

전자식 EGR밸브 제어기법에 관한 연구

최상윤¹, 이상훈², 이선봉^{3*}

¹계명대학교 지능형자동차대학원 지능형자동차공학과

²대구기계부품연구원, ³계명대학교 기계자동차공학과

A study on the electronic EGR valve control method

Sang-Yun Choi¹, Sang-Hun Lee² and Seon-bong Lee^{3*}

¹Division of ligent automobile, Keimyung University

²Daegu Mechatronics & Material Institute

³Division of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

요 약 최근 환경오염에 대한 경각심이 높아지면서 대기오염의 원인인 자동차 배기가스에 대한 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 자동차의 배기가스 규제를 만족하기 위해 각국의 자동차회사와 엔진 메이커에서 관련 기술 개발이 활발히 일어나고 있다. 이러한 자동차의 배기가스를 줄이고자 고안된 것이 배기가스 재순환 시스템이다. 배기가스 규제가 점차 엄격해지면서 보다 신속하고 정밀한 제어를 위하여 전자식 모터나 솔레노이드 밸브를 사용하는 시스템의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 배기가스 저감과 시스템의 성능 및 효율 향상을 위한 요소부품의 최적화가 필요할 뿐만 아니라, 요소부품의 설계 및 제작기술 확보를 통한 전자제어식 시스템 최적설계기술개발이 필요하다.

본 논문에서는 배기가스 재순환을 위한 전자식 EGR밸브의 위치제어응답성을 적용한 제어로직과 실험결과를 통해서 제시하고자 한다.

Abstract As environmental awareness increases, regulations on exhaust gas of automobile, which is a cause of air pollution, have been strengthened. In order to meet emission regulation, automobile companies and engine manufacturers have actively developed the related technologies.

Because the emission control has become severe, the systems using electronic motor or solenoid valve for high precise control are needed. For this reason, it is required not only the optimization of composition of components for improving performance and efficiency of the system but also the development of optimal design technology of electronic control system by securing the designing and manufacturing technology of the components.

In this paper, it is proposed the position characteristics for electronic EGR valve module through the applied control logic and experiment results.

Key Words : DC motor, Exhaust Gas Recirculation(EGR)

1. 서 론

2009년부터 시작되는 유럽과 북미 지역의 배기가스 규제인 Euro-6와 Tier-4를 만족시키기 위하여 각 디젤 자동차 엔진 메이커들은 보다 정밀하면서 많은 양의 배기가스를 재순환할 수 있는 부품을 연구 개발하여야 하

며, 배기가스 규제의 강화로 인한 관련 부품의 법적 내구 수명도 함께 길어져 고정밀도 대용량 고내구성 성능을 가진 제품을 개발해야만 한다[1].

이런 시장의 요구에 대응하기 위하여 기존 액츄에이터인 솔레노이드나 진공 타입보다 정밀제어가 가능하며 내구성능이 뛰어난 모터 기반의 EGR시스템의 개발이 요

*Corresponding Author : Seon-bong Lee(Keimyung Univ.)

Tel: +82-10-5180-5067 email: seonbong@kmu.ac.kr

Received March 18, 2014

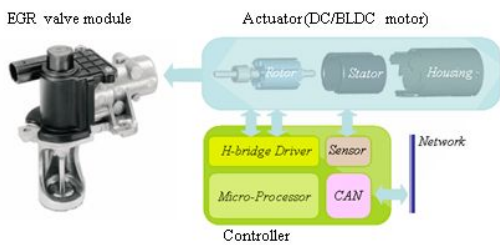
Revised May 7, 2014

Accepted May 8, 2014

구되어지고 있으며, 최근 네트워크 기반기술의 발전에 따라 분산화 또는 모듈화 되는 액츄에이터 모듈 개발은 필수적이라고 할 수 있다.

일반적으로 EGR 드라이브 모듈은 Fig. 1과 같이 EGR 밸브모듈과 DC모터 그리고 DC모터구동용 제어기로 구성된다.

본 논문에서는 EGR 모듈 구동을 위해 일반화된 관련 제어이론을 정리하고 이를 바탕으로 EGR 밸브모듈을 구동하기 위한 시뮬레이션환경과 하드웨어설계내용을 제시하였다.



