

## Trans-axle 형태의 구동계를 갖는 지게차의 진동원 파악 및 저감설계

### Identification of vibration source and vibration improvement design of forklift truck with trans-axle type power train

°박인환\*, 김성재\*, 김낙인\*  
In-Hwan Park, Sung-Jae Kim and Nag-In Kim

**Key word :** Forklift truck(지게차), trans-axle type power train(트랜스액슬형 구동계), steering wheel vibration(조향휠 진동)

#### Abstract

In this study, the improvement work to reduce the steering wheel vibration of a forklift truck is performed. The forklift truck newly developed possesses a trans-axle type power train to achieve a compact and low-price design. The forklift truck is directly subjected to a high-level engine vibration through hard mounted trans-axle housing. The engine vibration shakes the whole system of the forklift truck, and then a high level local vibration of steering wheel could not be avoided. As the results, the vibration source and path mechanisms are experimentally identified and then an improvement design is proposed to minimize the steering wheel vibration.

#### 1. 서론

안락성과 환경친화는 오늘날 모든 제품에 적용되는 기초설계 개념으로서, 산업차량의 진동 역시 환경 친화와 작업자 보호라는 측면에서 제품설계 단계부터 매우 중요한 제어대상이 된다. 그 결과 최근 제품의 설계경향은 과거 기능경쟁 위주에서 운전자의 안전성 및 안락성을 통한 작업효율 증가 측면으로 초점이 맞추어지고 있다. 이러한 경향은 산업차량을 선택하는 소비자의 기호를 적절히 대변해 주는 것으로서, 서구유럽을 중심으로 좀 더 인간 편의적이고 안락한 차량을 선호하는 경향에 대응하는 차량 생산자의 의도이다. 당사도 이러한 세계적 추세와 당사 제품을 구입하는 고객에게 보다 쾌적한 작업환경을 부여해 주기 위해 당사에서

판매되는 모든 차량의 소음 및 진동을 저감시키고자 하는 연구 개발이 끊임 없이 수행되고 있으며, 본 연구는 이러한 연구 과정 중에 도출된 하나의 결과이다.

본 연구에서는 산업차량 중 가장 우리 주위에 많이 볼 수 있는 엔진식 지게차의 진동 저감에 관한 내용으로서, 작업 중 운전자가 가장 민감하게 피로감을 느끼는 부분중의 하나인 조향휠 진동의 저감에 관한 내용이다. 지게차 특성상 무거운 작업물을 다루기 위하여 차량 크기에 비해 고 마력의 엔진을 사용하며, 최소한의 완충장치를 가지고 있다. 특히 본 연구에서는 가솔린엔진에 비해 엔진진동이 상대적으로 높은 디젤엔진을 사용하고, 구조가 단순하고 저가의 차량설계를 위해 적용한 트랜스액슬 형태의 구동계를 가지는 지게차에 관한 내용이다. 트랜스액슬 구동계를 가지는 지게차

\*박인환, \*김성재, \*김낙인: 대우종합기계 중앙연구소 시스템기술팀

는 일반 자동차 및 지게차와 달리 2점 엔진마운트 구조를 가지며, 나머지 2점의 지지는 차량의 프레임에 직접 체결되어 일부 방향의 엔진진동은 감소되지 않고 직접 차량에 전달된다. 그 결과 차량에 전달된 엔진 가진력은 차량 전체를 가진시키고, 운전자에 직접 접촉되는 조향휠, 의자 및 발판에 진동을 형성시키어 운전자로 하여금 작업 중 불편감 및 피로를 느끼게 할 수 있다.

차량에 대한 기초 설계시 발생할 수 있는 차량 전체의 진동 특성은 해석기법을 이용하여 보완설계 개선되었다. 하지만 해석 단계에서 모형화에 많은 시간이 필요하거나, 모형화를 위한 기초 자료가 부족한 부분은 초도품 제작 후 발생하는 진동에 대한 실험평가 후 개선 설계하는 방법을 사용하고자 하였다. 차량은 후판을 이용한 용접구조물로서 국부 부분 구조물은 정확한 해석모형을 작성하기가 매우 복잡하고, 주요 가진원인 엔진 불평형력에 대한 자료가 없어, 이에 대한 강제 가진 응답특성을 초기 설계단계에서 예측할 수 없었다.

