

## 고전압 전기용량 브리지 평가 기술 개발 및 검증

김윤형\*, 한상길, 정재갑, 한상옥\*\*  
 충남대학교\*, 한국표준과학연구원\*\*

### Development and Verification of Evaluation Technique for High Voltage Capacitance Bridge

Yoon-Hyoung Kim\*, Sang-Gil Han\*\*, Jae-Kap Jung\*\*, Sang-Ok Han\*  
 Chungnam National University\*, Korea Research Institute of Standards and Science\*\*

**Abstract** - 본 연구에서는 표준 용량기와 표준 저항을 이용하여 전기용량 브리지의 손실계수와 커패시턴스 비를 측정하여 전기용량 브리지를 평가하는 방법을 개발하였다. 이를 적용하면 기존의 해외 인증기관에서 성능평가를 의뢰했을 때 소요되는 교정기간을 단축하고, 교정 비용을 감소시킬 수 있다. 또한 현장에서 사용되고 있는 장비를 해외 인증기관에 교정 의뢰할 경우 그 기간 동안 장비를 사용할 수 없는 문제를 해결할 수 있다. 측정 범위는 손실계수의 경우  $1 \times 10^{-6} \sim 7.5 \times 10^{-3}$ 의 범위까지 광범위하게 측정하였고, 커패시턴스 비는  $C_N \times 0.1 \sim C_N \times 10^3$ 까지 측정하였다. 이로부터 제조사에서 제공하고 있는 전기용량 브리지의 성능을 확인이 가능하게 되었다.

#### 1. 서 론

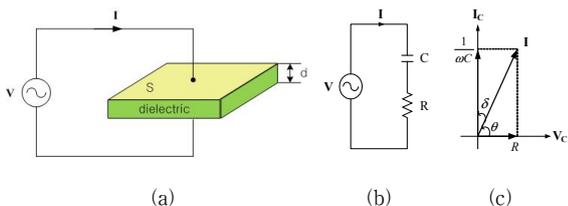
고전압 전기용량 브리지는 전기 용량기, 케이블 등의 전기용량 및 손실계수 측정을 위해 사용하는 장비이다. 현재 산업체에서 사용하는 전기용량 브리지는 그 성능을 제조사에서 제시하고 있는 성능을 신뢰하고 사용하는 상황이며, 성능을 교정평가하기 위해서는 해외 인증기관에 성능평가를 의뢰하여야 한다. 하지만 이는 많은 교정기간이 소요되고, 비용이 필요하기 때문에 교정의뢰를 하여 교정평가를 받기는 쉽지 않다. 또한 현장에서 사용되고 있는 장비를 해외 인증기관에 교정 의뢰할 경우 그 기간 동안 장비를 사용할 수 없는 문제가 발생하게 된다. 이에 본 논문에서는 고전압 전기용량 브리지를 평가하는 방법을 개발하여 산업체에서 사용하고 있는 전기용량 브리지의 손실계수와 비 성능평가를 수행하였고, 이를 제조사에서 제시하는 사양과 비교하였다.

#### 2. 전기용량 브리지 평가 이론

##### 2.1 유전손실 P와 tanδ

유전체에 교류전압이 인가될 때 발생하는 손실은 크게 두 가지가 있다. 하나는 누설컨덕턴스에 전류가 흘러서 발생하는 전도손실(Conduction loss)이고, 다른 하나는 교류 전기장에서 원자 또는 분자의 운동이나 회전에 의해 발생하는 유전손실(Dielectric loss)이다. 절연상태가 좋은 유전체의 경우 유전체에 고주파가 인가될 때 발생하는 유전손실(Dielectric loss)이라고 볼 수 있다. 그림 1 (a)와 같이 유전체 양면에 도체판을 대면 이것은 하나의 콘덴서가 된다. 이 때 두 도체에 고주파 교류를 인가할 때 흐르는 전류는 순수한 콘덴서에 흐르는 전류이기 때문에 이상적으로 전류의 위상은 전압보다 90° 앞서야 한다. 그러나 이 때 전류의 위상은 그림 1 (b)에 나타난 등가회로와 같이 R성분에 의해 그림 1 (c)와 같이 90° 앞서지 못하고 ∠δ 만큼 기울어진다. 이는 ∠δ에 해당하는 유효전력이 콘덴서에서 소비되고 있음을 의미한다. 이 때 콘덴서에서 소비되는 유효전력 P는 식 (1)과 같다.

