

Cross Capacitance 원리를 적용한 새로운 유전상수 측정방법 제안

A New Measurement Method of Dielectric Constants Applied the Principles of Cross Capacitance

김한준*, 이래덕, 강전홍, 유광민, 한상옥**

(Kim han jun*, Lee rae duk, Kang jeon hong, Yu kwang min, Han sang ok**)

Abstract

The guard-ring type 3-terminal parallel plate electrodes proposed by ASTM D 150-81 and IEC 250 have been widely used for measurement of dielectric constants of solid dielectrics. However the method using this electrodes causes many uncertainty associated with the measurement errors of the diameter of the guarded electrode, the gap between guarded and guard-ring electrode, the distance of two active electrodes(the thickness of specimen), the roughness and contamination of surface of electrode and specimen, close adherence grade of electrode and specimen. In this paper, a new electrode system of cross capacitance type based on Thompson-Lampard theorem is designed and is employed for the measurement of dielectric constant. The results of simulation of guard-ring electrode and cross capacitance electrode using FEM program show that distance measurement between two electrodes in guard-ring electrode produces large uncertainty, on the other hand this effect in cross capacitance electrode is negligible. Furthermore, the air gap effects in the cross capacitance electrode is 5.6 times less sensitive than that in guard-ring electrode by assuming air gap of 50 μ m.

Key Words: Thompson-Lampard theorem, Cross Capacitance, Guard-ring type electrode, Dielectric constants,

1. 서 론¹⁾

고체 유전체의 유전상수를 측정하는 방법에는 두 개의 평행판 전극을 이용한 guard-ring 형의 3-단자 전극방법^{[1][2]}, 마이크로메터를 이용한 2-단자 전극방법^[3], air gap 방법^[4]이 주로 많이 사용되는 방법이며, 그밖에 두 가지의 유체를 사용하는 two-fluid 방법^[5]이 필요에 따라 사용이 되고 있다. 이 중에서 guard-ring 형의 3-단자 전극방법은 이

론적인 것과 실제 기계적인 구조에서 발생하는 오차들 예로서 guarded electrode의 실제넓이를 적용할 때 발생하는 불확도를 보상하기 위한 연구^{[6][7]}, guarded electrode의 갭 영향에 대한 연구^[8], 전극 edge에 의해 발생하는 불확도 보상에 대한 연구^[9] 등을 보상하기 위한 많은 연구들이 진행이 되어왔다. 이러한 연구 결과를 기반으로 절연체 및 유전체에 대한 유전상수의 측정방법 및 절차의 표준화를 위하여 이미 IEC 250 및 ASTM D 150-81 등이 작성 공포되어 현재까지 세계적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 전극의 넓이 측정, 두 전극사이의 간격측정에서 발생하는 측정오차 및 시료와 전극사이에서 필연적으로 발생할 수밖에 없는 에어 갭 등이 직접적으로 불확도에 크게 작용하고 이것들

* 한국표준과학연구원 전기.자기그룹
(대전시 유성구 도룡동 1번지)
Fax: 042-868-5018
E-mail: hanjun@kriss.re.kr

** 충남대학교 전기공학파

은 보상으로 해결을 할 수가 없다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하여 보다 정확하게 유전상수를 측정할 수 있는 새로운 방법을 구현하고자 Thompson-Lampard^[10]의 정전기 원리를 이용한 cross capacitance 측정법에 대해서 연구하였다. 동일한 전극크기를 지닌 하나의 전극구조로부터 기존의 평행판 전극에 의한 전기용량 측정도 가능하고, 본 연구에서 제시하는 cross capacitance 측정도 가능한 전극구조를 설계하였고, FEM을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 기존의 가드링 3전극구조에서의 유전율 시뮬레이션 결과와 새로운 방법에 의한 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 cross capacitance 측정법의 우수성을 증명하였다.