초도품 제작 후 조향휠에서 예측하지 못한 큰 진동이 발생하였으며, 이러한 조향휠 진동을 최소화시키기 위한 개선 연구를 수행하였다. 이를 위해, 차량의 진동원 특성파악, 조향휠까지의 진동 전달경로 파악, 차단설계 및 국부진동 최소화 설계 등을 수행한 결과 만족할만한 진동 저감을 얻을 수 있어 이에 관한 내용을 소개하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 전체진동 저감설계

새로 설계되는 지게차의 저 진동 설계를 위해 유사모델의 양산차량을 기초모델로 한 진동해석을 평가하였다. 이는, 초도품 제작 전 개선 가능한 부분을 사전 파악하여 차량 신규 설계시에 적용하기 위한 것이다 새로이 설계되는 지게차는

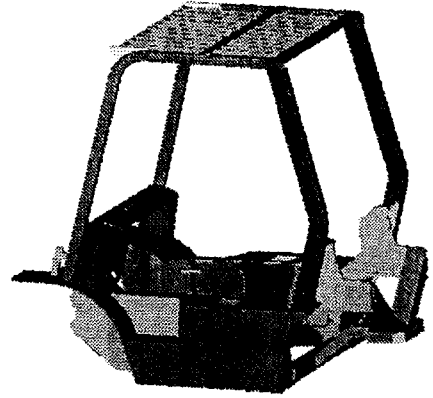


Fig. 1 Three dimensional model of the forklift truck

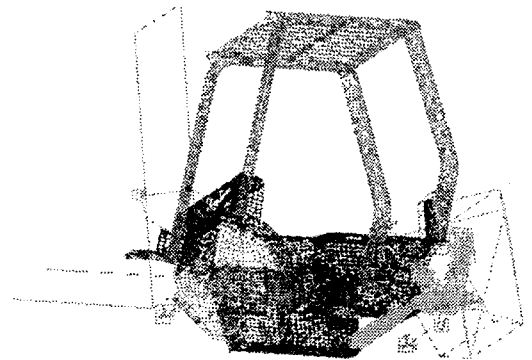


Fig. 2 Finite element model of the fork lift truck.

일체형 트랜스액슬을 사용하기 때문에 차량 앞쪽 프레임의 구조가 조립성을 고려한 설계로 강성도 저하가 발생할 가능성이 있어 진동특성이 악화될 가능성이 있다. 그러므로 설계단계에서 차체의 유연 모드에 의한 진동 기여도를 분석하여 초도 차량에 그 개선안을 적용하도록 하였다.

지게차 프레임의 3차원 모델은 Fig.1과 같으며, 해석모델은 프레임과 오버헤드 가드를 유연체로 모델링하였고, 질량이 큰 부분은 관성특성만을 고려한 강체로 모델링 하였다. 모델의 단순화를 위해 강성 및 관성값에 미치는 영향이 크지 않다고 판단되는 부품은 제외하였으며, 주요 프레임만으로 해석모델을 구성하였다. 지게차 프레임의 기본 구조는 판재의 철판을 절단하여 용접시킨 구조물

이므로 thin shell로 모델링 하였고, 용접부는 이상적인 접합으로 가정하였으며, 완성된 FE 모델은 Fig. 2와 같다.

양산차량의 프레임에 대한 고유 진동모드 해석결과에서 알 수 있는 사항은, Fig. 3과 같이 양쪽 레일을 연결하는 앞/뒤 부분이 진동관점에서 상대적으로 취약한 구조 특성을 가지고 있다. 이 때문에 발생하는 프레임의 비틀림 모드는 차량의 idle RPM 주파수의 2차 주파수 근처에서 발생되었으며, 이러한 진동 모드는 조향휠 진동이 발생하기 쉬운 모드 형상이다. 또한 의자진동의 주요 원인중의 하나로 인식되어온, 카운터웨이트의 피칭 진동 역시 idle RPM 주파수의 2차 주파수 근처에서 관찰되어 이에 대한 개선설계 필요성이 대두되었다.

