

직접분사식 가솔린 엔진의 연소제어인자에 따른 희박연소 특성 연구

박철웅* · 오진우 · 김홍석

한국기계연구원 그린동력연구실

A Study on the Lean Combustion Characteristics with Variation of Combustion Parameter in a Gasoline Direct Injection Engine

Cheolwoong Park* · Jinwoo Oh · Hongsuk Kim

Environmental System Research Division, Engine Research Team, Korea Institute of Machinery & Materials,
104 Sinseongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 24 June 2011 / Revised 25 November 2011 / Accepted 26 November 2011)

Abstract : Today gasoline engines for vehicular application are not only faced with stringent emission regulation but also with increasing requirements to better fuel economy, while guaranteeing power density. The spray-guided type gasoline direct injection (GDI) engine has an advantage of improved thermal efficiency and lower harmful emissions. Centrally mounted high pressure injector and adjacent spark plug allow stable lean combustion due to the flexible mixture stratification. In the present study, the performance and emissions characteristics of developed spray-guided type GDI combustion system were evaluated at various excess air ratio conditions. The specific fuel consumption and nitrogen oxides (NO_x) emissions were reduced due to the achievement of stable lean combustion under flammability limit. Multiple injection strategy was not helpful to improve fuel consumption while further reduction of NO_x emissions was possible.

Key words : Gasoline direct injection(가솔린직접분사), Lean combustion(희박연소), Injection strategy(분사전략), Multiple injection(다단분사), Late injection(분사시기지각)

Nomenclature

BMEP : brake mean effective pressure, MPa
BSFC : brake specific fuel consumption, g/kWh
CAD : crank angle degree, degree
COV : coefficient of variation, %

Subscripts

IMEP : indicate mean effective pressure

1. 서론

CO₂ 저감에 대한 적극적인 요구와 원유가의 불안정으로 인해 세계 각국의 자동차회사에서는 경쟁적으로 연비 향상 및 저배기를 목표로 기술개발에 박차를 가하고 있다. 이에 대응하기 위한 방안으로 일본 및 유럽의 자동차 회사들은 가솔린엔진에서 가솔린 직접분사(GDI; Gasolien direct injection), 하이브리드화 및 다운사이징(Downsizing) 기술 등을 개발하여 양산엔진에 적용하여 규제에 대응하고 있다.^{1,2)}

그중에서도 가솔린연료를 연소실 내에 직접 분사하는 GDI 엔진 기술은 연료 기화시 흡입공기를 냉

*Corresponding author, E-mail: cwpark@kimm.re.kr

각시켜 체적효율 및 압축비 증가를 가능하도록 하고, 희박연소에 의한 펌핑손실 및 냉각손실의 감소 등으로 부분부하 연비의 개선이 가능하게 하는 기술이다. 희박 GDI 엔진기술의 1세대에 해당하는 벽면유도방식(Wall-guided type)과 공기유도방식(air-guided type)은 이론공연비 혼합기의 형성이 용이하며 고압의 분사시스템을 요구하지 않는 장점 때문에 최근 이론공연비 연소를 하는 GDI 엔진에 적용되어 상용화되었다. 그러나 혼합기의 형성이 실린더 내부 유동에 지배적인 영향을 받기 때문에 넓은 운전영역에서의 성층 혼합기 형성을 통한 희박연소의 구현이 어렵고, 벽면 부착연료가 미연 탄화수소 증가의 원인으로 작용하는 문제점을 가지고 있다.^{3,5)}

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 제시된 방식이 분무유도방식(Spray guided type)으로서 실린더 중앙에 고압의 연료분사기와 점화플러그가 인접하여 위치하도록 하여 보다 안정적이고 효율적인 성층 연소를 구현할 수 있으며, 독일의 일부 자동차회사들은 분무유도방식을 적용한 초희박 GDI 엔진을 상용화하여 출시하고 있다. 그러나 국내에서는 이와 같은 초희박연소 기술에 대한 연구 및 개발은 미비한 실정이며, 안정적인 희박 연소 및 연비개선 효과를 확보하기 위해서는 연소 성능에 미치는 점화시기, 연료분사전략 등과 같은 제어인자에 대한 최적화가 필요한 상황이다.^{6,7)}

