마이크로 머시닝으로 제작한 기계적 가이드를 갖는 정전용량 선형 인코더

강대실 · 문원규⁺

Micro-Machined Capacitive Linear Encoder with a Mechanical Guide

Daesil Kang and Wonkyu Moon⁺

Abstract

Contact-type Linear Encoder-like Capacitive Displacement Sensor (CLECDiS) is a novel displacement sensor which has wide measurable range with high resolution. The sensor, however, is very sensitive to relative rotational alignment between stator and mover of the sensor as well as its displacement. In addition to, there can be some disturbances in the relative rotational alignment, so some noises occur in the sensor's output signal by the disturbances. This negative effect of the high sensitivity may become larger as increasing sensitivity. Therefore, this negative effect of the high sensitivity has to be compensated and reduced to achieve nanometer resolution of the sensor. In this study, a new type capacitive linear encoder with a mechanical guide is presented to reduce the relative rotational alignment problem. The presented method is not only to reduce the alignment problem, but also to assemble the sensor to the stage conveniently. The method is based on a new type CLECDiS that has mechanical guide autonomously. In the presented sensor, when the device is fabricated by micro-machining, the guide-rail is also fabricated on the surface of the sensor. By the direct fabrication of the guide-rail with high precision micro-machining, errors of the guide-rail can be reduced significantly. In addition, a manual yaw alignment is not required to obtain large magnitude of the output signal after the assembly of the sensor and the stage. The sensor movement is going to follow the guide-rail automatically. The prototype sensor was fabricated using the presented method, and we verify the feasibility experimentally.

Keywords : Capacitive displacement sensor, Guide rail, Linear encode, Alignment error

1. 서론

선형 인코더 방식은 카운터를 이용함으로써, read-out 회로의 신호대 잡음비에 의하여 결정되는 동적영역의 한계를 넘을 수 있도록 해 준다. 정전용량 변위 센서 분야에서도 작은 측정 영역을 극복하고자 comb-type 이라 불리는 고유의 선형 인코더를 도입하였고, 정전용량 선형 인코더의 민감도 향상과 최적화를 위한 다양한 연구가 진행되었다[1-6]. Comb-type 센서는 기존의 면적변화형 정전용량 센서와 기본적으로 동일하지만, 전극을 주기적으로 형성

하여 주기적인 출력 신호를 얻을 수 있도록 한 것이다(pp. 12-16 in [7]). 즉, 면적변화형 센서에 신호의 주기를 카운트하는 선형 인코더를 접목함으로써, 분해능 대 최대 측정영역의 비(이하 '동적영역')가 회로의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 증가할 수 있게 되었다.

그러나 comb-type 센서에서의 동적영역 확장이 용이해 진것은 측정영역의 확장이 용이해진 것을 의미하는 것일 뿐, 분해능의 향상에서는 데는 여전히 일반적인 면적변화형 정전용량 센서의 한계를 벗어나지 못했다. 이는 면적변화형 정전용량 센서에서 전극의 면적이 줄어들 때, 출력 신호에서 충분한 민감도를 얻을 수 있기 위해서는 갭도 동일한 비율로 작아져야 하기 때문이다[8]. 즉, comb-type 센서를 도입하여 전극의 면적을 작게 하더라도, 갭이 함께 작아지지 않으면, 출력 신호의 SNR이 크게 줄어든다. 따라서, comb-type 센서를 사용하여 높은 분해능을 얻기 위해서는 전극의 면적 뿐 아니라 갭의 크기 또한 작게 유지해야 하는데, 기존의 갭 유지 방법으로는 큰 변위가 발생하는 동안 작은 갭을 일정하게 유지하기가 어렵기 때문에 갭을 작게 만드는 데 한계가 있었다. 이에 Kim et al은

포항공과대학교 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH)
Nam-gu Hyoja-dong 790-784, POSTECH, Pohang, Gyongsangbuk-do, Korea

