

실린더 압력을 이용한 SI엔진의 페루프 점화시기 제어에 관한 연구

박승범* · 윤팔주** · 선우명호***
(2000년 2월 16일 접수)

SI Engine Closed-loop Spark Advance Control Using Cylinder Pressure

Seungbum Park, Paljoo Yoon, and Myoungcho Sunwoo

Key Words: Cylinder Pressure(실린더 압력), MBT(최적점화시기), Location of Peak Pressure(최고 압력발생위치), Feedforward Neural Network(앞먹임 신경회로망), Individual Cylinder MBT Control(개별실린더 최적점화시기제어)

Abstract

The introduction of inexpensive cylinder pressure sensors provides new opportunities for precise engine control. This paper presents a control strategy of spark advance based upon cylinder pressure of spark ignition engines. A location of peak pressure(LPP) is the major parameter for controlling the spark timing, and also the LPP is estimated, using a multi-layer feedforward neural network, which needs only five pressure sensor output voltage samples at $-40^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ after top dead center. The neural network plays an important role in mitigating the A/D conversion load of an electronic engine controller by increasing the sampling interval from 1° crank angle(CA) to 20° CA. A proposed control algorithm does not need a sensor calibration and pegging(bias calculation) procedure because the neural network estimates the LPP from the raw sensor output voltage. The estimated LPP can be regarded as a good index for combustion phasing, and can also be used as an MBT control parameter. The feasibility of this methodology is closely examined through steady and transient engine operations to control individual cylinder spark advance. The experimental results have revealed a favorable agreement of individual cylinder optimal combustion phasing.

기호설명

$e(k)$: k 번째 사이클의 LPP 제어오차
 E_i : 신경회로망 i 번째 학습데이터의 LPP
및 hook-back 추정오차
 K_{HB} : Hook-back 게인
 K_p : 비례 게인

N : 신경회로망 학습 데이터의 총수
 $SA(k)$: k 번째 사이클의 점화시기($^\circ$ BTDC)
 T_d : 미분 시간
 T_i : 적분 시간
 T_s : 샘플링 주기

1. 서론

* 회원, 한양대학교 대학원 자동차공학과
** 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
*** 회원, 한양대학교 자동차공학과

E-mail : msunwoo@email.hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0453 FAX : (02)2297-5495

자동차의 유해배기가스와 연비저감에 대한 연구는 엔진개발에 있어 중요한 과제이며, 진보된 엔진제어시스템을 이용한 효과적인 엔진제어에 관한 연구는 이 과제의 해결을 위해 지속적으로 수행되어 왔다. 기존 엔진 제어시스템은 여러

센서를 이용한 간접적인 엔진성능 측정을 통하여 엔진 운전 상태와 외부조건에 따라 엔진제어를 수행하기 때문에 개발과 양산단계에서 엔진시험과 보정에 많은 시간이 소요된다. 또한 초기 생산 시에 정확히 보정되어 있던 엔진 제어기도 엔진의 양산오차나 노후에 따라 그 성능의 저하가 초래된다. 이에 비하여 엔진 연소상황의 직접 계측을 통한 엔진제어는 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있을 뿐만 아니라 엔진 진단 기술확립에도 기여할 수 있다. 그러나 연소계측을 통한 엔진제어를 위해서는 엔진 연소상황을 정확히 측정할 수 있는 센서가 필수적이며, 대표적인 센서로는 연소압력 센서와 이온화전류 센서 등이 제시되었다.^(1~3)

이온화 전류를 이용한 엔진제어는 여러 가지 방법을 통하여 연구되어 왔다.^(1,2) 그러나 이 방법은 한 사이클에 많은 횟수의 이온화전류 측정이 필요할 뿐만 아니라 측정된 이온화전류로부터 연소압력을 추정하거나 필요한 정보를 추출하는 과정에서 복잡한 계산과정을 거쳐게 된다. 또한 그 계산과정은 연료나 흡입공기의 특성에 큰 영향을 받으므로 외부조건 변화에 민감하다 할 수 있다. 또한 이온화전류는 연소과정의 정보만을 제공하므로 실린더별 흡입 공기량 추정 등에는 사용할 수 없다.

실린더 압력을 이용한 점화시기제어에 사용되는 제어변수로는 주로 최고압력발생위치나 질량 연소율 50%인 크랭크각(CA50%) 등이 사용된다. Isao⁽³⁾는 최고압력발생위치(Location of Peak Pressure: LPP)를 이용한 점화시기제어를 통하여 대기압이 표준 대기압보다 낮은 경우의 엔진 출력향상효과를 확인하였다. 그러나, 최고압력 발생위치는 점화시기가 지연될수록 그 값이 증가하지만 엔진이 희박한계부근의 공연비에서 운전되거나 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 비율이 높은 영역에서 운전될 경우에는 혼합기 연소속도의 감소에 의하여 점화시기가 지연될수록 최고압력발생위치가 상사점으로 이동하는 hook-back이 발생하게 되고 이것은 점화시기제어에 최고압력발생 위치만을 이용하는 경우의 문제점으로 지적되었다.^(4~5) Müller 등⁽⁶⁾은 신경회로망을 이용하여 연소압력으로부터 CA50%를 추정하는 방법을 제시하였으며 엔진의 과도운전 상태에서 상용 엔진제어기 보다 효과적으로 CA50%를 일정하게 유지

