

## 승용 디젤 엔진의 실린더 차이 압력을 이용한 IMEP 추정 및 제어 알고리즘 개발

정재성\* · 오승석\* · 박인석\* · 선우명호\*\*†

\* 한양대학교 자동차공학과, \*\* 한양대학교 미래자동차공학과

### Development of IMEP Estimation and Control Algorithm Using In-Cylinder Difference Pressure for Passenger Diesel Engines

Jaesung Chung\*, Seungsuk Oh\*, Inseok Park\* and Myoungcho Sunwoo\*\*†

\* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.

(Received March 2, 2012 ; Revised June 18, 2012 ; Accepted June 20, 2012)

**Key Words:** Indicated Mean Effective Pressure(도시평균유효압력), Cylinder Pressure(실린더 압력), Difference Pressure(차이 압력), Torque Control(토크 제어), Torque Estimation(토크 추정)

**초록:** 이 연구에서는 실린더 압력과 모터링 압력의 차이인 차이 압력(difference pressure)을 이용하여 IMEP 를 추정하는 방법을 제안하고, 추정된 IMEP 를  $IMEP_{diff}$  로 정의하였다.  $IMEP_{diff}$  는 차이 압력이 연소 시작 시점에서 연소 종료 시점까지만 존재하는 압력이라는 사실에 기반하여 이론적인 IMEP 계산식의 연산 구간을 최적화한 것으로 IMEP 와 비교 시  $R^2$  0.9955 의 높은 선형관계를 보였다. 또한 이론적인 IMEP 계산 방법과 비교하여 21 %의 실린더 압력 데이터 및 31 %의 계산량만으로 IMEP 획득이 가능하여 실시간 제어에 용이하다.  $IMEP_{diff}$  추정 및 제어 성능은 엔진 실험을 통하여 검증하였으며,  $IMEP_{diff}$  제어를 통하여 실린더 간 토크 편차 감소를 확인하였다.

**Abstract:** In this study, we propose a new method for estimating the IMEP using difference pressure, which is the pressure difference between the cylinder pressure and the motoring pressure. The estimated IMEP, denoted as  $IMEP_{diff}$ , optimizes the theoretical IMEP calculation range based on the fact that the difference pressure exists between the start and the end of combustion.  $IMEP_{diff}$  is verified to have a high linear correlation with IMEP with  $R^2$  of 0.9955. The proposed method can estimate the IMEP with 21% of the cylinder pressure data and 31% of the calculation effort compared to the theoretical IMEP calculation method, and therefore, it has great potential for real-time implementations. The estimation and control performance of  $IMEP_{diff}$  is validated by engine experiments, and by controlling  $IMEP_{diff}$ , the torque variation between the cylinders was reduced.

- 기호설명 -

ATDC : 상사점 이후  
BMEP : 제동 평균 유효 압력, kPa  
BTDC : 상사점 이전  
CA,  $\theta$  : 크랭크 각도, degCA  
EGR : 배기 가스 재순환  
EOC : 연소 끝나는 점, degCA ATDC  
IMEP : 도시 평균 유효 압력, kPa

MFB50 : 50 % 연료 연소 지점, degCA ATDC  
 $R^2$  : 결정 계수  
RMSE : 평균 제곱근 편차  
SOC : 연소 시작 점, degCA ATDC

### 1. 서 론

강화되는 배기 규제 만족 및 운전성 향상을 위하여 실린더 압력을 이용한 제어에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>(1-6)</sup> 실린더 압력을 이용하면 환경 변화에 강건한 제어 성능 확보가 가능하여<sup>(6)</sup> 연소 상태 및 토크 편차를 감소시킴으로써

† Corresponding Author, [msunwoo@hanyang.ac.kr](mailto:msunwoo@hanyang.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

배기 가스 산포 감소,<sup>(4-7)</sup> 진동 및 소음 저감과<sup>(8)</sup> 운전성 향상의 효과를<sup>(9)</sup> 기대할 수 있다.

