

직접분사식 가솔린 엔진에서 분할분사 및 배기가스 재순환의 효과

문석수* · 최재준 · Essam Abo-Serie · 배충식

한국과학기술원 기계공학과

The Effects of Split-Injection and EGR on the Combustion Characteristics of a DISI Engine

Seoksu Moon* · Jaejoon Choi · Essam Abo-Serie · Choongsik Bae

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 28 June 2005 / Accepted 23 August 2005)

Abstract : Split injection has been known to reduce total hydrocarbon (THC) emission level and increase engine performance under certain operating conditions^{1, 2}). Exhaust Gas Recirculation (EGR) is a common technique adopted for nitric oxides (NOx) reduction by the dilution of intake air, despite a sacrifice of simultaneous increase in THC and decrease in engine performance³). Thus, using split injection with adequate EGR may improve the emission level of UBHC, NOx and the engine performance compared to that of single-injection with or without EGR cases. The purpose of this study is to investigate the engine performance and emission levels at various engine operating conditions and injection methods when it is applied with EGR. The characteristics of single-injection and split-injection were investigated with various engine loads and EGR rates. The engine speed is changed from 800rpm to 1200rpm to investigate how the combustion characteristics are changing with increasing engine speed.

Key words : DISI engine(직접분사식 가솔린엔진), Single injection(단일분사), Split injection(분할분사), Exhaust gas recirculation(배기가스재순환)

Nomenclature

- DISI : direct-injection spark-ignition
- EGR : exhaust gas recirculation
- MBT : minimum advance for best torque
- NOx : nitrogen oxidize
- THC : total hydrocarbon
- UBHC : unburned hydrocarbon

1. 서론

화석연료의 사용 증가에 따른 연료자원의 양 감

소와 이산화탄소(CO₂) 배출 규제 등 배기가스 규제가 날로 심각해져가는 상황에서 높은 연료경제성과 고출력을 가지는 차세대 엔진에 대한 요구가 자연스럽게 대두되게 되었고, 그 결과 기존의 가솔린엔진에 대한 대안으로 직접분사식 가솔린(DISI) 엔진이 제시되었다.¹⁾ 그러나 직접분사식 가솔린엔진은 연료경제성 및 공해배출물 저감의 측면에서 많은 장점을 가지고 있지만, 실제 구현함에 있어 몇 가지의 한계점을 나타내었다. 늦은 분사(late injection)와 이른 분사(early injection)로 대별되는 두 분사도드 사이의 변환이 부드럽게 이루어질 수 있도록 하기 위한 방법의 개발이 요구되고, 또한 연료경제성 향상 효과를 극대화하기 위한 성층연소 적용구간의

*To whom correspondence should be addressed.
moon03@kaist.ac.kr

증대가 요구된다.¹⁾ 또한 낮은 분사시 스파크 플러그 주위 농후한 혼합기에 의해 발생하는 입자상물질 및 탄화수소(THC; total hydrocarbon)의 발생을 최소화시키는 방법이 요구되고 있다.

선행연구들에서는 이의 해결을 위한 한 가지 방법으로 분할 분사 기법을 도입하여 고부하 조건에서의 출력향상을 이미 확인한 바 있다.²⁻⁵⁾ 그러나 성층연소 운전 영역, 즉 저부하와 중부하 운전 영역에서 단일 분사와 비교했을 때 분할분사가 상대적으로 어떠한 특성을 보이는가에 대해서는 아직 명확히 밝혀진 바 없다.

따라서 본 연구에서는 저부하 및 중부하 조건에서 분할분사기법(split injection)을 도입하여 엔진의 성능 및 배기 특성을 살펴봄으로써 어느 운전 영역에서 분할 분사가 단일분사(single injection)보다 우월성을 나타내는가를 살펴보았다. 이에 더불어 질소산화물 저감을 위해 널리 쓰이고 있는 배기가스 재순환 기법을 분할 분사와 함께 적용하여, 단일분사에 배기가스 재순환을 적용한 경우와 비교하였을 때, 성능 및 배기 모든 측면에서 우월성을 가질 수 있는가를 살펴보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험은 단기통 가시화 엔진을 사용하여 실시하였으며 Photo 1과 Table 1에 엔진의 형상 및 제원이 나타나 있다.

분사기는 슬릿 분사기(Slit Injector)를 사용하였으며, 슬릿 분사기의 팬형 분사 특성을 고려해 쉘형태(shell Type)의 피스톤 보울을 사용하였다.⁶⁾ 성층화 방식은 벽면유도방식(wall guided type)을 사용하였으며, 이를 위해 수직 흡기포트를 통해 발생하는 역턱블을 이용하였다.

