〈논문〉 SAE NO. 99370162

LBT연소를 통한 Idling 운전시의 연소안정성 평가
Evaluation of Combustion Stability of Idling Speed State

이 중 순*, 이 종 숭**, 김 진 영**, 정 성 식***, 하 종 률***
Joongsoon Lee, Jongsoong Lee, Jinyoung Kim, Sungsik Chung, Jongyul Ha

ABSTRACT

It is necessary to discuss lightening engine parts and reducing the friction of sliding parts to improve fuel consumption and combustion stability at idling condition. Lean best torque combustion which produce maximum power at a lean air-fuel ratio is effective for the reduction of exhaust gas emission and the improvement of fuel consumption.

Accordingly, this study deals with the expansion of lean combustible limitation, the combustion stability and the reduction of idle speed through the analysis of combustion characteristics on the base of the control technique of precise air-fuel ratio because it does not need to maximum power at idling condition. The idle speed is increased proportional to ISC(Idle Speed Control) duty ratio. On the other hand the idle speed is decreased by lean air-fuel ratio. The COV in engine speed is stable within maximum two percent up to 17.6 mixture ratio by the control of ISC duty ratio.

주요기술용어 : COV(싸이클 변동계수), ISC(공회전속도조절기), Engine speed(기관회전수), Ignition Timing(점화시기), LBT(최대출력을 낼 수 있는 희박연소)

1. 서 론

공전시의 연비개선을 위해서는 엔진 부품의 소형화, 경량화, 섭동부의 마찰저감 등 다방면의 검토가 필요하지만, 공전상태는 여유 출력을 필요로 하지 않기 때문에 연소측면으로 볼 때는 사이클 변동을 최소화하면서도 실화를 피할 수 있을 정도의 희박 연소가 효과적인 유해 배출물 저감 및 연비개선의 수단이 될 것으로 판단된다.

그러나 스파크 점화기관에서 점화와 화염전파가 잘 이루어지기 위해서는 공기 연료 혼합기가 이론혼합비 영역에 있어야 하는데, 당량비가 1보다 작은 희박혼합기의 경우, 이론혼합비에 비하여 착화가 어려울 뿐만 아니라 화염전파속도가 느리고 연소최고온도가 낮아지기 때문에 기관의 효율과 출력이 크게 저하하는 결과를 초래한

* 정회원, 동명대학 기계과
** 정회원, 동아대학교 대학원
*** 정회원, 동아대학교 기계공학과

나.[1)2)3)] 즉, 공연비가 희박해질수록 열효율은 증가하지만 혼합기가 너무 희박해지면 연소가 불안정해지고 효율은 다시 낮아진다.[4)]

따라서, 본 연구에서는 공전시의 연소특성을 정확히 파악하여 희박연소한계의 확장과 연소안정성의 상관관계를 규명하고, 이를 통한 공전속도의 순차적 저감 및 흡입공기량과 연료분사량 등과 같은 각종 운전조건이 엔진의 출력에 미치는 영향을 밝혀 가솔린 엔진의 연소 안정성을 높이고 유해배출가스의 발생을 최소화하고자 한다.

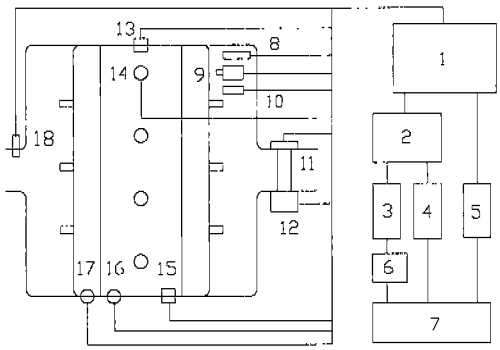
이를 위하여 기 수행한 정밀 공연비 제어 기술[5)]을 바탕으로 광역산소센서, 흡기관 미압 센서, 적산형 공기유량 센서[6)] (AFS: Air Flow Sensor)등을 장착한 시험용 기관과 연소개선을 위해 점화에너지의 최적화가 가능하도록 제작한 점화장치[7)] 및 데이터 획득장치를 사용하여 연소압력과 기관회전수, 흡입공기량, 연료 분사량 및 광역산소센서의 출력 등을 통계 처리한 후, 공회전 영역에서의 기관 구동특성을 밝힌다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 실험장치는 상용의 기관과 기관 ECU(Electronic Control Unit) 및 구동용 센서, 연구용으로 개발된 PC-ECU(Personal Computer based ECU) 및 추가로 장착된 센서와 변환장치로 구성하였으며, 기관의 운전에 필요한 냉각시스템을 별도로 장착하여 설정된 온도에서 기관을 구동할 수 있도록 하였다.

