

BMW N53 직접분사식 가솔린 엔진의 초희박 연소특성에 관한 연구

김 홍 석* · 오 진 우 · 김 성 대 · 박 철 응 · 이 석 환 · 정 용 일

한국기계연구원 그린동력연구실

A Study on the Ultra Lean Combustion Characteristics of the BMW N53 GDI Engine

Hongsuk Kim* · Jinwoo Oh · Sungdea Kim · Chulwong Park · Seokwhan Lee · Youngil Jeong

Engine Research Team, Korea Institute of Machinery & Materials, 104 Sinseongno, Yuseong-gu, Deajeon 305-343, Korea
(Received 7 February 2011 / Accepted 14 June 2011)

Abstract : Ultra lean combustion with stratified air-fuel mixture is one of the methods that can improve fuel economy of gasoline engines. The aim of this study is to show that how much fuel economy is improved and what are differences in engine control of the ultra lean combustion compared with stoichiometric combustion. In this study, the BMW N53 GDI engine, which is one of ultra lean combustion GDI engines introduced in the market recently, was tested at various engine operating conditions. Results indicated that fuel consumption rates were improved by 11.9~25.8% by the ultra lean combustion compared with stoichiometric combustion. It was also found that multiple fuel injection, multiple spark, early intake valve opening, and large vlvave overlap duration were the features of the ultra lean combustion for combustion stability and emission improvement.

Key words : GDI(Gasoline Direct Injection, 가솔린직접분사), Ultra lean combustion(초희박연소), BMW N53 engine(BMW N53 엔진)

Nomenclature

BMEP : Brake Mean Effective Pressure
BSFC : Brake Specific Fuel Consumption
BTDC : Before Top Dead Center
CA : Crank Angle
EGR : Exhaust Gas Recirculation
GDI : Gasoline Direct Injection
LNT : Lean NOx Trap
TDC : Top Dead Center
 λ : Air excess ratio

1. 서론

가솔린 엔진은 디젤 엔진 등에 비해 열효율이 낮기 때문에 지구온난화 물질인 CO₂ 배출량이 많고, 연비가 낮은 단점이 있었다. 가솔린 엔진은 통상 이론공연비 연소를 해왔으나 희박연소 기술을 적용할 경우 열효율이 향상되어 연비 및 지구온난화 물질 배출량을 현저히 저감할 수 있어 희박 연소 기술에 대한 많은 연구가 계속되고 있다.

2000년대 초반 도요타자동차 등에 의해 개발된 1세대 희박연소 GDI 엔진은 연소실 측면에 인젝터를 설치하고, 인젝터에서 분사된 연료를 피스톤 보울에 충돌시켜 스파크플러그 주변에 농후한 연료공기 혼합기를 만드는 벽면유도방식(wall-guided)기술이 적용되었다. 이 기술은 혼합기 형성이 용이하여 고

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

압의 분사 시스템을 요구하지 않는다는 장점이 있으나 엔진 운전 조건에 따라 크게 변화하는 실린더 내부 유동에 의한 혼합기를 형성함으로써 넓은 운전 영역에서 성층 연소 구현이 어렵고 벽면 부착 연료가 미연 탄화수소로 배출되는 문제점을 가지고 있었다.¹⁻³⁾

최근에는 인젝터와 스파크 플러그를 연소실 중앙에 위치시키고, 연료를 고압 분사하여 피스톤 벽면에 충돌되지 않으면서 스파크 플러그 근방에 연료 공기혼합기를 형성시키는 2세대 기술인 분무유도방식(spray-guided) GDI 엔진기술이 개발되어 적용되고 있으며, 1세대 벽면유도방식 GDI 엔진보다 회박 연소 운전영역이 넓고, 연소 안정성이 우수한 장점이 있다.^{4,5)}

Alex C⁶⁾는 분무유도방식 초회박 GDI엔진과 PFI (Port Fuel Injection) 엔진의 연료 소비율을 비교하였으며, 압축비 증가, 흡기드로틀 손실감소, 냉각손실 감소, 비열비 증가 등으로 초회박 GDI 엔진이 PFI 엔진에 비하여 연료 소비율이 15% 정도 저감되는 것으로 보고하였다. Szekely⁷⁾ 등은 분무유도방식의 GDI 엔진에서 회박연소 특성을 연구하였으며, 공기스웰 강도의 감소, 점화 에너지의 증가 등이 연비 개선에 효과가 있는 것으로 보고하였다.

