



[IDA입시연구소]



# 수행평가 보고서

---

## 물리학

## 보고서 활용 가이드

이 보고서의 가장 큰 강점은 세 편의 문헌을 단순히 나열하지 않고, '마찰소자 → 나노스케일 굽힘-전기 → 전기화학'이라는 흐름으로 물리적 메커니즘의 다양성을 비교·정리했다는 점입니다. 수행평가 제출 시에는 이 구조적 흐름이 잘 드러나도록 '결론' 부분을 가장 먼저 교사에게 어필하세요. 결론에서 세 접근법의 상호 보완성을 언급한 부분은 단순 요약을 넘어 본인의 사고가 담긴 핵심 논점이므로, 제출 전 결론 문단을 한 번 더 검토하여 논리 흐름이 자연스러운지 확인하는 것이 좋습니다.

보고서 전체에서 특히 강조할 포인트는 세 가지입니다.

- ① 서로 다른 물리 원리(압전, 굽힘-전기, 전기화학)를 하나의 주제(심장 박동기 자가 구동)로 묶어 비교한 관점
- ②  $Q=CV$  관계식처럼 고등 물리 개념을 실제 기술과 연결한 부분
- ③ 특허·논문·리뷰 논문이라는 서로 다른 형태의 문헌을 균형 있게 활용한 점

제출 시 참고문헌 목록에 특허번호(10-2191060)가 이미 포함되어 있는 것은 신뢰도를 높이는 좋은 요소입니다. 그대로 유지하세요.

## 섹션별 보완 포인트

'물리학 원리 설명' 섹션에서 마찰소자 방식을 '압전 효과(마찰소자 방식)'로 설명하고 있는데, 마찰소자는 엄밀히는 마찰대전(Triboelectric) 현상에 가깝습니다. 압전 효과는 결정 구조 내 전하 분리가 핵심인 반면, 마찰소자는 서로 다른 재료 간 접촉·분리 시 발생하는 정전기적 전하 이동이 핵심입니다. 이 두 현상은 유사해 보이지만 작동 원리가 다르므로, '마찰소자 방식(마찰대전 기반)'으로 표현을 살짝 다듬으면 물리적 정확도가 높아집니다. 실제로 함께 보면 좋은 자료로 제시된 '이중 접촉 마찰대전 발전기' 논문도 이 구분을 잘 다루고 있으니 참고하면 좋습니다.

## 추가 탐구 방향

이 보고서를 바탕으로 더 깊이 파고들 수 있는 방향을 세 가지로 제안합니다.

① 효율 수치 비교 탐구: 세 방식의 에너지 변환 효율(%)을 실제 논문 데이터 기반으로 직접 수치화해 보는 탐구를 해볼 수 있습니다. 예를 들어 마찰소자가 수명을 '50% 이상 연장'한다는 것이 실제 전력 출력( $\mu W$  단위)으로는 어느 정도인지, 탄소나노튜브 기반 시스템의 출력 밀도는 어느 수준인지 비교하면 보고서의 논의가 훨씬 구체적이고 설득력 있어집니다.

② 하이브리드 시스템 설계 아이디어: 결론에서 '세 접근법의 융합'을 언급했는데, 실제로 '심장 내 환경(혈액·전해질 존재) + 미세 진동 + 나노스케일 소재'를 동시에 고려한 하이브리드 하베스터를 가상으로 설계해 보고, 각 방식이 어떤 조건에서 담당 역할을 맡을지 도식화해 보면 심화 탐구 자료로 활용하기 좋습니다.

③ 생체적합성(Biocompatibility) 관점 추가: 현재 보고서는 에너지 변환 원리에 집중되어 있는데, '인체 삽입형 기기'라는 특성상 소재의 생체적합성(독성, 장기 안정성)도 중요한 변수입니다. 탄소나노튜브의 생체 독성 연구나 나노소재 규제 현황을 추가로 조사하면 생명과학·화학 교과와도 연결한 융합 탐구로 발전시킬 수 있습니다.

