

논문 21-1-10

고체재료의 유전율 측정용 Cell의 불확도 분석과 보상

Uncertainty Analysis and Compensation of the Cell for Permittivity Measurement of Solid Materials

김한준^{1,a}, 유광민¹, 강전홍¹, 한상옥²

(Han Jun Kim^{1,a}, Kwang Min Yu¹, Jeon Hong Kang¹, and Sang Ok Han²)

Abstract

The commercial parallel plate electrodes system with guard-ring electrode have been widely used for measurement of dielectric constants of solid materials. And the specification of the electrodes system is about 1 % of measurement uncertainty. This measurement uncertainty is only estimated the error come from mechanical measurements such as the area of the electrodes and the gap between the electrodes except the error come from the air gap between the electrodes and dielectric specimen. Because it is impossible to measure the air gap. This study analyze the total measurement uncertainties of the commercial dielectric constant test cell using 3 kinds of Standard Reference Materials. As a results, the total measurement uncertainty is much bigger than 1 % and the most of the uncertainty can be reduced by compensation of the error values evaluated in this study.

Key Words : Dielectric constants, Parallel plate electrodes capacitor, SRM, Dielectric specimen, Uncertainty, Compensation

1. 서론

고체절연체 및 유전체의 유전율 측정방법과 절차는 IEC-250[1] 및 ASTM D 150-98[2] 등의 규격으로 작성 공포되어 세계적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 기계적 가공오차나 측정오차에 의한 불확도는 발생할 수밖에 없으며, 특히 고체유전체 시료의 가공상태에 따른 표면 거칠기, 양 전극표면의 평행도에 따른 시료와 전극사이에 발생하는 공극이 오차를 발생시키는데 공극의 두께를 정확히 분석할 수가 없으므로 불확도를 산출할 수가 없다. 이러한 원인으로 유전율 측정분야의 전문가관이나 전문가들은 시료에 액체 금으로 코팅하여 전극을 만들어 공극 발생소지를 완전히 배제시키고 측정을 하지만

기계적으로 균일한 치수로 정확한 코팅을 하기 위한 또 다른 설비가 필요하게 된다. 또한 이 방법은 플라스틱, 목재 종류 등 재료에 따라서 코팅이 불가능한 재료도 있고, 코팅 과정에서 사용되는 유. 무 기용매가 시료 내부로 침투되어 재료의 성질이 변질되는 수도 있어, 측정이 가능한 시료는 한계가 있다. 이미 상품화 되어있는 가드링 전극이 있는 구조의 3-전극 측정 cell을 사용하는 경우 제작사에서 제공하는 측정불확도[3] (일반적으로 1 % 정도)를 믿고서 측정결과를 사용하는 것이 대부분이다. 그러나 제작사에서 제공하는 불확도는 전극의 기계가공 혹은 기계적 측정오차에 기인한 영향만을 분석한 것이므로 공극이 포함된 상태에서 측정된 결과와는 큰 오차가 발생하며, 공극이 포함되면 시료의 고유 유전율보다 측정된 값이 작게 된다. 본 연구에서는 이상에서 언급한 문제점을 해결하기 위하여 3종의 유전율 SRM(Standard Reference Material)을 사용하여 상품화된 3전극 유전율 측정 cell을 교정하였으며 이 교정결과로부터 cell의 불확도를 계산하였으며, 이 불확도를 보정계수로 사용함으로써 실제 불확도를 획기적으로 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.

1. 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹
(대전시 유성구 도룡동 1)
2. 충남대학교 전기공학과
a. Corresponding Author : hanjun@kriss.re.kr
접수일자 : 2007. 10. 4
1차 심사 : 2007. 10. 31
심사완료 : 2007. 11. 15

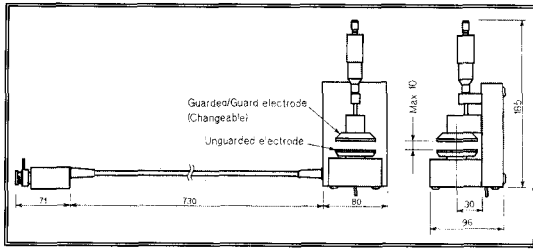


그림 1. 상품화된 유전율 측정용 cell의 구조.
Fig. 1. Structure of commercialized dielectric test cell assemble.

