

# 대한기계학회 주선

## 제12회 전국학생설계경진대회(2022년)

# 설계 최종 보고서

참가부	대학부 ( O )				
참가분야	공모주제 ( O ) / 자유주제 ( )				
참가팀명	지구를 지켜라				
설계제목	반응동형 반발력 보상 선형 모션 스테이지에서의 전자기형 에너지 하베스팅 시스템 구축				
지도교수/교사	(소속) 송실대학교 기계공학부 (성명) 안형준				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	신재민	송실대학교 기계공학부			

## 참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김서윤	송실대학교 기계공학부 / 3학년	
2	문성민	송실대학교 기계공학부 / 3학년	
3	박세진	송실대학교 기계공학부 / 3학년	
4	신재민	송실대학교 기계공학부 / 3학년	
5	양경호	송실대학교 기계공학부 / 3학년	
6			

# 설계 요약문

<b>참가분야</b>	공모주제 ( O ) / 자유주제 (   )
<b>참가팀명</b>	지구를 지켜라
<b>설계제목</b>	반능동형 반발력 보상 선형 모션 스테이지에서의 전자기형 에너지 하베스팅 시스템 구축
<b>대표자명</b>	신재민
<b>요약문</b>	<p>1) 설계 배경 및 목적  현재 반도체의 수요가 지속적으로 증가함에 따라 그 산업의 규모 또한 성장하고 있다. 최근 반도체 산업의 호황이 가져온 과도한 탄소배출량 증가는 국제 사회에서 문제가 되고 있다. 반도체 생산 과정에서 탄소 배출량이 많은 이유는 과도한 전기의 사용에 있으며, 반도체 생산 전 과정에 걸쳐 정전기를 제거하기 위해 이온라이저를 구동해야한다는 것에 주목했다. 본 설계는 반도체 생산 과정에서 소실되는 진동 에너지를 전자기형 에너지 하베스터를 이용해 전기 에너지로 변환하여 이온라이저를 구동함으로써 반도체 산업의 전기 에너지 효율을 높여 탄소 배출량을 감소시키고자 한다.</p> <p>2) 설계 내용  반도체 공정 전반에서 사용되는 리니어 모션 스테이지는 무버의 고속 이동에 따라 베이스에 진동이 전달되기에 이러한 진동 감쇠 제어는 정밀 반도체 생산에서 필수적이다. 최근 선행 연구에서 코일과 자석을 이용해 감쇠력을 조절하는 반능동형 반발력 보상 리니어 모션 스테이지가 고안되었다. 이 구조는 마그넷 트랙의 진동으로 추가 코일에 유도되는 전류를 이용한다.  이온라이저는 반도체 공정 중 정전기 제거를 위한 세정 공정에 사용된다. 수확한 전기 에너지를 부분적으로 추가 공급하여 반도체 공정의 전기 에너지 효율을 높이고자 한다. 이를 위해 추가 코일에 유도된 교류를 AC/DC converter를 이용해 직류로 변환하고 이를 배터리에 저장한다. 배터리에 저장된 전기 에너지를 이온라이저 구동에 맞추어 추가적으로 공급하여 사용한다.</p> <p>3) 기대 효과  본 시스템을 통해 반도체 공정에서 버려지는 에너지를 수확하여 공정 자체의 에너지 효율을 향상시키면 반도체 산업 전반으로 과도해진 탄소 배출량 감소에 일조할 것으로 기대된다. 또한 본 시스템의 경우 RFC 메커니즘을 사용하는 리니어 모션 스테이지에서 설비 변경 없이 활용이 가능하기에 빠르게 목표 효과를 달성할 수 있을 것이다.</p>

# 반능동형 반발력 보상 선형 모션 스테이지에서의 전자기형 에너지 하베스팅 시스템 구축

신재민\* · 김서윤\*\* · 문성민\*\* · 박세진\*\* · 양경호\*\* · 안형준\*†

\*숭실대학교 기계공학부

## Construction of Electromagnetic Energy Harvesting System in Semi-Active Reaction Force Compensation Linear Motion Stage

Jae-Min Sin\*, Seo-Yun Kim\*\*, Seong-Min Moon\*\*, Se-Jin Park\*\*, Kyung-Ho Yang\*\* and Hyeong-Joon Ahn\*†

\* School of Mechanical Engineering, Soongsil University

(Received September 13, 2022)

**Key Words:** Semi-Active Reaction Force Compensation Linear Motion Stage(반능동형 반발력 보상 리니어 모션 스테이지), Energy Harvesting(에너지 하베스팅), Electromagnetic Energy Harvester(전자기형 에너지 하베스터), Semiconductor Production Process(반도체 생산 공정), Removal of static electricit(정전기 제거)

**초록:** 최근 반도체 제조 공정에서의 탄소 배출 감축이 지속적으로 요구되고 있다. 본 연구에서는 RFC 리니어 모션 스테이지에서 버려지는 진동 에너지를 전기 에너지로 수확하는 시스템을 구축하여 이 문제를 해결하고자 한다. 수확한 전기 에너지는 반도체 생산 공정에서의 정전기 제거에 이용한다. 리니어 모션 스테이지 구동에 따라 추가 코일에 3상 교류 형태로 유도되는 전기 에너지를 직류로 정류하여 수확하였다. 이 과정에서 릴레이를 활용하여 추가 감쇠력의 제어를 그대로 이용하면서, 추가 코일을 에너지 하베스터로 이용할 수 있도록 설계하였다. 이후 전압을 일정하게 강하시켜 배터리를 충전했다. 충전된 배터리로 이오나이저를 구동해 정전기를 제거하였다.

**Abstract:** Recently, carbon emission reduction in semiconductor manufacturing processes is continuously required. In this study, we devised a energy harvesting system for using the abandoned vibration energy in Semi-Active RFC linear motion stage. Harvested energy is used to remove static electricity. By driving the linear motion stage, electrical energy induced in the form of 3-Phase AC was rectified and harvested in DC. By adding the relay, we can apply extra coil as harvester while using the control of extra damping force. Battery was charged and static electricity was removed with the ionizer using charged battery.

## 1. 서론

전기자동차, 스마트폰과 같은 소비자용 전자기기 등 반도체 수요가 많은 산업의 성장으로 인해 반도체 산업 또한 지속적으로 성장하고 있다.(1) 이러한 성장의 이면에는 반도체 생산 과정에서의 탄소 배출 문제가 존재한다. 탄소 배출량을 줄임으로써 환경 보호를 실천하고자 하는 움직임은 이미 세계적인 추세로 자리 잡았다. 대표적인 환경 오염 산업으로 여겨지던 자동차 제조 산업을 반도체 산업이 추월하면서 반도체 산업에서의 탄소 배출 감축이 점차 요구되고 있다.

한편 반도체 생산 과정에서 정전기 발생에 의한 많은 피해가 발생하고 있다.(2) 반도체의 제조공정은

† Corresponding Author, ahj123@ssu.ac.kr

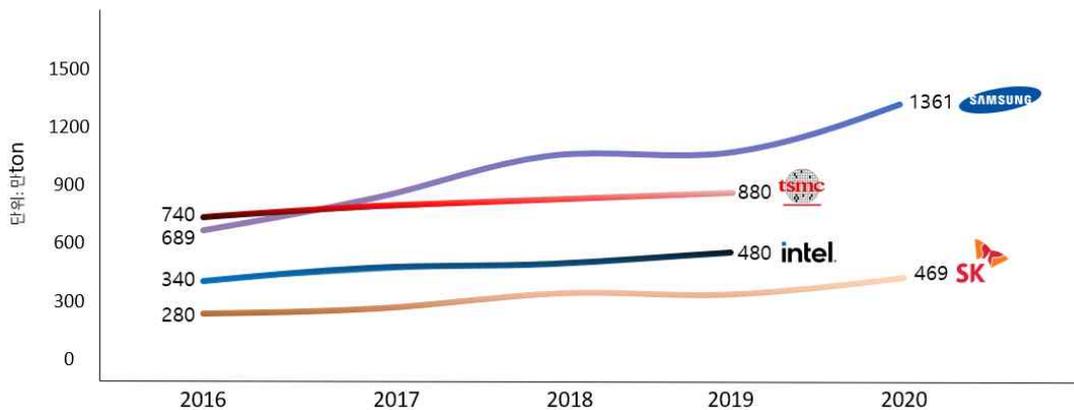
무균에 가까운 클린룸을 유지하는 것이 중요한데, 이때 대전된 물체가 존재할 경우 미세 먼지가 정전기력에 의해 흡입되어 반도체 장비나 웨이퍼 등에 부착될 수 있다. 따라서 제조공정 내의 정전기 발생에 대한 관리가 필수적이다.(3)

이 두 문제를 해결하기 위해 본 설계에서는 리니어 모션 스테이지에 주목했다. 리니어 모션 스테이지는 반도체를 제작하기 위한 고속, 고정밀 제어 장비로 사용된다. 이 장치의 구동에 따라 기계에 발생하는 진동 에너지는 그동안 활용하지 못하고 버려졌다. 본 설계는 리니어 모션 스테이지에서 소산되던 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 전자기형 에너지 하베스팅 시스템을 구축하고자 한다. 추수한 에너지는 반도체 공정 중 정전기 제거에 활용한다. 이를 통해 반도체 산업의 탄소 배출량을 줄여 환경 보호를 실천하고, 보다 효율적인 방법으로 반도체 공정이 수율을 높이는데 기여하고자 한다.