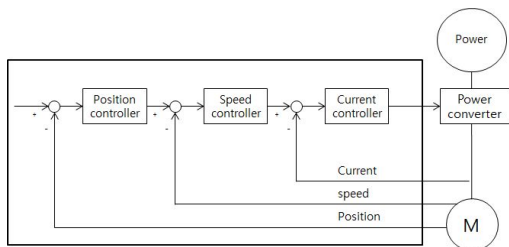
[Fig. 1] Drive module configuration of EGR Valve[2]

또한, 실험결과 제안된 EGR 밸브가 최소운전전압조건에서 안정적인 밸브 개폐가 수행됨을 확인하였고, 각 시스템상의 위치지령에 대하여 80[msec] 이내의 응답성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. DC 모터 제어기 설계

2.1 전체 제어기 설계

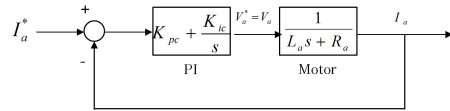
전동기 구동 시스템의 제어계 구성은 Fig. 2와 같이 위치제어, 속도제어, 전류제어를 순차적으로 제어하는 Cascade 구조가 된다.



[Fig. 2] The configuration of the motor control system

2.2 전류제어기 설계

일반적으로 비례/적분 제어기를 사용하여 DC모터 전류제어기를 Fig. 3과 같이 구성할 수 있다.



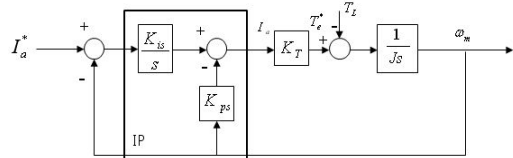
[Fig. 3] PI current controller

여기서 I_a 는 전기자의 전류, K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득, L_a 는 전기자 인덕턴스[henry], R_a 는 전기자 저항[ohm], v 는 인가 전기자 전압[volt]이다.

2.3 속도제어기 설계

속도제어기의 제어방식은 IP제어기를 사용하였고, 이는 속도제어기의 대역폭보다 전류 제어기의 대역폭을 충분히 크게 선정하면 전류 제어가 속도제어에 미치는 영향이 없고 속도 제어의 응답성이나 안정성이 향상되는 특성을 활용할 수 있다.

Fig. 4에 일반화된 IP제어기의 블록도를 나타낸다.



[Fig. 4] IP speed controller

여기서, K_{ps} 와 K_{is} 는 각각 비례 적분 속도 제어기의 비례이득과 적분이득을 나타내고, K_T 는 토크상수 이득, I_a 는 전기자의 전류, T_L 은 부하토크[Nm], J 는 전체 시스템의 관성 모멘트[$kg \cdot m^2$]가 된다.

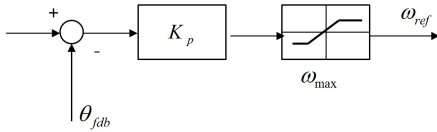
2.4 위치제어기 설계

위치제어기에서 사용되는 비례 제어기의 장점은 오차가 발생한 경우에 이를 제거하기 위한 시스템의 응답속도가 빠르다는 점이다.

비례 이득 K_p 을 크게 할수록 시스템의 응답 특성이 빨라지는데 속응성이 개선되지만, 오차가 있는 경우에만

제어 입력 값이 출력되기 때문에 정상상태 오차가 존재하는 단점을 갖게 된다.

Fig. 5는 일반적인 P제어기 블록도를 나타낸다.

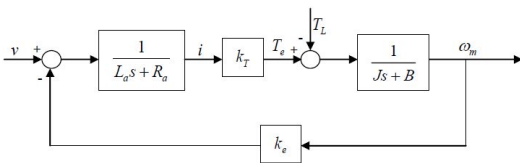


[Fig. 5] P controller

여기서 ω_{max} 값으로는 모터의 최고 속도를 지정하며, K_p 는 비례이득이다.

2.5 DC모터 제어기 설계

Fig. 6은 식(2.1)~(2.2)로 부터 직류 모터 구동시스템의 제어블록도를 나타내었다.



