

# SCR 시스템 전산해석을 통한 압력 강하 및 유동 균일도 분석

김도리\* · 금시찬\* · 응웬득하이\*\* · 임호\*\*\* · 김량균\*\*\* · 김규보\*\*\* · 박영도\*\*\* · 한경원\*\*\*\* · 박성균†

## Numerical analysis of the characteristics of pressure drop and flow uniformity inside a SCR system

Dori Kim\*, Sichan Geum\*, Nguyen Duc Hay\*\*, Ho Im\*\*\*, Ryanggyoon Kim\*\*\*, Gyubo Kim\*\*\*, Yeongdo Park\*\*\*, Kyeongwan Han\*\*\*\*, Sung Goon Park†

**Abstract** The study investigates the application of Selective Catalytic Reduction (SCR) systems in steel manufacturing processes. To calculate the pressure drop occurring in the SCR system's catalytic plates under various operating conditions, we assumed a porous filter model. The pressure drop along the gas flow path is determined by theoretical calculations and computational simulations. The discrepancy in the data obtained from the both approach happens in the region of curved sections of SCR system where secondary flows occur. The pressure drop was calculated depending on different flow rate, by which a correlation between the pressure drop and the flow rate was made based on the simulation results. Inside the SCR system, boundary layer separation occurs before the SCR chamber, causing the flow to deviate in one direction. As a result, the flow uniformity decreases in the SCR chamber, which could lead to a decrease in the reaction performance on the catalytic plates. By installing baffles at the inlet region of the SCR chamber, the uniformity is enhanced by around 18.8% based on the standard deviation.

**Key Words** : Selective Catalytic Reduction System (선택적 촉매환원 시스템), Pressure Loss (압력 손실), Flow Uniformity(유동 균일도)

---

† Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University, Assistant Professor

E-mail: psg@seoultech.ac.kr

\* Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University, Undergraduate student

\*\* Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Ph.D student

\*\*\* Research Institute of Industrial Science & Technology

\*\*\*\* POSCO

## 1. 서론

선택적 촉매 환원 장치(Selective Catalytic Reduction, SCR)는 다양한 산업 부문의 연소 과정에서 발생하는 유해 질소 산화물(NOx) 배출을 줄이는 데 중추적인 역할을 하는 배출 제어 기술이다. 환경 문제가 심화되고 전 세계적으로 엄격한 배출 규제가 시행됨에 따른 NOx 배출을 감소시키기 위한 여러 사회적, 경제적 압력들로 인하여 SCR 시스템은 배출 제어 전략의 중요한 요소가 되었다. 산업 공정 중 철강

가열로(Steel Heating Furnace)에서 발생하는 질소산화물의 배출도 중요한 환경적 문제로 대두되고 있으며, 이를 저감하기 위해 배기가스가 외부로 배출되는 경로 내 SCR 시스템의 도입이 확산되고 있다.

SCR 시스템은 배기가스 중에 포함된 질소산화물을 촉매를 이용하여 환원시켜 질소와 물로 변환시키는 기술로 시스템 내부에 반응 활성화를 위한 촉매판이 존재한다. 배기가스가 SCR 시스템 내부의 촉매판을 통과할 때, 환원 반응을 통해 질소산화물의 농도가 저감됨과 동시에 큰 압력 강하가 수반된다. SCR 시스템 내부에서 발생하는 압력에너지의 손실을 극복하기 위해 원심 팬과 같은 유체기계의 설치가 필수적이다. 유체기계를 통해 공급하는 에너지가 SCR 시스템 내부에서 추가적으로 발생하는 압력에너지의 손실을 극복하지 못하는 경우 배기가스가 외부로 제대로 배출되지 않아 시스템이 정상적으로 작동하지 않는 경우가 발생한다. 즉, SCR 시스템 전반에 걸쳐 발생하는 압력강하를 정확하게 계산하고, 그에 맞는 유체기계를 설계하는 것이 매우 중요하다.

