

PC-ECU를 이용한 SI 기관의 비정상상태 정밀공연비 제어

Precise Air-Fuel Ratio Control on Transient Conditions with the PC-ECU in SI Engine

윤수한*

S. H. Yoon

ABSTRACT

In a SI engine, three-way catalyst converter has the best efficiency when A/F ratio is near the stoichiometry. The feedback control using oxygen sensors in the commercial engine has limits caused by the system delays. So it is necessary to control fuel quantity in accordance with intake air amount in order to reduce exhaust emission and improve the specific fuel consumption. Precise A/F ratio control requires measurement of air amount with respect to the cylinder and injection fuel according to the air amount. In this paper, we applied nonlinear fuel injection model, and developed the algorithm of A/F ratio control. This algorithm includes the methods of measurement of transient air mass flowing into each cylinder, of calculation of injection pulse width for measured air mass, and the method of feedback and engine control by using lambda sensor. Also we developed control program for IBM-PC by using C++ Builder, and tested it in the commercial engine.

Keyword : ECU(전자제어장치), PC-based ECU(컴퓨터 전자제어장치), Signal process unit(신호 처리장치), AFR(공연비), CPU(Central processing unit), stoichiometry(이론공연비), Transient condition(비정상상태)

1. 서론

자동차 산업의 급속한 발달로 인해 환경 및 대기 오염 문제가 심각한 문제로 대두되고 있다. 전세계적으로 대기 오염을 줄이기 위해서 세계 각국에서는 유해 배출 가스에 대한 규제 정도가 점점 강화되고 있는 추세이다. 또한 에

너지 전량을 수입하는 우리나라로서는 연료의 소비를 감소하여야 한다. 이러한 배기가스와 연료소비율의 저감을 위해서 현재 상용의 가솔린 엔진의 경우 삼원 촉매장치(Three way catalyst convert)를 사용하며, 이 촉매 장치의 효율을 극대화 시키기 위해서 정밀한 공연비제어가 요구된다. 현재 상용화되고 있는 가솔린 엔진의

* 정회원, 동명정보대학교

경우, 가장 일반적인 연료제어 시스템은 실린더 안에 유입된 공기의 질량을 측정하는 간단한 개념을 기초로 한다.¹⁾

만약, 정확한 공기 질량을 알 수 있다면 화학량적으로 주입될 정확한 연료의 질량이 결정될 수 있다. 공기량의 측정 방법은 질량유동률(Mass air flow rate)센서를 이용하여 직접 측정하거나, 또는 흡기관의 공기온도 및 압력을 고려한 속도-밀도방법(Speed-density method)을 사용하여 간접측정하기도 한다. 회전수와 부하가 일정한 정상상태의 경우는 배기 매니폴드(Exhaust manifold)에 설치된 산소센서를 이용한 피드백 제어로 공연비제어가 가능하나, 엔진의 상태가 급격히 변하는 비정상상태에서는 연료분사와 배기가스 측정 사이의 시간 지연에 의해 산소 센서를 이용한 피드백 제어에 많은 어려움이 있다.²⁻⁵⁾

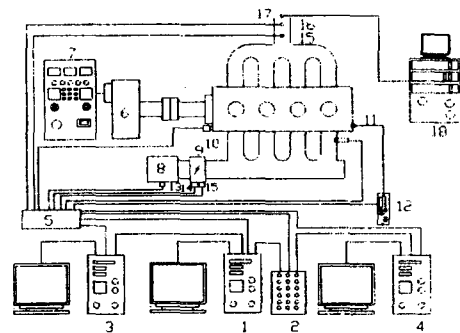
본 연구에서는 별도의 LMS(Lean mixture sensor)를 사용하여 페루프 모드에서 가·감속 시 조건표를 사용하지 않고 기관의 제어를 원활히 할 수 있는 제어장치를 개발하였다. 본 시스템은 기관의 크랭크 각도를 기준으로 Event based로 제어하였으며 사용된 알고리즘은 다음 Event에서 사용될 값을 미리 예측하는 방법을 적용하였다.⁶⁻⁷⁾

