

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

• 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🖃





공 학 석 사 학 위 논 문

 $m NH_3$ 흡탈착 모델을 이용한 m WHTC운전조건 디젤 엔진용 m Cu-Zeolite SCR 촉매의 $m NO_X$ 저감율 개선 연구

A Study on Improvement of NO_X Reduction rate of Cu-Zeolite SCR Catalyst for Diesel Engine under WHTC Operating Condition using NH_3 Adsorption and Desorption Model

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원 건 설 기 계 공 학 과 김 양 화

$m NH_3$ 흡탈착 모델을 이용한 m WHTC운전조건 디젤 엔진용 m Cu-Zeolite SCR 촉매의 $m NO_X$ 저감율 개선 연구

지 도 교 수 임옥택

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2020년 8월

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원 건 설 기 계 공 학 과 김 양 화

김 양 화 의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 이상 위 심사위원 이윤호(인) 심사위원 임옥택(대)

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원 2020 년 08 월

국문 요약

$m NH_3$ 흡탈착 모델을 이용한 m WHTC운전조건 디젤 엔진용 m Cu-Zeolite SCR 촉매의 $m NO_X$ 저감율 개선 연구

울산대학교 일반대학원 건설기계공학과 김 양 화

디젤엔진은 높은 효율성으로 인하여 널리 사용되고 있다. 그러나 디젤엔진에서 배출되는 $PM(미세입자, Particulate\ Matter)$ 및 $NO_X(질소산화물)$ 가대기 오염의 주요원인으로 손꼽히면서 배출제한을 도입하여 규제되고 있다. EURO3와 EURO6를 비교하였을 때, 배출규제의 폭이 크게 증가하고 있다. 이러한 상황에서 디젤기관에서 배출되는 NO_X 를 저감시켜주는 $SCR(선택적 촉매 환원법, Selective\ Catalyst\ Reduction)$ 시스템은 필수적인 요소이다. 따라서 요소수를 이용하여 NO_X 를 저감시키는 요소수 SCR의 NO_X 저감율 개선과 $NH_3(암모니아)$ Slip을 줄이기 위한 분사모델에 관한 연구를 필요로한다.

요소수 SCR 시스템에서 과도한 요소수의 분사는 NH₃ Slip을 일으키며, 고체 침전물을 생성한다. 따라서 NH₃ Slip과 고체 침전물 생성 방지를 위해 최적화된 요소수 분사모델은 SCR 시스템 연구에 있어서 중요한 요소이다. 이 연구는 Cu-Zeolite 촉매를 이용하는 요소수 SCR 시스템을 이용하여수행되었다.

엔진 벤치실험을 통해 각기 다른 조건의 배기가스 온도와 NH_3 농도에서 엔진을 가동한다. 배기가스 분석기와 $DCU(Dosing\ Control\ Unit)$ 를 이용하여 배기가스를 측정하고, 요소수 분사를 제어한다.

엔진 벤치실험의 데이터를 이용하여 배기가스 온도와 NH_3 농도가 미치는 영향과 NO_X 의 저감율, 암모니아 흡탈착에 걸리는 시간과 흡탈착률, 요소수 분사량, NH_3 Slip양을 계산한다. 계산한 결과를 앞선 연구들과 비교하고, 계산결과를 토대로 새로운 분사모델을 수립하여 NO_X 저감율을 높이는 동시에 NH_3 Slip이 일어나지 않도록 요소수 분사를 제어한다.

엔진 벤치실험을 통하여 가장 유효한 촉매 흡착용량을 정하였으며 이를 토대로 새로운 분사모델을 수립하여 NO_X 저감율을 높이는 동시에 NH_3 Slip이 일어나지 않도록 요소수 분사를 제어하였다. 분사모델을 사용하지 않았을 때의 NO_X 저감효율은 뛰어났으나 실험 횟수가 거듭됨에 따라 NH_3 Slip이 발생한다. 기존의 분사모델을 이용하였을 때 NH_3 Slip은 발생하지 않았으나, NO_X 저감효율이 크게 떨어진다. 새로 수립한 분사모델을 이용하였을 때, 높은 NO_X 저감율과 낮은 NH_3 Slip을 동시에 얻을 수 있었다. 이를 통하여 새로운 분사모델이 유효하다는 것을 입증 할 수 있었다.

목 차

국문 요약	j
목 차	ij
용어 정리	iii
기호 설명	iv
제1장 서론	1
1.1 연구 배경	 1
1.2 연구 동향	 4
1.2.1 요소수 SCR System 연구 동향	 4
1.2.2 기존 연구의 NH ₃ 흡탈착률 계산 ···································	 7
1.2.3 기존 연구의 요소수 분사모델	10
1.3 연구 목적	12
제 2장 실험장치 및 방법	14
2.1 실험장치	14
2.1.1 요소수 분사 시스템	15
2.1.2 엔진 벤치실험 장치	18
2.1.3 배출가스 분석 장비	20
2.2 실험방법	23
2.2.1 엔진 벤치실험 조건	23
제 3장 실험결과	25
3.1 Cu-Zeolite SCR 촉매의 NH3 흡탈착 특성	25
3.1.1 배출가스 온도 및 NH。 농도의 영향	25

3.2 NH ₃ 흡탈착률 계산결과의 검증 ···································	27
3.2.1 NH ₃ 흡탈착률 계산과 실험결과 비교	27
3.3 WHTC 운전조건에서의 NH ₃ 흡탈착 모델을 이용한 SCR의 NO _X 저성능 향상 연구	
3.3.1 분사모델을 적용하지 않고 분사한 결과	30
3.3.2 기존 분사모델을 이용하여 분사한 결과	32
3.3.3 새로운 분사모델을 이용하여 분사한 결과	33
제 4장 결론	37
참고문헌(References)	38
Abstract	40
감사의 글(Thanks to)	42

용어 정리

CO: 일산화탄소

CO₂: 이산화탄소

NO : 일산화질소

 NO_X : 질소산화물

HNCO 이소시안산

THC: 탄화수소

NH₃: 암모니아

PM (Particulate Matter) : 입자상 물질

SCR (Selective Catalytic Reduction) : 선택적 환원 촉매

Urea: 요소수

NH₃ Slip : SCR에서 NO_x와 반응하지 못하고 배출되는 암모니아

TPD (Temperature Programmed Desorption) : 온도가 증가 할 때 표면에

서 탈착 된 분자를 관찰하는 방법

SDPF (SCR-on-DPF) : 디젤 매연필터에 NO_X 정화용 SCR 촉매를

코팅하여 성능을 올린 기술

NSR (Normalized Stoichiometric Ratio) : NH₃/NO_X 몰비

PWM (Pulse Width Modulation) : 펄스폭 변조

DCU (Dosing Control Unit) : 요소수 수용액 분사 컨트롤 유닛

FTIR (Fourier Transform Intra-Red) : 푸리에 변환 적외선 분광법

WHTC (World Harmonized Transient Cycle) : 실제 무거운 상업용 차량의

전세계적 패턴을 기반으로한 천이상태 엔진 테스트 모드.

기호 설명

 $r_{\it ads}$: ${\rm NH_3}$ 흡착률 (${\rm NH_3}$ Adsorption rate)

 $r_{des}: \mathrm{NH_3}$ 탈착률 (NH $_3$ desorption rate)

 $r_{NO}: \mathrm{NH_3}$ 탈착률 (NO reaction rate)

 A_{ads} : NH_3 흡착 지수인자

 A_{des} : $\mathrm{NH_3}$ 탈착 지수인자

 $C_{N\!H_{\!\scriptscriptstyle 3}}$: 기체상 ${
m N\!H}_{\!\scriptscriptstyle 3}$ 몰농도

 C_{NO} : NO 몰농도

 $\theta_{N\!H_{\!\scriptscriptstyle 3}}:$ NH $_{\!\scriptscriptstyle 3}$ 의 SCR 표면점유율 (Surface Coverage)

 $\theta^{*N\!H_{\!\scriptscriptstyle 3}}$: 임계표면점유율 (Critical Surface Coverage)

 E_{des} : 활성화 에너지

R : 일반기체상수

T: 촉매표면온도

 Ω : 촉매 흡착용량 (Adsorption Capacity)

 Ω^* : 최대 촉매 흡착용량 (Maximum Adsorption Capacity)

제 1장 서론

1.1 연구 배경

디젤엔진은 열효율이 좋고 높은 압축비와 연비로 처음 발명된 이후 현재까지도 널리 사용되고 있다. 그러나 환경에 대한 관심이 높아지며, 환경오염 문제가 대두됨에 따라 배출가스 규제가 도입되었다. 현재 우리나라는 유럽연합(EU)이 도입한 경유 차량 배출가스 규제단계인 Euro6에 맞춰 배출가스를 규제하고 있다. 1992년 7월 시행된 Euro1부터 $2014년 9월부터 현재까지 적용중인 Euro6까지 CO(일산화탄소. 이하 CO), THC(탄화수소. 이하 THC), PM(Particulate Matter, 입자상물질. 이하 PM), <math>NO_X$ (질소산화물. 이하 NO_X)와 같은 배출가스를 규제하고 있으며. 배출규제의 폭이 크게 증가하고 있다.

