

# 지게차 피칭 승차감 개선을 위한 차량 동역학 모델 개발

## The study on dynamic vehicle model of a forklift for improving ride comfort of pitching vibration

이재영† · 김영현\*  
**Lee Jaeyoung, Kim Younghyun**

### 1. 서 론

최근 고객들의 눈높이가 높아짐에 따라 상용 차량 뿐만 아니라 산업차량도 저진동/저소음 등의 안락성이 제품 선택시 중요한 기준이 되고 있다. 대표적인 산업차량인 지게차는 노면으로부터 전달되는 진동을 제어하거나 저감할 수 있는 별도의 현가장치가 없는 관계로 주행 및 작업 중에 과도한 피칭 현상이 발생하여 운전자의 승차감을 저해할 우려가 있다. 따라서, 본 연구에서는 피칭진동을 저감할 수 있는 설계안 도출을 위해 전달함수 기반의 2자유도 차량 동역학 해석 모델을 구축하고 이를 활용한 승차감 개선방향에 대해 연구하였다.

### 2. 동역학 해석 모델 개발

#### 2.1 차량 동역학 해석 모델

차량 동역학 모델은 일반적으로 널리 사용하고 있는 2자유도 반차모델(2dof half car model)을 사용하였다. 반차모델은 차량을 강체로 가정하고 전/후륜 타이어가 각각 1개씩 존재하며, 지게차 특성상 현가장치를 고려하지 않았다. 2자유도 수학적 모델은 Fig. 1과 같이 간략히 도식화 하였다. 수학적 모델 수립을 위하여 수직 방향과 피칭 방향의 힘 평형방정식으로부터 운동방정식을 유도하였으며, 최종적으로 식 (1)과 같은 상태공간방정식(space-state equation)의 형태로 나타내었다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & 1_{2 \times 2} \\ -M_1^{-1}GK_1G^T & -M_1^{-1}GC_1G^T \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & 1_{2 \times 2} \\ M_1^{-1}GK_1 & M_1^{-1}GC_1 \end{bmatrix} w \quad (1)$$

† 교신저자: 정희원, 현대중공업 건설장비연구소  
 E-mail : jaeyounglee@hhi.co.kr

Tel : 052-203-6466, Fax : 052-250-9645

\* 정희원, 현대중공업 건설장비연구소

단,  $x = \begin{Bmatrix} z_c \\ \theta \end{Bmatrix}$ ,  $w = \begin{Bmatrix} w_l \\ w_r \end{Bmatrix}$

$M_1 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & I_y \end{bmatrix}$ ,  $K_1 = \begin{bmatrix} k_r & 0 \\ 0 & k_f \end{bmatrix}$ ,  $C_1 = \begin{bmatrix} c_r & 0 \\ 0 & c_f \end{bmatrix}$ ,  $G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -l_r & l_f \end{bmatrix}$  이다.

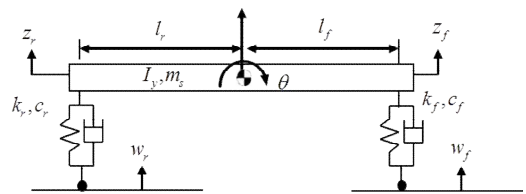


Fig. 1 2-dof mathematical dynamic model

#### 2.2 실차검증

실차시험을 통하여 동역학 모델의 신뢰성을 검증하였다. Fig. 2에서는 6축 모션을 측정할 수 있는 모션센서를 지게차량의 무게중심 부근에 부착한 모습을 나타내고 있으며, 대형 범프를 통과할 때의 수직 가속도와 피칭 각속도를 각각 측정하였다. 이때 실차 시험결과와 동역학 해석 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내고 있다. 이를 각각 주파수 분석한 결과를 Table 1에 나타내었으며, 오차는 0.1 %로 실험과 해석이 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.



