

R&D / 국토교통기술촉진연구사업-창의도전연구

철도/차량 및 도로/교량 잉여
에너지를 이용한 50 mW/cm^2
급 역 전기습윤 발전 모듈
개발 원천기술 연구
최종보고서

2016. 11.07.

주관연구기관 / 한양대학교 산학협력단

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

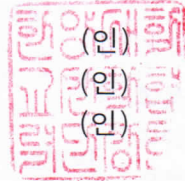
‘철도/차량 및 도로/교량의 잉여 에너지를 이용한 50 mW/cm² 급 역 전기습윤 발전 모듈 개발
원천기술 연구’(연구개발 기간 : 2014.8. ~ 2016.8.)과제의 최종보고서를 제출합니다.

2016. 11. 07.

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단 (대표자)

협동연구기관명 : (대표자)

참여기관명 : (대표자)



주관연구기관책임자: 김 영 범

협동연구기관책임자:

참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C07894 8-02	해당 단계 연구 기간	2015.08.14. - 2016.08.13.	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	철도/차량 및 도로/교량 잉여에너지를 이용한 50mW/cm ² 급 역 전기 습윤 발전 모듈 개발 원천기술 연구			
연구책임자	김 영 범	해당단계 참여 연구원 수	총: 6명 내부: 6명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부:50,000천원 기업: 0천원 정부 외: 0천원 계:50,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 0명	총 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 0천원 정부 외: 0천원 계:100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 산학협력단				
국제공동연구					
위탁연구					
요약				보고서 면수 41면	

연구의 목적 및 내용	■본 연구 과제에서는 철도/차량 및 도로/교량에서의 잉여 에너지를 활용한 에너지 생산 기술인 역 전기습윤 기술의 원천 기술 연구를 목적으로 함 ■특히, 기존 역 전기습윤 기술 대비 향상된 발전 성능을 지닌 발전 모듈의 개발 연구를 진행하며, 최종 성능 목표로 50 mW/cm² 급 역 전기 습윤 발전 모듈 개발을 목표로 함 ■이를 위해 높은 커패시턴스와 절연 파괴 강도를 지니는 고성능 유전막의 개발을 진행하며, 이를 통해 기존 연구 결과 대비 향상된 역 전기습윤 발전 모듈을 개발함 ■또한 회전 에너지를 효과적으로 수집하기 위해 회전 수집형 역 전기습윤 발전 모듈 개발에 대한 연구를 진행함 ■더 나아가, 앞선 개별적 운동 모드의 발전 모듈 개발을 통해 진동 또는 회전 환경에 국한되지 않고 다양한 운동 모드에 적용될 수 있는 환경 유연형 역 전기습윤 발전 모듈 개발을 목표로 함
연구개발성과	■본 연구를 진행함에 있어, 원활한 실험을 위해 진동 및 회전 수집형 역 전기습윤 성능 평가용 실험 스테이션을 제작함 ■기본적인 유전 물질인 Al₂O₃를 다양한 박막 증착 기술을 이용하여 효과적으로 제작하였으며, 박막의 특성 및 역 전기습윤 성능과 관련된 성질을 분석함 ■특히, 원자막 증착 기술을 이용하여 타 기술 대비 높은 수준의 박막을 제작하고 우수한 성질을 확인하였으며, 이를 통해 역 전기습윤 기술의 성능을 효과적으로 향상시킴 ■그 결과, 24 V의 낮은 전압 환경에서 약 11 mW/cm²의 높은 발전 밀도를

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	언어내었으며, 이는 선행 연구 결과의 성능이 도출된 환경에서의 성능으로 환산 시 약 80 mW/cm²의 발전 성능을 보여줄 수 있는 고성능의 발전 모듈 개발에 성공함 ■회전 수집형 역 전기습윤 발전 모듈의 경우, 앞서 개발된 고성능의 유전막을 활용하였으며, 이를 통해 24 V의 전압 환경, 16 Hz의 회전 환경에서 약 0.7 mW/cm²의 성능을 보여줌 ■회전 수집형 역 전기습윤 발전 기술의 경우 회전 주파수의 영향을 크게 받으며 본 연구에서 도출된 결과를 선행 연구의 실험 조건으로 환산 시 약 120 mW/cm²의 성능의 발전 모듈이라고 할 수 있음 ■또한 저속에서 매우 효과적으로 에너지를 수집할 수 있는 발전 모듈의 개발이 성공적으로 수행되었음 ■추가적으로, 더 높은 발전 성능을 얻기위해 다양한 물질로 이루어진 유전막의 개발을 진행하였으며, 높은 성능의 유전막을 개발함 ■추후 이를 이용하여 성능이 더욱 향상된 역 전기습윤 발전 모듈의 개발이 가능할 것으로 판단됨				
	■역 전기습윤 기술은 잉여 에너지인 진동 에너지를 수확하여 발전에 이용하기에 화석 연료나 송전선을 통한 전기 공급 없이 전기를 생산하여 이용할 수 있음 ■이러한 자체적인 전력 공급으로 인해 다양한 활용처가 기대되며, 높은 효율 및 출력을 갖고 있기 때문에 보조 전원 장치로서의 역할을 수행할 수 있고 주전원 장치로의 잠재성도 갖고 있음 ■다른 회생 에너지와는 달리 상하 진동, 회전 등 다양한 에너지 모드를 이용할 수 있고 미세 진동, 회전에서도 발전이 가능하여 실용성이 매우 높음 ■국내외적으로 역 전기습윤 기술 개념의 디바이스화 연구나 시스템 연구는 진행되고 있지 않으며, 본 연구 과제를 통한 신속하고 치밀한 연구개발을 통해 국가적 차원의 기술 선점 및 원천 기술을 확보할 수 있는 큰 성과가 기대됨 ■본 연구과제의 결과물은 역 전기습윤 기술을 이용하여 최고 수준의 발전 성능을 보여주고 있으며, 또한 일반적으로 발생하는 수준의 에너지 환경에서 높은 성능을 보여주는 결과는 추후 상용화에 큰 도움이 될 것으로 예상됨				
핵심어 (5개 이내)	역 전기습윤	회생에너지	신재생에너지	철도/차량	도로/교통

< SUMMARY >

Purpose & Contents	■The purpose of this research is the development of reverse electrowetting energy harvesting module that utilize surplus energy at the railroad/train and road traffic. ■Especially, the goal of performance is $50\text{mW}/\text{cm}^2$, which is improved performance compared to existing results about reverse electrowetting energy harvesting. ■For this improvement, researches about high quality thin film that has high capacitance and breakdown strength is conducted. ■In addition, study about energy harvesting module for the rotational energy is conducted. ■By these researches, development of combined energy harvesting module that utilize both vibrational and rotational energy is conducted.
Results	■Test stations for evaluation of vibrational and rotational reverse electrowetting energy harvesting was developed. ■Al_2O_3, which is a typical dielectric material, was used for reverse electrowetting energy harvesting module and the thin film properties were analyzed. ■Al_2O_3 was fabricated by various deposition technique. Especially, a Al_2O_3 thin film with superior quality was deposited by atomic layer deposition, and it helps a improvement of reverse electrowetting performance. ■In results, high performance of $11\text{ mW}/\text{cm}^2$ under voltage condition of 24 V, which is general condition compared to previous research, was achieved. ■In the case of rotational energy harvesting, the performance of $0.7\text{ mW}/\text{cm}^2$ under low voltage and rotation condition was achieved with the high quality thin film. ■Rotational energy harvesting by reverse electrowetting is strongly related to the rotation frequency, and the test environment in this research is very general compared to the previous research. ■Thus, our rotational energy harvesting module is fitted to the general environment and it can be useful for practical applications. ■In addition, various dielectric material was researched for higher performance of reverse electrowetting energy harvesting.
Expected Contribution	■Reverse electrowetting energy harvesting utilize the surplus energy at the surroundings, thus use of fossil fuel and loss of electrical energy during power transmission can be minimized. ■The efficiency of reverse electrowetting is high compared to other energy harvesting, so it can be used as not only auxiliary power but also main power system. ■Reverse electrowetting can utilize various energy including vertical vibration and rotation, and generate energy through the slight vibration. ■Researches about device and system of reverse electrowetting is necessary for practical use, and technological superiority can be possessed through this research project.

	■The results of this research project shows high performance of reverse electrowetting under general environmental condition, and it is helpful for the practical application of reverse electrowetting energy harvesting.				
Keywords	Reverse electrowetting	Regenerative energy	Renewable energy	Railroad/Train	Road traffic

< Contents >

1. Introduction of the research project	
2. Status of the developments	
3. Contents and results of the research project	
4. Achievement and level of contribution	
5. Plans for application of results	
6. Previous report about related technologies	
7. Security level of the results	
8. Status of the equipments on NTIS	
9. Information about safety	
10. Representative results of the project	
11. Additional notes	
12. Reference	

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	
2. 국내외 기술 개발 현황	
3. 연구 수행 내용 및 성과	
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	
5. 연구개발성과의 활용 계획	
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	
7. 연구개발성과의 보안등급	
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	
11. 기타 사항	
12. 참고 문헌	

제1장. 연구개발과제의 개요

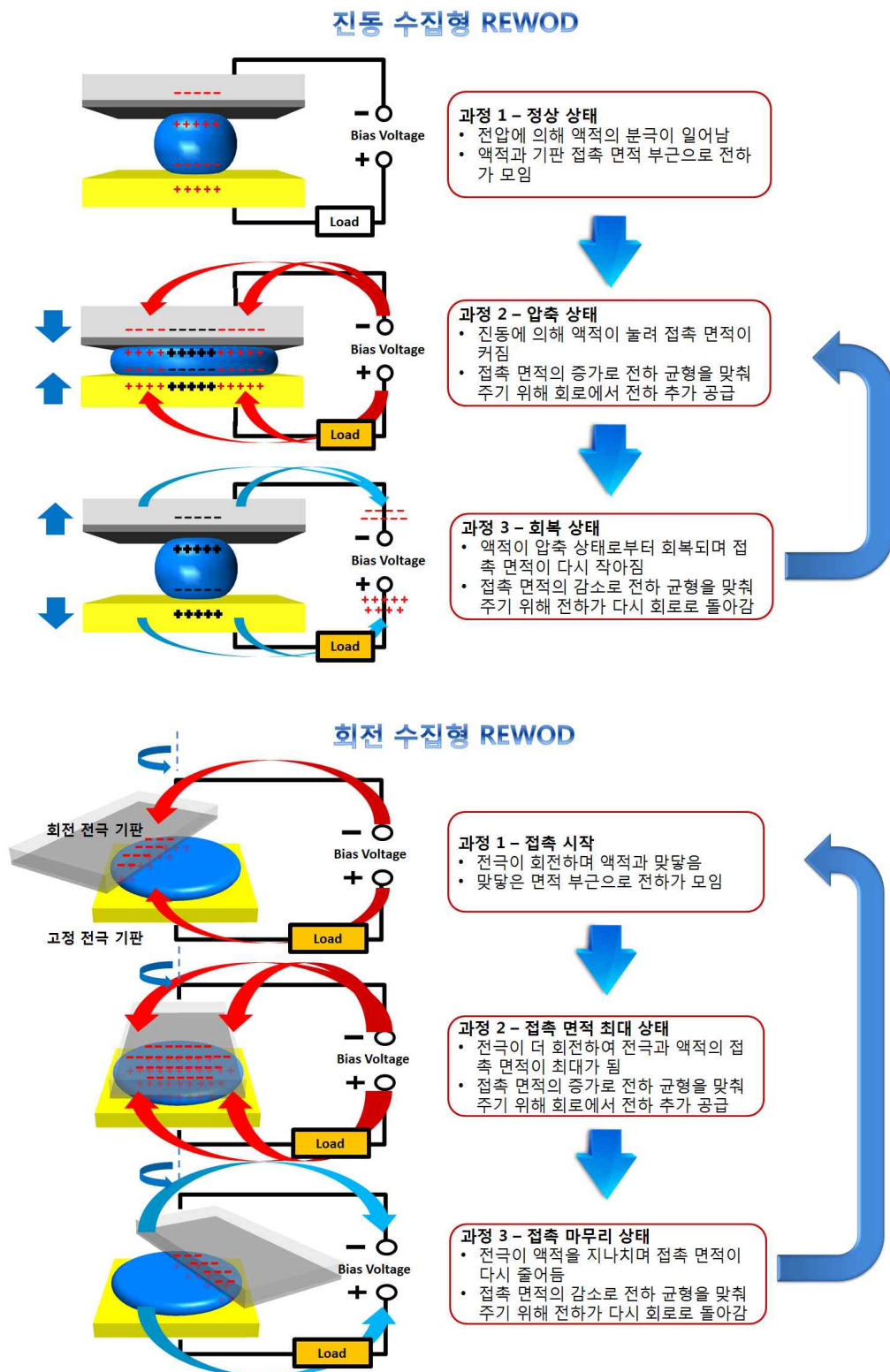
1. 연구개발 목적

- 기존 압전소자로 대변되는 회생에너지 시스템의 한계를 극복하는 **신개념의 진동 및 회전에 기반한 발전 방식인 역 전기 습윤(REWOD)을 본 과제의 연구주제로 제안함**
- 본 기술은 유전 박막이 증착된 두 기판사이에 각각 (+), (-) 전압을 인가하여 분극을 일으킨 후, 각 유전 박막과 맞닿아 있는 전도성 유체가 진동에 의해 표면적이 변화하게 되면 접촉 면적이 동시에 변화하게 되어 접촉 면적의 커패시턴스 변화량만큼 전하의 이동이 발생하게 되어 전력을 생산하는 메커니즘임
- 국내외적으로 이론 정립에 대한 연구만 존재할 뿐 시스템화의 검증 및 최적화의 실험 연구가 전무한 상황에서 기술 검증을 통한 **국가적 차원의 원천 기술의 확보**라는 의미를 지님
- 진동을 사용한다는 점에서 기존 압전 발전과 유사하나 압전 소자의 물질 특성을 이용하는 것과는 달리 미세 진동만으로도 큰 효율의 발전이 가능 (기존 선행 연구 결과 발전 효율 약 10 mW/cm²)
- 본 연구과제에서는 단순 진동 뿐 아니라 병진-회전 운동의 전환 시스템을 고안하여 다방면의 도로 교통 시스템의 적용을 위한 모듈 개발 예정
- 대부분의 도로 교통 시스템에서 필연적으로 발생되고 버려지는 진동, 회전 에너지를 활용한 발전이라는 점에서 기술적 차별성 뿐 아니라 사회 경제적으로도 연구개발의 큰 가치가 있음

