

배가스 탈질 설비의 유동해석 사례

고영건 · 류창국 · 최상민*

Numerical Simulation for Flow Optimization of De-NOx Selective Catalytic Reactor

Young Gun Go, Changkook Ryu and Sangmin Choi

Key Words: Flow Simulation, SCR, Guide vanes, NOx, Flow uniformity

Abstract

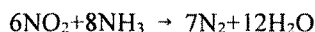
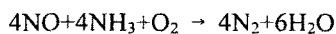
For the design of selective catalytic reactors of NOx by NH₃, engineering approach can be performed to determine the reactor shape, mixing device and NH₃ injection system. This study shows the optimization of guide vanes to improve the flow pattern near the catalyst layer of SCR in a utility boiler. By varying their spacings and shapes, flow performance of guide vanes was analyzed to achieve an uniform velocity distribution which increases the NOx conversion efficiency, and a flow direction normal to the layer which minimises the erosion by the dust in the flue gas. Including these results, experimental and numerical studies for the SCR design were discussed.

기호설명

- a Geometric surface area of catalyst layer, m²/m³
- C_i Concentration of species i , mol/m³
- k_c Intrinsic rate constant, s⁻¹
- K_{NH_3} Adsorption equilibrium constant of NH₃, m³/mol
- Q Flow rate of flue gas, m³/h
- u_{av} Area velocity, m/h
- V_c Volume of catalyst layer, m³

1. 서론

선택적 촉매 반응을 이용해 NOx를 제거하는 탈질설비인 SCR(Selective Catalytic Reactor)은 화력 발전, 폐기물 소각 등 대규모 연소 설비에 많이 이용되고 있다. 연소과정에서 발생한 NOx는 NH₃와 혼합되어 촉매층을 지나면서 질소로 환원되며 주요 반응은 다음과 같다[1].



* 한국과학기술원 기계공학과

촉매층은 연소가스와의 접촉을 최대화하기 위해 허니콤의 형태를 가지며, 촉매의 재질은 상용으로 많이 이용되는 V_2O_5/TiO_2 와 $MnOx/Al_2O_3$, $Fe-TiO_2-PILC$ 등이 알려져 있다.

촉매 반응은 연소가스의 O_2 , H_2O , SO_2 농도, NH_3 와 NO_x 비율, 작동온도와 유속, 촉매층의 형태 등에 의해 결정된다 [2]. 상용 연소설비의 연소가스는 3% 이상의 O_2 농도, 5% 이상의 H_2O 농도를 가지며, 촉매층 내의 등은 및 완전히 발달된 층류유동을 가정할 때 환원반응은 다음의 식으로 단순화되어 표시된다[2].

$$-\frac{dC_{NO}}{dt} = k_c \frac{C_{NO}K_{NH_3}C_{NH_3}}{1 + K_{NH_3}C_{NH_3}}$$

실제의 경우 다른 설비와의 연결 및 공간 배치 등의 제한으로 인해 SCR 및 인입 덕트에서 NH_3 의 완전혼합과 균일한 분포를 얻는 것은 쉽지 않다. NH_3 의 혼합을 향상시키려면 NH_3 의 주입 방식과 주입 노즐 상부에 설치되는 배플의 형태가 주요한 인자이다. 촉매층 내의 배가스 면적속도($u_{av}=Q/V_{ca}$)는 NO_x 전환율(x)과 다음의 관계에 있다.[3]

$$-\ln(1-x) = k_{NO_x}/u_{av}$$

따라서 균일한 유속 분포는 반응 효율의 증가로 직결되며 SCR 및 인입 덕트 형상과 덕트 굴곡부에서의 가이드 베인 설치 등이 중요한 인자가 된다.

이 인자들은 설계 단계에서 모형 실험 및 전산해석을 통해 최적화하는 것이 필요하다. 류 등[4]은 소각 플랜트 SCR의 덕트 가이드 베인에 대해 전산해석을 통해 설계안을 검토하고 축소모형에서 촉

매층 전단의 유속 측정을 통해 이를 확인하였다. 엄 등은 전산해석을 통해 화력발전소의 암모니아 주입 노즐[5] 및 가이드 베인의 최적화[6]를 수행하였다. ..

