

SCR 촉매의 공간속도 및 선속도가 NO_x 제거 효율에 미치는 영향

박진우* · 박삼식* · 구건우** · 홍정구†

Effect of NO_x Removal Efficiency according to Space Velocity and Linear Velocity of SCR Catalyst

Jin-woo Park, Sam-sik Park, Kun Woo Ku and Jung Goo Hong

Key Words: Nitrogen oxide(질소산화물), SCR(선택적촉매환원), Space velocity(공간속도), Area velocity(면속도), Linear velocity(선속도)

Abstract

Air pollutants nitrogen oxides are inevitably generated in the combustion reaction. Its amount trend is steadily increasing because the rapid modern industrialization and population growth. For this reason, NO_x is controlled to reducing the harmful components in the exhaust gas. So Marine Environment Protection Committee (MEPC) take effect 'Tier I', 'Tier II' of air pollution regulation in 2005 and 2011 respectively. According to NO_x emissions are strictly regulated management of the vessel through them. In addition, since 2016 the regulation enter into force in the next step 'Tier III' was confirmed by MEPC 66th committee. It's 80% enhanced emissions limits than the 'Tier I' Alternatively these emission regulation, research is actively being carried out about exhaust gas after-treatment methods through the vessel application of Selective Catalytic Reduction(SCR). Therefore depending on the basic specification of cell density according to the Area velocity, Space velocity, Linear velocity is studied the effects of NO_x removal efficiency

1. 서 론

질소산화물(Nitrogen Oxide, NO_x)은 연소반응에서 필연적으로 발생하는 대기 오염 물질로써, 급속한 현대 산업화 및 인구 증가에 따라 그 양이 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.

질소산화물이란 질소와 산소로 이루어진 화합물로서 이들의 혼합물을 지칭할 때 일반적으로 사용되는 용어이며, 그 중에서도 대기 오염의 주범이 되는 NO와 NO₂

를 총칭해 NO_x라고 한다. 지속적인 산업화에 따른 NO_x 배출농도 증가로 1980년대 이후 대기오염에 대한 관심이 지속적으로 증가하여 대기환경보호기구가 설립되었고, 1990년대 기초 대기환경규제가 최초로 발효됨에 따라 배출원 및 배출농도 등의 연구가 지속적으로 이루어졌다. 현재는 선진국을 필두로 개발도상국까지 규제에 대한 강도 차이는 있지만, 대기환경규제에 따른 설비개선뿐만 아니라 배출 가스를 규제하기 위한 다양한 방안들이 시도되고 있다⁽¹⁾. Fig. 1은 선박에 대한 규제 경향을 보여주는 그래프이다⁽²⁾. 대표적인 해상 교통 수단인 선박에 대해 국제해사기구 해양환경보호위원회는 'Tier'라는 명칭으로 2005년 5월 최초로 선박 엔진 작동에 따라 생성되는 NO_x에 대한 배출 규제를 적용하였다. 이는 해당년도 이후 제조하거나 주요한 설비 개조가 이뤄지는 선박에 설치된 출력 130 kW를 초과하는 디젤엔진을 대상으로 적용되었으며, 2008년 10월 질소

(Received: 31 May 2016, Received in revised form: 7 June 2016, Accepted: 8 June 2016)

*주식회사 나노 연구소

**자동차부품연구원 대구경북본부

†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

E-mail : jghong70@knu.ac.kr

TEL : (053)950-6570 FAX : (053)950-6550

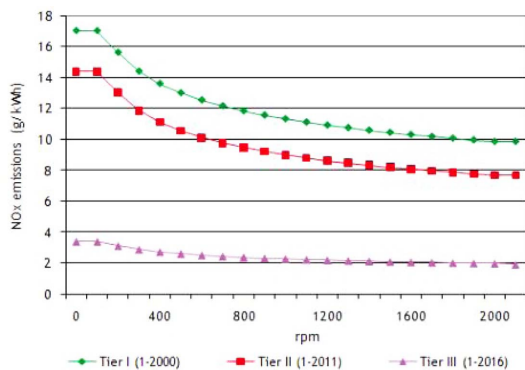


Fig. 1 Mandatory Marpol Annex IV emission standards⁽²⁾

산화물 배출량을 종전에 비해 15% 줄이는 새로운 규제 기준(Tier II)을 발효하였다. 더불어, 전년도인 2015년 해양환경보호위원회(MEPC) 66차 회의에서는 Tier III 요건의 이행시기 개정안이 최종적으로 채택되었으며, 이는 2016년도 1월 제조 혹은 주요 개조 선박에 대한 3단계 배출 규제를 의미한다. 종전 단계인 Tier II에 비해 약 76%, 최초 발효 단계인 Tier I에 비해 약 80%가 감소한 수치로써, 굉장히 높은 규제 정도를 나타낸다. Tier III 배출 규제가 발효됨에 따라, 2016년 1월 1일 이후로 제조된 선박이 규제 발효 지역으로 운항하게 된다면 이를 만족할 수 있는 기술력을 지닌 추가 장비의 탑재가 이루어져야 한다⁽¹⁻⁴⁾.