⁺Corresponding author: wkmooon@postech.ac.kr

(Received : Sep. 21, 2012, Revised : Nov. 8, 2012, Accept : Nov. 19, 2012)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

comb-type에서도 작은 갭을 용이하게 유지하고자 하는 연구를 하였으며[9], 그 결과로 접촉 메커니즘을 도입한 새로운 형태의 comb-type 센서를 개발하였다. 이를 contact-type linear encoder-like capacitive displacement sensor (CLECDiS) 라고 한다[10-12]. 선행 연구를 통해 CLECDiS는 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 갭을 유지하며, 약 10 mm 이상의 측정 영역에서 최대 1 nm 이하의 분해능(동적영역 10^7)을 가질 수 있는 것을 보였다[10]. CLECDiS의 도입으로 인해, 이제 면적변화형 정전용량 센서는 10^7 수준의 동적영역과 더불어 서브나노미터 수준의 분해능까지도 달성할 수 있게 된 것이다.

하지만, 센서의 민감도가 높아진 만큼, 이전에는 무시할 수 있었던 여러가지 비이상성(non-idealities)들을 더 이상 무시하기 어렵게 되었다. 특히 민감도의 향상은 원치 않는 거동에 대한 민감도 역시 증가시켰기 때문에, 작은 회전에 의한 미세한 정렬 상태 변화도 출력 신호에 부정적인 영향을 줄 수 있게 되었다[8]. 주로 상대적인 회전이 발생할 때 야기되는 이러한 정렬 상태 변화는 센서와 시스템의 조립시, 그리고 구동 중 신호에 왜곡이 발생할 때 등 수시로 수동으로 조절을 할 필요가 있었다. 이에 본 연구에서는 이러한 회전 오차에 의해 발생하는 정렬 상태 변화를 수동으로 조절하지 않고도 회전 오차를 적절히 구속할 수 있는 새로운 센서 모델을 제안하고 이 모델의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 모델 제안

CLECDiS는 앞서 언급한 바와 같이 comb-type 변위 센서에 접촉 메커니즘을 도입함으로써, 민감도를 극대화하였고, 이는 read-out 회로를 통해 검출할 수 있는 변위 분해능 한계를 크게 증가시켰다. 이러한 CLECDiS는 접촉 메커니즘을 사용하므로, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 전극 패턴이 표면에 드러나 있지 않고, 전극을 유전체로 코팅한 후 코팅면을 접촉 상태로 유지하여 사용한다.

Fig. 1. Schematic diagram of CLECDiS.

현재 CLECDiS 모델에서 사용하고 있는 유전체는 diamond-like-carbon(DLC)이며, 유전층과 고체 윤활제의 역할을 수행하고 있다. CLECDiS에 대해서는 참고문헌 [10]에 자세히 설명되어 있다.

CLECDiS는 평행 평판모델에 기반을 두고 있으며, 여기서 한 평

판은 고정되어 있고, 다른 한 평판은 6자유도를 갖는 움직이는 평판으로 고려할 수 있다. 이와 관련된 기본적인 용어는 Fig. 1을 따른다.

이상적인 경우라면, x가 Mover의 변위 측정 방향을 의미하므로, x 방향을 제외한 모든 방향의 움직임이 구속되어 있어야 한다. 그러나, 실제의 경우에는 모든 방향에서 완전한 구속이 이루어지지 않는기 때문에, 불완전 구속에 의한 구동 잡음이 발생할 수 있다. 이는 구속되어야 할 방향으로 일어나는 실제 변위에 해당하므로, 센서의 정전용량을 변화시킨다. 즉, 구동 잡음들은 정전용량 값을 직접 변화시키는 오차를 유발하기 때문에, read-out 회로는 이를 변위가 발생한 것으로 판단하게 되며, 신호 처리 등으로 제거하거나 개선하는 것이 쉽지 않다. 이러한 이유로 인해, 구동 잡음들은 시스템 설계 시부터 고려하여 개선하는 것이 좋다.

CLECDiS의 경우 접촉식 구동을 사용하기 때문에, z 방향의 구동 잡음과 roll, pitch 방향의 구동 잡음은 접촉력과 회전 조건의 적절한 설계에 의해 최소화 할 수 있다[13]. 그러나, y 방향과 yaw 방향의 구동 잡음은 센서를 고정하고 있는 외부 가이드 레일의 유격이 있는 한, 구동 잡음을 줄이는 것은 쉽지 않다. 때문에, y방향의 경우는 Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 mover의 전극 패턴 길이를 stator에 비해 길게 설계하여 어느 정도의 오차를 허용 가능하다.

