

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.11.897

디젤 NO_x 후처리 장치에 있어서 암모니아 SCR 시스템 혼합영역 내 가스유동의 유입열 수치모델링에 관한 연구

배 명 환* · 샤 이 풀*

(2008년 8월 12일 접수, 2008년 8월 20일 수정, 2008년 8월 25일 심사완료)

A Study on Numerical Modeling of the Induced Heat to Gaseous Flow inside the Mixing Area of Ammonia SCR System in Diesel NO_x After-treatment Devices

Myung-whan Bae and Syaiful

Key Words: Ammonia SCR System (암모니아 SCR 시스템), Diesel NO_x After-treatment Device(디젤NO_x 후처리 장치), Numerical Modeling(수치모델링), Induced Heat(유입열), Gaseous Flow(가스유동), Working Temperature(작동온도), Vortex(와류)

Abstract

Selective catalytic reduction(SCR) is known as one of promising methods for reducing NO_x emissions in diesel exhaust gases. NO_x emissions react with ammonia in the catalyst surface of SCR system at working temperature of catalyst. In this study, to raise the reacting temperature when the exhaust gas temperature is too low, a heater is located at the bottom of SCR reactor. At an ambient temperature, ammonia is radially injected perpendicular to the exhaust gas flow at inlet pipe and uniformly mixed in the mixing area after being impinged against the wall. To predict the turbulent model inside the mixing area of SCR system, the standard *k* - ϵ model is applied. This work investigates numerically the effects of induced heat on the gaseous flow. The results show that the Taylor-Görtler type vortex is generated after the gaseous flow impinges the wall in which these vortices influence the temperature distribution. The addition of heat disturbs the flow structure in bottom area and then stretching flow occurs. Vorticity strand is also formed when heat is continuously increased. Constriction process takes place, however, when a further heat input over a critical temperature is increased and finally forms shed vortex which is disconnected from the vorticity strand. The strong vortex restricts the heat transport in the gaseous flow.

1. 서 론

디젤기관은 다른 열기관에 비해 열효율, 내구성, 신뢰성 등의 면에서 우수하기 때문에, 이전부터 동력원으로 많이 활용되어 오고 있다. 연비가 좋은 디젤기관은 유가의 급상승, 지구온난화 등의 대책차원에서도 유리하기 하기 때문에, 최근

유럽, 일본, 미국 등에서는, 특히 소형 고속 디젤기관의 연구개발을 활발하게 진행하고 있다. 그러나 디젤기관은 배기 배출물, 그 중에서도 NO_x 및 매연 배출물이 다른 열기관에 비해 많기 때문에, 엄격해지는 배기규제값 미만으로 저감시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.⁽¹⁾

디젤기관에 있어서 연비를 향상시키고 배기 배출물을 저감시키기 위한 많은 연구개발을 통해 현재까지 상당한 성과를 이루어왔지만, 점점 증대되고 있는 고연비 및 저배기 배출물의 요구에 응답하기 위해서는 기관자체의 개량만으로는 이

* 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원

E-mail : mwbae@gnu.ac.kr

TEL : (055)751-6071 FAX : (055)762-0227

미 한계에 달했기 때문에, 특히 배기 배출물을 저감시키기 위해서는 후처리 장치가 필요하게 되었다. 그런데 배기 배출물 중에서도 NO_x 는 매연 배출물과 생성, 소멸, 저감 등의 과정이 상반되기 때문에, 동시에 저감시키는 대책을 수립하기는 쉽지 않지만, 후처리 장치에 의해 NO_x 배출물을 저감시키면서, 적어도 연비를 악화시키지 않을 수는 있다.⁽²⁾

본 연구에서는 연비를 악화시키지 않으면서 NO_x 와 매연 배출물을 동시에 저감시키는 후처리 조합 시스템으로서 선택적 환원 촉매인 SCR(selective catalytic reduction)과 필터를 적용하는 연구를 수행하고자 한다. 후처리 장치 중, SCR은 NO_x 배출물을 저감시키는 가장 좋은 방법 중의 하나로서 알려져 있는데, 본 연구에서는 일정한 온도범위에서 매연 저감용 촉매필터 내의 환원제로서 암모니아와 NO_x 배출물이 화학적 반응을 하도록 설계되었다.⁽³⁾

최근에는 안전 문제 때문에, SCR에 있어서 암모니아를 물에 희석한 요소(urea water solution)로부터 얻는다. SCR 시스템의 적용에 있어서 문제점은 암모니아의 이송뿐만 아니라, NO_x 환원에 관련된 중요한 변수 중의 하나인 촉매표면의 주위 작동온도이다.

최근, 넓은 온도범위(temperature window)에서 작동할 수 있는 SCR을 얻기 위한 기술이 많은 연구자들에 의해 개발되었다. Ha 등⁽⁴⁾은 150 ~ 400°C 온도범위에서 담체되는 NO_x 의 NH_3 -SCR에 대해 높은 촉매 활성도를 보여주는 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 촉매에 대한 Se, Sb, Cu, S와 같은 조촉매의 특성을 조사하였다. Padmanabha 등⁽⁵⁾은 저온 SCR에 대한 TiO_2 를 담체로 하는 산화망간(MnO) 촉매의 표면특성을 연구하였는데, 그들은 16.7 wt.% Mn/TiO_2 예추석(anatase)을 갖는 촉매가 175°C의 낮은 온도에서 높은 활성화를 나타내고 있음을 밝혔다.