SCR 시스템의 성능 분석 및 개선을 위해 많은 연구들이 수행되었다. Shang<sup>(1)</sup> 등은 석탄 화력 발전소에서 NO<sub>x</sub> 배출량을 줄이기 위한 SCR 시스템의 전산 해석을 수행하였으며, 환원 반응은 두 개의 촉매판 표면에서 진행된다. 시스템의 압력 강하를 고려하기 위해 촉매판을 다공성 매질로 가정하였으며, 측정 데이터를 기반으로 다공도를 결정하였다. SCR 입구 영역에 가이드 날개를 설치하여 2차 순환 유동을 감소시켰으며, SCR 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. Shon<sup>(2)</sup> 등은 촉매 베드로 흐르는 유동의 균일성이 NO<sub>x</sub> 제거 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 전산 해석을 수행하였으며, 입구 덕트의 형태에 따른 시스템 성능을 관측하였다. Tan<sup>(3)</sup> 등은 SCR 시스템의 성능을 향상시키기 위해 시스템의 주요 변인 중 하나인 압력 강하를 감소시키기 위하여 시스템 배치나 레이아웃을 수정하여 총 압력 강하를 29% 감소시켰다. Swamy<sup>(4)</sup> 등은 전산유체

해석을 통해 엔진 배기 시스템의 후처리 과정에서 발생하는 배압을 계산하여 후처리 시스템을 통과하는 배기 가스의 유동을 분석하였다. Kwiczala<sup>(5)</sup> 등은 DeNO<sub>x</sub> 시스템 중 하나인 RAH (Rotary Air Heater) 모듈 7종을 시험하였으며, 유속(레이놀즈 수)에 대한 압력 강하와의 관계 도출을 통해 각각의 모듈에 대한 유동 특성을 추론하였다. Lee<sup>(6)</sup> 등은 ARIMA 회귀 분석 모델을 이용하여 가상의 온도 데이터를 기반으로 온도 변화를 예측하고, 이를 통해 SCR-HP 밸브의 고장을 예측하는 유지보수 시스템을 구현하였다. 이어 Lee<sup>(7)</sup> 등은 고압 SCR 밸브의 예측 유지보수를 위해 열유동 해석을 수행하였다. 밸브의 누출량에 따른 후단의 온도 변화를 CFD(전산유체역학)를 통해 관찰하였다.

일반적인 SCR 시스템의 성능 향상을 위해 다양한 연구들이 진행되었으나, 철강 가열로 내 SCR 시스템의 성능 분석에 대한 연구는 비교적 제한적이다. 또한 SCR 시스템 내 압력에너지 손실을 극복하는 역할을 수행하는 유체기계의 적절한 설계를 위해서는 촉매판을 포함한 SCR 시스템 전체에 대한 해석이 요구되며, 철강 가열로의 작동 환경에 따라 다양한 배기가스 유량에 대한 압력강하 데이터 확보가 필수적이다.

본 연구의 목표는 전산해석을 통해 철강 가열로의 작동 환경에서 다양한 유량 값에 대한 시스템 내부 압력 강하 값을 계산하고, 상관 관계식을 도출하는 것이다. 이를 바탕으로 SCR 시스템 내부 압력강하를 극복하기 위한 유체기계를 설계하는 데 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 2장에서는 전산 해석을 위한 방법 및 다양한 설정값을 제시하였으며, 3장에서는 수치 해석 결과, 4장에서는 결론을 제시하였다.

## 2. 수치 해석 방법

본 연구에서는 SCR 시스템 내부 유동을 분석하고 압력강하를 계산하기 위해 정상상태 해석을 수행하였으며, 연속 방정식, 운동량 방정

식 및 에너지 방정식을 풀었다. 난류 모델은 k-ε 모델을 채택하였다. 배기가스는 공기로 가정하였으며, 온도는 배기가스의 온도인 673K으로 설정하였다. 입구 유량(Q)은 각 86,500 Nm<sup>3</sup>/h (= 59.2 m<sup>3</sup>/s), 107,000 Nm<sup>3</sup>/h (= 73.2 m<sup>3</sup>/s), 150,000 Nm<sup>3</sup>/h (= 102.7 m<sup>3</sup>/s), 200,000 Nm<sup>3</sup>/h (= 136.9 m<sup>3</sup>/s)로 설정하여 해석을 진행하였다. 본 연구의 목표는 다양한 조건의 SCR 시스템의 압력강하를 계산하고 시스템의 유량과 압력강하의 상관관계를 도출하는 것이다. 이를 위해 촉매관에서의 반응을 고려하는 대신 다공성 매질로 가정하였으며, Darcy 모델을 사용하였다.