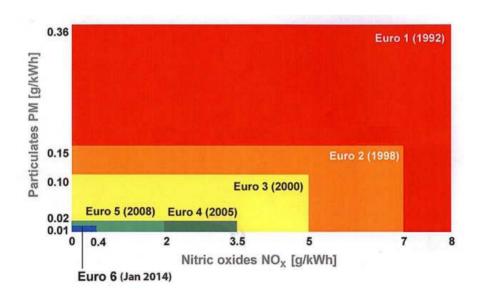


Fig. 1-1 Euro 1-6 배출가스 규제 (Directive 97/68/EC)

Fig. 1-1은 1992년 Eurol부터 2014년 Euro 6까지 규제되는 배출가스 중 PM과 NO_X 의 규제 변화를 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 규제의 폭은 빠르게 증가하고 있는 추세이다. 특히 PM과 NO_X 는 대기오염의 주 원인으로 뽑히는바 Euro6에서 PM은 0.01 g/kWh, NO_X 는 0.4 g/kWh으로 Euro5에 비하여서도 큰 폭으로 규제가 강화되었음을 알 수 있다.

디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 PM과 NO_X 가 더 많이 배출되기 때문에 배기가스를 저감시켜 주는 장치는 필수적이다. 그 중 환원제를 사용하여 NO_X 환원시키는 SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적 환원 촉매. 이하 SCR) 시스템은 NO_X 를 저감시키는 가장 효과적인 장치로 손꼽히며, 강화되는 규제로 인하여 활발하게 연구되고 있다. SCR 시스템 중 요소수를 사용하여 NO_X 를 환원하는 시스템인 요소수 SCR 시스템은 높은 정화효율과 적은 인체 유해성으로 인하여 많은 연구가 진행된 바, 이미 상용화 되어있다. 그러나 NH_3 Slip과 과도한 요소수 분사로 인한 고체 침전물 방지를 위해 최적화된 요소수 분사모델이 필요하다.

SCR 시스템에서 이루어지는 NO_X 저감 원리는 Fig. 1-2와 같은 과정을 거쳐일어난다. 요소수 수용액이 SCR 촉매 전단에 분사장치를 통해 분사되면 NH_3 으로 변환된며, 변환된 NH_3 가 SCR 촉매 표면에 흡착하게 된다. 흡착된 NH_3 가 배기가스 중 NO_X 와 환원반응을 일으켜 인체에 무해한 N_2 와 H_2 O로 변환되어 대기 중에 배출된다.(1-2)

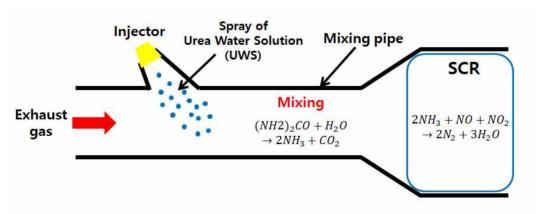


Fig. 1-2 SCR 시스템 작동원리 개략도

만일 NO_X 의 양에 비해 NH_3 의 양이 부족하면 반응하지 못한 NO_X 가 그대로 배출되게 된다. 반면, 요소수를 과도하게 분사하게 되면 NO_X 와 미처 반응하지 못한 NH_3 가 그대로 배기관을 통해 배출되게 된다. 이를 NH_3 Slip이라한다. 따라서 필요한 양의 요소수를 적절하게 분사하여 NO_X 저감과 NH_3 Slip을 방지하는 기술에 관한 연구가 필요하다.

1.2 연구 동향

1.2.1 NH₃ 흡탈착률 계산식

SCR은 배출가스에 환원제를 분사하여 NO_X 의 환원반응을 일으켜 배출가스의 NO_X 배출을 줄이는 장치이다. SCR 연구의 촉매로는 Vanadium 계열과 Zeolite 계열이 주를 이루고 있다. 이 연구는 Cu-Zeolite 촉매를 이용하는 요소수 SCR 시스템을 이용하여 수행되었다.

일반적으로 디젤 SCR 시스템에는 32.4% 농도의 요소수 수용액을 주로 사용한다. SCR 시스템에서 요소수 수용액이 NH_3 로 변환되는 과정은 다음과 같이 3단계에 걸쳐 변환된다.

1) 요소수 수용액 증발반응

$$NH_2 - CO - NH_2(liquid) \rightarrow NH_2 - CO - NH_2^* + xH_2O$$
 (2.1)

2) 요소수 분해반응

$$NH_2 - CO - NH_2^* \rightarrow NH_3 + HNCO \tag{2.2}$$

3) 요소수 가수분해

$$HNCO + H_2O \rightarrow NH_3 + CO_2 \tag{2.3}$$

요소수 수용액의 증발반응은 식 (2.1)과 같다. 고온의 배기가스에 요소수 수용액이 분사되면 증발반응이 일어나는데, 이를 통해 요소수 수용액은 요소수와 물로 분리된다. 분리된 요소수는 식 (2.2)의 분해반응을 통해 NH₃와 HNCO(이소시안산. 이하 HNCO) 으로 분해되고, 이때 생성된 HNCO는 식 (2.3)의 가수분해 반응을 통해 다시 NH₃와 CO_2 로 분해된다. 요소수수용액 증발반응은 주로 분무입자 크기와 온도에 의해 영향을 받는다.(3)

증발된 요소수 수용액은 분해반응을 통해 동등한 몰의 NH₃와 HNCO를 생성한다. 이 반응은 온도에 상당히 의존적이며, 200℃~300℃ 사이에서 주로 발생한다.(4) 배기가스 온도가 200℃ 보다 낮을 때 시아누르산, 멜라민, 아멜라이드, 아멜린과 같은 부산물을 생성하며, 이 부산물들은 배기관 벽에 침착되어 제거하기 매우 어려운 물질이다. 따라서 배기가스 온도가 200℃ 이상일 때에만 요소수의 분사가 이루어져야하며, 배기관은 2중벽으로 설계하여 온도가 낮아지지 않도록 해야 한다.

SCR 시스템에서 일어나는 화학반응 중 핵심적인 반응은 다음 식과 같다.(5-7)

1) Standard SCR 반응

$$4NH_3 + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$$
 (2.4)

2) Fast SCR 반응

$$4NH_3 + 2NO + 2NO_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \tag{2.5}$$

3) Slow SCR 반응

$$4NH_3 + 3NO_2 \rightarrow 3.5N_2 + 6H_2O \tag{2.6}$$

4) NH₃ 산화반응

$$4NH_3 + 3O_2 \to 2N_2 + 6H_2O \tag{2.7}$$

식 (2.4)의 Standard SCR 반응은 배기가스의 NO_X 의 함유량 중 NO가 NO_2 보다 많을 때 발생하는 반응이다. 식 (2.5)의 Fast SCR 반응은 NO_X 에서 NO와 NO_2 의 비율이 같을 때 일어나는 반응이며, 식 (2.6)의 Slow SCR 반응은 NO_2 가 NO보다 많을 때 발생하는 반응이다. 식 (2.7)의 NH_3

산화반응은 NO_X 환원 반응은 아니지만 분사된 NH_3 가 배기가스 중의 O_2 와 산화반응하여 N_2 와 H_2 O로 변환되는 반응으로 NH_3 를 소모하기 때문에 NH_3 분사량을 계산할 때, 이 반응 또한 고려하여 분사량을 계산하여야 한다.(8) SCR 시스템의 성능은 엔진 상태에 따라 크게 차이를 보인다. SCR은 정속 주행상태 엔진에서는 효과적인 NO_X 저감율을 보이지만, 실제 주행 상황의 엔진에서는 NO_X 의 저감과 NH_3 Slip 저감을 동시에 달성하기 어렵다.(9-13) 따라서 요소수 SCR 시스템의 성능을 향상시키기 위해 실시간으로 필요한 양의 요소수를 적절하게 분사하여 NO_X 저감과 NH_3 Slip을 방지하는 기술과 SCR 내부의 NH_3 흡탈착률 계산에 관한 연구가 진행되고 있다.(14)

1.2.2 선행 연구의 요소수 SCR 시스템의 수치해석

2000년대 초반의 SCR 시스템은 NH3 흡탈착을 고려하지 않고 NO_X 저감반응에 대한 Kinetics를 주로 연구하였으며, 2003년 이후로 요소수 SCR 시스템은 NH3 흡탈착률을 고려하여 NO_X 저감반응에 대하여 Kinetics Micro-reactor를 적용하여 연구하였다.

