한국소음진동공학회 2009년 추계학술대회논문집, pp.421~426

Maskless 방식을 이용한 PCB 생산시스템의 진동 해석

VIBRATION ANALYSIS OF PCB MANUFACTURING SYSTEM USING MASKLESS EXPOSURE METHOD

장원혁* · 이재문* · 조명우* · 김종수** · 이철희†

Won-Hyuk Jang, Jae-Mun Lee, Myeong-Woo Cho, Joung-Su Kim and Chul-Hee Lee

Key Words : Vibration Analysis(진동 해석), Modal Analysis(고유진동 해석), Maskless exposure(마스크리스 노광), Modal characteristic(고유진동 특성), PCB Manufacturing(인쇄회로기판 제조), FEM(유한요소해석)

ABSTRACT

This paper presents vibration analysis of maskless exposure module in Printed Circuit Board (PCB) manufacturing system. In order to complete exposure process in PCB, masking type module has been widely used in electronics industries. However, masking process confronts some limitations of application due to higher production cost for masking as well as lower printing resolution. Therefore, maskless exposure module is started to be in the spotlight for flexible production system to meet the needs of fabrication in variable patterns at low cost. Since maskless exposure process adopts direct patterning to PCB, vibration problems become more critical compared to conventional masking type process. Moreover, movements of exposure engine as well as stage generate vibration sources in the system. Thus, it is imperative to analyze the vibration characteristics for the maskless exposure module to improve the quality and accuracy of PCB. In this study, vibration analysis using the Finite Element Analysis is conducted to identify the critical structural parts deteriorating vibration performance. Also, Experimental investigations are conducted by single/dual encoder measurement process under the operating module speed. Measurement points of vibration are selected by three places, which are base of stage, exposure engine and top of stage, to check the effect of vibration from the exposure engine. Comparisons between analysis results and experimental measurement are conducted to confirm the accuracy of analysis results including the developed FE model. Finally, this studies show feasibility of optimal design using the developed FE analysis model.

1. 서 론

전자공학에서 인쇄 회로기판 혹은, PCB(Printed Circuit Board)는 기계적 지원에 사용되고 동기판에서 전도선이나 신호 선을 사용하여 전기적으로 전자부품을 연결하는 기본적인 부품이다. 이러한 인쇄회로기판은 견고함, 저렴한 가격 그리고 높은 신뢰성이 요구된다. 기존의 PCB 는 마스크(Mask)를 이용한 사진식각 방식을 사용하여 생산하였다. 하지만 마스크를 이용한 PCB 생산 방식은 여러 한계점을 가지고 있다. 특히 마스크를 교체할 때 발생하는 비용 및 긴 지연시간 그리고 마스크의 유지, 보수 및 관리비용 등이 문제시 되고 있다. 또한 최근에 반도체 산업의 발전 추이가 여러 분야로 확대되어가는 전환기에 진입하여 디지털 기기의 향상되는 성능을 충족시키기 위해서는 패턴(Pattern)의 대폭적인 성능 개선이 이루어져야 하는 불가피한 상황에 직면하게 되었고, 따라서 이렇게 높은 기술적 난이도의 요구 상황에 적극적으로 대응하기 위해서는 패턴의 초미세 회로 선폭을 구현해 주기 위한 새로운 방식의 패터닝 기술 개발이 대두 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Maskless LDI(Laser Direct Imagining) 직접 패터닝 기술이 개발되었다. LDI 직접 패터닝 기술은 기존의 회로제작 기술이 가지는 경제적, 기술적 한계를 극복할 수 있는 기술로서 혁신적으로 단순화된 공정 단계로 인하여 기존의 마스크를 사용한 패터닝 기술에 비하여 매우 적은 비용으로 회로 패턴을 구현할 수 있으며, 기존 기술로 대응이 어려운 미세 패턴 이미지를 구현할 수 있어 미래 신 사업 분야의 선도적 기술 및 가격 경쟁력을 확보하기 위한 핵심 기술이다.

