

## 소형디젤엔진용 E-EGR 밸브의 개발 및 차량적용에 관한 실험적 연구

송창훈\* · 정용일\*\* · 차경옥\*\*\*

\*명지대학교 대학원, \*\*한국기계연구원, \*\*\*명지대학교 기계공학과

### An Experimental Study on the Development & Application of E-EGR Valve for Light Duty Diesel Vehicle

Chang-Hoon Song\*, Youngil Jeong\*\* and Kyung-Ok Cha\*\*\*

\*Myongji University Graduate School

\*\*Korea Institute of Machinery & Materials

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Myongji University

#### 요 약

본 연구에서는 유니크에서 개발된 E-EGR 밸브의 특성을 분석하였으며, 차량적용의 가능성을 평가하였다. 메르세데스 벤츠에서 개발된 배기량 0.8리터급 소형디젤 승용차인 Smart car가 본 실험에 사용되었다. 실험용 차량은 전자식 EGR 밸브가 장착된 3기통의 터보 과급식 차량이다. 테스트벤치에서 EGR 밸브의 성능을 비교 및 분석한 후 차대동력계상에서 EGR map과 CVS-75 시험결과를 통하여 전자식 EGR 밸브의 차량적용 가능성을 여부를 수행하였다.

**Abstract** — In this study the characteristics of E-EGR valve developed by Unick were analyzed and the feasibility of application to vehicles were evaluated. Smart car (3 l/100 km) and engine which is small-displacement size, 0.8-liter, of diesel passenger car developed from Mercedes-Benz were used for this experiment. It was installed a 3-cylinder turbo-charged light duty diesel engine with an electronic EGR valve. After the analysis and comparison of E-EGR valve performance under test benches, the estimation of vehicle application was executed through the EGR map and CVS-75 test result measured on the chassis dynamometer.

#### 1. 서 론

최근에 온실효과의 주요원인으로 지목되고 있는 이산화탄소의 배출량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 연비 저감기술과 점차 엄격해져 가는 배기가스규제 대응기술을 중심으로 디젤차량에 관한 연구가 활발하게 진행 중이다.

디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 연소효율이 좋은 것은 대부분의 운전조건에서 공기과잉으로 인하여 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC)는 상대적으로 적게 배출되는 장점이 있지만, 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 입자상물질(PM)이 많이 배출되는 단점을 가지고 있다.

디젤자동차의 유해배출가스저감에 대응할 수 있는 기술은 크게 고압 연료 시스템 등의 연료분사계, TCI 등의 흡기계 및 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 등을 적

용한 엔진기술과 촉매나 필터 등의 후처리 기술로 크게 대별된다<sup>[1]</sup>.

특히 질소산화물을 저감시키기 위해서 EGR시스템이 가솔린엔진 및 소형디젤 엔진에 적용되고 있으며, 더욱이 대형 디젤엔진에도 적용을 시도하고 있다<sup>[2]</sup>.

EGR 기법으로 NO<sub>x</sub>를 저감하는 원리는 화염온도 저하와 산소농도저감에 의한 영향으로 설명되어지고 있다. 즉, 공기중의 N<sub>2</sub>를 배기가스 중 불활성 가스인 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 치환하였을 경우 기체의 열용량이 증대되고 이로 인하여 연소화염의 온도를 저감시키므로 NO가 저하된다는 열적효과(thermal effect)와 흡기에 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 혼입됨으로서 O<sub>2</sub> 농도가 감소되고 이로 인하여 NO가 저감되는 희석효과(dilution effect)가 있다<sup>[3]</sup>. 예혼합 연소방식인 가솔린엔진은 EGR 가스가 공기-연료혼합기와 균일하게 혼합되기 때문에 연소화염을 효율적으로 냉각시

키지만, 디젤엔진의 경우는 연료혼합기가 공간적으로 매우 불균일하기 때문에 EGR 가스가 연소화염을 냉각시키는 데에는 공간적으로 한계가 있다. 따라서 디젤엔진의 EGR 효과는 산소농도를 저감시킴으로서 NO<sub>x</sub>를 줄인다는 희석효과가 주된 이론으로 제시되고 있다.<sup>(4)(5)(6)(7)</sup>

가솔린 엔진과 달리 디젤엔진에서 EGR 시스템은 흡기관에 스톱 밸브가 없어 흡배기관의 압력차가 크지 않기 때문에 EGR 유량조절에 어려움이 있으며 TCI 엔진의 경우 배기관의 압력보다 흡기관의 압력이 높기 때문에 EGR 유로를 특별히 설계하여야 하는 문제점이 있다.

