

# 신개발 전기용량 레벨 센서 의 원리와 이용방법

The Application and Principle of an  
Improved Capacitive Level Sensor

이 래 덕

한국표준연구소 전기연구실장

## 1. 서 론

기상, 농업, 환경, 토목, 수리 등 불과 직접적으로 관계가 깊은 분야에서는 수위의 정확한 측정에 관한 관심이 높아가고 있으며 이러한 수위의 측정은 일반 공장에 설치되어 있는 각종 액체 저장 탱크 속의 유체의 양과 상태를 연속적으로 즉시 파악하고 원하는 양으로 자동 조절할 수 있는 공장자동화 시스템에 이용되기도 한다. 이러한 측정과 조절 시스템에 사용되는 레벨 센서는 용도와 원리에 따라 몇가지로 나누어져 있고 공정 제어면에서는 레벨 스위치와 연속 레벨 지시계형으로 구분하고 있는데, 대부분 선형도가 2% 정도로 낮은 편이다<sup>1)</sup>. 연속 레벨 지시계형으로 유체의 레벨(Level)을 측정하기 위한 레벨 센서(Level Sensor)는 여러가지 방법에 의하여 제작되고 있으며, 이러한 방법중에 레벨에 따라 전기용량을 변하게 하여 전기적으로 레벨을 측정하는 전기용량형(Capacitive Type)레벨 센서가 있다.<sup>2)</sup>

전기용량형 레벨 센서는 제작이 간단하고 가격이 저렴하며 제작방법에 따라 선형도(Linearity)를 높일 수가 있으며 측정대상의 형태에 의하여 센서의 구조를 여러가지로 선택할 수가 있다.<sup>3)</sup>

본 고에서는 이제까지 제작 보고된 전기용량형 레벨 센서의 문제점을 지적하고 이미 개발한 새로운 전기용량형 레벨 센서에 대한 기본원리와 선형도를 높이기 위한 보상전극 설치 및 측정결과에 대해 기술하려고 한다.

일반적으로 전기용량 변화를 발생시키는 센서의 기본 구조중 평판형을 이용하는 것 보다 동심 원통형을 이용하는 것이 형태적인 면에서 표류용량이나 센서를 구성하고 있는 전극 간의 각에 대한 오차를 줄일 수 있다.<sup>4)</sup> 그러나 이러한 원통형 레벨 센서도 레벨의 변화에 따라 발생하는 전기용량 값이 우수한 선형도를 나타내기 위해서는 전극간의 간격이 매우 가까워야 하는데 액체의 표면장력과 모세관현상, 액체 속에 포함되어 있는 이물질들의 영향에 의한 전기용량의

변화, 손실계수(Dissipation Factor) 변화 등의 원인에 의하여 오차와 선형성이 크게 악화된다. 따라서 이러한 원인들에 의하여 발생하는 오차들을 줄이기 위하여 보상형 전극을 설치한 동심 원통형 전기용량 레벨 센서를 제작하여 실험을 토대로 하여 특성을 분석 설명하고자 한다.

## 2. 센서의 원리와 제작

액체 레벨의 증감에 대응하여 전기용량이 변화되는 전기용량형 레벨 센서는 동심 원통 모양의 전기용량기를 기본으로 하여 제작한다. 동심 원통형 전극에서 발생하는 단위 길이당 전기용량  $C_0$  는

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{C}{a}} \quad (1)$$

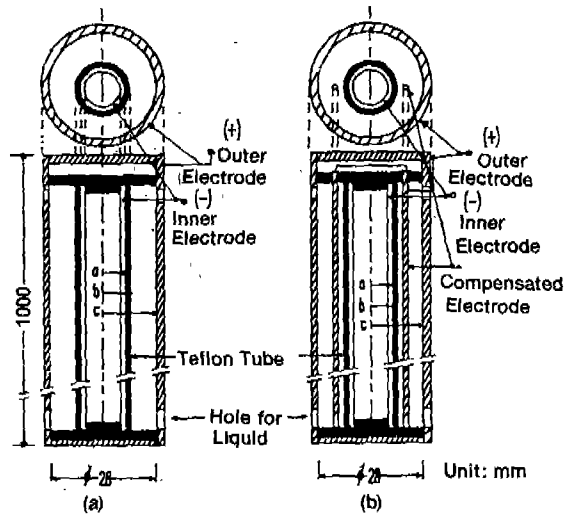
이다.

여기서  $\epsilon$ 는 유전체의 유전율,  $a$ 는 내부 원통 전극의 반지름,  $C$ 는 외부 원통전극의 반지름을 나타낸다.

