

<논 문> SAE NO. 96370056

# 전기점화기관에서 실린더압력을 이용한 점화시기 적응제어에 관한 연구

## A Study on the Adaptive Control of Spark Timing Using Cylinder Pressure in SI Engine

조 한 승,\* 이 종 화,\*\* 유 재 석\*\*  
H. S. Cho, J. H. Lee, J. S. Ryu

### ABSTRACT

The spark timing is one of major parameters to the engine performance and emissions. The ECU controls the spark timing based on preset values, which are functions of load and speed, in most of today's automotive SI engine. In this system, the preset spark timing can be different from optimum value due to the deviations from mass production, aging effects and so on. In the present study, a control logic is investigated for real time adaptation of spark timing to optimal value. It has been found that crank angle of maximum cylinder pressure is one of the appropriate parameters to estimate the optimum spark timing through experiment. It has also been observed for spark timing convergence by variation of engineering model factors. The simulation program including engineering model for cycle by cycle variation of combustion is developed for surveying spark timing control logic. It is also shown that simulation results reflect experiment outputs and reasonableness of spark timing control logic for crank angle of maximum cylinder pressure.

주요기술용어 : Crank angle of maximum cylinder pressure(최고압력장치), Spark timing control (점화시기제어), Cycle-by-cycle variation(사이클변화), Control algorithm(제어 알고리즘)

### 1. 서 론

자동차에서 엔진의 최적제어는 엔진의 효율 향상, 유해배출물 저감 및 출력 향상에 매우 중요

하다. 이를 위해 전자제어시스템의 채용이 보편화되고있으며 보다 정밀한 제어를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>1)~4)</sup>. 그러나, 기존의 전자제어시스템에서는 연소상태의 진단기능이 없어 점화시기를 최적상태로 적응시키는 학습제어의 적용이 어렵다. 양산시의 제품편차, 실린더별 특성차이등을 고려해줄 수 없을뿐만아니라, 경년변

\* 정회원, 아주대 대학원, 고등기술연구원

\*\* 정회원, 아주대학교 기계공학과

화에 따른 압축비 상승등의 문제때문에 점화시기 설정시 안전을을 고려해야하므로 최적점화시기로 설정할 수 없다. 그러므로 이로인한 효율의 저하 및 공해배출물 증가등의 불리함을 간과할 수 없다.

자동차생산업체에서는 제품의 편차를 줄이기 위해 연소실을 가공하는등 다양한 노력을 기울이고 있으나 이는 생산비의 직접적인 증가를 가져오며, 엔진 개발시에도 실린더별 연소특성 차이를 줄이기위해 여러가지 실험을 수행하고 있다. 또한 최근에는 양산시의 편차에 대한 경우를 미리 감안하여 이에대한 sensitivity를 시뮬레이션 또는 실험적 방법으로 검토하여 엔진 개발에 반영하려는 연구도 진행되고있다.

엔진의 연소상태를 모니터링하고 이를 엔진의 제어에 적용하기위한 시도로서 Sasayama<sup>5)</sup>등은 스파크플러그에 광섬유를 부착하고 화염광의 세기를 측정, 분석하여 엔진을 제어하는 시스템에 대한 개념을 제시하여 출력의 계산, 이상연소(노킹)의 판단, 실린더내의 온도추정에 의한 질소산화물 배출의 제어에 이용될 수 있다고 발표하였다. 그러나, 실제시스템에의 적용시 예상되는 여러가지 문제점을 간과한 초보적 수준을 벗어나지 못하였다. 그후 이상연소(노킹)를 제어하기 위한 방법의 하나로 일본 닛산(Nissan)<sup>6)</sup>에서는 스파크플러그형 압력센서를 이용한 시스템을 개발실차에 적용하였으나 시스템의 가격이 고가이고 설치장소가 제약을 받는 등의 단점때문에 고급승용차에만 한정되었다. Collings<sup>7)</sup> 등은 배기포트에 이온프루브를 설치하여 배기가스중의 이온농도를 측정하고 이로부터 연소상태의 진단을 시도하였다. 이 연구에서는 점화시기의 적용제어 가능성을 보여주었으나 연소상태와 상관도가 크지않고 센서의 내구성 문제에 많은 의문을 제기할 수 있다. 최근에 Miyata<sup>8)</sup>는 스파크플러그의 전압을 분석하여 화염이온의 농도를 측정하는 기술을 발표하였으며 Shimasaki<sup>9)</sup>는 이를 이용하여 엔진의 연소상태를 모니터링하는 연구를 수행하였으나 점화플러그의 국소적인 이온농도를 이용하였으므로 실린더내의 전체적인 연소상태를 구하는데 한계가 있다. Conolly<sup>10)</sup>는 엔진의