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.

또한, ECU와 PC-ECU의 입 · 출력 신호간의 상호간섭을 방지하기 위하여 아날로그 스위치와 입력 임피던스가 높은 연산증폭기 등을 사용하여



1. Switcher.
2. ECU
3. A/D Converter
4. Interface
5. Interface
6. Air calaulator
7. IBM PC
8. Air Flow Sensor
9. Injector
10. Manifold Pressure Sensor
11. Stepping Motor
12. Throttle Position Sensor
13. Pressure Sensor
14. Ignition System
15. Encoder
16. Oil Temperature Sensor
17. Water Temperature Sensor
18. Lean Mixture Sensor

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

신호를 서로 분리하는 I/F(Interface)장치를 구성하였다. 잡음에 영향을 받지 않도록 하기 위하여 실드선을 사용하였고, 특히 고압이 발생되는 점화장치 부분은 별도로 차폐를 하였다.

본 연구에 사용된 기관의 주요 제원은 Table 1과 같으며, PC-ECU의 구성도는 Fig.2와 같다.

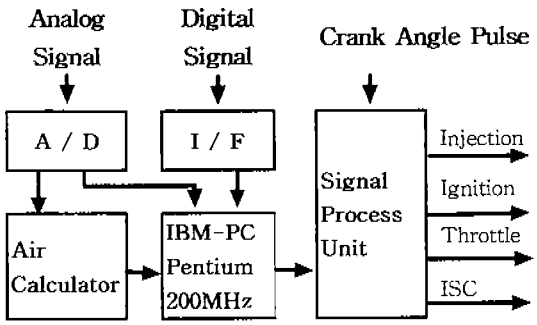


Fig.2 Block diagram of PC-ECU ISC duty rate

크랭크 축의 회전각도를 검출하기 위하여, 캠축의 1회전에 360펄스가 발생되는 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.

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

아날로그 신호 중 AFS는 별도로 개발된 공기량 검출기로 입력되며, TDC를 기준으로 매 행정마다 흡입공기량을 일정구간 계측하여 IBM-PC로 전송한다.

신호처리 제어장치(Signal process unit) 는 컴퓨터로부터의 제어신호 및 데이터를 입력받아 각종의 제어신호를 출력한다. 신호처리제어장치는 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.

PIC16C74는 엔진의 회전에 따라 캠축에 부착된 엔코더에 발생하는 펄스를 입력받아 각도를 계산한다. 또한 PC-ECU에서 전송된 데이터를 저장하고 PC-ECU의 제어신호에 따라 회전수의 검출과 함께 설정 값에 따른 점화 신호, 연료분사 신호, 스테핑모터 제어신호, ISC신호를 출력한다.

본 연구는 ECU에서 난기보정을 행하지 않는 온도(348±3K) 및 회전수 영역(700~900rpm)에서의 공연비 제어를 통한 연소의 안정성 향상 및 공전 속도의 순차적 저감을 통한 연비개선이 목적이기 때문에 희박영역에서 ISC의 듀티비를 40~52% 범위에서 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

MPI 기관에서 연료량을 결정하는 가장 중요한 요소는 공기량이다. 본 연구에서 실린더로 유입되는 흡입 공기량은 AFS의 순시값을 크랭크 1° 마다 샘플링하여 평균을 취하고 흡입 행정의 주기(T)를 곱하여 계산하였다. 또한, 저속 영역에서의 역방향유동[8]을 고려하였다.

Fig.3은 당량비 0.9인 희박한 운전조건에서 실린더 내로 유입되는 공기량을 계측한 결과를 나타낸 것으로 순시값과 적산값을 각각 나타낸 것이다. 그림은 흡기관내의 유속분포를 고려하지 않은 상태에서 흡입공기유량을 1차원으로 계측한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 ISC 듀티비를 변화시킴에 따라 매 사이클당의 흡입공기유량은 240~280mg 범위의 값을 보이며, 설정된 조건에 적합한 출력을 나타내는 반면, 다소의 변동폭이 존재함을 알 수 있다.

