



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

건물에너지 절감을 위한 저온도차
발전 기술 적용 및 화이버 광학
집광에 관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지工學科

金元植

2017年 2月



건물에너지 절감을 위한 저온도차 발전 기술 적용 및 화이버 광학 집광에 관한 연구

指導教授 千 院 基

金 元 植

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017年 2月

金元植의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 林 常 薰

委 員 _____ 玄 俊 豪

委 員 _____ 千 院 基



濟州大學校 大學院

2017年 2月

A study on LTD power generation and
fiber optic solar lighting for Building
energy conservation

Kim Won Sik

(Supervised by Professor Wongee Chun)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2017.02.

This thesis has been examined and approved

.....
Thesis Director, Wongee Chun, Prof. of Nuclear and Energy Engineering
.....
.....
.....

.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	IV
LIST OF TABLES	VIII
SUMMARY	IX
I. 서 론	1
1. 폐열을 활용한 저온도차 발전 기술	1
2. 화이버 광학 집광 시스템	3
II. 이론적 배경	4
1. 스텔링 엔진	4
1.1 스텔링 사이클	4
1.2 스텔링 엔진의 체적 및 압력 변화	5
1.3 이상적인 스텔링엔진의 효율	10
1.4 스텔링 엔진의 종류 및 특성	12
2. 가돌리늄 발전 시스템	16
2.1 가돌리늄의 역사	16
2.2 가돌리늄의 물리적 성질	16
2.3 가돌리늄의 기술적 적용	17
2.4 자력의 단위	17
3. TENG(triboelectric nanogenerator)	19
3.1 TENG 연구 사례	19

4. 화이버 광학 집광	21
4.1 광 에너지	21
4.2 광 에너지의 단위	22
4.3 자연채광 시스템(Daylighting System)	24
4.4 태양 위치의 천문학적 계산	28
Ⅲ. 저온도차 발전 기술	30
1. 실험장치 구성	30
1.1 저온도차 발전 장치 구성 ; 저온도차 스텔링엔진	30
1.2 저온도차 발전 계측 장비 구성	34
1.3 저온도차 발전 장치 구성 ; 가돌리늄 발전장치	36
1.4 저온도차 발전 장치 구성 ; TENG(Triboelectric nanogenerator)	39
2. 실험방법	41
2.1 Mechanical power	41
2.2 Electrical power	45
2.3 TENG(triboelectric nanogenerator)	49
3. 실험결과 및 고찰	53
3.1 Mechanical power ; 저온도차 스텔링엔진	53
3.2 Mechanical power ; 가돌리늄 발전장치	61
3.3 Electrical power ; 저온도차 스텔링엔진	67
3.4 Electrical power ; 가돌리늄 발전장치	68
3.5 TENG의 성능 측정	71
4. 소결론	80

IV. 화이버 광학 집광 시스템	82
1. 화이버 광학 집광 시스템 장치 구성	82
1.1 화이버 광학적 집광 시스템 ; 제어부	82
1.2 화이버 광학적 집광 시스템 ; 센서부	84
1.3 화이버 광학적 집광 시스템 ; 집광부	87
1.4 화이버 광학적 집광 시스템 ; 전송부	90
1.5 데이터계측 장치	91
2. 실험방법	94
3. 실험결과 및 고찰	96
4. 전력요금 비교	98
5.소결론	102
V. 결 론	103
참 고 문 헌	105
감 사 의 글	110

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Idealized Stirling cycles.	
(a) A pressure/volume graph	
(b) A temperature/entropy graph	4
Fig. 2. The relationship between total $V_t, V_o, A, B, \alpha, \phi, \tau, \omega,$ and θ	7
Fig. 3. V-type Alpha engine	13
Fig. 4. β type Stirling engine	14
Fig. 5. γ type Stirling engine	15
Fig. 6. Structure of Daylighting System	25
Fig. 7. Photograph of LTD Stirling engine [MM-7]	31
Fig. 8. Photograph of LTD Stirling engine [KS90]	31
Fig. 9. Photograph of LTD Stirling engine [KS90Twin]	32
Fig. 10. Photograph of hot plate	33
Fig. 11. Photograph of k-type thermocouple	34
Fig. 12. Photograph of data logger	35
Fig. 13. 1cm x 1cm x 1cm gadolinium	37
Fig. 14. Photograph of refrigerating bath circulator	38
Fig. 15. Fabrication and assembly of TENG part :	
(a) Al electrodes fabricated by laser cutting of 1mm thick Al plate	
(b) Al electrodes attached to acrylic disk	
(c) triboelectric surfaces comprised of Al electrode(disk-1) and FEP(disk-2)	39
Fig. 16. TENGs integrated with a LTD heat engine :	
(a) an actual photo of LTD heat engine integrated with a TENG	
(b) a schematic diagram of the experimental system	
(c) a close view of the disks arrangement (of TENG-1)	40
Fig. 17. System design for mechanical power calculation	42
Fig. 18. System for mechanical power calculation	42
Fig. 19. Position of hot water and cold water in gadolinium generator	44
Fig. 20. System for mechanical power calculation in gadolinium generator	44
Fig. 21. Schematic of MM-7 electric generator	46
Fig. 22. Experimental output using MM-7 engine	46
Fig. 23. Schematic of gadolinium electric generator	48

Fig. 24. Gadolinium generator with magnetic shield	48
Fig. 25. A schematic of TENG operation in sliding mode	50
Fig. 26. Experimental layout of TENG driven by a LTD heat engine placed on an electric plate heater	51
Fig. 27. Two TENGs integrated into LTD heat engine	52
Fig. 28. Output of Stirling engine against temperature difference	54
Fig. 29. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)	56
Fig. 30. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)	56
Fig. 31. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)	58
Fig. 32. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)	58
Fig. 33. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single)	59
Fig. 34. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single)	60
Fig. 35. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)	62
Fig. 36. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)	64
Fig. 37. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	65
Fig. 38. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	66
Fig. 39. Electric power using the LTD heat engine	67
Fig. 40. Voltage change over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	68
Fig. 41. Current change over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	69
Fig. 42. Electrical power change over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	69
Fig. 43. Performance of simplified TENG operating in sliding mode :	
(a) Simple experimental kit composed of two Al electrodes and a FEP film	
(b) Forward and backward sliding for electricity generation	
(c) V_{oc} produced	
(d) V_{oc} rectified	72
Fig. 44. Performance of TENG driven by a LTD heat engine:	
(a) V_{oc}	
(b) I_{sc}	73
Fig. 45. Voltage-input resistance curve of the TENG	74

Fig. 46. Output voltage and current of TENG-2 operating in vertical contact-separation mode:	
(a) A schematic diagram of experimental system	
(b) V_{oc}	
(c) I_{sc}	75
Fig. 47. Output voltage and current of TENG-1 operating in(rotation) sliding mode:	
(a) A schematic diagram of experimental system	
(b) V_{oc}	
(c) I_{sc}	76
Fig. 48. Integrated output (V_{oc}) of two TENGs connected in series:	
(a) Connection scheme of two TENGs for output measurement	
(b) V_{oc}	
(c) I_{sc}	77
Fig. 49. Charging a capacitor by TENG-1 and TENG-2:	
(a) Actual electric circuit	
(b) Circuit diagram	
(c) TENG-1	
(d) TENG-2.....	78
Fig. 50. A capacitor being charged by two TENGs and discharged through an LED.....	79
Fig. 51. Schematic diagram of the solar tracker and configuration of components.....	83
Fig. 52. Feedback device composed of eight CdS sensors and two lenses.....	84
Fig. 53. Position of CdS sensors.....	85
Fig. 54. Side view of the feedback device.....	85
Fig. 55. Change of focal location of sensors with varying angles of incoming solar radiation : (a) 0° , (b) 0.5° , (c) 1° , (d) 1.5° , (e) 2°	86
Fig. 56. Solar tracking system using parabolic dish.....	88
Fig. 57. Detailed geometries of the primary concentrator, the second reflector and the homogenizer.....	89
Fig. 58. Solar tracking system using Fresnel lens.....	90
Fig. 59. Fiber optical cable.....	91
Fig. 60. Agilent 34970A data logger.....	92
Fig. 61. LP PHOT 01 illuminance sensor.....	93
Fig. 62. Solar tracking system using Fresnel lens and parabolic dish	95

Fig. 63. Experimental layout in the test room..... 95
Fig. 64. Illuminance measured at different times..... 96
Fig. 65. Illuminance measured at different times (key measurement points)·· 96

LIST OF TABLES

Table 1. Luminous flux of general light sources	22
Table 2. A classification of collectors in light transport systems	27
Table 3. Specifications of LTD Stirling engines	32
Table 4. LTD engine torque(200mg)	53
Table 5. Performance measurement of Stirling engine(MM-7)	55
Table 6. Performance measurement of Stirling engine(Twin)	57
Table 7. Performance measurement of Stirling engine(Single)	59
Table 8. Torque by mass	61
Table 9. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)	62
Table 10. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)	63
Table 11. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	64
Table 12. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	66
Table 13. Performance measurement of gadolinium electric generator ($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	70
Table 14. Annual weather data (1981~2010)	98
Table 15. Production costs and maintenance costs	99
Table 16. Electric charges	100
Table 17. Total costs	101
Table 18. Measurement data of parabolic dish and Fresnel lens	102

SUMMARY

Global energy consumption is increasing by the day, but the limited resources of major fossil fuels such as petroleum, coal and natural gas are expected to be depleted in the near future and likely to cause environmental disasters if no sustainable resources are developed in near future. In order to secure stable energy supply, strenuous efforts are made around the world exploiting eco-friendly energy resources in parallel with encouraging the efficient use of energy in all sectors of society.

Low-temperature differential (LTD) power generation has the potential to reclaim much of the energy consumed in buildings via harnessing various kinds of unused waste heat discarded by outdoor units of HVAC systems, cooling towers and heat pipes in buildings. On the other hand, much energy could be saved in buildings if solar energy is wisely utilized where applicable. As studied in the latter part of this work, installation of fiber optic solar lighting could greatly reduce the energy consumption in buildings by reducing lighting loads.

1. LTD power generation

Research on LTD power generation was carried out by using power generation via an LTD Stirling engine and power generation using Gadolinium with triboelectric nanogenerators (TENGs). Especially, comparisons were made calculating the mechanical output against temperature differences and varying weights for a number of LTD Stirling engines. Of these, MM-7 engine showed the highest mechanical output of 2.98mW at $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$. When an AC motor was used, electric power of 0.09mW~0.12mW was measured. In the case of the Gadolinium Magnetic Generator, by conducting the experiment in the same manner, a mechanical output of about 29.4mW was observed at $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$. This is much higher than those produced by LTD Stirling engines.

In the case of TENG, when both methods were applied at the same time, the resulting voltage was as high as 105V. Based on these results, it can be concluded that there are much room for utilizing waste heat using LTD engines in addition to those used here in connection with TENGs.

2. Fiber optic solar lighting system

For fiber optic solar lighting, two different types of solar concentrators (each mounted on a double-axis solar tracker) were used and their performance were compared; a parabolic dish and Fresnel lens. Illuminances of 400 ~ 600 lux were measured for the case of Fresnel lens, which are comparatively higher those by the parabolic dish of 100 ~ 200 lux. It is interesting to not about 5.9 million won of electric bill could still be saved by hiring the latter over the period of 30 years implicating the cost effectiveness of present systems.

I. 서 론

주요 화석연료인 석유, 석탄, 천연가스등의 한정된 자원은 가까운 미래에 고갈 될 전망이며 온실가스 배출 등 각종 환경문제를 일으킨다. 이에 에너지문제는 전 세계적으로 커다란 사회적 이슈가 되었다. 한편 세계 에너지 총 사용량은 날로 증가하는 판세로, 전 세계적으로 새로운 대체에너지의 개발에 앞 다투어 각축을 벌이는 실정이다. 이에 안정적인 에너지 확보를 위해서는 지속적으로 사용이 가능한 친환경에너지 자원의 연구 및 개발이 필요하며 효율적인 에너지의 사용이 제고된다.

현대도시의 건물들은 점차대형화가 되고 있으며 이에 따른 HVAC(heating, ventilation, air conditioning)시스템 및 조명에 투입되는 전력량의 증가로 인해 건물에서 사용되는 에너지량은 점차 증가 할 것으로 전망된다. 또한, 조명에 사용되는 에너지는 건물에서 사용되는 총 건물에너지 사용량의 28%인 것을 고려 할 때 조명에 사용되는 에너지 감축을 통하여 얻을 수 있는 에너지절감 효과는 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 건물에너지 절감을 위한 저온도차 발전 기술과 태양에너지를 근간으로 하는 화이버 광학 집광에 관한 내용을 중점적으로 다루었는데, 전자는 건물에 설치된 실외기, 냉각탑, 열 배관 등 활용되지 못하고 방출되는 각종 폐열을 이용하여 전기에너지를 생산함으로써 건물에 사용되는 에너지를 충당할 수 있으며, 후자는 태양 빛을 건물 내부로 전송시킴으로써 난방에너지 절감 및 조명에 사용되는 부하를 충당함으로써 건물에서 소모되는 에너지를 효율적으로 절감 하므로 금전적인 효과뿐만 아니라 각종 환경문제에도 도움이 될 수 있을 것이다.

1. 폐열을 활용한 저온도차 발전 기술

저온 폐열로부터 전력을 생산하는 기술은 화석연료를 대체할 수 있는 방안으로써 관심은 점차 증가되어지고 있다. 폐열을 전력이나 기계적 일로 변환하는 방식으로는 저온도차스털링엔진(LTD stirling engine), 가돌리늄(Gadolinium), 열전 소자(Thermoelectric) 및 형상기억합금(Shape memory alloy) 등을 이용하는 기

술 방안이 있으며, 이 방식은 시스템 내의 온도차에서 전력을 얻어낼 수 있다. 위의 시스템들을 건물에 설치된 실외기, 냉각탑, 열 배관 등 폐열이 발생하는 부분에 적용하여 열에너지를 전기에너지로 회수한다면 건물자체에서 사용되는 전력을 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

스털링엔진은 19세기 초반 영국의 Robert Stirling(공학박사)에 의해 고안된 열 공기엔진(Hot Air Engine)으로, 스텔링 사이클을 기반으로 닫힌 공간 안의 작동가스를 서로 다른 온도에서 압축·팽창시켜 열에너지를 기계적 운동에너지로 변환하는 열기관이다. 1980년대 초반 KOLIN이 44°C 의 온도차에서 작동하는 스텔링엔진을 개발한 이래로 1990년대에는 SENFT가 0.5°C 차에서 작동하는 AN ULTRA LOW TEMPERATURE DIFFERENTIAL STIRLING 엔진을 개발하였다. 이러한 저온 스텔링엔진은 따뜻한 물, 텔레비전 등 가전기기의 열 또는 사람의 손바닥 체온에서도 작동하며, 작동유체로 공기 또는 이보다 좋은 효율을 얻을 수 있는 수소 또는 헬륨을 사용한다. 스텔링엔진은 일반적으로 외부에서 열원을 공급받아 스텔링엔진의 내부 압력이 변화하게 되고 그 압력 변화로 인해 디스플레이서가 작동하게 되며 방열부에 위치한 파워피스톤이 상·하로 움직이게 되는데, 이러한 과정을 거쳐 열에너지로부터 기계적 에너지를 얻을 수 있게 된다.

본 연구에서는 이러한 저온도차스털링엔진의 특성을 이용하여 온도차에 따른 출력 측정을 진행하여 스텔링엔진의 최대 기계적 출력을 산출하고, AC모터를 이용하여 시간에 따른 온도차와 전기적 출력을 얻어냈다. 또한, 비접촉 슬라이딩 방식과 수직 접촉 분리 방식에서 작동하는 두 가지 다른 방식의 TENG (triboelectric nanogenerator)를 적용하여 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방법을 제시하였으며 TENG가 소형 LTD 열 엔진에 의해 구동 될 때의 출력 특성을 연구하였으며, 이와 가돌리늄을 이용한 발전장치와의 비교분석을 통하여 TM(Thermal to Mechanical energy)발전변환기의 효율 개선 및 개발방안을 재고하고 이를 통한 건물에너지 절감을 모색하였다.

2. 화이버 광학 집광 시스템

현재, 범국가적인 차원에서 온실가스 배출감소와 환경 친화적 에너지의 사용량을 증가를 위해 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령[시행 2015.7.31.] [대통령령 제26316호, 2015.6.15., 일부개정]이 제정되어 청정 자연에너지인 태양에너지를 건축물에 보다 적극적으로 이용하도록 권장되고 있다. 또한, 건물에너지 소비 중 조명에너지에 의해 소비되는 에너지량이 총 에너지 사용량의 28% 인 것을 고려할 때, 조명에너지와 하절기의 냉방부하의 절감으로 인해 기대되는 경제적 효과는 다른 에너지 소비원에 비해 매우 크다고 할 수 있다. 특히, 산업부문의 경우에 에너지 소비량을 감축하는데 한계가 있어 건축물의 에너지 효율성 제고 및 정부차원의 정책 강화와 에너지 효율적인 신재생에너지 시스템 설비가 요구되고 있다.

또한, 인구수의 증가와 더불어 대도시권의 인구밀집 현상 등으로 인해 고층빌딩이나 아파트의 수가 점차 늘어나고 있고, 인접한 건물과 건물사이의 공간이 협소하게 증축되어 태양빛이 실내로 들어오지 못하는 일조권침해가 일어남에 따라 일조권분쟁이 일어나는 실태이다.

이에 본 연구에서는 태양광을 고밀도로 집광하여 햇빛의 유입이 어려운 환경 또는 건축물의 실내로 유입시킬 수 있도록 고정밀도의 화이버 광학 집광시스템인 태양추적장치 개발하였으며 집광된 빛을 광섬유를 이용해 자연채광에 활용하였으며, 또한 태양추적장치의 집광부를 Parabolic Dish(reflector)와 Fresnel Lens 2가지로 나누어 서로 비교해보며 실험을 진행하였다. 이를 통하여 건물의 난방 및 전력에 투입되는 에너지를 감축할 수 있는데 전자는 외부 실외의 빛을 내부로 전송함으로써 실내의 온도를 높이게 되어 이루어 질 수 있으며 후자는 건물에 사용되는 인공조명의 역할을 대신 자연채광을 통하여 수행함으로써 이루어질 수 있다. 본 연구에서는 자연채광장치를 사용했을 시 얻을 수 있는 이러한 효과들을 바탕으로 건물에너지의 절감을 위한 화이버 광학 집광에 관한 연구를 진행하였다.

II. 이론적 배경

1. 스텔링 엔진

1.1 스텔링 사이클

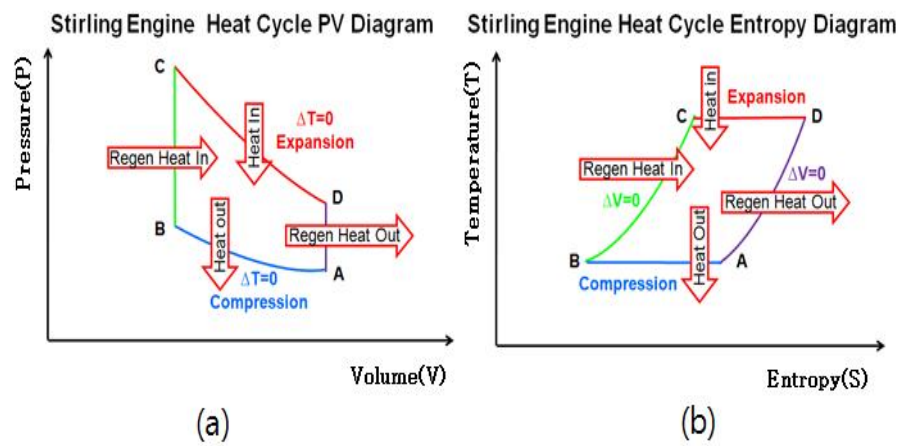


Fig. 1. Idealized Stirling cycles. (a) A pressure/volume graph (b) A temperature/entropy graph

스텔링엔진은 2개의 등온과정과 2개의 정적과정으로 이루어지며 스텔링사이클은 다음과 같다.

1. 등온압축과정 a-b ; 작동유체로부터 외부로 열전달이 이루어지는 과정으로 냉각된 작동유체가 수축하면서 파워피스톤이 하강하게 된다.
2. 정적가열과정 b-c ; 작동유체가 재생기로부터 열량을 받는 과정으로 가열부에 작동유체가 모이면서 가열된다.
3. 등온팽창과정 c-d ; 작동유체가 외부 열원으로부터 열량을 받는 과정으로 실린더 내부 작동유체는 가열부에서 팽창하게 되고 피스톤을 상승시킨다.
4. 정적방열과정 d-a ; 작동유체로부터 재생기로 열전달이 이루어지는 과정으

로 방열부에 모인 작동유체가 냉각된다.

1.2 스텔링 엔진의 체적 및 압력 변화

이론적 해석에서는 실제 스텔링엔진의 상황을 그대로 묘사할 수 없다. 그러므로 스텔링엔진의 열역학적 해석을 위해서는 다음과 같은 가정을 한다.

- i) 작동유체는 이상기체이다.
- ii) 유동 저항이 없고 재생기 손실은 없다.
- iii) 열교환 과정에서 전도에 의한 열손실이 수반되지 않는다.
- iv) 등은 팽창 및 압축 과정에서 온도 강하는 일어나지 않는다.
- v) 팽창 공간과 압축공간의 체적은 시간에 따라 정현파적으로 변화한다.
- vi) 기계적인 마찰은 존재하지 않는다.

스텔링 엔진 팽창공간의 체적과 압축공간의 체적은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_e = \frac{1}{2} V_o (1 + \cos \alpha) \quad (1)$$

$$V_c = \frac{1}{2} \omega V_o [1 + \cos (\alpha - \phi)] \quad (2)$$

여기서 팽창공간의 최대체적, 압축공간의 최대체적, 크랭크각, 압축공간의 상지연 각은 각각 V_e , V_c , α , ϕ 이다.

또한 데드스페이스(Dead space) V_s 는 다음과 같다.

$$V_s = X V_e \quad (3)$$

사이클 기간 중 순간 작동유체의 질량은 기체 상태방정식 $PV = mRT$ 에서 구할 수 있으며 팽창공간 V_e , 압축공간 V_c , 데드스페이스 V_s 에 기체 상태방정식을 적

용하면

$$m_e = \frac{PV_o}{RT_o}, \quad m_c = \frac{PV_c}{RT_c}, \quad m_s = \frac{PV_s}{RT_s} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 총 질량 m_t 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_t = \frac{P}{R} \left(\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_s}{T_s} \right) = \frac{P}{R} \sum_i \frac{V_i}{T_i} \quad (5)$$

또는

$$\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_s}{T_s} = \frac{m_t R}{P} = \frac{CV_e}{2T_c P} \quad (6)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이 식에서 $\frac{C}{P}$ 를 구하면

$$\frac{C}{2P} = \frac{(1 + \cos \alpha)T_c}{2T_e} + \frac{\omega[1 + \cos(\phi - \alpha)]T_c}{2T_c} + \frac{V_s}{V_o} \frac{T_c}{T_s} \quad (7)$$

이며, 위 식을 온도비 $\tau = \frac{T_c}{T_e}$ 와 환산 체적비 $S = \frac{V_s}{V_o} \frac{T_c}{T_s}$ 를 이용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{C}{P} &= \tau \cos \alpha + \omega \cos(\alpha - \phi) + \tau + \omega + 2s \\ &= (\tau + \omega \cos \phi) \cos \alpha + \omega \sin \phi \sin \alpha + \tau + \omega + 2s \end{aligned} \quad (8)$$

와 같은 관계가 성립된다.

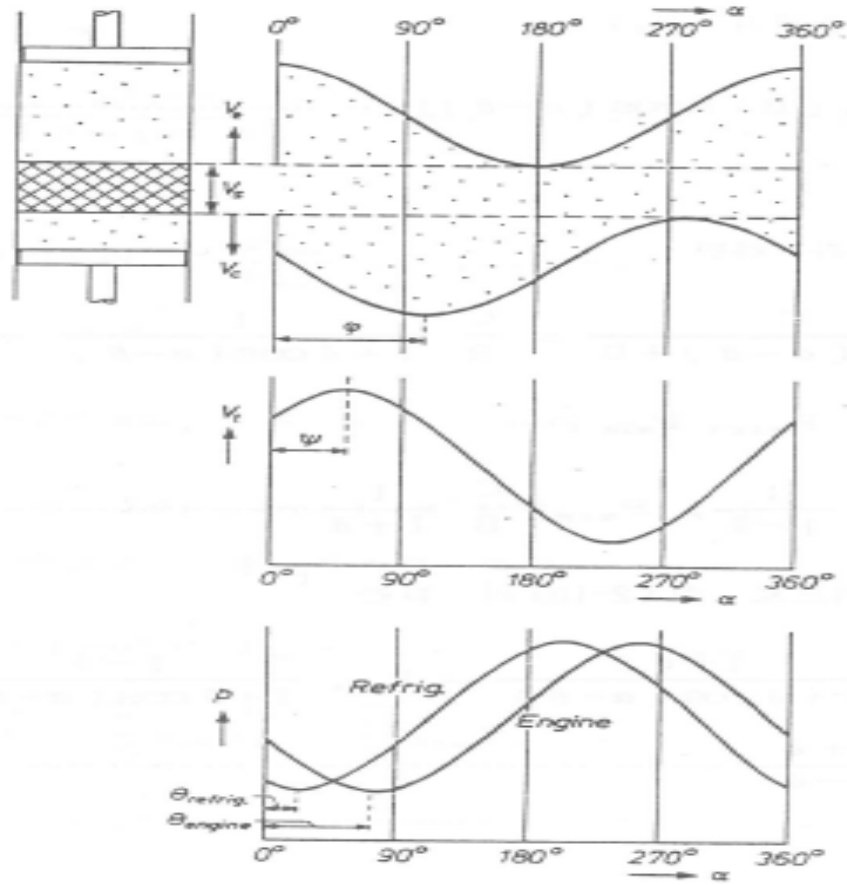


Fig. 2. The relationship between total V_t , V_o , A , B , α , ϕ , τ , ω , and θ

Fig. 2 에서 θ 와 A 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan\theta = \frac{\omega \sin\phi}{\tau + \omega \cos\phi} \quad (9)$$

$$A = [(\tau + \omega \cos\phi)^2 + \omega^2 \sin^2\phi]^{\frac{1}{2}} = [\tau^2 + \omega^2 + 2\tau\omega \cos\phi]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

또한

$$\tau + \omega \cos\phi = A \cos\theta \quad (11)$$

$$\omega \cos \phi = A \sin \theta \quad (12)$$

따라서 $\frac{C}{P}$ 는 다음과 같이 표시된다. 여기서 $B = \tau + \omega + 2s$ 이다.

$$\frac{C}{P} = A \cos(\alpha - \theta) + \tau + \omega + 2s \quad (13)$$

$$\frac{2m_t R T_c}{P V_o} = A \cos(\alpha - \theta) + B$$

위 식 (13)에서 총체적 V_t 은 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$V_t = \frac{1}{2} V_o [B + A \cos(\alpha - \theta)] \quad (14)$$

또한 $A/B = \delta$ 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{C}{A \cos(\alpha - \theta) + B} = \frac{C}{B} \frac{1}{1 + \delta} \quad (15)$$

따라서 P_{\max} 과 P_{\min} 은

$$P_{\max} = \frac{C}{B} \frac{1}{1 - \delta}, \quad P_{\min} = \frac{C}{B} \frac{1}{1 + \delta} \quad (16)$$

로 나타낼 수 있다. 그러므로 식 (15)에서 순간압력을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= P_{\min} \frac{1 + \delta}{1 + \delta \cos(\alpha - \theta)} \\ &= P_{\max} \frac{1 - \delta}{1 + \delta \cos(\alpha - \theta)} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 δ 는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{A}{B} = \frac{(\tau^2 + \omega^2 + 2\tau\omega \cos\phi)^2}{\tau + \omega + 2s} \quad (18)$$

또한 압력비는

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \quad (19)$$

이 된다.

1.3 이상적인 스텔링엔진의 효율

재생기는 스텔링엔진의 효율에 큰 영향을 미치며 일반적으로 다공체가 사용된다. 이러한 스텔링엔진의 재생기를 사용했을 때에는 재생기 튜브를 통과시의 전도 손실, 매트릭스를 통한 전도 손실, 재가열 손실, 압력 강하 손실 등 여러 손실이 일어난다. 이상기체를 작동유체로 사용한 경우 b-c과정의 Q_A 와 d-a과정의 Q_B 는 다음과 같다.

$$Q_A = mc_V \Delta T = Q_B \quad (20)$$

여기서 m , c_V , ΔT 는 각각 작동유체의 질량, 정적비열, 온도차를 나타낸다. Q_i 은 등온팽창과정 중 흡수하는 열을 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_i = mRT_H \ln r \quad (21)$$

$r = V_4/V_3$ 으로 압축비를 나타내며, R 은 기체상수이다. a-b 등온압축과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_o = mRT_L \ln r \quad (22)$$

재생기를 사용하지 않고 2원자 기체인 수소 등의 작동유체를 사용하였을 경우 열효율은 다음과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 2원자 기체의 C_v 는 $\frac{5}{2}R$ 이다.

$$\eta_{ts} = \frac{Q_i - Q_o}{Q_i + Q_A} = \frac{\Delta T \ln r}{T_H \ln r + \frac{5}{2} \Delta T} \quad (23)$$

어떠한 형식으로도 에너지의 손실이 없을 때의 이상적인 스텔링엔진의 효율

은 카르노 효율과 같아지므로,

$$\eta = \frac{W}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \quad (24)$$

로 나타낼 수 있으며 절대값을 무시하면

$$\eta_{tsr} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (25)$$

와 같이 이상적인 재생기를 갖는 스텔링사이클은 이론적으로 카르노사이클에 가장 근접한 이상적인 열기관으로써 그 효율은 카르노사이클의 효율과 같으며 이를 통하여 재생기가 얼마나 열효율에 큰 상관관계를 갖는지 알 수 있다.

1.4 스텔링 엔진의 종류 및 특성

1816년 스코틀랜드의 로버트 스텔링이 스텔링엔진을 고안한 이후로부터 스텔링엔진은 다양한 형태로 개발되었으며 대표적인 형태로는 실린더의 배열 형태에 따라 알파(α), 베타(β), 감마(γ)타입 스텔링엔진 등으로 구분할 수 있으며, 동력전달 구조에 따라 Kinematic엔진 또는 Free piston 엔진으로 구분할 수 있다.

