

고정밀 및 긴 측정범위를 위한 전기용량형 변위 센서

김무진 · 문원규[†]

A new capacitive displacement sensor for high accuracy and long range

Moojin Kim and Wonkyu Moon[†]

Abstract

In this paper, a contact-type linear encoder-like capacitive displacement sensor (CLECDS) is proposed. It is based on the linear encoder capacitive displacement sensor that consists of two substrates with a series of conducting grating in identical size and it is used as a contact sensor of which the two substrates assembled faced to each other after coated with thin dielectric film. It was confirmed that the prototype of this sensor has resolution of about 126nm and measuring range of 20 mm in the test.

Key Words : contact-type, linear encoder-like, capacitive displacement sensor

1. 서 론

최근 초정밀 구동 시스템과 관련한 산업이 발전함에 따라 미세 변위 측정을 위한 센서들에 대한 연구 또한 관심의 대상이 되어 왔다^[1-2]. 특히 전기용량형 변위 센서는 극저온 및 강자성에 대해 안정하고 또한 높은 민감도를 가지므로 미세 변위 센서로 널리 이용되고 있다^[3-5]. 이 센서는 공간변화형 센서와 면적 변화형 두 가지 타입으로 분류되는데, 공간변화형 전기용량형 변위 센서는 높은 민감도를 가지는 반면 면적 변화형 센서는 넓은 범위의 변위를 측정할 수 있으나 공간변화형에 비해 민감도가 낮다^[5]. 이러한 면적 변화형 센서의 단점을 보완하기 위해, 넓은 범위의 변위 측정뿐만 아니라 높은 분해능을 가질 수 있는 엔코더 형태의 전기용량형 변위 센서가 발표되었다^[6]. 반복적인 전극 패턴을 가진 두 평행한 평판으로 구성되는 이 센서는 전극 패턴의 한 주기가 작을수록 분해능이 더욱 향상되므로 패턴주기를 줄이는 대신 많은 패턴들을 나열하므로 높은 분해능과 넓은 측정범위를 동시에 얻을 수 있다. 그러나 전극의 주기보다 두 평판사이의 간격이 매우 작지 않으면 평판 사이의 전기장의 프링지(fringe) 효과

에 의해서 매우 작은 센서 민감도를 가져 오히려 분해능이 나빠질 수 있다. 그러므로 센서 분해능을 향상시키기 위해 센서 간격 또한 매우 작아져야 하지만, 센서의 평행간격 유지를 위해 포함되는 기계적 가이드 또는 공기 베어링의 정밀도 간격 유지는 매우 어렵다. 뿐만 아니라 일정 민감도를 확보하기 위해서는 센서 간격에 비해 패턴 주기가 커야하므로, 결국 분해능을 향상시키기 위해 패턴의 주기를 줄이는 것은 패턴 제작의 기술보다는 센서 간격 유지 방법의 정밀도에 따라 결정된다. 초기의 선형 엔코더 전기용량형 변위 센서라고 할 수 있는 Kosel의 연구^[6]는 엔코더 형태의 전기용량형 변위센서가 가지는 미세 분해능 및 대변위 측정 센서로서의 가능성을 보여준 반면에, 기계적 가이드에 의한 센서 간격 조정 및 분해능 향상에 대한 한계점을 명확히 보여주었다. 이 이후 엔코더 형태의 전기용량형 변위 센서와 관련된 대부분의 연구들은 센서의 선형성(linearity)을 향상시키기 위한 연구나 신호 처리기술의 향상에 국한되었다^[7-9].

본 논문에서는, 접촉식 방법을 이용한 선형 엔코더 타입의 전기용량형 변위 센서(CLECDS)를 제안한다. CLECDS는 반복적 전도성 패턴을 가지는 두 평판에 얇은 유전체 박막을 코팅하고, 이 두 평판을 접촉시켜 구성된다. 이러한 구조를 통해, 기존의 엔코더 타입의 전기적 용량센서에 비해 작은 분해능과 높은 민감도를 확보할 수 있고 또한 센서의 배열문제에 있어서도 보

포항공과대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

[†]Corresponding author: wkmooon@postech.ac.kr

(Received : January 13, 2005, Accepted : March 2, 2005)