EGR 시스템을 기관에 적용하기 위해서는 배기관과 흡기관을 연결하고 여기에 EGR 밸브를 설치하여 EGR 가스의 유량조절이 가능하도록 하여야 한다<sup>(8)</sup>. 지금까지의 EGR 밸브는 기계식 방식이 사용되어져 왔지만 배기 규제가 점차 엄격해 지면서 보다 신속하고 정밀한 제어를 위하여 전자식 모터나 솔레노이드 밸브를 사용하는 E-EGR 밸브의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

본 연구의 목적은 전자식 EGR 밸브의 개발과 관련하여 터보 과급식 소형 디젤엔진에 장착하여 E-EGR 밸브의 특성을 분석하고 차량적용시 배출가스의 특성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 시험차량에 장착되어 있는 E-EGR 밸브를 분석하고, (주)유니크에서 개발한 E-EGR 밸브를 시험차량에 설치하여 엔진성능 및 엔진배

출물의 차이를 비교 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2-1. EGR 밸브 특성실험

본 연구를 수행하면서 개발된 전자제어식 솔레노이드 EGR 밸브의 입력 신호에 따른 적정유량을 제어하는 작동특성 및 초기성능을 시험 평가하기 위한 종합성능평가장치를 제작하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 자동차엔진의 흡배기장치를 묘사한 공기유동장치를 제작하여 EGR 밸브의 유량특성을 실험하는데 사용하였다. EGR 밸브를 듀티(duty)비로 제어시키면서 EGR 밸브 통과 전후의 유량측정 및 그 특성을 분석하였고, 압력차를 50 mmHg에서 400 mmHg까지 변화시켜가면서 유량 특성을 측정하였다.

Fig. 2는 유니크에서 개발한 전자식 EGR 밸브로 위치센서부, 액추에이터부, 밸브로드부로 구성되어 있으며, ECU의 위치센서 신호를 feed back 시켜 EGR 밸브의 작동여부를 판정하고 EGR양을 보정하고 있다. 센서부의 중요부품인 ceramic resistor는 고온 내열성이 강한 재질이며, 액추에이터부는 응답성, 자력 및 고온내구성이 우수한 소재를 선정하여 개발되었다<sup>(8)</sup>.

또한 Smart car에 설치되어 있던 base E-EGR 밸브와 유니크에서 개발한 시제품 E-EGR 밸브의 특성을 비교하고자 마그네틱포스와 스트로크 관계, 차압에 따른 유량 및 응답성을 알아보았다.

### 2-2. 차량적용시험

실험에 사용되어진 차량은 독일 벤츠사에서 개발한 3리터카인 소형디젤경승용차로 행정체적 799 cc, turbo-charger 및 intercooler의 과급식 엔진으로 E-EGR 밸브가 장착된 차량이다. 엔진의 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

엔진작동에 따른 EGR율을 확인하기 위해서 사시 동력계(미국 Clayton사)에 차량을 설치한 후 차속을 10 km/

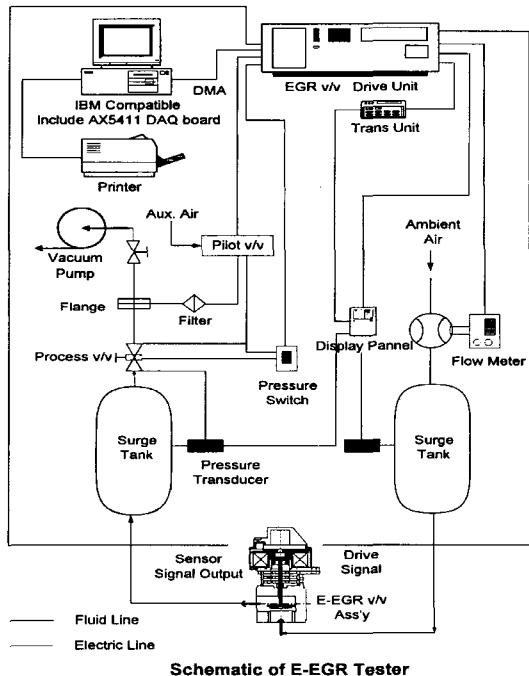


Fig. 1. Schematic diagram of E-EGR valve tester.