Fig.4는 Fig.3의 조건에서 분사되는 연료의 양을 계측한 결과를 나타낸 것이다. 계측된 공기량

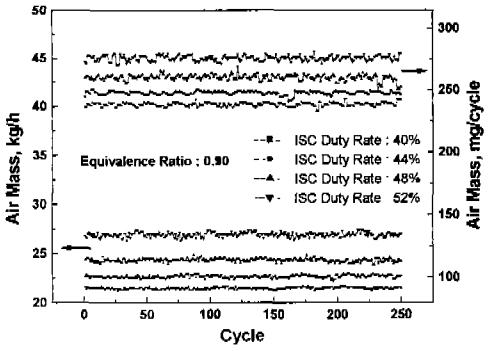


Fig.3 Relation between air mass and ISC duty rate

에 대하여 설정 공연비에 맞는 연료를 분사하기 위하여 인젝터 구동용 솔레노이드의 펄스 폭을 제어하였다. 연료의 분사기간은 본 연구에 사용된 영역에서는 선형적인 비례관계를 유지하기 때문에 연료분사량에 상당하는 것으로 보아도 무방할 것으로 생각된다. ISC 듀티비가 증가함에 따라 흡입공기유량이 증가하기 때문에 식(2)에서 보는 바와 같이 연료분사량이 증가하는 것이다.

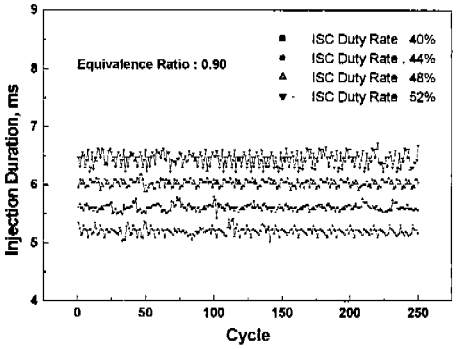


Fig.4 Control result of fuel injection duration

Fig.5는 이론혼합비로 기관을 구동시 실린더 내로 유입되는 공기량을 계측한 결과를 나타낸 것으로 순시값과 적산값을 각각 나타낸 것이다.

당량비 0.9인 조건에 비하여 기관출력의 변동폭이 훨씬 감소됨을 알 수 있다. 이와 같이 변동폭이 줄어드는 현상은 기관의 구동상태가 보다 안정된 결과에 기인하는 것이다.

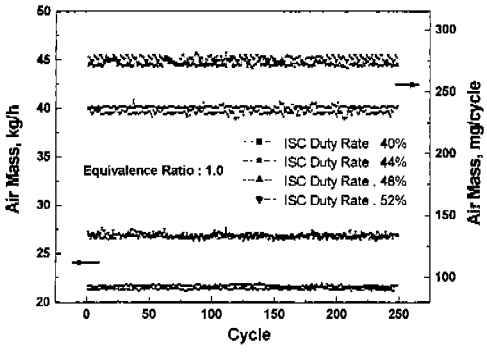


Fig.5 Relation between air mass and ISC duty rate

Fig.6은 Fig.5의 조건에서 흡입공기 유량에 상당하는 연료의 분사량을 계측한 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 연료분사시스템 내에서의 연료 전달 메커니즘은 고려하지 않고 인젝터의 구동시간을 계측한 결과이다. 연료분사기간은 당량비 0.9인 조건에 비하여 약간 증가하며, 변동폭도 훨씬 감소됨을 알 수 있다.

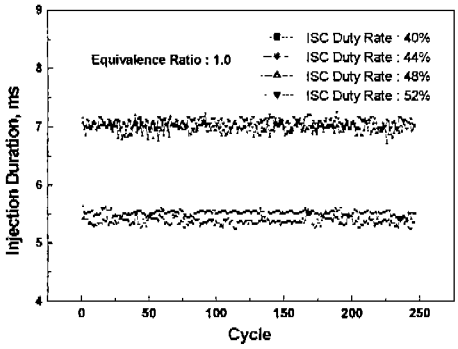


Fig.6 Control result of fuel injection duration

Fig.7은 Fig.5와 Fig.6에서 고찰한 바와 같이 설정된 당량비로 기관을 구동한 경우에 계측한 배기가스 중의 산소농도를 계측하여 공기 과잉률로 나타낸 것이다.