$$P = VI \cos \theta \quad [W] \quad (1)$$



<그림 1> 유전손실 P와 tanδ

식 (1)에서  $\cos \theta$ 는  $\sin \delta$ 이고,  $\sin \delta \approx \tan \delta$ 가 될 정도로 δ가 0에 가까우면 식 (1)은 다시 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$P = VI \tan \delta \quad [W] \quad (2)$$

식 (2)로부터 단면적 S, 두께 d, 유전율 ε인 유전체에 주파수 f인 교류 전압을 인가했을 때의 유전손실을 유도하면 식 (3)과 같다.

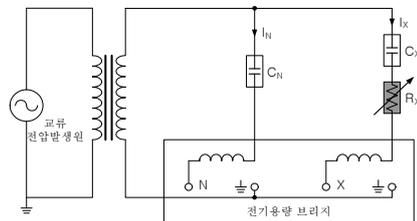
$$P = 2\pi f \frac{\epsilon S}{d} E^2 d^2 \tan \delta = 2\pi f \epsilon E^2 d \tan \delta \quad [W] \quad (3)$$

식 (3)으로부터 유전체의 단위체적당 유전손실 P를 구하면 식 (4)와 같다.

$$P = \frac{5}{9} f \epsilon E^2 \tan \delta \times 10^{-10} \quad [W/m^3] \quad (4)$$

##### 2.2 손실계수(tanδ) 평가 방법

유전체손은 식 (4)에서 보인바와 같이 손실계수(tanδ)에 비례한다. 따라서 손실계수를 측정하여 유전체손을 유도할 수 있다. 그림 2는 전기용량 브리지의 손실계수(tanδ)를 평가하는 시스템이다. 전기용량 브리지의 N 단자와 X 단자에 커패시턴스와 손실계수를 정확하게 평가하여 알고 있는 표준 용량기  $C_N$ ,  $C_X$ 를 각각 연결하고 교류 전압발생원으로 전압을 인가한다.



<그림 2> 전기용량 브리지 손실계수 평가 시스템

그림 2의 저항  $R_X$ 는 전기용량 브리지의 N 단자와 X 단자간의 손실계수를 임의로 조절하기 위한 정밀저항으로 저항의 리액턴스 성분이 0에 가까운 표준정밀저항이다. 저항  $R_X$ 가 없을 때 전기용량 브리지에서 측정되는 손실계수( $\tan \delta_0$ )는 식 (5)와 같다.

$$\tan \delta_0 = \omega C_X R_{0,X} - \omega C_N R_{0,N} \quad (5)$$

여기서,  $R_{0,X}$ 와  $R_{0,N}$ 은 전압발생원-표준용량기-전기용량브리지에 연결되는 케이블의 선 저항을 의미한다.

다음으로 표준 용량기  $C_X$ 에 값을 정확하게 알고 있는 표준정밀저항  $R_X$ 를 직렬로 연결하면  $R_X$ 에 의해 전기용량 브리지의 N 단자와 X 단자의 위상차가 발생하게 된다.  $R_X$ 를 연결 했을 때의 손실계수( $\tan \delta_R$ )은 식 (6)과 같다.

$$\tan \delta_R = \omega C_X (R_{0,X} + R_X) - \omega C_N R_{0,N} = \omega C_X R_X - \tan \delta_0 \quad (6)$$

