Transactions of the KSNVE, 24(2) : 102~107, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.24.2.102

한국소음진동공학회논문집 제24권 제2호, pp. 102~107, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

마운트 배치 최적화를 통한 지게차 엔진 진동 저감

Vibration Reduction of Forklift Truck Using Optimization of Engine Mount Layout

김 영 현†·김 규 태*·이 원 태*
Younghyun Kim, Kyutae Kim and Wontae Lee

(Received October 2, 2013 ; Revised January 23, 2014 ; Accepted January 23, 2014)

Key Words : Forklift Truck(지게차), Vibration(진동), Engine Mount(엔진 마운트), Layout(배치), Excel(엑셀), Program(프로그램), Optimization(최적화)

ABSTRACT

The engine excitation forces are considered as major vibration source for the forklift truck, especially in small class. Even though the current engine mounting system designs are acceptable for vibration isolation, the performance of the engine mounting system is still required for the tendency of light weight, higher power and driver's higher vibration requirement. In this paper vibration reduction technique of forklift engine which is supported on rubber mounts is presented. Based on the dynamic model of resilient engine mounting system, design evaluation program is established. The design optimization technique and evaluation method of system properties are discussed. Effects of optimal design are validated through comparison with test results.

Nomenclature

E : 모드에너지분포
I : 파워트레인 관성모멘트
K : 마운트 강성행렬
M : 파워트레인 관성행렬
k : 마운트 동강성
m : 파워트레인 질량
ϖ : 고유진동수
φ : 모드벡터

1. 서 론

지게차는 화물의 적재, 하차 등의 목적으로 사용되는 산업차량으로써 이동이 주 목적인 승용차에 비해 엔진 아이들 상태에서 사용하는 시간이 상대적으로 높다. 따라서 엔진 아이들 상태에서의 운전자 편의성에 대한 설계요구조건이 강화되고 있는 추세에 있으며, 특히 소형 지게차의 경우 운전석 시트 하부에 기진원인 엔진이 위치하여 운전석으로 진동을 전달하는 구조로써 운전석 진동 저감을 위해서는 엔진 마운팅의 효과적인 설계가 요구된다.

† Corresponding Author ; Member, HHI Construction Equipment Research Institute
E-mail : hyun@hhi.co.kr
Tel : +82-52-202-3066, Fax : +82-52-202-9645
* HHI Construction Equipment Research Institute

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

엔진의 진동 특성은 엔진의 관성 제원과 마운트의 종류 및 배치에 의해 결정되는 강체모드와 밀접한 관련이 있으며[1], 강체모드의 분리, 토크롤축(TRA, torque roll axis) 개념 등 여러 연구들이 진행되고 있다[2~5]. 또한 엔진 진동 저감을 위한 엔진 마운팅 시스템의 최적 설계에 대한 연구도 다수 진행되고 있다[6~10]. 그리고 실용적인 측면에서 엔진 마운팅 시스템에 대하여 다물체 동역학 소프트웨어 등을 사용할 경우 설계 검토에 많은 시간이 소요되므로 제품 개발 초기에 빠른 시간 내에 설계 검토가 가능한 전용의 소프트웨어를 개발하기 위한 연구도 진행되고 있다[11]. 이와 같이 엔진 마운팅 시스템의 설계에 대한 많은 연구를 통하여 관련된 이론이 많이 알려져 있으며, 이를 이용한 엔진 마운팅 시스템의 설계 검토가 가능하다. 그러나 실제 제품의 설계를 검토하는데 있어서는 재질의 물성치 등 설계 검토에 필요한 데이터의 불확실성으로 인하여 해석 결과의 신뢰성이 낮아지는 문제가 되고 있으며, 일부 연구에서는 통계학적인 접근 방법을 이용한 해결 방안을 제시하고 있다[12].

이 논문에서는 지게차 엔진 마운팅 시스템의 동특성 해석 및 설계 검토를 위한 전용 프로그램의 개발과 이를 이용한 엔진 관성, 마운트 동강성 등의 물성치 추정 및 엔진 마운팅 시스템의 설계 최적화 절차에 대해 설명하였다. 또한 개발된 프로그램을 이용하여 엔진 마운트 배치를 최적화함으로써 지게차의 엔진 진동을 개선한 내용을 설명하였다.

