

직접분사식 가솔린엔진의 분사 비율에 따른 연소특성에 관한 연구

인 병 덕¹⁾ · 박 상 기¹⁾ · 이 기 형²⁾

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

A Study on the Characteristics of Combustion according to Injection Strategy in DISI Engine

Byungdeok In¹⁾ · Sangki Park¹⁾ · Kihyung Lee^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 426-719, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-719, Korea

(Received 17 January 2011 / Revised 15 April 2011 / Accepted 8 July 2011)

Abstract : Recently, the important issues of gasoline engine are to reduce the fuel consumption and emission. Thus, many researchers are studying the technology to solve these problems. One approach of these issues is to achieve homogeneous charge combustion and stratified charge combustion with various injection strategy. In this study, the combustion characteristics of DISI engine according to injection strategy were examined. The effect of injection timing on lean limit A/F were investigated using dual DISI single cylinder. The results show that the engine operation region of dual DISI type engine is larger than that of PFI and DISI type engine cases. Especially, late injection is very effective to extend the operation region more than any other injection timings. In addition, the results show that when the DISI injection ratio is increase, lean limit A/F is improved. It means that the dual injection system can meet with emission regulations and reduce the fuel consumption. Also, combustion pressure of dual injection system is much higher than PFI and DISI injection.

Key words : Direct injection spark ignition(직접 분사식 가솔린 엔진), Ignition timing(분사시기), Lean burn combustion(희박연소), Injection ratio(분사비율), Stratified combustion(성층연소), Dual injection(듀얼분사)

1. 서 론

현재 전 세계적으로 SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle)와 CAFE(Corporate Average Fuel Economy)와 같은 배기 및 연비규제가 강화되고 있으며, CO₂의 배출규제 또한 시급히 해결하여야 할 기술과제로 부각되고 있다. 따라서 자동차 생산업체는 연료의 경제성과 더불어 오염물질의 배출이 적은 차량을 개발하는 것이 중요한 기술과제로 대두되고 있다.

가솔린 연소의 경우 신 연소 개념인 직접 분사식

가솔린 엔진이 기존의 포트 분사식 가솔린 엔진에 비해 연비와 출력의 면에서 우수한 장점을 보이고 있다.¹⁾ 이러한 연비와 출력의 장점을 두 가지 측면에서 고려해 보면 조기분사(early injection)시에는 균일한 혼합기의 형성으로 인하여 출력향상이 이루어 질 수 있고, 지각분사(late injection)의 경우에는 분사한 연료가 점화플러그 주변으로 모이는 성층 혼합기가 이루어져서 연료 소비율의 측면에서 커다란 이점을 지닌다.²⁾ 직접분사 방식의 경우, 연소실 내에 연료를 분사하게 되어 펌프 손실과 냉각 손실 등 각종 손실이 저감되고, 압축비의 향상을 가져오는 장점을 가지고 있다.³⁾ 또한 성층 연소를 통한 국

*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

부적으로 농후한 혼합기가 점화 플러그 쪽으로 모여 희박 연소가 가능해 진다.⁴⁾ 따라서 가솔린 엔진의 작동원리를 사용하지만 디젤엔진의 장점을 모두 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다.⁵⁾

이러한 장점을 가지는 직접 분사식 가솔린 엔진의 희박연소 특성을 파악하기 위해서는 혼합기 형성에 중요한 요인인 분사압력과 분사 후 혼합기 형성에 걸리는 시간의 영향을 분석 할 필요가 있다. 분사방식을 통해서 조기분사와 지각분사를 구현할 수 있고 이를 통해서 원하는 형식의 엔진시스템을 구성할 수 있기 때문이다.⁶⁾ 하지만 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우 희박 연소 구현을 위해서 성층 연소를 이용하면 출력의 저하가 나타날 뿐만 아니라, 성층 연소로 인해서 NOx의 배출량도 늘어난다. 하지만 듀얼 분사를 통한 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우 포트 분사에 의한 균일한 혼합기가 연소실 내에 존재하기 때문에 연소의 안정성과 출력의 향상, 그리고 배기 배출물 저감 등 기존 직접 분사식 가솔린 단일 분사의 단점을 보완하고 직접 분사식 가솔린 엔진의 희박 운전 영역을 확장시킨다고 알려져 있다.⁷⁻¹¹⁾

본 연구에서는 듀얼 분사식 가솔린 엔진을 구성하고 연료의 분사방식을 변화시켜 가면서 희박연소 특성을 파악하였다. 이를 통해서 희박연소에 최적한 분사방식을 선정하여 직접 분사식 가솔린 엔진의 성층 연소 최적화를 도모하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 엔진 및 제어시스템

본 연구에서 사용된 엔진은 Ricardo 사의 연구용 4-밸브 500cc 단기통 엔진으로 Table 1에 주요제원을 나타내었다. 2000cc 가솔린 엔진 헤드를 가공하여 1개의 실린더만을 사용하도록 개조하였고 직접 분사식 가솔린 인젝터를 실린더 내에 측면 분사방식으로 설치하였으며, 흡기 포트에는 상용 MPI용 인젝터를 장착하였다. 2개 인젝터의 제원을 Table 2에 나타내었고, 인젝터들을 독립적으로 제어할 수 있도록 맵핑 가능한 ECU(M800, Motec co.)를 설치하여 분사시기와 분사량을 제어하였으며, Fig. 1에 엔진의 실제 사진을 나타내었다.