독일의 BMW사와 Daimler-Chrysler에서는 2007년부터 초회박 GDI 엔진인 N53 엔진과 M272 DE 35 엔진 등을 각각 양산하고 있으며,⁸⁾ 향후 지구온난화 물질 규제 및 연료가격상승 등 요인에 의해 시장이 확대될 것으로 예상된다.

본 연구는 초회박 가솔린엔진의 연료소모율 향상 정도 및 초회박 연소시 분사, 점화 및 흡배기밸브 개폐 전략이 이론공연비 연소시와 다른점을 알아보기 위한 연구로써 BMW N53 엔진을 이용하여 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Table 1은 BMW N53엔진의 제원을 나타내고, Fig. 1은 N53엔진 단면 사진을 나타낸다. BMW N53엔진은 배기량 2,996cc의 6기통 GDI 엔진으로써 실린더 중앙에 3회까지 다단분사가 가능한 Continental사의 외향개방 피에조 인젝터⁹⁾가 장착되며 스파크 플러

Table 1 Specifications of BMW N53 engine

Engine type	6-cylinder in-line
Displacement	2,996 cm ³
Stroke/bore	85 mm/88 mm
Cylinder spacing	91 mm
Firing order	1-5-3-6-2-4
Max. Power	200 kW / 6,700 rpm
Max. Torque	320 Nm / 2,750 rpm
Compression ratio	12.0



Fig. 1 Cross section view of the N53 engine¹⁰⁾

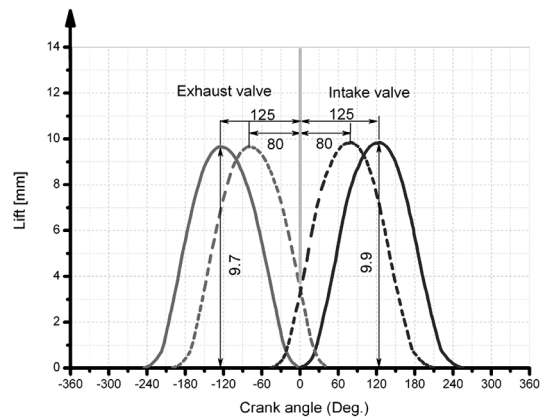


Fig. 2 Intake and exhaust valve lift and timing

그가 연소실 중앙에 위치하는 특징을 갖는다. 그리고, Continental사의 3축 피스톤형 고압연료펌프를 이용하여 20 MPa의 고압으로 연료를 공급하며, VANOS system을 이용하여 흡배기 밸브의 개폐시기를 조정한다. Fig. 2는 흡배기밸브 개폐시기 변화폭을 나타낸다. 배기밸브는 45° CA를 지각시킬 수 있으며, 흡기밸브는 45° CA를 진각시킬 수 있는 특징을 갖는다. 배출가스 시스템으로는 삼원촉매와

NO_x 저감을 위한 LNT(Lean NO_x trap)를 장착하고 있다.

본 연구에서는 BMW N53엔진을 엔진동력계에 설치하고, 여러 운전조건에서 공기과잉율, 연료소모율을 측정하고, 분사, 착화 및 흡배기밸브 개폐시기 전략 등을 고찰하였다. BMW N53엔진은 저·중부하조건에서 통상적으로 희박 연소모드로 운전되나 연소에 관계되는 센서 등에 이상이 있을 경우 이론공연비 연소모드로 작동된다. 본 연구에서는 필요시 질소산화물 센서의 컨넥터를 제거하여 이론공연비 연소모드를 구현하였다.

본 연구에서 점화시점은 스파크 플러그에 공급되는 전류 신호가 증가하다 하강하는 지점으로 정의하였으며, 분사시작시점은 인젝터에 공급되는 전류가 처음 상승되는 지점으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 분석

