

전기용량 국가표준의 소급범위 확장을 위한 직.병렬 연결구조의 전기용량 표준기 개발

김한준\*, 이래덕\*, 강전홍\*, 한상옥\*\*, Yu.P.Semenov\*\*\*  
 \*한국표준과학연구원 전자기표준부 전기.자기그룹, \*\*충남대학교 전기공학과

Development of Standard Capacitors for Extending National Standard Traceability

\*KIM Han Jun, \*LEE Rae Duk, \*KANG Jeon Hong, \*\*HAN Sang Ok, \*\*\*Yu.P.Semenov  
 \*Korea Research Institute of Standards and Science, \*\*Chung Nam National University, \*\*\*VNIM

**Abstract** - 전기용량 분야의 국가표준의 소급범위를 확대하기 위하여 직.병렬 연결구조의 전기용량 표준기 10 μF/1000 μF, 100 μF/10000 μF를 개발하였다. 개발된 전기용량 표준기를 직렬로 연결시의 값과 병렬로 연결시의 값의 보상 항은 계산상으로 1.92×10<sup>-7</sup>으로 추산되었다.

1. 서 론

전기용량의 국가표준을 유지하는 방법은 cross capacitor<sup>1)</sup>라고 하는 전기용량을 절대측정 할 수 있는 시스템을 정점으로 하여 전기용량의 안정도가 아주 좋고, 손실계수가 아주 작은 전기용량 표준기들을 개발 혹은 제작<sup>2)</sup>하여 사용하고 있다. 일반적으로 표준의 유지 및 공급에 사용되는 전기용량기는 1 pF~1000 pF까지의 전기용량범위에서는 특별히 제작된 고 성능의 것들이 사용이 되고, 그 이상 10 μF까지의 범위에서는 상품화 되어있는 것들 중 고 성능의 것을 선택하여 사용한다. 그러나 10 μF이상의 고 전기용량범위에서는 상품화 되어있는 전기용량기들이 표준의 유지와 소급용으로 사용하기에는 환경에 따른 변화와 안정도의 특성이 충분하지와 2개의 IVD로 구성되는 4-터미널 구조에 따라서 사용하기를 사용하여 왔다. 그러나 이 경우에는 IVD가 주파수에 따라서 변화량이 많기 때문에 모든 사용주파수에서 IVD의 특성을 모두 분석해야할 뿐 만 아니라, 2-터미널, 3-터미널 등 측정기기들의 터미널 구조에 따라서 사용하기에 적합하지 않은 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 해결하고자 직.병렬 연결구조의 전기용량 표준기 10 μF/1000 μF, 100 μF/10000 μF를 개발하였다.

2. 이 론

Hamon 저항<sup>3),4)</sup>이라고 부르는 저항 전달용 표준기들은 직류저항과 저항비의 정밀측정에 넓게 사용되고 있다. 이 Hamon 저항의 기본적인 장점은 전달결과가 전달표준기의 절대정확도와 장기안정도 뿐만 아니라 그것의 단기안정도에도 영향을 받지 않는다는 것이다. 이러한 방법을 전기용량에도 사용할 수 있는 유효성을 연구하기 위해서 N개의 전기용량기를 직렬과 병렬로 연결했을때의 전기용량과 tan δ를 계산할 필요가 있다. N개의 전기용량기가 병렬로 연결시의 어드미턴스는

$$Y_p = j\omega C_p(1 - j \tan \delta_p) \quad (1)$$

이고 n번째 전기용량기의 전기용량과 tan δ는 각각 아래의 식으로 된다.

$$C_n = C_0(1 + d_n) \quad (2)$$

$$\tan \delta_n = \tan \delta_0(1 + \alpha_n) \quad (3)$$

여기서  $C_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n$ : N개의 전기용량기의 평균값:

$$\tan \delta_0 = \frac{\sum_{n=1}^N (C_n \tan \delta_n)}{\sum_{n=1}^N (C_n)} : N개의 전기용량기의 평균$$

tan δ 값:  $d_n$ 과  $\alpha_n$ : n번째 전기용량기의 용량값 및 tan δ 값이 각각 평균값으로부터의 편차

그러면  $C_p = NC_0$ ,  $\tan \delta_p = \tan \delta_0$ . 만약  $|d_n| \leq 0.1$ ;  $|\alpha_n| \leq 0.2$ ;  $\tan \delta \leq 5 \times 10^{-3}$  그리고  $N=10$ 이면 직렬로 연결시의 어드미턴스는

$$Y_s = j\omega C_s(1 - j \tan \delta_s) \quad (4)$$

$$\text{여기서 } C_s = C_0(1 + \beta)/N \quad (5)$$

$$\tan \delta_s = \tan \delta_0(1 + \gamma) \quad (6)$$

$$\beta = -\frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N d_n^2 \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n^2} + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n^3 \left( 1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n^3 \right) - \frac{2}{N^2} \left( \sum_{n=1}^N d_n^2 \right) \cdot \left( \sum_{n=1}^N d_n^3 \right) + \frac{\tan \delta_0}{N} F \quad (7)$$