이와 같은 규제 만족을 위한 NOx 저감 기술로는 연료 중 질소성분을 제거하는 연료개질(Fuel denitrication)법⁽⁵⁻⁷⁾, 연소방법의 개량 및 연소장치의 개조를 통하여 NOx 발생을 억제하는 연소 중 탈질법 그리고 배연탈질에 의해 생성된 NOx 배기가스를 처리하는 연소 후 탈질법으로 나눌 수 있다^(3,6).

선박용 엔진에서의 연소방법 개량이란 고온 연소 과정에서 온도 및 산소 농도에 의존하기 때문에 엔진 내에서 이와 같은 요소(온도 및 산소농도)를 저감함으로써 NOx를 감량하는 방법으로 운전비용이 저렴하고 간단하게 적용할 수 있다는 장점은 있으나 운전효율 문제와 낮은 탈질효율로 인해 Tier III의 대기환경 규제를 만족하기에는 한계가 있다. 연소 후 탈질법은 흡착법(Adsorption), 전자선조사법(Electron Beam Irradiation), 선택적비촉매환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR), 선택적촉매환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR) 등이 있는데, 이 중에서도 NOx의 제거 효율이 가장 우수한 SCR을 이용한 방법이 각광받고 있는 추세이다. SCR법은 탈질촉매와 환원제를 이용하여 NOx를 질

소와 수증기로 전환하는 방법으로, 상기의 타 건식법에 비해 고정자산 투자와 운전비가 저렴하고, NH₃ 공급기와 반응기만이 필요한 단순공정이며, 높은 NOx 제거효율과 폐수 등의 부산물이 없어 현재 발전소, 소각로 등의 고정원 배연탈질 기술로 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 배기가스 성분에 따른 촉매의 내구성 및 미반응 NH₃에 의한 2차 반응 오염물의 배출 문제와 300°C 이하의 저온영역에서 활성이 떨어지는 단점을 가진다. 더불어, 운송을 기초 목적으로 하는 선박의 경우 엔진의 25~30% 수준의 체적을 차지하는 탈질촉매 반응기가 목적에 부합하지 않아 그 체적을 최소화하는 것을 목적으로 SCR 시스템 설비의 최적화 또는 SCR과 EGR의 hybrid 병합 설비 구축을 위한 시스템 적용에 대한 연구 등이 활발히 수행되고 있다⁽⁴⁾.

SCR 시스템에 사용되는 SCR 촉매는 촉매 형태와 제조방법에 따라 벌집(honeycomb)형, 평판(plate)형, 파(corrugate)형으로 구분된다^(5,8). 그 중에서도 본 연구에서 사용된 벌집형 SCR 촉매는 촉매의 속과 길이 같은 재질로 구성된 모노리틱 일체형으로서 어느 부위든 조성이 동일하고 촉매의 개구부는 다양한 기하학적 모양으로 제조가 가능하며, 단면은 일반적으로 사각형으로 구성되어 있어 단위부피당 반응면적이 넓고, 촉매재생이 용이한 장점을 가진다. 최근 들어 화력발전소와 같은 고정원의 경우 저가탄 연료 사용 비중이 증가함에 따라 강도 및 내구성이 우수한 평판형 촉매의 사용 비중이 높아지고 있으나, 단위 부피당 접촉 면적이 낮은 단점으로 인해 공간 집약적 설치를 요구하는 선박에서의 사용이 제한적이다. 선박의 SCR 적용에 있어서 단위부피당 접촉 면적이 우수하여 타 유형 촉매 대비 시스템의 집약적 설치가 가능하고, 압력 및 진동 등의 충격에 있어 내구성이 상대적으로 우수한 벌집형이 주로 사용되고 있다^(5,8).

