

수평 선형 진동 모터에 적용 가능한 높은 피로 수명을 가진 판 스프링 설계

이기범¹, 김진호^{1*}
¹영남대학교 기계공학부

Design of leaf spring with high fatigue life applied to horizontal linear vibrating actuator

Ki-Bum Lee¹ and Jin-Ho Kim^{1*}

¹Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요 약 본 논문은 수평 선형 진동 모터에서 운동자의 가이드 역할을 하는 높은 피로 수명을 가진 판 스프링의 설계를 다루고 있다. 현재까지 수직 선형 진동 모터가 스마트 폰의 햅틱 기능과 수신 알람 기능을 위한 진동 발생 장치로 사용 하고 있다. 하지만 이 진동모터는 수직 진동 방향의 특성으로 인해 스마트 폰 슬림화의 한계에 대해 한 가지 주요 원인이 되고 있다. 수평 선형 진동 모터의 부품 중에서 가이드 역할을 하는 스프링은 핵심 부품 중에 하나이다. 그리고 이 가이드 스프링은 작동기의 탄성적인 진동을 가능하게 한다. 다양한 판 스프링이 디자인 되었고, 높은 피로 수명을 가지며, 요구되는 강성을 측정하기 위하여, 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 그리고 시제품을 제작하여 진동 가속 및 스프링 수명 시간을 측정하기 위한 실험을 하였다.

Abstract This paper aims to design the leaf spring of high fatigue life which guides the moving part of the horizontal linear vibrating actuator. The vertical linear vibrating actuator has been used as the vibration device for haptic and alarm function on smart phone. However, the vibrating actuator has a major cause on the limitation to make smart phone slim because of its own characteristic of vertical direction vibration. The horizontally linear vibrating actuator for smart phone slimness has been developed in recent years. One of the most significant parts of horizontal vibrating linear actuator is the guide spring which supports moving part of actuator and enables actuator to vibrate elastically. Various types of leaf springs were designed and analyzed to get the required stiffness with high fatigue life through the stress analysis using commercial structural analysis program, ANSYS. The experiments were performed with prototypes to measure vibration acceleration and life time of leaf spring.

Key Words : horizontal linear vibrating actuator, fatigue life, leaf spring, smart phone

T 판 스프링의 두께
H 판 스프링의 높이
L 판 스프링의 길이
W 판 스프링의 운동 범위
K 강성
E 탄성계수
I 관성 모멘트

$F_{Lorentz}$ 로렌츠 힘
n 코일의 감긴 수
 B_g 공기 간격 사이의 자속 밀도
i 인가된 전류
 l_{eff} 자기장의 코일 유효 길이

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연공동기술개발사업(No.00045555)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jin-Ho Kim (Yeungnam University)

Tel: +82-53-810-2441 email: Jinho@ynu.ac.kr

Received September 3, 2012 Revised (1st October 9, 2012, 2nd October 31, 2012) Accepted December 6, 2012

1. 서론

핸드폰은 정보 산업과 기술의 발달로 인해 기존의 전화 통신 기능에서 인터넷, e-banking 및 각종 엔터테인먼트 등 까지 가능한 스마트 폰으로 발전 되었다. 또한, 스마트 폰의 디스 플레이가 커짐에 따라 스마트 폰 두께의 슬림화는 스마트 폰 하드웨어 시장에서 가장 큰 이슈 중의 하나이다. 하지만 쉽게 슬림화를 하지 못 하는 한 가지 원인은 스마트 폰의 부품 중 에서 가장 두꺼운 부분을 차지하는 진동 모터 에 있다. 현재 진동 모터로써 사용되는 모터는 수직 선형 진동 모터이다. 하지만 이 진동 모터는 수직 방향으로 운동자가 구동되므로 수직(두께) 방향으로 공간이 필요하다. 이러한 이유로 스마트 폰의 슬림화는 한계가 있다. 따라서 최근 몇 년간 수평 선형 진동 모터가 연구 중에 있다. [1] 하지만 아직까지 개발에 성공하여 스마트 폰에 적용된 사례는 없다. 실패 주요 원인은 수평 방향으로 움직이는 진동자의 가이드 역할을 하는 스프링이 반복적인 인장, 압축 응력으로 인하여 피로 파괴가 발생하는 것이다. 이 가이드 스프링은 선형 수평 진동 모터에서 진동자의 가이드 역할 및 진동력 발생을 위한 핵심 부품 이다. 진동 모터 관련 제조업체에서 지난 수년간 수평 선형 진동 모터의 가이드 판 스프링에 대한 연구 개발을 진행하였다. [2,3] 하지만, 수평 선형 진동모터에 적용 가능한 약 1,000,000 사이클 이상의 필요 수명을 만족시키는 스프링 에 대한 개발은 아직까지 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구 에서는 반복 운동에 높은 피로 수명을 가지며 제한된 부피 속에서 적용 가능한 판 스프링을 제안한다. 그리고 유한요소 해석과 그 결과를 이용하여 시제품을 제작하여 진동력 과 스프링의 수명 측정을 하였다.