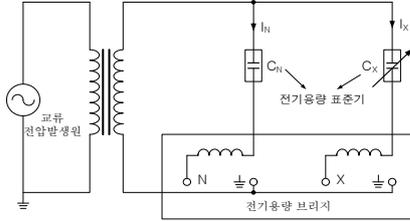
이제 식 (5)의  $R_X$ 가 없을 때의 손실계수  $\tan \delta_0$ 와 식 (6)의  $R_X$ 를 직렬로 연결했을 때의 손실계수  $\tan \delta_R$ 을 이용하여 전기용량 브리지의 이론적인 손실계수를 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$\tan\delta_R - \tan\delta_0 = \omega C_X R_X \quad (7)$$

따라서 식 (7)의 손실계수의 이론값과 전기용량 브리지에서 측정되는 손실계수를 비교하여 전기용량 브리지의 손실계수 성능을 평가할 수 있다.

### 2.3 비(Ratio) 성능 평가 방법

그림 3은 전기용량 브리지의 비(Ratio) 평가 시스템이다. 전기용량 브리지의 N 단자와 X 단자에 커패시턴스와 손실계수를 정확하게 평가하여 알고 있는 표준 용량기  $C_N$ ,  $C_X$ 를 각각 연결하고 교류 전압발생원으로 전압을 인가한다.



〈그림 3〉 전기용량 브리지 비 평가 시스템

이 때 전기용량 브리지에서 측정되는 비(Ratio)는 식 (8)과 같다.

$$Ratio = \frac{C_X}{C_N} \quad (8)$$

따라서 그림 3에서  $C_N$ 을 고정시키고  $C_X$ 를 변화시키면서 식 (8)의 비 이론값과 전기용량 브리지에서 측정되는 비를 비교하여 전기용량 브리지의 비 성능을 평가할 수 있다.

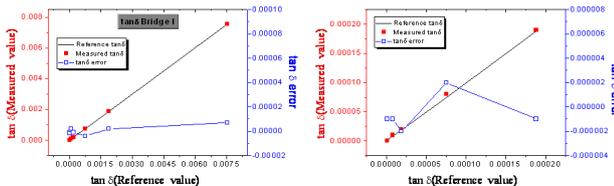
## 3. 전기용량 브리지 성능 평가 결과

### 3.1 전기용량 브리지 손실계수 성능 평가 결과

표 1은 전기용량 브리지의 손실계수 평가 결과로 첫 번째 열과 두 번째 열은 각각 표준 용량기  $C_N$ 과  $C_X$ 의 커패시턴스 값이다. 세 번째 열은 임의의 손실계수 인가를 위한 표준정밀저항  $R_X$ 의 값이다. 네 번째 열은 식 (7)을 이용하여 얻은 손실계수  $\tan\delta$ 의 기준값이고, 다섯 번째 열은 전기용량 브리지에서 측정되는 손실계수이다. 표 1의 마지막 열은 손실계수의 기준값과 측정값의 차이로 전기용량 브리지의 손실계수 최종평가 결과이다.

〈표 1〉 전기용량 브리지 손실계수 성능 평가 결과

$C_N$ [nF]	$C_X$ [nF]	$R_X$ [ $\Omega$ ]	$\tan\delta$ 기준값	측정값	절대오차
1.000012	9.9986	0.2	0.000001	0.00000	-0.000001
		2	0.000008	0.00001	-0.000001
		5	0.000019	0.00002	-0.000002
		20	0.000075	0.00008	0.000002
		50	0.000188	0.00019	-0.000001
		200	0.000754	0.00075	-0.000004
		500	0.001885	0.00189	0.000002
		2000	0.007540	0.00755	0.000007



〈그림 4〉  $\tan\delta$  기준값에 따른 측정값 및 절대오차

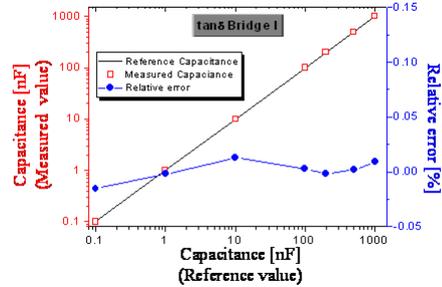
그림 4는  $\tan\delta$  기준값에 따른 측정값 및 절대오차를 그래프로 나타낸 것으로 (a)는 전체 범위에 대한 그래프이고, (b)는  $0 \sim 0.0002$  인 낮은 범위에 대해서 확대하여 나타낸 그래프이다.

