

실리콘 압저항형 진동 센서를 이용한 Voice-coil형 구동기의 미소 전자력 측정

論 文

48C - 2 - 13

The Micro Electromagnetic Force Measurement of Voice-coil Actuator
using Semiconductor Piezoresistive Type Vibration Sensor

權 奇 珍* · 李 起 讚** · 朴 世 光***
(Kijin Kwon · Kichan Lee · Sekwang Park)

Abstract - Semiconductor piezoresistive type vibration sensor was fabricated by using semiconductor process and micromachining technology. To measure the micro electromagnetic force between coil and magnet, fabricated vibration sensor was used. To apply micro electromagnetic force produced from the micro exciter, small-sized NdFeB permanent magnet was attached on the mass of the fabricated vibration sensor. The measured electromagnetic force are about 5~180dyne when the applied sinusoidal current of 1kHz in the range of 1.5~8mA. The measurement of micro electromagnetic force was performed by changing the distance between coil and magnet. Output characteristics of micro electromagnetic force according to the applied coil current were linear. Furthermore, output results were used to get the transfer constant that is important to decide the efficiency and the performance of the coil and magnet.

Key Words : Semiconductor piezoresistive type vibration sensor, Coil, Magnet, Linear, Transfer constant

1. 서론

반도체 공정 기술과 마이크로머시닝 기술을 이용한 진동 센서가 개발되면서 다양한 응용 분야에 적용되고 있다. 진동 측정 범위도 응용 분야에 적합하도록 개발되고 있다. 진동 센서는 압전 소자를 이용하는 압전형 진동 센서, 반도체의 압저항 변화를 이용하는 압저항형 진동 센서, 정전 용량 변화를 이용하는 용량형 진동 센서, 레이저 광을 이용하는 광형 진동 센서 등 여러 가지 형태로 연구 개발되고 있다. 이러한 진동 센서가 가장 많이 응용되고 있는 분야는 기계 설비의 고장 진단, 교각의 진동 진단, 지진 감지 및 미소 진동 측정 등에 널리 쓰이고 있다. 특히, 기계 설비의 고장 진단 분야에서는 진동 센서를 이용하여 기계 설비의 진동을 계측함으로써 설비를 분해하지 않고 이상을 검출할 수 있다. 또한, 교각의 고유 공진 주파수를 측정함으로써 교각의 안정도를 판별할 수 있을 뿐 만 아니라 지진의 예측 등에도 응용되고 있다.[1, 2, 3]

최근 마이크로머시닝 기술에 힘입어 급속히 발전하고 있는 MEMS(Microelectromechanical system)분야에서 초소형 공심 코일과 마그네트의 진동 운동을 응용한 마이크로 소자가 많이 연구 개발되고 있다. 그러나, 이들 상호간에 작용하는 미소 전자력을 이론이나 실험적으로 정확히 분석한

연구 사례는 매우 미비한 실정이다.

특히 다이아프래임에 부착된 소형 영구 자석은 항상 쌍극을 가지면서 존재하며, 코일에서 발생된 자계와 3차원적인 공간에서 상대적인 위치에 따라 힘이 결정되므로, 매우 복잡한 근사 모델로서 존재한다. 따라서 컴퓨터에 의한 수치 해석 방법만이 요구되고 있다.[4, 5]

기존의 진동 센서로서는 코일과 마그네트의 크기가 소형이고, 운동 변위가 작은 이들의 상호간에 작용하는 미소 전자력을 측정하는 것이 불가능하다. 따라서, 레이저 광을 이용하여 코일과 마그네트간의 미소 변위를 측정하여 이를 전자력으로 환산하는 방법이 현재 사용되고 있다.[6, 7] 그러나, 이러한 방법은 비교적 정확하지만 장치의 부피가 크고 가격이 고가이며, 전자력으로 환산하기 위한 진동계의 모델이 설정되어야 하므로 적지 않은 문제가 있다.

