

지게차 구조진동 특성분석을 통한 운전자승차감 개선기법 연구 Study on Riding Quality Improvement of a Forklift Truck through Structural Vibration Analysis

나덕주*·김재환**·최석배*·김낙인*

Duck-Joo Ra, Jae-Hwan Kim, Suck-Bae Choi and Nag-In Kim

Key Words : Forklift(지게차), Vibration(진동), Driver Comfort(운전 안락감), Human Vibration Index(인체진동불쾌감지수)

ABSTRACT

The vibration reduction process for the driver comfort of a forklift truck is studied in this study since the related driver comfort is a primary design target in the vehicle design recently. However, the underlying study for a vibration analysis regarding to the driver comfort is still an element stage. Thus, a preceding large work has to be needed to apply the CAE technology for the detail vehicle design, and it prevents the vehicle optimal design. To reduce the proceeding large works, the evaluated process and required data are comply with the accumulated trouble shooting experiences in this study. Since the driver comfort is a human related problem, the human vibration index associated with analysis vibration result is additionally introduced as a driver comfort judgement value.

1. 서론

산업용 지게차는 구동 파워를 발생시키는 방식에 따라 엔진식 및 전동식으로 분류되고 있으며, 주요한 기능은 파워를 발생시키는 엔진 및 전동모터, 발생한 파워를 바퀴로 전달 시킬 수 있는 파워트레인, 큰 부하를 다룰 수 있는 유압시스템, 차량의 각종 상태를 제어할 수 있는 제어 반 및 프레임 등으로 구성되어 있다. 이러한 물류운송장치의 핵심이 되는 지게차의 최근 경향은 기능 위주의 연구개발 보다도 작업 중 차량 운전자가 보다 안락하고 예측 가능한 안전 운전 환경이 가능해야 하며, 환경 친화적인 차량의 개발이 요청되고 있다. 이러한 이유는 세계적으로 확산되는 있는 노동 인력의 노령화 및 여성 인력의 노동참여 증가와 맞물려 환경보호에 대한 각 국의 적극적인 참여에 있다.

그 결과 차량 개발업체에서는 보다 운전자의 안락성을 만족시켜 줄 수 있도록 차량 연구개발을 하고 있으며¹⁾, 대표적인 분야는 진동/소음, 운전자공간 설계 및 각종 조작장치의 인간 친화적 설계이다. 특히 차량에서 발생하는 진동 및 소음은 운전자에게 불쾌감을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 때로는 신체의 각종 부위에 반복적인 물리적인 충격을 인가할 수도 있어 신체기능 손상을 가져와 일부국가에서는 차량의 기본 인증에 포함시키기도 한다. 그 결과 차량을 구입하는 고객은 차량의 소

음 및 진동품질로서 제품을 선택하는 중요한 결정 요인으로 되어가고 있다.

현재 양산되고 있는 대부분의 차량은 과거 개발 당시 이러한 고객의 요구특성을 차량 개발에 적용하지 않았다. 하지만, 차량의 구조공진은 구조체에 대한 형상적인 요소로서 초기설계단계에 이러한 현상을 충분히 검토하여 제거되지 않으면 제품개발 후 설계변경은 거의 불가능 하므로 차량의 초도 설계 시 이러한 검토는 필수적으로 수행되어야 한다. 하지만, 현재까지 연구된 결과는 개개의 진동문제에 대한 현상만 단기적인 개선한 연구로서, 차량 초도 설계시 적용할 수 있는 전반적인 진동연구 개선은 수행되지 않았다.

그러므로 본 연구는 운전자와 밀접하게 관계되는 지게차의 조향휠 과 seat 진동에 영향을 미치는 진동을 검토하고, 그 영향 정도를 인간의 느낌인 Human vibration index^{2), 3)}와 지게차 주요 가진 원인 엔진과 연계를 시키어 실제 사용시 운전자가 느끼는 진동 불쾌감 관점으로 평가를 하는 프로세스를 정립하였다.

