

## 다단분사가 초희박 GDI 엔진의 성능 및 배기에 미치는 영향

오진우\* · 박철웅\*\* · 김홍석\* · 조규백\*

\*한국기계연구원 그린동력연구실

### Effect of Multiple Injection on the Performance and Emission Characteristics of Lean Burn Gasoline Direct Injection Engines

Jin Woo Oh\*, Cheol Woong Park\*\*, Hong Suk Kim\* and Gyu Baek Cho\*

\* Environmental System Research Division / Engine Research Team, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received June 16, 2011 ; Revised October 31, 2011 ; Accepted November 4, 2011)

**Key Words:** Gasoline Direct Injection(가솔린직접분사), Ultra Lean Burn(초희박연소), Multiple Injection(다단분사), Ignition Timing(점화시기), Injection Timing(분사시기)

**초록:** 현재 세계적으로 배출가스 규제 강화와 유가 상승으로 인해 가솔린엔진에서 배출되는 유해 배출가스 저감기술 및 연비향상 기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 가솔린 직접분사(GDI; Gasoline direct injection) 기술은 가솔린 연료를 직접 연소실에 분사하여 정밀한 연소제어를 통해 매우 희박한 혼합기에 서도 고효율의 연소가 가능하게 함으로써 연비저감과 고풍력을 동시에 만족할 수 있는 효과적인 기술이다. 본 연구에서는 분무유도방식(spray-guided type)을 이용한 GDI 엔진을 개발하여 안정적인 희박연소를 구현하였다. 자주 사용되는 운전영역에서 연료분사시기의 TDC(Top dead center) 인근으로의 지각을 통하여 안정적인 희박연소를 구현하였으며, 다단분사를 적용하여 추가적인 연료소비율의 개선이 가능한 반면 탄화수소(THC)와 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 배출은 증가하고 CO의 배출은 감소되었다.

**Abstract:** Currently, in order to meet the reinforced emissions regulations for harmful exhaust gas including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as a greenhouse gas, technologies for reducing CO<sub>2</sub> emission and fuel consumption are being developed. Gasoline direct injection (GDI) systems have the advantage of improved fuel economy and higher power output than port fuel injection gasoline engine systems. The aim of this study is to examine the performance and emission characteristics of a lean burn GDI engine equipped with spray-guided-type combustion system. Stable lean combustion was achieved with a late fuel injection strategy under a constant operating condition. Further improvement in specific fuel consumption is possible with the introduction of multiple fuel injection strategies, which also increases hydrocarbon (HC) and nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions and decreases carbon monoxide (CO) emission.

### 1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화 및 원유 값 상승으로 인해 CO<sub>2</sub>를 포함한 배출가스 및 연비 저감을 위한 규제들이 강화되고 있으며, 이를 만족시키기 위한 기술들이 주목받고 있다.<sup>(1)</sup> 그 중에서도 가솔린 자동차는 유럽 등에서 제안한 120g/km 수준의 CO<sub>2</sub> 저감을 충족하기 위해서 현재 대비 약 15% 이상의 엔진 연비향상 기술이 필요한 상황이며, 가솔린 직접분사기술 및 하이브리드화 기

술 등은 개발이 완료되어 양산엔진에 적용되고 있다.<sup>(2)</sup>

가솔린 연료를 연소실내에 직접 분사하는 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진은 부분부하 영역에서의 성층화를 통한 초희박연소를 실현함으로써 연비를 향상시킬 수 있으며, 고부하영역에서는 이론공연비 연소를 구현하여 출력을 만족시킬 수 있다. 희박 GDI 엔진기술은 1세대와 2세대로 나뉘 수 있는데, 벽면유도방식(Wall-guided)과 공기유도방식(air-guided)은 1세대에 해당하는 것으로, 엔진 운전 조건에 따라 크게 변화하는 실린더 내부 유동을 이용하여 혼합기를 형성하기 때문에 넓은 운전 영역에서 성층 연소 구현이 어

\* Corresponding Author, cwpark@kimm.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

