

〈논 문〉 SAE NO. 96370127

가솔린기관의 연료분사 시기가 기관성능에 미치는 영향

Effect of Fuel Injection Timing on the Performance Characteristics in an SI Engine

조 규 상*, 정 연 종*, 김 원 배**
G. S. Cho, Y. J. Chung, W. B. Kim

ABSTRACT

In the sequential MPI system with one injection for each cycle, engine performance is influenced by the mixture conditions. It can be said that engine performance is improved by being better identical mixture formation conditions for all cylinders. As the fuel injection timing to the intake port effects on the mixture formation conditions and the engine performance, injection timing must be better adjusted to engine requirements.

Engine behavior was clearly different depending on the injection time during intake stroke. Therefore it was studied that injection timing of fuel effects on the engine performance i. e. combustion stability, COV(imep), A/F excursion, CO, HC emission concentration and fuel consumption. It was found that late intake-synchronous injection was deteriorated the combustion characteristics and performance characteristics, while early intake-synchronous injection resulted in favorable engine behavior.

주요기술용어 : MPI system (다중연료분사방식), Injection Timing(분사시기), A/F excursion(공연비 편차), COV(변동율), Rate of Mass burned(질량연소율), Rate of Heat release(열발생율), Combusted fuel(연소연료량).

1. 서 론

전자제어 연료분사 가솔린기관은 최적의 연료량을 적기에 분사되도록 제어함으로써 출력과 연

비의 향상 및 배기유해가스의 저감을 실현하게 되었다. 각 실린더마다 연료 인젝터를 설치하는 다중연료분사방식(MPI system)중 제어가 간편하나 실린더 흡입 혼합기의 형성이 실린더마다 변화가 심한 동시분사(Simultaneous injection)나 그룹분사(Group injection)형태보다는, 흡기 행정에 분사시기를 맞추어 분사함으로써 혼합기

* 정희원, 경북실업전문대학 자동차과

** 경북실업전문대학 자동차과

형성이 각 실린더마다 거의 비슷한 순차분사(Sequential injection) 시스템이 주로 사용되고 있다. 이 순차분사 시스템도 가능한한 실린더 가까이 인젝터를 설치하고 흡기포트의 흡기밸브를 향해 연료가 분사되도록 함으로서 연료의 비행시간을 단축하고 밸브에서 기화와 증발을 촉진하는 등 인젝터에 의한 영향을 최소화하고 있다. 그러나 분사된 연료의 일부는 흡기행정중에 충분히 미립화되어 기화된 연료증기의 상태로 흡입되지 못하고, 흡기관에 부착되어 흐르는 액막류 또는 액적의 형태로 유입되며, 이러한 상태로 유입되는 연료의 비율에 따라 기관 성능과 연소특성에 영향을 미친다.^{1), 2)} 이는 연료분사 위치와 방향 등의 기하학적 요소, 연료분사 패턴 뿐만 아니라 연료 분사시기에도 영향을 받으리라 예상된다.

연료분사시기의 변화에 따라 연료와 공기의 혼합 상태가 변하고, 동일 흡기행정이라도 인젝터에 따라 연료분무상태가 다르게 되며, 피스톤의 위치에 따라 실린더내 혼합기의 농도가 다르게 된다. 뿐만 아니라 밸브의 개폐시기에 따라 흡기관내 혼합기의 유동방향이 변하며 실린더별 공연비의 불균일로 인하여 연소변동에 따른 평균 유효압력과 기관토크의 변동이 크게되어 기관의 안정성이 저하하는 분사시기가 존재하는 것으로 알려져 있다^{4), 5)}. 이는 기관에 따라 또 운전조건에 따라 다르게 나타나며, 특히 가급속의 과도운전은 분사시기와 분사 연료량의 영향이 더욱 두드러지게 된다. 과도운전시 분사연료의 기상 액상으로서의 실린더 유입지연, 흡입공기량의 검출지연과 흡기관 충전지연, 인젝터 자체의 기계적 구동지연과 연료의 유체유동지연, 각종 센서의 계측지연과 ECU의 계산지연등을 수반하게 되어 보다 정밀한 제어가 요구되고 있다.^{6), 7)}

유동하는 공기에 연료를 분사하는 것은 연료분무의 미립화와 공기와의 혼합, 연료의 기화 증발 및 이동, 그리고 흡기포트 내에서의 액체 연료로서의 체류와 증발등 매우 복잡한 현상을 수반하고 있는데, 연료의 분사시기에 따라서도 이러한 현상은 크게 변화하여 기관성능과 연소특성에 영향을 미치리라 예상된다. 그러나 이를 위한 자세한 연구가 국내에는 그다지 많이 행하여지지 않

