

스파크 點火 엔진에서 稀薄燃燒의 電子制御 히스테리시스 現象에 關한 實驗的 研究

이치우† · 김응채* · 김판호** · 서병준*** · 김치원***
(원고접수일 : 2003년 10월 6일, 심사완료일 : 2004년 1월 14일)

A Experimental Study on the Electronic Control Hysteresis Phenomenon of Lean Burn in Spark Ignition Engine

Chi-Woo Lee† · Eung-Chae Kim* · Pan ho Kim** · Byung-Jun Seo*** · Chi-Won Kim***

Abstract : Recently it is strongly required on lower fuel consumption, lower exhaust emission, higher engine performance, and social demands in a spark ignition gasoline engine.

In this study, the experimental engine used at test, it has been modified the lean burn gasoline engine, and used the programmable engine management system, and connected the controller circuit which is designed for the engine control. At the parametric study of the engine experiment, it has been controlled with fuel injection, ignition timing, swirl mode, equivalence ratio, engine dynamometer load and speed as the important factors governing the engine performance adaptively.

It has been found the combustion characteristics to overcome the hysteresis phenomena between normal and lean air-fuel mixing ranges, by mean of the look-up table set up the mapping values, at the optimum conditions during the engine operation.

As the result, it is found that the strength of the swirl flow with the variation of engine speed and load is effective on combustion characteristics to reduce the bandwidth of the hysteresis regions.

The results show that mass fraction burned and heat release rate pattern with crank angle are reduced much rather, and brake specific fuel consumption is also reduced simultaneously.

Key words : Swirl Mode Control(스월 모드 제어), Hysteresis Phenomenon(히스테리시스 현상), Lean Burn Mixture(희박연소 혼합기), Equivalence Ratio(당량비)

† 책임저자(진주산업대학교 자동차공학과), E-mail : leecw@jinju.ac.kr, T : 055)751-3643

* 거창기능대학교 자동차과

** 대동기계공업학교 자동차과

*** 경남대학교 공과대학 기계자동화공학부

1. 서 론

최근 스파크점화 가솔린엔진의 연료절감, 유해 배기저감 및 출력향상 등이 절실히 필요한 시기이다. 따라서 국내외적으로 희박연소에 관한 연구는 70년대부터 시도되어 배기 저감은 상당히 개선할 수 있었지만, 공기-연료의 혼합기가 희박해 질수록 화염전파속도가 느리고, 연소상태가 불안정하여 최고압력이 낮아지는 등의 문제로 인하여 제동 연료소비율은 향상되지 못하였다. 그러나 80년대에는 엔진의 실린더 내에서 혼합기 성층연소의 시도가 희박연소에 적용되었고, 따라서 희박연소 가연 한계의 확장, 점화에너지와 방법개선, 연소실의 최적설계, 혼합기의 균질화와 유동형태, 연료의 분사방법 및 미립화, 화염의 전파과정, 사용연료의 개질 및 첨가물 혼합 등의 연구^{(1)~(7)}가 지속적으로 이루어져 왔다.

그러나 스파크점화 가솔린엔진에서 희박연소 시 엔진동력계의 부하와 속도에 따라 정상연소 및 희박연소영역과의 경계영역 즉 히스테리시스 현상에 관한 연구보고는 미비한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 엔진동력계의 부하와 속도를 혼합기의 상태에 따라 최적제어 할 수 있도록 실험엔진을 개조하고, 메카트로닉스의 하드웨어와 제어로직을 설계하여 제작 구성하였으며, 연속적으로 흡기량을 측정하여 연료분사를 제어할 수 있는 프로그램 가능한 엔진제어장치를 이용하여 최적 맵핑값으로 록업테이블을 설정하였다.