Fig. 2. A margin for unwanted motion on y-direction ; (a) y-direction disturbance. (b) yaw disturbance.

그러나 Fig. 2(b)에서와 같이 yaw 방향의 구동 잡음은 겹쳐지는 패턴 모양의 변형을 일으킨다. 때문에, 전극 패턴의 모양을 잘 설계하는 것만으로, 센서가 yaw 방향의 구동 잡음에 대한 적절한 허용치를 가질 수 있도록 하는 것은 매우 어렵다.

또한, yaw 방향의 구동 잡음은 다른 방향의 구동 잡음에 비해 야기하는 오차의 정도가 크다. Fig. 3은 초기 정렬에서 yaw가 발생하고, 그 뒤로는 상태의 변화가 없다고 가정하였을 때, yaw가 발생한 각에 따라 Mover의 한 주기 이동에 대한 인코더의 출력 신호를 시뮬레이션 한 것이다. Fig. 3(a)는 yaw는 발생했지만, Mover의 구동은 x방향을 따르는 경우이고, Fig. 3(b)는 yaw가 발생하였고, 발생한 yaw 방향으로 구동하는 경우의 출력 신호이다. 두 경우 모두 yaw의 크기에 따라 출력 신호의 변화폭이 달라지며, yaw의 발생에 따라 민감도가 큰 폭으로 떨어진다(yaw에 대한 자세한 해석은

ref. [8] 참고). 또한, Fig. 3(b)의 경우는 위상이 변한다는 사실에 주목해야 한다. 즉, 센서가 구동하는 동안 지속적으로 yaw가 발생한다면, 신호의 변화폭과 위상을 연속적으로 변화 시키게 되므로, 출력 신호의 안정성에 큰 영향을 줄 수 있는 것은 물론 출력 신호의 파형의 변화를 가져올 수 있다. 특히 yaw는 아주 적은 양이 발생하더라도 민감도 변화에 의한 잡음이 발생하게 되는데, 신호 대 잡음비를 60~80 dB 정도로만 유지하기 위해서도 일반적인 경우에 yaw가 최소한 0.01도 이하로 유지되어야 한다[8]. 이 조차도 다른 구동 잡음이 전혀 없고, yaw만 존재한다고 가정했을 때에 해당한다.

Fig. 3. Simulation results of yaw effect ; (a) case of x-direction motion with yaw, (b) case of yaw-direction motion with yaw.

따라서, 이러한 현상을 줄이기 위해, 조립시에, 그리고 구동 초기에 yaw 오차를 줄이기 위해 별도의 정렬 과정이 필요하다.

이러한 별도의 정렬 과정 없이, 용이하게 조립하면서도 yaw 오차에 의한 구동 잡음을 개선하기 위해 본 연구진은 다음과 같이 센서가 자체적으로 기계적 가이드를 포함하고 있는 모델을 제안한다.

Fig. 4. CLECDiS with mechanical guide.

제안하는 모델은 마이크로 머시닝으로 제작하는 센서의 공정 중에 두꺼운 벽을 형성하는 공정을 추가하여 기계적인 안내 역할을 할 수 있는 구조물을 센서 판에 직접 형성하는 것이다. 이렇게 제작한 센서를, 이러한 센서를 조립하기 위한 적절한 인터페이스와 함께 사용한다면, Fig. 4에서와 같이 yaw 방향의 초기 정렬이 정확하지 않더라도, 두 평행판간의 상대적인 yaw는 크게 줄어들 수 있다. 또한, yaw방향의 구속이 존재하므로, 구동 중의 yaw에 의한 잡음

역시 줄어들 수 있다.

3. 설계 및 제작

앞서 2절에서는 센서 자체에 기계적 가이드를 형성하는 모델을 제안하였다. 이 절에서는 이 모델을 CLECDiS에 적용하여 제작하는 과정을 설명할 것이다.

