

< 논문 >

스파크 점화기관의 냉시동시 배기밸브 타이밍 및 점화시기 변화에 따른 배기가스의 온도변화

김득상[†] · 양창석^{*} · 박영준^{*} · 조용석^{**}
(2004년 11월 9일 접수, 2005년 1월 22일 심사완료)

Variation of Exhaust Gas Temperature with the Change of Spark Timing and Exhaust Valve Timing During Cold Start Operation of an SI Engine

Duk-Sang Kim, Chang-Seok Yang, Young-Joon Park and Yong-Seok Cho

Key Words: Exhaust Gas Temperature(배기가스온도), Cold Start(냉시동), Catalyst Warmup(촉매예열), Variable Valve Timing(가변밸브타이밍), Spark Timing(점화시기)

Abstract

Experimental study of variation of exhaust gas temperature was carried out with the changes of spark timing and exhaust valve timing during the cold start operation of an SI engine. To investigate the effects of these variables on combustion stability, cylinder pressure and exhaust gas temperature were measured and analyzed. Experimental results showed that exhaust gas temperature increased when spark and exhaust valve timings were retarded from the baseline cases. However, combustion stability during cold start deteriorated under the retarded conditions. To increase exhaust gas temperature for fast warmup of catalysts while maintaining combustion stability, an optimal condition for spark and valve timing retard should be applied for the cold start period.

1. 서 론

자동차 배출가스에 의한 대기오염을 줄이기 위한 자동차기술 개발은 이미 여러 방면에서 활발히 이루어지고 있다. 특히 가솔린기관의 배기 후처리 기술은 삼원촉매장치의 개발 이후로 급격한 발전을 이룬 바 있다. 그러나 SULEV 등의 강화된 배기 규제의 만족을 위해서는 지금의 삼원촉매장치의 성능을 극대화할 수 있는 새로운 요소기술이 필요한 상

황에 있다. 삼원촉매의 경우 촉매의 예열성이 매우 중요한 요소기술로 평가되고 있으며, 최근에 적용되는 대부분의 삼원촉매 시스템에는 배기열을 효과적으로 이용하여 적은 비용으로 촉매예열성을 향상시키는 근접장착식 촉매장치(Close-Coupled Catalyst, CCC) 기술이 적용되고 있다.

기존의 연구에 의하면, 시동 초기에 점화시기를 지각시킬 경우 연소가 늦게 이루어져 배기가스의 온도가 크게 상승하는 점을 이용하여 촉매 예열성을 향상시키는 기술이 소개되고 있다.⁽¹⁾ 또한, ECU의 전자제어 및 처리기술의 발달로 엔진의 작동 조건에 부합하는, 보다 다양하고 보다 정밀한 엔진의 제어가 가능하게 되었다. 이중에서도 특히 가변밸브타이밍(Variable Valve Timing, VVT) 기술은 흡기계통에 주로 적용되어 엔진의 작동조건에 따라 흡기밸브의 개폐시기를 조절하

[†] 책임저자, 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원
E-mail : lordduke@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-5027 FAX : (02)942-7721

* 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

** 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

여 연소실 내의 공기유동을 원활히 하고 ram effect를 최대한 이용할 수 있게 함으로써 출력 증대와 연비 개선이 기대되고 있으며, 최근에는 더욱 활발한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 향후 엔진기술의 발달은 흡기 및 배기밸브 타이밍의 제어까지도 실현하여 엔진의 동력특성 뿐만 아니라 배기가스 저감 기술의 발달에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구에서는 이와 같은 배기밸브 타이밍 제어 기술과 점화시기 제어기술의 복합적용을 통해 초기 사동시의 배기가스 온도 상승시켜 촉매의 빠른 예열이 가능한 작동조건을 찾는 것을 목표로 하였다. 이 효과를 검토하기 위해 가변 캠샤프트를 이용하여 배기밸브의 타이밍을 변화시켰고, 이와 동시에 점화시기를 다양하게 변화시켜 각 조건에서 냉시동 특성의 변화를 관찰하였다. 이 과정동안의 배기가스 온도 및 연소실 압력을 측정하여 배기가스의 온도 상승 및 연소 안정성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 설정

실험에는 승용차용 SI 엔진인 1975cc, 4실린더 DOHC 엔진을 사용하였다. 실험용 엔진의 주요 제원은 Table 1에 정리한 바와 같다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

연소실의 압력은 Kistler 6052B 압력센서를 스파크 플러그 타입 마운트를 이용하여 1번 실린더에 설치하여 측정하였으며 센서로부터의 신호는 charge meter를 통해 전압신호로 환산된다.

