

실린더 압력을 이용한 디젤엔진의 실시간 IMEP 추정

김도화¹⁾ · 오병걸²⁾ · 오승석²⁾ · 이강윤³⁾ · 선우명호^{*4)}

현대자동차¹⁾ · 한양대학교 자동차공학과²⁾ · 한양대학교 자동차전자제어연구소³⁾ · 한양대학교 자동차공학과⁴⁾

Cylinder Pressure based Real-Time IMEP Estimation of Diesel Engines

Dohwa Kim¹⁾ · Byounggul Oh²⁾ · Seungsuk Ok²⁾ · Kangyoon Lee³⁾ · Myoungho Sunwoo^{*4)}

¹⁾Gasoline Engine R&D Team, Hyundai-KIA Motor Company, 772-1 Jangdeock-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Automotive Control & Electronics Laboratory, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

⁴⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 22 July 2008 / Accepted 18 September 2008)

Abstract : Calculation of indicated mean effective pressure(IMEP) requires high cylinder pressure sampling rate and heavy computational load. Because of that, it is difficult to implement in a conventional electronic control unit. In this paper, a cylinder pressure based real-time IMEP estimation method is proposed for controller implementation. Crank angle at 10-bar difference pressure(CA_{DP10}) and cylinder pressure difference between 60° ATDC and 60° BTDC(DP_{deg}) are used for IMEP estimation. These pressure variables can represent effectively start of combustion(SOC) and fuel injection quantity respectively. The proposed IMEP estimation method is validated by transient engine operation using a common-rail direct injection diesel engine.

Key words : Cylinder pressure(실린더 압력), Indicated mean effective pressure(도시평균유효압력), Estimation(추정), Real-time(실시간), CRDI(커먼레일 직접분사)

Nomenclature

ATDC : after top dead center
 BTDC : before top dead center
 CA_{DP10} : crank angle at 10-bar difference pressure, °CA
 CRDI : common-rail direct injection
 DP_{deg} : cylinder pressure difference between at 60° ATDC and 60° BTDC, bar
 IMEP : indicated mean effective pressure, bar
 P_{cyl} : corrected cylinder pressure, bar
 P_e : measured cylinder pressure with sensor

drift, bar

SOE : start of energizing, ° BTDC
 TDC : top dead center
 T_{inj} : injection duration, ms

Subscripts

estimated : estimated value
 real : real value
 target : target value

1. 서론

전 세계적으로 자동차의 배기 배출물 규제가 점차 강화되고 있는 가운데, 이러한 배기규제를 만족

*Corresponding author, E-mail: msunwoo@hanyang.ac.kr

하기 위하여 연소제어에 관한 많은 연구가 진행 중에 있다. 이 중 실린더 압력기반 엔진제어는 내연기관 실린더 압력을 이용하여 연소를 제어하는 방법으로, 기존의 간접 연소제어방식보다 효율적인 연소제어가 가능한 장점이 있다.

기존의 디젤엔진제어 시스템은 실린더 내부의 연소정보 없이 개루프 연소제어(open loop combustion control)를 하고 있다. 그러나, 압축 착화 기관은 고유 특성으로 인하여 착화 시기나 도시평균유효압력 등의 연소특성 변동이 가솔린 엔진에 비하여 큰 편이다. 실린더 압력을 기반으로 하여 연소를 폐루프 제어(closed loop combustion control)할 경우, 실린더 내 연소 정보를 알고 있기 때문에 엔진을 보다 정확하게 제어할 수 있게 할 뿐만 아니라, 실린더에 장착된 압력 센서가 대기압, MAF(Mass air flow), camshaft, knock 등의 다른 여러 종류의 센서를 대체할 수 있다는 장점이 있다.¹⁾

기존의 실린더 압력을 이용한 엔진제어의 예로는 최고 실린더 압력의 위치(LPP: Location of peak pressure)²⁾와 10° ATDC의 압력비(PRM10: Pressure ratio management at 10° ATDC)³⁾를 이용한 공연비의 희박한게 제어, 압력비의 무게중심(COG: Center of gravity of pressure ratio)⁴⁾을 이용한 연료분사 제어, 50% 열 발생 위치(HR50: Heat release of 50%)와 도시평균유효압력(IMEP: Indicated mean effective pressure)⁵⁻⁷⁾을 이용한 연료분사시기와 분사량 제어, 10 bar 압력차의 위치(CA_{DP10})⁸⁾를 이용한 착화시기(SOC: Start of combustion) 검출 및 제어 등이 있다.

