

SI 엔진의 시동 및 아이들 구간에서의 점화시기에 따른 사이클별 연소현상에 관한 실험적 연구

최성원[†] · 최관희^{*} · 명차리^{**} · 박심수^{**}

An Experimental Study of Cyclic Combustion Characteristics at Starting and Idling Phase on Spark Ignition Engine

Seongwon Choi, Kwanhee Choi, Cha-Lee Myung, Simsoo Park

Key Words : THC(탄화수소, Total Hydrocarbon), LOT(활성개시온도, Light off temperature), FFID(고속가스분석기, Fast response Flame Ionization Detector)

Abstract

THC(Total Hydrocarbon) emissions during cold start and warm-up phase constitute the majority of THC emissions during the FTP-75 mode. As the basic approach to improve the emission performance of Gasoline engine during transient phase, the effect of spark timing retard from MBT on THC emission characteristics is studied by engine test using a Fast response Flame Ionization Detector(FFID). A cyclic analysis of the combustion process shows that high THC emissions are produced first few cycles during the transient phase. This paper presents the results of engine performance and emission of Gasoline engine with various spark timing. consequently, This paper was focused on the combustion phenomena with various spark timing during transient phase which was analyzed by Fast response Flame Ionization Detector (FFID) equipment to measure the cyclic THC emission characteristics.

1. 서 론

자동차 산업의 급속한 발전과 아울러 최근 십여년 동안 자동차 배출물에 대한 규제가 점점 엄격해지고 있고 사회적으로 환경보호, 특히 대기보존에 대한 인식이 저변에 확산되면서 향후에도 이와 관련된 자동차 배출물 규제가 한층 첨예화될 것으로 보인다. 이렇게 환경 규제가 강화되는 추세에 따라 저공해 엔진의 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. FTP-75 mode 주행 시, 배기가스의 80% 이상이 Phase 1 에서 배출되므로 이의 저감을 위해서는 시동 후 100 sec 이내에

배출되는 배기가스를 정화하기 위한 방안이 검토되어야 한다. 엔진에서 배출되는 THC 성분을 저감하기 위한 방법으로 배기 후처리 시스템의 정화효율을 신속하게 높이는 방안에 대한 연구와 엔진에서 배출되는 Raw Emission 을 줄이는 방안에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 아이들 운전시에 점화시기를 지각시키면 엔진토크가 감소하기 때문에 동일한 아이들 스피드를 유지하기 위해서는 공기량을 증가시켜 엔진토크를 보상해 주어야 한다. 그런데 엔진에서 아이들 안정성이 저하되는 원인이 내부 유동에만 있는 것이 아니고 ISA 를 통한 흡입 공기량 제어와 연료의 Wall Wetting 량 및 점화 시기 제어에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 엔진대상에서 점화시기 변경에 따라 엔진에서 배출되는 THC 저감 원인과 배출 특성을 고속가스분석기와 연소해석기를 이용하여 Cycle 단위로 분석하였다.

[†] 학생회원, 고려대학교 기계공학과 대학원

E-mail : csw1315@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3763 FAX : (02)3290-3869

^{*} 고려대학교 기계공학과 대학원

^{**} 고려대학교 기계공학과

2. 실험장치 및 방법

2.1 엔진 연료 공급 시스템

Fig. 1 은 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험장치는 연료를 공급할 수 있는 연료공급장치와 EMS 컨트롤러 및 엔진의 각종 신호와 연소현상을 측정하고 분석하는 DAQ 시스템, 연소현상 해석을 위해 점화플러그형 연소압센서를 연소실에 설치 하였고, 연소현상은 연소압력 분석장치를 이용하여 분석하였다. THC 수준은 고속가스 분석기와 배출가스분석기를 사용하여 측정하였다.