◎ 연구과제의 추진목적과 추진배경

- 현재 국내 도로 교통 기술의 동향 및 기존 신재생 에너지 발전 방식을 고려한 기술적 평가와 기술 실현화의 장애 요소, 회생 에너지의 필요성 및 활용도를 종합적으로 고려한 결과, 본 과제를 통해 **순수 진동 및 회전 에너지를 토대로 회생에너지 기반 발전 방식인 역 전기 습윤법(Reverse electrowetting on dielectric, REWOD)를 이용한 신개념 발전 기술을 제안하고자 함.**
- REWOD란 유체역학 분야에서 연구되던 전기 에너지를 통해서 액체의 접촉 면적을 조절하는 전기 습윤 법(electrowetting on dielectric, EWOD) 기술을 역으로 구동하여, 진동에 의한 액체의 접촉 면적 변화를 통해 발생하는 전기 에너지를 얻는 신개념의 에너지 하베스팅 기술임.
- 유전박막이 코팅 된 두 기판의 한쪽에는 (+)전압, 다른 한쪽에는 (-)전압을 인가하여 두 기판 사이에 위치한 전도성 유체의 접촉 면적 주변으로 전하가 모이게 됨.
- 이 때 기판이 진동 및 회전환경에서 작동하게 되면 유체와 기판의 접촉 면적이 변하게 되고 **접촉 면적의 커패시턴스 변화**에 의해 전하 불균형이 일어남.
- 이 불균형을 해소하기 위해 기판의 잔여 전하가 회로로 되돌아가는 현상이 발생하게 되며, 이 전하의 흐름에 의해 전력이 생산됨.
- REWOD 기술은 버려지는 진동 에너지를 이용한다는 측면에서 압전 발전 방식과 비슷하게 생각될 수 있지만, 소자 자체의 물질 특성을 이용하며 실제 외부 힘의 전달에 의한 소자의 변형이 필요한 압전체와는 전혀 다른 새로운 방식의 기술임.
- 기존 선행 연구 조사 결과, 현재까지의 연구 결과만으로도 앞서 언급된 **압전소자의 발전**

량($\sim 0.1 \text{ mW/cm}^2$)을 훨씬 상회하는 $\sim 10 \text{ mW/cm}^2$ 정도의 성능을 보이고 성능 향상의 가능성 또한 열려있음.

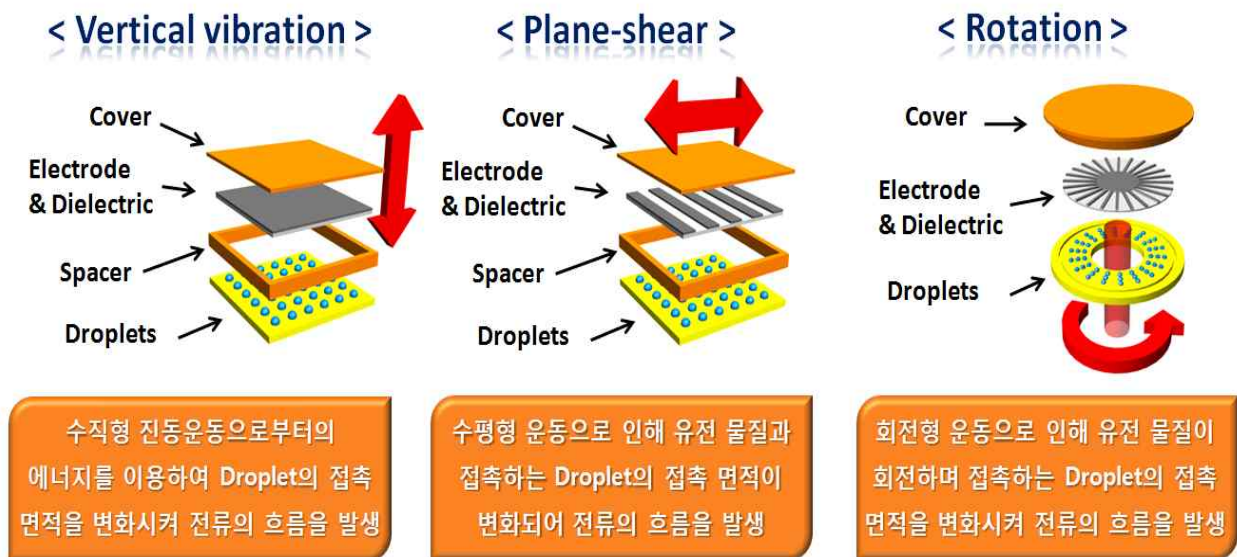


<그림 1. 진동형 및 회전형 REWOD 발전 기술의 원리>

◎ 연구과제로부터 예상되는 기술적, 경제적 성과

- 기존 선행연구의 이론 및 개념적 기술 수준을 넘어 REWOD 발전 시스템 및 모듈의 개발에 성공하면 도로 교통 분야의 회생에너지 기반 원천 기술 확보라는 측면에서 연구개발 가치가 크다고 할 수 있음.
- REWOD 기술은 기존 압전소자와는 달리 다양한 운동 모드(mode)를 수집할 수 있다는 또 다른 장점을 지니고 본 과제 제안에서는 병진 운동(상/하, 좌/우) 뿐만 아니라 회전 운동에서 발생하는 에너지를 상황에 맞게 자유롭게 변환시켜 이용할 수 있는 아이디어를 고안하였고 그 운동모드 자체로 다양한 환경에 적용할 수 있음.
- 따라서 대부분의 도로 및 교통 기반 시설 및 시스템에서 필연적으로 발생되고 버려지는 진동, 회전 에너지를 활용하기 때문에 기존 전력소비를 획기적으로 줄이면서 경제적으로 큰 도움이 될 것으로 예상.
- 도로나 교량 등 진동 발생 환경 외에 열차의 바퀴 등에서 발생하는 회전 운동 에너지도 이용이 가능하고 진동 형태와 규모에 맞춰 미세 진동부터 대규모 진동 환경까지 다양한 용량별 발전이 가능하며 고효율 발전 시스템으로의 발전 가능성 또한 보여주고 있음.

Three Different REWOD Modes



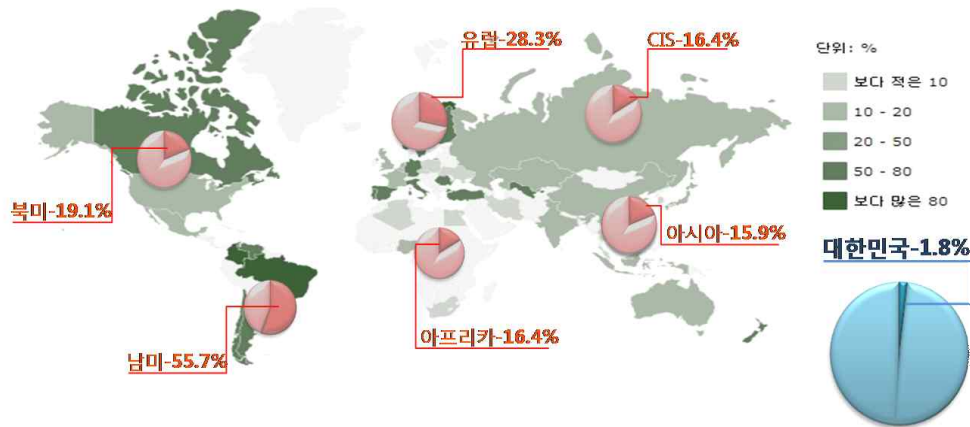
<그림 2. 여러 가지 가진 형태에 대한 REWOD 발전 모드>

2. 연구개발의 필요성

- 전력 수급난으로 인한 대체 에너지원 확보로서 신재생에 대한 연구 및 개발의 가속화가 이루어지고 있으며 도로 교통과 같은 공공 시설물에 대한 전력 수급 효율성 문제 또한 대두 됨
- 신재생 에너지뿐 아니라 버려지는 에너지를 이용하는 회생에너지 발전에 대한 관심이 증가하고 연구 필요성이 요구되고 있으나 아직 연구의 수준이 미미함
- 가장 대표적인 회생에너지 시스템인 압전 발전의 낮은 효율성 및 미세 진동의 이용 불가능, 기계적 압력으로 인한 재료의 미세 변형을 이용해야 한다는 점 등의 문제로 인해 상용화에 큰 걸림돌이 되었음
- 본 연구과제는 신개념 회생 에너지 발전 방식인 역 전기 습윤법 (reverse electrowetting on dielectric, REWOD)을 이용한 다양한 형태의 발전 시스템을 제안하고자 함
- REWOD는 기존 압전 발전에 비해 높은 효율성과 미세 진동 및 다양한 회전체로부터 발전이 가능하며 기존 압전 발전으로는 발전할 수 없었던 분야로의 적용이 가능하고 버려지던 에너지로부터 발전이 가능하다는 점에서 기술, 경제, 사회 분야 다방면으로 매우 큰 가치를 지니고 있음
- 국가 경쟁력을 넘어 국가의 안보와도 직결되고 있는 차세대 에너지원의 확보를 위한 대체 에너지 개발은 필수적이며 도로 교통 분야에서 얻을 수 있는 신개념 회생에너지의 국내 연구 개발을 통한 국가 차원의 원천기술 확보가 시급한 상황임

◎ 기존 에너지 수급 문제 및 신재생 에너지의 한계

- 전력 수급에 대한 위기의식과 사회적 갈등으로 말미암아 대두 된 신재생 에너지에 대한 관심이 급증하고 있으나 아직까지 신재생 에너지 시스템의 불안정성과 용량의 한계성 등으로 인해 연구가 지속적으로 수행 중에 있음.
- 최근 전력수급에 대한 국내의 상황은 전력 수요량이 매년 급증하여 지난 최근 5년간 최대 필요 전력 증가율은 4.3%인 반면, 공급 전력 증가율은 3.0%에 그쳐 1.5배의 차이를 보이고 있음.
- 이러한 수급난으로 인해 전기 에너지의 관리 및 대체 발전 장치에 대한 관심은 계속 커지고 있고, 특히 도로 교통과 같이 기간산업으로서 광범위 하게 사용 되고 있는 공공 시설물에 대한 전력 수급 효율에 대한 문제가 대두 되고 있음.
- 따라서 대두되는 전력 수급 문제 및 현재의 교통 기술에 접목 된 신재생 에너지와 전력 에너지 회생 및 소비 절감에 대해 재조명이 필요하며, 새로운 방식의 전력 에너지 공급이나 에너지 회생 기술에 대한 재평가가 요구 됨.



〈그림 3. 총 전기 생산에서 신재생/회생 에너지가 차지하는 비율〉

◎ 회생 에너지의 필요성 및 중요성

- 회생(回生)에너지란 인간의 활동 및 생활에서 낭비 또는 버려지는 에너지를 회수하여 발전하는 것을 말함.
- 회생에너지는 그 자체로 버려지는 에너지를 되살려 사용한다는 것에서 의미가 있을 뿐만 아니라, 발전 환경 특성에 맞춰 발전이 가능하다는 점에서 큰 장점이 있음.
- 그러나 아직 사회적인 측면에서도 회생에너지 발전은 다른 전력 발전에 비해 그 개념 자체가 매우 생소하며, 회생에너지를 기반으로 하는 연구는 그 수준이 미미함.
- 또한 국내의 도로 교통기술에 도입된 신재생 에너지는 태양광, 풍력 및 압전 소자로서 이를 대상으로 한 연구 및 개발은 상당 수준에 달하나 상용화 단계에서 고비용, 저효율, 환경 민감도 등의 문제로 인해 그림 1.과 같이 그 비중이 작고 아직 실효를 거두고 있지 못한 상황임.
- 따라서 국내를 포함한 전 세계적 전력 수급의 문제점을 해결하기 위한 신재생 에너지에 대한 관심과 더불어, 또 하나의 해결책으로 회생 에너지 기반 발전 시스템에 대한 기대가 고조되고 있음.
- 그 중에서도 철도, 지하철, 교량 등 교통 기반 시설에서 필연적으로 발생하는 잉여 진동, 회전 에너지를 이용한 발전 시스템 개발이 주요 연구 주제로 주목 받고 있으며 세계 유수 기관에서 심도 있는 연구를 진행하고 있음.



- 국내 도로 및 교량의 수송 분담률 < 90%
- 전 국토 중 도로 및 교량이 차지하는 비율 = 1.04%
- 도로에서 사용 되는 전력
= 국가 총 에너지 소비의 21%

- 국내 철도의 총 길이 = 3500km
- 열차를 구동하는데 소비되는 전력
= 13,560kWh (KTX, 서울-부산 편도 기준)
- 회생 제동 방식을 통한 에너지 재생산
= 전체 소비 전력의 10% 미만

〈그림 4. 국내 도로 및 철도 현황〉

◎ 도로 교통 기술에 대한 신개념 회생 에너지 발전의 필요성

- 기존의 교통 기반 시설의 잉여 진동 에너지를 이용한 발전 방법은 대표적으로 압전소자의 압전효과(piezoelectric effect)를 이용한 발전 방법이 고려되어 왔고 특히 lead zirconate titanate(PZT) 및 macro fiber composite(MFC)을 이용한 전력 생산 방법이 주 고려 대상이었음.
- 하지만 압전 발전은 발전 용량이 0.1 mW/cm^2 정도로 매우 작아 현재 기술 수준으로는 대용량 및 실효성이 있는 발전이 힘들다는 치명적인 단점을 지님.
- 또한 주요 연구 소재인 PZT 소자의 경우 성분 중 인체에 유해한 납(lead의 사용), MFC의 경우 단결정화로 인한 고비용 문제 등이 압전 발전을 통한 전력 생산에 대한 낮은 인식 및 상용화에 걸림돌이 되고 있음.
- 게다가 압전 발전은 교통 기반 시설에서 발생 되는 진동 에너지를 이용한 발전 시스템에 적용될 수 있는 적합한 기술이라고 생각되었으나, 진동 에너지로부터 기계적 압력으로 인한 소자의 변환이 필수적이라는 점에서 적용 범위에 명백한 한계가 있음.
- 다시 말해 순수 진동 에너지를 직접 사용하지 못한다는 점에서 진동 현상 자체를 이용한다고 말할 수 없으므로, 에너지 회생 차원의 신개념 발전 방식이 요구 됨.