Penelope Markatou의 Fe-Zeolite 기반 SCR 촉매에 대한 1차원 수치 모델개발 및 검증연구(15)는 NH3의 흡탈착을 포함한 NO_X 저감반응을 고려하여 진행되었다. NH3 흡탈착률은 온도와는 무관하며, 농도와 θ (NH3의 SCR 표면 점유율)에 비례한다고 가정하였으며, Kinetic 상수를 제시하지 않았다. NH3와 NO_X 의 반응식들을 동시에 계산하여 θ 값을 구하였으나 실제 엔진이 아닌 암모니아만 유입되는 조건인 TPD(Temperature Programmed Desorption, 온도가 증가 할 때 표면에서 탈착 된 분자를 관찰하는 방법) 실험결과와 비교하였으며, 비교결과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 아래 그림 1-3은 측정된 NO_X 저감률과 시뮬레이션된 NO_X 저감률을 비교한 그래프이다.

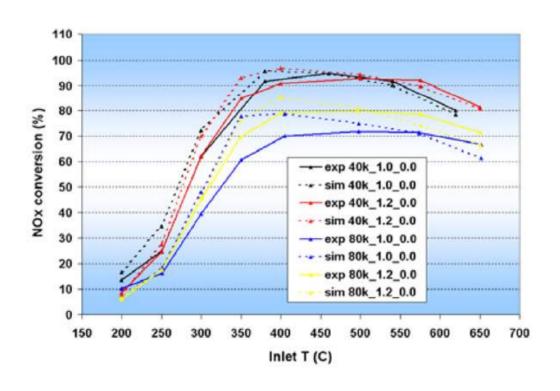


Fig. 1-3 측정 및 시뮬레이션 NO_X 저감률 비교(정상상태)(15)

Maruthi Devarakonda의 연구(16)에서 Cu-Zeolite 촉매를 이용한 SCR 시스템의 NH3에 의한 NO $_X$ 저감의 단순화된 1차원 모델을 제시하였다. 이연구에서도 엔진 실험이 아닌 TPD 실험을 진행하였으며, Kinetic 상수를 제시하지 않았다. Kinetic 상수 중 일부는 직접 계산하였으나, 일부는 이전문헌으로부터 취하였다. 이 연구에서는 온도조건을 고려하지 않고 Kinetic 상수를 계산하였다. 촉매 표면의 NH_3 흡착량과 NO, NO_X , NH_3 의 각 농도의 변화량을 계산하여 다음과 같이 Standard SCR 반응을 고려한 촉매 내의 NH_3 표면 점유율 계산식을 나타내었다.

$$\frac{\partial \theta_{NH_3}}{\partial t} = r_{ads} - r_{des} - r_{NO} \tag{2.8}$$

NH₃의 흡착률과 탈착률은 다음과 같이 식 2.9, 2.10과 같이 표현하였으며, NH₃의 SCR 표면 점유율은 아래의 식 2.11, 2.12와 같이 표현하였다.

1) NH₃ 흡착률

$$r_{ads} = A_{ads} C_{N\!H_{\!3}} (1 - \theta_{N\!H_{\!3}}) \tag{2.9}$$

2) NH₃ 탈착률

$$r_{des} = A_{des} \exp\left(-\frac{E_{ads}}{RT}\right) \theta_{NH_3} \tag{2.10}$$

3) NH_3 의 SCR 표면점유율

$$\theta_{NH_3} = \frac{\Omega}{\Omega^*} \tag{2.11}$$

$$\frac{d\theta_{NH_3}}{dt} = r_{ads} - r_{des} \tag{2.12}$$

아래 그림 1-4는 측정과 시뮬레이션으로 얻은 NO, NO $_2$, NH $_3$ 값을 비교한 그래프이다. 그림에 따르면 측정과 시뮬레이션 값에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

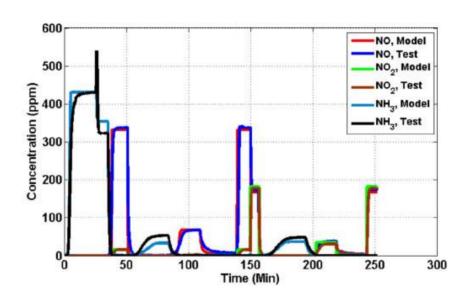


Fig. 1-4 측정 및 시뮬레이션 결과비교(16)

1.2.3 선행 연구의 요소수 분사모델

요소수 SCR 시스템을 실제 주행조건에서 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 SCR 촉매 내부에 흡착된 NH_3 양을 실시간으로 파악해야하며, 이데이터를 기반으로 요소수 분사모델을 구성해야한다.(16-19)

2003년 독일 Bosch사의 요소수 공급장치 초기모델의 NO_X 저감성능을 엔진벤치에서 ETC 모드로 실험하였다. 그러나 관련 수식, 수학적 모델과 실험 결과에 대한 검증이 이루어지지 않았다. 또한 모델 사용에 의한 NO_X 저감율 향상에 대한 결과비교가 나타나 있지 않으나, 문헌상 NH_3 흡탈착률을 고려하는 것을 시도했던 것으로 보인다. 아래 그림 1-5는 Bosch사에서 사용한 SCR 시스템의 다이나믹 모델이다.(1)

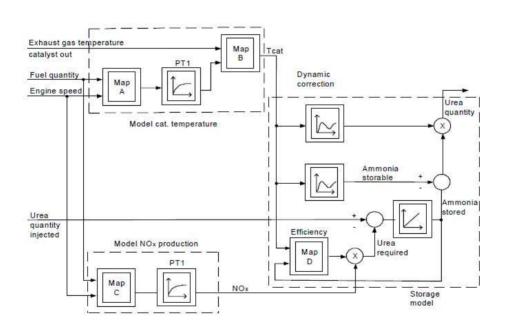


Fig. 1-5 2003년 Bosch사 SCR 시스템 다이나믹 모델(20)

Maruthi Devarakonda의 Fe-Zeolite 촉매를 이용한 SCR 시스템 연구(21)에서 NO $_X$ 센서 신호에서 NO $_2$, NH $_3$ 의 개별 성분을 고려한 모델기반의 요소수 분사 제어전략을 설계하였다. NO와 NO $_2$ 가 모두 NO로 가정되는

이전의 분사전략에 비하여 $\mathrm{NH_3}$ Slip과 요소수 분사량이 감소하였으며, NO_X 저감률은 증가하였다. 제어전략은 4가지 상태모델을 기반으로 하였다. 다음 그림 1-6은 $\mathrm{NO-NO_2}$ 과 NO_X 기반 제어전략의 성능을 비교한 것이다.

Strategy	NO_x Index	Urea Index	Urea	Average NH ₃ Slip
Units	gm of NO _x reacted gm of urea injected	gm of urea reacted gm of urea injected	g	ppm
NO-NO ₂ based	0.72	0.65	13.80	44
NO _x -based	0.46	0.42	20.34	60
% Change	36.2 ↑	36.1 ↑	32.2↓	27.0 ↓

Fig. 1-6 NO-NO2 및 NO_X 기반 제어전략 성능 비교(20)

함윤영의 연구(14)에서는 NH_3 흡탈착률과 θ 값 특성을 반영하여 NH_3 slip을 억제하도록 요소수 분사량을 보정하는 모델기반 제어로직을 연구하였다. SCR 촉매의 NH_3 흡착과 θ 값은 직접 측정 할 수 없으며 모델에서 제어 매개 변수로 계산되어야 한다. NO_X 감소를 유지하면서 NH_3 Slip을 감소시키기 위해서 NH_3 흡착량 제어 알고리즘이 θ 값을 정정하기 위해 적용되었다. 표준 SCR 반응을 기반으로 Kinetic 상수를 최적화하면 ETC 모드에서 모델 기반 제어 기능을 평가하는데 효과적이다. 다음 그림 1-7은 ETC 모드에서의 θ 값 변화량을 나타낸 그래프 이다.

