

스파크 점화기관의 냉시동시 배기밸브 타이밍 및 점화시기 변화에 따른 배기가스 온도 및 연소안정성의 변화

김득상* · 박영준 · 양창석 · 조용석

국민대학교 자동차전문대학원

Exhaust Gas Temperature and Combustion Stability Variation due to Changes in Spark and Exhaust Valve Timings

Duksang Kim* · Youngjoon Park · Changsuck Yang · Yong-Seok Cho

Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 10 November 2004 / Accepted 9 May 2005)

Abstract : The improvement of combustion stability is very important because it is closely related to the exhaust emission concentrations as well as the fuel consumption during the cold start of SI engine. In our previous studies, the spark and exhaust valve timings were retarded individually from the baseline case to increase the exhaust gas temperature for fast warmup of a close-coupled catalyst. In the study, it was found that combustion stability during cold start becomes worse when the valve timing is retarded from the baseline conditions. The spark and valve timings were simultaneously changed from the baseline conditions to find out the variation of combustion stability during cold start of an SI engine. Through the study, retarded spark timing by 5° CA helps improvement of COV_{imep} by 2% and 15°C increase of exhaust temperature. Retarded exhaust valve timing makes the exhaust gas temperature increase by 30°C, but it also deteriorates the COV_{imep} by 1%.

Key words : Combustion stability(연소안정성), COV_{imep}(도시평균유효압력 사이클 변동계수), Exhaust gas temperature(배기가스온도), Cold start(냉시동), Catalyst warmup(촉매예열), Valve timing(밸브타이밍), Spark timing(점화시기)

1. 서론

전 세계적으로 자동차로부터 배출되는 유해물질에 대한 규제가 엄격해지고 있는 가운데 각 나라마다 배기가스 규제법을 점차 강화시키고 있으며, 이러한 규제에 대응하기 위해서 보다 더 효과적인 배기 저감 기술이 요구되고 있다.

최근의 가솔린 기관에서의 배기 저감 기술은 삼원촉매장치에 크게 의존하고 있는 실정이다. 그러

나 삼원촉매장치는 예열이 충분하지 않은 상태에서 효과적인 배출가스의 저감을 기대할 수 없으며, 촉매의 빠른 예열을 위하여 근접 장착식 촉매(CCC) 및 배기시스템의 열용량 저감, air-gap 배기다기관 같은 후처리 기술들이 연구되어 왔다. 이에 더불어 발달된 기관 제어 기술은 시동시 배기가스 온도 상승을 위한 새로운 제어 방식의 개발을 촉진시키고 있다. 한 예로, 냉시동시 점화시기를 지각시키는 경우 배기가스의 온도가 상승하는 점을 이용하여 촉매 예열성을 향상시키는 기술이 소개되고 있다.¹⁾ 또한 배기가스의 온도상승을 위한 배기

*To whom correspondence should be addressed.
lordduke@kookmin.ac.kr

밸브 타이밍의 변화도 검토되고 있다. 그러나 냉시동시 점화시기와 밸브 타이밍의 변화는 연소안정성 측면에서 부정적인 영향을 미칠 수도 있는 것으로 관찰되었다.²⁾ 가솔린 기관에서의 냉시동시 연소안정성은 운전의 안락성 뿐만 아니라 연료소비를 및 배기가스의 배출농도에 막대한 영향을 미친다. 일반적으로 연소의 안정성과 관련된 인자는 많지만 그 중에서도 직접적인 요인은 사이클 변동에 기인한다.³⁾ 기존 연구에 따르면 냉시동시 및 공전시 기관회전수 변동에 영향을 미치는 요인으로는 연료분사시기, 점화시기, 공연비의 변화 등을 들 수 있고, 공전시 평균유효압력의 분포특성은 정규 분포에서 크게 벗어나기 때문에 그 특성효과가 다른 운전조건의 경우와 상이하므로 연구 보완될 필요가 있는 것으로 생각된다.^{4,5)} 따라서 촉매예열성 향상을 위한 냉시동시 제어조건 변화는 연소안정성 변화와 병행하여 관찰되어야 할 필요가 있다고 생각된다.