3. 연구개발 범위

○ 최대 발전 전력밀도 $\sim 50 \text{ mW/cm}^2$ 급 REWOD 발전 unit cell 개발

- 도로, 교량, 철도, 열차 등 교통 기술·기반 시설의 잉여 에너지 발생 환경 조사를 통한 REWOD 발전 모듈의 적용 환경 선정
- 박막 증착 기술 및 나노 리소그래피 기술을 이용한 막 특성 조절을 통해 REWOD unit cell의 제작 및 전력 밀도 극대화
- 유체 이동 방지부, 탄성 완충기 등의 설계 및 unit cell과의 어셈블리를 통한 REWOD 발전 모듈화 모델 수립

○ 소용량부터 대용량까지 규모 유연형 및 다양한 운동 환경에서 응용이 가능한 환경 유연형 REWOD 발전 모듈 개발

- 에너지 소비처의 필요 전력량에 맞추어 가능한 규모 유연형 REWOD 발전 모듈 개발
- 운동 형태 변환(진동 $\leftrightarrow$ 회전) 시스템 설계를 통한 진동 형태에 구애받지 않는 환경 유연형 REWOD 발전 모듈 개발



교통 기술·기반 시설의 잉여 에너지 회생형 REWOD 발전 모듈



제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 현황

- 국내에서는 REWOD 발전 기술에 대한 연구를 진행하는 연구진은 없는 것으로 파악됨
- 단, 유사한 원리를 이용하는 전기 이중층(electrical double layer, EDL)을 활용하는 발전 기술을 연구하는 연구진은 서울대학교와 전자부품연구원, 그리고 부산대학교에 존재하는 것으로 파악됨¹⁻⁵
- 서울대학교와 전자부품연구원은 공동연구를 진행하여 EDL을 활용한 발전 기술과 관련된 다양한 특허를 보유하고 있으며, SCI급 저널에 2편의 관련 논문을 게재한 바 있음¹⁻³
- 부산대학교는 EDL을 활용한 발전 기술과 관련된 2편의 SCI급 논문을 보유하고 있음^{4,5}
- 국외의 경우 Wisconsin-Medison Univ.의 T. Krupenkin group에서 2011년에 Nature Communications 저널에 발표한 논문과 REWOD 발전 시스템에 관한 특허를 보유하고 있음⁶
- 또한 2015년도에 수집 에너지의 형태를 변환하는 구조 장치와의 결합을 통한 REWOD 발전 시스템에 관련된 논문을 발표함⁷

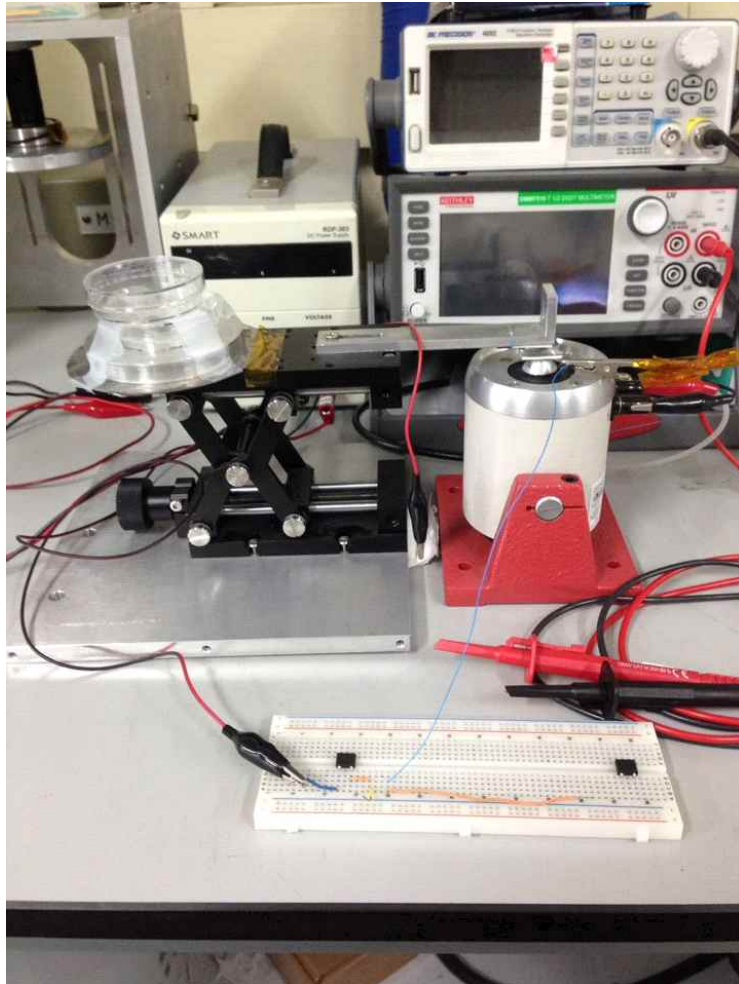
2. 본 연구 개발 과제의 연구 결과

- 본 연구 개발 과제에서는 REWOD 발전 기술의 대규모 발전 시스템 적용을 위해 그 성능 향상 연구에 주력하였음
- EDL를 활용한 발전 기술의 경우 발표된 성능이 낮은 수준이며, REWOD 발전 기술의 경우 기존 발표된 성능은 높은 수준이나 적용 환경의 한정성 등의 문제점이 존재함
- 본 연구진의 연구 결과는 기존 연구 결과에서 발표된 발전 성능을 상회할 뿐 아니라 일반적인 적용환경에서의 성능이 우수하다는 장점이 있음
- 또한, 본 연구진에서는 연구 개발 과제를 통해 총 4건의 특허를 출원하였으며, 그 중 1개의 특허가 현재 등록되었고 1건의 특허가 PCT 해외 출원 중에 있음

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

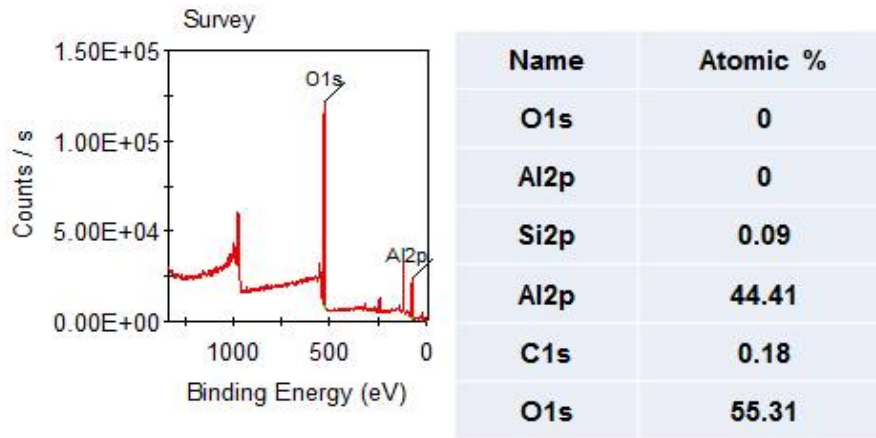
1. 진동 수집형 REWOD 발전 기술 연구

- REWOD 발전 기술의 증명 및 성능 특성 평가를 위해 진동형 REWOD 테스트 스테이션을 구축함
- 진동형 REWOD 테스트 스테이션은 진동 환경을 위한 가진기, 가진기의 신호 공급을 위한 신호 발생기, 샘플을 위치시키기 위한 테스트 지그, 그리고 발생하는 전기 신호의 측정을 위한 멀티미터로 구성되어 있음



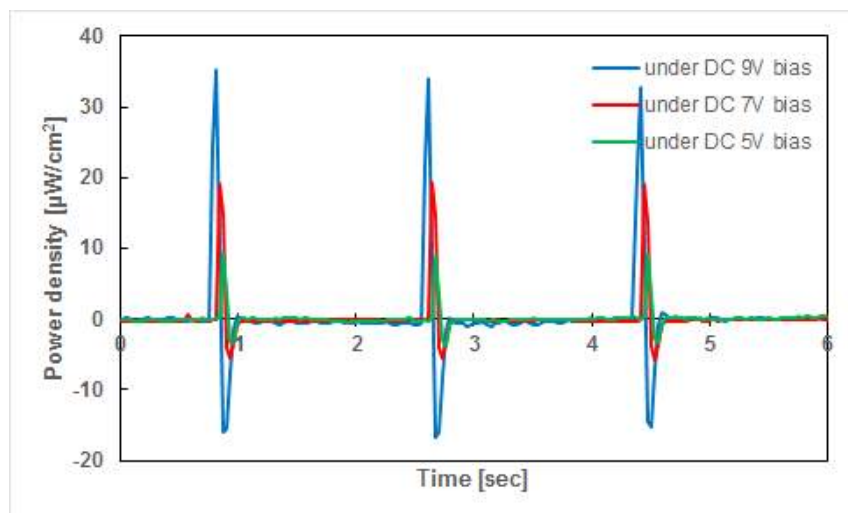
〈그림 5. REWOD 성능 평가를 위한 진동형 테스트 스테이션〉

- REWOD 발전 기술 검증을 위해 널리 사용되고 있는 유전 물질 중 하나인 Al_2O_3 (Aluminum oxide)를 REWOD unit cell의 유전막 물질로 선정함
- 치밀한 Al_2O_3 유전막의 제작을 위해 진공 기반의 증착 기술 중 하나인 sputtering 방법을 이용함
- Sputtering 시스템의 종류 중 하나인 magnetron sputtering system과 Al metal target을 이용하여 진행되었으며, 증착 시 반응성 기체를 주입하여 진행하는 reactive sputtering 법을 이용함
- 제작된 Al_2O_3 박막의 조성 분석을 위해 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 분석을 진행하였으며, $\text{Al} : \text{O} = 2 : 3$ 의 이상적인 조성비에 근접한 비율을 보여주고 있음



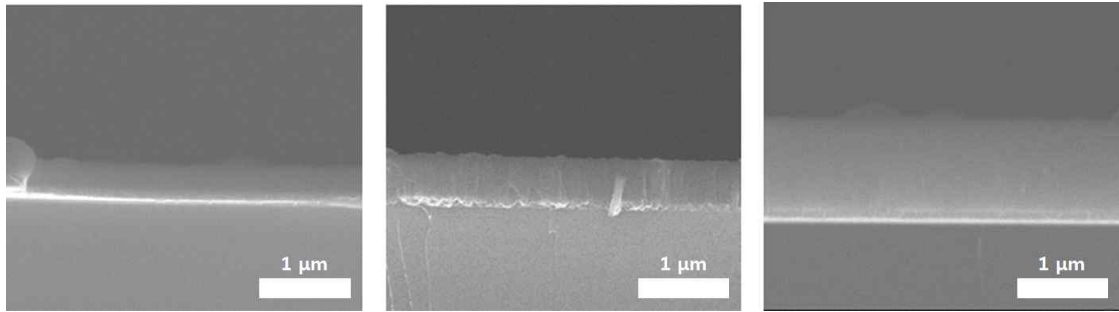
<그림 6. Sputtering 방법을 이용하여 증착한 Al_2O_3 의 XPS data>

- REWOD unit cell 제작을 위해 sputtering을 이용하여 Pt 전극층을 제작하였으며, 그 위에 수립된 공정을 이용하여 Al_2O_3 유전막을 형성하여 unit cell을 제작함
- 제작된 unit cell과 진동형 REWOD 테스트 스테이션을 이용하여 REWOD 발전 기술 검증 을 진행함
- Unit cell에 공급되는 전압을 5, 7, 9 V로 변화시켜가며 cell test를 진행함
- 그 결과, 가진기에 의해 진동이 발생하고 그에 따른 기판과 액체 사이의 접촉면적이 변화 함에 따라 전력이 발생하는 것을 확인하였음
- 또한, 인가 전압이 증가함에 따라 성능이 향상하는 것을 확인하였음



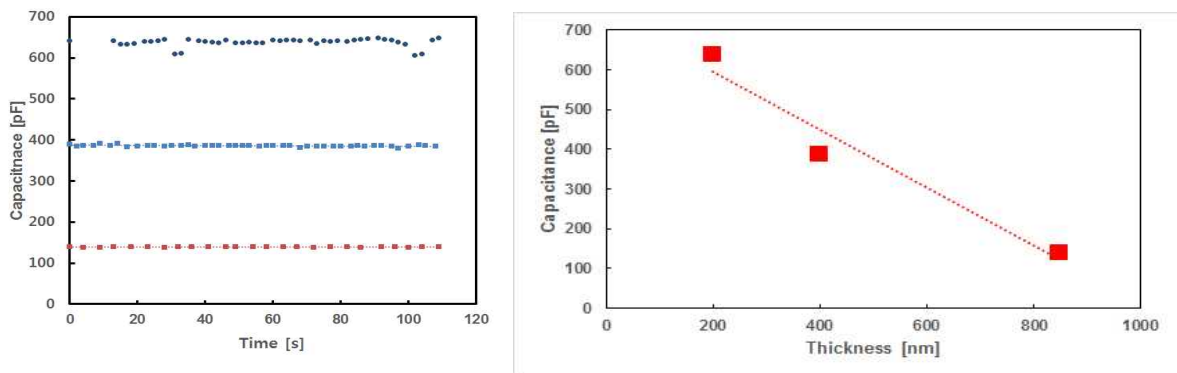
<그림 7. Al_2O_3 를 이용한 REWOD 발전 기술 검증 결과>

- REWOD 발전 기술의 성능에 영향을 미치는 인자에 대한 연구로, 박막의 capacitance의 영 향을 조사하기 위한 실험을 진행함
- 박막의 capacitance를 결정하는 인자는 대표적으로 물질의 유전상수와 박막의 두께가 있음
- Al_2O_3 유전막을 형성하기 위한 sputtering 방법은, 증착 시간을 달리하여 박막의 두께를 효 과적으로 조절할 수 있으므로 박막의 두께에 따른 capacitance 변화를 관찰하기 용이함
- 따라서, sputtering 증착 시간을 달리하여 각기 다른 두께를 가지는 Al_2O_3 유전막을 제작하 였으며 FE-SEM(Field Emission - Scanning Electron Microscopy) 분석을 통해 각 샘플의 두께를 관찰함