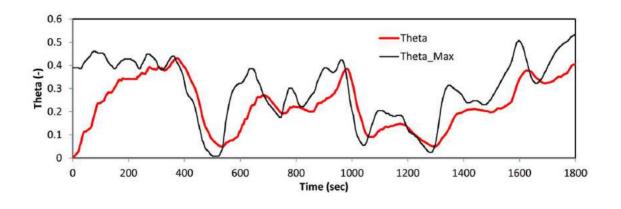


Fig. 1-7 ETC 모드에서의 θ 값 변화(14)

1.3 연구 목적

현재 강화되는 배기가스 규제로 인하여 디젤기관의 요소수를 이용하여 NO_X 를 저감시키는 요소수 SCR 시스템의 NO_X 저감율 개선과 NH_3 Slip을 줄이기 위한 분사모델에 관한 연구는 필수적이다. 본 연구는 <math>SCR 시스템의 촉매 중에서도 Cu-Zeolite 촉매를 이용하는 요소수 SCR 시스템을 이용하여 수행되었다.

현재까지 연구에서는 여러 온도 조건에서의 NH3 흡착량 변화 및 온도와 NH_3 농도 함수로 표현되는 NH_3 흡착량에 대한 연구가 주로 수행되었다. 그러나 SCR 촉매에 흡착되는 NH3 흡착량이 정확하게 정의되거나 계산되지 못해왔다. 정확한 양의 요소수를 분사하기 위해서는 촉매에 흡착되어있는 NH_3 양을 파악하는 것이 중요하기 때문에, 분사모델 수립에 $\theta_{NH3}(NH_3)$ 의 SCR 표면점유율)의 계산은 가장 중요한 요소이다. 하지만 $heta_{N\!H\!B}$ 를 정의하기 위해서는 1.2.2절에 나타난 계산식과 같이 A_{ods} (흡착 지수인자) A_{des} (탈착 지수인자), $E_{des}($ 활성화 에너지)의 변수를 구해야한다. 3개의 변수는 모두 결합되어 있기 때문에 각각의 변수값을 정확하게 계산하기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 엔진 벤치실험을 통하여 앞선 연구의 온도조건과 농도조건 두 가지가 흡착률에 미치는 영향을 입증하고, 평형상태의 NH3 흡착률을 구하고자 하였다. 이를 통하여 앞선 연구에서 가정된 변수들의 타당성을 평가하고, 새로운 분사모델에 적용할 Ω^* (최대 촉매 흡착용량, Maximum Adsortion Capacity)를 구하고자 하였다. NH_3 흡탈착량을 구해 $\theta_{\mathit{NH}3}$ 변화를 예측하여 요소수 분사량을 조절하는 로직모델의 타당성을 입증하는 것이 본 연구의 목표이다.

새로운 흡탈착 분사모델을 엔진 SCR 제어기에 프로그래밍하여 NO_X 저감율은 높이는 동시에 NH_3 Slip을 줄이고자 했으며, 분사모델을 사용하지 않았을 때와 기존의 분사모델을 사용했을 때, 새로 수립한 분사모델을 이용하였을 때의 요소수 분사량과 NO_X 저감율, NH_3 Slip양을 비교하여 어느

분사모델이 가장 유효한 결과를 나타내는지 배출가스 분석기와 차대동력계를 이용하여 비교하고자 하였다.

제 2장 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

앞에서 명시하였듯 배기가스 온도와 NH_3 농도가 미치는 영향과 NO_X 의 저감율, 암모니아 흡탈착에 걸리는 시간과 흡탈착률, 요소수 분사량, NH_3 Slip양을 계산하기 위해 엔진실험을 진행하였다. 실험에는 디젤엔진, 배기가스 전/후단의 배기가스 분석기, $FTIR(Fourier\ Transform\ Intra-Red,$ 푸리에 변환 적외선 분광법. 이하 FTIR) 장비가 사용되었으며, 실험 장치 개략도는 다음 그림 2-1과 같이 나타낼 수 있다.

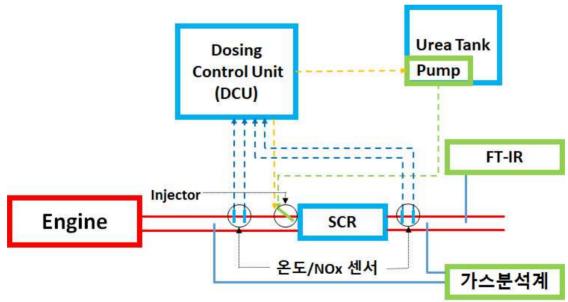


Fig. 2-1 실험 장치 개략도

2.1.1 Urea Dosing System

본 연구에서는 요소수 분사를 제어하고 실험 데이터를 얻기 위하여 요소수 SCR 시스템을 구성하였다. 그림 2-2에 시스템의 동작에 필요한 Input/Output 기능의 흐름도를 나타내었다. 이를 구동하기 위한 제어기인 DCU가 그림 2-3과 같이 제작되었으며 실시간으로 요소수 SCR 시스템의 상태를 확인, 데이터 저장과 제어가 가능하다.

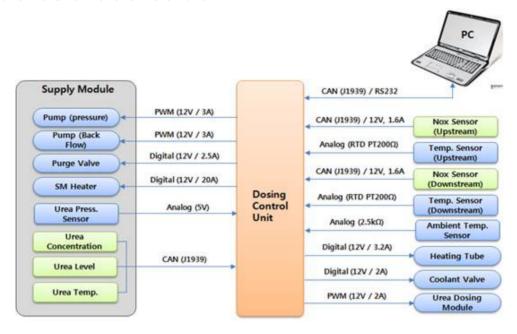


Fig. 2-2 요소수 SCR 시스템 Input/Output 흐름도



Fig. 2-3 요소수 SCR 시스템 DCU

본 연구에서는 디젤엔진의 배기가스의 효율적인 저감을 위하여 Urea-SCR 시스템에 대해 연구하였다. Urea-SCR 시스템은 요소수의 분해반응을 통해 NO_X 를 공급하고, NH_3 의 환원반응을 통해 NO_X 를 저감시킨다. 이 때, 질소산화물의 효율적인 저감을 위해선 NH_3 의 양을 NO_X 와 모두 반응할 수 있도록 요소수를 충분히 분사해주는 것이 필요하다. 요소수를 과도하게 분사하여 NH_3 Slip 농도가 높아지게 되면 인체에 유해하기 때문에 요소수의 분사량은 NO_X 를 충분히 저감시키는 동시에. NH_3 Slip이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 따라서 SCR 촉매 내부에서 반응하여 저감되는 NO_X 의 양과 저감에 필요한 NH_3 의 양을 파악하여 적절한 요소수의 양을 분사하는 것이 중요하다. 이를 위해 SCR 촉매 내부의 각 물질의 농도를 확인할 필요가 있다. 정확한 요소수 분사량을 DCU를 이용하여 계산하였고, DCU의 제어로직과 분사량 계산로직은 다음 그림 2-4, 2-5와 같다.

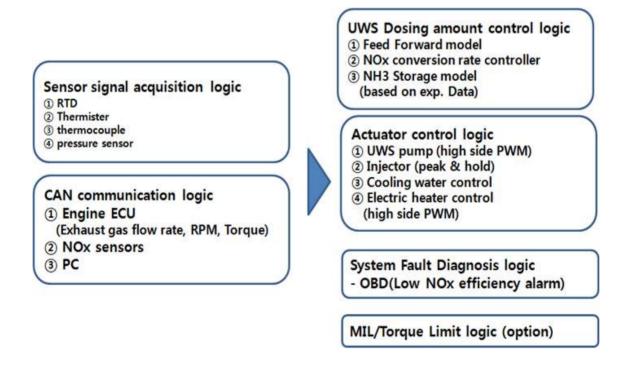


Fig. 2-4 기본 제어로직 구성

Determination of UWS injection amount Alpha ratio setting Input -NOx concentration -Exhaust gas mass flow rate **Determination of feedback factor** -Exhaust gas temperature Alpha_feedback_factor = (Nox_effi_target-Nox_effi_act) / NOx_effi_target*100 #FEEDBACK mode only Calculation of stoichiometric NH3 flowrate $M_NH3_st = NOx_uSCR*G_EXH17 / (29*60)$ **Determination of NSR factor** [mg/min] From 2D table (Exhaust gas flow rate, T_SCR) Catalyst aging factor Calculation of stoichiometric UWS flowrate $M_UWS_st = M_NH3_st*60.06 / (34*0.325)$ [mg/min] Determination of NH3 adsorption amount & desorption amount Calculation of required UWS flowrate M_UWS_required = (Alpha+Alpha_feedback)*NSR_factor*AF_cat*M_UWS_st+NH3 adsorption-NH3 desorption [mg/min]

Fig. 2-5 UWS 분사량 계산로직

2.1.2 엔진 벤치실험 장치

실험에 사용된 엔진은 현대 D4GA 상용 디젤엔진으로 제원 및 형상은 표 2-1와 같다. 엔진은 직렬 4기통, 배기량 3933cc 싱글터보로 정격출력은 2500rpm에서 165PS의 성능을 가진다. 수냉식 인터쿨러를 사용하여 터보차저이후 흡입공기를 냉각하였으며, 온도 컨트롤러를 사용하여 냉각수 온도가일정수준 이상 높아지지 않도록 조정하였다.