Tsykoza 등⁽⁶⁾은 암모니아에 의한 NO_x 환원용 허니컴 모노리스 V-W-Ti-O 촉매의 특성에 미치는 TiO_2 계의 영향을 고찰하였다. 그들은 촉매담체 TiO_2 가 225°C에서 암모니아에 의한 선택적 NO_x 환원에 있어서 미미한 활성도를 보여줌을 알았다. Wu 등⁽⁷⁾은 콜로이드 용액-겔 방법(sol-gel method)에 의해 준비된 저온 암모니아 NO SCR용 $\text{MnO}_x/\text{TiO}_2$ 에 기초한 촉매 특성을 실험적으로 연구하였다. 그들은 정상 및 과도 상태 하에서 온

도범위 353 ~ 523 K의 SCR 특성을 조사하는데 초점을 맞춰, 최적조건 하의 온도 423 K에서 NO 제거효율이 90%를 초과할 수 있음을 밝혔다.

NO_x 및 매연 배출물의 저감효율을 최대한 높이기 위해, Kim⁽⁸⁾은 촉매표면에 몇 가지 물질을 코팅하는 새로운 $\text{MnO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2/\text{SiC}$ 의 SCR 촉매필터를 개발하였다. 저자는 온도범위 493 ~ 603 K의 모사혼합가스 리그실험에서 이러한 SCR 촉매필터에 의해 NO 배출물을 95% 이상 저감시킬 수 있고, 또한, NH_3 슬립도 거의 발생되지 않고 있다고 했다.

상기 연구결과를 통해 SCR 촉매 주위의 작동 온도는 SCR 후처리 시스템의 NO_x 배출물 저감에 중요한 변수 중 하나가 됨을 알 수 있다. 이전 연구에서,^(3,9) 저자들은 SCR 장치 내의 3개 촉매필터 주위 온도분포를 CFD 시뮬레이션 모델링에 의해 조사를 하여 높은 Reynolds수에 대한 촉매필터 주위 최대온도분포가 SCR 장치의 혼합영역 내에서 가스유동에 유입열이 가해짐으로써 변화됨을 밝혔다. 그러나 이전 연구에서는 가스유동에 미치는 유입열의 영향에 관해서 구체적으로 검토하지 않았다.

본 연구에서는 가스유동장을 설명하여 유입열이 혼합영역 내의 가스유동에 따른 속도 및 온도 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 수치 시뮬레이션에 의해 조사하는 것이 주요 목적이다.

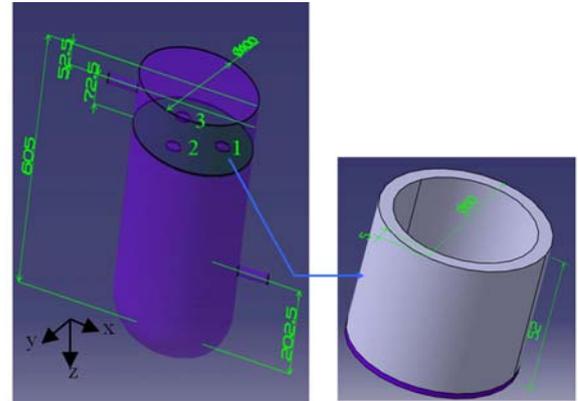
2. SCR 촉매필터 장치

Photo. 1에서 보여주고 있는 실제 SCR 촉매필터 장치의 설계연구에 본 모델링의 접근방법이 적용된다. 혼합영역 내부의 온도를 모니터링하기 위해 열전대가 사용되었는데, 열전대는 SCR 장치의 바닥에 위치한 가열기의 사용 때문에, 입구라인보다 위로 7 cm 떨어진 반응기 중심에 설치되었다.

직경 3 cm의 노즐을 갖는 3개 공기 주입기가 촉매필터보다 2 cm의 상단에 각각 설치되었다. 필터표면에 포집된 매연을 제거하기 위해, 17분 간격으로 0.5초 동안 교대로 0.3 MPa의 압축공기가 3개의 필터사이에 분사된다. 정상상태 작동(17분 지연 시간 동안)과 1273 K의 가열온도에서 543 K의 혼합영역온도를 갖는 실험에 의해 90%



Photo. 1 Practical SCR catalytic filter device



(a) SCR reactor (b) Catalytic filter
Fig. 1 Geometric modeling of SCR system

의 NO_x 환원이 달성되었다.⁽⁸⁾

3. 모델링

3.1 물리적 모델

SCR 반응기와 촉매필터의 물리적 모델은 Fig. 1과 같다. 촉매필터는 입구라인으로부터 27.75 cm의 상단에 위치해 있다. 촉매필터 1, 2 및 3은 각각 120° 간격으로 SCR 반응기 내부의 혼합 길이방향에 대해 수평면 상에 설치되어 있다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 것처럼 촉매필터의 바닥부분은 판으로 밀폐되어 있기 때문에, 가스유동은 오직 촉매필터의 표면으로만 통과한다.

