Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 12, No.1, pp. 58~68 February 1998

유전 히스테리시스 특성 측정장치의 연구 개발

(A Study on the Development of a System for Measuring Dielectric Hysteresis)

강대하*
(Dae-Ha Kang)

요 약

본 연구는 컴퓨터제어 유전 히스테리시스 특성 측정장치를 개발하기 위하여 수행한 것이다. 이 측정장치는 파형 발생부, 고전압 증폭부, 측정부, 데이터 취득부 및 관련 제어회로로 구성되어 있으며 컴퓨터에 인터페이싱한 장치이다. 인가전압 및 주파수가 P.C에 의해 제어되며 측정 데이터를 P.C의 RAM에 저장할 수 있으므로 데이터의 분석 및 그래픽이 매우 편리하다. 본 장치의 정도를 시험하기 위하여 시중의 마이카 콘덴서 및 스티롤 콘덴서에 대한 정전용량을 고전압을 인가하여 측정하였으며 그 결과 정격값과 잘 일치하였다. PZT 세라믹 시료에 대한 시험에서 단일주파수의 전계를 인가함으로써 전형적인 D-E 히스테리시스 곡선을 얻을 수 있었으며, 이중주파수의 전계를 인가함으로써 ε-E 및 D-E 히스테리시스 곡선을 동시에 측정할 수 있었다.

Abstract

A computer-controlled system for measuring dielectric hysteresis has been developed.

This system consists of the wave generation part, the high voltage amplifier part, the measurement part, the data acquisition part and the related controll circuits and is interfaced to P.C(personal computer). The applied voltage and its frequency are controlled by P.C . Since the measured datas can be saved in the RAM of P.C, the analysis and the graphics of the datas are very convenient . As a accuracy test, the capcitances of the commercial mica and styroll capacitors were measured by applying high voltage and the results were good agreement with the rating values . In the test of PZT ceramic sample, the typical D-E hysteresis loops were obtained by applying a single frequency voltage to the sample, and ε-E and D-E hysteresis loops could be measured at the same time by applying a double frequency voltage to the sample.

---

*정회원 : 부경대학교 전기과 교수
접수일자 : 1997. 9. 19
이 논문은 1996학년도 부경대학교 학술연구 조성비에 의한 것임.

1. 서 론

최근 유전특성에 관한 연구가 세라믹스 및 고분자 물질을 대상으로 광범위하게 진행되고 있다[1~4].

이러한 유전물질에 인가되는 전계가 증가할 때 그것에 대응하는 응답특성은 선형성을 잃는다. 자유로이 회전할 수 있는 쌍극자를 함유하는 유전체에 있어서도 그 전기 변위는 Langevin 함수에 따라 포화하는 경향이 있다. 이러한 비선형성은 강유전체에서 더욱 현저하게 나타난다. 강유전체는 쌍극자의 상호작용에 의한 자발분극이 있어 외부전계를 제거한 후에도 잔류분극이 있고 항전계보다 큰 반대방향의 외부전계에 의하여 자발분극이 반전되는 물질이다. 이러한 강유전체는 대부분의 경우 초전성 및 압전성을 지니게 되며 그 물성은 각종 센서 및 메모리 소자등 다방면에 응용되고 있다. 이러한 강유전체의 중요한 물성인 자발분극 (P_s), 잔류분극 (P_r) 및 항전계 (E_c) 등을 구하기 위하여는 외부전계 E에 대하여 전기변위 D가 그림1과 같이 나타나는 D-E 히스테리시스 곡선을 측정하여야하며, 이 히스테리시스 곡선은 강유전성을 밝히는 중요한 실마리가 된다. 현재 국내에서 이용되고 있는 D-E 히스테리시스 곡선의 측정방법은 Sawyer-Tower 회로를 이용한 것으로서 이와같은 방법으로 측정할 경우 시료에 인가해야 할 고전압 전원 장치가 따로 필요하며 측정하는데 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 시료에 인가되는 전압도 근사치를 적용할 수 밖에 없고 수동으로 조작하는 등 불편한 점이 많다. 본 연구의 목적은 기존의 측정방법에 대한 결점을 보완, 개선하여 D-E 히스테리시스 곡선을 보다 능률적이고 편리하게 측정하기 위한 것이다. 본 연구에서 개발한 유전 히스테리시스 특성 측정장치는 기존의 측정법을 개선한 것으로서 전기변위의 히스테리시스 현상을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 이중주파수의 전계를 시료에 인가함으로써 전기변위와 유전율의 히스테리시스 현상을 동시에 측정할 수 있는 장치이다. 또한 컴퓨터에 의하여 인가전계의 크기 및 주파수 등을 자동적으로 제어할 수 있으므로 매우 능률적이고 측정시간을 대폭 단축할 수 있으며 데이터를 컴퓨터의 메모리에 저장할 수 있으므로 데이터의 분석처리 및 그래픽 등이 매우 용이하다.

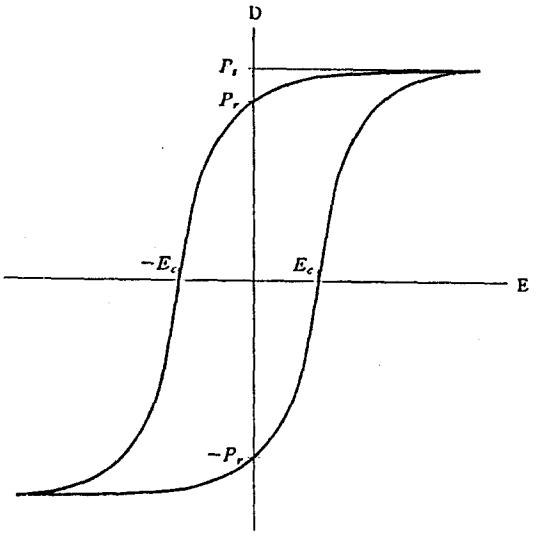


그림 1. D-E 히스테리시스 곡선
Fig. 1. D-E hysteresis loop

2. 측정장치의 제작

2.1 유전 히스테리시스곡선의 측정방법

유전체로 구성되어 있는 콘덴서에 일정 전압을 인가하면 유전체에는 과도적 충전 전류가 흐르며 그 형은 평형분극에 도달하는 속도에 의존한다. 원리적으로는 그것과 등가인 주파수 대역에서 유전체의 시간의존의 응답으로부터 푸리에 적분변환에 의해 얻을수 있다. 푸리에 적분은 시간대역에 있어서 하나의 과도적 신호로부터 모든 고조파 성분을 산출해 내는 것이다. 시각 t=0에서 계단전압 V_0를 인가한 콘덴서 중의 유전체에 충전되는 전하량은 일반적으로