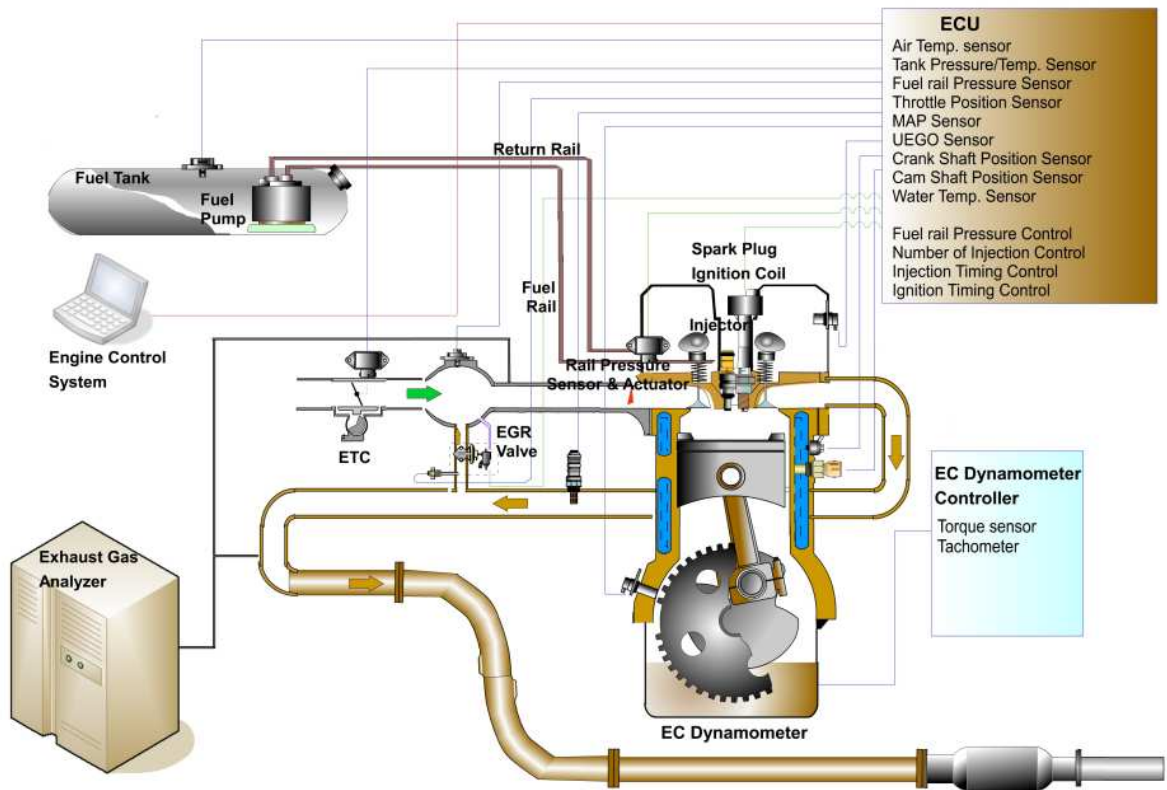


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

럽고 벽면 부착 연료가 미연 탄화수소로 배출되기 쉬운 문제점을 가지고 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 혼합기 형성이 용이하며 고압의 분사시스템을 요구하지 않는다는 장점 때문에 이론공연비 연소를 하는 GDI 엔진에 적용되어 상용화 개발되었다.

한편 최근 출시되는 희박 GDI 엔진은 대부분 2세대 분무유도방식(Spray-guided)을 채택하여 고압연료분사기가 연소실의 중앙에 위치하고 스파크플러그는 인접하도록 연소실 설계에 반영하고 있다. 이러한 연소실 구조는 희박 연소 안정성을 향상시켜 작동범위를 넓히고 효율적인 성층화 연소를 가능하도록 하였다.<sup>(4-7)</sup> 그러나 안정적인 연소성능을 확보하기 위해서는 점화시기 및 연료분사시기의 변경을 통한 최적화가 필요하며, 희박 연소 및 직접분사로 인한 탄화수소(THC; Total hydrocarbon) 등의 유해 배출가스를 저감하기 위한 기술적인 대책이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 승용 초희박 GDI 엔진 개발을 위한 선행 연구로써 분무유도방식의 초희박 GDI 엔진 시제품을 이용하여 연료분사시기 및 분사회수 등의 연소제어인자 변화에 따른 연소 및 배기

특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 초희박 GDI 엔진연소 최적화를 위한 제어변수 적용방안을 검토하기 위해 상용 MPI 방식의 가솔린 엔진을 개조하여 분무유도방식의 GDI 엔진을 개발 및 설치하여 주요 연소제어인자에 대한 성능 실험을 실시하였다.