본 연구에서는 공간 집약적 설비 운용이 이루어져야 하는 선박의 특성에 따라 SCR 촉매가 동일한 접촉 면적을 가지고 유동 분포가 균일하다고 가정하였을 때, 촉매의 셀(cell) 밀도에 따른 공간속도(Space Velocity), 면속도(Area Velocity) 및 선속도(Linear Velocity)에 따라 질소산화물 제거 효율에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법 및 장치의 구성

2.1 실험 방법

공간속도(Space Velocity, SV), 면속도(Area Velocity,

AV), 선속도(Linear Velocity, LV)가 SCR 촉매의 성능에 미치는 영향을 판단하기 위해, 두 가지의 변수를 이용한 시험을 진행하였다. 촉매의 파라미터 수치에 대해서는 변수 조건인 면속도, 공간속도, 선속도로 구분되며, 이는 SCR 촉매의 사양에 의존된다. 정사각형(square) 촉매의 기하학적 특성을 촉매 채널의 한변의 길이 $a_{ch}(=b_{ch})$ 와 내벽두께 $a_t(=b_t)$ 그리고 셀 개수 n 의 함수로 표현할 수 있다. a_{ch} 와 a_t 는 원하는 채널의 모양에 따라 조절되어 모노리스 반응기의 기하학적 특징인 접촉면적(specific surface area), 공극률(void fraction) 그리고 셀밀도(cell density) 등을 결정짓게 된다.

Figure 2는 각 파라미터 수치에 대한 $a_{ch}(=b_{ch})$ 및 $a_t(=b_t)$ 등의 촉매 제원에 대한 정보이며, 이를 이용한 파라미터 계산 방법은 다음과 같다. 공간속도는 체적(V_C)에 대한 유량(V_{wet})의 비로써, 식 (1)과 같이 촉매의 외관 체적에 대한 수치를 식 (2)와 같이 유량에 나누어 준다. 일반적으로 유량이 동일한 수치라고 가정하였을 때,

공간속도는 촉매의 셀 밀도의 영향을 받지 않는 체적에 따른 속도비라고 볼 수 있다.

$$\text{Catalyst volume } [V_C, m^3] = a \times b \times l \quad (1)$$

$$\text{Space velocity } [SV, h^{-1}] = V_{wet} / V_C \quad (2)$$

면속도는 접촉면적(S_c)에 대한 유량(V_{wet})의 비로써, 우선 접촉면적(specific surface area)은 식 (3)과 같이 하나의 채널 둘레에 길이와 채널 수를 곱한 수치로써, 표면반응인 SCR 촉매에서 실제 반응에 참여할 수 있는 반응면적을 나타내는 중요 수치이다. 이를 V_{wet} 에 나눈 수치가 식 (4)의 면속도이며, 동일 유량에서 역수의 관계로 그 수치가 높아질수록 촉매 내 배출가스의 표면반응 기회가 낮아짐을 의미한다.

$$\begin{aligned} \text{Surface area of catalyst } [S_C, m^2] \\ = 2 \times (a_{ch} + b_{ch}) \times l \times n \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Area velocity } [AV, m/h] = V_{wet} / S_C \quad (4)$$

선속도는 촉매 내 채널의 단면적(A_{ch})에 대한 유량(V_{wet})의 비로, 채널 내 배기가스의 유속을 의미한다. 동일한 체적에서 선속도가 증가한다는 것은 배기가스의 촉매 내 체류시간이 짧아짐을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{Cross section of channel } [A_{ch}, m^2] \\ = a_{ch} \times b_{ch} \times n \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Linear velocity } [LV, m/h] = V_{wet} / A_{ch} \quad (6)$$

더불어, 본 실험적 연구에서 사용되는 NOx 저감효율(DeNOx efficiency)은 촉매의 NOx 제거 효율을 의미하며 식 (7)과 같이 환원 반응 전 입구 농도 대비 후단의 환원 반응을 통한 저감 수치를 비율로 나타낸 값이다.

$$\begin{aligned} \text{DeNox efficiency}(\%) = \\ \frac{\text{Inlet NOx}_{ppm} - \text{Outlet NOx}_{ppm}}{\text{Outlet NOx}_{ppm}} \times 100 \end{aligned} \quad (7)$$

