Composites Research

Vol. 39, No. 5, 586-592 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.586
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

비가시성 정보 기록을 위한 정전하 삽입 기반 전하 패터닝 공정 개발

유선민* · 라윤상**† · 최동휘*†

Development of Static Charge Patterning Process with Electrostatic Charge Injection for Invisible Information Recording

Seonmin Yu*, Yoonsang Ra**†, Dongwhi Choi*†

ABSTRACT: Technologies that record information by patterning the surface of a material, such as barcodes, have become ubiquitous tools for conveying and identifying data. However, next-generation industries demand more advanced strategies in terms of applicability, security, and functionality. Herein, we propose a Static Charge Patterning (SCP) process capable of forming the triboelectric barcode (Tribar-code), an invisible information carrier. The SCP process records information by selectively injecting electrostatic charges onto the surface of a polymer film via corona discharge, thereby forming charge patterns. The resulting Tribar-code is indistinguishable to the naked eye and involves neither surface damage nor structural modification of the material. When formed on a transparent polymer film, the Tribar-code exhibits a visible-light transmittance of 95.05%, and a significant surface potential difference of 1.45 kV between the static charge patterns and the pristine parts is maintained for more than seven days. Furthermore, the stored information can be erased and rewritten on demand through a simple re-patterning procedure. The Tribar-code can be read out through a self-powered mechanism based on the free-standing sliding mode of a triboelectric nanogenerator. A code reader converts the width of each static charge pattern into the peak-to-peak time interval of the output voltage, enabling 250 distinct pattern combinations from the Tribar-code. As a proof-of-concept demonstration, a Tribar-code-based personal identification system employing a convolutional neural network achieved an accuracy of 99.7%, confirming its applicability in future industries.

초 록: 바코드와 같이 소재의 표면에 정보를 패턴화하여 기록하는 기술은 데이터를 전달 및 식별하는 보편적인 도구가 되고 있음. 그러나 차세대 산업에서는 활용성, 보안, 기능적 측면에서 더 진보된 전략이 요구됨. 이에 본 연구에서는 비가시성 정보 매체인 triboelectric barcode (Tribar-code)를 형성할 수 있는 Static Charge Patterning (SCP) 공정을 제안하는 바임. SCP 공정은 코로나 방전을 기반으로 폴리머 필름의 표면에 선택적으로 정전하를 삽입하여 패턴을 형성함으로써 정보를 기록하는 공정임. 이렇게 형성된 Tribar-code는 육안으로 구별할 수 없으며, 소재의 표면 손상이나 구조 변화를 수반하지 않음. Tribar-code는 투명한 폴리머 필름위에 형성되었을 경우 95.05%의 가시광 투과율을 보이며, 정전하 패턴 부분과 미처리 부분 사이에 1.45 kV의 유의미한 표면 전위차가 7일 이상 유지됨을 확인하였음. 또한 저장된 정보는 간단한 재패터닝 절차를 통해 사용자 요구에 따라 삭제 및 재기록 될 수 있음. Tribar-code는 free-standing sliding 모드의 triboelectric nanogenerator 원리를 통해 자가발전 메커니즘으로 읽어낼 수 있음. 코드 리더기가 정전하 패턴의 폭을 출력 전압의 peak-to-peak 시간간격으로 변환하며, 이를 통해 Tribar-code로부터 250가지의 서로 다른 패턴 조합을 제공함. 개념 시연을 위해 구축한 Tribar-code 기반 개인 식별 시스템은 합성곱 신경망을 적용하여 99.7%의 정확도를 보였으며, 미래 산업에서의 활용성을 확인할 수 있었음.

Key Words: 비가시성 정보 매체(Invisible information carrier), 정전하 삽입 패터닝(Electrostatic charge injection patterning), 전기적 표면 개질(Electrical surface modification), 자가발전형 식별(Self-powered identification)

Received 2 October 2026, received in revised form 11 October 2026, accepted 21 October 2026

*Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University
**School of Mechanical Engineering, Chonnam National University
†Corresponding author (yra87@jnu.ac.kr (Y. Ra), dongwhi.choi@khu.ac.kr (D. Choi))

1. 서 론

현대 산업과 일상생활에서 바코드와 QR (Quick Response) 코드 같은 패턴 기반 식별 기술은 정보를 식별하고 구별하기 위한 필수적인 데이터 표현 수단으로 널리 사용되고 있다[1,2]. 특히 바코드는 단순한 패턴 조합으로 다양한 정보를 효율적으로 표현할 수 있고, 제작과 인식이 간편하여 보안, 제조, 물류, 상거래 등 여러 분야에서 폭넓게 채택되었다. 그러나 기존 바코드는 광학 원리에 의존한다. 즉, 흰 배경 위에 배열된 검은 막대 패턴에 레이저 빛을 조사하고, 반사광 세기의 차이를 이진 신호로 읽어 정보를 해독한다. 그 결과 인코딩된 패턴이 외부 환경에 그대로 노출되어 위조와 복제에 본질적으로 취약하다. 또한 기존 바코드는 광학적으로 구별되는 패턴을 물리적으로 형성하는 방식이므로, 식별 코드가 제작 단계에서 고정된다. 높은 보안이 전 세계적으로 가장 중요한 관심사가 되면서, 이러한 위조와 복제에 취약하고 경직된 구조를 피할 수 없는 물리적 제약은 정교한 역설계 시도를 막기 위한 동적이고 비가시적인 암호화 전략에 대한 요구와 점점 더 맞지 않게 되었다[3,4].

