

복합화력 탈질설비 성능향상을 위한 암모니아 주입 그리드의 최적설계 방안에 관한 연구

김 광 추[†], 박 만 흥, 윤 준 규*, 임 중 한*

한국전력기술(주), *경원대학교 기계·자동차공학과

A Study for Optimal Design of the AIG to Improve the Performance of DeNOx Facilities Installed in Combined Cycle Plant

Kwang Chu Kim[†], Man Heung Park, Kyu-Yoon Jun*, Jong-Han Lim*

Korea Power Engineering Company Inc. Gyeonggi-Do, 446-713, Korea

*Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University, Gyeonggi-Do 461-701, Korea

(Received July 2, 2007; revision received October 17, 2007)

ABSTRACT: A Study on the optimal design of the AIG(Ammonia Injection Grid) to improve the performance of DeNOx facilities in the HRSG(Heat Recovery Steam Generator) was performed using the CFD analysis. On the basis of the flow analysis results in the case that the AIG in the HRSG was not installed, the numerical analyses according to the positions of AIG, injection angles of nozzle and the control of ammonia injection quantity were carried out. The standard deviation according to factors was calculated for quantitative comparison. As the results, the AIG in the HRSG should be installed in the position that the uniform flow field shows through the exact flow analysis in the previous of the AIG design and installation. In the case the AIG has already been installed and non uniform flow distribution shows, it is recommended that flow correction device or KoNOx catalyst should be used. Otherwise, the control of ammonia injection angle or the ammonia injection quantity using the velocity profile analysis is demanded to accomplish the optimal performance.

Key words: Ammonia injection grid(암모니아 주입 그리드), DeNOx facilities(탈질설비), CFD analysis(전산유체역학 해석), Optimal design(최적설계)

1. 서 론

과거에 환경오염은 산업발전에 따른 불가피한 문제로 인식되어 왔으나, 현재는 세계 각국의 산업구조 고도화에 따른 화석연료의 사용 증가로 환경오염물질 배출량이 증가하여 지구 온난화,

광화학 스모그, 산성비에 의한 환경오염 및 생태계 파괴 문제가 국제적으로 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 국내외적으로 환경 규제 강화와 함께 배출 가스 규제가 심화되고 있는 실정이다.

배출가스의 대기 오염을 방지하기 위한 설비들 중에 탈질설비는 연소과정 및 화학공정에서 발생되는 질소산화물을 처리하는 설비이며, 여기서 질소산화물(NO_x)은 대기오염분야에서는 일반적으로 NO와 NO₂를 의미한다.^(1,2) 국내의 경우 질소

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-289-4293; fax: +82-31-289-4991

E-mail address: kkc@kopec.co.kr

산화물은 환경정책기본법 시행령 제 3조에 환경기준 항목으로 설정되어 있으며, 2010년부터는 사업자의 대기오염물질 배출허용기준을 대폭강화하고 배출시설을 세분화하기 위한 대기환경보존법 시행규칙 개정안을 입법 예고하고 있다.⁽³⁾ 이제 점진적으로 강화되어 가는 환경규제 관련 법규의 영향으로 인하여 에너지 및 환경 플랜트에서의 공해물질 배출의 최소화는 선택의 문제가 아닌 필수적인 문제가 되었다.

탈질 방법으로는 선택적 촉매 환원법(selective catalytic reductions, SCR)과 선택적 비촉매 환원법(selective non-catalytic reduction, SNCR) 등이 있으며, 설비비는 선택적 비촉매 환원법이 적게 소요되나 반응이 안정적이지 못하며 환원 능력이 떨어지므로, 배출 규제를 만족시키기 위해서는 선택적 촉매 환원법을 사용하는 것이 일반적이다.^(4,5) 최근에는 환원제로 NH_3 를 대체하여 저가의 에탄올 등을 사용하는 공정도 개발되고 있다.⁽⁶⁾

일반적으로 SCR 설비의 성능은 촉매 및 운전 조건들에 따라 좌우되며, SCR 성능에 영향을 미치는 운전조건들로는 반응온도, 공간속도, 반응시간, 배기가스 성분 및 NH_3 와 NO_x 간의 혼합 등이 있다.⁽⁷⁾ 이들 운전조건들 중 NH_3 와 NO_x 간의 혼합 제어가 다른 운전조건들에 비해 개선에 제약이 적고, 경제적이어서 비교적 용이하게 상당한 성능 향상을 달성할 수 있는 방법으로 알려져 있다.^(8,9)

암모니아와 배기가스 간에 혼합 제어를 위한 기존의 일반적인 방법들로는 촉매층에서의 암모니아 농도분포의 균일화를 위해 AIG 후단에 정적믹서(static mixer)를 설치하거나 촉매층 전단에 유동균일화 장치로서 안내깃(guide vane) 등을 설치하는 방법들이 제안되어 왔다.^(10,11) 따라서 정확한 유동 균일화를 이루기 위해서는 SCR이 설치되는 덕트내의 유동장 해석이 필수적이다. 그러나 SCR이 설치되는 실제 플랜트의 덕트는 공간적인 제약으로 인해 그 형상이 상당히 복잡하기 때문에 수계산에 의한 방법으로는 불가능하며 그 대안으로서 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)에 의한 방법이 도입되어 왔다.⁽¹²⁻¹⁵⁾

최근 국내 플랜트 오염방지설비 입찰이나 수주 시 유동장 해석 결과를 기본적으로 제출하도록

요구하고 있어 대기오염 방지 설비에 대한 유동장의 해석 및 제어기술은 경쟁력 확보를 위해 반드시 확보해야 할 핵심적인 요소기술이 되었다.

