

碩士學位論文

비유리식(Nonglass) 진공관형  
태양열 집열기 개발에 관한 연구



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

吳 昇 珍

2008年 8月

# 비유리식(Nonglass) 진공관형 태양열 집열기 개발에 관한 연구

指導教授 千院基

吳昇畛

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 8月

吳昇畛의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李憲周 (印)

委員 李潤俊 (印)

委員 千院其 (印)

濟州大學校 大學院

2008年 8月

# A Study on the Development of Nonglass Solar Vacuum Tube Collector

Seung Jin Oh  
(Supervised by Professor Wongee Chun)

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

2008. 8.

This thesis has been examined and approved.

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

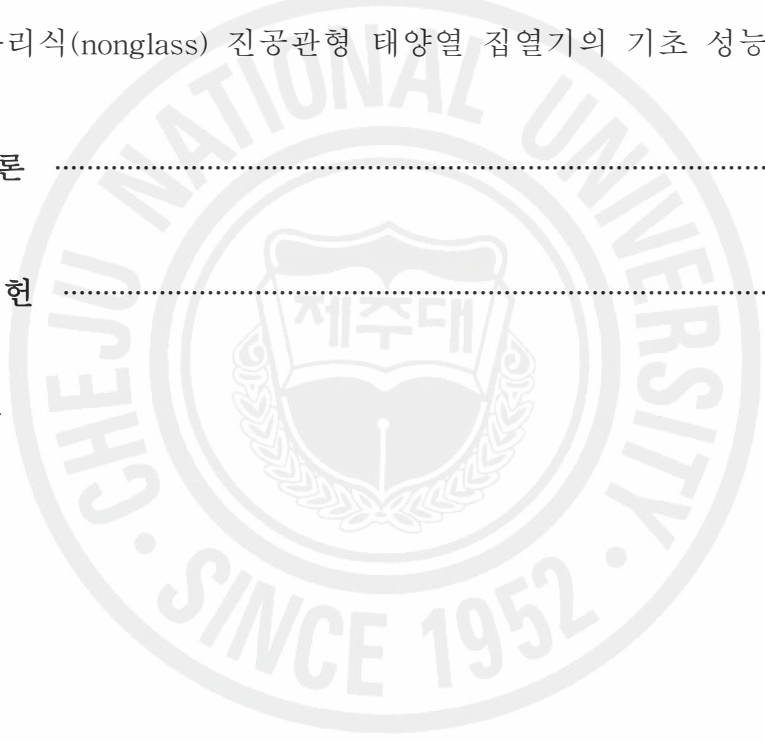
.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	v
SUMMARY .....	vi
I. 서 론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	4
1. 열효율 이론 .....	4
1.1 집열성능 .....	5
1.2 집열효율 .....	8
2. 유리식 태양열 집열기의 종류 .....	10
1.1 단일 진공관형(Single Solar Evacuated collector) .....	10
1.2 이중 진공관형(All-Glass solar Evacuated collector) .....	14
III. 실험장치 및 방법 .....	16
1. 실험장치 .....	16
1.1 비유리식 진공관형 집열기 .....	16
1.2 진공 제작 시스템 및 데이터 수집 장치 .....	23
1.3 플라즈마트론을 이용한 ZnO Coating .....	27

2. 실험방법 .....	30
2.1 진공도 테스트 .....	30
2.2 진공도가 흡열판의 열적특성에 미치는 영향 .....	34
2.3 기초 성능 테스트 .....	35
IV. 실험결과 및 고찰 .....	39
1. 비유리식(nonglass) 진공관 내부의 진공도 변화 분석 .....	39
2. 진공관 내의 진공도에 따른 흡열판 열적특성에 미치는 영향 분석	42
3. 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기의 기초 성능 분석 ...	45
V. 결 론 .....	50
참 고 문 헌 .....	51
감사의 글	



## LIST OF FIGURES

Fig. 1. Collector efficiency .....	9
Fig. 2. Schematic of a single vacuum collector with dual pipe flow passage (SEIDO 2) .....	11
Fig. 3. Connection of the storage tank and dual pipe flow passage (SEIDO 2) .....	12
Fig. 4. Schematic of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5) .....	13
Fig. 5. Connection of header and heat pipe (SEIDO 5) .....	13
Fig. 6. All-glass solar vacuum collector tube .....	14
Fig. 7. Concept of nonglass solar vacuum collector .....	16
Fig. 8. Cross sectional view of nonglass vacuum solar collector .....	17
Fig. 9. Transmittance of acrylic material by wavelength .....	19
Fig. 10. Heat pipe manufacturing process .....	20
Fig. 11. Merit numbers of various working fluids .....	21
Fig. 12. Major components of nonglass vacuum solar collector .....	22
Fig. 13. Manufacturing drawing of nonglass vacuum solar collector .....	22
Fig. 14. Apparatus for making vacuum inside a nonglass tube and a heat pipe .....	23
Fig. 15. Header-type vacuum chamber ; (a) General drawing of header-type vacuum chamber, (b) Detail drawing of header-type vacuum chamber connected to nonglass vacuum tube .....	25
Fig. 16. Photograph of the Header-type vacuum chamber; (a) Front view, (b) Back view .....	25
Fig. 17. ACM1000-multi channel Controller and APT1004 pirani gauge	26
Fig. 18. Schematic diagram of the axial plasmatron .....	28

Fig. 19. Process of ZnO coating by using a plamatron .....	29
Fig. 20. SEM Photo of actylic tube coated with ZnO by using a plamatron; (a)1.247 $\mu$ m, (b)1.2000 $\mu$ m .....	29
Fig. 21. Mass spectrometry leak detector .....	31
Fig. 22. Principle of magnetic separation .....	31
Fig. 23. Vacuum leakage test by using Helium .....	32
Fig. 24. Front panel of LabVIEW application for monitoring and collecting vacuum data .....	33
Fig. 25. Block diagram of LabVIEW application for monitoring and collecting vacuum data .....	33
Fig. 26. Position of K-type thermocouple for measuring temperature on absorber plate .....	34
Fig. 27. Photograph of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5) .....	35
Fig. 28. Experimental apparatus .....	36
Fig. 29. Indoor comparative experiment of nonglass vacuum solar collector with a single glass evacuated tube .....	36
Fig. 30. Front panel of LabVIEW application for monitoring and collecting temperature data .....	37
Fig. 31. Block diagram of LabVIEW application for monitoring and collecting temperature data .....	38
Fig. 32. Leak rate of vacuum in coupling region .....	39
Fig. 33. Vacuum variation inside acrylic tube .....	40
Fig. 34. Temperature variation of absorber plate at $10^{-2}$ torr .....	43
Fig. 35. Temperature variation of absorber plate at 5torr .....	43
Fig. 36. The results of a nonglass solar vacuum tube at $10^{-2}$ torr and $800\text{W}/\text{m}^2$ .....	46
Fig. 37. The results of a SEIDO 5 at $800\text{W}/\text{m}^2$ .....	46

Fig. 38. Transmittance of acrylic material by wavelength .....	48
Fig. 39. Transmittance of acrylic material coated with ZnO by wavelength;	
(a)At atmosphere,	
(b)At vacuum .....	49

## LIST OF TABLES

Table 1. The overview of materials for Acrylic;	
a) Physical properties,	
b) Mechanical properties,	
c) Thermal properties,	
d) Optical properties .....	18
Table 2. Specification of the system for making vacuum .....	24
Table 3. Experimental conditions .....	37
Table 4. Temperature of different thermocouples at given conditions ...	42
Table 5. The results of comparative experiment of a nonglass solar vacuum tube at $10^{-2}$ torr with a single glass evacuated tube ..	45



## SUMMARY

Nature has been providing us energy from the beginning of the world. However human has hardly used it wisely. Solar energy is a kind of renewable energy from the nature. This study has been carried out to study the use of solar energy as it is harnessed in the form of thermal energy. Solar energy is one of the most promising energy resources such as hydrogen, biomass, wind and geothermal energy, because it is clean and inexhaustible. Space heating in buildings can be provided from solar energy by systems that are similar in many respects to water heater systems. By tapping into solar energy, we can not only solve the problem of energy shortage, but also can protect the environment and benefit the human beings.

There are currently two types of evacuated tube; a single glass tube and a double glass tube. The former consists of a single glass tube which contains a flat or curved aluminium plate attached to a copper heat pipe or water flow pipe. The latter consists of rows of parallel transparent glass tubes, each of which contains an absorber tube.

Evacuated tube collectors introduced above, however, pose some problems as they break rather easily under mechanical stresses. This paper introduces some preliminary results in design and fabrication of a non-glass solar vacuum tube collector in which the thermosyphon(heat pipe)made of copper is used as a heat transfer device. A series of tests have been performed to assess the ability of a non-glass solar vacuum tube collector. The series of experiments are as follows;

- 1)Vacuum level inside a vacuum tube.
- 2)Effects of the air remaining inside a vacuum tube on the temperature on the absorber plate.
- 3)Comparison of a non-glass vacuum solar collector with a single glass evacuated tube(SEIDO 5).

Different vacuum levels inside non-glass vacuum tubes were applied to check any leakage or unexpected physical or chemical developments with time. The vacuum level changed from  $10^{-2}$  torr to 5 torr in 5 days due to air infiltration from the ambient and gas emissions from the materials they were made of.

The effect of vacuum levels inside a vacuum tube on the absorber plate were investigated in different conditions. Due to less heat losses to the ambient, the non-glass vacuum tube at vacuum level  $10^{-2}$  torr kept more heat at higher temperatures compared to the non-glass vacuum tube collectors whose vacuum levels were at 5 torr. However, the temperature was not linearly proportional to the vacuum level.

Two types of solar collectors were used to investigate the ability of non-glass solar vacuum tube; one single glass evacuated tube and one non-glass vacuum tubes ( $10^{-2}$  torr). The efficiency of a non-glass vacuum tube with  $10^{-2}$  torr was different from that of a single glass evacuated tube in which vacuum level is  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  torr due to the transmittance of ZnO.

Unlike glass evacuated tubes, non-glass solar vacuum tubes generally require some measures to prevent air infiltration through invisible pores of the tube wall and gas emission from the materials. If the problems related with vacuum inside a tube are solved, the non-glass vacuum collector will work more efficiently.

## I. 서론

선진국을 비롯하여 세계 각 국가들은 인류의 활동에 의한 지구의 기후변화를 막기 위하여 1992년 리우 UN환경개발회의에서 유엔기후변화협약을 채택하였으며, 1994년 3월 기후변화협약이 발효된 이후 1995년 3월 독일 베를린에서 열린 제1차 당사국총회를 시작으로 매년 정기적으로 당사국총회가 열리고 있다. 2004년 러시아국회에서 교토의정서 비준을 승인하여 2005년 2월 16일 교토의정서가 발효됨에 따라 기후변화협약과 관련한 국제 관계는 급물살을 타게 되었다. 기후변화협약은 에너지소비로 인하여 발생할 수 있는 지구적 재앙에 대비하기 위한 인류의 공동의 노력을 위한 국제협약이라고 할 수 있다. 기후변화에 대응하기 위한 핵심조치는 모든 사람들이 이해하는 바와 같이 CO<sub>2</sub>배출을 감소시키는 노력이며, 이는 인류의 산업화이후 주력 에너지인 화석연료의 대체노력을 의미한다. 한편, 최근의 100달러를 상회하는 고유가 현상은 이러한 화석연료 특히 석유의존도를 낮추어야 한다는 당위성을 더욱 가화시키는 요소로 작용하고 있다.

전 세계적으로 인구 25위인 우리나라가 쓰는 에너지소비량은 세계 10위수준(2003년 기준)으로 세계에서 7번째로 석유를 많이 사용하는 나라이다. 반면 신재생에너지의 비중은 1.8%로 수력을 포함하는 경우에도 2.5%에 불과하다. 이마저도 폐기물에 의한 소각열이 대부분(68.6%, 수력 제외 시 94.7%)이며 태양광, 풍력 등 진정한 의미의 재생가능에너지 비중은 총 1차 에너지의 0.1% 정도로 미미하다. 또한 지구온난화 등을 방지하기 위한 청정에너지 비중도 선진국에 비해 아직 낮은 수준이며, 한국은 에너지 자원 중에서도 석유에너지 소비가 절반이상을 차지하여 청정에너지 비중이 25%(2000년 기준)로 영국의 45%에 비해 절반정도 수준이다.

한마디로 한국의 에너지 분야는 소비규모가 급증하고 있을 뿐 아니라 환경적 외부효과가 크고 재생가능하지 않으며 해외에서 주로 수입하는 화석연료와 원자력(우라늄)의 비중이 높다는 문제가 있다. 에너지사용으로 인해 환경의 오염과 파괴가 발생하며 에너지안보가 상당히 취약한 것이다. 또한 전력의 경우 대규모 중앙집중적인 화력 및 원자력발전으로 공급하고 있어 생산지와 소비지가 이원화

되면서 시설의 입지를 둘러싸고 사회갈등이 빈발하고 있다.

부존자원이 거의 없고 에너지 다소비형 산업구조를 가진 우리나라는 신재생에너지 개발과 환경친화적인 산업구조로의 전환이 시급한 상황이다. 신재생에너지 관련 기술 중에서도 태양에너지의 활용은 많은 연구대상이 되어 왔다. 태양에너지를 이용하는 것 중 무한한 에너지원인 태양열을 이용한 시스템을 건물의 냉·난방에 적용하기 위한 많은 연구와 개발이 진행 되어 왔다. 태양열 시스템은 온실가스 발생 저감을 위한 투자효과가 높으며 기술의 완성도가 높고 각국의 자체 생산이 가능하여 국민경제에 미치는 파급효과가 크다. 또한, 가정에너지의 30% 이상이 온수생산에 상용됨으로 1차에너지 대체효과가 크고 CDM인증 취득시 기존 시스템비용의 25%~50%를 확보할 수 있다.

현재 온수·급탕 및 건물의 냉·난방에 이용되고 있는 태양열 시스템은 에너지를 전달하고 저장하는 방식에 따라 자연형(passive system)과 설비형(active system)으로 나뉘어진다. 설비형 태양열 시스템은 기계적 장치들을 이용하여 시스템을 구동시키는 것으로, 태양열집열기, 축열조, 펌프, 제어장치 등으로 구성되어 있다. 이 시스템의 경우 기계계통을 작동시키기 위해서 별도의 전력 공급을 필요로 하지만 시스템 각 계통을 제어함으로써 시스템의 효율을 높이고 대규모 설비가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 자연형 태양열 시스템은 자연순환 즉, 열전도, 대류 및 복사현상에 의해 에너지 전달이 이루어짐으로 특별한 기계장치 없이 태양열에너지를 자연적인 방법으로 열을 저장하여 이용할 수 있도록 하는 장치이다. 이 시스템은 경제성이 높은 것은 물론이고 고장의 염려가 적어 오래 쓸 수 있으며 관리가 쉽다는 장점이 있으나, 열의 순환을 원하는 대로 조절하기가 어렵고, 원하는 만큼의 열만 공급받을 수 있도록 제어하기 어렵다는 단점이 있다.

현재 국내외적으로 상용화되고 널리 보급된 유리식 진공관형 태양열 집열기는 크게 몇 가지로 그 형태를 대별할 수 있는데 모두 기능적으로 상당한 문제점을 가지고 있을 뿐 아니라 태양열 에너지의 이용에도 설계상 태생적인 문제점을 지니고 있다고 할 수 있다. 우선, 이중 외피의 완전 유리식 태양열 집열 튜브를 적용한 시스템은 기계적인 충격에 취약해 집열 튜브에서 물을 직접 가열할 경우 집열 튜브의 파손시 집열튜브 내부의 물 뿐이 아니라 축열조의 물이 모두 누수 되

는 단점과 함께 태양열에 의해 가열된 집열 튜브내에 물이 갑자기 유입될 때 열응력에 의해 집열 튜브가 파손되는 열쇼크 현상이 발생할 수 있다. 이는 유리가 가지고 있는 재질적인 취약성에서 비롯되는 것으로서 제품의 운반시에도 일부 혹은 전부가 파손되는 사고가 발생되기도 한다. 또한 직접 물을 집열 튜브 내에서 가열할 경우 겨울철 집열 튜브의 동파는 차치하고 물의 열용량이 큰 관계로 집열 튜브의 크기를 증가시켜 집열 면적을 늘릴 수 없는 적용상의 문제점을 아울러 지니고 있다. 유리식 단일진공관의 경우도 유리가 가지고 있는 재질적 취약성 때문에 이와 유사한 문제점이 상존한다.

본 연구에서는 기존의 유리식 진공관형 태양열 집열기를 대체할 수 있는 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기의 설계 및 제작에 관한 기술을 제시하고, Prototype의 성능 분석을 위한 기초 단계로 비유리식(nonglass) 진공관내의 진공도를 모니터링 하고 이에 따른 흡열판의 온도변화를 분석 하고, 기존의 유리식 진공관과의 비교 실험을 통하여 그 성능분석을 통하여 다양한 진공관형 집열기의 도입 가능성을 검토한다.

## II. 이론적 배경

태양열 집열기는 태양복사 에너지를 열에너지로 변환하기 위한 장치로써 열에너지의 이용목적과 축열온도에 따라 여러 가지의 형태를 갖는다. 구조적으로 평판형, 진공관형, 집광형 등으로 분류할 수 있다. 이들 중에서 진공관형 집열기는 진공 유리관, 흡수판과 그 중심부에 설치된 열회수요체로 구성되어 있다. 그리고, 흡수판이 설치된 유리관 내부를 진공으로 유지함으로써 흡수판 주위의 공기층에 의한 대류 열손실을 방지하기 위한 집열기이다.