연소 실험 시 초기 연소실 온도의 설정 및 열교환을 위하여 내부에 냉각 순환수 재킷이 설치된 강재의 실린더 라이너를 사용하였으며, 엔진의 냉각을 위해 85°C의 냉각 순환수를 실린더 라이너 및 헤드에 순환시켰고, 엔코더(360 pulse/rev.)를 이용하여 분사 및 점화시기를 파악하였다. 분사계는 인젝터, 고압 연료탱크, 질소탱크로 구성되어 있다. 분사압



Photo. 1 Optically accessible DISI engine

Table 1 Specifications of engine

Engine type	Wall-guided type 4Stroke, 4Valve
Bore × Stroke (mm)	85 × 88
Displacement vol.(cc)	499
Combustion chamber	Pent-roof
Compression ratio	9.8
Valve timing	IVO : 6° BTDC
	IVC : 46° ABDC
	EVO : 130° BBDC
	EVC : 10° ATDC

력은 고압 질소가스로 가압하여 90bar로 설정하였으며 실린더 내부 압력을 측정하기 위해 피에조 타입(Piezo electric type)의 압력센서(Kistler 6052B)를 사용하였고, 배기특성을 살펴보기 위해 배기가스 분석기(HORIBA MEXA-1500D)를 이용하였다. EGR을 공급하기 위해 배기에서 흡기로 통하는 관을 설치하였으며 흡입되는 EGR양을 조절하기 위해 중간에 EGR 밸브를 설치하였다. 전체적인 실험장치의 구성을 정리하면 Fig. 1과 같다.

2.2 실험 방법

배기가스 재순환 적용의 기준이 되는 지점을 찾기 위해 주 분사시기를 BTDC70°에서 BTDC30°까지, 점화시기를 BTDC50°에서 BTDC0°까지 변화시키면서 서로 다른 공연비에서의 MBT 시점을 각각

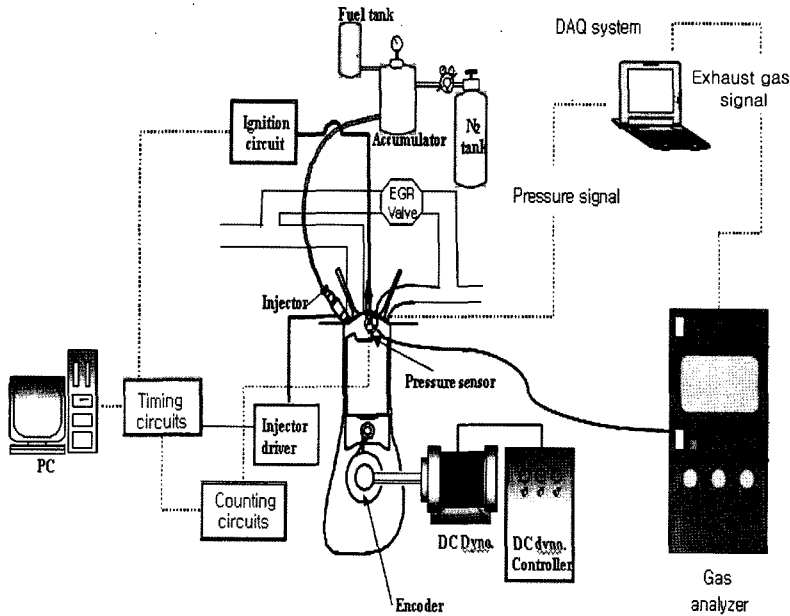


Fig. 1 Schematic diagram of engine setup

Table 2 Test conditions

Engine speed	800rpm, 1200rpm
Air-fuel ratio (Injection mass)	Low load : 31(17.54mg) Middle load : 24(31.72mg)
EGR rates	0%, 15%, 32%, 48%
Injection Timing	Single Injection:BTDC70~30
	Split Injection:BTDC300,70~30
Ignition Timing	BTDC 50~0
Injector	Slit injector [Fan spray]
Fuel	Gasoline

찾았다. 영향을 주는 다른 인자를 고정시키기 위해 분할 분사 시 선분사시기는 BTDC300°로 고정하여 실험하였으며, 선분사량과 후분사량의 비율은 적용 엔진에서 출력 및 배기 특성이 가장 최적인 25%_75%로 설정하였다. 부하조건은 연소실에 공급되는 에너지량, 즉 공연비를 통해서 설정하였으며 저부하 조건은 공연비 31, 중부하 조건은 공연비 24로 설정하였다. EGR율은 0%에서 48%까지 적용하였으며 EGR율의 측정은 흡기와 배기의 이산화탄소 양의 비로 계산하였다. 엔진 실험은 800rpm에서 주로 이루어졌으며 회전수 변화에 따라 경향성의 변화가 발생하는지 살펴보기 위해 1200rpm 조건에서도 실험이 수행되었다. 스로틀은 일반적인 직접분