본 연구에서는 이러한 레이저광 방식의 변위 측정에 따른 문제점을 보완하여 직접 코일과 마그네트간에 작용하는 미소 전자력을 간단히 측정할 수 있는 연구를 수행하였다. 반도체 공정과 마이크로머시닝 기술을 이용하여 빔과 질량부를 가지는 압저항형 진동 센서를 제작하였고, 제작된 진동 센서는 가속도, 진동, 힘 등을 측정할 수 있도록 설계하였다.[8, 9] 그리고, 제작된 진동 센서의 질량부에 마그네트를 부착함으로써 코일과 마그네트 사이에 작용하는 미소 전자력을 정량적으로 간단히 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 코일, 마그네트 및 진동 센서의 제작

2.1 코일과 마그네트의 구성

* 準 會 員 : 慶 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

** 正 會 員 : 慶 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 研 究 員 · 工 博

*** 正 會 員 : 國 家 大 學 代 表 學 科 助 教 授 · 工 博

接受日字 : 1997年 8月 5日

最終完了 : 1998年 12月 18日

실험에 사용된 코일은 테프론이 코팅된 직경 0.05mm의 구리선을 사용하였다. 그리고, 이 전선을 500, 1000, 1500, 2000회로 감아 코일 내경이 0.9mm인 공심으로 코일을 제작하였다. 이렇게 제작된 코일을 XYZ 초소형 조작기(Micro manipulator)에 고정시켜 각 방향으로 미세하게 거리를 조정할 수 있도록 설치하였다. 사용된 마그네트는 NdFeB 재질의 영구 자석을 직경 1.98mm, 길이 0.76mm, 무게 20.4mg의 원통형으로 가공하여 제작하였다. 이 영구 자석의 자속 밀도는 KANETEC사의 가우스미터(TM-301)에서 제공되는 프로브 상에 자석을 접촉시켜 자속밀도를 측정할 결과 1500[G]로 나타났다. 표 1과 2는 사용된 코일과 마그네트 부분의 사양을 요약한 것이다.

표 1 코일 사양

Table 1 The specification of coils

코일 종류	내경[mm]	외경[mm]	길이[mm]
500[turns]	0.9	3.60	1.52
1000[turns]	0.9	4.16	2.27
1500[turns]	0.9	8.01	1.85
2000[turns]	0.9	8.10	2.57

표 2 마그네트 사양

Table 2 The specification of magnet

재 질	NdFeB
직 경[mm]	1.98
길 이[mm]	0.95
무 게[mg]	20.4
자속밀도[G]	1500

2.2 진동 센서의 구성

미소 전자력을 측정하기 위한 진동 센서는 반도체 공정 기술과 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작하였다.[8] 센서는 길이가 3.2mm, 폭 1.8mm, 두께가 430 μ m이며 무게가 2.3mg인 질량부를 가지며, 이를 길이 830 μ m, 폭 400 μ m, 두께가 25 μ m인 빔(Beam) 4개가 지지하는 형태로 구성된다. 제작된 진동 센서의 질량부에 마그네트를 부착시켜 코일에 인가하는 전류에 따른 미소 전자력을 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 전자력 감지는 각 빔에 가해지는 외부의 힘에 의한 응력 분포 변화를 압저항의 변화로 측정한다. 그림 1과 2는 미소 전자력을 측정하기 위한 진동 센서의 구조를 나타낸 것이다.

4-inch, N-type (100)인 SDB 웨이퍼의 윗층 실리콘 두께가 25 μ m, 중간 절연층인 산화막 두께가 1 μ m, 아래 실리콘층의 두께가 440 μ m인 것을 진동 센서의 제작에 사용하였다. 미소 전자력 측정시, 빔이 파괴되는 것을 방지하고 질량부가 움직일 수 있는 공간(Mass space)을 마련하기 위하여 10 μ m 정도로 식각 공정을 수행하였다.

