

## 가솔린 직접분사 엔진의 흡기과급이 성층화 연소에 미치는 영향

조 남 효\* · 박 형 철 · 김 미 로

고등기술연구원 기계의용기술센터

### Effect of Boosted Intake Pressure on Stratified Combustion of a Gasoline Direct Injection Engine

Nam-Hyo Cho\* · Hyung-Cheul Park · Mi-Ro Kim

Mechanical and Medical Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Gyeonggi-do 449-863, Korea

(Received 28 November 2002 / Accepted 27 January 2003)

**Abstract** : The effects of pressure charge on combustion stability and emissions have been analyzed using a GDI single cylinder engine. A late injection mode of stratified condition at the air-fuel ratio of 40:1 for 1200~2400 rpm was tested while the boosted pressure ratio was increased up to 1.5:1. In-cylinder CFD analysis was also performed for better understanding of in-cylinder flow and fuel spray behavior. With a higher boosted pressure ratio the IMEP was increased greatly due to the increased engine load, and the ISFC was improved by more than 10% at all engine speeds. The regime of stable stratified combustion was extended to a higher engine speed, but the spark ignition angle had to be more advanced for stable combustion. The emissions of ISHC and ISNO<sub>x</sub> did not show a particular trend for the increased engine speed but a general trend of lower ISHC and higher ISNO<sub>x</sub> for a gasoline engine.

**Key words** : Gasoline direct injection engine(가솔린 직접분사식 엔진), Boosted intake pressure(흡기과급), Combustion stability(연소안정성), Stratified combustion(성층화 연소), In-cylinder CFD(실린더내부 유동해석)

### 1. 서 론

GDI 엔진은 고압의 가솔린을 연소실 내에 직접 분사하는 방식으로 혼합기의 형성기간이 포트 분사식 엔진보다 매우 짧고 연소실내 유동 특성에 민감하기 때문에 혼합정도가 적절하게 이루어지도록 분무 제어의 최적화가 필요하다. 연료분사 제어방식에 따라 가솔린엔진의 일반 포트분사 조건과 유사하도록 균일혼합기를 형성하여 연소하는 조기분사(Early injection) 방식과 디젤 직접분사식엔진과 유사하게 초회박 공연비 조건에서 성층혼합을 이용하여 연소하는 후기분사(Late injection) 방식으로 나눌

수 있다. 후자인 경우 초회박 공기연료비 조건에서 안정적인 연소를 실현하기 위해서는 실린더 내부에서의 연료분무와 유동을 적절히 제어하는 기술이 필수적이다. GDI 엔진의 성공적인 개발여부는 폭넓은 엔진 운전조건에서 연료분무 혼합기를 점화플러그 주변에 얼마나 안정적으로 분포시킬 수 있는가에 달려 있다. 성층 운전영역일 경우 공기연료비는 20:1에서 60:1까지 이르기도 한다. 이 경우 공기요구량은 증가하기 때문에 흡기매니폴드의 압력은 일반 포트분사 엔진보다 높아서 펌핑손실(Pumping loss)의 감소와 연료소비율의 향상을 가져오게 된다.<sup>1-4)</sup> 높은 흡입공기량의 증가로 인해 성층영역의 운전은 낮은 엔진속도와 낮은 토크 조건으로 한정되어지는

\*To whom correspondence should be addressed.  
nhcho@iae.re.kr

경우가 일반적이나 흡입압력을 높일 경우 공기량은 증가되어 성층운전영역은 확장된다.<sup>2,4)</sup>

흡입공기가 과급되면 동일한 공기연료비를 유지하기 위해서는 더 많은 연료량을 분사해야하므로 엔진 출력이 증가하게된다. 이러한 과급장치는 대표적으로 터보차저와 수퍼차저가 있으며 최근 이를 이용한 GDI 엔진에 대한 연구가 2세대 GDI 엔진 개념으로 활발히 이루어지고 있다.<sup>1,3)</sup>

본 연구에서는 저자들이 개발한 GDI 단기통 엔진에 이러한 과급기술을 적용하여 성층화영역에서의 연소 및 배기 특성을 중점적으로 고찰하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 단기통엔진 시험장치