$$F = \sum_{n=1}^N d_n^2 - 6 \sum_{n=1}^N d_n^3 - \frac{2}{N} \left( \sum_{n=1}^N d_n^2 \right) \left( \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \right) + 2 \tan \delta_0 \sum_{n=1}^N d_n \alpha_n \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n^2 + \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N d_n^3 - \frac{6}{N^2} \left( \sum_{n=1}^N d_n^2 \right)^2 - \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N d_n \alpha_n + \frac{3}{N} \sum_{n=1}^N d_n^2 \alpha_n - \frac{4}{N^2} \left( \sum_{n=1}^N d_n^2 \right) \cdot \sum_{n=1}^N (d_n \alpha_n) - \frac{2}{N} \tan \delta_0 \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \quad (9)$$

다음 전기용량기들의 직렬연결과 병렬연결시의 전기용량과 tan δ 사이의 관계는

$$C_p = N^2 C_s(1 - \beta) \quad (10)$$

$$\tan \delta_p = \tan \delta_s(1 - \gamma) \quad (11)$$

상기 식(10)(11)은 10개의 전기용량기에 대해서 평균값으로부터의 편차와 직렬연결시 측정 전기용량값(C/10)을 이용하여 병렬연결시의 전기용량값(10C)을 예측할 수가 있다는 것을 보여준다. 보상항 β와 γ는  $d_n$ 과  $\alpha_n$ 의 편차값과 비교하여 2,3차수 작은 아주 작은 값들의 합으로 되어있다. 예로서 만약  $n=1, 2, 3, 4, 5$ 일 때  $d_n=0.1, \alpha_n=0.2$ 이고  $n=6, 7, 8, 9, 10$ 일 때  $d_n=-0.1, \alpha_n=-0.2$ 라면 식(7)(8)로부터  $\beta=0.0100, \gamma=-0.0313$ 이 된다. 그러나 전기용량값을 0.1%보다 더 정확하게 조절하는 것이 가능하므로

$|d_n| = 0.1$  로 가정한 것은 실제와 거리가 많다. 따라서 보상값  $\beta$ 는 50배에서 100배정도 더 줄일 수가 있다. 한편 교류에서의 측정은 아래와 같은 몇 가지 사항이 고려되어야 한다. 1) 터미널 사이와 터미널과 그라운드 된 단자사이의 전기용량이  $C_0$ 에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작아야 한다. 2) 회로의 부품사이의 인덕턴스가 작아야 한다. 3) 전기용량의 온도, 전압, 주파수변화에 따른 변화를 고려해야 한다. 첫 번째의 문제는 직, 병렬 연결구조의 전기용량 표준기로 제작하고자하는 최소의 전기용량을 약  $1 \mu F$ 라면 이 경우 접지와 단자간의 전기용량은  $50-100 pF$ 정도가 된다. 두 번째의 것은 전기용량의 변화값, 즉  $\Delta C/C = \omega^2 C_0 M$ 이므로, 여기서  $M$ 은 인덕턴스, 큰 명목값과 높은 주파수에서 사용하고자는 것은 단자의 구성과 회로에서의 전류와 전압선의 디자인을 위한 연구가 필요하다. 세 번째의 것은 전기용량의 단기간정도만이 사용되어짐을 보여준다.

### 3. 제작방법

$10 \mu F/1000 \mu F$  직, 병렬구조의 전기용량표준기를 개발하기 위해서  $100 \mu F$ 의 명목치를 갖는 polycarbonate capacitor를 사용하였다. polycarbonate capacitor는 약  $3 \mu F/cm^3$ 의 specific capacitance를 가지며  $50 Hz$ 에서  $1 kHz$ 에서의 유전상수와  $\tan \delta$ 는 각각  $2.8$ 과  $10^{-3}$  order이다. 상온( $25^\circ C$ )에서의 온도계수를  $0$ 가 되도록 하고 그 상한범위에서 부(-)의 온도 특성을 갖는다. 대부분 상온근처에서 사용 시 온도계수가 약  $20 ppm/K$ 을 넘기지 않는다. 사용된  $10$ 개의 capacitor는 모두 동일회사의 동일종류의 것으로 명목치에  $0.1\%$ 이내의 값을 갖도록 선정하였다. 한편  $100 \mu F/10000 \mu F$  직, 병렬 구조의 전기용량표준기의 제작에는 탄탈륨 capacitor가 사용이 되었다. 탄탈륨 capacitor는 다른 전해 type capacitor보다 역 전압과 ripple current에 견디는 특성이 비교적 좋다.  $1000 \mu F$ 의 capacitor는 생산이 되지 않기 때문에  $2$ 개의  $470 \mu F$ 와 한 개의  $60 \mu F$ 를 병렬로 연결하여 사용하였다.