Table 1 Specification of test engine

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

이 신호는 엔진에 별도 장착한 엔코더에 의해 1° CA 당 하나씩 발진되는 펄스를 기반으로 스캔하도록 프로그램된 A/D 컨버터에 의해 PC에 저장된다. 이 과정에서 엔진의 1번 실린더 TDC 센서의 신호를 동시에 저장하여 압력 신호의 기준 TDC를 추적하였다. 압력센서에 의해 측정된 전압은 Labview에 의해 작성된 연소진단 프로그램을 통해 p-θ 선도로 환산되었다. 이 때 실험에 적용된 압력센서는 실험의 연속적 진행에 따라 전압의 drift가 발생되었으나, drift에 의한 zero 값은 시간에 따라 점차 낮은 전압으로 변해가는 반면, span 값은 계속 일정한 상태를 유지하므로,⁽²⁾ zero 압력을 보상하기 위해 Kistler 4045A 절대압 센서를 흡기기에 장착하여 흡기챔버 내부의 압력을 측정하였다. 흡기챔버 내부의 압력은 흡기과정 동안 연소실 내부의 압력과 거의 같으므로,⁽³⁾ 이 절대압 센서에 의한 흡기 부압을 연소압 센서의 흡기과정 동안의 압력으로 환산하고 이를 기초로 연소실 압력신호의 span값을 이용하여 연소실 압력센서의 신호를 압력으로 환산하였다.

배기가스의 온도는 k-type 열전대를 CCC입구와 배기다기관 사이에 설치하여 측정하였다. 이때 측정된 신호는 National Instrument의 SCXI-1000 signal conditioner 및 A/D 컨버터를 이용하여 PC에 저장하였다.

배기밸브 타이밍의 조정은 별도 가공된 가변캠 샤프트를 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 가변캠샤프트의 사진이다. 캠 프로파일은 원래 엔진에서 사용하는 캠과 동일한 형태이며, 캠스프로켓 및 체인 풀리와 캠축이 분리될 수 있는 구조로 되어 있다. 따라서 캠축은 실린더 헤드에

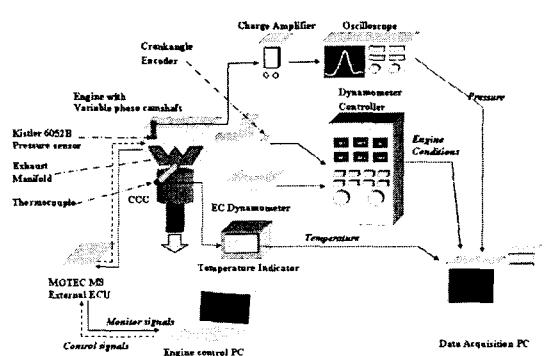


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

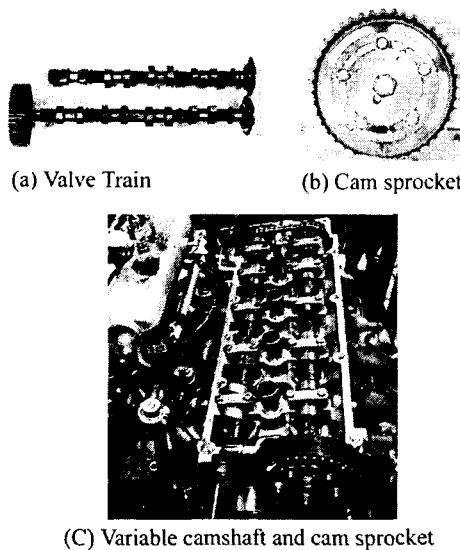


Fig. 2 Variable timing camshaft installed on the cylinder head

장착된 상태에서도 피스톤의 위치 및 흡기 캠샤프트와 독립적으로 분리되어 그 초기 위치를 변경할 수 있도록 구성되었다.