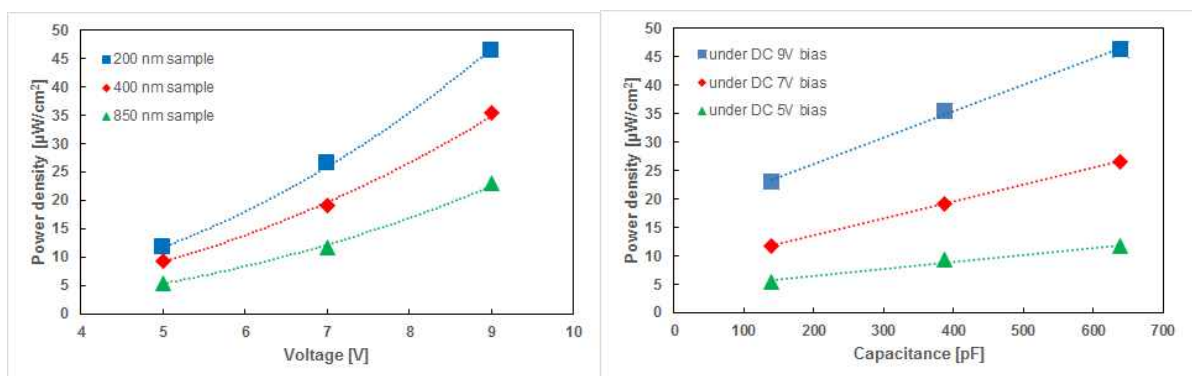
<그림 8. 두께를 달리하여 제작된 Al_2O_3 유전막의 FE-SEM 단면 이미지>

- 제작된 샘플의 capacitance를 측정하기 위해 impedance spectroscopy 방법을 이용하였으며, 두께의 변화에 따른 capacitance 변화를 관찰함
- Al_2O_3 의 유전막 두께가 감소함에 따라 capacitance가 향상되는 것을 관찰할 수 있음



<그림 9. 제작된 Al_2O_3 유전막의 두께별 capacitance 측정 결과>

- Capacitance가 REWOD 발전 성능에 미치는 영향을 관찰하기 위해 cell test를 진행함
- Cell test는 각 샘플별로 인가하는 전압을 달리하며 측정하였으며, 이를 통해 위에서 확인한 일반적인 REWOD 발전 거동과 capacitance의 영향을 동시에 관찰함
- 그 결과, capacitance가 향상함에 따라 REWOD 발전 성능이 높아지는 것을 확인함



<그림 10. Al_2O_3 유전막의 두께에 따른 REWOD 발전 성능의 변화>

- 200 nm의 Al_2O_3 유전막으로 구성된 unit cell에 9V 전압 인가 시 약 $46 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 성능이 관찰됨
- 기존 선행 연구에서는 매우 높은 전압 환경에서 구동하기 때문에, 이와 비교를 위해 전압

에 따른 성능 경향을 이용하여 실험 결과를 환산 후 비교함

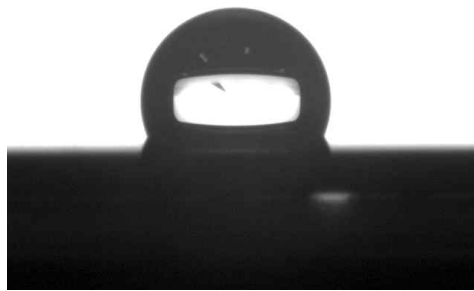
■ 환산 결과, 선행 연구의 실험 조건인 65 V 전압 환경에서 약 5 mW/cm²의 성능을 예상할 수 있음

■ 선행 연구 수준의 성능을 재현하기 위해 소수성 막 적용을 통한 성능 향상 연구를 진행함⁶

■ 소수성 물질층에 사용되는 물질로는 기 사용물질인 불소중합체(fluoropolymer) 계열 상용 물질인 CYTOP을 선정함

■ Polymer 계열 물질 특성 상 쉽게 막을 제작할 수 있는 솔루션 기반 증착법을 선정하였고, 그 중 스핀 코팅법을 이용하여 나노미터 수준의 얇은 막을 제작함

■ 제작된 CYTOP의 발수각을 측정한 결과, 약 110°의 발수각을 보여주어 발수성을 띄는 막이 제대로 형성되었음을 확인함



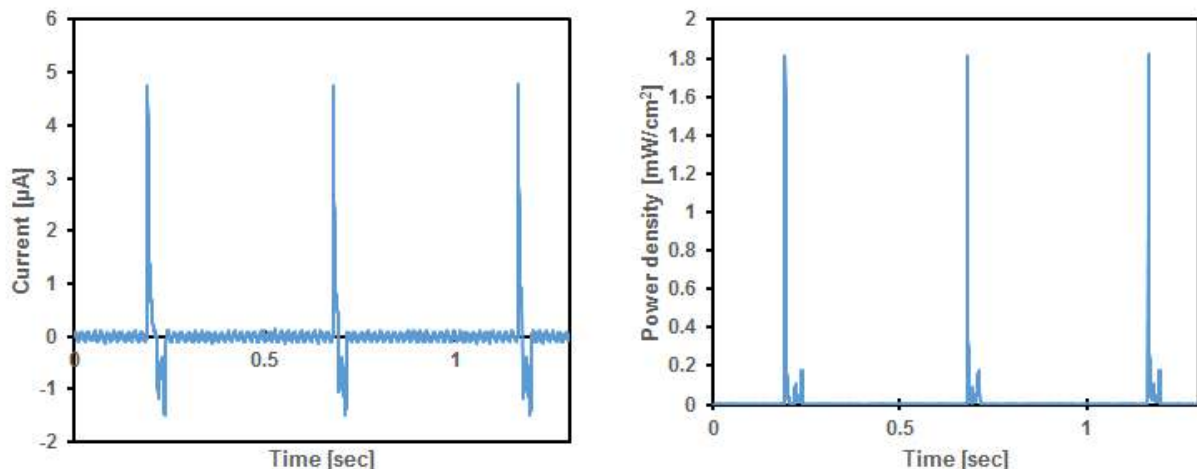
<그림 11. CYTOP이 코팅된 Si 표면의 발수각>

■ Al₂O₃ 유전막을 이용한 unit cell 위에 CYTOP 층을 적층하여 소수성 막이 적용된 unit cell에 대한 특성 평가를 진행함

■ 그 결과, 소수성 막이 적용되지 않은 unit cell에서 발생하던 전류 peak 값 감소 현상이 현저하게 줄어들었으며, 이에 따라 성능이 대폭 향상되었음을 확인할 수 있음

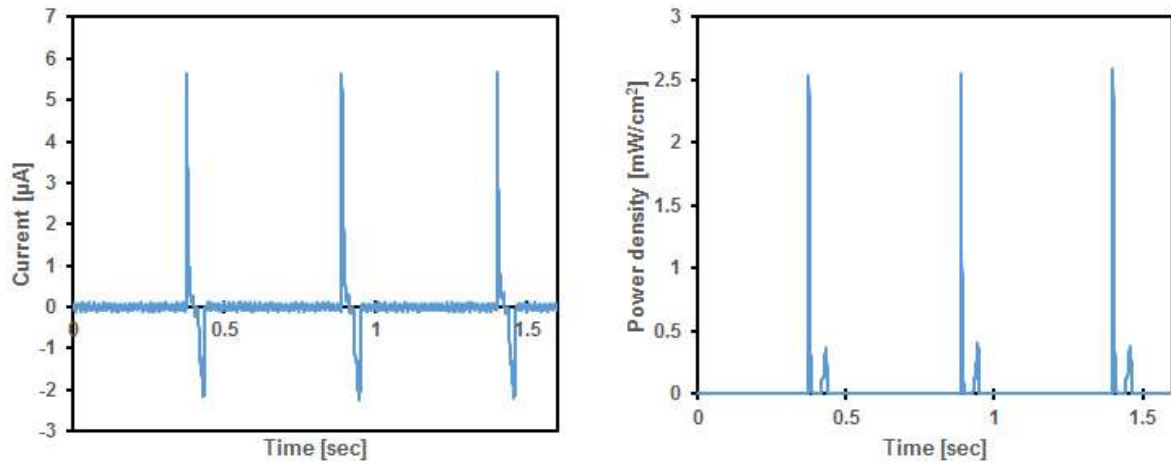
■ CYTOP으로 구성된 소수성 막은 표면 발수성 증가 뿐만 아니라 그 물질 특성상 지니고 있는 charge trapping 방지 효과에 의해 REWOD 성능 향상에 도움을 주는 것으로 확인됨^{8,9}

■ sputtering을 이용하여 제작된 100 nm 두께의 Al₂O₃ 유전막으로 이루어진 unit cell의 경우 12V 전압 환경에서 약 1.8 mW/cm²의 성능을 보여주고 있으며, 이는 선행 연구의 실험 조건인 65 V 전압 환경에서의 성능으로 환산 시 약 52.8 mW/cm²의 성능을 예상할 수 있음



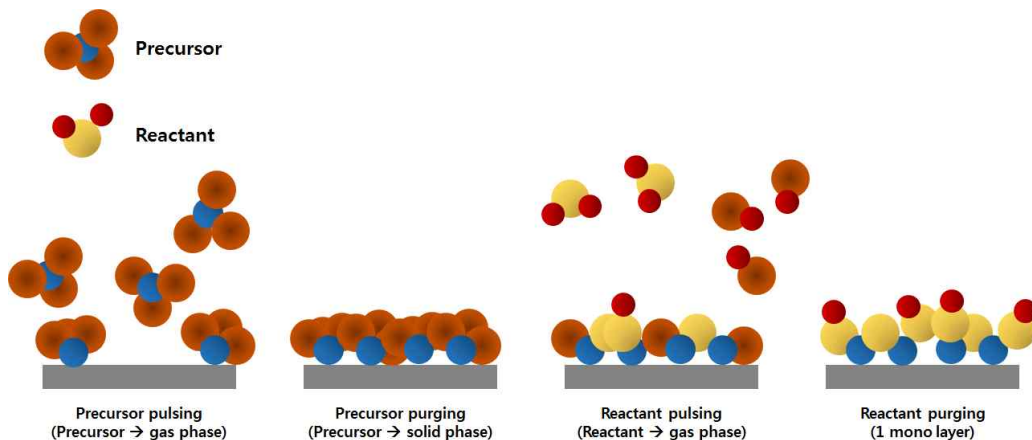
<그림 12. 100 nm 두께의 Al₂O₃ 유전막으로 이루어진 REWOD unit cell의 발생 전류/전력>

- REWOD unit cell에 있어 유전막의 두께 감소를 통해 더 높은 전력 밀도 값을 얻을 수 있을 것으로 판단하여 sputtering을 이용하여 50 nm 수준의 Al_2O_3 유전막을 제작함
- 그 결과, 50 nm 두께의 Al_2O_3 유전막이 적용된 unit cell은 9 V 전압 환경에서 약 2.6 mW/cm^2 의 성능이 관찰됨



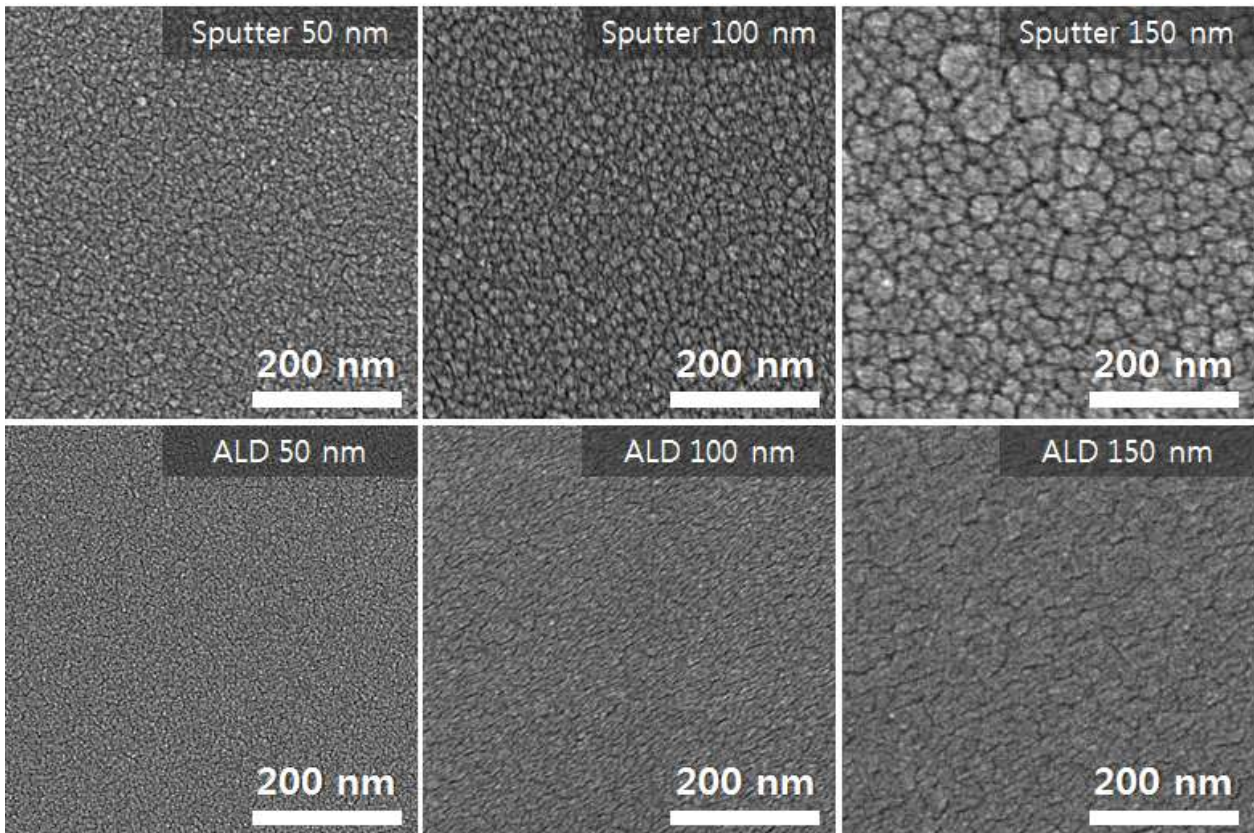
<그림 13. 50 nm 두께의 Al_2O_3 유전막으로 이루어진 REWOD unit cell의 발생 전류/전력>

