

차량용 소형디젤엔진의 배기 재순환용 전자식 밸브 특성과 적용에 관한 연구

송 창 훈* · 정 용 일** · 차 경 옥***

A Study on the Characteristics and Application of E-EGR Valve for Light Duty Automotive Diesel Engine

C-H Song* · Y-I Jeong** · K-O Cha***

Key words : EGR(배기 재순환), E-EGR Valve(전자식 EGR밸브), NOx(질소 산화물), Diesel Engine(디젤 엔진), CVS-75 mode (CVS-75 모드)

Abstract

In this study the characteristics of E-EGR valve developed by electrical method were analysed and the feasibility of application to vehicles was evaluated. The engine of smart cdi applied for diesel passenger car of small-displacement size developed by common vehicle was used for this experiment. It was installed a 3-cylinder, 0.8l, turbo-charged light duty diesel engine with an electronic EGR valve. After the analysis and comparison of E-EGR valve performance by test bench, the estimation of vehicle application was executed through the EGR map and CVS-75 test result measured on the chassis dynamometer.

1. 서 론

최근 디젤엔진에서 배출되는 연소가스중 환경 오염방지 측면에서 질소산화물(NOx)과 입자상 물질(particulate matter)을 저감시키고, 지구온난화 방지측면에서 이산화탄소(CO₂)를 저감시키려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁾

또한, 디젤엔진은 높은 열효율로 인하여 CO₂의

배출이 작아서 향후 CO₂규제에 대비할 수 있는 엔진으로 자리를 잡아가고 있다.^(1,2) 그렇지만 디젤엔진의 연소방식은 고온 희박연소로서 다량의 NOx가 생성되고, 확산연소방식으로 매연의 배출이 많은 단점을 가지고 있다. 이러한 질소산화물을저감하기 위한 EGR (Exhaust Gas Recirculation)시스템이 가솔린엔진 및 소형 디젤엔진에 적용되고 있으며, 또한 대형 디젤엔진에의 적용이 시도되고

* 명지대학교 대학원 기계공학과
** 한국기계연구원
*** 명지대학교 기계공학과

있다.⁽³⁾

EGR 기법으로 NO_x를 저감하는 원리는 화염온도 저하와 산소농도 저감 등에 의한 영향으로 설명되어지고 있다. 즉, 공기중의 N₂를 배출가스중 불활성 가스인 CO₂와 H₂O로 대체할 경우 흡기의 열용량이 증대되고 이로 인하여 연소화염의 온도가 저감되므로 NO가 저감된다는 열적효과(thermal effect) 및 흡기에 CO₂와 H₂O가 혼입됨으로서 O₂ 농도가 감소되고 이로 인하여 NO가 저감되는 희석효과(dilution effect)가 있다.⁽⁴⁾ 예혼합 연소방식인 가솔린엔진은 재순환 배기가 공기-연료 혼합기와 균일하게 혼합되기 때문에 연소화염을 효율적으로 냉각시키지만, 디젤엔진의 경우는 연료혼합기가 공간적으로 매우 불균일하기 때문에 재순환 배기가 연소화염을 냉각시키는 데에는 공간적으로 한계가 있다. 따라서 디젤엔진의 EGR 효과는 산소농도를 저감시킴으로써 NO_x를 줄인다는 희석효과가 주된 이론으로 제시되고 있다.^(5,6,7)

EGR 시스템을 엔진에 적용하기 위해서는 배기관과 흡기관을 연결하고 여기에 EGR 밸브를 설치하여 배기 재순환 유량조절이 가능하도록 하여야 한다.⁽⁸⁾ 지금까지의 EGR 밸브는 기계식 방식이 사용되어져 왔지만, 배기 규제가 점차 엄격해지면서 보다 신속하고 정밀한 제어를 위하여 전자식 모터나 솔레노이드 밸브를 사용하는 E-EGR 밸브의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

