

SCR 반응기 유동 균일화를 위한 수치적 연구

정유진*, 홍성길*, 이강우**, 손병현***

*씨이테크(주) 연구개발센터, ** (주)유성 중앙연구소

***한서대학교 환경공학과

e-mail : cfdking@paran.com

Numerical Study for Flow Uniformity in Selective Catalytic Reduction (SCR)

Yu-Jin Jung*, Sung-Gil Hong*, Gang-Woo Lee**, Byung-Hyun Shon***

*C.E.Tech corp., R/D Center

**Yoonsung Co. Ltd., R&D Center

***Dept of Environmental Engineering, Hanseo University

요 약

NOx 제어 기술로는 크게 연소 전 탈질, 연소 개선 및 연소 후 탈질 기술로 구분할 수 있으며, 연소 후 탈질 기술에 속하는 SCR은 촉매를 사용하여 NOx를 환원하는 대표적인 배연탈질기술이다. SCR의 NOx 저감 성능은 촉매 요인(촉매 구성물질, 형태, 공간속도 등)과 배가스의 온도, 유속 분포, 공정 운전 조건 등의 다양한 인자에 의해 좌우되는데 특히, 촉매층으로 유입되는 유동의 균일도는 가장 중요한 요소가 된다. 유동이 균일하지 않을 경우 촉매 전단에 편류가 발생하게 될 것이며 일정 촉매만 사용하게 되어 촉매 사용주기 감소 및 SCR 성능 저하를 초래할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 3차원 수치 해석 기법을 이용하여 설계 초기의 SCR 반응기 내 유동 특성을 모사하여 기류 균일도 여부를 확인하고, SCR 내 유동 균일도를 최적화시키기 위한 설계를 목적으로 설치하는 가이드 베인과 배플, 다공판이 반응기 내부 유동 및 촉매층의 기류 균일도에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 그 결과, 유동 개선을 위해 인입 덕트 곡관부에 가이드 베인을 설치하여 처리가스를 적절하게 배분시키고, 반응기 상단에 3단 배플을 설치한 결과 반응기 내부 유동의 편류 개선에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한 다공판을 예비 촉매층 하단부 위치에 추가로 설치함에 따라 유동을 한번 더 완충시킬 수 있어 기류 균일도가 매우 양호해짐을 알 수 있었다.

1. 서론

국내 에너지 소비량은 경제 발전에 비례하여 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 연료수급측면에서 대체에너지원의 개발이 완료될 때까지는 화석 연료의 사용이 지속적으로 증가될 것으로 전망된다. 화석연료는 연소 과정에서 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx)을 포함한 많은 대기오염물질을 생성하며, 이는 산성비, 건축물의 부식, 토양 및 수질의 오염, 국민건강의 저해 등에 대한 복합적인 원인으로 작용한다.

이 중에서 NOx는 자동차 등의 수송용이 주된 원인이었으나, NOx 배출량이 상당량에 이르는 산업용 설비 및 발전용 설비 등 점오염원의 오염원인물질의 관리와 제어가 상대적으로 용이하여 이를 중심으로 NOx 저감 시설이 설치되고 있는 추세이다.

NOx 제어 기술로는 크게 연소 전 탈질, 연소 개

선 및 연소 후 탈질 기술로 구분할 수 있으며, 연소 후 탈질 기술에 속하는 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)은 촉매를 사용하여 NOx를 환원하는 대표적인 배연탈질기술이다. SCR은 배가스 중에 포함되어 있는 NOx를 촉매층(Catalyst Layer)에 통과시킨 후 NH3와 반응시켜 무해한 질소(N2)와 물(H2O)로 전환하는 기술로 높은 탈질율과 안정화된 기술이다. 환원제로는 NH3 이외에 우레아(Urea)를 사용하기도 한다. SCR의 NOx 저감 성능은 촉매 요인(촉매 구성물질, 형태, 공간속도 등)과 배가스의 온도, 유속 분포, 공정 운전 조건 등의 다양한 인자에 의해 좌우된다.[1]

촉매의 우수성이 보장되는 경우 SCR의 반응 성능은 무수암모니아수의 농도 분포와 균일한 유입속도가 반응기에서의 환원효율을 결정하는 중요한 요소가 되며, 특히 촉매층으로 유입되는 유동의 균일도는 가장 중요한 요소가 된다. 유동이 균일하지 않을

