

디젤엔진 요소수 분사 SCR 시스템에서 촉매 내 암모니아 흡장량의 증가에 따른 NO_x 저감효율 향상 특성에 관한 연구

김양화* · 임옥택** · 김홍석†

A Study on the Improvement of Diesel NO_x Conversion Efficiency by Increasing the Ammonia Amount Adsorbed in a SCR Catalyst

Kim Yanghwa, Lim Ockteack and Kim Hongsuk

Key Words: Selective catalytic reaction catalyst(선택적 환원촉매), NO_x Conversion efficiency(질소산화물 전환효율), Ammonia adsorption(NH₃ 흡착), Urea water solution injection(요소수 분사), Diesel engine(디젤엔진)

Abstract

Nowadays, urea SCR technology is considered as the most effective NO_x reduction technology of diesel engine. However, low NO_x conversion efficiency under low temperature conditions is one of its problems to be solved. This is because injection of UWS (Urea Water Solution) is impossible under such a low temperature condition due to the problem of insufficient urea decomposition and urea deposits. In several previous studies, it has been reported that appropriate control of the amount of ammonia adsorbed on SCR catalyst can improve the NO_x conversion efficiency under low temperature conditions. In this study, we tried to find out how much the NO_x conversion efficiency increases with respect to the amount of ammonia adsorbed on the catalyst, and what the temperature conditions that the ammonia slip occurs. This study shows the results of 8 times repeated WHTC test with a diesel engine, in which UWS was injected with NH₃/NO_x mole ratio of '1'. Through this study, it was found that 13% of the NO_x conversion efficiency of WHTC increased while the θ (ammonia adsorption rate) increased from "0%" to "22%". In addition, it is found that in cases of high θ value, the significant improvement of NO_x conversion efficiency at low temperatures presented during the beginning period of WHTC and at high temperature and transient conditions presented during last part of WHTC test. The NH₃ slip occurring condition was 250°C of catalyst temperature and 10% of θ , and the amount of NH₃ slip increased as the temperature and θ are increased.

1. 서 론

디젤 엔진에서 배출되는 질소산화물(NO_x)은 대기오염의 주요 물질이기 때문에 세계 여러 나라에서 NO_x

규제를 점점 더 강화하고 있다. 이에 따라 추가적인 NO_x 저감 기술개발이 필요한 상황이다. 디젤엔진의 매우 효과적인 NO_x 저감 기술 중의 하나인 Urea SCR(Selective Catalytic Reaction, 선택적 환원 촉매) 기술은 2005년경부터 자동차에 적용되어 왔다. 이후로 연구개발을 통하여 많은 개선이 있어 왔으며, 주요한 개선내용은 다음과 같다. 첫째, SCR 촉매의 성능 및 고온 내구 특성이 크게 향상⁽¹⁻⁴⁾되었으며, 둘째 UWS 분무 및 배기가스와의 혼합에 대한 많은 이해를 통해 NO_x 저감 성능이 향상⁽⁵⁻⁹⁾되었고, 셋째 높은 SCR 반응률을 얻기 위한 배기관 단열 등의 열관리 기술⁽¹⁰⁾이 많이 발전하였다.

(Received: 15 Sep 2020, Received in revised form: 15 Oct 2020, Accepted: 16 Oct 2020)

*울산대학교 일반대학원 기계자동차공학과

**울산대학교 기계공학부

†김홍석, 회원, 한국기계연구원 그린동력연구실, 과학기술연합대학원대학교

E-mail : hongsk@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7367 FAX : (042)868-7305