사식 가솔린 엔진에서 적용되는 전개(wide-open) 상태로 적용하였으며, 연료로는 상용 가솔린을 이용하였다. 가스분석기 및 압력데이터를 통해서 배기 배출물 및 출력값을 얻었으며 압력데이터를 통해 MFB(mass fraction burned) 값 및 열방출률을 계산하였다.⁷⁾

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분할 분사 기법의 효과

Fig. 2는 저부하 및 중부하 조건에서 단일 분사 및 분할분사를 적용했을 때의 열방출률 및 연소 압력의 변화 및 차이를 나타내고 있다. 저부하 조건에서는 분할 분사를 적용하였을 시, 열방출률 및 실린더 압력이 최고값을 보이는 지점이 단일분사와 거의 동일하게 나타났으나, 최고값은 약간 낮아짐을 확인할 수 있다. 반면 중부하 조건에서는 분할분사를 적용했을 시, 단일 분사의 경우보다 열방출의 최고점이 나타나는 시기가 이른 것을 알 수 있으며, 최고값은 약간 높은 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 TDC 부근에서의 급작스런 열방출을 통해서 전체적인 실린더 압력이 분할분사의 경우가 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향성은 연소실 내 혼

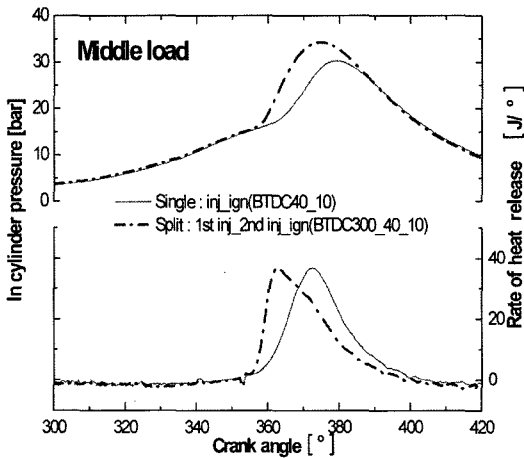
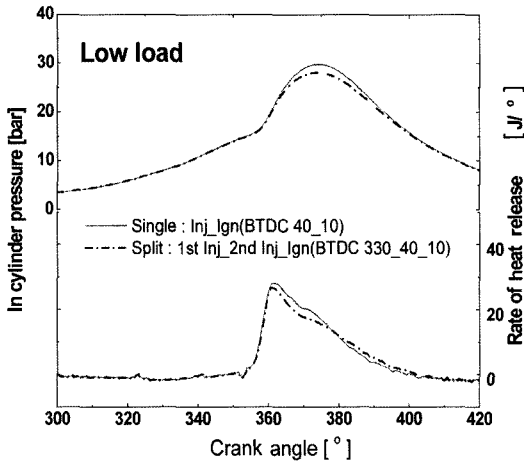
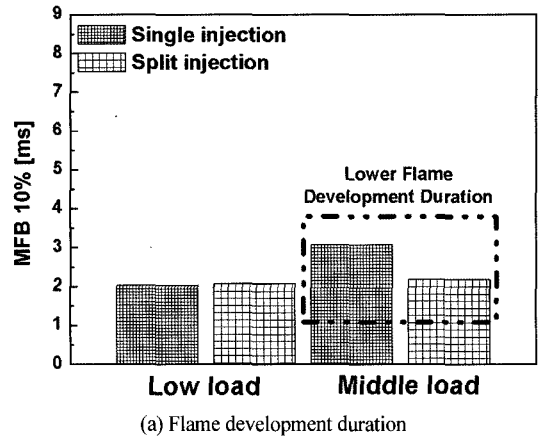
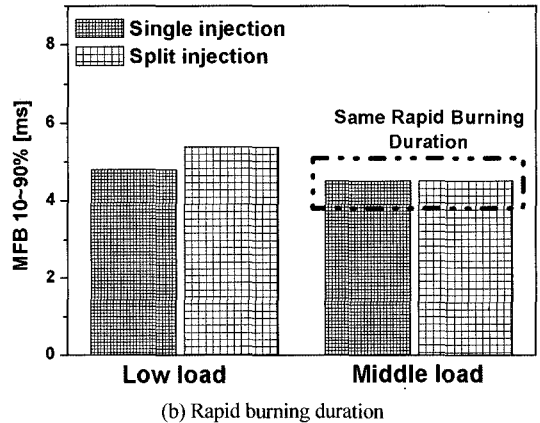