그림 1(a)는 SCR 시스템 및 배기가스가 외부로 유출되는 스택을 표현한 그림이고, 그림 1(b)는 본 연구의 해석 도메인을 나타낸다. SCR 챔버의 입구는 원형 덕트와 연결되어 있고, 내부에는 다공성 매질로 가정한 촉매관 필터가 2개 존재한다. 출구는 정사각형 덕트에 연결되어 그림 1(a)와 같이 O-형태의 관을 형성한다. O-형태 관 내부에는 두 개의 원심 팬이 설치되어 SCR 시스템 내부에서 발생하는 압력강하를 극복하는 역할을 수행하며, 그림 1(b)의 도메인에서 해석한 압력 강하 결과 값 및 유체 기계의 성능 곡선을 고려하여 적절한 팬을 선택하는 데 가이드라인을 제공할 수 있다. 연소과정 후 발생한 배기가스가 그림 1(a)의 스택을 통해 외부로 빠져나가기 전에 그림 1(b)의 SCR 시스템을 통과하는 상황을 가정하며, 설치된 유체 기계가 SCR 시스템에서 발생하는 압력강하를

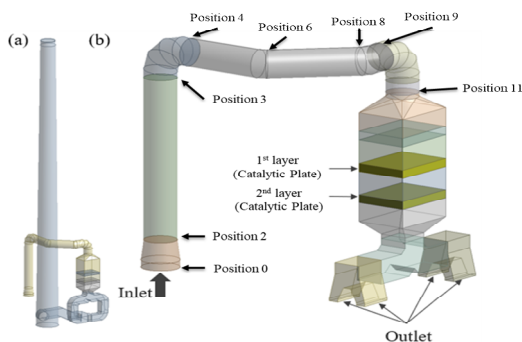


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the SCR system. (b) Computational domain.

극복하지 못하는 경우 배기가스가 원활하게 유출되지 못하고 내부에서 정체되는 문제가 발생하여 시스템이 정상적으로 작동하지 않을 수 있다. 본 연구에서는 SCR 시스템 내 유량에 따른 압력강하 값을 도출하는 것을 목표로 하며, 원심 팬의 해석은 고려하지 않았다.

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1. 격자 민감도 분석

그림 2는 격자 수렴성 테스트 결과를 보여주며, 서로 다른 격자수에 대해 첫 번째 필터 전 후단의 압력 강하 값을 비교하였다. 격자수가 약 36만 개인 경우 압력 강하가 비교적 과소평가 되었으나, 80만 개 이상의 격자에 대해서는 결과 값이 거의 수렴하는 경향을 보였다. 본 연구에서는 해석 비용과 정확도를 고려하여 약 210만 개(Mesh 3)의 격자를 채택하여 해석을 수행하였다. 그림 1(b)의 해석도메인에 약 210만 개의 격자를 사용하여 차분한 모습은 그림 3과 같다. 유동의 변화가 비교적 심한 원형 덕트의 굴절 부분, SCR 챔버 입구 및 출구 영역에서 조밀한 격자를 생성하였으며, SCR 시스템 표면에서의 Y+는 약 30~60 범위의 값을 갖는다.

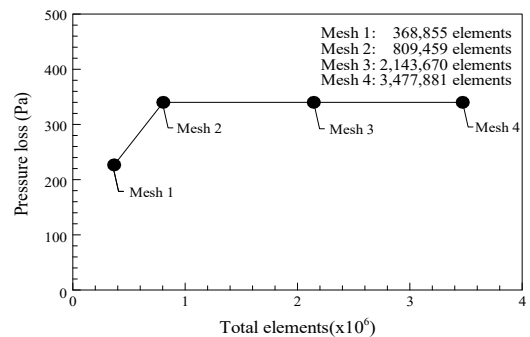


Fig. 2. Results of grid convergence test. The pressure loss variation with different grid sizes.

