

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0063

가솔린 엔진의 밸브타이밍 변화가 부분부하 조건에서 잔류가스량 및 연소특성에 미치는 영향

Effect of Valve Timing on Residual Gas Fraction and Combustion Characteristics at Part Load Condition in an SI Engine

김철수*, 송해박*, 이종화**, 유재석**, 조한승***
Cheolsoo Kim, Haibak Song, Jonghwa Lee, Jaisuk Yoo, Hanseong Cho

ABSTRACT

In-cylinder flow and mixture formation are key contributors to both idle stability and combustion stability at part load condition in SI engine. The real time measurements of air-fuel ratio and in-cylinder residual gas fraction are particularly important to obtain a better understanding of the mechanisms for combustion and emissions, especially during cold start and throttle transient condition.

This paper reports the cycle resolved measurements of residual gas fraction and equivalence ratio near spark plug with valve timing change and their effects on combustion characteristics at part load. The results showed that the effect of intake valve opening on the residual gas fraction was smaller than that of exhaust valve closing because of the decreases of exhaust gas reverse flow from exhaust port. The variation of equivalence ratio near spark plug increased with the increase of valve overlap, and it closely related with heat release rate and combustion stability

주요기술용어 : Valve overlap (밸브 오버랩), Residual gas fraction (잔류가스량 비율), Equivalence ratio near spark plug (스파크 플러그 주위의 당량비), Backflow of exhaust gas (배기가스의 역류)

1. 서론

엔진의 운전조건중에서 실린더로 유입되는 공기의 유동특성에 매우 큰 영향을 주는 것은 밸브

이벤트(valve event)이다. 흡기행정에서 실린더에 공급되는 공기량은 그 사이클 내에서 발생시킬 수 있는 에너지량을 결정하고, 흡기의 체적효율은 엔진에서 흡입하는 공기량의 공급상태를 표시한다. 이러한 의미에서 흡기의 체적효율은 기관의 출력상태를 결정하는 기본적인 중요한 인자가 되며, 체적효율의 향상은 밸브 개·폐시기의 조

* 회원, 아주대학교 대학원

** 회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

*** 회원, 고등기술연구원

절로서 가능하다. 실제의 엔진에 있어서 흡·배기 밸브의 개·폐시기는 작동가스의 관성과 밸브의 저항 때문에 유입과 유출이 지연되므로 이상적인 개·폐시기에 비해 일찍 열고 늦게 닫는다. 밸브 개·폐시기 가운데에서 기관 성능과 배기가스 측면에서 중요한 것은 흡기 밸브를 닫는 시기(Intake Valve Closing, IVO)와 배기 밸브를 여는 시기(Exhaust Valve Opening, EVO) 그리고 밸브 오버랩(valve overlap)이며 이들은 밸브 기구의 캠 형상과 그 조합에 따라 정해진다.

흡·배기 밸브의 오버랩 기간은 공회전에서 실린더내의 잔류가스량에 밀접하게 관련되어 연소의 안정성에 큰 영향을 미친다. 흡기압이 낮은 공회전이나 낮은 부하상태에서 밸브 오버랩 기간이 길어지게 되면 상대적으로 실린더내 압력보다 높은 배기 포트측에서 실린더내로의 배기가스 역유동이 발생하거나 배기효율의 감소로 실린더에는 많은 양의 잔류가스가 남게된다. 이것은 연소기간의 길어짐 및 연소변동의 증가를 가져오게 될 것으로 판단한다. 배기 밸브의 개폐시기도 흡·배기 밸브의 오버랩 기간과 연관이 있으며 특히, 저속 저부하에서 실린더내의 잔류가스량에 밀접하게 관련되어 연소의 안정성에 큰 영향을 준다.¹⁻⁷⁾

공회전 안정성 향상과 부분부하에서 연소의 안정을 위해서는 연소 및 유동의 개선 그리고 혼합기의 개선 등과 같은 연구가 중요하다. 특히, 실린더내 혼합기의 특성과 연관있는 당량비 및 잔류가스량의 변화에 따른 영향에 대한 연구가 필요하다. 엔진의 운전조건에 따른 실린더내 혼합기의 특성이 연소에 미치는 영향을 관찰하기 위해서는 운전조건에 따른 흡입공기의 거동 및 연료거동에 대한 이해와 이전 사이클의 영향에 대한 복합적인 해석이 뒤따라야 한다. 그러므로 본 연구는 운전자의 사용빈도가 많은 부분부하 상태의 운전영역에서 밸브 타이밍 변화에 따라 실시간으로 실린더내 잔류가스량과 스파크 플러그 주위의 국부 당량비 거동 특성을 측정하여 고찰하며 아울러 엔진의 연소특성에 주는 영향에 대하

