대한기계확회 주최 제12회 전국학생설계경진대회(2O22년)



참가부	대학부 (🗸)									
참가분야		공모주제 (√) / 자유주제 ()								
참가팀명			EC0 (Energy Co	st 0)						
설계제목		롤러형 압	전 에너지 하베스	팅 시스템 설계						
지도교수/교사		(소속)경상국립디	배학교 기계소재융	·합공학부 (성명)도	도재혁					
대표자	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소					
··· · (신청인)	최민혁	경상국립대학교 기계소재융합공학부								

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	최민혁	경상국립대학교 기계소재융합공학부 / 3학년	
2	이현승	경상국립대학교 기계소재융합공학부 / 3학년	
3	김시후	경상국립대학교 기계소재융합공학부 / 3학년	
4	방진홍	경상국립대학교 기계소재융합공학부 / 3학년	
5	임기훈	경상국립대학교 기계소재융합공학부 / 2학년	

설계 요약문



롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템 설계 최적화

최민혁*·이현승*·김시후*·방진홍*·임기훈*·도재혁** *경상국립대학교 기계소재융합공학부

Roller-type Piezoelectric Energy Harvesting System Design Optimization

Minhyeok Choi*, Hyeonseung Lee*, Sihu Kim, Jinhong Bang, Kihoon Lim and Jaehyeok

Doh

* School of Mechanical Materials Convergence Engineering, Gyeongsang National University

(Received January 1, 2013 ; Revised January 2, 2013 ; Accepted January 3, 2013)

Key Words: Carbon Neutral(탄소 중립), Piezoelectric Energy Harvesting(압전 에너지 하베스팅), Finite Element Analysis(유한요소해석), Multi-objective design optimization(다중 목적 설계 최적화)

초록: 본 설계는 탄소 중립에 기여하기 위해 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 전압 최대 목적 및 응력 최소 목적함수를 동시에 만족하는 최적화를 수행하여 이를 컨베이어 롤러에 적용하고자 한다. 설 계품의 전기적 성능 예측을 위해 이론적 해석, 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하였으며, 압전 계수 의 보정을 통해 예측값의 정확도를 개선하였다. 이후 전기적, 기계적 성능을 동시에 만족하는 다중 목 적 설계 최적화를 수행하였다. 이에 최적화 결과와 최적 형상의 실험 전압 오차율은 약 3.5%로 도출되 었다. 또한, 최적해에 따른 전압은 기존대비 6.9%향상되었으며, 실험 전압 대비 11.42% 향상되었다. 응 력 최소화 목적함수는 기존대비 14.76% 증가하였지만, 본 설계 시스템에 파단이 발생하는 변위 5mm에 서 발생한 응력 251.86MPa보다 낮은 164.16MPa이 발생하였으므로 최적해로 간주하였다.

Abstract: This design aims to apply the roller-type piezoelectric energy harvesting system to a conveyor roller for the purpose of maximum voltage and minimum stress. Theory, finite element analysis, experimental results were compared to predict the electrical performance, and the accuracy of the predicted value was improved by correction. multi-objective design optimization was performed to satisfy electrical, mechanical performance simultaneously. The voltage according to the optimized design was improved by 6.9% compared to previous. The stress increased by 14.76% compared to previous, but this design generated 164.16 MPa lower than 251.86MPa, generated at a displacement of 5mm for fracture.

^{*} Corresponding Author, jdoh@gnu.ac.kr

^{© 2022} The Korean Society of Mechanical Engineers

- 기호설명 -

$L_{\rm p}$	압전소자 길이	mm
L_{b}	황동 길이	mm
$H_{\rm p}$	압전소자 두께	mm
H_{b}	황동 두께	mm
Н	압전소자 총 두께	mm
$W_{ m p}$	압전소자 너비	mm
W_{b}	황동 너비	mm
F_{p}	압전소자 끝단 하중	Ν
$\delta_{ m p}$	압전소자 끝단 y축 변위	mm
d	압전 변형 계수	mm/V $\times 10^3$
g	전압 출력 계수	Vmm/N
е	압전 응력 계수	$C/mm^2 \times 10^{-6}$
h	전압 응력 계수	V/mm $\times 10^{-3}$
Ε	전기장	V/mm $\times 10^{-3}$
D	전기변위	$C/mm^2 \times 10^{-6}$
Т	응력	MPa
S	유연 계수	$mm^2/N \times 10^6$
С	강성 계수	MPa
V	전압	V
ε	유전율	$F/mm \times 10^{-3}$
Y _p	압전소자 탄성계수	MPa
S	변형률	
Y _b	황동 탄성계수	MPa
$\delta_{ m b}$	굽힘 모멘트에 의한 처짐	mm
kb	굽힘 처짐 상수	
В	굽힘 강성	$Nmm^2 \times 10^6$
F_{b}	황동 끝단 y축 하중	Ν
$\delta_{ m b}$	황동 끝단 변위	mm

최근 국제사회는 환경오염 및 기후변화의 심각성을 깨닫고 이를 해결하기 위해 교토 의정서(1997), 파 리협정(2015) 등을 채택하였다. 한국 정부도 '2050 탄소 중립 전략'(2020) 및 정책을 펼치며 온실가스 배 출을 줄이고 화석연료를 대체할 신재생 에너지 활용 확대에 앞서고 있다.⁽¹⁾ 이에는 에너지 하베스팅 (Harvesting) 기술이 있다. 에너지 하베스팅 기술에는 태양광, 열전, 전자기, 압전 에너지 하베스팅 등이 대표적이다. 이 중 압전 에너지 하베스팅은 진동, 하중과 같은 기계적 변형을 축적한 후 전기에너지로 변환 하여 발전한다. 이는 공간 및 환경의 영향을 받지 않고, 일상생활 속 에너지원이 다양하며, 에너지 변환 효율이 높은 장점이 있다.⁽²⁾

이와 같은 압전 에너지 하베스팅의 활용이 우선시 되어야 할 곳은 산업부문이다. 한국은 산업 성장과 함께 1990년 대비 약 4배 정도 경제 규모가 증가하였다. 이러한 산업의 성장은 온실가스 배출량을 증가 시켰으며, Fig. 1과 같이 2019년 한국의 온실가스 총배출량의 대부분을 산업부문이 차지함을 알 수 있 다.⁽³⁾ 또한 Fig. 2에서 알 수 있듯 2018년부터 감소 추세를 보이던 온실가스 총배출량이 거리두기 규제 완화로 재증가할 것으로 예상되어 압전 에너지 하베스팅의 활용이 시급하다고 판단된다.⁽⁴⁾



Fig. 1 2019 trends in national greenhouse gas emissions by sector⁽³⁾



Fig. 2 Re-increase in greenhouse gas emissions^(4,5)

본 설계는 이런 국가적 요구에 발맞추어 산업현장에서 버려지는 에너지원을 사용하여 탄소 중립에 기여하고자 한다. 이를 위해 산업현장에서 사용되는 기계요소 부품에 롤러 형태가 많이 사용되므로 롤 러 형태와 압전 에너지 하베스팅을 결합한 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템을 설계하고자 한다. 통 상적으로 롤러 내부가 비어있는 컨베이어 롤러(Conveyor roller)가 본 설계에 적합하다고 판단된다. 이를 기반한 설계를 수행함으로써 화석연료 사용을 절감, 환경오염 완화 등을 기대하며 탄소 중립에 기여하고 자 한다. 또한, 잉여 전력으로 경광등, 안전 버저(Buzzer)를 운용하여 작업자들의 안전 확보 및 전력 소비 절감을 통한 이윤 창출을 기대할 수 있다.

