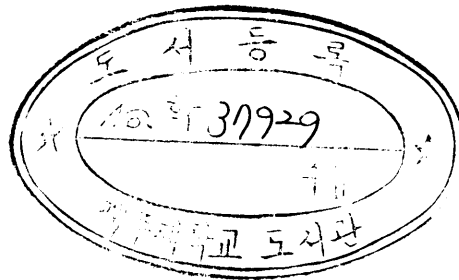


17
543.6
06610

碩士學位論文

熱다이오드 메커니즘을 利用한
太陽熱 煖房裝置의 設計 및 製作



에너지工學科

李 京 珍

1998年 12月

熱다이오드 메커니즘을 利用한 太陽熱 煖房裝置의 設計 및 製作

指導教授 千 院 基

李 京 珍

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



李京珍의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

1998年 12月

Design and Fabrication of a Solar Space
Heating System
by Thermal Diode Mechanism

 **Kyung-Jin Lee**
(Supervised by professor Won-Gee Chun)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1998. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	5
1. 열다이오드	5
2. 루프형 열다이오드	10
3. Bayonet형 열다이오드	12
III. 장치 설계 및 제작	15
1. 집열부	16
1) 회전식 흡열패널	20
2) 블라인드 차단식 흡열패널	21
2. 방열부	23
3. 연결부	26
4. 전체 지지 어셈블리	29
5. 시스템 제어	30
IV. 실험 및 결과	34
1. 옥내실험	34
2. 옥외실험	39
V. 결 론	44
VI. 참 고 문 헌	45

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Natural convection at a vertical plate	6
Fig. 2. Natural convection at horizontal plates	7
Fig. 3. Heat transfer modes for a thermal diode	8
Fig. 4. Rectangular closed-loop thermosyphon	8
Fig. 5. Bidirectional Loop-type thermal diode design	10
Fig. 6. Parts of a Bayonet thermal diode	13
Fig. 7. Bidirectional Bayonet thermal diode	14
Fig. 8. Configuration of Loop-type thermal diode	16
Fig. 9. Concept of the absorber window	17
Fig. 10. Welding (a) and Riveting (b) between the absorber plate and pipe	19
Fig. 11. Concept of the absorber assembly	20
Fig. 12. Absorber design	22
Fig. 13. Concept of the radiator assembly	23
Fig. 14. Radiator design	24
Fig. 15. Joint Between the absorber and the radiator	28
Fig. 16. Swivel Elbow	28
Fig. 17. Dimensions of the assembly support	29
Fig. 18. Control circuit	32
Fig. 19. Control unit	33
Fig. 20. System power supply configuration	33
Fig. 21. Laboratory test of the Loop-type thermal diode	34

Fig. 22. Laboratory test results of the Loop-type thermal diode under forward bias	37
Fig. 23. Laboratory test results of the Loop-type thermal diode under forward bias(Detail)	38
Fig. 24. Laboratory test results of the Loop-type thermal diode under reverse bias(Heating and Cooling)	38
Fig. 25. Dimensions of the test cell	39
Fig. 26. Configuration of the Loop-type thermal diode installed in the test cell	40
Fig. 27. Results of the outdoor test for Loop-type thermal diode	42
Fig. 28. Comparison between indoor temperatures of two test cells (with and without Loop-type thermal diode)	43



Table 1. Normal Emissivity of metals, paint and surface coatings	26
Table 2. Control conditions	32

SUMMARY

The thermal diode is a device which allows heat to be transferred in one direction, and blocks heat flow in the opposite direction. Most thermal diode designs have been based on the fact that heat usually can be transferred more efficiently by convection than by conduction. This study has been carried out to develop a Loop-type thermal diode solar space heating system, which is capable of adjusting the direction of heat flow and the solar absorption. It can be used for space heating in winter and for cooling load reduction of buildings in summer. This system exploits the sun's thermal energy more aggressively than the existing solar systems by adjusting itself appropriately to the direction of heat flow and insolation conditions. Also, by replacing curtain wall(nonstructural walls) of the building, the system could improve the utilization efficiency of building space. It is expected that the system could be applied broadly to public buildings, office accommodation, or residential buildings.

I. 서론

태양열을 건물 난방 및 냉방에 도입하고자 하는 여러 가지 연구들은 계속되어 왔으며, 그 결과 최근에 건설된 주거용 및 첨단 기술의 상업용 건물들 중 상당수는 태양열 난방을 채택하고 있다. 우리 나라의 연간 에너지소비량의 약 40%가 건물 및 상업 부문에 소요되고, 생활 수준이 향상됨에 따라 그 소비율도 증가하는 추세이다. 이러한 건물 에너지 부문에 태양열을 적용하고자 하는 연구와 시도는 에너지 자원이 부족한 우리 나라에서는 더욱 의의 있는 일이라 할 수 있다. 또한 최근의 경제 한파로 인한 유가 불안 및 기타 에너지원 수입 여건이 까다로워지면서 태양열 시스템을 비롯한 대체에너지의 이용에 관심이 증대되고 있다. 물론 한시적인 현상일 수도 있으나 태양열 시스템의 바른 이해와 장점을 홍보할 수 있는 좋은 계기가 될 수 있을 것이다. 장기적으로 볼 때, 태양열을 이용한 난방 및 냉방 기술은 사회적으로도 기존의 여러 형태의 에너지를 대신할 수 있는 무한한 잠재력을 지니고 있는 것이다.

현재 온수 급탕 또는 냉·난방을 위해 다양한 형태의 태양에너지 시스템이 설계 및 적용되고 있다. 일반적으로 태양열 냉·난방 시스템들은 에너지를 전달하고 저장하는 방식에 따라 설비형(Active system)과 자연형(Passive system)으로 대별된다(Duffie와 Beckman, 1991).

설비형 태양에너지 시스템은 태양 복사에너지를 흡수하는 태양열 집열기, 수집된 에너지를 저장하는 열 저장 장치, 열 전달 유체, 유체를 구동시키는 원동기, 그리고 제어 모듈로 구성되어 있다. 설비형 시스템은 기계 계통을 작동시키는데 별도의 전력 공급을 필요로 하지만, 시스템 각 계통의 제어를 통해 최적의 상태를 유지할 수 있도록 시스템을 운영할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

자연형 태양열 난방 시스템은 집열부, 축열부, 이용부 등 각 구성부 간의 에너지전달이 전도와 대류, 복사 등 자연적인 것에 이루어지며, 특별한 기계 장치 없이 태양에너지를 집열·저장하여 이용할 수 있는 시스템이다. 자연형 태양열 난방 시스템은 열에너지의 획득 방식에 따라 직접 획득식(Direct gain system) 과 간접 획득식 시스템(Indirect gain system)으로 구분된다.

직접 획득 시스템은 태양열에너지가 실내의 바닥이나 벽면 등의 축열체에 직접 복사 전달되는 형태이다. 한편, 가열된 축열체는 다시 전도 및 대류를 통해 실내를 가열하게 되며, 실내 축열체의 열용량에 따라 보다 많은 열에너지를 저장할 수 있게 된다. 겨울철에 실내의 열 손실을 방지하기 위해 단열을 강화하면 직접 획득 시스템의 성능은 더 향상될 수 있으며, 개구부 상단의 차양(Overhang) 설치는 여름철 태양 복사열의 실내 유입을 줄여 실내의 과열을 방지한다.

간접 획득 시스템은 직접 획득식처럼 태양에너지를 직접 생활공간에 끌어들이지 않고 집열부 혹은 축열부를 이용부(생활공간)와 분리시켜 놓은 형태이다. 간접 획득방식으로는 축열벽 방식(Trombe Wall), 온실부착 방식(Attached Sun Space), 지붕연못형(Roof Pond), 대류 루프 방식 등이 있으며, 직접 획득 시스템에 비해 간접 획득식은 중간매체(부착 온실, 축열벽 등)의 적절한 운용에 따라 온도조절이 가능하고, 야간에는 주간에 축열된 열을 실내로 서서히 방열할 수 있어 장시간 동안 난방 효과를 볼 수 있다.

태양열 냉방 시스템 역시 설비형과 자연형으로 나뉜다. 설비형 냉방 시스템은 설비형 난방 시스템과 마찬가지로 시스템을 가동하는데 동력을 필요로 하며 대체적으로 규모가 크고, 적절한 제어 전략과 부수적인 에너지 공급 계통이 필요하다. 자연형 시스템은 자연적인 열 전달 메커니즘을 이용하여 외부로 열을 전달하는 시스템이다. 복사, 자연대류, 자연적인 기류, 그리고 외부로의 열 전

도 등과 같은 메커니즘을 통해서 냉방효과를 얻고자하는 시스템을 총칭한다.

그리고 태양에너지 시스템을 설계하는데 있어 중요한 또하나의 요소는 에너지 저장이다. 직·간접으로 얻은 에너지를 어떻게 하면 보다 많은 양을 저장하여 사용자가 요구하는 시간에 알맞게 공급할 수 있는가 또한 매우 중요한 문제이다. 이런 점에서 다양한 형태의 열저장 시스템들이 활발히 연구되고 있으나 아직까지 기대 수준에는 미치지 못하고 있는 실정이다.

이와 같이 계속적으로 지금까지 연구되고 개발되었던 태양열 냉·난방시스템들은 아직까지도 공통적으로 몇 가지의 문제점을 안고 있다. 첫째가 냉·난방 공조 설계 개념이 미약하다는 것이다. 난방이든 냉방이든 어느 한쪽에 치중하다보면 일년 중 시스템 이용 시간이 제한적이며, 심지어 역효과를 나타나기도 한다. 둘째로 경제성과 안정성이 낮다는 것이다. 현재의 화석연료나 계통 전력을 사용하는 것보다 비용부담이 크며 시간적으로 공급과 수요를 달리 함으로써 발생하는 문제를 극복 할만한 대열용량 소규모의 축열재 개발이 미미하다. 셋째로 공간 배치와 외관의 문제이다. 건물의 내·외부의 많은 공간을 차지함으로써 건물의 공간 이용에 다소 무리를 주며, 건물 외관에 적절한 디자인 개발 등에도 미진한 상태이다.

이러한 문제점들로 하여금 태양열 이용의 긍정적인 면보다 부정적인 측면을 부각시키는 결과를 초래하여 태양열 시스템의 실용화에 많은 어려움을 주고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제의 해결점을 찾고자 하는 방향의 시스템 설계에 주안점을 두었다.

본 연구에서 개발하고자 하는 난방장치는 자연형 간접 획득 시스템과 약간의 제어 개념을 도입하여 만든 혼합형(Hybrid) 시스템이라 할 수 있다. 열 유동의 방향을 바꿀 수 있는 양방향 열 다이오드를 근간으로 하여 다양한 기상 조건에 따라 유효 열전달량과 태양열의 집열 여부를 조절함으로써 시스템의

이용 효율을 높여 쾌적한 실내 환경을 지속적으로 조성할 수 있도록 설계 하였다.

또한 설치도 건물의 외측 비내력벽(Curtain wall)을 대신함으로써 부차 공간을 따로 필요로 하지 않으며, 따라서 건물의 공간 활용에도 한 몫을 할 것이다.

이렇게 본 연구에서는 건물의 겨울철 난방과 여름철 냉방 부하 감소에 유효 적절하게 적용할 수 있는 태양열 시스템의 실용화 모델을 고안하는데 최종 목적을 두었다.



II. 이론적 배경

1. 열다이오드

열다이오드(Thermal diode)란 전기공학 분야에서 쓰이는 “다이오드”란 말과 의미가 유사한 것으로서 임의 한쪽 방향으로서는 효과적으로 열을 전달하고 다른 방향으로서는 열 흐름을 억제하는 열 전달 기구를 통틀어 말한다. 이는 열전달에 있어 전도(Conduction)보다는 대류(Convection)에 의해 열을 더 효과적으로 전달한다는 사실에 기초하여 제안된 장치이다.

대류에 의한 열전달에 있어 유체유동의 원인에 따라 강제대류(Forced convection)와 자연대류(Natural convection)에 의한 열전달로 분류된다. 강제대류 열전달은 펌프나 송풍기에 의해 유체를 강제로 흐르게 하여 열을 전달하는 방식이다. 반면, 중력장 내에서 유체의 온도차이에 의하여 생기는 밀도구배에 의한 부력 효과 때문에 일어나는 열전달을 자연대류에 의한 열전달이라고 한다. 대개 열다이오드의 열전달 메커니즘은 이러한 자연대류에 통해서 이루어진다.

자연대류는 대류유동을 강제로 유발시키는 특별한 장치 없이도 유체 내에서 유체유동이 일어나는 것을 말한다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 일정 온도의 유체 내에 수직으로 고정된 평판을 고려하여 보자. (a)와 같이 평판의 온도가 유체의 온도보다 높은 경우, 초기의 열전달은 순수한 열전도에 의해서 시작하고 이로 인해 서서히 유체 내에 온도구배가 생긴다. 이러한 유체의 온도구배는 유체의 밀도구배를 만들어 내고, 밀도구배는 중력장 내에서 부력(Buoyancy forces)을 발생시켜 유체가 상승하는 대류운동을 촉발시킨다. Fig. 1의 (b)는

따뜻한 유체 내에 차가운 평판이 고정되어 있는 경우로 유체 운동 방향이 (a)와는 반대가 된다. 이 경우에도 유체는 정지 상태의 바깥 영역의 유체를 끌어들이면서 하강한다.