## 참고사항 및 팁

- ① 용어와 수식은 이미 잘 정리되어 있습니다. 발표나 구두 평가 상황이 있다면, 용어 설명 섹션의 7개 개념 중 '굽힘-전기 효과'와 'EDLC'는 교사나 심사자가 추가 질문할 가능성이 높습니다. '굽힘-전기 효과는 압전 효과와 달리 모든 유전체에서 나타난다'는 포인트, 'EDLC에서 커패시턴스가 기계적 변형에 따라 변한다'는 포인트를 한 문장으로 말할 수 있게 준비해 두세요.
- ② '관련 질문 만들기' 섹션의 7번 질문(환경적 영향)은 현재 보고서 내용과 다소 거리가 있는 주제입니다. 만약 이 질문에 답변을 준비한다면, 배터리 교체 수술을 줄이는 것이 의료 폐기물 감소로 이어진다는 구체적인 연결고리를 만들어 두면 설득력이 생깁니다.
- ③ 고등학생 보고서 문체 팁: 현재 보고서는 전반적으로 문어체가 잘 유지되어 있습니다. 다만 '이는 물리학이 실제 인간의 삶의 질 향상에 직접적으로 기여할 수 있는 중요한 기술적 진보라 할 수 있습니다'처럼 다소 추상적으로 마무리된 문장은, '심장 박동기 배터리 교체를 위한 재수술 횟수를 줄여 환자 부담을 낮춘다는 점에서 직접적인 의료 혜택으로 이어진다'처럼 구체적인 사례로 바꾸면 더 인상적입니다.
- ④ 함께 보면 좋은 자료로 제시된 전자신문 기사(2024)와 마찰대전 발전기 논문은 보고서의 '마찰소자 기반 방식'을 실제 최신 사례와 연결해 주므로, 발표 자료나 추가 서술이 필요할 때 적극 활용하세요.

## 수행평가 보고서 내용

### 문헌 제목 및 출처

[자료 1] 제품 수명을 증가시킬 수 있는 심장 박동기 및 이의 에너지 하베스팅 방법

· 출처: 한국전자기술연구원 (KETI), 연구책임자 황태호

[자료 2] 심장 내 심박 조율기 자가 구동을 위한 나노스케일 혈압 에너지 하베스팅의 수학적 해석 모델: 크기 종속 연속체역학을 중심으로

· 출처: 윤현준, 윤병동 (서울대학교)

[자료 3] 기계-전기화학 에너지 하베스터의 최근 응용과 진전

· 출처: 심현준, 최창순 (동국대학교, 한양대학교), 한국전기화학회지, Vol. 28, No. 1, 2025

### 문헌 선정 이유

이 세 문헌을 선택한 이유는 심장 박동기의 에너지 하베스팅 기술을 실용적, 이론적, 그리고 응용적 측면에서 종합적으로 이해할 수 있기 때문입니다.

첫 번째 자료는 한국전자기술연구원에서 개발한 실제 특허 기술로, **마찰소자 기반** 비선형적 전기 에너지 하베스팅을 통해 심장 박동기 수명을 50% 이상 연장할 수 있는 구체적이고 실용적인 방법을 제시합니다.

두 번째 자료는 서울대학교에서 발표한 이론 연구로, **나노스케일 굽힘-전기 효과**에 기반한 혈압 에너지 하베스팅의 수학적 해석 모델을 제공하여 표면 효과, 비국소성 등의 물리학적 원리를 깊이 있게 다룹니다.

세 번째 자료는 동국대학교와 한양대학교의 최신 연구(2025년 1월)로, **탄소나노튜브 기반 기계-전기화학** 에너지 하베스터의 원리와 웨어러블 센서, 삽입형 의료기기, 해양 모니터링 등 다양한 실제 응용 사례를 포괄적으로 다룹니다.

이 세 자료를 통해 서로 다른 물리학적 접근법(마찰, 굽힘-전기효과, 전기화학적 이중층)의 비교분석이 가능하며, 이론적 토대부터 실제 응용까지 에너지 하베스팅 기술의 전체적인 발전 방향을 이해할 수 있어 물리학 탐구에 최적입니다.