[Fig. 6] Control block diagram

$$v(s) = (R_a + sL_a)i(s) + e(s) \quad (2.1)$$

$$= (R_a + sL_a)i(s) + k_e\Phi_j\omega_m(s)$$

$$T_e(s) = (Js + B)\omega_m(s) + T_L = k_T\Phi_j i(s) \quad (2.2)$$

여기서 v 는 인가되는 전기자 전압[volt], L_a 는 전기자 인덕턴스[henry], R_a 는 전기자 저항[ohm], K_T 는 토크상수이득이다. T_e 는 모터의 토크[N-m], T_L 는 외란에 의한 외부부하 토크[N-m], J 는 모터와 모터축에 연결된 부하의 등가관성모멘트, B 는 등가점성마찰계수[N-m/rad/sec]이다.

직류 전동기에 전기자 전압을 인가하는 경우 회전자 속도가 최종값에 도달하는 과도 응답 특성은 전기자 전압에 대한 회전속도의 폐루프 전달함수를 통해 알 수 있다.

Fig. 6의 제어 블록도로부터 전기자 전압에 대한 속도의 폐루프 전달함수는 아래의 식(2.3)과 같이 나타낼 수

있으며, $T_L = 0$ 으로 가정하였다.

$$\frac{w_m(s)}{v(s)} = \frac{k_T}{(L_a s + R_a)(Js + B) + k_T k_e} \quad (2.3)$$

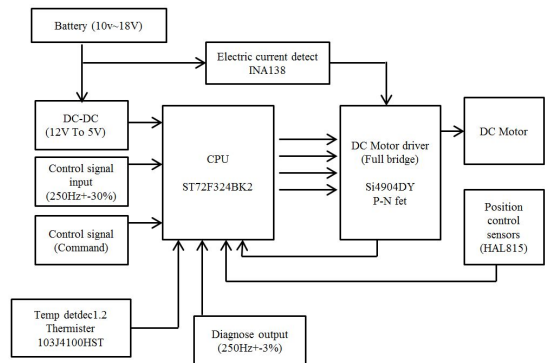
보통 모터 내부 인덕턴스는 아주 작기 때문에 $L_a \approx 0$ 으로 하여 식(2.3)에 적용하여 모터 전달함수를 단순화하면 식(2.4)가 된다.[3]

$$\frac{w_m(s)}{v(s)} \approx \frac{k_T}{R_a(Js + B) + k_T k_e} \quad (2.4)$$

3. EGR시스템 설계

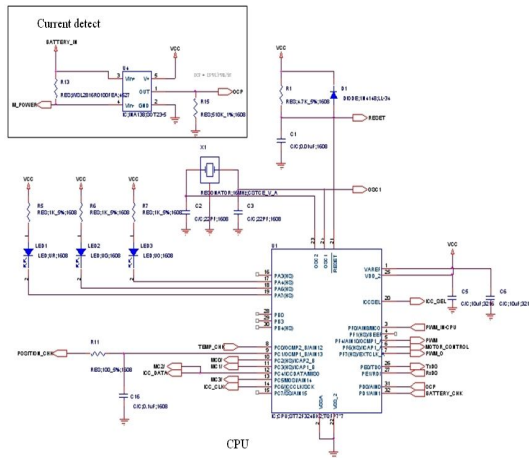
3.1 DC모터 드라이브 하드웨어 설계

DC모터 구동용 드라이브 하드웨어 설계는 ST사의 ST72F324BK2(8bit MICOM) 프로세서와 배터리 방전 또는 충전시 흐르는 전류량을 측정하기 위한 분류전류(shunt current) 센서, H-브릿지(H-bridge) 방식의 전력 변환회로 등으로 구성하였고, 전체 구성은 Fig. 7과 같이 설계하였다.



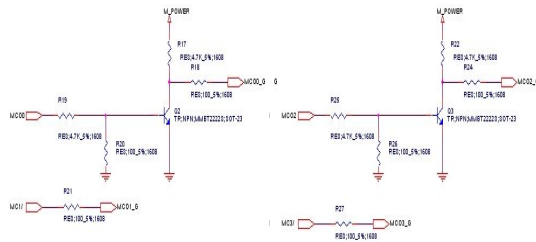
[Fig. 7] EGR configuration of the drive system

Fig. 8에서는 EGR밸브 제어를 위해 ST72F324BK2를 이용한 CPU 및 주변회로를 구성하여 나타내었고, 전류 검출부는 TI사의 INA138을 이용하여 최대 5A까지 측정할 수 있도록 하였다.

