



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 폐열 발전 및  
자연채광 적용에 관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지工學科

丁海俊

2017年 2月



# 건물에너지 절감을 위한 폐열 발전 및 자연채광 적용에 관한 연구

指導教授 千 院 基

丁 海 俊

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017年 2月

丁海俊의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 朴 春 根

委 員 \_\_\_\_\_ 韓 賢 珠

委 員 \_\_\_\_\_ 千 院 基



濟州大學校 大學院

2017年 2月

A study on waste heat power generation and  
daylighting application for building energy  
conservation

Jeong Hae Jun

(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

*Wongee Chun*

.....  
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	III
LIST OF TABLES	VI
SUMMARY	VII
I. 서 론	1
1. 저온도차 TM(Thermal to Mechanical) 발전 기술	1
2. 설비형 자연채광 적용 기술	2
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
3. 설비형 자연채광 장치	17
3.1. 광 에너지	17
3.2. 자연채광 장치(Daylighting System)	20
3.3. 시뮬레이션 프로그램	24
III. 저온도차 발전 기술	27
1. 실험장치 구성	27
1.1 저온도차 발전 장치 구성 ; 저온도차 스텔링엔진	27
1.2 저온도차 발전 계측 장비 구성	31
1.3 저온도차 발전 장치 구성 ; 가돌리늄 발전장치	33
2. 실험 방법	35
2.1 Mechanical power	35

2.2 Electrical power	39
3. 실험결과 및 고찰	44
3.1 Mechanical power ; 저온도차 스텔링엔진	44
3.2 Mechanical power ; 가돌리늄 발전장치	52
3.3 Electrical power ; 저온도차 스텔링엔진	57
3.4 Electrical power ; 가돌리늄 발전장치	59
4. 소결론	62
IV. 설비형 자연채광 적용 기술	63
1. 연구의 범위 및 방법	63
1.1. 실험 및 시뮬레이션 조건	63
1.2. Roller shade 차광비율 현황 조사 및 분석	65
2. 측정 및 시뮬레이션	68
2.1. Roller shade 차광비율에 따른 시뮬레이션	68
2.2. 시뮬레이션과 실제 측정값 비교 분석	70
2.3. 형광등과 태양추적장치를 이용한 자연 조명 비교 분석	73
3. 경제성 분석	78
4. 소결론	82
V. 결론	83
참 고 문 헌	85
감사의 글	88

## 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 $V_t, V_0, A, B, \alpha, \phi, \tau, \omega$ and $\Theta$	7
Fig. 3. V-type Alpha engine	13
Fig. 4. $\beta$ type Stirling engine	14
Fig. 5. $\gamma$ type Stirling engine	15
Fig. 6. Spectrum of solar radiation	18
Fig. 7. Structure of Daylighting System	21
Fig. 8. Photograph of LTD Stirling engine [MM-7]	28
Fig. 9. Photograph of LTD Stirling engine [KS90]	28
Fig. 10. Photograph of LTD Stirling engine [KS90Twin]	29
Fig. 11. Photograph of hot plate	30
Fig. 12. Photograph of k-Type thermocouple	31
Fig. 13. Photograph of Data logger	32
Fig. 14. 1cm x 1cm x 1cm gadolinium	34
Fig. 15. System design for mechanical power calculation	36
Fig. 16. System for mechanical power calculation	36
Fig. 17. Position of hot water and cold water in gadolinium generator	37
Fig. 18. System for mechanical power calculation in gadolinium generator	38
Fig. 19. Experimental output using the AC motor(MM-7)	40
Fig. 20. Experimental output using the generator coil:	
(a) MM-7	
(b) Generator coil	
(c) MM-7 with generator coil	40
Fig. 21. Measurement method for voltage and current	41
Fig. 22. schematic of gadolinium electric generator	43
Fig. 23. Gadolinium generator with magnetic shield	43
Fig. 24. Output of Stirling engine vs temperature difference	45

Fig. 25. Output of Stirling engine against temperature difference and torque (MM-7).....	46
Fig. 26. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque (MM-7).....	47
Fig. 27. Output of Stirling engine against temperature difference and torque (Twin).....	48
Fig. 28. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin).....	49
Fig. 29. Output of Stirling engine against temperature difference and torque (Single).....	50
Fig. 30. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single).....	51
Fig. 31. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ ).....	53
Fig. 32. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ ).....	54
Fig. 33. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ).....	55
Fig. 34. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ).....	56
Fig. 35. Electric power using AC motor.....	57
Fig. 36. Electric power using generator coil:	
(a) Electric	
(b) Temperature.....	58
Fig. 37. Voltage change over time( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ).....	59
Fig. 38. Current change over time( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ).....	60
Fig. 39. Electrical power change over time( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ).....	60
Fig. 40. Modeling conditions;	
(a) actual test room	
(b) modeling test room	
(c) solar tracking system	
(d) lighting position.....	64
Fig. 41. Sky condition and Window shading by Roller shade at different times;	
(a) 2016.03.03. 16:00	
(b) 2016.03.12. 16:00	

	(c) 2016.04.09. 16:00	
	(d) 2016.04.19. 16:00	65
Fig. 42.	The actual use of Roller shades;	
	(a) 2016.03.03.	
	(b) 2016.03.12.	
	(c) 2016.04.09.	
	(d) 2016.04.19.	67
Fig. 43.	Solar altitude and indoor illuminance(simulated)	
	(a) summer solstice	
	(b) result: at 12:30 blind 50%	68
Fig. 44.	Variation of Average indoor illuminance of test room with Roller shade length	69
Fig. 45.	Location of photo sensors	70
Fig. 46.	Comparison between measured values and simulation results in October 31 (75%)	71
Fig. 47.	Comparison between measured values and simulation results in June 19 (100%)	72
Fig. 48.	Diffuser setting;	
	(a) No diffuser	
	(b) Diffuser	
	(c) Before applying the diffuser	
	(d) After applying the diffuser	74
Fig. 49.	Change of indoor illuminance with time	76
Fig. 50.	Change of average indoor illuminance with time	77

## LIST OF TABLES

Table 1. Classification of collectors in light transport systems .....	23
Table 2. Specifications of LTD Stirling engines .....	29
Table 3. LTD engine torque(200mg) .....	44
Table 4. Performance measurement of Stirling engine(MM-7) .....	46
Table 5. Performance measurement of Stirling engine(Twin) .....	48
Table 6. Performance measurement of Stirling engine(Single) .....	50
Table 7. Torque by mass .....	52
Table 8. Performance measurement of gadolinium generator( $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ ) .....	53
Table 9. Performance measurement of Gadolinium generator( $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ ) .....	54
Table 10. Performance measurement of Gadolinium generator( $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ) .....	55
Table 11. Performance measurement of Gadolinium generator( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ) .....	56
Table 12. Performance measurement of gadolinium electric generator( $\Delta T$ = $45^{\circ}\text{C}$ ) .....	61
Table 13. Properties of materials used .....	64
Table 14. Annual weather data (1981~2010) .....	78
Table 15. Production and maintenance costs .....	79
Table 16. Electric charges .....	80
Table 17. Total costs .....	81

## SUMMARY

Climate change due to global warming and depletion of existing fossil fuels are calling for the development of renewable energy and increasing use of energy efficient technologies. Unfortunately many modern buildings, these days, have hired a rather stereotypical architecture design where major portion of a building envelope is more or less covered with glass windows for aesthetic appearance. As a result, energy consumption due to indoor air conditioning and lighting in buildings is increasing.

In this study, two different techniques were applied and their effects were examined to reduce energy use in buildings. The first is the use of low heat source TM (Thermal to Mechanical) power generation technology to produce electrical energy using low temperature waste heat (about 60 degrees) discarded by various HVAC systems in buildings. The second is a comparative analysis using a simulation model of fluorescent lighting and Fresnel lens based fiber optic lighting. These techniques deems to have great potential in saving electric energy consumed in buildings as well as alleviating rising environmental problems.

### 1. Low heat source TM(Thermal to Mechanical) power generation

To harness low grade thermal energy a single and twin type MM-7 engines were tested, which have been known as one of the most efficient ways to draw any power from a small temperature difference between two heat sources. The experimental results of the MM-7 engines were compared with gadolinium-based power generation system as the latter produced greater torques under the same thermal conditions. As for the MM-7 Stirling engines, the power output of the twin engine showed the highest value as long as the engine could handle the weight used to measure torques. As the mass increased beyond a certain value, it ceased to operate because the

power generated was smaller than that produced by weight. In comparison, the gadolinium-based power generation system produced the maximum mechanical output of 20.09mW at  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ . This was about 3 times higher than that of LTD Stirling engines.

## 2. Simulation of facility type daylighting system

In order to deliver the actual conditions in building energy simulation concerning indoor lighting conditions, simulation conditions were set based on the physical dimensions of actual windows and blind usage patterns of the building. ECOTEECT was used to model the test room (space) while Radiance was used to carry out its indoor lighting conditions (environment).

A series of experimental results show the validity of the Fresnel based daylighting system in saving energy used for indoor lighting. This was clearly demonstrated by comparing its energy consumption if the indoor lighting was solely furnished by fluorescent lamps. It was projected that 590,000 won could be saved over the period of 30 years if the daylighting system could be consistently employed during the daylight hours.

## I. 서 론

오늘날 전 세계적으로 에너지의 사용이 날로 증가하고 있으며, 이로 인해 지구 온난화, 기상이변, 자연자원의 고갈이라는 부작용이 점증하고 있어 청정하고 무한한 대체에너지의 개발과 보급은 시급한 실정이다. 세계 에너지 총 사용량은 날로 증가하는 판세이나 한정된 에너지 자원으로 인해 전 세계적으로 에너지문제는 큰 화두가 되었으며 새로운 대체에너지의 개발에 앞 다투어 각축을 벌이는 실정이다. 최근, 건물의 대형화 및 냉·난방, 조명, 환기, 공기조화 시스템 등의 사용량 증가로 인해 건물에서 사용되는 에너지양은 점차 증가 할 것으로 전망된다. 특히, 건물에서 사용되는 에너지 중 조명에 사용되는 에너지는 총 건물에너지 사용량의 28%인 것을 고려할 때 조명에 사용되는 에너지 절감으로 얻을 수 있는 경제적 파급 효과는 크다고 할 수 있다. 주요 화석연료인 석유, 석탄, 천연가스 등의 한정된 자원은 가까운 미래에 고갈 될 전망이며 온실가스 배출 등 각종 환경문제를 일으킨다. 이에 안정적인 에너지 확보와 공급을 위해서는 지속적으로 사용이 가능한 친환경에너지 자원의 연구·개발이 필요하며 효율적인 에너지의 사용이 재고된다.

본 연구에서는 건물에너지 절감을 위하여 저온도차 발전 기술을 이용해 건물의 공조시설 등에서 배출되는 약 60℃ 정도의 폐열을 이용하여 전기에너지를 생산하고 또한 태양에너지를 이용한 설비형 자연채광 적용 기술을 적용하여 건물의 조명에너지를 절약하기 위한 연구를 수행하였다. 후자의 경우, 같은 크기의 사무실 공간을 대상으로 자연채광과 기존 형광등에 의한 실내조도 분포 등에 대한 시뮬레이션을 통하여 photometry에 대한 정량적인 비교 분석 및 경제성을 평가하였다.

### 1. 저온도차 TM(Thermal to Mechanical) 발전 기술

저온 폐열로부터 전력을 생산하는 것은 최근 주목받는 주요한 기술이다. 대규모 기계 가공 및 전력 발전 시설들은 그 공정들에서 다량의 열에너지가 발생하

며, 다양한 냉각 또는 HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning)시스템을 활용하여 이를 제거 하거나 또는 적극적으로 활용한다. 이러한 시설들은 주위 온도보다 20 ~ 30℃ 높은 폐열을 지속적으로 생성하며, 잠재적으로 유용한 에너지인 대규모의 폐열을 제공한다. 폐열 회수에는 현재 고가의 열전기 및 형상기억 합금 기술이 이용되며, 이 방법을 사용하여 온도차로부터 전력을 생산할 수 있다. 이 분야에서의 최근 연구는 열전기 및 형상 기억 합금 기술 등에 치중되고 있으며 또 다른 연구로는 기계 시스템을 이루고 있는 스텔링 엔진(Stirling engine)이다. 스텔링 엔진은 디스플레이서 챔버(displacer chamber)의 한 쪽 측면이 따뜻하고 다른 측면이 차가울 때 밀봉된 제어 볼륨에서 데워지는 공기로 인해 디스플레이서 피스톤이 왕복운동을 함으로써 기계 에너지가 생성되는 장치이다. 이러한 장치는 보다 고가의 기존 기술들을 대체할 수 있으며 상대적으로 저비용의 기회를 제공한다. 또한 온도차에 따라 물리적 특성이 달라지는 가돌리늄을 활용한 TM 발전기에 대한 연구도 진행되고 있다. 저온 폐열에서 확보되는 전력의 기본적인 목적은 한정된 매체에 작은 온도 차를 적용하고 이를 기계적 에너지로 전환하며, 이후 사용 가능한 전력을 생산할 수 있는 발전기를 개발하는데 있다. 본 연구에서는 스텔링 엔진 및 가돌리늄을 활용하여 보다 높은 효율성에서 전력을 발생할 수 있는 TM발전기를 개발하는 것이다.

본 연구에서는 이러한 저온도차스텔링엔진의 특성을 이용하여 토크, 온도차 및 회전속도별 연구를 진행하여 스텔링엔진의 최대 기계적 출력을 산출하고 가돌리늄을 이용한 발전기와의 비교분석을 진행하여 TM(Thermal to Mechanical energy)발전변환기의 효율 개선 및 개발방안을 모색하고 이를 통하여 건물에너지 절감할 수 있는 방안을 모색해 보았다.

## 2. 설비형 자연채광 적용 기술

20세기의 대량생산과 소비는 지구의 자원을 고갈하고 엄청난 양의 폐기물을 쏟아내면서 공기, 물, 토양을 오염시키고 지구환경을 위협하고 있다. 이 중에서 지구온난화현상은 상당한 환경적 재앙을 초래하고 있어 세계적인 관심사가 되고

있다. 20세기 동안 화석에너지의 소비는 급증하여 화석연료를 연소하면서 대기에 배출되는 이산화탄소는 지구온난화의 주요 원인이라고 할 수 있다. 전 세계적으로 화석에너지 소비와 이에 따른 지구상의 영향의 즉각적인 삭감을 요구하고 있다. 그러나 이산화탄소 배출의 증가를 억제하기는커녕 점점 멀어지고 있다. 우리나라에서의 이산화탄소 배출을 보면 건물부문에서 에너지소비가 차지하는 비중이 30%가 넘는다. 건물에서의 에너지 소비의 주요 형태는 실내공조 및 실내조명이 대부분을 차지하고 있다.

현대의 건물들은 미적인 외관을 위하여 많은 부분을 유리로 덮는 등의 획일적인 건축설계를 하고 있다. 이로 인해 건물에서의 실내 공조, 실내조명으로 인한 에너지소비는 점점 늘어나는 추세이다. 최적의 설계를 통해 실내로 들어오는 빛의 양을 조절해주는 것만으로도 실내 냉난방 공조에 필요한 에너지를 절감할 수 있으며, 일광절약 시간제를 통해 조명으로 인한 에너지소비도 줄일 수 있다. 시뮬레이션을 이용하여 그 지방의 기후와 일조량 등을 감안한 건축물에 대한 체계적인 성능 분석 및 평가는 최적의 건축 설계와 건물 에너지의 절감에 상당한 영향을 미칠 수 있을 것이다.

본 연구에서는 건물 에너지 소비 효율 향상을 위하여 건물의 실제 창호와 Roller shade의 사용 패턴을 분석하여 시뮬레이션에 필요한 조건 등을 설정하였다. 또한 ECOTECH 프로그램으로 test room의 모델링을 하였으며 동시에 RADIANCE 프로그램과 연동하여 자연채광을 병용한 실내조명 시뮬레이션을 실행하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 스텔링 엔진

#### 1.1. 스텔링 사이클

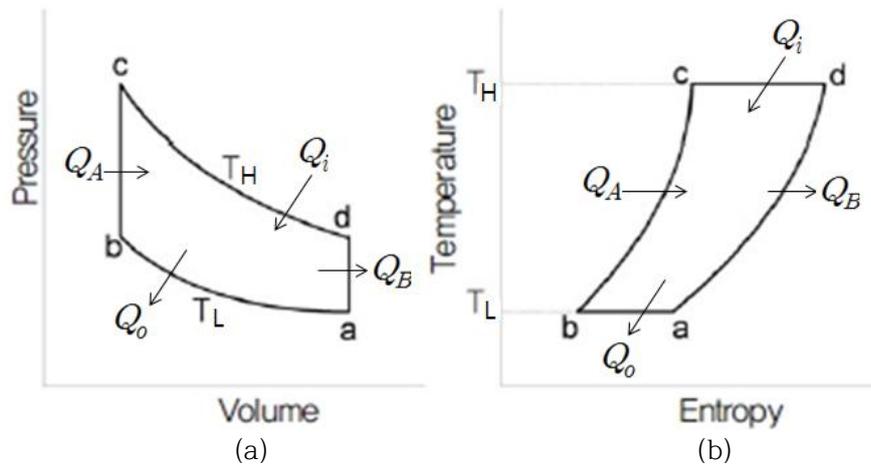


Fig. 1. Idealized Stirling cycles. (a) A pressure/volume graph (b) A temperature/entropy graph

스텔링엔진은 2개의 등온과정과 2개의 정적과정으로 이루어지며 스텔링 사이클은 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 과정으로 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  $V_e$ ,  $V_c$ ,  $\alpha$ ,  $\phi$  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 적용하면

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

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

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

$$= (\tau + \omega \cos \phi) \cos \alpha + \omega \sin \phi \sin \alpha + \tau + \omega + 2s$$

와 같은 관계가 성립된다.

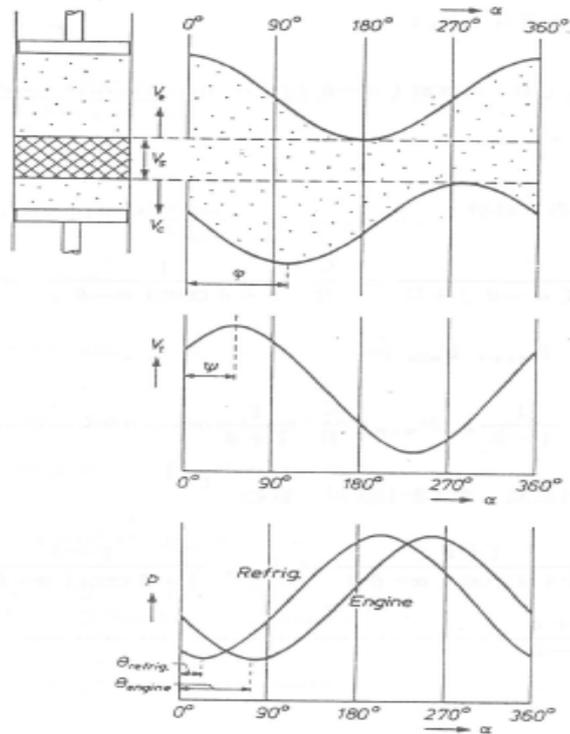


Fig. 2. The relationship between total  $V_t$ ,  $V_0$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\phi$ ,  $\tau$ ,  $\omega$  and  $\theta$

Fig. 2에서  $\theta$  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

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

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

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 16에서 순간압력을 나타내면 다음과 같다.

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

여기서  $\delta$ 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.<sup>[4]</sup> 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  $m$ ,  $c_V$ ,  $\Delta T$ 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 효율은 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 절대 값을 무시하면

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

와 같이 이상적인 재생기를 갖는 스텔링 사이클은 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( $\alpha$ ), 베타( $\beta$ ), 감마( $\gamma$ )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 스텔링 엔진

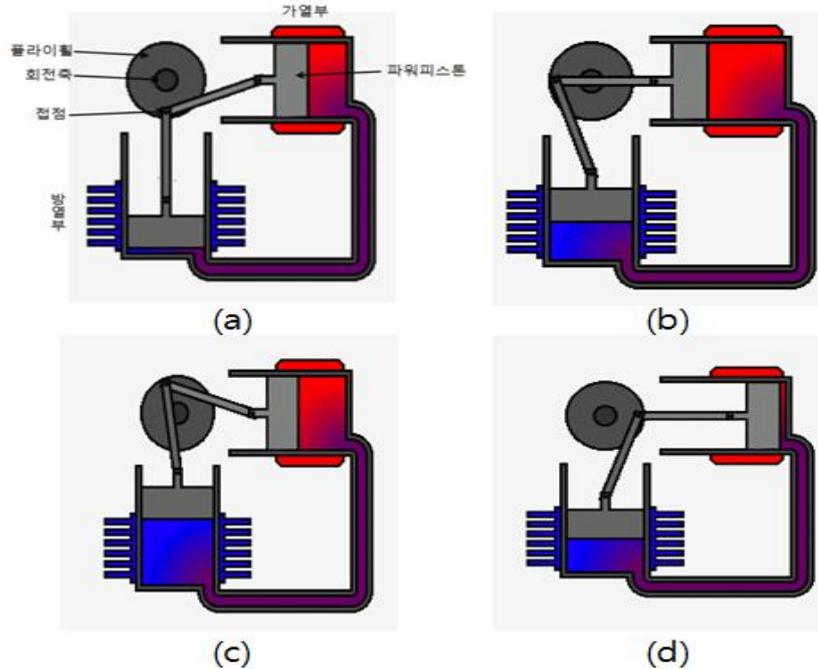


Fig. 3. V-type Alpha engine

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 거치게 된다. 알파(a)타입 스텔링엔진의 작동과정은 다음과 같다.

