

## 디젤엔진의 질소산화물 저감을 위한 Urea SCR 시스템 특성 분석 (II)

### Characterization of SCR System for NOx Reduction of Diesel Engine (II)

✉이준성<sup>1</sup>, 김남용<sup>2</sup>  
✉ Joon Seong Lee<sup>1</sup> and Nam Yong Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 경기대학교 기계시스템공학과 (Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.)  
<sup>2</sup> 자동차성능연구소 성능연구실 (Dept. of Performance Research, Korea Automobile Research Institute)  
✉ Corresponding author: jslee1@kyonggi.ac.kr, Tel: 031-249-9818

Manuscript received: 2008.3.4 / Revised: 2008.7.15, 8.29 / Accepted: 2008.9.1

*The Effect of Space Velocity(SV) on NOx conversion rate was performed to develop NOx reduction after-treatment system. SV is calculated from engine exhaust gas volume and SCR catalyst volume. Found the Urea injection duty of maximum efficiency for NOx conversion if increase SV, NOx Conversion rate is down. Especially, when SV is more than 110,000h<sup>-1</sup>, NOx conversion rate decrease suddenly. Same case, if SV is lower than 40,000h<sup>-1</sup>, NOx conversion rate is down. Also, the characterization of Urea-SCR system was performed. Three candidate injectors for injecting Urea were tested in terms of the injection rate and NOx reduction rate. The performances of SCR catalytic converter on temperature were investigated. The performance of Urea-SCR system was estimated in the NEDC test cycle with and without EGR. It was found that nozzle type injector had high NOx conversion rate. SCR catalytic converter had the highest efficiency at the temperature of 350°C. EGR+Urea-SCR system achieved NOx reduction efficiency of 73% through the NEDC test cycle.*

Key Words: NOx (질소산화물), Urea (요소), SCR (선택환원촉매), Space Velocity (공간속도), After-treatment System (후처리 장치), CDPF (매연저감장치), EGR (배기가스 재순환장치)

#### 1. 서론

디젤자동차 배출가스규제 수준이 단계적으로 높아짐에 따라 엔진연소 기술만으로 규제치를 만족하기에는 어려움이 있다. 따라서 후처리 시스템에 대한 기술개발이 요구되고 있으며, 디젤자동차에서 주요 저감대상 배출가스인 질소산화물(NOx)과 관련이 있는 입자상물질(PM)은 DPF 기술의 발달로 약 90%의 저감수준까지 도달해 있다.<sup>1</sup> 반면 NOx는 LNT(Lean NOx Traps), LNC(Lean NOx

Catalysts), SCR (Selective Catalytic Reduction)과 같은 저감기술이 제시되고 있다.<sup>2</sup> 이들 중 Urea-SCR은 향후 NOx 저감을 위한 유력한 기술로 예상되고 있으며, 선진각국에서 활발한 기술개발이 이루어지고 있다.<sup>3-8</sup> 유럽에서는 올해부터 시작되는 Euro-5에서 대형 디젤자동차의 NOx를 저감시키기 위한 기술로 Urea-SCR 장치를 활발히 개발하고 있다. 국내에서도 매연의 저감을 위하여 매연저감장치, 즉 중대형자동차는 DPF, 소형자동차는 DOC를 장착하고 있으나 2009년부터 경유차에 NOx를 저감

시키는 장치를 보급할 예정이다.<sup>9</sup>

SCR 기술은 고온의 소각로에서 배출되는 NOx 를 저감시키는데 적용된 기술로 잘 알려져 있으나, 자동차에 적용되기에는 저온 활성온도, SCR 촉매 크기의 제한 및 과도상태로 운전되는 운행패턴으로 인하여 적용이 어려웠다.

본 연구는 앞서 발표한 Urea-SCR 시스템을 위한 기초연구<sup>10</sup> 를 바탕으로 공간속도(Space Velocity)에 따른 NOx 저감성능을 알아보았다. 또한, 효율평가의 방법을 구축하기 위하여 최적의 NOx 전환효율이 나오는 온도영역, 엔진 맵상에서의 NOx 전환효율, 우레아 분사량의 적정성 등을 실험을 통하여 분석하고 실제 주행사이클을 엔진 동력계에서 구현하여 SCR 시스템의 성능을 평가하여 Urea-SCR 시스템 개발을 위한 자료로 활용하고자 한다.