## 2. 설계핵심내용

### 2.1 설계 문제 정의

#### 주요 반도체 기업의 연간 온실가스 배출량



**Fig. 1** Trends in direct and indirect greenhouse gas emissions of Samsung Electronics, Sk hynix, TSMC, Intel

최근 반도체 산업의 호황으로 인한 탄소 배출량의 증가는 국제 사회에서 문제가 되고 있다. 금융감독원 전자공시시스템에 의하면 **Fig. 1**과 같이, 삼성전자의 온실가스 배출량은 2019년 1114만에서 2020년 1361만으로 약 22% 증가했고,(4) SK 하이닉스 또한 2019년 378만에서 2020년 469만으로 24% 증가했다.(5) 대만의 TSMC와 미국의 INTEL의 경우도 마찬가지로 지속적으로 온실가스 배출량이 증가하고 있는 추세이다.(6)

본 설계에서 주목한 다른 문제로는 정전기 발생에 의한 피해가 있다. 반도체 공정이 이루어지는 공간 내에서 대전된 물체가 생길 경우, 정전기력에 의해 미세 먼지가 흡입되어 반도체 장비나 회로, 웨이퍼 등에 부착될 수 있다. 그에 따라 반도체 공정의 수율 감소 및 화재가 발생할 우려가 있다. 불량 상태의 웨이퍼가 발생하는 경우의 70%는 웨이퍼 자체의 대전이다. 따라서 제조 공정 내의 정전기 발생에 대한 관리가 필수적이다.

반도체 제조 공정 중 대다수의 공정에서 리니어 모션 스테이지를 활용한다. 이때 상판의 고속 움직임에 따른 베이스의 진동을 제어하는 과정에서 발생하는 잉여의 진동 에너지는 버려졌다. 그러나 최근의 선행 연구에 따르면 리니어 모션 스테이지에 코일을 부착하는 형태로 설계를 변경함으로써 반발력 보상을 통해 유도 기전력이 발생될 수 있다는 것이 밝혀졌다.(7) 이 점에 착안하여 본 설계에서는 반발력 보

상 과정에서 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지 형태로 변환하는 시스템을 설계하고자 한다. 이후 저장된 에너지는 반도체 제조 공정에서 정전기로 인한 열 파손 현상을 방지하는 이온이저를 작동시켜, 최종적으로 반도체 생산 공정에서의 탄소 배출량을 감축시키고자 한다.

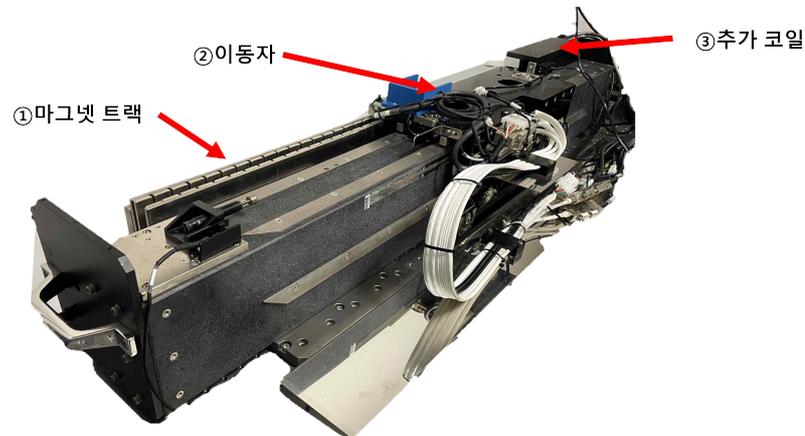
## 2.2 기존 연구 및 특허 분석

### 2.2.1 리니어 모션 스테이지

물체의 움직임을 정해진 축의 방향으로 제한하기 위해 사용되는 정밀 모션 제어 기구를 리니어 모션 스테이지라고 한다. 모든 리니어 모션 스테이지는 무버와 베이스, 리니어 베어링으로 구성된다. 무버는 베이스에 대해 선형 운동으로 제어되며 무버와 베이스는 리니어 베어링을 통해 연결된다. 리니어 모션 스테이지는 피치, 요, 롤, 축 방향 운동 등 선형 자유도에서의 모든 움직임을 제어하기에, 선형 위치를 제어하기 위한 모든 분야에 널리 사용된다.

특히 반도체 생산 과정에서 웨이퍼에 회로를 구성하기 위해 패턴을 기입하는 Lithography 공정에서 웨이퍼의 위치를 매우 높은 정밀도로 제어하는 것이 반도체 생산 기술력의 핵심이며 이는 리니어 모션 스테이지의 역할이다.

### 2.2.2 Semi-Active RFC



(a) Semi-Active RFC linear motion stage



(b) 마그넷 트랙



(c) 무버 (JTKL 3638)



(d) 추가 코일 (JTKL 3619)

**Fig. 2** Components of linear motion stage

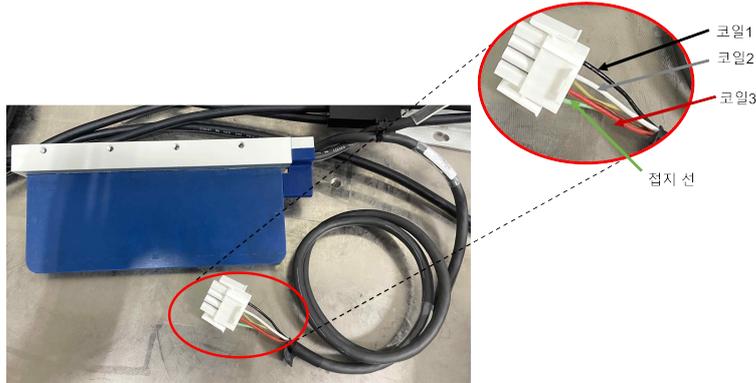


Fig. 3 Extra coil detail view

Table 1 Specifications for Semi-Active RFC

항목	기호	Magnet track	항목	기호	JTKL3638	JTKL3619
질량	$m_{MT}$	51.37kg	연속 추력	$F_c$	208N	104N
감쇠 계수	$c_{MT}$	43Ns/m	최대 추력	$F_p$	832N	416N
스프링의 강성	$k_{MT}$	3820N/m	연속 전류	$I_c$	6.0A	3.0A
			최대 전류	$I_p$	24A	12A
			추력 상수	$K_f$	34.7N/A	34.7N/A
			상간 역기전력 상수	$K_e$	20V/m/s	20V/m/s
			상간 저항	$R_s$	1.7Ω	3.0Ω
			상간 인덕턴스	$L_s$	1.8mH	3.5mH
			모터 상수	$K_M$	19.5N/√W	14.4N/√W
			최대 속도	$V_{max}$	5m/s	5m/s
			정격 출력	$P_c$	1040W	520W

위 Fig. 2와 Fig. 3은 이번 실험에서 사용된 리니어 모션 스테이지를 나타내었고, Table 1은 Semi-Active RFC에 사용된 제품의 사양이다. 시스템의 고가속 운동을 위한 추력은 기계 베이스에 큰 반발력을 발생시킨다. 기존의 리니어 모션 스테이지는 마그넷 트랙이 베이스에 결합되어 있어 베이스 자체가 진동하게 된다. 반면에 반발력 보상 시스템(Reaction Force Compensation System, 이하 RFC이라 함)이 적용된 리니어 모션 스테이지는 마그넷 트랙과 베이스가 스프링으로 연결되어 있어 반발력을 줄일 수 있다. 마그넷 트랙에는 스프링과 더불어 추가 질량 및 감쇠기가 부착되어 있다. 이 장치들은 마그넷 트랙의 진동을 소산시킨다.

RFC는 강성과 감쇠의 조절 여부에 따라 Passive, Semi-Active, Active RFC로 나뉜다. 본 설계에서 사용하는 리니어 모션 스테이지는 Semi-Active RFC Mechanism을 사용하여 마그넷 트랙, 무버 그리고 추가 코일로 구성된다. Semi-Active RFC Mechanism은 비교적 저렴하고 단순한 구조로 감쇠를 조절할 수 있어서 고정밀 선형 위치 제어에 적합하다.

**Table 2** Kind of RFC mechanism

	Passive	Semi-Active	Active
기본 요소	스프링, 댐퍼		
추가 요소	없음	추가 코일	제어기, 구동기, 추가 코일
외부 에너지	없음	스위칭을 위한 아주 적은 에너지	코일을 구동하기 위한 외부 에너지
조절 능력	없음	감쇠	강성과 감쇠
경제성	저가	저가	고가

위 **Table 2**는 RFC mechanism의 유형과 그 특성을 나타낸 표이다. Semi-Active RFC는 추가 코일로 감쇠력을 조절한다. 마그넷 트랙의 진동은 추가 코일 주변 자기 선속의 변화를 야기한다. 패러데이의 법칙에 따라 회로에는 유도 기전력이 발생하며, 이는 유도 전류를 만들어낸다. 이때 발생하는 유도 전류는 자기 선속의 변화를 방해하는 방향의 자기장을 생성한다. 유도 전류가 클수록 자기 선속의 변화를 강하게 방해할 수 있기에 유도 전류의 양과 추가 감쇠력은 비례한다. 옴의 법칙에 따라 저항은 회로 내에 흐르는 전류를 조절할 수 있다. 따라서 추가 코일과 연결된 저항을 조절하는 방식으로 감쇠력을 제어할 수 있다. 이때 추가 코일은 전자기형 에너지 하베스터의 역할 또한 수행할 수 있다. 본 설계에서는 능동적 감쇠 작용에서 발생하는 유도 기전력을 수확하여 설계에 사용하고자 한다. 부하 저항을 이용한 감쇠력 조절은 저항에서 전력이 소모된다는 단점을 가진다. 이를 보완하기 위해 PWM을 이용한 디지털 제어를 활용할 수 있다. 디지털 제어는 전력을 소모하지 않으면서도 저항과 동일하게 감쇠력 조절이 가능하다.