이 연구는 SCR 및 덕트 설계에 사용되는 전산해석의 기법과 평가 방식을 사례를 통해 보이기 위한 것이다. 설계 인자 중 덕트 굴곡부에 설치되는 가이드 베인의 배치 및 형태에 대해 유동 형태가 탈질 반응에 주는 영향을 촉매층에서의 유동의 균일도와 입사각로부터 평가하였다. 그리고 SCR 설계에 적용될 수 있는 전산해석을 포함한 공학적인 접근 방식을 검토하였다.

2. 해석 대상 및 방식

2.1. 대상 SCR

이 연구의 대상은 운전중인 화력 발전소에 추가될 탈질설비로서 Fig. 1에 형상이 나타나 있다. 입구 덕트의 폭은 4m, 촉매층 높이는 8m이며, 깊이는 7.9m인데

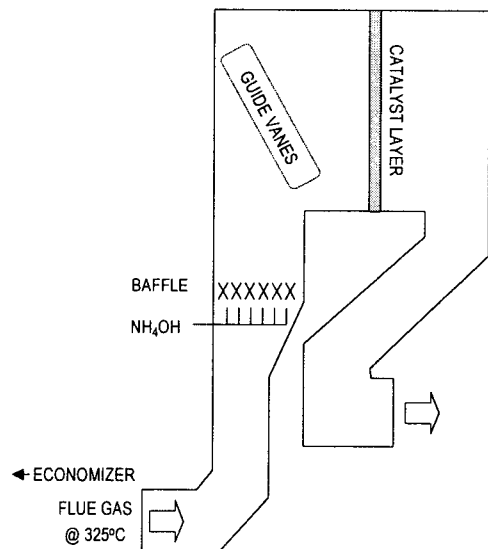


Fig. 1 Schematic of SCR and inlet duct

길이 방향으로도 골짜기 존재한다. 입구에서 연소가스의 온도는 325℃, 유속은 15.6m/s이다. 기존 설비의 보일러 후단에 설치되므로 입구 및 후단 덕트의 굴곡이 매우 심하고 축매층 진단의 길이가 짧다. 따라서, 골짜기부의 가이드 베인의 역할이 매우 중요하다.

암모니아는 현재의 7.9m×4m 덕트에서 19×32개의 노즐을 통해 암모니아 수의 액적으로 분사되며 배플 역시 복잡한 구조를 가지기 때문에 전산해석을 통한 접근이 매우 어렵다. 따라서, SCR 및 덕트 전체 유동해석은 노즐 및 배플을 단순화하여 수행하고, 암모니아 주입 방식의 평가는 이 부분만의 세부 유동 해석을 수행하는 방식으로 나누어 접근하는

것이 적절하다.

이 연구의 목표는 형상에 의한 유동의 불균형을 파악하고 가이드 베인을 최적화하는 것이다. 이를 위해 암모니아의 주입은 고려하지 않은 상태에서 가이드 베인이 설치되지 않은 경우(Case 1)의 유동을 평가하고, 가이드베인 설치 방법을 단계적으로 향상시킨 총 4개의 경우(Case 2~5)에 대해 해석을 수행하였다.

2.2. 해석 방식

Fig. 1에 나타난 덕트 및 SCR 형상에 대해 396,291개의 격자를 이용해 모델링하였다. 축매층은 직접 모사가 어려우므로 실제 측정된 압력 손실을 모사한 다공층(porous media)로 모사하였다. 암모니