Fig. 2 Heat-release and in-cylinder pressure diagrams in the single injection and split injection [800rpm, EGR0%]

합기의 분포 변화를 통해서 설명할 수 있다. 일반적인 성층 혼합기 연소 구역인 저부하 조건에서는 단일 분사를 하였을 때 점화플러그 주변에 이론공연비에 가까운 가연 영역이 분포되어 있으나, 분할분사를 함으로써 균일도는 증가한 반면 상대적으로 희박해짐으로써 이론공연비에 가까운 영역이 감소하여 이러한 결과가 나타났다고 판단된다. 반면 중부하 이상의 조건에서는 단일분사시 점화플러그 주변에 이론공연비 영역보다 농후한 영역이 형성되어 균일혼합 연소에 비해 악화된 특성을 나타내지만, 분할분사를 함으로써 점화플러그 주변의 균일도를 향상시키고 농후한 영역을 이론 공연비에 가까운 영역으로 변화시켜 줌으로써 TDC 근처에서 급속한 열방출이 일어났다고 판단된다. 이러한 결



(a) Flame development duration



(b) Rapid burning duration

Fig. 3 Mass fraction burned diagrams at low load and middle load conditions [800rpm]

과를 살펴볼 때, 분할분사는 기존의 단일분사를 이용할 때와 비교할 때, 성층 혼합기 연소 구간을 향상시키는 효과를 가져 올 것이라 예상되며, 이를 앞으로 설명할 출력 및 배기 결과를 통하여 확인해 보도록 한다.

Fig. 3은 저부하 및 중부하 조건에서의 질량연소율 (Mass fraction burned) 변화를 보여주고 있다. 저부하시에는 분할 분사를 적용했을 시 질량연소율 (MFB)이 0%에서 10%까지의 기간인 화염발달기간 (flame development duration) 및 질량연소율이 10%에서 90%까지의 기간인 급속연소기간 (rapid burning duration)이 모두 길게 나타남을 알 수 있다. 이는 분할 분사를 적용하였을 때 점화플러그 주변이 희박해졌을 뿐만 아니라 연소실 전체에 퍼져 있는 연료가 연소에 참여하지 못함을 의미하고, 이는 화염소

실(quenching)을 유발하여 탄화수소(THC) 배출의 요인이 되리라 예상된다. 중부하 시에는 분할 분사 적용 시 화염발달기간이 급속히 감소하였음을 볼 수 있으나, 급속연소 기간에는 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 이는 분할 분사 적용 시 점화플러그 주변의 균일도가 증가하고 이론공연비에 가까운 영역이 증가했기 때문이라 판단되며, 이는 열방출률의 결과와 동일한 경향성을 보여준다 할 수 있다.

3.2 EGR의 효과

Fig. 4는 EGR의 변화에 따른 열방출률 및 연소실 내의 압력 변화를 보여주고 있다. 모든 실험 조건에서 EGR의 경향성은 동일한 것이 확인되었으므로 결과는 단일분사 조건에 대해서만 표시하였다. 기

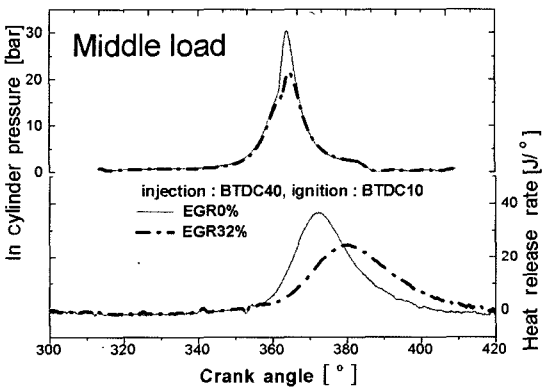


Fig. 4 Heat release and in-cylinder pressure diagrams at various EGR rates [800rpm]

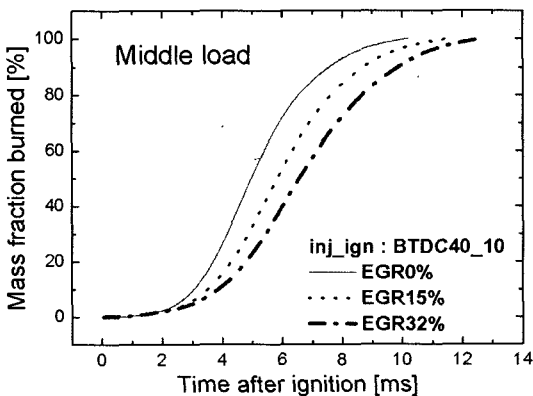


Fig. 5 Mass fraction burned diagram at various EGR rates [800rpm]

