

전기용량 국가표준 소급범위 확장을 위한 직/병렬 연결구조의 전기용량 표준기 개발

論 文
55B-8-3

Development of Standard Capacitors with Serial/Parallel Connection Structure for Expanding National Standard Traceability of Capacitance Standard Field

金 漢 俊[†] · 姜 鎔 洪^{*} · 韓 相 玉^{**}
(Han Jun Kim · Jeon Hong Kang · Sang Ok Han)

Abstract - Standard capacitors, as like as Hamon resistor standards, of series connection/parallel connection ratio 10 μ F/1000 μ F and 100 μ F/10000 μ F were fabricated for calibration of impedance bridges or analyzers with measuring ranges up to 1 F. The calculated correction terms to the ratio of one measured value in series connection to the value in parallel connection were evaluated to be 1.92×10^{-7} . These capacitors were designed to be used not only as 100:1 capacitance standards but also as single capacitors or decade capacitors with decade values at frequencies up to 1 kHz.

Key Words : Standard Capacitor, Impedance, Hamon, Serial/Parallel Connection, Decade Capacitor.

1. 서 론

전해 및 탄탈 전기용량기(capacitor), 산화막을 이용한 전기용량기, 박막 및 박막을 이용한 다층 전기용량기 등의 다양한 전기용량기들이 1 F까지의 대용량으로 상업화되어 생산되고 있다. 이러한 전기용량기들은 품질관리나 표준화 등을 위해서 일반적으로 임피던스 측정용 브리지, LCR meter 혹은 impedance analyzer 등의 측정기를 사용하여 불확도 0.2 ~ 0.5 % 정도로 측정을 하게 된다^{[1][2]}. 현재 대부분의 4-터미널 혹은 4-터미널-페어(4-terminal-pair) 측정법을 갖춘 임피던스 브리지 혹은 임피던스 analyzer는 주파수 5 Hz ~ 1 kHz에서 100 F까지의 대용량의 전기용량 값을 측정할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 이러한 측정기들의 전기용량 값의 측정 불확도를 입증(verify) 혹은 교정(calibration)을 해주기 위해서는 적어도 10 pF에서 1 F정도의 국가 표준으로 부터 소급의 유효성이 검증된 대단히 안정한 성능의 전기용량 표준기들이 필요하다. 한편 우리나라의 전기용량 분야 국가표준은 크로스 커패시터(cross capacitor)^[3]라고 하는 전기용량을 길이단위로부터 절대측정 할 수 있는 시스템을 정점으로 하여 전기용량의 안정도가 아주 좋고, 손실계수가 아주 작은 공기 유전체 10 pF 전기용량 표준기들을 개발^[4]하여 유지용 전기용량 표준기로 사용하고 있다. 다음 전기용량 표준의 유지 및 공급에 사용되는 기준기급 전기용량 표준기는 1 pF ~ 1000 pF까지의 전기용량 범위에서는 특

별히 Invar 금속판을 사용하여 온도계수가 아주 작도록 제작되어 상품화된 고성능의 것들이 사용이 되고 있다. 0.01 μ F에서부터 10 μ F 범위에서는 운모, polystyrene등의 유전체를 사용하여 상품화 되어있는 것들 중 고 성능의 것을 선택하여 사용한다. 그러나 10 μ F이상의 고 전기용량범위에서는 상품화 되어있는 전기용량기들이 다양하지도 않을 뿐더러 표준의 유지와 소급용으로 사용하기에는 환경에 따른 변화와 안정도의 특성이 충분하지 않기 때문에 일반적으로 한 개의 안정된 전기용량기와 2개의 유도성전압분할기(Inductive Voltage Divider: 이하 IVD)로 구성되는 4-터미널 단자의 고 전기용량 표준기를 사용하여 왔다. 그러나 이 경우에는 IVD가 주파수에 따라서 변화량이 많기 때문에 모든 사용주파수에서 IVD의 특성을 모두 분석해야할 뿐만 아니라, 2-터미널 혹은 3-터미널 등의 측정단자만을 갖춘 측정기기들은 터미널 구조에 따라서 사용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 해결하고자 Hamon 저항^{[5][6]}의 구조와 같은 직/병렬 연결구조의 전기용량 표준기 10 μ F/1000 μ F(직렬연결시 전기용량값/병렬연결시 전기용량값), 100 μ F/10000 μ F를 개발하였다.