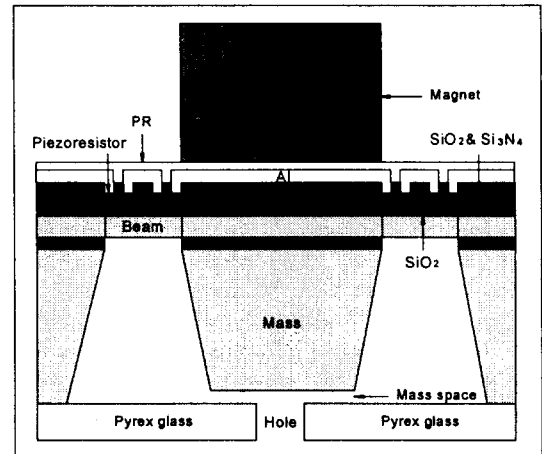


그림 1 진동 센서 구조 (옆면)

Fig. 1 The structure of vibration sensor (side view)

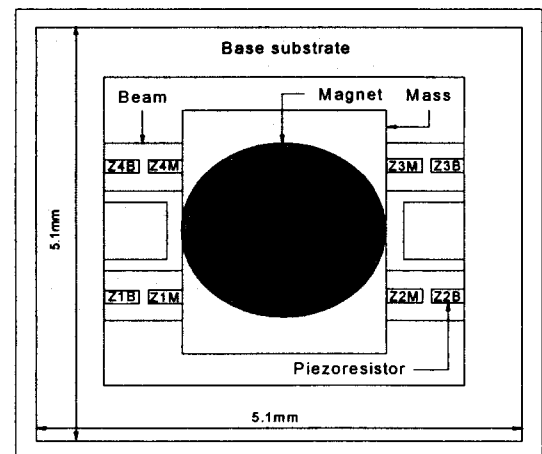


그림 2 진동 센서 구조 (윗면)

Fig. 2 The structure of vibration sensor (over view)

압저항체는 PBF를 스핀 코팅 후, 147 $^{\circ}$ C에서 하드 베이킹을 수행하고, 선확산(Pre-deposition) 공정으로 1000 $^{\circ}$ C의 N2 분위기에서 10분, BHF로 웨이퍼 표면에 형성된 BSG를 제거하였다. 후확산(Drive-in) 공정으로 1000 $^{\circ}$ C의 O2 분위기에서 30분간 보론(Boron)을 열확산시켜 압저항체를 형성시켰다. 압저항체의 저항값을 와이어 본딩 후, 측정할 결과, 약 2 k Ω 정도이었다. 식각 마스크로서 질화막을 증착시킨 후, KOH 식각 용액을 이용하여 진동 센서의 질량부를 형성하였고, 질량부의 모서리 부분이 과도 식각되는 것을 방지하기 위하여 보상 마스크를 사용하였다. Al 증착 및 패턴 공정을

수행한 다음, 파이렉스 유리를 양극접합 기술로 식각된 웨이퍼에 접합하였다. RIE 공정으로 실리콘을 건식 식각하여 진동 센서의 빔을 형성시켰다. 제작된 진동 센서에 마그네트를 부착하기 위하여 진동 센서의 질량부에 PR을 미량 투여한 후, 마그네트를 위치시키고, 150°C에서 건조하여 접착하였다.

그림 2에서 압저항체의 길이는 100 μ m, 폭은 10 μ m, 접합 깊이는 약 1000Å이며 최대 용력을 받을수 있도록 빔의 종단부에 가깝게 위치시켰다. 코일의 전류 변화로 자속이 변하여 자석과 질량부가 진동하게 되면 빔의 변형에 따라 압저항의 저항값이 변화하게 된다. 이 변화는 그림 3에서와 같이 8개의 압저항을 휘트스톤 브리지 회로로 구성하여 센서 출력 전압의 변화를 측정하였다.