이 연구에서는 실린더 압력기반 제어 시스템을 위한 실시간 IMEP를 추정하는 방법을 제안하였다. 엔진의 연소에 의한 도시일을 나타내는 IMEP는 이론적으로 구할 경우, 많은 계산량으로 인하여 기존 엔진제어시스템(EMS: Engine management system) 내에서 실시간 계산이 매우 어렵다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 IMEP와 밀접한 상관관계를 가지는 압력 변수를 도출하였고, 이를 이용한 실시간 IMEP 추정 방법을 제안하였다.

2. 도시평균유효압력 추정

2.1 IMEP

IMEP는 엔진의 배기량에 관계없이 엔진의 성능을 나타내는 지표로써, 식 (1)과 같이 실린더 압력 데이터를 이용하여 계산한다.⁹⁾

$$IMEP = \frac{\Delta\theta}{V_s} \sum_{n_1}^{n_2} p_{cyl} \frac{dV}{d\theta} \quad (1)$$

여기서 n , $\Delta\theta$, V_s , 그리고 p_{cyl} 은 각각 적분 구간, 크랭크 앵글 해상도, 단일 실린더 행정체적, 그리고 실린더 압력을 나타낸다. 식 (1)은 사이클 전 구간의 실린더 압력 데이터를 모두 필요로 한다. 예를 들어 1°CA 마다 실린더 압력을 샘플링 할 경우, 한 실린더의 한 사이클에 대한 IMEP를 구하기 위하여 720 개의 실린더 압력 데이터를 처리하여야 하고, 결과적으로 4 기통 엔진의 실린더 별 IMEP를 구할 경우, 사이클 당 2880 번의 데이터 샘플링과 이 데이터를 이용한 계산이 요구된다. 이러한 많은 양의 데이터는 기존의 엔진제어시스템에서는 실시간으로 처리가 매우 어렵다. 이 논문에서는 위와 같은 단점을 개선하기 위하여 엔진제어시스템에서 실시간 계산이 가능하도록 데이터의 계산량이 적은 압력 변수를 이용한 IMEP 추정 방법을 제안하였다.

2.2 압력 변수 선정

Kao와 Moskwa¹⁰⁾는 피스톤의 상사점(TDC)을 기준으로 하여 특정 크랭크 각 전·후의 실린더 압력 차이(ΔP_{deg})가 연소되는 연료의 양과 직접적인 관계를 가지고 있음을 발견하고 이를 실화 검출에 적용하였다. 이때 사용된 크랭크 각이 60°CA이고 이를 DP_{deg} 라 정의하였다.

이 연구에서는 IMEP를 추정하기 위하여 위에서 언급한 DP_{deg} 를 이용하였다. DP_{deg} 는 식 (2) 및 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상사점을 중심으로 60°CA 전과 후의 실린더 압력값의 차로 계산된다.

$$DP_{deg} = P_{@60^\circ ATDC} - P_{@60^\circ BTDC} \quad (2)$$

IMEP는 대부분의 운전조건에서 연료 분사량에 비례하여 커지기 때문에 Fig. 2에서 보는 것과 같이, 연료 분사량의 변화에 대하여 DP_{deg} 와 IMEP가 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