각속도변동을 이용하여 사이클마다의 연소압력의 변화를 추정하는 기법을 발표하였으며 Lim 등<sup>11)</sup>은 크랭크축 회전속도의 변동을 이용하여 실린더압력을 구하는 방법을 연구하였다. Lee 등<sup>12)</sup>은 엔진의 회전속도를 이용하여 공회전시의 속도 안정성을 향상을 위한 실린더별 전화시기 적용제어 알고리즘을 연구하였다. 엔진의 회전각속도변동은 실린더압력 뿐만아니라 관성력항이 포함되며 회전속도가 높아지면 상대적으로 압력변화에 의한 차이가 작아져 엔진운전범위 전체에서의 연소상태 분석에는 적합치않다고 생각된다.

이와같이 엔진의 연소상태를 모니터링하기 위한 간접적인 방법의 시도는 연소실 압력 측정상의 하드웨어 기술적 어려움을 극복하기위한 것으로 판단된다. 즉 실린더 압력을 측정하여 이용하고자 할 경우 설치에의 공간적 제약이 매우 크고 내구성 및 가격면에서도 불리한 점이 많았다. 그러나 최근에 적절한 연소실 압력센서가 개발되고 있는 등<sup>13),14)</sup> 이러한 장애요인을 해결하기 위한 연구가 많이 진행되고있어 실린더 압력을 이용한 엔진전자제어시스템 구성 및 이의 실현 가능성을 밝게해주고 있다.

본 연구에서는 실린더 압력을 이용하여 엔진의 연소상태를 진단하고 이를 이용하여 점화시기를 최적으로 제어하는 적용제어 기법의 연구개발을 위하여 최적점화시기 추정에 적합한 압력관련 인자를 선정한 후 엔진 연소의 특성상 수반되는 사이클 변동이 내재된 데이터로 부터 최적점화시기를 구하는 알고리즘을 제시하고 실험적으로 검토 보완하여 점화시기 적용제어 기술개발의 기초자료로서 활용하고자 한다. 또한 사이클변화에 따른 연소변동현상을 반영하는 엔진 시뮬레이션을 이용하여 제어로직의 타당성 검토를 모사할 수 있는 기반을 구축하였다.

## 2. 최적점화시기 추정에 적합한 인자 선정 및 점화시기 제어로직

전기점화기관에서 연소의 특성상 사이클 변동이 수반되며 이는 엔진의 설계 뿐만아니라 운전조건에 따라 그 특성이 다르게 나타난다. 연소상태의

분석에는 운전조건에 따라 달라지겠지만 대개 수십 내지 수백사이클의 산술적 평균으로 구한 실린더압력 선도가 이용된다. 차량이 주행시 엔진은 대부분 과도상태로 운전되므로 정상상태 운전시의 산술적 평균데이터를 얻기는 쉽지 않을 것으로 예상된다. 따라서 이러한 제반조건을 감안할때 각 운전조건에서의 최적점화시기를 구하기 위한 적응제어 알고리즘이 필수적이다.