Table 1 Engine specifications

Engine type	4 Stroke Single Cyl. 4 Valve
Bore × Stroke	82mm × 93.5mm
Displacement volume	500cc
Combustion chamber	Pentroof
Compression ratio	11.5

Table 2 Specifications of fuel injector

Injector type	KA-100 Type DISI
Injection pressure	10MPa
Spray geometry	Hollow cone
Nozzle type	Swirl type
Spray angle	60°

Injector type	Avante XD 2000CC injector
Spray geometry	4 Multiholes
Hole shape	Multiholes
Injection pressure	0.3MPa

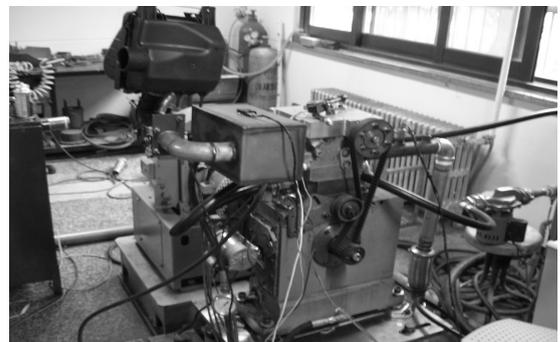


Fig. 1 Photographs of dual injection system DISI engine

직접 분사식 가솔린 엔진용 인젝터의 경우에는 케피코사에서 개발한 연구용 인젝터를 사용하였으며, 이 인젝터는 본 과제의 1, 2단계에서 분무 실험을 수행한 인젝터로 적정 분사압력은 10 MPa이다. 고압을 유지하기 위하여 고압펌프를 사용하지 않고 고압의 질소로 가압하였으며, 이는 연료 공급에 따른 맥동을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 직분식 인젝터의 경우 성층 연소를 구현하여 연소 한계를 확장하기 위하여 엔진 헤드의 흡기 포트 쪽으로 가공하여 부착하였고, 부착각도는 고압에 의한 피스톤 표면의 Wall Wetting을 고려하고 이전 분무 특성 연구결과를 참고하여 최적의 분사각도인 30°로 부착하였다. 반면 포트 분사식 인젝터의 경우에는 가솔린 저압 펌프를 이용하여 0.3 MPa로 가압하였고,

인젝터는 동일 배기량 엔진에 사용되는 상용 인젝터를 사용하였다. 포트 분사식 인젝터의 부착 위치는 흡기포트에 벽면 충돌이 가장 적게 발생하는 45° 각도로 부착하였다. 또한, 본 연구에 사용된 직분식 분사시스템의 경우에는 옆면 분사 방식이므로 피스톤에 충돌을 고려하여 2차 미립화 및 성층화가 가능하게 피스톤에 Cavity를 두어 가공하였고, 압축비를 11.5로 고정하였다.⁵⁾

2.2 각종 센서 및 데이터 해석 시스템

E/C 동력계(EC-150, 환웅기전)를 이용하여 엔진의 회전수와 부하를 일정하게 제어하였으며, 연소실에 실제적으로 흡입되는 공기흡입량을 측정하기 위하여 흡기 챔버에 TPS와 MAP Sensor를 장착하였다. 배기포트에는 연소 온도를 간접적으로 측정할 수 있도록 배기온도 센서를 설치하였으며, 공연비 제어와 희박한계를 규명하기 위한 산소(O₂) 센서, 배기 배출물 발생 특성을 측정하기 위한 배기 분석계(Greenline 9000, EUROTRON)를 설치하였다. 또한 엔진 헤드 중앙에 Kistler사의 점화 플러그 일체형 압력센서를 부착한 후, 연소실내의 압력을 측정하여 A/D 보드를 통하여 실시간으로 저장하였으며, 연소 해석을 위한 타이밍 데이터는 엔코더에서 발생하는 TDC(Z상)와 360개의 크랭크 각도(A상) 신호를 획득하여 확인하였고, 엔진의 부하는 로드셀을 이용하여 동력계에서 흡수하는 토크를 측정하였다.

