

<학술논문>

청각 유모세포를 모사한 미소기계적 능동 증폭기

허윤정* · 이원철** · 김태윤** · 조영호†
 (2007년 4월 24일 접수, 2007년 9월 18일 심사완료)

Haircell-inspired Micromechanical Active Amplifiers
 Using the Mechanical Resonance Modulated by Variable Stiffness Springs

Yun Jung Heo, Won Chul Lee, Taeyoon Kim and Young-Ho Cho

Key Words : Micromechanical Active Amplifier (미소기계적 능동 증폭기), Variable Stiffness Spring (가변탄성체), Cochlear Hair Cell (청각 유모세포)

Abstract

We present a micromechanical active amplifier, inspired from the principle of the outer hair cells in cochlea, amplifying both displacement and force. The present micromechanical active amplifier modulates the resonant carrier motion using the variable stiffness spring whose stiffness changes proportionally to the input motion. We design, fabricate, and characterize two types of the amplifiers A and B, each having the variable stiffness spring for the maximum displacement gain and force gain, respectively. In the experimental study, the amplifier A shows the displacement gain of 5.62, which is 2.15 times larger than that of the amplifier B. The amplifier B shows the force gain of 10.0, resulting in 1.26 times larger value compared to that of the amplifier A. We experimentally verify that the haircell-inspired micromechanical amplifiers are capable to amplify both displacement and force.

기호설명

- G_D : : 미소기계적 능동 증폭기의 변위 증폭률
- G_F : : 미소기계적 능동 증폭기의 힘 증폭률
- G_E : : 미소기계적 능동 증폭기의 에너지 증폭률
- k_i : : 가변탄성체의 입력부 탄성계수
- k_o : : 가변탄성체의 출력부 탄성계수
- d_i : : 미소기계적 능동 증폭기의 입력변위
- d_o : : 미소기계적 능동 증폭기의 출력변위

1. 서론

미소기계적 증폭기⁽¹⁻³⁾는 고감도 미소센서 혹은 대변위 미소구동기에 있어 필수적인 요소로 활발히 연구되어 왔다. 그러나 기존의 미소기계적 수동 증폭기는 외부로부터의 에너지 입력없이 지레,⁽¹⁾ 박막,⁽²⁾ 또는 탄성체⁽³⁾를 이용하여 기계적 운동을 증폭하기 때문에 변위와 힘을 동시에 증폭할 수 없는 한계를 가지고 있다.

이에 본 논문에서는 청각기관 내 달팽이관 (cochlea)의 유모세포(hair cell)를 모사하여 변위와 힘을 동시에 증폭할 수 있는 새로운 개념의 미소기계적 능동 증폭기(Fig. 1)를 제안하였다. 유모세포는 Fig. 2 와 같이 세포 외부의 화학에너지를 사용하여 음향신호의 크기에 따라 세포의 탄성계수를 변조시킴으로써 음향신호를 증폭하는 기능을 가지고 있다.⁽⁴⁾ 본 논문에서 제안하는 미소기계적

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단

E-mail : nanosys@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

* 동경대학교 지능기계정보학과

** 한국과학기술원 바이오및뇌공학과, 디지털나노구동연구단

능동 증폭기는 입력변위에 따라 탄성계수가 변화하는 가변탄성체를 이용하여 증폭기의 공진 주파수를 변조시킴으로써 힘과 변위를 동시에 증폭시킬 수 있도록 고안되었다. 본 연구에서는 이러한 가변탄성체를 갖는 미소기계적 능동 증폭기를 설계, 제작하고 그 증폭 성능을 실험적으로 검증하였다.

2. 동작원리 및 설계

본 연구에서 제안하는 미소기계적 능동 증폭기는 가변탄성체와 캐리어구동기로 구성된다.(Fig. 3) Figure 4 는 입력변위에 따라 가변탄성체의 탄성