### 2.1 실험 장치

Fig.1에 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 분무유도방식을 적용한 헤드를 설계 및 제작하여 실린더 헤드의 중앙에 개방형 노즐을 갖는 피에조 타입의 고압 인젝터와 점화플러그를 장착하였으며, 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 피에조 인젝터는 빠른 응답속도를 갖는 것으로서 사이클당 최대 3회의 분사가 가능하며 제원은 Table 2에 나타내었다. 고압연료분사가 가능하도록 배기 캠 샤프트에 플런저방식의 고압펌프를 장착하였고, 연료량 제어 밸브(FCV; Fuel control vale)에 인가되는

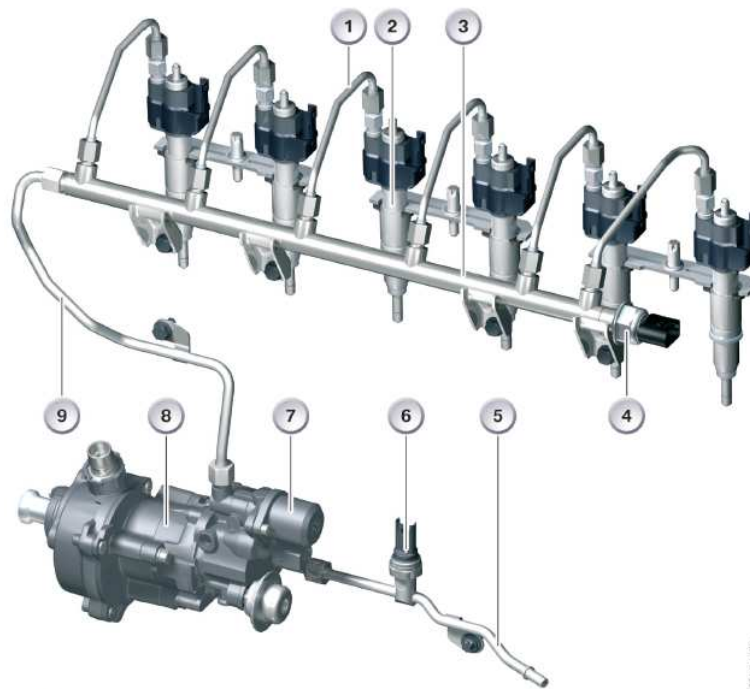
**Table 1** Specifications of engine

Engine type	4-stroke, 4-cylinder DOHC 4 valve/cylinder
Bore	86 mm
Stroke	86 mm
Compression ratio	12.0
Combustion chamber	Pentroof
Intake valve timing	BTDC 7 CAD / ABDC 67 CAD
Exhaust valve timing	BBDC 48 CAD / ATDC 0 CAD

**Table 2** Specifications of direct injection piezo injector

Dynamic flow	14.5 mg/injection at injection time of 0.4 ms
Static flow	> 35 g/s
Minimum dynamic flow	2 mg/str
Spray angle	94° ± 4°
SMD size	~ 15 μm @ 10 MPa
Opening/Closing time	< 150μs
Temperature range	-40°C ~ 140°C
Max. Voltage	190V
Proof pressure	29 MPa (1 minute Max.)

전압의 Duty를 제어함으로써 펌핑부에 유입되는 연료량을 제어하여 연료분사압력을 제어하였다. 고압 연료공급 시스템의 전체적인 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 다채널 피에조 인젝터 드라이버와 컴퓨터에 의해 제어되는 Universal ECS(Engine Control System)를 사용하여 각 연소실로 공급되는 연료의 분사량과 분사시기 및 분사회수를 임의로 조절이 가능하도록 하였다. 본 연구에서 밸브타이밍은 고정된 상태에서 실험을 수행하였으며, 피스톤의 경우 상용 엔진의 것과 유사한 형상을 갖는 고압축비 피스톤을 사용하였다. 실린더별로 공기과잉율을 측정할 수 있도록 각각의 배기 매니폴드에 광역산소센서(LA4, ETAS co.)를 설치하여 혼합기의 상태를 독립적으로 측정할 수 있도록 하였다. 연소제어인자의 변화에 따른 연소특성 분석은 각각의 실린더에 장착된 실린더 압력 센서와 연소분석기를 통해 이루어졌다. 배기가스의 측정은 삼원촉매의 전단에 가스 추출라인(Gas sampling line)을 장착하여 배기가스 분석계(AMA i60, AVL)에서 측정되도록 하였다.



