

## ETC 모드에서 Urea-SCR 시스템의 성능 특성 연구

함윤영<sup>\*1)</sup> · 최동석<sup>2)</sup> · 박용성<sup>2)</sup>

우석대학교 기계자동차공학과<sup>1)</sup> · 교통안전공단 자동차성능연구소<sup>2)</sup>

### Study on the Performance Characteristics of Urea-SCR System in the ETC Test

Yunyoung Ham<sup>\*1)</sup> · Dongseok Choi<sup>2)</sup> · Yongsung Park<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Division of EFV Research, KATRI, 625 Samjon-ri, Songsan-myeon, Hwaseung-si, Gyeonggi 445-871, Korea

(Received 3 August 2009/ Accepted 16 September 2009)

**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 NH<sub>3</sub> slip. In this study, the performance characteristics of urea-SCR system with open loop control were assessed in the European Transient Cycle(ETC) for heavy duty diesel engine. The SCR inlet temperature varied in the range of 200 to 340°C in the ETC cycle. Open loop control calculated the urea flow rate based on the NOx and NSR map which gave for each combination of SCR inlet temperature and space velocity the normalized NH<sub>3</sub> to NOx stoichiometric ratio which resulted in a steady-state NH<sub>3</sub> slip of 20ppm. During the ETC cycle, the open loop control with the optimized NSR offset achieved NOx reduction of 80% while keeping the average NH<sub>3</sub> slip below 10ppm and maximum 20ppm. It was also found that NOx sensor was cross-sensitive to NH<sub>3</sub> and a control strategy for cross-sensitivity compensation was required in order to use a NOx sensor as feedback device.

**Key words :** ETC(European Transient Cycle, 유럽 동적상태 시험모드), NOx(질소산화물), Urea(요소), NH<sub>3</sub> slip (암모니아 슬립), SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적촉매환원)

### 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.<sup>1-4)</sup>

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

Urea-SCR 시스템 개발에 있어서 높은 정화성을 갖는 촉매의 개발과 최적화된 분무특성을 갖는 Urea 분사시스템 개발, 그리고 정적조건(steady state condition)과 동적조건(transient condition) 모두에서 최대의 NO<sub>x</sub> 정화효율과 NH<sub>3</sub> slip을 최소화하는 urea 분사 제어 알고리즘의 개발 등이 매우 중요하다.<sup>5-10)</sup>

일반적으로 open loop 제어방식은 피드백 센서 없이 최적의 성능 달성이 가능하나, look-up table을 구성하는데 calibration 작업이 많이 요구되고 주변 환경변화에 따른 engine out NO<sub>x</sub> 변화와 촉매 aging 등의 문제에 대처하는데 취약한 면이 있다. 반면 closed loop 제어방식은 피드백센서의 사용으로 보다 강력한 제어가 가능하고 calibration 작업이 단축되는 장점이 있으나, 현재 양산되는 NO<sub>x</sub> 센서는 NH<sub>3</sub>와의 cross-sensitivity 특성 문제로 인하여 로직 구현에 세심한 주의가 필요한 것으로 알려져 있다.<sup>11,12)</sup>

본 연구에서는 11,149cc 버스용 디젤기관을 대상으로 urea-SCR 시스템을 적용하여, 동적주행상태를 모사할 수 있는 ETC 모드 상에서 성능평가 시험을 수행하였다. 정적조건 엔진실험을 통해 구한 look up table들로부터 NO<sub>x</sub> 정화에 필요한 urea 분사량을 실시간으로 구하는 open loop 제어로직을 구현하여 NO<sub>x</sub> 정화효율 80%, NH<sub>3</sub> slip 평균 6.2ppm, 최대 20ppm의 최적 결과를 얻었다. 또한 모든 실험에서 NO<sub>x</sub> 센서를 함께 측정하여 동적조건에서 NH<sub>3</sub> slip 발생시 NO<sub>x</sub> 센서의 cross-sensitivity 특성을 확인하고 향후 closed loop 제어의 구현을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