하였다. Leonhardt 등⁽⁷⁾은 디젤엔진의 모터링 압력과 연소압력의 차를 이용한 연료분사 시스템 제어 및 고장 진단 방법을 제시하였으며, 이는 가솔린 엔진 뿐만 아니라 디젤엔진제어에도 연소압력 이용 가능성을 제시한 것이다. 그러나, 위의 두 방법은 사이클 당 많은 횟수의 실린더 압력측정, 복잡한 계산, 그리고 압력센서 보정을 필요로 하는 단점이 있다.

위와 같은 문제점 때문에 실린더 압력을 이용한 엔진제어는 내구성이 있는 저렴한 연소압력 센서개발과 적절한 압력변수(연소 압력으로부터 계산되어 엔진제어에 이용되는 변수)의 선정이 중요한 과제로 제기되어 왔다.

내구성이 있는 저렴한 실린더 압력센서의 연구·개발이 많은 회사와 연구기관에서 진행되고 있으며, 그 결과 여러 종류의 센서가 소개되고 있다.⁽⁸⁾ 또한 실린더 압력센서는 동압 측정용 센서이므로 센서출력전압에 바이어스(bias)가 발생하게 되며, 이 바이어스는 사이클변동이 존재하므로 사이클마다 계산되어야하며 정확한 바이어스와 센서의 증폭비(gain)를 알아야만 센서출력 전압으로부터 정확한 압력을 계산할 수 있다. 따라서, 사용되는 실린더 압력센서는 반드시 보정하여야 하며 보정된 센서도 노후에 따라 오차가 발생할 수 있는 문제점이 있다.

실린더 압력을 이용하여 최적점화시기 제어를 수행하기 위해서는 실린더 압력으로부터 실제 점화시기를 반영하는 압력변수를 계산하여야 한다. 이 압력변수는 사이클 당 적은 양의 연소압력측정을 필요로 하고 그 계산이 간단할수록 이상적인 압력변수라고 할 수 있다. 지금까지 점화시기제어에 이용할 수 있다고 알려진 압력변수는 대부분의 경우 많은 횟수의 연소압력측정이 필요하거나 복잡한 계산과정을 거쳐야하는 문제가 있다. 특히 최고압력 발생위치의 정확도는 연소압력의 측정간격에 의해서 결정되며 크랭크각 1°마다 측정하는 것이 일반적이다. 그러나, 엔진제어 장치에서 크랭크각 1°마다 연소압력을 측정하기 위해서는 빠른 속도의 A/D 컨버터를 필요로 하며 그에 따른 계산량 증가로 인해 실제 적용에 많은 문제점이 있다.

이 논문에서는 센서의 바이어스와 증폭비에 상관없이 압력에 비례하는 센서출력 전압만으로 점화시기 제어변수를 계산하는 알고리즘을 제시함

으로써 센서의 양산오차나 노후에 상관없이 점화시기제어를 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 제시되는 알고리즘을 이용할 경우, 압력에 비례하는 출력전압을 갖는 센서만으로 충분히 점화시기 제어를 수행할 수 있으므로 센서출력 전압을 압력으로 변환하기 위한 센서 보정과 복잡한 계산과정을 거칠 필요가 없을 뿐만 아니라 센서의 양산오차에 무관하게 엔진제어를 수행할 수 있으므로 더욱 더 저렴한 압력센서의 개발이 가능해질 수 있다. 또한, 크랭크각 20° 간격으로 압축 상사점 부근의 다섯 점의 연소압력을 측정하여 최고압력발생위치를 추정함으로써 실린더 압력을 이용한 엔진제어의 실현 가능성을 제시하였다. 최적점화시기를 점화시기제어에 이용할 경우 발생할 수 있는 hook-back 문제를 해결하기 위하여 최고압력발생위치에 이용된 다섯 점의 센서 출력전압으로부터 hook-back 여부를 판별하는 신경회로망을 구성하였다.

또한, 실린더별로 추정된 최고압력발생위치를 이용하여 개별실린더 독립 점화시기제어를 수행하였으며, 그 결과 정상상태와 과도운전 상태에서 실린더간 최고압력발생위치의 편차를 현저히 감소시킬 수 있었다.