Fig.1 에서 LDI 방식의 직접 패터닝 시스템에 대해 묘사하고 있는데, LDI 는 전자기판에 마스크 없이 직접적으로 UV 레이저를 비춰 줌으로서 패턴을 구현한다. 이러한 직접 패터닝 시스템은 기구학, 광학, 전자기학 등에서 높은 수준의 기술을 요구한다. 특히 LDI 방식의 직접 패터닝 시스템은 내• 외부에서 발생하는 진동으로 인해 부정확한 패턴이 발생 할 수 있다. 그러므로 정확한 패턴의 구현을 위해 진동 감쇠에 대한 높은 수준의 기술이 필요하다. 본 논문

† 교신저자; 인하대학교 기계공학과
E-mail : chulhee@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7311, Fax : (032) 860-0000
* 인하대학교 기계공학과
** ㈜프로텍

에서는 LDI 시스템에서 발생하는 진동의 감쇠를 목적으로 유한요소 해석을 통하여 진동 특성에 대해 분석을 하고 진동 감쇠를 위한 최적 설계를 제안한다.

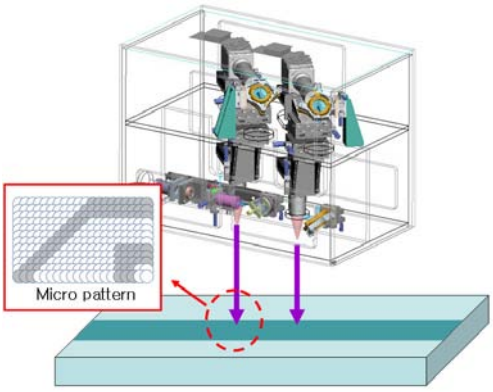


Fig.1 Maskless type exposure module

2. 실험 테스트 결과

LDI(Laser Direct Imaging) 시스템은 Fig.2 와 같이 크게 챔버, 스테이지, 석정반으로 구성된다. 중앙의 석정반 위에 X, Y 방향으로 이동 가능한 스테이지가 위치되어 있고 스테이지와 챔버는 양쪽 끝 단에 볼트로 부착되어 있다. 이러한 구조를 고려하여 LDI(Laser Direct Imaging) 시스템의 동적 특성에 대한 연구를 위해 실질적인 실험을 수행 하였다.

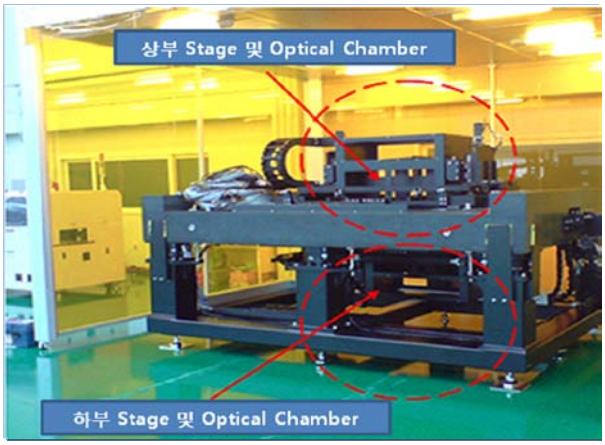


Fig.2 Structure of LDI system

진동 측정을 위해 측정 위치 선정 후 가속도 센서를 이용하여 실험을 수행하였다. 측정 위치는 Fig.3 과 같이 LDI 시스템의 상부 스테이지, 노광엔진 끝단 그리고 석정반 Base 이다. 그 후, Fig.4 와 같이 가속도응답에 대한 측정과 FFT(Fast Fourier Transform)를 통하여 주파수응답을 구하였다.

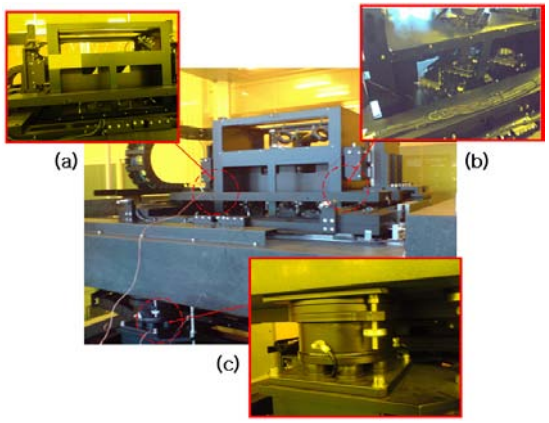


Fig.3 Monitoring points in experimental tests: (a) Linear Stage, (b) Exposure engine, (c) Base plate