- 1) 등온팽창과정 a-b ; 작동유체가 외부 열원으로부터 열량을 받는 과정으로 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 받는 과정으로 가열부

에 작동유체가 모이면서 가열된다.

-베타( $\beta$ )타입 스텔링엔진

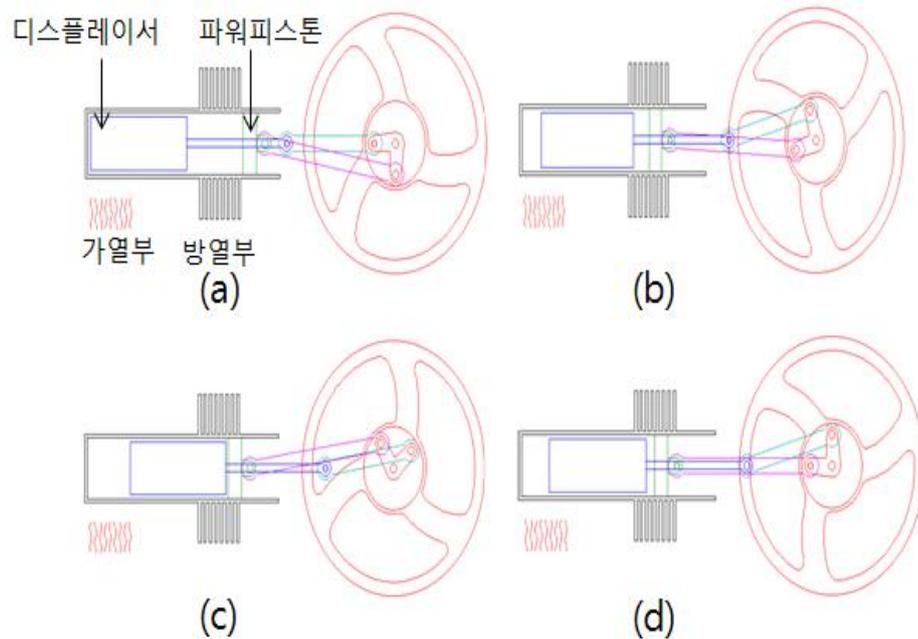


Fig. 4.  $\beta$  type Stirling engine

베타( $\beta$ )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 움직이게 한다. 베타( $\beta$ )타입 스텔링엔진의 작동 과정은 Fig. 4와 같다.

-감마( $\gamma$ )타입 스텔링엔진

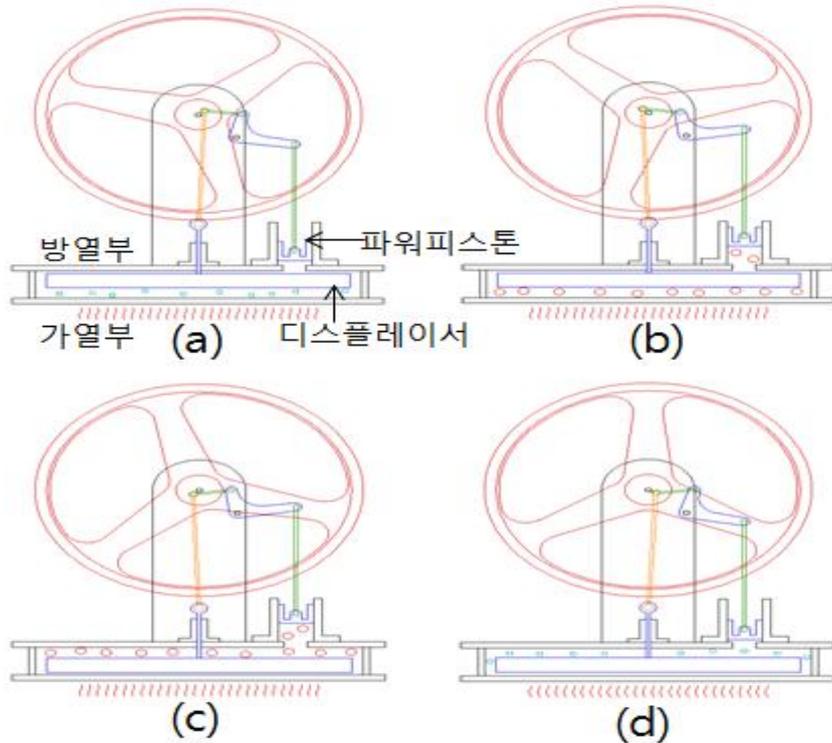


Fig. 5.  $\gamma$  type Stirling engine

감마( $\gamma$ )타입 스텔링엔진은 디스플레이서와 파워피스톤이 각기 다른 실린더에 위치한 구조로써 파워피스톤은 방열부인 상부 판에 위치하며 디스플레이서는 가열부와 방열부 사이 실린더 내부에 위치한다. 구조적으로 베타형에 비해 디스플레이서의 크기가 크며, 파워피스톤은 소형화하였다. 또한, 가열부와 냉각부의 면적을 늘려 파워피스톤의 행정 거리를 줄였다. 감마타입 스텔링엔진은 본 연구에서 사용된 타입으로서 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

가돌리늄은 연성과 전성이 있는 은백색의 희토류 금속으로써 공기 중에서는 표면이 쉽게 산화되어 옅은 노란색을 띤다. 녹는점은 1,313°C이고 끓는점은 3,273°C이며, 25°C 밀도는 7.90g/cm<sup>3</sup>이다. 실온에서는 육방조밀격자(hcp) 구조를 하는 α-형으로 존재하는데, 가열하면 1,235°C에서 체심입방(bcc) 구조를 갖는 β-형으로 전환된다. 20°C이하에서는 강자성(ferromagnetic, 외부에서 자기장을 걸면 자석이 되고 자기장을 제거한 후에도 자석 성질이 남아있는 특성)을 띠나, 이보다 높은 온도에서는 강한 상자성(paramagnetic, 외부에서 자기장을 걸면 약한 자석의 성질을 띠나, 자기장을 제거하면 자석 성질이 없어지는 특성)을 띤다. 또한, 자기장의 변화에 의해 온도가 변하는 자기열량 효과(magnetocaloric effect)를 보이는데, 자기장 속으로 들어가면 온도가 올라가고 자기장 밖으로 나오면 온도가 내려간다.

### 3. 설비형 자연채광 장치

#### 3.1. 광 에너지

##### 1) 빛의 물리학

빛은 광자라고 알려진 전자기적 “입자”로써 흡수되고 방출된다. 보통 빛다발은 너무나 많은 미세한 에너지 양자(quantum)들을 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 양자화 되어 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(380nm ~ 780nm) 사람의 눈으로 볼 수 있는 부분이며, 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 에너지원이다. 지표면에 도달하는 태양광은 자외선은 5%, 가시광선은 40%, 적외선이 55%정도의 비율을 가지고 있으며 320nm의 이하의 파장영역으로 그 에너지의 98%가 0.1 ~ 3.0 $\mu$ m의 파장에 존재한다. Fig. 6은 태양으로부터 지구로 들어오는 태양복사파장을 나타낸 그림이다.

표면온도가 약 6,000 $^{\circ}$ C인 태양으로부터 조사되는 일사량(Solar radiation)은 지구의 지표면에 도달하는 과정에서 대기 중의 O, N, O<sup>2</sup> 그리고 O<sup>3</sup> 등의 흡수에

의한 손실을 거치면서 약  $1000\text{W}/\text{m}^2 (=1\text{sun})$  정도가 평균밀도(power density)로 알려져 있다.

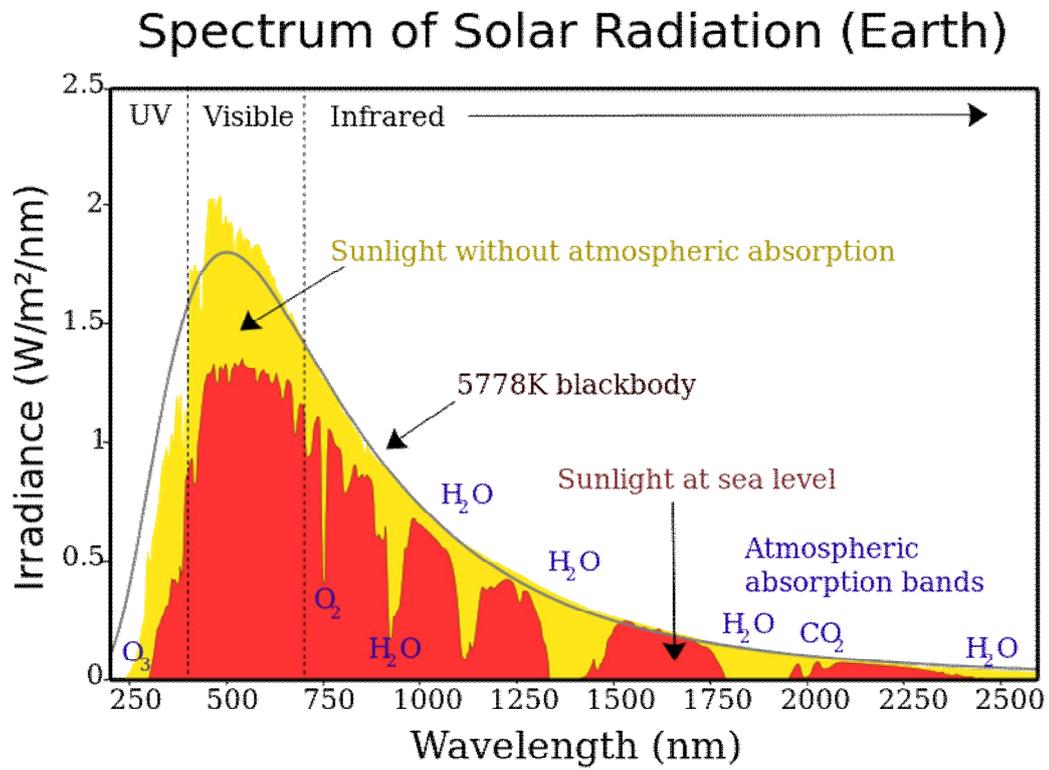


Fig. 6. Spectrum of solar radiation

## 2) 측광량(Photometric quantities)

### (1) 광속(luminous flux): $\Phi$

광속은 빛에너지 흐름의 크기를 말한다. 단위는 루멘(Lumen:  $lm$ )으로서, 균일한 1 cd의 점광원이 단위 입체각(1 sr : steradian)내에 방사하는 광양으로 정의된다. 따라서 1 cd의 광원에 의해 방사된 전광속은  $4\pi$  루멘이다.

### (2) 광도(luminous intensity) : $I$

점광원(point source)에 의한 어떤 방향에 발산 광속의 입체각밀도를 그 방향의 광도라고 한다. 입체각  $\omega$ 내에 광속  $\Phi$ 가 균일하게 발산될 때 광도  $I$ 는 다음과 같다.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

또한 점광원으로부터 전 공간에 균일하게 광속이 발산될 때는 다음과 같다.

$$I = \frac{4\pi}{\omega}$$

### (3) 조도(illumination) : $E$

어떤 면에 입사광속의 면적당 밀도를 그 면의 조도라 한다. 단위는 룩스(Lux:  $lx$ )로서, 1  $lm/m^2$ 의 광속밀도에 의하여 생기는 조도이다.

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

여기서,  $E$  : 표면의 조도(lx),  $\Phi$  : 표면에 도달한 광속(lm),  $S$  : 표면적( $m^2$ )이다.

(4)휘도(Brightness, 또는 luminance) :  $L$

휘도는 표면의 밝기의 척도이다. 우리가 물체를 식별하는 것은 밝음의 차이에 의한다. 밝음의 정도는 똑같은 광도를 가진 광원에서 넓은 면적으로 발산될 때와 좁은 면적으로부터 발산될 때 각각 광원의 밝음이 다르다. 단위는  $cd/m^2$ 이다.

$$L = \frac{dI}{dS}$$

여기서,  $S$ 는 밝은 면을 보고 있는 방향의 투영면적이고  $I$ 는 그 방향의 광도이다.

### 3.3. 자연채광 장치(Daylighting System)

#### 1)시스템 구성 및 원리

자연채광 장치는 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.

일반적으로 자연채광시스템은 전술한 광전송 시스템을 가리킨다고 할 수 있으며, 집광부(Light Collector), 전송부(Light Transmitter), 산광부(Light Distributor)로 구성된다. Fig. 7은 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.

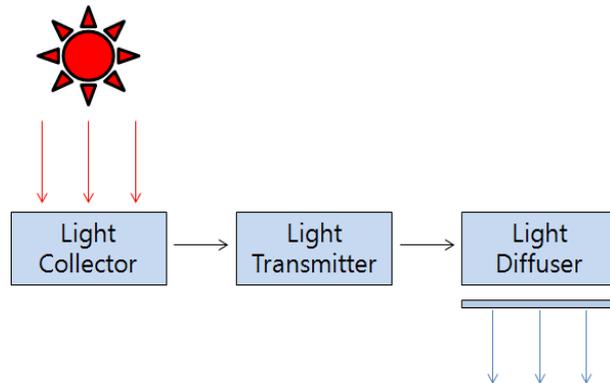


Fig. 7. Structure of Daylighting System

## 2) 자연채광 장치

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

집광부의 추적방식에 따라 자연형 채광 시스템(Passive Daylighting System)과 설비형 채광 시스템(Active Daylighting System)으로 분류되며, 또한, 일반적으로 설비형 자연채광시스템은 여러 가지 하드웨어 설비를 이용하여 보다 적극적으로 실내에 자연광을 도입시키기 위한 방법이다. 태양 추적 방식에 따라 광학적 방법과 천문학적 방법으로 구분되어 지고, 추적의 구조적 구현 방식에 따라 1축 제어와 2축 제어로 분류된다.

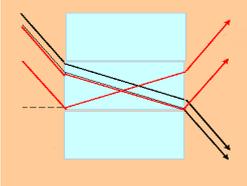
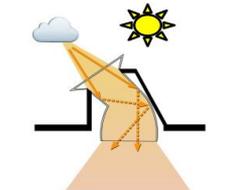
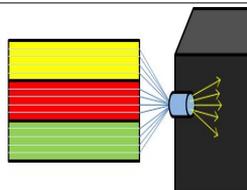
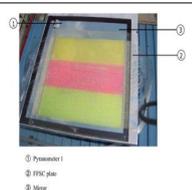
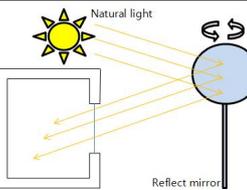
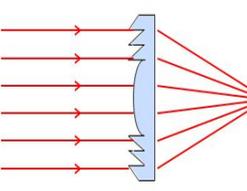
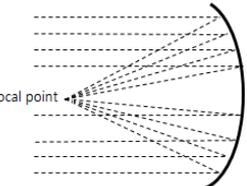
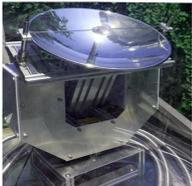
자연형 자연채광시스템은 태양의 움직임에 관계없이 시스템이 고정된 상태로 외부의 빛을 실내로 전송시키는 방법이며 특정각도에서만 빛을 수집할 수 있어 집광부와 전송부에 넓은 공간을 필요로 한다. 설비형 자연채광시스템은 태양추적 시스템을 적용하여 태양의 움직임에 따라 연속적으로 태양을 추적하여 실외의 빛을 실내로 전송시키는 방법이다.

설비형 자연채광시스템 중 Mirror Sunlightng System, Fresnel Lenses, Parabolic Dish 등의 시스템들은 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 1은 자연형 채광시스템과 설비형 채광시스템의 집광부의 형태에 따라 분류한 표이다. 자연형 채광시스템은 크게 반사형 집광형으로 나뉘어 Laser cut panel이나 compound parabolic concentrator등에 쓰이며, 설비형 채광시스템 또한 반사형과 집광형으로 나뉘어 Mirror sunlighting system, fresnel lenses, parabolic dish등에 사용된다.

Table 1. 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		
		Concentrating	Fluorescent Fiber Solar Concentrator		
	Active	Light Redirection	Mirror Sunlighting System		
		Concentrating	Fresnel Lenses		
		Concentrating	Parabolic Dish		

### 3.4. 시뮬레이션 프로그램

#### 1) ECOTEECT

ECOTEECT은 Square One Research사와 Andrew March 박사에 의해 2000년에 개발되었다. 그 후 친환경 건물성능 평가와 그린 빌딩의 이슈화에 따라 Autodesk사에서 2008년 6월에 인수하여, 현재 Autodesk ECOTEECT2011 Analysis까지 출시된 후 2012년부터 Revit Architecture에 흡수되었다.

ECOTEECT은 친환경 디자인과 환경 분석 프로그램이다. 초기 디자인 과정부터 최종평가까지 다양한 분야의 건축 환경을 평가 및 분석한다. 또한 건물 디자인과 각종 시스템들이 친환경 평가에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 수 있다. 특히 ECOTEECT의 주요 특징이라 볼 수 있는 다양한 3D 이미지와 결과물은 고효율 건물 및 그린 빌딩 이슈에 대한 직접적인 평가가 가능하다. 주요기능은 다음과 같다.

##### (a) 일조 및 음영 분석

ECOTEECT을 이용하여 빠르고 간단하게 일조 평가 및 분석이 가능하다. 태양의 시간별 위치 및 연중궤적 또한 파악이 가능하며, 기존의 태양궤적도로는 파악하기 어려운 태양의 위치를 해당 모델과 함께 연중 태양궤적을 3D로 표현하여 분석할 수 있다.

##### (b) 일사량 분석

기본적인 일사량 분석이 가능하다. 기상데이터의 수평면 일사량 분석이외에도 다양한 건물외피에서의 일사량 분석이 가능하다. 우선 기본적으로 단일 객체의 연중 월별 시간별 일사량을 그래프로 한 눈에 알아볼 수 있도록 제공하며, 태양궤적도를 통해서도 확인이 가능하다. ECOTEECT과 같은 3D모델링 시뮬레이션 프로그램에서의 일사량 분석이 가능하며 연간, 일일, 시간별 평균값등과 같은 다

양한 결과를 얻을 수 있다.

### (c) 실내조도 분석

각 실내공간에서의 측창 및 천창과 같은 건물 개구부 디자인에 따른 실내 조도의 분석이 가능하다. 실내 시뮬레이션 그리드를 통해 실내조도와 주광률을 산출할 수 있으며, 특히 차양이나 광선반등의 디자인 요소를 적용 시 더욱 용이하게 자연채광 디자인 평가가 이루어질 수 있다. 또한 더욱 세부적인 기준을 평가하기 위해 RADIANCE 또는 DAYSIM을 통한 시뮬레이션 평가 또한 가능하다. 다양한 시뮬레이션 옵션을 통하여 좀 더 실사와 같은 이미지의 연출이 가능하며, 이를 기반으로 다양한 실내조도 분포의 분석이 이루어질 수 있다.

## 2)RADIANCE

RADIANCE 프로그램은 미국 국립 Lawrence Berkeley Laboratory(LBL)의 조명연구팀이 개발한 프로그램으로서 1987년 이래로 버클리의 캘리포니아 대학 건축공학과에서 사용되어오고 있는 조명 렌더링 및 시뮬레이션 프로그램이다.