첫 번째로, 주어진 공간속도에서 면속도의 변화에 따른 시험을 진행하였다. 공간속도를 각각 10,000, 20,000, 50,000h⁻¹로 설정하였으며, 이 때 공간속도는 유량에 따른 체적의 역수로 공간속도가 증가함은 체적이 감소함을 의미한다. 이를 이용해 동일 체적에서 면속도(반응면적) 변화에 따른 NOx 제거 효율을 측정하였다. 각 공간속도 조건에서의 촉매는 셀 밀도 35, 40, 47, 50, 60의 5가지에 대한 평가를 진행하였다. 여기서 셀 밀도란 단면적 수치가 가로 세로 각 150 mm인 허니컴형 SCR 촉매

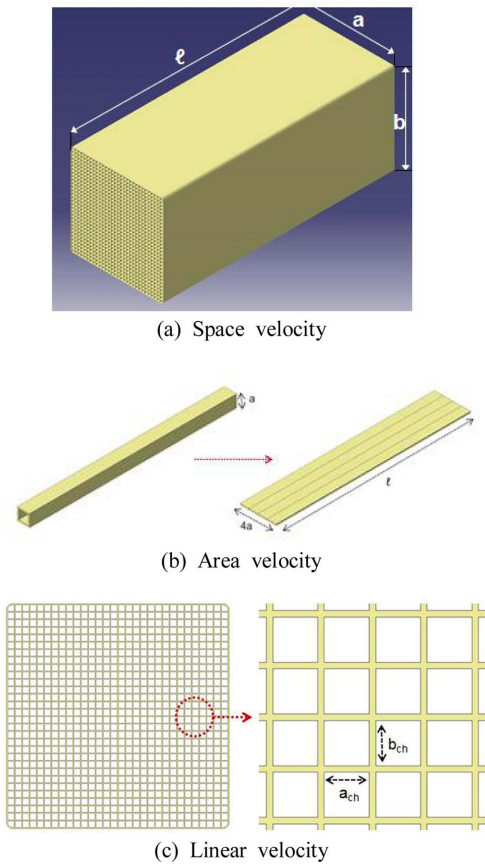


Fig. 2 Verification of the honeycomb type SCR catalyst

에서 한 변의 셀의 수량을 의미한다. 예를 들어 40셀 촉매의 경우 150 mm 단면 내에 1,600개의 셀이 존재하게 된다. 선속도는 채널의 크기에 따른 수치 변동 폭이 발생함으로 동일하게 수치를 고정하는 것은 불가능하다. 따라서 2.0 m/s에 가깝게 촉매의 채널 수를 선정하였으며 각 공간속도 조건에서 오차가 ± 0.2 m/s 수준으로 나

Table 1 Test sample condition each space velocity

Space velocity (h^{-1})	Cell density	Area velocity (m/h)	Linear velocity (m/s)
10,000	35	13.22	2.23
	40	11.38	2.00
	47	10.45	1.95
	50	8.94	2.25
	60	8.39	2.40
20,000	35	26.5	2.23
	40	22.1	2.00
	47	19.3	1.95
	50	17.9	2.25
	60	16.7	2.40
50,000	35	62.42	1.55
	40	55.29	2.00
	47	48.17	1.95
	50	44.48	1.72
	60	41.87	1.83

Table 2 Test sample condition each linear velocity

Cell density	Area velocity (m/h)	Linear velocity (m/s)	Space velocity (h^{-1})
30	25.0	1.11	16,207
		1.60	16,021
		2.49	15,937
		4.43	15,442
40		2.08	21,322
		3.00	21,229
		4.69	20,663
		8.34	19,888

타났다. 더불어, NH_3 는 최대 활성점을 이용한 상대적 비교를 위해 NO_x 농도 대비 120% 농도를 주입하였다.

두 번째로 동일한 면속도(25 m/h)를 가질 경우 즉, 가스의 표면 반응이 일어날 수 있는 동일한 반응면적을 가지는 조건에서 채널 내부의 유속에 따른 NO_x 저감 효율에 대한 시험을 진행하였다. 일반적으로 SCR 촉매의 성능 구현에 있어 배기가스의 양에 대한 촉매의 양은 면속도를 이용해 계산되며, 면속도가 동일할 경우 SCR 촉매는 유사한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이에 선속도의 영향을 파악하기 위해 면속도를 동일하게 25m/h로 설정하였을 때, 30, 40 셀 두 셀밀도의 촉매에서 각각 선속도에 변화를 주어 시험을 진행하였다. 이 때, 공간속도는 셀밀도 30셀의 경우 $20,775 \pm 546 h^{-1}$, 40셀의 경우 $15,900 \pm 305 h^{-1}$ 수준으로 근사하게 설정하였으며, 공간속도의 오차는 단면에 채널의 수가 줄어들면서 내벽을 채널 각각에 구성이 됨으로써, 체적이 소량 증가하게 된다.