하지만 배출가스 온도가 낮은 조건에서는 요소수가 NH₃로 열분해 되지 않아 요소수를 분사하지 못하기 때문에, Urea SCR 기술은 저온 운전조건에서 NO_x 저감율이 낮은 단점이 있다. 이와 관련하여 2000년대에 들어서 SCR 촉매에 흡장되는 NH₃ 양을 관리하면 저온조건에서 NO_x 저감 효율을 향상시킬 수 있다는 연구⁽¹¹⁾가 진행되었다. 2003년 Seher 등^(12,13)은 NH₃ 흡장 특성을 고려하여 요소수 분사량을 결정하고, 이를 이용한 엔진 ETC(European Transient Cycle)의 NO_x 저감성능 실험 결과를 보여주었다. 이들의 연구에는 수학적 모델링 방법이 자세히 제시되지 않았고, 이에 대한 검증이 없으나 문헌상 최초로 엔진 NO_x 저감에 NH₃의 촉매 흡장특성을 고려했다는 의미를 갖는다. 그 후 SCR 촉매의 NH₃ 흡장반응에 대한 반응속도론 관점으로 연구가 많이 진행되어 온도에 따른 NH₃의 흡장 및 탈착 특성에 대한 이해의 폭을 넓히게 되었다. 또한 함윤영 등⁽¹⁴⁾은 NH₃ 흡탈착 특성을 반영하여 NH₃ slip(SCR에서 NO_x와 반응하지 못하고 배출되는 NH₃)을 억제하도록 요소수 분사량을 보정하는 모델기반 제어로직을 만들어 엔진의 천이운전 모드에서 NO_x 저감 특성을 실험하였다. 하지만 SCR 촉매에 흡장된 NH₃가 NO_x 저감에 미치는 영향에 대한 자세한 연구는 여전히 많이 부족한 실정이다. 특히, WHTC(World Harmonized Transient Cycle)와 같은 대형엔진의 배출가스 규제 시험 모드에서 NH₃ 흡장량이 증가함에 따라 NO_x 전환율이 얼마나 상승하고, NH₃ slip이 얼마나 발생하는지에 대한 시험결과가 명확히 제시된 사례는 없다.

따라서 본 연구에서는 저온조건에서의 NO_x 전환효율을 개선하기 위한 기초 데이터로 활용할 목적으로 SCR 촉매에 흡장된 NH₃ 양의 NO_x 전환 효율과 NH₃ slip에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치

본 연구는 엔진동력계에 설치된 엔진을 이용하여 수행되었다. 이 연구에서 사용된 디젤 엔진은 배기량이 3.9L인 엔진으로 그 제원은 Table 1과 같다. 엔진의 배기관에 설치되는 배출가스 후처리장치는 DOC(Diesel Oxidation Catalyst, 디젤 산화 촉매기)와 SCRF(SCR on Filter), 그리고 SCR로 구성되며, 그 제원은 Table 2와 같다. SCRF는 SCR 촉매가 코팅된 매연여과필터인데 본 연구에서 사용된 배기후처리장치에서는 SCRF와 SCR

Table 1 Specifications of engine

No. of cylinders	4
Displacement volume (cc)	3933
Rated power (PS)	160
Rated engine speed (RPM)	2500
Fuel injection system	Common rail

Table 2 Specification of exhaust gas after-treatment system

Type	SCRF	SCR
Material	SiC	Cordierite
Diameter [mm]	159	159
Length [mm]	199	175
Catalyst	Cu-zeolite	Cu-zeolite

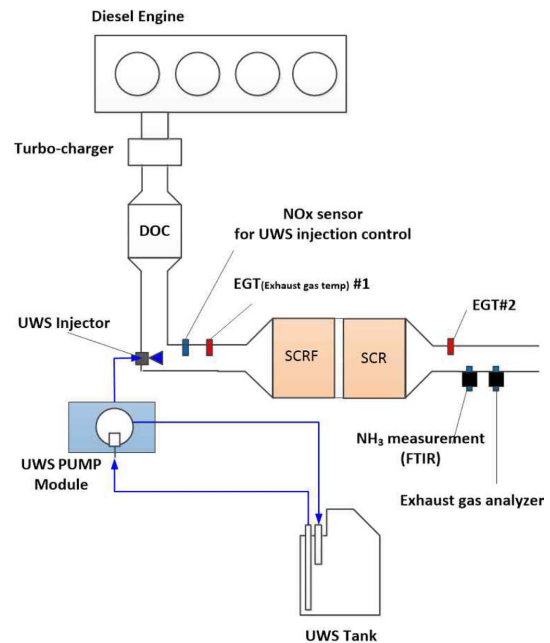


Fig. 1 Schematic diagram of exhaust gas after-treatment system

이 하나의 덩어리로 캐닝 되어 있어 본 연구에서는 이후 지면에서 편의상 SCRF와 SCR을 합하여 SCR 촉매로 부르기로 한다. 요소수 공급장치는 요소수 펌프와 요소수 탱크 그리고 제어기로 구성된다. 요소수 분사량은 SCR 전단의 NO_x 농도와 배출가스 유량을 이용하여 구해진 NO_x 질량을 이용하여 결정하였다. 자세한 요소수 결