실린더 압력제어를 위해서는 제어하고자 하는 연소 특성이 반영된 연소인자 계산이 필요하다. 실린더 압력을 이용하여 연소 정보를 나타내는 인자로는 연소 위상을 대표하는 MFB50(location of 50% of mass fuel burnt),<sup>(10)</sup> SOC(Start Of Combustion)<sup>(11)</sup> 등이 있고, 엔진 토크를 대표하는 인자로는 IMEP (Indicated Mean Effective Pressure)<sup>(12,13)</sup> 등이 많이 활용된다. 하지만 MFB50, IMEP 등 기존에 많이 알려진 연소 인자를 계산하기 위해서는 많은 연산 능력과 저장 공간이 요구되기 때문에 상용 ECU에 적용하기에는 어려움이 따른다.<sup>(3,4,7)</sup>

이러한 연소 인자의 계산 시 저장 공간의 부족과 연산 능력이 많은 문제 해결을 위하여 여러 방법이 제시되었다. Kim 등<sup>(3)</sup>은 차이 압력의 특정 위치의 크기와 IMEP의 상관 관계를 실험적으로 도출하여 IMEP를 추정하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법은 적은 계산량으로 IMEP 추정이 가능하나, 실험식에 근거하였기 때문에 정확성에 한계가 있고, 다양한 종류의 엔진에 적용하려면 실험을 통하여 실험식을 다시 도출해야 하는 단점이 있다. Oh 등<sup>(2)</sup>은 차이 압력의 적분을 이용하여 IMEP를 추정하였다. 이 방법은 IMEP 추정 시 필요한 연산량과 압력 데이터량을 이론적인 IMEP 계산식보다 감소시켜 실시간성을 확보하였고, 엔진 회전 속도 및 연료 분사 시기에 대한 관계식을 이용하여 정확성을 향상 시켰다. 하지만 IMEP와 엔진 회전 속도, 연료 분사 시기에 대한 영향을 독립 시키지 못하여 이 방법 또한 여러 종류의 엔진에 적용하려면 다시 실험을 통하여 보정해 주어야 하는 단점이 있다.

이 논문에서는 실린더 압력과 모터링 압력의 차이 압력을 이용하여 이론적인 IMEP 계산식의 연산 구간을 최적화하여 IMEP를 추정하고  $IMEP_{diff}$ 로 정의하였다. 그 결과 이론적인 IMEP 계산식으로 계산한 IMEP와 비교하여 높은 선형 관계를 보였으며, 계산 시 필요한 실린더 압력 데이터와 계산량을 감소시킴으로써 실시간 제어 적용 가능성을 확인하였다. 또한  $IMEP_{diff}$ 는 엔진의 형상, 연료량, 분사 시기 등과 독립적으로 사용 가능하므로, 여러 종류의 엔진에 적용이 가능한 장점이 있다. 제안한 방법의 검증은 위하여 연료 분사 시기, 부스트 압력, 공기 질량 유량 변경 등 다양한 조건에서 엔진 실험을 수행하였으며, 실시간 제어에 적용하여 실시간 추정 성능 및 제어 성

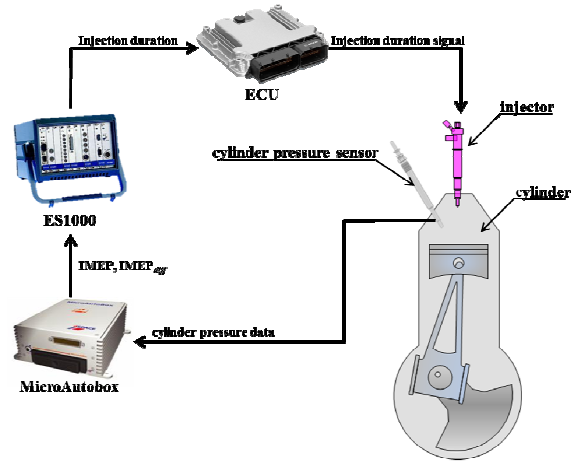


Fig. 1 Engine experiment environment

능, 제어를 통한 실린더 간 토크 편차 감소 등을 확인하였다.

