

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.4.415>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

수평 및 수직 착자에 대한 햅틱 진동자의 진동특성에 관한 연구

고동신* · 허덕재**† · 박태원* · 이재혁*** · 이성수****

* 아주대학교 기계공학과, ** 아주대학교 시스템공학과, ***고등기술연구원, ****크레신(주)

A Study of the Vibration Characteristics of a Haptic Vibrator for Horizontal and Vertical Magnetization

Dong Shin Ko*, Deog Jae Hur**†, Tae Won Park*, Jai Hyuk Lee*** and Sung Su Lee****

* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.,

** Dept. of System Engineering, Ajou Univ.,

*** Dept. of Mechatronics Team, Institute for Advanced Engineering.,

**** Dept. of Acoustic R&BD Lab, Cresyn Co., Ltd.,

(Received September 17, 2014 ; Revised January 22, 2015 ; Accepted January 27, 2015)

Key Words: Haptic Vibrator(햅틱 진동자), Horizontal Magnetization(수평자화), Vertical Magnetization(수직자화), Magnet Field(전자기장), Vibration Analysis(진동해석)

초록: 본 연구는 햅틱 진동자의 개발과정에 있어 성능인자의 단계별 설정절차와 성능 및 소형화를 위한 자석의 착자방법에 대한 연구를 수행하였다. 착자방법에 대한 연구는 수평착자와 수직착자의 구성방법에 따른 전자기력을 비교분석하여 수행하였으며, 수행결과 수평착자가 우수한 것으로 나타났다. 시스템적 설계 절차로는 제품의 특성으로부터 설계 인자를 설정하는 단계적 절차를 구성하여 시작품을 제작하고 시험을 통하여 검증하였다. 해석적 방법에서는 진동응답 특성 해석과 전기장의 해석을 독립적으로 수행하였으며, 시험결과와의 검증을 통해 잘 일치하는 결과를 도출하였다. 제품신뢰성 확보를 위한 신뢰성 기반 설계인자는 스프링 높이, 용접 위치, 코일의 위치로 선정하였다. 그리고 설계 인자에 따른 전자기장 민감도 및 성능 변화를 분석하였고 이를 바탕으로 신뢰성 기반의 고성능 햅틱 진동자를 구현할 수 있도록 설계방법을 제시하였다.

Abstract: This paper describes the study of the design procedure for the step-by-step setup parameters and of the magnetizing method for performance and size reduction in the development of a haptic vibrator. The study of magnetization was accomplished by comparing the electromagnetic force in accordance with the horizontal and the vertical magnetization. The theoretical results indicated that the horizontal magnetization resulted in a better performance. The systematic design of a step-by-step procedure for establishing the design parameters was verified by testing the characteristics of the fabricated prototype product. The vibration response function analysis and electric field analysis were processed by decoupling of the analytical method, and these were determined to be in good agreement with the test results. The design parameters to contributing to the product reliability included the spring height, the welding position, and the coil position. The sensitivity of the electromagnetic field and the performance change were analyzed based on the design parameters. As a result, we proposed a design method to implement a reliability-based, high performance haptic vibrator.