2.2 실험 장치의 구성

본 연구에 사용한 실험 장치는 실험실 규모의 SCR 촉매의 질소산화물 제거 효율을 측정할 수 있는 성능 평가 장치로써, 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 실험장치는 크게 가스 공급부, 예열부, 촉매 반응부, 측정부로 구성되어 있다. 가스 공급부 ㉑는 1% NO , SO_2 , NH_3 및 고순도 O_2 와 밸런스 가스(balance gas)로 사용되는 액체 질소를 기화하여 ㉒ 질량유량계(Mass flow controller, MFC)를 이용해 농도에 맞게 정량 주입하게 되며, ㉓ 수분정량펌프(Liquid metering pump)와 ㉔ 예열기(Pre heater)를 이용해 기화 상태로 추가 주입함으로써, 시험 조건에 부합한 가스의 농도를 조절한다. 예열부는 촉매 반응 전 황산염과 같은 부가반응물 생성을 방지하기 위한 장치로써, SO_2 는 산소와 반응하여 SO_3 로 전환된 후 $300^\circ C$ 이하의 온도에서 미반응 NH_3 및 수증기와 반응하여 황산암모늄(ammonium sulfate) 혹은 황산수소암모늄(ammonium bisulfate) 등의 반응물을 생성할 수 있을 뿐만 아니라, $150^\circ C$ 이하의 온도에서 NO_2 와 NH_3 및 수분이 촉매상이 아닌 기상반응을 통해 암모늄염(ammonium nitrate)을 형성하기 때문에 ㉔ 예열기는 $460^\circ C$ 의 고온으로 예열하고 기타 가스 배관부위는 $170^\circ C$ 의 온도로 배관을 예열을 해준다. 또한, 예열기 후단에서 가스는 환원제인 NH_3 및 기타 주입 가스들과의 혼합을 위해 ㉕ 혼합기(static mixer)를 통과한 후 반응부로 유입된다. 반응부는 ㉖ SCR반응기(reactor)로써, 실

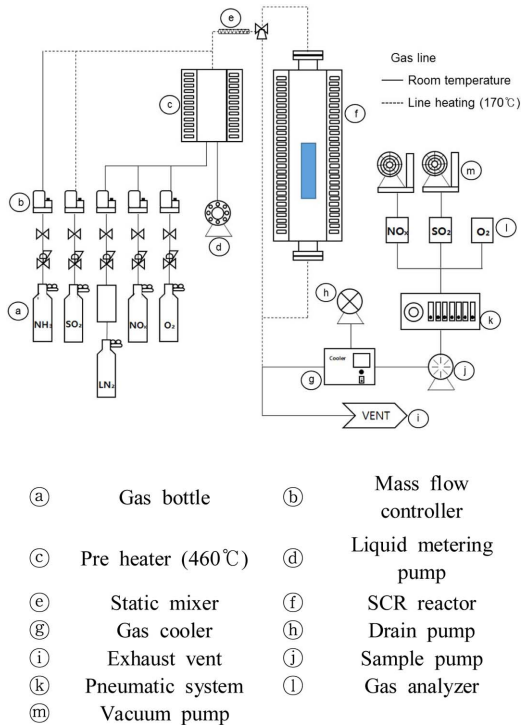


Fig. 3 Schematic diagram of SCR micro reactor system

제로 촉매를 장입하여 촉매와 배가스의 환원반응이 일어나는 구간이다. 전기가열방식의 전기로에 촉매 반응기 tube가 장착되며, 촉매의 상, 하단 온도차(ΔT)를 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 조절하기 위하여 3-zone으로 구분하여 개별 가열영역으로 설정하였다. k-type 열전대가 각 구간의 온도 측정에 따라 가열을 할 수 있도록 하였으며, 반응기 상 하단의 열전대 장입 포트를 별도로 제작하여 촉매 내 배가스 온도를 측정할 수 있도록 설계되었다⁽⁹⁻¹¹⁾.