2. 설계 내용

2.1 설계 문제 정의 및 본 설계 시스템 제안

앞서 언급한 바와 같이 압전 에너지 하베스팅은 다양한 장점이 있지만, 발전을 위한 주파수 대역이 좁고 발전량이 작은 문제점이 있다.⁽⁶⁾ 이를 해결하기 위해 본 설계에서는 기존 주파수를 통해 발전하는 형태와 달리 충격하중(Impact load)을 가해 지속해서 발전하는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템을 제 안한다.

본 설계는 외팔보형 압전소자(Piezoelectric cantilever)가 축에 고정되어있다. 이에 롤러가 회전하며 충격 하중을 가하는 메커니즘(Mechanism)이다. 이를 위해 롤러에 돌기를 추가하였다. 이는 공진(Resonance)을 통해 발전하는 통상적인 압전소자와 차이를 가져 압전소자에 받침대를 부착한 복합 압전 외팔보 (Composite piezoelectric cantilever, CPC)를 설계함으로써 충격하중에 대한 안전성을 높였다.⁽⁷⁾ 이를 Fig. 3 에 나타내었다.



Fig. 3 Schematic diagram of the proposed piezoelectric energy harvesting system of roller type

본 설계의 타당성을 검증하기 위해 이론적 해석, 유한요소해석(Finite element analysis, FEA) 및 실제 실험을 통해 CPC의 출력 전압을 분석한다. 이를 기반으로 CPC의 최대 발전, 시스템의 안전성 증대, 시 스템 중량 최소화의 전기적, 기계적 다중 목적 설계 최적화를 진행한다. 또한 고유진동해석을 수행하여 시스템의 공진 회피 설계를 한다. 이후 최적화 값을 통해 프로토타입을 제작하고 실험을 통해 검증한다. 설계 과정의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다.



Fig. 4 Research procedure of piezoelectric energy harvesting system design of roller type

2.1.2 문헌 조사

압전 하베스팅은 발전 전압은 높으나 전류는 매우 적은 모습을 보인다. 전류를 증가시키는 방법으론 압전체 층수나 전극의 면적을 늘리거나 하중이 인가되어 발전되는 횟수가 많아야 한다.⁽⁸⁾ 또한, 통상적인 압전 하베스팅은 압전체에 압력을 가하는 방식이며 압전소자의 면적 전부를 눌러줄 넓은 하중이 필요하 다. 따라서 본 연구는 비교적 필요 하중이 적게 들면서도 발전 횟수가 많고 넓은 하중 인가가 필요 없 는 외팔보를 활용한 롤러형 압전 하베스팅 시스템을 설계해 발전 성능을 높이고자 한다. 추가로 하중을 받아 변위가 발생해야 발전하는 압전 특성상 활용할 수 있는 부분이 한정적이어서 산업화되어 있는 분 야가 거의 없다.⁽⁹⁾ 이러한 제한조건을 해소하고자 전반적인 산업시설에 활용할 수 있도록 발전하는 부분 과 하중을 주는 부분이 일체화된 형상의 롤러 설계를 제시한다.

일반적으로 외괄보형 압전 에너지 하베스팅 시스템은 공진주파수를 활용해 최대 변위를 발생시켜 발 전량을 높이지만 공진 대역을 맞추기가 어렵고 맞춘다고 하더라도 실제 적용이 어려운 단점이 있다. 이 에 본 설계에서는 공진주파수 대역을 맞춰 발전하는 형태가 아닌 외괄보와 회전하는 롤러의 돌기가 충 돌하여 변위가 발생해 발전하는 형태를 제시한다.

2.2 CPC 설계

2.2.1 압전소자의 개념

기계적 변형을 가하여 전기를 발생시키는 순방향 압전효과와 전기를 가해 기계적 변형을 발생시키는 역방향 압전효과를 가지는 소자이다. 이런 전기적, 기계적 압전효과는 압전 구성방정식과 압전 계수를 이용해 정량적으로 나타낼 수 있다. 이는 *d*, *e*, *g*, *h* 형태에 따라 각각 식(1), 식(2), 식(3), 식(4)와 같이 표현된다. 상첨자 *E*, *D*, *S*, *T*는 각각 전기장, 전기변위, 변형, 응력이 일정하다는 것을 뜻한다.⁽¹⁰⁾

$$S = S^{E}T + d_{31}E$$

$$D = d_{31}T + \varepsilon^{T}E$$
(1)

$$T = c^E S - eE$$

$$D = eS + \varepsilon^T E \tag{2}$$

$$S = s^{D}T + gD$$

$$E = -gT + \beta^{T}D$$
(3)

$$T = c^{D}S - hD$$

$$E = -hS - \beta^{S}D$$
(4)

압전계수는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.(11)

$$\left(\frac{\partial D}{\partial T}\right)_{E} = d \qquad -\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_{D} = g$$

$$\left(\frac{\partial D}{\partial S}\right)_{E} = e \qquad -\left(\frac{\partial E}{\partial S}\right)_{D} = h$$

$$(5)$$

압전소자의 물성은 하첨자 2가지로 표현된다. 첫 번째 첨자는 분극(Polarization)의 방향, 두 번째 첨자 는 하중의 방향이다. 이를 압전 모드라 부르며 31모드 및 33모드가 대표적이다. 이는 각각 분극 방향과 힘의 방향이 수직, 평행일 때를 가리킨다. 이를 Fig. 6에 나타내었다. 외괄보의 경우 31모드가 33모드보 다 힘 방향에 대한 변형이 크게 일어나 전력 생산에 용이하다.⁽¹²⁾ 이에 본 설계에서는 31모드를 선정하였다.





2.2.2 CPC 설계

한 개의 압전소자를 가진 유니모프(Unimorph)형보다 상하부에 압전소자를 배치해 전력생산이 높을 것 으로 사료되는 바이모프(Bimorph)형을 선정하였다.⁽¹³⁾

압전소자 재료에는 PVDF (Polyvinylidene fluoride), PZT 등이 있다. 폴리머 압전재료인 PVDF는 유연하여 큰 변위에 사용되나, 전압 생산이 낮은 단점이 있다. 세라믹 압전재료인 PZT는 비교적 전압 생산이 높으나, 취성이 높은 단점이 있다.⁽¹⁴⁾ 본 설계품에는 PZT를 적용하였으며, 취성이 높은 단점은 받침대를 추가함으로써 해결하고자 한다. 향후 실제 실험을 위한 PZT 중 경제성을 고려하여 PZT-5J를 압전소자 재료로 선정하였다.