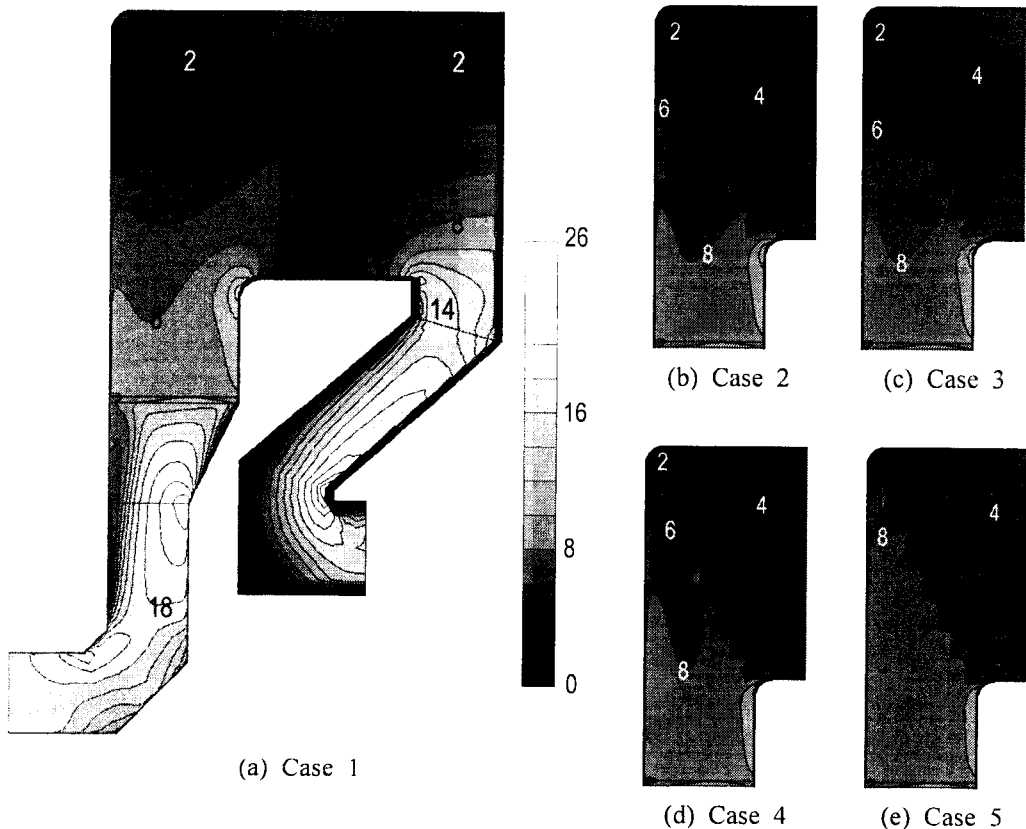
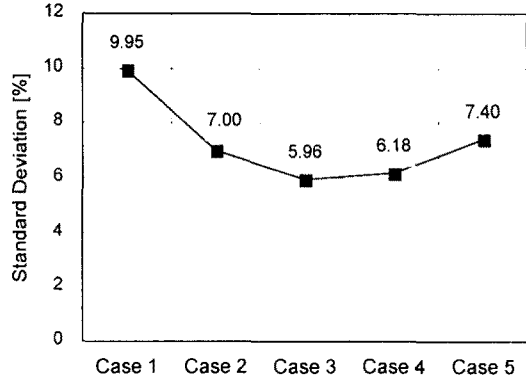
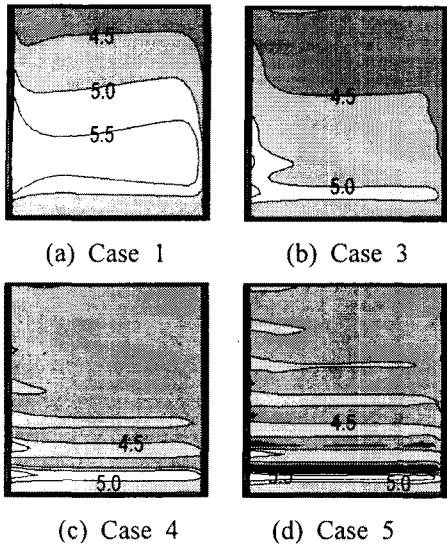


Fig. 2 Velocity magnitude on the cross-section of SCR and duct



(e) Standard deviation of velocity magnitude

Fig.4 Velocity magnitude on the catalyst layer

아 주입 노즐 상부의 배플은 형상이 복잡한 수백개의 X자형 판으로 구성된다. 이는 유동 형태와 난류 특성에 많은 영향을 주지만, 격자 구성이 매우 어렵기 때문에 역시 압력 손실을 고려한 다공층으로 모사하였다. 배플은 암모니아의 혼합 뿐 아니라 유동의 균일화 효과를 주게 되는데, 단위 배플의 크기는 10cm, 배플에서 덕트 굴곡부까지의 거리는 3.8m이므로 다공층을 통한 모사가 가이드베인과 그 후류의 유동에 영향을 주지 않는다.

