

선형 가변 차동 변압기를 이용한 강유전 세라믹의 전기장 인가에 따른 변형 측정

한형수¹, 안창원² 

¹ 울산대학교 첨단소재공학부

² 울산대학교 반도체학과 에너지 하베스트-스토리지 연구소

초록: 강유전체, 압전체 및 전왜 재료의 전기-기계적 반응의 기본 원리를 이해하기 위해 전기장 인가에 따른 변형 측정법은 널리 사용되고 있다. 특히, 전기 자극에 반응하는 압전 재료의 변형 특성을 이해하는 것은 압전 액추에이터, 음향 장치, 초음파 발생기와 같은 부품을 연구하고 개발하는 데 중요하다. 이 튜토리얼 논문에서는 다양한 산업 분야에서 널리 사용되는 변위 측정 장치인 선형 가변 차동 변환기(linear variable differential transducer, LVDT)의 구성 요소와 작동 원리를 소개한다. 또한 전기장을 인가하여 강유전체, 압전체 또는 전왜 재료의 변형 특성을 측정하기 위해 LVDT를 사용하는 실험 장치의 구성을 소개한다. 그리고 이 논문에는 LVDT 실험 장치를 통해 얻은 간단한 측정 결과와 분석이 포함되어 있어서 다양한 재료의 전기-기계 상호 작용 연구 방법에 대해 유용한 정보를 제공한다.

키워드: 선형 가변 차동 변압기, 전계 유도 변형, 강유전체, 압전체

Electric-Field-Induced Strain Measurement of Ferroelectric Ceramics Using a Linear Variable Differential Transducer

Hyoung-Su Han¹ and Chang Won Ahn²

¹ School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44776, Korea

² Energy Harvest-Storage Research Center (EHSRC), Department of Semiconductor Physics,
University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received January 11, 2024; Revised January 28, 2024; Accepted January 29, 2024)

Abstract: The measurement of strain under an electric field has been widely employed to comprehend the fundamental principles of electro-mechanical responses in ferroelectric, piezoelectric, and electrostrictive materials. In particular, understanding the strain properties of piezoelectric materials in response to electrical stimulation is crucial for researching and developing components such as piezoelectric actuators, acoustic devices, and ultrasonic generators. This tutorial paper introduces the components and operational principles of the linear variable differential transducer (LVDT), a widely used displacement measurement device in various industries. Additionally, we present the configuration of an experimental setup using LVDT to measure the strain characteristics of ferroelectric, piezoelectric, or electrostrictive materials under the application of an electric field. This paper includes simple measurement results and analyses obtained through the LVDT experimental setup, providing valuable information on research methods for the electro-mechanical interactions of various materials.

Keywords: Linear variable differential transducer, Electric-field-induced strain, Ferroelectrics, Piezoelectrics

✉ Chang Won Ahn; cwahn@ulsan.ac.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서문