3.2 수치적 기법

본 연구에서는 Star-CD v. 4.02가 3차원 CFD 시뮬레이션 도구로서 사용되었고, 배출가스가 뜨거운 공기로서 모델화되었다. 시스템의 주요 유동은 비압축성 및 정상상태 조건으로 가정하였고, SCR 장치내의 난류유동을 모델화하기 위해서 표준 $k - \epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 압력과 속도를 계산하기 위해 SIMPLE(semi-implicit method for the pressure-linked equation) 해법 알고리즘을 적용하였다.

수렴기준 요구치는 최대 허용오차가 적어도 0.001이하이거나 최대 반복횟수가 1000회일 경우로 하였다. 대류확산 방정식의 영향을 고려하기 위해 풍상차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였다. 본 논문에서는 다공성 셀을 두 개의 상수 a 와 β 를 갖는 등방성의 다공매체 모델로

서 가정했다. 이러한 상수는 분자점도, 유체밀도 및 다공성 매체내의 입자 평균직경과 같은 다공성 매체의 파라미터와 다공성 인자에 의존한다.

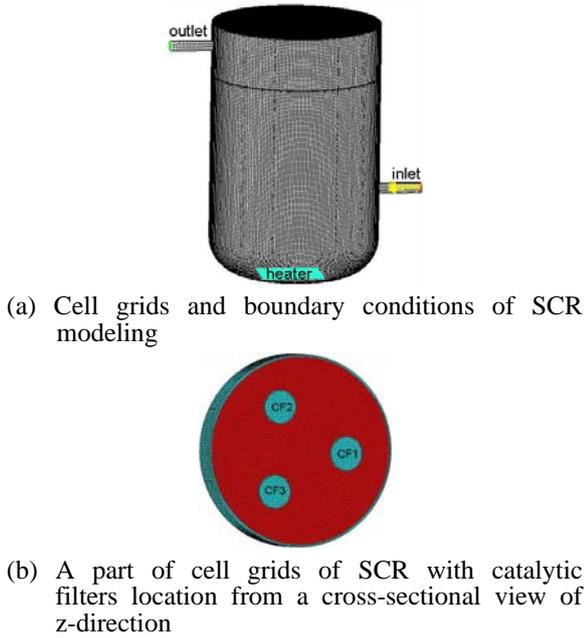
암모니아 분사는 라그랑지안 모델(Lagrangian model)로 가정하였다. 이 경우에 유동은 가스형태의 연속적이며 하나의 분산된 상으로 이루어져 있고, 연속적이며 분산된 상 사이에 결합이 나타났다. 이것은 분산된 상의 운동이 연속적인 상의 운동에 의해 영향을 받고, 반대로 연속적인 상의 운동이 변위, 분열간기 운동량 질량(interphase momentum mass) 및 열전달 효과와 같은 분산된 상의 운동에 의해 영향 받음을 의미한다.

본 연구에서는 공기분사 기간 사이인 지연시간 동안의 정상상태 과정만을 고려하고 있기 때문에 분사된 공기과정은 모델에 채용하지 않았다.

3.3 경계조건 및 메시생성

본 시뮬레이션에서는 연속적인 상의 경우에 대한 경계조건은 입구, 출구 및 벽이고, 분산된 상의 경우에 대한 경계조건은 분사된 암모니아이다. 계산은 400, 450 및 500 K와 같은 다른 3 종류 배출가스온도 조건에서 이루어졌다.

본 모델링에서는 Reynolds수를 입구경계에 수직한 배출가스 유동의 속도벡터로 계산했는데, Reynolds수는 저속유동의 경우에 100이고, 고속유동의 경우에는 500과 1000이다. 입구경계에서의 난류강도는 5%로 가정하였고, 난류길이 값은 0.0364 cm이었다. 출구의 경계조건은 미지수인데, 이를 추정하기 위해서 경계셀 중심 부근에서 경계면 중심(압력의 경우를 제외하고)으로 합해지는



(a) Cell grids and boundary conditions of SCR modeling

(b) A part of cell grids of SCR with catalytic filters location from a cross-sectional view of z-direction

Fig. 2 The trimmed cell grids and boundary conditions of SCR modeling devices with catalytic filters location