본 연구에서는 가솔린 기관의 냉시동시 배기밸브 타이밍 및 점화시기 변경을 통한 배기가스의 온도 변화를 관찰하고자 하며, 특히 이러한 변화에 의한 연소안정성의 변화를 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에는 1975cc, 4실린더 DOHC의 승용차용 가솔린 기관을 사용하였다. 기관의 주요 제원은 Table 1에 정리한 바와 같으며 Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

실험에 사용된 압력센서는 실험의 진행에 따라 전압 drift가 발생되었으나, drift에 의한 zero 값은 시간에 따라 점차 낮아지는 반면, span 값은 계속 일정한 상태를 유지하는 특성을 보이므로,⁶⁾ zero 압력을 보상하기 위해 Kistler 4045A 절대압 센서를 흡기다기관에 장착하여 흡기 챔버 내부의 압력을 측정하였다. 흡기챔버 내부의 압력은 흡입과정 동안 연소실 내부의 압력과 거의 같으므로,⁷⁾ 이 절대압 센서에 의한 흡기 부압을 연소압력 센서의 흡기압력으로 환산하여 zero 신호를 보상하고 이를 기초로 연

Table 1 Specification of test engine

Items	Secification
Bore	82mm
Stroke	93.5mm
Compression ratio	10.3
Idle speed	800 ± 100 rpm
Spark timing	BTDC 10° ± 5°
Itake timing	BTDC 8° / ABDC 40°
Exhaust timing	BBDC 50° / ATDC 10°
Valve overlap	18°

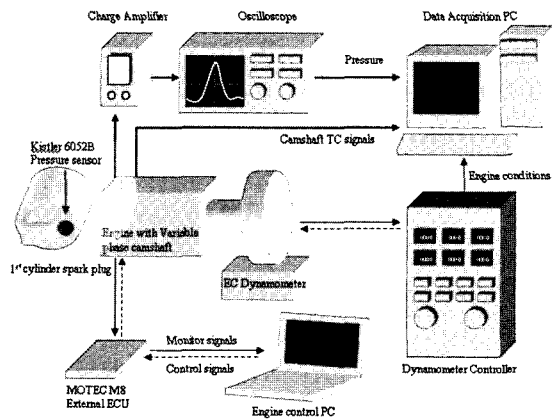


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

소실 압력신호의 span 값을 이용하여 연소실 압력을 측정하였다.

2.2 연소진단 프로그램

Fig. 2는 본 연구에서 연소압 측정 결과를 분석하기 위해 구성된 연소 진단 프로그램의 메인화면을 나타낸다. 화면 좌측 상단에는 실험기관의 사양을 입력하고 좌측 하단에는 흡기압력 및 온도, 압력 측정 환산 전압 등의 측정 조건값을 입력한다. 압력센서를 통해서 측정된 실험치는 데이터 취득장치에 의해 측정된 후 spreadsheet 파일로 저장되며, 이 값은 본 연소 진단 프로그램을 통해 p-θ선도, p-V 선도, log p-logV, 그리고 열병출률 곡선 등으로 계산된다. 또한 p-V 선도로부터 사이클 적분을 통해 각 사이클별 imep, imep 평균값 및 COV_{imep} 등을 계산하도록 개발되었다. 본 실험에서 기관 연소압력은 20사이클 단위로 10회 측정되었으며, 연소안정성의 평가는 COV_{imep}를 이용하였다. COV_{imep} 계산식은 다음

과 같으며, 이 값은 imep의 표준편차를 imep 평균값으로 정규화한 후 퍼센트 단위로 표현한 것이다.

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{imep} \times 100(\%) \quad (1)$$

COV_{imep}가 낮은 것은 각 사이클의 imep 변동이 적은 것을 의미하여, 이것은 결국 각 사이클당 연소가 안정적으로 지속된 것으로 볼 수 있다.