2. 진동 현상 및 평가방법

2.1 차량진동 발생현상분석

지게차 진동을 발생시키는 가진 원은 크게 주행 중 노면의 요철에 의해서 발생하는 진동과 엔진의 불 평형력에 의해서 발생하는 진동으로 나눌 수 있다. 노면의 요철에 의해서 발생하는 차량진동은 주로 차체가 가지는 관성질량과 타이어가 가지는 강성 값에 의해서 결정되는 강제모드로서 10Hz 이내의 진동영역이다. 하지만, 엔진 가진 원에 의해

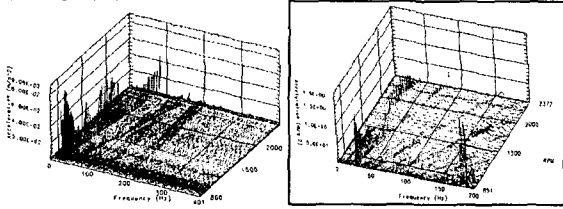
* (주)대우종합기계

E-mail : djra@dhltd.co.kr

Tel : (032) 760-1022, Fax : (000) 000-0000

** 인하대학교 기계공학과

서 발생하는 진동은 엔진의 작동 RPM 내의 엔진 폭발력의 배수에 관계하는 가진 원과 차량 프레임이 가지는 유연 체 모드로서 10Hz 부터 100Hz 대의 진동이다.



(a)Steering wheel vibration (b)Seat vibration

Fig. 1 Vibrations of steering wheel and seat frame excited by engine RPM sweep

차량이 주행 중 노면 요철에 의해서 발생하는 진동은 주로 낮은 주파수대에 존재하기 때문에 작업자에게 진동으로서 인식되지 않고 차량에 대한 불안정 거동인 조작성 관점으로 인식된다. 그 결과 이러한 진동은 진동불쾌감 관점으로서 평가되지 않고 차량 제어안정성으로 평가되어 지게차 조작성의 튜닝을 통한 접근을 해야 하므로 본 연구에서 다루지 않기로 한다

지게차의 엔진은 seat 하부에 위치해 있으며 Fig.1 과 같이 엔진 RPM 영역에서 차량의 구조공진과 연계하여 주로 조향휠, 발판 및 seat 를 통해서 작업자에게 진동이 전달 되어 진동 불쾌감을 발생시킨다. 본 연구에 검토되는 2 톤급 지게차는 대부분 4 기통 디젤 엔진을 사용하고 그 사용 RPM 은 800-2600 까지 사용하기 때문에 주 관심 가진 주파수는 2 배수 진동으로서 26-86Hz 까지의 진동이다. 또한, 지게차 사용 중 브레이크와 조향휠 작동으로 인해 엔진에 부하를 받게 되면 엔진 RPM 은 약 450RPM 까지 비정상적으로 낮아질 가능성이 있으므로 실제 관심 주파수는 15- 86Hz 까지 되어야 한다. 그 결과, 차량 운전 중 운전자가 차량진동에 반응하는 특성은 그 동안의 경험결과 다음과 같이 크게 3 가지 영역으로 정리할 수 있으며, 본 연구에서는 가장 중요한 25-33Hz 사이의 진동부분에 대해서만 검토하였다.

- 15Hz-25Hz(450RPM-750RPM): 비정상적인 엔진작동영역으로 공진발생시 과대진동.
- 25Hz-33Hz(750RPM-1000RPM): 작업 중 차량이 정상활동을 하지 않아 운전자가 진동에 가장 민감도를 가지는 작동영역
- 33Hz-86Hz(1000RPM-2500RPM): 차량이 주행 중이거나 부하작업을 하고 있는 영역. 운전자가 작업에 집중하므로 진동에 민감한 반응을 하지 않음.

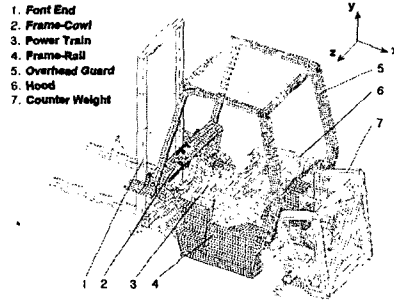


Fig. 2 FE model of 2 ton class forklift truck

2.2 Human vibration

차량 운전 중 발생한 진동은 주 가진 원인 엔진에서 발생하여 차량을 형성하는 프레임을 통해 운전자에게 전달되며, 구조체의 진동특성에 따라 증폭과 감쇄를 통해 운전자에게 전달 된다. 하지만, 전달된 진동에 의해 운전자가 느끼는 불쾌감은 가속도계로 측정된 진동의 크기에 직접 비례하지 않고 진동이 가지는 주파수 및 방향성에 따라 그 불쾌 정도가 다르기 때문에 진동 저감을 위한 목표설정 시 이를 고려해야 한다.