그리고 엔진시험시 운전인자는 연료분사, 점화 시기, 스웰모드, 당량비, 엔진동력계의 부하와 속도 등으로 하였으며, 해석인자는 최고실린더압력, 압력상승률, 열발생률, 질량연소률, 지시평균유효압력, 제동연료소비률 및 배기(열기원질소산화물)^{(8)~(11)} 등으로 수행하였다

연소특성과 희박연소한계를 해석한 결과 엔진속도와 부하의 변화와 함께 스웰유통이 엔진의 연소특성과 히스테리시스 현상에 상당한 영향을 주는 것을 확인하였다. 그 결과 질량연소율과 열발생률 패턴이 크게 개선되었고, 최고압력과 지시평균유효압력 값도 높아지면서 또한 제동연료소비률이 동시에 향상되었다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

연구 목적을 달성하기 위한 실험적 해석을 위하여 엔진 동력계에 희박연소(Lean Burn) 1.5 DOHC 엔진을 개조하여 스웰모드 제어모듈을 그림 2.1과 같이 부착하였다. 엔진제어를 위해 하드웨어에 해당하는 EMS (Engine Management System)를 개발하였으며, 여기에 따른 컨트롤 와이어링을 접속하고, 연소 후 최적제어 확인을 측정할 수 있는 광역공기비 미터(wide band λ meter)를 사용하였다.

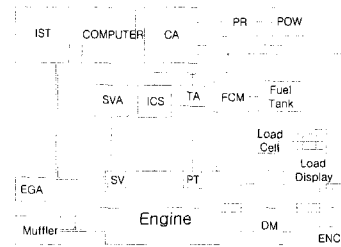


Fig. 2.1 Arrangement diagram of experimental apparatus

CA	: Combustion analyzer
IST	: Inlet surge tank
DM	: Dynamometer
ICS	: Injection control system
EGA	: Exhaust gas analyzer
P	: Fuel pump
ENC	: Encoder
PT	: Pressure transducer
FCM	: Fuel consumption meter
POW	: Power supply
SVA	: Swirl valve adjuster
PR	: Printer

2.2 실험 방법

Table 2.1과 같이 엔진 작동조건으로 엔진의 부하와 회전수제어, 스웰밸브의 개도비를 설정하고, 연료분사는 순차제어 방식으로 실험하였다. 그리고 소프트웨어는 연료분사제어, 점화시기제어, 공전속도제어, 스웰모드 제어 맵핑 록업 테이블(Look-up table)을 이용하여 최적 맵핑 값을 추적하여 산출한 결과를 EMS RAM에 저장하여

희박연소 엔진을 실제 작동하였다. 해석인자는 최고실린더압력, 압력상승률, 열발생률, 질량연소율, 지시평균유효압력, 제동연료소비율 및 배기(열기 원질소산화물) 등으로 수행하여 실험데이터를 취득하였다.

Table 2.1 Engine operating condition

Condition	Variation
Engine speed control	Load, Unload
Engine speed (rpm)	1,000, 2,000 3,000, 4,000
Swirl valve openness ratio	2.5s, 5s 7.5s, 10s
Load condition	Unload, Full load
Spark timing	MBT

3. EMS 제어 시스템

희박연소 엔진의 제어는 일반제어 영역, 히스테리시스 영역, 희박연소제어 영역으로 나누어 제어되고 있다. 그러나 희박연소제어 영역은 일부에 지나지 않으며, 히스테리시스 영역으로 인하여 운행 서지현상이 발생되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 희박연소 엔진의 제어시스템을 설정하고, 스웰모드 제어를 가능하게 하는 모듈을 부착하여 제한된 히스테리시스 현상을 갖는 희박연소가 가능하도록 최적제어 엔진을 하기 위해 전자제어를 할 수 있는 EMS(Engine management system)를 개발하였다.