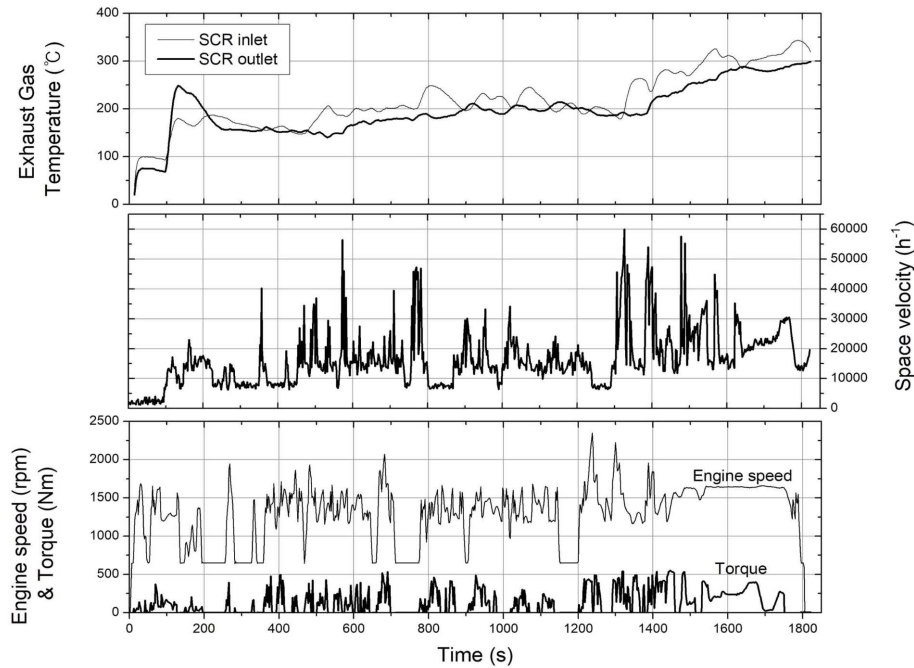


Fig. 2 Variation of engine speed, torque, space velocity and exhaust gas temperatures during a WHTC

정 방법은 이전 연구⁽¹⁵⁾에 자세히 알 수 있어 생략한다.

NO_x 농도는 SCR 전후단에서 AVL사의 배출가스 분석계(AMA i60R2 사용)를 이용하여 측정하였으며, NH₃의 농도는 SCR 후단에서 AVL사의 FTIR(Fourier Transform Intra-Red, 푸리에 변환 적외선 분광법, AVL SESAM i60 사용)을 이용하여 측정하였다. 배출가스 온도는 SCR 전후단에 PT-100Ω의 자동차용 EGT(Exhaust Gas Temperature) 센서를 설치하여 측정하였다.

3. 실험방법

본 연구에서는 SCR 촉매에 흡장된 NH₃의 양이 NO_x 전환 효율과 NH₃ slip에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 엔진을 WHTC로 운전하는 시험을 8차례 반복하였다. 여기서 NH₃ slip이란 NH₃가 SCR 촉매에서 완전히 반응하지 않고, SCR 촉매 후단으로 NH₃가 배출되는 것을 말한다. 그리고, WHTC는 UN ECE(Economic Commission for Europe)에서 제안한 엔진동력계를 이용한 대형 엔진 배출가스 시험 방법이며, 현재 우리나라에서도 대형엔진 배출가스 측정방법으로 사용⁽¹⁶⁾하고 있다. 이 실험 동안 요소수는 NH₃/NO_x 몰비가 '1'인 조건으로 분

사되었다. 최초 WHTC 시험을 시작하기 전, 배출가스 온도가 약 400°C인 조건에서 20분 동안 운전하여 촉매에 흡장되어 있는 NH₃를 모두 제거하였다. 그리고 각 WHTC 시험이 끝난 후에는 약 10분의 휴지기간을 거친 후, 다음 WHTC 시험을 진행하는 방식으로 총 8 차례 연속 시험하였다.

Fig. 2는 WHTC 시험 중 엔진회전속도와 토크, SCR 전후단의 배출가스 온도, 공간속도의 변화를 나타낸다. 배출가스 온도는 SCR 전후단이 약간의 차이가 있으나 실험 초기 약 100°C에서 실험 종료 시 약 350°C까지 상승한다. 배출가스 공간속도는 배출가스 유량을 촉매체적으로 나눈 값으로 최대 60,000 h⁻¹의 값을 갖는다. 이는 현재 상용 자동차에서 사용하는 통상적인 값과 유사하다. 본 연구에서 SCR 촉매의 온도는 SCR 전후단 배출가스 온도를 평균하여 계산한 값을 의미한다.

NO_x 저감효율 η_{NO_x} 은 다음과 같이 SCR 전단의 NO_x 농도와 SCR 후단의 NO_x 농도를 이용하여 백분율로 표현하였다.

$$\eta_{NO_x} = \left(\frac{NO_{x_{in}} - NO_{x_{out}}}{NO_{x_{in}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 $NO_{x_{in}}$ 은 SCR 촉매전단의 NO_x 농도이고,

NOx_{out} 은 SCR 촉매후단의 NOx 농도이다.