2. 실린더 압력을 이용한 엔진제어를 위한 실험장치 구성

Fig. 1은 실린더 압력을 이용한 점화시기제어를 수행하기 위하여 구성된 실험장치의 개략도이다. 이 실험장치를 이용하여 연소압력 기초특성실험과 점화시기 제어실험을 수행하였다. 엔진제어 시스템(Engine Control System)⁹⁾과 연소압력해석시스템은 크랭크축에 부착된 엔코더의 동일한 신호를 이용해 동기화 함으로써 크랭크각 기준의 엔진제어와 연소압력 자료획득을 가능하게 하였다. 엔진제어 시스템은 내장되어 있는 A/D 컨버터를 이용하여 실린더 압력, 스톨 밸브 위치, 흡기매니폴드 압력(MAP)과 공연비등을 실시간으로 측정하여 점화시기와 연료 분사량을 결정함으로써 페루프 제어시스템을 구성하였다. 공연비는 Bosch LSU4 광역 산소센서를 이용하여 측정값을 기준으로 하였다.

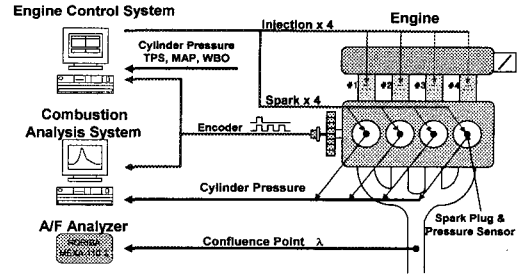


Fig. 1 Experimental setup for cylinder pressure based engine control

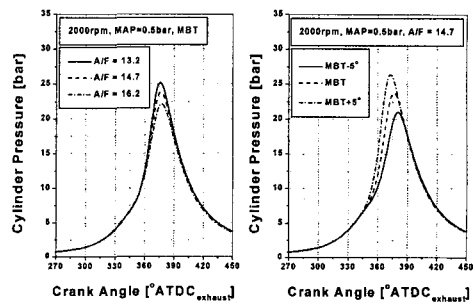


Fig. 2 LPP characteristics for various spark advance and A/F

3. 신경회로망을 이용한 최고압력 발생위치 추정

Fig. 2는 일정 운전조건(엔진회전수, 부하)에서 점화시기와 공연비에 따른 200사이클 평균 연소압력을 나타낸 것이다. 일정한 공연비에서 점화시기의 변화는 최고압력발생위치에 반영되며, 점화시기에 따른 연소압력의 변화는 주로 상사점 부근에서 발생하게 된다. 따라서 최고압력발생위치의 추정은 상사점 부근의 연소압력 측정만으로 가능하다.

Fig. 3은 최고압력발생위치와 hook-back 검출에 이용된 상사점부근 다섯 점의 연소압력의 측정위치를 나타낸다. 실린더 별로 측정된 다섯 점의 연소압력을 이용하여 최고압력발생위치와 hook-back 여부를 추정한다.

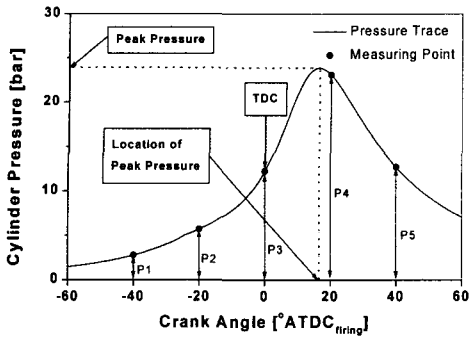


Fig. 3 Combustion pressure measuring points for LPP and hook-back estimation

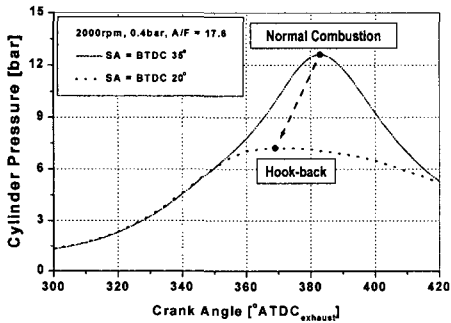


Fig. 4 Combustion pressure comparison for normal combustion and hook-back phenomena

3.1 Hook-back 현상

가솔린 엔진의 연소상황을 반영하는 대표적인 압력변수는 최고압력과 최고압력발생위치이다. 일정한 엔진회전수와 부하에서는 점화시기가 퇴각되어 최고압력발생위치가 상사점에서 멀어질수록 최고압력은 낮아지게 된다. 그러나 혼합기가 희박하거나 EGR 비율이 증가하는 등의 원인으로 연소속도가 감소하는 경우에는 점화시기가 퇴각될수록 최고압력발생위치가 증가하다가 다시 감소하는 현상을 볼 수 있으며, 이 현상을 hook-back이라 한다. Fig 4와 Fig. 5는 hook-back 현상을 나타내고 있다. Fig 4에서와 같이 hook-back에 의하여 실제 점화시기가 최적점화시기보다 퇴각되어있음에도 불구하고 최고압력발생 위치가 목표 최고압력발생위치인 ATDC 16° 보다 상사점에 가까이 발생하게 된다.

