

## 에너지 하베스팅 기술을 활용한 스마트 패키징 연구 동향

신은애 · 심진기\*

한국생산기술연구원 패키징기술센터

### Research Trends of Energy Harvesting Utilized on Smart Packaging

EunAe Shin and Jin Kie Shim\*

*Korea Packaging Center, Korea Institute of Industrial Technology*

**Abstract** Packaging has evolved from its traditional role of containment and protection to the concept of smart packaging, which integrates monitoring, communication, and security functions. To implement such advanced features, researchers have increasingly explored the incorporation of energy harvesting technologies, enabling packaging to become self-powered and autonomous. Over the past decade, extensive research has been conducted to explore how energy harvesting can enable autonomous sensing, wireless communication, and real-time product monitoring within packaging systems. This review provides a comprehensive overview of recent advances in energy harvesting-based packaging technologies. We first introduce the fundamental principles of triboelectric, piezoelectric, thermoelectric, photovoltaic, radio frequency, and hydrovoltaic energy harvesting. We then examine their applications in logistics monitoring, food quality and safety evaluation, anti-counterfeiting, autonomous power supply, and the direct use of packaging materials as functional harvesters. Challenges such as energy output stability, large-scale fabrication, and compliance with food safety standards are also discussed. Finally, we outline future perspectives on hybrid systems, biodegradable materials, and the convergence of energy harvesting with IoT and AI. By synthesizing these developments, this review aims to highlight both the opportunities and limitations of energy harvesting in packaging, positioning it as a key enabler of sustainable and intelligent supply chains.

**Keywords** Energy harvesting, Smart packaging, Intelligent packaging, Food quality monitoring, Anti-counterfeiting, Sustainable supply chain

## 서론

패키징은 오랫동안 제품을 보호하고 운송 및 보관을 용이하게 하는 기본적인 역할을 수행해왔다. 그러나 최근 식품, 의약품, 물류 산업의 발전과 함께 패키징에 요구되는 기능은 단순한 보호를 넘어서는 수준으로 확대되고 있다. 현대 사회의 소비자는 제품의 품질과 안전성에 대한 높은 신뢰를 요구하며, 동시에 글로벌 공급망은 보다 투명하고 효율적인 관리 체계를 필요로 한다. 이러한 변화는 패키징 기술이 단순 포장재를 넘어 지능형 기능을 갖춘 스마트 패키징 (Smart packaging) 시스템으로 진화하도록 이끌고 있

다. 특히 식품 및 의약품 산업에서는 유통 과정 전반에 걸친 실시간 모니터링과 보안성 확보가 핵심 과제로 떠오르고 있다. 제품의 신선도를 유지하고, 변질이나 위조를 방지함으로써 소비자 안전을 보장하는 것은 필수적인 요구사항이다. 또한 물류 환경에서 충격·손상 감지, 위치 추적, 재고 관리 등 다양한 기능이 포장 단계에서부터 통합적으로 수행하고자 하는 수요가 증가하고 있으며, 나아가 환경적 측면에서 지속가능성과 친환경성을 갖춘 패키징은 글로벌 규제와 소비자 요구에 따라 점점 더 중요한 과제가 되고 있다.

그러나 이러한 기능을 수행하기 위해 필요한 센서와 통신 장치는 대부분 배터리에 의존하고 있으며, 이는 제한된 수명, 교체의 번거로움, 폐기물 발생 등의 문제를 야기한다. 따라서 외부 전원 없이 자율적으로 구동할 수 있는 새로운 에너지 솔루션이 필요하다. 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting) 기술은 주변 환경에서 발생하는 기계적, 광학적, 열적, 전자기적 에너지를 전력으로 변환하여 배터리 없는

\*Corresponding Author: Jin Kie Shim  
Korea Packaging Center, Korea Institute of Industrial Technology  
14449, Republic of Korea  
Tel: +82-32-624-4771  
E-mail: jkshim@kitech.re.kr

시스템을 가능하게 하는 기술로, 이러한 문제의 유력한 해결책으로 부상하고 있다.

본 리뷰 논문은 에너지 하베스팅 기반 패키징 기술의 최신 연구 동향을 종합적으로 고찰하고자 한다. 구체적으로, 에너지 하베스팅의 기본 원리를 간략히 소개한 후, 전원 공급 및 자율 시스템, 식품 품질 및 안전성 평가, 유통·물류 모니터링, 보안 및 위조 방지와 같은 응용 분야별 연구 사례를 체계적으로 분석한다. 또한 기술적 과제와 향후 발전 방향을 논의함으로써, 에너지 하베스팅 기반 패키징 기술이 지속가능한 공급망 구축의 핵심 기술로 발전할 가능성을 제시한다.

## 에너지 하베스팅 기술 원리

에너지 하베스팅(Energy Harvesting)은 주변 환경에서 발생하는 물리적·화학적 에너지를 수확하여 전기에너지로 변환하는 기술로, 자율 구동형 전자 시스템을 가능하게 하는 핵심 원리이다. 수확할 수 있는 에너지원의 특성과 환경 조건에 따라 다양한 메커니즘이 적용되며, 각 방식은 고유의 장점과 한계를 지닌다. 본 절에서는 패키징 응용에서 주목 받고 있는 여섯 가지 대표적 에너지 하베스팅 방식을 구체적으로 설명한다. (Fig. 1)

마찰전기(Triboelectric Nanogeneration, TENG)는 서로 다른 전기적 성질을 가진 두 소재가 접촉하고 분리되는 과정에서 전자가 이동하여 전위차가 발생하는 마찰전기 효과(triboelectrification)와 정전유도(electrostatic induction)를 기반으로 한다. 발생한 전위차는 전극 사이 전류로 흐르며 전력으로 활용된다. TENG은 단순한 구조와 제작 용이성, 소재 선택의 자유도 덕분에 다양한 형태로 구현될 수 있다. 특히 유연한 필름, 종이, 플라스틱 기반으로 제작이 가능해

포장재와의 융합이 용이하다. 물류 과정의 충격, 진동, 압력과 같은 기계적 자극을 에너지원으로 활용할 수 있어 충격·손상 감지 센서, 가스 모니터링, RFID 전원 공급 등 다방면에서 활용되고 있다. 다만 출력 전력의 밀도가 낮고 외부 조건(습도, 표면 거칠기)에 영향을 받기 쉽다는 한계가 있어, 소재 표면 처리와 다층 구조 설계 등으로 성능을 보완하는 연구가 활발하다.

압전 (Piezoelectric Nanogeneration, PENG) 기술은 특정 결정 구조(예: ZnO, PVDF, BaTiO<sub>3</sub> 등)에서 압력, 인장, 굽힘과 같은 기계적 변형이 전기분극을 유도하는 압전 효과를 기반으로 한다. 변형이 가해지면 결정 내 전하 중심이 이동하면서 양·음 전하가 분리되고, 이 전위차가 외부 회로에서 전류로 변환된다. 구조가 단순하고 내구성이 우수하여 포장재나 적층형 센서로 구현하기에 적합하다. 특히 물류 과정에서 발생하는 압착, 진동을 활용해 손상 감지나 제품 상태 모니터링에 적용될 수 있다. 출력 안정성이 높고 장기간 사용 가능하다는 장점이 있으나, 발생 전력이 제한적이어서 단독 전원보다는 TENG과 함께 복합적으로 사용하는 하이브리드 구조 연구가 증가하고 있다.

