

비유리식(nonglass) 진공관의 진공도가 집열판의 열적 특성에 미치는 영향

오승진*, 현준호**, 김남진***, 이윤준****, 천원기*****

*제주대학교 대학원 에너지공학과(osj2558@cheju.ac.kr),
**제주대학교 대학원 에너지공학과(junho214@hanmail.net),
***제주대학교 에너지공학과(jnkim@cheju.ac.kr)
****제주대학교 에너지공학과(leeyj@cheju.ac.kr),
*****제주대학교 에너지공학과(wgchun@cheju.ac.kr)

Effect of Vacuum in a Non-glass Vacuum Tube on the thermal behavior of the Absorber Plate

Oh, Seung-Jin*, Hyun, Jun-Ho**, Kim, Nam-Jin***, Lee, Yoon-Joon****, Chun, Won-Gee*****

*Dept. of Nuclear & Energy Engng, Graduate School, Cheju National University(osj2558@cheju.ac.kr),
**Dept. of Nuclear & Energy Engng, Graduate School, Cheju National University(junho214@hanmail.net),
***Dept. of Nuclear & Energy Engng, Cheju National University(jnkim@cheju.ac.kr),
****Dept. of Nuclear & Energy Engng, Cheju National University(leeyj@cheju.ac.kr)
*****Dept. of Nuclear & Energy Engng, Cheju National University(wgchun@cheju.ac.kr)

Abstract

This study has been carried out to investigate the effect of vacuum on the thermal performance of a nonglass evacuated tube. A series of measurements are made indoors to monitor the temperature change of the absorber plate contained in the evacuated tube under different conditions of vacuum and heat fluxes. Those temperatures measured at the thermal equilibrium could be used to assess the heat losses to the ambient in link with the steady operation of non-glass evacuated tubes for solar exploitation.

Keywords : 비유리식(Non-glass), 태양열(Solar thermal), 실측(Measurements), 진공(Vacuum)

1. 서론

2005년 2월 16일 교토의정서 발효가 공식

화됨에 따라 선진국들에게는 온실가스 배출
량 저감의무가 주어지는 동시에 온실가스
배출권을 사고 팔 수 있는 배출권 거래제도
(Emission Trading, ET)가 형성되었다. 이에

투고일자 : 2008년 5월 28일, 심사일자 : 2008년 5월 30일, 게재확정일자 : 2008년 6월 24일
교신저자 : 천원기(wgchun@cheju.ac.kr)

따라 앞으로는 환경기준이 더욱 까다로워질 것으로 전망되며, 현재 우리나라는 1차 의무감축 대상국에 포함되어 있지 않지만 에너지 소비 10위, 세계CO2 배출량 세계9위로 2차 공약 기간이 시작되는 2013년에는 의무감축 대상국에 포함 될 것이 불가피한 실정이다.

부존자원이 거의 없고 에너지 다소비형 산업구조를 가진 우리로서는 대체에너지 개발과 환경 친화적인 산업구조로의 전환이 시급한 상황이다.

태양열 이용 기술은 가장 유망한 대체에너지 기술의 하나이며 이를 이용한 난방 및 온수 급탕 시스템(SWH)은 사회적으로도 기존의 여러 형태의 에너지를 대신할 수 있는 잠재력을 지니고 있으며, 태양열 온수 급탕(SWH) 시스템은 가장 간단하면서도 기술의 완성도가 높고 각국의 자체 생산이 가능하여 국민경제 파급효과가 크다. 또한 가정에너지의 30%이상이 온수 생산에 사용됨으로 화석연료 대체효과가 크다.

현재 국내·외적으로 유리식 진공관형 태양열 집열기는 그 보급이 활발하게 이루어지고 있으나 유리의 기계적 취약성으로 인해 그 보급에 상당한 어려움이 존재한다. 본 연구에서 개발하고자하는 비유리식 진공관형 태양열 집열기는 이러한 유리식 태양열 진공관이 가지고 있는 취약성을 보완할 수 있을 뿐 아니라 그 적용성도 우수해 다양한 형태로 태양열의 이용을 용이하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 비유리식 진공관형 태양열 집열기의 성능분석을 위한 기초 단계로 비유리식 진공관내의 진공도와 집열판(absorber plate)의 열적 특성 관계를 파악하기 위한 실험을 하였다.

2. 실험장치 및 방법

비유리식 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 진공관형 태양열 집열기는 유리와 달리 진공관 내로 공기의 침투가 발생하므로 이를 억제하거나 진공도 유지를 위한 메카니즘이 고려되어야 한다. 이를 위해서는 그림 1과 같이 진공관 내부의 일정한 진공도 유지를 위해 집열기와 별도로 설치된 Vacuum Chamber를 진공관과 연결하여 진공관 내의 Outgasing이 가능하도록 할 수도 있으며, 그림 2와 같이 진공관 외피에 공기의 침투를 억제하기 위한 Gas Barrier Coating을 고려할 수도 있다.

