

< 논문 >

가솔린엔진의 냉시동 천이구간에서 배출가스 온도 및 유해배출물 특성에 관한 연구

조용석[†] · 정대철* · 박영준* · 김득상*
(2006년 7월 7일 접수, 2006년 11월 9일 심사완료)

Characteristics of Exhaust Gas Temperature and Harmful Emission During Cold Start Transient Operation in an SI Engine

Yong-Seok Cho, Dae-Chul Jeong, Young-Joon Park and Duk-Sang Kim

Key Words: Exhaust Gas Temperature(배출가스온도), Valve Overlap(밸브오버랩), Ignition Timing(점화시기), Catalyst Heating Function(촉매예열기능), Exhaust Emission(배기배출물), Cold Start(냉시동)

Abstract

Stringent regulations of exhaust emission from vehicles become a major issue in automotive industries. In SI engines, it is one of the crucial factor to reduce exhaust emissions during cold start in order to meet stringent regulations such as SULEV or EURO-4, because SI engines emit a large portion of total harmful exhaust compounds when they are cold. At early stages of cold start in gasoline engines, exhaust gas temperature plays a key role to improve three way catalyst by virtue of fast warmup. Therefore, this study focused on the increase of exhaust gas temperature under controls of engine operating parameters such as spark ignition timing, valve overlap by virtue of intake VVT and catalyst heating function. Furthermore, effects on harmful emission due to these parameters are also investigated. Experiments showed that retarded spark ignition timings and increased valve overlap may be helpful to increase exhaust gas temperature. It was also found that NO_x was decreased with increased valve overlap. This study also showed that sudden changes in ISA and amount of fuel due to the deactivation of catalyst heating function cause temporal increase of harmful emissions.

1. 서론

가솔린엔진에서 배출되는 유해 배출물은 냉시동 초기에 전체 배출물의 80%를 차지하여, 이 구간동안 촉매의 빠른 예열 및 유해 배출물의 발생을 억제하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 냉시동 구간에서와 같이 엔진의 시동 성능 확

보를 위해서 많은 양의 연료를 분사해야 하는 상황에서는 연소 시 미연 탄화수소 및 일산화탄소 성분의 증가를 초래할 수 있다. 따라서 냉시동 초기의 유해 배출가스 저감을 위해 촉매의 활성화 온도 도달시간을 줄이기 위한 연구가 수행되어 왔으며, 기존의 연구를 통해 점화시기의 지각 및 적절한 수준의 배기밸브 열림 시기 진각은 배출가스 온도의 빠른 상승과 공회전시 연소의 안정성을 높일 수 있는 방안임이 확인되었다.^(1,2)

본 연구에서는 엔진 공회전 천이구간, 즉 시동 직후 촉매의 빠른 온도 상승을 위해 적용되는 촉매예열기능의 특성을 조사하고, 그에 따른 엔진

[†] 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : yscho@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-5027 FAX : (02)942-7721

* 국민대학교 자동차공학전문대학원

내부의 연소상황 변화에 기초하여 ECU의 제어 조건, 즉 냉간시동 시 엔진의 밸브오버랩 및 점화시기를 조절하여 각 조건에서의 배출가스의 온도, 배출가스의 농도변화 및 연소압력의 변화를 측정하고 분석하였다. 이를 통해 공회전 전이구간 내에서 촉매에열성을 개선하고 유해 배출물 발생을 억제할 수 있는 제어방안을 찾고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 엔진은 흡기밸브의 개폐시기를 가변적으로 변화시킬 수 있는 승용 1979 cc DOHC VVT 가솔린엔진이다. 엔진의 주요 제원은 Table 1에 정리하였으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실린더 내의 압력 측정을 위하여 스파크 플러그 마운트형 압력센서(Kistler, 6052B)를 1번 실린더에 장착하고 수행하였다. 흡기챔버 내부의 압력은 흡입과정 동안 연소실 내부의 압력과 거의 같으므로 연소압센서의 드리프트(drift) 보상 및 흡기관의 공기유동 특성 검토를 위해 흡기다기관 서지탱크에 절대압센서(Kistler, 4045A)를 장착하여 흡기압을 측정 한 후, 이를 이용하여 연소압 곡선을 보정하였다.⁹⁾ 크랭크 축에는 로터리 엔코더를 연결하여, 1회전 당 1회 발생하는 Z-펄스를 측정 개시 트리거 신호로 사용하고, 0.1°CA 간격의 A-펄스를 클럭 신호로 이용하여 연소실 압력을 측정하였다.