- 박막의 두께 감소에 의한 capacitance의 향상으로 REWOD 발전 성능의 향상이 확인되었으나, 막의 절연 파괴 전압 감소에 의해 높은 전압 인가를 통한 추가적인 전력 밀도 상승에 어려움이 있음
- 따라서 막의 절연 파괴 전압을 높이는 것이 전력 발생량의 증가에 도움을 줄 수 있음
- 막의 절연 파괴 전압은 물질의 특성, 박막의 두께, 밀도 등의 영향을 받음
- 또한 박막을 구성하는 결정입자간의 경계인 결정립계는 전자가 쉽게 이동할 수 있는 통로로 알려져있으며, 따라서 이러한 결정립계 형상 또한 박막의 절연 파괴 전압에 영향을 줄 수 있음¹⁰
- 기존에 유전막을 형성하였던 방법인 sputtering의 경우 진공 기반의 증착 방식으로 매우 얇은 두께의 고품질 막을 효과적으로 제작할 수 있으나, 물리적 증착 방식의 한계로 결정립계가 수직으로 형성되어 절연 파괴 전압이 하락될 수 있음
- 이에 대한 해결책으로, 최신의 박막 제작 기법인 원자막 증착법(atomic layer deposition, ALD)를 도입하여 문제를 해결하고자 함



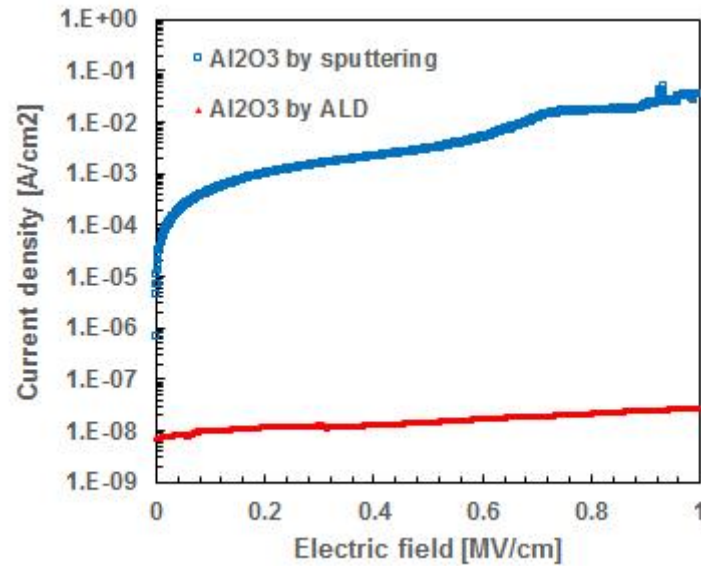
<그림 14. 원자막 증착법(ALD)의 증착 원리>

- 원자막 증착법이란, precursor, reactant를 이용하여 기관과의 자기 제한 반응(self-limiting reaction)에 의한 공정을 통해 막이 제작되는 방식이며, 원자 단위로 층층이 막이 제작(layer-by-layer growth)되기 때문에 결함이 없는 최고 수준의 박막을 얻을 수 있음
- 또한 그 증착 원리에 의해 결정립계가 형성되지 않는 비정질(amorphous)의 박막이 형성되어 절연 파괴 전압 증가에 도움을 줄 수 있음¹¹
- 이러한 ALD의 효과를 검증하고 더 높은 성능을 지니는 REWOD unit cel 제작을 위해 ALD를 이용하여 50, 100, 150 nm의 두께를 지니는 Al_2O_3 유전막을 제작하였으며, sputter Al_2O_3 유전막으로 이루어진 unit cell과의 비교를 진행함



<그림 15. Sputtering과 ALD로 제작된 Al_2O_3 유전막의 FE-SEM 표면 이미지>

- FE-SEM 분석을 이용하여 막 표면의 결정립계 형상에 대한 비교 분석을 진행함
- Sputtering으로 제작된 Al_2O_3 유전막의 경우 표면을 관찰해보면 결정립계가 뚜렷하게 형성되어있음을 확인할 수 있으며, 이는 절연 파괴 전압 감소를 야기하여 REWOD 발진 성능 향상에 악영향을 줄 수 있음
- 반면, ALD로 제작된 Al_2O_3 유전막의 경우 표면에 뚜렷한 결정립계를 관찰하기 어려우며 이에 따라 절연 파괴 전압이 높을 것으로 예상할 수 있음



<그림 16. sputtering과 ALD로 제작된 Al_2O_3 유전막의 Leakage current 측정 결과>

- 보다 정량적인 분석을 위해 제작된 Al_2O_3 유전막에 대해 누설 전류(leakage current) 측정을 진행함
- 누설 전류 측정 실험의 경우 박막의 질을 평가하는 방법 중 하나이며 절연 파괴 전압 측정에도 이용됨.
- 측정 전압 범위 내에서 절연 파괴가 관찰되지 않더라도 누설 전류의 수준을 통해 간접적으로 절연 파괴에 저항하는 성능을 예측해볼 수 있음
- ALD로 제작된 Al_2O_3 유전막의 경우, sputtering으로 제작된 유전막과 비교하였을 때 매우 낮은 수준의 누설 전류를 보여주고 있으며, 전기장이 상승함에 따른 변화가 미미함을 알 수 있음

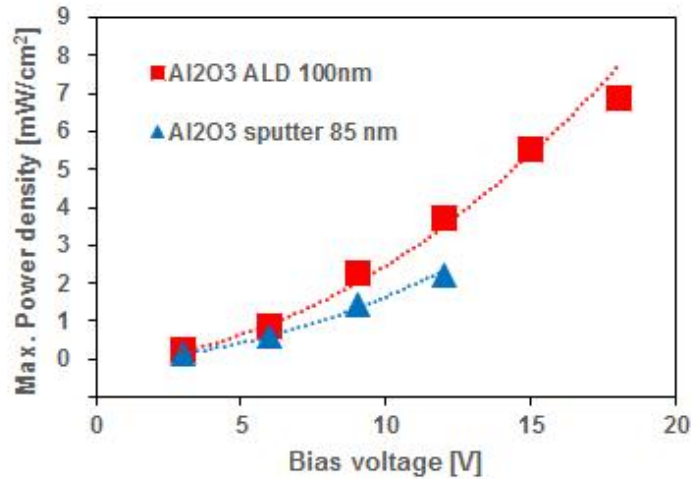
Deposition technique	Thickness (nm)	Capacitance (nF/cm ²)	Dielectric constant
ALD	45 nm	245.19	12.46
ALD	100 nm	106.82	12.06
ALD	140 nm	69.61	11.01
Sputter	85 nm	89.27	8.57
Sputter	145 nm	42.39	6.94

<그림 17. 증착 방식과 두께에 따른 capacitance 측정 결과 및 유전 상수>

- 성능에 주요한 영향을 미치는 인자인 capacitance에 있어 증착 방법의 영향을 검증하기 위해 증착 방법과 두께에 따라 제작된 막의 capacitance를 측정하였으며, 이를 바탕으로 유전상수를 계산하였음
- 일반적인 Al_2O_3 의 경우 6~10 정도의 유전상수를 지니고 있으며, 제작된 막의 유전상수의 경우 이 근처의 값으로 존재하고 있음
- ALD로 제작된 막의 경우 비슷한 두께에서 sputtering으로 제작된 막에 비해 높은 capacitance 및 유전 상수를 보여주고 있으며, 이는 ALD로 제작된 막의 우수한 밀도 때문

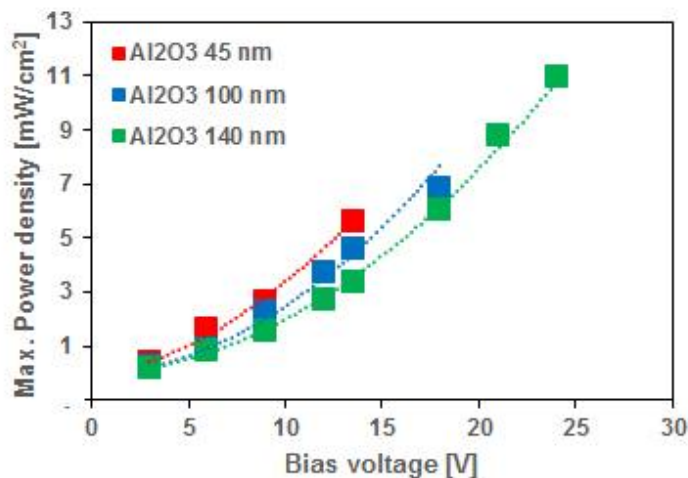
이라고 볼 수 있음

- 박막 내부에 결함이 존재할 때, 그 결함은 물질의 유전 특성에 악영향을 줄 수 있음. 만약 공기가 박막 내 결함으로 존재한다면, 공기의 유전 특성(유전 상수 ~1)에 의해 막 전체의 capacitance 감소를 야기시킬 수 있음¹²
- ALD로 제작된 막은 이러한 내부 결함이 최소화 될 수 있으며, 이에 따라 높은 유전 상수 및 정전용량을 얻을 수 있어 REWOD 발전 성능이 향상될 수 있음



<그림 18. sputter와 ALD로 제작된 REWOD unit cell의 성능 비교>

- 비슷한 두께로 제작된 unit cell 성능의 비교 그래프를 보면, ALD로 제작된 unit cell의 경우 sputtering으로 제작된 것에 비해 인가할 수 있는 전압의 한계가 더 높음을 알 수 있음
- 이는 앞서 검증한 바와 같이 막의 절연 파괴 전압이 ALD로 제작된 막에서 더 높게 형성되기 때문이며, ALD로 제작된 unit cell의 경우에 보다 넓은 전압 범위 하에서 안정적인 REWOD 발전이 가능함을 의미함
- 더 나아가, 더 높은 전압의 인가가 가능하기 때문에 높은 발전 성능을 이끌어 낼 수 있음
- 성능을 비교해 보았을 때에도, ALD로 제작된 막의 경우에서 더 높은 capacitance를 지니고 있음을 앞서 확인하였고, 이와 상응하여 같은 전압 환경에서 더 높은 성능을 보여줄 수 있음을 확인할 수 있음



<그림 19. ALD로 제작된 Al₂O₃ 유전막의 두께에 따른 성능 비교>

- ALD의 REWOD 발전 기술에의 적용이 타 증착방법에 비해 우수함을 확인하였으며, 이후 ALD로 제작된 유전막의 두께에 따른 성능을 검증하고 최적화를 진행함
- 앞선 capacitance 측정 결과, 50 nm의 유전막으로 이루어진 unit cell의 경우에서 가장 높은 capacitance를 얻었으며 이에 따라 동일한 전압 환경에서 가장 높은 성능을 보여주고 있음
- 그러나, ALD로 제작된 막의 경우에 있어서도 또한 두께가 얇아짐에 따라 절연 파괴 전압의 감소가 일어나기 때문에 인가할 수 있는 전압에 있어 한계가 발생함
- 150 nm 두께의 유전막의 경우 50 nm 두께의 유전막에 비해 capacitance에서 손실은 발생하나, 더 높은 전압을 인가할 수 있으며 24 V 전압 환경에서 약 11 mW/cm²의 높은 발전 밀도를 관찰할 수 있음. 이는 선행 연구 결과의 실험 환경인 65 V 조건으로 환산 시 약 80 mW/cm²의 성능을 보여준다고 말할 수 있음
- 이 결과는 원자막 증착법을 활용하여 고성능의 unit cell을 제작할 수 있는 원천 기술을 확보하였다고 할 수 있음
- 현재 본 실험 결과를 바탕으로 SCI급 저널에 논문을 투고하였으며, 현재 심사 중에 있음

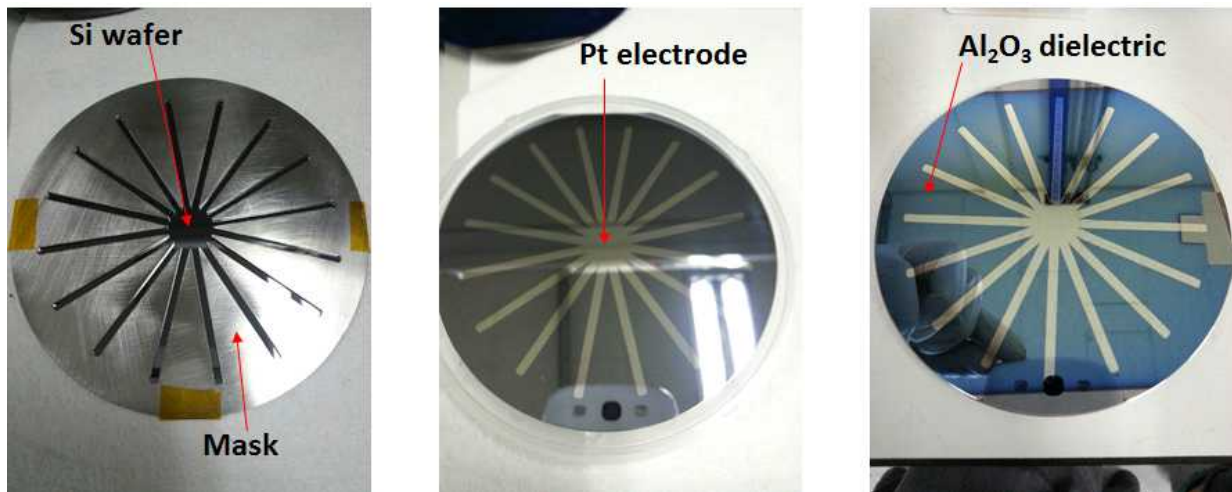
2. 회전 수집형 REWOD 발전 기술 연구

- 회전 에너지를 이용하는 REWOD 발전 기술 개발을 위해 회전형 REWOD 실험 스테이션을 구축함
- 회전형 실험 스테이션의 경우, 회전 운동을 발생시키기 위한 DC 모터, 모터 구동을 위한 power supply, 테스트 샘플을 위치시키기 위한 지그 등으로 구성되어 있음
- 또한, 회전 상태에서 집전을 용이하게 하기 위해 볼 베어링을 이용한 집전 방식을 선정함



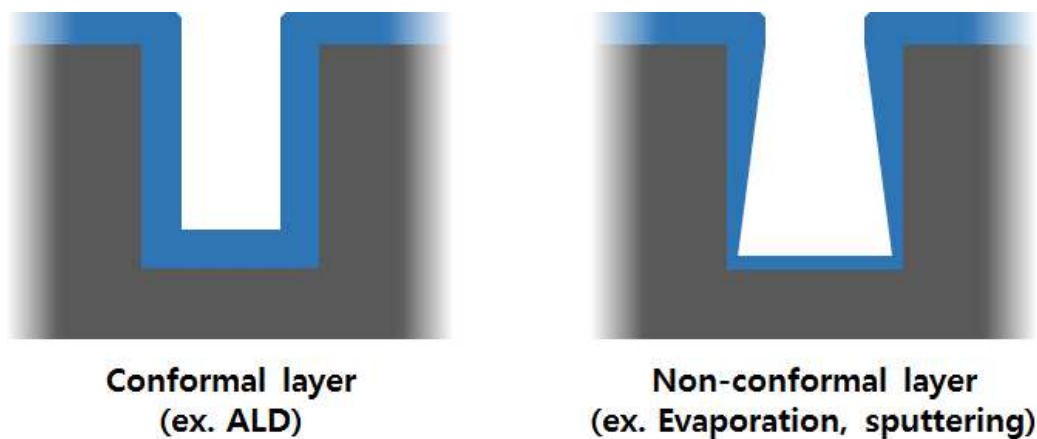
<그림 20. 회전형 테스트 스테이션>

- 회전 에너지 수집형 REWOD 발전 기술의 검증을 위해 Al₂O₃ 유전막을 이용하여 실험을 진행함
- Unit cell 제작은 스퍼터링 방법을 이용하였으며, 물리적 마스크를 이용하여 패턴된 전극을 제작하고, 그 위에 Al₂O₃ 유전막을 적층함