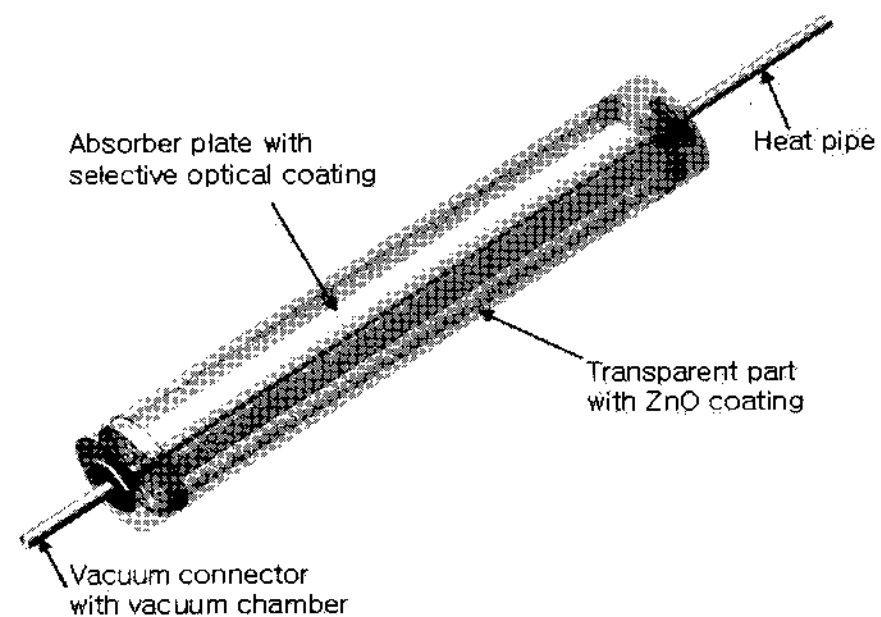


그림 1. 비유리식 진공관형 집열기 개념도

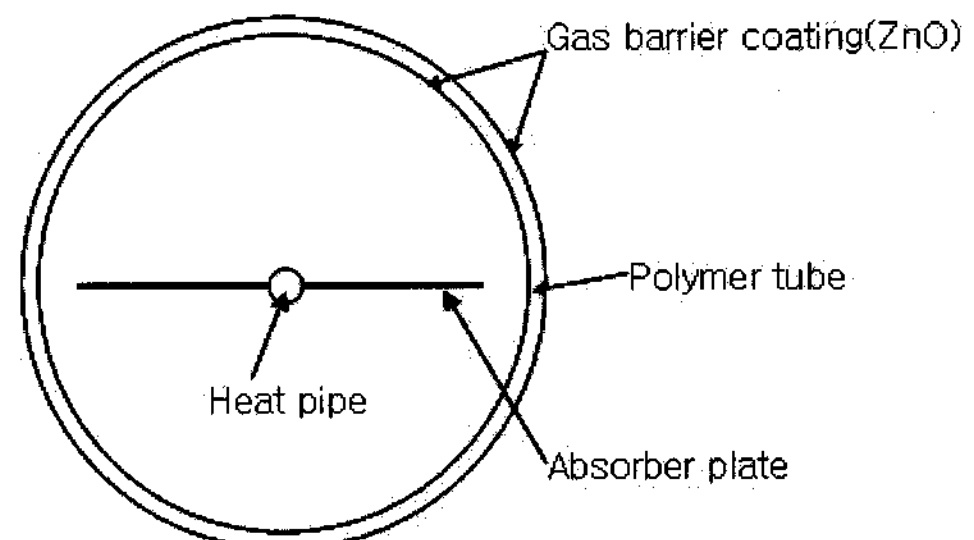


그림 2. 비유리식 진공관 단면도

2.1 실험 장치

비유리식 진공관형 집열기는 Polymer tube, 히트파이프, 집열판 및 Vacuum connector 로 구성이 되어 있다. Polymer tube는 구입이 용

이하고 다른 재료에 비해 비교적 저렴한 아크릴을 사용하였고, 직경 70mm, 두께 10mm, 길이 450mm의 양쪽 캡을 가지고 있다. 히트파이프는 열전도가 좋은 구리로 제작되었고, 길이 550mm, 외경 8mm 이다. 집열판은 두께 0.5mm, 너비 55mm × 380mm 의 구리판으로 제작이 되었으며 선택적 흡수 도료로 코팅이 된다. 사용된 재료는 The Dampney Company의 ThurmaloX solar collector coating 이다. Vacuum connector는 앞서 언급하였듯이 진공관내의 Outgasing이 가능하도록 외경 9.5mm의 구리관으로 제작이 되었다.