#### 3.2. 촉매관 다공도 결정을 위한 사전 해석

본 연구에서는 SCR 챔버 내에 두 개의 촉매관을 모사하였으며, 유동이 촉매관을 지날 때

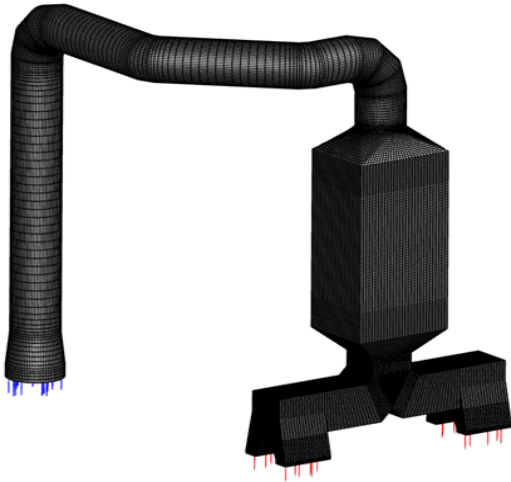


Fig. 3. Result of mesh generation

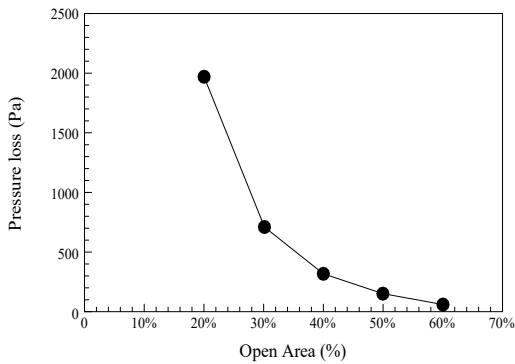


Fig. 4. Pressure loss with different open areas of porous media

발생하는 압력강하를 모사하기 위해 Darcy 모델을 채택하여 해석을 수행하였다.

그림 4는 유량이 86,500 Nm<sup>3</sup>/h 일 때, 하나의 다공성 매질을 지나가면서 발생하는 압력강하 값을 다공도에 따라 표현한 그림이다. 촉매판의 압력강하는 주로 다공성 매질의 다공도로 결정되며, 다공도가 증가함에 따라 압력강하가 비선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 포항산업과학연구원으로부터 제공받은 촉매판의 압력강하 실측값을 바탕으로 다공도는 39.5%로 설정하였으며, 그림 1(b)와 같이 SCR 챔버 내부의 두 개의 촉매판을 고려하여 해석을 진행하였다.

### 3.3. SCR 챔버 전단 원형 덕트의 압력강하 분석 (유량 = 86,500 Nm<sup>3</sup>/h)

표 1은 SCR 시스템에서 사용되는 관의 형태와 길이, 각도 등의 정보를 바탕으로, 시스템 입구부터 챔버 입구까지 그림 1에 표현된 각 위치에서의 압력 강하 값을 이론적으로 계산한 결과이다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 대부분의 압력에너지 손실은 원형 덕트가 큰 각도로 굴절될 때 발생하는 것으로 계산되었으며, 위치 3-4 및 9-10의 구간에서 발생한 압력강하가 덕트 전체에서 발생하는 값의 약 55.7%를 차지하였다. 그림 5는 표 1의 이론적 계산값과 전산 유체해석을 통해 얻은 단면에서의 압력 평균값을 구간에 따라 비교한 그림이다. 대부분의 구간에서 이론값과 CFD 해석 값이 유사한 경향을 보이나, 2차유동이 발생하는 관이 굴절된 직후(위치 4-5, 6-7)에서는 차이가 발생함을 확인하였다. 그림 6은 SCR 시스템의 원형 덕트 내 각 위치의 압력장을 보여준다. 위치 0-3의 직선 구간에서는 덕트 형상이 일정하여 입구에서 유입되는 비교적 안정적인 유동 패턴을 확인할 수 있었으며, 그 이후로는 관 형상의 변화 또는 굴절로 인해 관 내부에서 2차 유동이 발생하는 것을 관측하였다. 그림 6의 위치 4의 압력장에서 확인할 수 있듯이, 2차 유동 생성으로 인해 관 안쪽 부분의 압력이 바깥쪽 부분에 비해 감소함을 확인할 수 있으며, 유동이 덕트를