본 실험에 사용된 GDI 단기통 엔진의 제원과 구성을 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 연소실 중앙에 점화플러그를 설치하였으며 고압분사식 인젝터는 흡기관과 실린더 헤드 연결되는 부분의 하단에 설치하였다. 연료를 후기분사할 경우 성층연소를 위해

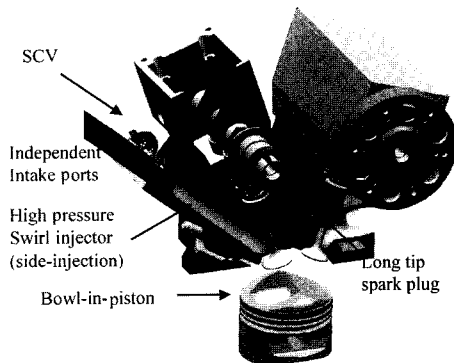


Fig. 1 Schematic diagram of the GDI engine

Table 1 Specification of the test engine

Engine	GDI single cylinder, DOHC, 4 valves
Bore	79.0mm
Stroke	81.5mm
Displacement volume	399.5cc
Compression ratio	11.5 : 1
Swirl ratio (Impulse type)	2.3 (one port blocked by an SCV)
Valve timing (deg.):	
IVO / IVC	11(BTDC)/43(ABDC)
EVO / EVC	41(BBDC)/13(ATDC)

실린더 헤드는 스월형 헤드를 사용하였으며 스월조절밸브(Swirl control valve; SCV)를 사용하여 한 쪽 포트를 막아 실린더내 스월유동을 강화하였다.

실린더 압력은 연소실내에 플래쉬 마운팅형 압력 센서(Kistler 6051B)를 설치하여 측정하였으며 플래넘챔버에는 절대압센서(Kistler 4075B)를 설치하여 흡기압력을 측정하였다. 연료 분사 및 점화시기를 제어하기 위하여 캠센서와 엔코더(360pulse/rev.)를 사용하였으며 엔진제어장치(DSECU-1)를 별도로 제작하여 사용하였다. 연료와 공기의 혼합정도를 확인하기 위하여 UEGO 센서(Horiba Mexa-110)를 사용하였으며 실린더 헤드에서 배기관으로 약 200 mm위치에 센서를 설치하였다. 배기가스온도는 약 160mm 떨어진 곳에서 측정하였다. 배기가스분석은 영국 Signal사의 배기가스 분석장치를 사용하였고 샘플링 가스는 배기포트로부터 약 130mm 위치에서 채취하였다. 매연의 정도를 측정하기 위하여 스모크미터(AVL 415S)를 설치하였으며 측정위치는 배기포트로부터 약 250mm 위치이다. 점화플러그는 Champion사의 전극길이 7mm 점화플러그를 사용하였으며 점화코일은 캔형 코일을 사용하였다. 실린더내에 연료를 직접 분사하기 위해 연료공급라인에 70bar 정도의 압력을 유지하였으며 이를 위해 연료라인에 압력 조절기 및 압력센서를 설치하였다. GDI 인젝터는 Delphi사의 개발용 시제품을 사용하였으며 분무특성 및 엔진시험결과 등은 참고문헌<sup>5-7)</sup>을 참고하기 바란다.

### 2.2 과급장치 구성

본 실험에 사용하기 위한 과급장치는 구동리그를 별도로 제작하여 과급기의 성능을 선행실험을 통해 미리 측정하였다. 과급기는 Opcon사의 OA2089형 (Twin screw charger)을 사용하였는데 최대압력비 2.0, 최대용량 12.3m<sup>3</sup>/min이었다. 구동모터는 22kW의 정격출력을 갖는 3상 AC 모터를 사용하였으며 인버터를 이용하여 모터의 회전속도를 제어하였다. 모터의 출력과 과급기의 입력은 벨트로 전달되며 이 때 과급기의 회전속도를 높이기 위해 벨트 풀리의 원주비를 1:5로 제작하였다. Fig. 2에 본 실험에 사용된 과급장치의 개략도를 나타내었다.

