

직접분사식 가솔린 엔진의 분사전략 변경 및 EGR 적용을 통한 배기저감에 관한 연구

박철웅** · 김홍석* · 우세종* · 김용래*

* 한국기계연구원 그린동력연구실

Study on Emission Reduction with Injection Strategy and Exhaust-Gas Recirculation in Gasoline Direct Injection Engine

Cheol Woong Park** , Hong Suk Kim* , Se Jong Woo* and Yong Rae Kim*

* Engine research team, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received October 26, 2011 ; Revised December 16, 2011 ; Accepted December 19, 2011)

Key Words: Gasoline Direct Injection Engine(직접분사식 가솔린엔진), Spray-guided Type Combustion System(분무유도방식 연속기구), Fuel Stratification(연료 성층화), Exhaust Gas Recirculation(배기가스재순환)

초록: 자동차배출가스는 이산화탄소(CO₂)에 의한 지구온난화 및 탄화수소(HC)와 질소산화물(NO_x)에 의한 오존생성을 야기하는 등, 인체와 환경에 나쁜 영향을 미치기 때문에 이에 대한 관심이 증폭되고 있다. 가솔린 직접분사 (Gasoline Direct Injection; GDI)엔진은 디젤엔진과 같이 연소실내에 연료를 직접 공급하는 방식으로 가솔린엔진의 취약점으로 지적되어 오던 높은 연료소비율 문제를 획기적으로 개선할 수 있는 기술로 평가되고 있다. 본 연구에서는 분무유도방식(Spray-guided type)의 GDI엔진을 이용하여 공기과잉률 2.0 이상의 초희박연소를 통해 연료소비율을 개선하였다. 추가적인 연료소비율 개선 및 배출가스 저감을 위해 희박연소시 다단 분사전략과 Exhaust Gas Recirculation (EGR)을 적용하였다. 배출가스 수준과 운전성능을 평가하고 이를 배출가스 규제와 비교·검토함으로써 국내 관련기술 개발 방향 및 상용화 가능성에 대해 검토하고자 하였다.

Abstract: Nowadays, automobile manufacturers are focusing on the reduction of exhaust-gas emissions because of the harmful effects on humans and the environment, such as global warming by greenhouse gases. Gasoline direct injection (GDI) combustion is a promising technology that can improve fuel economy significantly compared to conventional port fuel injection (PFI) gasoline engines. In the present study, ultra-lean combustion with an excess air ratio of over 2.0 is realized with a spray-guided-type GDI combustion system, so that the fuel consumption is improved by about 13%. The level of exhaust-gas emissions and the operation performance with the multiple injection strategy and exhaust-gas recirculation (EGR) are examined in comparison with the emission regulations and from the point of view of commercialization.

- 기호설명 -

IN : Intake
ATM : Atmosphere
EX : Exhaust

1. 서 론

전 세계적으로 각 자동차 제작사에서는 저공해 및 저연비 엔진 개발에 많은 노력을 기울이고 있

으나, 경제성 및 기술적용의 한계성으로 인해 강화되는 자동차 배출가스 규제를 만족하기에는 어려움이 있다. 그 중에서도 1992년 6월에 채택된 지구변화협약 이후 CO₂ 배출에 대한 국제적 규제가 본격화되면서 이를 만족시키기 위한 기술들이 주목받고 있다.⁽¹⁾ 이러한 대안 중의 하나인 가솔린직접분사식(Gasoline Direct Injection; GDI)엔진 기술은 가솔린연료를 연소실내에 직접분사하여 희박연소 또는 고효율 연소를 구현하는 기술로서 1995년에 일본의 미쯔비자동차에서 발표하여 큰 관심을 끌게 되었다.

