

SCR 믹서형상에 따른 배기가스와 환원제 혼합 효율에 관한 실험적 연구

최문석

영남이공대학교 스마트 e-자동차과

Experimental Study on Mixing Efficiency of Exhaust Gas and Reductant According to SCR Mixer Shape

Munseok Choe

Department of Smart e-Automobile, Yeungnam University College

요약 본 연구는 SCR 시스템 내에서 믹서 형상에 따른 배기가스와 요소수의 혼합 효율을 분석하기 위하여 진행되었다. 실험을 위하여 SCR 모사시스템을 제작하였으며, 균일도 측정을 위하여 균일도 측정기를 촉매 위치에 부착하였다. 실험 변수는 배기가스의 유량, 온도, 믹서의 타입, 촉매의 거리를 변수로 두어 실험을 진행하였다. 실험결과로는 스월각 분석, 요소수 분포 형태, 균일도 등을 확인하였으며, 모델 A와 B의 스월각 실험결과 모델 A의 스월각이 전체 RPM영역에서 약 7~8도 높게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 요소수 균일도 실험결과 SCR 시스템 내에 믹서가 없는 경우에는 요소수가 한쪽으로 편중되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, 믹서 모델 A는 전체적으로 고른 분포를 나타내었고 모델 B는 짧은 거리에 균일도 감지기를 설치하였을 때는 약간의 편중이 있지만 점차 거리가 멀어질수록 안정적인 요소수 분포를 나타내었다. 균일도 목표타겟인 혼합 효율 90%는 모델 A와 모델 B에서 만족할 수 있었으며, 특히 모델 A의 경우가 촉매 위치 10cm에서 이미 90%의 효율을 만족하는 우수한 결과를 나타내었다.

Abstract This study examined the mixing efficiency of exhaust gas and urea according to the mixer shape in the SCR system. For the experiment, an SCR simulation system was manufactured, and a uniformity detector was attached to the catalyst location to measure the uniformity. The experiment was conducted by setting the exhaust-gas flow rate, temperature, mixer type, and catalyst distance as variables. The experimental results confirmed the swirl angle analysis, urea number distribution, and uniformity. The swirl angle experiment of Models A and B confirmed that the swirl angle of Model A was formed approximately 7 to 8 degrees higher over the entire RPM range. When there was no mixer in the SCR system, the urea and water were concentrated to one side. Mixer Model A showed an even distribution overall, and Model B showed a slightly concentrated tendency at the beginning but then showed a stable distribution of urea. The mixing efficiency of 90%, which was the uniformity target, could be satisfied in Model A and Model B. In particular, Model A showed excellent results that satisfied 90% efficiency at 10 cm of the catalyst position.

Keywords : SCR(Selective Catalytic Reduction, Exhaust Gas, NOx, Uniformity Index, Swirl Angle

*Corresponding Author : Munseok Choe(Yeungnam University College)

email: cms0290@ync.ac.kr

Received November 24, 2020

Accepted March 5, 2021

Revised January 6, 2021

Published March 31, 2021

1. 서론

자동차의 내연기관의 경우 현재 배기가스 규제인 TIER 규제 및 EURO 규제를 맞추기 위하여 배기가스 후처리 분야의 개발이 필수적이다[1]. 디젤 엔진의 경우 가솔린 엔진대비 고압축 연소로 인하여 높은 열효율 그리고 펌핑손실 감소 효과가 있다[2-3]. 또한 희박연소를 가능하게 함으로 가솔린 엔진 대비 연료소비율이 약 30% 정도 이점을 가진다고 알려져 있다[4]. 디젤엔진은 가솔린엔진 대비 토크 변동이 적고 배기가스의 총량이 적다는 장점이 있으나, 배기가스 중 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)이 많이 발생된다는 문제점을 가지고 있다. 환경오염 적인 문제는 이전보다 많이 개선되었지만, 여전히 디젤엔진에서 생성되는 질소산화물과 입자상물질의 발생량은 다른 연료의 차량 대비 상대적으로 많은 실정이다[5-6]. 입자상물질과 질소산화물의 문제점은 입자상물질의 경우 인간의 폐에 직접적인 영향력을 가진다고 알려져 있으며, 질소산화물의 경우 산성비와 오존생성이 되는 문제점을 가지고 있으므로 이를 저감하는 것이 중요한 과제로 남아있다[7].