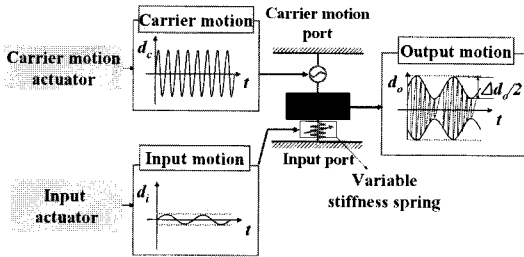


Fig. 1 Simplified model of the micromechanical active amplifier

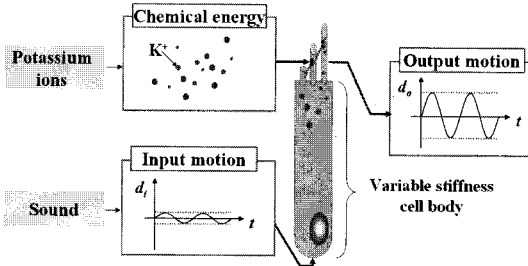


Fig. 2 Simplified model of the outer hair cell amplifier

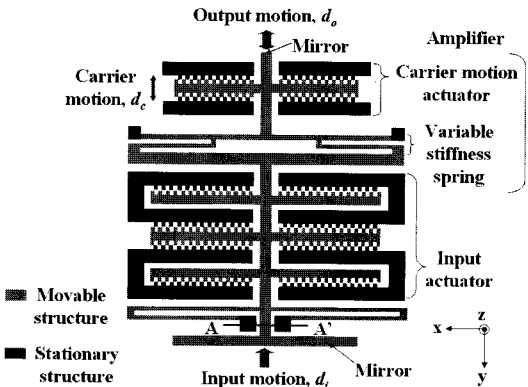


Fig. 3 Top view of the micromechanical active amplifier

계수가 변화하는 원리를 나타내고 있다. 여기서, 입력부 탄성계수는 출력부(P_o)가 고정되었을 때 입력부(P_i)의 변형에 대한 스프링 상수를, 출력부 탄성계수는 입력부(P_i)가 고정되었을 때 출력부(P_o)의 변형에 대한 스프링 상수를 의미한다. 이때, 입력구동기로부터 y 축 음의 방향으로 입력이 전달되면 가변탄성체의 보간거리(r) 및 면적관성 모멘트 ($I_o=I_x+Ar^2$)가 감소하게 되고, 이에 따라 탄성체의 출력부 탄성계수가 감소한다.[Fig. 4(b)] 반대로 가변탄성체에 y 축 양의 방향으로 입력이 전달되면 출력부 탄성계수가 증가하게 된다.[Fig. 4(c)] 이러한 가변탄성체의 탄성계수 변화는 Fig. 5 에서와 같이 증폭기의 공진 주파수를 변조시켜 캐리어구동의 진폭을 변화시킨다. 결과적으로, 본 증폭기는 입력 변위에 의해 변조되는 캐리어구동의 포락선으로부터 입력변위가 증폭된 결과를 얻는다.

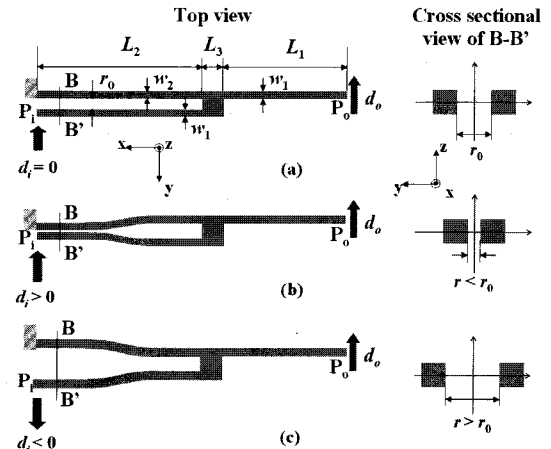


Fig. 4 Working principle of the variable stiffness spring: (a), (b), and (c), each showing the top view and the cross sectional view of the spring at the conditions of $d_i=0$, $d_i < 0$, and $d_i > 0$, respectively

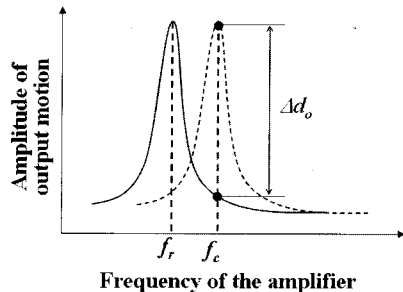


Fig. 5 Amplitude change of the output motion due to the resonant frequency shift from f_c to f_r of the micromechanical active amplifier

