

## 연소제어인자의 변화에 따른 직접분사식 초희박 LPG엔진의 연소특성 연구

박윤서\* · 박철웅\*\* · 오승묵\* · 김태영\* · 최 영\* · 이용규\*

\* 한국기계연구원 그린동력연구실

### Study of Combustion Characteristics with Variations of Combustion Parameter in Ultra-Lean LPG Direct Injection Engine

Yun Seo Park\*, Cheol Woong Park\*\*†, Seung Mook Oh\*, Tae Young Kim\*, Young Choi\* and Yong Gyu Lee\*

\* Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials.

(Received December 27, 2012 ; Revised April 9, 2013 ; Accepted April 9, 2013)

**Key Words:** LPG Direct Injection(Lpg 직접분사), Ultra Lean Combustion(초희박연소), Spray-Guided Type Combustion System(분무유도방식 연소기구), Brake Specific Fuel Consumption(연료소비율), Combustion Stability(연소 안정성), Fuel Injection Timing(연료 분사 시기), Spark Timing(점화 시기)

**초록:** 오늘날 전 세계의 자동차 회사들은 연비를 향상시키고 배기가스를 저감시키기 위해 다양한 기술을 개발하고 있다. 그 중 직접분사식 초희박 연소기술은 연료제어의 정확도를 향상시켜 연소 효율을 극대화하고 초희박 연소를 통해 연비를 향상시킬 수 있는 차세대 기술로 평가받고 있다. 따라서 기존 가스엔진에 초희박 직접분사 기술을 적용한 초희박 LPG 직접분사 엔진을 개발하기 위해 2ℓ급 MPI 엔진을 베이스 엔진으로 실린더 헤드를 재설계하였다. 재설계된 헤드는 초희박 연소를 구현하기 위해 인젝터와 점화플러그가 헤드 중앙에 장착되는 분무유도방식 연소시스템을 적용하였다. 연료 분사 압력별 연료 분사 시기와 점화 시기의 변경을 통해 연료 소비율과 연소 안정성을 측정하였으며 이를 통해 최적 연료 분사시기와 점화시기를 선정하였다.

**Abstract:** Nowadays, automotive manufacturers have developed various technologies to improve fuel economy and reduce harmful emissions. The ultra-lean direct injection engine is a promising technology because it has the advantage of improving thermal efficiency through the deliberate control of fuel and ignition. This study aims to investigate the development of a spray-guided-type lean-burn LPG direct injection engine through the redesign of the combustion system. This engine uses a central-injection-type cylinder head in which the injector is installed adjacent to the spark plug. Fuel consumption and combustion stability were estimated depending on the ignition timing and injection timing at various air-fuel ratios. The optimal injection timing and ignition timing were based on the best fuel consumption and combustion stability.

### 1. 서론

전 세계 자동차 회사들은 날로 강화되는 배기가스 규제를 만족시키고 엔진 효율을 향상시키기 위해 다양한 신기술을 연구하고 있다.<sup>(1,2)</sup> 직접분사(direct injection) 기술, 다운사이징(downsizing) 및 대체 연료 개발 등 다양한 방면으로 연구가 진행되고 있으며 그 중 직접분사기술은 이미 가솔린 엔진에

적용되어 그 효과가 입증된 기술이다.<sup>(3)</sup> 직접분사 기술은 연료를 연소실 내로 직접 분사함으로써 연료제어의 정확도를 향상시켜 연소 효율을 극대화시킬 수 있는 기술이다.<sup>(4,5)</sup> 초희박 연소기술은 연비를 향상시킬 수 있는 차세대 기술로서 직접분사기술과 접목할 경우 기대할 만한 효과가 있는 것으로 평가받고 있다.<sup>(6)</sup>

하지만 이러한 신기술들은 가솔린이나 디젤 기관에 주로 적용되고 있으며, 국내 가스 엔진의 기술 개발 단계는 아직 포트분사(MPI; multi-point

† Corresponding Author, [cwpark@kimm.re.kr](mailto:cwpark@kimm.re.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

injection) 기술에 머물고 있다. 최근 에너지원의 다변화와 청정연료로서의 가스연료 엔진에 대한 관심이 높아지면서 저연비, 고효율 가스엔진과 같은 새로운 기술이 요구되고 있는 상황이다. 따라서 초회박 연소기술을 기존 가스 엔진에 적용함으로써 체적효율 증가, 펌핑 손실 저감 및 희박영역 확장 등 여러 이점을 통해 기존 가스 엔진의 연비와 출력을 향상시키고 배기가스 저감이 가능할 것으로 판단하였다.