2. 이론

2.1 가드링 전극을 지닌 3-단자 전극구조

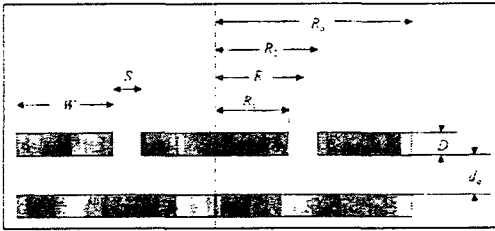


그림 1. 가드링 전극을 지닌 3-단자 전극구조
Fig. 1. Guard-ring type 3-terminal electrode

그림1과 같은 가드링 구조의 전극에서 edge correction을 첨가하면^[11], $s \ll d_0 \ll R_1 \ll R_0$ 일 때 전기용량 C_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{d_0} (R_1 + \frac{s}{2})^2 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_1^2}{d_0} \quad (1)$$

여기서 $R_i = R_1 + s/2$ 이다. 그러나 실제로 사용되는 가드링 전극은 가드링과 측정전극의 크기가 무한하게 클 수 없고 일정크기로 제한되기 때문에 식(1)에서 요구하는 이상적인 조건과 일치되지 않는다. 가드링의 외경(R_0)과 측정전극의 반경(R_1)의 차이가 d_0 의 약 5배 이상일 때에만 식(1)에 의한 전기용량값과 근사적으로 일치한다^[11]. 따라서 전극구조의 규모가 필연적으로 커지는 단점을 가지고 있다.

2.2 Thompson-Lampard 정전기 이론

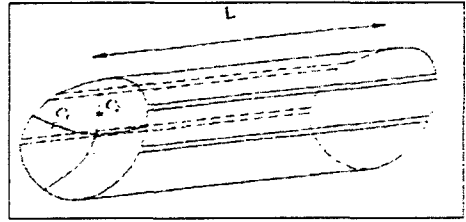


그림 2. Thompson-Lampard 정리의 원리
Fig. 2. Principle of the Thompson-Lampard theorem.

그림2와 같이 진공 중에서 닫혀진 임의의 단면이 4개의 좁은 절연 갭으로 나누어지는 무한길이의 전극구조에서 C_1 의 전극을 접지 하였을 때 단위 길이당 전기용량을 C_2 , C_2 의 전극을 접지 하였을 때 단위 길이당 전기용량을 C_1 이라면 SI 단위계에서 C_1 및 C_2 의 사이에는

$$\exp(-\frac{\pi}{\epsilon_0} C_1) + \exp(-\frac{\pi}{\epsilon_0} C_2) = 1 \quad (2)$$

의 관계가 성립하는데 이를 Thompson-Lampard 정리라고 한다^[10]. 일반적으로 $C_1 \neq C_2$ 이므로 $\Delta C = C_1 - C_2$ 이고, 평균값을 $C_m = (C_1 + C_2)/2$ 라고 하면

$$\begin{aligned} C_1 &= C_m + \Delta C/2 \\ C_2 &= C_m - \Delta C/2 \end{aligned} \quad (3)$$

으로 표현할 수 있다. 식(3)을 식(2)에 대입하여 Taylor series로 전개를 하면

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{\epsilon_0}{\pi} \left[\ln 2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \Delta C}{\epsilon_0} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{12} \left(\frac{\pi \Delta C}{\epsilon_0} \right)^4 + \dots \right] \\ &\approx \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \text{ F/m} \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 여기서 $\Delta C/C < 3.14 \times 10^{-4}$ 일 때 $C_m = C$ 가 된다. 이 원리는 상호보완하고 있는 전극의 C_1 과 C_2 는 상호보완되기 때문에 기존 평행판 전극의 경행도, 대칭정도 그리고 실제전극과 가드 전극 사이의 먼지 등의 영향을 무시할 수가 있다^{[3][4]}. 이 원리를 평면전극과 원형전극판에 적용시킨 전극의 모양은 각각 그림3과 그림4와 같다. 시뮬레이션을 위한 전극은 그림4와 같이 설계하였으며 동일한 조건으로 가드링 3-전극형 전극과 cross capacitance형 전극이 되도록 3-전극형으로 시뮬레이션을 할 때에는 전극 c 와 d 에 동일전위를

인가하였다. 시뮬레이션한 전극의 크기는 외부직경 50 mm, 가드링 전극과 low 전극사이의 gap은 0.1 mm, 전극의 두께는 1 mm로 하였다.