배출가스 온도측정을 위하여 1/16" k형 열전대를 배기다기관 각부에 삽입하였으며, 1~4번 실린더의 배기포트 후단, 촉매입구, 촉매 담체 중심으로부터 상단 2.5 cm 지점 및 촉매 후단의 총 7개 지점에서 시동 이후 시간에 따른 온도 변화를 측정하였다.

엔진 제어조건의 변화에 따른 배기배출물을 분석하기 위해서 Horiba Exsa-1500 배기분석기를 이용하였으며, 촉매 상단에 샘플링 프로브를 설치하여 CO, CO₂, O₂, THC, NO_x 성분을 측정하였다. 모든 측정치는 엔코더의 Z-펄스를 기준으로 동기화하여, 동일 시점에서 측정을 시작하였다. 엔진의 제어를 위하여 CAN 통신방식을 통해 ECU의 제어정보를 조정하였다. ECU와 CAN 카드간의 통신은 ECU 배선에서 CAN-high, low,

ground 신호를 고속케이블(high speed cable)을 통해 CAN 카드에 연결하는 방식으로 이루어지며, 제어 PC에서 CAN 통신용 제어프로그램을 사용하여 ECU를 실시간으로 제어하고 모니터링 할 수 있게 하였다.

2.2 실험조건

본 실험은 시동 초기 크랭킹 구간부터 엔진이 일정한 회전수로 안정화되는 구간인 공회전 정상 상태에 도달하는 시점까지 이루어진다. 이러한 실험 조건에서는 주위의 대기 환경이 측정치에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 엔진 실험공간 내의 온도, 냉각수온 및 오일온도는 매 실험시에 20°C로 유지되도록 충분히 소킹(soaking) 후 실험을 수행하였다. 또한 ECU의 제어변수 조절 및 실험 후 ECU를 엔진으로부터 분리하여 이전 조건에서의 실험에 의해 ECU에 학습된 값을 초기화한 후 실험 조건을 재설정하였다.

Table 1 Specifications of test engine

Items	Specifications
Bore	82 mm
Stroke	93.5 mm
Compression ratio	10.1
Idle speed	700 ± 100 rpm
Spark timing	BTDC 8 ± 5 °CA
Intake timing	ATDC 11 / ABDC 59 °CA
Exhaust timing	BBDC 42 / ATDC 6 °CA
Valve overlap	Variable, -5 °CA at cranking

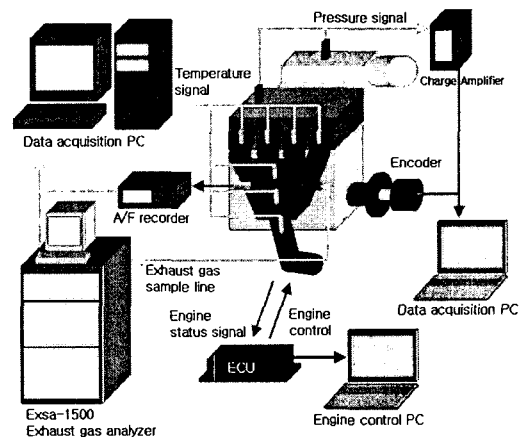


Fig. 1 Schematic diagram of test engine bench

각 실험시간은 기초실험을 통해 결정하였으며, 시동 후 180초 운전 후 공회전 정상상태에 도달한 것으로 판단하였다. 이 구간에서 촉매 예열기능의 작동 및 해제가 구분되는 시점을 기준으로 엔진 제어변수의 변화에 따른 경향을 분석하고자 하였다.