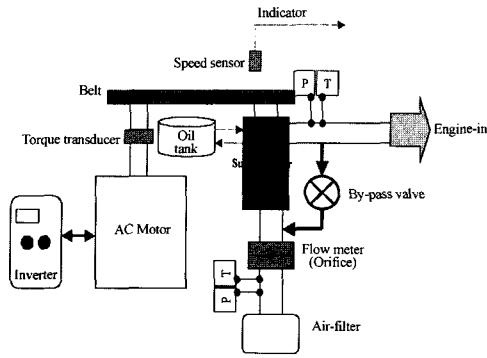


Fig. 2 Schematic diagram of the supercharger test rig

또한 과급기의 입출구 온도를 측정하기 위해 K형 온도센서를 설치하였으며 출구압력은 엔진의 흡기 포트에 가까운 압력을 측정하는 것으로 대체하였다. 과급기의 출구를 시험엔진 흡기포트에 연결하기 위해  $\phi = 75\text{mm}$ 의 고압형 탄성 호스를 사용하였다. 과급의 영향에 따른 흡기온도상승을 고려하기 위해 400cm의 긴 관을 사용하여 자연냉각을 유도하였다. 인터쿨러의 사용은 소요동력 측정에 대한 신뢰성 검토로 인하여 배제하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 성층화 영역에서의 과급에 따른 연소특성

단기통엔진 실험을 통해 성층화 운전 영역에서 흡기과급이 연소성과 배기가스에 주는 영향을 분석하였다. 운전조건은 엔진시험에서 빈번하게 사용되는 부분부하 조건을 선택하였다. 연료 분사압력은 70bar로 고정하였으며 관련 인자에 대하여 엔진 회전속도와 흡기압력을 일정하게 유지하고 EOI과 점화시기를 변화해가면서 연소안정성, 연료소비율, 배출물 특성을 분석하였다.

Fig. 3, 4는 1200rpm에서 측정한 과급 GDI 단기통엔진의 연소특성을 보여주고 있다. 동일한 공연비 40:1을 맞추기 위해서는 흡입공기량 증가에 따라 연료량도 증가되어야 한다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 IMEP는 증가하게 되며 NA(Natural aspiration) 조건에서 IMEP 3.2bar, 과급비(Pr) 1.5 조건에서 최고 6bar를 나타내었다.

일반적으로 과급기는 체적효율의 향상을 통해 동

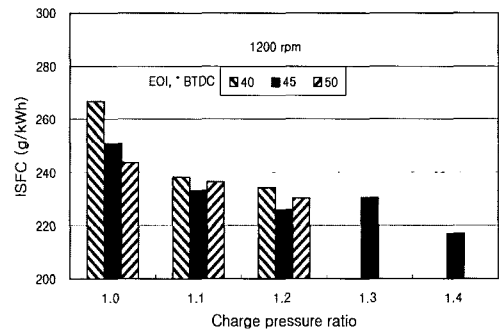
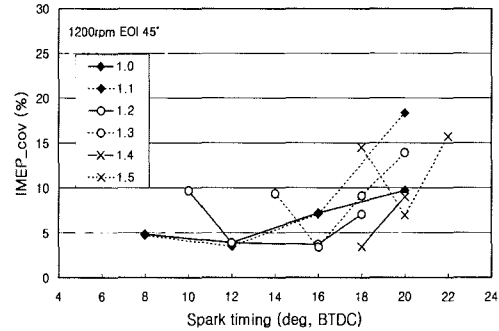
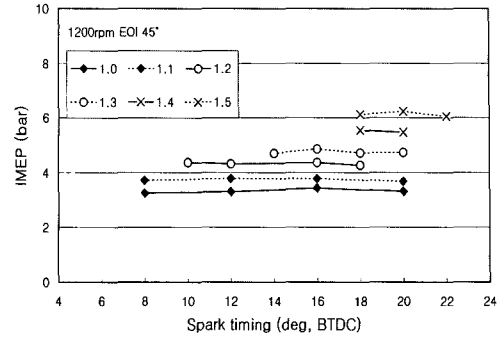


Fig. 3 Effects of boosted pressure on combustion characteristics(1200rpm, Pr 1.0~1.4, A/F 40:1)