제안하는 모델은 스테이지 가이드 레일의 유격 범위 보다 더 정밀한 yaw의 구속을 하고자 하는 데 사용할 것이므로, 기본적으로 기계 가공이 아닌 마이크로 머시닝을 사용하여 디바이스를 제작하는 것으로 가정한다. CLECDiS 역시 기본적으로 마이크로 머시닝으로 제작하였다. 디바이스에 형성된 구조물이 가이드 레일의 역할을 하려면, 가이드 레일을 위한 구조물이 형성되지 않은 판과 가이드 레일 구조물 사이에 구동을 제한하려는 구속조건이 작용할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 비교적 두께가 두꺼운 층이 필요하다. 마이크로 머시닝에서는 증착을 통해 수십 마이크로 미터 이상의 두꺼운 구조물을 형성하기 어렵다. 한편 식각을 통해서 이러한 단차를 형성할 수 있긴 하지만, CLECDiS는 가이드 레일을 위한 구조물 사이에 전극 패턴이 형성되어야 하는데, 두꺼운 구조물이 형성된 이후에 정밀한 전극 패턴을 형성하는 것이 쉽지 않다. 이러한 이유로 가이드 레일을 위한 구조물은 전극을 우선 패턴닝한 후에, 실리콘 웨이퍼를 양극 접합(anodic bonding) 하여 형성하는 것이 용이하다.

Fig. 5. Fabrication processes.

디바이스는 damascene 공정의 chemical mechanical polishing (CMP)를 적용하여 평탄화 한 CLECDiS의 샘플 제작 과정에 기반한다[14](Fig. 5 참고). 먼저 유리 웨이퍼에 형성된 전극 모양을 패터닝하고, 전극으로 사용될 크롬을 증착하여 패터닝된 부분을 채운다. 그리고 CMP를 사용하여 광역 평탄화를 수행하여 패터닝된 부분의 전극만 남도록 한다. CMP 후에 양극 접합(anodic bonding)을 사용하여, 패터닝된 유리 웨이퍼 면에 실리콘 웨이퍼를 접합한다. 접합된 실리콘 웨이퍼를 이용하여 가이드 레일 역할을 구조물을 형성하고, 마지막으로 유전 박막인 DLC를 코팅하면 모든 공정이 마무리된다.

센서는 선폭 $10\ \mu\text{m}$ 의 전극이 $20\ \mu\text{m}$ 주기로 형성되어 있으며, 유전층으로 사용된 DLC는 약 $200\ \text{nm}$ 의 두께로 코팅되었다(DLC는 Mover와 Stator에 모두 코팅되어 있으므로, 갭은 약 $400\ \text{nm}$ 가 된다.). 가이드 레일을 만들기 위해 접합한 실리콘 웨이퍼는 양극 접합 후 CMP를 사용하여 약 $100\ \mu\text{m}$ 로 두께를 얇게 만든 후 가이드 레일 모양으로 deep reactive ion etching (DRIE)을 사용하여 패터닝하였다. 실리콘 웨이퍼의 두께를 얇게 만든 이유는, 두꺼운 상태의 실리콘 웨이퍼에서는 DRIE를 이용한 식각이 균일하게 이루어지지 않았기 때문이다.

제작된 샘플은 Fig. 6과 같다. 그림에서 왼쪽 판이 Mover이고, 오른쪽 판이 Stator이다. 실리콘 웨이퍼의 패터닝으로 형성된 가이드 레일은 Mover에 형성되어 있다.

Fig. 6. Fabricated sample.

4. 실험

제작한 디바이스에 형성된 기계적 가이드는 마이크로 머시닝으로 제작한 구조물이므로 구조물의 크기도 작을 뿐 아니라, 구조물의 강도, 기판과 실리콘 구조물 간의 접합력 등의 문제로 인해 실제 상황에서 가이드 레일의 역할을 정상적으로 수행하지 못할 수도 있다. 따라서 시스템에 결합하여 사용하기 전 단계로, 가이드 레일의 역할을 정상적으로 수행할 수 있는지를 확인하는 실험이 필요하다. 실험 설정은 Fig. 7과 같다.