※ 실린더의 배열 형태에 따른 구분 및 특성

- 알파타입 스텔링엔진 : 독립된 2개의 파워피스톤 구조
- 베타타입 스텔링엔진 : 디스플레이서와 파워피스톤이 동일 축 선상에서 하나의 밀폐된 실린더 안에 위치
- 감마타입 스텔링엔진 : 디스플레이서와 파워피스톤이 독립된 구조

※ 동력전달 구조에 따른 구분 및 특성

- Kinematic 엔진 : 피스톤의 선형운동을 회전력으로 변환하여 동력을 전달하는 구조
- Free piston 엔진 : 회전부가 없으며 파워피스톤-질량-댐퍼 시스템에 의해 선형적으로 구동하는 구조

이러한 스텔링엔진들은 각기 다른 구동방식으로 작동하며 일반적으로 파워피스톤, 실린더, 디스플레이서, 가열부, 방열부, 재생기, 휠 및 크랭크샤프트 등으로 구성되어있다. 스텔링엔진은 2번의 등온과정과 2번의 정적과정 등 총 4가지 과정을 거치며 작동하게 되는데 그 효율은 스텔링엔진의 종류에 따라 상이하며 또한, 작동유체에 따라 달라질 수 있다.

-알파(a)타입 스텔링엔진

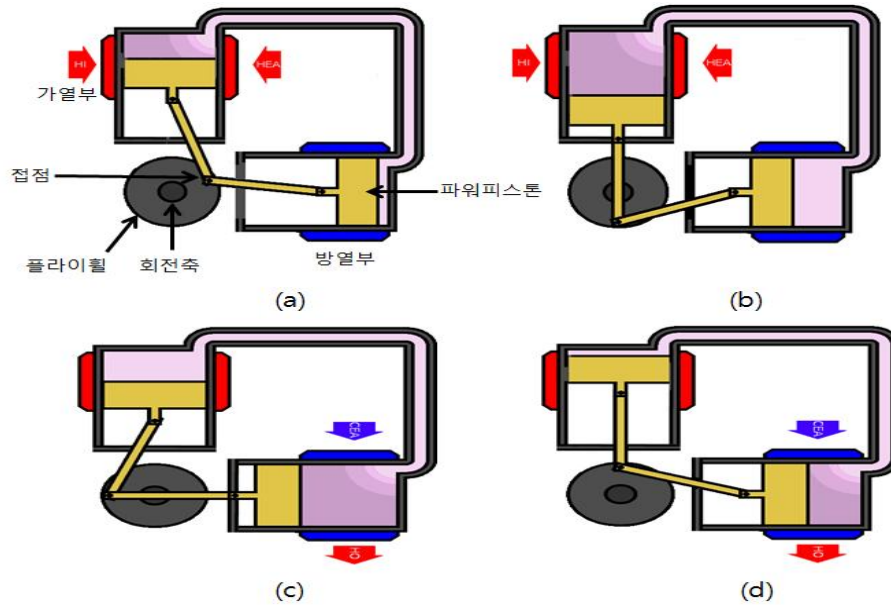


Fig. 3. V-type Alpha engine

알파(a)타입 스텔링엔진은 가장 기초적인 스텔링엔진이며 두 개의 파워피스톤과 가열부, 방열부, 휠 및 재생기 등으로 구성된다. 두 개의 파워피스톤은 플라이휠에 연결되어 있으며 그 위상차는 90°이다. 작동유체는 가열부와 방열부간의 열교환으로 팽창과정과 수축과정을 거치게된다. 알파(a)타입 스텔링엔진의 작동 과정은 다음과 같다.

1. 등온팽창과정 a-b ; 작동유체가 외부 열원으로부터 열량을 받는과정으로 실린더 내부 작동유체는 가열부에서 팽창하게 되고 피스톤을 상승시킨다.
2. 정적방열과정 b-c ; 작동유체로부터 재생기로 열전달이 이루어지는 과정으로 방열부에 모인 작동유체가 냉각된다.
3. 등온압축과정 c-d ; 작동유체로부터 외부로 열전달이 이루어지는 과정으로 냉각된 작동유체가 수축하면서 파워피스톤이 하강하게 된다.
4. 정적가열과정 d-a ; 작동유체가 재생기로부터 열량을 받는과정으로 가열부에 작동유체가 모이면서 가열된다.

-베타(β)타입 스텔링엔진

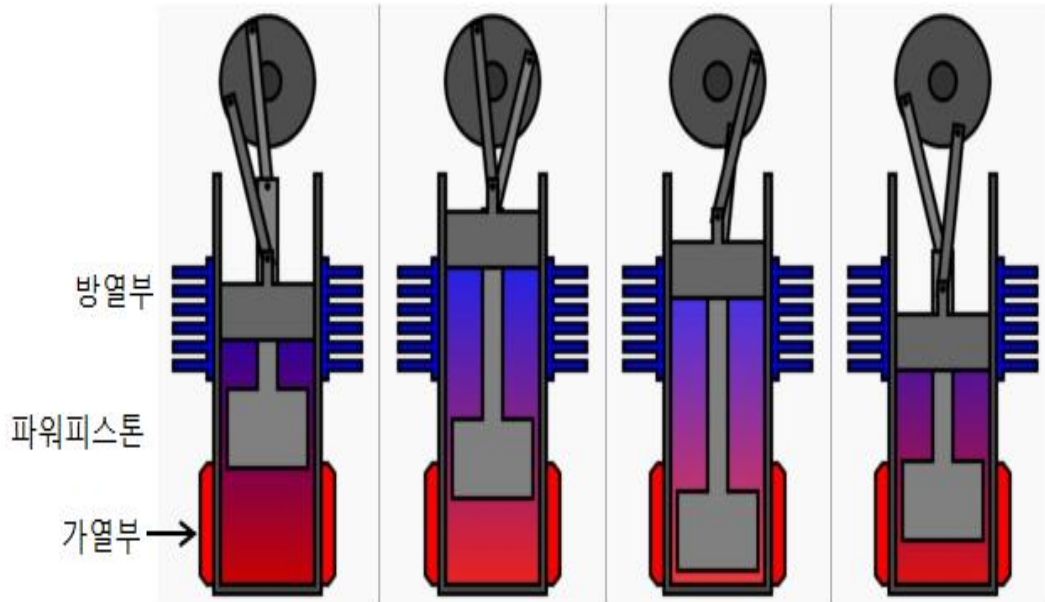


Fig. 4. β type Stirling engine

베타(β)타입 스텔링엔진은 파워피스톤과 디스플레이서, 가열부, 방열부, 휠 등으로 구성 되어있는데 디스플레이서와 파워피스톤은 동일 축 선상에서 하나의 밀폐된 실린더 안에 위치한다. 실린더 내부의 작동유체는 상단과 하단의 가열부와 냉각부에서 압축·팽창 등의 과정을 거치며 파워피스톤과 디스플레이서를 상·하로 움직이게한다. 베타(β)타입 스텔링엔진의 작동 과정은 Fig. 4 와 같다.

-감마(γ)타입 스텔링엔진

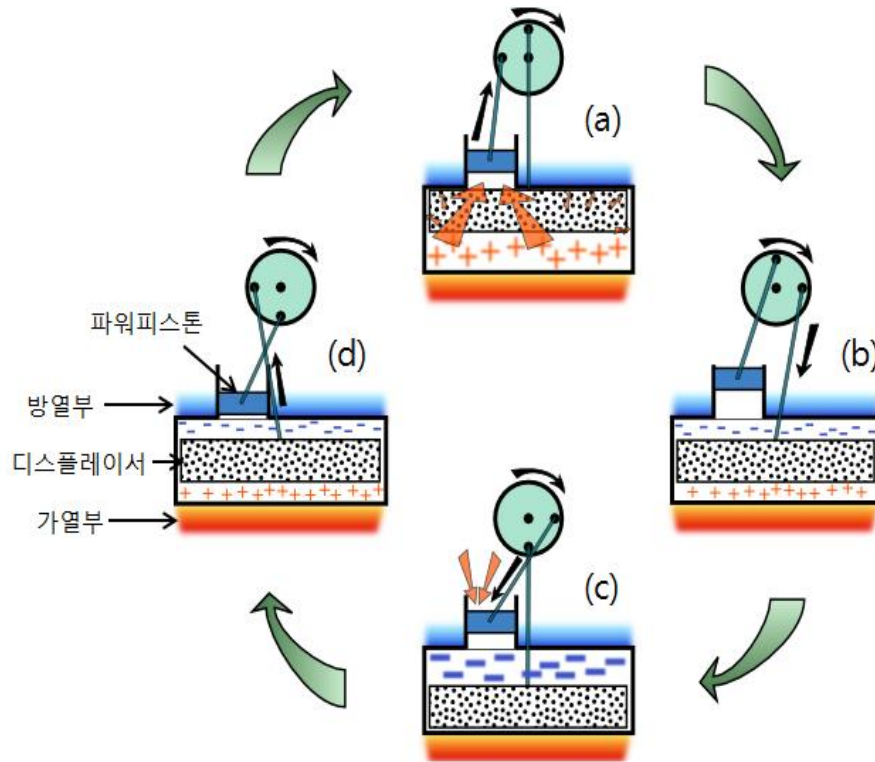


Fig. 5. γ type Stirling engine

감마(γ)타입 스텔링엔진은 디스플레이서와 파워피스톤이 각기 다른 실린더에 위치한 형태인데 파워피스톤은 방열부인 상판측에 위치하며 디스플레이서는 가열부와 방열부 사이 실린더 내부에 위치한다. 구조적으로 베타형에 비해 디스플레이서의 크기가 크며, 파워피스톤은 소형화하였다. 또한, 가열부와 냉각부의 면적을 늘려 파워 피스톤의 행정 거리를 줄였다. 감마타입 스텔링엔진은 본 연구에서 사용된 타입으로써 낮은 온도 차이에서도 작동이 가능한 점을 고려하여 각종 공장이나 가정에서 나오는 폐수나 배기가스를 활용한 발전, 컴퓨터 CPU의 쿨러 및 과학교육기자재 등 다양한 방면으로의 이용이 가능하다.

2. 가돌리늄 발전 시스템

2.1 가돌리늄의 역사

가돌리늄은 1800년대 스위스의 화학자인 드 마리낙(Jean Charles Galissard de Marignac)에 의해 처음 발견되었으며 그 과정을 간략히 살펴보면 다음과 같다. 1787년 스웨덴의 육군 장교가 스웨덴의 이테르비(Ytterby) 마을에서 무거운 검정색 광석을 발견하였는데, 이테르바이트(Ytterbite)라고 불렀으며, 그 후 핀란드 화학자 가돌린(Johan Gadolin)이 1789년에 이테르바이트에서 새로운 금속 산화물 이트리아(Yttria, 산화이트륨 Y_2O_3)를 발견하였다. 이러한 가돌린을 기리기 위해 1800년에 클라프로트(Martin Heinrich Klaproth)는 ‘이테르바이트’를 ‘가돌리나이트(gadolinite)’로 바꾸어 불렀다.

그 후 1880년에 스위스 화학자 드 마리낙(Jean Charles Galissard de Marignac)은 세라이트(cerite) 광석에서 얻은 희토류 원소의 혼합 산화물인 디디미아(didymia)와 가돌리나이트에서 새로운 스펙트럼 선들을 관찰하였으며, 얼마 후에 실제로 디디미아로부터 새로운 금속원소의 산화물을 분리하였다. 그는 가돌린의 이름을 따서 가돌리니아(gadolinia)로 명명하였다. 새로운 원소 자체는 1886년에 프랑스 화학자 부아보드랑(Paul Emile Lecoq de Boisbaudran)이 가돌리니아에서 처음 분리하였으며, 이를 가돌리늄(gadolinium)으로 명명하였다.

높은 순도의 금속 가돌리늄은 1935년에야 처음으로 얻어졌는데, 이후 가돌리늄이 실온 부근에서 강자성을 갖는다는 것이 발견되었다.

2.2 가돌리늄의 물리적 성질

가돌리늄은 연성과 전성이 있는 은백색의 희토류 금속으로써 공기 중에서는 표면이 쉽게 산화되어 옅은 노란색을 띤다. 가돌리늄의 녹는점은 $1313^{\circ}C$, 끓는점은 $3273^{\circ}C$ 이며, $25^{\circ}C$ 에서의 밀도는 $7.90g/cm^3$ 이다. 실온에서 육방조밀격자(hcp) 구조를 하는 α -형으로 존재하는데, 가열하면 $1235^{\circ}C$ 에서 체심입방(bcc) 구

조를 갖는 β -형으로 전환된다.

20°C 이하에서는 강자성(ferromagnetic, 외부에서 자기장을 걸면 자석이 되고 자기장을 제거한 후에도 자석 성질이 남아있는 특성)을 띠나, 이보다 높은 20°C 이상의 온도에서는 강한 상자성(paramagnetic, 외부에서 자기장을 걸면 약한 자석의 성질을 띠며 자기장을 제거하면 자석 성질이 없어지는 특성)을 띤다. 또한, 자기장 속으로 들어가면 온도가 올라가고 자기장 밖으로 나오면 온도가 내려가는 자기열량 효과(magnetocaloric effect)를 보인다.

2.3 가돌리늄의 기술적 적용

가돌리늄은 널리 사용되지는 않으나 몇몇 특정한 분야에서 소량씩 사용되는데, 그 중 하나는 의료 진단용 자기공명영상(MRI) 촬영에서 암과 같은 이상 조직의 이미지를 선명하게 보이도록 하는 조영제로 사용하는 것이다.

또한, 가돌리늄이 갖고 있는 열 중성자 흡수 성질을 이용하여 원자로와 중성자 투과검사법에서 중성자 차폐물 등으로 사용되며 캔두형 원자로에서 급히 핵반응을 감속시킬 시에도 사용된다. 그리고 합금첨가제로써 철(Fe)과 크로뮴(Cr)의 고온 내산화성과 가공성을 향상시키기 위한 재료로도 사용된다.

가돌리늄-규소-저마늄 합금(Gd₅Si₂Ge₂)은 실온에서 큰 자기열량 효과(magnetocaloric effect: 자기장의 변화에 따라 온도가 변하는 것)를 보이고 있어 실온 자기 냉각에 유용하게 사용될 수 있으며, 가돌리늄 화합물은 브라운관 컬러 TV 등에서 녹색 형광체로 사용되며, 가돌리늄 이트륨 가넷(Gd:Y₃Al₅O₁₂)은 전자 오븐(마이크로파 오븐)에서의 마이크로파 발생 소자에 사용되며, 가돌리늄 갈륨 가넷(GGG, Gd₃Ga₅O₁₂)은 모조 다이아몬드와 광학 부품으로 사용되는 등 다양한 방향으로 기술적인 적용이 되어 사용되어지고 있다.

2.4 자력의 단위

가우스(gauss, 기호 G)는 자기장(B)의 CGS 단위이며 독일의 수학자이자 물

리학자인 카를 프리드리히 가우스의 이름을 땀다. 1 [G]는 1 cm²의 단면에 1 [Mx] 의 자기 선속이 통과하는 자기장이다. 1932년 이전까지는 가우스가 현재는 에르스텝으로 불리는 자기장의 세기를 나타내는 단위로도 쓰였으며 이 용어 변경은 자기유도와 자기장의 세기를 구분하기 위해 도입되었다. 국제단위계에서 자기장의 단위는 테슬라(tesla, 기호 T)이며, 1 [G]는 10⁻⁴ [T]와 같다. 또한, 1 T = 10,000 G 와 같다.

3. TENG(triboelectric nanogenerator)

발전소 및 A/C 시스템을 포함한 전 세계의 산업 플랜트 및 공정에서 엄청난 양의 매우 낮은 온도의 폐열이 매일 생산되는데 이는 발전소의 전환 효율이 일반적으로 30%에 불과하기 때문이며 이 때, A/C 시스템에서 배출되는 열량은 냉각된 공간에서 제거된 열량의 합과 같다. 이 풍부한 에너지원은 지역난방과 열 펌프 용도의 열원으로 직접 사용되고 있지만, 기계적 또는 전기적 발전에는 거의 사용되지 않고 있는 실정이다.

최근 많은 연구원들 및 엔지니어들이 LTD(Low-temperature differential) 열 엔진을 다른 LTD 발전장치의 잠재적인 경쟁시스템으로 바라보고 있으며 관심을 보이고 있는데 예를 들면 형상 기억 합금(SMA), 열 엔진 및 열전(TE)발전기 등이 있다.

3.1 TENG 연구 사례

주위의 에너지를 얻어내기 위한 LTD 엔진 사용의 가능성은 Haneman에 의해 연구되었으며, 콜린(Kolin)은 15°C의 온도차에서 작동 할 수 있는 엔진을 제작했으며, 이는 피스톤 엔진의 역사에서 중요한 업적으로 평가 받았다. Kolin의 엔진은 "고무 막(rubber diaphragm)"과 "슬립 링크(slip-link)"가 중요한 특징인데, 이는 크랭크 메커니즘의 단순화가 가능하도록 하는 독특한 특징으로, 고무막은 파워 피스톤으로 사용되었으며 슬립 링크는 디스플레이서의 간헐적인 움직임 제어를 위해 사용되었다.

현재, 폐열을 이용할 수 있는 많은 LTD 열 엔진이 시판되고 있는데 특히, 마찰 전기 정전 유도에 기초한 발전 용 저온 열원을 이용하는 것에 대한 관심이 증가하고 있다.

Hinchet, Seung, Kim은 TENGs의 과거 이루어진 기술적 기본사항과 진보된 점에 대해 철저히 검토하였으며 향후 개선점 및 응용방안 등의 개발 방향 및 최신 동향을 제시하였다.

Niu와 Wang은 TENG의 기본적인 작동 원리에 관한 이론적 분석을 수행하였

으며, 수치 모델을 개발하고 실용화를 위해 효과적으로 활용되는 최적화 기법을 제안하였다.

Guo는 열악한 환경에서 기계적 에너지를 회수하기 위한 방수 마찰 전기 - 전자 하이브리드 발전기 (WPHG)를 연구했는데, 외부 소스에서 TENG으로의 기계적 동력 전달을 위해 비접촉식 작동 방식을 사용하였으며, 발전기 시스템의 나머지 부분에서 TENG 부품을 격리한 상태로 600RPM 상에서 개방 회로 전압 500V, 단락 전류 40 μ A 를 얻어냈다. 또한, TENG와 EMG (전자기 발전기)의 동시 작동으로 개방 회로 전압 5V, 전류 2.3mA 의 출력을 얻을 수 있었는데 22초 동안 1V, 20mF 의 커패시터를 충전하는데 충분했다.

Lin은 비접촉 방식에서 동작을 자유롭게하는 회전 디스크로부터 전기를 발생시킬 수 있는 TENG를 개발했는데, 직렬로 연결된 100 개의 발광 다이오드를 구동 할 수 있는 1.22W/m² 의 유효 출력 밀도를 생성 할 수 있었으며, 또한 발전기가 리튬 이온 배터리를 효과적으로 충전 할 수 있는 안정적인 출력을 보여주었는데, DC 충전 전류 7.5 μ A 로 전류리튬 이온 배터리(LIB)를 1시간 30분 내에 완전히 충전되는 결과를 보였으며 이러한 결과에 따라 발전기는 에너지 수확 및 기타 실용적인 응용 분야에서 기존의 disk-TENG에 비해 비교할 수없는 장점을 가진 것으로 간주된다.

Shin은 PDMS(polydimethylsiloxane)을 기반으로하는 TENG의 제작을 위한 간단한 방법을 소개했는데, TENG가 접촉 분리 모드에서 작동 할 때 소형 전자 부품을 구동하는 불규칙한 기계적 에너지를 없앨 수 있으며 이 방식은 TENG를 작동시키는 가장 간단한 방식 중 하나이며 최대 개방 회로 전압은 6.3V, 단락 전류는 0.635 μ A 로 나타났다.

Chun 수직 접촉-수직 접촉 분리 모드로 동작 할 때 TENG의 성능을 향상시키기 위해 금 나노 입자를 함침한 mesoporous필름의 사용을 입증하였으며, 또한 쉽고 확장 가능한 합성을 보여줌으로써 대규모의 실용적인 자체 전원 공급 장치 개발에 대해 긍정적인 방향을 제시하였다.

4. 화이버 광학 집광

4.1 광 에너지

빛은 작고 이산적인 파열, 즉 광자라고 알려진 전자기적 “입자”로써 흡수되고 방출된다. 보통 빛 다발은 너무나 많은 미세한 에너지 양자(quanta)를 운반하므로 본질적인 입자성이 총체적으로 감추어지고 거시적으로 연속적인 현상만이 관찰되는 것이다. 프랑스 과학자 드 브로이(Louis de Broglie)는 빛은 물질이 가장 세련된 형태이며 빛을 포함한 모든 물질은 양자화되어 있는데, 물질의 최소 단위는 쿼크, 렙톤, 광자와 같은 엄밀한 기본 단위들이다 라고 설명하였다. 광자들은 다음과 같이 프랑크 상수($6.625 \times 10^{-34} J \cdot s$)와 복사장의 주파수의 곱에 해당하는 에너지를 갖는다.

$$E = h\nu \quad (26)$$

전자파 복사는 복사 에너지가 어떤 물체에 입사했을 때 그 물체가 받는 영향에 따라 전자파 스펙트럼의 파장 별로 구분된다. 가시광선은 사람의 눈으로 볼 수 있으며, 적외선은 열로써 느낄 수 있으며, 자외선은 피부를 태우는 효과를 통해 알 수 있다.

태양은 막대한 양의 전자파 에너지를 방출시키며 그 에너지 중의 아주 작은 일부는 복사를 통해 지구대기에 입사하게 된다. 지구대기에 도달하는 이 태양복사 에너지가 지구의 대기를 움직이는 에너지 원이다. 태양 복사 에너지는 7% 가 자외선 파장 역, 46% 가 가시광선 역, 32% 가 근적외선 역, 그리고 13% 가 적외선 역에 분포하여 그 에너지의 98% 가 $0.1 \sim 3.0 \mu m$ 의 파장에 존재한다.

표면온도가 약 $6,000^\circ C$ 인 태양으로부터 조사(Radiation)되는 일사량은 지구의 지표면에 도달하는 과정에서 대기중의 O, N, O₂ 그리고 O₃ 등의 흡수에 의한 손실을 거치면서 약 $1000W/m^2 (=1sun)$ 정도가 평균밀도(power density)로 알려져 있다. 일반적으로 air mass, $a/m = 2$ (경도 30)일 경우, 이 일사량 중 $700 \sim$

920nm 까지의 가시광선이 44.4% 를 차지하며, 315 ~ 400nm 까지는 2.7% 를 차지한다고 알려져 있다.

4.2 광 에너지의 단위

1)방사속

전자파로서 전달되는 에너지를 총칭하여 방사라고 하고, 단위시간에 어떤 면을 통과하는 방사에너지의 양을 방사속(*Radiant flux*: Φ)이라 한다. 단위는 와트(W)를 사용한다.

2)광속

사람의 눈에 보이는 가시범위의 방사속을 광속(*Luminous flux*: F)이라 하며, 파장이 380 ~ 760nm 사이인 방사속을 말한다. 단위는 루멘(*Lumen*: lm)을 사용한다.

Table 1. Luminous flux of general light sources

광원	광속[lm]	광원	광속[lm]
태양	3.6×10^{28}	백색 형광램프 40W	3,000
백열전구 40W	350	3파장 형광램프 40W	3,500
주광색 형광램프 40W	2,500	고압나트륨램프 400W	46,000
LED 램프 40W	4,800		

3)조도

빛을 받는 면의 밝기를 표시한 것을 조도(*Illumination*: E)라 하며, 단위면적당의 입사광속으로 표시된다.

$$E = \frac{F}{S} [lm/m^2]$$

F : 입사광속

S : 입사면적

단위는 룩스(*Lux: lx*)와 풋캔들(*Footcandle: fc*)을 사용하며 $1lx = \frac{1lm}{m^2}$,

$1fc = \frac{1lm}{ft^2}$ 이다.

4)광도

광원으로부터 모든 방향으로 빛이 발산되고 있으나, 그 방향에 따라 빛의 발산이 달라진다. 이처럼 어떤 방향에 대한 빛의 세기를 광도(*Luminous intensity: I*)라 하며, 그 방향의 단위입체각에 포함된 광속으로 나타낸다. 단위는 칸델라(*Candela: cd*)를 사용한다.

$$I = \frac{F}{\omega} \quad (28)$$

F : 입체각 ω 에 포함된 광속

ω : 입체각

점광원으로부터 모든 방향으로 균등하게 광속이 발산되면 다음 식과 같다.

$$I = \frac{F}{4\pi} \quad (29)$$

5)휘도

광원을 볼 때 강하게 빛나 보이는데 이 빛나는 정도를 휘도(*Luminance: L*)라

고하며, 어떤 방향의 광도를 그 방향으로의 투영면적으로 나누 값으로 표시된다.

$$L = \frac{I}{S'} \quad (30)$$

I : 어느 방향의 광도

S' : 어느 방향의 투영 면적

단위로는 스틸브(*Stulb; sb*), 니트(*Nit; nt*) 및 풋램버트(*Foot lambert; fL*)를 사용하며, $1nt = \frac{1cd}{m^2}$, $1fL = 0.29191 \frac{cd}{m^2}$ 가 된다.

또한, 완전확산면의 경우 휘도 L 과 광속발산도 M은 $M = \pi L$ 과 같은 관계를 갖는다.

4.3 자연채광 시스템(Daylighting System)

1)시스템 구성 및 원리

태양광의 방향 전환을 통해 실내 유입을 꺾하는 패시브 개념의 자연채광 기법인 광가이드 시스템(Light Guide System)은 광선반(light shelf) 애니돌릭(anidolic) 등 여러 형태가 개발되었으나, 이러한 시스템들은 남측면의 실이 깊은 공간의 자연채광은 수직형 창면으로의 자연채광보다는 유리하나 다른 향과 다양한 형태의 공간 적용 시에 많은 한계점이 있다. 광전송 시스템(Light Transport System)은 보다 적극적으로 자연광을 건물의 실내 깊은 곳까지 이용하기 위한 태양광의 효율적 집광과 전송 그리고 배광을 위한 다양한 구성 요소를 갖추고 있다. 즉, 이 시스템은 자연광의 수집을 위한 집광부와 재료의 다양한 광학적 특성을 극대화한 광파이프와 광화이버 등 폐쇄형 광전송부 그리고 눈부심을 최소화하고 균일한 실내조명을 위한 배광부로 구성되어 있다. 전술했듯이 광선반이나

에니돌릭 등 대표적인 광 가이드 시스템은 건물의 코어 부분이나 창이 없는 건물의 자연채광에는 많은 어려움이 있으므로, 자연광의 실내로의 유입을 용이하게 하기 위해 보다 효율적인 광전송 시스템의 적용은 필수적이라 할 수 있다. 많은 자연광의 실내 유입을 위해서는 집광부의 성능이 무엇보다 중요하다 할 수 있는데, 광전송 시스템(Light Transport System)의 경우 추적 방식에 따라 일반적으로 자연형 집광(Passive Collection)과 설비형 집광(Active Collection)의 형태로 구분될 수 있다.

자연채광 시스템은 현재 다양하게 개발과 보급이 이루어지고 있는데, 그 기능적 정의를 위하여 국제 에너지 기구(International Energy Agency)는 이를 “공간에 빛을 유입하거나 조절하는 것이 가능하도록 다양한 물리적(광학적) 요소들을 건축학적 요소와 유기적으로 결합시킨 시스템”이라고 정의하고 있다.

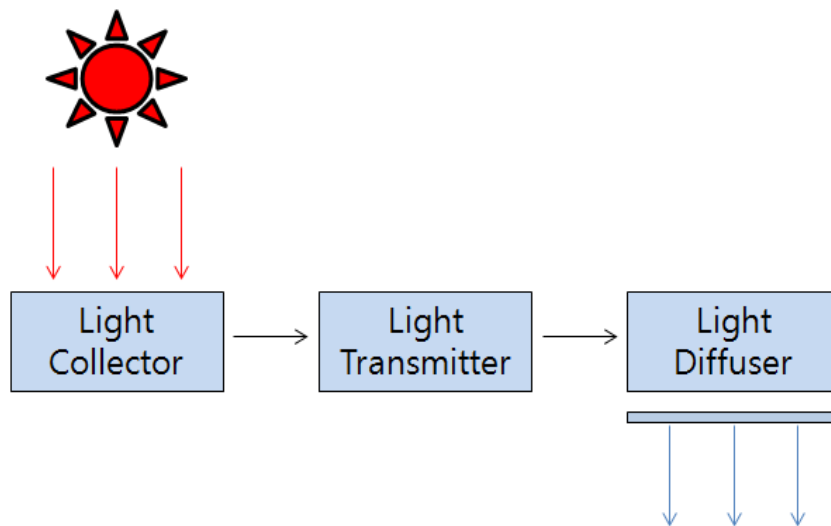


Fig. 6. Structure of Daylighting System

전술했듯이 일반적으로 자연채광시스템은 광전송 시스템을 가르킨다고 할 수 있으며, 집광부(Light Collector), 전송부(Light Transmitter), 산광부(Light Distributor)로 구성된다. Fig. 6 은 자연채광시스템의 모식도를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 자연채광시스템은 집광부를 통하여 태양광을 집광한 후에 광투브나 광섬유 등을 활용하여 자연광을 전송한 후 산광부를 통해 확산광을 실내로

조사하게 된다.

2) 자연채광 시스템 분류

자연채광시스템은 다양하게 연구·개발되어지고 있으며 매우 광범위하여 분류하는데 어려운 점이 있지만, 총괄적으로 각 시스템의 특성에 따라 나눌 수 있다.

집광부의 추적방식은 전술했듯이 자연형 시스템(Passive System)과 설비형 시스템(Active System)으로 분류할 수 있다. 또한, 태양 추적 방식에 따라 광학적 방법과 천문학적 방법으로 구분되어지고, 추적의 구조적 구현 방식에 따라 1축 제어와 2축 제어로 분류된다.

자연형 집광시스템은 태양의 움직임에 관계없이 시스템이 고정된 상태로 외부의 빛을 실내로 전송시키는 방법이며 특정각도에서만 빛을 수집할 수 있어 집광부와 전송부에 넓은 공간을 필요로 한다. 설비형 집광시스템은 태양추적 시스템을 적용하여 태양의 움직임에 따라 연속적으로 태양을 추적하여 실외의 빛을 실내로 전송시키는 방법이다.

