

디젤엔진용 전자식 EGR 밸브의 성능 특성

진영욱^{1*}, 정진은¹

Performance Characteristics of an Electronically Controlled EGR Valve for Diesel Engines

Young-Wook Chin^{1*} and Jin-Eun Chung¹

요 약 최근 디젤 차량의 NOx와 PM의 동시 저감을 위해 EGR 밸브와 EGR 쿨러로 구성된 modulated EGR 시스템이 디젤엔진에 장착되고 있다. 본 연구에서는 modulated EGR 시스템의 성능 평가를 위한 test bench를 설계, 제작한 후 2.0 L 디젤엔진용 전자식 EGR 밸브를 시험하였다. 또한 전자식 EGR 밸브의 성능을 밸브양정의 거동, 밸브 개폐시의 응답성, 밸브 통과 유량을 통하여 평가하였다. PWM 신호의 듀티율에 따른 밸브 양정의 거동은 비선형적이었으며, 밸브 개방과 폐쇄의 경로가 상이한 히스테리시스 현상을 나타냈다. 밸브 개방시 응답성은 통상의 기준을 만족하여 적절하였다. 끝으로 밸브 통과 유량은 듀티율 40~60%에서 듀티율과 밸브 전후의 차압에 의해 결정되나, 듀티율 60%이상에서는 차압에만 의존하였다.

Abstract Lately, the modulated EGR system that includes EGR valve and EGR cooler is being installed in diesel engines for the purpose of the simultaneous reduction of NOx and PM. In this study, we designed and constructed a test bench for the performance evaluation of the modulated EGR system, and tested an electronically controlled EGR valve for 2.0 L diesel engines. The performance of the EGR valve was evaluated in terms of the valve lift behavior, the valve opening/closing response, and the mass flow rate through the valve. The valve lift with respect to the duty ratio of PWM signal was non-linear, and followed a different path for valve opening and closing, that is, hysteresis. The valve opening response was concluded satisfactory falling within the usual standard response time. For the duty ratio of 40 to 60%, the mass flow rate through the valve was observed to depend on the pressure difference across the valve as well as the duty ratio, while it solely depended on the pressure difference for the duty ratio above 60%.

Key words : Modulated EGR, EGR Valve, Performance Characteristics

1. 서 론

최근 자동차에 대한 연구는 연비, 환경 및 안전의 세 가지 관점에서 진행되고 있다. 1980년대 후반부터 전 세계적으로 환경에 관한 관심이 높아지면서 대기오염에 대한 개선 방안이 범세계적으로 논의되고 연구되었으며, 대기오염의 주범 중 하나인 자동차의 배기가스에 대한 규제가 미국과 유럽을 비롯한 세계 각국에서 본격적으로 실시되었다. 그에 따른 해결책으로 대두된 것이 친환경 엔진을 지향하는 다양한 배기가스 저감 기술 중 NOx를 효과적으로 제어할 수 있는 배기가스재순환(EGR) 장치이다.

강화된 배기가스 규제에 대응하기 위하여 가능한 한 EGR 제어 속도가 빨라야 하며 이를 위하여 종래의 기계식 밸브 대신에 솔레노이드 방식의 전자식 EGR 밸브가 사용되어야 한다.^[1] 또한 더욱 엄격해진 배기가스 규제에 대응하기 위하여 EGR 쿨러(Cooler)가 장착된 modulated EGR 시스템의 필요성이 대두하고 있다.[2] 연비와 PM(Particulate Matter) 증가 없이 NOx를 저감시키는 방법으로 기존의 EGR 밸브에 엔진 냉각수를 이용한 EGR 쿨러를 설치함으로써 비교적 적은 투자로 큰 NOx 저감 효과를 얻을 수 있다. 이러한 관점에서 연비와 환경을 동시에 만족시키기 위하여 modulated EGR과 가변 압축이 가능한 VGT(Variable Geometry Turbine)이 장착된 소형 디젤 엔진에 대한 관심이 고조되고 있다.^{[3][4]} 본 연구에서는 modulated EGR 시스템의 성능 평가 장

¹ 한국기술교육대학교 기계정보공학부
*교신저자: 진영욱(youngjin@kut.ac.kr)

치를 구축하여 소형 디젤 엔진용 전자식 EGR 밸브의 성능 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. Modulated EGR 시스템의 성능 실험장치