$$Q(w)=\int_0^{\infty} i(t)e^{-jwt}dt \qquad (1)$$

단 i(t) : 시각 t에서 과도적 충전전류

로 주어진다. 실제로 과도전류는 원자 및 전자분극

에 대응하는 순간적인 초기 펄스와 그것에 연이어 나타나는 완화적 쌍극자 배향과정에 의한 감쇄전류로 되어있다. 만약 유전체가 어느 정도 전도성을 갖고 있으면 정상전류도 존재할 것이다.
따라서 식(1)은

$$Q(w)=\int_0^{\infty} i(t)e^{-jwt}dt-jGV_0 \qquad (2)$$

단 G : dc 콘덕턴스

로 된다. 과도전류 데이터의 완전 푸리에 변환은 매우 광범위한 수치 계산을 해야 한다. 따라서 두가지의 근사법이 종종 사용되어 왔다.

Hamon(1952)근사법[5]으로 알려져있는 최초의 방법은 과도전류가

$$i(t)At^n,\ (0.5<n<1) \qquad (3)$$

에 따른다는 가정에 근거를 두고 있다. 이 식은 과도전류 곡선의 어느 한정된 부분에서는 실험적으로 정확함이 인정되고 있다. 또 하나의 근사법으로는 Hyde[5]에 의하여 제안된 방법이다. 이 방법은 과도전류의 시간적분 Q(t)의 상승은 log(t)에 대하여 보통 완만하다는 실험적 사실에 기초를 두고 있다. 그러므로 log(t)의 눈금상에서 등간격으로 Q(t)를 측정함으로써 넓은 주파수범위에 걸쳐 과도 현상의 경제적인 기록을 할 수 있다. 본 연구에서는 전기변위 D의 전계 E에 대한 변화를 측정하는 것이므로

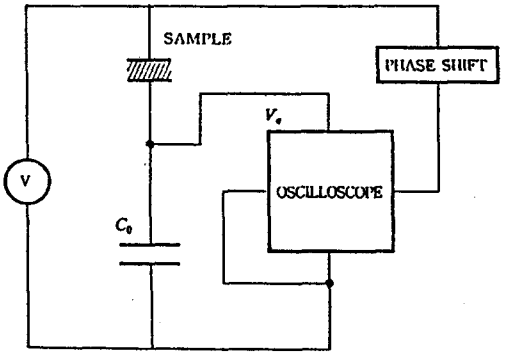


그림 2. Sawyer-Tower 회로
Fig. 2. The Sawyer-Tower circuit.

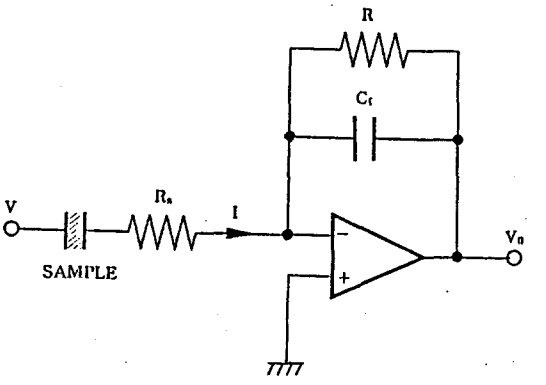


그림 3. 전류 I를 측정하기 위한 미분회로
Fig. 3. A derivative circuit for measurement of the current I.

주로 단일 주파수에 관한 것이다. 전하 Q의 실제적인 측정에는 그림2와 같은 Sawyer-Tower회로[6]가 종종 사용되고 있다.

C_0의 양단에 나타나는 전압 V_q를 오실로스코프의 수직축에 입력하고, 인가전압 V를 수평축에 인가함으로써 V_q와 V의 관계를 관측할 수 있으며 이 관계는 D-E 관계의 형상과 같게 된다. 그러나 이 방법은 시료에 인가되는 전압에 근사값이 사용되며 시료 자체의 전도성은 전혀 보상할 수 없다는 결점이 있다. 또한 측정전압이 오랜시간 동안 인가됨으로써 유전가열에 의한 시료의 온도상승도 우려된다.

또 한가지 측정방법으로서 그림3과 같은 미분회로를 사용하여 전류를 측정하고 그 결과를 적분함으로써 전하를 구하는 방법[7]이 있다.

그림3에서 R_s및 C_f는 잡음 제거용이다. 이 미분회로에서 전류 I는

$$I=-\frac{V_0}{R} \qquad (4)$$

로 주어지므로 출력전압 V_0를 측정함으로써 I를 구하며 이것을 적분하면 전하 Q를 구할 수 있다. 이 방법은 컴퓨터에 의해 데이터처리를 할 경우 디지털 적분을 해야하는 번거로움을 수반한다.

전하 Q를 구하는 최근의 개량된 방법으로서 그림4와 같은 전하증폭기[8]를 사용하는 방법이 있다.

전하 증폭기는 연산증폭기(OP Amp : 저바이어스 전류 FET형)와 부궤환 콘덴서 C_f 및 저항 R_f로 구성된다. 이득이 높고 입력 임피던스가 매우 크기 때문에 전하증폭기의 입력은 가상접지 상태가 된다. 이와 같은 사실은 인가전압 V가 시료의 두께방향에 모두 걸리게 해 준다. 시료의 전극에 유도된 전하 Q는 부궤환 콘덴서 C_f에 동일량으로 충전되며 전하증폭기의 출력 전압 V_q로 부터 전하 Q를 다음식으로 산정할 수 있다.

$$Q = -C_f V_q \tag{5}$$

부궤환 저항 R_f는 연산증폭기의 바이어스 전류를 보상하기 위한 것으로서 고저항(수 M Ω이상)을 사용한다. 만약 R_f가 없을 경우 출력전압의 시간적 이동을 초래하며 포화현상이 갑작스럽게 일어날 수 있다. 그러나 이 저항을 부과함으로써 연산증폭기가 시정수 R_fC_f의 high pass filter처럼 동작하게 된다. 이와 같은 동작은 $f=\frac{1}{2\pi R_f C_f}$의 보다 낮은 차단주파수를 제공하며 직류동작을 거의 이행할 수 있도록 해 준다. 본 측정장치에서는 전하증폭기에 의한 전하측정법을 사용하였으며 인가전압 V 및 응답전압 V_q를 디지털화 하여 분석처리 하도록 하였다.