최근 진동이 인간에 미치는 생체 학적인 연구와 인체실험을 통한 연구결과를 이용한 Human vibration index(ISO 2631)가 만들어져, 진동에 대한 운전자 불쾌감 관점으로 진동저감을 설계할 수 있는 환경이 갖추어져 있다. 이러한 Human vibration index 는 기존에 사용하던 진동의 절대크기 외로 진동의 주파수와 방향성에 대한 항목까지도 고려할 수 있어 운전 쾌적성을 위한 진동 저감연구를 위한 연구 개발자들의 선택폭을 넓혀주고 있다. 최근 당사에서도 기존 평가기준과 실제 진동에 대한 불쾌감 순위가 반대로 도출되는 예가 있어 이러한 Human vibration index 을 이용한 진동 평가에 대한 타당성을 높여주는 계기가 있었다⁹⁾.

3. 구조체 기여분석

3.1 해석 모델의 구성

Fig. 2 는 power train 부를 포함하는 2 톤급 지게차의 유한요소 해석 모델이다. Frame 부는 Thin Shell Element 로 모델링 하였고, 재질의 물성치는 일반적인 Steel 의 값을 사용하였다. 일반 용접 부는 완전 용입으로 가정하였고, 엔진 및 트랜스미션, 마스트, 구동기, 조향휠, 카운터 웨이트등은 관성 값을 가지는 강체 질량으로, 엔진 및 트랜스미션 마운트는 3 방향의 탄성계수를 가지는 스프링으로 모델링 하였고, 각 타이어는 강체 질량과 스

프링으로 모델링 하였다⁴⁾.

사용조건을 기반으로 한 운전자 진동분석이므로, 평가부위는 조향휠과 seat 로 한정 하였다. 하지만, 지게차 특성상 조향휠은 차량 cowl 부에서부터 복잡한 링크를 거쳐서 조향휠까지 연결되므로 조향휠 시스템이 가지는 비선형성에 의해서 조향휠의 정확한 모델을 구성하기가 불가능하여, 조향휠 평가부위는 조향휠이 차량에 체결되는 부위를 기준으로 하였다. Seat 부 역시 seat 및 인체의 상호작용에 의한 영향을 정확히 파악하기가 불가능 하므로 seat 를 지지하는 프레임 진동을 기준으로 seat 부를 평가 하였다.

본 연구는 지게차 엔진의 가진 원에 의한 진동 응답특성에 의한 운전자 진동 불쾌감 개선이므로 엔진에서 발생한 가진 원에 의한 응답으로 진동 평가를 해야 한다. 하지만, 전술한 바와 같이 정확한 엔진 가진 원을 예측할 수 없으므로 4 기통 인라인 엔진에서 가장 크게 발생하는 불평형력으로 예측되는 엔진의 수직방향 및 롤링 방향 가진력에 의한 진동 응답을 이용하여 평가프로세스를 구축 하였으며, 각 방향의 가진 크기는 전 주파수 영역에서 단위 값을 사용하였다⁵⁾.

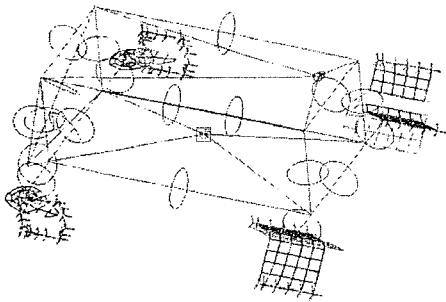


Fig. 3 FE model of power train system

3.2 모델튜닝

해석모델의 타당성 부여를 위해 실차실험 결과를 이용한 모델튜닝을 하였다. 본 연구에서는 시험의 간소화를 위해 차량 구조체에 대한 모달시험을 수행하지 않고, 엔진가진력을 이용한 진동응답을 이용하여 평가하였으므로, 측정된 ODS 및 공진주파수만을 이용하여 모델 튜닝을 하였다. 결과적으로 실제 엔진에서 발생하는 가진력, 질량과 강성도로 정의되는 공진 주파수 및 진동응답크기를 결정하는 댐핑에 대한 정확한 값을 알아야 되나, 본 연구에서는 엔진의 불평형력 및 댐핑계수를 정확히 계측하기가 불가능 하므로 그 동안의 진동 개선 경험을 이용하여 차량의 주요 구성부인

파워트레인부가 가지는 강체진동 및 차량 프레임이 가지는 유연체 진동의 공진주파수 및 모드형태만을 참고로 하여 튜닝을 수행하였다⁶⁾.