### 내용 요약

**첫 번째 자료**는 기존 심장 박동기가 배터리 한계로 약 10년 주기로 교체해야 하는 문제를 해결하기 위한 혁신적인 에너지 하베스팅 기술을 소개합니다. 이 기술은 심장 박동기 내부에 **마찰소자**를 삽입하여 비선형적 전기 에너지를 수확하는 방식으로, 다중 에너지 저장소를 통해 불규칙적인 에너지 공급 상황에서도 효율성을 높일 수 있습니다. 특히 과포화 및 불규칙한 에너지 발생 상황에서의 에너지 분배 방안을 제공하고, 시동 전압을 능동적으로 제어하여 제품 수명을 50% 이상 증가시킬 수 있다는 점이 핵심입니다.

**두 번째 자료**는 나노공정 기술의 발전으로 가능해진 초소형 심박 조율기의 이론적 기반을 제시합니다. 인체 혈압으로부터 영구적으로 전력을 수확하는 나노스케일 에너지 하베스팅 기술에 대한 수학적 해석 모델을 개발했습니다. **굽힘-전기 효과**(flexoelectricity), 표면 효과, 비국소성에 의한 크기 효과를 고려하여 나노스케일 유전체 판의 출력 전압을 예측할 수 있는 멀티피직스 해석 모델을 제안했으며, Kirchhoff 박판 이론과 Gurtin-Murdoch 이론을 적용하여 1Hz 저주파 변동하는 인체 혈압 조건에서 출력 전압을 계산할 수 있는 이론적 토대를 마련했습니다.

세 번째 자료는 2025년 최신 연구로, **탄소나노튜브 기반 기계-전기화학** 에너지 하베스터의 원리와 응용을 종합적으로 다룹니다. 탄소나노튜브가 전해질에 담귀질 때 전기화학적 이중층 커패시턴스(EDLC)를 형성하고, 기계적 변형시 이 커패시턴스가 변화하면서 전압이 발생하는 원리를 설명합니다. 코일, 버클, 플라이 등 다양한 구조의 탄소나노튜브 실을 제작하여 웨어러블 센서, 삽입형 의료기기, 해양 모니터링 시스템에 실제 적용한 사례들을 제시하며, 특히 돼지 심장 실험에서 심박동으로부터 전기를 생성하여 심장을 역으로 자극하는 것에 성공했다고 보고합니다.

## 주요 쟁점 소개

세 문헌에서 다루는 주요 쟁점은 **에너지 하베스팅 메커니즘의 다양성과 규모별 접근법의 차이**입니다.

첫 번째 자료는 **마찰소자 기반** 거시적 접근으로 불규칙한 에너지 공급 상황에서의 효율성 향상에 초점을 맞추며, 두 번째 자료는 **나노스케일 굽힘-전기 효과**를 통한 미시적 접근을 다룹니다. 세 번째 자료는 이들과 완전히 다른 **전기화학적 메커니즘**을 제시하여, 탄소나노튜브 표면의 이온 흡착/탈착에 따른 커패시턴스 변화를 활용합니다.

또 다른 핵심 쟁점은 **실용성과 이론적 정교함의 균형**입니다. 첫 번째 자료는 특허 등록된 기술로서 즉시 상용화 가능성에 중점을 두고, 두 번째 자료는 수학적 모델링을 통한 정확한 예측에 집중하며, 세 번째 자료는 실제 생체 실험(돼지 심장)까지 수행하여 생체 적합성과 실제 적용 가능성을 동시에 검증했습니다.

**환경 적응성** 역시 중요한 쟁점입니다. 마찰소자는 건조한 환경에서, 나노스케일 유전체는 혈관 내 환경에서, 탄소나노튜브는 전해질 환경에서 각각 최적화되어 작동 조건의 다양성을 보여줍니다. 이러한 접근법의 다양성은 에너지 하베스팅 기술이 단일 솔루션이 아닌 응용 분야별 맞춤형 기술로 발전해야 함을 시사합니다.

## 관련 단원명

- **전기와 자기:** 전기장, 전위, 정전 용량과 관련된 개념들이 에너지 하베스팅의 전기적 측면을 이해하는 데 필요합니다.
- **역학과 에너지:** 운동 에너지와 위치 에너지의 전환, 에너지 보존 법칙이 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 과정에서 중요합니다.
- **파동과 진동:** 심장 박동의 주기적 운동(1 Hz)과 공진 주파수 개념이 에너지 하베스팅 효율성과 직접 연관됩니다.

