, Fax : (042)821-1587

* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

** 충남대학교 기계설계공학과

*** (주)한밭

농무(mist)나 집진기를 통과한 재(ash) 등의 미세한 입자가 열교환 요소에 고착되어 설비 차압이 높아지는 현상이 발생되고 있다. 이러한 문제를 고압 물 세척을 통하여 단기적으로 문제점을 해결하려 하고 있으나 장기적인 방안이 되고 있지는 못한 실정이다. 또한 탈질설비의 운전 시에는 연소가스 중 암모니아와 SO_3 의 반응에 황산암모늄이 고착되어 GGH의 열전달 공극을 막아 차압을 상승시키고 부식속도를 증가시키는 등의 부수적인 문제를 유발하고 있다. 최근 이러한 GGH 패널 요소의 scale 생성 원인에 관한 연구⁽¹⁾와 고장 또는 파손 해석에 대한 연구⁽²⁾와 패널 요소 사이에 공기 중 습도의 변화에 따른 유동해석과 압력분포 등에 대한 연구⁽³⁾는 있었지만, 패널 요소 사이로 인입되는 가스의 침적물인 석회 입자의 유동현상과 침착되는 위치 등에 대한 정량적인 연구는 거의 없는 실정이다. Ryu와 그의 공동연구자들은⁽⁴⁾ 최근 입자크기를 고려한 GGH 패널 요소의 유동해석에 대해 연구하였고, 이러한 연구들에 관련된 유동과 가스입자에 대한 수치해석 연구들이 이루어져 왔다⁽⁵⁻⁸⁾. 이 논문의 목적은 GGH 요소 적층 패널 사이를 통과하는 가스의 침적입자에 대한 유동해석을 통해, 시간의 변화에 따른 입자의 유속분포와 침적위치 등으로 이상적인 패널 요소 형상을 찾는 데 있다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

Fig.1은 화력 발전소의 탈황 및 탈질 설비에 사용되는 열교환기에 있어서 GGH 열소자를 점검하여 A부터 F열까지의 등급을 매긴 평면에서 본 그림을

Fig. 1 A plane figure of GGH column elements

나타내고 있고, 석회분말이 가장 많이 침적되거나 부식이 발생하는 D열 부분을 붉게 표시하고 있다.

Fig. 2 Three dimensional model for some parts of GGH panel elements

(a) NF type

(b) UNF type

(c) NU type

Fig. 3 Three types of panel elements

Fig. 4 Mesh model for fluid analysis

Fig. 2는 Fig. 1의 D열 중 한 부분만을 3차원 모델링한 그림을 나타내고 있다.

Fig. 3은 GGH 패널 요소 중 NF, UNF, NU의 세 가지 형태의 두께 8 mm의 패널 요소가 두 개로 적층되어진 유동해석 모델을 나타내고 있다. 현재 사용빈도로는 NF가 많이 사용되고 있고, UNF와 NU형태는 사용 검토 중에 있는 것으로 사료된다.

이 논문에서는 주로 많이 사용되는 NF와 UNF 형태만을 다루고 있다.

Fig. 4는 해석모델에 사용된 계산격자 중에서 유체 영역에 대한 격자를 도시한 것이며, Table 1은 Fig. 4의 격자모델에 대한 격자특성 값들이다.

2.2 지배방정식 및 경계 조건

기체 유동은 정상 상태의 난류 유동으로서 지배방정식은 다음의 식 (1)~(3)으로 표시되는 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식과 식 (4)~(5)로 기술되는 난류운동에너지소산율방정식 등으로 구성된다. 또한 난류모델로서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

where, $i = 1, 2, 3$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) \\ + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H \end{aligned} \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u_i u_i}{2}$$

Table 1 Properties of meshes

Property of meshes	Values
Total mesh	1,263,686
Fluid mesh	728,544
Solid mesh	89,892
Partial mesh	445,250

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 밀도, u_i 는 속도성분, τ_{ij} 는 점성 전단 응력 텐서, τ_{ij}^R 는 Reynolds 응력 텐서, k 는 난류운동에너지, ϵ 는 소산율, H 는 엔탈피를 나타낸다.