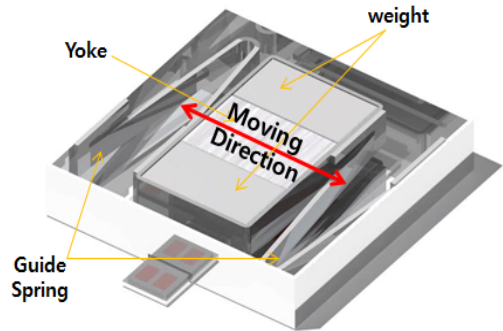
2. 본론

2.1 수평 선형 진동 모터

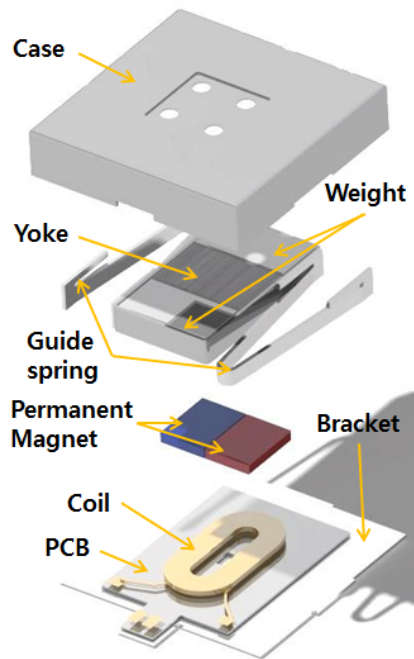
Fig. 1,2은 코일과 요크, 영구자석, 웨이트 그리고 판 스프링으로 이루어진 수평 선형 진동 모터의 구조를 보여준다. 그리고 작동원리는 영구자석에 의해 생성된 자속과 코일에 흐르는 전류 사이의 관계에 의해 발생하는 로렌츠 힘을 이용하여 좌, 우로 구동력을 생성하는 작동기이다.[4] 여기에서 사용되는 스프링은 판 스프링이며, 이 스프링은 다음 식 1과 같은 로렌츠 힘에 의해 움직이는 운동자의 가이드 역할을 한다.

$$F_{Lorentz} = n \cdot B_g i l_{eff} \quad (1)$$

또한, 지속적인 압축, 인장 응력을 받으므로 충분한 피로 수명을 가져야 한다.



