

가솔린기관의 시동시 기관 제어변수가 배기가스온도 및 시동성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

조용석^{*1)} · 안재원²⁾ · 박영준²⁾ · 김득상²⁾ · 이성욱¹⁾

국민대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 국민대학교 자동차공학전문대학원²⁾

Effects of Engine Control Variables on Exhaust Gas Temperature and Stability during Cranking Operation of an SI Engine

Yong-Seok Cho^{*1)} · Jae-Won An²⁾ · Young-Joon Park²⁾ · Duk-Sang Kim²⁾ · Seang-Wock Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul 136-702, Korea

²⁾Graduated School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 30 March 2006 / Accepted 20 July 2006)

Abstract : Raising exhaust gas temperature during cold-start period is very crucial to improve emission performance of SI engines because it enhances the performance of catalyst in the early stage of engine start. In this study, control variables such as ignition timing, idle speed actuator(ISA) opening and fuel injection duration were extensively investigated to analyze variations in exhaust gas temperature and engine stability during cranking period. Experimental results showed that spark timing affected engine stability and exhaust gas temperature but the effects were small. On the other hand, shortened injection duration and increased ISA opening led to a significant increase in exhaust gas temperature. Under such conditions, increase in cranking time was also observed, showing that it becomes harder to start the engine. Based on these observations, a pseudo fuel-air ratio, defined as a ratio of fuel injection time to degree of ISA opening, was introduced to analyze the experimental results. In general, decrease in pseudo fuel-air ratio raised exhaust gas temperature with the cost of stable and fast cranking. On the contrary, an optimal range of the pseudo fuel-air ratio was found to be between 0.3 to 0.5 where higher exhaust gas temperatures can be obtained without sacrificing the engine stability.

Key words : Exhaust gas temperature(배기가스 온도), Injection duration(연료분사 기간), Idle speed actuator(공회전 속도 조절기), Ignition timing(점화시기), Engine start(엔진시동), Engine stability(시동 안정성)

1. 서론

배기규제가 강화됨에 따라 엔진내부에서 유해가스를 저감시키는 기술만으로 배기규제를 만족시키기에는 한계가 있기 때문에 다양한 배기후처리 기술의 개발이 불가피해졌다. 가솔린기관에서 배출되는 유해 배기가스의 대부분은 CO, HC 및 NOx가 차

지하고 있다. 정상적인 운전상태에서 이들 유해 배기가스는 촉매를 이용하여 대부분 저감시킬 수 있으나, 일반적으로 촉매는 활성화온도에 도달한 이후에 제 기능을 발휘할 수 있기 때문에, HC의 경우 촉매가 활성화되기 전에 전체 배출의 약 80%정도가 배출된다.¹⁾ 이로 인해 더욱 강화된 규제를 만족시키기 어려움이 있어, 다양한 촉매 예열 기술의 개발 및 적용이 필수적이며, 아울러 기관의 시동초기 제

*Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

어를 보다 정밀하게 수행하여 시동초기 배기가스의 온도를 상승시키고 이를 통해 촉매의 예열특성을 향상시킬 필요가 있다.

시동초기의 공기량은 스로틀밸브가 거의 닫힌 상태이므로 ISA의 개도에 따라 공기량이 변하게 되며, 따라서 ISA의 조절을 통해 냉시동 구간에서 연소실의 연소조건을 조절할 수 있다. 더욱이 냉시동 구간에서는 온도가 낮아 분사된 액상연료의 기화가 적어 연료-공기 혼합기의 효과적 구성이 어려워 뿐만 아니라 안정적인 시동성을 확보하기 위해 많은 양의 연료를 분사하는 것이 일반적이다. 냉시동 초기에 농후하게 분사된 연료로 인해, 증발되지 않은 연료액적은 초기 HC의 배출을 크게 증가시키는 문제를 일으킨다. 따라서 시동초기 시동성에 영향을 주지않는 범위에서 연료분사량 및 공기량을 적절히 제어하여 보다 적은 연료공급을 이룰 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 또한 점화시기는 연소시작 시점을 결정하여 연소실 최대압력, 연소기간 및 연소 온도 등에 영향을 준다. 점화시기를 시동초기에 적절히 설정하면 시동성 향상 및 배기가스의 온도상승을 피할 수 있어 촉매예열성 향상 및 배기 오염물질 배출개선에 효과적일 수 있다.^{2,3)}