는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순차분사 다중연료분사기관을 대상으로 정상운전시, 흡기포트에 분사되는 연료의 분사시기 변화가 기관성능과 연소특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 기관은 표1과 같은 제원을 갖는 순차분사기관으로서 정속주행시는 배기행정중에 분사되고, 가속시는 동시분사가 행해진다. 그림 1은 연료분사시기(Fuel Injection Timing, IT)를 변화시켰을때 기관의 각 성능인자를 측정하기 위한 실험장치도이다.

분사되는 연료의 양과 시기는 기존 엔진의 ECU 기능을 하면서 변화가 가능한 엔진제어시스템(IC 5460, INTELLIGENT CONTROLS, INC.)을 사용하여 연료분사시기를 변화시켰으며, 광역공연비센서(UEGO Sensor)를 사용하여 공연비를 피드백 제어하면서 동시에 공연비도 계측하였다. 흡입공기량은 열선식 질량유량계(MAF)에 의해 계측하여 엔진제어시스템에 입력되어 기본분사량을 결정하고, 기타의 각종 센서입력에 의해 분사량을 보정하게 된다. 드로틀밸브는 드로틀 액츄에이터에 의해 일정개도를 유지 또는 조절하였다. 또 실린더내에는 상대압센서(Kistler

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	Water cooled MPI gasoline engine
Displacement Volume(cc)	1468
Bore x Stroke(mm)	75.5×82.0
Number of Cylinder	4
Firing order	1-3-4-2
Compression Ratio	9.4
Intake Valve open(deg.)	BTDC 18.5°
close(deg.)	ABDC 51.5°
Exhaust Valve open(deg.)	BBDC 51.5°
close(deg.)	ATDC 18.5°

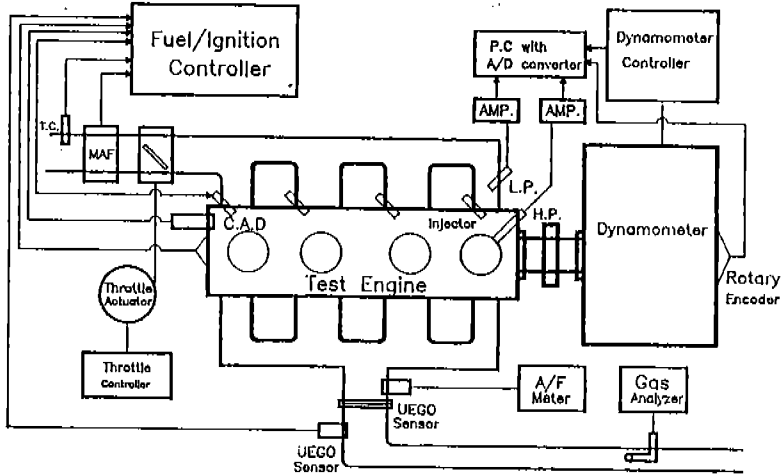


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

6061B)를 설치하여 연소압력을 검출하였으며, 흡기관에는 절대압센서(Kistler 4045A2)를 설치하여 엔코더의 펄스신호에 따라 크랭크각도로 1도 마다 50사이클 분의 압력 데이터를 채취하였다.

실험방법은 일정 부하와 회전수하에서 목표치 공연비가 되도록 피드백 제어 운전을 하여 인젝터에서 분사되는 연료량의 펄스폭을 확인한 후, 연료량이 일정하게 분사되도록 피드백을 정지시킨 상태에서 분사시기를 변화시켰다. 실험중 기관 냉각수 온도는 $80 \pm 1^\circ\text{C}$ 가 되도록 유지하였으며, 기관회전수 N 를 $1510 \pm 6\text{rpm}$, 기관토크 T 는 $3.0 \pm 0.05\text{kg}\cdot\text{m}$ 중속운전 조건에서 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사시기에 따른 연소연료량 및 공연비의 영향

흡기관의 흡기포트를 향해 분사되는 연료량은 일정 회전수와 일정 부하에서는 거의 일정하게 유지된다. 즉 피드백 제어를 하고 있는 동안 인젝터의 연료분사 펄스폭은 연료량에 비례하므로 이론공연비에 해당하는 분사연료량을 구할 수 있