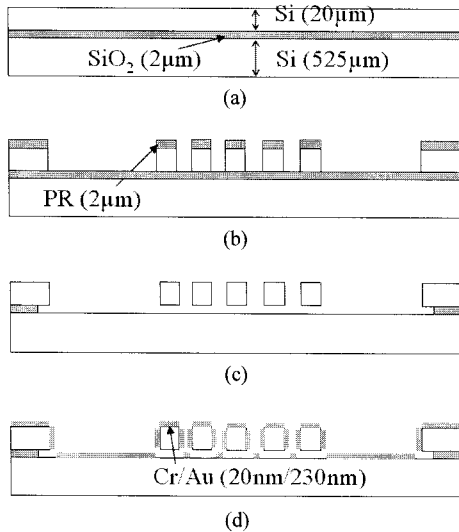


Fig. 6 Fabrication process of the micromechanical active amplifier showing the cross section along A-A' in Fig. 3

이러한 미소기계적 능동 증폭기의 변위, 힘, 및 에너지 증폭률은 다음 식과 같다.

$$G_D = \frac{\Delta d_o}{d_i} \quad (1)$$

$$G_F = \frac{k_o \Delta d_o}{k_i d_i} \quad (2)$$

$$G_E = \frac{k_o (\Delta d_o)^2}{k_i d_i^2} \quad (3)$$

여기서 G_D , G_F , 및 G_E 는 각각 변위, 힘, 및 에너지 증폭률을, d_i 와 Δd_o 는 각각 입력과 출력변위를, k_o 와 k_i 는 각각 가변탄성체의 출력부 및 입력부에서의 탄성계수를 나타낸다.

본 논문에서는 제안된 증폭기의 성능을 검증하기 위해 각각 가변탄성체 A와 B (Table 1)를 갖는 두 종류의 미소기계적 능동 증폭기를 설계하였다. 이때 가변탄성체의 탄성계수와 미소기계적 능동 증폭기의 증폭률은 Marc®을 이용한 수치해석으로 예측되었다. 가변탄성체 A는 입력변위에 대한 출력부 탄성계수의 변화, k_o/d_i ,가 최대값(1.18 N/m/μm)을 갖도록 하여 능동 증폭기 A가 최대의 변위 증폭률(3.77)을 얻도록 설계하였다. 한편 가변탄성체 B는 가변탄성체의 출력부와 입력부 탄성계수의 비, k_o/k_i ,를 최대(2.80)가 되도록 하여 능동 증폭기 B가 최대의 힘 증폭률(5.96)을 갖도록 설계되었다.

Table 1 Dimension and numerically estimated property of the variable stiffness spring in Fig. 4(a)

Spring dimension & property	Spring A	Spring B
Beam length (L_1, L_2, L_3) [μm]	176, 215, 20	174, 347, 20
Beam width (w_1, w_2) [μm]	3.2, 3.2	3.1, 6.6
Beam thickness (t) [μm]	20	20
Initial gap between beams (r_0) [μm]	3.8	3.8
Input stiffness (k_i) [N/m]	9.45	2.81
Output stiffness at $d_f=0$ (k_{o0}) [N/m]	8.27	7.88

3. 소자 제작

제안된 미소기계적 능동 증폭기는 Fig. 6과 같이 단일 마스크 공정을 통해 제작되었다. 먼저 SOI (Silicon On Insulator) 웨이퍼의 상부 실리콘 층을 RIE (Reactive Ion Etching) 공정으로 식각하고 산화 실리콘 층을 BOE (Buffered oxide etchant)로 습식 식각하여 증폭기의 구조를 형성하였다. 그 후 20 nm와 230 nm 두께의 크롬 및 금 박막을 제작된 소자에 마스크없이 증착하여 전극을 형성함으로써 소자 제작을 완료하였다. Figures 7, 8은 제작된 두 종류의 증폭기의 SEM 사진이다.

4. 성능시험 및 고찰

제작된 증폭기의 성능시험을 위해 1)가변탄성체의 탄성계수 변조를 확인하고 2)증폭기의 증폭성을 평가한 후, 3)입-출력구동 간의 간섭을 측정하였다. 제작된 능동 증폭기 A와 B의 캐리어구동기는 각각 18.5 kHz와 16.95 kHz의 정현파로 구동시켰고, 입력구동기는 고주파수의 캐리어구동의 진폭이 저주파수의 입력구동에 의해 효과적으로 변조되도록 500 Hz의 정현파로 구동시켰다. 입력구동기와 캐리어구동기의 변위는 Laser Doppler Vibrometer (해상도: 0.5 μm/sec, 최대 측정주파수: 250 kHz)를 이용하여 측정하였다.