† Corresponding Author, cwpark@kimm.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

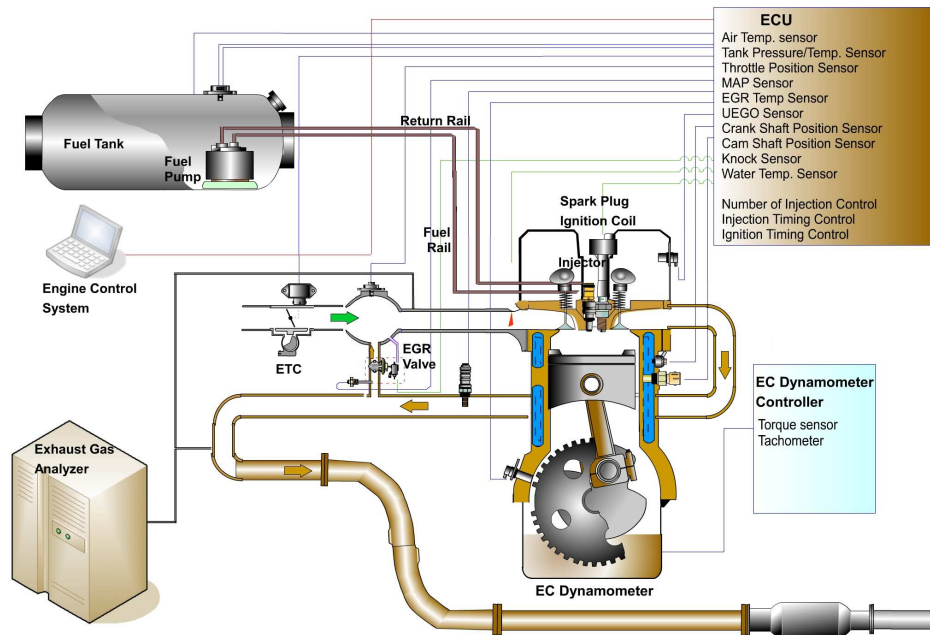


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

벽면유도방식(Wall-guided type)과 공기유도방식(Air-guided type)으로 대표되는 종래의 GDI엔진은 실린더 내부 유동을 이용하여 회박한 연료/공기 혼합기의 성층연소를 구현하여 디젤엔진 대비 높은 연료소비를 문제를 개선하는 것에 집중되어 있었다.^(2,3) 그러나 성층연소의 특성상 넓은 운전 영역에서의 적용이 쉽지 않고, 연소실에 직접 분사된 연료가 벽면에 부착되어 탄화수소 배출 증가의 원인으로 작용할 가능성이 높은 문제점 때문에 최근에는 고출력을 목표로 하는 이론공연비 연소 방식의 GDI 엔진 개발이 일반적인 추세이다. 이런 방식의 GDI 엔진은 흡입과정 중에 연료를 분사함으로써 연료의 기화열로 충전효율이 증가되고, 내노킹성이 우수하여 압축비 증대를 통해 고효율화가 가능한 장점이 있다.

그러나 기존의 포트분사방식(Port Fuel Injection; PFI)과 동일하게 이론공연비 연소를 구현하기 때문에 디젤엔진수준의 연비개선은 어려운 것이 사실이다. 최근 연료공급시스템 및 점화장치 기술의 발달은 초회박연소를 구현하는 엔진의 상용화 개발을 가능하게 하였으며, 회박 GDI 엔진 기술이 제조명 받게 하는데 중요한 역할을 하였다. 일부 자동차제조사에서 상용화하여 소개한 분부유도방식(Spray-guided type) GDI엔진 기술은 디젤엔진과 유사하게 고압연료분사기가 연소실의 중앙에 위치하고 인접한 위치에 점화플러그가 장착

되도록 한 설계가 특징이다.⁽⁴⁻⁷⁾

상기와 같은 연소실 구조는 점화플러그 주변에 착화 가능한 공연비를 공급할 수 있도록 초회박 공연비에서의 성층화가 용이하고, 넓은 운전영역에서의 안정적인 회박연소의 구현이 가능하다. 그러나 회박연소 시 기존의 삼원촉매의 사용이 어렵다는 점을 고려하면 NOx의 저감이 큰 문제점으로 제시되고 있으며, 직접 분사된 연료의 연소실 벽면에의 부착으로 인한 HC 배출의 증가 및 고부하 조건에서 PFI 방식에 비해 높은 농도로 배출되는 미세입자와 매연에 대한 개선방안도 중요하다.^(8,9) 실용화를 위해서는 배기규제를 만족하는 것이 가장 시급한 문제이지만 현재 양산되고 있는 회박 GDI엔진의 경우 De_NOx 촉매를 부착하여 EURO-IV 수준의 규제를 겨우 만족하고 있는 실정이다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 승용 초회박 GDI 엔진 개발을 위한 선행 연구로써 분부유도방식의 초회박 GDI 엔진 시제품을 이용하여 다양한 연료분사전략 및 운전전략을 통한 배출가스 수준과 운전성능을 평가하고 이를 배출가스 규제와 비교·검토함으로써 국내 관련기술 개발 방향 및 상용화 가능성에 대해 검토하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 초회박 GDI 엔진연소 최적화를