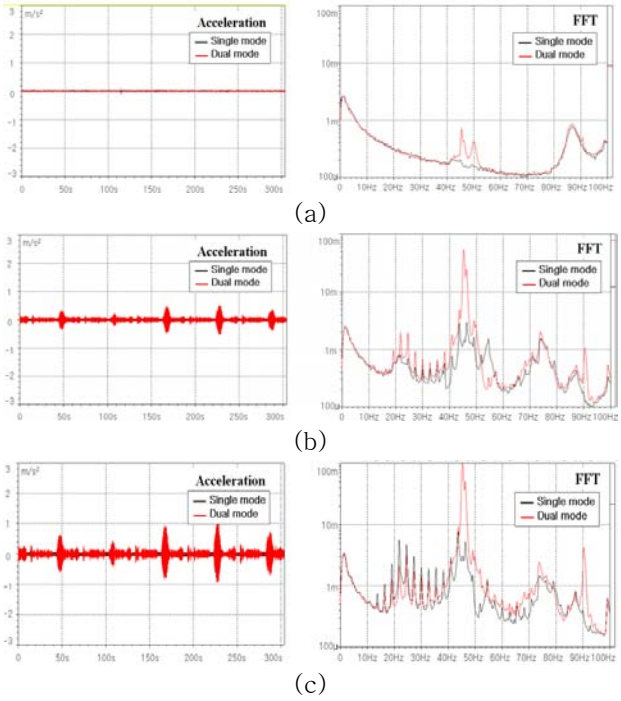


Fig.4 Results of experimental test: (a) Base plate, (b) Linear stage, (c) Exposure engine

Fig.4 에서 검은색 실선은 싱글 모드에서의 실험결과이고 붉은 실선은 듀얼 모드에서 실험결과이다. 스테이지는 X, Y 로 움직이도록 각각 2 개씩의 리니어 모터가 설치되어 있다. Fig.5 에서 보이는 것과 같이 싱글모드는 하나의 리니어 모터만을 구동하여 스테이지를 동작 시킨 것이고 듀얼 모드는 2 개의 리니어 모터를 구동하여 스테이지를 동작 시킨 것이다. 실험결과 듀얼모드가 싱글모드보다 속도는 빠르지만 진동의 크기가 큼을 알 수 있다.

진동 문제를 규명하기 위해 실험 모드해석(EMA: Experimental Modal Analysis)을 수행하였다. 실험

모드해석은 실험 결과의 데이터를 이용한 기계시스템의 기본적인 실험 모델링 절차이다. 특히 실험모드해석을 통하여 고유진동, 모드형상 등으로 구성된 모달 모델을 만들 수 있다. Fig.4 에서 노광엔진의 결과를 보면 수 많은 공진이 있는 것을 볼 수 있다. 또한 스테이지에서도 비슷한 결과를 보여주고 있는데, 이것은 노광엔진의 공진이 스테이지로부터 발생하여 챔버를 통해 전달 된 것임을 알 수 있다. 그러므로 스테이지와 챔버는 시스템의 진동 감쇠를 위한 주요 최적화 목표물임을 알 수 있다. Fig.4 (c)의 FFT 해석에서 45Hz 와 82Hz 의 주파수에서 큰 공진이 일어남을 알 수 있는데 이것은 주로 노광엔진 파트의 움직임에 의해 야기된 것임을 알 수 있다. 또한 Fig.4 (a)에서 1.4Hz 부근에 공진이 발생함을 알 수 있는데, 이것은 테이블의 Air Isolator 로 인해 발생 된 것으로 예상한다.