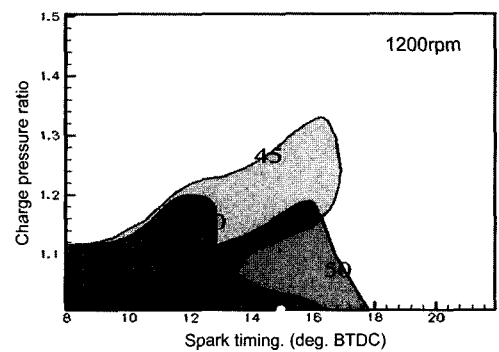


Fig. 4 Regime of stable combustion at EOI of 40, 45, 50 BTDC (IMEPcov < 5%, 1200rpm, A/F 40:1)

일 출력 대비 연료소비율을 좋게 한다. Fig. 3의 최하단은 EOI 시점에서 흡기과급에 따른 지시연료소비율(ISFC)을 보여주는데 연소안정성이 나쁜 영역은 표시하지 않았다. 과급비가 증가할수록 ISFC는 감소하는 추세를 보여주고 있다. Fig. 4는 1200rpm에서 각 EOI와 점화시기에 따른 과급의 한계를 보여주고 있다. 이 영역은 연소안정성이 5%이내의 영역을 나타내고 있다. 과급비가 증가할수록 연소안정성을 확보할 수 있는 점화시기 영역은 좁아지고 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 연소안정성(IMEPcov)측면에서 보면 과급비가 1.3 이상이 되면 불안정한 연소 현상이 발생하여 이 이상의 과급조건에서는 안정된 운전이 불가능하게 된다. 실제로 과급비 1.4 이상이 되면 주어진 점화시기의 영역에서는 안정된 연소가 이루어지지 않으므로 1200rpm의 부분부하 영역에서의 실제 운전영역은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3의 1200rpm 조건에서 부분부하 성층화영역 중에서 공연비 40:1 조건으로 운전할 경우 NA조건에서는 IMEP가 약 3.5bar 이상으로 확대되지 않았다. 즉 IMEP 4bar로 증가할 경우 공연비는 36:1로 낮

아지게 됨을 선행연구에서 볼 수 있었다.<sup>5)</sup> 그러나 과급을 통해서 IMEP 6bar까지 공기연료비를 40:1로 유지할 수 있어 성층화 영역이 확대됨을 볼 수 있었다.

Fig. 5는 2000, 2400rpm에서 과급비에 따른 연소안정성 선도를 보여준다. 대체로 과급비를 증가할 때 점화 진각이 가능해지면서 운전영역이 확대되는 경향을 볼 수 있다. 엔진회전수가 이 이상 계속 증가하면 과급비가 상대적으로 높을 경우에는 제한된 영역에서만 연소안정성을 보여주는 것을 볼 수 있는데 이것은 본 연구에서 사용된 엔진의 특성으로 판단된다.

Fig. 6은 1200rpm 조건에서 연소압력, 열발생률

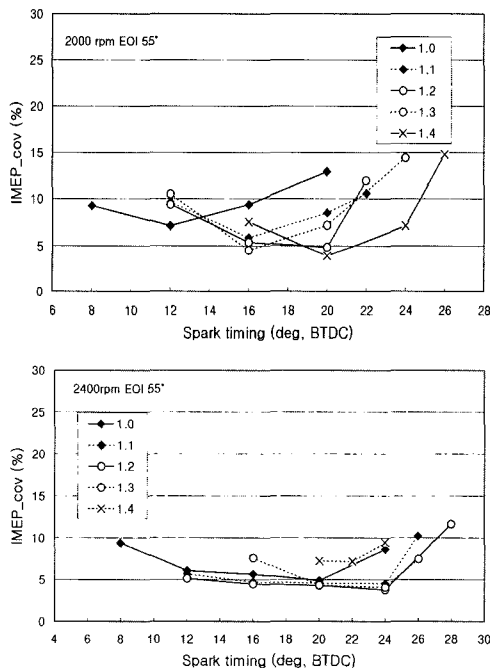


Fig. 5 Effects of boosted pressure on combustion characteristics at 2000rpm(top), 2400rpm(bottom) (Pr 1.0~1.4, A/F 40:1, EOI 55 deg. BTDC)