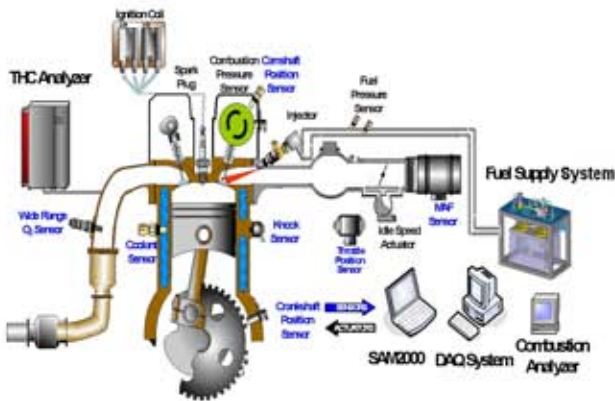


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Table 1 은 시험 엔진의 제원을 나타낸 것이다. 시험 엔진은 2.0L 가솔린 엔진으로 압축비는 10.5:1 이다.

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Power-train	2.0L, DOHC
Type	In-line 4
Displacement	1,998 cc
Compression ratio	10.5 : 1
Valve timing	0/56, 34/10 (IVO/IVC, EVO/EVC)

Fig. 2 는 시동시에 촉매활성화 시간을 단축하기 위해 적용된 급속 촉매 가열로직을 나타낸 것이다. 각각의 그래프는 시동후 시간이 지남에 따른 ISA(Idle Speed Actuator)의 개도와 엔진회전속도 및 점화시기를 나타낸 것이다. 촉매가열로직은 시동후에 냉각수온에 따라 점화시기를 상사점 이후로 지각시켜 연소가스가 배기 밸브와 배기 포트 등의 배기계를 통과하면서 추가적인 산화반응이 이루어

저 촉매를 급속하게 가열하는 기능을 이용한 것이다. 점화시기를 상사점 이후로 지각시킴에 따라 엔진의 요구 출력이 저하되므로 공회전시의 목표 엔진회전수를 유지하기 위해 ISA 의 개도를 증가시켜 각각의 실린더에 공급되는 공기량을 증가시키고 엔진의 냉각수온이 일정온도로 상승하면 점화시기를 상사점 이전으로 회복시키면서 ISA 의 개도를 서서히 감소시켜 엔진 출력을 유지하게 된다.

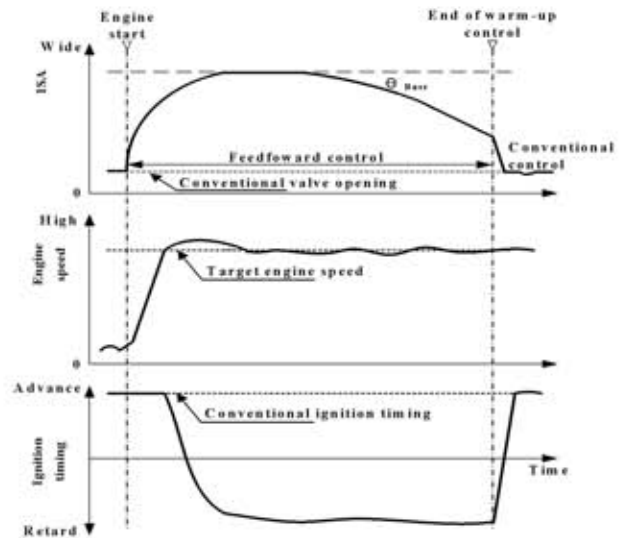


Fig. 2 Schematic diagram of catalyst heating function

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 운전공연비와 점화시기 변경에 따른 특성

Fig. 3 은 점화시기 지연에 따라 목표 아이들 엔진 속도 유지를 위해 ISA 를 통과하는 공기량을 증가시킨 경우의 흡기매니폴드의 압력을 나타낸 것이다.

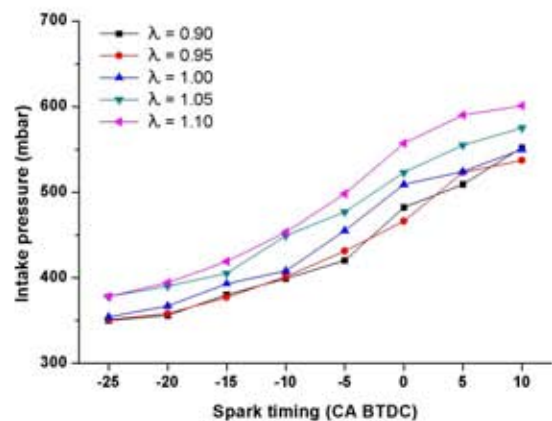


Fig. 3 Intake manifold pressure with spark timing (1500RPM/Idle, W/T : 25 °C)

