

북미 Tier2 Bin5 규제 대응을 위한 디젤 SCR 개발

이강원* · 강중훈 · 조청훈

현대자동차 승용디젤엔진시험팀

Diesel SCR Development to Meet US Tier2 Bin5 Emission Regulation

Kangwon Lee* · Jungwhun Kang · Chung Hoon Jo

Passenger Car Diesel Engine Test Team, Hyundai Kia Corporate R&D Division, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 10 May 2010 / Accepted 13 September 2010)

Abstract : The introduction of a diesel engine into the passenger car and light duty applications in the United States involves significant technical challenges for the automotive makers. This paper describes the SCR System optimization procedure for such a diesel engine application to meet Tier2 Bin5 emission regulation. A urea SCR system, a representative NO_x reduction after-treatment technique, is applied to a 3.0 liter diesel engine. To achieve the maximum NO_x reduction performance, the exhaust system layout was optimized using series of the computational fluid dynamics and the urea distribution uniformity test. Furthermore a comprehensive simulation model for the key factors influencing NO_x reduction performance was developed and embedded in the Simulink/Matlab environment. This model was then applied to the urea SCR system and played a key role to shorten the time needed for SCR control parameter calibration. The potential of a urea SCR system for reducing diesel NO_x emission is shown for FTP75 and US06 emission standard test cycle.

Key words : Selective catalytic reduction(선택형 환원 촉매), Tier2 Bin5, NO_x reduction(질소산화물 저감), Conversion efficiency(정화효율), Fuel economy(연비)

1. 서론

승용디젤엔진 개발의 궁극적인 목표는 경제적이고 친환경적인 차량이다. 디젤엔진 승용차가 보편화되어 있는 유럽시장과는 달리, 승용디젤엔진의 불모지와 다름없는 북미 시장으로의 디젤엔진의 진출은 매우 도전적이고 개척적인 과제이다.

북미 시장의 디젤엔진 진출을 위해서는 가장 엄격한 배기가스규제를 만족시켜야 한다. 디젤엔진의 대표적인 공해물질로 PM(Particulate Matter)과 NO_x를 들 수 있는데, 이중 PM의 경우 일반화된 기술인 DPF를 이용하여 대부분의 입자상 물질을 제거할 수 있지만, NO_x의 경우 연비와 비용 상승의 문제로 인

하여 다양한 해결 방법들이 모색되고 있다. 디젤엔진의 대표적인 NO_x정화 후처리 기술로 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 LNT(Lean NO_x Trap)를 들 수 있는데, SCR의 높은 정화효율 및 내구 안정성 그리고 연비악화를 최소화할 수 있는 장점으로 인해 경쟁사들의 적극적인 개발이 진행되고 있다.¹⁻³⁾

본 연구에서는 3리터 승용디젤엔진에 Urea SCR 시스템을 적용하여 NO_x정화효율 극대화를 위한 시스템 레이아웃 최적화를 수행하였고 SCR 제어변수와 정화성능 모델링을 통하여 정확하고 효율적인 SCR 제어 방법을 구현하였다. 그리고 촉매활성화 온도의 조기도달을 위한 급속 승온기술을 적용하여 NO_x정화효율을 극대화하였고 이에 따른 연비악화를 최소화하기 위한 방법론에 대해 서술하고 있다.

*Corresponding author, E-mail: bomarc@hyundai.com

현재 SCR시스템의 가장 유력하고 효과적인 배치인 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)-DPF(Diesel Particulate Filter)-SCR 레이아웃을 가진 신품축매를 대상으로 최적화를 진행하였으며, NO_x 정화성능 검증을 위하여 복미 배출가스 표준시험모드인 FTP75와 US06에 준해 실차를 상사한 Transient 엔진 시험을 진행하였다.

2. SCR H/W개발 및 정확효율 최적화

2.1 시험 대상 엔진

본 연구에서는 복미 Tier2 Bin5 규제에 대응하기 위해 개발 중인 3L 디젤엔진에 Urea SCR시스템을 적용하여 배기가스 규제대응 개발을 진행하였다. Fig. 1과 Table 1에서 시험 대상엔진 및 제원을 보여주고 있다.