점화시기의 변경 및 연료공급량의 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. 점화 시기는 M8 ECU의 제어용 PC에서 쉽게 설정할 수 있으며, 설정된 정보는 시리얼 통신으로 M8 ECU에 인가된다.

2.2 실험조건

모든 실험에서 엔진은 냉시동 조건하에서 시동되었으며, 이때의 냉시동 조건은 엔진의 냉각수 온도가 20°C 가 되도록 조절된 상태를 말한다. 엔진은 시동 후 300초간 공회전 상태로 유지되며, 이 과정동안 배기가스의 온도를 측정하였다. 예비실험 결과 냉시동 후 약 200초 이상 공회전을 지속한 경우 배기가스 온도 및 엔진 회전수가 안정되었으므로, 이에 따라 200초 후에 연소실의 압력을 측정하였다. 이는 초기 시동시의 연소불 안정에 의한 효과가 어느 정도 약해진 것으로 판단되는 상태에서 연소실의 압력특성을 측정하여 배기밸브 타이밍 및 점화시기의 변화에 따른 연

소 안정성을 검토하고자 하였기 때문이다.

점화시기는 엔진의 기본값인 BTDC 10° 를 기준으로 5° CA씩 변경하여 BTDC 5° (retard) 및 BTDC 15° (advance)인 경우를 대상으로 실험하였으며, 배기밸브 타이밍은 엔진 기본값인 BBDC 50° 를 기준으로 BBDC 38° 조건인 $+12^{\circ}$ CA (advance), 그리고 BBDC 62° 조건인 -12° CA (retard) 조건에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 밸브타이밍의 영향

배기밸브 타이밍의 변화는 배기가스 온도 변화에 크게 두 가지 영향을 일으킬 수 있을 것이다. 먼저 배기밸브 열림시점을 앞당길 경우 블로우다운 시점을 앞당기는 효과를 일으켜 연소실 내부에 존재하는 가스가 보다 고온고압의 상태인 채로 배기관으로 공급되어 배기가스의 온도를 상승시키는 효과를 일으킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한 현재의 실험 조건과 같이 흡기밸브의 작동시점 및 캠 프로파일은 변화가 없이 배기밸브 타이밍만을 변화시키게 되므로 밸브 오버랩 구간을 변화시키게 되는데, 초기 시동시와 같이 흡기의 부압이 강한 조건에서는 배기가스의 일부가 오히려 흡기관쪽으로 이동하게 되고 이 가스는 흡기과정 동안에 연소실로 유입되어 연소실 내부의 잔류가스량을 증가시키게 된다.⁽⁵⁾ 결국 배기밸브 타이밍이 지각되면 밸브 오버랩 구간이 증가하여 연소실 내의 잔류가스가 증가하며 이에 따라 다음 사이클의 연소안정성 및 화염 속도에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다. 결국 이 두 가지 영향은 서로 상반된 특성을 보이기 때문에, 어떤 효과가 실제 엔진의 냉시동 조건하에서 배기가스 온도 변화를 지배할지를 검토하여야 한다.

Fig. 3은 배기밸브 타이밍의 변화에 따른 배기가스 온도 변화를 시간별로 나타낸 그래프이다. 이 때 점화시기는 BTDC 10° CA로 일정하다. 실험 결과, 초기에는 배기밸브 열림 시기가 진각되는 경우 배기가스의 온도가 기준상태에 비해 약간 감소하나, 시간이 어느 정도 지난 이후에는 기준상태와 비슷하거나 약간 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 열림 시기의 지각에 의해 온도 상승이 상대적으로 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 결국 앞에 설명한 바와 같이 배기밸브 타

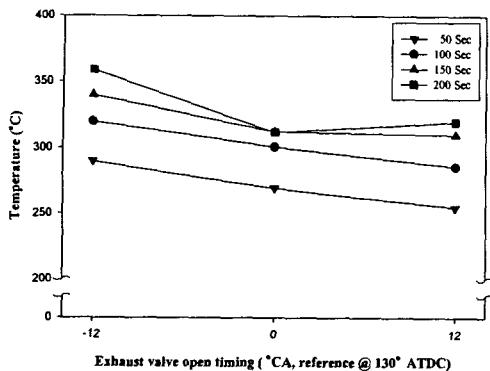


Fig. 3 Variation of exhaust gas temperature with the change of exhaust valve open timing (spark @ BTDC 10°)