Table 2-1 실험 엔진 제원

	Items	F-Engine			
	Displacement	3933			
	Bore X Stroke	103 x 118			
	Cylinder type	I4			
General	Compression ratio	17			
	Maximum power (ps/rpm)	150/2500			
	Maximum torque (kg·m/rpm)	59/1400~1800			
	Total weight (kg)	440			
Materail of cylinder head and block		CGI (Compacted Graphite Iron)			
VALVE No./CAM type		4/OHC			
Turbo type		WGT			
Fuel injection system		Common rail			
Emission system		EGR+P M C			
Electrical avators	Alternator (truck/bus)	70AH/80AH			
Electeical system	Starter	5.5 kW			
Engine oil capacity (ℓ) (Oil pan/total quantity)		13.5/15			

실험에 사용한 엔진 동력계 제원과 형상은 표 2-2와 그림 2-6과 같다. 엔진 동력계는 Transient Cycle이 가능한 AC동력계를 사용하였다.

Table 2-2 엔진 동력계 제원

종류	AC 동력계
출력	120-220 kW
토크	255-525 Nm
최대 속도	12000 rpm
냉각 방식	공랭식



Fig. 2-6 엔진 동력계

2.1.3 배출가스 분석 장비

SCR 촉매 전/후단에 설치한 배출가스 분석기의 제원 및 형상은 표 2-3과 그림 2-7과 같다. 배출가스 분석기는 배출가스에 포함되어있는 THC, CH_4 , NO, NO_X , CO, CO_2 , O_2 의 농도를 측정할 수 있다.

Table 2-3 배출가스 분석기 제원

측정 가능 성분		THC, CH_4 , NO, NO_X , CO, CO_2 , O_2			
	THC	0 ~ 20000 ppm			
	CH_4	0 ~ 20000 ppm			
측정 범위	NO	0 ~ 10000 ppm			
	NO_X	0 ~ 10000 ppm			
	СО	0 ~ 10 %			
	CO_2	0 ~ 20 %			
	O_2	0 ~ 25 %			



Fig. 2-7 배출가스 분석기

SCR 촉매 후단에 설치한 FTIR 장비는 배출가스 분석기에서는 측정 불가능한 NH₃를 측정가능하다. FTIR 장비의 제원 및 형상은 표 2-4와 그림 2-8과 같다.

Table 4-4 FTIR 장비 제원

사용 환경	온도 10 ~ 55℃, 습도 20 ~ 80%
냉각 방식	액화 질소, 50ml/h
측정 속도	1Hz (초당 1회)



Fig. 2-8 FTIR

실험에 사용한 배기가스 정화장치는 Euro 6의 STAREX 차량배기정화장치이다, 사용된 배기정화 장치의 SDPF(SCR-on-DPF, 디젤매연필터에 NO_X 정화용 SCR 촉매를 코팅하여 성능을 올린 기술)와 SCR에 사용된 촉매는 Cu-Zeolite 계열의 촉매로, 아래 그림 2-9와 같으며, 제원은 표 2-5에 나타내었다.

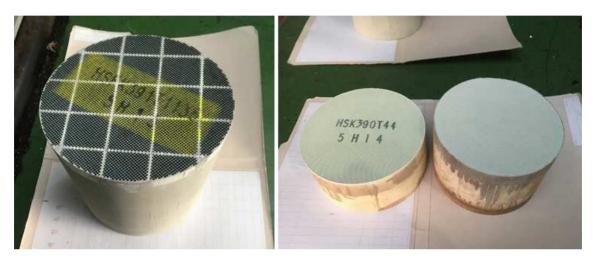


Fig. 2-9 SCR 촉매

Table 2-5 SCR 촉매 제원

SDPF	Dimension			Dimension		
	지름(mm)	높이(mm)	SCR		지름(mm)	높이(mm)
	159 199.4	100.4		Front	159	75
			Rear	159	100	
	Cu-z	Cu-zeolite			Cu-zeolite	

2.2 실험방법

2.2.1 엔진 벤치실험 조건

배기가스의 온도조건과 분사되는 요소수의 농도조건이 흡착률에 미치는 영향을 비교하기 위하여 각기 다른 배기가스 온도와 요소수 분사 조건하에서 엔진 벤치실험이 실시되었다. 배기가스 온도 200℃, 225℃, 250℃, 300℃, 350℃ 조건과 요소수 분사 PWM (Pulse Width Modulation, 펄스폭변조. 이하 PWM) Duty Ratio 15%, 30%, 50%, 90%의 조건에서 영향을 비교하였다. 이 실험결과를 통하여 NH₃의 흡착량을 계산 하였으며, 흡탈착량의 실험결과와 계산결과를 비교하였다.

 $\mathrm{NH_3}$ 의 흡착량 계산에 사용되는 Ω^* 값의 타당성을 평가하기 위하여 앞선 연구의 $A_{ads},\ A_{des},\ E_{des}$ 값을 대입하여 분사모델에 적용하였다. $(15)\ A_{ads},\ A_{des},\ E_{des}$ 값을 대입한 수식에 Ω^* 를 10, 25, 50 3개의 값으로 변화시키며 분사모델에 적용하였다. Ω^* 값을 대입하여 얻은 분사모델을 엔진 벤치실험으로 결과를 비교하였다. 또한 계산으로 얻은 값과 실험으로 얻은 값을 비교하여 Ω^* 값의 타당성을 평가하였다. 이 실험으로 적절한 Ω^* 값을 지정하여 요소수 분사량을 조절하는 간단한 분사모델을 만들었다.

분사모델을 사용하지 않았을 때와 기존의 분사모델을 사용했을 때, 새로 수립한 분사모델을 이용하였을 때의 요소수 분사량과 NO_X 저감율, NH_3 Slip양을 비교하여 어느 분사모델이 가장 유효한 결과를 나타내는지 비교하기 위하여 WHTC(World Harmonized Transient Cycle, 실제 무거운 상업용 차량의 전세계적 패턴을 기반으로 한 천이상태 엔진 테스트 모드. 이하 WHTC) 모드를 각각 연속 9회 이상 실험하였다.

아래 표 2-6은 실험조건을 나타낸 것이다.

Table 2-6 실험 조건

Case 1							
배기가스 온도	200℃	225℃		250℃	3	300℃	350℃
	15%	15%		15%		15%	15%
PWM Duty Ratio	30%	30%		30%		30%	30%
rwm Duty Natio	50%	50%		50%		50%	50%
	50%	50%		50%		50%	50%
Case 2							
$arOmega^*$ 설정값	10			25		50	
Case 3							
분사모델 X			분사모델 O		분사모델 O		
	교기고 E X		(흡탈착량 계산 X)		(흡탈착량 계산 O)		
WHTC Mode 실험 횟수	9 Cycle		10 Cycle		10 Cycle		

제 3장 실험결과

3.1 Cu-Zeolite SCR 촉매의 NH₃ 흡탈착 특성

3.1.1 배출가스 온도 및 NH₃ 농도의 영향

배기가스 온도 200℃, 225℃, 250℃, 300℃, 350℃ 5개의 조건과 요소수 분사기의 PWM Duty Ratio 15%, 30%, 50%, 90%의 4개의 조건에서의 엔진 벤치실험을 통하여 각 조건이 미치는 영향을 비교하였다.

아래 그림 3-1에는 NH_3 흡착량을 배기가스 온도, 요소수의 농도별로 나타내었다. 배기가스 온도와 NH_3 흡착량은 반비례, 요소수 분사 용량과 NH_3 흡착량은 비례하는 것을 볼 수 있다.

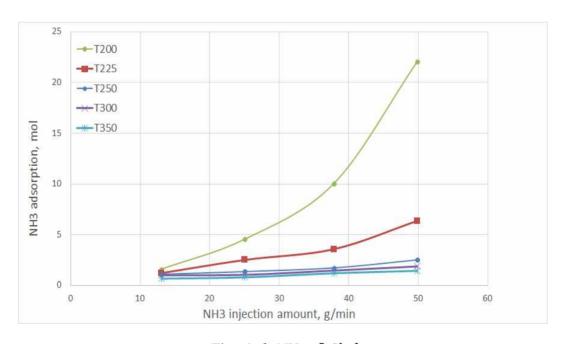


Fig. 3-1 NH₃ 흡착량

그림 3-2에는 분사종료 후 발생하는 NH₃ Slip 양을 나타내었다. NH₃ Slip양은 200℃ 결과를 제외하고 온도의 영향을 거의 받지 않으나, 농도가증가할수록 NH₃ Slip양 또한 증가하였다. 200℃ 실험결과의 경우 일반적인 SCR System의 온도보다 낮은 온도로 인하여 다른 온도에 비하여 실험진행에오랜 시간이 소모되었으며, 촉매반응이 느리게 일어나기 때문에 결과가불안정하게 측정되었다.