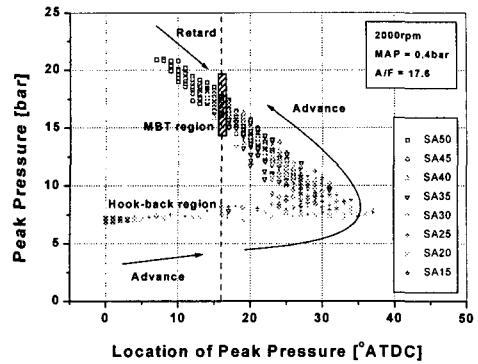


Fig. 5 Peak pressure and LPP correlation for various spark advances

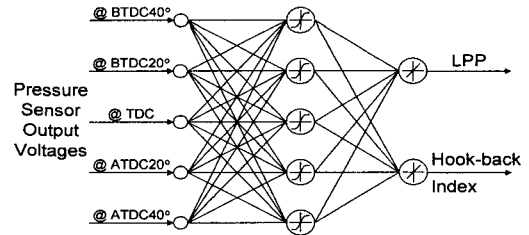


Fig. 6 Feedforward neural network for LPP and hook-back estimation

이러한 현상은 최고 압력발생위치를 점화시기제어에 이용하는데 있어서 문제점으로 제기되어 왔다. 이 논문에서는 최고압력발생위치 추정에 이용된 다섯 점의 압력으로부터 최고압력발생위치 추정뿐만 아니라 hook-back 여부를 판별하는 신경회로망을 구성하여 이 문제를 해결하였다.

3.2 최고압력발생위치 및 Hook-back 추정

Fig. 6은 최고압력발생위치와 hook-back의 추정을 위해 사용된 앞먹임 신경회로망의 구조를 나타낸 것이다. 이 신경회로망은 상사점 부근의 압력센서 출력전압을 입력으로 하며 은닉층(hidden layer)에 시그모이드(sigmoid)함수 뉴런(neuron)과 출력층(output layer)에 선형함수 뉴런으로 구성된다. 신경회로망의 학습을 위해서 전운전영역에서 점화시기와 공연비를 변화시키면서 100가지의 운전조건에서 각각 200사이클의 연소압력을 측정하였다. 또한 저부하, 희박영역에서 발생하는 hook-back 영역의 연소압력도 포함시켰

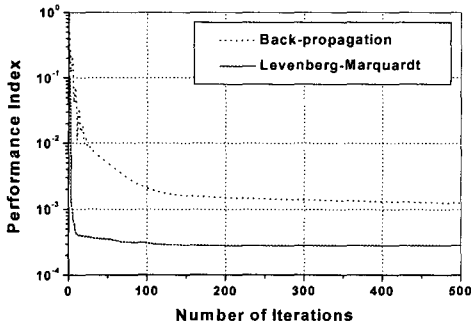


Fig. 7 Comparison of back-propagation and Levenberg-Marquardt algorithm

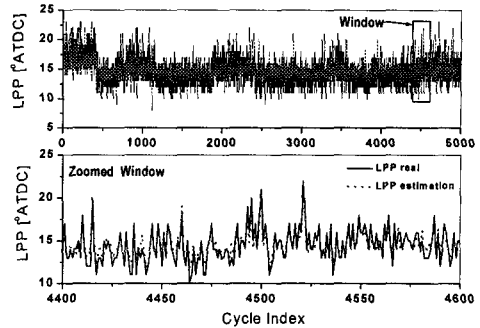


Fig. 8 LPP estimation results during a transient operation

다. 신경회로망의 학습방법으로는 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하였으며, 이 방법이 오차역전과(back-propagation)를 통한 학습보다 효과적이었다.⁽¹⁰⁾ Fig. 7은 오차역전과와 Levenberg-Marquardt 방법의 최적화성능을 비교한 것이다. 여기서 신경회로망의 성능지수(Performance Index)는 식 (1)과 같이 추정오차의 제곱의 합을 총 학습 데이터 수로 나눈 것으로 정의하였다.

$$\text{Performance Index} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N E_i^2 \quad (1)$$

Fig. 7에서와 같이 Levenberg-Marquardt 방법이 오차역전과를 통한 학습보다 효과적이었으며, 학습된 신경회로망의 성능은 실제 엔진 시험을 통하여 검증되었다.

Fig. 8은 과도운전 상태에서 최고압력발생위치 추정실험 결과이다. Fig. 8에서 아래 그림은 위 그림에 표시된 부분을 확대한 것이다. 최고압력 발생위치는 상사점부근 다섯 점의 압력으로부터 효과적으로 추정되고 있음을 알 수 있다. 최고압력발생위치 추정오차의 RMS 값은 0.014이다. Fig. 9는 hook-back이 발생할 수 있는 희박운전 영역에서 최적점화시기보다 27° 퇴각되어있는 경우의 최고압력발생위치와 hook-back 여부 추정결과이다. hook-back index는 임의로 설정된 값으로 정상연소의 경우의 출력이 10이며 hook-back 영역에서는 5 이하의 값을 갖는다. Fig. 9에서와 같이 최고압력발생위치와 hook-back 여부가 효과적으로 추정되고 있음을 알 수 있다.