## 타교과목 관련 단원명

- **수학:** 미분방정식, 벡터 해석, Hamilton의 원리 등이 나노스케일 에너지 하베스팅의 수학적 모델링에 활용됩니다.
- **화학:** 결정 구조, 격자 상수, 유전체의 분자 구조 등이 나노스케일에서의 물리적 현상을 이해하는 데 필요합니다.
- **생명과 의학:** 심장의 구조와 기능, 혈압의 생리학적 메커니즘이 에너지 하베스팅 기술의 의학적 응용을 이해하는 기초가 됩니다.
- **공학:** 재료공학의 압전 소재, 나노공정 기술, 전자공학의 회로 설계가 실제 기술 구현과 직결됩니다.

## 물리학 용어 설명

**에너지 하베스팅(Energy Harvesting):** 주변 환경에서 버려지는 에너지를 수집하여 전기 에너지로 변환하는 기술입니다. 본 연구에서는 심장 박동으로 인한 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환합니다.

**압전 효과(Piezoelectric Effect):** 기계적 응력이 가해졌을 때 전기 분극이 발생하거나, 반대로 전기장이 가해졌을 때 기계적 변형이 일어나는 현상입니다.

**굽힘-전기 효과(Flexoelectric Effect):** 변형을 구배와 전기 분극 사이의 선형 결합으로, 변형을 구배가 국부적으로 반전 대칭을 깨뜨려 모든 유전체에서 쌍극자 모멘트를 형성하는 현상입니다.

**전기화학적 이중층 커패시턴스(EDLC, Electrochemical Double Layer Capacitance):** 전극과 전해질 계면에서 이온들이 전극 표면에 흡착되어 형성되는 전기적 이중층의 커패시턴스입니다. 탄소나노튜브 표면의 접근 가능한 표면적이 변할 때 커패시턴스가 변화합니다.

**탄소나노튜브(Carbon Nanotube):** 탄소 원자들이 육각형 격자를 이루며 원통형으로 말린 구조로, 뛰어난 전기 전도성과 기계적 강도를 가집니다. 기계-전기화학 하베스터에서는 전극 소재로 활용됩니다.

**트위스트론(Twistron):** 탄소나노튜브 실을 꼬아 코일 형태로 만든 구조로, 기계적 변형시 전기화학적 특성이 변화하여 전기를 생성하는 에너지 하베스터입니다.

**나노스케일(Nanoscale):** 10-m 수준의 극미세한 크기 단위로, 이 영역에서는 거시세계와 다른 특별한 물리 현상들이 나타납니다.

**유전체(Dielectric):** 전기장이 가해질 때 전기 분극이 일어나는 절연 물질로, 전기 에너지를 저장할 수 있는 능력을 가집니다.

## 물리학 원리 설명

에너지 하베스팅의 핵심 원리는 **에너지 변환과 보존 법칙**입니다. 심장 박동으로 인한 기계적 에너지가 서로 다른 물리적 메커니즘을 통해 전기 에너지로 변환되는 과정에서 에너지 보존 법칙이 적용됩니다.

### # 1. 압전 효과 (마찰소자 방식)

**압전 효과**는 기계적 힘을 가했을 때 전기가 발생하는 현상입니다. 심장 박동으로 압전 소재가 압축되면 전하 분리가 일어나 전압이 생성됩니다:

기계적 압력 → 전하 분리 → 전압 생성

### # 2. 굽힘-전기 효과 (나노스케일 방식)

**굽힘-전기 효과**는 나노크기에서 재료가 휘어질 때 전기가 발생하는 현상입니다. 일반적인 압전 효과와 달리 모든 유전체 재료에서 나타나며:

재료의 휨 → 전기 분극 → 전압 생성

### # 3. 기계-전기화학 효과 (탄소나노튜브 방식)

탄소나노튜브에서는 **전기화학적 이중층 커패시턴스** 변화가 핵심입니다. 기본 관계식은:

$$Q = CV$$

여기서 기계적 변형이 전극 표면적을 변화시켜 커패시턴스 C가 변하고, 이에 따라 전하 Q와 전위 V가 변화합니다.