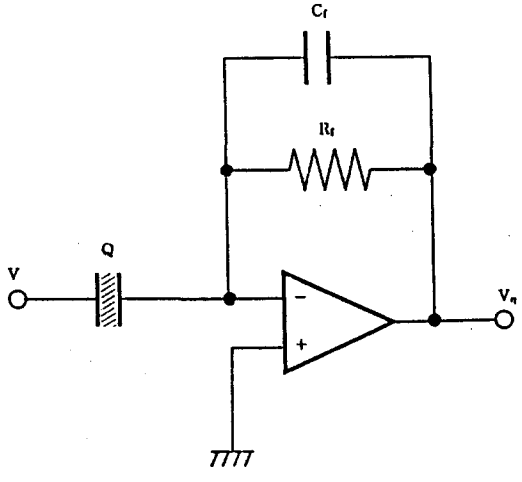


그림 4. 전하증폭기
Fig. 4. Charge amplifier.

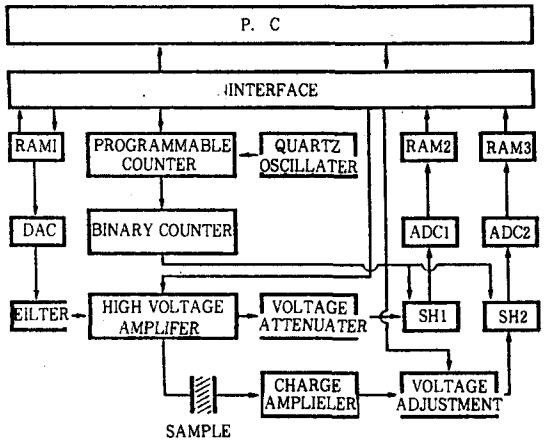


그림 5. 측정장치의 개략도
Fig. 5. Block diagram of measurement system.

2.2 측정장치의 구성

본 측정장치의 개략도는 그림5와 같으며 그 구성은 파형발생부, 고전압증폭부, 측정부 및 데이터취득부로 분류된다.

2.2.1 파형발생부

먼저 컴퓨터에서 정현파를 4096개의 데이터로 디지털화 한 다음 RAM1 (12 bit, 4096 words)에 써 넣는다. 이 때 D−E와 ε−E관계 또는 Q−V와 C−V관계를 동시에 측정할 경우는 다음식에 의한 중첩파형을 정규화하여 디지털화 한다.

$$V(I)=\sin\frac{2\pi I}{N}+K\sin\frac{2\pi mI}{N} \tag{6}$$

단, I=1, 2, 3,……, 4096, N=4096, K : 상수

한편 컴퓨터 내부의 클럭펄스 또는 수정발진기에 의한 외부 클럭펄스는 프로그래머블 카운터(8254)에 의해 적당한 주파수의 펄스로 분주되며 이 펄스에 의해 RAM1의 데이터를 읽을 수 있게된다. 이 RAM1의 데이터는 12bit의 DAC를 거쳐 아날로그 정현파 전압(±10[V])으로 변환된다. 이 전압의 주파수는 RAM1의 읽기 속도에 의해 좌우되므로 컴퓨터에 의해 자유롭게 가변할 수 있으며 적당한 능동필터를 거쳐 고전압 증폭기에 입력된다.

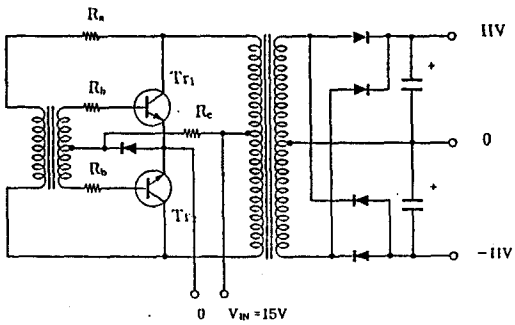


그림 6. DC-DC 콘버터 회로.
Fig. 6. DC-DC converter circuit.

2.2.2 고전압 증폭부

고전압을 얻기 위하여는 직류 고전압 전원이 필요하다. D-E히스테리시스 현상 측정에는 대용량의 고전압 전원이 필요하지 않으므로 소용량, 소형으로 할 수 있는 DC-DC 콘버터를 직접 제작하여 사용하였으며 60[VA], ±800[V]의 출력전압을 발생하도록 설계하였다. 그림6은 DC-DC 콘버터의 회로도를 나타낸다.

고전압 증폭기는 그림7과 같이 연산증폭기, 전류증폭기 및 포토 트랜지스터의 조합으로 구성하였다.

이 증폭기의 이득은 70으로서 최대 출력전압은 ±700[V]로 설계하였다. 출력전압의 조정은 입력단의 연산증폭기에 의해 행하며 컴퓨터에 의해 조정할 수 있도록 하였고 이 출력전압이 시료에 인가된다.

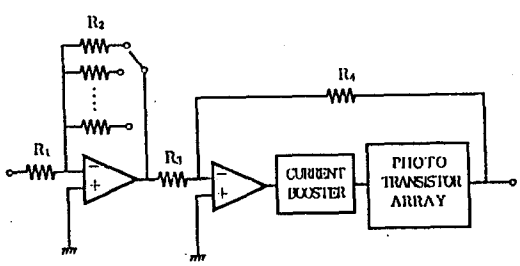


그림 7. 고전압 증폭부
Fig. 7. High voltage amplifier part.

2.2.3 측정부

그림8은 측정부 회로를 나타낸 것이다. 히스테리시스 현상의 측정에 사용되는 전압은 고전압이므로 다음 과정의 데이터 처리를 위해 이 전압을 적절한 값으로 낮추어야 한다. 이것은 연산증폭기 OP_1의 입력저항 R_1과 부궤환 저항 R_2를 $R_1 \gg R_2$가 되도록 선정함으로써 달성할 수 있다. 즉 감쇄전압은

$$V_v = \frac{R_2}{R_1} V \tag{7}$$

로 된다. 히스테리시스 현상의 측정시 문제로 되는 것은 높은 인가전압으로 인한 유전가열 현상으로서 측정시 시료 자체의 온도상승 효과를 발생한다. 이러한 현상은 인가전계의 주파수를 낮춤으로써 해결할 수 있으며 본 측정장치에서는 컴퓨터에 의해 주파수 제어가 가능하므로 문제성이 없다. 그러나 이와 같은 낮은 주파수에서는 시료 자체의 전도전류에 의한 부가적 영향을 받게 된다.