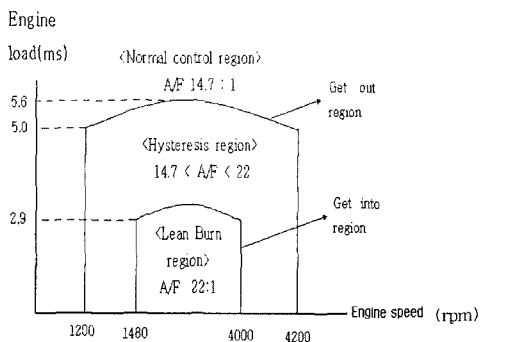


Fig 3.1 Engine load with engine speed at engine control region

3.1 소프트웨어의 구성

CPS센서는 엔진 EMS가 점화시기와 연료분사 제어에 대한 기준신호를 제공하며 CPS는 센서 휠에 장착된 60개의 돌기 중 2개를 제거시키고 58개를 갖는 톤휠과 에어갭이 $1\text{mm} \pm 0.5$ 가 되도록 구성하였다. SYNC 신호는 매 엔진 사이클 당 하나의 실제 모서리를 제공하여야 한다. 이 모서리는 1압축 행정 TDC 실린더의 지침 톱니보다 크랭크 회전이 $180 \pm 70^\circ$ 가 되도록 해야 한다.

3.2 하드웨어의 구성

하드웨어의 일반적인 사양으로 인젝터는 4개로 구성되어있으며, 점화코일은 멀티코일이고, 크랭크 위치 센서와 캠 각 센서는 마그네틱과 홀센서이다. 공전속도제어는 PWM 출력단자를 이용하였고, 연료펌프 릴레이는 스위치 출력단자를 사용하였다. EMS 소프트웨어 장치는 엔진 회전수와 부하에 따른 3D 맵핑에 의해 구성하였다.

4. 실험 및 고찰

4.1 EMS 제어 특성 실험

연료분사 제어는 기준신호(CPS)에 의해 엔진속도를 계산하고 연료 분사 시기와 점화시기를 결정하였다. 흡입기량을 맵 센서에 의해 간접 계량하고 엔진 회전수로 나누면 기본 연료 분사량이 계산되며, 부하 값에 따라 제어 모드가 결정된다. 분사제어 방식은 순차 분사방식과 동시 분사방식이 있으나, 통상 시는 순차분사방식으로 제어하였다. 연료분사 시기의 분사기준은 분사 종료제어 방식을 도입하였으며, 분사시간은 시동 후 워밍업이 완료되면 엔진의 동력성능, 응답성, 배출가스 저감 및 연료경제성 등이 고려된 공연비 제어가 수행되었다.

통상 시 연료의 분사시간은 기본 분사시간에 보정계수를 곱한 만큼의 연료를 분사하며, 스웰밸브가 작동되는 희박연소 모드에서는 스웰모드에 따라, 적절한 공연비 제어가 선택되며, 각종 센서로부터 보정 값의 합이나 곱에 의해 최종 출력 값을

산출하였다.

점화시기는 기준신호를 기점으로 하여 시동시의 진각, 통상시의 진각 및 아이들 시의 진각으로 모두 판정하였다.

통전시간(DWELL)은 엔진 회전수와 축전지 전압에 따라 보정식으로 구하고, 엔진 회전수 200 rpm 미만일 때는 통전 시간을 40° 로 고정하였다. 기본 점화시기는 엔진 회전수와 부하치에 따르고 보정치에는 수온 진각 보정, 안정화 진각보정, 연료차단 회복보정, 가속 회복 보정, 최종 출력 점화 시기 조정, 감속시 진각보정, 아이들 시의 점화시기 보정을 계산하였다. 공연비가 증가할수록 점화 지연시간이 길어지므로 점화시기를 이론공연비 보다 진각 시켜 최대 압력 시점이 동일하도록 제어 맵핑 값을 최적화하였다.

엔진의 공전회전수는 가능한 한 가장 낮은 값으로 하는 것이 연비나 소음 면에서 유리하지만 부하변동의 영향을 받아 엔진회전수 변동을 일으키기 쉽다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 공전속도 제어장치는 듀티 제어식, 공전속도 전동기를 사용하였으며, 대기압에 따라 밀도 보정식을 사용하였다. 희박연소 엔진에의 공전속도 기본 제어량은 개회로 제어 상태에서 저감됨을 알 수 있었으며, 최적의 공전속도 제어를 위하여 점화제어, 연료분사 제어, 냉각수 온도, 엔진부하 변동 등을 함께 EMS에서 제어하였다.