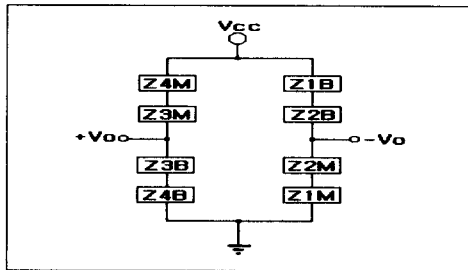


그림 3 진동 센서 압저항체 브리지 회로
Fig. 3 Wheatstone bridge circuit of piezoresistor of vibration sensor

3. 실험 장치

그림 4는 미소 전자력을 측정하기 위한 실험 장치의 전체 시스템에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 마그네트를 부착한

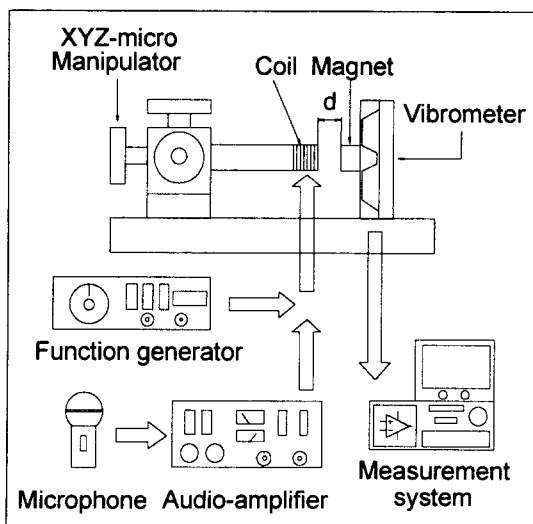


그림 4. 미소 전자력 측정 시스템의 개략도
Fig. 4 Schematic diagram of system for measurement of micro electromagnetic force

진동 센서의 앞 부분에 코일을 위치시킨 다음, XYZ마이크로 매니플레이트를 이용하여 코일과 진동 센서 사이의 이격 거리 d를 미세하게 변화시킬 수 있도록 설치하였다. 그림 5는 코일과 진동 센서부의 이격 거리를 미세하게 조절하기 위한 장치를 나타낸 것이다.

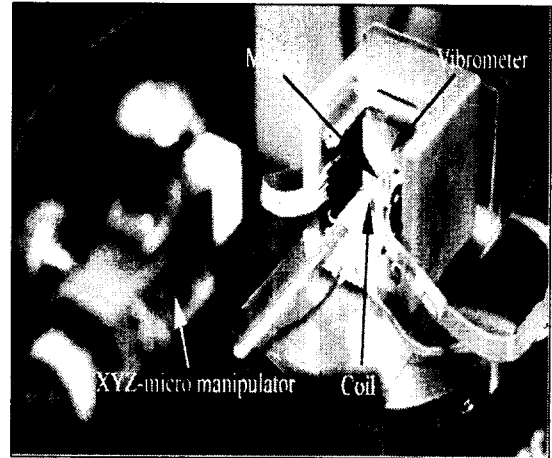


그림 5 코일, 마그네트, 진동 센서
Fig. 5 Coil, magnet and vibration sensor

그림 6은 마그네트를 진동 센서에 부착시킨 후, DIP 패키지에 센서를 실장한 사진을 나타낸 것이다. 실험장치에 설치된 코일에 주파수와 인가하는 전류의 진폭을 변화시키면서 이에 따른 미소 전자력을 측정하였다. 코일에 인가하는 전류와 주파수를 변화시키기 위하여 함수 발생기(Model: FG-1880BF, ED Lab.)를 사용하였고, 진동 센서의 출력을

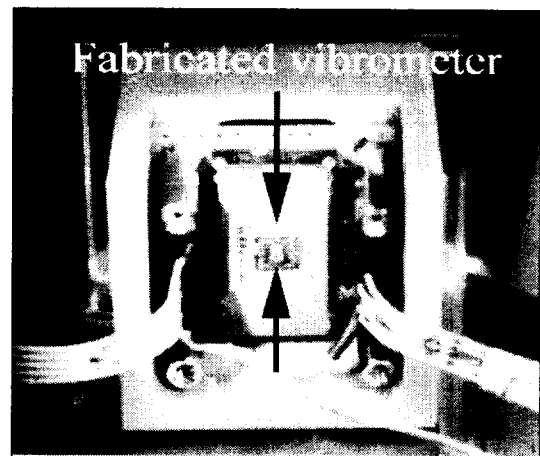


그림 6 제작된 진동 센서
Fig. 6 Fabricated vibration sensor

측정하기 위하여 OP Amp(LM207, National)를 사용하여 계장(Instrument) 차동 증폭회로를 구성하였다. 이 신호를 PC(486DX)에서 분석하기 위하여 A/D 변환기(MAX180, 12bit)와 C-프로그램으로 측정 시스템을 구성하였다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 실험 방법