RADIANCE 프로그램은 역광선추적기법(Backwards Ray-tracing Technique)을 기초로 한다. 이것은 광선이 자연적으로 진행되는 방향의 반대 방향으로 추적하여, 실제 광선이 발생한 광원의 활동을 예측하는 것을 의미한다. 그 과정은 눈으로부터 시작하여 공간의 대상물들의 표면들을 따라 모든 물리적 상호작용을 계산하여 광원까지의 광선을 쫓아가게 된다. 이러한 개념은 몬테카를로 방법과 광선추적기법에 기본 바탕을 두고 있다. 실제 공간에서 광원으로부터 반사된 광선은 결국 흡수될 때까지 반사, 투과되는데 우리가 실제로 보게 되는 장면은 이러한 광선들이 망막에 영상을 만든 것이다. 이처럼 망막에 영상이 맺히게 되는 것은 공간 내에 존재하는 전체 광선 중 일부분만이 재실자의 눈에 들어옴으로써 이루어지는 것이므로, 눈으로부터 주변 환경을 거쳐 광원으로부터의 광선을 역으로 추적함으로써, 광원으로부터 나온 광선들의 거동을 확인하여 빛 환경을 가시화할 수 있게 된다. 또한 대상공간의 기하학적, 광학적 모델링이 완료되면 광선

추적 결과로부터 조도 분포 및 휘도 분포 값을 계산하고, 그 결과로부터 이미지 파일을 생성한다.

### Ⅲ. 저온도차 발전 기술

#### 1. 실험장치 구성

##### 1.1 저온도차 발전 장치 구성 ; 저온도차 스텔링엔진

본 연구에서는 저온도차 스텔링엔진의 최대출력을 실험을 통하여 산출해냄으로써 건물에너지 절감을 위한 적용 및 응용 가능한 방법을 고려해 보았다. 저온도차 스텔링엔진의 최대 출력을 구하기 위하여 저온도차 스텔링엔진 구동휠의 중앙에 추를 연결하여 엔진 작동시 감겨 올라오는 추의 평균 속도를 구하였으며, 이 때 추의 질량과 온도를 변화시켜 각 상황별 엔진의 출력을 얻어 가능한 최대출력을 산출하였다. 이 때 산출해낸 최대출력은 Mechanical Power로 저온도차 스텔링엔진에서 얻을 수 있는 가장 큰 출력이므로 엔진에서 얻을 수 있는 Electrical Power는 엔진에 사용된 전기발전시스템이 가장 이상적으로 설계되었을 때의 출력과 같다.

##### 1) LTD스텔링엔진

본 실험에 사용된 스텔링엔진은 감마( $\gamma$ )형 스텔링 엔진으로 저온도차 스텔링엔진에서 보편적으로 사용되어지고 있다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 그 실제 모습이다. 감마( $\gamma$ )형 스텔링 엔진은 두 개의 실린더에 각각 디스플레이서와 파워피스톤이 하나씩 위치해있는 형태이며 스텔링엔진의 상판(방열부)과 하판(가열부) 사이에 디스플레이서가 위치하게 제작되었다. 파워피스톤은 상대적으로 디스플레이서가 들어가 있는 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. 2에 저온도차스텔링엔진의 사양을 나타내었다.

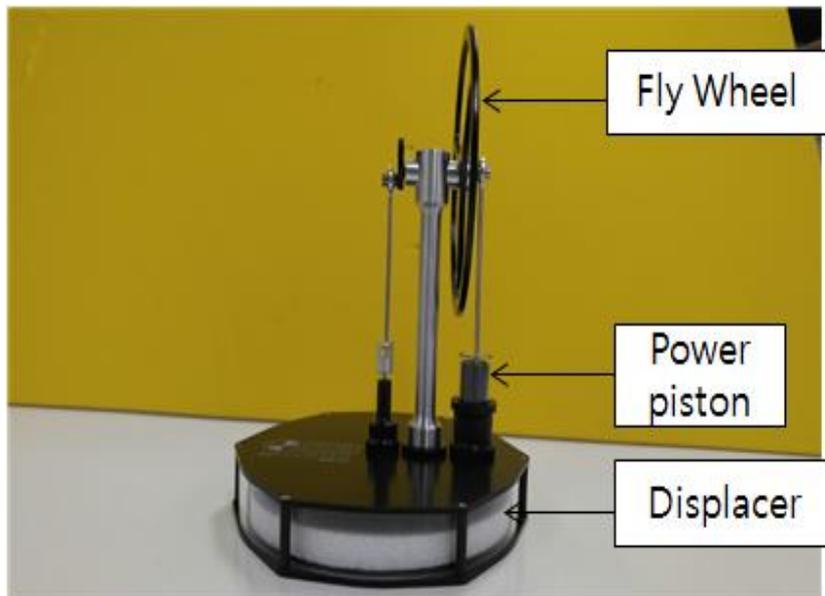


Fig. 8. Photograph of LTD Stirling engine [MM-7]



Fig. 9. Photograph of LTD Stirling engine [KS90]



Fig. 10. Photograph of LTD Stirling engine [KS90Twin]

Table 2. 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  $\Delta T$ 의 변화량에 따른 저온도차스털링엔진의 출력을 정확히 산출해낼 수 있다. 저온도차스털링엔진 하판부의 정밀가열을 위해 WiseTherm사의 HP-20D를 사용하였다. 스크린을 통한 실시간 온도확인 가능하며 최대온도는  $380^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 정밀한 온도제어가 가능하다. 저온도차스털링 엔진은 동작시 약간의 흔들림이 발생하므로 핫플레이트와 엔진을 밀착시킨 후 움직임이 없도록 고정시킨 상태에서 실험을 진행하였다. Fig. 11은 실제 사용된 핫플레이트를 보여준다.



Fig. 11. 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-K타입 열전대(K-Type thermocouple)를 사용하였으며 저온도차 스텔링엔진의 상판과 하판에 부착하여 가열부와 방열부의 온도차를 측정하였다. 열전대를 통해 측정된 온도데이터는 데이터수집장치-midi Logger GL820로 전송되어 기록하였다. Fig. 12는 실험에 사용된 열전대의 모습이다.

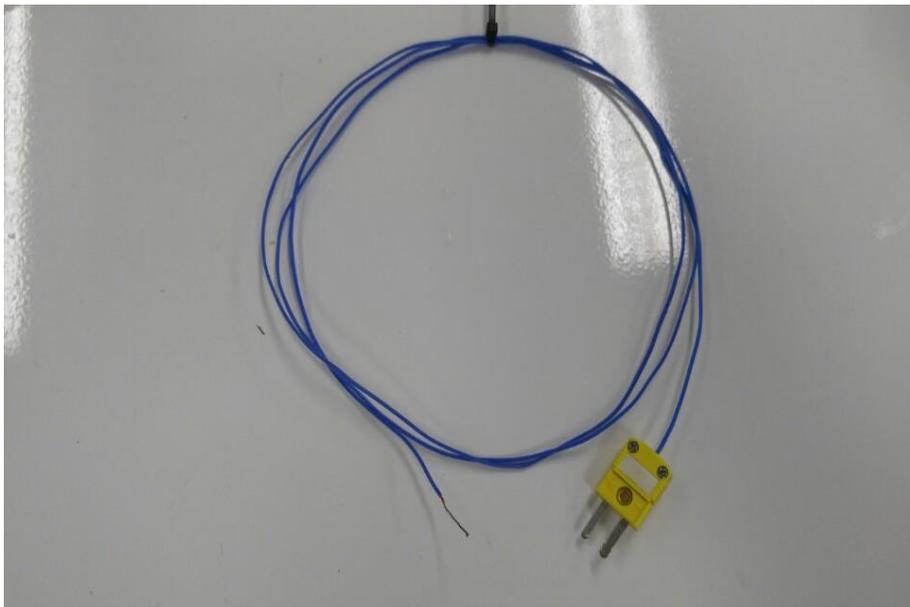


Fig. 12. Photograph of k-Type thermocouple

## 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  $\Sigma$ 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. 13은 실험에 사용된 데이터 수집 장치의 모습을 나타냈다.



Fig. 13. Photograph of Data logger

### 1.3 저온도차 발전 장치 구성 ; 가돌리늄 발전장치

가돌리늄을 이용한 발전 장치 또한 저온도차 스텔링엔진과 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 수집 장치는 저온도차스텔링엔진의 연구에 사용되었던 것과 같은 midi LOGGER GL820을 사용하였으며, 저온순환 수조를 이용하여 연구에 사용되는 유체의 온도를 맞추었다.

#### 1) 가돌리늄

이론부분에서 전술했듯이 가돌리늄의 물리적 성질은 20°C를 기준으로 이하에서는 강자성을 띄며 20°C이상에서는 상자성을 띄는 성질을 가지고 있으며, 의학적으로 가돌리늄 화학물의 강한 상자성을 이용해 자기공명영상(MRI)에서 조영제(contrast agent)로 사용되는데 사용시 암 조직과 같은 이상 조직에 축적되어 암 조직을 MRI영상을 통해 뚜렷이 볼 수 있다. 또한 원자로에서 중성자 흡수체로 사용되어 핵분열 연쇄반응을 조절하는 데 사용되기도 한다. 이 외에도 합금재료로써 금속에 첨가하여 가공성과 산화 저항성을 높이는데 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\*1cm의 정사각의 형태이며 Fig. 14는 가돌리늄의 모습을 나타낸다.

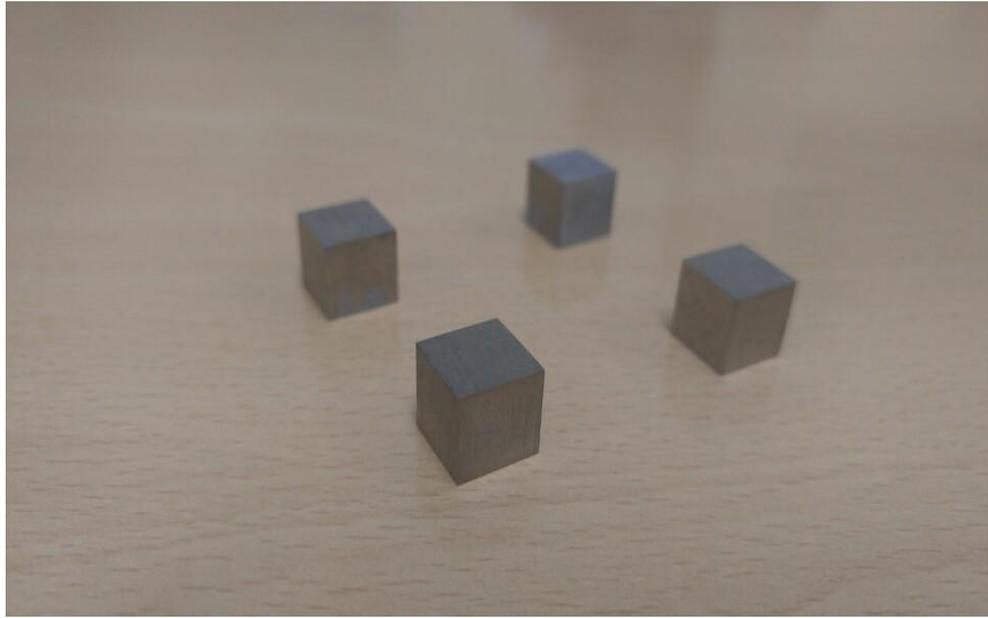


Fig. 14. 1cm x 1cm x 1cm gadolinium

## 2) 저온순환수조

본 연구에서는 저온순환 수조는 제이오 텍의 RW-0525G 모델을 사용하였다. 5L의 물을 순환할 수 있으며  $-25^{\circ}\text{C}$ 에서  $150^{\circ}\text{C}$ 까지의 온도 제어가 가능하다.

본 연구의 특성상 유체온도의 일정함을 유지하는 것은 매우 중요하며, 본 기기를 사용하여  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$  로 물 온도를 맞추고 각 실험조건 온도차  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$  별로 공급하여 사용하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Mechanical power

#### 1) 저온도차 스텔링엔진(LTD Stirling engine)

저온도차스텔링엔진의 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 스텔링엔진을 고정시켰다. 스텔링엔진의 중심축부에 실을 이용하여 추와 저온도차 스텔링엔진의 크랭크축에 연결한 후 바닥으로부터 무게추가 일정한 속도로 올라가는 시점부터 상단 끝까지 올라오는 동안의 평균 속도를 구해 토크를 계산하였다. 열원을 공급하기 위하여 저온폐열을 대신하여 600W의 Heat Plate를 설치하였으며 저온도차 스텔링엔진의 흡열부와 방열부에 열전대를 설치하여 온도차를 측정하였다. 이 때 실험이 진행되는 과정 중에는 스텔링엔진과 핫플레이트는 흔들림이 없도록 하여 무게추가 일직선으로 진행할 수 있도록 제작하였다. 온도 및 무게추 등의 변수를 바꿔가며 실험을 진행하였으며 데이터 로거에 외부저장장치를 연결하여 데이터 값을 저장하였다. Fig. 15에 기계적 출력 산출을 위한 시스템 디자인을 나타내었으며 Fig. 16는 본 실험의 실제측정구성을 보여준다.

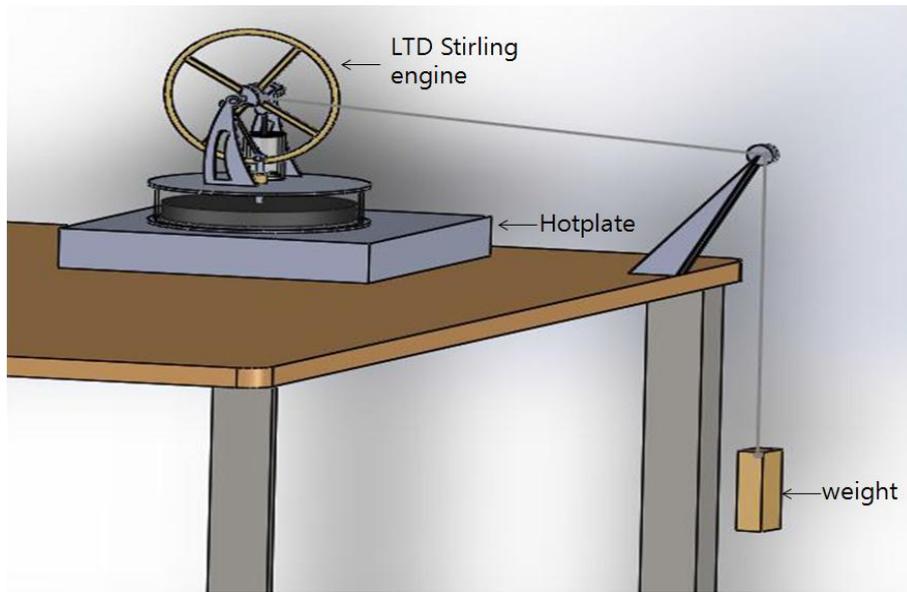


Fig. 15. System design for mechanical power calculation

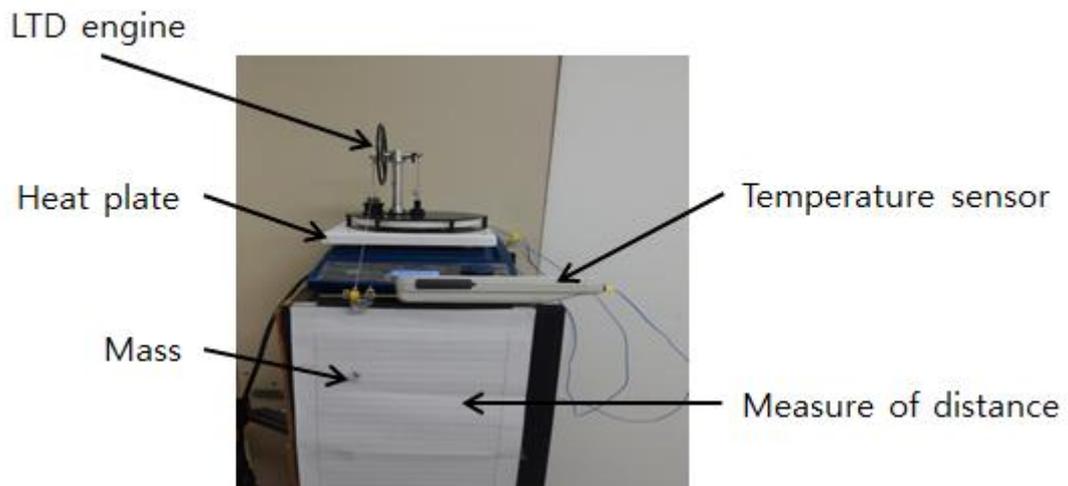


Fig. 16. System for mechanical power calculation

## 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\*1cm사이즈의 네오디움 자석을 매우 밀접한 0.1mm이하의 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. 이때, 전술했던 스텔링엔진의 기계적 출력을 측정하는 방법과 동일하게 회전하는 축에 추를 달고 온도차, 질량에 따른 기계적 출력을 산출하였다.

가돌리늄 발전장치의 특성상 저온도차 스텔링엔진에 비해 토크가 강하므로 무게추의 질량을 높여 5g부터 10g, 20g, 50g 순으로 실험을 진행하였으며 온도차 20°C, 30°C, 40°C, 45°C 에서 각각의 출력을 산출하였다. Fig. 17, Fig. 18에 각각 가돌리늄 발전장치에 고온과 저온의 물이 투입되는 위치의 모습과 가돌리늄 발전장치에 추를 달아 기계적 출력을 측정하는 모습을 나타내었다.

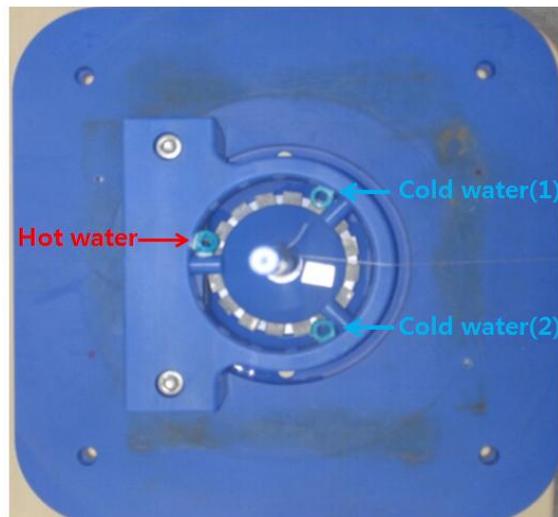


Fig. 17. Position of hot water and cold water in gadolinium generator



Fig. 18. System for mechanical power calculation in gadolinium generator

## 2.2 Electrical power

### 1)저온도차 스텔링엔진(LTD Stirling engine)

저온도차 스텔링엔진에서 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 맞게 놓아 자석과 코일 간에 생기는 유도전류를 이용하는 것이다. 이 때 유도전류의 세기는 자석의 자력과 코일의 감은 횟수에 따라 변화된다.

본 연구에서는 Electrical power를 이 두 가지 타입으로 측정 및 산출하였다. 첫 번째는 AC모터를 LTD 엔진과 연결하였으며, 두 번째는 Generator coil을 활용하여 측정 및 산출하였다. ACmotor는 소형 풍력발전기 kit에서 구매한 것으로 자세한 스펙(권선 수 등)은 없다. Fig. 19는 AC모터를 활용한 출력 실험을 보여 준다. Generator coil의 경우 실험 장치는 MM-7 스텔링 엔진의 플라이휠에 3D프린터를 이용하여 직경 135mm의 magnet holder를 제작한 후 직경 10mm, 높이 10mm의 원통형 네오디움 자석을 36°마다 부착하였다. Generator coil의 권선 수는 약 750회이며 9개를 제작하여 피스톤 축이 지나가는 경로인 하부를 제외하고 3D프린터를 이용하여 coil holder를 제작한 후 자석과 마찬가지로 36°마다 하나씩 붙여 넣어 완성하였다. Fig. 20 (a)는 플라이휠과 자석의 배치를 나타낸 사진이며, (b)는 코일의 배치를 나타낸 사진이다. (c)는 실제 MM-7의 Generator coil이 작동하는 사진이다.