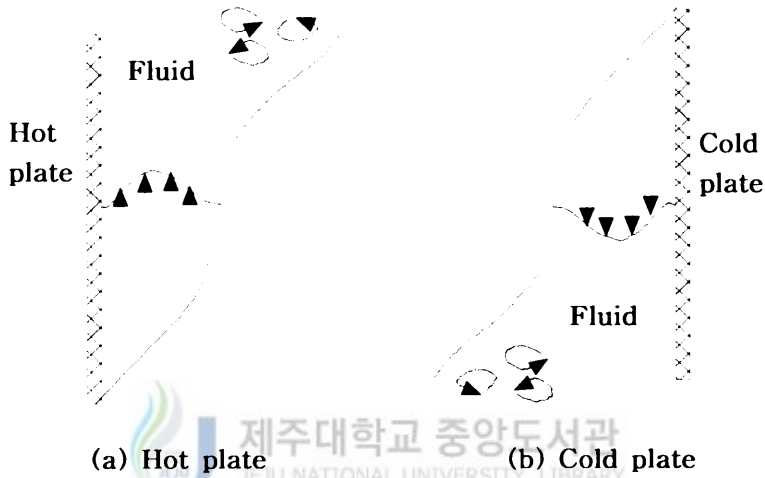
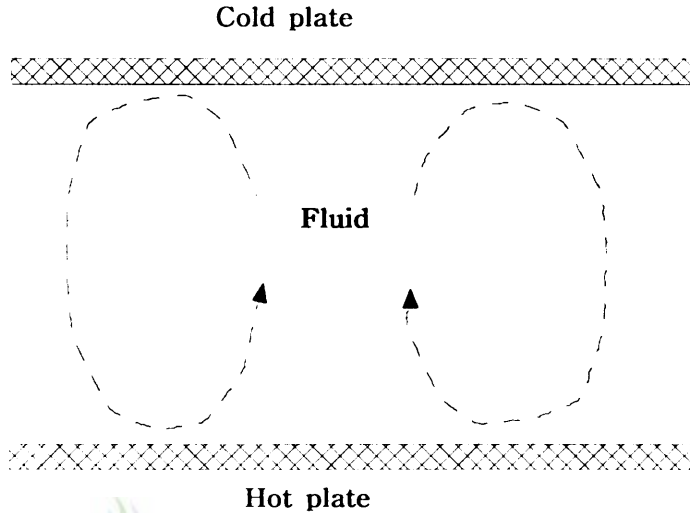


Fig. 1. Natural convection at a vertical plate

Fig. 2는 유체가 하부평판에서 가열되어 상부에서 냉각되어질 때의 유체유동을 나타낸 것이다. 하판이 상판보다 온도가 높으면 이 공간에서의 유체는 수직 방향의 온도구배가 생길 것이다. 시간의 지남에 따라 상부의 유체는 차가워져 밀도가 증가하고 바닥의 유체는 뜨거워져 밀도가 작아지게 된다. 온도구배에 의한 밀도 차가 어느 임계치 이상으로 커지면 부력은 유체의 점성력보다 커지게 되고, 유체는 서서히 움직이기 시작한다. 이 때 위로 상승한 유체는 다시 상판에서 식혀져 하강하고, 하강한 유체는 하판에서 데워져 상부로 이동하는 순환과정을 반복하게된다. 이와 반대의 경우, 즉 하판은 차고 상판이 뜨거운 경우에도 전도에 의한 온도구배가 발생하기는 하나 상부의 유체밀도가 바닥의 밀도

보다 작아 밀도 차에 의한 부력은 발생하지 않는다. 따라서 자연대류는 일어나지 않는다.

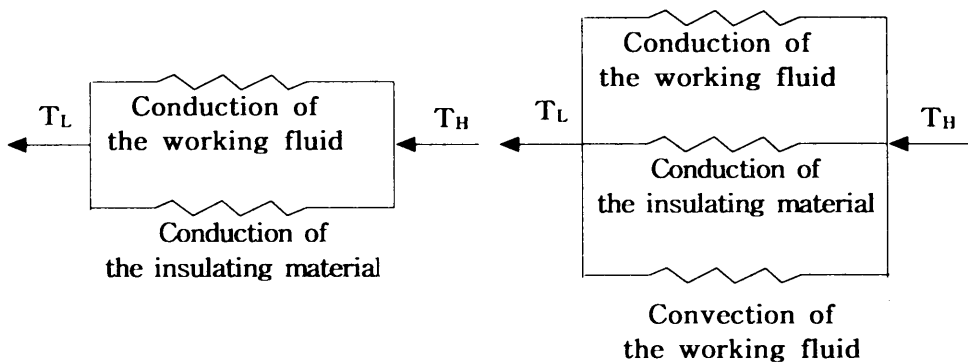


제주대학교 중앙도서관
 Fig. 2. Natural convection at horizontal plates

가장 단순한 형태의 열다이오드는 역시 열사이폰(thermosyphon)이라 불리는 폐쇄 루프 열다이오드이다. 열사이폰에 대한 연구는 높은 열 효율 덕택에 지속적으로 이루어져 오고 있다. Groll 등(1979)의 연구에 의하면, 작동유체를 암모니아로 하는 열사이폰을 최적의 조건하에서 작동시키면 폐쇄 루프 열다이오드의 열전달율이 구리 Fin의 300배에 이를 수 있음을 실증하였다.

열다이오드는 두 가지의 열전달 방향을 가지며 각각 순방향(Forward bias) 열전달과 역방향(Reverse bias) 열전달이라 부른다(Fig. 3). 순방향 열전달의 경우에는 유체의 대류 매커니즘에 의해 많은 양의 열이 전달되며 역방향이 경우에는 오로지 전도(Conduction)에 의한 열전달 밖에 허용되지 않는다.

열다이오드는 집열부(Absorber), 방열부(Radiator) 그리고 두 부분의 유체의 흐름을 연결하는 연결부(Joint)로 구성된다. 순방향 바이어스(bias)를 걸어주면, 즉 아래쪽에 위치한 집열부를 가열하거나 윗쪽의 방열부를 냉각시켜 두 부분의 온도차를 유발하면 다이오드 내에서 자연대류가 일어나게 된다.



(a) Reverse bias (b) Forward bias

Fig. 3. Heat transfer modes for a thermal diode

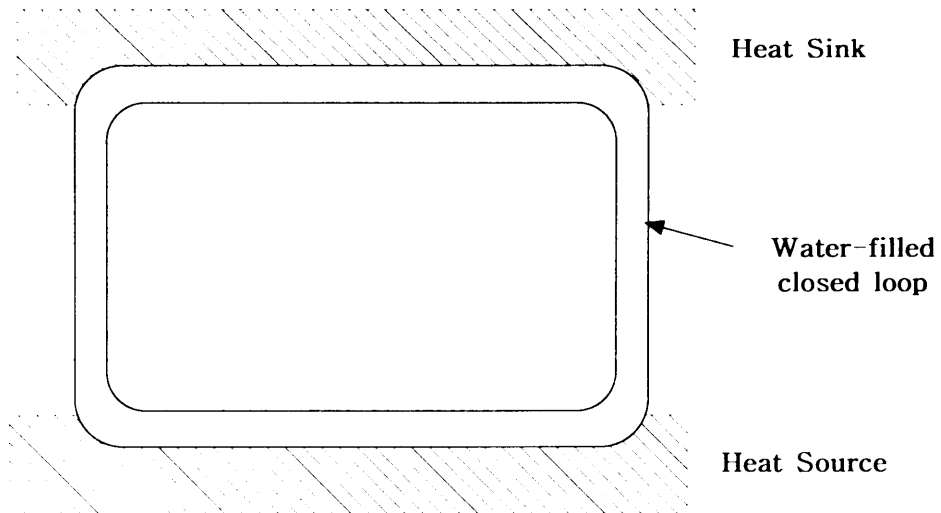


Fig. 4. Rectangular closed-loop thermosyphon

Fig. 4는 가장 단순한 형태의 루프형 열다이오드의 개념도이다. 열다이오드의 상부는 열침원(Heat sink)에 노출되어 있으며 하부는 열원(Heat source)과 직접 접촉하고 있다. 이렇게 해서 두 부분의 온도차가 존재하면 루프 내의 유체는 밀도 차에 의한 부력에 의해 순환현상이 일어난다. 이 과정에서 열원과 열침원을 서로 바꾸어 역방향 바이어스가 되게 하면 두 부분 사이의 유체 순환 현상은 더 이상 발생하지 않으며 열전달은 단지 열전도에 의해서만 이루어진다. 유체가 액체 금속이 아닌 이상 열전도도는 매우 낮아 열전달량은 매우 적다. 따라서 사각형태 루프형 열다이오드는 순방향 상태에서는 열을 효과적으로 전달하지만 역방향에 대해서는 매우 제한적이다.

이러한 열다이오드의 작동 및 그 기본원리에 대하여 많은 연구 논문이 발표되어 이 분야에의 꾸준한 관심을 보여주고 있다. Creveling 등(1975)은 실험적으로 물을 작동유체로 하여 루프형 열다이오드의 작동 안정성을 조사 연구에서, 어떤 조건하에서는 루프내의 작동유체의 유동이 상당히 불안정해질 수 있음을 밝혔다. 그리고 Greif 등(1979)은 Numerical simulation을 통해 루프형 열다이오드 내에서의 작동유체의 유동특성에 대해 연구하기도 하였다.

2. 루프형 열다이오드

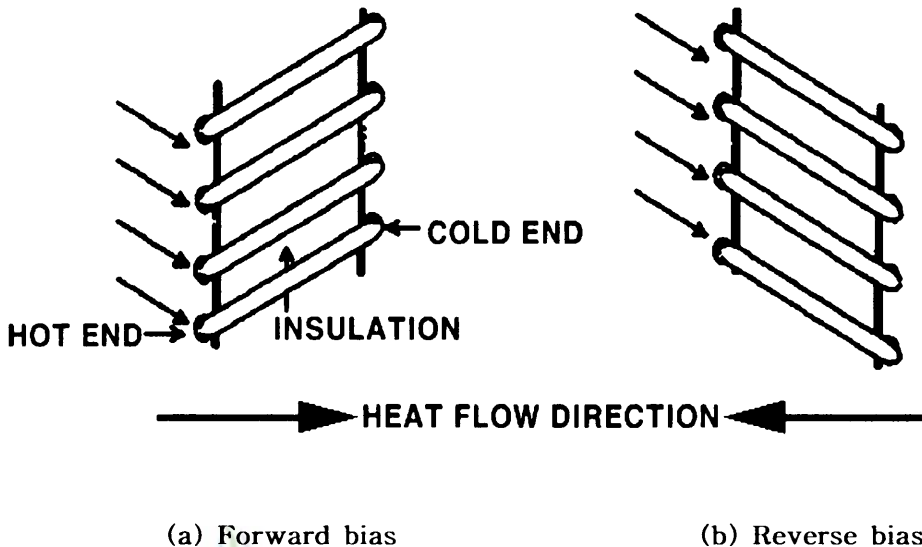


Fig. 5. Bidirectional Loop-type thermal diode design

루프형 열다이오드(Loop-type thermal diode)는 열다이오드의 기본 개념을 가장 명료하게 보여주는 모델이다. Fig. 5는 여러 개의 사각형 형태의 루프 다이오드로 구성된 열다이오드이다. 열다이오드는 두 개의 수직 평판과 이에 부착된 유체로 채워져 있는 여러 개의 루프로 구성되어 있다. 한편 루프는 수평부와 경사부로 나눌 수 있는데, 수평부는 열의 흡수 또는 방열 목적으로 설계되어 구리나 알루미늄 같은 열전도도가 높은 금속으로 만들어져 있으며, 경사부는 수평부를 오가며 열전달을 수행하는 유체의 흐름을 연결하며, 열전도도가 낮은 물질의 관으로 되어 있다.

Fig. 5의 (a)와 같이 열다이오드 수평 하부가 가열되고 상부에서 냉각되어질 때 열다이오드의 순방향(Forward bias) 모드라 부르며, (b)의 경우를 역방향

(Reverse bias) 모드라 한다. 천원기 등(1996)은 실측실험을 통하여 이런 형태의 열다이오드의 순방향(Forward bias) 및 역방향(Reverse bias) 작동 성능 분석 결과, 열다이오드에서 두 수직 평판(즉, 흡열판 및 방열판) 사이의 온도차가 20℃일 때, 순방향에 대해서는 800 W/m² 이상의 열전달 효과를 얻을 수 있으며 역방향에 대해서는 2 W/m² 이하로 매우 열저항이 큼을 보여주었다. Jones(1986)도 난방용으로 액체식 열 다이오드를 고안하여, 실험을 통해 시스템 효율이 50% 정도 됨을 보였고 이것을 이론적 결과와도 비교하여 검증하였다.

또한 수평부의 한쪽을 움직여 두 수평부의 높이를 달리함으로써 열전달 방향을 바꿀 수 있는 형태의 열다이오드를 양방향성 열다이오드(Bidirectional thermal diode)라 하며, 이와 같은 메커니즘을 이용하여 냉방 및 난방에 응용하고자 하는 연구들이 계속되고 있다. Madejski와 Mikielewicz(1971)는 작동 유체가 들어있는 루프를 회전시켜 열흐름 방향과 열전달율이 변화시키는 양방향성 루프형 열다이오드를 고안하여 열 유동형태를 연구하기도 하였다. 본 연구에서도 이러한 양방향성 열다이오드 메커니즘을 근간으로 하여 열성능 및 시스템 이용 효율을 향상시킬 수 있는 설계를 제시하고자 한다.