엔진의 점화시기는 BTDC 9 °CA, 3 °CA 및 ATDC 3 °CA, 밸브 오버랩 구간은 0, 10, 20 °CA의 조건에서 실험하였으며, 각 조건 변화에 따른 연소실내의 압력, 배출가스의 온도 및 배기배출물의 변화를 측정하였다. 온도 및 배기배출물 신호는 초당 1개씩, 연소실내의 압력은 매 측정시 연속으로 20 사이클의 압력신호를 저장하여, 이 과정을 10 회 반복하였다. 모든 데이터들은 엔코더의 Z-펄스를 기준으로 측정을 시작하므로 엔진의 크랭킹 이후 동일한 시점에서 측정을 수행하기 위해서 1번 실린더의 피스톤을 항상 상사점 위치로 이동시킨 후 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 촉매예열기능(Catalyst heating function, CH function)

냉시동 구간에서의 촉매의 빠른 예열을 위하여, ECU는 촉매예열기능을 작동시키게 된다. 촉매예열기능은 공회전 천이구간에서 엔진의 공회전 목표값을 다소 높게 설정하여 연료량 및 공기량을 공회전 정상상태 구간보다 많이 공급하여 배출가스의 열용량을 강제로 증가시켜 촉매의 예열을 촉진시킨다.

Fig. 2는 공회전 천이구간 동안의 시간에 따른 ISA(Idle Speed Actuator)개도 및 연료분사량의 변화를 나타낸다. Fig. 2를 통해 촉매예열기능이 작동된 경우 ISA 및 연료분사 기간이 증가하여, 많은 공기량과 연료량이 공급되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3은 동일 구간에서 공기연료비의 변화를 나타낸다. 촉매예열기능의 작동과 관계없이 공기연료비는 거의 모든 구간에서 동등한 수준으로 유지되고 있으나, 예열기능이 차단되는 시점에서 공기연료비가 급격한 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 ISA의 빠른 차단에 비해 연료분사량 변화는 상대적으로 더디게 진행되어 일시적으로 연료분사가 많아지기 때문으로 볼 수 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 따라서

촉매예열기능이 차단되는 영역 부근에서는 오히려 유해 배출물 농도의 증가가 발생할 수 있게 된다.

Fig. 4 및 Fig. 5의 그래프를 살펴보면 촉매예열기능이 작동하는 구간에서 배기배출물의 성분을 분석한 결과 CO는 거의 변화가 보이지 않으며 NO_x 배출량은 다소 적은 양의 증가를 보이고 있다. 반면 공기량의 증가에 따른 연소실 내부의 연료기화 촉진에 의하여 THC 배출량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 촉매예열기능이 차단되는 시점에는 모든 유해배출물의 배출특성이 달라지는 현상을 그래프를 통하여 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, ISA개도 변화에 의한 공기량 감소를 산소센서가 검출하여 연료를

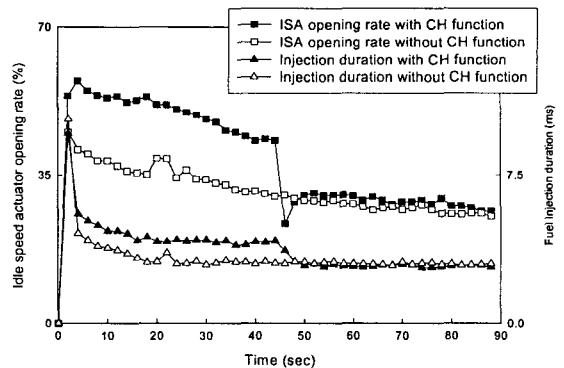


Fig. 2 ISA open rate and injection duration with/without activation of catalyst heating function