초회박 연소기술을 기존 가스 엔진에 적용하기 위해 분무유도방식(spray-guided)의 연소시스템을 적용하고자 하였다. 직접분사 방식의 1세대로 볼 수 있는 벽면유도(wall-guided)방식이나 공기유도(air-guided)방식은 자연 급기 또는 과급 방식으로 작동되는 직접분사 엔진의 이론공연비 혼합기 형성에 용이하다. 그러나 혼합기의 형성이 실린더 내부 유동에 많은 영향을 받기 때문에 넓은 운전영역에서 안정적인 성층혼합기를 형성하기 어렵다. 또한 실린더 벽면에 부착된 연료가 미연탄화수소(THC; total hydrocarbon)를 증가시키는 원인으로 작용하기 때문에 초회박 연소기술에는 부적합하다. 이에 반해 분무유도방식은 실린더 중앙에 고압의 인젝터와 점화플러그가 인접하게 위치되어 보다 안정적이고 효율적인 성층 혼합기의 구현이 가능한 기술이다.<sup>(7,8)</sup> 따라서 본 연구에서는 분무유도방식을 적용하여 초회박 LPG 직접분사 엔진 개발을 목표로 연소제어인자의 변경을 통한 희박연소 조건에서의 성능 및 배출가스를 관찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 전체적인 구성을 나타낸 개략도이다. 본 연구에서는 승용차량용 2ℓ 급 포트분사방식 엔진을 기반으로 직접분사식 초회박 LPG 엔진의 시제품을 제작하여 실험을 수행하였으며 엔진의 제원을 Table 1

Table 1 Specifications of re-designed engine

Engine type	4-stroke, 4-cylinder
Bore	86
Stroke	86
Compression ratio	12.0
Combustion chamber	Pent roof
Intake valve timing	BTDC 7 CAD/ABDC 67 CAD
Exhaust valve timing	BTDC 48 CAD/ABDC 0 CAD

에 나타내었다. LPG 저장 탱크의 저압연료펌프에서 5 bar의 압력으로 LPG 연료를 고압연료펌프에 공급한다. 공급된 연료는 다시 고압연료펌프에서 가압되어 커먼레일(common rail)로 공급된다. LPG 연료의 온도가 상승되어 기화되면 커먼레일에 연료공급을 방해하여 압력 상승이 어렵기 때문에 재순환되는 연료라인에 열교환기를 장착하여 연료를 냉각시켰다. 고압연료펌프는 최대 200 bar까지 가압이 가능하며 장착된 연료분사기는 사이클 당 최대 4번의 연료 분사가 가능한 외부 개방형 노즐(outwardly opening nozzle)을 갖는 피에조 타입의 인젝터를 이용하였다. 이때 연료 분사압력은 PCV(pressure control valve)를 통해 일정한 압력으로 유지하였고 피에조 인젝터 드라이버와 범용 ECU(engine control unit)를 사용하여 연소실로 공급되는 연료 분사량, 연료 분사시기 및 점화시기를 제어하였다. 각각의 실린더 별 공기과잉률을 측정하기 위해 배기 매니폴드에 광역 산소센서(LSU 4.2 / LA4, ETAS Co.)를 설치하여 혼합기의 상태를 관찰하였다. 연소제어인자 변경에 따른 연소실내 연소특성을 파악하기 위해 실린더 내부에 압력센서를 장착하였다. 압력센서로부터 측정되는 신호를 연소해석기(Osiris, D2T Co.)로 받아들여 실시간으로 계산되는 도시평균 유효압력(indicated mean effective pressure; IMEP)과 변동계수(coefficient of variation; COV) 값을 관찰하고, 200 사이클에 해당하는 압력신호를 저장하여 계산에 이용하였다. COV<sub>IMEP</sub>는 200 사이클의 IMEP 값의 표준편차를 평균값으로 나누어 백분율로 표시한 것이다. 배기관에 가스 추출라인을 장착하여 배기가스 분석기(AMA i60, AVL Co.)를 통해 배기가스를 분석하였다.

### 2.2 실험 방법

본 연구에서는 승용차량에서 주로 사용되는 운전영역중 하나인 2,000 rpm, BMEP(brake mean effective pressure) 0.2 MPa의 운전조건에서 실험을 수행하였다. 연소제어인자로 연료 분사시기, 점화시기, 공기과잉률 및 연료 분사압력을 변경시키며 연소특성을 측정하였다. 이때 최적 연료 분사시기와 점화시기는 연료소비율이 가장 낮을 때로 정의하였다. 연료 분사시기는 BTDC(before top dead center) 330 CAD(crank angle degree)에서 BTDC 40 CAD까지 변경하였고, 점화시기는