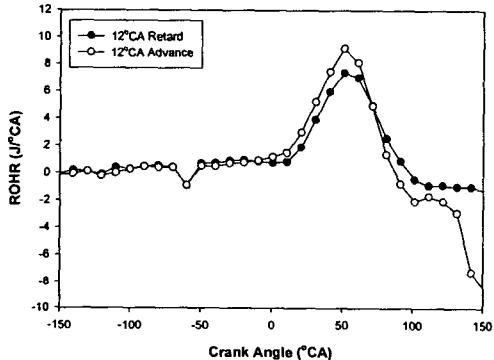


Fig. 4 Rate of heat release curves with the change of exhaust valve timing

이iming의 변화는 밸브 오버랩 구간 길이의 변화 및 블로우다운 시점의 변화를 통해 배기ガ스 온도변화를 일으킬 수 있는 요소인 것으로 확인되며, 특히 온도 상승은 밸브 오버랩 구간 증가에 의한 잔류ガ스 증가 및 화염속도 감소에 의한 효과가 더욱 지배적인 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 잔류ガ스량이 증가하면 실린더내의 혼합ガ스를 회석시켜 열용량이 증가되어 연소실 온도 및 배기ガ스 온도를 낮추는 역할을 하게 된다.⁽⁶⁾ 그러나 본 실험과 같이 배기밸브 타이밍 변화를 통한 오버랩 구간의 증가는 배기 시점의 배기ガ스 온도를 상승시키는 역할을 하게 된다. 이러한 현상은 압력선도의 미분값으로부터 추정한 열방출률 곡선 특성에서 그 근거를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 배기밸브 열림시기의 변화에 따른 연소실 내부의 열방출률 곡선으로, 밸브타이밍이

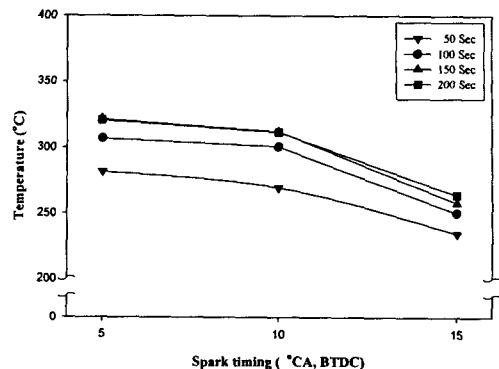


Fig. 5 Variation of exhaust gas temperature with the change of spark timing (exhaust valve open @ BBDC 50°)

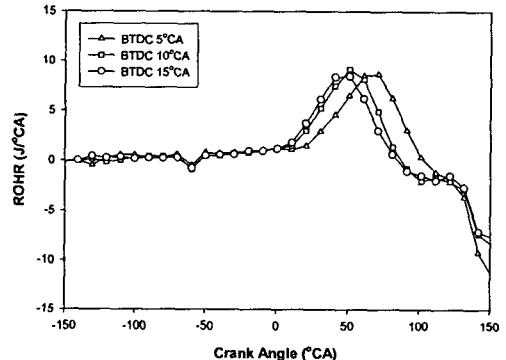


Fig. 6 Rate of heat release curves with the change of exhaust spark timing

진각된 경우에는 상대적으로 밸브 오버랩 구간이 짧아지고, 이에 따라 연소실 내의 잔류ガ스가 감소할 것으로 생각된다. 따라서 화염속도가 증가하여 ATDC 50° CA 근방에서 최대의 열방출률을 보이고 있다. 반면에 밸브 타이밍이 지각된 경우에는 최대 열방출률은 낮은 반면, ATDC 100° CA에 이르기까지 상대적으로 느린 감소를 보여 이후에는 더 높은 열방출률을 나타내고 있다. 결국 잔류ガ스의 증가로 연소의 속도가 저하되어 연소실 내부의 가스온도를 배기시점 근처에서까지 높게 유지하므로 배기ガ스의 온도가 상승되고 있는 것으로 볼 수 있다.