**2. 실험장치 및 방법**

**2.1 실험장치**

실험에 사용된 장치는 Fig. 1 과 같으며 주요장치는 엔진동력계, 실험엔진, Urea-SCR 시스템으로 구성되어 있다. 실험엔진의 사양은 Table 1 과 같이 4 행정, 4 기통, 직렬형 실린더 배치이며 총 배기량은 1991cc, 압축비 17.7 이다. 최대 출력은 4,000rpm 에서 115PS 이며 최대 토오크는 2,000rpm 에서 약 269Nm 이다. 또한, 공기를 과급할 수 있는 터보차저와 과급된 공기를 냉각시키는 인터쿨러 및 배기가스 재순환(EGR) 장치가 부착되어 있다.

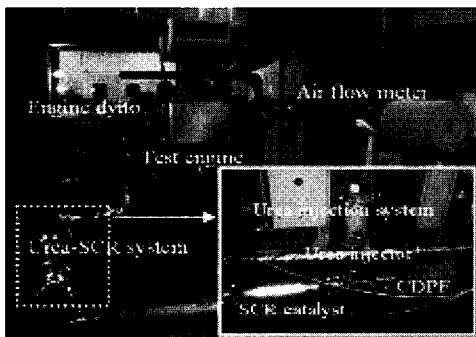


Fig. 1 Engine system of experimental set up

Fig. 1 의 우측 하단부는 Urea-SCR 촉매 및 Urea-SCR 인젝션시스템을 나타내는 것으로 자연

재생식 매연저감장치(CDPF), 환원제 저장소, 환원제분사용 모듈, SCR 촉매로 배열되어 있다.

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine Name	D4EA
Displacement Volume	1991cc
Bore x Stroke	83 x 92
Maximum Power	115PS/4,000rpm
Maximum Torque	269Nm/2,000rpm
Tobocharger	Wastegate Type

**2.2 Urea-SCR 시스템**

실험에 사용된 Urea-SCR 시스템의 구성을 Fig. 2 에 나타내었다. 우측으로부터 DOC, CDEF, SCR 및 SOC 로 구성되어 있다. DOC 에서는 SCR 과 CDEF 의 효율을 증대시키기 위하여 NO 를 NO<sub>2</sub> 로 변환시키며, CDPF 는 배기가스 온도에 의하여 PM 을 연속 재생시킨다. 또한 SCR 에서 NOx 를 선택적으로 N<sub>2</sub> 로 환원시켜 저감하며 마지막으로 슬립되는 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 산화시키기 위한 SOC 로 구성되어 있다. SCR 촉매는 Zeolite 계열의 촉매를 사용하였고 촉매의 체적은 4.34 l 리터이다.

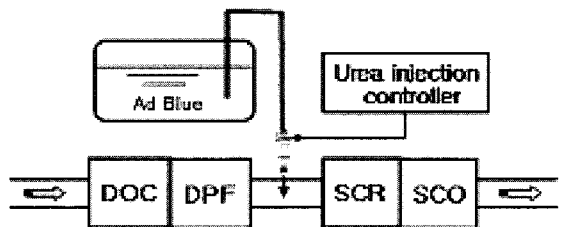


Fig. 2 Urea-SCR system

환원제의 분사는 자체 개발한 4 홀 노즐타입의 인젝터를 사용하였고 환원제 분사용 모듈에 의해 엔진운전 조건에 따라 분사시기와 분사량을 제어하도록 되어 있다.

환원제는 Urea-SCR 에서 많이 사용하고 있는 AdBlue 를 사용하였고 제원은 Table 2 와 같다.