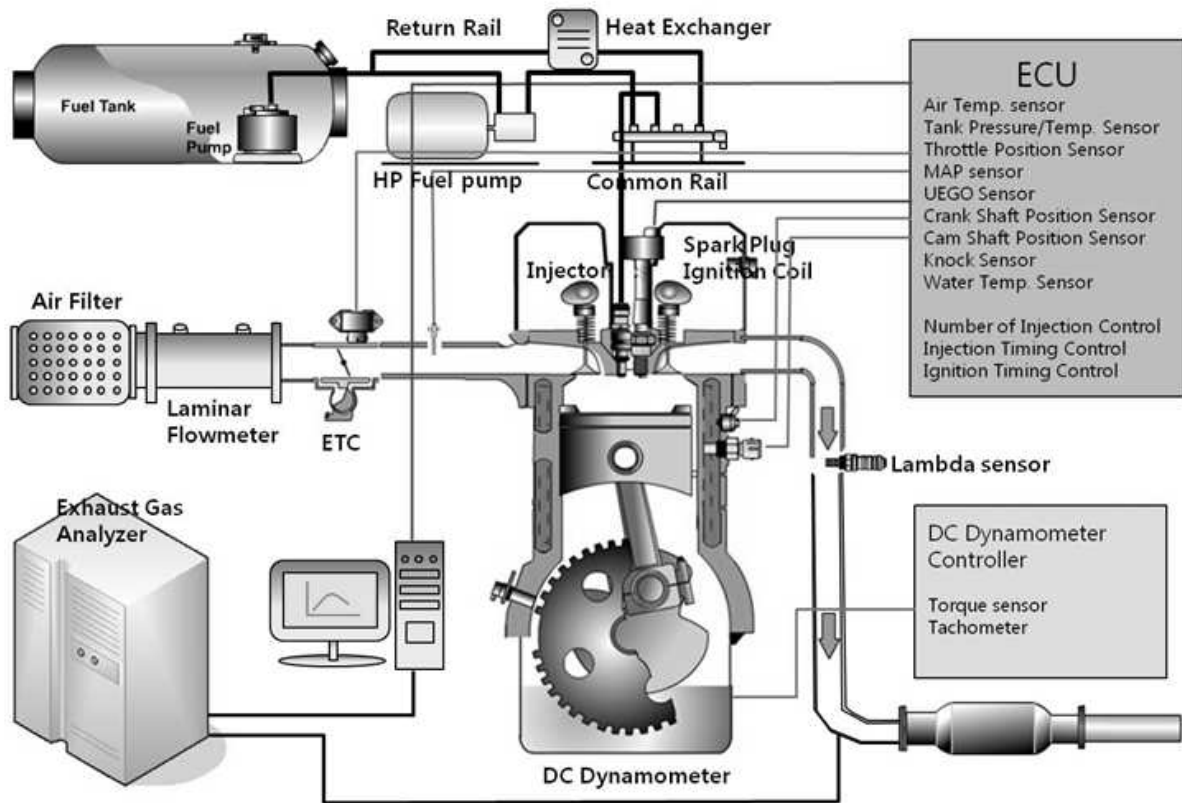


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

BTDC 60 CAD에서 BTDC 25 CAD까지 변경하였다. 공기과잉률은 이론공연비에서 희박연소한계 영역까지 0.5 단위로 증가시켰으며 연료 분사압력은 10 MPa, 15 MPa 및 20 MPa의 세 조건에서 실험을 수행하였다. 순환되는 냉각수의 온도는 엔진을 충분히 Warm-up 시킨 후  $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지 되도록 냉각수 온도 조절 시스템을 설정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 이론공연비 조건의 연소 특성

Fig. 2에 이론공연비 조건에서 연료분사 압력을 10 MPa로 고정하였을 때, 점화시기 변경에 따른 연료소비율(BSFC; brake specific fuel consumption)과  $\text{COV}_{\text{IMEP}}$ 의 변화를 나타내었다. 엔진의 연소안정성을 판정하는 기준은 여러 가지이지만, 본 연구에서는 그 중에서 가장 신뢰도가 높은 연소실 내부의 압력을 측정하여 계산되는  $\text{COV}_{\text{IMEP}}$ 를 기준으로 하였다.  $\text{COV}_{\text{IMEP}}$  값이 낮을 경우 각 IMEP 값의 변동이 적고, 연소가 안정적으로 이루어진 것으로 판단할 수 있다. 분사시기를 BTDC 330 CAD로 고정한 후 점화시기를 BTDC 30

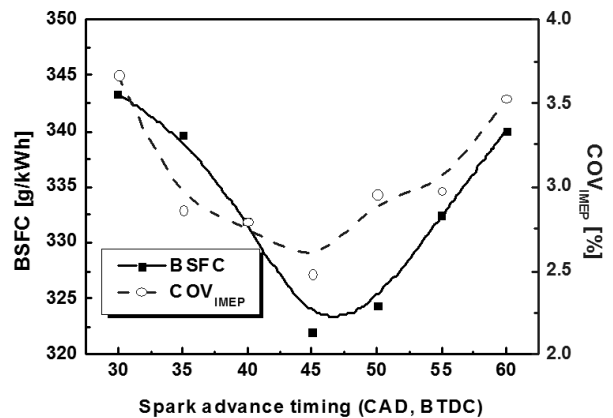


Fig. 2 Effect of spark advance timing on specific fuel consumption and COV (공기과잉률;  $\lambda = 1.0$ )