유동의 Re수는 덕트에서 5.6×10^5 의 매우 강한 난류이므로, 표준 k- ϵ 모델을 적용하였다. 유동 해석은 상용 코드인 FLUENT v.5.5를 이용하였다.

3. 해석 결과

Fig. 2와 3은 덕트 및 SCR 부분의 전체 단면과 촉매층 부분(촉매층의 10cm 앞)의 속도 분포를 나타낸 것이다. Case 1은 가이드베인이 없는 경우이다. 인입

덕트의 굴곡부로 인해 유속이 불균일해 지지만 배플로 인해 유속의 균일화 효과가 크다. 그러나 촉매층 전단에서 다시 90°로 꺾이면서 단면이 확장되기 때문에 유속이 2~8m/s의 넓은 분포를 가지며 (Fig. 2(a)), 촉매층에서도 6~3m/s의 분포 (Fig. 3(e))에서 10%의 표준편차를 가진다. 따라서 이 부분의 유속을 가이드 베인을 통해 균일화하는 것이 필요하다.

Case 2는 90°의 원호형태를 가지는 가이드베인을 균일한 간격으로 6개를 설치한 경우이다. 이 때 유속 분포는 크게 개선되지만, 굴곡부 안쪽의 유속이 크다. 이를 개선하기 위해 Case 3에서는 가이드 베인의 위치를 안쪽이 더 밀집되도록 변경하였다. 이 때 Fig. 3(e)에서 나타난 바와 같이 속도 편차는 7%에서 6%로 향상되었다.

유동 특성이 만족해야 할 조건 중 하나는 촉매층으로의 입사각이다. 유동이 촉매층에 수직인 경우, 비산재에 의한 촉매층의 마모를 최소화할 수 있다. 유동이 덕트의 굴곡부를 지나면서 y방향

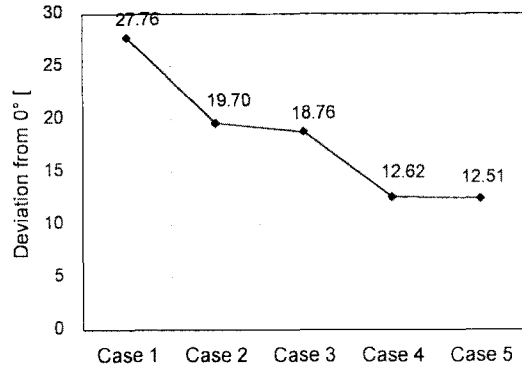
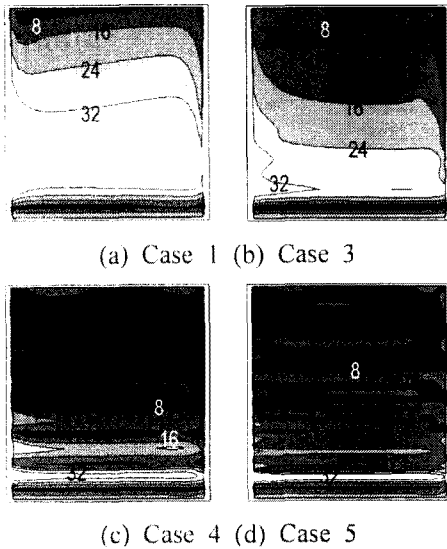


Fig.4 Distribution of attack angle and its deviation on the catalyst layer

속도 성분이 남게 되는데, Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 30° 가 넘는 부분의 면적이 50%에 가깝다. 가이드베인이 설치된 Case2와 3은 Case1에 비해 나아지지만, 역시 면적의 반 이상에서 16° 가 넘는다. 특히, 촉매층과의 거리가 가까운 굴곡부 안쪽에서 입사각이 더 크게 된다.

