

나노 공진기의 1차 고유진동수에 미치는 링클 영향 연구

Study of Wrinkle Effect on Primary Natural Frequency of Nano-resonator

윤 주 일† · 강 상 욱*
Juil Yoon and S.W. Kang

(Received January 10, 2012 ; Revised November 15, 2012 ; Accepted November 15, 2012)

Key Words : Natural Frequency(고유진동수), Nano-resonator(나노 공진기), Wrinkle(링클)

ABSTRACT

Natural frequency of a nano-resonator via nano transfer printing is studied. Through a nano transfer printing, the hybrid metal/polymer membrane may evolve a wrinkle. Natural frequency of a wrinkled hybrid membrane decreases significantly, as the amplitude to wavelength ratio becomes larger. To address the design limit of a hybrid nano resonator, we perform parametric study using finite element analysis. Specifically, we study the effects of the Young's modulus ratio of the metal/polymer membrane, thickness ratio and wrinkle amplitude to wavelength ratio, respectively. The results from the parametric studies can serve as guideline to design hybrid nano resonators.

1. 서 론

21세기 시작과 함께 유연 전자회로(flexible electronics)에 대한 관심은 급속히 증대되고 있다. 이는 유연 전자회로의 다양한 분야로의 응용가능성에 기인한다. 응용 분야로는 종이처럼 얇고 유연한 기판에 구현이 가능함으로써 휘거나 말 수 있는 플렉서블 디스플레이(flexible display), 프린트 공정에 의하여 생산할 수 있는 박막 태양전지(thin film solar cell), 전자 피부 등이 있다⁽¹⁻³⁾. 유연 전자 회로를 구현하려면 얇고 유연한 기판(thin flexible substrate)에서의 제조가 필수적이며, 이는 전통적인 공정인 포토리소그래피(photolithography)공정에서는 적합하지 않으며, 새로운 공정 개발이 중요 이슈가 되고 있다. 고효율, 저비용의 유연 전자회로를 구현하기 위하여

마이크로-나노 단위의 다양한 신 공정들이 선보이고 있다. 특히나 최근에 제시된 나노 전사인쇄(nTP: nano-transfer printing)공정은 포토리소그래피공정에 비하여 연속 공정이 가능하며 다양한 소재 적용이 용이하고, 가격 경쟁력이 우수하기 때문에 주목을 받고 있다.

유연 전자회로기반의 응용분야로 나노 공진기(nano-resonator)에 대한 관심 또한 증대되고 있다. 나노 공진기의 응용분야로는 화학 분자, 단백질, 바이러스, 전자기장, 가속도, 압력 등의 탐지뿐만 아니라, 박막의 기계적 물성 측정 등이 포함된다⁽⁴⁻⁶⁾. 현재까지의 연구는 응용분야에 대한 기초적인 검증단계가 대부분이며, 이론적으로는 나노 공진기의 제조 공정, 물성, 형상, 두께 등에 따른 주 고유진동수 및 공진거동에 대한 연구가 수행되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. Maryland University의 Teng⁽⁷⁾그룹은 나노 전사 인쇄 공정을

† Corresponding Author ; Member, Hansung University, Dept. of Mechanical System Engineering
E-mail : juilyoon@hansung.ac.kr
Tel : +82-2-760-8008, Fax : +82-2-760-4329

* Member, Hansung University, Dept. of Mechanical System Engineering

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이용하여 나노 공진기를 제작하였으며, 나노 전사인쇄공정의 가능성을 보여주었다. 한편 나노 전사인쇄공정에 의한 인쇄층과 디바이스 층에는 전통적인 제조법에 의하여 제조된 경우보다 일반적으로 계면 접합성이 떨어지게 되며, 이로 인한 박리가 생기는 경우가 빈번하다^(7,8). 이러한 계면 박리를 줄이기 위하여 적합 조건을 조절하다 보면, 인쇄층에 원하지 않는 링클(wrinkle)이 나타나기도 한다⁽⁷⁾. 링클이 존재하는 경우, 나노 공진기의 고유진동수 및 공진거동의 변화가 예상되며, 이에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이 논문에서는 나노 전사 공정에 대한 간략한 소개와 나노 전사 공정에 의하여 제조시 공진기에서 링클이 주 고유진동수에 미치는 영향을 연구하고자 한다. 이를 위하여 2장에서는 나노 전사공정의 개념과 장단점을 소개하였다. 3장에서는 나노 공진기의 링클이 없는 경우의 고유진동수에 대한 해석, 하이브리드 멤브레인의 물성변화에 의한 효과 및 링클이 있는 경우 고유진동수에 미치는 효과를 다루었다.

