

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.10.837>

ISSN 1226-4881(Print)

2288-5324(Online)

## 압축비 변화에 따른 초희박 직접분사식 LPG엔진의 연소특성 연구

조시현\* · 윤준규\*† · 박철웅\*\* · 오승묵\*\*

\* 가천대학교 기계공학과, \*\* 한국기계연구원 그린동력연구실

### Study of Combustion Characteristics with Compression Ratio Change in Ultra-Lean LPG Direct Injection Engine

See Hyeon Cho\*, Jun Kyu Yoon\*†, Cheol Woong Park\*\* and Seung Mook Oh\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

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

(Received May 7, 2014 ; Revised July 25, 2014 ; Accepted July 29, 2014)

**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)

**초록:** 최근 자동차 제조사는 강화되는 배출가스 규제를 만족시키고 엔진 효율을 향상시키기 위해 다양한 기술을 연구하고 있다. 그 중 직접분사식 초희박 연소기술은 정밀한 연소제어를 통해 연소효율을 극대화 하고 연비를 향상시킬 수 있는 차세대 기술로 평가받고 있다. 기존 가스엔진에 초희박 직접분사 기술을 적용하기 위해 기존의 MPI 엔진의 헤드를 재설계하였다. 기존 압축비10:1에서 12:1로 증가시킴으로써 이에 따른 압력선도, 열방출률, 연료소비율 등의 연소특성과 배출가스특성을 파악하였다. 압축비를 증가시킴에 따라 불안정한 연소상태로 인하여 연료소비율의 개선이 어려웠으나 탄화수소(THC)와 질소산화물(NOx)의 배출은 감소되었다.

**Abstract:** Automotive manufacturers have recently developed various technologies for improving fuel economy and satisfying enhanced emission regulations. The ultra-lean direct injection engine is a promising technology because it has the advantage of improving thermal efficiency through the deliberate control of ignition. A conventional LPG engine has been redesigned to an ultra-lean-burn LPG direct injection engine in order to adopt combustion system of ultra-lean-burn . This study is aimed at investigating the effect of a change in the compression ratio on the performance and emission characteristics of a lean-burn LPG engine . The fuel consumption, heat release rate, combustion pressure, and emission characteristics are estimated depending on changing the effect of compression ratio . When the compression ratio is increased, it is difficult to improve the fuel consumption owing to an unstable combustion state, but the total hydrocarbon and nitrogen oxide emissions are reduced.

#### 1. 서 론

전 세계 자동차 회사들은 온실가스 배출을 저감시키고 연료소비율의 개선을 위해서 연료전지, 청정 디젤엔진, 직접분사기술 등 다양한 기술들을 연구하고 있다. 이중 직접분사식 기술은 실린더 내에

연료를 직접 분사시키는 방식으로 연료제어의 정확도가 개선될 뿐만 아니라 분사된 연료를 스파크 플러그 주변으로 성층화시켜 희박연소를 구현함으로써 펌핑손실과 열손실을 낮춤으로 높은 열효율이 가능하게 되면서 연료경제성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(1-4)</sup> 이러한 효과로 인한 배출가스 저감으로 CO<sub>2</sub> 배출의 관건이 되는 에너지 효율을 극대화할 수 있게 되었다. 대체연료로는 성분 중

† Corresponding Author, [jkyoon@gachon.ac.kr](mailto:jkyoon@gachon.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

탄소의 함량이 적거나 없는 LPG, CNG, 알코올, 수소, DME등이 있는데, 이중 LPG 연료는 기존 연료들에 비해 단위중량당 발열량이 높고 옥탄가가 높으며, 특히 유해 배기가스를 적게 배출하는 청정연료로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 이런 LPG연료를 직접분사기술과 접목시킨 LPG직접분사기술은 연소실내로 직접 분사함으로써 정밀한 연료제어가 가능해졌고 그 결과 출력 및 연비가 개선되면서 기존의 LPG엔진에 비해 연소효율의 극대화가 가능해졌다.

