

# 건설기계 엔진 시스템의 가진력 예측 모델 개발

## A Study of the excitation force of an engine system for construction equipment

김우형† · 김성재\* · 김인동\*

Woohyung Kim, Seongjae Kim and Indong Kim

**Key Words** : Engine Excitation Forces(엔진 가진력), Combustion Pressure(연소 압력) , Inertia Forces(관성력), Noise and Vibration(소음 진동)

### ABSTRACT

In this paper, we study the analytical method to predict the excitation forces for the engine system. The engine system on the construction equipment is one of the important power sources, and the characteristics of the engine decide the performance of noise and vibration for the equipment. We predict the excitation forces using the geometrical data of the crank system and the combustion pressure in the cylinder. The excited forces are represented by the torque fluctuation above the center of the crank shaft.

### 1. 서 론

건설 기계에서 엔진 시스템은 동력을 발생하는 주요 장치이며, 엔진의 특성에 따라 건설 기계는 많은 성능의 차이가 있다. 설계 단계에서 엔진 시스템은 건설기계의 구동을 목적으로 만 설계 되며, 설계 단계에서 편의성을 고려하는 것은 쉽지 않다. 소음 및 진동 특성은 편의성의 관점에서 고려되는 주요한 항목이다. 대부분의 평가는 시험을 통해 이루어지며, 시험 단계에서는 개선 할 수 있는 방법이 극히 제한적이다. 또한, 건설기계는 장비의 특성 상 많은 시험 차량을 만들기 어렵기 때문에 다양한 방법으로 시험을 수행하는 것 또한 쉽지 않다. 이와 같은 이유와 개발 기간 단축 및 연구 동향에 따라 설계 단계에서 소음 및 진동 특성 분석을 수행의 요구가 많아지고 있다.

소음 진동 특성을 설계 단계에서 분석을 하기 위

해서는 크게 세 가지의 정보를 활용해야 하는데 가진원, 전달 경로, 응답특성이다. 특정 단계의 설계를 완료하게 되면 전달 경로 및 응답 특성을 모델링을 할 수 있지만, 가진원 분석이 쉽지 않기 때문에 사전 분석은 쉽지 않다. 건설 기계의 주요 가진원 중 엔진 시스템은 가장 큰 영향을 주는 인자이며 본 논문에서 가진원 예측을 위한 방법론을 제시할 예정이다.

엔진 구동 시스템은 연료의 연소 과정에서 발생되는 폭발력과 피스톤의 왕복운동으로 구분하여 정의 할 수 있다. 연소 과정에 의해 폭발이 발생하고, 피스톤, con-rod 및 crank 축의 수직 왕복운동에 의해 관성력이 발생하게 된다. 본 논문에서는 두 힘에 대하여 정의를 하고 구동 조건에 엔진에 의해 발생하는 힘을 정의 할 수 있다.

### 2. 본 론

엔진 구동 중 발생하는 주요 가진원은 연소과정에서 발생하는 폭발력과 피스톤 왕복운동에 의한 관성력이 있다. 엔진이 구동함에 있어 이 두 힘이 발생하게 되지만, 장비에 직접적으로 작용하는 가진력은

† 교신저자; 두산인프라코어 소음진동 성능개발팀

E-mail :Woohyung.kim@doosan.com

Tel :032-211-6722, Fax :032-211-8572

\* 발표자; 두산인프라코어

엔진 블록의 운동에 의해 장비에 전달되는 힘이다.

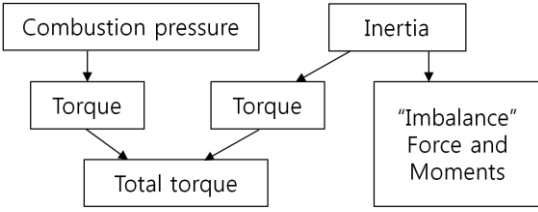


Figure 1 Engine excitation forces

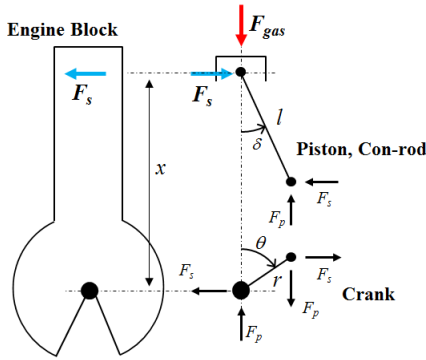


Figure 2 Forces by combustion pressure

### 2.1 Gas Pressure Forces

연소과정에 의해 폭발이 발생하고 이 과정에서 실린더 내부에 압력이 형성되게 된다. 내부의 압력은 피스톤을 움직이는 외력으로  $F_{gas}$  로 작용하며 식 (1)과 같이 피스톤의 면적  $A$  와 압력  $p$  로 나타낼 수 있다. 피스톤에 작용된 힘  $F_{gas}$  는 그림 2 와 같이 힘을 나타낼 수 있으며, 각 절점에서의 작용력은 상호간에 상쇄 된다. 하지만 피스톤이 수직 상하 운동을 하면서 엔진 블록에 작용하는 힘은  $F_s$  연소에 의해 발생하는 블록의 외력으로 작용하여 엔진을 가진 하는 힘이  $F_g$  된다. 이때 작용하는 힘은 con-rod의 각도에  $\delta$ 에 따라 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{gas} = Ap \quad (1)$$