2. 나노 전사 인쇄

전통적인 제조공정에서 구현이 불가능한 연속적인 인쇄기법에 대한 관심이 학계뿐만 아니라 산업계에서도 계속적으로 증대되고 있다. 연속 인쇄 공정에는 그라비어(gravure), 플렉소(flexography), 오프셋(offset), 그라비어-오프셋(gravure-offset)과 같은 인쇄기법들이 포함 된다. 또한 새롭게 두각 되고 있는 인쇄기법으로 나노 전사인쇄가 있다. 현재까지 나노 전사인쇄 공정은 유기 박막 트랜지스터(OTFTs), 탄소 나노튜브 박막트랜지스터 등에서 성공적으로 적용이 시도되고 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

나노 전사 인쇄공정의 개념을 간략히 설명하면 다음과 같다. (1) 이송층(transfer layer)과 인쇄층(printable layer)간의 접착 강도와 (2) 디바이스층(device layer)과 인쇄층간의 접착강도의 차이를 이용하여 이송층으로부터 디바이스 층으로 인쇄층을 옮기는 방식으로 인쇄를 진행하는 방법이다 나노 전사 인쇄공정의 개념도는 Fig. 1과 같다.

Teng⁽⁷⁾ 그룹은 이러한 나노 전사인쇄공정을 이용하여 나노 공진기를 제작하였다. 그들의 연구결과를 간단히 요약하면, 35 nm 금(Au)와 200 nm 폴리카보

네이트(PC)의 하이브리드 멤브레인을 인쇄층으로 사용하여, 실리콘 이송층위에 160 °C의 온도와 500 psi의 압력으로 접착을 이루어냈다. 이를 또 다른 PC 디바이스 층에 Au/PC 하이브리드 멤브레인을 130 °C의 500 psi의 압력을 가하고 분리함으로써, 원하는 패턴의 나노 공진기를 만들 수 있었다. 이러한 나노 전사인쇄 공정에서 중요한 점은 고온 가압시 사용온도는 전이온도(Tg)보다 낮아야 한다는 점이다.

이러한 나노 전사인쇄 공정에 의한 멤스 디바이스 생성은 연속공정 가능성, 소재 적용 용이성, 가격 경쟁력 등의 다양한 장점을 가지고 있지만 본질적인 약점 또한 가지고 있다. 예를 들면, 인쇄층은 이송층으로부터 쉽게 분리될 수 있어야 하며, 반면에 디바이스 층으로는 접착이 용이하여야 한다. 이러한 접착강도의 차이를 만들기 위하여 (1) 다양한 종류의 물질들이 사용되거나, (2) 이송시의 속도 차를 이용하거나, (3) 적절한 압력과 온도를 사용하는 방법들이 시도되고 있다. 이러한 다양한 시도에도 불구하고 나노 전사인쇄 공정에서는 계면 접합성이 떨어지게

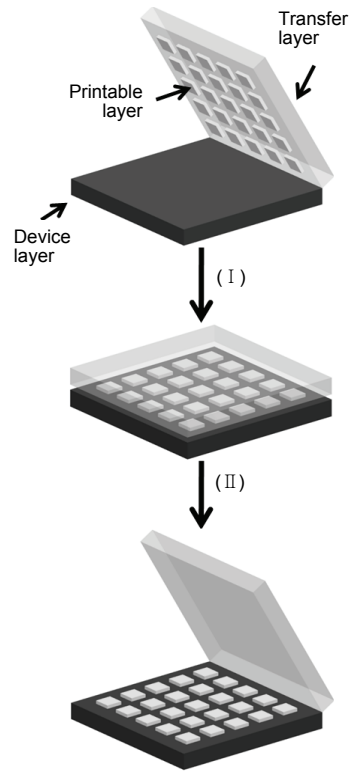


Fig. 1 Schematics of the nano-transfer printing

된다. 이는 전통적인 공정과정인 화학 기상 증착(CVD), 원자층 증착(ALD) 공정 등에서는 일반적으로 고온 고압에서 공정이 수행되기 때문이다.