여 연구한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 엔진은 승용차용 4기통 1.5리터 DOHC 가솔린 엔진으로 제원은 Table 1에 나타낸 것과 같다. Figure 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 엔진에는 4번 실린더에 압전형 압력센서(Kistler, 6051A)를 설치(플러쉬 마운팅)하여 엔코더 신호에 따라 크랭크 각도 1° 별로 압력을 측정할 수 있도록 하였으며, 흡기압을 측정하기 위하여 동 실린더의 플레넘 챔버(plenum chamber)에 흡기압 센서(Kistler, 4045A)를 설치하였다. 점화시기를 조절하기 위하여 점화시기 조절장치(IC5200)를 설치하였다. 또한 4번 실린더의 배기밸브로부터 200 mm 떨어진 부분에 UEGO 센서(Mexa-110 λ, Horiba)를 설치하였으며, 프로판가스의 연료량은 마이크로 미터링 밸브(micro metering valve)를 설치하여 조절하였다.

Table 1 Engine Specifications

	Specifications
Engine type	4 cylinder, DOHC, 16 valves
Bore	76.5 mm
Stroke	81.5 mm
Displacement volume	1498 cm ³
Compression ratio	9.5 : 1
Valve Timing IVO(BTDC)/IVC(ABDC) EVO(BBDC)/EVC(ATDC)	8/42 42/8

엔진의 운전조건에 따라 실시간으로 실린더내의 미연탄화수소 농도를 측정하기 위하여 응답성이 빠른 Fast Response FID(HFR400, Cambustion)를 이용하였다. Fast Response FID의 운전조건 선정 및 교정 방법(calibration)은 참고문헌^{8, 9, 10)}에서 이미 밝힌바 있어 본 논

문에서는 생략하였다.

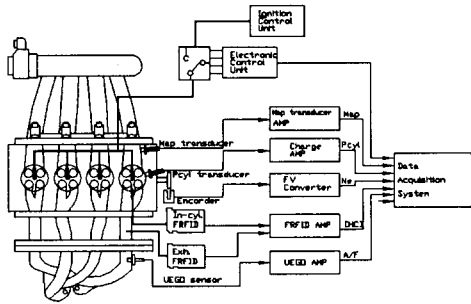


Fig. 1 Schematic diagram of test engine

실험에서 사용한 연료는 프로판(C_3H_8) 가스이며 공기와의 충분한 혼합과 운전조건에 따라 변화하는 흡기 매니폴드 압력을 고려하기 위하여 트로틀 밸브로부터 약 400 mm 상류 부분인 공기 정화기 입구에서 프로판 가스를 공급하였다. 엔진의 운전조건은 사용빈도가 높은 영역인 1500 RPM, BMEP 1.5 bar, 그리고 당량비는 이론 당량비에서 실험하였다.

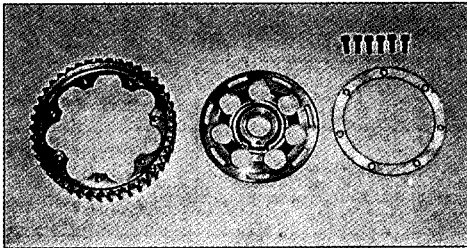


Fig. 2 (a) Cam sprocket for cam-phasing

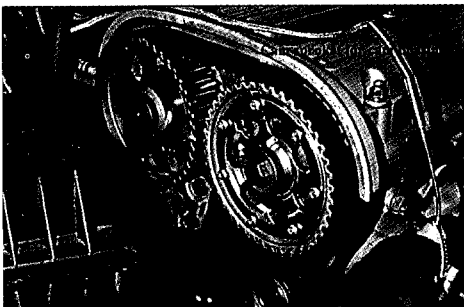


Fig. 2 (b) Installation cam sprocket

또한 밸브의 개폐시기 변경을 위하여 Figure 2와 같은 가변캠을 제작하였다. 밸브의 개도 기간(valve open duration)은 모두 230° CA이며 밸브 리프트 경로(valve lift profile)도 동일하다.