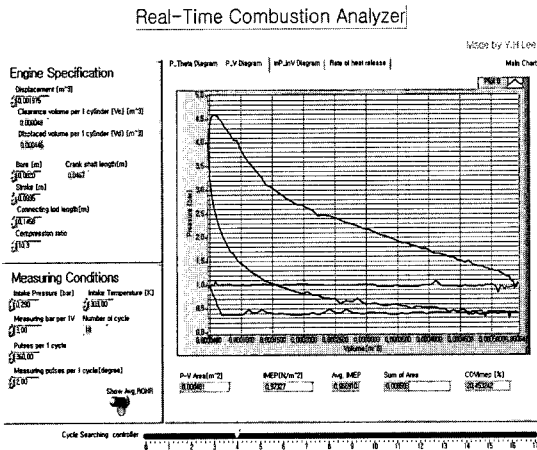


Fig. 2 Main screen of combustion analyzer

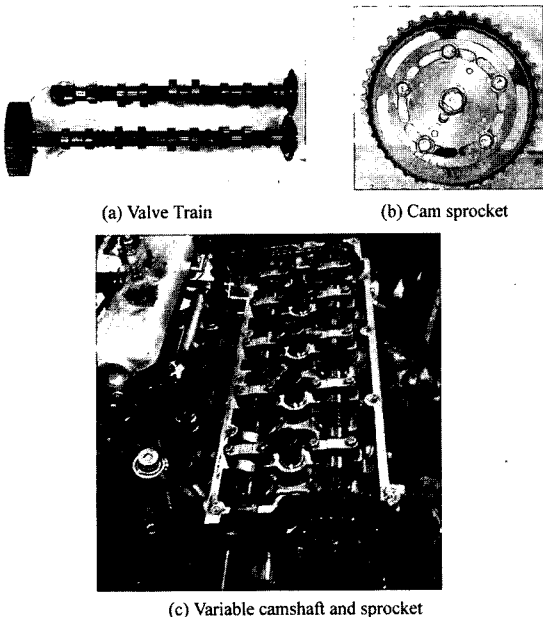


Fig. 3 Variable timing camshaft installed on the cylinder head

2.3 밸브 타이밍 및 점화시기 조절

밸브 타이밍의 조절은 가변 캠샤프트를 사용하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 가변 캠샤프트의 사진이다. 본 가변 캠샤프트는 캠 스프로킷 및 체인 폴리와 캠축이 분리될 수 있는 구조로 되어 있으므로, 캠 프로파일은 원래 기관에서 사용하는 캠과 동일한 형태이나 배기밸브의 개폐시기를 3°C 단위로 자유롭게 조절할 수 있다. 또한 캠축은 실린더 헤드에 장착된 상태에서도 피스톤의 위치 및 흡기 캠샤프트와 독립적으로 분리될 수 있으므로 헤드에 장착된 상태에서 실험 조건을 변화시킬 수 있다.

점화시기 변경 및 연료공급량 제어는 programmable ECU인 Motec M8 ECU에 의해 수행되었다. 연료공급량은 기초실험을 통해 냉시동 및 공회전구간의 연료공급 맵을 M8 ECU에 별도로 지정하였고 각 실험 조건에서 동일한 연료공급 맵을 적용하였다. 점화시기 및 연료공급 맵은 M8 ECU의 제어용 PC에서 설정되며, 설정된 정보는 시리얼 통신으로 M8 ECU에 인가된다.

2.4 실험조건

모든 실험에서 기관은 냉시동 조건하에서 시동되었으며, 이때의 냉시동 조건은 기관의 냉각수 온도가 20°C가 된 이후 1시간 이상 충분히 냉각시키는 것으로 설정하였다. 실험시 기관은 시동 후 300초간 공회전 상태를 지속시켰다. 예비실험 결과 냉시동 후 약 200초 이상 공회전한 경우 배기가스 온도 및 기관 회전수가 안정되는 것을 관찰하였다. 따라서 200초 후에 연소실의 압력을 측정하여 초기 시동구간에서 발생할 수 있는 불안정한 연소특성 변동요소가 어느 정도 해소된 이후에 점화시기 및 밸브 타이밍 변화에 의한 압력 변동을 관찰하고자 하였다.