- 기호설명 -

H : 자기장도
J : 전류밀도

B : 자기선속밀도
 μ : 투자율
i : 전류
l : 코일의 길이
A : 단면적
F : 자기력

† Corresponding Author, djhur@iae.re.kr

1. 서론

현재 우리 주변에는 넷북, 스마트폰, 스마트패드와 같은 소형 모바일 전자기기 제품들이 새로운 IT 환경을 구성하고 있다. 특히 모바일제품 분야에서는 국내 기업들이 세계시장에서 선도 기업의 위치를 차지하고 있고, 시장 점유율이 매우 높은 품목이다. 이러한 기기들은 디지털 기술 및 무선 인터넷의 발전으로 여러 기능의 복합된 멀티미디어 엔터테인먼트 기능을 지닌 형태로 변화해 가고 있다. 또한 이중 공통적인 기술로 감성적 품질을 요구하고 있다. 이러한 추세에 따라 소비자의 오감을 자극하는 시각, 청각, 촉각의 감성 솔루션들의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 청각을 자극하는 이어폰 및 헤드셋의 경우 통화 및 멀티미디어 기능을 위한 최적의 음향 솔루션으로 중요도가 크게 증가하여 품질의 고사양화 및 고급화가 진행되고 있다. 또한 진동에 대한 연구는 리니어 모터를 사용한 진동 발생용 진동자의 연구가 진행되고 있으며, 소형화 및 고성능화를 추구하고 있다. 리니어 모터 진동자의 착자는 현재 수직착자에 의해 개발 연구되고 있으며, 수평착자에 대한 연구는 현재 없는 것으로 나타나고 있다. 그러나 선도기업에서는 PCB 및 배선구조의 용이성으로 인해 신뢰성 및 성능향상이 가능하고 소형화 구현이 가능하기 때문에 수평착자에 의한 진동자 특허를 확보하고 이에 대한 연구를 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 진동자의 광대역 및 고성능을 구현하기 위해 수평착자에 의한 진동자 개발과정의 시스템엔지니어링 중 진동특성에 대한 연구를 진행하였다. 즉, 초기 파라미터의 설정을 위한 해석 예측으로 부터 제품의 실험적 검증을 수행하는 것, 그리고 제품 신뢰성 확보를 위한 신뢰성 기반 설계 기술에 대한 연구 내용을 기술하였다.

2. 본론

본문에서는 햅틱 진동자의 개발을 위한 내용으로 원리와 전자기장, 진동 해석, 시험 및 검증에 대한 내용을 기술한다.

2.1 햅틱 진동자의 구조 및 원리

햅틱 진동자(Fig. 1)는 크게 진동체(Vibrator Assembly), 자기력 조립체(Magnetic Assembly), 하우징조립체(Housing Assembly), 감쇠기(Damping Assembly)로

구성되어 있다. 진동체는 스프링과 질량으로 구성되어 있으며, 코일(Coil)로부터 유도된 AC 전자기력을 운동에너지로 변환시키는 역할을 한다. 스프링은 질량과 결합되어 있고 외부 프레임과 연결되는 부분 사이에 탄성변형을 일으켜 위치에너지를 진동 전달을 하는 기능을 한다. 자기력 조립체는 자석, 코일, 폴피스(Pole Piece), FPCB로 구성되어 있으며 전자기력을 발생시킨다. 하우징 조립체는 진동체 및 자기력 조립체, 감쇠기를 외부요인으로부터 부품을 보호하는 상부 및 하부 케이스로 구성되어 있다. 감쇠기는 상하운동 시 스톱퍼(Stopper) 기능과 사용 주파수 대역폭을 결정하는 요소이며 충격을 완충하는 역할을 한다. 햅틱 진동자의 자석은 수직 착자 및 수평 착자를 할 수 있다. 기존의 연구들은 수직 착자 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 수평 착자기술을 적용하고 있기 때문에 Fig. 2와 같이 극이 수평으로 형성되어 있다. 코일에 교류전류를 인가하면 자기장이 형성 되고 폴피스가 N/S극으로 극성을 갖게 되면서 수평 착자된 자석을 밀고 당기면서 상하로 운동을 한다.

2.2 햅틱 진동자의 전자기장 해석

햅틱 진동자의 진동 가진력에 대한 해석을 위해서는 인가된 전압에 대한 전자기력을 추출하여야 한다. 전자기력은 조립체의 평균 자속밀도로부터 식 (6)을 사용하여 계산할 수 있다. 본 논문에서는 제시된 평균자속밀도에 대한 전자기장 해