열전 (Thermoelectric Generation, TEG) 기술은 두 지점 사이의 온도차에 의해 전위차가 발생하는 제벡 효과(Seebeck effect)를 활용한다. 서로 다른 전도체나 반도체 재료를 직렬로 연결했을 때, 온도차가 형성되면 전자가 고온부에서 저온부로 이동하면서 전류가 흐른다. 냉장·냉동 식품 유통 환경에서는 포장 내부와 외부 사이의 온도차가 자연적으로 존재하기 때문에, 이를 에너지원으로 활용할 수 있다. 예를 들어 냉장식품 내부의 산소 농도를 측정하는 센서를 구동하거나, 온도 유지 여부를 장기간 모니터링하는데 적용된다. 출력 전력은 온도차에 크게 의존하기 때문에, 대규모 전력 공급에는 한계가 있으나 패키징 내부의 저전력 센서에는 충분히 적합하다.

광전력(Photovoltaic harvesting, PV)은 광전 효과(photo-voltaic effect)를 기반으로 태양광 또는 인공조명의 광자를 흡수하여 전자를 여기시키고 전류를 생성한다. 실리콘 기반 태양전지뿐만 아니라 유연한 박막 태양전지, 유기 태양전지 등이 패키징 연구에 활용되고 있으며, 창고나 매장 조명 환경에서도 구동할 수 있다는 장점이 있다. 포장재에 소형 PV 모듈을 부착하면 과일, 음료, 의약품 패키징에서 온도, 가스 농도 등을 지속적으로 측정하는 센서를 구동할 수 있다. 다만 광원이 없는 환경에서는 전력 공급이 어렵기 때문에, 주로 물류·유통 과정에서 RF나 TENG 등과 함께 보완적으로 사용된다.

Radio Frequency (RF) Harvesting은 주변에 존재하는 무선 주파수 신호를 안테나로 수신하여 전력으로 변환하는 방식이다. 수신된 RF 에너지는 정류회로를 거쳐 직류 전력으로 변환되어 센서를 구동한다. RFID 태그와 결합하기에



Fig. 1. 에너지 하베스팅 종류.

적합하며, 물류 과정에서 상자의 위치 추적, 신선도 평가, 무선 통신에 활용되고 있다. RF 기반 전력 공급은 기존 통신 인프라와 쉽게 연동할 수 있어 IoT 기반 스마트 패키징의 핵심 기술로 평가된다. 다만 송신원과의 거리, 전파 세기, 환경 장애물에 따라 효율이 크게 달라지는 한계가 있다.

수분 기반 에너지 하베스팅(Hydrovoltaic Energy Generation, HEG)은 물과 고체 표면 간의 상호작용, 즉 물 분자의 흡착, 증발, 확산, 이온 이동 등을 통해 전기 에너지를 발생시키는 방식이다. 예를 들어 수분이 친수성 소재 표면에 흡착되거나 증발하면서 전하가 분리되고, 이 전하 이동이 전력으로 전환된다. HEG는 습도가 높거나 수분 교환이 활발한 환경에서 특히 효과적이므로, 신선식품 포장이나 고습 환경에서의 품질 모니터링에 적합하다. 셀룰로오스, 종이, 전분 기반 고분자와 같은 친환경 소재와 결합하면 생분해성과 에너지 자급성을 동시에 확보할 수 있어 지속가능한 포장재 설계에 유리하다. 현재 출력 밀도는 낮지만, 포장 내부의 습도 감지와 같은 저전력 응용에는 충분히 적용 가능하다.

이와 같이 다양한 에너지 하베스팅 방식은 각기 다른 환경 조건에서 작동할 수 있으며, 공통적으로 유연성, 저비용, 저전력 적합성, 친환경성이라는 장점을 지닌다. 특정 응용 환경에 맞추어 적절한 방식을 선택하거나, 여러 방식을 결합한 하이브리드 구조를 도입함으로써 자율 구동형 패키징의 상용화를 가속화할 수 있을 것으로 기대된다.

## 에너지 하베스팅 기술 활용 패키징 연구 동향

에너지 하베스팅 기술은 패키징에 자율 전원 공급 기능을 부여함으로써 기존 배터리 기반 한계를 극복하고, 다양한 스마트 기능 구현을 가능하게 하고 있다. 최근 연구들은 포장재 자체 또는 통합된 센서를 통해 전력을 수확하여, 식품 품질과 신선도 평가, 유통 과정 모니터링, 보안 기능 등으로 활용 범위를 확장해 왔다. 전력 공급을 통한 자율 구동 패키징은 물류 및 저장 환경에서 장기적이고 지속적인 센서 네트워크 운용을 가능하게 하며, 품질 및 안전성 모니터링의 기반을 제공한다. 또한 충격·진동 감지와 같은 유통 환경 안전 기능은 제품 파손 방지와 공급망 관리의 효율성을 높이고, 위변조 방지 기능은 소비자 신뢰를 강화하는 핵심 요소로 부각되고 있다. 이처럼 에너지 하베스팅 기반 패키징 연구는 단순 보호를 넘어 지속가능성과 지능형 기능을 아우르는 새로운 패러다임으로 발전하고 있다. (Fig. 2)

### 1. 자가 발전형 자율 구동 패키징

배터리 대신 전자기기에 전력을 공급하는 것은 에너지 하베스팅의 가장 본질적이고 핵심적인 역할이다. 스마트 패키징 기술을 구현하기 위해서는 센서, 데이터 송신 등 전자기기를 활용하기 마련인데, 이러한 전자기기의 전원으로서 에

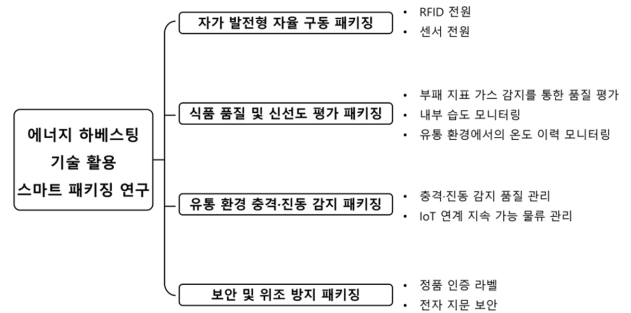


Fig. 2. 에너지 하베스팅 기술 활용 스마트 패키징 연구 동향 요약.

너지 하베스팅 기술을 적용하여 자가 발전형의 자율 구동 스마트 패키징 연구가 활발히 진행되고 있다. (Table 1)

물류·유통 과정에서는 제품의 위치와 상태를 실시간으로 추적하기 위해 Radio Frequency Identification (RFID) 기술이 널리 활용되고 있다. 그러나 기존 수동형 RFID 태그는 전력 부족으로 인식 거리가 짧고 안정성이 떨어져, 대규모 물류 관리에서 한계가 있었다. 최근에 보고된 TENG 기술을 RFID 모듈에 적용한 리터어블 접이식 플라스틱 상자 개발 연구에서는 수송 과정에서 발생하는 진동과 충격을 에너지로 전환하여 RFID 태그에 필요한 전력을 공급할 수 있음을 입증하였다<sup>1)</sup>. (Fig. 3) TENG는 테플론과 양극산화 알루미늄(Anodized aluminum oxide, AAO)을 조합한 구조로 제작되었으며, AAO의 에칭 공정 시간을 최적화하여 전압과 전류 발생량을 향상시켰다. 모듈은 실제 농산물인 양파가 적재된 상자 내부에 장착되어 랜덤 진동 시험을 통해 검증되었으며, 그 결과 TENG와 통합된 RFID 모듈은 지속적인 사용에도 방전 없이 일정 전압을 유지하는 충전 특성을 보였다. 이를 통해 RFID 태그가 기존의 수동형 방식보다 안정적으로 동작할 수 있었으며, 인식 거리도 최대 1.4 m까지 확보되었다. 기존 수동형 RFID 태그는 짧은 인식거리와 전력 부족으로 물류 현장에서 활용도가 낮았으나, 본 연구의 TENG 기반 모듈은 외부 배터리 교체 없이도 장시간 구동이 가능해 이러한 한계를 극복하였다. 운송 과정에서 발생하는 반복적 진동은 일반적으로 식품과 의약품의 품질 저하 요인으로 인식되지만, 동시에 이를 전력 자원으로 전환할 수 있는 잠재력도 지니고 있다. 본 기술은 농산물 물류에서 효율적이고 지속 가능한 스마트 패키징 솔루션으로 적용 가능성이 높으며, 향후 반응동형 RFID 태그에도 확장될 수 있는 기반을 마련한 사례라 할 수 있다.