4.2 연소 특성

희박연소엔진에서 연소특성을 해석하는 인자로는 연소압력과 압력상승률, 열발생률과 질량연소률을 해석하여 스웰모드(2.5s~10s) 및 스웰조절 밸브 미부착에 해당하는 0s 모드의 연소 특성을 비교하였다. 연소특성 실험시 스웰 모드 변화와 엔진회전수에 따른 연소기간의 고찰과 희박운전 전 영역에서 압력변화가 적고 연소안정성이 확보되는 최적 맵핑 값을 맵핑 테이블에서 산출하여 연소 특성을 비교한 결과를 Fig. 1~8에 나타내고 있다.

Fig. 4.1~4.2는 스웰모드 5s, 10s 에서 연소 안정성이 확보되는 룩업테이블에서 최적 맵핑 값

을 산출하여 개발된 EMS에 저장하고, 희박연소 엔진을 제어 운전한 결과의 압력 선도를 나타내고 있다. 실린더 내 연소압력은 엔진회전수 증가에 따라 상승되고 있으며, 최고압력은 제어되지 않은 엔진의 압력선도와 일치하고 있으며, 최고압력의 발생시기는 상사점에 근접하였다.

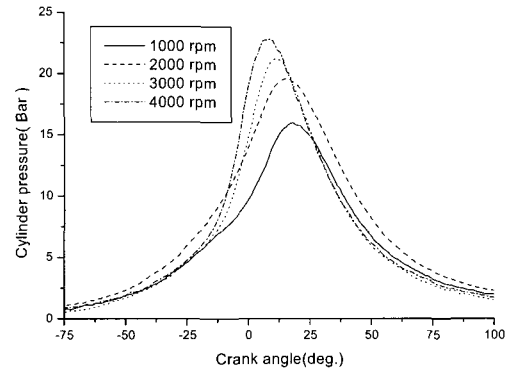


Fig. 4.1 Cylinder pressure versus crank angle for engine speed diagram under swirl of 5 s

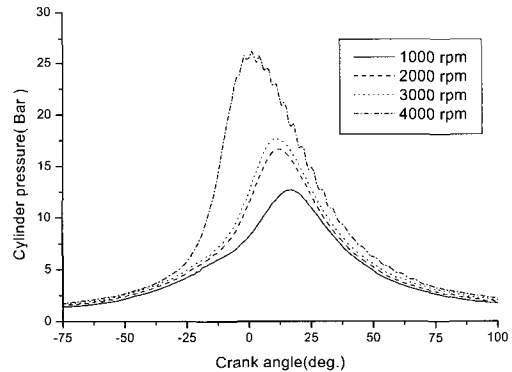


Fig. 4.2 Cylinder pressure versus crank angle for engine speed diagram under swirl of 10 s

Fig. 4.3~4.4는 스웰모드 5s, 10s에서 연소 안정성이 확보되는 최적 맵핑 값을 산출하여 개발된 EMS로 희박연소엔진을 운전한 결과의 압력 상승률을 나타내고 있다. 압력상승률은 엔진회전수 증가에 따라 상승률의 변화가 작게 됨을 보이고 있으며, 스웰모드 10s 보다는 5s에서 연소안정성을 나타내었다. 이것은 스웰모드의 확장에 유용함을 확인할 수 있었다.