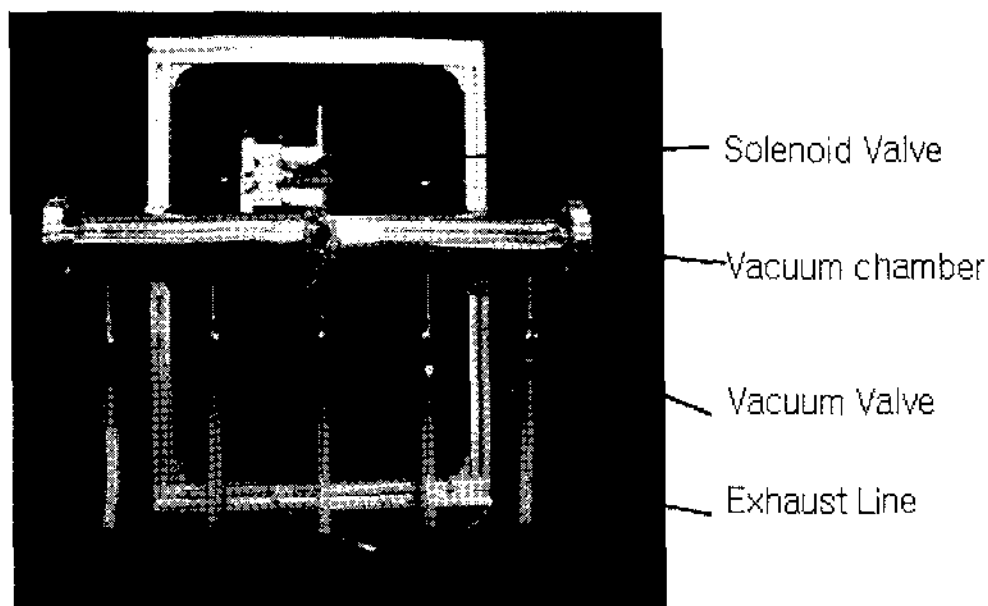


그림 3. 헤더형 진공 챔버

그림 3은 Header-type Vacuum chamber로서 진공관 내부의 진공을 유지시키기 위하여 특별히 제작된 장치로서 진공관의 vacuum connector와 연결되어진다.