이러한 기술적 문제는 산업 현장과 일상 환경 모두에서 보안의 중요성이 부각된 4차 산업혁명(Industry 4.0) 시대에 특히 중요하다. 전자, 광학, 컴퓨팅 기술이 발전하면서 기존의 정적인 식별 방식은 점차 한계를 드러냈고, 동적으로 생성되며 시간에 따라 변하는 보안 코드에 대한 수요가 증가하고 있다. 대표적인 예로 일회용 비밀번호(One Time Password, OTP) 방식이 있으며, 이는 수명이 짧고 필요할 때 쉽게 재설정할 수 있는 인증 코드를 생성하여 보안을 강화한다. 나아가 이러한 첨단 식별 시스템이 점점 복잡해지는 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 네트워크에 통합됨에 따라, 실제 적용은 안정적인 작동을 위한 에너지 지속 가능성 문제와 밀접하게 연결된다. IoT 기술의 적용 범위가 계속 확대되면서 산업 및 일상 환경에 연결된 엣지 디바이스의 수가 급격히 증가하였고, 이에 따라 개별 구성 요소에 대한 전력 공급 문제가 중요한 기술적 과제로 대두되었다. 특히 분산된 모든 요소에 외부 전력을 지속적으로 공급하는 것은 시스템 확장성과 유지보수 측면에서 근본적인 한계를 갖는다. 따라서 외부 전원 없이 작동할 수 있는 자가발전 기술이 차세대 IoT 시스템의 핵심 대안으로 큰 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 비가시성 정보 매체인 triboelectric barcode (Tribar-code)를 형성할 수 있는 Static Charge Patterning (SCP) 공정을 제안하고, 이를 자가발전형 식별 시스템으로 구현한다. Tribar-code는 강한 전기장 아래에서 주변 공기를 이온화하여 국부적인 정전하 삽입을 가능하게 하는 코로나 방전 기반 SCP 공정으로 제작된다[5]. 정전하 패턴과 미처리 부분 사이의 전기적 대비, 그리고 각 정전하 패턴의 조절 가능한 폭이 다단계 코드의 기반이 된다. 정전하 패턴은 어떠한 소재 계면이나 구조적 손상도 만들지 않으므로, Tribar-code 전체가 광학적으로 투명하고 육안으로 인지할 수 없으며 소재 고유의 투명성을 유지한다. 또한 정보가 물리적 구조가 아닌 표면 전하 패턴으로 기록되기 때문에, Tribar-code는 고유한 동적 재구성성을 제공한다. 이를 통해 기록된 패턴은 전하 제거와 재삽입 과정을 연속적으로 거쳐 가역적으로, 사용자 요구에 따라 재구성될 수 있다. Tribar-code는 마찰전기 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG) 기반 자가발전 메커니즘을 통해 코드 리더기를 단순히 슬라이딩하는 동작만으로 디코딩될 수 있다. 자가발전 기술의 하나인 TENG는 서로 다른 두 소재의 접촉과 분리에서 발생하는 마찰전기 효과와 전하 유도를 바탕으로 작동한다[6,7]. TENG는 순차적인 접촉과 분리라는 단순한 기계적 자극만으로 전기 신호를 직접 생성할 수 있어, 외부 전원 없이 신호를 발생시킬 수 있다[8,9]. 이러한 단순한 작동 메커니즘과 폭넓은 적용 가능 소재 덕분에 TENG는 차세대 자가발전 기술의 구성 요소로 연구되어 왔다[10]. 제안하는 Tribar-code는 간편한 제작, 단순한 메커니즘, 다양한 가용 소재, 높은 보안 특성, 넓은 적용 분야 덕분에 학술적 의의뿐 아니라 산업적 잠재력도 지닌다. 이에 본 논문에서는 기본 작동 원리부터 실제 응용 시연에 이르는 다양한 체계적 연구 결과를 제시한다. 이에, 제안하는 SCP 공정 기반 Tribar-code는 스마트 보안 시스템, 스마트 팩토리, 스마트 물류를 포함한 폭넓은 산업 응용에서 유연한 식별 전략으로 활용될 것으로 기대된다. 아울러 소형 개인용 전자기기, IoT 단말기, 저전력 기계 시스템, 극한 환경에서 작동하는 로봇 등으로의 확장성도 크다.

2. 제작 및 실험방법

2.1 재료

Tribar-code는 기판, 전극, 접촉층으로 구성되며, 각각 폴리메틸메타크릴레이트(Polymethyl Methacrylate, PMMA), 인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO), 불화 에틸렌 프로필렌(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP)으로 제작되었다. 코드 리더기는 전극과 상대층으로 구성되며, 각각 알루미늄(Aluminum, Al)과 FEP로 제작되었다. 접촉층으로는 두께 50 μm의 FEP 필름을 사용하였다. SCP 공정에 사용한 마스크는 PMMA 기판과 Al 층으로 구성하였다. Tribar-code의 패턴을 재구성하기 위해, 이소프로필 알코올(Isopropyl Alcohol, IPA)을 적신 상용 와이퍼(WypAll L25 Air Pocket, Kimberly-Clark)로 접촉층 표면을 닦아내는 패턴 제거 공정을 수행하였다.