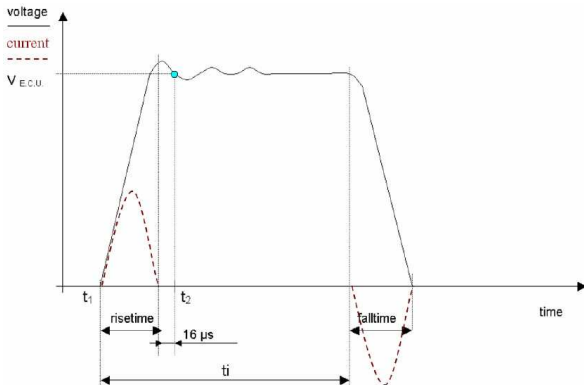


Fig. 2 Electrical driver characteristics - typical voltage and current signal

위한 다양한 운전전략의 적용 및 실현 가능성을 검토하기 위해 상용 MPI 방식의 가솔린 엔진을 개조하여 분무유도방식의 GDI 엔진을 개발 및 설치하여 운전전략의 변화에 따른 실험을 실시하였다.

2.1 실험 장치

Fig. 1에 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 분무유도방식을 적용한 헤드설계 및 제작하여 실린더 헤드의 중앙에 개방형 노즐을 갖는 피에조 타입의 고압 인젝터와 점화플러그를 장착하였으며, 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 피에조 인젝터는 고압다단분사가 가능하며 제원과 대표적 구동신호를 각각 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다. 고압연료분사가 가능하도록 배기 캠 샤프트에 플러저방식의 고압펌프를 장착하였고, 연료량 제어 밸브(Fuel Control Valve; FCV)에 인가되는 전압의 Duty를 제어함으로써 펌핑부에 유입되는 연료량을 제어하여 연료분사압력을 제어하였다. 다채널 피에조 인젝터 드라이버와 컴퓨터에 의해 제어되는 Universal Engine Control System(ECS)를 사용하여 각 연소실로 공급되는 연료의 분사량과 분사시기 및 분사회수를 임의로 조절이 가능하도록 하였다. 효율적인 Exhaust Gas Recirculation(EGR) 가스 공급 및 제어를 위한 여러 시스템을 추가하였으며, 기존의 엔진에는 장착되어 있지 않은 EGR 모듈 적용을 위한 라인을 별도로 구성하였다. EGR 라인 은 스로틀과 흡기매니폴드 사이에 어댑터를 가공 및 장착하여 연결되도록 하고, 정밀한 제어와 신속한 작동이 가능한 전자제어방식 EGR (E-EGR) 밸브와 EGR 쿨러를 사용하였다.

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.)

실린더별로 공기과잉률을 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 가스추출라인(Gas Sampling Line)을 장착하여 배기가스 분석계(AMA i60, AVL)에서 측정되도록 하였다.

2.2 실험 방법

본 연구의 대상이 되는 승용 가솔린 엔진에서 자주 사용되는 저속·저부하 운전영역 중의 하나인 2,000 rpm, Brake Mean Effective Pressure (BMEP) 0.2 MPa 조건으로 운전조건을 고정하여 실험을 수행하였다. 일부 자동차제작사에서 기준 연비실험 조건으로 사용되는 조건으로서, 엔진 제어전략에 따른 효과가 명확하게 나타나고 상대적으로 넓은 희박한계를 갖기 때문에 EGR의 적용 가능성이 높다. 이론 공연비 조건과 희박한계 조건에서 점화시기와 연료분사시기의 변경을 통하여 최적점화(Minimum advance for Best Torque; MBT)시기 및 최적 연료분사시기를 결정하였으며, 엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수의 온도가 83±2°C에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하였다. 전용 컨트롤러를 사용하여

E-EGR 밸브의 개로를 제어하여 목표 EGR율을 결정하였으며, EGR율의 측정은 가스분석기를 사용하여 측정된 CO₂ 값을 이용하여 식 (1)로부터 산출하였다.