- 강유전체(ferroelectrics)는 외부의 전기장이 없어도 자발 분극(spontaneous polarization, P_s)을 가지는 소재이며 외부 전기장에 의하여 분극의 방향이 바뀔 수 있는 물질이다 [1].
- 강유전체 소재는 자발 분극의 방향을 전기장을 인가하여 일정한 방향으로 정렬시켜 놓으면, 압전 현상이 발현되기 때문에 압전 소재로 활용 가능하다.
- 압전체(piezoelectrics)는 외부에서 소재에 힘을 가하면 전기신호가 발생하는 소재이다. 또는 역으로 전기신호를 인가하면 변형을 일으키는 소재이다. 전자를 압전 효과(또는 정압전 효과), 후자를 역압전 효과라 한다 [2].
- 압전 소재는 다양한 분야에서 응용 부품으로 사용되며, 여러 기술 및 제품에 적용되고 있다. 아래는 압전 소재를 사용한 몇 가지 응용 부품의 예시이다.
 - 압전 센서(piezoelectric sensor): 압전 센서는 압력, 가속도, 음향 등과 같은 물리적인 변화를 감지하는 데 사용된다. 이러한 센서는 소형이면서 높은 민감도를 가지고 있어 자동차 충돌 센서, 음향 기기, 의료 기기 등 다양한 분야에서 활용된다 [3].
 - 압전 발전기(piezoelectric generators): 압전 소재는 외부에서 가해지는 진동이나 압력을 통해 전기를 생성할 수 있다. 이러한 압전 소재를 이용한 압전 발전기는 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술에 적용되어 센서나 무선 센서 네트워크에서 작은 양의 에너지를 생산하는 데 사용된다 [4].
 - 압전 액추에이터(piezoelectric actuators): 압전 소재는 전압을 가하면 그 크기에 따라 소재가 변형되는 특성이 있다. 이를 이용하여 압전 액추에이터는 나노미터 크기의 정밀한 움직임을 만들어내어, 렌즈 이동, 밸브 조절, 초미세 위치 제어 등 다양한 기계적인 동작에 사용된다 [5].
 - 음향 장치(piezoelectric buzzers, speaker): 압전 소재를 사용한 부저는 소형이면서 고효율의 음향을 발생시킬 수 있어 전자 제품에서 경보음, 알림음 등에 사용된다. 압전 박막은 소형 전자 기기의 음향 장치로 MEMS 스피커용 소재로 사용한다 [6].
 - 초음파 변환기(ultrasonic transducers): 압전 소재는 초음파를 발생시키거나 감지하는 데 사용할 수 있으며, 초음파 세정기, 초음파 이미징 장치 등에 활용되고 있다 [7].
- 압전 액추에이터, 음향 장치, 초음파 발생기 등의 역압전 효과를 활용하는 소재에 적용되는 압전 소재를 연구

하기 위해서는 전기신호를 인가하였을 때 압전 소재의 변형 특성에 대해서 측정하고 분석할 필요가 있다 [8,9].

- 본 튜토리얼 논문에서는 선형 가변 차동 변압기(linear variable differential transducer, LVDT)를 이용하여 전기장을 인가할 때 강유전체, 압전체 또는 전액 재료의 변형 특성을 측정할 수 있는 실험 장치의 구성법과 이를 활용한 간단한 측정결과 및 분석 결과를 소개한다.

2. 선형 가변 차동 변압기(linear variable differential transducer, LVDT)의 구조 및 동작 원리

- 그림 1에 일반적인 LVDT의 내부 구조를 나타내었다 [10,11].
- LVDT 센서 내부에는 일반적인 변압기 구조와 유사하게 1차 코일(primary coil)과 2차 코일(secondary coil)로 구성되어 있고 2차 코일은 두 부분으로 나누어져 서로 반대 방향으로 감겨 있다.
- 그림 1에서 2차 코일의 No.1 부분과 No.2는 서로 반대 방향으로 감겨 있다.
- 1차 코일과 2차 코일 내부에 움직일 수 있는 철심(core)이 위치하며, 이 철심은 변위를 측정하기 위해 시료 표면에 접촉되어 있는 팁(tip)과 샤프트(shaft)로 연결되어 있다.
- 철심은 1차 코일에서 발생한 자기력선을 2차 코일에 지나가도록 하는 역할을 한다.

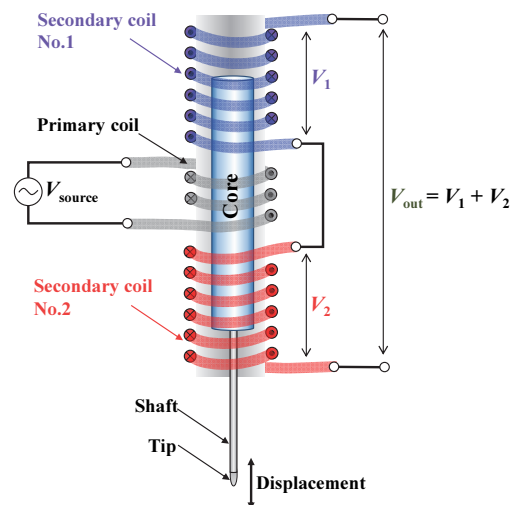


Fig. 1. Structure illustration of linear variable differential transducer (LVDT).