태양복사는 약  $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ (단파)대의 파장영역에 열에너지가 집중되어 있다. 복사에너지는  $3\times 10^8$  m/sec의 속도로 지구 대기층에 도달하며, 이러한 복사에너지 즉, 태양 에너지를 집열하는 태양열집열기의 집열효율을 높이기 위해 진공복사관식 태양열집열기는 집열 시스템의 대류에 의한 열손실을 진공 단열을 통하여 획기적으로 줄인 것이다. [곽희열, 2000.]

집열기의 열성능은 일사량, 외기온도, 집열기 입구온도, 집열기 출구온도의 몇 가지 조건들로 순간효율을 계산함으로써 부분적으로 결정된다. 순간효율은 실험적으로 집열기에 입사하는 일사량과 열매체가 집열기를 통과할 때 열매체가 얻는 에너지율을 측정하는 것이 필요하다.[에너지 전문가 기술 교육 프로그램, 2001.]

### 1. 열효율 이론

#### 1.1 집열성능

기본적인 개념을 살펴보면, 안정된 상태 하에서 어떤 주어진 시간 동안에 태양열집열기가 취득한 에너지는 흡수판에서 흡수한 에너지와 주위로 손실된 에너지와의 차이이다. 여기에, 태양열 시스템에 일사량의 변화를 무시할 수 없다. 이와 같은 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_w = A_c [I_t \tau \alpha - U_L (\bar{t}_p - t_a)] \quad \dots \dots (1)$$

여기서

$Q_w$  : 집열 에너지(kcal/hr)

$A_c$  : 집열 면적(  $m^2$  )

$I_t$  : 집열면 일사량( kcal/hr ·  $m^2$  )

$\tau$  : 유리관 투과율

$a$  : 흡열판 흡수율

$U_L$  : 열손실계수 ( kcal/hr ·  $m^2\text{°C}$  )

$\bar{t}_p$  : 흡수판 표면의 평균 온도 (  $\text{°C}$  )

$t_a$  : 외기 온도 (  $\text{°C}$  )

앞서 언급한 바와 같이 집열판의 성능을 크게 하려면 일사량과의 관계가 아주 중요하다. 위의 식 (1)에서 일사량과 관계된  $I\tau a$  값을 최대한으로 크게 하고, 일사량과 함께 흡수한 열에너지를 빼앗기지 않도록 열손실계수와 관계된  $U_L(\bar{t}_p - t_a)$  값을 최소로 줄일 수 있도록 설계하고, 가동조건도 적절히 선택해야 한다.[John A. Duffie and William A. Beckman, 1980.]

### 1) 열손실계수, $U_{LT}$

열손실계수는 진공 압력과 흡수판의 방사율에 영향을 받는다.

$$U_{LT} = \frac{c_f M(t_i - t_f)}{A_A(t_m - t_a)\Delta\tau} \dots \dots (2)$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$$

$$t_m = \frac{t_{a1} + t_{a2} + t_{a3}}{3}$$

$t_i$  : initial temperature

$t_f$  : final temperature

$U_{LT}$  : Heat loss coefficient, [w/m<sup>2</sup>°C]

$t_m$  : average water temperature in the tubes, [°C]

$t_a$  : average ambient temperature, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta\tau$  : total measuring period of time, [s]

M : mass of water filled up in the tube, [kg]

$c_f$  : specific heat capacity of water, [J/kg  $\cdot$  K]

$A_A$  : outside area of absorber, [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta t$  : testing time interval

$t_1, t_2, t_3$  : 각 위치에서 시작 온도와 시작 후 30분, 60분 후의 온도를 평균한 값이다.

### ① 흡수관의 방사 열손실 $Q_e(W)$

보통 선택성 흡수 도료층의 hemispherical emittance  $\varepsilon_h$ 에 의해 결정된다.

$$Q_e = \frac{\varepsilon_h \cdot \sigma \cdot A_A}{1 + \frac{d_1 \varepsilon_h}{d_2 \varepsilon_e} (1 - \varepsilon_e)} (T_m^4 - T_a^4) \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{d_1 \varepsilon_h}{d_2 \varepsilon_e} (1 - \varepsilon_e) \ll 1$$

$$Q_e = \varepsilon_h \cdot \sigma \cdot A_A (T_m^4 - T_a^4)$$

$\varepsilon_h$  : hemispherical emittance

방사율은 물체의 온도, 방사된 복사선의 파장, 및 방향에 따라 달라진다. 따라서 특정한 파장에서의 방사율을 spectral emissivity  $\varepsilon_\lambda$ 라 하고, 특정 방향에서의 방사율을 directional emissivity  $\varepsilon_\theta$ , 표면에서의 수직과 복사선의 각, 표면의 모든 방향에 대해 평균한 방사율을 hemispherical emissivity라 하며, 모든 파장에 대해 평균한 방사율을 total emissivity라 한다. 그리고, 모든 파장 방향에 대해 평균한 방사율을 total hemispherical emissivity라 한다.



## 2) 태양열의 흡수량

집열기의 성능을 좌우하는 태양열 흡수량은 집열기의 설치 경사각, 흡열판 표면의 광선흡수율, 유리의 광선투과율 등의 요소에 의해 결정된다.

① 경사진 집열판에 입사되는 입사광선의 양 : 경사각에 따라 입사광선의 양은 달라지며 가장 집열량이 높은 방위는 정남향이 아니라 동으로 약간 치우친 각도이다. 최대 집열량의 95%이상 집열이 가능한 방위각 범위는 동으로 50°치우친 각도에서 서로 10°치우친 각까지 50°나 된다. [에너지 전문가 기술 교육 프로그램, 2001.]

② 흡열판 표면의 광선흡수율( $\alpha$ ) : 집열기 전체의 효율은 이 흡수율에 의해서 많이 좌우된다. 알루미늄의 기본 층에 질소와 알루미늄 혼합물질을 침적시킨 것으로 이 혼합물질을 표면에 코팅하였을 경우 태양의 보편적인 파장에서 높은 흡수율을 가진다. 열처리된 표면의 흡수율은 0.92까지 올라가고 방사율은 0.06~0.08(80°C)까지 감소한다. [Yin Zhiqiang, 1997.]

③ 유리의 광선투과율( $\tau$ ) : 유리의 광선투과율은 유리의 질과 입사광선이 유리 표면에 도달할 때에 표면과 이루는 각도에 의해 달라진다. 보통 유리 한 장이 반사시키는 양은 직사광선의 약 8% 정도이다. 유리 속의 불순물 특히 철분은 광선을 흡수하므로 철분이 적은 유리를 사용하면 광선을 거의 다 투과시킬 수 있다. 현재 시판되는 유리의 투과율은 양호한 것이 약 80% 내외이다.

## 3) 흡수된 태양열의 열손실

집열기의 성능에 영향을 미치는 또 하나의 요소인 집열기의 열손실은 유리관 성능, 흡열판의 평균온도 등에 의해 결정된다.

① 유리관 성능 : 진공복사관식 태양열집열기의 경우 대류와 복사에 의한 열손실을 줄이기 위해 하나 또는 두 겹의 유리로 열매체가 흐르는 관이나 흡열판을 둘러싸고 있다. 즉, 흡열판과 유리 사이를 진공 처리함으로써 대류에 의한 열

전달을 막아 전체 열손실계수( $U_L$ )를 작게하는 것이다. 특히, 우리는 흡열판으로부터 방사되는 장파장의 열복사를 막을 수가 있다.

② 흡열판의 평균온도 : 식 (1)에서 알 수 있듯이 흡열판의 온도와 외기온도와의 차이가 적을수록 열손실도 적어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 주위 공기의 온도는 임의로 조절할 수 없으므로 흡열판의 평균온도를 조절해야 한다. 이 흡열판의 온도는 집열기의 설계 및 그 작동 방법에 관계된다. 가장 중요한 요소는 집열기를 흐르는 전열매체의 유속, 유체의 종류, 집열기로 들어올 대의 전열매체의 온도, 흡열판의 열전도도 등이다. 이러한 요소들을 조절함으로써 흡열판의 평균온도를 조절하여 열손실을 줄일 수 있다. [천원기, 2001.]

## 1.2 집열효율

모든 측정값들은 준 정상 상태에서 측정되며, 태양열집열기에 입사되는 일사량에 대한 집열기의 유리관내 파이프(manifold)에 흐르는 열매체에 가해지는 에너지의 비를 실험적으로 측정하는 것이 필요하다. 태양열 가용 집열량(useful energy gain)  $Q_w$ 를 구하려면 집열기의 설계조건은 물론 일사량, 흡열판의 평균온도 및 외기온도 등을 알아야 한다. 이 중에서 흡열판의 평균온도를 제외한 다른 요소들은 쉽게 구할 수 있으나, 흡열판의 평균온도는 전열매체의 공급온도 및 단위 시간당 흐르는 유량에 의해 변화되기 때문에, 편의상 흡열판 평균온도 대신 쉽게 알 수 있는 집열기 입구온도로 바꾸고, 집열효율수정계수  $F_R$ 을 사용하여 식 (1)을 식 (9)로 표현할 수 있다. 태양열 시스템에서 열매체의 온도는 쉽게 측정될 수 있으며, 액체식 집열기의 흡열판 온도는 집열기 입구의 열매체 온도보다 5°C내지 10°C가 높고, 공기 식의 경우는 20°C내지 30°C 높다.

$$Q_w = F_R A_c [I_t \tau_a - U_L(t_i - t_a)] \quad \dots \dots \dots (4)$$

$t_i$  : 집열기 입구의 열매체 온도 (°C)

$F_R$  : 집열 효율 수정 계수

식 (9)를 태양열 집열효율식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_w}{I_t A_a} = F_R \tau a - F_R U_L \frac{(t_i - t_a)}{I_t} \dots \dots (5)$$

여기서,  $\eta$ 는 실제로 유용한 태양 집열량을 집열면에 조사되는 총열량으로 나눈 값으로 집열기의 효율을 말한다.

전열매체의 유속을 일정하게 유지하면서 작동하는 태양열집열기에서  $A_c F_R \tau a$  및  $U_L$  등은 거의 항상 일정하므로, 상수로 가정한다면 집열효율  $\eta$ 는  $(t_i - t_a)/I_t$ 의 조건에 따라 변하는 일차식으로 나타낼 수 있으며, 기울기가  $-F_R U_L$ 이고 수직축인 효율축의  $F_R(\tau a)$ 를 지나는 직선 그래프로 나타난다. 그림 1은 집열성능 그래프이다[John A. Duffie and William A. Beckman, 1980]

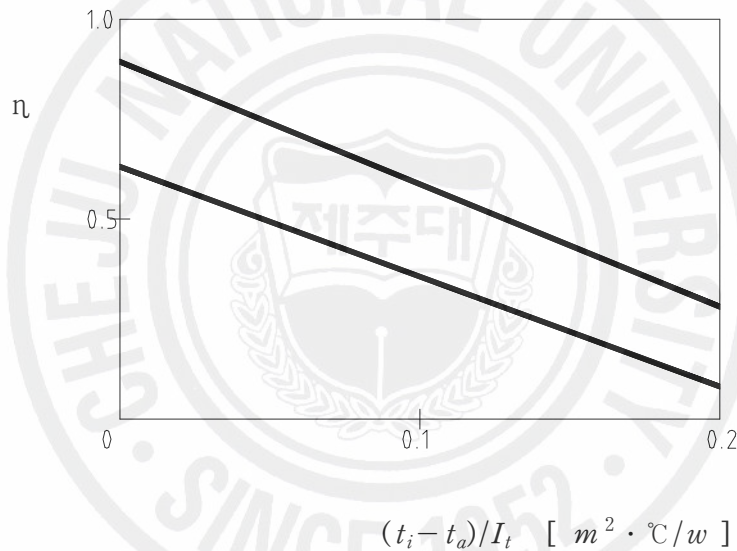


Fig. 1. Collector efficiency

태양열집열기의 성능은 일반적으로 실험에 의하여 구하며, 태양열집열기를 통과하는 열전달 매체의 유량과, 집열기 입·출구의 온도차를 측정하면 된다.[천원기, 2001]

$$Q_w = A G C_p (t_o - t_i) \dots \dots (6)$$

A : 집열면적

G : 집열매체의 유량

$C_p$  : 열매체의 비열

$t_i$  : 집열기 입구의 온도

$t_o$  : 집열기 출구의 온도

식 (6)의 집열기 효율은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= Q_w / AI_t \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7) \\ &= GC_p(t_o - t_i) / I_t \\ &= F_R \tau a - F_R U_L(t_o - t_i) / I_t \\ &= F_R \tau a - F_R U_L(t_i - t_a) / I_t \end{aligned}$$

그림 1에서  $(t_i - t_a) / I_t$  의 조건에 의한 집열효율 그래프의 기울기와, 효율축 값에 영향을 미치는 집열기의 주요 요소는, 유리막의 수효와 흡열관의 특성 등이다. 어떤 경우에는 태양열집열기의 성능 시험 결과로서 집열효율 그래프가 집열기 내의 열매체 평균온도나, 집열기 출구의 열매체 온도에서 외기온도를 뺀 값을 집열면 일사량으로 나눈 값으로서 표시하기도 한다. 즉,  $(\frac{t_i - t_a}{2} - t_a) / I_t$  또는  $(t_i - t_a) / I_t$  의 조건에 의한 집열효율 성향과 매우 비슷하게 나타난다. 그러나 이 그래프의 기울기나 효율축 값은 다르게 나타난다.[천원기, 2001]

## 2. 유리식 태양열 집열기의 종류

### 2.1 단일 진공관형 (Single Solar Evacuated Collector)

중국 SUNDA社의 이중관 삽입형(SEIDO 2)과 히이트 파이프 삽입형인(SEIDO 5) A Single Solar Vacuum Collector에 대한 구조, 집열 방법 및 집열기와 축열조의 연결 방법은 다음과 같다.

1) 이중관 삽입형(SEIDO 2)

이중관 삽입형 진공복사관식 태양열집열기(single solar vacuum collector)인 SEIDO 2는 그림 2에서 보는 바와 같이 진공으로 처리된 유리 튜브 속에 diameter가 서로 다른 두 개의 관을 삽입한 구조로 되어있다. 이 이중관 삽입형은 내부의 관을 통하여 열 매체가 입수하여 외부 파이프를 통하여 데워진 열 매체가 축열조로 이동하게 된다. 이 집열기는 그림에서 보는 바와 같이 주 파이프(헤더) 또한 이중관으로 되어 있다.

그림 3은 이중관 삽입형 진공복사관식 태양열집열기의 이중관과 축열조와 연결되는 주 파이프와의 연결 형태를 나타내는 그림이다.

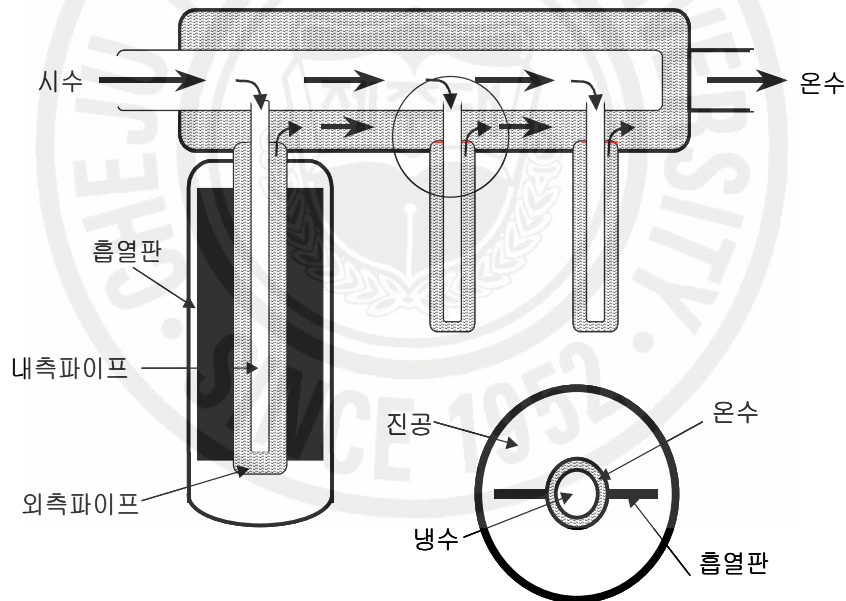


Fig. 2. Schematic of a single vacuum collector with dual pipe flow passage(SEIDO 2).

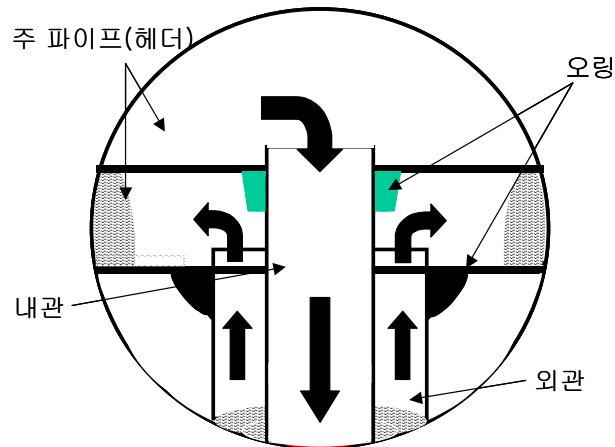


Fig. 3. Connection of the storage tank and dual pipe flow passage (SEIDO 2).