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

엔진동력계는 460kW AC 동력계로 정적상태 및 동적상태(ESC, ETC)의 시험이 모두 가능하다. 실험엔진은 4행정, 직렬 6기통, 배기량 11,149cc, 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

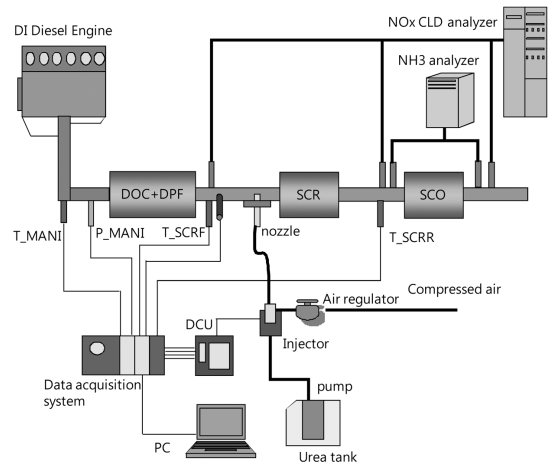


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

있다. 배기가스분석기는 호리바 MEXA-7500D EGR을 사용하여 SCR 촉매 및 SCO(Selective Catalytic Oxidation) 촉매의 전단과 후단 NO<sub>x</sub>를 측정하였고 NH<sub>3</sub>는 MEXA-1170NX를 이용하여 실시간으로 측정하였다.

후처리장치는 DOC, DPF, SCR, SCO로 구성된다. 매연저감장치는 촉매식 DPF로 전단에 DOC가 장착되어 NO<sub>2</sub> 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 무화과 노즐 막힘 방지를 위한 압축공기의 압력은 2.5bar로 설정하였다. 분무노즐의 형태는 4공 외부스웰노즐이다.

## 3. 실험결과

### 3.1 촉매 특성

Fig. 2는 실험엔진의 urea-SCR 시스템에서 환원제로 urea와 NH<sub>3</sub> 가스를 사용하여 SCR 촉매 전단온도에 따른 NO<sub>x</sub>의 저감효율을 나타낸 것으로 샘플 촉매의 실험결과와 비교하였다. 실선으로 표시된 샘플촉매 실험은 공기를 가열하여 분위기조건을 만들었으며, 투입되는 NO 가스 저감을 위하여 이론비에 해당하는 NH<sub>3</sub> 가스를 공급하여 저감효율을 측정

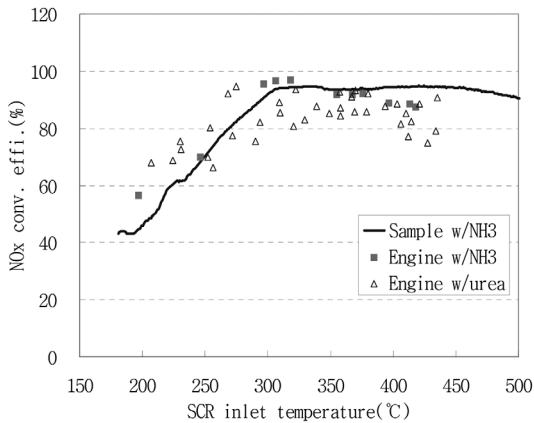


Fig. 2 NOx conversion efficiency for sample and engine tests

하였다. 촉매온도 증가에 따라 효율은 증가하며 265°C 이상에서 80% 이상의 효율이 얻어진다. NH<sub>3</sub> 가스를 환원제로 한 엔진실험 결과는 샘플촉매 결과와 거의 유사한 결과를 나타낸다. 환원제를 urea로 사용하는 경우는 NH<sub>3</sub> 가스를 사용하는 경우보다 효율이 다소 낮게 나타난다. 이로부터 엔진배기상태에서 urea가 NH<sub>3</sub> 가스로 전환되는 효율만 높인다면 촉매의 성능을 최대로 이용할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 ETC 모드 특성