CAD에서 BTDC 60 CAD까지 5 CAD씩 진각시켰다. BTDC 45 CAD 조건에서 연소안정성이 가장 좋게 나타났으며 그 결과 최저 연료소비율을 확인하였다. 이론공연비 조건이기 때문에 최적점화시기 조건에서 벗어나더라도 연소안정성 및 연료소비율의 악화 정도는 크지 않았으며, 이와 같은 결과는 일반적인 포트분사방식의 연소조건과 크

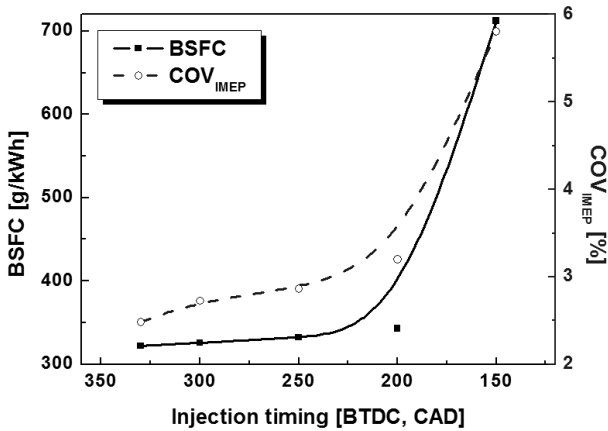


Fig. 3 Effect of Injection retard timing on specific fuel consumption and COV ( $\lambda=1.0$ )

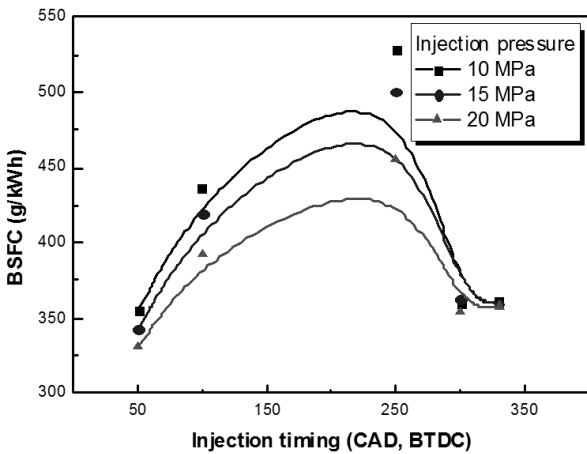


Fig. 4 Effect of Injection advance timing on specific fuel consumption( $\lambda=1.5$ )

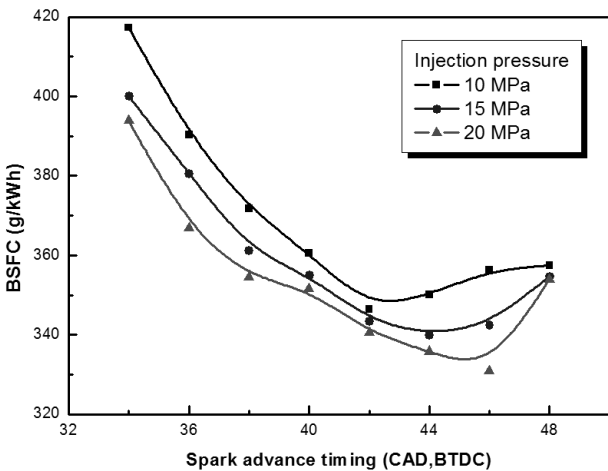


Fig. 5 Effect of Spark advance timing on specific fuel consumption( $\lambda=1.5$ )

게 다르지 않다.

일반적으로 이론공연비 연소는 포트분사된 연료

가 공기와 적절하게 혼합된 혼합기를 상사점 (TDC; top dead center) 인근에서 점화하여 연소를 일으키는 것으로서, 직접분사식 엔진에서 이론공연비 조건의 연소를 구현하기 위해서는 조기연료 분사를 통해 예혼합기의 형성시간을 확보해야 한다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 분사시기를 BTDC 330 CAD에서 50 CAD 간격으로 BTDC 150 CAD 까지 지각시키며 연료소비율과 연소안정성을 측정한 결과, 예상한 것과 같이 조기연료분사 조건인 BTDC 330 CAD에서 가장 좋은 연료소비율과 연소안정성을 나타내었다. 이에 반해, 연료분사시기를 지각시켜 TDC에 가깝게 분사할수록 연소실 내 균질한 예혼합기의 형성 시간이 감소하게 되어 국부적으로 농후한 영역이 형성되게 된다. 연소실 내 불균질한 예혼합기는 연소안정성의 악화를 야기하고 악화된 연소안정성으로 인해 연료소비율 또한 악화되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과를 통해 이론공연비 영역에서의 최적 연료 분사시기와 최적점화시기는 각각 BTDC 330 CAD와 BTDC 45 CAD로 나타났다.