냉각수는 25°C, $\lambda=1.0$ 의 경우 점화시기 BTDC 25° 대비 ATDC 10° 의 흡기압력은 350mbar 에서 540mbar 로 증가하므로 펌프손실은 감소하게 되는 이점이 있다. $\lambda=1.1$ 인 경우 점화시기 BTDC 25° 대비 ATDC 10° 의 흡기압력은 370mbar 에서 610mbar 로 증가하게 된다. 점화시기가 지각되는 경우에 엔진의 안정적인 운전을 위해서는 추가 공기량을 확보하기 위해서는 ISA 의 듀티율을 증가 시켜야 함을 알 수 있다.

점화시기 변경에 따른 배기가스온도와 MCC 촉매 담체의 온도를 Fig. 4 및 5 에 나타내었다. $\lambda=1.0$ 의 경우 공연비에 따라 점화시기를 BTDC 25° 에서 ATDC 10° 까지 지각시킨 경우 배기온 및 촉매 담체에서의 온도는 각각 50°C와 70°C 이상 상승되므로 후연소 현상에 따른 배기온 상승으로 촉매 담체에서의 온도도 동일하게 상승되고 있음을 알 수 있다.

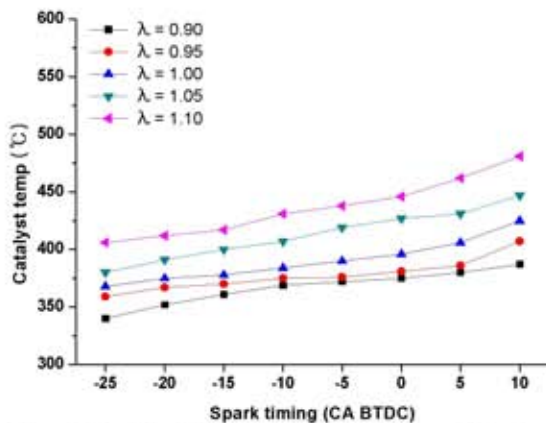


Fig. 4 Catalyst bed temperature with spark timing (1500RPM / Idle, W/T : 25°C)

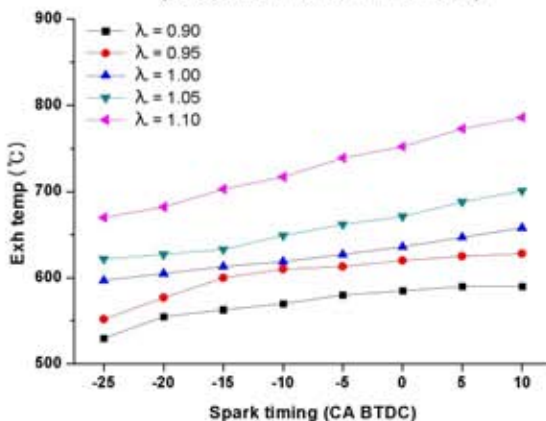


Fig. 5 Exhaust temperature with spark timing (1500RPM / Idle, W/T : 25°C)

Fig. 6 은 엔진 냉시동 조건인 냉각수온 25°C와 아이들 회전속도 1500RPM 에서 THC 배출 특성을 나타낸 것으로 점화시기를 BTDC 25° 에서

ATDC 10° 로 지각시킴에 따라 엔진에서 배출되는 THC 량이 크게 감소하고 있음을 나타내고 있다. $\lambda=0.9$ 인 경우 점화시기를 BTDC 25° 에서 ATDC 10° 로 지각시킨 경우의 THC 배출량은 5000ppmc 에서 2600ppmc 으로 약 52% 정도가 감소하고, $\lambda=1.0$ 의 경우에는 59% 이상이 저감되고, $\lambda=1.1$ 의 경우에는 THC 배출량이 1000ppmc 미만으로 떨어져 엔진에서 배출되는 THC 배출량이 73% 이상 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그러나 냉각수온이 낮은 경우에 시동 공연비를 과도하게 희박하게 운전하면 THC 배출량은 급격히 감소하지만 엔진의 연소안정성이 상대적으로 불안정하게 되고 운전성에도 악영향을 미치게 되므로 유동장화기구나 연소를 신속하게 시킬 수 있는 장치에 대한 연구가 필요하다.