본 연구에서는 과도운전상태에서의 적응제어 알고리즘 구성을 위한 기초단계로 정상상태에서 점화시기제어 알고리즘 구성에 중점을 두었다. 실제 과도운전상태에서는 최고압력위치 평균치의 거동이 일정범위내에서 변하고 있어<sup>15)</sup> 기초 알고리즘 및 정상상태 실험을 근거로 운전상태변화에 대해서 알고리즘을 조정하여 점화시기제어에 반영할 것이다.

입력센서를 이용하여 매번의 연소사이클을 열역학적으로 분석하여 최적여부를 판단하는 것은 시스템의 하드웨어 구성상 제약이 뒤따른다. 그러므로 최적점화시기의 상관도가 크고 상관관계가 선형적이면서 측정에 시간이 많이 소요되지 않는 인자를 선정하여야한다. 이러한 인자로는 실린더압력이 최고일때의 크랭크각, 질량연소율이 50% 일때의 크랭크각등을 들수있다. 일반적으로 최적 점화시기에서는 질량연소율이 50% 일때의 크랭크각은 ATDC 7-10° CA이며 실린더압력이 최고가 되는 위치는 경험적으로 ATDC 15° CA부근임이 알려져있다. 질량연소율이 50% 일때의 위치와 최고압력위치와의 상관관계는 연소기간의 변화에 따른 영향을 제외하고는 서로 비례하는 경향을 나타내고 있다. 질량연소율 50% 일때의 위치는 측정과 연산처리에 어려움이 있으나 최고압력위치는 그 측정이 용이하며 연소율을 반영하기에 충분하므로 이러한 연구결과를 근거로 본연구에서는 압력이 최고일때의 크랭크각( $\theta_{pmax}$ )을 최적점화시기의 선정에 적합한 인자로 정하였다.<sup>1), 15), 16), 17)</sup>.

연소변동이 없을 경우에는 매사이클마다 압력이 최고일때의 크랭크각을 설정한 기준과 비교하여 점화시기를 조정할 수 있다. 그러나 실제에 있어서는 연소변동에 의해 한 사이클의 값을 기

준으로 점화시기를 변동하기에는 무리가 따른다. 그러므로 본연구에서는 임의로 N개의 최고압력 위치( $\theta_{pmax}$ )를 산술평균하여 그 영향을 반영하였으며 산술평균수치(TPAVE)와 최적 최고압력 위치(TPSET)를 비교하여 점화시기를 조절하였다. 사이클변화에 따른 최근의 연소변동 현상을 알고리즘에 반영하기 위해 매사이클마다 산술평균수치에 전단계의 평균치에 가중치 n, 현사이클의 최고압력위치값에 1-n를 곱하여 합한수치를 평균치로 정하였다.(식 (1) 참조)

Criteria & Control Logic:

$$\text{Spark Timing}_{\text{new}} = \text{Spark Timing}_{\text{old}} + \Delta S/T$$

$$\text{TPAVE}_{\text{new}} = \theta_{pmax} \times (1-n) + \text{TPAVE}_{\text{old}} \times n$$

$$\Delta S/T = \alpha \times \text{TPDEL}$$

$$\text{TPDEL} = \text{TPAVE} - \text{TPSET}$$

$$\alpha : \text{weighting factor} \quad (1)$$

### 3. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치에서 엔진은 4기통 1500cc MPI DOHC 엔진을 사용하였으며 압력센서, 온도측정장치, A/D 변환기, 전하증폭기(charge amplifier), 연소해석기등의 기본장치외에 압력이 최고 일때의 크랭크각을 검출하기위한 최고압력 검출기(position of peak pressure analyzer), 최고압력 위치에 따라 점화시기를 제어하는 PC-ECU등으로 구성되었으며, 실험장치에 대한 개략적인 구성은 Fig.1과 같다.