경우 촉매 진단에 편류가 발생하게 될 것이며 일정 촉매만 사용하게 되어 촉매 사용주기 감소 및 SCR 성능 저하를 초래할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 촉매의 우수성 및 유동의 균일화를 보장하기 위하여 많은 제한적 조건이 따르게 되므로 SCR내 유동 균일화를 위해서는 필요시에 가이드 베인(Guide Vane)이나 다공판(Perforated Plate)등과 같은 유동을 변경시켜줄 수 있는 장치가 설치되어야 한다.[2]

본 연구에서는 3차원 수치 해석 기법을 이용하여 설계 초기 SCR 반응기 내 유동 특성을 모사하여 기류 균일도 여부를 확인하고, SCR 내 유동 균일도를 최적화시키기 위한 목적으로 가이드 베인과 배플, 다공판 설치에 따른 유동 특성을 해석하여 기류 균일도에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다.

2. 수치 해석 내용

2.1. 수치 해석 개요

2.1.1. 기초 방정식

유체의 유동에 대한 물리적인 특성을 나타내는 기본적인 법칙이 있다. 예를 들어, mass, momentum, energy conservation등과 같은 법칙들이다. 정상 상태, 비압축성 기체라 가정할 때 일반적인 물리량의 수송 방정식을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.[3]

$$\text{div}(\rho V \phi_i - \Gamma_{\phi_i} \text{grad} \phi_i) = S_{\phi_i} \quad (1)$$

S_{ϕ_i} 는 부력항(S_{buoyancy})을 제외한 비정상항, 압력구배등을 포함한 모든 source term을 나타낸다.

난류 모델에는 난류점성계수를 취급하는 방법에 따라 여러 가지 모델이 있는데, 본 연구에서는 Launder와 Spalding에 의해 제시된 Standard k-ε turbulence model을 사용하였다.[4]

2.1.2. 수치 해석 방법

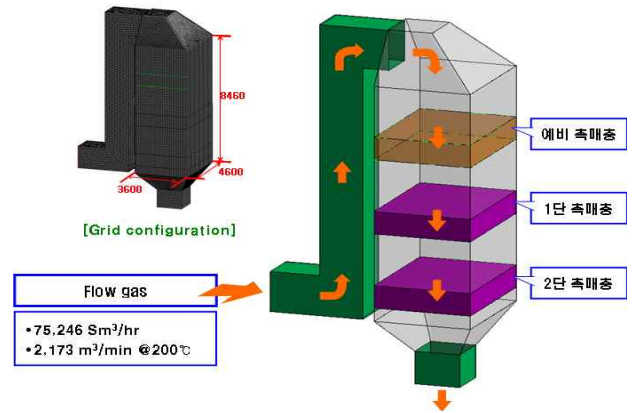
본 연구에 사용된 상용 소프트웨어인 FLUENT에서는 이산화 방법으로 유한 체적법(Finite-volume method)을 사용하고 있다. 모든 수치 해석은 상류 차분 도식(Upwind differencing scheme)과 엇갈림 격자계(Staggered grids)를 이용하여 수행하였다. 압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE(Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였고, 벽면과 고체 표면에서의 전단 응력은 벽함수(Wall function)를 이용하여 계산하였다. 촉매층은

실제 형상과 공극을 모델링하여 구현하는 것이 불가능하므로 Porous jump model을 이용하여 다공성 물질로 가정하고 국부 유속에 대한 단위 면적당 압력강하로 계산하였다.[5]

2.2. 수치 해석 모델

2.1.1. 설계 초기 모델 및 경계 조건

[그림 1]에 SCR 반응기의 3차원 모델링 모습과 수치 계산을 위한 격자 형성(Grid configuration) 모습도 함께 나타내었다. 시간당 75,246Sm³ (2,173m³/min, at 200°C)의 처리가스가 반응기 상부로 유입되어 SCR 촉매층을 통과하여 하부로 배출된다. 촉매층은 총 3layer로 구성되며 최상단 촉매층은 예비 촉매층으로 실제 2layer(1단/2단 촉매층)만 설치된다.

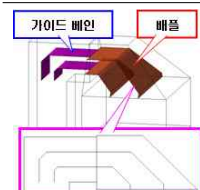
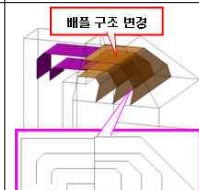
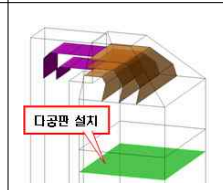


[그림 1] SCR 반응기 설계 초기 모델

2.1.2. 설계 변경 모델

SCR의 설계 초기 모델의 유동 균일도를 최적화시키기 위한 설계를 목적으로 [표 1]와 같이 가이드 베인과 배플, 다공판 설치에 따른 유동 특성을 해석하여 기류 균일도에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.