이에 본 연구에서는 분무유도방식의 초희박 GDI 엔진 개발을 위한 선행 연구로써 분무유도방식의 초희박 GDI 엔진 시제품 개발하였고, 최적 연소 방식의 선정을 위하여 각각의 연소 제어인자를 변경하면서 연소특성을 파악하였다. 희박연소 시 점화시기를 포함한 연료분사시기 및 연료분사회수 등의 연소제어인자 변화에 따른 연소 및 배기특성을 이론공연비 연소조건과 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 초희박 GDI 엔진연소 최적화를 위한 제어변수 적용방안을 검토하기 위해 상용화되어 판매되고 있는 MPI(multi point injection)방식의 가솔린 엔진을 개조하여 분무유도방식의 연료공급시스

템을 설치하였다. 개발된 초희박 GDI 엔진에서 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. 고압연료분사가 가능하도록 배기캠 샤프트에 플러저방식의 고압펌프를 장착하였고, 연료량 제어 밸브(FCV; Fuel control vale)에 인가되는 전압의 Duty를 제어함으로써 펌핑부에 유입되는 연료량을 제어하여 연료분사압력을 제어하였다. 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. 실린더별로 공기과잉율을 측정할 수 있도록 각각의 배기 매니폴드에 광역산소센서(LA4, ETAS co.)를 설치하여 혼합기의 상태를 독립적으로 측정할 수 있도록 하였다. 연소제어인자의 변화에 따른 연소 특성분석은 각각의 실린더에 장착된 실린더 압력 센서와 연소 분석기를 통해 이루어졌다. 배기가스의 측정은 삼원촉매의 전단에 가스 추출라인(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 운전영역 중의 하나로서 연비 시험에도 적용되는 운전조건인 1,500 rpm, BMEP(Brake mean effective pressure) 0.15 MPa 조건으로 운전조건을 고정하여 실험을 수행하였다. 이론 공연비 조건과 희박한계 조건에서 점화시기와 연료분사시기의 변경을 통하여 최적 점화시기 및 최적 연료분사시기를 결정하였으며, 엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수의 온도가 $83\pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하였다. 이론공연비 조건에서 공기과잉율을 희박연소한계까지 0.5 단위

