

Urea-SCR 시스템의 Map 기반 Open Loop 제어알고리즘 개발

함윤영^{*1)} · 박용성²⁾

우석대학교 기계자동차공학과¹⁾ · 교통안전공단 자동차성능연구소 녹색융합실²⁾

Development of Map based Open Loop Control Algorithm for Urea - SCR System

Yunyoung Ham ^{*1)} · Yongsung Park ²⁾

¹⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea

²⁾Division of EFV Research, KATRI, 625 Samjon-ri, Songsan-myun, Hwaseung-si, Gyeonggi 445-871, Korea

(Received 15 March 2010 / Accepted 1 September 2010)

Abstract : To meet the NOx limit without a penalty of fuel consumption, Urea-SCR system is currently regarded as promising NOx reduction technology for diesel engines. SCR system has to achieve maximal NOx conversion in combination with minimal NH₃ slip. In this study, map based open loop control for urea injection was developed and assessed in the European Transient Cycle (ETC) for heavy duty diesel engine. The basic urea quantity set-value which was calculated using the look up tables of engine out NOx, exhaust flow rate and optimum NSR resulted in NOx reduction of 80% and the average NH₃ slip of 24 ppm and maximum of 79 ppm. In order to reduce NH₃ slip, NH₃ storage control algorithm was applied to correct the basic urea quantity and reduced NH₃ slip levels to the average 15 ppm and maximum 49 ppm while keeping NOx reduction of 76%. With high and increasing SCR temperature, the NH₃ storage capacity decreases, which leads to NH₃ slip. The resulting NH₃ slip peak can be avoided by stopping or significantly reducing the urea injection during the SCR temperature gradient is over 30°C/min.

Key words : ETC(European Transient Cycle, 유럽 과도상태 시험모드), NOx(질소산화물), Urea(요소), NH₃ slip (암모니아 슬립), SCR(Selective Catalyst Reduction, 선택적 촉매환원), NH₃ storage capacity(암모니아 저장용량)

1. 서론

디젤기관은 불꽃점화기관에 비해 압축비와 연료 효율이 높아 중·대형 상용차는 물론 SUV와 디젤승용차용으로까지 그 사용범위가 넓어지고 있다. 디젤기관에서 문제가 되는 유해 배출물질은 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM)이며 이들을 동시 저감시키는 방향으로 배출가스 규제가 강화되고 있다. 질소산화물과 trade-off 관계에 있는 입자상물질은 DPF(Diesel Particulate Filter)의 기술 발달로 약 90%의 저감 수준까지 도달해 있다. 반면 질소산화물은

LNT(Lean NOx Traps), LNC(Lean NOx Catalysts), SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 저감기술이 제시되고 있고 현재 대형차 위주로 기술이 적용되고 있지만, NOx 배출규제치가 강화됨에 따라 향후 디젤승용차에도 필연적으로 적용될 것으로 예상되고 있다. 이 중 환원제를 요소(Urea)로 사용하는 Urea-SCR 시스템은 연비저감 없이 높은 NOx 저감 효율을 기대할 수 있어 가장 유력한 기술로 주목받고 있으며, 선진각국에서 활발한 기술개발이 이루어지고 있다.¹⁻³⁾

Urea-SCR 시스템 개발에 있어서 높은 정화성능을 갖는 촉매의 개발과 최적화된 분무특성을 갖는

*Corresponding author, E-mail: yyham@woosuk.ac.kr

Urea 분사시스템 개발 그리고 정적조건(steady state condition)과 동적조건(transient condition) 모두에서 최대의 NOx 정화효율과 NH₃ slip을 최소화하는 urea 분사 제어 알고리즘의 개발 등이 매우 중요하다.⁴⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 zeolite 계열의 촉매를 사용한 Urea-SCR 시스템에서 엔진실험을 통해 엔진토크, engine out NOx 농도, 배기유량, 최적 NSR 등의 결과들을 look up table 로 구성하여 기본 urea 분사량을 구하고, SCR 촉매의 흡, 탈착 특성을 반영하여 NH₃ slip을 억제하도록 urea 분사량을 보정하는 map 기반의 open loop 제어로직을 개발하여 ETC 모드상에서 NOx 및 NH₃ slip 저감 효과를 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치의 구성은 Fig. 1과 같이 실험엔진, Urea-SCR 시스템, 배기가스분석기 등으로 구성되어 있다.