본 연구에서는 SCR 촉매에 흡착되는 NH_3 양을 배기관에 분사된 NH_3 양에서 NOx 환원반응에 소모된 NH_3 양과 SCR 후단으로 slip되는 NH_3 양을 빼서 계산하였다.

또한, 이 연구에서는 촉매가 흡장할 수 있는 최대 NH_3 양에 대한 현재 촉매가 흡장하고 있는 NH_3 양을 나타내는 NH_3 흡장율 θ 를 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$\theta = \frac{\Omega}{\Omega^*} \times 100 \quad (2)$$

여기서 Ω (mol)는 촉매 내에 흡장되어 있는 NH_3 양이며, Ω^* (mol)는 촉매의 최대 NH_3 흡장량 값이다. 이 촉매의 최대 NH_3 흡장량 값으로는 이전 연구⁽¹⁷⁾로부터 얻은 6.5 mol을 사용하였다.

4. 실험결과

Fig. 3은 총 8 차례의 WHTC 시험 동안 엔진에서 배출되는 NOx 량과 SCR 후단의 NOx 배출량을 비교하여 나타낸다. 엔진 NOx 배출량은 약 3.5 g/kWh로 8 차례의 시험동안 큰 변화가 없다. 이는 엔진 운전조건 및 각종 측정 장치의 측정 신뢰성이 있다는 것을 의미한다. 반면 SCR 후단의 NOx 배출량은 첫 번째 WHTC 시험에서 1.1 g/kWh이었던 것이 8 번째 시험에서는 0.68 g/kWh로 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 각 WHTC 시험에서 요소수 분사량 등 다른 모든 조건이 동일하기 때문에 실험 설계에서 의도한 바와 같이 촉매 내에 흡장되는 NH_3 양에 의해 영향 받는 것으로 보이며, 이 논문에서는 앞으로 여러 분석을 통해 이를 입증하고자 한다.

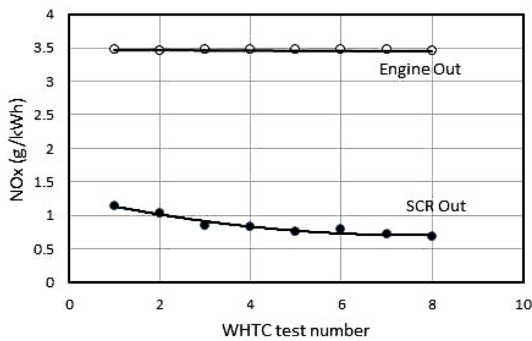


Fig. 3 NOx emissions of the 8 times repetition of WHTC

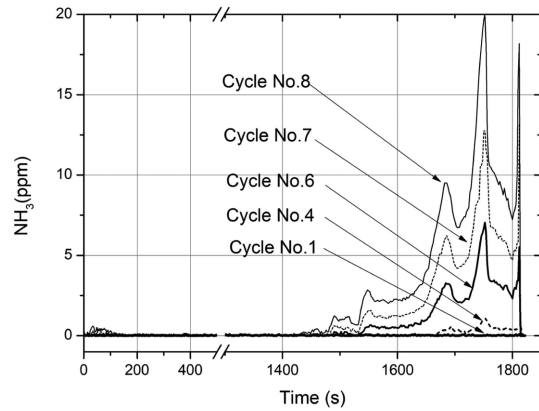


Fig. 4 Increase of NH_3 slip of the 8 times repetition of WHTC

부연하면, 이 시험에서는 NOx 저감효율이 낮은 초기 저온 구간에서도 요소수를 NH_3/NOx 몰비 ‘1’인 조건으로 분사하였고, 이 때 분사된 요소수가 전부 NOx 저감 반응에 소모되지 않고 일부는 촉매에 흡장되는 것으로 보인다. 이 NH_3 흡장량은 WHTC 시험이 반복됨에 따라 증가하고, 이에 따라 NOx 저감율도 증가하는 영향을 받는 것으로 보인다.