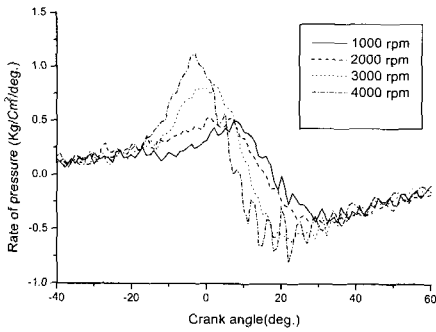


Fig. 4.3 Rate of pressure rise versus crank angle for engine speed diagram under swirl of 5 s

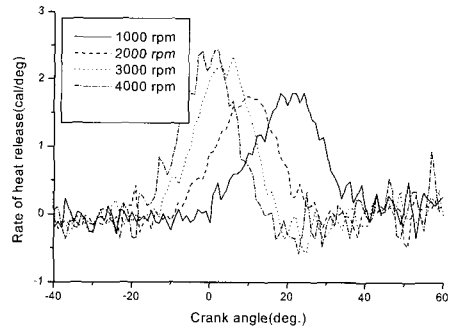


Fig. 4.6 Rate of heat release versus crank angle for engine speed diagram under swirl of 10s

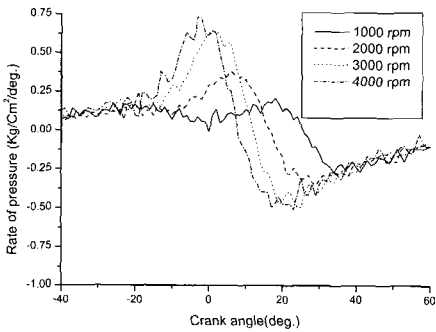


Fig. 4.4 Rate of pressure rise versus crank angle for engine speed diagram under swirl of 10 s

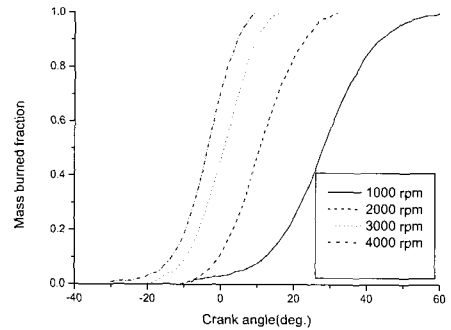


Fig. 4.7 Burned mass fraction versus crank angle for engine speed under swirl mode (5 s)

Fig. 4.5~4.6은 EMS가 장착된 스윙모드 5 s, 10 s상태에서의 열발생률을 나타내고 있다. 연소안정성은 스윙모드 10 s 상태가 열발생률의 변화가 적었고, 열발생률의 크기는 스윙모드 5 s 에서 상승된 결과를 나타내고 있다. 그 이유는 스윙 강도의 증가에 따라 연소속도의 상승에 기인한 것으로 판단된다.

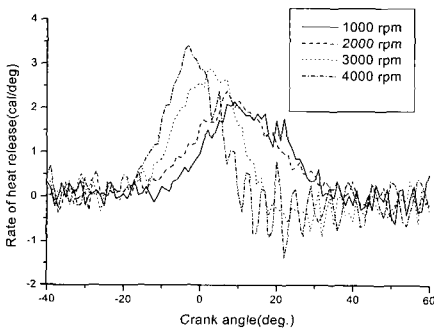


Fig. 4.5 Rate of heat release versus crank angle for engine speed diagram under swirl of 5s

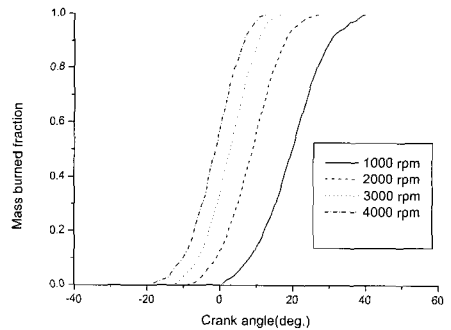


Fig.4.8 Burned mass fraction versus crank angle for engine speed under swirl mode (10 s)

Fig. 4.7~4.8은 EMS가 장착된 스윙모드 5 s 와 10 s상태에서 질량연소율을 나타내고 있다. 엔진회전수의 저속영역(1000 rpm)에서는 스윙모드 10s보다 5 s 모드에서 질량연소율이 낮음을 나타내고 있으나, 고속영역에서는 스윙모드의 영향을 적게 받음을 확인할 수 있었다. 그 결과는 연소속

도에 대하여 고속에서보다 저속에서 스월의 영향이 더 크고, 스월조절밸브를 부착하지 않는 상태보다 전체적인 평균 연소속도는 16.6% 증가하였다.

