

# 미소변위 측정용 전기용량변환기 개발에 관한 연구

## (A Study on the Development of Capacitive Transducer for Measurement of Small Displacement)

朴 榮 泰\*, 李 來 德\*

(Young Tae Park and Rae Duk Lee)

### 要 約

전기용량 변화를 이용한 미소변위 측정용 전기용량변환기는 대부분 입력변위에 따라 전기용량기 전극간의 거리를 변화 시키므로 해서 전기용량 변화로 나타나게 하여 변위를 측정하는데 이용하였다. 그러나 전극간의 거리를 변화시켜 전기용량을 변화시키는 방법은 측정 범위가 한정되어 있는 단점이 있다.

본 연구에서는 두개의 전기용량기의 면적 변화를 이용하여 측정 범위를 넓혀 측정범위 25mm, 분해도 0.1 $\mu$ m의 전기용량 변환기를 개발하였다. 또 개발된 전기용량변환기의 환경변화에 대한 제반 특성을 조사하였으며 출력신호 변환장치인 신호변환기를 제작하였다.

### Abstract

The capacitive transducers, which are used of the principle of capacitance changes by means of the variation of distance between electrodes, are usually utilized for measurement of small displacements. But the measurement ranges of this method are limited.

In this study, the measurement ranges are extended by using the variation method of the surface area of electrodes. Thus the capacitive transducer and signal conditioner, which are having the capability of measurement range of 25 mm and resolution of 0.1 $\mu$ m, have developed, and its environmental characteristics are also tested.

### 1. 서 론

미소한 변위 측정을 위한 변환기(transducer)의 종류는 피측정물의 형태, 크기, 요구되는 정확도, 측정 방법등에 따라 다양하게 발전되어 왔다. 피측정물의 변위변화를 기계적변화로 감지하여 전기적양인 저항, 인덕턴스, 전기용량의 변화로 바꾸어 다시 변위의 크기로 나타내는 전기적소자를 이용하는 방법<sup>1,2,3,4</sup> 중 전기용량기(capacitor)를 센서로 이용하여 변위를 측정하

는 방법이 오래전부터 개발, 개량되어 왔다. 전기용량기를 이용한 변위측정 방법에는 단일 전기용량기를 이용하는 방법<sup>5,6</sup>과 두개의 전기용량기를 이용하는 방법,<sup>6,7,8</sup> 그리고 comb형 전기용량기를 이용하는 방법<sup>9,10,11</sup> 등이 있다. 단일 전기용량기를 이용한 변환기는 전기용량변화가 비선형적인 특성을 나타내는 단점이 있으므로, 이를 개선하기 위하여 두개의 전기용량기를 사용한다. 두개의 전기용량기를 사용한 변환기는 주위 환경변화에 대해 두개의 전기용량기의 전기용량변화가 동일한 조건으로 변하므로 안정도가 우수하고 선형성이 개선된다. 지금까지 발표된 두개의 전기용량기를 이용한 전기용량 변환기는<sup>6,7,8</sup> 전기용량기의 전극간 거리를 변화시켜 전기용량을 변하게 하였다. 이것은 전극간의 거리를 변화시킴으로써 감도(sensitivity) 및 분해도

\*正會員, 韓國標準研究所 電氣研究室

(Electricity Lab. KSRI)

接受日字: 1987年 4月 18日

(※ 본 연구는 과학기술처 특정연구개발 사업의 일환으로 수행된 일부임.)

(resolution)가 향상되며 미세한 측정까지 가능케 한다. 그러나 측정범위가 넓지 못한 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 두개의 전기용량기를 외부의 영향에 크게 변화를 받지 않게 변환기를 대칭적으로 설계하고 전극간 거리를 변화시키는 대신 전극의 대향 면적을 변화시킴으로써 측정범위범위 25mm, 분해도 0.1μm, 선형도 ±0.08% 이하의 특성을 가진 전기용량변환기(capacitive transducer)를 개발하였다. 또한 개발된 전기용량변환기를 온도, 습도, 주파수, 입력전압, 시간등 주변환경의 임의적인 변화에 따른 물리적 특성을 조사하였다.

