

영구자석 스프링과 보이스 코일 구동기를 가진 직선형 진동모터의 설계 및 해석

최정규* · 유승열** · 노명규*†

*충남대학교 메카트로닉스공학과, **충남대학교 첨단수송체연연구소

Design and Analysis of Linear Vibration Motor Equipped with Permanent-Magnet Springs and Voice-Coil Actuators

Jung-kyu Choi*, Seong-yeol Yoo** and Myounggyu Noh*†

* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

** Institute of Advanced Transportation and Vehicle Research, Chungnam Nat'l Univ.

(Received August 6, 2012 ; Revised September 27, 2012 ; Accepted October 1, 2012)

Key Words: Vibration Motor(진동모터), Voice-Coil Actuator(보이스 코일 구동기), Permanent-Magnet Spring(영구자석 스프링), Equivalent Current Sheet(등가전류판), Method of Images(이미지 방법)

초록: 직선형 진동모터가 휴대전화의 알람용이나 햅틱 인터페이스의 구동기로 적용하려면 빠른 응답속도와 긴 수명을 제공하여야 한다. 본 논문에서는 기존 직선형 진동모터를 개선하여 보이스 코일 구동기와 영구자석 스프링을 이용한 직선형 진동모터를 제시하고, 설계 제작하여 그 가능성을 검증하였다. Halbach 배열의 영구자석에 의해 구동되는 보이스 코일 구동기와 영구자석 간의 반발력을 이용하는 영구자석 스프링을 해석하고 설계하기 위해, 등가전류판 방법과 이미지 방법을 사용하였고, 방법의 적절성을 유한요소해석을 통해 검증하였다. 시제품 모터를 설계하고 제작하고, 실험을 통해 진동모터의 특성을 확인하였다.

Abstract: In order to use a linear vibration motor for the actuator of a haptic interface, the motor must provide a higher reaction rate and longer service life than typical rotational motors with an eccentric mass. In this paper, we propose a linear vibration motor that is equipped with a voice-coil actuator and permanent-magnet springs. To concentrate the magnetic flux in the actuator, a Halbach-style magnetization pattern is used. Permanent-magnet springs replace mechanical springs to help increase the service life. We use the method of equivalent current sheets and the method of images to analyze and model the proposed vibration motor. These methods are validated using finite element analyses and experiments. A prototype motor is designed and fabricated. Tests with the prototype show the feasibility of the proposed linear vibration motor.

- 기호설명 -

B : 자속밀도
 c : 감쇄 상수
 F : 진동모터의 힘
 I : 보이스 코일의 전류
 N : 코일의 권선수
 K_i : 구동기 상수
 K_x : 위치 강성계수
 M_s : 포화 자화 강도

μ_0 : 공기의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
 ζ : 감쇄비
 ω_n : 고유진동수

1. 서론

진동모터는 전자기적 힘을 이용하여 전기적 에너지를 기계적 진동에너지로 변환하는 부품이다. 직선 왕복운동을 하는 직선형 진동모터는 가진기,⁽¹⁾ 음향발생기,⁽²⁾ 직선형 압축기⁽³⁾ 등과 작동원리가 유사하며 최근 휴대전화의 알람용으로 적용된 바가 있다.^(4,5)

† Corresponding Author, mnoh@cnu.ac.kr
 © 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

휴대전화의 알림용으로 사용되는 진동모터는 효율이 우수하고 제작이 용이한 회전형 진동모터가 주류를 이루어 왔다.⁽⁶⁻⁸⁾ 그러나 스마트폰의 급속한 보급과 햅틱 인터페이스의 발전으로 빠른 응답속도와 긴 수명을 가진 진동모터에 대한 요구가 증가하고 있다. 직선형 진동모터는 회전형 진동모터에 비해 응답속도가 빠르며 크기를 줄일 수 있는 가능성이 높아 향후 스마트폰의 발전 방향에 부응하는 면이 있다. 본 논문에서는 기존의 직선형 진동모터의 형태를⁽¹⁻⁵⁾ Halbach 자화패턴을 가지는 영구자석 진동자가 보이스코일에 의해 구동되고 영구자석 간의 반발력을 스프링으로 활용하는 형태로 개선하여 그 성능을 확인하고자 한다. 기계적 스프링 대신 영구자석 스프링을 사용함으로써 진동모터의 수명이 증대될 수 있으며 Halbach 자화패턴을 이용하여 보이스코일에 작용하는 자기장을 극대화할 수 있다.