실험은 실차 엔진의 운전조건에 가깝도록 하기 위하여 열교환기를 이용하여 냉각수의 온도를 80~85°C로 제어하였다. 엔진회전수는 동력계 제어기의 정속운전모드(2000rpm, load : 42Nm) 상태에서 행하였으며 4번 실린더에 설치된 압력센서를 통하여 측정된 실린더내 압력신호는 최고압력 검출기로 보내지고 다시 최고압력치는 PC-ECU로 보내져 엔코더에서 보낸 각도신호와 맞물려서 최고압력위치가 표시된다. 이때 표시된 최고압력위치는 PC-ECU내에서 식 (1)에 제어 알고리즘에 의해서 점화시기를 변화시킴으로 목표표로 하는 위치로 이동시킨다. 압력센서에 의해

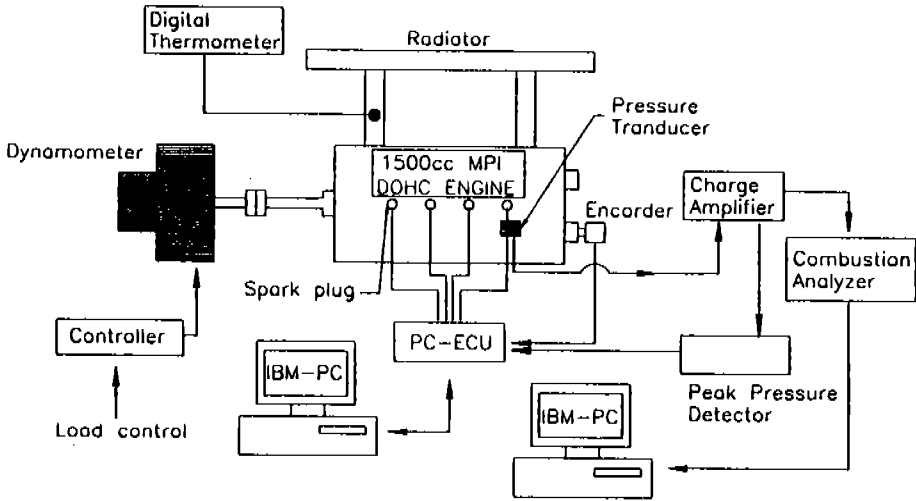


Fig.1 Schematic diagram of the engine firing test

측정된 압력신호는 전하증폭기를 통하여 A/D 변환기를 거쳐 PC내에 설치한 연소해석기에 보내져 연소상태를 해석하였다.

4. 연소변동 모델링 및 사이클 시뮬레이션

전기점화기관에서 연소의 특성상 사이클 변동이 수반되며 이는 엔진의 설계 뿐만 아니라 운전 조건에 따라 그 특성이 다르게 나타난다. 연소상태의 분석에는 운전조건에 따라 달라지겠지만 대개 수십 내지 수백사이클의 산술적 평균으로 구한 실린더 압력 선도가 이용된다. 그런데 차량의 주행시 엔진은 대부분 과도상태로 운전되므로 정상상태 운전시의 산술적 데이터를 얻기는 쉽지 않을 것으로 예상된다. 따라서 이러한 제한조건을 감안하여 본 연구에서는 연소의 사이클 변화를 모델링하고 이를 엔진사이클 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 정상상태 운전조건에서 앞에서 제시된 인자가 연소의 사이클 변동에 따라 어떤 거동을 나타내는지를 알아보고 실험결과와 비교하여 과도운전시의 데이터로부터 각각의 운전조건에서의 최적점화시기를 추정하기 위한 기본자료로 이용할 수 있다.