또한 제습제를 기반으로 한 마찰전기 나노발전기(desiccant-based TENG, D-TENG)도 보고되었다<sup>2)</sup>. 최근 제안된 제습제 기반 마찰전기 나노발전기(desiccant-based triboelectric nanogenerator, D-TENG)는 이러한 진동 에너지를 수확하여 포장 내 센서를 구동하는 자가 발전형 스마트 패키징 시스템으로 활용된 대표적인 사례이다. 이 장치



Fig. 3. 랜덤 진동 활용 RFID 모듈이 설치된 농산물 물류용 플라스틱 상자.

는 종이 기반 벌집 구조에 실리카겔과 같은 제습제를 삽입하고, 이를 PTFE/Cu 전극과 접촉·분리시키며 전하를 발생시키는 방식으로 동작했다. 물류 유통 과정에서 상하 진동이 발생하면 제습제가 PTFE와 반복적으로 접촉·분리되면서 전하가 발생하고, 이를 통해 수십에서 수백 볼트의 개방전압을 얻을 수 있다. 다양한 진동 조건에서 최대 수백 볼트 수준의 전압과 수 마이크로 암페어의 전류를 출력할 수 있었으며, 이를 축전지에 저장하여 온도·습도 센서를 구동하는데 성공했다. 제습제는 원래 포장 내부의 습기를 흡수해 제품을 보호하는 기능을 가지는데, 본 연구에서는 이를 동시에 전기 발생 재료로 활용하여 구조적 단순성과 기능적 다중성을 확보했다. 또한 수분을 흡착하여 출력이 감소하더라도, 건조 과정을 거치면 본래 성능이 회복되어 반복적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 이는 장기간의 유통 및 재사용을 고려한 실제 응용 가능성을 높이는 중요한 결과이다.

자가 발전형 자율 구동 패키징을 구현하기 위해서는 다양한 물류·저장 환경에서도 안정적인 전력 확보가 필수이며, 이를 위해 서로 다른 방식의 에너지 하베스팅을 결합한 하이브리드 구조가 효과적인 대안으로 주목되고 있다. 단일 방식은 저주파·저조도·고속 등 특정 조건에서 출력이 크게 저하되는 반면, 하이브리드 구조는 한 방식의 취약점을 다른 방식이 보완할 수 있어 출력 안정성, 환경 대응성, 충전 효율이 전반적으로 향상된다. 보고된 연구들에서는 공통적으로 저주파에서도 안정적 출력 유지, 고전압 충전 가능 범위 확대, 조명·습도·진동 변화에 대한 내성 증가 등 일관된 성능 개선 경향을 보여 스마트 패키징의 자율 구동을 위한 실질적 기술적 기반이 될 잠재성을 갖고 있다. 대표적인 사례로, triboelectric-electromagnetic hybrid generator(TEHG)의 연구는 하이브리드 구조의 장점을 실제 식품 저장 환경에서 실증적으로 보여주고 있다<sup>3)</sup>. TEHG는 냉장 창고의 팬 회전에서 발생하는 저주파 기계적 동작(90 r/min)에서도 8 V 이상의 안정적인 포화 전압을 유지하며, 고속 조건(600 r/min)에서는 단일 EMG 대비 포화 전압이 33.3% 증가한 것으로 보고되었다. 또한 초기 충전 단계에서는 EMG가 높은

전류를 공급해 빠르게 충전을 진행하고, 이후 고전압 영역에서는 TENG가 전력을 보완함으로써 충전 속도와 전압 확보 범위를 동시에 향상시키는 상호 보완적 작동 특성이 확인되었다. 이러한 구조적 시너지 덕분에 TEHG는 실제로 500 mAh 리튬 이온 배터리를 충전하여 자율 구동형 무선 센서를 안정적으로 운영할 수 있었으며, 이는 하이브리드 하베스팅이 스마트 패키징 분야에서 배터리 교체 없는 장기 자율 구동을 실현할 수 있는 실질적 가능성을 보여주는 의미 있는 결과이다.

## 2. 식품 품질 및 신선도 평가 패키징

식품의 부패와 품질 저하는 포장 내부의 가스 조성 변화와 습도 증가와 밀접하게 관련되어 있다. 대표적으로 암모니아, 에틸렌, 이산화탄소와 같은 휘발성 가스와 포장 내부 습도 증가는 식품 부패와 품질 저하의 주요 지표로 활용된다. 더불어 유통 과정에서 온도가 제대로 유지되지 않으면 제품의 기능과 소비자 안전이 위협받는다. 따라서 스마트 패키징 분야에서는 이러한 환경 변화를 실시간으로 감지할 수 있는 자가 발전형 센서 개발이 핵심적인 연구 과제로 부상하였다. (Table 2)

Table 1. 자가 발전형 자율 구동 패키징 연구 사례

에너지 하베스팅	패키징 기능	적용처	참고 문헌
TENG	물류 진동 활용	양파 상자	[1]
TENG	물류 진동 활용	모니터링 센서	[2]
TENG	물류 진동 활용	물류 상자	[4]
TENG	물류 진동 활용	식품 패키징	[5]
TENG	물류 진동 활용	식품 패키징	[6]
TENG	물류 진동 활용	식품 패키징	[7]
TENG+PENG	물류 진동 활용	식품 패키징	[8]
TENG+EMG	분광 모듈 기반 센서	마나나 숙성도	[3]
Solar cell (PV)	온도 모니터링 센서	포도 신선도	[9]
Solar cell (PV)	온습도 모니터링 센서	과일 신선도	[10]

### 2.1. 부패 지표 가스 감지를 통한 품질 평가

목재 다공체를 기반으로 한 자가 발전형 TENG와 압모니아 감지 기능을 결합한 무선 센서 시스템이 개발되었다<sup>11)</sup>. 이 장치는 냉장 유통 과정에서 발생하는 식품 부패 지표 가스(특히 암모니아)를 실시간으로 감지하여 식품 품질을 평가하도록 설계되었는데, 목재의 3차원 다공 구조와 CNT의 높은 전도성 및 흡착 특성 덕분에, 제작된 TENG는 넓은 표면적을 확보했다. 암모니아 농도 증가에 따라 TENG의 출력 전압 감소를 민감하게 반영하는 특성을 보여, 출력 전압에 따라 암모니아 농도를 감지할 수 있다. 또한,  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 저온과 75% 상대습도 환경에서도 출력 안정성을 유지하여 냉장·냉동 유통망에서 적용 가능성을 입증하였다. 제작된 TENG는 포장 내부 진동을 활용해 충분한 전력을 공급할 수 있었으며, 무선 송신 모듈과 통합된 시스템은 TENG의 출력 변화를 직접 식품 상태 데이터로 변환해 외부 수신기에 전송함으로써, 소비자가 저장 환경 변화를 즉시 파악할 수 있도록 지원한다. 실제 돼지고기와 생선 시편을 이용한 시험에서도 부패 진행에 따른 암모니아 농도 상승을 실시간으로 추적할 수 있었으며, 부패 임계값을 기준으로 유통 중 품질 저하 시점을 명확히 식별하였다. 이 연구는 외부 전원이 필요 없는 친환경적이고 단순한 구조의 스마트 패키징 솔루션을 제시하며, 실시간 원격 모니터링을 통해 식품 안전 확보와 폐기물 저감을 동시에 달성할 수 있음을 보여주었다.