본 논문에서는 제안하는 형태의 진동모터를 해석하고 설계하기 위해 등가전류판 방법(method of equivalent current sheet)과 이미지 방법(method of images)을 이용하여 해석식을 유도하고, 이를 유한요소해석 및 실험을 통해 검증하였다. 등가전류판이란 영구자석을 동등한 자기장을 발생하는 전류판으로 대체하는 방법으로서 공기와 같이 자기적으로 균질한 매질에서 해석적 방법으로 자기장의 분포를 구할 수 있다.⁽⁹⁻¹⁰⁾ 본 논문의 진동모터에서는 자기장의 집중을 위해 강자성 요크(yoke)가 사용되었으며 등가전류판에 의한 해석식을 사용하기 위해 이미지 방법을 도입하였다. 이미지 방법은 경계면에서 동일한 경계조건을 가지도록 강자성체를 다수의 이미지 영구자석으로 대체하는 방법이다.⁽¹¹⁾

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장은 본 논문에서 제안하는 진동모터의 구조와 구성요소를 설명하며, 3 장은 등가전류판 방법, 4 장은 이미지 방법의 진동모터에 대한 적용 과정을 설명하고 있다. 5 장은 제작된 진동모터 시작품에 대한 실험 결과가 기술되어 있으며, 6 장의 결론으로 논문이 매듭지어진다.

2. 진동모터의 구조 및 구성요소

본 논문에서 제안하는 직선형 진동모터는 Fig.1에 도시된 바와 같이 진동자(vibrator)와 고정자(stator)로 구성되어 있다. 진동자는 영구자석의 조합으로 이루어져 있으며, 영구자석에 의해 생성된 자기장은 보이스코일과의 상호 작용에 의해 수평

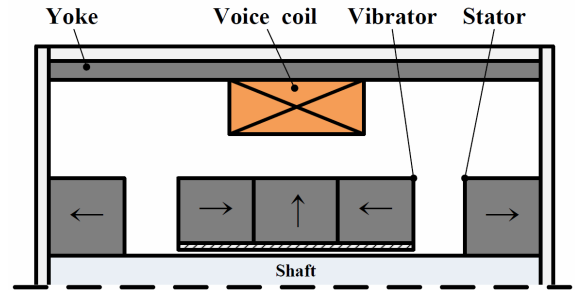


Fig. 1 Schematic view of the proposed linear vibration motor that is composed of voice-coil actuators and permanent-magnet springs

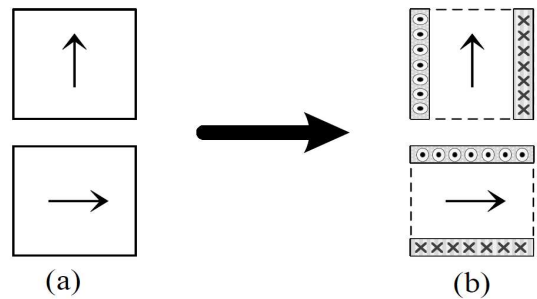


Fig. 2 (a) Cross section of permanent magnets; (b) Equivalent current sheets that replace the original permanent magnets

방향 힘을 만들어 내고, 고정자 영구자석에 의한 자기장과 상호 작용하여 반발력을 만들어 낸다. 진동자 영구자석의 자화 패턴은 보이스코일에 자기장을 집중하기 위해 Halbach 형태로 배열되어 있으며 보이스코일에 자기장 집중 효과를 극대화하기 위해 요크가 장착되어 있다. 보이스코일에 교류 전류가 인가되면 수평 방향으로 로렌츠 힘이 발생하여 왕복 운동이 만들어 진다. 진동자에 작용하는 수직 방향의 힘을 최소화하고 진동자와 진동자를 지지하는 안내면 간의 마찰을 최소화하기 위해 진동 모터는 수평축을 중심으로 대칭 구조이며 Fig.1은 대칭 부분을 생략하여 도시하였다.

3. 등가전류판 방법

등가전류판(Equivalent Current Sheet, ECS) 방법을 이용하면 영구자석에 의해 생성되는 자기장을 편리하게 구할 수 있다. 등가전류판이란 영구자석과 동일한 자기장을 발생하는 전류판의 조합으로서 영구자석을 등가전류판으로 치환하고 전류판에 의한 자기장 분포를 이용하여 영구자석에 의해 발생하는 힘을 구할 수 있다.^(8,9)

사각형의 단면을 가지는 영구자석이 자화방향에

수직방향으로 무한히 길다고 가정하면, Fig. 2와 같이 영구자석을 등가전류판 한 쌍으로 대체할 수 있다. 자기장의 분포를 구하고자 하는 영역이 자기적으로 균일하다고 가정하면, 등가전류판에 의해서 생성되는 자기장을 해석적으로 얻을 수 있다.