- 1차 코일에 교류를 인가하면 시간에 따라 사인 형태로 변화하는 전류에 의해 코일 내부에 변화하는 자기장이 형성되고, 형성된 자기장에 의한 자기력선은 철심을 통해 2차 코일에 전달된다.
- 변화하는 자기력선에 의해 2차 코일에 유도기전력이 발생한다. 이때 2차 코일의 No.1 부분과 No.2는 서로 반대 방향으로 감겨 있기 때문에 각각 코일의 양단의 전위차 V_1 과 V_2 는 부호가 서로 반대이다.
- LVDT의 출력 신호는 V_1 과 V_2 의 합으로 나타낸다.
- 철심의 위치가 그림 2(a)와 같이 중앙에 위치해 있다면 V_1 과 V_2 는 크기는 같고 부호가 반대이기 때문에 서로 상쇄되어서 출력 신호는 0이 된다 [그림 2(d)에서 변위가 0일 때 $V_{rms-out}$ 값].
- 철심의 위치가 그림 2(b)와 같이 2차 코일의 No.1 부분으로 치우쳐 있다면 V_1 의 전위차가 증가하고 V_2 는 감소한다. 그러므로 철심의 변위가 2차 코일의 No.1 방향으로 증가하면 출력 V_{rms} 값은 증가하고 입력 신호와 출력 신호의 위상차는 0이 [그림 2(e)에서 변위가 양(+)일 때] 된다.
- 철심의 위치가 그림 2(c)와 같이 2차 코일의 No.2 부분으로 치우쳐 있다면 V_2 의 전위차가 증가하고 V_1 은 감소

한다. 그러므로 철심의 변위가 2차 코일의 No.2 방향으로 증가하면 출력 V_{rms} 값은 증가하고 입력 신호와 출력 신호의 위상차는 180° 차이 [그림 2(e)에서 변위가 음(-)일 때] 난다.

- 그러므로 출력 V_{rms} 값의 크기에 따라서 변위의 크기를 알 수 있고, 입력 신호와 출력 신호의 위상차로 변위의 부호를 구분할 수 있다.
- LVDT 센서의 장점: LVDT는 변위에 따른 출력이 선형적으로 변하기 때문에 정밀한 변위 측정이 가능하다. 또한 넓은 온도 범위에서 작동하고 습기와 먼지에 민감하지 않기 때문에 다양한 분야에 적용할 수 있다. LVDT는 움직이는 부분들이 서로 닿지 않거나 마찰이 매우 적어서 긴 수명이 필요한 극단적인 환경에서 선호되는 센서이다.
- LVDT 센서의 단점: LVDT 센서는 상대적으로 복잡한 구조를 가지고 있고, 크기가 크기 때문에 작은 공간에 적용하기 어려울 수 있다. 그리고 측정 범위가 코일의 길이에 의해 그 한계가 정해지기 때문에 측정 길이에 제한이 있다. 경우에 따라서 변위 측정 대상물과 물리적으로 접촉해야 한다는 것이 단점으로 작용할 수 있다.

