

# 가속도를 이용한 굴삭기 엔진 충격 변위 추정 연구

## Acceleration based Estimation of Shock Displacement on the Excavator Engine

김영현† · 이원태\*  
**Younghyun Kim and Wontae Lee**

### 1. 서 론

굴삭기는 가혹한 작업 조건으로 인하여 주행 및 작업 시 발생하는 충격에 의해 엔진의 변위가 크게 발생한다. 엔진의 최대 변위가 설계 기준을 초과하게 되면 엔진과 연결된 냉각팬, 벨로우즈 등의 파손이 발생하게 되므로 제품 개발 단계에서 엔진 최대 변위에 대한 설계 검토가 필요하다. 엔진의 최대 변위를 평가하기 위해서는 3 축 방향의 변위 정보가 필요하나 실제 장비에서는 엔진 마운트 위치에 폴리머 클레이(Polymer Clay)를 삽입하여 충격시의 최대 압축 변위를 평가하는 방법이 주로 사용된다. 이러한 방법은 마운트 위치의 압축 변위로부터 엔진의 최대변위를 경험에 의존하여 추정해야 하므로 장비의 특성을 충분히 고려할 수 없으며 평가 결과에 대한 신뢰성이 낮아지게 된다. 변위계를 사용하여 충격변위를 평가하는 방법도 있으나 굴삭기 엔진의 경우 주변 구조 사이의 협소한 공간 및 작업시 발생하는 10g 이상의 높은 충격으로 인하여 계측 자체가 쉽지 않다. 현장에서 손쉽게 이용할 수 있는 계측 방법으로써 가속도를 이중 적분하여 변위를 추정할 수도 있으나 지면에서 차체 프레임으로 전달되는 진동 등으로 인하여 적분 오차가 크게 발생하는 문제가 있다. 본 논문에서는 가속도를 이용하여 굴삭기 엔진의 충격 변위를 효과적으로 추정하는 방법에 대하여 소개하였다. 가속도를 이중 적분할 때 발생하는 오차를 제거하기 위하여 고역통과필터(High-pass Filter)를 사용하였으며, 오차를 효과적으로 제거하기 위한 고역통과필터의 설정 기법을 제안하였다. 제안된 방법의 정확성을 검토하기 위하여 변위계 및 폴리머 클레이를 이용한 기존의 굴삭기 엔진 충격변위 평가 결과와 비교하였다.

† 교신저자; 정회원, 현대중공업 건설장비연구소  
 E-mail : hyun@hhi.co.kr  
 Tel : 052-202-3066, Fax : 052-202-9645  
 \* 현대중공업 건설장비연구소

### 2. 가속도를 이용한 충격변위 추정

#### 2.1 이중 적분

계측된 가속도를 이용하여 변위를 추정하기 위해서는 적분을 수행해야 한다. 수치적분 방법은 사다리꼴 방법, Simpson 방법, Newmark-β 방법 등 여러 가지가 알려져 있으나, 본 논문에서는 이 중 가장 간단한 사다리꼴 방법을 사용하였다. 사다리꼴 방법을 이용한 적분은 식 (1)~(2)와 같이 진행된다.

$$v_{t+\Delta t} = v_{t+\Delta t} + \frac{1}{2} \cdot (a_t + a_{t+\Delta t}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_{t+\Delta t} + \frac{1}{2} \cdot (v_t + v_{t+\Delta t}) \cdot \Delta t \quad (2)$$

여기서  $a_t$ ,  $v_t$ ,  $u_t$  는 가속도, 속도, 변위이다.

#### 2.2 이중 적분 오차

이중 적분 시 가속도에 포함된 DC 성분 등의 오차, 속도 및 변위의 초기값에 의해 식 (3)에 나타낸 바와 같은 오차가 발생하게 된다.

$$x(t) = \iint a + \frac{1}{2} d_0 t^2 + v_0 t + x_0 \quad (3)$$

여기서  $x$ ,  $a$ ,  $d_0$ ,  $v_0$ ,  $x_0$  는 변위, 가속도, 가속도오차, 초기속도, 초기변위이다.

#### 2.3 주파수필터

일반적으로 FIR(Finite Impulse Response) 필터를 많이 사용하나 시간 지연이 발생하므로 초기 적분 결과를 신뢰할 수 없다. 따라서 엔진 충격 변위를 분석하는 방법으로 적합하지 않은 것으로 판단하였으며, 본 논문에서는 FFT 필터를 사용하였다. FFT 필터는 원 신호를 FFT 한 후 원하지 않는 신호를 제거하고 다시 역 FFT 를 하는 방법으로써 원

하는 신호와 제거하고자 하는 신호의 주파수가 명확히 구별될 경우 효과적이다. Figure 1은 실제 굴삭기에서 변위계와 가속도계로 측정한 변위 및 가속도 신호의 PSD(Power Spectral Density)를 나타낸다. 변위 PSD를 살펴보면 9Hz~19Hz 구간에 대부분의 에너지가 집중되는 것을 알 수 있다. 이는 엔진의 강제모드와 관련된 응답이 주된 응답을 구성함을 의미한다. 가속도 PSD의 경우 변위 PSD와 유사한 주파수 특성을 확인할 수 있으므로 가속도 신호로부터 엔진 강제모드와 관련된 주파수 구간을 확인하고 이와 관련 없는 신호를 제거하면 엔진의 변위를 추정할 수 있을 것으로 판단하였다.