본 연구의 목적은 전자식으로 개발한 E-EGR 밸브를 터보과급식 소형 디젤엔진에 장착하여 E-EGR 밸브의 특성을 분석하고 차량의 적용가능성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 시험차량에 장착되어 있는 E-EGR 밸브를 분석하고, 개발된 E-EGR 밸브를 시험차량에 설치하여 엔진성능 및 배출물의 차이를 비교하고 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

실험차량은 3리터(3 L / 100 km)자동차로 개발된 상용의 소형 디젤경승용차로서 행정체적 799 cc, 과급기 및 중간냉각기가 부착된 엔진으로 E-

Table. 1 Specifications of test engine

Model	MCC smart cdi
Type	In-line, 3-cylinder
Fuel Injection	Common rail direct injection
Aspiration	TCI
Bore × Stroke	65.5 mm × 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

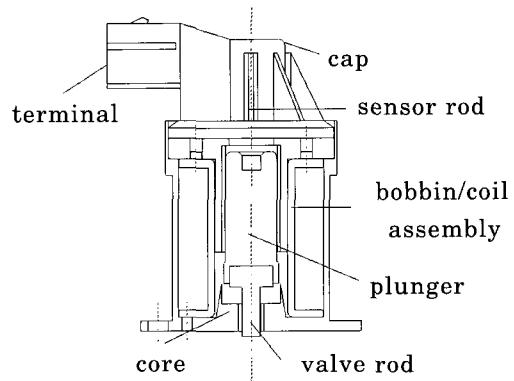


Fig. 1 Cross-section view of developed EGR valve

EGR 밸브가 장착된 차량이다. 엔진의 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 전자식 EGR 밸브로서 위치센서부, 액추에이터부, 밸브로드부로 구성되어 있으며, ECU의 신호를 피드백시켜 EGR 밸브의 작동여부를 판정하고 EGR 양을 보정하고 있다. 센서부의 중요부품인 세라믹 저항체는 고온 내열성이 강한 재질이며, 액추에이터부는 응답성, 자력 및 고온내구성이 우수한 소재를 선정하여 개발되었다.⁽⁹⁾

2.2 실험 방법

실험차량에 설치되어 있던 원래 E-EGR 밸브와 개발된 시제품 E-EGR 밸브의 특성을 비교하고자 마그네틱포스, 스트로크 관계, 차압에 따른 유량 및 응답성을 알아보았다. EGR율을 듀티(duty)비로 제어할 수 있는 구동장치를 제작하여 사용하였

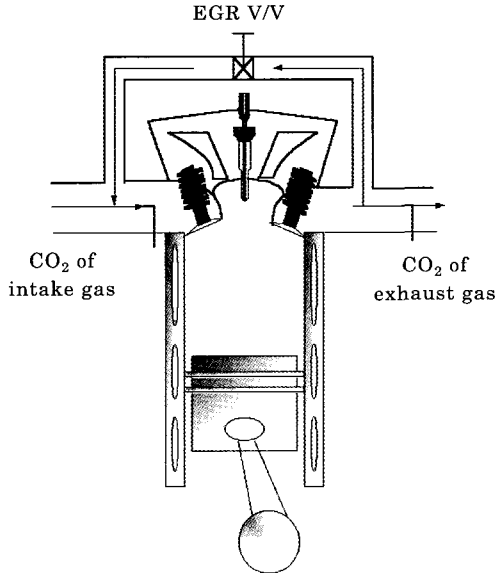


Fig. 2 Illustration used to explain the definition of EGR rate

고 차압센서를 이용하여 압력차를 측정하였다.

엔진작동에 따른 EGR율을 확인하기 위해서 차량용 새시 동력계(미국 Clayton사)에 차량을 설치한 후 차속을 10 km/h 단위로 100 km/h까지 변화시키고, 변속기를 1단부터 6단까지 변속시키면서 실험을 하였다.