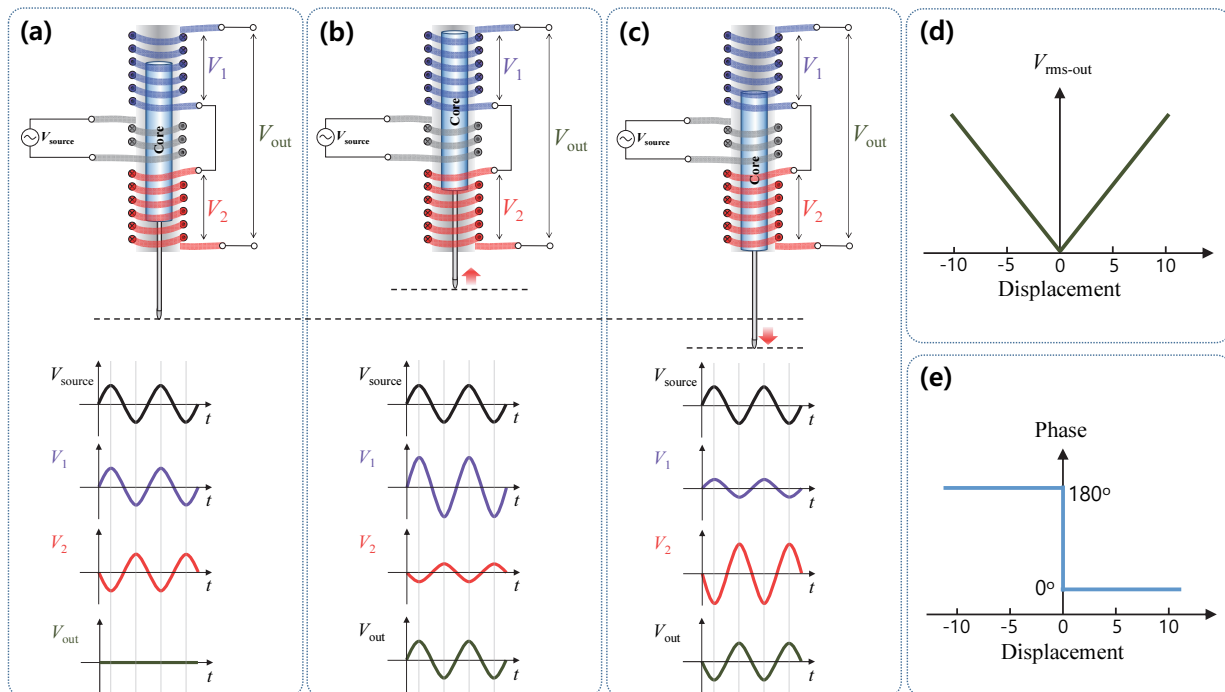


Fig. 2. Schematic diagram of the operating principle of an LVDT sensor: schematic diagram of the movement of the core in the LVDT and the signals of V_{source} , V_1 , V_2 , and V_{out} when the displacement is (a) 0, (b) positive, and (c) negative, (d) change in output V_{rms} value and (e) phase difference between V_{source} and V_{out} signals according to displacement.

3. LVDT를 이용한 전기장 인가에 따른 강유전체의 변형 측정 장치의 구성

- 그림 3은 전기장 인가에 따른 강유전 또는 압전 소재의 변형 측정에 관한 개략적인 장치도이다.
- 전기장 인가에 따른 강유전체의 변형 측정을 위한 인가 신호를 생성하고 측정된 변형 신호를 저장하는 장치의 종류에 따라서 그림 3(a) 또는 (b)와 같이 측정 장비를 구성할 수 있다. 또한 프로그램 가능 여부에 따라서 DAQ (data acquisition) 보드 등을 이용하여 구성할 수도 있다.
- 그림 3(a)는 신호발생기(function generator), 고전압 증폭기, 시그널 컨디셔너(signal conditioner), 오실로스코프로 이루어진 측정 장비의 개략도이다.
- 신호발생기에서 측정하고자 하는 목적에 따라서 신호를 생성하여 고전압 증폭기에 입력한다.
- 기본적으로 강유전체 세라믹의 분극 반전 특성을 측정하려면 kV 단위의 고전압이 필요하기 때문에 일반적으로 $\times 1,000$ 성능의 고전압 증폭기가 필요하다.
- 고전압 증폭기의 모니터 단자에서 출력되는 신호는 오실로스코프의 Ch1에 입력한다. 이 신호를 이용하여 시료에 인가된 전기장을 계산할 수 있다. 일반적으로 많이 사용하고 있는 TREC사의 고전압 증폭기의 경우 고전압 출력 신호의 $1/1,000$ 로 환산하여 모니터 단자로 출력한다. 이 경우, 시료에 인가된 전압은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{H.V.} = V_{Ch1} \times 1,000 \quad (1)$$

여기서 $V_{H.V.}$ 는 시료에 인가된 전압, V_{Ch1} 는 오실로스코프의 Ch1로 받은 고전압 증폭기의 모니터 전압을 의미한다.

- 시료에 인가되는 전기장은 식 (2)와 같이 인가된 전압에 시료의 두께로 나누어서 계산하면 된다.

$$E = V_{H.V.} / t \quad (2)$$

여기서 E 는 시료에 인가되는 전기장의 크기, t 는 시료의 두께를 의미한다.