### 3.2 희박연소 조건의 연소 특성

혼합기가 희박해질수록 연소온도 및 펌핑손실의 저감효과에 의해 연료소비율의 개선 효과를 얻을 수 있으나, 연소안정성의 악화가 동반되기 때문에 오히려 연소효율이 악화되거나 미연탄화수소가 증가되는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 효과적인 희박연소를 구현하기 위해서는 연소제어인자에 대한 최적화를 통해 연소안정성을 확보하는 것이 중요하다.

Fig. 4는 희박연소 조건인 공기과잉률 1.5 조건에서 연료분사시기를 BTDC 330 CAD에서 BTDC 50 CAD까지 점차 지각시키며 연료소비율의 변화를 측정한 그래프이다. 이때 연료분사압력의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 연료분사압력을 10 MPa, 15MPa, 20 MPa로 변화하였다. 점화시기는 이론공연비 조건에서 최적으로 판단된 BTDC 45 CAD로 고정하였다. 조기연료분사조건인 BTDC 330 CAD의 경우 이론공연비 조건에 비해 연소안정성이 악화되어 연료소비율이 증가하였다. 그러나 1.5의 공기과잉률이 LPG의 희박연소 한계조건에 가깝기 때문에 BTDC 250 CAD 조건에 비해 감소된 결과를 나타내었다. 반면에 연료 분사시기를 지각시킬수록 연료소비율이 다시 감

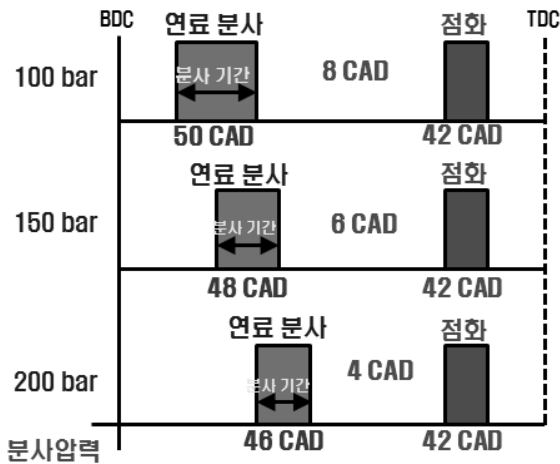


Fig. 6 Intervals between fuel injection timing and spark advance timing for each injection pressure

소되었으며, BTDC 50 CAD로 지연분사시켰을 경우 조기연료분사 조건에 비해 낮은 연료 소모율을 보였다. 이는 지연분사로 인해 점화가 일어날 때 플러그 주위에 적절한 성층 혼합기가 형성되어 연소안정성과 연료소비율이 개선되었기 때문으로 판단된다. 연료분사시기가 지각될수록 연료 소비율이 큰 폭으로 증가하였다가 다시 감소되는데, BTDC 100 - 250 CAD 조건의 경우 분사된 연료가 공기와 혼합되는 데 충분한 시간을 갖지 못하고 일부만이 예혼합기를 형성하기 때문에 실화가 발생하여 나타나는 현상으로 보인다. 그러나 연료분사시기가 지연될수록 점화가 일어날 때 플러그 주위에 형성되는 성층혼합기의 비율이 증가하여 연소안정성이 개선되는 것으로 예상된다. 결론적으로 회박연소조건에서는 연료의 조기분사보다는 지연분사를 적용하여 성층혼합기를 이용할 경우 연소안정성과 연료소비율의 개선에 더 효과적인 것으로 나타났다.

외부개방형 노즐의 경우 분사된 연료의 선단에서 재순환되는 영역이 발생하는데 이 영역이 점화가 일어나는 지점과 가깝고 혼합기가 이론공연비에 가까울수록 안정적이 성층연소가 일어나고 이때를 최적 성층혼합기 형성 조건으로 판단할 수 있다. 변경된 최적 연료 분사시기로 인해 최적 점화시기도 변경되었을 것으로 판단하여 연료 분사시기를 BTDC 50 CAD로 고정한 후 점화시기를 BTDC 48 CAD에서 BTDC 34 CAD까지 변화시키며 연료소비율을 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이론공연비 조건의 최적 점화시기인