우선 센서의 Stator를 아래쪽에 고정시키고, Mover에 형성된 가이드 레일 사이에 Stator가 들어가도록 엮었다. 그리고, 구동 중 접촉을 유지하도록 $200\ \text{g}$ 추를 사용하여 하중을 인가하였다. 이 상태

로 리니어 모터를 이용하여 $10\ \mu\text{m/s}$ 의 속도로 Mover를 밀었고, Mover가 움직이는 동안 정전용량 변화 신호를 획득하였다. 시스템에서 Mover가 구동하는 동안 추에 의해 인가되는 수직 하중과 리니어 모터에 의해 인가되는 힘을 제외하면, 시스템 자체는 센서 디바이스 대해 어떠한 구속도 하지 않는다.

가이드를 갖는 디바이스의 실험과 함께, 동일한 과정에 대해 가이드 레일 없이 평탄화만 수행된 샘플에 대해서도 정전용량 변화 신호를 획득하였다.

Fig. 7. Guide sample test.

측정된 결과는 Fig. 8에 표시하였다. 결과에서 x축은 획득한 포인트의 수로서 시간 축에 대응한다. 테스트 시에는 등속 구동을 하였으므로, 변위에 직접 대응하며, 여기서는 1000 포인트가 $100\ \mu\text{m}$ 에 대응한다. y축은 디지털로 변환된 전압값을 비교의 용이성을 위해 정규화(normalize)한 것이다. 그래프에서 Fig. 8(a)는 가이드를 포함하지 않는 디바이스의 신호이고, Fig. 8(b)는 가이드를 포함하는 디바이스의 신호이다. 가이드를 포함하는 경우와 그렇지 않은 경우 모두에 있어서 출력신호에 드리프트가 나타난다. 이러한 문제는 제작된 디바이스의 표면 프로파일에 의한 것으로 적절한 접촉 유지 기구를 도입함으로써 제거할 수 있으며, 자세한 내용은 참고문헌 [13]에 설명되어 있다.

Fig. 8. Experimental results corresponding to (a) traditional sample, and (b) new sample with mechanical guide.

그러나 드리프트 성분을 제외하고 보면, Fig. 8(a)의 경우 비교적 큰 신호 변화폭을 보이며, 앞서 Fig. 3을 설명할 때 언급했던 출력 신호의 파형 변화도 나타나고 있다. 기계적 가이드가 형성된 디바이스의 출력인 Fig. 8(b)의 경우 신호 변화폭도 상대적으로 작으며, 출력 신호의 파형이 변하지 않는다. 이는 각 위치에서의 출력 신호의 위상이 일정함을 의미하며, 디바이스에 형성한 가이드 레일이 yaw를 적절히 구속하고 있음을 알 수 있다. 즉, yaw free 상태에서 arctangent method[15]를 사용하여 변위 값을 구할 때, Fig. 8(a)의 결과에서는 아날로그 값을 변위 값으로 변환하는 것이 사실상 불가능하지만, Fig. 8(b)의 결과는 아날로그 값을 변위 값으로 변환하는 것이 가능해졌다.

5. 결론

본 연구에서는 회전 오차 중 yaw의 자동 보정을 위한 기계적 가이드가 결합된 센서를 제안하였다. 제안한 방식은 마이크로 머시닝으로 제작되는 정전용량 센서 플레이트에 가이드 레일이 직접 형성됨으로써 조립에 의한 오차를 자체적으로 보정함으로써 조립 및 구동 시에 발생할 수 있는 회전 오차의 영향을 개선할 수 있다. 제안한 방식의 센서는 정전용량형 대변위 초정밀 변위 센서인 CLECDiS에 적용하여 샘플을 제작하였다. 제작된 샘플을 사용하여, yaw와 y 방향의 구속이 없는 상태의 구동 실험을 수행하였고, 이를 통해 제작한 기계적 가이드를 통해 yaw의 구속이 적절히 이루어짐을 확인하였다.