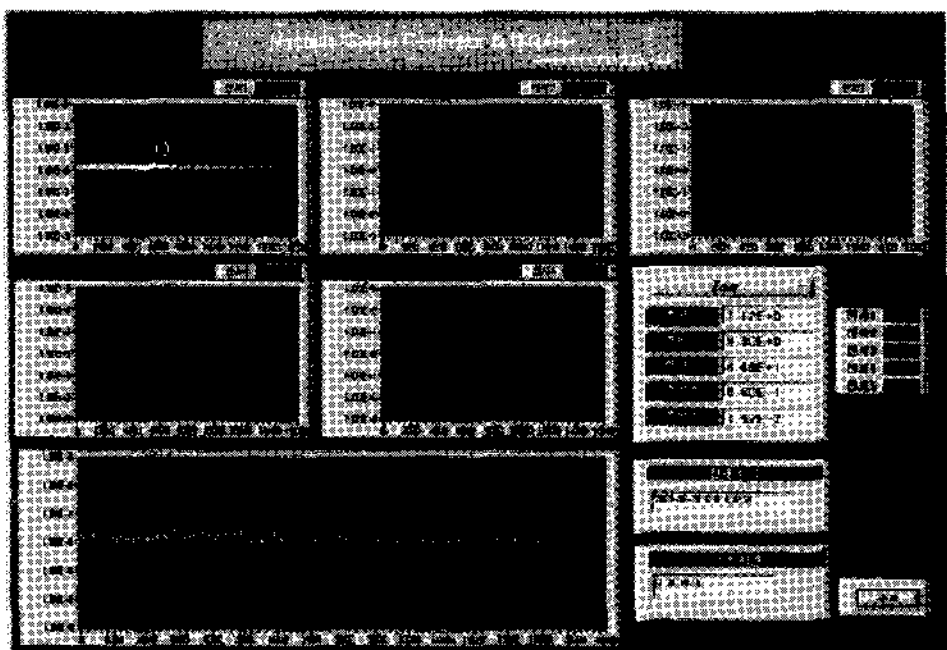


그림 4. LABVIEW를 이용한 데이터 수집 및 제어 어플리케이션

헤더형 진공 챔버는 솔레노이드 벨브와 컨트롤러를 통하여 On-off 동작이 자동으로 이

루어지며, 그림 4와 같이 LabVIEW 프로그램을 이용하여 실시간으로 데이터를 수집 받고 진공도 변화를 모니터링을 할 수 있도록 되어있다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 비유리식 진공관형 집열기 내부의 진공도변화에 따른 집열판의 온도변화를 분석하기위해 75W 할로젠램프 20개로 구성된1.5kW 급 인공태양(Solar Simulator)의 열속을 $800\text{W}/\text{m}^2$ 로 고정하였다. 이때 열속값은 집열면 높이에 따른 평균치를 가리키며, $\pm 25\text{W}/\text{m}^2$ 이었다. 진공도를 10^{-2}Torr 와 5torr 로 조건을 달리 하였으며 연속적으로 온도변화를 측정하였다. 집열판에는 그림 5와 같이 4곳에 K형 열전대를 접합하였으며, 진공관내부의 온도를 측정하기위해 관 내부에도 K형 열전대를 삽입하였다. 데이터 수집은 AGILENT사의 34970A 계측기를 사용하였다.

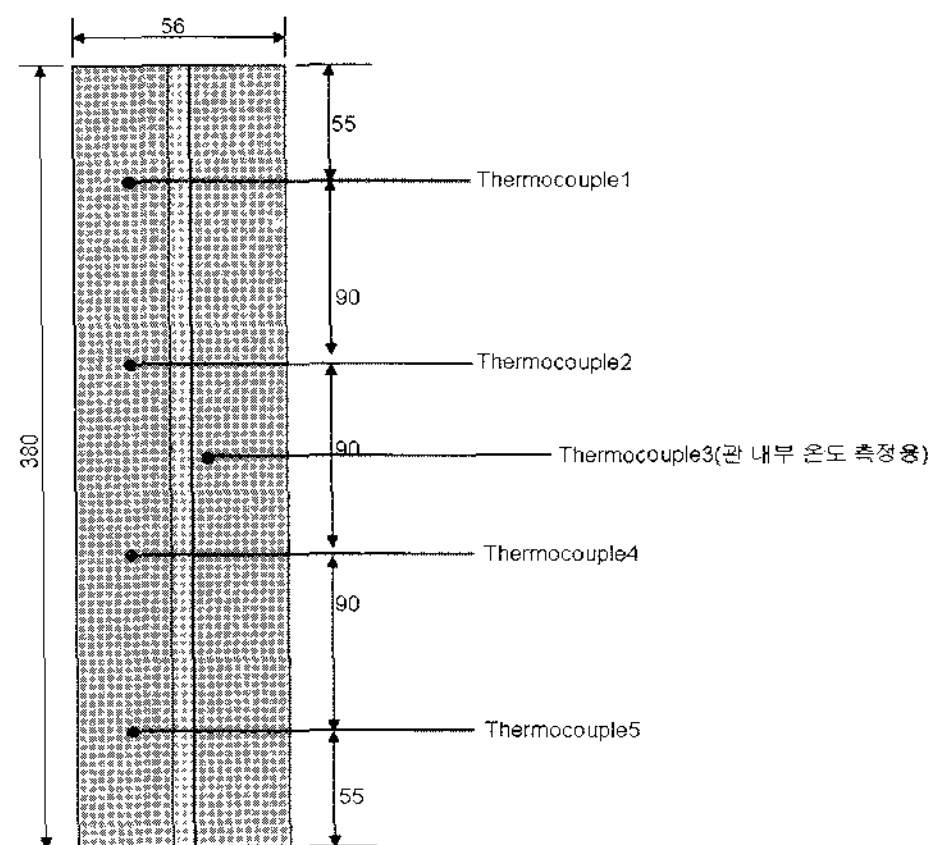


그림 5. 집열판의 열전대 위치

3. 실험 결과

아크릴 진공관 내부의 진공도는 대기로부터의 공기 유입과 진공도가 높아짐에 따라 재질 내부에서의 가스 입자의 방출로 인하여 시간이 경과됨에 따라 진공도가 저하될 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 일정한 초기

의 압력이 유지되도록 내부진공도가 10^{-2} torr 이상인 경우에는 앞서 언급했듯이 진공 챔버를 사용하여 간헐적인 outgasing이 가능하도록 고려하였는데, outgasing을 위한 튜브의 내부 압력 기준치는 9.0×10^{-2} torr로 설정하였다. 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 1은 앞서 언급한 인공태양 장치를 이용하여 평균 열속 $800W/m^2$ 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.

표 1. 열속 및 진공도에 따른 각 센서별 최종 온도

	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 6과 그림 7은 각각 진공관 내부의 진공도가 10^{-2} torr 및 5torr일 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(~ 1 torr) 범위에서는 공기의 열전도도는 1atm에서의 그것과 거의 같은 값을 보이기 때문이다⁹⁾.