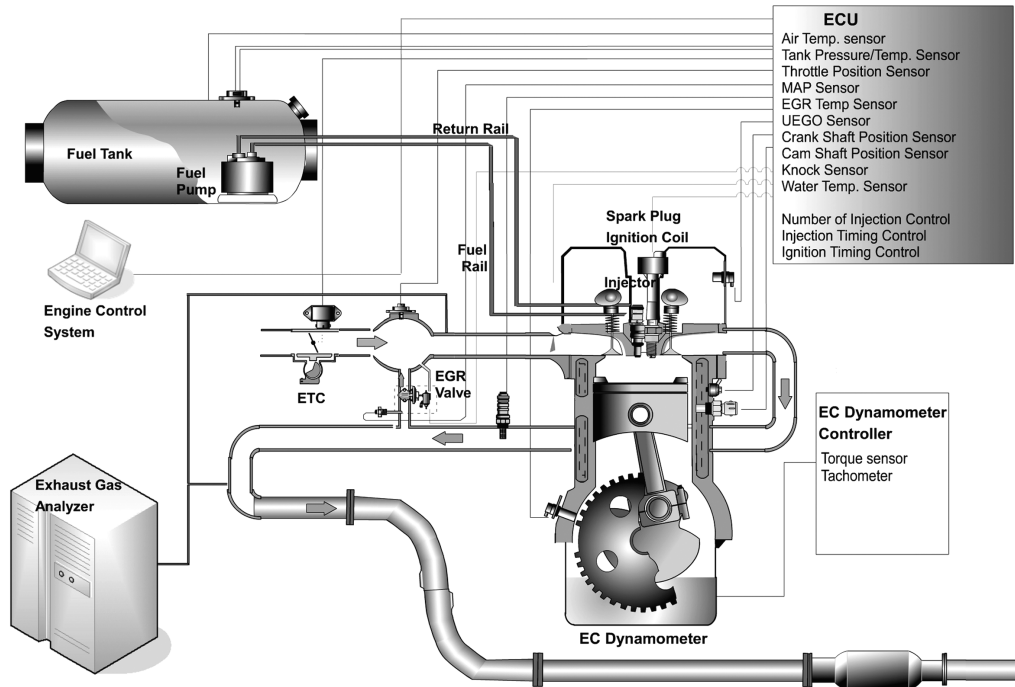


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

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

로 증가시키면서 변화시켰으며, 이때 천이영역에 해당하는 $\lambda=1.5$ 조건은 제외하였다.

연료분사압력은 20 MPa로 고정하고 각각의 실험 조건에 따른 연료소비율, 배기가스, 연소 안정성 등을 검토하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 점화시기에 따른 연소 특성

가솔린엔진에서 혼합기에 이론공연비보다 공기를 과잉 공급하여 희박연소를 하게 되면, 연료의 발화가 어렵게 되어 연소가 불안정해지고 토크의 변

동을 초래하게 된다. 따라서, 희박연소를 이용하여 효율을 높이고 배기가스를 저감시키기 위해서는 희박연소안정성을 확보하여 희박가연한계를 가능한 넓히는 것이 매우 중요하다. 불안정한 희박연소는 오히려 효율의 감소와 미연탄화수소의 증가를 발생시키며, 넓은 희박가연한계를 갖지 못하면 질소산화물(NO_x)을 저감시키는데 한계가 있다. 본 논문에서와 같이 분무유도방식의 직접분사연소를 하는 목적도 성층혼합기의 형성이 용이하고 실린더 내부 유동에 독립적으로 점화가 가능한 특성을 이용하고자 함이다.

Fig. 2에 이론공연비 조건과 희박 한계($\lambda=4.2$)조건에서 점화시기 변화에 따른 연료소비율을 나타내었다. 최적 점화시기를 연료소비율이 가장 낮을 때로 정의하였으며, 이론공연비 조건과 희박연소 조건에서 최적 점화시기는 각각 BTDC(Before top dead center) 30 CAD(Crank angle degree)와 BTDC 28 CAD로 나타났다. 연료 분사시기는 이론공연비 연소 조건의 경우 예혼합기의 조성을 위해서는 조기 분사가 유리하기 때문에 BTDC 330 CAD에서 최적을 보

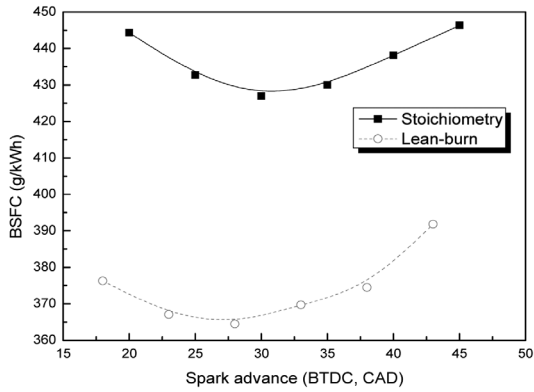


Fig. 2 Effect of spark advance timing on specific fuel consumption

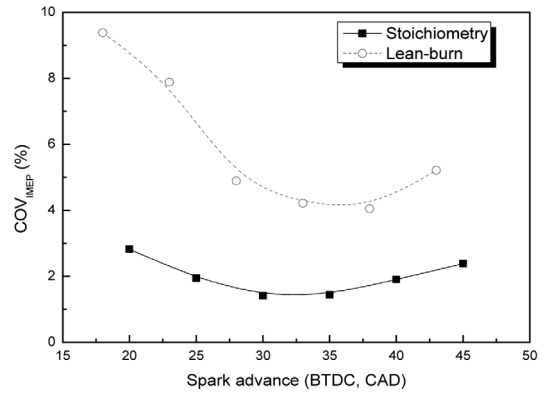


Fig. 3 Effect of spark advance timing on combustion stability

였으나, 희박연소의 경우 점화시기에 스파크 플러그 주변의 농후한 혼합기를 생성하기 위하여 TDC 인근의 지각된 분사시기가 안정적인 희박연소에 효과적이었다.