Table 2 Specification of aqueous Urea-solution

Property	Value
Name	AdBlue
Urea Content	Urea 32.5 w-% Water 67.5 w-%
Chemical Formula	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> COH <sub>2</sub> O

2.3 실험방법

실험 전 엔진을 충분히 가동하여 엔진온도, 배기가스 온도 및 SCR 촉매의 온도를 일정하게 유지시킨 후 실험하였다. SCR 에 의한 NOx 저감 성능을 확인하기 위해 배기가스 재순환 장치(EGR)는 OFF 시킨 상태에서 실험을 진행하였다. 환원제 분사량 매핑을 위하여 엔진 맵상의 총 27 점에서 환원제 분사량을 바꾸어 NOx 저감효율이 최대값을 가진 후 떨어지는 단계까지 총 213 회 실험하였다.

엔진운전영역에 대한 분사량 매핑시험을 완료한 후 프로그램화하여 전자적으로 환원제 분사가 가능하게 하였고, 최종적으로 차량의 주행모드인 배출가스시험모드를 진행하여 NOx 의 저감량 및 저감효율을 알아보았다.

3. 실험결과

3.1 공간속도

공간속도(SV)에 따른 촉매의 효율을 알아보기 위하여 공간속도는 식 (1)과 같이 계산하였고 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.

$$SV = [(A \times G_{exh} \times T_{exh}) / P_{exh}] / V \quad (1)$$

여기서 A : 상수

G<sub>exh</sub> : 배출가스 유량(kg/h)

T<sub>exh</sub> : 배출가스 온도(K)

P<sub>exh</sub> : 배출가스 압력(kPa)

V : 촉매의 체적(m<sup>3</sup>)

이다.

일반적으로 촉매 설계 시 가솔린 엔진용 촉매의 경우는 공간속도가 30,000 ~ 100,000h<sup>-1</sup> 로 하며, 디젤엔진 DOC 의 경우에는 60,000 ~ 150,000h<sup>-1</sup> 로 하고 있다. 본 실험에 사용된 촉매는 공간속도가 28,000~170,000h<sup>-1</sup> 이었고 이 경우에 대하여 효율을 측정하였다.

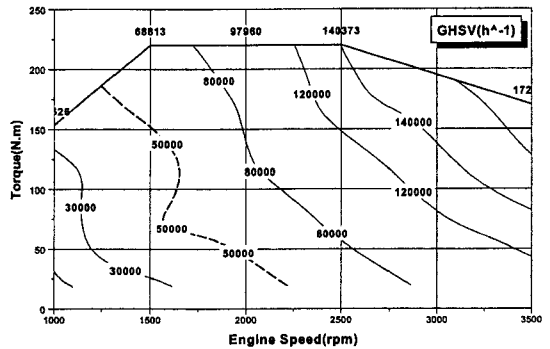


Fig. 3 SV of SCR catalyst

3.2 NOx 저감특성 시험

3.2.1 공간속도에 따른 NOx 저감

Fig. 4 ~ Fig. 6 은 SCR 촉매온도 280℃, 350℃, 450℃에서의 공간속도에 따른 저감효율을 나타낸 것이다. Fig. 4 는 촉매온도 280℃에서의 시험결과로서 촉매의 효율의 주요인자인 촉매의 온도가 280℃로 일정하게 유지시킨 상태에서 시험이 이루어졌다. 공간속도 증가에 따른 NOx 저감효율을 살펴보면 공간속도가 증가함에 따라 NOx 전환효율 60%에서 42%정도로 감소하는 경향을 보였다.

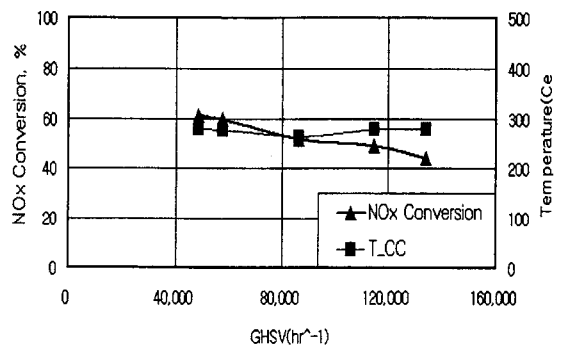


Fig. 4 NOx conversion curve vs. SV(280℃)