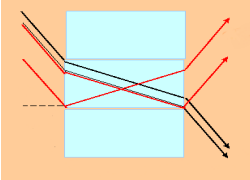

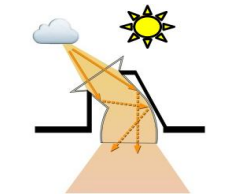

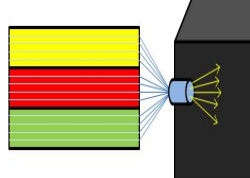
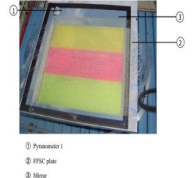
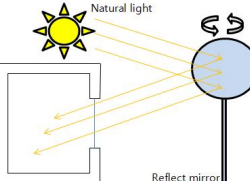

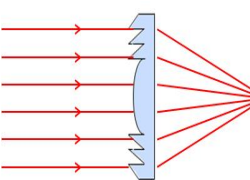

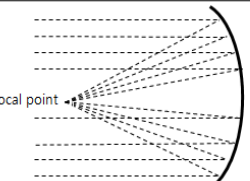
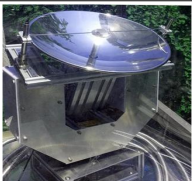
설비형 집광시스템 중 Mirror Sunlighting System, Fresnel Lenses, Parabolic Dish 등의 시스템들은 전술한 태양 추적 방식(광학적 추적, 천문학적 추적) 및 제어 방식(1축 제어, 2축 제어)을 적용하고 있다.

태양의 위치에 따라 집광부의 법선벡터를 일치시키기 위한 광학적 방식의 태양 추적은 광센서의 출력신호 비교에 의해 작동하는 방식이고, 천문학적 방식은 황도 좌표를 근간으로 설치장소에서의 태양의 고도 값과 방위각을 수치적으로 산출하여 지속적으로 태양을 추적하는 방식이다. 광학적 방식에 의한 태양 추적은 광센서에 의해 작동하므로 흐린 날이나 태양이 구름에 가려진 경우 정확한 태양추적이 되지 않는 단점이 있으며, 이런 점을 보완하기 위해 천문학적인 추적 방식과 병행하여 사용된다. 한편, 1축 제어방식은 태양의 고도 혹은 방위각 중 하나를 고정시켜 놓고 한 각도만 추적하는 방식이며, 2축 제어방식은 태양의 고도각과 방위각을 동시에 고려하여 태양을 추적하는 방식이다. 1축 제어 방식은 그 효율이 2축 추적방식에 비해 다소 떨어진다.

Table. 2 는 집광부의 형태, 태양 추적 방식 및 집광 원리에 따른 체계와 실

제 적용 예를 보여주고 있다.

Table 2. A classification of collectors in light transport systems

집광부	구분	집광 원리	명칭	모식도	실제적용사진	
	Passive	Light Redirection		Laser Cut Panel		
		Concentrating		Anidolic Concentrators, Compound Parabolic Concentrator		
				Fluorescent Fiber Solar Concentrator		
	Active	Light Redirection		Mirror Sunlighting System		
		Concentrating		Fresnel Lenses		
			Parabolic Dish			

4.4 태양 위치의 천문학적 계산

천문학적 제어방식을 병행하는 태양추적장치를 사용함으로써 태양의 위치를 계산해 추적시스템에 입력하기 위하여 고도각과 방위각 식을 설정하여야한다. 태양추적장치에 설치된 장소에서 태양의 고도각 및 방위각을 계산하게 되며, 고도각은 태양과 태양추적장치가 설치되어 있는 지점을 직선으로 연결하였을 때 지구표면과 이루는 각이며 방위각은 태양의 위치를 투영하였을 시에 투영시킨 태양의 좌표원점이 이루는 직선이 좌표상의 정북으로부터 시계 방향으로 측정된 각이다.

태양의 고도각과 방위각을 식(31)과 식(32)로 나타낼 수 있다.

$$\sin\theta_e = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos H \quad (31)$$

$$\sin\theta_a = \sin n(H) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos(90-\theta_e)\sin\phi - \sin\delta}{\sin(90-\theta_e)\cos\phi} \right) \right| \quad (32)$$

θ_e 와 θ_a 는 각각 태양의 고도각(altitude)과 방위각(azimuth)을 의미하며 δ 는 적위(declination), ϕ 는 설치장소의 경도, H 는 태양의 시간각(hour angle)을 의미한다. 적위 δ 는 지구의 중심과 태양의 중심을 잇는 선이 지구의 적도와 이루는 $\pm 90^\circ$ 를 갖는 각도이며, 천의 시간각 H 는 자오선과 천체를 지나는 대원이 이루는 각도이며 $\pm 90^\circ$ 의 값을 갖는다.

태양이 지표면으로 내려가면 태양추적장치는 추적을 중지하고 추적 전 초기 상태로 복귀되어야하며 다시 태양이 지표면위로 올라오면 추적을 시작하여야한다. 태양의 일출 시간과 일몰시간을 계산하면 태양추적장치의 작동제어를 그 시간들에 맞춰 제어할 수 있게 된다. 태양의 상단부 끝점이 지표면에 위치했을 경우를 일출과 일몰시간으로 정의하며 태양의 중심이 지표면에서 태양의 반지름 각도만큼 낮은 지점에 도달한 시간을 일출, 태양의 중심이 지표면으로부터 태양의 반지름 각도만큼 내려간 시간을 일몰로 설정하여 시간 계산을 수행하며, 일출과 일몰의 시간계산 식은 식 (3)으로 나타내어진다.

$$T = H + \alpha - (0.06571 \times t) - 6.622 \quad (33)$$

위의 식 (33)에서 일출일 경우 t 값은

$$t = N + ((6 - \ln gHour) / 24) \quad (34)$$

로 나타내어지고, 위의 식 (34)에서 일몰일 경우 t 값은

$$t = N + ((18 - \ln gHour) / 24) \quad (35)$$

로 나타낼 수 있으며, α 는 δ 와 같이 천구상 천체의 위치를 나타내는 좌표값의 하나로 춘분점을 기준으로 하여 천의 적도를 따라 시간당 $1h = 15^\circ$ 로 계산한 것이며, $\ln gHour$ 은 ϕ 를 시간각으로 환산하는 것을 의미한다.

Ⅲ. 저온도차 발전 기술

1. 실험장치 구성

1.1 저온도차 발전 장치 구성 ; 저온도차 스텔링엔진

본 연구에서 사용된 저온도차 스텔링엔진의 최대 출력을 실험을 통하여 산출해냄으로써 그에 따른 건물에너지절감을 위한 적용 및 이용 가능한 수준을 고려해 볼 수 있다. 저온도차 스텔링엔진의 최대 출력을 구하기 위하여 저온도차 스텔링엔진의 휠 축의 중앙에 추를 연결하여 엔진 작동시 올라오는 추의 평균 속도를 구하였으며, 이 때 추의 질량과 온도를 변화시켜 상황별 엔진의 출력을 얻어 가능한 최대출력을 산출하였다. 이 때 산출해낸 최대출력은 Mechanical Power로 저온도차 스텔링엔진에서 얻을 수 있는 가장 큰 출력으로 엔진에서 얻을 수 있는 Electrical Power는 엔진에 사용된 전기발전시스템이 가장 이상적으로 설계되었을 때의 출력과 같다.

1) LTD스텔링엔진

본 실험에 사용된 스텔링엔진은 감마(γ)형 스텔링 엔진으로 저온도차 스텔링엔진에서 보편적으로 사용되어지고 있다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 는 그 실제 모습이다. 감마(γ)형스텔링 엔진은 두 개의 실린더에 각각 디스플레이서와 파워피스톤이 하나씩 위치해있는 형태이며 스텔링엔진의 상판(방열부)과 하판(가열부) 사이에 디스플레이서가 위치하게 제작되었다. 파워피스톤은 상대적으로 디스플레이서가 들어가있는 실린더보다 매우 작은 사이즈의 실린더에 위치하여있으며 플라이휠과 연결되어 있다. 또한, 디스플레이서가 들어가 있는 실린더의 상판(방열부)와 하판(가열부)에는 작동유체가 새어나가지 않도록 고무링으로 밀봉이 되어있으며, 이는 온도차에 의해 변화하는 압력의 차로 작동하는 스텔링엔진의 구조상 고무링의 불량 또는 파손 시 스텔링엔진의 작동이 정상적인 상태와 다를 수 있다. Table. 3 에 LTD엔진의 사양을 나타내었다.

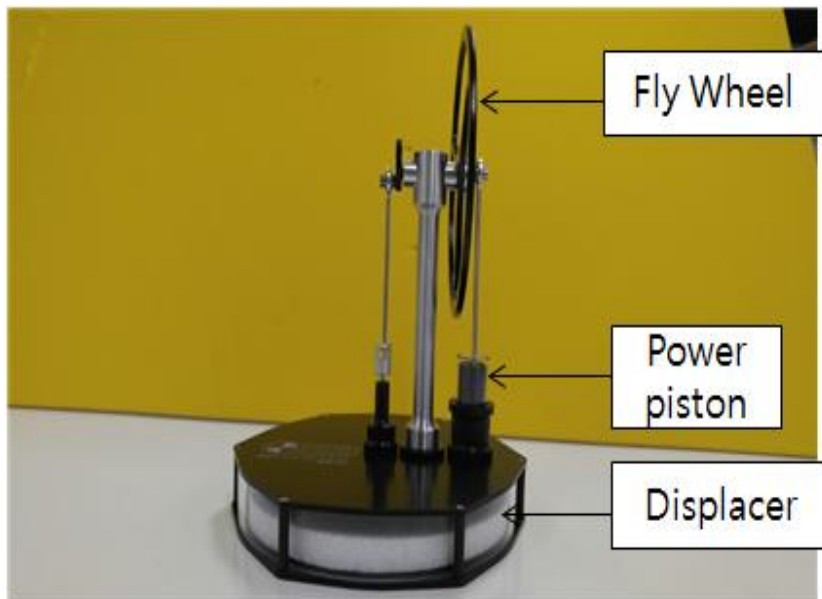


Fig. 7. Photograph of LTD Stirling engine [MM-7]



Fig. 8. Photograph of LTD Stirling engine [KS90]



Fig. 9. Photograph of LTD Stirling engine [KS90Twin]

Table 3. Specifications of LTD Stirling engines

	MM-7	Kontax(Single)	Kontax(Twin)
Displacer diameter	14 cm	7 cm	7 cm x2
Piston Material	Graphite	Graphite	Graphite
Power cylinder Material	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Borosilicate glass
Flywheel	12 cm	8.25 cm	8.25 cm
Overall height	20.3 cm	13 cm	14 cm
Base plate	16.5 cm	9.2 cm	18 cm
Weight	500 g	172 g	350g
Temperature differential required	4°C	10°C	10°C

2) 정밀가열장치

본 연구는 가열부와 방열부의 온도가 유지된 상태로 연구가 진행되어야 ΔT 의 변화량에 따른 LTD엔진의 출력을 정확히 산출해낼 수 있다. LTD엔진 하판부의 정밀가열을 위해 WiseTherm사의 HP-20D를 사용하였다. 스크린을 통한 실시간 온도확인이 가능하며 최대온도는 380°C , $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 정밀한 온도제어가 가능하다. LTD엔진은 동작 시 약간의 흔들림이 발생하므로 핫플레이트와 엔진을 밀착시킨 후 움직임이 없도록 고정시킨 상태에서 실험을 진행하였다. Fig. 10은 실제사용된 핫플레이트를 보여준다.



Fig. 10. Photograph of hot plate

1.2 저온도차 발전 계측 장비 구성

1) K타입 열전대

본 연구는 저온도차의 발전기술을 주제로 하기에 온도의 변화에 매우 민감한 장치를 이용한다. 그러므로 낮은 오차율을 가졌으며 연구의 온도범위에서 측정이 가능한 온도측정용 센서, K-타입 열전대(k-type thermocouple)를 사용하였으며 LTD엔진의 상판과 하판에 부착하여 가열부와 방열부의 온도차를 측정하였다. 열전대를 통해 측정된 온도데이터는 데이터수집장치 midi Logger GL820로 전송되어 기록하였다. Fig. 11에 사용된 열전대의 모습을 나타냈다.

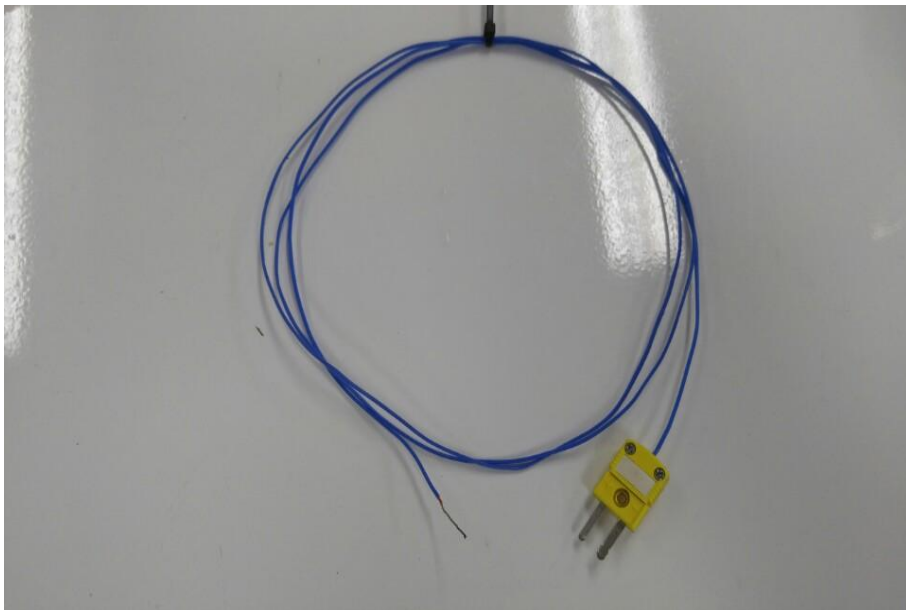


Fig. 11. Photograph of k-type thermocouple

2) 데이터 수집 장치

데이터 수집 장치는 GRAPHTEC사의 midi LOGGER GL820을 사용하였으며 온도, 전압, 습도, Pulse/Logic의 멀티 입력이 가능하다. 측정데이터범위 설정 후 스크린을 통하여 실시간으로 데이터 값의 확인이 가능하며 외부저장장치의 연결 또는 컴퓨터와의 직접 연결을 통한 데이터수록이 가능하므로 장시간동안의 데이터저장가능하다. 채널수는 20ch - 200ch 까지 확장이 가능하며 전 채널 절연 입력방식을 채용하여 오차가 낮은 안정적인 데이터 측정을 할 수 있다. 또한 발생하는 노이즈로 인한 오차를 감소시키기 위해 Σ 형태의 A/D 컨버터를 탑재하여 고주파 노이즈 제거 효율을 향상시켰다. 소형으로 제작되었으며 내부배터리가 있어 휴대가 간편하고 장소에 구애받지 않아 관리, 보관 및 측정의 편의성을 가졌다. Fig. 12에 사용된 데이터 수집 장치의 모습을 나타냈다.



Fig. 12. Photograph of data logger

1.3 저온도차 발전 장치 구성 ; 가돌리늄 발전장치

가돌리늄을 이용한 발전 장치 또한 LTD엔진과 같은 방법으로 최대 출력을 실험을 통하여 산출하고 그에 따른 건물에너지절감을 위한 적용 및 이용 가능한 수준을 고려해 볼 수 있다. 가돌리늄 발전장치의 최대 출력을 구하기 위해 축의 중앙에 추를 연결하여 발전장치가 회전할 때 올라오는 추의 평균 속도를 구하였으며, 이 때 추의 질량과 온도를 변화시켜보며 가돌리늄의 출력을 산출하였다. 또한, 저온도차 스텔링엔진의 발전 장치 구성부분에서 설명했듯이 산출해낸 기계적 출력은 가돌리늄 발전장치에서 얻을 수 있는 최대 출력으로써 가돌리늄 발전장치에 가장 이상적으로 설계된 전기발전 시스템을 적용한다면 얻을 수 있는 최대 전기적 출력은 기계적 출력과 같다.

가돌리늄 발전장치의 데이터 수집장치는 저온도차스텔링엔진의 연구에 사용되었던 것과 같은 midi LOGGER GL820을 사용하였으며, 저온순환수조를 이용하여 연구에 사용되는 유체의 온도를 맞추었다.

1) 가돌리늄

이론부분에서 전술했듯이 가돌리늄의 물리적 성질은 20°C 를 기준으로 이하에서는 강자성을 띄며 20°C 이상에서는 상자성을 띄는 성질을 가지고 있으며, 의학적으로 가돌리늄 화학물의 강한 상자성을 이용해 자기공명영상(MRI)에서 조영제(contrast agent)로 사용되는데 사용 시 암 조직과 같은 이상 조직에 축적되어 암 조직을 MRI영상을 통해 뚜렷이 볼 수 있다. 또한 원자로에서 중성자 흡수체로 사용되어 핵 분열 연쇄반응을 조절하는 데 사용되기도 한다. 이 외에도 합금 재료로써 금속에 첨가하여 가공성과 산화 저항성을 높이는 데 사용되기도 하며 형광체로 컬러TV 브라운관에서 녹색 형광체로도 사용되기도 하였다.

본 연구에서는 이러한 다양한 가돌리늄의 활용 중 온도에 따른 자성 변화를 이용하여 발전장치를 구상하였으며 사용된 가돌리늄의 형태는 1cm*1cm*1cm 의 정사각의 형태이며 Fig. 13은 가돌리늄의 모습을 나타낸다.

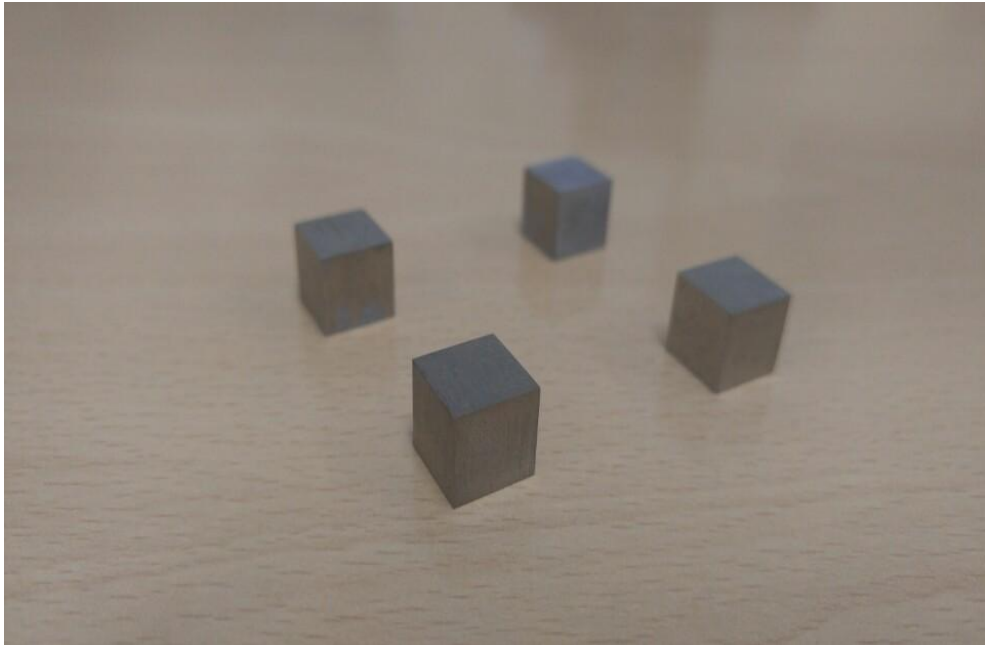


Fig. 13. 1cm x 1cm x 1cm gadolinium

2) 저온순환수조

본 연구에서는 저순환수조는 제이오 텍의 RW-0525G 모델을 사용하였다. 5L의 물을 순환할 수 있으며 -25°C 에서 150°C 까지의 온도 제어가 가능하다.

본 연구의 특성상 유체온도의 일정함을 유지하는 것은 매우 중요하며, 본 기기를 사용하여 20°C, 40°C, 50°C, 60°C, 65°C 로 물 온도를 맞추고 각 실험조건 온도차 20°C, 30°C, 40°C, 45°C 별로 공급하여 사용하였다. Fig. 14는 본 연구에 사용된 저온순환수조의 모습을 나타낸다.



Fig. 14. Photograph of refrigerating bath circulator

1.4 저온도차 발전 장치 구성 ; TENG(Triboelectric nanogenerator)

TENG에 사용된 두 개의 Al 전극은 레이저로 가공을 하여 1mm 두께의 Al 플레이트로 제작하였으며 Fig. 15(a)에 그 모습을 나타냈으며, 두 개의 Al 전극을 아크릴 디스크에 부착한 모습을 Fig. 15(b)에 나타내었다. 또한, Fig. 15(c)에서 disc-1이 Al전극, disc-2는 FEP인 TENG의 마찰 전기면을 보여주는데 Al 전극 디스크에는 전압/전류 측정기에 연결된 두 개의 도선이 존재한다.

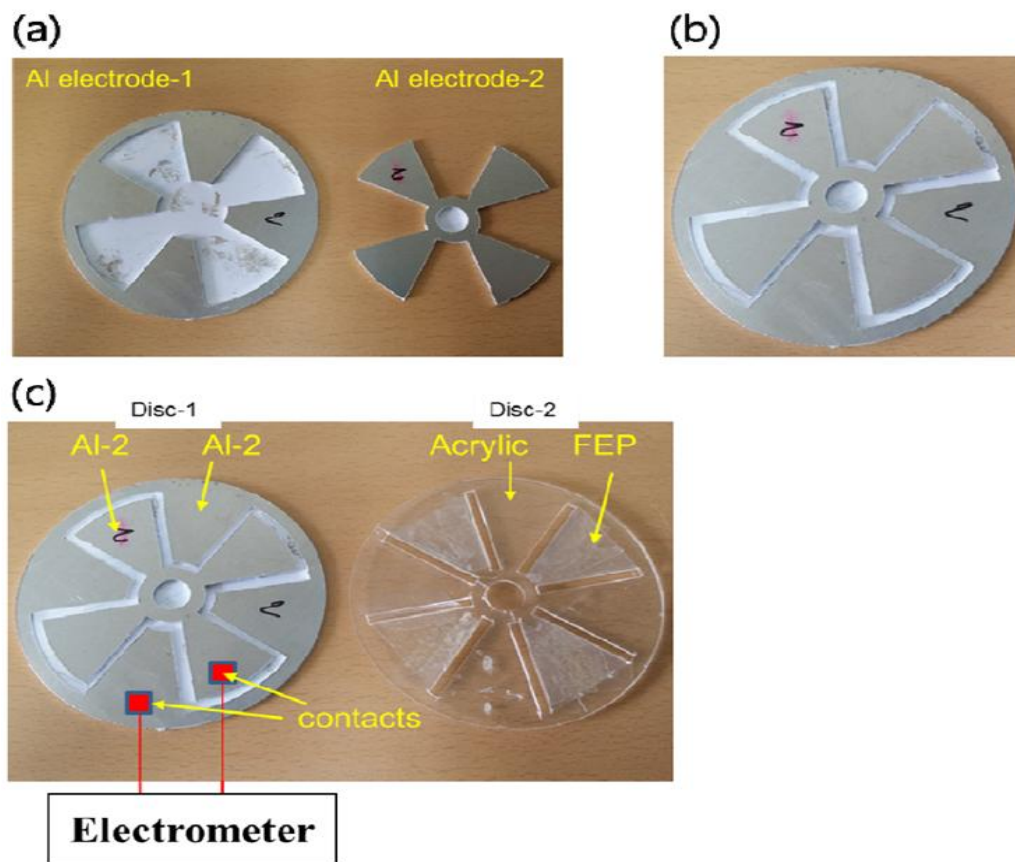


Fig. 15. Fabrication and assembly of TENG part :

- (a) Al electrodes fabricated by laser cutting of 1mm thick Al plate,
- (b) Al electrodes attached to acrylic disk, (c) triboelectric surfaces comprised of Al electrode(disk-1) and FEP(disk-2)

Fig. 16(a)는 TENG와 결합된 LTD엔진의 모습을 나타낸다. Fig. 16(b) 는 그 모습을 개략적으로 나타낸 것이며 TENG의 AI 전극 부분은 LTD 열 엔진의 휠에 부착된 FEP부분이 회전하는 동안 고정되어 슬라이딩 방식으로 전기를 발생하게 되며 이때, 두 디스크 사이의 간격은 1mm로 유지하였다. Fig. 16(c)는 디스크 배치의 종단면도를 나타낸다.

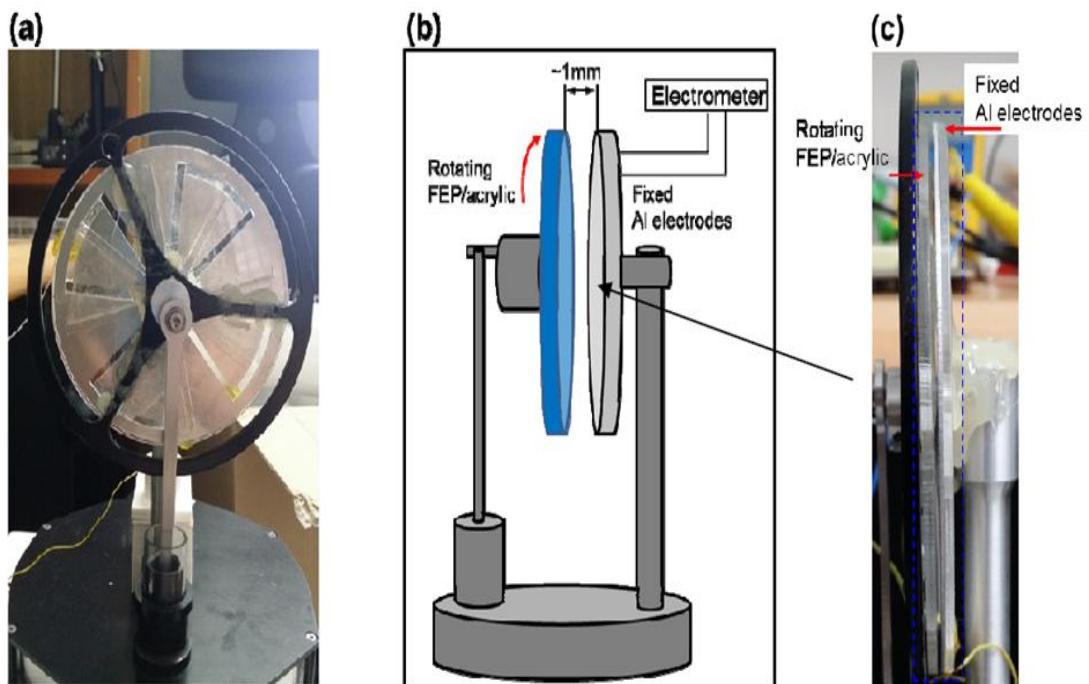


Fig. 16. TENGs integrated with a LTD heat engine :

- (a) an actual photo of LTD heat engine integrated with a TENG,
- (b) a schematic diagram of the experimental system, (c) a close view of the disks arrangement (of TENG-1)

2. 실험 방법

2.1 Mechanical power

1)저온도차스털링엔진

LTD엔진의 기계적 출력을 산출함에 따라 시스템이 낼 수 있는 최대 출력을 구해낼 수 있다. 본 연구에서는 기계적 출력을 산출하기 위해 높이 약 2m 정도의 선반 위에 스텔링엔진 하판부의 가열을 위한 핫플레이트를 올려놓은 후 핫플레이트에 LTD엔진을 고정시켰다. LTD엔진의 중심축부에 추를 연결하여 바닥으로부터 추가 일정한 속도로 올라가는 시점부터 상단 끝까지 올라오는 동안의 평균 속도를 구해 온도차별 출력을 계산하였으며 속도 분석을 위해 영상 카메라를 이용하여 녹화를 하였다. 이 때 실험이 진행되는 과정 중에는 LTD엔진과 핫플레이트는 흔들림이 없도록 하여 추가 일직선으로 진행할 수 있도록 제작하였다. 온도 및 추 등의 변수를 바꿔가며 실험을 진행하였으며, 이 때 온도의 측정은 열전대를 가열부와 방열부에 각각 접촉시켜 측정하였으며 데이터로거에 외부저장장치를 연결하여 데이터 값을 저장하였다.

본 연구에서 사용된 LTD엔진은 각기 다른 크기로 제작되어 각각 걸리는 토크가 다르게 측정되는데 그 계산은 $F \times r$ 로써 힘에 반지름을 곱한 값으로 구할 수 있다. Fig. 17에 기계적 출력 산출을 위한 시스템 디자인을 나타내었으며 Fig. 18은 본 실험의 실제측정구성을 보여준다.

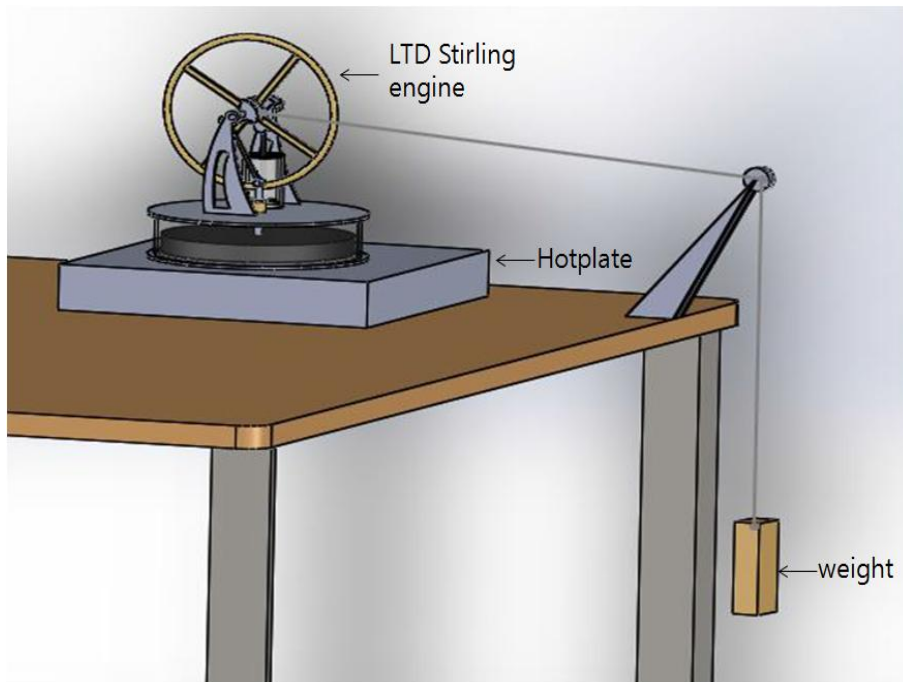


Fig. 17. System design for mechanical power calculation



Fig. 18. System for mechanical power calculation

2) 가돌리늄 발전장치

본 연구에 사용된 가돌리늄은 1cm*1cm*1cm 사이즈의 큐빅형태이며 총 16개의 가돌리늄을 회전축에 부착하여 사용하였다. 가돌리늄의 온도변화에 따른 자성변화를 이용하여 발전장치를 설계하였는데, 가돌리늄이 부착된 회전축의 한 쪽편에 10cm*2.5cm*1cm 사이즈의 네오디움 자석을 매우 밀접한 0.1mm 이하의 간격을 두어 고정하였다. 실험진행시 고온의 유체는 네오디움자석이 고정되어있는 편에 흘러주어 자석 인근에서는 자력이 약해지게 하고 자석과 떨어지는 부근에는 저온의 유체를 흘러주어 강자성을 띄게 해 연속적인 회전을 하도록 하였다. 이 때, 전술했던 스텔링엔진의 기계적 출력을 측정하는 방법과 동일하게 회전하는 축에 추를 달고 온도차, 질량에 따른 기계적 출력을 산출하였다.