46 - HPI

T006-1052

Index	Explanation	Index	Explanation
1	High-pressure line (rail - injector)	6	Low-pressure sensor
2	Piezo-injector	7	Fuel supply control valve
3	Rail	8	Three-piston high-pressure pump
4	High-pressure sensor	9	High-pressure line (pump - rail)
5	Feed line (from el. fuel pump)		

**Fig. 2** Overview and function of high pressure injection system

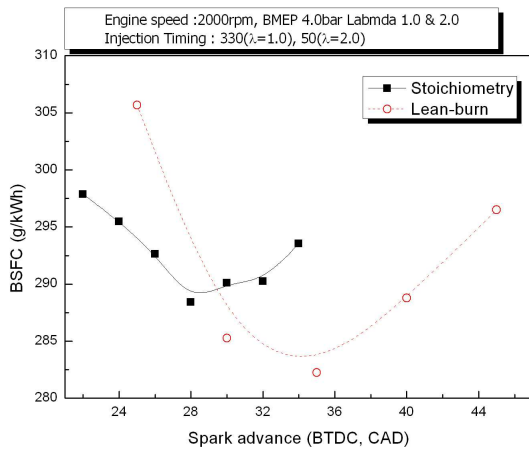


Fig. 3 Effect of spark advance timing on fuel consumption with different excess air ratio

2.2 실험 방법

본 연구의 대상이 되는 승용 가솔린 엔진에서 자주 사용되는 운전영역 중의 하나인 2,000 rpm, BMEP (Brake mean effective pressure) 0.4 MPa 조건으로 운전조건을 고정하여 실험을 수행하였다. 이론 공연비 조건과 희박한계 조건에서 점화시기와 연료분사시기의 변경을 통하여 최적점화시기 및 최적 연료분사시기를 결정하였으며, 엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수의 온도가 83±2℃에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하였다. 연료분사압력은 20 MPa 로 고정하고 각각의 실험조건에 따른 연료소비율, 배기가스, 연소안정성 등을 검토하였다. 각각의 운전조건에서 최소 3회 이상의 실험결과를 토대로 하여 연소 및 배출가스특성을 분석하였다.

3. 실험결과

3.1 연료분사시기에 따른 영향

이론공연비 조건과 희박연소(공기과잉율; λ=2.0)조건에서 점화시기에 따른 연료소비율을 Fig. 2에 나타내었다. 최적점화시기는 연료소비율이 가장 낮을 때의 점화시기로 정의하였으며, 이론공연비 연소와 희박연소 시 각각 BTDC(Before top dead center) 28 CAD 와 BTDC 35 CAD로 나타났다. 이론 공연비 연소의 경우 MBT(Minimum advance for Best Torque) 점화시기는 BTDC 28 CAD 로서 포트분사방식의 점화시기와 크게 다르

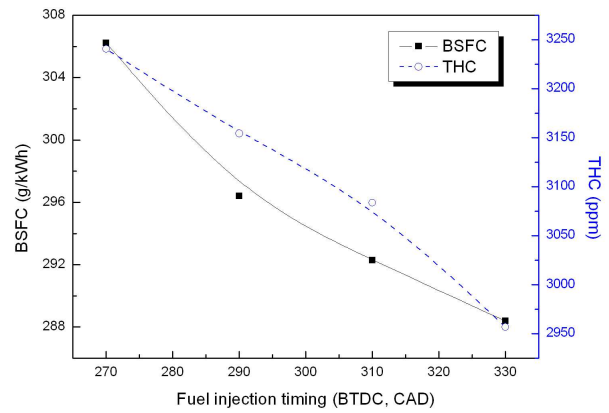


Fig. 4 Effect of fuel injection timing on fuel consumption and THC emissions at stoichiometric

지 않았으며, 점화시기가 지각될수록 연료소비율이 급격하게 악화되었다. 희박연소시의 MBT 점화시기는 공기량의 증가에 따른 희석효과 및 연소속도의 저하로 인해 이론공연비 조건에 비해 7 CAD 정도 진각되었다.