$$EGRrate(\%) = \frac{[CO_2]_{IN} - [CO_2]_{ATM}}{[CO_2]_{EX} - [CO_2]_{ATM}} \quad (1)$$

여기서, [CO₂]_{IN} : 흡입공기 중의 CO₂ 농도
 [CO₂]_{ATM} : 대기 중의 CO₂ 농도
 [CO₂]_{EX} : 배기가스 중의 CO₂ 농도

본 실험에서 최적연료분사시기 및 최적점화시기는 연료소비율이 가장 낮을 때의 각각의 시기로 정의하였다. 연료분사압력은 20 MPa 로 고정하고 연료분사 전략 및 EGR 적용에 따른 연료소비율, 배기가스, 연소안정성 등을 검토하였다.

3. 실험결과

3.1 연료분사전략에 따른 영향

공기과잉률 2.0 이상의 초희박연소를 안정적으로 구현하기 위해서는 점화플러그 주위로 고도의 연료 성층화가 필수적이다. 이를 위해서는 공기 유동과 연료분사량 및 분사시기, 점화시기 등 모든 관련된 변수들이 운전조건에 따라 최적화되어야 한다. Fig. 3에 해당운전 조건에서 각 연료분사 전략에 따른 희박연소시 연료소비율을 이론공연비 연소조건과 비교하였다. 이론공연비 조건에서는 단분사 만을 적용하였으며, 희박연소조건에

서는 다단분사에 의한 효과를 관찰하였다. 공기과잉률을 희박한계조건인 λ=3.5까지 변화시킴에 따라 체적효율의 증가 및 펌핑손실의 감소로 연료소비율이 약 7%에서 최대 13%까지 감소되는 결과를 보였다.

본 실험의 운전조건에 해당하는 엔진부하에서 연료분사기간이 상대적으로 긴 단분사 만으로는 적절한 혼합기의 형성이 어렵고 다단분사가 효과적임을 확인하였다. 상대적으로 농후한 혼합기의 λ=2.0 조건에서는 분사전략에 따른 영향은 관찰하기 어려웠으나, 공기과잉률이 증가됨에 따라 다단분사에 의한 연료의 성층과가 효과적으로 작용하여 5:5의 비율로 2단분사를 적용했을 때 가장 낮은 연료소비율을 보였다. 그러나 3단분사의 경우는 오히려 단분사보다 높은 연료소비율을 나타내었다.

일반적으로 희박연소시의 연료소비율은 연소안정성과 관계가 깊기 때문에 3단분사 시 연료소비율 악화의 원인을 연소안정성에 의한 것으로 예상하였으나, Fig. 4에 나타난 것과 같이 희박연소시 단분사를 제외한 모든 조건에서 도시평균유효압력(Indicated Mean Effective Pressure; IMEP)의 변동율을 나타내는 COV_{IMEP} 값이 5% 미만의 안정적인 연소가 구현되었다. 이것은 3단분사 적용시 악화된 연료소비율이 연소안정성과는 관계가 없음을 보여주는 매우 흥미로운 결과로 볼 수 있다. 각각의 분사시기의 변화를 통해 최소 연료소비율을 보이는 조건에서 3단분사를 이용하더라도 상대적으로 낮은 부하의 운전조건에서는 성층혼

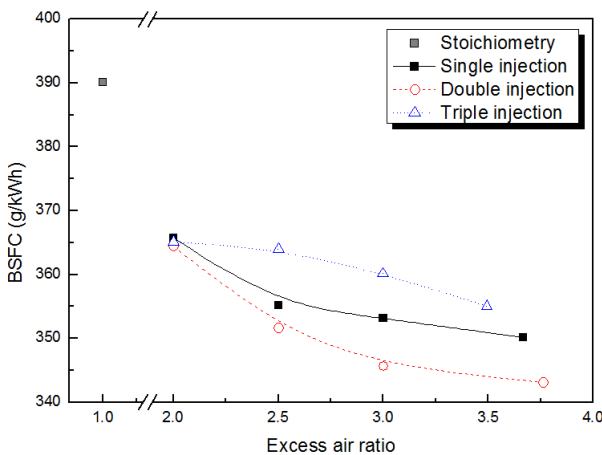


Fig. 3 Effect of fuel injection strategies on fuel consumption versus excess air ratio