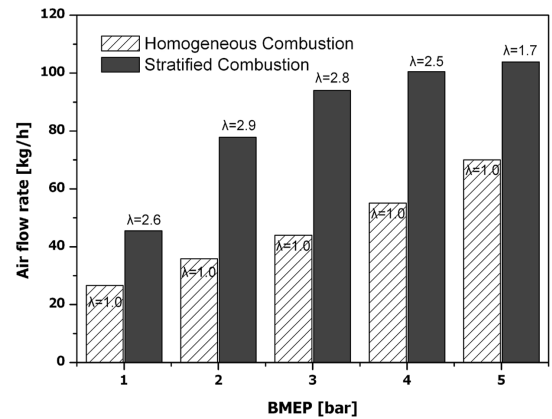
3.1 희박연소 특성 및 연료소모율 향상특성

BMW N53엔진은 중·저속의 중·저부하 조건에서는 희박 연소 모드로 운전되고, 고속 고부하 조건에서는 이론공연비 연소모드로 운전된다. Table 2는 실험을 통해서 얻어진 BMW N53엔진의 각 운전조건에서의 공기과잉률을 나타낸다. 1,000rpm에서는 BMEP 3bar까지 공기과잉률 2.2~2.4 수준의 초희박 연소를 하며, BMEP 3bar이상에서는 이론공연비 연소를 한다. 2,000rpm 조건에서는 BMEP 5bar 이하인 경우 공기과잉률 2.4~3.0수준의 초희박 연소를 하며, BMEP가 6~8bar로 증가하면 공기과잉률 1.4 정도의 희박연소를 한다. 이는 부하가 높을수록 흡입되는 공기량 대비 연료량이 많아지기 때문으로 판단된다. 한편, 3,000rpm과 4,000rpm은 2,000rpm에 비해 낮은 부하에서만 희박 연소를 하는 것을 알 수 있다. 이는 엔진회전수가 높은 경우 연소를 할 수 있는 절대 시간이 부족하기 때문에 낮은 부하에만 안정적인 희박 연소가 가능한 것으로 판단된다.

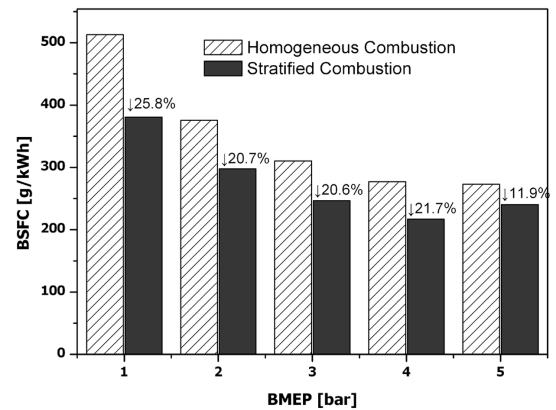
Fig. 3은 1,500rpm에서 부하 변동에 따른 이론공연비 연소와 희박 연소시의 흡입공기유량 및 공기과잉률과 비연료소모율을 비교하여 나타내었다. 이론공연비 연소시에 비하여 희박 연소시에는 흡입공기량이 증가하고, 공기과잉률은 1.7~2.9로 연소되고

Table 2 Air excess ratio with respect to engine operating conditions of N53 engine

rpm /BMEP	1,000	2,000	3,000	4,000
1 bar	2.3	2.4	3.5	1.3
2 bar	2.4	3.0	2.2	1.4
3 bar	2.2	3.0	3.4	1.4
4 bar	1.0	3.0	3.1	1.0
5 bar	1.0	2.5	2.7	1.0
6 bar	1.0	1.4	1.5	1.0
7 bar	1.0	1.4	1.0	0.96
8 bar	1.0	1.4	1.0	0.88
9 bar		0.97	1.0	0.87
10 bar		0.94	1.0	0.85
11 bar			0.9	0.82