밸브 타이밍과 점화시기를 변경한 각각의 조건에서 1번 실린더 내의 압력데이터를 각각 5회씩 취득하였으며, 앞서 소개된 연소진단 프로그램으로 COV_{imep} 값을 계산하였다. 한 케이스에 대한 대표값은 이 5개의 COV_{imep}의 평균값이다. 점화시기는 기관의 기본값인 BTDC 10°를 기준으로 5 CA씩 변경하여 BTDC 5°(retard) 및 BTDC 15°(advance)인 경우를 대상으로 실험하였으며, 배기밸브 타이밍은

기관 기본값인 BBDC 50°를 기준으로 BBDC 56° 조건인 +6° CA (advance) 그리고 BBDC 44° 조건인 -6° CA (retard) 조건에서 수행하여 연소안정성을 비교하였다. 그리고 온도측정은 기본값에서 BBDC 62° 조건인 +12° CA (advance) 그리고 BBDC 38° 조건인 -12° CA (retard)에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배기가스 온도변화 특성

Fig. 4는 배기밸브 열림시기 변경에 따른 배기가스 온도 변화를 시간별로 나타낸 것으로 이때 점화시기는 BTDC 10°로 일정하다.

Fig. 5는 배기밸브 타이밍을 기준상태로 고정하고 점화시기를 진각 및 지각시켰을 때 배기가스의

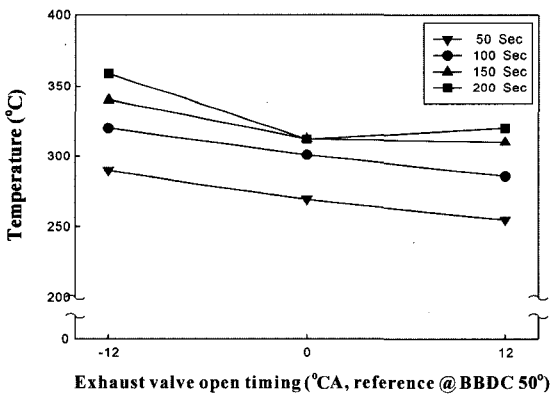


Fig. 4 Variation of exhaust gas temperature with the change of exhaust valve open timing (spark @ BTDC 10°)²⁾

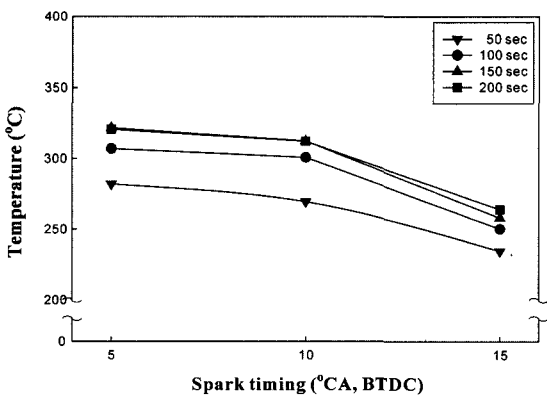


Fig. 5 Variation of exhaust gas temperature with the change of spark timing (exhaust valve open @ BBDC 50°)²⁾

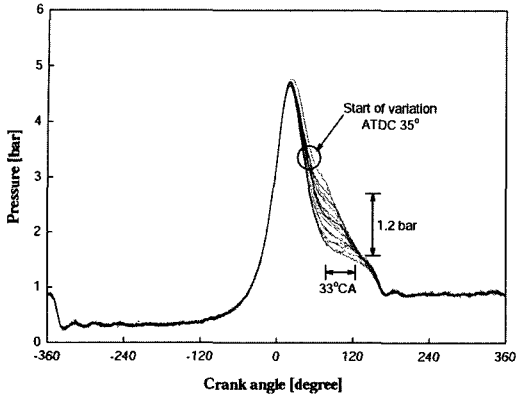
온도 변화를 시간별로 나타낸 그래프이다. Fig. 4를 통해, 밸브타이밍이 지각되는 경우 배기가스의 온도가 150초 이전의 동일 시점에서 약 30°C 가량 상승하며, 진각되는 경우 동일한 비율로 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5를 통해 점화시기가 baseline에서 지각됨에 따라 배기가스의 온도가 15°C 가량 상승하였으며, 진각될 경우에는 보다 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