가돌리늄 발전장치의 특성상 LTD엔진에 비해 토크가 강하므로 추의 질량을 높여 5g부터 10g, 20g, 50g 순으로 실험을 진행하였으며 온도차 20°C, 30°C, 40°C, 45°C 에서 각각의 출력을 산출하였다. Fig. 19, Fig. 20에 각각 가돌리늄 발전장치 고온과 저온의 물이 투입되는 위치의 모습과 가돌리늄 발전장치에 추를 달아 기계적 출력을 측정하는 모습을 나타내었다.

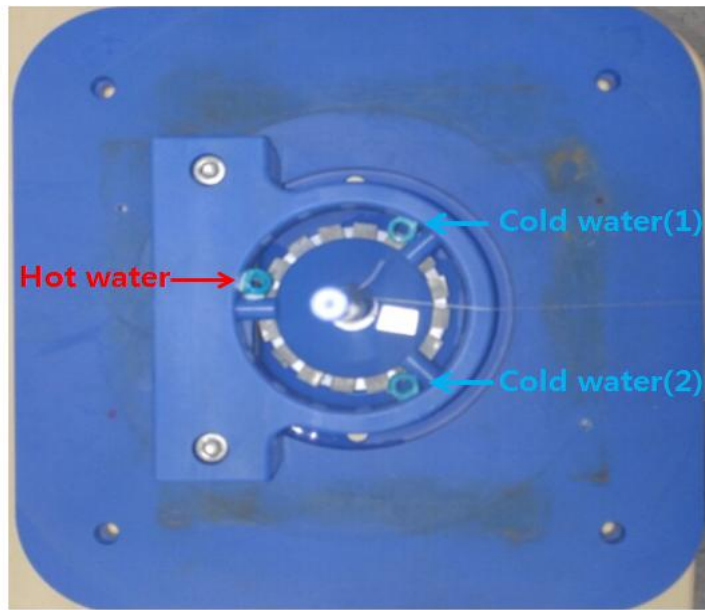


Fig. 19. Position of hot water and cold water in Gadolinium generator



Fig. 20. System for mechanical power calculation in Gadolinium generator

2.2 Electrical power

1)저온도차스털링엔진

LTD엔진에서 휠이 회전하는 구조적 특성을 이용해 전기적 출력을 얻어 낼 수 있다. 첫째로는 모터를 연결하여 발전기로 사용하는 방법으로 엔진의 회전하는 휠에 AC또는 DC모터를 연결하여 전기적 출력을 얻는 방법이며 두 번째로는 자석과 코일을 이용하여 전기를 얻어내는 방법인데 회전하는 휠에 자석을 부착한 후 휠 정면으로 감겨진 코일을 정면으로 마주보게 맞닿게 놓아 자석과 코일 간에 생기는 유도전류를 이용하는 것이다. 이 때 유도전류의 세기는 자석의 자력과 코일의 감은 횟수에 따라 변화된다.

본 연구에서는 모터를 연결하여 LTD엔진에서 출력을 얻어냈는데, 엔진의 휠 축에 동일한 직경 $\varnothing 120\text{mm}$ 의 크기로 제작한 플라스틱 휠을 접착시킨 후 모터에 연결하였으며 이 때, 기어비는 약 1:15 정도이고 스텔링엔진의 토크가 강하지 않은 점을 고려하여 최대한 마찰손실이 일어나지 않고 모터가 작동할 수 있도록 실을 연결하여 실험을 진행하였다. AC출력은 AC-DC컨버터를 이용하여 DC출력으로 변환하고 캐패시터를 모터에 연결하여 일정한 출력을 얻어냈으며, $2\text{k}\Omega$ 의 소형 LED를 연결하였다. 본 연구에서는 모터를 1개에서 3개까지 직렬로 연결하여 얻을 수 있는 전기적 출력을 산출해 보았다. Fig. 21, Fig.22는 각 각 본 실험에 대한 개략도와 실제 실험이 진행되고 있는 모습을 나타내고 있다.

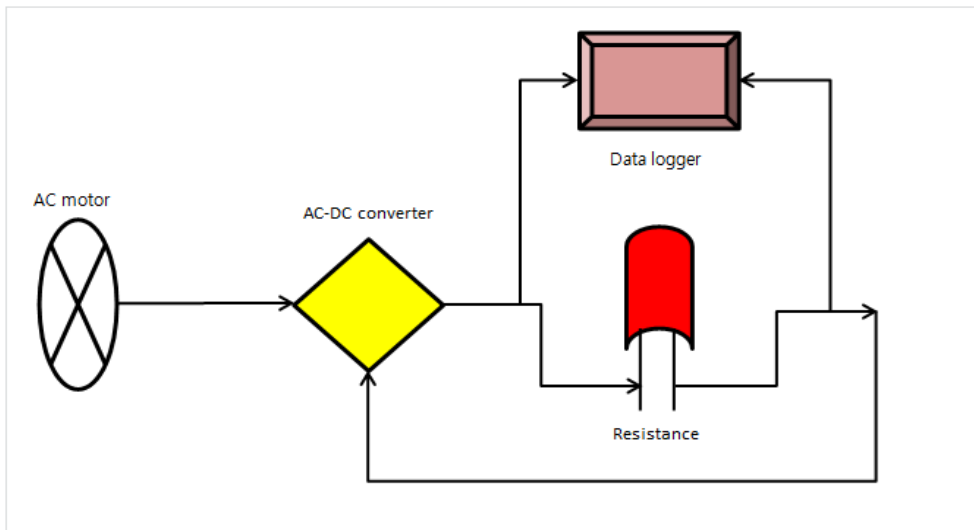


Fig. 21. Schematic of MM-7 electric generator

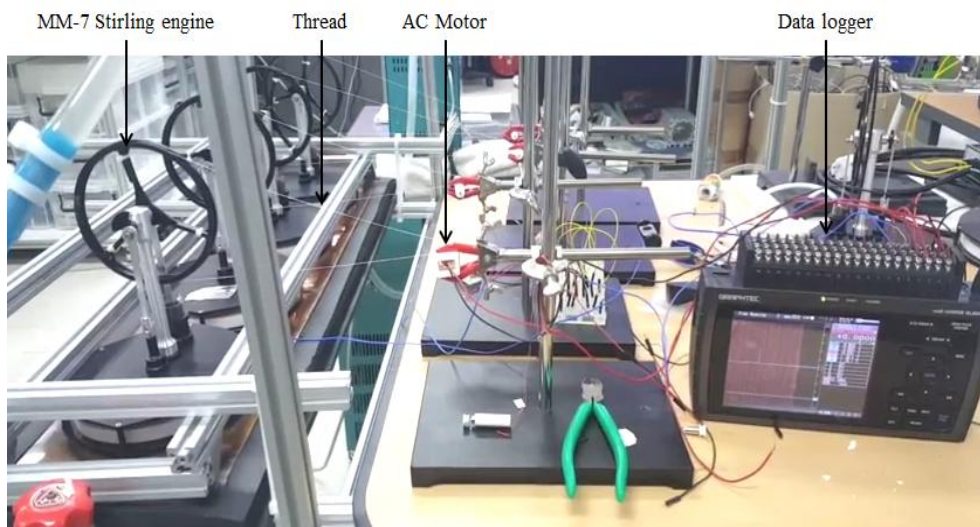


Fig. 22. Experimental output using MM-7 engine

2) 가돌리늄 발전장치

가돌리늄 발전장치 또한 LTD엔진을 이용해 전기적 출력을 얻어내는 방법과 동일한 방식으로 회전하는 가돌리늄 발전장치에 AC모터를 연결하여 발전기로 사용하였으며 발전장치의 축에 직경 $\text{\O}130\text{mm}$ 의 휠을 부착하고 모터 축에 직경 $\text{\O}7.5\text{mm}$ 의 휠을 부착하였으며 이때 기어비는 약 1:17 정도로 설계되었다. 이 때 네오디움자석의 자력에 의해 AC모터의 RPM이 줄어드는 현상을 방지하기 위해 가돌리늄 발전장치를 두께 2.5mm 의 첼로 제작된 자기장 차폐체로 감싸 자장이 밖으로 새어나가 모터에 영향을 끼치지 않도록 하였는데 이때의 자기장차폐체로 감싸기 전 가돌리늄 발전장치 근처 자력은 약 200[Gauss] 로 나타났으나 자기장 차폐체로 감싼 후 같은 위치에서의 자력은 약 10[Gauss] 정도로 낮아짐이 확인되었다.

고온의 작동유체는 관내 직경 3.8 \O 를 통해 300ml/min 의 유량으로 네오디움자석이 고정되어있는 부근에 흘려주었으며 저온의 작동유체는 2개의 관을 사용하였으며 각각 120 $^{\circ}$ 씩 떨어진 지점에 연결하였다.

Fig. 23은 본 실험에 대한 개략도를 나타낸 것이며 Fig. 24는 자기장차폐체로 감싸 자장이 밖으로 흐르지 못하도록 제작한 가돌리늄 발전장치의 모습을 나타냈다.

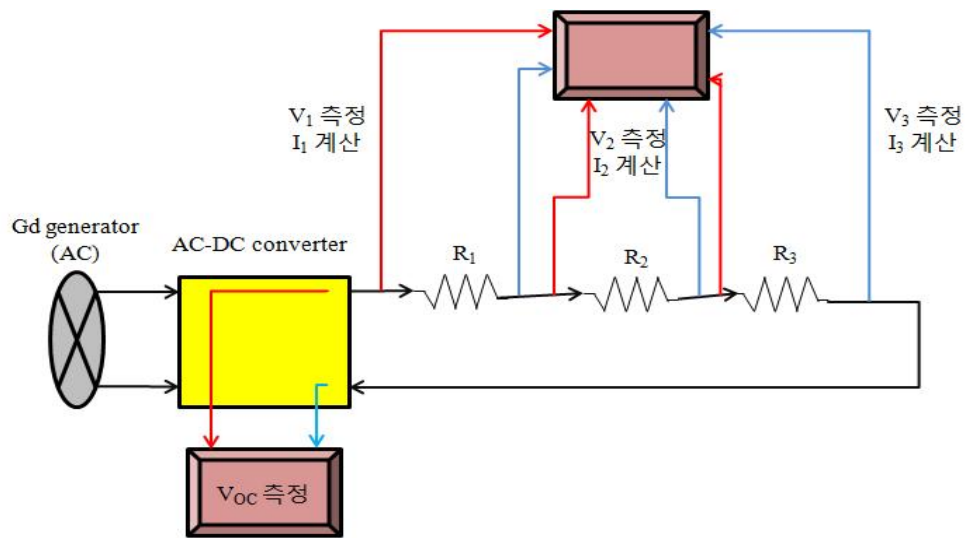


Fig. 23. Schematic of gadolinium electric generator

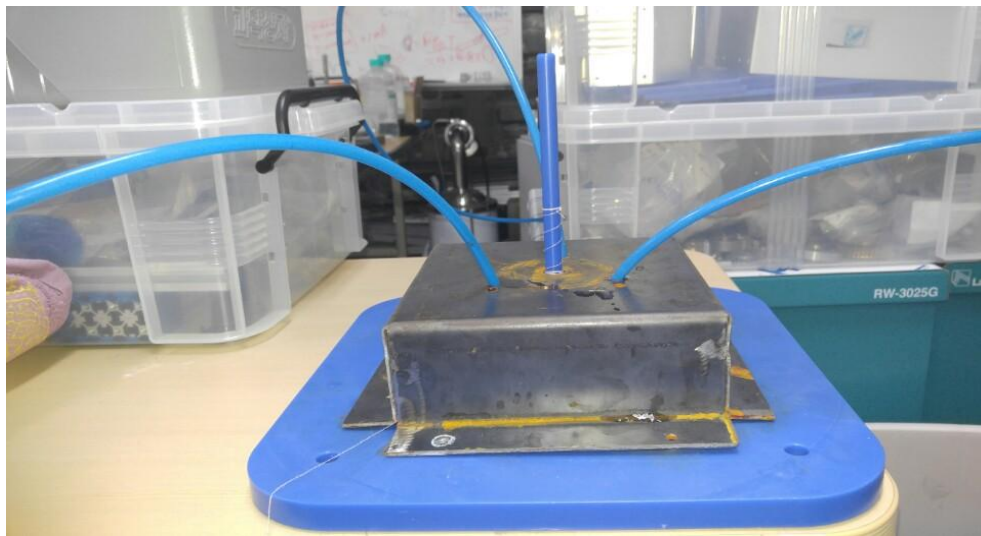


Fig. 24. Gadolinium generator with magnetic shield

2.3 TENG(triboelectric nanogenerator)

1) 작동 원리

TENG의 작동 원리와 구조를 Fig. 25에 나타내었다. TENG는 세그먼트 디스크 모양의 알루미늄 전극 2개와 FEP(fluorinated ethylene propylene) 필름 (테플론 필름의 일종)으로 코팅 된 아크릴 세그먼트로 구성되어있다.

FEP가 음전하(전자를 쉽게 얻음)를 갖는 동안 A1은 양의 표면을 가지기 쉽고 (전자를 쉽게 잃는다), FEP 필름 및 A1 전극은 마찰 전기 표면으로서 작용한다.

TENG에 의해 에너지가 생성되는 메카니즘은 두 가지 주요 단계가 있는데 첫째, 초기 접촉 대전 단계와 둘째, 순환 회전 정전 유도 단계가 있다. 우선 첫 번째 단계에서는 FEP 세그먼트는 알루미늄 층과 접촉하게 되는데, 두 표면의 극성이 다르기 때문에 전자는 알루미늄에서 FEP 표면으로 보내지고 그 결과 FEP 표면에 순 음전하가 발생하고 알루미늄에 순 양전하가 생기게 된다. 이어서 두 번째 단계에서는, 두 개의 층 사이에 0.5 ~ 1 mm 두께의 공기 매질을 형성 한 상태에서 FEP 세그먼트를 A1에서 A2로 회전시킴에 따라 전자는 A2에서 A1로 이동하게 되는데, FEP 표면의 이동하지 않는 음 전하에 의해 생성 된 전위차를 무효화한다. 여기 까지가 에너지 변환 과정의 전반부이며, 세 번째 단계에서는 FEP가 A2의 겹쳐진 위치에 도달하고 대다수의 전자가 A1로 이동하게 되어 A2에는 대부분 양이온만이 있게 되며, 그 후 A1을 향해 FEP 세그먼트가 이동하게 된다. 따라서 네 번째 단계에서는 전자는 A1에서 A2로 되돌아가 FEP 세그먼트가 원래 위치로 돌아갈 때까지 반대 방향으로 전류를 발생시키는데 여기까지가 에너지 전환 과정의 후반부이다.

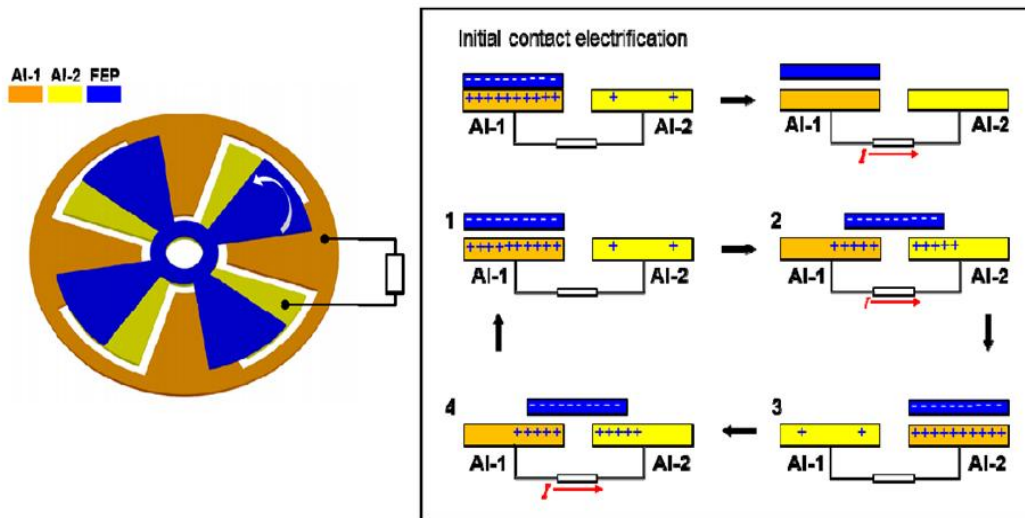


Fig. 25. A schematic of TENG operation in sliding mode, [7].

2) LTD 열 엔진 이용: TENG 슬라이딩 방식

Fig. 26은 슬라이딩 방식에서 작동 할 때의 실제 TENG-LTD 열 엔진의 모습을 나타내며 이 때, LTD 열 엔진을 구동하기 위해 핫플레이트 (600W, 최대 온도 380°C)를 사용하였으며 LTD 열 엔진의 고온 및 저온의 평균 온도는 약 98°C 및 23.6°C (ST= 74.4°C)상에서 측정되었다.

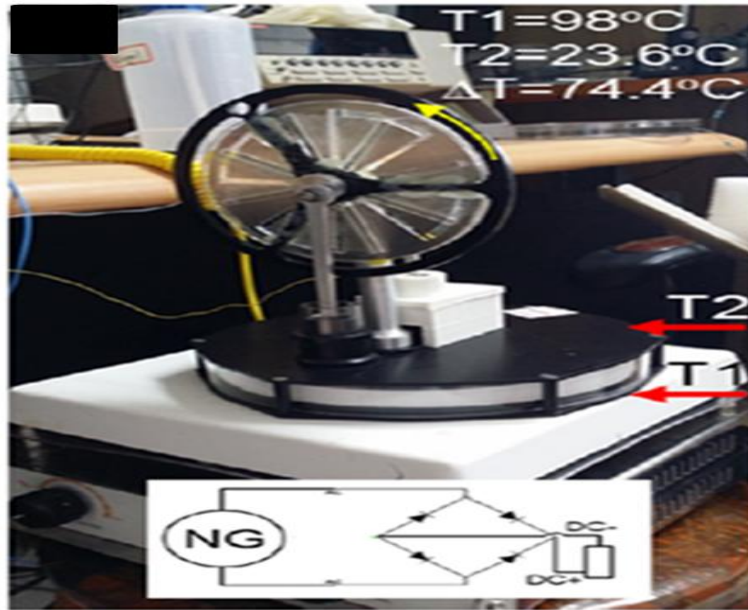


Fig. 26. Experimental layout of TENG driven by a LTD heat engine placed on an electric plate heater

3) 슬라이딩방식과 수직 접촉 분리방식을 적용한 TENG

수직 접촉 분리 모드로 작동하는 TENG는 LTD엔진에서 디스플레이서의 움직임을 제어하는 축에 결합하였다. 이는 엔진의 파워 피스톤에 연결된 휠의 회전운동으로 축이 반복적으로 위아래로 움직이기 때문에 슬라이딩 방식으로 작동시키는 것 외에도 수직 접촉 분리 모드로 작동하는 TENG를 적용 할 수 있기 때문이며 즉, 하나의 TENG는 엔진의 회전하는 휠을 통해 슬라이딩 방식으로 작동하고 다른 TENG는 위에서 언급 한 수직 접촉 분리 방식으로 작동할 수 있다. Fig. 27은 LTD 열 엔진에 통합된 2개의 상이한 TENG 작동방식을 동시에 적용한 모습을 나타낸다. 여기서, TENG-2는 수직 접촉 분리 모드로 작동하는 TENG를 말하며, 슬라이드 유리 기판 및 그 위에 위치한 두 개의 전극으로 구성된다. 이 중 하나는 FEP 필름과 Al 박층의 두 층으로 구성되며, 다른 하나는 Al 박층만을 갖는 형태이다.

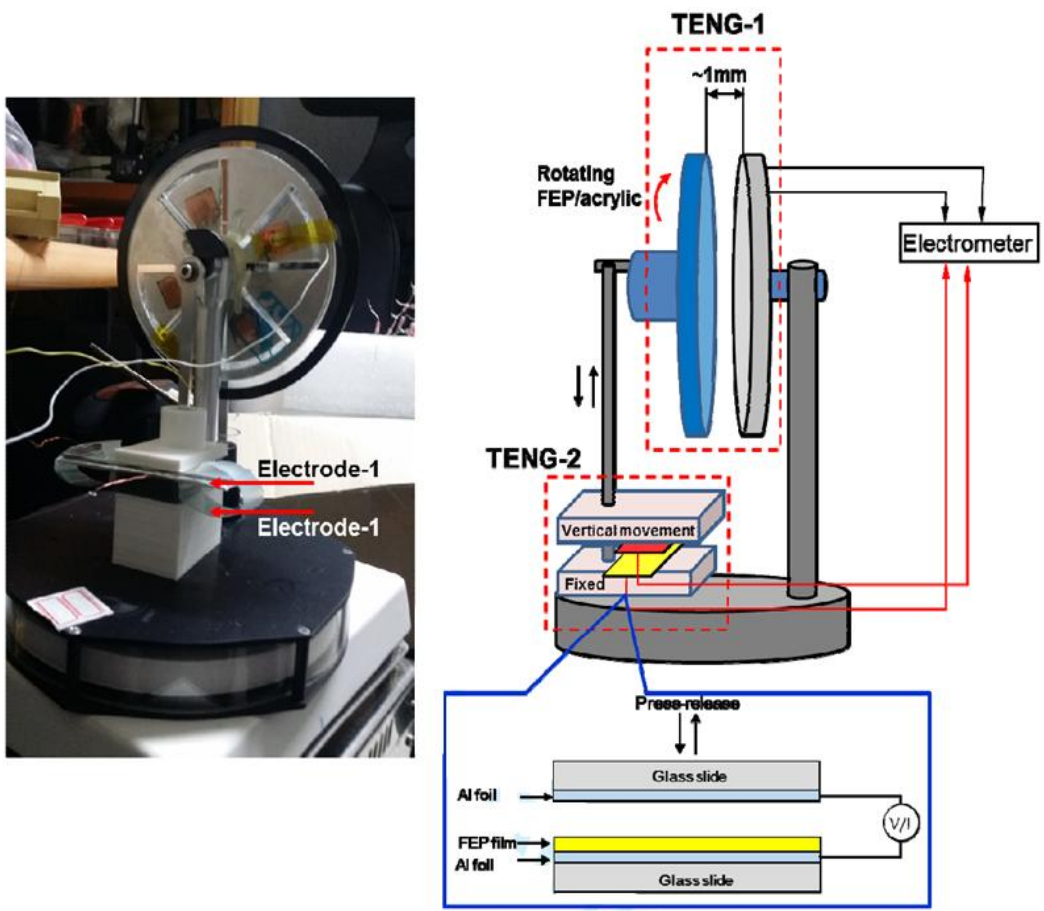


Fig. 27. Two TENGs integrated into LTD heat engine

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Mechanical power ; 저온도차 스텔링엔진

1) 저온도차 스텔링 엔진 별 토크

엔진 별 토크의 계산은 위 실험방법에서 다루었듯이 $\tau = F \times r$ 로써 구할 수 있다. 여기서 $\tau = F \times r = m \times g \times r$ 을 이용하여 본 연구에 사용된 LTD엔진의 토크를 계산하였다. 온도차 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 와 질량 200mg 을 사용했을 때의 각 스텔링 엔진 별 토크를 Table. 4 에 나타내었다.

Table 4. LTD engine torque(200mg)

MM-7	질량(mg)	온도차	중력가속도(m/s ²)	반지름(mm)
	200	10 [°] C	9.8	10.25
토크 = 0.02009(N)·mm				
Single	질량(mg)	온도차	중력가속도(m/s ²)	반지름(mm)
	200	10 [°] C	9.8	9.25
토크 = 0.01813(N)·mm				
Twin	질량(mg)	온도차	중력가속도(m/s ²)	반지름(mm)
	200	10 [°] C	9.8	12
토크 = 0.02352(N)·mm				

Table. 4 에서 알 수 있듯이 동일한 온도차 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 와 200mg 의 질량을 이용 했을 시 Twin엔진의 토크가 0.02352[N*mm]로 가장 높았으며 다음으로 각각 MM-7엔진 0.02009[N*mm], Single엔진 0.01813[N*mm]의 토크가 측정되었다.

2) 온도차에 따른 저온도차 스텔링 엔진의 기초 출력 비교

가열부와 방열부간의 온도차 10°C, 20°C, 30°C, 40°C 에서 측정 한 저온도차 스텔링 엔진별 출력을 Fig. 28에 나타내었다. 이 때, LTD엔진의 출력은 $P = F \times V = m \times g \times (distance/time)$ 로 계산되어질 수 있다.

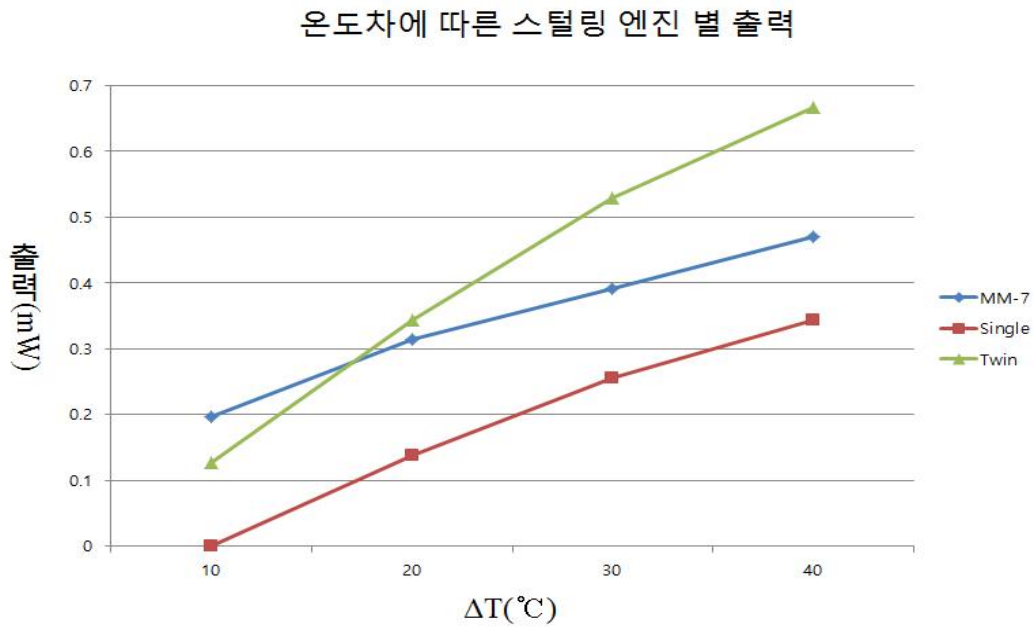


Fig. 28. Output of Stirling engine against temperature difference

측정결과 질량200mg 고정인 상태에서 $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 일 때, MM-7엔진의 출력이 가장 높게 나타났으나 $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 이후부터 Twin 엔진의 출력이 가장 높게 산출되었다.

3) 온도차에 따른 저온도차 스텔링 엔진의 토크 및 출력

추의 질량을 1g, 2g, 3g 등으로 변경하며 측정하였으며 온도차 또한 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 등으로 올라가며 LTD엔진 별 토크, 출력, 단위면적 당 출력 측정 및 계산을 하였다.

- 저온도차 스텔링엔진(MM-7)

LTD엔진(MM-7)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table. 5에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력과 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력은 각각 Fig. 29, Fig. 30에 나타내었다.

Table 5. Performance measurement of Stirling engine(MM-7)

MM-7												
ΔT	10°C			20°C			30°C			40°C		
추 질량(g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
토크 (N-mm)	0.10045	0	0	0.10045	0.2009	0.30135	0.10045	0.2009	0.30135	0.10045	0.2009	0.30135
출력(mW)	0.363	0	0	1.176	1.795	1.893	1.274	2.305	2.988	1.078	2.579	4.455
단위면적당 출력 (mW/mm ²)	0.000026	0	0	0.000085	0.000129	0.000136	0.000092	0.000166	0.000215	0.000078	0.000186	0.000321

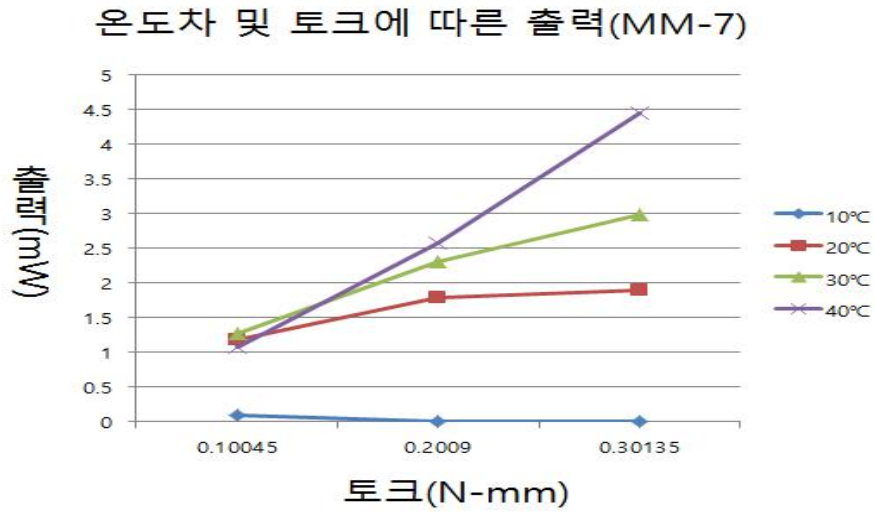


Fig. 29. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)

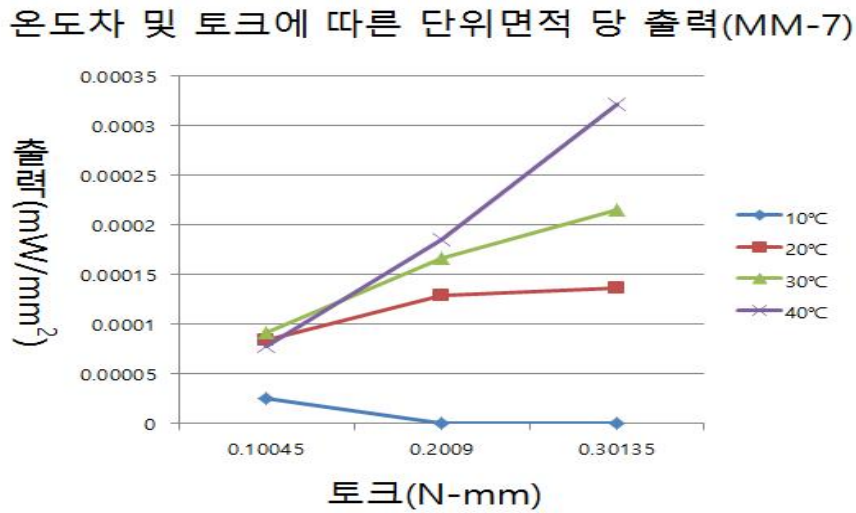


Fig. 30. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)

온도차 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 일 경우 추의 질량 2g 과 3g 에서는 스텔링엔진이 추를 들어 올리지 못하였으며, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 의 조건을 제외한 낮은 토크 값 0.10045[N*mm]에서 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 온도차의 경우 서로 비슷한 출력을 보였으나 그 이상의 토크 값을 가졌을 시에는 확연히 다른 출력 값을 보여준다.