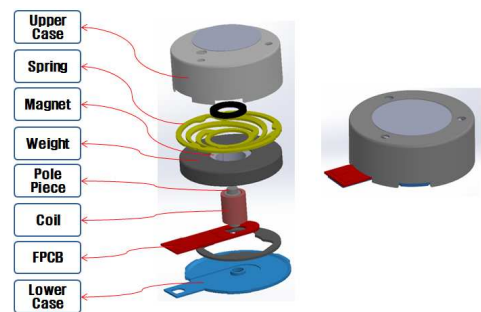


Fig. 1 Structure of haptic vibrator

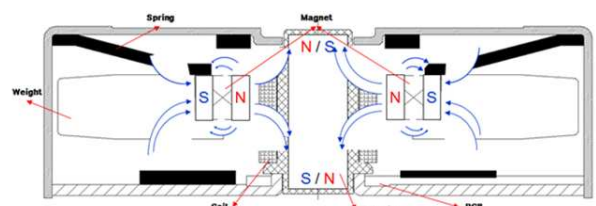


Fig. 2 Principle of AC vibrator

석방법^(5,6)을 참고하여 활용하였으며 기본적인 인자에 대한 구성도는 Fig. 3에 나타냈다. 또한 자기력 해석에 필요한 인자는 코일의 내경, 코일의 외경, 원주길이, 코일의 총길이, 코일선의 저항, 인가전압, 자석의 자기력 등으로 나타낼 수 있으며, 각각의 정보는 아래의 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

평균자속밀도를 구하기 위한 전자기장 해석모델로 Fig. 3과 같이 원주방향 대칭을 적용하여 2D 전자기장 해석모델을 사용하였으며, 경계조건으로는 위치에 따라 Drichlet boundary condition 과 Neumann boundary condition을 적용되기 때문에 두 가지의 경계조건을 모두 정의할 수 있는 Robin(Mixed Boundary Condition)조건을 적용하여 해석하였다.

전자기장 해석은 기존의 수직착자와 수평착자의 성능을 비교하기 위하여 같은 구성도 안에서 코일의 위치에 따른 해석을 수행하여 비교하였다. 해석결과는 Fig. 3, 4에 나타냈으며, 평균자속밀도는 수평착자의 경우 0.1334T로 계산되었고 수직착자는 0.0208T로 나타났다.

여기서, 평균자속밀도는 맥스웰(Maxwell) 방정식에서 주어지는 식 (1)~식 (4)를 통해 정의할 수 있다. 식 (2)~식 (4)를 식 (1)에 대입하여 적용하면 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 식 (5)에서 얻어진 자속밀도와 자기선속밀도의 관계를 통해서 자기력(F)을 계산할 수가 있다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2}$$

$$B = \mu H \tag{3}$$

$$B = \nabla \times A \tag{4}$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \tag{5}$$

$$F = \int J \times B dV = B_{n,avg} il \tag{6}$$

Table 1 Geometry value of coil

| 내경 (mm) | 외경 (mm) | 원주길이 (mm) | 총길이 (m) | 저항 (Ω) | 인가전압 (V) |
|---------|---------|-----------|---------|--------|----------|
| 1.5 | 1.98 | 5.4636 | 1.54 | 23 | 2 |

Table 2 Electrical properties of NdFeB(Magnet)

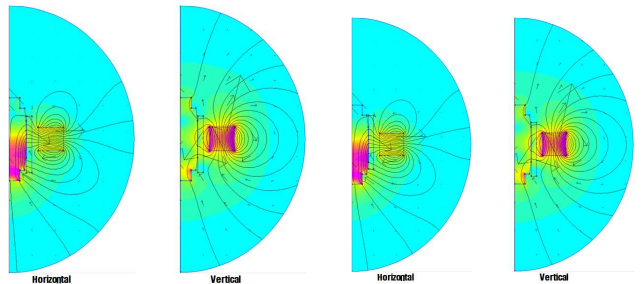
| Coercivity (A/m) | Electrical Conductivity (o) |
|------------------|-----------------------------|
| 883,310 | 0.694 |

따라서 전자기장 해석에서 도출된 자기선속밀도와 식 (6)을 적용하여 수평착자 자기력 0.0178N, 수직착자 자기력 0.0028N 값을 도출하였다.