Fig. 4는 총 8차례의 WHTC 시험 동안 slip되는 NH_3 농도의 변화를 나타낸다. 이미 언급한 바와 같이 NH_3 농도는 SCR 후단에서 FTIR로 측정하였다. 1~3번째 WHTC 시험에서는 NH_3 slip은 발생하지 않았다. WHTC 1번째 시험 전에 촉매를 약 400°C인 조건에서 20분 동안 운전하여 촉매에 흡장되어 있는 NH_3 를 모두 제거하였다. 따라서 1~3번째 WHTC 시험 동안에 NOx 저감 반응에 사용되지 않는 NH_3 가 조금씩 촉매에 흡장되어 축적되다가 촉매 내 NH_3 가 어느 정도 이상 흡장이 되면 NH_3 slip이 발생하는 것으로 보인다. 즉, 촉매로부터 NH_3 의 탈착과 이에 따른 NH_3 slip은 촉매에 흡장되어 있는 NH_3 양과 관계가 있는 것으로 보인다. NH_3 slip은 4번째 WHTC 시험부터 발생하였는데, 특히 배출가스 온도가 높은 WHTC 후반부에서 나타난다. NH_3 분자의 흡착과 탈착은 NH_3 분자와 SCR 촉매 사이의 결합에너지와 주변 온도의 함수인 NH_3 분자의 운동 에너지에 관계되는 것으로 보인다. 즉, 배출가스 온도가 높은 조건에서는 흡착상태에서 NH_3 분자와 SCR 촉매 사이의 결합에너지보다 NH_3 분자의 운동에너지가 더 크기 때문에 NH_3 탈착이 발생하는 것으로 판단된다. 이로부터 SCR 촉매는 NH_3 가 일정 이상 흡장되었을 때 고온 조건에

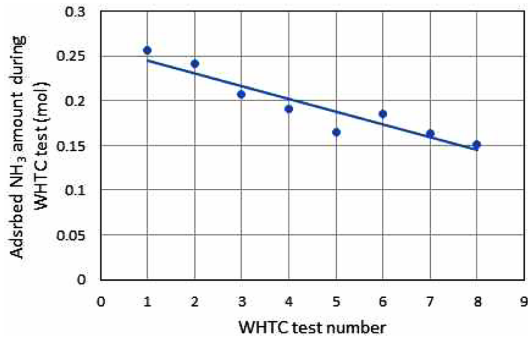


Fig. 5 Adsorbed NH₃ amount in the SCR catalyst in each WHTC

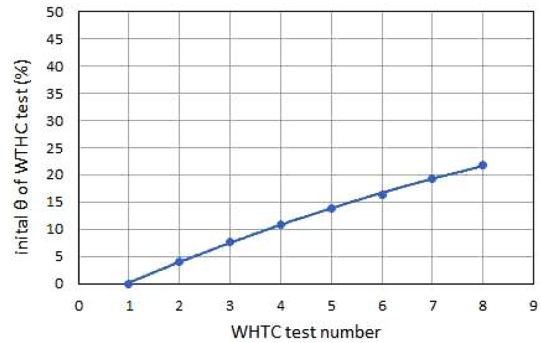


Fig. 7. The θ at the starting time of WHTC test

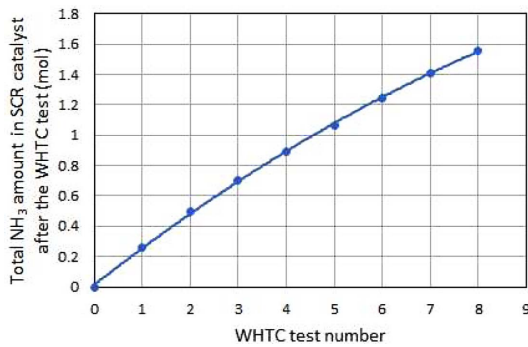


Fig. 6 Total accumulated NH₃ amount in the SCR catalyst during 8 times repetition of WHTC

서 NH₃가 slip되는 특성을 갖는다고 할 수 있고, NH₃ slip량은 NH₃ 흡장량과 온도에 영향을 받는 것으로 보인다.

Fig. 5는 WHTC 1회 시험 동안 SCR 촉매에 흡착되는 NH₃ 양의 변화를 나타낸다. SCR 촉매에 흡착되는 NH₃ 양은 분사된 NH₃ 양에서 NO_x 환원반응에 소모된 NH₃ 양과 SCR 후단으로 slip되는 NH₃ 양을 빼서 계산한 값이다. WHTC 1회 시험 동안 SCR 촉매에 흡착되는 NH₃ 양은 1회차 시험에서 0.25 mol 이었으며, 8회차 시험은 0.15 mol로 WHTC 시험 횟수가 증가 할수록 선형적으로 감소한다. WHTC 시험이 계속 됨에 따라 촉매 내에 NH₃이 흡장될 수 있는 산점(acid site)의 수가 점차 감소하기 때문으로 보인다. 염기성 분자인 NH₃의 흡착은 SCR 촉매에 존재하는 산점과 관계되는 것^(18,19)으로 알려져 있다. 본 연구에 사용한 Cu-zeolite SCR 촉매에는 Brønsted 산점 및 Lewis 산점 등 다양한 산점이 존재하는 것으로 보이며, 이 산점의 종류와 수, 공간적 배치 등 다양한 요인에 의해 흡착량이 결정 될 것으로 보인다. 본 연구에서는 거시적 관점에서 WHTC 시험 중 촉매

내에 흡착되는 NH₃ 총량의 변화만을 고찰하였다.