엔진동력계는 460kW AC 동력계로 정상상태 및 과도상태(ESC, ETC)의 시험이 모두 가능하다. 실험엔진은 4행정, 직렬 6기통, 배기량 11149cc, 압축비 17.2의 직접분사식 대형 디젤기관이다. 최대출력은 2000rpm에서 290PS이며 최대토크는 1200rpm에서 약 1100 N·m이다. 공기를 과급할 수 있는 터보차저와 과급된 공기를 냉각시키는 인터쿨러가 장착되어 있다. 배기가스분석기는 호리바 MEXA-7500D EGR을 사용하여 SCR 촉매 및 SCO(Selective Catalytic Oxidation) 촉매의 전단과 후단 NOx를 측정하였고 NH₃는 3초 이내의 빠른 응답시간을 갖는 호리바 MEXA-1170NX를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 후처리장치는 DOC, DPF, SCR, SCO로 구성된다. 매연저감장치는 촉매식 DPF로 전단에 DOC가 장착되어 NO₂ 가스를 발생시켜 매연을 산화시키는 작용을 한다. SCR 전단에는 공기보조방식의 urea 공급 시스템을 장착하였다. 인젝터에서 나온 urea는 압축공기로 불어져 배기파이프에 장착된 노즐로 나오게 된다. 사용한 urea는 AdBlue이며 1Hz의 주파수로 인젝터 듀티(duty)를 제어하였다. urea 분사압력은 3bar, 환원제의 무화와 노즐 막힘 방지를 위한 압축공기의 압력은 2.5bar로 설정하였다.

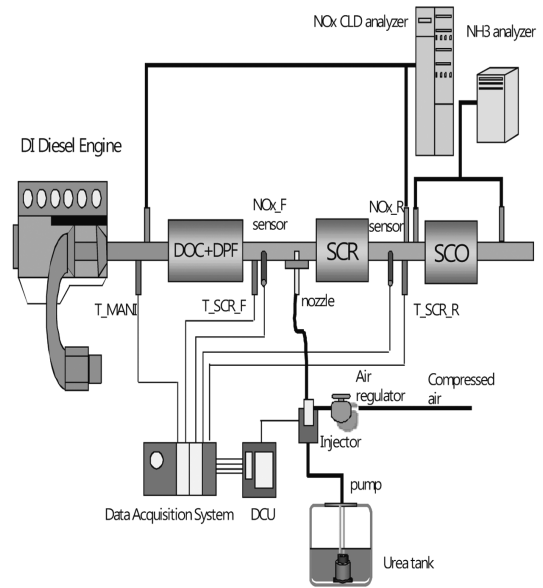


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

3. Open loop urea 분사 제어

Urea-SCR 시스템은 전체 운행조건에서 최대의 NOx 정화효율과 NH₃ slip을 최소화하는 urea 분사 제어 알고리즘의 개발이 중요하다. Fig. 2는 엔진실험을 통해 엔진 토크, NOx 농도, 배기유량, 최적 NSR 등의 결과들을 look up table로 구성하여 정적 조건에서의 기본 urea 분사량을 구하고 촉매 내 NH₃ 저장 특성을 고려한 모델을 통해 NH₃ slip을 제어하는 보상로직을 구현한 open loop urea 분사제어알고리즘의 개념도를 나타낸다.