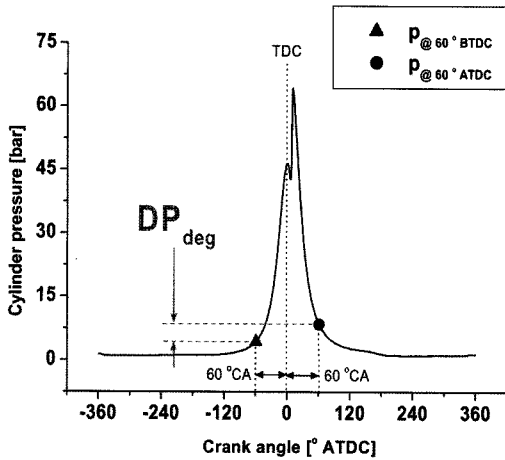


Fig. 1 Definition of DP_{deg}

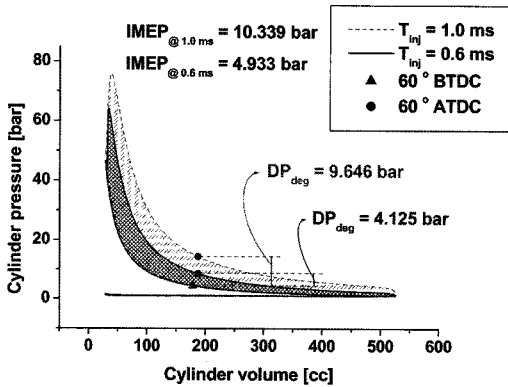


Fig. 2 Pressure-volume diagram

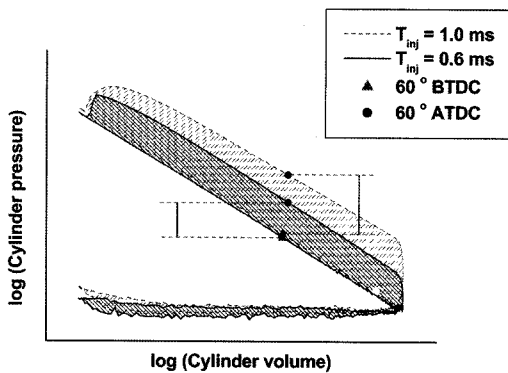


Fig. 3 Pressure-volume diagram in log scale

IMEP와 DP_{deg}의 관계는 로그스케일의 P-V 선도에 서 개념적으로 확인할 수 있다. Fig. 3은 연료분사기 간 0.6 ms와 1.0 ms에 대하여 DP_{deg}를 표시하고 있다.

그림에서 보는바와 같이 로그스케일 P-V 선도에서 DP_{deg}는 도시일 즉, 그래프의 넓이와 관계가 있음을 알 수 있다.

2.3 IMEP 추정

DP_{deg}는 IMEP를 추정할 수 있는 가장 중요한 압력 변수이지만, SOC(Start of combustion)과 같은 연소 시점의 변동에 의한 IMEP 변화는 추정해 내지 못한다. 이를 개선하기 위하여 연소 시점과 밀접한 관계를 가지는 CA_{DP10}^{8,11,12}을 이용하여 IMEP 추정 방법을 보완하였다.

Fig. 4에서 보는바와 같이 각각의 SOE(start of energizing)에 대하여 연소시점을 의미하는 CA_{DP10}과 IMEP의 관계는 2차식의 경향을 나타낸다. Fig. 5는 여러 가지 연료 분사시간에 따른 CA_{DP10}과 IMEP의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연료 분사시간에 따른 CA_{DP10}과 IMEP은 곡률반경이 큰 2차식의 형태를 보이고 있다. 최종적으로 얻어진 MEP 추정식(1500 rpm)은 아래와 같다.¹³⁻¹⁵⁾

$$\widehat{IMEP} = (ax^2 + bx + c) \cdot (dy^2 + ey + f) \quad (3)$$

x와 y는 각각 DP_{deg}와 CA_{DP10}을 의미하고, 각 계수는 비선형 커브 피팅 방법을 이용하여 도출하였다.