이러한 제어 방법은 센서의 값을 실시간으로 읽어 처리하여야하고 많은 계산이 필요하다. 따라서 본 연구에서 개발한 시스템은 센서 값을 읽어 정리하는 부분, 연료분사기 같은 액추에이터를 정해진 시간에 따라 정확히 제어하는 부분, 전체적인 관리와 최적의 값을 연산하는 부분으로 구성하였으며, 빠른 처리를 위하여 200Mhz CPU)를 이용하였다.⁸⁾ 공기량 센서는 상용의 Mass Flow 방식의 AFS를 사용하였으며, 기존 가솔린엔진에서 사용되는 EGO 센서는 배기가스중의 산소농도를 검출하여 산

소의 양 여부에 따라 전압을 발생하는 ON/OFF 방식으로서, 이론공연비에서 벗어나 공연비가 희박한지 또는 농후한지의 여부밖에 파악할 수 없으나, 본 연구에서는 lambda값을 0.7~1.6범위에서 측정할 수 있는 LMS를 사용하여, PC-ECU의 설정 공연비로 연료분사시간을 제어하도록 Closed Loop 제어를 실시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치



- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. Main PC | 10. Encoder |
| 2. Signal Process Unit | 11. Pressure Sensor |
| 3. Air Mass Calculating PC | 12. Pressure Sensor Amplifier |
| 4. Ignition Timing Control PC | 13. Mass Air Flow Sensor |
| 5. Interface & A/D Board | 14. Throttle Position Sensor |
| 6. Dynamometer | 15. UEGO Sensor |
| 7. Dynamometer Controller | 16. O2 Sensor |
| 8. Air Cleaner | 17. Exhaust Gas Sampling |
| 9. Throttle Body | 18. Exhaust Gas Analyzer |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.1은 실험장치의 전체 개략도를 나타낸다. 실험장치는 배기량 1.8ℓ인 DOHC 4기통 기관과 기관에 관련된 센서, ECU(Electronic control unit) 및 연구용으로 개발된 PC-ECU(Personal computer based - ECU) 및 추가로 장착된 센

서, 각 센서의 입·출력을 ECU와 PC로 전환할 수 있는 인터페이스, 흡입공기량 측정장치로 구성되었다.

연소압력의 계측을 위하여 1번 실린더의 연소실에 압력센서를 설치하였고, 공연비 계측을 위하여 광역산소센서(LMS)를 배기다기관에 설치하여 배기가스 중의 산소 농도에 따른 전압을 출력하여 공기-연료 혼합비를 구하였다.

또, 배기가스의 계측을 위하여 배기가스 분석기(EXSA-1500 HORIBA Co.)를 촉매변환기를 통과한 배기다기관에 설치하여 배기가스의 조성을 계측하였다.

Fig.2는 PC-ECU의 구성도를 나타낸다. ECU 및 PC-ECU의 제어신호는 변환장치를 통하여 필요한 실험조건에 따라 선택적으로 엔진을 제어할 수 있도록 하였고, ECU의 동작상태와 엔진의 동작상태는 PC-ECU의 입력으로 연결되어 있어 PC-ECU는 모든 동작상태를 상시 감시하고 제어할 수 있다.

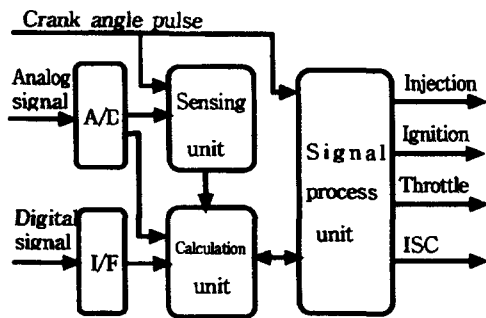


Fig.2 Block diagram of PC-ECU

또한, ECU와 PC-ECU의 입·출력 신호간의 상호간섭을 방지하기 위하여 아날로그 스위치와 입력 임피던스가 높은 연산증폭기 등을 사용하여 신호를 서로 분리하는 I/F(Interface)장치를 구성하였다. 잡음에 영향을 받지 않도록 하기 위하여 실드선을 사용하였고, 특히 고압이 발생하는 점화장치 부분은 별도로 차폐를

하였다. 본 연구에 사용된 기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of test engine

| Item | Specification |
|--------------------------------|--|
| Type of engine | 4-valve four-cylinder SI engine (DOHC) |
| Type of combustion chamber | Pent roof |
| Intake valve Open Close | 6 deg. BTDC 46 deg. ABDC |
| Exhaust valve Open Close | 50 deg. BBDC 10 deg. ATDC |
| Stroke volume (cc) | 448.3 |

크랭크축의 회전각도를 검출하기 위하여, 캠축의 1회전에 360펄스가 발생하는 엔코더를 설치하였으며, 엔코더 펄스의 상승과 하강 Event를 모두 검출하여 크랭크축의 회전각을 1도의 정밀도로 제어할 수 있도록 하였다. 한편, 엔진에 장착된 각종 센서들의 신호를 검출하기 위하여 본 연구에서는 16채널의 아날로그 입력과 4채널의 아날로그 출력 및 24채널의 디지털 입출력이 가능한 변환기(Win-3016PGL, UEI, Max. sampling rate : 1MHz)를 사용하였다.