2. 엔진 마운팅 시스템 설계 평가

2.1 지게차 엔진 마운팅

지게차의 엔진 마운팅은 일반적으로 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 엔진과 트랜스미션으로 구성되는 파워트레인이 유니버셜 조인트를 통해서 전륜축과 연결되고 파워트레인 좌우에 전후 방향으로 각 2지점에서 마운트를 배치한다. 마운트 설계는 엔진에 작용하는 하중, 마운트 최대처짐, 엔진진동, 엔진충격거동 등의 기준을 만족하도록 진행된다. 이러한 설계 기준 중 엔진에 작용하는 하중은 파워트레인의 관성과 마운트 배치에 의해 결정되며, 나머지 항목은 강체모드와 같은 동특성에 의해 결정된다.

2.2 엔진 강체모드 관련 이론

(1) 강체모드 계산

파워트레인과 마운트를 각각 강체와 스프링으로 가정하면 6개의 강체모드가 계산된다. 강체모드 주파수와 모드형상은 엔진진동에 큰 영향을 주며 일반적으로 엔진 강체모드를 적절히 설계하면 엔진진동을 저감할 수 있다. 따라서 효과적인 설계를 위해서는 엔진 강체모드의 정확한 계산이 중요한데, 강체모드 계산에 대한 이론은 식 (1)~(4)와 같다[1].

(2) 강체모드 분리

엔진 강체모드가 서로 분리되면 한 모드의 가진에 의한 운동이 다른 모드를 가진 하지 않게 되어 엔진 진동이 감소되며 설계 측면에서도 운동이 단순해져서 진동의 이해 및 제어가 용이하게 된다. 식 (5)는 각 모드의 에너지분포를 나타낸 것으로 '1'에 가까울수록 모드의 분리 정도가 높은 것을 의미한다. 따라서 모드 에너지분포로부터 계산된 강체모드의 모드형상과 모드분리 정도를 평가할 수 있다.

$$\left|K-\omega^2 M\right|=0 \tag{1}$$

여기서 K 는 강성행렬
M 은 관성행렬
ω 는 고유진동수

$$\left|K-\omega_i^2 M\right|\varphi_i=0 \tag{2}$$

여기서 ω_i 는 i 번째 고유진동수

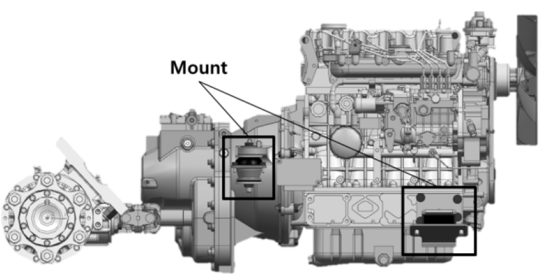


Fig. 1 A view of engine mounting layout

φ_i 는 고유모드 벡터

$$[M]=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 m 은 질량

I_{ij} 는 ij 축에 대한 질량관성모멘트

$$[K]=\begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & k_{51} & k_{61} \\ 0 & k_{22} & 0 & k_{42} & 0 & k_{62} \\ 0 & 0 & k_{33} & k_{43} & k_{53} & 0 \\ 0 & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{54} & k_{64} \\ k_{51} & 0 & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{65} \\ k_{61} & k_{62} & 0 & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

K_{ij} 는 ij 축 방향에 대한 마운트 강성

$$E_{kj}=\frac{\sum_{l=0}^{6}\left(\varphi_j\right)_k m_{kl}\left(\varphi_j\right)_l}{\sum_{k=1}^{6}\sum_{l=1}^{6}\left(\varphi_j\right)_k m_{kl}\left(\varphi_j\right)_l} \quad (5)$$