## 2) Heat pipe 삽입형(SEIDO 5)

Heat pipe 삽입 형태인 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 5)는 진공으로 밀봉된 유리튜브 내에 태양열 흡열관이 부착된 Heat pipe가 삽입되어 있는 형태로 진공 튜브의 뛰어난 단열 기능과 Heat pipe의 신속한 열 응답성을 이용하여 태양열의 집열을 극대화 할 수 있도록 되어있다. Heat pipe 삽입형 진공복사관식 태양열 집열기는 높은 열전도도를 갖는 열전도체로서 직접 태양열을 흡수하여 열매체를 데우는 것이 아니라 태양열을 받은 Heat pipe 내에 있는 열매체의 대류에 의한 열전달에 의해 Heat pipe 상부로 열전달이 이루어지고 Heat pipe상부가 축열조와 열결되는 주 파이프와 결합하여, 주 파이프에 있는 열매체에 열을 전달하는 것이다. 이것은 일종의 간접 열전달 방식을 취한다고 할 수 있다.

그림 4와 그림 5는 Heat pipe 삽입형 진공복사관식 태양열집열기의 모양과 주 파이프인 헤더와의 연결 형태를 나타내고 있다.

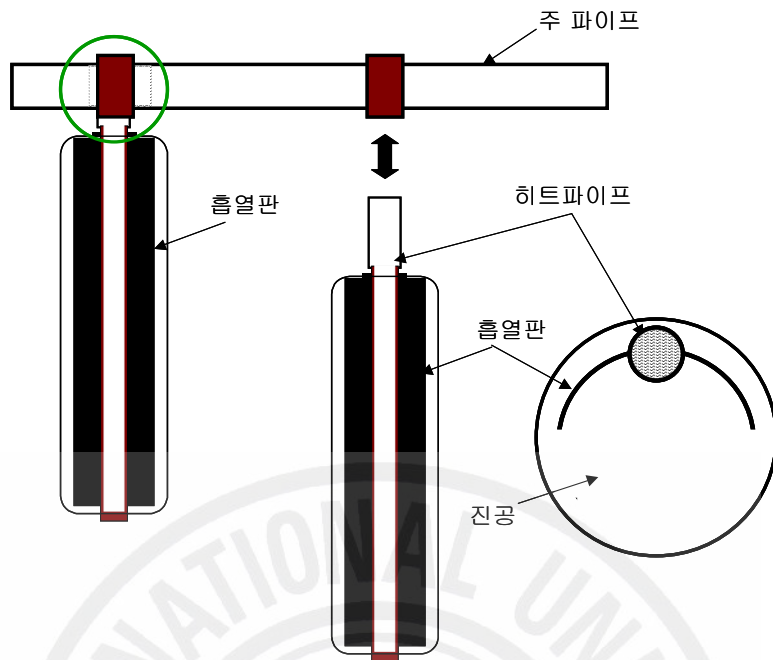


Fig. 4. Schematic of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5).

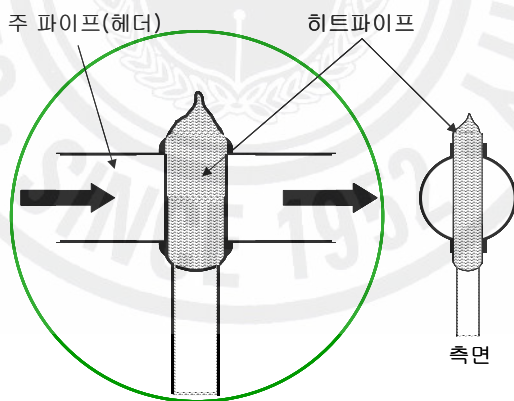


Fig. 5. Connection of header and heat pipe (SEIDO 5).

## 2.2 이중 진공관형 (All-Glass Solar Evacuated Collector)

U자관형인 청화대학에서 제작한 All-Glass Solar Vacuum Collector의 특징은 집열기 전체를 유리로 제작하는 것이다. 이는 A Single Solar Vacuum Collector의 기술적인 어려움 즉, 유리관과 금속과의 접합 문제를 극복하기 위한 것으로 그림 6은 바로 이와 같은 개념으로 설계·제작된 All-Glass Solar Vacuum Collector Tube의 구조를 나타낸 것이다.

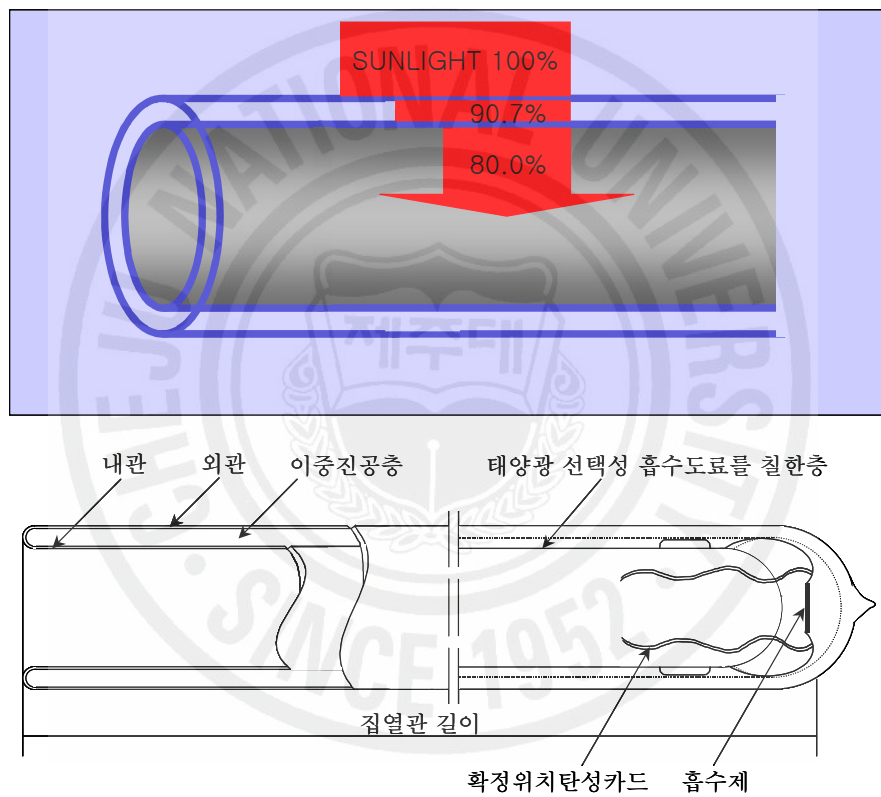


Fig. 6. All-glass solar vacuum collector tube

All-Glass Solar Vacuum Collector의 집열관은 길게 뽑은 보온병처럼 내유리관과 동주축의 외유리관으로 조성되었고, 내·외유리관의 입구는 합쳐 용융되어 있다. 내·외관 사이는 고압 진공 상태에서 받침대 있는 흡기제를 봉입하여 한면으로 흡기제를 사용하여 증기 발산 후 진공 집열관의 보존 혹은 사용 과정 중



발산한 미소량의 기체를 흡수한다. 내관의 바깥쪽 표면은 태양광 선택성 흡수성 도표층(solar spectrum selective absorbing surface)을 칠하여 태양광에 대해 높은 흡수율을 보이고, 적외 파장 범위가 낮은 반사율을 확보하게 하였다. 흡수면의 코팅 과정에서 코팅면을 내·외곽 유리관의 진공 상태로 약 400℃에서 한 시간 가량 열처리를 하면 열처리된 표면의 흡수율이 0.92까지 상승하고, 방사율은 0.06~0.08(80℃)까지 감소한다.[Yin Zhiqiang, 1999.]

현재 All-Glass Solar Vacuum Collector는 중·고온 이용을 위한 태양열 집열 기술 분야에서 많이 이용되고 있으며, 독일 파라디그마사의 CPC(Compound Parabolic Concentrator)형 태양열 집열 시스템, 중국 청화대학의 All-Glass Tube 방식의 태양열 집열기 등 여러 제품들이 출시되고 있다.



### Ⅲ. 실험 장치 및 실험 방법

#### 1. 실험 장치

##### 1.1 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기

비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기 설계 및 제작에 관한 기술의 개발은 기계, 화공, 물리, 재료 등 여러 분야의 원천 기술을 복합적으로 응용하여 새로운 형태의 시스템 요소 기술을 창출하는 것이라 할 수 있다. 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기는 크게 Polymer tube, Heat pipe, 흡열판 및 Vacuum connector 로 구성이 되어 있다. 하지만, 유리와 달리 진공관 내로 공기의 침투가 발생하므로 이를 억제하거나 진공도 유지를 위한 메카니즘이 고려되어야 한다. 이를 위해서는 그림 7과 같이 진공관 내부의 일정한 진공도 유지를 위해 집열기와 별도로 설치된 Vacuum Chamber를 진공관 튜브(vacuum connector)로 연결하여 진공관 내의 Outgasing이 가능하도록 할 수도 있으며, 그림 8과 같이 진공관 외피에 공기의 침투를 억제하기 위한 Gas Barrier Coating 을 고려할 수도 있다.

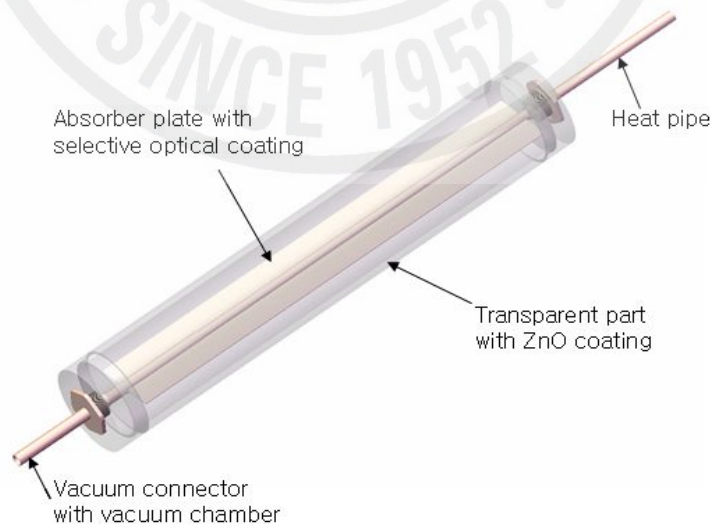


Fig. 7. Concept of nonglass solar vacuum collector.

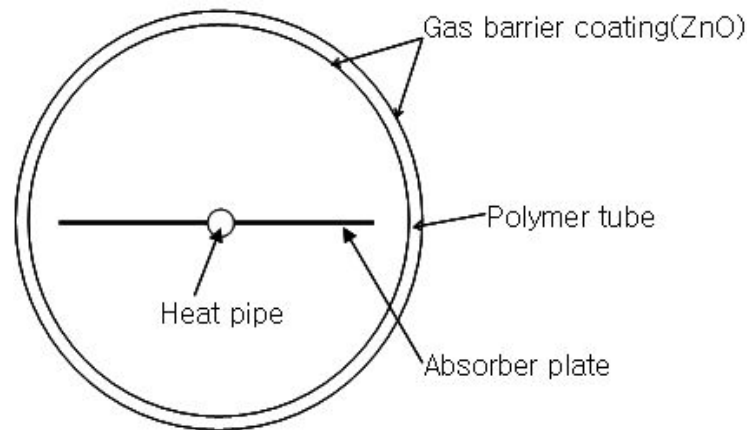


Fig. 8. Cross section view of nonglass vacuum solar collector.

#### 1) 비유리식 진공관(Polymer tube)

본 연구에서는 1차적인 실험으로 Polymer tube의 재질로 구입이 용이하고 다른 재료에 비해 비교적 저렴한 아크릴 수지를 사용하였다. 사용된 아크릴 수지의 물성치는 표 1과 같다.

아크릴수지는 현존하는 플라스틱 중에서 가장 무색성이며 투명성이 높으며 비중이 1.19로 무기 유리의 약 1/2이고 강인성은 무기강화 유리에 필적 한다. 특히 뜨거운 것에서는 무기강화유리보다 격단과 충격에 대해 강하다. 아크릴수지의 최대 특징은 옥외의 자연환경에 대하여 대단히 저항성이 높다는 것이다. 내후성이 뛰어난 플라스틱의 경우도 없지는 않지만 옥외에서 사용하여 일광이나 비바람에 방치됐을 경우 사용당초의 상태와는 아주 달라지는 것들이 대부분이다. 반면, 아크릴 수지의 경우는 오랜 세월 옥외에 방치 되어도 그 외관상의 변화는 물론 물리적, 기계적 성질도 거의 변화하지 않고 장기간 옥외에서 견뎌 낸다.

Table 1. The overview of materials for Acrylic ; a) Physical properties, b) Mechanical properties, c) Thermal properties, d) optical properties [출처: MatWeb; <http://www.matweb.com>].

<b>Physical Properties</b>	<b>Metric</b>
Density	1.18 - 1.19 g/cc
Water Absorption	0.130 - 0.480 %
Water Absorption at Saturation	1.10 - 2.10 %
Moisture Expansion	0.500 %
Moisture Vapor Transmission	55.0 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm
<b>Mechanical Properties</b>	
	Metric
Hardness, Rockwell M	94.0 - 102
Ball Indentation Hardness	175 MPa
Tensile Strength, Ultimate	40.0 - 40.0 MPa @Temperature 70.0 - 70.0 °C 62.0 - 110 MPa
Elongation at Break	4.00 - 5.50 %
Modulus of Elasticity	2.80 - 3.30 GPa
Flexural Modulus	2.96 - 3.30 GPa
Coefficient of Friction	0.450 - 0.800
<b>Thermal Properties</b>	
	Metric
CTE, linear 20°C	61.0 - 104 μm/m-°C
Specific Heat Capacity	1.47 J/g-°C
Thermal Conductivity	0.190 W/m-K
Maximum Service Temperature, Air	80.0 - 200 °C
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	113 - 115 °C
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	99.0 - 112 °C
Vicat Softening Point	105 - 118 °C
Flash Point	425 °C
<b>Optical Properties</b>	
	Metric
Refractive Index	1.49 - 1.49
Haze	0.500 - 2.20 %
Transmission, Visible	89.0 - 92.0 %
UV Transmittance	0.000 - 1.00 %
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.0400

아래 그림 9는 본 연구에서 사용된 아크릴 수지의 투과율을 보여주고 있으며 이 데이터는 근적외선분광광도계(UV/VIS/NIR Spectrophotometer)UV-3150을 이용하여 측정 하였다. 측정 범위는 300nm ~1200nm 이다.

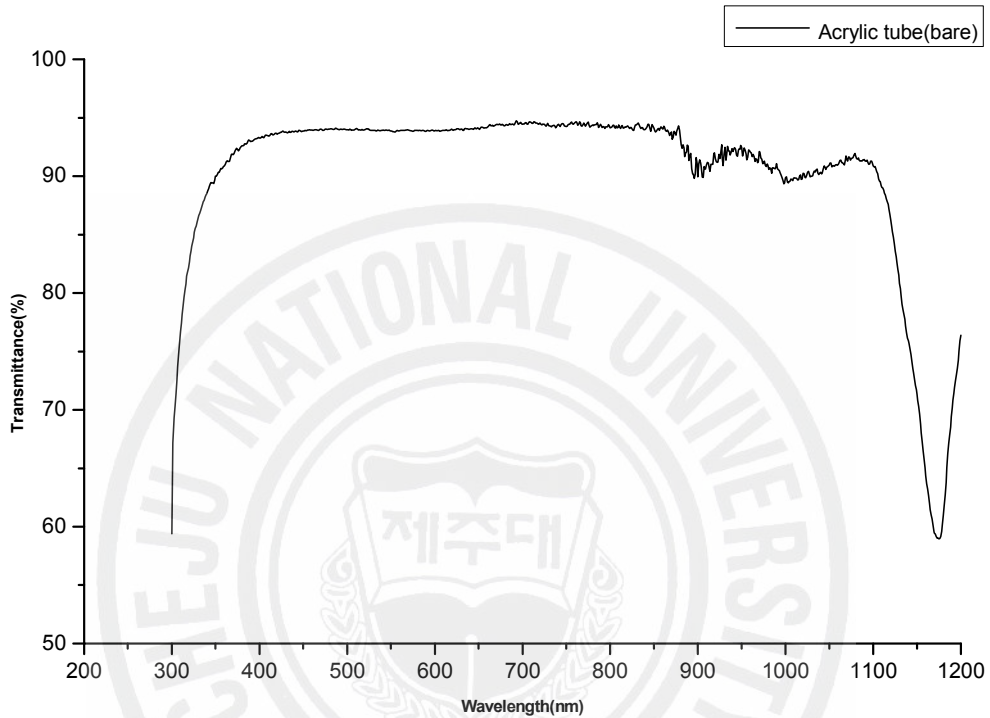


Fig. 9. Transmittance of acrylic material along with wavelength.

아크릴의 투과율은 3회 측정결과 가시광선 영역인 400~800nm에서 평균 91%으로 단일진공관형 집열기(SEIDO 5)의 투과율 91% 와 동일하게 측정이 되었다.

Heat pipe 및 Vacuum connector의 연결을 위하여 관 양쪽으로 중심에 Hole을 갖고 있는 캡이 연결된다. 또한, 진공누설을 방지하기 위하여 Polymer tube와 캡, 캡과 Heat pipe 및 Vacuum connector는 오링을 이용하여 연결 되어 진다.

## 2) Heat pipe 및 흡열판

태양열 집열기의 성능은 태양열의 흡수량과 집열기에서의 열 손실들 등 크게 이 두 가지 요소에 의해 좌우된다. 흡열판 표면의 광선 흡수율은 집열기 전체의 효율을 결정하는 요소로 흡열판 제작이 얼마나 중요한가를 알 수 있다. 특히, 집열기의 전체 효율은 흡열판에서 집열된 태양열이 축열조로 얼마나 많이 전달되는지에 따라 결정되는데 이는 Heat pipe의 성능에 의해 좌우된다.