Figure 9는 입력구동에 따른 가변탄성체 A와 B의 출력부 탄성계수의 변화를 측정한 그래프이다. 그래프의 기울기로부터 가변탄성체 A의 단위 입력변위당 출력부 탄성계수의 변화는 1.82 N/m/μm로 측정되어, 가변탄성체 B의 0.636 N/m/μm에 비해 2.86배 큰 값을 가짐을 확인하였다(Table 2). Table 2의 실험 값과 예측 값 사이의 오차는 가변탄성체의 탄성계수의 경우 실리콘의 RIE 공정오차에 의한 빔 크기 변화에 의한 영향에 의해 발생한 것으로 생각된다.

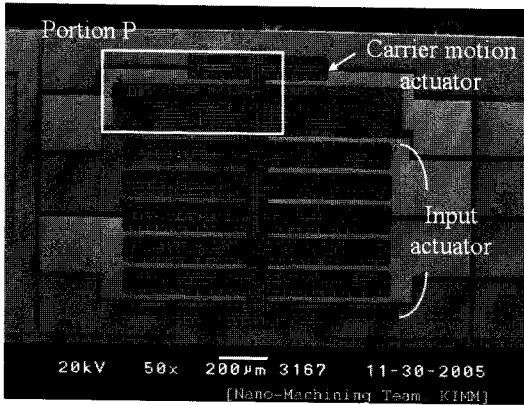


Fig. 7 SEM photograph of the micromechanical active amplifier

Table 2 Input-dependent spring stiffness and amplifier frequency

	Amplifier A	Amplifier B
Input motion (d_i) at 500Hz [μm]	0~0.945	0~0.786
Output stiffness (k_o) [N/m]	9.38~11.1 (8.27~9.21)	9.05~9.55 (7.88~8.47)
Output stiffness variation for input motion (k_o/d_i) [N/m/ μm]	1.82 (1.18)	0.636 (0.743)
Amplifier frequency (f_i) [kHz]	17.4~18.9 (16.3~17.2)	17.0~17.5 (15.9~16.5)
Amplifier frequency shift for input motion (f_i/d_i) [kHz/ μm]	1.59	0.646

* The values in parenthesis are the numerically estimated performance.

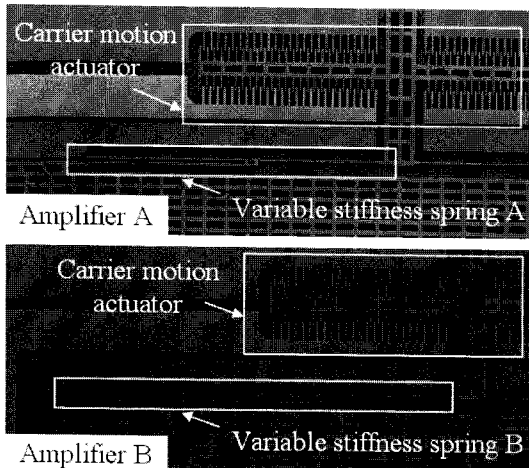


Fig. 8 SEM photographs showing the enlarged view of the portion P in the amplifiers A and B of Fig. 7

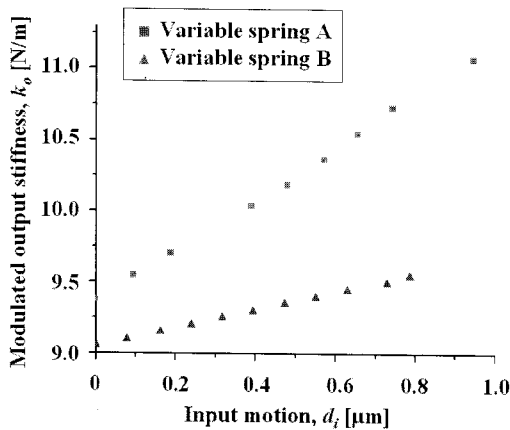
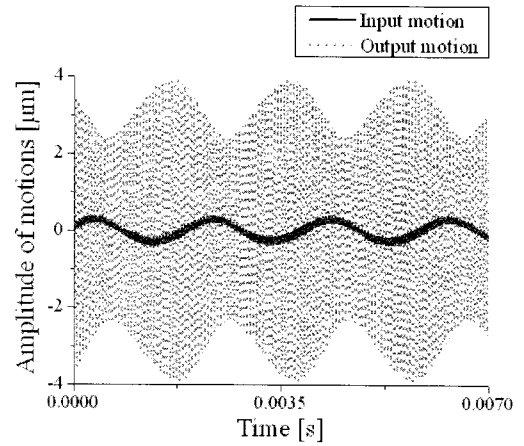
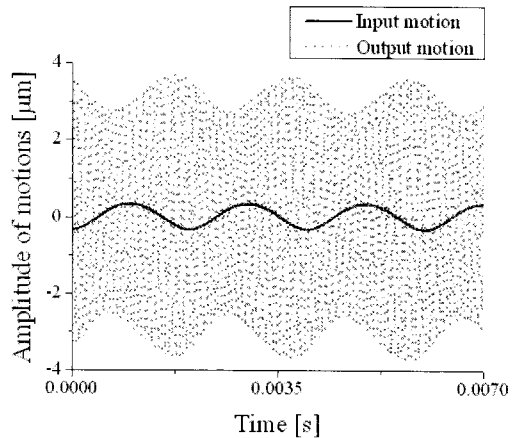