λ=2.0의 초희박연소조건에서 안정적인 희박연소를 구현하여 펌핑손실과 냉각손실을 저감효과에 의한 연비개선 효과를 확인할 수 있었으며, 이론공연비 조건에 비하여 약 2% 정도 연료소비율이 감소되는 결과를 보였다. 여기서 주목할 점은 연료분사 시기로서 이론공연비 연소 시에는 조기분사전략을 채택하여 BTDC 330 CAD에서 분사하였다. 이러한 결과는 Fig. 3에 나타낸 연료분사시기에 따른 연료소비율과 THC 배기가스 배출특성 결과에서 볼 수 있듯이, 이론공연비 조건의 경우 예혼합기 조성을 위한 조기 분사가 효과적으로 나타났다. 연료분사시기가 지각될수록 연료와 공기가 혼합하는데 충분한 시간을 확보하지 못해 연료소비율이 악화되고 THC의 배출이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그러나 λ= 2.0의 희박연소조건에서는 조기분사를 적용할 경우 전체적으로 희박한 혼합기의 형성으로 인한 연소안정성의 악화로, 안정적인 연소를 확보하기 위해서는 TDC 인근의 지각된 분사시기가 효과적이었다. 이 때, 연료분사직후의 농후한 혼합기가 스파크 플러그 인근에 형성 되었을 때 점화를 일으켜 연소를 구현하기 때문에 연료분사시기에 대한 상대적인 점화시기가 최적화되지 않으면 Fig. 5

와 Fig. 6에 나타난 것처럼 연소안정성의 악화로 연료소비율이 급격하게 증가하였다. 각각 연료분사시기와 점화시기를 고정했을 때 상대적인 시간을 변화시켰을 때의 연료소비율 및 연소안정성 결과를 나타낸 것으로서 해당 운전조건에서 단분사만을 이용하여 혼합기를 성층화시킬 경우 연료분사시기와 점화시기 사이의 간격을 15 CAD로 유지해야만 안정적인 연소와 함께 연료소비율이 개선됨을 확인할 수 있었다.

각각의 최적연료분사시기와 최적점화시기는 BTDC 50 CAD, BTDC 35 CAD로서 가장 낮은 연료소비율을 보였으며, 연소안정성 확보를 위해 연료분사시기와 점화시기 사이의 간격을 15 CAD로 유지하며 점화시기를 변경시키더라도 MBT 점화시기에 비해 진각되거나 지각되면 연료소비율

이 악화되어 이론공연비 연소에 비해 연비개선 효과를 얻을 수 없었다.

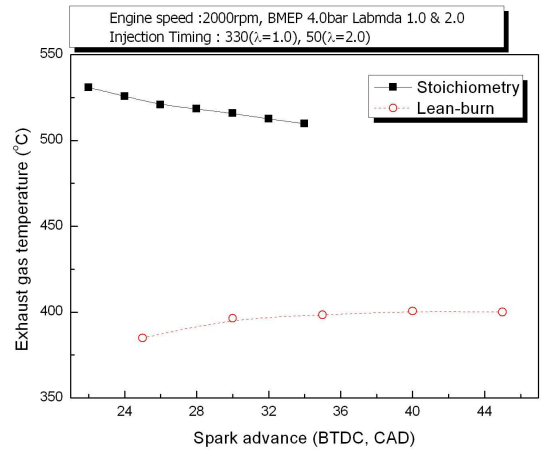


Fig. 7 Effect of spark advance timing on exhaust gas temperature with different excess air ratio

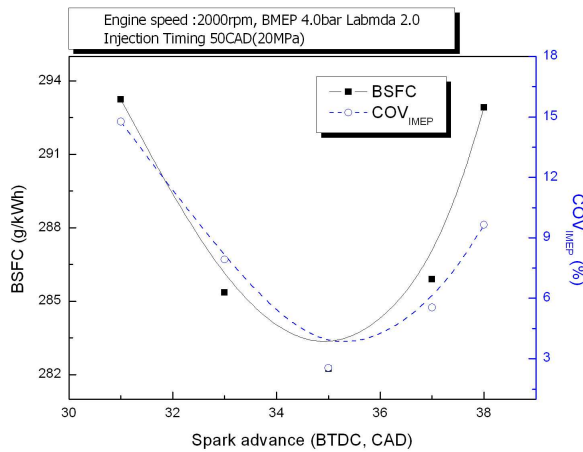


Fig. 5 Effect of spark advance timing on fuel consumption and combustion stability at a fixed fuel injection timing

