

## 균일 혼합기를 이용한 이론 공연비 직접분사 가솔린 엔진 개발에 관한 실험적 연구

### A Study on the Development of Stoichiometric Direct Injection Gasoline Engine by Homogeneous Charge

이 내 현\*, 유 칠 호\*, 최 규 훈\*\*  
N. H. Lee, C. H. Yu, K. H. Choi

#### ABSTRACT

Lean burn gasoline engine is recognized as a promising way to meet better fuel economy. Lean burn engine is classified into port injection and direct injection(DI), DI is more active technique for improving fuel economy with ultra-lean operation. Nowadays, port injected lean burn engine has been produced by many Japan maker. Also, DI engine is also possible for production owing to improvement in control technique of spray, flow air fuel ratio.

DI engine uses either homogeneous stoichiometric mixture or stratified mixture by controlling injection timing to be early or late respectively. HM(homogeneous mixture) is worse than SM(stratified mixture) in view of ultra-lean operation in partial load and Nox reduction by using EGR control. But, HM has advantages in cold starting and emission reduction during transient operation.

This paper describes experimental variables and bench test results of HM GDI engine.

주요기술용어 : Direct Injection(직분사), Homogeneous mixture(균일혼합기), Spray(분무), Stratified mixture(층상혼합기), Cold Starting(냉시동), Transient Operation(과도운전)

---

\* 기아자동차 기술센터

\*\* 정회원, 기아자동차 기술센터



분사시켜 공기와 혼합이 이루어진 상태에서 연소시켜야 하므로 고압 연료 분사장치의 채용이 필수적이다. 고압 연료분사 장치는 Common Rail, Jerk식 및 Air Assist 분사식으로 나눌 수 있으나 분사시기의 변환 범위가 넓은 Common Rail 연료공급 장치를 이용하였고, ECU에 의한 연료분사 시기 설정이 가능하도록 솔레노이드를 이용한 Pick & Hold 방식의 인젝터를 사용하였다.

Fig.2는 연료 분사 시스템 구성을 보여주고 있다.

저압 연료펌프로 1차 가압한 후에 고압펌프로 설정된 압력까지 연료를 가압한 후 압력조정기(Pressure Regulator)를 통하여 듀티 비(Duty Ratio)로 분사압력을 제어하는데 최고 120bar까지 제어가 가능하다. 연료의 분사량과 분사시기는

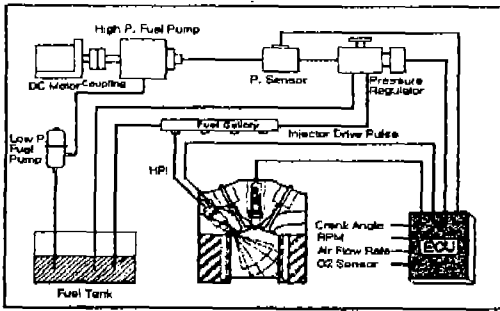


Fig.2 High pressure gasoline injection system

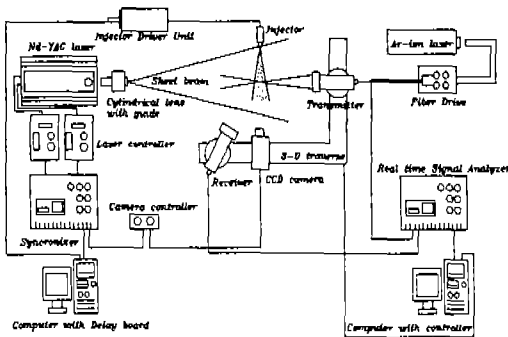


Fig.3 Schematic diagram of test equipment

Universal ECU Controller(IC5460)을 사용하여 고압인젝터 구동장치(High Pressure Injector Driver Unit)에 공급된 ECU Controller의 펄스 신호에 의해 고압 인젝터를 구동 제어하였다.

짧은 시간내에 연료를 기화시키기 위해서는 분무연료의 입경을 작게 할 필요가 있으므로 분사 연료 미립화에 효과적인 스윙 타입 인젝터를 사용하였다. 엔진개발에 이용된 고압 연료 인젝터의 연료 분사율은 엔진이 최고속도, 전부하로 운전할 경우 흡기행정시작 이후 크랭크 각도 180° 이내에 연료 분사가 완료될 수 있도록 설정하였고, 최저 연료 분사량은 엔진의 아이들 운전시 요구되는 최저연료량으로 설정하였다.

엔진 연소실 내 인젝터 설치 위치와 함께 연료의 분사조건은 엔진 성능에 영향을 주는 중요한 요소이다. 따라서, 최적분사조건 설정을 위해 20°, 40°, 60°, 64°의 분무각도를 갖는 인젝터의 분사압력을 조정하면서 엔진 실험을 수행하였다.

