Cross Capacitance 측정법을 이용한 유전상수 정밀측정

김한준, 강전홍, 유광민, 이세현*, 구경완**, 한상옥***
한국표준과학연구원, 한국폴리텍IV대학*, 호서대학교**, 충남대학교***

Precise Measurement of Dielectric Constant Using Cross Capacitance Measurement Method

Han Jun Kim, Kang Jeon Hong, Kwang Min Yu, Lee Sei Hyun*, Kyung-Wan Koo**, Sang Ok Han***
KRISS, Polytechnic Colleges IV*, Hosei Uni.**, Chungnam Uni***.

Abstract - The cross capacitor electrode system applied Thompson-Lampard theorem for precise and accurate measurement of dielectric constants is studied in this study. The capacitance derived from cross capacitor is calculated by the equation of ($C=\frac{\epsilon \ln 2}{\pi}$ • effective length of electrode) which is very different from the equation of capacitance derived from parallel plate capacitor. From above mentioned reason, the capacitance measurement uncertainty of cross capacitor can be reduced then that of the parallel plate capacitor. the measurement dielectric constant measured by cross capacitor electrode method is one order more accurate and precise than that of 3-electrode method.

1. 서 론

지금까지 유전율 측정에는 주로 두 개의 금속 평행판 전극을 이용한 3-전극 가드 링(3-terminal guard ring) 전극방법[1, 2] 주로 사용되고 있으며 상업화 된 측정 전극시스템도 여러 종류가 개발되어 있다. 그러나 유전율 측정에 중요한 변수인 측정용 전극의 넓이, 두 전극 사이의 간격, 유전체 시료의 두께 등의 기계적 측정에서 발생하는 오차, 유전체 시료 표면의 가공과 전극 표면의 가공정도에 따라 전극과 유전체의 접촉면 사이에 발생하는 공극의 영향으로 발생하는 오차, 전극 모서리의 전계의 불균일로 발생하는 모서리 영향, 그리고 전극면의 산화로 인하여 전극 면에 입혀진 대단히 얇은 산화 필름 막에 의해 발생하는 오차 등이 발생할 수 있는 단점이 있다. 특히 유전체 시료의 가공상태에 따른 표면 거칠기, 양전극표면의 평행도에 따른 시료와 전극사이에 발생하는 공극이 오차를 발생시키는데 공극의 두께를 정확히 분석할 수가 없으므로 보상값 혹은 불확도를 산출할 수가 없다. 이러한 원인으로 유전율시료에 액체 금이나 은으로 코팅하여 전극을 형성하여 공극 발생소지를 완전히 배제시키고 측정을 하지만 기계적으로 균일한 치수로 정확한 코팅을 하기위한 또 다른 설비가 필요하게 되고 또한 재료에 따라서 코팅이 불가능한 재료도 있고, 코팅 과정에서 사용되는 유. 무기용매가 시료 내부로 침투되어 재료의 성질이 변질되는 수도 있어, 측정가능 시료에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이상에서 언급한 문제점을 개선하여 유전율을 정확하게 측정할 수 있는 Thompson-Lampard의 정전기 이론[3]을 적용한 Cross Capactance(이하 CC) 전극을 이용한 측정방법을 제안하였고 3전극방법과 CC방법 2가지를 함께 측정할 수 있는 전극시스템으로써 유전율 CRM을 측정하여 CC방법의 우수성을 보였다.

2. 본 론

2.1 Thompson-Lampard 정전기 이론

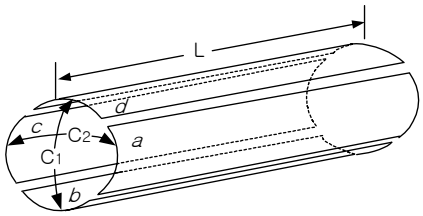

Fig. 1 Principle of the Thompson-Lampard theorem

Fig. 1과 같이 진공 중에서 닫혀 진 임의의 단면이 4개의 좁은 절연 틈으로 나누어지는 무한길이의 전극구조에서 *a, c*의 전극을 접지 하였을 때 전극 *b, d* 사이에서 단위 길이 당 유도되는 전기용량을 C_1, 전극 *b, d*를 접지 하였을 때 전극 *a, c*에서 단위 길이 당 유도되는 전기용량을 C_2이라면 SI 단위계에서 C_1 및 C_2의 사이에는

$$\exp(-\frac{\pi}{\epsilon_0}C_1)+\exp(-\frac{\pi}{\epsilon_0}C_2)=1 \quad (1)$$

의 관계가 성립하는데 이를 Thompson-Lampard 정리라고 한다.
전극의 구조가 완전 대칭일 경우에는

$$C=C_1=C_2=\frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \quad \mathrm{F/m} \quad (2)$$

가 된다.