제작한 코일에 함수발생기를 이용하여 정현파 전원을 인가하였다. 전원은 1kHz 주파수에 대하여 전류 프로브(A6032, Tektronix)와 결합된 디지털 스코프(TDS340A, Tektronix)를 통해 전류를 관측하면서 0mA에서 8mA에 이르는 범위까지 실험을 수행하였다. 함수 발생기에서 공급된 전류로 인하여 발생된 교번 자속의 변화에 따라, 진동 센서에 부착된 마그네트는 교번 자속의 힘을 받아 미세하게 진동을 하게 된다. 여기서 발생된 전자력을 제작된 진동 센서로 측정하였다. 이때 사용된 코일은 500, 1000, 1500, 2000회의 코일을 사용하였고, 코일과 마그네트 사이의 거리 d를 0.25, 0.50mm로 변화시키면서 전자력을 측정하였다.

4.2 제작된 진동 센서의 특성

미소 전자력을 측정하기 위해 마그네트가 부착된 진동 센서의 가속도 및 주파수 특성을 분석하였다. 제작된 진동 센서의 가속도 특성은 외부에서 인가된 가속도와 그 출력을 비교함으로써 구할 수 있다. 즉, 외부에서 가해진 힘 F와 가속도 a의 관계는 다음의 식 (1)로 표현된다.

$$F = M \cdot a \quad (1)$$

여기서 질량 M은 제작된 진동 센서에서 4개의 빔으로 지지되고 있는 질량부의 무게로 마그네트의 무게(20.4mg)와 마이크로머시닝 기술로 제작된 질량부의 무게(2.3mg)의 합으로 나타낼 수 있다. 결국 진동 센서의 출력은 식 (2)에서와 같이 진동체에 인가된 진동력 F가 ΔF만큼 변할 경우, 진동 센서의 구조에 의해 결정되는 게이지 상수 K와의 곱으로서 나타난다. 여기서 압저항체의 저항값 R이 ΔR만큼 변할 경우, 이를 Wheatstone bridge를 사용하여 전압으로 검출함으로써 진동력을 측정할 수 있게 된다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta F}{F} \quad (2)$$

제작된 진동 센서의 보정(Calibration)을 위해 기준 센서를 통해 가속도 특성을 조사하였다. 측정에 사용된 테스트 장치는 B&K사의 제품을 이용하였다. 여기에는 가속도를 인가할 수 있는 가진기(Vibration exciter: Model 4809)와 전력 증폭기(Power amplifier: Model 2706)를 사용하였으며, 기준 가속계로 ATOCHEM사의 가속도 센서(Model ACH-01)를 사용하였다. 제작된 진동 센서의 가속도에 대한 특성을 조사하기 위하여 제작된 진동 센서와 기준 가속도 센서를 가진기에 같이 위치시킨 후, 각 가속도에 대한 기준센서의 출력을 기준으로 제작된 진동 센서의 출력 전압을 측정하였다. 그림 7은 주파수 1kHz에서 제작된 진동 센서의 가속도에 대한 출력 특성을 나타낸 것이다. 또한 그림 8은 실험 장치를 통하여 진동 센서에서 코일에 인가되는 전류를 4.5mA로 일정하게 하고 주파수만을 가변시킨 결과이다. 이 결과는

마그네트가 부착된 진동 센서의 고유 공진 주파수가 약 1.7 kHz임을 보여주고 있다.

