

열다이오드식 태양열 난방모듈 개발

천 원 기* · 이 경 진**

Development of Energy Efficient Smart Module

Won-Gee Chun* and Kyung-Jin Lee**

ABSTRACT

This study has been carried out to develop thermal diode Smart Modules, which are capable of adjusting the direction of heat flow and solar absorption. It can be used for space heating in winter and reduce the cooling load of buildings in summer. The major feature of this system is the application of bidirectional thermo-diode which allows a change in the forward bias heat transfer direction. Manufacturing processes and installation of the system were designed to facilitate the "modular" production of the system. A master module equipped with an electronic controller determines the operational mode of the system.

Key words : Space heating and cooling, Thermo-diode, Loop-type Smart Module, Electronic controller.

1. 서 론

본 연구의 목표는 열흐름 방향 및 태양열의 집열이 조절 가능한 열다이오드식 태양열 이용 모듈의 개발에 있다. 본 태양열 이용 Smart Module은 동절기 난방뿐만 아니라 하절기 냉방부하 감소에도 적용이 가능하다. 기존의 태양열 시스템은 일조시간 동안만 운용되는 반면 본 Smart Module은 낮뿐만 아니라 밤에도 단열 및 냉방 부하 감소 효과를 거둘 수 있다.

태양열을 이용한 냉·난방기술은 계속적으로 연구되어왔고, 그 결과 많은 기술들이 실용화 단계를 거쳐 최근 건설되는 건물들에 적용이 되기 시작했다.

Trombe벽(Trombe Wall), 드럼 벽(Drum Wall), Sunspace, 그리고 대류 루프(Convection Loop) 설계 등과 같은 것들이 그 예이다. 그러나 이들 시스템은 공통적으로 다음과 같은 단점을 갖고 있어 이로 인하여 태양열의 적용에 긍정적인 면보다 부정적인 측면을 부각시키는 결과를 초래하여 실용화에 어려움을 겪고있다.

- (1) 여름철에는 지나치게 더워서 태양광의 흡수를 줄이기 위한 차광막을 필요로 한다. 이러한 설계는 겨울철 난방에는 적합하지만 여름철에는 냉방 효율을 떨어뜨린다.
- (2) 이들 시스템은 대체로 크기가 커서 한 장소에서 다른 장소로 이동하기 어려울 뿐만 아니라 주택의 형태가 바뀔 경우 쉽게 개조할 수 없다.
- (3) 태양에너지 시스템은 대량생산이 곤란해 단가가 높다.

* 제주대학교 에너지공학과
Dept. of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

- (4) 앞에서 언급한 태양열 시스템의 대부분은 전체적인 외관에 나쁜 영향을 미쳐서 주택 가격을 떨어뜨릴 수도 있다.
- (5) 수요와 공급 pattern의 상이함을 극복하기 위한 대열용량 소규모 축열재의 개발 및 적용을 위한 기술 개발이 부진하다.

본 연구에서는 이러한 기존 시스템의 단점을 보완하고자 열다이오드 메커니즘을 도입하여 열흐름 방향을 제어하고, 또한 전자제어를 통해 집열조건 등을 제어함으로써 보다 효율적인 시스템을 설계하였다. 또한 전체 시스템을 모듈화(Modular)하여 제작 및 설치의 간편성과 시스템의 확장성도 제고하였다.

II. 열다이오드

Smart Module의 핵심 요소는 양방향성 열 다이오드(bidirectional thermal diode)이다. 전기공학 분야에서 쓰이는 "다이오드"가 전류의 흐름을 제어하듯이 "열다이오드"는 열 흐름의 방향을 제어하는 열전달 기구를 말한다. 즉 임의의 한쪽 방향으로서는 열 흐름을 최대한 허용하고 또다른 방향으로의 열흐름은 억제하는 장치이다.

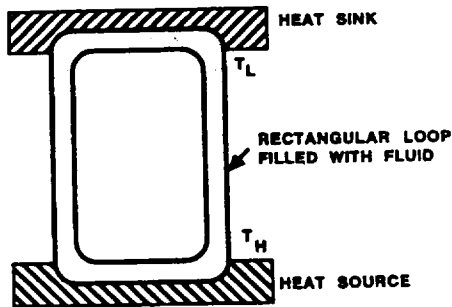


Fig. 1 A rectangular closed-loop thermosyphon.

열다이오드(thermo-diode)는 일종의 열사이폰(열파이프)으로, 유체에 의한 열전달에 있어 전도보다 대류 메커니즘에 의해 더 많은 양의 열이 전달되는 것에 착안하여 고안된 장치이다. 열다이오드는 집열부,

방열부로 구성되며 어느 한 쪽 부를 가열하거나 냉각시켜 두 부분에 온도차가 발생하게 되면 다이오드 내에서 자연대류가 일어난다. Fig. 1은 가장 단순한 형태의 하나로 루프형 열다이오드를 보여주고 있다. 열다이오드의 위 부분은 열침원(heat sink)에 노출되어 있으며 아래부분은 열원(heat source)과 맞닿아 있다. 두 부분의 온도차가 존재하면 루프 내의 유체는 밀도차에 의한 부력이 발생해 순환현상이 일어난다. 열원과 열침원이 서로 바뀌면 두 부분 사이에는 열전도만 일어난다. 그러나 유체가 액체 금속이 아닌 이상 열전도도는 매우 낮다. 따라서 사각형태 루프형 열다이오드는 아래에서 위로는 열을 효과적으로 전달하지만 반대방향으로는 그렇지 않다. 그리고 상부와 하부의 위치를 바꿈으로써 열 흐름의 방향이 바뀔 수 있도록 설계된 열다이오드를 양방향성 열다이오드(bidirectional thermo-diode)라 하는데, 이 양방향성 열다이오드는 거울철 난방과 여름철 냉방부하 감소에 모두 효과적으로 적용될 수 있다.