예를 들어, Fig. 3(a)와 같이 전류판이 x 방향으로 펼쳐져 있는 경우, 코일 영역 내에서의 임의의 점 (x, y) 에서 y 방향의 자기장은 식 (1)로 주어진다.⁽¹¹⁾

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 M_s}{2\pi} \tan^{-1} \frac{l_m(x - x_m)}{(x - x_m)^2 + (y - y_m)(y - y_m - l_m)} \quad (1)$$

유사한 방법으로, Fig. 3(b)처럼 전류판이 y 방향으로 펼쳐져 있는 경우, 임의의 점 (x, y) 에서 y 방향의 자기장은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \ln \frac{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2}{(x - x_m - l_m)^2 + (y - y_m)^2} \quad (2)$$

만약 여러 개의 영구자석이 있다면, 중첩의 원리에 의해 각각의 영구자석을 등가전류판으로 대체하고 모든 전류판으로부터의 얻은 자기장의 결과를 중첩하여 총 자기장을 얻을 수 있게 된다.

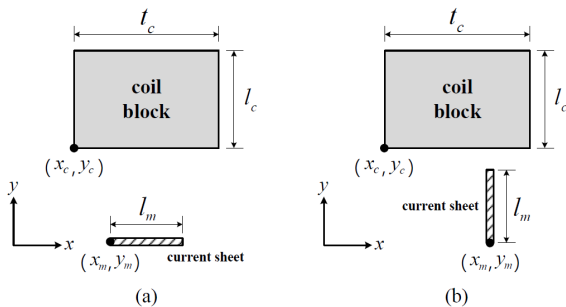


Fig. 3 (a) Single current sheet in x direction. The magnetic field produced by the current sheet creates a Lorentz force in the coil block, which is obtained by (1) and (3). (b) Single current sheet in y direction. The force can be obtained similarly by (2) and (3)

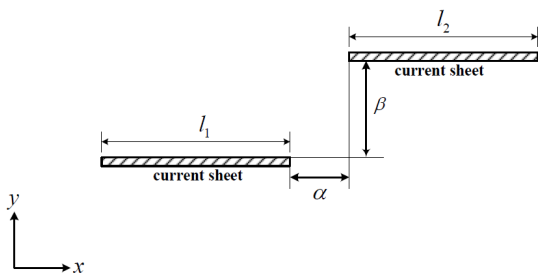


Fig. 4 Interaction between two current sheets. Each current sheet may be a part of the stator PM and the vibrator PM

자기장의 분포를 얻게 되면 자기장에 의해 코일 영역에 작용하는 로렌츠 힘을 식 (3)에 의해서 구할 수 있다.

$$F = \int_{x_c}^{x_c+l_c} \int_{y_c}^{y_c+l_c} \left(\frac{NI}{t l_c} \right) B_y(x, y) dy dx \quad (3)$$

진동자 영구자석과 고정자 영구자석 간의 척력 또한 등가전류판 방법을 이용하여 구할 수 있고, 자석 간의 거리 변화에 의한 힘의 변화 즉 강성계수를 해석적으로 구할 수 있다.⁽⁹⁾ 예를 들어 Fig. 4에 도시된 바와 같은 한 쌍의 수평 방향 전류판 간의 수평 방향 강성계수는 식 (4)에 의해 구할 수 있다.

$$K_x = \frac{\mu_0 M_s^2}{4\pi} \ln \frac{(\alpha^2 + \beta^2)[(\alpha + l_1 + l_2)^2 + \beta^2]}{[(l_1 + \alpha)^2 + \beta^2][(l_2 + \alpha)^2 + \beta^2]} \quad (4)$$

진동자 영구자석과 고정자 영구자석 간의 총 강성계수는 자기장을 구하는 경우와 마찬가지로 중첩의 원리에 의해서 얻을 수 있다.