현재 양산되고 있는 LPG엔진에 직접분사기술과 초회박 연소기술을 적용하기 위해 분무유도방식(Spray-Guided)의 연소시스템을 적용하였다. 1세대인 벽면유도방식(Wall-Guided)과 공기유도방식(Air-Guided)방식은 엔진 운전조건에 따라 크게 변화하는 실린더 내부유동을 이용하여 혼합기를 형성하기 때문에 넓은 운전 영역에서 성층 혼합기형성의 어려움이 있고 실린더벽면에 부착된 연료가 미연탄화수소로 배출되는 문제점을 가지고 있다.<sup>(6)</sup> 이에 반해 2세대 분무유도방식은 고압연료분사가 실린더 중앙에 위치하고 점화플러그가 인접하도록 설계하여 분사되는 연료가 피스톤 벽면에 충돌하지 않으면서 안정적인 성층회박혼합기 형성이 가능하게 되어 보다 효율적인 성층화연소를 가능하도록 한 기술이다.<sup>(7,8)</sup> 분무유도방식을 적용한 LPG직접분사식 엔진은 10:1의 압축비로 선행연구를 통한 많은 연구 성과를 가져왔다. 엔진의 효율을 증가시키는 방법으로 여러 가지가 있는데, 이중 압축비증가의 경우 열효율 향상과 더불어 출력 및 연비향상을 기대할 수 있다. 그러나 연소압력이 높아지면서 노킹과 같은 이상연소가 발생할 수 있으므로 엔진의 특성에 맞는 최적의 압축비 선정하기 위해서는 최적점화시기와 분사시기의 변경을 통한 성층회박연소의 안정적인 연소안정성의 확보가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 분무유도방식을 적용한 LPG직접분사식 엔진에서 압축비 변경에 따른 연소 및 배출가스 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 현재 양산되고 있는 현대자동차(주) 가솔린 세타엔진에 직접분사식 초회박 연소기술과 LPG 연료 공급기술을 적용하기 위해 엔

**Table 1** Specification of base engine

Engine style	DOHC 4 valve
Displacement volume(CC)	1,996
Bore × Stroke(mm)	86 × 86
Compression ratio	10:1 → 12:1
Fuel injection pressure	20 MPa
A/F ratio	Up to 40
Cam adjustment	Intake & Exhaust

진 및 주변장치를 변경하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. MPI방식의 기존 승용차량용 2L급 가솔린엔진의 헤드를 재설계하여 분무유도방식을 적용하였다. 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다. LPG연료는 물분율로 프로판(C<sub>3</sub>) 5%와 부탄(C<sub>4</sub>) 95%의 조성을 가지는 여름용 연료를 실험에 적용하였다. LPG 저장탱크 내에 있는 저압연료펌프로 0.5 MPa의 압력으로 액상의 LPG 연료를 고압펌프에 공급한다. 저압펌프에서 보내진 연료는 고압펌프에서 다시 가압하여 커먼레일(Common Rail)로 공급하게 된다. 이때 온도변화에 따라 포화 수증기압의 변화가 크고 기화특성 때문에 커먼레일에 고압연료의 공급이 어려울 수 있다. 이에 재순환되는 연료라인에 열교환기를 설치하여 연료온도를 일정하게 유지시켰다. 고압연료펌프는 최대 25 MPa까지 가압이 가능하며 3개의 피스톤으로 구성되어 있는 플린저 타입의 펌프이다. 연료분사기는 외부개방형 노즐(Outwardly Opening Nozzle)을 갖는 피에조타입을 사용하였고 상기의 연료분사기를 이용할 경우 사이클당 최대 4회의 다단분사가 가능하다.