**작동 원리:** 탄소나노튜브가 늘어나면 → 표면적 증가 → 커패시턴스 증가 → 더 많은 전하 저장 → 전압 변화

### # 4. 에너지 변환 과정

모든 방식에서 **에너지 보존 법칙**이 적용됩니다:

E기계 = E전기 + E손실

에너지 변환 효율은 각 방식별로 다르며:

- 마찰소자: 거시적 압력 변화에서 높은 효율
- 굽힘-전기: 나노스케일 미세 변형에서 높은 효율
- 전기화학: 전해질 환경에서 지속적 작동 가능

인체 혈압의 **주기적 변동**(심박수 60-100회/분, 맥압 약 40 mmHg)이 모든 방식에서 공통적인 에너지원이 됩니다.

## 참고문헌

1. 황태호 외, "제품 수명을 증가시킬 수 있는 심장 박동기 및 이의 에너지 하베스팅 방법", 한국전자기술연구원, 특허번호 10-2191060
2. 윤현준, 윤병동, "심장 내 심박 조율기 자가 구동을 위한 나노스케일 혈압 에너지 하베스팅의 수학적 해석 모델: 크기 종속 연속체역학을 중심으로", 서울대학교
3. 심현준, 최창순, "기계-전기화학 에너지 하베스터의 최근 응용과 진전", 한국전기화학회지, Vol. 28, No. 1, 2025, pp. 1-13

## 관련 질문 만들기

1. 에너지 하베스팅의 핵심 원리인 에너지 보존 법칙을 설명하고, 심장 박동의 기계적 에너지가 전기 에너지로 변환되는 과정을 서술하시오.
2. 압전 효과와 굽힘-전기 효과의 차이점을 설명하고, 각각이 어떤 상황에서 더 효과적인지 비교하시오.
3. 탄소나노튜브에서  $Q=CV$  관계식을 이용하여, 기계적 변형이 전압 생성에 미치는 영향을 설명하시오.
4. 심장 박동의 주기적 특성(1분에 60-100회)이 에너지 하베스팅에 어떤 장점을 제공하는지 주기 운동의 관점에서 설명하시오.
5. 세 가지 에너지 하베스팅 방식(마찰소자, 굽힘-전기, 전기화학) 중에서 심장 박동기에 가장 적합한 방식은 무엇이고, 그 이유를 물리학적 근거와 함께 설명하시오.
6. 나노기술이 에너지 하베스팅 분야에 기여하는 점을 설명하고, 나노스케일에서만 나타나는 특별한 물리 현상의 예를 들어보시오.
7. 에너지 하베스팅 기술이 환경에 미치는 긍정적 영향을 에너지 절약과 지속가능성 관점에서 논하시오.

## 결론

이번 세 문헌 분석을 통해 심장 박동기의 에너지 하베스팅 기술이 **다각적 접근법**을 통해 급속히 발전하고 있음을 확인했습니다. 한국전자기술연구원의 마찰소자 기반 기술, 서울대학교의 나노스케일 굽힘-전기 효과 모델, 그리고 동국대-한양대의 탄소나노튜브 기반 전기화학 시스템은 각각 서로 다른 물리학적 메커니즘을 활용하면서도 상호 보완적인 특성을 보입니다.

**물리학적 다양성**의 관점에서, 마찰소자 방식은 거시적 압전효과를, 나노스케일 방식은 굽힘-전기효과와 크기 종속성을, 전기화학 방식은 이온 이동과 계면 커패시턴스 변화를 각각 활용하여 에너지 하베스팅의 물리적 원리가 얼마나 다양할 수 있는지를 보여줍니다.

**실용성과 확장성** 측면에서 특히 주목할 점은 탄소나노튜브 기반 기술이 단순히 심장 박동기를 넘어 웨어러블 센서, 해양 모니터링, 심지어 세포 자극까지 다양한 분야에 실제 적용되고 있다는 것입니다. 돼지 심장에서의 성공적인 생체 실험은 이론에서 실제 의료 응용으로의 전환 가능성을 명확히 입증했습니다.