양방향성 열다이오드의 열전달 방향은 기상조건에 따라 정해지게 되는데, 기본적으로 동절기에는 열흐름 방향을 건물 내측으로 하여 시스템을 난방에 이용하고, 하절기에는 열전달 방향이 밖을 향하게 하여 냉방 혹은 단열매체로써 이용되어 질 수 있다.

이와 같이 하나 또는 다수의 루프로 구성하여 열 흐름의 방향을 바꿀 수 있는 양방향성 열다이오드의 적용성을 극대화하기 위해서는 루프 설계 및 제작에 있어 여러 요소 결합의 단순성 및 루프내의 유체의 관로 수두 손실의 최소화에 대한 고려 등이 필요할 것이다.

3. Bayonet형 열다이오드

단면이 총검(Bayonet)을 닮아 이름이 붙여진 Bayonet형 열다이오드 또한 태양열 이용 시스템에 도입하여 연구되어 지고 있는데, 이 형태의 열다이오드는 Jones가 1980년대 중반에 개발하여 난방효과를 실증하였다. Fig. 6과 같이 Bayonet형 열다이오드는 가늘고 긴 집열부, 열을 저장하는 축열부, 집열부와 축열부를 이어주는 연결부 그리고 내부유동 분리하는 단열 분리판 등으로 구성되어 있다.

Bayonet형 열다이오드는 가늘고 긴 집열부가 아래쪽에 그리고 축열부(저장조)가 위쪽에 위치하여, 집열부가 가열되면 데워진 작동유체는 밀도 차에 의한 부력에 의해 축열부로 이동하여 그 자리를 축열부의 차가운(데워지지 않은) 작동유체가 채우게 된다. 즉, 시스템 내에 흡열판의 가열로 인하여 자연대류 현상이 유발되어 작동유체가 집열부와 축열부를 반복하여 순환하면서 집열부의 열에너지를 계속해서 축열부를 이동시키게 된다. 이와 같은 Bayonet형 열다이오드의 열 유동의 원리는 루프형 열다이오드와 동일하다고 할 수 있다. 한편, 집열부와 축열조 사이의 유로 중앙에 단열 분리판이 삽입되어 있는데, 단열 분리판은 상승하는 따뜻한 유체와 하강하는 차가운 유체 사이의 혼입을 방지하여 열전달율을 향상시켜준다. Jones와 Cai(1993)는 2차원 수치해석을 통해 Bayonet형 열다이오드의 유동과 축열탱크 내에서의 작동유체의 열 성층화 등 Bayonet형 열다이오드의 열성능을 분석하기도 했다.

Loop형 열다이오드에 비해 Bayonet형 열다이오드는 열 용량이 크고 마찰 손실 손실이 작으므로 작은 온도차에 의해서도 작동될 수 있다. 일반적으로 Bayonet형 열다이오드가 Loop형 열다이오드에 비해 유체의 유동에 따른 저항이 적어 작은 온도차에서도 축열부로의 유체의 유동이 일어날 수 있다.

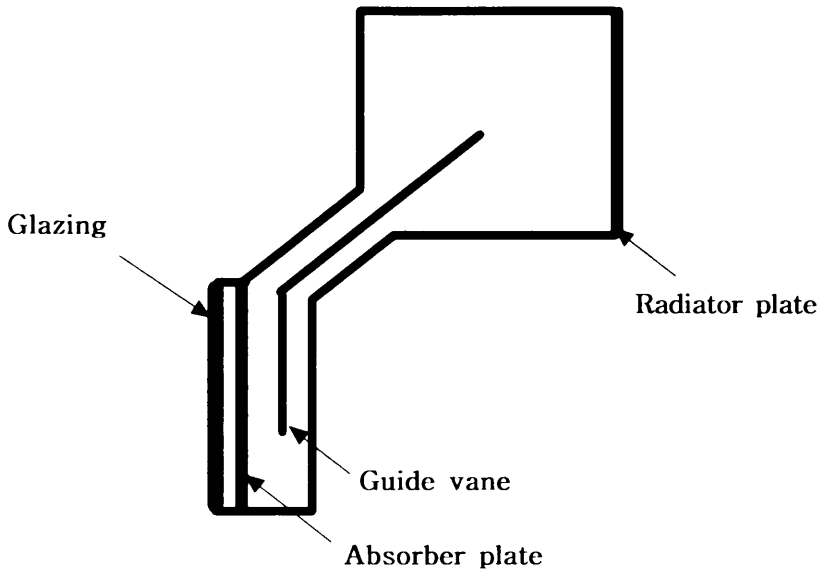


Fig. 6. Parts of a Bayonet thermal diode



Bayonet형 또한 양방향 열전달이 가능하도록 설계되어 질 수 있다. 그러나 열 흐름의 방향을 바꾸는 것은 Loop형 열다이오드에서처럼 용이한 문제가 아니다. Fig. 7은 두 개의 열다이오드가 상하로 놓인 상태에서 연결부의 중앙에 Two-way 밸브를 설치하고, 밸브의 동작에 따라 열흐름의 방향을 조절하며, 난방 및 냉방부하의 감소에 도움을 줄 수 있도록 설계·제작된 Bayonet형 열다이오드를 나타내고 있다(천원기 등, 1997).

Bayonet형의 경우 열 응답성이 Loop형보다 양호한 편이긴 하나 Two-way 등의 양방향성의 구성 요소 설계가 루프형에 비해 어렵다. 또한 양방향성 Bayonet형 열다이오드는 난방 또는 냉방 모드 작동시 어느 한 쪽 부분은 기능적으로 아무 역할을 못하는 단점이 있다.

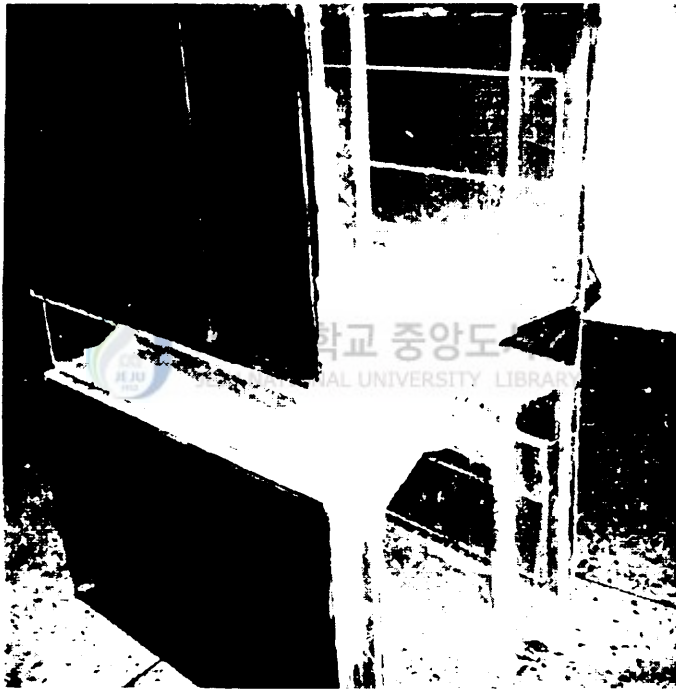


Fig. 7. Bidirectional Bayonet thermal diode

III. 장치 설계 및 제작

본 연구에서는 루프형 열다이오드(Loop-type thermal diode)를 이용한 태양 열 난방 장치를 제작·시험하고, 또한 열 흐름의 방향을 변경하기 위해 다양한 설계를 시도하고 실험적으로 조사하였다. 기후의 변화에 대응하여 시스템이 작동될 수 있도록 열흐름의 방향, 태양열의 흡열 여부 등을 상황에 알맞게 인위적(자동적)으로 조절될 수 있도록 하였다. 열흐름의 방향이 변화할 수 있도록 고안된 이 시스템은 태양열을 이용한 건물의 난방 뿐만아니라 작동매체(액체)의 단열성을 이용한 냉방부하의 감소 등에도 적용될 수 있다.

본 연구에서는 일사량과 실내 설정 온도에 따라 태양열의 흡수 및 열 유동의 방향을 용이하게 변경할 수 있도록 장치를 설계하였다. 그리하여 동절기 동안 일사량에 따라 최적의 흡열조건을 만들며, 열다이오드를 통해 원활한 열전달이 이루어지도록 하였다. 하절기에는 태양 빛을 차단함으로써 작동유체의 가열을 방지하고, 열다이오드의 역방향 열전달 특성을 이용하여 열의 이동을 원천적으로 차단시켰다. 아울러 집열부에 대한 통풍 설계를 통해 집열부의 과열을 방지하였다.

Fig. 8은 개발한 난방장치의 건물 설치 개념도이다. 자연형 태양열 난방 시스템과 같이 건물의 남측 벽면에 설치되어, 건물의 비내력벽(Curtain wall)과 거의 같은 두께로 설치될 수 있도록 하였다. 즉, 기존의 태양열 시스템이 건물 공간을 많이 차지하는 것과는 달리 별도의 설치 공간을 필요로 하지 않아 건물 공간 이용에 탄력적으로 적용될 수 있도록 설계하였다.

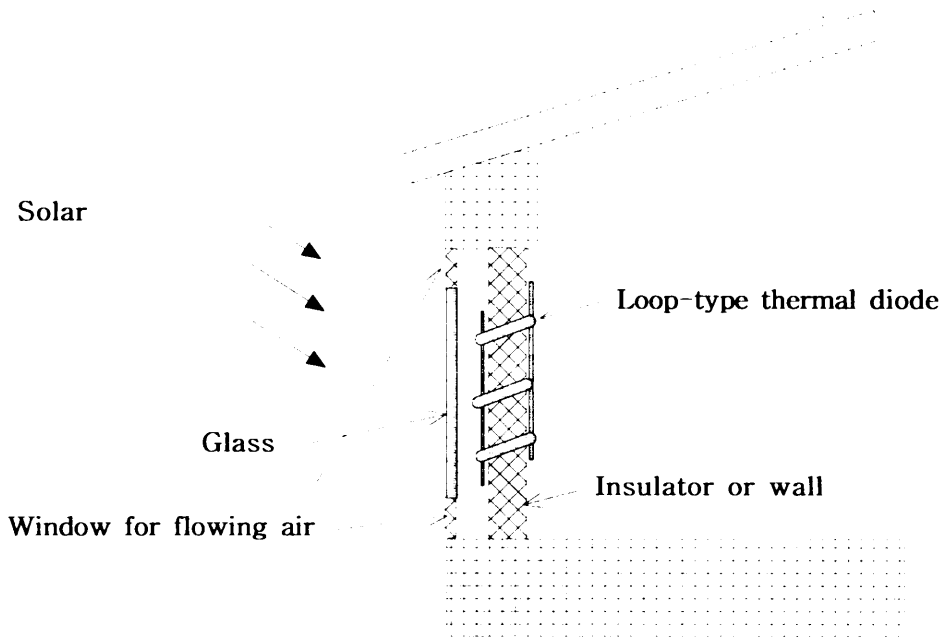


Fig. 8. Configuration of Loop-type thermal diode



1. 집열부

집열부는 태양열을 최대한 효과적으로 흡수하여, 집열된 열이 손실되지 않게 방열부로의 최대 열전달이 이루어지도록 하는 것이 중요하다. 그리고 하절기에는 과열되지 않도록 하는 것도 중요하다. 따라서 집열부로 들어오는 태양광의 유입을 조절할 필요가 있으며, 조절 방법에 따라 두 가지 형태로 집열부를 제작하였다. 첫 번째 형태가 흡열판이 회전하여 태양광을 차단할 수 있는 흡열패널 회전식(Rotational panel type)이고, 나머지 하나가 블라인드를 내려 빛을 차단하는 블라인드 차단식(Blind type)이다.

집열부는 흡열패널(Absorber panel), 유리(Glass), 통풍막(Window for flowing air) 그리고 집열부 몸체로 구성된다. 집열부 몸체는 샷시와 측면덮개

로 구성된다. 구조재로는 알루미늄 샤시를, 측면 덮개로는 나무 합판을 각각 사용하였다. 유리 덮개는 집열부에 모아진 태양열의 자연대류에 의한 손실을 막기 위한 것이며, 단창이나 이중창의 형태로 태양열 시스템에 적용되었다.

통풍막(Absorber window)은 하절기 태양열의 과도한 유입으로 인한 집열부의 과열을 방지하기 위해 설계되었다. Fig. 9(a)와 같이 하절기에 통풍막을 열어 놓으면 아래쪽 통풍구를 통해 유입된 찬 공기가 위쪽 통풍구로 빠져나가면서 집열부 내의 축적된 열을 빼앗아가게 되어 집열부의 과열을 막는다. 또한 위쪽 통풍막은 여름철 태양 고도가 높은 점을 감안하면 햇빛 가리개 역할도 할 수 있다. 동절기에는 (b)와 같이 통풍막을 닫아 집열부 내에서의 자연대류를 억제시켜 집열된 열이 빠져나가는 것을 방지한다.