엔진의 다양한 운전 조건에 대한 식 (3)의 추정 성능을 확인하기 위하여 식 (1)로부터 계산된 IMEP_{measured}

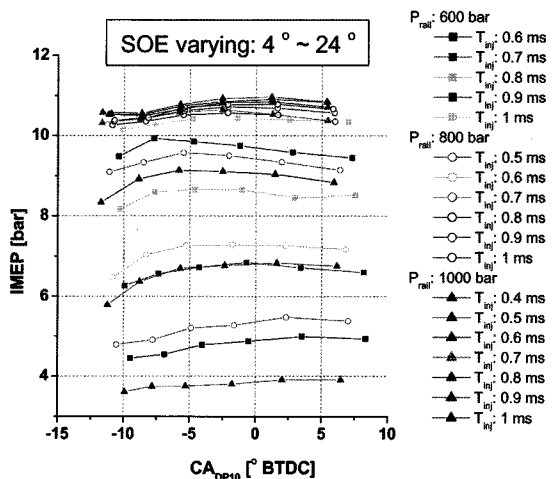


Fig. 4 Relation between IMEP and CA_{DP10} at various SOE, 1500 rpm

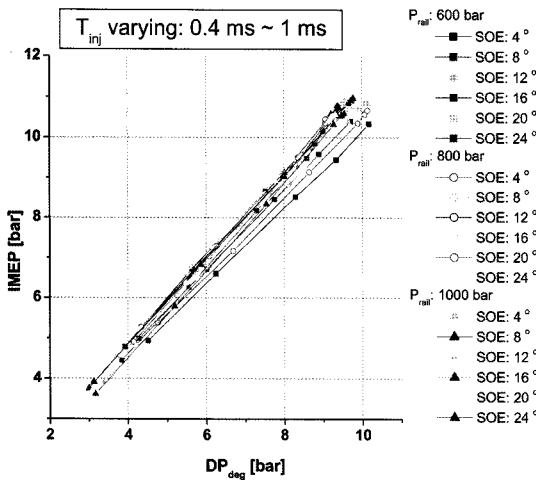


Fig. 5 Relation between IMEP and DP_{deg} at various fuel injection duration, 1500 rpm

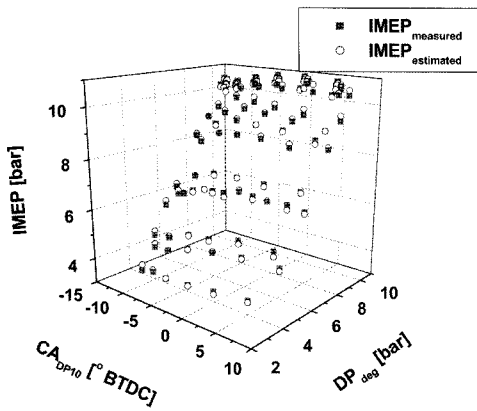


Fig. 6 Relation between IMEP, CA_{DP10} , and DP_{deg} at 1500 rpm

와, 식 (3)을 이용하여 추정된 $IMEP_{estimated}$ 를 비교하였다. Fig. 6은 IMEP와 CA_{DP10} , 그리고 DP_{deg} 의 관계를 3차원 그래프로 나타내 비교한 결과이다. 원형으로 표시된 $IMEP_{estimated}$ 가 사각형의 $IMEP_{measured}$ 를 2-norm 퍼센트 오차가 15.756 이내로 추정하는 것을 볼 수 있다. 또한, 제한된 추정식은 연소되는 연료량의 변동에 의한 IMEP 변화뿐만 아니라, 연소의 타이밍 변동에 의한 IMEP의 변화도 추정할 수 있음을 확인하였다.

식 (3)의 IMEP 추정 알고리즘은 기존의 계산방법과 비교하여 상대적으로 적은 실린더압력 데이터를 필요로 하기 때문에 보다 빠르게 IMEP를 계산할 수

있다. 이를 이용하면 계산능력이 한정되어 있는 기존의 엔진 제어시스템에서도 실린더 압력을 바탕으로 실시간 IMEP의 추정 및 제어가 가능하다.

3. IMEP 추정식 검증

3.1 엔진 실험 환경

엔진 실험은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 2.0 리터의 직렬 4 기통 커먼레일 직접분사(Common rail direct injection) 디젤 엔진을 이용하였다. 엔진제어 시스템은 상용 RCP(Rapid control prototyping) 장비인 MicroAutoBox를 이용하여, 연료분사시기, 연료분사량, 커먼-레일 압력 등을 실험 조건에 맞게 설정할 수 있도록 하였다. 실린더 압력은 피에조 타입의 압력 센서를 이용하여 측정하였으며, 엔진의 글로우 플러그를 탈거 후 실린더 압력 센서를 장착하였다. 실험 장비의 상세 내용은 Table 1에 정리하였다.