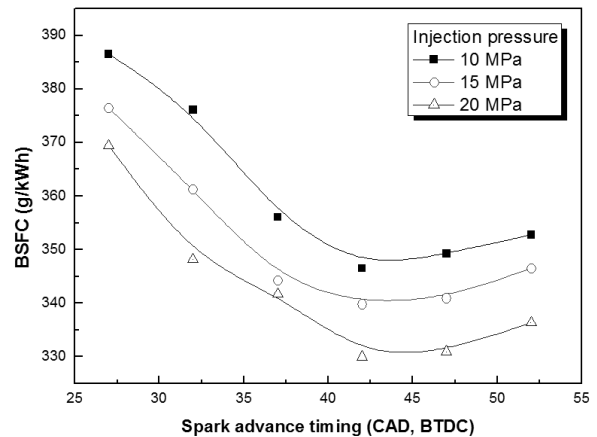


Fig. 7 Specific fuel consumption on spark advance timing( $\lambda=1.5$ )

BTDC 45 CAD 근처에서 최저 연료소비율을 나타내고 있으며, 연료분사압력별로 최저 연료소비율을 나타내는 점화시기가 다르게 나타났다. 이는 연료분사압력에 따라 성층혼합기를 형성하는데 걸리는 시간이 다를 수 있다는 결과이며, 연료분사기간 및 연료의 미립화 특성 등이 이에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 분무유도 방식의 연료공급시스템의 분무를 가시화한 이전의 연구결과와 일치하는 결과로 볼 수 있다.<sup>(9,10)</sup>

연료를 15 MPa의 압력으로 분사할 경우 최적 분사시기가 BTDC 44 CAD로서 10 MPa의 압력으로 연료를 분사할 경우와 비교하여 2 CAD 진각되었다. 연료 분사압력을 20 MPa로 증가시켜 분사하였을 경우에는 최적 분사시기가 BTDC 46 CAD로 진각되는 것을 확인하였다. 위와 같은 결과로부터 지연분사조건에서 최적의 성층혼합기를 형성하는데 필요한 분사시기와 점화시기간의 간격이 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa의 각각에 대해서 Fig. 6과 같이 8 CAD, 6 CAD, 4 CAD 임을 알 수 있었다.

Fig. 7은 각각의 연료분사압력 조건에 대해서 최적 연료분사시기 및 점화시기를 확인하기 위해, 연료분사시기와 점화시기의 간격을 최적 조건으로 고정하고 점화시기를 변경하였을 때 연료 소비율의 변화를 나타낸 것이다. 연료분사압력에 관계없이 BTDC 42 CAD 조건에서 최저 연료소비율을 나타내고 있으며, 이는 성층 회박연소시 연소속도가 연료분사압력에 크게 영향 받지 않음을 나타내는 결과로 볼 수 있다. 그러나 연료의

미립화 및 성층화 정도는 연소효율에 영향을 미치기 때문에 연료분사압력이 증가할수록 연료소비율이 점차 개선되었으며, 연료분사압력을 20 MPa로 했을 때 10 MPa 조건 대비 연료소비율이 약 14% 개선되는 결과를 보였다.

3.3 공기과잉률의 변화에 따른 연소 특성

공기과잉률 1.5 조건에서의 실험결과를 바탕으로 공기과잉률의 변화에 따른 연소 및 배출가스 특성을 관찰하였다. 앞선 실험과 마찬가지로 각각의 공기과잉률 조건에서 점화시기 및 연료분사

시기를 변화시키며 최저 연료소비율을 나타내는 조건을 찾고, Table 2에 최적 점화시기와 분사시기를 정리하여 나타내었다. 공기과잉률의 변화에 관계없이 희박연소조건에서의 최적 분사시기와 점화시기가 연료분사압력 조건에 대해서 점화시기와 연료분사시기 간의 간격을 적절하게 유지할 경우 모두 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 성층혼합기의 연소에서 나타나는 특징으로서, 혼합기의 성층화가 실린더 내부 유동에 거의 영향을 받지 않음을 보여주는 결과이다. 따라서 주어진 운전조건에 대해서 최적화된 연료 분사시기와 점화시기의 제어가 중요하며, 희박한 혼합기 조건에서 성층희박연소의 효과가 크게 나타날 것을 예상할 수 있다.

Fig. 8은 각 연료분사압력 조건에서 Table 2의 최적 연료 분사시기와 점화시기를 적용하였을 때 공기과잉률의 변화에 따른 연료소비율의 변화를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 공기과잉률이 증가할수록 희박연소 효과에 의해 연료소비율이 개선되었으며, 공기과잉률 1.5 조건의 결과를 제외하면 연료분사압력 변화가 연료소비율에 거의 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 이는 LPG 연료가 가지는 높은 기화특성에 인한 것으로 점

Table 2 Optimum spark and fuel injection timing on excess air ratio

Excess air ratio	Injection timing (BTDC)			Spark timing (BTDC)
	10 MPa	15 MPa	20 MPa	
1.0	330	330	330	45
1.5	50	48	46	42
2.0	50	48	46	42
2.5	50	48	46	42
3.0	50	48	46	42
3.5	50	48	46	42

