

실린더 압력센서를 사용한 가솔린 엔진의 도시토크와 부하토크의 추정

백 종 탁 · 박 승 범 · 선 우 명 호*

한양대학교 자동차공학과

Indicated and Load Torque Estimation of SI-Engine using Cylinder Pressure Sensor

Jongtak Baek · Seungbum Park · Myoungho Sunwoo*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 135-791, Korea

(Received 28 March 2003 / Accepted 7 August 2003)

Abstract : The torque is an important measure that represents the performance of a particular engine. Furthermore the information of engine torque can be used as a primary feedback parameter in modern engine management system. In this paper, a methodology is proposed for torque estimation of SI-engine. Since the proposed method uses cylinder pressure sensor, the torque can be estimated in a simple manner. The indicated torque is estimated from the peak pressure and its location, and the load torque is observed by the state observer based on the estimated indicated torque. The proposed method is accurate and robust against the variations that affect the torque production such as spark timing, mass air flow and others. This torque estimation method may be an alternative solution to the use of engine torque maps in a modern torque-based engine management system.

Key words : Cylinder pressure(실린더 압력), Indicated torque(도시토크), Load torque(부하토크), Peak pressure(최고압력), Location of peak pressure(최고압력발생위치), Neural network(신경회로망), Observer(관측기)

Nomenclature

J_{eff} : effective inertia of engine and dynamometer system, $kg \cdot m^2$
 N : engine speed, rpm
 n : number of cycle
 nR : number of crank revolutions for one cycle
 P_c : cylinder pressure, bar
 V : cylinder volume, m^3
 V_s : stroke volume, m^3
 VD : engine displacement volume, m^3

Ψ : crank angle, deg

Subscripts

EBDC : bottom dead center at exhaust stroke
IBDC : bottom dead center at intake stroke

1. 서론

엄격해지는 자동차 유해 배기가스에 대한 규제와 차량의 고성능화에 대한 소비자 요구를 동시에 충족시키기 위하여 첨단 엔진제어시스템의 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이들 연구는 보다 정밀하게 엔진을 제어하는데 그 목적이 있는데

*To whom correspondence should be addressed.
msunwoo@hanyang.ac.kr

이를 위해서는 엔진 작동과 관련된 여러 가지 인자들에 대한 정보가 요구된다. 그 중 토크는 엔진의 성능과 운전상태를 반영하는 중요한 지표로서 차량의 운전성 및 응답성과 밀접한 관계를 가지고 있고 운전자가 직접적으로 감지할 수 있기 때문에 소비자의 만족도에 큰 영향을 준다. 토크기반 엔진제어 시스템은 엔진에 부가되는 부하의 변동이 있더라도 운전자가 요구한 만큼의 토크를 발생시키도록 엔진을 제어하여 차량의 운전성을 향상시킬 수 있고, 에어컨이나 파워 스티어링 시스템과 같이 엔진 토크를 필요로 하는 장치들과 엔진제어시스템과의 연계가 토크를 기반으로 되어 있어서 엔진의 제어가 간단해지는 장점이 있다.¹⁾ 하지만 기존의 연구에서는 측정된 토크가 아닌 엔진모델로 계산된 토크를 되먹임(feedback)하기 때문에 실질적으로 제어시스템은 개루프(open-loop)방식으로 구성되어 있으며 정확한 엔진토크의 계산을 위하여 복잡한 엔진모델이 필요하게 되고, 모델 오차나 엔진의 노화와 같은 불확실성에 의해 제어오차가 수반되는 단점이 있다. 따라서 정밀한 엔진의 제어를 위해서는 실제로 발생하는 토크의 측정이나 추정이 필요하다.