Fig. 3은 ETC 모드 시험결과를 경과된 시간에 따라 엔진회전수와 토크에 대하여 나타낸 것이다. 전체 1800초로 평균 차속 50km/h의 도심지역, 72km/h의 교외지역, 88km/h의 고속도로지역으로 각각 600초로 구성되어 있다. Fig. 4는 ETC 모드의 세 가지 영역에 대하여 엔진의 작동상태를 나타낸 것이다. 도심영역은 엔진맵의 거의 전 영역에 작동점이 분포하고 있는 반면, 교외와 고속도로 영역으로 갈수록 작동 엔진회전수 영역이 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 특히 고속도로 영역은 1600 rpm 부근에서 부하의 변동만 있을 뿐이다. Fig. 5는 ETC 모드에서 엔진출구, SCR 촉매의 전단과 후단에서 측정된 온도 변화를 나타낸 것이다. SCR 촉매 전단온도는 대부분 200~340°C 사이에 있으며 Fig. 2에서와 같이 NOx 정화효율이 90% 이상이 되는 300°C 이상의 온도 영역이 약 500초 경과부분과 1000초 경과 부근에서 나타나며 전체적으로 약 20% 차지하게 된다.

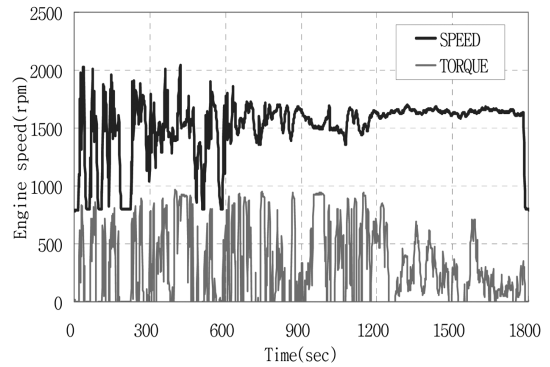


Fig. 3 Engine speed and torque with time in the ETC test

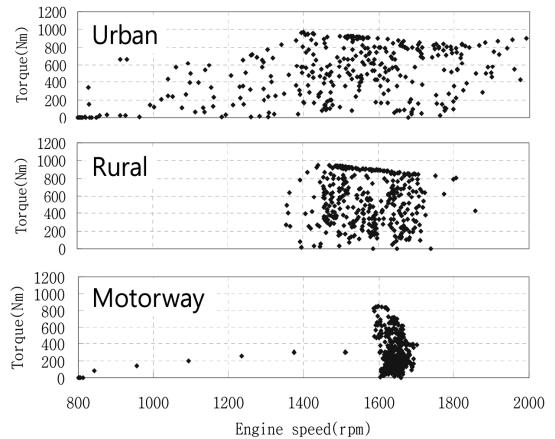


Fig. 4 Engine operating points of each region in the ETC test

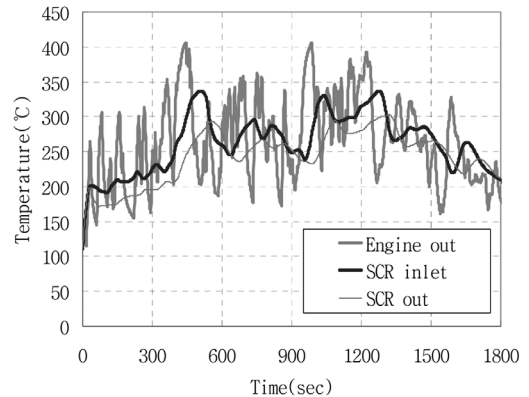
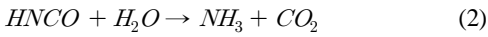
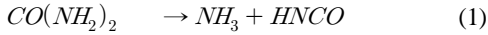