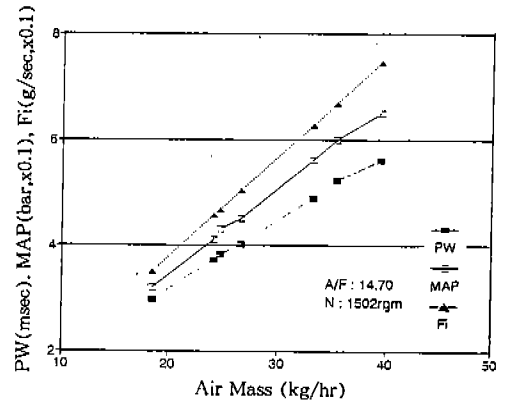


Fig.2 Amount of fuel for stoichiometric A/F ratio.

다. 그림 2는 실험 범위내에서 이론 공연비가 되는 흡입공기량에 대한 분사연료량(F_i), 흡기관 압력(MAP), 인젝터 연료분사펄스폭(PW)을 나타낸 것이다. 그림에서 흡입공기량에 대하여 분사연료량 및 펄스폭은 대체로 비례관계가 잘 성립하므로 일정 공연비에서 분사폭을 이용하여 분사량을 구할 수 있다.

분사된 연료중 일부는 흡기관내에서 액체상태로 액막류를 형성하여 증발된 기체상태보다도 훨씬 느린 속도로 유입되는데^{8),9)}, 현 행정에서 분사연료량(F_{in})과 실린더에 유입되어 연소된 연

소연료량(F_{out})과의 차이와 전 행정까지 형성되었던 액막류(MF_{-1})와의 합이 흡기포트에서의 총 액막류량(MF)이 된다. 일정 부하 회전수하에서 피드백을 차단하여 일정량의 연료가 분사되도록 하였을때, 분사된 연료중 실제 실린더에 유입되어 연소된 연료량은, 흡입공기량(A_{out})을 배기가스중의 산소농도를 계측하는 광역 공연비 센서를 이용하여 계측된 공연비(A/F)로 나누어 주므로서 구할 수 있다¹⁰⁾. 즉

$$MF = MF_{-1} + (F_{in} - F_{out})$$

에서 정속운전시는

$$MF - MF_{-1} = MF_{(bal)} = F_{in} - F_{out}$$

로 생각할 수 있으므로 연소연료량은 다음 식으로 구하여, 흡기관내 평형연료량($MF_{(bal)}$)를 구할 수 있다.

$$F_{out} = A_{out} / (A/F)$$

그림 3은 기관회전수와 부하를 1,510rpm, 3.0kgm의 실험조건하에서 피드백을 차단하여 일정량의 연료가 분사되도록 제한한 상태에서 연료분사시기를 변경하였을때 흡입공기량과 공연비를 측정, 위식을 이용하여 구한 연소연료량 F_{out} 을 분사시기에 대해 나타낸 것이다. 분사시기는 분사 시작점을 크랭크각도로 나타낸 것이며, 0도는 압축 상사점을 나타내며 이를 기준으로 하였다. 흡기행정(빗금친 부분)을 제외한 나머지 행정에서 연료가 분사된 경우는 대체로 연소연료량은 일정하나, 흡기행정중에 연료가 분사되면 연소연료량의 편차가 매우 심하게 나타나고 있다. 흡입행정중인 400도에서 540도 사이에 연료가 분사되면 연소 연료량이 감소하는데, 이는 일정량의 연료가 분사되고 있으므로 일부의 연료는 그 흡입행정 중에 유입되지 못한 채로 흡기포트에 체류하고 있음을 의미하며, 희박공연비에서 보다 농후공연비에서 그 양은 증가되고 있음을 알 수 있다. 흡기행정 초기인 360도 부근에서

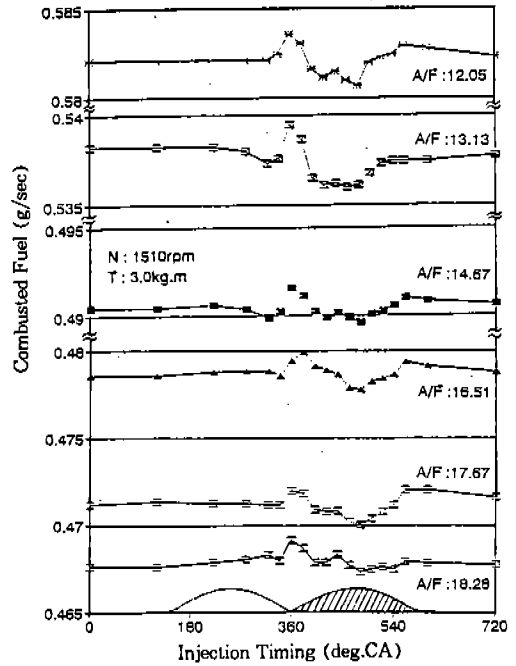


Fig.3 Effect of fuel injection timing on the combusted fuel.