3. 나노 공진기의 고유진동수 해석

나노 공진기는 박막⁽⁴⁻⁶⁾이나 탄소 나노튜브(carbon nanotube)^(11,12)를 이용하여 제작되고 있으며, 사용 목적이나 재질에 따라 다양한 형상이 존재한다. 이 연구에서는 Teng 그룹⁽¹⁰⁾에서 제시한 나노 공진기의 형상 및 재질 등에 기반을 두고 연구를 수행하였다. Teng 그룹에서 사용된 형상의 모식도는 Fig. 2(a)와 같다. 하부 기질(substrate) 위에 폴리머 박막과 금속 박막으로 이루어진 하이브리드 멤브레인 형태를 띄고 있으며, 이러한 하이브리드 멤브레인 형태는 나노 전자 인쇄공정에 적합하며, 물성의 변화가 용이한 장점이 있다.

유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.9를 사용하여 고유진동 해석을 수행하였다. 해석모델의 모식도는 Fig. 2(b)와 같다. 이때, h_t 는 상부층(top layer)의 두께, h_b 는 하부층(bottom layer)의 두께를 의미하며, E_t 는 상부층의 탄성계수, E_b 는 하부층의 탄성계수를 의미한다. 사용한 요소는 4노드 이중선형 감차요소(CPE4R)이며, 해석의 정밀도를 보장하기 위하여 해석대상물의 수렴도 테스트를 수행하였으며, 실제 해석에 사용한 요소 수는 대략 15~20만개이다. 이러한 요소수의 결정은 해석결과를 Teng⁽⁷⁾의 결과와 검증을 통하여 이루어졌다.

하이브리드 멤브레인의 금속 박막과 폴리머 박막은 박리나 균열 없이 완벽하게 연결된 경우로 가정하고 해석을 수행하였다. 경계조건으로는 하이브리드 박막이 양단 고정된 상태이다. 또한 이 해석에서는 하이브리드 멤브레인과 링클이 나노 공진기의 고유진동수에 미치는 영향을 파악하는 것이 주 목적이기 때문에 하단부의 캐비티(cavity) 부분은 해석모델에서 배제하였다.

3.1 박막 물성의 영향

일반적인 나노 전자 인쇄공정을 통하여 하이브리드 멤브레인을 만들기 위하여 사용되는 재질은 Au 박막, 수계은(nano silver-paste) 등이 있을 수 있다. 한편 폴리머 박막의 탄성계수는 소재와 제조공정에 따라 다양한 값을 얻을 수 있다. 예를 들어 PDMS (Polydimethylsiloxane)의 경우 가교제(cross linking agent)를 사용함으로써 기계적 물성치인 탄성계수를 10~100배 정도 변화시킬 수 있다. 따라서 금속 박막과 폴리머 박막으로 이루어진 하이브리드 멤브레인을 사용할 경우 멤브레인 내의 상부층과 하부층의 탄성 계수비(E_b/E_t) 조절이 용이하다. 이는 유연 전자회로 기반의 나노 공진기의 경우 고유진동수 조절이 매우 용이하며 폭넓은 응용 가능성을 의미한다.

따라서 하이브리드 멤브레인의 물성의 변화에 따른 나노 공진기의 고유진동수 변화 정도에 대한 연구를 수행하였다. 이때, 해석모델은 Fig. 2와 같이 링클이 없는 상태이며, L 은 캐비티 길이로서 5 mm이다. 물성변화에 의한 효과에 더하여 하이브리드 멤브레인 두께에 의한 효과도 고려하기 위하여, 2종류의 하이브리드 멤브레인을 선택하였으며, (1) $h_b=1$ mm, $h_t=0.035$ mm, (2) $h_b=0.105$ mm, $h_t=0.035$ mm이다. (1)의 경우 상부층에 비하여 상당히 두꺼운 하부층으로서 Teng의 나노 공진기의 수치와 동일하다. 해석에 사용한 파라미터 값은 Table 1과 같다.