2.3 실험조건 및 방법

본 연구에서는 희박연소 영역에서 주로 사용되는 대표 운전조건으로 2000rpm과 BMEP 3bar를 기준으로 실험하였으며, 점화시기는 MBT에 고정하였다. 또한, 희박연소 특성을 파악하기 위해서 MPI 인젝터의 분사시기는 전년도 연구 결과로부터 가장 연소 특성이 좋은 BTDC 90°로 고정하였고, 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우에는 균일 혼합기와 성층 혼합기의 형성을 확인하기 위해서 분사시기를 BTDC 180°, 90°, 60°, 45°로 변경하여 실험하였으며, 분사시기의 비교 그림을 Fig. 2에 나타내었다. 공연비 제어 방법은 스로틀을 고정해서 엔진에 흡입되

Table 3 Engine test conditions

Engine performance test	
Engine speed	2000 rpm
A / F	1~40
Injection pressure (PFI system)	0.3 MPa
Injection pressure (DISI system)	10 MPa
Injection timing (PFI system)	BTDC 90°
Injection timing (DISI system)	BTDC 180°, 90°, 60°, 45°
Ignition timing	MBT
Charge air pressure	Natural aspiration
Fuels	Gasoline

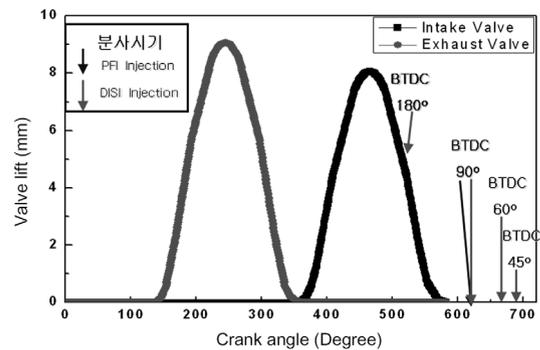


Fig. 2 Dual injection system according to the various injection timing

는 공기의 체적유량을 동일하게 유지하면서 연료량을 점차 줄여 희박 연소 특성을 파악하였고, 동시에 연소 안정 특성인 COV_{imep} 값을 측정하였다. 본 연구에서는 COV_{imep} 가 5% 미만인 경우를 연소 안정 영역으로 정의하였으며, 동시에 원인 분석을 위하여 동력계와 제어장치를 이용하여 토크와 출력 및 각종 엔진 부품의 온도를 측정하였다. 특히 연소실에 압력센서를 통해 측정한 실린더 압력을 통해서 IMEP(Indicated Mean Effective Pressure), ROHR(Rate of Heat Release) 그리고 Burning Rate를 계산하였고, 배기 분석계를 이용하여 공연비와 분사시기에 따른 배기 배출물을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 듀얼 분사 엔진의 분사시기에 따른 연소 특성

Fig. 3은 포트 분사식 가솔린엔진에서 분사시기에 따라 연료량을 고정하고 스로틀의 개도를 증가

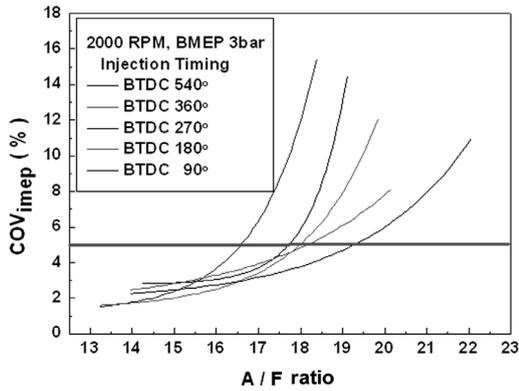


Fig. 3 The operating region of PFI combustion system

시켜 운전가능 영역($COV_{imep} < 5\%$)을 확인한 그래프이다. 분사시기가 BTDC 90°일 때, 즉 흡기밸브가 닫혔을 때 분사하는 것이 A/F가 19정도까지 운전영역이 확대됨을 알 수 있었다.

Fig. 4는 직접 분사식 가솔린 인젝터로 100% 분사하였을 경우에 분사시기에 따른 연소 변동률을 나타낸 그래프이다. 분사시기가 압축 시작인 BTDC 180°보다 압축말기로 갈수록 운전가능 공연비 영역이 확장되었다. 특히, 분사시기가 BTDC 45°의 경우에는 공연비(A/F)가 29까지 연소변동률이 5%이하로 안정되게 연소됨을 볼 수 있다.

본 실험에서는 포트에 분사되는 인젝터의 분사시기는 이전 연구에서 얻은 결과를 토대로 연소특성과 배기 배출물 특성이 가장 우수한 BTDC 90°로 고정하고, 성층혼합기를 형성하기 위하여 직접 분사 인젝터는 분사시기를 변경시키면서 실험하였다. 먼저 분사시기에 대한 영향을 분석하기 위하여 직접 분사와 포트 분사의 분사비율은 각각 50%인 조건에서 직접 분사시기를 변경하여 나타난 COV_{imep} 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 직접 분사의 분사시기가 TDC에 가까워짐에 따라 COV_{imep} 가 5%이하인 희박한계 운전영역이 최대 A/F=32까지 확대되는 것을 알 수 있었고, 직접 분사만의 경우보다 희박한계 공연비가 8~10정도 확장함을 알 수 있었다. 이와 같이 운전 한계영역이 확장되는 이유는 포트 분사식 가솔린 분사에 의하여 균일한 혼합기를 형성한 후, 직접 분사된 연료가 점화플러그 주변에 성층화 됨으로써 나타난 결과로 사료된다.