## II. 전기용량변환기의 원리 및 제작과 측정 시스템의 해석

### 1. 원리

전기용량변환기는 입력변위를 전기용량기를 통하여 전기적인 신호로 바꾼다. 두개의 평행판 전극이 간격 d 만큼 떨어져 있을 때의 전기용량 C는

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \tag{1}$$

로 정의된다. 여기서 ε는 유전체의 유전율, S는 평판 전극의 면적을 나타낸다. 따라서 전기용량 변화를 위해서 전극을 이루고 있는 전극의 면적, 유전율, 전극간 거리를 변화시키면 전기용량은 변한다. 그런데 마주보는 전극의 원통형 구조가 평판형 구조보다 마주보는 각의 변화에 의한 표류전기용량 발생에 대한 문제가 적다. 원통형 전극에서 발생하는 단위길이당 전기용량C<sub>0</sub>는

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b}{a}} \tag{2}$$

이다. 여기서 a는 내부원통전극의 반지름, b는 외부원통전극의 반지름을 나타낸다. 원통형 전극을 두개 조합하여 그림 1과 같이 전기용량변환기를 구성한다. 그림 1(a)는 내부전극을 이동시켜 전기용량의 차이를 나타내게 하는데, 감도가 좋고 출력용량변화가 커지는 반면에 전극 자체를 이동시켜야 하므로 전극간의 직진도 및 전극이동시의 왜곡(distortion)등에 의해 선형성이 크게 저하될 수 있다. 이러한 것을 개선하기 위하여 그림 1(b)와 같이 변환기를 구성한다. 즉 원통형 외부 및 내부전극을 고정시키고 그 사이의 차폐전극을 이동시켜 전기용량의 차를 나타내게 한다. C<sub>s</sub>는 항상 일정한 전기용량을 가진 기준 전기용량기를 나타내고, C<sub>x</sub>는 차폐전극의 이동에 따라 전기용량이 변하는 측정 전기용량기를 나타낸다. x<sub>0</sub>는 기준전기용량기의 전극길이를 나타내며, x는 차폐전극의 이동 거리를 나타낸

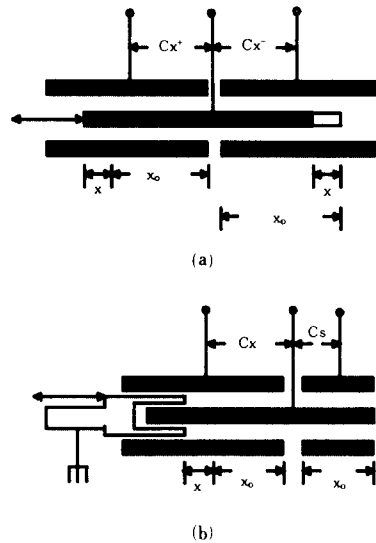


그림 1. 면적 변화를 이용한 전기용량 변환기  
(a) 이동전극에 의한 면적변화  
(b) 차폐전극 이동에 의한 면적변화

Fig. 1. Capacitive Transducers by Variable Area.  
(a) Variable Area by Movable Electrode.  
(b) Variable Area by Movable Shield Electrode.

다. 따라서 두개의 전기용량기의 용량변화는 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$C_s = C_0 x_0 \tag{3}$$

$$C_x = C_0 (x_0 + x) \tag{4}$$

또한 전극구조 전체를 정전차폐 시킴으로써 표류전기용량이 고정되어 선형성이 크게 개선된다.

### 2. 제작

전기용량기의 전극은 이동체인 차폐전극을 제외하고 모두 고정시켰다. 전극의 재질은 온도계수가 10<sup>-6</sup>mm/°C 인 스테인레스(SUS 304)를 사용하였다. 전극을 지지해주는 지지물은 모두 폴리스티렌을 사용하였고, 전극간 절연체는 0.1mm 마이카·와셔(mica washer)를 사용하였다. 내부전극은 앞부분에서의 가장자리 효과를 줄이기 위해 직경 7mm의 홈을 만들었으며 움직이는 차폐전극의 바깥쪽 끝은 샤프이어 불을 삽입하여 피 측정물과의 접촉상태를 일정하게 하였고, 스프링을 부착하여 차폐전극이 항상 같은 지점으로 되돌아오게 하였고, 안쪽 끝에 턱을 내어 차폐전극이 밖으로 빠져나오지 않게 하였다. 전극 구조물은 스테인레스 통 속에 넣어 고정시켰으며 동시에 각 전극의 리드(lead)선을 외부로 끌어내어 양질의 동축케이블에 연결시켰다. 그림 2에 전기용량변환기의 단면 구조를 나타내었다.