디젤엔진의 배출가스 저감을 위한 연구로 Samuelsson[8] 등은 Urea의 액적크기와 SCR 인젝터 분사각에 따른 Urea 변환 효율에 관하여 분석을 진행하였으며, 분석결과로 분사각이 클수록 그리고 액적의 크기가 줄어들수록 Urea 변환 효율이 증대된다는 결과를 제시하였다. Lim[9] 등은 SCR 시스템의 질소산화물(NO_x) 저감 성능 개선을 위하여 배기포트의 설계 최적화에 관한 연구를 진행하였고, 연구결과 믹서의 위치는 촉매와의 거리가 멀수록 더 효율이 증대된다는 결과를 제시하였다. 기존의 선행연구의 결과를 분석해보면 모두 해석적으로 연구만 진행되어 왔을뿐 실험적 연구에 관한 결론이 미흡하였다. 따라서 추가적으로 믹서형상에 따른 유동 균일도에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 질소산화물 저감시스템 중 질소산화물 저감 효율이 큰 Urea SCR에 대하여 연구를 진행하고자 하며, 배기가스와 Urea의 믹싱효율 분석을 위하여 Urea SCR 모사장치를 제작하여 믹서 형상에 따른 혼합효율에 관한 연구를 진행하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 배기 시스템 개략도

Fig. 1은 배기가스 시스템의 개략도이며, 배기가스는 흡기포트 전단인 1번 에어크리너로 들어온 공기가 2번의 터보차저에 의해 한번 압축된 후 3번 인터쿨러를 지나 흡기포트로 유입된다. 실린더 내에서 폭발이 진행된 뒤 배기가스는 두 개의 통로로 나뉘게 되는데 하나는 HP EGR유로와 배기포트로 빠져나가게 된다. 이후 DPF에서 입자상물질을 정화한 뒤 LP EGR유로로 다시 한번 재순환이 이루어지고 나머지 배출가스는 밖으로 배출하게 된다. NO_x를 저감하기 위한 장치는 12번 위치에 장착되게 되며, 종류로는 SCR, LNT등을 들 수 있다.

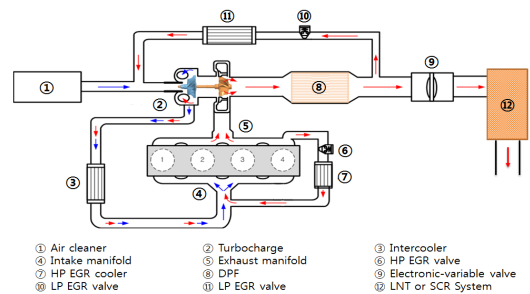


Fig. 1. Schematic of exhaust system

Fig. 2는 SCR 시스템의 기본원리에 관한 사진이며, 인젝터에서 요소수를 분무하여 믹서에 의해 요소수와 배기가스가 서로 혼합되고 혼합된 배기가스가 촉매에 직접 접촉하는 시스템으로 설계되어 있다. 배기가스 중 질소산화물의 저감의 경우 Eq. (1)~(3)과 같이 UREA SCR에서 분무 된 요소수 중 요소와 혼합되고 이후 촉매에 접촉하여 인체에 무해한 질소와 물로 정화되어 배출된다.

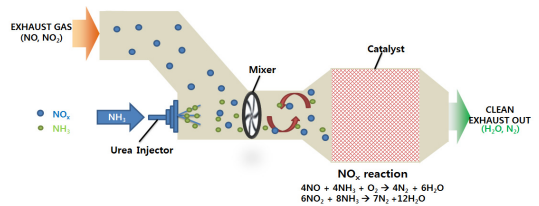
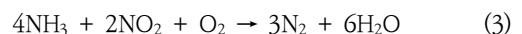
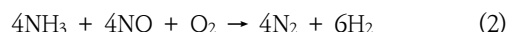
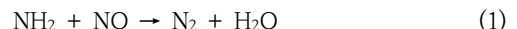


Fig. 2. The principle of Selective Catalytic Reduction



2.2 균일도 지수

Welten[10] 제안한 농도 균일도 지수가 대표적인 식

이다. 균일도의 경우 액체와 액체가 고르게 퍼져있는 정도 혹은 공기 중에 액체가 퍼져있는 정도를 수치화 시켜 표현한 것으로 균일도를 구하는 방법으로는 국부적인 온도를 이용하는 TUI 식, 속도를 이용하여 균일도를 구하는 VUI식, 질량유량을 이용해 구하는 MUI식 등이 있다. TUI, VUI, MUI 구하는 식은 Eq. (4), (5), (6)과 같다.

