

소형 지게차의 Idle 진동 저감을 위한 차체 구조 최적 설계

Structure Design Optimization of Small Class Forklift for Idle Vibration Reduction

이원태† · 김영현*
Wontae Lee, Younghyun Kim

Key Words : Forklift Truck(지게차), Idle Vibration(아이들 진동), EMA(실험모드해석), Strain Energy(변형에너지), Design Sensitivity(설계민감도), Design Optimization(설계최적화)

ABSTRACT

A diesel forklift truck under 3-ton class has disadvantages in the vibration transmission path. Because the weight ratio of body structure to powertrain which is source of excitation force is lower than a mid-class forklift. In addition, the torsional and bending vibration mode frequencies of body structure are within the engine excitation frequency range, then high idle vibration generated by resonance. In this paper vehicle body structure design and optimization technique considering idle vibration reduction are presented. Design sensitivity analysis is applied to search the sensitive of design parameters in body structure. The design parameters such as thickness and pillar cross section were optimized to increase the torsional and bending vibration mode frequencies.

기 호 설 명

- [M] : 관성행렬
- [K] : 강성행렬
- λ : 고유치
- ψ : 모드벡터
- ν : 설계변수

1. 서 론

지게차는 화물의 상하차 및 적재를 위한 목적으로 사용되는 산업차량으로써 작업 특성상 차량의 이동과 정차가 빈번하게 반복되는데, 이에 따라 엔진 idle 상태에서 운전 시간의 비율이 일반 자동차에 대비하여 상대적으로 높다. 따라서 엔진 idle 상태에서 차체 진동은 중요한 품질 요소로 작용하며, 설계 요구 수준이 상당히 높은 실정이다. 3톤 급 이하

의 소형 디젤 지게차의 경우, 기진원인 파워트레인 대비 차체 구조의 중량비가 낮아 진동 전달 경로 측면에서 매우 불리한 구조를 가지고 있다. 특히 캐노피 타입의 소형 지게차는 idle 운전영역에서 차체 구조의 굽힘 및 비틀림 진동 모드의 고유주파수가 4기통 엔진의 2차 기진력 주파수 대역에 인접하게 위치하고 있다. 따라서 구조 공진에 의한 운전석 진동 문제의 원인이 되므로 제품 개발 단계에서 차체 구조의 동특성을 고려한 설계 검토가 필요하다.

일반 승용 자동차 분야에서는 차체 구조 설계에 관한 연구가 활발히 진행되었으며, 고강성 차체 개발을 위한 기본 설계 이론이 정립되어 차량의 진동 저감 및 승차감 향상에 많은 기여를 하고 있다.⁽¹⁾ 최근 산업용 차량인 지게차의 경우에도 이와 같은 저진동 차체 구조 설계에 대한 관심이 높아지고 있으며, 소형 지게차를 대상으로 진동 해석 기법 및 저진동 차체 구조 설계에 관한 여러 연구들이 진행되고 있다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

소형 지게차는 구조적 측면에서 크기와 형상이 일반 차량과 유사하여 기존의 자동차 분야에서 적용되는 차체 설계 기법을 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 지게차의 차체에는 작업

† 교신저자; 정희원, 현대중공업 건설장비연구소
E-mail : wontae.lee@hhi.co.kr
Tel : 052-202-5739, Fax : 052-250-9645

* 현대중공업 건설장비연구소

장치 및 카운터웨이트(counter weight)와 같은 중량물이 체결되어 있어 구조적 측면에서는 다소 차이가 있다. 또한 부하 작업에 따른 차체의 강도를 확보하기 위하여 차체 구조를 구성하고 있는 강재도 일반 자동차에 비하여 상당히 두꺼운 판재를 이용하고 있다. 따라서 기존의 자동차 분야에 적용된 기술을 바탕으로 지게차 고유의 차체 구조 설계 기법을 개발하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 캐노피 타입의 소형 지게차를 대상으로 차체 구조의 방진 설계 기법에 대해 소개한다. 또한 유한요소모델을 구성하여 모달 해석을 수행하고 최적설계 기법을 적용하여 차체 구조의 설계 개선안을 제시하였다.