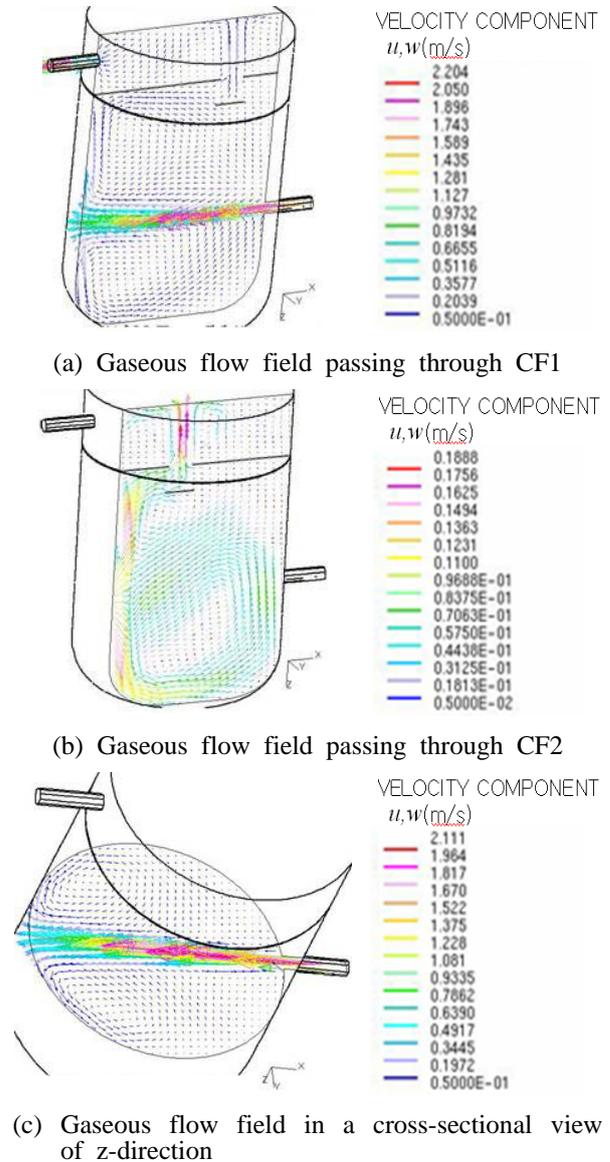
하나의 선 방향에 따라 영구배(zero-gradient)를 가정하고, 전체 출구유동은 이 경계를 통과한다. 입구관에서는 30 mg/s의 질량유량과 293 K의 온도에서 환원제인 암모니아가 배출가스 유동에 수직한 반경방향으로 분사된다. 바닥벽을 제외하고, 모든 벽경계는 단열로 설정하였다. 그러나 가열기가 위치한 일부의 바닥벽(이하, 가열벽이라 부른다.)에는 각각 다른 773, 1073 및 1273 K의 일정한 온도로 유지되었다.

SCR과 같은 디젤 NO_x 후처리 시스템의 조밀한 설계를 위해서 분할 셀(trimmed cell) 격자형이 사용되었다. Fig. 2(a)에 나타난 것처럼 SCR 시스템의 모델은 입구, 출구 및 가열벽면 경계를 포함하여 900,000셀로 이루어져있다. 또한, Fig. 2(b)에서 보여주는 SCR 촉매필터의 부분에 대한 셀격자는 빨간색의 유체셀로 나타냈고, 벽면경계 근처는 파란색의 유체셀로 나타내었다. Fig. 2(b)에서 촉매필터는 Fig. 1(a)에서 나타난 촉매필터 위치번호 1, 2 및 3에 일치하도록 각각 CF1, CF2 및 CF3로 표시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 가스유동장

Fig. 3은 y방향 단면에서 Reynolds수 1000에 대



(a) Gaseous flow field passing through CF1

(b) Gaseous flow field passing through CF2

(c) Gaseous flow field in a cross-sectional view of z-direction

Fig. 3 Cross-sectional view of gaseous flow field inside SCR system with an exhaust gas temperature of 500 K without a heater for Re = 1000

해 CF1 및 CF2를 통과하는 SCR 시스템 내부의 가스유동장을 보여주고 있다. 그런데 CF3을 통과하는 유동장의 단면은 CF2를 통과하는 유동장의 단면과 유사한 경향을 나타내고 있기 때문에 본 논문에서는 제시하지 않았다.

Fig. 3에서 보여준 것처럼 재분배 유동에서는 오목한 벽에 충돌한 후 Taylor-Görtler형 와류⁽¹⁰⁾가 발생된다. Xu 등⁽¹¹⁾의 연구결과에 따르면, Taylor-Görtler형 와류의 존재 때문에, 2차원보다는 오히려 3차원에서 오목한 벽상의 유동이 더 많이 발생된다고 했다. Fig. 3(a)에서는 가스유동이 벽에