[Fig. 1] Schematic diagram of the horizontal linear vibrating actuator

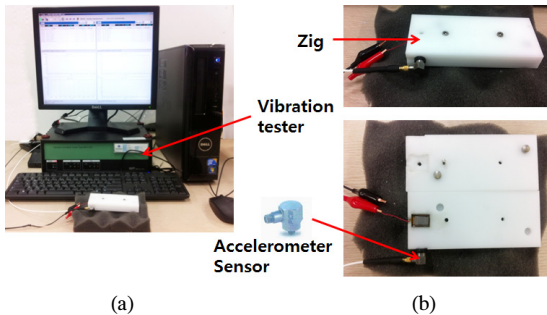


[Fig. 2] Exploded view of the horizontal linear vibrating actuator

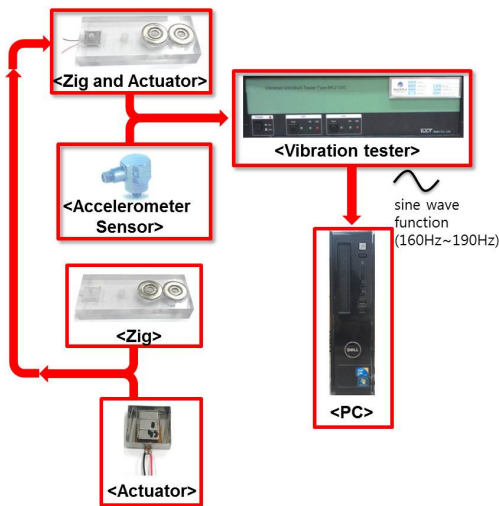
2.2 실험 방법

제안된 판 스프링을 이용하여 수평 선형 진동 모터의 시제품을 제작한다. Fig. 3 (a)는 진동모터를 장착한 지그와 진동 테스터 기를 보여준다. 그리고 Fig. 3 (b)는 지그에 장착된 진동모터를 보여준다. 실험 장비는 진동 테스

터 기, PC, 지그 그리고 시제품이 필요하다. 실험 방법은 제작한 시제품을 지그에 삽입 후 가속도 센서를 지그 옆에 부착한다. 그리고 진동 테스터 기를 이용하여 시제품에 사인함수를 160 Hz ~ 190 Hz까지 스입 신호를 인가하여 고유진동수를 확인한다. 그 다음, 확인된 고유진동수를 인가하고, PC에서 진동 가속도를 측정한다. Fig. 4는 실험 과정을 간략하게 나타낸다.



[Fig. 3] (a) Experiment equipment
(b) Manufactured zig and actuator

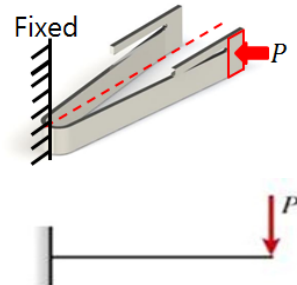


[Fig. 4] The experimental process

3. 가이드 스프링의 설계

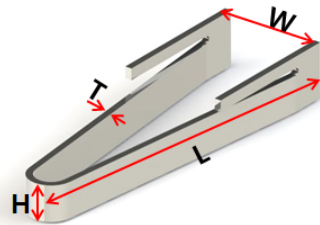
높은 수명을 가진 가이드 판 스프링의 설계를 위해 다음과 같은 식 1을 이용하였다. Fig. 5와 같이 인장 또는 압축으로 변위가 발생하는 판 스프링의 절곡 부분이 고정된 캔틸레버 보로 간주 할 수 있다. 캔틸레버 보의 처짐과 기울기에 대한 식을 이용하여 길이(L), 높이(H), 두께 (T)의 값들을 계산하여 조절 하였다.[5]

$$K = \frac{3EI}{L^3} = \frac{EHT^3}{4L^3} \left(I = \frac{HT^3}{12} \right) \quad (1)$$



[Fig. 5] Free body diagram of leaf spring

그리고 스프링의 운동 범위(W) 한 가지 변수를 추가 하였다. 따라서 Fig. 6과 같이 총 4가지의 설계변수를 조절한 후, 판스프링의 끝부분의 집중 하중을 부여 하고 유한 요소 해석을 하였다.