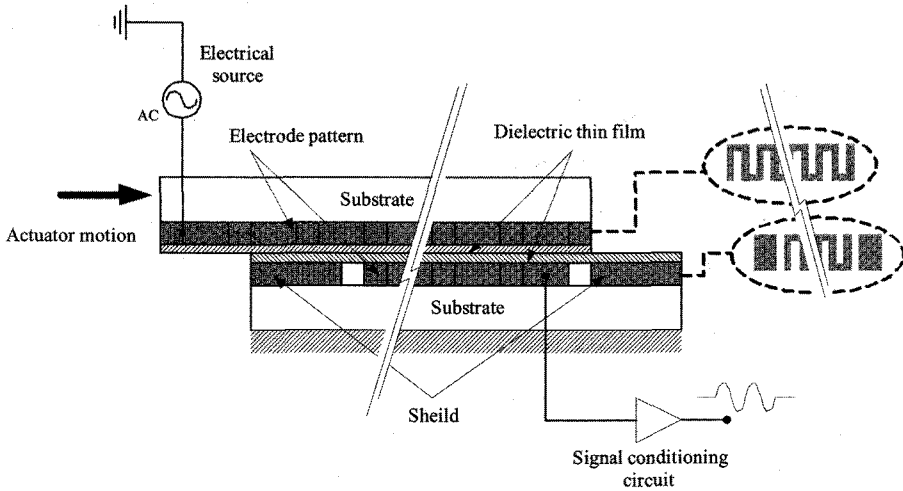


그림 1. CLECDs의 구조
Fig. 1. Schematic diagram of CLECDs.

다 안정적이다. 본 논문은 CLECDs의 특성을 기술하고 FEM 해석 및 실험을 통해서 그 성능을 검증한다.

2. CLECDs의 이론적 모델

그림 1은 CLECDs의 구조를 보여준다. 본 센서는 기본적으로 전극 패턴이 있는 2개의 기판에 유전체 박막(dielectric film)을 코팅한 후 전극들이 마주보게 두 기판이 겹쳐져 있는 형태이다. 두 기판의 전극의 형태는 막대 타입의 전극이 같은 폭, 같은 간격, 같은 주기로 나열되어 있고 지그재그 형태로 연결되어 있다. 회로의 전원이 연결되는 기판을 트랜스미터(Transmitter), 회로의 신호 조절부로 연결되는 기판을 리시버(receiver)라 이름 지을 때, 리시버의 전극패턴은 접지(ground) 전극으로 둘러싸여 외부의 기생 전기용량(stray capacitance)의 영향을 차단하고 기판의 이동시에도 두 기판 사이 항상 고정된 개수의 전극들에 의해서 커패시턴스 변화가 발생하게 한다. 지그재그 형태의 막대 전극연결은 센서 회로부에 최소한의 전극 연결만 요구되도록 하고, 동시에 막대전극들 사이의 연결부(bridge)에 의한 센서의 민감도 감소를 막는다. CLECDs의 센서 회로는 변위발생시 변화하는 센서 전기용량의 크기(magnitude)를 측정하여 변위를 계산한다. 센서의 한 기판을 구동시스템의 고정부에 부착하고 나머지 기판은 구동기에 의해 이동되는 부분에 부착하여, 구동기가 이동부를 이송시킬 때 센서는 두 기판 사이 이송방향으로 상대 변위가 발생하게 된다. CLECDs의 이송 기판은 접촉을 유지한 채로 미끄러져 이동할 수 있도록 스프링

과 같은 접촉 유지장치가 필요하며 가능한 마찰계수 및 마모가 작은 유전체 박막이 이용되어야 한다. 구동시스템이 변위를 발생시킬 때, CLECDs의 전기용량은 전극패턴의 주기에 따라 반복 변화하는 전기용량을 발생시킨다. 이 때 반복되는 전기용량의 극값(extreme value)을 셸(counting)하여 대변위를 계산하고 전기용량의 한주기 내에서 변화하는 값을 위치 값으로 환산함으로써 미세변위를 측정하게 된다.

전기용량형 변위 센서는 일반적으로 무한 크기의 전도성 평행 평판으로 설명될 수 있다. 평판의 가장자리에서 발생하는 전기장의 프링지(fringe) 효과를 무시할 수 있을 정도로 두 평판 사이 간격에 비해서 평판의 크기가 상대적으로 매우 클 경우 전기용량 C 는 다음 수식을 만족한다^[10].