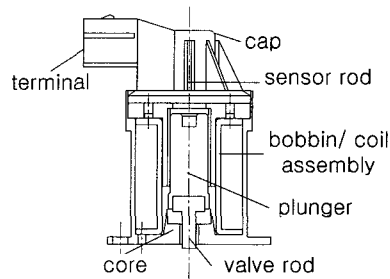


Fig. 2. Cross-section view of developed EGR valve

Table 1. Specification of test engine.

Model	MCC smart cdi
Type	In-line, 3-cylinder
Fuel Injection	Common rail
direct injection	Aspiration
TCI	
Bore × Stroke	65.5×79 mm
Compression ratio	18.5 : 1
Total displacement	799 cc
Max. power	30 kW at 4200 rpm
Max. torque	100 N · m at 1800~2800 rpm

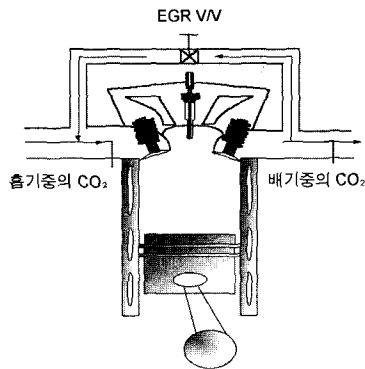


Fig. 3. Schematic diagram of CO<sub>2</sub> measurement port.

h부터 100 km/h까지 10 km/h씩 변화시키고 변속기를 1단부터 6단까지 변속시키면서 실험을 수행하였다.

EGR율의 정의는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하여 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$EGR\ rate\ [\%] = \frac{\text{흡기중 } CO_2\ \text{농도} - \text{대기중 } CO_2\ \text{농도}}{\text{배기중 } CO_2\ \text{농도} - \text{대기중 } CO_2\ \text{농도}} \times 100 \quad (1)$$

Base 밸브와 시제품밸브를 차량에 장착하였을 경우 차

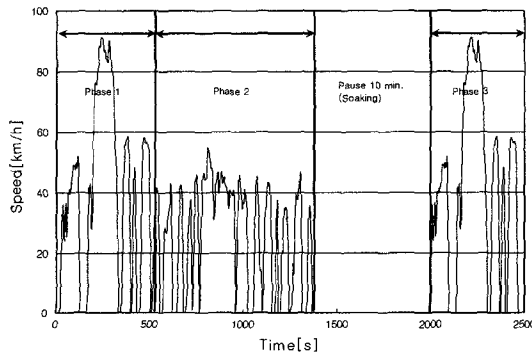


Fig. 4. CVS-75 mode schedule.



Fig. 5. View of CVS-75 mode test.

량의 동적인 특성에 따라서 EGR 밸브의 작동성이 원활한가를 평가하고 두 가지 밸브의 차량 적용시에 연비 및 배출가스 특성을 알아보고자 차대동력계상에서 CVS-75 모드로 실험을 수행하였다. CVS-75 모드시험방법은 주행모드 full cycle을 1회 주행 후 시험차량을 12~36시간 정차(soaking)시킨 후 차대 동력계에서 Fig. 4의 주행모드를 추적하여 차량을 운전하고 주행 속도별 실시간으로 배기가스의 데이터를 획득하였다. Fig. 5는 CVS-75모드 시험장면을 나타내고 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. EGR 밸브 특성실험

본 연구를 수행하면서 전자식 솔레노이드 밸브의 유량특성은 여러 가지 밸브설계 인자에 의해서 달라짐을 알 수 있었다. 이러한 특성을 고려하여 솔레노이드 부품의 단품별로 파라미터를 결정하였으며 실험을 통하여 base 밸브와 시제품 밸브를 비교 검증하였다.

Base 밸브와 시제품 밸브의 유량차이를 duty비의 상승(forward)이나 하강(backward)에 따라 각각 실험하여 Fig. 6~8에 나타내었다.

일반적으로 고속소형디젤기관 및 가솔린기관의 경우 흡·배기관의 압력차가 200 mmHg내외에서 형성되어지고, 최대 EGR율을 고려하더라도 Fig. 6~8에서 보여주는 유량특성은 엔진에서도 충분하게 EGR을 공급할 수 있는 유량이라고 판단된다. 하지만 밸브의 기본적인 사양이 동일하지 않으므로 약간의 duty비의 조정은 필요하였다. 또한 결과들에서 알 수 있듯이 duty 비 수(%) 내에서 유량을 조정하여야 하기 때문에 밸브의 응답성 또한 그에 상응할 수 있도록 설계하여야 함을 알 수 있었다.