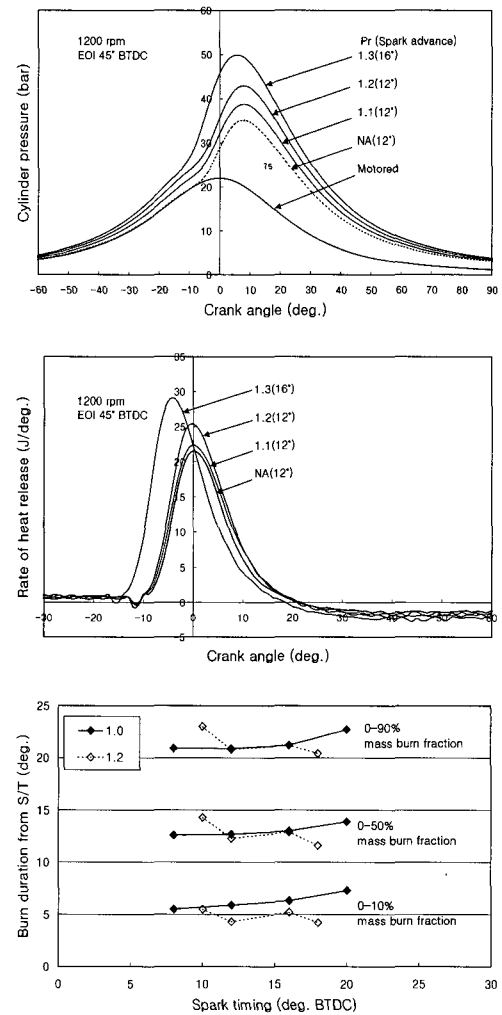


Fig. 6 Effects of boosted pressure on P-Theta diagram(top), ROHR(middle), MBF(bottom) (1200rpm, Pr 1.0~1.4, A/F 40:1, EOI 45 deg. BTDC)

(ROHR), 질량연소율(MBF)을 나타낸 그림이다. 과급에 따른 공기량과 연료량 증가에 따라 최고 실린더압력과 열발생량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 과급비 1.3의 경우 상대적으로 실린더압력과 열발생선도가 급격하게 증가하는데 점화진각이 상대적으로 크기 때문으로 생각된다. 최하단 그림은 점화진각에 대한 질량연소율 변화를 나타낸다. 과급을 하게 되면 NA보다 초기 화염발달기간(MBF 0-10%)이 짧은 특성을 보여준다. 그러나 과급 여부에 따른 총연소기간은 큰 차이를 보여주지 않는다. 또한 과급의 경우 점화진각을 크게 할 수록 급속연소 경향을 보여주고 있다. 엔진회전수를 증가할 경우 NA보다 과급의 경우가 실험 결과 상대적으로 빠른 연소를 보여주고 있다. 엔진회전수별 ISFC의 영향은 Fig. 7에 나타내었다. 과급에 따라 ISFC가 10% 이상 향상되는 것을 보여주며, 엔진회전수가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 특성을 보여준다.

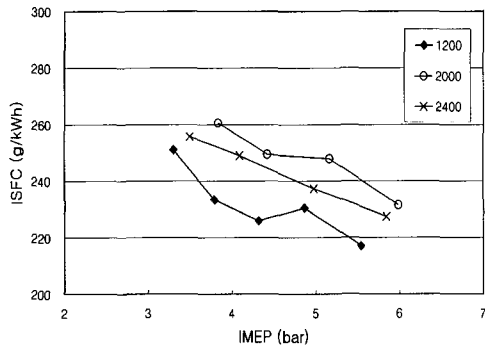


Fig. 7 ISFC vs IMEP at three engine speeds(A/F 40:1)

### 3.2 성층화 영역에서의 배출가스 특성

Fig. 8~10은 각각 1200, 2000, 2400rpm에서의 엔진부하별 배출특성을 보여준다. 각 부하별 연소안정성이 가장 좋은 점화시기를 대표로 선정하여 나타내었으며, IMEP의 증가는 과급비 증가에 따른 엔진부하의 증가임을 유의해야 된다.