2. 이 론

Hamon 저항이라고 부르는 저항 전달용 표준기들은 직류 저항과 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 N 개의 전기용량기를 직렬과 병렬로 연결했을 때의 전기용량과 $\tan \delta$ 를 계산할 필요가 있다. N 개의 전기용량기가 병렬로 연결시의 어드미턴스는

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部 先任 研究員

E-mail : hanjun@kriss.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部 先任研究員

^{**} 正會員 : 忠南大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 5月 30日

最終完了 : 2006年 6月 19日

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

이고 n 번째 전기용량기의 전기용량과 $\tan \delta$ 는 각각 아래 의 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 $\tan \delta$ 값,

d_n 과 α_n : n 번째 전기용량기의 용량값 및 $\tan \delta$ 값이 각각 평균값으로부터의 편차이다.

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

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

로 된다.

여기서

$$C_s = C_0(1 + \beta)/N \quad (5)$$

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

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

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

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

이다.

다음 전기용량기들의 직렬연결과 병렬연결시의 전기용량과 $\tan \delta$ 사이의 관계는

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

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

로 된다.

위의 식(10)과 (11)은 10개의 전기용량기에 대해서 평균값 으로부터의 편차와 직렬연결시 측정 전기용량값($C/10$)을 이 용하여 병렬연결시의 전기용량값($10C$)을 예측할 수가 있다

는 것을 보여준다. 보상항 β 와 γ 는 d_n 과 α_n 의 편차 값과 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 전기용량 값을 0.1 %보다 더 정확하게 조절하는 것이 가능하므로 $|d_n|=0.1$ 로 가정한 것은 실제와 거리가 많다. 따라서 보상 값 β 는 50배에서 100배정도 더 줄일 수가 있다. 한편 교류에서의 측정은 아래와 같은 몇 가지 사항이 고려되어야 한다. 첫째, 터미널 사이와 터미널과 접지된 상자사이의 전기용량이 C_s 에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작아야 한다. 즉 직/병렬 연결구조의 전기용량 표준기로 제작하고자하는 최소의 전기용량을 약 1 μF 라면 이 경우 접지와 단자간의 전기용량은 50 ~ 100 pF정도가 되어야 한다. 둘째, 회로의 부품과 부품사이에서 나타나는 인덕턴스가 작아야 한다. 전기용량의 변화 값 $\Delta C/C = \omega^2 C_0 M$ 이므로(여기서 M 은 인덕턴스) 큰 명목 값과 높은 주파수에서 사용하고자하는 것은 인덕턴스 값을 줄이기 위하여 단자의 구성과 회로에서 전류와 전압선의 디자인을 위한 연구가 필요하다. 셋째, 전기용량기의 온도, 전압, 주파수변화에 따른 단기안정도 변화를 고려해야 한다.

3. 제작방법

10 $\mu F/1000 \mu F$ 직. 병렬구조의 전기용량표준기를 개발하기 위해서 100 μF 의 명목치를 갖는 폴리카보네이트(polycarbonate) 전기용량기를 사용하였다. 폴리카보네이트 전기용량기는 약 3 $\mu F/cm^3$ 의 단위부피에 대한 전기용량을 가지며 50 Hz에서 1 kHz에서의 유전상수와 $\tan \delta$ 는 각각 2.8과 10^{-3} 대(order) 이다. 상온(25 $^{\circ}C$)에서의 온도 계수가 0이고 그 상하범위에서 부(-)의 온도 특성을 갖는다. 대부분 상온근처에서 사용 시 온도계수가 약 20 ($\mu F/F$)/K을 넘기지 않는다. 사용된 10개의 전기용량기는 모두 동일회사의 동일종류의 것으로 명목 값에 0.1 %이내의 값을 갖도록 선정하였다. 한편 100 $\mu F/10000 \mu F$ 직/병렬 구조의 전기용량표준기의 제작에는 탄탈륨 전기용량기가 사용이 되었다. 탄탈륨 전기용량기는 다른 전해 형보다 역 전압과 ripple current에 견디는 특성이 비교적 좋다. 1000 μF 의 전기용량기는 생산이 되지 않기 때문에 2개의 470 μF 와 한 개의 60 μF 를 병렬로 연결하여 사용하였다. 그림 1은 전기용량기들을 직/병렬로 연결할 수 있는 회로이다. 그러나 (a)회로의 경우 전기용량기 각각의 전기용량값을 측정하려면 전단에서 연결된 만큼의 전기용량값을 빼주어야 하기 때문에, 즉 $C_n = \sum C_n - \sum C_{n-1}$, 매우 불편하다. 또한 직렬연결 시 스위치들의 접촉저항 증가가 전기용량기 부품들에게 부하로 작용하여 손실계수의 증가로 나타나게 된다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 그림 1 (b)의 회로와 같이 제작하여 각각의 전기용량값을 전단에 연결된 전기용량기에 관계없이 측정할 수가 있을 뿐만 아니라 직렬 연결시에도 접촉저항의 증가가 발생하지 않도록 하였다.