### 2.2. 내부 습도 모니터링

습도 변화에 따른 TENG의 전압 출력 변화를 정량적으로 측정하여 과일의 신선도를 평가할 수 있는 스마트 패키징이 보고되었다<sup>12)</sup>. 목재 펄프에 존재하는 헤미셀룰로오스를 xylanase 효소로 부분 분해하여, 섬유 표면에 미세한 거칠기를 형성하고  $-\text{OH}$  그룹을 노출시켰다. 이 과정은 표면 접촉 면적을 늘리고, 수분 흡착 시 표면 전하가 소거되어 출력 전압이 감소하는 원리를 이용했다. 개발한 TENG는 과일 저장 및 유통 중 호흡과 증발을 통해 방출하는 수분에 의한 포장 내부 습도 변화를 민감하게 감지할 수 있다. 실제 7일간의 딸기 저장 실험을 통해 TENG의 출력을 추적하였다. 저장 시간이 경과함에 따라 딸기의 부패와 함께 포장 내부 습도가 증가하였고, 이에 따라 TENG 출력 전압은 초기 92.11 V에서 69.36 V까지 점차 감소하였다. 이는 출력 신호가 중량, 경도, pH 등 생리적 지표와 잘 일치함을 보여주며, 별도의 전원 없이 실시간 신선도 모니터링이 가능한 스마트 패키징으로의 적용이 가능함을 입증하였다.

수용성 다당류인 펙틴도 활용이 가능한데, 상대 습도를 감지한 TENG를 활용한 식품 품질 모니터링이 가능한 스마트 패키징이 보고되었다<sup>13)</sup>. 펙틴과 글리세롤을 조합한 필름형 TENG는 글리세롤 함량 변화에 따라 기계적 유연성

및 전기적 출력 특성이 달라졌다. 글리세롤 함량이 증가하면 필름의 유연성이 향상되어 기계적 변형에 따른 접촉 면적 확보가 용이해지고, 이에 따라 마찰 대전 및 전하 분리 효율이 개선되었다. 반면 본 연구의 최적 조건인 50% 조성의 경우, 필름 표면이 수분 흡착에 민감하게 반응하여 상대 습도 변화에 따른 전하 축적 및 소거 과정이 두드러지게 나타났다. 이러한 습도 의존적 전기 출력 특성은 펙틴 및 글리세롤의 친수성 작용기에 기인하며, 포장 내부 습도 변화를 전기적 신호로 직접 변환할 수 있는 센싱 기능을 가능하게 한다. 이러한 특성을 활용해 ‘Triboelectric Food-Quality Sensor (TFQS)’가 설계되었는데, 소비자가 포장을 살짝 눌렀을 때 발생하는 전기 신호는 모니터링 시스템에 전달되어 “적합”, “주의”, “부적합”과 같은 직관적 지표로 표시된다. 특히 크래커와 같은 저수분 식품의 경우 습기 흡수로 인한 경도 감소가 전기 신호 변화와 직접적으로 연관되어, 기존의 단순 인쇄된 유통기한 대신 실제 저장 조건을 반영한 동적 품질 모니터링이 가능해졌다. 이와 같은 시스템은 소비자에게 더 정확한 품질 정보를 제공하여 불필요한 식품 폐기를 줄일 수 있으며, 특히 자가 발전과 생분해성 소재라는 장점 덕분에 지속 가능한 스마트 패키징 솔루션으로 평가된다.

### 2.3. 유통 환경에서의 온도 이력 모니터링

온도는 냉장·냉동 식품의 안전성을 결정짓는 가장 기본적인 요소인데, 냉장 유통 과정에서 온도가 조금만 벗어나도 미생물의 급격한 증식이나 화학적 변질이 발생할 수 있기 때문이다. HEG를 기반으로 한 신선식품 운송용 온도 이력 표시 스마트 패키징도 개발된 바 있다<sup>14)</sup>. (Fig. 4) 이 시스템은 식품이나 의약품 포장 표면에 경고 라벨을 부착하고, 그 위를 인가된 전압에 따라 투과율이 변하는 고분자 분산 액정 필름(polymer dispersed liquid crystal, PDLC)으로 덮어 구성된다. PDLC 필름은 HEG와 연결되어 있으며, HEG의 출력 전압은 온도가 상승할수록 수분의 흡착·이동·증발 속도가 빨라지면서 증가한다. 정상 상태에서는 PDLC가 반투명하여 라벨 문구가 보이지 않지만, 특정 온도 이상에 도달하면 발생 전압이 임계값을 넘어 PDLC가 투명해지고, 그 아래에 숨겨져 있던 “떡지 마세요”와 같은 경고 문구가 드러나 소비자에게 품질 이상을 즉시 알린다. 또한 이 패키징은 단순히 경고를 표시하는 것에 그치지 않고, 제품이 고온 환경에 노출된 이력까지 표시할 수 있도록 설계되었다. PDLC 하단에 조도 센서를 배치하여 필름이 투명해질 때 들어오는 빛의 세기를 감지하고, 이 값이 일정 시간 이상 지속되면 LED가 점등되도록 하여, 이후 온도가 내려가 PDLC가 다시 불투명해져도 고온 노출 이력이 남도록 하였다. 사용된 HEG 소자는 셀룰로오스 기반으로 제작되어, 폐기 후 효소 처리로 분해 가능하며 전자 폐기물 문제



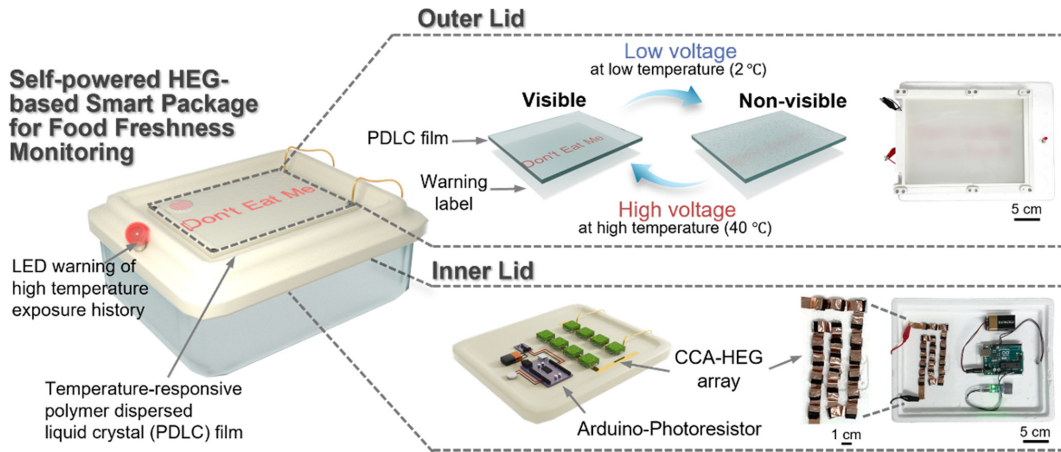


Fig. 4. 자가 발전형 신선식품 유통 환경 온도 모니터링 박스 개념도.

를 최소화할 수 있다는 장점도 갖는다.

에너지 하베스팅 기술이 도입된 식품 품질 및 신선도 모니터링 시스템은 가스, 습도, 온도 등 다양한 지표를 포괄한다. 습도와 온도 센서는 기본적으로면서도 광범위하게 활용되고 있으며, 가스 검출은 부패와 신선도 평가의 핵심 지표로 자리잡았다. 세균 및 화학적 위해 요소 검출은 소비자 건강 보호와 직접 연결된다. 향후 이러한 기술들은 식품 유통 과정에서의 안전성 확보, 소비자 신뢰 제고, 불필요한 폐기물 저감 등 사회적·산업적 파급 효과를 가져올 것으로 기대된다.