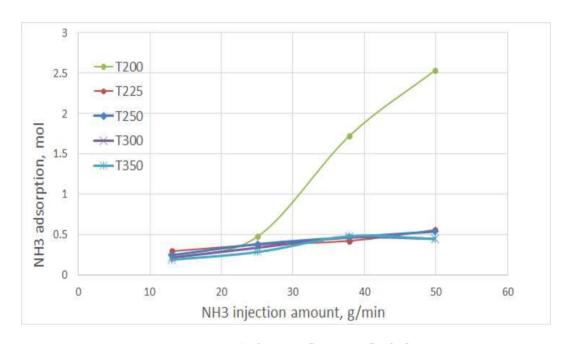


Fig. 3-2 분사종료 후 NH₃ 흡장량

3.2 NH₃ 흡탈착률 계산결과의 검증

3.2.1 NH3 흡탈착률 계산과 실험결과 비교

 NH_3 의 흡착량 계산에 사용되는 값의 타당성을 평가하기 위하여 앞선 연구의 계산조건을 이용한 θ 계산 값과 실제 엔진 벤치실험을 통하여 얻은 θ 값을 비교하였다. 계산에 적용한 계산조건은 아래의 표 3-1과 같으며 이를 적용하여 얻은 θ 값은 아래 그림 3-3에 나와 있다. 실제 엔진 벤치 실험을 통하여 얻은 θ 값은 그림 3-4와 같다.

계산을 통하여 얻은 θ 값과 실제 엔진벤치 실험을 통하여 얻은 θ 값 사이의 간극이 존재하므로, 표 3-1에서 사용한 계산조건은 정확한 값이라고 볼 수 없다.

계산결과 A_{ads} 값을 0.99로 하면 θ 의 증가가 너무 빠르기 때문에 암모니아 흡착이 매우 빠르다. 따라서 A_{ads} 을 0.02로 재조정하면 θ 증가의 기울기를 줄일 수는 있다. A_{ads} 값을 0.02로 재조정하여 다시 계산한 θ 값은 아래의 그림 3-5와 같다. A_{ads} 값을 재조정 한 결과 앞선 결과보다 실험 θ 값에 근접한 그래프를 얻었으나, 완전히 동일한 그래프를 얻을 수는 없었다.

Table 3-1 NH3 흡탈착 계산을 검증하기 위한 계산 조건 (NH3 흡착/탈착 반응 계수는 SAE 2013-01-1578의 연구에서 사용된 값들임.)

1		
Name	Value	Unit
G_EXH	200	kg/h
A_{ads}	0.99	m3/(mol/s)
A_{des}	1.01E+11	s-1
E_{des}	180200	J/mol
r	0.81	
R	8.3144	J/molK

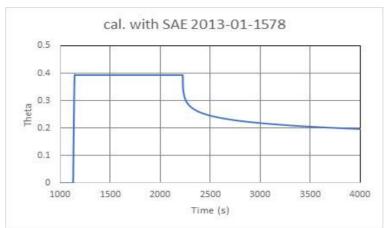


Fig. 3-3 SAE 2013-01-1578의 연구의 NH3 흡착/탈착 반응 계수를 사용하여 얻은 시간에 따른 θ 값의 변화(A_{des} = 0.99)

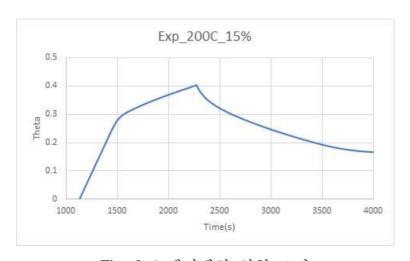


Fig. 3-4 엔진벤치 실험 θ 값

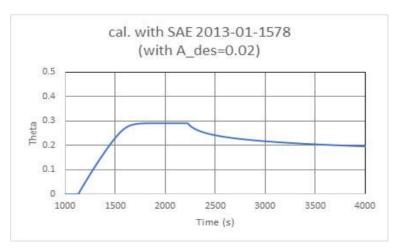


Fig. 3-5 계산상 θ 값(A_{des} = 0.02)

 Ω^* (촉매흡착용량)값을 10, 25, 50 3개의 값으로 변화시키며 비교하였다. 각기 다른 Ω^* 값을 분사모델에 적용하여 엔진 벤치실험을 통하여 결과를 비교하였다.

아래의 그림 3-6은 Ω^* 값 변화에 따른 NO_X 저감률을 퍼센트로 나타낸 그래프이다. 그림 3-7에서 프로그램 계산으로 얻어진 요소수의 요구값과 실제로 분사된 요소수의 양을 비교한 그래프이다.

 Ω^* 값이 클 경우 NO_X 저감성능이 떨어지는 반면, 요구되어지는 요소수의 양은 줄어든다. Ω^* 값이 작을 경우 저감성능은 NO_X 높아지지만 시간이 지날수록 촉매에 흡착되는 NH_3 의 양이 증가하게 되므로 NH_3 Slip이 일어나게 된다. 따라서 적정 Ω^* 값은 25로 판단하였다.

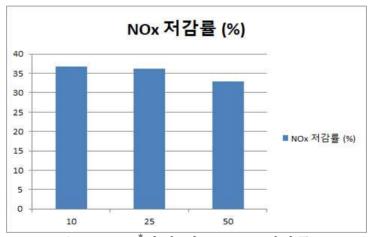


Fig. 3-6 Ω^* 값에 따른 NO_x 저감률

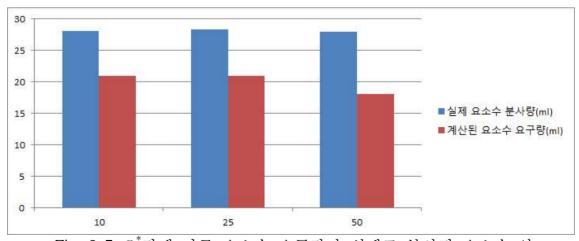


Fig. 3-7 Ω^* 값에 따른 요소수 요구값과 실제로 분사된 요소수 양

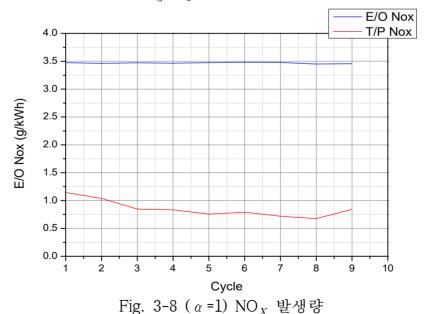
3.3 WHTC 운전조건에서의 NH₃ 흡탈착 모델을 이용한 SCR의 NOx 저감 성능 향상 연구

3.3.1 분사모델을 적용하지 않고 분사한 결과

분사모델을 적용하지 않고 WHTC 운전조건에서 연속 9회 운전하였다. NO_X 저감율은 아래의 그림 3-8에 나타나 있으며, NH_3 Slip은 그림 3-9에 나타내었다.

 $E/O(Engine\ Out)$ 은 SCR을 거치기 전의 NO_X 농도이며, $T/P(Tail\ Pipe)$ 는 SCR을 거친 후의 NO_X 농도이다. 그림 3-8에서 보이는바와 같이 NO_X 는 8 Cycle에서 최대 저감성능을 보이며, 9 Cycle에서 NO_X 저감 성능이 줄어든 것을 볼 수 있다. 실험 시작 시 촉매에 흡장된 NH_3 가 없기 때문에 실험 초반에는 NH_3 Slip이 일어나지 않으나, 실험 횟수가 거듭될수록 촉매에 NH_3 흡착량이 누적되므로 3 Cycle 이후 NH_3 Slip 양이 급증하는 것을 그림 3-9을 통하여 볼 수 있다.

분사모델을 사용하지 않고 분사하였기 때문에 NO_X 는 높은 저감성을 보이지만 시간이 지날수록 NH_3 Slip이 크게 발생하게 된다.