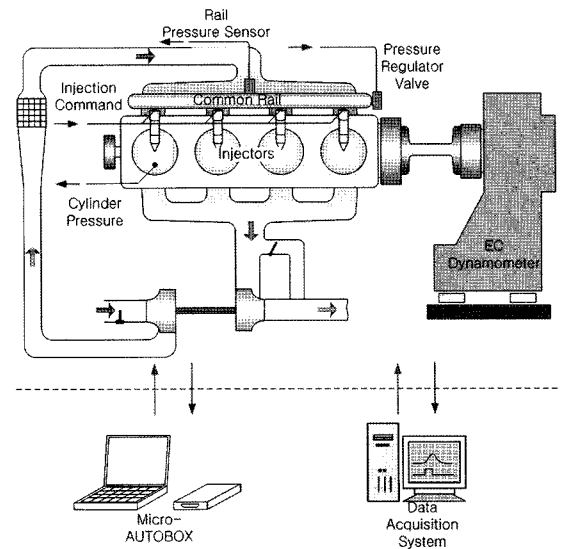


Fig. 7 Experimental setup

3.2 선형 제어 시스템

제한된 IMEP 추정 방법의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 8과 같이 제어 시스템을 구성하였다. 엔진에 장착된 실린더 압력 센서에서 나오는 압력 데이터는 1°CA마다 계측되고, 720°CA, 즉 한 사이클마다 페깅(Pegging; Absolute pressure referencing)¹⁾이 수행된다. 페깅된 실린더 압력 데이터를 가지고 IMEP 추

Table 1 Specifications of the experimental system

Engine	Type	In-line SOHC, CRDI
	Number of cylinder	4
	Displacement volume	1991 cc
Cylinder-pressure sensor	Company	Kistler(Switzerland)
	Type	Piezoelectric pressure transducer
Engine controller	Company	dSPACE(Germany)
	Model	MicroAutoBox
	Processor	IBM PPC 750FX, 800 MHz

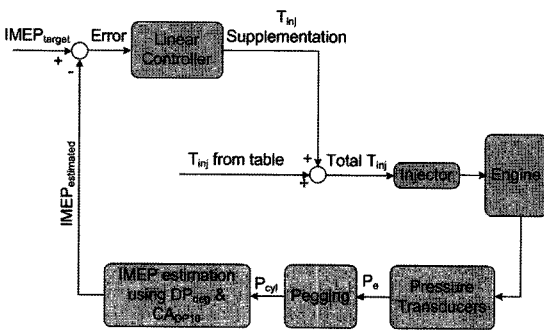


Fig. 8 Structure of the IMEP controller

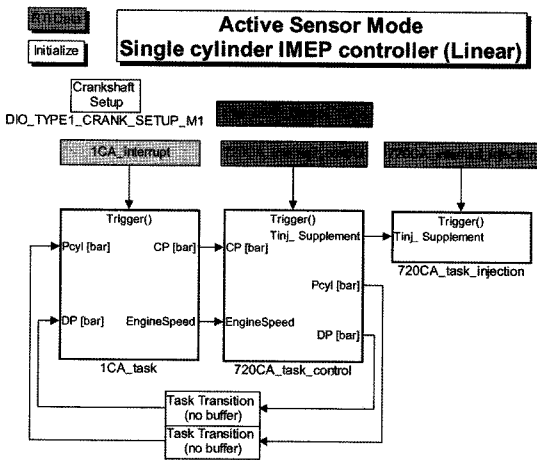


Fig. 9 Block diagram of the IMEP control system

정 방법을 이용하여 추정할 때 사이클의 IMEP는 제어의 유효성을 위하여 이동평균(moving average) 처리하였으며, 목표 IMEP(IMEP_{target})와의 차이값을 선형 제어기에 입력하였다.

Fig. 9는 MicroAutoBox에서 구현한 IMEP 제어 시스템의 Simulink 블록다이어그램을 나타내고 있다.

3.3 목표값 추종

외란 또는 오동작하는 부품에 의한 IMEP 변동시 목표값 추종 성능을 확인하기 위하여 두 가지 시험을 수행하였다.