연료가 분사되면 오히려 연소연료량이 증가하는데 이는 분부연료가 흡기포트에 도달된 이후에도 흡기행정은 계속되고 있으므로 분사된 연료 대부분이 유입되고 있다고 생각된다. 이러한 연소연료량의 차이는 실린더간 사이클간의 공연비 편차를 유발하고 이로인해 연소특성과 기관성능에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

그림 4는 동일 실험조건에서 분사시기별 공연비 편차를 나타내고 있다. 흡기행정중에 연료가 분사된 경우는 공연비 편차가 다른 행정의 경우보다 심하게 나타나고 있다. 흡기행정 중간 부근에 분사된 경우는 공연비가 희박하게 되는 등 편차가 더욱 심하게 나타나고 있는데, 이는 분사된 연료의 유입이 줄어들고 있어 연소연료량이 감소되고 있음을 증명한다. 따라서 분사된 연료가 흡기포트부 흡기밸브를 지나 실린더까지 유입되는 데는 일정 시간이 소요되므로, 흡기밸브가 닫히기 시작하는 흡기행정 중간 부근에 분사된 연료의 일부는 그 행정중에 흡입되지 못하고 흡기포트와 밸브근처에 체류하게 되리라 생각된다. 그

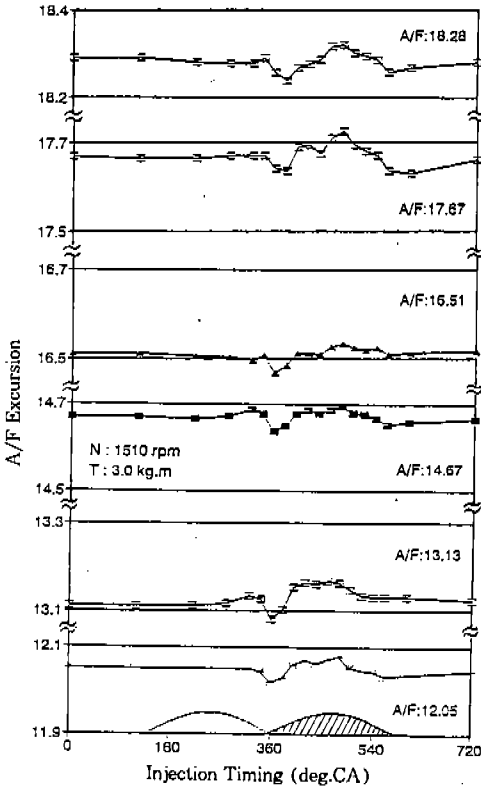


Fig.4 Effect of fuel injection timing on the A/F excursion.

러나 흡입행정이 시작되는 시기인 360도 부근에 분사된 경우는 연소연료량이 증가하여 공연비가 약간 농후하게 나타나고 있다.

3.2 분사시기에 따른 연료소비율 및 HC, CO의 영향

그림 5는 일정 부하와 회전수하에서 각 분사시기에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다. 공연비가 이론공연비 부근에서 희박공연비로 변화하면 회전수와 토크를 일정하게 유지하기 위해서는 드로틀밸브의 개도를 조정하여야 하고, 이로 인하여 공기량이 변하므로 분사되는 연료량은 변하게 된다.

이론공연비 부근인 공연비 14.67인 경우는 이보다 희박한 경우에 비하여 연료소비율은 크게

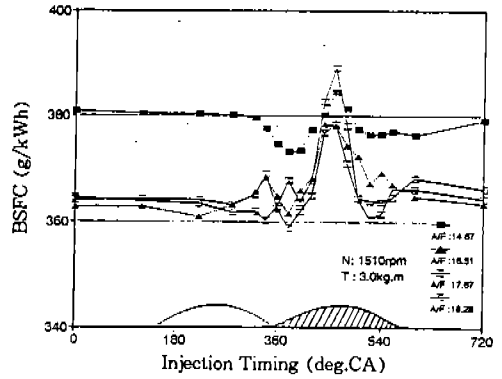


Fig.5 Effect of fuel injection timing on the BSFC.