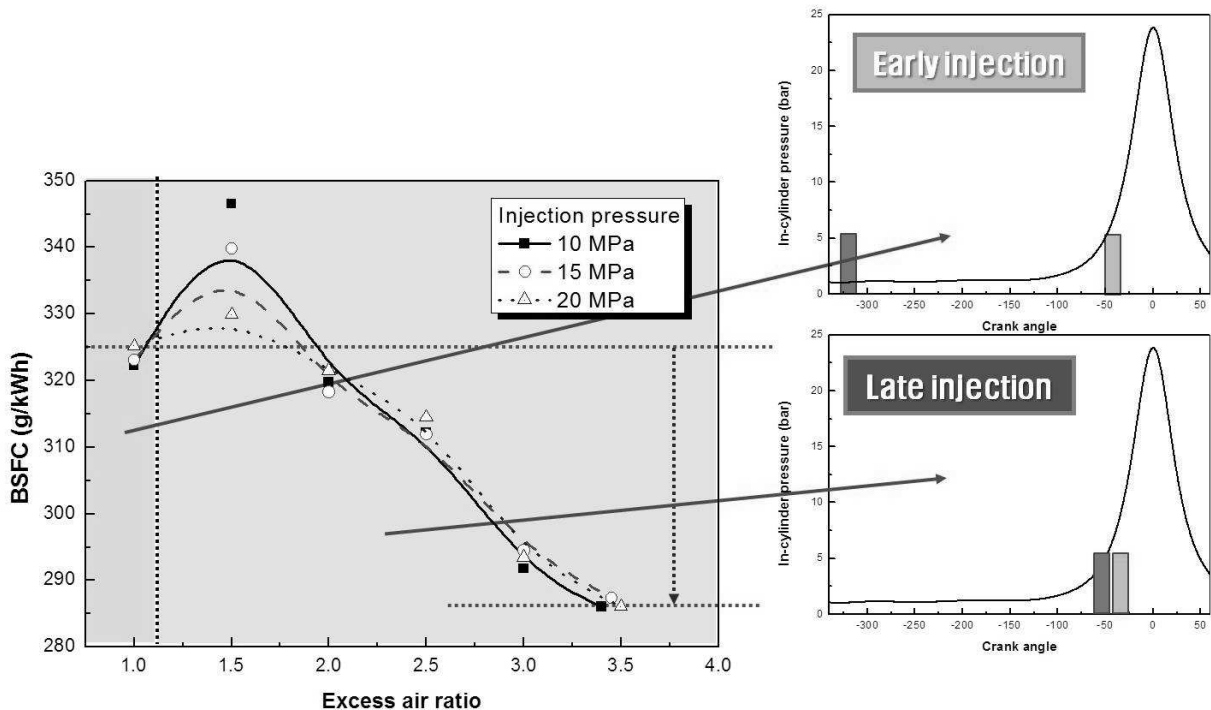


Fig. 8 Specific fuel consumption versus excess air ratio

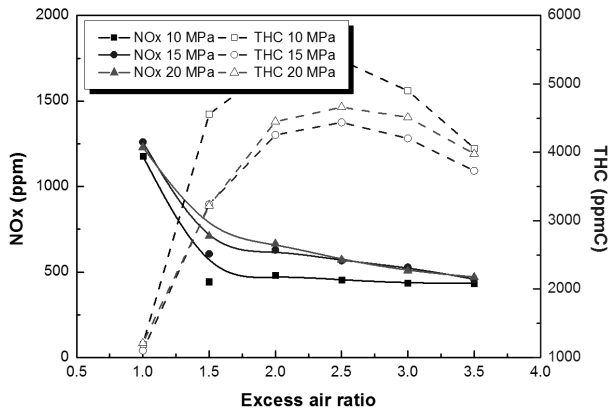


Fig. 9 NO<sub>x</sub> and THC emission versus excess air ratio

화시기와 연료분사시기를 최적화할 경우 연료의 미립화 특성이 연소에 영향을 미치지 않기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 이에 반해 공기과잉률 1.5 조건은 조기연료분사와 지연분사의 중간영역에 있는 조건으로서 희박연소 조건임에도 불구하고 다른 희박연소 조건에 비해 상대적으로 작은 공기 유량에 의해 공기이용률이 감소하여 연료소비율이 오히려 증가하였으며, 미립화 특성이 가장 좋은 높은 연료분사압력 조건에서 가장 좋은 결과를 보였다.