받침대 재료는 황동을 선정하였다. 황동의 탄성계수는 SUS304와 구리 합금보다 낮아 변형이 가장 높다. 그러나 항복강도는 가장 우수하여 높은 하중에도 파손 발생 가능성이 현저히 낮을 것으로 예상한다. 이에 대한 물성치는 Table 1에 나타내었다.^(15,16)

Table 1 (Comparison	of Material	properties	between	Brass,	SUS304	and	Copper al	lloy
-----------	------------	-------------	------------	---------	--------	--------	-----	-----------	------

	Brass	SUS304	Copper alloy
Young's modulus (MPa)	105,000	193,000	110,000
Yield strength (MPa)	427	215	280

2.3 발전량 예측

2.3.1 기하학적 파라미터 선정

향후 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 설계를 위해 이론적 해석, FEA 및 실험을 통해 CPC의 정량적인 출력 전압 예측을 선행한다. 이에 사용될 기하학적 파라미터(Parameter)는 Fig. 7과 같다.





이론적 해석, FEA 및 실험에 사용할 기성품의 제원을 Table 2에 나타내었다.

PZT	Г-5Ј	Brass				
$L_{\rm p}$ (mm)	45.7	$L_{\rm b}$ (mm)	60			
$H_{\rm p}$ (mm)	0.15	$H_{\rm b}$ (mm)	1			
W _p (mm)	20.6	W _b (mm)	20			

Table 2 Geometric dimension of commercial PZT-5J and Brass sheet

2.3.2 이론적 해석

CPC의 받침대인 황동은 전압 출력에 관여하지 않으므로 이를 제외한 바이모프형 압전 외팔보 (Bimorph piezoelectric cantilever, BPC)형태로 이론적 해석을 진행한다. 이에 적용되는 물성은 Table 3과 같다. 이는 SJ instrument사의 물성을 참고하였다.

Table 3 Material properties in theory

BZT 51 material properties	g_{31} (-Vmm/N)	-10.4		
FZ1-55 material properties	Y _p (MPa)	51,000		

아래 식(6)는 C. Germano⁽¹⁷⁾가 제안한 직사각형 BPC에 변위가 인가되는 경우에 대한 압전 전압 이론 식 이다.

$$V = -\frac{3H^2}{8L_{\rm p}^2} g_{31} Y_{\rm p} \delta_{\rm p} \tag{6}$$

2.3.3 처짐 공식 전개

식 (6)의 V는 &에 의해 크게 좌우된다. 본 설계의 발전방식은 CPC와 롤러의 돌기 간 충격하중을 통 해 발전하므로 δ_p과 F_p 간 관계 확인을 위해 처짐 공식을 전개한다. 이에 사용되는 이론은 티모센코 보 이론(Timoshenko beam theory)과 오일러 베르누이 보 이론(Euler-Bernoulli beam theory)이 있다. 두 이론 중 본 설계에 적합한 이론 선정을 위해 Table 4에 두 이론의 특징을 기술하였다.⁽¹⁸⁾

Table 4 Comparison of Timoshenko beam theory and Euler-Bernoulli beam theory

Timoshenko beam theory	Euler-Bernoulli beam theory
두꺼운 판을 가진 보의 처짐을 해석에 사용하는 이론이다.	얇은 판의 형태를 가진 보의 처짐을 해석에 주로 사용하는 이론이다.
전단에 의한 처짐을 고려한다.	전단에 의한 처짐을 무시한다.
수식의 형태가 비교적 복잡하나 오일러 빔 이론보다 정확한 값을 예측할 수 있다.	수식의 형태가 비교적 단순하다.

CPC는 총 두께가 1.3mm인 얇은 박판이므로 오일러 베르누이 보 이론을 통해 처짐 공식을 전개한다. 전개 시 전압 생성과 무관한 CPC의 황동은 BPC와 길이가 같은 샌드위치 보(Sandwich cantilever, SC)로 가정하였다.(19)

$$\delta_{p} = k_{b} \frac{F_{p} L_{p}^{3}}{B} \text{ where, } B = Y_{p} \left(\frac{W_{p} H_{p}^{3}}{6} + \frac{W_{p} H_{p} (H_{b} + H_{p})^{2}}{2} \right) + Y_{b} \frac{W_{b} H_{b}^{2}}{12}$$
(7)

식(7)의 k,는 외력과 지지 조건에 따라 변하는 상수이며, 본 설계에 적합한 k, 값을 산출하기 위해 FEA를 통해 도출되는 성능지수 데이터를 기반으로 식(7)과 비교 검증한다.

)

2.4 정적 해석

CPC의 정량적인 출력 전압 예측을 위한 유한요소해석은 ANSYS Workbench의 정적 구조(Static structural) 해석을 사용하였다. 이에 사용된 3차원 모델의 물성은 각각 Table 5에 기술하였다. 압전물질인 PZT-5J의 물성은 기계적 특성과 전기적 특성을 가진 행렬 형태로 입력해야 한다. 이는 SJ instrument사의 PZT-5J 물성을 참고하였다.

	Material properties of PZT-5J												
	Stiffness matrix												
	c_{11}	c_{12}	c_{13}	0	0	0]	[1.3365E+5	85729	89749	0	0	0]
	c_{12}	c_{22}	c_{23}	0	0	0		85729	1.0945E+5	85729	0	0	0
	c_{13}	c_{23}	c_{33}	0	0	0		89749	85729	13365	0	0	0
	0	0	0	C_{44}	0	0	=	0	0	0	18500	0	0
	0	0	0	0	C55	0		0	0	0	0	18500	0
	0	0	0	0	0	C ₆₆		0	0	0	0	0	21951
							_	Piezoelectri	c matrix (e)				
					0	e_{31}	0	0	-5.0612E-6	0]		
					0	e_{33}	0	0	21.172E-6	0			
					0	e_{31}	0	0	-5.0612E-6	0			
					e_{15}	0	0	$ ^{=} _{13.394E-6}$	5 0	0			
					0	0	e_{15}	0	0	13.394	E-6		
					0	0	0	0	0	0			
								Permittivity at	constant strain				
						Γ	ε^{s}	0 0] [1	343 0	0]			
							0	$\varepsilon^{s} = 0 =$	0 1224	0			
							0	$0 \varepsilon^{S}$	0 0 1	343			
						L	0						
	•,			0	47	10-6	1 /	Material proper	rties of Brass				
Den	Density $8.47 \times 10^{-6} \text{ (kg/mm^3)}$												
$\frac{Y_{\rm b}}{{\rm p}}$	<u>Y_b</u> 105,000 (MPa)												
Pois	son's	ratio		0.3	33								
해신	넉을 :	위한 3	3차원	모델	의 me	sh 설	정을	· Table 6에 정리	하였다.				
Tab	le 6	CPC	mesh	size									
			Ele	ement	size	(mm)					0.5		
	Element type							3D	8-node e	lement (S	olid 45)		

Table	5	Material	properties	of	CPC	in	FEA
-------	---	----------	------------	----	-----	----	-----

No. Elements

No. Nodes

이후	황동과	PZT-5J	사이	접촉	조건(Bond	ed),	외팔보의	굽힘	거동	모사를	위한	좌측	끝단	구속조건(Fixed
support)	및 우큭	두 끝단 기	강제변	위(Dis	olacement) 들	는 부	-여하였다.								