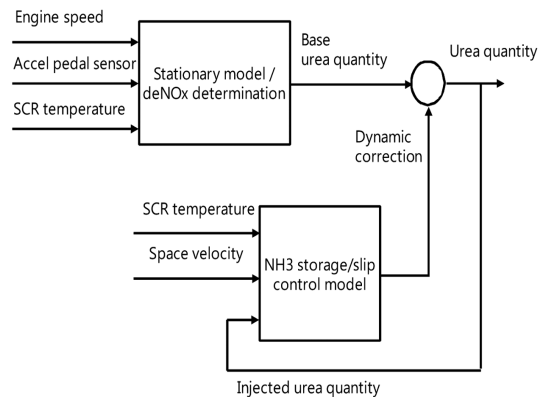
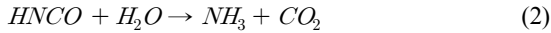
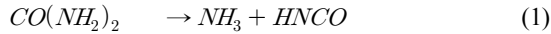


Fig. 2 Open loop control logic for urea injection

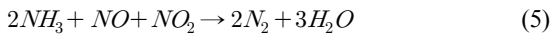
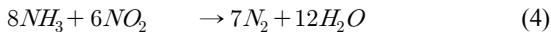
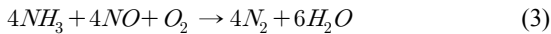
3.1 기본 urea 분사량 결정

Urea-SCR 시스템에서 일어나는 주요 반응 과정은 다음과 같다.

urea decomposition :



overall SCR reaction :



본 연구에서는 urea 32.5% 수용액인 Adblue를 사용하였다. urea와 urea 수용액으로부터 발생하는 NH₃ 질량유량은 다음 식으로 계산된다.

$$NH_3(g/h) = 0.5667 \times urea(g/h) \quad (6)$$

$$= 0.184 \times urea_{solution}(g/h)$$

한편, 배출가스 중 NO_x의 질량유량은 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$NO_x(g/h) = 0.001587 \times NO_x(ppm) \times \dot{m}_{ex}(kg/h) \quad (7)$$

공급된 urea 수용액 질량의 18.4% 정도가 NH₃로 생성되는데, NO_x의 NO/NO₂비를 1:1로 고려하여 반응식 (5)를 기준으로 deNO_x에 필요한 NH₃양을 계산하고 이를 NSR(Normalized Stoichiometric Ratio, NH₃/NO_x 몰비) 1로 하였다. deNO_x에 필요한 이론적인 NH₃양은 다음 식으로 계산된다.

$$NH_3(g/h) = NO_x(g/h) \times \frac{MW_{NH_3}}{MW_{NO_x}} \times \left(\frac{NH_3}{NO_x}\right)_{mole\ ratio} \quad (8)$$

여기서, MW_{NH_3} 와 MW_{NO_x} 는 각각 NH₃와 NO_x의 분자량을 의미한다.

따라서, 식 (6), (7), (8)을 이용하여 NSR 1 조건의 urea 수용액 분사량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$urea_{stoich}(g/min) = 2.43 \times NO_x(g/h) / 60 \quad (9)$$

NSR 1 조건의 urea 분사량은 최대의 NO_x 정화효율을 얻는데 필요한 이론 분사량이지만 실제조건에

서 최대의 NO_x 정화효율과 NH₃ slip을 방지하기 위해서는 촉매온도와 공간속도의 함수로 최적의 NSR 값들을 구하여 이론 분사량($urea_{stoich}$)에 곱해 기본 urea 분사량($urea_{NSR}$)을 구하게 된다. 즉,

$$urea_{NSR}(g/min) = NSR \times urea_{stoich}(g/min) \quad (10)$$

Fig. 3은 기본 urea 분사량 계산에 필요한 각 매개 변수들을 look-up table들로부터 구하는 open loop urea 분사 제어로직의 개념도이다. 제어 입력신호는 엔진회전속도(rpm), 가속페달신호(APS), SCR 촉매 전단온도(T_SCR_F)이다. 엔진회전속도와 엔진토크의 함수로 NO_x 농도, 배기유량을 구하여 deNO_x와 이론 urea 분사량을 계산한다. 공간속도(SV)와 SCR 촉매전단온도의 함수로 최적의 NSR 값을 구하여 이론 urea 분사량에 곱해 기본 urea 분사량을 구하게 된다.