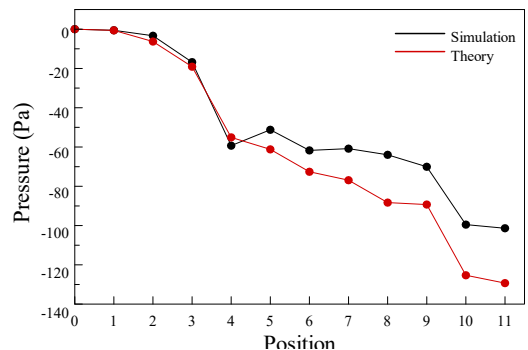
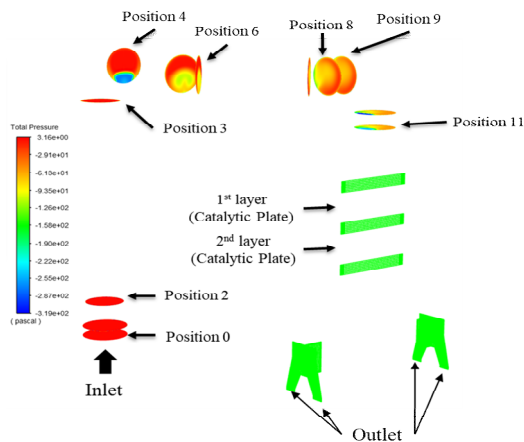


Fig. 5. Pressure variation along the circular duct before the SCR chamber. The positions 0-11 correspond to those in Fig. 5.

**Table 1.** Theoretical pressure loss in the duct before the SCR chamber

위치	형상	압력강하[Pa]
0-1	덕트	0.6
1-2	축관	5.7
2-3	덕트	12.8
3-4	90°원형 엘보우	36
4-5	덕트	6.1
5-6	원형 엘보우	11.4
6-7	덕트	4.3
7-8	원형 엘보우	11.4
8-9	덕트	1
9-10	90°원형 엘보우	36
10-11	직사각형 덕트로의 변환	4

