

실린더 내부 압력 추정을 위한 진동 기반 디젤 엔진 모델링 Vibration-based diesel engine modeling to monitor internal pressure in cylinder

이대순†* · 이진우* · 민경덕** · 이승현** · 최희명*** · 정인수****

Dae Soon Lee · Jin Woo Lee · Kyoungdoug Min · Seunghyun Lee · Hoimyoung Choi · Insoo Jung

1. 서 론

고온, 고압의 연소실 내에 연료를 분사하여 연소를 일으키는 디젤엔진은 높은 열효율과 낮은 온실가스 배출로 자동차, 선박 등 많은 분야에서 사용된다. 그러나, 디젤엔진은 연소실 압력과 압력상승률이 가솔린 엔진에 비해 높아 연소음과 진동이 크게 발생한다. 따라서, 디젤엔진이 사용되는 승용차에서는 연소에 의해 발생하는 소음과 진동을 줄이는 노력이 가솔린 엔진에 비해 더욱 요구된다.

최근 디젤엔진의 연소특성과 발생 소음의 관계를 살펴보는 연구가 활발히 진행되고 있다. Badami⁽¹⁾ 등은 디젤 엔진의 다중 연료 분사가 연소음에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. Kim⁽²⁾ 등은 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 양을 변화시켜 CAI(Controlled Auto Ignition) 엔진의 소음을 줄일 수 있음을 확인하였다. 그러나, 연소실 내에 압력 센서를 직접 장착하였기에 압력센서의 내구성에 문제가 발생할 수 있기에 가속도센서를 엔진마운트에 부착하여 실린더 내의 연소특성을 파악하는 연구가 진행되고 있다. Carlucci⁽³⁾ 등은 엔진블록에 가속도센서를 부착하여 진동신호와 Heat Release의 상관관계를 살펴보았다. Polonowski⁽⁴⁾ 등은 firing과 non-firing에 대해 측정된 진동 신호와 연소 압력 신호의 상관관계로부터 진동신호의 고주파성분과 Heat Release의 관계를 살펴보았다. 이런 연구가 좀 더 발전하기 위해서는 진동신호 처리기법과 진동 모델에 대한 연구가 심화 되어야 한다.

본 연구에서는 진동 신호로부터 실린더 내부 압력 특성 추정을 위한 엔진 시스템 모델링과 신호처리 방법에 대해 살펴본다. 진동계는 질량, 스프링, 감쇠로 구성되고, 실린더 내부의 엔진 폭발력을 외력으로 간주한다. 발생하는 응답 신호와 폭발력의 상호 관계를 파악하여, 응답 신호만으로 외력의 특성을 추정하고자 한다.

2. 1 자유도 엔진 진동계

엔진의 연소과정과 같이 순간적으로 큰 힘이 작용할 때의 응답특성을 살펴보기 위하여, 질량, 감쇠, 스프링으로 구성된 1 자유도 진동계 모델(Fig 1 참조)을 고려한다. $m, c, k, x(t), F(t)$ 는 각각 질량, 감쇠계수, 스프링상수, 변위, 외력을 나타낸다.

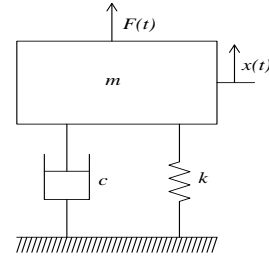


Fig. 1 1 degree-of-freedom engine vibrating model

식(1)은 Fig. 1의 운동방정식을 나타낸 것이고, 식(2)는 식(1)을 상태공간 표현법으로 나타낸 것이다.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\ddot{x}}(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c/m & -k/m \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/m \\ 0 \end{bmatrix} F(t) \quad (2)$$

실제 엔진 운전 중 연소실 내에서 발생하는 폭발에 의한 압력 변동이 Fig. 1의 시스템에 외력으로 작용할 경우의 응답을 살펴보고자 한다. 실제 엔진 운전 중에 측정되는 진동 신호에는 연소실 내의 압