압력센서를 사용하여 실린더 내의 연소 압력을 측정할 경우 도시평균유효압력(indicated mean effective pressure : IMEP)을 계산할 수 있고 이에 의하여 도시토크를 구할 수 있을 뿐만 아니라 엔진제어에 유용한 최고압력(peak pressure : PP) 및 최고압력 발생위치(location of peak pressure : LPP) 등의 압력 변수들을 얻을 수 있는 장점이 있다. 엔진제어에 압력센서를 적용하는데 있어서 장애가 되는 가장 큰 요인으로는 가격을 들 수 있는데, 현재 발표된 연구 결과²⁾에 따르면 저가의 신뢰성 있는 압력센서 개발의 가능성이 커지고 있다.

이 연구에서는 최고압력과 그 발생위치 및 엔진 회전속도에 의하여 도시 토크를 추정하는 방법을 제안하였고, 이를 이용하여 엔진의 부하토크를 추정하였다.

2. 도시토크의 추정

2.1 도시토크

엔진의 실린더간 토크변동을 무시할 수 있다고

가정하면 도시토크는 식 (1)로 구할 수 있다.³⁾

$$T_{ind} = \frac{100 V_D IMEP}{6.28 n_R} \quad (1)$$

여기서, 도시평균유효압력은 실린더 압력이 일정한 샘플링 주기로 측정된다고 가정하면 식 (2)로 계산할 수 있다.⁴⁾

$$IMEP = \frac{\sum_{\phi_k = \phi_{max}}^{\phi_{k+1}} [P_c(\phi_k) + P_c(\phi_{k+1})] [V(\phi_{k+1}) - V(\phi_k)]}{2V_s} \quad (2)$$

따라서 실린더 압력센서에 의한 압력 신호로부터 식 (1),(2)와 같이 도시 토크를 계산 할 수 있지만, 이 경우 정확한 도시평균유효압력의 값을 얻기 위해서는 많은 횟수의 연소압력측정이 필요하고, 그에 따라 부가 되는 계산량도 많아지기 때문에 현재 사용되는 엔진제어시스템의 A/D 변환속도나 프로세서의 계산능력을 고려 할 때 실제 차량에서 이와 같은 방법으로 도시토크를 계산하기에는 어려움이 따른다.

2.2 도시평균유효압력의 추정

2.2.1 압력변수 선정

Fig. 1은 엔진회전속도와 공연비를 고정시키고 부하를 변화 시켰을 때 최고압력, 최고압력발생위치와 도시평균유효압력과의 관계를 도시한 것이다.

Fig. 1에 의하면 부하가 변화할 경우 도시평균유효압력은 최고압력에 의해 지배적인 영향을 받으며 선형적으로 비례하고, 부하가 고정되었을 경우는

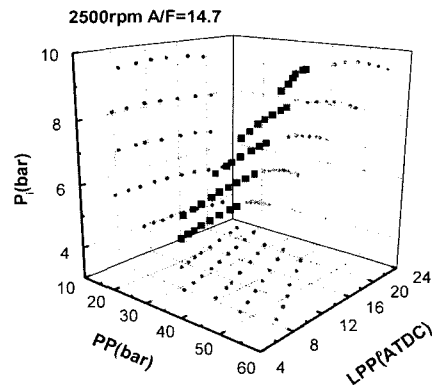


Fig. 1 Relation of IMEP with selected pressure parameters

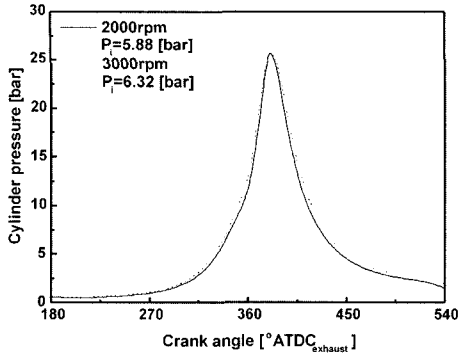


Fig. 2 Example of the IMEP difference with the same peak pressure and LPP

최고압력발생위치와 2차 함수의 관계를 나타낸다. 최고압력과 최고압력발생위치가 같은 값을 가지더라도 엔진회전속도가 다를 경우 도시평균 유효압력은 약간의 차이를 보인다. Fig. 2는 그 예를 도시한 것으로 이러한 현상은 동일한 흡기 매니폴드 압력 조건에서도 엔진회전속도에 따라 실린더내로 유입되는 공기량이 변화하며 또한, 팽창 행정시 고온의 연소가스와 실린더 벽면의 접촉시간이 엔진회전수가 증가함에 따라 감소하므로 고속일 경우 저속일 때에 비하여 실린더 벽면으로의 열전달이 감소하기 때문에 설명될 수 있다.