Case 4에서는 입사각을 개선하기 위해 0.5R(가이드베인 반지름) 길이의 수평한 꼬리를 각각의 가이드베인에 추가하였다. 이로 인해 입사각의 분산은 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 약 19° 에서 13° 로 크게 향상되었다. 그러나 가이드베인 끝에서 촉매층까지의 거리가 짧아짐에 따라, 가이드베인에 의한 벽면 효과 및 유동의 박리가 촉매층에 주는 영향이 커져 유속의 표준편차가 조금 커진다(Fig. 2(c)와 (e)).

Case 5은 입사각의 추가적인 개선을 위해 1R 길이의 꼬리를 추가하였다. 그러나, 입사각의 개선효과는 Case 4에 비해 0.09° 로 매우 작지만, 오히려 유속의

불균형이 6.2%에서 7.4%로 커진다.

이와 같이 촉매층에서의 유속 분포 및 입사각을 볼 때 Case 4가 가장 적절한 경우이다.

가이드베인은 이 사례에서와 같이 그 수와 형태 및 배치 방법이 주요 인자가 된다. 이 때 덕트의 형태 및 입구 유동의 특성에 따라 가이드 베인의 형태와 배치 위치가, 그리고 유속과 촉매층까지의 거리(또는 유동이 균일화 될 수 있는 시간)에 따라 가이드 베인의 수 및 꼬리 부분의 길이가 결정된다. 이 방식이 공학적으로 정립될 경우, 다양한 플랜트의 SCR 설계 과정에서 매우 유용한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

4. 검토

탈질설비의 설계는 설정된 NOx 제거 효율에 대해 운전조건(온도, 산소, 예상 NOx 농도 등)에 따른 촉매의 반응률로부터 적절한 촉매의 크기와 필요 NH₃ 양 결정, SCR 본체 및 연결 덕트 형상

설계, NH₃ 주입 방식 설계, 유동의 균일화 및 혼합 촉진을 위한 가이드베인 및 배플 설계의 절차를 거치게 된다. 형상 설계 단계부터는 실험 및 전산해석을 통한 공학적인 접근을 통해 설계 근거 자료를 얻을 수 있다.

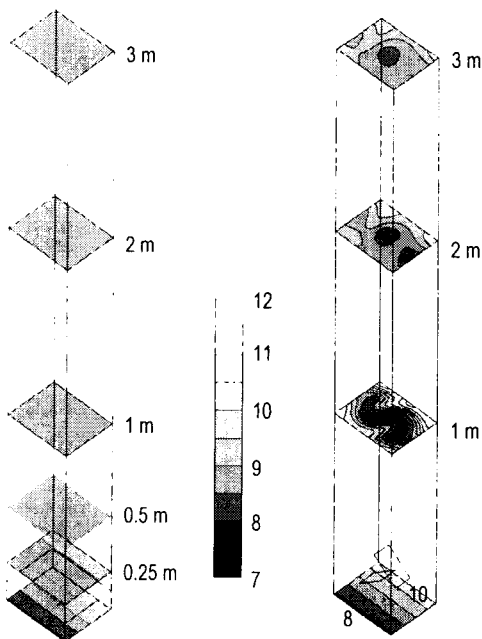
SCR 전체에 대한 연구의 경우, 형상 및 가이드베인 설치 방식이 주요 인자가 되며, 이 사례에서 제시된 유동의 균일도와 입사각을 평가해야 한다. 실험의 경우 축소모형을 통해서도 운동량비, 분사 특성에 따른 액적의 거동, 배플에 의한 난류 발생에 대한 상사성의 만족이 불가능하다. 따라서, 이 사례에서와 같이 암모니아의 혼합을 고려하지 않고 유동 형태의 개선을 초점으로 해야 한다.