16,800

105,791

PZT-5J의 3차원 모델에 압전물성 적용을 위해 ANSYS Workbench에 내장된 Piezoelectric and MEMS tool을 사용하였다. 상, 하단 PZT-5J에 Piezoelectric body 조건 부여 후 출력 전압 측정을 위한 조건(Voltage) 및 일정한 전



압측정을 위한 조건(Voltage coupling)을 추가로 부여하였다. 이를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8 Boundary condition set of static analysis

이를 기반으로 CPC의 전기적 해석을 진행한 결과 Fig. 9와 같이 0.5mm 변위 인가 시 2.4977V로 도출되었다. 이와 같은 방법으로 5mm까지 0.5mm씩 변위를 인가하였을 때 전압을 도출하였으며, 이를 Table 7에 정리하였다.



Fig. 9 Result of CPC voltage via static analysis

Table 7 Result of CP	PC voltage acco	rding to disp	lacement
----------------------	-----------------	---------------	----------

Input data	Outpu	t data
δ_{b} (mm)	δ_{p} (mm)	V _{FEA} (V)
0.5000	0.3184	2.4977
1.0000	0.6368	4.9953
1.5000	0.9552	7.4930
2.0000	1.2735	9.9906
2.5000	1.5919	12.488
3.0000	1.9103	14.986
3.5000	2.2287	17.484
4.0000	2.5471	19.981
4.5000	2.8655	22.479
5.0000	3.1839	24.977

돌기의 다중 목적 설계 최적화에 사용할 식(7)의 검증을 위해 CPC 모델을 기반으로 기계적 해석을 진행하여 본 설계에 적합한 k, 값을 산출한다. Table 8에 δ,를 5mm까지 0.5mm씩 증가시키며 이에 따른 δ_p, F_p를 나 열하였다. 이를 기반으로 Fig. 10에 곡선 피팅(Curve fitting)을 사용해 생성한 선형 모델을 나타내었다.

Table 8 FEA result of δ_p and F_p for CPC according to forced displacement

	$\delta_{\rm b}$ (mm)	$\delta_{\rm p}$ (mm)	$F_{\rm p}$ (N)
ð	0.5000	0.3184	3.1049
	1.0000	0.6368	6.2097
	1.5000	0.9552	9.3147
δ_{b}	2.0000	1.2735	12.419
	2.5000	1.5919	15.524
	3.0000	1.9103	18.629
	3.5000	2.2287	21.734
	4.0000	2.5471	24.839
	4.5000	2.8655	27.944
	5.0000	3.1839	31.049



Fig. 10 Curve fitting to derive k_b

 $F_{\rm p}$

2

산출된 k, 값은 0.3063이며, 이를 식(7)에 대입한다. Table 9에 FEA와 처짐 공식 간 $\delta_{p,}$ F_p의 평균 오차 율을 도출하였다. 처짐 공식과 FEA 간 결과가 유사하여 k, 값이 적합하다고 판단하였다.

	$\delta_{\rm b}$ (mm)	1	2	3	4	5	
FEA data	$\delta_{ m p}$ (mm)	0.636	1.273	1.910	2.547	3.183	
	$F_{\rm p}$ (N)	6.209	12.41	18.62	24.83	31.04	
Euler-Bernoulli	$\delta_{\rm p}$ (mm)	0.636	1.273	1.910	2.547	3.184	
beam theory	$F_{\rm p}$ (N)	6.209	12.41	18.62	24.83	31.04	
Average error (%)				0.014			

Table 9 FEA data and deflection formula verification for CPC

2.5 실험

2.5.1 CPC 제작

실제 실험 진행에 앞서 CPC 제작을 위한 부착 개략도를 Fig. 11에 나타내었다. PZT-5J와 황동 사이는 에폭시를 사용해 부착한다. 이후 PZT-5J의 취성을 고려하여 실리콘을 덧대어준다. 실리콘의 상부 압력이 가해질 부분에 금속을 덧대어 고압에 버틸 수 있는 환경을 조성해준다.



Fig. 11 Schematic of CPC attachment

CPC는 Fig. 12과 같은 공정 순서로 제작되었다. 접착제는 에폭시 글루를 사용하여 황동의 표면에 펴 발라주었다. 이후 부착된 황동과 PZT-5J 상부에 실리콘과 금속을 덧대어 압력을 약 10시간 가해주었다.



Fig. 12 Manufacturing process of CPC

2.5.2 강제 변위 인가 시험

실험에 사용된 장비는 Fig. 13과 같이 구성하였다. 테스트 베드(Test bed)는 PLA(Polylactic acid)를 사용 해 3D프린터로 제작하였고 오실로스코프(Oscilloscope, EZ사의 DS-1080)를 사용하여 전압을 측정하였다. 이를 기반으로 강제 변위 인가시험을 평균 30번씩 수행하였다. 이를 통해 끝단에 5.0mm의 변위를 인가 하였을 때 PZT-5J에 파단이 생기는 것을 확인하였다. 따라서 4.5mm까지 0.5mm 간격으로 측정한 평균 전압(V_M) 데이터를 Table 10과 Fig. 14에 나타내었다.



Fig. 13 Photo view of experimental set up to measure voltage

Table	10	Result	of	voltage	according	g to	displacement	via	experiment	
					1					

Input data	Outpu	t data
$\delta_{\rm b}$ (mm)	$\delta_{\rm p}$ (mm)	V_M (V)
0.5000	0.3462	3.4562
1.0000	0.6924	4.2676
1.5000	1.0386	6.1156
2.0000	1.3848	6.4941
2.5000	1.7310	7.6906
3.0000	2.0772	9.1955
3.5000	2.4234	10.825
4.0000	2.7696	11.711
4.5000	3.1158	13.350



Fig. 14 Result of voltage about piezoelectric element's diplacement according to tip displacement of CPC on experiment

2.5.3 이론, FEA, 실험 간 도출 결과 비교

실험 전압 데이터 기반 압전 전압 이론 식 및 FEA의 전압 데이터 간 적합도와 오차를 결정계수(R²)와 평균 제곱근 오차(Root mean square error, RMSE)를 사용해 분석하였다. 이를 Table 11에 나타내었고 Fig. 15와 같이 CPC 변위 증가에 따라 오차가 증가함을 알 수 있다.

Table 11 The evaluation error between experiment, FEA, and theory

	Experiment	Theory	FEA				
\mathbb{R}^2	-	-5.367	-				
RMSE (V)	-	8.075	6.671				



Fig. 15 Result of voltage according to displacement between experiment, FEA, and theory

이러한 오차는 황동과 PZT-5J의 적층 공정에서 고온, 고압 환경이 조성되지 못해 도전성 저하가 발생 했을 것으로 판단된다. 이에 압전계수가 감소하여 기존 압전계수와 상이한 것으로 판단된다.⁽²⁰⁾ 따라서 실험 전압 데이터 기반 압전 전압 이론식과 FEA의 압전계수를 실험적으로 보정하였다.