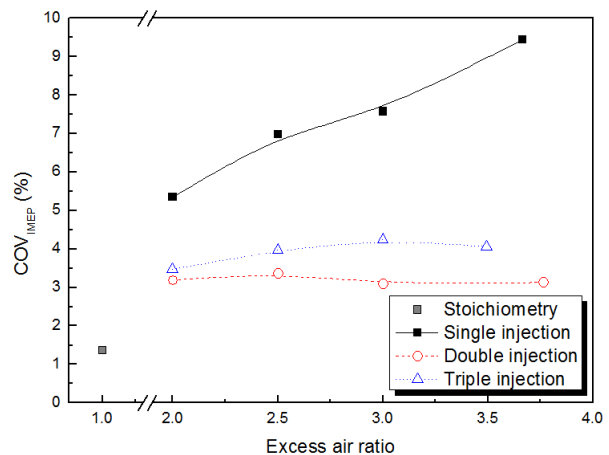


Fig. 4 Effect of fuel injection strategies on combustion stability versus excess air ratio

합기의 형성이 적절하지 않은 것으로 판단되며, 이와 같은 결과는 이전의 실험에서도 확인한 바 있다.^(10,11) 단분사의 경우는 점화플러그 인근에 국부적으로 과도하게 농후하거나 희박한 혼합기가 형성되기 때문에, 공기과잉률이 증가할수록 간헐적인 실화가 발생하는 등 매우 불안한 연소상태를 보였다.

3단분사 시의 연료소비율 악화에 대한 원인은 연료분사시기 기인하는 것으로 볼 수 있다. 희박한 계조건에서의 각각의 분사전략에 따른 연료분사시기 및 점화시기를 Table 3에 나타내었다. 동일한 공기과잉률 조건에서 연소속도의 변화는 크지 않기 때문에 MBT 점화시기는 변하지 않았으나, 분사회수가 증가할수록 최초의 분사시기는 진각되었다. 3단분사 조건에서 각각의 연료분사시기 및 점화시기를 최적화 하더라도 매우 이른시기에 분사되는 최초 분사연료가 연소를 통한 출력상승에 크게 기여하지 못하기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 공기과잉률의 변화에 따른 THC

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

Injection Strategy	1st Injection	2nd Injection	3rd Injection	Spark Advance
	Before Top Dead Center (BTDC), Crank Angle Degree (CAD) / Injection Duration (μsec)			
Single	41 / 510	-	-	30
Double	47 / 270	37 / 270	-	30
Triple	59 / 200	47 / 200	37 / 200	30

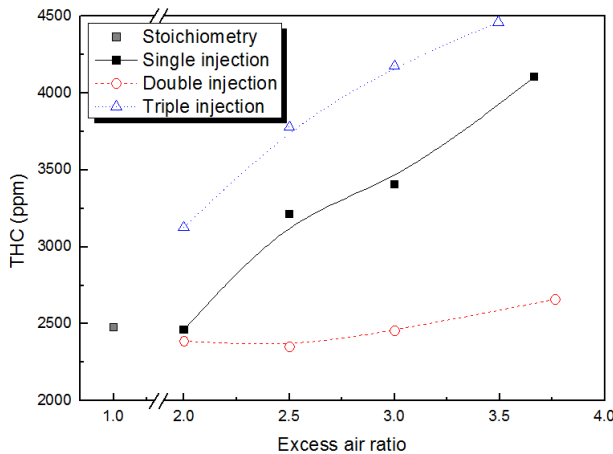


Fig. 5 Effect of fuel injection strategies on THC emissions versus excess air ratio