Heat pipe의 제작은 그림 10과 같은 과정으로 제작되며, 특히 주위 해야 할 사항은 각 구성요소에 대한 청정도유지이다. 이들 구성요소의 기계적 가공과 준비과정중 이물질인 기름, 먼지, 금속입자들이 포함될 수 있다. 기름등의 유기물은 작동유체와 금속표면과의 부착력을 약하게 하여 모세관효과를 저해하며 금속입자와 먼지 등은 증발부 하단의 벽에 존재하여 응축된 액체의 유동저항을 크게 한다. 또한 이러한 이물질은 작동유체와 화학적 반응으로 인한 비응축 가스의 발생요인이 된다.



Fig. 10. Heat pipe manufacturing process.

따라서 Heat pipe의 각 구성요소에 대한 기계적 가공 및 조립 후 이들에 대한 철저한 세척과정과 작동유체를 Heat pipe내에 주입하기 전에 작동유체내에 용입된 가스의 탈기과정이 요구된다.

현재 상용화 되고 있는 Heat pipe의 작동유체는 물 및 에탄올 사용할 수 있다. 그림 11은 다양한 작동유체의 Merit number를 보여준다. 물은 가장 우수한 merit number를 가지고 있다. 하지만 동절기 결빙 지역에서는 사용이 제한되고 있다. 또한 에탄올은  $-30^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$ 에서 적용할 수 있으나 Heat pipe가 과열이 될 경우 구리와 화학적 반응에 의해 Heat pipe내에 불응축 가스가 발생하여 Heat pipe의 기능을 상실하게 된다.

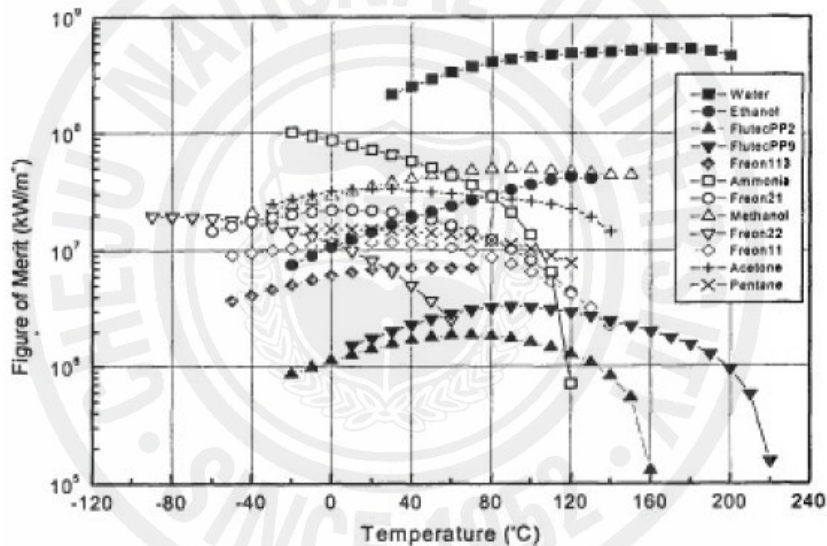


Fig. 11. Merit numbers of various working fluids.

본 연구에서는 Heat pipe 작동유체로 에탄올을 사용하였고, 주입용량은 체적의 30%를 주입하였다. 또한, Heat pipe는 열전도가 우수한 구리 관으로 제작되었고, 길이 550mm, 외경 8mm 이다.

흡열판은 두께 0.5mm, 너비 55mm × 380mm 의 구리판으로 제작이 되었으며 선택적 흡수 도료(Selective optical coating)로 코팅이 된다. 사용된 재료는 The Dampney Company의 ThurmaloX solar collector coating 이다.

선택적 흡수 도료는 태양 파장(가시광선, 자외선 및 적외선 파장)을 최대한의 열함량(heat content)로 선택적으로 흡수한다. 그리하여, 일반적인 검정색 페인트보다 많은 열에너지를 집열할 수 있다.

Vacuum connector는 앞서 언급하였듯이 진공관내의 Outgasing이 가능하도록 외경 9.5mm의 구리관으로 제작이 되었고, Header-type vacuum chamber 와 연결되어 진공관내의 진공유지를 위해 사용되어진다. 그림 12과 13은 비유리식 진공관형 집열기의 주요 구성부품과 설계도를 보여주고 있다.

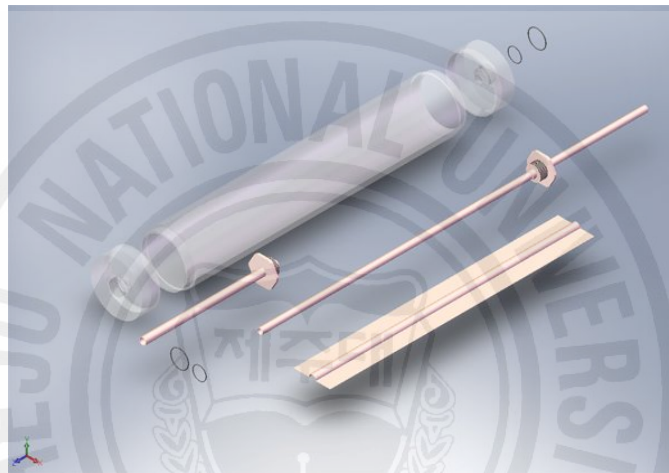


Fig. 12. Major components of nonglass vacuum solar collector.

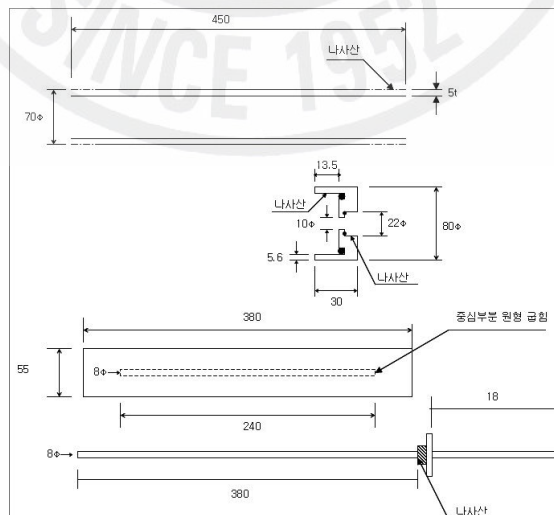


Fig. 13. Manufacturing drawing of nonglass vacuum solar collector.



## 1.2 진공 제작 시스템 및 데이터 수집 장치

### 1) 진공 제작 시스템

Heat pipe 및 비유리식(nonglass) 진공관의 진공 제작을 위한 시스템은 그림 14와 같이 구성을 하였고, 표 3은 주요부품의 규격을 보여주고 있다. 이 장치는 Heat pipe 및 진공관 내부의 원하는 진공도를 위하여 Rotary pump, Dry pump 및 Diffusion pump 로 구성되어 있고 공기의 차단을 위하여 8개의 밸브를 가지고 있다. 시스템 내의 진공도 측정을 위하여 Cold cathode 게이지 및 Geissler 게이지가 내장되어 있다. 또한 Heat pipe에 작동유체를 주입하기 위하여 상부에 주입용기가 연결되어 있다.

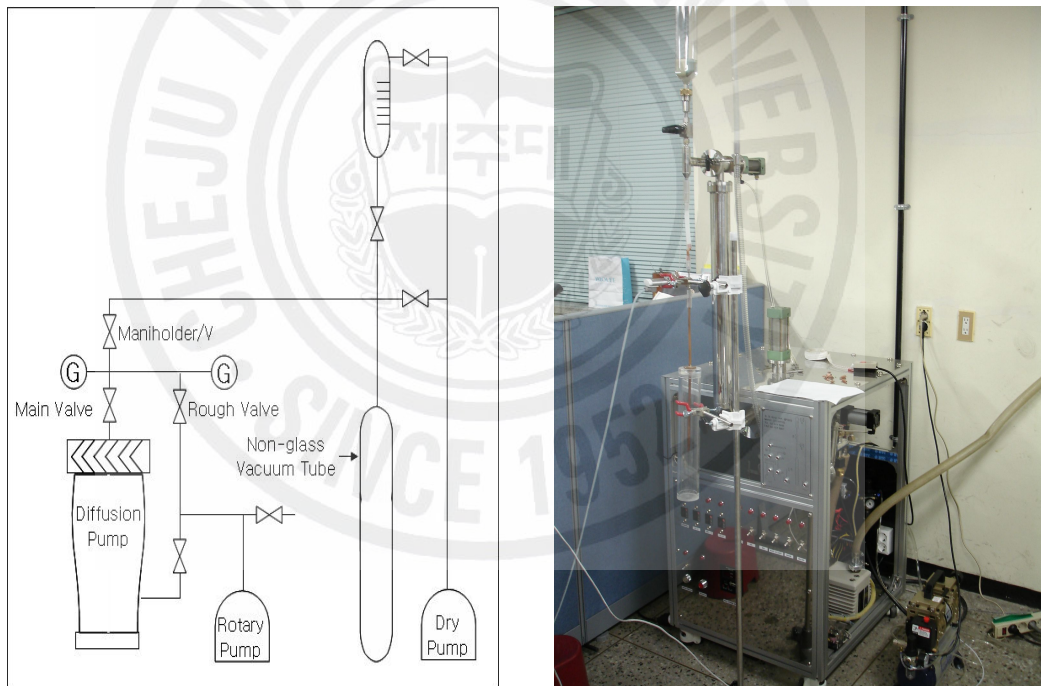


Fig. 14. Apparatus for making vacuum inside a nonglass tube and a heat pipe.

Table 2. Specification of the system for making vacuum.

구 분	항 목	사 양
Rotary Pump	Model	TRP-12
	Pumping Speed	200 ℓ /min
	Ultimate Pressure	$5 \times 10^{-4}$ Torr
	Motor	0.4kW
	Oil Filling	1.1 liter
Dry Bane Pump	Model	YFPV-200S-1
	Volt	200/200
	Hz	50/60
	Phase	1
	Ploes	4
	Output	0.15/2.0kW
	AMPS	1.4/1.6
Compressor	Model	NCP 031-T5
	RPM	1760
	Volt	220
	Hz	60
	AMPS	Max 1.8A
	Working Temp.	40℃
	Thermally Protected Max Pressure	7bar

## 2)헤더형 진공 챔버(Header-Type vacuum chamber)

아크릴 수지로 제작된 진공관 내부의 진공도는 대기로부터의 공기 유입과 진공도 상승에 의한 재질 내부에서의 가스 입자의 방출로 인하여 시간이 경과됨에 따라 진공도는 평형상태 까지 떨어진다. 여기서, 평형상태는 진공에 의하여 재질에서 입자들이 발생하지 않는 수준의 진공도를 의미한다. 앞서 언급한바와 같이

진공관 내부의 입자들을 진공 챔버를 사용하여 지속적으로 Outgasing을 해주어야 한다.

본 연구에서 사용된 진공 챔버는 헤더형 진공 챔버(Header-Type vacuum chamber)로 로터리 펌프와 연결되어 챔버 내부의 진공을 유지 시킨다.

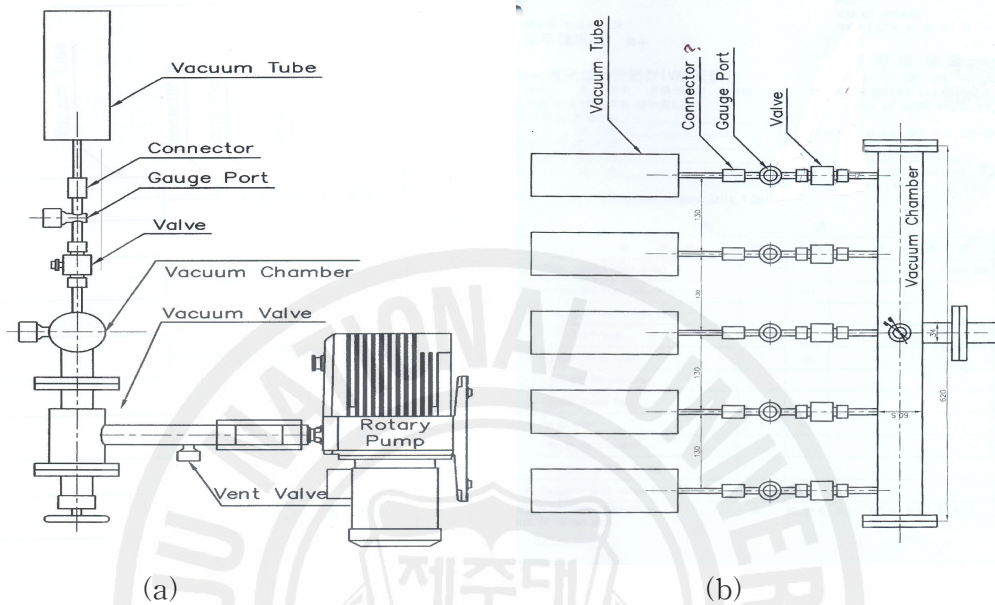


Fig. 15. Header-type vacuum chamber ; (a) The general drawing of header-type vacuum chamber , (b) The detail drawing of header-type vacuum chamber connected to nonglass vacuum tube.

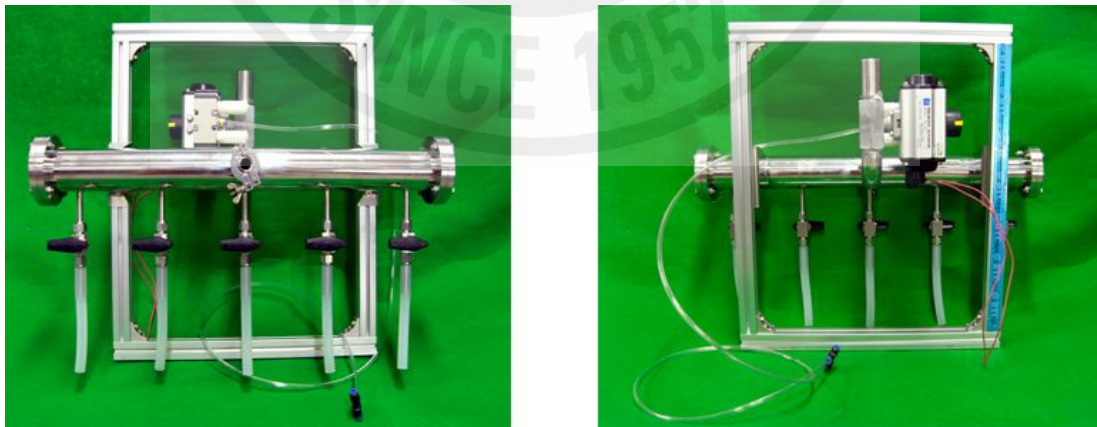


Fig. 16. Photograph of the Header-type vacuum chamber ;  
(a) Front view (b) Back view.

그림 15는 헤더형 진공 챔버의 설계도를 보여 주고 있으며, (a)는 전체 시스템 구성을 나타내고 (b)는 ventilation line과 진공관의 연결되는 개념을 보여주고 있다. 그림에서 Vent Valve는 솔레노이드 밸브를 의미하며 이 밸브에 의해 진공 챔버와 로터리 펌프사이에 On-off 동작이 작동되어진다. 그림 16은 헤더형 진공 챔버의 제작된 모습을 나타내는 사진이다.

### 3)진공게이지 및 컨트롤러

솔레노이드 밸브는 추가적인 컨트롤러 장치와 RS-232 케이블로 연결되어 미리 설정한 Set-point 에 의하여 자동으로 작동되며, 이는 진공 챔버 내의 진공도를 원하는 수준으로 지속적으로 유지시킬 수 있도록 제어 된다.

컨트롤러 장치는 ALCATEL 사의 ACM 1000-Multi channel Controller로 6개의 Sensor connection을 가지고 있고, 측정범위는  $10^{-11}$ mbar~55 bar 이다. 또한, 진공챔버와 비유리식(nonglass) 진공관 내부의 압력측정을 위하여 ALCATEL 사의 APT 1004 게이지를 사용하였다. 이 모델은 Pirani gauge로써, 저압과 진공영역을 측정하는데 있어 널리 쓰이는 압력게이지 이다. 그림 17은 ACM 1000-Multi channel Controller와 APT1004 게이지의 모습이다.



Fig. 17. ACM1000-multi channel Controller and APT1004 pirani gauge.

Pirani gauge의 원리는 기체의 열전도율이 저압하에서는 거의 진공도(잔류기체의 압력)에 비례한다는 것을 이용하며 구조적으로는 필라멘트를 가진 관구의 한쪽 끝을 진공장치에 연결을 할 수 있도록 되어 있다. 이 필라멘트에 전류를 흘려서 전기 저항을 측정함으로써 온도를 통해 필라멘트에서 상실된 열을 알고, 그 측정값을 통해 간접적으로 진공장치 안의 진공도를 측정한다.

#### 4)데이터수집장치

본 연구에서 헤더형 진공챔버 및 비유리식(nonglass) 진공관내의 진공도와 집열기의 온도 데이터는 매우 중요한 요소이다. 따라서 진공도와 온도 변화 모니터링은 필수적이며 실시간으로 데이터를 수집하고 저장 할 수 있어야 한다.

데이터 모니터링과 수집을 위하여 사용된 데이터 수집 장치들은 AGILENT사의 34970A 계측기와 National Instrument사의 Data Aquisition Board 이고, LabVIEW를 이용하여 어플리케이션을 작성하여 실시간으로 진공도와 온도 변화를 모니터링 하며 데이터를 수집하였다.

#### 1.3 플라즈마트론을 이용한 ZnO Coating

앞서 언급한바와 같이 유리와 달리 진공관 내로 공기의 침투가 발생하므로 이를 억제하거나 진공도 유지를 위한 메카니즘이 고려되어야 한다. 이를 위해서는 그림 8과 같이 진공관 외피에 공기의 침투를 억제하기 위한 Gas Barrier Coating을 고려할 수도 있다.