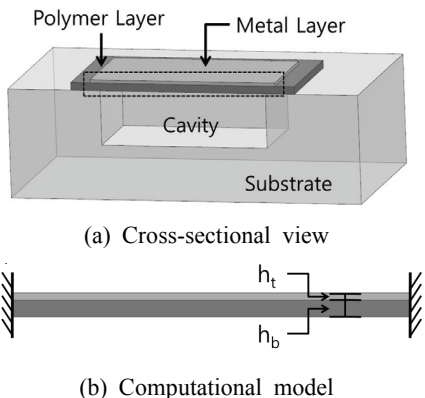


Fig. 2 Schematics of the hybrid nano resonator via nTP

Table 1 Parameter values used in FEM analysis

Parameter	Value
Au(E_t)	78 GPa
Polymer(E_b)	0.1~10 GPa
$h_t^{(7)}$	0.035 mm
$L^{(7)}$	5 mm

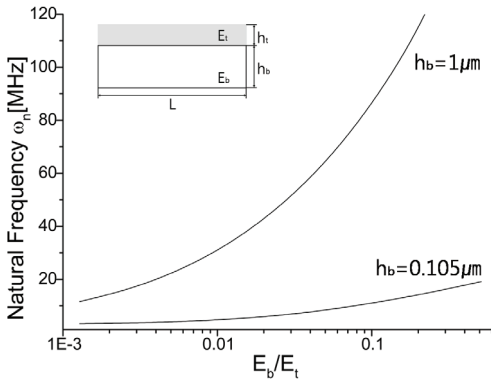


Fig. 3 Resonant frequency of hybrid nano-resonator with constant top layer thickness $h_t=0.035$ mm

나노 공진기의 고유진동수에 대한 해석 결과는 Fig. 3과 같다. 멤브레인의 상부층과 하부층의 탄성계수 비(E_b/E_t)가 증가함에 멤브레인의 고유진동수는 증가하였다. 예를 들어 폴리머 박막의 $h_b=1$ mm이며, 탄성계수 비가 0.001인 하이브리드 멤브레인의 고유진동수는 12 MHz에서, 탄성계수 비가 0.1인 경우 고유진동수는 거의 100 MHz에 이른다. 이 결과는 유연 전자회로 기반의 나노 공진기의 경우 비교적 간단한 폴리머 박막의 물성 개질을 통하여, 하이브리드 멤브레인의 탄성계수비 조절이 용이하며 이를 통한 공진기의 고유진동수 조절이 매우 폭넓음을 의미한다.

또한 이러한 경향성은 하부폴리머 박막의 두께가 얇을수록 감소한다. 예를 들어, 폴리머 박막의 탄성계수 $E_b=10$ GPa, 두께 $h_b=1$ mm인 경우, 1차 고유진동수는 34.84 MHz이며, 탄성계수 $E_b=0.1$ GPa인 경우라면, 1차 고유진동수는 11.56 MHz이다. 한편 하부 폴리머 박막의 두께가 매우 얇은 경우 ($h_b=0.105$ mm)인 경우는, 멤브레인의 길이/두께 비 (L/h)가 30을 넘으며, 하이브리드 멤브레인은 빔과 같은 거동(*beam-like behavior*)을 보이며, 오일러 빔 모델을 통하여 구한 고유진동수 값과 일치한다.

3.2 링클(wrinkle)

연성(soft) 재료와 강성재료로 이루어진 하이브리드 소재가 박막산업에 성능향상, 기능추가, 가격경쟁력 등의 이유로 각광받고 있다. 강성(stiff)재료가 연성재료 위에 증착이 될 때, 박막은 압축응력 등의 원인에 의하여 링클이 형성되곤 한다. 이러한 링클은

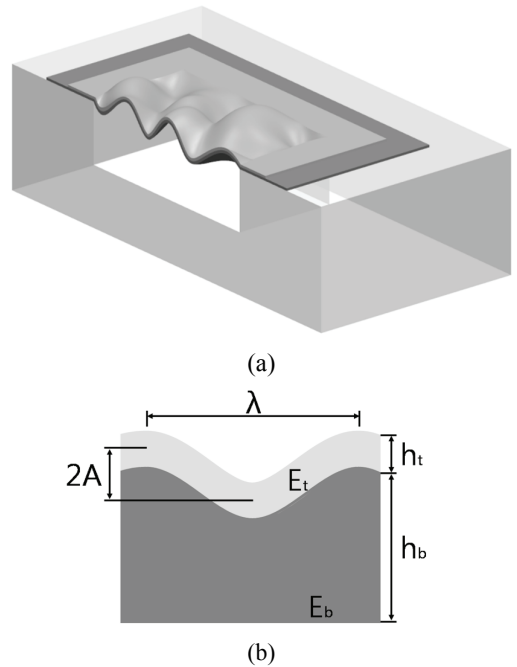


Fig. 4 (a) Schematics of the wrinkled membrane, (b) Stripe wrinkle model

일반적으로 부정적인 요소로 작용하나, 수축가능 도선(*stretchable interconnect*)^(13,14), 디바이스 형판⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 등의 분야에서는 링클을 인위적으로 유도하여 사용중이다.