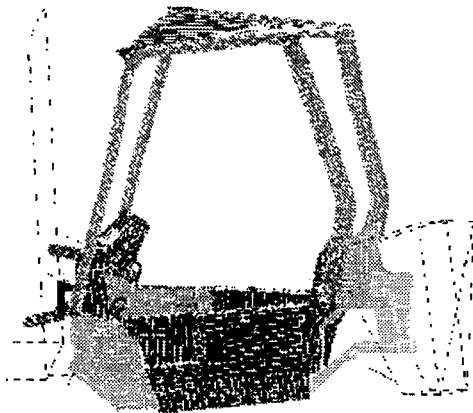
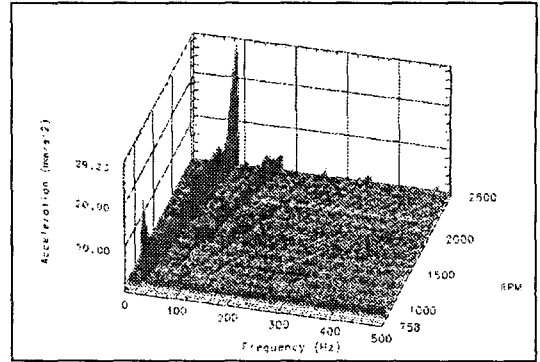
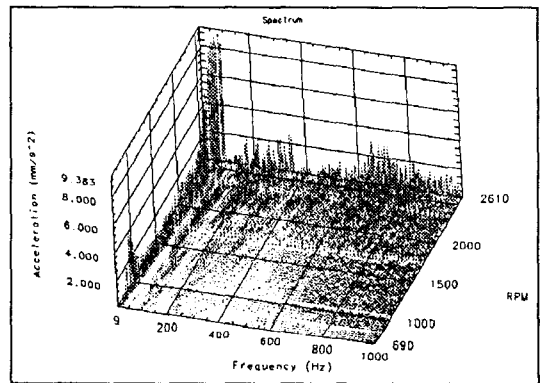


Fig. 3 1<sup>st</sup> flexible mode

작업 중 많은 시간을 유지하는 idle RPM영역에서의 진동은 운전 경험상 운전자의 중요한 불만 원인이 된다. 그러므로 idle RPM영역 근처에서 발생하는 공진에 의한 진동을 최소화하는 설계가 필수적으로 요청되며, 이를 위해 고유진동수를 이동시킬 수 있는 설계 개선이 필요하였다. 가장 이상적인 설계 개선은 차량엔진에서 발생하는 2차



(a) vertical direction.



(b) Forward direction

Fig. 4 Engine vibrations.

가진원 주파수영역 밖으로 공진주파수가 형성될 수 있도록 프레임에 대한 개선 설계를 하는 것이지만, 이러한 방법은 차량의 기본적인 구조변경이나 큰 강성으로 보강을 해야 하므로 적절한 방법이 아니다. 그러므로 본 개발에서는 공진 주파수가 가능한 idle RPM영역에서 멀리 벗어날 수 있는 현실적인 설계개선을 하고자 하였다.

## 2.2 초도품 진동 특성 파악

차량의 진동 특성을 파악하기 위해 엔진 상용 구간인 700RPM ~ 2600RPM 까지 엔진 RPM에 대한 Sweep Test를 통하여 엔진 진동 특성을 검토하였다. 그 결과, fig. 4의 Waterfall 선도와 같이 엔진 RPM에 대한 2차 성분이 주요 가진 주파수 성분으로 나타났다. 특히 약 2500RPM부터 급격하게

엔진 진동의 크기가 증가됨을 알 수 있었다. 엔진진동 방향별로는 상·하 진동이 전후방향 진동에 비해 약 3배정도 크게 나타났으며, 2차 성분의 진동 방향별 spectrum은 동일한 패턴을 보이고 있다. High RPM 구간에서 엔진의 진동특성은 일반적으로 엔진 회전수의 제곱에 비례하는 것이 정상이지만, 2500RPM부터 급격하게 진동이 커진 것은 단순히 가진력이 커졌다기보다는 엔진내부에서 급격한 비평형 특성, 실린더 블럭의 질량 및 마운트의 탄성특성에 의한 응답특성에 의해 야기된 현상으로 추측되었다. 그러나, fig. 5의 Campbell 선도에서 알 수 있듯이, 특별한 공진 특성은 나타나지 않아 엔진 마운트계에 의한 공진은 없는 것으로 판단되어, high RPM영역에서의 과도 진동특성은 엔진 자체의 고유특성에 의해 야기된 것으로 판단된다.

