

## 소형디젤엔진의 배기가스 재순환용 전자식 밸브의 특성해석 및 차량적용 평가

송창훈\*, 이진욱\*\*, 정용일\*\*, 양갑진\*\*\*, 이창훈\*\*\*, 이현우\*\*\*, 차경옥\*\*\*\*

### Evaluation of E-EGR Valve for Light Duty Diesel Vehicle

Chang-Hoon Song\*, Jinwook Lee\*\*, Youngil Jeong\*\*, Kab-Jin Yang\*\*\*,  
Chang-Hoon Lee\*\*\*, Hyun-Woo Lee\*\*\* and Kyung-Ok Cha\*\*\*\*

**Key Words:** EGR(배기가스재순환), E-EGR Valve(전자식 EGR밸브), NO<sub>x</sub>(질소산화물), Diesel Engine(경유엔진), CVS-75 mode

#### 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(3L/100km, cdi version) 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

최근의 디젤엔진에 관한 연구는 연소가스의 배출물중에서 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 입자상 물질(particulate matter)을 저감시

키려는 환경적인 측면과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 저감시키려는 지구온난화 방지 측면에서 활발하게 연구되어지고 있다<sup>[1]</sup>.

디젤엔진은 높은 열효율 및 낮은 연료소비율로 인하여 CO<sub>2</sub>의 배출이 적은 이점을 가지므로, 향후 CO<sub>2</sub>규제에 대비할 수 있는 기관으로 자리잡고 있다<sup>[1,2]</sup>. 하지만 디젤기관의 연소방식은 고온 희박연소로써 다량의 NO<sub>x</sub>가 생성되고 확산연소방식으로 매연의 배출이 많은 약점을 가지고 있다. 특히 질소산화물을

\*명지대학교 대학원 기계공학과

\*\*한국기계연구원

\*\*\* (주)유니크 기술연구소

\*\*\*\*명지대학교 기계공학과

저감시키기 위해서 EGR(Exhaust Gas Recirculation)시스템이 가솔린엔진 및 소형디젤 엔진에 적용되고 있으며 대형 디젤엔진에도 적용이 시도되고 있다.

EGR기법이 NOx를 저감하는 원리에 대해서는 화염온도 저하와 산소농도저감에 의한 영향으로 설명되어지고 있다. 즉, 공기중의 N<sub>2</sub>를 배기가스중의 불활성가스인 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. 가솔린엔진은 EGR 가스가 연료혼합기와 균일하게 혼합되기 때문에 연소화염을 효율적으로 냉각키지만, 디젤엔진의 경우는 연료혼합기가 공간적으로 매우 불균일하기 때문에 EGR 가스가 연소화염을 냉각시키는데에는 공간적으로 한계가 있으며 따라서 디젤엔진의 EGR 효과는 산소농도를 저감시킴으로서 NOx를 줄인다는 희석효과가 주된 이론으로 제시되고 있다<sup>[3,4,5]</sup>.

EGR시스템을 기관에 적용하기 위해서는 배기관과 흡기관을 연결하고 여기에 EGR밸브를 설치하여 배기가스재순환 유량조절이 가능하도록 하여야 한다<sup>[6]</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 (주)유니크에서 개발한 E-EGR밸브를 터보과급식 소형 디젤엔진에 장착하여 E-EGR 밸브의 특성을 분석하고 차량적용 가능성을 파악하는데

에 있다. 이를 위하여 시험차량에 장착되어 있는 E-EGR밸브를 분석하고 유니크에서 개발한 E-EGR밸브를 설치하여 엔진성능 및 엔진배출물의 차이를 비교 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

#### 2.1.1 실험차량

실험차량은 독일 벤츠사에서 개발한 3리터카인 소형디젤경승용차인 Smart cdi 모델로 행정체적 799cc, turbocharger 및 intercooler의 과급식 엔진으로 E-EGR 밸브가 장착된 차량이다. 엔진의 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

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× 79mm
Compression ratio	18.5 : 1
Total displacement	799cc
Max. power	30kW at 4200rpm
Max. torque	100 N· m at 1800-2800rpm

#### 2.1.2 시제품 E-EGR밸브

Fig. 1은 유니크에서 개발한 전자식 EGR밸브로 위치센서부, 액추에이터부, 밸브로드부로 구성되어 있으며, ECU의 신호를 feed back 시켜 EGR 밸브의 작동 여부를 판정하고 EGR양을 보정하고 있다. 센서부의 중요부품인 ceramic resistor는 고온 내열성이 강한 재질이며, 액추에이터부는 응답성, 자력 및 고온내구성이 우수한 소재를 선정하였다<sup>[7]</sup>.