여기서 E_{kj} 는 kj 모드의 에너지분포

2.3 설계 평가 프로그램

(1) 프로그램 구성

엔진 마운팅 시스템의 설계 평가를 위해서는 엔진 강체모드에 대한 계산뿐만 아니라 엔진의 기진력에 의한 진동수준과 지면 또는 작업 충격에 의한 엔진의 충격거동에 대한 계산이 필요하다. 엔진의 진동수준은 엔진의 기진력 모델과 엔진 마운트 모델로부터 계산될 수 있고, 엔진의 충격거동은 엔진 마운트 위치에서 계측한 가속도 신호로부터 Fig. 2와 같은 방향별 충격응답스펙트럼을 구하고 이를 이용하여 엔진의 최대변위를 평가하는 방법을 이용하였다.

전체적으로 프로그램을 이용한 엔진 마운팅 시스템의 설계 검토 절차는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다.

프로그램의 구성은 마이크로소프트사의 스프레드시트 프로그램인 엑셀(Excel)을 이용하였다. 설계 검토에 필요한 엔진 마운트 시스템의 설계변수 입력 부분과 마운트 처짐, 진동, 강체모드, 충격변위 등 설계 기준에 대한 계산 결과 부분으로 구성하였다.

(2) 최적설계

설계 검토뿐만 아니라 엔진 진동저감을 위해서는 최적설계가 요구된다. 이 연구에서는 엑셀의 해찾기 모듈에 포함되어 있는 진화(evolutionary) 알고리즘을 사용하였다. 엑셀의 진화 알고리즘은 비선형 문제에 우수한 결과를 제공하며 다변수 최적화가 가능하여 엔진 마운팅 시스템처럼 여러 설계변수를 대상으로 최적화가 필요한 경우 적절하게 사용될 수 있다. 이 연구에서는 설계변수를 각 마운트의 종류, 위치 및 각도로 두고 마운트 최대처짐, 마운트 작용하중 및 모멘트, 강체모드 주파수, 강체모드 연성정도, 엔진진동, 충격거동 등을 제한조건으로 최적화를

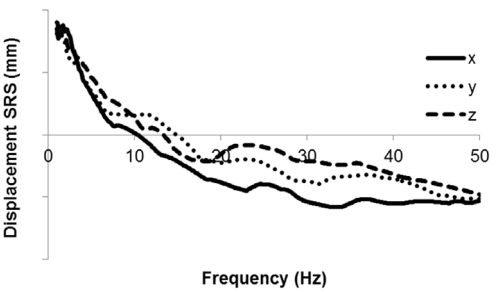


Fig. 2 Shock response spectrum

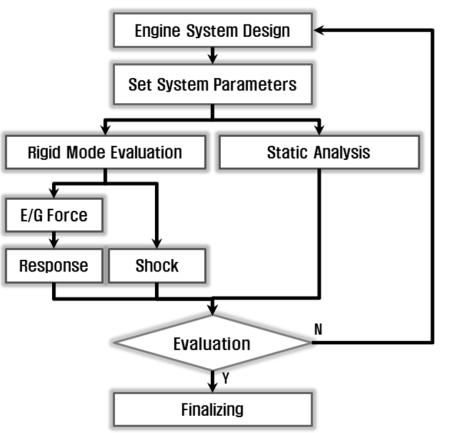


Fig. 3 Evaluation procedure of engine mount

진행하였다. 최적화 진행시의 선택사항은 수렴도 0.000001, 변이율 0.075, 모집단 크기 2000, 임의 초기값은 0을 사용하였다.

실제 설계 검토 단계에서는 파워트레인의 관성, 마운트 동강성 등 프로그램 입력 데이터의 신뢰성이 부족한 경우가 많으며, 이러한 데이터를 이용하여 설계 검토를 진행하는 경우 부정확한 해석 결과로 인하여 실제 제품을 제작한 이후에 예상과 다른 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 정확한 데이터의 입수가 중요한데, 업체로부터 얻지 못하는 경우 실제 장비를 대상으로 해석 결과와 계측 결과의 오차를 최소화함으로써 보다 신뢰성 높은 데이터 확보가 가능하다. 이에 대해서는 3장에서 다시 설명하였다.