공기과잉률을 나타낸 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기관의 구동을 위하여 설정된 당량비 조건이 재현성있게 제어되고 있음을 확인할 수 있다. ISC의 듀티비를 40%로 제어한 경우에 당량비에 따라 공기과잉률의 진동폭은 서로 차이는 있지만 상대적으로 적정 혼합비 영역에서 다소 안정된 출력을 보인다. 또한, 듀티비를 44%로 제어한 경우에는 듀티비를 40%로 제어한 경우에 비하여 좀 더 희박한 영역까지 안정된 출력을 보임을 알 수 있다. 그러나, 듀티비를 52%로 제어하여 흡입공기유량을 증가시킨 경우에는 실험범위 내의 전 당량비 영역에서 산소센서의 출력값이 흔들리는 현상을 볼 수 있다.

산소센서의 출력값이 변화하는 현상은 선행 행정의 연소결과에 대한 피드백 보상을 행하기 때

문에 나타나는 현상으로, 흡입행정에 소요되는 시간 및 산소센서의 지연시간 등을 고려하여 처리시간을 단축시킬 수 있는 알고리즘과 프로그램의 개발을 통한 계속된 연구를 통하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

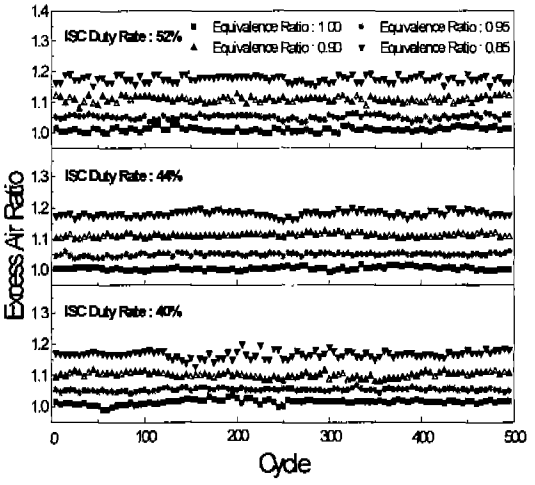


Fig.7 Excess air ratio result by the ISC duty rate and Equivalence ratio

Fig.8은 기관 작동 온도 348K인 조건에서 당량비와 기관회전수 및 점화시기의 상관관계를 ISC 듀티비에 따라 나타낸 것이다.

이론혼합비에 비하여 당량비가 희박해짐에 따라 기관의 회전수는 감소하고 점화시기는 진각되는 일반적인 현상을 볼 수 있다.

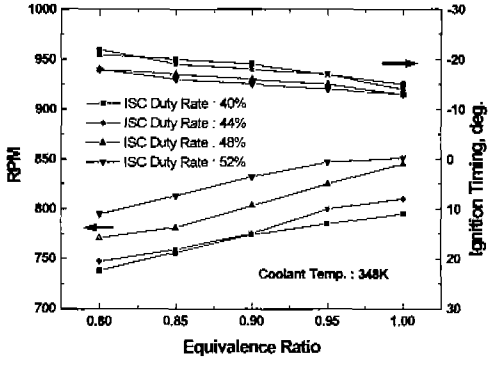


Fig.8 Effect of engine rpm on the igniton timing, Equivalence ratio and ISC duty rate

또한, ISC 듀티비가 증가함에 따라 기관회전수는 증가하는 반면, 점화시기는 TDC쪽으로 지각되는 현상을 볼 수 있다.

일반적으로 공회전 속도의 변동에 영향을 미치는 원인은 국부 공연비의 차이, 사이클 당의 흡입공기유량 및 실린더간의 흡입공기유량의 차이와 실린더 내 유동특성의 변화 등 많은 인자가 관련되어 있는 것으로 알려져 있지만, 이의 개선을 위해서는 당량비와 ISC 듀티비에 따른 적정의 점화시기 제어가 필요함을 알 수 있다.

Fig.9는 당량비와 ISC 듀티비에 따른 기관회전수의 변동계수를 나타낸 것이다. 공회전 상태의 연소안정성을 판단하기 위하여 기관의 회전수 변동계수를 이용하였다. 기관의 회전수는 동일조건에서 각각 500사이클을 취득하여 COV_{rpm} (Cofficient of Variation in rpm) 개념을 사용하였다.

$$COV_{rpm} = \frac{\sigma_{rpm}}{m_{rpm}} \times 100\ (\%) \qquad (1)$$

여기서, σ_{rpm} : 표준편차,

m_{rpm} : 평균 기관회전수

그림에서 보는 바와 같이 모든 영역에서 기관회전수 변동계수는 2% 이내의 안정된 결과를 보이고 있으며, ISC 듀티비가 증가함에 따라 기관회전수 변동계수는 작아지는 현상을 보인다.