Fig. 4는 본 실험엔진의 엔진회전속도와 엔진토크에 따른 engine out NO_x 농도 분포를 나타낸 것이다. 한편, 정적시험조건에서 urea 분사량을 증가시키면서 NO_x 정화효율과 NH₃ slip을 측정하였는데 NH₃ slip이 SCO 후단에서 20ppm 이하를 만족하는 듀티(%)를 구하고 NSR로 환산하도록 하였다. Fig. 5는 이와 같이 구한 NSR을 공간속도와 SCR 촉매전단온도의 함수로 나타낸 것이다. NSR은 0.42~0.68의 범위에 분포함을 알 수 있다.

Fig. 6은 ETC 모드조건에서 기본 urea 분사량으로 공급하였을 때 NO_x 정화 및 NH₃ slip의 특성을 나타낸 것으로 NO_x 정화효율은 80%, 최대 및 평균 NH₃ slip은 각각 79 ppm, 24 ppm 발생하였다. 정적실험에

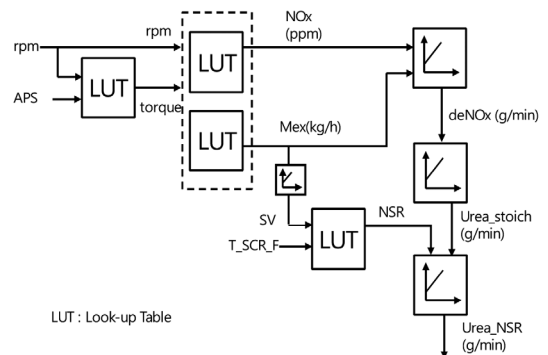


Fig. 3 Stationary model for open loop control

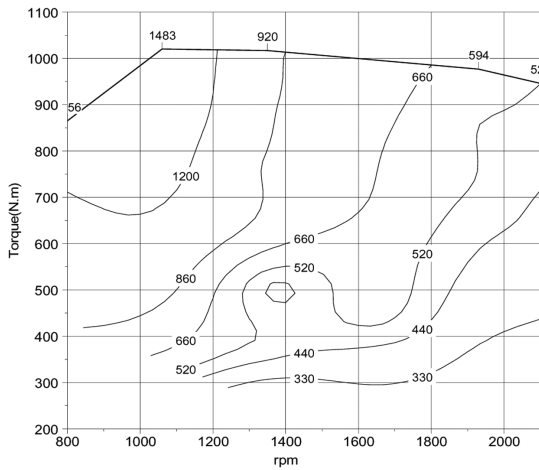


Fig. 4 Engine out NOx contour based on rpm and torque

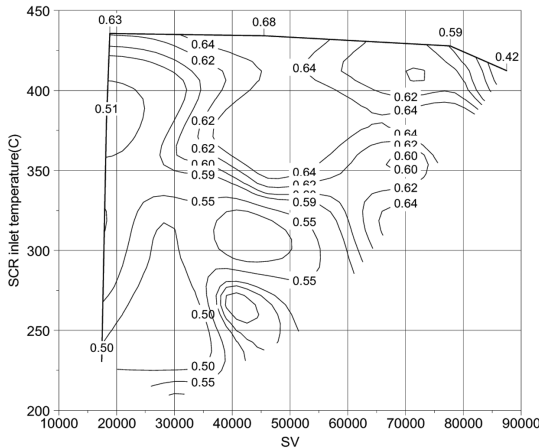


Fig. 5 NSR contour based on SV and SCR inlet temperature

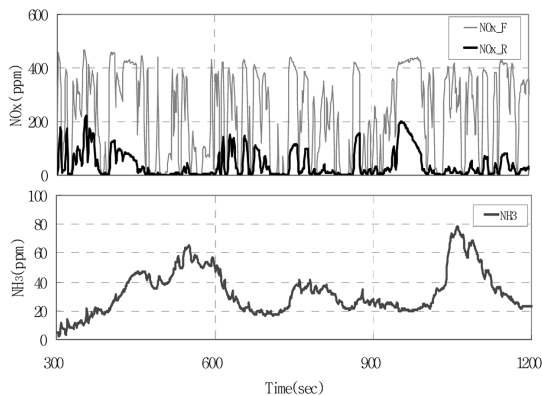


Fig. 6 NOx reduction efficiency and NH₃ slip with basic urea injection in the ETC test

서 NH₃ slip 20 ppm 이하 조건으로 기본 urea 분사량을 공급하였지만 부하가 급격히 증가하는 일부 영역에서 NH₃ slip이 크게 증가하는 문제가 나타났다.

3.2 NH₃ storage 제어

정적조건인 Map 기반 제어전략은 가·감속이 있는 동적조건에서 SCR 촉매의 NH₃ 흡, 탈착 특성을 고려하여 NH₃ slip을 최소화할 수 있도록 urea 분사량을 보상하는 동적보상(dynamic compensation) 기능이 필요하다. Fig. 7은 촉매온도와 공간속도의 함수로 촉매의 NH₃ 최대저장용량, NH₃ 저장비율, NOx 정화효율을 look up table로 구하여 실시간으로 NH₃ slip 가능성을 예측하고 urea 분사량을 보정하는 동적모델을 나타낸다.

Fig. 8은 본 연구에 적용된 SCR 촉매에 대해 촉매 온도 변화에 따른 촉매가 저장할 수 있는 최대 NH₃ 저장용량을 나타낸 것으로 촉매온도의 증가와 함께 급격히 감소함을 알 수 있고 약 350°C 이상에서는