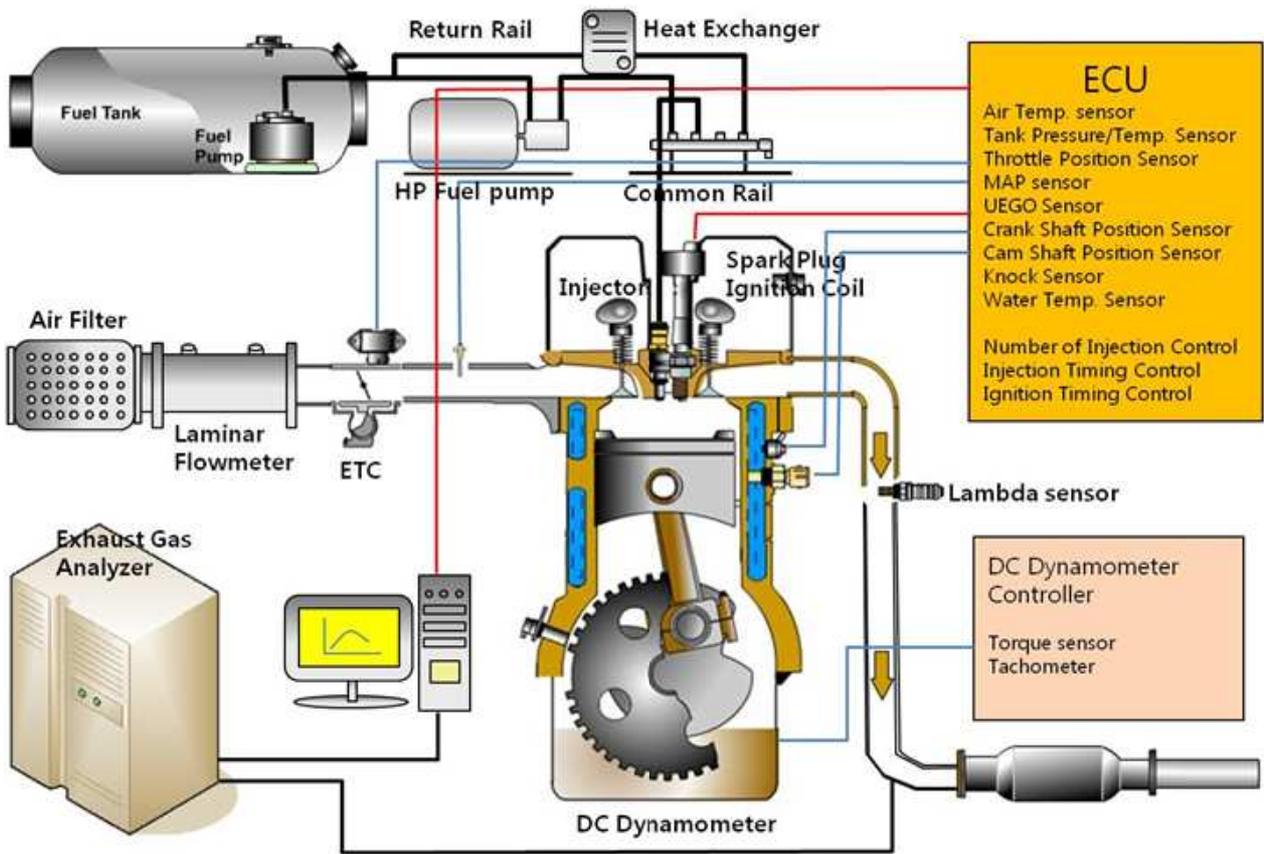
연료분사압력은 압력조절밸브(PCV; Pressure Control Valve)를 통해 20 MPa로 일정한 압력을 유지하였고 피에조 인젝터 드라이버와 범용 ECU(Engine Control Unit)를 사용하여 연소실에 공급되는 연료분사량, 연료분사시기 및 점화시기를 제어하였다. 공기과잉률을 측정하기 위해서 배기 매니폴드와 각각의 실린더 내에 광역산소센서(LSU 4.2 / LA4, ETAS Co.)를 설치하여 연소된 혼합기의 상태를 실시간으로 측정하였다. 연소실내의 연소특성을 파악하기 위해 실린더 내부에 압력센서를 장착하였다. 압력센서로 측정되는 신호를 연소해석기(Osiris, D2T Co.)를 통해서 실시간으로 계산되는 도시평균유효압력(IMEP; Indicated Mean

**Table 2** Optimum spark and fuel injection timing at compression ratio 10:1

Compression ratio	Injection strategy	$\lambda$	Injection timing		Spark Timing
			First injection	Second injection	
10:1	Single injection	1.0	330°CA	×	35°CA
		1.5 ~ Lean limit	46°CA	×	42°CA
	Multiple Injection (I.S.I)	1.5 ~ Lean limit	46°CA	38°CA	42°CA

**Table 3** Optimum spark and fuel injection timing at compression ratio 12:1

Compression ratio	Injection strategy	$\lambda$	Injection timing		Spark timing
			First injection	Second injection	
12:1	Single injection	1.0	330°CA	×	35°CA
		1.5 ~ Lean limit	37°CA	×	31°CA
	Multiple injection (I.S.I)	1.5 ~ Lean limit	35°CA	23°CA	29°CA



**Fig. 1** Schematic diagram of experimental apparatus

Effective Pressure)과 변동계수(COV; Coefficient of variation) 값을 확인하고, 변동계수를 나타내는 연소안정성인 COV값은 200 cycle에 해당하는 연소실의 압력을 측정하여 나타내었다. 배기관에 배출가스 측정라인을 설치하여 빠져나오는 배출가스를 포집하여 배출가스분석기(AMA i60, AVL Co.)를 통해 배출가스를 분석하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구의 실험조건은 승용차량에서 주로 평가되고 있는 회전수 2000 rpm 및 BMEP(Brake Mean Effective Pressure) 0.2 MPa의 실험조건에서 실험을 수행하였다. 최적의 분사시기와 점화시기는 연료소비율이 가장 낮을 때로 선정하였으며 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 공기과잉률은 이론공연비조건인 1.0

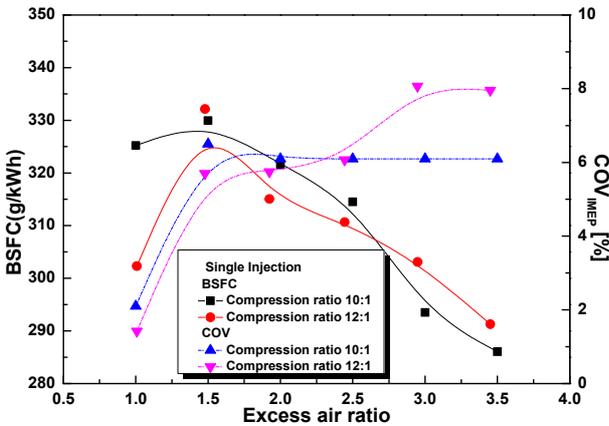


Fig. 2 Effect of single injection on specific fuel consumption and COV versus excess air ratio with each compression ratio