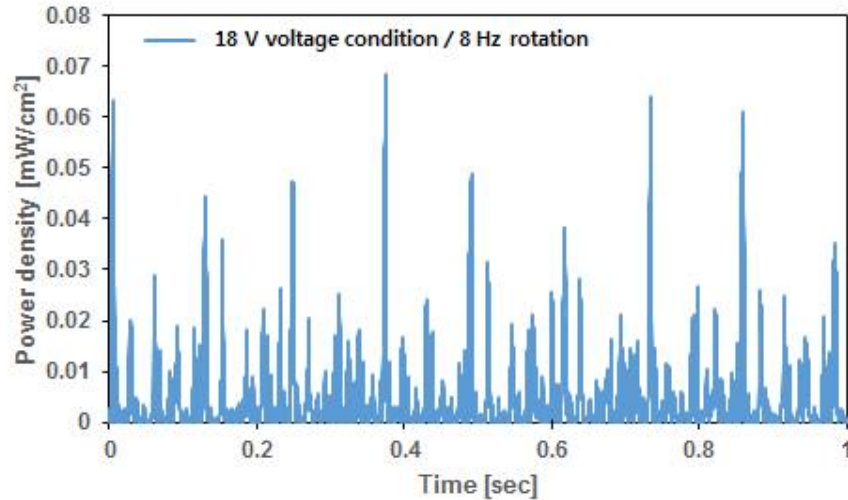
〈그림 21. 패턴 전극 증착을 위한 마스크 및 제작된 cell〉

- 실험 결과, 같은 두께에서 진동형 REWOD 발전 기술용 unit cell에서는 절연 파괴가 일어나지 않은 전압 환경에서도 절연 파괴가 발생하는 문제를 관찰함
- Unit cell 제작에 사용된 sputtering 기술은 그 특성상 증착의 직진성에 의해 단차가 있는 구조를 균일하게 덮는 정도(step coverage)가 낮게 형성되는데, 단차가 있게 패턴된 전극 위에 유전막을 적층할 경우 패턴의 모서리 부분의 두께가 균일하지 않고 얇게 형성될 수 있으며, 이에 따라 절연 파괴 전압이 국부적으로 낮아진 것으로 판단됨



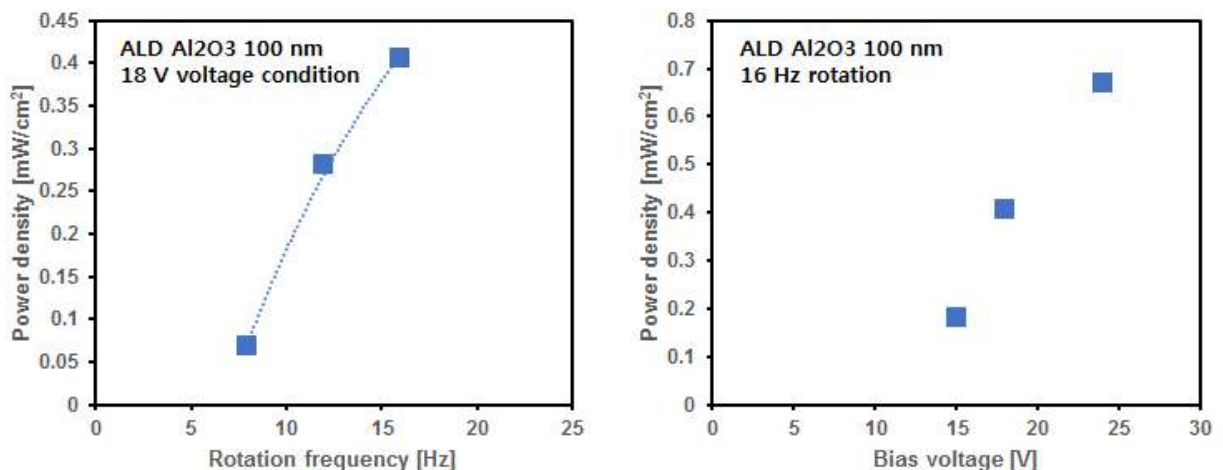
〈그림 22. 증착 기술에 따른 증착 양상의 차이〉

- 패턴된 전극 위에 유전막 증착시 발생하는 절연 파괴 전압 감소 문제를 해결하기 위해 ALD 기술을 도입함
- ALD 기술의 경우, 기판과 물질 사이의 자기 제한 반응 및 층층이 증착되는 메커니즘을 통해 증착이 진행되는 특징과 동시에 3차원 구조에 균일한 두께의 막을 형성할 수 있다는 장점이 있음
- 따라서 ALD를 이용하여 회전형 REWOD 발전 기술 unit cell을 제작 시 sputtering을 이용하여 제작된 cell에서 발견된 절연 파괴 문제점을 해결할 수 있을 것으로 판단됨
- 이에 대한 검증을 위해, sputtering을 이용하여 패턴된 전극을 증착하고, 그 위에 ALD를 이용하여 Al_2O_3 유전막을 적층시킴



<그림 23. ALD로 제작된 100 nm의 Al_2O_3 유전막이 적용된 회전형 REWOD 발전 성능 평가>

- 실험 결과, 절연 파괴 현상 없이 기존 진동형 REWOD 발전 기술에 적용 가능했던 수준의 전압 인가가 가능했으며, 8 Hz의 회전, 18 V 전압 환경에서 약 0.07 mW/cm²의 성능이 측정됨
- 하지만, 측정된 전력 밀도는 같은 전압 조건 하에서 실험한 진동형 REWOD 발전 기술에 비해 낮은 수준으로 형성됨
- REWOD 발전 기술의 경우 그 발전 성능이 외부 힘 주파수에 의한 면적 변화의 속도에도 영향을 받는데, 이에 따라 낮은 주파수의 회전에서 실험한 결과는 낮은 전력 밀도를 보여주게 됨^{6,7}
- 이를 해결하기 위해 높은 주파수의 회전을 인가할 경우에는 회전하는 기관과 액적 사이의 마찰에 의해 액적이 정위치에서 탈락하는 현상이 발생함
- 따라서 액적의 탈락 현상을 방지하기 위해 고정시킬 수 있는 구조물을 형성하여 탈락 현상을 억제하였으며, 기존 실험조건 대비 높은 주파수의 회전을 인가함



<그림 24. 회전 속도에 따른 성능 변화와 16 Hz 회전에서의 전압 환경에 따른 성능 변화>

- 실험 결과, 회전 속도가 증가함에 따라 성능이 증가하는 경향을 보였으며, 24 V의 전압, 16 Hz 회전 환경 하에서 약 0.7 mW/cm²의 성능을 보여줌. 이는 선행 연구 결과의 실험

조건인 70 V 조건으로 환산시 약 6 mW/cm²의 성능으로 예측할 수 있음

■또한 선행 논문을 바탕으로 주파수의 영향을 고려해보면, 선행 연구 결과의 주파수 범위인 300 Hz에서 약 160 mW/cm²의 성능이 예상되고 있음

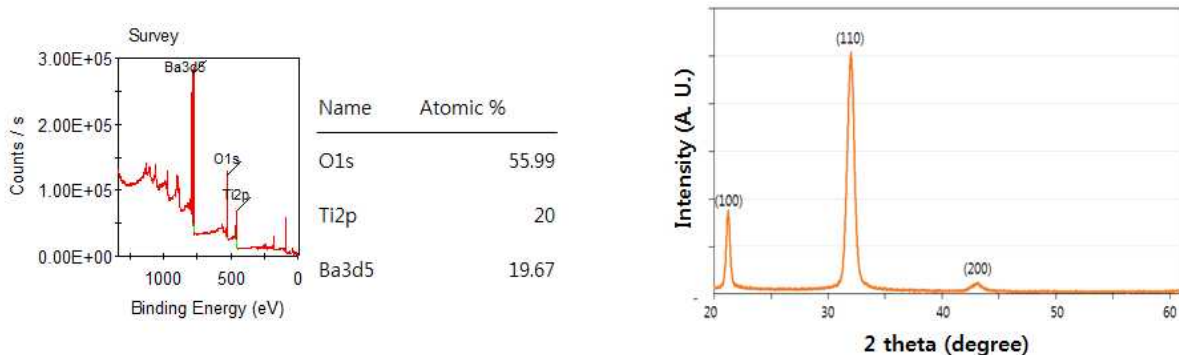
■8 Hz의 속도는 선행 연구 결과의 회전 속도에 비해 매우 낮은 회전 속도이며, 따라서 본 실험 결과는 저속의 회전 에너지에서도 효과적으로 에너지 수집이 가능한 REWOD 발전 시스템을 개발한 것이라고 말할 수 있음

3. REWOD 성능 향상을 위한 추가 연구

■REWOD 발전 기술의 성능을 극대화시키기 위해, 더 높은 유전상수를 지니는 새로운 유전 물질을 이용한 성능 개선 연구를 진행하고자 새로운 물질에 대한 characterization을 진행함

■기존에 사용하던 범용물질인 Al₂O₃에 비해 매우 높은 유전 상수를 지니는 것으로 알려진 대표적 고유전 물질인 티탄산 바륨(BaTiO₃)를 선정하였으며, 기초 연구를 위해 솔루션 기반의 스펀 코팅법을 이용하여 선행 실험을 진행함

■Barium, Titanium precursor를 이용하여 제작된 솔루션을 이용하여 막 제작을 진행하였으며, 추후 적용될 금속 전극에 대한 악영향을 최소화 하기 위해 상대적으로 낮은 온도인 600°C에서 소결을 진행함

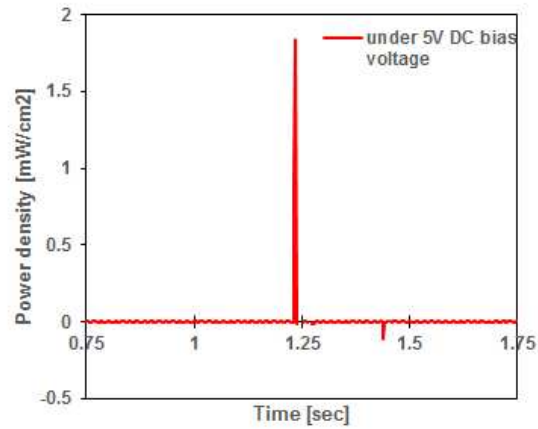


<그림 25. 스펀 코팅으로 제작된 BaTiO₃ 유전막의 XPS, XRD data>

■제작된 막에 대해서 XPS 분석을 진행한 결과, Ba, Ti, O의 비율이 이상적인 비율인 1 : 1 : 3에 가깝게 형성되었으며 이를 통해 BaTiO₃ 박막이 제대로 형성됨을 확인함

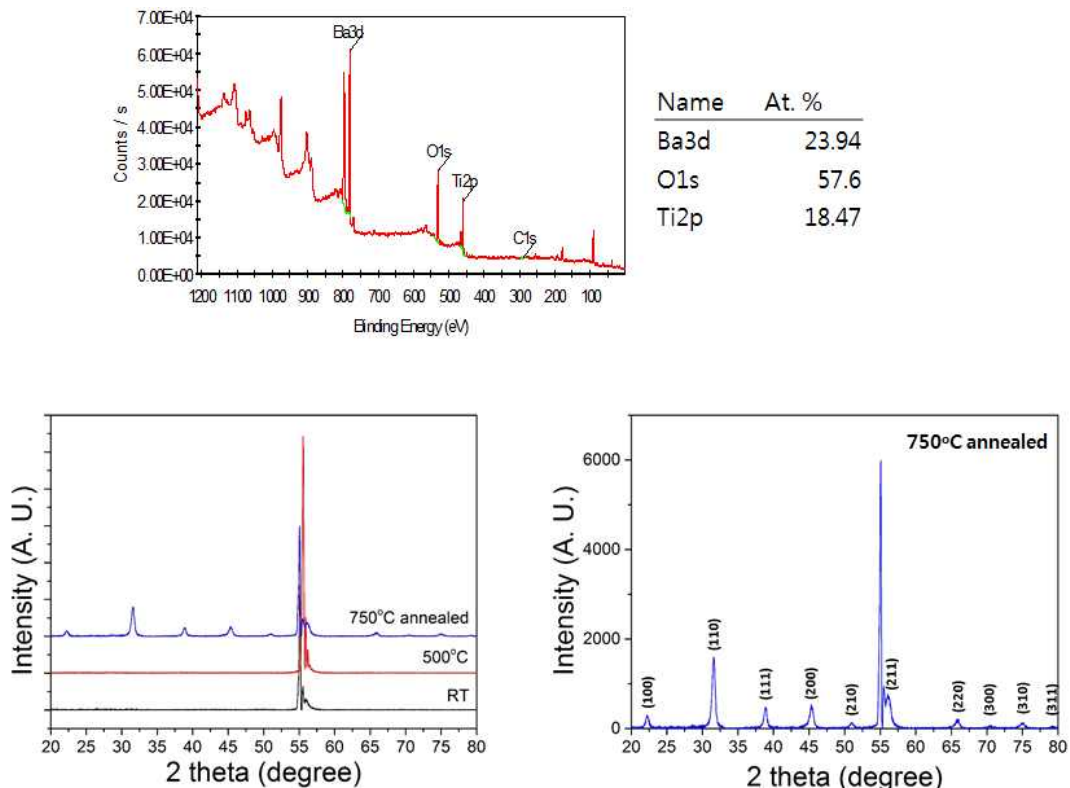
■또한 XRD(X-Ray Diffraction) 분석을 통해 박막의 결정성을 확인하였고, BaTiO₃의 유전성에 영향을 미치는 peak으로 알려진 (110) peak이 관찰됨^{13,14}