3. 실험결과 및 해석

배기 밸브의 닫힘시기는 흡기 밸브의 열림시기와 함께 밸브 오버랩에 관련된 중요한 인자이다. 이것은 밸브 오버랩이 직접적으로 잔류가스량에 영향을 미치며 아울러, 잔류가스량의 증가는 연소기간의 길어짐 및 연소변동의 증가를 가져오기 때문이다.

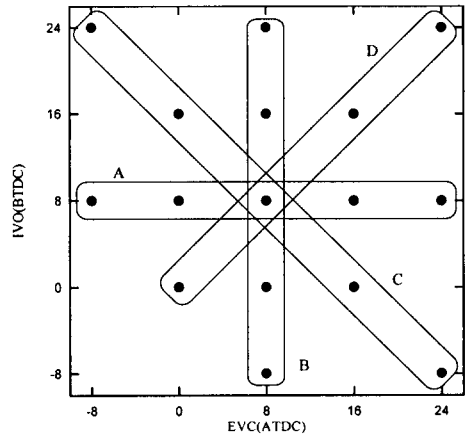


Fig. 3 Valve timing test conditions

Figure 3은 밸브의 개폐시기 변경에 관한 실험 조건을 나타낸 것이다. 그림에서 (A) 경우는 흡기 밸브 열림시기를 고정하고 배기 밸브의 닫힘시기를 변화한 것이며 (B) 경우는 반대로 배기 밸브 열림시기를 고정하고 흡기 밸브의 닫힘시기를 변화한 것이다. (C) 경우는 밸브 오버랩 기간을 16° CA로 고정하면서 밸브 타이밍을 변화한 것이고 (D) 경우는 밸브 오버랩 기간을 변화한 것이다.

Figure 4는 흡기 밸브 타이밍을 고정하고 배기 밸브 열림시기를 이동하면서 밸브 오버랩 변화에 따른 잔류가스량 분율에 대한 측정값을 나

타낸 것이다. 밸브 오버랩이 증가함에 따라 상대적으로 실린더내 압력보다 높은 배기 포트에서 실린더내로의 배기가스 역유동이 발생하고, 배기 효율의 감소로 실린더에는 많은 양의 잔류가스가 남게된다.

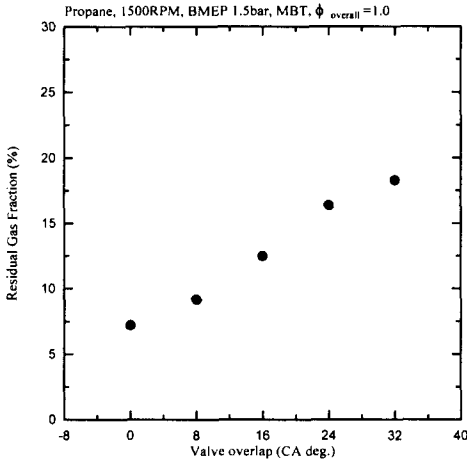


Fig. 4 Residual gas fraction as a function of overlap with exhaust valve cam-phasing

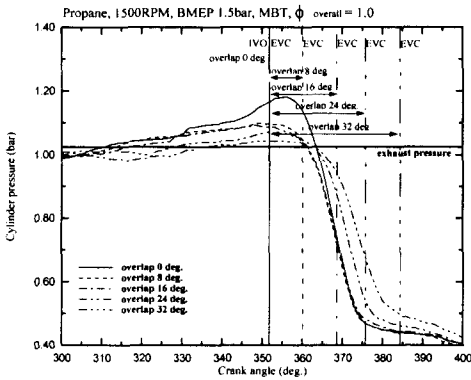


Fig. 5 Cylinder pressure as a function of crank angle with exhaust valve cam-phasing

Figure 5는 밸브 오버랩 기간의 실린더 압력을 나타낸 그림이다. 배기 압력과 실린더 압력의 차이가 작을수록 배기포트에서 실린더로 역류하는 기연가스의 양이 줄어들게 된다. 밸브 오버랩이 0° CA인 경우 배기 밸브는 흡기 밸브가 열림과 동시에 닫히기 때문에 배기 포트에서 실린더로

역류하는 시간적인 여유가 없고 실린더 압력 또한 배기 압력보다 높기 때문에 역류하는 기연가스는 없다. 밸브 오버랩 8° CA와 16° CA의 실린더내 압력이 흡기 압력까지 떨어지는 기올기는 거의 같지만 배기 밸브 닫힘시기가 점차 늦어짐에 따라 배기 압력과 차이로 배기 포트에 존재하는 기연가스가 실린더로 역류하는 양은 증가함을 알 수 있다. 전반적으로 배기밸브 닫힘시기가 TDC이후로 갈수록 기연가스가 실린더로 역류하는 양이 증가함을 알 수 있다. 이는 곧 잔류가스량의 증가를 나타낸다.