밸브 타이밍 변화에 따른 이와 같은 현상은 밸브 오버랩 구간의 변화에 의한 잔류가스량의 변화와 이에 따른 연소실의 연소특성변화에 기인하여, 점화시기 변화에 따른 현상은 연소 개시시점의 변화로 연소실 내의 화염지속기간이 팽창행정 말기까지 늦춰진 영향으로 생각된다.²⁾

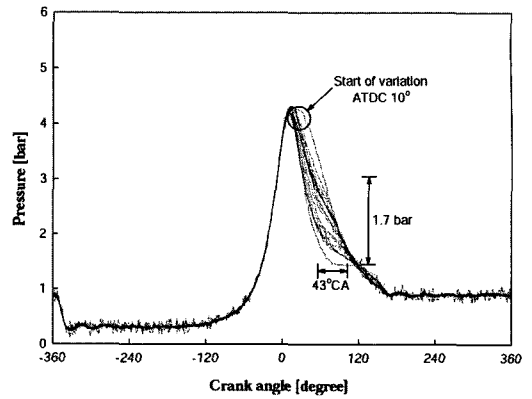
3.2 연소안정성 변화 특성

Fig. 6은 점화시기를 기준상태인 BTDC 10°로 고정시키고 배기밸브 열림시기를 변경하여 20개의 사이클의 압력선도를 중첩하여 나타낸 그래프이다. 그래프의 분석을 용이하기 위하여 변동시작점(Start of Variation), 최대 압력 변동량 및 최대 크랭크 앵글 변동량을 지정하였다. 변동시작점은 압력선도의 한 크랭크각 지점에서 압력값의 평균과 표준편차의 비가 5% 이상으로 나타나기 시작하는 시점으로 정의하였다. 그리고 최대 압력 변동량은 동일 크랭크 앵글에서의 최대 압력차를 의미하며, 최대 크랭크 앵글 변동량은 동일 압력에서 최대 크랭크 앵글의 차를 의미한다.

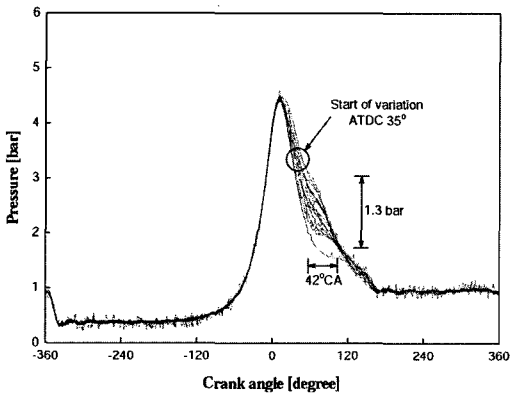
흡기밸브의 작동시점 및 캠 프로파일의 변화 없이 배기밸브 타이밍만을 변화시킨 경우 다음 사이클에 영향을 줄 수 있는 대표적인 변화는 블로다운의 시점과 밸브 오버랩 구간의 변화를 들 수 있다. 일반적인 운전상태에서 밸브 오버랩은 신기 유입이 잔류가스의 배출을 돕는 의미를 지니는 반면, 초기 시동시와 같이 흡기의 부압이 강한 조건에서는 오히려 연소실 압력이 흡기압보다 크게 높아 배기가스의 일부가 오히려 흡기관 쪽으로 이동하게 되고 이 가스는 흡기과정 동안에 연소실로 유입되어 연소실 내부의 잔류가스량을 증가시키게 되는 역류현상이 일어난다.⁹⁾