[Fig. 6] The four design variables of spring

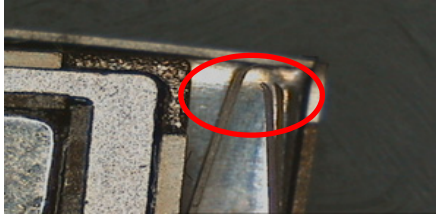
3.1 가이드 스프링의 설계 목표치

판 스프링의 설계 목표치는 약 2 G 이상의 진동 가속도이다. 또한, 스마트 폰 진동 모터는 약 1,000,000 사이클 이상의 피로 수명 및 175 Hz의 고유진동수가 요구된다. 175 Hz의 기준으로 100만 사이클을 시간으로 계산 시 약 1시간 35분이므로 실험 진행 시간은 1시간 35분으로 정하였다. 현재 스마트 폰에 적용되고 있는 수직 선형 진동 모터의 두께가 3.4 mm이므로 현재 연구 중인 수평 선형 진동 모터의 두께는 약 13% 감소된 두께 3 mm로 목표를 하고 있다. 따라서 가이드 판 스프링은 두께 3 mm인 수평 선형 진동 모터 안에 장착이 가능한 크기로 설계되어야 한다.

3.2 첫 번째 시제품

실험 결과로는, 첫 번째 시제품 스프링은 177 Hz의 고유진동수를 가지며 1.4 G ~ 1.5 G의 진동가속도를 전달

하였다. 하지만 Fig. 7은 약 21,000사이클(실험진행 시간 2분)안에 접힌 부분에서 피로 파괴가 발생한 것을 보여준다.

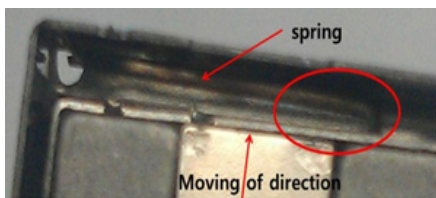


[Fig. 7] Fracture of spring(Two minute of operation time)

유한요소 해석을 이용하여 피로파괴가 일어난 부분에서 응력을 확인한 결과, 접힌 부분에서 약 $2.4868 \times 10^9 N/m^2$ 의 집중 응력을 확인하였다. 따라서, 접힌 부분에서 일어나는 집중 응력을 분산시켜야 한다는 결론을 얻었다.

3.3 두 번째 시제품

집중되는 응력을 분산시키기 위해 기존 스프링의 길이(L) 13% 증가와 높이(H) 32% 증가시켜 두번째 시제품 스프링을 설계를 하였다. 두 번째 진동 모터와 첫 번째 진동 모터가 동일한 크기를 가지기 위해 두께(T)와 스프링 운동 범위(W)는 고정하였다. 조정 후 유한요소해석 결과로는 집중응력이 약 30% 감소된 $1.7522 \times 10^9 N/m^2$ 로 확인되었다. 두번째 스프링의 실험 결과로는 178 Hz의 고유 진동수를 가지며, 약 1,000,000사이클(실험진행 시간 1시간 35분)동안 1.6 G의 진동 가속도를 전달 하였다. 따라서, 1.6 G에서 목표치의 피로 수명을 만족한다. 하지만, 진동력 및 수명 측정 실험 시 진동모터의 케이스와 스프링의 접힌 부분에서 충돌소음이 발생하였다. Fig. 8은 스프링의 운동 범위(W)가 이동 가능한 범위 보다 더 많이 움직이게 되므로 충돌이 발생하는 부분을 보여준다. 따라서, 스프링의 운동 범위(W)가 충분치 않다는 결론을 얻게 되었다.



[Fig. 8] View of collision when moving part was moving

3.4 세 번째 시제품

상기에서 말한 문제점을 보완하기 위하여 스프링의 운동 범위(W)값을 약 65% 증가 시켰다. 그리고 그 변화에 따라 두께(T) 27% 증가와 길이(L) 11% 증가되었다. 따라서, 총 3가지의 설계변수가 변경되었으며, 유한요소 해석 결과로는 처음 시도된 스프링보다 약 47.4% 정도의 집중 응력의 감소를 확인하였다. 또한, 실험 결과로는 188 Hz의 고유진동수를 가지며, 약 1,000,000사이클(실험진행 시간 1시간 35분)동안 1.73 G의 진동가속도를 전달하였다. 하지만 아직까지 목표치의 진동 가속도에 못 미치며, 고유진동수는 목표치보다 높게 측정 되었다. 따라서 목표치의 고유진동수에 만족시키기 위해 세번째 스프링을 제작시 이용한 강성값에서 약 13.5% 정도 적어야한다. 또한, 높은 진동 가속도를 위해서는 운동 방향으로의 변위가 더 필요하므로 스프링의 운동범위(W) 값의 증가가 필요하다는 결론을 얻게 되었다.