(1)식에서 내부 원통전극과 외부 원통전극을 매우 가깝게 하면 전기용량  $C_0$ 는 커지지만 실제로 레벨 측정시 액체의 표면장력과 모세관현상에 의해 오차가 크게 발생되므로 이들 두 원통을 너무 가깝게 접근시킬 수가 없다. 또 레벨이 내려간 후에도 액체의 부착력에 의해 어느 정도 원통전극 표면에 잔류액체가 존재하여 측정오차로 나타난다.

이러한 오차의 원인들은 필연적으로 존재하기 때문에 이를 완전히 제거할 수가 없지만 가느다란 튜브 전극을 내부 원통전극과 외부 원통전극 사이에 삽입하고 내부 원통전극 표면을 테프론(Teflon)으로 입혀줌으로써 오차의 크기를 크게 줄일 수가 있다.

그림 1은 액체의 레벨을 측정하기 위한 레벨 센서의 구조를 나타내었다. 그림에 나타낸 센서는 외부에서 액체가 흘러 들어오면 전기용량 값이 액체의 레벨에 따라 비례적으로 변하게 되



(그림 1) Structure of level sensors  
(a) Cylindrical sensor.  
(b) Compensated cylindrical sensor.

로 레벨에 대응되는 전기적인 신호로 변환하여 사용할 수가 있다. 그림 1 (a)는 직경 28mm의 원통을 1개의 전극으로 하고 그 속에 전기용량기(Capacitor)를 형성할 수 있는 원통을 대향 전극으로 하는 동심 원통형 전기용량 레벨 센서의 구조를 나타낸 것이다.

내부 및 외부 원통전극은 모두 내부식성이 강한 스테인레스 강(SUS 304)을 사용하며 특히 내부 원통전극의 표면을 테프론으로 입혀줌으로써 외부와 전기적으로 절연되고 레벨 증감시 잔류되는 액체의 부착력에 의한 오차 원인도 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 부식 및 화학적 반응에 양호한 테프론의 특성에 의해 수명도 크게 연장시킬 수 있다.

내부 원통전극의 끝 부분은 외부 원통 전극과 일정 거리를 유지하기 위하여 와사 형태의 테프론으로 고정되어 있으며 외부 원통의 아래 부분에 구멍을 뚫어 내부 전극의 제일 아래위치에서 부터 액체가 흘러 들어오게 하고 윗 부분의 구멍은 액체 레벨의 원활한 상승과 하강을 위한 것

이며 동시에 내부 원통전극으로부터 측정 연결선의 통로가 되게 한다. 이때 그림 1 (a)에서 발생하는 전기용량  $C_a$ 는

$$C_a = k \left[ \frac{L}{\frac{1}{\epsilon_r} l_n \frac{b}{a} + \frac{1}{\epsilon_s} l_n \frac{c}{b}} + \frac{dl}{\frac{1}{\epsilon_r} l_n \frac{b}{a} + \frac{1}{\epsilon_s} l_n \frac{c}{b}} \right] \quad (2)$$

로 표현되며  $k = 2\pi\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0$ 는 진공 중의 유전율,  $\epsilon_s$ 는 공기 중의 유전율,  $\epsilon_r$ 은 테프론의 유전율,  $\epsilon_s$ 는 액체의 유전율을 나타내며  $a$ 는 내부 원통전극의 반경,  $b$ 는 테프론까지의 반경,  $c$ 는 외부 원통전극의 반경을 나타낸다. 그리고  $L$ 은 센서의 전체 길이를 나타내며  $dl$ 은 센서에 유입되는 액체의 레벨을 나타낸다.

(2)식의 첫 항은 센서에 액체가 없을 때의 전기용량 값을 나타내고 두번째 항은 센서에 액체가 유입될 때 변화되는 전기용량 값을 나타낸다.

그림 1 (a)에 의해 제작된 센서는 이제까지 레벨 측정용 전기용량 센서로서 가장 개량된 것으로, 정밀 측정용으로 사용되지만 내부 원통전극과 외부 원통전극 사이의 간격을 액체의 표면장력과 모세관현상의 영향을 받지 않을 만큼 간격을 유지해야 하므로 선형성이 좋지 않다.

이를 개선하기 위하여 그림 1 (a)에 나타낸 센서에 보상전극을 삽입하여 그림 1 (b)와 같이 제작한다. 액체의 표면장력과 모세관현상에 의한 영향을 줄이기 위해 가느다란 튜브 전극을 내부 원통전극과 외부 원통전극 사이에 대칭으로 두 개 삽입하여 외부 원통전극과 Lead선으로 연결한다. 이렇게 함으로써 내부 원통전극에 의해 출력되어지는 전기용량 변화와 보상을 위하여 설치한 튜브 전극에 의해 발생하는 출력 전기용량을 더함으로써 출력값도도 나아지고 선형도도 크게 향상된다. 보상전극은 원통전극과 같은 재질을 사용한다.