Fig. 9 Measured output stiffness of the variable stiffness springs modulated by the input motion



(a)



(b)

Fig. 10 Measured input and output responses of the micromechanical active amplifiers: (a) amplifier A; (b) amplifier B

제작된 두 미소기계적 능동 증폭기 A 와 B 의 변위, 힘, 에너지 증폭률은 앞서 측정된 가변탄성체의 탄성계수와 증폭기의 입력과 출력 응답 (Fig. 10)으로부터 산출할 수 있다. Figure 11 은 입력변위의 변화에 따른 출력변위 포락선의 진폭 변화를 나타낸 것으로서, 그 기울기로부터 변위 증폭률을 얻을 수 있다. 또한 증폭기의 힘 및 에너지 증폭률은 식 (2)와 (3)으로부터 각각 구할 수 있다. 그 결과, 능동 증폭기 A 는 변위 증폭률 5.62, 힘 증폭률 7.92, 에너지 증폭률 44.5 을 갖고, 능동 증폭기 B 는 변위 증폭률 2.62, 힘 증폭률 10.0, 에너지 증폭률 26.2 를 보이는 것으로 측정되어(Table 3), 능동 증폭기 B 가 A 보다 큰 힘 증폭률과 작은 변위 증폭률을 보임을 실험적으로 확인하였다. 따라서 가변탄성체의 설계에 따라 증폭률을 변화시킬 수 있음을 검증하였다.

제안된 미소기계적 능동 증폭기는 입력구동기와 캐리어구동기가 가변탄성체에 의해 연결된 구조를 가지고 있기 때문에 구동에 있어 서로 간섭을 일으킬 수 있다. Figure 12 는 이러한 구동 간섭을 측정 한 결과를 나타내고 있다. $8.06 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 의 캐리어구동이 증폭기의 입력단에 미치는 간섭의 크기는 능동 증폭기 A 와 B 각각 $0.214 \mu\text{m}$, $0.031 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며[Fig. 12(a)], $0.86 \pm 0.12 \mu\text{m}$ 의 입력구동이 출력단에 미치는 간섭은 각각 $0.419 \mu\text{m}$ 와 $0.020 \mu\text{m}$ 로 측정되었다[Fig. 12(b)]. 따라서, 출력부와 입력부의 탄성계수의 비, k_o/k_i , 가 최대가 되도록 설계된 가변탄성체 B 가 가변탄성체 A 에 비해 입-출력 구동 간의 간섭을 적게 발생시킴을 확인하였다.

Table 3 Measured performance of the micromechanical active amplifiers

		Amplifier A	Amplifier B
Motion	Input	0~0.945 μm	0~1.08 μm
	Output	0~5.07 μm	0~2.75 μm
	Gain	5.62	2.62
Force	Input	0~ $7.01 \times 10^{-6}\text{N}$	0~ $2.56 \times 10^{-6}\text{N}$
	Output	0~ $5.62 \times 10^{-5}\text{N}$	0~ $2.67 \times 10^{-5}\text{N}$
	Gain	7.92	10.0
Energy	Input	0~ $3.19 \times 10^{-12}\text{J}$	0~ $1.38 \times 10^{-12}\text{J}$
	Output	0~ $1.42 \times 10^{-10}\text{J}$	0~ $3.66 \times 10^{-11}\text{J}$
	Gain	44.5	26.2