정상상태에서 사이클변화에 따른 연소변동현

상을 반영하기위하여 단기통 엔진 시뮬레이션 프로그램내에 연소모델의 변수를 Monte Carlo 방법을 이용하여 난수(random number)로 발생하게 하였다. 연소모델로는 일반적으로 널리 이용되고 있는 Wiebe 식을 적용하였다. 식에는 최종 질량연소율(final mass burn fraction)을 나타내는 a와 연소율곡선의 기울기를 표시하는 m, 그리고 전연소구간(total burn duration)인  $\theta_b$ 가 변수이다.(식 (2) 참조)

$$x_b = 1 - \text{EXP}\left(-a\left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_b}\right)^{(m+1)}\right) \quad (2)$$

- $x_b$  : mass burn fraction
- $\theta_s$  : crank angle at spark timing
- $\theta_b$  : total burn duration

Monte Carlo 방법은 현상내에 존재하는 불확실성을 확률개념(probability theory)을 이용하여 다루어 그것에 대한 정보를 얻을 수 있도록 수학적으로 처리한 것이다. 실험결과상에서 연소모델내 변수들은 정규분포가 아닌 한쪽으로 치우치는 형태(skew pattern)을 나타내는데 연소변동모델내에는 실제상황과 유사하도록 타당한 범위내에서 삼각형 분포형태(triangular distribu-

tion)로 난수를 발생시켰다. 이것은 확률상 높은 영역에서는 발생된 난수들중에서 많은 부분이 차지할 수 있도록 고려한 것이다. 분포형태에서는 최저치(x min), 최고치(x max) 그리고 빈도수 많은 영역(most likely)에 대한 정확한 입력이 중요하다<sup>18)~20)</sup>.

a는 최소치 4.75, 빈도수 많은 영역 5.0, 최대치 5.25, m은 최소치 1.75, 빈도수 많은 영역 2.0, 최대치 2.25, 연소구간을 최소치 50°, 빈도수

많은영역 60°, 최대 70° CA의 분포로 a, m, 전 연소구간을 모두 난수를 발생하여 사이클 변화에 따른 연소변동현상을 반영하였다<sup>20)</sup>.

### 5. 결과 및 검토

본 연구에서는 산술평균할 사이클수(averaging number of cycles, A.N.), 가중지수(weighting factor,  $\alpha$ )의 변화에 따라 점화시기, 최고압

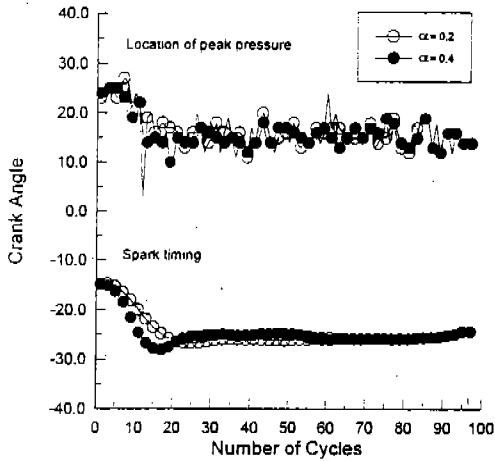


Fig.2 Effects of weighting factor for A.N.=5 (Experiment)

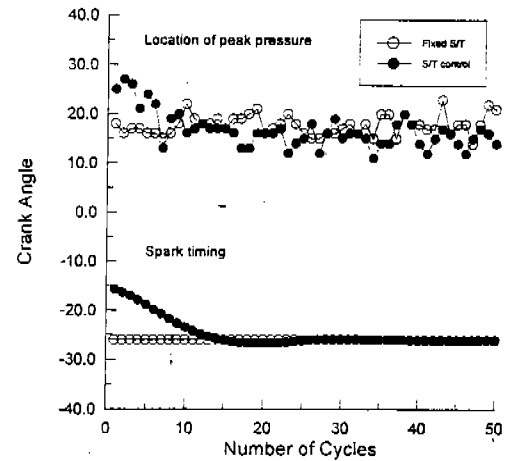


Fig.4 Comparison of  $\theta_{pmax}$  and spark timing for A.N.=4,  $\alpha=0.2$ (Experiment)