### 3. 연료분무 특성실험

직접 분사식 엔진을 개발하기 위해서는 연료의 기화촉진 및 혼합기 분포제어 등을 위한 효과적인 유동제어와 더불어 분무의 제어가 필수적이다. 따라서 분무패턴 및 입경분포 등 분무특성을 해석하기 위하여 Fig.3과 같은 실험장치를 구성하여 Table 1과 같은 실험조건으로 실험을 수행하였다.

#### 3.1 분무 가시화

연료분무 가시화를 위해서 Nd-YAG pulse 레이저를 광원으로 하였으며, 원통형렌즈 및 구형렌즈에 의해 형성된 평면빔에 의해 조사된 분

Table 1 Variations of spray characteristics test

인젝터 사양(분무각도)	20°, 40°, 60°
분사압력(bar)	20, 35, 50, 70
분무기간(ms)	1, 10
분무환경	대기분무

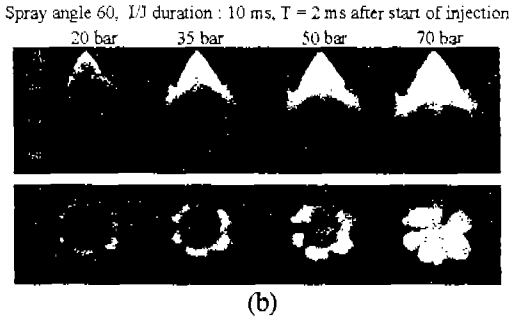
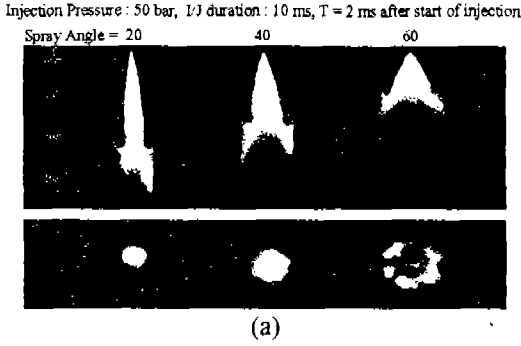


Fig.4 Visualization photograph of spray pattern

무 이미지는 synchronizer에 의해 레이저 및 인젝터와 신호 동기되어 작동되는 고해상도 CCD 카메라(MEGAPLUS4.2)로 가시화하였다. 이 경우 가시화를 위한 사용연료는 n-Heptan을 이용하였으며 대표적인 분무가시화 결과를 Fig.4에 나타내었다.

Fig.4의 (a)는 분사압력 50bar로 10ms동안 분무시 분사후 2ms 시점에서의 분무각도 변화에 따른 횡단면 및 종단면 가시화 결과이다. 분무각도가 클수록 공기유입이 쉬어져 분무 선단부의 진행거리가 작아지나 분무각은 커지며 와류(Vortex)가 상류에 형성됨을 알 수 있다. 분무의 횡단면사진을 보면 분무각도가 작은 20°에서 분무단면에 공기유입이 이루어지지 않아 미립화가 되는 것이 보이지 않지만 40°에서는 공기유입에 의한 미립화가 분무의 바깥면에서 시작됨을 볼 수 있다. 반면에 분무각도 60°인 경우 충분한 공기유입으로 원추(Hollow Cone)형상으로 완전히 발달된 것을 알 수 있다. 그리고

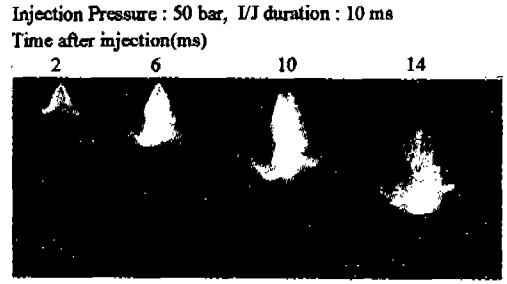


Fig.5 Visualization photograph of spray time history

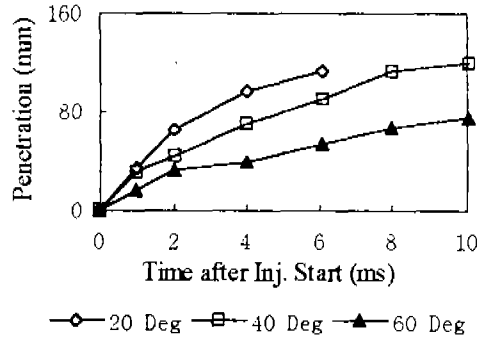


Fig.6 Spray penetration as a function of time after injection at various injection angles

분무면이 6개로 나뉘어져 공기유입을 촉진하도록 되었는데, 이것은 본 인젝터가 인젝터 내부에 스월을 생성시키기 위한 6개의 나선형 홈을 가지는 구조 때문이다.