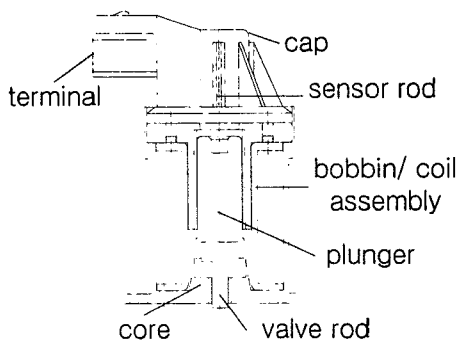


Fig. 1 Cross-section view of developed EGR valve

## 2.2. 실험 방법

### 2.2.1 EGR밸브 특성실험

Smart car에 원래 설치되어 있던 E-EGR 밸브와 유니크에서 개발한 E-EGR 밸브의 특성을 비교하고자 마그네틱포스와 스트로크 관계, 차압에 따른 유량 및 응답특성을 살펴보았다. 이를 위해 EGR율을 듀티(duty)비로 제어할 수 있는 drive unit을 제작하여 사용하였고, 차압센서를 이용하여 압력차를 측정하였다.

### 2.2.2 차량적용 시험방법

엔진작동에 따른 EGR율을 확인하기 위해서 샤시 동력계(미국 Clayton사) 상에 차량을 설치한 후 차속을 10km/h 단위로 100km/h까지 변화시키고 변속기를 1단부터 6단까지 변속시키면서 실험을 수행하였다.

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

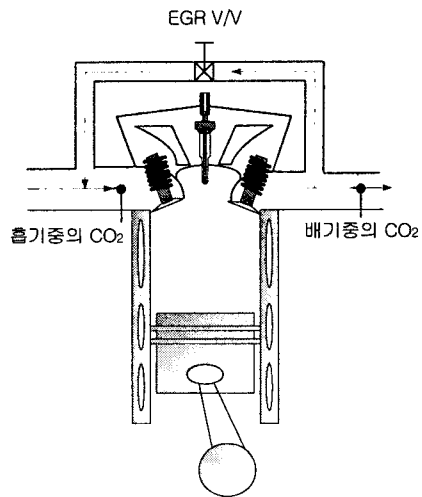


Fig. 2 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> measurement port

EGR rate[%]=

$$\frac{\text{흡기중CO}_2\text{농도} - \text{대기중CO}_2\text{농도}}{\text{배기중CO}_2\text{농도} - \text{대기중CO}_2\text{농도}} \times 100$$

.....(1)

EGR 밸브의 종합적인 특성을 분석하기 위하여 CVS-75 모드시험을 수행하였으며, 시험차량을 12~36시간 soaking 시킨 후 차대 동력계에서 Table 2의 주행 모드로 차량을 운전하고 주행 속도별 실시간으로 배기가스의 데이터를 획득하였다. Fig. 3은 CVS-75 모드시험 장면이다.

Table 2 CVS-75 mode schedule

단	계	시간(초)	거 리	비 고
저온시동시험 초기 단계		505	5.78Km	저온시동
저온시동시험 안정 단계		865	6.26Km	
주 차		9-10분		
고온시동시험 초기 단계		505	5.78Km	고온시동
계		42분	17.84Km	

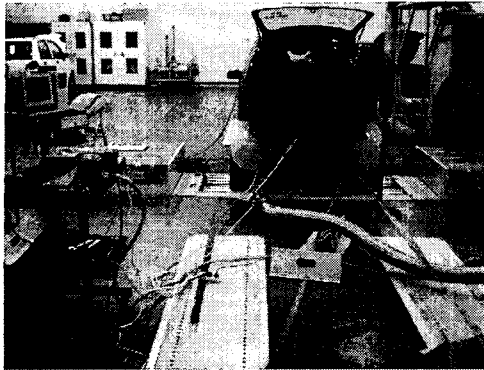


Fig. 3 View of CVS-75 mode test

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. EGR밸브 특성실험

Fig. 4는 E-EGR밸브의 액추에이터 구동용 솔레노이드에 전원을 인가하였을 때의 자력특성을 나타낸다. 밸브가 완전 개방되는 5mm에서 플런저 끝과 core부가 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 가능하다.