Table 2 Material properties of a stainless steel at 400 K

Materials	Stainless steel
Density	8100 kg/m ³
Specific heat	520 J/kgK
Thermal conductivity	16.67 W/mK
Melting temperature	1683.15 K

Table 3 Material properties of calcium hydroxide at 400 K

Materials	Calcium hydroxide
Density	2200.55257 kg/m ³
Specific heat	712 J/kgK
Thermal conductivity	1.488864 W/mK
Melting temperature	785.15 K

Table 4 Material properties of ammonia at 400 K

Materials	Ammonia(Liquid)
Density	344.8 kg/m ³
Specific heat	6500 J/kgK
Thermal conductivity	0.23 W/mK

Table 5 Properties of deposition particles

Properties	Values
Number of injection points	1,000,000
Diameter	0.8 μ m
Mass flow rate	0.0158271 (kg/sec)

경계조건과 관련하여 외벽의 조건은 주변 온도 86 °C의 환경에서 외벽의 열전달 계수를 $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 가정하고, 입구부에서는 13.9 m/s 로 공기가 유입되며, 출구부에서는 대기압의 정압 조건인 것으로 가정하였다.

투입 입자의 경우 석회가루와 암모니아 액체입자를 선정하여 각각 따로 투입하여 해석하였다.

Tables 2~4는 해석모델에서 GGH 패널 요소의 물성으로 부가한 stainless steel과 침적입자로 고려한 석회가루와 암모니아 액체입자의 400 K 환경에서의 비열 및 열전도도 등의 물성치를 나타내며, 실제 해석에서는 물성에 대한 온도 의존 데이터를 사용하였다.

Table 5는 침적 입자의 투입 설정에 대한 값들이다. 질량유량은 전체 질량유량의 10 %로 가정하였다.

2.3 수치 해석 기법

이 논문에서는 열유동 해석을 수행하기 위하여 유체역학 및 열전달, 화학반응 등을 계산하는 범용 CFD 코드인 COSMOS FloWorks 2007⁽⁹⁾을 사용하였으며, 또한 난류 모델로서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 방정식 내 대류항의 계산을 위하여 상류차분도식을 사용하였다. 수렴조건으로 각 셀에 대한 운동량유수의 합 및 연속방정식의 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하로 조건을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 GGH 패널 요소 유동해석 결과

GGH 유동해석 결과는 각 형태별 온도, 압력, 유속 및 습도 분포를 계산하였다. 습도 변화는 0 % ~ 90 %까지 10 %씩 증가시켜가며 공기에 포함하여 계산하였다. 습도 10 % ~ 90 %의 경우 온도차가 유사한 경향을 보이고 있으나 습도 0 %의 경우는 다른 경우들보다 최소온도가 약 380 K로 약간 높은 온도분포를 보이고 있다.

Table 6은 NF 형태에 대한 해석 조건별 온도의 최대값과 최소값을 나타내고 있다.

Table 7은 NF 형태에 대한 조건별 압력의 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 전체적으로 유사한 압력분포를 보이고 있으며 습도 0 %의 경우가 다른 경우보다 약 33 Pa 정도 낮은 압력분포를 보이고

있다.

Table 8은 NF 형태에 대한 조건별 속도의 최대값을

Table 6 Minimum and maximum temperature of NF type elements

Humidity	Temperature[K]	
	Minimum	Maximum
0 %	380.715	408.248
10 %	364.574	407.175
20 %	364.285	407.255
30 %	364.287	407.242
40 %	364.333	407.251
50 %	364.522	407.252
60 %	364.535	408.189
70 %	364.561	408.191
80 %	364.593	408.192
90 %	364.612	408.191

Table 7 Minimum and maximum pressure of NF type elements

Humidity	Pressure[Pa]	
	Minimum	Maximum
0 %	101283	101589
10 %	101284	101623
20 %	101283	101622
30 %	101283	101622
40 %	101283	101621
50 %	101283	101622
60 %	101284	101621
70 %	101283	101622
80 %	101284	101620
90 %	101284	101621

Table 8 Maximum velocity of NF type elements

Humidity	Maximum velocity[m/s]
0 %	26.827
10 %	26.210
20 %	26.233
30 %	26.275
40 %	26.250
50 %	26.242
60 %	26.191
70 %	26.290
80 %	26.232
90 %	26.247

나타내고 있다. 습도 0 %의 경우가 다른 경우보다 최대속도가 약 0.6 m/s 빠른 속도로 계산되었다.

Table 9는 UNF 형태에 대한 조건별 온도의 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 마찬가지로 습도 변화는 0 %~90 %까지 10 %씩 증가시켜가며 공기에 포함하여 계산하였다. 습도 10 %~90 %의 경우 온도차가 유사한 경향을 보이고 있으나 습도 0 %의 경우는 다른 경우들보다 최소온도가 약 387 K로 높은 온도분포를 보이고 있다.