3. 지게차 엔진 진동 저감

3.1 진동 특성 분석

(1) 진동계측

대상 장비는 3톤급 지게차로써 파워트레인 좌우에 각각 2지점씩 총 4지점에서 마운트가 하중을 지지하는 방식이며, 4기통의 기계식 엔진을 채용하고 있다. 기계식 엔진은 부하에 따라 엔진의 회전수가 낮아지는 경우가 발생하는데, 대상 장비는 아이들 회전수에서 유압시스템이 릴리프 상태가 되면 엔진 회전수가 약 200 rpm 가량 낮아지게 된다. 대상 장비의 엔진 진동은 Fig. 4에 나타낸 바와 같으며, 엔진 아이들 상태에서 유압시스템 릴리프가 되면 엔진 회전수가 약 600 rpm으로 낮아지고 이때 엔진 진동이 급격히 증가하여 설계 기준을 초과한다.

또한 엔진 충격시험을 통하여 엔진 강체모드를 확인하였으며 엔진 진동에 가장 많은 영향을 주는 롤모드 주파수는 18.8 Hz로써 유압시스템 릴리프 상태의 엔진 가진 주파수인 21 Hz와 밀접한 상태이다.

(2) 해석 모델 구축

엔진 마운팅 시스템의 데이터를 이용하여 동특성 해석 모델을 구성하였다. 부품 업체로부터 입수한 데이터의 부정확성으로 인하여 동특성 해석 모델의 해석 결과와 계측 결과의 차이가 발생하였다. 데이 터의 부정확성을 해소하기 위하여 해석과 계측의 오차를 최소화하는 최적화를 진행하였다. Figs. 5, 6은 최적화 전후의 물성치와 모드 계산 오차를 나타낸다.

(3) 동특성 분석

강체모드의 연성 정도를 확인하기 위하여 개발된 프로그램으로 파워트레인의 동특성 모델을 구성하고 모드에너지분포를 계산하였다. Fig. 7에 나타낸 모드의 에너지 분포를 살펴보면 모드의 비연성 정도가 68 %로써 개선이 필요한 상태이다.