$$TUI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |t_i - \bar{t}|}{2n(\bar{t} * \frac{C}{100})} \quad (4)$$

(t_i : 포인트 온도 \bar{t} : 평균온도 C: 온도상수 n: 포인트 개수)

$$MUI = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(C_i - \bar{C})^2}}{\bar{C}} \quad (5)$$

(C_i : 포인트 질량유량 \bar{C} : 평균 질량유량 n:포인트 개수)

$$VUI = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(w_i - \bar{w})^2}}{\bar{w}} \quad (6)$$

(w_i : 포인트 속도 \bar{w} : 평균 속도유량 n:포인트 개수)

본 연구에서는 TUI식을 활용하였으며, 이를 통해 배기가스와 우레아의 혼합 효율에 관하여 실험을 진행하고자 한다.

3. 실험 장치 및 실험변수

3.1 실험 장치

Fig. 3은 SCR 시스템을 모사하기 위한 실험장치의 개략도이며, 실시간으로 배기가스 온도변화, 유량변화, Urea 분사 압력, 믹서의 형상 등을 변경할 수 있도록 설계하였다. 실험 장치의 주요 사양으로는 Table 1에 나타내었으며, 자동차 배기가스의 유량을 맞추기 위하여 블로우 모터의 최대 유량은 5,000lpm으로 선정하여 승용 디젤차량의 유량에 맞게 선정하였다. 히터의 경우 자동차 배기가스의 온도에 맞추어 설정하기 위하여 25도 ~ 500도까지 가변 가능한 사양으로 설계하였고 이후 실험의 정확도를 높이기 위하여 응답성이 빠른 레귤레이터, DAQ Board, 온도계등을 장착하여 실험 장치를 구성하였다.

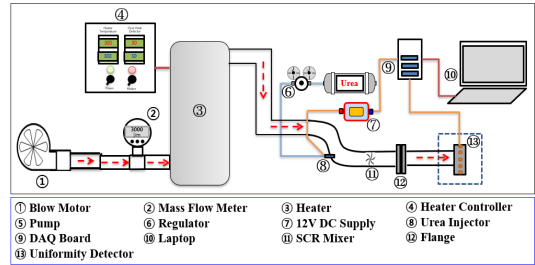


Fig. 3. Schematic diagram of SCR system simulator

Table 1. Specification of part components for experiment

Item	Specification
Blow Motor	- Maximum Flow : 5,000 lpm
Mass Flow Meter	- Measured Frequency: at 1 ± 0.1 kHz - Maximum Detecting Flow : 5,000 lpm
Heater	- Voltage and Current: AC 380V - Machine work range : 25 °C to 500 °C
Pump	- Output : 5 HP
Regulator	- Inlet Pressure : 20 bar - Outlet Pressure : 14 bar
NI-9211 9213	- Temperature: (-)40 °C to 70 °C - Maximum Voltage : 80mV
NI-9407	- Output Range : 6 V to 30 V - Temperature: (-)40 °C to 70 °C
Thermocouple	- Sheathed Type(K type) - Detecting temperature : (-)25 °C to 1500 °C

Fig. 4는 Fig. 3의 균일도 감지기(UD)의 초기 셋팅 사진이며, 배기관 내에 센서를 장착할 경우 배압이 발생할 수도 있으므로 최적화하여 총 19개의 온도센서를 배기관 내부에 세팅하여 설정하였다. 실험 프로그램의 경우 Labview를 이용하였으며 온도센서의 반응의 경우 10ms의 속도로 설정하여 균일도 측정기를 설정하였다.