따라서 이와 같은 관계에 의하여 최고압력, 최고압력발생위치, 엔진회전속도를 반영하는 변수로 구성되는 다항식으로 도시평균유효압력을 계산할 수 있다.

2.2.2 도시평균유효압력 추정식

Fig. 3은 엔진회전수와 공연비를 고정시키고 부하와 점화시기를 변화하여 얻은 결과로써 각 운전 조건당 100사이클의 데이터를 평균한 것이다.

같은 부하조건에서 도시평균유효압력은 최고압력발생위치에 대한 2차 함수로 표현될 수 있으며 부하의 증가로 최고압력이 높아지면 이에 비례하여 도시평균유효압력도 증가하므로 식 (3)과 같이 추정식을 구성하였다.

$$\hat{P}_i = (a_1 P_{max} + a_2)(\theta_{max} + a_3)^2 + a_4 P_{max} + a_5 N + a_6 \quad (3)$$

여기서, \hat{P}_i 는 추정된 도시평균유효압력, P_{max} 는 최고압력, θ_{max} 는 최고압력발생위치, N은 엔진회전

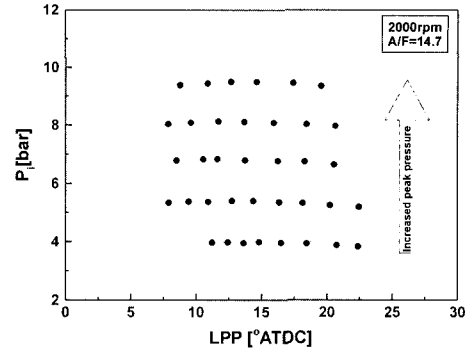


Fig. 3 Relation of IMEP with LPP

속도이며, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 는 추정식의 계수를 나타낸다. 식 (3)의 계수들은 정상상태 운전을 통하여 취득한 데이터로부터 각 운전조건의 도시평균유효압력, 최고압력발생위치, 최고압력을 추출한 후 Levenberg-Marquardt 방법으로 적합곡선을 구한 결과이다.

2.3 추정식의 성능 검증

2.3.1 실험장치

실험을 위하여 2.0L, 4 실린더, 4밸브의 DOHC 엔진과 와전류식 동력계를 이용하였으며, 실린더 내 압력은 0~200bar 까지 계측이 가능한 Kistler사의 스파크 플러그 타입 압력센서를 사용하여 측정하였다.

2.3.2 오차의 정량화

추정식의 추정오차는 크랭크 각도 1도마다 얻어진 연소압력을 식 (2)에 대입하여 구한 도시평균유효압력(P_i)과 추정식을 이용하여 구한 값(\hat{P}_i)과의 상대오차로 정의하였으며 식 (4)와 같다.

$$E_P[\%] = \frac{\hat{P}_i - P_i}{P_i} \times 100 \quad (4)$$

또한 추정오차를 정량화하기 위하여 식 (5)와 같이 평균제곱근오차(RMS_E : root mean square error)를 정의하였다.

$$RMS_E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n E_P(k)^2}{n}} \quad (5)$$

2.3.3 실험결과

최고압력과 최고압력발생위치는 크랭크 각도 1도마다 압력신호를 샘플링하여 검출하였으며 임의로 운전조건을 변화시킨 과도운전조건에서 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 운전조건 변화에 상관없이 2.1%의 평균제곱근오차로 도시 평균유효압력을 추정할 수 있었다. 추정된 값은 식 (2)를 사용하여 구한 값에 비해 사이클간 변동이 심한 것을 알 수 있으며 이는 추정식에 사용된 압력변수의 사이클간 변동이 반영되었기 때문이다.