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 두 평판 사이 매질의 유전율, A 는 두 평판의 면적, d 는 두 평판사이의 간격을 의미한다. 일반적인 전기용량형 변위 센서는 식 (1)을 기본으로 변화하는 전기용량을 이용해서 변위를 검출한다. 공간변화 전기용량형 센서는 간격 d 의 변화로부터, 면적변화 전기용량형 센서는 전극면적 A 의 변화로부터 발생하는 변위를 각각 측정한다. 또한 엔코더 형태의 전기용량형 센서는 다수 전극의 총면적 A 의 반복적인 변화에 기인하므로, 식 (1)에다 마주 보는 전극 쌍의 개수를 곱하므로 센서의 전기용량의 변화를 모델링 할 수 있다. 그러나 엔코더 형태의 전기용량형 센

서의 전기용량 크기를 결정하기에는 센서 전극의 프린지 효과를 무시할 수 없으므로 엔코더 형태의 센서에는 수식 (1)의 또 다른 수정이 필요하다.

$$C = \frac{\epsilon N l x}{d} + f(d, x) + R + e(t) \quad (2)$$

여기서 N 은 센서의 마주보는 전극쌍의 개수, l 은 전극들의 길이, x 는 센서 측정 방향의 변위, $f(d, x)$ 는 프린지 효과에 의한 비선형 위치 함수, R 은 센서의 공정 오차 및 간격오차를 포함하는 전극용량 옵션, $e(t)$ 는 회로 및 외부적 환경 영향에 의해 발생하는 잡음이다. CLECDS는 변위 x 에 대해 전극 패턴의 주기에 따라 프린지 효과가 반복적으로 작용하여 $f(d, x)$ 는 한주기 변위에 대한 실험결과값 만의 획득으로 근사될 수 있다. $e(t)$ 는 변화를 알 수 없는 센서의 잡음으로 이 파라미터를 통해 CLECDS의 분해능이 결정된다. 즉 식 (2)는 이론모델과 실험모델이 복합된 식으로서, 제작된 센서의 초기 실험의 결과 값을 통한 한번의 보정으로 반복적인 적용이 가능하다. 결국 식 (2)는 센서가 가지는 오차 및 비선형 특성을 포함하므로 CLECDS의 신호처리회로에 검색표(look-up table)로 저장되어 실시간으로 적용되었을 때 센서의 선형성을 향상시킬 수 있다.

3. 모의실험

엔코더 형태의 전기용량형 센서에서 대부분의 이론적 모델들은 프린지 효과를 간과하였기 때문에 실제

센서의 전기용량 변화 특성을 예측하는 데 어려움이 있다. 특히 CLECDS를 포함한 엔코더 형태의 전기용량형 변위 센서는 전극 주기와 센서 평판 간격 사이의 관계에 따라 프린지 영향의 크기가 달라지므로 이에 대한 해석 및 고찰이 중요하다. 이러한 센서의 전기용량은 두 평판 사이의 전기장의 변화에 따라 결정되므로 전기장 해석용 FEA(Finite Elements Analysis) 프로그램으로 센서의 비선형 특성을 확인할 수 있다. 센서의 커패시턴스 변화 특성 이해를 위해, 2차원의 CLECDS의 근사 모델을 구성하고 전자기장 해석프로그램인 Maxwell을 이용하여 해석을 수행하였다. CLECDS의 형태는 35개의 사각 전극이 나열된 트랜스미터와 24개의 사각 전극이 나열된 리시버로 구성되어 있고 리시버의 가장자리는 접지로 보호되어 있다. 또한 두 평판 사이의 매질은 공기로 가정한다. 각 평판에 나열된 사각 전극의 크기는 0.001 mm(두께) 1 mm (폭) 12.2 mm(길이)로 결정되고 전극사이의 간격은 폭과 같으며 전극의 나열주기(pitch)는 전극폭의 2배가 된다. Maxwell을 이용한 해석 시에는 설정된 CLECDS 모델은 전극의 개수가 줄어들고 길이방향은 선형모델로 가정되어 2차원 모델로 축소되어 계산된다. 축소모델은 11개의 전극을 가지는 트랜스미터와 5개의 전극을 가지는 리시버로 수정되고 센서 기판의 영향은 무시한다. 이 축소모델을 이용한 모의실험 결과에 스케일 계수(scale factors)를 곱하므로 실제 모델과 결과값에는 차이가 없으면서도 빠른 CLECDS 모델의 전기용량을 구할 수 있다.