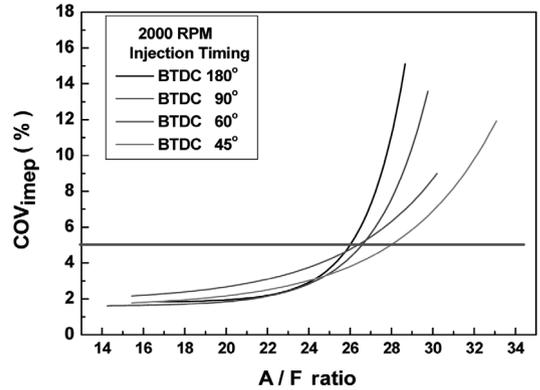


Fig. 4 Effects of injection timing on operation region using DISI injection system

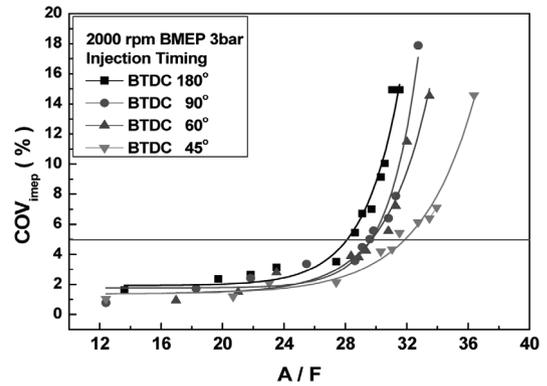


Fig. 5 Effects of injection timing on operation region

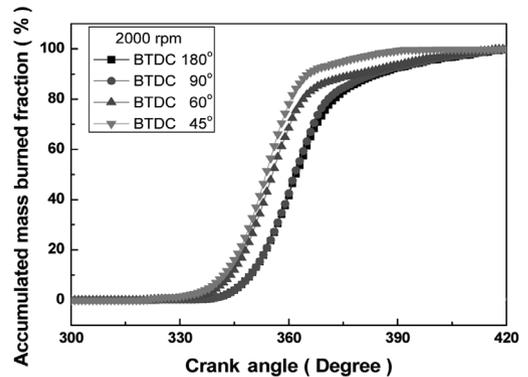


Fig. 6 Effects of injection timing on accumulated mass burned fraction

Fig. 6은 듀얼 분사를 적용한 엔진의 분사시기에 따른 누적질량 연소율을 나타낸 그래프이다. 이 그림은 포트 분사가 BTDC 90°로 고정된 상태에서 직

접 분사시기를 변화시키는 경우로서 분사시기가 TDC에 근접함에 따라 급격하게 연소율이 증가함을 보이고 있으며, 착화시기도 진각되는 특성을 보인다. 이는 분사시기가 TDC에 근접할수록 성층된 혼합기가 증가함에 따라 나타난 결과로 사료된다. 그러나 BTDC 45° 이상 근접할 경우에는 노킹이 발생하고, 불완전 연소 특성을 보여 더 이상 실험이 불가능하였다.⁵⁾

3.2 듀얼 분사 엔진의 분사비율에 따른 연소 특성

Fig. 7은 포트 분사와 직접 분사하는 연료의 분사 시기와 비율에 따른 희박한계($COV_{imep} < 5\%$) 영역을 직접 분사 비율이 10~90%까지의 결과를 나타낸 그래프이다. 직접 분사의 비율이 증가할수록 희박한계 운전영역이 확장되는 것을 알 수 있으며, 직접 분사 비율이 40%인 경우에는 거의 직접 분사 100%와 동일한 희박 운전영역까지 확대됨을 알 수 있다. 이는 직접 분사의 비율이 낮을수록 과도한 포트 분사의 비율로 인해서 성층화 효과보다 균일한 혼합기를 형성하게 되고, 직접 분사로 점화가 발생되므로

희박 운전 영역을 확대하는데 큰 영향을 미치고 있지는 못하는 것을 보여주고 있다. 직접 분사의 비율이 60% 이상에서는 100%인 경우와 비교하여 희박 운전영역이 확대되는 결과를 보이고 있다. 이는 직접 분사만으로 운전이 이뤄지는 경우보다 적은 양이지만 포트 분사로 연료가 분사되어 연소실에서 균일한 혼합기가 형성되고, 직접 분사의 비율이 높아질수록 점화플러그 주변에 연료가 분포되어 성층화 효과를 나타내게 되어 희박 운전 영역이 기존 직접 분사만 했을 경우보다 확장되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 직접 분사 시기와 분사 비율에 따른 듀얼 분사식 가솔린 엔진의 질량 연소율 특성이다. 질량 연소율은 분사비율보다는 분사시기에 따른 영향도가 크게 나타났다. 즉 앞 장에서 설명했다시피 분사시기가 TDC에 가까워질수록 성층화된 연료의 연소로 인하여 질량 연소율이 급격히 증가한다. 또한, 직접 분사 비율이 증가할수록 분사시기에 대한 영향도가 크다. 이는 직접 분사된 연료가 성층화에 미치는 영향이 크기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