- 고전압을 인가할 때 시료의 상-하부 전극 사이에서 일어날 수 있는 아크 방전을 방지하기 위하여 실리콘 오일과 같은 절연유를 담을 수 있는 수조에 하부전극에 접촉할 수 있는 금속팁을 고정하여 고전압 증폭기의 출력 단자에 연결한다.
- 고전압 인가 시 LVDT 센서를 보호하기 위하여 금속팁과 LVDT 샤프트 사이에 절연 지지대를 설치한다. 금속팁은 얇은 전선을 이용하여 고전압 증폭기의 고전압 출력 단자(H.V.)와 연결한다. 시료의 변형에 따라서 움직여야 하므로 유연하고 얇은 전선을 사용하는 것이 좋다. 고전압이지만 전류가 낮기 때문에 얇은 전선을 사용하여도 무방하다.
- LVDT를 이용하여 측정된 변위 값을 데이터로 저장하기 위해서 아날로그 신호 또는 디지털 신호로 변환해 주기 위한 시그널 컨디셔너 또는 인디케이터(indicator)가 필요하다. 그림 3(a)의 실험 구성에서는 오실로스코

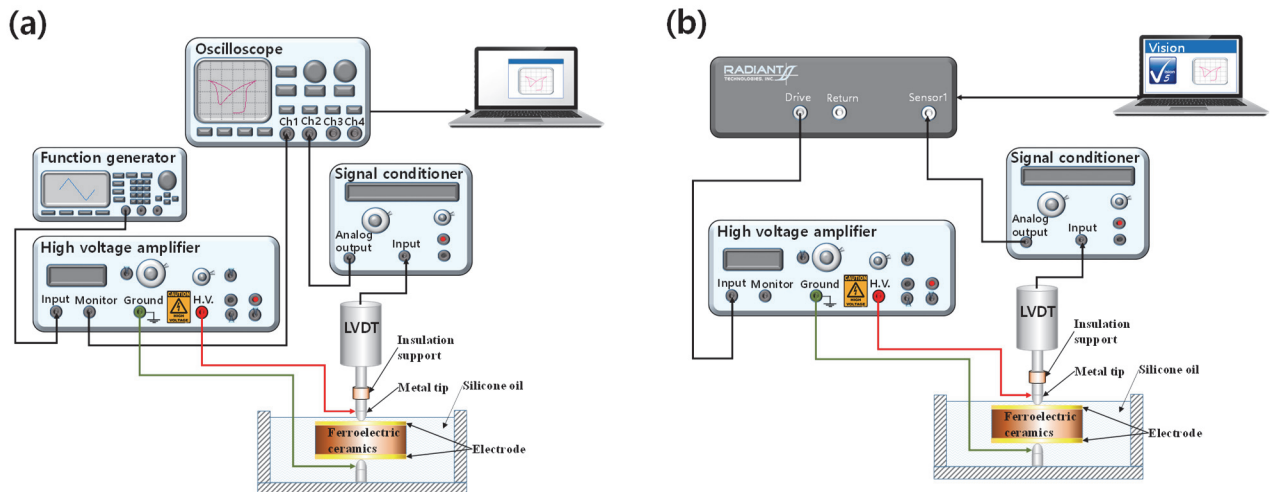


Fig. 3. Schematic figure of the experimental setup for electric-field-induced strain measurement of ferroelectric ceramics using a LVDT: (a) a system consisting of a function generator, high voltage amplifier, LVDT, signal conditioner and oscilloscope and (b) a system consisting of RADIANT's ferroelectric tester, high voltage amplifier, LVDT, and signal conditioner.

프를 이용해서 변위 값에 해당하는 아날로그 신호를 획득하여 저장하는 시스템이므로 LVDT를 이용하여 측정된 변위 값을 전압 신호로 변환해 주는 시그널 컨디셔너가 필요하다.

- 여기서 시그널 컨디셔너는 LVDT의 1차 코일에 구동신호를 인가하고 2차 코일에서 발생하는 출력 신호를 받아서 변위값을 계산하여 디스플레이에 표시해 주거나 아날로그 신호로 변환하여 출력하는 역할을 한다. 시그널 컨디셔너 또는 인디케이터는 LVDT 제조사에서 사용하는 LVDT 센서와 적합한 제품을 같이 구매해서 설치하는 것이 좋다.
- 시그널 컨디셔너의 아날로그 출력 단자를 오실로스코프 Ch2에 연결하여 변위값을 전압 신호로 기록할 수 있다. 예를 들면, 시그널 컨디셔너에 측정 범위[RANGE (DIV)]가 5 μm 로 설정되어 있고, 아날로그 신호 출력 비율이 측정 범위[RANGE (DIV)]당 1 V로 출력되는 장치일 경우, LVDT를 이용하여 측정된 변위값은 아날로그 출력전압으로부터 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Displacement} = V_{\text{Ch2}} \times (5 \times 10^{-6} \text{ m}) \quad (3)$$

여기서 V_{Ch2} 는 오실로스코프를 이용하여 LVDT의 시그널 컨디셔너로부터 받은 아날로그 신호 출력 신호의 전압 값이다. 아날로그 출력 신호의 비율은 기기마다 다르기 때문에 기기의 사용설명서에 명시되어 있는 비율을 이용하여야 한다.