### 3.2 전기용량 브리지 비 성능 평가 결과

표 2는 전기용량 브리지의 비 평가 결과로 첫 번째 열은 실험에 사용된 표준 용량기의 명목값이고, 두 번째 열은 표준 용량기를 정확하게 측정하여 얻은 커패시턴스 값이다. 세 번째 전기용량브리지에서 측정된 커패시턴스 값이다. 표 2의 네 번째 열은 커패시턴스의 기준값과 측정값의 차이를 절대값으로 나타낸 것이고, 마지막 열에 전기용량 브리지의 커패시턴스 측정값의 상대오차를 최종적으로 나타내었다. 또한 그림 5에 커패시턴스 기준값에 따른 측정값 및 상대오차를 그래프로 나타내었다.

〈표2〉 전기용량 브리지 비 성능 평가 결과

$C_X$ 명목값	기준값 [nF]	측정값 [nF]	절대오차 [nF]	상대오차 [%]
0.1 nF	0.1000001	0.099985	-0.000015	-0.015
1 nF	1.000006	0.999898	-0.000108	-0.011
10 nF	9.9986	9.99896	0.00036	0.004
100 nF	99.994	99.99712	0.003123	0.003
200 nF	199.950	199.9459	-0.004133	-0.002
500 nF	499.951	499.9626	0.011567	0.002
1000 nF	1000.05	1000.135	0.085333	0.009



〈그림 5〉 Capacitance 기준값에 따른 측정값 및 상대오차

### 3.3 전기용량 브리지 평가 결과의 제조사 제시 사양과의 비교

표 3은 본 논문에서 적용한 전기용량 브리지의 평가 결과를 제조사에서 제시한 사양과 비교한 결과이다.

〈표3〉 전기용량 브리지 평가 결과의 제조사 제시 사양과의 비교

손실계수 ( $\tan\delta$ )			커패시턴스 비(Ratio)		
범위	제조사사양	평가결과	범위	제조사사양	평가결과
$1 \times 10^{-6}$ $\sim 7.5 \times 10^{-3}$	$\pm 1$ % rdg $\pm 20$ ppm	$\pm 0.09$ %rdg $\pm 7$ ppm	$C_N \times 0.1$ $\sim C_N \times 10^3$	$\pm 0.01$ %	$\pm 0.015$ %

## 4. 결 론

본 연구에서는 표준 용량기와 표준 저항을 이용하여 손실계수와 커패시턴스 비를 측정하는 전기용량 브리지를 평가하는 방법을 개발하여 적용 하였다. 측정 범위는 손실계수의 경우  $1 \times 10^{-6} \sim 7.5 \times 10^{-3}$ 의 범위까지 광범위하게 측정하였고, 커패시턴스 비는  $C_N \times 0.1 \sim C_N \times 10^3$  까지 측정하였다. 이로부터 제조사에서 제공하고 있는 전기용량 브리지의 성능을 확인이 가능하였고, 산업체에서 사용하고 있는 전기용량 브리지의 성능을 교정시험 해주는 데에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국표준협회, “고체 전기 절연재료의 교류손실 특성과 유전율 시험 방법”, KSC 2135, 2006.
- [2] DAVID K.CHENG, “전자기학”, 피어슨에듀케이션코리아, 2001.
- [3] PrescoAG, “Modular Capacitance and Dissipation Factor Measuring Bridge Type TG-1MOD”, (www.prescoag.com).