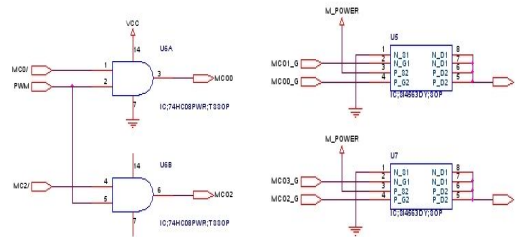


[Fig. 8] ST72F324BK2 using the CPU and peripheral circuit

Fig. 9은 모터구동을 위한 전력 제어부로 CPU에서 PWM(3.75KHz)스위칭으로 DC모터의 정/역제어를 위한 H-브릿지 부를 구성하였다.



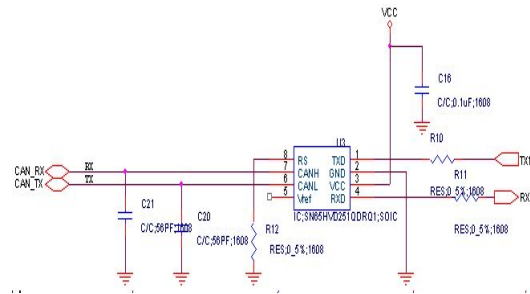
(a) DC motor switching signal circuits



(b) Gate Driver

[Fig. 9] Main circuits of EGR gate driver

CAN기반 네트워크제어의 경우 Fig. 10과 같이 인터페이스 회로를 구성하여 PC와 제어보드간 제어를 수행하였다.



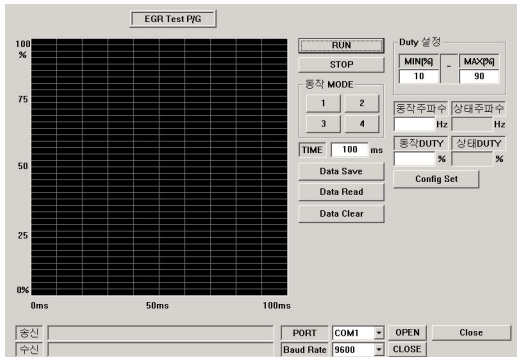
[Fig. 10] CAN circuit for implementation

CAN 시방은 CAN 2.0B FullCAN STANDARD을 사용하였고, 메시지 맵은 Table1과 같이 나타내었다.

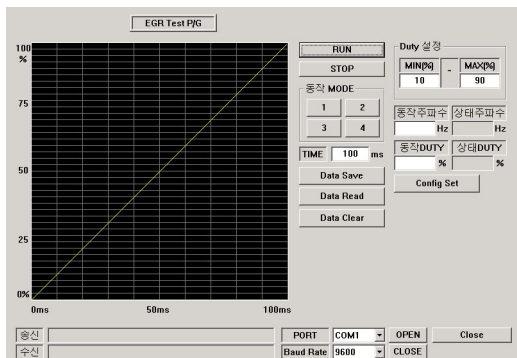
[Table 1] CAN communication message map

Device	Message ID	Symbol Name	Byte No	Start Bit	Data Length (bit)	Mean	Range
PC (상위)	001h	Control	0	0	1	RUN	0~1
				1	1	STOP	0~1
			1	0	8	PWM Duty Raito	0~255
MCU (EGR DRIVER)	002h	Feed Back	0	0	8	Index_0	0~255
			1	0	8	Position Data_0	0~255
			2	0	8	Index_1	0~255
			3	0	8	Position Data_1	0~255
			4	0	8	Index_2	0~255
			5	0	8	Position Data_2	0~255
			6	0	8	Index_3	0~255
		7	0	8	Position Data_3	0~255	

Fig. 10과 Fig. 11은 EGR 드라이브 응용프로그램 대기화면과 응용프로그램과 간의 통신으로 구현한 모터 응답성을 나타내었다.