본 연구에서는 플라즈마트론을 이용하여 ZnO film을 아크릴관 내부에 증착을 하였다. 플라즈마트론이란 플라즈마 발생장치를 의미하며 플라즈마 발생을 위해서는 여러 가지 방전 방식이 사용된다. 본 실험에서 사용된 플라즈마트론은 직류 방전방식을 사용한 것으로 아르곤 가스의 아크방전을 사용하였다. 아크방전을 이용한 플라즈마트론은 특수한 진공장치가 필요 없이도 대기압에서 작동이 가능하여 산업적 응용이 널리 이루어져 있다.

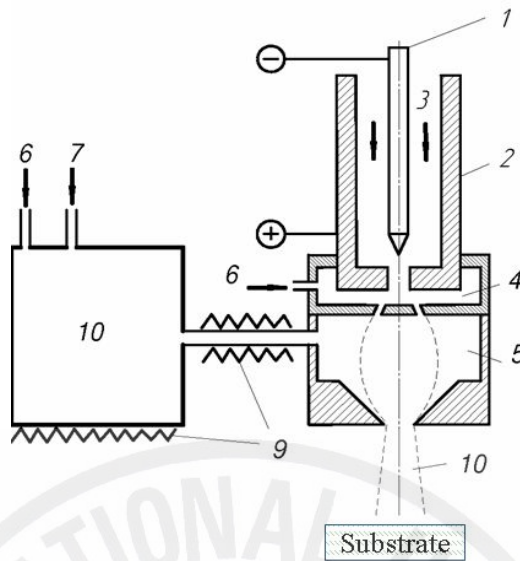


Fig. 18. Schematic diagram of the axial plasmatron.

- 1 - cathode
- 2 - anode
- 3 - argon supply
- 4 - activation chamber
- 5 - reaction chamber
- 6 - oxygen supply
- 7 - water supply
- 8 - metallic precursor tank
- 9 - heater
- 10 - resulting plasma flow

그림 18은 본 연구에 사용된 플라즈마트론 발생장치의 개략도이다. 이 장치는 크게 cathode, anode, argon supply, activation chamber, reaction chamber 등 10 부분으로 구성되어진다.

시작 단계에는 고 전압, 고주파의 AC 전압이 내부 전극 틈새(inter-electrode gap)를 파괴하기위해 인가되어지고, 그 후에는 DC전압이 Arc 방전을 지속적으로 유지 시킨다. oxygen supply(6)에서 산소가 activation chamber(4)로 공급되고, 이곳에서 산소는 플라즈마와 상호작용하고 활성화된 후 플라즈마는 reaction

chamber(5)로 흘러 들어가 상태로 저장되어지며, water supply(7)를 통하여 물이 공급되면 Zinc acetylacetonate는 산소와 함께 heated pipe를 통하여 reaction chamber로 흘러들어 간다. 최종적으로 ZnO는 아크릴 표면에 증착되어진다.

그림 19는 플라즈마트론을 이용하여 아크릴 내부에 ZnO 코팅을 하는 과정을 보여주고 있다. 여기서, 플라즈마트론은 고정되어 있고 아크릴 튜브가 전·후로 움직이게 되어 튜브 전면에 코팅이 이루어지게 된다.

그림 20은 아크릴진공관에 코팅된 ZnO film의 SEM 사진으로 (a)는 film두께가  $1.247\mu\text{m}$  이고, (b)는  $1.200\mu\text{m}$ 이다.

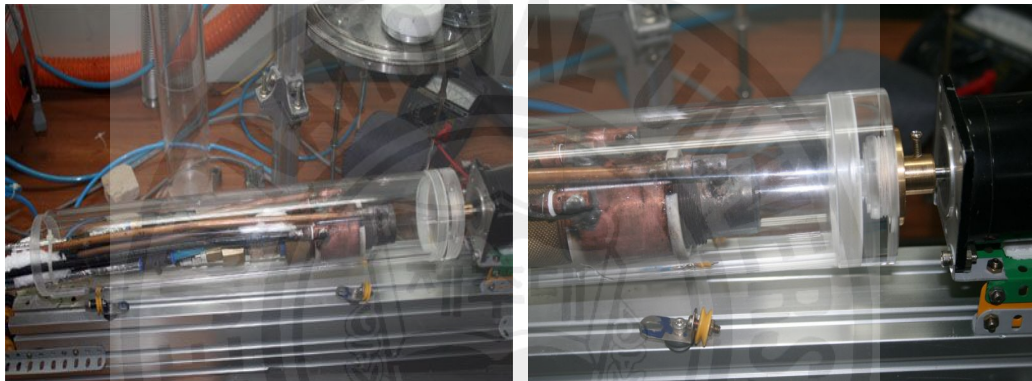


Fig. 19. Process of ZnO coating by using a plamatron.

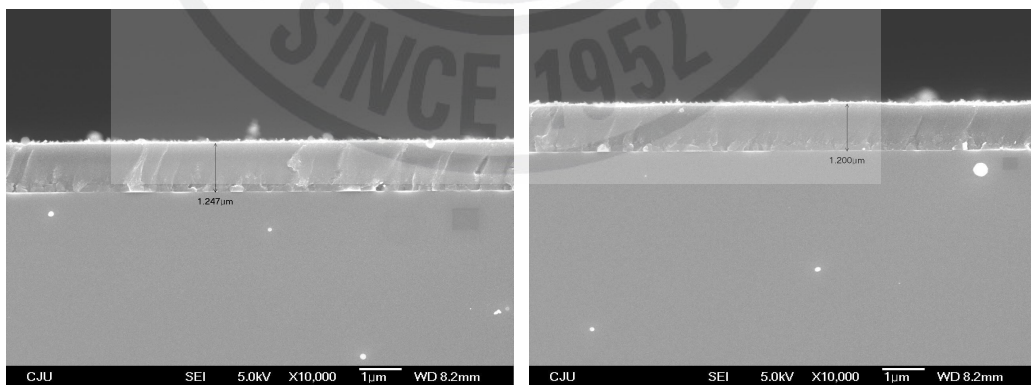


Fig. 20. SEM Photos of acrylic tube coated with ZnO by using a plamatron;  
(a) $1.247\mu\text{m}$  ,(b) $1.200\mu\text{m}$ .

## 2. 실험방법

본 연구에서는 기존의 유리식 진공관형 태양열 집열기를 대체할 수 있는 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기의 설계 및 제작에 관한 기술을 제시하고, Prototype의 성능 분석을 위한 기초 단계로 비유리식(nonglass) 진공관내의 진공도를 모니터링 하고 이에 따른 흡열판의 온도변화를 분석 하고 기존의 유리식 단일 진공관형 집열기와 비교 실험을 통하여 그 성능분석을 통하여 다양한 진공관형 집열기의 도입 가능성을 검토하고자 하였다.

### 2.1 진공도 테스트

앞서 언급 하였듯이 아크릴 진공관 내부의 진공도는 대기로부터의 공기 유입과 진공도가 높아짐에 따라 재질 내부에서의 가스 입자의 방출로 인하여 시간이 경과 됨에 따라 진공도는 떨어진다. 본 실험에서는 아크릴 재질로 제작한 진공관의 성능을 분석하기 위하여 진공도 누설 측정과 어느 정도의 진공도를 유지시킬 수 있는지를 측정하였다.

진공도 누설 측정은 Varian 사의 979모델 헬륨질량 분광계 누출 감지기를 사용하였다. 이 모델은 광범위한 헬륨 질량 분광계 누출 감지기이며, 터보 분자 고진공 펌프, 분광계관, 밸브 블록, Vacuum Technologies의 플랫폼 누출 감지 전자 장 및 하우징의 작동자 인터페이스로 구성 되어 있다.

그림 21은 본 연구에서 사용된 질량 분광계 누출감지기의 계략도로 이 모델은 기본적으로 분광계 관이라고 불리는 분석 감지관, 관을 작동시키는 전자 장치 및 이 관 내에서 고 진공을 유지하는 진공 시스템으로 구성된다. 추가적으로 러핑 진공 펌프 및 밸브 시스템이 제공되어 시험주기가 수행되도록 한다. 분광계 관에 있어서 가스 분자는 분자를 뜨거운 소리에이티드 이리듐 필라멘트로부터 전자로 폭파시켜서 이온화를 시키게 된다. 형성된 이온은 질량 4(헬륨) 이온이 90도로 비껴가는 자장으로 가속되어 지고(그림 22 참조) 단지 헬륨 이온만이 수집기에 도달하게 된다.



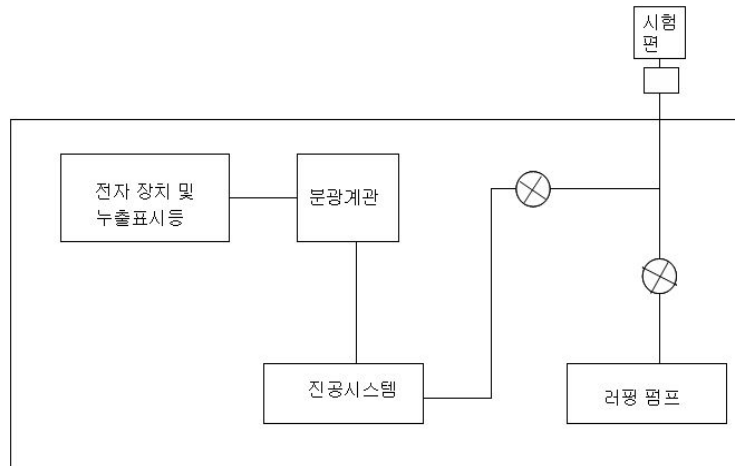


Fig. 21. Mass spectrometry leak detector.

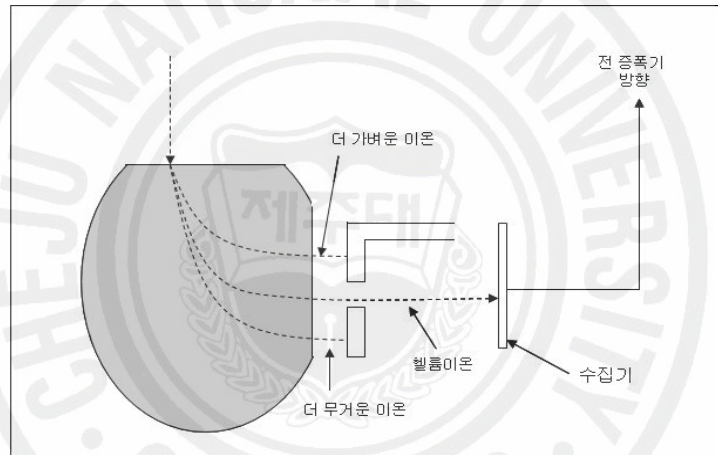


Fig. 22. Principle of magnetic separation.

아주 안정적인 전위계는 헬륨 이온의 수집에 의하여 생성되는 전류를 증성화 하는 수집기에 전자 전류를 제공하고, 피드백 전류가 누출을 막대 그래프에 제공 된다. 이 전류는 단위 시간당 수집기를 때리는 헬륨 이온의 수에 직접적으로 비례하기 때문에, 패널 누출을 막대 그래프는 항상 진공시스템의 헬륨 농도를 반영 한다.

이 누출감지기에서 사용되는 누출율은 std cc/sec 로 표준 기압의 압력 차이 에서 초당 가스  $1\text{cm}^3$ 의 양이 누설 한다. 누출을 일상용어로 시각화 하였을 경우  $10^{-7}$  std cc/ sec는 약 1년에 3cc가 누설된다는 것을 의미한다.

연구 결과에 의하면 인간이 만든 결합의 누출크기는 이음의 모든 누출은 약  $5 \times 10^{-7}$  std cc/sec(약 1cc/월) 이상이며 세라믹과 금속, 플라스틱과 금속 봉합, 용접, 납땀, 접합 이음에 적용되어진다. 유리의 경우 헬륨의 확산은 표면 면적  $\text{cm}^2$  당  $10^{-8}$  std cc/sec 만큼 높을 수 있다.[모델 979 시리즈 헬륨 질량 분광계 누출 감지기 작동 지침서, 2003년9월]

본 연구에서는 이 헬륨 질량 분광계 누출 감지기를 사용하여 1차적으로 아크릴 진공관의 누출율을 감지한 후, 헤더형 진공챔버를 사용하여  $10^{-3}$  torr 까지 진공도를 유지시킨 후 장치를 중지 시키고 내부의 진공도 변화를 모니터링 하였다.

진공도 데이터 모니터링 및 수집은 LabVIEW를 이용하여 어플리케이션을 작성하여 RS-232케이블을 통해 ACM 1000-Multi channel Controller와 컴퓨터를 연결하여 실시간으로 진공도를 모니터링 하고 데이터를 수집하였다. 그림 23은 헬륨누설 측정기를 사용하여 아크릴 진공관의 진공누출율을 측정하는 과정을 보여 주고 있고 그림 24와 25는 진공도 데이터 모니터링 및 수집을 위한 프론트패널 및 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

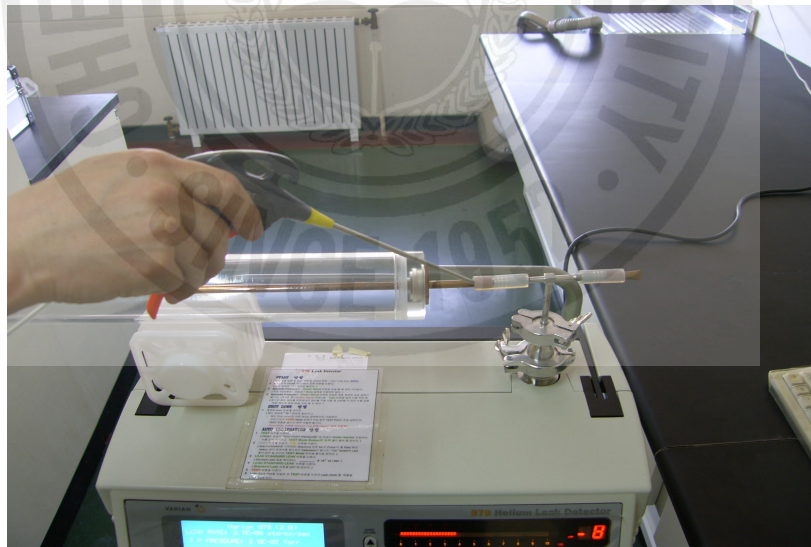


Fig. 23. Vacuum leakage test by using Helium.

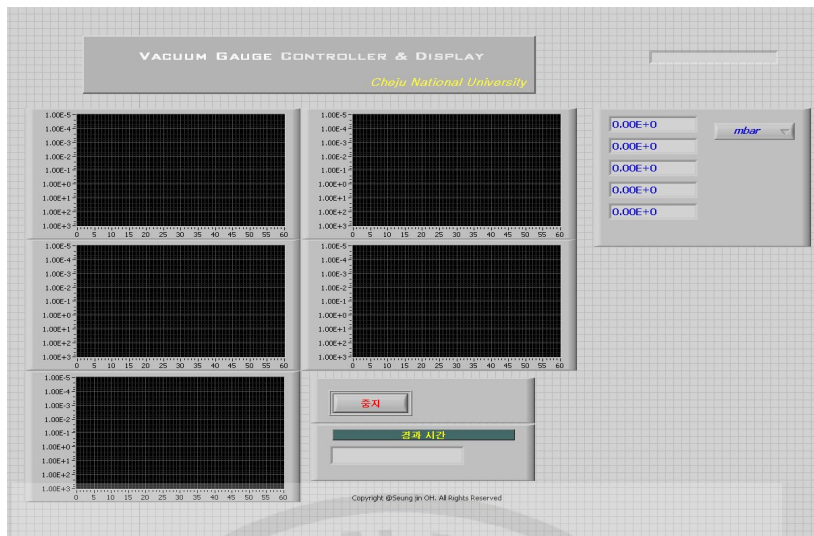


Fig. 24. Front panel of LabVIEW application for monitoring and collecting vacuum data.

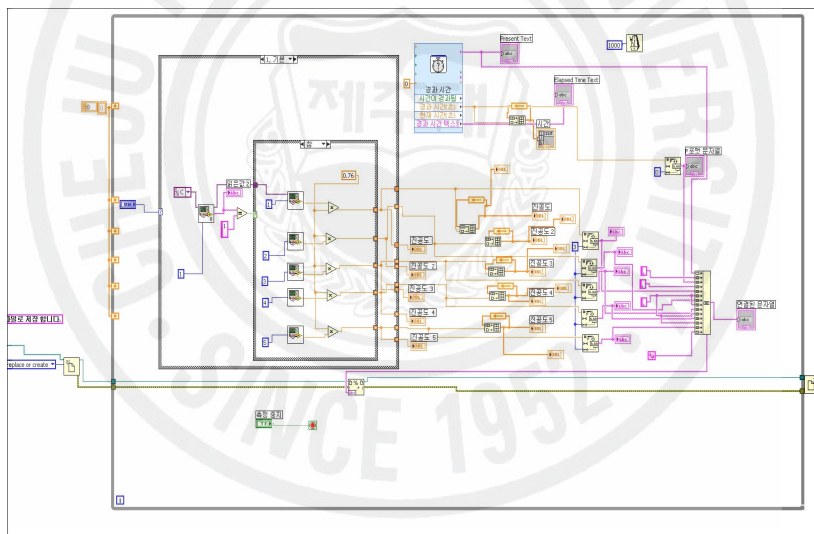


Fig. 25. Block diagram of LabVIEW application for monitoring and collecting vacuum data.