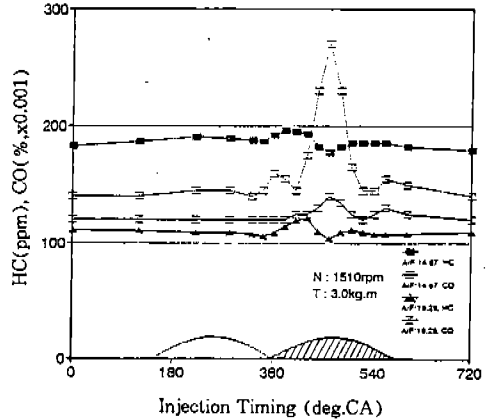


Fig.6 Effect of fuel injection timing on the HC, CO emission.

되고, 희박공연비에서는 연료소비율이 매우 감소하였다. 연료분사가 흡기행정중에 이루어지면 연료소비율이 매우 증가하는데, 그림 3과 비교하면 분사연료량은 일정하게 유지되고 있는데 연소연료량은 감소하는 시기이다. 실험시 이 기간에는 토크가 약간 저하하고 있어 후술하는 바와 같이 실린더내에서 연소의 불충분으로 평균유효압력이 저하하고 있었다.

그림 6은 각 분사시기에 따라 배기가스 중 HC, CO성분을 나타낸 것으로 촉매장치에 유입되기 전에 채취된 것이다. HC가스는 흡기행정 초기에 연료분사가 이루어진 경우는 약간 증가하

고 있는데, 이는 이 기간이 밸브오버랩 기간으로 일부의 연료가 연소되지 않은채 배출되는 것으로 생각된다. 그러나 분사시기가 흡기행정 중이라도 배출량에는 변동이 크지 않는데, 이는 엔진이 충분히 가열된 상태이므로 연료의 기화 증발등 HC배출에 미치는 분사시기의 영향은 거의 받지 않는 것으로 생각된다.

CO가스의 경우 흡기행정에 연료가 분사되면 배출량이 증가하는데, 특히 460도 부근에서 매우 급증하고 있다. 이러한 경향은 그림 5에서의 연료소비율 증가형태와 일치하고 있다. 이 기간에 분사된 연료의 일부는 분사되자마자 실린더에 유입되어 충분히 미립화하는 시간이 부족하고 또 기화 증발하지 못하여 혼합기형성이 나쁘게 되어 불완전연소에 따른 증가로 생각된다. 공연비 변화에 따른 HC, CO가스 배출량의 평균값은 농후 혼합비가 되면 CO가스는 매우 급증하나 HC는 완만한 증가를 보이고 있다.

3.3 분사시기에 따른 실린더내 압력변동

연료분사시기에 따라 연소특성에도 영향을 미칠 것으로 예상되어, 50사이클 분의 실린더내 압력을 채취하여 평균유효압력과 연소최고압력을 이용하여 연소특성을 분석하였다. 그림 7은 공연비별 평균유효압력을 나타낸 것으로, 흡기행정중에 연료가 분사된 경우에는 그 편차가 심하게 나타났다. 특히 공연비가 16.51과 18.28의 희박

공연비이고 분사시기가 440도 부근에서 더욱 심하게 나타났다. 분사시기가 400도인 경우는 약간 증가하고 있는데, 이 시기가 흡기밸브의 양정이 최대로 되는 때로 흡입공기의 유동이 가장 활발하게 되어 기류를 충분히 이용할 수 있어 분무 연료의 미립화를 촉진시켜 혼합기 형성이 좋아지기 때문으로 생각된다. 그러나 440도 부근에 연료가 분사되면 분사된 연료가 지연시간을 거쳐 흡기포트부에 도달할 때는, 분사말기의 일부의 연료는 그 행정중에 흡입되지 못하게 되어 다음 행정에 흡입되거나 또는 역류하게 되어 옆의 실린더로 흡입될 것으로 생각된다.

그림 8은 연료분사 신호로부터 지연시간과 비

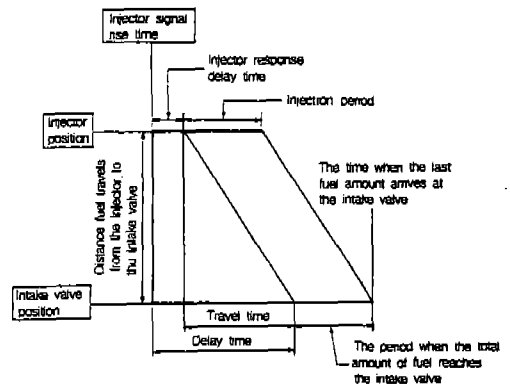


Fig.8 Diagram of fuel delay time.