따라서 본 연구에서는 냉시동 초기 크랭킹 구간 동안 기관의 점화시기, 연료분사량 및 ISA 개도를 제어하여 기관의 시동성 변화 및 배기가스 온도변화를 실험적으로 관찰하였다. 이를 위해 ECU의 제어맵을 수정하여 각 실험조건을 조절하고, 각 조건에서 냉시동 과정을 실험하여 배기가스온도를 측정하였다. 또한 시동 시작점부터 크랭킹 완료시점까지의 시간과 엔진 회전수 상승률을 측정하여 기관의 시동성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 엔진은 4-실린더 DOHC 2.0L 가솔린 엔진으로, CCC 및 흡기 가변 밸브타이밍기구(VVT: variable valve timing)가 장착되어 있다. 자세한 엔진의 제원과 실험장치의 개략도를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 The specifications of test engine

Engine spec.	Production type
Cylinder	4
Valves / Cylinder	4
Bore	82 mm
Stroke	93.5 mm
Displacement	1975cc
Compression ratio	10.1
Idle speed	700 ± 100 rpm
Spark timing	BTDC 8° ± 5°
Intake timing	ATDC 11°/ABDC 59°
Exhaust timing	BBDC 42°/ATDC 6°
Valve overlap	Variable, -5° at cranking

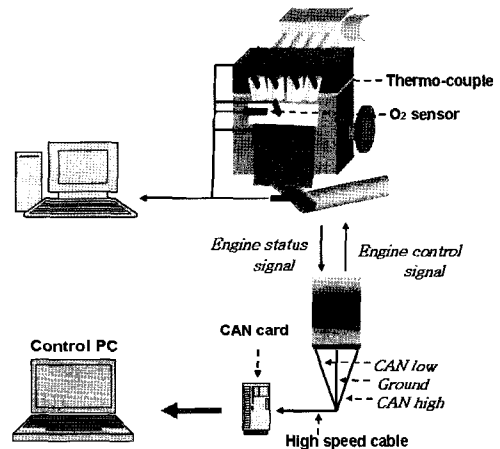


Fig. 1 Schematic diagram of engine test bench

배기가스의 온도는 응답성이 빠르고 고온영역에서 측정이 가능한 1/16 inch K-type 열전대(thermo-couple)를 이용하여 측정하였다. 측정위치는 배기다기관을의 각 분지관, 촉매 입구, 촉매 담체 중심 상단 및 촉매 출구 지점으로 총 7개를 설치하여 측정하였다. 온도변화 측정시점을 통일하기 위해 encoder를 크랭크 샤프트 중심에 설치하여 1회전당 1개의 신호가 발생되는 Z-pulse를 측정 개시 트리거 신호로 이용하여 측정을 시작하였고, 1000Hz로 데이터를 측정 저장하였다. 측정 저온보상(CJC: cold junction calibration)은 서미스터 타입의 저온보상 센서를 탑재한 신호 처리기(signal conditioner)를 적용하였다. 측정된 온도신호는 PIC-MIO-16E4 컨버터, SCXI-1000, 1100 신호처리기 및 TC-2095 터미널을 이용

하여 처리하였다.

시동시 점화시기와 연료분사량을 제어하기 위한 장치로 CAN(controller area network) 통신카드를 ECU에 적용하였다. ECU와 CAN 카드간의 통신은 ECU배선에서 CAN-high, low, ground 신호를 high speed cable을 통해 CAN 카드에 연결하는 방식으로 이루어지며, 제어 PC에서 CAN통신용 프로그램을 사용하여 ECU를 실시간으로 제어하고 모니터링 할 수 있게 하였다.