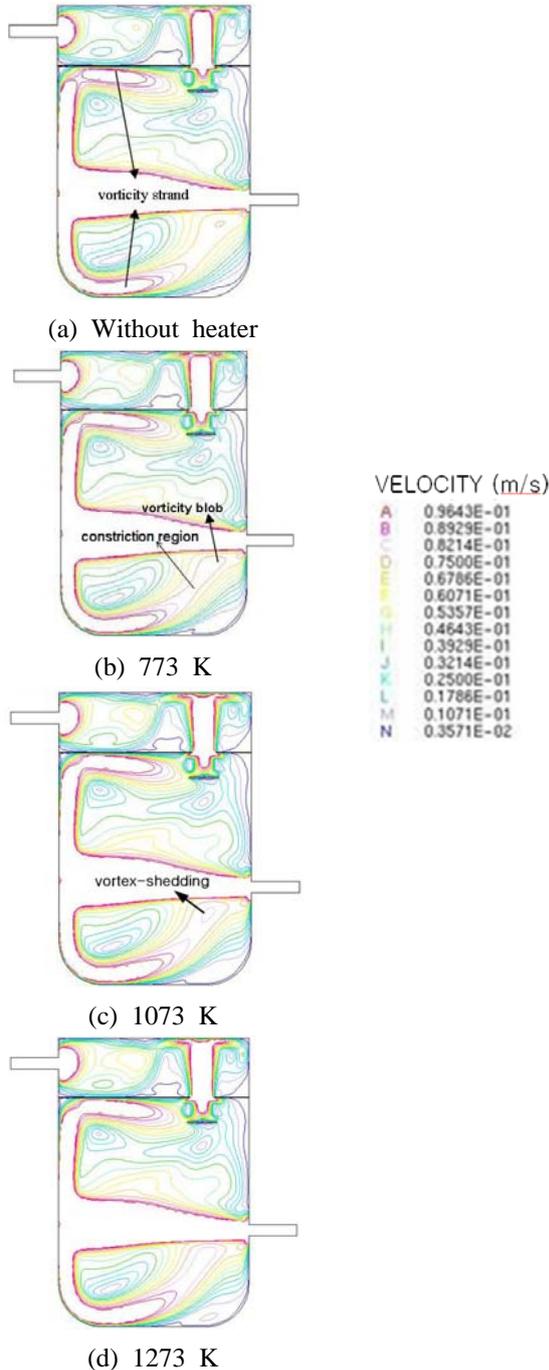


Fig. 4 Velocity contour of gaseous flow in SCR system for an exhaust gas temperature of 500 K with and without the heating temperature at $Re = 1000$

충돌한 후, 유동방향의 두 개 Taylor-Görtler 와류가 형성된다. 또한, 이러한 와류는 Fig. 3(c)에서 보여준 z방향의 단면도에서도 분명하게 볼 수 있다. 만일 가스상 입자 중에 와류가 있다면, SCR 시스템의 혼합영역에서 발생된 와류는 가스상 입자의 열전달을 발생시킬 것이다. Niazmand 등⁽¹²⁾

은 강한 와류가 주변유동에 변동을 유발시키고, 잠재적으로 열전달률에 더 많은 영향력을 미치고 있음을 관찰했다. 본 연구에서는 가스유동에 미치는 열전달에 대한 와류의 영향을 뒤 부분에서 고찰한다.

4.2 저속 등고선에 미치는 유입열의 영향

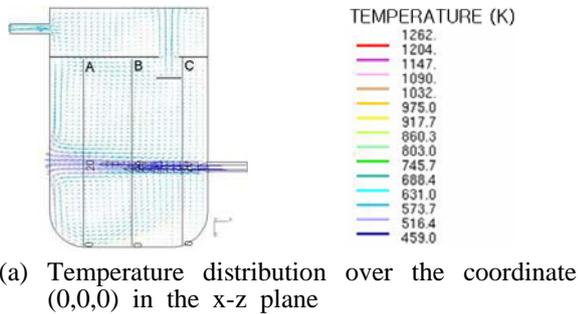
Fig. 4에서는 SCR 시스템에 유입열이 있을 경우와 없을 경우의 가스유동 저속 등고선을 보여주고 있다. Fig. 4와 같이 가열온도를 증가시키므로써, 특히 가열기가 위치한 바닥벽에 가까울수록 속도 등고선이 가스유동 방향으로 퍼져있다. 일반적으로 유입열의 추가는 높은 온도차로 인한 유체에 미치는 부력효과를 도입함으로써 저속을 유발시킨다.⁽¹³⁾

Fig. 4(a)에서는 와도 스트랜드(vorticity strand)⁽¹⁴⁾가 최고속도에서 형성되고 있음을 보여주고 있다. 또한, Fig. 4(b)에서는 유입열이 증가되어 와도 덩어리(vorticity blob)가 생성될 때, 유동이 퍼짐을 알 수 있다. 0.075 m/s의 속도를 갖는 유동이 늘어지는 Fig. 4(a) 및 (b)를 비교함으로써 이러한 과정을 관찰할 수 있다. 유동이 유사한 속도영역을 가질지라도, 본 연구에서는 와도 덩어리가 가열 온도 773 K 이상으로 증가시키는 경우에만 생성되고, 또한 Fig. 4(b)에서 나타나는 것처럼 수축과정이 발생된다. 임계온도(수축영역이 나타나는 온도) 이상으로 유입열이 증가되면, Fig. 4(c)에서 알 수 있는 것처럼 와류분계(vortex-shedding)가 형성된다. 이러한 고찰결과로부터, 가열온도가 증가될수록 유입열에 의해 유동구조가 늘어짐을 알 수 있다.

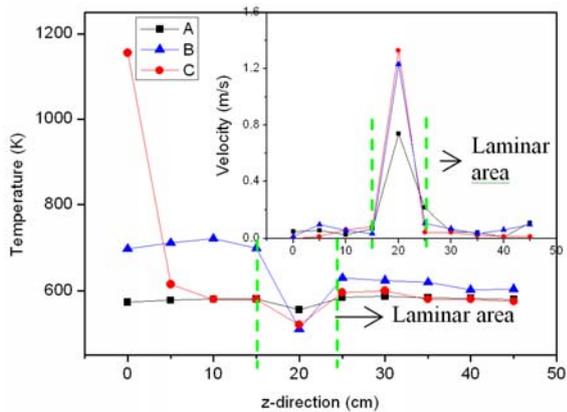
4.3 온도분포에 미치는 와류의 영향

앞에서 고찰한 것처럼, 가스유동이 오목한 벽면과 충돌한 후에 Taylor-Görtler 와류가 발생된다. 이 때 강한 와류는 열전달률에 영향을 줄 수 있다. SCR 시스템에서 온도분포에 미치는 와류 영향을 관찰하기 위해 Fig. 5(a)에 보여준 것처럼 3개 선에 대한 온도분포 결과의 단면도를 제시하였다. 각 선은 관찰영역을 나타내고 있는데, 선 A는 충돌영역의 와류 내이고, 선 B는 충돌영역의 와류와 보다 가까운 영역이고, 선 C는 충돌영역 와류와 멀리 떨어진 영역이다.