이후 반응이 완료된 가스는 ① 배출부(Exhaust vent)를 통해 외부로 배출된다. 반응부는 주입 가스에 대한 환원 반응 정도를 확인하기 위한 가스 분석 단계이다. 가스의 농도 분석을 위해 ① NO, SO₂, O₂ 3가지의 건식 가스 분석기를 사용하였으며, 수분을 제거하기 위해 ⑥ 냉각기(Cooler)에서 수분을 응축하게 되고 이를 ⑦ 드레인 펌프(drain pump)를 이용해 배출시킨다. ⑧ 샘플펌프(Sample pump) 차단제로의 가스 공급을 원활히 할 수 있도록 지속적으로 가스를 밀어주는 역할을 하며 이를 통해 ⑨ pneumatic system에서 각 분석기에 필요한 만큼의 가스량을 조절하여 분배하게 된다. 이때, NO, SO₂ 분석기는 후단의 진공펌프의 압력에 의해 정밀하게 가스량을 제어하게 된다. 시험 절차는 면속도 또는 공간속

도의 시험 조건에 따라 적합한 크기로 촉매를 절단하고 튜브(tube)에 세라믹을 이용해 시험편을 고정하여 반응기에 설치한다. 예열기와 가스 배관을 가열한 후, 반응기의 각 구간 온도를 설정하여 반응로를 가열한다. 평가 사전에 가스 분석기 각각을 교정 가스로 교정한 뒤, 바이패스(bypass) 상태에서 분석 조건에 적합한 NO, SO₂, O₂, N₂ balance 가스를 주입하고 입구 농도를 확인한다. 이후 배기가스를 반응기 방향으로 전환하고 NH₃와 H₂O를 주입한다. 2시간 경과 후 5분 이상 출구의 NOx 농도에 변화가 없을 경우 결과를 산출하는 순서로 진행하였다.

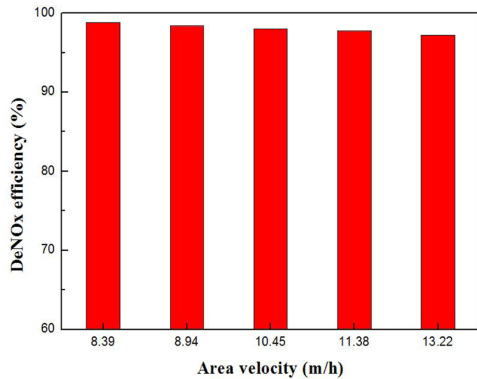
3. 결 과

3.1 공간속도에 따른 NOx 저감 효율

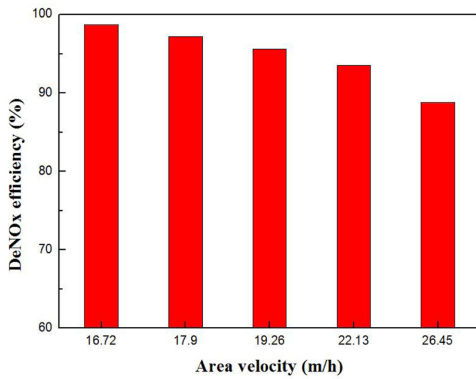
공간속도에 따른 NOx 저감 효율 시험 결과 촉매와의 반응 접촉면적을 의미하는 면속도는 각각 10,000 h⁻¹ 일 경우 13.22~8.399 m/h로 36.5%, 20,000 h⁻¹ 일 경우 26.45~16.72 m/h로 36.8%, 50,000 h⁻¹의 경우 33.0%의 변화 정도를 보였다. 공간속도가 증가할수록 낮은 수치로 면속도의 변화폭은 감소함을 확인할 수 있었으나, 정량적 수치상으론 그 편차가 공간속도가 증가할수록 높은 폭으로 상승함으로써 공간속도에 따른 NOx 저감 효율의 편차가 높아지는 것으로 나타났다.

단, 동일한 공간속도 내에서 면속도에 따른 NOx 저감 효율을 상대적으로 비교해보았을 때, Fig. 4와 같이 공간속도 10,000 h⁻¹에서의 NOx 저감효율은 셀 밀도에 따라 각각 97.2, 97.8, 98.0, 98.4, 98.8% 수준으로 면속도가 평균 1.2 m/h 감소할 때 0.4% 수준으로 NOx 제거 효율이 상승하며, 공간속도 20,000 h⁻¹에서의 NOx 저감 효율은 각각 88.7, 93.4, 95.2, 97.5, 98.7%이며, 셀 밀도 증가에 따라 평균 2.5 m/h의 면속도가 감소할 때, NOx 저감 효율은 2.5% 수준 상승하며, 공간속도 50,000 h⁻¹에서 NOx 저감효율은 각각 66.5, 74.5, 79.1, 83.1, 88.4%로, 셀 밀도 증가에 따라 5.1 m/h의 면속도가 감소하며, 이에 5.5% 수준으로 NOx 저감 효율이 상승함을 확인할 수 있다.