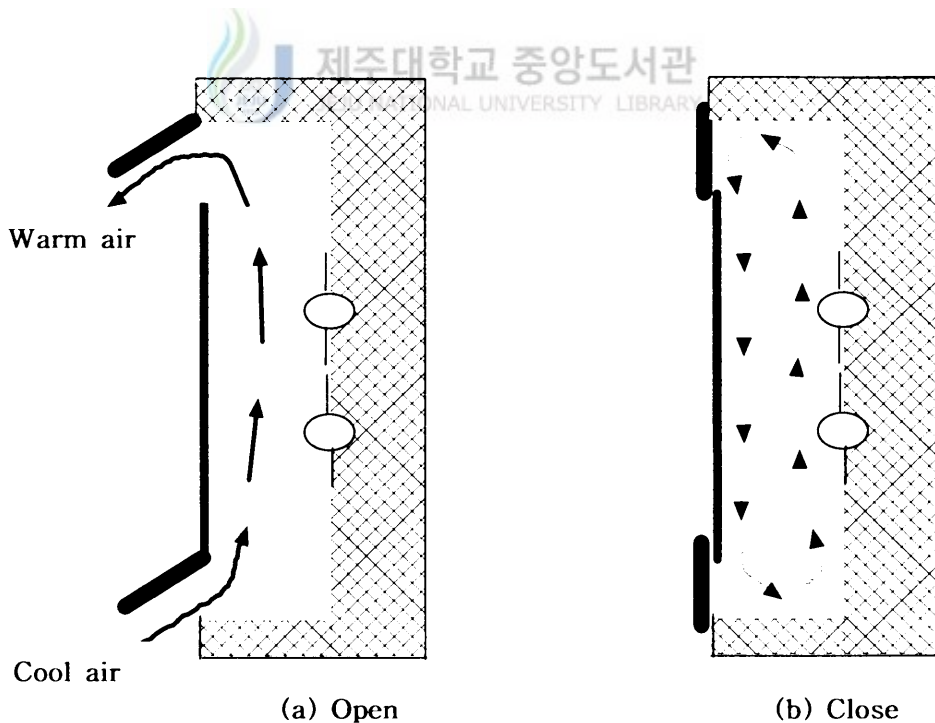
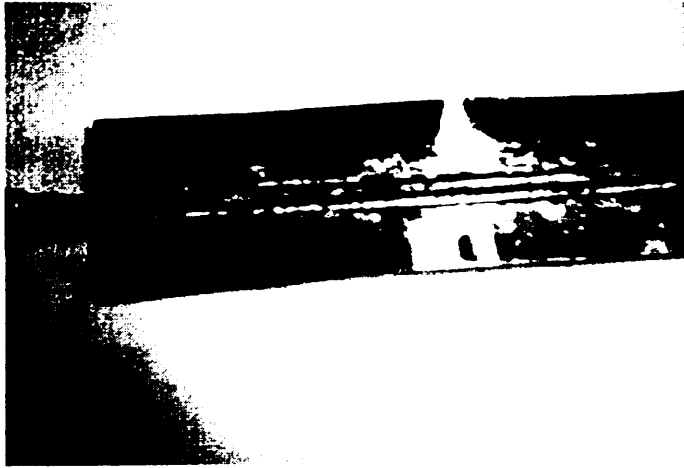
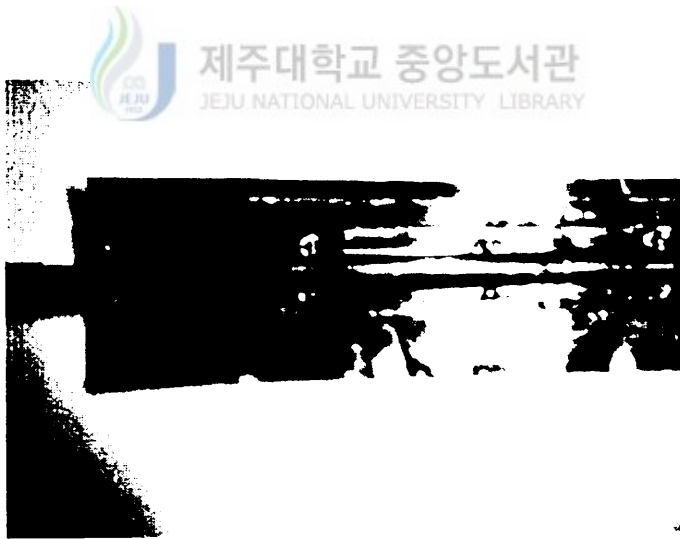


Fig. 9. Concept of the absorber window

흡열판은 동관(Copper pipe)에 얇은 동판(Copper plate)을 부착시킨 것이다. 이 때 흡열판과 관 사이의 접촉 열저항을 줄이기 위해 접촉면적을 최대한 하고 또한 부착부위의 틈이 생기지 않도록 하였다. 제작 방법은 우선 흡열판(0.3mm) 중심에 홈을 만들어 동관(내경: 10mm)을 덧댄 후, 용접재(95% Tin, 5% Antimony)를 이용하여 용접(Welding)을 하였다. 그리고 반대편에 다시 폭이 좁은 동판을 덧댄 후 리벳팅하여 흡열판과 동관과의 열전달 면적이 최대가 될 수 있도록 하였다(Fig. 10). 태양으로부터 직접 열을 흡수하는 흡열판은 구리로 제작된 튜브(동관)와 밀착되어 작동유체에 열을 전달하게 된다. 따라서 동관과 흡열판 사이에 공간이 존재하면 접촉 열저항이 커지게 되어 그만큼 손실이 발생하므로 동관과 흡열판은 단단히 밀착시킬 필요가 있다. 흡열판의 표면은 깨끗이 세척하여 불순물을 제거하고 선택흡수막(Selective coating) 도료로 처리하여 태양열 흡수율을 높였다. 광학적 선택흡수막에 의한 표면 처리방식은 일반적으로 태양 복사열의 흡수를 높이기 위해 검게 칠해진다. 흑색 표면의 방출 또는 흡수계수는 필요에 따라 이용하고자 하는 파장 범위 내에서 그 값이 변경될 수 있다. 이처럼 표면을 광학적 선택흡수막으로 처리하면 특정한 파장에 대한 흡수 또는 반사가 강화된다.



(a)



(b)

Fig. 10. Welding (a) and Riveting (b)
between the absorber plate and pipe

1) 회전식 흡열패널

흡열판 회전식 집열시스템은 태양열의 집열을 흡열판의 회전을 통해 제어할 수 있도록 한 것이다(Fig. 11의 (a)). 이 시스템의 흡열판은 흡열판마다 감속기를 설치하여 모터로부터의 동력을 전달받아 적정속도로 회전할 수 있도록 했으며, 흡열판의 회전각을 제어하기 위해 마이크로 스위치를 사용하였다. 난방을 필요로 하는 동절기에는 흡열면(Black)이 밖을 향하고 하절기에는 반사면(Reflective)이 밖을 향하게 된다. 그리고 흡열판 뒷 면에는 단열재를 부착하여 흡열된 열이 전도에 의해 빠져나가는 것을 방지하도록 하였다.

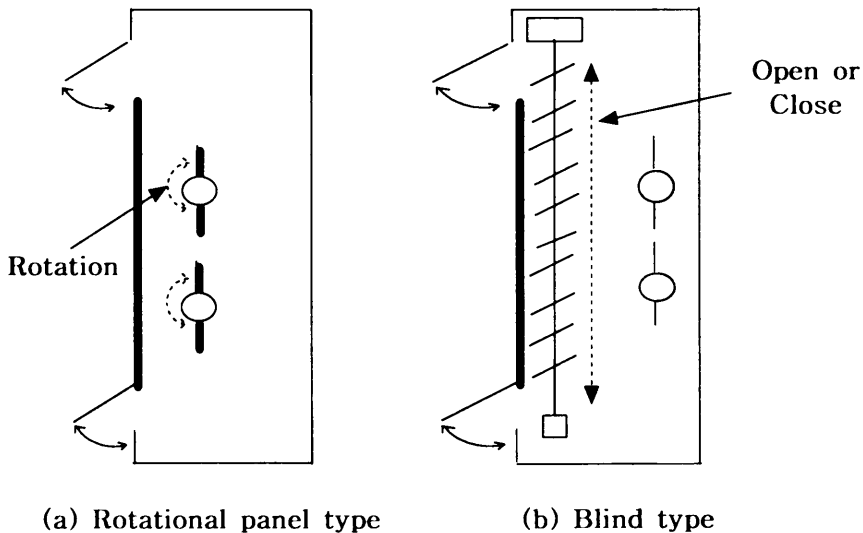


Fig. 11. Concept of the absorber assembly

태양열을 보다 많이 집열하기 위해서는 흡열판이 나뺀을 향하도록 하여야 하며, 일정한 각도도 경사(slope)를 주어야 한다. 일반적으로 태양광의 흡열판 입사각이 90도가 될 때 집열기는 최대 집열효율을 얻을 수 있는데, 우리 나라 겨울철 태양 방위각(Solar azimuth angle)이 45도 근처인 것을 감안하면 45도 경사가 적당하다. 그러나, 흡열판에 경사를 줄 경우 흡열판 하나가 차지하는 면적이 커져 실제로는 집열 면적을 줄이게 되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 즉, 흡열판에 경사를 두어 위쪽을 향하게 되면 패널과 패널 사이 간격을 두어 위쪽 패널 그림자가 아래쪽 패널을 가리지 않게 해야 되는데, 각이 커질 경우 간격 또한 넓어져 전체적으로 집열면적을 줄이는 결과를 초래하게 된다.

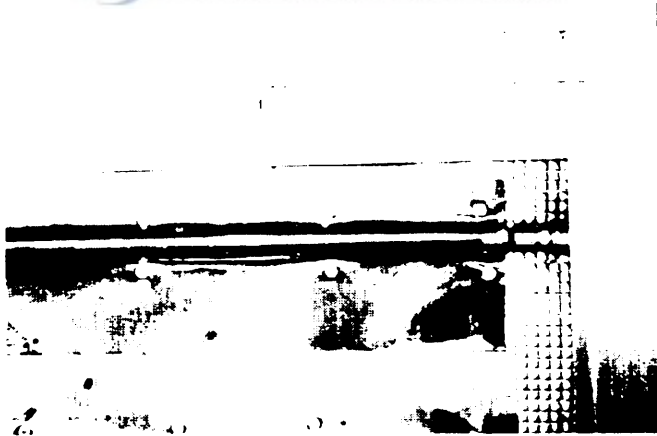
2) 블라인드 차단식 흡열패널



Fig. 11의 (b)는 블라인드 차단식 집열시스템을 나타내는데, 흡열판을 고정시키고 블라인드를 상하 이동시킴으로써 태양열의 집열부 유입을 조절한다. 즉 태양열을 흡수하고자 할 때는 블라인드를 걷어올리고, 차단하고자 할 경우는 블라인드를 내리게 된다. 따라서 흡열판의 회전에 따른 공간이 불필요하며 집열부 폭을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 집열부 폭을 줄이면 집열부 공동(Absorber cavity)에서의 자연대류 현상이 위축되고, 이는 공동에서의 흡열부 열손실을 줄일 수 있게 된다. 아울러 회전식처럼 흡열패널마다 동력을 따로 전달하지 않아도 되므로 DC모터의 부하를 줄일 수 있어, 보다 작은 전력으로 시스템을 운용할 수 있다. 흡열판의 설치도 회전식의 경우처럼 공동 내의 작동 공간 확보 등이 필요 없고 집열부 후면에 바로 붙여 제작할 수 있으므로 한층 효율적이라 할 수 있다.



(a) Rotational panel type



(b) Blind type

Fig. 12. Absorber design

한편, 집열부의 열적 독립을 위해 측면과 뒷면은 5mm 합판과 30mm 단열재 (스티로폼)를 사용하여 마무리하였다. 제작의 용이성을 높이기 위해 집열부 뿐만 아니라 시스템 대부분의 몸체는 알루미늄 샤시를 이용하였다.

또한 유리덮개 및 대부분의 구성품은 독립 제작하여 조립 및 분해가 수월하도록 하였다.

2. 방열부

방열부는 Fig. 13에 나타나 있는 것처럼 방열판의 상하 위치(높이)를 바꿈으로써 시스템의 열전달 방향을 결정하는 중요한 부분이다. 즉 방열판과 흡열판의 상대적 높이 차에 따라 열을 획득할 것인가 열을 방출할 것인가가 결정된다. 방열판이 흡열판보다 높은 위치에 있으면 열은 실내로 투입되고, 반대의 경우 방열판이 흡열판보다 낮은 위치에 있으면 열은 실외로 빠져나가게 된다.