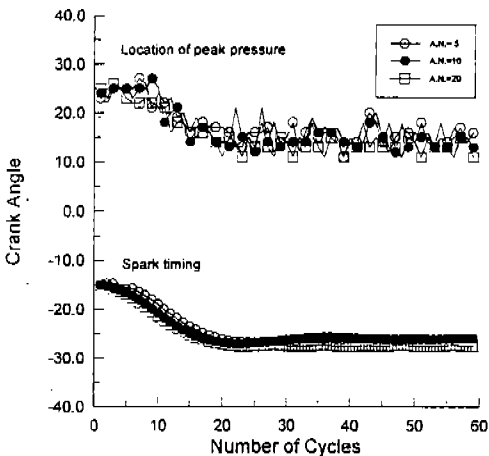


Fig.3 Effects of averaging number of cycles for  $\alpha=0.2$ (Experiment)

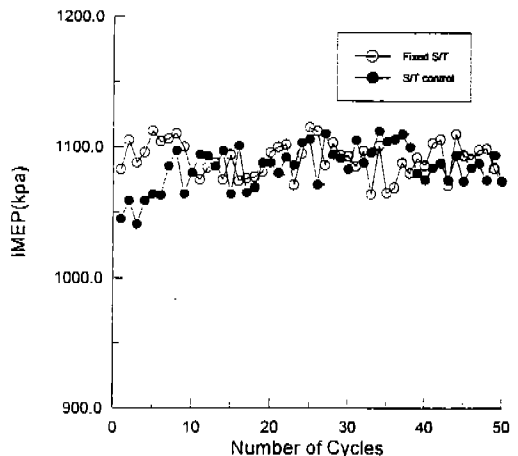


Fig.5 Comparison of individual cycle IMEP for A.N.=5,  $\alpha=0.2$ (Experiment)

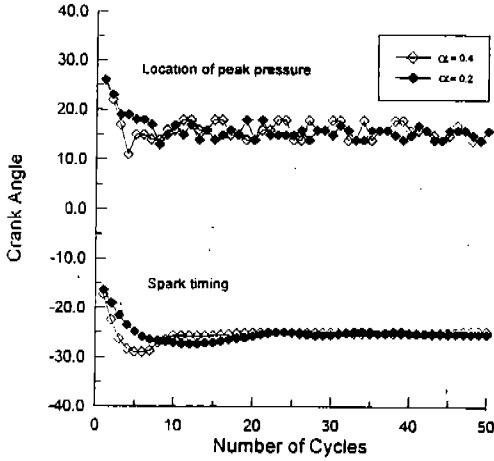


Fig.6 Effects of weighting factor for A.N.=5 (Simulation)

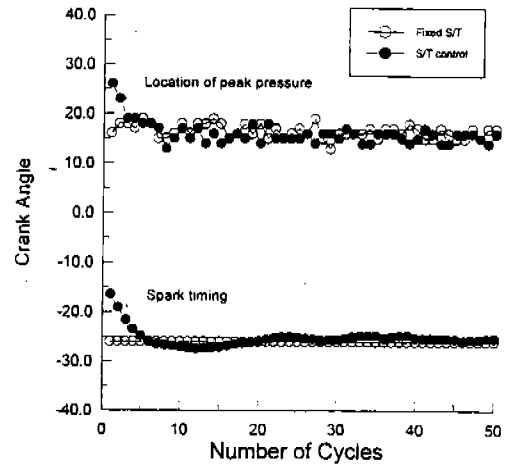


Fig.8 Comparison of  $\theta_{pmax}$  and spark timing for A.N.=5,  $\alpha=0.2$ (Simulation)

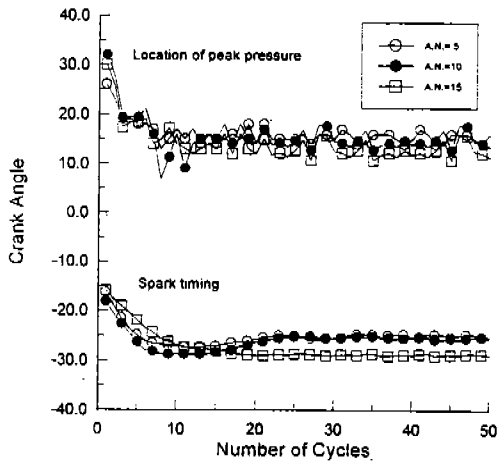


Fig.7 Effects of averaging number of cycles for  $\alpha=0.2$ (Simulation)