잔류가스는 이전 사이클의 기연가스가 미처 빠져나가지 못하고 다음 사이클에 남아있는 것이므로 자기 자신은 타지 않고 열을 흡수하는 역할을 한다. 그러므로 잔류가스량이 많을수록 연소의 최고 온도는 낮아지고 화염전파를 방해하여 연소기간이 늘어나게 된다. 이러한 영향을 Figure 6 과 Figure 7에 나타냈다.

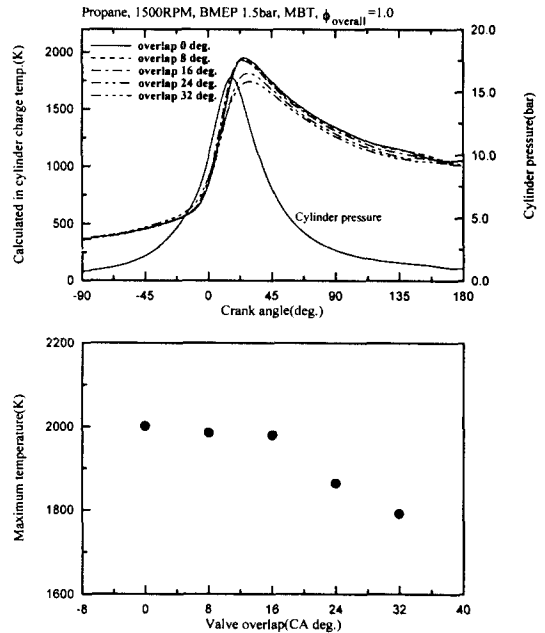


Fig. 6 Calculated in cylinder charge temperature and maximum temperature as a function of overlap with exhaust cam-phasing

먼저 Figure 6에는 측정된 실린더내 압력과 1

차원 오리피스 모델을 이용하여 실린더로 유입된 신기량을 구하고 이로부터 계산된 실린더 내의 작동유체의 온도를 나타내었다. 밸브 오버랩 0° CA에서 16° CA까지는 큰 차이는 없으나 밸브 오버랩 24° CA와 32° CA에서는 기본 밸브 타이밍에 대하여 각각 약 120 K, 200 K의 온도 저하현상이 보인다. 이것은 잔류가스량의 증가에 의하여 나타난 현상으로 판단한다.

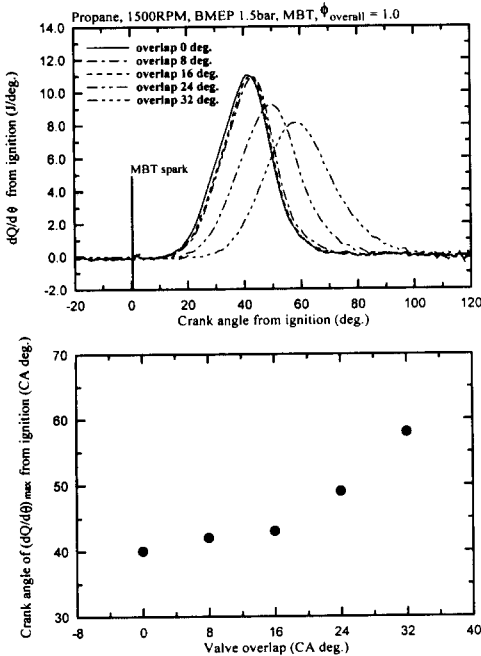


Fig. 7 Heat release rate and crank angle of peak heat release rate as a function of overlap with exhaust cam-phasing

Figure 7은 크랭크 각도에 따른 열발생율과 최대 열발생율이 발생하는 위치를 점화시기로부터의 기간으로 나타낸 것이다. 그림에서 나타나듯이 밸브 오버랩이 증가할수록 열발생율의 시작점이 점화시기로부터 멀어지고 있으며, 또한 열발생율의 기울기도 완만해지는 경향을 보이고 있다. 아울러 최대 열발생율이 발생하는 크랭크 각도가 점화시기로부터 점차 멀어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 잔류가스량 증가의 영향에 의하여 화염전파속도가 늦어지고 있음을 의미한다.