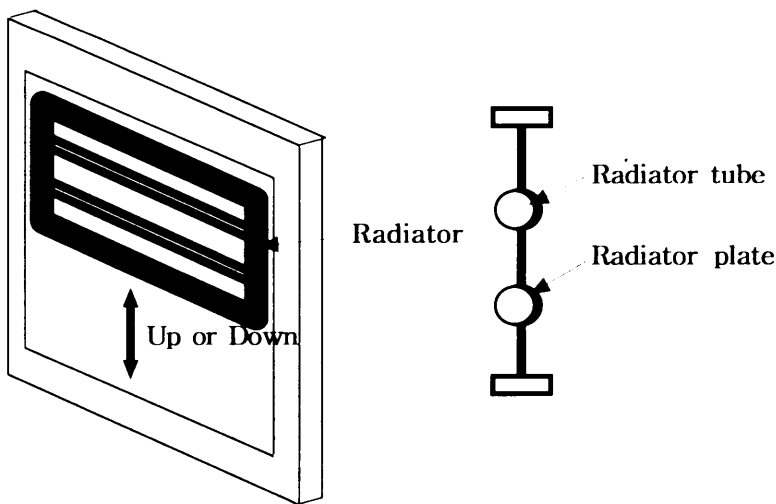
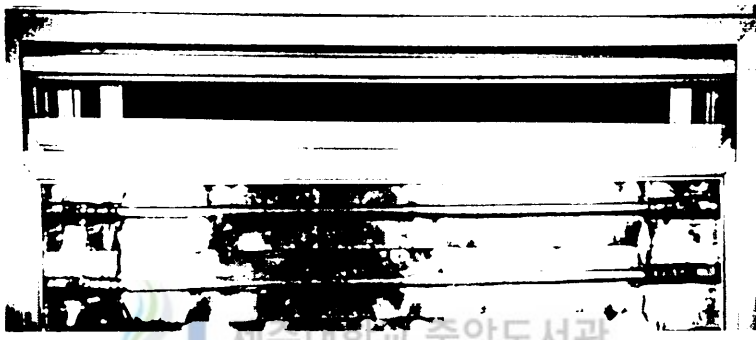


Fig. 13. Concept of the radiator assembly

방열패널은 흡열패널과 동일한 방법의 Fin형(Fig. 14(a))과 작동유체를 축열재로 이용하거나 혹은 또다른 축열재를 삽입하여 축열할 수 있는 사각형상의 Radiator(Fig. 14(b)) 형태로 제작하였다.



(a) Fin type



(B) Storage type

Fig. 14. Radiator design

축열식 방열패널은 각각의 흡열패널로부터 자연대류에 의해 이동한 유체가 일시적으로 머무는 reservoir의 역할을 수행한다. 이런 축열식 방열패널은 Fin형에 비해 몇 가지의 장점을 갖고 있다. 우선 누수나 기타 오염물질로 인해 생기는 기포를 방열패널 상층에 모아줌으로써 기포로 인해 관로가 막히는 것을 방지해 주며, 축열용량도 Fin형에 비해 커 난방효과도 지속적으로 누릴 수 있다. 가장 중요한 것은 갑작스런 온도변화나 기후변화에도 시스템의 적응성이 커져 그만큼 시스템은 열적으로 안정하게 동작하게 된다.

흡열판과 방열판은 그 용도에 맞게 열전달을 극대화할 수 있도록 제작하는 것이 중요하다. 본 연구에서 흡열판은 한쪽 면을 단열재로 감싸 흡열된 열이 빠져나가지 않게 설계하였으며, 방열판은 양쪽 면을 모두 공기 중에 노출시켜 열대류 면적을 넓혔다. 대개 방열부에서의 열전달은 대류에 의해 이루어지는데, 보다 많은 대류 열전달을 위해 방열판의 면적은 넓히는 것은 당연하다. 그러나 흡열판보다 지나치게 넓어질 경우 집열관과 방열판을 잇는 연결부의 길이가 달라져 방열부의 상하이동이 어렵게 된다. 가장 간단하게는 방열판의 폭을 흡열판의 폭과 동일하게 제작하는 것이다. 방열판의 표면 상태 또한 흡열판의 표면과 같이 열전달 성능의 중요한 인자으로써 작용한다. 방열판에서는 복사에 의해 상당량의 열에너지를 실내로 전달하게 되는데, 깨끗한 구리표면의 경우 복사율(Emissivity)이 매우 낮아(Table 1) 복사에 의한 열전달에 있어 매우 불리하다. 따라서 본 연구에서는 복사율이 높은 물질을 선택하여 방열판 표면에 얇게 도포 함으로써 복사 열전달 효과를 제고하였다. 그러나 코팅물질의 두께가 두꺼워지면 오히려 열전도 저항이 커져 열손실이 오히려 커질 수 있으므로 주의해야 한다. 본 연구에서는 구입의 용이성이나 경제적 측면에서 유리한 유성 페인트($\epsilon = 0.885$)를 사용하였다.

Table 1. Normal Emissivity of metals, paint and surface coatings

Substance	State of Surface	Temperature (K)	Normal Emissivity ϵ
Aluminum	Polished plate	296	0.040
Brass	Rough plate	298	0.070
Copper	Black oxidized	293	0.780
Gold	Not polished	293	0.47
Iron	Oxidized smooth	398	0.78
Lead	Gray oxidized	293	0.28
Nickel	Oxidized	373	0.41
Silver	Polished	293	0.025
Tin	Bright	293	0.070
Tungsten	Filament	3300	0.39
Zinc	Tarnished	293	0.25
Aluminum bronze enamel		373	0.20-0.40
Aluminum paint	Rough heated to 325℃	293	0.39
Bakelite enamel		423-588	0.35
Enamel White		353	0.935
Oil paint	Rough	293	0.90
Red lead primer		273-473	0.885
		293-373	0.93

3. 연결부

열다이오드 시스템의 근간인 사각 루프를 구성하기 위해서는 집열부 동관과 방열부 동관을 연결해 주어야 한다. 본 연구에서는 유연성과 내구성이 강한 폴리우레탄 튜브를 이용하여 집열부와 방열부의 동관을 서로 연결하였다. 이는 방열부의 상하이동시 튜브가 접혀 유체의 흐름이 차단되는 것을 방지하고 적당한 유연성을 필요로 하는 다이오드의 루프 구성에 가장 부합되는 물리적 특

성을 지니고 있기 때문이다. 연결 튜브는 열 흡수나 냉각으로 인한 유체의 부피 팽창 혹은 수축 압력을 충분히 흡수할 수 있어야 한다.

연결부의 경사각(Inclined angle)은 작동유체의 유동 능력에 많은 영향을 끼친다. Chen(1985)의 1차원 이론적 해석에 의하면 수평면에 대하여 20° 이상에서는 순방향 열전달량의 최대 값이 경사각에 무관하게 되며 최적 형상비 (Aspect ratio)는 경사각이 커질수록 증가함을 알 수 있다. 본 장치에서는 연결부의 경사각을 25° 가량으로 설정하였는데, 경사각이 이보다 커질 경우 방열부의 이동 거리 증가와 함께 불필요 공간(Dead space)의 형성되고 시스템의 응답성도 떨어지게 된다.

동관과 튜브의 연결은 회전 엘보우(Swivel Elbow)를 사용하였다. 집열부 및 방열부 모두 시스템의 작동 특성상 회전 자유도를 요구하기 때문이다. 특히, 흡열판 회전식(Rotational panel type)은 흡열판의 회전 자유도를 요구할 뿐만 아니라 방열부의 상하이동시 연결부분의 회전도 고려해야 하므로, 폴리에탄 튜브와 회전 엘보우의 결합은 아주 이상적이라 할 수 있다. 회전 엘보우는 밀폐가 뛰어나고 소재가 가벼운 플라스틱 재질의 것을 사용했으며, Fig. 15는 연결된 상태를, Fig. 16은 회전 엘보우를 각각 보여주고 있다.



Fig. 15. Joint Between the absorber and the radiator

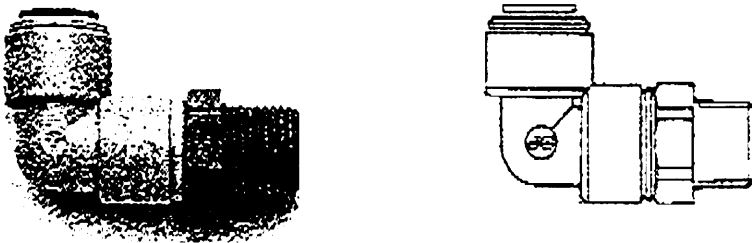


Fig. 16. Swivel Elbow

4. 전체 지지 어셈블리

건물의 벽체를 대신하기 위해서는 무엇보다 시스템 전체 두께가 중요하다. 기존의 건물 벽체를 대체할 경우 장치의 폭이 벽체보다 넓어서는 안되며, 또한 폭이 넓어지면 연결관(Joint tube)의 길이가 길어지고, 이것은 루프 내 유체의 흐름을 방해하는 마찰 손실 요인으로 작용하여 시스템의 성능을 떨어뜨리게 된다. 그러나 너무 좁게 할 경우 자동화와 관련되어 설치되는 장치(DC모터, 블라인드 box 등)들이 필요로 하는 공간을 폭에서 소화하지 못하고 시스템 위쪽이나 아래쪽 혹은 측면으로 나아가 설치되게 된다. 따라서 시스템 정면에서 집열(집광)면적이 차지하는 면적이 줄어들고 이는 시스템의 효율성을 저하시키는 결과를 초래할 수 있다. 지지어셈블리의 크기는 $1300 \times 200 \times 1000\text{mm}$ (Fig. 17)이다.

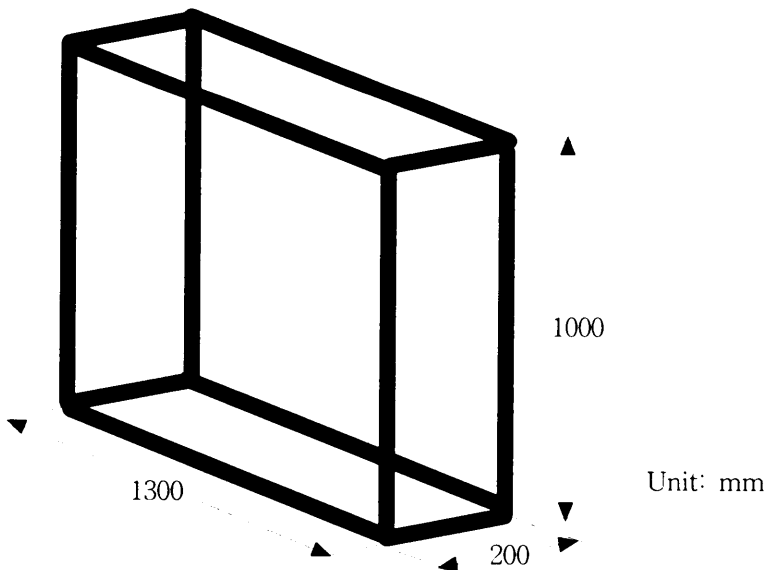


Fig. 17. Dimensions of the assembly support

지지 어셈블리는 시스템 설치시 비내력벽의 대체에 따른 어느 정도의 기계적 강도를 유지할 수 있어야 한다. 또한, 집열부와 방열부 등 구성요소들과의 연결이 구조적으로 안정성을 확보할 수 있어야 하므로, 본 연구에선 가볍고 단단한 소재의 알루미늄 샤시를 사용하여 지지 어셈블리를 제작하였다.

집열부 어셈블리와 방열부 어셈블리는 각각 지지어셈블리 앞뒤 쪽에 위치하여 열다이오드 시스템 전체를 구성하게 된다. 이 때 집열부와 방열부 사이의 지지 어셈블리 빈 공간은 단열재로 채워져 시스템 외부요인으로 인한 열 전달을 억제하게 된다. 실제의 경우, 열다이오드 시스템에서의 단열재를 통한 열손실은 일반의 벽체보다 더 작게 나타난다(천원기 등, 1997).

5. 시스템 제어



앞에서 보았듯이 열다이오드는 주어진 한 방향으로만 열 전달이 가능하도록 설계된 열전달 기구이다. 그러나 양방향 열다이오드 시스템에서 원하는 한 방향으로의 열전달이 가능하기 위해선 이에 따른 시스템 각 부의 적절한 조절이 필요하다. 가장 중요한 것은 집열부(Absorber)와 방열부(Radiator)의 위치를 변화시켜 열전달 방향을 결정하는 것이다. 그리고 이러한 열원과 열침원의 변경에 따라 태양에너지의 집열을 극대화하거나 또는 완전히 차단할 수 있는 설계도 필요하다. 본 연구에서는 이에 대한 양방향성 열다이오드 시스템의 제어 알고리즘을 완성하였다.

열다이오드 시스템은 난방과 냉방 두 가지의 동작모드를 가지게 된다. 이 두 가지 동작모드(난방 혹은 냉방)는 일사량과 실내 적정온도에 의해 결정된다. 일사량과 온도는 각각 광전관(CDS)과 서미스터(Thermistor)를 이용하여

측정하였고, 여기서 검출된 신호를 비교하여 동작 모드를 결정하게 된다. 난방 모드에서는 흡열판이 태양을 향하도록 회전하거나 블라인드를 올림으로써 집열부로 태양광이 유입되도록 하고 방열부는 높은 위치로 이동하여 순방향 열전달 방향이 실내측을 향하게 한다. 이 때 통풍막도 닫혀 집열부와 외부와의 공기유동을 막아 외부로의 열손실을 억제하게 된다. 하절기 냉방모드로 동작하는 경우는 태양열의 유입을 막기 위해 흡열판의 단열면(Reflective)이 밖(남측)을 향하게 하고 통풍막은 개방되어 집열부의 과열을 방지하게 된다. 이때 방열부는 아래로 내려와 실내 측을 향해 열다이오드가 역방향 열전달이 되도록 한다.