본 연구에서는 복합화력 열회수 보일러(heat recovery steam generator, HRSG)내 탈질설비 SCR 장치의 최적 설계 및 성능 향상을 보장하기 위한 암모니아 주입 그리드(ammonia injection grid, AIG)의 유동 최적화를 위한 연구가 수행되었으며, 이를 위해 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 해석 방법이 이용되었다.

2. 해석방법

2.1 해석모델

본 연구에서는 국내 복합 플랜트 중 수평형 HRSG를 전산해석 대상 표준모델로 선정하고 각종 형상의 크기 및 전산 입력 자료의 근거로 활용하였다. Fig. 1은 본 연구의 전산해석 대상 표준모델인 수평형 HRSG의 개략도이다. HRSG 입구 덕트로 유입된 배기가스(flue gas)는 환관 덕트를 지나 폭 6m의 HRSG 수평 덕트내에 설치된 관다발 형태의 각종 열교환기들과 열교환을 거친 후 최종적으로 연돌(stack)을 통해 대기중으로 빠져 나가게 된다. 이때 탈질제거 장치인 SCR 반

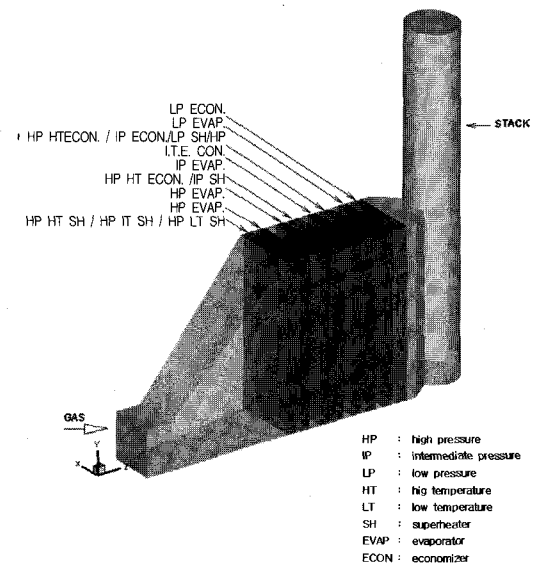


Fig. 1 Schematic for analysis model.

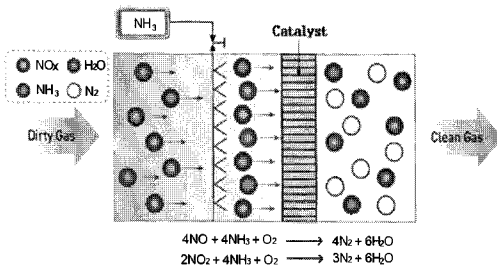


Fig. 2 DeNOx facilities system configuration.

용기를 설치할 수 있는 공간은 HP, IP 그리고 LP의 후단 공간이나 일반 탈질 촉매(catalyst)의 활성화 온도(300 °C 이상)를 감안하여 HP 후단에 설치되는 것이 일반적이다. 그러나 SCR 반응기를 HP 후단에 설치할 경우 반응온도에 있어서는 최적이나 공간이 협소하여 만족할만한 NOx 제거율을 얻지 못할 수도 있다. 이런 경우에는 170 °C ~ 450 °C의 넓은 영역에서도 활성을 나타내는 저온탈질 촉매를 사용한다면, IP후단의 저온영역에도 SCR 반응기를 설치할 수 있다.^(2,16)

암모니아를 분사시키는 AIG는 SCR 장치 전단에 설치되게 되며, AIG를 통과한 배기가스는 AIG를 통해 분사된 암모니아와 결합한 후 SCR 반응기의 촉매층을 통과하면서 Fig. 2와 같은 반응을 통해 질소와 수증기로 환원된다.

따라서 이러한 탈질설비의 경우 우수한 촉매가 확보되었을 경우, 암모니아와 배기가스가 만나는 지점 및 촉매층과 만나는 SCR 반응기 전단에서의 유동장 최적화는 탈질설비의 성능을 결정짓는 매우 중요한 변수이다.

2.2 지배방정식

암모니아 주입그리드가 설치되는 HRSG 덕트 내의 유동을 정상상태 비압축성 3차원 유동으로 가정하고 질량보존방정식, 운동량보존방정식 및 에너지보존방정식이 지배방정식으로 사용되었다. 또한 농도장 해석을 위해 화학종 보존방정식이 사용되었다. 이때 화학종 간에 화학적 반응은 없다고 가정하였다. 난류모델로는 재순환 유동 및 급격한 유동 단면적의 변화가 일어나는 난류 유동특성을 비교적 타당하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 RNG $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.⁽¹⁷⁾

일반형 보존방정식에서 비정상항을 제외한 보존방정식은 식(1)과 같이 대류항(convection term), 확산항(diffusion term) 및 생성항(source term)으로 이루어진 형태로 나타낼 수 있다.⁽¹⁸⁾

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (1)$$

2.3 다공성 매질

본 연구에서는 HRSG내의 관군의 형태의 과열기(superheater), 재열기(reheater), 절탄기(economizer) 등의 열교환기는 다공성 매질(porous media)로 처리하였다.