3. 유통 환경 충격·진동 감지 패키징

식품 및 농산물의 유통 과정에서는 낙하, 충격, 진동 등 다양한 기계적 스트레스가 빈번하게 발생한다. 이러한 물리적 충격은 제품의 외관 손상뿐 아니라 내부 품질 저하를 초래하며, 소비자 불만족과 식품 폐기로 이어진다. 따라서 물류 과정에서 발생하는 충격과 진동을 실시간으로 감지하고 기록할 수 있는 스마트 패키징 기술은 품질 관리와 물류 안전성을 확보하는 핵심 요소로 자리잡고 있다. 최근에는 유통·물류 과정에서 발생하는 기계적 진동을 전기 에너지로 변환하며 이를 센서로 활용하는 자가 발전형 센서 연구가 보고되고 있다. (Table 3)

최근 연구에서는 과일 운송 과정에서 발생하는 충격 문제를 해결하기 위해, 충격을 전기 신호로 바꾸어 활용할 수 있는 자가 발전형 스마트 패키징 기술이 제안되었다<sup>15)</sup>. 셀룰로오스와 키토산, 알긴산나트륨과 같은 천연 소재를 이용해 마찰전기 나노발전기(NP-TENG)를 제작하고 이를 포장재에 적용하였다. 이 장치는 운송 중 상자가 흔들리거나 충격을 받을 때 발생하는 힘을 전기적 신호로 변환하여, 외부 배터리 없이도 포장 내부의 충격 상황을 스스로 기록하고 전달할 수 있도록 설계되었다. 제작된 NP-TENG는 높은

Table 2. 식품 품질 및 신선도 평가 패키징 연구 사례

에너지 하베스팅	패키징 기능	적용처	참고 문헌
TENG	충돌, 손상 모니터링	과일	[15]
TENG	습도 모니터링	과일	[12]
TENG	습도 모니터링	크래커	[13]
TENG	습도 모니터링	식품, 의약품 패키징	[16]
TENG	박테리아 농도 감지	물	[17]
TENG	Melamine (불법 포장소재) 감지	-	[18]
TENG	산소 농도 모니터링	-	[19]
TENG	암모니아 가스 모니터링	육류	[11]
TENG	암모니아 가스 모니터링	돼지고기, 조개	[20]
HEG	온도 모니터링	신선식품	[14]
NFC	암모니아 가스 모니터링	어류	[21]
NFC	암모니아 가스 모니터링	시금치	[22]
NFC	압력(CO <sub>2</sub> 가스에 의한 부피팽창) 모니터링	김치	[23]
PV	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> 농도 모니터링	-	[24]
TEG	산소 농도 모니터링	냉장 식품	[25]

내구성과 안정성을 보여, 수만 회의 반복 충격에도 일정한 출력을 유지했다. 또한 실제 과일 운송을 모사한 실험에서, 충격의 세기와 위치, 적재 높이에 따라 출력 신호가 달라지는 것이 확인되었으며, 이 값은 과일의 손상 정도와 직접적으로 연관되었다. 키위 운송 실험에서는 진동이나 적재 높이가 커질수록 출력 신호와 손상률이 동시에 증가하는 결과가 관찰되었다. 더 나아가 실제 도로 환경에서도 가속이나 감속, 요철 통과 시 발생하는 충격을 즉각적으로 감지할 수 있었다. 이러한 특성은 과일과 같은 민감한 신선식품이

**Table 3.** 유통 환경 충격·진동 감지 패키징 연구 사례

에너지 하베스팅	패키징 기능	적용처	참고 문헌
TENG	유통 상황 모니터링	IoT 앱	[26]
TENG	상자 개수 카운팅	포장 상자	[27]
TENG	위치 파악	밀폐포장	[28]
EMG	저장고 문 개폐 인식	냉장 식품	[29]
RF	내부 압력 모니터링	고기, 생선	[30]
RF	온도, 습도, VOC 모니터링	돼지고기	[31]
RF	온도, 습도, 암모니아, 황하수소 가스	돼지고기	[32]

운송 과정에서 어떤 환경에 노출되었는지를 실시간으로 추적할 수 있게 하며, 유통 후 소비자에게 보다 신뢰성 있는 품질을 보장하는 기반이 된다. 결국 NP-TENG를 적용한 스마트 패키징은 충격 기록을 통해 물류 안전성을 높이고, 불필요한 손실을 줄이며, 장기적으로는 IoT 기반 유통 관리 시스템과 결합해 식품 폐기를 줄이는 지속 가능한 솔루션으로 발전할 수 있음을 보여주었다.

**4. 보안 및 위조 방지 패키징**

글로벌 유통 및 소비 시장의 확대와 함께, 위조품 및 불법 유통 제품의 문제는 날로 심각해지고 있다. 의약품, 주류 등 고가 제품은 위조와 불법 복제의 주요 대상이 되고 있으며, 이는 단순한 경제적 손실을 넘어 소비자의 안전과 건강에도 직접적인 위협을 가한다. 제품의 진위 여부를 확인하고 위변조를 방지하며, 추적 가능성을 확보하는 보안 기술을 통합한 스마트 패키징 기술에 에너지 하베스팅 기술을 접목한 연구 사례가 보고되고 있다. (Table 4)

기능화된 종이를 활용한 TENG 기반 보안 태그가 보고되었는데, 이 라벨은 손가락 터치와 같은 인간-기기 상호작용을 통해 전기 신호를 발생시키며, 이를 무선으로 전송해 정품 여부를 인증한다<sup>[33]</sup>. 이 라벨은 소비자가 단순히 라벨을 터치하는 것만으로도 제품의 진위 여부를 확인할 수 있으며, 위조자가 동일한 출력 신호를 모방하기는 매우 어렵다. 이 보안 태그는 터치 인터페이스뿐 아니라 IoT 네트워크와 연동될 수 있어, 정품 인증뿐 아니라 제품 추적 및 공급망 관리까지 가능하게 한다. 즉, 소비자가 제품을 구매할 때 스마트폰을 통해 정품 여부를 확인할 수 있고, 동시에 제조사와 유통업자는 해당 제품의 유통 경로를 추적할 수 있다.

또한 투명한 나노페이퍼를 활용해 인간-인터랙티브 방식으로 작동하는 보안 시스템도 제시되었다.<sup>[34]</sup> 사용자가 라벨을 터치하면 고유한 전기 신호가 생성되어, 정품 인증 과정에서 일종의 전자 지문 역할을 한다. 이러한 방식은 시각적 요소만을 모방하는 기존 위조품에 비해 훨씬 높은 수준의 보안성을 제공한다. 이 시스템은 그림이나 조각 작품의

**Table 4.** 보안 및 위조 방지 패키징 연구 사례

에너지 하베스팅	패키징 기능	적용처	참고 문헌
TENG	제품 인증, 위조 판별, 접근 제어	상자 라벨	[33]
TENG	위변조 방지	고가 제품	[34]
TENG	보안	QR코드	[35]
TENG	보안	딥러닝	[36]
TENG	보안	문자 암호화	[37]
RFID	보안	보안인쇄	[38]

표면에 직접 부착해도 시각적 손상이 거의 없으며, 소유자가 작품을 확인할 때만 전기 신호를 발생시킨다. 이는 제품의 미적 가치를 해치지 않으면서도 고유한 보안성을 부여한다. 또한 이 태그는 가품 제작자가 동일한 출력을 재현하기 어렵기 때문에, 정품 인증의 신뢰도를 크게 높일 수 있다.