이러한 현상은 전하증폭기에 가변저항을 통하여 감쇄기의 출력전압 V_v를 입력함으로써 수정할 수 있다. 그러나 이와 같은 경우는 전도전류가 선형적으로 관련될 때에만 유효하다. 전하증폭기의 출력전압이 현저하게 작을 경우 AD 콘버터 ADC_2의 정도가 떨어질 우려가 있으므로 적절한 전압 (3~8[V])로 높이기 위해 전하증폭기의 후단에 증폭기를 부가하였으며 이 전압의 조정은 컴퓨터에 의해 자동적으로 행해지도록 하였다. 전하증폭기의 연산증폭기는 OP 104를 사용하였으며 C_f는 33.6×10^{-8}[F], R_f는 200[MΩ]을 사용하였다.

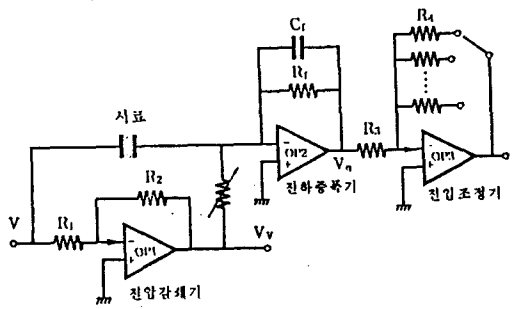


그림 8. 측정부 회로
Fig. 8. The measurement circuit

2.2.4 데이터 취득부

전하 증폭기의 출력 전압을 적절한 값으로 조정한 뒤 인가전압의 감쇄전압와 V_r 함께 각각 Sample & Hold (SH1, SH2) 및 AD콘버터(ADC1, ADC2)를 통하여 디지털화 한다. 이들 두가지 신호는 동시에 샘플링되도록 하였으며 외부 메모리 RAM2 및 RAM3에 자동적으로 저장되도록 설계하였다. 이와 같이 데이터가 메모리에 저장됨으로써 측정은 모두 끝나게 된다. 메모리 RAM2 및 RAM3의 설치는 되도록 빠른 시간내에 측정을 끝내 유전가열에 의한 시료의 온도상승을 최소화하기 위한 것이며 데이터의 저장 즉시 고전압 증폭기의 출력전압이 0으로 조정되도록 하였다.

2.3 데이터 취득 및 오차보정

인가전압 V_r 및 응답전압 V_q는 Sample & Hold 회로에 있어서 동일 펄스에 의해 샘플링되도록 하였으며 그 샘플링 타이밍은 한 파형에 대하여 512개의 데이터가 취해지도록 설계하였다. 이와 같이 샘플링된 데이터 V_r 및 V_q는 각각 12[bit]의 ADC (ADC1 및 ADC2)의 입력으로 가해지고 디지털화된 데이터는 자동적으로 메모리 RAM2 및 RAM3에 저장된다. 이 때 각각 1개씩의 인가전압 및 전하 증폭기의 출력전압 데이터를 메모리에 저장할 때까지 소요되는 시간은 약 32μs이다. 따라서 최대로 취할수 있는 단일 주파수는 $f=\frac{1}{32\times10^{-6}\times512}\fallingdotseq60$ [Hz]로 제한된다. 그러나 기본주파수의 n배에 해당되는 디지털화된 정현파 데이터를 RAM1에 저장함으로써 측정가능 단일 주파수범위를 n배로 확대할 수 있다. 한 파형에 대하여 512개의 데이터를 취할 경우 8개의 파형을 저장할 수 있게 된다. 따라서 동일한 8개의 파형을 합산하여 산술평균을 취할수 있으므로 오차를 최소화 할 수 있다. 그림5의 DA콘버터(DAC)는 12[bit]의 것을 사용하여 해상도가 0.0025[%]로서 매우 양호한 것으로 평가할 수 있으나 그 출력에는 디스크리트 스텝(discrete step)에서 발생하는 고주파 성분이 다소 포함된다. 이를 개선하기 위해 차단주파수가 각각 20[Hz]와 2[kHz]인 저역필터(low-pass filter)를 설치하여 측정주파수에 따라 선택할 수 있게 함으로써 파형의 오차를 최소화 하였다. 전하 증폭기는 고역필터(high-pass filter)와 유사한 주파수 특성을 갖는다. 출력전압 V_q는 다음식과 같이 시료에 충전되는 전하 Q와 관련이 있다.

$$Q=C\left(1+\frac{1}{jwC_fR_f}\right)V_q \tag{8}$$

고주파에서는 $wC_fR_f\gg1$이며 전하 Q는 C_fV_q로 주어진다. 주파수가 점점 낮아지면 연산증폭기의 바이어스 전류를 보상하기 위해 사용되는 저항 R_f로 인해 위상이 변화되며 V_q의 크기가 감소된다. 본 측정장치에서는 컴퓨터에 의해 RAM1의 읽기 속도를 결정하므로 측정주파수의 정확한 값을 알 수 있다. C_f 및 R_f의 값이 알려지면 푸리에 변환 결과에 $1+\frac{1}{jwC_fR_f}$을 곱함으로써 주파수 특성을 완전히 보상할 수 있다. 또한 고전압 전원 장치를 제외한 모든 저전압 기판을 금속함에 수납하였으며 금속외함을 접지하여 외부로부터의 잡음 유도를 최소화 하였다. 이상과 같은 방법으로 오차보정을 행하였으며 마이카, 스티롤콘덴서 및 표준콘덴서등으로 시험한 결과 0.05[%] 이하의 오차를 나타냄을 확인하였다.