존의 포트분사방식과 마찬가지로 직접분사식 가솔린 엔진에서 EGR의 양이 증가하였을 때 열방출률 및 실린더 내 압력이 감소하는 것을 그래프를 통해서 확인할 수 있다. 이는 연소실 내에 기연가스가 유입됨으로써 혼합기가 희석되고 혼합기 전체의 열용량이 커졌기 때문이라 판단할 수 있다. Fig. 5는 EGR율의 증가에 따른 질량연소율의 변화를 보여주고 있으며 EGR율의 증가에 따라서 화염발달기간 및 급속연소기간이 모두 증가하는 것을 볼 수 있다.⁸⁻¹⁰⁾

3.3 분할 분사와 EGR 동시 적용 시 출력 및 배기 특성

3.3.1 출력 특성

Fig. 6은 분할 분사와 EGR을 동시에 적용했을 시 나타나는 출력 및 배기특성의 변화를 단일 분사와 EGR 동시에 적용했을 경우와 비교해서 보여주고 있다. 그래프에서 제시된 IMEP(indicated mean effective pressure) 값은 150사이클의 IMEP값을 평균해서 얻어진 값이다. 우선 분할분사의 영향을 살펴보면, 저부하 시에는 분할분사 적용 시에 단일분사보다 낮은 출력값을 보여주고 있으며, 중부하 시에는 높은 출력값을 보여주고 있다. 이는 앞에서 설명한 열방출률의 그래프를 통해서 설명할 수 있다. 저부하 시에는 열방출률의 최고점이 나타나는 지점이 비슷하나, 열방출률의 최고값이 단일분사의 경우가 높기 때문에 이러한 결과가 나타났다고 볼 수 있으며, 중부하 시에는 분할분사의 경우 TDC 근처에서 급속한

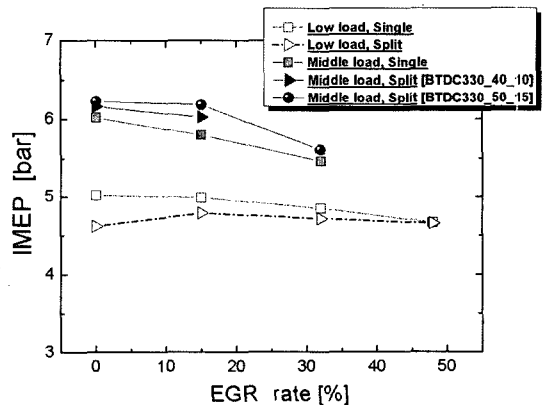


Fig. 6 Engine performance at various injection methods and EGR rates [800rpm]

열방출을 함으로써 출력의 향상 효과가 나타났음을 알 수 있다. 다음으로 EGR에 의한 영향을 살펴보면, EGR율의 증가에 따라서 출력이 전체적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 EGR율의 증가에 따른 열방출률 및 연소 압력의 감소를 통해서 쉽게 예측할 수 있는 결과라 할 수 있다. 또한 저부하 및 중부하 조건 모두에서 EGR율의 증가에 따라 분할분사와 단일분사가 출력 측면에서 점차 동일화되는 것을 확인할 수 있다.

3.3.2 배기 특성

Fig.7은 EGR율과 분사방법의 차이에 따른 공연비별 질소산화물의 배출량을 보여 주고 있다. 우선 분사 방법에 따른 차이를 살펴보면 저부하의 경우는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 단일 분사의 경우가 분할 분사보다 압력 및 열방출의 최고점이 높아 연소실 내의 온도가 상대적으로 높고 연소지속기간은 비슷하기 때문에 전체적인 질소산화물 배출량은 분할 분사보다 약간 높게 나타난 것으로 판단된다. 중부하의 경우에는 분할 분사의 경우 TDC 근처에서의 급속한 열방출로 인하여 정적 구간에서의 열방출 및 압력 상승 정도가 높아짐으로 인해서 연소실 내의 온도가 단일 분사보다 상대적으로 높아 질소산화물의 배출량이 높게 나타났다. 다음으로 EGR율의 증가에 따른 효과를 살펴보면 EGR율의 증가에 따라 희석효과 및 열용량의 증가에 의해 연소실 온도가 낮아지게 되며 이로 인해, 질소산화물의 배출량이 감소하였다.⁸⁻¹⁰⁾ EGR율이 상승함에 따라 이 차이는 점차 감소하는 경향성을 보였으며, 중부하 조건의 EGR율 32% 조건에서는 거의 동일한 값을 나타냈다. 이는 Fig. 9에서 살펴볼 수 있듯이 EGR의 증가에 따른 희석효과에 의해 대부분의 열방출이 TDC 이후에 일어남으로써, 단일분사와 분할분사의 화염 후면가스 온도의 차이가 감소했기 때문이라 판단된다. 그래프에 표시된 데이터 값들은 IMEP COV(coefficient of variation)값이 4% 이하일 경우에 만 표시하였으며 저부하시에는 EGR율 48%까지 IMEP COV 4% 이내의 안정된 연소를 보였다.