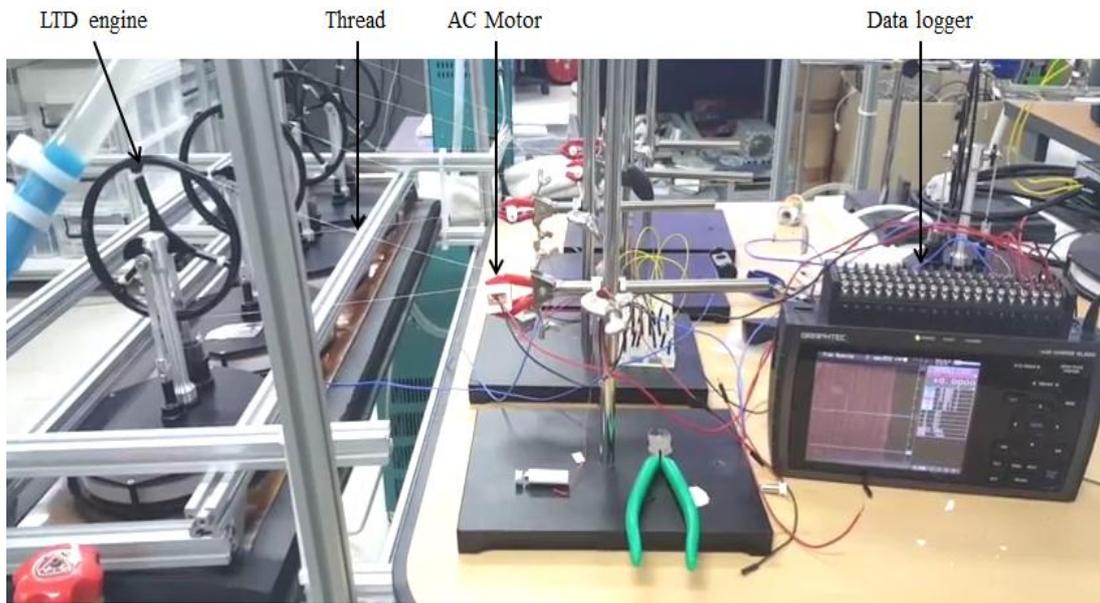


Fig. 19. Experimental output using the AC motor(MM-7)



(a)



(b)



(c)

Fig. 20. Experimental output using the generator coil: (a) MM-7 (b) Generator coil (c) MM-7 with generator coil

두 실험의 전압 및 전류 측정 방법은 동일하게 측정되었다. Fig. 21은 전압 및 전류 측정 방법을 보여준다.

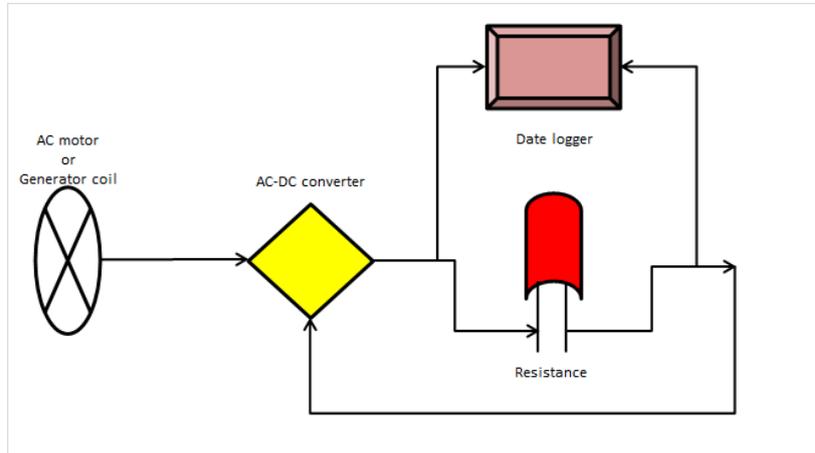


Fig. 21. Measurement method for voltage and current

## 2) 가돌리늄 발전장치

가돌리늄 발전장치 또한 저온도차 스텔링엔진을 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 설계하였다. 이 때 네오디움 자석의 자력에 의해 AC모터의 RPM에 영향을 주는 현상을 방지하기 위해 가돌리늄 발전장치를 두께 2.5mm의 철펠로 제작된 자기장 차폐체로 감싸 자장이 밖으로 새어나가 모터에 영향을 끼치지 않도록 하였는데 이때의 자기장 차폐체로 감싸기 전 가돌리늄 발전장치 근처의 자력은 약 200[Gauss]로 나타났으나 자기장차폐체로 감싼 후 같은 위치에서의 자력은 약 10[Gauss] 정도로 낮아짐이 확인되었다.

고온의 작동유체는 관내 직경 3.8 $\text{\O}$ 를 통해 0.3L/min의 유량으로 네오디움 자석이 고정되어있는 부근에 흘려주었으며 저온의 작동유체는 2개의 관을 사용하였으며 각각 120도씩 떨어진 지점에 연결하였다.

Fig. 22는 본 실험에 대한 개략도를 나타낸 것으로 전압은  $V_{oc}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  총 4지점에서 측정하였으며 여기서  $V_{oc}$ 는 저항이 없는 개방회로이며 그 외  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ 는 각 저항의 양단에서 측정한 값이다. 전류는 옴의 법칙을 이용하여 계산하였다. Fig. 23은 자기장차폐체로 감싸 자장이 밖으로 흐르지 못하도록 제작한 가돌리늄 발전장치의 모습을 나타냈다.

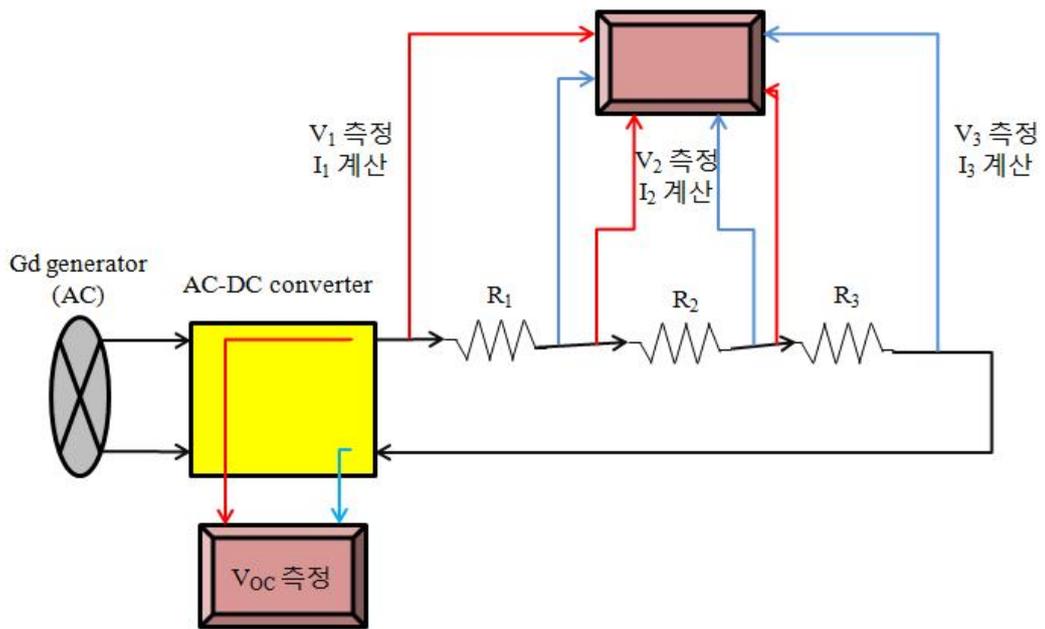


Fig. 22. schematic of gadolinium electric generator

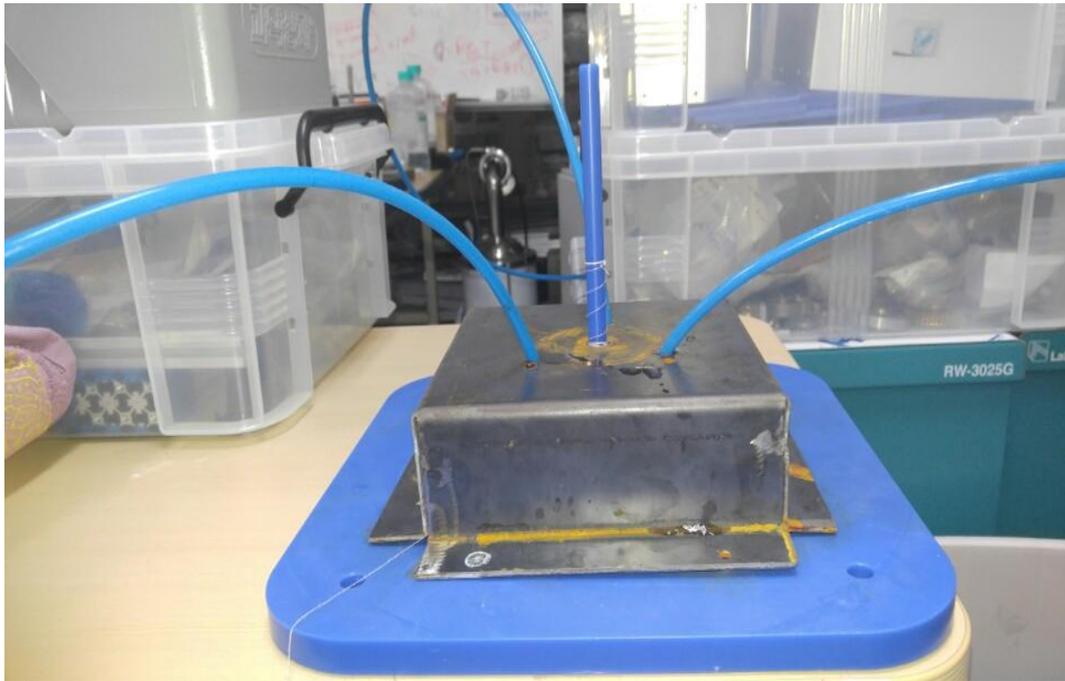


Fig. 23. Gadolinium generator with magnetic shield

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Mechanical power ; 저온도차 스텔링엔진

##### 1) 저온도차 스텔링 엔진 별 토크

엔진 별 토크의 계산은 위 실험방법에서 다루었듯이  $\tau = F \times r$ 로서 구할 수 있다. 여기서  $\tau = F \times r = m \times g \times r$  을 이용하여 본 연구에 사용된 저온도차 스텔링 엔진의 토크를 계산하였다. 온도차  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  와 질량 200mg을 사용 시 각 스텔링엔진 별 토크를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. LTD engine torque(200mg)

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

Table 3에서 알 수 있듯이 동일한 온도차  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  와 200mg의 질량을 이용했을 시 Twin엔진의 토크가 0.02352[N\*mm]로 가장 높았으며 다음으로 각 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 측정한 저온도차 스텔링 엔진별 출력을 Fig. 24에 나타내었다. 이 때, 저온도차 스텔링엔진의 출력은  $P = F \times V = m \times g \times (\text{distance}/\text{time})$  로 계산되어질 수 있다.

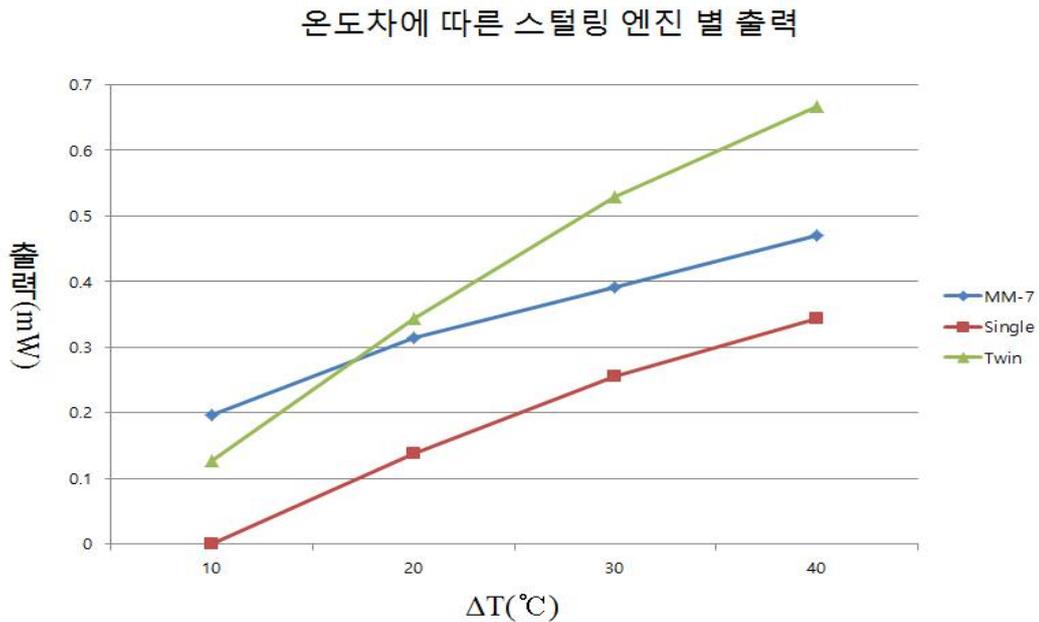


Fig. 24. Output of Stirling engine against temperature difference

측정결과 질량을 200mg로 고정된 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 저온도차 스텔링 엔진 별 토크, 출력, 단위면적 당 출력 측정 및 계산을 하였다.

- 저온도차 스티어링엔진(MM-7)

저온도차 스티어링엔진(MM-7)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table 4에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력과 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력은 각각 Fig. 25, Fig. 26에 나타내었다.

Table 4. Performance measurement of Stirling engine(MM-7)

MM-7												
$\Delta T$	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 <sup>2</sup> )	0.000026	0	0	0.000085	0.000129	0.000136	0.000092	0.000166	0.000215	0.000078	0.000186	0.000321

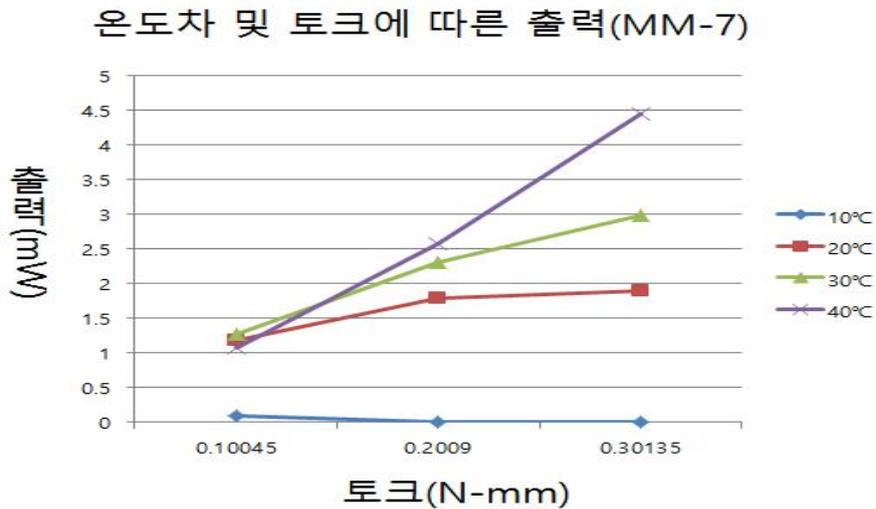


Fig. 25. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)

온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력(MM-7)

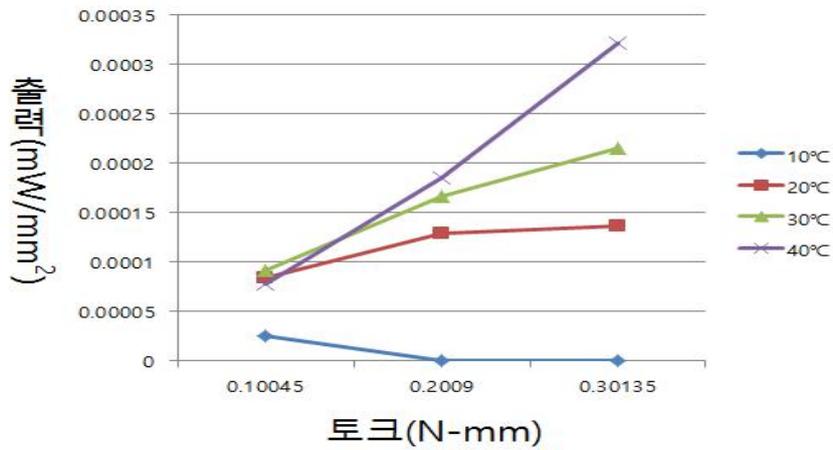


Fig. 26. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)

온도차  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 일 경우 추의 질량 2g과 3g에서는 스티어링엔진이 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)

저온도차 스티어링엔진(Twin)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table 5에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력과 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력은 각각 Fig. 27, Fig. 28에 나타내었다.

Table 5. Performance measurement 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 <sup>2</sup> )	0	0	0	0.0000495	0	0	0.000138	0.0000575	0	0.000238	0.000114	0

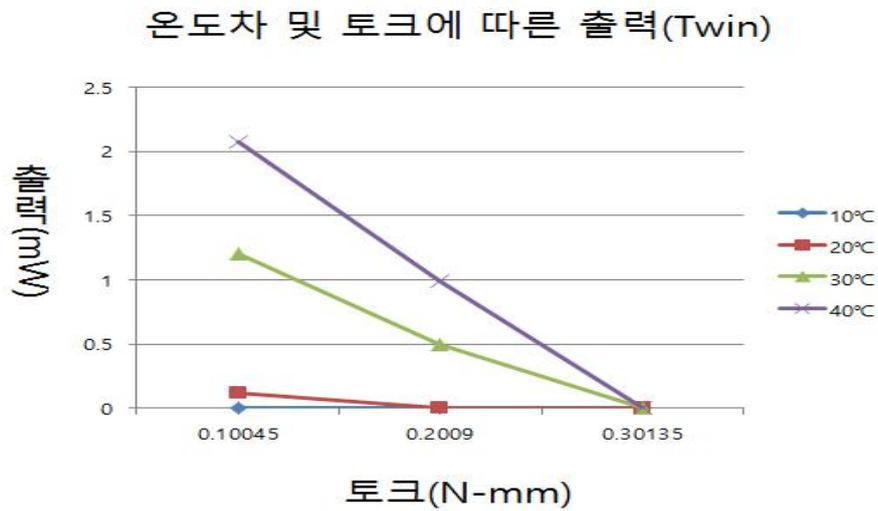


Fig. 27. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)

온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력(Twin)

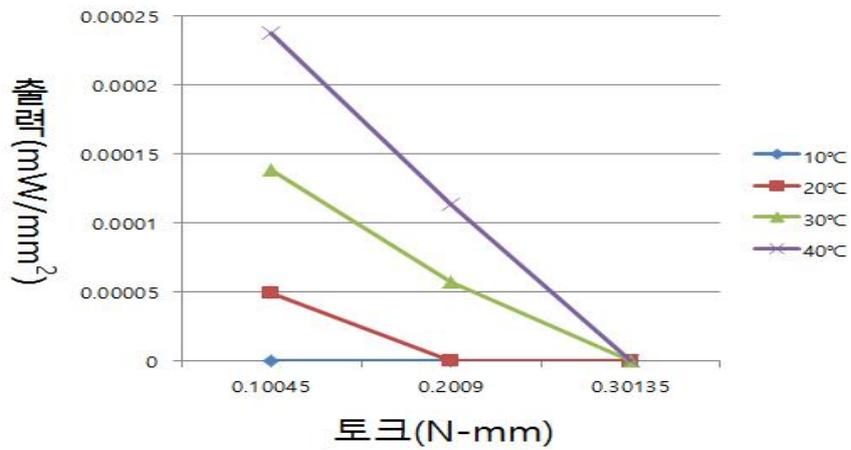


Fig. 28. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)

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

- Single

저온도차 스티어링엔진(Single)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table 6에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력과 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력은 각각 Fig. 29, Fig. 30에 나타내었다.

Table 6. Performance measurement of Stirling engine(Single)

$\Delta T$	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 <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000118	0	0

온도차 및 토크에 따른 출력(Single)

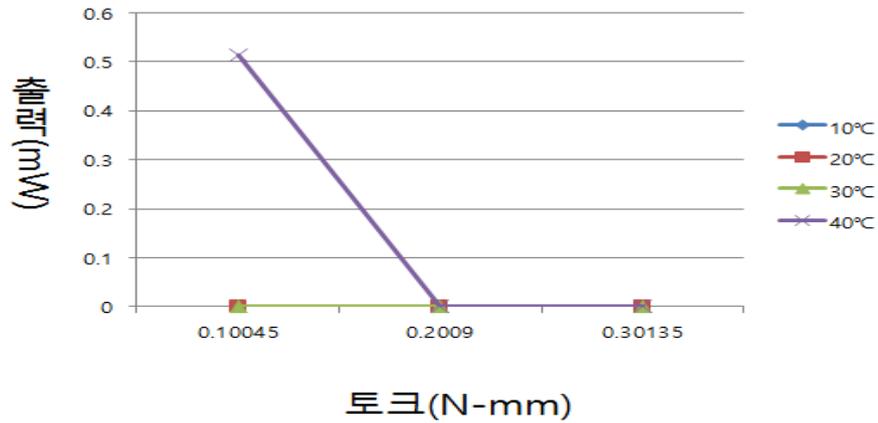


Fig. 29. Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single)

### 온도차 및 토크에 따른 단위면적 당 출력(Single)

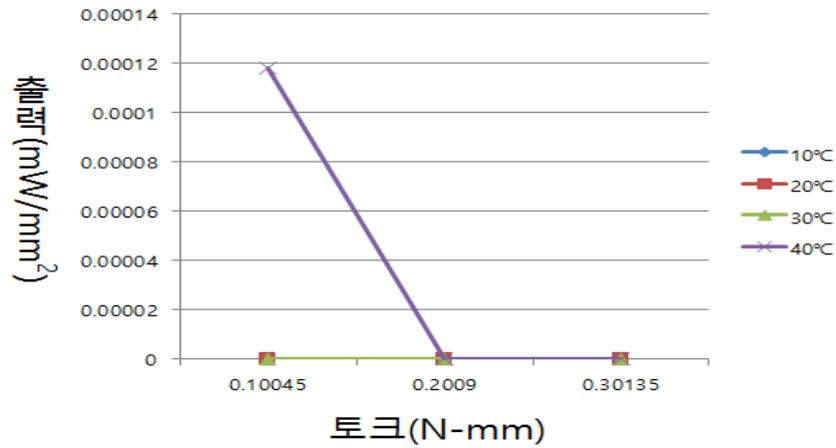


Fig. 30. Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single)

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 들어 올린 후 2g 과 3g 은 들어 올리지 못하는 결과가 나왔다.