## 2. 실험 장치 구성

차이 압력을 이용한 IMEP 추정 및 제어 알고리즘 개발과 검증을 위하여 Fig. 1과 같이 엔진 실험 장치를 구성하였다. 이번 연구에서 사용한 엔진은 4 실린더 2.2 리터 커먼 레일 직접 분사식 디젤 엔진이다. 엔진의 실린더 연소 압력 측정을 위하여 Beru사의 피에조 저항 타입의 글로 플러그 압력 센서를 사용하였다. 실린더 연소 압력 데이터는 dSPACE사의 MicroAutobox를 이용하여 0.5 degCA 간격으로 측정하였다. 측정된 실린더 연소 압력 데이터를 사용하여 IMEP와 추정된 IMEP를 계산하고, 계산된 값을 ETAS사의 ES1000으로 전송하였다. ES1000에서는 전송 받은 추정된 IMEP 값을 이용하여 연료 분사 기간을 변경하는 방법으로 엔진을 제어하였다.

## 3. IMEP 추정 알고리즘

### 3.1 차이 압력을 이용한 IMEP 추정

엔진 토크는 식 (1)과 같이 IMEP를 이용하여 나타낼 수 있으며, IMEP는 식 (2)와 같이 실린더 압력을 이용하여 계산된다.<sup>(14)</sup>

$$T = \frac{V_d}{(1000)4\pi} IMEP \quad (1)$$

여기서  $T$ : 엔진 토크, Nm

$V_d$ : 단일 실린더 행정 체적,  $m^3$

$$IMEP = \frac{1}{V_d} \int_{-360}^{360} P_{cyl} \frac{dV}{d\theta} d\theta \quad (2)$$

여기서  $P_{cyl}$  : 실린더 압력, kPa  
 $\theta$  : 크랭크 각도, degCA ATDC  
 $V_d$  : 실린더 부피, m<sup>3</sup>

식 (2)에서 실린더 압력  $P_{cyl}$  는 피스톤의 압축에 의해 발생하는 모터링 압력과 연소에 의해 발생하는 차이 압력의 합으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 이 때 모터링 압력은 실린더 내부를 이상 기체와 단열계로 가정하고, 두 지점의 실린더 압력 정보를 이용하여 계산하였다. 이러한 방법으로 모터링 압력을 계산하면 모터링 압력 변화에 영향을 주는 인자들의 영향이 반영된 모터링 압력을 도출할 수 있다.

$$P_{cyl} = P_{motoring} + P_{diff} \quad (3)$$

여기서  $P_{motoring}$  : 모터링 압력, kPa  
 $P_{diff}$  : 차이 압력, kPa

이러한 방법으로 측정된 실린더 압력과 계산한 모터링 압력을 이용하면 식 (4)와 같이 IMEP 를 나타낼 수 있으며,

$$IMEP = \frac{1}{V_d} \int_{-360}^{360} (P_{motoring} + P_{diff}) \frac{dV}{d\theta} d\theta \quad (4)$$

식 (4)에서 모터링 압력은 상사점을 기준으로 대칭으로 나타나기 때문에 식 (5)와 같은 관계가 성립된다.

$$\int_{-360}^{360} P_{motoring} \frac{dV}{d\theta} d\theta = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하면 식 (6)과 같이 차이 압력만을 사용하여 IMEP 를 계산할 수 있다.

$$IMEP = \frac{1}{V_d} \int_{-360}^{360} P_{diff} \frac{dV}{d\theta} d\theta \quad (6)$$

차이 압력은 연소에 의해서만 발생하는 압력이므로 연소가 시작하는 시점 (Start Of Combustion, SOC)에서 연소가 종료되는 시점 (End Of Combustion, EOC)까지만 발생한다. 따라서 추정된 IMEP 를 식 (7)과 같이 계산할 수 있고, 이를

Table 1 Engine operating conditions

Engine speed [rpm]	1000, 1500, 2000, 2500
BMEP [kPa]	400, 600, 800
Main injection timing [degCA ATDC]	0, ±2, ±4, ±6, ±8, ±10
Common-rail pressure [MPa]	40-140 (20 단위로 변경)
Boost pressure [kPa]	100-220 (10 단위로 변경)
Mass air flow [mg/str]	300-700 (40 단위로 변경)