2.2.3 차별성

**Table 3** Comparison of energy harvesters

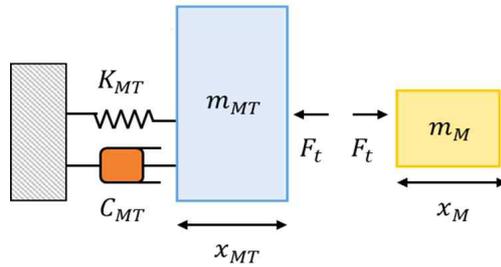
	전자기형 에너지 하베스터	압전형 에너지 하베스터
에너지원	전자기 유도	압전 효과
에너지 변환 방식	전자기 유도 → 전기	압력 → 전기
출력 형태	높은 출력 전류	높은 출력 전압

**Table 3**은 2가지 에너지 하베스터의 비교표이다. 에너지 하베스터는 에너지원의 형태에 따라 다양하게 구분된다. 압전형 에너지 하베스터는 공진 효과를 사용하여 낮은 미세 자기장에서 응답성이 좋고 구조가 간단하다는 장점이 있기에, 대부분에 선행된 에너지 하베스팅 시스템에 이용되었다. 그러나 시스템이 커지게 될 경우, 사용 환경에 맞추어 에너지 하베스터의 고유 진동수를 조정하는 것이 쉽지 않아 실용화에는 단점이 존재한다.<sup>(8)</sup> 반면, 전자기형 에너지 하베스터는 크기가 큰 시스템에도 공진과 관계없이 적용 가능하다는 장점이 있다. 설계에서 사용되는 리니어 모션 스테이지는 상당히 큰 질량을 가지고 있으며 지속적으로 진동한다. 따라서 규모가 큰 시스템에서 유리한 전자기형 에너지 하베스터를 이용하는 것이 전기 에너지 변환에 보다 유리하다.

### 2.3 수학적 모델링

**Table 4** Nomenclature

$m_{MT}$	마그넷 트랙의 질량	$R_q^{coil}$	등가 저항
$c_{MT}$	마그넷 트랙의 감쇠계수	$L_q^{coil}$	등가 인덕턴스
$k_{MT}$	마그넷 트랙의 강성	$L_d^{coil}$	d축 인덕턴스
$F_{coil}$	추가 코일의 로렌츠 힘	$c_{coil}$	추가 코일의 감쇠 계수
$F_t$	이동자의 추력	$e_q^{coil}$	등가 역기전력
$K_{emf}$	기전력 상수	$r_{OC}$	스위치 Open-Close 비율
$K_f$	추력 상수	$\psi$	마그넷 트랙의 쇄교 자속
$L^{coil}$	추가 코일의 인덕턴스	$\tau$	마그넷 트랙 극점 피치
$R^{load}$	부하 저항	$I_d$	d축에 흐르는 전류
$R^{coil}$	추가 코일의 저항	$I_q$	등가회로에 흐르는 전류
$p$	코일의 극점 개수	$m_m$	무버의 질량



**Fig. 4** Free body diagram of Semi-Active RFC mechanism

위 **Fig. 4**는 Semi-Active RFC의 자유물체도이고 **Table 4**는 사용된 기호에 대한 설명이다. 에너지 하베스팅 시스템을 구축하기에 앞서, 유도 전류의 크기를 수학적으로 예측해보려 한다. 추가 코일 회로가 개방 상태일 때 시스템의 운동방정식은 식(1)과 같이 표현되고, 연결 상태일 때 식(2)와 같이 표현된다.

$$m_{MT}\ddot{x}_{MT} + c_{MT}\dot{x}_{MT} + k_{MT}x_{MT} = F_t \quad (39)$$

$$m_{MT}\ddot{x}_{MT} + c_{MT}\dot{x}_{MT} + k_{MT}x_{MT} = F_t - F_{coil} \quad (2)$$

추가 코일의 로렌츠 힘, 즉 코일의 감쇠력은 식(3)으로 표현이 가능하다. 식(3)을 식(2)에 대입해 풀이하기 위해 필요한  $x_{MT}$ 를 구하기 위해서는  $c_{coil}$ 이 결정되어야 한다.

$$F_{coil} = c_{coil}\dot{x}_{MT} \quad (3)$$

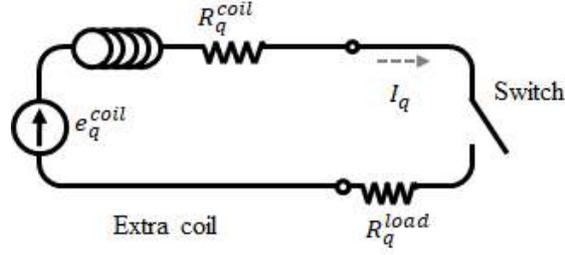


Fig. 5 Equivalent circuit diagram of the extra coil

Fig. 5는 추가코일의 등가 회로도이다. 스위치가 연결 상태일 때, 추가 코일의 회로 방정식과  $q$ 축 등가 저항의 회로 방정식은 각각 식(4)와 식(5)로 표현될 수 있다.

$$e_q^{coil} = R_q^{coil} I_q + L_q^{coil} \frac{dI_q}{dt} + R_q^{load} I_q \quad (4)$$

$$R_q^{coil} = R_{coil}, \quad R_q^{load} = R_{load} \quad (5)$$

추가 코일의 감쇠 계수를 구하기 위해서 마그넷 트랙의 움직임이 추가 코일의 기전력을 유도한다는 패러데이 법칙을 이용한다. 이때, 코일의 시상수와 부하 저항이 스위칭 주기보다 매우 작다고 가정하면, 로렌츠 힘은 추가 코일의 유도 전류와 마그넷 트랙의 채교 자속에 의해 식(6)과 같이 계산된다.

$$F_{coil} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi + (L_d^{coil} - L_q^{coil}) I_d] r_{OC} I_q \quad (6)$$

추가 코일의 인덕턴스가 낮음을 이용하면 식(7)과 같이 추가 코일의 로렌츠 힘을 근사화할 수 있다. 또한  $q$ 축에서의 추가 코일의 유도 기전력은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{coil} \approx r_{OC} \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} \psi I_q = r_{OC} K_f I_q \quad (7)$$

$$e_q^{coil} = K_{emf} \dot{x}_{MT} \quad (8)$$

식(4)와 식(7), 식(8)을 이용하면 전달함수를 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_{coil}(s)}{sX_{MT}(x)} = \frac{r_{OC} K_f K_{emf}}{R_q^{coil} + R_q^{load} + sL_q^{coil}} \quad (9)$$

위와 마찬가지로 마그넷 트랙의 진동주기가 낮고 코일의 인덕턴스가 낮음을 이용하면 식(9)의 전달함수를 근사화하여 추가 코일의 감쇠 계수를 유도할 수 있다.

$$c_{coil} = \frac{F_{coil}(s)}{sX_{MT}} \approx \frac{r_{OC} K_f K_{emf}}{R_q^{coil} + R_q^{load}} \quad (10)$$

따라서 식(2)에 식(10)의 감쇠 계수를 적용하여 마그넷 트랙의 변위를 통해 수확 가능한 에너지를 예상할 수 있다. 또한 식(4)를 앞과 마찬가지로 추가 코일의 인덕턴스가 작음을 이용해 기전력을 저항과 전류에 대한 식으로 근사화하면 식(11)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 전류도 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_q^{coil} \approx R_q^{coil} I_q + R_q^{load} I_q \quad (11)$$

$$I_q = \frac{e_q^{coil}}{(R_q^{coil} + R_q^{load})} \quad (12)$$

기전력은 식(8)에 의해 속도 마그넷 트랙의 속도에 대한 식이기에 식(12)에 대입하면 다음과 같이 표현 된다.

$$I_q = \frac{K_{emf} \dot{x}_{MT}}{(R_q^{coil} + R_q^{load})} \quad (13)$$

따라서 마그넷 트랙의 속도를 알 수 있다면 변환되는 전류량 또한 알 수 있다. 아래 Fig. 6은 블록 선도를 이용한 시스템의 모델링이고 Fig. 7은 시간에 따른 예상 전류량이다.

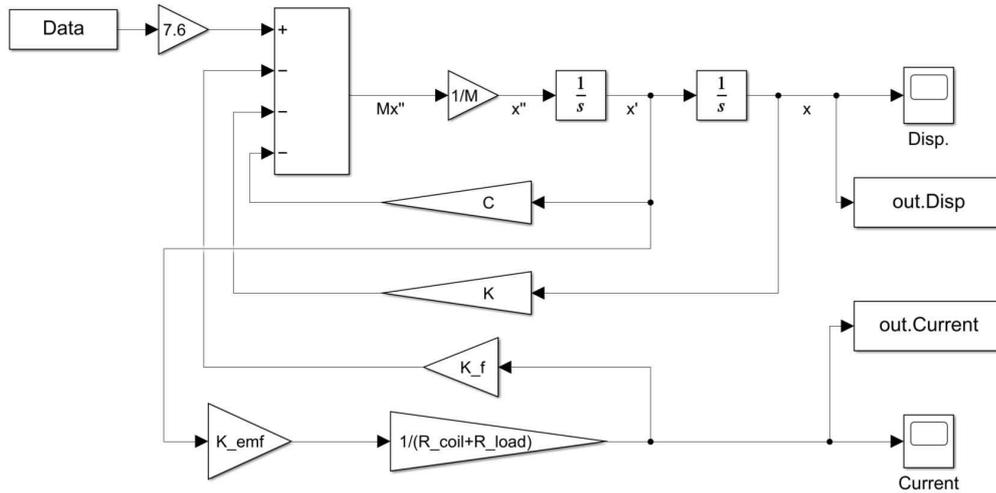


Fig. 6 Simulink block diagram for predicting the amount of current using acceleration commands