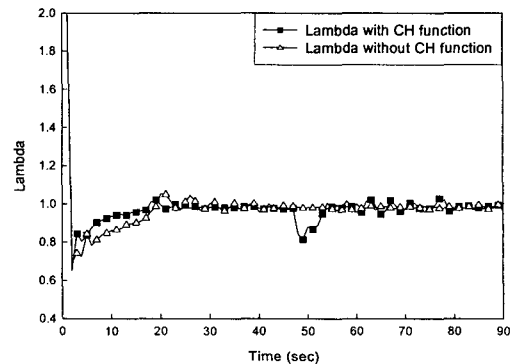


Fig. 3 Excess air ratio with/without activation of catalyst heating function

보상하기 위한 시간지연이 발생하여 순간적으로 공연비가 불안정해지기 때문에 볼 수 있다. 그 결과 45 ~ 50 sec 지점에서 불완전 연소가 발생하게 되며 이는 CO 및 THC의 배출량의 증가를 가져오지만, 이로 인하여 NO_x는 감소하는 현상을 관찰할 수 있다.

따라서 촉매예열기능은 배출가스 온도를 상승시켜 촉매예열에 긍정적인 영향을 미칠 수 있지만, 촉매예열 기능이 차단되는 시점에서 유해 배출물의 증가를 초래할 수 있어, 변환 시점에서 정밀한 제어가 필요할 것으로 판단한다.

3.2 배출가스 온도의 변화

공회전 천이구간 동안 점화시기 및 밸브타이밍

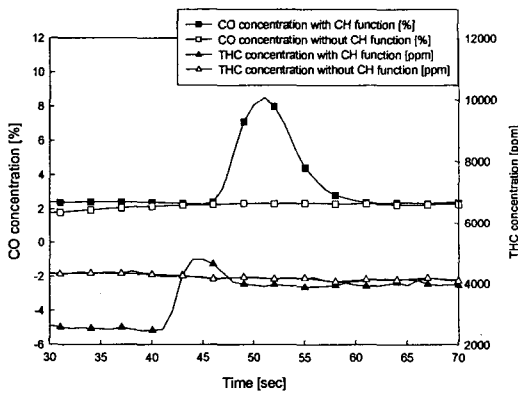


Fig. 4 Variation of CO and THC concentration with/without activation of catalyst heating function

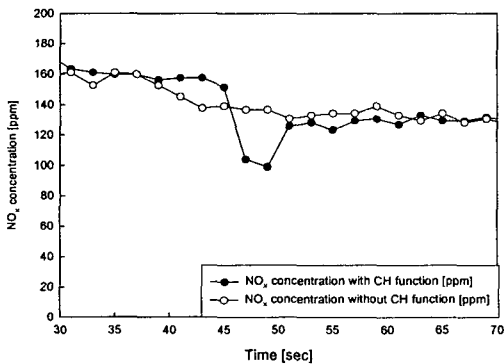


Fig. 5 Variation of NO_x concentration with/without activation of catalyst heating function

변화에 따른 배출가스의 온도 변화는 Fig. 6 및 Fig. 7에서 보이는 바와 같다. 점화시기의 지각은 화염의 생성시기를 늦춰 팽창행정 말기까지 연소를 지속시키므로 배출가스 온도의 상승에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 밸브 오버랩 변화에 따른 온도의 변화는 점화시기 변화에 비해 적은 편이나, 소폭의 배출가스 온도 상승을 일으키는 것을 볼 수 있다. 밸브 오버랩의 증가에 의한 잔류가스의 증가는 화염전파 속도를 감소시키며 이로 인해 연소의 지속시간 증가를 일으키는 것으로 볼 수 있으며, 그 결과 배출가스 온도의 상승을 가져오는 것으로 생각할 수 있다.⁽⁷⁾ 이를 통해 공회전 천이구간의 배출가스 온도 상승에는 점화시기의 지각과 밸브 오버랩구간의 증가, 특히 점화시기의 적절한 제어가 긍정적인 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