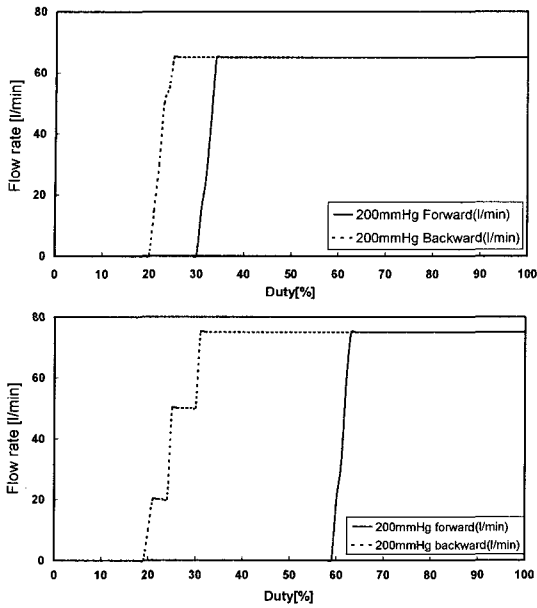


Fig. 6. Flow rate of EGR v/v at 200 mmHg (a) base EGR v/v (b) developed EGR v/v.

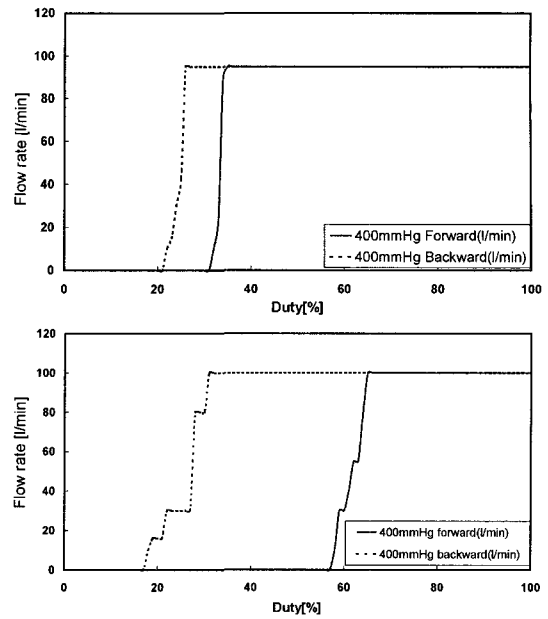


Fig. 8. Flow rate of EGR v/v at 400 mmHg (a) base EGR v/v (b) developed EGR v/v.

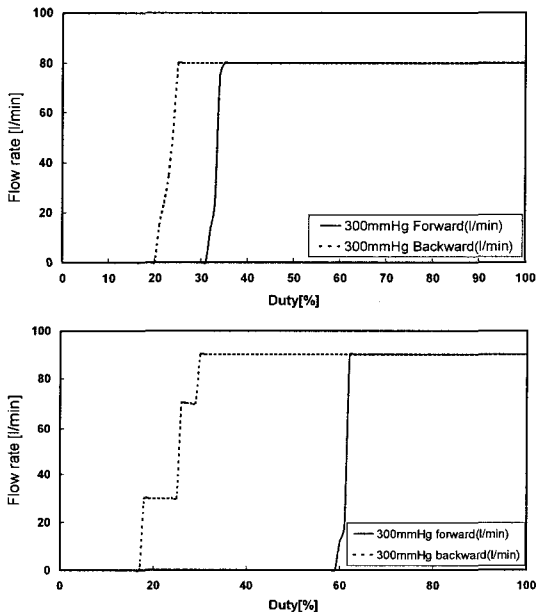


Fig. 7. Flow rate of EGR v/v at 300 mmHg (a) base EGR v/v (b) developed EGR v/v.