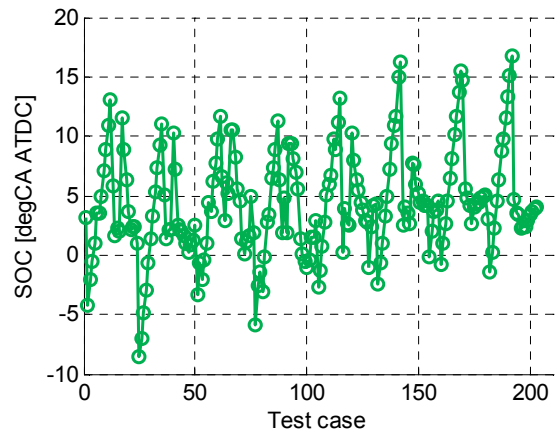


Fig. 2 SOC calculation result when engine operating conditions are varied

IMEP<sub>diff</sub>라고 정의하였다.

$$IMEP_{diff} = \frac{1}{V_d} \int_{EOC}^{SOC} P_{diff} \frac{dV}{d\theta} d\theta \quad (7)$$

식 (7)과 같은 IMEP<sub>diff</sub> 의 계산 구간을 최적화하기 위하여 Table 1 과 같은 운전 조건 실험을 통하여 Fig. 2 와 Fig. 3 과 같이 승용 디젤 엔진의 SOC 와 EOC 를 분석하였다. 이 때 SOC 와 EOC 는 누적열발생량에 기반하여 정의하였다. 누적열발생량은 식 (8)과 같이 계산되며, 이를 이용하여 누적열발생량률이 전체 누적열발생량의 1 %가 되는 지점의 크랭크 각도를 SOC, 99 %가 되는 각도를 EOC 로 계산하였다.

$$Q = \int \left( \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP_{cyl}}{d\theta} + \frac{\gamma}{\gamma-1} P_{cyl} \frac{dV}{d\theta} \right) d\theta \quad (8)$$

여기서  $\gamma$  : 비열비

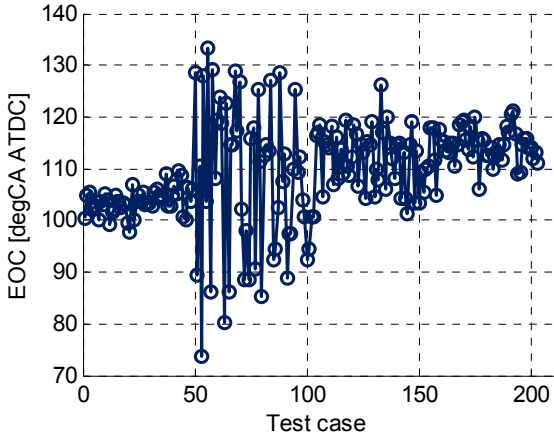


Fig. 3 EOC calculation result when engine operating conditions are varied

분석 결과 실험 운전 조건에서 연소의 시작은 BTDC 10 도 이후에 발생 하였으며, ATDC 135 도 이전에 연소가 종료 되었다. 이 결과를 이용하여 식 (9)과 같이 IMEP 계산 시 적분 범위를 최적화 하여 IMEP 를 추정 하였다.

$$IMEP_{diff} = \frac{1}{V_d} \int_{-15}^{135} P_{diff} \frac{dV}{d\theta} d\theta \quad (9)$$

3.1 IMEP 추정 실험 결과

IMEP<sub>diff</sub> 의 IMEP 추정 성능 검증을 위하여 엔진 실험을 진행하였다. 엔진의 운전 조건은 Table 1 과 같이 엔진 속도, BMEP, 주 연료 분사 시기, 커먼 레일 압력, 공기 질량 유량, 그리고 부스트 압력 조건을 변경하며 실험을 진행하였다. 각각의 운전 조건에서 정상 상태의 실린더 압력을 측정하고, IMEP 와 IMEP<sub>diff</sub> 를 계산하였다. 그리고 계산된 두 인자를 선형 보간하여 R<sup>2</sup> 와 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산해 두 인자간의 선형 관계를 알아보았다. R<sup>2</sup> 는 식 (9)와 같이 계산하며 1 에 가까울수록, RMSE 는 식 (10)과 같이 계산하며 0 에 가까울수록 두 인자 간의 상관 관계가 높다는 것을 의미한다.