- 저온도차 스티어링엔진(Twin)

LTD엔진(Twin)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table. 6 에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력과 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력은 각각 Fig. 31, Fig. 32에 나타내었다.

Table 6. Performance measurement data of Stirling engine(Twin)

ΔT	Twin											
	10°C			20°C			30°C			40°C		
추 질량(g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
토크 (N-mm)	0	0	0	0.118	0	0	0.118	0.235	0	0.118	0.235	0
출력(mW)	0	0	0	0.431	0	0	1.204	0.501	0	2.072	0.992	0
단위면적당 출력 (mW/mm ²)	0	0	0	0.0000495	0	0	0.000138	0.0000575	0	0.000238	0.000114	0

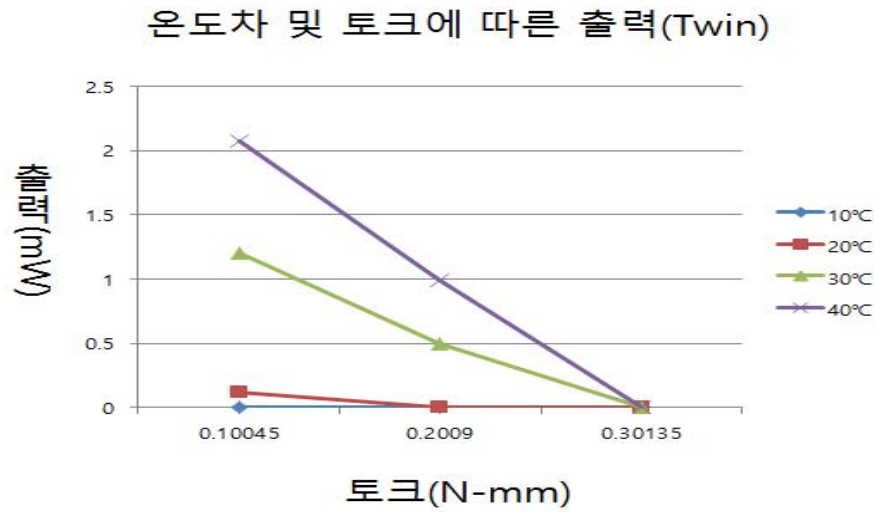


Fig. 31. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)

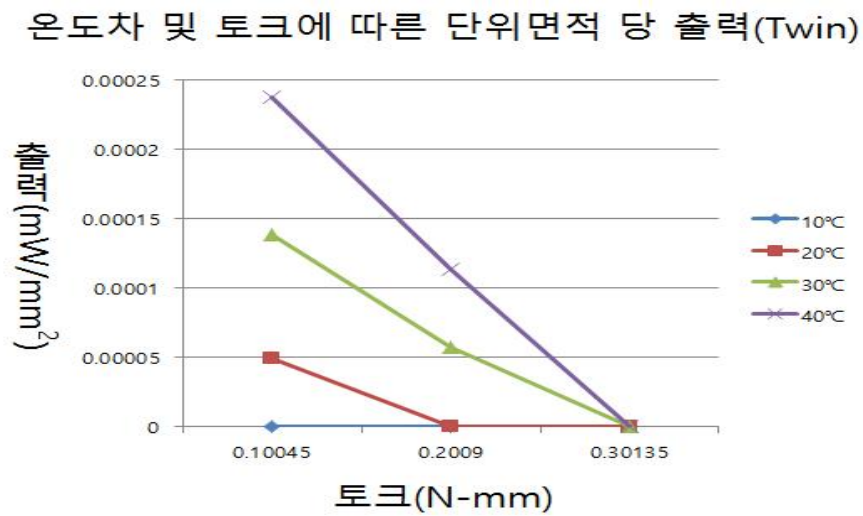


Fig. 32. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)

온도차 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 에서는 질량 1g, 2g, 3g 모두 들어올리지 못하였으며, 온도차 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 경우 질량 2g 과 3g, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 와 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 경우는 3g 을 들어올리지 못하였다.

- Single

LTD엔진(Single)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table. 7 에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력과 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력은 각각 Fig. 33, Fig. 34에 나타내었다.

Table 7. Performance measurement data of Stirling engine(Single)

ΔT	Single											
	10°C			20°C			30°C			40°C		
추 질량(g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
토크 (N-mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09065	0	0
출력(mW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.513794	0	0
단위면적당 출력 (mW/mm ²)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000118	0	0

온도차 및 토크에 따른 출력(Single)

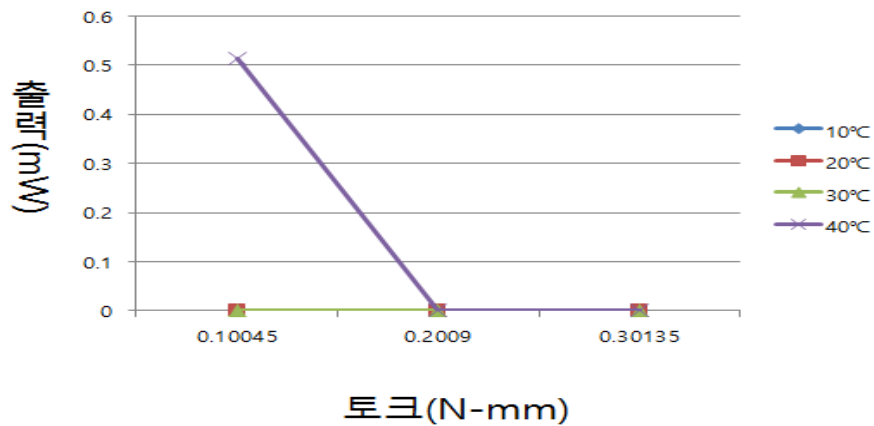


Fig. 33. Output of Stirling engine against difference and torque(Single)

온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력(Single)

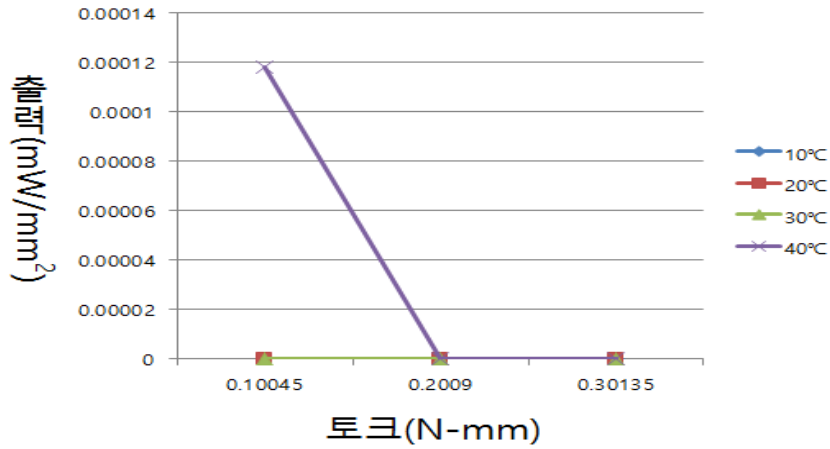


Fig. 34. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single)

Single엔진의 경우 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 질량 1g, 2g, 3g 모두 들어 올리지 못하였으며 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서 1g의 추를 들어올린 후 2g 과 3g 은 들어 올리지 못하는 결과가 나왔다.

LTD엔진의 기계적 출력을 산출한 결과 MM-7의 최대 출력이 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 상에서 약 4.45mW 로 가장 높게 산출되었다. 이에 LTD엔진으로부터 전기적 출력을 얻어내는 연구는 MM-7엔진을 이용하여 실험을 진행하였다.

3.2 Mechanical power ; 가돌리늄 발전장치

1) 가돌리늄 발전장치 토크

가돌리늄 발전장치의 토크 계산은 위 실험방법에서 다루었듯이 $\tau = F \times r = m \times g \times r$ 을 이용 본 연구에 사용된 가돌리늄 발전장치의 토크를 계산하였다. 질량 5g, 10g, 20g, 50g 과 축의 반경 5mm 에서 가돌리늄 발전장치에 걸리는 질량별 토크를 Table. 8 에 나타내었다.

Table 8. Torque by mass

Gadolinium			
질량(g)	중력가속도(m/s ²)	반지름(mm)	토크(N*mm)
5	9.8	5	0.245
10			0.49
20			0.98
50			2.45

Table. 8 에 나타낸 바와 같이 각 질량별 가돌리늄 발전장치의 토크는 질량 5g, 10g, 20g, 50g 에 따라 각 각 0.245[N*mm], 0.49[N*mm], 0.98[N*mm], 2.45[N*mm] 등으로 산출되었다.

2) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 가돌리늄 출력 및 RPM

$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 측정 시 추 질량을 5g, 10g, 20g, 50g 로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 120RPM 으로 측정되었다. 이때 고온의 작동유체 온도는 40°C 이며 저온의 작동유체 온도는 20°C 이다. Table. 9 에 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 9. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N-mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	2.94	5.39	0	0
분당회전수 (r/mim)	114.6497	105.0955	0	0

$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 질량 20g, 50g 을 들어올리지 못하였으며 질량5g 에서 RPM은 약 114.64[r/min] 출력은 약 2.94mW 로 나타났으며 질량 10g 에서 RPM은 약 105.1[r/min] 출력은 약 5.39mW 로 나타났다. Fig. 35에 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 그래프를 나타냈다.

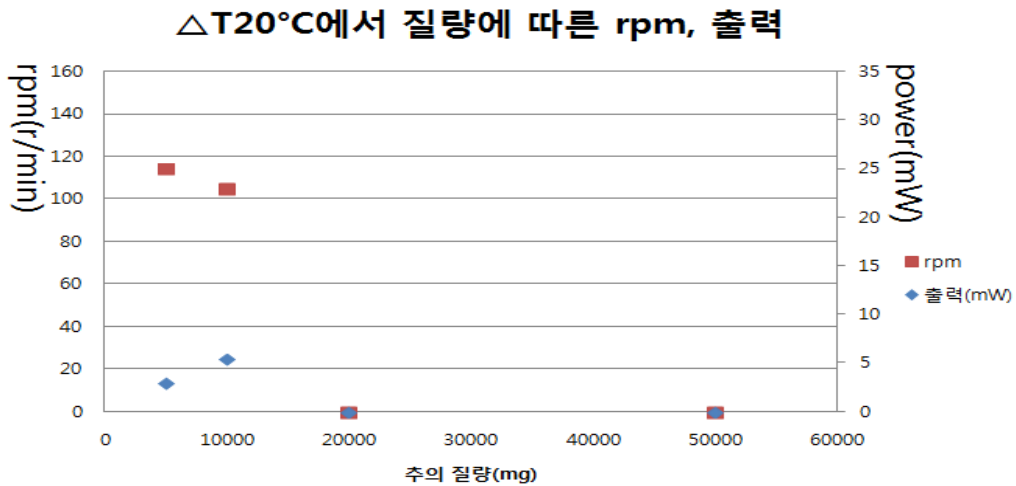


Fig. 35. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)

3) $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 가돌리늄 출력 및 RPM

$\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 측정시 추 질량을 5g, 10g, 20g, 50g 로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 125RPM 으로 측정되었다. 이때 고온의 작동유체 온도는 50°C 이며 저온의 작동유체 온도는 20°C 이다. Table. 10 에 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 10. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N*mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	3.136	5.586	9.8	0
분당회전수 (r/min)	107.0064	108.9172	95.5414	0

$\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 질량 50g 을 들어올리지 못하였으며 질량5g 에서 RPM은 약 107.0[r/min], 출력은 약 3.1mW 로 나타났으며 질량 10g 에서 RPM은 약 108.9[r/min], 출력은 약 5.5mW 로 나타났으며 질량20g 에서 RPM은 약 95.5[r/min], 출력은 약 9.8mW 로 나타났다. Fig. 36에 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 그래프를 나타냈다.

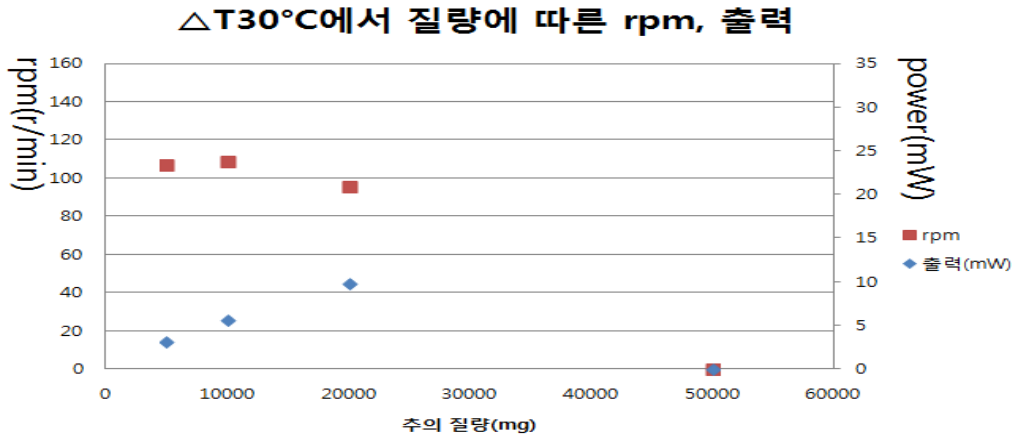


Fig. 36. RPM and mechanical power vs mass ($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)

4) $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 가돌리늄 출력 및 RPM

$\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서 측정 시 추 질량을 5g, 10g, 20g, 50g 로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 145RPM 으로 측정되었다. 이때, 고온의 작동유체 온도는 60°C 이며 저온의 작동유체 온도는 20°C 이다. Table. 11에 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 11. Performance measurement of gadolinium generator ($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N*mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	3.185	6.664	12.25	20.09
분당회전수 (r/mim)	124.2038	129.9363	119.4268	108.9172

$\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서는 실험에 사용한 추를 모두 들어올렸으며 질량5g 에서 RPM 은 약 124.2[r/min] 출력은 약 3.1mW 로 나타났으며, 질량 10g 에서 RPM은 약

129.9[r/min] 출력은 약 6.6mW 로 나타났으며, 질량20g 에서 RPM은 약 119.4[r/min], 출력은 약 12.2mW 로 나타났으며, 질량50g 에서 RPM은 약 108.9[r/min], 출력은 약 20.0mW 로 나타났다. Fig. 37에 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 그래프를 나타냈다.

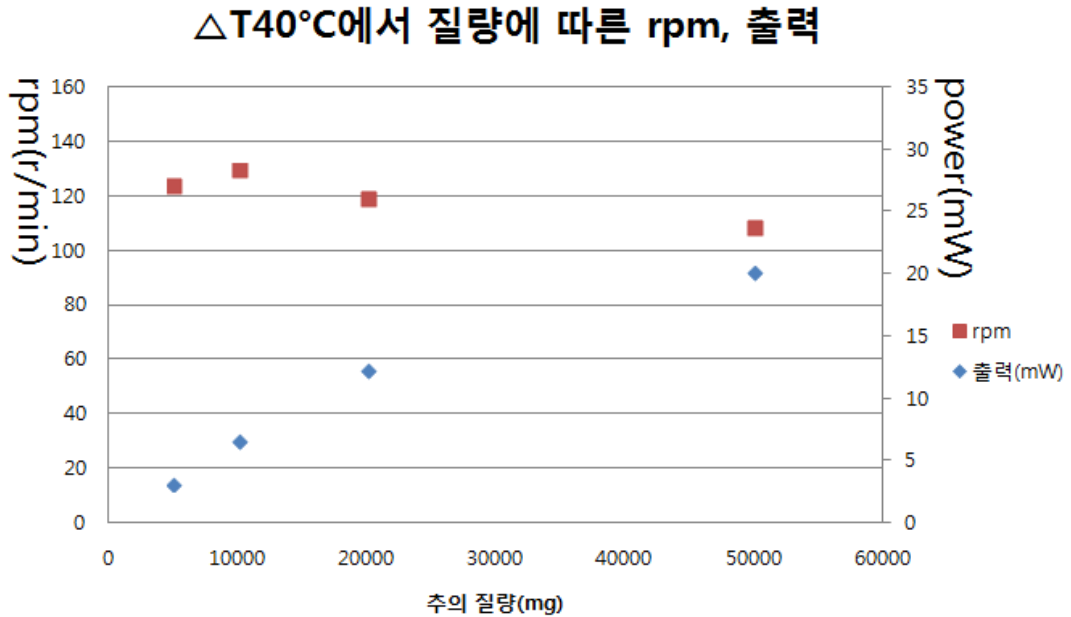


Fig. 37. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)

5) $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 가돌리늄 출력 및 RPM

$\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 측정시 추 질량을 5g, 10g, 20g, 50g 로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 185RPM 으로 측정되었다. 이때 고온의 작동 유체 온도는 65°C 이며 저온의 작동유체 온도는 20°C 이다. Table. 12에 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 12. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

		Gadolinium $\Delta T = 45^{\circ}\text{C}$			
추질량(g)	5	10	20	50	
토크(N*mm)	0.245	0.49	0.98	2.45	
출력(mW)	4.067	6.86	12.93	29.4	
분당회전수(r/mim)	158.598	133.758	126.1146	114.6497	

$\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서는 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서와 같은 결과로 실험에 사용한 추를 모두 들어올렸으며, 질량5g 에서 RPM은 약 158.5[r/min], 출력은 약 4.0mW 로 나타났으며 질량 10g 에서 RPM은 약 133.7[r/min], 출력은 약 6.8mW 로 나타났으며 질량20g 에서 RPM은 약 126.1[r/min], 출력은 약 12.9mW 로 나타났으며 질량 50g 에서 RPM은 약 114.6[r/min], 출력은 약 29.4mW 로 나타났다. Fig. 38에 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 그래프를 나타냈다.

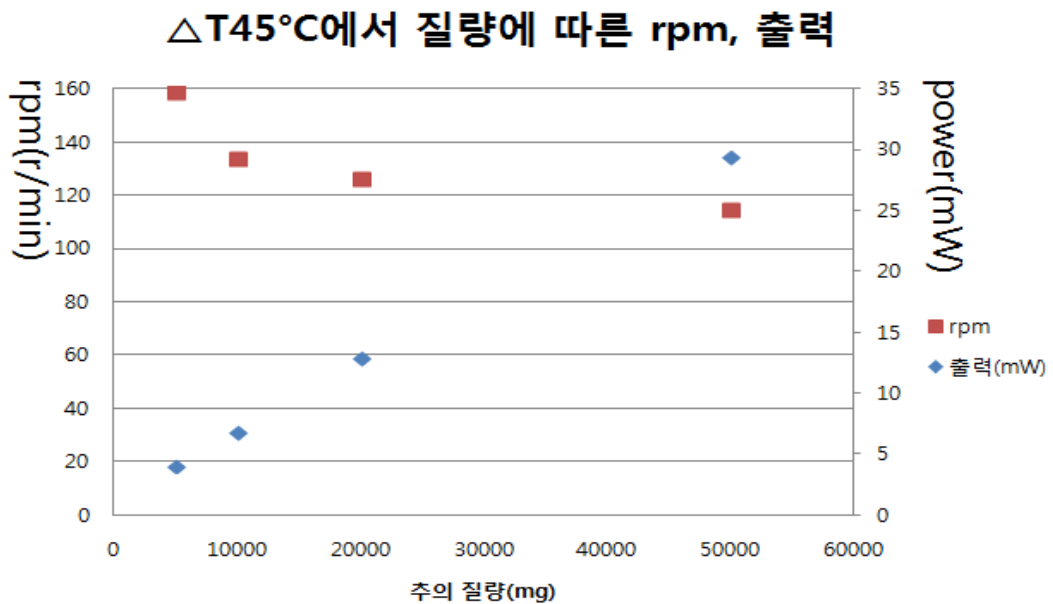


Fig. 38. RPM and mechanical power vs mass($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

3.3 Electrical power ; 저온도차 스텔링엔진

LTD엔진에서 전기적 출력을 얻기 위해 소형 AC모터를 발전기로 사용하여 출력을 얻었으며 가열부와 방열부의 온도차 약 $\Delta T=25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 사이에서의 시간에 따른 전압을 측정하였다.

Fig. 39에 발전장치에 AC모터 1개를 연결했을 경우의 전압과 AC모터 3개를 직렬로 연결했을 경우의 전압을 시간과 온도에 따른 그래프로 나타내었다.

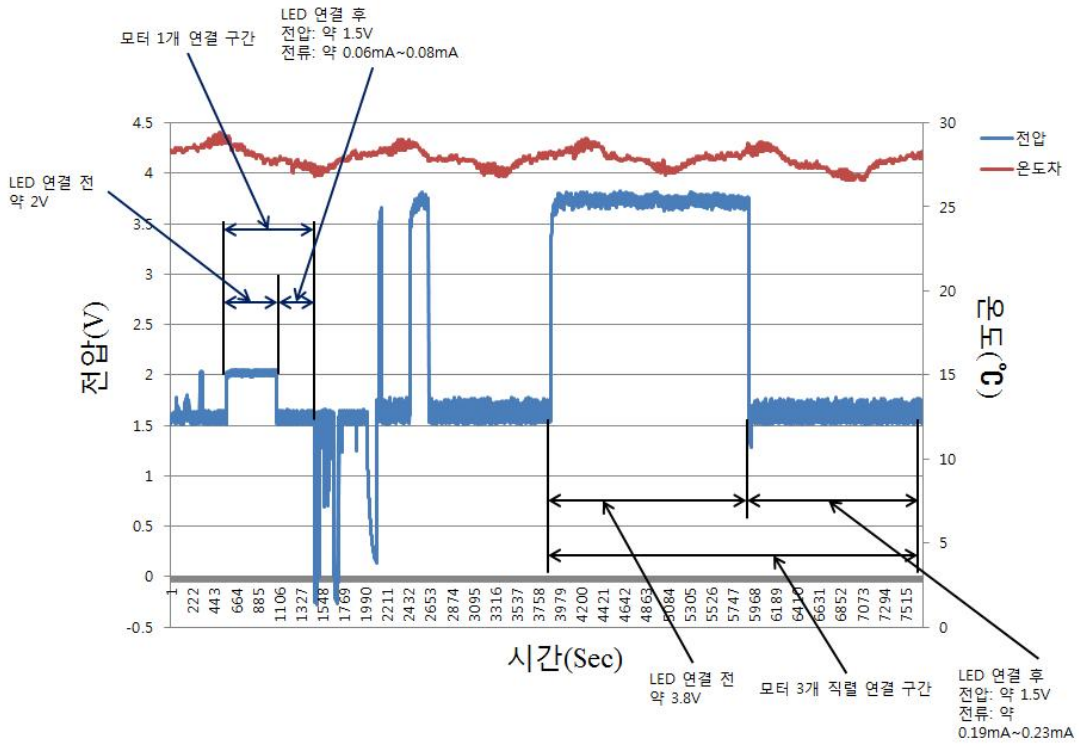


Fig. 39. Electric power using the LTD heat engine

AC모터를 활용하여 출력을 측정 한 결과 모터 1개 연결 구간에서 LED 연결 시 전압은 약 1.5V, 전류는 약 0.06mA~0.08mA 가 측정되었으며, 모터 3개 직렬 연결 구간에서의 전압값 약 3.8V, 전류값은 약 0.19mA~ 0.23mA 가 측정되었다. 따라서 약 $\Delta T=25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 사이에서의 출력은 1개 연결 시 0.09mW~ 0.12mW

로 산출되었으며 3개 직렬연결 시 0.72mW~ 0.87mW 가 산출 되었다.

앞서 측정 한 기계적 출력은 약 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 2.98mW 로 전기적 출력과 비교 시 약 24배의 출력차이를 보였다.

3.4 Electrical power ; 가돌리늄 발전장치

가돌리늄 발전장치 또한 저온도차발전장치와 같은 방식으로 전기적 출력을 얻기 위해 소형 AC모터를 발전기로 사용하여 전기적 출력을 얻어 계산하였으며 기계적 출력계산시 가장 높은 온도차였던 고온의 작동유체와 저온의 작동유체의 온도차 약 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 사이에서의 시간에 따른 전압, 전류 및 출력을 측정하였다. Fig. 40, Fig. 41, Fig. 42에 각 각 시간에 따른 가돌리늄 발전장치의 전압, 전류, 출력 값을 나타냈으며 그 결과 값을 Table. 13 에 정리하여 나타내었다.

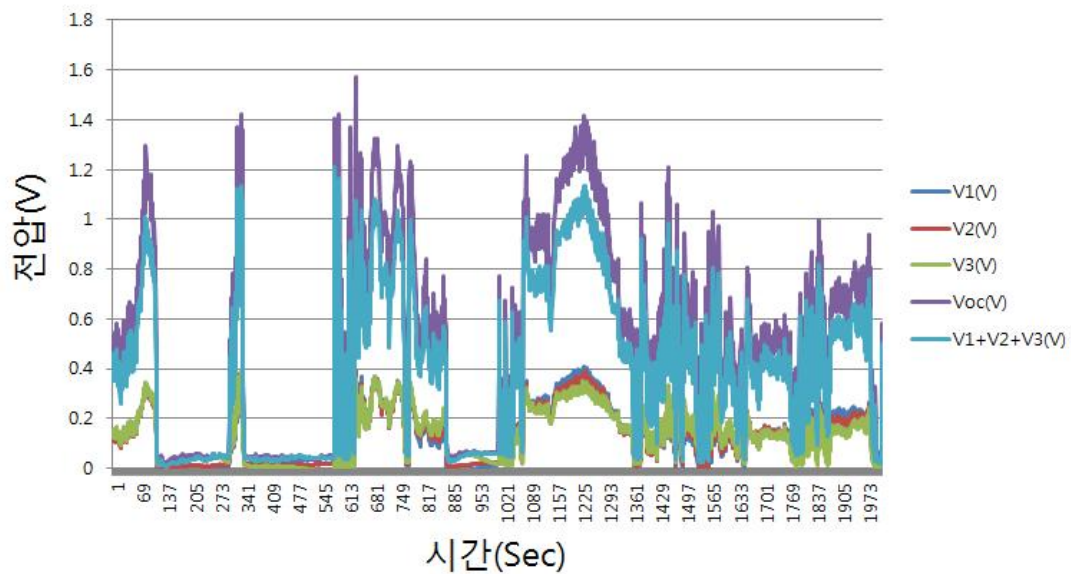


Fig. 40. Voltage change over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

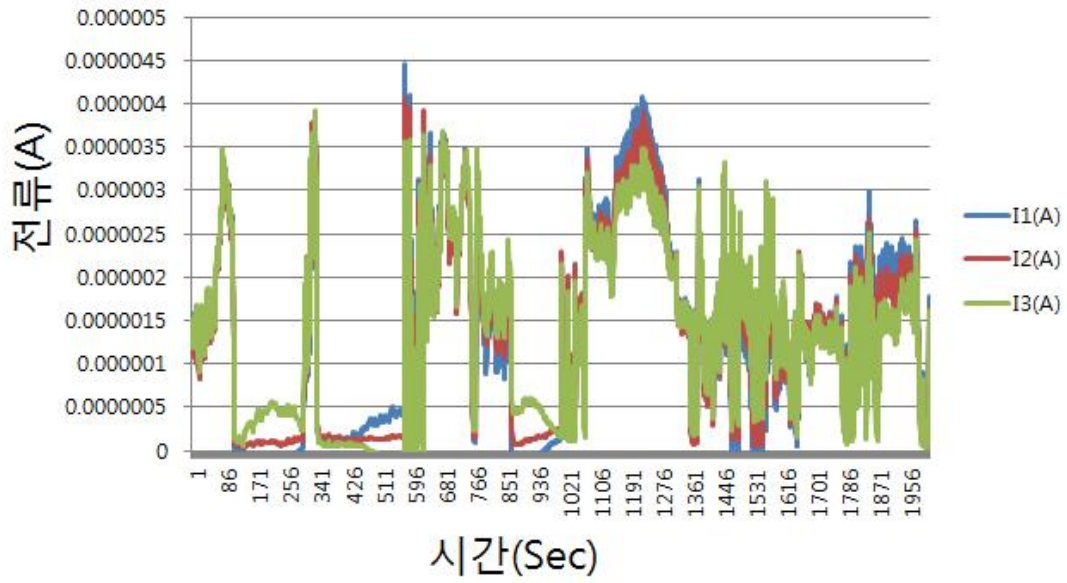


Fig. 41. Current change over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

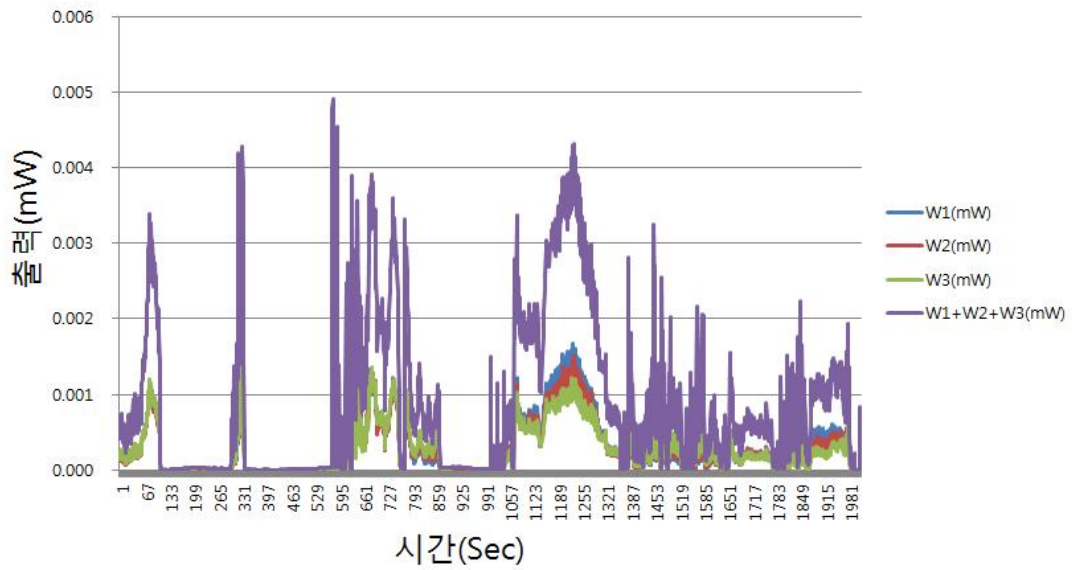


Fig. 42. Electrical power change over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

Table 13. Performance measurement of gadolinium electric generator($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium			
최대 $V_{oc} = 1.58\text{V}$, 저항 = $100\text{k}\Omega$			
	전압(V)	전류(mA)	출력(mW)
1	0.44	0.0044	0.0019
2	0.41	0.0041	0.0017
3	0.36	0.0035	0.0013
4	1.21		0.0049

가돌리늄 발전장치의 경우 출력을 측정 한 결과 개방전압 약 1.58V으로 측정 되었으며 저항 $100\text{k}\Omega$ 3개를 연결하여 측정하였을 시의 전압은 각각 0.44V, 0.41V, 0.36V 전류는 각각 약 0.0044mA, 0.0041mA, 0.0035mA 로 측정되었다. 이 때 출력은 각각 0.0019mW, 0.0017mW, 0.0013mW 가 측정되어 총 출력은 0.0049mW 로 산출되었다.