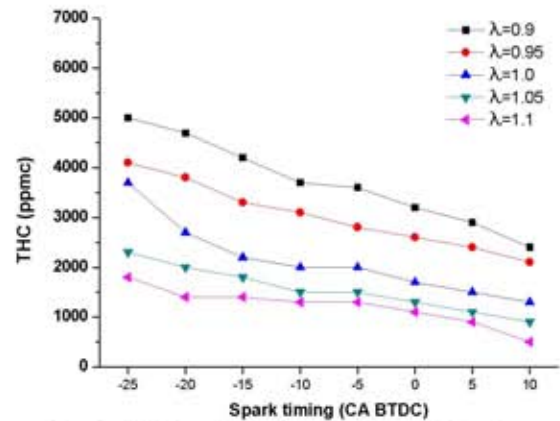


Fig. 6 THC emission level with spark timing (1500RPM / Idle, W/T : 25°C)

3.2 연소 현상 해석

점화시기 변경에 따른 연소현상 해석을 위해 1번 실린더에 점화플러그 타입의 연소압 센서를 설치하여 연소현상을 분석하였다. 냉각수온은 25°C로 조정하였고 엔진회전속도는 1500RPM, 무부하 상태이다. 점화시기는 BTDC 25° 에서 ATDC 10° 까지 5° 간격으로 변화시켰고 공연비는 $\lambda=0.9$ 에서 1.0 까지 0.5 간격으로 변화시켰다. Fig. 7~9 는 점화시기에 따른 실린더압력을 나타낸 것으로 점화시기가 지각되면서 연소가 팽창행정말까지 유지되므로 배기행정 중에도 연소반응이 이루어져 배기온도의 상승을 유도하게 된다. 실린더 최고압력은 BTDC 25° 에서 BTDC 5°까지는 3bar 정도이고 점화시기가 지각됨에 따라 연소최고압력이 위치하는 크랭크각도도 지각되는 일반적인 연소현상을 보이고 있다. 그러나 BTDC 5° 에서 ATDC 10° 로 지각될수록 실린더 압력은 5bar 까지 상승

되고 실린더 최고 압력의 위치도 상사점 부근에서 발생하고 있다.

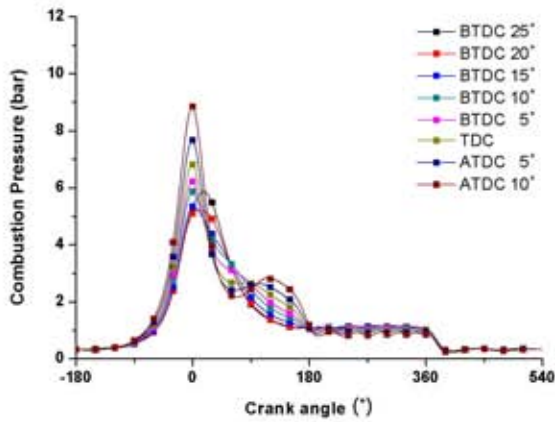


Fig. 7 Cylinder pressure with various spark timing (λ : 0.9, 1500RPM / Idle, Water temp : 25°C)

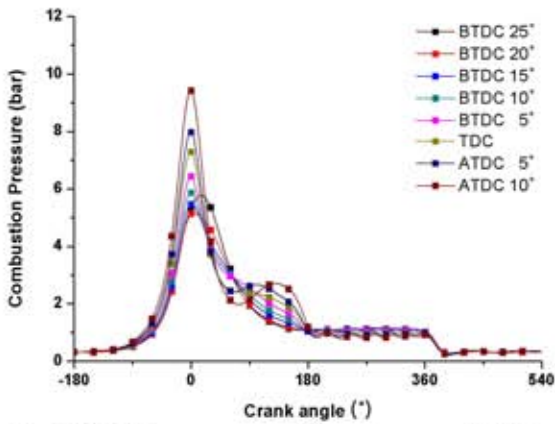


Fig. 8 Cylinder pressure with various spark timing (λ : 0.95, 1500RPM / Idle, Water temp : 25°C)