차량의 조향휠 진동은 fig. 6과 같은 진동특성을 보이고 있으며, 엔진 전후방향의 2차 진동에서 나타난 주파수 spectrum과 동일한 특성을 보이고 있다. 조향휠 진동은 그 작동 조건에 따라 특성이 다르게 나타났으며, 조향휠이 자유로운 상태에서 발생한 진동 특성보다 조향휠에 임의의 토오크가 작용된 상태에서 손에 전달되는 진동이 더 크게 발생되었다. 조사 후, console box내의 조향휠 유압 펌프가 2500RPM근처에서 상·하 방향으로 공진과 유사한 과도진동이 발생함을 알 수 있었고, 이로 인한 조향휠의 상·하 진동에 직접적인 영향을 주는 것으로 판단되었다. 따라서 조향휠과 console box과의 주파수 응답특성을 측정하였으며, fig. 7과 같이 83Hz 부근에서 공진특성과 유사한 과도 응답특성을 확인할 수 있었다. 따라서 조향휠에서 발생한 국부 공진 특성을 개선시키기 위해 조향휠 지지부분을 추가적으로 보강하여 공진 주파수 값이 차량의 상용 RPM 영역을 벗어나게 하는 설계가 필요함을 알 수 있었다.

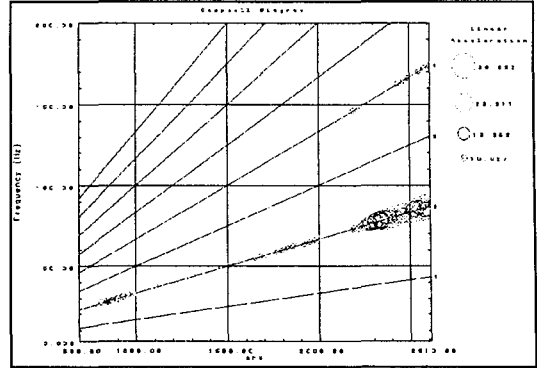


Fig. 5 Campbell diagram associated with vertical engine vibration

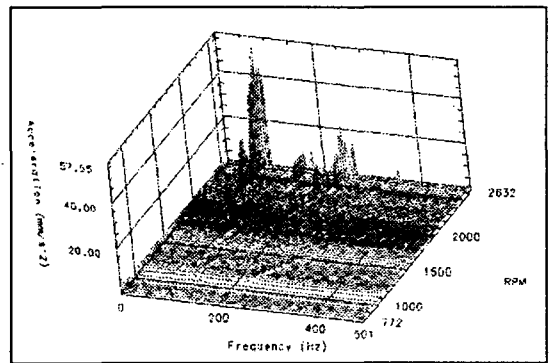


Fig. 6 Vertical vibration of steering wheel.

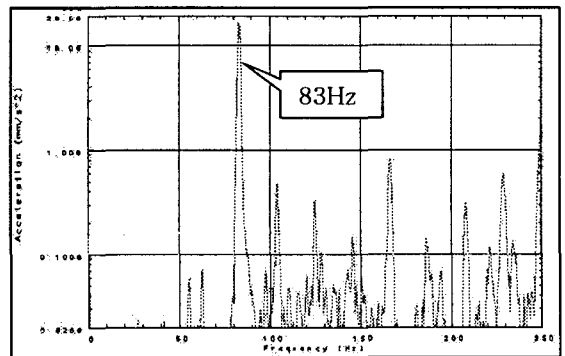


Fig. 7 Frequency response function of the steering assembly.

엔진 진동이 차량진동에 미치는 영향을 관찰하기 위해 MTS사 T-DAS Software의 ODS(Operational Deflection Shape) 측정 프로그램을 이용하여 실험을 실시하였다. 차량 상태에서 엔진 + Torque Converter + Axle + Cowl부분을 대상으로 하여, 측정

하였다. 측정 결과, 최대 진동값을 보인 2600RPM에서 2차성분에 대한 ODS는 fig. 8과 같으며, 점선 부분은 변형 전 상태를 표시한 것으로서, 엔진 상하 방향의 진동이 가장 큰 변위를 보여주고 있어 엔진 Sweep Test에서 나온 결과와 일치되고 있음을 알 수 있다. 또한 조향휠을 기준으로 Cowl Panel 중앙 부위에서 발생된 Bending Mode가 조향휠 Console Box로 전달되어 과다 진동의 원인이 됨을 알 수 있었다. 따라서 이러한 ODS 계측을 통하여 상기 모델에 대한 진동Mode Shape을 관찰할 수 있었고, Cowl Panel 부분의 심한 변형 현상이 조향휠의 과다진동을 발생시키는 직접적인 원인으로 판단할 수 있었다.