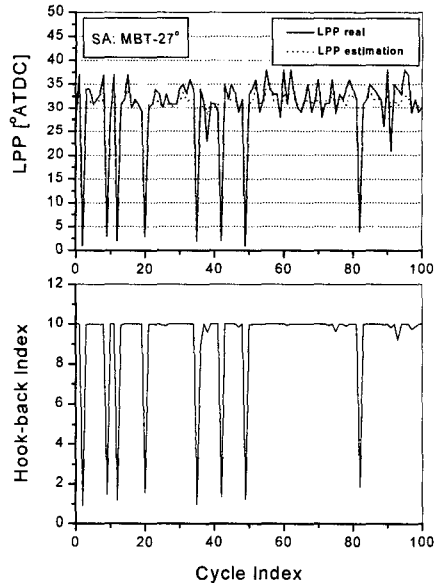


Fig. 9 LPP and hook-back detection in a slow-burn condition

4. 최적점화시기제어

가솔린엔진의 최적점화시기는 엔진의 회전수, 부하 등의 운전조건변화에 따라 결정된다. Fig. 10은 이론공연비에서 회전수와 부하에 따른 최적점화시기를 나타낸다. Fig. 11은 엔진의 여러 운전조건에서의 최적점화시기에서 평균 최고압력발생위치를 나타내고 있다. 운전조건에 따라

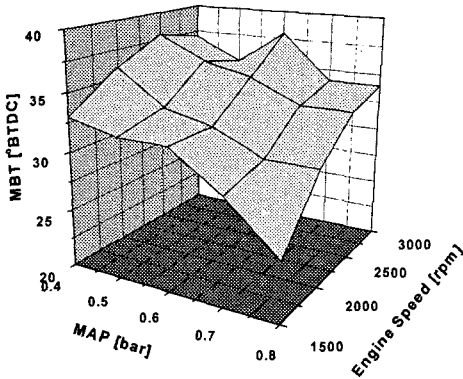


Fig. 10 MBT for various operating conditions

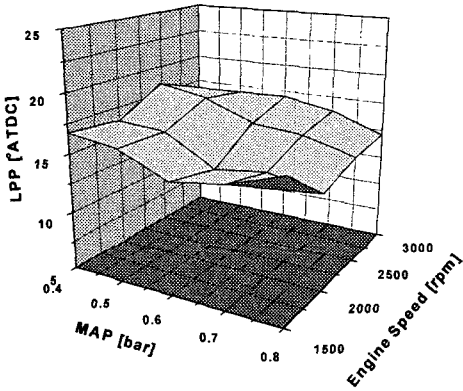


Fig. 11 LPP for various operating conditions [Set-point MBT]

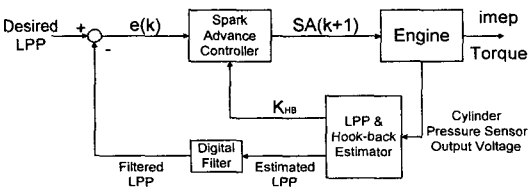


Fig. 12 Block diagram of closed-loop spark advance controller using LPP

최적점화시기는 BTDC25°에서 BTDC37°까지 12° 변화하였으나 그때의 최고압력발생위치는 대부분 ATDC14°에서 ATDC18°까지 최대 4°의 차이를 보이고 있으며 대부분의 최고압력발생위치는 ATDC16°이다. 또한 최적점화시기부근에서는 점화시기 변화에 따른 발생토크의 변동량이

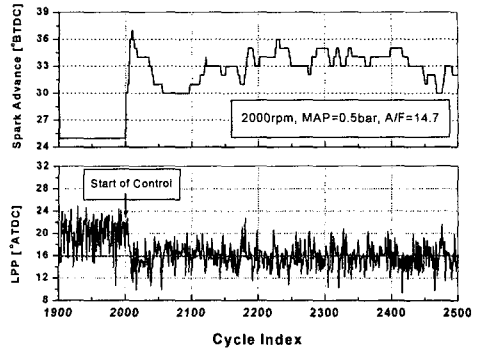


Fig. 13 Spark advance control using LPP in steady conditions [4 cycles averaging]

작기 때문에 모든 운전조건에서 목표 최고압력발생위치를 ATDC16°로 정하여 최적점화시기제어를 수행하였다. Fig. 12는 점화시기 제어기의 구조를 나타낸 것이다. 여기서 점화시기(SA)는 식 (2)에 의해 결정된다.