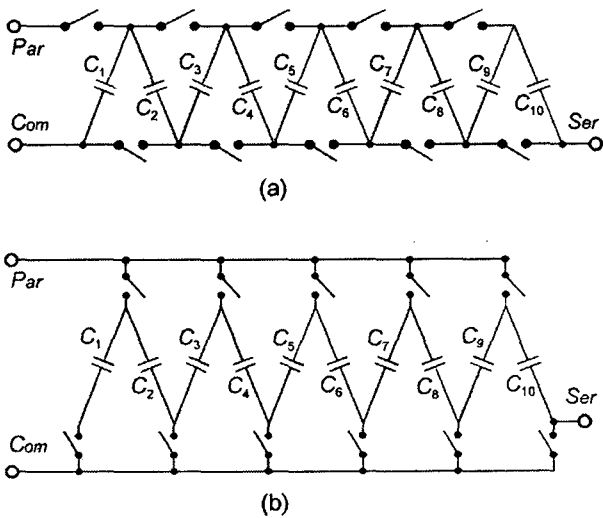


그림 1. 100:1로 전기용량을 전달할 수 있는 직/병렬연결 회로.
Fig. 1. Possible circuits for 100:1 capacitor transfer.

그림 2는 제작된 직/병렬구조의 전기용량 전달용 표준기의 회로를 3차원으로 나타낸 것이다. 10개의 전기용량기 부품들을 직/병렬연결 시 연결선의 길이를 줄이고, 인덕턴스와 접촉저항을 줄이기 위해서 2층 구조로 배열을 하고 배선도 대칭구조가 되도록 하는 한편 연결선은 은도금한 두꺼운 구리 bar를 사용하였고 스위치로 사용하는 knob도 은도금을 하여 각각의 연결지점에 사용하였다. 이러한 구조로 하여 직렬연결 시 입력단자와 출력단자를 가깝게 할 수 있었고, 또한 단순히 하나의 전기용량을 100:1로 전달하는 전달용 전기용량 표준기로서 뿐만이 아니라 주파수 1 kHz까지의 범위에서 십진전기용량기 (decade capacitor)로서도 사용할 수가 있다.

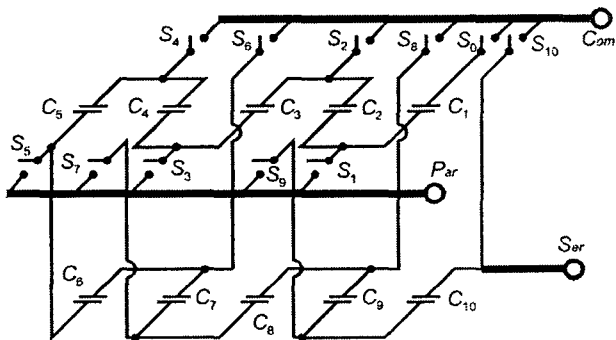


그림 2. 2층구조와 대칭연결 구조로 연결한 전달 전기용량기의 회로.
Fig. 2. Structure of the Hamon transfer capacitor using switches and capacitor elements in two rows.