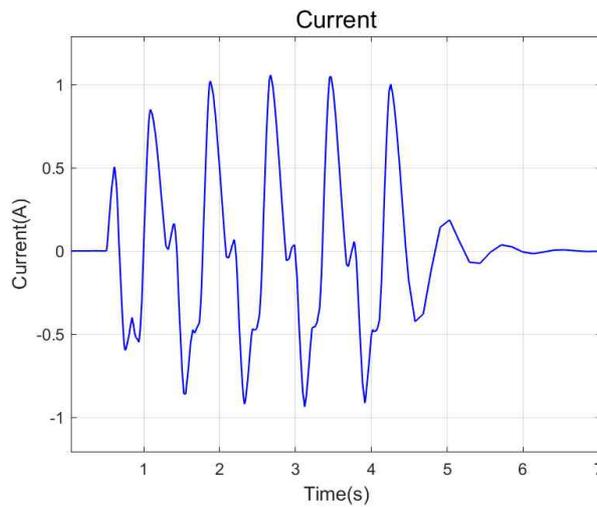
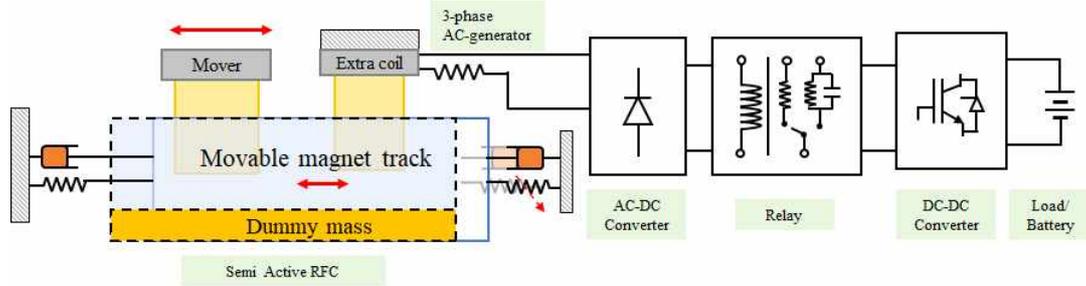


Fig. 7 Amount of current calculated by simulink

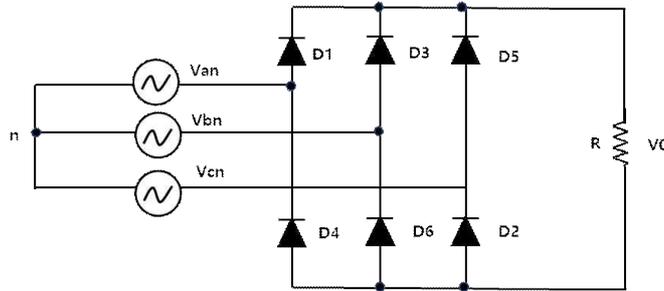
## 2.4 하베스팅 시스템 구축



**Fig. 8** Schematic diagram of electromagnetic energy harvesting system in semi-active reaction force compensation linear motion stage

위 **Fig. 8**은 에너지 하베스팅 시스템의 개략도이다. 본 설계는 마그넷 트랙의 움직임에 따라 추가 코일에 발생하는 유도 기전력을 이용한다. AC/DC converter를 이용하여 3상의 교류를 직류로 정류한다. DC/DC converter를 이용하여 전압을 일정하게 강하해준 뒤 배터리를 충전한다. 일정 시간 배터리가 충전되면 이오나이저에 수확한 전기 에너지를 사용한다. 이 과정에서 릴레이와 PWM 제어를 결합하여 추가 감쇠력의 제어를 그대로 사용하면서 추가 코일을 하베스터로도 이용 가능하도록 설계하고자 한다.

### 2.4.1 AC/DC converter



**Fig. 9** 3-Phase full-wave rectifier circuit diagram

3상의 교류를 직류로 바꾸기 위한 AC/DC converter로 3상 전파 정류기를 설계한다. 위 **Fig. 9**는 3상 전파 정류기의 회로도이다. **Fig. 9**를 보면 3상 전파 정류기는 6개의 다이오드로 구성된다. 상단부 다이오드의 경우, 3상 전원 중 크기가 양의 방향으로 가장 큰 상의 다이오드가 활성화되고, 하단부 다이오드는 3상 전압 중 크기가 음의 방향으로 가장 큰 상의 다이오드가 활성화된다. 이에, 언제나 선간 전압이 가장 크게 되는 2개 조합의 다이오드가 활성화되는 효과를 발생시킨다. 따라서 부하에는 구간별로 가장 큰 선간 전압이 인가되고 전원 전압 한 주기에 6개의 구간이 존재하게 된다.

### 2.4.1.1 AC/DC converter 제작

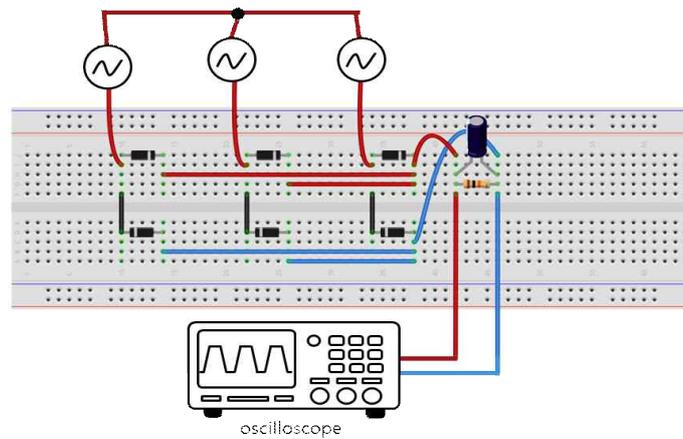
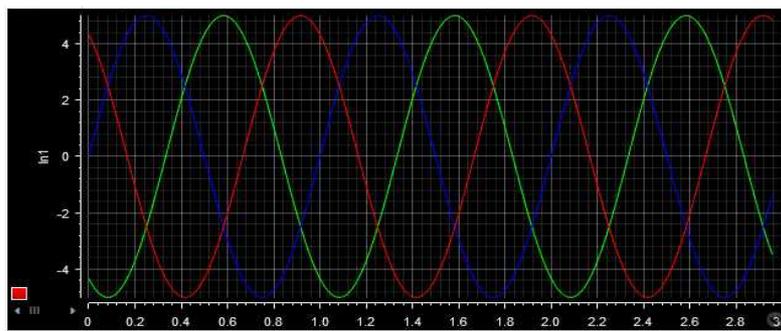


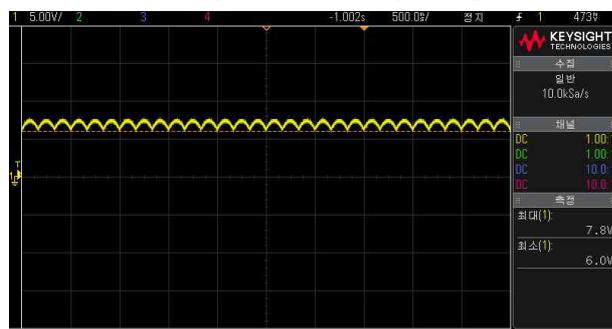
Fig. 10 3-Phase full-wave rectifier breadboard circuit

Table 5 Components of 3-phase full-wave rectifier

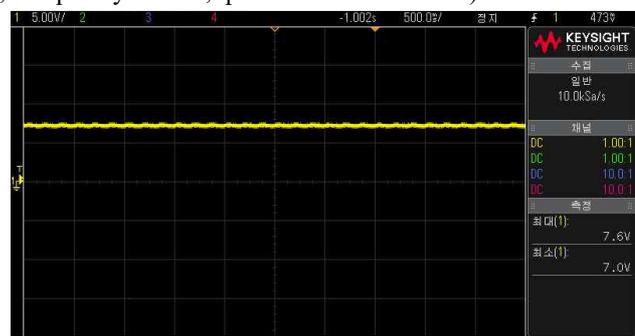
분류	다이오드	커패시터	부하 저항
부품 상세	1N4148	50V, 470 $\mu$ F	10k $\Omega$



(a) 3-phase AC voltage (amplitude: 5.2 V, frequency: 1 Hz, phase difference: 120)



(b) Without capacitor



(c) Using capacitor

Fig. 11 Result of using 3-Phase full-wave rectifier

3상 전파 정류기를 시험하기 위해 브레드보드를 이용하여 제작한 회로를 Fig. 10에 나타내었다. Table 5는 회로 제작에 사용된 소자를 명시한 것이다. Fig. 11은 3상의 교류 전압을 전파 정류기에 인가한 결과이다. 인가한 3상 교류 전압은 Fig. 11(a)와 같다. Fig. 11(b)를 보면 커패시터 사용 전에는 맥류가 측정되었고, Fig. 11(c)를 보면 커패시터 사용 후에는 직류가 측정되었다.

단상의 교류 전압을 이용했을 때의 최대 전압이 4.2V인 반면에, 3상의 교류 전압을 이용한 최대 전압은 7.8V이다. 이는 3상 전파 정류기의 출력 전압은 선간 전압 형태로 나타나기 때문이다. 하나의 양의 정현파가 최대인 지점에서 다른 음의 정현파는  $30^\circ$  인 지점을 지난다. 따라서 이 둘의 선간 전압은  $\frac{3}{2}$ 이며, 입력 전압의 진폭을 이용해서 계산하면  $5.2 \times \frac{3}{2} = 7.8V$ 를 얻을 수 있다. 추가 코일에서 단일한 선간 전압만을 이용할 때보다 3상의 선간 전압을 모두 이용할 때 더 많은 에너지를 수확할 수 있을 것이다.

#### 2.4.1.2 AC/DC converter를 이용한 전류 측정

리니어 모션 스테이지의 움직임에 따라 추가 코일에 유도되는 전류는 3상 전파 정류기에 흐르게 된다. 추가 코일에 부하로 연결되는 저항은 회로에 흐르는 전류의 크기를 결정한다. 저항값의 변화에 따른 유도 전류 및 추가 감쇠력의 특성을 파악하기 위해 부하 저항을 바꿔가며 부하 영역에 흐르는 전류를 측정하려고 한다. 이때 부하 저항이 없는 경우부터 0.1Ω, 3Ω, 10Ω인 경우를 순서대로 전류를 측정하였다. 4번의 실험에서 동일하게 사용한 무버의 모션 프로파일은 아래 Fig. 12에 나타내었다. 정류된 전류의 크기를 측정할 때에는 전류 프로브와 오실로스코프를 이용하였다.