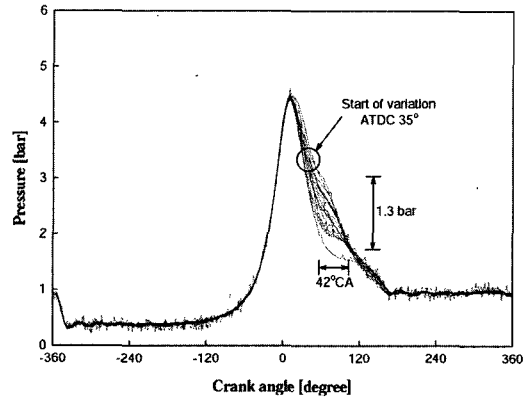
(a) Spark timing : BTDC 10°, exhaust valve open : BBDC 56°(+6)



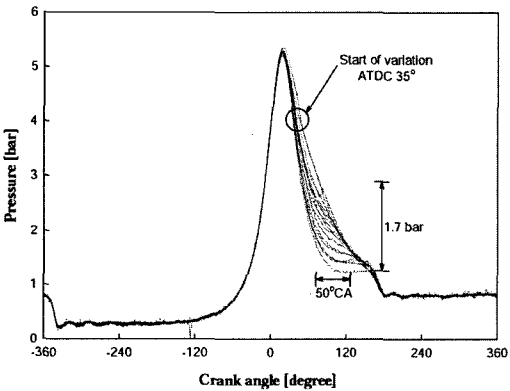
(a) Spark timing : BTDC 15°(+5°), exhaust valve open : BBDC 50°



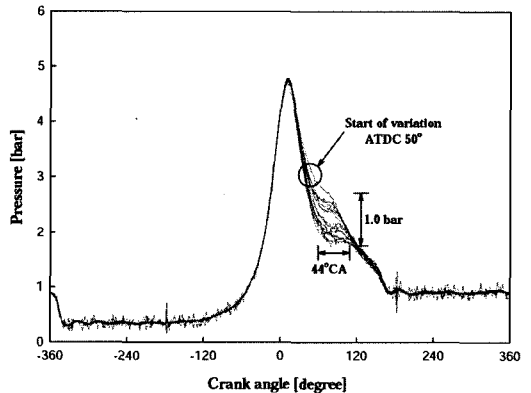
(b) Spark timing : BTDC 10°, exhaust valve open : BBDC 50°(base)



(b) Spark timing : BTDC 10°, exhaust valve open : BBDC 50°(base)



(c) Spark timing : BTDC 10°, exhaust valve open : BBDC 44°(-6)



(c) Spark timing : BTDC 5°(-5°), exhaust valve open : BBDC 50°

Fig. 6 Pressure variation of cylinder with the change of exhaust valve timing (spark timing @ BTDC 10)

Fig. 7 The pressures variation of cylinder with the change of spark timing (exhaust valve open @ BBDC 50)

이에 따라 시동시 밸브 오버랩의 증가는 연소실의 잔류가스량을 높이는 효과를 일으킨다고 볼 수 있다. 또한 블로다운 시점의 경우, 밸브 타이밍을 지

각시키는 경우 연소실 압력이 상대적으로 더 낮은 상태로 블로다운이 일어나므로 배기과정의 효율성이 더욱 악화된다고 볼 수 있다.

배기밸브 열림 시점을 기준 상태에서 앞당긴 (a)의 경우, 밸브 오버랩 구간이 짧아지고 블로다운이 빠르게 발생하여 잔류가스량이 기준 상태보다 감소하여 사이클의 변동성이 줄어들어 결국 연소안정성 면에서 좋은 효과를 나타낸 것으로 관찰된다.