4. 이미지 방법

식 (1)과 식 (2)는 매질이 자성적으로 균일한 경우에 대해 성립된다. 즉, 강자성체가 영구자석 주변에 존재하지 않는 경우에만 유효하다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 진동모터는 코일 영역에 자기장을 집중시키기 위해 강자성체 요크가 사용되었다. 앞서 기술한 등가전류판의 해석 방법을 강자성체가 존재하는 경우에도 적용하기 위하여 이미지 방법(method of images)을 사용하였다.⁽¹¹⁾

이미지 방법은 강자성체의 투자율(permeability)이 무한대라고 가정하고, 강자성체를 대신하여 하나 혹은 여러 개의 가상 영구자석으로 강자성체 경계면에서 동일한 경계조건을 갖도록 하는 것이

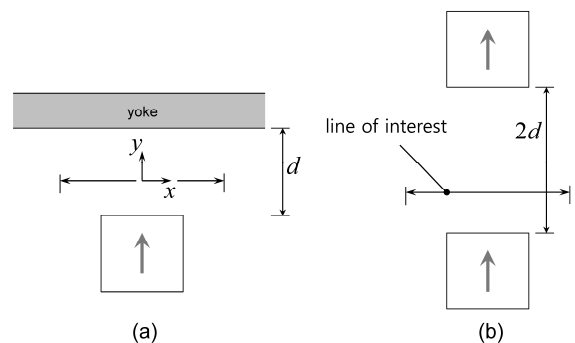


Fig. 5 (a) A single magnet with a yoke; (b) An image PM replacing the yoke in (a)

다. 해의 유일성(uniqueness of solution)에 따라 경계 조건이 동일하면 맥스웰 방정식의 해 또한 동일하다는 이론에 근거한다. 가상의 영구자석을 이미지라고 하며 실제 영구자석과 강자성체의 위치에 따라 개수 및 위치가 결정된다. 예를 들어 Fig. 5(a)에 도시된 바와 같이 영구자석에서 d 만큼 떨어진 곳에 강자성체가 위치한 경우, Fig. 5(b)처럼 요크 대신 원래 영구자석에서 $2d$ 만큼 떨어진 곳에 이미지 영구자석을 가정하면 요크 경계면에서 동일한 경계조건을 갖게 되며 관심 영역에서 동일한 자기장 분포를 가지게 된다.

본 논문에서 제안한 진동모터의 진동자 영구자석처럼 여러 개의 영구자석이 요크와 함께 있는 경우에도 이미지 방법을 사용할 수 있다. Fig. 6(a)에 도시된 바와 같이 Halbach 배열을 가지는 영구자석이 요크에서 d 만큼 떨어진 곳에 위치한 경우, 요크면에서 동일한 경계조건을 갖도록 Fig. 6(b)와 같이 이미지 영구자석의 자화방향을 정하고 실제 영구자석으로부터 $2d$ 의 거리에 이미지 영구자석을 두어 동일한 자기장 분포를 얻게 된다.

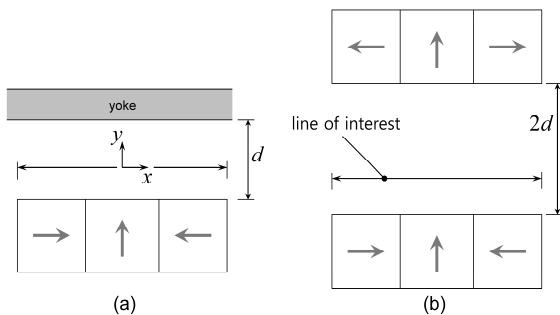


Fig. 6 (a) A set of three permanent magnet bars with Halbach magnetization pattern and a yoke (b) The yoke is replaced with image PMs

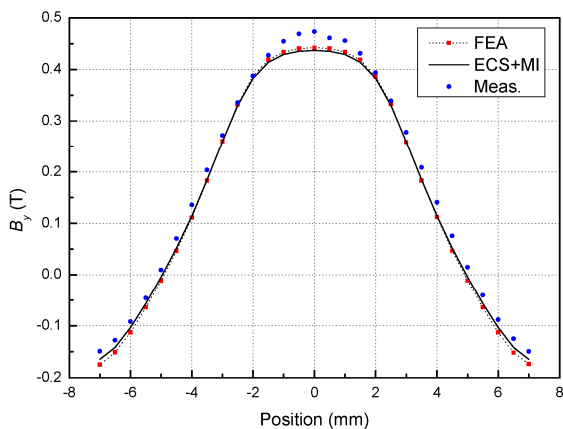


Fig. 7 Comparison of the flux density obtained from the analytical method with those by FEA and measurements