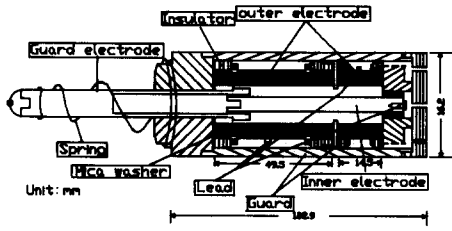


그림 2. 전기용량변환기의 구조도.  
Fig. 2. Configuration of a Capacitive Transducer.

3. 측정 시스템의 해석

제작된 전기용량변환기의 특성조사를 위한 기본적인 측정 시스템을 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 특성 조사를 위한 시스템이고 (b)는 (a)를 등가적으로 나타낸 것이다. 신호원은 GR1316발진기를 사용하였고 출력 전기용량을 측정 할 때는 GR1621 capacitance measuring system(정확도 : 10ppm)을 이용하였으며 출력전압으로 측정할 때는 제작된 신호변환기를 사용하여 직류전압출력을 멀티미터(Fluke 8840A)로 읽었다. 그림 3(b)의 점P에서 출력에 관한 식으로 표시하면

$$j\omega C_s(E_b - E_o) - j\omega C_x(E_b + E_o) = \frac{E_o}{Z} \quad (5)$$

으로 된다. 식(5)를 다시 고쳐쓰면

$$E_o = \frac{(C_s - C_x) E_b}{C_s + C_x + \frac{1}{j\omega Z}} \quad (6)$$

로 나타낼 수가 있다. 여기서  $E_b$ 는 구동 입력신호원의 크기,  $E_o$ 는 출력,  $\omega$ 는 각주파수를 나타낸다. 또 감도  $E_o/x$ 를 표시하면 식(4), (5), (6)으로 부터

$$E_o/x = \frac{E_b/2x_o}{\left(1 + \frac{x}{2x_o}\right) + \frac{X}{Z}} \quad (7)$$

$$X \equiv \frac{1}{2j\omega C_s}$$

로 나타낼 수가 있다. 위식을 통하여 션트임피던스 (shunt impedance)  $Z$ 가 무한하다면 출력은 전 측정 범위에서 직선적이 된다. 그러나 션트임피던스  $Z$ 가 실제로는 표류전기용량의 효과에 의해 유한한 값을 가지게 되므로 측정범위의 끝부분에 비직선적인 출력이 나타난다. 그림 3(c)는 전기용량변환기 측정회로에서의 잡음 해석을 위한 등가회로이다.  $e_n$ 과  $i_n$ 은 프리앰프 (preamplifier)의 전압, 전류잡음이고,  $e_r$ 는 션트임피던스  $Z$ 의 저항 성분  $R$ 에서 발생하는 열잡음 즉 존슨잡음을 나타낸다. 션트임피던스  $Z$ 의 인덕티브 성분은 오디오 주파수에서 거의 무시될 수 있고, 좁은 대역폭을 가진 PSD(phase sensitive detector)가 프리앰프

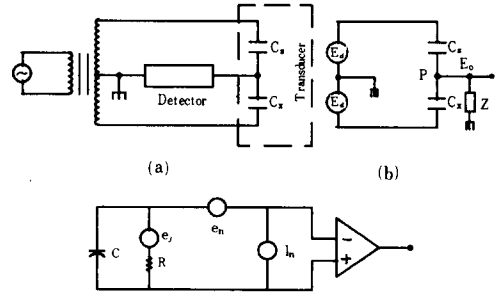


그림 3. (a) 전기용량변환기의 측정시스템  
(b) 션트임피던스  $Z$ 을 포함한 등가회로  
(c) 전기용량변환기의 잡음해석을 위한 회로  
Fig. 3. (a) Measuring System for Test of the Transducer.  
(b) Equivalent Circuit Including Shunt Impedance  $Z$ .  
(c) Circuit for Noise Analysis of the Transducer.