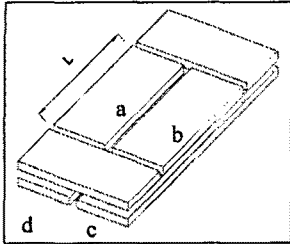


그림 3. Tompson-Lampard 정리를 평면전극에 적용.

Fig. 3. Plat shape electrode adapted Tompson-Lampard theory.

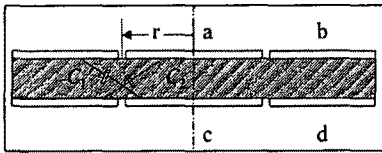


그림 4. Thompson-Lampard 정리를 원형전극에 적용.

Fig. 4. A round shape electrode adapted Thompson-Lampard theorem.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 전극간 간격변화가 전기용량에 미치는 영향

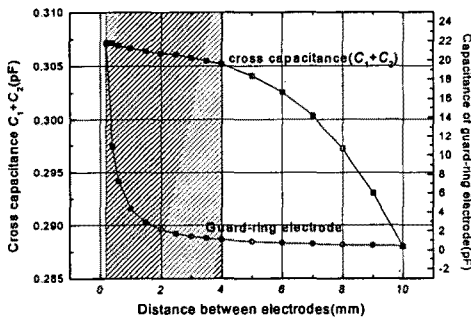


그림 5. 가드링 전극구조와 cross capacitance 전극구조에서 전극간 간격이 측정전기용량에 미치는 영향.

Fig. 5. Capacitance change of cross capacitance electrode and guard-ring electrode.

그림5는 공기 중에서 가드링 전극과 cross capacitance 측정전극의 간극간의 간격을 변화시킬 때 전기용량이 어떠한 영향을 미치는가를 시뮬레이션 한 결과이다. 즉 공기 중에서 가드링 전극을 지닌 3-단자형 전극의 전극간 간격 변화에 따른 전기용량 변화는 그림5(■)와 같이 반비례 관계가 있기 때문에 갭이 좁은 곳에서는 급격히 떨어진다. 반면에 cross capacitance 측정방법(●)에서는 서서히 감소하는 것을 보여주고 있다. 즉 가드링 전극에서는 시료의 두께를 측정시의 오차와 전극의 간격조절에서 발생하는 오차가 유전상수 측정에 대단히 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 특히 1 mm 이하의 얇은 시료를 측정 시에는 cross capacitance 측정 방법이 매우 효과적임을 알 수가 있다.

4.2 전극과 시료사이에 에어 갭이 있을 경우 전기용량에 미치는 영향

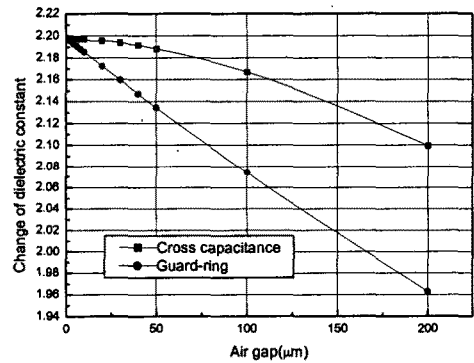


그림 6. 가드링 전극구조와 cross capacitance 전극구조에서 전극과 시료사이에 에어갭이 있을 때 유전율 측정에 미치는 영향.

Fig. 6. Change of dielectric constant when the air gap exist between electrode and specimen of cross capacitance and guard-ring electrode.