전산해석 역시 많은 수의 암모니아 주입 노즐과 배플에 대한 모사가 불가능하

므로 이 연구에서와 같이 다공층으로의 단순화가 불가피하다. 이에 따른 유동의 차이는 Fig.6과 같이 단위 배플에 대한 세부 해석(입구면적 0.25m×0.32m)을 통해 비교 평가하여 단순화의 타당성을 확인할 수 있다. Fig. 2(a)에 나타난 배플 직전 유속의 최대 구배를 가지도록 입구 속도 분포(평균 8.9m/s에서 2m/s의 편차)를 주었을 때, 배플을 다공층으로 모사한 경우(Fig.6(a))는 유동이 배플을 지난 직후 균일화가 이루어진다. 그러나 실제 배플 형상에 대해 해석한 경우(Fig.6(b)), 배플에 의한 유동의 작은 교란들이 후류 3m에서도 존재한다. 이는 암모니아의 혼합에는 매우 큰 영향을 주지만, 배플로부터 충분한 거리에 있는 가이드베인과 촉매층 부위의 유동 형태의 분석에는 직접 영향을 주지 않는다. 따라서, 전체 유동 형태 분석에서 격자 구성의 어려움을 피하기 위해 배플을 다공층으로 모사하는 것은 적절하다. 그러나, 암모니아 혼합을 초점으로 한 경우 이러한 단순화는 적절치 않다.

촉매층 역시 다공층으로 모사할 수 있는데, 이 때 주어진 실제의 압력 강하로부터 점성저항계수와 관성저항계수를 결정해야 한다. 그러나 실제의 촉매층 내에서는 층에 수직인 방향으로만 진행하며, 그 후류의 유동도 수직화되지만, 다공층으로의 단순화에서는 이러한 현상과 차이가 존재한다. 촉매층 후류 유동을 살펴보는 것이 목적인 경우 수직방향으로만 침투율(permeability) 값을 설정하는 것이 필요하다.

암모니아 주입 노즐 및 배플에 대한 연구의 경우, 노즐 열의 배치, 직경, 배플 형상 등이 주요 인자가 되며 암모니아의 혼합 효율, 압력강하, 유동의 균일화 효과를 평가해야 한다. 이 경우 축소



(a) porous media assumed (b) actual baffle
Fig. 6 Comparison of flow pattern at the downstream of a unit baffle(unit: m/s)

모형에 비해 상사성의 만족이 쉬운 실규모 부분모형을 통한 연구가 타당하다. 그러나 냉간 실험(cold test)의 경우 액시의 기화를 상사하기 힘들고, 대체가스를 이용할 경우 거동이 달라지므로 전산해석과 상호병행해야 한다.

5. 결론

배가스 탈질 설비 내 유동 형태의 개선을 통해 촉매 반응 효율을 높이기 위해 전산해석기법을 이용하였다. 설비 영상이 고정된 경우에 대해 덕트 굴곡부의 가이드베인의 수와 배치 및 형태에 따른 촉매층에서의 유동 특성을 평가하였다. 이 때 유동 특성은 탈질 반응에 직접 영향을 주는 유속의 편차와 촉매의 마모에 영향을 주는 입사각으로 보았다. 그리고 전산해석을 포함하여 탈질 설비 설계에 필요한 공학적인 접근 방식과 문제점에 대해 검토하였다.

참고문헌

- (1) Prins, W.L. and Nuninga, Z.L., Design and Experience with Catalytic Reactors for SCR-DeNOx, Catalysis Today, Vol.16, No.2 (1994), pp.187-206
- (2) Svachula, J., Ferlazzo, N., Forzatti, P. and Tronconi, E., Selective Reduction of NOx by NH3 over Honeycomb DeNoxing Catalysts, Ind. Eng. Chem. Res, Vol.32 (1993), pp.1053-1060
- (3) EPA/EPRI, 1991 Joint Symposium on Stationary Combustion NOx Control, (1991), Washington, San Francisco, March 6-9, EPA
- (4) 류창국, 심광보, 최상민, 모형 실험 및 전산해석을 통한 선택적 촉매 반응기 내부 유동 최적화 연구, 대한기계학회 논문집B, Vol.23, No.4 (1999), pp.548~555
- (5) 엄희문, 이정빈, 김동화, 이인영, 전산 유체 해석을 통한 SCR 촉매반응기 유동 최적화 연구, 한국전력공사 전력연구원, TM.92CJ07.P2000.290, (2000).
- (6) 엄희문, 이정빈, 김동화, 이인영, SCR 공정에서 전산해석을 통한 암모니아 주입 설계, 한국전력공사 전력연구원, TM.92CJ07.P2000.291, (2000).