2.2 실험방법

냉시동의 조건은 FTP-75 모드의 각 실험에서 phase 1의 조건을 적용하여, 동일한 냉시동 조건의 재현을 위해 자연 냉각방식으로 실험공간의 대기온도, 엔진의 냉각수 온도 및 오일온도를 모두 25°C로 냉각(soaking)후 실험을 수행 하였다. 또한 ECU의 학습값에 의한 데이터 변경을 막고, 실험의 일관성을 유지하기 위해 매 실험시 ECU를 초기화하여 학습값을 소거시키는 과정을 수행하였다. 엔진 시동에 관련된 제어변수의 변화에 따른 온도 및 시동 특성을 이용해 효과적인 촉매 예열 및 시동을 위한 조건을 찾기 위해서는 시동시의 제어변수에 의한 효과가 관찰되는 구간의 데이터를 높은 시간적 해상도로 처리하는 것이 유효하다고 판단하여 시동기간을 포함하여 5초 동안 1000Hz의 수준으로 데이터를 수집하였다.

실험조건은 점화시기 BTDC 10°C A, 3°C A, ATDC 5°C A의 세 조건을 적용하였고, 인젝터 분사 시간(TI: time of injection)으로 연료 분사량을 정의하여, 10~70ms까지 5ms 간격으로 변경하여 실험하였다. ISA개도는 5 ~ 95%까지 5%씩 변경하여 위의 인젝터 분사시간 조건과 조합하였다. 먼저, 각 조건에 대한 가연한계, 즉 크랭킹 구간에서 반복적으로 시동성이 확보되는 한계 범위를 조사하고, 그 중에서 가연한계영역 내에 있는 조건을 대상으로 온도변화 및 기관회전수 변화를 측정하였다.

이와 같은 제어변수는 냉시동 크랭킹 구간에만 적용되며, 크랭킹 성공 후 ECU가 기관의 시동을 판단하면 냉간 공회전 조건에 따라 ECU에 저장된 공회전 천이구간 제어맵으로 변환되어 운전된다. 따라서 크랭킹 완료의 시점은 ECU의 상태를 모니터

하여 이들 제어변수 값이 공회전조건으로 변화되고, 엔진 회전속도가 일정 RPM에 도달하는 시점으로 정의하였다. 냉시동 크랭킹 구간은 매우 짧은 시간 동안 이루어져, 각각의 조건에서 시간에 따른 온도 및 엔진회전수 데이터를 비교하기 위해서 데이터의 취득 시점을 일치시켰다. 이를 위해 encoder에서 발생하는 첫 번째 Z-pulse가 항상 같은 크랭크각에서 발생할 수 있도록 시동 전에 1번 실린더의 피스톤을 항상 상사점 위치로 이동시킨 후 실험을 수행하였다.

배기가스 온도는 제어조건에 변화에 가장 민감하게 반응할수 있는 1~4번 배기다기관 온도를 사용하였으며, 이들 값의 평균을 배기가스 온도의 대표값(Te)으로 이용하였다. 크랭킹 구간에는 기화하여 공기와 혼합된 연료량을 정확히 판단할 수 없어 연료-공기 혼합기의 연료공기비를 판단하기 어렵다. 이에 따라 동일 온도에서 기화율이 일정하다고 가정하면 혼합기의 연료량은 연료분사시간 TI에 비례한다고 볼 수 있고, 공기 공급량은 ISA 개도량에 의해 결정된다고 볼 수 있으므로 시동초기의 TI/ISA 개도의 비를 의사 연료공기비(pseudo fuel-air ratio) ψ 로 정의하여 데이터 분석에 이용하였다.

$$\psi = \frac{TI}{ISA}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 배기가스의 온도변화

3.1.1 점화시기 변화에 의한 영향

먼저 점화시기, 연료분사량 및 ISA 개도변화에 따른 배기가스 온도변화를 검토하였다. Fig. 2는 ISA 개도를 95%로 고정시키고 연료분사량 및 점화시기 변화에 따른 온도변화를 나타내었다. 온도값은 시동 후 5초 시점에서, 각 실험 조건에서의 Te 최대값을 기준으로 정규화한 값을 나타내었다. 다른 외부 조건에 의한 온도변화의 영향을 고려하지 않고 점화시기 변화에 따른 온도변화 특성만을 관찰하기 위해 위와 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