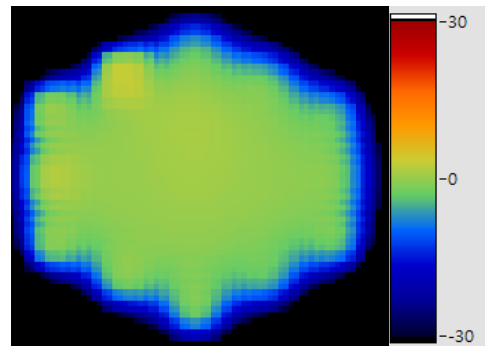


Fig. 4. Base setting of uniformity index before experiment

3.1 실험 변수

아래의 Table 2는 실험변수에 관한 내용을 표로 정리한 것이며, 실험변수로 디젤엔진의 주된 사용 구간인 1,500rpm ~ 2,500rpm까지 선정하였고 배기가스의 온도는 200~400도 균일도 감지기의 거리 10~40cm로 하여 실험을 진행하였다. Fig.4 는 실험에 적용된 믹서의 두 가지 형상구조이다. Model B는 Model A 대비 중앙쪽의 유동을 더 확산시키기 위하여 4개의 파트에 사각 플레이트를 추가 모델링하였고 나머지 4개의 날개는 크기를 기존의 2/3정도로 줄이고 외각으로 흐르는 유동만을 생성하도록 설계되었다.

Table 2. Specification of experimental condition

Engine RPM	1,500 to 2,500 from 100 unit
Exhaust gas Temperature(°C)	200 to 400 from 50 unit
Uniformity Detector Distance (cm)	10 to 40 from 10 unit
Mixer Model	Non Mixer, Model A, Model B

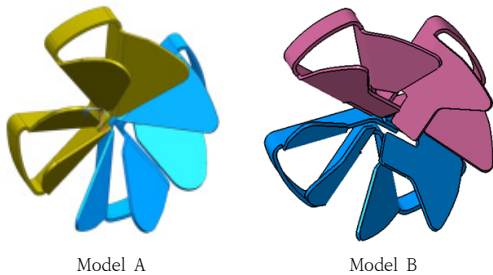


Fig. 5. Structure of Mixer

4. 실험 결과

4.1 스월각 실험 결과

Table 3은 스월각 결과를 나타내었다. 엔진회전수에 따른 분석을 해보면 모델 A와 모델 B 모두 엔진 회전수가 증대될수록 스월각은 낮아지는 것으로 나타났으며 모델 A의 경우 7.4° 모델 B의 경우 6° 작아진 결과를 나타내었다. 1,500RPM에서 모델 A의 경우 22.4°로 B모델 대비 8.6° 높게 형성되었으며 500RPM 씩 증대될수록 차이는 각각 7.9°, 7.2°, 7.2° 로 나타났다. 모델 A의 경우 스월각이 크게 형성되어 스월강도는 우수함으로 믹서

와 촉매 사이의 거리가 짧을수록 높은 효율을 나타낼 것이라고 판단되었다. 하지만 믹서와 촉매의 거리가 늘어날수록 높은 스월강도로 인하여 요소수가 배기관 주변에 축적되는 요소수슬립 발생가능성이 높다고 판단되었다.

Table 3. Swirl angle experiment result

RPM	Swirl angle(°)	
	Model A	Model B
1500	22.4	13.8
2000	19.1	11.2
2500	18.3	11
3000	15	7.8

4.2 균일도 시험 결과

Fig. 6은 Non-Mixer type에서의 SCR 모사장치에서 검출된 균일도 분포 특성이다. 10cm에서의 결과를 보면 인젝터에서 분무된 요소수가 국부적으로 분사되어 한곳에 밀집되어있는 경향을 확인할 수 있다. 그리고 20cm 이상부터 거리가 멀어지는 경우 왼쪽 하단부에 요소수의 분포가 밀집하여 온도가 저감되는 현상을 나타내었으며 전체적으로 중심에서 2시 방향의 경우 10°C 이상의 편차를 나타내는 것으로 확인되었다. 요소수의 분포가 국부적으로 발생할 경우 배기가스와 요소수의 혼합이 제대로 일어나지 않은 것임으로 질소산화물의 저감 효율이 낮을 것으로 판단되며 왼쪽 하단부에 온도가 계속 낮았으므로 보아 요소수 슬립도 발생 가능성이 높다고 판단되었다.