Fig. 3 과 같이 엔진과 미션을 포함하는 파워트레인 부분은 미션과 전륜 구동계가 호스 조인트로 연결되어 진동이 단절되고, 파워트레인은 4 개의 러버마운트로 체결되었으며, 전륜 구동계는 차체에 볼트를 이용해서 연결되었다. 3D modeling 을 통해 파워트레인 및 전륜 구동계의 관성 값은 계산하였으며, 러버마운트는 제조사에서 제공한 값을 사용하였다. 그 결과 모델링 과정 중 부정확한 형상 및 관성정보가 입력될 가능성이 있어 프레임 진동튜닝과 달리 해석모델과 시험결과와의 사이에 큰 오차가 발생할 가능성이 있다. 이러한 구동계가 가지는 공진 및 모드형태는 차량진동에 중요한 영향을 미치므로 본 연구에서는 파워트레인계 강체진동 부분은 모드시험을 통한 정확한 튜닝을 수행하였다⁴⁾.

실험에 의해서 측정된 파워트레인계의 국부진동모드는 1 차모드가 피치운동에 18 Hz, 2 차모드는 요운동에 25 Hz, 3 차 mode 는 38 Hz 로서 롤링모드였으며 이 값을 고려해 해석모델을 튜닝결과 1 차모드가 17.6 Hz, 2 차모드가 23.1 Hz, 3 차모드가 36.0 Hz 로서 모든 모드에 있어서 최대 오차가 6% 이내의 모델구성을 마쳤다.

엔진에서 발생한 가진 원이 마운트를 통해 차체로 전달되어 차량프레임의 유연체 모드로 응답하여 최종적으로 조향휠 및 seat 부의 진동으로 나타난다. 또한, 프레임에 대한 유연체 진동해석모델 개발은 강체모드인 파워트레인계와 달리 구조물의 정확한 형상 및 물성치 입력이 용이한 반면, 주요 프레임간의 체결방법이 용접과 bolting 에 의해서 연결되므로 해석모델에서 실차 상태와 같이 정확하게 모형화 시키어 줄 수가 없어 오차의 원인이 된다. 특히 2 톤급 차량에서 사용하는 철판 두께는 6mm 부터 100mm 까지 이며, 각각의 용접은 완전 용입, 불완전 용입 및 단속 용접을 사용하여 해석 모델 개발시 이에 대한 고려를 해야 한다. 또한 볼트를 이용한 체결에 의해서 체결부가 가지는 강성 도는 단순한 볼트의 길이방향 강성 도를 이용해서 해석모델을 구성하면 오차가 존재하여 관련 부에 대한 기여분석을 통해 적절한 형태로 모델을 만들어야 한다.

4. 진동기여분석

4.1 조향휠 진동분석

조향휠 진동은 엔진 상하방향과 롤방향의 가진력에 따른 절대비교를 할 수 없으므로 각기 평가하였다. 또한 본 연구는 운전자 관점의 운전 쾌적성을 개선하기 위한 기초연구 이므로 각각의 주파수 및 방향에 따르는 체감지수가 다르므로 주파수 및 진동방향의 가중계수를 곱한 등가 인덱스를 기준으로 상호비교평가로 사용하였다.

엔진상하방향의 가진으로 인한 조향휠 진동은 프레임 벤딩모드에 의한 진동으로 조향휠 측면방향의 진동이 가장 크며, 두번째는 오버헤드의 비틀림 모드에 의한 조향휠 측면방향진동이고, 세번째는 조향휠 전후방향진동이다.

엔진 롤방향 가진에 의한 조향휠 진동은 파워트레인공진에 의한 조향휠 좌우방향 진동과 상하방향이 각각 첫 번째와 두 번째 진동크기로 나타났다.