앞서 측정한 가돌리늄 발전장치의 기계적 출력은 약 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 29.4mW 로 전기적 출력과 비교 시 약 6000배의 큰 출력차이를 보였다.

3.5 TENG의 성능 측정

1) 슬라이딩 방식의 전기 출력 기초 측정

실제 측정을 수행하기 전에 두 개의 AI 전극과 FEP 필름으로 구성된 간단한 실험 키트를 사용하여 기본 전기 출력을 측정하였으며 Fig. 43(a)는 그 모식도를 나타낸 것이다.

Fig. 43(b)에 나타냈듯 AI 전극 위로 FEP 필름을 앞뒤로 미끄러뜨림으로써 발생하는 개방 회로 전압의 거동을 관찰하였으며, Fig. 43(c)에 그래프로 나타냈듯 FEP 필름이 하나의 AI 전극에서 다른 쪽의 AI 전극으로 미끄러지면 양의 전압이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 반대로 FEP 필름이 후방으로 미끄러지면 음의 전압을 발생시키는걸 알 수 있었다. 따라서 FEP 필름의 연속적인 전·후진으로 미끄러지는 동작은 AC 전압 신호를 생성하게 되는데 이는 4개의 다이오드로 구성된 브리지 정류기를 사용하여 쉽게 DC 신호로 변환 할 수 있었다. Fig. 43(d)는 정류된 DC 신호의 그래프를 나타낸다.

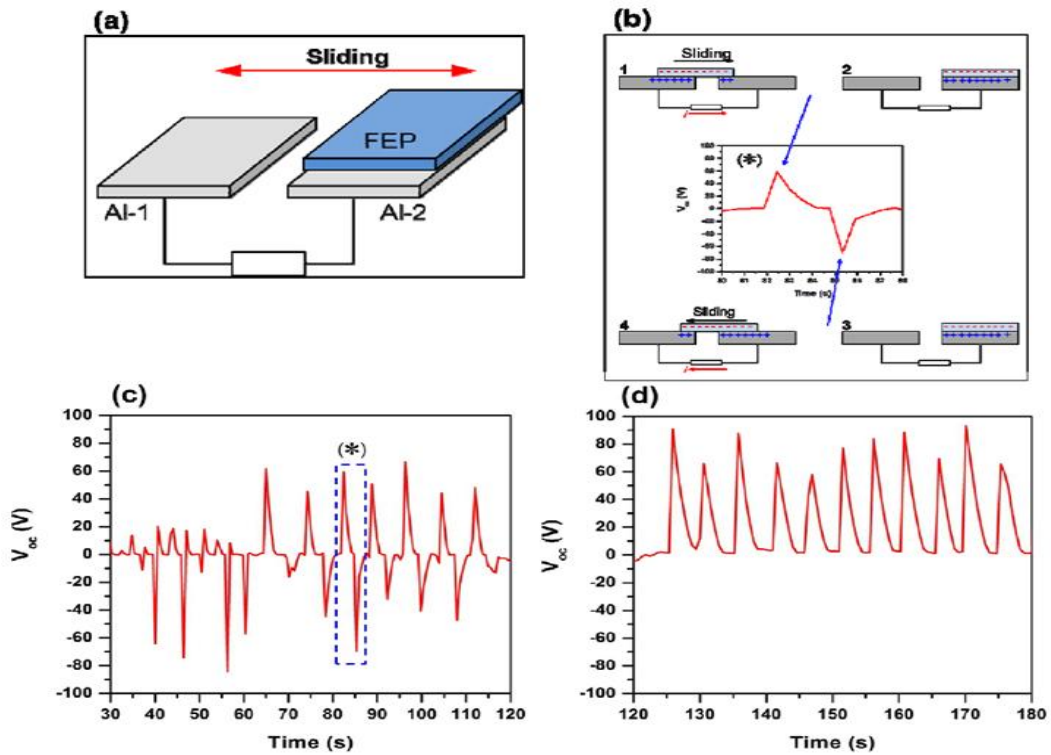


Fig. 43. Performance of simplified TENG operating in sliding mode :

- (a) Simple experimental kit composed of two Al electrodes and a FEP film,
- (b) Forward and backward sliding for electricity generation, (c) V_{oc} produced, (d) V_{oc} rectified

2) LTD 열 엔진 이용: TENG 슬라이딩 방식

Fig. 44는 슬라이딩 방식에서 작동 할 때의 실제 TENG/LTD 열 엔진의 전압 및 전류 신호를 나타내며 온도차는 74.4°C 상에서 측정되었다. 이 때의 온도차에서 TENG/LTD 열 엔진의 회전 속도는 250RPM 으로 나타났으며 Fig. 44(a), Fig. 44(b)에 나타냈듯 전압과 전류 신호는 TENG를 작동시키는 동시에 엔진의 움직임에 따른 즉각적인 응답을 표시하게 된다. 전극 간 간격이 1mm 인 TENG의 개방 회로 전압 및 단락 전류는 각각 70V 및 0.31 μ A 로 측정되었다.

LTD 열 엔진과 연계한 TENG의 작동 시 노이즈가 존재하여 일부 불확실한 값이 측정 기간 동안 존재했으며, 이로 인해 평균값 근처에서 전압 약 $\pm 1.3V$,

전류 약 $0.017\mu\text{A}$ 정도의 변동이 있었다.

TENG의 출력은 입력 저항에 크게 의존하는데 전위계 내부 저항은 $200\text{G}\Omega$ 으로 매우 높았으며 이는 TENG가 생산할 수 있는 최대 출력 전압을 측정할 수 있는 것으로 간주된다.

그러나 최대 출력 전압에 대응하는 입력 저항의 정확한 값을 알기 위해서는 저항과 전압 사이의 관계를 조사하는 것이 바람직하며 Fig. 45는 그 저항과 전압의 관계를 나타낸다. 이 전압 - 저항 곡선은 상이한 값의 저항으로 출력 전압을 측정함으로써 얻어졌는데 Fig. 45에 나타냈듯이 입력 저항이 $1.5\text{G}\Omega$ 일 때 약 60V 의 최대 출력 전압이 측정되었다.

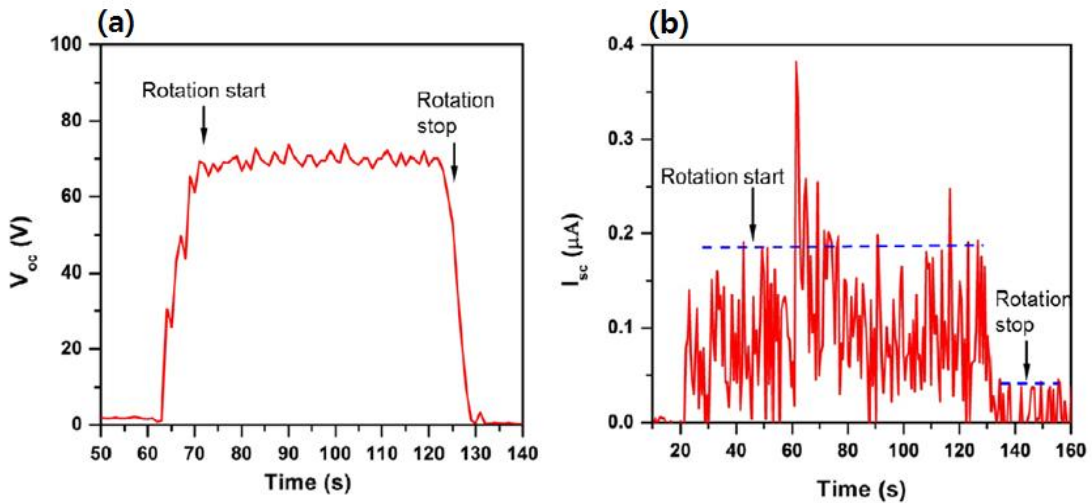


Fig. 44. Performance of TENG driven by a LTD heat engine:(a) V_{oc} , (b) I_{sc} .

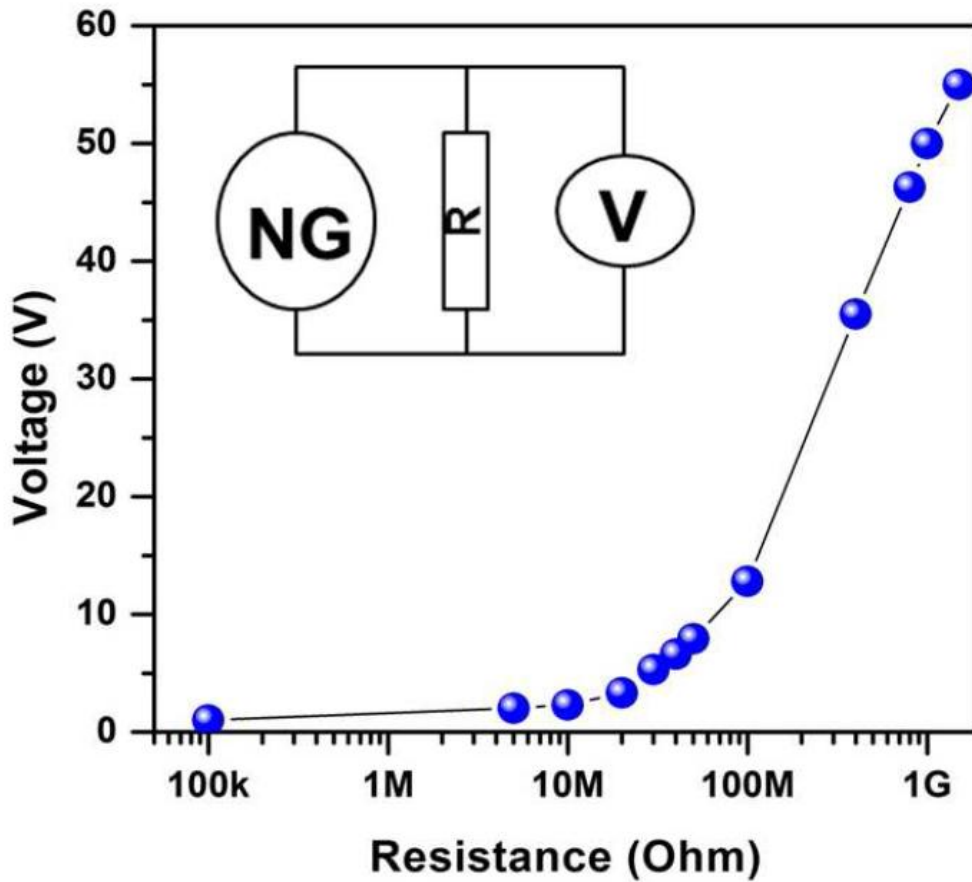


Fig. 45. Voltage-input resistance curve of the TENG.

3) 슬라이딩방식과 수직 접촉 분리방식을 적용한 TENG

총 출력을 산출하기 위해 TENG를 결합하기 전 별도의 측정을 하였는데, Fig. 46에 수직 접촉 분리방식(TENG-2)에서 작동하는 TENG에 의해 생성된 전압 및 전류 출력을 나타냈으며, TENG-1은 슬라이딩 모드에서 작동하는 TENG를 나타냈다. Fig. 46(a)에서 TENG-1에 연결된 회선의 빨간색 "X"표시는 TENG에서 나오는 전력이 없음을 나타낸다. Fig. 46(b), Fig. 46(c)에 나타난 그래프는 시간 변화에 따른 개방 회로 전압(V_{oc})과 전류(I_{sc})로써, TENG 작동의 시작점과 종단점을 명확히 보여준다. 그러므로 전기 신호의 최고점과 최저점을 관찰함으로써 그림과 같이 TENG의 작동을 쉽게 식별 할 수 있다.

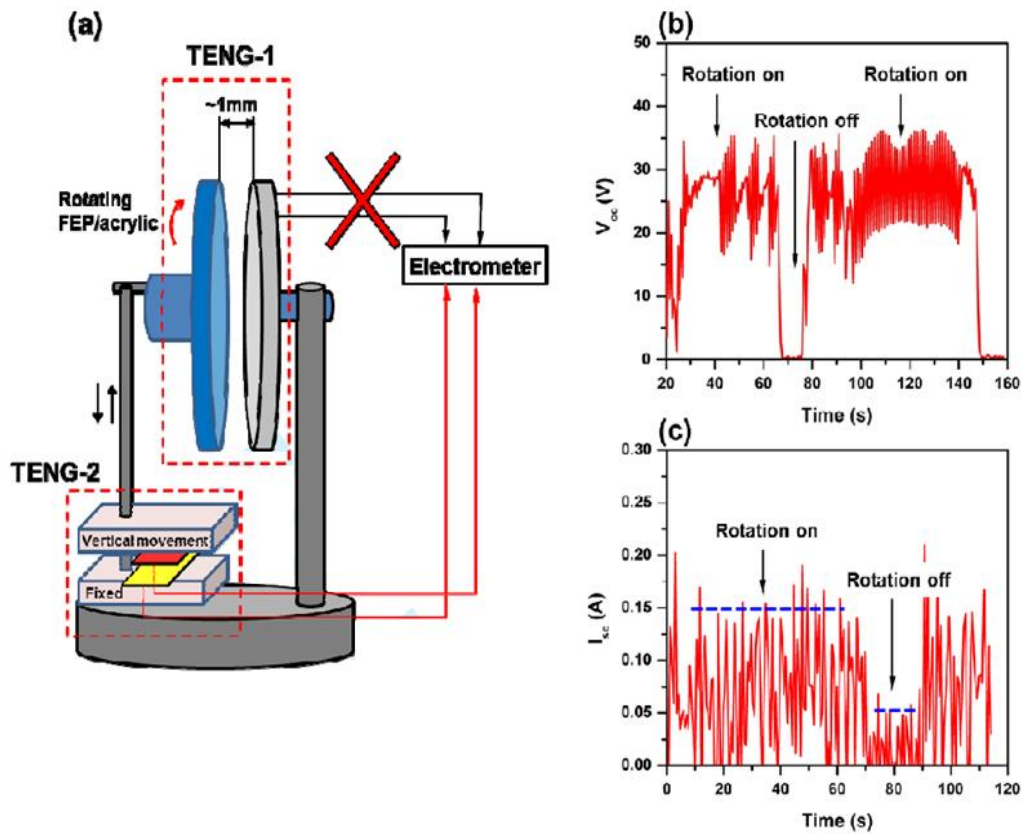


Fig. 46. Output voltage and current of TENG-2 operating in vertical contact-separation mode: (a) A schematic diagram of experimental system, (b) V_{oc} , (c) I_{sc}

Fig. 47에 슬라이딩 방식(TENG-1)에서 작동하는 TENG에 의해 생성된 전압 및 전류 출력을 나타냈다. 위에서 설명했듯 TENG-2에 빨간색 “X”표시는 전기 신호가 들어오지 않음을 나타낸다. 즉, TENG-2는 전력을 생산하지 않으며, 여기서 시간에 따라 변하는 개방 회로 전압(V_{oc}) 및 전류(I_{sc})의 전기 신호의 패턴이 Fig. 46과 유사하게 일어졌다.

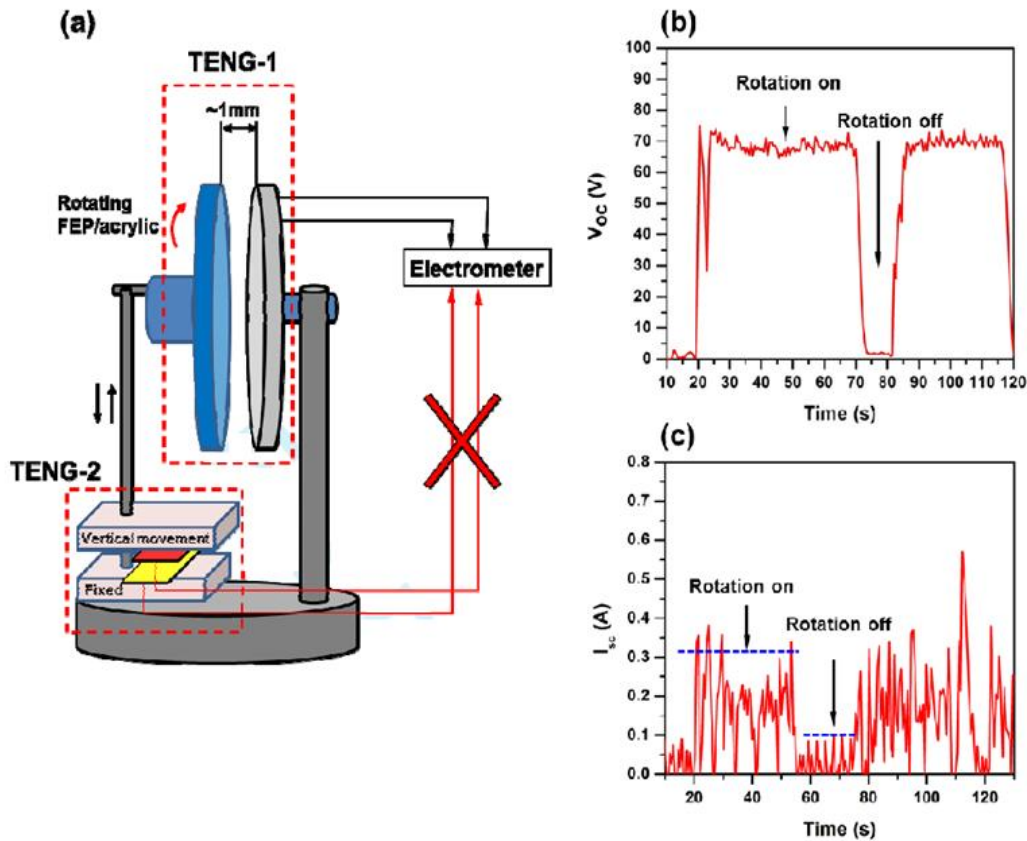


Fig. 47. Output voltage and current of TENG-1 operating in (rotation) sliding mode: (a) A schematic diagram of experimental system, (b) V_{oc} , (c) I_{sc}

두 TENG의 전기 신호가 Fig. 48(a)에 개략적으로 나타난 바와 같이 정류되고 합쳐지면 TENG의 결합된 출력은 Fig. 48(b), Fig. 48(c)와 같이 측정된다. 여기서 두 개의 브리지 정류기를 사용하여 각 TENG의 AC출력을 DC로 변환하는데 사용되었다.

Fig. 48(b)에 약 110°C 로 가열 된 핫플레이트에서 작동되는 두 개 TENG 각각의 V_{oc} 및 통합된 V_{oc} 를 나타냈으며 그림에서 보이듯 TENG-1(슬라이딩 방식)과 TENG-2(수직 접촉 분리 방식)는 각각 70V 와 35V 의 전압을 발생시키므로 결합된 출력은 105V 로 산출된다. 이는 본 연구에서 사용된 두 가지 다른 방식의 TENG결합의 유효성을 검증하였다고 사료되며, Fig. 48(c)는 각 TENG-1

과 TENG-2에 의해 생성된 전류(I_{sc})와 결합하였을 때 생성되는 전류 (I_{sc})를 나타낸다.

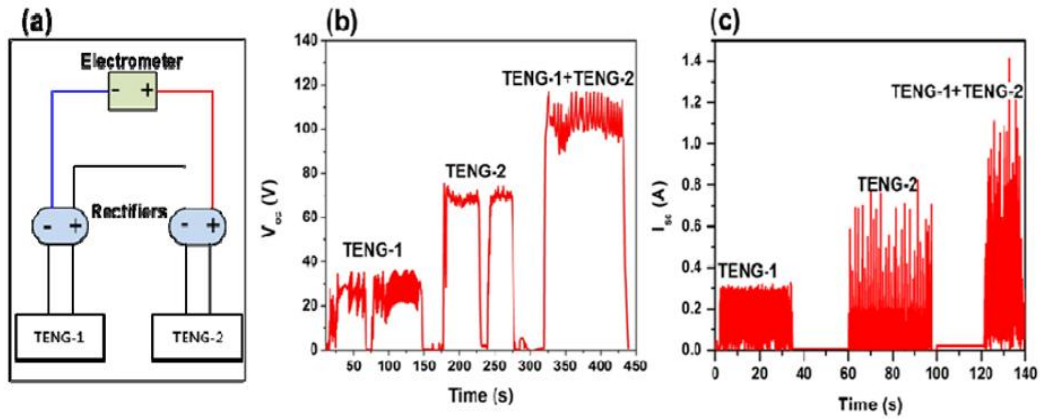


Fig. 48. Integrated output (V_{oc}) of two TENGs connected in series: (a) Connection scheme of two TENGs for output measurement, (b) V_{oc} , (c) I_{sc}

TENG의 성공적인 작동과 그 응용의 가능성은 $4.7\mu\text{F}$ 용량의 커패시터를 충전하고, 초록색의 LED를 킴으로서 입증되었는데 Fig. 49(a)에 본 연구에 사용된 실제 전기 회로의 모습을 나타냈으며 Fig. 49(b)는 그 회로도를 보여준다. 이때, 회로는 커패시터, 정류기 및 LED로 구성되었다.

또한, Fig. 49(c)와 Fig. 49(d)에 각각 TENG-1, TENG-2 를 사용하여 커패시터를 별도로 충전하는 다이어그램을 나타냈다.

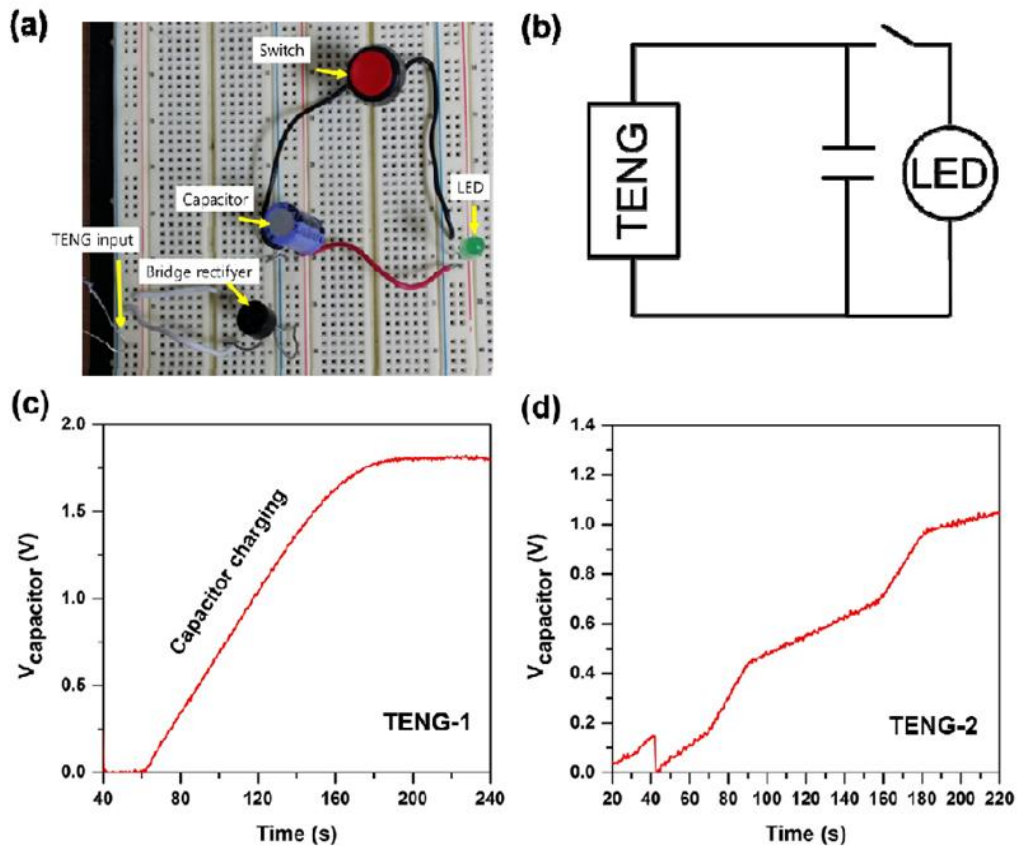


Fig. 49. Charging a capacitor by TENG-1 and TENG-2: (a) Actual electric circuit, (b) Circuit diagram, (c) TENG-1, (d) TENG-2

Fig. 50은 두 발전기의 결합된 전력으로 충전되고 LED 조명을 통해 방전되는 캐패시터를 보여준다.

본 연구에서 사용 된 LTD 엔진의 열효율은 약 4.85% 로 추정되는데, 이는 열에너지에서 전기 에너지로 전환하는 발전기의 변환 효율이 더욱 개선되어야 함을 의미한다.

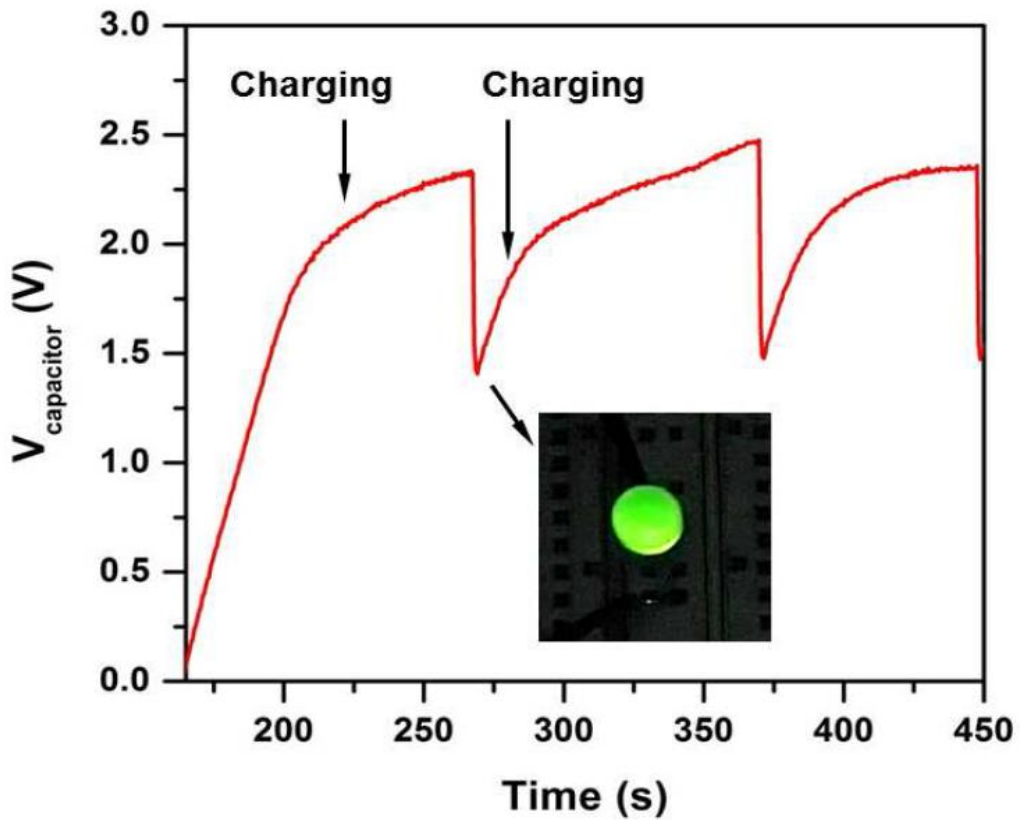


Fig. 50. A capacitor being charged by two TENGs and discharged through an LED

4. 소결론

본 연구에서는 스텔링엔진, 가돌리늄 및 TENG를 활용하여 저온도차 발전 기술의 연구를 진행하였다. 저온도차 스텔링엔진의 경우 MM-7엔진, Single 및 Twin엔진의 기초 성능을 비교·분석하였으며 가돌리늄을 이용한 발전장치 및 TENG와의 비교를 통해 본 연구의 활용에 적절한 저온도차 발전기술을 찾고자 하였고 이에 대한 결과는 다음과 같다.

(i) LTD엔진의 기초성능 비교분석의 경우 200mg 의 낮은 질량을 사용했을 경우에는 Twin엔진의 출력이 이 중 가장 높은 수치를 보였으나, 질량을 높임에 따라 MM-7엔진의 기계적 출력이 높게 산출됨에 따라 MM-7을 이용한 연구를 진행하였으며 0.09mW~0.12mW 의 전기적 출력을 산출하였다. 여기서 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 상에서 기계적 출력은 2.98mW 로 전기적 출력 약 24배로 나타났으며 이에 저온도차 스텔링엔진 기술을 적용한 발전장치의 최대 전기적 출력은 연구 및 개발을 통한 최적화로 약 19배 정도의 출력상승을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

(ii) 가돌리늄을 활용한 발전장치의 경우 기계적 출력이 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 상에서 최대 9.8mW 로 나타났으며, 이는 저온도차 스텔링엔진과 비교하였을 때 약 3배 이상의 출력 차이를 보였으며 토크 또한 0.98N*mm 로 약 3배 이상의 차이가 나타났다. 그러나 가돌리늄 발전장치의 전기적 출력은 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 0.0049mW 로 산출되어 저온도차 스텔링엔진 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 산출된 0.09mW ~ 0.12mW 에 비하여 더 높은 온도차를 가짐에도 18배의 낮은 출력 차이를 보였는데 이는 낮은 회전수나 기어비의 영향으로 사료되며 가돌리늄발전장치의 토크를 고려했을 때, AC모터를 더 높은 토크를 가진 모터로 교체하면 보다 높은 출력을 보일 것으로 기대된다.