Material	BaTiO ₃
Deposition technique	Spin coating
Thickness	200 nm
Capacitance	258.59 nF/cm ²
Dielectric constant	58.41



<그림 26. 제작된 BaTiO₃ 유전막의 capacitance 및 성능 측정 결과>

- 스핀 코팅법으로 제작된 BaTiO₃ 유전막의 capacitance를 측정한 결과, 약 258.59 nF/cm²의 capacitance이 나타났으며 FE-SEM으로 관찰된 두께를 이용하여 유전 상수를 계산하면 약 58.41의 값으로 나타남
- 또한 BaTiO₃ 유전막으로 구성된 unit cell의 성능 평가 결과, 5 V 전압 환경에서 약 1.8 mW/cm²의 성능을 보여주고 있으며 이는 Al₂O₃ 유전막을 사용한 unit cell에 비해 2배 이상 두꺼운 막임에도 불구하고 매우 높은 성능을 보여주었다고 할 수 있음
- 하지만 비진공 증착 방법인 스핀 코팅법의 한계에 의해 높은 전압의 인가에 어려움이 있음
- BaTiO₃ 유전막에 있어 높은 전압 인가를 통한 성능 향상을 위해 비교적 고품질의 막을 제작할 수 있는 sputtering 방법을 이용하여 BaTiO₃ 막을 제작함
- Sputtering을 위해 BaTiO₃ ceramic target을 이용하였으며, RF magnetron sputtering 방식을 이용함



<그림 27. sputtering으로 제작된 BaTiO₃ 유전막의 후열처리 공정 후 XPS, XRD 측정 결과>

- 제작된 막에 대해 XPS, XRD 분석을 진행하였으며, XPS 결과를 통해 BaTiO₃가 제대로된 조성비를 갖추어 제작되었음을 확인하였으나, XRD 결과로 보았을 때 비정질의 막이 형성되었음을 알 수 있음^{13,14}
- BaTiO₃의 경우 막의 결정성이 유전 특성에 영향을 끼친다고 보고되고 있으며, 따라서 측정된 capacitance값과 두께로 계산된 유전 상수값이 기존 보고되던 값에 비해 낮은 것을 확인할 수 있음^{13,14}
- 따라서 결정성을 확보하기 위해 500°C, 750°C에서 후열처리 공정을 진행함
- 500°C의 온도에서 열처리된 BaTiO₃ 유전막의 경우 XRD 상에서 peak이 검출되지 않으나, 750°C 온도에서 열처리된 유전막의 경우 BaTiO₃의 유전 특성에 관련된 perovskite의 peak이 발견됨

Deposition technique	Sample treatment	Thickness (nm)	Capacitance (nF/cm ²)	Dielectric constant
Sputtering		250 nm	39.96	10.42
Sputtering	750°C post annealing	288 nm	226.16	73.57

〈그림 28. 제작된 BaTiO₃ 유전막의 capacitance 측정 결과〉

- 열처리 공정을 거친 유전막에 대해서 capacitance 측정 및 유전 상수 계산을 진행한 결과, 열처리 공정을 거치지 않은 막보다 향상된 유전 성능을 보여주고 있음
- 하지만, 현재 스핀 코팅법과 sputtering 법으로 제작된 막의 특성은 기존 사용 물질에 비해서는 매우 높은 값이나 일반적으로 보고되는 BaTiO₃의 유전상수보다는 낮은 값임
- 이러한 현상에 대한 원인은 상대적으로 낮은 소결 온도에 의해 막의 결정성이 덜 발달된 데에서 온 것으로 판단됨
- 따라서 더 높은 온도에서 소결 처리를 진행할 시 높은 유전 상수값과 극대화된 capacitance를 지니는 막을 제작할 수 있을 것으로 판단되나, 소결 온도 상승 시 REWOD unit cell에 구성 요소인 전극에 문제가 될 수 있어 새로운 전극 물질의 개발이 필요함
- 이에 따라 추후 고온에서 견딜 수 있는 ITO 등의 ceramic 물질로 이루어진 전극의 개발을 진행하고, 전극 전도도 향상 등 추가 연구를 진행할 예정임
- 추가 연구 개발을 통해 보다 더 성능이 향상된 unit cell 제작 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대되며, 고온 전극의 활용으로 다양한 온도대에서 활용 가능한 unit cell 개발을 할 수 있을 것으로 기대됨
- BaTiO₃ 유전막 개발과 더불어, 에너지 재료로 자주 사용되는 doped-ceria 계열의 물질에 대한 characterization과 막 분석도 진행하였으며, 이에 파생된 결과를 통해 SCI급 저널에 2 편의 논문을 등재시킨 바 있음

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

핵심성과	단위성과	최종 성과점검기준		
		질적 성과지표	목표치	달성치
발전 전력 밀도 50 mW/cm ² 급 진동 수집형 REWOD 발전 모듈	고성능 유전막	정전 용량 절연 파괴 강도	70 nF/cm ² 6 kV/mm	245.19 nF/cm ² 171.43 kV/mm
	초발수성 막	접촉각	150°	110°
	진동 수집형 REWOD 발전 모듈	순간 전력밀도	50 mW/cm ²	11 mW/cm ² (24 V condition)
발전 전력 밀도 20 mW/cm ² 급 회전 수집형 REWOD 발전 모듈	고성능 유전막	정전 용량 절연 파괴 강도	30 nF/cm ² 6 kV/mm	245.19 nF/cm ² 171.43 kV/mm
	회전 수집형 REWOD 발전 모듈	순간 전력밀도	20 mW/cm ²	0.7 mW/cm ² (24 V, 16 Hz condition)

<본 과제에의 주요 달성 목표를 정리한 표>

- 본 과제의 주요 달성 목표는 전력 밀도 50 mW/cm² 급 진동 수집형 REWOD 발전 모듈 개발과 20 mW/cm² 급 회전 수집형 REWOD 발전 모듈 개발의 원천 기술 연구이며, 목표치는 선행 연구 논문의 수치를 바탕으로 계획되었음⁶
- 50 mW/cm² 급 진동 수집형 REWOD 발전 모듈 개발을 위한 세부 연구 목표로는 고성능 유전막 개발 및 초발수성 막 구현이 있으며, 각각의 목표치 역시 선행 연구 논문의 수치를 바탕으로 계획되었음⁶
- 고성능 유전막 개발의 경우, 본 연구진은 최신 박막 기술인 원자막 증착법(ALD)을 도입함으로써 수십 nm 수준의 치밀한 박막을 제작하였으며 이에 따라 목표치인 70 nF/cm²를 상회하는 245.19 nF/cm²의 성능을 달성함
- 또한, 절연 파괴 강도 역시 ALD로 제작된 박막의 치밀한 구조로 인해 대폭 상승되었으며, 목표치를 상회하는 171.43 kV/mm의 성능을 달성함
- 초발수성 막의 경우, 접촉각 이력 현상을 억제하고 면적 변화 극대화를 통해 성능 향상을 이끌어내기 위해 초발수성의 기준이 되는 150°의 접촉각을 목표로 선정함
- 하지만, 연구 진행 중 초발수성 막의 주요 역할 중 하나로 charge trapping 현상 억제가 발견되었으며, 이는 재료의 특성을 통해 이끌어 내는 것으로 조사됨^{8,9}
- 따라서 불소중합체(fluoropolymer) 계열의 상용 물질인 CYTOP의 적용을 통해 접촉각도 110° 수준의 막을 성공적으로 제작하였으며, charge trapping 현상 억제 및 성능 향상을 이끌어냄
- 이러한 연구 결과를 바탕으로 고성능 REWOD 발전 모듈을 제작하였으며, 24 V 전압 환경에서 순간 전력 밀도 11 mW/cm²의 성능을 달성함
- 선행 연구 논문의 수치인 65 V의 전압 환경에서 약 10 mW/cm²의 성능과 비교해보았을 때, REWOD 발전이 전압 환경의 제곱에 비례한다는 점을 고려하면 본 연구 결과의 성능 수치는 65 V 전압 환경 기준 약 80 mW/cm² 수준으로 평가할 수 있으며 고성능의 발전 모듈 개발을 성공적으로 수행하였음⁶
- 더 나아가, 실제 적용에 있어서는 전압을 낮추는 것이 필요불가결하며, 24 V의 전압 환경

은 실제 환경에서 무리 없이 적용 가능한 수준이므로 더 큰 의미를 가지고 있다고 할 수 있음

- 20 mW/cm² 급 회전 수집형 REWOD 발전 모듈 개발을 위한 세부 연구 목표로는 고성능 유전막 개발이 있으며, 이는 진동 수집형 REWOD 발전 모듈에 적용되었던 유전막을 활용 하였음
- 본 연구 과제를 통해 개발된 회전 수집형 REWOD 발전 모듈의 경우, 24 V 전압 및 16 Hz 회전 환경에서 약 0.7 mW/cm²의 성능을 달성함
- 선행 연구 논문에서는 70 V 전압 및 300 Hz 이상의 회전 환경에서 약 10 mW/cm² 급의 성능을 보여주고 있음⁶
- 회전 수집형 REWOD 발전 기술의 경우, 전압 환경과 더불어 회전 속도가 성능에 매우 중요한 영향을 끼치게 됨⁶
- 본 연구 과제에서 개발된 발전 모듈의 성능을 70 V로 환산하면 약 6 mW/cm²의 성능으로 평가할 수 있으며, 또한 선행 연구 결과의 회전 주파수인 300 Hz 수준으로 환산 시 약 160 mW/cm²의 높은 성능을 예상할 수 있어 우수한 성능의 발전 모듈 개발에 성공하였음
- 또한 개발된 발전 모듈은 저속 회전에서도 효과적으로 에너지를 수집할 수 있다는 점에서 큰 의미를 가지고 있다고 평가함

2. 관련 분야 기여도

- 현재까지 REWOD 발전 기술의 경우 기존 에너지 하베스팅 기술 대비 높은 발전 전력 밀도를 학계에 보고하고 있음
 - 하지만 높은 전력 밀도를 위해 높은 전압 환경 등 실제 환경에서 얻어내기 어려운 조건들이 있고, 이러한 점들이 한계점으로 지적됨
 - 본 연구 개발 과제로 달성된 목표들은 이러한 한계점들을 일부 극복하고, 추후 추가 연구 개발을 통한 상용화의 가능성을 열었다고 판단됨
 - 주요 연구 성과인 11 mW/cm²급 진동 수집형 REWOD 발전 모듈은, 24 V라는 기존 연구 결과 대비 절반 이하의 전압 환경하에서 달성되었다는 점에서 큰 의미가 있으며 실제 환경에서 쉽게 적용될 수 있는 환경 조건이라는 점 또한 장점임
 - 또한 회전 수집형 REWOD 발전 모듈의 경우 기존 연구 결과 대비 대폭 감소된 회전 속도 환경에서도 의미있는 발전 밀도를 얻어냈으며, 이를 통해 고속 환경에서만 아니라 인체 관절 등 다양한 회전 환경에의 적용이 가능할 것으로 예상됨
 - 정리하면, 본 연구 개발 과제의 수행 결과로 실제 에너지 하베스팅 기술이 적용될 수 있는 환경에서 충분한 성능을 낼 수 있는 발전 모듈의 개발이 이루어졌다고 평가할 수 있음
-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

현장 적용 방안

- 교통 기술·기반 시설의 진동 및 회전이 발생하는 모든 환경에 적용이 가능함.
- 예를 들어, 자동차 및 도로 하층부, 도로 주변 및 방음벽, 교량 하층부, 철도 선로 주변, 열차 내부 및 바퀴, 선박 엔진부 등에 무궁무진한 적용이 가능할 것임.
- 기존 회생에너지 대비 높은 발전량을 수득할 수 있기 때문에 보조 전력 발생 장치 뿐 아닌 적용 분야에 따라서는 주 전원 장치로서의 역할도 수행할 수 있을 것으로 기대됨.

실용화, 제품화 방안

- REWOD를 발전 모듈의 형태로 제작하여 용량별, 진동 형태별, 적용 환경별 등으로 구분하여 목적에 부합하는 형태로 제작이 가능함.

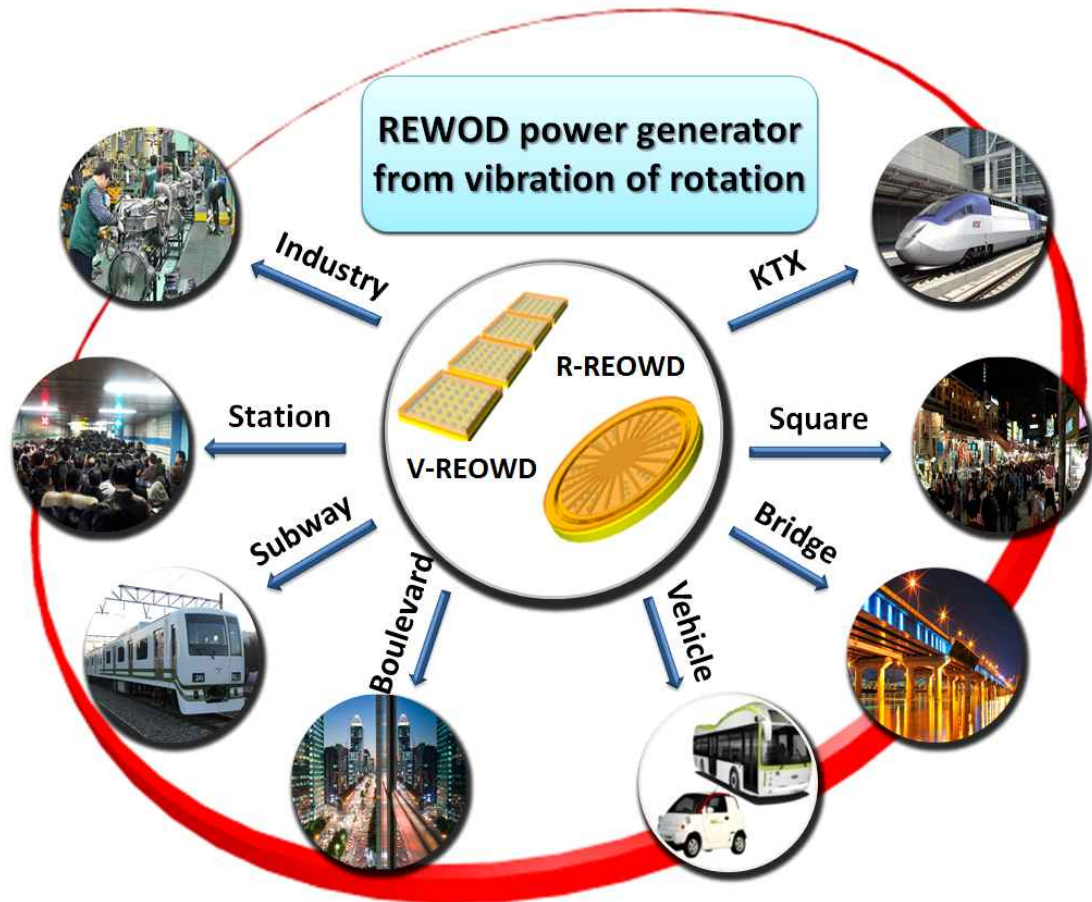
미래 원천 기술 확보

- REWOD는 미국 등 선진국에서도 초기 연구 개발 단계에 머물러 있음. 특히, 실제 적용을 위한 디바이스화 등에 대한 연구가 매우 미미함.
- 따라서 REWOD를 이용한 발전 모듈 제작 및 평가를 통해 심도있는 연구를 진행한다면 미래 원천 기술의 확보가 가능함.