아날로그 신호 중 AFS는 별도로 개발된 공기량 검출기 PC로 입력되며, TDC를 기준으로 매 행정마다 흡입공기량을 일정구간 계측하여 Main PC로 전송한다.

신호처리 제어장치(Signal process unit)는 컴퓨터로부터의 제어신호 및 데이터를 입력받아 각종의 제어신호를 출력한다. 신호처리제어 장치는 One Chip Microprocessor인 PIC16C74를 사용하였으며, 이는 EPROM이 내장된 8Bit CMOS형의 CPU(Central processing unit)로 동종의 CPU에 비하여 코드 압축 효과가 있기

때문에 처리능력이 매우 빠른 반면, 소비전력이 적은 특징을 가지고 있다.

2.2 공기질량 측정

MAS의 값은 크랭크 1° 마다 측정한다. 흡입 공기질량은 이 측정된 값을 평균하여 흡입행정의 주기 T_s 를 곱하여 얻으며 아래의 식 (1)과 같다. LMS센서의 값은 배기행정의 주기동안 측정된 값의 평균을 취하여 식 (2)과 같다.

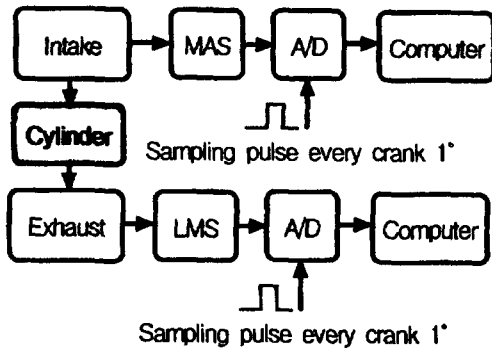


Fig.3 System for the measurement of mass air and LMS

$$m_a(k) = \frac{1}{180} \sum_{i=1}^{180} m_a(i) \quad (1)$$

$$\lambda(k) = \frac{1}{180} \sum_{i=1}^{180} \lambda(i) \quad (2)$$

i : 크랭크 각도

k : 엔진 사이클 흡입행정 지수

$m_a(k)$: 흡입 공기질량

$\lambda(k)$: 배기가스에서의 공기과잉률

물론, 흡입 공기질량은 엔진이 안정상태에 있을 때는 정확하지만, 특정 rpm에서 역류에 의한 공기량의 변화와 가·감속시 공기량의 불

규칙한 변화 등의 영향으로 오차가 있을 수 있으나,⁹⁾ 본 연구에서는 이 부분에 대하여 근사적인 평균값으로 처리하였다. 또한 $\lambda(k)$ 는 실린더로 유입된 혼합 기체가 연소되어 LMS센서까지 전달한 뒤에 센서가 반응하고, 이 값을 제어 장치가 읽어 엔진동작에 적용할 수 있도록 하기까지는 응답지연 시간이 있으며 이에 대한 보상이 필요하다.

2.3 Wall Effects

측정된 공기질량 m_a 에 대하여 분사되어야 할 연료량은 예를 들면 $m_a/14.7$ 이 될 것이다. 그러나 인젝터로부터 분사된 연료는 공기와 혼합되기도 하고 일부는 흡기밸브 부근의 벽면에 붙어 액체상태로 남기도 한다. 사이클당 실린더 내로 연료는 분사된 연료량 중 벽면에 붙지 않은 연료와, 벽면에 남아 있던 연료 중 기화된 연료가 합쳐져서 유입된다. 그러므로 실제 실린더 내부로 들어가는 연료량은 인젝터에서 분사되어 바로 그 행정에 들어가는 양과 이전 행정에서 분사되어 벽면에서 기화하여 유입되는 연료량을 고려한 식(3)과 같으며 실제로 인젝터에서 분사되어야 할 연료량은 식(4)와 같다.