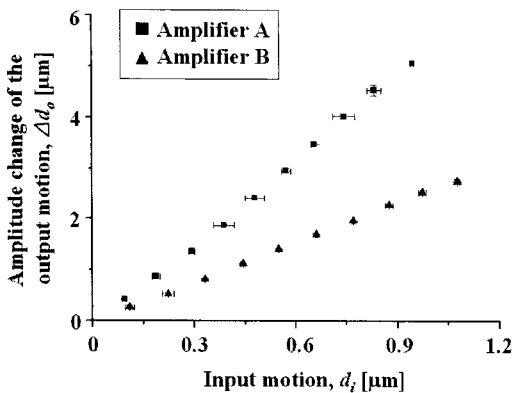
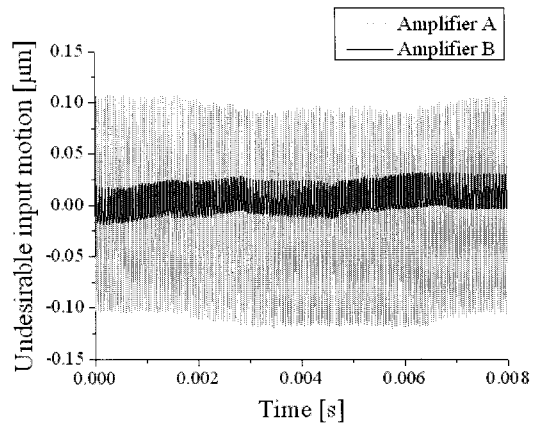
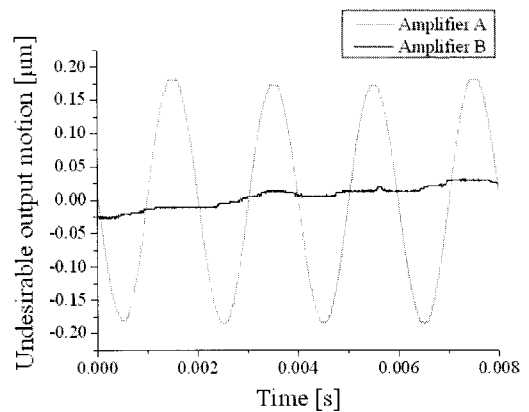


Fig. 11 Output amplitude change for varying input motions in the amplifiers A and B



(a)



(b)

Fig. 12 Motion interference: (a) the undesirable input motions induced by the carrier motion of $8.06 \pm 0.11 \mu\text{m}$; (b) the undesirable output motion induced by the input motion of $0.86 \pm 0.12 \mu\text{m}$

5. 결 론

본 논문에서는 입력변위에 따라 탄성계수가 변화하는 가변탄성체를 이용하여 캐리어구동의 공진을 변조시킴으로써 힘과 변위를 동시에 증폭시킬 수 있는 미소기계적 능동 증폭기를 제안하였다. 제작된 미소기계적 능동 증폭기 A와 B의 증폭성능을 실험적으로 확인한 결과, 능동 증폭기 A는 변위와 힘을 각각 5.62와 7.92의 증폭률로, 능동 증폭기 B는 각각 2.62와 10.0의 증폭률로 동시에 증폭할 수 있음을 검증하였다. 이러한 미소기계적 능동 증폭기는 고감도 미소센서와 대변위 미소구동에 응용될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 창의적연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 “생체모사기법

을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Aikele, M., Bauer, K., Ficker, W., Neubauer, F., Prechtel, U., Schalk, J. and Seidel, H., 2001, “Resonant accelerometer with self-test,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 92, pp.161~167.
- (2) Kang, T. G., Seo, K.-S., Cho, Y.-H., Baek, O. H., Hwang, W. L. and Moon, J. H., 1998, “A long-stroke thermopneumatic actuator for applications to microflow and pressure regulation,” *Actuator '98*, pp.62-65.
- (3) Kota, S., Hetrick, J., Li, Z., Rodgers, S. and Krygowski, T., 2000, “Synthesizing high-performance compliant stroke amplification systems for MEMS,” *MEMS 2000*, pp.164-169.
- (4) Dallos, P., Popper, A. N., and Fay, R. R., 1996, *Outer Hair Cell Motility in The Cochlea*, Springer-Verlag, New York, Chap. 7.