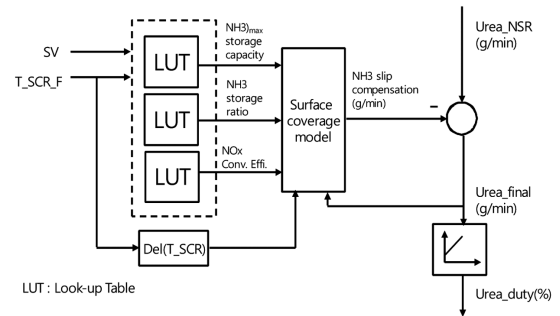


Fig. 7 Dynamic model for open loop control

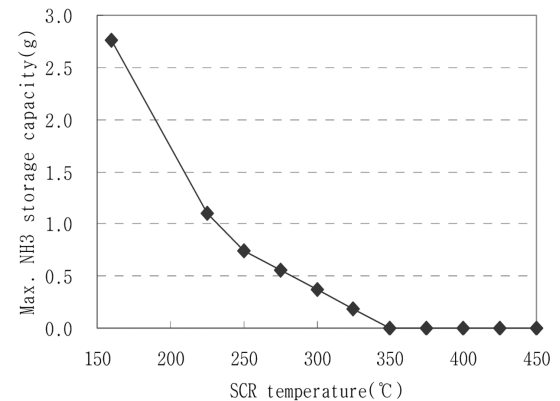


Fig. 8 Maximal NH₃ storage capacity

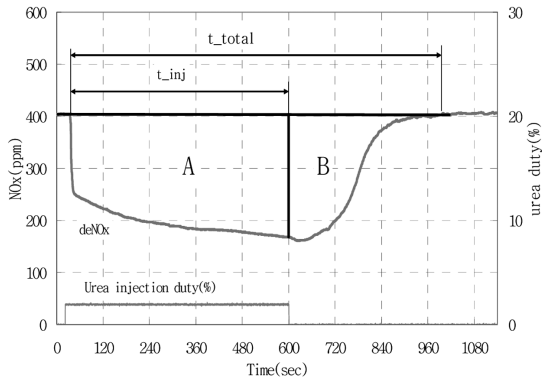


Fig. 9 NOx reduction characteristics

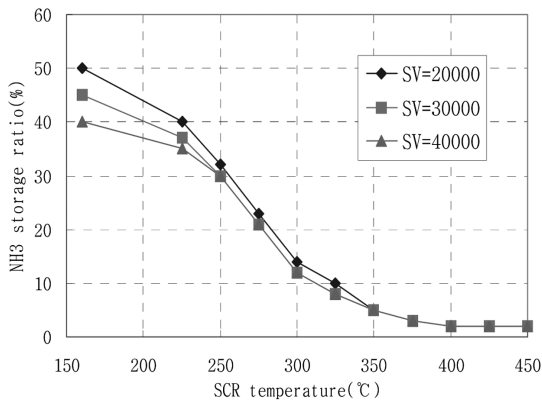


Fig. 10 NH₃ storage ratio based on SV and SCR inlet temperature

저장능력이 거의 없음을 알 수 있다. 최대 NH₃ 저장 용량은 일정한 온도 조건에서 NH₃를 공급하다가 NH₃ slip이 발생하면 최대저장용량에 도달한 것으로 간주하여 공급된 NH₃ 양에서 NH₃ slip 발생 시까지 반응에 소진된 NH₃ 양을 제하고 남은 양으로 결정하였다.

Fig. 9는 urea 공급에 따른 SCR 후단에서의 NOx 거동을 살펴본 것이다. 이것은 SCR 촉매의 흡, 탈착 및 정화특성의 결과로 나타난 것이며 urea 공급 중단 이후에 정화성능을 보이는 것은 촉매 내에 흡착된 NH₃ 때문이다. 그림에서 urea 공급 시작점부터 urea 중단 후 urea 공급 전의 NOx로 회복하는데 걸리는 시간까지를 전체시간(t_{total})으로 하고, urea 공급을 중단한 시간까지를 분사시간($t_{injection}$)으로 하면 전체시간동안 저장된 NOx의 총량은 면적 A+B로 고려할 수 있고, 분사시간동안 저장된 총량은 면