저온도차 스텔링엔진의 기계적 출력을 산출한 결과 MM-7의 최대 출력이 가장 높게 산출되었다. 이에 저온도차 스텔링 엔진으로부터 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, 50g과 축의 반경 5mm에서 가돌리늄 발전장치에 걸리는 질량별 토크를 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Torque by mass

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

Table 7에 나타낸 바와 같이 각 질량별 가돌리늄 발전장치의 토크는 질량 5g, 10g, 20g, 50g에 따라 각각 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 측정시 추의 질량을 5g, 10g, 20g, 50g으로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 120RPM으로 측정되었다. 이때 고온의 작동유체 온도는  $40^{\circ}\text{C}$  이며 저온의 작동유체 온도는  $20^{\circ}\text{C}$  이다. Table 8에  $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$  에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 8. 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/min)	114.65	105.09	0	0

$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 질량 20g, 50g을 들어 올리지 못하였으며 질량5g에서 RPM은 약 114.64[r/min] 출력은 약 2.94mW 로 나타났으며 질량 10g에서 RPM은 약 105.1[r/min] 출력은 약 5.39mW 로 나타났다. Fig. 31에  $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$  에서의 측정 그래프를 나타냈다.

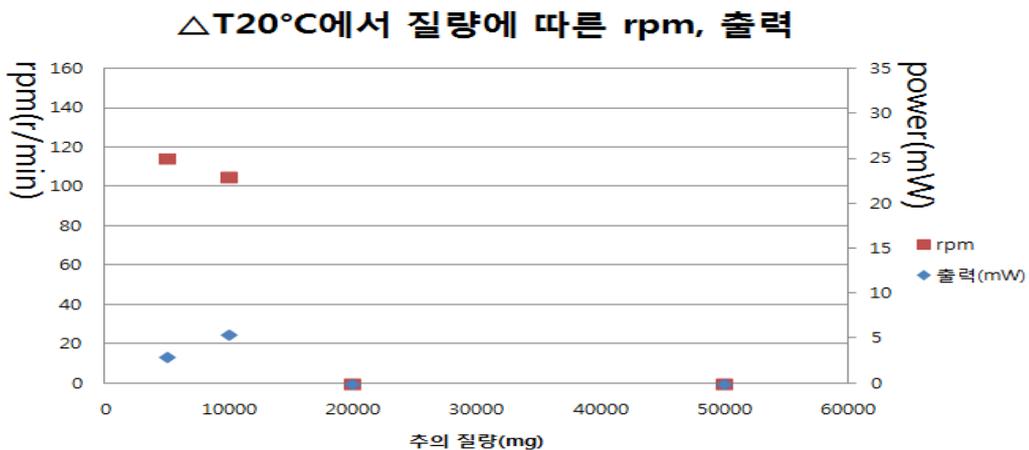


Fig. 31. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ )

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, 50g로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 125RPM으로 측정되었다. 이때 고온의 작동유체 온도는  $50^{\circ}\text{C}$  이며 저온의 작동유체 온도는  $20^{\circ}\text{C}$  이다. Table 9에  $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$  에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 9. 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/mim)	107.01	108.92	95.54	0

$\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 질량 50g을 들어 올리지 못하였으며 질량5g에서 RPM은 약 107.0 [r/min] 출력은 약 3.1mW로 나타났으며 질량 10g에서 RPM은 약 108.9 [r/min] 출력은 약 5.5mW로 나타났으며 질량 20g에서 RPM은 약 95.5 [r/min] 출력은 약 9.8mW 로 나타났다. Fig. 32에  $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$  에서의 측정 그래프를 나타냈다.

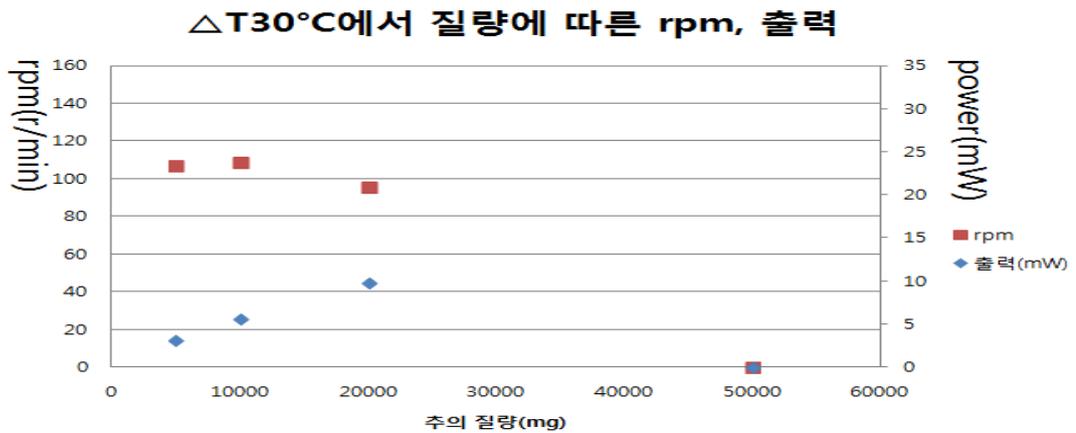


Fig. 32. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ )

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

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

Table 10. 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)	124.20	129.94	119.43	108.92

$\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서는 실험에 사용한 추를 모두 들어 올렸으며 질량5g에서 RPM은 약 124.2 [r/min] 출력은 약 3.1mW로 나타났으며 질량 10g에서 RPM은 약 129.9 [r/min] 출력은 약 6.6mW로 나타났으며 질량20g에서 RPM은 약 119.4 [r/min] 출력은 약 12.2mW로 나타났으며 질량50g에서 RPM은 약 108.9 [r/min] 출력은 약 20.0mW로 나타났다. Fig. 33에  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$  에서의 측정 그래프를 나타냈다.

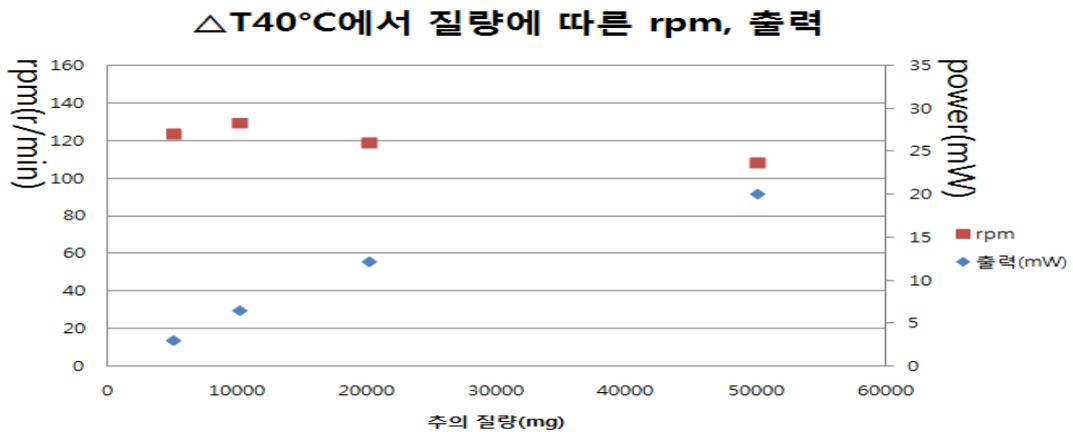


Fig. 33. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ )

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, 50g로 높여가며 측정하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 185RPM으로 측정되었다. 이때 고온의 작동유체 온도는  $65^{\circ}\text{C}$  이며 저온의 작동유체 온도는  $20^{\circ}\text{C}$  이다. Table 11에  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$  에서의 측정 데이터를 나타냈다.

Table 11. 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)	158.60	133.76	126.11	114.65

$\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서는  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서와 같은 결과로 실험에 사용한 추를 모두 들어 올렸으며, 질량 5g에서 RPM은 약 158.5 [r/min] 출력은 약 4.0mW로 나타났으며 질량 10g에서 RPM은 약 133.7 [r/min] 출력은 약 6.8mW로 나타났으며 질량 20g에서 RPM은 약 126.1 [r/min] 출력은 약 12.9mW로 나타났으며 질량 50g에서 RPM은 약 114.6 [r/min] 출력은 약 29.4mW로 나타났다. Fig. 34에  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 그래프를 나타냈다.

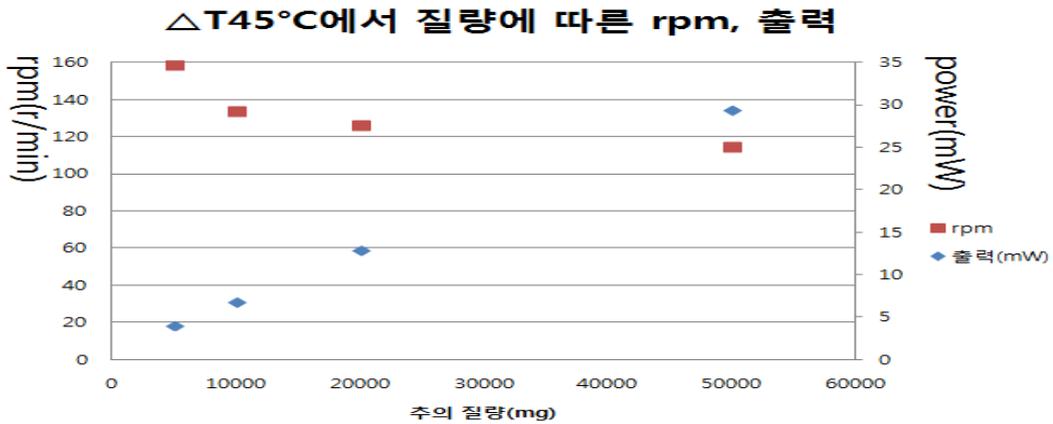


Fig. 34. RPM and mechanical power vs mass( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ )

### 3.3 Electrical power ; 저온도차 스텔링엔진

Electric power를 측정하기 위한 실험에서 스텔링엔진 특성상 시간이 지날수록 전열판과 방열판의 온도차가 동시에 상승하여 온도차를 일정하게 유지하기 힘들다. 본 실험에서는 일정한 온도차에 대한 출력 대신 시간에 따른 온도차와 그에 따른 출력을 측정 및 산출하였다.

AC motor를 활용한 실험에서 Fig. 35에서 보는바와 같이 시간에 따라 온도차가 변화됨을 확인할 수 있다. AC motor를 활용한 실험에서 온도차는 약 23 ~ 25°C이며 전압은 2V로 측정되었다. 2kΩ의 소형 LED를 연결하여 측정 시 전압은 약 0.2V이며 전류는 약 0.1mA로 산출되었다. 따라서 AC motor를 활용한 저온도차 스텔링엔진의 출력은 온도차가 약 23 ~ 25°C에서 약 0.02mW로 산출된다.

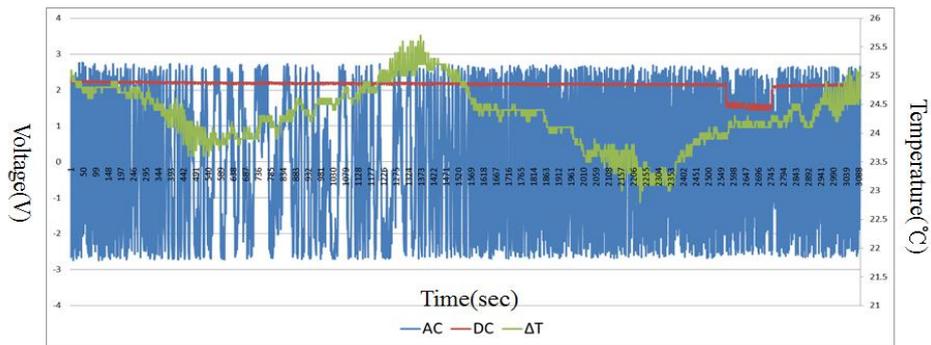
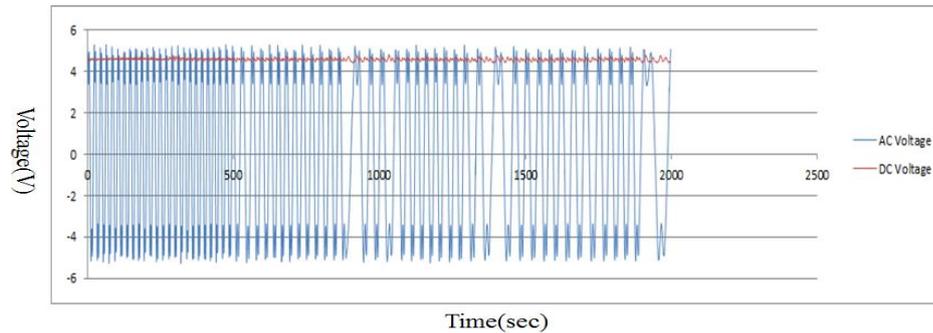


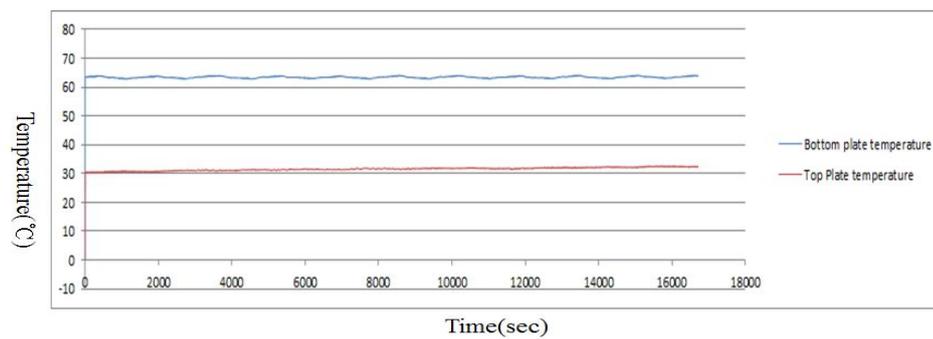
Fig. 35. Electric power using AC motor

Generator coil을 활용한 실험에서는 Fig. 36 (a)에서 보는바와 같이 AC와 DC로 변환했을 경우 모두 전압이 4.7V로 일정하게 나타나는 것을 알 수 있으며 (b)에서는 전열판과 방열판의 온도가 서서히 올라가는 것을 확인할 수 있다.

2k $\Omega$ 의 소형 LED를 연결하여 측정 시 전압은 약 1.8V이며, 전류는 약 0.9mA로 산출된다. 따라서 출력은 1.6mW로 산출된다.



(a)



(b)

Fig. 36. Electric power using generator coil: (a) Electric (b) Temperature

### 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. 37, Fig. 38, Fig 39에 각각 시간에 따른 가돌리늄 발전장치의 전압, 전류, 출력 값을 나타냈으며 측정 방법은 Fig. 22의 설명에 나타내었다. 결과 값은 Table 12에 정리하여 나타내었다.

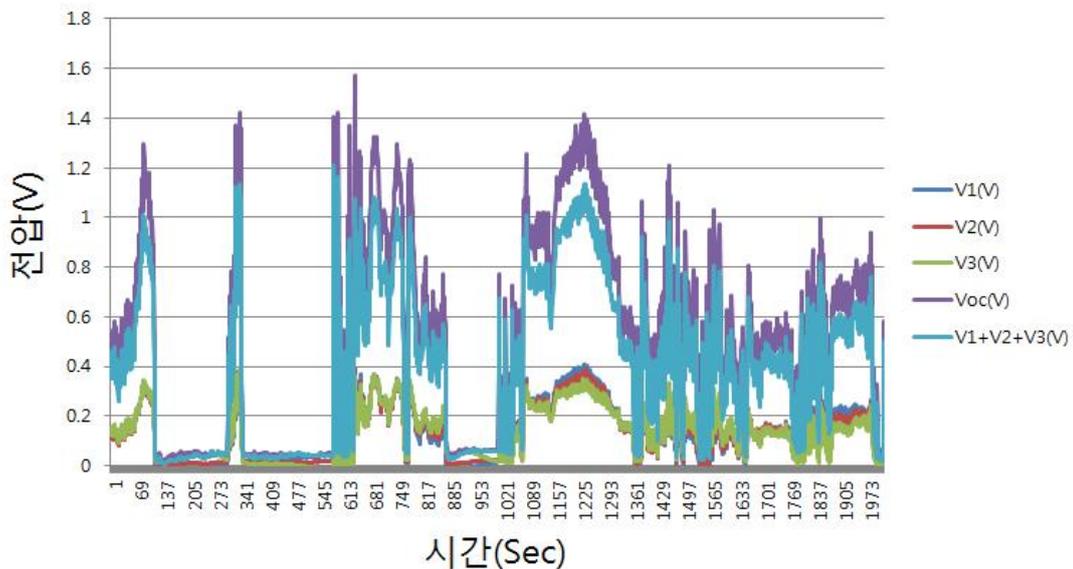


Fig. 37. Voltage change over time( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ )

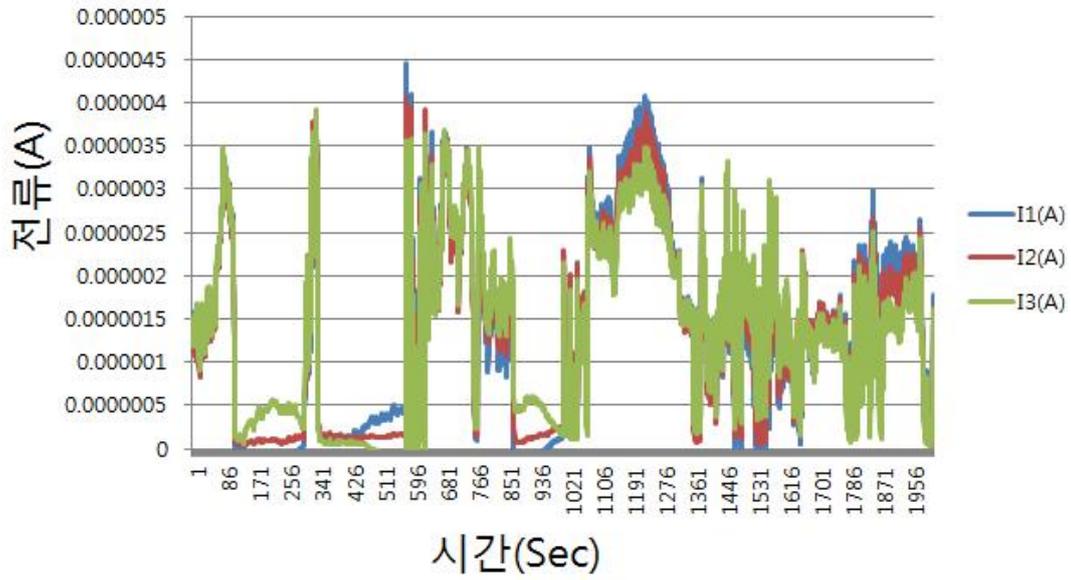


Fig. 38. Current change over time( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ )

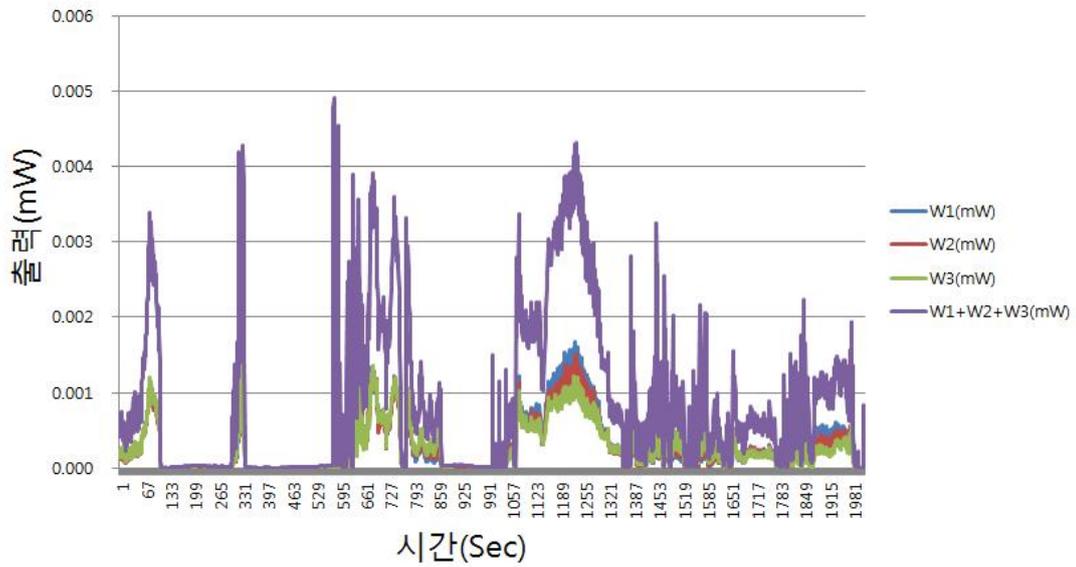


Fig. 39. Electrical power change over time( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ )

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

Gadolinium electric generator			
최대Voc =1.58V, 저항 = 100k $\Omega$			
	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
Total	1.21		0.0049

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

#### 4. 소결론

본 연구에서는 스텔링 엔진과 가돌리늄을 활용한 저온도차 발전 기술의 연구를 진행하였다. 저온도차 스텔링엔진의 경우 MM-7엔진, Single 및 Twin엔진의 기초 성능을 비교·분석하였으며 가돌리늄을 이용한 발전장치와의 비교를 통해 본 연구의 활용에 적절한 저온도차 발전기술을 찾고자 하였다. 이에 저온도차 스텔링엔진의 기초성능 비교분석의 경우 200mg의 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 진행하였다.