수평 및 수직착자에 대한 자기장 특성 해석결과를 비교하기 위하여 코일의 위치에 따른 자기력의 특성 변화를 해석하였다. 그 결과를 현 설계위치에서의 전자기장 분포와 설계 가능 범위의 최적 위치에서의 전자기장 분포를 Fig. 3에 비교하여 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 전자기장 분포 및 자기력결과를 고찰하면 수평착자가 수직착자에 비해 우수한 것으로 나타나고 있으며 설계 구성상 유리한 것으로 판단할 수 있다.

자기력에 대한 착자방법에 따른 민감도는 설계범위인 0.3mm이내에서 수평착자의 경우는 코일위치를 상하방향으로 최대한 이동시킬수록 자기력이 커지는 특성을 나타냈으며, 수직착자의 경우는 상하방향으로 이동하면 자기력이 감소하다 증가하는 것으로 나타났다. 진동자 공정상의 조립편차에 대한 영향은 코일 위치에 따른 민감도를 고찰한 결과, 설계범위인 0.3mm 이내에서 상하이동에 따른 자기력 변화율을 고려하였을 때 수평착자가 수직착자에 비해 변



(a) Initial position (b) Maximum position

Fig. 3 Compare of magnetic flux density

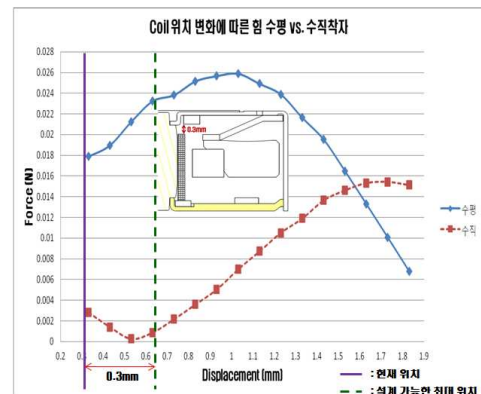


Fig. 4 Compare of magnetic force by coil position for vertical and horizontal

화율이 작은 것으로 나타나 조립편차에 의한 품질의 안정성이 우수 할 것으로 판단할 수 있다. 따라서 성능 및 공정조건 모두 수평착자의 설계방법이 우수한 것으로 판단할 수 있다.

2.3 햅틱 진동자의 진동해석

2.3.1 햅틱 진동자의 이론적 고찰

진동특성은 리니어 액추에이터 시스템의 연구 결과⁽¹⁻⁴⁾를 바탕으로 1자유도 모델로 단순화하여 특성을 고찰하고 최종 시스템 특성은 유한요소해석을 통하여 고유진동 모드와 응답을 해석하였다. 구조감쇠 η 에 대한 1자유도 모델은 다음과 같다.

$$m \ddot{x} + k(1 + j\eta)x = f \quad (7)$$

또한 공진 주파수와 응답 특성은 식 (8), (9)로 나타낸다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X/F &= \frac{k - \omega^2 m}{(k - \omega^2 m)^2 + (k\eta)^2} - \frac{k\eta j}{(k - \omega^2 m)^2 + (k\eta)^2} \\ |X/F| &= \frac{1}{\sqrt{\{(k - \omega^2 m)^2 + (k\eta)^2\}}} \\ &= \frac{1/k}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \eta^2\right\}}} \quad (9) \end{aligned}$$

여기서, 질량(m)과 강성(k)에 따른 공진 주파수의 민감도는 식 (8)을 m, k에 대한 미분식이다. 미분식을 테일러급수 전개를 하고, 공진주파수 f_n 의 변화량 식에서 $\Delta m/m$, $\Delta k/k$ 의 고차항을 무시하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f_n = -f_n \cdot \frac{\Delta m}{2m}, \quad \Delta f_n = f_n \cdot \frac{\Delta k}{2k} \quad (10)$$

식 (8), (9), (10)을 사용하여 설계 목표 시스템 1.8g이상, 210Hz에 대하여 초기 질량과 강성에 대한 설계안을 설정하였다. 식 (8), (9)의 사용 과정에서 시스템 측정 지그의 전달함수(입력 힘에 대한 가속도) 크기는 210Hz에서 3.37g로 나타났다. 이를 적용하면 시스템의 1.8g를 얻기 위해서는 0.534N의 힘이 입력되어야 한다. 따라서 진동자가 210Hz에서 진동자 질량체의 변위와 강성에 의하여 결정된다. 진동자의 강성, 질량에 대한 자기력 (0.0178N)의 가진에 대하여 계산한 결과를

Table 3에 나타냈다.