강자성체를 제거하고 영구자석 만으로 자기장이 발생하면 앞 절의 등가전류판 방법을 통해 자기장의 분포를 해석적으로 구할 수 있다. Fig. 7 은 이미지 방법과 등가전류판 방법을 이용하여 Fig. 6 과 같은 영구자석 배열에 의한 자기장 분포를 구하고, 이를 유한요소해석 결과와 비교한 결과이다. 영구자석의 단면크기는 $5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 이며 영구자석의 세기를 나타내는 포화자화강도(M_s)는 83.5 kA/m 이다. 영구자석으로부터 요크 방향으로 1.5 mm 떨어져 있으며 영구자석의 폭과 동일한 길이를 가지는 가상의 선을 따라 y 방향의 자기장을 구하였다.

해석적 방법을 통해 구한 자기장의 분포는 다음 절에서 기술할 시작품에서 측정된 결과와도 비교하였다. Fig. 7 에서 측정 결과는 점으로 표시되어 있으며, 해석 결과와 7% 이내의 차이를 보여준다. 이러한 오차의 원인으로는 영구자석 자화 강도의 불균일성, 측정 오차, 요크의 비선형적 자화 특성 등을 고려할 수 있다.

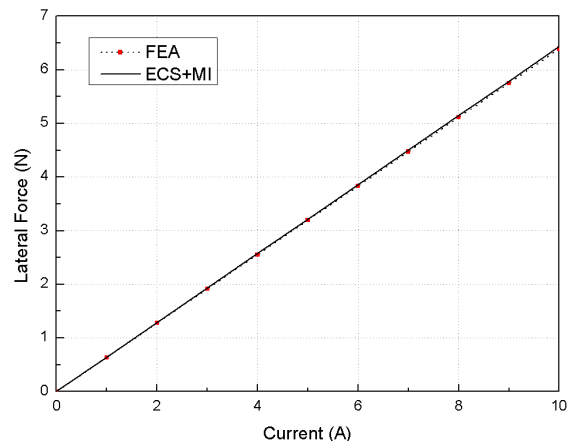


Fig. 8 Force in the voice-coil actuator with respect to the coil current

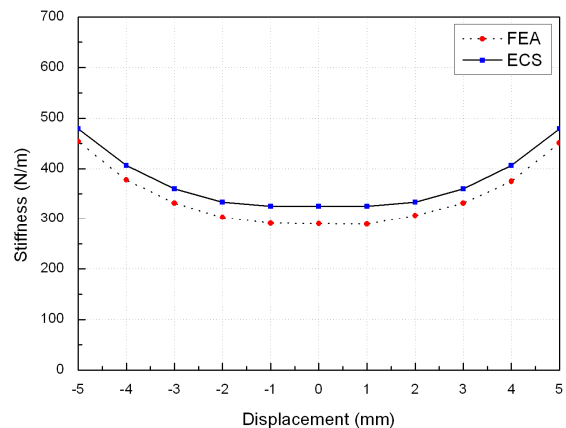


Fig. 9 Stiffness in the voice-coil actuator with respect to the displacement

식 (3)에 의해 구한 로렌츠힘과 유한요소해석 결과를 비교하여 Fig. 8 에 나타내었다. 이미지 방법과 등가전류판 방법에 의한 결과는 유한요소해석 결과와 매우 유사하며 차이는 1% 이내이다. 전류 변화에 대한 로렌츠 힘의 변화를 구동기 상수 (actuator constant)로 정의할 수 있으며, Fig. 8 의 결과로부터 0.64 N/A 로 계산되었다.

등가전류판 방법에 의한 진동자와 고정자 영구자석 간의 강성계수 계산 또한 유한요소해석을 통하여 검증하였다. Fig. 9 는 식 (4)에 의해 구한 강성계수와 유한요소 해석 결과를 비교하였다. 영구자석 간의 반발력은 떨어진 간격의 제곱에 반비례하므로 진동자가 고정자 영구자석에 근접하면 강성계수는 증가한다. 중앙에서 등가전류판에 의한 강성계수는 326 N/m 이며 유한요소해석에 의한 강성계수는 290 N/m 로서 약 12%의 차이를 보여 준다. 이는 강성계수 해석 시 진동자의 바깥쪽 영구자석 만을 고려하였으나, 진동자 중앙의 영구자석에 의한 자기장이 영구자석 간의 반발력에 영향을 미치는 것으로 유한요소해석 결과가 실험 결과에 매우 근접한 것으로부터 확인할 수 있다.