EGR율은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 CO₂농도를 측정하여 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\text{EGR rate}[\%] = \frac{\text{흡기중 CO}_2 \text{ 농도} - \text{대기중 CO}_2 \text{ 농도}}{\text{배기중 CO}_2 \text{ 농도} - \text{대기중 CO}_2 \text{ 농도}} \times 100 \quad (1)$$

EGR 밸브의 종합적인 특성을 분석하기 위하여 CVS-75 모드 테스트를 수행하였으며 시험차량을 12~36시간 정차시킨 후 새시 동력계에서 Fig. 3의 주행모드로 차량을 운전하고 주행 속도별 실시간으로 배출가스의 데이터를 획득하였다. Photo. 1은 CVS-75 모드 시험 장면이다.

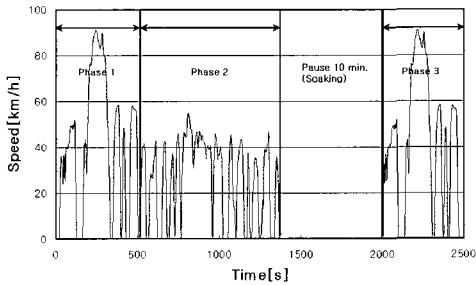


Fig. 3 CVS-75 mode schedule

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1 EGR밸브 특성실험

Fig. 4는 E-EGR 밸브의 액추에이터 구동용 솔레노이드에 전원을 인가하였을 때의 자력특성을 나타낸 것이다. 밸브가 완전 개방되는 5mm에서 플런저 끝과 코어부가 접촉되어 자력이 상승하고, 이후 스트로크의 감소에 따라 자력이 점점 증가하



Photo. 1 Scene of CVS-75 mode test

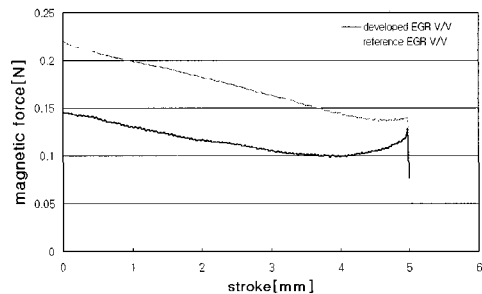


Fig. 4 Magnetic force of E-EGR valve

는 것을 볼 수 있다. 전반적인 실험결과의 비교를 통하여 시제품의 자력이 작게 나타나는데, 이것은 플런저의 사양, 코일 감김수 변화 등으로 조정이 가능하다.

Fig. 5는 기본 밸브와 시제품 EGR 밸브의 차압에 따른 유량특성을 보여준 것이다. 기본 밸브와 시제품에 대한 $\Delta P \sim Q$ 특성의 선형성에 있어서 약간 차이가 있지만, 듀티값의 조정으로 유량성능을 일치시킬 수 있었다.

Fig. 6은 시제품 밸브의 응답성을 나타낸 것으로 ON시에 57 ms, OFF시에 46 ms의 응답속도를 보이며 이는 기본 밸브의 ON시 56 ms, OFF시 50 ms와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 57 ms는 엔진속도 4000 rpm에서 3.8회전에 해당하는 응답속도로서 기계식에 비하면 월등하게 우수하지만, 가능하면 빠른 응답속도로 향상시킬 필요가 있다.