### 2.3 진동 개선

엔진 진동에서 나타난 2차 성분 중 high RPM 영역에서 발생하는 과다 진동성분의 영향을 저감시키기 위해 엔진 마운트계에 의한 진동 기여특성을 검토하였다. 먼저 엔진마운트 고무의 강성도를 현재 80kgf/mm에서 180kgf/mm으로 변경하였으나, 엔진진동특성은 전혀 변화가 없었다. 이 결과로부터 알 수 있는 사항은 현재 사용된 마운트 브라켓의 강성도가 상대적으로 약하여 마운트계의 강성도를 결정하는 주요한 요소로 판단되어 마운트 브라켓 강성도를 증가시켰다. 그 결과 엔진 상하 진동이 보강전에 비해 약 30%정도가 저감 되었으며, 초도 엔진 브라켓의 강성도가 약하게 설계되었음을 확인할 수 있었다. 브라켓 보강과 마운트 강성도 증가로 조향휠 진동 중 2500RPM부터 2600 RPM까지의 과다진동성분은 보강 후 크게 저감됨을 추가적으로 확인할 수 있었다. 2점 엔진마운트를 사용하는 트랜스액슬 구동계는 high RPM영역에서 차체진동과 엔진마운트 강성도가 반비례하는 특성을 가짐을 확인할 수 있었다.

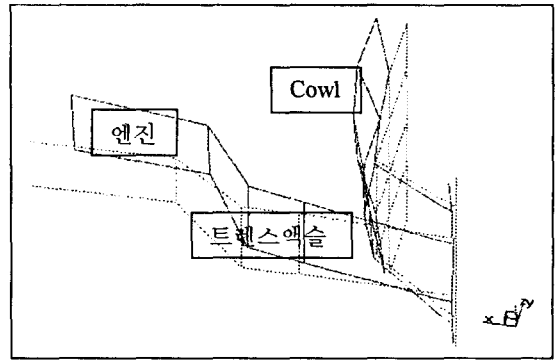


Fig. 8 Operational deflection shape of the cowl and power train system.

Fig. 8의 ODS 측정 결과에서 알 수 있듯이, 엔진 및 구동축계 전·후 방향의 강제 진동이 차체로 전달되어 cowl panel 중앙 부위에 큰 변형이 발생하였다. 이러한 변형은 cowl panel이 하부를 회전 중심으로 변형하는 모드와 cowl panel중심이 안쪽으로 변형하는 2가지 모드가 중첩되어 발생하였다. 그러므로 이러한 진동모드를 저감 시키고자 cowl panel에 형강을 이용하여 진동을 구속하는 기여실험을 수행하였다. 적용 결과, 조향휠 진동이 2.2g로 보강 전에 비해 3.5g가 저감되었다. 그러나 2500 RPM이상에서 2차 성분에 나타난 주파수 spectrum이 보강전과 동일한 패턴을 보이고 있으며, 조향휠 진동의 느낌도 그다지 만족할 수준을 보이고 있지 않고 있어 추가적인 진동 저감 방법을 검토하였다.

현재까지의 조향휠 진동 저감 방법은 엔진에서 발생한 가진력에 의해 cowl까지의 진동발생을 최소화하는 개선방법을 검토하였다. 하지만, ODS를 통한 steering console부의 진동 특성을 관찰해 본 결과, steering console이 상하방향으로 cowl에 대한 상대운동이 존재함을 확인할 수 있었으며, steering console 내의 steering assembly가 2500RPM근처에서 상하 방향으로 공진과 유사한 과대진동이 발생함을 알 수 있었다. 이는 steering console과 cowl과의 체결부가 느슨하여 과대 진동응답특성이 나타남을

확인할 수 있어, 1차적으로 console과 cowl의 취부 체결부분에 체결 강성도를 증가 시키었다. 이와 같은 방법으로 steering console과 cowl과의 상대진동크기가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 2차적으로 steering assembly의 상.하 공진특성을 제거하고자, 이 부분을 지지하는 구조를 보강한 결과 fig. 9와 같이 2차 진동성분이 최대 1.0g로 감소되었으며, high RPM 영역에서 조향휠 진동 민감도도 만족할 만한 수준으로 개선되었음을 느낄 수가 있었다.