2. 측정시스템

측정에 사용된 상품화된 유전율 측정용 cell은 그림 1과 같은 구조의 것으로서 측정기기와의 연결을 위한 컨넥터부, 전극부로 이루어져 있다. 또한 전극부는 상하전극의 중심도와 전극의 평행도를 조절하는 장치를 부가적으로 갖추고 있어서 전극의 기계적 비 평형 구조로 인한 오차가 최소화 되도록 설계가 되었다. 전극의 표면은 거울면 정도의 경면은 아니지만 아주 우수한 기계적인 연마가 되어있다.

사용된 3종의 유전율 표준시료는 각각 KLR-1.1, NIST SRM774, Al_2O_3 이며, 지름 60 mm, 두께 1 mm로 가공하였으며, 표 1에 보인 것처럼 그 가공 상태는 우수한 평행도를 갖는 것으로 측정되었다. 유전율 표준시료 KLR-1.1은 열팽창계수가 상온에서 거의 0에 가까워 미국 및 러시아에서 광학기구 및 군사용 목적으로 사용되어 그 특성이 많이 알려진 Quartz 종류이고, NIST SRM774[4]는 미국의 표준연구소인 NIST(National Institute of Science and Technology)에서 보급하는 유전율 표준물질이고 세계 16개국의 표준기관에서 국제비교 결과 공인된 유전율 값을 가지고 있다, 마지막으로 유전율 표준시료는 97 %농도의 알루미늄(Al_2O_3)을 사용하였다. 각각의 기계 가공된 시료표면에 액체 금을 사용하여 3전극을 도포한 다음 열처리를 하여 시료표면에 금 전극을 형성하였다. 유전율의 측정은 주파수 1 kHz에서 하였으며, 측정된 표준시료의 유전율 값을 표 2에 보였다. 한편 NIST SRM774의 유전율은 인증된 유전율과 측정된 유전율이 정확히 일치하였으며, 표준편차의 값은 오히려 본 연구에서 측정된 편차가 더 작게 나타나 안정된 측정이 되었음을 보여주었다.

표 1. 사용된 표준시료의 유전율.

Table 1. Dielectric constant of SRMs.

표준물질	측정된 유전율
KLR-1.1	4.008 ± 0.012
NIST SRM774	7.462 ± 0.015 (7.46 ± 0.05)
Al_2O_3	9.69 ± 0.02

()안은 국제비교에 의하여 공인된 값

표 2. 사용된 표준시료의 두께 및 평행도.

Table 2. Thickness and parallelism of SRMs.

측정회수	표준시료 종류		
	NIST SRM 774	KLR-1.1	Al_2O_3 97 %
1	1.038	1.114	0.999
2	1.039	1.116	1.000
3	1.039	1.116	0.997
4	1.039	1.116	1.000
5	1.039	1.115	1.000
6(중앙부)	1.036	1.122	1.002
평균	1.0383	1.1165	0.9997
표준편차 (k=1)	0.0012	0.0028	0.0016

측정에 사용된 기기는 미국 Andeen-Hagerling사에서 제작한 Ultra-precision capacitance meter로서 모델 AH2500A를 사용하였다. 이 브리지의 기본구조는 잘 설계된 변성기를 비례팔로 사용하고 fused-silica를 유전체로 사용한 커패시터 표준기가 일정하게 온도조절이 되는 항온조 내에 설치된 구조로 되어있는 1 kHz 전용 전기용량 측정용 브리지이다. 측정불확도는 $3 \mu F/F[5]$ 로서 본 실험에서는 기기의 측정불확도는 전체 불확도에 비해서 완전히 무시할 수 있을 정도로 작다.

3. 측정결과

표준시료 3종을 상품화된 유전율 측정용 전극에 삽입시켜서 측정된 결과는 아래 표 3에 보였다.

표 3. 표준시료 3종을 상품화된 전극으로서 측정 한 결과.