및 NOx 배출 결과를 나타내었다. THC의 배출은 공기과잉률이 증가됨에 따라 국부적으로 과도하게 희박한 혼합기를 형성할 가능성이 높아지기 때문에 증가되는 경향을 보였다. 2단분사의 경우 안정적인 연소가 확보된 상태에서 연료소비율이 지속적으로 개선되기 때문에 THC 배출이 이론공 연비와 비슷한 수준을 유지한다. 그러나 간헐적인 실화가 발생하는 단분사 조건 및 조기분사 연료로 인해 연료소비율이 증가된 3단분사 조건의 경우 공기과잉률이 증가될수록 THC 배출이 큰 폭으로 증가하였다. 3단분사 시 THC의 배출이 더 높은 결과를 보이는 것은 앞서 언급한 조기분사 연료의 벽면 부착 또는 불충분한 기화에 의한 것으로 판단된다. 3단분사시 두 번째와 세 번째의 분사시기가 2단분사시의 첫 번째 및 두 번째 분사시기와 동일함에도 불구하고 3단분사 조건에서 THC의 배출이 급격하게 증가한 것은, 첫 번째 분사시기가 BTDC 59 CAD로서 이후 분사되는 연료에 비해 이른시기에 분사되기 때문에 상대적으로 낮은 분위기 압력 및 온도가 원인으로 작용한 것으로 보인다. NOx의 배출은 공기과잉률이 증가할수록 감소하였으며, 연료경제성이 가장 좋은 2단분사 시 NOx 배출이 높은 것은 고도의 연료성층화에 따른 높은 연소효율에 대한 증거로 볼 수 있다. NOx 배출이 가장 낮은 3단분사의 경우 충분히 농후한 혼합기의 형성이 어렵고 이로 인해 연소온도가 낮음을 예상할 수 있다.

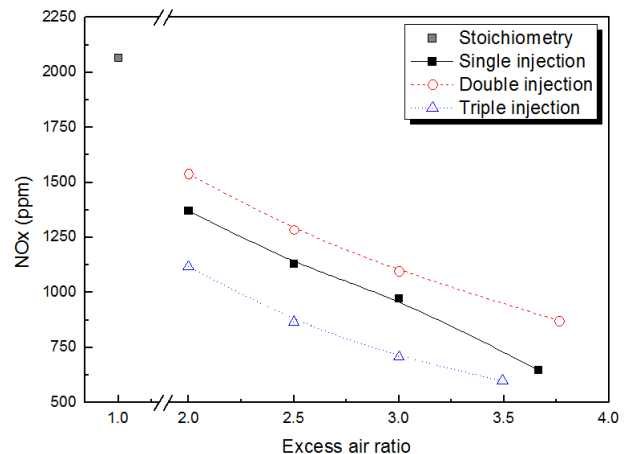


Fig. 6 Effect of fuel injection strategies on NOx emissions versus excess air ratio