적 A로, 촉매 내에 저장된 NH₃에 의해 저장된 총량은 면적 B로 고려할 수 있다. 따라서, 전체 urea 분사율 중 촉매 내에 저장된 만큼의 분사율이 차지하는 비율은 면적B/(면적 A+B)이며, 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$NH_3 \text{ storage ratio} = 1 - \frac{\int_0^{t_{inj}} deNOx dt}{\int_0^{t_{total}} deNOx dt} \quad (11)$$

Fig. 10은 공간속도와 촉매온도에 따른 NH₃ 저장비율(NH₃ storage ratio)을 나타낸다. 촉매온도가 낮고 공간속도가 낮을수록 NH₃ 저장비율은 증가함을 알 수 있다.

NH₃ 저장비율에 NH₃ 분사율과 NOx 정화효율을 곱하면 촉매 내에 저장되는 NH₃ 저장율이 계산된다. 즉,

$$NH_3 \text{ storage (g/m)} = NH_3 \text{ inj (g/m)} \times NH_3 \text{ storage ratio} \times \eta_{conv} \quad (12)$$

실시간 촉매 내에 저장되는 NH₃ 양은 매 초 NH₃ 저장율을 적분기를 통해 더하여 계산할 수 있다. 이 값을 실시간으로 look up table을 이용해 구해지는 최대 NH₃ 저장용량과 비교하여 만일 클 경우에는 NH₃ slip이 발생하는 것으로 판단하여 urea 공급량을 줄이도록 하였다.