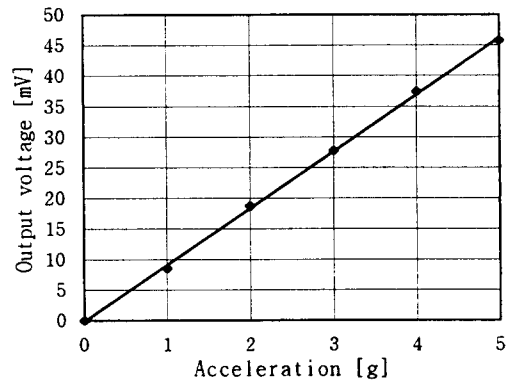


그림 7 제작된 진동 센서의 출력 특성

Fig. 7 Output characteristic of fabricated vibration sensor

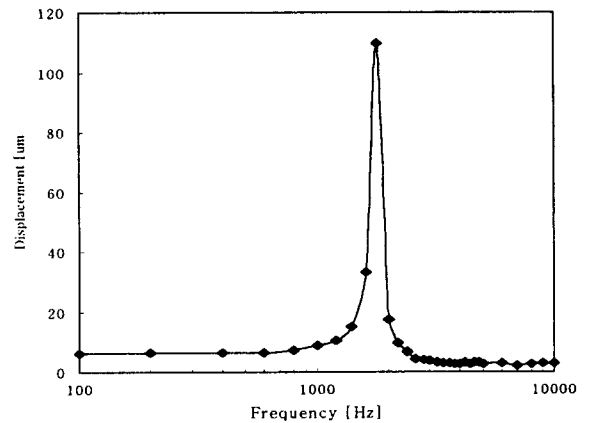


그림 8 제작된 진동 센서의 주파수 특성

Fig. 8 Frequency characteristics of fabricated vibration sensor

4.3 미소 전자력 측정 결과

코일과 마그네트 사이에 작용하는 미소 전자력을 측정하기 위하여 코일의 권수, 인가되는 전류의 크기 및 코일 마그네트간의 거리를 변화시키면서 발생하는 전자력을 진동 센서로 측정하였다. 코일에서 발생된 자속 밀도는 Biotsavart의 법칙에 의해 인가되는 전류에 비례하게 되며 교류에 의해 발생된 교번 자속은 영구 자석의 고정 자속에 대하여 인력과 척력에 해당하는 순간적인 힘을 발생시키게 된다. 즉, 코일에 공급되는 전기적 에너지를 자기적 에너지로 변환시키며, 이 자기적 에너지가 기계적인 힘인 전자력으로 마그네트에 전달하게 된다. 진동 센서를 통한

측정 결과를 이용하여 코일과 마그네트 사이의 성능과 효율을 결정하는 중요한 변수인 전달 상수(Transfer constant: Tr[dyn/mA])를 구하였다. 즉, 전달 상수는 코일에 인가하는 전류[mA]와 인가된 전류에 의하여 발생된 힘[dyn]의 비로서

나타낼 수 있다.

그림 9, 10, 11, 12는 각각 코일의 권선을 500, 1000 1500, 2000회로 제작한 다음 코일과 마그네트 사이의 이격 거리를 변화시키면서 1kHz 전류 입력에 대한 전자력을 측정 한 결과이다. 1kHz 정현파 실효치 전류를 1.5~8mA까지 코일에 인가했을 때 마그네트가 부착된 진동 센서를 통해 5~180dyne에 이르는 미소 전자력을 측정할 수 있었다. 또한 코일의 권수 및 코일 마그네트간의 이격 거리에 대한 미소 전자력도 정량적으로 측정하였다. 실험 결과에서 코일에 인가된 전류의 크기와 전자력의 관계를 보면 선형적인 관계를 보여주고 있으며, 그래프에서 기울기는 전달 상수를 나타내고 있다. 즉, 기울기가 크면 클수록 코일과 마그네트 사이의 효율이 개선되었다는 것을 알 수 있다. 각각에 대한 Tr 값을 계산하여 표 3에 나타내었다. 코일의 권수를 많이, 이격 거리를 짧게 할수록 Tr 값이 개선됨을 알 수 있다. 그러나, 실제 단층으로 감은 솔레노이드 코일의 경우 자속밀도는 권수에 비례하지만, 초소형 공심 코일을 다층으로 감아 제작하게 되면, 권선밀도와 형상(코일의 내경, 외경 및 길이)의 변화가 필연적으로 발생되며, 이로 인해 표 3에서도 전달상수가 완전한 선형성을 갖지 않는 것으로 추정된다.