분무각도가 60°인 인젝터의 분사압력 변화에 따른 가시화 결과를 Fig.4의 (b)에 보여주고 있다. 두 경우 모두 분사압력이 클수록 분사율이 증가되어 연료입자의 밀도가 증가되는 것을 볼 수 있으며, 분무형상의 변화없이 분무선단의 진행거리가 길어져 공기접촉면이 증가하게 된다. 따라서 특정 부하조건에서 적절한 연료량을 고압 분사하는 경우 미립화 촉진화 함께 분사기간의 감소에 의한 공기와의 Mixing 기회시간 증대로 균일 혼합기 형성에 유리함을 알 수 있다.

Fig.5는 분무각도 60°, 분사압력 50bar 조건

에서 시간 변화에 따른 분무의 진행과정을 보여 주고 있다. 분사 종료 후에는 분무의 후단도 공기와 접촉하여 미립화가 진행되고 선단부는 진행속도가 느려졌지만 여전히 연료입자가 밀집된 것을 볼 수 있으며 와류는 계속 성장하여 분무의 미립화 및 공기와의 혼합을 증진시킨다.

Fig.6은 분무각도에 따른 분무 도달 거리(Penetration)를 시간에 따라 보여주고 있다. 분무 개시 후 분무주류의 도달거리는 급격히 진행되어 분사후 2ms에서 분무각도에 따라 약 15~35m/s의 속도로 30~70mm 진행됨을 알 수 있으며 이후 분무가 분열됨에 따라 분무 도달 거리의 정도는 감소됨을 알 수 있다.

이러한 분무 가시화 실험을 통하여 각 인젝터 사양별로 분무되는 패턴을 가시화 함으로써 인젝터와 스파크 플러그의 상대위치 결정을 위한 설계 자료를 제공하였고, 분사압력에 따른 분사 패턴을 가시화하여 분무도달거리(Penetration), 분무 밀도분포(Spray Density Distribution) 등의 정성적 분석을 통해 최적 분사조건 설정에 유용하게 이용하였다.

### 3.2 분무 입경 및 속도

분무연료의 입경과 속도를 측정하기 위해서는 아르곤 이온 레이저(최대출력 5W)의 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하였으며 렌즈의 초점거리는 트랜스미터의 경우 50mm, 리시버의 경우 300mm를 이용하였다.

입경과 속도는 인젝터 선단을 원점으로하여 분무축 방향(Z)으로 Z=10, 30, 60mm를, 반경방향(R)으로는 분무가 도달되는 위치까지 이동하며 동시에 측정하였다. 연료의 분사압력은 20, 35, 50, 70bar로 하였고, 분사주파수 및 분사기간은 실엔진의 1,500rpm, 1.5bar BMEP에 대응하는 12.5Hz, 1ms로 하였다. 각각의 측정위치에서 1,000~3,000개의 데이터를 획득하여 측정된 값들의 축방향, 반경방향의 평균 속도 및 SMD를 구하였다.

분무의 특성 인자 측정시 각 분무조건에서 사이클 변동에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 추정된 것은 연료라인의 압력변동이다. Fig.7은 세

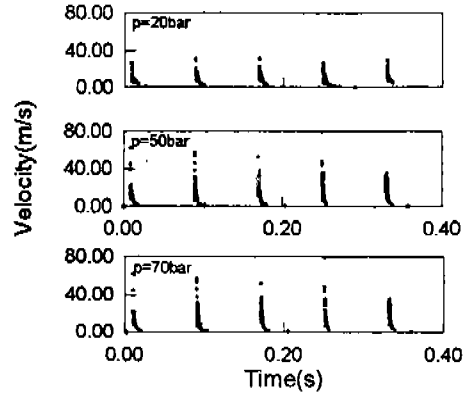


Fig.7 Spray velocity as a function of time at various injection pressures

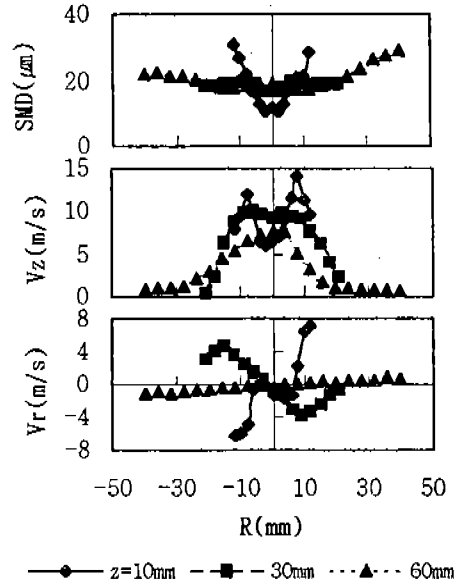


Fig.8 Radial distribution of SMD and velocity at various measuring positions

가지의 압력조건에서 샘플링한 분사속도를 나타 내며 본 연구에서 채용한 common rail형의 직분식 고압연료 시스템의 우수한 압력 조절 기능으로 각 사이클 조건에서 비교적 안정된 분무를 확인할 수 있었다.