2. 소형 지게차의 동특성 평가

2.1 Idle 진동

소형 지게차의 시트 프레임에서 측정한 3축 방향의 idle 진동 응답을 Figure 1에 나타냈다. 엔진 low idle 운전 영역에서 고진동 현상을 확인할 수 있으며, 운전 속도 증가에 따라 진동이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Low idle 운전 영역에서 고진동 현상은 파워트레인 마운트 시스템의 최적화와 같은 기진원 측면에서의 문제가 원인이거나 또는 진동 전달 경로 측면에서 차체 구조의 동특성에 기인한 문제로 추정할 수 있다. 해당 차량의 경우에는 차체 구조의 비틀림 모드의 고유주파수가 저속 운전 구간에서 엔진 2차 기진력 주파수와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Figure 2는 파워트레인 가진에 의한 차체 구조의 실험모드해석 결과를 나타내고 있다. 해당 차량의 파워트레인에에서 발생하는 일반적인 진동 응답을 고려할 때, low idle 운전 구간에서 고진동의 원인은 프레임의 비틀림 진동 모드와의 공진에 의한 것으로 판단할 수 있다.

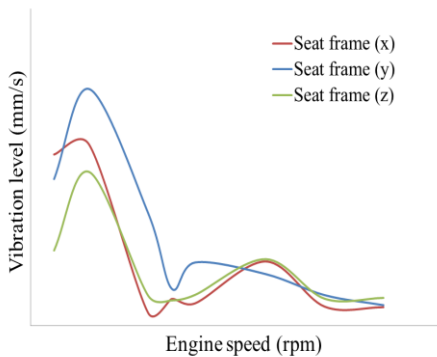


Figure 1 Idle vibration on the seat frame

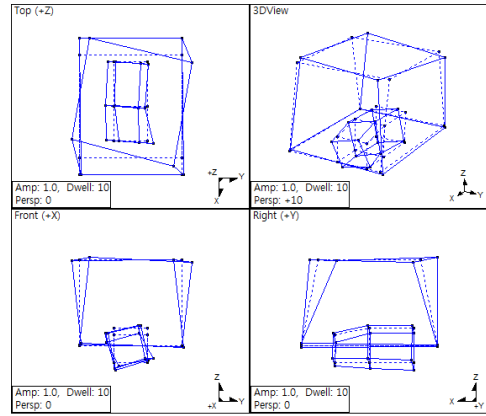


Figure 2 EMA result (torsional mode)

2.2 차체 구조 진동 해석

(1) 해석 모델 구축

차체 구조의 동특성을 파악하기 위한 소형 지게차의 기본 해석 모델을 Figure 3에 나타냈다. 차체를 구성하는 다양한 두께의 강판 부재를 shell 요소로 나타내고 용접 연결은 RBE2 요소를 이용하였다. 카운터웨이트 및 전후방 액슬(axsle)과 같은 중량물들은 집중질량요소로 모델링 하였다.



Figure 3 FE model

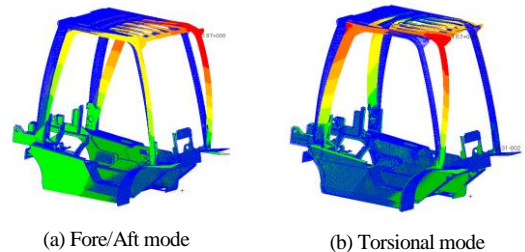


Figure 4 Modal analysis results

(2) 모달 해석

모달 해석을 통해 도출한 차체 구조의 주요 진동 모드를 Figure 4에 나타내었다. Idle 진동의 주요 원인이 되고 있는 비틀림 진동모드(torsional mode)를 확인할 수 있으며, 실차를 대상으로 수행한 실험 모드해석(EMA, Experimental Modal Analysis)을 통해 확인한 주요 진동모드의 고유주파수와 일치하고 있는 것을 확인하였다. 또한 인접한 주파수 대역에 전후 방향 진동모드(fore/aft mode)가 위치하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 차체 구조의 설계 개선 과정에서 두 진동 모드의 고유주파수 변화를 동시에 확인할 필요가 있다.