### 3. 실험에 의한 특성분석

그림 1 (b)에 나타낸 것처럼 각 원통전극에 연결된 도선에서 발생하는 전기용량 값이 측정조

전마다 변하기 쉬우므로 정전차폐 성능이 우수한 양질의 동축 케이블을 각 원통전극에 연결한 후 양호한 Grounding 처리를 해야 하며 동축 케이블의 길이도 2m를 넘지 않도록 하는 것이 바람직하다. 연속적인 레벨의 변화에 따른 출력 전기용량과 손실계수는 정확한 측정을 위하여 측정 공급주파수 10kHz에서 10MHz 범위까지 정확도가  $\pm 0.1\%$ 인 Multi-frequency LCR meter (HP4275A)를 사용하여 연속적으로 측정하고 그 외에 측정을 용이하게 하기 위하여 치구를 제작 사용한다. 레벨 센서의 특성 측정을 위하여 물을 대상으로 하여 실험하였는데, 공급 전압 1Vrms, 공급주파수 10kHz에서 원통형전극만으로 구성된 그림 1 (a)의 센서에서 식(2)의 계산에 의해 출력되어지는 전기용량 값과 측정에 의해 출력되어진 전기용량 값, 그리고 보상전극을 사용한 그림 1 (b)의 센서에서 출력되어진 측정 전기용량 값을 비교하여 표 1에 나타내고 있다.

표 1에 의하면 그림 1 (a)의 계산값과 측정값의 차이는 센서의 치수오차, 표류전기용량, 손실계수의 변화, 대향전극 간의 비직선성 등의 원인으로 생각된다. 또 그림 1 (b)의 센서에서 출력된 전기용량 값이 그림 1 (a)에서 출력되어진 전기용량 값 보다 큰 것은 보상전극이 삽입됨에 따라 보상전극과 내부 원통전극 사이에 발생하는 전기용량이 그림 1 (a)에 출력되어진 전기용량 값에 더해졌기 때문이다. 손실계수도 0에서 5cm 레벨 근방을 제외하고 모두 0.001보다 적다. 그러나 이것의 변화는 출력 전기용량의 선형도에 영향을 미친다. 그림 2에는 원통형 센서와 보상형 센서의 출력 전기용량에 대한 비선형도를 나타낸다.

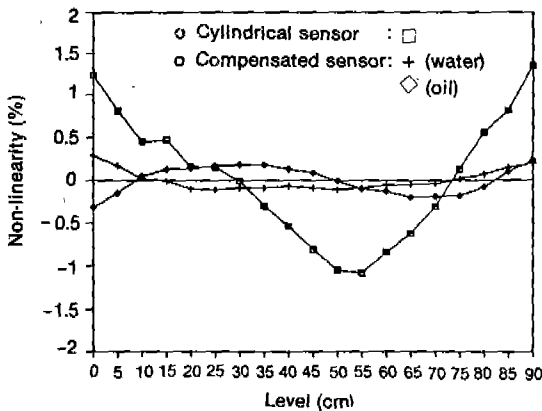
또한 보상형 센서를 사용하여 Mineral oil의 레벨을 측정하여 그 비선형도를 동시에 나타내고 있는데, 결과에 의하면 원통형 센서인 경우 그 선형도가  $\pm 1.4\%$ 인데 비해 보상형 센서인 경우는 물이나 기름인 경우에도 비선형도가  $\pm 0.3$

〈표 1〉 Comparison of output capacitance between cylindrical sensor and compensated cylindrical sensor for water level ( $23 \pm 1^\circ\text{C}$ )

Level (dl:cm)	Cylindrical sensor		Compensated cylindrical sensor Measured capacitance	Dissipation factor
	Calculated capacitance	Measured capacitance		
0	74.640	74.00	94.20	0.00111
5	99.035	98.80	123.13	0.00105
10	123.43	129.05	151.93	0.00097
15	147.82	157.90	181.37	0.00014
20	172.22	186.30	210.52	0.00014
25	196.61	215.10	240.04	0.00001
30	221.01	244.35	269.78	0.00001
35	245.40	273.90	299.37	0.00001
40	269.80	303.65	329.07	0.00002
45	294.19	333.00	358.54	0.00002
50	318.58	362.40	388.06	0.00001
55	342.98	390.80	417.79	0.00001
60	367.37	418.00	447.57	0.00001
65	391.77	444.80	477.17	-0.00002
70	416.16	471.60	506.82	-0.00003
75	440.56	498.20	536.75	0.00002
80	464.95	524.25	566.61	0.00001
85	489.35	550.70	596.65	0.00001
90	513.74	576.80	626.45	0.00002

%를 벗어나지 않고 있다.