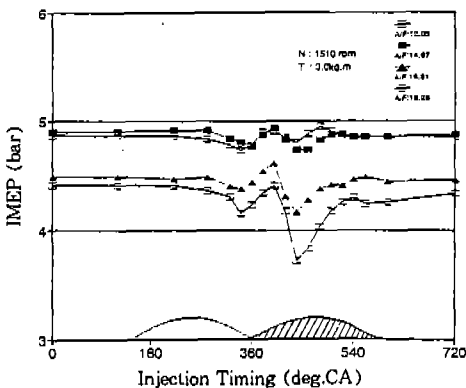


Fig.7 Effect of fuel injection timing on IMEP.

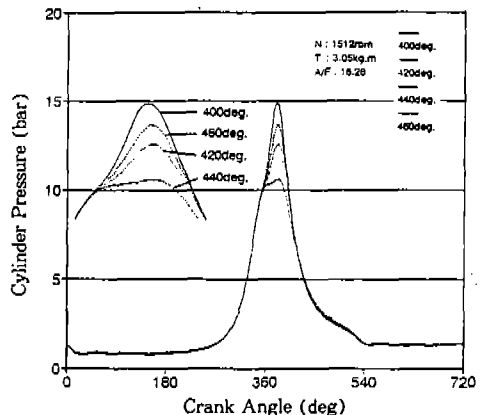


Fig.9 Effect of fuel injection timing on the cylinder peak pressure.

행시간을 거쳐 흡기포트부에 연료가 도달할 때까지의 기간을 나타낸 것으로, 포트부에서의 연료 증발지연등은 고려하지 않았다. 본 실험 엔진에 적용하여보면 인젝터 응답지연은 0.7msec, 인젝터 분사지속기간은 그림 2에서 3~4msec, 인젝터로부터 흡기밸브까지의 거리는 8~9cm, 연료입자의 속도를 10~15m/sec라 하면 연료분사로부터 흡기포트부에 도달할때까지는 약 10~13msec가 걸리고 크랭크각으로는 90~115도가 소요된다. 따라서 흡기행정 440도에 연료가 분사되면 대부분의 연료가 도착할 때는 흡기행정의 후반부로 피스톤은 하사점을 지나 상승하기 시작하는 시점으로 흡기 기류의 유동이 매우 약해지거나 역류의 효과가 나타날 수도 있게 된다. 따라서 그림 9에서와 같이 이 시기에 연료분사가 이루어지면 평균유효압력의 저하 뿐만 아니라 연소최고압력의 저하와 완만한 압력상승이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 희박공연비인 경우에 더욱 현저하게 나타나고 있다.

그림 10은 연소최고압력과 평균유효압력 50사이클 분의 평균치에 대한 표준편차의 비인 변동율(COV)을 나타낸 것이다. 공연비가 희박해질수록 변동율은 점점 커지고 있으며, 특히 분사시기가 420도, 440도인 경우는 사이클별 최고압력의 변동이 매우 큼을 알 수 있다. 평균유효압력의 공연비별 변동율도 공연비가 18.28인 경우는 5%를 넘고있어 기관의 안정성이 좋지 못함

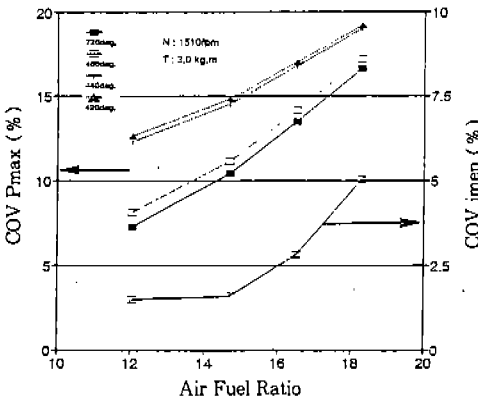


Fig.10 Effect of fuel injection timing on the COV Pmax and COV imep.

을 알 수 있다.

3.4 열발생을 및 질량연소율

각 분사시기에서 50사이클의 실린더내 압력데이터를 앙상블 평균처리한 것을 1차 미분하여 압력상승율을 구하고, 이로부터 열발생율과 질량연소율을 계산하였다. 그림 11은 공연비 18.28에서 분사시기별 열발생율을 나타낸 것으로, 분사시기가 440도에 연료가 분사되면 초기연소와 열발생이 늦어지며 완만한 연소가 이루어지고 최고치도 작음을 알 수 있다. 그러나 분사시기가 400도인 경우는 최고치와 기울기가 크고 빠른 연소가 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 농후 공연비에서도 비슷하게 나타나나 분사시기의 영향은 상대적으로 작았다.