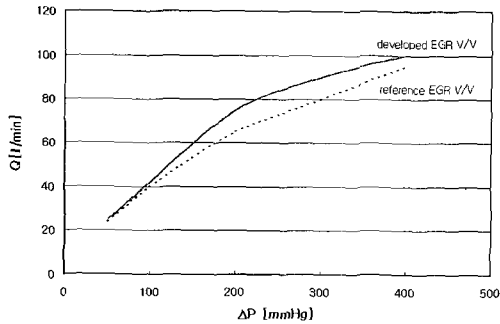


Fig. 5 Flow rate of EGR valve

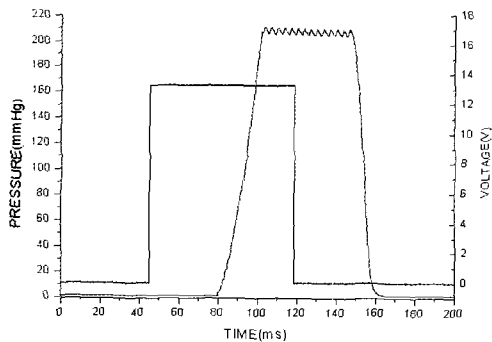


Fig. 6 Response time of the developed valve

3.2 차량적용시험

3.2.1 EGR 도표

Fig. 7에는 기본 E-EGR 밸브에 대한 기관 회전속도와 BMEP(Brake mean effective pressure)의 관계를 EGR 도표로 나타낸 것이다. 새시 동력계에서 측정하였기 때문에 엔진 전운전 영역을 포함하지는 못하였지만 EGR 특성을 파악하는 데에는 충분하였다. 저속·저부하 영역에서 EGR율이 60% 이상으로 최대를 나타내고 있으며, 속도와 부하가 커질수록 EGR율이 감소하고 4000 rpm과 중부하 이상에서는 EGR 공급이 중단되는 특성을 나타내고 있다.

확산연소 방식인 디젤엔진은 공연비가 아주 높은 저속·저부하에서는 EGR율이 커져도 연소가 원활하다. 이것이 예혼합방식의 가솔린엔진과 큰

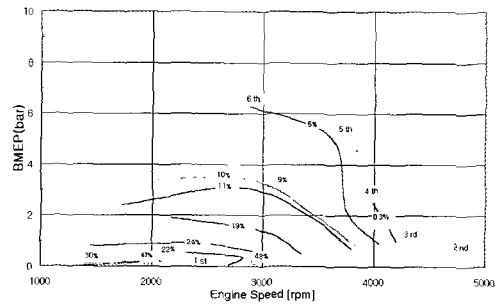


Fig. 7 EGR map of reference E-EGR valve

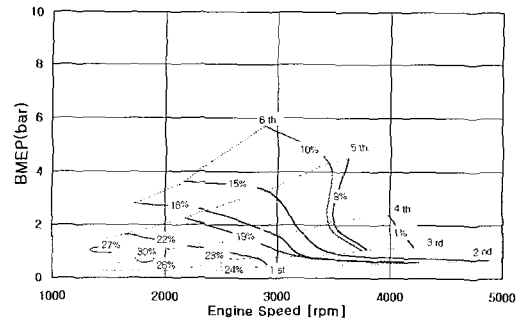


Fig. 8 EGR map of developed E-EGR valve

차이를 보이는 특성이다. 반면 고속·고부하 영역에서는 PM 발생이 많아 EGR율을 높이지 못하며, 또한 과급기의 특성상 흡기관 압력이 배기관보다 높아져 이 작동 영역에서는 EGR 유량을 확보하는 것이 용이하지 않았다.

Fig. 8은 시제품의 E-EGR 밸브를 장착하여 차량의 ECU로부터 동일한 EGR 밸브 제어신호를 사용하였을 때의 EGR 도표를 나타낸 것이다. 저속·저부하 영역에서는 기본 밸브보다 낮은 EGR율을 보이지만, 중속·중부하에서는 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있었다. 최대 EGR율이 38%까지 나타났지만, 기본 밸브에 비해 낮게 나타났다. 그러나 50km/h 이상의 중고속 영역에서는 EGR율이 높게 공급되는 것을 알 수 있었다.