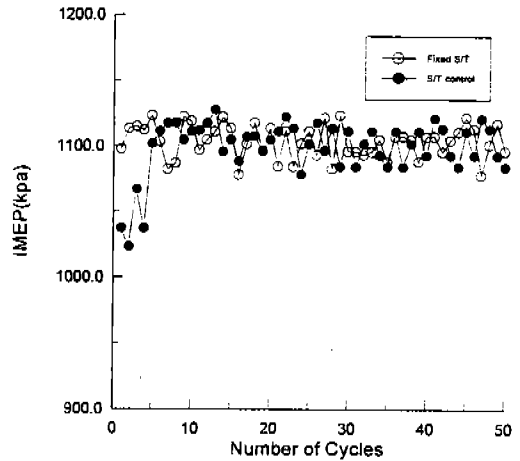


Fig.9 Comparison of Individual cycle IMEP for A.N.=5,  $\alpha=0.2$ (Simulation)

력위치 그리고 IMEP의 거동을 관찰하여 최적점화시기로의 수렴성, 수렴속도등 모델의 타당성을 검토하였다. 가중치  $n$ 은 0.8로 하였다. Fig.2에서 Fig.5까지는 실험결과를 나타낸 것이며 Fig.6에서 Fig.9까지는 시뮬레이션 결과를 표시한 것이다.

Fig.2는 평균할 사이클 수를 고정하고 가중치 수를 변화할때 그 영향을 살펴본 것이며 Fig.3 반대로 자중치수를 고정시키고 산술평균할 사이

클 수를 변화시킨 경우이다.

상대적으로 가중치수가 큰 경우에는 제어로직에 따라 점화시기의 이동간격이 커져 수렴과정에서 점화시기가 너무 진작하다가 다시 후퇴하는 현상(undershooting effect)이 발생한다. undershooting effect는 이상연소(노킹등)가 발생할 가능성이 있어 적절한 가중치수 수치를 정하는 것이 중요함을 잘 반영하고 있다. 상대적으로 평균할 사이클수가 많을수록 최근 연소변동의 영향

의 반응이 미미하므로 점화시기의 수렴이 늦어지는 경향을 나타내지만 평균할 사이클수가 적게 되면 연소변화에 의해 민감하게 반응하므로 운전조건에 따라 가중치수와 함께 적절한 선택이 필요하다.

Fig.6에서 Fig.9까지는 실험과 같은 조건하에서 연소변동 모델을 반영한 시뮬레이션 결과이다. 가중치수와 평균할 사이클 수의 변화에 따라 undershooting effect, 최고압력위치의 거동을 근거로 하는 제어로직에 따른 점화시기의 움직임 등이 실험결과와 특징을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 제어로직을 매번 변경할 때마다 실험을 반복하는 것은 많은 시간과 노력이 요구되므로 이러한 연소변동현상을 반영하는 사이클 시뮬레이션을 이용하면 제어로직에서 주요 영향을 미치는 인자들을 예측함으로써 불필요한 노력과 시간을 줄일 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 실린더 압력을 이용한 점화시기 제어로직에 관한 시뮬레이션 연구 및 실험을 수행하였다. 실린더압력이 최고일 때의 크랭크각을 최적점화시기 판정인자로 선정하였으며, 사이클 변동을 고려하여 산술평균할 사이클수(averaging number of cycles, A.N.), 가중치수(weighting factor,  $\alpha$ ) 등의 인자를 도입하여 점화시기 제어로직을 구성하여 최고압력위치, 점화시기 그리고 IMEP의 거동을 관찰하였다.