Fig. 5 Exhaust gas temperatures of each point in the ETC test

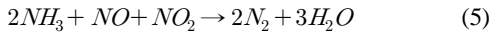
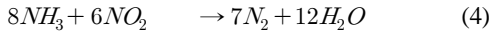
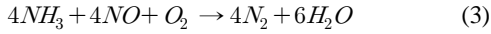
### 3.3 NOx 저감성능

urea-SCR시스템에서 일어나는 주요 반응 과정은 다음과 같다.

urea decomposition :



overall SCR reaction :



공급된 urea 수용액 질량의 18.4% 정도가 NH<sub>3</sub>로 생성되는데, NO<sub>x</sub>의 NO/NO<sub>2</sub>비를 1:1로 고려하여 반응식 (5)를 기준으로 deNO<sub>x</sub>에 필요한 NH<sub>3</sub>양을 계산하고 이를 NSR(Normalized stoichiometric Ratio, NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> 몰비) 1로 하였다.

Fig. 6은 look-up table들을 이용한 open loop urea 분사 제어로직의 개념도이다. 먼저 엔진회전속도 (rpm), 가속페달신호(APS)를 입력으로 엔진토크를 구하고, 이 토크와 엔진회전속도의 함수로 NO<sub>x</sub> 농도, 배기유량을 구하여 deNO<sub>x</sub>와 이론 urea 량을 계산한다. NH<sub>3</sub> slip을 방지하기 위하여 공간속도(SV)와 SCR 촉매 전단온도(T\_SCR\_F)의 함수로 NH<sub>3</sub> slip이 20ppm 이하를 만족하는 NSR 값들을 구하여 이론 urea 량에 곱해 최종 urea 분사량을 구하였다.

Fig. 7은 정적시험을 통해 엔진에서 배출되는 NO<sub>x</sub> 농도의 분포를 나타낸 것이다. 부하가 증가할수록 NO<sub>x</sub> 배출이 증가하며, 특히 약 1000~1200 rpm