4.3 전자제어 히스테리시스 현상

스월모드의 변화에 따라 희박연소 성능실험을 수행하여 히스테리시스 현상에 대한 스월 효과를 분석하였다. 또한 연소 안정화에 적합한 스월모드의 조건을 검토하여 최대 연소 압력이 발생하는 최적 연료분사 제어, 점화시기제어, 공전속도제어를 갖는 맵핑 값을 산출하였다. 도출된 맵핑값을 가지고 전 스월 모드에서 히스테리시스 없는 시스템으로 실험한 결과 스월모드 2.5 s, 7.5 s 및 10 s에서는 기존 제어 희박연소에 근접한 열발생률과 질량연소률을 보이고 있으나, 스월모드 5 s의 엔진 회전수 2000 rpm 및 2500 rpm에서는 스월모드

2.5s와 7.5s보다 증가된 연비상태를 보였고, Fig 4.9~4.10에서와 같이 전체적인 연료 소모율은 약 7%의 저감을 얻을 수 있었다.

5. 결 론

스파크 점화 엔진에서 희박연소 영역과 완전연소 공연비의 영역 사이에서 발생하는 히스테리시스의 저감 및 엔진성능 향상을 위하여 전자제어에 의한 스월 모드 전 영역에서 엔진의 부하 및 회전속도의 변화에 따른 연소특성이 최적의 상태가 되도록 알고리즘 적용하여 맵핑값을 산출하였으며, 최적화로 구명된 맵핑 테이블을 EMS RAM에 저장하고 실험 및 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 희박연소 엔진의 연소특성이 최적화 될 수 있도록 제어알고리즘을 적용하여 실험한 결과 스월모드의 변화에 따라 실린더내의 압력이 상승함을 확인 할 수 있었다. 압력상승률도 정성적으로 같은 경향을 보이고 있으며, 스월이 없는 기존 희박연소 엔진과 제어시스템 엔진의 압력 선도의 최고압력 변화는 5% 이내로 일치되어 짐을 확인할 수 있었다.
2. 희박연소 엔진의 스월모드를 적절히 제어한 결과, 연소기간은 단축되고 희박운전 전 영역에서 연소안정성이 증대됨을 질량연소율 선도에서 확인 할 수 있었다. 엔진회전수 상승에 따라 연소시작과 끝나는 시점이 점차 빨라지고 연소속도가 증가하여 히스테리시스 영역이 감소됨을 알 수 있었다.
3. EMS 제어 특성의 최적 점화시기일 경우 희박연소영역이 확대되었지만 안정된 연소를 보였으며, 엔진출력은 연료분사시간에 선형적으로 증가되었다. 점화시기의 진각시 맵핑값은 엔진 부하보다도 엔진회전수에 더 영향을 받는 것을 확인 할 수 있었다.
4. 전 히스테리시스 영역에서 연료분사 제어, 점화시기 제어, 공연비 제어 및 공전속도 제어의 맵핑 특업 테이블 값을 도출하고 실험엔진에