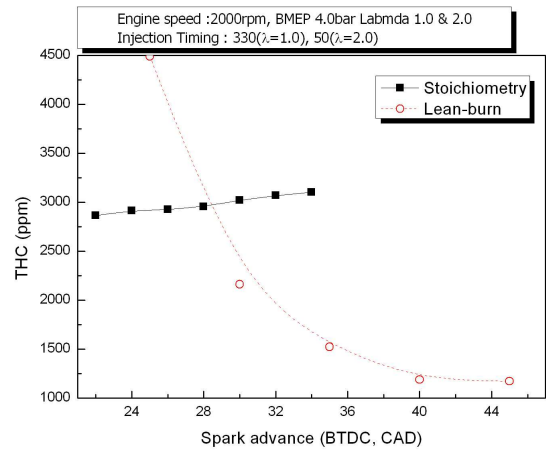


Fig. 8 Effect of spark advance timing on THC Emission with different excess air ratio

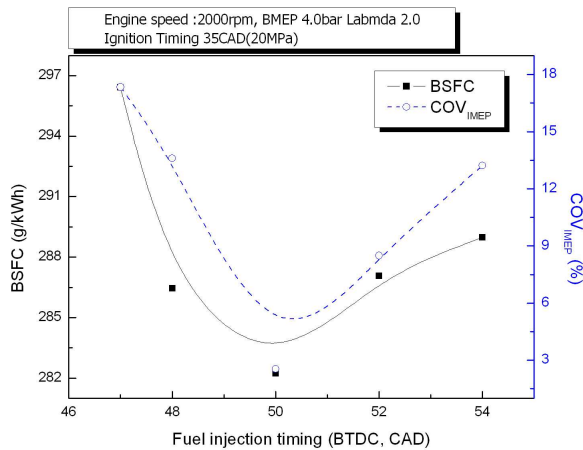


Fig. 6 Effect of fuel injection timing on fuel consumption and combustion stability at a fixed spark advance timing

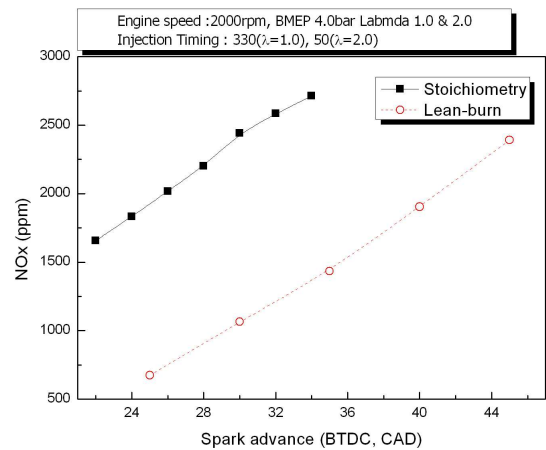


Fig. 9 Effect of spark advance timing on NOx Emission with different excess air ratio



**Table 3** Optimum injection and spark advance timing for each injection strategy

Operation condition	1st injection	2nd injection	3rd injection	Spark advance
	BTDC, CAD			
Stoichiometry	330	-	-	28
Lean / Single	50	-	-	35
Lean / Double	60	45	-	35
Lean / Triple	72	57	42	35