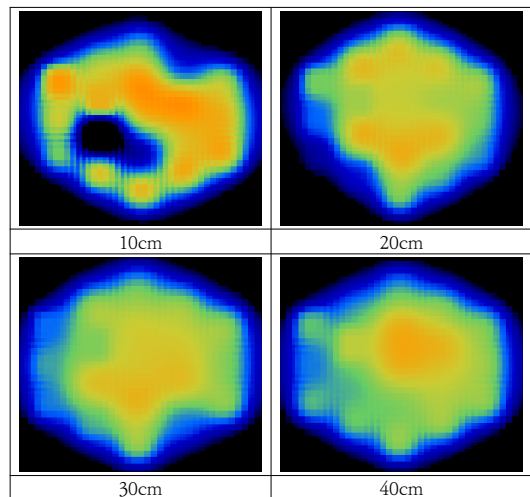


Fig. 6. Uniformity distribution characteristics of Non mixer

Fig. 7은 Model A에서의 SCR 모사장치에서 검출된 균일도 분포 특성이다. 10cm 영역에서 분석해보면 전체적으로 고르게 온도분포가 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이후 20cm, 30cm, 40cm에서도 국부적인 온도 저하 없이 안정적인 요소수 분포를 확인할 수 있었다. Model A의 경우 요소수와 배기가스의 혼합이 원활하게 잘 이루어진다고 파악되었으며 이는 촉매의 정확효율에도 크게 기여할 수 있다고 판단되었다.

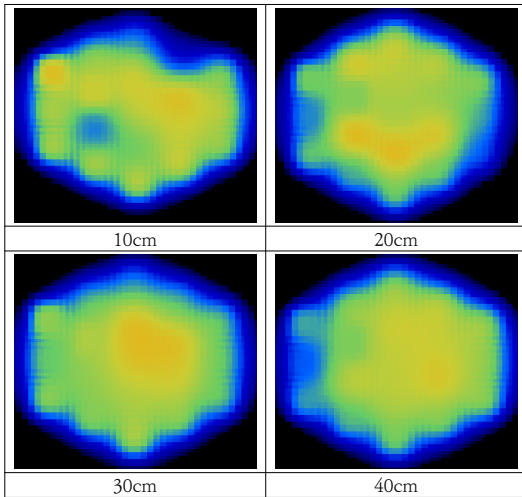


Fig. 7. Uniformity distribution characteristics of Model A

Fig. 8은 Model B에서의 SCR 모사장치에서 검출된 균일도 분포 특성이다. Model B는 Model A 대비 유동

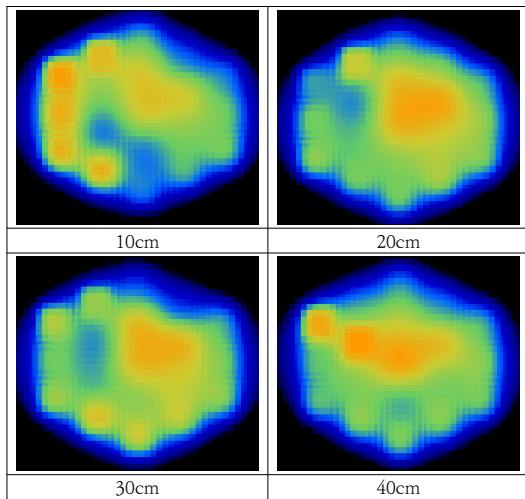


Fig. 8. Uniformity distribution characteristics of Model B

의 직진성이 확보된 모델이다. 실험 결과에서도 직진성 강화로 인하여 온도의 편차가 조금 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이후 거리가 멀어지면서 점차 온도의 편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 직진성이 강한 Model B의 경우 촉매의 위치를 40cm 이후에 설치해야 될 것으로 판단되었다.

Fig. 9는 각 모델별 균일도 결과이다. 각 거리에 따른 균일도 감지기에서의 실험결과를 선형화한 것이며 실험 결과 거리에 따른 균일도 분포 특성으로 믹서 후단 10cm 영역에서는 Model A만 균일도 목표인 90%에 도달하였을 뿐 나머지 Non-mixer와 Model B의 경우 도달하지 못한 결과를 나타내었다. 이후 Model B의 경우 거리 25cm 이상의 영역에서는 균일도 목표치인 90%를 만족할 수 있었으며, Non-mixer의 경우 최종 거리 40cm 영역에서도 목표치를 만족하지 못한 것을 확인할 수 있었다. 모델 A를 사용한 경우 믹서와 촉매 사이가 짧아져도 촉매에서의 목표 정확효율을 만족할 수 있을 것으로 판단되며, Non-mixer의 경우 효율을 만족하지 못할 것으로 판단되었다.