Fig. 5 는 SCR 촉매가 가장 활성화 되는 온도인 촉매온도 350℃에서의 공간속도 증가에 따른 NOx 저감효율 그래프이다. 공간속도가 40,000h<sup>-1</sup> 에서 110,000h<sup>-1</sup> 까지는 80%이상의 NOx 전환효율을 보이다가 공간속도가 110,000h<sup>-1</sup> 이상에서부터 효율이 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 공간속도가 낮은 40,000h<sup>-1</sup> 이하의 영역에서도 NOx 의 전환효율이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 촉매온도 450℃에서의 공간속도 증가에 따른 효율을 나타내었다. 전체적인 효율은

60% 수준이고 공간속도 증가에 따라 효율이 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

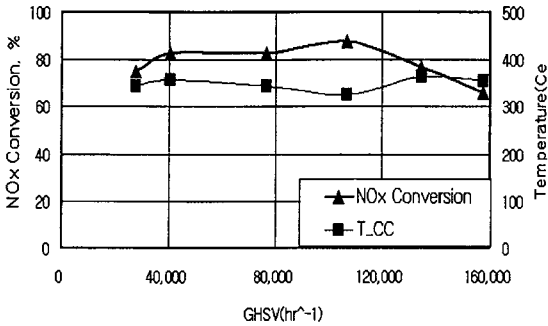


Fig. 5 NOx conversion curve vs. SV(350°C)

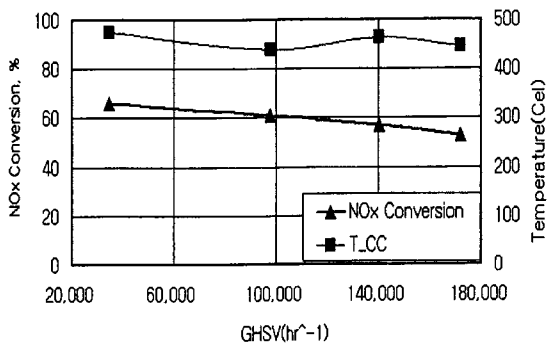


Fig. 6 NOx conversion curve with SV(450°C)

### 3.2.2 NOx 저감효율과 공간속도

엔진맵 상에서 공간속도에 대한 NOx 저감효율과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 엔진의 배기가스 온도가 낮은 저부하 영역에서는 공간속도와 관계없이 낮은 저감효율을 보였다. 이는 Zeolite 계열의 온도에 따른 NOx 저감 특성 때문에 나타난 것으로 보인다. 엔진 부분부하 시험에서 공간속도가 140,000h<sup>-1</sup> 이하 영역에서 공간속도의 변화에 따라

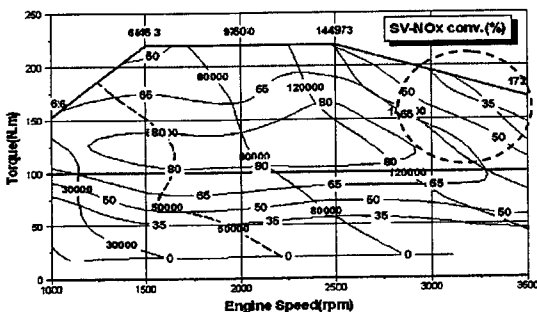


Fig. 7 NOx conversion rate with SV

효율의 변화가 거의 없으나 고속 고부하 영역에서는 효율이 떨어지는 경향을 보였다. 그림의 원형으로 나타낸 부분인 고속 고부하 영역에서 공간속도의 증가에 의해 NOx 저감효율이 감소된 것을 알 수 있다. 또한 SCR 촉매의 최대 효율은 배기온도 약 350°C 부근의 공간속도 40,000~120,000h<sup>-1</sup> 부근에서 80% 이상의 효율이 나왔다.

### 3.3 NOx 저감효율

#### 3.3.1 엔진 NOx 전환효율 분석

엔진회전속도 2,000rpm에서 엔진 토오크별 SCR 전후에서의 NOx 전환효율의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 엔진 토오크가 높아짐에 따라 배기온도 상승에 의하여 350°C에서는 90%까지 전환효율을 보였으나 400°C 이상 상승할 경우 다시 감소하는 경향을 보였다.