3.2.2 CVS-75 모드 테스트

EGR 밸브가 엔진의 정속운전 뿐만 아니라, 동적인 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 CVS-75 모드 운전시의 배출가스를 측정하였다. Fig. 9에는 CVS-75 모드 중 phase 1과 phase 2의 일부를 포함하여 600초까지의 시간에 대해 시험차 속도, CO, HC, NOx의 시험결과를 표시하였다. 배출가스의 농도는 희석된 값으로서 절대 농도는 아니지만, 희석조건이 동일하기 때문에 두 밸브 사용시의 상대적인 농도비교는 가능한 값이다.

NOx의 경우 CVS-75 모드에서 가장 가혹한 운전조건인 두 번째 가속구간 약 200초에서 다량으로 배출되나, 기본 밸브에 비해 시제품 밸브 사용시 현저하게 줄어든다. 이것은 EGR 도표에서도 설명하였듯이 E-EGR 밸브의 응답특성이 거의 유사하다는 것을 고려하면, 개발된 시제품이 ECU의 동일한 제어신호에 대한 EGR율이 중·고속에서 높기 때문인 것으로 사료된다.

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

Table 2는 CVS-75 모드에 의한 배출가스 측정 결과이다. EGR 도표와 CVS-75 모드 과정에서 예측할 수 있었던 개발된 시제품이 기본 밸브에 비해 NOx는 약 20% 정도가 적게 배출되었으나 PM

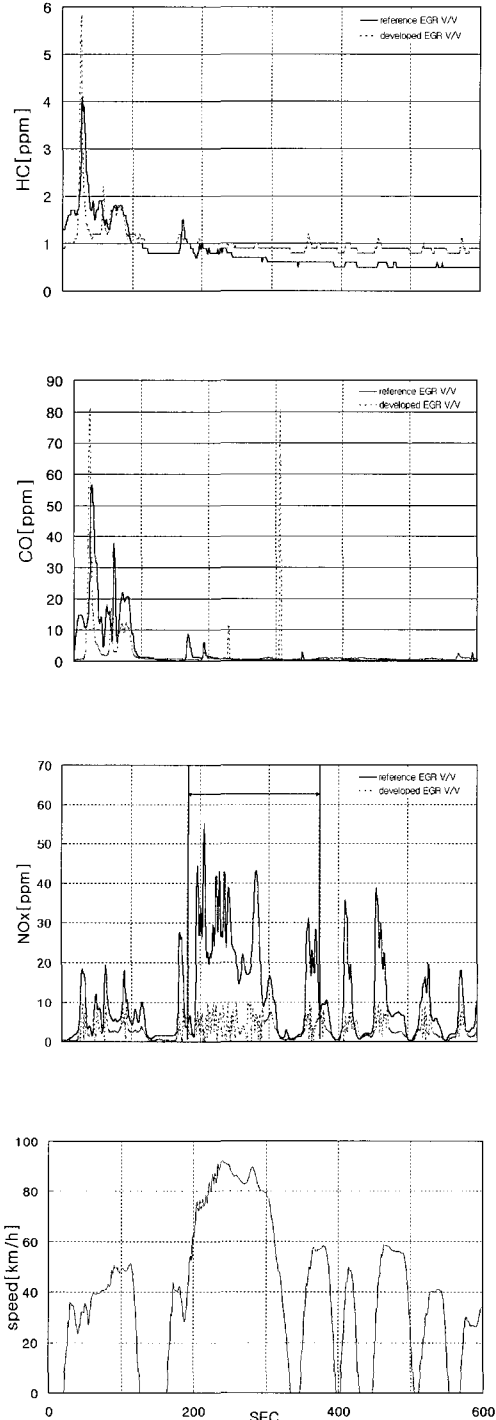


Fig. 9 Performance of E-EGR valve at CVS-75 mode

Table. 2 Results of CVS-75mode

	NOx [g/km]	HC [g/km]	CO [g/km]	CO ₂ [g/km]	PM [g/km]	Fuel Economy [km/l]
reference	0.56	0.006	0.0068	5.196	0.0363	1.634
developed	0.444	0.002	0.0159	7.751	0.0512	7.49

은 40%가 증가하였다. 또한 연비는 13% 악화되었으며 CO₂도 15% 증가하였다.