일반적으로 엔진이 희박 공연비에서 운전할 경우 일반 포트분사 엔진보다 HC 배출량이 상대적으로 많이 발생된다. 또한 GDI 엔진의 성층화 영역에서의 불완전 연소도 추가적인 요인이 되는 것으로 생각된다. Fig. 8에서 보면 엔진회전수 증가에 따른 일정한

경향은 볼 수 없으나, 동일 회전수에서는 엔진부하가 증가할 수록 상당한 양이 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 ISNOx의 변화를 보여준다. 엔진회전수에 따른 특별한 변화는 볼 수 없으나 엔진부하 증가에 따라, 즉 과급에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 가솔린엔진의 일반적인 경향이기는 하지만 과급비 증가에 따라 흡기온도가 상승하는 본 실험의 영향이 더해진 것으로 보여진다.

Fig. 10은 스모크 배출 특성을 보여준다. 엔진회

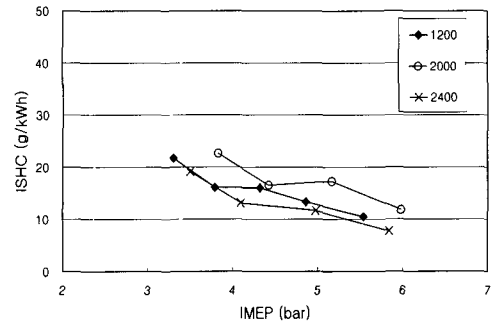


Fig. 8 ISHC vs IMEP at three engine speeds(A/F 40:1)

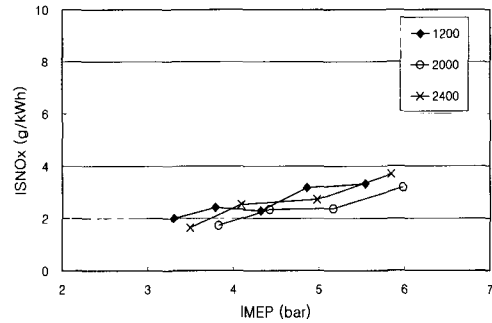


Fig. 9 ISNOx vs IMEP at three engine speeds(A/F 40:1)

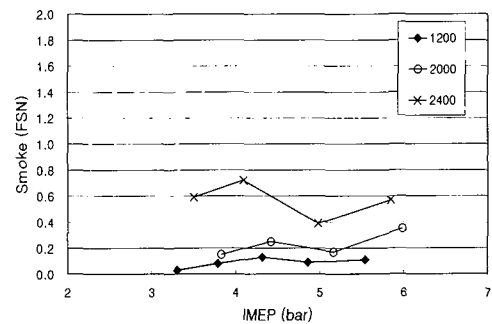


Fig. 10 Smoke(FSN; Bosch Filter Smoke Number) vs IMEP at three engine speeds(A/F 40:1)

전수가 증가함에 따라 전반적 수준이 크게 증가하는 경향을 보여 주는데 2400rpm의 경우 스모크 배출량이 과다한 수준으로 평가되며 이것은 본 실험에서 사용된 단기통 GDI 엔진의 특성으로 보여진다.

#### 4. 흡기과급에 따른 실린더 유동 특성

3장의 실험결과 분석을 보완하기 위해 흡기과급에 따른 실린더 내부 유동 및 연료분무특성에 대한 CFD 해석을 수행하였으며 해석조건은 대표적인 운전구간인 2000rpm으로 설정하였다. 무과급 조건의 CFD 해석은 참고문헌<sup>8,9)</sup>을 참고하기 바란다.

Fig. 11은 흡기압력비를 NA에서부터 1.5배까지 증가시키며 수행한 비정상 스월비(Swirl ratio;  $R_s$ )의 해석결과이다. 상기 Pr은 NA 압력대비 실제 흡기압력의 비율로써 실험에서는 NA에 따라 같은 Pr에서도 약간의 압력차가 발생할 수 있으나 본 CFD 해석에서는 NA 조건을 1.0bar로 가정하여 해석을 수행하였다.

최대 스월비는 NA 조건에 비해 1.4~1.5Pr의 결과가 20~30% 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 흡기행정 초기에 흡기밸브가 열리면서 갑자기 매우 강한 유속의 공기가 흡입되어 실린더내에 형성되어 있는 주유동을 밀어내기 때문으로 생각된다. 최종적으로는 최대 밸브리프트 구간을 지나면서 초기 유동 형태는 대부분 주유동에 흡수되게 된다.