(iii) 두 가지 방식을 적용한 TENG(triboelectric nanogenerator)의 실험을 진행하였으며 연구에 저온도차스텔링엔진을 사용하였다.

실험 결과 비접촉 슬라이딩 방식은 두 개의 마찰전기 표면의 거리가 1mm 의

간격으로 떨어져 있을 때, 개방 회로 전압 : $V_{oc} = 75V$ 및 전류 : $I_{sc} = 0.2\mu A$ 을 보였으며, 두 마찰 전기표면이 엔진의 작동을 방해하지 않는 한에서 더 밀접하게 접촉되었을 시에는 이보다 더 높은 전압인 약 $100 \sim 150V$ 의 전압을 보였다.

또한, 슬라이딩 방식과 수직 접촉 분리 방식의 두 가지 방식을 동시에 사용하여 온도차 $74.4^{\circ}C$ 상에서 실험을 진행한 결과, TENG 출력을 결합하였을 시에는 개방회로 전압 : $V_{oc} = 105V$ 에 도달했으며 이후, 캐패시터가 빠르게 충전되었다. 저온도차 스틸링엔진과 가돌리늄 발전장치와의 출력을 비교했을 때, 전압은 높게 나오지만 전류가 낮게나와 그 출력은 높지 않게 산출되었다.

TENG의 출력은 표면적과 표면의 전하밀도를 증가시킴으로써 더욱 향상 될 수 있는데, 전자는 TENG의 섹션수를 늘림으로써 쉽게 달성할 수 있으며 후자는 알루미늄 및 FEP 마찰표면을 변형 또는 개선시킴으로써 이루어질 수 있다고 사료되어진다.

IV. 하이브리드 광학 집광 시스템

1. 하이브리드 광학 집광 시스템 장치 구성

본 연구에서는 광학적방법과 천문학적방법을 동시에 활용하는 하이브리드 추적 방식을 적용하는 기술을 이용하였는데, 이 기술은 단일 추적방법만을 적용한 자연채광 시스템보다 태양 추적이 용이하고 보다 고밀도로 태양광을 집적하여 실내의 자연채광에 이용할 수 있는 장점이 있다. 앞의 이론부분에서 전술 하였듯이 광학적 방법은 광센서의 출력 신호 비교에 의해 작동하는 방식이고 천문학적 방법은 수치적 계산에 의하여 실시간으로 설치장소에서의 태양의 고도 값과 방위각을 추적하는 방식이다. 광학적 제어에 의한 태양추적기는 광센서에 의해 작동하므로 흐린 날이나 태양이 구름에 가려진 경우 정확한 태양추적이 되지 않는 단점이 있으며, 천문학적 방법은 추적 오차가 누적되는 단점이 있다. 하지만 전술했듯이, 하이브리드 추적 방식을 적용한 시스템은 광학적방법과 천문학적 방법을 동시에 적용하였기 때문에 집광의 효율성이 높아 보다 성능이 양호한 자연채광 기술을 구현할 수 있다.

1.1 하이브리드 광학적 집광 시스템 ; 제어부

본 연구에서는 마이크로컨트롤러 유닛(MCU : Microcontroller Unit)을 사용하였는데 CPU기능에 RAM 및 ROM의 메모리 장치를 갖고 있는 장치로써 하나의 소자 안에 메모리와 입출력 포트 및 주변 장치가 모두 내장되어있어 복잡한 장치가 필요 없이 전원만 공급해도 구동이 되는 장점을 갖고 있으며 기기 제어용으로 많이 사용되고 있다. 이러한 마이크로 컨트롤러는 소자 구조에 따라 크게 8051 계열, PIC 계열, AVR 계열로 구분 할 수 있는데, 본 연구에서는 AVR 계열의 ATmeg128을 사용하였으며 이 소자는 Atmel사에서 출시한 8bit 마이크로컨트롤러로써 RISC 구조인데, 프로그램 메모리와 데이터 메모리가 분리된 하버드 구조(Harvard Architecture)와 저전력 고성능 처리방식의 파이프라인 기능을

보강한 고성능의 마이크로컨트롤러이다.

AVR은 PIC계열의 방식과는 다르게 JTAG(Joint Test Action Group) 방식 및 ISP(In-System Programming)을 이용하여 다운로드 및 디버깅을 편리하게 구축하였으며 레지스터 중심형 구조로 설계되어 C 언어에 유리하며 1MIPS/1MHz의 처리속도로 대부분의 명령을 단일 클럭에 수행할 수 있다. Fig. 51에 태양추적 시스템의 구성도를 나타내었다.

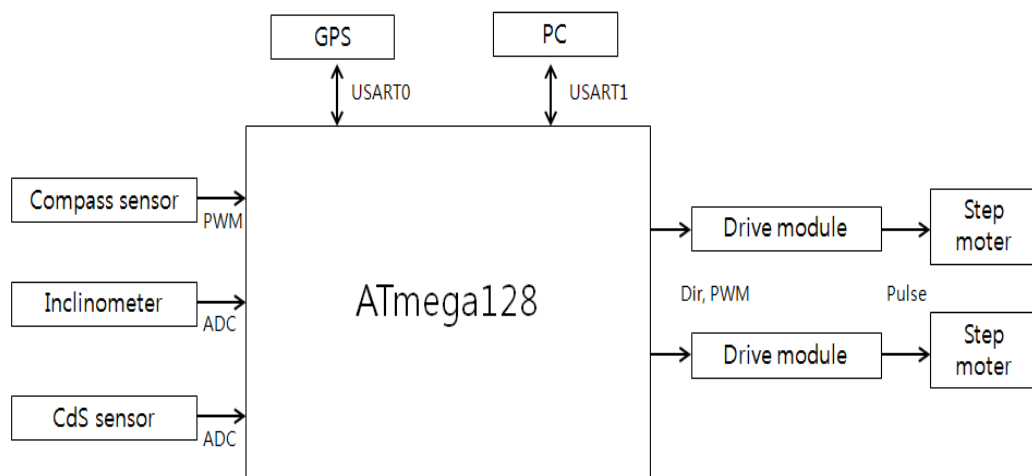


Fig. 51. Schematic diagram of the solar tracker and configuration of components

Fig. 51에 나타냈듯 본 연구에 사용된 태양추적 시스템의 제어에는 ATmega128 마이크로 컨트롤러, 나침반 센서(Compass sensor), 기울기 센서(Inclinomter), CdS센서, 스텝모터, 드라이브모듈, GPS 등으로 구성되어있다. 여기서 스텝모터는 구동방식이 유니폴라(Unipolar, 단극성) 형식으로 무게 200g, 토크 1.7kg*cm 으로 태양추적 시스템의 2축 구동을 위해 2개의 스텝모터를 사용하였으며, 드라이브 모듈은 스텝모터의 구동을 위한 장치이다.

ATmega128마이크로 컨트롤러는 동기 또는 비동기에서 송수신이 가능한 USART를 2개 내장하고 있는데 USART0은 GPS으로부터 NMEA-0182 프로토

쿨을 수신하며 여기서 UTC Time, UTC Date, 경도, 위도 등의 데이터를 분류해 내며 이 데이터로 시스템이 설치된 장소의 태양 고도각, 방위각, 일출 및 일몰 시간을 계산한다. USART1은 컴퓨터와 통신하며 ATmega128에서 생성되는 각종 데이터들을 모니터링하고 다운로드 할 수 있다.

1.2 화이버 광학적 집광 시스템 ; 센서부

본 연구에서는 천문학적 방식으로는 부족한 추적 정확도를 위해 CdS센서를 제작하여 광학적 방법을 동시에 이용하였다. CdS센서는 광도전효과를 활용한 CdS셀을 이용해 만든 센서로 CdS셀은 광 에너지에 대응하여 내부 저항이 변화하는 일종의 광 가변 저항기이다. 일반적으로 CdS셀은 광 에너지가 전혀 조사되지 않을 경우에는 거의 절연체에 가깝게 되며, 조사되는 빛이 증가함에 따라 저항이 증가하는 원리를 이용하였다. Fig. 52, Fig. 53과 같이 8개의 CdS셀을 이용해 상, 우상, 우, 우하, 하, 좌하, 좌, 좌상 8방향으로 연결한 후 2개의 렌즈를 이용해 집광된 빛이 CdS셀들의 중앙으로 이동하도록 제어하게 된다.

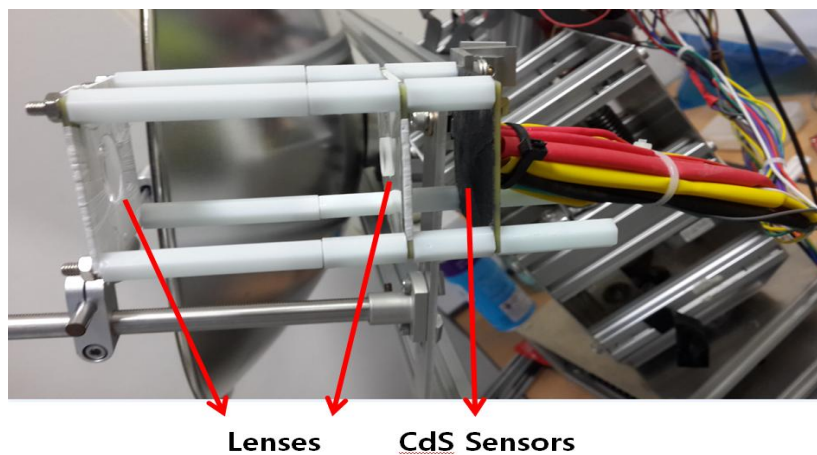


Fig. 52. Feedback device. Composed of eight CdS sensors and two lenses

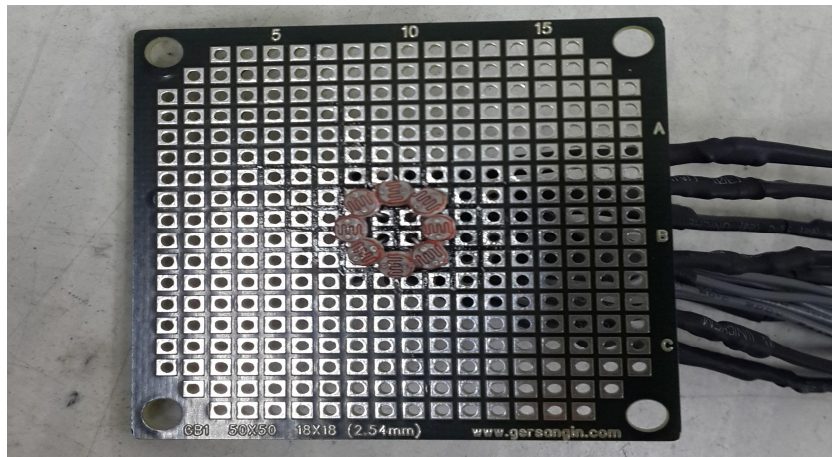


Fig. 53. Position of CdS sensors

센서부에 사용된 2개의 렌즈는 각각 상단의 렌즈 직경 20mm, 초점거리 80mm 이며 하단부의 렌지는 직경 12mm, 초점거리는 -12mm이다. 이때 상단의 렌즈에서 집광된 빛은 하단부의 렌즈를 거치며 수직하게 내려가게 됨으로써 CdS 소자들의 중앙에 초점을 맞추게 된다. Fig. 54에 센서부의 측면에서 바라본 설계 모식도 나타내었다.

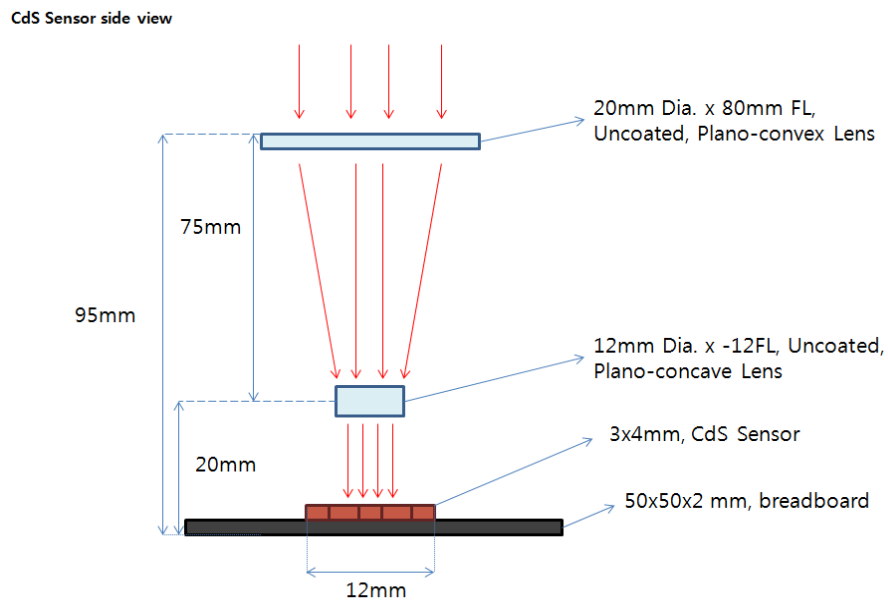


Fig. 54. Side view of the feedback device

또한, 자연채광장치를 구동하는데 있어 CdS센서가 작동하는 범위를 파악함으로써 보다 정밀한 추적이 가능하게 되는데, 이를 위하여 태양빛이 입사하는 각도에 따른 센서부의 초점 위치변화를 TracePro를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며 이는 Fig. 55에 나타내었다. 여기서 (a) 0°, (b) 0.5°, (c) 1°, (d) 1.5°, (e) 2°이다.

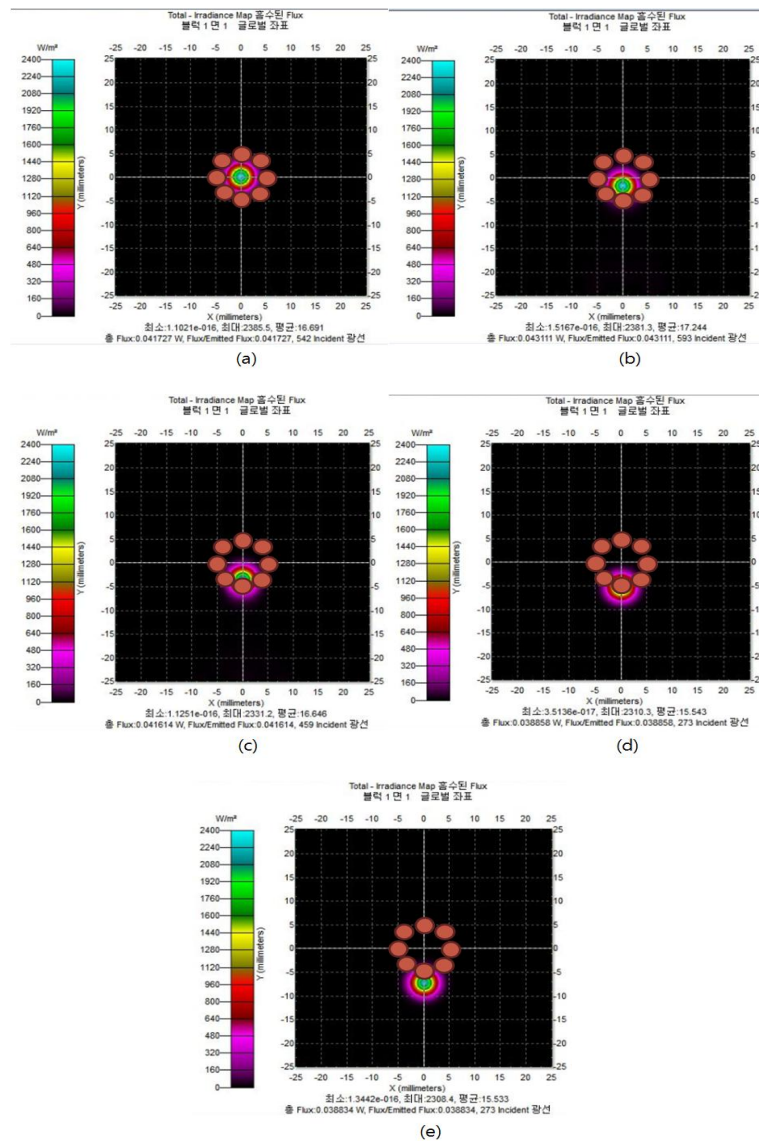


Fig. 55. Change of focal location of sensors with varying angles of incoming solar radiation :
(a) 0°, (b) 0.5°, (c) 1°, (d) 1.5°, (e) 2°

각도별 시뮬레이션을 진행한 결과 각도가 0° 인 경우 태양빛의 초점이 센서 중앙부에 맞춰지는 것을 확인 할 수 있었으나 각도가 2° 를 넘어갈 경우 초점이 확연히 벗어나는 것으로 나타났다. 이에 각도범위가 2° 를 벗어나는 경우 천문학적 추적방법을 통해 태양을 추적하여 지속적인 태양추적을 수행할 수 있다.

1.3 화이버 광학적 집광 시스템 ; 집광부

1) Parabolic Dish형 집광장치

Parabolic Dish를 이용한 집광장치는 포물면을 갖는 1차반사경, 2차반사경으로 이루어져있다. 이 형태의 집광장치는 초점지역에 고열을 발생시키는 문제점이 있으나, 본 연구에서 조사한 국내 시스템은 1차반사경의 직경이 30cm 이하로 다른 시스템에 비하여 열 발생이 적으며 95 ~ 98% 의 높은 반사율 및 적외선 필터적용 등을 통하여 열 발생문제를 해결할 수 있다.

파라볼릭 디쉬형 시스템의 집광기는 태양으로부터 태양광을 차단해서 그 태양광을 조그만 면적으로 집중시킨다. 포물면은 포물선 축을 중심으로 360°회전시켜 만들어진다. 포물면은 축에 수직한 태양광이 초점을 관통하여 표면으로부터 반사하게된다. 파라볼릭 디쉬는 포물면 일부분이 잘려나간 형상이고 직각 좌표계에서 다음과 같이 표시된다.

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (36)$$

x, y는 개구부 면적에서의 좌표계이고, z는 포물면 대칭축에 평행한 정점으로부터 거리이고 f는 초점길이를 나타낸다. 초점길이 대 직경비 (focal-length-to-diameter ratio), f/d는 포물면의 형상과 상대적 위치로 정의된다. 이러한 형상은 림각(rim angle, ψ_{rim})에 의해 묘사되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f/d = \frac{1}{4 \tan(\psi_{rim}/2)} \quad (37)$$

여기서 ψ_{rim} 은 포물선 축으로부터 포물면이 잘려나간 가장자리까지 초점에서 측정된 각을 말하며, 예를 들면 45° 의 립각을 갖는 포물면은 f/d 가 0.6이 되며 즉, 립각이 감소할수록 포물면은 평평해지며 초점거리는 길어진다. 본 연구에 사용된 1차 반사경은 초점길이가 0.195m 이며 직경은 0.3m 인 포물반사경을 사용했으며 립각은 42° , f/d 는 0.65이고 표면은 알루미늄 물질로 코팅되었다. 그리고 2차 반사경의 경우 초점길이는 0.0195m 이며 직경은 0.03m, 립각은 42° 이다. 본 연구에 사용된 Parabolic Dish형 집광장치를 Fig. 56에 나타내었다.

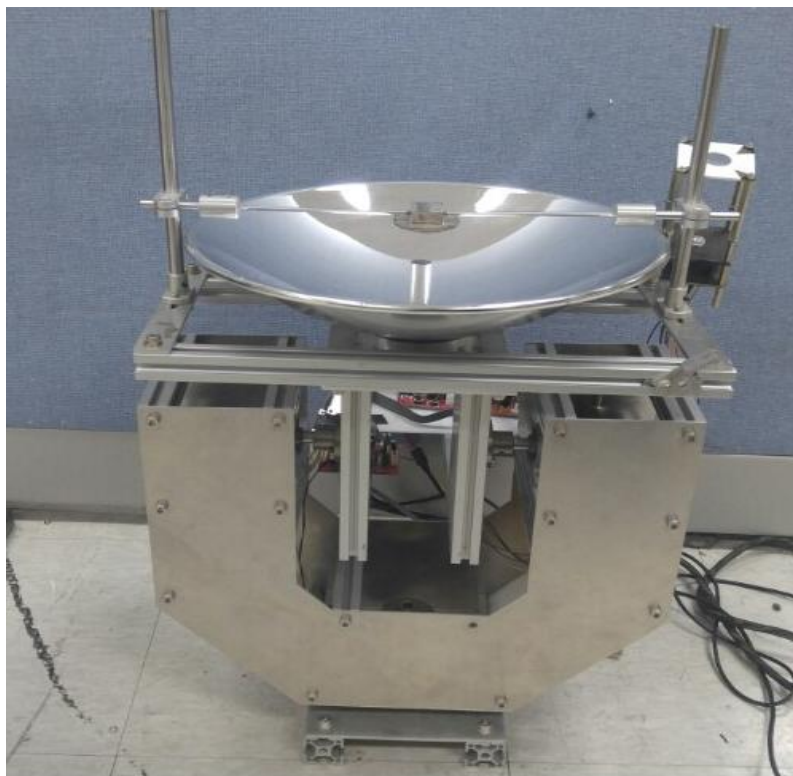


Fig. 56. Solar tracking system using parabolic dish

또한, 2차 반사경은 1차 반사경으로부터의 반사되어진 태양광을 Homogenizer로 수렴시키는데 이때, 2차 반사경은 높이 약 0.7m 에 위치하도록 설계되었다. 여기서 Homogenizer는 길이 0.8m, 직경 0.16m 로 제작되었으며 광택이 나는 알루미늄 튜브로 만들어졌으며 그 반사율은 반사경의 반사율보다 다소 낮다.

Fig. 57에 1차 반사경과 2차 반사경 그리고 Homogenizer의 측면에서 바라본 자세한 설계도면을 나타내었으며, 여기서 F1 과 F2 는 각 각 1차 반사경과 2차

반사경의 초점을 나타낸다.

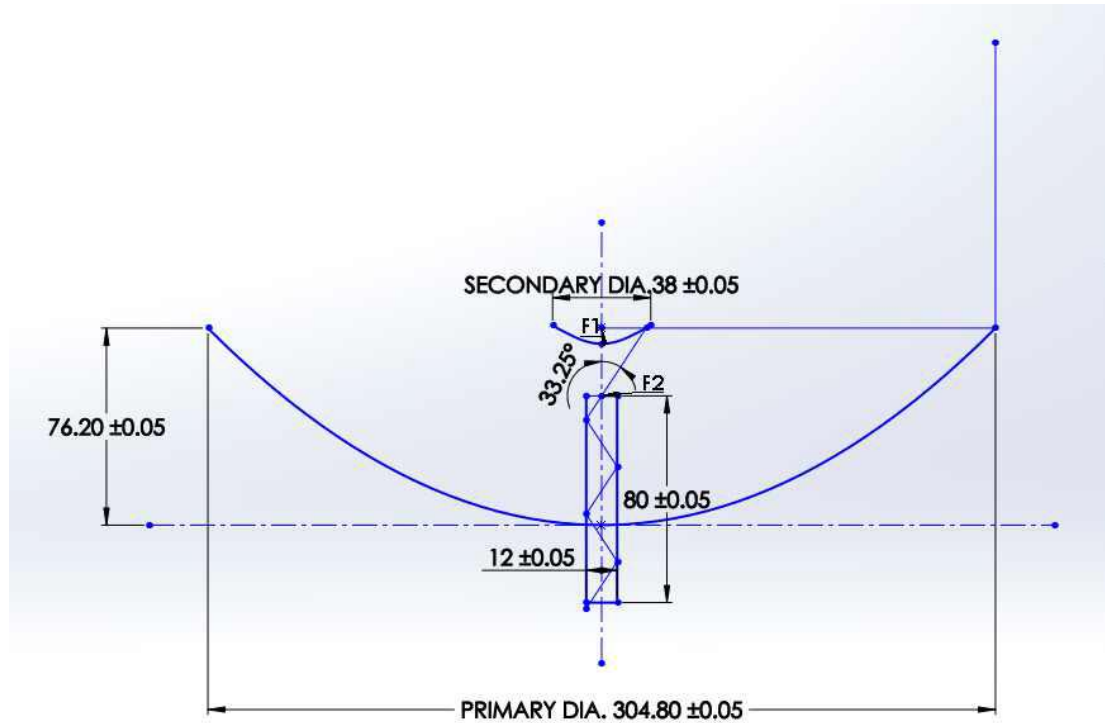


Fig. 57. Detailed geometries of the primary concentrator, the second reflector and the homogenizer

2) Fresnel Lens형 집광장치

Fresnel Lens란 작고 좁은 원형의 돌기들로 이루어진 형태로 기존 볼록렌즈나 오목렌즈에 비하여 무게, 두께, 가격 등을 개선한 플라스틱 판 형태의 렌즈이다. 각각의 돌기들은 일정한 비율에 의해 조금씩 다른 각도로 설계되어 빛을 한 개의 초점으로 모아줄 수 있다. 각각의 돌기들은 모두 빛을 굴절시키는 프리즘 형태의 개별 렌즈라 할 수 있다. 또한 프레넬 렌즈는 구면수차를 줄일 수 있어 일반 볼록렌즈와 달리 상이 흐트러지는 것을 막을 수 있다.

이 형태의 집광은 광학설계디자인에서 높은 유연성을 가져 그 적용성이 뛰어나

나며, 기존의 거울을 이용한 집광 방식에 비해 광학설계 및 제조 오차율도 적다. 또한, 일반 유리에 비해 두께가 얇고 작게 만들 수 있어 경량이며, 짧은 초점거리와 낮은 가격이 큰 장점이다.

본 연구에 사용된 프레넬 렌즈는 가로세로 약 30cm, 30cm이며 두께 0.5cm의 사이즈로 제작되었으며 초점거리는 약 60cm 이며 각 각 홈 사이의 거리는 0.05cm의 간격을 갖고 있다. 또한, 400-1000nm의 스펙트럼영역에서 92% 정도의 빛 전송률을 보인다. 파라볼릭 디쉬형 집광장치와 동일한 Homogenizer를 사용하여 시스템을 구성하였으며 이 때, 2차반사경은 불필요하므로 배제하였다. Fig. 58은 본 연구에 사용된 프레넬 렌즈형 집광장치를 보여준다.

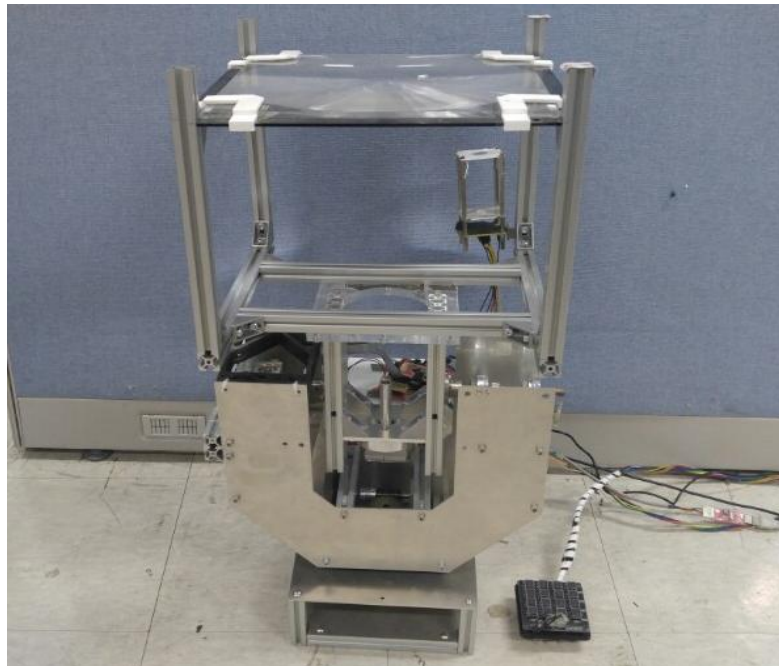


Fig. 58. Solar tracking system using Fresnel lens

1.4 화이버 광학적 집광 시스템 ; 전송부

전송부에서 산란부에 이르는 빛의 이동을 돕는 장치로 광섬유를 사용하였다. 이러한 광섬유는 단면의 지름이 0.1mm 이하로써 굴절률이 높은 유리 섬유에 굴

질률이 낮은 유리를 썬 형태로 광이 전반사하는 것을 이용한 것이다. 광섬유는 규소로 만든 유리 섬유와 플라스틱으로 만든 플라스틱 유리로 나뉘며, 굴곡에도 강하므로 외부의 영향을 거의 받지 않는 장점이 있어 본 연구에서 사용 시 외부의 빛을 실내로 전송할 때 자유로운 위치선정을 할 수 있어 천정의 원하는 위치를 택해 작업면으로 빛을 전달하기가 용이하였으며 전송과정 중 빛을 가리거나 방해하는 요소 등에 의한 광전송차단의 상황이 생기지 않아 다른 전송방식에 비해 집광형태의 빛을 전송하기에 유리하였다. 본 연구에서 사용된 광섬유는 유리 섬유로 제작된 광섬유로 약 1,200cm 길이, 지름 약 0.12cm의 광섬유를 사용하였으며 Fig. 59에 실험에 사용된 광섬유를 나타내었다.



Fig. 59. Fiber optical cable

1.5 데이터계측 장치

1) 데이터로거

본 연구에서 사용된 데이터로거 Agilent 34970A는 6.5디지트 DMM을 내장한 3슬롯 메인프레임으로 이루어져 있으며 각 채널은 액세서리를 추가하는 비용이

나 번거로움 없이 내장 신호 컨디셔닝이 열전쌍(thermocouple), RTD 및 서미스터, ac/dc 전압 및 전류, 저항, 주파수 및 주기 측정 기능 중 하나를 측정하도록 각각 구성할 수 있다. 또한, 초당 최대 250채널 스캐닝을 할 수 있으며 모듈에 스크류 터미널 연결이 있어 터미널 블록이 필요 없으며 고유한 릴레이 관리 기능이 각 스위치에서 모든 연결을 카운트하여 릴레이 관리가 쉽고 예측 가능하다. 본 연구에서는 데이터로거를 이용해 10초당 1회씩 조도를 측정하여 데이터를 수집하였다. Fig. 60은 사용된 데이터로거의 모습을 나타낸다.