2.5.4 압전계수 보정

전압 출력 계수(g₃₁)는 실험 전압 데이터 기반 곡선 피팅을 사용하여 산출하였다. 이를 FEA에 적용하 기 위해 압전 응력 계수(e₃₁, e₃₃, e₁₅)를 실험적으로 보정하였다. 이를 통해 보정된 압전계수(g₃₁, e₃₁, e₃₃, e₁₅)를 적용하여 실험 데이터 기반 압전 전압 이론 식 및 FEA의 R²와 RMSE를 Table 12에 정리하였고, 이에 따른 도출 전압을 Table 13과 Fig. 16에 나타내었다.

Table 12 Dataset of calibration piezoelectric coefficient and R² and RMSE

	Experiment	Theory	FEA
g_{31} (Vmm/N)	-	5.405	-
e_{31} (C/mm2) × 10 ⁻⁶	-	-	-1.461×10^{-6}
e_{33} (C/mm2) × 10 ⁻⁶	-	-	12.57×10^{-6}
e_{15} (C/mm2) × 10 ⁻⁶	-	-	5.394×10^{-6}
\mathbb{R}^2	-	0.9125	-
RMSE (V)	-	0.9466	1.253

 Table 13 Result of calibrated voltage according to displacement

Input data	Ouput data					
$\delta_{\rm b}$ (mm)	$\delta_{\rm p}~({ m mm})$	V_M (V)	V_{FEA} (V)	V _{Theory} (V)		
0.5000	0.3462	3.4562	1.5525	1.5421		
1.0000	0.6924	4.2676	3.1051	3.0843		
1.5000	1.0386	6.1156	4.6576	4.6265		
2.0000	1.3848	6.4941	6.2101	6.1687		
2.5000	1.7310	7.6906	7.7627	7.7109		
3.0000	2.0772	9.1955	9.3152	9.2531		
3.5000	2.4234	10.825	10.868	10.795		
4.0000	2.7696	11.711	12.420	12.337		
4.5000	3.1158	13.350	13.973	13.880		



Fig. 16 Result of calibrated voltage according to displacement between experiment, theory, and FEA

2.6 동적 해석

2.6.1 돌기 형상 선정

앞서 진행한 결과를 기반으로 CPC에 지속적인 최대 변위를 인가할 수 있는 돌기 형상 및 치수 설계 를 진행한다. 이를 위해 ANSYS Workbench의 명시적 동해석(Explicit dynamics)을 사용하였다. 본 설계에 적합한 돌기 형상의 선정을 위해 응력을 확인한다. 이에 여러 형태의 돌기와 CPC가 충돌하는 거동을 모사한다. Fig. 17과 같이 임의의 돌기에 구속조건(Fixed support)을 부여하였으며, *x*, *z* 축 방향 변위를 0으로 설정하였다. 또한, 회전체 모사를 위한 축에 좌표계(Cylinder)를 설정하였으며, 본 설계품이 컨베이어 벨트에 적용됨을 고려하여 15rad/s의 속도(Velocity)를 부여하였다. Fig. 18과 같이 단축 *a*는 5.8mm, 장축 *b*는 14mm로 지정 후 네모, 세모, 원 형태에 따른 도출 응력을 Table 14에 나타내었다.



Fig. 17 Boundary condition set of dynamics analysis



Fig. 18 Stress by protuberances shape

Table	14	Result	of	von-Mises	stress	according	to	impact	load
		1.000000	~ -		0	areareng	•••	mparer	10000

Geometry	von-Mises stress (MPa)
Rectangular	286.974
Triangle	318.220
Circle	138.291

Table 14에서 원형돌기와 CPC가 충돌할 때 발생 응력(von-Mises stress, σ)이 가장 낮은 것을 알 수 있 다. 이에 따라 원형 돌기를 선정한 후 돌기 세부 치수를 설계한다.

2.6.2 동적, 정적 해석 비교

돌기 치수를 선정하기 전 벨트 컨베이어용 롤러(KS B 6229)의 치수 참고 및 내구성을 고려하여 롤러 바깥지름, 롤러 안지름 및 축 지름을 Fig. 19에 나타내었다.



Fig. 19 Size of roller

CPC의 전력 생산 증대, 충돌 시 응력을 최소화하는 돌기 치수의 최적화를 위해 중심합성계획(Central composite design, CCD)을 사용하였다. CCD는 변수 범위의 중간값부터 멀어질 때 경향을 분석하여 블록 안의 모든 결과를 추가 실험 없이 도출할 수 있다.⁽²¹⁾ 설계변수가 k이고 반복 횟수가 n_c 일 때 총해석 횟 수는 2^k+2k+n_c가 된다.⁽²²⁾ 본 설계는 원형 돌기의 *a*, *b*를 설계변수로 선정하여 Fig. 20과 같이 총 9회의 해석이 필요하다.



해석 소요 시간을 고려해 롤러는 형상에서 제외한 후 2.4.1절과 동일한 조건을 부여한 후 해석하였다. Fig. 21과 같이 CPC가 돌기와 충돌하여 끝단 변위가 최대일 때 평균 응력(σ_{Mean})을 Table 15에 정리하였 다.

Fig. 21 Result of explicit dynamics analysis

Table 15 Result of FEA by fac	ced central composite design
-------------------------------	------------------------------

Input	data	Output data		
a (mm)	<i>b</i> (mm)	$\delta_{ m b}$ (mm)	σ_{Mean} (MPa)	
12	5.8	2.8267	144.03	
14	5.8	2.7779	143.77	
16	5.8	2.9229	150.73	
12	5.9	3.0258	156.09	
14	5.9	3.0717	158.23	
16	5.9	3.1130	159.28	
12	6.0	3.2260	163.52	
14	6.0	3.3280	167.27	
16	6.0	3.2196	162.54	

이어 2.3.5절의 정적 해석 모델을 사용하여 동적 해석 값과 비교하였다. 이를 위해 Table 15의 끝단 변 위를 사용하여 발생 응력을 Table 16에 나타내었다.

Table 16 Result of static analysis by explicit dynamics analysis

	~ ~ ~ ~				
Input	Output data				
$\delta_{\rm b}$ (mm)	σ (MPa)	$F_{\rm b}$ (N)	$F_{\rm p}$ (N)	Weight (Kg)	
2.8267	142.38	11.941	17.553	0.2888	
2.7779	139.93	11.735	17.250	0.2891	
2.9229	147.23	12.348	18.150	0.2894	
3.0258	152.41	12.782	18.790	0.2889	
3.0717	154.73	12.976	19.074	0.2891	
3.1130	156.81	13.151	19.331	0.2894	
3.2260	162.50	13.628	20.032	0.2889	
3.3280	167.64	14.059	20.666	0.2892	
3.2196	162.18	13.601	19.993	0.2895	

동적 해석의 평균 응력과 정적 해석의 최대 응력 간 비슷한 양상을 보였으며 이에 따른 끝단 반력, 소자 반력 및 롤러 전체 무게를 도출하였다.