$$F_g = F_{gas} \tan \delta \quad (2)$$

### 2.2 Inertia Forces

연소에 의해 피스톤의 왕복운동을 하게 되지만,

이 과정에서 관성력이 발생하게 된다. 이는 수직 왕복운동을 하는 질량과 위치에 따라 정의할 수 있다.

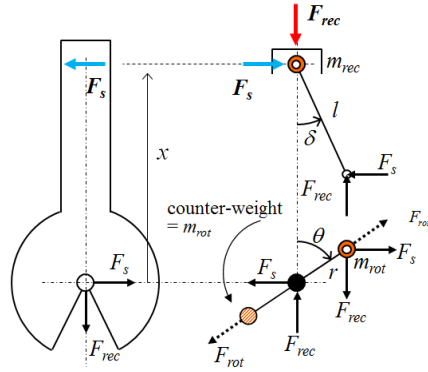


Figure 3 Forces by inertia

왕복운동을 하는 질량은 피스톤  $m_p$  과 con-rod 의 왕복운동을 하는 부분의 질량  $m_{crp}$  이며 이 부분의 위치  $x$  는 식 (3)과 같이 정의할 수 있으며, 가속도 또한 정의 할 수 있다. 정의된 질량과 가속도를 이용하여 식 (4)와 같이 관성력을 정의 할 수 있으며, 관성력에 의한 힘은 그림 3 과 같이 나타낼 수 있다. 각 작용점에서 발생하는 힘은 연소 때 발생하는 힘 과 같이 상호 작용에 의해 상쇄되며 엔진 블록에는 힘  $F_s$  만 작용하게 되고, 관성력에 의해 블록에 작용하는 힘  $F_i$  는 식 (5)와 같이 정의 할 수 있다.

$$x = r \cos \omega t + l \cos \delta$$

$$= (l - \frac{r^2}{4l}) + r \cos \omega t + \frac{r^2}{4l} \cos 2\omega t \quad (3)$$

$$\ddot{x} = -r\omega^2 \cos \omega t - \frac{r^2\omega^2}{l} \cos 2\omega t$$

$$F_{rec} = (m_p + m_{crp})\ddot{x} \quad (4)$$

$$F_i = (m_p + m_{crp})\ddot{x} \tan \delta \quad (5)$$

### 2.3 Engine Excitation Forces

연소에 의해 작용하는 폭발력  $F_g$  와 수직 왕복운동에 의해 작용하는  $F_i$  는 엔진 블록에 작용하게 된다. 엔진에서 발생하는 힘으로 2 번 피스톤의 수직 왕복운동 과정에 1 번의 폭발력이 작용하게 되고 두 힘은 그림 5 와 같이 작용하게 되며, 결과적으로 힘

과 작용 위치에 의해 torque 가 발생하게 된다. 관성력에 의해 발생하는 torque 와 폭발력에 의해 발

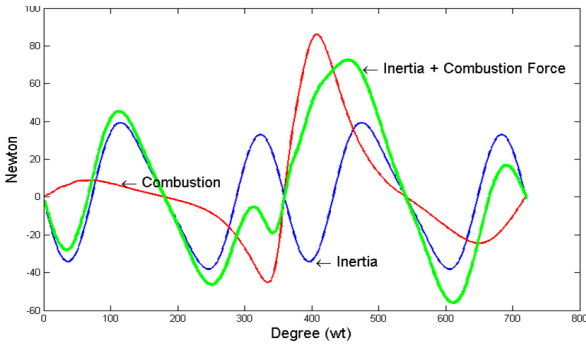


Figure 4 Torque fluctuation

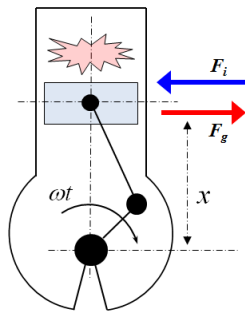


Figure 5 Engine excitation forces in the cylinder

생되는 그림 4 와 같이 나타낼 수 있다. 그림 5 는 엔진 crank 축이 2 회전함에 따라 관성력은 회전 특성을 따라가며 폭발력은 2 회전 과정 중 한 번의 폭발 특성을 볼 수 있다. 이와 같은 torque fluctuation 특성을 보면 엔진 블록에 작용하는 torque 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Torque = T = (F_i + F_g)x \quad (6)$$

일반적으로 엔진의 주요 가진 주파수는 엔진 기통수의 0.5 배라 하며, 이는 엔진 2 회전에 1 번의 event 가 발생하는 것을 그림 5 를 통해 확인할 수 있다. 엔진의 특성을 분석할 때 엔진 주요 가진 주파수뿐 아니라 crank 축의 주요 회전 차수 또한 주요 분석 대상이 된다.