Fig. 5(b)에는 각 선에 대한 온도 및 속도 분포



(a) Temperature distribution over the coordinate (0,0,0) in the x-z plane



(b) Temperature and velocity distributions in the lines A, B and C along stream direction

Fig. 5 Temperature and velocity distributions of gaseous flow in the lines A, B and C along stream direction for an exhaust gas temperature of 500 K with heating temperature of 1273 K at $Re = 1000$

를 나타내고 있다. 선 A는 $5\text{ cm} \leq z \leq 15\text{ cm}$ 와 $25\text{ cm} \leq z \leq 45\text{ cm}$ 범위에서 최고온도 곡선이 형성된다. 와류의 중심이 위치된 $z = 10\text{ cm}$ 와 $z = 30\text{ cm}$ 에서는 국부적 최고온도가 나타났다. 온도가 더 높은 영역으로부터 초래된 고립된 와류가 형성된 와류의 중심에서 강한 와류 순환이 존재했다. 따라서 와류영역 중심에서의 국부적 온도는 그 주변온도보다 더 높다. 또한, 와류가 존재하는 $25\text{ cm} \leq z \leq 45\text{ cm}$ 의 범위에서도 이러한 현상이 발생한다.

Fig. 5(b)의 선 B에서 온도는 $0\text{ cm} \leq z \leq 15\text{ cm}$ 의 범위에서 높게 나타났다. 이 영역에서 온도가 보다 높게 나타난 이유는 가열벽으로부터 가스유동까지 열을 전달하는 유체의 확산 때문이다. 또한, 이러한 높은 온도는 이 영역에서의 와류영향에 의한 것임을 관찰할 수 있다. Fig. 5(b)에서 알 수 있는 것처럼 와류형성으로 인한 고온유체의 동반 때문에 온도상승이 초래된다. 와류로부

터 멀리 떨어진 선 C의 온도분포는 유체 수평류(advection)에 의해 좌우된다. 이 선에서 와류의 영향은 없다. 이 영역에서 가장 높은 온도는 가열벽으로부터 가스유동으로의 수평류에 따른 열전달로 인한 것이다.

Fig. 5에서는 유체의 더욱 빠른 속도가 층류영역에서 나타났고, 모든 3개의 관찰영역(선 A, B 및 C)은 최소온도에 도달했다. 그것은 층류영역에서의 열수송은 대류보다 전도에 의해 지배됨을 의미한다. 입구영역으로부터 주요유동의 높은 속도 때문에 층류영역으로의 유체확산은 이루어지지 않았다. 아마도 층류영역에서의 다른 선 B 및 C보다는 더 높은 온도로 인해 초래되는 선 A에서 낮은 유체동반이 생길 것이다.

4.4 촉매필터 주위의 온도분포

Fig. 6은 Reynolds수가 1000일 경우 배기온도 500 K에서 SCR 장치의 3개 촉매필터 주위의 온도분포에 대한 3D 모델링 결과를 나타낸 것이다. 앞에서 고찰한 것처럼 본 모델링에서는 3개 Reynolds수가 입구경계에서 존재한다. 그림에서 온도를 가열할 때, $Re = 1000$ 에 대한 모델링의 경우에만 최고 온도분포의 변화가 발생됨을 알 수 있다. Reynolds수가 100과 500일 경우에는 최고 온도분포가 변하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 $Re = 1000$ 에 대한 모델링만을 고찰하기로 한다.

Fig. 6(a)에서 알 수 있는 것처럼 온도를 가열하지 않는 경우에는 CF3 위치에 더 가깝게 최고온도가 분포되었다. 그러나 Fig. 6의 (b)~(d)에 나타낸 것처럼 가열하여 유입열이 가스유동에 가해질 때, 최고 온도분포는 CF1 위치에 더 가깝게 이동되었다. 그런데 가열온도가 증가될수록 최고 온도분포의 등고선은 유사하게 변화하고 있지만, 온도분포의 차이가 더 커지기 때문에, 온도분포의 균일성은 더 떨어짐을 알 수 있다.

가스유동에 열이 가해질 때, 가열벽 경계로부터 고온유체의 수평류에 의해 최고온도의 변화가 발생하게 된다. Fig. 7에서는 x-방향 단면도의 좌표 $(-6,0,0)$, $(9,0,0)$ 및 $(13,0,0)$ 에 대한 위치에서 온도분포를 나낸 것이다. Fig. 7(a)에서 보여주는 것처럼 가장 높은 $Re = 1000$ 에서는 유체의 수평류가 CF1 영역에 더 가깝게 도달된다. 한편, Fig. 7(b)에서 알 수 있는 것처럼 $Re = 500$ 에서도 유체의 수평류는 발생하지만, $Re = 1000$ 보다 낮은