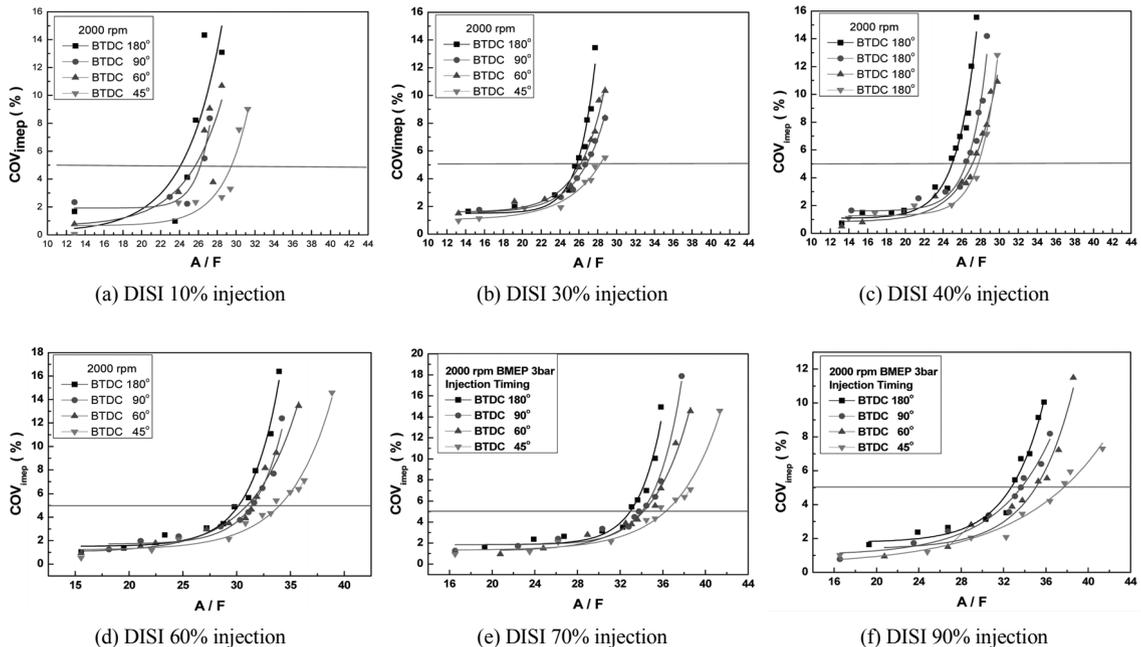


Fig. 7 Effects of injection timing and ratio on operation region

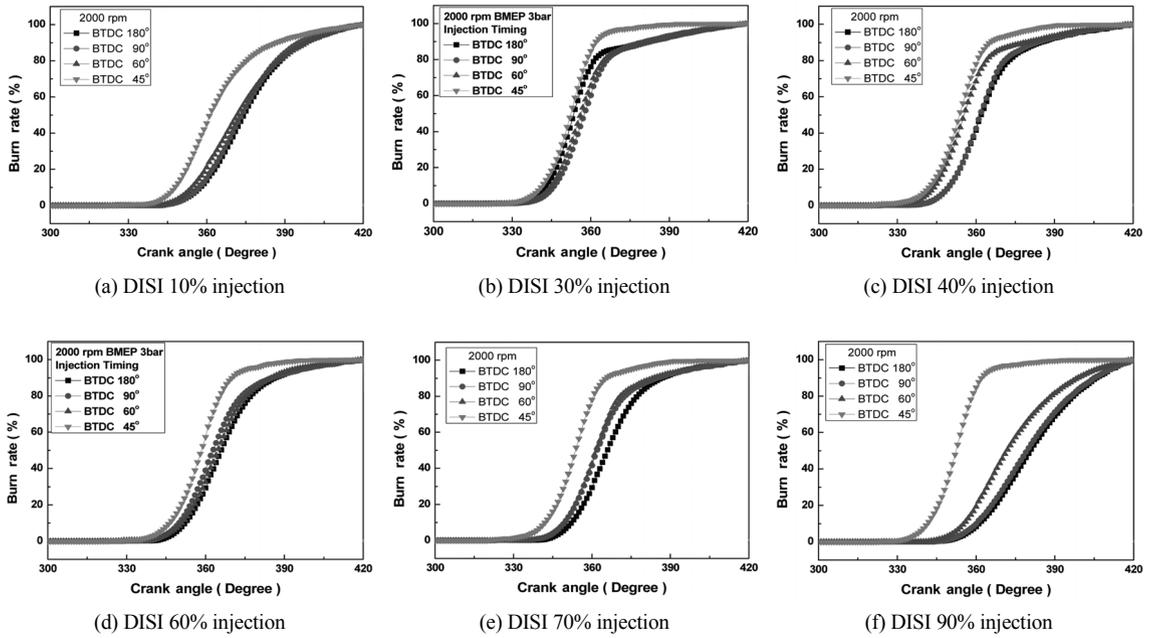


Fig. 8 Effects of injection timing and ratio on burn rate

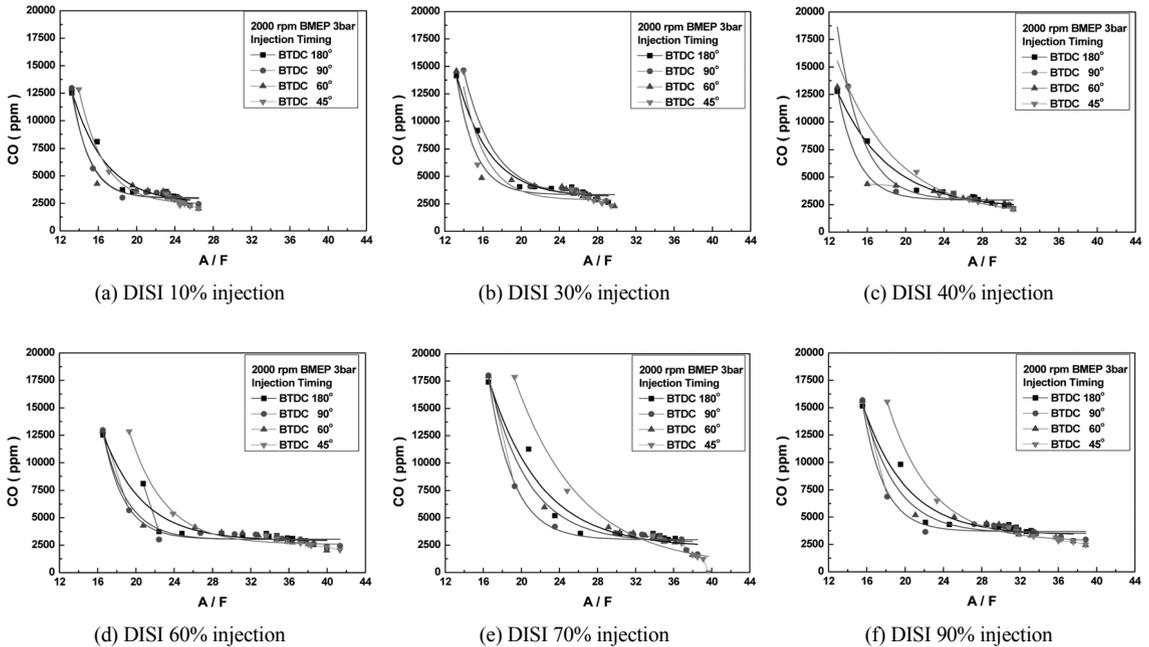


Fig. 9 Effects of injection timing and ratio on CO emission

3.3 듀얼 분사 엔진의 분사비율에 따른 배기 특성

Fig. 9는 공연비와 직접 분사 시기 및 비율에 따른

CO 배출물의 발생 특성을 나타낸 그래프이다. CO의 발생 특성은 분사 비율보다는 공연비에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한, 농후한 공연