의 출력을 필터링 시키는 작용을 한다. 만약  $e_n, i_n, e_r$ 의 원천잡음을 조절할 수 없다고 가정한다면 프리앰프의 입력에서 전체 잡음  $V_n$ 은<sup>[7]</sup>

$$V_n = \left( \frac{4KTR + i_n^2 R^2}{1 + j\omega RC}^2 + e_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

로 표시된다. 여기서  $K$ 는 볼츠만 상수이고  $T$ 는 절대 온도를 나타낸다. 만약  $R$ 과  $C$ 가 충분히 크다면 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$V_n \approx \left( \frac{4KT}{R\omega^2 C^2} + \frac{i_n^2}{\omega^2 C^2} + e_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \approx \left( \frac{4KT X_c^2}{R} + \frac{e_n^2 X_c^2}{Z_n^2} + e_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

여기서  $X_c$ 는 전체 션트임피던스의 리액티브 임피던스를 나타내고,  $Z_n = e_n/i_n$ 은 프리앰프의 잡음 임피던스를 나타낸다. 션트저항이 증가할 수록 존슨잡음의 영향은 감소하고 주파수가 증가하면 존슨잡음과 전류잡음은 감소하며 전압잡음은 전기용량변환기의 분해도에 제한을 가져다 준다. 식(7)에서 최소 분해도와 식(9)의 입력잡음의 크기가 같다고 한다면 전기용량변환기가 측정할 수 있는 최소 측정 한계치를 계산할 수가 있다. 즉 측정한계치  $\delta_n$ 는

$$\delta_n = \frac{2x_o}{E_b} \left( 1 + \frac{x}{2x_o} + \frac{X}{Z} \right) \left( \frac{4KT}{R\omega^2 C^2} + \frac{i_n^2}{\omega^2 C^2} + e_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

로 표현할 수 있다.

III. 전기용량변환기의 특성조사 및 신호변환회로

1. 특성조사

본 연구에서 전기용량변환기의 전극구조 설계를 위

하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 이를 기본으로 하여 전기용량변환기를 설계제작 하였다. 그림 1(b)에 나타난 것과 같이 기준 전기용량의 전기용량 변화  $C_s$ 는 입력변위에 따라 전기용량은 변하지 않고 일정한 값을 가진다. Table 1에 측정 전기용량  $C_x$ 와  $C_x - C_s$ 을 입력변위에 따라 변화되는 값을 컴퓨터 계산값과 측정된 값을 비교 하였다. 또 신호변환기를 제작하여 출력전압의 변화로 나타내었다. 컴퓨터 계산값과 측정값이 차이가 나는 것은 계산을 위한 전극치수(dimension) 오차와 앞에서 언급한 선형성의 저하 원인들 때문이다. 기준전기용량기  $C_s$ 의 컴퓨터 계산값은 2.4032259pF이었고, 실제 측정된 값은 2.401113pF이었다. 이들의 측정값은 실험실 온도  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 습도  $50 \pm 1\% \text{RH}$ 에서 얻어진 값들이다. 이러한 측정 결과와 함께 전기용량 변환기의 출력특성인 비선형오차, 온도, 습도, 입력전압, 입력주파수 시간의 경과등 제반 주위환경 변화에

표 1. 변위에 따른 출력전기용량과 출력전압의 이론값과 측정값

Table 1. The Theoretical and Measured Values of the Capacitance and Voltage Changes as a Function of Displacement.