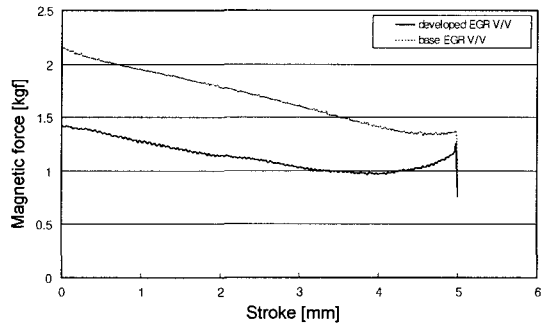


Fig. 9. Magnetic force of E-EGR valve.

부가 접촉되어 자력이 상승하나 이후 스트로크가 감소하면서 자력이 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 시제품의 자력이 작게 나타나는데 이것은 플런저의 사양 및 coil turn 수 변화 등으로 조정이 가능한 부분이다.

Fig. 10은 시제품 밸브의 응답성을 나타낸 것으로 ON시에 57 ms, OFF시에 46 ms의 응답속도를 보이며 이는 base 밸브의 ON시 56 ms, OFF시 50 ms와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으며 기계식 EGR 밸브와 비교하면 상당히 우수한 성능을 나타낸다. 57 ms는 엔진속도 4000 rpm에서 크랭크샤프트 약 3.8회전에 해당하는 응답속도로서 4행정기관의 경우 1회전당 흡입, 압축, 팽창, 배기의 4사이클이 반복되므로 향후 가능하면

Fig. 9는 E-EGR 밸브의 액추에이터 구동용 솔레노이드에 전원을 인가하였을 때의 자력특성을 나타낸 것이다. 밸브가 완전 개방되는 5mm에서 플런저 끝과 core

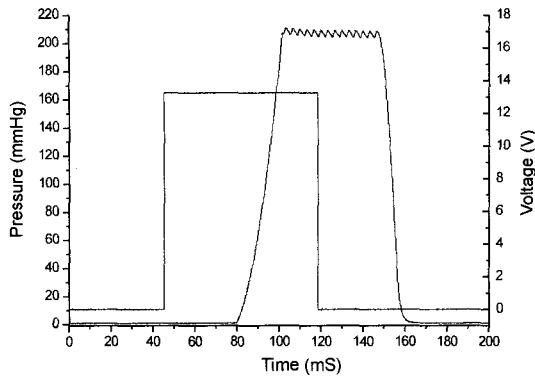


Fig. 10. Response time of developed valve.

더욱 빠르게 향상시킬 필요성은 있다고 판단된다.

3-2. EGR map

Fig. 11은 base E-EGR 밸브의 EGR map을 보이고 있다. 차대 동력계상에서 측정하였기 때문에 엔진 전 운전영역을 포함하지는 못하였지만 EGR 특성을 파악하는데에는 충분하다고 판단된다. 저속 저부하 영역에서 EGR 율이 60% 이상으로 최대이며 속도와 부하가 커질수록 EGR 율이 감소하고 4000 rpm과 중부하 이상에서는 EGR 공급이 중단되는 특성을 나타내고 있다.

확산연소 방식인 디젤엔진은 공연비가 아주 높은 저속 저부하에서는 EGR 율이 커도 엔진연소가 원활하며 이는 예혼합방식의 가솔린엔진과는 큰 차이를 보이는 특성이다. 반면 고속 고부하 영역에서는 매연과 PM 발생이 많아 EGR 율을 높이지 못하며, 또한 터보차저 특성상 흡기관 압력이 배기관보다 높아져 이 작동 영역에서는 EGR 율을 확보하는 것이 용이하지 않기 때문이다.

시제품의 E-EGR 밸브를 장착하여 차량의 ECU로부터 동일한 EGR 밸브 제어신호를 사용하였을 때의 EGR map을 Fig. 12에서 나타내었다. 저속 저부하 영역에서는 base 밸브보다 낮은 EGR 율을 보이지만 중속, 중부

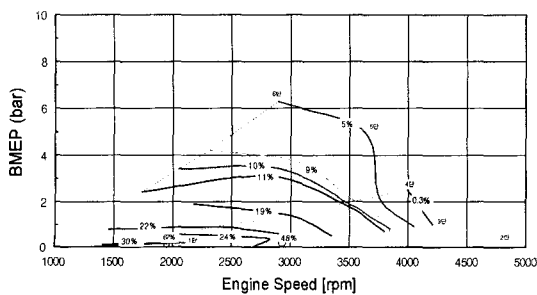


Fig. 11. EGR map of base E-EGR valve.