### 2.4 굴삭기 엔진의 충격 변위 추정 방법

앞서 설명한 이중 적분과 주파수필터를 이용하여 Figure 2에 나타낸 방법으로 굴삭기 엔진의 충격 변위를 추정하고자 한다.

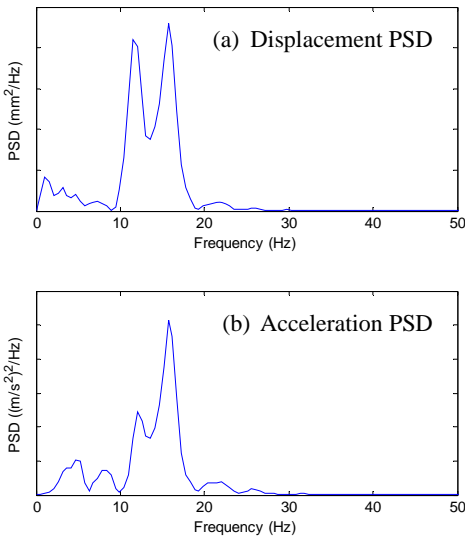


Figure 1 PSD of displacement and acceleration

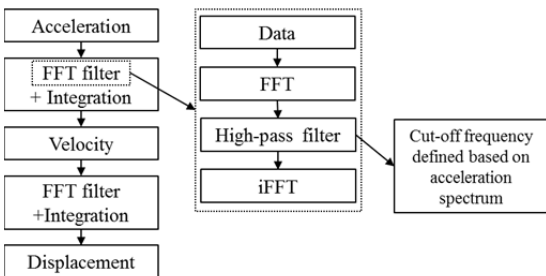


Figure 2 Displacement estimation procedure

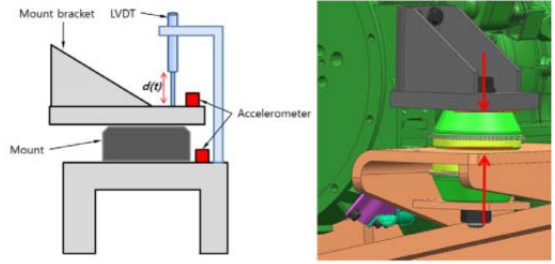


Figure 3 Measurement location

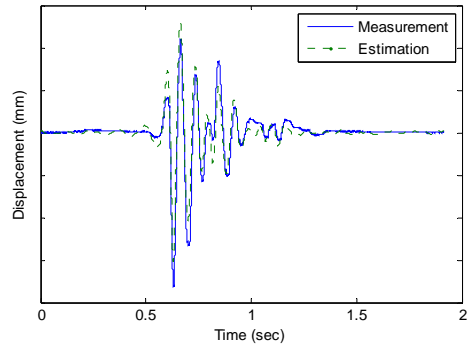


Figure 4 Estimation of engine shock displacement

## 3. 실차 검증

Figure 3에 나타낸 바와 같이 굴삭기의 엔진 마운트 위치에 변위계(LVDT)와 가속도계를 설치하여 충격시의 변위와 가속도를 측정하였다. 측정된 가속도로부터 제안된 가속도 적분 방법을 이용하여 엔진의 변위를 추정하였다. Figure 4에 나타낸 바와 같이 가속도를 이용한 변위 추정결과는 변위계측 결과와 상당히 유사함을 알 수 있었다.

## 4. 결론

굴삭기의 작업 시 발생하는 엔진 충격 변위를 현장에서 쉽게 평가하기 위하여 가속도를 이용한 변위 추정 방법을 제안하였다. 이중 적분 과정에서 발생하는 오차를 제거하기 위한 방법으로 충격시의 엔진 거동이 엔진의 강제모드에 의해 지배됨을 고려하여 주파수 필터를 설정하였다. 실제 굴삭기에 대하여 제안된 방법을 이용한 변위 추정 결과와 변위 계측 결과를 비교하였으며 상당히 유사함을 확인하였다. 따라서 제안된 변위 추정 방법을 이용하여 엔진의 변위를 현장에서 가속도 계측만으로 신속하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.