본 연구는 소형 고속 디젤엔진용 전자식 EGR 밸브를 개발하여 차량에 적용이 가능한지를 확인하기 위한 목적으로 시험차량에 이미 매칭되어 있는 기본밸브의 특성과 유사하게 설계한 시제품을 장착하고, ECU의 제어신호를 그대로 사용하였기 때문에, 시제품 밸브가 시험엔진에 정확하게 매칭된 상태는 아니라고 판단된다.

결 론

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

(1) 소형 고속 디젤엔진에서 시제품 밸브의 작동이 원활함을 확인하였으며, 실제엔진 적용을 위해서는 엔진특성에 맞게 ECU 제어값을 매칭하여야 한다.

(2) 시제품 E-EGR 밸브는 실험차량에 장착된 기본 E-EGR 밸브에 비해 유량특성과 밸브 응답속도는 거의 유사한 특성을 갖고 있다.

(3) 디젤엔진은 저속·저부하에서 EGR율을 높일 수 있는데, 이는 가솔린 엔진과 큰 차이가 나타나는 특성임을 알 수 있었다.

(4) 시제품 밸브의 EGR율은 저속·저부하에서는 기본 밸브보다 낮게 나타났지만 중속·중부하 영역에서는 더 높게 나타났다.

(5) CVS-75 시험결과 시제품 E-EGR 밸브에서 NOx는 20% 정도가 저감되었으나 PM은 40% 증

가하였으며, 연비와 CO₂도 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.

참 고 문 헌

- (1) P. Zelenka, H. Aufinger, W. Reczek and W. Cartellieri, "Cooled EGR-A Key Technology for Future Efficient HD Diesels," SAE paper 980190, 1998.
- (2) R. S. G. Baert, D.E. Beckman and A. Veen, "Efficient EGR Technology for Future HD Diesel Engine Emission Targets," SAE paper 1999-01-0837, 1999.
- (3) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim and H. Zhao, "The Effects of Carbon Dioxide in EGR on Diesel Engine Emissions," IMechE paper NO. C517/028/96, 1996.
- (4) S. Ropke, "NOx Formation in Diesel Engines for Various Fuels and Intake Gases," SAE paper 950213, 1995.
- (5) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zho, Z. Hu, "The Dilution, Chemical and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 2," SAE paper 961167, 1996.
- (6) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zho, Z. Hu, "The Dilution, Chemical and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 3," SAE paper 971659, 1997.
- (7) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zho, Z. Hu, "The Dilution, Chemical and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 4," SAE paper 971660, 1997.
- (8) J. A. Leet, A. Matheaus and D. Dickey, "EGR System Integration on a Pump Line-Nozzle Engine," SAE paper 980181, 1998.
- (9) 이현우 외, "전자제어식 솔레노이드 EGR밸브 개발", 환경부 연차보고서, 2000.

저 자 소 개



송창훈(宋昌勳)

1974년 9월 28일생. 2000년 명지대학교 기계공학과 졸업. 2002년 명지대학교 대학원 기계공학과 졸업.



정용일(鄭龍驄)

1977년 서울대학교 공업교육과(자동차전공) 졸업. 1985년 한국과학기술원 기계공학과 석사 졸업. 1993년 매국 텃거스 뉴저지주립대 박사. 현 환경부 자동차공해대책분과위원. 현 (사)한국천연가스차량협회 회장. 현 한국기계연구원 책임연구원.



차경옥(車京玉)

1945년 1월 4일생. 1972년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1977년 단국대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1984년 동대학원(박사). 1986년 일본 도요다대학원 연구원. 1998. 1~1999. 12 대학기계학회 사업이사 및 총무이사. 2001. 11~현재 한국자동차학회 부회장. 현 명지대학교 기계공학과 교수.