전산해석과정에서 다공성 매질은 운동량 방정식의 생성항(momentum source term)으로 처리하였으며, 식(2)와 같이 점성에 의한 손실항(viscous loss term)과 관성에 의한 손실항(inertial loss term)의 합으로 이루어진다.

$$S_i = \nabla p = \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho u_j |u_j| \quad (2)$$

여기서 S_i 는 운동량 방정식의 각 방향(x, y or z)에 대한 생성항을 나타낸다. 그리고 D 와 C 는 각각 점성저항계수(viscous resistance coefficient)와 관성저항계수(inertial resistance coefficient)이다. 이러한 생성항의 계산이 다공성 영역에서의 압력강하량(pressure drop)을 결정하게 되며, 식(2)과 같이 각 셀(cell)에서의 유체의 속도에 비례하여 나타나는 것을 알 수 있다.

2.4 경계조건

Table 1은 과열기, 재열기 및 절탄기 등의 열교환기들에 대한 체적, 압력손실 및 온도 조건에 대한 설계값들로서, 다공성 매질로 처리한 열교환기들의 유동 저항계수값 및 열손실량에 대한 산출의 근거로 활용되었다.

Fig. 3은 설계인자들에 따른 전산해석 수행을 위해 모델링된 암모니아 주입그리드를 나타내고 있다. AIG의 최적 위치 선정을 위해 4개의 지점에 AIG가 모델링되었으며, 설치 위치는 입구덕트를 지난 확관 덕트의 중간, 고압증발기(HP ev-

Table 1 Pressure and temperature conditions

Item	HT/IT/ LT SH	HP EVAP. (I, II)	HPHT ECO. IP SH	IP EVAP.
Pressure Drop, mmH ₂ O	30	69	32	27
Inlet Temp. °C	531	464	314	271
Outlet Temp. °C	464	314	271	232
Volume m ³	39.7	41.2	51.5	41.2
Item	HPIT ECO. IP ECO. LPSH, HPLT ECO	LP EVAP.	LP ECO.	
Pressure Drop, mmH ₂ O	24	24	25	
Inlet Temp. °C	232	208	183	
Outlet Temp. °C	208	183	105	
Volume m ³	50.9	41.8	50.9	

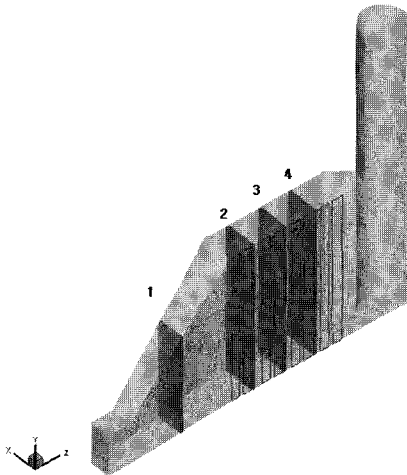


Fig. 3. AIG modeling and positions.

aporator) 후단, 고압열탄기(HP economizer) 후단 및 저압과열기(LP superheater) 후단으로 가정하였다. 또한 노즐의 최적 분사를 위해 확산 덕트 및 고압증발기 후단의 AIG는 덕트의 하단으로부터 상단까지 5개의 영역으로 균등하게 분할하여 모델링하여 위치에 따른 암모니아 분사량을 조절할 수 있도록 하였다. AIG 부분의 모델링은 다공성 매질과 같이 유체 영역으로 설정하되 압력강하 및 열손실은 무시하고 운동량 방정식의 생성항을 통해 암모니아가 주입되도록 하였다. 암모니

아의 공급량은 134 kg/hr로 가정하였으며 회석조건은 5%의 조건으로 정하였다. HRSG 입구덕트를 통해 유입하는 배기가스의 속도조건은 40.1245 m/s이며 온도조건은 804 K이다. 유입된 배기가스는 연돌(stack)을 통해 빠져나가며 연돌의 출구조건은 대기압의 일정 압력 경계조건을 부여하였다.

2.5 수치해석

Fig. 4는 수평형 HRSG의 전산해석을 위해 모델링된 격자망을 도시하고 있다. 본 연구의 모델링에 사용된 HRSG 설비가 축대칭인 점을 고려하여 HRSG 전체영역의 1/2만을 모델링하고, 대칭부분은 축대칭 조건(symmetric condition)을 부여하였다. 그밖에 모든 벽에 대해서는 점착조건(no slip condition)을 부여하였으며, 벽면에서의 난류 유동에 대한 정확한 해석을 위해 벽면에 격자가 밀집될 수 있도록 배려하였다.

전산해석을 위해 유한체적법을 사용하는 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.0 코드가 사용되었으며, 수치계산 시 대류항의 처리는 상류도식(upwind scheme)을 사용하였고, 압력장에 대해서는 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations) 알고리즘이 사용되었다.⁽¹⁸⁾

수치계산에서 해의 수렴을 판정하기 위해 질량 생성, 속도장 및 난류장에 대해서는 오차값이 1.0 ×

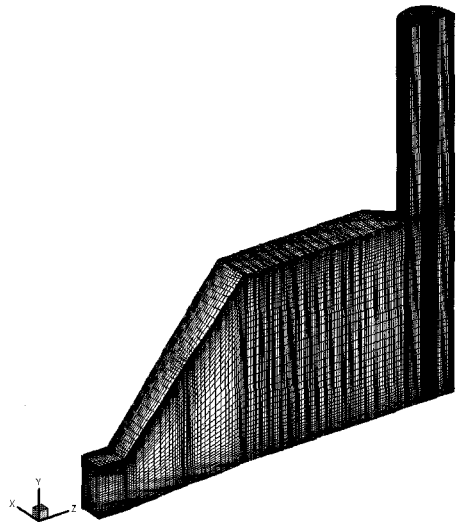


Fig. 4 Grid system.