Figure 8은 스파크 플러그 주위의 국부 당량비의 빈도수를 나타낸 것으로, 밸브 오버랩이 증가할수록 농후한 국부 당량비의 빈도수가 낮아지고 또한 국부 당량비의 분포가 넓어지고 있다. 이것은 초기 화염발달기간에 영향을 미친다.

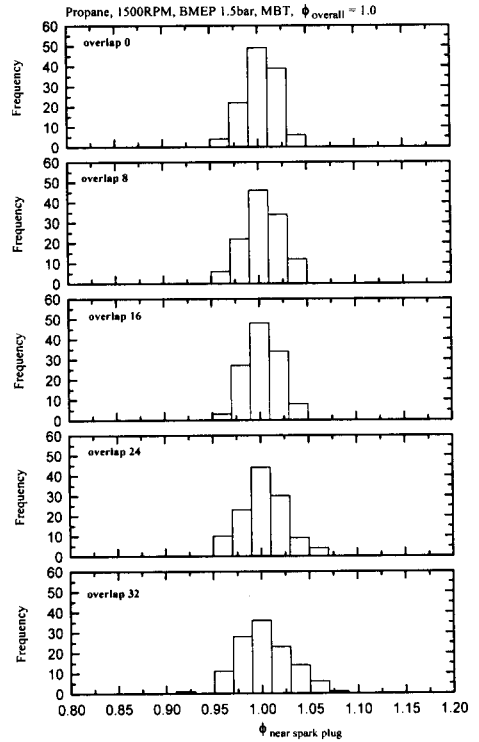


Fig. 8 Histogram of equivalence ratio near spark plug as a function of overlap with exhaust cam-phasing

Figure 9는 점화시기, 질량연소율 10, 50, 그리고 90 % 일때의 크랭크각과 연소기간을 나타낸 그림이다. 최적 점화시기(MBT)의 거동을 살펴보면, 밸브 오버랩이 증가할수록 점화시기가 진각되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 밸브 오버랩이 증가할수록 실린더내에 남아있는 잔류가스량이 증가하기 때문에 기연가스의 온도가 낮아지고 화염전파속도가 낮아짐으로서 초기 화염발달기간은 점점 길어지고 전체적으로 연소 기간이 길어지는 것이다. Figure 10은 밸브 오버랩에 따른 사이클 변화계수(COV_{imep})를 나타낸 것이다. 밸브

오버랩 증가에 따라 COV_{imep} 는 증가하는 경향을 보이고 있다.

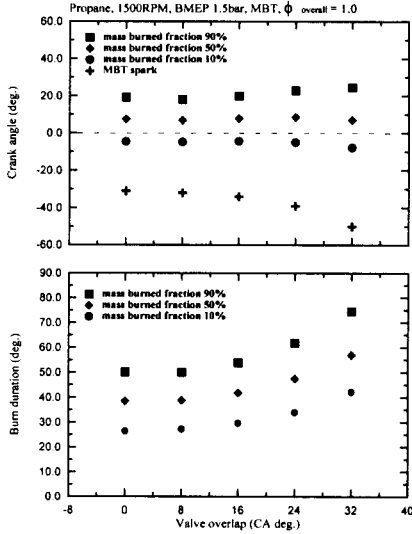


Fig. 9 Crank angle of mass burned fraction 10, 50, 90 % and burn duration as a function of overlap with exhaust cam-phasing

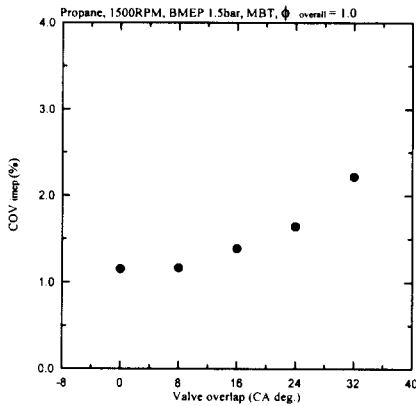


Fig. 10 COV_{imep} as a function of overlap with exhaust cam-phasing

Figure 11에서 Figure 15까지는 Figure 3에 표시한 실험 조건에 대하여 측정된 실험결과를 나타낸 것이다. 그림들은 각각 잔류가스량 분율, 최대 열발생율, 스파크 플러그 주위의 국부 당량비의 표준편차, 점화시기부터 질량연소율 90 %