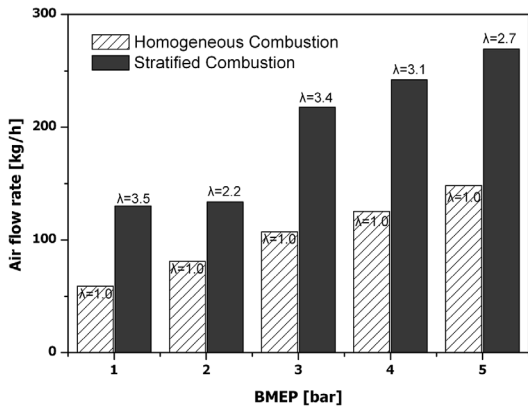


(a) Air flow rate with respect to BMEP

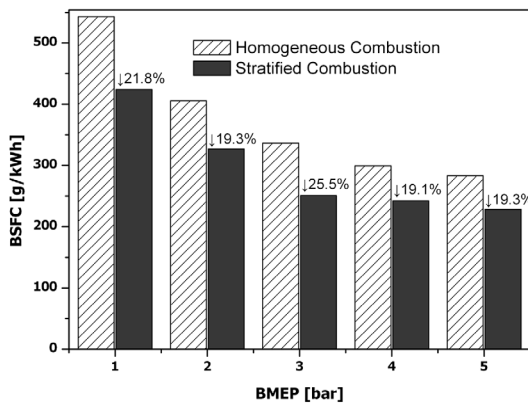


(b) BSFC with respect to BMEP

Fig. 3 Comparison of air flow rate and BSFC of homogeneous combustion and stratified lean combustion (1,500rpm)



(a) Intake air flow rate with respect to BMEP



(b) BSFC with respect to BMEP

Fig. 4 Comparison of air flow rate and BSFC of homogeneous combustion and stratified lean combustion (3,000rpm)

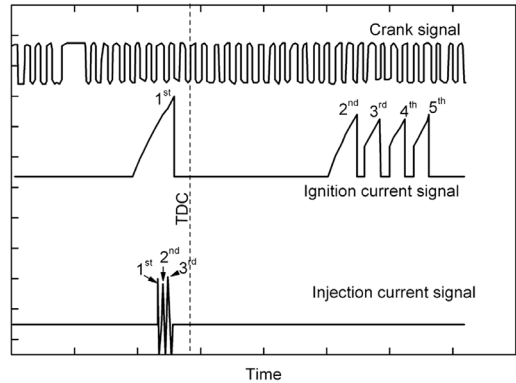
있음을 알 수 있다. 한편, 희박 연소시에는 이론공연비 연소에 비해 11.9~25.8%의 비연료소모율이 감소한다. 비연료소모율이 감소하는 요인으로는 펌핑손실 저감, 냉각손실 저감, 흡입공기량 증대에 따른 실제 압축압력의 증가 및 혼합기의 비열 감소 등이 그 원인으로 알려져 있다.¹¹⁾

Fig. 4는 3,000rpm에서 부하 변동에 따른 이론공연비 연소와 희박 연소시 흡입공기유량, 공기과잉률과 비연료소모율을 비교하여 나타낸다. 희박 연소시에는 이론공연비 연소에 비해 흡입공기량이 증가하여 공기과잉률 2.2~3.5로 운전되고 있으며, 희박연소시 비연료소모율은 이론공연비 연소시에 비해 19~25.5% 감소함을 알 수 있다.

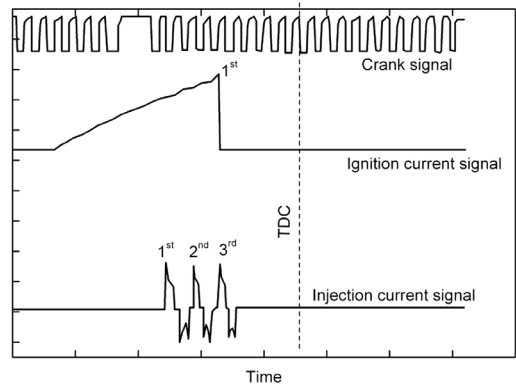
3.2 점화 및 분사전략

Fig. 5는 1500rpm BMEP 1 bar($\lambda=2.6$)와 5 bar($\lambda=1.7$) 조건에서 희박 연소시 점화 신호와 연료 분사 신호의 전류 파형을 나타낸다. 연료는 BMEP 1 및 5 bar 조건 모두 압축 말기에 3단 분사하고 있으며, 이는 연소안정성 확보와 관계가 있는 것으로 판단된다. 점화시기는 최종 분사 시기에 근접하는 것을 알 수 있다.