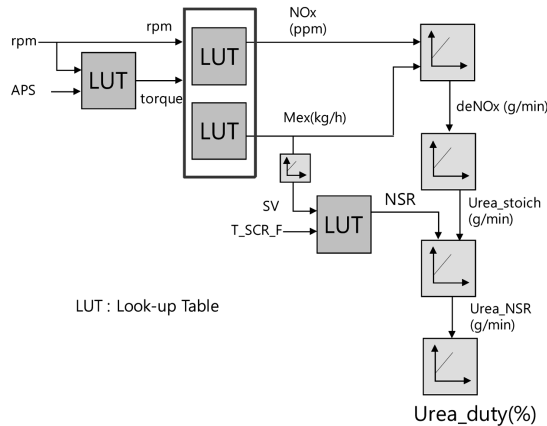


Fig. 6 Open loop control logic for urea injection

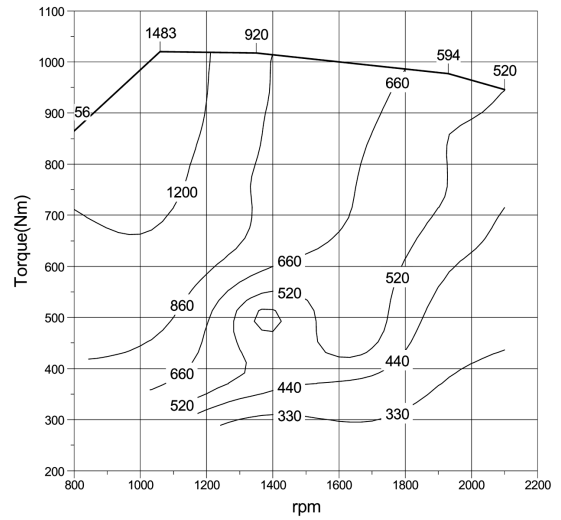


Fig. 7 Engine out NO<sub>x</sub> contour based on engine speed and torque

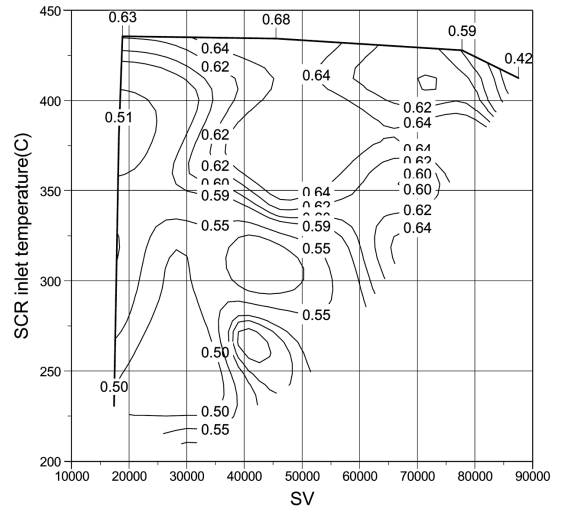


Fig. 8 NSR contour based on SV and SCR inlet temperature

영역에서 NO<sub>x</sub> 농도가 가장 높음을 알 수 있다. 한편 정적시험조건에서 urea 분사량을 증가시키면서 NO<sub>x</sub> 정화효율과 NH<sub>3</sub> slip을 측정하였는데 NH<sub>3</sub> slip이 SCO 후단에서 20ppm 이하를 만족하는 듀티(%)를 구하고 NSR로 환산하도록 하였다. Fig. 8은 이와 같이 구한 NSR을 공간속도와 SCR 촉매 전단온도의 함수로 나타낸 것이다. NSR은 0.42~0.68의 범위에 분포함을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 NSR을 기준(NSR offset100%)으

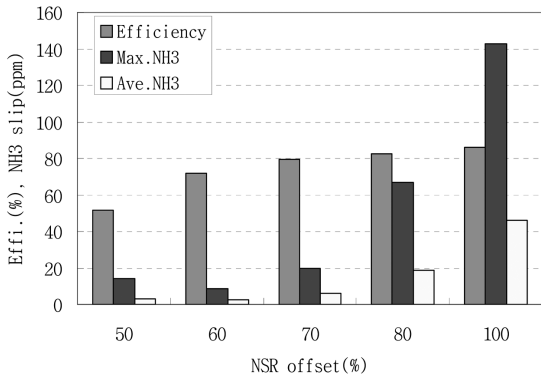


Fig. 9 NOx reduction efficiency and NH<sub>3</sub> slip with different NSR offset in the ETC test

로 NSR offset 50%, 60%, 70%, 80%, 100% 로 urea 공급량을 변화시킨 경우 ETC 모드상에서의 성능특성 결과를 나타낸 것이다. NSR offset 100%의 경우 NOx 정화효율은 86.3%, NH<sub>3</sub> slip은 평균 46ppm, 최대 142ppm이다. 정적시험조건에서 NH<sub>3</sub> slip이 20ppm 이하가 되는 NSR로 구성하였지만 가감속조건이 빈번한 ETC 모드상에서는 NH<sub>3</sub> slip이 다소 많이 나온 결과를 얻었다. NSR offset을 감소시키면 NOx 저감 효율이 감소하지만 NH<sub>3</sub> slip 또한 감소하게 된다. NSR을 20% 줄인 NSR offset 80% 조건에서 정화효율 82.7%, NH<sub>3</sub> slip 평균 18.7ppm, 최대 67ppm 이고, NSR을 30% 줄인 NSR offset 70% 조건은 정화효율 80%, NH<sub>3</sub> slip 평균 6.2ppm, 최대 20ppm의 최적 결과를 얻었다.