Fig. 12와 13은 연소실 중심 단면에서 두 흡기조건에 따른 연료농도분포를 나타내는데 각각 EOI

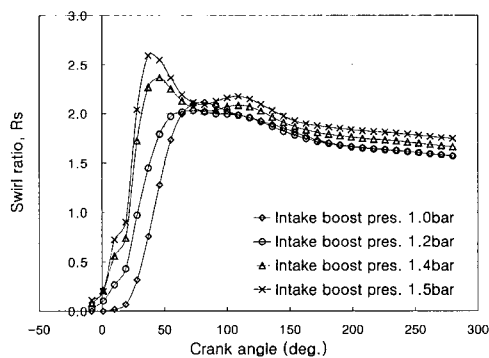


Fig. 11 Transient behavior of the in-cylinder swirl ratio during the intake and compression strokes for various boosted pressure ratios(2000rpm)

(End of injection)와 EOI 이후 10도 크랭크각(CA)에서의 해석결과를 보여준다. Fig. 12의 진한색 부분은 공연비가 25:1 이하인 농후한 연료 분포영역을 나타내는데 흡기과급에 따른 공기량과 연료량의 증가로 인하여 1.4 Pr의 경우 더욱 넓게 분포된 것을 볼 수 있다. 특히 1.4 Pr로 과급된 흡기조건의 경우 EOI 시점에서 NA 경우에 비하여 압력과 온도가 각각 1bar, 30°C 이상 증가하기 때문에 더욱 빠르게 증발하는 것을 알 수 있었으며, 또한 같은 시점에서 스월비가

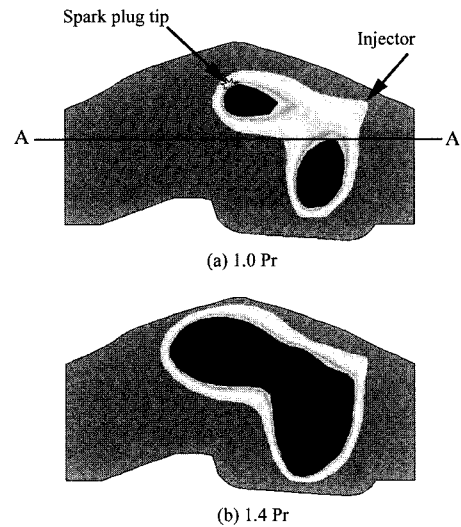


Fig. 12 Calculated distribution of fuel vapor density at EOI (2000 rpm)

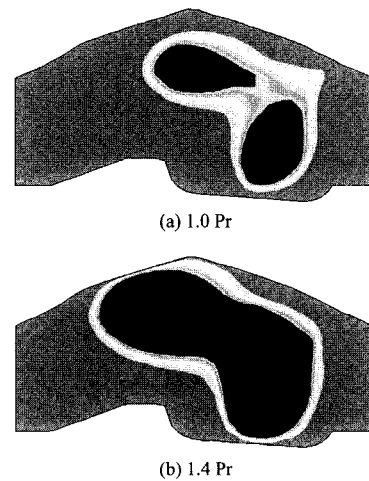


Fig. 13 Calculated distribution of fuel vapor density at 10 deg. CA after EOI (2000 rpm)

10% 정도 증가한 유동특성으로 인하여 균일하게 혼합되는 속도 역시 더 빠른 것으로 판단된다.

Fig. 13은 EOI이후 10도 CA에서의 분포를 보여준다. 점화플러그 끝단이 상대적으로 농후한 연료분무 영역에 위치하게 되므로 연소안정성이 향상될 것으로 판단할 수 있는데 Fig. 5의 실험결과도 동일한 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 14와 15는 Fig. 12에 표시한 A-A단면에서 연료 농도분포이며 모든 조건은 각각 Fig. 12 및 13과 같다. NA 조건보다는 1.4 Pr의 경우 더욱 농후한 혼합기가 점화플러그 주변으로 이동하는 경향을 볼 수 있다.