즉, 희박 연소시에는 마지막 분사된 연료가 스파크 주변에 농후한 혼합기를 형성하는 시점에 점화를 하여 화염을 형성한 후 1 차 및 2 차 분사된 연료-공기 혼합기로 화염이 전파되어 연소되는 것으로 판단된다. 한편 BMEP 5 bar 조건에서는 점화신호가 1개인데 반해 BMEP 1 bar조건에서 팽창 과정 중에 4번의 추가 점화 신호를 볼 수 있다. 이는 연소온도



(a) BMEP 1 bar



(b) BMEP 5 bar

Fig. 5 Ignition and Injection signal at BMEP 1 bar and 5 bar condition of 1,500rpm

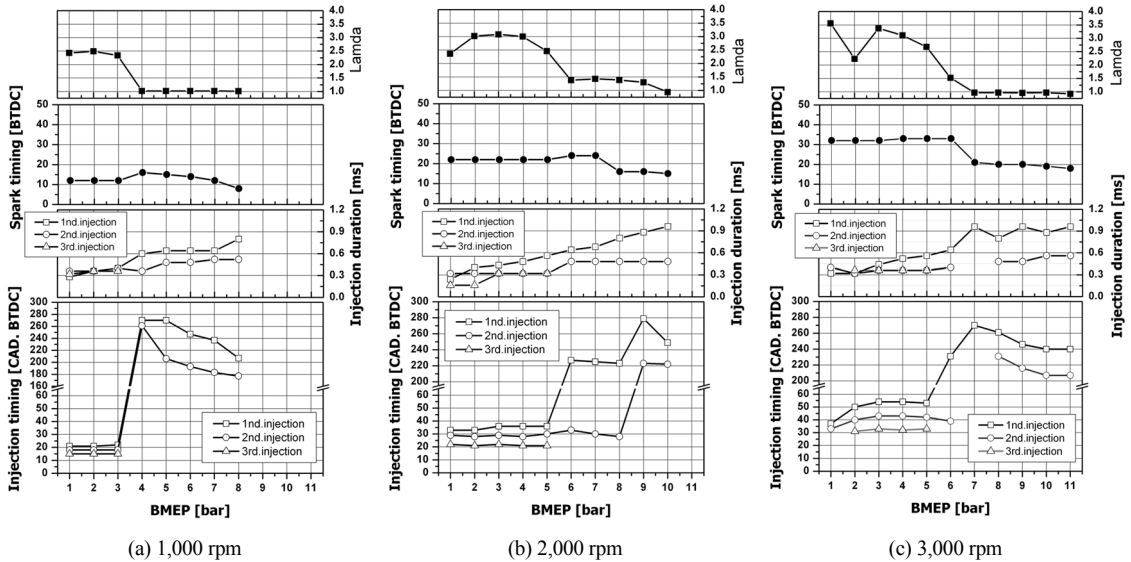


Fig. 6 Injection and spark timing strategy

가 낮은 저부하에서 스파크 플러그 오염을 방지하기 위한 것으로 판단된다.

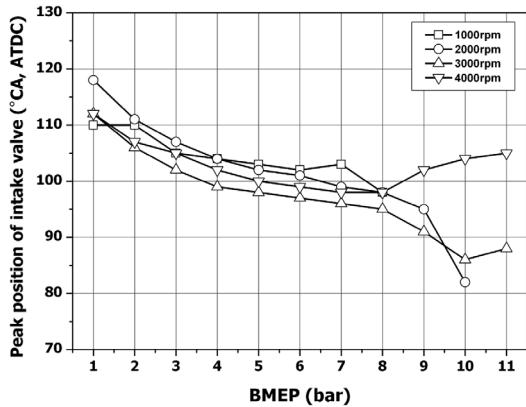
Fig. 6은 여러 운전조건에서의 연료분사 및 점화 특성을 나타낸다. 1,000rpm, 2,000rpm, 3,000rpm 모두 공기과잉률 1.5 이상의 희박연소시에는 압축과정 말기에 3단 분사하며, 공기과잉률 1.4~1.5의 희박연소시에는 흡입과정 중에 1차 분사를 하고, 압축과정 중에 2차 분사하는 특성을 보였다. 한편, 2,000rpm과 3,000rpm의 고부하조건에서는 흡입과정 중에 두차례 분사하며 이론공연비 연소를 한다.

또한, 부하가 증가할수록 1차, 2차 또는 3차 연료 분사기간이 길어지는데, 1차 분사기간이 2차 분사기간 보다 길고, 2차 분사기간보다 3차 분사기간보다 긴 것으로 보아 1차 분사량 또는 2차 분사량으로 부하를 조정하는 것으로 보인다. 희박 연소시 점화시기는 1,000rpm의 경우 BTDC 15° CA, 2,000rpm의 경우 BTDC 25° CA, 3,000rpm의 경우 BTDC 35° CA로 엔진회전속도가 증가함에 따라 진각된다. 이는 엔진회전속도가 빨라지면 연소할 수 있는 절대 시간이 부족하기 때문에 점화시기를 진각하는 것으로 판단된다. 그러나 희박연소시에는 부하 증가에 따른 점화시기의 변화는 없으며, 부하가 증가하여도 3차 연료분사시기와 점화시기는 일정하게 유지된다.