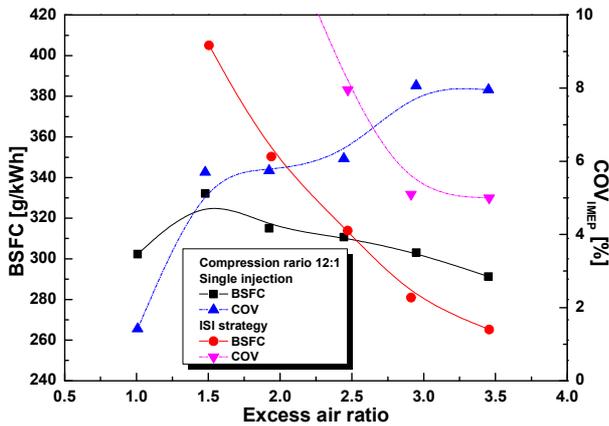


Fig. 3 Effect of single injection and multiple injection (I.S.I) on specific fuel consumption and COV versus excess air ratio with compression ratio 12:1

부터 희박한계까지 0.5간격으로 측정하였다. 이때, 이론공연비조건( $\lambda=1.0$ )은 연료분사시기가 BTDC 330°CA에 해당하는 조기연료분사를 적용한 예혼합연소조건이고, 나머지 구간( $\lambda=1.5$ ~Lean limit)은 지각연료분사를 적용한 성층희박연소조건이다. 기존의 압축비에서 Piston bowl의 체적변경을 통해 압축비를 12:1로 변경후 각각 압축비에 대해서 단분사 및 다단분사 시스템을 적용하여 실험을 수행하였다. 순환되는 냉각수온도는 엔진을 Warm-up시킨 후 80±2°C로 유지되도록 냉각수 온도조절장치를 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 단분사 적용시 압축비 변화에 따른 연소특성 비교

Fig. 2는 단분사 적용시 각각의 압축비에 대하

여 공기과잉률 변화에 따른 연료소비율 및 연소안정성(COV)의 특성을 나타내었다. COV값이 낮은 경우 IMEP값의 변동률이 적고 안정적인 연소가 이루어진 것이고, COV 5%를 안정적인 연소 한계 값으로 판단하였다. 이론공연비조건( $\lambda=1.0$ )에서는 성층연소(Late injection)를 하는 희박조건과는 다르게 예혼합연소(Early injection)를 한다. 이론공연비조건에서 Late injection의 적용은 예혼합기 형성시간이 부족하여 불안정한 연소가 일어나기 때문에 적절하지 않다. 연소안정성은 압축비 10:1의 경우 이론공연비조건에서 공기과잉률 1.5까지 급격하게 악화되었고, 이후부터 희박한계영역까지 일정하게 유지되는 경향을 보이고, 압축비 12:1 또한  $\lambda=1.5$  까지 급격히 증가한 후  $\lambda=2.5$ 까지 일정하게 유지되다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 공기과잉률 1.5영역은 조기연료분사조건과 지각연료분사조건의 중간영역인 천이영역에 해당하는 운전조건으로서 적절한 성층혼합기가 형성되더라도 상대적으로 낮은 공기과잉률로 인해 공기이용률이 감소하기 때문에 불안정한 연소를 보이며, 이로 인해 COV값이 가장 높게 나타났고 연료소비율 또한 가장 큰 값을 보인다. 압축비 12:1에서  $\lambda=2.5$ 부터 희박한계영역으로 갈수록 연소안정성이 더욱 악화되는 경향을 보인다. 압축비가 증가하면서 높아진 분위기압력에서 연소가 진행됨으로 인해 균질한 성층혼합기 형성의 어려움이 있고 이에 따른 간헐적인 실화가 발생하면서 연소안정성이 더욱 악화된 것으로 판단된다. 연료소비율의 경우 두 압축비 모두 천이영역에서 가장 높은 값을 보이다가 희박한계영역으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 공기과잉률이 증가함에 따라 흡입공기량이 증가하면서 이로 인한 펌핑손실 및 열손실이 감소하면서 연료소비율이 개선되는 것으로 판단된다. 압축비 12:1의 경우 공기과잉률 2.5까지는 압축비 10:1에 비해 낮은 연료소비율을 보였고 이후부터 희박한계영역에 가면서 압축비 10:1보다 높은 경향을 보인다. 앞서 확인한 바와 같이 희박한계영역으로 갈수록 높아진 분위기 압력에 따른 균질한 성층혼합기 형성의 어려움과 실화발생으로 인해서 압축비가 증가함에도 불구하고 연소안정성의 악화로 연료소비율이 증가한 것으로 판단된다. 압축비가 증가로 인한 열효율 및 연비 개선효과를 기대하였으나 희박한계영역에서 연소안정성이 악화되면서

연료소비율은 오히려 증가하였고, 두 압축비 모두 희박한계 영역에서 연소안정성의 경우 안정적인 연소한계인 5%를 상회하고 있기 때문에 단분사 적용시 두 압축비 모두 불안정한 연소상태인 것으로 판단된다.