10^{-3} 의 값을 온도장 및 농도장에 대해서는 1.0×10^{-6} 이하의 값을 가질 때를 수렴판정 조건으로 정하였다. 반복계산 시 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향 이완 (under relaxation)을 도입하였다.

3. 결과 및 고찰

HRSG 덕트내에 설치되는 탈질설비 SCR 장치의 성능 향상을 위한 AIG에서의 유동최적화에 관한 전산 열유동 해석 결과가 고찰되었다. 우선 AIG가 설치되지 않은 경우에 대한 열유동 해석을 통해 HRSG내 유동장의 특성을 고찰하고, 이를 토대로 AIG의 위치, 노즐의 분사각도 및 노즐 영역의 분배를 통한 분사량 조절 등의 주요 설계 인자에 따른 영향이 고찰되었다.

각 주요 인자에 따른 유동장의 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 해석결과의 contour를 통한 가시화뿐만 아니라 식(3) 및 식(4)와 같이 정의된 표준편차를 이용하여 속도 및 농도값에 대한 균일도를 수치적으로 비교, 검토하였다.

$$S_w = \sqrt{\frac{\int (w - \bar{w})^2 dA}{A}} / \bar{w} \times 100[\%] \quad (3)$$

여기서, w 는 주유동 방향의 속도이며, \bar{w} 는 평균속도 값을 나타낸다.

$$S_c = \sqrt{\frac{\int (c - \bar{c})^2 dA}{A}} / \bar{c} \times 100[\%] \quad (4)$$

여기서, c 는 농도이며, \bar{c} 는 평균농도 값이다.

3.1 AIG가 설치되지 않은 경우의 유동장

본 절에서는 우선 HRSG내에 AIG가 설치되지 않은 경우에 대한 열유동 해석을 고찰하였다. Fig. 5 및 Fig. 6은 축대칭 단면에서의 압력분포 및 온도분포를 도시하고 있으며, Table 2는 CFD로 계산된 결과값을 설계값과 비교한 결과이다. 다공성 매질로 처리한 HRSG내 과열기, 재열기 및 절탄기 등의 압력손실 및 열손실 값들이 설계값과 비교하였을 때 타당하게 처리되었음을 확인할 수

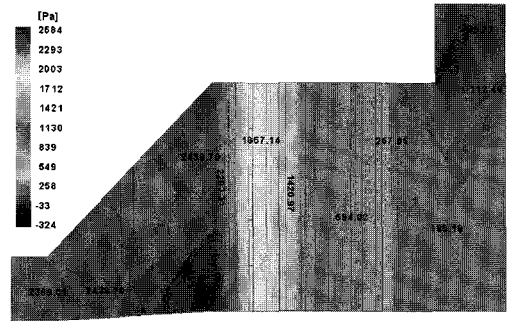


Fig. 5 Pressure contour in case of no AIG.

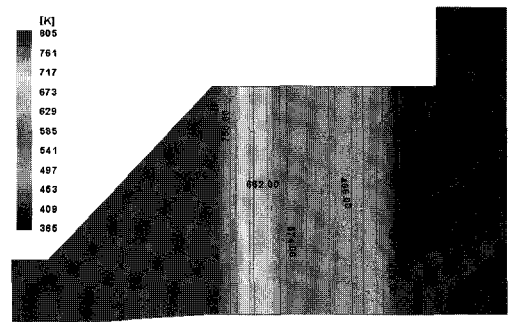


Fig. 6 Temperature contour in case of no AIG.

Table 2 Comparison of CFD results with design data.

Item	ΔP [Pa]		T_{in} [K]	
	CFD	Design	CFD	Design
HT/IT/LT SH	290	294	530	531
HP EVAP. (I, II)	680	676	465	464
HPHT ECO. IP SH	330	314	316	314
IP EVAP.	260	265	275	271
HPIT ECO. HPLT ECO	240	235	235	232
LP EVAP.	240	235	211	208
LP ECO.	250	245	185	183
Stack	218	-	107	105

있다.

Fig. 7은 HRSG내 배기가스 유입에 따른 유적선(pathline) 분포이며, Fig. 8은 축대칭 단면에서의 주유동 방향(z방향) 속도성분에 대한 contour

이다. 입구 덕트를 지난 배기가스는 확관 덕트를 지나면서 기하학적 특성에 따라 전체적인 유동이 확관 덕트의 하단부에 치우쳐 흐르게 되며, 이러한 편향된 유동은 유동 저항체인 열교환기를 만나면서 첫 번째 열교환기 전단에서 상당히 큰 재순환 영역(recirculation zone)과 함께 급격한 상승유동을 보여주었다. 반면에 열교환기를 지나가는 유동은 상당히 빠르게 균일화하려고 하는 경향이 나타남을 볼 수 있다.