Fig. 6은 WHTC 시험이 계속 반복됨에 따라 촉매 내에 존재하는 NH₃ 총 양을 나타내는 것으로 Fig. 5의 값을 누적한 그래프이다. WHTC 시험이 계속됨에 따라 1회 WHTC 시험당 NH₃ 흡장량의 증가는 점차 감소하기 때문에 그 값이 선형적으로 증가하지는 않는다.

Fig. 7은 각 WHTC 시험 시작 시점에서의 NH₃ 흡장율 θ 를 나타낸다. 여기서 NH₃ 흡장율 θ 는 Fig. 6에서 얻어진 촉매 내에 흡장되어 있는 NH₃ 양을 이 촉매의 최대 NH₃ 흡장량 값으로 나누어 얻었다. Fig. 5~7의 계산을 통해서 WHTC 시험이 계속 반복됨에 따라 초기 NH₃ 흡장율 θ 는 0%에서 21.5%까지 점차적으로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 촉매 내에 존재하는 NH₃ 총 양이 WHTC 시험이 계속됨에 따라 그 값이 비선형적으로 증가하므로 흡장율 θ 도 비선형적으로 증가한다.

Fig. 8은 8번째 WHTC 시험에서 촉매 온도와 NH₃ 흡장율 θ , slip되는 NH₃ 농도를 나타낸다. WHTC 시험 시작 시점에서 θ 는 22%이었으나 시험 중 증가하여 종료

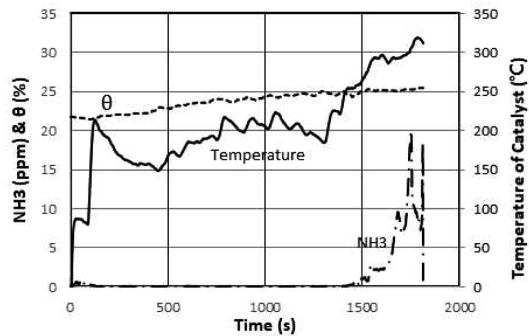
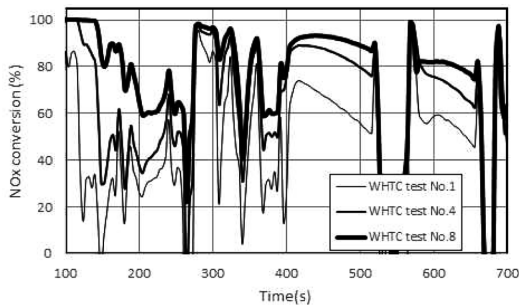


Fig. 8 Effect of θ and catalyst temperature on NH₃ slip (the WHTC 8th test)

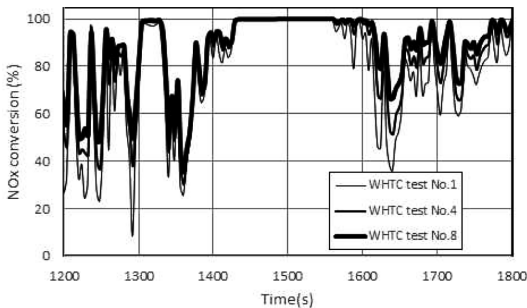
시점에는 25%까지 상승하였다. 그리고 이 시험에서 NH₃ slip은 WHTC 후반부의 촉매 온도가 250°C 이상 조건에서 발생하기 시작함을 알 수 있다. 이로부터 NH₃ slip의 발생 시점은 촉매의 온도와 관계가 있고, NH₃ slip량은 θ 와 관계되는 것을 유추 할 수 있다.

Fig. 8로부터 얻은 결과를 토대로 NH₃ slip 특성을 나타내는 Fig. 4와 WHTC 시험 시작시점의 θ 를 나타내는 Fig. 7을 종합하여 판단해 볼 때 본 연구에서 사용한 Urea SCR 시스템에서 NH₃ slip은 WHTC 후반부의 촉매 온도가 250°C, 흡장율 θ 가 10% 인 조건에서 발생하기 시작하였으며, NH₃ slip 양은 온도와 흡장율 θ 가 증가함에 따라 증가한다고 결론 내릴 수 있다. 따라서 NH₃ slip을 방지하면서 NOx를 효과적으로 저감하기 위해서는 요소수 분사량을 조절하여 저온 조건에서 NH₃ 흡장율 θ 를 크게 하고, 고온조건에서 NH₃ 흡장율 θ 를 작게 제어하는 것이 필요해 보인다.