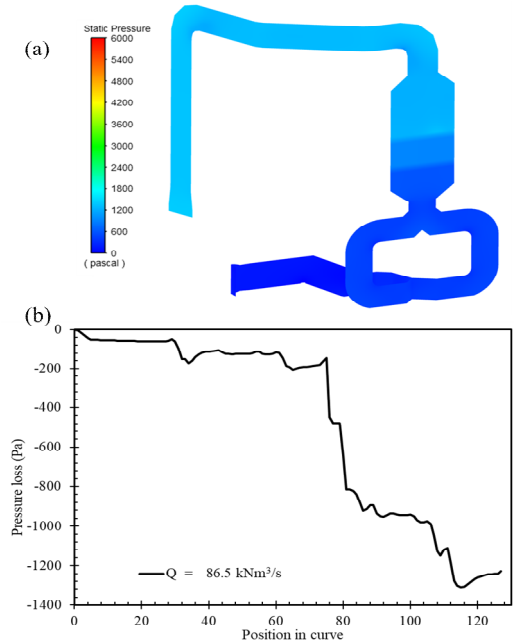


**Fig. 6.** Pressure contour at each cross-section of the SCR system.

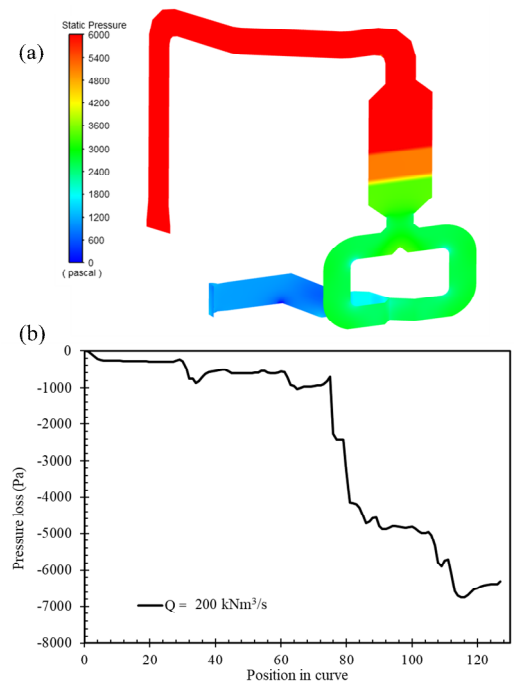
지나감에 따라 위치 5-7 구간에서 회복되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 이론적 계산에서는 모든 부분에서 균일한 유동이 들어온다는 가정 하에 압력강하가 계산되므로 다양한 위치에서의 압력 값 추세의 일관성이 유지될 수 있다.

### 3.4. 유량에 따른 압력강하 분석

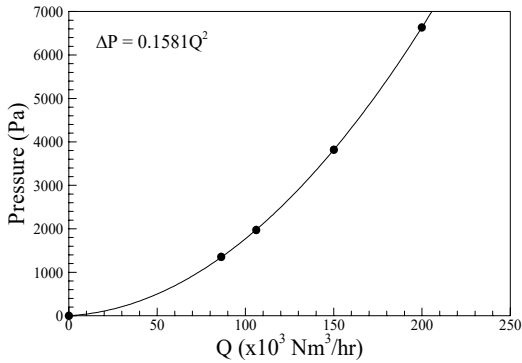
그림 7과 8은 스택을 제외한 전체 시스템에서 유량이 각각 86,500 Nm<sup>3</sup>/h 및 200,000 Nm<sup>3</sup>/h 일 때, 압력강하를 분석한 결과이다. 유량이



**Fig. 7.** (a) Pressure contour and (b) pressure variation along the SCR system. The volume flow rate is 86,500 Nm<sup>3</sup>/h.



**Fig. 8.** (a) Pressure contour and (b) pressure variation along the SCR system. The volume flow rate is 200,000 Nm<sup>3</sup>/h.

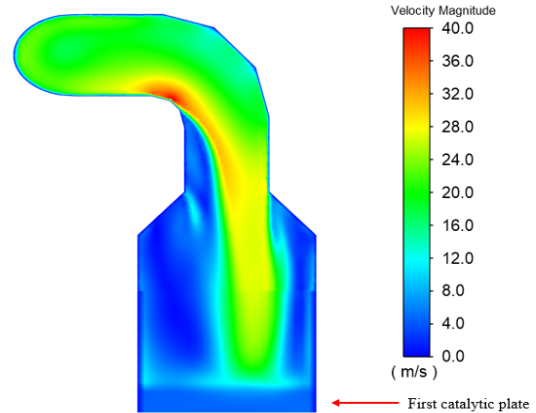


**Fig. 9.** Pressure loss as a function of volume flow rate. The relationship between two parameters is written in the graph.

86,500 Nm<sup>3</sup>/h 인 경우 SCR 챔버 전단의 원형 덕트, SCR 촉매판, 챔버 후단의 O관에서 발생하는 압력 강하량은 각각 전체 압력강하의 12%, 60%, 28%로 관측되었으며, 유량이 200,000 Nm<sup>3</sup>/h 인 경우에도 비슷한 경향을 확인하였다. SCR 시스템에서 발생하는 압력강하의 대부분이 촉매판에서 발생하며, 원심 팬이 설치되어 있는 O관에서도 큰 비율의 압력강하가 발생하는 것이 그림 7(a)와 그림 8(a)에서 확인된다. 원심 팬의 설계를 위해서는 주어진 유량에서 시스템 전체에 걸쳐 발생하는 압력강하 정보가 필요하며, 이를 위해 유량에 따라 시스템 압력강하 값을 그림 9와 같이 도출하였다. 시스템 내부에서 발생하는 압력강하는 유량의 제곱에 비례하는 것으로 확인되며, 해석 결과를 바탕으로  $\Delta P = 0.158Q^2$  의 상관관계식을 도출하였다. 즉, 유량이 200,000 Nm<sup>3</sup>/h 일 때, 86,500 Nm<sup>3</sup>/h 인 경우에 비해 압력강하가 약 5배 증가하는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 상관관계식을 바탕으로 철강 공정에서 배기가스를 적절하게 배출하기 위해 요구되는 원심 팬의 성능을 결정하는 데 가이드라인을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.5. 챔버 전단에 설치된 배플이 유동 균일도에 미치는 영향