2.4 측정데이터의 처리

인가전압 신호 및 시료의 응답신호는 기본파 주기에 대하여 512개의 데이터 수가 되도록 하였으며 이것을 다음식에 의해 인가전계 E 및 전기변위 D를 계산한다.

$$E=\frac{V}{d}[V/m],\ D=\frac{Q}{S}[C/m^2] \tag{9}$$

단, V : 인가전압, D : 시료두께, S : 전극면적,
Q : 측정전하

각각의 디지털 신호는 동시에 샘플링된 512개의 데이터로 구성되어 있으므로 기본파 주기에 대하여 E(I)와 D(I)로 표현할 수 있다. 이 때 I는 1~N까지의 정수값을 가진다. 본 연구에서는 N의 값을 512로 하였다. 따라서 E(I)의 변화에 대한 D(I)의 히스테리시스 곡선을 관측할 수 있다. 이 때 컴퓨터

에 의해 인가전압을 점차적으로 증가시켜 시료에 인가하고 측정된 히스테리시스 곡선으로부터 E=0시의 D의 값을 계산하여 변화가 없을 때 이 값을 잔류분극 P_r로 한다. 또 이 때 D=0시의 E의 값을 항전계 E_c로 결정한다. 만약 시료의 두께 및 전극면적을 알 수 없을 경우는 인가전압 V에 대한 시료의 충전하 Q의 관계로 부터 히스테리시스 곡선을 관측할 수 있다. ε-E 및 D-E히스테리시스 곡선을 동시에 측정할 경우는 다음과 같은 데이터 처리를 행한다. 식(6)에 의해 주어진 인가전계의 파형은 다음식으로 표현할 수 있다.

$$E=E_1\sin wt+E_n\sin nwt \tag{10}$$

본 실험장치의 실험에서는 $K=\frac{E_n}{E_1}=0.1$ 로 하였으며 n은 64로 하였다.그러므로 기본파에 대한 1주기의 데이터 수를 512개로 할 때 n배 주파수의 1주기에 대한 데이터 수는 8개로 구성된다. 이와 같은 복합파형에 대한 응답으로서 얻어지는 D(I)에서 8개의 데이터 점에 대하여 평균을 취하면 고전압 기본파에 대한 전기변위, 즉

$$D_1(p)=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}D(mp+k) \tag{11}$$

단, m=8, p=0,1,2,……,63

를 얻을 수 있다. 또한 D(I)에 포함되어 있는 n배 주파수의 저전압 성분의 응답은 D(I)를 푸리에 변환함으로써 결정한다. 이때 $D_1(p)$의 변화량을 고려해야 하며 $D_1(p)$의 변화량을 $\Delta D_1(p)$라 하면

$$\Delta D_1(p)=\frac{1}{2m}(D_1(P+1)-D_1(P-1)) \tag{12}$$

로 구할 수 있다. 따라서 n배 주파수 성분에 대한 푸리에 변환은 식 (13) 및 식 (14)으로 쓸 수 있다.

$$D_1'(p)=\frac{2}{m}\sum_{k=1}^{m}D(mp+k)-k\triangle D_1(p))\cos\frac{2\pi k}{m} \tag{13}$$

$$D_1''(p)=\frac{2}{m}\sum_{k=1}^{m}D(mp+k)-k\triangle D_1(p))\sin\frac{2\pi k}{m} \tag{14}$$

따라서 n배 주파수 성분의 전기변위 $D_n(p)$는

$$D_n(p)=\sqrt{(D_n'(p))^2+(D_n''(p))^2} \tag{15}$$

로 주어진다. 인가전계에 대하여도 전기변위와 동일한 방법으로 $E_1(p)$및 $E_n(p)$를 구할 수 있으므로 유전율 $\varepsilon(p)$는

$$\varepsilon(p)=\frac{D_n(p)}{E_n(p)} \tag{16}$$

로 결정할 수 있다. 만약 시료의 두께 및 전극면적을 알 수 없는 경우는

$\varepsilon(p) \rightarrow C(p)$
$D_1(p) \rightarrow Q_1(p)$
$D_n(p) \rightarrow Q_n(p)$
$E_1(p) \rightarrow V_1(p)$
$E_1(p) \rightarrow V_n(p)$

의 대응관계로 부터 C-V 및 Q-V관계를 알 수 있다.

3. 측정에

그림9는 PZT세라믹 시료에 대한 인가전압 및 응답특성 즉 전하증폭기의 출력전압(V_q)을 1파형에 대하여 도시한 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 인가전압 파형이 매우 안정되어 있으며 잡음이 적은 양호한 파형을 나타내고 있다. 또한 응답파형은 구형성을 띠고 있어 강유전 특성의 존재를 반영하고 있다.

그림10은 동일 시료에 대하여 저주파 고전압에 고주파(기본주파수의 64배) 저전압을 중첩한 인가전압 및 그 응답특성을 도시한 것으로서 시료의 응답에도 고주파 응답성분이 나타남을 확실히 보여주고 있다.

그림11 및 그림12는 시중의 마이카, 스티롤 콘덴서에 대한 Q-V관계를 나타낸 것이다. 이 콘덴서들의 Q-V관계가 직선적으로서 히스테리시스 현상은 나타나지 않아 강유전성이 없음을 보여주고 있다.

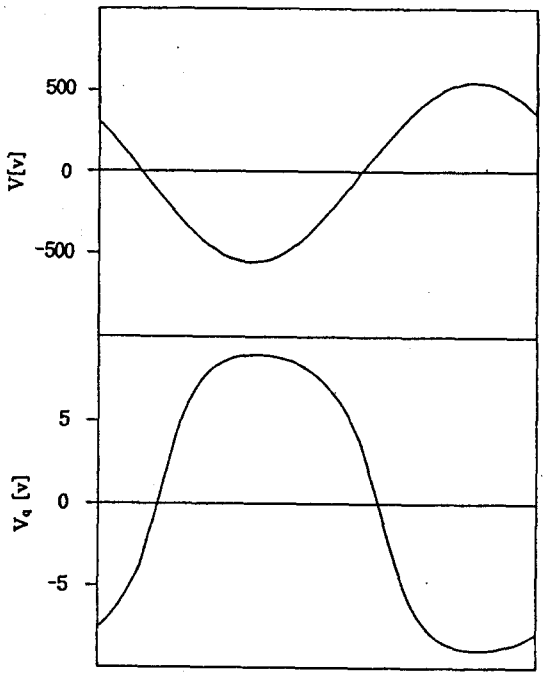


그림 1. 9. PZT 세라믹 시료에 있어서 단일 주파수의 인가전압 V 및 전하증폭기의 출력전압 V_q의 파형.
Fig. 9. Single frequency wave forms of thr applied voltage V and the output voltage V_q of charge amplifier in PZT ceramic sample.