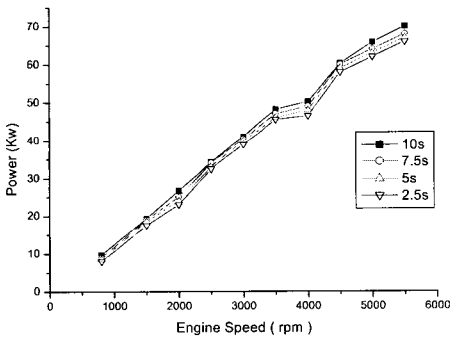


Fig. 4.9 Engine power with engine speed according to swirl mode

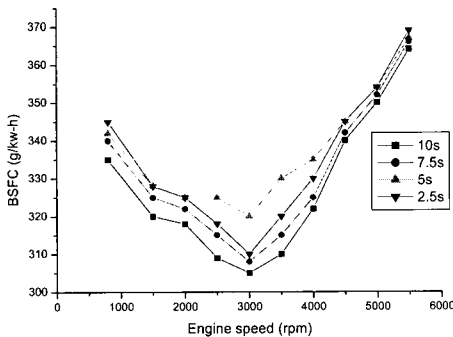


Fig. 4.10 Brake specific fuel consumption with engine speed according to swirl mode

적용한 결과 안정된 공전속도는 800 ± 100 rpm 범위 내에 속하고, 제동 연료소비율의 7% 저감과 운전성이 향상되는 것을 확인 하였다.

본 연구는 2003학년도 경남대 학술논문연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] J. Ishi, et. al., "Wide Range Air-fuel Ratio control System", pp. 323-325, SAE Paper No.880134, 1988
- [2] Steven W. Beyerlein, "A Lean-burn Catalytic Engine", pp.1040-1041, SAE Paper880574, 1988
- [3] E. Murase, "Plasma Jet Ignition in Turbulent Lean Mixtures", pp.183-185, SAE Paper890155, 1989
- [4] Harry C. Waston, "Near Elimination of Idle Combustion Variability", p.25-27, SAE Paper912456, 1991
- [5] 장 영성 외, "2중 Wiebe 연소모델을 이용한 2행정 대형 선박용 디젤 엔진의 성능 예측", 1999, p.637-638, 한국박용기관학회지, 제23권 제5호
- [6] 최 재성 외, "축대칭 엔진 실린더내의 유동장에 관한 수치적 연구", 1999, p.662-664, 한국박용기관학회지, 제23권 제5호
- [7] 오 세준 외, "선박용 디젤엔진을 위한 지능적인 속도제어 시스템의 설계", 1997, p.414-415, 한국박용기관학회, 제21권 제4호
- [8] V. Ganesan : "Internal Combustion Engines", McGraw-Hill, 1996.
- [9] G.L. Borman : "Combustion Engineering", McGraw-Hill, 1998
- [10] 栗原 仲夫, "自動車 エンジンの 點火時期制御最適化 方法" Vol. 23, No.1, 日本自動車技術會 論文集, 1992
- [11] 稀薄燃燒 エンジンの 燃料制御系に 關する 研究 Vol. 40, 1989, 日本自動車技術會 論文集

저 자 소 개



이치우 (李致雨)

1965년 8월생, 1991년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1993년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 2000년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1995~현재 마산대학 기계자동차공학부 교수, 당학회 회원



김응채 (金應彩)

1954년 9월생, 1986년 조선대학교 기계공학과 졸업, 1999년 경남대학교 산업대학원 기계공학과(석사), 2003년 동대학원 기계공학과(박사), 1998년~현재 거창기독교대학 자동차과 조교수



김판호 (金判鎬)

1958년 3월생, 1984년 경남대학교 기계공학과 졸업, 1994년 경남대학교 산업대학원 기계공학과(석사), 1003년 동대학원 기계공학과(박사), 1989년~현재 대동기계공업고등학교 자동차과 재직 중



서병준 (徐炳濬)

1979년 12월생, 2004년 경남대학교 기계자동차공학부 졸업, 2004~현재, 동대학원 기계공학과 재학중.



김치원 (金治遠)

1974년 동아대학교 기계공학과(공학사), 1985년 Brigham Young University (과학 석사), 1992년 성균관대학교 기계공학과(공학 박사), 1997~1998년 University of Utah, ACERC 객원교수, 현재 경남대학교 공과대학 교수