Table 10은 UNF 형태에 대한 조건별 압력의 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 전체적으로 유사한 압력분포를 보이고 있으며 습도 0 %의 경우가 다른 경우보다 약 37 Pa 정도 낮은 압력분포를 보이고 있다.

Table 11은 UNF 형태에 대한 조건별 속도의 최대값을 나타내고 있다. 습도 0 %의 경우가 다른 경우보다 최대속도가 약 0.8 m/s 느린 속도로 계산되었다.

Table 12는 NU 형태에 대한 조건별 온도의 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 마찬가지로 습도변화는 0 %~90 %까지 10 %씩 증가시켜가며 공기에 포함하여 계산하였다. 습도 10 %~90 %의 경우 온도차가 유사한 경향을 보이고 있으나 습도 0 %의 경우는 다른 경우들보다 최소온도가 약 342 K로 높은 온도분포를 보이고 있다.

Table 13은 NU 형태에 대한 조건별 압력의 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 전체적으로 유사한 압력분포를 보이고 있으며 습도 0 %의 경우가 다른 경우보다 약 72 Pa 정도 낮은 압력분포를 보이고

있다.

Table 14는 NU 형태에 대한 조건별 속도의 최대

Table 10 Minimum and maximum pressure of UNF type elements

Humidity	Pressure[Pa]	
	Minimum	Maximum
0 %	101221	101795
10 %	101225	101833
20 %	101227	101832
30 %	101225	101832
40 %	101225	101832
50 %	101226	101831
60 %	101227	101831
70 %	101228	101831
80 %	101226	101829
90 %	101227	101829

Table 11 Maximum velocity of UNF type elements

Humidity	Maximum velocity[m/s]
0 %	26.584
10 %	27.368
20 %	27.220
30 %	27.311
40 %	27.338
50 %	27.310
60 %	27.369
70 %	27.357
80 %	27.368
90 %	27.352

Table 9 Minimum and maximum temperature of UNF type elements

Humidity	Temperature[K]	
	Minimum	Maximum
0 %	386.785	408.240
10 %	365.244	408.226
20 %	365.272	408.225
30 %	365.236	408.225
40 %	365.270	408.227
50 %	365.088	408.227
60 %	365.532	408.231
70 %	365.433	408.231
80 %	365.578	408.230
90 %	365.782	408.230

Table 12 Minimum and maximum temperature of NU type elements

Humidity	Temperature[K]	
	Minimum	Maximum
0 %	342.227	408.233
10 %	331.694	408.227
20 %	332.372	408.277
30 %	331.848	408.279
40 %	331.534	408.279
50 %	331.339	408.279
60 %	332.813	408.279
70 %	332.161	408.279
80 %	333.473	408.279
90 %	329.150	408.256

값을 나타내고 있다. 습도 0%의 경우가 다른 경우보다 최대속도가 약 1.3 m/s 느린 속도로 계산되었다.

3.2 침적입자를 고려한 유동해석 결과

침적입자를 고려한 해석은 선행 수행한 유동해석의 결과를 기반으로 해석하는 것으로 기존 해석결과에 입자에 관한 정보를 추가하여 그 값을 정량적으로 수치해석을 한 것이다. 따라서 입자별 침적, 온도특성을 제외한 다른 값(유속, 전체압력 등)의 두 입자를 따로 구분하지 않았다.

Fig. 5와 6, 7은 각각 NF, UNF, NU 형태 패널 요소의 시간변화에 따른 입자의 위치분포를 나타내고 있다. 입자는 0.0 μsec 를 기점으로 GGH 패널 요소의 입구로부터 동시에 투입된다.