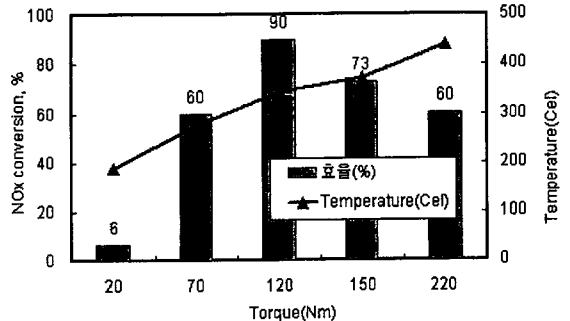


Fig. 8 NOx conversion at 2,000rpm

촉매의 효율이 가장 높은 350°C인 영역에서 엔진 회전수 증가에 따른 NOx 전환효율의 시험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 엔진회전수 1,500~3,000rpm 영역에서는 90% 정도의 높은 효율을 보였으나 1,000rpm과 3,500rpm에서는 효율이 약간

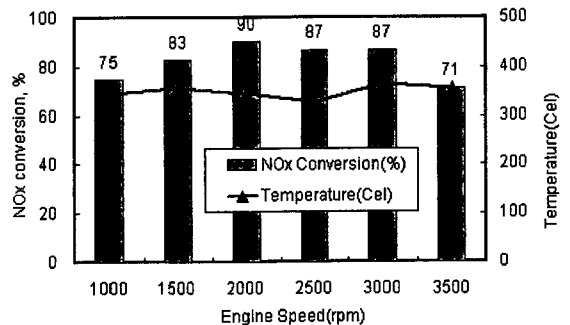


Fig. 9 NOx conversion at 350°C

저하됨을 알 수 있다. 또한 엔진이 운전될 수 있는 모든 영역에서의 전환효율을 Fig. 10 에 나타내었다.

저부하 영역에서는 온도가 낮음으로 인하여 효율이 낮게 나왔으나, 촉매의 최대 효율이 나타나는 엔진 배기온도 350℃ 부근인 중부하 영역에서는 80% 이상의 높은 효율이 나타남을 알 수 있다.

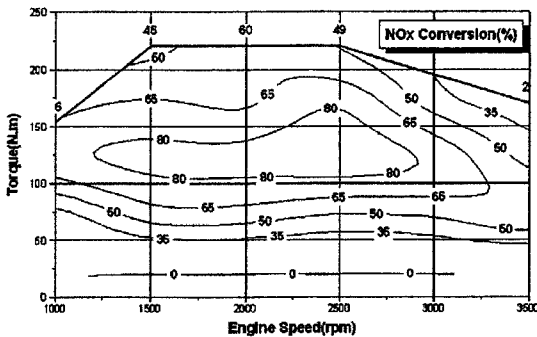


Fig. 10 NOx conversion rate in all area

3.3.2 환원제 분사량 분석

Fig. 11 은 환원제 분사용 제어기에 맵상으로 입력된 인젝터 개도의 Duty 이다. 배기온도가 낮은 저부하에서는 SCR 촉매가 활성화 되지 않아 환원제를 분사하지 않으나 고부하로 갈수록 환원제의 분사량이 많아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 고부하 영역에서는 엔진에서의 NOx 의 발생량이 많고 배기가스 온도상승에 의하여 환원제에서 생성되는 NH<sub>3</sub>의 양이 적기 때문이다.

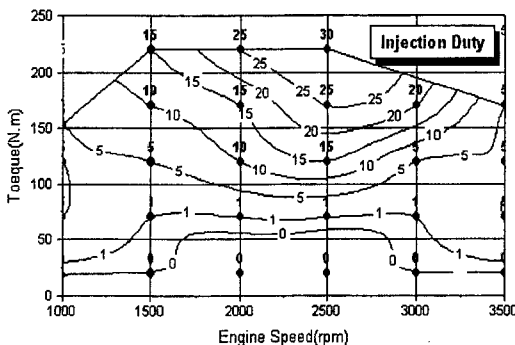


Fig. 11 Duty map for injection of urea solution

Urea 분사량의 적정성을 알아보기 위하여 엔진에서 소모되는 연료소모량 대비 실제 분사된 Urea

Solution의 비를 Fig. 12 에 나타내었다. 대체적으로 Urea Solution 의 소모량은 연료량의 1~6% 정도이었다.