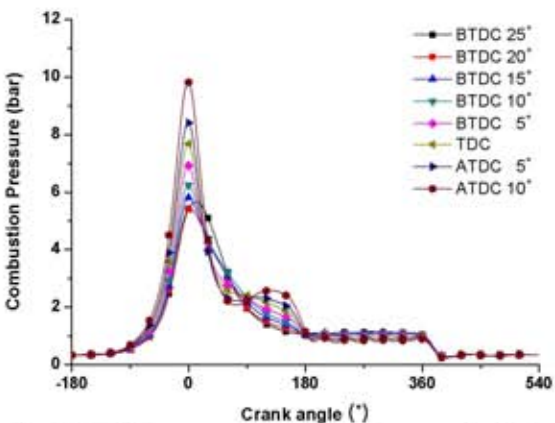


Fig. 9 Cylinder pressure with various spark timing (λ : 1.0, 1500RPM / Idle, Water temp : 25°C)

3.3 점화시기와 공연비에 따른 배기포트에서의 THC 배출 특성

점화시기지연에 따라 THC 농도가 저감되는 원인을 해석하기 위해 Fig. 10 에서와 같이 배기포트

에 고속가스분석기의 샘플링 프로브를 설치하여 THC 농도를 측정하였다. 샘플링 프로브의 위치는 1 번 실린더의 배기포트와 배기매니폴드가 접촉하는 지점에 설치하여 측정하였다.

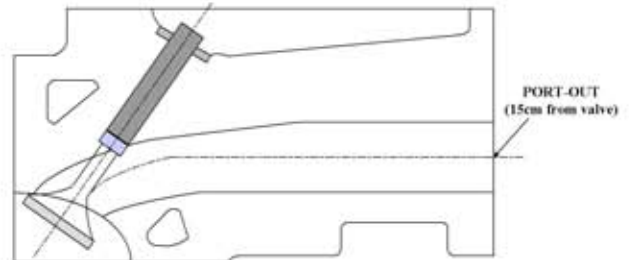


Fig. 10 Sampling probe position of fast response FID

배기밸브가 열렸다가 닫히는 기간을 배기밸브가 열리는 초기구간(I)과 밸브가 완전히 열리는 구간(II) 및 밸브가 닫힌 구간(III)으로 구분하면, 배기밸브가 열리는 초기 I구간에 배출되는 THC 는 매우 높은 농도를 유지하며, 배기밸브가 완전히 열리는 II구간에서 배출되는 THC 는 낮은 농도를 보인다. 배기밸브가 닫힌 III구간에서는 THC 농도는 다시 증가하게 된다.

Fig. 11 은 운전조건 1500RPM, 냉각수온 25°C에서 $\lambda=0.9$ 로 고정하고 점화시기를 변경한 경우에 배기포트에서 고속가스 분석기를 이용하여 측정한 THC 농도를 나타낸 것이다. 점화시기가 변경됨에 따라 배기밸브가 열리기 전과 열린 후에 측정된 THC 농도는 비슷한 수준을 보이고 있음을 알 수 있다. THC 배출농도는 점화시기가 BTDC 25° 에서 ATDC 10° 로 지각될수록 감소하고 있으며 배기밸브가 열리기 전의 THC 수준은 5300ppmc 에서 2800ppmc 로 줄어들고 있으며 점화시기 지각에 따른 THC 저감율은 48% 수준에 달하고 있음을 알 수 있다.