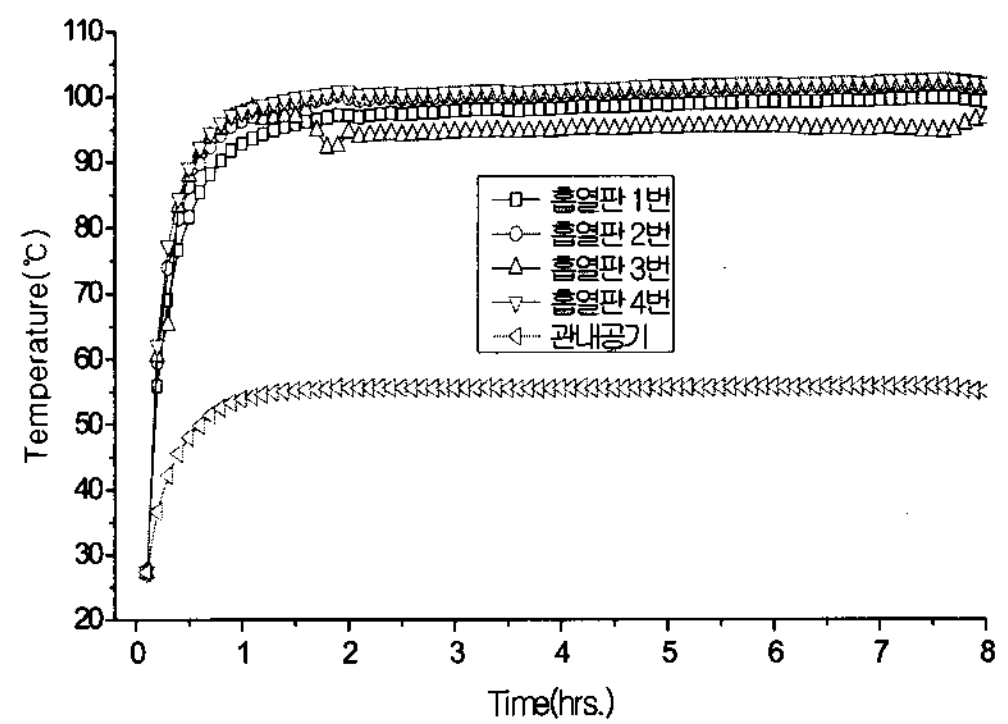


그림 6. 진공도 10^{-2} torr에서의 집열판 온도변화.

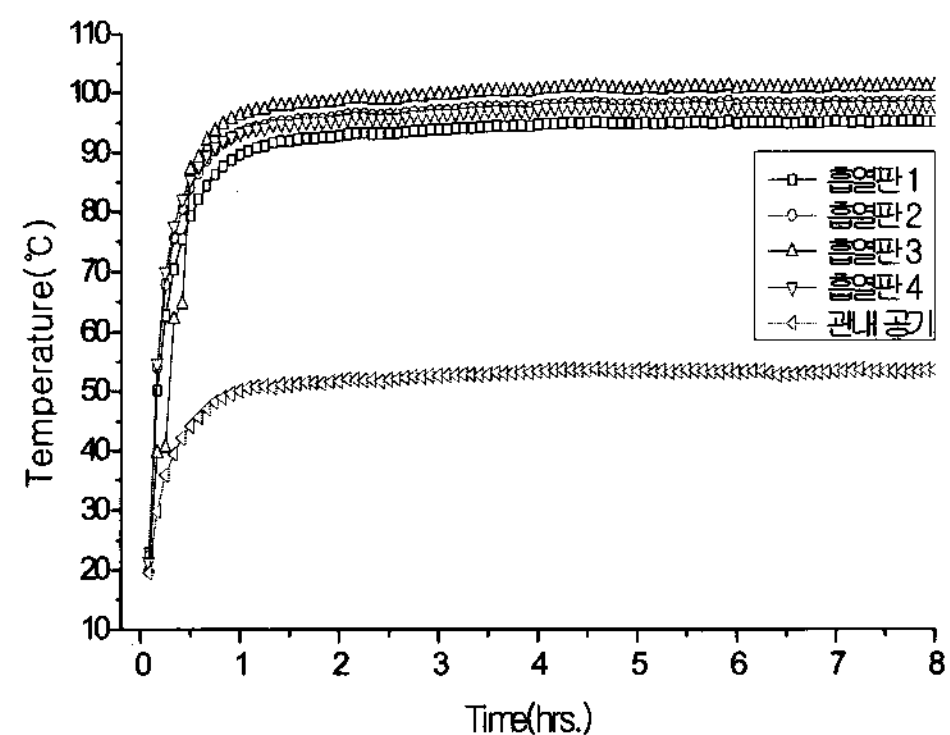


그림 7. 진공도 5torr에서의 집열판 온도변화

진공관 내부의 압력 강하는 내부에서 일어나는 자연대류 현상에만 영향을 미친다. 특

히, 높은 형상비(aspect ratio)를 갖는 경우에는 이를 최대한도로 억제할 수 있을 것이며, 그 내부의 진공도에 따라 고진공이 아닌 경우($<10^{-4}$ torr)에는 열손실의 차이가 크게 나지 않을 것이다.