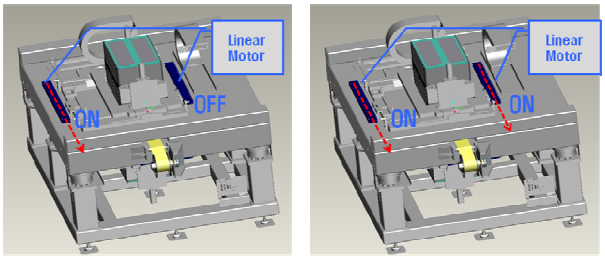


Fig.5 Drive method of LDI system

3. 유한요소해석

3.1 LDI 시스템의 3D 모델

LDI 시스템은 노광엔진, 리니어 스테이지, 롤러, 석정반 등과 같은 여러 개의 솔리드 파트들로 구성되어 있다. 이러한 LDI 시스템의 각 파트들은 3D 모델링 툴을 이용하여 모델링 되었다. 모델은 총 19 개의 어셈블 파트로 자세히 표현되었으며 다수의 볼트, 너트 등의 체결 부품도 포함되어있다.

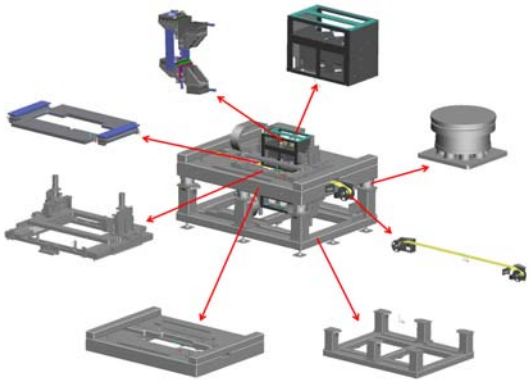


Fig.6 Geometry models of major components in LDI system

3.2 유한요소 모델

유한요소 해석(Finite Element Analysis)에서 유한요소 모델은 유한요소해석의 결과에 대해 직접적인 영향을 야기한다. 그러므로 확실한 유한요소 모델의 개발은 매우 중요하다. LDI 시스템의 유한요소 모델을 위해서 3D 모델의 물성에 따라 FE 모델링을 한다. FE 모델링 시 기본적으로 플레이트 파트는 쿼드(Quad) 쉘 메쉬(Mesh)로 표현하고 솔리드 파트는 테트라(Tetra) 메쉬로 표현한다. FE 모델의 요소(Element)에 대한 세부적인 사항은 Table.1 에 나타내었다.

Table.1 Element specifications for the FE model

Component	Geometry type	No. of node	No. of element	Element type
Base plate	Solid	112146	529896	TETRA
Linear stage	Solid	54619	175715	TETRA
Fixing device	Solid	5193	14321	TETRA
Support	Plate	39848	39989	QUAD
Chamber	Plate	11670	11035	QUAD
Roller	Plate	3826	9342	QUAD
Aluminum plate	Plate	978	857	QUAD
Air isolator /Bolts	-	1906	24	CELAS1 / RBE2

Fig.7 은 LDI 시스템의 부품에 대한 FE 모델과 조립 모델에 대해 나타내었다. 부품들을 조립 시 RBE2 요소를 이용하여 부품간의 체결을 표현하였고 CELAS1 을 이용하여 Isolator 를 표현하였다. 부품들 대부분의 물성은 알루미늄으로 하였고 석정반은 화강암으로 하였다.