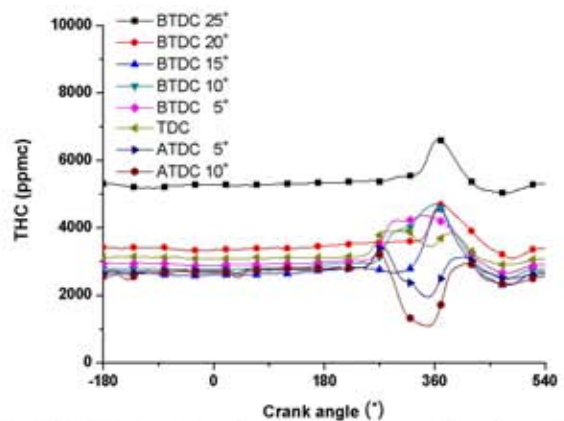


Fig. 11 THC emission level at Ex. port with various SA (λ : 0.9, 1500RPM / Idle, Water temp : 25°C)

Fig. 12 는 운전조건 1500RPM, 냉각수는 25℃에서 $\lambda=0.95$ 로 고정하고 점화시기를 변경한 경우에 배기포트에서 고속가스 분석기를 이용하여 측정한 THC 농도를 나타낸 것이다. THC 배출량은 점화시기가 BTDC 25° 에서 ADTC 10° 로 지각될수록 감소하고 있으며 배기밸브가 열리기 전의 THC 수준은 3050ppmc 에서 1100ppmc 로 줄어들고 있으며 점화시기 지각에 따른 THC 저감율은 54% 수준이다. THC 최대 피크는 BTDC 25° 에서는 4300ppmc 수준이며 ATDC 10° 에서는 2000ppmc 수준으로 64%의 저감율을 보이고 있다.

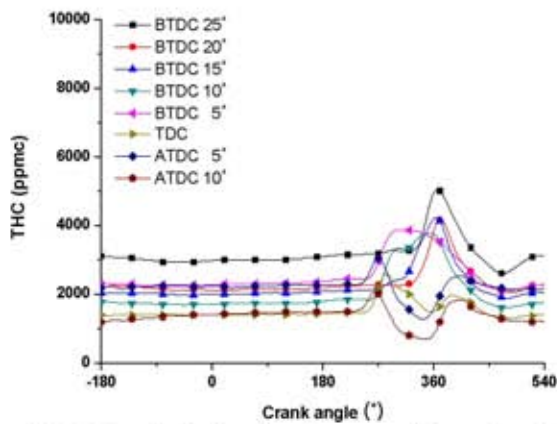


Fig. 12 THC emission level at Ex. port with various SA ($\lambda : 0.95, 1500\text{RPM} / \text{Idle}, \text{Water temp.} : 25^\circ\text{C}$)

Fig. 13 은 운전조건 1500RPM, 냉각수는 25℃에서 $\lambda=1.0$ 으로 고정하고 점화시기를 변경한 경우에 배기포트에서 고속가스 분석기를 이용하여 측정한 THC 농도를 나타낸 것이다.

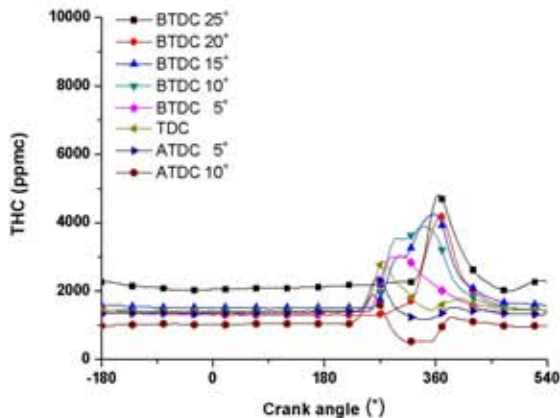


Fig. 13 THC emission level at Ex. port with various SA ($\lambda : 1.0, 1500\text{RPM} / \text{Idle}, \text{Water temp.} : 25^\circ\text{C}$)

점화시기가 BTDC 25° 에서 ADTC 10° 로 지각될수록 감소하고 있으며 배기밸브가 열리기 전의 THC 수준은 2200ppmc 에서 1000ppmc 로 줄어들고

있으며 점화시기 지각에 따른 THC 저감율은 55% 수준이다. 배기밸브가 열린 기간 동안에 THC 최대 피크가 위치하며 BTDC 25° 에서는 4800ppmc 수준이며 ATDC 10° 에서는 1800ppmc 수준으로 63%의 저감율을 보이고 있다.