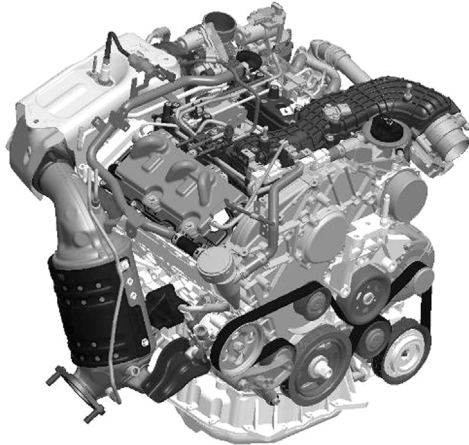


Fig. 1 V6 3L Diesel engine

Table 1 Engine specification

| | |
|-----------------------|-------------|
| Engine model | S-3.0 V6 |
| Displacement | 2959 cc |
| Engine type | V-6 DOHC |
| Bore × Stroke | 84 × 89 mm |
| Emission target | Tier2 Bin5 |
| Aftertreatment system | DOC+DPF+SCR |

2.2 Urea SCR시스템의 구성

SCR시스템은 선택적 환원촉매 전단에 Urea수용액을 분사하여 배기가스중의 NO_x와 분사된 Urea수

용액이 열분해되고 가수분해되어 생성되는 NH₃를 반응시켜 공해물질을 저감하는 기술이다. 디젤엔진의 후처리 장치인 산화촉매(DOC), 매연여과장치(DPF), 선택적 환원촉매(SCR)은 여러 가지 조합으로 구성될 수 있지만, 본 연구에서는 가장 가능성 있는 조합인 DOC-DPF-SCR을 적용하였다.^{8,9)} DOC는 배기가스중의 HC, CO등을 산화시키는 역할을 가지며 NO를 산화시켜 DPF에서의 Soot의 산화에 도움을 주고 후단 SCR에서의 정화효율 상승을 위한 NO₂ 생성에 기여한다.⁵⁾

Urea SCR은 주로 Fe(철)계열이나 Cu(구리)계열의 Zeolite촉매가 사용되는데, 본 연구에서는 Umicore社의 최신 Fe계열 촉매를 선정하여 개발하였다.

Fig. 2에서 시험엔진에 장착된 SCR시스템의 구성 및 레이아웃을 보여주고 있다.

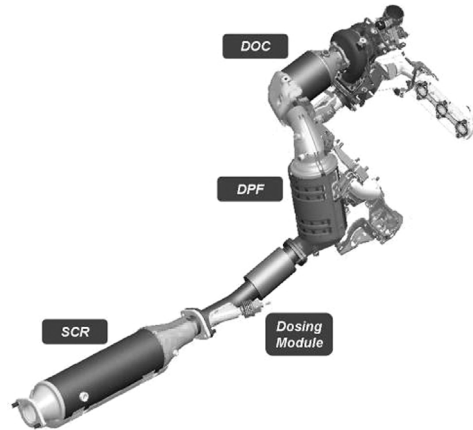


Fig. 2 SCR system configuration and layout

후처리 촉매와 더불어 Bosch社에서 제작한 Urea수용액 Dosing module과 분사된 Urea수용액의 균일한 분포를 위한 믹서를 장착하였다. 또한, SCR시스템의 분사제어를 위하여 별도의 DCU(Dosing Control Unit)를 Etas社의 ASCET 프로그램을 이용하여 ECU와 연동할 수 있도록 하였다.

2.3 배기계 레이아웃 최적화

SCR이 적용된 후처리 장치들의 레이아웃은 매우 중요한 개발요소이다. 최적의 NO_x정화효율을 구현하기 위해서는 후처리 배기계의 열손실을 최소화해

야 하고 분사된 Urea수용액이 기화하고 분해되어 SCR촉매로 유입되어야 한다. 이러한 개발조건을 만족시키기 위하여 각 후처리 장치들의 상대적인 위치와 Dosing module의 장착위치 및 분사각도 그리고 믹서의 형상과 위치가 NO_x정확효율측면에서 최적화되어야 한다.