† 교신저자; 학생회원, 아주대학교 기계공학과

E-mail : damsuny@ajou.ac.kr

Tel : 031-219-2939

* 아주대학교 기계공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 차세대융합기술연구원

**** 현대자동차 파워트레인 소음진동팀

력 변동에 의한 응답만 아니라 다양한 진동원에 의해 발생한 진동 신호가 포함되어 있다. 측정된 진동 신호에 웨이블릿 변환을 적용하여 압력 변동에 의한 진동 신호를 추출해 낼 수 있다. Fig. 2는 실제 엔진 운전 중 연소실 내의 폭발에 의한 압력 변동이 Fig. 1의 진동계에 외력으로 작용한 경우, 출력을 웨이블릿 변환하여 주파수 누적한 결과와 입력이다. Fig. 3은 입력과 출력의 웨이블릿 변환한 결과의 peak-to-peak 시간차이와 진동 시스템의 고유 주파수의 관계를 살펴본 것이다. 그림에서의 근사곡선은 식 (3)을 이용하여 얻었고, 근사 곡선은 R^2 이 0.999 로 정확하게 정확하였다.

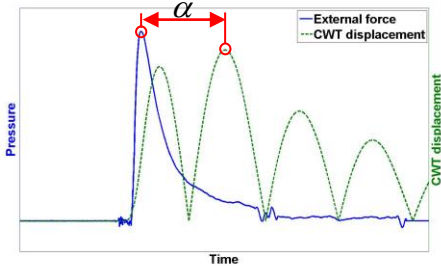


Fig. 2 Input signal and the Wavelet transformed output signal of the vibrating system in Fig. 1

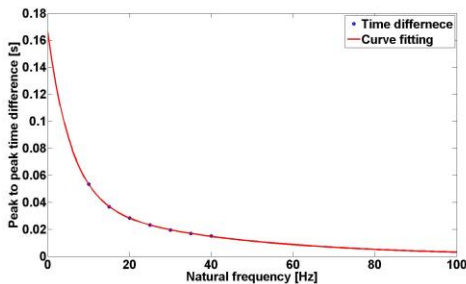


Fig. 3 Relation between α and f_n

$$CF(f) = ae^{b \cdot f} + ce^{d \cdot f} \quad (3)$$

Table 1 Coefficients in Eq. (3)

Symbol	Value
a	0.1245
b	-0.1767
c	0.04162
d	-0.02619

근사식 (3)과 Table 1의 계수의 유효성을 점검하기 위해, 시스템의 고유 주파수가 5, 23, 50 Hz 에서 α 추정 값과 실제 값을 Table 2에서 비교하였다. 5 Hz에서는 오차가 컸으나, 23, 50 Hz에서는 비교적 정확하였다.

Table 2 curve fitting

f_n	α		Error
	Expected value	Real value	
5 Hz	0.0879	0.0159	0.0720
50 Hz	0.0113	0.0121	-0.0008
23 Hz	0.0249	0.0252	-0.0003

3. 결 론

엔진을 1 자유도 진동계로 모델링하고, 실제 엔진의 폭발력을 입력으로 사용하여 시스템의 응답을 얻었다. 응답 신호의 웨이블릿 변환 값과 입력 신호의 peak-to-peak 시간차이와 시스템의 고유 주파수 사이의 관계를 살펴보았다. 이를 이용하면 응답 신호로부터 가진력의 특성을 살펴볼 수 있다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 엔지비(주)를 통해 체결된 산학협동 과제 “진동 신호 기반 디젤 연소 및 연소음제어”를 통해 도출된 결과로서 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Badami, M., Mallamo, F., Millo, F. and Rossi, E. E., 2002, Influence of multiple injection strategies on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common rail diesel engine, SAE World congress & exhibition, 2002-01-0503.
- (2) Kim, S. U., Ki, M. Y., Lee, Y. and Min, K. D., 2008, An experimental study of EGR effect on reducing the noise of CAI engine, 한국자동차공학회 창립 30주년 기념 학술대회 논문집, pp.37-42.
- (3) Carlucci, A. P., Chiara, F. F., Laforgia, D., 2006, Analysis of the relation between injection parameter variation and block vibration of an internal combustion diesel engine, Journal of sound and vibration, Vol. 295, pp.141-164.
- (4) Polonowski, C. J., Mathur, V. K., Naber, J. D., Blough, J. R., 2007, Accelerometer based sensing of combustion in a high speed HPCR diesel engine, SAE World congress & exhibition, 2007-01-0972.