[그림 1]은 본 연구를 위해 설계, 제작한 modulated EGR 성능 평가를 위한 실험 장치의 구성도이다. 일차적으로 modulated EGR 시스템에 공기를 공급하는 송풍기와 공급 공기의 유동 안정성 확보를 위한 100L의 서지 탱크로 구성된다. 이와 더불어 EGR 클러의 성능 평가를 위해 공급 공기의 가열과 냉각을 담당하는 전기 히터와 냉각수 폐회로가 추가된다. 냉각수 폐회로에서 EGR 클러로 공급되는 냉각수는 미리 설정된 온도로 일정하게 유지되어야 한다. 이를 위하여 30L의 냉각수 탱크에 3kW의 히터를 설치하여 필요에 따라 가열하고, 냉각수의 냉각이 필요할 때에는 냉각 팬을 이용하여 온도를 낮추도록 하였다. 냉각수의 온도는 EGR 클러의 입구에 설치되어 있는 온도센서를 기준으로 온도 제어가 설정 온도와 비교하여 가열과 냉각 동작을 제어하도록 하였다. [표 1]은 각 구성요소의 상세 제원을 나타낸다.

(duty ratio)에 의해 밸브 개도가 조절되는데, 여기서 듀티율은 주기에 대한 펄스 신호 ON 기간의 비율이다. 또한 밸브 개폐시 밸브의 응답성을 파악하기 위하여 센서 LVDT(Linear Velocity Displacement Transducer)를 설치하여 밸브의 움직임을 측정하였다.

표 1. 구성요소의 제원

Components	Type	Specifications
Air Circuit	Flow Meter	M100 Coriolis Type, 0.050 kg/s
	Surge Tank	Cylinder 100 liter
	Blower	Ring 6.1 m ³ /min, 5300 mmAq
	Heater	Flange 8 kW, Dia 8"
	EGR Cooler	Pipe Length 135mm, Dia. 53.5 mm
	EGR Valve	Electric 0.03 kg/s, Max. lift 5mm
Water	Pump	Centrifugal 20 L/min, Head 3m
	Flow meter	Magnetic 33 L/min
	Heater	Flange 3 kW
	Cooler	Tube 1 hp x 3

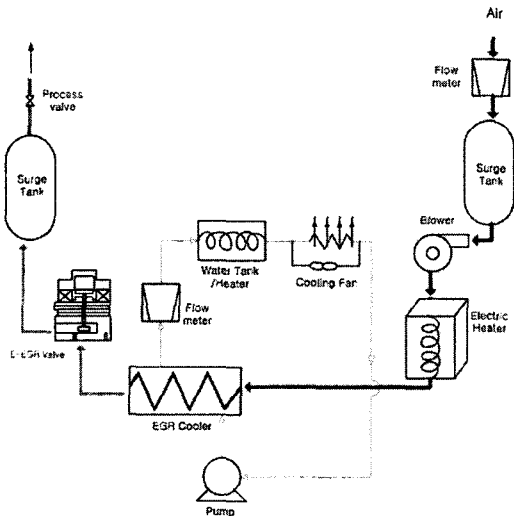


그림 1. Modulated EGR 시스템 실험 장치

[그림 2]는 본 연구에 사용된 전자식 EGR 밸브와 이의 구동 장치이다. 전자식 EGR 밸브는 직경 23.0mm, 최대 양정 5.0mm이며, 구동장치에서 발생하는 신호는 PWM (Pulse Width Modulation) 방식으로 주파수 140Hz, 작동 전압 13.5V이다. 이 방식에 의한 밸브 구동은 솔레노이드에 보내지는 일정 주파수의 펄스 신호의 듀티율

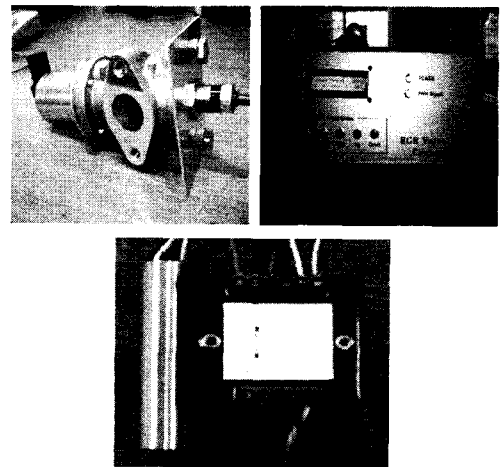


그림 2. 전자식 EGR 밸브, 구동 장치, LVDT

3. 결과 및 고찰

전자식 EGR 밸브의 성능 특성을 듀티율에 따른 밸브 양정, 밸브 개폐시의 응답성, 듀티율에 따른 밸브 통과 유량을 통하여 살펴보았다.