2.3.1 전산유체역학 해석

본 연구에서는 CFD를 이용하여 설계된 후처리 레이아웃 선행평가를 실시하였고, 여러 가지 설계 변수들이 Urea수용액 분무 유동장에 미치는 영향과 설계 가이드라인을 확보할 수 있었다. 본 수치해석은 Urea수용액의 실제 물성치들을 3차원 분무 유동장에 적용하여 해석하여 Spray각도, 믹서의 위치, 믹서와 Dosing module간의 상대위치, SCR촉매 Cone부 형상 및 길이 등을 최적화 하였다. 본 연구에서 최적화된 배기계 사양은 Urea 수용액 분무각도 16.5도, 믹서의 두께 24.5mm, SCR Cone부의 형상과 길이는 차량의 하부 Package를 고려하여 선정하였다.

Fig. 3에서 SCR시스템의 형상에 따른 Urea분무 유동장의 해석결과를 볼 수 있다.

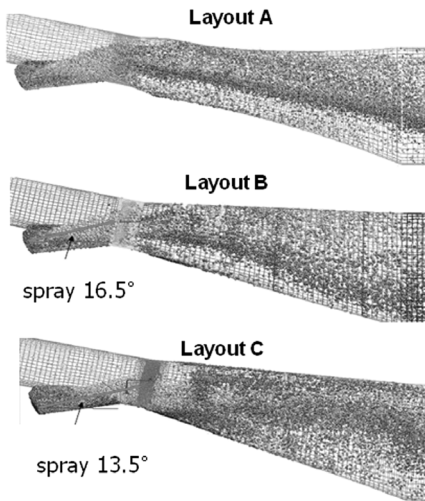


Fig. 3 Simulation results of flow and NH₃ distribution

2.3.2 NH₃ 분포 균일도 시험

해석결과를 바탕으로 설계되고 제작된 SCR시스템 레이아웃에 대상으로 주요 Emission영역에서의 NH₃분포 균일도(Uniformity Index)시험을 수행하였

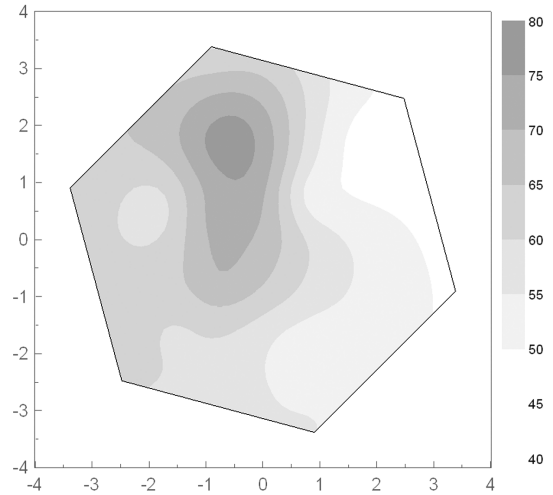


Fig. 4 Contour of NH₃ distribution (NO_x Conversion efficiency at the catalyst cross sectional area- review)

다. SCR촉매 내부의 균일하게 분포된 NH₃은 NO_x정확효율을 극대화하기 위한 가장 기본적이고 중요한 개발항목이다. 본 연구에서는 SCR촉매의 종단면에 배치된 19개의 측정점에서의 정확효율을 측정하여 UI 0.95이상의 균일한 NH₃분포를 확인하였다.

Fig. 4에서 최적화된 레이아웃의 UI측정 시험결과를 보여주고 있다.

2.4 SCR 제어인자 및 정확효율 모델

SCR의 NO_x정확효율에 영향을 미치는 인자로는 SCR촉매의 온도, 배기가스 유량, NO_x중의 NO₂비율, 촉매의 열화 정도, NH₃흡장량, SCR전단의 THC농도, DPF내의 Soot로딩량 등을 들 수 있다.⁷⁾ 이 중 NO_x정확효율에 가장 지배적인 영향을 미치는 촉매의 평균 온도는 열역학적인 방법으로, NO_x중의 NO₂비율은 통계적이고 수치적인 방법을 이용하여 모델링 할 수 있다. 그리고 Urea SCR시스템의 분사량 제어에 직접적으로 사용되는 실시간 정확효율에 대한 모델을 완성하였다.⁴⁾ 이러한 수학적인 모델링은 Matlab을 기반으로 동작하는 Simulink를 통하여 구현하였으며 SCR제어인자 최적화를 위한 Offline simulation tool로서 실제 개발에 적용하였다.