상기와 같은 이유로 BTDC 35 CAD의 지각된 분사시기를 이용하여 안정적인 희박연소를 구현하여 펌핑손실 및 냉각손실 등의 저감을 통한 약 15% 정도의 연료소비율 개선을 얻을 수 있었다.

예혼합기를 이용한 연소를 하는 점화착화기관에서의 효율은 연소안정성과 깊은 관계가 있으며, Fig. 3의 이론공연비 연소조건 결과에서 볼 수 있는 것과 같이 MBT 점화시기보다 진각되거나 지각되면 연소안정성의 악화와 함께 연료소비율이 증가하게 된다. 그러나 희박연소의 경우 최적점화시기로 정의한 BTDC 28 CAD 보다 진각되더라도 연소안정성은 개선되다가 다시 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 분무유도방식의 특징으로 해당 운전조건에서 점화시기의 제어가 BTDC 28-38 CAD의 범위 내에서 이루어질 경우 점화플러그 주위에 적절한 성층 혼합기가 형성되어 안정적인 희박연소를 확보할 수 있음을 보여준다. 너무 이르거나 늦은 시기의 점화는 실린더 내의 압력이 너무 낮거나 점화 지연으로 인한 연소안정성의 악화가 연료소비율의 증가에 영향을 주었다. BTDC 33, 38 CAD 점화시기 조건에서 연소안정성은 개선되었으나, 이른 시기의 열방출이 출력증가에 기여하지 못하여 연료소비율이 증가된 것으로 판단된다.

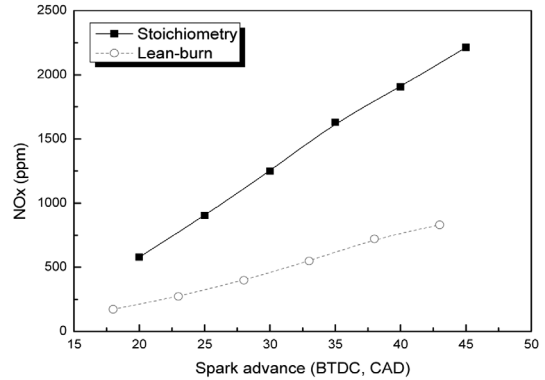


Fig. 4 Effect of spark advance timing on NO_x emissions

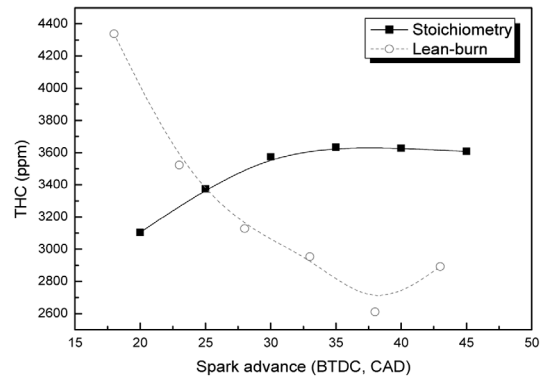


Fig. 5 Effect of spark advance timing on THC emissions

Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 2와 동일한 조건에서 점화시기의 변화에 따른 NO_x 및 탄화수소(THC; Total hydrocarbon)의 배출을 나타낸 것이다. NO_x의 배출은 이론공연비 조건과 희박연소 조건에서 모두 점화시기가 지각됨에 따라 감소하는 경향을 보였다.