Fig. 9는 몇 개의 WHTC 시험 중 NOx 전환율의 실시간 변화를 나타낸다. Fig. 9(a)는 초반 600초 동안의 NOx 전환율을 나타낸 것으로, WHTC 시험 횟수가 증



(a) The NOx conversion efficiency during the early 600s of WHTC mode



(b) The NOx conversion efficiency during the end 600s of WHTC mode

Fig. 9 Variation of NOx conversion efficiency during the 8 times repetition of WHTC

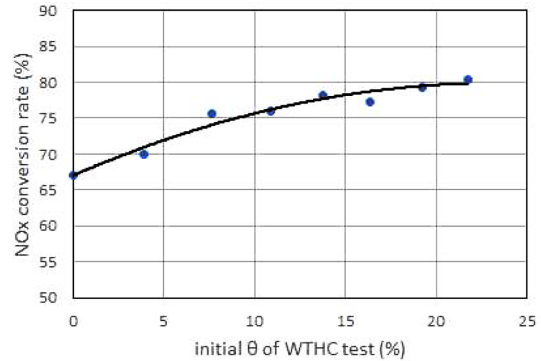


Fig. 10 The relationship with initial θ of WHTC test and NOx conversion efficiency

가 할수록 NOx 전환율이 증가함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9(a)는 후반 600초 동안의 NOx 전환율을 나타낸 것으로, 마찬가지로 WHTC 시험 횟수가 증가 할수록 NOx 전환율이 낮은 천이조건에서 증가하는 것을 알 수 있다. 이상의 결과를 종합하였을 때 SCR 촉매에 흡장되어 있는 NH₃ 양은 NOx 저감율에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. NH₃ 흡장량에 따른 NOx 저감율의 상승은 WHTC 운전 초기 저온에서의 NOx 저감율 상승이 크게 작용하였지만 WHTC 운전 후기 고온 조건에서도 일부 영향을 받는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 10은 WHTC 시험 시작시점의 NH₃ 흡장율 θ 와 NOx 전환율의 관계를 나타낸다. NH₃ 흡장율 θ 가 '0%'에서 '22%'까지 상승하는 동안 WHTC의 NOx 저감율이 13% 증가함을 알 수 있다. WHTC 시험 시작 전에 NH₃ 흡장율을 크게 가져가는 것이 높은 NOx 전환율을 얻을 수 있는 효과적인 방법임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 요소수 공급장치와 Cu-zeolite SCR 촉매를 사용하는 디젤엔진의 배기후처리 시스템에서 촉매에 흡착된 NH₃ 양에 따른 NOx 전환효율과 NH₃ Slip 특성을 알아보려고 하였다. 이를 위해 요소수를 NH₃/NOx 몰비가 '1'인 조건으로 SCR 촉매 전단에 분사하면서 WHTC 시험을 8회 반복하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) SCR 촉매에 흡장되어 있는 NH₃ 양이 증가할수록 NOx 저감율이 증가한다. 특히, NH₃ 흡장량에 따른 NOx

저감율의 상승은 WHTC 운전 초기 저온에서의 크게 나타났지만 WHTC 운전 후기 고온의 천이운전 조건에서도 일부 영향을 받는 것을 확인 할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 사용한 SCR 촉매는 NH₃ 흡장율 θ 가 '0%'에서 '22%'까지 상승하는 동안 WHTC의 NO_x 저감율이 13% 증가하는 특성을 보이고, 이는 엔진의 배기 규제 대응 전략 수립에 기초자료로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다.