Fig. 9는 공기과잉률의 변화에 따른 질소산화물과 탄화수소의 배출을 나타낸 것이다. 공기과잉률의 증가에 따라 질소산화물의 배출이 선형적으로 감소하는 예혼합연소에서의 배출 특성과는 달리, 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하는 성층연소의 특징으로 인해 공기과잉률의 변화에 관계없이 국부적으로 온도가 높은 영역이 유지되기 때문에 질소산화물 발생이 크게 저감되지 않는 것을 볼 수 있다. 성층연소가 일어나더라도 LPG의 기화특성이 우수하기 때문에 일부 기화되어 과도하게 희박한 혼합기에 의한 탄화수소의 배출이 희박연소 조건에서 급격하게 증가하였다. 이러한 경향은 연료분사시간이 상대적으로 긴 연료분사압력 10 MPa 조건의 경우 탄화수소의 배출이 보다 높게 나타났다. 이러한 탄화수소의 배출은 공기과잉률 2.5에서 최대를 보이고 이보다 희박한 공기과잉률 조건에서 다시 감소되었다. 이는 공기과잉률이 증가할수록 흡입공기량이 증가하여 연소실내 공기의 밀도가 증가하고, 그 결과 연료의 분무도달거리 감소와 같은 연료의 모멘텀이 감소되어 나타나는 결과로 판단된다. 이와 같은 결과는 연료소비율과 연관된 경향을 보이는

예혼합 연소의 THC 배출과는 다른 경향으로서, 펌핑손실의 저감에 의한 연비개선과 THC의 배출 원인이 각각 다르기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

### 3. 결론

본 연구에서는 분무유도방식을 적용한 직접분사식 초회박 LPG 엔진 개발의 일환으로 설계변경을 통해 초도 제작된 초회박 LPG 엔진을 이용하여 연료 분사시기, 점화시기, 공기과잉률 및 연료 분사압력 등의 연소제어인자 변화에 따른 연소 특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이론공연비 연소에서 연료 분사시기는 조기연료분사가 효과적이며 최적 연료 분사시기는 BTDC 330 CAD, 점화시기는 BTDC 45 CAD로 나타났다.

(2) 희박영역 연소 시 조기연료분사보다 지연연료분사가 효과적이며 최적 점화시기는 BTDC 42 CAD, 최적 연료분사시기는 연료분사압력에 따라 다르게 나타났다.

(3) 공기과잉률 2.0 이상에서 연료분사압력의 변화는 연료소비율에 거의 영향을 미치지 않았으며, 지연연료분사를 적용한 공기과잉률 3.5에서 이론공연비 대비 연료소비율이 약 14% 개선되었다.

(4) 성층연소의 특징으로 인해 공기과잉률의 변화에 관계없이 국부적으로 온도가 높은 영역이 유지되어 질소산화물 발생이 크게 저감되지 않았으며, 탄화수소의 배출은 공기과잉률 2.5에서 최대를 보이고 이보다 희박한 공기과잉률 조건에서 다시 감소하였다.

### 참고문헌

- (1) Schunemann, S. E., Durst, B., Fischer J., and Witt, A., 2006, "Potentials of the Spray-guided BMW DI Combustion System," SAE 2006-01-1265.
- (2) Basshuysen, R. v., 2009, Gasoline Engine with Direct Injection: Processes, Systems, Development, Potential, Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- (3) Pauly, T., Franoschek, S., Hoyer, R. and Echhoff, S., 2010, "Cost and Fuel Economy Driven

- Aftertreatment Solution for Lean GDI," SAE 2010-01-0363.
- (4) Park, C. W., Oh, J. W. and Kim, H. S., 2012, "A Study on the Lean Combustion Characteristics with Variation of Combustion Parameter in a Gasoline Direct Injection Engine," *Trans. of KSAE*, Vol. 20, No. 4, pp. 39~45.
- (5) Kim, S. J., Kim, Y. N. and Lee, J. H., 2008, "Analysis of the In-Cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-Guided GDI Engine," SAE 2008-01-0142.
- (6) Ramesh, A., 2003, "An Experimental Study of Cyclic Variations in a Lean Burn Natural Gas Fuelled Spark Ignition Engine," ASME ICEF2003-772.
- (7) Oh, H., Lee, M., Park, J. and Bae, C., 2011, "Effect of Injection Pressure and Injection Timing on Combustion Characteristics of Spray-guided Direct-injection Spark-ignition Engine under Lean Stratified Combustion Operation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 10, pp. 981~987.
- (8) 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.
- (9) Oh, H., Jung, J. and Bae, C., 2012, "Study on Stratified Combustion Process and PM Emission Characteristic in a DISI Engine Using Natural Flame Luminosity Visualization," 2012 KSAE Annual conference, pp. 139~148.
- (10) Oh, H., Lee, M., Park, J. and Bae, C., 2013, "Effect of Injection Pressure and Injection Timing on Spray and Flame Characteristics of Spray-Guided Direct-Injection Spark-Ignition Engine Under Lean Stratified Combustion Operation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 3, pp. 221~228.