4.2 Seat 진동

Seat 진동역시 조향휠 진동과 같이 주파수 및 진동방향의 가중계수를 곱한 등가 인덱스를 기준으로 상호비교평가로 사용하였다. 엔진 상하방향 가진에 의한 seat 진동은 프레임 벤딩모드에 의한 seat 좌우방향 진동이 첫째고, 두 번째는 오버헤드 비틀림 진동에 의한 seat 전후 방향진동에 미치는 영향으로 비슷한 크기를 가진다. 세 번째는 프레임 벤딩모드에 의한 전후 방향의 진동으로 좌우방향진동의 약 50%정도 불쾌감을 가지고 있다.

엔진 롤방향에 의한 가진 원으로 seat 부에 발생하는 진동영향은 다른 진동에 비해 매우 낮았다.

4.3 프레임 형상기여분석 결과

지게차 구조특성상 그 기본적인 구조형태의 커다란 변화는 불가능 하다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 구조체 형태를 변경하지 않은 범위에서 주요한 구조체의 강성 및 관성 값이 변할 때 조향휠 진동과 seat 진동에 미치는 기여특성을 분석하였고, 이 결과를 추후 관심진동 모드개선을 할 때 사용하고자 하였다. 본 연구에서는 그 동안의 진동개선 경험을 이용하여 다음과 같이 3 가지 변화요인에 따르는 진동기여 특성을 분석하였다.

Case 1: 지게차 양쪽 프레임을 차량 후반부에서 연결하는 구조물의 체결 강성도

Case 2: 카운터웨이트에 대해 동일 질량을 기준으로 회전방향의 관성 값 변화.

Case 3: 지게차 양쪽 프레임과 카운터웨이트를

연결하는 프레임의 강성도 변화

프레임의 벤딩모드에 의한 조향휠 전후 및 seat 전후방향 진동은 case 1, 2 및 3 모두가 영향을 미친다. 프레임 전후 방향의 벤딩모드에 의한 조향휠부 측면 진동은 case 1 이 큰 영향을 가지며, 프레임 전후 방향에 의한 벤딩모드에 의한 조향휠 전후 및 좌우 방향 진동은 case 1 및 2 의 영향이 크다.

오버헤드의 비틀림 진동에 의한 조향휠 전후 방향 진동은 case 1 및 2 가 기여가 높고, 상하방향 진동은 case 1 의 영향이 가장 높았다. Seat 전후 방향진동은 case 1 및 2 가 가장 높다.

5. 결론

차량 설계 전 운전자 피로 및 쾌적성에 영향을 미치는 진동개선을 위한 해석 및 평가 프로세스에 대한 방법론을 검토 하였다. 모든 과정에 대한 기초적인 분석 및 정리를 위해서는 방대한 연구와 그 연구 결과를 통한 프로세스 정립 및 각 프로세스에서의 방향 설정을 해야 하나, 본 연구에서는 그 동안 단기적으로 수행해온 관련된 과제들의 결과와 축척 된 데이터를 근거로 필요한 많은 부분의 사전 연구를 제거할 수 있었다.

축척 된 data 와 평가기법이 정량적인 해석결과를 도출할 수 있을 만큼 충분하지 않기 때문에 현 단계에서는 완전한 정량적 평가에 제한 점이 있지만, 지게차 초도 설계단계에서 해석적 기법을 사용한 기초진동 저감 연구에 적용할 수 있다. 그 결과, 신규모델의 지게차 개발시 구체적인 제품목표가 정해지면 설계자들은 본 연구결과를 이용하여 제품의 기초구조형태를 설정하고, 상세설계 당시에 이러한 평가프로세스 및 방법을 이용하여 구체적인 제품의 목표설계를 수행할 수 있다.

참고 문헌

- (1) J. C. Barton, 1981, Off-road machine operator vibration measurement methods, SAE 810695.
- (2) ISO2631, Evaluation of human exposure to whole body vibration
- (3) SO8041, Human response to vibration-Measuring instrumentation.
- (4) 팽성규, G30P Frame 의 고유진동해석 모델 Tuning, 대우종합기계 내부보고서.
- (5) 김성재, D45S_2 Proto 및 Pilot 차량 진동비교 및 진동 감각 성능비교, 대우종합기계 내부보고서.