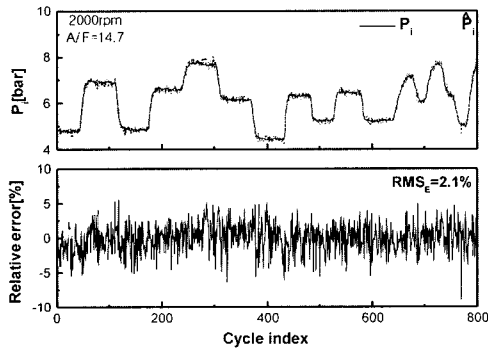


Fig. 4 Experimental result of IMEP estimation

3. 신경회로망의 적용

3.1 신경회로망을 이용한 압력변수 추정

제한된 추정식을 사용하여 2.3.3절의 실험결과와 같이 간단한 다항식으로 도시평균유효압력을 추정할 수 있다. 하지만 최고압력과 최고압력발생위치의 정확한 검출을 위해서는 크랭크 각도 1도마다의 압력신호 샘플링이 필요하게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 한 사이클당 5지점의 압력신호만으로 최고압력과 최고압력발생위치를 검출할 수 있는 신경회로망을 적용하였다.⁵⁾ Fig. 5는 이 연구에 사용된 신경회로망의 구조를 도시한 것이다.

신경회로망은 배기 상사점을 기준으로 크랭크 각도 320, 340, 360, 380, 400도에 해당하는 5지점의 압력신호를 입력으로 하여 최고압력과 그 발생위치를 추정하도록 훈련되었으며, Fig. 6은 2.3.3절의 실험 데이터를 사용하여 신경회로망의 추정성능을 시험한 결과 중 처음 100사이클을 도시한 것이다.

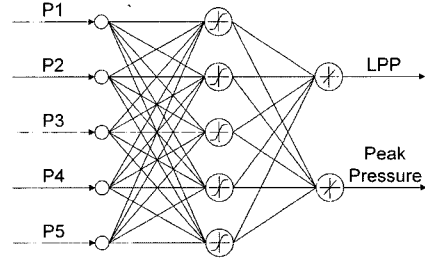


Fig. 5 Feedforward neural network for peak pressure and LPP estimation

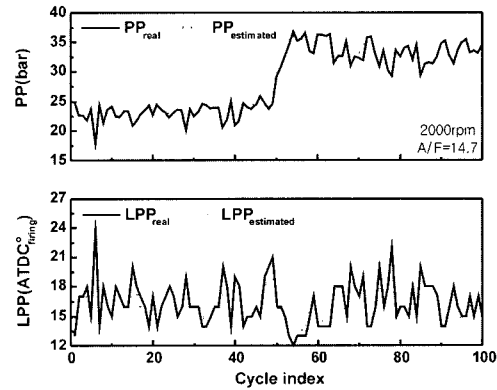


Fig. 6 Estimation results of peak pressure and LPP using neural network

3.2 실험결과

Fig. 7은 3.1절의 신경회로망에 의하여 추정된 최고압력과 그 발생위치를 식 (3)에 대입하여 도시평균유효압력을 추정한 결과이다.

최고압력과 최고압력발생위치가 신경회로망에 의하여 추정되었기 때문에 사용되는 압력변수에 추정오차가 내포되어 있음에도 불구하고 2.3.3절의 결

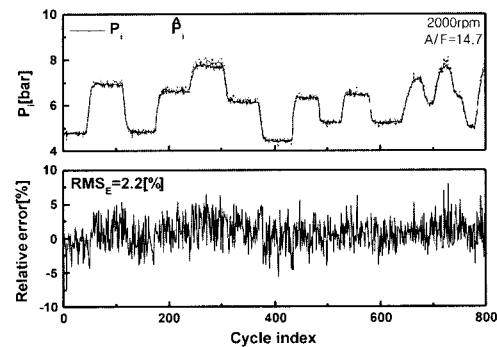


Fig. 7 IMEP estimation result with estimated peak pressure and LPP

과와 비교할 때 성능의 저하가 두드러지게 나타나지 않았다.