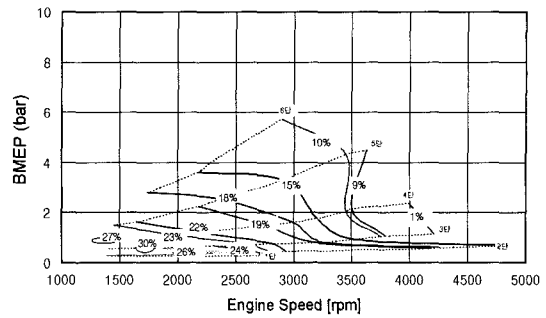


Fig. 12. EGR map of developed E-EGR valve.

하에서는 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있었다. 최대 EGR 율이 38%까지 나타났지만 base 밸브에 비해서는 낮게 나타났다. 그러나 50 km/h 이상의 중고속 영역에서는 도리어 EGR 율이 높게 공급되는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 유량실험의 결과에서도 볼 수 있듯이 base 밸브와 시제품의 E-EGR 밸브 사이의 유량 응답특성이라고 생각된다.

3-3. CVS-75 mode test

EGR 밸브가 엔진의 정속운전 뿐만 아니라 동적인 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 CVS-75 모드 운전시의 배출가스를 연속측정하였다. CVS-75 mode 중 phase 1과 phase 2의 일부를 포함하여 600초까지의 시험결과를 시간에 대하여 시험 차속도와, CO, HC, NO<sub>x</sub> 농도로 Fig. 13에 표시하였다. 배출가스의 농도는 회색된 값으로서 절대 농도는 아니나 회색조건이 동일하기 때문에 두 밸브 사용시의 상대적인 농도비교는 가능한 값이다.

NO<sub>x</sub>의 경우 CVS-75 모드에서 가장 가혹한 운전조건인 두 번째 가속구간인 약 200초에서 다량으로 배출되나, base 밸브에 비해 시제품 밸브 사용시 현저하게 줄어든다. 이것은 EGR map에서도 설명하였듯이 E-EGR 밸브의 응답특성이 거의 유사한 것을 고려하면, 개발된 시제품이 ECU의 동일한 제어신호에 대한 EGR 율이 중고속에서 높기 때문인 것으로 사료된다.

HC와 CO의 경우 시동 초기단계에서 다량 배출되는 것을 알 수 있으며 개발된 시제품이 base 밸브보다 피크값은 크게 나타나지만 전체적으로는 큰 차이가 없는 것으로 보여진다.

Table 2는 CVS-75 모드에 의한 배출가스 측정결과이다. EGR map과 CVS-75 모드 과정에서 예측할 수 있었듯이 개발된 시제품이 base 밸브에 비해 NO<sub>x</sub>는 약 20% 정도가 적게 배출되었으나 PM은 40%가 증가하였다. 또한 연비는 13% 악화되었으며 CO<sub>2</sub>도 15% 증가하였다.