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

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

스텝과 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) 차이에 기인하는 것으로 보인다.

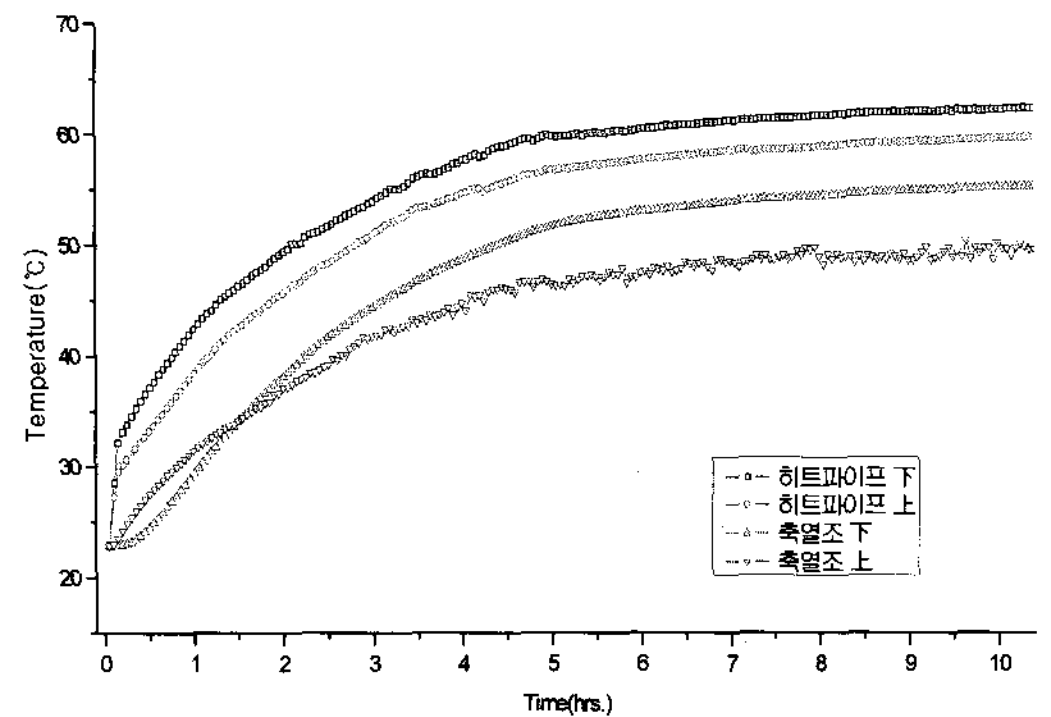


그림 8. 비유리식 집열기의 히트파이프 및 축열조 온도 변화.

표 2. 비유리식 집열기와 SEIDO 5의 히트파이프 성능 분석결과

	비유리식집열기 (10^{-2} torr)		SEIDO 5	
	초기 온도(°C)	최종 온도(°C)	초기 온도(°C)	최종 온도(°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 2는 10^{-2} torr로 제작된 집열 튜브에 히트파이프를 장착하고 실제 시스템을 제작하여 유리진공관(내부진공도: 10^{-5} mbar) 시