$$SA(k+1) = SA(k) + K_{HB} K_p [e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^k e(k) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}] \quad (2)$$

where, $K_{HB} = 1$ if Normal Combustion

$K_{HB} = -1$ if Hook-back

4.1 정상 상태 점화시기제어

Fig. 13은 엔진회전수 2000rpm, 매니폴드 압력 0.5bar, 이론공연비 정상상태에서 최적점화시기제어 결과를 나타낸 것이다. 이 운전조건에서의 최적점화시기는 BTDC33°이며 점화시기를 최적점화시기에 고정하였을 경우 최고압력발생위치의 평균은 ATDC16.06°, 표준편차는 1.64이다. 점화시기제어를 시작하기 전의 점화시기는 BTDC25°로 고정되어 있었으며, 2000사이클부터 점화시기제어가 시작되었다. 최고압력발생위치의 사이클변동에 의한 점화시기의 급격한 변화를 방지하기 위하여 제어기의 점화시기출력을 4사이클씩 이동 평균하였으나 점화시기에 큰 오버슈트(overshoot)가 발생하였으며 정상상태에서도 점화시기변동이 ±3° 정도의 큰 값을 나타내고 있다. 제어기의 출력이 안정된 후의 최고압력발생위치의 평균은

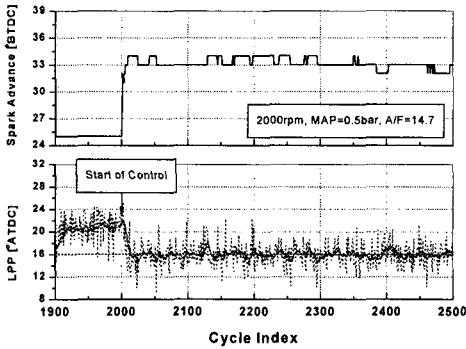


Fig. 14 Spark advance control using LPP with a digital filter in steady conditions

ATDC15.83° 이고 표준편차는 2.16이었다. 엔진이 정상상태임에도 불구하고 최고압력발생위치의 사이클변동이 상당히 증가하였으며 최고압력발생위치의 평균값에도 0.17°의 제어오차가 존재하였다.

최고압력발생위치와 점화시기의 사이클변동 문제를 해결하기 위하여 1차 이산필터를 설계하였으며, 이를 이용한 결과는 Fig. 14이다. Fig. 14의 점선은 실제 최고압력발생위치를 나타내며, 실선은 필터링된 최고압력발생위치를 나타낸다. 그 결과 점화시기의 오버슈트는 발생하지 않았으며, 사이클변동도 $\pm 1^\circ$ 로 감소하였다. 제어기의 출력력이 안정된 후의 최고압력발생위치의 평균은 ATDC16.0° 이고 표준편차는 1.92이다. 점화시기를 4사이클 평균하여 제어하는 경우보다 제어오차와 최고압력발생위치의 표준편차가 감소하였으며 이는 이산필터를 이용함으로써 점화시기제어 성능이 향상됨을 보여준다.

4.2 과도 상태 점화시기제어

Fig. 15는 엔진회전수를 고정한 운전조건에서 스로틀 개도 변화를 통한 엔진의 부하 변동조건에서 최적점화시기 제어결과이다. 엔진의 부하 변동은 사각파 형태로 주어졌다. 이때 엔진제어기는 ATDC16°에 최고압력이 발생하도록 점화시기를 제어하고 있으며 엔진의 과도운전에 따라 페루프 제어가 수행되고 있다. 이러한 방식의 점화시기제어는 최적점화시기 매핑(mapping)이나 점화시기 결정을 위한 여러 가지 센서입력을 필요로 하지 않으므로 엔진의 외부조건 변화나 운

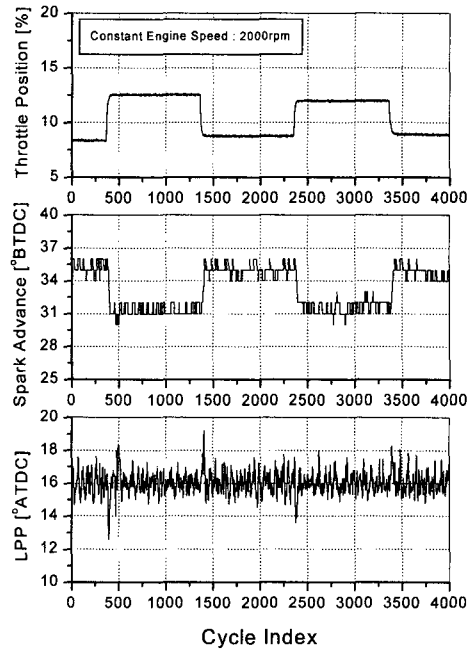


Fig. 15 MBT control using estimated LPP [Transient condition]

전조건 변화에 상관없이 간단한 방법으로 혼합기 연소율을 최적으로 제어할 수 있음을 나타낸다.