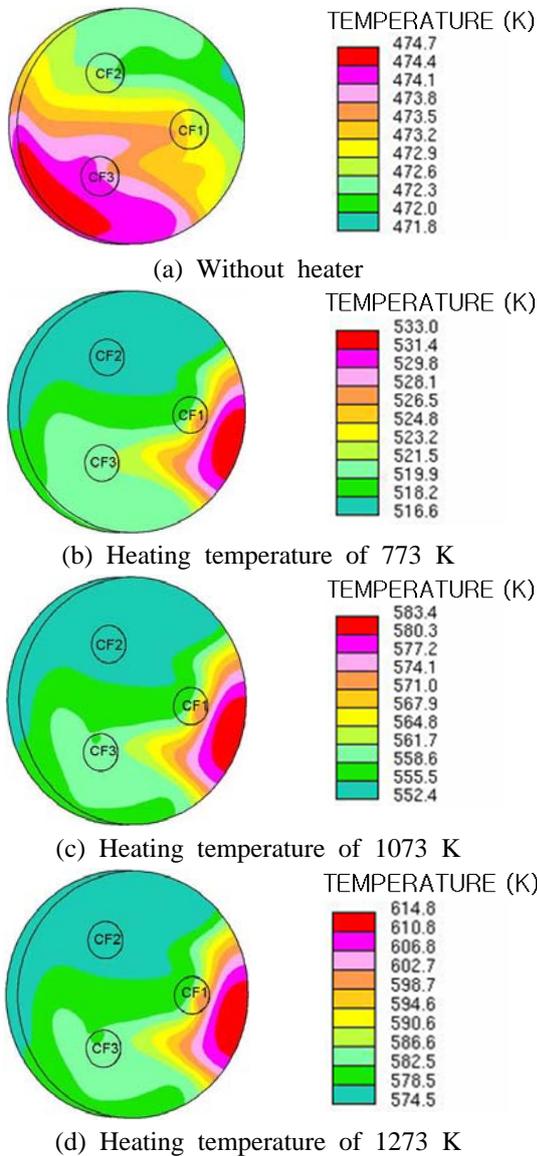


Fig. 6 3D Modeling results of temperature distribution around three catalytic filters of SCR system for an exhaust gas temperature of 500 K with heating temperature variations at $Re = 1000$

속도 때문에 CF1 영역에 도달하지는 못했다. Fig. 7(c)의 $Re = 100$ 과 같은 낮은 Reynolds수에서는 수평류를 관찰할 수 없었다.

5. 결론

본 연구에서는 SCR 시스템의 혼합영역 내부의 가스유동에 대한 유입열의 수치 모델링을 했다. Taylor-Görtler 와류는 혼합영역에서 형성되었고, 가스유동 내의 열수송은 혼합영역에서의 이러한 와류에 의해 영향 받음을 알았다. 또한, 보다 고

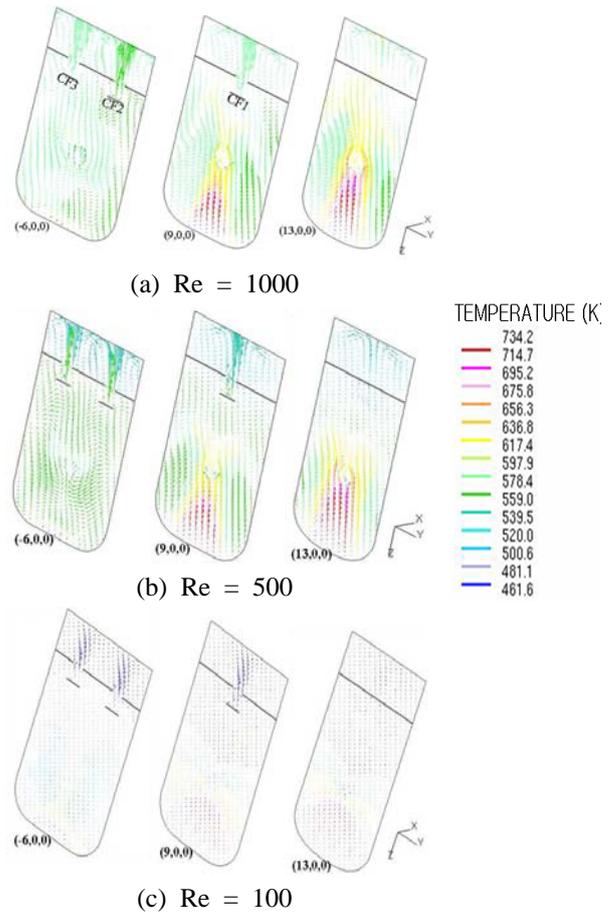


Fig. 7 Temperature distribution of gaseous flow in SCR system for an exhaust gas temperature of 500 K with heating temperature of 1273 K at three kinds of Reynolds number

온인 영역에서 초래된 와류 중심에서 와류에 의해 온도가 증가되었다.

낮은 가스유동 속도는 가열온도의 증가에 의해 영향을 받고, 가열온도가 임계온도 이상일 때 와류분계가 형성되었다. 그러나 이러한 와류는 가스유동 내의 열수송에 많은 영향을 미치지 않았다. 또한, 유입열은 가열벽에 더 가깝게 유동 구조가 퍼져나갔다.

$Re = 1000$ 에서 가스유동에 열이 가해질 때 촉매필터 주위의 최고온도가 변화되었고, 바닥의 가열벽으로부터 고온유체의 수평류에 의해 최고온도의 변화가 발생되었다. 그러나 낮은 속도 때문에 $Re = 100$ 과 500 의 최고 온도분포는 $Re = 1000$ 보다 변화되지 않았다.