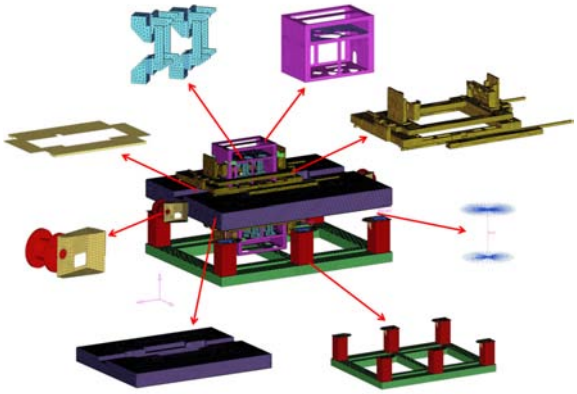


Fig.7 Finite element models of components in LDI system

시험적 모드해석 결과와 FEM 을 이용한 해석적 모드 결과는 MAC(Modal Assurance Criterion)이라는 해석을 통해 검증하였다. MAC 해석은 진동 시스템의 고유 벡터의 일치성을 평가하는 방법이다. 시험적 모드해석결과의 벡터와 해석적 모드 해석 결과의 고유벡터의 일치성을 평가하는 방법으로서 두 벡터 사이의 자유도 요소의 성분을 이용한다. 만약 두 고유 벡터가 같은 방향인 경우는 MAC 값이 1 이 되고 두 벡터가 직교한다면 MAC 값은 0 이 된다. 두 개의 벡터로부터 MAC 값을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$MAC_{i,j} = \frac{[\{\Phi_{Test}\}_i^T \{\Phi_{FEM}\}]^2}{[\{\Phi_{Test}\}_i^T \{\Phi_{Ttest}\}] \cdot [\{\Phi_{FEM}\}_i^T \{\Phi_{FEM}\}]} \quad (1)$$

여기서, Φ 는 진동 시스템의 각 공진 주파수 대역에서의 모드 형상을 나타내는 고유 벡터이다. 특히, Φ_{Test} 는 실험에 의한 고유 벡터이고 Φ_{FEM} 는 유한요소해석에 의한 고유 벡터이다. Fig.8 은 시험적 모드해석 결과와 유한요소해석의 결과를 이용하여 얻어진 MAC 의 결과에 대해 나타낸 것이다. MAC 값은 각각의 모드에서 평균적으로 0.8 이상 나왔고 이것은 실제적인 LDI 시스템의 진동특성을 유한요소해석을 통하여 나타내도 된다는 것을 의미한다.

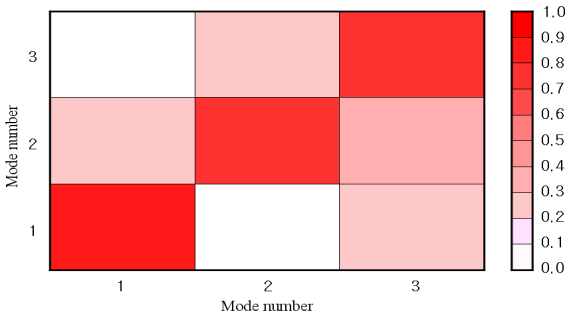
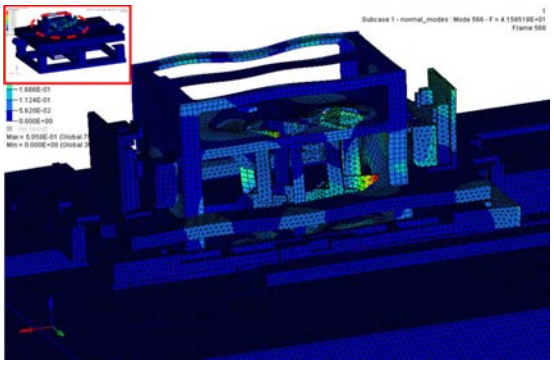
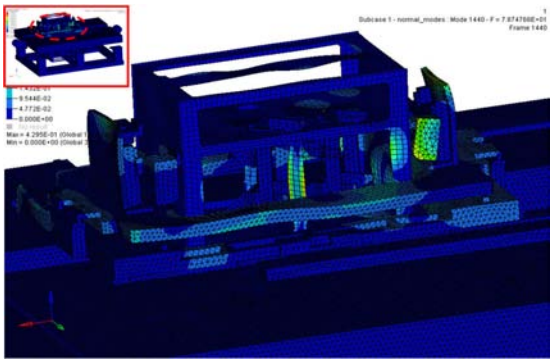


Fig.8 Result of MAC obtained using EMA and FEA results



(a)



(b)

Fig.9 Result of modal analysis from FEA: (a) 1^{st} mode shape, (b) 2^{nd} mode shape

Fig.9 는 유한요소 해석을 이용한 모달 해석의 결과로서 노광엔진 파트와 리니어 스테이지의 1^{st}, 2^{nd} 모드 형상을 나타낸 것이다.