5. 개별실린더 점화시기제어

기존의 엔진제어기는 대기통 엔진에 적용되는 경우에도 기통수에 관계없이 모든 실린더의 연료 분사량과 점화시기를 동일하게 제어하였다. 그러나, 동일한 운전조건에서도 실린더별로 흡입 공기량, 흡기 유동, 점화에너지 등의 변동에 의해서 실린더간 연소변동이 존재하게 된다. 실린더 압력센서를 이용할 경우 실린더별 연소상황을 측정할 수 있으므로 개별실린더 점화시기 제어를 수행할 수 있다. 대부분의 내연기관은 Fig. 16과 같이 일정한 운전조건에서도 실린더별 최적점화시기의 차이가 존재하게 된다. 실험에 사용된 엔진의 경우에는 2000rpm, 0.5bar, 이론공연비에서 2번 실린더의 최적점화시기가 가장 진각되어 있으며, 1번 실린더의 최적점화시기가 가장 퇴각되어 있다. 3, 4번 실린더의 MBT는 1번과 2번 실린더의 최적점화시기의 중간에 위치하고 있음을 알 수 있다. 실린더 별로 연소압력을 측정하여

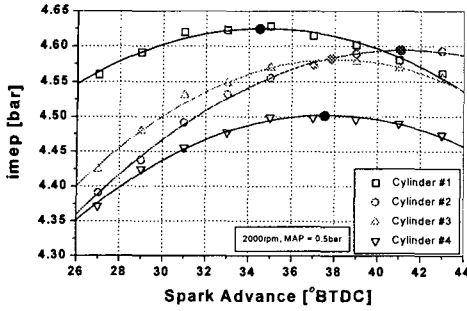


Fig. 16 Individual cylinder imep with various spark advance

점화시기제어를 수행할 경우에는 기존 엔진제어 시스템의 문제점인 실린더간 연소변동을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 실린더 각각의 점화시기를 최적으로 제어할 수 있다.

5.1 정상 상태 점화시기제어

개별실린더 최적점화시기 제어를 수행하기 위하여 각각의 실린더에 압력센서를 부착하였으며 각각의 실린더에 별도의 PID 제어기를 이용하여 점화시기제어를 수행하였다. 2000rpm, 0.5bar의 운전조건에서 정상상태 점화시기 제어실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 17과 같다. 초기 1000사이클동안은 매핑을 통해 구한 최적점화시기로 고정 운전되었으며, 1000사이클 이후부터 실린더별 최고압력발생위치를 이용하여 점화시기 제어를 수행한 결과이다. 실린더마다 일정한 점화시기로 운전되는 경우에는 최고압력발생위치의 실린더간 변동이 발생하였으나 점화시기 제어를 통해 모든 실린더의 최고압력발생위치를 목표 값인 ATDC16°로 제어하고 있다. 각각의 실린더의 점화시기는 Fig. 15에서 나타낸 바와 같이 2번, 3,4번, 1번 실린더의 순서로 진각되었다. 개별 실린더 점화시기제어를 통해 Fig. 18에서 나타낸 바와 같이 실린더별 도시평균유효압력(imep)이 향상되었으며 실린더간 도시평균유효압력의 차이도 크게 감소하였다.

5.2 과도 상태 점화시기제어

Fig. 19는 부하고정, 엔진회전수 변동의 과도운전 상태에서 점화시기 제어기의 성능을 실험한 결과이다. 1000사이클 이전에는 기존 시스템과

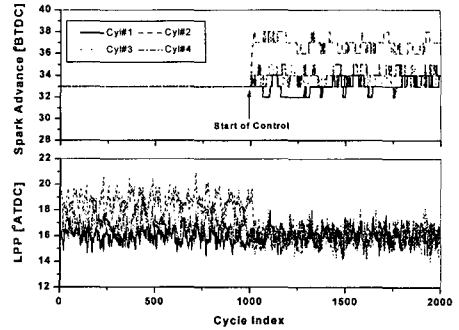


Fig. 17 Individual cylinder MBT control using LPP [Steady conditions]

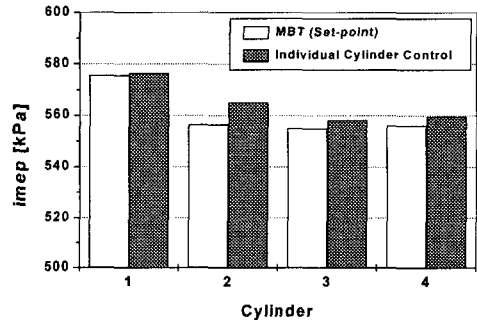


Fig. 18 Imep increase by individual cylinder MBT control using LPP

엔진회전수와 부하에 따라 매핑되어 있던 점화시기로 4개의 실린더를 동일하게 제어하였으며, 개별실린더 점화시기 제어는 1000사이클부터 시작되었다. 1000사이클 이전까지는 실린더마다 최고압력발생위치의 차이가 발생하였고 최적 값인 ATDC16°와 큰 차이를 보이고 있으나, 개별실린더 제어를 통해 실린더별 최고압력발생위치의 차이도 감소하였으며, 목표 값으로 제어되고 있음을 알 수 있다. 또한 실린더간 최고압력발생위치의 표준편차도 감소하였으며 과도운전상태에서도 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 이러한 방법의 엔진제어는 엔진의 노후나 생산오차에 따른 실린더간 최적점화시기 변동에 효과적으로 대처할 수 있을 것이다.