### 3.2 압축비 12:1에서 단분사와 다단분사 전략에 따른 연소특성 비교

압축비를 증가시키더라도 단분사만으로는 연비 개선과 연소안정성 확보의 어려움이 있기 때문에 다단분사 전략을 적용하였다. Fig. 3은 압축비 12:1에서 단분사 및 다단분사 시스템을 적용했을 때 공기과잉률 변화에 따른 연료소비율 및 연소안정성의 특성을 나타내었다. 이론공연비조건은 조기연료분사를 적용한 예혼합연소조건인 결과이다. 다단분사는 일반적으로 2회의 연료분사 후에 점화를 일으키는 일반적인 다단분사 전략이 아닌 I.S.I(Inter Injection Spark Ignition)분사방식을 적용하였다. 최초 연료분사 이후에 점화를 일으키고 다시 연료를 분사하는 전략으로써 선행연구를 통해 일반적인 다단분사에 비해 I.S.I전략을 적용했을 때 열효율 증가와 안정적인 연소안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.<sup>(9)</sup> 따라서 본 연구에서도 I.S.I전략을 적용하여 LPG의 연소특성을 파악할 수 있었다.

압축비 12:1에서 I.S.I전략을 적용한 다단분사조건인 경우 압축비 10:1과 유사하게 천이영역에서 급격한 연료소비율의 증가를 보이고, 연소안정성을 나타내는 COV값이 단분사조건과는 반대로 공기과잉률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 성층희박연소시 희박한계영역에서 COV가 5%인 안정적인 연소상태를 보였으나 이론공연비조건에 비해서 상대적으로 좋지 않은 결과를 보인다. 단분사의 경우 희박연소시 COV값이 6~8%의 불안정한 연소상태를 보였으나 다단분사의 경우 희박한계 조건에서 5%로 안정적인 연소기준을 만족하였다. 단분사의 경우 분사된 연료가 실린더 안에서 흩어지면서 연소에 제대로 참여하지 못하고 이는 연료분사후 즉시 LPG의 기화가 발생했기 때문으로 판단된다. 이에 반해 다단분사 I.S.I전략은 분사된 연료가 퍼지기 전에 점화가 이루어지게 되고 연료의 대부분이 연소에 기여하게 된다. 이로 인해 연소안정성이 5%이하의 값을 확보하게 된다. 연료소비율의 경우 천이영역 이

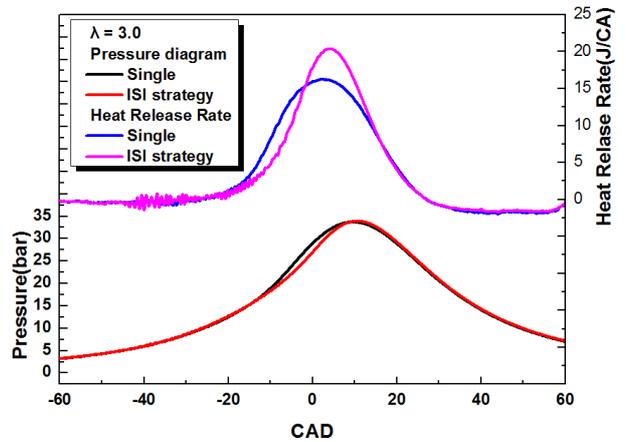


Fig. 4 Pressure diagram and heat release rate for each single injection and ISI strategy (air ratio;  $\lambda = 3.0$ )

후부터 희박한계영역까지 감소하는 경향을 보이는데 이는 앞서 확인한 바와 같이 흡입공기량 증가에 따른 펌핑손실 감소의 결과로 보인다. 이론공연비 조건에서 공기과잉률 2.5까지는 단분사의 연소안정성이 확보되면서 연료소비율이 다단분사 I.S.I전략에 비해 낮은 값을 보이다가  $\lambda=2.5$ 부터 희박한계영역으로 갈수록 높은 분위기압력으로 인한 실화로 연소안정성이 악화되면서 연료소비율의 개선정도가 크지 않다. 반면 다단분사 I.S.I 전략의 경우  $\lambda=2.5$ 이후부터 연소안정성이 5% 수준으로 낮아지면서 연료소비율 또한 감소하는 경향을 보였다. 다단분사의 경우 공기과잉률에 대한 영향이 크기 때문에 상대적으로 흡입공기량 변화와 같은 외부요인에 의한 민감도가 큰 결과를 나타내었다. 이에 대한 원인은 연소압력선도와 열방출률의 특성을 통해 확인할 수 있다.