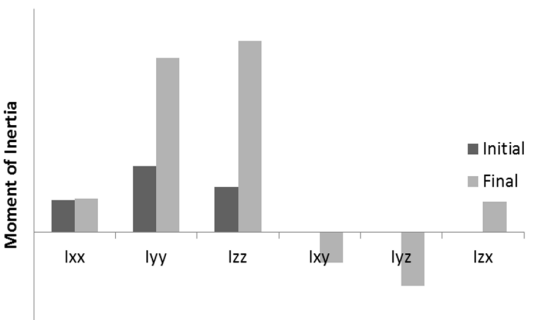


Fig. 5 Evaluation of system properties

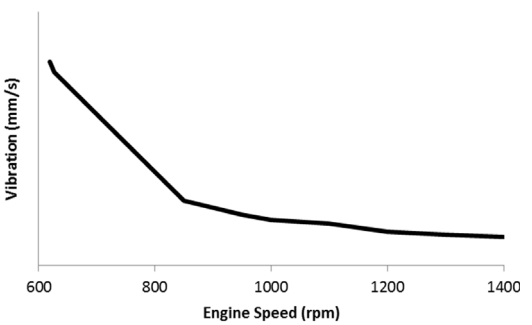


Fig. 4 Engine vibration

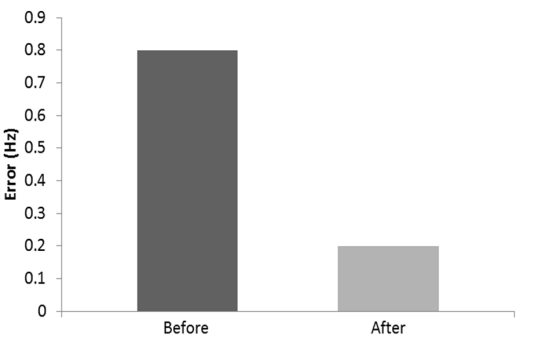


Fig. 6 Calculation error

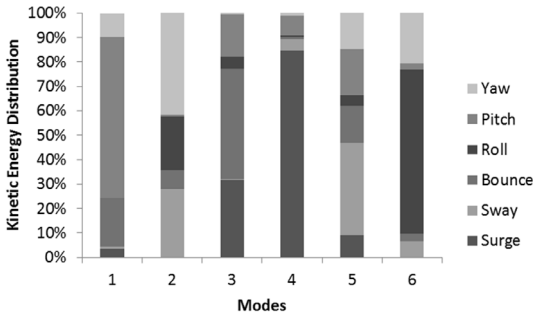


Fig. 7 Modal energy distribution of initial condition

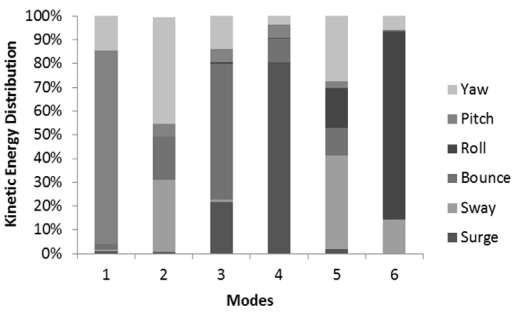


Fig. 9 Modal energy distribution of final condition

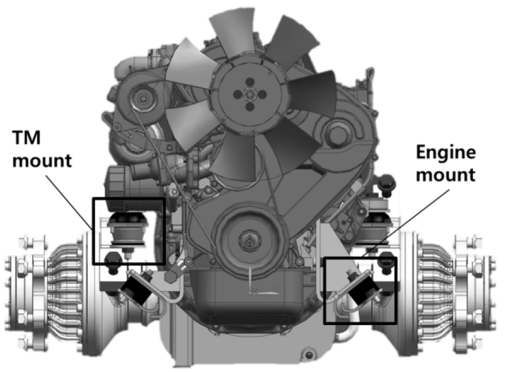


Fig. 8 Mount layout

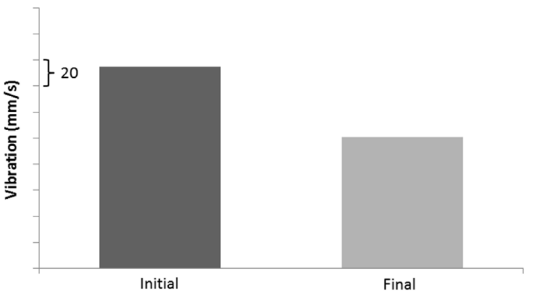


Fig. 10 Optimization result

3.2 개선안 도출

(1) 마운트 배치 최적화

대상 지게차의 엔진 마운팅 시스템은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 엔진 좌우에 경사형 마운트가 적용되고 TM 좌우에 수직형 마운트가 적용되어 있다.

동특성을 변경하기 위해서는 마운트의 동강성 또는 배치를 변경해야 하는데, 기본적인 설계 방향이 엔진 강체모드를 낮추는 것이므로 가급적 마운트의 동강성이 작은 것을 사용해야 한다. 그러나 현재 적용된 마운트의 동강성이 사용 가능한 마운트 중에서 가장 작아서 마운트의 종류는 변경하지 않기로 하였다. 또한 TM 마운트는 프레임과의 연결 문제로 인하여 위치도 변경하기 어려운 상황이었다. 따라서 엔진 마운트의 위치와 각도를 설계 변수로 두고 최적화를 진행하였다.

마운트 작용하중 등 기본적으로 만족해야 할 항목이외에 엔진 마운트 위치와 각도를 현실적으로 적용 가능한 범위로 제한조건을 설정하고 엔진 진동, 롤모드 주파수 및 비연성 정도를 최소화 하는 방향으로 최적화를 수행하였다. 개선안의 강체모드를 살펴보면 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 롤 모드의 비연성 정도가 79 %로 높아진 것을 알 수 있다.