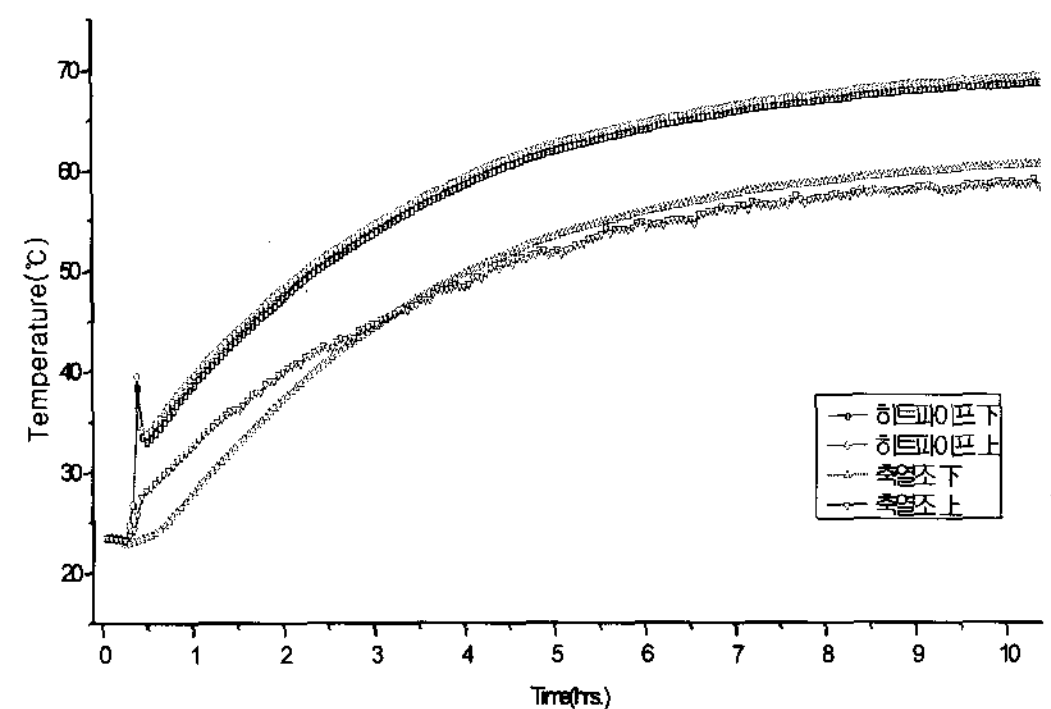


그림 9. SEIDO 5의 히트파이프 및 축열조 온도 변화.

그림 10과 11은 아크릴의 투과도에 대한 실험 결과를 나타내고 있는데, 그림 10에서 보듯이 ZnO 코팅 전의 아크릴의 투과도는 유리의 투과도에 비해 전혀 떨어지지 않은 것을 보여주고 있다. 한편, ZnO 코팅 후에는 코팅막(1 μ m)의 형성으로 인한 투과도의 저하가 나타나는데, 그림 11에서 보듯이 Plasmatron

을 이용하여 상압에서 코팅한 것(a)과 진공에서 코팅한 것(b)과는 크지는 않지만 다소의 차이를 보여주고 있다.