이는 점화시기가 지각될수록 연소실의 열에너지 보유시간이 짧아짐에 따라 연소온도가 저하되어 나타나는 결과로 판단되며, NO_x 배출 농도는 희박 연소 시 이론공연비 조건에 비하여 낮은 값을 보였다. 그러나 이론공연비 연소조건인 경우 삼원촉매를 이용하여 배출량의 90% 이상을 저감을 시킬 수 있지만 희박연소의 경우 삼원촉매를 사용하기 어려운 상황을 고려하면 추가적인 NO_x의 저감을 위하여 연료소비율 및 THC의 증가를 제어할 수 있는 범위 내에서 점화시기를 약간 지각시키는 것이 효과적인 것으로 보인다.

일반적으로 점화시기의 지각은 연소실 내의 후연소를 촉진시켜 THC와 일산화탄소(CO)의 저감도 더불어 확보할 수 있는 장점이 있다. 그러나 본 연구의 분무유도방식의 희박연소 조건에서는 점화시기가 지각될수록 THC의 배출이 급격히 증가하였는데, 연소의 대부분이 점화시기에 일어나고 과잉공기로 인해 후연소가 효과적이지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 분사전략에 따른 희박연소 특성

엔진에서 연소되는 혼합기가 희박할수록 연료소비율 개선에 유리하지만 연소안정성의 악화가 동반되는 것이 일반적이기 때문에 이를 극복하기 위한 연소제어인자의 최적화가 요구된다. Table 2와 같이 이전의 연구결과로부터 저속 중부하에 해당하는 2,000 rpm, BMEP 0.4 MPa 운전조건에서 다단분사를 통해 연비의 저감 및 연소안정성 확보 효과를 확인하였기 때문에, 본 연구의 운전조건인 저속 저부하 조건에서의 공기과잉율의 변화 및 분사전략에 따른 연소성능 및 배출가스 특성을 살펴보았다.

Fig. 6은 각각의 운전조건에서 공기과잉율의 변화에 따른 최적 점화시기 및 최적 연료분사시기를

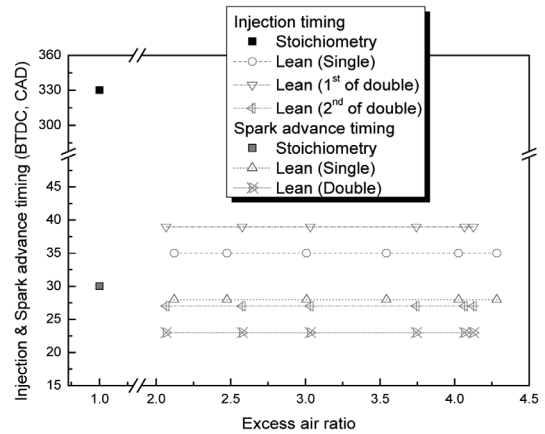


Fig. 6 Effect of excess air ratio on optimum spark advance and fuel injection timing

나타낸 것으로서 희박연소의 경우 단분사와 2단 분사의 경우를 비교하였다. Table 2의 결과와는 달리 저속 저부하 조건에서의 사이클당 절대 연료량이 작기 때문에 3단 분사를 적용했을 경우 안정적인 연소가 확보되지 않아 요구 출력성능을 만족하지 못하였다.

공기과잉율이 변화하더라도 연소안정성은 점화시기에 스파크플러그 주위에 형성된 혼합기에 지배적이기 때문에 점화시기 및 연료분사시기의 변화는 나타나지 않았다. 그러나 동일 연료량을 2단으로 나누어 분사하게 되면 예혼합정도를 포함한 혼합기의 특성이 달라지고, 최후 분사량이 감소되기 때문에 단분사에 비해 5 CAD 진각된 조건에서 최저 연료소비율을 보였다. 1회 분사시의 연료분사량 감소는 분무도달거리 및 예혼합기 형성시간을 감소시키기 때문에 최후연료분사시기와 점화시기 사이의 간격이 단분사시 7 CAD에 비해서 4 CAD로 감소하였다.