Fig. 11은 ETC 모드상에서 NH₃ storage 제어 로직을 구현한 결과를 나타낸 것이다. 실시간 촉매 내에 저장되는 NH₃ 양이 최대 NH₃ 저장용량보다 클 경우에는 flag_exceed가 on이 되며 이 때 urea 공급은 30% 줄여서 공급하도록 하였다. 그림에서 urea 분사량은 인젝터 듀티(duty)로 표현하였으며 NH₃ storage 로직이 없는 경우가 기본 분사량(base duty)이고, NH₃ storage 제어에 의해 기본 분사량에서 감해지는 듀티는 저감듀티(reduced duty)이며, 기본 분사량에서 저감듀티를 뺀 값이 최종 urea 공급량(final duty)이 된다. 기본 분사량으로 공급한 결과는 최대 NH₃ slip이 79 ppm, 평균 24 ppm이었는데 NH₃ storage 제어 로직을 구현한 결과 각각 49 ppm, 15 ppm으로 감소하였다. NOx 정화효율은 80%에서 76%로 감소하였다. 저온조건에서 충분히 저장된 NH₃는 급격한 촉

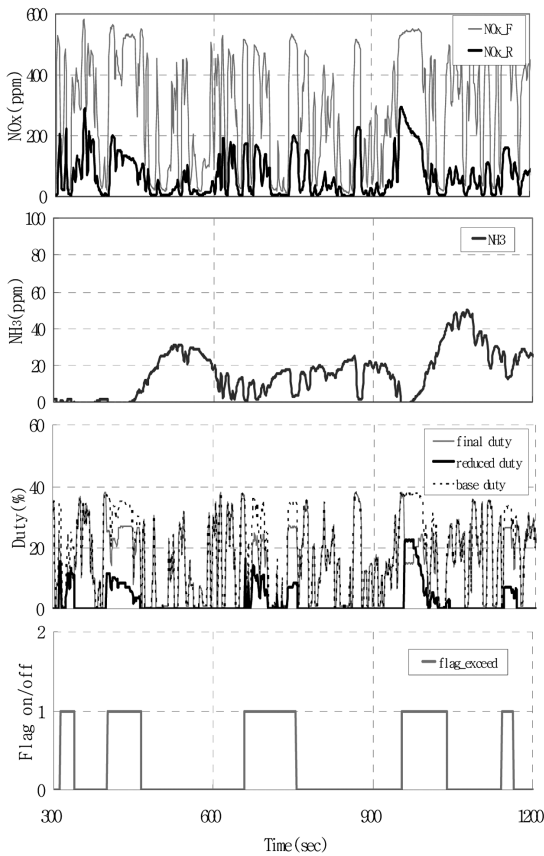


Fig. 11 NOx reduction efficiency and NH₃ slip with NH₃ storage model in the ETC test