그림 2는 센서간격의 여러 경우에 대해서, 4 mm의 변위 발생시 CLECDS 모델의 전기용량 변화를 보여준

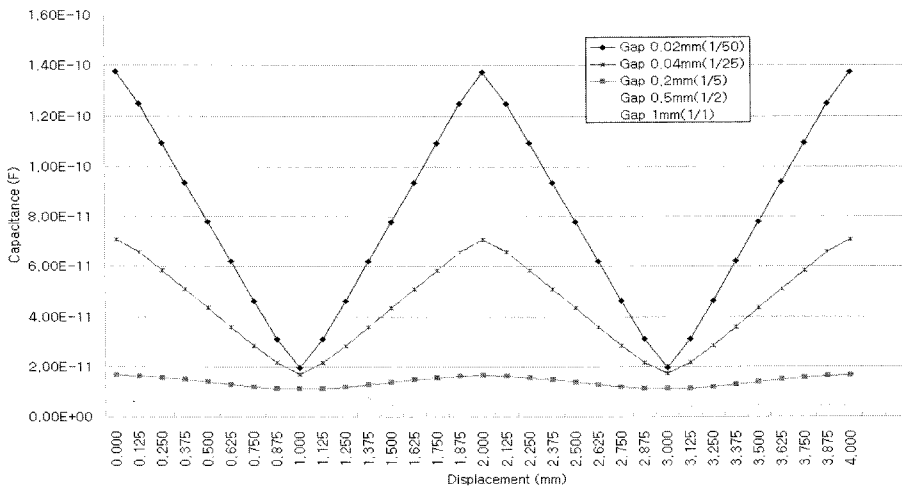


그림 2. 센서 간격에 따른 센서 모델의 전기용량 비교
Fig. 2. The capacitance traces of the simulation models with various gap sizes.

다. 전극패턴의 주기(2 mm)에 따라 커패시턴스 변화가 주기적으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한 패턴 폭이 센서간격에 비해 매우 크지 못하다면 센서의 전기용량에 대한 민감도가 급격히 감소하게 된다. 이 결과 센서간격과 패턴폭의 비가 1/1인 경우에 비해 1/50의 경우 그 민감도는 약 2360배 정도 차이가 난다. 센서간격의 선형 감소에 비해 비선형적으로 민감도가 증가하는 이유는 프린지 효과가 폭에 비해 센서간격이 클 때 더 크게 작용하기 때문이다. 특히 프린지 효과는 트랜스미터와 리시버의 마주보는 전극들의 위상이 일치할 때와 180일 때 가장 크게 작용하므로, 이 때 센서의 선형성(linearity)도 떨어지게 되며 패턴 폭이 패턴간격과 비슷한 경우(1/1)에는 정현파 형태의 전기용량 변화를 가지면서 선형성이 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 물론 전기용량의 위상변화를 이용하기 위해 측정되는 전기용량의 변화 형태를 정현파가 되게끔 오히려 센서간격을 적당히 유지하는 엔코더 형태의 전기용량형 변위 센서가 있지만¹⁵⁾ 이 또한 센서의 낮은 민감도 때문에 출력신호 조정(signal conditioning)에 어려움이 크고 여전히 센서 정렬문제를 가지고 있으므로 나열된 패턴 주기를 줄여 나노 구동기에 적용될 수 있을 정도로 분해능을 향상시키기 어렵다. 이러한 결과로 볼 때, 엔코더 형태의 전기용량형 변위 센서는 전극패턴의 주기를 줄인다면 센서 분해능을 향상시킬 수 있으나 센서간격을 그 주기보다 더욱 크게 줄일 수 없다면 민감도 및 선형성 문제 때문에 전극 주기는 제한될 수밖에 없다. 결국 센서간격을 가능한 작게 하는 것이 센서의 분해능, 민감도, 선형성을 향상시키는 확실한 방법이 된다. 제안한 CLECDS는 얇은 유전체 박막 코팅을 통해 기존의 엔코더 형태 센서에 비해 매우 작은 센서간격을 얻을 수 있으므로 기존의 엔코더 타입 센서의 한계를 해결할 수 있는 대안이 된다.