[표 1] 설계 변경 모델 case

Case 1	Case 2	Case 3
·인입 덕트에 가이드 베인 설치 ·반응기 상단 2단 배플 설치	·인입 덕트에 가이드 베인 설치 ·반응기 상단 3단 배플 설치	·인입 덕트에 가이드 베인 설치 ·반응기 상단 3단 배플 설치 ·예비 촉매층 하단부 다공판 설치
		

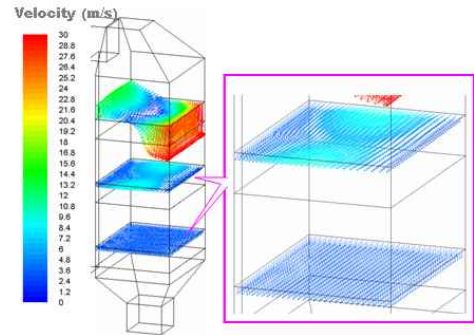
3. 결과 및 고찰

소 양호한 수준으로 예측되었다.

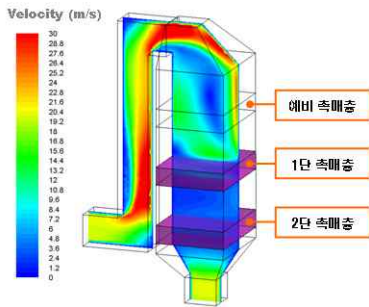
3.1. 설계 초기 모델

3.1.1. 반응기 내 유동 예측 결과

설계 초기 모델의 반응기 내 속도 분포를 예측한 결과, [그림 2]~[그림 4]와 같이 인입 덕트의 곡관에 의해 반응기 내부 한쪽으로 심한 편류가 형성되면서 편류 반대편으로 사영역(Dead-zone)이 발생하여 부상 기류가 형성되고 있음을 알 수 있었다.



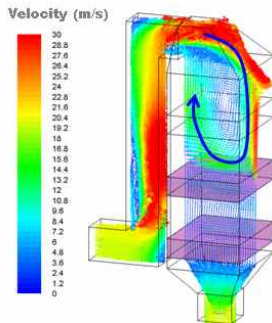
[그림 5] 설계 초기 모델 반응기 내부 유선 형상



[그림 2] 설계 초기 모델 반응기 내부 속도 분포

3.1.3. 결과 종합

본 SCR 반응기의 설계 초기 모델은 편류가 심하게 발생하여 1단 촉매층에서의 기류 균일도가 매우 불량한 상태이며, 이는 곧 촉매 성능을 저하시켜 De-NOx 효율이 저하될 수 있으므로 유동의 균일도를 개선할 수 있는 설계 변경이 반드시 필요할 것으로 판단된다.



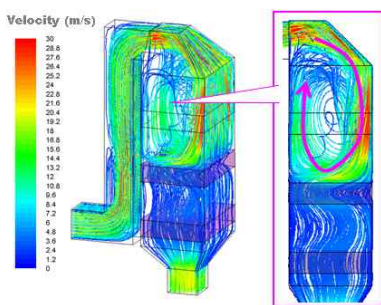
[그림 3] 설계 초기 모델 반응기 내부 기류 분포

3.2. 설계 변경 모델

3.2.1. 반응기 내 유동 예측 결과

설계 초기 모델의 기류 균일도 개선을 위해 기류 안내용 가이드 베인과 배플, 다공판을 설치한 결과 [그림 6]~[그림 8]과 같이 유동 균일도 개선에 많은 영향을 미치는 것으로 예측되었다.

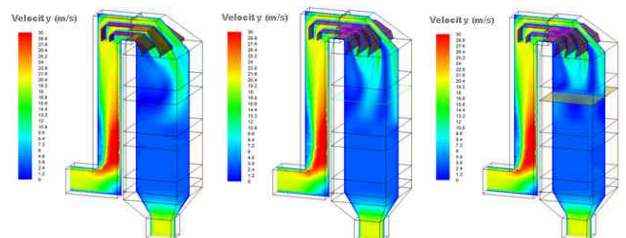
Case 1의 경우에는 설계 초기 모델에 비해 편류가 많이 개선되기 하나 여전히 기류가 한쪽으로 편향됨에 따라 미소하게 사영역이 형성되는 반면, Case2의 배플을 3단으로 설치하였을 때 사영역 해소에 따른 부상 기류 형성을 억제하는데 효과적인 것으로 예측되었다. 또한 Case 3과 같이 반응기 내부에 다공판을 설치한 경우(배플 3단 설치 포함) 유동이 완충됨에 따라 유동 균일도 개선에 더 효과적인 것으로 예측되었다.