Fig. 2 Folk lift truck and motion measuring point

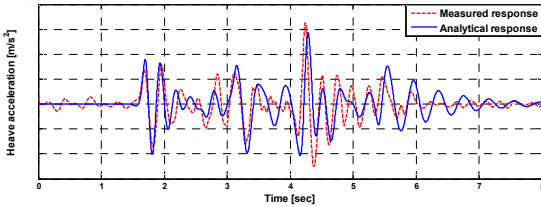


Fig. 3 The comparison between measured response and analytical response for heave acceleration

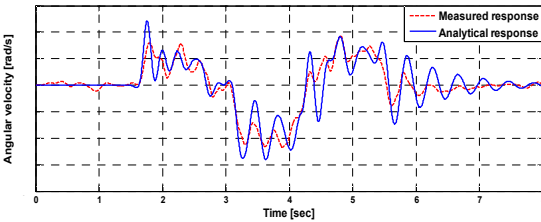


Fig. 4 The comparison between measured response and analytical response for angular velocity

Table 1 The result of measured natural frequency and calculated natural frequency

	Measurement	Analysis	Error
Pitching mode	2.54 Hz	2.544 Hz	0.1 %
Bounce mode	4.103 Hz	4.104 Hz	0.02 %

### 3. 전달함수를 이용한 민감도 해석 및 개선 방안 도출

설계변수의 변화에 따른 목적함수나 제약함수의 변화율을 민감도(sensitivity)라고 한다. 본 연구에서는 동역학 모델을 이용하여 지게차의 피칭 진동을 줄이기 위하여 해석 파라메타별 민감도 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 도시하였다. 목적함수로는 수학적 모델의 고유치 해석(eigen value analysis)을 통해 구한 전달함수의 크기값을 선정하였다.

그 결과 무게중심의 위치가 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인 하였으며 앞쪽 타이어의 강성, 질량관성모멘트, 뒤쪽 타이어의 강성, 그리고 차체 질량순으로 피칭 진동에 영향을 미치는 것을 확인 하였다. 이를 바탕으로 피칭 진동을 줄이기 위한 개선방안을 도출하였으며, 개선내용과 그 효과는 Table 2에 나타내었다.

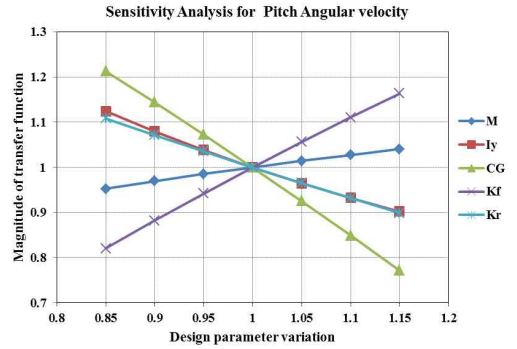


Fig. 5 The result of sensitivity analysis in accordance with changing design parameters

Table 2 Improvement suggestions to reduce pitching vibration

	Item	Changing Parameter	Analysis result (p-p 기준)
1	축간거리 증대 C/Weight 이동	전후축 부하율 증가 관성모멘트 감소	5 % 감소
2	앞/뒤 타이어 공기압 변화	앞/뒤 타이어 강성 및 댐핑 변화	8 % 감소

## 4. 결 론

본 연구에서는 2자유도 지게차량에 대한 차량 동역학 해석 모델을 구축하고, 실차시험을 통해 모델에 대한 신뢰성을 검증하였다. 구축된 동역학 해석 모델의 전달함수를 바탕으로 설계변수별 피칭 진동에 대한 민감도 해석을 실시 하였으며, 차량의 무게중심의 위치가 피칭 진동에 가장 큰 영향을 주는 것을 확인 하였다. 민감도 해석 결과를 이용하여 피칭진동을 저감하는 개선방향을 제시하였으며 개선 효과를 확인하였다.

향후 동역학 해석 모델을 활용하여 신제품 개발시 설계단계에서 지게차의 승차감을 예측할 수 있으며, 정량적 민감도 해석결과는 승차감을 개선을 위한 다양한 아이디어를 얻는데 활용될 것으로 예상된다.