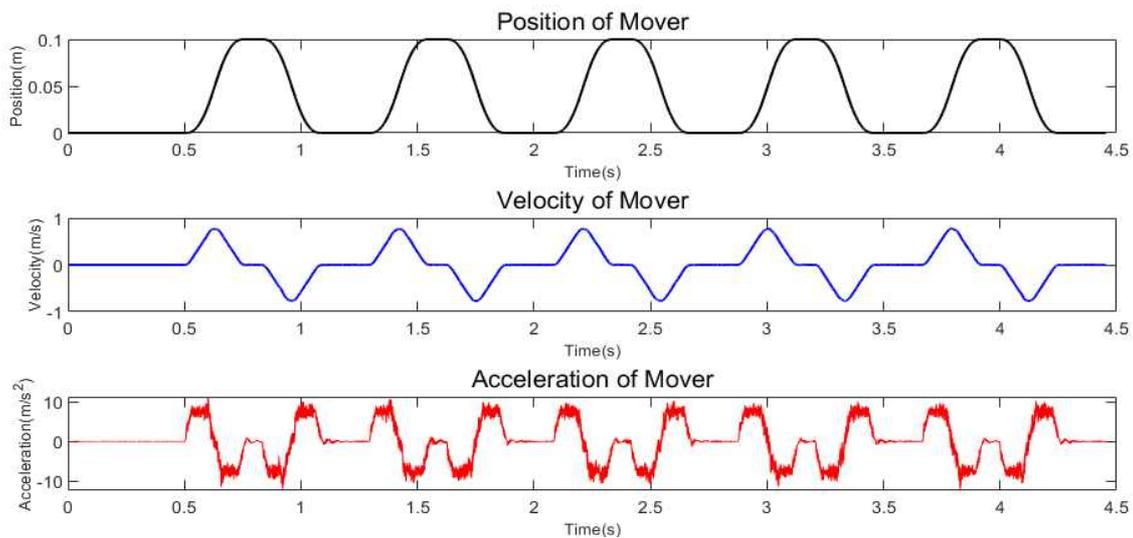
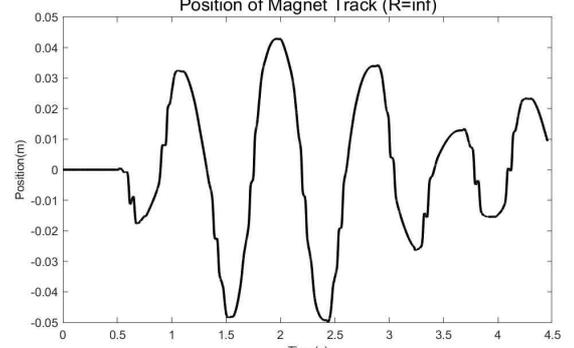
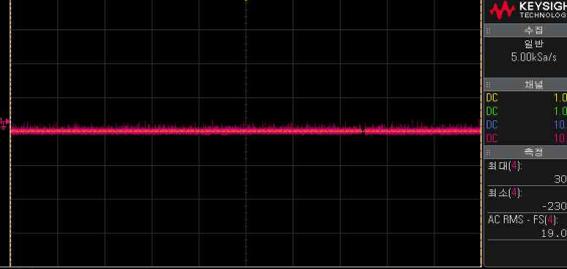
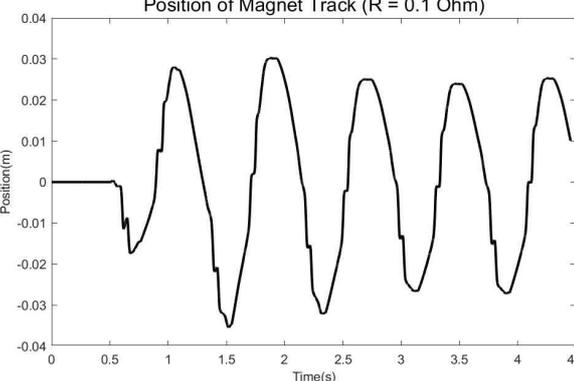
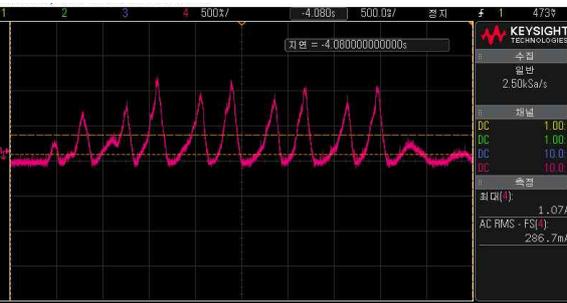
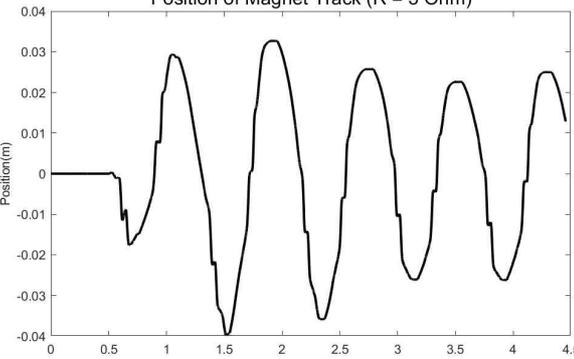
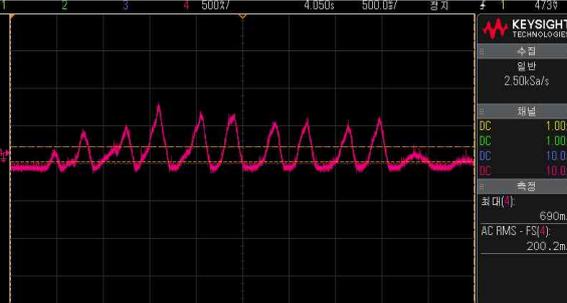
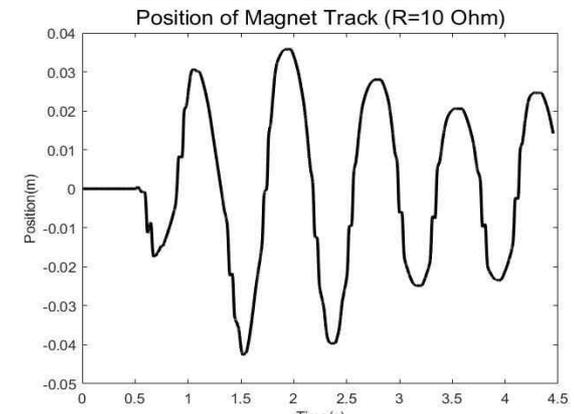
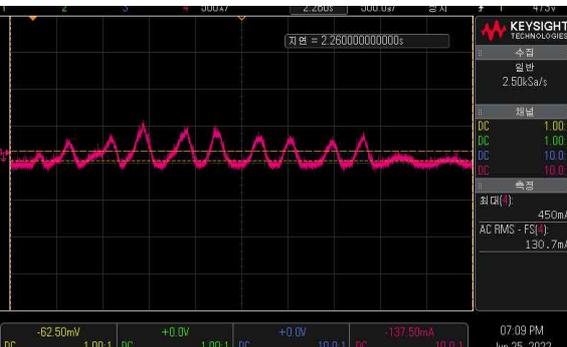
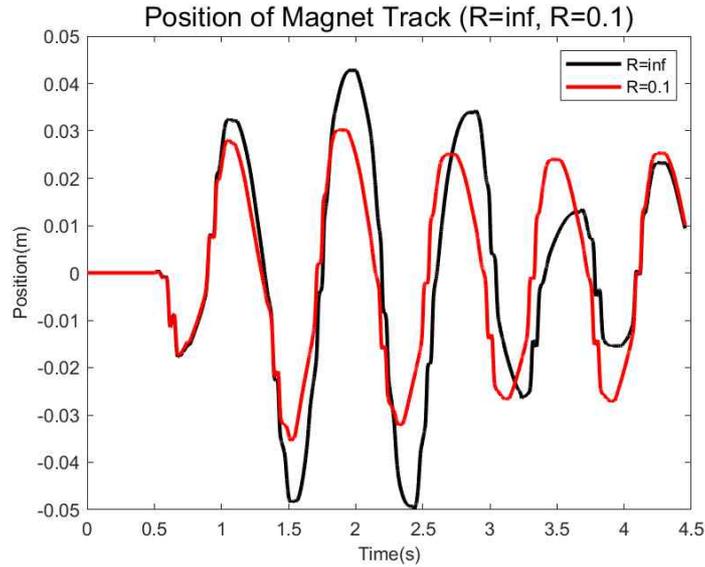


Fig. 12 Movement displacement, velocity acceleration graphs

**Table 6** Current measurement using AC/DC converter based on resistance

$R^{load}$	마그넷 트랙의 변위	유도 전류
$\infty \Omega$	 <p>Position of Magnet Track (R=inf)</p>	
0.1Ω	 <p>Position of Magnet Track (R = 0.1 Ohm)</p>	
3Ω	 <p>Position of Magnet Track (R = 3 Ohm)</p>	
10Ω	 <p>Position of Magnet Track (R=10 Ohm)</p>	

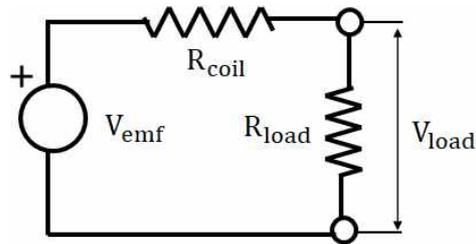
**Table 6**은 실험 결과를 나타낸 것이다. 저항을 달지 않아 회로가 개방된 상태에서 리니어 모션 스테이지를 구동하였을 때에는 전류가 흐르지 않는다. 부하 저항이  $0.1\Omega$ 인 경우, 유도 전류의 크기가  $1.07A$ 로 측정되었다. 위 네 번의 실험 중 가장 작은 저항을 사용하였으므로 전류가 가장 크게 측정되었다. 감쇠력의 크기 역시 가장 크게 발생하여 마그넷 트랙의 변위 진폭이 가장 작았다.  $3\Omega$ 의 저항을 부하 영역에 달았을 경우,  $690mA$ 의 유도 전류가 측정되었다.  $0.1\Omega$ 보다 큰 저항이 부하 영역에 있으므로 위 경우보다 적은 전류가 유도되었다. 부하 영역에  $10\Omega$ 의 저항이 존재할 경우  $450mA$ 의 전류가 발생하였다. 감쇠력의 크기 또한 가장 작게 발생하여 마그넷 트랙의 변위 진폭의 크기가 가장 크게 측정되었다.