4. CLECDS의 제작 및 테스트

실험에 이용되는 CLECDS는, 그림 3과 같이, PCB (printed circuit board) 공정으로 제작되었다. 트랜스미터와 리시버는 사이즈가 각각 84 mm × 48 mm, 68 mm × 48 mm이다. 지그재그 전극의 패턴폭은 1 mm, 피치는 2 mm이고 패턴의 길이는 리시버가 13.2 mm, 트랜스미터가 17.6 mm이다. 패턴의 개수는 리시버가 24개, 트랜스미터가 35이고 센서의 측정가능 변위의 범위는 20 mm로 결정된다. 리시버의 패턴주위의 나머지는 접지된 보호(shielding) 전극 영역이 된다. 센서 평판들은 2층 레이어로 제작되어 패턴이 있는 뒤쪽에서

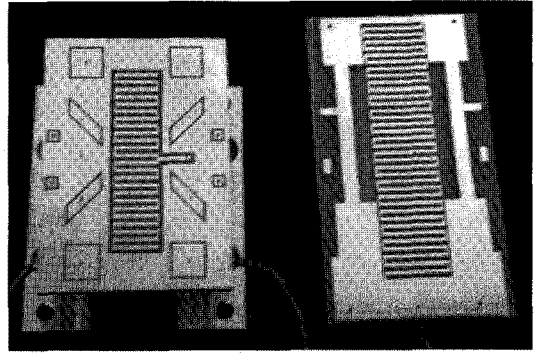


그림 3. PCB로 제작된 CLECDS(좌: 리시버 모델, 우: 트랜스미터 모델)
Fig. 3. A CLECDS sample with PCB (left: receiver, right: transmitter).

외부 전선과 연결될 수 있게 설계되었다. 이것은 트랜스미터와 리시버가 접촉할 때 연결되는 전선이 장애가 되지 않도록 한다. 리시버에 그려진 각종 사각모양의 패턴들은 pitch, yaw, roll 방향의 오차를 보정하기 위한 커패시턴스 측정을 위한 것들로서, 같은 크기를 가지는 센서가 접촉식으로 이용되므로 본 논문에서는 활용되지 않는다. 제작된 센서는 최상의 조건으로 제작된 것은 아니며 다양한 공정방법으로 유전물질의 두께를 보다 얇게 하고 패턴의 폭을 줄임으로서 센서의 성능을 보다 더 개선시킬 수 있다.

센서 테스트를 위해, 먼저 트랜스미터를 테스트벤치에 고정시키고, 리시버를 정밀 포지셔너에 부착시켜 센서평판들의 전극들이 마주보게 한다. 그리고 정밀 포지셔닝(positioning) 시스템에 연결된 구동기가 작동할 때 리시버의 이동에 따라 두 평판사이의 변화하는 전기용량을 측정한다. 정밀 포지셔너(Newport사의 M-562)는 기울기 오차 약 40 μ rad 이하인 수평움직임이 가능하다. 포지셔너에 연결되어 있는 구동기 및 컨트롤러(Newport사의 CMA-25CCCL, ESP300)는 구동범위 25 mm에서 12 μ m 이하의 정밀도를 가진다. 그리고 센서의 전기용량 측정을 위해 에절런트사(Agilent)의 임피던스 해석기(4294A)가 이용된다. 임피던스 해석기에서 트랜스미터로 입력되는 신호의 입력 주파수는 10 kHz이고 입력 전압은 500 mV이다.