2.7 다중 목적 설계 최적화

2.7.1 실험계획법 및 설계 정식화

본 설계에서는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 형상을 최적화하여 기존 대비 응력 감소 및 높 은 전압을 도출하고자 한다. 이를 위해 시간(Time) 및 비용(Cost)을 효율적으로 사용하기 위한 방법으로 최소 실험 횟수로 최대 정보를 얻을 수 있는 실험계획법(Design of experiment, DOE)을 선행적으로 수행 하였다. DOE의 방법으로는 2.4.2에서 언급한 CCD를 선정하였다. 이후 정식화 및 근사모델 사용에 있어 편의를 위해 앞서 언급한 단축(a) 및 장축(b)을 각각 설계변수 x_1, x_2 로 표기하였으며, 각 설계변수의 범 위는 전체 시스템의 형상을 고려하여 각각 5.8mm~6mm, 12mm~16mm로 선정하였다. 이에 본 설계 시스 템의 롤러가 회전할 때 단축 및 장축의 변화에 따른 응력(von-Mises stress), 압전소자 끝단 하중(F_M) 및 무게(Weight) 성능지수를 FEA를 통해 도출하였다. 또한, 모드(mode)해석을 통해 1~3차 모드의 시스템 공 진대역을 확인하였으며, 15rad/s에 대한 진동수 2.387(Hz) 대비 큰 차이를 보여 고유진동수 조건을 제외 하였다. 이에 대한 결과를 앞서 언급한 Table 16의 내용을 수정하여 Table 17에 나타내었다.

							ω (Hz)	
	$\begin{array}{c} x_1 \\ (mm) \end{array}$	$\begin{array}{c} x_2 \\ (mm) \end{array}$	(MPa)	F _p (N)	Weight (Kg)	1 st	2 nd	3 rd
1	5.8	12	142.38	17.553	0.2888	590.32	1,163.0	1,163.1
2	5.8	14	139.93	17.250	0.2891	591.87	1,165.3	1,165.3
3	5.8	16	147.23	18.150	0.2894	593.23	1,167.1	1,167.2
4	5.9	12	152.41	18.790	0.2889	590.86	1,163.7	1,163.8
5	5.9	14	154.73	19.074	0.2891	592.35	1,165.9	1,165.9
6	5.9	16	156.81	19.331	0.2894	593.82	1,167.9	1,168.1
7	6.0	12	162.50	20.032	0.2889	591.43	1,164.6	1,164.6
8	6.0	14	167.64	20.666	0.2892	592.98	1,166.8	1,166.8
9	6.0	16	162.18	19.993	0.2895	594.35	1,168.6	1,168.8

Table 17 Result of performance factor and natural frequency via FEA

2.7.2 정식화

본 설계의 응력 최소화 및 전압 최대화를 동시에 만족하는 최적화 목적함수를 선정하였다. 또한, 실제 시스템의 생산 비용을 줄이기 위한 제한조건으로 기존 모델 [x₁, x₂] = [5.8, 14]의 최대 중량인 0.2891Kg 으로 선정하였으며, 이를 정식화하여 식(8)과 같이 나타내었다.

Min. $f_{\text{Support}}(x_1, x_2)$

Max $f_{Voltope}(x_1, x_2)$

Subject to :

 $g_{Weight} \leq 0.2891(Kg)$

Variables :

 $5.80 \text{mm} \le x_1 \le 6.00 \text{mm}$

 $12.0 \text{mm} \le x_2 \le 16.0 \text{mm}$

Initial parameter : $[x_1, x_2] = [5.80 \text{mm}, 14.0 \text{mm}]$

2.7.3 대리모델

FEA를 통해 도출된 성능지수 데이터를 기반하여 목적함수에 대한 정량적인 수치를 추정하기 위한 회 귀모델(Regression model)을 반응표면법(Response surface method, RSM)으로 생성하였다. 이는 여러 설계변 수가 복합적인 작용을 하여 목적함수에 영향을 주고 있을 때 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통 계적인 분석 방법이다.⁽²³⁾ 본 설계에서 응력(σ) 및 압전소자 끝단 하중(*F*_p) 성능지수 데이터로 2차 회귀모

(8)

델을 사용하였으며, 중량(Weight) 성능지수 데이터의 경우 설계변수 변화에 따라 일정하게 변하는 선형 적인 거동을 보이기 때문에 1차 회귀모델을 사용하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i \le j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j$$
(9)

식 (9)를 사용하여 총 설계변수(k)가 2개일 때에 대한 2차 회귀모델을 식 (10)에 나타내었으며, 1차 회 귀모델을 식(11)에 나타내었다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2$$
(10)

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 \tag{11}$$

Table 17에서 도출된 성능지수 데이터를 기반으로 2차 및 1차 다항 회귀모델을 생성하였다. 압전소자 끝단 하중 성능지수는 식 (6) 및 식(7)을 활용하여 목적함수 최대화를 위한 V에 대한 성능지수 데이터로 변환하였으며, 이를 기반으로 회귀모델을 생성하여 식(12), 식(13), 식(14)에 나타내었다.

응력 다항 회귀모델

$$y_{5785} = -4496.37250 + 1375.10833x_1 + 80.19583x_2$$

 $-100.00000x_1^2 - 0.17500x_2^2 - 12.92500x_1x_2$
(12)

전압 다항 회귀모델

$$y_{Foltege} = -253.45664 + 77.53754x_1 + 4.50362x_2$$

 $-5.64073x_1^2 - 0.00958x_2^2 - 0.72641x_1x_2$
(13)

중력 다항 회귀모델

$$y_{Weight} = 284.73556 + 0.40000x_1 + 0.29000x_2 \tag{14}$$

2.7.4 대리모델 적합도 평가

회귀모델 생성 후 최적화를 수행하기 전 신뢰도 검증을 위한 적합도 평가가 선행된다. 이에 회귀모델 에 대한 적합도를 R² 로 평가하였으며, Fig. 22에 나타내었다.

2.7.5 최적화

중량 제한조건에 대해 응력 최소화와 전압 최대화 두 가지의 목적함수를 동시에 만족하는 최적화를 수행하기 위해 NSGA-II 알고리즘을 사용하였다. NSGA-II는 비지배 분류 유전자 알고리즘(Non-dominated sorting genetic algorithm-B)으로 기존에 사용하던 비지배 분류 유전자 알고리즘(Non-dominated sorting genetic algorithm)의 연산 복잡도, 사전 우수해 선별 조건 미흡 및 공유 변수값 결정 등을 개선한 알고리 즘이다. 본 설계에서는 인구 수(Population) 및 세대 수(Generation)를 각각 100, 300으로 설정하였으며, 두 목적함수는 최소화를 위한 방향으로 수렴함으로 최대화를 위한 전압 회귀모델 함수에 (-1)을 곱해주었 다.^(24,25) 이를 Fig. 23에 나타내었다.

Fig. 23 Result of pareto optimal set using NSGA-II

2.7.6 결과

NSGA-II로 도출된 최적해 집합의 정확성 검증을 위해 양단의 끝점(Opt. 1, Opt. 3)과 중간 점(Opt. 2)을 추출하였고, 각 점에 해당하는 성능지수와 설계변수를 확인하여 Table 18에 나타내었다. 이어 도출된 최 적 설계변수에 따른 응력 및 전압 결과 값을 기존 모델과 검증하였으며, 이를 Table 19에 나타내었다.