링클의 종류에는 지그재그형태의 헤링본(*herringbone*) 구조, 2차원 형태인 스트라이프(*stripe*) 구조 등이 있다. 이 논문에서는 링클에 의한 나노 공진기의 고유진동수에 미치는 영향을 연구하는 것이 주 목적이므로, Fig. 4(b)에서와 같은 단순한 스트라이프 구조의 링클만 고려하였다. 이러한 링클에 대한 연구는 Suo 그룹 등을 통하여 많이 이루어졌으며, 기판과 박막의 탄성계수 불일치에 의하여 발생하는 링클과 관련된 결과를 정리하면 다음과 같다⁽¹⁸⁾.

$$\frac{2\pi h_t}{\lambda} = \left(\frac{4(1-\nu_t)^2 E_b}{E_t} \right)^{\frac{1}{3}}, \tag{1}$$

$$\frac{A}{h_t} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} - 1}, \tag{2}$$

여기서, 링클의 파장 λ 는 박막의 두께 h_t 와 상부층과

Table 2 The ratio of amplitude to wavelength(A/λ) of wrinkle structure

ϵ_0/ϵ_c	A/λ		
	$E_b/E_r=7.8$	$E_b/E_r=39$	$E_b/E_r=78$
1	0	0	0
1.1	0.0223	0.0131	0.0104
1.2	0.0316	0.0185	0.0147
1.3	0.0387	0.0226	0.0180
1.5	0.0500	0.0292	0.0232
2	0.0707	0.0413	0.0328
3	0.0999	0.0584	0.0464
5	0.1413	0.0827	0.0656
10	0.2120	0.1240	0.0984

하부층의 탄성계수의 비와 상부층의 푸아송 비 ν_r 에 의하여 결정된다. 또한 링클의 진폭의 크기 A 는 초기 내재 변형률(initial built-in strain) ϵ_0 와 임계 변형률 ϵ_c 에 의하여 결정된다. ϵ_0 는 일반적으로 박막의 생성조건에 의하여 결정되며, 잔유 응력(residual stress)이나 계면간의 불일치응력(misfit stress)등이 그 예 일수 있다. Teng 그룹의 나노 공진기에서도 링클이 관측되는데 이는 박막간의 열팽창계수 차이 등에 의하여 발달된 것으로 추정된다. 이 논문에서는 열팽창계수에 의한 링클의 생성은 다루지 않으며, 추후 논문에서 보고할 예정이다.

대표적인 Au/폴리머 박막 시스템의 경우, 탄성계수 비는 $E_b/E_r=7.8$ 이다. 초기 내재 변형률이 임계 변형율과 같은 경우는 링클의 진폭 대 파장 비 A/λ 는 0이며, 이는 평편한 박막/기판을 의미한다. 이에 반하여, 초기 내재 변형률이 임계 변형률 보다 크게 되면 링클의 진폭 대 파장 비 A/λ 또한 증가하게 되며, 박막에 링클이 심해짐을 의미한다. 보다 다양한 물성치에 대하여 링클의 진폭 대 파장 비 A/λ 를 Table 2에 정리하였다.

3.3 고유진동수에 미치는 링클의 영향

하이브리드 멤브레인으로 이루어진 나노 공진기에 대하여 링클에 의한 주 고유진동수의 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 링클의 진폭과 파장을 변화시키면서 주 고유진동수를 계산하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다.