조향휠 작동시 free상태에 비해서 최대 4.5g정도의 큰 진동이 발생되었다. 전술한 바와 같이, 과대 진동발생 원인은 조향시 steering pump와 steering wheel이 접촉함에 따라 관성질량이 증가하고, 이 질량증가에 의해서 83Hz 영역에서 국부적 공진특성과 엔진 전후방향진동이 2500RPM에서 급격하게 진동증가 함을 확인할 수 있었다. 따라서 steering assembly에서 발생하는 국부적 공진 주파수를 엔진의 과대 진동영역에서 회피하고자 steering pump에 추가적인 질량을 인가시키어 공진 주파수를 낮추는 기여분석을 수행하였다. 기여분석 결과, fig. 10과 같이 공진주파수가 낮은 RPM 영역으로 이동하여 2500RPM에서의 공진에 의한 과대 진동이 발생되지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 질량증가에 의한 개선은 양산성에 문제가 있으므로, 실제 양산제품에서는 steering assembly를 취부하는 내부격판의 강성을 보강하여 국부 공진 주파수의 값이 차량의 엔진 상용 RPM을 벗어난 영역에 위치하도록 개선 설계하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 결론

지게차 설계의 단순화를 위해 적용한 트랜스액슬형의 구동 시스템으로 인한 조향휠의 과다진동이 해석과 실험방법을 이용하여 개선되었다. 초도

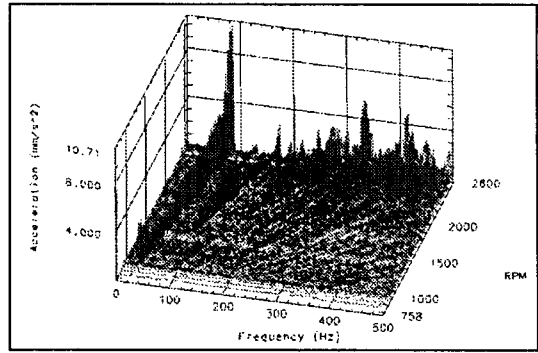


Fig. 9 Steering wheel vibration when the steering torque is operated.

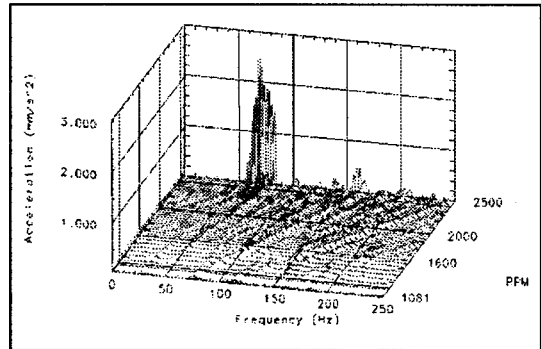


Fig. 10 Steering wheel vibration after local improving.

품 제작시 주어진 정보를 이용하여, 차량전체 진동을 최소화 할 수 있도록 1차적으로 차량을 설계 하였으며, 설계시 예측하지 못한 정보 및 모형에 의해서 발생하는 진동은 실험적인 기여 분석을 통해 그 원인과 개선방안을 구할 수 있었다. 차량은 제작 초기 조향휠에서 약 5g정도의 진동이 발생하였다. 이러한 진동은 엔진의 과대진동이 차량으로 전달되어 국부적으로 진동에 약한 cowl 및 console 부분에 탄성변형 및 공진에 의한 조향휠 진동을 발생시키는 현상에 기인하였다. 엔진에서 발생한 진동에 의한 조향휠 진동을 진동전달 경로의 추적과 부분개선을 수행하여 최종적인 단계에서 약 0.3g정도의 진동으로 저감할 수 있었다.