4. 부하토크의 추정

4.1 부하토크

엔진부하토크는 타이어와 지면의 마찰력, 공기 저항, 동력 전달계에 의한 기계적 토크손실, 에어컨이나 파워 스티어링 시스템과 같은 차량 내 부가장치에 의한 소비토크 등과 같이 외부적 요인에 의하여 엔진에 부가되며, 차량의 운행상태에 따라 변화된다. 따라서 토크기반엔진제어의 관점에 있어서 부하토크는 시간에 따라 변하는 외란으로 간주되고, 엔진은 외란의 변동이 있더라도 운전자가 요구한 만큼의 토크를 발생시켜야 하므로 엔진토크제어나 속도제어에 있어서 부하토크에 대한 정보는 매우 중요하다. 이 연구에서는 엔진회전모델과 관측기를 사용하여 부하토크를 추정하였다.

4.2 엔진회전모델

엔진의 회전동력학은 엔진과 동력계의 유효관성모멘트가 일정하다고 가정하면 식 (6)으로 표현된다.

$$J_{eff} \frac{dN(t)}{dt} = \frac{30}{\pi} (T_{ind}(t) - T_{flp}(t) - T_L(t)) \quad (6)$$

식 (6)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{1}{J} T_L(t) + \frac{1}{J} T_{br}(t) \quad (7)$$

Where, $J = \frac{\pi J_{eff}}{30}$

$$T_{br} = T_{ind} - T_{flp}$$

여기서 도시토크(T_{ind})는 도시평균유효압력으로 부터 식 (1)에 의하여 계산될 수 있으며, 펌핑과 마찰로 인한 손실토크(T_{flp})는 정상상태에서 연소실 압력으로부터 계산된 도시토크와 동력계에서 측정된 계동토크와의 차이로부터 추정하였고, 식 (8)과 같이 엔진회전속도와 행정당 충전 공기량(m_{ac})의 다항식으로 근사하였다.⁶⁾

$$T_{flp} = p_1 + p_2 N + p_3 N^2 + (p_4 + p_5 N) m_{ac} \quad (8)$$

부하토크(T_L)는 엔진회전속도에 비해 느리게 변화하므로 $\dot{T}_L(t) \approx 0$ 라고 가정하고, $x = [N \ T_L]^T$ 를 상태변수로 정의하면 엔진회전모델은 식 (9)와 같이 상태공간방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (9)$$

where, $A = \begin{bmatrix} 0 & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 1/J \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$

$$u = T_{br}, \ y = N$$

4.3 관측기 설계

식 (9)의 가관측성 행렬은 식 (10)과 같고 행렬의 계수(rank)가 2이므로 모든 상태변수의 관측이 가능하다.⁷⁾

$$O = [C^T : A^T C^T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1/J \end{bmatrix} \quad (10)$$

따라서 식 (11)과 같이 관측기를 설계하여 부하토크를 추정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A \hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ &= A \hat{x} + Bu + K C \tilde{x} \end{aligned} \quad (11)$$

where, $K = [k_1 \ k_2]^T$; Observer Gain Matrix

\tilde{x} 는 관측오차로서 상태변수의 측정치와 추정치의 차로 정의되며 식 (12)와 같다.