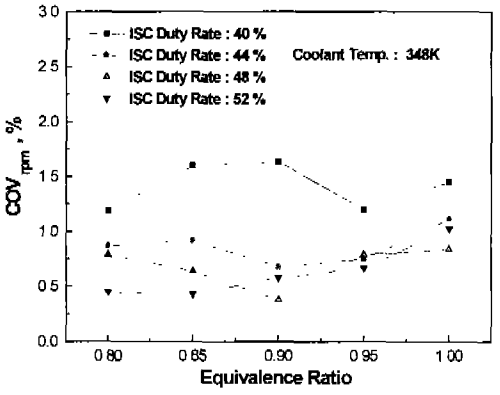


Fig.9 Relation between COVrpm and equivalence ratio on the ISC duty rate

전 당량비에 거쳐 ISC duty rate 48~52% 영역에서 기관 회전수는 대체적으로 낮은 변동률을 보였으며, 당량비 0.9~1.0의 영역에서 가장 안정되었다.

공회전시의 사이클 변동을 평가하기 위하여 도시평균 유효압력을 사용하였다. 공급 공기량의 변화는 ISC를 제어하였고, 당량비의 계산은 다음과 같다.

$$m_f(k) = \frac{\phi_r}{(A/F)_s} m_a(k) \quad (2)$$

여기서, ϕ_r : 제어하고자 하는 당량비

k : 엔진 사이클 흡입행정 지수

m_f : 사이클당 실린더로 유입되는 연료량

m_a : 사이클당 실린더로 유입되는 공기량

Fig.10은 당량비와 ISC 듀티비에 따른 도시평균유효압력을 나타낸 것이다. 점화는 본 연구에서 설정한 기관회전수 700~900rpm 조건에서 사이클 변동을 최소화하는 각각의 당량비에 적절한 점화시기를 결정하여 행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이론혼합비로부터 ISC 듀티비가 작아지거나 혼합비가 희박해짐에 따라 도시평균 유효압력은 감소하는 경향을 보인다.

공회전 상태는 여유출력을 요하지 않는 운전조건이기 때문에 0.02MPa 정도의 도시평균 유효압력으로도 충분히 구동 가능함을 알 수 있다. 따라서, 공회전시 기관의 출력과 연료의 경제성을 고려한다면, 해당 당량비에 적합한 ISC 듀티비의 정밀제어를 통하여 연소개선이 가능할 것으로 판단된다.

Fig.11은 Fig.10에서 표현한 도시평균 유효압력에 대한 도시평균 유효압력의 사이클 변동계수를 나타낸 것이다. 알려진 바와 같이 혼합비가 희박해짐에 따라 도시평균 유효압력 사이클 변동계수는 증가하는 현상을 볼 수 있다.

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{m_{imep}} \times 100\ (\%) \quad (3)$$

여기서, σ_{imep} : 표준편차

m_{imep} : 도시평균 유효압력의 평균

그러나, 도시평균 유효압력 사이클 변동계수도 ISC 듀티비의 제어에 의하여 보다 개선되는 결과를 볼 수 있다. 이와 같이 ISC 듀티비가 감소함에 따라 도시평균 유효압력의 사이클 변동계수가 증가하는 현상은 근본적으로 운전 조건이 공회전 상태이기 때문에 스로틀밸브가 닫혀있는 상태에서 공급되는 공기와 연료의 공급비율의 재현성이 나빠지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig12는 당량비와 ISC 듀티비를 변화시킨 조건에서 기관을 구동시킨 경우의 도시평균 유효압력의 분포를 나타낸 것이다. 당량비와 ISC듀티비