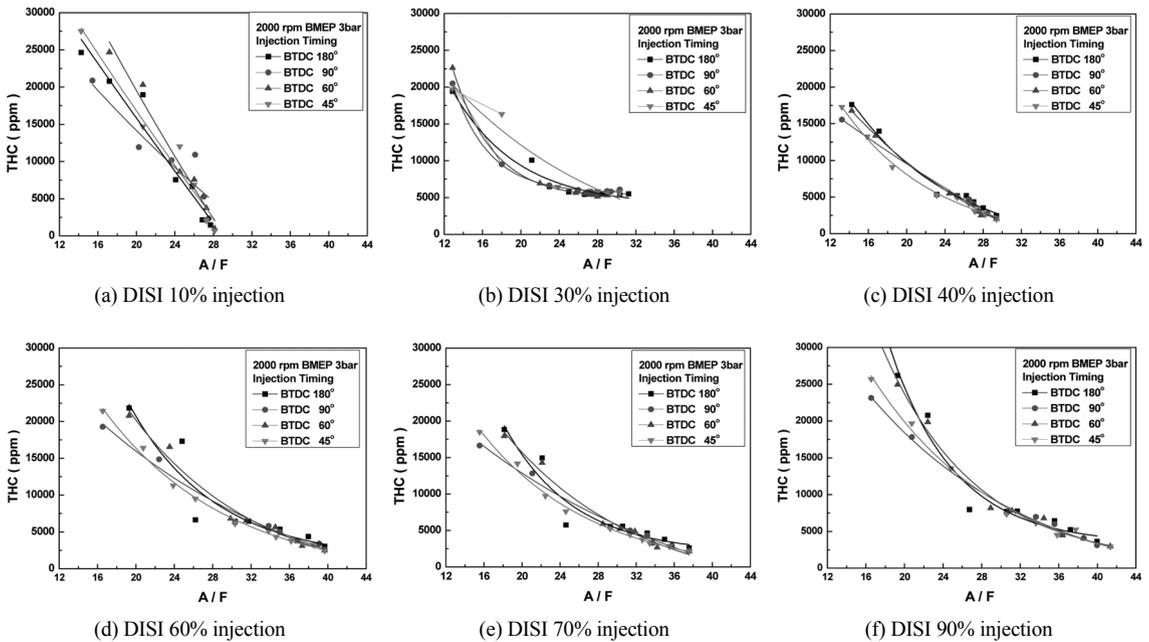


Fig. 10 Effects of injection timing and ratio on THC emission

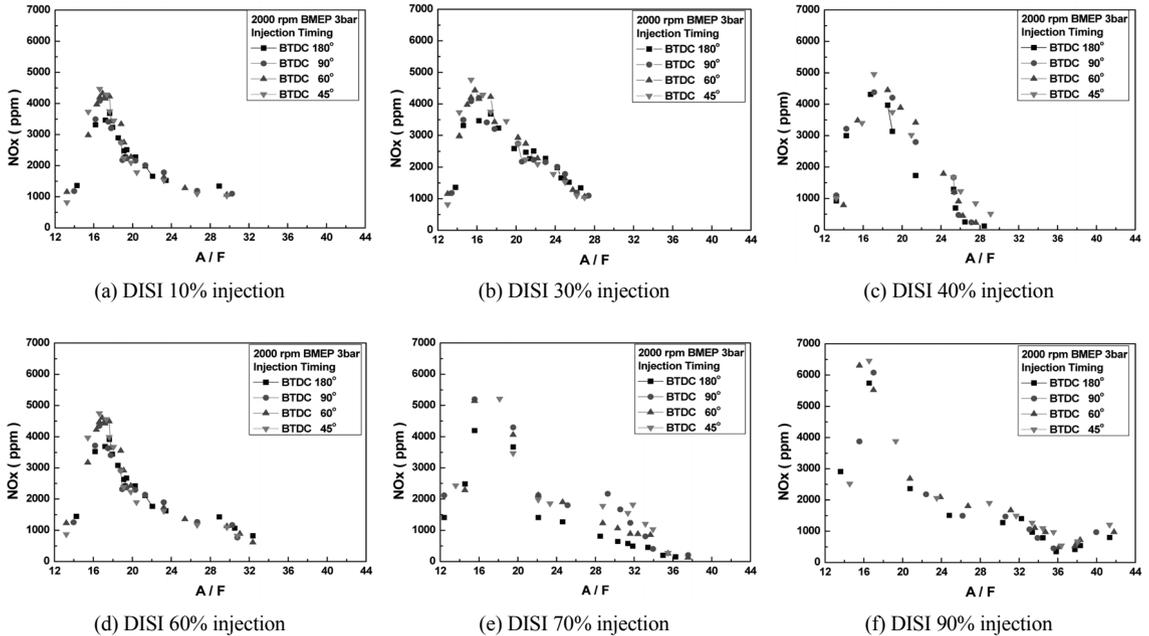


Fig. 11 Effects of injection timing and ratio on NOx emission

비에서는 분사시기가 BTDC 45°인 경우가 CO량이 증가하나 희박영역으로 갈수록 감소하게 된다. 이는 희박영역에서 분사시기 BTDC 45°가 성층화 특

성이 증가되었기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 분사 비율에 따른 CO 발생 특성은 거의 유사한 것으로 나타났다.⁵⁾

Fig. 10은 공연비 및 직접 분사의 비율과 시기에 따른 THC의 배출특성을 나타낸 그림이다. 공연비에 따른 특성은 전체적으로 CO 특성과 유사하게 희박영역으로 갈수록 감소됨을 보이고, 전체적으로 혼합기가 성층화가 됨에 따라, 즉 분사시기가 TDC에 접근함에 따라 THC가 감소하는 특성을 보이고 있다. 또한, 직접 분사 비율이 증가함에 따라 THC는 증가함을 보인다. 이는 직접 분사 시 연료의 벽면 충돌과 캐비티에 연료가 쌓이기 때문에 나타나는 결과로 사료된다.

Fig. 11은 배기 배출물 중 성층화 지표가 될 수 있는 NOx 배출 특성에 관한 그래프이다. 전체적으로 분사시기와 분사비율에 관계없이 이론 공연비 14.7보다 약간 희박한 부분에서 최고 배출량을 나타내고 있으나, 직접 분사시기가 압축말기인 BTDC 45°로 지각될수록 NOx의 배출량이 늘어나는 것을 알 수 있다. 이는 압축말기에 분사가 이뤄질수록 점화 플러그 주변에 농후한 성층 혼합기가 형성되고 이로 인하여 국부적인 온도 상승으로 NOx의 배출량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 조금씩 다른 경향을 나타내고 있지만 직접 분사의 비율이 증가할수록 NOx의 배출이 증가하는데 이는 성층 혼합기를 형성하는 양이 증가하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 직접 분사식 가솔린 엔진이 가지는 문제점을 해결하기 위하여 포트 분사식 가솔린 엔진의 분사방법을 적용하여, 듀얼 분사 방식 가솔린 엔진을 구현하였다. 기존 분사방식을 기초로 하여 두 가지 분사의 분사시기와 분사비율을 달리하여 구현된 엔진의 연소특성과 배기특성을 측정하였다.