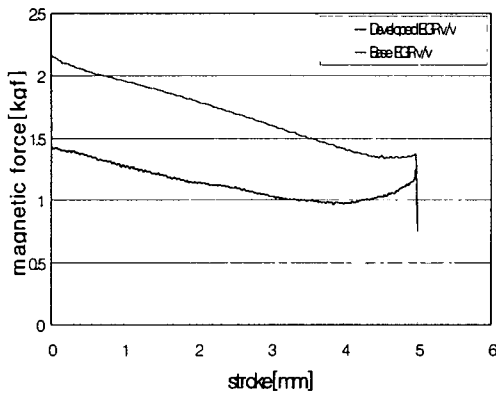


Fig. 4 Magnetic force of E-EGR valve

Fig. 5는 base밸브와 시제품 EGR밸브

의 차압에 따른 유량특성을 보여준다. base제품에 비해 시제품의 직선도가 약간은 떨어지지만 듀티값의 조정으로 유량성능을 일치시킬 수 있다.

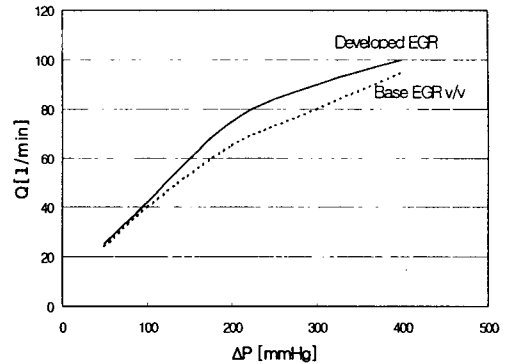


Fig. 5 Flow rate of EGR valve

Fig. 6은 시제품 밸브의 응답성을 나타낸 것으로 ON시에 57ms OFF시에 46ms의 응답속도를 보이며 이는 base제품의 ON시 56ms, OFF시 50ms에 비해 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 57ms는 엔진속도 4000rpm에서 1.2회전에 해당하는 응답속도로서 기계식에 비하면 월등하게 우수하나 가능하면 빠른 응답속도로 향상시킬 필요가 있다.

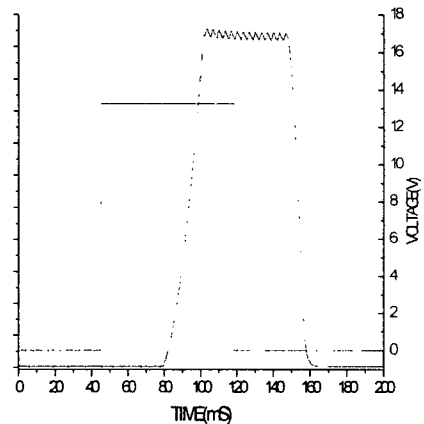


Fig. 6 Response time of developed valve

### 3.2 차량적용시험

#### 3.2.1 EGR map

Fig. 7은 base E-EGR 밸브에 의한 EGR map을 보이고 있다. 차대 동력계상에서 측정하였기 때문에 엔진 전운전영역을 포함하지는 못하였지만 EGR특성을 파악하는 데에는 충분하다. 저속 저부하 영역에서 EGR율이 60%이상으로 최대이며 속도와 부하가 커질수록 EGR 율이 감소하고 4000rpm과 중부하 이상에서는 EGR 공급이 중단되는 특성을 나타내고 있다.

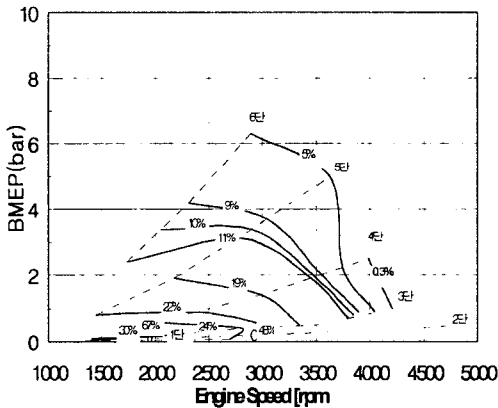


Fig. 7 EGR map of base E-EGR valve

확산연소 방식인 디젤엔진은 공연비가 아주 높은 저속 저부하에서는 EGR율이 커도 엔진연소가 원활하며 이는 예혼합 방식의 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 유량을 확보하는 것이 용이하지 않다.

Fig. 8은 각 변속단의 운전 속도별로 EGR율을 나타낸 것이다. 2단 20km/h에서 EGR율이 67%로 가장 높으며 속도가

증가할 수로 줄어든다. 앞의 EGR map에서 알 수 있듯이 2단부터 변속 단수가 커지고 차속이 증가할 수록 EGR 율이 줄어든다.