전기적 출력 실험에서 AC motor를 이용하였을 경우의 출력은 0.02mW, Generator coil을 이용하였을 경우는 1.6mW로 산출되었는데 Mechanical power와 Electric power 비교 시 단순 수치상으로 Generator coil을 활용한 출력이 약 80배정도 높게 산출된다. 또한, Electric power의 온도차가 일정하지 않아 정밀한 비교는 할 수 없으나 Mechanical power의 20℃, 3g의 출력과 30℃, 3g의 출력을 Electric power의 AC motor와 Generator coil과 각각 비교 했을 때 두 타입 별 출력은 AC motor가 약 1.5%, Generator coil이 53.3%로 Generator coil 발전이 더 높은 변환 효율을 보인다. 본 연구에서 알 수 있듯이 Generator의 타입에 따라 출력이 크게 다를 수 있으며, Generator의 최적화에 따라 더 높은 출력 및 변환 효율을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

가돌리늄을 활용한 발전장치의 경우 기계적 출력이  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 상에서 최대 20.09mW로 나타났다. 또한  $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 상에서는 9.8mW로 나타났으며, 이는 저온도차 스텔링엔진과 비교하였을 때 약 3배 이상의 출력 차이를 보였으며 토크 또한 0.98N\*mm로 약 3배 이상의 차이가 나타났다. 하지만 전기적 출력은 매우 낮게 나왔는데 저온도차 스텔링엔진의 경우와 마찬가지로 Generator의 최적화 및 추가적인 실험을 통해 더 높은 전기적 출력 및 변환 효율을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구를 통하여 건물 내에서 발생하는 저온폐열을 전기에너지로 변환할 수 있다면 건물에서 소비되는 에너지의 절감은 물론 저온폐열에 의한 환경오염도 줄일 수 있을 것이다.

#### IV. 설비형 자연채광 적용 기술

##### 1. 연구의 범위 및 방법

###### 1.1. 실험 및 시뮬레이션 조건

설비형 자연채광 적용 기술 분석을 위한 평가모델은 자연채광시스템의 실제 측정을 위해 세팅된 제주대학교 공과대학 4호관의 test room을 기준으로 설정되었다(Fig. 40 (a), (b)). 그리고 실제 적용 기술 분석을 위한 자연채광 장치는 당 연구실(제주대학교 신재생에너지 연구실)에서 제작된 Fresnel lens가 장착된 태양추적형 자연채광장치를 이용하였다(Fig. 40 (c)). 본 자연채광 장치는 태양광을 고도나 위치에 상관없이 항상 고정밀도로 집광하여 햇빛의 유입이 어려운 환경 또는 건축물의 실내로 유입시킬 수 있도록 고정밀도로 태양을 추적하며 거의 일정한 양의 태양광을 집광시키며, 집광된 빛을 광섬유를 이용해 자연광이 필요한 실내로 보내 자연채광에 활용시키는 장치이다. test room은 창문을 기준으로 정남향이며 층과 층 사이에 수평 길이 1,000mm인 직사광의 유입을 막아주는 오버행이 있다. 크기는 9,000 x 3,000 x 2,700mm이고 조도는 작업면 기준인 바닥에서 750mm를 기준으로 측정하였다. 시뮬레이션의 조건으로 실내 천장으로 들어오는 광섬유의 위치는 실제 형광등의 위치와 같은 위치로 y축 상으로 test room의 중앙에 위치하였으며, x축 상으로는 창문으로부터 각각의 거리가 750mm, 1,800mm, 1,800mm, 1,500mm에 위치하도록 모델링되었다.(Fig. 40 (d))

시뮬레이션을 위하여 ECOTECT 프로그램으로 모델링을 완성하였다. Table 13은 본 모델링에 적용한 내부 재질 및 창문과 차광장치의 재질 및 특성을 보여주고 있다. 반사율은 실제 재질의 색을 기준으로 설정하였으며, 투과율은 창문은 ECOTECT 내의 Double window의 기본 투과율로 설정하였고 Blind는 실제 조도계를 이용해 투과율을 측정한 후 값을 입력하였다. 창문의 반사율은 시뮬레이션 프로그램인 RADIANCE에서는 적용되지 않고 투과도만 적용되었다.

Table 13. Properties of materials used

	Wall	Floor	Ceiling	Window	Shading device(blind)
Material	Concrete	Concrete	Plaster	Double window	Fabric
Reflectance (0~1)	0.9	0.75	0.9	0.92	0.54
Transparency (0~1)	n/a	n/a	n/a	0.92	0.0256

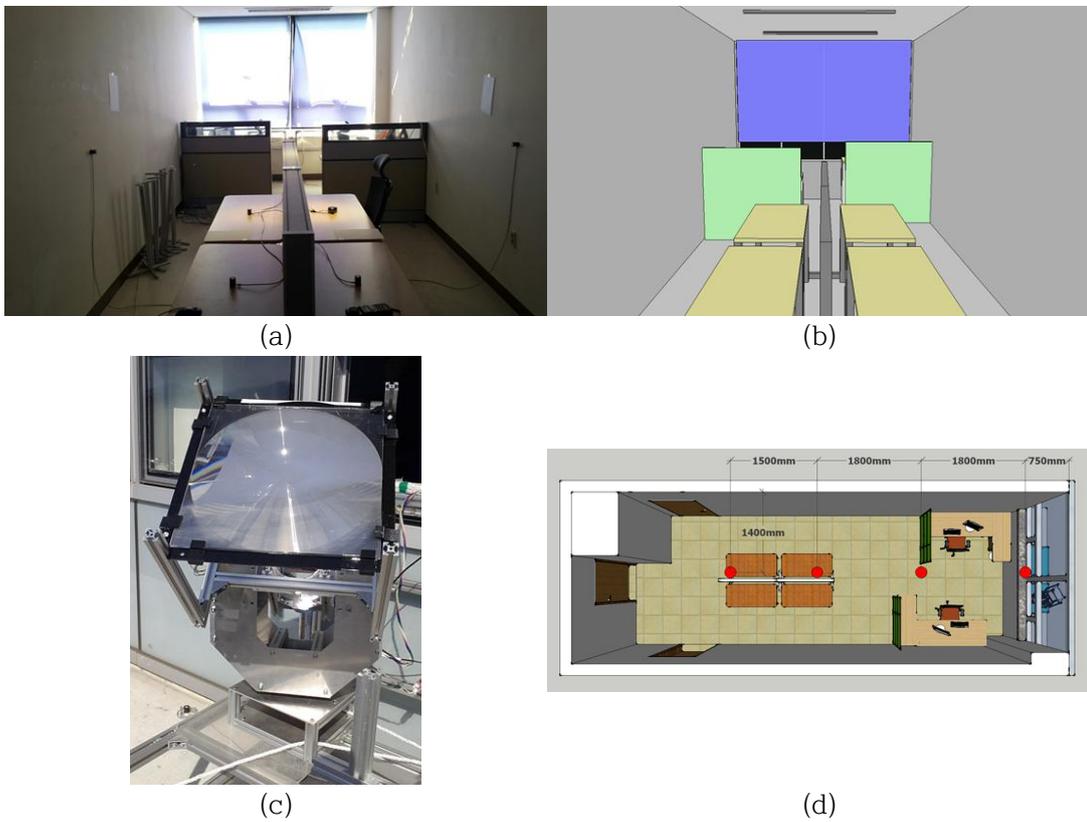


Fig. 40. Modeling conditions; (a) actual test room (b) modeling test room (c) solar tracking system (d) lighting position

## 1.2. Roller shade 차광비율 현황 조사 및 분석

### 1) 실제 사용현황 조사

먼저 시뮬레이션을 하기에 앞서 실제 사무실들의 Roller shade 차광 비율 사용 현황을 분석하여 보았다. 조사 위치는 test room이 위치한 제주대학교 공과대학 4호관을 모델로 하였으며 test room과 같은 남향인 사무실만 조사대상으로 삼았다. Fig. 41은 어안렌즈로 제주대학교 공과대학 4호관의 남향을 날짜별로 찍은 사진이다. Fig. 41에 나와 있는 2016년 03월 03일, 12일, 04월 09일, 19일 외에도 총 10일간에 걸쳐 1시간 간격으로 사진을 찍어 재실자들의 Roller shade 사용현황을 조사하였다.

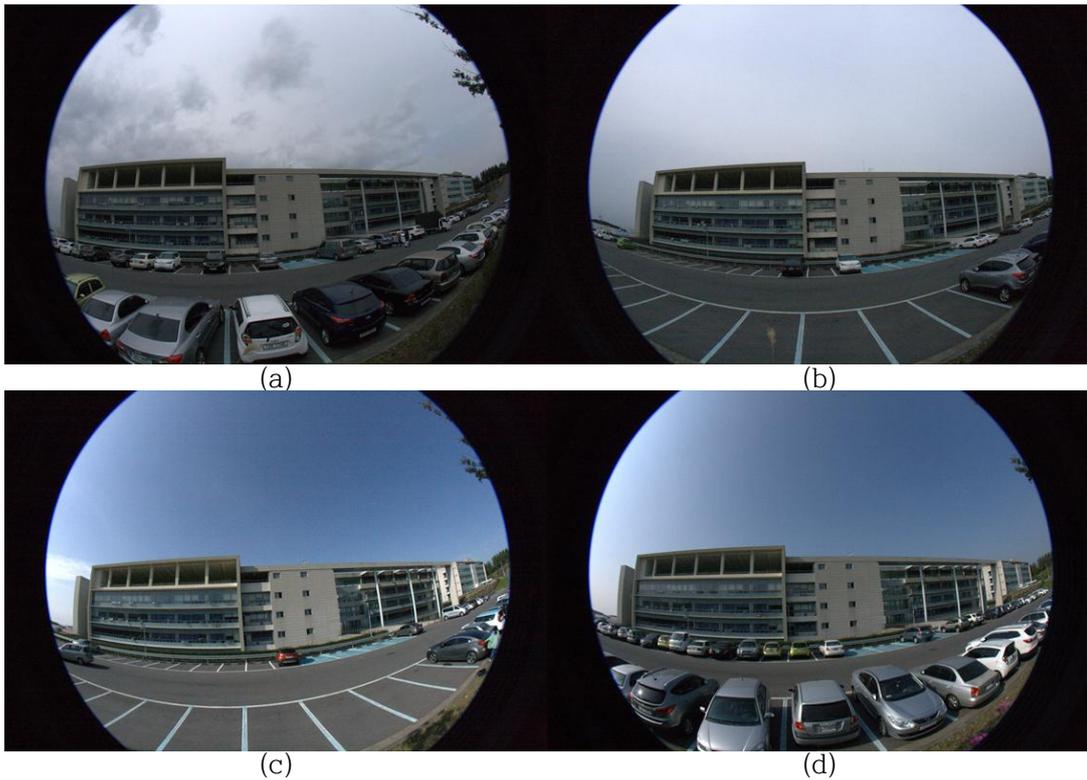
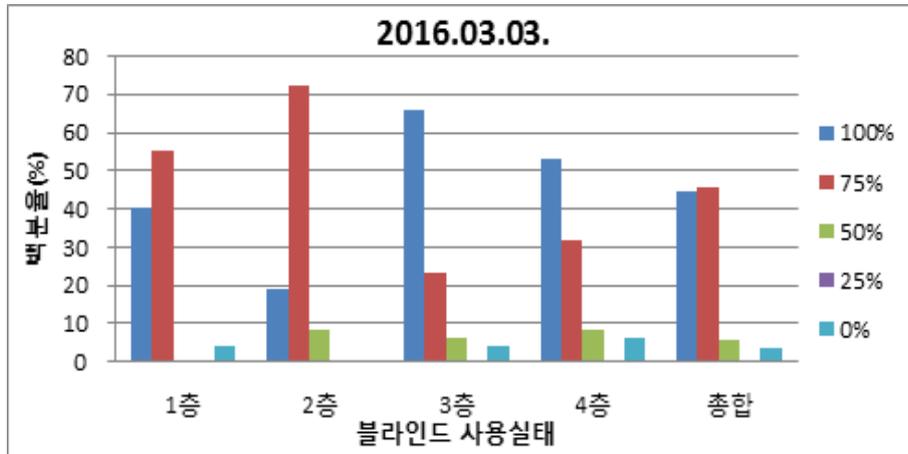
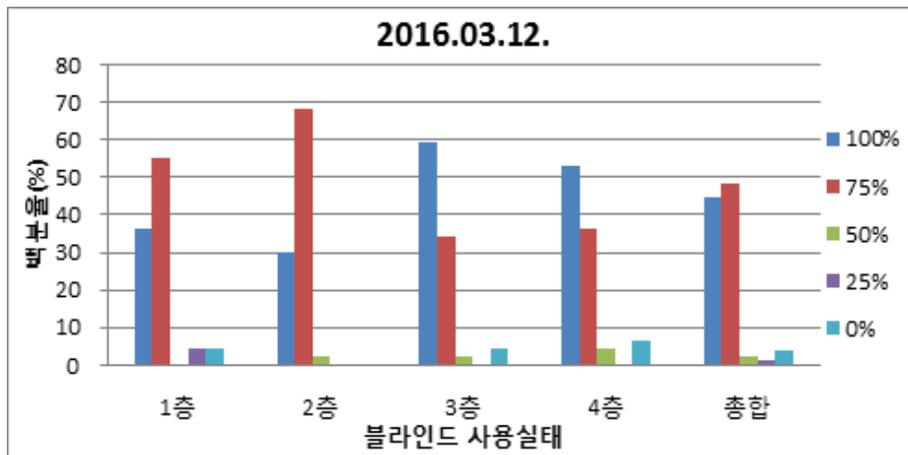


Fig. 41. Sky condition and Window shading by Roller shade at different times; (a) 2016.03.03. 16:00 (b) 2016.03.12. 16:00 (c) 2016.04.09. 16:00 (d) 2016.04.19. 16:00

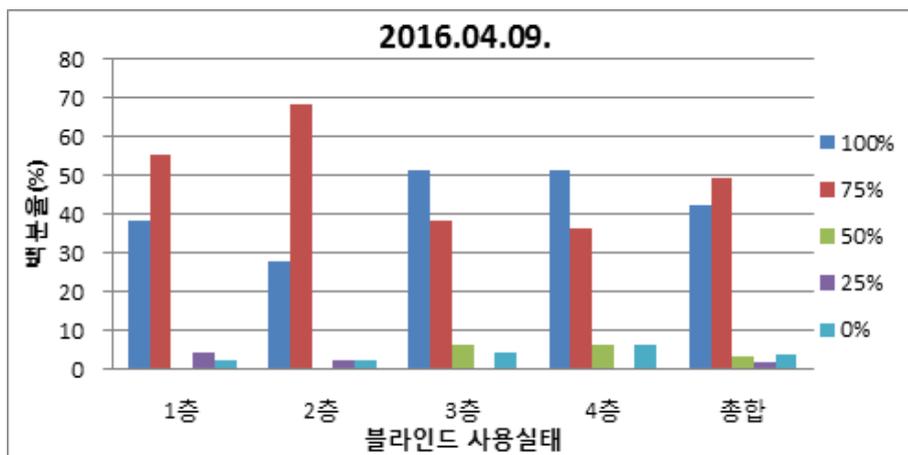
2) 사용현황 분석



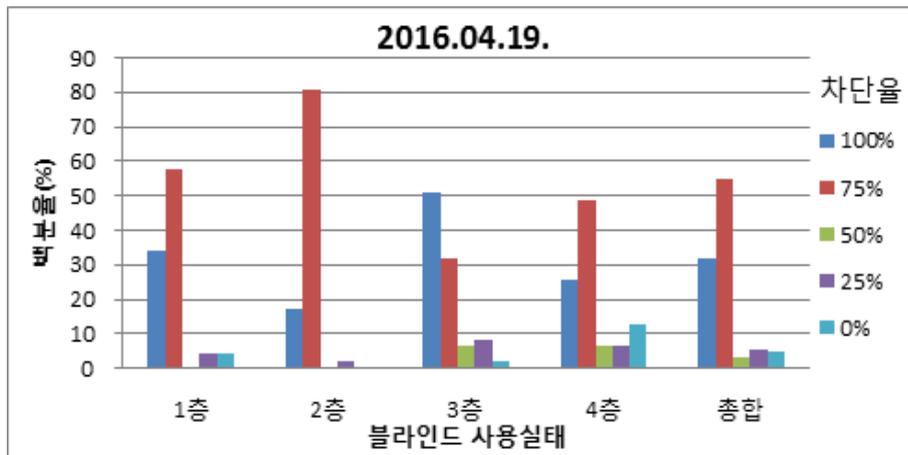
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 42. The actual use of Roller shades; (a) 2016.03.03. (b) 2016.03.12. (c) 2016.04.09. (d) 2016.04.19.

Fig. 42는 Fig. 41의 사진에서 보이는 제주대학교 공과대학 4호관 사무실들의 Roller shade 차광비율을 조사하여 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 나누어 그래프로 나타낸 것이다. 2016년 03월 03일, 12일, 04월 09일, 19일 총 4일간의 Roller shade 사용실태를 조사한 결과 Roller shade를 100%모두 가린 경우(전체의 30 ~ 45%)와 75%를 가린 경우(전체의 45 ~ 55%) 두 가지가 대부분을 차지하고 있었으며, 75%를 가린 경우가 가장 많은 것으로 나타났다. 또한 조사결과 대부분의 재실자들이 Roller shade의 길이를 조절하지 않고 실내에서 형광등을 켜 채 생활하고 있는 것으로 나타났다.

## 2. 측정 및 시뮬레이션

### 2.1. Roller shade 차광비율에 따른 시뮬레이션

#### 1) Roller shade 시뮬레이션 조건

시뮬레이션은 ECOTECT을 이용하여 기본적인 모델링과 재질 설정을 한 후 RADIANCE와 연동하여 수행하였다. 먼저 차광장치인 Roller shade의 차광비율에 따라 실내로 유입되는 태양광의 양을 알기 위해 Roller shade의 차광비율(창문 높이의 0%(차광장치 없음), 50%, 75%, 100%)에 따라 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 태양광이 가장 강한 여름인 6월 21일(하지)을 기준으로 실내조도의 평균값을 산출하였다.