Fig 4는 단분사와 다단분사의 연소안정성이 극명하게 차이가 나는 공기과잉률 3.0 조건에서의 압력선도와 열방출률을 비교한 것이다. 다단분사의 경우 단분사에 비해 최적의 점화시기가 지각되어 공기과잉률의 변화에 관계없이 최초 열방출이 일어나는 시기가 늦지만 연소속도가 빠르기 때문에 최대 연소압력이 비슷한 시기에 나타나고 열방출기간이 짧은 경향을 보였다. 단분사에 비해 최대 열방출률이 증가한 것으로 보아 다단분사 I.S.I전략이 성층혼합기형성에 더욱 효과적인 분사전략이고, 이로 인해 열효율이 증가하면서 연비가 개선된 것으로 판단된다. 단분사와 다단분사 I.S.I전략 모두 최대열방출률 이후 열손실에 의한 음의 열방출률 폭은 비슷한 경향을 보이는

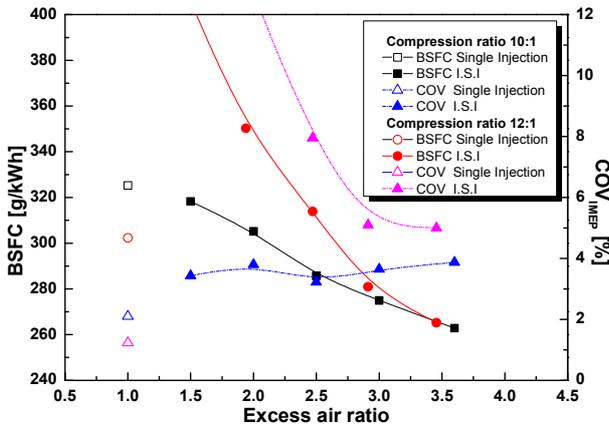


Fig. 5 Effect of multiple injection(I.S.I) on specific fuel consumption and COV versus excess air ratio with each compression ratio

것을 확인하였다.

### 3.3 I.S.I 전략적용시 압축비 변화에 따른 연소 특성 비교

단분사에 비해 다단분사 I.S.I전략을 적용했을 때 희박한계영역에서 연소안정성이 확보되고 연료소비율이 개선됨을 확인하였다. 이 결과를 토대로 최종적으로 다단분사 I.S.I전략을 적용했을 때 압축비증가에 따른 연소특성을 확인하고자 하였다. Fig. 5은 다단분사 I.S.I전략을 적용하였을 때 각 압축비에 대한 공기과잉률 변화에 따른 연료소비율 및 연소안정성의 특성을 나타내었다. 두 압축비 모두 천이영역인 공기과잉률 1.5에서 불안정한 연소로 인해 가장 높은 연료소비율을 보이고 희박해 질수록 연비가 개선되는 경향을 보인다. 앞서 언급했던바와 같이 선행연구에서 단분사 대신에 다단분사 I.S.I전략을 적용했을 때 안정적인 성층혼합기의 형성으로 인하여 안정적인 연소안정성을 확보할 수 있었음을 확인하였다.<sup>(8)</sup> 압축비 12:1의 경우 단분사 대신에 다단분사 I.S.I전략을 적용하였을 때 연소안정성이 확보되면서 연료소비율의 저감효과가 있었으나 압축비 10:1과 비교했을 때 오히려 높은 연료소비율을 보였다. 압축비 증가를 통해 열효율을 향상시킴으로서 출력 및 연비개선을 기대하였지만 높은 분위기의 온도 및 압력에 의한 노킹 및 실화 발생으로 연소가 불안정해지면서 연비절감의 효과가 크지 않았고 안정적인 연소안정성을 확보하기 어려웠다. 압축비 10:1의 조건이 12:1에 비해 더 낮은 연료소비율을 나타내었고, 희박한계영역이

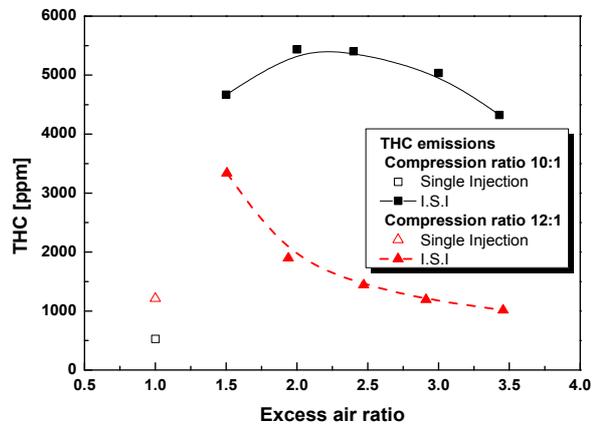


Fig. 6 THC emission versus excess air ratio with each compression ratio

더 늘어난 것을 확인할 수 있었다.