분무위치 및 분사압력에 따른 입자의 SMD

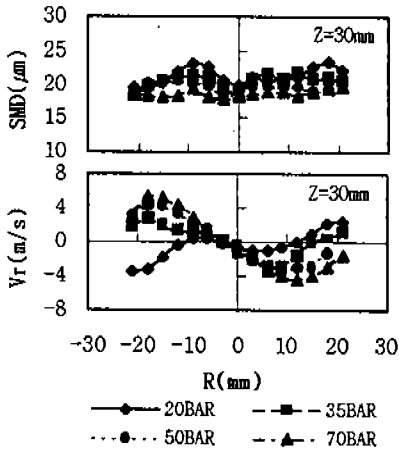


Fig.9 Radial distribution of SMD and velocity at various injection pressures

및 속도를 Fig.8,9에 나타내었다. 분무상류에서는 분무주류에 크기가 큰 입자들이 존재하고 원추 중앙에는 연료 입자의 유입이 적으나 하류로 갈수록 공기와 연료입자의 강한 혼합으로 분무주류와 원추중앙의 입자크기 및 속도가 균일해지고 있다. 반경방향의 속도가 Z=30mm에서 원추 중심으로 향하고 있음을 볼 때 스윙 유동에 의한 공기의 유입이 존재함을 확인할 수 있다. 분사압력의 증가로 SMD(Sauter Mean Diameter)의 저감이 가능하였으나 저감의 효과는 원추형 분무형상을 가진 인젝터의 특성상 적었으며, 분사압력에 따라 공기가 유입되는 위치도 변하며 고압의 경우 공기유입이 되는 위치가 상류로 접근되고 유입속도도 큼을 알 수 있다.

#### 4. 엔진실험 방법 및 조건

엔진 Bench 실험에 있어서의 주된 평가내용은 안정된 운전을 확보하면서 연비 및 배출가스 저감에 효과적인 각종 설계변수나 운전변수 최적화 조건을 주어진 Test Code에 의해 설정하는 것이다. 이 경우 운전조건은 실차량의 상용운전 영역중 1,500rpm, 1.5bar BMEP 및 2,400rpm, 2.5bar BMEP의 두 조건을 대상으로 하였다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 길들이기 이

후 HC Deposit 안정화 실험을 수행하였으며, 재현성 확보를 위해 본 실험도 2회 이상 수행하여 이를 비교하였다.

균일 혼합기 직분식 엔진의 경우 흡기밸브가 열려있는 상태에서 연료를 실린더 내에 직접분사하므로 실린더 내의 유동형태와 인젝터의 분무각도 및 압력, 그 분사시기에 따라 연소특성을 크게 달리하게 되므로 이에 대한 최적 분사시기 결정 실험을 수행하였다. 또한 부분부하에서 공연비의 변화에 따른 성능, 연소해석, 배기가스 특성을 보는 Mixture Loop, Idle 상태에서 점화시기의 영향을 보는 Idle Spark Swing, 공연비를 LBT(4% CO)로 하고 점화시기로는 MBT(DBL-60° CA/DBL)로 하는 전부하 성능을 평가하였으며 이를 포트 인젝션의 결과와 비교하였다. 직접분사엔진의 과도제어 특성을 확인하기 위하여 이론공연비 및 일정한 회전수 2,000rpm에서 부하를 2.5bar BMEP에서 50bar BMEP로 증가시키고 난 후 부하를 다시 2.5bar BMEP로 돌아가는 부하의 계단적인 변화를 주었다.

엔진의 연소안정성의 평가는 IMEP의 변동계수(COV<sub>IMEP</sub>)로 평가하였으며 이 경우 충분한 재현성 확보 및 측정시간을 줄일 수 있도록 500사이클을 측정하였다. 점화지연기간 및 주연소기간은 상용의 Burnrate Program을 사용하였다. 통상 엔진의 연소안정성의 한계는 COV<sub>IMEP</sub> 5% 이하로 하나 가솔린 엔진의 경우 COV<sub>IMEP</sub>

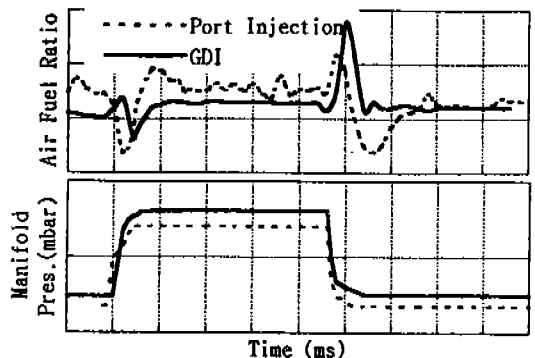


Fig.10 Characteristics of variation of A/F ratio at transient

3% 이상의 경우 연소악화로 BSFC 및 HC 증가동이 발생하므로  $COV_{IMEP}$  3% 이하를 가솔린엔진의 실질적인 연소한계로 보았다.