4. LID 시스템의 최적화

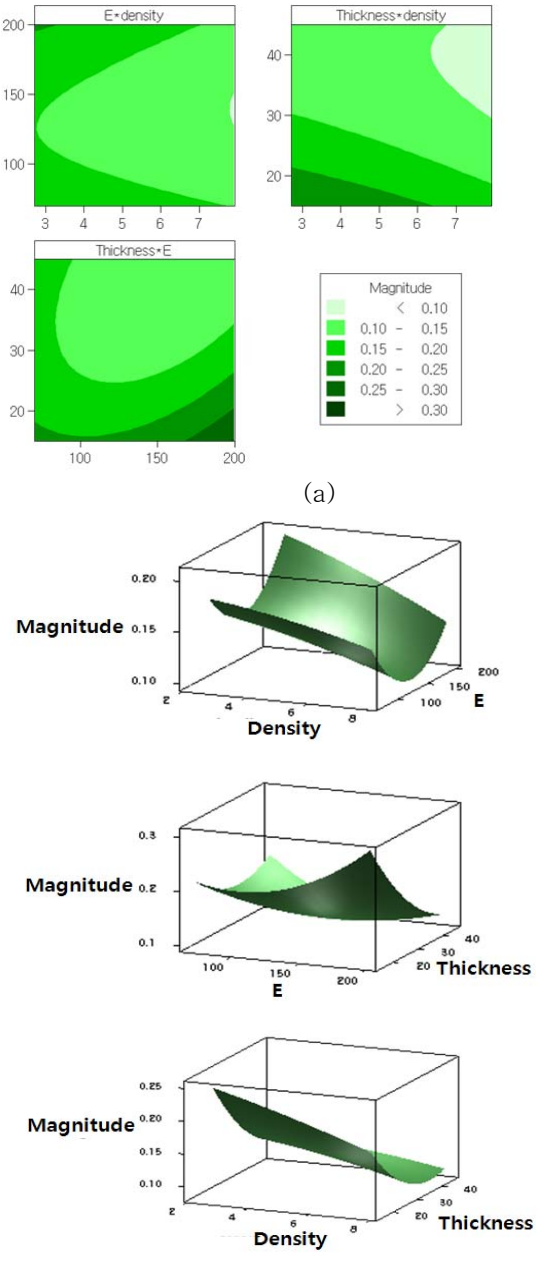
LDI 시스템의 노광 엔진 끝 단에서 발생하는 진동의 감쇠를 위해 우선 여러 설계 변수를 선정하였다. 먼저 진동 특성의 향상을 위한 중요 설계변수로 스테이지의 물성, 스테이지의 구조 형상, 스테이지와 챔버의 체결 형태 및 범위, 챔버의 구조형상, 챔버의 물성, 챔버의 두께 등이 있다. 본 논문에서는 이 설계 변수 중 노광엔진과 직접적으로 연결되어 있는 챔버의 물성과 챔버의 두께를 주요 설계변수로 선택하였다. 챔버의 물성은 밀도와 탄성계수 2 가지 인자를 채택하였다. Table.2 는 챔버의 밀도, 탄성계수, 두께에 대해 각 요인의 수준에 따른 값을 나타내고 있다. 탄성계수와 밀도의 수준은 일반적인 철과 알루미늄 등의 물성을 포함한 금속재료의 물성 범위이고 두께의 수준은 챔버 내부의 노광엔진을 고려하여 적용 가능한 범위를 나타내었다.

Table.2 Response surface design level

Level	Density (Mg/m^3)	Young's Modulus(GPa)	Thickness (mm)
(-1)Low	2.71	70	15
(0)Medium	5.315	135	30
(+1)High	7.92	200	45

선택한 설계 변수와 각 요인의 수준을 적용하여 실험계획법(DOE: Design of Experimental)을 수행하였다. 실험계획법 중에 반응표면분석법(RSM: Response Surface Methodology)을 사용하여 Fig.10 과 같이 진동의 크기에 대해 적절한 통계적

모형을 반응표면으로 나타내었다. 여러 인자에 따른 여러 조건에서 해석을 수행하여 데이터를 얻은 후에 회귀분석을 통하여 반응 표면을 추정 한 것이다. Fig.10 의 (a)는 챔버의 여러 조건에 대한 LDI 시스템 노광엔진 끝 단에서의 진동 크기(Magnitude)에 대해 등고선의 형태로 나타낸 것이고, (b)는 3 차원 표면의 형태로 나타낸 것이다. (a)의 등고선에서 색깔이 옅을수록 진동의 크기가 적어짐을 알 수 있다. 또한 (b)의 3 차원 표면도에서 계곡의 모양이므로 변곡점이 진동의 크기가 최저임을 알 수 있다.