**Fig. 13** Comparison of displacement of magnet track by resistance

**Fig. 13**은 위 실험에서 회로를 개방시킨 경우와 부하 저항이  $0.1\Omega$ 일 때의 응답을 비교한 그래프이다. 부하 저항의 크기가 작아질수록 더 많은 전류가 회로에 흐르고 코일의 감쇠력이 증가하여 마그넷 트랙의 변위 진폭이 감소함을 확인할 수 있다.

#### 2.4.1.3 전자기형 하베스터의 한계점



**Fig. 14** Thevenin equivalent circuit of extra coils

**Fig. 14**는 추가 코일을 테브난 등가 회로로 나타낸 모습이다. 이 등가 회로를 통해 전자기형 하베스터에서 전류와 전압의 반비례 관계를 알아보려 한다. 회로 전체에 흐르는 전류  $I_s$ 는  $I_s = \frac{V_{emf}}{R_{coil} + R_{load}}$  이다. 이 식에서 부하 저항  $R_{load}$ 와 유도 전류  $I_s$ 가 반비례 관계임을 알 수 있다. 부하 영역에서의 전압  $V_{load}$ 는  $V_{load} = \frac{R_{load}}{R_{coil} + R_{load}} \times V_{emf}$ 이다. 이 식에서 부하 저항  $R_{load}$ 가 변경되면 유도 기전력  $V_{emf}$ 도 함께 달라진다. 부하 저항이 작아 회로에 흐르는 전류가 커지면 감쇠력이 증가하여 마그넷 트랙의 변위 진

폭을 감소시킨다. 이는 추가 코일을 지나는 자기 선속의 변화량 감소를 의미하기에 유도 기전력은 빠르게 소산한다. 또한 코일의 상간 저항인  $3\Omega$ 보다 훨씬 작은 부하 저항을 사용하면 부하 영역에서의 전압은 더욱 감소한다. 반면 코일의 상간 저항보다 훨씬 큰 부하 저항을 사용한다면 전류는 흐르지 않지만  $\frac{R_{load}}{R_{coil} + R_{load}}$ 가 1에 근접하여 유도 기전력을 그대로 부하 영역에서의 전압으로 사용할 수 있다.

본래 위의 AC/DC 실험에서  $0.1\Omega$ 인 경우 발생하는 최대 전류를 이용한 에너지 하베스팅 시스템을 구상했다. 하지만 에너지 하베스팅을 위해서는 일정 기준 이상의 전압이 요구되었고 전류를 전압으로 변환하는 과정에서의 한계점이 존재했다. 이에 따라 최대 전류가 발생하는  $0.1\Omega$ 과 최대 전압이 발생하는  $10k\Omega$ 을 동시에 활용하는 방안을 모색했다.

#### 2.4.1.4 릴레이

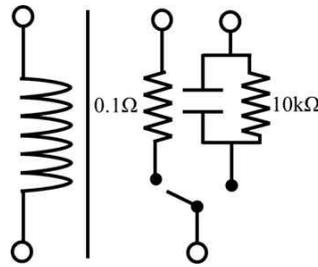


Fig. 15 Relay circuit diagram

Fig. 15는 설계에 적용할 릴레이 회로도이다. 릴레이는 전기적으로 작동하는 스위치를 일컫는다. 릴레이 내부에는 코일이 존재한다. 이 코일은 전류가 흐르면 자석이 되는 성질을 가지고 있다. 따라서 전을 릴레이에 인가하면 자석이 된 코일이 옆에 있는 철편을 끌어당겨 스위치가 켜지는 방식으로 작동한다. 본 설계에서는 SPDT(Single Pole Double Throw) 형식의 릴레이를 사용했다. 두 가지의 출력에는 각각  $0.1\Omega$ 과  $10k\Omega$ 이 부착되어 있다. 릴레이에 전원을 인가한 상황(ON)에서는  $0.1\Omega$ 에 연결, 전원을 인가하지 않은 상황(OFF)에서는  $10k\Omega$ 에 연결되도록 회로를 구성한다.

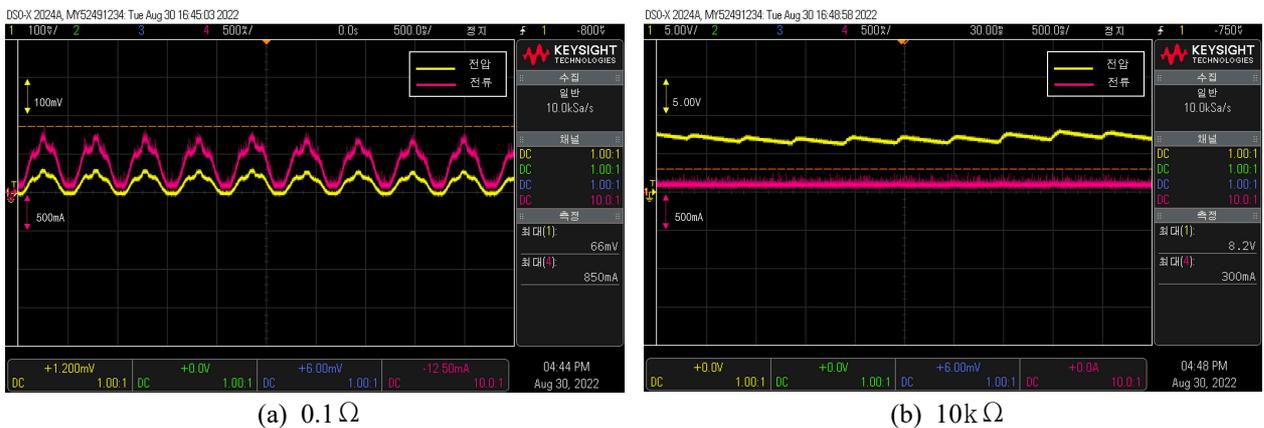


Fig. 16 Experimental results based on load

Fig. 16은 부하 저항에 따라 각각 전압과 전류를 측정한 결과이다.  $0.1\Omega$ 은 전류 및 추가 감쇠력이 최대가 되는 연결 상태와 동일하다. Fig. 16(a)와 같이 전류는 최대가 되지만 전압은  $66mV$ 로 매우 미미하다는 것을 알 수 있다. 반면에  $10k\Omega$ 은 전류 및 추가 감쇠력이 없는 개방 상태와 동일하다. Fig. 16(b)와 같이 전류는 매우 미미하지만 전압은  $8.2V$ 로 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

릴레이와 PWM 제어를 결합하여 ON/OFF의 입력에 따라  $0.1\Omega/10k\Omega$ 의 부하가 번갈아가며 사용된다.

이때 PWM은 사각파 신호의 폭을 제어하는 것으로 한 주기 안에서 신호가 ON 되어 있는 비율을 조절하여 제어하는 방법이다. ON/OFF의 비율을 듀티 사이클(Duty cycle)이라 칭하며 듀티 사이클이 클수록 한 주기 안에서 ON 되어 있는 시간이 길어진다. 0.1Ω에 스위치가 연결된 경우 추가 코일은 댐퍼의 역할을 수행하고 10kΩ에 스위치가 연결된 경우 추가 코일은 에너지 하베스터로 작동한다.

듀티 사이클이 길어지면 한 주기 안에서 0.1Ω에 연결되는 시간이 길어지고 그 결과 감쇠력이 증가하는 반면에, 듀티 사이클이 짧아지면 한 주기 안에서 10kΩ에 연결되는 시간이 길어지고 그 결과 변환되는 전기 에너지가 증가한다. 따라서 추가 감쇠력의 제어를 그대로 사용하면서도 추가 코일을 에너지 하베스터로도 사용할 수 있게 된다. 아래 Fig. 17은 최종적으로 완성한 AC/DC converter의 모습이다. 본 설계에서는 편의를 위해 OFF에 해당하는 10kΩ만 사용한다.

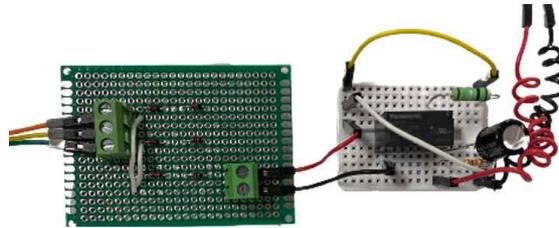


Fig. 17 AC/DC converter and relay

#### 2.4.2 DC/DC converter



Fig. 18 DC/DC converter

Table 7 PWR060010 specifications

Category	Specifications	Category	Specifications
Input voltage	7-18 V	Stable output current	2A
Output voltage	5V ±6%	Maximum output current	3A

Fig. 18에 5V의 출력 전압을 얻기 위해 사용한 레귤레이터 모듈을 나타내었다. 레귤레이터 모듈의 사양은 Table 7과 같다. 전압이 안정되지 않은 전원을 공급할 경우 장치에 오동작, 특성 열화 등의 문제가 발생한다. 이때 DC/DC converter는 전압을 일정하게 변환하여 장치를 안정화하는 과정에 필요하다.