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 과도 운전시의 공연비 추종성

포트분사식 엔진의 경우, 흡기포트에서의 연료의 Wall Wetting에 의해 냉시동이나 과도운전시 HC가 다량 배출되는 것으로 알려져 있다. 부하가 급변하는 과도운전시 흡입공기량으로 증감에 대한  $O_2$  센서의 피드백 신호의 시간지연 및 예혼합을 위한 분사시기의 영향으로 인해 공연비 변화에 대한 응답성이 느리게 되며 이로부터 다량의 HC 배출원인이 된다. Fig.10은 포트분사식 엔진 및 직분사엔진의 과도 운전시 공연비 추종성을 보여주는 선도이다. 직분식 엔진의 경우 분사연료의 Wall Wetting에 의한 시간 지연 및 사이클 지연이 없으므로 공연비 추종성이 우수함을 알 수 있다.

### 5.2 분사각도에 따른 영향

연료압을 50bar로 설정하고 1,500rpm, 1.5bar

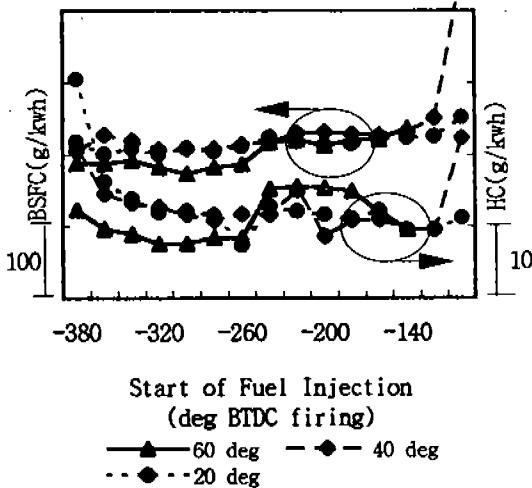


Fig.11 BSFC and HC as a function of injection timing at various injection angles

BMEP 조건에서 연료분무각이 20°, 40°, 60° 인 연료 인젝터를 대상으로 Fig.11에서 보는 바와 같이 이론공연비 상에서 분사시기 변화에 따라 연료소비율 및 HC 배출량 비교실험을 수행하였다. 연료분사 시작점을 기준으로 볼 때 엔진의 연소는 압축 TDC를 기준으로 120° BTDC까지 안정된 연소가 가능하였으며 300° BTDC 부근에서 BSFC가 가장 적고, HC 배출량도 적게 배출됨을 보여준다. 연료공기의 혼합과정은 공기 유동특성에 강하게 의존하므로 통상 흡기 밸브가 열리고 피스톤의 하강운동이 시작한 직후 Bulk Air Motion 및 가장 큰 난류가 형성됨을 볼 때 이 시기의 분사가 활발한 공기이용에 의한 균일 혼합기 형성에 유리함을 알 수 있다. 분무각도에 따라 연료 소비율은 분무입경이 작으므로 혼합기 형성이 가장 좋은 분무각 60°의 경우가 가장 좋게 나타났다. 이로부터 연료분무각이 크고 분사연료의 입경이 작을수록 혼합이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. HC 배출에 있어서는 흡입초기에 분사하는 조기분사의 경우, 연료 분무 가시화 실험 결과에서 알 수 있듯이 분무도달거리(Penetration)가 가장 큰 분무각 20° 인젝터의 경우가 Wall Wetting이 증가하는데 기인하여 가장 많은 배출을 보이고 있으며, 반면 후기분사하는 경우는 상대적으로 HC 배출량이 적음을 보여주고 있다. 또한 분사연료의 입경이 가장 작은 분무각 60°의 경우가 미립화 및 기화촉진 효과 등에 의해 가장 적은 HC를 배출하였다.

이상의 결과로 보아 분사연료가 실린더 벽면에 부딪히지 않는 범위 내에서는 연료분무각이 충분히 클수록 흡입공기와 혼합이 원활하여 엔진성능면에서 유리한 결과를 얻을 수 있었다.

### 5.3 연료 분사압력에 따른 영향

Fig.12는 분무각 60° 인젝터를 대상으로 분사압력 및 분사시기 변화에 대한 연소실험결과를 보여주는 선도이다.

분사압력이 상대적으로 높은 50, 70bar의 연료소비율이 다소 유리함을 보여주며  $NO_x$ 는 분사압력 변화에 따라 일률적인 경향을 보이지 않

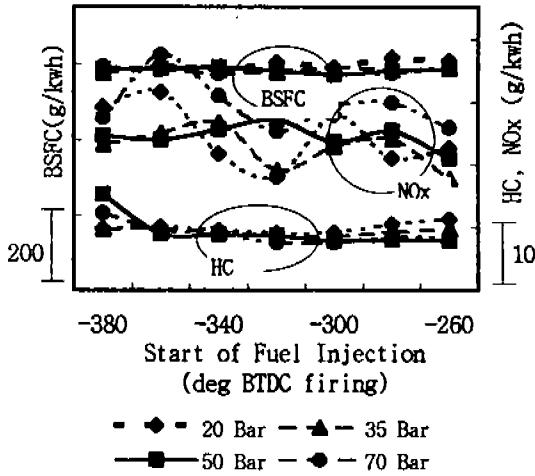


Fig.12 BSFC and HC, NOx as a function of injection timing at various injection pressures