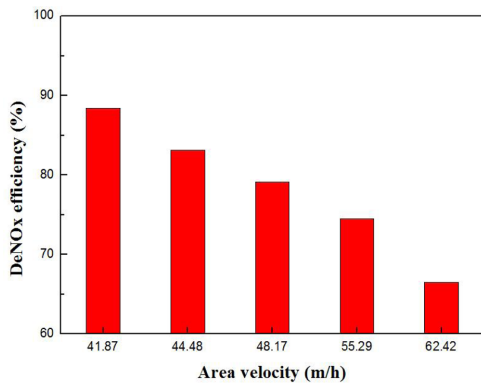
즉, 동일한 체적을 가지는 촉매 내에서 면속도가 낮아질수록 반응면적이 높아짐으로써 배기가스의 환원 작용 기회 또한 높아짐으로써, NOx 저감효율이 상승하는 것으로 확인 할 수 있으나, 공간속도 10,000 h⁻¹ 수준의 공간 체적에서는 촉매의 셀 밀도에 따른 NOx 저감 효율



(a) Space velocity 10,000h⁻¹



(b) Space velocity 20,000h⁻¹



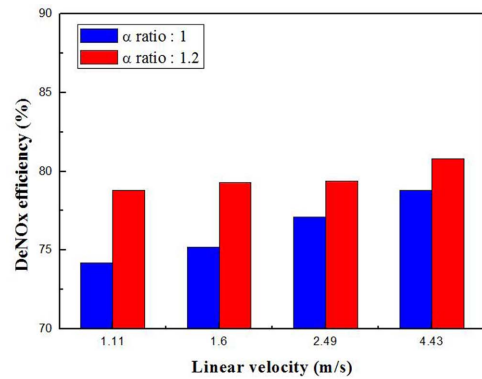
(c) Space velocity 50,000h⁻¹

Fig. 4 DeNOx efficiency according to the space velocity

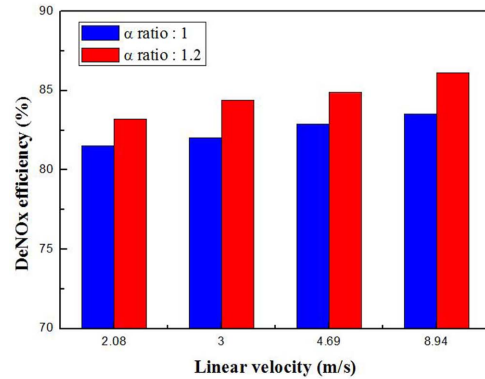
에 대한 영향은 점차 감소하는 것으로 확인되었다.

3.2 선속도에 따른 NOx 저감 효율

셀 밀도 30, 40셀 촉매의 채널 크기는 각 4.3, 3.1 mm 수준으로 25m/h의 동일한 면속도를 가질 때 채널수에 따라 면속도는 1.1~8.3 m/h 수준이다.



(a) 30 cell catalyst at area velocity 25m/h



(b) 40 cell catalyst at area velocity 25m/h

Fig. 5 DeNOx efficiency according to the linear velocity

30, 40셀의 촉매는 선박에서 일반적으로 사용되어지는 셀 밀도이며, 이를 반응면적이 동일할 때, 선속도에 관한 변수만을 부여할 수 있도록 각각 단면 채널 수를 6×6, 5×5, 4×4, 9×9로 제단하여 촉매 활성을 평가하였다. 이때, 각 시편은 단면의 채널 수에 따라 그 길이가 변경되며, 단면 채널 수가 좁고 길이가 길어질수록 관내 유체의 체류시간은 짧아지게 된다.

Fig. 5는 채널 변화로 인한 선속도 변경에 따른 NOx 저감 효율을 나타낸 것이다. 30셀 촉매에서의 채널 수에 따른 선속도는 채널 수 36, 25, 16, 9 순서로 각 1.11, 1.60, 2.49, 4.43 m/s로 채널수가 감소할수록 유체가 집중됨으로써 촉매 내부의 유속은 증가하게 된다. 이 때, 촉매의 활성은 몰비(molar ratio, α=NH₃/NO) 1.0에서 74.2, 75.2, 77.1, 78.8%로 최대 4.6%의 활성 차이를 확인할 수 있었다. 미반응분을 제외한 촉매의 최대 활성점을 비교하기 위해 NH₃의 농도를 증가하여 몰비 1.2에서의 측정 결과 또한 78.8, 79.3, 79.4, 80.8%로 2.0% 수준 활성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