링클의 진폭 대 파장 비 A/λ 가 증가함에 따라 고유진동수는 감소하였다. 이는 하이브리드 멤브레인

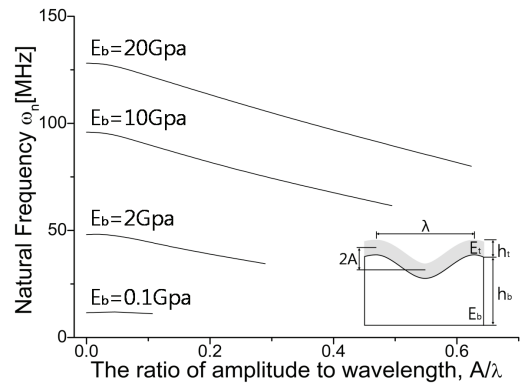


Fig. 5 Resonant frequency of hybrid nano-resonator with wrinkle

내의 링클의 정도가 증가함에 따라 링클을 고려하지 않은 경우에 비하여 고유진동수 예측이 크게 벗어날 수 있음을 의미한다. 특히나, 하이브리드 박막의 폴리머 층의 탄성계수가 증가함에 따라 하이브리드 멤브레인의 주 고유진동수는 링클의 진폭 대 파장비의 증가에 따라 매우 크게 감소하였다. 예를 들어, 폴리머 박막의 탄성계수가 $E_b=2$ GPa, $A/\lambda=0$ 인 경우, 1차 고유진동수는 48.03 MHz으로부터 $A/\lambda=0.29$ 인 경우, 1차 고유진동수는 34.45 MHz로 28.3 % 감소하였다. 이에 반하여, $E_b=10$ GPa, $A/\lambda=0$ 인 경우, 1차 고유진동수는 95.85 MHz로부터 $A/\lambda=0.49$ 인 경우, 1차 고유진동수는 61.55 MHz로 35.8 % 감소하였다. 따라서 강성(stiff) 폴리머를 사용하는 경우라면, 링클에 의한 고유진동수 변화 폭이 증가하므로, 제조공정상에서 특별한 주의가 필요하다고 판단된다. 한편 하부층의 탄성계수가 매우 연한 경우(예: 100 MPa), 링클에 의한 고유진동수 변화는 거의 없음을 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 링클이 발생하게 되면, 전체 멤브레인의 굽힘강성(bending stiffness)이 감소하기 때문으로 설명될 수 있다. 실제로 유연 전자 소자에서 인위적으로 링클을 발생시켜서 사용하는 경우도 이러한 이유 때문이다.^(13,14)

4. 결 론

나노 전자 인쇄공정에 의하여 제작된 하이브리드 나노 공진기의 링클에 의한 주 고유진동수에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 전자 인쇄 공정의 특징상 하이브리드 멤브레인에서는 박리나 링클이

발생할 수 있으며, 이러한 링클은 나노 공진기의 고유진동수에 영향을 미칠 수 있다. 이 연구의 중요 사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) 링클의 진폭 대 파장 비 A/λ 가 증가함에 따라 고유진동수는 감소하며, 특히나, 하이브리드 박막의 폴리머 층의 탄성계수가 증가함에 따라 이러한 경향성은 더욱 증가한다.

(2) 링클의 진폭 A 는 나노 공진기의 고유진동수 변화에 큰 역할을 하며, 이는 공정상의 초기 내재 변형률(initial built-in strain)을 줄임으로써, 링클의 효과를 완화 시킬 수 있다. 이 논문의 연구결과에 이어 박막간의 열팽창계수를 고려하여 링클의 생성과 내재 변형률간의 관계에 대하여 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제임.

참 고 문 헌

(1) Nathan, A. and Chalamala, B. R., 2005, Special Issue on Flexible Electronics Technology, Part 1: Systems and Application, Proc IEEE 2005, Vol. 93, No. 7, pp. 1235~1238.

(2) Someya, T., Kato, Y., Sekitani, T., Lba, S., Noguchi, Y., Murase, Y., Kawaguchi, H. and Sakurai, T., 2005, Conformable, Flexible, Large-area Networks of Pressure and Thermal Sensors with Organic Transistor Active Matrixes, PNAS, Vol. 102, No. 35, pp. 12321~12325.

(3) Wagner, S., Lacour, S., Jones, J., Hsu, P., Strum, J., Li, T. and Suo, Z., 2004, Electronic Skin: Architecture and Components, Physica E., Vol. 25, No. 2, pp. 326~334.

(4) Herrera-May, A. L., García-Ramírez, P. J., Aguilera-Cortés, L. A., Plascencia-Mora, H., García-González, L., Manjarrez, E., Narducci, M. and Figueras, E., 2011, Analytical Modeling for the Bending Resonant Frequency of Sensors based on Micro and Nanoresonators with Complex Structural Geometry, IEEE Sensors J., Vol. 11, No. 6, pp. 1361~1374.

(5) Waggoner, P. S., Tan, C. P., Craighead, H. G.,

2010, Atomic Layer Deposited Silicon Dioxide Films on Nanomechanical Silicon Nitride Resonators, J. of Applied Physics, Vol. 107, No. 11, p. 114505.