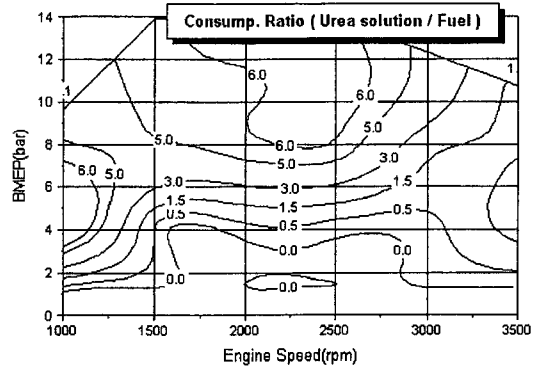


Fig. 12 Urea solution ratio with fuel consumption

3.3.3 NEDC 모드에서의 NOx 저감효율

Urea-SCR 시스템의 효율을 실제 주행모드에서 조사하기 위해 현재 유럽의 중·소형 자동차 법규 시험 모드인 NEDC 모드를 엔진동력계상에서 구현하여 실험하였다. Fig. 13 은 NEDC 모드를 주행하면서 SCR 시스템을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 시간의 경과에 따라 NOx 의 변화를 상호 비교한 것이다. SCR 시스템을 사용하지 않은 베이스 상태에서는 NOx 가 2.4g/km, SCR 시스템을 사용한 상태에서는 1.22g/km 가 발생되었다. NOx 저감율은 49% 정도였으나 우레아 분사 매핑 등의 최적화를 통하여 어느 정도 높일 수 있을 것으로 사료된다.

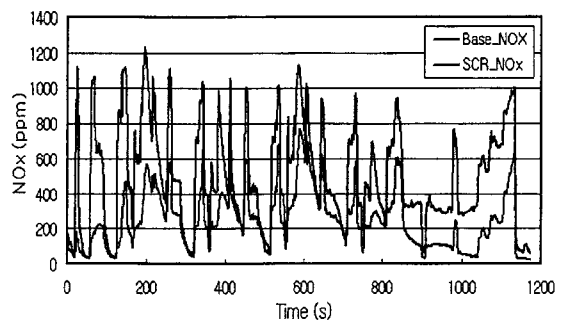


Fig. 13 Effect of NOx reduction on Urea-SCR system

Fig. 14 는 NEDC 모드에서 EGR 에 의한 NOx 저감효과를 나타낸 것이다. SCR 시스템을 사용하지 않은 베이스 상태에서는 NOx 가 2.4g/km, EGR

을 작동한 상태에서는 1.5g/km 가 발생되어 37.5% 저감율을 보였다. 따라서 EGR 에 의한 NOx 저감량에 비해 SCR 시스템에 의한 NOx 저감이 약 12% 정도 더 높았다.

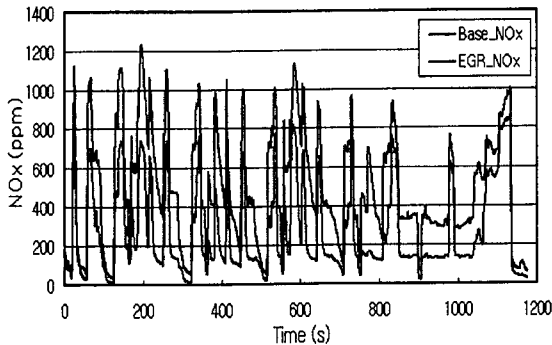


Fig. 14 Effect of NOx reduction on EGR

Fig. 15 는 EGR 과 Urea-SCR 시스템을 적용한 경우의 NOx 발생 및 저감량을 나타낸 것이다. 베이스 대비, 두 가지 모두 적용했을 경우 NEDC 모드를 주행한 결과 NOx 량은 0.66g/km, NOx 저감율은 약 73%이었다.