2.2 Tribar-code 제작

전기적 특성의 기초 분석을 위해, Tribar-code는 120 mm × 50 mm 크기의 FEP 필름으로 제작하였다. SCP 공정으로

Tribar-code의 정전하 패턴을 형성할 때, 고전압 전원 공급기(Model ESN-HV30BN)를 이용하여 일반적인 코로나 방전 장치를 구성하였다. 타겟필름은 하부 컬렉터 역할을 하는 접지된 Al 전극 위에 배치하였다. 균일한 전하 삽입을 위해 니들 전극과 타겟필름 사이에 망눈 크기 7 × 12 mm, 두께 0.8 mm의 알루미늄 메쉬를 그리드로 사용하였다. 그리드는 타겟필름 표면으로부터 수직 거리 30 mm에 배치하고 접지하였다. 코로나 방전을 일으키기 위해 니들 전극에 -16.8 kV의 고전압을 1분간 인가하였다. 이를 통해 타겟필름 표면에 안정적이고 균일하게 정전하를 삽입하여, 정전하 패턴에 -3 kV의 표면 전위를 형성하였다.

2.3 표면 특성 분석

Tribar-code 필름의 광투과율은 적분구(ISV-722, 60 nm)가 장착된 UV-vis 분광광도계(V-650, Jasco, Easton, MD, USA)로 측정하였다. 측정은 300~800 nm 파장 범위에서 5 nm 간격으로 수행하였으며, 측정 전에 대기(ambient air)를 기준선으로 사용하여 장비를 보정하였다. 국부적인 전하 밀도를 정량화하기 위해, 비접촉식 정전 전압계(Trek 347, Trek Inc, Lockport, NY, USA)를 이용하여 균일하게 배치한 여러 지점에서 표면 전위를 측정하였다. 프로브와 표면 사이의 간격은 3 mm로 일정하게 유지하였으며, 프로브의 x-y 스캔 이동은 통합 소프트웨어로 정밀하게 자동 제어하였다.

2.4 전기적 출력 측정

Tribar-code의 전기적 출력 특성을 조사하기 위해, AC 서보 모터(HG-KR13, Mitsubishi Electric, Japan)를 선형 왕복 운동 장치로 사용하여 스캔 과정에서 정밀하고 일정한 직선 운동을 제공하였다. 정확한 데이터 수집과 분석을 위해, 발생한 전기 신호는 데이터 수집 장치(DAQ; cDAQ-9174, National Instruments Corp., USA)로 측정 및 수집하였다. 전기적 출력과 관련된 모든 실험은 21 ± 0.5 ℃, 상대습도 25% 조건에서 수행하였다.

3. 분석 및 고찰

3.1 SCP 공정

본 연구에서는 비가시성 정보 매체인 Tribar-code를 제작할 수 있는 SCP 공정을 제안한다. 이 공정은 코로나 방전을 기반으로 하며, Fig. 1(a)에 나타낸 시스템을 이용하여 수행된다. SCP 공정에서는 전압 공급기를 통해 핀 전극과 컬렉터 접지 사이에 높은 전기장을 인가하여 공기 분자를 이온화하고 전하를 이동시킨다. 그리드 접지는 타겟필름 표면에 정전하가 균일하게 삽입되도록 돕는다. 본 연구에서는 높은 광학적 투명성을 갖추면서, 일렉트렛 관련 선행연구에서 PET, PC, PP 등 다른 고분자 재료보다 우수한 전하 유지 특성이 보고된 FEP를 타겟필름으로 사용하였다[11]. FEP

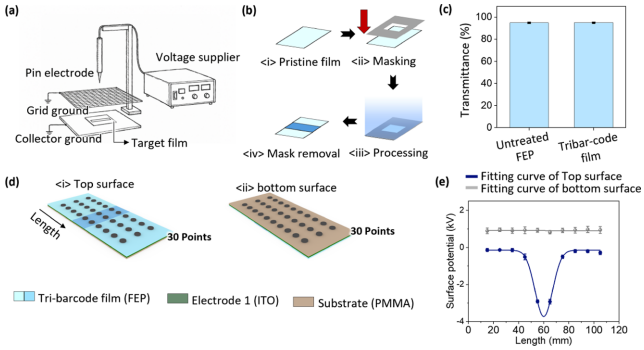


Fig. 1. Static charge patterning (SCP) process and surface potential of the Tribar-code. (a) Setup and (b) procedure of the SCP process. (c) Average visible light transmittance of Untreated FEP and Tribar-code film. (d) Measurement points and (e) surface potential distributions of the front and back surfaces of the Tribar-code

에서는 코로나 방전으로 주입된 음전하가 깊은 전자 트랩에 포획되어 상온에서 전하의 이탈과 이동이 억제되는 것으로 알려져 있으며, 이러한 특성은 SCP 공정으로 형성된 정전하 패턴의 안정적인 유지에 유리하다. SCP의 세부 공정은 Fig. 1(b)에 나타나 있다. 먼저 사용자가 요구하는 패턴에 맞게 제작된 PMMA-Al 마스크를 타겟필름(pristine film) 위에 올려놓는다(Fig. 1(b)-<i>, <ii>). 이어서 Fig. 1(b)-<iii>과 같이 SCP 처리를 수행하면, 마스크로 덮이지 않은 영역에만 음전하가 선택적으로 삽입된다. 마지막으로 마스크를 제거하면 Fig. 1(b)-<iv>와 같이 Tribar-code가 형성된다. 정전하 패턴에는 음전하가 국부적으로 존재하는 반면, 양전하는 전기적 중성을 유지하기 위해 기판 전체에 균일하게 분포한다. Fig. 1(c)는 미처리 FEP 필름과 Tribar-code 필름의 평균 가시광 투과율을 비교한 결과를 나타낸다. 제작된 Tribar-code의 가시광 영역(380–780 nm) 평균 투과율은 95.05%로 측정되었으며, 이는 SCP 공정으로 정전하 패턴을 형성한 이후에도 FEP 필름의 높은 광학적 투명성이 유지됨을 보여준다. 양전하가 전기적 중성을 유지하기 위해 기판 전체에 균일하게 분포함을 확인하기 위해 Fig. 1(d)와 같이 Tribar-code의 앞면과 뒷면에 10 mm 간격으로 균일하게 배치한 30개 지점에서 표면 전위를 측정하였다. 측정 결과, Fig. 1(e)에서와 같이 앞면에서는 단일 정전하 패턴에 음전하가 국부적으로 존재하고, 뒷면에서는 양전하가 균일하게 분포함을 확인할 수 있다. 추가적으로 Tribar-code의 패턴의 유지기간을 분석한 결과, 또한 정전하 패턴과 미처리 부분 사이의 표면 전위차는 7일 후에도 1.45 kV로 유지됨을 확인하였다.