$$m_f(k) = \beta m_{fw}(k) + \alpha m_{fi}(k) \quad (3)$$

$$m_{fi}(k) = \frac{1}{\alpha} [m_f(k) - \beta m_{fw}(k)] \quad (4)$$

k : 엔진 사이클 흡입행정 지수

m_{fw} : Wall에서의 액체연료 양

m_{fi} : 분사된 연료량

m_f : 사이클당 실린더로 유입되는 연료량

α : 분사된 연료가 실린더로 유입되는 비율

β : 벽면에서 연료가 증발되는 비율

2.4 제어방법

제어 시스템에 적용된 알고리즘은 현재 엔진의 동작상태를 정밀하게 반복하여 측정하여 다음의 엔진상태를 추정하여 제어할 수 있도록 구성하였다. 산소센서의 출력신호로서 연소후의 공기 비는 식 (5)로 나타내어지며 흡기밸브 벽면의 연료량은 식 (6)과 같이 근사적으로 나타내어진다. 따라서 현재의 연료 분사량은 식 (7)과 같이 된다.

$$\lambda(k) = \frac{1}{14.7} \frac{m_a(k)}{m_f(k)} \quad (5)$$

$$m_{fw}(k) = m_{fw}(k-1) + m_d(k) - m_o(k) \quad (6)$$

$$m_f(k) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{14.7} \frac{m_a(k)}{\lambda(k)} - \beta m_{fw}(k) \right] \quad (7)$$

m_d : 분사된 연료중 벽면에 흡착되는 연료량

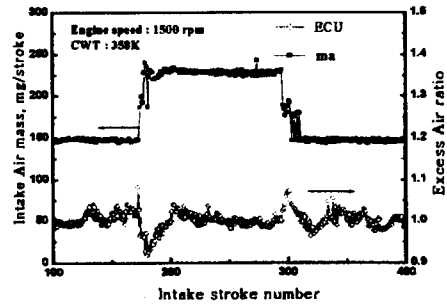
m_o : 벽면 연료에서 증발되는 연료량

3. 실험결과 및 고찰

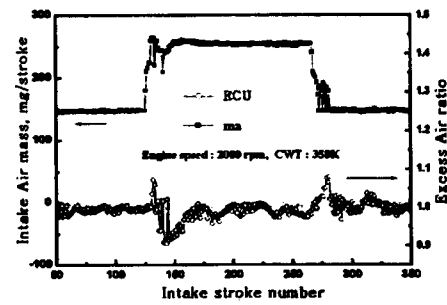
3.1 공연비제어결과

Fig.4는 엔진의 회전수를 일정하게 고정하고 스로틀 밸브를 급격히 열고, 닫는 비정상 운전 상태에서 상용의 ECU와 PC-ECU의 공연비 제어결과를 나타내고 있다.

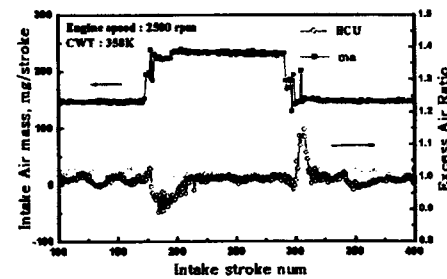
상용의 ECU는 스로틀 밸브가 급격히 개방되는 시점에서 약간 농후한 영역에서 이론공연비 영역에서 제어하고 반대로 흡입공기가 급속히 감소하는 경우에는 희박한 영역에서 이론공연비 영역으로 제어하고 있다. 이것은 상용의 ECU는 흡입공기량이 일정한 정상상태에서는 배기다기관에 설치된 LMS센서로부터 공연비 결과 데이터를 피드백 받아서 공연비 제어를 수행하나 스로틀 밸브의 개폐속도가 일정속도 이상으로 빨리 급가변하는 비정상상태에서는



(a) 1500 rpm



(b) 2000rpm



(c) 2500rpm

Fig.4 Comparison of Air Excess Ratio excursion during throttle valve opening and closing between ECU and PC-ECU at the engine speed of 1500, 2000, 2500 rpm

LMS센서로부터의 공연비 데이터에 의한 피드백제어가 아닌 개방 루프식 공연비 제어를 하

기 때문이다. 따라서 스로틀 밸브가 급격히 개방되는 시점에서는 기준 연료분사량보다 일정량만큼 많은 양의 연료를 분사시켜 약간 농후한 영역에서 차츰 연료량을 감소시켜가면서 이론공연비 영역으로 제어하고 반대로 스로틀 밸브가 급격히 폐쇄되어 흡입공기가 급격히 감소하는 경우에는 기준 연료분사량보다 일정량만큼 적은 양의 연료를 분사하여 희박한 영역에서 연료량을 증가시켜 가면서 이론공연비 영역으로 제어하고 있다.