3. 차체 구조 최적화

3.1 설계민감도

소형 지게차의 idle 진동 저감을 위해서는 차체 구조의 동특성 개선이 필요하며, 이를 위한 차체 구조의 설계최적화(Design Optimization)를 진행하고자 한다. 지게차의 차체는 다양한 두께와 형상을 가진 부재가 용접되어 구성된다. 이러한 여러 부재를 대상으로 다수의 설계 변수를 선정할 수 있는데, 만일 주요 진동 모드의 고유주파수에 대한 여러 설계 변수의 설계민감도(design sensitivity)를 파악할 수 있다면 효율적인 차체 설계가 가능할 것이다.

고유주파수에 대한 설계민감도는 아래의 식을 통해서 구할 수 있다. 먼저, 고유치 방정식을 식 (1)과 같이 정리한다.

$$([K] - \lambda_r [M])\{\psi_r\} = \{0\} \quad (1)$$

고유치 방정식을 임의의 설계 변수로 미분하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial [K]}{\partial v_j} \{\psi_r\} + [K] \frac{\partial \psi_r}{\partial v_j} - \frac{\partial \lambda_r}{\partial v_j} [M] \{\psi_r\} - \lambda_r \frac{\partial [M]}{\partial v_j} \{\psi_r\} - \lambda_r [M] \frac{\partial \psi_r}{\partial v_j} = \{0\} \quad (2)$$

식 (2)를 정리하면, 식 (3)과 같이 설계민감도를 임의의 설계 변수에 대한 고유치의 도함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \lambda_r}{\partial v_j} = \{\psi_r\}^T \left(\frac{\partial [K]}{\partial v_j} - \lambda_r \frac{\partial [M]}{\partial v_j} \right) \{\psi_r\} \quad (3)$$

상용 유한요소해석 프로그램에서는 동적해석(dynamic analysis)을 통한 설계민감도해석 기능을 제공하고 있다. 본 논문에서는 Altair사의 OptiStruct에서 제공하는 Sensitivity analysis 사용하여 여러 설계 변수에 대한 차체 구조의 고유주파수의 설계민감도를 해석 검토하였다.⁽⁵⁾ 해석 결과를 바탕으로 설계민감도가 높게 나타나는 주요 설계 변수를 선정하여 차체 구조의 설계 개선에 활용하고자 한다.

3.2 주요 설계 변수 선정

(1) 차체 강판 두께

기본적인 차체 구조를 유지하고 차체를 구성하는 부재의 두께만이 변경 가능한 설계 변수라고 가정하고 설계민감도를 해석을 수행하였다. Figure 5에 나타낸 모달변형에너지(modal strain energy) 분포를 참고하여 차체를 구성하는 shell 요소 8개 그룹을 선정하였다. 부재의 두께에 대한 설계 민감도 해석 결과는 Figure 6에 나타냈다. 헤드가드 필러(head guard pillar) 구조물의 두께 변화에 대한 민감도가 가장 높으며, 다음으로 웬더(fender) 및 필러 지지부 등으로 나타났다. 실제로 필러 구조물의 제작성을 고려할 때, 부재의 두께를 증가시키는 것은 제한적이다. 임의로 1mm 증가시키는 경우를 가정하고 모드해석을 수행한 결과, 비틀림 모드의 고유주파수가 3.3% 증가하는 것으로 나타났다. 주요 설계 변수의 임의 변경에 따른 고유주파수 변화는 Table 1에 나타냈다.