Table 3. Measurement results of 3 kind SRMs using the commercialized test cell for Permittivity.

SRM		상품화된 전극		
종류	유전율 ①	측정값 ③	$(\text{①}-\text{③})/\text{①}$ $\times 100, \%$	표준편차
KLR-1.1	4.01	3.69	7.98	0.022
SRM774	7.46	6.23	16.5	0.031
Al ₂ O ₃	9.69	7.54	22.2	0.057

표 3의 결과는 시료나 측정시스템의 전극의 면(surface)상태가 경면 상태로 가공되고 상하전극의 중심과 평행도를 최적의 상태로 조절하였음에도 불구하고 가드링 전극을 갖는 3-전극에 시료를 삽입하여 측정하는 방법은 유전율이 4.01인 측정시료 KLR-1.1에서 실제 값보다 8 % 작게, 유전율이 7.46인 SRM774에서는 실제 값보다 16.5 % 작게, 유전율이 9.69인 측정시료 Al₂O₃에서 실제 값보다 22.2 % 작게 측정되었다. 이 결과는 상품화된 test cell의 spec.에서 제공된 측정불확도 1 %와는 예상 밖 에 대단히 큰 차이를 보였다.

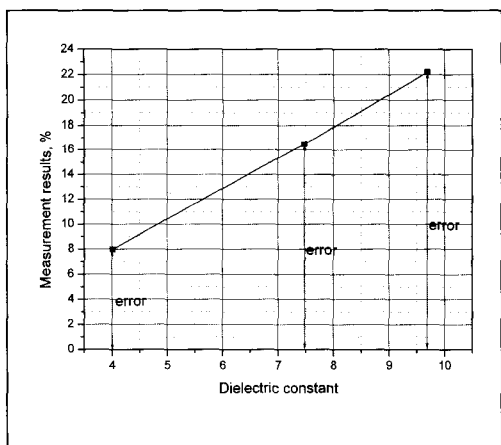


그림 2. 표준시료의 유전율과 상품화된 전극을 사용하여 측정된 유전율과의 오차(%)를 표시한 그래프.

Fig. 2. Graph of the difference values between the values of SRMs and the measured values by test cell.

이 결과는 측정전극과 시료사이에 발생하는 공극의 영향으로, 전극면이나 시료의 표면이 최적의 조건으로 가공되어도 공극을 완전히 제거할 수가 없다는 것을 보여주는 결과이며 미소한 공극의 발생이 유전율의 값이 클수록 큰 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다.

그림 2는 표준시료의 인증된 유전율과 실제 상품화된 전극을 사용하여 표준시료의 유전율 측정 한 값과의 차이를 그래프로 보인 것이다. 유전율이 클수록 오차가 커지지만 우수한 선형성을 보이고 있다. 결과로서 오차만큼을 측정값에 보상하면 그만큼 측정불확도를 줄일 수가 있다.

4. 측정결과 검증

상기의 측정결과는 단 한개의 상품화된 유전율 측정용 전극에 대한 결과이므로 그 결과가 보편성이 있는 결과인지를 확인하기위하여 전극을 제작하였다[6].

제작된 전극은 그림 3에 보였다. 상·하단전극의 중심과 전극의 평행도를 조절할 수 있는 구조를 갖추고 있으며 상하 전극의 표면은 완전한 광학적 경면처리를 하였다.

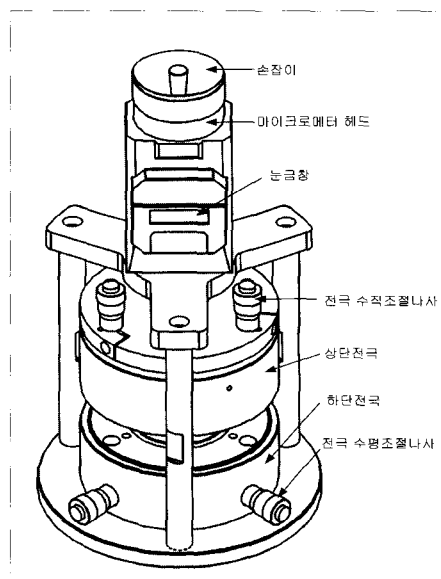


그림 3. 검증을 위하여 제작된 유전율 측정용 3-전극 시스템.