그림 12는 공연비별 분사시기에 따라 단위 크랭크 각도당 열발생량이 최대가 되는 최대열변환율을 나타낸 것이다. 희박공연비에서 분사시기가 440도인 경우가 최대열변환율이 작게 나타나며, 400도인 경우는 크게 나타나는데, 이는 그림 11, 12에서 열발생율이 최대값을 나타내는 시기와 잘 일치하고 있다. 따라서 열발생율이 최대가 되는 분사시기에 연료분사가 이루어지도록 하며, 특히 희박공연비로 운전될 때는 급격한 연소가 이루어지도록 운전조건이 조정되어야 할 것으로 사료된다.

그림 13은 공연비별 질량연소율을 나타낸 것으로 농후공연비에서 희박공연비가 될수록 초기

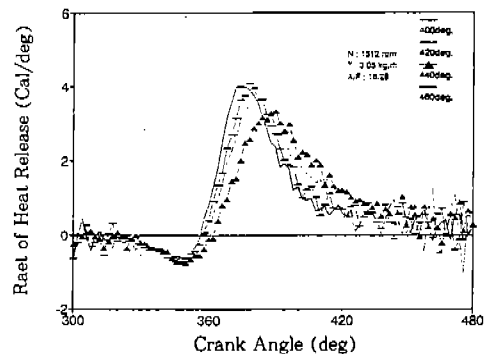


Fig.11 Effect of fuel injection timing on the rate of heat release.

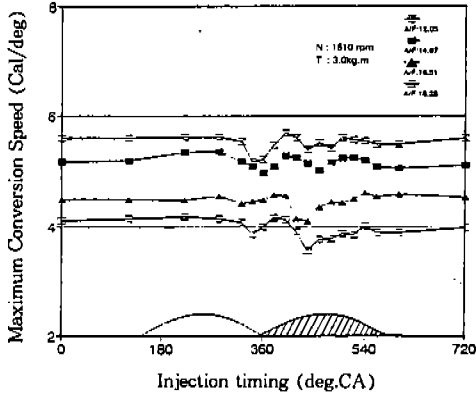


Fig.12 Effect of fuel injection timing on the maximum conversion speed of heat.

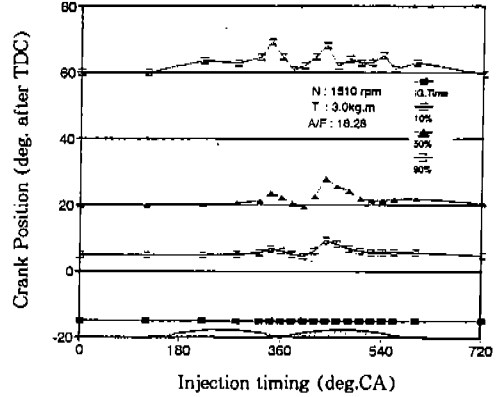


Fig.14 Effect of fuel injection timing on the speed of mass burned.

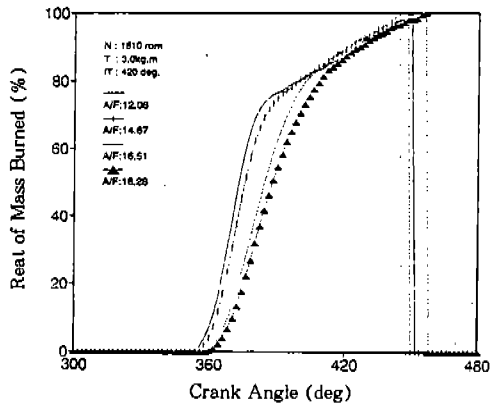


Fig.13 Effect of A/F ratio on the rate of mass burned.

매우 빠르게 뒀을 알 수 있고, 열발생율의 그림 과도 잘 일치하고 있다. 점화로부터 질량연소가 10% 될때까지의 기간은 공연비 14.67인 경우는 크랭크각도로 약 30도의 기간이 걸리나 공연비가 18.28인 경우는 약 35도의 기간이 걸려 회박 연소가 될수록 늦어지고 있다. 이러한 경향은 질량연소가 50% 되는 기간에서도 대체로 일치하였다. 그러나 90% 연소하는데 걸리는 기간은 공연비와 연료분사시기에 따라서 변동이 심하게 나타나고 있다.