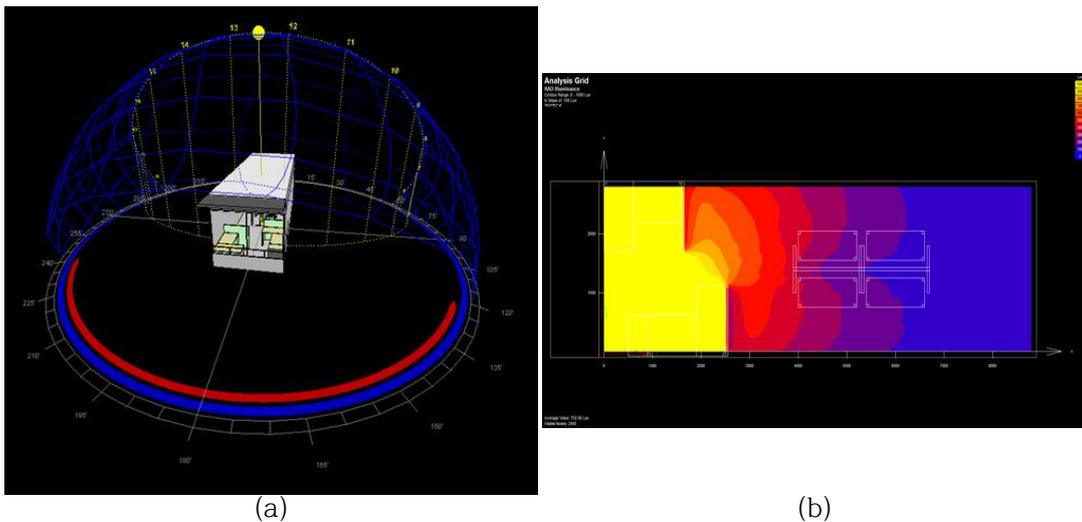


Fig. 43. Solar altitude and indoor illuminance(simulated) (a) summer solstice  
(b) result: at 12:30 blind 50%

Fig. 43 (a)는 시뮬레이션 조건인 6월 21일(하지)의 태양고도 및 test room의 상태를 보여준다. Fig. 43 (b)는 Roller shade의 길이별, 시간별 시뮬레이션을 수행한 결과 값 중 하나이며 Roller shade 길이가 50%일 경우 오후 12:30에서 0 ~

1,000 lux까지 100 lux단위로 실내 조도분포를 나타내고 있다. 천공상태는 clear sky로 설정하였다.

## 2)차광비율 시뮬레이션 결과

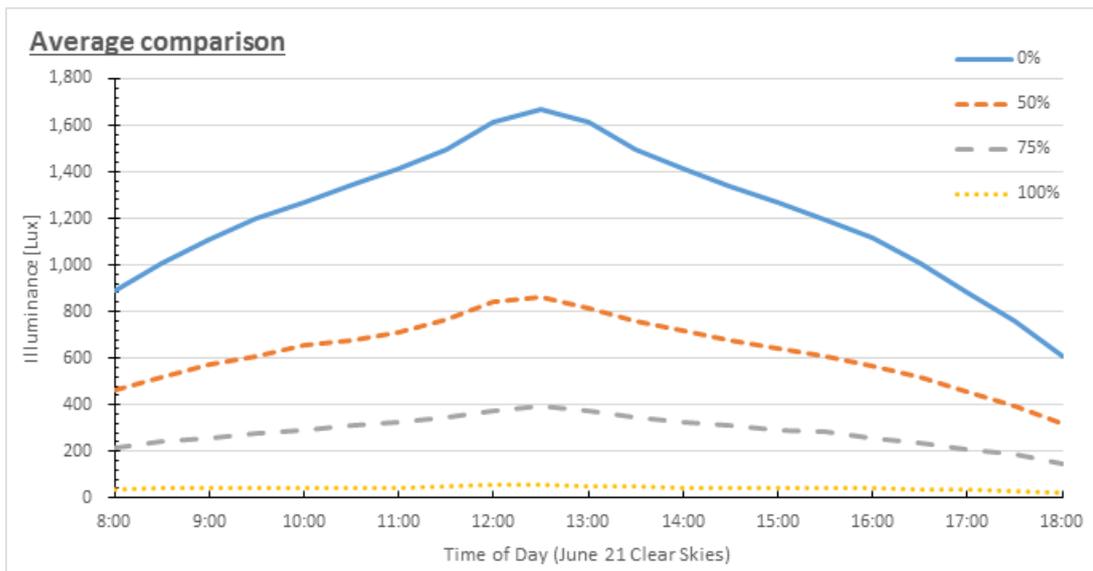


Fig. 44. Variation of Average indoor illuminance of test room with Roller shade length

Fig. 44는 Roller shade 차광비율에 따른 평균 실내조도 변화량을 나타낸다. 실내를 모두 가린 100 %의 경우 평균조도는 50 lux도 나오지 않았으며, 75 %의 경우는 평균 200 ~ 400 lux의 결과를 보였다. 50%의 경우는 400 ~ 900 lux까지의 분포를 보였고, 0 %는 평균 900 ~ 1600 lux까지 나왔다. 하지만 0 %의 경우 사무실 실내 조도 기준을(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600 lux]) 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 또한 100 %와 75 %는 조도기준에 못 미치는 결과가 나왔고 0 %와 50 % 경우 모두 창가가 아닌 쪽에 비해 매우 밝아 눈부심이 심한 것으로 나타나 인공조명 없이는 태양이 있는 낮에도 원활한 작업이 불가능하다는 것을 알 수 있었다.

## 2.2. 시뮬레이션과 실제 측정값 비교

### 1) 비교 조건

본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램의 정확도 및 재질의 물성치와 특성을 확인하기 위해 시뮬레이션 결과 값과 실제 Roller shade의 차광비율별로(75%, 100%) 조도측정을 한 결과 값을 비교하였다. 실험과 시뮬레이션은 모두 조명이 없는 상태에서 자연광의 영향만 받는 상태에서 이루어졌다. Fig. 45는 실제 측정시의 조도계의 위치와 이름을 나타낸다. 조도계는 작업면 높이 기준과 책상 높이인 바닥으로부터 750 mm에 맞추어졌으며, 101번이 동쪽 창가 책상위에 위치하였으며, 102번은 서쪽 창가에 위치하였다. 103, 104, 105, 106번은 중앙 책상에서 각각 동쪽 창가에서부터 차례차례 위치하였다.

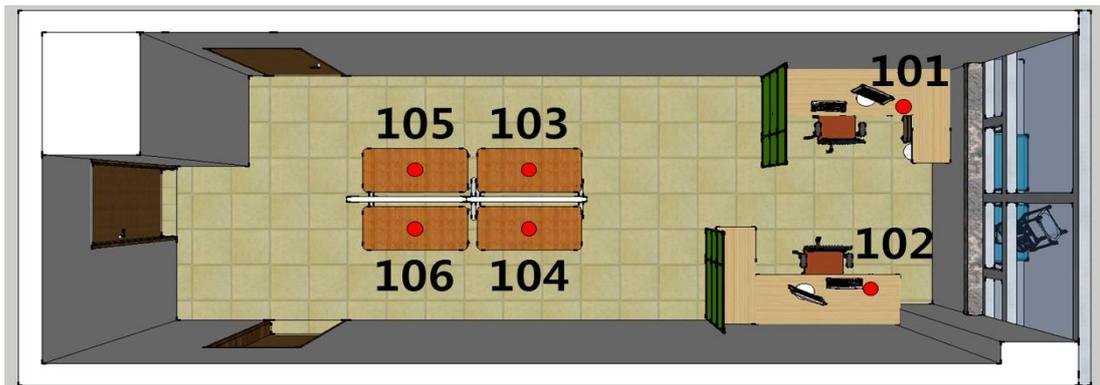


Fig. 45. Location of photo sensors

## 2) 차광비율 75% 비교

Fig. 46은 2015년 10월 31일에 Roller shade가 창문의 75%를 차지하고 있는 경우의 실제 측정된 조도 값과 시뮬레이션 값을 비교한 그래프이다. 실제 조도 값은 Delta OHM 사의 PHOT 01 조도 측정 장치와 Agilent 사의 34970A 데이터 로거를 이용하여 Fig. 45의 그림에서 보이는 포인트에서 데이터를 측정하였다. 시뮬레이션 결과 값은 실선으로 나타내었고 실제 측정 결과 값은 점선으로 나타내었다. 시뮬레이션과 실제 외부조도 측정값은 조금 더 굵게 표시하고 스케일은 보조축인 오른쪽 y축이다. 그 외의 조도 값은 왼쪽 축을 기준으로 한다. 실제 측정값은 11시 30분부터 기록되었다. 시뮬레이션은 Clear sky의 조건으로 측정하였고 실제 값은 구름이 약간 있는 맑은 날이었다. 실험 결과 외부조도 값은 실제 측정에서 약간의 구름의 영향을 받았지만 비슷하게 나왔으며 그 외의 각각의 조도센서의 값도 거의 일치하거나 약간 높은 것으로 나타나 시뮬레이션 결과가 거의 정확하다고 보인다. 값이 약간 높게 나온 것은 Roller shade의 투과도가 RADIANCE 프로그램에서 제대로 적용이 되지 않아 시뮬레이션 값이 약간 낮아진 결과이다.

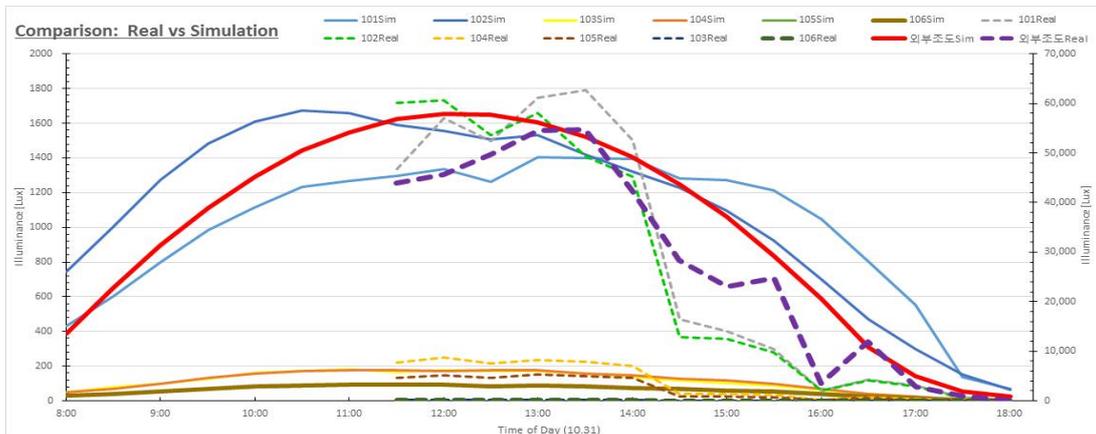


Fig. 46. Comparison between measured values and simulation results in October 31 (75%)

### 3)차광비율 100% 비교

Fig. 47은 2015년 6월 19일 Roller shade를 모두 내렸을 경우의 실제 측정값과 시뮬레이션 결과 값을 비교한 그래프이다. 시뮬레이션의 조건은 Clear sky 이었고 실제 측정된 날의 날씨는 구름이 열게 긴 맑은 날이었다. Fig. 46의 경우와 마찬가지로 설정하였으며 결과 값을 보면 외부조도는 실제 측정값이 구름의 영향으로 낮게 나왔지만 내부 측정지점들의 값은 실제 결과 값이 더 높게 나온 것을 알 수 있다. Roller shade를 모두 내렸을 경우 이전의 비교 결과보다 더욱 Roller shade 투과도의 영향이 커져 차이가 더 커지는 결과를 얻었다.

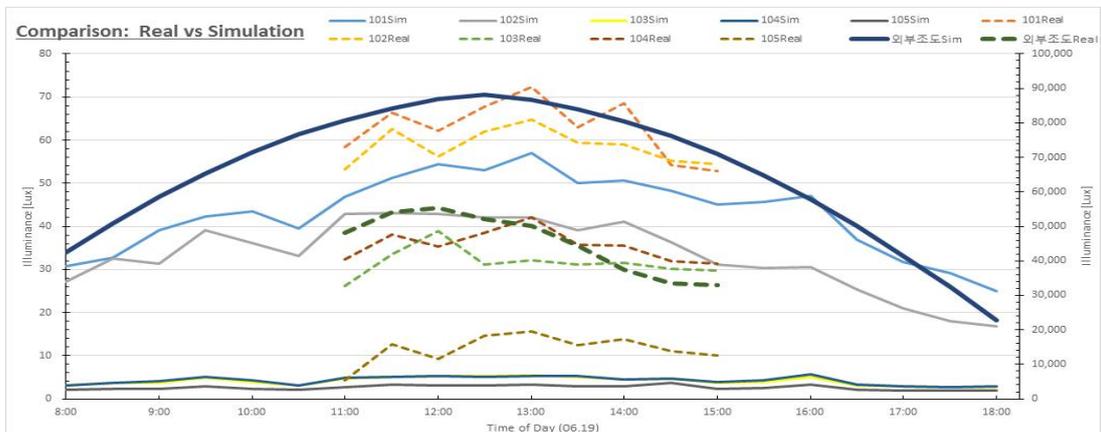


Fig. 47. Comparison between measured values and simulation results in June 19 (100%)

## 2.3. 형광등과 태양추적장치를 이용한 자연 조명 비교 분석

### 1) 형광등과 자연조명 비교 조건

앞에서 조사한 재실자의 실제 Roller shade 사용현황을 고려하여 차광한 상태로 재실자들이 선호하는 Roller shade 75%를 조건으로 하여 시뮬레이션 하였다. 공대 4호관 test room의 실제 조건과 비슷한 조건의 설비형 자연채광 장치 시뮬레이션을 위해 형광등은 현재 사용 중인 Philips사의 MASTER TL-D 32W/865 형광등 2개가 1세트인 매입형 등기구를 조건으로 하였고 자연채광 조명은 주로 맑은 날에 태양추적장치로 상시적으로 작동하여 항상 태양을 향하도록 하여 동일 시간대에 가장 많은 양의 태양광을 획득할 수 있도록 제작되었다. 시뮬레이션을 진행한 6월 21일(하지)을 기준으로 식 31을 이용해 가장 밝은 시간대의 조도(89,000 lux)를 측정하여 이를 태양추적장치의 집광부의 면적(0.071 m<sup>2</sup>)에 들어오는 광선속(6,288 lm)으로 계산하여 손실이 없는 효율이 100%인 자연채광 장치를 조건으로 적용하였고, 형광등과 같은 위치에 광섬유를 통해 실내 천장으로 자연광이 조사되도록 하였다.

$$I_{\max} \times A_{LC}(\pi r^2) = lumen_{st} [lm] \quad (31)$$

$I_{\max}$  = 일간 가장 밝은 시간대의 조도  
 $A_{LC}$  = 집광부(Light Collector)의 면적

또한, 태양광은 태양추적장치의 특성상 대부분이 직사광선으로 광섬유에 집광되어 들어오고 그로인해 대부분의 빛이 직사광선 형태로 산광되어 나가므로 실내로 들어오는 자연광은 실내조명으로 활용하기 위해 균일한 채광이 이루어지지 않아서 산광부의 광섬유에 디퓨저를 장착하여 시뮬레이션을 한 번 더 진행하였다. Fig. 48 (a), (b)는 디퓨저 적용 전과 후의 배광곡선을 나타내며 Fig. 48 (c), (d)는 디퓨저 적용 전과 후의 조도부포 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

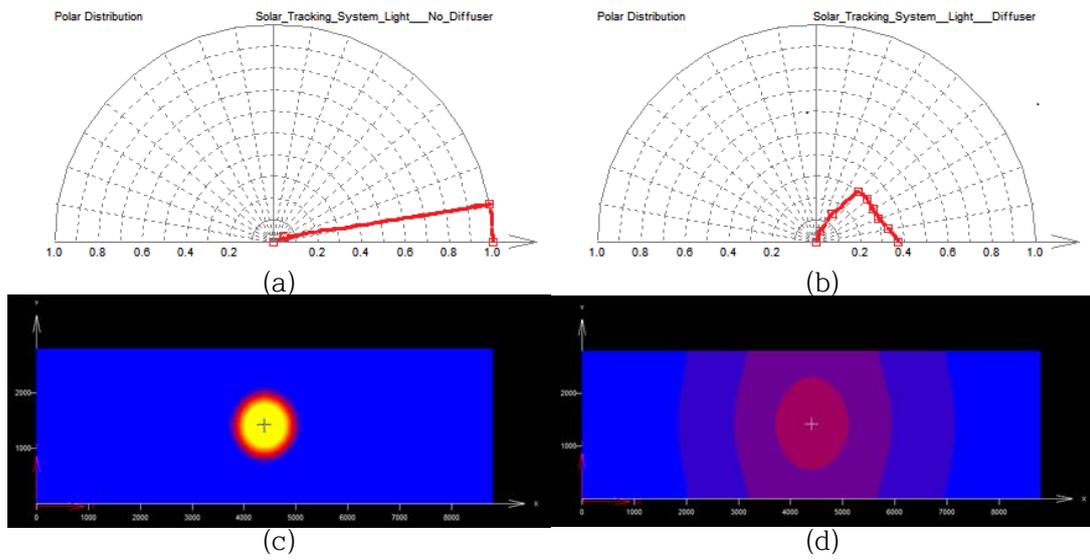


Fig. 48. Diffuser setting; (a) No diffuser (b) Diffuser (c) Before applying the diffuser (d) After applying the diffuser

## 2)형광등과 자연조명 비교 결과

본 연구에서는 형광등과 태양추적장치를 이용한 자연채광 조명 비교 시뮬레이션을 실제 모델인 제주대학교 공과대학 4호관의 test room을 기준으로 ECOTECT로 모델링한 후 RADIANCE를 이용해 시뮬레이션을 수행하여 Roller shade가 75% 내려간 조건의 형광등을 적용했을 때와 자연채광 조명장치를 적용한 경우, 자연채광 조명장치에 Diffuser를 장착한 경우를 시간에 따른 조도 분포와 평균조도 값의 변화로 분석해보았다.

Fig. 49는 시뮬레이션 된 형광등과 태양추적장치와 태양추적장치 + 디퓨저를 사용했을 경우의 조도분포의 변화를 그림으로 나타낸 그래프이다. 이 그래프는 오전 9시를 기준으로 3시간마다의 변화를 나타내었으며 가장 어두운 부분인 0 lux부터 가장 밝은 부분인 1,000 lux까지 100 lux단위로 나타내었다. 그림을 보면 형광등은 중앙부분이 일정하게 600 lux이상 나오는 것을 알 수 있으며 태양추적장치는 디퓨저를 장착하지 않아 광섬유의 위치를 중심으로 태양광이 몰려있는 것을 알 수 있다. 태양추적장치와 디퓨저를 함께 쓴 경우는 중앙부분이 700 lux가 나오는 것을 알 수 있으며 형광등과 비슷한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 형광등 결과와 태양추적장치와 디퓨저를 사용한 결과를 비교해보면 후자의 경우가 더 높은 것을 알 수 있는데 이는 태양추적장치 광 전송효율을 100%로 계산해 나온 값으로 실제로는 조금 더 낮아진다.