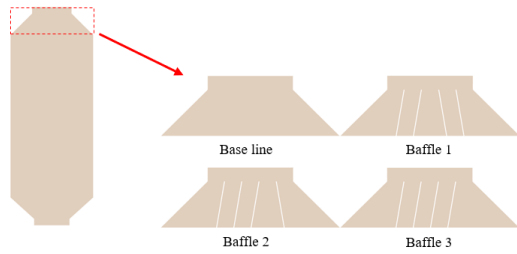
그림 10은 유량이 86,500 Nm<sup>3</sup>/h 인 경우 90°



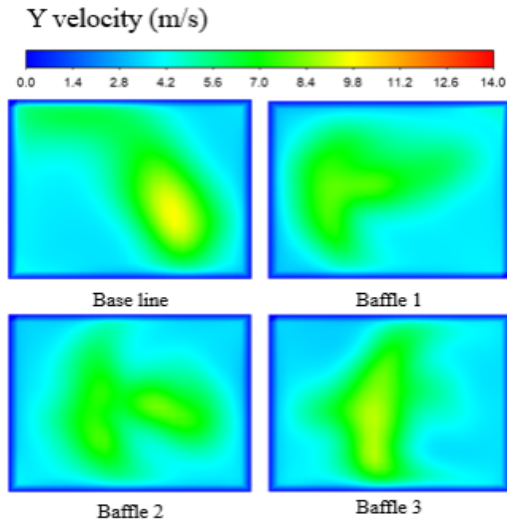
**Fig. 10.** Velocity magnitude contour of SCR chamber from the front view in baseline case.

원형 엘보우 및 SCR 챔버 전 영역의 유동 속도 분포를 보여준다. 유동이 챔버 전 영역의 곡관을 지남에 따라 경계층 박리가 발생하며, 이로 인해 챔버 내부 영역으로 들어오는 유동의 불균일도가 높아지는 경향을 초래한다. 결과적으로 이는 촉매판의 반응 효율과 수명을 감소시킬 수 있다.

유동 균일도를 증가시키기 위해 86,500 Nm<sup>3</sup>/h 유량에 대하여 80° 각도의 배플을 그림 11과 같이 세 가지 케이스로 나누어 해석을 진행하였다. 유동의 균일도를 판단하는 인자로는 촉매판 윗면에서의 표준편차(STD) 및 속도의 최대값과 최소값의 차이( $\Delta T$ )를 사용하였다. 그림 12는 첫 번째 촉매판 위치에서의 수직 방향 속도의 절대속도를 보여준다. 그림 10 및 그림 12의 baseline 경우에서 확인할 수 있듯이, 직사각형 챔버 내 유동이 오른쪽 하단부에 집중되는 현상을 확인할 수 있으며, STD는 약 1.54,  $\Delta T$ 는 약 7K로 나타났다 (표 2). SCR 챔버 입구에 배플을 그림 11의 Baffle 1 및 Baffle 2의 형상으로 설치함에 따라 유동의 불균일도가 감소하였으며, STD는 각각 1.34, 1.25로 baseline 경우에 비해 감소하는 경향을 보였다 (표 2). 반면, baffle 3의 경우에는 유동이 챔버 가운데로 집중되는 현상을 보였으며, STD는 1.63으로 증가하였다. baffle 2 경우에서 가장 높은 유동 균일도의 증가를 보여주었으며, baseline



**Fig. 11.** Schematic diagram of SCR chamber from the front view. The red dashed box indicates the inlet region of the SCR chamber where the baffles are installed.