Fig. 3. Fabricated 3-electrodes system for verification of the results.

표 4. 표준시료 3종을 제작된 전극으로서 측정 한 결과.

Table 4. Measurement results of 3 kind SRMs using the fabricated test cell for verification.

SRM		연구 제작된 전극		
종류	유전율 ①	측정값 ③	$(\text{①}-\text{③})/\text{①}$ $\times 100, \%$	표준편차
KLR-1.1	4.01	3.69	7.98	0.022
SRM774	7.46	6.28	15.8	0.025
Al ₂ O ₃	9.69	7.64	21.2	0.056

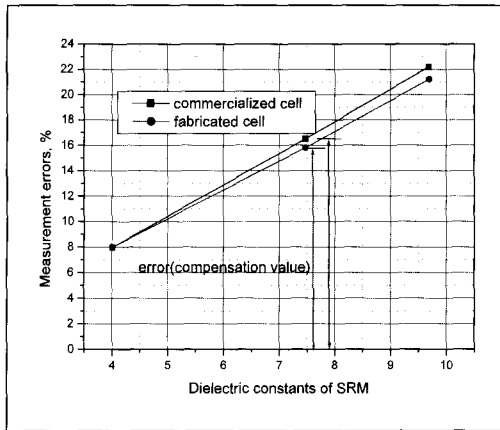


그림 4. 상품화된 전극과 연구제작된 전극을 사용한 측정결과의 오차비교.

Fig. 4. Comparison results measured by Fabricated 3-electrodes system for verification of the results and commercialized test cell.

측정은 상기한 상품화된 전극에서와 같은 방법으로 하였으며, 측정결과는 표 4에 보였고, 그림 4는 상품화된 전극을 사용한 측정결과와 제작된 전극을 사용한 측정결과의 오차를 한 그래프로 보인 것이다.

표 3과 표 4, 그림 4로부터 두 가지 전극을 사용한 측정결과는 대단히 유사함을 알 수가 있다. 단지 연구 제작된 측정용 전극을 사용한 결과가 약간 작은

오차를 보이는 것은 전극표면을 광학적 경면처리를 한 원인으로 보인다. 그러나 광학적 경면처리를 한 것과 기계적 연마만을 한 결과가 본 연구의 주제를 흐릴 정도의 차이는 되지 않음을 알 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고체재료의 유전율 측정에 사용되는 상품화된 가드링을 갖는 3-전극을 사용하여 유전율을 측정시 시료와 전극 사이에 발생하는 작은 공극의 영향으로 발생하는 오차를 분석하였다. 분석 결과 시료나 측정전극이 최적의 조건으로 기계적 가공과 조절이 되었음에도 불구하고 그 측정불확도는 제작회사에서 제공하는 1%보다는 대단히 크게 측정이 되었다. 즉 유전율이 4.01인 측정시료 KLR-1.1에서 8%, 유전율이 7.46의 경우 16.5%, 유전율이 9.69의 측정시료의 경우에는 22.2% 실제 값보다 작게 측정되었다. 이 결과는 전극 면이나 시료의 표면이 최적의 조건으로 가공되어도 공극을 완전히 제거할 수는 없지만 본 연구의 결과를 측정값에 보상의 방법으로 적용하면 측정값과 실제 값의 차이를 약 십분의 일 정도로 줄일 수 있다.

참고 문헌

- [1] "International Electrotechnical Commission", Publication 250, p. 7, 1969.
- [2] "ASTM Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials", D-150, 1998.
- [3] Agilent Technologies, Agilent 16451B Dielectric Test Fixture Operation and Service Manual, October, 2000.
- [4] NBS Certificate of SRM 774, 1982.
- [5] Andeen-Hagering, Inc, Operation and Maintenance Manual of AH2500 A 1 kHz Ultra-Precision Capacitance Bridge, 1995.
- [6] 김한준, "Cross capacitor 전극을 이용한 유전율 정밀측정에 관한 연구", 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 2007.