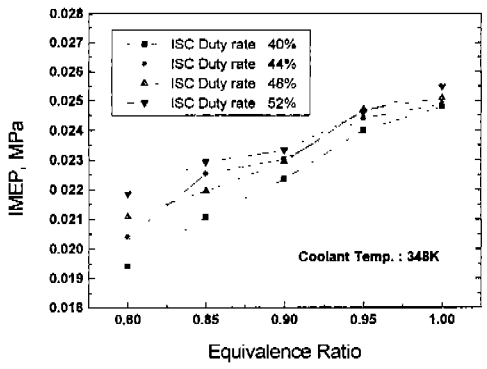


Fig.10 Relation between imep and equivalence ratio on the ISC duty rate

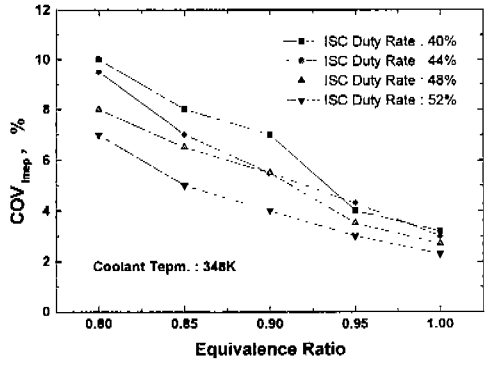


Fig.11 Relation between COVimep and equivalence ratio on the ISC duty rate

의 변화가 도시평균유효압력의 변화에 미치는 영향을 밝히기 위하여 나타낸 것으로 당량비가 희박해짐에 따라 도시평균 유효압력이 낮게 나타나며, 변동의 폭이 넓어지는 현상을 볼 수 있다. 그러나, 이론혼합비 및 당량비 0.95인 조건에서는 도시평균 유효압력의 분포가 좁아지며 발생 빈도수 높은 영역이 존재하는 현상을 볼 수 있다.

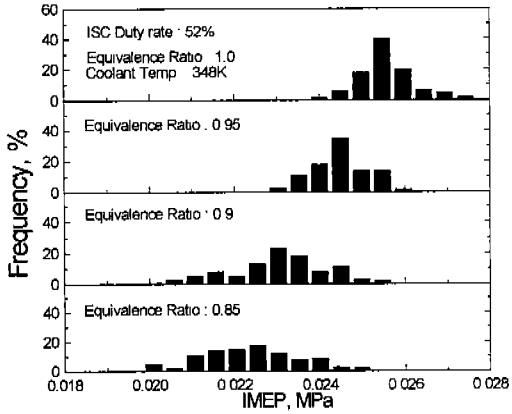


Fig.12 IMEP distribution with various ISC duty rate and equivalence ratio

4. 결 론

1. 실린더에 유입되는 공기량을 계측한 후 임의 당량비에 해당하는 연료량을 공급하는 것은 정밀하게 제어 가능하였다.

2. 당량비 조건에 적합한 ISC 듀티비가 존재하며, 당량비 0.9~1.0의 영역에서 COV_{rpm} 이 가장 낮은 값을 보였다.

3. 공회전 영역에서 ISC 듀티비를 변화시킴에 따라 기관회전수는 7~8% 정도 조정 가능하기 때문에 정밀한 ISC의 제어를 통한 기관의 공회전속도의 순차적 저감 제어가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Brian A. Ault, V. K. Jones, J. David Powell, and Gene F. Franklin, "Adaptive Air-Fuel Ratio Control of a Spark-Ignition Engine", SAE Paper No.940373, 1994.
2. Elbert Hendricks, Michael Jensen, Alain Chevalier, and Thomas Vesterholm, "Conventional Event Based Engine Control", SAE Paper No.940377, 1994.
3. Kevin J. Bush, Neil J. Adams, Sanjay Dua, and Craig R. Markyvech, "Automatic Control of Cylinder by Cylinder Air-Fuel Mixture Using a Proportional Exhaust Gas Sensor", SAE Paper No.940149, 1994.
4. Jhon B. Heywod, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1989.
5. 이종승 외 5인, "SI 기관의 정밀공연비 순시제어에 관한 연구"한국자동차공학회 추계학술대회논문집 No.97380270, 1997.
6. 박경석, "MPI 엔진 제어를 위한 실시간 유량측정과 흡기유동 특성 해석", 공학박사 학위논문, 서울대학교, 1995.
7. 이중순, "점화에너지와 예혼합기의 유동특성이 전기점화기관의 연소에 미치는 영향", 공학박사 학위논문, 동아대학교, 1998.
8. 박경석, 김중일, 고상근, 노승탁, 이종화, "초음파센서를 이용한 전자식 연료분사엔진의 흡기유량측정", 한국자동차공학회 논문집 제3권 제3호, KSAE Paper No.953736, 1995.