엔진 구동과정에서 연소에 의한 폭발력은 연료의 양에 따라 큰 변화가 없으며, 지속적인 연소에 의해

엔진 crank 축의 rpm 은 지속적으로 증가하게 된다. 식(2)와 식(5)에서 확인할 수 있듯이 연소에 의해 발생하는 torque 는 압력  $p$  와 관련이 있으며, 관성

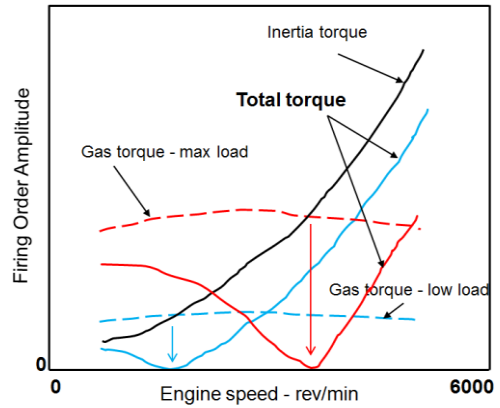


Figure 6 Total torque with respect to engine rpm

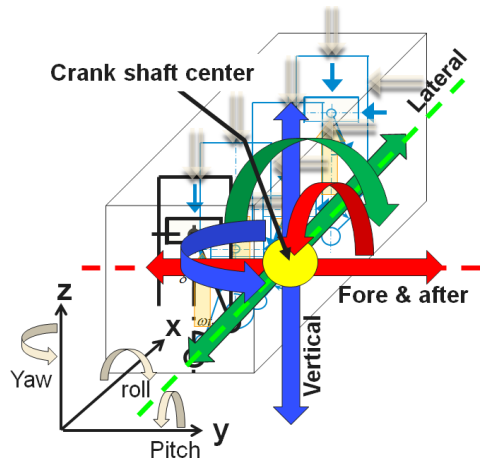


Figure 7 Engine excitation forces above the crank shaft center

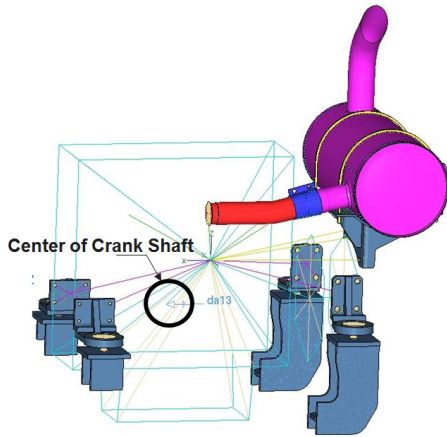


Figure 8 FE-model for vibration analysis

에 의해 발생하는 torque 는 rpm 에 영향을 받는다. 이는 rpm 이 높아짐에 따라 관성력은 증가하게 되고 압력의 변화는 적기 때문에 엔진 블록에 작용하는 torque 는 그림 6 과 같이 나타낼 수 있다.

### 3. 결 론

일반적으로 엔진은 다 기통으로 구성되어 있기 때문에 그림 7 과 같이 엔진 관점에서 힘을 정의해야 한다. 각 실린더에서 작용하는 torque 를 crank 축의 중심에서 작용하는 힘으로 표현 할 수 있으며, 이를 이용하여 그림 8 과 같이 해석 모델에 반영할 수 있다. 사진 검증 단계에서 장비의 소음 진동 특성을 분석하는 것은 가진 특성에 대하여 정의되어야 하고 이는 매우 힘들지만, 본 논문에서 제시하는 방법을 통해 엔진의 가진력을 정의하면 장비의 소음 진동 특성을 분석하는데 활용 할 수 있다.

본 논문에서는 엔진에서 작용 힘을 정의 하였다. 복잡한 메커니즘으로 정의 되는 엔진 구동 특성이지만, 건설장비에서 사전 설계 단계에서 적용할 수 있는 간략한 모델을 제시하였다. 단 실린더 내부에서 작용되는 특성을 분석하였으며, 이를 소음 진동 특성 분석에 활용 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

(1) Kim, W.H. and Kim, I.D., 2013, A Study of the Dynamic Stiffness Modification to the Idle Vibration