(a)

(b)

Fig.10 Response surface result: (a) Contour plot of magnitude, (b) Surface plot of magnitude

반응표면의 결과, 진동의 크기가 낮은 영역의 물성은 대략 스틸의 물성과 유사했고 두께는 설정된 설계변수의 수준 범위 내에서 대략 30~45mm 사이의 두께에서 진동의 크기가 작음을 알 수 있었다. 아래의 Fig.11 은 본래 챔버의 물성과 두께를 가진 LDI 시스템과 철의 물성, 30mm 의 두께를 가진 챔버의 LDI 시스템과의 진동 크기를 비교한 것이다.

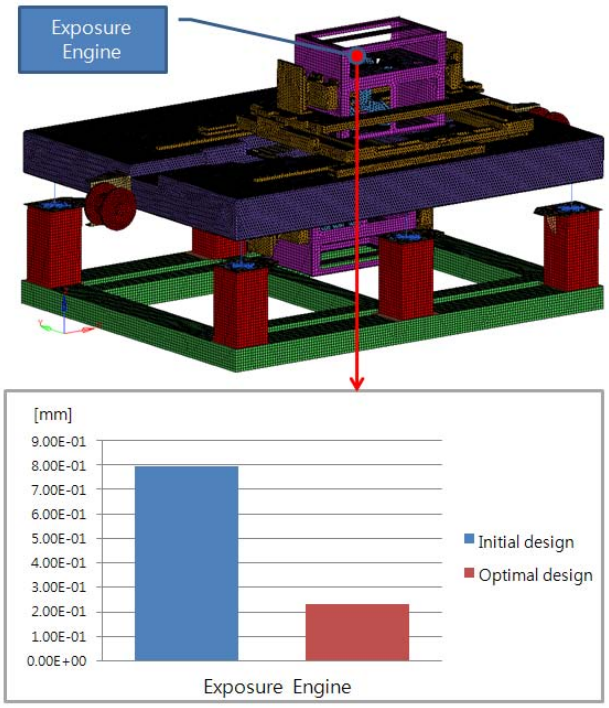


Fig.11 Improvement of vibration characteristics in LDI system via optimization

5. 결론

본 연구는 복잡한 구조물인 LDI 시스템에 대하여 FE 해석을 통해 구조물의 최적화가 가능하다는 것을 나타내고 있다. 우선 FE 모델의 정확성을 검증하기 위해 실제의 실험과 MAC 해석을 사용하였다. 그리고 LDI 시스템의 챔버에 대해 설계변수를 선정하고 실험계획법과 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 특정 챔버의 물성 및 두께의 변화를 통해서 진동 감쇠의 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 최적화를 통해 다른 컴포넌트에 대해서도 최적화가 가능함을 예측할 수 있다. 특히 리니어 모터에서 발생하는 진원은 스테이지에서 체결된 부위를 통해 챔버에 전달이 되는데 이러한 점을 고려하여 스테이지의 물성이나 형상 등의 변화와 챔버와 스테이지 사이의 체결 형태 등을 변화시켜 진동감쇠를 위한 최적화가 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

(1) D.J Ewins, 2000, Model testing-theory, practice and application, Research Studies Press LTD.

(2) S.J. Kim and S.K. Lee, 2008, " Excitation Force Analysis of a Powertrain Based on CAE Technology", Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol.25, No.12, pp.107-116

(3) R.J. Allemng, 2003, The Modal Assurance Criterion-Twenty years of Use and Abuse, Sound and Vibration, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio

(4) F.M. Shuaeib, A.M.S. Hamouda, S.V. Wong, R.S. Radin Umar and M.M.H. Megat Ahmed, 2007, " A New Motorcycle Helmet Liner Material: The finite element simulation and design of experiment optimization", Materials and Design 28, pp.182-195