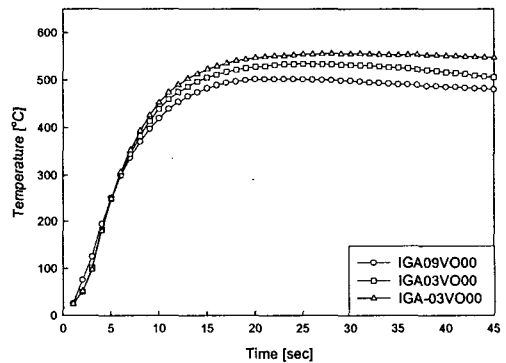


Fig. 6 Variation of exhaust gas temperature with changes in spark ignition timing (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

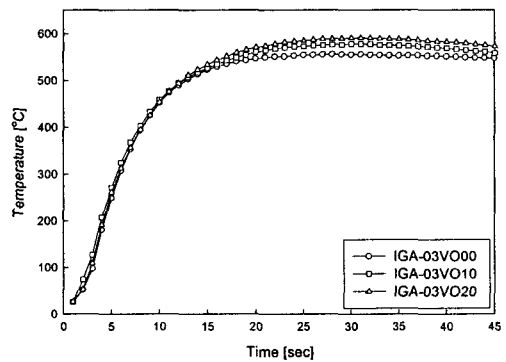


Fig. 7 Variation of exhaust gas temperature with changes in valve overlap periods (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

3.3 연소압 특성

본 실험에서 사용된 엔진은 배기밸브 타이밍이 고정되어 있는 상태에서 흡기캠의 위상각 변화에 의해 밸브오버랩을 제어한다. 따라서 흡기밸브 열림시기 진각에 의한 밸브오버랩 증가는 TDC 이전에 오버랩 구간이 시작되어 흡기 포트에 배출가스의 역류 현상이 일어난다. 이렇게 역류한 배출가스는 다음 사이클의 잔류가스량을 증가시키는데 영향을 준다. 또한 IVO 시점의 진각으로 인해 IVC 시점도 진각되므로, 유효 압축비의 증가를 가져올 수 있다.⁽⁸⁾

Fig. 8과 Fig. 9는 밸브오버랩(VO: Valve Overlap) 변화에 따른 연소압의 변화를 나타내는 그래프이다. 흡기포트 쪽으로 역류되는 양이 많

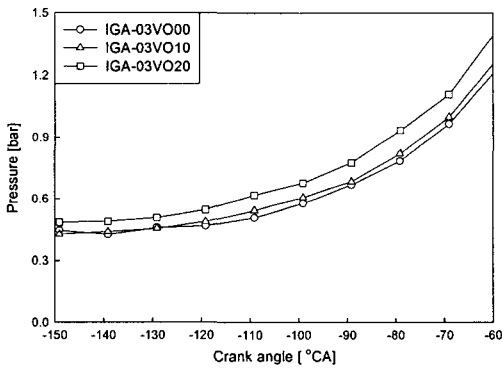


Fig. 8 Variation of combustion pressure with changes in valve overlap periods (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

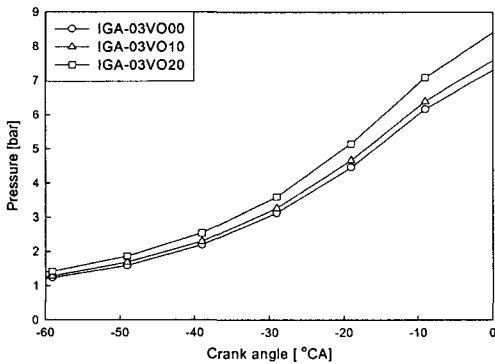


Fig. 9 Variation of combustion pressure with changes in valve overlap periods (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

은 밸브오버랩 구간이 20 °CA인 지점에서 흡기 압력이 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 또한 IVC지점의 진각에 의한 유효압축비 차이로 인해 오버랩이 커질수록 압축말기의 실린더 내부 압력이 상승하는 것을 볼 수 있으며 이는 연소에 긍정적인 효과를 미칠 것으로 고려할 수 있다.