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (IMEP_{diff,i} - IMEP_{mean})^2}{\sum_i^n (IMEP_i - IMEP_{mean})^2} \quad (9)$$

여기서 IMEP<sub>mean</sub> : IMEP 의 평균, kPa  
 IMEP<sub>i</sub> : i 번째 IMEP, kPa  
 IMEP<sub>diff,i</sub> : i 번째 IMEP<sub>diff</sub>, kPa

Table 2 Calculation load comparison between IMEP and IMEP<sub>diff</sub>

Indicator	IMEP	IMEP <sub>diff</sub>
Number of additions	1440	601
Number of multiplications	1441	302
Total	2881	903

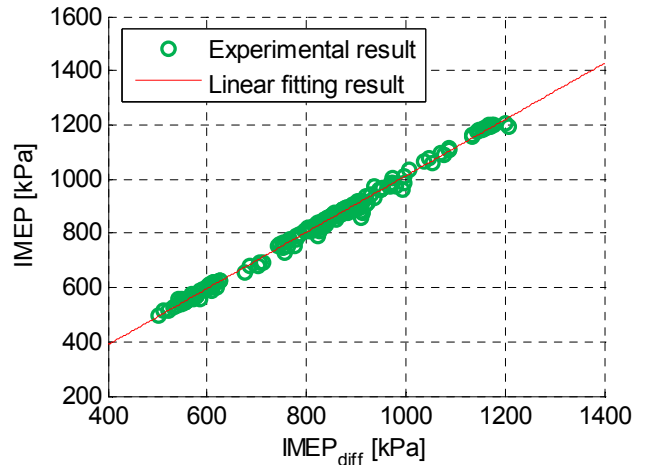


Fig. 4 The curve fitting result of IMEP and IMEP<sub>diff</sub>

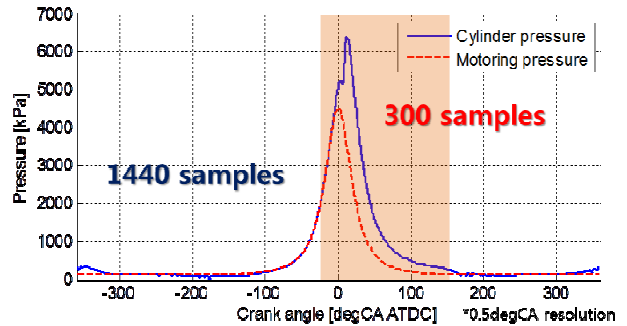


Fig. 5 The number of pressure data required for calculation of IMEP and IMEP<sub>diff</sub>

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (IMEP_{diff,i} - IMEP_i)^2} \quad (10)$$

IMEP 와 IMEP<sub>diff</sub> 의 선형 보간 결과는 Fig. 4 와 같고, R<sup>2</sup> 는 0.9955, RMSE 는 12.257 kPa 로 IMEP 와 IMEP<sub>diff</sub> 는 상관 관계가 높다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 IMEP<sub>diff</sub> 의 장점