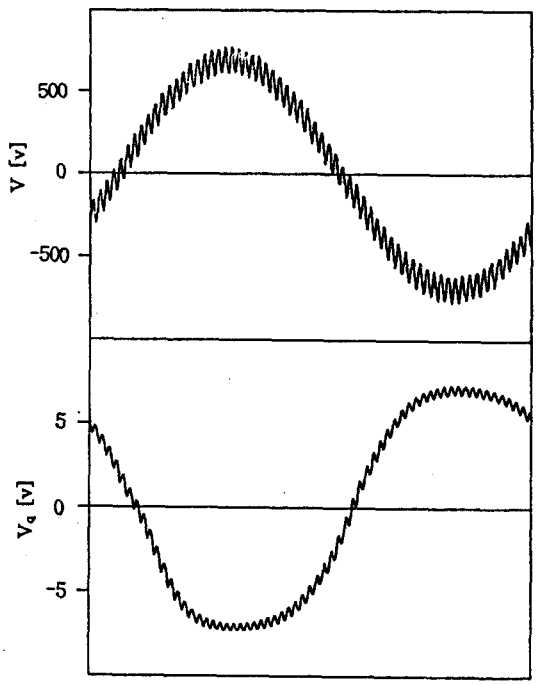


그림 10. PZT 세라믹 시료에 있어서 이중주파수의 인가전압 파형 V 및 전하증폭기의 출력전압 파형 V_q.
Fig. 10. Double frequency wave forms of the applied voltage V and the output voltage V_q of charge amplifier in PZT ceramic sample.

이와 같이 Q−V관계가 직선적으로 나타남에 따라 Q및 V의 푸리에 변환을 통해[9] 정전용량을 평가한 결과 각각 1013[pF], 4207[pF]로 나타났다. 이 값은 각각 102J, 472J 규격의 콘덴서라는 점을 감안할 때 모두 본래의 오차범위 내에 들어옴을 알 수 있다.

그림13은 PZT세라믹 박막에 알미늄 전극을 증착한 시료(두께 150[㎛], 전극면적 20[㎟])의 D−E 히스테리시스 곡선을 나타낸 것이다. 전형적인 히스테리시스 곡선을 나타내고 있으며 잔류분극 은 약 50[mC/㎡] , 항전계 E_c는 약 1[MV/m]로 산정 되었다. 이 잔류분극의 값은 기 보고된 값 48[mC/㎡][12]과 거의 일치한 값이다.

그림14는 이 PZT 세라믹 시료에 최대인가전계를 달리하여 측정한 결과를 도시한 것이다. 최대인가전계가 3.6, 3.0, 2.4[MV/m]인 경우 잔류분극 및 항전계 의 값이 약 50[mC/m2] 및 1[MV/m]로서 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림14의 각 파형에 대하여 푸리에 변환을 행하면 전기변위 D에 대한 고조파 성분을 구할 수 있다. 그림15는 그림14의 각 파형에 대하여 디지털 푸리에 변환을 통해 얻은 결과를 인가전계의 최대값 E_0에 대하여 도시한 것이다. 그림에서 D의 우수차 고조파에 대하여는 그 값이 매우 작았으므로 무시하였다. D_1에 있어서 D_1'는 전계의 증가에따라 양의 값, D_1''는 음의 값을 나타내나 D_3 및 D_5는 양, 음의 다양한 값을 나타내고 있다. D_1'의 경우, 저전계 부근에서는 거의 직선적인 변화를 나타내며 고전계로 갈수록 비선형적으로 증가하여 포화의 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 사실은 강유전성이 고전계 영역에서 나타남을 의미한다. 이러한 특성으로부터 온도변화에 대한 D−E특성을 측정할 경우 강유전성에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다[11].

저주과 고전계에 고주파 저전계가 중첩된 이중주

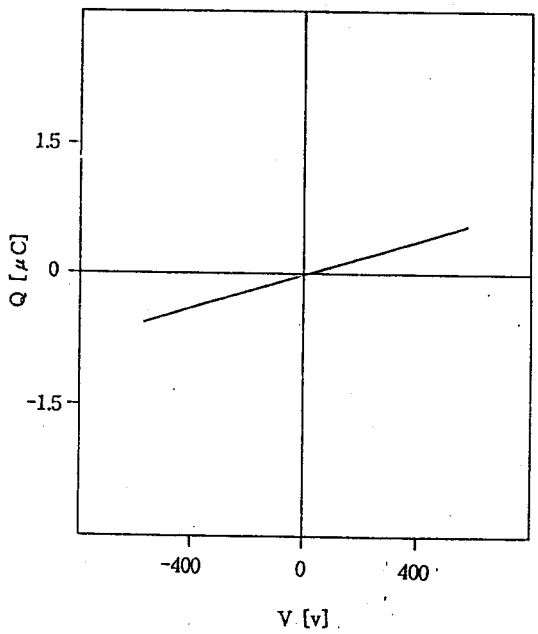


그림 11. 마이카 콘덴서의 인가전압 V에 대한 충전전하 Q 특성
Fig. 11. Q-V characteristics in mica capacitor.

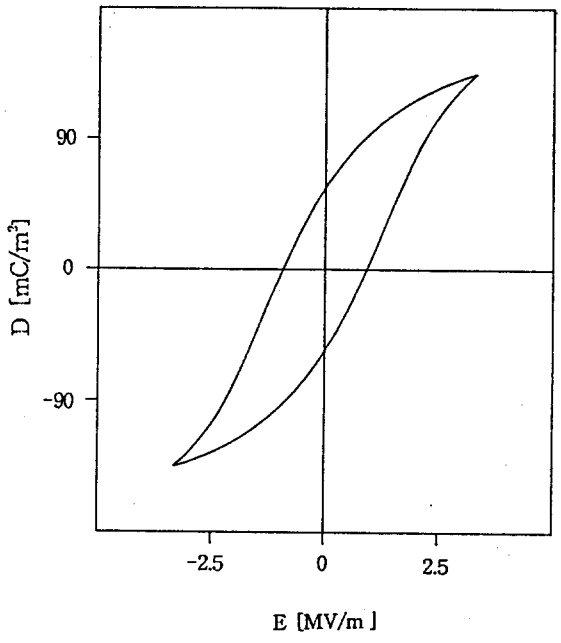


그림 13. PZT 세라믹 시료의 D-E 히스테리시스 곡선.
Fig. 13. A typical D-E hysteresis loop in PZT ceramic sample.