시스템의 진동 특성은 복잡한 구조에 의하여 평가하고 있어 다자유도계의 유한요소 모델을 적용하여 예측하였다. 진동모델은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (11)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며, $\{x\}$, $\{f\}$ 는 절점에서의 변위와 절점에서 작용하는 외력을 나타낸다. 절점에서의 변위와 외력을 시간 t에 대한 조화함수로 생각하여 $x = X e^{j\omega t}$ 와 $f = F e^{j\omega t}$ 로 놓으면, 식 (11)은 식 (12)과 같이 된다.

$$[K + j\omega C - \omega^2 M]\{X\} = \{F\} \quad (12)$$

$$\{X\} = [K + j\omega C - \omega^2 M]^{-1} \{F\} \quad (13)$$

여기서, $j = \sqrt{-1}$ 이고, ω 는 각 주파수이다. 위의 식을 이용하여 강제 진동해석을 수행하면 특정주파수 ω 에서 변위응답 $\{X\}$ 를 산출할 수 있다. 여기서 산출된 변위응답은 속도 및 가속도 응답으로도 나타낼 수 있다.

2.3.2 햅틱 진동자의 유한요소 해석

햅틱 진동자에 적용된 부품의 물성치는 Table 4에 나타난 것과 같이 적용하였다.

Table 3 Design of initial vibration parameters

| Design Parameters | Mass(M) | Stiffness(K) | Damping(η) |
|-------------------|--|--------------|-------------------|
| | 0.976g | 1,780N/m | 1.5% |
| 응답특성 | 1.85g (Vibrator/Jig Transfer function ratio(\dot{X}/F) = 3.37) | | |

Table 4 Material properties of haptic vibrator's part

| Part | Material | Density (kg/m ³) | Elastic Modulus (GPa) | Poisson's ratio |
|------------|----------|------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Spring | SUS301 | 7,800 | 210 | 0.3 |
| Weight | Tungsten | 19,300 | 411 | 0.28 |
| Magnet | Nd-Fe-B | 7,600 | 150 | 0.24 |
| Upper Case | SUS430 | 7,800 | 200 | 0.3 |
| Lower Case | SPC | 7,820 | 200 | 0.29 |
| Upper Jig | Acetal | 1,200 | 2.9 | 0.363 |
| Lower Jig | Acetal | 1,200 | 2.9 | 0.363 |