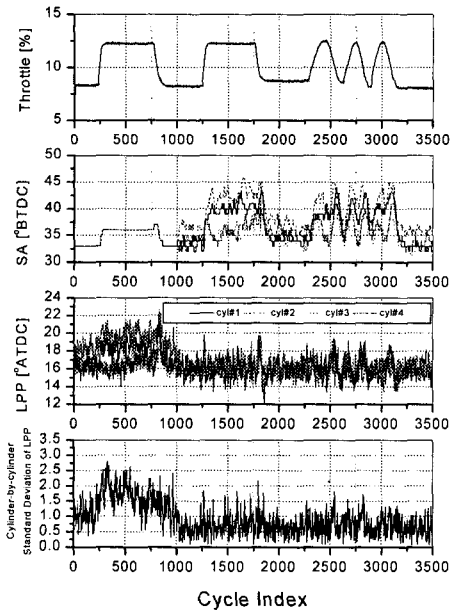


Fig. 19 Individual cylinder MBT control using LPP [Transient Conditions]

6. 결론

이 연구에서는 그 동안 실린더 압력을 이용한 점화시기 제어의 문제점으로 지적되었던 많은 양의 연산과 A/D 변환문제, 압력센서의 정확한 보정 필요성, 그리고 최고압력발생자를 점화시기 제어에 이용할 경우 발생하는 hook-back문제의 해결방법을 제시하였으며, 이 방법을 이용한 엔진 시험에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 신경회로망을 이용하여 최고압력발생위치 추정기를 설계함으로써 엔진제어기의 A/D 변환 주기를 크랭크각 20° 까지 증가시킴으로써 엔진 제어기의 연산 및 A/D 변환의 부담을 획기적으로 감소시켰다. 또한 실린더 압력센서의 출력전압만으로 최고압력발생위치를 추정함으로써 센서의 증폭비와 바이어스에 상관없이 엔진제어기를 설계할 수 있다.

(2) 압축상사점부근의 다섯 점의 실린더 압력만으로 희박영역이나 EGR 비율이 높은 영역에서 hook-back을 감지함으로써 폭넓은 운전영역에서 최고압력발생위치를 점화시기 제어에 효과적으로 이용할 수 있다.

(3) 실린더압력을 이용하여 페루프 점화시기 제어를 수행함으로써 엔진의 노후, 양산오차 그리고 운전조건 변화에 상관없이 점화시기를 최적으로 제어할 수 있음을 엔진 실험을 통하여 증명하였다.

(4) 내연기관은 동일한 운전조건에서도 실린더간 연소변동이 존재하며, 이러한 연소변동은 출력손실, 소음증가, 실린더간 불균형을 초래한다. 이 연구에서는 개별실린더 점화시기 독립제어를 통해 실린더별로 최고압력발생위치를 최적으로 제어함으로써 이러한 문제의 해결가능성을 보여 주고 있다.

참고문헌

- (1) Lars Eriksson, Lars Niesen, Mikael Glavenius, "Closed Loop Ignition Control by Ionization Current Interpretation," SAE paper 970854.
- (2) Devesh Upadhyay, Giorgio Rizzoni, "AFR Control on a Single Cylinder Engine using the Ionization Current," SAE paper 980203.
- (3) Isao Fujii, Makoto Kawai, Kiyoshi Ishii, Michigata Kono, 1997, "MBT Feedback Control System in Spark Ignition Engines," 日本自動車技術會 論文集 Vol. 28, No. 3.
- (4) Fredric A. Matekunas, "Modes and Measures of Cyclic Combustion Variability," SAE paper 830337.
- (5) John B. Heywood, 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York.
- (6) Rainer Müller, Hans-Hybert Hemberger, "Neural Adaptive Ignition Control," SAE paper 981057
- (7) Steffen Leonhardt, Nobert Müller, Rolf Isermann, 1999, "Methods for Engine Supervision and Control based on Cylinder Pressure Information," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 4, No. 3.
- (8) Thomas J. Poorman, Sergey Kalashnikov, Mar다 T. Wlodarczyk, Eugene Danielson, 1996, "In-cylinder Fiber-optic Pressure Sensor for Engine Monitoring and Control," ICE-Vol. 26-2, *ASME Spring Technical Conference*, Volume 2.
- (9) 윤팔주, 김명준, 선우명호, 1998, "크랭크 각 기준의 엔진 제어시스템 설계·제작에 관한 연구," 자동차공학회 논문집, 제6권 제4호.

- (10) Martin T. Hagan and Mohammad B. Menhaj, "Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 6, 1994.