Fig. 8은 분사 방법과 EGR율의 차이에 따른 THC 배출량을 보여 주고 있다. 단일분사가 높은 열방출률 최고값을 보이는 저부하 시의 경우 분할분사를

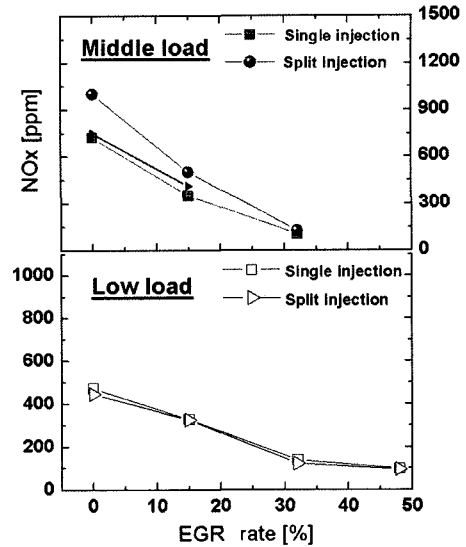


Fig. 7 NOx emission at various injection methods and EGR rates [800rpm]

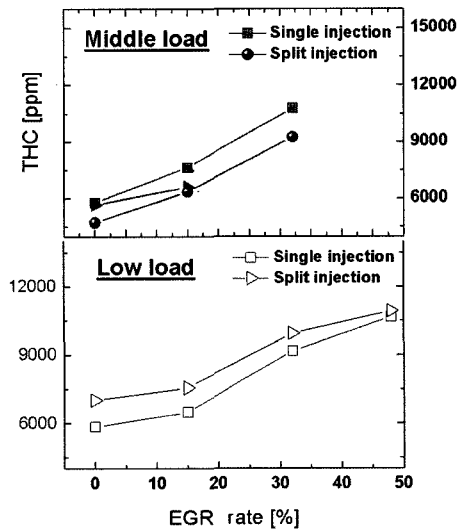


Fig. 8 THC emission at various injection methods and EGR rates [800rpm]

적용했을 시 점화플러그 주변의 희박한 혼합기와 주변 연료의 화염소실에 의해 단일 분사에 비해 높은 탄화수소 배출량을 보였으며, EGR율의 증가에 따라서 이 차이는 급격히 감소하여 EGR율 48% 조건에서는 거의 동일한 값을 보였다. 분할분사 적용 시 TDC 근처에서 급속연소가 일어나는 중부하 조건에서는 혼합기의 균일도 증가와 높은 연소실 온

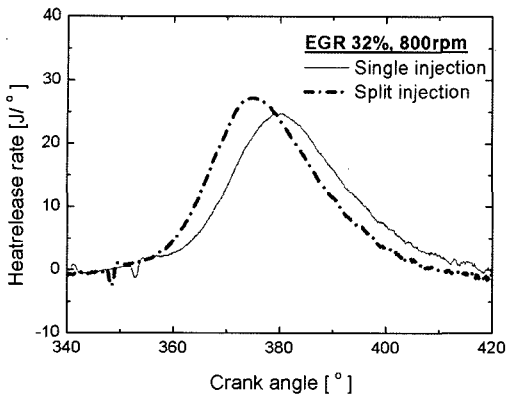


Fig. 9 Heat release rate diagrams at EGR 32% condition [Middle load condition]

도에 의한 THC의 산화에 의하여 분할 분사의 경우 단일 분사에 비해 낮은 THC 배출량을 보였으며, 이 차이는 EGR율이 증가하였을 때에도 계속 유지되는 경향성을 보였다. 이는 EGR율이 증가하여도 분할 분사의 경우에서 점화플러그 주변 혼합기의 균일도가 높게 나타나기 때문으로 판단되며, 이로 인한 상대적으로 급속연소를 Fig. 9에서 확인할 수 있다. EGR 율의 증가에 따라 저부하 및 중부하 조건 모두에서 THC 배출량이 증가하였으며, 이는 기연가스 유입에 의한 연소의 악화에 기인한다.