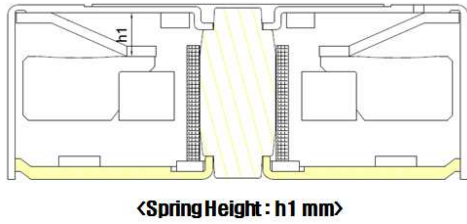


Fig. 5 Case of Spring Height

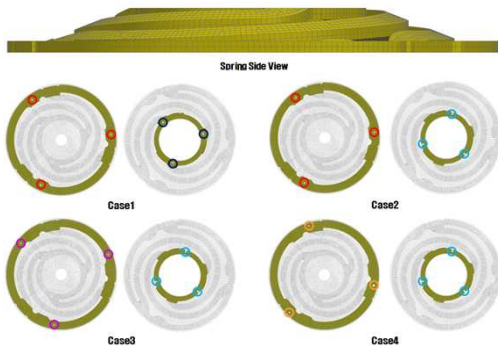


Fig. 6 Case of Welding Point

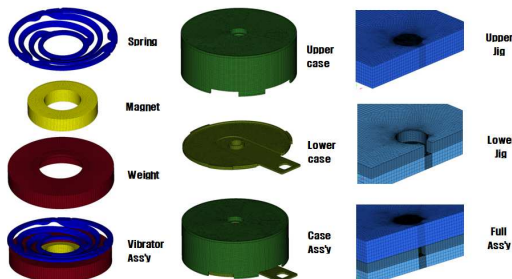


Fig. 7 FE model of haptic vibrator

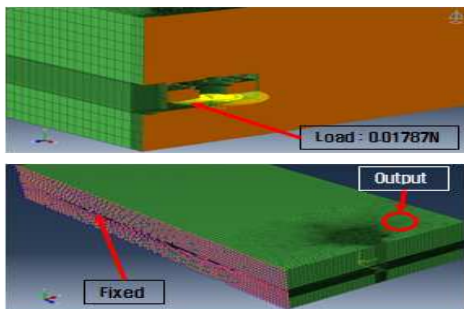


Fig. 8 Boundary and Loading condition

햅틱 진동자의 진동특성을 고찰하기 위해 우선 스프링 높이(h_1 , Fig. 5)와 용접위치에 따른 조합 (Fig. 6)으로 Fig. 7과 같이 유한요소모델을 구축하였다. 해석은 전자기장 해석에서 얻어진 전자기력 결과를 입력 가진력으로 적용하였다(Fig. 8). 구축조건으로는 실제 인증 시험조건에 맞추어 시

Table 5 Result of natural frequency and Response analysis

| Spring Height | Case Study | Model | Acceleration response |
|---------------|------------|---------|---------------------------------|
| h1mm | Case1 | 216.7Hz | 18,528mm/s ² (1.89g) |
| | Case2 | 212.1Hz | 18,546mm/s ² (1.89g) |
| | Case3 | 209.0Hz | 18,548mm/s ² (1.89g) |
| | Case4 | 222.4Hz | 18,492mm/s ² (1.89g) |
| h1+0.07 mm | Case1 | 216.5Hz | 18,474mm/s ² (1.89g) |
| | Case2 | 211.9Hz | 18,494mm/s ² (1.89g) |
| | Case3 | 208.9Hz | 18,625mm/s ² (1.89g) |
| | Case4 | 222.3Hz | 18,431mm/s ² (1.88g) |

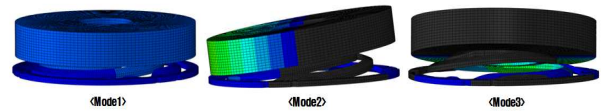


Fig. 9 Natural frequency and mode shape

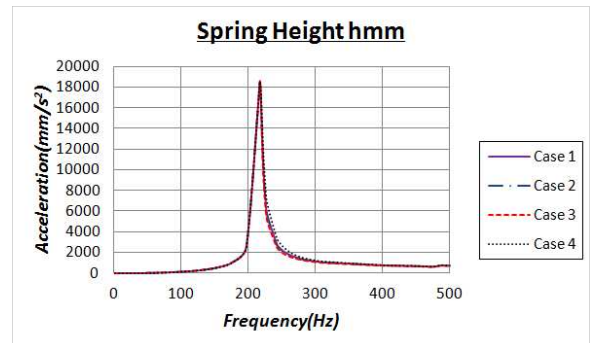


Fig. 10 Acceleration response of FRF(hmm)

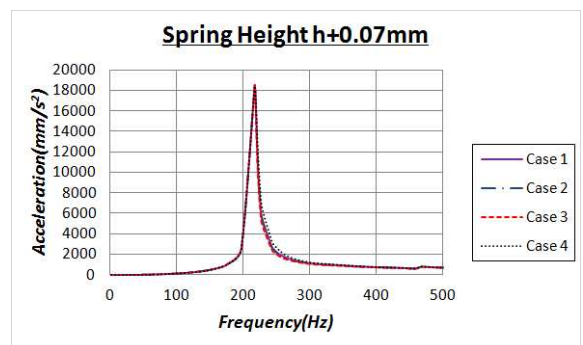


Fig. 11 Acceleration response of FRF(h+0.07mm)

험 지그를 모델링하고 측정점의 한 점에서 응답을 고찰하였다.