위의 동작 모드를 정확히 수행하기 위해서 시스템 제어회로는 네 가지 출력을 갖게 되는데, 방열판의 상승 혹은 하강, 집열부의 태양광 흡열 혹은 차단을 제어하도록 되어 있다. 집열부의 통풍막은 방열부의 상하이동에 따라 개폐를 같이한다. 제어회로(Fig. 18)의 동작조건은 Table 2와 같다.

또한 Fig. 20과 같이 제어 회로와 모터 구동을 위한 전력을 태양전지(Solar cell)를 이용하여 공급함으로써 완전한 독립전원 시스템(Stand-Alone System)이 되도록 구성하였다.

Table 2. Control conditions

Comparison between indoor temp.(T_i) and referential value(T_r)	Comparison between solar flux density(I) and referential value(I_r)	Window for flowing air	Potational panel type		Blind type	
			Absorber plate	Radiator plate	Absorber blind	Radiator plate
$T_i < T_r$ (heating)	$I > I_r$	close	black	top	open	top
	$I < I_r$	close	reflective	top	close	top
$T_i > T_r$ (cooling)	$I > I_r$	open	reflective	bottom	close	bottom
	$I < I_r$	open	reflective	bottom	close	bottom

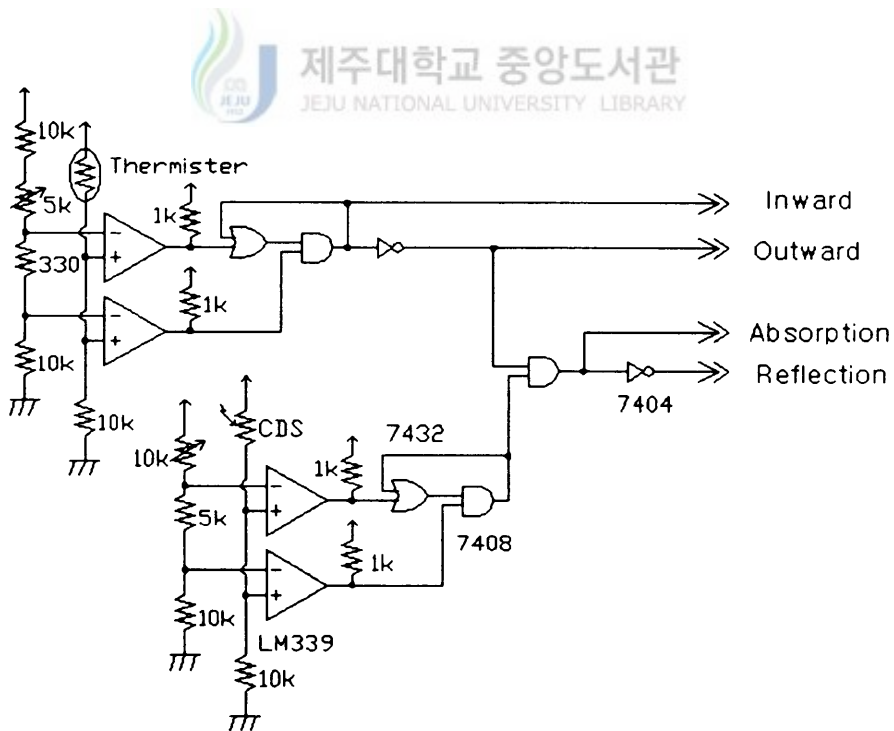


Fig. 18. Control circuit

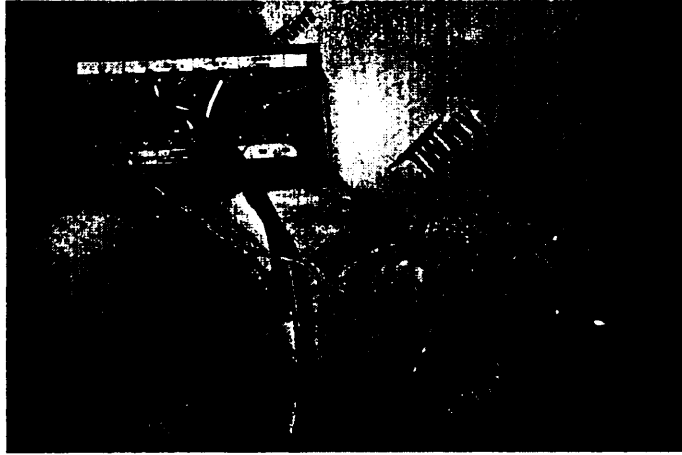


Fig. 19. Control unit

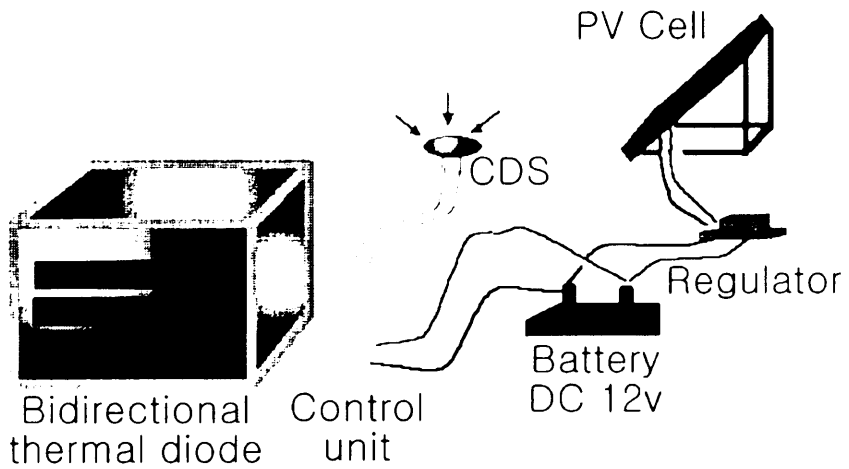


Fig. 20. System power supply configuration

IV. 실험 및 결과

1. 옥내실험

루프형 열다이오드에 대한 옥내 실측 실험은 4kW급 인공태양(Solar simulator)을 이용하였다. Fig. 21과 같이 실험장치와 인공태양을 거리를 조절하여 열속을 800W/m^2 로 고정시켰으며, 공간이 충분히 넓은 실험실을 택하여 안정적인 열침원을 만들어 실험동안의 대기온도를 거의 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

온도 측정을 위한 열전쌍(Thermocouple)은 흡열판, 방열판, 작동유체 그리고 대기온도를 모니터링할 수 있도록 설치하였고, 자료획득시스템(HYDRA: Data Acquisition System)을 이용하여 매 1분마다 자료를 수집·기록하였다.



Fig. 21. Laboratory test of the Loop-type thermal diode

Fig. 22는 열다이오드의 순방향 작동 조건 하에서의 실측 데이터이다. Fig. 22의 (a)를 보면, 방열부로 들어오는 유체의 온도(방열부 입구)가 실험 시작 약 10분 후되는 시점에서 갑자기 20℃ 이상 상승함을 알 수 있다. 이것은 열다이오드 내에서 유체의 유동(Circulation)이 시작됨을 보여주는 것으로, 10분 동안 계속 가열되었던 집열관 출구 근처의 유체가 유동의 시작과 함께 방열부로 유입되면서 눈에 보이는 현격한 온도 차이를 보여 주고 있는 것이다. 계속 증가하던 유체의 온도는 정점을 기점으로 다시 하락하고, 실험 시작 15분 쯤 이후부터 정상상태까지 서서히 증가한다. 유체의 온도가 일시 하락하는 것은 시간이 지남에 따라 더욱 활발해지는 유동 때문에 방열부에 들어있던 차가운 유체가 방열부를 빠져나와 집열부를 지나면서 미처 데워지지 않고 다시 방열부 입구로 되돌아 오기 때문이다.

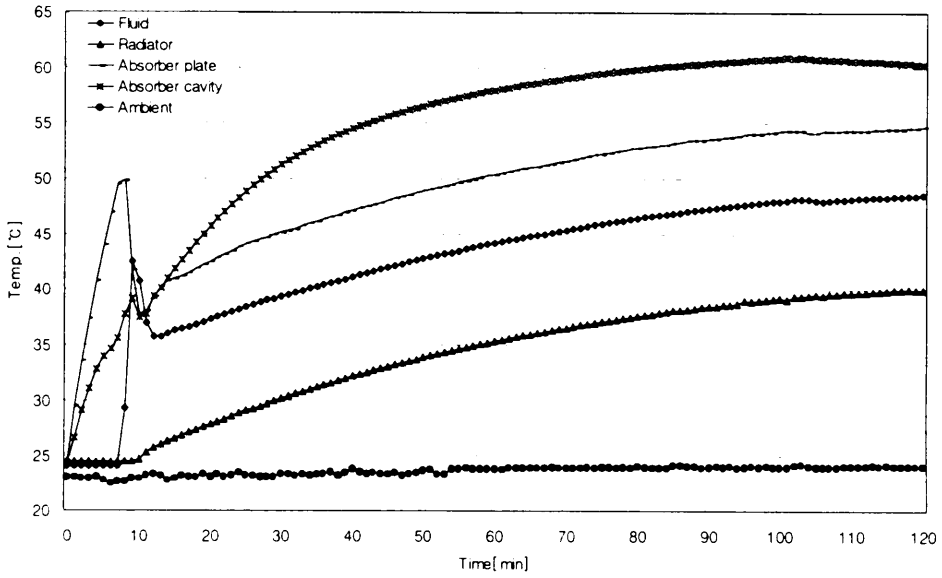
Fig. 23은 이러한 유동 현상을 보다 더 자세히 관측하고자 짧은 시간간격(20sec)을 두어 실측한 데이터이다. 우선 흡열판의 온도변화를 살펴보면 9분여까지 계속적으로 증가하다가 유동점(CP, Circulation Point)을 만나면서 온도는 급락한다. 이와 반대로 방열부 입구에서는 흡열부에서 데워진 유체가 들어오면서 유체의 온도가 빠르게 상승한다. 그리고 다시 조금 하락하였다가 정상상태로까지 올라가는 불안정상태를 보인다. 루프형 열다이오드의 불안정성(Instability)에 관한 연구들을 보면 시간에 따른 이런 루프형 열다이오드의 과도특성에 대해 언급하고는 있다(B. J. Huang과 Z. Zelaya, 1988). 열다이오드의 이런 특성은 루프의 형상비(Asspect ratio), 경사각(Inclined angle), 집열부와 방열부간의 온도차 그리고 작동유체의 특성들이 복합적으로 작용되어 나타나게 된다.

Fig. 22의 (b)는 열다이오드가 냉각되어지는 과정을 보여주고 있다. 인공태양의 전원을 끊어 열원이 차단되는 순간부터 모든 부분의 온도가 급격히 하락

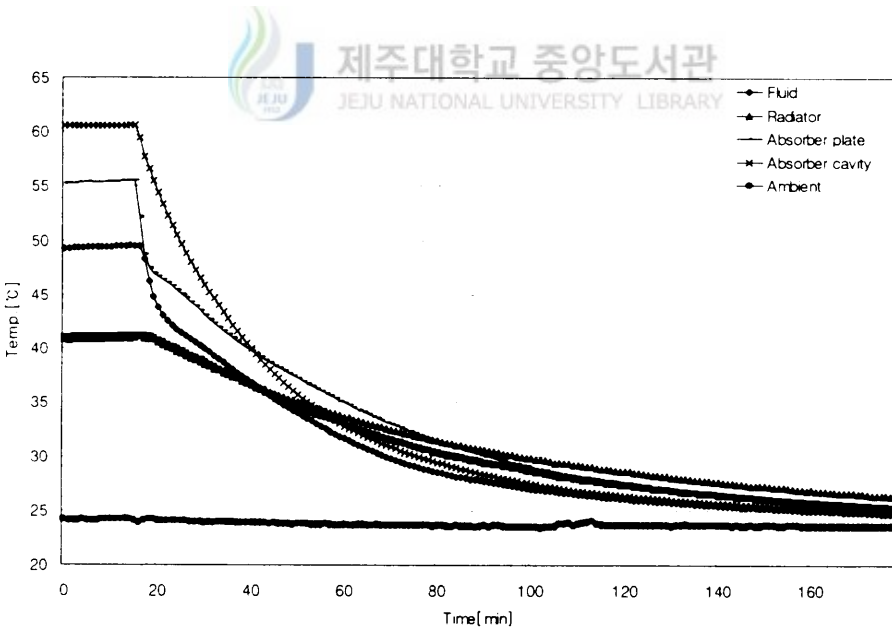
하는데, 특히 집열부(Cavity)와 작동유체의 온도가 가장 빠른 응답성을 보인다. 그러나 냉각(Cooling) 과정에서도 열다이오드는 지속적인 순방향 열전달 특성을 보인다. 흡열판(Plate)과 집열부(Cavity)의 온도 변화를 관찰하여 보면, 응답성은 집열부(Cavity)가 빠르지만 최종 흡열판의 온도는 집열부보다 더 많이 하락함을 알 수 있다. 집열부의 온도가 방열부(실내)의 온도 이하로 떨어질 때까지 열다이오드는 계속적으로 순방향 열전달을 충실히 수행하고 있는 것이다.

Fig. 24는 역방향 열전달 상태에서의 실험결과이다. 초기에는 순방향 실험과 마찬가지로 흡열판의 온도가 급격히 상승하지만, 점차 시간이 지나도 방열판의 온도변화는 거의 없다. 예측한 바와 같이 다이오드 내에서 작동유체의 자연순환이 일어나지 못해 실내측으로의 열전달이 억제되고 있다.