3.3.3 출력 및 배기 특성 고찰

앞 절에서 설명한 출력 및 배기 결과는 분할 분사에 EGR을 적용하였을 경우가 단일 분사에 EGR을 적용했을 때와 비교했을 때 출력 및 배기 모두에서 좋은 특성을 보일 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. 적용엔진에서 EGR 적용시의 NOx 저감효율이 80% 이상이며, 대부분의 엔진이 NOx 배출량 저감을 위해 EGR을 장착하는 상황이기 때문에 EGR에 의한 THC 증가 및 출력 감소는 EGR의 적용을 확대하는데 중요한 문제라 할 수 있다. 분할 분사 적용 시 중부하 조건에서는 성층 연소 영역을 확장시키며, 또한 특정 EGR율 조건에서 단일 분사에 EGR을 적용한 경우와 비교하여 NOx 배출량의 큰 상승 없이 출력 증가 및 THC 배출 저감 효과를 이루어 냄으로써 EGR을 증가에 의한 문제를 감소시킬 수 있는 가능성을 보여 준다 할 수 있다.

3.3 엔진 회전수 증가에 의한 분할분사 특성 변화

Fig. 10은 엔진 회전수 1200rpm의 저부하 및 중부하 조건에서 단일분사 및 분할분사 적용시의 열방출률 및 연소 압력의 차이를 보여주고 있다. 저부하시에는 800rpm의 경우와 열방출률 및 연소 압력이 거의 동일한 경향성을 보임을 알 수 있다. 반면 중부하시에는 800rpm의 경우와 비교했을 때, 분할분사에 의한 TDC 근처에서의 급속연소 효과가 상당히 감소하였음을 확인할 수 있다. 엔진 회전수가 증가함에 따라 유동 속도가 증가하게 되고 이는 연료와 공기의 혼합을 촉진시키리라 예상되나,¹¹⁾ 초기 분사에 의해 균일 혼합기가 형성될 만한 충분한 시간을 갖지 못하기 때문에 위와 같은 현상이 나타났다고 판단된다. Fig. 11은 엔진 회전수 1200rpm에서의 출력 및 배기배출량을 보여주고 있다. 저부하시의 배기 배출 경향성은 800rpm의 경우와 유사하게 분할 분사를 적용하였을 때 출력이 감소하고 THC 배출

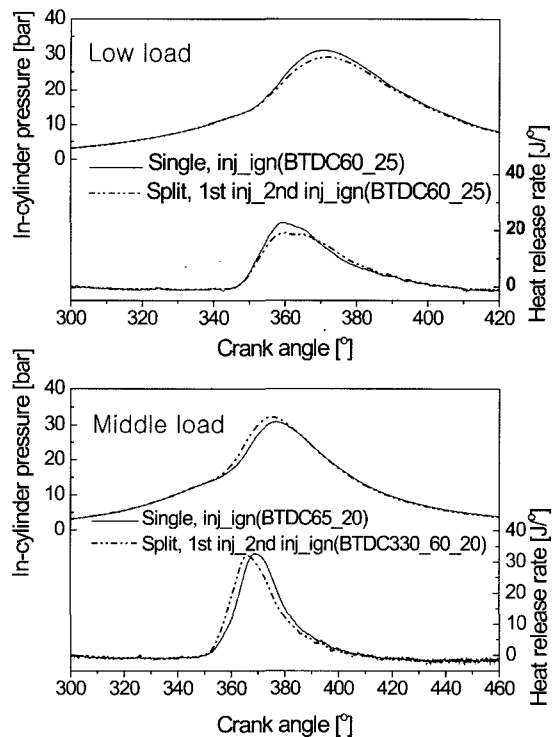


Fig. 10 Heat release rate and in-cylinder pressure diagrams in the different injection methods [1200rpm]