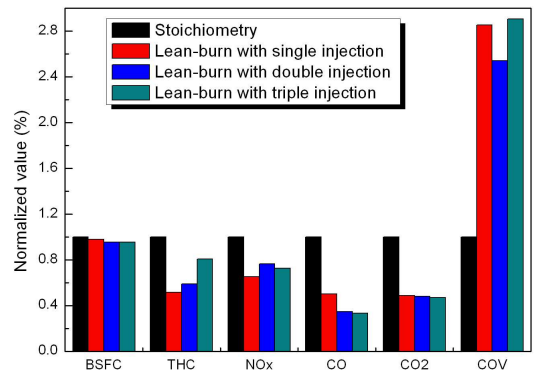
Fig. 7은 Fig. 3와 동일한 조건에서 점화시기의 변화에 따른 배기가스 온도를 나타낸 것으로 이론공연비 연소의 경우 점화시기의 지각에 따라 배기가스 온도가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 그러나 희박연소의 경우 점화시기가 진각될수록 배기가스 온도가 증가하다가 일정한 수준을 유지하였다. MBT에 비해 진각된 점화시기의 경우 이른시기의 점화로 인해 압력 상승이 초기에 일어나는 반면 팽창시기의 연소에 의한 일의 증가는 다른 조건과 차이가 크지 않기 때문에 연소효율이 좋지 않고 대부분 배기열로 배출되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9은 각각 점화시기의 변화에 따른 THC 및 질소산화물 (NO<sub>x</sub>) 배출 결과를 나타낸 것이다. 이론공연비 조건에서 THC 배출은 점화시기의 지각에 따른 후연소의 증가로 감소되었으나 그 차이가 크지 않았다. 희박연소조건에서는 이와 반대로 점화시기가 지각될수록 THC의 배출이 급격하게 증가되었는데, 늦은 점화시기로 인해 연료의 대부분이 팽창시기에 연소되지만 압력 및 온도의 강하로 인해 미연탄화수소가 증가하는 반면 과잉공기로 인해 후연소가 효과적이지 않기 때문인 것으로 판단된다.

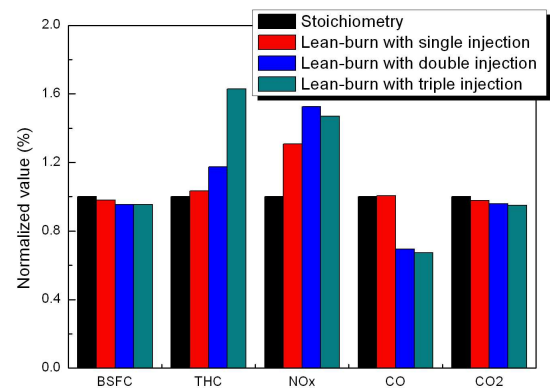
NO<sub>x</sub>의 배출은 공연비에 관계없이 점화시기가 지각될수록 연소온도의 저감으로 인해 감소되었고, 희박연소 조건에서의 절대값의 저감은 확인할 수 있었으나 삼원촉매의 적용이 어려운 점을 고려하면 여전히 높은 수준을 유지하였다.

3.2 연료분사 전략에 의한 영향

연료분사시기 및 점화시기를 최적화하여 희박연소를 구현하더라도 이론공연비 연소 대비 연료소비율의 향상 폭이 크지 않고 NO<sub>x</sub>의 배출 또한 예상보다 높은 수준을 나타내었기 때문에, 효과



**Fig. 10** Effect of multiple injection strategies on performance and volumetric emission level



**Fig. 11** Effect of multiple injection strategies on performance and mass emission level

적인 혼합기 형성을 통한 추가적인 연비 개선 및 배출가스저감을 위해 희박연소 조건에서 다단분사를 적용하여 그 결과를 비교하였다. 이때 동일한 조건에서의 연료소비율 및 배출가스특성 비교를 위하여 공기과잉율은  $\lambda = 2.0$ 을 유지하도록 제어하였다. Fig. 10은 이론공연비 조건을 기준으로 희박연소 시의 연료분사 전략에 따른 연료소비율과 배출가스 값의 변화를 비율로 나타낸 것이다. 분사회수가 증가할수록 스파크 플러그 주위에 형성되는 혼합기의 개선으로 이론공연비 연소 대비 약 4.5%의 연료소비율의 저감을 얻을 수 있었다.

단분사만으로 연료를 분사하게 되면 일정한 연료압력 조건에서 분사시간이 증가하게 되고 분무도달거리도 증가하기 때문에 상대적으로 연료량이 많은 중부하 조건에서의 혼합기는 분무선단에서는 과농하고 나머지 부분에서는 희박하게 되어 적절한 혼합기를 형성하기가 쉽지 않다. 그러나 동일한 연료량에 대하여 다단분사를 적용하게 되

면 분사기간 및 분무도달 거리가 짧아지고 초기 분사된 연료의 예혼합기 형성 시간이 확보되기 때문에 스파크플러그 주위에 보다 효과적인 혼합기의 형성 및 효율적인 연소가 가능하다.