IMEP<sub>diff</sub> 는 차이 압력을 이용하기 때문에 차이 압력이 발생하는 구간인 SOC 에서 EOC 까지의

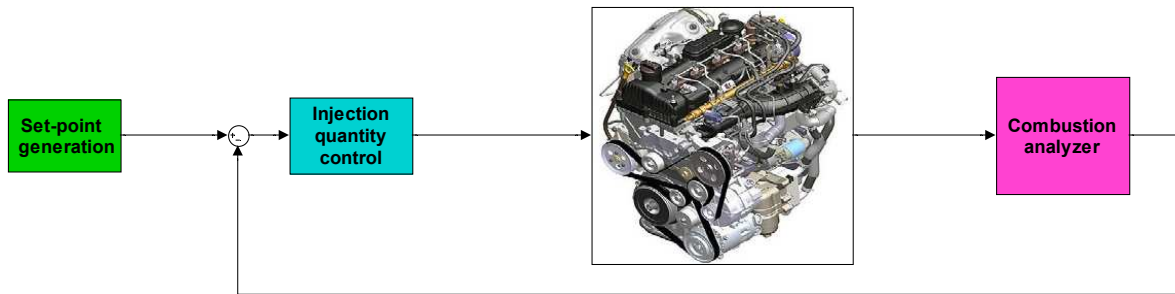


Fig. 6 The control structure of IMEP<sub>diff</sub>

압력 데이터만을 사용하여 IMEP 를 계산할 수 있다. 이러한 이유로 기존의 IMEP 계산 방법보다 더 적은 실린더 압력 데이터만을 이용하여 IMEP 를 계산할 수 있다.

실린더 압력 데이터를 0.5 degCA 주기로 측정하면 기존의 IMEP 계산 방법은 1440 개의 압력 데이터를 필요로 한다. 하지만 Fig. 5 와 같이 IMEP<sub>diff</sub> 를 이용하면 300 개의 실린더 압력 데이터를 이용하여 IMEP 를 추정할 수 있다.

또한 Table 2 와 같이 기존의 IMEP 계산 방법은 총 1440 개의 덧셈과 1441 개의 곱셈을 필요로 하지만 새로운 IMEP 추정 알고리즘을 이용하면 덧셈 601 개, 곱셈 302 개만으로 IMEP 추정이 가능하다.

이와 같이 IMEP<sub>diff</sub> 는 실린더 압력 데이터 측정량을 약 79 % 감소시키고, 계산량을 약 69 % 감소시켜 이론적인 IMEP 계산 방법보다 실시간 엔진 제어 시스템에 적용하기 용이한 장점이 있다.

#### 4. IMEP 추정 및 제어 실험 결과

IMEP<sub>diff</sub> 의 실시간 IMEP 추정 및 제어 성능 검증은 위하여 엔진 실험을 수행하였다. IMEP<sub>diff</sub> 제어 알고리즘으로는 Fig. 6 과 같이 일반적으로 널리 사용하고 있는 PID 제어 방법을 이용하여 구성하였다.

제어 성능 검증은 정상 상태와 인젝터 편차가 있는 상태에서의 토크 편차 감소 성능을 확인해보았다. 또한, IMEP 목표 값을 스텝으로 변화 시 실시간 IMEP 추정 성능 및 제어기의 목표 값 추종 성능을 검증하였다.

정상 상태의 제어 성능 검증은 2000 rpm, IMEP 600 kPa 의 엔진 운전 조건에서 실험을 진행하였다. 엔진의 실린더 간의 토크 편차를 확인하기 위하여 IMEP 의 표준 편차를 계산하였으며, 그 결과 Fig. 7 과 같이 제어 전에는 표준 편차가 31.134 kPa 에

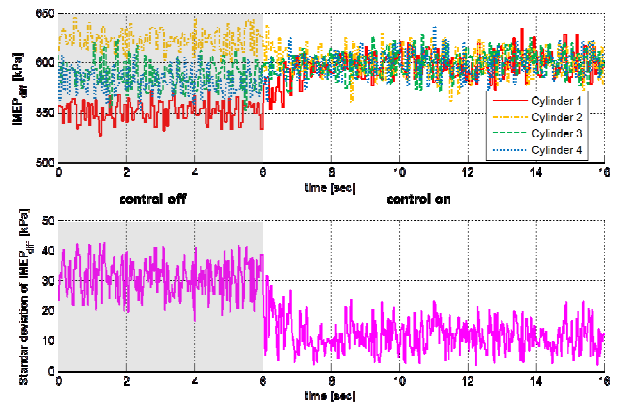


Fig. 7 Controller on/off experiment results at engine speed 2000 rpm, target IMEP 600 kPa

서 제어 후에는 11.678 kPa 로 감소하여 토크 편차가 적은 상태에서도 토크 편차를 감소 시킬 수 있는 것을 확인하였다.