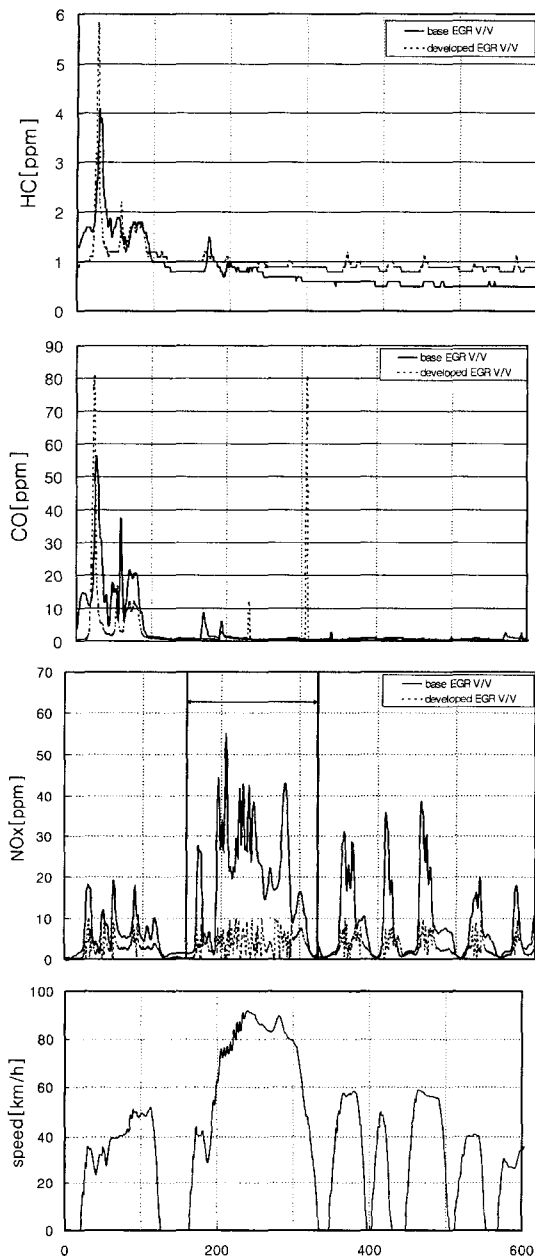


Fig. 13. Performance of E-EGR valve at cvs-75 mode.

Table 2. Results of CVS-75mode.

	NO <sub>x</sub> [g/km]	HC [g/km]	CO [g/km]	CO <sub>2</sub> [g/km]	PM [g/km]	FE [km/l]
base	0.567	0.006	0.033	85.196	0.036	31.634
developed	0.444	0.002	0.015	97.751	0.051	27.497

본 연구는 소형고속디젤엔진용 전자식 EGR 밸브를 개발하여 차량에 적용이 가능한지를 확인하기 위한 목적으로 시험차량에 이미 매칭되어 있는 base 밸브의 특성과 유사하게 설계한 시제품을 장착하고 ECU의 제어 신호를 그대로 사용하였기 때문에 시제품 밸브가 시험엔진에 정확하게 매칭된 상태는 아니라고 판단된다.

#### 4. 결 론

고속소형디젤엔진에서 시제품 밸브의 작동이 원활함을 확인하였으며, 실제 엔진 적용을 위해서는 엔진 특성에 맞게 ECU 제어값을 매칭하여야 한다.

본 연구를 통하여 시제품 EGR 밸브의 기본특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

(1) 시제품 E-EGR 밸브는 Smart car에 장착된 base E-EGR 밸브에 비해 유량특성과 밸브 응답속도는 거의 유사한 특성을 갖고 있다.

(2) 디젤엔진의 EGR율은 저속 저부하에서 가장 높으며, 이는 가솔린 엔진과 큰 차이가 나타나는 특성임을 알 수 있었다.

(3) 시제품 밸브의 EGR 율은 저속저부하에서는 base 밸브보다 낮게 나타났지만 중속중부하 영역에서는 더 높게 나타났다.

(4) CVS-75 시험결과 시제품 E-EGR 밸브에서 NO<sub>x</sub>는 20% 정도가 저감되었으나 PM은 40% 증가하였으며, 연비와 CO<sub>2</sub>도 15% 정도 악화되었다. 이는 시험차량에 이미 매칭되어 있는 ECU의 EGR 밸브제어 신호를 그대로 사용하였기 때문에 시제품 밸브가 시험차량에 최적으로 매칭된 상태가 아니므로, 향후 시제품 밸브의 특성에 맞게 매칭하면 배출가스 특성은 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Baert, R.S.G., Beckman, D.E. and Veen, A.: "Efficient EGR Technology for Future HD Diesel Engine Emission Targets", SAE paper 1999-01-0837 (1999).
2. Zelenka, P., Aufinger, H., Reczek, W. and Cartellieri, W.: "Cooled EGR-A Key Technology for Future Efficient HD Diesels", SAE paper 980190 (1998).
3. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M. and Zhao, H.: "The Effects of Carbon Dioxide in EGR on Diesel Engine Emissions", IMechE paper NO. C517/028/96 (1996).
4. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M., Zho, H. and Hu, Z.: "The Dilution, Chemical and Thermal Effects

- of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 1", SAE paper 961165 (1996).
5. Ropke, S.: "NO<sub>x</sub> Formation in Diesel Engines for Various Fuels and Intake Gases", SAE paper 950213 (1995).
  6. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M., Zho, H. and Hu, Z.: "The Dilution, Chemical and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 2", SAE paper 961167 (1996).
  7. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M., Zho, H. and Hu, Z.: "The Dilution, Chemical and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 4", SAE paper 971660 (1997).
  8. 이현우 외: "전자제어식 솔레노이드 EGR밸브 개발", 환경부 연차보고서 (2000).