- 변형률(S)은 식 (4)와 같이 원래 시료의 두께와 비교하여 전기장을 인가하였을 때 시료의 변형된 비율을 백분율로 나타낸다. 여기서 t 는 전기장을 인가하지 않았을 때 시료의 두께이고 displacement는 전기장을 인가하였을 때 시료의 변형 때문에 발생한 변위값을 LVDT로 측정된 값이다 [식 (3)].

$$S = \text{displacement} / t \times 100 (\%) \quad (4)$$

- 그림 3(b)는 RADIANT사의 강유전테스트 기기를 이용하여 설치한 측정 장치의 개략도이다.
- RADIANT사의 강유전테스트 기기는 전용 소프트웨어(vision)를 이용하여 여러 가지 인가 신호(bipolar loop, unipolar loop, double bipolar loop double unipolar loop, fatigue test 등)를 쉽게 설정할 수 있고, 사용자가 임의의 파형을 생성할 수 있으며, 간단하게 측정 프로그램을 작성할 수 있기 때문에 다양한 측정 조건으로 배치 프로그램을 작성하여 일괄 측정이 가

능하다.

- RADIANT사의 강유전테스트 기기의 drive 단자를 고전압 증폭기의 입력단자에 연결하고, LVDT 시그널 컨디셔너의 아날로그 출력 단자를 RADIANT사의 강유전테스트 기기의 sensor 단자에 연결하여 강유전체의 전기장 인가에 따른 변형 측정이 가능하다.

4. 강유전체의 전기장 인가에 따른 변형 측정의 예

- 그림 4는 LVDT를 이용하여 강유전 세라믹의 전기장 인가에 따른 변형을 측정한 예시이다.
- 분극(poling)하지 않은 $\text{Bi}_{1/2}(\text{Na}_{0.82}\text{K}_{0.18})_{1/2}\text{TiO}_3$ (BNKT18) 세라믹스에 대하여 양극(bipolar) 전기장을 인가하였을 때, 얻어지는 초기 변형률 곡선(virgin strain curve) 또는 분극 변형률 곡선(poling strain curve)을 그림 4(c)에 나타내었다.
- 인가한 전기장 변화에 대한 이해를 돕기 위하여 시간 변화에 따른 전기장 변화를 그림 4(b)에 나타내었다.
- 일반적인 강유전체는 양극의 전기장을 인가하게 되면 그림 4(c)와 같이 나비 모양의 변형률 특성을 나타낸다.
- 이는 인가하는 전기장의 세기 및 극성의 변화에 따라 강유전체의 분극 전환(polarization switching), 분역 벽(domain wall)의 이동 및 확장, 분역 전환(domain switching) 등의 현상에 의한 결과이다.
- 이러한 분극 상태 변화 및 변형률 특성을 단계별로 살펴보면,
 - ① 강유전 세라믹을 제조한 후 전기장을 인가하지 않은 상태에서는 자발 분극(spontaneous polarization)이 무작위 방향으로 배열하게 되어 전체 분극 값이 '0'인 상태이다.
 - ② 양(+)의 방향으로 항전계(coeceive field, E_c) 이상의 강한 전기장이 인가되면, 무작위 방향으로 배열되어 있던 분극들이 전기장 인가 방향으로 전환 및 분역을 형성하기 시작하며, 그 이상의 전계에서는 분극 포화 상태에 이르게 되는데, 이때 최대 변형률(maximum strain, S_{max})을 얻을 수 있다. 이러한 거대한 변형 특성은 분극 변형률 곡선(poling strain curve) 또는 초기 변형률 곡선(virgin strain curve)이라 부르며, 분극하기 전 상태의 시료에서만 관찰할 수 있다.
 - ③ 이후 인가 전기장 세기를 줄이면 확장되어 있던 분역이 점차 분해되면서 변형률 특성은 선형적으로 감소하게 되며, 인가 전기장이 '0'이 되면 전기장 방