[Fig. 10] EGR driver communication test P/G drivers



[Fig. 11] Motor response using CAN communication

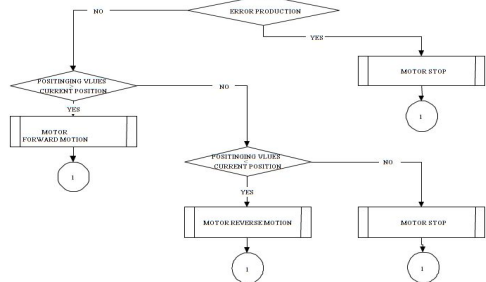
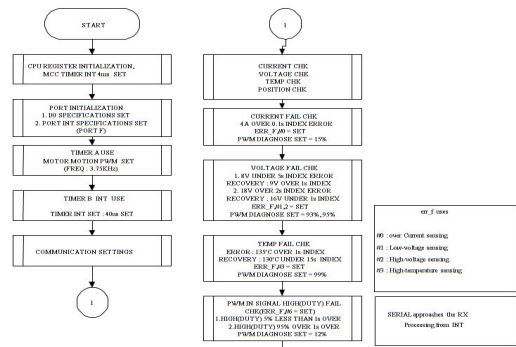
Fig. 11은 Table 1에 CAN통신 메시지 맵에 따라 일정하게 EGR 드라이브와 응용프로그램 간에 응답하는 것을 볼 수 있다.

3.2 DC모터 드라이브 소프트웨어 설계

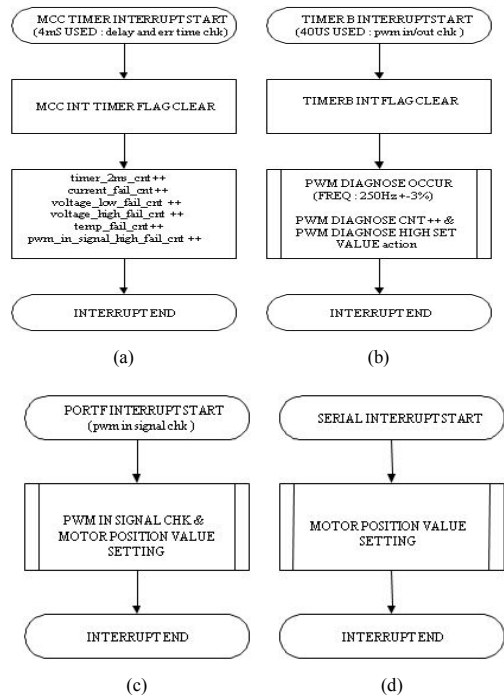
EGR드라이브 구동을 위한 메인 프로그램 구성과 인터럽트 프로그램 순서도는 각각 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다.

3.3 DC모터 제어 프로그램

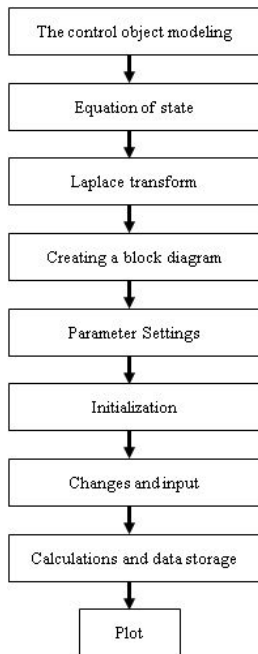
EGR시스템의 모터에 대한 최적제어 특성 시뮬레이션을 수행하기 위해 식(2.3)~(2.4)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 Visual C++을 사용하여 Fig. 14과 같이 블록다이어그램으로 나타내었고 그 결과 값을 Fig. 15와 같이 위치/속도/전류제어특성으로 나타내었다.



[Fig. 12] Main program configuration

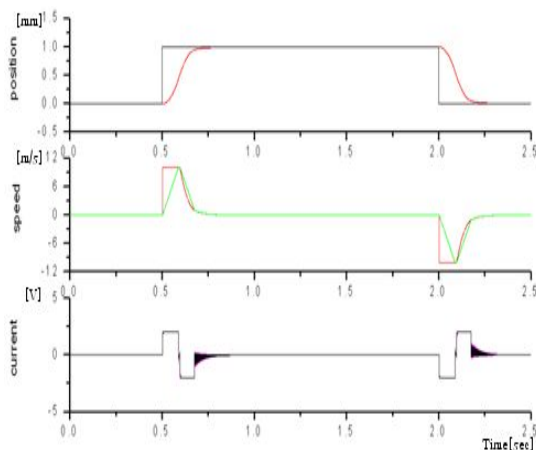


[Fig. 13] Configuration of the interrupt program (a) Mcc(motor control center) Timer interrupt program (b) Timer B interrupt program (c) Port F interrupt program (d) Serial interrupt program



[Fig. 14] Block diagram of the simulation program

시뮬레이션 결과값은 Table 2의 사양에 따라 DC모터의 파라미터는 코일 저항값과 코일 인덕턴스 값은 $R = 1.542 [\Omega]$, $L = 0.863 [mH]$, 관성 모멘트는 식(2.6)을 사용하여 $J = 0.001152 [kg - m^2]$ 를 선정하였다. 역기 전력상수 K_e 와 토크상수 K_t 는 동일함을 전제로 하였다.