(6) Ilic, B., Krylov, S. and Craighead, H. G., 2010, Theoretical and Experimental Investigation of Optically Driven Nanoelectromechanical Oscillators, J. of Applied Physics, Vol. 107, No. 3, p. 034311.

(7) Dechaumphai, E., Zhang, Z., Siwak, N. P., Ghodssi, R. and Li, T., 2011, Resonant Frequency of Gold/polycarbonate Hybrid Nano Resonators Fabricated on Plastic via Nano-transfer Printing, Nanoscale Research Letters, Vol. 6, No. 90, pp. 1~8.

(8) Tucker, M. B., Hines, D. R. and Li, T., 2009, A Quality Map of Transfer Printing, J. of Applied Physics, Vol. 106, No. 10, p. 103504.

(9) Liang, X., Fu, Z. and Chou, S. Y., 2007, Graphene Transistors Fabricated via Transfer-printing In Device Active-areas on Large Wafer, Nano Lett, Vol. 7, No. 12, pp. 3840~3844.

(10) Hines, D. R., Ballarotto, V. W., Williams, E. D., Shao, Y. and Solin, S. A., 2007, Transfer Printing Methods for the Fabrication of Flexible Organic Electronics, J. of Applied Physics, Vol. 101, No. 2, p. 024503.

(11) Ke, C. H., 2009, Resonant Pull-in of a Double-sided Driven Nanotube-based Electro-mechanical Resonator, J. of Applied Physics, Vol. 105, No. 2, p. 024301.

(12) Kim, I. K. and Lee, S., 2011, Nonlinear Dynamic Response of Cantilevered Carbon Nanotube Resonator by Electrostatic Excitation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 813~819.

(13) Watanabe, M., Shirai, H. and Hirai, T., 2002, Wrinkled Polypyrrole Electrode for Electroactive Polymer Actuators, J. of Applied Physics, Vol. 92, No. 8, pp. 4631~4638.

(14) Lacour, S. P., Jones, J., Suo, Z. and Sigurd, W., 2004, Design and Performance of Thin Metal Film Interconnects for Skin-like Electronic Circuits, IEEE Electron Device Letters, Vol. 25, No. 4, pp. 179~181.

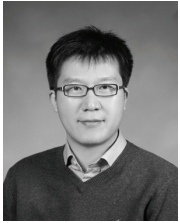
(15) Bowden, N., Brittain, S., Evans, A. G., Hutchinson, J. W. and Whitesides, G. M., 1998, Spontaneous Formation of Ordered Structures in Thin

Films of Metals Supported on an Elastomeric Polymer, *Nature*, Vol. 393, No. 6681, pp. 146~149.

(16) Bowden Ned, T. S. Huck Wilhelm, Paul Kateri E., White sides George M, 1999, The Controlled Formation of Ordered, Sinusoidal Structures by Plasma Oxidation of an Elastomeric Polymer, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 75, No. 17, pp. 2557~2560.

(17) Yoo, P. J., Suh, K. Y., Park, S. Y. and Lee, H. H., 2002, Physical Self-assembly of Microstructures by Anisotropic Buckling, *Abv. Mater(Weingeim, Ger)*, Vol. 14, No. 19, pp. 1383~1387.

(18) Lacour, S. P., Wagner, S., Huang, Z. and Suo, Z., 2003 Stretchable Gold Conductors on Elastomeric Substrates, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 15, pp. 2404~2407.



Juil Yoon received a B.S. degree and M.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Yonsei University in 1994 and in 1996, respectively. In 2005, He received a Ph.D degree Dept. of

Mechanical Engineering from University of Alberta. He is currently working in Hansung University as a professor of the mechanical system engineering. His research interests include Thermo-mechanical reliability of micro-electronic devices and micro-systems thin film mechanics, mechanics of the micro/nano structures in flexible macroelectronics, mechanics of carbon nanotubes, nanotube ropes and nanotube composite materials.



Sang-Wook Kang received a B.S., M.S., and Ph.D degree in Dept. of Mechanical Design Engineering from Seoul National University in 1992, 1994 and 1999, respectively. He is currently working in Hansung University as a professor of the mechanical system engineering. His research interests include the development of NDIF method for free vibration analysis of membrane, acoustic cavities, and plates with general shapes.