Displacement (mm)	$C_x$ (pF)	$C_x - C_s$ (pF)	Measured $C_x - C_s$ (pF)	Measured voltage (V)
0.	7.29254766	4.88932173	4.88737	8.1437
1.0	7.12680794	4.72358201	4.70998	7.8748
2.0	6.96106822	4.57784229	4.53262	7.6060
3.0	6.79532849	4.39210257	4.35545	7.3376
4.0	6.29588788	4.22636285	4.17829	7.0694
5.0	6.46384906	4.06062313	4.00117	6.8012
6.0	6.29810934	3.89488341	3.82404	6.5332
7.0	6.13236962	3.72914369	3.64681	6.2651
8.0	5.96666299	3.56340397	3.46978	5.9972
9.0	5.80089018	3.39766425	3.29274	5.7293
10.0	5.63515046	3.23192453	3.11567	5.4618
11.0	5.46941074	3.06618481	2.93870	5.1941
12.0	5.30367102	2.90044509	2.76175	4.9263
13.0	5.13793130	2.73470537	2.58475	4.6588
14.0	4.97219158	2.56896565	2.40775	4.3914
15.0	4.80645186	2.40322593	2.23081	4.1239
16.0	4.64071215	2.23748621	2.05389	3.8566
17.0	4.47497243	2.07174649	1.87712	3.5893
18.0	4.30923270	1.90600677	1.70041	3.3223
19.0	4.14349299	1.74026705	1.52370	3.0553
20.0	3.97775327	1.57452733	1.34716	2.7883
21.0	3.81201355	1.40878761	1.17060	2.5216
22.0	3.64627383	1.24304790	0.99419	2.2550
23.0	3.48053411	1.07730818	0.81782	1.9784
24.0	3.31479439	0.91156847	0.64145	1.7218
25.0	3.23192453	0.828698597	0.55327	1.5886

다른 출력변화를 관찰하였다. 전기용량변환기를 Laser measurement system(HP 5526A)과 Capacitance measuring system(GR1621)를 이용하여 입력변위에 따른 출력 전기용량의 변화를 측정하였다. 측정결과는 Table 1과 그림 4에 나타내었다. 출력전기용량의 변화는 입력변위 25mm 변하는데 4.88737pF에서 0.55327pF로 변하였으며, 감도는  $0.0002\text{pF}/\mu\text{m}$ 로 측정되어졌다. 이때 입력전압은  $15V_{\text{rms}}$ , 주파수 1.6KHz에서 측정된 결과이다. 동일한 조건에서의 출력전압을 측정한 결과도 Table 1과 그림 4에 나타내었다. HP5526A 시스템에 부착된 전기용량변환기의 출력을 제작된 신호변환기를 사용하여 출력전압을 디지털 볼트메타 (Fluke 8840A)로 읽었다. 이때 출력전압은 직류이며 입력변위 25mm에 출력전압은 8.1437V에서 1.5886V로 변하였으며 감도는  $300\mu\text{V}/\mu\text{m}$ 이었다. 그림 3에 나타난 바와같이 선트임피던스Z가 무한한다면 전변위에 걸쳐 비선형오차는 거의 직선적인데, 실제로 표류전기용량(stray capacitance) 효과 때문에 비선형 오차는 증가되고 출력전기용량보다 큰 표류전기용량이 브릿지암(arm)과 접지사이에 생긴다. 이것은 케이플과 전극을 지지해 주는 지지물들에 의해 생성되는 것이다. 그림 5는 출력전기용량과 출력전압의 비선형 오차를 나타내었다. 그림에서 출력전기용량의 비선형 오차는  $\pm 0.05\%$  미만이고 최소사승법에 의한 피팅포인트(fitting point)는 0.999999795이었고, 출력전압의 비선형 오차는  $\pm 0.08\%$  미만으로 나타났고 피팅포인트는 0.999999451로 나타났다.

변환기에 공급되는 공급전압원의 변화에 따라 출력이 어떻게 변하는가를 조사하여 그림 6에 나타내었다. 입력공급주파수 1kHz 및 10kHz에서 입력공급전압( $0 \sim 50V_{\text{rms}}$ )을 변화시켜 가면서 기준 전기용량  $C_s$ 의 변

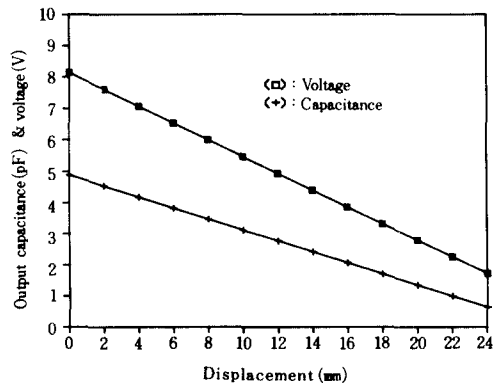


그림 4. 입력변위에 따른 출력전기용량과 출력전압  
Fig. 4. The Output Capacitance and Voltage versus Displacement.