3.4 배출가스 성분의 농도 변화

배출가스의 온도상승에 영향이 가장 큰 ATDC 3 °CA의 상황에서 오버랩 구간을 변경시켜가며 배출가스 농도 변화를 측정하였다. Fig. 10은 THC의 변화 경향을 나타내고 있다. 오버랩 구간이 증가하게 되면, 오버랩 구간 동안 신기와 잔류가스의 혼합이 발생하여 연소실 내부의 산소농도는 다소 줄어드는 반면, IVC 시점의 진각으로

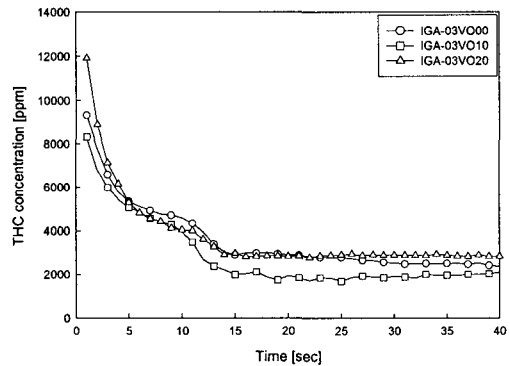


Fig. 10 Variation of THC concentration with changes in valve overlap periods (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

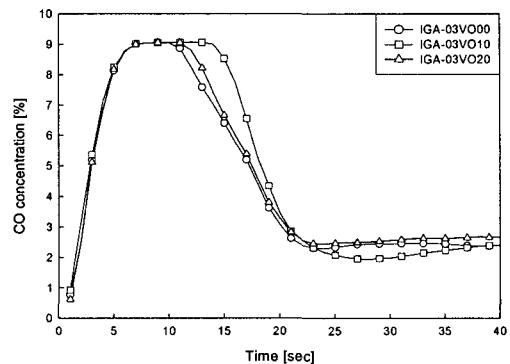


Fig. 11 Variation of CO concentration with changes in valve overlap periods (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

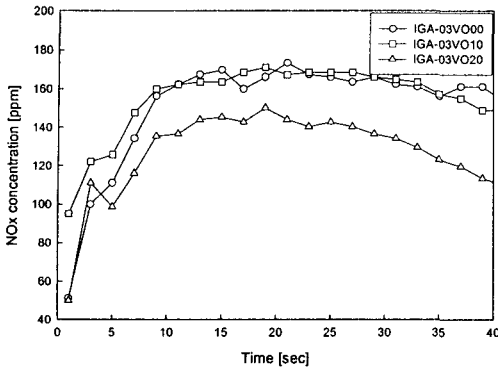


Fig. 12 Variation of NO_x concentration with changes in valve overlap periods (IGA: Ignition Angle, VO: Valve Overlap)

인한 유효압축비의 상승으로 압축말기의 연소실 압력이 상승하게 된다. 따라서 공회전 천이구간에서 오버랩 구간의 변화는 잔류가스 증가에 의한 연소실내의 연소조건 악화라는 부정적 효과와 압축말기의 연소실내 압력의 상승이라는 긍정적 효과의 경쟁관계에 의한 영향을 받을 수 있다. 이런 효과는 Fig. 11에서 나타내는 CO의 변화 경향에서도 관찰할 수 있다. 실험을 통해 공회전 천이영역 부근에서는 각 효과의 긍정/부정적 영향이 상쇄되어 밸브오버랩의 변화가 THC 및 CO에 미치는 영향은 미약한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12은 NO_x의 변화경향을 보이고 있으며 밸브오버랩 구간이 20 °CA인 경우에 NO_x가 가장 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 공회전 천이구간은 다소 농후한 상태로 혼합기가 공급되기 때문에 NO_x의 발생은 산소농도에 의한 효과보다는 연소실의 최고온도에 의한 효과가 더 지배적인 적이다. 그러나 밸브오버랩의 증가에 따른 연소실내 잔류가스의 증가는 EGR의 효과와 유사하게 혼합기의 비열을 증가시켜, 연소 최고 온도를 낮추어 NO_x의 발생을 줄인다. 실험결과 공회전 천이구간에서 촉매의 온도를 높이면서도 유해 배출물을 저감시키는 조건은 엔진의 연소안정성을 해치지 않는 범위 내에서의 점화시기의 지각과 밸브오버랩 구간을 증가시키는 것이 적합할 것으로 생각한다.