점화시기에 의한 온도변화를 보면 점화시기가 지각된 경우 배기가스 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 연소발생 시점이 늦어져 팽창행정 말기까

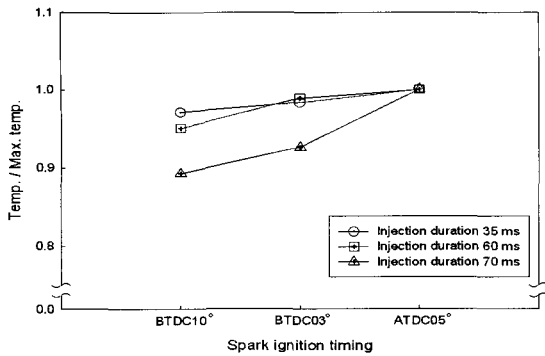


Fig. 2 Exhaust gas temperature variations with respect to spark ignition timings at 5 seconds after engine start

지 열방출이 지속되기 때문인 것으로 생각한다.⁴⁾ 그러나, 점화시기 변화에 따른 배기가스의 온도 변화는 가장 심한 차이를 보이는 경우에도 10% 수준에 지나지 않으므로, 점화시기 변화에 따른 배기가스 온도의 변화는 크랭킹 구간에서 큰 효과를 일으키지 않는 것으로 생각한다. 이는 후술할 ISA개도 및 연료분사기간 변화에 의한 온도 변화에 비해 매우 적은 차이라고 할 수 있다.

3.1.2 연료분사량 변화에 의한 영향

냉시동 크랭킹 구간에서는 연소실의 온도가 낮아 분사된 연료가 쉽게 기화하지 못하게 된다. 따라서 시동의 안정성을 확보하기 위해 연료분사량을 증가시켜 연료의 기화량을 강제로 증가시키게 된다. 그러나 이러한 연료 분사량 증가는 점화플러그 오염 등에 의한 실화 및 과도한 wall wetting을 일으키며, 시동후 수 초 동안 연소실의 환경을 농후상태로 지속시켜 시동초기의 HC 배출을 증가시킨다.^{5,6)}

Fig. 3은 연료분사량 변화에 따른 배기가스 온도 변화를 나타낸 것으로, 점화시기는 BTDC 3°CA, ISA 개도는 제어조건인 최대값인 95%로 고정하였다. 가연한계영역 내에서는 연료분사량이 많아짐에 따라 배기가스의 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 과도한 연료분사로 인해 공기-연료 혼합기가 농후해지면서 연소최고온도가 낮아지기 때문이라고 생각한다. 또한 연소실 및 흡기관 주위에 다량의 연료액적이 존재하여 크랭킹 후 사이클의 공연비는 한동안 농후하게 운전되는 것으로 볼 수 있다. Fig. 4는 가연한계영역 내의 조건에서 ISA 개도 및 연료분

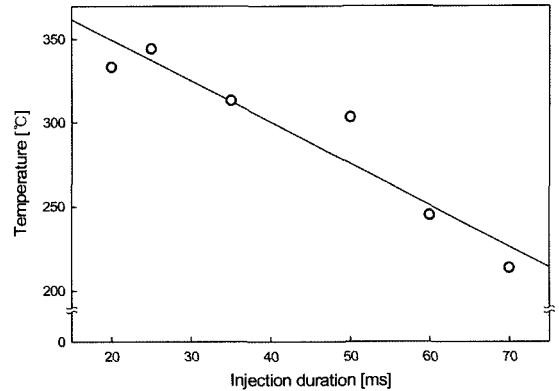


Fig. 3 Exhaust gas temperature with changes in injection duration at 5 seconds after engine start

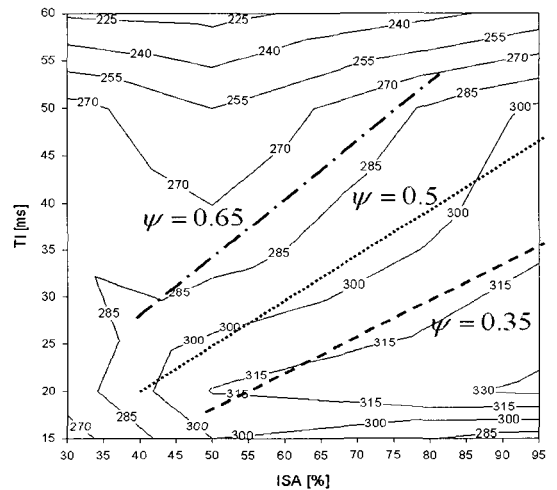


Fig. 4 Distribution of exhaust gas temperature with changes in injection duration and degree of idle speed actuator open (Dotted lines indicate the same pseudo-fuel ratios)