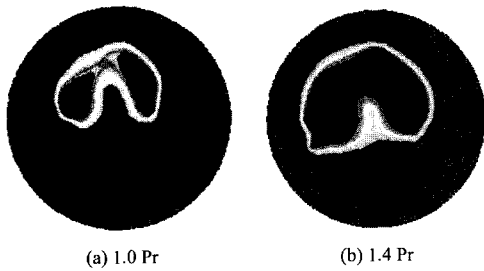


Fig. 14 Calculated distribution of fuel vapor density at EOI (A-A section in Fig. 4, 2000 rpm)

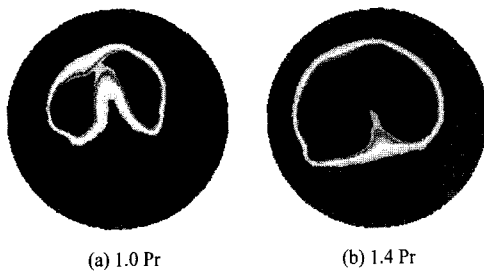


Fig. 15 Calculated distribution of fuel vapor density at 10 deg. CA after EOI (A-A section in Fig. 4, 2000 rpm)

## 5. 결론

측면분사방식과 스웰 유동형태를 적용한 GDI 연소시스템에서 별도의 구동 동력을 사용한 과급기를 적용하여 성층화 연소특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 실험조건은 공연비 40:1, 과급비 1.1~1.5배, 엔진회전수 1200, 2000, 2400rpm의 저중속 조건으로 설정하였다.

1) 과급비 증가에 따른 엔진부하의 증대로 IMEP

는 증가하고 ISFC는 10% 이상 감소하는 경향을 보여주었다. 과급을 이용한 성층화 운전영역의 확장 시에는 상대적으로 점화시기가 자연흡기보다 진각 되어야 하는 한편 안정된 연소를 위한 점화시기 영역은 좁아지는 현상을 볼 수 있었다.

2) 엔진회전수에 따른 ISHC, ISNOx 변화 특성은 특이한 경향을 보여주지 않았으며 과급비 증가에 따라 ISHC는 감소하고 ISNOx는 증가하는 가솔린엔진의 일반적인 특성을 보여주었다.

3) 흡기과급에 따른 실린더내 분무 특성을 이해하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 과급비 증가에 따라 실린더내 압력과 온도가 더 증가하고 점화플러그 주위의 농후한 연료분포 영역이 확대되어 연소안정성이 증대될 것으로 예상되었으며 실험결과도 유사한 경향을 보여주었다.

## References

- 1) J. Buckland, J. Cook, I. Kolmanovsky, J. Sun, "Technology Assessment of Boosted Direct Injection Stratified Charge Gasoline Engine," SAE 2000-01-0249, 2000.
- 2) M. Wirth, U. Mayerhofer, W. F. Piock, G. K. Fraidl, "Turbocharging the DI Gasoline Engine," SAE 2000-01-0251, 2000.
- 3) F. Kramer, Ch. Schwarz, A. Witt, "Effect of Compression Ratio on the Combustion of a Pressure Charged Gasoline Direct Injection Engine," SAE 2000-01-0250, 2000.
- 4) A. Ranini, G. Monnier, "Turbocharging a Gasoline Direct Engine," SAE 2001-01-0736, 2001.
- 5) Han-Seung Cho, Tae-Yong Park, Sung-Jin Park, Nam-Hyo Cho, "Engine Operation Characteristics of a Gasoline Direct Injection Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.5, pp.54-66, 2000.
- 6) Jae-Won Song, Mi-Ro Kim, Han-Seung Cho, Jin-Ku Yeo, Nam-Hyo Cho, "Effects of Combustion Chamber Shape on the Stratified Combustion of a GDI Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.67-75, 2002.
- 7) Eui-Yong Kwon, Nam-Hyo Cho, "The Fuel Spray

- Structure of a High Pressure Gasoline Injector in a Constant Volume Chamber,” Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.10-17, 2000.
- 8) Yong-Jin Kim, Sang Lee, Nam-Hyo Cho, “Effect of Air Motion on Fuel Spray Characteristics in a Gasoline Direct Injection Engine,” SAE 1999-01-0177, 1999.
- 9) Mi-Ro Kim, Nam-Hyo Cho, “Analysis of Port Flow Rig Result by CFD of In-Cylinder Flow,” Autumn Conference of KSAE, Vol.I, pp.111- 117, 1999.