이와같이 센서의 출력 전기용량의 선형도에 영

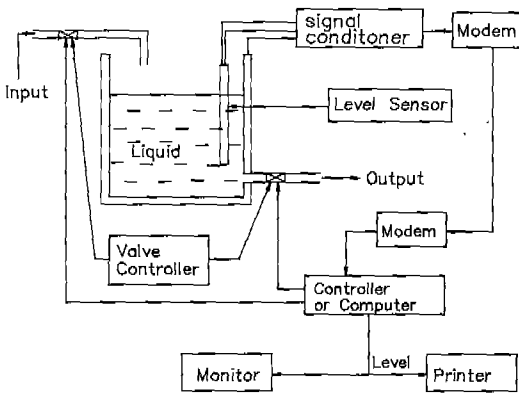


〈그림 2〉 Nonlinearities of output capacitances, for cylindrical sensor and compensated cylindrical sensor

향을 미치는 오차의 원인은 액체의 모세관 현상과 표면장력, 부착력에 의해 전극 표면에 잔류되는 소량의 액체에 의해 발생하는 출력 전기용량 변화, 센서를 이루고 있는 전극들과 이들 전극을 지지해 주는 테프론 등의 식진도와 평행도 및 표면거칠기와 대칭성, 측정대상물의 Conductivity의 변화, 센서의 상단과 하단, 그리고 출력 리드 선에서 발생하는 표류용량, 기계적인 안전성 결함에서 발생하는 변화, 센서의 외부온도 변화 등을 나열할 수 있다.

#### 4. 센서의 활용

일반적으로 트랜스듀서 시스템은 물리적 변화를 센서를 사용하여 전기, 자기 혹은 광 등의 신호로 바꾸어 물리적 변화량을 측정한다. 이러한 과정에서 측정의 정확도는 센서를 포함하여 신



〈그림 3〉 A Automatic Level Control System with Level Sensor

호변환장치와 표시기의 성능에 의해 좌우된다. 따라서 측정 대상물의 측정 정확도를 높이기 위해서는 트랜스듀서 시스템의 성능도 높여야 한다.

그림 3은 정확도가 높은 보상적극형 전기용량 레벨 센서를 사용하여 탱크 속의 액체를 원거리에서 조절할 수 있는 시스템을 예로서 나타내었다.

입력 밸브 컨트롤러와 출력 밸브 컨트롤러가 설치된 액체 저장용 탱크 속의 액체 상태를 원거리에서 Monitoring 하고 이를 필요에 따라 자동 조절하게 한다. 이때 탱크 속에 부착된 레벨 센서는 정확한 레벨을 감지하며 감지된 전기용량 값은 신호변환기 (Signal Conditioner)를 통하여 직류전압이나 주파수로 바꾸어 이를 원거리로 전송하기 위하여 모뎀을 통하여 컨트롤러

나 제어용 컴퓨터에 연결된다.

중앙처리 장치에 속하는 컴퓨터에서는 적정값의 설정에 의해 입력 혹은 출력 밸브를 조절하게 한다. 이러한 시스템에서 레벨 센서의 정확도는 시스템 전체에 커다란 영향을 끼친다. 이외에도 홍수로 인한 교량의 수위, 댐 (Dam), 배수갑문, 하천 등의 수위를 감지하며 원하는 방류량을 자동으로 조절할 수 있는 중앙통제 장치에 연결하여 모든 상황을 즉시 파악하여 조직적이며 능률적으로 대책을 강구할 수가 있다.

## 5. 결 론

저장용 탱크 속에 들어 있는 액체의 레벨을 측정하여 탱크 속에 채워져 있는 현재의 양과 상태를 즉시 파악하고 필요에 따라 이들을 연속적으로 원거리에서 자동으로 조절할 수 있는 레벨 센서 개발과 아울러 기본원리, 실험적인 특성과 응용에 관하여 기술하였다.

최근 계측기기의 국산화와 함께 계측기기의 측정 정확도를 향상시키려는 부단한 노력은 계측 시스템의 자동화로 급속히 바뀌어 가고 있다. 특히 레벨의 정확한 측정을 위하여 앞에서 기술한 방법 이외에 고가의 시스템인 초음파 및 레이저를 이용한 측정방법이 사용되기도 한다.

비록 제작가격이 적은 전기용량식 레벨 센서를 여러가지 방법으로 개량하여 간다고는 하지만 아직까지 응용면에서 많은 어려움이 따르며 측정대상과 설치형태에 따른 구조적 개선이 계속되어야 한다.

## 참고문헌

- 1) 이광우의 관련전문가, "센서 개발을 위한 사전 조사연구", KSRI-88-35-IR, 1988.
- 2) P. J. Ross. A water-Level Sensor using a Capacitance to Frequency Converter. J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 16, pp. 827-828, 1983.
- 3) T. L. Foldyari & K. S. Lion, Instruments & Control System, 37, 77 (1961).
- 4) 박영태, 이래덕, 대한전자공학회논문지, 24, 30, 1987.
- 5) 박영태, 이래덕, 새물리, 27, 557 (1987).