2.2 원형 Cross Capacitance 전극의 전기용량

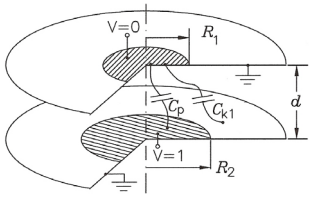

Fig. 2 Modified Kelvin guard ring capacitor in cross section

Fig. 1의 그림을 원형의 전극구조로 변형이 되고, Fig. 2의 원형전극에서 빗금처진 상단전극과 하단전극 사이에서 유도되는 전기용량은

$$C_p=\frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r R_1^2}{d_0}-C_{k1} \quad (3)$$

$$C_{k1}=\frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}{d_0}\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}I_1(n\rho_1)K_1(n\rho_2) \quad (4)$$

여기서 $\rho_1=\frac{\pi R_1}{d_0}$, $\rho_2=\frac{\pi R_2}{d_0}$이고, $I_1(n)$과 $K_1(n)$은 각각 ρ_1, ρ_2 2종류로 바뀌진 Bessel 함수이다.

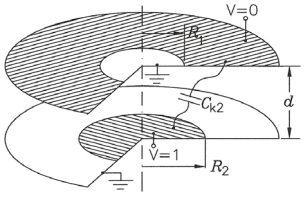

Fig. 3 Changed connection in modified guard ring capacitor

전극의 연결을 Fig. 3과같이 연결하면 정기용량 C_{k2}는 아래 식 (5)와같이 유도된다.

$$C_{k2}=\frac{\pi\epsilon(R_2^2-R_1^2)}{d}+C_{k1} \quad (5)$$

상기 식 (5)에서

1) $x = R_2 - R_1$이 대단히 크면, 실제적으로는 $x > 5\,d_o$, 식 (3)은

$$C_p = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_1^2}{d_0} \tag{6}$$

으로 되어 이상적인 Kevin guard ring 전극의 식과 같다.

2) $R_1 = R_2$ 이면 즉 상단과 하단전극의 내부전극의 크기가 같으면

$$C_{k1} = C_{k2} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_1^2}{d_0} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} I_1(n\rho_1) K_1(n\rho_1) \tag{7}$$

$$\approx \frac{4\pi\epsilon R_1^2}{d} \frac{d}{2\pi R_1} \ln 2 \approx 2\epsilon R_1 \ln 2$$

$$\approx \epsilon \cdot 2\pi R_1 \cdot \frac{\ln 2}{\pi} = \text{유전율} \cdot \text{원주길이} \cdot \text{Lampard coefficient}$$

식 (7)은 Lampard에 의해서 만들어진 곡선이 완전 보상된 즉 직선구조에서의 cross capacitance, 즉 식 (2)와 같다.

2.3 원형 CC 전극 제작

본 연구에서는 3-전극 방법과 CC 전극 방법의 기계적인 오차가 2가지 방법에서 같도록 하기 위해서는 동일한 전극구조의 3-전극 방법과 CC 방법으로 측정할 수 있도록 하여야 한다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 구조의 전극을 필요에 따라 외부에서 컨넥터 연결만 바꾸어줌으로 전극형태를 3-전극과 CC전극이 되도록 설계 및 제작 하였다.

외부에서 컨넥터로 상단외부전극과 내부전극을 연결하면 3-전극형 구조가 되고, 열결없이 직접 측정하면 Thompson-Lampard 정리를 이용하여 측정할 수 있는 CC 전극구조가 된다.

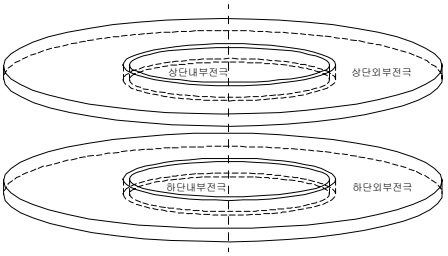

Fig. 4 Basic electrode structure and connection method of electrodes

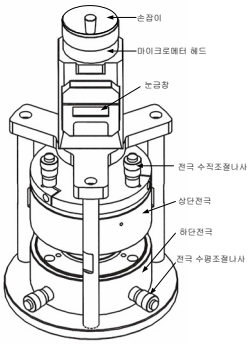

Fig. 5. Fabricated electrodes system.

2.4 유전율 CRM을 이용한 측정 및 결과분석

제작된 전극의 3전극방식과 CC방식을 이용한 측정오차분석에는 3종류의 유전율 CRM이 사용되었다. 첫째는 미국의 표준연구소인 NIST (National Institute of Science and Technology)에서 보급하는 표준물질 774(유전율:7.46 ± 0.05) 이고, 둘째는 미국 및 러시아에서 광학기구 및 군사용 목적으로 사용되어 그 특성이 많이 알려진 Quarz 종류인 KLR-1.1(유전율:4.011 ± 0.012)을 사용하였고, 마지막으로는 97 %농도의 알루미나(Al_2O_3)(유전율:9.69 ± 0.05)를 사용하였다.