2.3.2 햅틱 진동자의 진동해석결과

햅틱 진동자의 고유진동모드해석결과는 Fig. 9와 같이 주요 모드만 나타냈다. 그리고 스프링의 용접조립위치에 따른 진동 특성 변화를 고찰한 결과를 Table 5에 고유진동수와 응답의 최대값을 나타내었다. 또한 햅틱 진동자의 주파수 응답특성 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 스프링 변수 $h1(0.78mm)$ 의 경우에 용접위치에 따라 1차 공진 주파수는 209Hz~222.4Hz 범위에서 변하고 가속도 수준은 1.89g로 나타났다. 공정상의 스프링 높이범위 $h1+0.07mm$ 의 경우에는 1차 공진 주파수가 208.9Hz~222.3Hz 범위에서 변하고 가속도 수준은 1.88g~1.89g로 나타났다. 공정상의 스프링 높이에 대한 특성은 공진주파수 및 응답 수준에는 큰 영향이 없는 것으로 판단할 수 있으나, 용접위치에 따른 특성은 공진 주파수에 큰 영향(6%)을 주는 것으로 나타나고 있다.

따라서 진동자의 최종제작은 $h1+0.07mm$ 의 용접점 Case 3으로 설계 및 제작하였다.

2.4 햅틱 진동자의 진동특성시험

2.4.1 햅틱 진동자 진동특성 시험구성

햅틱 진동자의 특성시험은 인증 규격에 의하여 Fig. 12와 같이 시험장비의 구성하였다. 그리고 시험 Jig에 진동자를 장착한 후 AC 전원을 인가하면 진동자에서 발생된 진동을 시험 Jig에 장착된 가속도 센서를 통해 진동을 측정하고 분석 시스템으로 분석할 수 있도록 시험환경을 구축하였다.

2.4.2 햅틱 진동자 진동특성 시험결과

시험 입력 조건은 전자기장 해석에서 사용한 2.0ACV 전압을 180~250Hz, 해상도 0.1Hz 정형파 스위프(sweep) 형태로 인가하여 측정하였다. 햅틱 진동자의 진동특성 시험결과는 Fig. 12에 나타냈으며, 1차 공진은 206Hz에서 나타나고 진동력은 약 1.8g 수준을 나타냈다. 또한 초기 해석한 결과와 비교하여 응답 특성을 Fig. 14에 나타내었다. 비교 결과 공진 주파수는 매우 잘 일치하고 있으나 190~200Hz 대역의 가속도 응답특성 특성이 약간 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이는 측정 지그의 조립 상태 등을 고려하지 못한 것에 의하여 발생한 것으로 판단된다. 그러나 그 오차는 진동자를 인증 평가하는 데는 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다.