테스트에 센서는 2가지 종류가 이용된다: 하나는 코팅이 되어있지 않은 비접촉식 센서이고, 나머지는 에폭시 합성수지가 코팅된 CLECDS이다. 이러한 테스트를 통해 CLECDS 샘플의 성능을 확인하고 비접촉식 센서와 그 특성을 비교한다. 구동기를 3 mm 움직였을 때, 각각 센서의 전기용량 변화는 그림 4와 같다. 두 센서

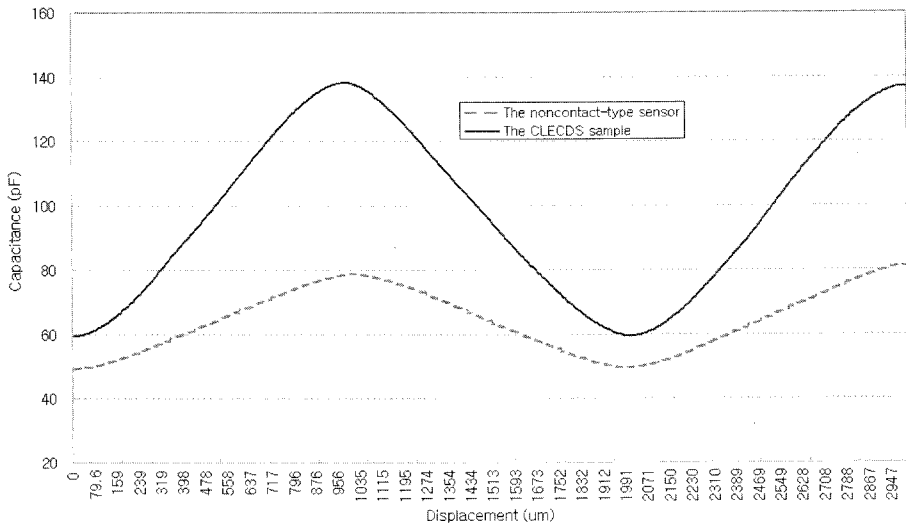


그림 4. 비접촉식 센서와 CLECDs의 변위에 따른 전기용량 변화
 Fig. 4. Capacitance traces of the noncontact-type sensor and the CLECDs sample.

표 1. 비접촉식 센서 및 접촉식 CLECDs의 실험 결과 비교
 Table 1. Experiment results of the noncontact-type sensor and the CLECDs sample

	접촉매질	매질유전율	센서간격	이송범위	민감도	간격변화 오차인덱스	분해능
비접촉식센서	-	1	20 μm	20 mm	30 fF/μm	0.0826	760 nm
CLECDs	PSR ink	4	40 μm	20 mm	78.2 fF/μm	0.0183	126 nm

모두 전기용량이 주기적으로 변화하고, 상대적으로는 CLECDs가 전기용량이 크고 변화 폭 또한 더 큰 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 센서 간격은 비접촉식 센서 2배정도 작지만 CLECDs의 평판 사이 유전율은 비접촉식 센서에 비해 4배 정도 더 크기 때문이다.

각각의 실험 조건 및 성능요소를 표 1로 비교하였다. 두 센서의 평판 간격과 간격사이 매질의 유전율이 다르기 때문에 실험결과 값을 통한 절대적 비교는 어렵지만, CLECDs가 다소 큰 간격에도 불구하고 매질의 유전율에 의해 높은 민감도를 갖는 것은 접촉식 방법의 CLECDs가 비접촉식 방법의 일반적 엔코더 형태의 전기용량형 센서에 비해 민감도를 높일 수 있는 방법 적용이 보다 쉬워질 수 있다는 것을 의미한다. 두 센서의 간격 변화에 기인한 오차의 정도를 비교하기 위해, 간격변화 오차 인덱스 δ_{err} 를 정의한다.

$$\delta_{err} = \frac{C_{peak}^{n+1} - C_{peak}^n}{C_{mean}} \quad (3)$$

여기서 C_{peak}^n 는 측정된 전기용량에서 n 번째 임의의 첨두치이고 C_{mean} 측정된 전기용량의 평균값이다.

실험결과를 통해 인덱스값을 비교했을 때, CLECDs가 비접촉식 센서에 비해 보다 더 적다는 것은 수평방향의 변위 측정시 수직방향의 변위에 기인한 영향이 더 적다는 것을 의미한다. 설사 비접촉식 센서가 기계적 가이드의 정밀 조정을 통해 기울기 오차를 줄일 수 있다고 하더라도 CLECDs가 접촉식 방법을 통해 보다 적은 노력을 통해 균일한 간격을 유지하는 것이 가능하다는 사실은 변함이 없다. PCB 공정으로 만든 마크로 CLECDs의 분해능은 126 nm로 확인되었다. 만약 마이크로 구조물 제작 기술로 전극 패턴을 보다 가늘게 제작하고 유전체 박막을 코팅하여 이용한다면 CLECDs는 분해능을 더욱 개선시킬 수 있을 것이다.