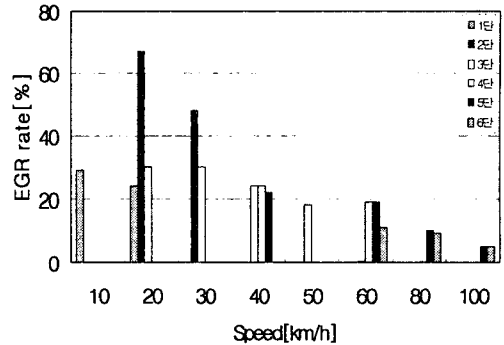


Fig. 8 EGR rate of base EGR valve at driving conditions

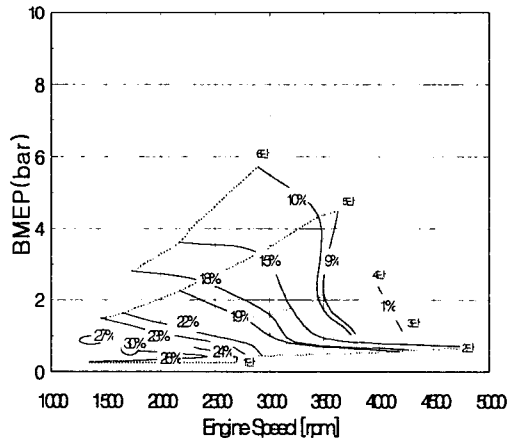


Fig. 9 EGR map of developed E-EGR valve

시제품의 E-EGR 밸브를 장착하여 차량의 ECU로부터 동일한 EGR 제어신호를 사용하였을 때의 EGR map을 Fig. 9에서 나타내었다. 저속 저부하 영역에서는 base 밸브보다 낮은 EGR 율을 보이지만 중속, 중부하에서는 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있었다.

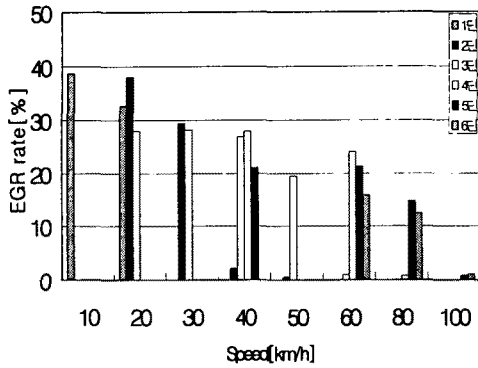


Fig. 10 EGR rate of developed EGR valve at driving conditions

Fig. 8과 같이 각 변속단의 운전 속도 별로 EGR율을 Fig. 10에 나타내었다. 1단과 2단 20km/h이 비슷하게 38% EGR율로 가장 높으나 Smart 밸브에 비해서는 낮다. 그러나 50km/h 이상의 중고속 영역에서는 도리어 EGR 율이 높게 공급되는 것을 알 수 있다.

### 3.2.2 CVS-75mode test

EGR 밸브가 엔진의 정속운전뿐만 아니라 동적성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 CVS-75 모드 운전시의 배출가스를 연속 측정하였다. CVS-75 mode 중 phase1과 phase2의 일부를 포함하여 600초까지의 시험결과를 시간에 대하여 시험차속과, CO, HC, NOx로 Fig. 11에 표시하였다. 배출가스의 농도는 희석된 값으로서 절대 농도는 아니나 희석조건이 동일하기 때문에 두 밸브 사용시의 상대적인 농도비교는 가능한 값이다.

NOx의 경우 CVS-75에서 가장 가혹한 운전조건인 두 번째 가속구간 약200초에서 다량으로 배출되나, base밸브에 비해 시제품밸브 사용시 현저하게 줄어든다. 이것은 EGR map에서도 설명하였듯이 E-EGR밸브의 응답특성이 거의 유사한

것을 고려하면, 개발된 시제품이 ECU의 동일한 제어신호에 대한 EGR 율이 중고속에서 높기 때문인 것으로 사려된다.