			0			
		$x_1 \pmod{2}$	$x_2 (mm)$	g _{Weight} (Kg)	f _{Stress} (MPa)	f _{Voltage} (V)
Initial design		5.800	14.000	0.28910	139.93	8.607
NSGA-II	Opt. 1	5.800	12.000	0.28871	140.34	7.905
	Opt. 2	5.896	12.168	0.28888	152.82	8.607
	Opt. 3	6.000	13.478	0.28909	164.16	9.245
FEA	Opt. 1	5.800	12.000	0.28880	142.38	8.777
	Opt. 2	5.896	12.168	0.28885	146.66	9.061
	Opt. 3	6.000	13.478	0.28909	157.97	9.739

Table 18 Result of performance factor according to pareto optimal set

Table 19 Verification of initial design and optimal design

	x_1	x_2	g _{Weight} (Kg)	f _{Stress} (MPa)	$f_{Voltage}$ (V)
Initial design	5.800	14.000	0.28910	139.93	8.607
Optimum value	6.000	13.478	0.28909	164.16	9.245

롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템 형상 최적화를 통해 도출된 최적 설계변수는 중량 제한조건을 만족하였으며, 이에 따른 전압 목적함수는 기존 대비 6.90% 증가하였으며, 응력 최소화 목적함수는 기존 대비 14.76% 증가하였지만, 본 설계 시스템에 파단이 발생하는 변위 5mm에서 발생한 응력 251.86MPa보 다 낮은 164.16MPa이 발생하였으므로 최적해로 간주하였다. 이어 Fig. 24와 같이 최적 설계변수에 대한 모드해석을 수행하여 1~3차 모드의 시스템 공진대역을 확인하였으며, 15rad/s에 대한 진동수 2.387(Hz) 대비 큰 차이를 보여 공진으로부터 안전하다고 판단하였다.

1st mode : 592.61Hz **Fig. 24** Result of mode analysis

2nd mode : 1,166.2Hz

3rd mode : 1,166.3Hz

3. 결과 및 토의

3.1 롤러 프로토타입 실험

CPC와 2.5절에서 최적화된 돌기와 초기 돌기 간 발전량을 검증한다. 이를 위한 모터 실험 테스트 베 드 설계도를 CATIA Assembly를 사용해 Fig. 25에 나타내었다.

Fig. 25 Schematic of motor experiment set up

이후 Fig. 26과 같이 모터 실험 장치를 제작하였다. 테스트 베드는 PLA를 사용해 3D프린터로 제작되었고 2.3.7절과 동일한 오실로스코프를 사용하였다. 이에 모터(NIDEC사의 KH42JM2-901)를 장착하여 롤러에 회전을 가하였다.

Fig. 26 Photo view of motor experimental set up

3.1.1 롤러 프로토타입 결과

최적화된 돌기와 초기 돌기 간 모터 실험을 통해 22회의 출력 전압 평균을 비교하여 Table 20과 Fig. 27에 나타내었다. 최적 설계 변수 Fig. 27의 x축은 시행 횟수이고 y축은 출력 전압이다.

	8 1	0	
		Initial	Opt.
		$x_1 = 5.8$ mm	$x_1 = 6.000$ mm
		$x_2 = 14$ mm	$x_2 = 13.478$ mm
NSGA-II	V	8.607	9.245
	Improving	6.900 (%)	
Expenmental	Average V	8.491	9.600
	Improving	11.55 (%)	

Table 20 Comparison of Initial design and optimal design

Fig. 28은 소자와 연결되는 회로 개략도를 나타내었다. 이는 PZT-5J에서 출력된 교류 전압을 직류 전 압으로 변환하는 다이오드(Diode)를 활용한 정류 브릿지(Bridge rectifier)와 전압을 완만하게 출력시켜주는 커패시터(Capacitor)를 포함하고 있다. 이를 Fig. 29과 같이 CPC에 부착하여 발전된 에너지 정류, 배터리 충전 및 부하한다.

Fig. 28 Schematic of circuit connection

Fig. 29 Circuit connection of CPC

3.1.2 돌기 개수와 CPC 개수 선정

본 설계에서 2개 이상의 CPC가 동시에 돌기와 충돌하면 시스템 전체에 큰 충격이 가해진다. 더불어 공진에 가까워지면 시스템에 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 이를 방지하기 위해 돌기 개수와 CPC 개 수는 서로 간 최대공약수가 1인 서로소 관계가 되어야 한다. 모터 테스트 베드 실험에는 이 점을 고려 하여 1개의 돌기와 1개의 CPC로 진행하였다. 이후 전력 생산은 증대하며 경제적 측면을 고려하여 돌기 개수 5개, CPC 개수 3개를 최적값으로 실험을 진행한 결과는 전압은 그대로이나 전력이 늘어난 CPC 개 수만큼 상승하였으며, 실험에 대한 내용을 Fig. 30에 나타내었다.

Fig. 30 Photo view of motor experimental with 3 CPC and 5 protursions set up

3.2 활용방안 및 기대효과

3.2.1 활용방안

본 설계품은 압전 에너지 하베스팅이라는 신재생 에너지의 활용과 동시에 전반적인 산업시설에 활용 할 수 있는 '롤러'형태를 기반으로 설계하여 컨베이어 벨트를 비롯해 산업부문의 다양한 사용처에 적용 할 수 있다. 이어 현재 설계품의 치수 조정 및 재료 교체를 통해 산업부문에 국한되지 않고 롤러 형태 가 사용되는 모터, 터빈 등 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 기대효과

본 설계품은 발생 전압이 우수하나 취성이 높아 활용하기 어려웠던 PZT를 효과적으로 사용할 수 있 어 기존의 압전 에너지 하베스팅 시스템보다 높은 효율을 가질 것으로 기대된다.

발전량 예측 프로세스를 사용함에 따라 돌기 개수 및 CPC 개수를 변경하여도 적은 비용에도 최대 효 율을 낼 수 있다.

이여 전력으로 경광등, 안전 버저를 운용하여 현장 작업자들의 안전 확보에 기여할 수 있다.

컨베이어 벨트에 본 설계품을 적용함으로써 화석연료 사용 저감을 통해 탄소 중립에 기여한다. 또한, 추가 발전을 통해 에너지 효율 증대와 경제적 이윤 창출을 기대할 수 있다.

4. 결 론

기존 압전소자의 문제점인 좁은 주파수 대역, 작은 발전량을 해결하기 위해 충격하중을 통해 발전하는 메커니즘과 바이모프 외팔보 형태의 압전소자를 선택하였다. 충격하중에 대한 안전성을 가지기 위해 바이모프 외팔보 사이에 황동 받침대를 추가하여 발전 효율 및 내구성이 향상되었다. 본 연구는 이론적 해석, 유한요소해석, 실험 결과의 보정을 통한 전기적 성능 예측 정확도를 개선하였다. 이를 기반으로 CPC 전력생산 증대를 위해 최대 변형에 따른 전압 발생을 유도하고 도출 응력을 최소화하는 전기적, 기계적 다중 목적 설계 최적화를 진행하였다. 시스템의 공진회피설계를 위해 고유주파수 대역을 확인하였으며, 최종 최적화 결과 초기 설계안 대비 이론 전압은 6.9%, 실제 실험 전압은 11.55% 향상되었다. 또한, 본 설계에서 진행한 최적화 결과는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템 중 돌기 하나의 형상만을 고려하여 수행한 것이다. 이에 최적화 형상을 전체 시스템에 적용하면 전압 향상량이 늘어날 것이다. 더 불어 이론으로 정립한 전압 식을 사용하여 하베스팅 시스템의 전압을 설계 초기부터 예측할 수 있다. 향후 연구 및 개선을 통해 실제 사용될 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템 제작 시 PLA 재료가 아닌 각 공정에 적합한 재료로 제작하여 컨베이어 벨트 외 폭 넓은 분야에 적용하여 탄소 중립에 기여할 수 있다고 판단된다.