### 3.4 I.S.I 전략적용시 압축비 변화에 따른 배출 특성 비교

Fig. 6은 각 압축비에 따라 공기과잉률 변화에 따른 THC의 배출특성을 나타내었다. 압축비 10:1의 경우 이론공연비조건에서 가장 낮은 배출량을 보이고 희박연소시 증가하여 공기과잉률 2.5에서 최대를 보이고 다시 감소하는 경향을 보인다. LPG연료의 기화특성으로 인해 일부 연료가 기화되면서 과도하게 희박한 혼합기에 의한 THC의 배출로 인해 급격하게 증가하였고 더욱 희박해질수록 흡입공기량이 증가하면서 연소실내 공기의 밀도가 증가하고 이로 인해 연료의 분무도달거리 감소되어 나타나는 결과로 선행연구를 통해 확인한바 있다.<sup>(9)</sup> 이에 반해 압축비 12:1의 경우 높은 압축비로 인한 노킹 및 실화가 발생하면서 불안정한 연소로 인한 높은 연료소비율로 인해 크게 증가하였다가 공기과잉률이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 압축비 10:1에 비해 최적의 점화시기와 연료분사시기가 많이 지각되어 있고 연료분사시기와 점화시기와의 간격이 좁기 때문에 연소실 내로 연료가 퍼지는 시간이 상대적으로 부족하기 때문에 희박한 성층혼합기의 형성에 어려움이 있었고, 압축비가 증가함에 따라 높은 분위기압력에 의해 연료의 운동량이 감소하게 되면서 THC의 배출이 줄어든 것으로 판단된다. 이론공연비조건의 배출량과 비교하였을 때 희박한계조건의 배출수준이 더 낮은 배출량을 보인다. 압축비를 증가시켰을 경우 안정적인 연소가 확보된다면 희박연소조건에서도 THC의 배출을 저감

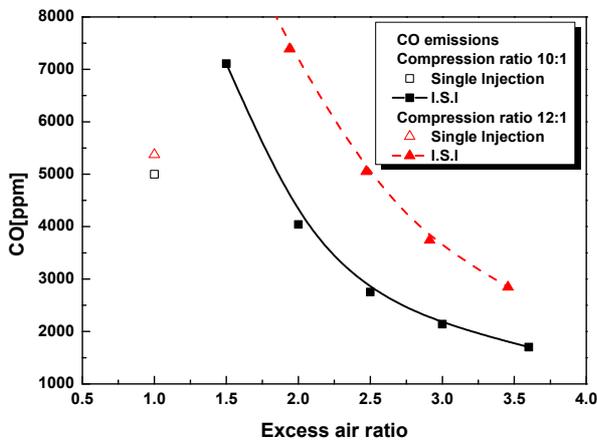


Fig. 7 CO emission versus excess air ratio with each compression ratio

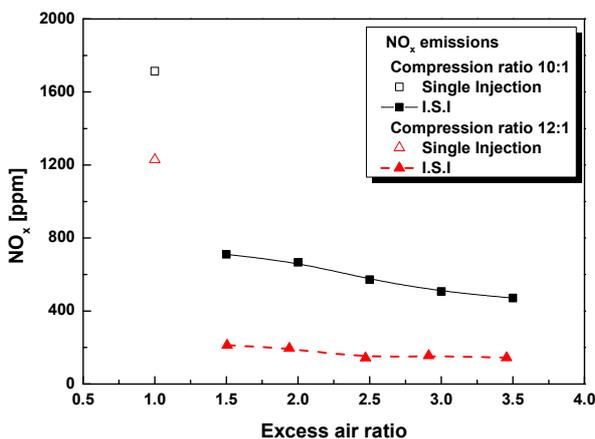


Fig. 8 NOx emission versus excess air ratio with each compression ratio

시킬 수 있는 결과라고 판단된다. Fig. 7은 공기과잉률 변화에 따른 일산화탄소의 배출특성을 나타내었다. CO의 배출량은 공기과잉률에 대한 민감도가 큰 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 연료가 농후할 경우 CO의 배출량이 증가하지만 공기과잉률 1.5 조건의 경우 매우 불안정한 연소로 인해 이론공연비조건에 비해 상대적으로 희박한 조건임에도 불구하고 가장 많은 배출량을 보인다. 더욱 희박해질수록 안정적인 연소가 일어나게 되고 불완전연소가 감소하게 되면서 배출량이 줄어드는 경향을 보였다. 압축비의 증가로 연소효율이 증가하였음에도 불구하고 압축비 12:1이 10:1에 비해서 전체적으로 더 많은 배출량을 보인다. 이는 압축비증가로 인해 간헐적으로 실화가 발생하면서 연소의 불안정성이 커지게 되었고 이로 인한 불완전연소량의 증가가 가장 큰 원인