[Fig. 15] Simulation results - position / speed / current control waveform

4. 실험 검증 및 결과

4.1 EGR밸브 시스템 장치 구성

본 논문에서 제안한 제어기법의 검증을 위하여 Table 2의 모터와 Table 3의 드라이브 사양을 이용하였다.

[Table 2] Motor specifications

Item	Specifications
Resistance	Coil inductance : 1.542 ohm
Inductance	Coil inductance : 0.863mH
Rated voltage	13.5V (Driving Range: 8V~16.5V)
Current	2A (Max. 5A)
Rated output	20W
Speed (load / no load)	3800rpm/4600rpm
Rated torque	0.03Nm

[Table 3] Driver specifications

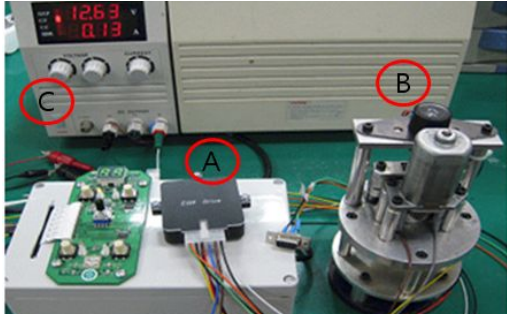
Item	Specifications
Temperature	-40°C ~ 125°C
The input resistance	DC10V ~ 18V
Position command	PWM 250Hz or Serial Data
Valve position control	HAL815 (Using the Hall sensor output)
Diagnose	PWM 250Hz ± 3%
Current control	INA138 Shunt current (4A trip)
Internal CPU performance	8bit 16MHz/ Prog. Mem 8Kb
Operating temperature	-20°C ~ 85°C
Motor control method	PWM control (3.75KHz)

실험장비 구성은 Fig. 16와 같이 나타내었으며, A는 EGR드라이브이고 B는 EGR밸브 테스트지그이며 C는 전원 공급기이다. 전원 공급기는 Table 4와 같다[3].

4.2 실험 결과

4.2.1 구동성 평가 실험

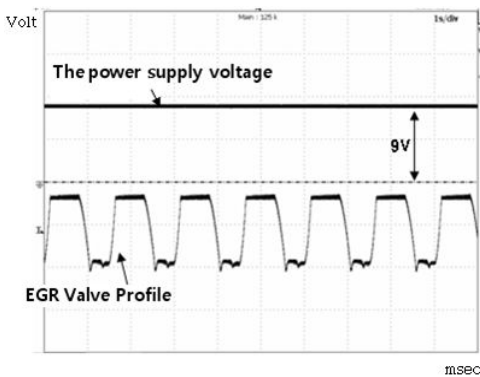
EGR드라이브 구동을 위한 최소운전전압을 평가하기 위하여 전원전압 9V를 인가한 상태에서, EGR테스트 지그의 밸브 개폐운전을 반복하여 운전 실패 유무를 확인하였으며, 정상적인 운전이 가능함을 Fig. 18과 같이 확인하였다.



[Fig. 17] Experimental equipment configuration

[Table 4] DC power supply specifications

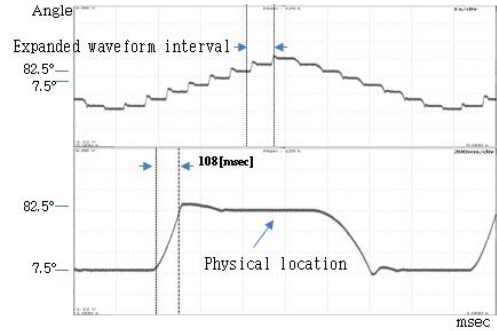
Specifications	UP-5020
Output voltage (CV)	0~50V
Output current (CC)	0~20A
Ripple rejection (rms/p-p)	5/50 mV
Line regulation	40 mV
Load regulation	50 mV
Voltage regulation	0.01V → 0.1V
Current regulation	0.01A → 0.1A
Transient recovery time	100 μs (50% Load charge) (minimum load 0.5A)