이때 최후 분사량의 변화로 인한 최적연료분사 시기의 제어가 동반되어야 하고 각각의 분사전략에 따른 연료분사시기 및 점화시기를 Table 3에 나타내었다. 동일한 공기과잉율 조건에서 연소속도의 변화는 크지 않기 때문에 MBT 점화시기는 변하지 않았으나, 분사회수가 증가할수록 1회당 분사량이 감소하기 때문에 최후분사시기가 점화시기에 가깝게 지각되었으며 각각의 분사시기 간의 간격도 감소되었다. 연소안정성 및 연료소비를 개선 정도를 고려할 때 2단 분사만으로도 충분히 효과적인 혼합기의 형성이 가능함을 예상할 수 있다.

배출가스 측면에서 보면 분사회수가 증가할수록 초기 분사를 위한 시간적인 여유가 필요하기 때문에 최초 분사시기는 진각되어야 하고, 이로 인해 연소실내의 피스톤과 실린더 벽면과 같은 틈새로 유입되는 연료의 비율이 증가하여 THC의 배출이 증가하였다. 다단분사에 의한 예혼합기의 증가는 연소온도의 증가로 인한 NO<sub>x</sub> 배출의 증가 결과를 보였으나, 3단 분사의 경우 다시 약간 감소하였다.

이론공연비 대비 배출가스의 저감은 THC와 NO<sub>x</sub>에 대해서 각각 40%와 30% 수준을 보이고 있으나, 희박연소 조건이기 때문에 질량으로 환산하여 비교하면 Fig. 11과 같이 다른 결과를 확인할 수 있다. 희박연소를 하게 되면 공기량이 증가되기 때문에 질량으로 환산된 THC 및 NO<sub>x</sub>의 배출은 이론공연비 연소 시에 비해 오히려 증가되었으며, 이러한 결과는 희박연소에 의한 연비 개선 효과를 반감시키는 것으로 연비 개선 폭이 약간 저하되더라도 추가적인 저감을 위한 EGR 또는 점화시기의 지각과 같은 연소적인 방법이나 후처리시스템의 적용이 고려되어야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 분무유도방식의 초회박 GDI 엔진 시제품을 이용하여 연료분사시기 및 분사회수 등의 연소제어인자 변화에 따른 연소 및 배기 특성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무유도방식의 GDI 엔진에서 안정적인 희박연소는 지각된 연료분사시기를 통해 구현이 가능하였으며, 해당 운전조건에서 최적점화시기와 연료분사시기 사이의 간격은 15 CAD로 고정되었다.

(2) 단분사를 통한 희박연소 구현 시 이론공연비조건에 비해 약 2%의 연비 저감과 함께 THC와 NO<sub>x</sub>의 배출은 각각 46%, 39% 저감되었다.

(3) 다단분사를 적용하여 분사회수가 증가하게 되면, 1회 분사량의 감소로 최후분사시기가 점화시기에 가깝게 지각되고 각각의 분사시기 간의 간격도 감소되었다.

(4) 다단분사를 적용한 경우 추가적인 연비 저감이 가능한 반면, THC와 NO<sub>x</sub>의 배출은 증가하고 CO의 배출은 감소되었다.

#### 참고문헌

- (1) Han, D. H., Han, S. K., Han, B. H. and Kim, W. T., 2007, "Development of 2.0L Turbocharged DISI Engine for Downsizing Application," SAE 2007-01-0259.
- (2) Alkiad, A. C. and Eltary, S. H., 2003, "Contributors to the Fuel Economy Advantage of DISI Engines Over PFI engines," SAE 2003-01-3101.
- (3) Szekely, G. A. and Alkiads, A. C., 2005, "Combustion Characteristics of a Spray-Guided Direct-Injection Stratified-Charge Engine with a High-Squish Piston," SAE 2005-01-1937.
- (4) Baecker, H., Kaufmann, A. and Tichy, M., 2007, "Experimental and Simulative Investigation on Stratification Potential of Spray-Guided GDI Combustion Systems," SAE 2007-01-1407.
- (5) Schwarz, Ch., Schünemann, E., Durst, B., Fischer J. and Witt, A., 2006, "Potentials of the Spray-Guided BMW DI Combustion System," SAE 2006-01-1265.
- (6) Spicher, U., Reissing, J., Kech, J. M. and Gindele, J., 1999, "Gasoline Direct Injection (GDI) Engines - Development Potentialities," SAE 1999-01-2938.
- (7) Chang, W. S., Kim, Y. Nam. and Kong, J. K., 2007, "Design and Development of a Spray-guided Gasoline DI Engine," SAE 2007-01-3531.