(2) 헤드가드 필러 단면 계수

제작성과 차체 중량 증가를 고려할 때, 단순한 부재의 두께 변화만으로는 고유주파수를 증대시키는데 한계가 있다. 따라서 부재 두께에 대한 설계민감도 해석 결과에서 높은 민감도를 나타내고 있는 전후방 필러를 대상으로 단면의 형상을 변경하여 차체의 동특성을 향상시키고자 한다.

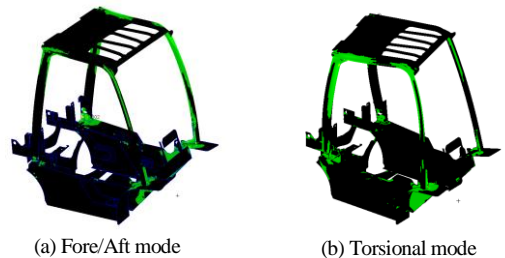
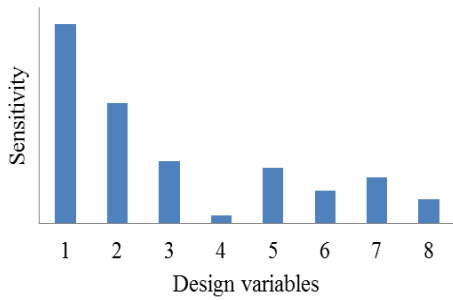
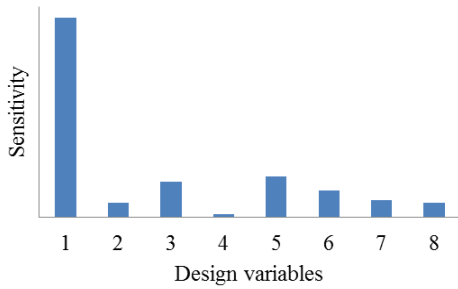


Figure 5 Modal strain energy



(a) Fore/Aft mode



(b) Torsional mode

Figure 6 Sensitivity of design variables (thickness)

Table 1 Natural frequency variation of plate thickness modification (torsional mode)

Design variable	Change	Freq. change
1	+ 1mm	+ 3.3%
2	+ 1mm	+ 0.4%
3	+ 5mm	+ 2.5%

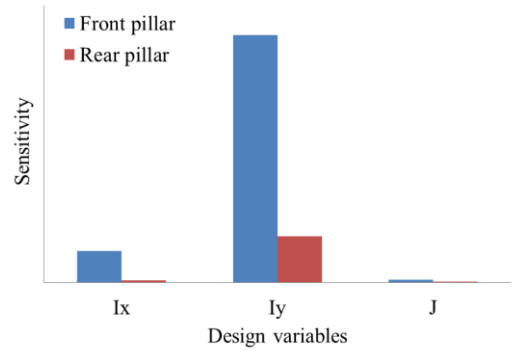
기존 유한요소 모델에서 shell 요소로 모델링된 필러 부분을 beam 요소로 수정하고, 단면 계수를 설계 변수로 선정하여 설계민감도 해석을 진행하였다. Figure 7은 필러의 단면 형상을 나타내고 있다. 단면 계수에 대한 설계민감도 해석 결과는 Figure 8에 나타나 있으며, 단면계수 I_y 값에 대한 설계민감도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서 필러의 단면에 대하여 I_y 값을 증대시키는 방향으로 치수를 개선하는 경우에 고유주파수의 상승 효과가 있을 것으로 예상할 수 있다. 필러 부재의 두께를 유지하고 단면의 형상을 변화시키는 조건에서 비틀림 모드에 대한 고유주파수의 변화를 Table 2에 나타냈다. 해석 결과에서 확인한 바와 같이 필러의 I_y 값을 증대시키는 설계 변수 A를 변경하는 경우에 가장 큰 고유주파수 변화를 확인할 수 있었다.