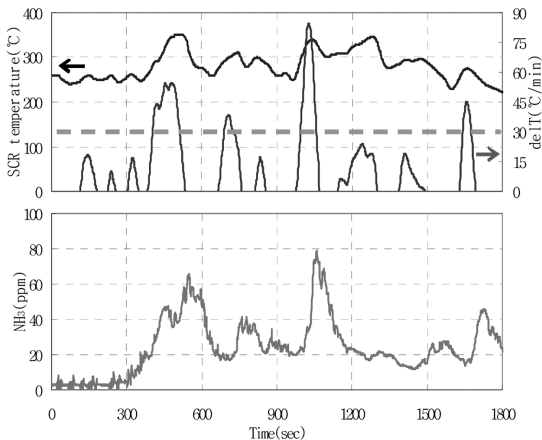


Fig. 12 Effect of SCR temperature increase and NH₃ slip peak occurrence

매 온도 증가 시 NH₃ 저장용량의 감소와 탈착률의 증가로 NH₃ slip을 유발하게 된다. Fig. 12는 ETC 모

드 조건에서 NH₃ slip과 촉매온도의 증가율과의 관계를 나타낸 것으로 촉매온도의 증가율이 큰 경우 NH₃ slip이 피크를 보이는 경향이 있음을 알 수 있다. 온도증가율이 30°C/min 보다 큰 영역에서 urea 분사를 중단하거나 크게 줄일 경우 NH₃ slip의 peak를 낮출 수 있을 것이다. NH₃ slip의 peak 정도는 촉매 내 저장된 NH₃의 양에 비례하게 되므로 앞서 고려한 NH₃ storage 로직을 함께 사용함으로써 보다 효과적으로 NH₃ slip을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 제어 변수들을 엔진실험을 통해 look-up table로 구성하는 map 기반의 open loop 제어로직을 개발하여 ETC 모드 상에서 NOx 및 NH₃ slip 특성 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진실험을 통해 NOx 농도, 배기유량, 최적 NSR 등의 결과들을 look up table로 구성하여 기본 urea 분사량을 구하여 ETC 모드 조건에서 구현한 결과 NOx 정화효율 80%, 최대 NH₃ slip 79 ppm, 평균 NH₃ slip 24 ppm의 결과를 얻었으며 특히 부하가 급격히 증가하는 일부 영역에서 NH₃ slip이 크게 증가하는 문제가 발생하였다.
- 2) NH₃ storage 모델을 개발하여 실시간 촉매 내에 저장되는 NH₃ 양이 최대 NH₃ 저장용량보다 클 경우 urea 공급을 줄이는 제어로직을 구현하여 기본 urea 분사량을 보정한 결과, 최대 NH₃ slip 49 ppm, 평균 NH₃ slip 15 ppm으로 NH₃ slip이 저감되었다.
- 3) NH₃ slip은 촉매온도의 증가율이 큰 경우 피크를 보이는 경향이 있다. 촉매 온도증가율이 30°C/min 보다 큰 영역에서 urea 분사를 중단하거나 크게 줄일 경우 NH₃ slip의 피크를 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-SRAR Project 사업의 무·저공해사업단 지원 하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) M. Koebel, M. Elsener and M. Kleemann, "Urea-SCR: A Promising Technique to Reduce NOx Emissions from Automotive Diesel Engines," *Applied Catalysis*, pp.335-345, 2000.
- 2) C. Havenith and R. Verbeek, "Transient Performance of a Urea deNOx Catalyst for Low Emissions Heavy-duty Diesel Engines," SAE 970185, 1997.
- 3) L. Hofmann, K. Rusch, S. Fisher and B. Lemire, "Onboard Emission Monitoring on a HD Truck with a SCR System Using NOx sensors," SAE 2004-01-1290, 2004.
- 4) S. J. Jeong, S. J. Lee, W. S. Kim and C. Lee, "Numerical Study on the Injector Shape and Location of Urea-SCR System of Heavy-duty Diesel Engine for Preventing NH₃ Slip," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.1, pp.66-78, 2006.
- 5) R. V. Helden, R. Verbeek, F. Willems and R. V. D. Welle, "Optimization of Urea SCR deNOx Systems for HD Diesel Engines," SAE 2004-01-0154, 2004.
- 6) M. Chen and S. Williams, "Modelling and Optimization of SCR-exhaust Aftertreatment Systems," SAE 2005-01-0969, 2005.
- 7) T. Wang, S. Baek, M. Jung and G. Yeo, "A Study of NH₃ Adsorption/Desorption Characteristics in the Monolithic NH₃-SCR Reactor," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.3, pp.125-132, 2006.
- 8) H. S. Kim, Y. I. Jeong, M. H. Song, S. W. Lee, H. D. Park and J. W. Hwang, "Influential Factors for NOx Reduction Performance of Urea-SCR System for an In-use Medium Duty Diesel Engine," *Transactions of KSAE*, Vol.17, No.1, pp.154-161, 2009.
- 9) F. Willems, R. Cloudt, E. Eijnden, M. Genderen and R. Verbeek, "Is Closed-loop SCR Control Required to Meet Future Emission Targets?," SAE 2007-01-1574, 2007.
- 10) D. H. E. Seher, M. Reichelt and S. Wickert, "Control Strategy for NOx - Emission Reduction with SCR," SAE 2003-01-3362, 2003.