반대로, 배기밸브 열림 시점을 늦춘 (c)의 경우 밸브 오버랩구간이 길어지고 블로다운 효과가 약해지므로 잔류가스량이 증가하여 연소안정성을 저해한다. 모든 그래프에서 변동시작점은 ATDC 35°로 동일하다. 그러나 최대 압력 및 크랭크 앵글 변동량은 밸브타이밍을 진각시킬수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 결국 배기밸브 타이밍이 진각되면 연소실 내의 잔류가스가 감소하며 이에 따라 사이클 변동을 감소시키고 화염 속도를 빠르게하여 연소안정성을 향상시키는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 배기밸브 타이밍을 기준값인 BBDC 50°로 고정시키고 점화시기를 변경하여 20사이클의 압력선도를 중첩하여 나타난 그래프이다. 점화시기를 지각시킬수록 변동시작점이 연소 후반부로 늦춰지는 것을 볼 수 있다. 가솔린 기관에서 사이클 변동성은 점화직후 초기화염전파의 영향을 크게 받는다.³⁾ 공전시 점화시기가 지각되면 초기화염 영역의 연소실 온도와 압력이 높은 상태가 되므로 진각시킨 경우보다 초기연소조건이 개선되고 연소시작시점의 연소실 체적이 감소하여 화염형성 및 전파의 변동성이 적어져, 연소 후반부까지의 압력선도가 일정하게 유지되어 COV_{imep}가 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 점화시기를 진각시킨 BTDC 15°경우의 사이클 변동성을 보면 점화 이후 최고압력점 직후부터 압력선도의 변동이 심해지는 것을 볼 수 있는데, 이는 점화시기가 진각되어 화염형성 및 전파에서 변동성이 증가하여 전체 압력선도의 변동이 많이 일어나 COV_{imep}가 증가한 것으로 판단된다. 또한 점화시기를 지각시킬수록 최대 압력 및 크랭크앵글 변동량도 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 변동시작점이 늦춰지면서 변동폭이 줄어든 것으로 판단된다. 결국 점화시기의 지각은 압력선도상의 변동시작점을 늦춰, 연소안정성을 향상시키는 것으로 판단된다.

물론 정상 주행시 연소의 효율을 높이고 최고연

소압을 증가시켜 성능을 증대시키는 경우에는 적절한 점화진각이 필수적이거나, 냉시동 또는 공회전시와 같이 연소안정성이 중요한 조건에서는 적절한 점화시기 지연을 통해 촉매예열성 상승 및 연소안정성 개선을 도모하는 것이 좋은 방법으로 생각된다.

Table 2는 배기밸브와 점화시기 변경에 따른 COV_{imep}값을 나타낸 것이다. 실험결과 전체적인 COV_{imep}는 10~18% 수준으로 나타났으며, 일반적인 가솔린 기관의 경우 공회전시 COV_{imep}가 약 13 ~ 15% 정도로 나타나는 것⁸⁾으로 볼 때 정량적으로 타당한 결과로 볼 수 있다.

Table 2 COV_{imep}(%) with the change of valve timing and spark timing

Valve timing Spark timing	6°CA Advance	Baseline case	6°CA Retard
BTDC 5°	10.83	13.91	14.66
BTDC 10°	12.44	14.23	15.62
BTDC 15°	14.36	17.81	18.50

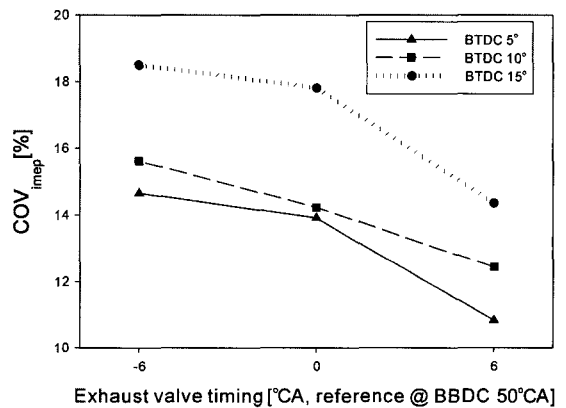


Fig. 8 Variation of COV_{imep} with the change of exhaust valve and spark timing

Fig. 8은 COV_{imep} 변화를 그래프로 나타낸 것으로서 점화시기 지각 및 밸브타이밍 진각을 통해 COV_{imep}가 감소됨을 볼 수 있다. 따라서 점화시기를 지각시키는 것이 배기가스 온도 상승과 연소안정성에 모두 도움을 준다. 이에 비해 배기밸브 타이밍을 지각시키는 것은 시동시 배기가스 온도 상승에는 도움을 주나, 밸브 오버랩 구간의 증가로 잔류가스

가 증가하여 연소안정성에는 나쁜 영향을 끼친다. 그러나 배기밸브 타이밍을 진각시키면 연소안정성에 좋은 영향을 줄 수 있다고 판단된다. 따라서 초기 냉시동시 촉매 예열성 향상 및 연소안정성 확보를 위한 최적의 점화시기 및 밸브 타이밍 확보가 요구되며, 이를 위한 연구가 계속 진행중에 있다.