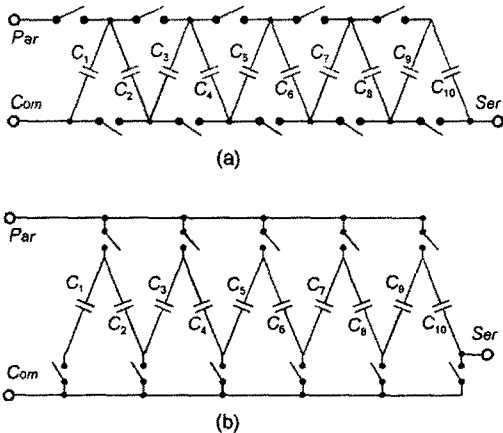


그림1. 100:1로 전기용량을 전달할 수 있는 직, 병렬 연결회로.  
Fig.1. Possible circuits for 100:1 capacitor transfer.

그림1의 capacitor 들을 직, 병렬로 연결할 수 있는 회로이다. 그러나 이 회로의 경우는 capacitor 개개의 용량을 측정하려면 연결된 만큼의 전기용량의 변화에 따라서 측정이 되기 때문에 매우 불편하다. 또한 직렬연결

시 switch들의 접촉저항의 증가가 capacitor element 들에게 부하로 작용하여 손실계수의 증가로 나타나게 된다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 그림1 (b)의 회로와 같이 제작하였다.

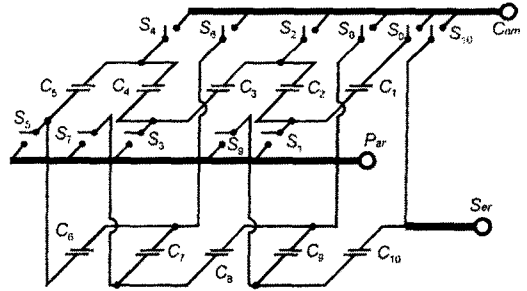


그림2. 2층구조와 대칭연결 구조로 연결한 전달전기용량의 회로.

Fig. 2. Structure of the Hamon transfer capacitor using switches and capacitor elements in two rows.

그림2는 제작된 직, 병렬구조의 전기용량 전달용 표준기의 회로를 도식적으로 보인 것이다.  $10$ 개의 capacitor component들을 직병렬 연결 시 연결선의 길이를 줄이고, 인덕턴스와 접촉저항을 줄이기 위해서  $2$ 층 구조로 배열을 하고 배선도 대칭구조가 되도록 하는 한편 연결선은 은도금한 두꺼운 구리 bar를 사용하였고 knob도 은도금을 하여 각각의 연결지점에 사용하였다. 이러한 구조로 하여 직렬 연결 시 입력단자와 출력단자를 가깝게 할 수 있었고, 또한 단순히 하나의 전기용량을  $100:1$ 로 전달하는 전달용 전기용량 표준기로서 뿐만 아니라 주파수  $1 kHz$ 까지의 범위에서 decade capacitor로서도 사용할 수가 있다.

### 4. 측정결과

$d_n = (C_n - C_0)/C_0$ 와  $\alpha_n = (\tan \delta_n - \tan \delta_0)/\tan \delta_0$ 로부터  $d_n$ 과  $\alpha_n$ 을 구한 뒤, 식 (7)(8)와 (9)로부터  $\beta$ 와  $\gamma$ 의 보상값을 계산할 수가 있다. 표1에서의  $d_n$ 과  $\alpha_n$ 으로부터 계산을 하면  $\beta = -1.65 \times 10^{-7}$ ,  $\gamma = -38 \times 10^{-6}$ 로 계산이 되어진다. 이 결과는  $10 \mu F/1000 \mu F$  전달 전기용량표준기의 경우 전기용량의 경우 약  $0.2 ppm$ , 손실계수의 경우 약  $40 ppm$ 의 불확도로서  $10 \mu F$ 에서의 측정능력을  $1000 \mu F$  측정에 전달할 수가 있는 것이다. 한편 탄탈 capacitor로 제작된  $100 \mu F/10000 \mu F$ 의 경우는 탄탈 capacitor의 특성으로 인하여  $10 \mu F/1000 \mu F$ 의 경우보다 특성이 나쁜  $\beta = 1.6 \times 10^{-6}$ ,  $\gamma = -0.001$ 로 계산되었다. 표1은 제작된  $10 \mu F/1000 \mu F$ 를  $120 Hz$ 에서 측정된 각각의 전기용량 및  $\tan \delta$  값이다. 온도계수의 경우는  $60 Hz$ 에서  $1 kHz$ 사이에서  $10 \mu F/1000 \mu F$ 의 경우 약  $50 ppm$ ,  $100 \mu F/10000 \mu F$ 의 경우 약  $70-180 ppm$ 으로 측정이 되었다.  $10 \mu F/1000 \mu F$ 의  $60 Hz$ 에서  $10 kHz$ 까지의 주파수 변화에 따른 전기용량의 변화는 그림3에 나타내었고,  $\tan \delta$ 의 변화는  $0-0.013$ 로 측정이 되었다. 직렬로 연결 시 전기용량과  $\tan \delta$  값은  $10.00169 \mu F$ ,  $0.000704$ 로 측정이 되었다. 개발된 직, 병렬연결 전기용량 표준기는 표2에 보인 것처럼 십전 전기용량기로서도 사용 할 수가 있다.  $\tan \delta_{pn}$ 은 전기용량의 증가에 따라 조금씩 증가를 하는데 이것은 panel에서의 각각의 스위치 접촉저항의 증가에 따라서 나타나는 것으로 보인다.