그 첫째로 엔진의 운전 조건을 1500 rpm, 600 bar의 커먼-레일 압력, 1° BTDC의 SOE, 0.6 ms의 연료 분사시간으로 정상상태 운전 조건에서 목표값 추종 성능을 확인한 결과, IMEP_{target}의 계단입력 변화에 대하여 Fig. 9와 같은 IMEP_{measured}, IMEP_{estimated}, 연료 분사시간, 그리고 오차의 변동을 확인할 수 있다. IMEP_{target}의 변화에 대해 제어 대상인 IMEP_{measured}은 0.2 초의 상승시간(rising time)과 2 초의 정착시간(settling time)을 보였다. 반면에 IMEP_{estimated}는 사이클 별 variation에 의한 오차를 줄이기 위하여 이동평균 처리하였기 때문에 응답이 지연되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11과 12는 IMEP_{target}을 연속되는 계단함수와 사인파형으로 변화시켰을 때의 결과를 나타내고 있다. IMEP_{estimated}와 IMEP_{measured}이 동시에 Fig. 10에서 확인한 것과 같은 성능으로 IMEP_{target}을 추종함을 볼 수 있고, 이는 제안된 IMEP 추정 방법을 이용하면 엔진 제어시스템에서 실시간 제어가 가능하다는 것을 의미한다.