각각의 분사전략에 대해서 공기과잉률 변화에 따른 연료소비율 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 단분사

Table 2 Effects of injection strategy on fuel economy and emissions at 2,000 rpm / BMEP 0.4 MPa operating condition

Operation condition	1st injection	2nd injection	3rd injection	Spark advance	BSFC	THC	NO _x	COV
	BTDC, CAD				g/kWh	ppm	ppm	%
Stoichiometry	330	-	-	28	288.39	2957	2201	0.89
Lean / Single	50	-	-	35	282.23	1524	1435	2.54
Lean / Double	60	45	-	35	275.3	1738	1679	2.26
Lean / Triple	72	57	42	35	274.88	2380	1598	2.59

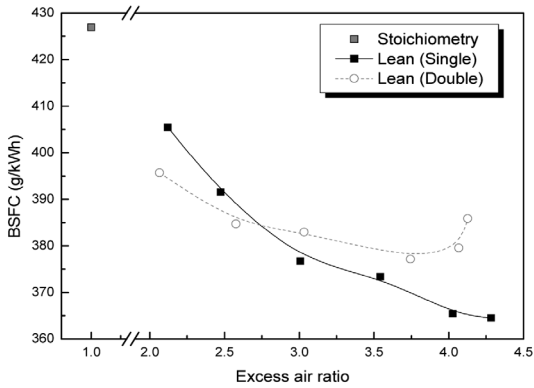


Fig. 7 Effect of multiple injection on specific fuel consumption

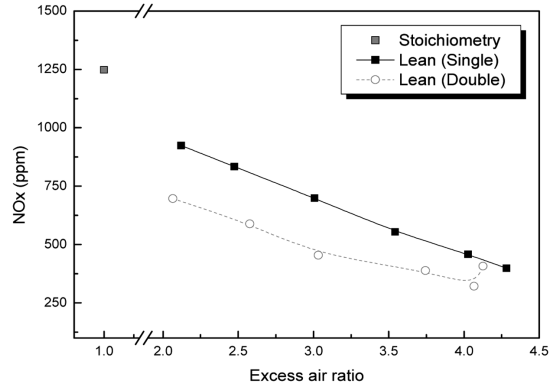


Fig. 9 Effect of multiple injection on NO_x emission

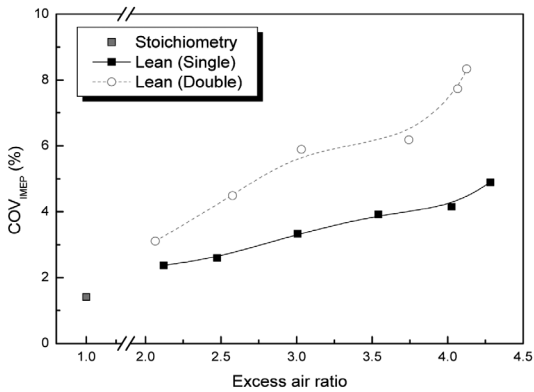


Fig. 8 Effect of multiple injection on combustion stability

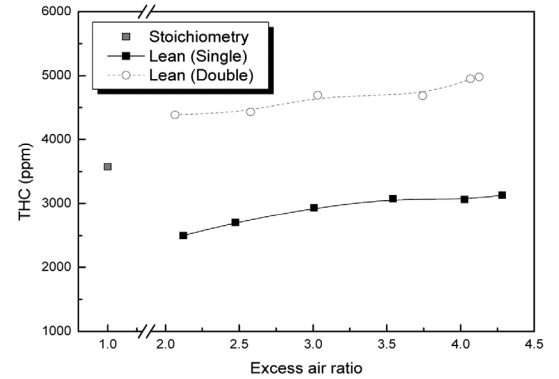


Fig. 10 Effect of multiple injection on THC emission

의 경우 공기과잉율이 증가할수록 희박연소에 의한 손실의 감소로 연료소비율이 개선되었다. 이에 반해 2단분사의 경우는 희박한계에서 다시 증가하였으며, $\lambda=2.5$ 이하의 조건에서는 단분사에 비해 낮은 연료소비율을 보이다가 $\lambda=3.0$ 이상에서는 단분사에 비해 연료소비율이 악화되었다. 이것은 연소안정성의 악화에 대한 영향으로 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 COV_{IMEP} 5%를 운전가능한 안정된 연소기준으로 설정했을 때, 2단분사 적용시 $\lambda=3.0$ 이상에서는 공기과잉율이 증가함에 따라 연소가 불안정하여 희박가연한계가 축소되어야 함을 보여주는 결과이다. 분무유도방식이 적용된 성층연소 조건이지만 저부하 조건에서는 요구 연료량이 작기 때문에 다단분사를 하여 최후 연료량이 감소되면, 초희박조건에서는 공기과잉율을 포함한 실린더 내부 유동조건에 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10의 공기과잉율에 따른 NO_x와 THC 배출을 살펴보면 위와 같은 연소안정성의 악화는 배출가스에도 영향을 미쳐서, 2단 분사 시 희박한계에서의 NO_x 배출은 공기과잉율의 증가에도 불구하고 오히려 증가하는 결과를 확인할 수 있다. 초기분사된 연료에 의한 예혼합기의 증가로 NO_x의 배출이 증가될 것으로 기대하였으나, 최적점화시기의 지각으로 인해 연소온도의 저감이 지배적으로 작용하여 단분사의 경우에 비해 2단분사 적용시 NO_x의 배출은 전체적으로 낮게 나타났다. 그러나 여전히 상용화 되기에는 높은 수준의 NO_x 배출경향을 보이고 있다. 2단분사의 적용으로 인해 최초연료분사시기는 단분사의 경우에 비해 진각되고, 분사된 연료의 일부가 연소실 내의 틈새로 유입되어 THC의 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결론