유동장의 정량적인 고찰을 위하여 Fig. 9에 축대칭 단면에서의 임의의 3지점에 대한 덕트의 높이에 따른 주유동 방향 속도성분의 프로필(profile)을 나타내었다. ref 1은 확관 덕트의 중간 지점을 나타내며, ref 2는 고압가열기 전단을 나타내고, ref 3는 고압증발기 후단을 나타낸다. 확관 덕트의 중간지점인 ref 1에 대한 결과를 살펴보면, 기하학적 특성으로 인해 주유동은 덕트의 하단부로 치우쳐 흐르게 되며 이로 인해 덕트의 상단부에는 큰 재순환 영역이 발생하였음을 볼 수 있다. 이러한 확관 덕트에서의 재순환 유동에 의한 영향은 고압가열기 전단에까지 미치게 되어 고압가열기 전단에서는 속도 프로필이 S자 형태를 띄고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이러한 S자 형태의 속도 프로필은 고압증발기를 지나면서 상당히 균일화되어진 것을 알 수 있다.

3.2 AIG 설치위치에 따른 영향

본 절에서는 HRSG내 AIG의 설치위치에 따른 유동장 해석 결과를 고찰하였다.

Fig. 10은 정량적인 비교를 위하여 Fig. 3에 도

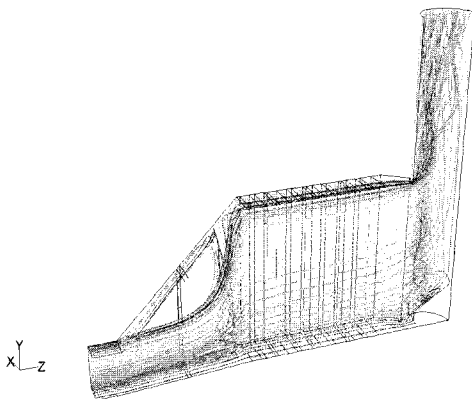


Fig. 7 Pathline in case of no AIG.

시된 각 위치에 따른 동일 지점에서 측정된 암모니아 농도의 균일도를 비교한 결과이다. 균일도의 측정 위치는 HRSG내 모든 열교환기를 통과

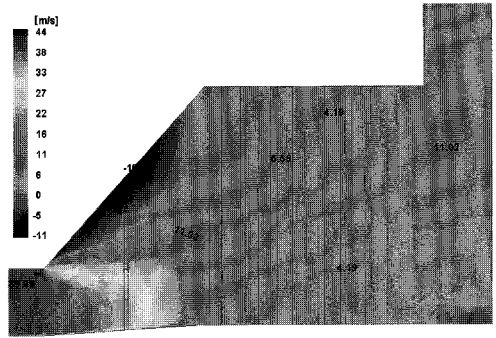
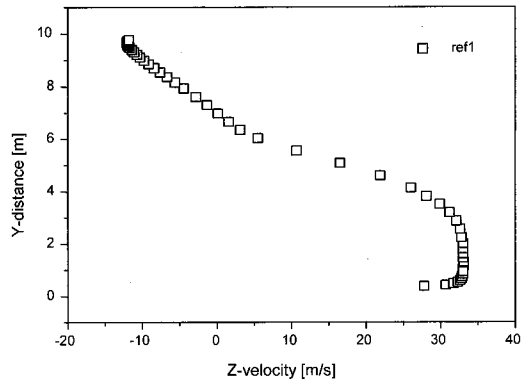
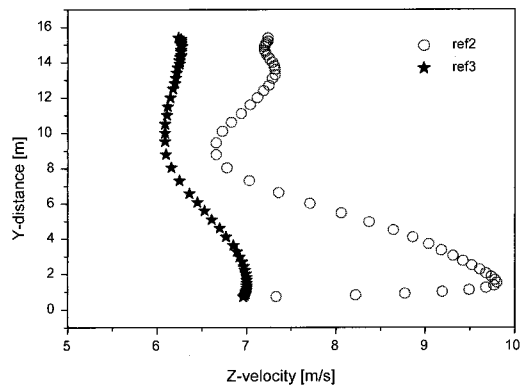


Fig. 8 Main flow direction velocity contour in case of no AIG.



(a)



(b)

Fig. 9 Main flow direction velocity profiles in case of no AIG

한 후인 저압절탄기 후단의 단면이 선정되었으며, 정량적인 균일도의 수치는 앞서 식(16)에 정의된 표준편차를 이용하였다. 균일도에 있어서 확관부에 AIG가 설치된 경우인 1의 경우가 가장 균일도가 좋지 않게 나타났으며, 고압가열기 후단에 AIG를 설치한 경우인 3의 경우가 가장 균일도가 좋은 것으로 나타났다. 3의 경우보다 더 후단에 AIG를 설치한 4의 경우는 3의 경우보다 다소 좋지 않게 나타났는데 이는 후단에 설치된 연돌의 영향으로 인해 유동의 균일도가 다소 떨어지기 때문으로 판단된다.

Fig. 11의 각 AIG 위치에서의 주유동 방향 속도성분의 표준편차를 보면 3의 경우가 약 5%로 가장 낮게 나타나며, 다음으로 4의 경우가 끝으로 2의 경우가 9%로 가장 높게 나타났다. 이는 Fig. 10의 암모니아 농도장의 결과와 완전히 일치하는 결과로서 AIG 설치위치에서의 암모니아와 혼합하는 주유동 방향 속도성분의 균일도가 성취되어야만 최적의 설비가 보장 될 수 있다는 것을 보여준다.