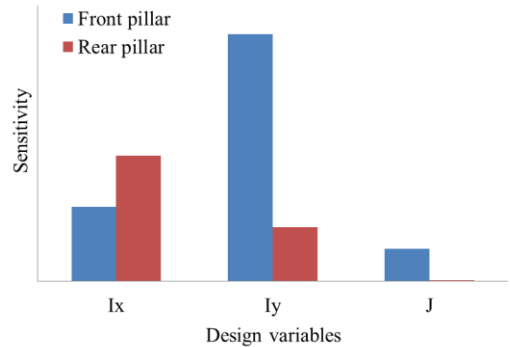
(a) Front pillar

(b) Rear pillar

Figure 7 Cross section of head guard pillar



(a) Fore/Aft mode



(b) Torsional mode

Figure 8 Sensitivity of design variables (pillar section)

Table 2 Natural frequency variation of pillar section modification (torsional mode)

Design variable	Change	Freq. change
A	+ 10mm	+ 3.4%
B	+ 10mm	+ 1.7%
C	+ 10mm	+ 0.4%
D	+ 10mm	+ 0.2%

3.3 차체 구조 개선안 도출

설계민감도 해석 결과를 바탕으로 설계 개선안을 도출하였다. 차량의 양산성과 차체 중량 증가에 따른 연비 저감 문제를 고려하여 주요 설계 변수의 상한을 설정한 결과를 Table 3에 나타냈다.

Table 3 Natural frequency variation of design modification (torsional mode)

Design modification	Freq. change
Pillar section A	+ 5.8%
Pillar section B	+ 4.5%
Thickness plate A	+ 3.3%
Thickness plate B	+ 4.0%
Thickness plate C	+ 1.5%

주요 설계 변수의 개선에 따른 비틀림 진동모드의 고유주파수가 초기 설계 대비 3~5Hz 증가하는 것으로 나타났으며, 각각의 설계 변수의 상한을 동시에 적용할 경우에 20Hz 이상의 고유주파수 증가를 확인할 수 있었다. 비틀림 진동모드와 인접한 주파수 대역에 위치하고 있는 전후 방향 진동모드의 고유주파수도 엔진 low idle 운전 영역과 충분히 분리될 수 있으므로 차체 구조 개선을 통한 idle 진동 저감 효과가 기대된다.

4. 결 론

소형 지게차에서 발생하는 idle 진동의 원인은 차체 구조의 동특성에 기인하는 것으로 나타났으며, 실차의 동특성을 반영하는 유한요소 모델을 구성하여 해석을 통한 차체 구조의 최적 설계 방안을 검토하였다. 차체 구조의 고유주파수에 대하여 주요 설계 변수의 설계민감도 해석을 수행하였으며, 헤드 가드 필러 구조의 설계 개선 효과가 가장 높은 것으로 나타났다. 설계민감도가 높게 나타나는 차체 구조의 주요부를 선정하여 설계 변경을 수행하였으며, 최종 개선 모델의 모달 해석 결과를 통하여 비틀림 진동모드의 고유주파수가 초기 설계 대비 20% 이상 상승하는 것을 확인하였다. 해석 결과를 바탕으로 엔진 기진력과의 공진 회피를 통하여 idle 진동 저감에 효과가 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- (1) Hong Jae Yim, Sang Beom Lee, 1995, Technology for Initial Design and Analysis of Vehicle Pillar Structures for Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 395~402.
- (2) Duck-Joo Ra, Jae-Hwan Kim, Suck-Bae Choi and Nag-In Kim, 2004, Study on Riding Quality Improvement of a Forklift Truck through Structural

Vibration Analysis, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 542~545.

(3) Chuljun Park, Hyungbin Im and Jintai Chung, 2007, A Study on the Vibration Reduction of a Forklift with an Electric Motor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 1145~1151.

(4) Dong-II Lee, Hyeong-Woo Choi, Keun-Bae Park and Seung-Kuh Lee, 1996, Dynamic Response Optimization for Vibration Reduction of the Fork-Lift Truck, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 155~160.

(5) OptiStruct Optimization manual, Altair.