(3) NH₃ slip의 발생 시점은 촉매의 온도와 관계가 있고, NH₃ slip량은 θ 와 관계가 있다. NH₃ slip은 WHTC 후반부의 촉매 온도가 250°C, 흡장율 θ 가 10% 인 조건에서 발생하기 시작하였으며, NH₃ slip 양은 흡장율 θ 가 증가함에 따라 증가하였다. NH₃ slip을 방지하면서 NO_x를 효과적으로 저감하기 위해서는 요소수 분사량을 조절하여 저온 조건에서 NH₃ 흡장율 θ 를 크게 하고, 고온 조건에서 NH₃ 흡장율 θ 를 작게 제어하는 것이 필요해 보인다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 주요사업 “미세먼지(PM2.5) 및 온실가스 대응 미래발전/동력시스템 초청정 기계기술”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S. Sato, S. Sato and M. Hosoya, “Improvement of Low-Temperature Performance of The NO_x Reduction Efficiency on the Urea-SCR Catalysts”, SAE Technical Paper 2013-01-1076, 2013.
- (2) J. Theis, “SCR Catalyst systems optimized for lightoff and steady-state performance”, SAE Int. J. Fuels Lubr. Vol. 2, No. 1, 2009, pp. 332~341.
- (3) J. Girard, G. Cavataio, R. Snow and C. Lambert, “Combined Fe-Cu SCR Systems with Optimized Ammonia to NO_x Ratio for Diesel NO_x Control”, SAE Int. J. Fuels Lubr, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 603~610.
- (4) G. Cavataio, J. Girard, J. Patterson, C. Montreuil, et al., “Laboratory Testing of Urea-SCR Formulations to Meet Tier 2 Bin 5 Emissions”, SAE Technical Paper 2007-01-1575, 2007.
- (5) T. Mckinley, A. Alleyne and C. Lee (2010). Mixture Non-Uniformity in SCR Systems: Modeling and Uniformity Index Requirements for Steady-State and Transient Operation. SAE Int. J. Fuels Lubr. Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 486~499.
- (6) P. Sharma, S. Venkatachalam, P. Paulraj, V. Halbe, et al., “An Experimental Comparison of the Uniformity Index for Two Dual Stage Plate Mixers in a SCR system”, SAE Technical Paper 2015-26-0109, 2015.
- (7) H. Smith, M. Zöchbauer and T. Lauer, “Advanced Spray Impingement Modelling for an Improved Prediction Accuracy of the Ammonia Homogenisation in SCR Systems”, SAE Technical Paper 2015-01-1054, 2015.
- (8) V. Rajan, J. Mallikarjuna and G. Venkitachalam, “3-D Numerical Study of Effect of Injection Parameters Upon the Uniformity of Ammonia in Urea-SCR”, SAE Technical Paper 2013-01-2768, 2013.
- (9) S. Drennan, G. Kumar, S. Quan and M. Wang, “Application of Automatic Meshing to Urea-Water Injection Simulation for Engine Aftertreatment”, SAE Technical Paper 2015-01-1057, 2015.
- (10) C. Sharp, C. Webb, G. Neely, J. Sarlashkar, et al., “Achieving Ultra Low NO_x Emissions Levels with a 2017 Heavy-Duty On-Highway TC Diesel Engine and an Advanced Technology Emissions System - NO_x Management Strategies”, SAE Int. J. Engines Vol. 10, No. 4, 2017, pp. 1736~1748.
- (11) D. Seher, M. Reichelt and S. Wickert, “Control Strategy for NO_x - Emission Reduction with SCR”, SAE Technical Paper 2003-01-3362, 2003.
- (12) M. Devarakonda, G. Parker, J. Johnson, V. Strots, et al., “Model-Based Estimation and Control System Development in a Urea-SCR Aftertreatment System”, SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 646~661.
- (13) P. Markatou, J. Dai, A. Johansson, W. Klink, et al., “Fe-Zeolite SCR Model Development, Validation and Application”, SAE Technical Paper 2011-01-1304, 2011.
- (14) 함윤영, 박수열, “Urea-SCR 시스템의 NH₃ 흡탈착 특성 및 모델기반 제어연구”, 한국자동차공학회는문집 Vol. 24, No. 3, 2016, pp. 302~309.
- (15) 김홍석, 정용일, 송명호, 이성욱, 박현대, 황재원, “중형 운행 경유차용 Urea-SCR 시스템의 NO_x 저감 성능에 미치는 영향인자”, Transaction of KSAE, Vol. 17, No. 1, 2009, pp. 154~161.
- (16) 환경부, “제작자동차 시험검사 및 절차에 관한 규정”, 환경부고시 2018-45호, 2018.

- (17) 고준채 “Urea-SCR의 분사량 계산로직에 따른 NOx 저감 성능 연구,” 송실대학교 석사학위 논문, 2019.
- (18) Y. Mao, H. Wang and P. Hu, “Theoretical Investigation of NH₃-SCR Process over Zeolites: A review”, *International Journal of Quantum Chemistry*, Vol. 115, 2015, pp. 618~630.
- (19) M. Niwa and N. Katada, “New Method for the Temperature-Programmed Desorption of Ammonia Experiment for Characterization of Zeolite Acidity: A review”, *Chem. Rec.*, Vol. 13, 2013, pp. 432~455.