5. 결 론

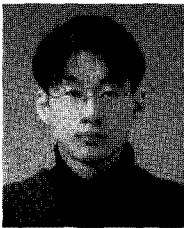
정밀도 향상 및 넓은 측정범위를 만족시키기 위한 새로운 전기용량형 변위 센서(CLECDs)가 개발되었다. 본 센서는 엔코더 형태의 전기용량형 변위 센서이지만, 얇은 유전체로 코팅되어 접촉식으로 이용되므로 기존

의 선형 엔코더 타입 변위 센서만큼 넓은 측정범위를 가질 뿐만 아니라 보다 높은 민감도를 확보하고 센서 간격 변화에 대한 오차를 감소시킬 수 있다. 모의실험을 통해 엔코더 형태의 전기용량형 센서에서 센서간격에 비해 전극 주기가 작아질 때 민감도가 크게 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 전극 주기를 줄여 분해능을 향상시킬 때 센서 간격을 기계적 가이드에 의존하는 것에 대한 한계를 설명하였으며 박막 코팅을 이용하는 CLECDs를 제안하므로 기존의 한계를 극복할 수 있는 대안을 제시하였다. 비접촉식과 비교한 실험을 통해 그 장점을 확인하였으며 실험된 CLECDs 샘플에 대해 측정장치의 노이즈 RMS를 기준으로 약 126 nm의 분해능을 확인하였다. 제안된 센서가 MEMS 기술로 제작되고 더욱 얇은 유전체 박막을 이용한다면 CLECDs의 분해능은 더욱 향상될 것이다.

참고 문헌

- [1] 박영태, 권성원, 강전홍, “물리센서 : 변위측정용 LVDT의 개선에 관한 연구”, *센서학회지*, 제5권, 제3호, pp. 1-8, 1996.
- [2] 이래덕, 김한준, 박세일, 세묘노프, “물리센서 : 미소 변위 측정용 비접촉식 4 - 전극형 전기용량 센서”,

- 센서학회지*, 제7권, 제2호, pp. 90-6, 1998.
- [3] “Nano positioning catalog”, *Physik Instrumente*, 1998.
- [4] P. W. Kolb, R. S. Decca, and H. D. Drew, “Capacitive sensor for micropositioning in two dimensions”, *Rev. Sci. Instrum.* vol. 69, no. 1, pp. 310-312, 1998.
- [5] L. K. Baxter, “Capacitive sensors: design and application”, *IEEE Press, Piscataway*, 1997.
- [6] P. B. Kosel, G. S. Munro, and R. Vaughan, “Capacitive transducer for accurate displacement control”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-30, no. 2, pp. 114-123, 1981.
- [7] F. Zhu, J. W. Spronck, and W. C. Heerens, “A simple capacitive displacement Sensor”, *Sensor and Actuator A*, vol. 25-27 pp. 265-269, 1991.
- [8] M. H. Bonse, F. Zhu, and H. F. van Beek, “A long-range capacitive displacement sensor having micrometre resolution”, *Meas. Sci. Technol.* vol. 4, pp. 801-807, 1993.
- [9] A. Pedrocchi, S. Hoen, G. Ferrigno, and A. Pedotti, “Perspectives on MEMS in bioengineering: a novel capacitive position microsensors”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* vol. 47, no. 1, pp. 8-11, 2000.
- [10] D. K. Cheng, “Field and wave electromagnetics”, Addison Wesley, pp. 121-124, New York, 1989.



김 무 진

- 부산대학교 지능기계공학과 석사
- 현재 포항공과대학교 기계공학과 박사과정
- 주관심 분야 : 미세 변위 측정 센서, 초정밀 구동 시스템



문 원 규

- Ph.D. in Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin(텍사스 대학교(오스틴) 기계공학과 박사)
- 현재 포항공과대학교 기계공학과 부교수
- 주관심 분야 : 음향 및 압전 트랜스듀서, 나노 구동 시스템