4. 측정결과 및 검토

식(2)와 식(3)으로부터 d_n 과 α_n 을 구한 뒤, 식 (7)(8)과 (9)로부터 β 와 γ 의 보상값을 계산할 수가 있다. 표 1은 제작된 10 μ F/1000 μ F를 120 Hz에서 측정된 각각의 전기용량 및 $\tan \delta$ 값이다. 표 1에서의 d_n 과 α_n 으로부터 계산을 하면 $\beta = -1.65 \times 10^{-7}$, $\gamma = -38 \times 10^{-6}$ 으로 계산된다. 이 결과는 10 μ F/1000 μ F 전달 전기용량표준기의 경우 약 0.2 μ F/F, 손실계수의 경우 약 40 μ F/F의 불확도로서 10 μ F에서의 측정능력을 1000 μ F 측정에 전달할 수가 있는 것이다. 10 μ F/1000 μ F의 60 Hz에서 10 kHz까지의 주파수 변화에 따른 전기용량의 변화는 그림 3에 나타내었고, $\tan \delta$ 의 변화는 0 ~ 0.013으로 측정이 되었다. 직렬로 연결 시 전기용량과 $\tan \delta$ 값은 10.00 169 μ F, 0.000 704로 각각 측정 되었다. 개발된 직/병렬연결 전기용량 표준기는 표 2에 보인 것처럼 십진 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.

표 1. 제작된 10 μ F/1000 μ F 전달 전기용량 표준기를 120 Hz에서 측정된 각각의 전기용량 및 $\tan \delta$.

Table 1. The measured capacitance and $\tan \delta$ of the capacitor elements of the 10 μ F/1000 μ F transfer capacitor at 120 Hz.

No.	$C_n(\mu F)$	$\tan \delta$	d_n	α_n
1	100.00	0.000 73	+0.0000	+0.05
2	99.95	0.000 50	-0.0005	-0.28
3	100.01	0.000 62	+0.0001	-0.11
4	99.99	0.000 61	-0.0001	-0.13
5	99.95	0.000 84	-0.0005	+0.20
6	100.07	0.000 91	+0.0007	+0.30
7	99.95	0.000 49	-0.0005	-0.30
8	100.08	0.000 51	+0.0008	-0.27
9	99.99	0.000 88	-0.0001	+0.26
10	100.01	0.000 89	+0.0001	+0.28
mean	100.00	0.000 70		
Series	9.999 998	0.000 698		

한편 탄탈 전기용량기 부품으로 제작된 100 μ F/10000 μ F의 경우는 탄탈 전기용량기 부품의 특성으로 인하여 10 μ F/1000 μ F의 경우보다 특성이 나쁜 $\beta = 1.6 \times 10^{-6}$, $\gamma = -0.001$ 로 계산되었다. 온도계수의 경우는 60 Hz에서 1 kHz사이에서 10 μ F/1000 μ F의 경우 약 50 μ F/F, 100 μ F/10000 μ F의 경우 약 70 ~ 180 μ F/F으로 측정이 되었다.

직렬로 연결 시 전기용량과 $\tan \delta$ 값은 10.00 169 μ F, 0.000 704로 각각 측정 되었다. 개발된 직/병렬연결 전기용량 표준기는 표 2에 보인 것처럼 십진 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.

표 2. 제작된 10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ 전달 전기용량 표준기를 십진 전기용량기로 사용 시 120 Hz에서 측정된 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	0.000 73
2	199.95	0.000 74
3	299.96	0.000 78
4	399.94	0.000 78
5	499.89	0.000 93
6	599.94	0.000 93
7	699.94	0.001 09
8	800.01	0.000 98
9	900.01	0.001 06
10	1000.02	0.001 02

10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ 의 60 Hz에서 10 kHz까지의 주파수 변화에 따른 전기용량의 변화는 그림 3에 나타내었고, $\tan \delta$ 의 변화는 0 ~ 0.013으로 측정이 되었다.