표1. 제작된 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$  전달 전기용량표준기를 120 Hz에서 측정한 각각의 전기용량 및  $\tan \delta$ .  
Table 1. The measured capacitance and  $\tan \delta$  of the capacitor elements of the 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$  transfer capacitor at 120 Hz.

No.	$C_n(\mu\text{F})$	$\tan \delta$	$d_n$	$a_n$
1	100.00	0.00073	+0.0000	+0.05
2	99.95	0.00050	-0.0005	-0.28
3	100.01	0.00062	+0.0001	-0.11
4	99.99	0.00061	-0.0001	-0.13
5	99.95	0.00084	-0.0005	+0.20
6	100.07	0.00091	+0.0007	+0.30
7	99.95	0.00049	-0.0005	-0.30
8	100.08	0.00051	+0.0008	-0.27
9	99.99	0.00088	-0.0001	+0.26
10	100.01	0.00089	+0.0001	+0.28
mean	100.00	0.00070		
Series	9.999998	0.000698		

표2. 제작된 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$  전달 전기용량표준기를 십진전기용량기로 사용 시 120 Hz에서 측정한 각각의 전기용량 및  $\tan \delta$ .  
Table 2. The measured capacitance and  $\tan \delta$  as a decade capacitor in the 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$  transfer capacitor at 120 Hz.

Dial No.	$C_{pn}(\mu\text{F})$	$\tan \delta_{pn}$
1	100.00	0.00073
2	199.95	0.00074
3	299.96	0.00078
4	399.94	0.00078
5	499.89	0.00093
6	599.94	0.00093
7	699.94	0.00109
8	800.01	0.00098
9	900.01	0.00106
10	1000.02	0.00102

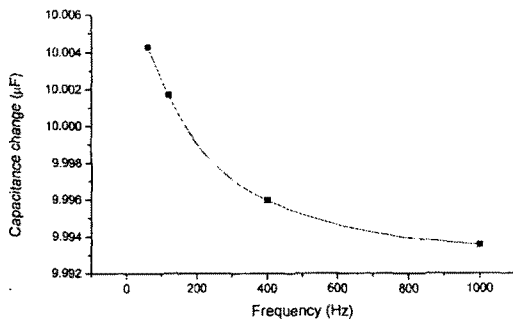


그림3. 제작된 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$  전달 전기용량표준기의 주파수 영향.  
Fig. 3. Capacitance change with frequency for 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$  transfer capacitor.

## 5. 결 론

직.병렬연결구조의 10  $\mu\text{F}$ /1000  $\mu\text{F}$ 와 100  $\mu\text{F}$ /10000  $\mu\text{F}$  전기용량 표준기가 각각 polycarbonate 전기용량기와 탄탈전기용량기를 사용하여 제작하였다. 이 표준기가 제작이 됨으로서 기존의 IVD 형의 고 전기용량 표준기가 안고있던 결점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 안정된 고 용량의 십진 전기용량기로도 사용할 수 있게 되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이래덕, 김한준 외, "전기용량 원기 Vertical Cross Capacitor 개발," KRISS-98-037-IR, 1998.
- [2] Rae Duk Lee, Han Jun Kim and Yu. P. semenov, "New stable 10 pF Gas-Dielectric capacitors," IEEE Tran. Instru. and Meas., Vol.50, No. 2, pp. 294-297, 2001.
- [3] B. V. Hamon, "A 1-100  $\Omega$  build-up resistor for the calibration of standard resistors," J. of Sci. Instru. 31, pp. 450-453 1954.
- [4] J. C. Riley, "The accuracy of series and parallel connections of four-terminal resistors," IEEE Tran. Instru. Meas., Vol. 1M-16, No. 3, pp. 258-268, 1967.