Fig. 10은 NSR offset 100% 조건에서 시간에 따른 NOx 농도 및 NH<sub>3</sub> slip 변화를 나타낸 것이다. 약 250초 경과 후 NH<sub>3</sub> slip이 발생하기 시작하여 테스트 완료 때까지 지속적으로 발생하며 약 550초 부근과 1100초 부근에서 각각 105, 142ppm의 높은 값을 보인다. 이는 Fig. 5에서 SCR 촉매 전단부의 온도 변화와 연관시켜 고찰하면, 초기 약 300초 경과 시까지 비교적 낮은 온도조건에서 SCR 촉매 내에 조금씩 저장되던 NH<sub>3</sub>가 이후 급격한 온도의 증가로 인한 촉매 내 최대저장용량의 감소와 탈착율의 증가때문에 다량으로 NH<sub>3</sub> slip이 발생하는 것으로 생각된다. Fig. 11은 NSR offset 70% 조건에서 시간에 따른 NOx 농도 및 NH<sub>3</sub> slip 변화를 나타낸 것이다. NSR offset 100% 조건보다 urea 분사량이 30% 저감된 경우이

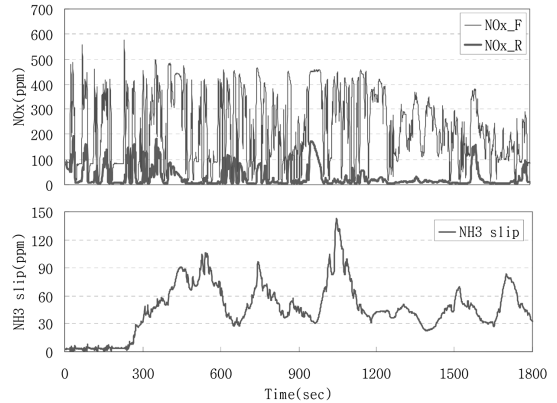


Fig. 10 NOx concentration and NH<sub>3</sub> slip with NSR offset 100% in the ETC test

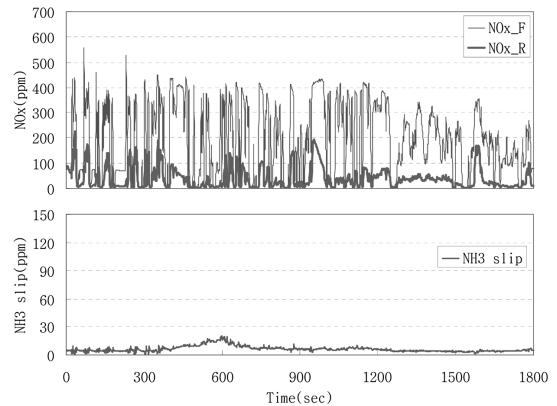


Fig. 11 NOx concentration and NH<sub>3</sub> slip with NSR offset 70% in the ETC test

지만, 전체적으로 효율의 감소가 크지 않으면서 NH<sub>3</sub> slip은 크게 저감된 결과를 보여준다.

Fig. 12는 NSR offset 100%와 70% 조건에서 NOx 센서로 측정된 결과이다. Fig. 10과 Fig. 11의 CLD 분석기로 측정된 결과와 비교할 때 NSR offset 70% 조건은 전체적으로 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 Fig. 9의 결과에서 확인한 바와 같이 NOx 정화효율이 높고 NH<sub>3</sub> slip이 많이 발생하는 NSR offset 100% 조건에서는 오히려 SCR 촉매후단의 NOx 센서 측정값이 크게 증가하고 일부 영역에서는 전단 NOx 값 보다 높게 나타나 마이너스 효율로 계측됨을 알 수 있다. 이는 slip된 NH<sub>3</sub>를 NOx로 오인하는 NOx 센서의 cross-sensitivity 특성 때문인 것으로 판단된다.