(E/O : SCR을 거치기 전의 NO_X , $\mathrm{T/P}$: SCR을 거친 후의 NO_X 농도)

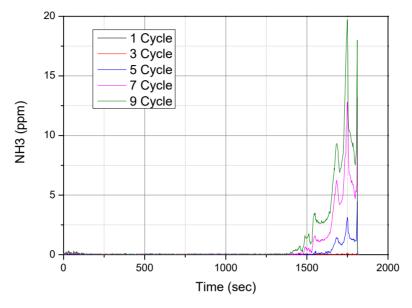


Fig. 3-9 (α =1) NH $_3$ Slip%

3.3.2 기존 분사모델을 이용하여 분사한 결과

NSR(Normalized Stoichiometric Ratio, NH_3/NO_X 몰비) = 2로 설정하여 기존 분사모델을 적용하여 엔진벤치에서 WHTC 운전조건에서 연속 10회 운전하였다. 촉매의 흡탈착량을 고려하지 않고 온도조건만을 고려하여 요소수 분사량을 조절한다.

실험 결과 NO_X 배출량은 아래의 그림 3-10과 같다. $E/O(Engine\ Out)$ 은 SCR을 거치기 전의 NO_X 농도이며, $T/P(Tail\ Pipe)$ 는 SCR을 거친 후의 NO_X 농도이다. 그림 3-10과 같이 NO_X 저감률은 실험 누적 횟수와 크게 상관이 없으며, 앞선 3.3.1의 분사모델을 사용하지 않은 실험에 비하여 NO_X 저감률이 크게 떨어짐을 알 수 있다. 요소수의 분사량이 앞의 실험에 비하여 크게 줄어들었으므로 NH_3 Slip은 전혀 일어나지 않는다.

분사모델을 이용함으로써 NH_3 Slip의 발생은 막을 수 있으나, NO_X 저감률을 크게 얻을 수 없는 부분에서 한계가 있음을 알 수 있다.

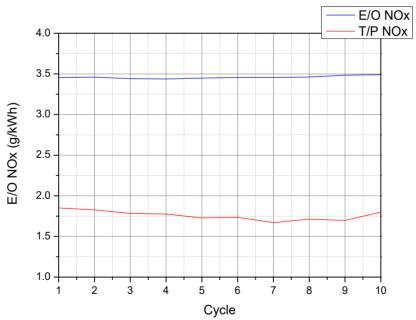


Fig. 3-10 (NSR =2, 기존 분사모델) NO_X 발생량

(E/O:SCR을 거치기 전의 NO_X , T/P:SCR을 거친 후의 NO_X 농도)

3.3.3 새로운 분사모델을 이용하여 분사한 결과

NSR = 2, Ω^* = 25의 값을 이용한 새로운 분사모델을 적용하여 엔진벤치에서 WHTC 운전조건에서 연속 10회 운전하였다. 촉매의 흡탈착량과 온도조건을 모두 고려하여 요소수 분사량을 조절한다. 실험 결과 NO_X 배출량은 아래의 그림 3-11과 같으며 NH_3 Slip은 그림 3-12와 같이 발생하였다.

그림 3-11에 보이는 바와 같이 실험 누적 횟수에 따른 NO_X 저감률의 차이가 없으며, 앞의 3.3.2의 기존 분사모델을 사용하여 실시한 실험결과에 비해 NO_X 저감률이 증가하였다. 또한 그림 3-12와 같이 3.3.1의 분사모델을 사용하지 않은 실험에 비하여 NH_3 Slip 양이 줄어들었으므로, 새로운 분사모델은 유효하다고 볼 수 있다.

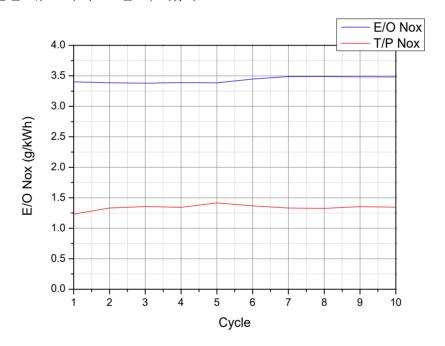


Fig. 3-11 (α =1, NSR =2, 새로운 분사모델) NO $_X$ 발생량 (E/O : SCR을 거치기 전의 NO $_X$, T/P : SCR을 거친 후의 NO $_X$ 농도)

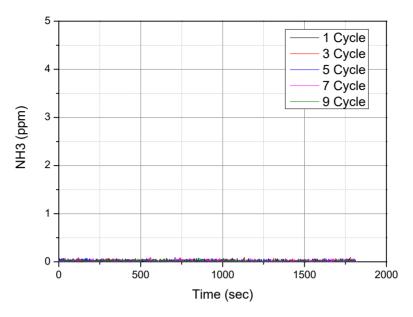


Fig. 3-12 (α =1, NSR =2, 새로운 분사모델) $\mathrm{NH_3}$ Slip양

아래의 그림 3-13은 분사모델을 사용하지 않은 경우와 기존의 분사모델을 사용한 경우, 새로운 분사모델을 사용한 경우의 SCR 전단 NO_X 배출량을 나타낸 그래프이다. 그림 3-14는 SCR 후단의 NO_X 배출량을 나타내었으며, 그림 3-15는 NO_X 저감율을 비교한 그래프이다.

SCR 전단의 경우, SCR을 거치지 않은 상태의 NO_X 를 측정한 것이므로, 이결과를 통하여 SCR을 거치기 전의 NO_X 농도는 분사모델의 사용유무, 실험의 횟수와 무관하게 일정함을 알 수 있다. SCR을 거친 후의 NO_X 값을 측정한 SCR 후단의 NO_X 값을 통하여 SCR을 통하여 NO_X 저감이 정상적으로 일어남을 알 수 있으며, NO_X 저감률을 비교한 그래프를 통하여 새로운 분사모델이 타당하다는 것을 증명할 수 있다.

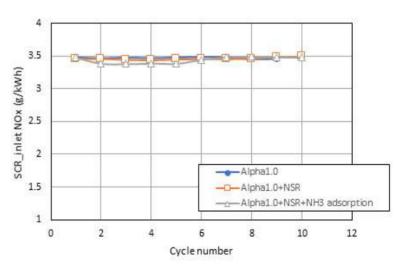


Fig. 3-13 SCR 전단 NO_X 배출량

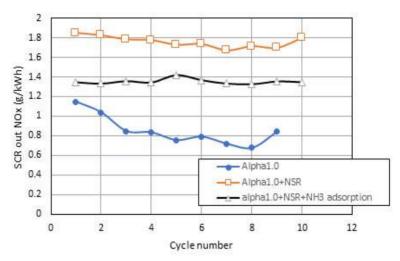


Fig. 3-14 SCR 후단 NO_X 배출량

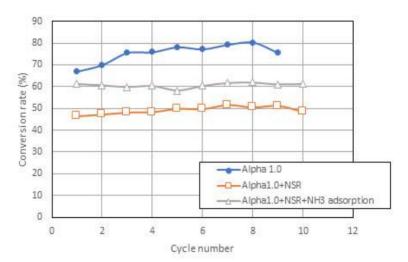


Fig. 3-15 NO_X 저감률

제 4장 결론

- 이 연구는 Cu-Zeolite 촉매를 이용하는 디젤엔진 요소수 SCR 시스템의 NO_X 저감율 개선과 NH_3 Slip 량을 줄이기 위한 요소수 분사모델에 관한 연구로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.
- 배기가스 온도가 200℃, 225℃, 250℃, 300℃, 350℃로 일정한 디젤엔진 정속운전 조건과 요소수 분사기의 PWM Duty Ratio 15%, 30%, 50%, 90% 조건이 NH₃ 흡착률에 미치는 영향을 비교하여 선행 연구에서 제안한 배기가스 온도에 따라 NH₃ 흡착률이 감소하며, NH₃ 농도에 따라 NH₃ 흡착률이 증가함을 검증하였다.
- 2. 선행 연구의 A_{ads} , A_{des} , E_{des} 변수 값을 이용하여 NH_3 흡착량과 탈착률을 실제 실험결과와 비교하였다. 그 결과 계산 결과와 실험 결과 사이에 차이가 발생하였다. 이 차이를 극복하기 위해 계산상의 A_{des} 값을 보정하였으나, 실험과 일치하는 결과를 얻을 수 없었다. 실험과 완전히 동일한 그래프를 얻기 위해서는 변수 A_{ads} , A_{des} , E_{des} 의 정확한 값을 모두 알아야 하지만 이 변수들은 모두 연관되어 있으며, 실제 엔진실험에서는 흡착과 탈착이 동시에 일어기 때문에 이를 계산하기란 어렵다.
- 3. 엔진 벤치실험을 통하여 가장 유효한 촉매 흡착용량을 정하였으며 이를 토대로 새로운 분사모델을 수립하여 ${
 m NO}_X$ 저감율을 높이는 동시에 ${
 m NH}_3$ Slip이 일어나지 않도록 요소수 분사를 제어하였다.
- 4. 분사모델을 사용하지 않았을 때의 NO_X 저감효율은 뛰어났으나 실험 횟수가 거듭됨에 따라 NH_3 Slip이 발생한다. 기존의 분사모델을 이용하였을 때 NH_3 Slip은 발생하지 않았으나, NO_X 저감효율이 크게 떨어진다. 새로 수립한 분사모델을 이용하였을 때, 높은 NO_X 저감율과 낮은 NH_3 Slip을 동시에 얻을 수 있었다. 이를 통하여 새로운 분사모델이 유효하다는 것을 입증 할 수 있었다.