**Fig. 12.** Absolute y-velocity contours at the first catalytic plate

**Table 2.** Effect of baffle in each case

case	Baseline	Baffle 1	Baffle 2	Baffle 3
STD	1.54	1.34	1.25	1.63
$\Delta T(K)$	7.03	5.94	5.83	6.98

경우에 비해 STD는 약 18.8%,  $\Delta T$  는 약 17% 감소하였다. 배플의 설치에 따른 추가적인 압력강하의 증가는 전체 시스템 압력강하의 약 1% 내외로 측정되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전산해석을 통해 실제 철강

공정에서  $NO_x$ 를 줄이기 위해 설치된 SCR 시스템 내부 압력강하를 분석하였다. 다양한 작동 조건에서 SCR 시스템 내부의 촉매판에서 발생하는 압력강하를 고려하기 위하여 다공성 매질로 가정하였고, 다공도는 포항산업과학연구원에서 제공받은 실측 데이터를 바탕으로 결정하였다. 시스템 내부의 배기가스 유동 경로에서의 압력강하를 이론적 계산과 CFD 해석을 통해 도출하였다. 관 형상이 비교적 일정한 영역에서는 해석 결과와 이론 결과의 경향이 유사하였으나, 곡관에서는 관 내부에서 2차 유동이 발생함에 따라 차이가 발생함을 확인하였다. 각 유량에 따른 시스템 전체 압력 강하를 분석하였으며, 압력강하는 유량의 제곱에 비례하는 상관관계식을 도출하였다. SCR 시스템 내 곡관에 의해 유동이 박리되는 현상을 확인하였으며, 촉매판에 도달하는 유동이 한 쪽으로 쏠리는 현상을 확인하였다. 이를 완화하기 위해 SCR 챔버 입구에 배플을 추가하여 해석을 진행하였으며, 촉매판에 도달하는 유동의 균일도가 STD 기준 최대 18% 증가하는 경향을 확인하였다. SCR 챔버 입구에 배플을 설치함으로 인해 촉매판에 도달하는 유동의 균일도를 증가시켜 촉매판의 반응 성능 및 수명을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 포항산업과학연구원의 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCE

- 1) Shang, D., Li, B., & Liu, Z., 2019, "Large eddy simulation of transient turbulent flow and mixing process in an SCR denitration system." Chemical Engineering Research and Design, Vol. 141, pp.279~289.
- 2) Byung-Hyun, S., 2022, "Numerical Analysis of Flow Uniformity in Selective Catalytic Reduction (SCR) Process Using Computational Fluid



- Dynamics (CFD).” *International Journal of Advanced Culture Technology (IJACT)*, Vol. 10(3), pp.295~306.
- 3) Tan, L., Feng, P., Yang, S., Guo, Y., Liu, S., & Li, Z., 2018, “CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent.” *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 123, pp.82~88.
  - 4) Swamy, M., Kulkarni, R., Dharmadhikari, R., & Rajput, S., 2020, “Estimation of Pressure Drop across Exhaust System by CFD Simulation.” *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 7(7), pp.7.
  - 5) Kwiczala, A. M., Wejkowski, R. A., Jagodzińska, K., & Bandała, D., 2019, “Hybrid technology of flue gas denitrification system. Part 1-Preliminary studies of flow turbulence and pressure drop in the elements of rotary air heater baskets.” *Journal of Power Technologies*, Vol. 99(2), pp.98~103.
  - 6) Lee, S., Hong, H., Park, J., & Yeom, E., 2021, “Real-time SCR-HP (Selective catalytic reduction-high pressure) valve temperature collection and failure prediction using ARIMA.” *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 19(1), pp.62~67.
  - 7) S. H. Lee, & E. S. Yeom., 2022, “Thermal flow analysis for predictive maintenance of high-pressure SCR (selective catalytic reduction) valves.” *한국가시화정보학회 학술발표대회 논문집*, 2022 Spring Conference of The Korean Society of Visualization, pp.77~78.