에너지 하베스팅 기반 보안 및 위조 방지 스마트 패키징 기술은 단순히 시각적 식별을 넘어, 에너지 자급자족형 전자적 인증을 가능하게 한다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 기존의 홀로그램, 특수 잉크, QR 코드 등이 여전히 유효하지만, 이들은 모방 가능성과 전원 의존성이라는 한계를 벗어나기 어렵다. 반면 에너지 하베스팅 기반 라벨과 태그는 배터리스 구동, 무선 통신 연동, 고유 전기적 반응을 특징으로 하며, 위조 방지 난이도를 크게 높인다.

**결론**

**1. 요약**

에너지 하베스팅 기술은 기존 패키징이 수행하던 단순 보호 기능을 넘어, 센서·전원·보안 기능이 통합된 스마트 패키징으로의 진화를 가능하게 하는 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 에너지 하베스팅은 식품 품질 모니터링, 유통 과정 관리, 위변조 방지 등 다양한 기능을 위해 포장재에 자율 전원 공급 기능을 부여하며, 이를 통해 장기간 배터리 교체 없이 지속적인 센서 운용과 실시간 모니터링이 가능해짐이 확인되었다.

또한 TENG, PENG, PV 등 다양한 에너지 하베스팅 방식은 포장재 자체의 변형, 진동, 충격, 빛 등 주변 환경 요소를 활용하여 전력을 확보할 수 있어, 물류·저장 환경 전반에서 지능형 패키징 플랫폼을 구성하는 기반 기술로 기능한다. 이러한 기술은 식품 신선도 유지, 제품 안전성 강화, 공급망 투명성 향상 등을 지원하며 스마트 패키징의 핵심 역할을 하고 있다.

**2. 전망**

최근 사례들에서 눈에 띄는 경향은 생분해성·친환경 소

재를 활용한 에너지 하베스팅 기반 스마트 패키징 기술이다. 연구에서 제시된 목재 다공체 기반 TENG, 셀룰로오스 및 종이 기반 HEG, 천연 다당류 필름 기반 TENG와 같은 생분해성·친환경 소재들은 기존의 석유계 고분자 기반 에너지 하베스팅 소자를 대체할 수 있을 뿐 아니라, 기능성 측면에서도 우수한 특성을 나타내고 있다. 이러한 생분해성 기재들은 사용 후 자연 분해가 가능해 폐기물 축적 문제를 줄일 뿐 아니라, 식품·물류 환경에서 요구되는 안전성·비독성·규제 적합성 측면에서도 기존 고분자 대비 유리한 장점을 가진다. 따라서 친환경 기반 에너지 하베스팅 소자의 도입은 지속가능성을 확보하는 전략적 선택일 뿐 아니라, 스마트 패키징의 성능과 신뢰성을 동시에 개선할 수 있는 핵심적 기술 방향으로 자리매김하고 있다.

특히 패키징 재료 자체를 기능적 하베스터로 전환하는 이중 기능성 설계 전략은 자율 구동형 패키징 설계의 새로운 패러다임을 제안한다. 본 논문에서 소개한 사례로서, 식품 포장에 널리 사용되는 알루미늄 포일을 마찰 대전층으로 재해석한 TENG 구조는 기존 포장의 기계적 보호 성능을 유지하면서도 반복 접촉·마찰을 통해 유의미한 전기적 출력을 생성하여 센서 구동이 가능한 수준의 에너지를 제공하였다. 또한 본 논문에서 소개한 제습제가 갖는 수분 흡착 특성을 전하 발생 메커니즘과 결합한 사례는, 포장 내부의 습도 조절 기능과 에너지 생성 기능을 동시에 수행함으로써 패키징 내부 환경 관리와 전력 공급을 단일 소재로 해결할 수 있음을 보여주었다. 이처럼 본래의 보호·보존 기능을 수행하던 소재를 전력 생성 플랫폼으로 전환하는 방식은 소자 부피나 구조적 복잡성을 증가시키지 않으면서도 자율 구동형 패키징 구현을 가능하게 하는 혁신적 접근으로 평가된다. 따라서 향후 스마트 패키징 기술은 외부 전원·별도 모듈에 의존하지 않고, 포장재 자체가 센서와 모니터링 기능을 구동할 수 있는 재료 내재적 기능 중심의 설계로 확장될 가능성이 크며, 이는 지속가능성과 비용 효율성 측면에서도 중요한 연구 방향이 될 것이다.

에너지 하베스팅 기반 스마트 패키징은 향후 식품 신선도 모니터링, 의약품·백신 콜드체인 관리, 충격·진동 기반 물류 기록, 환경 변화 감지(습도·가스·온도), 위조 방지·정품 인증, NFC 기반 소비자 인터페이스 등 다수의 응용 분야로 확장될 잠재력이 크다. 산업적으로는 소비자 안전·신뢰성 강화, 물류 비용 절감, 폐기물 저감, 자동화 기반 공급망 관리의 정밀도 향상 등 다양한 이점을 제공하며, IoT·RFID·NFC 기반의 디지털 유통 인프라와 결합할 경우 스마트 패키징의 자율·지능 기능이 한층 강화될 것으로 기대된다. 향후 유망한 제품군으로는, 소비자와의 인터랙션을 강화하는 NFC 연동형 정보 제공 패키징, 저장된 에너지를 이용해 상태 변화(부패·습도·악화·온도 이상)를 시각적으로 표현하는 전력 자립형 표시 시스템, 물류 중 발생하는 환경

스트레스를 자동 기록하는 자가 기록형 패키징, 포장재 자체가 센서·전극 역할을 수행하는 재료 융합형 패키징 등이 주목된다.

### 3. 해결 과제

한편 이러한 에너지 하베스팅 기반 스마트 패키징 기술이 상용화로 나아가기 위해서는 다음과 같은 기술적·공정적·산업적 과제를 해결해야 한다.

#### 3.1. 출력 밀도 향상 및 에너지 관리 기술 확보

현재 보고된 에너지 하베스팅 소자의 출력 밀도는 수  $\mu\text{W}$ ~ $\text{mW}$  수준으로, BLE·RFID·NFC 등 무선 통신 모듈의 구동에 요구되는 수 W 수준의 전력 대비 여전히 부족한 수준이다. 특히 물류·저장 환경에서 발생하는 기계적 자극은 저주파·불규칙성이 크기 때문에 순간 출력의 변동폭도 크며, 이는 센서·통신 모듈의 안정 구동에 직접적인 제한 요소가 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 연구에서는 표면 미세구조 최적화(나노·마이크로 패터닝), 다층·3D 적층 구조, 비접촉 TENG 구조, 산화 알루미늄 에칭 공정 최적화 등을 통해 전하 밀도 및 전력 변환 효율을 향상시키는 전략이 제시되고 있다. 또한 초저손실 정류기, 임피던스 매칭 기반 승압 회로, 저전력 전력관리반도체와 같은 에너지 관리 회로의 고효율화는 동일 입력 대비 사용 가능한 유효 전력을 크게 증가시킬 수 있다. 나아가 마이크로 슈퍼커패시터·소형 리튬 배터리 등과 결합한 간헐 구동 전략은 낮은 출력 환경에서도 센서·통신 모듈의 신뢰성 있는 작동을 가능하게 한다. 따라서 향후 연구는 단일 하베스터의 출력 향상을 넘어, 에너지 수집·저장·소비 흐름을 통합적으로 최적화하는 시스템 수준의 설계가 필수적이며, 이는 스마트 패키징 분야에서 자율 구동 구현의 핵심 기술로 자리잡을 것으로 전망된다.