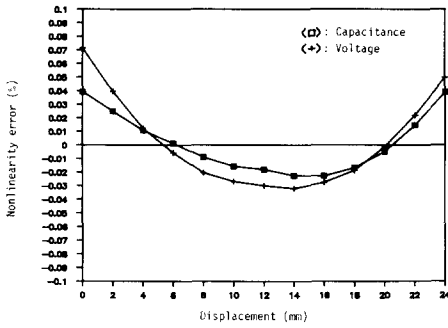


그림 5. 출력 전기용량과 출력전압의 비선형오차  
 Fig. 5. The Nonlinearity Error of Output Capacitance and Voltage.

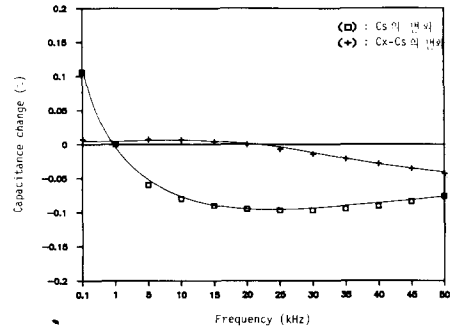


그림 7. 입력주파수 변화에 대한 출력전기용량의 변화  
 Fig. 7. Capacitance Changes by Means of Input Frequencies.

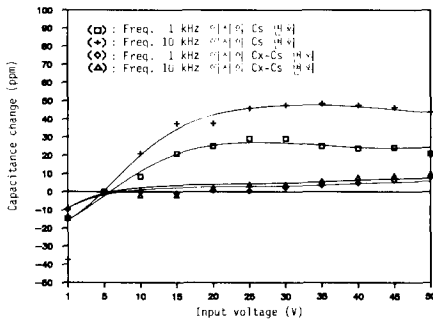


그림 6. 입력전압의 변화에 의한 전기용량의 변화  
 Fig. 6. Capacitance Changes by Means of Variations of Input Voltage.

화와  $C_x - C_s$ 의 변화를 조사하였다. 그림에 나타난 결과와 같이 입력전압의 변화에 따라 전기용량기 각각의 전기용량 변화가  $C_x - C_s$ 의 전기용량 보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 두개의 전기용량기를 사용한 전기용량변환기는 입력전압의 변화에 의해 출력특성이 나빠지지 않는다. 입력공급전압이 높으면 높을수록 감도가 좋고 분해도가 향상된다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 입력공급전압 5V를 기준으로 하여 입력 공급전압의 변화를 비교하여 표시하였다. 입력주파수에 따른 전기용량 변화의 주 원인은 전기용량기에 포함되어 있는 잔류 인덕턴스와 정전기적 불량인 콘택터에 의한 오차로 추정되는데, 그림 7에는 입력주파수 변화에 대한 출력전기용량의 변화를 조사하여 나타내었다. 결과에 따르면 전기용량  $C_x - C_s$ 의 변화는 입력주파수 1-50kHz 변화에 거의 변하지 않았으며 고감도와 분해도를 향상시키려면 주파수를 높이는 것이 좋으나 능동적 전자소자의 동작 한계를 감안하여 20kHz 미만이 적당하다. 그림 7에서 1kHz를 기준주파수로 하여 주파수 변화에 의한 출력변화를 나타내었다. 주변