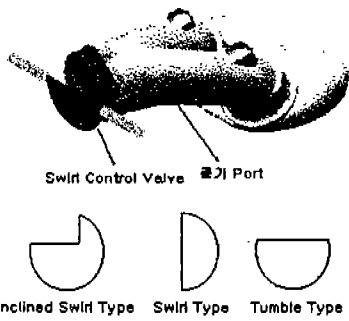


Fig.13 Intake port and SCV shapes

고 있다. HC의 경우도 명확한 경향은 보이지 않으나 상대적으로 피스톤과의 충돌 가능성이 큰 흡입초기 시기에 분사하는 경우 고압분사의 이득이 나타나지 않으나 상대적으로 기화시간이 충분하지 않은 후기분사에서는 고압분사에 의한 미립화 촉진 및 분사시간 단축이 HC 저감에 기여함을 알 수 있다. 따라서 50bar 이상의 압력에서는 뚜렷한 우월 관계를 판별할 수 없기 때문에 향후 내구성 및 엔진 동력손실을 고려 50bar로 분사압력을 설정하였다.

#### 5.4 유동특성에 따른 영향

이론공연비 직분식 운전에서 있어서 균일한 혼

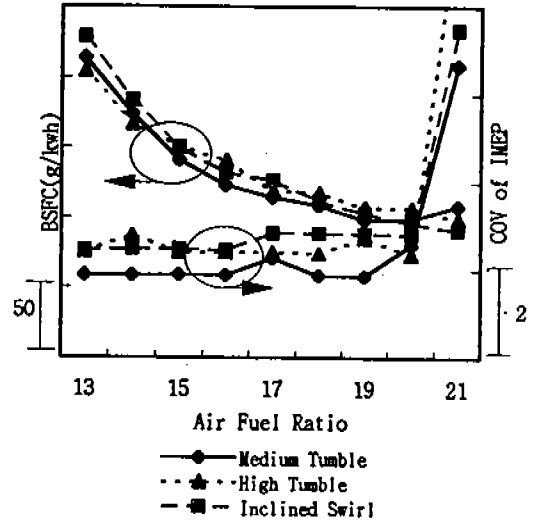


Fig.14 BSFC and COV of IMEP as a function of A/F ratio at various flow patterns

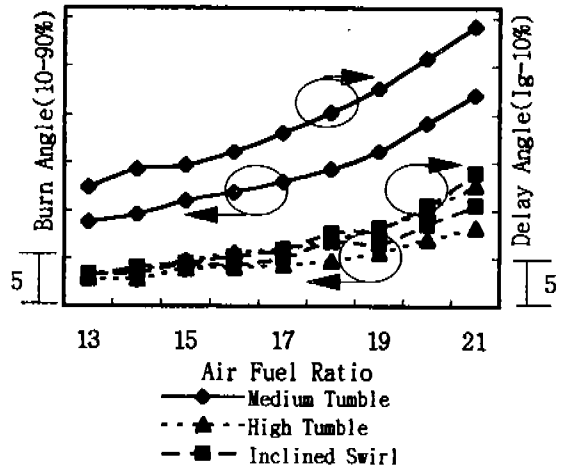


Fig.15 Burn angle and delay angle as a function of A/F ratio at various flow patterns

합기의 형성 및 공기유동개선에 의한 연소촉진 및 배기가스 저감 효과를 얻기 위해 중텀블(Medium Tumble)을 갖는 베이스 엔진의 포트에 Fig.13과 같은 스윙조절 밸브(SCV, Swirl Control Valve)를 이용 고텀블(High Tumble), 경사스윙(Inclined Swirl)을 발생시켜 도입공기



의 유동개선을 시도하였다. Fig.14 및 Fig.15는 이 경우의 엔진 실험결과를 나타낸다. Fig.14의 연비 및 연소 안정성을 보면 각 경우 모두 중탑블의 경우가 유리한 결과를 보여준다. 그러나 Fig. 15의 연소기간 및 점화지연기간 비교 선도를 보면 유동장을 강화시킨 경우가 연소 촉진 효과에 의해 급속연소가 됨을 알 수 있다.

이러한 결과는 유동장 강화의 이득을 얻지 못한 것으로 통상 예혼합연소의 경우 유동장의 개선은 연비 및 배기가스에 직접적인 영향을 미치나 포트 분사식은 달리 실린더내에 직접 연료를 분사하는 경우, 인젝터에서 분사되는 연료의 입경은 매우 작고 주변 공기 유동에 더욱 큰 영향을 받으므로 분무 연료의 벽면 충돌을 줄이면서 균일 혼합기를 형성하기 위해서는 분무와 공기 유동의 고정도의 제어가 필요함을 알 수 있다.