마찬가지로 40셀 촉매의 채널 수에 따른 선속도는 상기 순서와 동일하게 2.08, 3.00, 4.69, 8.34 m/s로 증가하였으며, 선속도가 증가함으로써 몰비 1.0에서의 NO_x 저감 효율은 81.5, 82.0, 82.9, 83.5%로 약 2.0%, 몰비 1.2에서 83.2, 84.4, 84.9, 86.1%로 약 2.9% NO_x 저감 효율이 상승함을 확인하였다. 이러한 결과는 표면반응인 SCR 촉매의 특성상 관내 유체의 체류시간이 길수록 DeNO_x 제거 효율이 상승할 것이라는 예상과는 달리 선속도가 높아질수록 활성이 증가함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

선박용 벌집형 SCR 촉매를 이용하여 면속도, 공간속도, 선속도에 따른 NO_x 저감 효율을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일한 공간속도에서 촉매의 셀 밀도가 증가함에 따라 면속도의 감소로 인한 반응 면적 증가로 인해 NO_x 저감 활성은 상승하였다. 단, 공간속도 50,000 h⁻¹에서 10,000 h⁻¹으로의 체적 증가에 따라 NO_x 저감 활성 편차는 감소하였으며, 이는 촉매 반응기 내부에서 유량에 따른 일정 면속도를 초과하게 되면 셀 밀도가 상승하더라도 촉매의 활성 영향에는 제한적임을 의미한다.

2. 무조건적인 셀 밀도 상승을 통한 효율 증대보다는 시스템의 유량 및 체적 등의 조건에 따라 촉매로 인해 발생할 수 있는 차압 및 촉매의 플러깅(plugging)에 의한 열화 등을 고려하여, 배출 규제를 만족하는 수준에서 저밀도 셀을 사용함으로써 안정적인 시스템 운용에 적합한 촉매의 설계가 필요로 될 것으로 예상된다.

3. 촉매 채널의 단면적이 감소함에 따라 선속도가 높아질수록 NO_x 저감 효율이 증가됨을 확인하였다. 이와 같은 연구는 종래에 반응기 전단에서의 유동 균일도가 촉매의 활성 및 차압 등에 미치는 영향 등의 연구만이 일반적으로 수행된 결과에 반해 선박의 벌집형 SCR 촉매의 적용에 있어 선속도 증가에 따른 NO_x 저감 효율 개선을 통한 시스템 적용 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) United States Environmental Protection Agency, "Nitrogen Oxides (NO_x): Why and How They are Controlled", EPA-456/F-99-006R, 1999 cited 15 October 2004.
- (2) CNSS; Clean North Sea Shipping Technology. 2010, NO_x emissions (IMO).
- (3) M. Koebel, M. Elsener and G. Madia, "Reaction pathway in the Selective Catalytic Reduction Process with NO and NO₂ at Low Temperature", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 40, No. 1, 2001, pp. 52~59.
- (4) J. H. Seinfeld, "Atmospheric chemistry and physics of air pollution", New York John Wiley & Sons., 1986, p. 58.
- (5) Park Sam-sik, "Thermal Behavior of TiO₂-based honeycomb Type SCR Catalyst and the Influence of Cell Density on the Reaction Efficiency", Gyeongsang university Ph, D, Thesis, 2010.
- (6) J. A. Miller and G. A. Fisk, "Combustion Chemistry", Feature Article for Chem. Eng. News 65, 1987, p. 22.
- (7) Seungchul Woo, "A study on the injection characteristics of diesel-water emulsion fuels according to compositions", Transactions of KSAE, Vol. 23, No. 3, 2015, pp. 263~270.
- (8) J. Y. Lee, "A study on the property of SCR at low temperature and removal of dioxine with V₂O₅/TiO₂-based catalyst", Korea university Ph, D, Thesis, 2001.
- (9) N. Y. topsøe, "Mechanism of the selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia elucidated by in situ on-line fourier transform infrared spectroscopy", Science Vol. 265, No. 5176, 1994, pp. 1217~1219.
- (10) J. M. G. Amores, V. S. Escibano, G. Ramis and G. Busca, "An FT-IR study of ammonia adsorption and oxidation over anatase-supported metal oxides", Appl. Catal. Vol. 13, No. 1, 1997, pp. 45~58.
- (11) Kim Hoi-jun, "Air pollution from ships. Korean Register of shipping".