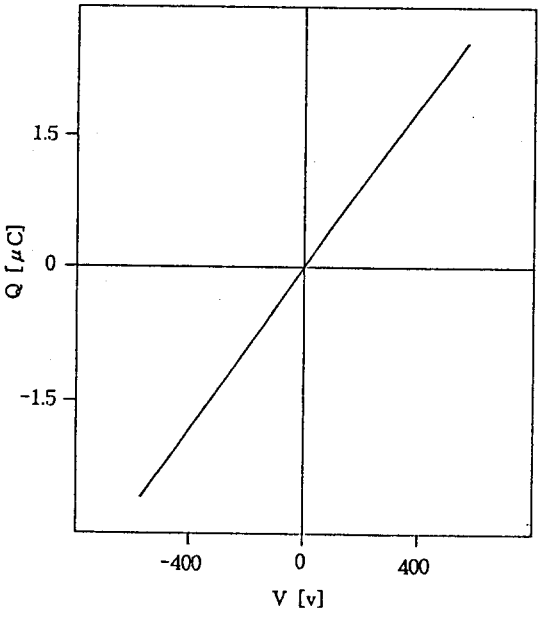


그림 12. 스티롤콘덴서의 인가전압 V에 대한 충전전하 Q 특성
Fig. 12. Q-V characteristics in styroll capacitor.

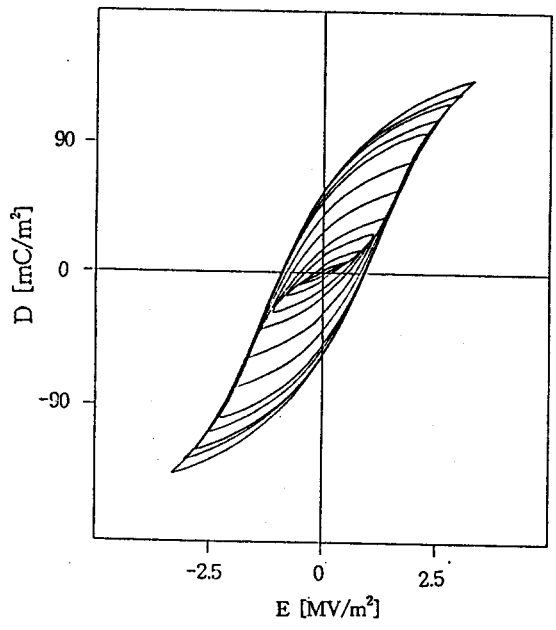


그림 14. PZT 세라믹 시료에 있어서 최대 인가전계별 D-E 히스테리시스 곡선
Fig. 14. D-E hysteresis loops for various applied maximum electric field in PZT ceramic sample.

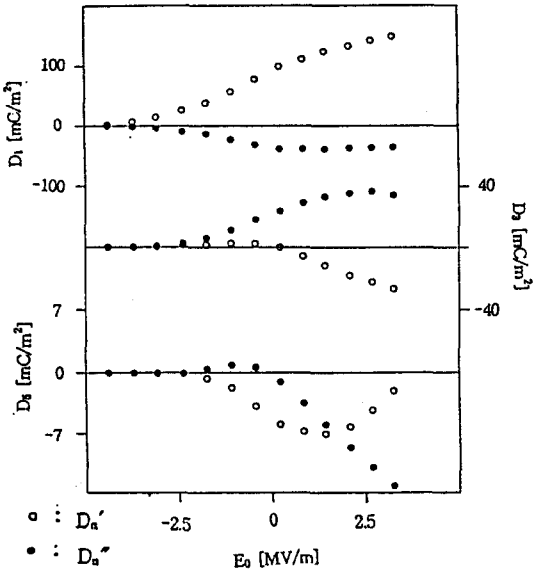


그림 15. 최대 인가전계의 변화에 대한 전기변위 D의 고조파 성분 변화.

Fig. 15. Changes in Harmonics of dielectric displacement D for variations of applied maximum electric field E_0.

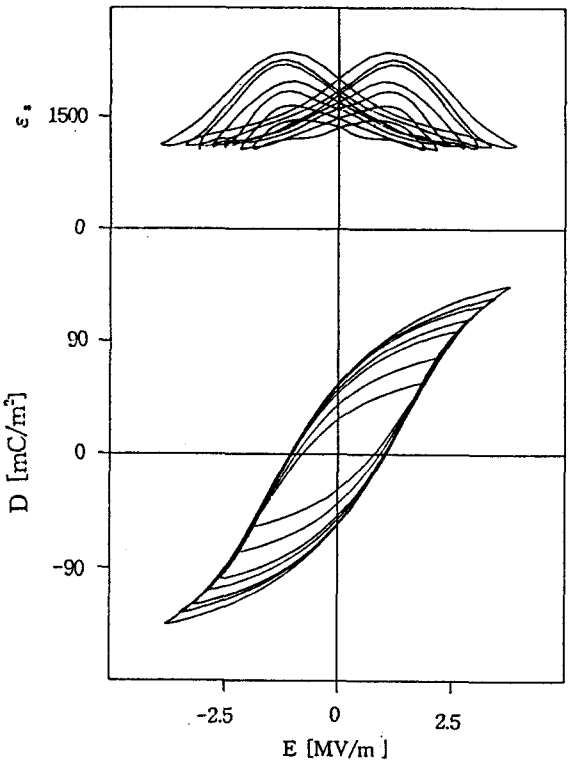


그림 16. PZT 세라믹 시료의 ε_s-E 히스테리시스 곡선 및 D-E 히스테리시스 곡선.

Fig. 16. ε_s-E and D-E hysteresis loops in PZT ceramic sample.

파수 파형을 시료에 인가함으로써 비선형 유전성을 조사하기 위한 대안적 실험을 수행할 수 있으며 이 결과로 부터 고바이어스 전계에 대한 선형 유전율의 의존성을 검토 할 수 있다.

그림16은 PZT 시료에 대한 ε_s-E 및 D-E 관계를 나타낸 것이다. 여기서 비유전율 ε_s는 243[Hz]에서 결정한 것이며 바이어스 전계 E의 주파수는 3.8[Hz]이다. ε_s는 전계 E에 대하여 버터플라이형의 히스테리시스 곡선을 보여주고 있으며 좌표 원점에 대하여 대칭성을 나타내고 있다. D-E 히스테리시스 곡선은 단일 주파수의 전계를 인가한 경우와 동일하게 나타났으며 중첩된 고주파 저전계에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

그림17은 전계인가 초기에 발견된 이중 히스테리시스 곡선을 나타낸 것이며 VDF/T,FE 시료에서도 발견된 바 있다[11]. ε_s-E히스테리시스 곡선에서는 -전계 및 + 전계영역에서 각각 2개의 peak 현상을 수반하고 있다. 이와 같은 현상은 쌍극자의 배향이 두단계로 일어남을 의미한다[11].