4. 결론

- 1) 초기 냉시동시 점화시기를 지각시킨 경우 배기 가스 온도상승에 도움을 주어, 기준상태에 비해 평균 약 15℃정도 배기가스의 온도가 높게 관찰되었다.
- 2) 배기밸브 타이밍의 지각은 밸브 오버랩 구간을 증가시키고 블로다운 효과를 감소시켜 초기시동시 연소실의 잔류가스량을 증가시키고 화염전파 속도를 떨어뜨려 팽창행정중의 연소를 지속시키고, 이에 따라 동일 시점에서 baseline에 비해 약 30℃정도 배기가스 온도가 상승하였다. 그러나 잔류가스량의 증가로 연소가 불안정해지기 때문에 COV는 타이밍 지각에 따라 계속 증가하였다.
- 3) 배기밸브 타이밍의 변경은 시동시 온도상승에는 기여하나 연소실의 연소 불안정성이 증가되므로, 점화시기와의 적절한 매칭을 통해 배기밸브 타이밍의 제어가 필요하다.
- 4) 최적의 점화시기 및 밸브타이밍 조절을 시동 초기에 적용하면 시동성 및 아이들 안정성을 향상 시킬과 동시에 배기가스 온도를 상승시켜 촉매의 예열에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육부의 BK21 및 국민대학교 우수연구센터 사업의 지원하에 국민대학교 자동차공학전 문대학원 열기관실협실의 연구과제로 수행되었음.

References

- 1) S. Russ, M. Thiel and G. Lavoit, "SI Engine

Operation with Retarded Ignition: Part 2- HC Emissions and Oxidation," SAE 1999-01-3507, 1999.

- 2) D. S. Kim, J. Y. Lee, Y. H. Lee and Y. S. Cho, "Variation of Exhaust Gas Temperature with the Change of Spark Timing and Exhaust Valve Timing during Cold Start Operation of an SI Engine," Spring Conference Proceeding, Vol.I, KSAE, pp.58-64, 2004.
- 3) J. S. Lee, "A Study on the Improvement of Combustion Stability for SI Engine at Idle Operation," Spring Conference Proceeding, Vol.I, KSAE, pp.196-202, 1998.
- 4) Y. J. Chung, G. S. Cho and W. B. Kim, "The Influence of Engine Operation Variables on Idle Stability in the S. I. Engine," Spring Conference Proceeding, Vol.II, KSAE, pp. 461-466, 1996.
- 5) H. S. Cho, S. H. Hwang and J. W. Lee, "Modeling and its Experimental Validation on Cycle Variability of Combustion at Idle Operation," Transactions of KSAE, Vol.4, No.2, pp.221-229, 1996.
- 6) Kistler Instruction Manual: M5 Sensors Type 6052B, 002-017e-02.03, Kistler, p. 28, 2003.
- 7) D. S. Kim, S. C. Kim, S. H. Hwang, Y. S. Cho and I. Y. Ohm, "Estimation of Exhaust Gas Recirculation using In-Cylinder Residual Gas Fraction in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.55-60, 2004.
- 8) K. H. Lee and K. S. Kim, "Influence of Initial Combustion in SI Engine on Following Combustion Stage and Cycle-by-Cycle Variation in Combustion Process," Int. J. Automotive Technology, Vol.2, No.1, pp.25-31, 2001.
- 9) C. S. Kim, H. B. Song, J. H. Lee, J. S. Yoo, H. S. Cho and D. Y. Ahn, "Effect of Valve Timing on Residual Gas Fraction and Combustion Characteristics at Part Load Condition in SI Engines," Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.26-33, 2000.