2.4.1 SCR촉매 평균온도 모델링

선택적 환원촉매로서의 NO_x정확효율을 지배하

는 주요인자인 촉매 평균온도를 열역학적인 방법으로 모델링하였다. 온도모델링의 목적은 원가절감을 위하여 SCR후단의 온도센서를 삭제하고 촉매 각부의 온도변화를 예측하기 위함이다. 배기가스로부터 촉매에 공급된 열량과 대기 중으로의 열손실량을 시간에 따른 에너지 보존식을 이용하여 과도응답 촉매온도방정식을 구하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_{p,substrate} \times m_{substrate}} [c_{p,gas} \times \dot{m} \times (T_{in} - T) + h \times A \times (T - T_{ambient})]$$

위 식에서 $c_{p,substrate}$, $c_{p,gas}$ 는 촉매 담체와 배기가스의 비열, h 는 대류열전달계수, A 는 촉매블록이 외기와 접하는 면적을 의미한다. 아래의 그림과 같이 촉매를 종 방향으로 n개의 블록으로 나누어 각 블록별로 촉매의 담체에 공급된 열량은 담체의 온도를 올리는 데 사용되고 나머지는 외기로 방출되는 간단한 열수지식이다.

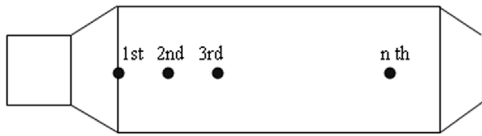


Fig. 5 n-Block SCR catalyst temperature modeling points

온도모델의 검증을 위해 촉매에 종방향으로 n개의 온도센서를 장착하여 n-블록에 대한 온도모델의 정확도를 확인하였다. 온도모델의 실 적용성을 고려하여 FTP75와 US06 복합 Emission mode에서 확인시험을 진행하였다.

Fig. 6에서는 n-블록 온도모델의 정확성을 보여주고 있다.

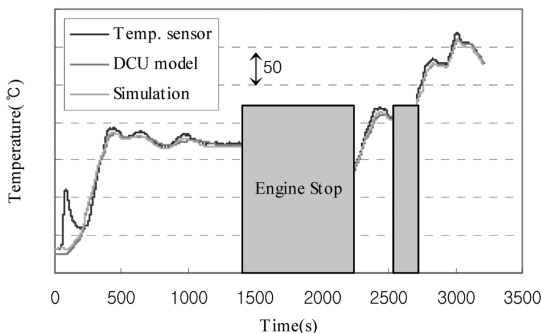


Fig. 6 SCR catalyst temperature modeling result

2.4.2 NO₂/NO_x 비율 모델

Urea SCR시스템에서의 이상적인 NO₂/NO_x 비율은 50%로 알려져 있으며, NO₂/NO_x 비율에 따라 정화율 및 NO_x정화에 사용되는 NH₃의 반응비도 결정된다.⁶⁾ 따라서 정확한 NO₂/NO_x비율은 예측은 정확한 효율예측의 필수 조건이 된다. 본 연구에서는 차량상사 Transient시험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 배기가스유량과 DOC-DPF의 대표온도에 따른 NO₂/NO_x비율값을 추출하여 통계적인 방법으로 모델링을 완성하였다.

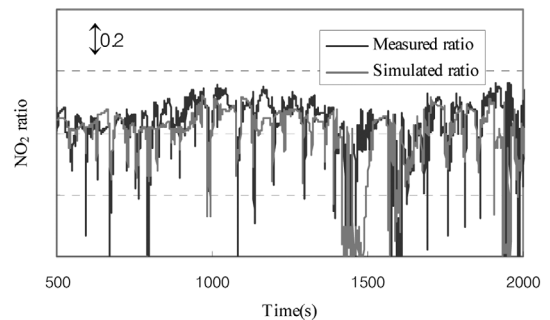


Fig. 7 NO₂ ratio modeling result for FTP75 and US06

2.4.3 NO_x 정확효율 모델

실시간 유레아 분사량을 결정하는 효율모델링은 배기가스유량, SCR촉매의 온도, NO₂/NO_x비율, NH₃ 흡장량에 따른 가스벤치 측정효율을 인자별로 Breakdown하여 지수함수의 형태로 모델링하였다. 엔진대상의 Steady조건에서 효율모델을 검증 후 FTP75, US06등의 실제 Emission Test Cycle에 적용하여 동적 거동특성에 따르는 모델의 오차를 보정하였다.