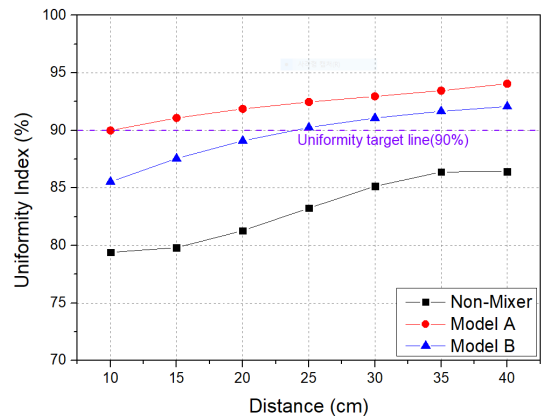


Fig. 9. Uniformity index result of each model

5. 결론

SCR 시스템의 효율증대를 위하여 SCR모사장치를 활용하여 배기가스와 요소수의 혼합율을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 촉매와 믹서 사이의 거리가 증대될수록 혼합될 수 있는 시간이 증대되어 혼합 효율 개선이 극대화 되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 스월각의 경우 Model A가 Model B 대비 평균 8° 정도 큰 것을 확인할 수 있었으며, 스월강도가 중앙에 사각플레이트가 있는 Model B에 비하여 큰 것을 확인할 수 있었다.
3. Non-mixer의 경우 분무된 Urea가 국부적으로 형성되어 전체적으로 낮은 균일도를 보였으며, 최종적으로는 목표 균일도 타겟인 90%에 믹서와 균일도 감지기 사이의 거리가 길어지더라도 효율 만족을 못 하는 것으로 나타났다.
4. 전체적인 실험 결과 목표 균일도 타겟을 만족하는 것은 Model A, Model B로 나타났으며, 특히 Model A의 경우 믹서와 균일도감지기의 거리 10cm에서의 혼합 효율이 이미 90%에 달하는 우수한 결과를 나타내었다.

marine urea-SCR system", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(6), 1020-1033, 2020

DOI: <https://doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0071>

- [8] E. M. E. L. I. E. Samuelsson, & S. A. R. A. Holmberg, *A CFD study of the urea supply, droplet breakup and mixing in a pipe upstream of a SCR catalyst*, Master's thesis, [5]
- [9] LIM, Joo-Hyoung, et al. "A numerical analysis on distribution of reductant with mixer application and various injection method in urea-scr system", *In: KSAE Spring Conference Proceedings*, p.130-135, 2010.
- [10] H. Welten, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier, and D. Rammoser "Optimization of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction", *SAE paper* 930780. (1993).
DOI: <https://doi.org/10.4271/930780>

References

- [1] M. S. Choe., and D. S. Choi. "Study of the Optimization of the SCR Catalyst Position in by Exhaust System of using Mixer", *Indian Journal of Science and Technology* 9.24, 1-5. 2016
- [2] Jones, Casey B., et al. "Effects of dioxygen pressure on rates of NOx selective catalytic reduction with NH3 on Cu-CHA zeolites", *Journal of Catalysis*, 389, 140-149, 2020
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.05.022>
- [3] Wu, X., Yu, X., Huang, Z., Shen, H., & Jing, G. "MnOx-decorated VOx/CeO2 catalysts with preferentially exposed {110} facets for selective catalytic reduction of NOx by NH3", *Applied Catalysis B: Environmental*, 268, 118419, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118419>
- [4] I. R. Khan, Y. Lethwala, A. Chawla, & S. Jaichandar, "Study of Nox Treatment with Selective Catalytic Reduction and Diesel Exhaust Fluid with Emphasis on Importance of Mixer in Flow", *In Proceedings of ICDMC 2019*, pp. 41-49. Springer, Singapore 2020.
- [5] R. Vignesh, & B. Ashok, "Critical interpretative review on current outlook and prospects of selective catalytic reduction system for De-NOx strategy in compression ignition engine", *Fuel*, 276, 117996, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117996>
- [6] Huang, Haozhong, et al. "Analysis of deposit formation mechanism and structure optimization in urea-SCR system of diesel engine", *Fuel* 265 (2020): 116941.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116941>
- [7] C. Choi, Y. Sung, G. M. Choi, & D. J. Kim, "Numerical analysis of NOx reduction for compact design in

Abbreviation section

SCR : Selective Catalytic Reduction
 PM : Particulate Matter
 TUI : Temperature Uniformity Index
 VUI : Velocity Uniformity Index
 MUI : Mass Uniformity Index
 UD : Uniformity Detector

최 문 석(Mun-Seok Choe)

[정회원]



- 2017년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 자동차과 교수

<관심분야>

자동차 파워트레인, 친환경자동차, 자동차제어, 전기자동차, 자동차 구조설계