까지의 연소기간 그리고 COV_{imep} 를 나타낸 것이다. 먼저 Figure 11을 살펴보면, 배기 밸브 타이밍 변화와 흡기 밸브 타이밍을 변화시켰을 때, 두 경우 모두 밸브 오버랩이 증가할수록 실린더 내 잔류가스량이 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 상대적으로 배기 밸브 타이밍을 변화시켰을 경우가 잔류가스량의 변화량이 더 컸으며 이것은 밸브 오버랩을 이루는 배기 밸브 닫힘시기와 흡기 밸브 열림시기 중 실린더내 잔류가스량 변화에 큰 영향을 미치는 것은 배기 밸브 닫힘시기를 의미한다. 밸브 오버랩이 증가할수록 상대적으로 흡기 밸브가 열리기 이전에 실린더 내에 남아있는 잔류가스량의 영향 보다 배기포트에서 실린더내로 역류하는 기연가스량의 영향이 증가함을 알 수 있다. 아울러, 밸브 오버랩 중심이 상사점 전에서 상사점 후로 이동할수록 잔류가스량은 증가하였다.

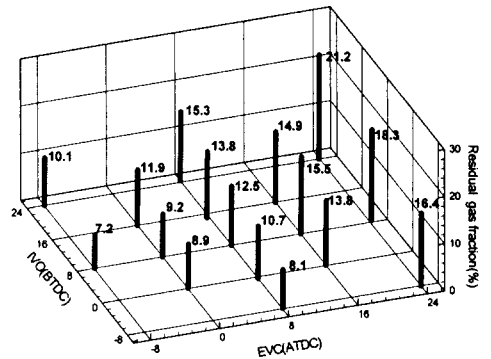


Fig. 11 Effect of valve timing on residual gas fraction

Figure 12는 최대 열발생율을 나타낸 것이다. 밸브 오버랩이 커질수록 잔류가스량 증가로 인하여 연소는 점차 slow burn이 되며 최대 열발생율은 감소하게 된다. Figure 13은 스파크 플러그 주위의 국부 공연비 편차를 나타낸 것이다. 국부 공연비 편차도 흡기 밸브 열림시기 보다는 배기 밸브 닫힘시기 변화에 더 큰 영향이 있으며 배기 밸브 닫힘시기가 늦어질수록 증가하고 있다.

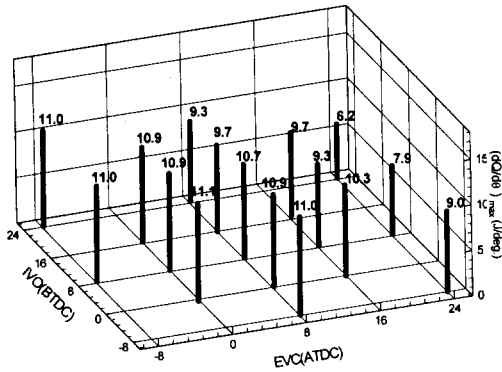


Fig. 12 Effect of valve timing on maximum heat release rate $(dQ/d\theta)_{max}$

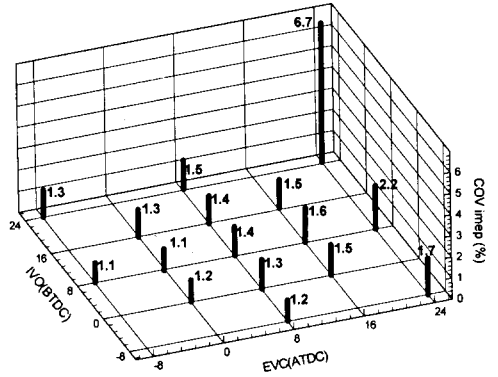


Fig. 15 Effect of valve timing on coefficient of variation $(COV)_{imep}$

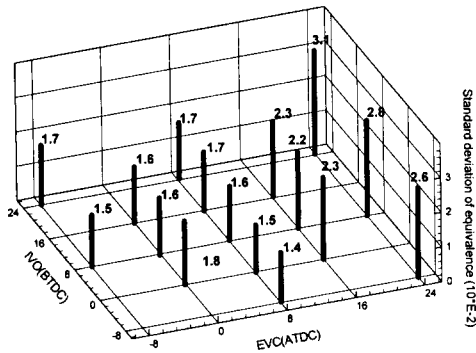


Fig. 13 Standard deviation of equivalence ratio near spark plug with valve timing