3.2 EGR에 따른 영향

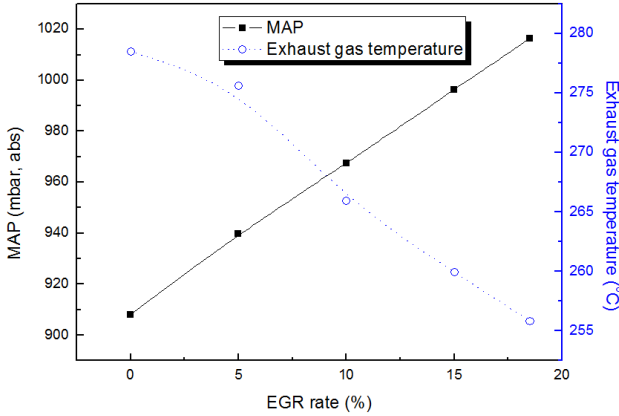


Fig. 7 Effect of EGR on MAP and exhaust gas temperature

=3.0 조건이 유지되도록 throttle의 개도를 조절하

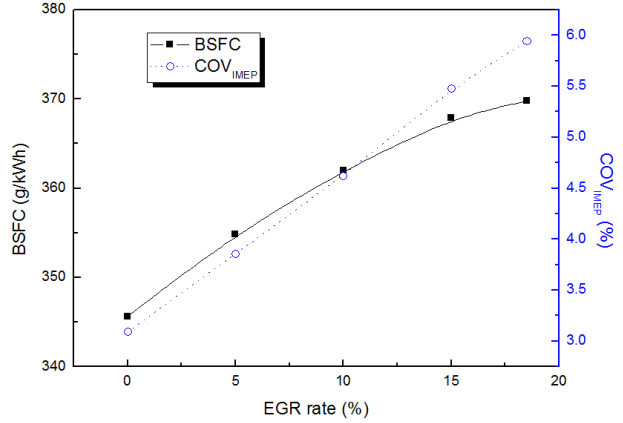


Fig. 8 Effect of EGR on fuel consumption and combustion stability

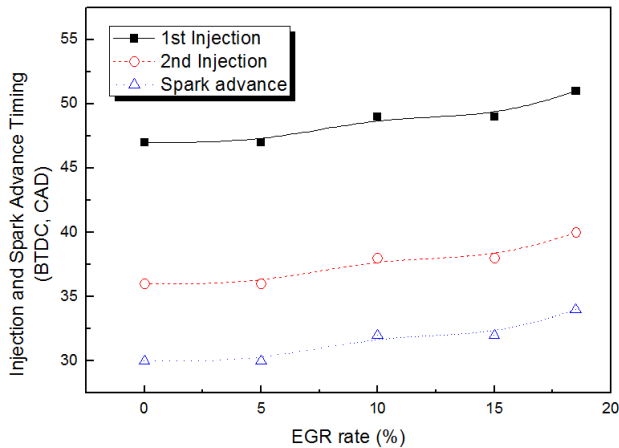


Fig. 9 Effect of EGR on fuel injection timing and spark advance timing

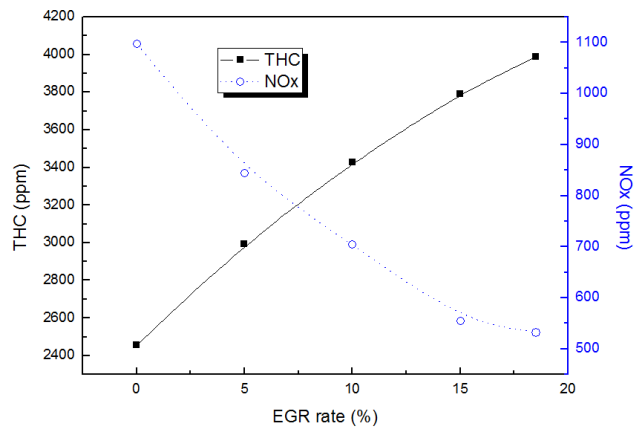


Fig. 10 Effect of THC and NOx emissions

희박한계조건에서 2단분사를 적용하여 안정적인 희박연소를 확보한 상황에서 연료소비율이 큰 폭으로 개선되었으나, NOx 저감을 위한 별도의 후처리장치 없이 상용화하기에는 높은 NOx 배출 결과를 나타내었다. 이에 효과적인 배출가스저감을 위해 EGR을 적용하여 EGR 율에 따른 연소 및 배출가스특성을 비교하였다. Fig. 7에 EGR율의 변화에 따른 흡기매니폴드 압력 (Manifold Air Pressure; MAP) 및 배기가스 온도를 나타내었다. 연료경제성이 가장 좋은 2단분사 조건에서 EGR을 적용하여 그 결과를 살펴보았다. Wide Open Throttle (WOT) 조건인 희박한계 ($\lambda=3.5$) 조건에서는 흡기와 배기간의 압력차가 거의 없고 흡입 공기량도 최대이기 때문에 EGR 적용 여지가 거의 없다. 따라서 희박한계보다 약간 농후한 λ

며 EGR을 적용하였다. 이때 적용가능한 최대 EGR율은 18.5%였으며, EGR율이 증가할수록 배기가스온도는 감소되고 흡기매니폴드 압력은 증가하였다. 최대 EGR율에서의 스로틀 개도와 흡기매니폴드의 압력은 희박한계 조건과 동일하였다.

Fig. 8은 EGR율의 증가에 따른 연료소비율 및 연소안정성의 변화를 나타낸 그래프이다. EGR율이 증가될수록 연소가 불안정해지기 때문에 펌핑손실 및 열손실의 감소에도 불구하고 연료소비율이 악화되었다. 여기서 흥미로운 점은 Fig. 9에 나타난 것과 같이 EGR율의 증가에 따라 최적 점화시기와 최적연료분사시기가 진각된 점이다. 단순히 공기과잉률이 증가되었을 경우 최적점화시기의 변화는 나타나지 않았으나, EGR이 적용되

면 EGR 율의 증가에 따라 연소속도가 감소됨을 보여주는 결과라 할 수 있다.