4. 결 론

일반적으로 널리 사용되고 있는 D-E히스테리시스 곡선의 측정방법은 Sawyer-Tower회로를 이용하는 방법이다. 이 방법은 그 회로구성이 간단하다는 장점은 있으나 오실로스코프에 의한 시각적 방법이 대부분이므로 측정시간이 오래 걸려 유전가열현상에 의하여 물질의 특성이 달라질 우려가 있으며, 정확도가 떨어지므로 정량적 분석에도 문제가 있다. 또한 고전계의 인가시 유전율의 전계변화 특성을 전혀 관측할 수 없다.

본 연구에서 개발한 유전히스테리시스 특성 측정장치는 컴퓨터에 인터페이싱한 것으로서 측정 주파수, 측정 데이터수 및 측정 파형수를 임의로 선택할 수 있으므로 측정 시간을 대폭 줄일 수 있으며, 인가

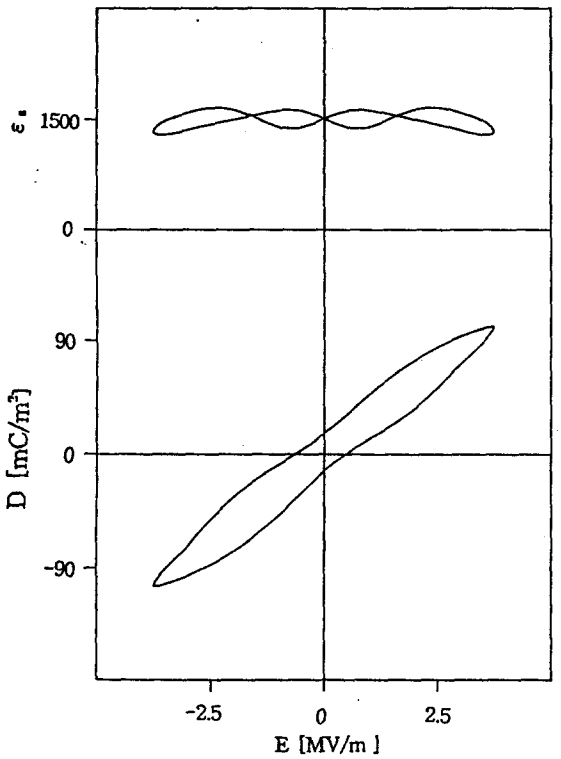


그림 17. PZT 세라믹 시료에서 발견된 ε_r-E 및 D-E의 이중 히스테리시스 곡선.

Fig. 17. ε_r-E and D-E hysteresis loops observed in PZT ceramic sample.

전압의 크기를 자동으로 가변시킬 수 있으므로 인가전압 변화에 대한 D-E 히스테리시스 현상을 쉽게 관측할 수 있다. 또한 고전계 인가시 전계변화에 대한 전기변위 D와 유전율 ε의 특성을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 실온에서의 측정예로서 상유전체인 마이카 및 스티롤 콘덴서와 강유전체인 PZT 세라믹 시료에 대하여 측정을 하였다. 고전계 인가시 마이카 및 스티롤 콘덴서의 D-E 특성은 직선으로서 상유전체임을 나타냈으며 그정전용량의 측정값들은 정격치와 잘 일치하였다. 또한 PZT 세라믹에 대하여 D-E 히스테리시스 특성 및 ε-E 히스테리시스 특성을 측정한 결과 전형적인 히스테리시스 곡선을 얻을 수 있었으며, 그 잔류분극은 기 보고된 값과 거의 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] B. Jaffe et al, "Piezoelectric Ceramics," Academic Press, London and Newyork, (1971).

[2] H. Banno, "Recent Developments of Piezoelectric Ceramic Products and Composite of Synthetic Rubber and Piezoelectric Ceramic Paticles," Ferroelectrics, Vol. 50, pp. 3~12(1983).

[3] 이덕출, 강대하, "VDCN 공중합체의 선형유전특성," 대한전기학회, Vol. 38, No. 1, pp. 416~423, (1989).

[4] 이덕출, 강대하, "VCDN/VPr 공중합체의 비선형유전특성," 대한전기학회, Vol. 39, No.1, pp. 57~67, (1990).

[5] A. R. Blythe, "Electrical Properties of Polymers," Cambridge University Press, (1979).

[6] C. B. Sawyer and C. H. Tower, "Rochelle Salt as a dielectric," Phys. Rev. Vol. 35, pp. 269~273, (1930).

[7] T. Furukawa et al, "Hysterisis Phemomena in polyvinylidene fluoride under high electric field," J. appl. Phys. 51(2), pp. 1135~1141, (1980).

[8] Willis J. Tompkings and John G. Webter, "Interfacing sensors to IBM P.C," Prentice-Hall International editions.

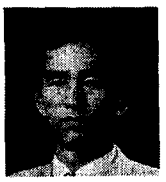
[9] 남징락, 엄상오, 강대하, "복소유전율 측정장치의 연구개발," 전기전자재료학회, Vol. 6, No. 6, pp. 554~564, (1993).

[10] T. Furukawa et al, "Dielectric Hysteresis and Nonlinearity in a 52/48 mol% copolymer of Vinylidene Fluoride and Trifluoroethylene," Macromolecules, Vol. 16, No. 12. pp. 1885~1890, (1983).

[11] 방태찬, 김종경, 강대하, "VDF/TrFE 공중합체의 히스테리시스 및 온도특성," 전기 전자재료학회, Vol. 10, No. 2, pp. 156~165, (1997).

[12] 이경희 역, "세라믹 유전체공학," 대광 문화사, PP. 410~411, 1994

◇著者紹介◇



강 대 하

1948년 12월 17일생. 1975년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1975년~1980년 한국전력 근무. 1980년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년~1988년 일본 이화학연구소 초청연구원. 1990년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 일본 아키타 대학 초청연구원. 현재 부경대학교 전기공학과 교수.