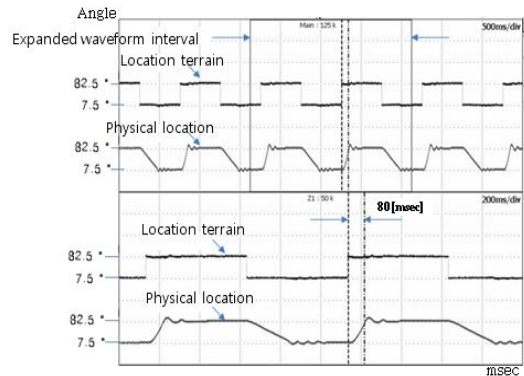
[Fig. 18] Minimum voltage waveform for driving test

4.2.2 응답성 평가 실험

정상 운전이 가능한 상태조건에서 EGR드라이브 구동을 통한 응답성 평가를 위하여 자체 개발한 지그를 활용하여 기존 제품과 자체 개발한 장치의 구동평가를 수행하였다. 그 결과는 Fig. 19, Fig. 20와 같이 확인할 수 있었다.



(a)



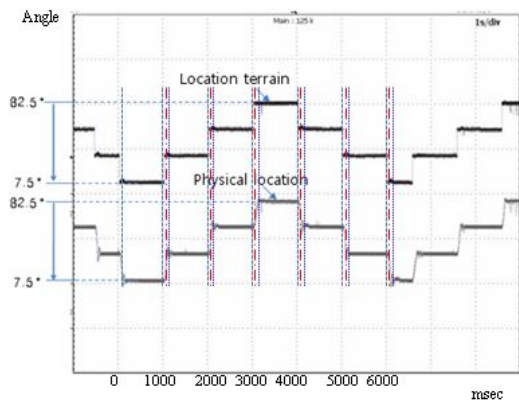
(b)

[Fig. 19] The staff on the unit measured response

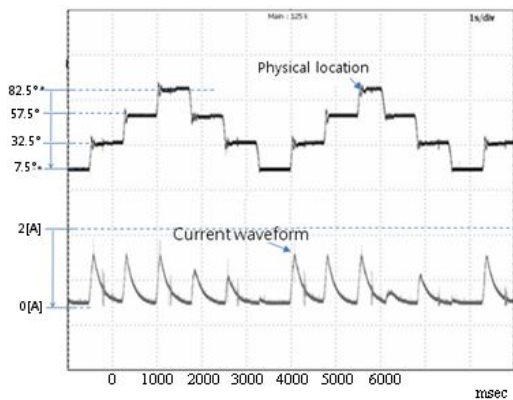
(a) Existing products (b) Research equipment

오픈루프 전압제어를 수행할 경우 응답성은 108msec로 측정되었으나, 폐루프 전류제어방식을 적용할 경우 응답성이 80msec로 측정되었다. 이 결과를 비교하면 폐루프 전류제어방식을 통해 응답성은 28msec만큼 빠르게 되며 이는 제어 성능이 26% 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 21은 반복운전을 수행할 때 입력단의 전류파형에 따른 밸브의 On/Off 특성시험 결과이며, 동작에 따라 연속스텝상의 위치제어시 해당전류파형을 나타내었다.



[Fig. 20] Step-response measurements on a continuous



[Fig. 21] Continuous staff position control on the current waveform

5. 결론

유럽과 북미 지역의 배기가스 규제를 만족시키기 위하여 보다 정밀하면서 많은 양의 배기가스를 재순환할 수 있는 부품을 연구 개발하고 있는 시장의 요구에 대응하기 위하여 기존 액츄에이터인 솔레노이드나 진공 타입보다 정밀제어가 가능하며 내구성능이 뛰어난 모터 기반의 EGR시스템의 제어기법에 관한 연구하였다. 또한 최근 네트워크 기반기술의 발전에 따라 분산화, 모듈화 되는 액츄에이터 모듈을 기반으로 연구하였고, DC모터기반으로 하는 전자식 EGR밸브의 동작 특성을 실험적으로 검증하였다.

결과는 아래와 같다.