실험에서는 최고압력위치 검출기와 제어로직에 의해 점화시기를 제어하는 PC-ECU등을 사용하여 모델 인자 변화에 따른 수렴속도, 수렴성등을 관찰하였다. 수렴정도, 점화시기의 거동등을 고려할때 운전조건에 따라 적절한 가중치수, 산술평균할 사이클 수의 선택이 필요하다.

시뮬레이션은 사이클 마다의 연소변동을 고려하기 위하여 연소를 함수의 인자를 Monte Carlo 방법으로 변화시키는 연소변동모델을 구성하고 이를 사이클 모사 프로그램에 적용하였다. 새로운 시스템이나 제어기법을 실차에 적용하여 실험해 보기전에 어느 정도 결과를 예측 검토해 볼

수 있어 개발시간과 노력을 줄일 수 있다는 측면에서 긍정적으로 평가할 수 있다.

점화시기를 최고압력위치의 거동에 따라 제어한 후 부터 변화하는 연구결과는 본 연구의 제어 알고리즘의 타당성을 반영하고있다. 본 연구결과는 점화시기 제어로직을 실제 엔진에의 적용 전 단계에서 검토해보는데 활용될 수 있다고 기대된다.

## 후 기

본 연구는 1994년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비 및 1993년 아주대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1987.
2. G. Kaiser et. al., "Closed Loop Control at Engine Management System MOTRONIC", SAE Paper No. 880135, 1988.
3. J. J. Moskwa and J. K. Hedrick, "Modeling and Validation of Automotive Engines for Control Algorithm Development", Trans. of ASME, Vol. 114, pp. 278~284, 1992.
4. K. J. Bush et. al., "Automotive Control of Cylinder by Cylinder Air-Fuel Mixture Using a Proportional Exhaust Gas Sensor", SAE Paper No. 940149, 1994.
5. T. Sasayama et. al., "An Advanced Engine Control System Using Combustion Sensor", Proceedings of the fifth international conference on Automotive electronics, pp. 55~59, 1985.
6. S. Yamashita, "Knock Sensor", 內燃機關, Vol. 29, 1990.
7. N. Collings et. al., "Exhaust Gas Ionization for Spark Ignition Engines", Proc. of Inst. Mech. Engineering, C59/88, 1988.

8. S. Miyata, "Flame Ion Density measurement Using Spark Plug Voltage Analysis", SAE Paper No. 930462, 1993.
9. Y. Shimasaki, "Spark Plug Voltage Analysis for Monitoring Combustion in Internal Combustion Engines", SAE Paper No. 930461, 1993.
10. F. T. Conolly, "Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine", SAE Paper No. 940143, 1994.
11. B. Lim et. al., "Estimation of Cylinder Pressure in SI Engines using the Variation of Crankshaft Speed", SAE Paper No. 949145, 1994.
12. J. H. Lee et. al., "Adaptive Control of Individual Cylinder Ignition Timing for Improvement of Idle Stability", SAE Paper No. 930315, 1993.
13. T. Inoue et. al., "Toyota Lean Combustion System-The Third Generation System", SAE Paper No. 930873, 1993.
14. W. Herden et. al., "A Now Combustion Pressure Sensor for Advanced Engine Management", SAE Paper No. 940379, 1994.
15. M. F. Chang et. al., "Location of Peak Pressure for an Axially Stratified-Charge Engine", SAE Paper No. 870080, 1987.
16. 김 한바라, "최적점화시기에서 실린더 최고 압력위치의 거동에 관한 연구", 공학석사학위논문, 아주대학교, 1994.
17. F. A. Matekunas, "Modes and Measures of Cyclic Combustion Variability", SAE Paper No. 830337, 1983.
18. D. D. Matekunas, "Monte Carlo Simulation of Cycle by Cycle Variability", SAE Paper No. 922165, 1992.
19. G. A. Hazelrigg, "System Engineering", IAE, 1993.
20. 조한승외 3인, "실린더압력을 이용한 점화시기 제어로직의 시뮬레이션연구(1)", 한국자동차공학회 춘계 학술대회 논문집, 1995.