### 5.5 압축비에 따른 영향

일반적으로 직접분사식 엔진은 실린더내에 직접연료를 분사함에 따른 기화잠열의 영향으로 요구옥탄가가 증가하게 되며 이로부터 열효율 향상을 기대할 수 있다.

Fig.16은 압축비 9.3 및 11.9의 경우 공연비 변화에 따른 연료소비율, NOx 및 HC 배출결과를 포트 분사식과 비교한 선도이다. 예상대로 연료소비율은 압축비 증가에 의해 개선되며, 반면 HC 및 NOx 배출에 있어서는 체적에 대한 표면적의 비(Surface Volume Ratio)의 증가 및 연소온도 증가에 의해 일부 증가됨을 보여준다.

### 5.6 Idle 및 전부하 평가

Fig.17 및 Fig.18은 연료소비량 및 연소안정성, HC 및 NOx에 대한 Idle 이론공연비 운전에서의 Ignition Swing 결과이다. 포트분사식의 경우, 점화시기 BTDC 25~30°에서 안정된 연소를 보이지만 직접 연소실에 연료를 분사하면 5~30°의 넓은 범위에서 안정된 연소를 한다. 이때의 연료소비율을 보면 비슷한 수준이다. HC 배출은 직접분사의 경우가 다소 높은 편이지만 NOx는 직접분사식의 경우가 다소 낮게 배출됨을 보여준다.

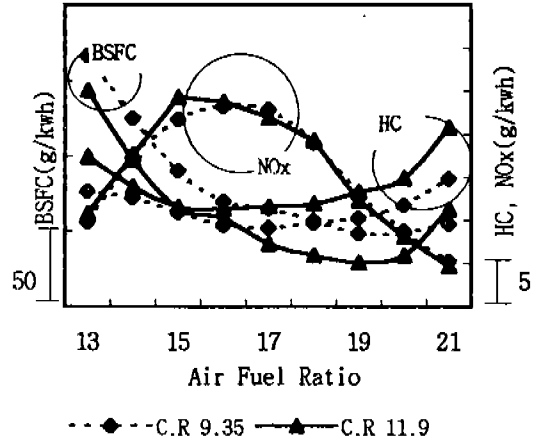


Fig.16 BSFC and HC, NOx as a function of A/F ratio at various compression ratios

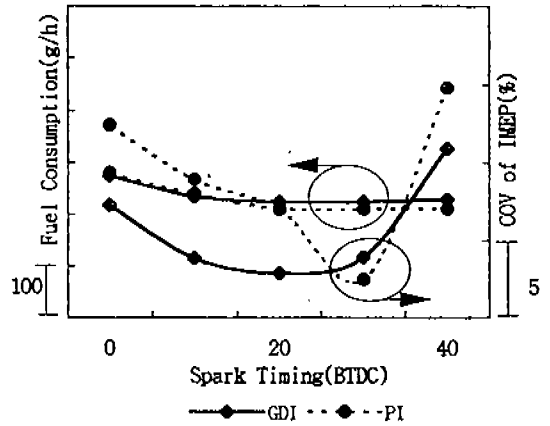


Fig.17 Fuel consumption and COV of IMEP as a function of spark timing at GDI and PI

이것은 고압 연료를 실린더내 직접분사시 미립화에 의한 기화촉진 효과에 비해 Idle 미립화에 의한 기화촉진 효과에 비해 Idle시 흡입공기 유동저하에 따른 mixing 저하 및 유동과 분무와의 상대제어가 충분하지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 기화촉진 및 mixing 개선에 따른 균열 혼합기 형성을 위해 흡입 유동강화 및 분사압력 상승, 인젝터 위치 변경 등

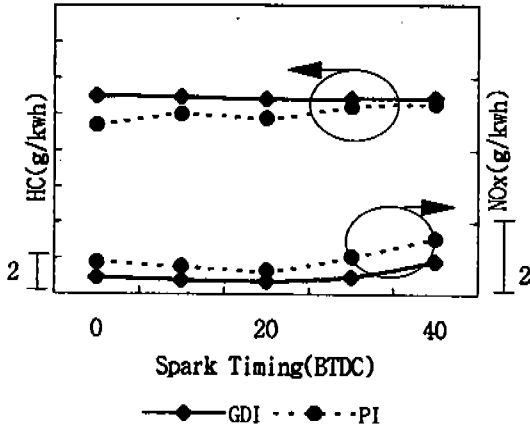


Fig.18 HC and NOx as a function of spark timing at GDI and PI

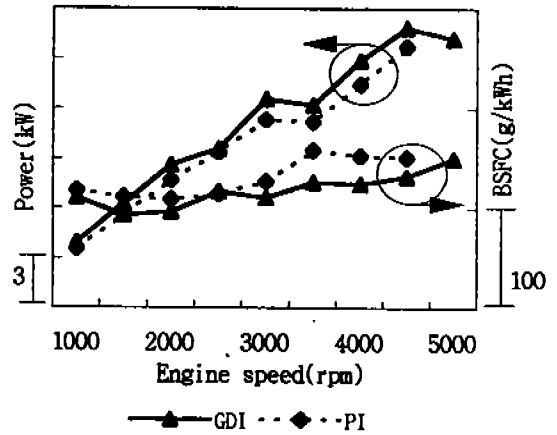


Fig.19 Power and BSFC as a function of engine speed at GDI and PI

의 실험을 수행하여 이에대한 개선을 시도중이다.