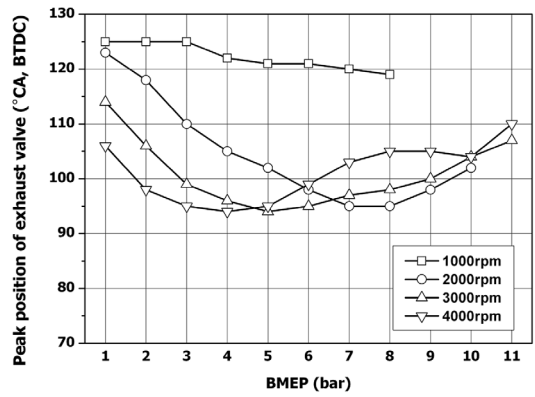
3.3 흡·배기밸브 제어전략

Fig. 7은 엔진회전수 및 부하조건에 따른흡기 밸브의 개폐시기를 나타낸다. Fig. 7(a)는 이론공연비 연소 조건의 흡기밸브 개폐시기를 나타낸 것으로서 부하가 증가하거나 엔진회전속도가 증가할수록 체적효율 증대를 위해 흡기밸브 개폐시기가 진각되는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 희박연소 운전시의 흡기밸브 개폐시기를 나타낸것으로 BMEP 1~2 bar의 저부하 조건에서는 흡기밸브 개폐시기의 진각 정도가 이론공연비 연소에 비해 감소하는데 이는 흡기밸브를 일찍 열어 체적효율을 극대화하거나 NOx 저감을 위해 내부 EGR율을 높이기 보다는 연소실내 연소 잔류가스를 줄여 연소 안정성을 확보하고자 하는 것으로 판단된다. 한편, BMEP 3~6 bar 조건의 희박연소시 흡기 밸브 개폐시기는 이론공연비 연소시에 비하여 많이 진각되는데 이는 배기행정 중에 흡기밸브를 미리 열어 체적효율을 향상시키는 물론 배기행정 말기에 배출가스가 흡기밸브를 통해서 흡기관으로 일부 배출되다가 다시 연소실로 재유입되는 내부 EGR효과를 실현하여 배출가스 중의 NOx를 저감하기 위한 것으로 판단된다.

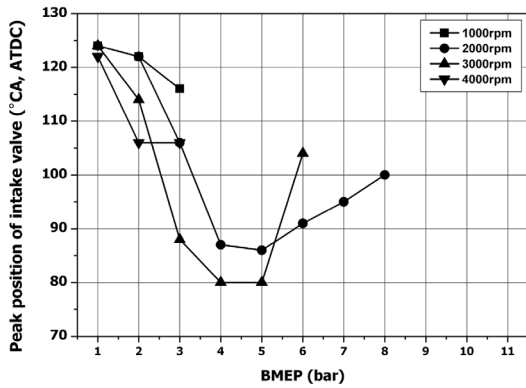
Fig. 8은 엔진회전수 및 부하에 따른 배기밸브 개폐시기를 나타낸다. Fig. 8(a)는 이론공연비 연소시의 배기밸브의 개폐시기로서 배기밸브는 엔진회전