3.4 시동시 온도변화 및 THC 배출특성

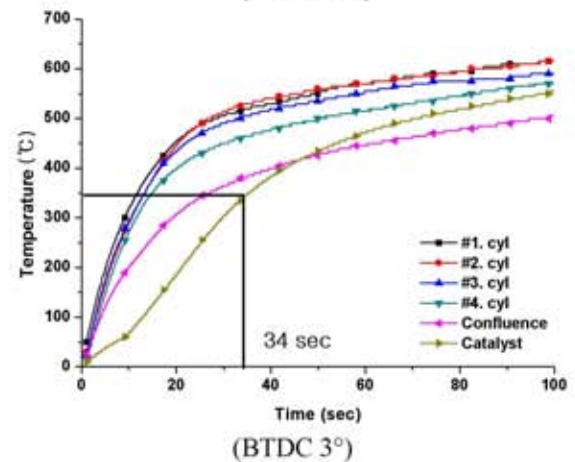
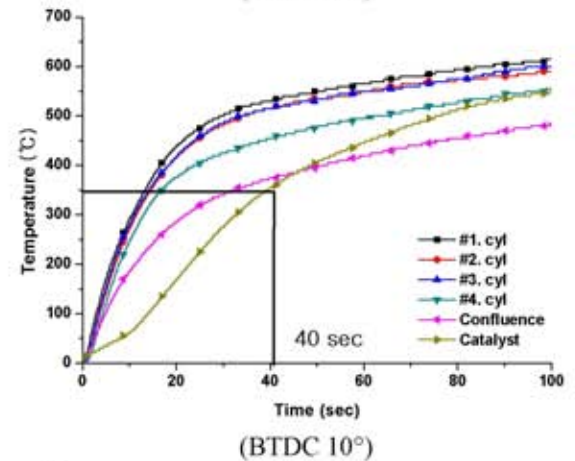
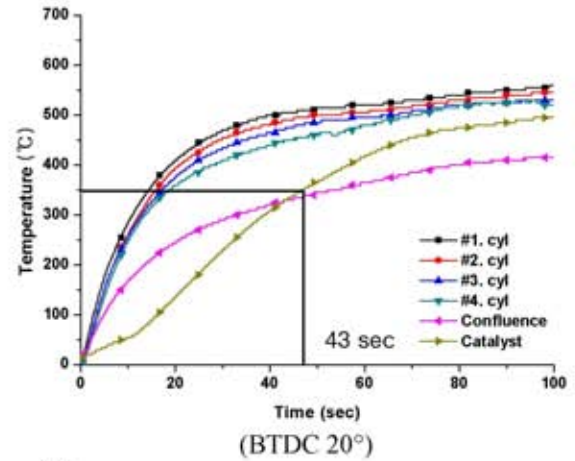


Fig. 14 Exhaust gas temperature during cold start phase

Fig. 14 는 무부하에서 엔진 시동시 배기 포트 및 촉매의 온도를 측정한 결과이다. 촉매 온도가 상승되어 배기가스의 정화율이 50%에 도달하는 온도를 LOT 로 정의하고 350℃로 가정할 때, BTDC 20° / BTDC 10° / BTDC 3° 은 각각 43 초 / 40 초 / 34 초 임을 확인 하였다. BTDC 3° 의 촉매 활성화 온도는 34 초로 BTDC 20° 에 비해 약 10 초 정도 단축되므로 점화시기 지연은 THC 저감에 매우 효과적이다.

Fig. 15 는 점화시기 변경에 따른 시동시 배출되는 THC 의 량을 고속가스분석기로 측정한 결과이다. 점화시기는 BTDC 20° / BTDC 10° / BTDC 3° 로 점차 지각시키며 실험을 하였다. BTDC 20° 인 경우, THC 는 52840ppmc 까지 상승하고 있으며 점화시기가 BTDC 10° 와 BTDC 3° 로 지각되면서 35740ppmc 와 28224ppmc 로 각각 67%와 53% 수준으로 저감됨을 알 수 있었다.