또한 엔진 생산 공차 그리고 엔진 노후화 등으로 인하여 인젝터 편차가 존재할 때의 상황을 인위적으로 연료 분사량을 조절하여 모사한 실험을 진행하였다. Fig. 8 과 같이 2000 rpm 운전 조건에서 인젝터 편차가 존재하여 IMEP<sub>diff</sub> 의 표준 편차가 135.089 kPa 로 크더라도, 제어 후에는 11.649 kPa 로 줄어 들었다. 이와 같이 실린더 간 토크 편차 큰 상태에서도 IMEP<sub>diff</sub> 제어를 통해 토크 편차를 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

실시간 IMEP 추정 성능과 과도 응답성을 검증하기 위하여 엔진을 1500 rpm, 목표 IMEP 500 kPa 의 정상 상태에서 목표 IMEP 를 700 kPa 로 변경하는 실험을 진행하였다. 그 결과 Fig. 9 와 같이 IMEP<sub>diff</sub> 가 실제 IMEP 를 RMSE 13.839 kPa 의 적은 오차로 추정하는 것을 확인했고, 모든 실린더에서 IMEP<sub>diff</sub> 의 표준 편차 14.424 kPa 이하로 IMEP 목표 값이 변하더라도 제어기의 실시간 IMEP 추종 성능을 검증할 수 있었다.

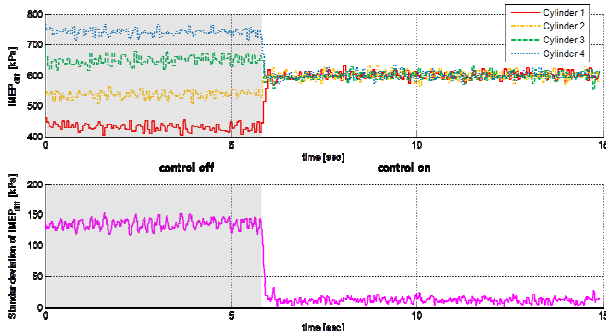


Fig. 8 Controller on/off experiment at engine speed 2000 rpm, target IMEP 600 kPa

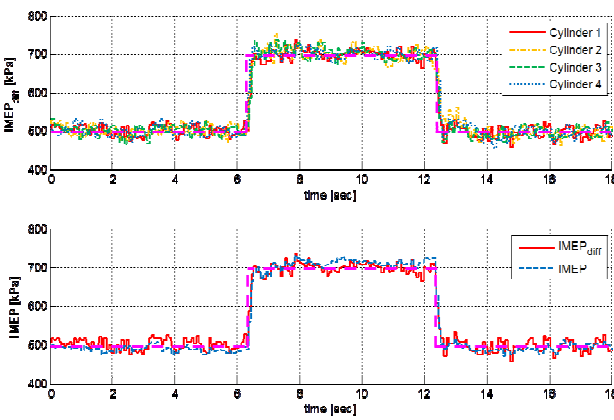


Fig. 9 Step response of IMEP estimator and controller at engine speed 1500 rpm

이러한 실험을 통하여  $IMEP_{diff}$  를 이용하여 엔진을 제어하면 각각의 실린더 간의 토크 편차를 줄여 엔진의 소음 및 진동을 줄일 수 있으며, 토크 성능 개선을 통해 차량의 운전 성능을 향상시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

이 연구에서는 실린더 압력과 모터링 압력의 차인 차이 압력을 이용하여 IMEP 를 계산하는 새로운 IMEP 추정 알고리즘  $IMEP_{diff}$  와  $IMEP_{diff}$  를 이용한 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 IMEP 추정 알고리즘은 이론적인 IMEP 계산 방법보다 필요한 실린더 데이터량과 연산 시간을 줄일 수 있어, 실시간 엔진 제어 시스템에 적용에 용이하며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 엔진 실험을 통하여  $IMEP_{diff}$  와 IMEP 는  $R^2$  0.9955, RMSE 12.257 kPa 로 상관 관계가 높은 것을 확인하였다.

(2)  $IMEP_{diff}$  는 이론적인 IMEP 계산 방법에 비해 필요한 실린더 압력 데이터 및 계산량이 각각 79 %, 69 % 감소되어 실시간 엔진 제어 시스템 적

용에 용이하다.