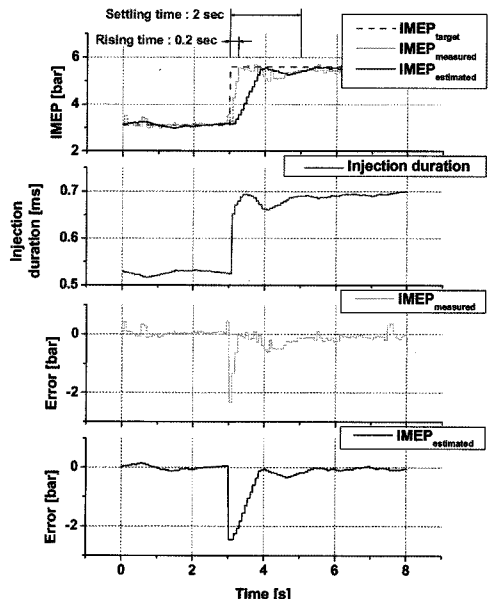


Fig. 10 Step response of IMEP control

실린더 압력을 이용한 디젤엔진의 실시간 IMEP 추정

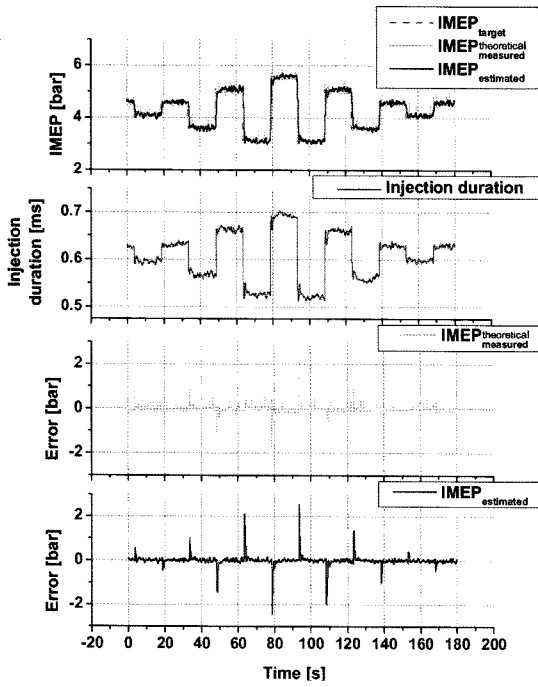


Fig. 11 Repetitive step response of IMEP control

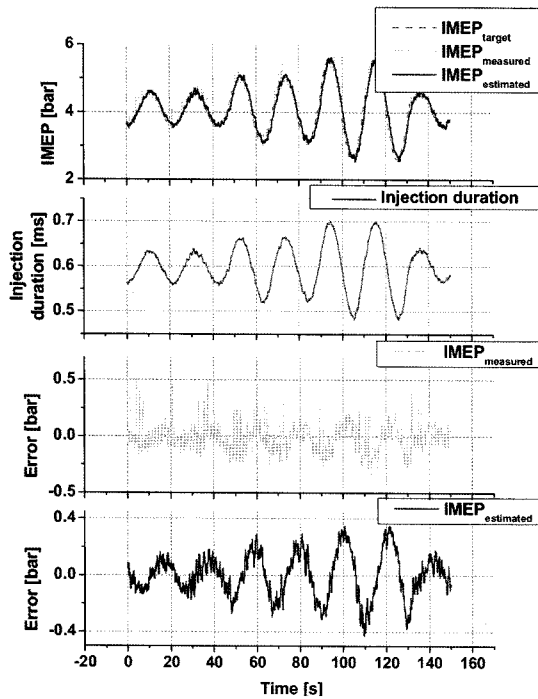


Fig. 12 Repetitive sinusoidal response of IMEP control

두 번째로 연료분사기간과 SOE와 같은 연료분사

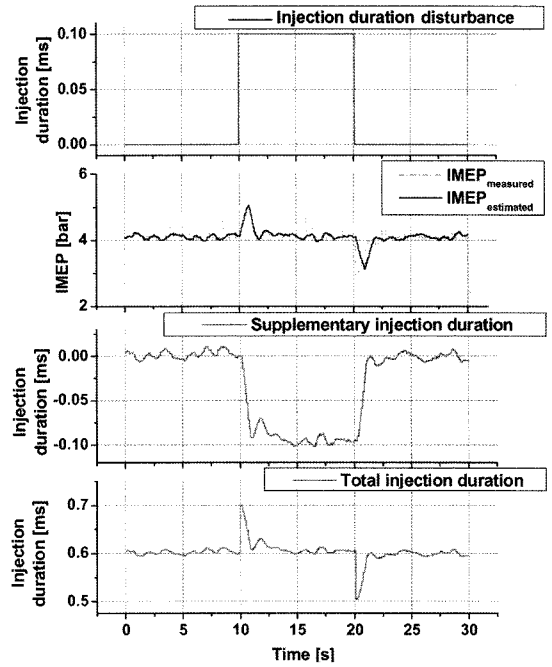


Fig. 13 Response to injection duration disturbance with linear controller

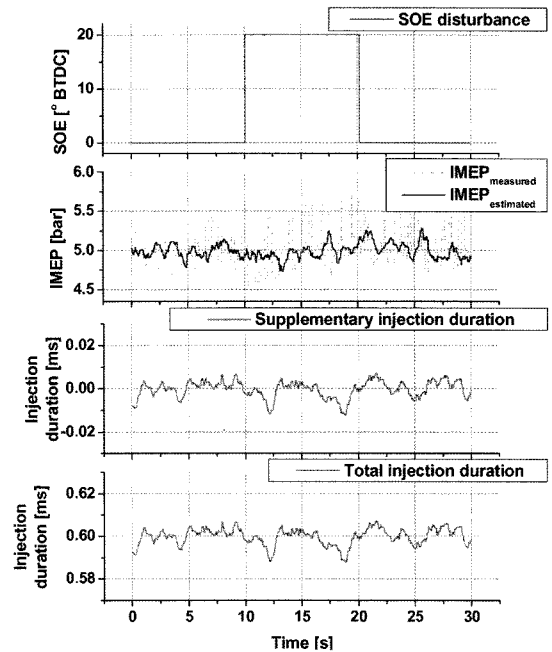


Fig. 14 Response to SOE disturbance with linear controller

신호에 외란이 더해질 경우 목표 IMEP 추종 성능에 대하여 실험하였다.