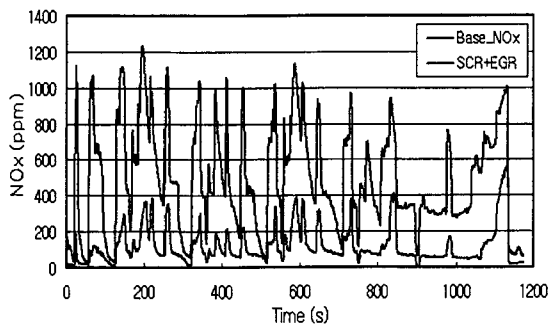


Fig. 15 Effect of NOx reduction on EGR and SCR system

**4. 결론**

본 연구는 Urea-SCR 시스템의 공간속도에 따른 NOx 저감, NOx 저감효율과 공간속도와의 관계를 실험을 통해 조사하였다. 또한 Urea-SCR 과 환원제 분사모듈을 구성하고 실차주행 모드 모사에 의한 저감효율 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엔진배기량 1991cc, 최대출력 115PS 인 엔진

에서 체적이 4.34 리터의 SCR 촉매를 사용한 결과, 공간속도 분포는 28,000~170,000h<sup>-1</sup> 이었다.

(2) NOx 전환 효율은 배기온도가 낮은 저속 저부하 영역에서는 낮았으나 촉매의 높은 효율이 나오는 350℃영역에서는 80% 이상의 NOx 전환효율을 나타내었다.

(3) 환원제 분사 매핑에 의한 Urea Solution 소모량은 연료소모량 대비 1~6% 수준이었다.

(4) 주행모사 모드에서 NOx 저감효율 EGR 만 작동될 경우 약 38%, Urea-SCR 시스템만 작동될 경우 약 49%, EGR 과 Urea-SCR 시스템 모두 작동될 경우 약 73%로 나타났다.

**후 기**

본 연구는 2007 학년도 경기대학교 학술연구비 (일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

**참고문헌**

1. Park, Y. S., Kim, N. Y., Choi, D. S., Jung, H., Kim, Y. W., Jung, H. S., Kim S. H., Cho, Y. G. and Lee, S. H., "The Effect of Space Velocity on NOx Conversion Rate of Urea-SCR System," Proceedings of KSAE Spring Conference, Vol. I, pp. 285-290, 2006.
2. Johnson, T. V., "Diesel Emission Control in Review," SAE Paper, No. 1-0030, pp. 21-26, 2006.
3. Arrowsmith, D., Bott, A. and Bush, P., "Development of a Compact Urea-SCR+CRT System for Heavy-Duty Diesel using a Design of Experiments Approach," SAE Paper, No. 1-0636, pp. 63-66, 2006.
4. Schar, C. M., Onder, C. M., Geering, H. P. and Elsener, M., "Control of a Urea SCR Catalytic Converter System for a Mobile Heavy Duty Diesel Engine," SAE Paper, No. 1-0776, pp. 71-76, 2003.
5. Rusch, K., Kaiser, R. and Hackenberg, S., "DPF SCR Combinations Integrated Systems to Meet Future LDV Emission Limit," SAE Paper, No. 1-0637, pp. 32-36, 2006.
6. Birkhold, F., Meingast, U., Wassermann, P. and Deutschmann, O., "Analysis of the Injection

- of Urea-Water-Solution for Automotive SCR DeNOx Systems: Modeling of Two-Phase Flow and Spray/ Wall-Interaction,” SAE Paper, No. 1-0643, pp. 43-48, 2006.
7. Nishioka, A., Sukegawa, Y., Mukai, T., Katogi, K., Yokota, H., Mamada, H. and Kowatari, T., “A Study of a New After- treatment System(2) : Control of Urea Solution Spray for Urea-SCR,” SAE Paper, No. 1-0644, pp. 37-40, 2006.
  8. Song, C. S. and Lee, S. H., “A Study on Design Parameter of a Hydraulic Shift Actuator of an ATM,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 10, pp. 75-82, 2007.
  9. Kim, N. Y., “A Study on the Characterization of SCR System for NOx Reduction of Diesel Engine,” Master Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Kyonggi University, 2007.
  10. Kim, N. Y. and Lee, J. S., “Characterization of SCR System for NOx Reduction of Diesel Engine(I),” Journal of Graduate Studies, Vol. 36, pp. 223-242, 2007.