(3) IMEP 제어 알고리즘의 적용으로 정상 상태 시 RMSE 13.839 kPa 로 정확하게 수렴하였으며, IMEP 의 표준 편차가 31.134 kPa 에서 제어 후 11.678 kPa 로 실린더 간 토크 편차가 감소하였다.

### 후기

이 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업, 지식경제부의 산업원천기술개발 사업(No. 10039673), 교육과학기술부에서 후원하는 BK21(201000000000173), 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(2006ETR11P091C) 그리고 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0017495)을 받아 수행된 연구결과임.

### 참고문헌

- (1) Sellnau, M., Matekunas, F., Battiston, P., Chang, C. and Lancaster, D., 2000, "Cylinder-Pressure-Based Engine Control Using Pressure-Ratio-Management and Low-Cost Non-Intrusive Cylinder Pressure Sensors," *SAE Transactions*, Vol. 109, pp. 899~918.
- (2) Oh, S., Kim, J., Oh, B., Lee, K. and Sunwoo, M., 2011, "Real-Time IMEP Estimation and Control Using an In-Cylinder Pressure Sensor for a Common-Rail Direct Injection Diesel Engine," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 133, pp. 062801-9.
- (3) Kim, D., Oh, B., Ok, S., Lee, K. and Sunwoo, M., 2009, "Cylinder Pressure Based Real-Time IMEP Estimation of Diesel Engines," *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 17, pp. 118~125.
- (4) Lim, J., Oh, S., Chung, J., Lee, K. and Sunwoo, M. 2010, "Development of a Combustion Phase Indicator for Real-Time Combustion Control in CRDI Diesel Engines," *KSAE 2010 Conference paper*, pp. 14~19.
- (5) Willems, F., Doosje, E., Engels, F. and Seykens, X., 2010, "Cylinder Pressure-Based Control in Heavy-Duty EGR Diesel Engines Using a Virtual Heat Release and Emission Sensor," *SAE Technical Paper* 2010-01-0564.
- (6) Yu, S., Song, H., Min, K. and Choi, H., 2011, "Development of Engine Control Using the In-Cylinder Pressure Signal in a High Speed Direct Injection Diesel Engine," *SAE Technical Paper* 2011-01-1418.
- (7) Oh, S., Lim, J., Chung, J., Lee, K., Sunwoo, M., Han,

- K., Yu, J. and Park, S., 2010, "Development of a Combustion Phase Detection Algorithm for Real-time Combustion Control in Common-rail Direct Injection Diesel Engines," *KSAE 2010 Conference paper*, pp. 291~294.
- (8) Hillion, M., Buhlback, H., Chauvin, J. and Petit, N., 2009, "Combustion Control of Diesel Engines Using Injection Timing," *SAE Transactions*, Vol. 9, p. 0507.
- (9) Schiefer, D., Maennel, R. and Nardoni, W., 2003, "Advantages of Diesel Engine Control Using In-Cylinder Pressure Information for Closed Loop Control," *SAE Technical Paper 2003-01-0364*, pp. 85~90.
- (10) Koo, T., Yu, S., Choi, H., Min, K., Han, K., Kim, J., Kwon, S. and Cho, S., 2009, "Closed-Loop Control of Main Injection Timing Using MFB50 in Diesel Engine," *KSAE 2009 Conference*, pp. 299~306.
- (11) Lee, K., Yoon, M., Son, M. and Sunwoo, M., 2006, "Closed-Loop Control of Start of Combustion Using Difference Pressure Management," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 220, pp. 1615~1628.
- (12) Hamedović, H., Raichle, F., Breuninger, J., Fischer, W., Dieterle, W., Klenk, M. and Böhme, J. F., 2005, "IMEP-Estimation and In-Cylinder Pressure Reconstruction for Multicylinder SI-Engine by Combined Processing of Engine Speed and One Cylinder Pressure," *SAE Technical Paper 2005-01-0053*.
- (13) Jang, J., Lim, B. and Han, B., 1999, "A Study on the Measurement and Estimation of Frictional Loss of CI Engine with IMEP Method," *Trans. of the KSME (B)*, pp. 717~723.
- (14) Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGRAW-HILL, Columbus.