이상의 4가지 설치 위치에 따른 유동장 해석 결과를 토대로 판단할 때, HRSG 덕트의 형상이 다소 복잡한 기하학적 형태를 가진 경우에 열교환기 이전의 확관 덕트부에 AIG를 설치하기 보다는 다수의 열교환기를 거치면서 상당히 유동이 균일화되고, 연돌에 의한 영향이 가장 작게 나타나는 지점에 AIG를 설치하는 것이 탈질설비의 최적성능을 확보할 수 있을 것이다.

다만, 탈질촉매는 온도에 직접적인 영향을 받으므로 AIG 성능의 최대화가 탈질효율의 최대화를 의미하지는 않기 때문에 촉매의 반응 온도를 고려하여 AIG의 위치를 선정하여야 한다.

일반적인 탈질설비의 경우는 촉매가 반응하는 온도를 높이기 위해 열교환기 전단에 AIG를 설치해야만 하는 경우에는, 가이드 베인(guide vane) 등과 같은 적절한 유동 균일화 장치(flow correction device)의 설치를 통해 유동 균일화를 성취한 후에 AIG를 설치하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 또한 최근 개발된 저온탈질촉매(KoNOx catalyst)의 경우는 기존의 탈질설비보다 넓은 온도 영역인 170℃~400℃의 온도에서도 촉매가 적절하게 반응하므로 본 AIG 설치 위치에 따른 유동장 해석 결과를 토대로 설치위치를 결정하는 것이 가능할 것이다.^(2,16)

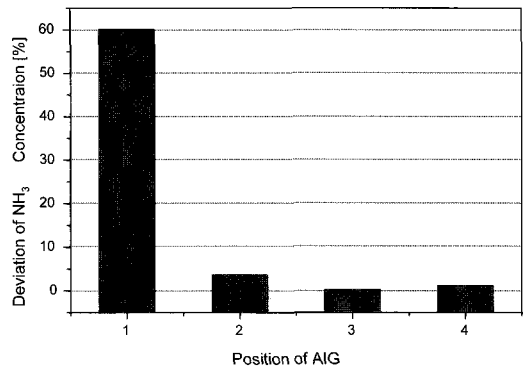


Fig. 10 Variation of NH₃ concentration deviation with the installed AIG position.

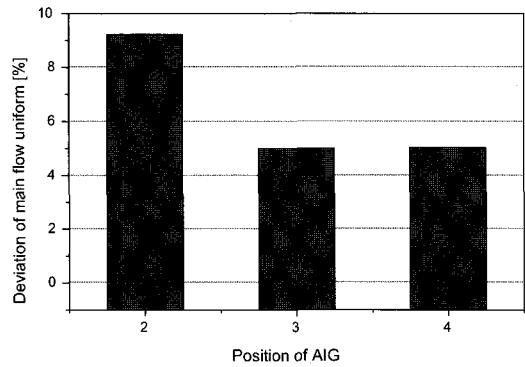


Fig. 11 Variation of main flow velocity deviation with the installed AIG position.

3.3 AIG 노즐의 분사각도에 따른 영향

본 절에서는 AIG 노즐의 분사각도의 변화에 따른 암모니아 농도장의 변화를 고찰하였다. AIG 노즐의 위치는 앞서 설치위치에 따른 변화 조건 중 2의 경우인 고압증발기 후단에 AIG가 설치된 경우를 기본 모델로 하여 노즐의 분사각도를 15°와 30°인 경우로 바꾸어 가며 전산해석을 실시하였다. 암모니아 농도장의 균일도는 모든 각도에 대하여 저압절탄기 후단에서 계산되었다.

Fig. 12는 동일한 설치위치에서 AIG 분사 노즐의 각도를 달리한 경우의 전산해석 결과이다. 분사각도가 본 해석 조건에서 가장 하향인 -30인 경우가 암모니아 농도값의 편차에 있어 가장 작게 나타났으며, 이후 암모니아를 노즐을 상향으로 바꾸어 가며 분사할수록 농도값의 편차는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 본 HRSG내 배기

가스의 유동이 동일 횡단면에서 덕트의 상부보다는 하부의 유량이 상대적으로 큼으로 인해 암모니아 분사량을 하부로 편중하여 분사하는 것이 암모니아 농도장의 균일화에 기여하는 것으로 판단할 수 있다.

3.4 AIG 노즐 분사량 조절에 따른 영향

본 절에서는 HRSG내 유동의 불균일로 인해 상하간 높이마다 배기가스의 유속이 다르게 나타나는 점에 착안하여 HRSG내 동일 지점 횡단면에 대해 높이별로 AIG 노즐들을 그룹화하고 세분화하여 각 그룹마다 다른 양의 암모니아 분사하여 이에 따른 유동장 변화를 고찰하였다. AIG의 설치위치는 고압증발기 후단에 설치하는 것으로 가정하였으며, 암모니아 농도장의 균일도를 고찰하기 위한 표준편차의 계산은 저압절탄기 후단면에 대하여 수행하였다. AIG 노즐은 Fig. 13과 같이 덕트 하단에서부터 상단까지 5개의 그룹으로 균등하게 분할하였다.