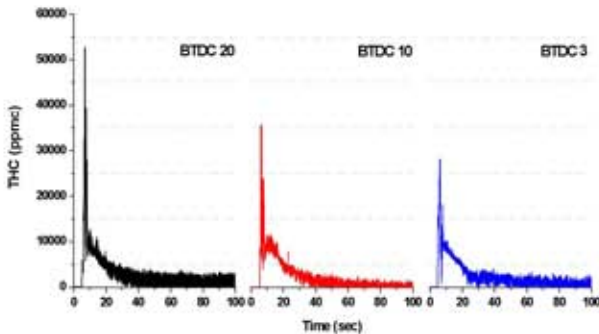


Fig. 15 THC emission level during cold start phase

4. 결론

본 연구에서는 엔진 대상에서 냉시동시 점화시기변경에 따라 엔진에서 배출되는 THC 저감 원인과 배출특성을 고속가스분석기와 연소해석기를 이용하여 사이클 단위로 분석 하였고 이에 따른 결과를 아래에 나타낸다.

- (1) 점화시기 지각에 따라 실린더 최고 압력이 높게 측정된 이유는 점화시기가 지각되면서 목표 엔진 속도를 유지하기 위해 요구되는 공기량이 증가하고 피스톤이 하강하면서 연소가 이루어져 피스톤에 가해지는 압력이 증가하므로 흡기과정 중에 유입된 공기의 압축압력이 높아져 엔진의 실제압축비가 상승한 것으로 판단된다.
- (2) 냉각수온 25℃, 아이들 회전속도 1500RPM 에서 $\lambda=0.9$ 에서 점화시기를 BTDC 25° 에서 ATDC 10° 로 지각시킨 경우의 THC 배출량은 5300ppmc 에서 2800ppmc 으로 약 48% 정도가 감소하고, $\lambda=0.95$ 의 경우에는 64% 이상이 저감되고, $\lambda=1.0$

의 경우에는 THC 배출량이 1000ppmc 미만으로 떨어져 엔진에서 배출되는 THC 배출량이 63% 이상 감소한다. 그러나 냉각수온이 저온일 때 과 회박 운전을 위해서는 유동강화기구나 급속연소를 유도할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

(3) 공연비에 따라 점화시기를 BTDC 25° 에서 ATDC 10° 까지 지각시킨 경우 배기가스 및 촉매 담체에서의 온도는 약 80° 이상 상승되므로 후연소 현상에 따른 배기온 상승으로 촉매 담체에서의 온도도 동일하게 상승되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 무부하 아이들 상태에서의 실험이므로 급속촉매가열로직을 사용하면 아이들 상태에서도 LOT 가 촉진 될 것이라 생각된다.

(4) 점화시기 변경에 따라 시동시 배출되는 THC 배출량을 고속가스 분석기를 이용하여 사이클별로 분석한 결과, 점화시기가 BTDC 20° 인 경우 52840ppmc 의 높은 THC 배출량을 보이고 있으며 BTDC 3° 인 경우에는 28224ppmc 수준이 배출되고 점화시기가 지각 될수록 최대 THC 가 배출되는 시간도 급격히 단축되고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 자동차부품 기반기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Cha-Lee Myung, "THC Emission Characteristics of LPLi Engine during Cold Start," *KOREA Univ. paper*, 2004.
- (2) Klaus Mueller-Haas, Rolf Brueck, Jeffery S. Rieck, Cynthia C. Webb and Keith A. Shaw, "FTP and US06 Performance of Advanced High Cell Density Metallic Substrates as a Function of Varying Air/Fuel Modulation," *SAE paper*, 2003-01-0819, 2003.
- (3) Han-Sang Kim, Kyoungdoug Min, Cha-Lee Myung, and Simsoo Park, "A Combined Experimental and Computational Approach to Improve Catalyst Flow Uniformity and Light-Off Behavior," *Proc Instn Mech Engrs Vol. 216 Part D: J Automobile Engineering*, 2002.
- (4) Per Marsh, Ingemar Gottberg, Karin Thorn, Mats Lundgren, Filip Acke and Goran Wirmark, "SULEV Emission Technologies for a Five Cylinder N/A Engine," *SAE paper* 2000-01-0894, 2000.