3.5 네 번째 시제품

네번째 시제품 스프링의 운동 범위(W)를 세번째 시제품 스프링보다 약 20% 증가 시켰다. 또한, 스프링의 운동 범위(W)값이 증가함에 따라 세가지 변수 두께(T), 길이(L)과 높이(H)도 각각 31%증가와 22%증가, 23% 감소되었다. 유한요소해석 결과로는 기존 스프링보다 약 47.8% 감소된 $1.2974 \times 10^9 N/m^2$ 의 집중응력을 보였다. 그리고 실험 결과로는 172 Hz의 고유진동수를 가지며, 1,000,000사이클(실험진행 시간 1시간 35분)동안 약 1.9 G의 진동가속도를 전달하였다. 따라서 네번째 시제품 스프링은 목표치인 진동가속도를 전달하며, 피로수명을 만족한다.

[Table 1] An overview of the four types spring

스프링 종류	조정된 변수	전달 가능한 진동 가속도 (가동시간 2시간)
첫 번째 시제품	-	1.4 G~1.5 G
두 번째 시제품	H,L	1.6 G
세 번째 시제품	T,L,W	1.7 G
네 번째 시제품	T,H,L,W	1.9 G

Table 1은 변수에 의해 조정된 판 스프링의 4가지 종류를 간략히 보여준다.

4. 결론

본 논문은 수평 선형 진동 모터 안에서 진동자의 가이

드 역할을 하는 한번 접은 판 스프링의 설계를 다루고 있다. 그리고 목표치를 만족하는 판 스프링을 설계하기 위하여 4가지 설계 변수를 이용하여 4차례의 시제품을 제작하여 실험하였다. 또한, FEA 해석과 실험을 통하여 약 1,000,000 사이클의 피로 수명 가지며, 약 1.9 G 의 진동 가속도를 전달하는 스프링을 개발하였다. 따라서, 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 두께 3mm의 작동기에 적용 가능하며, 약 1,000,000사이클의 피로 수명 만족한다.
- (2) 요구되어지는 고유진동수 만족한다.
- (3) 기존 수직 선형 진동 모터보다 약 26% 향상된 1.9G의 진동력을 만족한다.

References

- [1] Jae-Hee Kim and Jin-Ho Kim. A horizontally vibration linear actuator for slimming of smart phone. Proceedings of the ICCESSE Conference, 21-23; Phuket,Thailand, December, 2011.
- [2] Dongin Hi tech Co., Ltd., [Utility patents] HORIZONTAL TYPE VIBRATION MOTOR, <http://patent2.kipris.or.kr/pat/biblioa.do?method=biblioFrame,2012.07.11>
- [3] Samsung Electro-mechanics Co., Ltd., HORIZONTAL LINEAR VIBRATOR, <http://patent2.kipris.or.kr/pat/biblioa.do?method=biblioFrame, 2012.07.11>
- [4] Kim Ki Hyun, "Design and Control of Ultra-precision Dual Servo Stage Using Voice Coil Motor and Halbach magnet array linear motor", Ph.D Dissertation, the Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp.52~102, 2005.
- [5] Roy.R.Craig,Jr, "MECHANICS OF MATERIALS" ,JOHN WILEY & SONS, pp.796, second edition 2007.

김 진 호(Jin-Ho Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 공학사 (기계설계전공)
- 2002년 5월 : 미) U.C. Berkeley 공학 석사 (기계공학전공)
- 2002년 9월 ~ 2005년 9월 : 미) U.C. Berkeley Ph.D. (기계공학 전공)

• 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계

이 기 범(Ki-Bum Lee)

[준회원]



- 2005년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 학부생

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계