온도 변화에 의하여 전기용량기의 전극과 절연체 및 전극을 지지해주는 지지물 들은 열적으로 팽창하게 되어 출력값이 변한다. 그림 8에는 주변온도를 변화시켜 가면서 온도 0℃를 기준으로 하여 출력변화를 관찰하였다. 온도 10~50℃ 사이에서 출력 전기용량은 매우 적게 변화했으나 출력전압은 다소 변화하였다. 이것은 신호변환기의 드리프트가 주 원인으로 나타났다. 전기용량변환기의 특성 변화에 가장 큰 영향을 미치는 온도 변화는 전극 각부분을 온도계수가 극히 낮은 재질은 선택하면 온도변화에 의한 영향을 줄일 수가 있다. 습도 변화에 의한 출력의 변화 원인은 유전체의 흡습현상과 이에 의한 절연체 및 지지물의 변형을 들 수 있다. 그림 9는 습도 30%RH를 기준으로하여 습도 변화에 따른 출력변화를 나타내었다. 습도 변화에서도 두개의 전기용량기를 사용할 때 출력특성에 크게 영향을 끼치지 못한다. 시간의 경과에 따른 출력변화를 관찰하였는데 5시간 동안 전기용량변화가 약 30ppm, 출력전압은 약 110ppm 정도 변화하였다. 그림 10은 144시간 동안 출력전압의 변화를 나타내었다. 144시간 동안 풀스케일(full scale) 10V에서 약  $\pm 2mV$ 의 변화가 있었다.

2. 신호변환회로

입력변위에 따라 출력전압을 나타내기 위한 신호변환기를 설계 제작하였으며 신호변환기의 전체 구성도를 그림 11에 개략적으로 나타내었다. 전기용량변환기를 구동시키는 구동신호원과 전기용량변환기의 출력신호는 PSD를 통하여 필터에 연결된다. 이때 PSD를 구성하기 위해서 기준신호는 같은 신호원에 연결된다. 전기용량변환기를 통하여 출력되어진 신호는 아날로그신호이므로 직류신호로 바꾸는데 이 과정에서 PSD를 사용하였다. PSD를 사용함으로써 quadrature 신호가 제거되고 저역필터와 같은 작용을 하는 증폭기로서 잡음

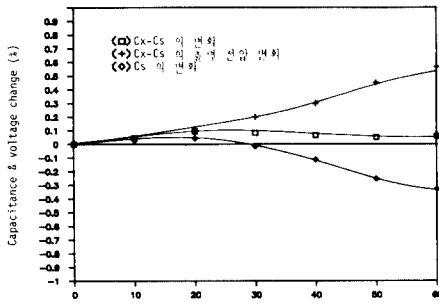


그림 8. 온도에 의한 출력전기용량과 출력전압의 변화  
 Fig. 8. Capacitance and Voltage Changes Depend on Temperature Variations.

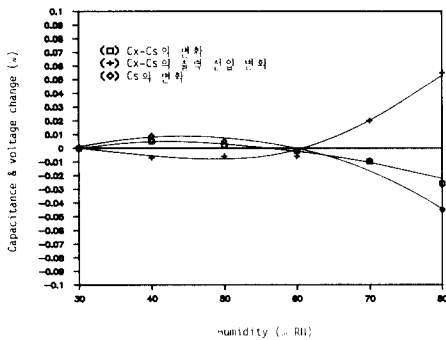


그림 9. 습도변화에 따른 출력전기용량과 출력전압의 변화  
 Fig. 9. Capacitance and Voltage Changes Depend on Humidity Variations.

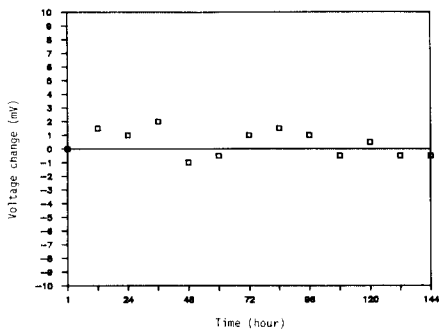


그림 10. 시간변화에 따른 출력전압의 변화  
 Fig. 10. Capacitance and Voltage Changes According to Time Interval.

을 줄일 수 있는 장점이 있다. PSD는 그림에 나타낸 바와 같이 스위치를 조정함으로써 아날로그 신호를 정류할 수 있는 신호로 선택하게 된다. 스위치는 기준신호의 양극성 변화에 의해서 전자적으로 조정되어진다.

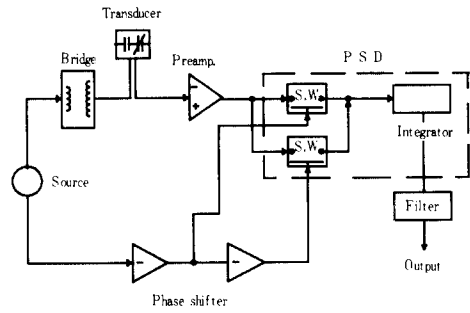


그림 11. 신호변환기의 회로도  
 Fig. 11. Circuit of the Signal-Conditioner.