3.2 Tribar-code 작동 메커니즘

Tribar-code의 신호 발생 원리는 마찰전기 효과와 정전기 유도에 기반한다. Tribar-code는 코드 리더기와 상호작용하

는 동안, 단일 전극 TENG 모드를 결합한 free-standing sliding 모드(FS 모드) 메커니즘으로 작동한다. 단일 정전하 패턴을 가진 샘플은 FEP 필름의 중앙 영역에만 선택적으로 SCP 처리를 하여 제작한다. FEP 필름 아래에는 ITO 층과 PMMA 층이 위치하여 각각 전극 1과 기판 역할을 한다. 코드 리더기는 FEP 필름으로 코팅된 전극 2로 구성되며 접지되어 있다. 코드 리더기의 소재는 재료적 차이로 인한 마찰대전의 영향을 최소화하고, SCP 공정으로 형성된 정전하 패턴에 따른 정전기 유도 응답을 평가하기 위해 코드리더기의 표면층에는 Tribar-code와 동일한 FEP 필름을 사용하였다. 유도 전류를 측정하기 위해 전극 2와 접지 사이에 데이터 수집 장치를 연결한다. 코드 리더기가 미처리 부분 위를 이동하는 초기 상태(Fig. 2(a)-<i>)에서는 정전기 유도의 순변화가 없으므로 회로에 유의미한 전류가 흐르지 않는다. 코드 리더기가 정전하 패턴과 중첩되면(Fig. 2(a)-<ii>), 정전하 패턴 내부의 고밀도 음전하가 기판에 분포한 양전하의 영향을 압도하여 전류가 흐르고 음의 피크가 발생한다. 정전하 패턴과 중첩된 상태로 이동하는 동안에는 정전기 유도의 순변화가 없으므로 전류가 흐르지 않는다. 코드 리더기가 정전하 패턴에서 이탈하여 미처리 부분으로 진입하면(Fig. 2(a)-<iii>), 코드 리더기에 지배적으로 작용하는 영향이 정전하 패턴의 고밀도 음전하에서 기판의 저밀도 양전하로 바뀐다. 그 결과 반대 극성의 전류가 흘러 양의 피크가 나타난다. Fig. 2(b)는 제안한 원리를 검증하기 위해 w = 30 mm인 Tribar-code를 FS 모드에서 f = 1 Hz로 구동하여 얻은 출력 전압 (Vo)을 나타낸다. 파형에서 볼 수 있듯이, 코드 리더기가 정전하 패턴과 중첩될 때 음극성 피크가 유도되고(Overlap), 정전하 패턴에서 이탈할 때 양극성 피크가 발생한다(Release). 따라서 중첩-이탈 사이클 동안

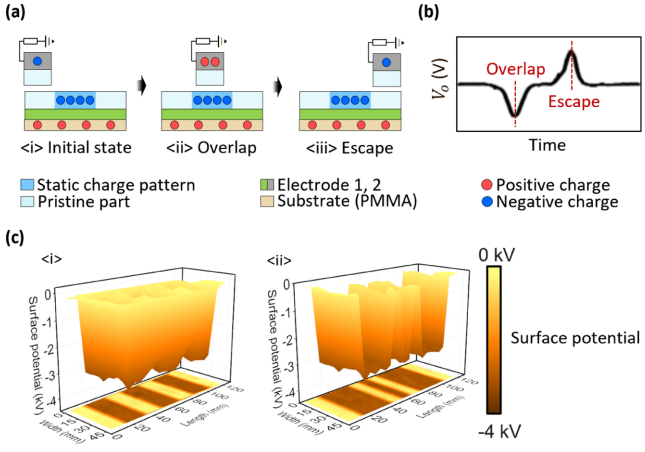


Fig. 2. Operation principle and reconfigurability of the Tribar-code. (a) Operation principle of the Tribar-code with a single static charge pattern and (b) corresponding output voltage. (c) Surface potential distributions of the Tribar-code after <i> patterning and <ii> re-patterning

w에 해당하는 상대 변위가 발생한다. 이에 따라 두 극성 피크 사이의 peak-to-peak 시간간격 i는 정전하 패턴의 폭을 시간적으로 투영하게 된다. Tribar-code는 기존의 정적 바코드와 달리 재구성성을 제공한다. SCP 장치는 마스크를 교체하는 것만으로 타겟필름에 사용자가 원하는 패턴을 형성할 수 있다. Fig. 2(c)-<i>은 SCP 처리로 제작한, 15 mm 간격으로 배치된 20 mm × 50 mm 크기의 정전하 패턴 3개에 대한 2D 및 3D 표면 전위 분포를 나타낸다. 이 패턴은 IPA를 적신 와이퍼로 표면을 닦아내면 완전히 제거된다. 이 과정은 물리적 변형 없이 고분자 트랩에 포획된 전하를 중화하며, 짧은 시간 건조를 통해 필름 표면에 IPA 액적도 남기지 않는다. 이후 다른 마스크로 SCP 처리를 다시 수행하여 동일한 타겟필름 위에 다른 정전하 패턴을 형성할 수 있다. Fig. 2(c)-<ii>는 폭은 50 mm로 동일하지만 길이가 각각 30, 10, 30 mm로 서로 다른 정전하 패턴 3개가 10 mm 간격으로 배치된 새로운 패턴의 표면 전위 분포를 나타낸다. 결론적으로 Tribar-code는 물리적 흔적 없이 제거되는 일회성 보안 코드로 활용될 수 있다. 패터닝, 패턴 제거, 재패터닝의 가역적 사이클을 통해 사용자 요구에 따라 보안 코드를 구현할 수 있다. 이는 한 번 인쇄된 패턴을 물리적으로 파괴하지 않는 한 정보를 바꿀 수 없는 기존 바코드나 QR 코드의 경직성을 해소할 수 있다.