Fig. 5와 6, 7을 비교해 보면 NF 형태의 경우, 전체 입자의 90% 이상이 통과하는데 소요되는 시간은

Table 13 Minimum and maximum pressure of NU type elements

Humidity	Pressure[Pa]	
	Minimum	Maximum
0 %	101161	101977
10 %	101153	102071
20 %	101148	102037
30 %	101152	102054
40 %	101154	102074
50 %	101150	102060
60 %	101152	102035
70 %	101150	102035
80 %	101152	102034
90 %	101146	102041

Table 14 Maximum velocity of NU type elements

Humidity	Maximum velocity[m/s]
0 %	27.697
10 %	29.037
20 %	29.049
30 %	29.077
40 %	29.035
50 %	29.016
60 %	29.016
70 %	28.979
80 %	28.974
90 %	29.222

약 6 μsec 전후인데 비해 모든 입자가 통과하는데 소요되는 시간은 약 14 μsec 인 것으로 나타났다. UNF 형태의 경우는 전체 입자의 90% 이상이 통과하는데 소요되는 시간이 약 4.5 μsec 이고, 모든 입자가 통과하는데 소요되는 시간은 약 6.5 μsec 인 것으로 나타나 NF 형태에 비해 입자의 소통이 원활한 것으로 판단되었으며 NU 형태의 경우는 전체 입자의 90% 이상이 통과하는데 소요되는 시간이 약 4.0 μsec 이고, 모든 입자가 통과하는데 소요되는 시간은 약 4.6 μsec 으로 나타나, 입자가 가장 빨리 통과하는 형태인 것으로 판단되었다.

Fig. 5 Position distributions of particles according to time variations in NF type panel elements

Fig. 6 Position distributions of particles according to time variations in UNF type panel elements

Fig. 8과 10, 12는 각각 NF, UNF, NU 형태 패널 요소의 시간변화에 따른 입자의 속도분포를 나타내고 있고, Fig. 9와 11, 13은 각각 NF, UNF, NU 형태 패널 요소의 시간변화에 따른 입자의 투입면 정면에서의 속도분포를 나타내고 있다.

Fig. 8과 10, 12를 비교해 보면 약 $2\ \mu\text{sec}$ 전후까지는 속도 분포에 별 차이가 없으나, 약 $3\ \mu\text{sec}$ 전후를 기점으로 다소 차이가 나타났다. UNF 형태 패널 요소의 경우 입자들이 좁은 영역에 분포되어 있어 NF 형태 패널 요소보다 전체입자가 통과하는

유속이 비교적 원활한 것으로 판단되었다.

같은 조건에서 NU 형태 패널 요소의 경우 UNF 형태 패널 요소의 경우 보다 더욱 좁게 분포하고 있어 입자가 가장 원활하게 통과하는 패널 요소는 NU형태인 것으로 나타났다.

이는 Fig. 9와 11, 13을 살펴보면 더욱 잘 알 수 있는데, NF 형태 패널 요소의 경우 유속 분포가 $13\ \text{m/s}$ 와 $18\ \text{m/s}$ 에 집중되어 있어 이 중간에 해당하는 속도분포를 찾기가 어려운 것으로 보인다.

Fig. 7 Position distributions of particles according to time variations in NU type panel elements

Fig. 8 Flow velocity distributions of particles according to time variations in NF type panel elements

Fig. 9 Flow velocity distribution of particles shown at the front side of NF type panel elements

Fig. 10 Flow velocity distributions of particles according to time variations in UNF type panel elements.

Fig. 11 Flow velocity distributions of particles shown at the front side of UNF type panel elements

Fig. 12 Flow velocity distributions of particles according to time variations in NU type panel elements

Fig. 13 Flow velocity distributions of particles shown at the front side of NU type panel elements

반면에 UNF 형태 패널 요소는 13 m/s에서부터 18 m/s까지 유속이 고르게 분포되는 것을 알 수 있고 NU 형태 패널 요소는 UNF 형 패널 요소처럼 유속이 고르게 분포되어 있음과 동시에 유속이 16 m/s에서부터 22 m/s까지 비교적 높게 형성되어 있다.

4. 결 론

침적입자를 고려한 탈황설비용 GGH 패널 요소의 유동해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, NF, UNF, NU 형태에 대한 패널 요소의 온도분포를 비교한 결과, 공기 중에 수분이 함유되어 있지 않을 경우, 모두 높은 온도분포를 보이고 있으며 NU 형태가 NF, UNF 형태보다 높은 온도분포를 보이고 있다. 패널 요소의 형태에 있어 전열면적이 넓은 패널 요소 형태인 NU 형태가 여타 형태보다 열전달이 잘 이루어진 것으로 사료된다.