(2) 개선안 효과 검증

엔진 마운트 배치 최적화를 통해 도출된 개선안의실차 적용 결과는 Fig. 10에 나타낸 바와 같다. 개선 전과 비교하여 엔진 진동이 약 30 % 감소된 것을 알 수 있다.

4. 결 론

엔진 지게차의 진동 저감을 위해 엔진 마운팅 시스템의 설계 평가를 위한 전용 프로그램을 엔진 동특성 해석 이론을 기반으로 개발하였다. 엑셀 프로그램을 기반으로 제작되어 해 찾기 기능을 활용한 다목적 최적화가 가능하여 엔진 마운팅 시스템의 설계 기준에 대한 평가뿐만 아니라 설계 개선에 필요한 최적화가 가능하다.

개발된 프로그램을 이용하여 3톤급 지게차의 엔진 진동 저감을 위해 동특성을 분석하고 개선안을

도출하였다. 개선 적용 결과 기존 설계와 비교하여 엔진 진동이 30 % 정도 감소됨을 확인하였다.

References

(1) Harris, C. M. and Piersol, A. G., 2002, Harris' Shock and Vibratino Handbook, McGraw-Hill.

(2) Jeong, T. S. and Singh, R., 2000, Analytical Methods of Decoupling the Automotive Engine Torque Roll Axis, Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, no. 1, pp. 85~114.

(3) Wamsler, M. and Rose, T., 1998, Advanced Mode Shape Identification Method for Automotive Application via Modal Kinetic Energy Plots Assisted by Numerous Printed Outputs, MSC Americas Users' Conference.

(4) Alzahabi, B., Mazzei, A. and Natarajan, L. K., 2003, Investigation of Powertrain Rigid Body Modes, Conference & Exposition on Stural Dynamics

(5) Alzahabi, B. and Nashef, S., 2004, Parametric Study of Engine Rigid Body Modes, Conference on Structural Dynamics.

(6) Kang, K.-T. and Won, K.-M., 2001, Optimal Design of Vehicle Engine Mount, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 361~368.

(7) Song, Y.-C., Lee, D.-W., Son, Y.-K. and Um, T.-U., 2009, Vibration Reduction of Forklift at Idle Using Engine Mount Shape Optimization, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 436~437.

(8) Fu, J.-H., Shi, W.-K., Teng, T. and Liu, Z.-B., 2009, Optimization of Automotive Powertrain Mounting System Based on Adaptive Genetic Algorithm, International Symposium on Intelligent Information Technology Application, pp. 347~350.

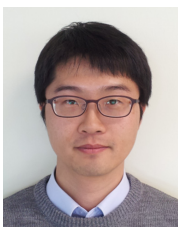
(9) Wu, J, 2011, Optimization Method for Powertrain Mounting Systems with Uncertain Parameters, Journal of Automobile Engineering, pp. 147~157.

(10) Shi, W.-K., Fu, J.-H., Ya, H. and Teng, T., 2009, Multi-objective Optimization of Powertrain Mounting Based on MATLAB, Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications, pp. 484~487.

(11) Park, U.-H. and Song, Y.-C., 2010, The Development of Software for Vehicle Engine Mounting System Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 20, No. 4, pp. 348~354.

(12) Jung, J. Y., 2009, Reliability Based Design Optimization for the Improvement of Engine Mount Vibration Performance, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 430~435.

Younghyun Kim received his B.S. and M.S. degree in the Department of Mechanical Engineering from Pusan National University in Korea. Currently he is a Head Researcher at the Construction Research Institute of Hyundai Heavy Industries. His research interests are noise and vibration prediction of construction equipment.



Kyutae Kim received his M.S. and Ph.D. degree in the School of Mechanical and Aerospace from Seoul National University in Korea. Currently he is a Chief Research Engineer at the Construction Research Institute of Hyundai Heavy Industries. His research focuses on the investigation of cause-effect-relation for noise-vibration in different structures of construction equipment.

Wontae Lee received his B.S. and M.S. degree in the Department of Mechanical Engineering from Pusan National University in Korea. Currently he is a Researcher at the Construction Research Institute of Hyundai Heavy Industries. His research interests are structural vibration and vibration isolation for construction equipment.