직접분사식과 포트분사식 엔진의 전부하 출력 및 연료 소비율을 나타낸 선도가 Fig.19로 직접 분사식 엔진의 경우가 전운전 영역에서 출력 및 연비에 있어서 우수함을 알 수 있다. 이는 흡입 행정중에 연료를 직접 분사함에 따른 기화 잠열의 영향으로 혼합기의 온도가 저하하게 되고 이로부터 충전효율의 향상과 압축비의 증대가 가능한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

냉시동 및 과도운전시의 고정도의 공연비 제어가 가능하므로써 모드 주행시 배출가스 및 연비 저감이 가능하고 공연비 응답성이 향상되므로 발전성 및 추월성능 등 과도운전시의 차량 성능 향상이 기대되는 이론 공연비 직접분사식 엔진의 개발 실험으로부터 지금까지 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 직접 분사식 가솔린 엔진 개발에 있어서 중요한 개발내용의 하나는 신뢰성 있는 연료분사 시스템을 이용 전 운전 영역에서의 안정된 운전의 확보이다. 본 연구에서는 전자식 연료펌프 및 스웰 인젝터, Common Rail식 연료공급 시스템을 구축, 단기통 엔진을 통해 안정된 직분식 운전을 확보하

였다.

- 레이저를 이용한 연료분무 가시화 및 분무 입경 및 속도의 측정으로부터 직접분사엔진의 인젝터의 분무특성을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 인젝터 선정 및 위치, 분사압력 및 분사시기의 설정 등을 위한 기초자료를 얻을 수 있었다.
- 직접분사식 균일혼합연소에 있어서 분사압력이 높으면서 연료분사각이 충분히 크고 실린더 벽면 및 피스톤에 부딪히지 않는 범위 내에서는 분사하는 것이 균일혼합기 형성에 유리하여 엔진성능면에서 유리하였다.
- 유동장 강화, 압축비 향상, 분사각도 및 압력, 분사시기등 몇가지 설계변수 및 운전 변수의 최적화 실험을 통해 직접분사식 균일혼합 엔진의 가능성을 확인하였다. 현재 steady 운전조건인 bench 실험에서는 포트분사식 엔진과 동등 이상의 성능을 얻을 수 있었다.
- 이론 공연비 직분식 운전에 있어서 균일한 혼합기의 형성 및 공기유동개선에 의한 연소속진 및 배기가스 저감 효과를 얻기 위해서는 분무 연료의 벽면 충돌을 줄이면서 균일 혼합기를 형성하기 위해 분무의 공기 유동의 고정도의 매칭이 매우 중요함을 확인 할 수 있었으며, 좀더 적극적이고 효과

적인 유동제어와 분무제어가 필요함을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

1. S. Iguchi, "Combustion and Current Status of Lean Burn Engine", Lean Burn Gasoline Engine Symposium, Japan, 1992.
2. Chulho Yu, Taehoon Kim, Yonggyun Yi, Juheon Lee, Seokhong Noh, and Kyuhoon Choi, "Development of KMC 2.4L Lean Burn Engine", SAE Paper No.950685.
3. Tateshi Kume, Hiroshi Tanada, Kazumasa Iida, Nobuaki Murakami, Hiromitsu Ando, "Combustion control Technologies for Direct Injection Engines", SAE paper No. 9631948.
4. "直噴 ガソリン エンジン Toyota D-4 & Mitsubishi GDI", 自動車工学, Japan, 1996.
5. G.K.Fraidl, W.F.Piock, and M.Wirth, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion System", SAE Paper 960465.
6. T.Kume, Y.Iwamoto, K.Iida, M.Murakami, K.Akishino, and H.Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE Paper 960600.
7. Seok hong Noh, Yonggyun Yi, Chulho Yu, Naehyun Lee, Minho Chang, Kyuhoon Choi, "Development of KMC Medium Displacement Lean Burn Engine", Proceeding of 4th Next Generation Vehicle Workshop, 1996.
8. Chulho Yu, Jongho Park, Naehyun Lee, Kyuhoon Choi, "An Study on the Spray and Combustion Characteristic of Gasoline Direct Injector", 추계학술대회, KSAE, 1996.
9. Naehyun Lee, Chulho Yu et al., "An Experimental Study on the Development of Stoichiometric Direct Injection Gasoline Engine", 기관, 공해, 연료 및 윤활유 부문 학술강연회, KSAE, 1996.