반면, PC-ECU에 적용된 제어 알고리즘은 현재 엔진의 동작상태를 정밀하게 반복, 측정하여 다음의 엔진상태를 추정하여 제어 할 수 있도록 구성하였다. 따라서 상용의 ECU보다는 상당히 빠른 시간 내에 제어가 되지만, 스로틀이 급격히 열리는 구간에서는 정상상태보다 공연비가 희박한 영역이 나타나며, 스로틀이 급격히 닫히는 구간에서는 약간 농후한 영역이 나타난다. 이 영역들은 공기량 센서의 시간지연, 분사된 연료의 벽면 흡착에 의한 시간지연 등에 의해 발생된다고 생각된다. 이러한 피크 영역을 줄이기 위해서는 보다 정확한 연료기동 모델과 실린더 유입공기량에 대한 예측이 필요하다.

3.2 공연비제어에 따른 기관출력 관계

Fig.5는 스로틀 밸브 개도율을 25%로 일정하게 유지하고 엔진 회전속도를 1000~2500rpm까지 500rpm씩 증가시켜가면서 각 회전속도에서 10분간 상용의 ECU와 PC-ECU로 운전한 공연비제어 결과에 따른 기관 출력 및 연료소비율을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 상용의 ECU보다 PC-ECU에서 기관출력은 약 0.11~0.39% 정도 증가하였고, 연료소비율은 약 2~6% 정도 향상되었음을 알 수 있다. 이것은

상용의 ECU에서는 엔진의 회전속도가 증가하면 공기과잉률이 0.95~0.98인 약간 농후한 영역에서 공연비제어를 수행하는 경향을 나타낸다. 반면 PC-ECU는 엔진 회전속도에 관계없이 항상 이론공연비 영역에서 제어를 수행하므로 좀더 향상된 연료소비율 결과를 나타낸다.

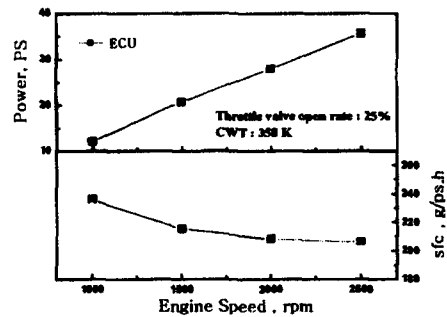


Fig.5 Comparison of power and sfc between ECU and PC-ECU with rpm

Fig.6은 기관의 회전속도에 따른 열효율의 관계를 나타내고 있다. 상용의 ECU보다 PC-ECU에서 약 0.5~1.8% 정도 열효율이 향상되었음을 나타낸다.

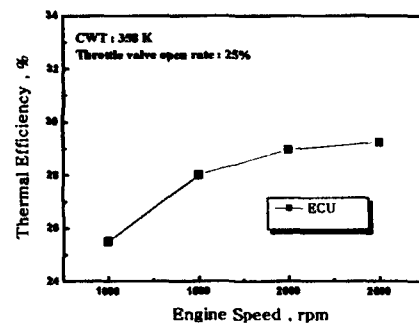
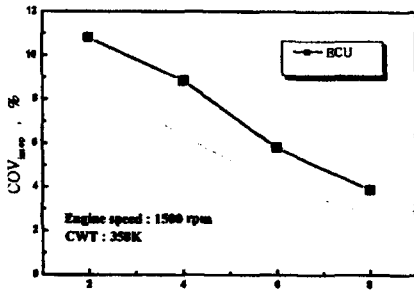
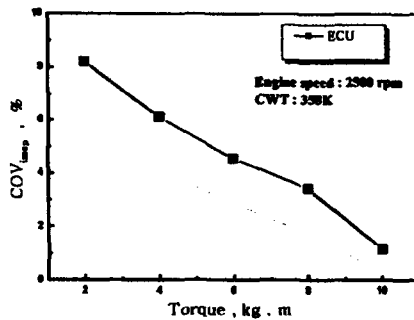


Fig.6 Comparison of thermal efficiency between ECU and PC-ECU with rpm



(a) 1500 rpm



(b) 2500 rpm

Fig.7 Comparison of COV_{imep} between ECU and PC-ECU with torque at the engine speed of 1500, 2500 rpm

Fig.7은 상용의 ECU와 PC-ECU의 사이클 변동률을 확인하기 위하여 1500, 2500rpm에서 토크 변화에 따른 도시평균 유효압력 변동계수 COV_{imep}(Coefficient of variation in indicated mean effective pressure)를 나타내고 있다.