3.3 정전하 패턴의 시간적 투영

SCP 공정으로 제작한 단일 정전하 패턴 Tribar-code의 전기적 출력 특성을 FS 모드에서 평가하였다. 이후 분석을 위해 Fig. 3(a)와 같이 정전하 패턴의 폭을 w로 정의한다. Fig. 3(b)는 w를 10, 20, 30 mm로 변화시키면서 FS 모드에서

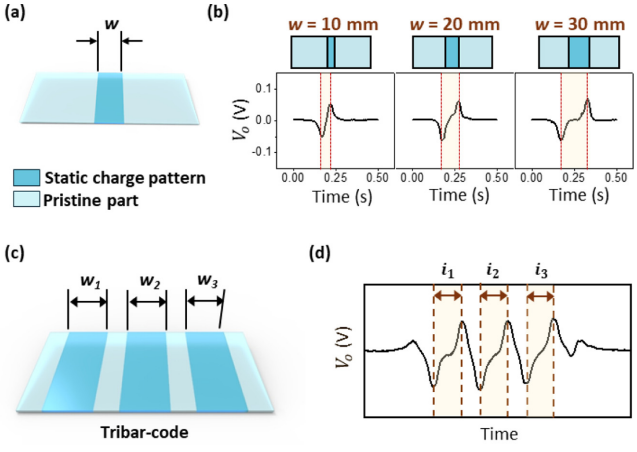


Fig. 3. Temporal projection of static charge patterns. (a) Schematic of the Tribar-code with a single static charge pattern of width w. (b) Output voltages of the Tribar-code with varying w. (c) Schematic of the Tribar-code with three static charge patterns of widths w_1, w_2, and w_3, and (d) corresponding output voltage with peak-to-peak time intervals i_1, i_2, and i_3

f = 1 Hz로 측정한 Vo를 보여준다. Tribar-code에서 정보 판독의 핵심 메커니즘은 정전하 패턴의 폭 w를 양·음 전압 피크 사이의 peak-to-peak 시간간격 i로 직접 변환하는 데 있다. 이는 SCP 공정에서 마스크로 w를 조절하여 다양한 정보를 기록하고, 이후 코드 리더기를 이용해 이 패턴을 시간 영역 데이터로 판독할 수 있게 하는 핵심 기술적 특징이다. Fig. 3(b)에서 w가 증가함에 따라 시간간격이 뚜렷하게 증가하는 것은 공간 정보가 시간 영역으로 투영되고 있다는 시각적 증거이다. 본 연구에서 Tribar-code는 Fig. 3(c)에서와 같이 SCP 공정을 통해 단일 소재 표면에 형성된 3개의 정전하 패턴으로 구성된다. 각 정전하 패턴의 폭(w_1, w_2, w_3)은 정량적 분석을 위해 10 mm에서 30 mm까지 5 mm 간격으로 설정되었다. 각 패턴의 폭은 10, 15, 20, 25, 30 mm의 다섯 가지 값 중 하나로 독립적으로 설정할 수 있으므로, 세 패턴의 조합은 5^3 = 125가지이다. 여기에 스캔 방향 표시부의 두 상태를 추가 정보로 함께 사용하여, Tribar-code는 총 $5^3 \times 2$ = 250가지의 서로 다른 코드 조합을 구현할 수 있다. 스캔 시 코드 리더기는 Tribar-code 표면으로부터 1 mm의 수직 간격을 유지한 채 FS 모드로 슬라이딩한다. 이때 w_1, w_2, w_3로 정의된 공간적 패턴은 시간 영역의 i_1, i_2, i_3로 변환된다. Fig. 3(d)는 w_1, w_2, w_3를 모두 20 mm로 설정한 경우의 대표적인 Vo를 보여준다. 각 정전하 패턴이 코드 리더기를 지나갈 때마다 음·양 피크 쌍이 연속적으로 발생한다. 이 메커니즘을 통해 공간 간격(w_1, w_2, w_3)이 이산적인 시간간격(i_1, i_2, i_3)에 대응되어, 기록된 정보의 공간-시간 변환이 이루어진다. Fig. 3(d)의 파형 말단에 관찰되는 작은 추가 피크는 정보 기록용 세 정전하 패턴과 별도로 충전한 스캔 방향 표시부에서 발생한 신호이다. 이 추가 신호의 시간적 위치를 이용하여 스캔 방향을 구분하고, 정보 패턴의 판독 순서를 확인할 수 있다.