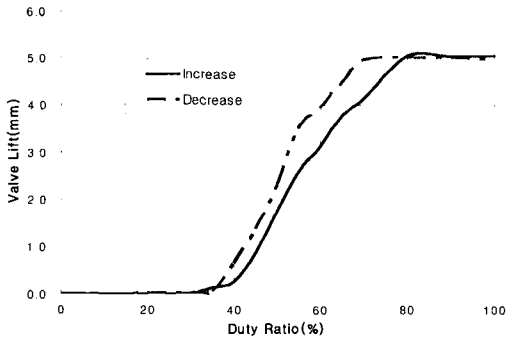


그림 3. 전자식 EGR 밸브의 밸브 양정

[그림 3]은 듀티율에 따른 밸브 양정을 나타낸다. 전자식 EGR 밸브는 듀티율 30%미만에서는 거의 작동하지 않으며 듀티율 30~40%에서는 0.1 mm 미만의 미세한 움직임을 보인다. 반면 듀티율 40%부근에서 밸브의 급격한 열림이 나타나면서 듀티율 60%까지 듀티율과 밸브양정은 선형적 관계를 보인다. 이후 듀티율 60~80%에서 기울기가 약간 완만해지다가 듀티율 80%이상에서는 밸브가 전개됨을 볼 수 있다. 또한 듀티율을 증가시키는 경우와 감소시키는 경우를 비교할 때 동일 듀티율에서 밸브 양정이 차이를 보이고 있어 히스테리시스 현상이 나타남을 알 수 있다. 이를 극복하기 위해 추가적으로 밸브 개도 센서(valve lift sensor)를 장착하여 EGR 밸브 개도를 보다 정밀하게 제어하려는 경향이 나타나고 있다.

전자식 EGR 밸브는 기계식 EGR 밸브의 느린 응답성에 대한 해결 방안으로 도입되었으며 보다 신속한 제어를 위해 흡기 부압 라인을 없애고 솔레노이드 밸브를 사용한다. [그림 4]는 전자식 EGR 밸브의 개방과 밀폐시 응답성을 보여준다. 개방과 밀폐시의 응답성은 서로 다르며 개방시 응답시간은 지연기간 16.3ms를 포함하여 66.0ms이나 밀폐시 응답시간은 지연기간 8.0ms를 포함하여 41.7ms이다. 즉,

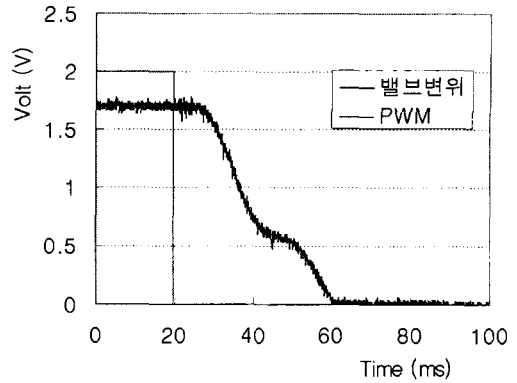
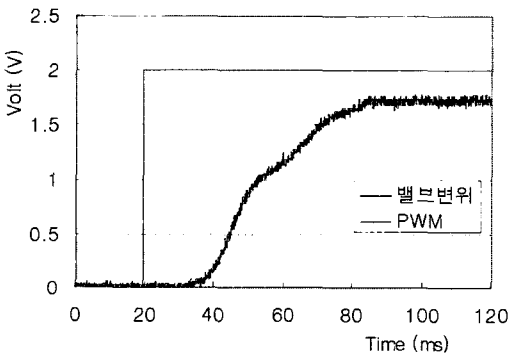


그림 4. 전자식 EGR 밸브의 밸브 양정

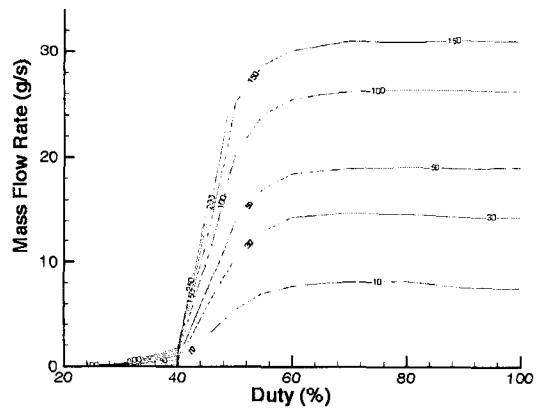


그림 5. EGR 밸브 통과 유량
(밸브전후 차압 : 10, 30, 50, 100, 150 mmHg)

전자 제어식 EGR 밸브의 응답성은 개방시 90 ms 이하로 규정하고 있으므로 현 EGR 밸브는 적절한 응답성을 가지고 있다 하겠다.