1) 포트에 분사되는 인젝터의 분사시기는 이전 연구에서 얻은 결과를 토대로 연소특성과 배기 배출물 특성이 가장 우수한 BTDC 90°로 고정하고, 성층혼합기를 형성하기 위하여 직접 분사 인젝터는 분사시기를 변경시키면서 실험하였다. 직접 분사의 분사시기가 TDC에 가까워짐에 따라 COV_{imep} 가 5%이하인 희박한계 운전영역이 최대 A/F=32까지 확대되는 것을 알 수 있었고, 직접

분사만의 경우보다 희박한계 공연비가 8~10정도 확장함을 알 수 있었다. 듀얼 분사를 적용한 엔진의 분사시기에 따른 질량 연소율을 나타내었다. 포트 분사가 BTDC 90°로 고정된 상태에서 직접 분사시기를 변화시키는 경우 분사시기가 TDC에 근접함에 따라 급격하게 연소율이 증가함을 보이고 있으며, 착화시기도 진각되는 특성을 보인다.

- 2) 듀얼 분사 엔진에서 공연비 및 분사시기에 따른 배기 배출물 특성을 나타내었다. CO, THC의 경우 단일 분사보다 동일 공연비에서 감소하는 경향을 확인할 수 있었고, 같은 공연비에서 분사시기가 TDC에 가까워질수록 CO, THC는 감소하고 NOx는 증가하게 된다.
- 3) 포트 분사와 직접 분사하는 연료의 분사시기와 비율에 따른 희박한계 영역을 직접 분사 비율이 10~90%까지의 결과를 나타내었다. 직접 분사의 비율이 증가할수록 희박한계 운전영역이 확장되는 것을 알 수 있으며, 직접 분사 비율이 40%인 경우에는 거의 직접 분사 100%와 동일한 희박 운전영역까지 확대됨을 알 수 있다.
- 4) 공연비와 직접 분사 시기 및 비율에 따른 배기 배출물의 발생 특성을 나타내었다. CO의 발생 특성은 분사 비율보다는 공연비에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한, 농후한 공연비에서는 분사시기가 BTDC 45°인 경우가 CO량이 증가하나 희박영역으로 갈수록 감소하게 된다. THC의 공연비에 따른 특성은 희박영역으로 갈수록 감소됨을 보이고, 분사시기가 TDC에 접근함에 따라 THC가 감소하는 특성을 보이고 있다. NOx 배출 특성은 이론 공연비 14.7보다 약간 희박한 부분에서 최고 배출량을 나타내고 있으나, 직접 분사시기가 압축말기인 BTDC 45°로 지각될수록 NOx의 배출량이 늘어나는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) T. Ikoma, S. Abe, Y. Sonoda, H. Suzuki, Y. Suzuki and M. Basaki, "Development of V-6 3.5-liter Engine Adopting New Direct Injection System," SAE 2006-01-1259, 2006.
- 2) M. Koike, A. Saito, T. Tomoda and Y. Yamamoto, "Research and Development of a New Direct Injection Gasoline Engine," SAE 2000-01-0530, 2000.
- 3) M. Kanda, T. Baika, S. Kanto, M. Iwamuro, M. Koike and A. Saito, "Application of a New Combustion Concept to Direct Injection Gasoline Engine," SAE 2000-01-531, 2000.
- 4) A. Lettori, "The Potential of Next Generation Gasoline Direct Injection Technology," ATA, Vol.56, N.1/2 Gennail/Febbraio, 2003.
- 5) J.-O. Olsson, P. Tunestal and B. Johnsson, "Closed Loop Control of an HCCI Engine," SAE 2001-01-1031, 2001.
- 6) C. H. Lee and K. H. Lee, "A Study on the Fuel and Mixture Formation in the Early Injection Timing of GDI Injector," Transactions of KSME(B), Vol.26, No.8, pp.1138-1144, 2002.
- 7) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., USA, 1988.
- 8) M. F. J. Brunt, H. Rai and A. L. Emtage, "The Calculation of Heat Release Energy from Engine Cylinder Pressure Data," SAE 981052, 1998.
- 9) B. Leach, H. Zhao and Y. Li, "Control of Combustion through Injection Timing in a GDI Engine with an Air-assisted Injector," SAE 2005-01-0134, 2005.
- 10) C. S. Lee and W. S. Kim, Thermodynamics, Dong-myeong, Korea, pp.635-639, 2000.
- 11) K. M. Chun and K. W. Kim, "Methods of Knock Signal Analysis in a S. I. Engine," Transactions of KSAE, Vol.1, No.3, pp.12-21, 1993.