Tribar-code의 3개의 정전하 패턴에 대한 공간-시간 변환의 선형성과 신뢰성을 검증하기 위해, 8가지 대표 패턴을 Fig. 4(a)~(h)에 나타냈다. 3개의 정전하 패턴 폭 w_1, w_2, w_3는 각 폭을 mm 단위의 순서쌍으로써 괄호를 사용해 나타내었다. 먼저 w_1, w_2, w_3를 동일한 폭으로 설정하여, 세 공간 간격이 균일한 경우를 분석하였다(Fig. 4(a)~(c)). Fig. 4(a)는 w_1, w_2, w_3를 각각 10 mm로 형성했을 때의 Vo 신호로, 대응하는 시간간격 (i_1, i_2, i_3) 은 거의 동일한 값을 나타낸다. 마찬가지로 폭을 각각 20 mm(Fig. 4(b))와 30 mm(Fig. 4(c))로 형성한 경우에도, 각 i 값은 균일한 공간 구성을 일관되게 반영한다. Fig. 4(a)~(c)의 결과를 종합하면, 폭이 10 mm씩 증가함에 따라 시간간격 i가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 선형 상관관계는 w_1, w_2, w_3를 각각 10, 20, 30 mm로 형성한 Fig. 4(d)에서도 확인되며, 각 i 값이 계단식으로 선형 증가하여 공간-시간 변환의 신뢰성을 입증한다. 또한, Tribar-code의 실용적인 정보 기록 능력을 평가하기 위해 불균일한 패턴을 설계하고 분석하였다. w_2가 w_1 및 w_3보다 현저히 큰 경우와 작은 경우를 조사하였다. Fig. 4(e)는 w_1, w_2, w_3를 각각 10, 30, 10 mm로 형성한 패턴의 Vo 신호로, w_1과 w_3에 대한 i 값은 비슷한 수준인 반면 w_2에 대응하는 i는 더 크다. 반대로 Fig. 4(f)는 각각 30, 10, 30 mm로 형성한 경우로, w_1과 w_3의 i 값은 비슷하고 w_2에 대응하는 i는 더 작다. 마지막으로 더 복잡한 조합에 대한 식별 능력을 검증하기 위해 비대칭 패턴을 분석하였다. Fig. 4(g)는 각각 15, 25, 20 mm로 형성한 경우로, 각 i 값이 급격히 증가했다가 약간 감소하는 공간 배열을 정확하게 반영한다. Fig. 4(h)는 각각 15, 10, 25 mm로 형성한 경우로, 각 i 값이 약간 감소했다가 급격히 증가하는 공간적 패턴 변화와 동일한 경향성을 보임을 확인할 수 있다. 따라서, Tribar-code의 고유한 패턴 설계에 따라 w_1, w_2, w_3에 대응하는 i 값은 서로 구별되는 기울기와 변곡점을 보인다. 이는 단일 소재 위에 SCP 공정으로 제작한 Tribar-code가 시각적으로 전혀 드러나지 않으면서도 정밀하고 고유한 패턴을 가질 수 있음을 보여주며, 보안 특성이 기존의 바코드에 비해 강화될 수 있음을 보여준다. 더 나아가 정전하 패턴의 폭에 따라 i가 정밀하게 변환된다는 점은, Tribar-code 시스템이 단순한 이진(0, 1) 신호 인식을 넘어 더 높은 정보 밀도를 위한 아날로그식 신호 판독을 가능하게 함을 의미한다.

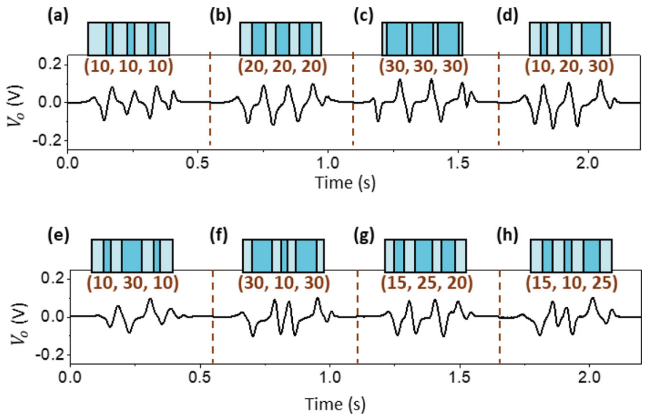


Fig. 4. Electrical output analysis of the Tribar-code for pattern encoding. (a)–(h) Output voltages of Tribar-codes with eight different patterns, where the numbers in parentheses denote w_1, w_2, and w_3 in mm

3.4 개인 식별 시스템 구축

Tribar-code의 개념 시연 및 활용성 확인을 위해, Tribar-code를 보안 시설의 개인 식별용 출입 카드로 구현하였다. 마찰전기 신호는 스캔 속도, 접촉 압력과 같은 사람의 비정형적 행동에 의해 본질적인 변동성을 가지므로, 인공지능 기반 판독 절차를 도입하였다. 머신러닝을 활용한 접근법은 불규칙적인 실제 사용 환경에서 안정적인 신호 분류를 달성하는 데 핵심적 역할을 할 수 있다. Fig. 5(a)는 개인 식별 시스템의 운용 구조를 보여준다. Tribar-code를 코드 리더