Fig. 14는 전산해석을 수행하여 구한 AIG 설치 위치에서의 덕트 하부에서 상부까지의 각 노즐 그룹마다의 주유동 방향 속도성분의 평균값이다. 1번 노즐군의 경우가 평균 속도값에 있어 가장 큰 값을 보여주었으며, 2번, 5번, 3번, 4번순으로 평균 속도의 크기가 감소하여 나타났다. 1번 및 2번 노즐군의 경우는 1번에서 5번까지의 단면 전체에 대한 평균 속도보다 큰 값이 관찰되었으며, 3번, 4번 및 5번의 경우는 전체 평균 속도보다 작은 값을 나타내었다. 이러한 노즐 군마다의 배

기가스의 평균 속도값의 차이는 AIG를 통한 암모니아 분사 시 위치마다 불균일한 농도장을 만들게 된다.

따라서 본 해석에서는 이러한 위치마다의 속도장의 불균일도를 이용하여 암모니아 농도장의 균일도를 증가시키기 위한 해석이 수행되었다. Fig. 14의 전체 평균에 대한 각 노즐군마다의 평균 속도값의 분포와 반비례하도록 노즐군마다 다른 암모니아의 양을 분사하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 15는 각 노즐군마다 암모니아의 분사량을 조절하여 분사한 경우에 대한 저압절탄기 후단에서의 표준편차에 대한 계산 결과이다. 상대적으로 비교를 위해 5개의 노즐군 모두에서 동일한 양이

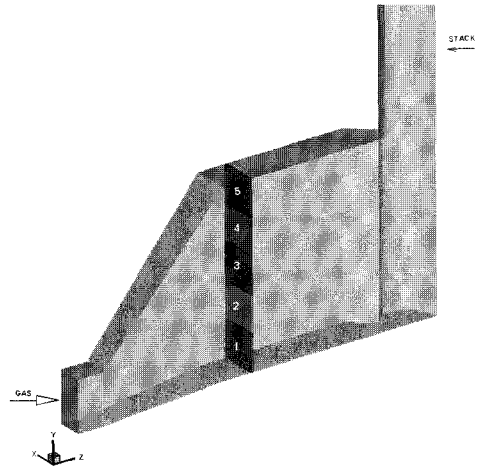


Fig. 13 Schematic for grouping of the AIG nozzles to control the ammonia injection quantity.

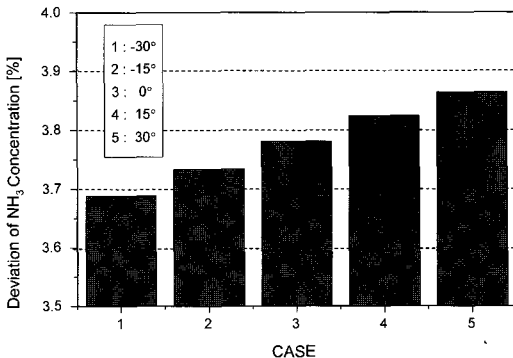


Fig. 12 Variation of NH₃ concentration deviation with the injection angle in AIG.

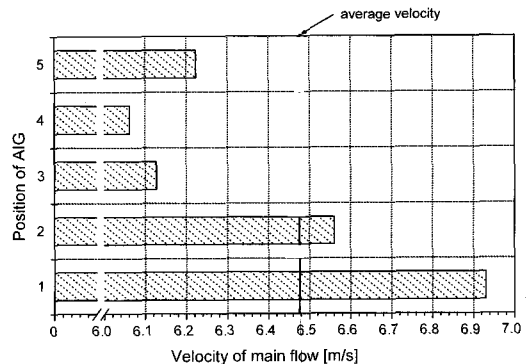


Fig. 14 Velocity profile with the position of the AIG nozzle group.

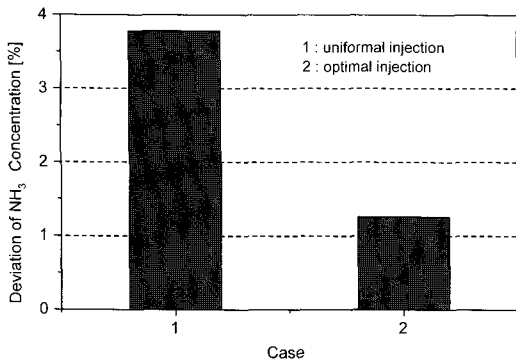


Fig. 15 NH₃ concentration deviation with the injection quantity control.

분사되는 경우와 비교 도시하였다. 그래프에서 1번의 경우가 모든 노즐군에서 동일하게 암모니아가 분사된 경우이며, 2번의 경우가 속도 프로필에 근거하여 각 노즐군마다 암모니아 분사량을 조절하여 분사하는 경우이다. 속도 프로필에 근거하여 각 노즐군마다 암모니아 분사량을 조절하여 분사한 2번의 경우가 균일하게 암모니아를 분사한 1번의 경우보다 암모니아 농도의 표준편차가 2.3% 정도 감소하여 나타났다. 이는 HRSG내의 정확한 유동장 해석을 통해 각 지점마다의 속도 프로필을 구하고 이를 토대로 위치마다 적절하게 암모니아 분사량을 조절함으로써 암모니아 농도장의 균일화를 이룰 수 있으며, SCR 설비의 성능을 최대로 보장할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 이용하여 SCR 탈질설비의 최적 성능을 보장하기 위한 암모니아 주입설비(AIG)의 유동최적화에 대한 전산해석이 수행되었다.