측정된 유전율 값들을 분석하여 정리한 Table 1로부터 아래의 몇 가지를 알 수가 있다.

Table 1 . Comparison data of dielectric constant of SRMs by CC method and 3-electrode measurement method using fabricated dielectric measurement system

CRM		3-electrode measurement			CC measurement		
종류	유전율 ①	측정값 ②	(①-②)/① ×100, %	표준편차	측정값 ④	(①-④)/① ×100, %	표준편차
KLR-1.1	4.01	3.69	7.98	0.022	4.02	-0.25	0.003
SRM774	7.46	6.43	13.8	0.025	7.00	6.1	0.006
Al_2O_3	9.69	7.64	21.2	0.056	8.86	8.6	0.008

첫째, CC 방법으로 측정된 결과가 가드링 전극을 갖는 3-전극 방법으로 측정된 결과보다 측정정확도뿐 만 아니라 측정 안정도 면에서도 대단히 우수하다.

둘째, 유전율이 클수록 3-단자 및 CC 방법 모두 측정오차가 증가한다. 그러나 측정오차의 증가율은 CC 방법이 3-전극측정방법보다 대단히 작다.

셋째, 시료나 측정시스템의 전극이 거울 면으로 가공되었음에도 불구하고 가드링 전극을 갖는 3-전극에 시료를 삽입하여 측정하는 방법은 유전율이 4.01인 측정시료 KLR-1.1에서 실제 값보다 약 8 % 작게 측정되었다. 이 결과는 예상 밖의 결과이기에 상품화된 3-단자 방식의 유전율 측정 셀인 Agilent 사의 16451B를 사용[52]하여 본 연구에서 제작된 유전율 측정 시스템을 검증을 하였으나 전극표면 상태가 본 연구에서 제작된 전극보다 거칠어 결과는 더 나쁘게 측정되었다. 이 결과는 측정전극과 시료 사이에 발생하는 공극의 영향으로, 전극면이나 시료의 표면이 최적의 조건으로 가공되어도 공극을 완전히 제거할 수가 없다는 것을 보여주는 결과이다.

3. 결 론

유전체의 유전율을 측정하기 위하여 널리 사용되고 있는 가드링방식의 3-전극 구조를 사용하여 유전율을 측정하기위해서는 전극과 시료사이에 발생하는 공극에 의한 오차는 측정결과에 결정적인 영향을 미칠 수 있으나 실제적으로 공극이 얼마나 발생되어 있는지를 측정 혹은 추산하는 것은 불가능하다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 Thompson-Lampard의 정전기 이론을 적용한 CC 측정원리를 이용하여 유전율을 측정할 수 있는 방법에 대하여 연구 하였다. 측정결과

첫째, CC 전극방법으로 측정된 결과가 3-전극 방법으로 측정된 결과보다 측정정확도 및 측정 안정도 면에서 한 order이상 정확한 측정이 가능하다. 특히 기계적 측정오차의 영향으로부터 발생되는 불확도 요인이 매우 작게 영향을 주어 유전율의 값이 6 이하의 경우에는 1 %이하의 정확도로 측정이 가능하다.

둘째, 유전율이 클수록 3-전극 및 CC 방법 모두 측정오차가 증가한다. 그러나 측정오차의 증가율은 CC 방법이 3-전극 측정방법보다 대단히 작다.

셋째, 시료나 측정시스템의 전극이 거울 면으로 가공되었음에도 불구하고 가드링 전극을 갖는 3-전극에 시료를 삽입하여 측정하는 방법은 유전율이 4.01인 측정시료 KLR-1.1에서 8 %, 유전율이 7.46의 경우 13.8 %, 유전율이 9.69의 측정시료의 경우에는 21.2 % 실제 값보다 작게 측정되었다. 이 결과는 공극의 영향으로, 전극면이나 시료의 표면이 최적의 조건으로 가공되어도 공극을 완전히 제거할 수가 없다. 그러나 본 연구의 결과를 측정값에 보상의 방법으로 적용하면 측정값과 실제값의 차이를 십분의 일 정도로 줄일 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] G. Oneal and W. P. Harris, "Three-Terminal Cell for Thin Film Dielectric Measurements", 1969 Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, NAS-NRC, pp.164-170, 1969.

[2] Arnold H. Scott and W. P. Harris, "Residual Losses in a Guard-ring Micrometer-Electrode Holder for Solid-Disk Dielectric Specimens", J. Research of the National Bureau of Standards, Vol. 65C, No. 2, pp. 101-112, 1961.

[3] D. G. Lampard and R, D, Cutkosky, "Some Results on the Cross Capacitance per Unit Length of Cylindrical Three-Terminal Capacitors with Thin Dielectric Films on Their Electrodes", No, 351M, pp. 112-119, January, 1960.