5. 실험결과

등가전류판 방법과 이미지 방법의 유효성을 확인하고 본 논문에서 제안하는 진동모터의 실효성을 확인하기 위해 시작품을 제작하였다. Fig. 10 은 제작된 시작품의 형상은 나타내며 Table 1 은 주요 파라미터를 정리하였다.

Table 1 Parameters for the prototype motor

Parameter	Value
Number of coil turns	63
Vibrator mass	52 g
Permanent-magnet (PM) size	$5 \times 4.5 \times 28.5 \text{ mm}^3$
Distance between vibrator and spring PM	15 mm
Saturated Magnetization of PM	83.5 kA/m

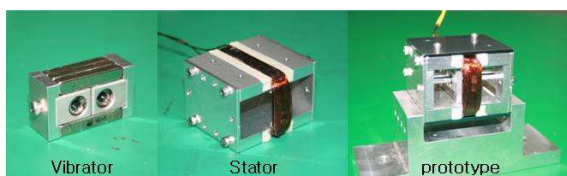


Fig. 10 Pictures of the prototype motor

진동모터의 구동은 진동자의 고유진동수에서 가장 효율적이 된다. 진동자의 고유진동수는 진동자의 질량과 영구자석 스프링의 강성계수를 통해 추정할 수 있으며

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

의 식으로부터 구할 수 있다. 진동모터의 변위크지 않다는 가정 하에 구동 전류 및 주파수와 출력 변위 간의 관계는 전달함수 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{X}{I} = \frac{K_i}{ms^2 + cs + k} \quad (6)$$

식 (6)을 표준형대로 표현하면

$$\frac{X}{I} = \frac{K_i / m}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

와 같으며 댐핑비 ζ 는 식(8)로 정의된다.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (8)$$

식 (7)로 표현되는 진동모터의 전달함수를 측정하였는데, 그 과정은 다음과 같다. 전류증폭기를 통해 특정한 주파수의 정현파 전류를 코일에 인가하고, 진동자에 부착된 가속도계로 가속도를 측정한다. 스펙트럼분석기를 이용하여 전류와 가속도의 구동 주파수 성분을 추출하고 가속도와 변위의 관계를 이용하여 변위를 계산한다. 구동 주파수를 변화시키며 위의 과정을 반복하여 전달함수를 구한다. 그 결과는 Fig. 11 에 나타나 있다.

최소 자승 오차법(least squared error)을 이용하여 측정 결과로부터 전달함수 (7)의 파라미터를 추정하였으며 그 결과는 Table 2 에 요약되어 있다. 고유진동수는 11.65 Hz 로 추정되었는데 이는 유한요소해석을 통해 얻은 11.9 Hz 에 근접한 결과이다.

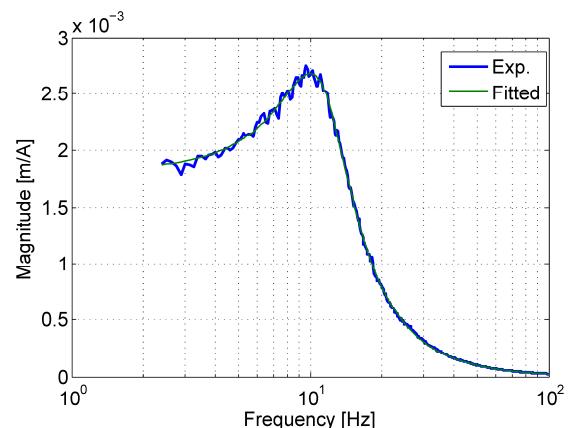


Fig. 11 Frequency response of the vibration motor

Table 2 Characteristics of the prototype motor

Parameter		ECS+MI	FEA	Exp.
Natural freq. (Hz)	ω_n	12.6	11.9	11.65
Damping ratio	ζ	-	-	0.36
Spring const. (N/m)	k	326	290	292
Actuator const. (N/A)	K_i	0.64	0.64	0.53

특히 진동자의 운동을 측정하기 위해 진동자에 부착한 가속도계의 질량(2.4 g)을 고려하면, 실험 결과는 유한요소해석 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 이미지 방법과 등가전류판에 의한 고유진동수는 12.4 Hz 로서 실험 결과와 6% 정도의 차이를 보여 준다. 이는 영구자석 자화강도의 불확실성, 불균일한 자화 정도, 측정 오차 등에 기인하는 것으로 추측된다.