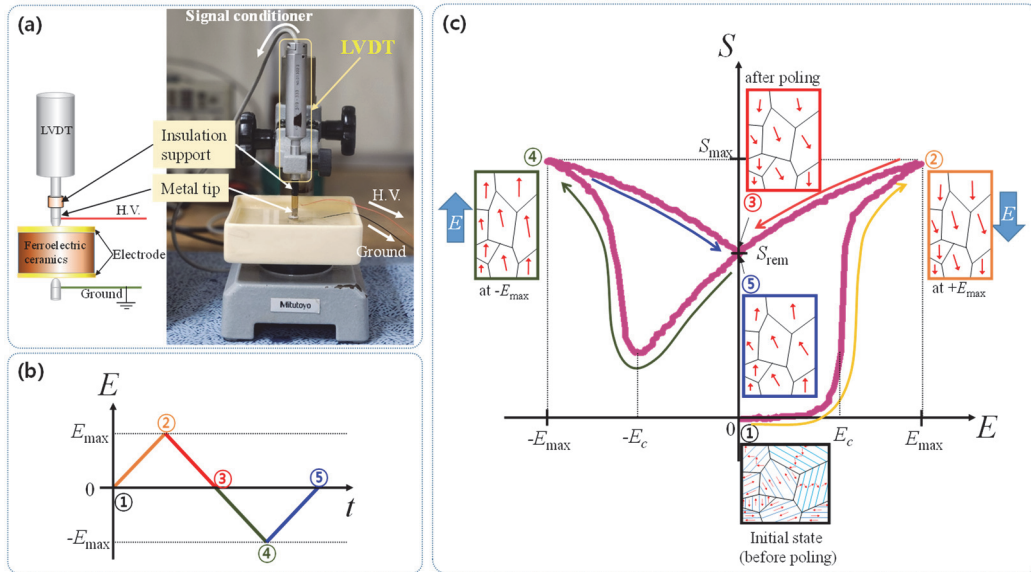


Fig. 4. Example of measurement of field-induced-strain characteristics of ferroelectric ceramics using LVDT: (a) schematic diagram and photo of the measurement system, (b) input signal for measuring field-induced-strain characteristics of ferroelectric ceramics, and (c) virgin strain curve of $\text{Bi}_{1/2}(\text{Na}_{0.82}\text{K}_{0.18})_{1/2}\text{TiO}_3$ (BNKT18) ceramics and schematic diagram of ferroelectric domain state changes.

향으로 정렬된 분역들이 원래 (무작위) 상태로 되돌아가지 않고 잔류 분극(remanent polarization, P_r)이 남아 있게 되는데, 이로 인해서 변형률도 '0'이 아닌 잔류 변형률(remanent strain, S_{rem})로 나타나게 된다.

- ④ 음(-)의 방향으로 전기장을 인가하게 되면 전기장 인가 방향으로 분극이 전환되기 시작하여 변형률이 점점 작아지다가 분극 값이 '0'이 되는 항전계 ($-E_c$)에 도달하게 되면, 변형률 곡선의 기울기가 급격하게 반대 방향으로 전환되기 시작한다. 점차 인가 전기장 세기가 증가함에 따라 분극 전환과 분역 형성 및 확대에 변형률 특성은 급격하게 커지게 되고, 음의 방향(-)으로 전기장을 지속적으로 증가시키면 분극 포화 상태에 이르게 되는데, 이때 다시 최대 변형률(S_{max})에 도달하게 된다.
- ⑤ 이후 인가 전기장 세기를 줄이면 앞서 설명한 ③ 단계와 동일한 현상이 나타나게 된다.

5. 강유전체의 전기장 인가에 따른 변형률 측정을 위한 LVDT 센서 사양

- LVDT는 적용하는 분야에 따라서 다양한 사양의 제품이 사용되고 있다. 일반적인 LVDT의 최대 측정 범위는 $\pm 0.5 \sim 50 \text{ mm}$ 정도이고 변위의 분해능은 $0.005 \sim 10 \mu\text{m}$

정도이다.