[그림 5]는 듀티율과 밸브 전후의 차압에 따른 밸브 통과 유량을 나타낸다. 듀티율 60%이하에서는 유량이 듀티율과 차압에 의존하나 듀티율 60%이상에서는 밸브 전후의 차압에만 의존하여 결정됨을 알 수 있다. 듀티율과 차압이 통과 유량에 미치는 영향을 분리하기 위하여 오리피스 를 지나는 압축성 유체의 질량 유량을 나타내는 다음 식을 이용하여 밸브 유효 면적 A_{eff} 를 구하였다.^[4]

$$A_{eff} = \frac{\dot{m}}{\sqrt{\frac{p_e^2}{RT_e} \frac{2n}{n-1} \left[\left(\frac{p_i}{p_e} \right)^{2/n} - \left(\frac{p_i}{p_e} \right)^{(n+1)/n} \right]}} \quad (1)$$

여기서 p 는 압력, T 는 온도이고 첨자 i 는 밸브 입구, 첨자 e 는 밸브 출구, n 은 공기 비열비로서 1.4이다. 실험

에서 얻어진 질량 유량, 밸브 전후의 압력, 온도를 이용하면 식(1)로부터 A_{eff} 를 산출할 수 있으며 이를 밸브의 최대 유로면적 $A_{max}=366 \text{ mm}^2$ 으로 무차원하여 [그림 6]에 나타내었다. 듀티율 40~60%에서 무차원 유효 면적은 적지 않은 폭의 변동을 보이는데 이는 공기 유동 즉 레이놀즈수가 질량 유량에 영향을 미치고 있음을 의미한다.

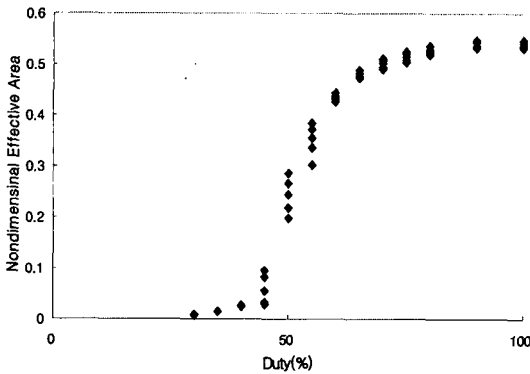


그림 6. 무차원 유효면적

4. 요약 및 결론

전자식 EGR 밸브의 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 전자식 EGR 밸브의 성능을 듀티율에 따른 밸브 양정, 밸브 개폐시의 응답성, 듀티율에 따른 밸브 통과 유량을 통하여 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PWM 신호의 듀티율에 따른 밸브 양정의 거동은 비선형적이었으며, 밸브 개방과 폐쇄의 경로가 상이한 히스테리시스 현상을 나타냈다. 히스테리시스를 해결하고 보다 정밀한 밸브 양정이 요구되는 향후의 EGR 유량제어를 위해서는 밸브 개도 센서의 장착이 요구된다.
- 2) 본 연구의 전자식 EGR 밸브는 개방시 응답성능이 82.3ms로 통상 요구되는 90ms 이하의 적절한 응답성을 보인다.
- 3) 본 연구의 전자식 EGR 밸브의 질량 유량은 듀티율 40~60%에서 듀티율과 차압에 의해 결정되나, 듀티율 60%이상에서는 차압에 의해 결정된다.

참고문헌

[1] 양갑진 외, "소형 디젤엔진용 전자식 EGR 밸브 개발과 엔진적용에 관한 연구", 한국자동차공학회 2000년도 추계학술대회, pp.290-295, 2000

[2] J. L. Lazaro, J. L. Garcia-Bernad, C. Perez, J. Galindo, H. Climent and F. J. Arnau, "Cooled EGR Modulation: A Strategy to Meet EURO IV Emission Standards in Automotive DI Diesel Engine," SAE 2002-01-1154, pp.209-216, 2002.

[3] Takashi Shirakawa, Manabu Miura, Hiroyuki Itoyama, Eiji Aiyoshizawa and Shuji Kimura, "Study of model-based cooperative control of EGR and VGT for a low-temperature, premixed combustion Diesel engine", SAE Paper No. 2001-01-2006, 2001.

[4] P. M. Azzoni, G. Menelli, D. Moro, and G. Serra, "A Model for EGR Mass Flow Rate Estimation", SAE 970030, 1997.

[5] P. M. Azzoni, G. Menelli, D. Moro, and G. Serra, "A Model for EGR Mass Flow Rate Estimation", SAE 970030, 1997.

진영욱(Young-Wook Chin)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서울대학교 기계공학과(공학사)
- 1984년 2월 : 서울대학교 기계공학과(공학석사)
- 1992년 2월 : Univ. of Texas at Austin 기계공학과(공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계정보공학부 부교수

<관심분야>

열유체 시스템, 동력시스템, 열전달

정진은(Jin-Eum Chung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 1990년 8월 : 서울대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수

<관심분야>

열유체 시스템, 소형 동력장치, 열유체 신뢰성