구동기 상수(actuator constant)의 경우 실험으로부터 추정된 값인 0.53 N/A 와 해석식에서 예측한 0.64 N/A 사이에 비교적 큰 차이(~20%)를 보이는데 이는 진동자와 진동자 안내면 사이의 마찰에 기인한다고 할 수 있다. 마찰이 없는 경우 식 (7)에서 감쇠비가 0 이 될 것이나, 실제 실험으로부터 추정된 값은 0.36 으로 상당히 큰 감쇠비를 가지고 있다. 진동자의 왕복운동에 따른 마찰력과 함께, 안내면의 축이 자기적으로 대칭 위치에 놓이지 않는 경우, 운동방향과 직각을 이루는 횡방향 힘이 발생하게 되어 마찰력이 커지게 되고 이로 인해 감쇄 효과가 증폭된다. 보다 정확하게 구동기 상수를 측정하고 해석결과와 비교하려면 진동모터의 제작 정밀도를 높이고 안내면의 마찰을 줄이기 위한 노력이 필요하다.

6. 결론

본 논문에서는 기존 진동모터의 단점과 형태를 개선한 직선형 진동모터를 제안하였다. 이 진동모터는 높은 응답특성을 가지는 보이스 코일 구동기에 의해 구동되며, 영구자석 스프링을 사용하여 기계적 스프링에 비해 긴 수명과 신뢰성 향상을 기대할 수 있다. 진동모터를 해석하고 설계하기 위해 등가전류판 방법과 이미지 방법을 사용하였으며, 그 유효성을 유한요소해석 및 실험을 통해 확인하였다.

본 논문에서 제시한 진동모터를 휴대전화나 스마트폰과 같은 모바일 기기에 적용하려면 소형화

및 효율을 극대화하기 위한 최적 설계가 필요할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Nam, Y., Choi, J. and Kang, B., 2002, "Vibration Exciter Design for Flow Resonance with a Displacement Estimator Using strain Gage," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, pp. 1874~1881.
- (2) Sun, J. and Kim, K., 2012, "Isolation of Vibrations due to Speakers in Audio-Visual Electronic Devices Without Deteriorating Vibration of Speaker Cone," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, pp. 723~730.
- (3) Kim, Y., Kim, H., Kim, E. and Kim, K., 2010, "Isolating Vibration in Miniature Linear Cryogenic Cooler with Tuned Vibration Absorber," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.34, pp. 605~609.
- (4) Hwang, K., Kim, J., Yoo, J. and Kim, J., 2010, "Analysis and Design of Horizontally Vibrating Linear Actuator for Enhanced Vibration Performance of Haptic Mobile Phones," *Proc.of KSME Fall Annual Meeting*, pp. 1018~1021.
- (5) Kwon, D., Yang, T. and Cho, Y., 2010, "The State of the Art in Tactile Actuators and Related Applications," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, June, pp. 36~41.
- (6) Bailey, D., Grant, D., Jasso, A., Martin, K., Shahoian, E., Tierling, K. and Vassallo, S., 2007, "Haptic Feedback Using Rotary Harmonic Moving Mass," U. S. Patent, No. 7,161,580.
- (7) Chung, S., Hwang, G., Hwang, S., Kang, B. and Kim, H., 2002, "Development of Brushless and Sensorless Vibration Motor Used for Mobile Phones," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 38, pp. 3000~3002.
- (8) Suh, S. H. and Lee, J., 2005, "Analysis of Flat-Type Vibration Motor for Mobile Phones," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, pp. 4018~4020.
- (9) Chen, C., Paden, B., Antaki, J., Ludlow, J., Paden, D., Crowson, R. and Bearnson, B., 2002, "A Magnetic Suspension Theory and Its Application to the HeartQuest Ventricular Assist Device," *Artificial Organs*, Vol. 26, pp. 247~251.
- (10) Yoo, S., Kim, W., Kim, S., Lee, W., Bae, Y. and Noh, M., 2011, "Optimal Design of Non-Contact Thrust Bearing Using Permanent Magnet Rings," *Int. J. Prec. Eng. Manufac.*, Vol. 12, pp. 1009~1014.
- (11) Furlani, E. P., 2001, *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*, Academic Press: San Diego, pp. 185~190.