일반적인 DC/DC converter의 경우, 컨버터에 입력되는 전압이 설정 전압보다 크면 스위치가 작동하여 입력단에서 출력단으로 전력을 공급한다. 이때 컨버터 내부에 전류가 흐르며 인덕터에 자기 에너지를 저장한다. 전력이 공급되고 출력단의 전압이 설정 전압보다 높아지면 스위치가 꺼지며 축적되어있던 자기 에너지가 부하출력으로 공급된다. 인덕터의 자기 에너지가 낮아져 전압이 설정 전압보다 낮아지면 스위치가 다시 켜진다. 이 과정을 스위칭 주파수로 반복하며 목적으로 하는 출력 전압을 유지한다. 이 출력 전압은 Fig. 19와 같이 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

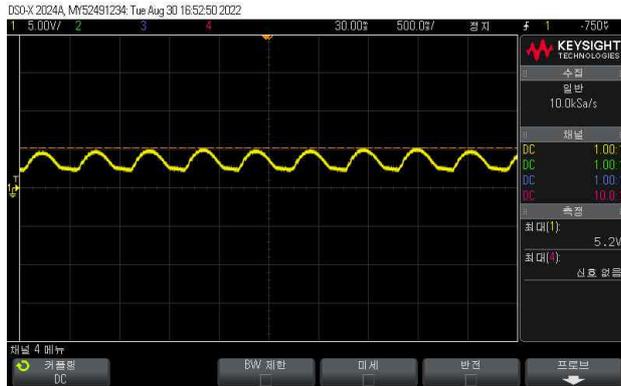


Fig. 19 Experimental results used DC/DC converter

### 2.4.3 배터리 충전

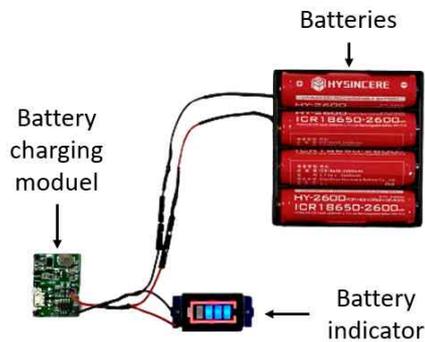


Fig. 20 Battery charging module, battery indicator and batteries

Table 8 SZH-LP001, SY-LD224, J5019 specifications

Category	SZH-LP001	SY-LD224	J-5019
Battery specifications	Li-ion 3.7V	Li-ion, Li-po 3.7V	Li-Po 3.7 V
Capacity	2600 mAh	-	-
Range	-	3.3 V ~ 4.2 V	-
Input voltage	-	-	4.5V ~ 8V
Output voltage	-	-	4.3V ~ 27V
Charge voltage / Current	-	-	4.2V / Max 1A
Output current	-	-	Varies by voltage
Output power	-	-	7W

배터리 충전 모듈은 LIBH-ANC-P4, 배터리는 SZH-LP001, 배터리 인디케이터로는 SY-LD224, UPS 모듈로는 J5019를 사용하였으며 이를 Fig. 20으로 나타내었다. 사용한 장치들의 제사한 사양은 Table 8과 같다.

DC/DC converter에서 출력되는 직류가 배터리 충전 모듈에 입력된다. 배터리 모듈 내 충전되는 배터리를 충전하여 이온나이를 구동하는 전원의 역할을 수행할 수 있다. 수확된 에너지를 이용해 충전되는 것을 확인하기 위해 배터리 인디케이터 모듈을 활용하여 배터리의 잔량과 충전 유무를 파악할 수 있다. 또한 불안정한 전압이 입력되어도 일정한 전력을 배터리에 공급할 수 있도록 UPS 모듈을 사용하였다.

#### 2.4.4 이온나이저 구동

반도체 생산 공정에서 정전기의 발생은 생산 품질 저하와 산업적 피해를 야기하고, 반도체와 같이 민감한 전자제품의 경우 약한 정전기만으로도 파괴될 수 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 정전기를 제거해주는 역할을 하는 이온나이저는 모든 공정 과정에서 필수적으로 사용된다. 이온나이저를 통해 생성되는 이온 입자들을 전자 부품들에 흩뿌리면 정전기를 제거할 수 있다. 대상물이 양이온을 띄고 있는 경우, 이온나이저를 통해 배출된 음이온과 결합하면 전기적인 중화가 발생하며 정전기가 제거된다.

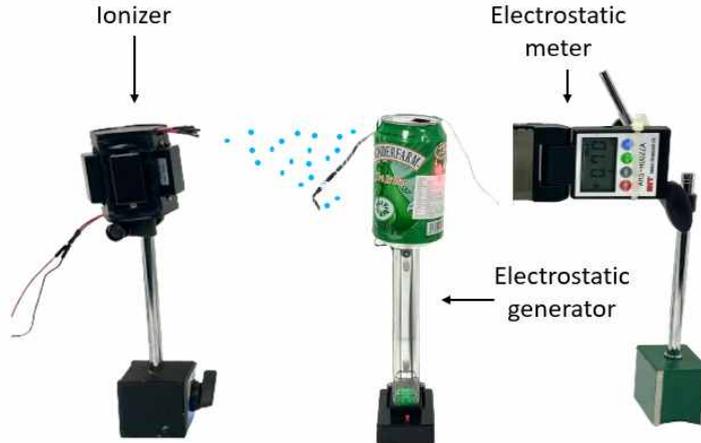


Fig. 21 Electrostatic removal measurement

Table 9 Ionizers specifications

Category	Specifications
Input voltage	DC 5V
Output voltage	DC - 4.8kV
Negative ion density	4000000pcs/m <sup>3</sup>
Power	0.5W

Table 10 Electrostatic meter specifications

Category	Specifications	
Input voltage	9V±10% (Alkaline battery use)	
Sensor	Oscillating chopper type (DIT)	
Distance	25mm (±0.5mm)	
Range / Autochange	Precise mode	±2kV (±10%)
	Expanded mode	±20kV (±10%)
	Ion-Balance mode	±300V (±10%)
Resolution	Electrostatic voltage mode	10V (-1.99kV~+1.99kV)
		100V (<-20.0kV, >+20.0kV)
	Ion Balance mode	1V
Response time	1sec	
Communication	USB communication	
Ambient temperature	0℃ ~ +50℃ (32~122°F)	
Ambient humidity	35~85%RH (No condensation)	

정전기 제거 공정을 구현하기 위해 구성된 실험 장치를 Fig. 21에 나타내었다. Table 9와 Table 10은 설계에 이용한 이오나이저와 정전기 측정기의 사양이다. 해당 실험에서는 양이온을 생성하는 정전기 발생기와 음이온을 생성하는 이오나이저를 사용하여 정전기를 제거할 수 있음을 보이려고 한다. 정전기 측정기를 이용하면 제거된 정전기의 양을 수치적으로 얻을 수 있다.

#### 2.4.5 설계 과정의 경제성

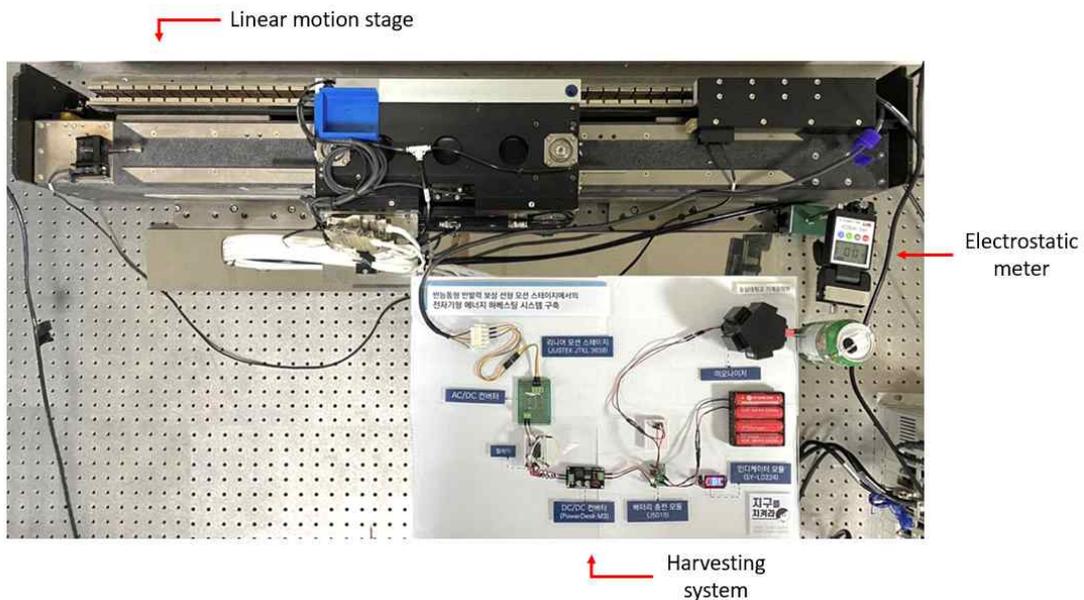
전자기형 에너지 하베스터 시스템을 구성하는 부품으로는 AC/DC Converter, DC/DC Converter, 배터리, 배터리 홀더, 배터리 인디케이터, UPS 모듈이 있다. 본 시스템을 통해 수확한 에너지를 활용할 구동기로는 이오나이저를 사용하였다. 위와 같은 시스템을 구축하기 위한 부품들의 가격을 아래 Table 11에 나타냈다.