둘째, NF, UNF, NU 형태에 대한 패널 요소의 속도분포를 비교한 결과, NF 형태는 공기 중에 수분이 함유되어 있지 않을 경우 최대 속도가 약 0.6 m/s 빠른 속도를 보이고 있으며, 반면에 UNF 형태는 0.8 m/s, NU 형태는 1.3 m/s 느리게 나타났다. 수분이 함유되어 있는 경우 UNF 형태에서의 속도가 동일조건인 NF 형태보다 최대속도가 약 1 m/s 빠른 속도를 보였으며, 같은 조건에서 NU 형태는 UNF 형태 보다 약 1.7 m/s 빠르게 나타나 가장 빠른 유속 특성을 보였다.

셋째, NF, UNF, NU 형태에 대한 패널 요소의 압력차를 비교한 결과, NF 형태는 공기 중에 수분이 함유되어 있지 않을 경우 압력차가 약 240 Pa이고 공기 중에 수분이 함유되어 있는 경우는 약 270 Pa이며, UNF 형태는 공기 중에 수분이 함유되어 있지 않을 경우는 압력차가 약 309 Pa이고 공기 중에 수분이 함유되어 있는 경우는 약 344 Pa로 계산되었다. NU 형태는 공기 중에 수분이 함유되어 있지 않을 경우는 압력차가 약 454 Pa이고 공기 중에 수분이 함유되어 있는 경우는 약 523 Pa로 계산되었다. 상기 결과들은 입·출구 압력차의 기준치인 686.47 Pa의 범위를 초과하지 않으므로 설계기준에 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

넷째, 시간변화에 따른 입자들의 움직임을 살펴본 결과, NF, UNF 형태 패널 요소에 비해, NU 형태 패널 요소의 경우가 입자의 소통이 원활한 것으로 판단되었다.

다섯째, 시간변화에 따른 입자의 속도분포를 살펴본 결과, NU 형태 패널 요소의 경우 입자들이 좁은 영역에 분포되어 있어 NF, UNF 형태 패널 요소보다 전체입자가 통과하는 유속이 비교적 원활한 것으로 판단되었다.

최종적으로 세 가지 형태 중 NU와 UNF 형태의 일장일단이 있으나, 가공성, 생산단가 등을 고려했을 때 UNF 형태가 실용적이라고 판단되었다.

참 고 문 헌

- (1) Ahn, H. S., Kim, G. H., Park, S. S. and Park, K. G., 2005, "Consideration on Scale Forming in Gas-gas-heater of FGD System," Proceeding of the 40th Meeting of KOSAE, pp. 475-477.

- (2) Kim, M. T., Chang, S. Y., Oh, O. Y., Won, J. B. and Park, H. W., 2007, "Failure Analysis of Enamel-coated Carbon Steel Heating Elements of Gas-gas Heater for Flue Gas Desulfurization System," Engineering Failure Analysis, Vol. 14, pp. 686-693.
- (3) Ryu, B. J., Oh, B. J., Baek, S. G. and Kim, H. S., 2008, "Optimization of the Gas Gas Heater Element for Desulfurization Equipment through Flow Analysis," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 599-602.
- (4) Ryu, B. J., Kim, J. H., Kim, H. S., Lee, K. S. and Koo, K. W., 2009, "Fluid Analysis of GGH Panel Elements Considering Deposition Particles for Desulfurizing Equipments," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 601-605.
- (5) Choi, J. W. and Song, O. S., 2001, "Stability Analysis of Composite Material Pipes Conveying Fluid," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 8, pp. 314-321.
- (6) Gorlé, C., Van Beeck, J., Rambaud, P. and Van Tendeloo, G., 2009, "CFD Modelling of Small Particle Dispersion: The Influence of the Turbulence Kinetic Energy in the Atmospheric Boundary Layer," Atmospheric Environment, Vol. 43, Issue 3, pp. 673-681.
- (7) Zheng, Y., Wan, X., Qian, Z., Wei, F. and Jin, Y., 2001, "Numerical Simulation of the Gas-particle Turbulent Flow in Riser Reactor Based on $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p-\Theta$ Two-fluid Model," Chemical Engineering Science, Vol. 56, Issue 24, pp. 6813-6822.
- (8) Habib, M. A., Badr, H. M., Said, S. A. M., Ben-Mansour, R. and Al-Anizi, S. S., 2006, Solid-particle Erosion in the Tube End of the Tube Sheet of a Shell-and-tube Heat Exchanger," International Journal for Numerical Methods in Fluids Vol. 50, Issue 8, pp. 885-909.
- (9) Dassault Systems, S. A., 2006, "COSMOS-FloWorks Fundamentals," Dassault Systemes SolidWorks Corp.