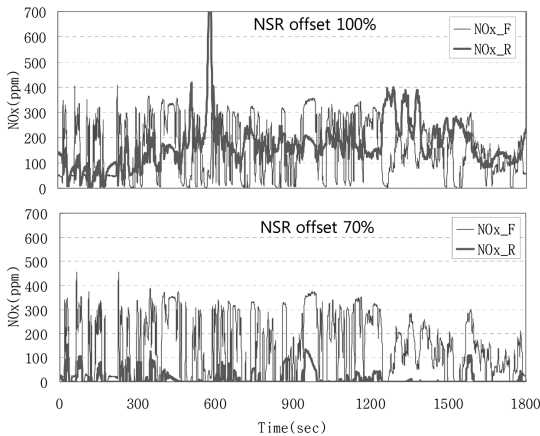


Fig. 12 NOx concentration measured with NOx sensor

이와 같이 NOx 센서를 이용한 피드백 제어방식을 구현하고자 할 때 urea의 과잉 공급으로 NH<sub>3</sub> slip 발생 시 실제 NOx 저감 현상과 다른 계측 결과로 인하여 제어의 어려움이 발생할 수 있다. 이러한 NOx 센서의 cross-sensitivity 문제를 해결하기 위해서는 촉매의 NH<sub>3</sub> 흡·탈착 특성과 cross-sensitivity 보상 등을 고려한 모델기반의 제어로직이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 11,149cc 버스용 디젤기관을 대상으로 urea-SCR 시스템을 적용하여 동적주행상태를 모사할 수 있는 ETC 모드에서 open loop 제어로직을 구현, NOx 저감 및 NH<sub>3</sub> slip 특성 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진매기조건하에서의 촉매실험은 SCR 샘플촉매 실험과 유사한 NOx 저감효율을 나타내었다.
- 2) ETC모드에서 SCR 촉매 전단온도는 200~340°C 범위에 있었으며 300°C 이상은 약 21% 차지하였다.
- 3) 정적조건에서 공간속도와 촉매 전단온도 별로 NH<sub>3</sub> slip이 20ppm이하를 만족하는 NSR을 적용한 결과, NOx 정화효율은 86.3%, NH<sub>3</sub> slip은 평균 46ppm, 최대 142ppm 이다. NSR을 30% 줄인 NSR offset 70% 조건이 정화효율 80%, NH<sub>3</sub> slip 평균 6.2ppm, 최대 20ppm으로 최적의 조건인 것으로 확인되었다.

- 4) NOx 센서는 응답성은 빠르지만 NH<sub>3</sub> slip을 NOx로 오인하는 특성이 있어 피드백 제어로직의 구성에 주의를 기울여야 한다.

#### 후 기

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

#### References

- 1) T. V. Johnson, "Diesel Emission Control in Review," SAE 2009-01-0121, 2009.
- 2) K. Hirata, N. Masaki, H. Ueno and H. Akagawa, "Development of Urea-SCR System for Heavy-Duty Commercial Vehicles," SAE 2005-01-1860, 2005.
- 3) D. H. E. Seher, M. Reichelt and S. Wickert, "Control Strategy for NOx-Emission Reduction with SCR," SAE 2003-01-3362, 2003.
- 4) 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.
- 5) C. Havenith and R. Verbeek, "Transient Performance of a Urea deNOx Catalyst for Low Emissions Heavy-Duty Diesel Engines," SAE 970185, 1997.
- 6) 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 NH<sub>3</sub> Slip," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.66-78, 2006.
- 7) 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.
- 8) M. Chen and S. Williams, "Modelling and Optimization of SCR-Exhaust Aftertreatment Systems," SAE 2005-01-0969, 2005.
- 9) T. Wang, S. Baek, M. Jung and G. Yeo, "A Study of NH<sub>3</sub> Adsorption/Desorption Characteristics in the Monolithic NH<sub>3</sub>-SCR Reactor,"

- Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.125-132, 2006.
- 10) H. S. Kim, Y. I. Jeong, M. H. Song, S. W. Lee, H. D. Park and J. W. Hwang, "Influential Factors for NO<sub>x</sub> 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.
  - 11) L. Hofmann, K. Rusch, S. Fisher and B. Lemire, "Onboard Emission Monitoring on a HD Truck with an SCR System Using NO<sub>x</sub> Sensors," SAE 2004-01-1290, 2004.
  - 12) 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.