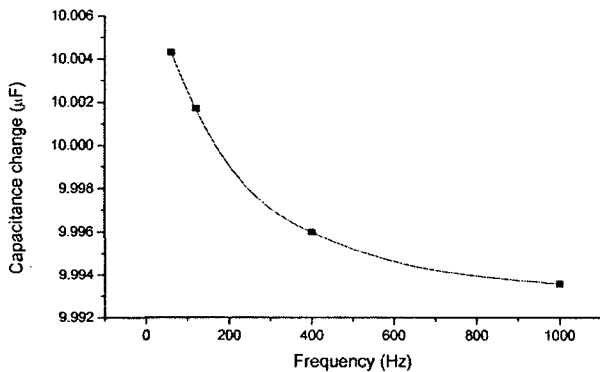


그림 3. 제작된 10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ 전달 전기용량표준기의 주파수 영향.

Fig. 3. Capacitance change with frequency for 10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ transfer capacitor.

한편 기존의 IVD를 사용한 고 전기용량 표준기의 제작회사에서 제시한 성능과 개발 제작된 표준기의 1 mF에서 측정된 성능은 표 3과같이 비교되었다. 전기용량 표준기의 성능 중에 가장 중요한 요소인 전기용량 및 손실계수의 불확도가 한 order 정도 작아서 대단히 우수한 결과를 보여주고 있다.

표 3. IVD를 사용한 고 전기용량 표준기와 제작된 표준기 10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ 의 성능비교(120 Hz, 1 mF).

Table 3. A comparison data of a IVD type high value capacitance standard and developed 10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ transfer capacitor (at 120 Hz, 10 mF)

Items	IVD type capacitor	10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ transfer capacitor
Capacitance accuracy	0.25 %	0.05 %
Dissipation factor	0.01	0.0007
Dissipation factor accuracy	0.001	0.0001
Voltage coefficient	+0.3 %	+0.001 %
Temperature coefficient (at 25 °C)	-140 ppm/°C	±20 ppm/°C

5. 결 론

Hamon 저항이라고 부르는 저항 전달용 표준기와 같은 구조인 직/병렬연결구조의 10 $\mu\text{F}/1000 \mu\text{F}$ 와 100 $\mu\text{F}/10000 \mu\text{F}$ 전기용량 표준기가 각각 폴리카보네이트 전기용량기와 탄탈전기용량기를 사용하여 제작하였다. 이 표준기가 제작이 됨으로서 Hamon 저항의 장점과 같이 10 μF 에서의 측정 불확도를 기본으로 0.1 F까지의 전기용량값을 전달할 수가 있게 되었으며, 측정시마다 10 μF 에서부터 0.1 F까지를 단 시간에 전달함으로써 장기안정도를 불확도 요인에서 배제를 시킬 수 있음으로서 기존 IVD형의 고 전기용량 표준기가 가지고 있던 결점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 안정된 고 용량의 십진 전기용량기로도 사용할 수 있게 되었다. 제작된 전기용량기 표준기는 10 μF ~ 0.1 F까지 범위의 전기용량 국가표준분야의 유지 및 공급에 표준기로 사용되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Agilent Technologies, Agilent 4294A precision impedance analyzer operation manual, April, 2003.
- [2] Agilent Technologies, Agilent 4284A precision LCR meter operation manual, January, 2000.
- [3] 이래덕, 김한준 외, "전기용량 원기 Vertical Cross Capacitor 개발," KRISS-98-037-IR, 1998.
- [4] 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.
- [5] B. V. Hamon, "A 1-100 Ω build-up resistor for the calibration of standard resistors," J. of Sci. Instru. 31, pp. 450-453 1954.
- [6] J. C. Riley, "The accuracy of series and parallel connections of four-terminal resistors," IEEE Tran. Instru. Meas., Vol. IM-16, No. 3, pp. 258-268, 1967.

저 자 소 개



김 한 준 (金 漢 俊)

1959년 1월 10일생. 1984년 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2006 현재: 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 1987~2006 현재: 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기·자기그룹, 선임연구원.

Tel : 042-868-5283

Fax : 042-868-5018

E-mail : hanjun@kriss.re.kr



한 상 옥 (韓 相 玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수, 1989년 일본 나고야대 객원교수, 현 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5655

E-mail : sohan@cnu.ac.kr



강 전 홍 (姜 鎭 洪)

1963년 2월 8일생, 1998년 대전한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2006년 충남대학교 전기공학과 박사과정, 1988년~2006년 현재: 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기·자기그룹, 선임기술원

Tel : 042-868-5152

Fax : 042-868-5018

E-mail : jhkang@kriss.re.kr