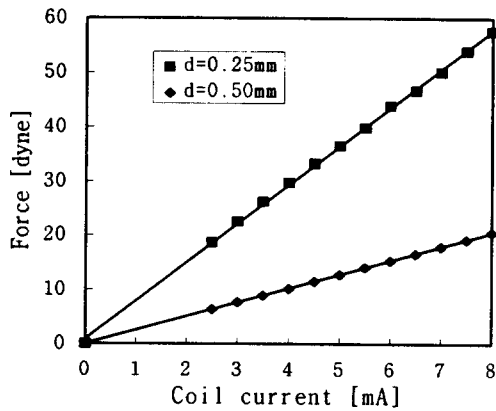


그림 9 코일 500회의 경우 센서 출력
Fig. 9 Sensor output according to coil-magnet distance and current at 500 turns

표 3 전달 상수
Table 3 Transfer constant

코일 권수 [turns]	코일 마그네트간 이격 거리 [mm]	전달 상수 [dyne/mA]
500 (내경: 0.9mm, 외경: 3.60mm)	0.25	4.11
	0.50	2.81
1000 (내경: 0.9mm, 외경: 4.16mm)	0.25	5.62
	0.50	4.09
1500 (내경: 0.9mm, 외경: 8.01mm)	0.25	19.17
	0.50	15.79
2000 (내경: 0.9mm, 외경: 8.10mm)	0.25	22.67
	0.50	18.50

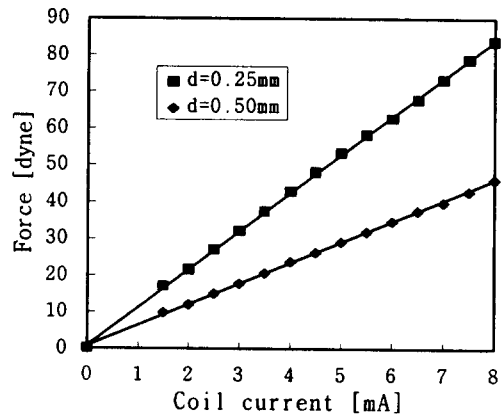


그림 10 코일 1000회의 경우 센서 출력
Fig. 10 Sensor output according to coil-magnet distance and current at 1000 turns

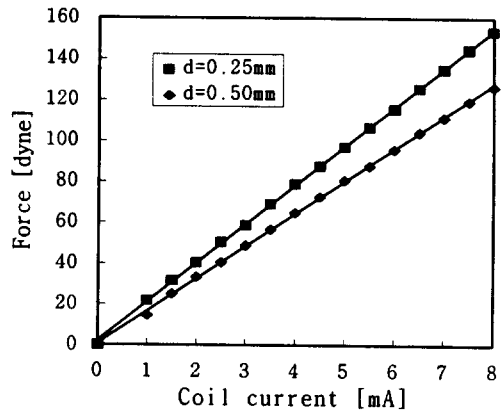


그림 11 코일 1500회의 경우 센서 출력
Fig. 11 Sensor output according to coil-magnet distance and current at 1500 turns

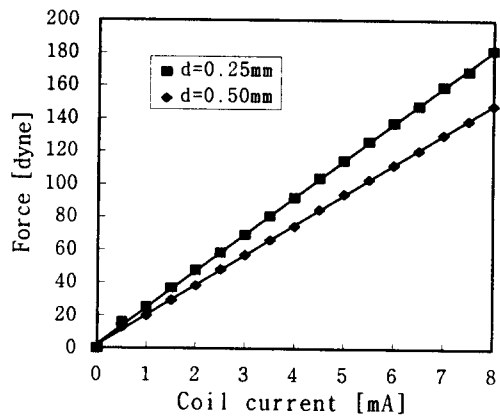


그림 12 코일 2000회의 경우 센서 출력
Fig. 12 Sensor output according to coil-magnet distance and current at 2000 turns