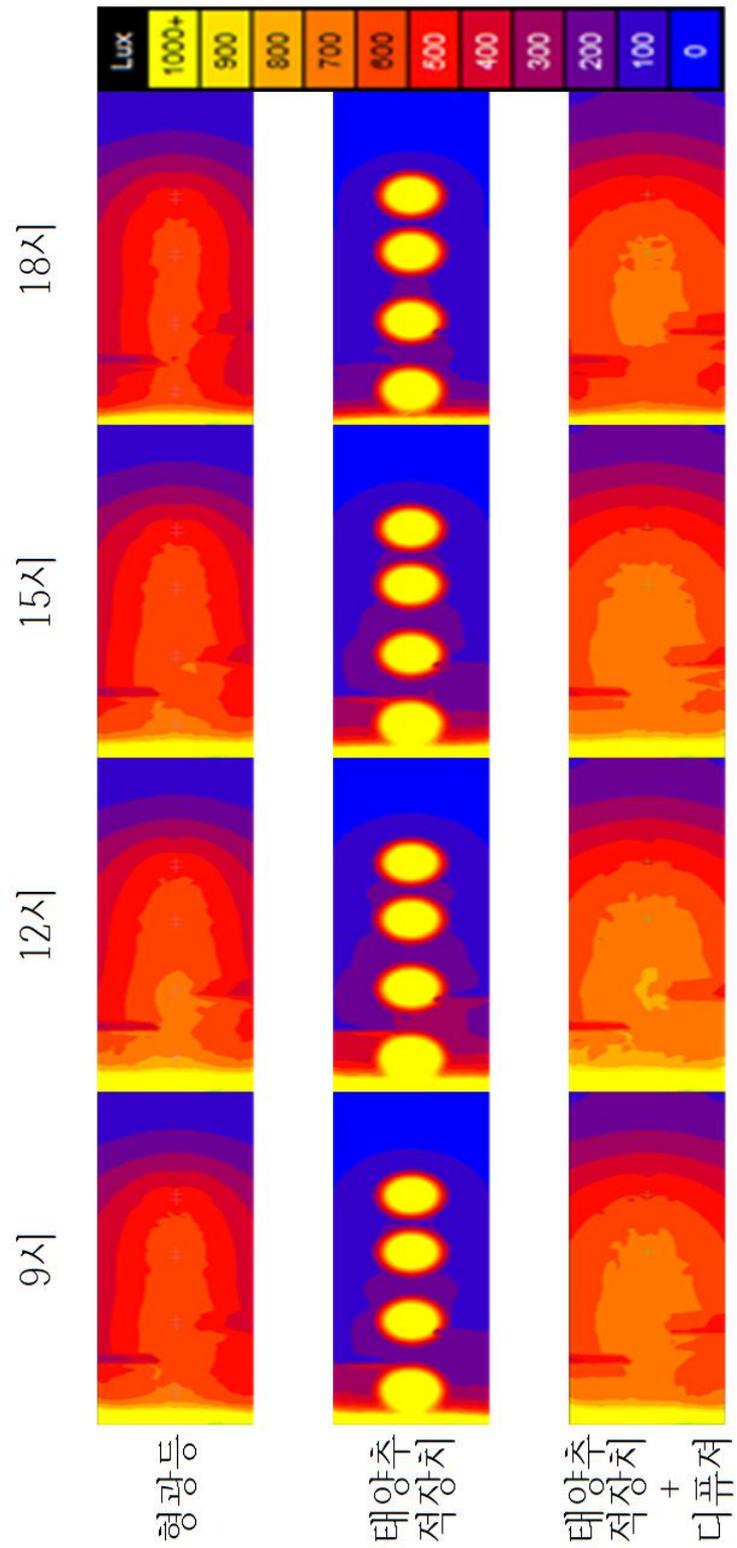


Fig. 49. Change of indoor illuminance with time

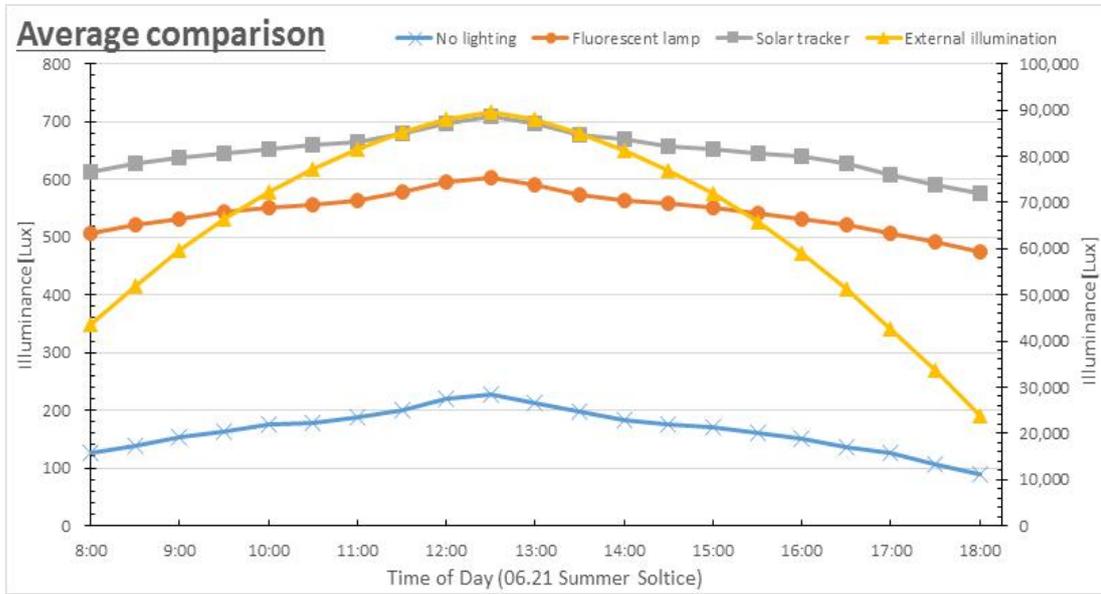


Fig. 50. Change of average indoor illuminance with time

Fig. 50은 시뮬레이션 된 형광등과 태양추적장치와 디퓨저를 사용했을 경우 의 부조도와 test room의 평균조도 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 49의 경우와 마찬가지로 Roller shade의 차광비율은 75%로 하였으며 그림의 No lighting은 실내조명 없이 시뮬레이션 한 결과이며, Fluorescent lamp는 형광등만 있는 기존의 조건을 시뮬레이션 한 결과이고, Solar tracker는 태양추적장치와 디퓨저를 사용하였을 경우의 결과이다. 외부조도의 경우 그래프의 오른쪽 보조 축을 기준으로 하며 Sky condition은 Clear sky로 오전 8시부터 오후 6시까지 평균 23,000 ~ 90,000 lux로 일정한 분포를 보였다. 실내조명이 없는 경우는 평균 100 ~ 200 lux의 조도분포를 보였고 형광등의 경우 평균 500 ~ 600 lux의 조도분포를 보였다. 자연채광 조명과 디퓨저를 사용하였을 경우는 평균 600 ~ 700 lux의 조도분포를 가지는 것을 알 수 있다. 세 경우 모두 외부조도 곡선을 따라 완만하게 평균조도가 변하였다. 형광등은 사무실 실내 조도 기준을(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600lux]) 충분히 만족하는 결과를 보였으며 자연채광 조명과 디퓨저를 사용한 경우는 사무실 실내 조도 기준을 넘는 결과를 보였다.

### 3. 경제성 분석

본 연구의 궁극적인 목표는 자연채광장치를 적용하여 전기 소비량을 절감함으로써 인공조명에 걸린 부하를 대체하는 것이다. 이를 위해서는 실생활에서 자연채광 조명을 적용했을 경우 얼마만큼의 성능을 보여주는가와 실제 전력 소비가 얼마나 감소하고 어느 정도의 전기료 절감을 할 수 있는지가 중요하다. 그러므로 태양추적장치를 사용하였을 경우의 총 비용 변화를 초기투자비, 유지보수비, 전기요금 등의 변수를 이용해 계산해보았다.

Table 14. Annual weather data (1981~2010)

연간 날씨	맑은 날	257 day
	흐린 날	103 day
월간 날씨	맑은 날	21.416 day
	흐린 날	8.584 day

기상청에 따르면 연평균(1981~2010) 흐린 날은 103일 맑은 날은 257일로 Table 14에 평균 월간 맑은 날과 흐린 날로 계산하여 나타내었다. 실내조명 시간은 하루 9시간을 기준으로 고려하였는데, 형광등 단일시스템의 경우 9시간씩 360일 점등되어 있어야 한다. 한편, 형광등과 태양추적장치 병용시스템 첫 번째 경우는 360일 중 257일은 하루 중 3시간은 형광등에 의해 그리고 나머지 6시간은 태양추적장치에 의해 실내조명이 이루어지며, 두 번째 경우 맑은 날인 257일 모두 태양추적장치에 의해 실내조명이 이루어진다고 설정하였다. 두 경우 모두 360일 중 257일을 뺀 나머지 기간인 103일은 형광등 단일시스템의 경우처럼 하루 9시간씩 형광등이 점등되어 진다.

Table 15. Production costs and maintenance costs

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

(센서 및 보드 교체)

Table 15는 형광등과 자연채광장치의 제작·설치비와 유지보수비 및 장비 설치에 필요한 내역이다. 형광등의 수명은 1개당 15,000시간이며 자연채광장치의 수명은 30년마다 센서 및 보드를 교체해주면 영구적으로 사용이 가능하다. 센서 및 보드의 가격은 95,000원이며 형광등은 시중에서 25개에 56,000원에 판매되고 있다. 형광등의 개당 소비전력은 32W이며 자연채광장치는 12W이다. 또한 개당 설치비는 형광등 2개가 1세트인 매립형 형광등기구가 시중에 세트 당 약 200,000원에 판매되고 있어 개당 100,000원으로 설정하였다. 자연채광장치는 1개 500,000원에 제작이 가능하며 대량생산을 할 경우 더욱 절감될 것이다.

Table 16. Electric charges

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

Table 15과 Table 16을 통해 연간 사용시간과 연간 유지비 및 전력 요금을 계산하였다. Table 16을 보면 형광등만 설치된 경우 총 연간 유지비가 3,871원이고 두 시스템을 병용하였을 경우 첫 번째 경우는 5,195원이며 두 번째 경우는 4,274원이다. 또한 전력 요금은 한전의 주택용 저압 전력 요금을 적용했을 경우 형광등은 월간 35,702원, 연간 428,424원 병용하였을 경우 첫 번째는 월간 19,766원, 연간 237,192원 두 번째는 월간 13,597원, 연간 163,164원이다. 이 결과로 보면 태양추적장치를 병용하여 사용하였을 경우 연간 약 20만원을 절약할 수 있고 태양추적장치를 최대 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 17은 초기투자비용, 연간 유지보수비, 전기요금 등을 모두 감안하여 10년간, 30년간 사용 시의 총 비용의 변화를 나타낸 표이며, 결과를 보면 형광등만 사용하였을 경우 설치비용은 80만원이고 병용하였을 경우의 설치비용은 280만원이지만 10년을 사용하였을 경우 형광등은 512만원, 병용하였을 경우 첫 번째는 522만원 두 번째는 447만원으로 일반적으로 사용하였을 경우는 유지비가 비슷해지며 태양추적장치를 최대로 사용하였을 경우는 약 50만원을 절약할 수 있는 것으로 나타났다. 30년을 사용하였을 경우는 차이가 더 커지는데 형광등의 경우 1,377만원이 사용되지만 병용하였을 경우 첫 번째는 약 1,007만원 두 번째는 782만원이 사용되므로 각각 약 370만원, 590만원이 절약되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 소결론

본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램인 ECOTECT과 RADIANCE를 사용하여 test room을 모델링한 후 Roller shade의 길이에 따른 실내 조도변화를 비교하고 실제 재실자들의 Roller shade 사용 형태를 조사하였다. 위의 결과를 바탕으로 Roller shade의 길이를 설정한 후 설비형 자연채광 장치를 이용한 실내조명을 일반 형광등과 비교하여 시뮬레이션을 하였다. 그리고 이 결과를 이용하여 이 장치를 적용하였을 경우의 총 비용을 계산 후 형광등만 사용하였을 때와 비교하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

실내조명으로 형광등을 사용하였을 경우의 평균조도는 사무실 실내 조도 기준을(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600lux]) 충분히 만족하는 결과를 보였으나 자연채광 장치를 이용한 조명과 디퓨저를 사용한 경우는 사무실 실내 조도 기준을 넘는 결과를 보였다. 하지만 자연채광 장치의 광전송 효율이 적용될 경우 조도기준을 만족하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

또한 시스템을 적용할 경우의 총 비용을 계산한 결과 30년을 사용하였을 때 형광등의 경우 보다 형광등과 태양추적장치를 병용하며 일반적으로 설비형 자연채광 장치를 사용하였을 경우와 자연채광 장치를 최대로 사용하였을 경우에 각각 약 370만원, 590만원이 절약되는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 누진세를 고려하지 않고 계산한 결과이므로 누진세까지 고려하면 절약되는 비용의 차이가 더욱 늘어날 것으로 예상된다. 또한 비용 절감뿐만 아니라 조명에너지도 그만큼 절약되고 자연광을 이용하면 작업자의 눈의 피로가 감소하며 두통과 스트레스가 완화되는 효과가 있다.

설비형 자연채광 장치를 이용한 조명에도 약점이 존재하는데 구름이 많은 날이면 실내 조도가 일정하지 않게 된다는 점이다. 그러나 디밍 제어시스템을 이용하면 날씨가 맑은 날 뿐만 아니라 구름이 많은 날에도 효율적으로 작동하여 사무실 내부가 일정한 조도를 갖게 할 수 있을 것이다.

## V. 결론

본 연구에서는 건물에너지 절감을 위한 폐열 발전 및 자연채광 적용에 관한 연구를 위한 스텔링엔진과 가돌리늄 발전기를 이용한 저온도차 발전 시스템 개발과 자연채광 적용을 위한 측정 및 시뮬레이션을 실시하였다.

저온도차 발전 기술을 활용한 건물에너지 절감을 위한 연구에서는 스텔링 엔진의 경우 MM-7엔진, Single 및 Twin엔진의 기초 성능을 비교·분석하였으며 이 중 기계적 출력이 가장 좋은 MM-7엔진을 이용하여 AC motor와 Generator coil을 이용하여 발전기를 만들어 비교 분석해보았다. 또한 가돌리늄 발전장치를 제작하여 기계적 출력을 측정하였고 저온도차 스텔링엔진과 비교하였으며 또한 저온도차 스텔링엔진의 경우와 마찬가지로 전기를 생산해 보았다. 이러한 발전장치와의 비교를 통해 본 연구의 활용에 필요한 최적의 저온도차 발전기술을 찾고자 하였다. 실험 결과 MM-7엔진의 기계적 출력이 40°C의 온도차에서 4.45 mW로 가장 높게 산출되었으며 이에 따라 이 엔진을 이용한 연구를 진행하였으며 가돌리늄 발전장치를 활용한 기계적 출력과 비교한 결과 가돌리늄 발전장치가 같은 온도차에서 저온도차 스텔링엔진의 경우보다 약 3배 이상의 더 높은 출력이 나오는 것을 알 수 있었다.

설비형 자연채광 장치를 적용한 시뮬레이션 분석에서는 먼저 Roller shade의 길이에 따른 실내 조도를 분석하고 실제 Roller shade의 사용실태를 조사하여 설비형 자연채광 장치 적용에 필요한 최적의 설정을 알아보았으며, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 한 결과 자연채광 조명과 디퓨저를 사용한 경우의 평균조도가 최대 700 Lux 정도로 분석되었으며 형광등만 이용했을 경우가 최대 600 Lux로 분석되어 자연채광 장치를 적용한 경우가 평균조도가 더 높은 결과를 얻었으며 KS 조도기준과 채실자의 선호도가 점차 높아지는 것을 고려해볼 때 자연조명의 활용은 전기에너지의 절감과 특히, 하절기의 냉방부하를 줄이기 위해 지속적인 연구가 이루어져야 한다. 또한, 이를 적용하여 총 비용을 계산한 결과 30년을 최대치로 이용하였을 경우 590 만원의 전력요금 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

저온도차 발전기술 연구에서는 건물에서 발생하는 폐열을 이용해 전기를 생산

하는 충분한 가능성을 엿보았으며 설비형 자연채광 장치를 적용한 시뮬레이션에서는 전력요금 절약 효과까지 따져본 결과 에너지 절감뿐만 아니라 확실한 요금 절감효과 까지 있는 것으로 판단된다. 본 연구는 추후 저온활용 및 자연채광 분야에서 기초 데이터로 활용될 것이라 생각되며 앞으로도 활발한 연구를 통해 기존 전기에너지가 담당하고 있는 부하를 친환경적이며 인간에게 부담을 주지 않는 이러한 에너지들로 대체해 나가야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

Seon-Jun Jang, Yoon-Pyo Lee and Kyuho Sim, “Experimental Feasibility Study on Low-Temperature Differential Stirling Engines with Water Spray Heat Transfer”, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 38, No. 6, pp. 475~482, 2014.

JAMES R. SENFT, “An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines”, 1St Edition.

Lee, C. S., Kim, J. M., Park, Y. M., Sung, T. K., Joung, C. B., Kang, S. H., Kim B. C., “Development of Tracking daylighting System Using Multi-Parabolic Reflector”, Journal of the Korean Solar energy Society, Vol. 33, No. 2, pp. 56-63, 2013.

Lee, J. Y., Song, K. D., “Developing Computer Models for the performance Evaluation of Daylighting system and Lighting Control”, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 19, No. 3, pp. 211-218 2003.

신명철, 안준, 강병하, “스털링 엔진용 재생 열교환기의 다공체 구조에 따른 성능 특성”, 대한설비공학회, 제 24권, 제 5호, pp. 415~422, 2012.

박성제, 고준석, 홍용주, 김효봉, “스털링엔진/발전기 기술 동향”, 한국동력기계 공학회지, 제 19권, 제 1호, pp. 5~10, 2015.

Eugene Hecht, “광학 - 4th Edition”, 두양사, 2008.

이태규, “태양에너지를 이용한 수소제조”, 에너지공학, 제 15권, 제 2호, pp.

96~106, 2006.

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

Kjeld Johnsen, Richard Watkins, “Daylight in buildings”, Energy Conservation in Buildings & Community Systems & Solar Heating and Cooling Programmes, Project Summary Report.

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.

Oh, S. J., Lee, Y. J., Kim, N. J., Hyun, J. H., “Development of an AVR MCU-based Solar Tracker”, Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 353-357, 2011.

Park, Y. C., “Sun Tracking System for Active Daylighting System”, The Society Of Air-Conditioning And refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 11, pp. 47-58, 2000.

고동환, “Autodesk ECOTECH Analysis 2010을 이용한 친환경 건축물 평가 및 분석”, 대한건축학회 제 54권 제 7호, pp. 56~60, 2010.

“KS A 3011 조도기준”, 한국표준협회, 1998.

이정하, 이상훈, “Ecotect를 이용한 공동주택의 배치유형과 인동간격에 따른 일조 시뮬레이션 연구”, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제 30권, 제 1호 pp. 189~190, 2010.

최우람, 한석중, 윤영일, “ECOTECH 시뮬레이션을 활용한 학교건축의 상호계획에 관한 연구-기상데이터 기반 동적 자연채광 시뮬레이션을 기반으로”, 한국생태환경건축학회, 제 13권, 제 6호, pp. 77~82, 2013.

조관행, 윤재욱, “에너지 및 빛 환경평가 프로그램을 이용한 패시브 주택의 에너지 성능 비교 연구”, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제 30권, 제 1호, pp. 435~436, 2010.

“기후특성분석자료-12월과 2015년(1~12월) 기후 분석”, 기상청, 2016.

정해준, 김영민, 김원식, 천원기, “형광등과 fibre-optic 자연채광 시스템의 경제성에 대한 LCC 비교 분석 연구”, 한국에너지기후변화학회.

김영민, 김원식, 정해준, 천원기, “LTD 히트 엔진의 동력 출력에 대한 비교 분석: AC모터 vs. Generator coil”, 에너지공학.

김영민, 김원식, 정해준, 천원기, “태양추적식 자연채광 장치의 집광기 종류에 따른 성능 분석: 포물 반사경 vs. 프레넬 렌즈”, 한국태양에너지학회.

이영희 “건축환경계획”, 문운당, 2006.

## 감사의 글

그동안 이끌어주고 가르쳐주고 함께해주신 주변의 모든 분들에게 감사의 글을 남깁니다. 대학원을 입학한지가 엇그제 같은데 벌써 2년이지나 졸업을 하게 되었습니다. 하고픈 일도 다 못하고 시간이 너무 빠르게 흘러 아쉬움이 많이 남는 대학원 생활이었던 것 같습니다. 앞으로도 많은 일들이 있겠지만 실수를 통해서 미래를 사는 지혜를 배운다는 말이 있듯이 그동안의 많은 아쉬운 일들을 기억하고 보완하며 앞으로 나아가겠습니다.

지금까지 학문적으로나 인격적으로 많은 가르침을 주신 천원기 교수님께 먼저 감사의 말씀을 올리며 부족함이 많음에도 가르치고 이끌어주신 이윤준 교수님과 김남진 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 또한 대학원 생활동안 어두운 밤의 등대와 같은 이정표가 되어주신 영민이형 고맙습니다. 그리고 연구에 대한 가르침뿐만 아니라 진로에 관해 내일처럼 생각해주신 승진이형과 준호형 감사합니다. 지난 2년간 힘들 때나 즐거울 때나 동고동락하며 함께해준 원식이형 고맙습니다. 그리고 대학원 생활동안 함께 고생한 종근이형, 영훈이, 연현이형, 정환이, 현미, 윤기, 연하, 수연이, 병일이 그리고 조교로써 많이 도와준 경호형, 용현이형, 제원이, 경윤이 또, 우리 실험실 후배 연주, 종인이, 송이 모두들 감사합니다.

그리고 나의 친구들 이승민, 김태준, 채형탁 그동안 바쁘다는 핑계로 별로 못 놀아서 미안하고 기다려줘서 고맙다.

마지막으로 사랑하는 어머니, 아버지, 누나 우리 가족들 대학원 생활동안 버팀목이 되어줘서 정말 감사합니다. 이제부터는 그 기대에 부응하는 사람이 되도록 더욱 노력하겠습니다. 이 외에도 여기에 이름이 나오지 못한 모든 분들에게 감사의 말씀을 올립니다.