## 2.2 진공도가 흡열판의 열적특성에 미치는 영향

본 실험에서는 비유리식(nonglass) 진공관형 집열기 내부의 진공도변화에 따른 흡열판의 온도변화를 분석하기위해 1.5kW급 인공태양(Solar Simulator)의 열속을  $800\text{W/m}^2$  로 고정하였다. 이때 열속값은 집열면 높이에 따른 평균치를 가리키며,  $\pm 25\text{W/m}^2$  의 오차 범위를 갖는다. 진공도를  $10^{-2}\text{torr}$  와  $5\text{torr}$ 로 조건을 달리 하였으며 연속적으로 온도 변화를 측정하였다. 집열판에는 그림 26과 같이 균일한 간격을 두고 총 4곳에 K형 열전대(Thermocouple)를 접합하였으며, 진공관 내부의 온도를 측정하기위해 관 내부에도 K형 열전대(thermocouple)를 삽입하였다. 온도 데이터 수집은 AGILENT사의 34970A 계측기를 사용하였다.

진공관 내부의 진공도유지는  $10^{-2}\text{torr}$ 인 경우에는 진공챔버를 연결을 하여 간헐적인 outgasing이 가능하도록 고려하였는데, outgasing을 위한 솔레노이드 밸브 설정값은  $1.0 \times 10^{-2} \sim 9.0 \times 10^{-2}$  torr 이다.

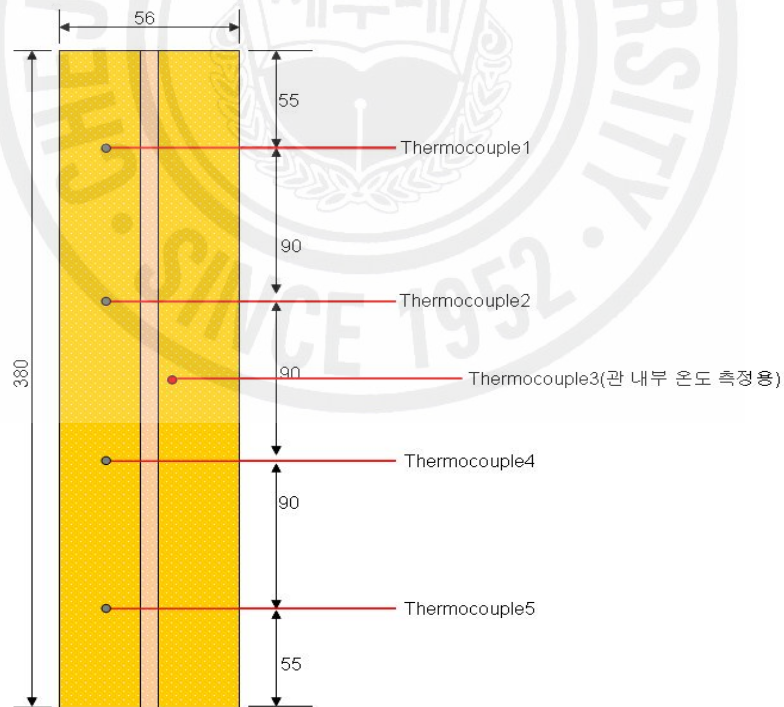


Fig. 26. Position of K-type thermocouple for measuring temperature on absorber plate.

### 2.3 기초 성능 테스트

본 실험에서는 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열집열기의 Prototye의 기초 성능 테스트를 위하여 가급적이면 동일한 조건(집열면적, 축열조 용량, 일사량 등)에서 모든 실측 data를 획득하는 데에 그 초점을 맞추고 수행 하였다.

비교 대상인 단일진공관형 집열기는 Heat pipe 삽입형인 SEIDO 5를 사용하였다. 실험에 사용된 집열기는 그림 27과 같다.



Fig. 27. Photograph of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5).

동일한 조건을 위하여 비유리식(nonglass) 진공관형 집열기와 SEIDO 5는 동일한 일사량, 집열면적, 축열조에서 기초 성능 테스트를 수행 하였다. 일사량은 1.5kW급 인공태양(Solar Simulator)의  $800\text{W}/\text{m}^2$  로 고정하였다.

그림 28은 기초 성능 실험을 위한 전체적인 시스템 구성도이고 그림 29는 실내 실험 사진이다. 단일진공관형 집열기(SEIDO 5)가 진공관 내부의 진공도를  $10^{-4} \sim 10^{-5}\text{torr}$  로 유지시키는 반면, 비유리식(nonglass) 집열기는 진공도 유지 문제로 인하여 별도로 헤더형 진공챔버를 장착하여 간헐적인 outgasing을 해줌으로써 진공관 내부의 진공도를  $10^{-2}\text{torr}$ 로 유지 시켰다. 이를 위하여 Rotary pump와 진공챔버 사

이에 솔레노이드 밸브와 Controller가 장착되어 원하는 진공도를 유지 시켰다.

축열조의 용량은 비유리식(nonglass) 집열기와 SEIDO 5 모두 한 개의 집열기만 사용하여 성능 테스트를 하는 것이므로 1L의 물을 유동 없이 축열조에 저장하고 테스트를 수행하였다.

온도 측정에 필요한 열전대(thermocouple)는 K타입을 이용하였고, 열전대의 위치는 각 집열기의 응축부 상·하부 및 축열조의 상·하부 그리고 주변 온도를 모니터링 할 수 있도록 각각 설치하였다.

표 3에 본 연구에서 사용되어진 조건이 나타나 있다.

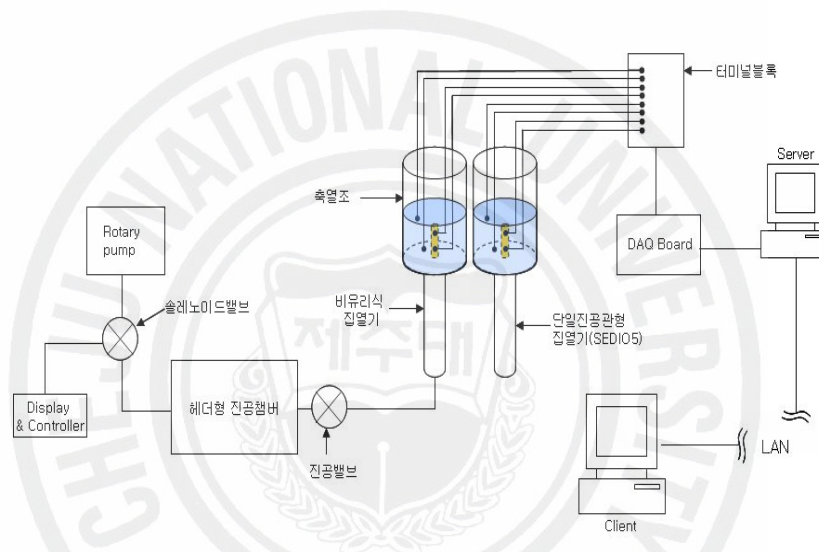


Fig. 28. Experimental apparatus.

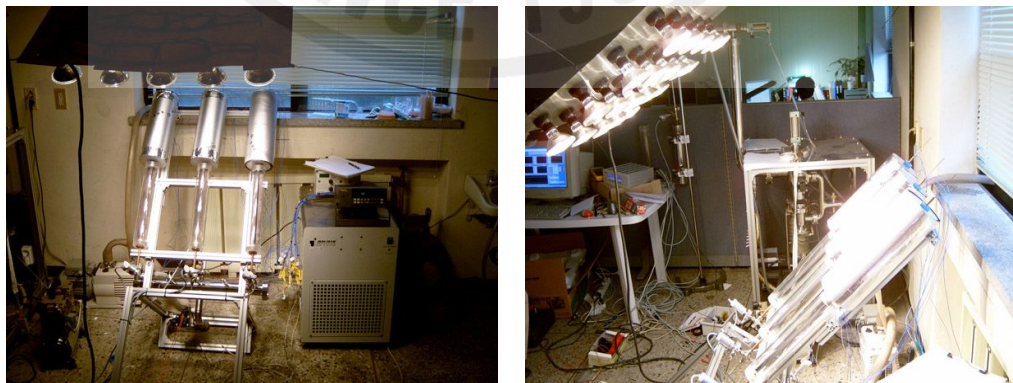


Fig. 29. Indoor comparative experiment of nonglass vacuum solar collector with a single glass evacuated tube.

Table 3. Experimental conditions.

조건	비유리식 진공관형 집열기	단일진공관형 집열기(SEIDO 5)
외경(mm)	70	70
진공관의 진공도(torr)	$10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
연결형태	Heat pipe 삼입형	Heat pipe 삼입형
응축부 형태	직관형	확관형
집열면적(m <sup>2</sup> )	0.02	0.02
축열조 용량(L)	1	1

측정데이터 수집은 LabVIEW를 사용하여 실시간으로 데이터를 수집하고 기록할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. 데이터 수집을 위한 부품은 National Instrument사의 Data Acquisition Board(PCI-6251 Board), 68핀 차폐 케이블(SHC 68-68 EPM)케이블 그리고 68pin Terminal Block이 사용되었다. 또한, 인터넷이 연결된 컴퓨터면 어느 곳에서든지 현재 데이터를 모니터링 할 수 있도록 원격 시스템을 구성하였다. 그림 30과 31은 LABVIEW를 이용한 데이터 수집 어플리케이션의 프론트 패널과 블록다이어그램을 보여주고 있다.

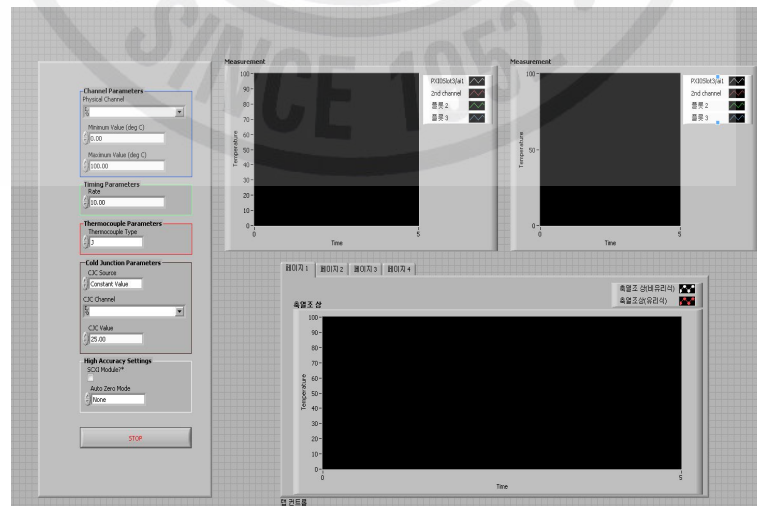


Fig. 30. Front panel of LabVIEW application for monitoring and collecting temperature data.

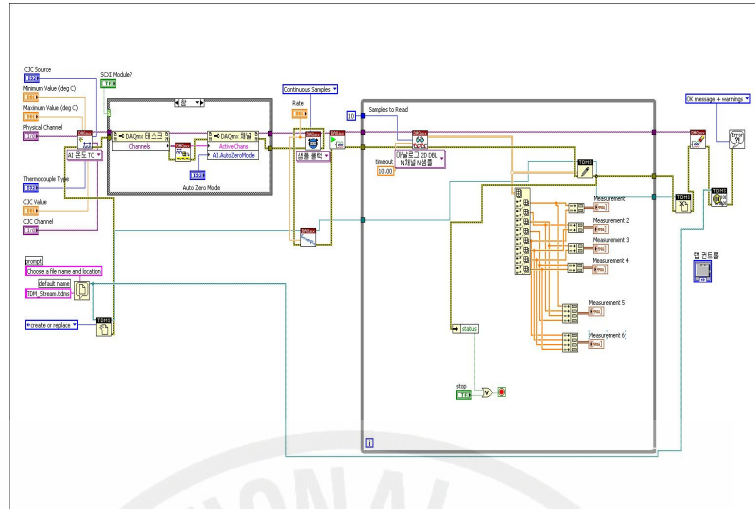
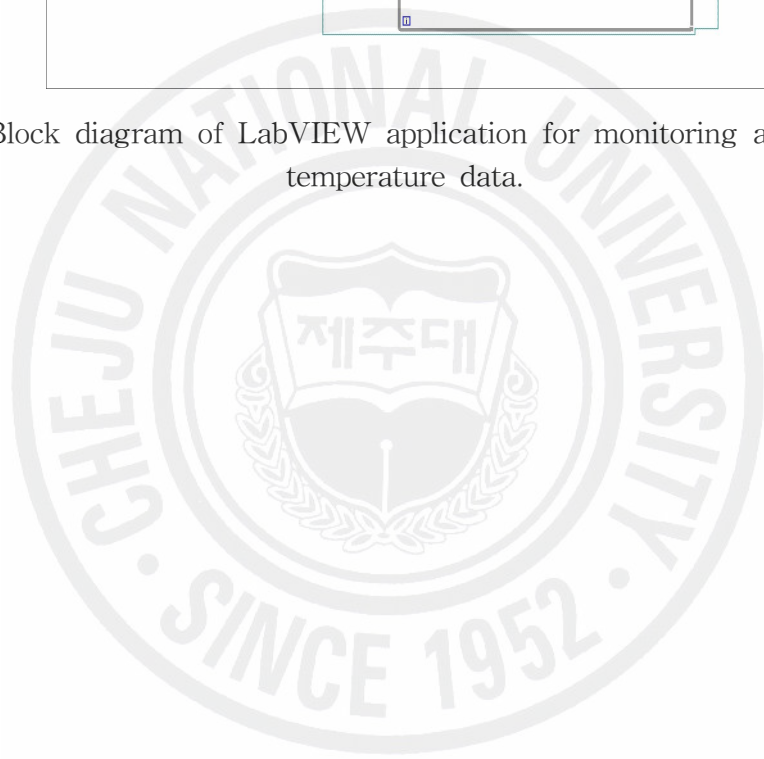


Fig. 31. Block diagram of LabVIEW application for monitoring and collecting temperature data.





## V. 실험 결과 및 고찰

### 1. 비유리식(nonglass) 진공관 내부의 진공도 변화 분석

아크릴 재질로 제작된 진공관 내부의 진공도를 분석하기 위하여 헬륨 질량 분광계 누출 감지기를 사용하여 누출량을 분석하였다. 헬륨 질량 분광계 누출 감지기의 테스트 포트에 아크릴 진공관을 연결 시킨후 헬륨의 작은 분사물로 검사하여 개별 누출을 찾아내었다. 그림 32는 누출 감지기의 전면 패널로써 진공관의 진공도가  $10^{-4}$ torr 일때 누출률이  $10^{-8}$  atm-cc/sec 로 측정 되었다.  $10^{-7}$ std-cc/sec 는 3cc/년 의 누출율을 의미하므로 아크릴 진공관의 누출율은 0.3cc/년 이다. 이는 극히 미세한 값으로 비유리식(nonglass) 진공관 내부의 진공도에 영향을 주지 않는 다고 할 수 있겠다.

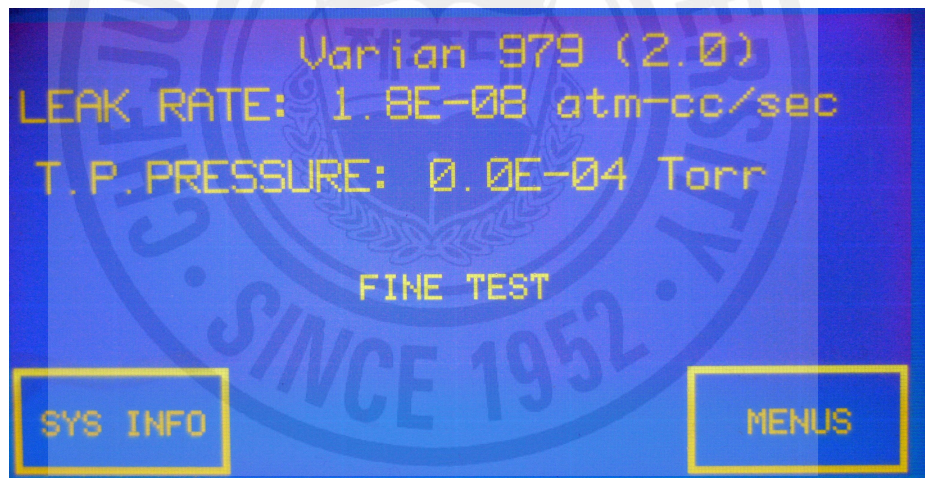


Fig. 32. Leak rate of vacuum in coupling region.

하지만 아크릴 재질은 진공상태에서 승화작용이 일어나기 때문에 내부에서 가스 입자가 발생하게 된다. 본 연구에서 제작된 아크릴 진공관에 진공도를  $10^{-3}$ torr로 유지시킨후 펌프를 off 시키고 5일 동안 모니터링을 해보았다. 그 결과 진공도는 초기 30분 동안 1torr 까지 급격히 떨어진 후 서서히 5~6torr로 유지하는 현상을 보였다.

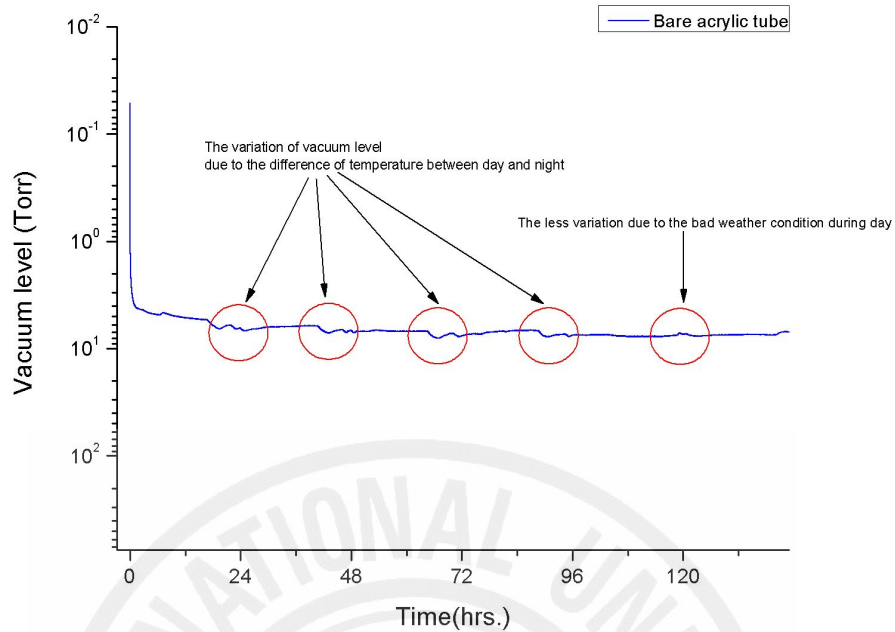


Fig. 33. Vacuum variation inside acrylic tube.