신산업 창출/사업화, 기술 이전, 후속 연구

- 회생 에너지 기반 REWOD 기술은 기초 기술 연구 수준에 머물러 있고, 이에 뚜렷한 시장이 형성되어있지 않음.
- 국내 회생에너지 기반 산업의 규모는 매우 작고 국내 동향 상 큰 관심을 끌지 못하고 있음.
- REWOD 발전 모듈의 제작을 통해 REWOD 기술 시장이라는 새로운 시장을 형성할 수 있고 회생에너지에 대한 관심의 제고가 이루어질 수 있을 것이라고 생각됨.

- REWOD는 우리 주위에 흔하게 볼 수 있는 열차, 교량, 도로 및 선박 등에서 버려지는 진동 및 회전 운동이 존재하는 곳에 모두 적용 가능한 범용성 발전 기술임.
- 따라서 발생하는 진동 및 회전에너지가 존재하는 도로 교통 관련 어느 분야든지 적용 가능하며, 그 활용성이 매우 높음.
- 예를들어 REWOD를 자동차 및 도로 하층부에 직접 설치 및 도로 주변의 방음벽, 교량의 하층부에 직접 설치, 철도의 선로 주변, 열차의 내부, 선박의 엔진부 등에 설치하여 발전이 가능하며, 이 외에도 건설 교통 전반에 적용하여 잉여 에너지로부터 전기에너지를 생산해낸다면 보조 전력 발생 장치뿐만 아니라 용량에 따른 주 전원 장치로서의 역할까지도 수행할 수 있을 것으로 기대됨.



〈그림 29. REWOD 발전 기술의 다양한 응용 방안〉

- 기차 및 전철 등은 일반 승객 수송의 목적도 있지만, 내부 공간이 넓고 운행시간이 길어 다양한 편의시설을 갖추고 있음. 이러한 편의시설은 내부 조명, 승객용 전기콘센트, 자동문, 화장실, 냉난방 등이 있어, 상당한 전기를 소모함. 기존 지하철 공사 등은 이러한 전력 소모에 대한 마땅한 대책이 없었음.
- 기존 기차나 전철은 바퀴로부터의 회전 에너지와 열차 차체(body)에서 진동에너지가 발생하지만, 전혀 이용되지 못하고 낭비 되고 있음. 따라서 열차에 REWOD 기반 발전 모듈을 설치하여 상당 부분 낭비되는 에너지로부터 전력을 생산할 수 있음.
- 서울-부산 구간을 편도로 하는 KTX의 경우 13,560 kWh 의 전력소모가 발생하며 이 모든 전력을 펜티그래프를 통해 공급을 받고 있음. 이를 50 mW/cm² 급의 REWOD 발전 모듈이 적용된 18량 기차(1량 당 약 60 m²의 면적)를 기준으로 계산해보면 열차 한량 당 30 kWh의 전력 생산이 기대 되어, 총전력소모량의 약 5% 에 해당되는 부분을 회생 시킬 수 있음.
- 전철의 경우, 2012년 한국철도통계에 따르면 수도권 전철의 소비전력이 열차 당 하루 평균 2,080 kWh로 굉장히 높음. 기차와 다르게 전철은 매 2-3분마다 정지하여 에너지 소모가 크고, 승객의 승하차를 위한 문의 여단음,
- 지하철 내부 환풍, 그리고 상시 냉난방 등 많은 전력을 필요로 함. 전철의 특성상 주행 중 항상 진동을 수반하기 때문에 보조전원장치(APU)로서의 REWOD 발전 모듈 적용이 매우 적합함.
- 지하철역의 경우 하루 평균 운영 시간이 20시간 정도이며, 역사 내부 환·배기 및 역 내부 조명 등 전력 소비처가 많음.



<그림 30. 진동 환경에 국한되지 않는 V-REWOD / R-REWOD 의 연계 모듈>

- 따라서 전력 소비 감소를 위해 매 정차역 및 철로마다 REWOD 발전 모듈을 설치해 열차의 진동에너지를 이용한 추가적인 전력 생산이 가능함.
- 대도시의 도로는 차량 통행이 잦고 특히 출퇴근 시간에는 정차시간이 길어 REWOD를 이용한 잉여 에너지 회생 가치가 높음.
- 이와 더불어 사람들의 통행이 잦은 주요 지하철역, 광장 및 인도에 REWOD 발전 모듈을 설치하여 주변의 가로등, 신호등의 전력원의 APU로 이용할 수 있음.
- 서울시 한강 위에는 차량 통행이 빈번한 24개의 대형 교량이 있고, 야간에 가로등과 외관 조명으로 인한 전력 소비량이 많아 외관 조명의 경우 3개의 교량씩 돌아가면서 점등하고 있음.
- 교각의 환경은 일반 도로에 비해 진동이 심하고, 많은 차량이 물리기 때문에 REWOD 발전 모듈의 활용조건을 충분히 갖추고 있어 REWOD 발전 모듈을 적용한다면 진동 에너지 회생이 가능함.
- 앞에서 언급한 적용방안 외에도 REWOD 발전 모듈은 진동이나 회전운동이 존재하는 장소 및 장치에는 모두 적용 할 수 있으므로 활용 가능성이 높음.
- 또한 회전운동을 진동으로, 진동을 회전으로 전환할 수 있는 장치를 설치하여 그 적용 범위를 더욱 넓힐 수 있으며 에너지 저장장치와 연계하면 그 활용 범위는 더욱 넓어짐.
- 도로 교통 기술에 직접 REWOD를 적용하기 위해서, REWOD를 발전 모듈로 제작하여 용량별, 진동 형태별, 적용 환경별 등으로 구분 하여 각기 목적에 부합하는 형태로 제작이 가능함.
- 또한, 공장과 같은 생산 설비를 갖춘 장소는 진동 및 소음 에너지가 버려지고 있으며 회전기기가 많아 REWOD 발전 모듈을 적용하기에 최적의 조건을 갖추고 있고 REWOD 발전 모듈을 설치해 공장에 적용 시킬 경우 공장 건물 등의 보조전력으로도 활용도가 높을 것으로 예상함.
- 그 외에도 소비자들이 사용하기 쉽도록 휴대용 모듈로 제작한다면 진동이 존재 하는 곳에 올려놓거나 회전이 존재 하는 곳에 결합해 작은 전자기기들에 보조적으로 전력을 공급하는 용도로 사용될 수 있음.
- 또한 액체를 이용하는 기술의 특성 상 매우 미세한 진동 또한 이용 가능하여 큰 진동이 발생하는 환경 이외에도 다양한 환경에 적용이 가능할 것으로 예상되어 기존 에너지 하베스팅 기술이 적용되지 못했던 분야에 대해서 확장 가능할 것으로 기대됨

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- REWOD 기술과 관련하여, 해외 논문의 경우 2011년 Nature Communications 지에 게재된 “Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting” 과 2015년 Scientific Reports 지에 게재된 “Bubbler: A Novel Ultra-High Power Density Energy Harvesting Method Based on Reverse Electrowetting” 의 두 편이 발표되었음^{6,7}
 - 상기 두 편의 논문에서 발표된 REWOD 기술의 기초 이론 등에 대한 내용과 electrowetting 과 관련된 정보를 기반으로 본 연구 과제의 연구를 진행함^{15,16}
 - 선행 논문에서 REWOD 기술의 성능 저하에 영향을 끼치는 현상으로 charge trapping 현상이 제시되었으며, 이는 oxide 물질에 있어 쉽게 발생할 수 있는 현상으로 보고됨
 - 이를 방지하기 위해서는 물질적 특성이 필요하며, 대표적으로 fluoropolymer 계열의 물질이 charge trapping 현상을 억제할 수 있는 물질로 다수의 논문에서 발표되었음^{8,9}
 - REWOD 성능 향상을 위해서는 유전막의 절연 파괴 현상에 대한 분석이 필요하였으며, 박막의 결정립계 구조가 절연 파괴 현상에 영향을 끼칠 수 있다는 논문이 발표된 바 있으며, 이에 따라 결정립계 구조에 대한 분석을 진행함¹⁰
 - 회전형 REWOD 발전 모듈의 경우, 회전 주파수가 성능에 영향을 줄 수 있다는 보고가 발표된 바 있음^{6,7}
 - REWOD 성능 향상을 위한 고성능 유전막 개발에 있어, BaTiO₃가 높은 유전 특성을 지니고 있다는 다수의 보고가 발표된 바 있음^{13,14}
 - 또한 BaTiO₃의 경우 그 박막의 결정성에 따라 유전 특성에 큰 차이가 나타난다는 보고가 있어 결정구조의 조절이 매우 중요하며 열처리, 플라즈마 공정 등 다양한 처리 방법에 대한 논문이 발표되었음^{13,14}
-

제7장. 연구개발성과의 보안등급

본 과제는 국토교통기술과학기술진흥원에서 국토교통기술촉진연구사업 창의도전연구 공고시
게시한 보안등급에 따라 일반과제로 분류되었으며, 이에 따라 본 연구 과제의 연구개발성
과 또한 일반과제의 보안등급에 따름

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

연구원들의 안전 관리를 위해 주관 기관에서 인증하는 실험실 안전 교육을 매년 이수하였으며, 이수한 연구원에 대해서만 실험 수행 자격을 부여함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	REWOD 발전장치	한양대 학교 산학협 력단	발명 자	대한민국	-	2015.06.04	-	-
2	특허	REWOD 발전장치 및 역 전기습윤 발전 모듈	한양대 학교 산학협 력단	발명 자	PCT	-	2015.07.30	-	-
3	논문	Thermally-Induced Dopant Segregation Effects on the Space Charge Layer and Ionic Conductivity of Nanocrystalline Gadolinia-Doped Ceria	한양대 학교	저자	Journal of the Electrochemical Society	3.014	2016.06.15	중복 사사	SCI
4	논문	Enhanced Oxygen Reduction Reaction in Nanocrystalline Surface of Samaria-Doped Ceria via Randomly Distributed Dopants	한양대 학교	저자	Journal of the American Ceramic Society	2.787	2016.08.10	중복 사사	SCI
5	특허	회전형 에너지 발전 모듈	한양대 학교 산학협 력단	발명 자	대한민국	-	2014.06.09	-	-

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

1. S. -H. Kwon, J. Park, W. K. Kim, Y. Yang, E. Lee, C. J. Han, S. Y. Park, J. Lee, Y. S. Kim, “An effective energy harvesting method from a natural water motion active transducer” , *Energy & Environmental Science*, **2014**
 2. Y. Yang, J. Park, S. -H. Kwon, Y. S. Kim, “Fluidic active transducer for electricity generation” , *Scientific Reports*, **2015**
 3. J. Park, Y. Yang, S. -H. Kwon, Y. S. Kim, “Influences of surface and ionic properties on electricity generation of an active transducer driven by water motion” , *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **2015**
 4. J. K. Moon, J. Jeong, D. Lee, H. K. Pak, “Electrical power generation by mechanically modulating electrical double layers” , *Nature Communications*, **2013**
 5. J. K. Moon, M. W. Song, H. K. Pak, “Investigation of surface charge density on solid-liquid interfaces by modulating the electrical double layer” , *Journal of Physics: Condensed Matter*, **2015**
 6. T. Krupenkin, J. A. Taylor, “Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting” , *Nature Communications*, **2011**
 7. T. -H. Hsu, S. Manakasettham, J. A. Taylor, T. Krupenkin, “Bubbler: A novel ultra-high power density energy harvesting method based on reverse electrowetting” , *Scientific Reports*, **2015**
 8. H. J. J. Verheijen, M. W. J. Prins, “Reversible electrowetting and trapping of charges: Model and experiments” , *Langmuir*, **1999**
 9. M. K. Kilaru, J. Heikenfeld, “Strong charge trapping and bistable electrowetting on nanocomposite fluoropolymer: BaTiO₃ dielectrics” , *Applied Physics Letters*, **2007**
 10. P. Bhattacharya, K. -H. Park, Y. Nishioka, “Control of grain structure of laser-deposited (Ba, Sr)TiO₃ films to reduce leakage current” , *Japanese Journal of Applied Physics*, **1994**
 11. M. D. Groner, F. H. Fabreguette, J. W. Elam, S. M. George, “Low-temperature Al₂O₃ atomic layer deposition” , *Chemistry of Materials*, **2004**
 12. M. G. H. M. Hendriks, B. A. Boukamp, J. E. ten Elshof, W. E. van Zyl, H. Verweij, “The electrical behaviour of platinum impregnated porous YSZ” , *Solid State Ionics*, **2002**
 13. A. Ianculescu, B. Despax, V. Bley, T. Lebey, R. Gavrilă, N. Drăgan, “Structure-properties correlations for barium titanate thin films obtained by rf-sputtering” , *Journal of the European Ceramic Society*, **2007**
 14. C. -S. Hsi, F. -Y. Hsiao, N. -C. Wu, M. -C. Wang, “Dielectric properties of nanocrystalline barium titanate thin films deposited by rf magnetron sputtering” , *Japanese Journal of Applied Physics*, **2003**
 15. F. Mugele, J. -C. Baret, “Electrowetting: from basics to applications” , *Journal of Physics: Condensed Matter*, **2005**
 16. F. Mugele, M. Duits, D. van den Ende, “Electrowetting: A versatile tool for drop manipulation, generation, and characterization” , *Advances in Colloid and Interface Science*, **2010**
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.