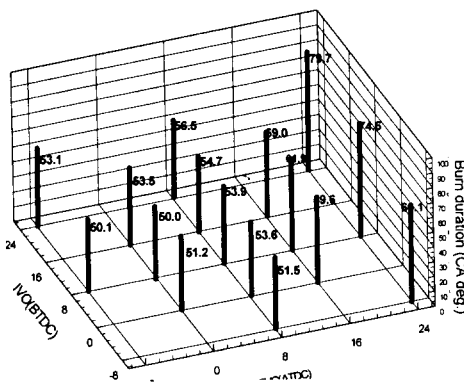


Fig. 14 Effect of valve timing on burn duration

상승된 이유로 밸브 오버랩이 증가할수록 내부 EGR(internal EGR)로 알려진 잔류가스량의 증가로 인하여 연소기간은 길어지며, 아울러 연소가 불안정해진다. 이를 각각 Figure 14, Figure 15에 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 스파크 점화 엔진의 부분부하조건에서 밸브개폐시기 변화에 따른 실린더내의 잔류가스량 및 연소특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 아울러 측정된 스파크 플러그 주위의 미연탄화수소 농도로부터 사이클별 실린더내 공연비 분포를 추정하여 이들이 연소에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실린더내 잔류가스량은 밸브 오버랩이 증가함에 따라 증가한다. 동일한 밸브오버랩 기간인 경우에는 배기밸브 닫힘시기가 늦어질수록 즉 밸브 오버랩 중심이 상사점 이후로 갈수록 배기밸브에서 실린더로의 역유동이 커져 잔류가스량이 늘어나게 된다. 이것은 밸브 오버랩을 이루는 배기밸브 닫힘시기와 흡기밸브 열림시기를 상대적으로 잔류가스량에 큰 영향을 미치는 것은 배기밸브 닫힘시기임을 알 수 있다.

2) 전체적으로 밸브 오버랩 기간이 일정한 크랭크각도(24° CA)을 넘어서면 잔류가스량이 급격히 증가하고, 스파크플러그 주위의 국부공연비의 거동에 대한 표준편차가 증가한다. 이에 따라 계산한 실린더 내의 작동유체의 온도를 보면 밸브 오버랩 0° CA에서 16° CA까지는 큰 차이는 없으나 밸브 오버랩 24° CA와 32° CA에서는 기본 밸브 타이밍에 대하여 각각 약 120 K, 200 K의 온도 저하현상이 보이고, 최고 열발생을 위치가 뒤로 후퇴하면서 연소기간이 길어지게 되고 연소 불안정을 초래한다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원과 함께 수행되었습니다. 도움을 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) T. W. Asmus, "Valve Events and Engine Operation," SAE Paper, 820749, 1982.
- 2) M. Siewert, "How Individual Valve Timing Events Affect Exhaust Emissions," SAE Paper 710609, 1971.
- 3) C. Gray, "A Review of Variable Engine Valve Timing," SAE paper, 880386, 1988.
- 4) T. H. Ma, "Effect of Variable Engine Valve Timing on Fuel Economy," SAE Paper, 880390, 1988.
- 5) F. Galliot, et. al., "In-Cylinder Measurements of Residual Gas Concentration in a Spark Ignition Engine," SAE Paper 900485, 1990.
- 6) P. Kreuter, et. al., "Strategies to Improve SI-Engine Performance by Means of Variable Intake Lift, Timing and Duration," SAE Paper 920449, 1992.
- 7) B. Johansson and F. Soderberg, "The Effect of Valve Strategy In-Cylinder Flow and Combustion," SAE Paper 960582, 1996.
- 8) 송해박, 조한승, 이종화, 이귀영, "스파크 점화기관에서 고속응답 FID를 이용한 실린더내 잔류가스량 측정에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집 제6권 제1호, 1998.
- 9) H. S. Cho, J. H. Lee and K. Y. Lee, "Measurements of HC Concentration near Spark Plug and Its Effects on Combustion," SAE Paper 981431, 1998.
- 10) Cambustion Ltd., HFR 400 Fast Response FID User Manual., 1995.