Fig. 10은 EGR율의 증가에 따른 THC 및 NOx 배출의 변화를 나타낸 것으로서 EGR율이 증가될수록 NOx의 배출은 감소되고 THC의 배출이 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다.^(12,13) 최대 EGR율 적용 시 약 51%에 가까운 NOx 저감 효과를 얻을 수 있으나, THC의 배출 또한 급격하게 증가하였다. 급격한 THC 증가 경향은 일반적인 PFI방식의 가솔린엔진에 EGR을 적용한 경우와 비교했을 때 이례적인 결과로서,⁽¹⁴⁾ 희박한 분위기에서 EGR 적용에 따른 희석효과가 초기 분사된 연료의 연소에 크게 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. THC 배출 증가와 동시에 연료소비율 악화를 감수하더라도 여전히 높은 수준의 NOx 배출 결과를 고려할 때 EGR의 적용이 배출 규제 만족을 위한 대안이 될 수 없으며, 높은 효율의 후처리시스템의 적용이 상용화에 가까운 성능을 보장할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 분무유도방식의 초희박 GDI엔진 시제품을 이용하여 연료분사전략 및 EGR 등의 연료경제성을 포함한 배출가스 특성에 영향을 미치는 연소제어인자의 변화에 따른 연소 및 배출가스 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무유도방식의 GDI 엔진에서 다단분사전략을 이용하여 희박연소한계를 $\lambda=3.5$ 까지 확장하여 안정적인 희박연소를 구현하였으며, 연료소비율을 이론공연비 대비 최대 13%까지 개선할 수 있었다.

(2) 연료소비율은 2단분사조건에서 가장 낮은 결과를 보였으며, 3단분사 조건에서는 매우 이른 시기에 분사되는 최초 분사연료가 연소를 통한 출력상승에 크게 기여하지 못하여 단분사의 경우보다 연료소모율이 증가하였다.

(3) 단분사 조건 및 3단분사 조건의 경우 공기과잉률이 증가될수록 THC 배출이 큰 폭으로 증가하였으나, 2단분사 시 이론공연비 조건과 유사한 수준의 THC 배출을 유지한 상태에서 NOx 배출을 약 50% 정도 저감할 수 있었다.

(4) 추가적인 NOx 저감을 위해 EGR을 적용하더라도 후처리장치 없이 배출가스 규제를 만족하

기는 어렵고 연료소비율 개선의 효과는 다소 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 El Tary, S. H., 2003, "Contributors to the Fuel Economy Advantage of DISI Engines Over PFI engines," SAE 2003-01-3101.
- (3) Szekeley, 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, C., 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., Reising, 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.-N. and Kong, J.-K., 2007, "Design and Development of a Spray-Guided Gasoline DI Engine," SAE 2007-01-3531.
- (8) Lee, S.-H., Oh, S.-M., Kang, K.-Y., Cho, J.-H. and Cha, K.-O., 2011, "Particulate Emissions from a Direct Injection Spark-Ignition Engine Fuelled with Gasoline and LPG," *Transaction of KSAE*, Vol. 19, No. 3, pp.65~72.
- (9) Maricq, M., Podsiadlik, D., Brehob, D. and Haghhoie, D., 1999, "Particulate Emissions from a Direct Injection Spark Ignition (DISI) Engine," SAE 1999-01-1530.
- (10) Kim, S.-D., Yun, B.-K., Park, C.-W. and Kim, H.-S., 2010, "A Study on Lean-Combustion Characteristics of Spray-Guided GDI Engine," *KSME 2010 Spring Conference Proceeding*, pp. 96~101.
- (11) Park, C.-W., Kim, S.-D., Kim, H.-S., Lee, S.-Y. and Moriyoshi, Y., 2011, "Effect of a Split-Injection Strategy on the Performance of Stratified Lean

- Combustion for a Gasoline Direct-Injection Engine," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 225, No. 10, pp.1415~1426.
- (12) Przystek, J., Dabkowski, A. and Teodorczyk, A., 1999, "The Study of Exhaust Gas Recirculation on Efficiency and NOx Emission in Spark-Ignition Engine," SAE 1999-01-3514.
- (13) Cha, J.-Y., Kwon, J.-H., Cho, Y.-J. and Park, S.-S., 2001, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Gasoline Engine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 15, No. 10, pp.1442~1450.
- (14) Park, C.-W., Choi, Y. and Kim, C.-G., 2009, "Analysis of Performance and Emissions Characteristics on Gasoline Engine for Hybrid Vehicles with Optimum EGR Rate and the Cylinder Variation of EGR Rate," *Transaction of KSAE*, Vol. 17, No. 1, pp.1~7.