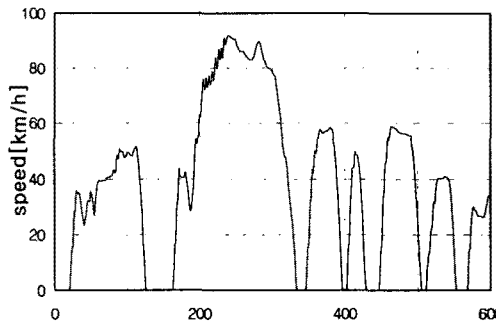
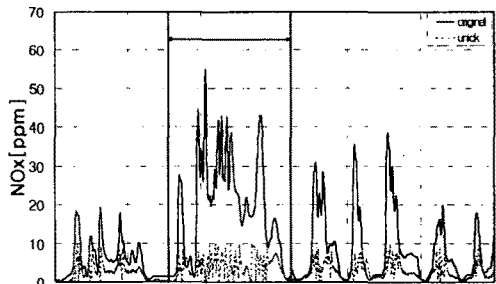
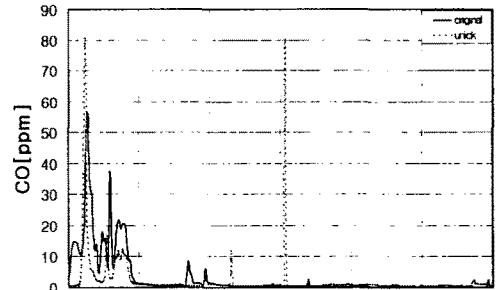
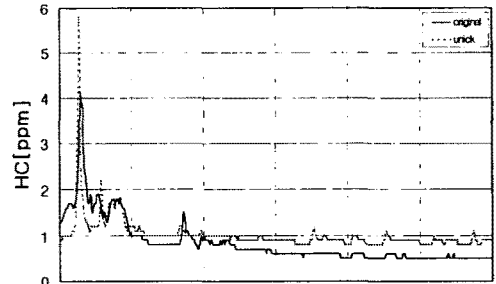


Fig. 11 Performance of E-EGR valve at cvs-75 mode

HC와 CO의 경우 시동 초기단계에서 다량 배출되는 것을 알 수 있으며 시제품이 base밸브보다 피크값은 크게 나타났지만 전체적으로는 큰 차이가 없는 것으로 보여진다.

Table 3은 cvs-75 모드에 의한 배출가스 측정결과이다. EGR map과 CVS-75 모드 과정에서 예측할 수 있었듯이 시제품이 base밸브에 비해 NOx는 약 20% 적게 배출되었으나 PM은 40% 증가하였다. 또한 연비는 13% 나빠지고 CO<sub>2</sub>도 15% 증가하였다.

본 연구는 소형고속디젤엔진용 전자식 EGR밸브를 개발하여 차량에 적용이 가능한지를 확인하기 위한 목적으로 시험차량에 이미 매칭되어 있는 base밸브의 특성과 유사하게 설계한 시제품을 장착하고 ECU의 제어 신호를 그대로 사용하였기 때문에 시제품 밸브가 시험엔진에 정확하게 매칭된 상태는 아니다.

Table 3 Results of cvs-75mode

	NOx	HC	CO	CO <sub>2</sub>	PM	FE (km/l)
original	0.567	0.006	0.033	85.196	0.036	31.634
unick	0.444	0.002	0.015	97.751	0.051	27.497

#### 4. 결론

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

본 연구를 통하여 시제품 EGR밸브의 기본 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

(1) 시제품 E-EGR밸브는 Smart car에

장착된 EGR밸브에 비해 유량특성과 밸브 응답속도는 거의 유사한 특성을 갖고 있다.

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

(3) 시제품 밸브의 EGR 율은 저속저부하에서는 base밸브에 비해 낮으나, 중속 중부하 영역에서는 더 높게 나타났다.

(4) CVS-75 시험결과 시제품 E-EGR밸브에서 NOx는 20% 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 시험엔진에 최적으로 매칭된 상태가 아니므로, 향후 시제품 밸브의 특성에 맞게 매칭하면, 배출가스 특성은 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 자동차 부품연구원 G-7차세대 자동차 기술개발사업(저공해기술과제) 및 한국과학재단 지원 KAIST 연소기술센터 ERC 과제의 일환으로써 한국기계연구원과 (주)유니크 기술연구소가 공동으로 수행한 연구결과의 일부이다.

#### 참고문헌

- [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, "NO<sub>x</sub> Formation in Diesel Engines for Various Fuels and Intake Gases", SAE paper 950213, 1995.
- [5] N. Ladommatos, "The Dilution, Chemical and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Emission-Parts 4", SAE paper 971660, 1997.
- [6] J. A. Leet, A. Matheaus and D. Dickey, "EGR System Integration on a Pump Line-Nozzle Engine", SAE paper 980181, 1998.
- [7] 이현우 외, "전자제어식 솔레노이드 EGR밸브 개발", 환경부 연차보고서, 2000.