후 기

대한기계학회 주관 제12회 전국 학생 설계경진대회에 참가하여 학교에서 공부한 전공지식을 다시금 이해할 수 있었습니다. 나아가 접해보지 못했던 'ANSYS', 'Matlab' 및 'Python' 등 여러 상용 프로그램을 사용할 기회가 되어 좋은 경험이었습니다. 또한, 설계 완성을 위해 직접 재료구매 및 회로 제작을 하는 등 전공지식 외적으로도 배울 좋은 기회였습니다. 평소 학부생 수준에서 오랜 기간 팀 프로젝트를 수행 할 기회가 많지 않다고 생각합니다. 이에 대한기계학회에 감사드립니다. 오랜 기간 함께해온 모든 팀원 에게 감사하며, 진행 시 아낌없는 조언을 주신 경상국립대학교 기계소재융합공학부 도재혁 교수님께 진 심으로 감사드립니다.

이번 프로젝트를 통해 처음 접했던 ANSYS 프로그램 공부에 많은 도움을 주신 태성에스엔이, 프로토 타입 제작에 도움을 주셨던 3D프린팅 경남센터, 압전소자 관련 공부에 도움을 주신 SJ instrument 등 저 회 질문에 친절히 답변해주신 기업들에 감사드립니다.

본 설계품이 앞으로 수정 및 보완을 거쳐 다양한 사용처에 적용되어 탄소 중립에 큰 기여가 되기를

바랍니다.

본 논문은 경상국립대학교 2021 Social Lab 동아리 사업과 2022학년도 대학혁신지원 사업 및 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다.(No.2021R111A3044394)

참고문헌

- Government of the Republic of Korea, 2020, 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea: Towards a Sustainable and Green Society, pp. 8~10
- (2) Kim, K. H., Lee, C. Y., Park, J. Y., Choi, Y. C., Park, M. S. and Choi, H. B., 2017, "Operation Strategy Establishment and performance verification for Piezoelectric Harvester," Expressway and Transportation Research Institute, Hwaseong, pp. 1~2
- (3) KOSIS, "국가 온실가스 분야별 배출량 추이,"
- https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_99_2800020&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=T_2&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do
- (4) 환경부, "2021년 국가 온실가스 배출량, 6억 7,960만톤 예상,"
- http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1533570&menuId=10525
- (5) MBC 뉴스, "온실가스 배출 다시 증가···탄소 중립 '빨간불'",
- 'https://www.youtube.com/watch?v=-ABXsm-0zNM
- (6) Kim, J. I., Kim, Y. S., Kim, I. S. and Kim, J. S., 2011, "Modeling and Power Prediction of Piezoelectric Material-Based Energy Harvesting Device," *Proceedings of the KSME spring conference*, pp. 193~198.
- (7) Pozzi, M. and Zhu, M., 2011, "Plucked Piezoelectric Bimorphs for Knee-Joint Energy Harvesting: Modelling and Experimental Validation," *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 5
- (8) Lee, S.Y., and Choi, Y.M., 2020, "Piezoelectric Energy Harvesting Principles and Materials,"Polymer Science and Technology, Vol. 31, No. 6, pp. 484~489.
- (9) Park, B.K., and Paik, J.H., 2020, "Development and Evaluation of Broadband Piezoelectric Harvesters using a Cantilever-Type Module," Journal of Sensor Science and Technology, Vol. 29, No. 4, pp. 261~265.
- (10) ANSI/IEEE Std 176-1987, 1987, IEEE standard on piezoelectricity, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, pp. 7~10.
- (11) Lim, J. I. and Kim, B. I., 2005, "Evaluation Techniques for Material Properties and Characteristic of Piezoelectric Ceramics," *Ceramist*, Vol. 8, No. 1, pp. 50-56.
- (12) Kim, S. J., Song, Y. W., Hwang, S. J., Ahn, J. H., Kim, J. h. and Sung, T. H., 2015, "Comparison between Cantilevered and Fixed-Fixed Piezoelectric Energy Harvesters," *In Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, pp. 33-37.
- (13) Kim, C., 2013, Development of New Piezo-composites and a Cantilevered Energy Harvesting System, Kyungpook national university, Daegue, pp. 7~8.
- (14) Lee, S. J., Kim, S. U, and Ham, Y. B., 2013, Trends and Prospects of Piezoelectric Energy Harvesting Technology, KISTI, Daejeon, pp. 19~20.
- (15) Lee, O. S., Kim, K. J. and Lee, J. W., 2003, "Dynamic Compressive Deformation Characteristics of Free-Cutting Brass And Yellow Brass at High Strain Rates," *In Proceedings of the KSME spring Conference*, pp. 107~112.
- (16) Matweb, "304 Stainless Steel,"
- https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1
- (17) Germano, C., 1971, "Flexure mode piezoelectric transducers. IEEE Transactions on audio and electroacoustics," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Vol. 19, No. 1, pp. 6~12.

- (18) Beck, A. T. and da S. J., C. R., 2011, "Timoshenko versus Euler beam theory: Pitfalls of a deterministic approach," *Structural Safety*, Vol. 33, No. 1, pp. 19~25.
- (19) Shin, K. B., Lee, J. Y., Ryu, B. J. and Lee, S. J., 2007, "A study on flexural behaviors of sandwich composites with facesheets of unequal thickness," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 2, pp. 201~210.
- (20) Park, J. M. and Song, C. H., 2020, "Study on the small sized robots actuator using piezoelectric ceramic bender," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 337~343.
- (21) Hong, S. H., Lee, W. J. and Lee, S. B., 2017, "Optimization of waste cooking oil-based biodiesel production process using central composite design model," *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 559~564.
- (22) Kim, D. S. and Park, Y. S., 2011, "Optimization of air-plasma and oxygen-plasma process for water treatment using central composite design and response surface methodology," *Journal of Environmental Science International*, Vol. 20, No. 7, pp. 907~917.
- (23) Lee, S. H. and Yu, E. J., 2017, "Model Updating of a RC Frame Building using Response Surface Method and Multiobjective Optimization," *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 30, No. 1, pp. 39~56.
- (24) Park, S. K., Lee, S. B. and Lee, W. C., 2007, "Goal-Pareto based NSGA-II Algorithm for Multiobjective Op timization," *The Journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 32, No. 11, pp. 1079~1085.
- (25) Kim, D. S., Lee, J. S. and Choi, H. Y., 2013, "Optimization of Stress and Deformation of Culvert Gate by using RSM and NSGA-II," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 27~32.