Fig. 8은 Steady상태의 대표 운전점에서의 정확효율 모델링 결과를 보여주고 있다. 모델효율과 실측효율의 최대오차 5%로 비교적 정확한 모델링 결과를 얻을 수 있었다.

2.5 실차 상사 대상 Transient Test

본 연구의 목적은 북미 Tier2 Bin5배기규제를 만족시키기 위한 SCR시스템의 개발이다. 시험대상엔진에 신품 촉매조합을 적용하여 FTP75 및 US06 Emission Test Cycle에 대한 SCR시스템 및 Urea분사 제어 최적화를 수행하였다.

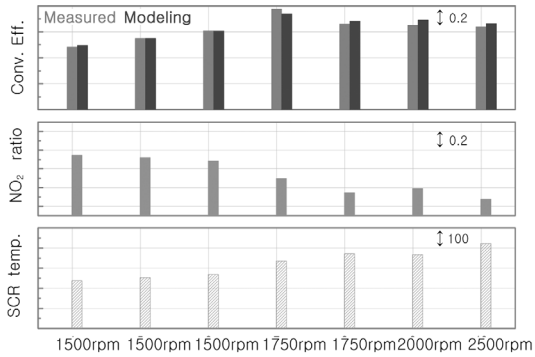


Fig. 8 Steady state conversion efficiency modeling

Table 2 Tier2 Bin5 emission regulation [g/mile]

| FTP75 | | | | |
|---------|----------------------|-----|-----------------|------|
| Mileage | NMOG | CO | NO _x | PM |
| 50K | 0.075 | 3.4 | 0.05 | 0.01 |
| 120K | 0.090 | 4.2 | 0.07 | |
| US06 | | | | |
| Mileage | NMHC+NO _x | | CO | |
| 4K | 0.4 | | 10.5 | |

Table 3 Transient emission cycle test result

| Emission test | FTP75 | US06 |
|-------------------------------|----------|----------|
| Distance [mile] | 11.04 | 8.01 |
| Duration [sec] | 1874 | 596 |
| Tail NO _x [g/mile] | 0.035 이하 | 0.016 이하 |

Table 2에서 Tier2 Bin5 배기가스 규제치를 보여주고, Table 3에서 엔진대상 Transient 시험을 통해 얻은 결과를 보여주고 있다.

2.5.1 FTP75 Emission Test

SCR 촉매의 온도에 따른 NO_x 정화효율 특성 때문에 촉매 활성화 온도에 조기에 도달하는 것이 무엇보다도 중요한 개발 과제이다. SCR은 촉매의 활성화 온도(200도) 이상에서는 촉매로 유입되는 대부분의 NO_x를 정화할 수 있는 능력을 가지고 있다. 따라서 전체 EM Cycle에서 SCR이 NO_x 정화도구로 작동할 수 있는 영역을 확대하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 FTP75 Cycle의 Cold Transient 영역(Phase1)에 배기가스 급속 승온 전략을 적용하였다.