#### 3.2. 대량생산 공정과의 호환성 확보

에너지 하베스팅 기반 패키징 기술은 필름·종이·플라스틱 등 저비용 기재와의 높은 적합성을 강점으로 가지지만, 실제 산업용 패키징 라인(roll-to-roll, 라미네이션, 인쇄 공정 등)과의 호환성에서는 여전히 기술적·경제적 병목이 존재한다. 기존 패키징 라인은 50-300 m/min 수준의 고속 공정을 요구하는 반면, 표면 패터닝·금속 증착·다층 적층 기반 하베스터는 공정 속도 저하, 계면 박리, 기계적 응력 손상 등으로 품질 안정성이 저해될 가능성이 크다. 또한 기능성 하베스터 필름의 단가가 기존 패키징 필름 대비 수 배 이상 증가할 수 있어, 생산비용 측면의 장벽 또한 상용화를 제한하는 핵심 요소로 작용한다. 이를 해결하기 위해 최근 연구에서는 인쇄 기반 전극(탄소 잉크, PEDOT:PSS), 저온 공정, 단층 구조 설계, micro-texture 기반 저가 표면 기능



화, 기존 라미네이션 조건(압력·온도·속도)에 적합한 계면 안정화 공정, 나아가 장비 조건을 고려한 공정-소자 공동 최적화(co-optimization) 전략이 제시되고 있다. 이러한 접근은 기능성 유지와 제조 비용 절감을 동시에 달성하며, 기존 패키징 라인의 설비·속도·기계적 조건과의 간극을 줄여 상용화 장벽을 점진적으로 해소하는 핵심 전략으로 평가된다.

### 3.3. 장기 신뢰성 및 실사용 환경 내 안정성 검증

스마트 패키징이 실제 유통·물류 환경에서 활용되기 위해서는 에너지 하베스팅 소자가 장기간에 걸쳐 안정적인 출력을 유지할 수 있어야 한다. 그러나 포장재가 직면하는 조건은 온도 변화(냉장·상온), 고습도(50-95% RH), 반복적 진동·충격, 굽힘·압력, 표면 마찰, 장기간 저장으로 인한 노화 등 매우 가혹하며, 이는 에너지 하베스팅 소자의 출력 안정성과 내구성에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 연구는 수분·열 안정성이 높은 고분자 또는 복합 소재의 도입, 내굴곡성 유연 전극 개발, 봉지 기술 적용, 고습 환경에서도 전하 유지가 가능한 이온 기반 또는 표면 처리 기술 등을 통해 장기 신뢰성 확보 전략을 제시하고 있다. 또한 하베스터와 센서·전극 사이의 계면 안정성을 향상시키기 위한 접착층 최적화, 라미네이션 조건 조절, 표면 개질 등도 필수적이며, 반복 하중 및 환경 노출을 모사한 가속 수명 시험의 표준화 필요성도 제기되고 있다. 특히 실제 물류 환경(저주파 진동, 반복 충격, 장기 냉장 조건)에서의 출력 유지성은 자율 구동 패키징 상용화의 핵심 검증 단계이며, 향후 연구는 소재·구조·공정 수준의 내환경성 확보와 함께 출력 편차를 최소화하는 장기적 안정성 설계에 집중될 것으로 전망된다.

### 3.4. 표준화 및 규제 적합성 확보

식품 접촉 물질 (Food Contact Material, FCM) 규제(FDA/EU), 전자파 규제, 생분해성 인증 등 산업별 표준을 충족시키기 위한 소재·구조·공정 레벨의 연구가 병행되어야 한다. 특히 셀룰로오스, 키토산, 알긴산나트륨, 펙틴 등 바이오 기반 재료는 본질적으로 인체 및 환경에 안전한 소재로 평가받고 있다. 특히 셀룰로오스의 경우 FDA 21 CFR 176.170에서 식품 접촉 용도로 사용 가능한 물질로 분류되고 있으며, EU Regulation 10/2011 목록에서도 자연 유래 다당류로서 인정받고 있다. 또한 펙틴, 전분 등 식품 등급 소재는 EU Regulation No. 1333/2008에서 이미 식품첨가물로 허용되고 있어 소재 안전성 기반이 구축되어 있다. 따라서 향후 스마트 패키징 분야에서는 전력 생성 기능을 넘어, 식품 규제 인증을 충족하는 소재 공학적 설계와 검증 절차가 기술 상용화의 필수 단계로 자리잡을 것으로 전망된다.

위 내용을 종합하면, 에너지 하베스팅 기술은 단순 전력 보조 기술을 넘어 스마트 패키징의 기능·신뢰성·지속가능성

을 동시에 향상시키는 핵심 플랫폼으로 발전하고 있다. 기술적 해결 과제와 공정적 장벽이 점진적으로 해소될수록, 스마트 패키징은 식품·의약·물류·소비재 등 다양한 산업 전반에서 빠르게 확산될 것으로 전망된다.

## 감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원 기본사업 "신재생 에너지 구현 친환경 고효수성수지 기반 수분 유도 발전기 개발 (KITECH UR250066)"의 지원으로 수행한 연구입니다.

## 참고문헌

- Park, J.-M.; Jung, H.-M. Development of a Returnable Folding Plastic Box RFID Module for Agricultural Logistics using Energy Harvesting Technology. *Korean Journal of Packaging Science and Technology* 2023, 29 (3), 223-228.
- Pang, Y.; Huang, Z.; Fang, Y.; Xu, X.; Cao, C. Toward self-powered integrated smart packaging system - Desiccant-based triboelectric nanogenerators. *Nano Energy* 2023, 114.
- Meng, W.; Yang, Y.; Zhang, R.; Wu, Z.; Xiao, X. Triboelectric-electromagnetic hybrid generator based self-powered flexible wireless sensing for food monitoring. *Chemical Engineering Journal* 2023, 473.
- Park, J.-M.; Jung, H.-M. Analysis of Power Generation Characteristics of TENG (Triboelectric Nanogenerator) Suitable for Domestic Transport Environment. *Korean Journal of Packaging Science and Technology* 2022, 28 (3), 193-199.
- Ravi Sankar, P.; Supraja, P.; Mishra, S.; Prakash, K.; Rakesh Kumar, R.; Haranath, D. A novel triboelectric nanogenerator based on only food packaging aluminium foils. *Materials Letters* 2022, 310.
- Esmeria, J. M.; F. Ligutan, D. D.; Abad, A. C. Triboelectric nanogenerator (TENG) energy harvester using polypropylene-based recycled food packaging materials. *Japanese Journal of Applied Physics* 2025, 64 (9).
- Sankar, P. R.; Prakash, K.; Supraja, P.; Rakesh Kumar, R.; Mishra, S.; Haranath, D. A triboelectric nanogenerator based on food packaging Aluminium foil and Parafilm for self-powered electronics. *Physica Scripta* 2021, 96 (12).
- Slobodian, P.; Olejnik, R.; Matyas, J.; Riha, P.; Hausnerova, B. A coupled piezo-triboelectric nanogenerator based on the electrification of biaxially oriented polyethylene terephthalate food packaging films. *Nano Energy* 2023, 118.
- Xiao, X.; Wang, M.; Cao, G. Solar energy harvesting and wireless charging based temperature monitoring system for food storage. *Sensors International* 2023, 4.
- Xiao, X. Facile fabrication of flexible sustainable light energy harvester for self-powered sensor system in food monitoring. *Sensors International* 2022, 3.
- Cai, C.; Mo, J.; Lu, Y.; Zhang, N.; Wu, Z.; Wang, S.; Nie, S. Integration of a porous wood-based triboelectric nanogenerator and gas sensor for real-time wireless food-quality assessment. *Nano Energy* 2021, 83.