3.2 점화시기 변화의 영향

점화시기는 연소의 시작시점을 변화시켜 연소 최대압력, 출력 및 노킹의 발생 등에 지대한 영

향을 미치는 중요한 변수이다. 냉시동 초기에 배기ガ스의 온도를 높이는 데에는 점화시기를 지각시켜 화염의 발생 시점을 늦추어 주는 것이 효과적일 것으로 기대할 수 있으며, 실험 결과는 이러한 예측을 뒷받침하고 있다.

Fig. 5는 배기밸브 타이밍을 기준상태로 고정하고 점화시기를 진각 및 지각시켰을 때 배기ガ스의 온도 변화를 시간별로 나타낸 그래프이다. Fig. 5에서 나타나는 바와 같이 기준상태 및 점화시기 지각의 경우를 비교해보면, 지각시킨 경우에 배기ガ스의 온도가 약간 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이에 비해서 점화시기를 진각시킨 BTDC 15°의 경우에는 배기ガ스 온도가 크게 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 이것은 Fig. 6에 나타나는 점화시기 변화에 따른 열방출률 곡선을 통해 그 이유를 더욱 명확히 확인할 수 있다. 열방출률 곡선을 살펴보면 점화시기와는 관계없이 열방출률 곡선의 양상이 비슷한 것을 볼 수 있다. 점화시기가 변함에 따라 열방출률 곡선이 옆으로 이동한 모양을 띠는 것을 관찰할 수 있다. 결과적으로 점화시기가 지각되면 최대 열방출율이 발생되는 시점이 늦어지고 배기밸브가 열리는 시점까지 온도를 상승시킨 것으로 판단된다. 따라서 점화시기 지각은 배기ガ스 온도를 상승시켜 촉매 활성화에 도움을 줄 뿐만 아니라, 냉시동 초기의 HC 배출량을 감소시키는 효과도 기대할 수 있을 것이다.

3.3 접화시기 및 밸브 타이밍의 영향

위와 같은 결과를 통해 점화시기의 지각 및 벨브타이밍의 지각은 초기 시동시 화염발생의 시점을 늦추고 화염속도를 느리게 하여 배기가스의 온도를 상승시키는 것으로 판단된다. 그런데, 이 두 변수간의 상관성이 존재한다면, 즉 두 조건이 동시에 변화할 때에 다른 상관특성이 존재한다면 이러한 변화를 동시에 일으키는 것은 연소 과정에 또다른 변화를 일으킬 수 있기 때문에 두 변수간의 상관성을 검토하는 것이 필요하다고 볼 수 있다. Fig. 7은 점화시기 및 벨브타이밍의 변화가 동시에 적용된 경우의 배기가스 온도를 냉시동 후 50초 간격으로 측정한 그래프이다. 실험 결과에 나타나는 바와 같이 배기밸브 타이밍의 지각 및 점화시기 지각이 동시에 적용되는 경우에서 가장 높은 배기가스 온도를 관찰할 수 있으