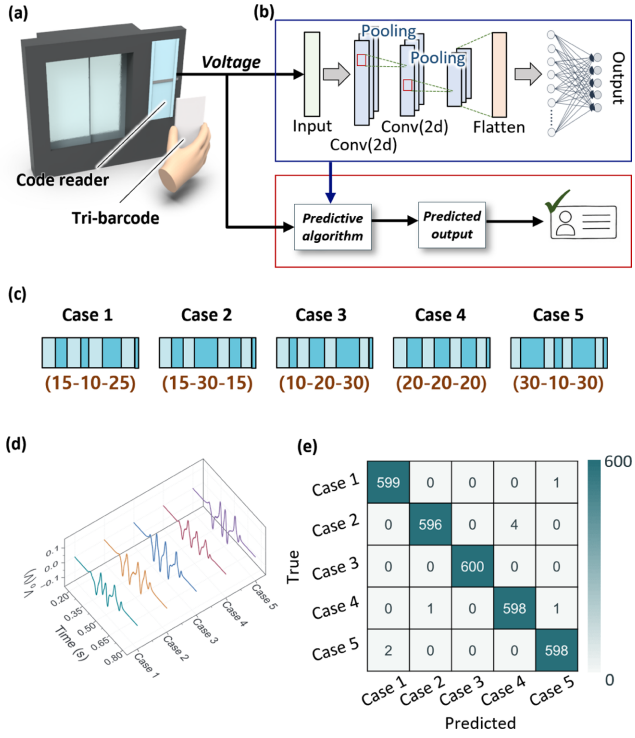


Fig. 5. Personal identification system with AI-assisted Tribar-code. (a) Operational framework and (b) CNN architecture of the personal identification system. (c) Configurations, (d) output signals, and (e) confusion matrix of CNN classification of five different Tribar-code patterns

기로 스캔하면 시스템은 발생한 신호를 수집하고, 이를 학습 단계와 추론 단계로 처리한다. 학습 단계에서는 전기 출력 신호의 파형을 나타내는 이미지 기반 데이터를 입력으로 활용한다. 이미지 데이터의 국부적인 패턴과 공간적 특징을 효과적으로 추출할 수 있는 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)을 적용하여, Fig. 5(b)와 같은 딥러닝 구조로 식별 모델을 구축한다. 이를 통해 시스템은 신호 파형 이미지에 나타나는 미세한 차이를 서로 구별되는 특징 집합으로 변환한다. 공간적 특징 매핑을 위한 연속적인 2차원 합성곱(Conv2D) 층과 비선형성을 부여하는 ReLU 활성화 함수를 거치면서, 모델은 환경 노이즈를 걸러내고 핵심적인 특징 맵을 포착한다. 이 특징 맵은 풀링 층을 통해 한층 정제되어 연산 효율과 신호 강건성이 향상된다. 처리된 데이터는 flatten 층을 거쳐 변환된 후 밀집(dense) 네트워크로 통합되며, 여기서 softmax 활성화 함수가 인가된 패턴과의 일치 확률을 결정한다. 이어지는 추론 단계에서는 사전 학습된 모델을 바탕으로 입력 신호를 추론하여 실시간 인증을 위한 예측 결과를 출력한다. 이 구조는 신호 왜곡을 완화하고 고정 임계값에 대한 의존을 없앰으로써 높은 정확도의 인식을 달성할 수 있게 한다. 예측 모델을 학습시키기 위해, SCP 공정으로 제작한 서로 다른 5개의 Tribar-code 패턴(Fig. 5(c))으로부터 5개의 서로 다른 데이터 세트(Fig. 5(d))를 수집하였다. 학습 데이터셋의 강건성을 확보하기 위해 각 경우마다 다양한 스캔 속도에서 3,000개의 전기 출력 데이터를 취득하여, 총 15,000개의 샘플로 이루어진 데이터셋을 구성하였다. 수집된 데이터셋은 8:2 비율로 학습용과 검증용으로 무작위 분할하였으며, CNN 모델은 학습용 데이터셋을 이용하여 총 50 에포크 (epochs)동안 학습하였다. 5개 패턴에 대한 예측 알고리즘의 분류 성능은 Fig. 5(e)에 혼동 행렬로 나타냈으며, 99.7%의 정확도를 달성할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SCP 공정을 기반으로 한 자가발전형 식별 플랫폼으로서 Tribar-code를 제안하였다. Tribar-code는 FEP 필름 위에 형성된 비가시적인 정전하 패턴으로 정보를 기록한다. SCP 공정을 통해 FEP 표면에 정전하 패턴을 선택적으로 형성하고, 나머지 영역은 미처리 부분으로 남긴다. 정보가 광학적 대비나 구조적 변형이 아닌 국부적인 표면 전하 밀도로 기록되므로, Tribar-code는 광학적 투명성을 유지하면서 전기적 정보 기록을 가능하게 한다. 제작된 Tribar-code는 정전하 패턴과 미처리 부분 사이에 뚜렷한 표면 전위 대비를 보였으며, 그 표면 전위차는 SCP 처리 직후 2.47 kV, 7일 후에도 1.45 kV로 유지되었다. 또한 평균 가시광 투과율 95.05%의 높은 광학적 투명성을 보여, SCP 공정이 FEP 필름의 광학 특성을 크게 변화시키지 않음을 확인하였다. 나아가 정전하 패턴은 IPA를 이용한 간단한 패턴 제거 공정으로 제거한 뒤 SCP 공정을 반복하여 재구성할 수 있었으며, 이를 통해 패터닝, 패턴 제거, 재패터닝의 가역적 사이클을 입증하였다.