Fig. 60. Agilent 34970A data logger

2) 조도센서

본 연구에서 테스트룸 내·외부의 조도를 측정하기 위해 사용된 조도센서는 Delta OHM사의 LP PHOT 01를 하였다. 여기서 조도는 빛의 밝기를 나타내는 정도로써 표면을 통해 지나가는 빛의 흐름과 표면 지역(m²)사이의 비율을 나타낸다. 포토다이오드 방식이므로 전원 공급이 불필요하며 감도: 0.5~1.5mV/klux, 정밀도: <4%, 스펙트럼 범위: V(λ), V(λ)match error: <8%, Cosine response: <3%, 직진성: <1%, Fatigue: <0.5%이며 사용온도는 0~50°C의 성능을 갖고 있

다. 본 연구에서 사용된 조도센서는 총 11개를 사용하였으며 테스트룸 내부의 조도 측정을 위해 10개를 주요 작업면 또는 지점에 설치하였고 동시에 외부조도의 측정을 위해 1개를 외부 집광시스템 옆에 설치하였다. Fig. 61은 사용된 조도센서의 모습을 나타낸다.

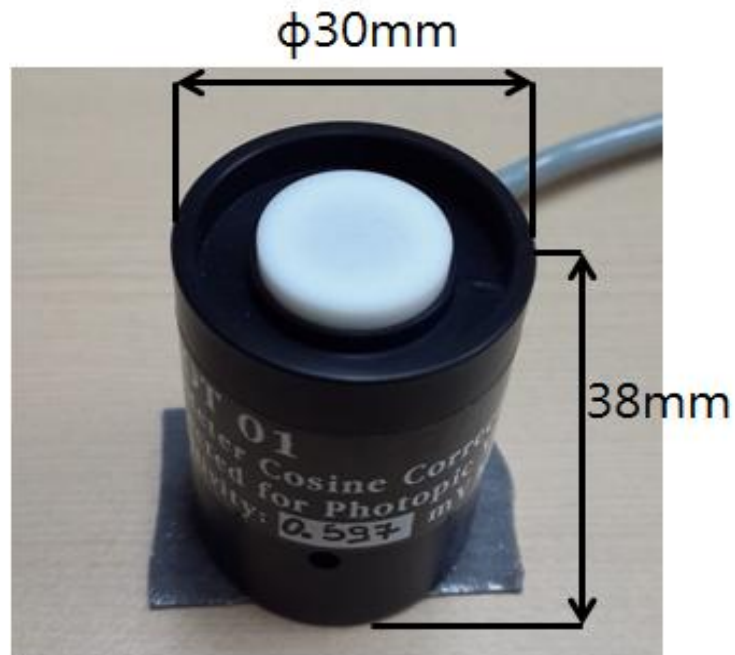


Fig. 61. LP PHOT 01 illuminance sensor

2. 실험 방법

본 연구에서는 남향으로 설계된 5 x 15 m 크기의 Test Room에 30cm 크기의 프레넬렌즈(Fresnel lens)와 포물반사경(Parabolic dish)을 장착한 태양추적장치를 이용해 태양광을 집광시킨 후 높은 광전송 효율로 전달해줄 수 있는 광섬유(Optical fiber)를 이용해 태양추적시스템으로 집광된 태양광을 천장에서부터 채광시켜 Test Room 내부를 인공조명과 함께 비춰주도록 설계하였다.

태양추적시스템은 기존에 개발된 AVR 계열의 ATmega128을 이용한 2축 추적을 하였으며, 제어방식은 앞서 설명한 방법과 같이 천문학적 방식과 광학적 방식 두 가지 모두를 이용하였다.

데이터 계측 방법으로는 조도센서를 이용하여 태양추적장치의 산광부와 수직인 책상면과 외부조도, 기타 중요 위치에 부착한 후 애질런트 데이터로거 데이터 계측 장치를 이용해 10초당 1회씩 조도를 측정하였다.

Test Room은 실제 사무실 내부와 유사하게 배치하였고, 조도센서 110번은 외부 조도센서이고 101번과 102번은 창측에 가까운 책상면에 배치하였으며, 책상면은 KS조도측정 기준인 바닥면에서 80cm떨어진 높이이며, 바닥부터 천장까지의 높이는 270cm이다. 그리고 책상면마다 하나씩 103, 104, 105, 106번을 배치하였고, 103번의 상부에는 30cm 프레넬 렌즈를 장착한 태양추적장치를 연결하였으며, 104번의 상부에는 30cm 포물반사경을 장착한 태양추적장치를 연결하였다. 그에 상응하는 벽면에도 107, 108, 109, 111번의 조도센서를 배치하였다.

실험은 2016년 04월 14일 하루 동안의 청천공인 날씨에 블라인드를 모두 내린 후 Test Room을 암실 형태로 만들어 진행되었다. Fig. 62에 실제 실험에 사용되고있는 태양추적장치의 모습을 나타냈으며 왼쪽과 우측은 각각 포물반사경, 프레넬 렌즈를 장착한 태양추적장치이다. Fig. 63에 Test Room 내부의 조도센서 배치도의 모습과 실제 실험 모습을 나타냈다.



Fig. 62. Solar tracking system using Fresnel lens and parabolic dish

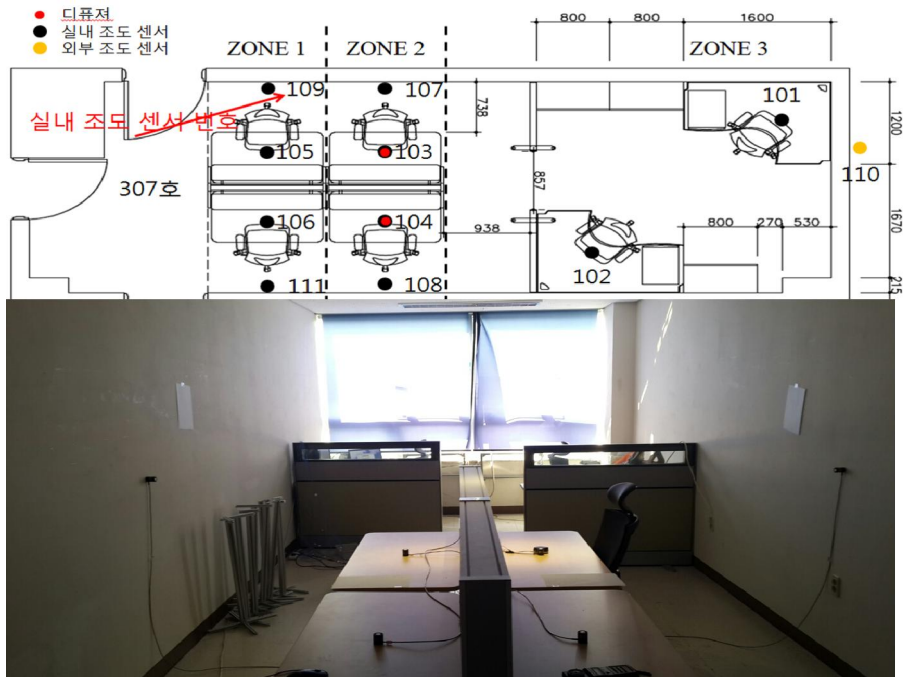


Fig. 63. Experimental layout in the test room

3. 실험결과 및 고찰

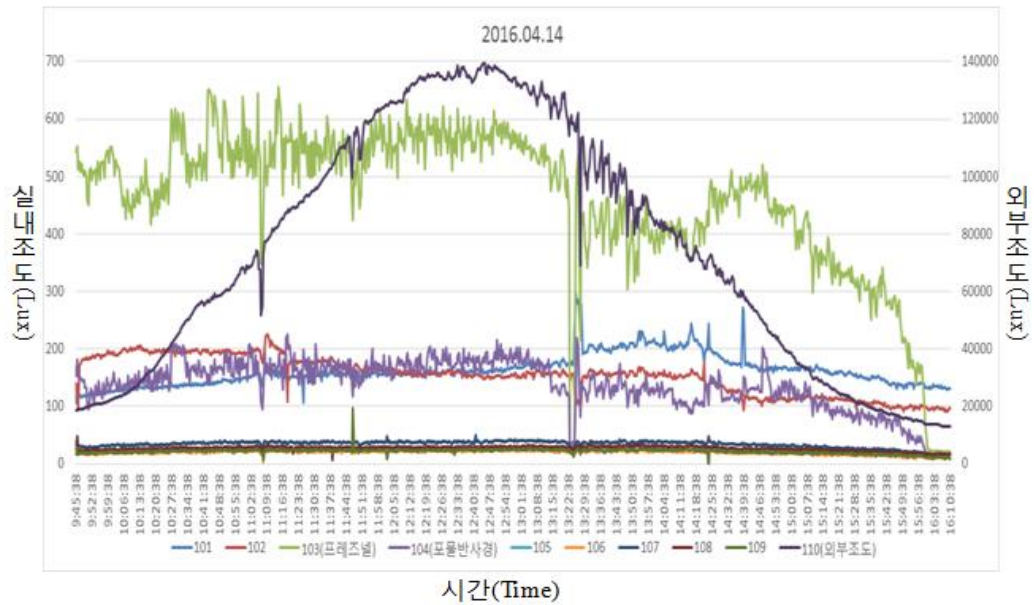


Fig. 64. Illuminance measured at different times



Fig. 65. Illuminance measured at different times (key measurement points)

Fig. 64는 테스트 룸에 설치된 모든 센서들의 측정값을 나타낸 그래프이며 Fig. 65는 실험 중 중요 위치인 103(프레즈넬), 104(포물반사경)번 센서의 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 위 그래프에 의하면 태양추적장치를 이용함으로써 태양

의 방위나 고도각에 의한 실내 자연채광량이 큰 변화 없이 거의 일정함을 알 수 있었다.

또한, 외부조도가 약 20,000 ~ 140,000lux 일 때 프레넬 렌즈를 장착한 태양추적장치의 자연채광량은 약 400 ~ 600lux 정도였고, 파라볼릭 디쉬를 장착한 태양추적장치의 자연채광량은 약 100 ~ 200lux 였다. 창문에서 50cm정도 떨어진 101번 조도센서의 채광량(150 ~ 250lux)을 비교해보면 프레넬 렌즈를 장착한 태양추적장치는 창문과 가까운 101번 위치에서의 채광량보다 훨씬 높은 수치를 보여주었고 KS조도기준(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600lux])에 충분히 만족하는 결과를 보여주었다. 반면 파라볼릭 디쉬를 장착한 태양추적장치는 매우 부족한 값을 보여주는 것으로 나타났다.

4. 전력요금 비교

본 연구의 목표는 건물에서 사용되는 에너지 절감을 위해 자연채광장치를 이용함으로써 건물에서 사용되는 전기 소비량을 절감하고 인공조명에 걸린 부하를 대체하는 것이다. 이를 위해서는 실생활에서 자연채광 조명을 적용하였을 시 어느 정도의 자연채광성능을 보여주는가와 실제로 전력 소비가 얼마나 감소하고 그에 따라 정도의 전기료 절감을 할 수 있는지가 중요하다. 그러므로 자연채광장치를 사용하였을 경우의 총 비용 변화를 초기투자비, 유지보수비, 전기요금 등의 변수를 이용해 계산해보았다.

Table 14. Annual weather data (1981~2010)

	연간	월간
맑은날(Day)	257	21.416
흐린날(Day)	103	8.584

기상청에 따르면 연평균(1981년~2010년) 중 흐린날은 103일이며 맑은날은 257일로 조사되었으며 Table. 14 에 연평균과 월평균의 맑은날과 흐린날을 나타내었다.

실내조명의 점등 시간은 보통 사무 건물의 하루 9시간을 기준으로 고려하였는데, 형광등 단일시스템의 경우 9시간씩 360일 점등되며 자연채광 장치를 사용한 경우 실내 점등 시간의 두 가지 경우를 고려해봤다.

첫째, 형광등과 자연채광장치를 병용한 시스템 : 360일 중 맑은날인 257일은 하루 중 3시간동안 형광등을 작동시키며 나머지 6시간은 자연채광장치에 의해 실내조명이 이루어진다.

둘째, 360일 중 맑은날인 257일동안 하루 9시간씩 계속 자연채광장치에 의해 실내조명이 이루어진다.

여기서, 두 경우 모두 360일 중 257일을 뺀 나머지 기간인 103일은 자연채광장치를 사용하지 않고 형광등 단일시스템의 경우처럼 하루 9시간씩 형광등에 의해 실내조명이 이루어지는 경우로 가정하였다.

Table 15. Production and maintenance costs

유지비	수명	개수	유지보수비 [원]	소비전력	개당 설치비 [원]
Philips 32W 865 형광등	15,000 hour /ea	8ea	$\frac{56,000}{25ea}$ 2,240 /ea	32 W/ea	100,000 /ea
Solar tracking System	30 year /unit	4ea	$\frac{95,000}{30year}$ 3,167 /year	12 W/unit	500,000 /unit

(센서 및 보드 교체)

Table. 15 는 형광등과 자연채광장치의 제작·설치비와 유지보수비 및 장비 설치에 필요한 내역을 나타낸 것이며 형광등의 수명은 1개당 15,000시간이고 자연채광장치의 수명은 30년마다 센서 및 보드를 교체해주면 영구적으로 사용이 가능하다.

자연채광장치에 사용되는 센서 및 보드의 가격은 95,000원이며 형광등은 시중에서 25개에 56,000원에 판매되고 있고, 형광등의 개당 소비전력은 32W이며 자연채광장치는 12W이다.

또한, 개당 설치비는 형광등 2개가 1세트인 매립형 형광등기구가 시중에 세트당 약 200,000원에 판매되고 있어 개당 100,000원으로 설정하였다. 자연채광장치는 1개 500,000원에 제작이 가능한데 이는 소량으로 주문하여 제작된 값으로 대량으로 생산을 할 경우 금액은 더욱 절감될 것이다.

Table 16. Electric charges

전력 요금		연간 유지비 [원]	총 연간 유지비 [원]	월간 전력 소모 [W/month]	월간 전력 요금 (주택용 저압 전력)[원]	연간 전력 요금[원]
형광등 단일	형광등	3,871	3,871	69120.0	35,702	428,424
	태양추적장치	-		-		
형광등, 태양추적장치 병용 1	형광등	2,029	5,195	36225.0	19,766	237,192
	태양추적장치	3,167		6167.8		
형광등, 태양추적장치 병용 2	형광등	1,108	4,274	19777.5	13,597	163,164
	태양추적장치	3,167		9251.7		

위의 Table. 15 와 Table. 16 을 통해 연간 사용시간과 연간 유지비 및 전력 요금을 계산하였다.

Table. 16 을 보면 형광등만을 사용한 경우는 총 연간 유지비가 3,871원으로 산출되었으며 형광등과 자연채광장치를 병용하였을 경우의 첫 번째 조건에서는 5,195원으로 산출되었고, 두 번째 조건에서는 4,274원으로 산출되었다.

전력 요금 계산 시 한전의 주택용 저압 전력 요금을 적용했을 경우 형광등만을 사용한 경우는 월간 전력요금 35,702원, 연간 전력요금 428,424원으로 산출되었으며, 형광등과 자연채광장치를 병용하였을 경우 첫 번째 조건에서는 월간 전력요금 19,766원, 연간 전력요금 237,192원으로 산출되었으며, 두 번째 조건에서는 월간 전력요금 13,597원, 연간 전력요금 163,164원으로 산출되었다.

이 결과로 보면 형광등과 자연채광장치를 병용하여 사용하였을 경우 연간 약 20만원을 절약할 수 있으며, 자연채광장치를 최대한 활용하여 사용하였을 경우 최대 26만원까지 절약이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Table 17. Total costs

총 비용	형광등 단일 [원]	형광등, 태양추적장치 비용 1 [원]	형광등, 태양추적장치 비용 2 [원]
설치비용	800,000	2,800,000	2,800,000
연간 유지보수비	3,871	5,195	4,274
연간 전기요금	428,424	237,192	163,164
10년 투자비	5,122,947	5,223,873	4,474,382
30년 투자비	13,768,842	10,071,618	7,823,146

Table. 17 에 초기투자비용, 연간 유지보수비, 전기요금 등을 모두 감안하여 10년간, 30년간 사용시의 총 비용의 변화를 나타내었다.

결과를 보면 형광등만 사용하였을 경우 설치비용은 80만원이며 형광등과 자연채광장치를 병용하였을 경우의 설치비용은 280만원으로 산출되었다.

10년 동안 사용하였을 경우 형광등은 약 512만원으로 산출되었으며 형광등과 자연채광장치를 병용하였을 경우 첫 번째 조건에서는 약 522만원이며 두 번째 조건에서는 약 447만원으로 산출되어 일반적으로 형광등만을 사용하였을 경우와 첫 번째 조건은 유지비가 비슷하나 두 번째 조건인 태양추적장치를 최대로 사용하였을 경우는 약 50만원 정도를 절약할 수 있는 것으로 나타났다.

30년 동안 사용하였을 경우는 차이가 더 커지는데 형광등만을 사용했을 경우 약 1,377만원이 사용되지만 형광등과 자연채광장치를 병용하였을 경우 첫 번째 조건에서는 약 1,007만원, 두 번째 조건에서는 약 782만원이 사용되므로 각각 약 370만원과 590만원 정도가 절약되는 것을 알 수 있다.

5.소결론

본 연구에서는 테스트룸의 블라인드를 모두 내린 후 프레넬 렌즈를 장착한 태양추적장치와 파라볼릭 디쉬를 장착한 태양추적장치를 비교하여 보았으며 Table. 18 에 그 결과를 나타내었다.

Table 18. Measurement data of parabolic dish and Fresnel lens

	프레넬 렌즈 [lux]	포물반사경 [lux]	101번 센서 [lux]	KS 조도기준 [lux]
조도	400 ~ 600	100 ~ 200	150 ~ 250	300-400-600

본 실험에서는 프레넬 렌즈를 사용한 경우가 파라볼릭 디쉬를 사용한 경우보다 3 ~ 4배 정도 더 높은 조도값을 얻었다. 프레넬 렌즈보다 파라볼릭 디쉬를 이용했을 경우의 조도값이 낮은 것은 프레넬 렌즈의 경우 전송부와의 거리만 조절하면 바로 집광을 할 수 있지만, 포물반사경의 경우 1차, 2차 반사경의 각도와 거리 및 호모제나이저와의 거리를 모두 조정해야 하므로 집광이 상대적으로 어려울 뿐만 아니라 여러 과정을 거치게 되며 조도 값 또한 낮아지는 것으로 나타났다.

본 실험에서는 태양추적장치에서 같은 크기의 프레넬 렌즈와 파라볼릭 디쉬를 사용하여 두 종류의 집광부를 비교·분석해 보았다. 프레넬 렌즈를 사용한 경우 일반 사무실 KS 조도기준을 충분히 만족하는 결과를 보여주었고, 파라볼릭 디쉬를 적용한 경우 기준에 못 미치는 낮은 결과값을 보여주었다. 이번 실험에서는 책상면의 밝기만 측정했지만 좀 더 큰 렌즈와 디퓨저를 이용하면 일반 형광등 수준의 넓은 범위를 비출 수 있을 것으로 사료되며, 전력요금을 계산한 결과 30년 동안 최대로 자연채광장치를 사용했을시 약 590만원 정도의 전력요금을 절약할 수 있음을 알았다.

V. 결 론

본 논문에서 제시된 저온도차 발전기술들은 간단한 시스템 원리와 구조를 갖고 있어 기술적, 환경적, 경제적 등의 제약이 적어 앞으로의 에너지활용 극대화를 위한 폐열활용 분야의 한 방안을 제시하였다. 또한, 태양추적장치의 사용으로 건물에 투입되는 조명에너지의 절감방안을 제시하였으며, 이에 따른 비용을 산출해내어 적극적인 태양에너지의 활용을 통한 건물에너지 절감에 관한 연구를 진행하였다.

저온도차 발전기술에서는 저온도차스털링엔진을 활용한 발전 기술과 가돌리늄을 활용한 발전기술 및 TENG를 이용하여 연구를 진행하였다. 이 때, 여러 개 발된 저온도차 스텔링엔진들의 온도차 및 무게에 따른 기계적 출력을 계산하여 비교하였으며, 이 중 MM-7엔진이 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 상에서 2.98mW로 가장 높은 기계적 출력을 보였으며 AC모터를 이용해 연구를 진행한 결과 0.09mW~0.12mW의 전기적 출력을 얻을 수 있었다. 또한, 가돌리늄 발전장치의 경우도 같은 방식으로 실험을 진행 하였는데 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 상에서 기계적 출력이 약 29.4mW 가 산출되어 저온도차스털링엔진을 활용한 발전기술 보다 훨씬 높은 출력값을 보였으며, TENG의 경우 2가지 방식을 동시에 적용한 경우 전압이 105V 로 높게 나왔다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서 사용되어진 LTD엔진만이 아니라, 다른 유형의 소형 LTD엔진들도 폐열 에너지를 이용하는 TENG에 효과적으로 적용될 수 있다고 사료되어진다.

화이버 광학 집광에 관한 연구에서는 하이브리드 추적 방식을 적용한 태양추적장치로 실내의 자연채광에 활용하였는데 집광부에 포물반사경과 프레넬 렌즈를 각각 설치하여 성능을 비교하였다. 그 결과 프레넬 렌즈를 사용한 태양추적장치의 경우 약 400 ~ 600 [lux] 의 조도값을 보였으며, 포물반사경을 사용한 태양추적장치의 경우 약 100 ~ 200 [lux] 의 조도값을 보여 프레넬 렌즈를 활용한 경우 KS 조도 기준을 만족시키는 결과를 보였으며 전력요금을 계산한 결과 30년 동안 자연채광장치를 최대한 활용했을 시에는 약 590만원 정도의 전력요금을 절약할 수 있는 것으로 나타나 기존의 전기에너지가 담당하고 있는 부하를 대체할 수 있는 방안으로써 그 효용성을 입증하였다.

본 연구는 향후 건물에너지 절감을 위한 방안의 기초자료로 활용 될 것이라 기대되며 특히, 가돌리늄을 활용한 발전기술의 경우 연구된 사례가 미미하기에 추후 추가적인 연구자료 수집과 연구개발을 통한 최적화로 발전성능을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

이충식 외 “다중 파라볼릭 반사경 방식을 이용한 추적식 집광시스템 개발”, 한국 태양에너지학회 논문집, Vol. 33, No. 2, pp. 56-63, 2013

장선준, 이윤표, 심규호 “스프레이 열전달을 이용한 저온도차 스텔링 엔진의 실험적 개념 연구”, 대한기계학회 논문집, Vol. 38, No. 6, pp. 475-482, 2014

JAMES R. SENFT, An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines, 2000

송규동, 이주윤, 유기형, “자연채광 시스템의 성능 평가를 위한 실내 조도 예측 및 조명제어 컴퓨터 모델 개발”, 대한건축학회논문집, Vol. 19, No. 3, pp. 211-218, 2003

이영수 외, “스텔링 엔진의 연료다양화에 관한 연구(Ⅲ)”, 연차보고서, 한국에너지기술연구소, 1993

신명철, 안준, 강병하, “스텔링 엔진용 재생 열교환기의 다공체 구조에 따른 성능 특성” 대한설비공학회, Vol. 24, No. 5, pp. 415-421, 2012

박성제, 고준석, 홍용주, 김효봉, “스텔링엔진/발전기 기술 동향” 한국동력기계공학회, Vol. 19, No. 1, pp. 5-12, 2015

Cengel YA, Boles MA. McGraw Hill, “Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition”, 2015.

Shirani M, Kadkhodaei M, “One-dimensional constitutive model with transformation surfaces for phase transition in shape memory alloys

considering the effect of loading history”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 81, pp. 117–129, 2016

Chen K, Gwilliam SB, “An analysis of the heat transfer rate and efficiency of TE(Thermoelectric) cooling systems”, International Journal of Energy Research, Vol. 20, pp. 399–417, 1996

Kolin I, “Stirling motor: history–theory–practice”, the 5th International Stirling Engine conference, 1991

Hinchet R, Seung WC, Kim SW, “Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Electronics”, ChemSusChem, Vol. 8, pp. 2327–2344, 2015

Niu S, Wang ZL, “Theoretical systems of triboelectric nanogenerators”, Nano Energy, Vol. 14, pp. 161–192, 2015

Guo H, Wen Z, Zi Y, Yeh MH, Wang J, Zhu L, Hu C, Wang Z, “A Water-Proof Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Generator for Energy Harvesting in Harsh Environments”, Advanced Energy Materials, Vol. 6, 2016

Lin L, Wang S, Niu S, Liu C, Xie Y, Wang ZL, “Noncontact Free-Rotating Disk Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Energy Harvester and Self-Powered Mechanical Sensor”, American Chemical Society Applied Materials & Interfaces, Vol. 6, pp. 3031–3038, 2014

Shin SY, Saravanakumar B, Ramadoss A, Kim SJ, “Fabrication of PDMS-based triboelectric nanogenerator for self-sustained power source application”, International Journal of Energy Research, Vol. 40, pp. 288–297, 2016

Chun J, Kim JW, Jung WS, Kang CY, Kim SW, Wang ZL, Baik JM, “Mesoporous pores impregnated with Au nanoparticles as effective dielectrics for enhancing triboelectric nanogenerator performance in harsh environments” Energy Environmental Science, Vol. 8, pp. 3006-3012, 2015

조재홍, 장수, 황보창권, 조두진, “광학” Eugene Hecht Fourth Edition, 다성출판사, 2008

이태규, 태양에너지를 이용한 수소제조, 에너지공학, Vol. 15, No.2, 2006

김영민, 석사학위논문, 태양에너지 저온활용의 효율성 제고를 위한 연구 : 자연채광 및 흡착식 해수담수화, 2011

MTech, M. N., Ramamurthy, K., Ganesan, “Classification of indoor daylight enhancement systems”, Lighting res. Technol, Vol. 46, pp. 245-267, 2012

“Daylight in buildings”, Energy Conservation in Buildings & Community Systems & Solar Heating and Cooling Programmes

Vu, N. H., Shin, S. Y, “Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators”, Solar Energy, Vol. 136, pp. 145-152, 2016

오승진, 이윤준, 김남진, 현준호, 임상훈, 천원기, “AVR 마이크로 컨트롤러 기반의 태양추적 장치 개발”, 에너지공학, Vol. 20, No. 4, pp. 353-357, 2011

박영철, “자연채광장치를 위한 태양추적시스템”, 대한설비공학회, Vol. 11, pp. 47-58, 2000

박영철, 강용혁, “집광식 태양열 집열기의 태양추적장치를 위한 태양위치계산”, 한국태양에너지학회, Vol. 18, No. 4, pp. 87-94, 1998

Clifford M.J, Eastwood D, “Design of a novel passive solar tracker”, Solar Energy. Elsevier Vol. 77, pp. 269-280, 2004

Aviation Formulary V1.44 by ED Willams.
[Http://wolliams.best.vwh.net/avform.htm](http://wolliams.best.vwh.net/avform.htm)

Wang ZL, “Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors”, American Chemical Society NANO, Vol. 7, pp. 9533-9557, 2013

오승진, 박사학위논문, Development of Smart Solar Tracking Systems for High Concentration Solar Applications : Daylighting, Photovoltaics and Thermoacoustics, 2014

Riba JR, Lopez-Torres C, Romeral L, Garcia A, “Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 367-379, 2016

김성곤, 정산훈, 이성훈, “당근이의 AVR 갖고 놀기” 복두출판사, 2009

오승진, 한현주, 전영일, 천원기, “Photopia를 이용한 추적식 디쉬형 집광기의 배광분포 분석 및 자연채광 성능 예측”, 한국태양에너지학회, Vol. 32, No. 3, pp. 104-113, 2012

Dish형 집광기를 이용한 태양열 발전 현황, 에너지관리공단. 2003

Lin, M., Sumathy, K., Dai, Y. J., Zhao, X. K., “Performance investigation on a linear Fresnel lens solar collector using cavity receiver”, Solar Energy, Vol. 107, pp. 50 - 62, 2014

Tripanagnostopoulos, Y., Siabekou, C., Tonui, J. K., “The Fresnel lens concept for solar control of buildings”, Solar Energy, Vol. 81, pp. 661-675, 2007

http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=44&contents_id=17034

감사의 글

제가 지내온 2년간의 석사과정은 제 자신스스로와 소중한 주변 사람들과의 관계를 되새겨보며 한번 뿐인 인생에 있어 정말 소중한 것이 무엇인가에 대하여 깊게 생각할 수 있는 기간이었다는 생각이 듭니다. 이제 이 소중한 여정을 마무리하고 새로운 여행을 떠나려 합니다.

그 동안 저를 응원해주시고 감싸주고 아껴주며 칭찬 혹은 더 잘되라는 의미를 담은 충고 또는 조언을 해주신 모든 소중한 분들에게 감사의 말을 올리며, 학부생시절부터 지금의 석사과정에 오르기까지 아낌없는 격려와 자상하고 따듯한 지도로 부족한 저를 이끌어주신 지도 교수이신 천원기 교수님, 정말 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 인자하신 모습으로 연구에 관해 학문적으로 도움을 주시고 폭넓은 지식으로 기본 소양에 대한 가르침을 주어 세상을 넓게 바라보도록 도와주신 이윤준 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 부족한 논문에 한결같은 열정적이고 적극적인 모습으로 많은 조언을 주신 임상훈 교수님과 한현주 교수님 그리고 김남진 교수님께 다시 한 번 깊은 감사를 드립니다.

실험실 생활을 하는데 여러 가지 부족한 후배를 친동생처럼 항상 다독이며 인생의 조언을 아낌없이 해주신 준호형, 승진이형, 영민이형에게도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 같은 석사 과정 동안 함께 지내온 참 아끼는 후배 해준이에게 고맙고 그 동안 함께해준 윤정이, 종인이, 연주, 송이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

에너지 공학과를 위해 항상 애쓰신 조교선생님이었던 경호형, 용현이형에게도 감사드리며 새로 조교선생님 직책을 맡아 에너지 공학과를 위해 노력하고 있는 제원이, 경윤이에게도 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 그리고 석사과정동안 도움을 주신 보안이형, 영준이형에게 감사드리며 바쁜 와중에도 도움을 준 종근이, 영훈이, 연현이, 정환이, 병일이, 현미, 연아, 수연이, 운기 그리고 친구이자 동기인 용우 에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

끝으로 석사과정 중에 돌아가신 존경하는 우리 외할아버지, 저 열심히 사는 모습 하늘나라에서 보실 수 있도록 항상 노력하겠다고 전해 드리고 싶고, 언제나 아들 건강걱정만 하시는 사랑하는 아버지, 어머니 그리고 동생에게 언제나 응원해주고 곁에 있어줘서 진심으로 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.