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

- 1) 지각된 분사시기를 이용하여 안정적인 희박연소를 구현하여 펌프손실 및 냉각손실 등의 저감을 통한 약 15% 정도의 연료소비율 개선을 얻을 수 있었다.
- 2) 최저 연료소비율 조건에서의 NO_x와 THC의 배출은 각각 68%, 13% 저감되었으나 추가적인 NO_x의 저감을 위한 점화시기의 지각과 같은 운전전략이 모색되어야 한다.
- 3) 2단분사 전략을 적용하여 $\lambda=2.5$ 이하의 조건에서는 단분사에 비해 낮은 연료소비율을 얻을 수 있었으나, $\lambda=3.0$ 이상에서는 연소안정성의 악화로 단분사에 비해 증가되었다.
- 4) 저속 저부하 조건에서의 사이클당 절대 연료량이 작기 때문에 3단 분사를 적용했을 경우 안정적인 연소가 확보되지 않아 요구 출력성능을 만족하지 못하였다.

References

1) C. Schwarz, E. Schünemann, B. Durst, J. Fischer

and A. Witt, "Potentials of the Spray-guided BMW DI Combustion System," SAE 2006-01-1265, 2006.

2) T. Pauly, S. Franoschek, R. Hoyer and S. Eckhoff, "Cost and Fuel Economy Driven Aftertreatment Solution -for Lean GDI," SAE 2010-01-0363, 2010.

3) Y. S. Lee, S. S. Moon, J. J. Choi and C. S. Bae, "Effects of Spilt Injection Strategy in Single Cylinder DISI Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.38-43, 2003.

4) S. J. Kim, Y. N. Kim and J. H. Lee, "Analysis of the In-cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-guided GDI Engine," SAE 2008-01-0142, 2008.

5) H. Baecker, A. Kaufmann and M. Tichy, "Experimental and Simulative Investigation on Stratification Potential of Spray-guided GDI Combustion Systems," SAE 2007-01-1407, 2007.

6) W.-S. Chang, Y.-N. Kim and J.-K. Kong, "Design and Development of a Spray-guided Gasoline DI Engine," SAE 2007-01-3531, 2007.

7) F. Grimaldi, D. Gervais, A. Marchal and A. Floch, "Single-cylinder Experiments for Downsizing-oriented SI Concept : GDI and VVL Thermodynamic Comparison," SAE 2007-24-0013, 2007.