제안하는 방식의 센서를 사용하기 위해서는, 이 방식의 센서를 일반적인 스테이지에 장착하여 사용할 수 있도록 하는 지그를 추가로 개발할 필요가 있다. 또, 이를 위해 기계적 가이드가 좀 더 큰 하중을 허용할 수 있도록 하는 추가 연구가 필요하다. 향후, 더 정밀하고 강인한 기계적 가이드를 만드는 방법과, 가이드를 가진 센서를 위치제어 시스템에 적용하여, yaw의 자동 보정과 정렬이 잘 작동하는 지를 확인하는 연구를 수행할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부의 재원으로 교육과학기술부 한국연구재단(No.2011-0020435) 및 방위사업청/국방과학연구소 지정 국방 MEMS 특화연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] A. A. Kuijpers, G. J. M. Krijnen, R. J. Wiegerink, T. S. J. Lammerink, and M. Elwenspoek, "A micro-

machined capacitive incremental position sensor : part 2. Experimental assessment", *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. pp. S125-S134, 2006.

- [2] A. A. Arkadan, S. Subramaniam, Sivanesan, O. Douedari. "Design optimization of a capacitive transducer for displacement measurement", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, pp. 1869-1872, 1999.
- [3] F. Zhu, and J. W. Spronck, "A capacitive tactile sensor for shear and normal force measurements", *Sens. Actuators A*, Vol. 31, pp. 115-120, 1992.
- [4] F. Zhu, and J. W. Spronck. "A simple capacitive displacement sensor", *Sens. Actuators A*, Vol. 25-27, pp. 265-269, 1991.
- [5] W. C. Heerens, "Application of capacitance techniques in sensor design", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 19, pp. 897-906, 1986.
- [6] M. Hirasawa, M. Nakamura, and M. Kanno, "Optimum from of capacitive transducer for displacement measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-33, pp. 276-280, 1984.
- [7] A. A. Kuijpers, "Micromachined capacitive long-range displacement sensor for nano positioning of microactuator systems". Ph.D. Enshede: University of Twente. p. 208, 2004.
- [8] D. S. Kang, M. J. Kim, and W. K. Moon. "Optimization of a capacitive sensor for high dynamic range", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 19, No. 2, pp. 92-98, 2010.
- [9] M. J. Kim and W. K. Moon "A new capacitive displacement sensor for high accuracy and long range", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 14, No. 4, pp. 219-224, 2005.
- [10] M. Kim, W. Moon, E. Yoon, and K-R Lee, "A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range", *Sens. Actuators A*, Vol. 130-131, pp. 135-141, 2006.
- [11] M. Kim, W. Moon, W. Chung. "Capacitive motor sensor". US. p. 13, 2006.
- [12] M. Kim and W. Moon "A new linear encoder-like capacitive displacement sensor", *Measurement*, Vol. 39, pp. 481-489, 2006.
- [13] S. Kim, W-G Lee, and W-K Moon, "Developing an

instrument ensuring reliable contact conditions for contact-type area-varying capacitive displacement sensors”, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 35, pp. 1147-1156, 2011.

[14] D. Kang, “Improvement of high dynamic range

capacitive displacement sensor by a globalm planarization”, *Journal of Sensor Technology*, Vol. 1, pp. 99-107, 2011.

[15] L. M. Sanchez-Brea and T. Morlanes, “Metrological errors in optical encoders”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, p. 115104, 2008.

강 대 실 (Daesil Kang)

- 2005년 부산대학교 기계공학과(공학사)
- 2007년 POSTECH 기계공학과(공학석사)
- 현재 POSTECH 기계공학과 박사과정 재학
- 주관심분야 : 변위센서, 위치제어 시스템, 정전용량 센서

문 원 규 (Wonkyu Moon)

- 1984년 서울대학교 기계공학과(공학사)
- 1986년 KAIST 기계공학과(공학석사)
- 1995년 The University of Texas at Austin 기계공학과(공학박사)
- 1986년 ~ 1990년 한국원자력 연구소
- 1996년 ~ 1998년 삼성종합기술원
- 1998년 ~ 현재 POSTECH 교수
- 주관심분야 : 전자기, 음향, 진동 트랜스듀서, 초정밀 시스템