12. Du, J.; Jiao, C.; Li, C.; Tao, Y.; Lu, J.; Cheng, Y.; Xia, X.; Tan, M.; Wang, H. Eco-friendly and humidity-sensitive cellulosic triboelectric materials tailored by xylanase for monitoring the freshness of fruits. *Nano Energy* 2023, 116.
13. Jin, Z.; Fu, Y.; Zhao, H.; Ding, W.; Wang, Y.-C. Carbohydrate polymer-based triboelectric devices for energy harvesting and intelligent packaging for food-quality monitoring. *Nano Energy* 2025, 134.
14. Shin, E.; Kim, G.; Zhao, K.; Zan, G.; Kim, H.; Li, S.; Lee, J.; Kang, D.; Oh, J. W.; Jung, J.; et al. Environmentally sustainable moisture energy harvester with chemically networked cellulose nanofiber. *Energy & Environmental Science* 2024, 17 (19), 7165-7181. DOI: 10.1039/d4ee01881h.
15. Su, J.; Gao, Y.; Yang, Y.; Fan, P.; Zhou, Z.; Wang, Z.; Zhang, X.; Fang, L. Natural Polysaccharide Film-Based Triboelectric Sensor for Fruit Transportation Collision Monitoring. *ACS Appl Mater Interfaces* 2024, 16 (10), 12417-12427.
16. Rehman, H. M. M. U.; Prasanna, A. P. S.; Rehman, M. M.; Khan, M.; Kim, S.-J.; Kim, W. Y. Edible rice paper-based multifunctional humidity sensor powered by triboelectricity. *Sustainable Materials and Technologies* 2023, 36.
17. Wang, C.; Wang, P.; Chen, J.; Zhu, L.; Zhang, D.; Wan, Y.; Ai, S. Self-powered biosensing system driven by triboelectric nanogenerator for specific detection of Gram-positive bacteria. *Nano Energy* 2022, 93.
18. Zhu, H.; Wang, N.; Xu, Y.; Chen, S.; Willander, M.; Cao, X.; Wang, Z. L. Triboelectric Nanogenerators Based on Melamine and Self-Powered High-Sensitive Sensors for Melamine Detection. *Advanced Functional Materials* 2016, 26 (18), 3029-3035.
19. Won, S.; Won, K. Self-powered flexible oxygen sensors for intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 2021, 29.
20. Gao, C.; Zhang, W.; Liu, T.; Luo, B.; Cai, C.; Chi, M.; Zhang, S.; Liu, Y.; Wang, J.; Zhao, J.; et al. Hierarchical porous triboelectric aerogels enabled by heterointerface engineering. *Nano Energy* 2024, 121.
21. Douaki, A.; Ahmed, M.; Longo, E.; Windisch, G.; Riaz, R.; Inam, S.; Tran, T. N.; Papadopoulou, E. L.; Athanassiou, A.; Boselli, E.; et al. Battery-Free, Stretchable, and Autonomous Smart Packaging. *Adv Sci (Weinh)* 2025, 12 (22), e2417539.
22. Naik, A.; Lee, H. S.; Herrington, J.; Barandun, G.; Flock, G.; Guder, F.; Gonzalez-Macia, L. Smart Packaging with Disposable NFC-enabled Wireless Gas Sensors for Monitoring Food Spoilage. *ACS Sens* 2024, 9 (12), 6789-6799.
23. Nguyen, T. B.; Tran, V. T.; Chung, W. Y. Pressure Measurement-Based Method for Battery-Free Food Monitoring Powered by NFC Energy Harvesting. *Sci Rep* 2019, 9 (1), 17556.
24. Escobedo, P.; de Vargas-Sansalvador, I. M. P.; Carvajal, M.; Capitán-Vallvey, L. F.; Palma, A. J.; Martínez-Olmos, A. Flexible passive tag based on light energy harvesting for gas threshold determination in sealed environments. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2016, 236, 226-232.
25. Araque, P. E.; Perez de Vargas-Sansalvador, I. M.; Lopez-Ruiz, N.; Capitán-Vallvey, L. F.; Palma, A. J.; Carvajal Rodriguez, M. A.; Martínez-Olmos, A. Thermoelectric Energy Harvesting for Oxygen Determination in Refrigerated Intelligent Packaging. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2020, 69 (4), 1353-1361.
26. Wang, Y.; Liu, G.; Meng, Q.; Jiang, X.; Li, X.; Liu, H.; Li, Z. Bending the straight into curved: A tree-ring-inspired fully printed omnidirectional triboelectric nanogenerator with ring-nested structure for all-in-one wearable self-powered systems and IoT smart packaging. *Nano Energy* 2025, 135.
27. Kang, M.; Cui, X.; Zhou, Y.; Han, Y.; Nie, J.; Zhang, Y. Self-powered wireless automatic counterweight system based on triboelectric nanogenerator for smart logistics. *Nano Energy* 2024, 123.
28. Yang, Y.; Mu, B.; Wang, M.; Nikitina, M. A.; Zafari, U.; Xiao, X. Triboelectric nanogenerator-based wireless sensing for food precise positioning. *Materials Today Sustainability* 2022, 19.
29. Xiao, X.; Yang, Y.; Wu, Z. Biomechanical energy harvested wireless sensing for food storage. *Biosensors and Bioelectronics: X* 2022, 12.
30. Do, H.-D.; Kim, D.-E.; Lam, M. B.; Chung, W.-Y. Self-Powered Food Assessment System Using LSTM Network and 915 MHz RF Energy Harvesting. *IEEE Access* 2021, 9, 97444-97456.
31. Lam, M. B.; Dang, N. T.; Nguyen, T.-H.; Chung, W.-Y. A Neural Network-Based Model of Radio Frequency Energy Harvesting Characteristics in a Self-Powered Food Monitoring System. *IEEE Sensors Journal* 2019, 19 (19), 8813-8823.
32. Nguyen, N. H.; Lam, M. B.; Chung, W.-Y. Battery-less Pork Freshness Monitoring Based on High-Efficiency RF Energy Harvesting. *Journal of Sensor Science and Technology* 2020, 29 (5), 293-302.
33. Ferreira, G.; Opinião, A.; Das, S.; Goswami, S.; Pereira, L.; Nandy, S.; Martins, R.; Fortunato, E. Smart IoT enabled interactive self-powered security tag designed with functionalized paper. *Nano Energy* 2022, 95.
34. Zhong, J. W.; Zhu, H. L.; Zhong, Q. Z.; Dai, J. Q.; Li, W. B.; Jang, S. H.; Yao, Y. G.; Henderson, D.; Hu, Q. Y.; Hu, L. B.; et al. Self-Powered Human-Interactive Transparent Nanopaper Systems. *ACS Nano* 2015, 9 (7), 7399-7406.
35. Xia, Y.; Zhu, Y.; Yang, B.; Guo, W.; Han, S.; Wang, X. Wireless-controlled, self-powered, and patterned information encryption display system based on flexible electroluminescence devices. *Nano Energy* 2022, 102.
36. Chen, W.; Kang, J.; Zhang, J.; Zhang, Y.; Zhou, X.; Yan, Q.; Kim, H.-S.; Guo, T.; Wu, C.; Kim, T. W. An information display and encrypted transmission system based on a triboelectric nanogenerator and a cholesteric liquid crystal. *Nano Energy* 2025, 134.
37. Han, F.; Wang, T.; Chen, Y.; Ren, X.; Peng, Z.; Zheng, X.; Wang, K.; Gao, Y.; Cheng, Y.; Gao, G. Aligned triboelectric all-nanofiber generator as self-powered sensors for message cryptography. *Composites Part B: Engineering* 2025, 306.
38. Simske, S. J. Smart Packaging for Security and Logistics. *NIP & Digital Fabrication Conference* 2011, 27.