[그림 4] 설계 초기 모델 반응기 내부 유선 형상

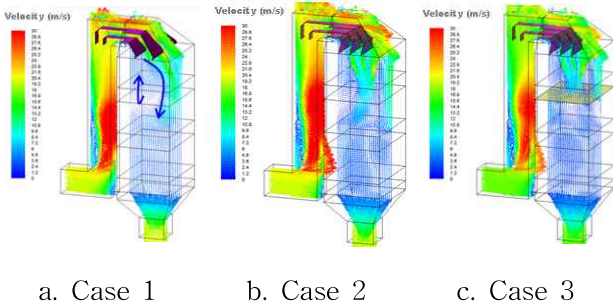
3.1.2. 촉매층 인입부 기류 예측 결과

[그림 5]와 같이 1단 촉매층의 기류 균일도는 매우 불량한 것으로 예측되었다. 2단 촉매층은 거리에 의해 유동이 다소 발달하게 되고 촉매층에 의한 압력손실이 완충 역할을 함에 따라 기류 균일도는 다

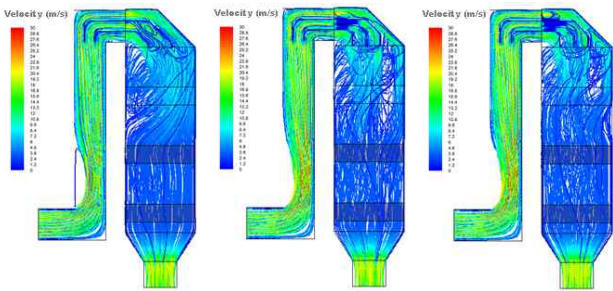


a. Case 1 b. Case 2 c. Case 3

[그림 6] 설계 변경 모델 반응기 내부 속도 분포



[그림 7] 설계 변경 모델 반응기 내부 기류 분포



[그림 8] 설계 변경 모델 반응기 내부 유선 형상

3.2.2. 결과 종합

인입 덕트 곡관부에 가이드 베인을 설치하여 처리 가스를 적절하게 배분시키고, 반응기 상단에 3단 배플을 설치한 결과 반응기 내부 유동의 편류 개선에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한 다공판을 예비 촉매층 하단부 위치에 추가로 설치함에 따라 유동을 한번 더 완충시킬 수 있어 기류 균일도가 매우 양호해짐을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 수치 해석 기법을 이용하여 설계 초기의 SCR 반응기 내 유동 특성을 조사하여 기류 균일도 여부를 확인하고, SCR 내 유동 균일도를 최적화시키기 위한 설계를 목적으로 설치하는 가이드 베인과 배플, 다공판이 반응기 내부 유동 및 촉매층의 기류 균일도에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 SCR 반응기의 설계 초기 모델에 대하여 유동 특성을 해석한 결과, 편류가 심하게 발생하여 1 단 촉매층에서의 기류 균일도가 매우 불량한 상태이며, 이는 곧 촉매 성능을 저하시켜 De-NOx 효율이

저하될 수 있으므로 유동의 균일도를 개선할 수 있는 설계 변경이 반드시 필요한 것으로 예측되었다.

2. 유동 개선을 위해 인입 덕트 곡관부에 가이드 베인을 설치하여 처리가스를 적절하게 배분시키고, 반응기 상단에 3단 배플을 설치한 결과 반응기 내부 유동의 편류 개선에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한 다공판을 예비 촉매층 하단부 위치에 추가로 설치함에 따라 유동을 한번 더 완충시킬 수 있어 기류 균일도가 매우 양호해짐을 알 수 있었다.

사사

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 08지역기술혁신B-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 정수진, 이상진, 김우승, 이준범, “대형 디젤엔진용 SCR 시스템의 암모니아 슬립 억제를 위한 인젝터의 형상 및 위치에 관한 수치적 연구”, Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 1, pp. 68-78, 2006.
- [2] 박영빈, 장춘만, “열병합 보일러 SCR 장치의 유동 균일화를 위한 최적화 연구”, 대한설비공학회, pp. 415-420, 2009.
- [3] 명현국, “수치유체공학”, 한미출판사, 124-138, 1997.
- [4] Patankar SV, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980
- [5] 신병록, 장근식, 조강래, “전산유체역학”, 대영사, pp. 264-277, 1997.