상용의 ECU와 PC-ECU 모두 토크가 증가함에 따라 도시평균 유효압력 변동계수가 감소하는데 이것은 토크 증가에 따른 스로틀 밸브의 개도율이 증가하여 흡입되는 공기량에 대한 흡

입저항의 감소에 의한 것과 도시평균 유효압력의 절대값의 증가로 인한 오차의 감소로 판단된다. 또, 상용의 ECU보다 PC-ECU의 도시평균 유효압력 변동계수 값이 2% 정도 감소한 결과를 나타내는데 이것은 상용의 ECU는 이른 공연비 영역에서 ±0.3 영역에서 공연비제어를 수행하지만 PC-ECU는 이른공연비 영역에서 ±0.1 영역에서 공연비제어를 수행하므로 상대적으로 상용의 ECU보다 도시평균 유효압력 변동계수 값이 2% 정도 감소한 결과를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서 적용된 모델은 기관의 흡입행정 시간(T)을 계산하고 LMS(lean mixture sensor) 센서의 지연시간 등을 고려하여 다음 행정에서 적용될 예측값을 미리 계산하여 제어하므로 상용의 ECU 보다는 좋은 결과를 얻을 수 있었고, 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 기관의 운전용 PC-based ECU로서 제어가 가능하도록 시스템을 개발하였으며 여러 가지 변수를 주어 기관을 동작함으로써 SI엔진의 운전특성을 확인 할 수 있는 시스템을 구축하였다.
- 2) 실린더로 유입되는 공기량을 측정하고, 비선형적인 연료분사 모델을 적용하여 Event-based로 제어를 하는 프로그램을 개발하였다.
- 3) 실제의 기관에 적용한 결과, 연구영역에서는 비정상상태에서 상용의 ECU보다 응답성 및 추종성이 더 양호한 공연비 제어 결과를 얻었다.
- 4) 본 연구조건에서는 정밀한 공연비 제어결과 상용의 ECU보다 기관출력은 약 0.11~0.39% 정도 증가하였고, 연료소비율은 약 2~6% 정도 향상된 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

1. 박경석, 김중일, 고상근, 노승탁, 이종화, "초음파센서를 이용한 전자식 연료분사 엔진의 흡기 유량측정", 한국자동차공학회 논문집 제3권 제3호, SAE Paper No.953736, 1995
2. 강태성, 김중일, 고상근, "적분형 초음파 유량계와 MAP 센서를 이용한 MPI 엔진의 비정상상태 공연비 제어", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집 Volume I, pp56~61, 1999
3. Goran Almqvist and Soren Eriksson, "An Analysis of Air to Fuel Ratio Response in a Multi Point Fuel Injected Engine under Transient Conditions", SAE Paper No.932753, 1993
4. P. J. Shayler and M. S. Goodman, "Transient Air/Fuel Ratio Control of an SI Engine using Neural Networks", SAE Paper No.96026, 1996
5. Patrick Kaidantzis, Per Rasmussen, Michael Jensen, Thomas Vesterholm and Elbert Hendricks, "Transient A/F Ratio Errors in Conventional SI Engine Controllers", SAE Paper No.930856, 1993
6. 이종승, 김진영, 이중순, 정성식, 하종철, "SI 엔진의 전자제어신호 처리에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집 Volume I, pp145~151, 1998
7. Chen-Fang Chang, Nicholas P. Fekets, and J. David Powell, "Engine Air-Fuel Ratio Control Using an Event-Based Observer", SAE Paper No.930766, 1993
8. "Borland C++ Builder User's Guide", "Borland C++ Builder for Window95 & Window NT Programming Guide", "VCL Reference Vol.1, Vol.2", Borland.
9. 박경석, "MPI 엔진제어를 통한 실시간 유량 측정과 흡기유동 특성 해석", 서울대학교 대학원 기계공학과, 박사학위논문, 1995.