수치 시뮬레이션의 결과에 의한 고찰에 따르면, 특히 가열온도가 증가될수록 $Re = 1000$ 에서

SCR 시스템 촉매필터의 주위온도가 균일하게 분포되지 않았다. 이러한 이유는 입구영역 및 가열기의 위치에 따른 유동장의 차이로 인해 온도분포의 차가 발생되었기 때문이다. 따라서 추후의 연구에서 저자들은 SCR 시스템의 촉매필터 주위 온도분포에 미치는 혼합 영역 내부의 가열기 위치의 영향을 조사하는 것을 검토하려고 한다.

후 기

본 연구는 “보일러의 매연 및 질소산화물 배출물 동시저감용 촉매필터 EGR(FGR) 조합시스템 개발(Development of a Combined Catalytic Filter EGR(FGR) System for Reducing Soot and NO_x Emissions Simultaneously in Boilers)”에 대한 중간 결과물로서 경상대학교 공학연구원 제15차 산·학 공동 기술개발컨소시엄 과제, “LNG선 보일러의 질소산화물 배출물 저감용 SCR 후처리 시스템 개발(Development of SCR After-treatment System for Reducing Nitrogen Oxides Emissions in LNG Ship's Boilers)”에 대한 부분적 결과물로서 광성(주)와 산·학 기술개발컨소시엄 위탁과제 지원에 의해 수행되었다. 또한, 본 연구는 수행 중 2단계 BK21 및 NURI 사업의 부분적 지원을 받았기에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bae, M. W., Ku, Y. J. and Lee, B. S., 2006, "A Study on Characteristics of Performance and NO_x THC Emissions in Turbo Intercooler ECU Common-rail Diesel Engines with a Combined Plasma EGR System," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 10~21.
- (2) Hirata, K., Masaki, N., Ueno, H., Iijima, M. and Akagawa, H., 2005, "Development of Urea-SCR System for a Heavy-Duty Commercial Vehicle," *Nissan Diesel Technical Review*, Vol. 65, pp. 75~81.
- (3) Syaiful, and Bae, M. W. 2008, "Numerical Simulation of Working Temperature Distribution around Catalytic Filters in Ammonia SCR Device of Diesel NO_x After-treatment System," *KSAE 30th Anniversary Conference 2008 Proceeding on Automotive Engineering (International Session)*, Volume IV(KSAE08-S0272), pp. 1691~1698.
- (4) Ha, H. P., Maddigapu, R. P., Pratap, R., Pullur, A. K., Lee, K. J. and Jung, S. H., 2008, "SO₂ Resistant Antimony Promoted V₂O₅/TiO₂ Catalyst for NH₃-SCR of NO_x at Low Temperatures," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 78, pp. 301~308.
- (5) Padmanabha, R. E., Neeraja, E., Sergey, M., Punit, B. and Panagiotis, G. S., 2007, "Surface Characterization Studies of TiO₂ Supported Manganese Oxide Catalysts for Low Temperature SCR of NO with NH₃," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 76, pp. 123~134.
- (6) Tsykoza, L. T., Kulikovskaya, N. A., Zhulanov, N. K. and Ismagilov, Z. R., 1997, "Effect of the Origin of TiO₂ on the Properties of Honey-comb Monolith V-W-Ti-O Catalysts for Selective NO Reduction by Ammonia," *Reaction Kinetic Catalytic Letter*, Vol. 60, No. 2, pp. 323~330.
- (7) Wu, Z., Jiang, B., Liu, Y., Zhao, W. and Guan, B., 2007, "Experimental Study on a Low-temperature SCR Catalyst Based on MnO_x/TiO₂ Prepared by Sol-Gel Method," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 145, pp. 488~494.
- (8) Kim, Y. A., 2007, "The Effect of MnO₂ Addition on the V₂O₅/TiO₂ Catalytic Filters for NO Reduction," *Graduate School Master Thesis of Gyeongsang National University*.
- (9) Syaiful, Bae, M. W., Han, Y. W., Lee, B. S., Im, K. C. and Choi, J. H., 2007, "Temperature Modeling on Catalyst Surface Using MnO₂-V₂O₅-WO₃/TiO₂/SiC as a Reference Catalytic Filter in Ammonia SCR System of Diesel NO_x After-treatment Devices," *2007 Fall Conference Proceeding on Automotive Engineering (International Session)*, Volume IV(KSAE07-F0288), pp. 1782~1790.
- (10) Souris, N., Liakos, H. and Founti, M., 2004, "Impinging Jet Cooling on Concave Surface," *AICHE Journal*, Vol. 50, No. 8, pp. 1672~1683.
- (11) Xu, C. X., Choi, J. I. and Sung, H. J., 2003, "Identification and Control of Taylor-Görtler

- Vortices in Turbulent Curved Channel Flow," *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 12, pp. 2387~2393.
- (12) Niazmand, H. and Renksizbulut, M., 2004, "Heat Transfer from a Rotating Sphere Interacting with a Vortex," *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2269~2281.
- (13) Kieft, R., Rindt, C. C. M., van Steenhoven, A. A., 2007, "Near-wake Effects of A Heat Input on the Vortex-shedding Mechanism," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 938~947.
- (14) Green, R. and Gerrard, J., 1993, "Vorticity Measurements in the Near Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 246, pp. 675~691.