Fig. 9에서 배기가스 급속 승온 전략을 보여주고 있다. 일반적인 DPF의 재생방법과 비슷한 배기가스

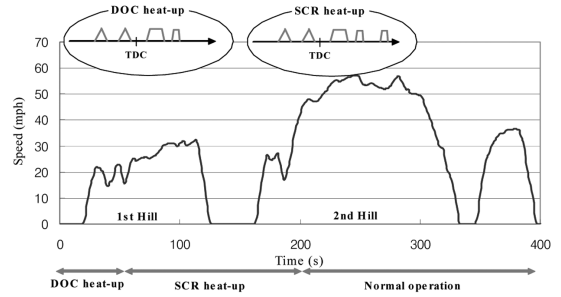


Fig. 9 Exhaust gas rapid heat-up strategy

온도 상승 전략을 가지고 있고 DOC Heat-up과 SCR Heat-up의 두 가지 모드를 가지고 있다. DPF 재생과 다른 점은 승온 운전 때 따른 THC Slip을 최소화 하고, NO_x 배출은 정상시 수준 혹은 그 이하로 최적화 하는 것이다. 또한, 후 분사에 따른 연비악화를 최소화 해야 한다. 그리고 Phase1의 2nd Hill 종료 이전에 SCR 활성화 온도에 도달해야 전체 Emission Cycle의 정화효율을 극대화 할 수 있다.

Fig. 10에서 대상 FTP75 Transient 시험결과를 보여주고 있다. Tail Pipe 후단으로 배출되는 NO_x 량의 대부분은 Phase1에서 발생함을 알 수 있고, 배기가스 급속 승온 시간 및 engine-out NO_x 저감의 필요성을 보여주고 있다. Phase2의 NO_x 정화율은 98% 이상으로 Phase1의 승온 기간에 악화된 연비를 회복할 수 있는 수준이다. 따라서 SCR의 최대 정화효율 유지 기간 동안의 연비 최적화를 통해 연비악화 없는

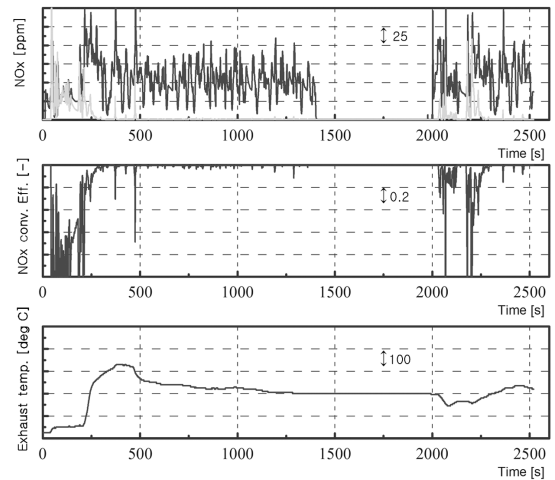


Fig. 10 FTP75 emission test result

NO_x정화기술의 구현이 가능할 것으로 사료된다. Phase3 영역의 경우 별도의 배기가스 승온 전략 없이 80%이상의 정화효율 수준을 보이고 있으며, 급속승온 전략 적용시 연비악화 대비 정화효율 상승의 폭이 미미하기 때문에 SCR배기계 시스템의 열손실 저감을 통해서 높은 효율을 유지하는 것이 바람직하다.

따라서 배기계의 경우 플렌지 연결부위를 볼조인트로 대체하고 배기가스관의 이중관 적용영역을 최대화하는 것이 바람직하다.

2.5.2 US06 Emission Test

북미 배기가스 규제의 보조 시험모드인 US06 Emission Test Cycle에 대하여 SCR시스템을 적용하여 NO_x정화효율 특성을 고찰하였다.

US06은 최고속도 80.3mph로 고속운전 배기가스 시험모드이다. FTP75와는 달리 Cold Start영역이 없으며 평균 SCR온도 300도 수준의 고온 운전모드이다. 배기가스온도가 상대적으로 높고 유량이 많기 때문에 SCR의 NO_x정화성능은 흡장된 NH₃량보다는 실시간 분사되어 공급되는 NH₃량에 따라 결정되는 특성을 가진다.

고온의 SCR촉매는 흡장할 수 있는 NH₃양이 저온에 비하여 급격하게 줄어들게 되므로 운전중의 NH₃ Slip을 억제하면서 정화효율을 유지하는 것이 주요 개발 항목이다. 또한, US06과 같이 배기가스 유량과 배출되는 NO_x량이 많아지면 SCR전단의 NO_x센서

의 측정치와 정화효율모델링으로 결정되는 Urea 분사량의 정확한 제어가 더욱 중요해진다. 본 연구에서는 NH₃ Slip을 3ppm이하로 유지하면서 정화효율 75% 이상의 수준을 달성하였다.