1. 시작품의 응답시험을 통하여 밸브 개폐에 EGR밸브

액츄에이터가 최소 공급전압 9V에서 안정적인 개폐를 수행할 수 있다.

2. 작동성능은 오버슈트와 언더슈트로 인한 기구적 충격을 고려하여 초기 위치 7.5°에서 82.5°까지의 반복 운전이 가능함을 확인하였다.
3. 스텝성 위치제어 응답성은 페루프 전류제어를 통하여 응답성을 80msec를 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후 양산을 위해서는 환경시험수행 및 신뢰성 평가수행이 추가적으로 필요한 것으로 사료된다.

References

- [1] Wikipedia, the free encyclopedia, "European emission standards", en.wikipedia.org
- [2] Sang-Youn Choi, Sang-Hun Lee, Young-Deok Cheon, Seon-Bong Lee, "Development of an Actuator Drive Module for an Exhaust Gas Recirculation Efficiency Improvement" Transactions of KSAE, Vol, 2013, No.5, pp1188~1190
- [3] Sang-Hun, Kim,, "DC AC BLDC Motor control", bogdoo publisher, 2010.
- [4] Chung-Ki Lee, Hwan-II Kang, IlKyu Yu, "An Implementation of the Controller Design System Using the Runge Kutta Method and Genetic Algorithms", Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol.13 No.3, pp259~265, 2003
DOI: <http://dx.doi.org/10.5391/JKIIIS.2003.13.3.259>
- [5] Sang-Youn Choi, Seon-Bong Lee,, "Analysis of EGR valve to technology", Keimyung University Bull, I.I.S. Vol. 35-1, 2012
- [6] Chang-hyeon Park, "EGR (Exhaust Gas Recirculation) system's Patents", Korea Institute of Patent Information, www.kipi.or.kr, 2010,
- [7] Gun-Feel Moon, Gyu-Baek Cho, Yong-Gyu Lee,, Dong-Soo Jeong, Choong-Sik Bae, "The Experimental Study on Controlled Auto Ignition with various IEGR rate and Variable Valve Timing in RICEM," KSAE Fall Conference Proceedings, 2006, pp. 209~214.
- [8] Cheol-Woong Park, Chang-Gi Kim, "A Study on the Characteristics of the Electronic EGR Valve for Gasoline Engine", Transactions of Korea Society of Automotive Engineers, 2008, Vol. 16 No. 1, pp. 127~133.

- [9] Jea-Jin Kim, "(An) Experimental Study on Cooled-EGR Control System of a Heavy-Duty Diesel Engine," Kookmin University, 2002.
- [10] Hyeong-Seon Park, "(An) Experimental Study on Estimation and Control of Exhaust Gas Recirculation through Intake Manifold Pressure in an SI Engine," Kookmin University, 2002.
- [11] Chang-Hun Song, "(A) Study on the characteristics & Application of E-EGR Valve for Light Duty Diesel passenger car," Myongji University, 2001.
- [12] Byoung-Gi Oh, Mink-Wang Lee, Yeong-Seop Park, Myoung-Ho Sunwoo, Ki-Hoon Nam, Sung-Hwan Cho, " Feedforward EGR Control of a Passenger Car Diesel Engine Equipped with a DC Motor Type EGR Valve," Transactions of KSAE, 2011, Vol. 19, No. 5, pp. 14~21.

이 상 훈(Sang-Hun Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 경성대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 부산대학교 대학원 전기공학 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 대구기계부품연구원 지능형자동차 연구팀장

<관심분야>
정보경영, 정보통신

최 상 윤(Sang-Yun Choi)

[정회원]

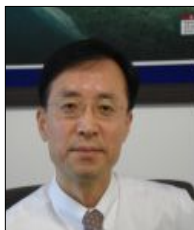


- 2012년 3월 : 계명대학교 기계자동차공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 계명대학교 지능형자동차대학원 (공학석사)

<관심분야>
자동차 전자장치, 지능형 자동차

이 선 봉(Seon-bong Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 부산대학교 대학원 기계공학 (공학박사)
- 2007년 2월 : 대구경북과학기술원 지능형자동차 연구팀장
- 2007년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수
- 2009년 12월 ~ 현재 : 대구경북자동차부품진흥원 원장

<관심분야>
자동차 전자장치, 지능형 자동차