5. 결론

본 연구에서는 최근 MEMS 분야에 널리 응용되고 있는 소형 코일 및 마그네트의 실험 모델을 직접 제작하였고, 이들 사이에 작용하는 미소 전자력을 측정하기 위해 반도체 공정과 마이크로머시닝 기술을 이용하여 진동 센서를 제작하였다. 구성된 실험 장치를 이용하여 1kHz 정현파 전류를 1.5~8mA까지 코일에 인가했을 때, 자석이 부착된 진동 센서를 통해 5~180dyne에 이르는 미소 전자력을 측정할 수 있었다. 또한 코일의 권수 및 코일 마그네트간의 이격 거리에 대한 미소 전자력도 정량적으로 측정하였다. 실험 결과를 이용하여 코일과 마그네트 사이의 전달 상수를 계산할 수 있었으며, 직접 유도된 전달 상수는 코일 마그네트간 미소 전자력을 추정하는 데 더욱 정확하고 용이한 방법을 제시해 주었다. 또한, 이러한 결과는 최근 마이크로머시닝 기술을 응용한 이식형 보청기, 초소형 스피커 그리고, 진동형 발전기와 같은 전자구동기의 설계 및 제작 등에 응용될 수 있으리라 사료된다.[5, 6, 7]

본 연구는 1998년도 G7 의료공학기술개발사업의 연구과제명 "전자트랜스듀서 방식의 이식형 인공중이 개발"의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Yoshihiro Konaka and Mark G. Allen, "Differential Capacitance Microaccelerometer Using Multi-layer Electroplating Technology", Technical Digest of The 14Th Sensor Symposium, pp. 31~34, 1996

[2] Kijin Kwon, Yoshinori Matsumoto, Hidekazu Tanaka, Makoto Ishida and Sekwang Park, "A Study of Three Dimensional Polysilicon Type Accelerometer Using Silicon Direct Bonding Technology", Technical Digest of The 14Th Sensor Symposium, pp. 27~30, 1996

[3] Mitsuteru Kimura and Katsuhisa Toshima, "A New Type Optical Fiber Vibration Sensor", International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Vol 2, pp. 1225~1228, 1997

[4] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp. 225~294, 1989

[5] W. H. Ko, W. L. Zhu, and A. J. Maniglia, "Engineering principles of mechanical stimulation of middle ear", Otolaryngologic Clinics of North America, Vol 28, no. 1, pp. 29-41, 1995

[6] M. A. Harradine, T. S. Birch, J. C. Stevens and C. Shearwood, "A Micro-machined Loudspeaker for The Hearing Impaired", International Conference on Solid

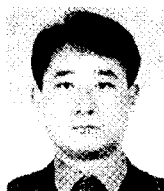
State Sensors and Actuators, Vol 1, pp. 429~432, 1997

[7] Timothy G. Dietz, Geoffrey R. Ball and Bob H. Katz, "Partially Implantable Vibrating Ossicular Prosthesis", International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Vol 1, pp. 433~436, 1997

[8] Kijin Kwon and Sekwang Park, "Three Axis Piezoresistive Accelerometer Using Polysilicon Layer", International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Vol 2, pp. 1221~1224, 1997

[9] Kijin Kwon and Sekwang Park, "A Bulk-micromachined Three-axis Accelerometer Using Silicon Direct Bonding Technology and Polysilicon Layer", Sensors and Actuators A66, pp.250~255, 1998

저 자 소 개



권 기 진(權奇珍)
1969년 3월 10일생. 1991년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 센서 기술 연구소 연구원



이 기 찬(李起讚)
1969년 6월 26일 생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



박 세 광(朴世光)
1954년 10월 25일생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 Case Western Reserve대 전기전자공학과 대학원 졸업(석사). 1988년 동 대학원 졸업(공학). 1988년~1989년 미국 LVAD Technology사 Project Leader. 현재 경북대 공대 전자전기공학부 부교수