인 것으로 판단된다. Fig. 8은 공기과잉률 변화에 따른 NOx의 배출특성을 나타내었다. 이론공연비 조건에 비해 희박연소시 배출량이 크게 감소하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하는 성층연소의 특징으로 인해 공기과잉률의 변화와 관계없이 국부적으로 온도가 높은 영역이 유지되기 때문에 희박연소조건에서는 NOx의 배출이 크게 저감되지 않는 것을 과거의 연구를 통해 확인한바 있다.<sup>(10)</sup> 압축비 12:1 적용시 더 큰 배출가스의 감소효과를 가져왔다. 압축비가 증가하면서 최적의 점화시기가 지각되었고 이에 따라 열방출률 또한 지각되면서 TDC이후에 열방출이 일어나면서 최대의 연소실압력이 감소하였고, 연소실의 온도상승에 큰 영향을 주지 못하여 최대의 연소실온도가 감소하였기 때문에 판단된다. 이로 인해 압축비를 증가하였음에도 불구하고 NOx가 현저하게 낮게 배출되는 특성을 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 기존 LPG엔진의 실린더헤드를 재설계하여 분무유도방식을 적용한 초희박연소를 구현하였고, 직접분사식 초희박 LPG엔진을 통해서 압축비 변화에 따른 연소특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) 성층희박연소조건에서 단분사 적용시 압축비 12:1의 경우 희박한계영역에서 실화로 인한 연소안정성의 악화로 연료소비율이 압축비 10:1보다 높은 경향을 보였다.
- (2) 압축비 12:1에서 I.S.I전략을 이용한 다단분사 조건의 경우 단분사에 비해 연소속도가 빠르고 희박한계영역에서 연소안정성이 확보되면서 단분사보다 낮은 연료소비율을 보였다.
- (3) 압축비 12:1의 희박한계영역에서 노킹 및 실화로 인해 압축비 10:1과 비교했을 때 연료소비율의 개선이 어려웠다.
- (4) 압축비 12:1의 경우가 압축비 10:1에 비해 THC의 배출량이 크게 감소하였으나 이론공연비와 비교했을 경우 비슷한 배출량을 보였다. 또한 CO의 배출량은 압축비 12:1의 경우 이상연소에 따른 불안정한 연소에 의해서 압축비 10:1에 비해서 전체적으로 더 많은 배출량을 보였다. NOx는 압축비증가에 따른 최적 점화시기의 지각되면서 연소실온도가 감소함에 따라 배출량이 감소하였다.

## 참고문헌

(References)

- (1) Takagi, Y., 1996, "The Role of Mixture Formation in Improving Fuel Economy and Reducing Emissions of Automotive S.I. Engines," FISITA Technical Paper, No. P0109.
- (2) Husted, H., Piock, W. and Ramsay, G., 2009, "Fuel Efficiency Improvements from Lean Stratified Combustion with a Solenoid Injector," SAE paper 2009-01-1485.
- (3) 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.
- (4) 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 paper 2008-01-0142.
- (5) Dardalls, D., Matthews, R. D., Lewis, D. and Davis, K., 1998, "The Texas Project, Part-Economic Analysis: CNG and LPG Conversion of Light-Duty Vehicle Fleets," SAE paper 1998-10-19
- (6) 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 paper 2005-01-1937.
- (7) VanDerWege, B. A., Han, Z., Lye, C. O., Munoz, R. B., and Yi, J., 2003, "Development and Analysis of a Spray-Guided DISI Combustion System Concept," SAE paper 2003-01-3105.
- (8) Honda, T., Kawamoto, M., Katashiba, H., Sumida, M., Fukutomi, N., and Kawajiri, K., 2004, "A Study of Mixture Formation and Combustion for Spray Guided DISI," SAE paper 2004-01-0046.
- (9) Park, C. W., Park, W. S., Oh, S. M., Lee, Y. G., Kim, T. Y., Kim, H. S., Choi, Y. and Kang, K. Y., "Emission Characteristics of Gasoline and LPG in a Spray-Guided-Type Direct Injection Engine," SAE paper 2013-01-1323
- (10) Park, Y. S., Park, C. W., Oh, S. M., Kim, T. Y., Choi, Y. and Lee, Y. G., 2013, "Study of Combustion Characteristics with Variations of Combustion Parameter in Ultra-Lean LPG Direct Injection Engine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 6, pp. 607~614.