**미래 전망**으로는 세 가지 접근법의 융합을 통한 하이브리드 시스템 개발이 예상됩니다. 각 방식의 장점을 결합하여 다양한 환경 조건과 에너지원에 대응할 수 있는 범용적 에너지 하베스터의 등장이 기대되며, 이는 물리학이 실제 인간의 삶의 질 향상에 직접적으로 기여할 수 있는 중요한 기술적 진보라 할 수 있습니다.

## 함께 보면 좋은 자료

1. 김기용, 김진아, 무하메드 우스만 자베이드, 조한철, 김성열, 박진형, 「에너지 하베스팅 성능 향상을 위한 이중 접촉 마찰대전 발전기 개발 및 특성 분석」, 한국정밀공학회지, 38(4), 287-294, 2021.
  - 추천 이유: 마찰대전 발전기의 구조와 출력 특성을 다뤄, 심장 박동기 에너지 하베스팅의 물리적 변환 원리를 구체적으로 이해하는 데 도움이 된다. 보고서의 마찰소자 기반 접근과 연결해 에너지 변환 효율과 작동 조건을 비교하기 좋다.
  - URL: <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artild=ART002702246>
2. 남상엽, 이규대, 안병구, 『무선전력전송과 에너지 하베스팅 기술』, 상학당, 2021.
  - 추천 이유: 에너지 하베스팅의 개요부터 기술, 표준화, 활용까지 체계적으로 정리한 국내 전문 도서이다. 보고서에서 다룬 에너지 보존, 전기 에너지 변환, 무선전력전송과의 관계를 넓게 정리하는 참고자료로 적합하다.
  - URL: <https://www.yes24.com/Product/Goods/104069684>
3. 전자신문, 「표준연, 버려지는 '미세진동' 증폭해 전기 만드는 메타물질 개발」, 2024.
  - 추천 이유: 최근 국내 연구기관의 에너지 하베스팅 관련 기사로, 버려지는 진동을 전기에너지로 바꾸는 최신 응용 사례를 보여준다. 보고서의 심장 박동 같은 주기적 기계 에너지를 전기로 바꾸는 논의와 실제 응용 가능성을 연결해 설명하기 좋다.
  - URL: <https://www.etnews.com/20240327000080>

## 세부능력 및 특기사항 물리학 생기부 작성 예시

심장 박동기의 에너지 하베스팅 기술을 물리학적으로 탐구하기 위해 세 가지 활동을 수행함. [활동 1: 문헌 분석] 마찰소자 기반(한국전자기술연구원), 나노스케일 굽힘-전기 효과(서울대), 탄소나노튜브 기반 하베스터(동국대·한양대) 세 편의 자료를 수집해 각 방식의 물리적 원리를 비교함. 마찰소자 방식에서는 압전 효과와 에너지 보존 법칙( $E_{기계} = E_{전기} + E_{손실}$ )으로 에너지 전환 과정을 분석하고, 탄소나노튜브 방식에서는  $Q = CV$ 를 활용해 기계적 변형에 따른 전압 변화를 서술함. 나노스케일 방식에서는 Kirchhoff 박판 이론 및 Gurtin-Murdoch 이론에 따른 크기 종속성이 굽힘-전기 효과에 미치는 영향을 파악하고 거시적 압전 효과와의 차이를 설명함. [활동 2: 주기 운동과 에너지 변환 분석] 심박수 60~100회/분, 맥압 약 40 mmHg의 혈압 변동을 단순 조화 운동으로 치환해  $f = 1/T$  관계를 토대로 1 Hz 저주파 에너지원이 소자 설계에 부여하는 제약과 가능성을 살펴봄. 공진 주파수 조건에서 에너지 전달 효율이 극대화되는 원리로 각 하베스터의 작동 주파수 적합성을 비교함. [활동 3: 효율 비교 토의] ① 작동 환경, ② 에너지 변환 메커니즘, ③ 상용화 단계별 비교표를 작성하고, 탄소나노튜브 실을 활용한 돼지 심장 실험 결과를 근거로 각 방식의 장단점을 정리함. 단일 솔루션보다 하이브리드 시스템이 효율·내구성 면에서 유리함을 에너지 보존·전기장 원리와 연결해 설명하며, 자기주도적으로 자료를 탐색하고 탐구 과정을 꼼꼼히 기록함. (1773 bytes)