Tribar-code는 FS 모드에서 코드 리더기와의 상호작용을 통해 TENG 기반 자가발전 메커니즘으로 뚜렷한 전압 피크를 생성한다. Tribar-code의 핵심 판독 원리는 공간적 패턴 정보를 시간적 신호 정보로 변환하는 데 있으며, 각 정전하 패턴의 폭은 양·음 전압 피크 사이의 peak-to-peak 시간간격으로 변환된다. 정전하 패턴의 폭과 시간간격의 관계는 신뢰할 수 있는 선형성을 보였으며, 이러한 공간-시간 변환을 통해 Tribar-code는 자체 생성한 전기 신호만으로 비가시적인 정전하 패턴을 판독할 수 있다. 이 메커니즘을 바탕으로 각 폭을 10 mm에서 30 mm까지 독립적으로 설정할 수 있는 3개의 정전하 패턴으로 구성된 Tribar-code를 개발하였다. 스캔 방향 표시부와 함께 Tribar-code는 250가지의 서로 다른 패턴 조합을 구현할 수 있으며, 이는 단순한 이진 식별을 넘어서는 고밀도의 아날로그식 정보 기록 능력을 보여준다. 개념 검증을 위해 Tribar-code를 인공지능 기반 개인 식별 시스템에 적용하였으며, 서로 다른 5개의 Tribar-code 패턴에서 얻은 15,000개의 전기 출력 데이터로 학습시킨 CNN 모델은 99.7%의 분류 정확도를 달성하

였다. 한편, 선행연구에 따르면 고온에서는 포획 전하의 열적 이탈이, 고습 환경에서는 전하 소산이 촉진되어 표면전위의 절대값이 감소할 수 있다[11,12]. 이러한 변화로 정전하 패턴과 미처리 부분 사이의 전위 대비가 감소하면 출력 피크의 식별성이 낮아져 정보 판독의 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 실제 환경에서의 활용을 위해 다양한 온·습도 조건에서 전하 유지 특성과 판독 안정성을 추가로 평가할 필요가 있다.

종합하면, 제안한 Tribar-code는 투명성, 비가시성, 재구성성, 자가발전 신호 생성, 인공지능 기반 판독의 장점을 결합한다. SCP 공정으로 형성된 정전하 패턴, TENG 기반 신호 생성, CNN 기반 신호 분류를 통합함으로써 Tribar-code는 동적 식별 기술을 위한 새로운 전략을 제시한다. 특히 SCP 공정은 화학적·구조적으로 균질한 고분자 표면에 공간적으로 구별되고 재구성 가능한 전기적 기능을 부여하여, 비가시적 정보 기록을 위한 소재적 기반을 제공한다. 따라서 Tribar-code는 비가시적이고 재구성 가능하며 에너지 지속 가능한 정보 기록이 필요한 차세대 보안 시스템, 스마트 팩토리, 스마트 물류, IoT 단말기, 소형 개인용 전자기기 등 다양한 분야에서 유망한 플랫폼이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 전남대학교에서 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Furness, A., “Machine-readable data carriers–a brief introduction to automatic identification and data capture.” *Assembly Automation*, Vol. 20, No. 1, 2000, pp. 28-34.
2. Crossler, R. E., Johnston, A. C., Lowry, P. B., Hu, Q., Warkentin, M., and Baskerville, R., “Future directions for behavioral information security research.” *Computers & Security*, Vol. 32, 2013, pp. 90-101.
3. Kuang, Q., Hou, X., Du, C., Wang, X., and Gao, D., “Recent advances in the anti-counterfeiting applications of long persistent phosphors.” *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 25, No. 27, 2023, pp. 17759-17768.
4. Shen, Y., Le, X., Wu, Y., and Chen, T., “Stimulus-responsive polymer materials toward multi-mode and multi-level information anti-counterfeiting: recent advances and future challenges.” *Chemical Society Reviews*, Vol. 53, No. 2, 2024, pp. 606-623.
5. Yun, Y., La, M., Cho, S., Jang, S., Choi, J. H., Ra, Y., Kam, D., Park, SJ., and Choi, D., “High quality electret based triboelectric nanogenerator for boosted and reliable electrical output performance.” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 8, No. 1, 2021, pp. 125-137.
6. Choi, D., Lee, Y., Lin, Z. H., Cho, S., Kim, M., Ao, C. K., ... and Choi, D., “Recent advances in triboelectric nanogenerators: from technological progress to commercial applications.” *ACS Nano*, Vol. 17, No. 12, 2023, pp. 11087-11219.
7. Ra, Y., Song, M., Lee, D., Jang, S., Kim, Y. S., Chae, J., ... and Choi, D., “Recent progress in triboelectric platforms: engineering materials to industrial applications from the perspective of manufacturing.” *International Journal of Extreme Manufacturing*, Vol. 7, No. 3, 2025, pp. 032007.
8. Fan, F.-R., Tian, Z.-Q., and Wang, Z.L., “Flexible triboelectric generator.” *Nano Energy*, Vol. 1, No. 2, 2012, pp. 328-334.
9. Wang, S., Lin, L., and Wang, Z. L., “Triboelectric nanogenerators as self-powered active sensors.” *Nano Energy*, Vol. 11, 2015, pp. 436-462.
10. Ra, Y., Cho, S., Guo, X., Choi, D., and Lee, C., “Triboelectric Wearable Sensors for Human-Centric Smart Electronics: From Self-Powered Sensing to Artificial Intelligence-Assisted Human–Machine Interface Systems.” *Nano-Micro Letters*, Vol. 18, No. 1, 2026, pp. 402.
11. Gerlach, A., Liebler, M., Sessler, G. M., von Seggern, H., Scheufele, B., and Hirth, E., “Comparative analysis of isothermal decay of the surface potential of fluoroethylenepropylene electrets and of the sensitivity of electret microphones at elevated temperature.” *AIP Advances*, Vol. 10, No. 9, 2020, pp. 095313.
12. Ma, X., Zhang, X., Sessler, G. M., Chen, L., Yang, X., Dai, Y., and He, P., “Energy harvesters based on fluorinated ethylene propylene unipolar ferroelectrets with negative charges.” *AIP Advances*, Vol. 9, No. 12, 2019, pp. 125334.