Fig. 22(a)의 순방향 열전달 실측 데이터를 보면, 정상상태 순방향 열전달 하에서의 흡열판(Plate)의 온도는 집열부 공동(Cavity)보다 낮은 온도에서 안정되어 있다. 루프 내에서의 활발한 유체 유동이 효과적으로 흡열판을 식혀주어 흡열판의 온도가 집열부보다 낮게 유지 되는 것이다. 그러나 Fig. 24의 역방향 실험치를 보면, 역방향 열전달 상태에서의 흡열판은 오로지 통풍구를 통해 유입되는 공기에 의해 냉각되어 집열부 공동(Cavity)보다 온도가 높다. 이런 사실들은 열다이오드를 통한 열전달이 극히 미미함을 보여주는 것이며, 열다이오드의 단열효과를 상당함을 시사하는 것이다.



(a) Heating



(b) Cooling

Fig. 22. Laboratory test results of the Loop-type thermal diode under forward bias

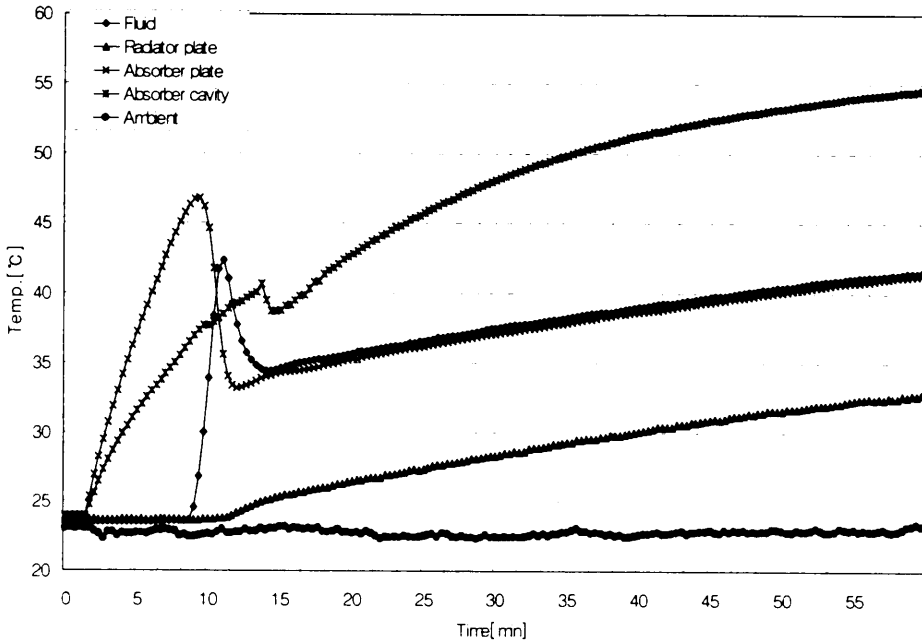


Fig. 23. Laboratory test results of the Loop-type thermal diode under forward bias(Detail)

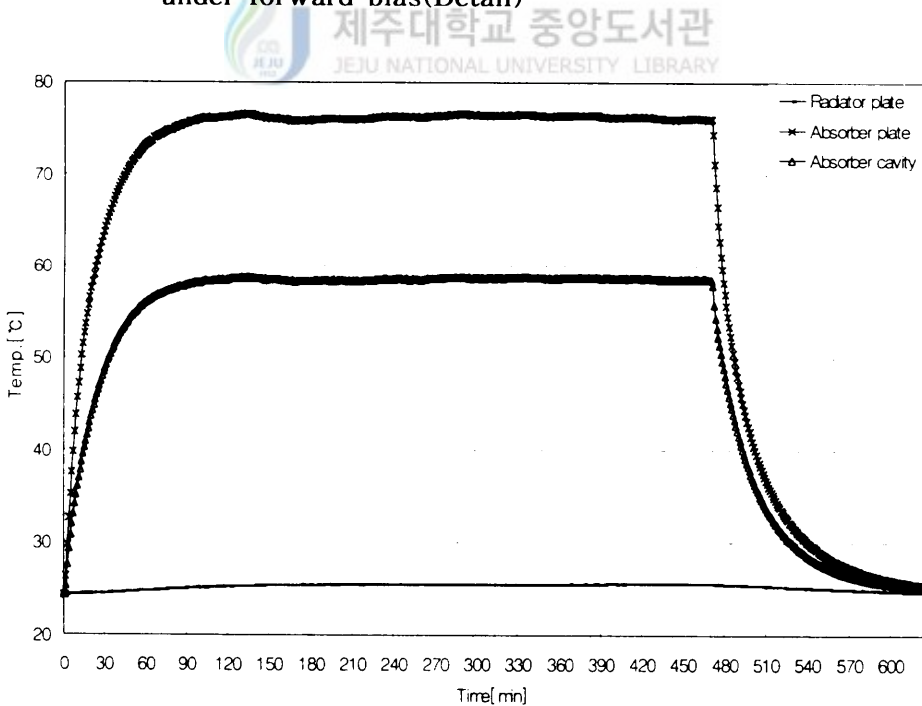


Fig. 24. Laboratory test results of the Loop-type thermal diode under reverse bias(Heating and Cooling)

2. 옥외실험

본 연구에서는 조립 및 분해가 가능한 조립식 패널로 test cell(이동식 소형 건물)을 만들어 옥외 실측 실험에 이용하였다. 조립식 패널은 50mm의 스티로폼에 얇은 철판을 덧대 제작한 것으로, 전체 cell의 크기는 1605×1705×2210mm이다(Fig. 25).

본 연구에서는 동일한 두 개의 test cell을 건물 옥상에 설치하여 열다이오드의 옥외 실측 실험을 하였다. 열다이오드 시스템은 흡열판 회전식(Rotational panel type)과 블라인드 차단식(Blind type) 두 가지를 동시에 test cell 남쪽 벽면에 같이 설치하여 실측 실험에 들어갔다. 나머지 한 cell은 빈 채로 두어 열다이오드를 설치한 cell과의 데이터를 비교·검증하는데 이용하였다.

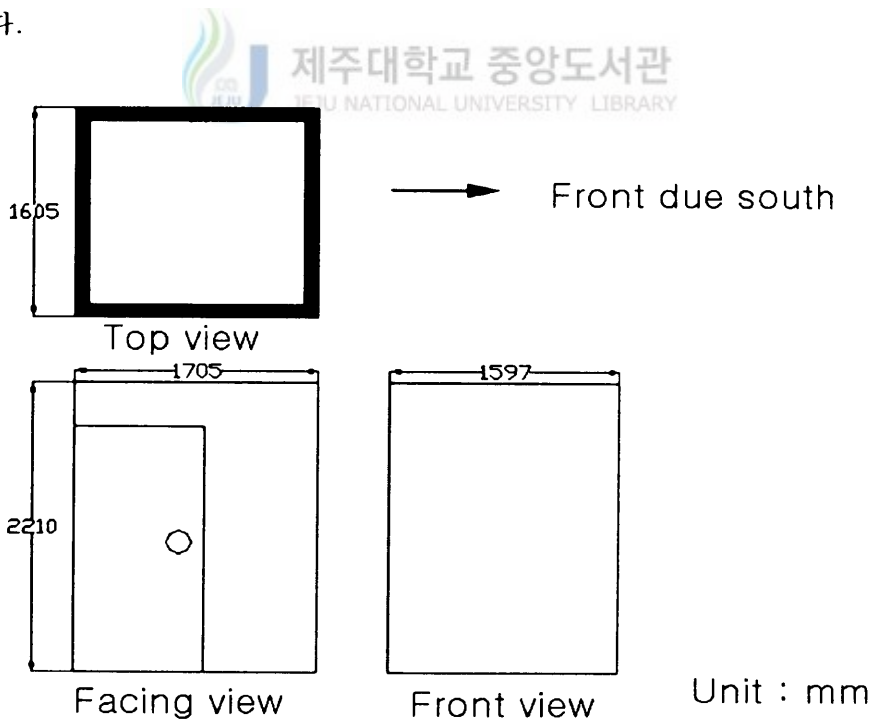


Fig. 25. Dimensions of the test cell

옥내 실험과 같이 각 부의 온도 측정을 위해 열전쌍(Thermocouple)을 이용하였고, 태양 복사열 측정을 위해서는 일사량계(Pyranometer)를 사용하였다. 데이터는 1분 간격으로 데이터 획득장치(HYDRA)를 통해 측정·저장하였다. Fig. 26은 루프형 열다이오드 장치가 test cell에 설치된 모습이다. 아래쪽 열다이오드 시스템이 흡열판 회전식이며, 위쪽 시스템이 블라인드 차단식 열다이오드이다.

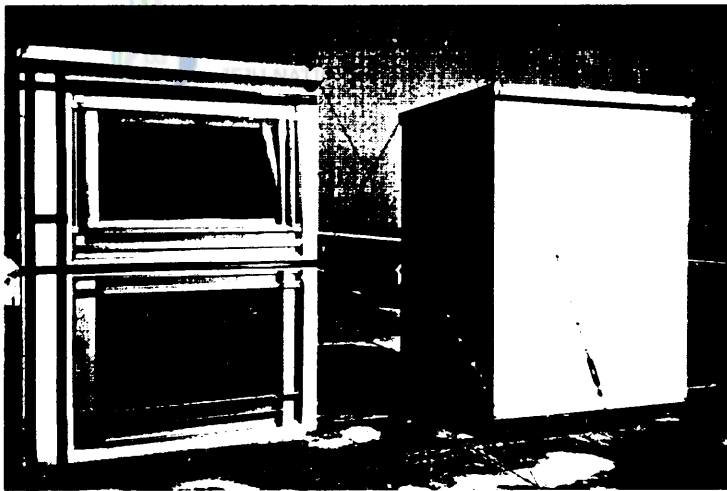


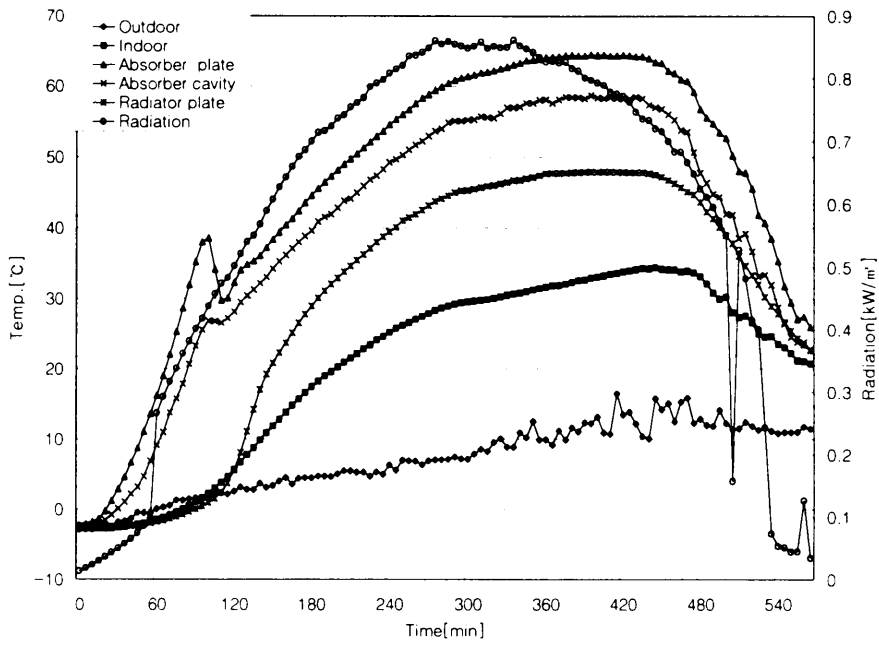
Fig. 26. Configuration of the Loop-type thermal diode installed in the test cell

Fig. 27은 루프형 열다이오드의 옥외 실측 실험 결과이다. 흡열판 회전식(a)과 블라인드 차단식(b) 열다이오드 시스템의 각 부 온도변화는 비슷한 양상을 띈다. 루프형 열다이오드의 옥내 실험 결과로부터 예상되었던 것과 같이, 실험 시작 1시간 30분 후까지 급격히 상승하던 흡열판의 온도가 유동점(CP)을 만나면서 다시 하락하는 루프형 열다이오드의 특징이 뚜렷하게 나타나는 것을 데이터를 통해서 알 수 있다. 어느 정도 하락한 흡열판의 온도는 다시 서서히 증가하고, 방열판의 온도는 이 때를 기점으로 빠르게 상승하고 있다. 그 후로 시스템은 방열판과 흡열판의 온도가 대략 10℃를 차이를 유지하면서 계속적으로 효과적인 순방향 열전달을 수행하고 있다.