일반적으로 유전상수 측정을 위하여 제작된 전극 및 시료는 필연적으로 표면의 거칠기를 가지고 이로써 전극과 시료사이에 공기 갭을 포함할 수밖에 없다. 그림6은 시료의 두께를 2 mm로 고정하고 시료와 전극사이에 공기 갭을 1 μm-200 μm 까지 가변하면서 cross capacitance 전극방법과 guard-ring 전극방법에서의 차이를 시뮬레이션 한

것이다. 100 μm 의 공기 갭에 대해서 가드링 전극 구조에서는 약 5.7 % 정도의 유전상수 값의 감소 현상을 보이고 있지만 cross capacitance 전극구조에서는 단지 약 1.5 %만의 감소를 보였다. 즉 측정시의 공기 갭에 대한 영향이 기존의 가드링 구조에서 보다 cross capacitance 전극구조에서 현격히 줄어드는 것을 알 수 있으며 이 현상을 좀더 확장하면 전극의 산화, 거칠기 등에 따르는 영향도 cross capacitance 전극구조에 장점이 있다고 할 수 있다.

5. 결 론

고체 유전체의 유전상수를 측정하기 위한 기존의 가드링 전극구조는 전극의 넓이, 가드링과 low 전극사이의 갭, 시료의 두께 등을 측정 시 필연적으로 오차를 수반한다. 이 오차를 개선하기 위하여 Thompson-Lampard 정전기이론을 적용한 cross capacitance 측정방법의 전극을 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 그 우수한 점을 보였다. 첫째로 가드링 전극구조에서는 두 전극사이의 간격측정 불확도가 대단히 크게 영향을 미치는 반면에 cross capacitance 전극구조에서는 이러한 영향이 상당히 미미하게 평가되었다. 둘째로 전극 사이에 시료를 삽입했을 때 발생할 수밖에 없는 공기 갭의 영향은 공기 갭을 약 50 μm 로 가정 시 cross capacitance 전극구조가 가드링 전극구조보다 약 5.6배정도 영향을 덜 받는 것으로 평가가 되었다.

참고 문헌

- [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] A. 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] M. G. Broadhurst and A. J. Bur, "Two-Terminal Dielectric Measurement Up to 6×10^8 Hz," J. Research of the National Bureau of Standards, Vol. 6pC, No.3, pp.165-172, 1965.
- [4] A. H. Scott, "Techniques for Using the Precise Determination of the Dielectric Constant and Loss Angle of Solid Disk Specimens," 1963 Annual Report, Conference on Electrical Insulation, NAS-NRC, pp.74-76, 1963.
- [5] W. P. Harris and A. H. Scott, "Precise Measurement of Dielectric Constants by the Two-Fluid Technique," 1962 Annual Report, Conference on Electrical Insulation, NAS-NRC, pp.51-53, 1962.
- [6] W. P. Harris, "Precise Determination of the Area of Guarded Electrodes for Accurate Dielectric Measurements on Solid-Disk Specimens," 1963 Annual Report, Conference on Electrical Insulation, NAS-NRC, pp.71-73, 1963.
- [7] J. I. Lauritzen, "The Effective Area of a Guarded Electrode," 1963 Annual Report, Conference on Electrical Insulation, NAS-NRC, pp.67-70, 1963.
- [8] W. C. Heerens, E. M. Boogh, and G. Keizer, "Gap Influences in Guarded Capacitors," Delft Progress Report, Vol. 8, pp.149-160, 1983.
- [9] A. H. Scott and H. L. Curtis, "Edge Correction in the Determination of Dielectric Constant," J. Research of the National Bureau of Standards, Vol. 22, pp.747-775, 1939.
- [10] 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," pp. 112-119, 1960.
- [11] W. C. Heerens, "Application of Capacitance Techniques in Sensor Design," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 19, pp. 897-905, 1986.