3. 결론

승용디젤엔진의 북미 Tier2 Bin5 대응을 위한 SCR개발을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SCR시스템의 정화효율을 극대화하기 위해서는 분사된 Urea수용액이 유동장내에서 균일하게 분포해야 하며, 이를 위해 CFD해석을 통한 최적설계가 필요하고 Uniformity Index평가를 통해 실제 엔진과 배기계 시스템을 대상으로 검증해야 한다.
- 2) SCR의 NO_x정화효율 제어인자 및 효율 모델링을 통하여 예측 가능한 시뮬레이션 툴을 자체 개발하였으며, 실제 개발에 적용하여 시험기간을 단축하였다. SCR의 정화효율 극대화 및 부작용인 NH₃ Slip을 억제하기 위해서는 정화효율과 관련된 성능인자들의 정확한 모델링이 필요하며 엔진대상의 Steady 및 Transient평가를 통하여 종합적인 검증이 필요하다.
- 3) 북미 Tier2 Bin5배기가스 규제 대응을 위한 FTP75 및 US06 Test Cycle의 SCR시스템 최적화를 수행했으며, FTP75와 US06의 50K mile기준 규제치를 만족하였다.

References

- 1) C. Lambert, S. Williams, B. Carberry and E. Koehler, Urea SCR and CDPF System for a Tier2 Light-Duty Truck, Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2006.
- 2) E. Jacob, R. Muller and A. Scheeder, "High Performance SCR Catalyst System: Elements to Guarantee the Lowest Emission of NO_x," 27th International Vienna Motor Symposium, 2006.
- 3) S. Kimura, E. Matsumoto and M. Yamane, "Nissan's New Clean Diesel Technology for Japanese Post New Long Term Regulation,"

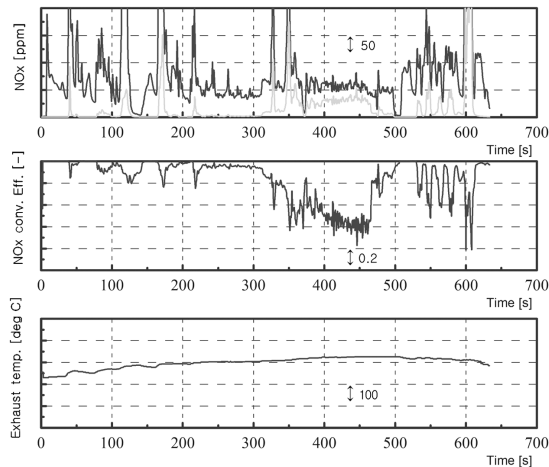


Fig. 11 US06 Emission test result

30. Internationales Wiener Motorensymposium, 2009.
- 4) M. Shost, J. Noetzel, M.-C. Wu, T. Sugiarto, T. Bordewyk, G. Fulks and G. B. Fisher, "Monitoring, Feedback and Control of Urea SCR Dosing Systems for NO_x Reduction: Utilizing an Embedded Model and Ammonia Sensing," SAE2008-01-1325, 2008.
- 5) S.-C. Jung and W.-S. Yoon, "Unified Modeling and Performance Prediction of Diesel NO_x and PM Reduction by DOC-DPF-SCR System," Transactions of KSAE, Vol.16, No.4, pp.110-119, 2008.
- 6) D. Chatterjee, T. Burkhardt, T. Rappe, A. Guthenke and M. Weibel, "Numerical Simulation of DOC+DPF+SCR Systems: DOC Influence on SCR Performance," SAE2008-01-0867, 2008.
- 7) A. Guethenke, P. Lanzerath, A. Massner and U. Gaertner, "Thermal Aging of Catalyst in Combined Aftertreatment Systems," SAE2009-01-0623, 2009.
- 8) S. Bremm, M. Pfeifer, S. Kurze and M. Paule, "Bluetec Emission Control System for the US Tier2 Bin5 Legislation," SAE2008-01-1184, 2008.
- 9) C. Enderle, G. Vent and M. Paule, "BLUETEC Diesel Technology-Clean, Efficient and Powerful," SAE2008-01-1182, 2008.