사량 변경에 따른 배기가스의 온도변화를 나타낸 것이다. ISA 개도가 커지고, 연료분사량이 줄어들수록 배기가스의 온도가 높아지는 것을 볼 수 있다. 또한 의사 연료공기비 ψ 가 일정한 구간에서는 배기가스의 온도 분포가 거의 일정한 것을 알 수 있는데, 이것은 시동 초기 가연한계영역 내에서 배기가스의 온도를 결정하는 가장 중요한 요소가 연료-공기 혼합기의 비임을 의미한다. 또한 의사 연료공기비가 낮을수록 배기가스의 온도가 상승함을 알 수 있다. 실험을 통해 의사 연료공기비 0.25 근방에서 가장 높은 배기가스온도가 관찰되었다. 다만, 연료분

사시간이 5ms이하인 경우에는 가연한계영역을 희박하게 벗어나면서 시동성이 급격히 떨어지고 배기가스 온도가 감소하는 것으로 판단된다. 연료분사량이 50ms를 초과하는 영역에서는 ISA개도의 변화에 관계없이 온도가 일정한 것을 볼 수 있으며, 이것은 시동구간의 wall wetting이 심화되어 크랭킹 이후에도 다소 농후한 연소가 지속되고 있는 것으로 볼 수 있다.

3.1.3 공기량 변화에 의한 영향

연료 분사시간 35ms와 점화시기 BTDC 3°CA의 조건에서 ISA 개도의 변화에 따른 배기가스의 온도 변화를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과 ISA 개도가 커질수록 배기가스 온도는 상승하고, 반대로 개도가 작아져서 흡입 공기량이 적어지면 배기가스 온도는 낮아지는 것을 알 수 있다. 시동초기 연료분사량은 실제로 매우 농후한 수준의 연료량이므로 공기량의 증가는 연료액적의 기화를 도와 혼합기 형성에 도움을 준다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 4의 결과에 따라, 공기량 증가는 의사 연료공기비를 낮추는 효과를 일으켜 가연한계영역 이내에서 배기가스의 온도를 상승시킨다.

Fig. 6에 점화시기가 BTDC 3°CA일 때 의사연료공기비 변화에 따른 배기가스 온도를 나타내었다. Fig. 4에서 나타난 것과 같이 0.2~0.7까지의 의사 연료공기비 구간에서는 Ψ 의 감소에 따라 배기가스 온도가 상승하였으며, 이에 따라 Ψ 가 0.2 수준일 때 가장 높은 배기가스 온도를 나타내고 있다. 그러나

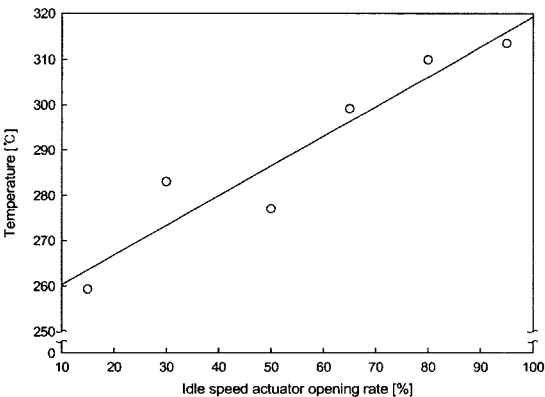


Fig. 5 Exhaust gas temperature with respect to open rate of idle speed actuator at 5 seconds after engine