참고문헌(References)

- 1. S. H. E. Seher, M. Reichelt, S. Wickert, "Control Strategy for NOx-Emission Reduction with SCR" SAE Technical Paper 2003-01-3362, 2003
- 2. C. Enderle, G. Vent, M. Paule, "BLUETEC Diesel Technology Clean, Efficient and Powerful" SAE Technical Paper 2008-01-1182, 2008
- 3. G. Piazzesi, M. Devadas, O. Krocher, M. Elsener, A. Wokaun, "Isocyanic acid hydrolysis over Fe-ZSM5 in urea-SCR" Catalysis Communication 7, 2006
- 4. O. Vadim, V. Strots, J. Brad, A. Gregory, M. Edward, "Deposit Formation in Urea-SCR Systems" SAE International 2009-01-2780, 2009
- 5. F. Willems, R. Cloudt, E. Eijnden, M. Genderen, R. Verbeek, B. Jager, W. Boomsma, I. Heuvel, "Is Closed-Loop SCR Control Required to Meer Future Emission Targets?" SAE Technical Paper 2007-01-1574, 2007
- A. York, T. Watling, J. Cox, I. Jones, "Modeling an Ammonia SCR DeNOx Catalyst: Model Development and Validation" SAE Technical Paper 2004-01-0155, 2004
- 7. 이승근, 이성욱, 강연식, "NOx 및 NH3 Slip 저감을 위한 Urea-SCR 제어기반 모델 개발 및 검증" 대한기계학회 논문집 B권 39(1), 2015
- 8. X. Song, "A SCR Model based on Reactor and Engine Experimental Studies for a Cu-zeolite Catalyst" Michigan Tech, 2013
- 9. 신병욱, 박주영, 이성욱, 강연식, "실차 실험을 통한 승용 디젤엔진의 Urea-SCR을 위한 암모니아 흡장률 피드백 제어 분사전략 검증" 대한기계학회 논문집 B권 41(6), 2017
- L. Lu, L. Wang, "Model-Based Optimization of Parameters for a Diesel Engine SCR System" International Journal of Automotive Technology 14, 2013

- 11. M. Fu, Y. Ge, X. Wang, J. Tan, "NOx emissions from Euro IV busses with SCR systems associated with urban, suburban and freeway driving patterns" Science of The Total Environment 452-453, 2013
- A. Bonfils, Y. Creff, O. Lepreux, N. Petit, "Closed-loop control of a SCR system using a NOx sensor cross-sensitive to NH3" Journal of Process Control 24, 2014
- Q. Song, G. Zhu, "Model-based Closed-loop Control of Urea SCR Exhaust Aftertreatment System for Diesel Engine," SAE Technical Paper 2002-01-0287, 2002
- 14. 함윤영, 박수열, "Urea-SCR 시스템의 NH₃ 흡·탈착 특성 및 모델기반 제어 연구" KSAE, Vol. 24, No. 3, 2016
- 15. P. Markatou, J. Dai "Fe-Zeolite SCR Model Development, Validation and Application" SAE International 2011-01-1304, 2011
- 16. M. Devarakonda, J. Lee, G. Muntean, J. Pihl, S. Daw, "1D Model of a Copper Exchanged Small Pore Zeolite Catalyst Based on Transient SCR Protocol" SAE International 2013-01-1578, 2013
- 17. A. Schuler, M. Votsmeier, P. Kiwic, J. Gieshoff, W. Hautpmann, A. Drochner, H. Vogel, "NH3-SCR on fe zeolite catalyst From model setup to NH3 dosing" Chemical Engineering Journal 154, 2009
- 18. F. Birkhold, U. Meingast, P. Wassermann, "Modelling and simulation of the injection of urea-water-solution automotive SCR DeNOx-systems" Applied Catalysis B: Environmental 70, 2007
- 19. 왕태중, 백승욱, 정명근, 여권구, "모노리스 NH3-SCR 반응기 내에서의 NH3 흡탈착 측성에 대한 연구" KSAE, vol. 14, No. 3, 2006
- M. Devarakonda, G. Parker, J. Johnson, "Model-Based Estimation and Control System Development in a Urea-SCR Aftertreatment System" SAE International 2008-01-1324, 2008

Abstract

A Study on Improvement of NO_X Reduction rate of Cu-Zeolite SCR Catalyst for Diesel Engine under WHTC Operating Condition using NH_3 Adsorption and Desorption Model

Yanghwa Kim Dep. of Construction Mechanical Engineering Graduate School, University of Ulsan

Diesel engines are widely used due to their high efficiency. However, PM (fine particles, particulate matter) and NO_X (nitrogen oxide) emitted from diesel engines are considered to be the main causes of air pollution, and they are regulated by introducing emission limits. When comparing EURO3 and EURO6, the width of emission regulations is increasing significantly. In this situation, the SCR (Selective Catalyst Reduction) System that reduces NO_X emitted from diesel engines is an essential element. Therefore, it is necessary to study the injection model to improve the NO_X reduction rate of Urea Water SCR to reduce NO_X by using urea water and to reduce NO_X (ammonia) slip.

In the Urea SCR system, the injection of excess urea water causes NH_3 Slip and produces a solid precipitate. Therefore, the urea water injection model optimized to prevent the formation of NH_3 slip and solid sediment is an important factor in the study of the SCR system.

This study was performed using Urea SCR system using Cu-Zeolite catalyst.

Through engine bench experiments, the engine is operated at different conditions of exhaust gas temperature and NH_3 concentration. Exhaust gas is measured using an exhaust gas analyzer and DCU (Dosing Control Unit), and urea water injection is controlled.

Using the data from the engine bench experiment, calculate the effect of exhaust gas temperature and NH_3 concentration, the reduction rate of NO_X , the time and adsorption and desorption rate for ammonia adsorption and desorption, the amount of urea water injection, and the amount of NH_3 slip. The calculated results are compared with the previous studies, and a new injection model is established based on the calculated results to increase the NO_X reduction rate while controlling the injection of urea water so that NH_3 slip does not occur.

Compare the urea water injection amount, NO_X reduction rate, and NH_3 slip amount when the injection model is not used and when the existing injection model is used. Using the newly established injection model, NO_X reduction rate is increased and NH_3 slip is minimized.

감사의 글(Thanks to)

2년 동안의 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 지도해주시고 많은 기회를 주신 임옥택 교수님 감사드립니다. 부족한 부분이 많은 저를 이끌어 주시고 연구자의 길을 알려주신 김홍석 박사님께 정말 감사드립니다. 기계연구원 생활을 하며 새롭게 가지게 된 박사의 꿈을 이루기 위해 열심히 노력하겠습니다.

기계연구원에 왔을 때 적응할 수 있게 챙겨주시고 많은 도움을 주신 이준순연구원님, 장형준 기술원님, 트리버스 분들과 따뜻하게 맞아주신한국기계연구원 박사님들 모두 감사드립니다. 덕분에 낯선 환경에서도씩씩하게 무사히 석사과정을 마무리 지을 수 있었습니다.

울산에 자주 가지 못했음에도 갈 때마다 즐겁게 맞아주고 반겨준 진수오빠, 용수오빠, 태곤오빠와 항상 여러 가지로 챙겨주고 도와준 범기오빠 고맙습니다. 건설기계 3기 오빠들 덕에 울산에서도 대전에서도 외롭지 않게 지냈고, 석사과정 마치고도 모두 자주 만났으면 좋겠습니다. 오랜만에 만나도 항상 재밌는 내연기관 연구실 학생들 모두 하고 있는 공부 무사히 마무리 짓기를 바랍니다.

놀러갈 때 마다, 만날 때 마다 쉬어갈 수 있는 곳이 되어준 나의 소중한 친구들 고맙고 언제나 나를 지탱해주고 기댈 수 있는, 내 의견을 지지해주는 엄마, 아빠, 언니, 푸딩 가족들 모두 감사하고 사랑합니다.

함께한 모든 분들에게 언제나 행복한 일만 가득하기를 바라며 많은 분들이 주신 도움과 사랑에 감사하며, 보답하며 살겠습니다.