- 그림 4(c)에 보여준 변형률 곡선 측정에 사용한 LVDT의 사양은 최대 측정 범위가 $\pm 1 \text{ mm}$ 이고, 분해능이 $0.1 \mu\text{m}$ 이다. 이 LVDT를 이용하여 $0.3 \sim 1 \text{ mm}$ 두께의 강유전체 세라믹의 전기장 인가에 따른 변형 특성을 무리 없이 측정할 수 있다.
- LVDT를 이용하여 강유전체 세라믹의 전기장 인가에 따른 변형 특성을 측정할 때 일반적으로 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 의 주파수 범위의 신호를 이용하여 측정한다. LVDT 센서 자체의 측정 한계 주파수는 수 kHz 이상일 수 있지만, LVDT 센서를 이용하여 변위를 측정할 때 LVDT 팁이 시료 표면에 접촉되어 있는 것이 아니라 대략 1 N 정도의 스프링 힘을 이용하여 단순히 접촉해 있는 상황이기 때문에 고 주파수 진동인 경우 정확한 변화를 감지하기 힘들 수 있다.
- 수십 Hz 이상의 진동은 레이저 간섭계, 레이저 도플러 진동계 등의 기기를 이용하여 측정하는 것이 적합하다.

6. 맺음글

- 본 튜토리얼 논문에서는 선형 가변 차동 변압기(linear variable differential transducer, LVDT)를 이용하여 전기장을 인가할 때 강유전체, 압전체 또는 전매 재료의 변형 특성을 측정할 수 있는 실험 장치의 구성법

을 소개하였다. 또한 분극(poling)하지 않은 BNKT18 세라믹스에 대하여 양극(bipolar) 전기장을 인가하였을 때, 얻어지는 초기 변형을 곡선을 예시로 소개하였고 각 부분의 대략적인 강유전 도메인의 상태에 대해서 간략하게 소개하였다. LVDT를 이용한 변형 특성 측정 장치는 강유전체, 압전체, 전왜 재료의 전기장 인가에 따른 변형 특성뿐만 아니라 기능성 소재들의 외부 자극(전기장, 자기장, 빛 등) 또는 주변 환경(온도, 습도, 압력 등)의 영향으로 변형되는 특성을 측정하는 데 도움이 될 수 있을 것이라 기대한다.

ORCID

Chang Won Ahn

<https://orcid.org/0000-0003-0613-9823>

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program (RS-2023-00245221) and Priority Research Centers Program (NRF-2019R1A6A1A11053838) through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education.

REFERENCES

- [1] L. W. Martin and A. M. Rappe, *Nat. Rev. Mater.*, **2**, 16087 (2017). doi: <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.87>
- [2] H.-P. Kim, W.-S. Kang, C.-H. Hong, G.-J. Lee, G. Choi, J. Ryu, and W. Jo, *Advanced Ceramics for Energy Conversion and Storage* (eds. O. Guillon) (Elsevier, Netherlands, 2020), p. 157.
- [3] P. Regtien and E. Dertien, *Sensors for Mechatronics, 2nd Edition* (Elsevier, Netherlands, 2018), p. 245.
- [4] N. Sezer and M. Koç, *Nano Energy*, **80**, 105567 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>
- [5] K. Uchino, *Acta Mater.*, **46**, 3745 (1998). doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00102-5)
- [6] M. Garud and R. Pratap, *J. Micromech. Microeng.*, **34**, 013001 (2024). doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/acfe86>
- [7] J. Jung, W. Lee, W. Kang, E. Shin, J. Ryu, and H. Choi, *J. Micromech. Microeng.*, **27**, 113001 (2017). doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aa851b>
- [8] J. S. Choi, T. H. Kim, and C. W. Ahn, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 431 (2022). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.5.2>
- [9] A. Ullah, R. A. Malik, A. Ullah, D. S. Lee, S. J. Jeong, J. S. Lee, I. W. Kim, and C. W. Ahn, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **34**, 29 (2014). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.014>
- [10] K. V. Santhosh and B. K. Roy, *Procedia Technol.*, **4**, 854 (2012). doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.140>
- [11] T. Meydan and G. W. Healey, *Sens. Actuators, A*, **32**, 582 (1992). doi: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80047-7](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80047-7)