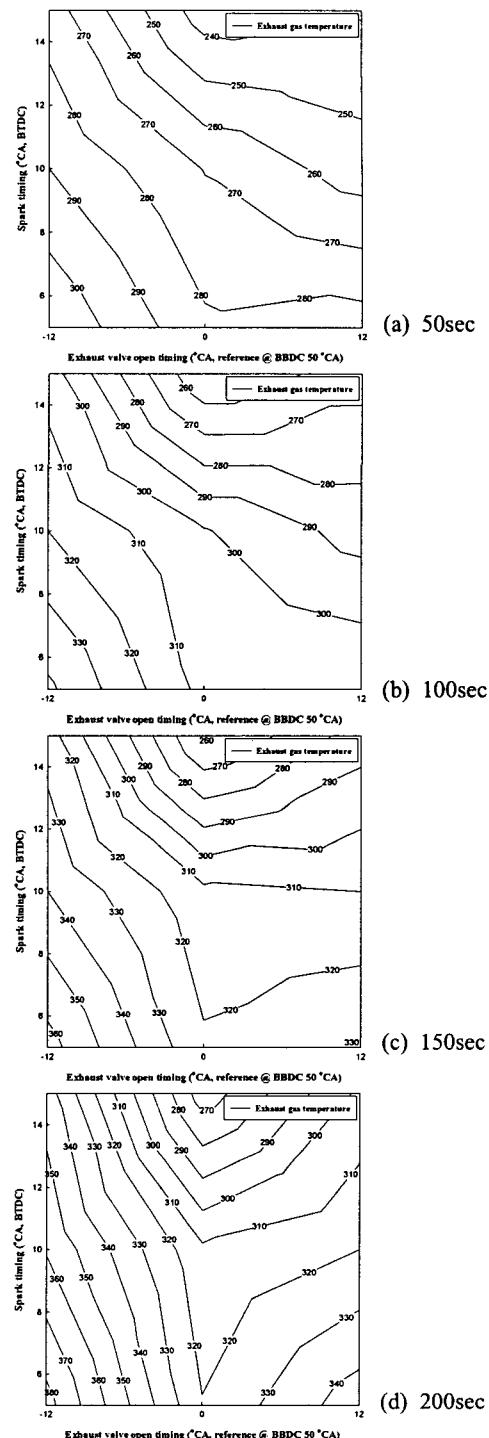


Fig. 7 Exhaust gas temperature contours with the changes of spark timing and exhaust valve timing

며, 이 조건으로부터 점화시기 및 벨브타이밍이 변화함에 따라 점차 온도가 점차 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 두 변수는 온도변화에 대해서는 독립적이라고 볼 수 있다. 다만 150초 및 200초의 경우 배기밸브 타이밍의 진각에 따라 온도가 약간 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 연소가 안정되어감에 따라 블로우다운이 일찍 일어나는 효과에 의한 온도상승이 점차 커지고 있는 것으로 추정된다. 다만, 실험 결과 배기밸브 타이밍의 변화 및 점화시기의 변화는 배기ガ스의 온도 변화 이외에도 엔진의 불안정성을 변화시키는 것으로 관찰되었으며, 이에 관한 보완실험 및 분석이 추가적으로 수행되어야 할 필요가 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

촉매의 예열성을 향상시키기 위해 배기가스의 온도를 빠르게 상승시킬 수 있는 기술로 점화시기 변경 및 배기밸브 타이밍 변화를 동시에 적용하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 배기밸브 타이밍의 진각은 블로우다운시점 을 앞당겨 배기가스의 온도를 일부 상승시키나, 그 정도는 벨브타이밍의 지각에 의한 효과에 비해 상대적으로 약한 것으로 관찰된다.

(2) 배기밸브 타이밍의 지각은 벨브오버랩구간 을 증가시켜 초기시동시 연소실의 잔류가스량을 증가시키고 화염전파속도를 떨어뜨려 팽창행정중 의 연소를 지속시킨다. 또한 점화시기의 지각은 화염의 생성 시점을 늦추게 된다. 이러한 효과에 의해 배기가스의 온도가 상승된다.

(3) 적절한 점화시기 및 벨브타이밍 제어를 시동 초기에 적용하면 배기가스 온도를 상승시켜 촉매의 예열에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 교육부의 BK21과 국민대학교 우수 연구센터 사업의 지원하에 국민대학교 자동차공학전문대학원 열기관실험실의 연구과제로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Russ, S., Thiel, M. and Lavoie, G., 1999, "SI Engine Operation with Retarded Ignition: Part 2-HC Emissions and Oxidation," SAE Technical paper 1999-01-3507.
- (2) Kistler Instrumente AG, 2003, "Kistler Instruction Manual: M5 Sensors Type 6052B," p. 28, 002-017e-02.03.
- (3) Kim, D.S., Kim, S.C., Hwang, S.H., Cho, Y.S. and Ohm, I.Y., 2004, "Estimation of Exhaust Gas Recirculation Using In-Cylinder Residual Gas Fraction in an SI Engine," *Transaction of KSAE*, Vol. 12, No. 1, pp. 55~60.
- (4) John, B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, pp. 413~418.
- (5) Kim, C.S., Song, H.B., Lee, J.H., Yoo, J.S., Cho, H.S. and Ahn, D.Y., 2000, "Effect of Valve Timing on Residual gas Fraction and Combustion Characteristics at Part Load Condition in a SI Engines," *Transaction of KSAE*, Vol. 8, No. 4, pp. 26~33.
- (6) Jang, J.Y., Park, Y.K., Bae, C.S. and Kim, W.T., 2002, "Effect of Operating Conditions on the Residual Gas Fraction in an SI Engine," *Transaction of KSAE*, Vol. 10, No. 6, pp. 11~18.