기준신호와 전기용량변환기의 출력신호는 같은 신호원에 의해 동작되어진다. 비교신호 채널의 중요한 목적은 기준신호의 제로크로싱(zero crossing)에 대한 응답과 정확한 구형과 스위칭 전압을 생성하는 것이다.

### VI. 결 론

제작된 전기용량변환기의 특성 및 주위환경 변화에 대한 조사를 통하여 전극의 대향 면적을 변화시키는 두개의 전기용량기를 사용하므로써 측정범위를 넓힐 수 있었고 측정범위가 넓는데 비해 분해도, 감도, 선형도가 우수하였다. 비선형 오차가 출력전기용량인 경우  $\pm 0.05\%$  미만이고, 출력전압인 경우  $\pm 0.08\%$ 로 나타났는데 더 보완된 신호변환기를 제작한다면 더욱 향상되리라 본다. 입력공급 전압의 변화에 의한 출력변화는 두개의 전기용량기를 사용하였을 때 공급전압 변화에 대해 출력 전기용량 변화를 거의 무시할 수 있으며, 가능한 높은 전압을 공급 하므로써 감도를 높일 수가 있다. 공급 입력주파수는 감도와 분해등을 감안한다면 가능한 높으면 좋으나 20 kHz 미만의 범위에서 사용함이 타당하다. 주변온도 변화는 전기용량변환기의 출력변화에 가장 크게 영향을 미친다. 그러나 전기용량 변환기 각 부분을 온도계수가 극히 낮은 재질을 사용한다면 출력변화를 최소화 할 수 있다. 습도변화에 의한 영향은 크게 염려할 것이 없으며 1주일간의 시간 변화에  $\pm 2\text{mV}$ 의 드리프트가 있었다. 잡음에 의한 선형성 악화도 고려해야 하는데 이들의 주원인은 신호변환회로의 프리앰프에서의 존슨 잡음과 전류, 전압잡음 때문이다.

본 연구에서 제작된 전기용량 변환기는 측정범위 25mm, 분해도 0.1 $\mu\text{m}$ 의 측정능력을 가지고 있으며 이것을 이용하여 힘, 압력, 차압, 유량, 레벨, 진동, 가속도, 토오크 등의 측정에 활용할 수 있다.

## 參 考 文 獻

- [1] J.D. Garratt, "Survey of displacement transducers below 50mm", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 12, pp.563-573, 1979.
- [2] P.H. Mansfield, "Electrical Transducers for Industrial Measurement", *London Butterworths*, pp.27-59, 1973.
- [3] P.H. Sydenham, "Microdisplacement transducers", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 5, pp.721-733, 1972.
- [4] E.J. Clabburn, "An inexpensive fast response displacement transducer", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol.16, pp.248-250, 1983.
- [5] A.L. Hugill, "Displacement transducers based on reactive sensors in transformer ratio bridge circuits", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol.15, pp.597-606, 1982.
- [6] R.V. Jones and JCS Richards, "The design and some applications of sensitive capacitance micrometers", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol.6, pp.589-600, 1973.
- [7] Jay Dratler, Jr., "Inexpensive linear displacement transducer using a low power lock-in amplifier", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 48, no.3, March 327, 1977.
- [8] M.C. Mc Gregor, "A simple three-terminal micrometer capacitor", *J. Sci. Instrum.*, vol.33, 190, 1954.
- [9] V.T. Morgan and D.E. Brown, "A differential capacitance transducer for measuring small displacements", *J. Sci. Instrum.*, series 2, 793, 1969.
- [10] P.B. Kosel, G.S. Munro, Richard Vaughan, "Capacitive transducer for accurate displacement control", *IEEE. Tran.* vol. IM-30 no.2, 114, 1981.
- [11] Masahide Hirasawa, Mitsumobo Nakamura, Makoto Kanno, "Optimum form of capacitive transducer for displacement measurement", *IEEE. Trans.* vol.IM-33, no.4, 276, 1984.