그림 33에서 대략 24시간 주기 적으로 미세한 fluctuation이 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 낮과 밤의 주변 온도차에 의해 진공관 내부의 진공도가 변화 하는 것으로 사료되어진다.

만약, 진공관 내부의 공기 입자들을 이상기체로 간주 하였을 경우 이상기체 상태 방정식 (8)에서

$$PV = nRT \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$P = \frac{nR}{V} T$$

여기서,

P : 진공관 내부 압력

n : 공기 입자의 몰수(=m/M n: 질량(g), M: 분자량(g))

R : 공기의 기체상수

T : 내부 온도(K)

$\frac{nR}{V}$  가 일정하므로,

$$P \propto T$$

즉, 온도가 상승하면 압력이 증가하여 진공도는 감소되고, 온도가 감소하면 압력이 떨어져서 진공도가 증가하게 된다.

단일 진공관형 집열기(SEIDO 5)의 내부 진공도는  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  torr 이다. 진공관 내부의 진공은 집열기의 대류로 인한 열손실을 최소한으로 줄여주는 역할을 한다. 아크릴 진공관 내부의 진공도 5~6torr는 SEIDO 5보다 현저히 낮아서 집열기 효율에 큰 영향을 미치게 된다.

그리하여 Vacuum chamber를 이용하여 outgasing을 지속적으로 가능케 해줌으로써 아크릴 진공관의 진공도를 고진공으로 유지시킬 수 있고, 아크릴 진공관 내부에 가스 발생 억제를 위한 ZnO film을 코팅 할 수도 있다.

현재 플라즈마트론을 이용한 아크릴 진공관 내부의 ZnO film 코팅에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

## 2. 진공관 내부의 진공도가 흡열판의 열적특성에 미치는 영향 분석

아크릴 진공관 내부의 진공도는 대기로부터의 공기 유입과 진공도가 높아짐에 따라 재질 내부에서의 가스 입자의 방출로 인하여 시간이 경과 될수록 진공도가 저하될 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 일정한 초기의 압력이 유지되도록 내부 진공도가  $10^{-2}$  torr 이상인 경우에는 앞서 언급했듯이 진공 챔버를 사용하여 간헐적인 outgasing이 가능하도록 고려하였다. 이런 아크릴 재질의 단점을 보완 하기위한 방법으로 진공챔버를 사용하여 outgasing을 해주면서 실험을 수행 하였다.

아크릴 내부는 히이트 파이프 제작 때와 같은 진공 펌프를 이용한 배기 과정을 필요로 하며, 이를 위하여 본 연구에서는 8시간 이상의 배기 과정을 반복적으로 여러 번 수행하여 (집열)시스템 제작 후의 튜브 내부로의 가스 방출을 최소화 하도록 하였다. 실제로 본 연구에서 이와 같은 과정을 거치지 않고 시스템을 제작하였을 경우 진공 챔버로의 outgasing이 꾸준히 발생하였으며, 이는 시스템의 열적 성능에도 어느 정도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

표 4는 앞서 언급한 인공태양 장치를 이용하여 평균 열속  $800\text{W/m}^2$  하에 장시간 노출시켰을 경우 튜브 내의 흡열판의 초기 및 최종 표면 온도를 보여주고 있으며, 튜브 내의 진공도는  $10^{-2}$  torr 및 5torr를 유지하였다. 즉, 흡열판의 길이 방향으로 설치된 4개의 온도 센서와 튜브 내의 공기의 온도를 측정하기 위해 흡열판 후면에 설치한 온도 센서의 초기 그리고 평형 상태(thermal equilibrium state)에 도달한 후의 측정치를 보여주고 있다.

Table 4. Temperature of different thermocouples at given condition.

	$10^{-2}$ torr		5torr	
	초기 온도[°C]	최종 온도[°C]	초기 온도[°C]	최종 온도[°C]
센서1	27.3	99.1	22.8	95.0
센서2	27.3	101.4	22.2	98.2
센서3	27.3	96.7	20.3	100.0
센서4	27.4	102	21.3	97.7
센서5 (관내)	27.4	55.0	19.5	53.1
흡열판 평균	27.3	99.8	21.7	97.7

한편, 그림 34와 그림 35는 각각 진공관 내부의 진공도가  $10^{-2}$  torr 및 5 torr 일 때의 시간에 따른 튜브 내의 흡열판 및 공기의 온도 변화를 보여주고 있는데, 그림에서 보듯이 진공도에 상관없이 두 경우 모두 측정 시작 후 2시간이 경과하면 평형상태에 도달함을 보여주고 있다.

만약 진공관 내부의 주된 열전달 메커니즘이 전도에 의한 것이라면 내부의 압력을 낮춘다고 그에 상응하여 집열판으로부터 외부로의 열손실이 줄지는 않을 것이다. 이는 본 연구에서 고려한 정도의 진공도( $\sim 1$  torr) 범위에서는 공기의 열전도도는 1 atm에서의 그것과 거의 같은 값을 보이기 때문이다.

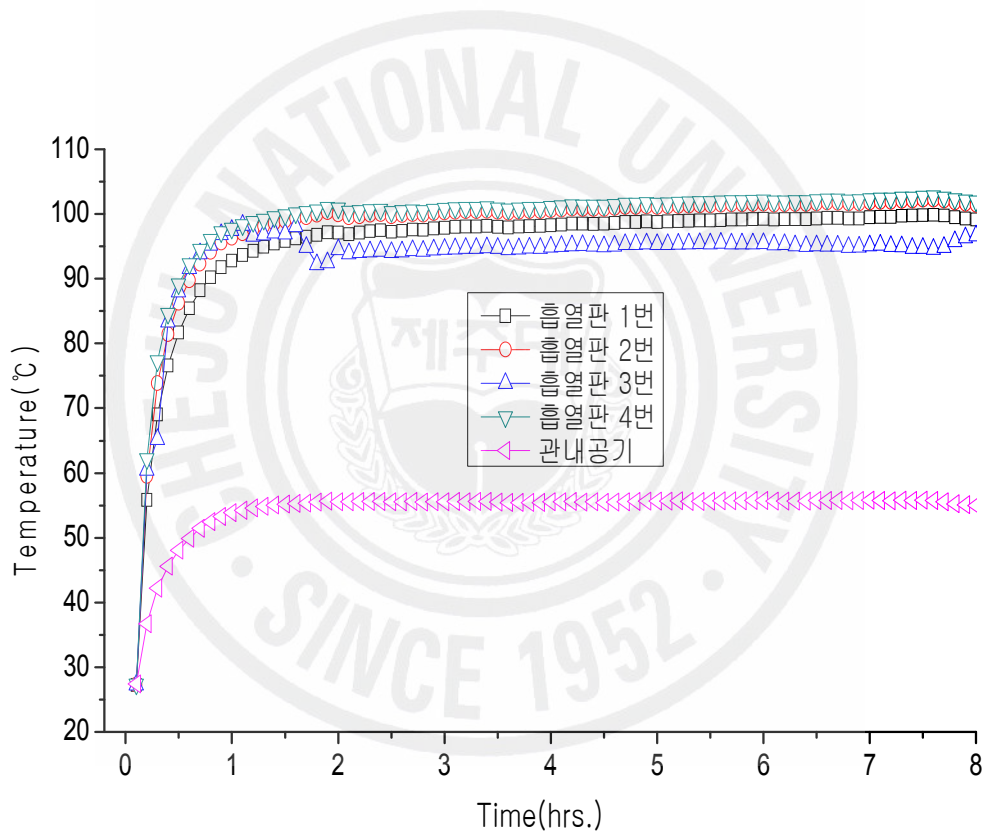


Fig. 34. Temperature variation of absorber plate at  $10^{-2}$  torr.

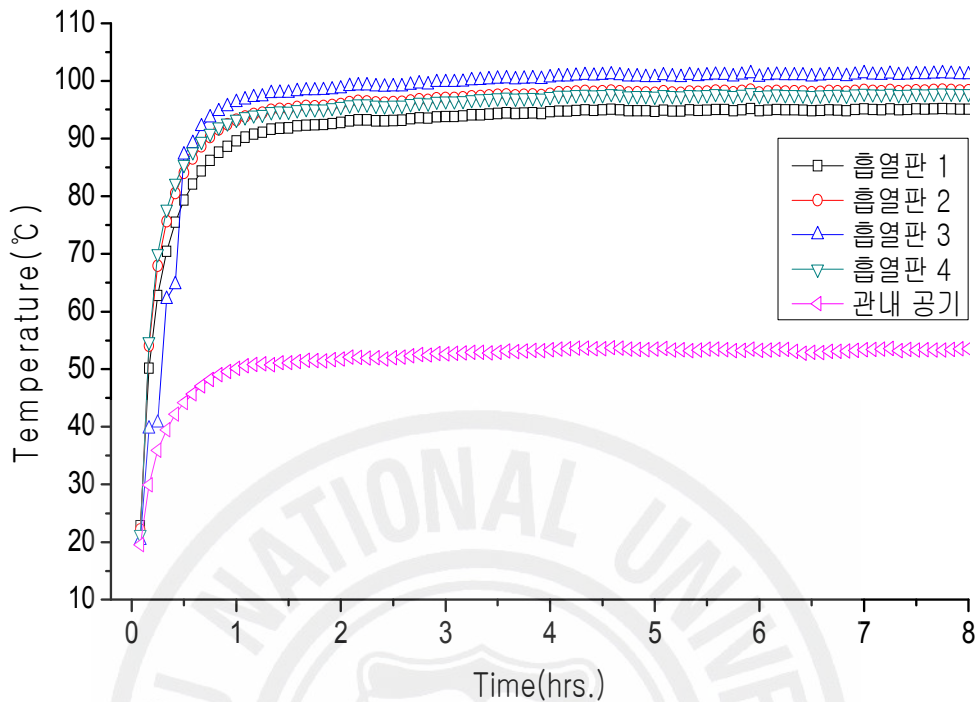


Fig. 35. Temperature variation of absorber plate at 5torr.

진공관 내부의 압력 강하는 내부에서 일어나는 자연대류 현상에만 영향을 미친다. 특히, 높은 형상비(aspect ratio)를 갖는 경우에는 이를 최대한도로 억제할 수 있을 것이며, 그 내부의 진공도에 따라 고진공이 아닌 경우( $<10^{-4}$ torr)에는 열 손실의 차이가 크게 나지 않을 것이다.

작은 형상비의 경우, 공기의 동점성계수(Kinematic viscosity)는 압력 강하에 선형적으로 증가하며, 1torr에서의 값은 1atm에서의 값에 비해 약 1,000배 가량 된다. 또, Prandtl수는 압력과 무관하며, Raleigh수는 열확산계수와 동점성계수에 역비례 한다. 따라서 튜브 내부의 압력 1torr 정도에서의 Raleigh수는 1atm에서의 값에 비해 1/1,000,000 정도로 줄어든다.

한편, Nusselt수는 층류영역에서 Raleigh수의 1/4승에 비례하는데,  $Nu = CRa^{1/4}$ 의 식을 이용하면 1torr에서의 값은 1atm에서의 값의 약 0.0315배가 되는 것으로 계산되어진다(대류가 튜브 내주의 주된 열전달 메카니즘일 경우).

### 3. 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기의 기초 성능 분석

본 실험에서는 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열집열기의 Prototype의 기초 성능 테스트를 위하여 가급적이면 동일한 조건(축열조 용량, 일사량 등)에서 모든 실측 data를 획득하는 데에 그 초점을 맞추고 수행 하였다.

일사량은 1.5kW급 인공태양을 사용하여 평균 열속을  $800\text{W/m}^2$  으로 고정시키고 비유리식 진공관형 집열기와 단일진공관형 집열기(SEIDO 5)를 비교 실험 하였다. 테스트 시간은 10시간으로 비유리식 집열기와 SEIDO 5의 결과 값은 표 5와 같다. 그림 36과 그림 37은 각 집열기에 대한 결과 그래프이다.

Table 5. The results of comparative experiment of a nonglass solar vacuum tube at  $10^{-2}$  torr with a single glass evacuated tube.

	비유리식집열기 ( $10^{-2}$ torr)		SEIDO 5	
	초기온도( $^{\circ}\text{C}$ )	최종 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	초기 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	최종 온도( $^{\circ}\text{C}$ )
히트파이프 下	22.9	62.5	23.4	68.7
히트파이프 上	23.0	59.8	23.5	69.3
축열조 下	22.9	55.4	23.4	60.6
축열조 上	22.9	49.7	23.5	58.4
히트파이프 평균	23.0	61.2	23.5	69
축열조 평균	22.9	52.6	23.5	59.5

표 5는  $10^{-2}$ torr로 제작된 집열 튜브에 히이트 파이프를 장착하고 실제 시스템을 제작하여 유리 진공관(내부 진공도:  $10^{-5}$ mbar) 시스템과 비교 실험한 결과를 보여주고 있는데, 유리진공관 시스템 (SEIDO 5)의 성능이 더 양호하게 나타나고 있다. 이는 튜브 내부의 진공도와 빛의 투과도(유리: 0.91, ZnO 코팅 아크릴: 0.86 ; 그림 38과 39참조) 차이에 기인하는 것으로 보인다.

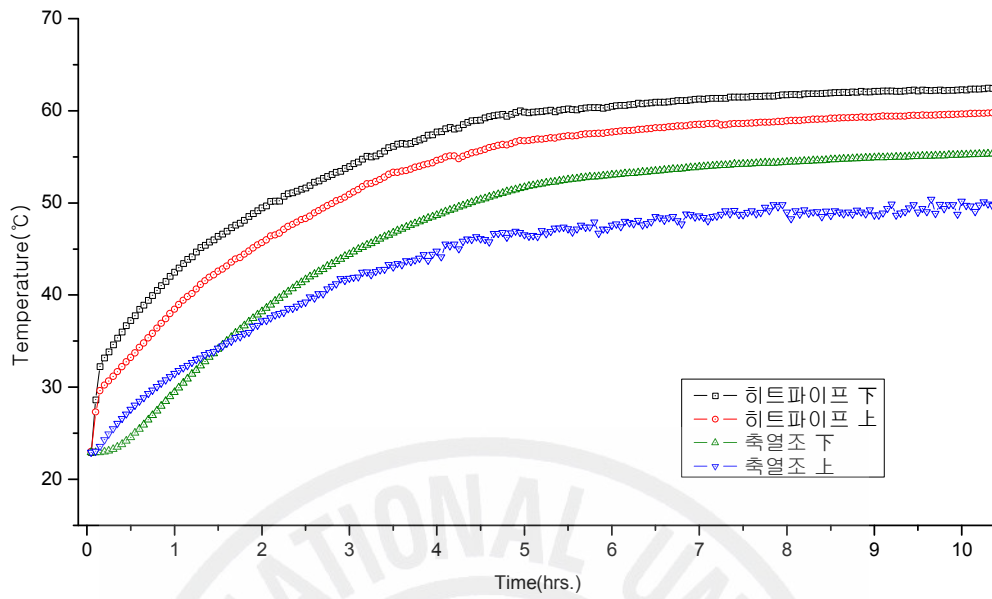


Fig. 36. The results of a nonglass solar vacuum tube at  $10^{-2}$  torr and  $800\text{W/m}^2$ .

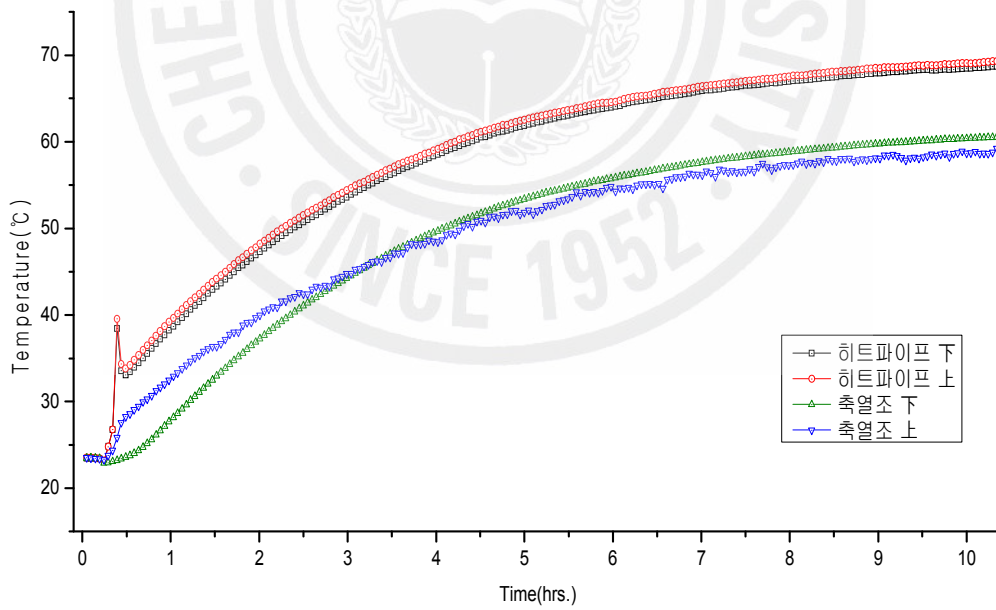


Fig. 37. The results of a SEIDO 5 at  $800\text{W/m}^2$ .