(a) Homogeneous combustion

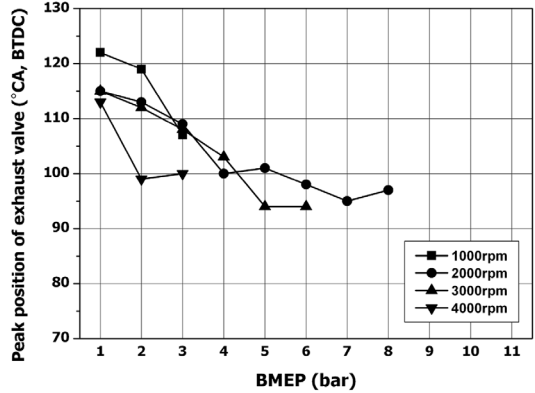


(a) Homogeneous combustion



(b) Stratified combustion

Fig. 7 Strategy of intake valve timing control



(b) Stratified combustion

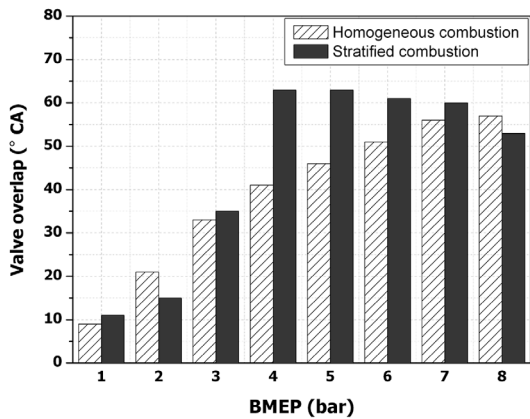
Fig. 8 Strategy of exhaust valve timing control

속도 및 부하가 증가할수록 팽창일을 극대화시키고, 배기유동의 관성을 이용하여 잔류연소가스를 최소화하기 위하여 지각됨을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 회회박 연소 운전시 배기밸브의 개폐시기로서 전체적으로 이론공연비 연소시와 유사한 개폐시기를 갖음을 알 수 있다. 단, 1,000rpm의 BMEP 1~3 bar 및 2,000rpm BMEP 1, 2 bar 등의 저부하 조건에서 회회박 연소의 경우 이론공연비 연소의 경우보다 배기밸브 개폐시기가 다소 많이 지각된다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 이 운전조건에서는 회회박 연소시 흡기밸브 개폐시기가 진각되지 않으므로 배기밸브 개폐시기가 다소 많이 지각되더라도 배출가스가 흡기밸브를 통해서 흡기관으로 일부 배출되다가 다시 연소실로 재유입되는 내부 EGR 효과는 크지 않을 것으로 판단되며, 배기밸브 개폐시기가 많이 지각됨에 따라 팽창일 증대 및 소기 효율이 높아질 것으로 판단된다.

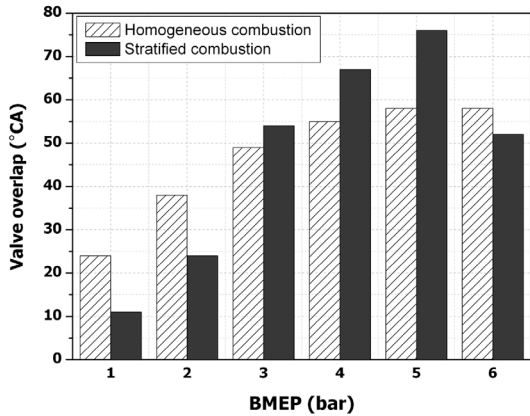
Fig. 9는 이론공연비 연소시와 회회박 연소시 밸브 오버랩 기간을 비교하여 나타낸 것으로서 Fig. 9(a)는 2,000rpm에 대한 밸브 오버랩을 나타내고, Fig. 9(b)는 3,000rpm에 대한 밸브 오버랩을 나타낸다. 이 이론공연비 연소 및 회회박 연소 조건 모두 엔진회전속도 및 부하가 증가할수록 흡배기 유동의 관성을 최대한 이용하여 체적효율 및 소기효율을 높이기 위해 밸브오버랩이 커지는 것을 알 수 있다. 특히, 2,000rpm BMEP 4~7 bar 및 3,000rpm BMEP 3~5 bar 등의 조건에서는 회회박 연소시의 밸브 오버랩 기간이 이론공연비 연소시보다 큼을 알 수 있으며 이에 따라 내부 EGR율이 증가할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 엔진 벤치 실험을 통해 BMW N53 엔진의 회회박 연소시 연료소모율 저감 성능과 회회박



(a) 2,000 rpm



(b) 3,000 rpm

Fig. 9 Comparison of valve overlap duration of homogeneous combustion and stratified combustion