4. 결 론

순차분사 다중연료분사기관에서 정속운전시 흡기판을 흐르는 공기류에 연료분사시기를 변화시켰을 때 공연비 변동, 연소연료량, 연료소비율 및 배기유해 배출량등 기관 성능특성에 미치는 영향과 평균유효압력, 열발생율, 질량연소율등 연소특성에 미치는 영향에 대해 연구한 결과 다음과 같다.

- 1) 흡기행정중에 연료가 분사되면 연소연료량 및 공연비 변동이 매우 심하며, 특히 흡기 행정 중간부근에 연료분사가 이루어지면 공연비는 회박해지고 연소연료량이 감소하고 있어 분사연료의 일부는 흡기판에 체류하고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 흡기행정 중간인 460도 부근에 연료분사가

및 주연소기간에서 연소속도가 느리고 매우 완만한 연소가 이루어짐을 알 수 있다. 그리고 후기 연소 및 연소가 종료되는 시기는 거의 비슷하게 되나 공연비 18.28의 회박공연비에서는 분사시기가 400, 420도에서 늦어지는등 차이를 나타내고 있다.

질량연소율의 시기를 점화위치로부터 크랭크 각도로 나타냄으로서 질량연소속도를 알 수 있도록 나타낸 것이 그림 14이다. 공연비가 18.28이고 연료분사시기가 440도인 경우 10%, 50%, 90% 연소하는데 걸리는 기간이 매우 늦어지고 있으며, 분사시기가 400도인 경우는 연소속도가

이루어지면 CO가스 배출량이 급격히 증가하였으며, 연료소비율이 증가하는 경향과 잘 일치하였다.

- 3) 연료분사시기가 440도인 경우 평균유효압력과 연소최고압력이 매우 저하하고 변동율이 커지는 것은, 분무연료가 흡기포트부에 도달할 때는 피스톤이 하사점을 지나 상승하기 시작하여 흡기유동이 약해지는 시기이며, 400도인 경우는 분사연료 대부분이 포트부에 도달할 시기로 밸브양정이 최대가 되어 흡기 유동이 가장 활발한 때이므로 분무연료의 미립화와 혼합을 촉진시켜 혼합기형성이 좋아지기 때문에 평균 유효압력과 연소최고압력은 크게 되고 변동율도 작게 된다.
- 4) 공연비가 희박해질 수록 초기연소가 늦어지고 열발생이 완만해지며, 연료분사시기가 440도인 경우는 최대열변환율도 작아졌다.
- 5) 질량연소율은 농후공연비에서보다 희박공연비가 될수록 늦어지고 있으며, 분사시기가 440도인 경우는 10%, 50% 연소하는데 걸리는 기간이 매우 늦어지나 400도인 경우는 빠르게 나타났다.

참 고 문 헌

1. N. Nakamura, K. Nomura, M. Suzuki, "Key Factors of Fuel Injection System to Draw Out Good Response in 4-Valve Engine", SAE paper 870126, 1987.
2. K. Oshiage et al, "New Fuel Injection Method for Better Driveability", SAE paper 880420, 1988.
3. S. Robert FOZO, C. F. Aquino, "Transient A/F Characteristics for Cold Operation of a 1.6Liter Engine with Sequential Fuel Injection", SAE paper 880691, 1988.
4. 大久保 悟, 外2人, "電子制御燃料噴射システムにおける過渡空燃比制御", 内燃機關 Vol26 No334, 1987. 8
5. T. MATSUMURA, Y. NANYOSHI, "New Fuel Metering Technique for Compensating Wall Flow in a Transient Condition Using the Model Matching Method", JSAE Review Vol.10 No.3, 1989. 7.
6. C. F. Aquino, "Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine", SAE Paper No. 810494, 1981.
7. N. F. Benninger and G. Plapp, "Requirements and Performance of Engine Management Systems under Transient Conditions", SAE Paper 910083, 1991.
8. 岩野浩 外3人, "燃料噴射機關における吸気ポート内燃料學動の解析", 日本自動車技術會論文集 vol122 no4, 1991. 10.
9. 이종수, 조석구, "인젝터에 따른 가감속시 공연비 변동에 관하여", 자동차공학회지 15권 1호, 1993.
10. 永石初雄 外2人, "實用機關における壁流の一計測法", 自動車技術會學術講演會前刷集 No. 872105, 1987. 10.