비유리식 집열기와 SEIDO 5의 집열효율을 식(7)을 응용하여 계산해보면,

$$\begin{aligned} \eta &= Q_w / AI_t \quad \dots \dots \dots (7) \\ &= GC_p(t_o - t_i) / I_t \end{aligned}$$

위 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{mC_p(t_o - t_i)}{A_c I T_w} \quad \dots \dots \dots (8)$$

여기서,

$m$  : 축열조의 물의 질량(kg)

$C_p$  : 물의 비열(=4200J/Kg°C)

$t_o$  : 물의 최종 온도(°C)

$t_i$  : 물의 최종 온도(°C)

$A_c$  : 흡열판의 면적(m<sup>2</sup>)

$I$  : 일사량(W/m<sup>2</sup>)

$T_w$  : 작동 시간(s)

식(8)에 각 항목의 값을 대입하여 계산하면,

비유리식 진공관형 집열기는

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1 \times 4200 \times (52.6 - 22.9)}{0.02 \times 880 \times 36000} \\ &= 0.20 \end{aligned}$$

즉, 효율은 20% 이다.

단일진공관형 집열기는

$$\eta = \frac{1 \times 4200 \times (59.5 - 23.5)}{0.021 \times 880 \times 36000}$$

$$= 0.24$$

즉, 효율은 24% 이다.

그림 39와 40은 아크릴의 투과도에 대한 실측 결과를 나타내고 있는데, 그림 39에서 보듯이 ZnO 코팅 전의 아크릴의 투과도는 유리의 투과도에 비해 전혀 떨어지지 않은 것을 보여주고 있다. 한편, ZnO 코팅 후에는 코팅막의 형성으로 인한 투과도의 저하가 나타나는데, 그림 40에서 보듯이 Plasmatron을 이용하여 상압에서 코팅한 것(a)과 진공에서 코팅 한 것(b)과는 크지는 않지만 다소의 차이를 보여주고 있다.

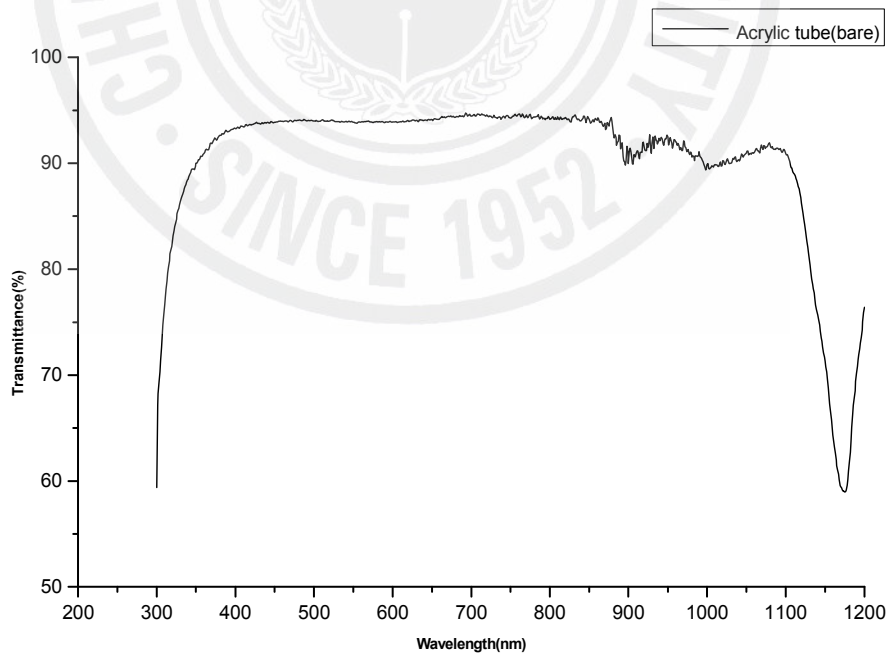


Fig. 38. Transmittance of acrylic material along by wavelength.

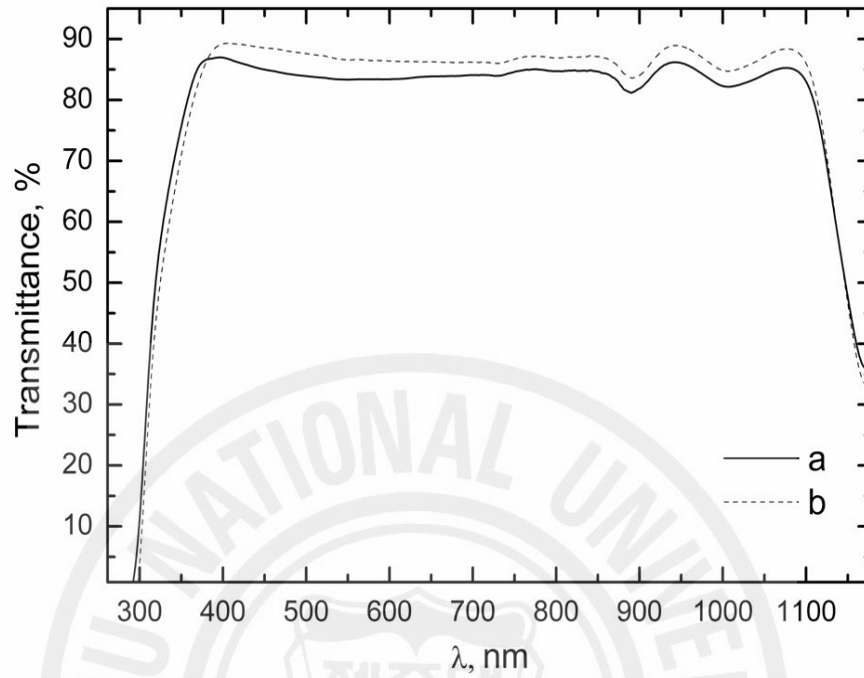


Fig. 39. Transmittance of acrylic material coated with ZnO by wavelength ;(a) at atmosphere, (b) at vacuum.

## V. 결 론

본 연구는 현재 국내외적으로 널리 보급되어지고 있는 유리식 태양열 집열기를 대체할 수 있는 비유리식(nonglass) 진공관형 태양열 집열기를 개발함으로써 열성능은 물론 집열기의 내구성 향상에 도움이 되는 자료를 얻고자 수행되었다. 가장 투명성이 높고 구입이 용이한 아크릴 수지를 사용하여 태양열 집열기의 prototype을 소개 하였다. 아크릴수지로 진공관을 제작하였을 경우 진공이 누설되지 않는 최적의 모델 설계를 제안 하였고, 진공관 내부의 진공도 유지를 관찰 하였다. 또한, 진공관 내부의 진공도가 흡열판의 열적특성에 미치는 영향을 태양열속 및 진공도에 변화를 주면서 분석하였으며 기존의 단일진공관형 태양열 집열기(SEIDO 5)와의 비교 실험을 통하여 기초 성능을 분석하였다.

그 결과 아크릴 재질 자체에서의 가스 발생에 의해 시간이 경과됨에 따라 진공관 내부의 진공도가 감소하는 현상을 보였고 5torr 에서는 재질에서 가스가 발생하지 않는다는 것을 예측 할 수 있었다. 진공도가 높을수록 튜브 내의 흡열판의 온도는 상승하나 실험 오차를 감안하더라도 그 상승폭의 크기는 진공도와 선형적으로 비례하지는 않은 것을 알 수 있었다.

비유리식 재질의 특성상 유리와는 달리 충분한 배기 과정을 거치지 않으면 진공상태에서 내부 가스 발생으로 인하여 진공도가 감소할 수 있으며 진공 챔버 등 별도의 배기 장치를 장착하여야 한다. Plasmatron을 이용한 ZnO 코팅은 빛의 투과도를 7%까지 떨어뜨리나, 내부의 진공도 유지에는 적지 않은 효과가 있는 것으로 관찰되었다. 또한, 이 투과도의 감소로 인하여 비유리식 진공관형 집열기가 SEIDO 5 보다 효율이 다소 낮게 측정이 되었다.

비유리식 진공관형 태양열 집열기 개발에 있어서 가장 큰 걸림돌은 진공관내부의 고진공을 어떻게 유지하는가에 달려있다. 현재 진행중인 플라즈마트론(Plasmatron)을 이용한 ZnO film을 코팅한 진공관의 진공도가 목적 진공도 까지 유지 된다면 비유리식 진공관형 태양열 집열기 개발에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료되어진다.

## 참 고 문 헌

- M. Groll, et al. Development of a Liquid-Trap Heat Pipe Thermal Diode, *J. Spacecraft*, Vol. 16, No. 4, pp.195-202, 1979.
- H. H. Bau, and K. E. Torrance, On the Stability and Flow Reversal of an Asymmetrically Heated Open Convection Loop. *J. Fluid Mech.*, 106, pp. 417-433, 1981.
- K. Chen, Design of a Plane-Type Bidirectional Thermal Diode. *ASME J. Solar Energy Engineering*, 110, pp. 299-305, 1988.
- K. Chen, R. W. Shorthill, S. S. Chu, P. Chailapo, and Narasimhan, S. An Energy-Efficient Construction Module of Variable Direction of Heat Flow, Heat Capacity, and Surface Absorptivity, *USAF Report WL-TR-95-3046*. 1995
- A. A. Mason and J. H. Davidson, 1995, "Measured Performance and Modeling of an Evacuated-Tube, Integral-Collector-Storage Solar Water Heater", *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp.225 ~ 229.
- G. Oliveti and N. Arcuri, 1996, "Solar Radiation Utilisability Method In Heat Pipe Panels", *Solar Energy*, Vol. 57, pp. 346 ~ 349.
- Ghoneim A. A., Fisch N., Ammar A. S. A. and Hahne E., 1994, "Investigation of Evacuated Tube Collectors", *Solar Energy*, Vol. 16, pp.16 ~ 23.
- HE ZINIAN, GE HONGCHUAN, JIANG FULIN and LI WEI, 1997, "A Comparison of Optical Performance between Evacuated Collector Tubes with Flat and Semicylindric Absorbers", *Solar Energy*, Vol. 60(2), pp. 115 ~ 116.
- Hawlder M. N. A and Qijeysundera N.E., 1987, "Solar Collector Testing",

*Renewable Energy Review Journal*, Vol. 9, pp. 11 ~ 25.

K. A. R. Ismail and M. M. Abogderah, 1998, "Performance of a Heat Pipe Solar Collector", *Transactions of the ASME*, Vol. 120, pp. 52 ~ 58.

K. Sumathy, 1997, "Solar Flat-Plate Collector Testing for The HongKong Climate", *ISES 1997 Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 57 ~ 58.

M. Y. Othman, B. Yatim, M. H. Ruslan and K. Sopian, 1996, "Indoor Testing of Various Collectors", *Solar Energy Research Group*, pp.149 ~ 150.

Wu Jinfa, Zou Huaisong, Zhang Jian and Fang Jun, 1997, "Experiments of All-Glass Evacuated Tubular Collect with U-Tube and Al Fin Manifold and Embodiment", *ISES 1997 Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 79 ~ 84.

강용혁 등, "태양열 온수 급탕 시스템 성능 표준화", 한국에너지기술연구소, KIER-991423, 1999.

조일식 등, "태양열 열전 발전 시스템의 실험적 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 제 18권, 제 3호, pp. 114 ~ 116, 1998.

지명국, 정효민, 정한식, 이철재, 지관 형상에 따른 평판형 태양열 집열기의 최적설계. 공기조화 냉동공학회 동계학술발표회 논문집 pp.675-681, 2000.

천원기 등, "진공복사관식 태양열 집열기의 최적모델 개발 연구", 포항산업과학연구원, 2001.

황용하, 재생형 태양열 집열기의 성능에 대한 연구. 충남대학교 논문집 제 36호 1호 2001.

이용훈, 최석천, 이광성, 지명국, 정효민, 정한식, 흡수식 태양열 집열기의 열전달 특성에

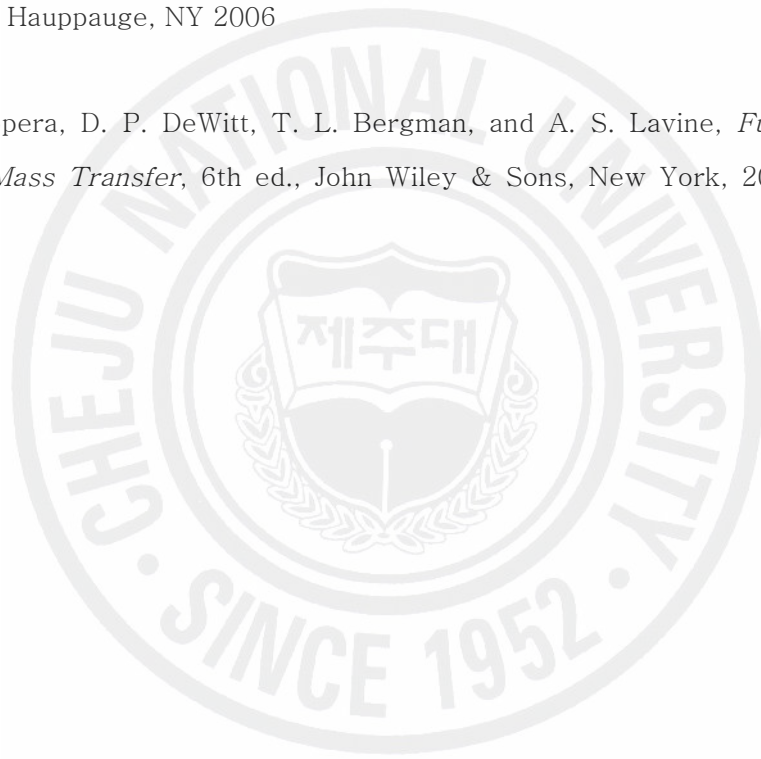
관한 연구. 대한기계학회 2002.

김용, 서태범, 강용하, 흡수관 형상과 일사각도에 따른 진공관형 태양열 집열기의 성능 변화. 설비공학논문집 제 17권 제 7호 pp. 659-668, 2005.

김병기, 정경택, 배찬호, 서정세, 태양열 집열기용 히트파이프의 열전달 특성에 대한 해석. 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집 pp.317-322, 2005.

K. Chen, and W. G. Chun, et al. *Solar Energy* : New Research, 1st ed., Nova Science Publishers, Hauppauge, NY 2006

F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons, New York, 2007.



## 감사의 글

이제 하나의 작은 결실을 마무리 지었습니다. 짧지도 길지도 않은 2년이란 시간 동안 많은 일을 겪으면서 이 한편의 논문으로 모든 걸 표현 할 수는 없지만 지난 세월은 저에게 있어서 매우 중요한 시간이었다는 것을 애써 부인 할 수는 없습니다. 이 한편의 논문은 배움의 끝이 아니고 저의 인생에 있어서의 또 다른 시작을 의미하는 첫 계단이라고 여기고 싶습니다. 시련을 실패로 착각하거나 실패가 두려워 도전하기를 꺼려하는 것은 어쩌면 나약한 인간의 본성일지 모릅니다. 실험과 논문 작성이 힘들 때마다, 제 자신의 한계에 부딪혀 도망치고 싶을 때마다, 언제나 ‘희망’이라는 단어와 ‘최선’을 다하면 이루지 못할게 없다는 신념은 제 자신과의 경쟁에서 조금이나마 앞서 나갈 수 있는 힘이 되었습니다.

이 작은 결실이 있기까지 너무도 많은 분들의 관과 도움이 있었습니다. 좁은 지면에 그 분들을 일일이 열거하면서 감사의 마음을 전하지는 못하지만 이 모든 것이 결코 저 혼자만의 힘으로 이룬 것이 아니었음을 고백하지 않을 수 없습니다.

우선, 모자란 저에게 학문의 길을 열어주시고 학문적인 지도뿐만 아니라 삶의 태도에 대해서 일깨워주시며, 포기하고 싶은 순간에 인생의 끈을 놓지 않게 이끌어 주신 지도 교수이신 천원기 교수님께 머리 숙여 깊은 감사드립니다. 그리고 저의 미흡한 논문을 자상하게 심사해 주시고 아낌없는 격려와 지도를 하여 주신 이윤준 교수님과 이현주 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

학부 1학년 때 첫 발을 내딛고 석사 과정을 마치기까지 8여년이라는 시간을 에너지공학과란 한 울타리에서 보내면서 항상 많은 조언과 격려를 아끼지 않은 준호형, 지훈이형 에게도 지면을 빌어 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 언제나 옆에서 도와주고 힘이 되어주었던 동기 순일, 정성, 용호, 찬주에게도 고맙다는 말을 전하며 바쁜 학과 업무 와중에도 늦은 밤까지 곁에서 실험을 도와준 성식, 향민, 기창이, Iskandar 에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

또한, 논문이 완성되기까지 실험에 필요한 자재의 보급에 힘써주신 고연종 선배님, 고태경 선배님, 항상 저를 다독거리며 때로는 친구처럼 위로와 격려가 되어준 덕원이형, 덕지형, 봉진이형, 민국이와 민우에게도 고마움을



전하며 곁에서 많은 힘이 되어주신 선·후배님들 에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 항상 한결같은 사랑과 믿음으로 멀리서나마 자식을 걱정하시는 부모님과 늘 저의 든든한 버팀목이 되어 주시는 누나에게 진심으로 감사드리며 세계 사랑과 용기를 심어준 모든 분들께 감사의 마음과 함께 이 논문을 드립니다.