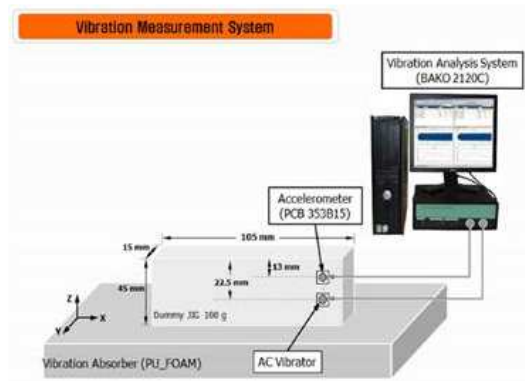


Fig. 12 Vibration measurement system

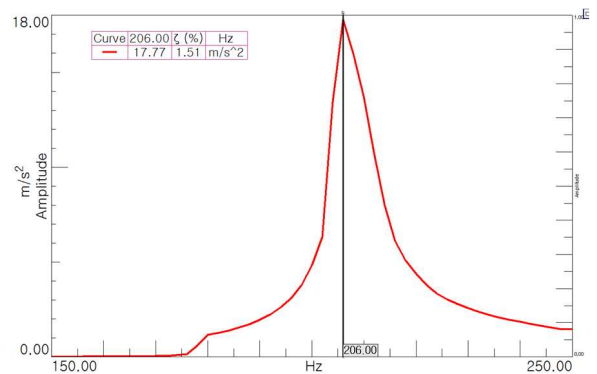


Fig. 13 Acceleration level result of sine sweep exciting (2.0V, 180 ~250Hz) test

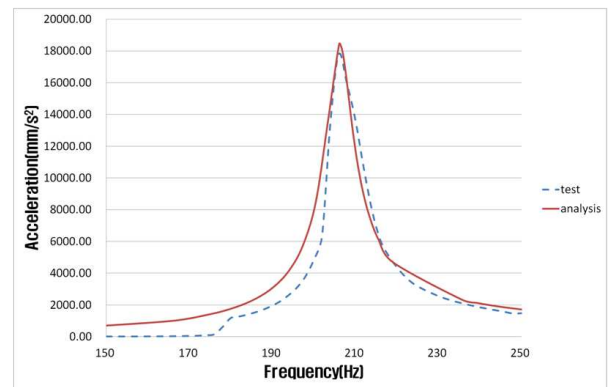


Fig. 14 Compare of analysis and test acceleration results (2.0V, 180 ~250Hz)

3. 결론

햅틱 진동자의 개발에 있어, 진동특성 인증시험 규정에 의한 시스템적인 접근 방법으로 1자유도 모델부터 시스템 해석을 수행하고 제작, 시험 검증을 한 결과 비교적 해석결과와 잘 일치하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

진동자 자석의 착자 방법에 대하여 비교한 결과 진동 성능이 같은 크기 내에서 수직착자보다 수평

착자가 우수한 것으로 판단할 수 있었다. 또한 진동자의 설계에 있어 수직착자의 경우 자기력을 향상시키기 위해서는 N극과 S극의 거리를 늘려야 하기 때문에 magnet 두께가 커져서 소형화하기에는 한계가 있다. 따라서 수평착자의 경우는 수평방향으로의 N극과 S극의 거리는 두께에 영향을 미치지 않기 때문에 진동자 높이를 결정하는데 매우 유리한 구조임을 알 수 있으며 동일 성능에서 얇은 구조개발에 유리한 것을 알 수 있었다.

진동자 해석에서 전자기력과 진동특성 해석을 완전 연성해석을 하지 않고 비연성 해석의 단계적인 해석을 통해서도 잘 예측할 수 있었다.

그리고 공정 신뢰성 관점에서도 수평착자 방법이 코일위치에 대한 조립편차 민감도가 작기 때문에 제품성능의 편차가 작아 보다 유리한 것을 알 수 있었다. 또한 설계 인자 및 공정인자로 용접점은 공진주파수에 영향을 주고 있어 선정에 주의가 요구되고 관리 대상인자임을 알 수 있었다. 반면 스프링의 높이는 공진주파수 및 진동력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타나 공정의 관리 대상인자로 설정할 필요가 없음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 소재부품기술개발사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

(References)

- (1) Park, J. B., Ko, B. H., Park, Y. P., Park, N. C., Park, K. S. and Seo, H. W., 2013, "Vibration Characteristics Improvement of Smart Phone Linear Resonant Actuator," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 147~148.
- (2) Kamg, S. W., Lee, J. Y. and Kwak, H. Y., 2000, "Analysis on the Oscillation of Nonlinear Oscillators," *KSME Fall Annual Meeting*, pp. 585~590.
- (3) Park, J. S. and Go, Y. J., 2005, "An Analysis of Vibration and Frequency Characteristics for Quartz Crystal Using the Finite Element Method," *Transactions of the Institute of Electronics and Information Engineering*. Vol. 42, No. 1, pp. 7~12.
- (4) Choi, Y. S., 1989, "Steady-state of Forced Symmetric Piecewise-Linear Oscillator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.* Vol. 13, No. 4, pp. 583~594.
- (5) Abaqus User's Manual 2013, "Magnetic Pulse Forming of a Metallic Tube," Dassault System. Workshop 4.
- (6) Kim, C. H., Ju, Y. H. and Park, J. P., 1999, "Vibration Analysis of a Generator-Stator Core Under Electromagnetic Excitation," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. Vol. 9, No. 4, pp. 747~753.