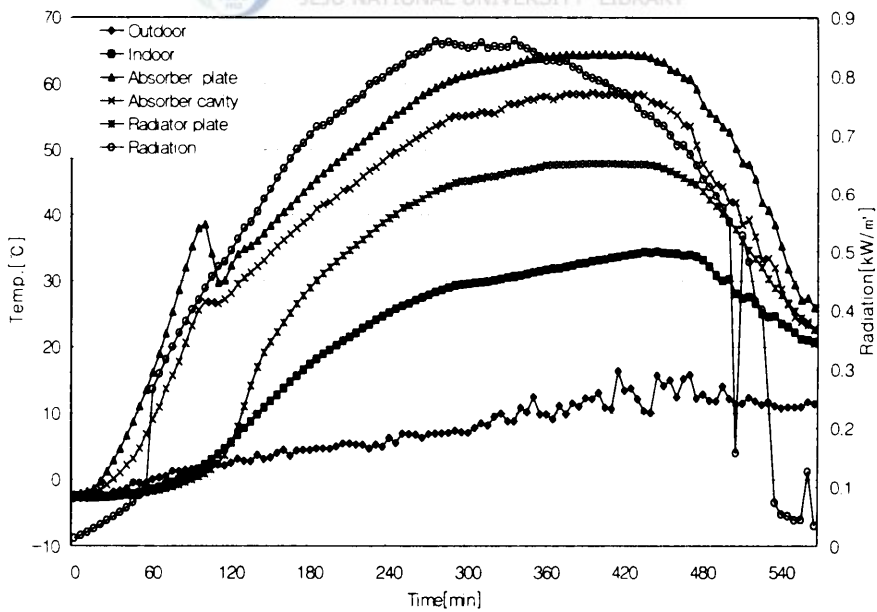
한편, 일사량은 실험 시작 6시간 이후부터 줄어들기 시작했으나 열다이오드의 모든 부분의 온도는 이보다 2시간 가량을 조금 더 상승하다 떨어지고 있다. 이것은 방열부가 Fin형으로 제작되어 유체의 양이 매우 적음에도 불구하고 시스템의 열용량이 예상외로 커 유입 열량이 줄어들더라도 열다이오드 내의 작동 유체의 유동은 지속적으로 원활하게 일어나고 있음을 보여 주는 것이다.

한편, 외기와 최대 20℃의 온도차를 보이는 실내온도는 test cell의 열용량이 그리 크지 않아 시간에 따른 열다이오드 시스템의 온도변화와 비슷한 양상을 보였다.

Fig. 28은 열다이오드 시스템이 설치된 test cell과 빈 채로 둔 cell의 시간에 따른 내부 온도 변화를 보여 주고 있다. 시스템이 설치된 cell의 실내 온도는 외기 온도보다 최대 15℃ 이상, 빈 test cell에 비해 10℃가량 높게 나타났다. 일사조건이 그다지 좋지 않은 것을 감안하면 두 cell의 온도는 상당한 차이가 남을 알 수 있다.



(a) Rotational panel type



(b) Blind type

Fig. 27. Results of the outdoor test for Loop-type thermal diode

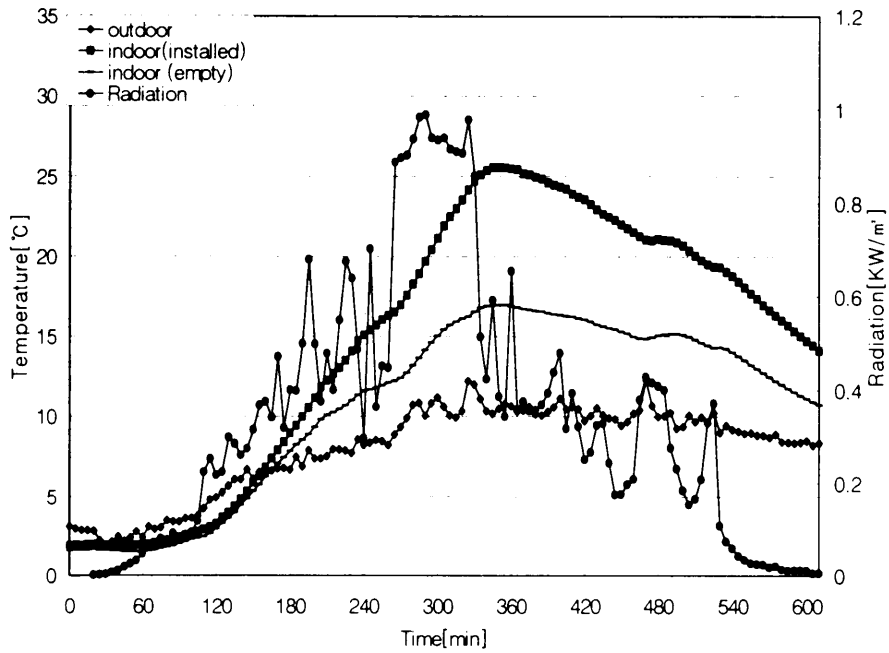


Fig. 28. Comparison between indoor temperatures of two test cells (with and without Loop-type Thermal diode)

V. 결 론

본 연구에서는 열흐름 방향이 조절 가능한 루프형 양방향성 열다이오드를 공간으로 하는 태양열 난방장치를 설계 및 제작하였다. 본 장치는 "다이오드"란 말 자체가 의미하듯 임의의 주어진 한 방향으로만 효과적인 열전달이 가능하도록 설계되었으며, 옥내 및 옥외 실험을 통해 난방 효과를 실증하였다. 또한 필요에 따라 시스템의 열흐름 방향을 달리하여 하절기 냉방 부하 감소 및 단열매체로써 활용할 수도 있다. 이와 같이 열다이오드식 태양열 난방장치는 열전달 방향과 태양열의 흡열 여부를 자동적으로 조절하여 운용함으로써 시스템의 이용효율을 높일 수 있었으며, 보다 능동적인 태양열 응용 시스템의 활용 방안을 제시할 수 있었다.

기존의 자연형 혹은 설비형 태양열 시스템은 건물 옥상이나 혹은 건물 내·외부 등의 부착 공간을 필요로 한다. 반면 본 연구에서 개발한 시스템은 건물의 비내력벽(Curtain wall)을 대체함으로써 또다른 설치공간을 확보하지 않아도 되며, 이는 건물공간의 효율적 이용에도 한몫을 할 것이다.

한편, 태양열을 이용한 본 난방장치의 실용성을 높이기 위해서는 향후 몇 가지의 문제를 더 해결해야 할 것이다. 첫째, 시스템의 단순성을 강화해야 한다. 각종 제어장치, 모터 등의 기계 장치와 시스템 간의 최적 배치를 찾아 불필요한 공간과 설계의 복잡성을 피할 수 있어야 한다. 둘째, 가열이나 냉각시 작동유체의 팽창 혹은 수축에 따른 연결부와 각 구성 요소에서의 작동유체의 누수 및 내압 발생으로 인한 시스템 손상 방지를 위한 요소 기술의 개발이 있어야 할 것이다. 마지막으로 유리 및 블랙 코팅, 그리고 집열부 통풍막 등이 건물과 전체적인 조화를 이룰 수 있도록 시스템의 외관 디자인 개발 등에도 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

VI. 참고 문헌

- Chen, K., 1985, The Optimum Configuration of Natural convection Loops, *Solar Energy*, Vol. 34, pp.407~416.
- Creveling, H. F., et al., 1975, Stability Characteristics of a Single-Phase Free Convection Loop, *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, Part 1, pp. 65~84.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, pp.555~586.
- Greif, R., Zvirin, Y. and Mertol, A., 1979, The Transient and Stability Behavior of a Natural Convection Loop, *J. Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 684~688.
- Groll, M., et al., 1979, Development of a Liquid-Trap Heat Pipe Thermal Diode, *J. Spacecraft*, Vol. 16, No. 4, pp.195~202.
- Huang, B. J. and Zelaya, R., 1988, Heat Transfer Behavior of a Rectangular Thermosyphon Loop, *J. of Heat Transfer*, Vol. 110, pp.487~493.
- Jones, G. F. and Cai, J., 1993, Analysis of a Transient Asymmetrically Heated/Cooled Open Thermosyphon, *J. of Heat Transfer*, Vol. 115, pp.621~630.
- Jones, G. F., 1986, Heat Transfer in a Liquid Connective Diode, *J. Solar Energy Eng.*, Vol. 108, pp.163~171.

Madejski, J. and Mikielewicz, J., 1971, Liquid Fin- A New Device For Heat Transfer Equipment, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, pp.357 ~ 363.

천원기 등, 1996, Thermo-Diode식 태양열 이용 모듈 개발(I), 연구보고서, 통상산업부, pp.46 ~ 55.

천원기 등, 1997, Thermo-Diode식 태양열 이용 모듈 개발(II), 연구보고서, 통상산업부, pp.41 ~ 49.

천원기 등, 1998, Thermo-Diode식 태양열 이용 모듈 개발(III), 연구보고서, 통상산업부, pp.89 ~ 93.



감사의 글

변화한 2년 이었다. 잘 나갈 때도 있었고, 휘청거릴 때도 있었다. 군더더기 없는 생활이 어디 있겠냐마는 내 똘엔 그리 신중하고 많이 생각해야 했던 시기도 드물었다. 그 끝에 보잘 것 없는 이 한편의 논문을 내 놓았다. 기쁨 반 아쉬움 반. 여러 감정들이 앞선다.

누가 나보고 참 년 행운아라고 말한 적이 있다. 늘 곁에 많은 친구들과 좋은 사람들이 있어서. 그랬다. 스스로도 별로 달갑지 않은 성격에 뭐 볼 것 없는 나에게 힘들 때마다 즐거울 때마다 같이 해준 좋은 사람들.

영근아! 종언아! 정말 고맙다. 바쁜 척하는 내 스케줄 맞춰준다고 애썼다. 그리고 우리 은숙 선생님. 내년이면 10년입니다. 착한 일호랑 나를 참 많이 도와 줬지요. 가끔 연구실을 방문해서 즐거움을 주고 가는 성민, 성권 그리고 우리 구공 동기들. 모두 고마워요.

아무래도 이 논문을 마치기까지 가장 큰 영향을 끼치신 분들은 우리 교수님들이겠죠. 당근과 채찍으로 매일을 단련시켜 주신 천원기 교수님. 아직도 무서운 앞으로도 무서울 이윤준 교수님. 똘똘한 이현주 교수님. 근엄과 웃음이 조화로우신 조경호 교수님. 소박 털털한 박재우 교수님. 흰머리가 너무 멋진 김신 교수님. 진심으로 감사드립니다.

제주대학교 공대B동 옥상에는 원가가 많이도 있습니다. 재광이, 성택이, 일호 그 녀석들과 하루에도 십수번씩 오르내리며 설치한 것입니다. 또 그럴때면 우리 학부 후배녀석들 맨날 부러 먹었지요. 후배녀석들아! 제대로 밥 한번 사주지 못해 미안하다.

혼자서 시작했더라면 정말 어려웠을 것이다. 어디든 동기가 있듯 나와 같이 대학원 2년을 보낸 동규. 여러 자료들이랑 이것 저것 부탁하면 다들어 준 참 착한 동규. 고맙다. 비록 일년 늦게 들어왔지만, 친구같고 동생같은 보안이, 명철이. 그리고 이윤준 교수님 말씀에 따르면 '배신자'라는 키도 훌쩍하고 멋있는 재성이. 실험실 멤버들. 태경, 진석, 정선, 현식, 승범. 다들 네게는 소중한 사람들입니다.

이렇게 알고 있는 이들을 하나 둘씩 적다보니 괜히 사생활이 다 들춰지는 것 같네요. 뭐 그리 대단할 게 없으니 계속 적어 볼랍니다. 휴찬 선생님. 그 바

통을 잇는 종관 선생. 이것 저것 해달라는 소리만 하고 도와주진 못해서 죄송
하구요, 앞으로 기회가 주어진다면 많이 도와드릴께요. 전기공학과 임대관 선
생님, 조용철 선생님, 문상호 선생님 그리고 동춘씨. 내 삶에 많은 귀똥을 해
주셨지요. 참 기계공학과 이동원 선생님, 산업디자인학과 경호 선생님을 뵈 먹
을 뵈 했네. 내년엔 어떻게 될지 모르니 미리 인사드려야 겠지요. 감사합니다.

연락 안된지 꽤 되는 은철이랑 성방이랑. 잘 있남? 인쇄 나오는 대로 들고
찾아 갈께. 서울에 있는 동영이와 근택. 올라갈 때마다 매번 신세를 졌지요.
신세 갚으러 또 한번 가마.

「바람은 늘상 불었다. 역한 것도 달가운 것도 뺄어내지 못했다. 아랜 바다가
있었다. 水位는 분주히 오갔지만 한번도 만나지 못했다.(‘겨울, 한라산’ 中에서
).」 어찌다 이렇게 모자랄 것같은 삶이 느껴질 때면 아낌없이 배려해 주신 미
정누나, 독특한 웃음 주는 희야, 친구 혜경에게 더한 고마움을 전합니다.

철년의 더부살이에도 여태껏 큰소리 한번 안 내시는 우리 큰 매형·누나.
저에게 갚을 기회가 주어 질런지..... 터프한 큰 형·형수님, 작은 누나·매형,
그리고 우리 막내 경식이. 우리 식구들. 생각하면 할 수록 전 행복한 농입니다.

두어 해만 있으면 而立의 서른입니다. 허나 아직도 부모님을 살을 깎아 먹
고 살고 있습니다. 이젠 로션도 배어들지 않은 그 굳어진 살을. 어머니, 아버
지, 죄송해요. 그리고 너무 감사해요.

그토록 저를 어여뵈 하시던 작은 형님 靈前에 이 논문을 바칩니다.