**Table 11** Probable cost of our system

품목	가격 (원)
UPS 모듈 [J5019]	2,700
인디케이터 모듈 3.7V [SY-LD227]	3,000
4구 배터리 홀더 [LIBH-ANC-P4]	3,300
5V 전원 레귤레이터 모듈 [PWR060010]	2,100
3.7V 2600mAh 리튬 충전 배터리 [SZH-LP001]	22,000

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 결과



**Fig. 22** Electromagnetic energy harvesting system in Semi-Active RFC linear motion stage

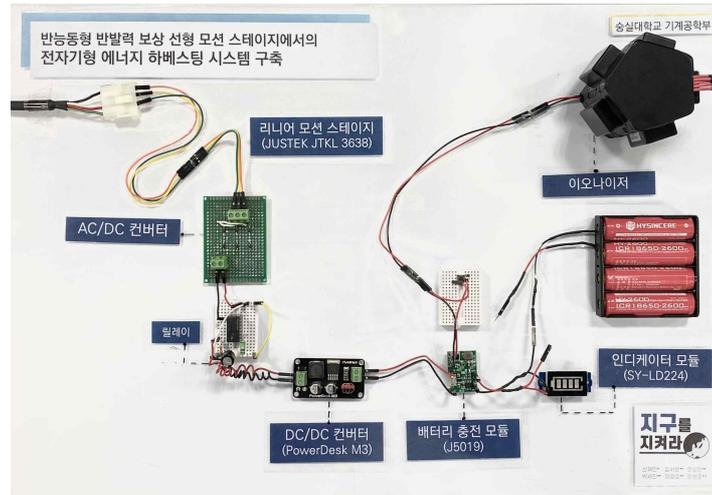


Fig. 23 Detail view of electromagnetic energy harvesting system

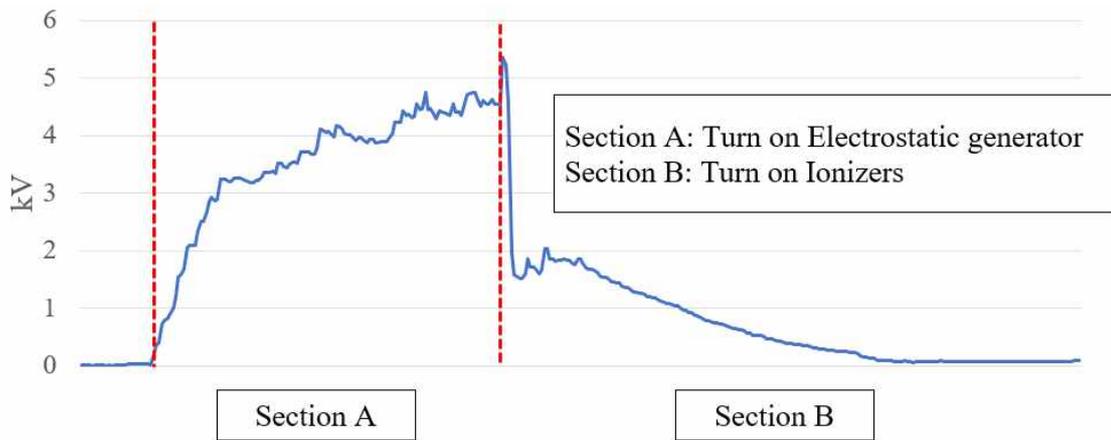


Fig. 24 Graph of results of electrostatic removal experiments using ionizers

Fig. 22는 반능동형 반발력 보상 리니어 모션 스테이지에서의 전자기형 에너지 하베스팅 시스템을 구축한 모습이다. 본 시스템은 리니어 모션 스테이지, 에너지 하베스팅 시스템, 정전기 제거부로 구성된다. 그 중 에너지 하베스팅 시스템의 상세도를 Fig. 23에 나타내었다. 전체 시스템의 구동 순서는 다음과 같다.

1. 리니어 모션 스테이지에서 무버의 구동에 따라 마그넷 트랙이 진동한다.
2. 추가 코일을 통해 진동 에너지를 전기 에너지로 전환하여 수확한다.
3. AC/DC converter를 사용하여 3상 교류를 직류로 정류한다.
4. DC/DC converter를 사용하여 전압을 일정하게 변환한다.
5. 배터리 충전 모듈 및 리튬 이온 배터리를 사용하여 수확한 에너지를 저장한다.
6. 충전된 배터리로 이오나이저를 구동하여 반도체 제조 공정 중 발생하는 정전기를 제거한다.

Fig. 24는 설계한 에너지 하베스팅 시스템을 사용하여 정전기를 제거한 결과를 나타내는 그래프이다. 해당 실험에서는 AC/DC converter의 부하 저항에 10kΩ만을 연결하여 추가 코일을 에너지 하베스터로만 사용하였다. 정전기 발생기를 이용하여 물체 주변에 양이온을 발생시키는 과정을 Fig. 24의 Section A에 나타내었다. 정전기 발생기를 끄고, 충전된 배터리로 이오나이저를 구동하여 정전기를 제거하는 과정을

**Fig. 24**의 Section B에 나타내었다. 이를 통해 설계한 에너지 하베스팅 시스템으로 이온나이지저를 정상적으로 구동시킬 수 있음을 확인했으며, 최종적으로 반도체 제조 공정에서의 탄소 배출 감축과 정전기 문제 해결이라는 두 가지 목표를 달성하였다.

### 3.2 활용 방안 및 기대효과

본 시스템은 기존에 이용하는 리니어 모션 스테이지의 추가적인 변형 없이 시스템을 이용할 수 있어 활용도가 높다. 따라서, 리니어 모션 스테이지를 이용한 대다수의 산업 현장에 큰 무리 없이 적용할 수 있다.

본 시스템은 버려지는 에너지를 수확하기 때문에 환경친화적이다. 기존 반도체 공정 과정에서는 이온나이지저를 통한 정전기 제거를 위해 추가적인 에너지 소비가 필요하다. 그러나 본 시스템을 이용할 경우, 정전기 제거를 위해 소비되는 에너지 일부를 변환된 에너지로 충당할 수 있어 반도체 생산 과정에서 발생하는 탄소량을 줄일 수 있다. 또한 감쇠 작용으로 버려지는 진동 에너지를 전기 에너지 형태로 변환할 수 있어 전체 시스템의 측면에서 에너지 효율이 증가하는 효과가 나타난다. 더 적은 양의 에너지로 동일한 시스템을 구동시키기에 소비되는 에너지량을 감소시킬 수 있으며, 이는 전반적인 반도체 생산 과정에 필요한 비용을 절감하는데 효율적이다.

## 4. 결 론

대부분의 반도체 공정 과정에서는 리니어 모션 스테이지가 주로 사용되고 있다. 리니어 모터의 고속 이동과 잦은 반복 운동으로 인해 리니어 모션 스테이지가 불안정해질 수 있다. 따라서 안정적인 상태를 유지하기 위해 고안된 반능동형 리니어 모션 스테이지를 활용하여 진동 억제 및 에너지 수확이 가능하도록 시스템을 구축하였다. 본 설계에서는 리니어 모션 스테이지 구동에 따라 3상 코일에 흐르는 유도 전류를 에너지 형태로 저장하고, 반도체 공정 과정에서 발생한 정전기를 제거하는 이온나이지저 구동에 사용할 수 있도록 한다. 본 설계와 실험을 진행하며 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 반도체에 대한 수요가 급증하는 상황에서 공정 과정에 과도한 전력이 사용되고 있으며, 이에 따라 탄소 배출량이 과도하게 증가하고 있다. 본 에너지 하베스팅 시스템의 이용을 통해 반도체 산업의 탄소 배출량을 감축에 기여할 수 있다.
- (2) 본 설계 시스템은 수확한 에너지를 배터리에 저장한 후 이온나이지저 구동에 사용한다. 이온나이지저 뿐만 아니라 전기 에너지를 사용하는 다양한 구동기에 하베스팅 시스템을 적용할 수 있다.

## 후 기

이 논문을 작성하는 데 많은 도움을 주신 안형준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 본 공모전의 설계와 제작 환경을 지원해주신 숭실대학교 지능 기전 시스템 실험실에 감사드립니다.

본 공모전을 개최함으로써, 기계공학 기술에 관한 관심을 고취시키며, 설계 능력 배양에 큰 도움을 주신 기계학회 관계자분께 진심으로 감사의 인사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) 전자신문 Etnews, “반도체 산업 2030년에 1조달러 돌파...자동차,데이터센터 주도”,  
<https://www.etnews.com/20220429000159>, 22.05.02.
- (2) 김규빈, 2022, "반도체 공정 소형 전기집진기의 정전기 완화 특성." 국내석사학위논문 충북대학교, 충청북도 pp. 6~8.
- (3) Chong-Ho Yi, Sung-Ho, 2009, “Development of The System of Clearing Static Electricity with A Fan in the VLSI Device”, The Institute of Electronics Engineers of Korea - IE,46(3), pp. 26~32.
- (4) SAMGSUNG, 2021, “A JOURNEY TOWARDS A SUSTAINABLE FUTURE”, 삼성전자 지속가능경영 보고서, p. 30.
- (5) SK hynix, 2021, “WE DO TECHNOLOGY”, SK hynix Sustainability Report 2021, p. 21.
- (6) 조미덥 기자, ESG 경제, “‘반도체 호황의 딜레마’ 온실가스 배출은 어쩌나”  
<https://m.khan.co.kr/economy/economy-general/article/202104112128045#c2b>, 2021.04.11.
- (7) Kim Duc Hoang and Hyeong-Joon Ahn, 2017, “Both Energy and Cost-Effective Semi-Active RFC (Reaction Force Compensation) Method for Linear Motor Motion Stage”, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY, Vol. 4, pp. 73~78.
- (8) Dong-Gyu Lee, Yeon-Jeong Yee and Hyun-Cheol Song, 2019, “Broadband Piezoelectric Energy Harvesting Technology”, Ceramist, Vol 22, No 1, pp. 56~69.
- (9) Mo-hyun Cho, 2014, “Electrostatic Control in Semiconductor Wet Cleaning Process“, 국내석사학위논문 아주대학교, 경기도, pp. 1~4.