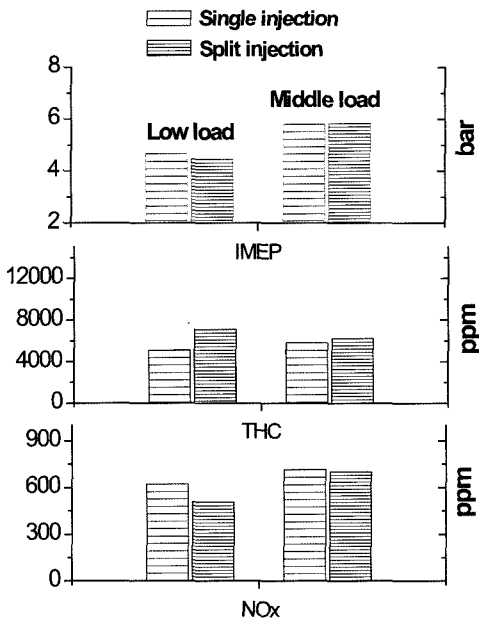


Fig. 11 Performance and emission in the different injection methods

량은 증가하였으며 NOx 배출량은 감소하였다. 그러나 THC의 증가 정도나 NOx의 감소 정도는 800rpm에 비해서 크게 나타났다. 반면 중부하시에는 800rpm에서의 경향성과는 달리 출력이 약간 증가하기는 하였으나 THC와 NOx의 배출량은 단일 분사와 분할 분사 적용 시 거의 동일한 값을 나타내었다. 이는 엔진 회전 수의 증가에 따라 분할분사에 의한 개선 효과가 감소됨을 의미하나, 각각의 연소실 및 피스톤 볼 형상 차이에 따라 최적화시키는 경우 적용 가능한 회전수는 증가하리라 예상된다.

4. 결론

단기통 직접분사식 가솔린 엔진에서 분할 분사와 EGR 동시 적용 시의 연소 특성을 단일 분사의 경우와 비교하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 저부하 조건에서는 분할 분사에 의한 급속 연소 효과가 나타나지 않고 단일분사보다 낮은 열방출 및 연소속도를 보였으며, 이로 인해 출력은 감소하고 THC 배출량은 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 중부하 조건에서는 TDC 근처에서 분할 분사의 급속연소에 의해 연소압력의 급격한 상승이 나

타났으며, 이로 인해 출력은 증가하고 THC 배출량은 감소하였으나 NOx 배출량은 증가하였다.

- 3) EGR율의 증가에 따라 단일 분사 및 분할분사 모두에서 연소속도 및 열방출률이 감소하는 경향을 보였으며, 이로 인해 THC 배출량은 증가하고 NOx의 배출량은 현저히 감소하였다.
- 4) EGR율의 증가에 따라 중부하시 단일분사와 분할 분사에서의 출력 및 THC 배출량 차이는 유지되었으나 NOx 배출량의 차이는 현저히 감소되었다.
- 5) 엔진 회전 수 증가에 따라 분할분사에 의한 저부하시 출력 및 배기특성은 더 악화되었으며, 중부하시 출력 및 배기특성의 향상 효과는 점차 감소되었다.

후 기

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

References

- 1) T. Kitagawa, H. Kido, K.-S. Kim, K. Fujioka and N. Nakamura, "Characteristics of Combustion in Stratified Mixture," SAE 2003-01-1808, 2003.
- 2) J. Yang and R. W. Anderson, "Fuel Injection Strategies to Increase Full-Load Torque Output of a Direct-Injection SI Engine," SAE 980495, 1998.
- 3) F. (Frank) Zhao, D. L. Harrington and M.-C. Lai, Automotive Gasoline Direct-Injection Engines, SAE, pp.171-177, 2002.
- 4) K. Kuwahara, K. Ueda and H. Ando, "Mixing Control Strategy for Engine Performance Improvement in a Gasoline Direct Injection Engine," SAE 980158, 1998.
- 5) N. Miyamoto, H. Ogawa, T. Shudo and F. Takeyama, "Combustion and Emissions in a New Concept DI Stratified Charge Engine with Two-Stage Fuel Injection," SAE 940675, 1994.
- 6) F. (Frank) Zhao, D. L. Harrington and M.-C. Lai, Automotive Gasoline Direct-Injection Engines, SAE, pp.88, 295-299, 2002.

- 7) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1998.
- 8) G. H. Abd-Alla, "Using Exhaust Gas Recirculation in Internal Combustion Engines: a Review," Energy Conversion and Management 43, pp.1027-1042, 2002.
- 9) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zhao and Z. Hu. "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions Part1-2," SAE 961165-961167, 1996.
- 10) K. T. Yeom, Y. M. Woo, J. Y. Jang, Y. K. Park and C. S. Bae, "Performance and Emission Characteristics of Liquid-Phase LPG Injection Engine with Different EGR Rate," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.7-14, 2003.
- 11) K. Kawajiri, T. Yonezawa, H. Ohuchi, M. Sumida and H. Katashiba, "Study of Interaction Between Spray and Air Motion, and Spray Wall Impingement," SAE 2002-01-0836, 2002.