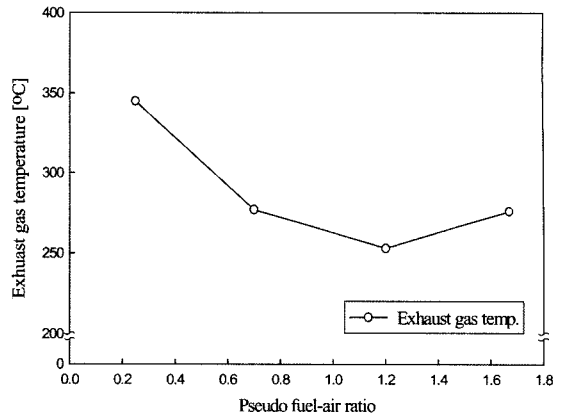


Fig. 6 Exhaust gas temperature with the changes in pseudo fuel-air ratio at 5 seconds after engine start

ISA개도와 관계없이 Ψ 가 0.7이상 되는 연료분사 조건에서는 온도변화가 크지 않은 것으로 관찰되었으며, Fig. 6은 이러한 현상을 반영하고 있다.

3.2 시동안정성 평가

시동안정성을 평가하기 위해 다음과 같은 두 가지 값을 측정하여 비교하였다. 먼저 시동 초기의 엔진회전수 증가율을 측정하였다. 실린더 내에 안정적으로 연소하기 좋은 혼합기가 공급되는 조건에서는 크랭킹 직후에 안정적으로 연소가 진행되어 기관 회전수가 빠르게 상승할 것으로 생각할 수 있다. 그러나 적절한 혼합기가 형성되지 못했다면 연소가 불안정한 사이클이 나타나게 되어 기관의 안정적 시동성공이 어렵고, 기관의 회전수 증가량이 적어질 것으로 볼 수 있다. 다른 하나는, 엔진 크랭킹 구간 길이를 측정하는 것이다. 스타트 모터에 의한 기관 회전수는 200rpm 수준인 데 비해, 연소가 시작되는 순간 기관 회전수가 크랭킹 구간의 회전수에서 급격하게 상승하고, ECU의 제어모드가 변화하기 때문에, 크랭킹 시작 시점으로부터 ECU의 제어모드가 변화하는 시점까지의 시간을 크랭킹 시간 (cranking time)으로 정의하여 시동성을 평가하였다. Fig. 7은 크랭킹 직후부터 크랭킹 시간과 연소직후부터 0.1초 동안의 엔진회전수 증가량을 나타낸 것이며, 점화시기 BTDC 3°CA에서 연료분사량과 공기량을 변화시켜 측정하였다. 그 결과, 적은 연료분사량과 많은 공기량을 공급해 주었을 때, 즉 의사연

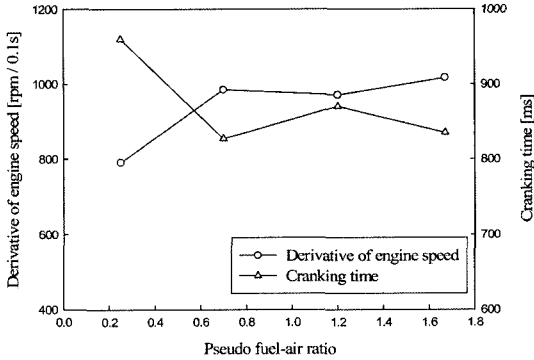


Fig. 7 Variations of engine speed and cranking time with respect to the pseudo fuel-air ratio

료공기비가 작을 때는 엔진회전수 증가량이 적었고, 반대로 의사 연료공기비가 클 때는 엔진회전수 증가량이 크게 나타났다. 이는 냉간 시동초기에는 연료의 기화율이 현저히 낮기 때문에 많은 양의 연료분사를 통해 다소 농후한 혼합기를 형성하는 것이 첫 연소 사이클에서 높은 연소압을 발생시켜 엔진 시동에 도움을 주기 때문이다. 그러나 의사 연료공기비가 0.6을 넘으면 엔진회전수 변화량이 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 엔진 시동부터 혼합기가 연소되는 지점까지의 시간인 크랭킹 시간의 길이는 의사 연료공기비가 커질수록 짧아지는 결과를 보였다. 이러한 결과 역시 연료의 기화율에 의한 변화로 판단된다. 그러나 연료분사시간이 10ms 이하인 적은 영역, 또는 농후 가연한계 영역에서는 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 결국, 시동안정성은 배기가스의 온도변화와는 반대의 경향을 보이는 것으로 생각한다.