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (12)$$

관측기의 오차동력학은 식 (13)으로 표현되며 A_e 의 고유치가 음의 실수부를 가지면 관측기의 오차는 0으로 수렴하게 되므로 극점배치기법(pole placement technique)을 사용하여 관측기의 게인을 선정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A_e \tilde{x} = (A - K C) \tilde{x} \\ &= \begin{bmatrix} -k_1 & -1/J \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} \end{aligned} \quad (13)$$

4.3 실험결과

부하토크의 추정실험에 있어서 신경회로망에 의해 추정된 최고압력과 최고압력발생위치를 식 (3)에 대입하여 도시토크를 추정하였고, 관측기의 성

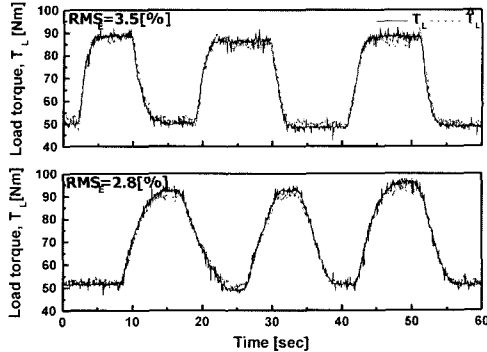


Fig. 8 Performance of the observer for a transient operation at fixed engine speed(2000rpm, A/F=14.7)

능을 검증하기 위하여 동력계로 부하토크를 측정하여 추정값과 비교하였다.

Fig. 8은 엔진회전속도를 고정하고 스로틀 밸브를 제어하여 임의로 부하토크를 변화시킨 과도운전 조건에서 관측기의 부하토크 추정성능을 실험한 결과이다. 부하가 급격히 변화하도록 계단함수의 형태로 부하변동을 가하였을 경우에는 3.5%의 추정오차를 나타내었고, 부하가 완만하게 변화하는 정현파 형태의 부하변동을 가하였을 경우는 2.8%의 추정오차를 나타내었다.

5. 결론

이 연구에서는 실린더 압력센서를 사용하여 가솔린 엔진의 도시토크와 부하토크를 추정하는 방법을 제안하였다. 최고압력과 최고압력발생위치, 엔진회전속도의 다항식으로 도시토크를 추정하였으며, 보다 효율적인 방법으로 5지점의 압력신호에 의하여 필요한 압력변수를 추정하는 신경회로망을 적용하여 도시토크의 계산에 필요한 하드웨어의 요구조건을 최소화하였다. 또한, 부하토크 관측기를 설계하여 임의의 부하변동을 가한 과도운전 조건에서 추정성능을 실험하였다.

이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 최고압력, 최고압력발생위치, 엔진회전속도를

독립변수로 하는 다항식으로 도시평균유효압력을 추정하여 도시토크를 계산할 수 있다.

- 2) 5지점만의 압력신호를 입력으로 하는 신경회로망에 의해 추정된 최고압력과 최고압력발생위치를 사용하였을 경우도 도시평균유효압력 추정식의 성능은 크게 저하되지 않았다.

- 3) 엔진회전속도를 고정하고 임의의 부하 변동을 가한 조건에서 관측기를 사용하여 부하토크를 추정한 결과 약 3.2%의 평균제곱근오차를 나타내었다.

References

- 1) N. Heintz, M. Mews, G. Stier, A. J. Beaumont, A. D. Noble, "An Approach to Torque-Based Engine Management Systems," SAE 2001-01-0269, 2001.
- 2) M. C. Sellnau, F. A. Matekunas, P. A. Battiston, C. F. Chang, D. R. Lancaster, "Cylinder-Pressure-Based Engine Control Using Pressure-Ratio-Management and Low-Cost Non-Intrusive Cylinder Pressure Sensors," SAE 2000-01-0932, 2000.
- 3) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co., pp.50-51, 1988.
- 4) M. F. Brunt, A. L. Emtage, "Evaluation of IMEP Routines and Analysis Errors," SAE 960609, 1996.
- 5) P. J. Yoon, S. B. Park, M. H. Sunwoo, "Closed-Loop Control of Spark Advance and Air-fuel Ratio in SI Engines using Cylinder Pressure," SAE 2000-01-0933, 2000.
- 6) P. J. Yoon, M. H. Sunwoo, "A Nonlinear Dynamic Engine Modeling for Controller Design," Transactions of KSAE, Vol.7, No.7, pp.167-180, 1999.
- 7) K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall International Inc., pp.795-821, 1990.