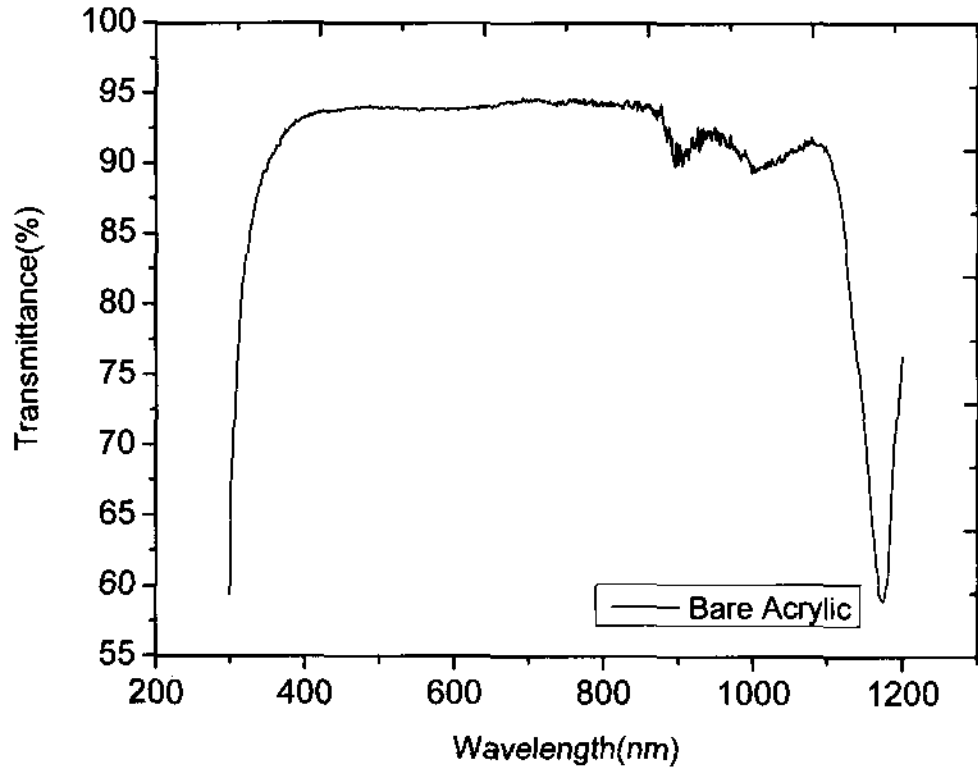


그림 10. 아크릴 투과율

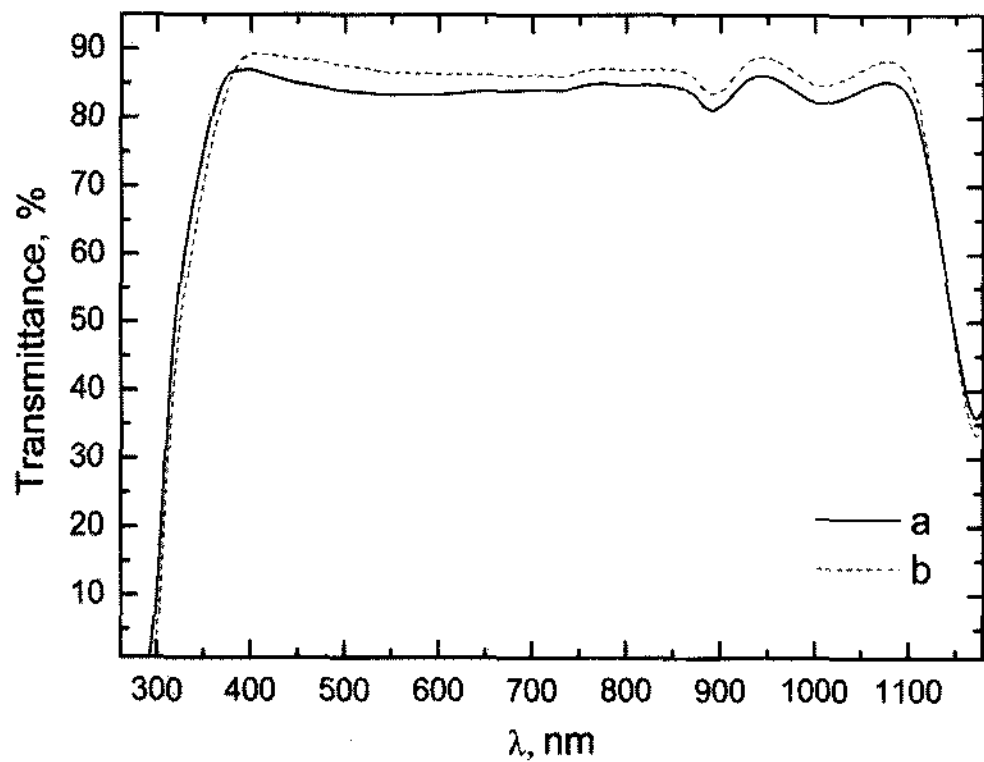


그림 11. ZnO 코팅시 아크릴 투과율

4. 결 론

본 연구에서는 비유리식 진공관형 태양열 집열기의 체계적 성능분석을 위해 비유리식 진공관내의 진공도와 집열판(absorber plate)의 온도 관계를 파악하기 위한 기초 실험과 함께 히이트 파이프를 장착한 간단한 시스템을 제작하여 기존의 유리 진공관 시스템과의 성능 비교를 수행하였다.

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. 비유리식 집열기의 최적 설계를 위해서는 ZnO 코팅에 관한 다각적인 기술적 데이터와 함께 튜브 내의 최적 진공도에 대한 보다 상세한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터의 에너지·자원기술개발사업 연구과제(과제번호: 2006-N-SO08-01-0-000) 및 「2단계 BK21 사업」의 지원을 받아 수행되었습니다

참 고 문 헌

1. K. Chen, and W. G. Chun, et al. Solar Energy : New Research, 1st ed., Nova Science Publishers, Hauppauge, NY 2006
2. 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.
3. M. Groll, et al. Development of a Liquid-Trap Heat Pipe Thermal Diode, J. Spacecraft, Vol. 16, No. 4, pp.195-202, 1979.
4. K. Chen, Design of a Plane-Type Bidirectional Thermal Diode. ASME J. Solar Energy Engineering, 110, pp. 299-305, 1988.
5. K. Chen, R. W. Shorthill, S. S. Chu, P. C

- hailapo, 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.
6. 김용, 서태범, 강용하, 흡수관 형상과 일사각도에 따른 진공관형 태양열 집열기의 성능 변화. 설비공학논문집 제 17권 제 7호 pp. 659-668, 2005.
 7. 이용훈, 최석천, 이광성, 지명국, 정효민, 정한식, 흡수식 태양열 집열기의 열전달 특성에 관한 연구. 대한기계학회 2002.
 8. 황용하, 재생형 태양열 집열기의 성능에 대한 연구. 충남대학교 논문집 제 36호 1호 2001.
 9. 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.