분사명령 외란은 연료분사기간과 SOE에 계단입력값을 더하여 구현하였고, 고정된 IMEP_{target}에 대한 실험 결과는 Fig. 13~14와 같다. Fig. 13은 연료분사기간에 임의로 외란을 입력했을 때의 실험 결과이다. 제어를 하지 않는 경우 외란의 크기만큼 IMEP에 변동이 생기지만, 제어를 할 경우 외란에 의한 영향을 없애고 IMEP가 일정한 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. Fig. 14는 SOE에 외란이 더해졌을 때의 실험 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 SOE 외란입력은 연료분사기간의 외란보다 IMEP에 끼치는 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 실시간 제어를 위한 실린더 압력 기반 IMEP 추정 방법을 제안하였다. 제안된 IMEP 추정 방법을 검증하기 위하여 커먼레일 디젤 엔진을 이용한 IMEP 제어 시험을 수행하였으며, 이 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) DP_{deg}는 연소되는 연료의 양과 밀접한 관계를 가지는 압력 변수로써, IMEP와 높은 상관관계를 가진다.
- 2) 엔진의 IMEP를 추정하기 위하여 압력 변수, DP_{deg}과 CADP10를 이용한 결과, 분사되는 연료의 양 뿐만 아니라 연소 타이밍의 변동에 의한 IMEP의 변화도 실시간으로 추정할 수 있었다.
- 3) 추정된 IMEP를 이용하여 선형 제어를 수행한 결과, 실린더의 IMEP가 목표값을 0.2 초의 상승시간과 2 초의 정착시간으로 추종하였으며, 연료분사기간과 SOE 외란에 의한 IMEP변동을 효과적으로 저감하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

- 1) K. Lee, Closed-loop Control of SOC for Common-rail Direct Injection Diesel Engines, Ph. D. Dissertation, Hanyang University, Seoul,

Korea, 2005.

- 2) M. Hubbard, P. D. Dobson and J. D. Powell, "Closed Loop Control of Spark Advance using a Cylinder Pressure Sensor," ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, pp.414-420, 1996.
- 3) M. C. Sellnau, F. A. Matekunas, P. A. Battiston, C. Chang and 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.
- 4) S. Leonhardt, C. Ludwig and R. Schwarz, "REAL-TIME SUPERVISION FOR DIESEL ENGINE INJECTION," Control Engineering Practice, Vol.3, pp.1003-1010, 1995.
- 5) A. T. Lee, M. Wilcutts, P. Tunestål and J. Karl Hedrick, "A Method of Lean Air-fuel Ratio Control using Combustion Pressure Measurement," JSAE Review, Vol.22, pp.389-393, 2001.
- 6) T. Jaine, A. Charlet, P. Higelin and Y. Chamaillard, "High Frequency IMEP Estimation and Filtering for Torque Based SI Engine Control," SAE 2002-01-1276, 2002.
- 7) H. Husted, D. Kruger, G. Fattic, G. Ripley and E. Kelly, "Cylinder Pressure-Based Control of Pre-Mixed Diesel Combustion," SAE 2007-01-0773, 2007.
- 8) K. Lee, M. Yoon, M. Son and M. Sunwoo, "Closed-loop Control of Start of Combustion using Difference Pressure Management," IMechE Automobile Engineering, Vol.220, pp.1615-1628, 2006.
- 9) M. F. J. Brunt and A. L. Emtage, "Evaluation of IMEP Routines and Analysis Errors," SAE 960609, 1996.
- 10) M. Kao and J. J. Moskwa, "Model-Based Engine Fault Detection Using Cylinder Pressure Estimates from Nonlinear Observers," IEEE Decision and Control, Vol.3, pp.2742-2747, 1994.
- 11) M. Yoon, "Real-time Simulation and Control of Common-rail Direct Injection Diesel Engines," Ph. D. Dissertation, Seoul, Korea, 2006.
- 12) M. Yoon, K. Lee, M. Sunwoo and B. Oh,

- “Cylinder Pressure Based Combustion Phasing Control of a CRDI Diesel Engine,” SAE 2007-01-0772, 2007.
- 13) D. Kim, B. Oh, K. Lee and M. Sunwoo, “Cylinder-Pressure based IMEP Estimation for CRDI Diesel Engines,” Fall Conference Proceedings, Vol. IV, KSAE, pp.1770-1776, 2007.
- 14) S. Park and D. G. Thomas, “Cyclic Variability of IMEP and Its Correlations in Distribution with Other Combustion-Related Parameters in Natural Gas Engine,” Transactions of KSAE, Vol.4, No.5, pp.82-89, 1996.
- 15) S. Kim, S. Kim, M. Kim and J. Park, “The Indicated Performance Analysis of Spark Ignition Engine by Available Energy,” Proceedings of Busan Engine International Symposium, pp.101-104, 2001.