연소시 점화, 분사, 흡배기밸브 개폐시기 전략을 이론공연비 연소시와 비교 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 회박 연소가 적용되는 운전영역은 엔진회전수 4,000rpm 이하의 중·저부하 조건이었다. 엔진회전수가 증가할수록 연소안정성 문제로 회박 연소 운전영역은 낮은 부하로 국한되며, 부하가 증가할수록 흡입공기량 부족으로 공기과잉률이 낮은 조건에서 운전됨을 알 수 있었다. 회박 연소시 비연료소모율은 이론공연비 연소시에 비해 11.9%~25.8% 감소하였으며, 펌핑손실 및 냉각손실 저감등이 주 원인으로 판단된다.
- 2) 회박운전시 연소안정성 확보 및 배출가스 저감을 위해 다단 연료분사하는 것으로 판단된다. 공

기과잉률 1.4~1.5의 회박 연소시에는 흡입과정 중에 연료를 1차 분사를 하고, 압축과정 중에 2차 분사하여 연소하였다. 공기과잉률이 1.5를 초과하는 초회박 연소시에는 연료를 압축말기에 3단 분사하여 연소함을 알 수 있었다.

- 3) 회박 연소시 점화시기는 이론공연비 연소시와 마찬가지로 엔진회전속도가 빨라지면 진각되었다. 그러나 동일한 엔진회전수에서 부하 증가에 따른 점화시기의 변화는 없었다. 부하는 1차 및 2차 연료분사량으로 조정되기 때문으로 판단된다.
- 4) 회박 연소시 흡기밸브 개폐시기는 이론공연비 연소시와 유사하게 엔진회전속도 및 부하가 증가할수록 체적효율을 증대시키기 위해 진각되었다. 그러나 BMEP 1~2bar의 저부하 조건에서는 체적효율증대 보다는 연소실내 연소 잔류가스를 줄여 연소 안정성을 확보할 목적으로 흡기밸브 개폐시기의 진각 정도가 이론공연비 연소시에 비해 작으며, BMEP 3~6 bar 조건에서는 체적효율 및 내부 EGR효과를 극대화 하기 위해 흡기밸브 개폐시기를 이론공연비 연소시 보다 많이 진각함을 알 수 있었다.
- 6) 회박 운전시 배기밸브 개폐시기는 이론공연비 연소시와 유사하게 엔진회전속도 및 부하가 증가할수록 팽창일을 극대화시키고, 배기유동의 관성을 이용하여 잔류연소가스를 최소화하기 위하여 지각되었다. 하지만 저속 저부하조건에서는 이론공연비 연소시에 비해 배기밸브 개폐시기가 크게 지각되어 팽창일 및 소기효율을 극대화하는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 사업의 무·저공해자동차사업단 지원 하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) Y. Jeong, J. Lee, G. Cho and H. Kim, Automotive and Environment, Soongsil Univ. Press, Seoul, 2010.
- 2) R. V. Basshuysen, Gasoline Engine with Direct

- Injection, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- 3) J. Lee, J. Kang and D. Kim, "Effect of Injection Timing and Intake Flow on In-cylinder Fuel Behavior in a GDI Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.6, pp.7-13, 2003.
 - 4) B. A. VanDerWege, Z. Han, C. O. Lyer, R. B. Munoz and J. Yim, "Development and Analysis of a Spray-guided DISI Combustion System Concept," SAE 2003-01-3105, 2003.
 - 5) T. Honda, M. Kawamoto, H. Katashiba, M. Sumida, N. Fukutomi and K. Kawajiri, "A Study of Mixture Formation and Combustion for Spray Guided DISI," SAE 2004-01-0046, 2004.
 - 6) A. C. Alkidas and S. H. El Tahry, "Contributors to the Fuel Economy Advantage of DISI Engines Over PFI Engines," SAE 2003-01-3101, 2003.
 - 7) G. A. Szekely and A. C. Alkidas, "Combustion Characteristics of a Spray-guided Direct-injection Stratified-charge Engine with a High-squish Piston," SAE 2005-01-1937, 2005.
 - 8) Ch. Schwarz, E. Schunemann, B. Durst, J. Fischer and A. Witt, "Potentials of the Spray-guided BMW DI Combustion System," SAE 2006-01-1265, 2006.
 - 9) E. Achleitner, H. Backer and A. Funaioli, "Direct Injection Systems for Otto Engines," SAE 2007-01-1416, 2007.
 - 10) BMW Group, Production Information, After-sales Training Material, 2006.
 - 11) A. C. Alkidas, "Combustion Advancements in Gasoline Engines," Energy Conversion and Management, Vol.48, pp.2751-2761, 2007.