4. 결론

본 연구는 엔진의 제어변수 변화가 배출가스의

온도 및 배기 배출물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 진행되었으며, 실험결과를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 촉매 예열기능이 차단되는 시점에서 공연비가 불안정하게 되는 현상이 발생하며, 이는 배기 배출물 증가로 나타난다.

(2) 시동초기 공회전시 점화시기의 지각은 화염 발생 시기를 늦춰 연소를 팽창행정 말기까지 지속시켜 촉매의 온도를 높이는데 긍정적인 영향을 미친다. 또한 흡기의 부압이 낮은 무부하 공회전 상태의 조건에서 밸브오버랩 증가는 잔류가스를 증가시켜 연소실 내의 화염속도 감소 및 연소의 지속시간 증가를 가져오게 되고, 이에 의해 배출가스 온도를 다소 상승시킨다.

(3) 밸브오버랩의 증가는 연소실내의 잔류가스 증가라는 연소의 부정적 효과와 압축말기 연소실내의 압력상승이라는 긍정적 연소효과를 일으켜, 이들의 경쟁관계에 의한 연소현상 변화가 발생한 다.

(4) 밸브오버랩의 증가에 의한 긍정적, 부정적 효과의 상쇄로 인해 THC 및 CO 배출 농도 변화는 미약한 것으로 관찰되었다. 이에 비해 잔류가스량의 증가로 인한 실린더 내 혼합기 비열의 증가는 연소실내의 최고 온도를 감소시켜 NO_x의 배출량 감소에 큰 영향을 미친다.

후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발” 과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yang, C. S., Lim, C. K., Ahn, J. W., Kim, D. S. and Cho, Y. S., 2005, “Raw Emissions and Changes of Combustion Stability with Controls of Timing Variables in Idle Operations of an SI Engine,” *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 3, pp. 384~389.
- (2) Choi, M. S., Sun, H. Y., Lee, C. H., Myung, C. L. and Choi, J. K., 2000, “The Study of HC Emission Characteristics and Combustion Stability with Spark Timing Retard at Cold Start in

- Gasoline Engine Vehicle," *SAE technical paper*, 2000-01-1082.
- (3) Kim, D. S., Kim, S. C., Hwang, S. H., Cho, Y. S. and Ohm, J. Y., 2004, "Estimation of Exhaust Gas Recirculation Using In-Cylinder Residual Gas Fraction in an SI Engine," *Trans. of KSAE*, Vol. 12, No. 1, pp. 55~60.
- (4) Almukvist, G. and Eriksson, S., 1993, "An Analysis of Air Fuel Ratio Response in a Multi Point Fuel Injected Engine Under Transient Conditions," *SAE technical paper*, No. 932753.
- (5) Shayler, P. J. and Goodman, M. S., 1996, "Transient Air/Fuel Ratio Controls of an SI Engine Using Neural Networks," *SAE technical paper*, No. 96026.
- (6) Kaidantzis, P., Rasmussen, P., Jensen, M., Vesterholm, T. and Hendricks, E., 1993, "Transient A/F Ratio Errors in Conventional SI Engine Controllers," *SAE technical paper*, No. 930856.
- (7) Lee, J. H., Lee, C. H., Kim, D. S. and Cho, Y. S., 2005, "Numerical Analysis of Flow Characteristics of Residual Gas due to Changes of Valve Timings During an Idle Operation in an SI Engine," *KSAE fall conference proceedings*, Vol. 1, pp. 68~73.
- (8) Jeong, Y. J., Kim, Y. Y. and Lee, J. T., 2004, "A High Expansion Effects of Atkinson Cycle by Adopting Variable Intake Valve Closing Timing with Compensated Intake Air-mass and Effective Compression Ratio," *KSME fall conference proceedings*, pp. 1698~1703.