우선 AIG가 설치되지 않은 경우에 대한 유동장 해석을 통해 HRSG내의 기하학적 특성에 따른 유동장의 특성을 파악하고, 이를 토대로 AIG 설치위치, 노즐의 분사각도 및 각 위치마다의 암모니아 주입량의 조절을 통한 암모니아 농도장의 변화를 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) AIG의 설치위치로는 속도분포가 복잡하게 나타나는 확관 덕트부에 설치하기보다는 다수의 열교환기를 거치면서 연돌의 영향을 비교적 덜 받

는 고압가열기 후단에 설치하는 것이 바람직하다. 다만, 탈질촉매는 온도에 직접적인 영향을 받으므로 AIG 성능의 최대화가 탈질효율의 최대화를 의미하지는 않기 때문에 촉매의 반응 온도를 고려하여 AIG의 위치를 선정하여야 한다.

2) 노즐의 분사각도에 있어서는 확관부에서의 재순환 유동에 의한 영향을 고려하여 분사각도를 하단으로 설치한 것이 농도장의 균일도를 향상시킬 수 있다.

3) 노즐을 통한 암모니아 주입에 있어서는 모든 위치에서 암모니아의 주입량을 균일하게 분사하기보다는 위치마다 노즐들을 그룹화하고 위치에 따른 속도분포와 반비례 하도록 암모니아 주입량을 조절하는 것이 암모니아 농도장의 균일도를 증대시킬 수 있다.

본 연구결과들의 고찰을 토대로 탈질설비의 성능을 증대시키기 위해서는 우수한 촉매가 확보되었을 경우, AIG 설치에 앞서 HRSG내의 정확한 유동장 해석이 이루어져야 하며, 이를 통해 AIG의 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다. 즉, 정확한 유동장 해석을 통해 유동이 균일하게 나타나는 지점에 AIG를 설치하여야 하며, 이미 AIG가 설치되어 있으나 배기가스의 속도 분포가 불균일하게 나타나는 경우는 가이드 베인(guide vane) 등과 같은 유동 균일화 제어장치 등의 설치를 통해 유동 균일화를 선행하거나 최근 개발된 넓은 온도 영역에서도 촉매가 적절하게 반응하는 저온탈질촉매(KoNOx)의 사용을 통해 설치 위치를 바꾸는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 유동 균일화나 촉매의 변경이 어려운 경우에는 AIG 설치 지점에서의 유동장 해석에 나타나는 속도분포 등을 토대로 노즐의 분사각도를 조절하거나 각 위치마다의 암모니아 분사량을 적절하게 조절하여 분사하는 것이 HRSG내 탈질설비의 성능을 극대화할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. NIER, 1998, Air pollutant emission data.
2. Hong, S. H., 2005, KoNOx catalyst technology for LNG combined cycle plant, News & Information for Chemical Engineers, Vol. 23, No. 4, 404-409.

3. Ministry of Environment, 2007, ME Bulletin 2007-229.
4. Cobb, D., Glatch, L., Ruud, J. and Snyder, S., 1991, Application of selective catalytic reduction (SCR) technology for NO_x reduction from refinery combustion sources, Environ. Prog., Vol. 10, No. 1, pp. 49-59.
5. Byrne, J., Chen, J. and Speronello, B., 1992, Selective catalytic reduction of NO_x using zeolites for high temperature applications, Catal. Today Vol. 13, No. 1, pp. 33-42.
6. Gutberlet, H. and Schallert, B., 1993, Selective catalytic reduction of NO from coal fired plants, Catal. Today, No. 16, pp. 207-236.
7. Ralf, S., Cindy, K. and Edward, H., 2003, Enhance ammonia distribution for maximum SCR performance, Inst. Clean Air Comp. Forum 2003.
8. Freek, K., Lydia, S., Nico, J.J.D. and Jacob, A.M., 1993, Kinetics of the selective catalyst reduction of NO with NH₃ over Mn₂O₃-WO₃/Al₂O₃, Ind. Eng. Chem. Res. 445.
9. Jiri, S., Natale, F., Pio, F., Enrico, T. and Fiorenzo, B., 1993, Selective reduction of NO_x by NH₃ over honeycomb deNO_xing catalysts, Ind. Eng. Chem. Res. 1053.
10. Kenneth, J.F. and John, H.C., 1993, Design guidelines for NH₃ injection grids; Optimize SCR NO_x removal. Oil Gas J. 48.
11. Kevin, R., Milobowski, M. and Wooldridge, B., 1999, Perspectives on ammonia injection and gaseous static mixing in SCR retrofit applications, In EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium, Washington, DC.
12. Adams, B., Crener, M., Valentine, J., Bhamidipati, V., Letcavits, J., O'Connor, D. and Vierstra, S., 2002, Use of CFD modeling for desing of NO_x reduction systems in utility boilers, Proceeding of the 2002 International Joint Power Generation Conference, ASME, Phoenix, AZ.
13. Kevin, R., Mel, A. and Michael, V., Numerical modeling for design optimization of SCR applications, ICAC NO_x Forum Washington D.C.
14. Sayre, A. and Milobowski, M., Validation of numerical models of flow through SCR units, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium, Washington D.C.
15. Bae, J.H, Kim, K.C., Park, M.H., Park, K.S. and Lee, J.W., 2000, A Study on a uniformity of flow field in a duct cooler of FGD system, SAREK J., Vol. 12, No. 12, pp. 120-130.
16. WILCOX, D.C., 1983, Turbulence Modeling for CFD, La Canada, CA : DCW Industries, Inc.
17. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere.
18. KOPEC, www.konox.co.kr.