위의 두 결과, 즉 배기가스의 온도 상승과 시간안정성의 동시 확보를 위해서는 의사 연료공기비 0.3~0.5 사이의 조건에서 크랭킹이 이루어지는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

또한, 이 의사 연료공기비 영역에서 기관의 가연범위 내에서 가능한 적은 연료분사량을 적용하는 것이 HC 배출억제 등을 고려할 때 타당하다고 생각한다. 높은 시동안정성과 높은 배기가스온도를 동시에 만족하는 영역을 선정하는 것은 매우 어려운 문제이며, 겨울철과 같은 극한 냉시동 조건에서는 시동성의 확보가 더욱 어려워지기 때문에 시동성에 초점을 맞춘 엔진제어와 더불어 촉매 예열을 극대

화하기 위한 부가적 방안을 검토할 필요도 있다. 또한 의사 연료공기비는 온도 및 기관 형성에 따라 크게 변할 수 있기 때문에 냉시동 구간의 모든 현상을 파악하기에는 무리가 있다고 할 수 있으나, 일정한 조건 하에서 정성적인 냉시동 초기의 특성을 이해하는 데에 효과적으로 적용되었다고 판단한다.

4. 결론

본 연구에서 점화시기, 연료분사량 및 ISA 개도량과 같은 기관 제어변수의 변화가 냉시동시 배기가스의 온도변화 및 시동초기의 시동성을 측정해본 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 냉시동 크랭킹 구간에서 점화시기의 변화는 시동성 및 배기가스 온도변화에 큰 영향을 미치지 않는 반면, 연료분사량 및 ISA개도의 조합에 의한 의사 연료공기비의 변화는 시동성과 배기가스 온도를 크게 변화시킨다.
- 2) 의사 연료공기비가 일정한 구간에서는 배기가스의 온도분포가 거의 일정하였으며, 의사 연료공기비 0.25 근방에서 가장 높은 배기가스 온도가 관찰되었다. 그러나 의사 연료공기비의 감소는 시동성을 악화시키며, 의사 연료공기비 0.6 이상에서는 모두 안정적인 시동성을 나타내었다.
- 3) 의사 연료공기비 0.3~0.5 인 영역에서 최적의 시동성 및 배기가스 온도의 상승을 기대할 수 있으며, 이 영역에서 연료분사량은 HC 배출억제를 위해 가연한계영역 이내에서 가능한 적은 분사량을 적용하는 것이 타당하다.

후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발” 과제의 일부 및 2005년도 국민대학교 교내 연구비를 지원받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) M. E. Crane, R. H. Thring, D. J. Podnar and L. G. Dodge, “Reduced Cold-Start Emissions Using Rapid Exhaust Port Oxidation (REPO) in

- a Spark Engine,” SAE 970264, 1997.
- 2) S. Lee, C. Bae, Y. Lee and T. Han, “Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine,” SAE 2002-01-1677, 2002.
 - 3) C. Yang, C. Lim, J. Ahn, D.-S. Kim and Y.-S. Cho, “Raw Emissions and Changes of Combustion Stability with Controls of Timing Variables in Idle Operations of an SI Engine,” Transactions of KSME, Vol.29, No.3, pp.384-389, 2005.
 - 4) M.-S. Choi, H.-Y. Sun, Cheil-Hee, C.-L. Myung, W.-T. Kim and J.-K. Choi, “The Study of HC Emission Characteristics and Combustion Stability with Spark Timing Retard at Cold Start in Gasoline Engine Vehicle,” SAE 2000-01-1082, 2000.
 - 5) S.-R. Lee, Internal Combustion Engine Fundamentals, Boseongkak, Seoul, Korea, pp.102-104, 2002.
 - 6) H. Kim, S. Yoon and M.-C. Lai, “Study of Correlation between Wetted Fuel Footprints on Combustion Chamber Walls and UBHC in Engine Start Processes,” Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.5, pp.437-444, 2005.