1980년대 이전의 열사이폰(열파이프)에 대한 연구는 Dunn과 Reay에 의해 잘 요약된 바 있으며, 열사이폰의 높은 열 효율 덕분에 많은 연구가 이루어져 왔다. 연구에 의하면, 열파이프를 이용한 열다이오드를 최적의 조건하에서 작동시키면 폐쇄 루프 열다이오드의 열전달율이 구리 원의 300배에 이를 수 있는 것으로 입증되었다.

열다이오드의 작동 및 그 기본원리와 많은 연구 논문이 발표되어 이 분야에의 꾸준한 관심을 보여주고 있다. Welander¹⁾는 루프형 열다이오드의 작동 불안정성에 관하여 이론적 연구를 수행하였으며, Madejski와 Mikielewicz²⁾는 루프형 열다이오드의 "액체 핀(liquid fin)"으로서의 역할에 관하여 그 효율성을 연구하였다. Fig. 2는 이들이 고안해낸 장치의 개략도로서 작동유체가 들어있는 loop를 회전시켜 그 열흐름 방향과 열전달율이 변화될 수 있도록 한 것이다. Creveling 등³⁾은 실험적으로 물을 작동유체로 하여 루프형 열다이오드의 작동 안정성을 조사하였으며, 그 결과 어떤 조건하에서는 루프내의 작동유체의 유동이 상당히 불안정해질 수 있음을 발견하였다.

Yin 등⁴⁾은 직사각형 공간(cavity)내의 공기의 자연대류 현상에 관하여 aspect ratio를 변화시켜가며 그

유동특성을 실험적으로 살펴보았으며, Grief 등⁵⁾은 루프형 열다이오드내의 유체의 유동에 관하여 numerical simulation을 수행하였다. 한편, 암모니아를 작동유체로

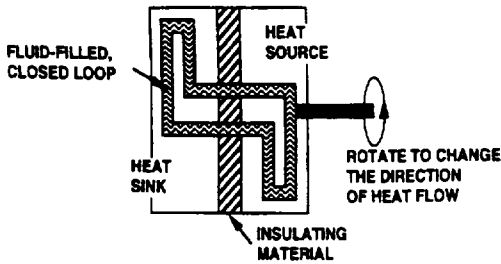


Fig. 2 Bidirectional thermal diode.

알루미늄으로 제작한 히트 파이프를 이용하여 Groll 등⁶⁾은 순방향과 역방향일 경우의 열수송량을 비교하였으며, 그 결과 약 300배까지의 차이가 남을 입증하였다. Zvirin과 Greif⁷⁾는 point heat source와 point heat sink를 가정하고 루프형 열다이오드의 작동 특성(transient behavior)을 1차원적으로 해석하였다. Ban과 Torrance^{8),9)}는 U자형의 개방형 루프에서의 물의 작동 특성에 관하여 연구하였으며, Chen¹⁰⁾은 루프형 열다이오드의 optimization과 이의 태양열에의 응용에 관하여 이론적으로 다루었다. 미국 Los Alamos National Laboratory 소속의 Jones¹¹⁾는 난방용으로 액체식 열 다이오드를 제안하였다. 그는 건물 난방 부하에 기여한 태양에너지에 다이오드에 저장된 순 에너지를 더하여 두 장의 유리판으로 덮여 있는 다이오드의 흡수면에 입사되는 태양 복사에너지로 나눈 값을 열 효율로 정의하였으며, 그의 실험에서 New Mexico주 Los Alamos에서 겨울철 3달 동안 평균 열 효율이 50% 정도 된다는 결과를 얻었다. Jones의 다이오드는 저장조(수조)와 이에 연결된 얇은 평판형의 태양열 집열부(cavity)로 구성되어 있다. Jones의 다이오드는 수조 외부 표면의 단열이 불충분하였으며, 열의 흐름도 한 방향으로만 가능하도록 설계되었다. 그러나, 그는 이 Thermal diode를 이용하여 겨울철 3개월간 실험하고 이론적 모델을 세워 해석하였으며, 두 결과와 일치함을 보여주었다.

또 한 형태의 열다이오드인 Bayonet형(그 단면이 총검을 닮아 붙혀진 이름) 열다이오드에 관한 연구도 있었다. 이 형태의 열 다이오드는 Jones가 1980년대 중반에 개발하여 그 난방 효과가 실증된 Tongue-and-tank 형태의 열 다이오드를 개량한 것으로 가늘고 긴 집열부, 열을 저장하는 축열부, 집열부와 축열부를 이어주는 연결부 그리고 효율제고를 위해 내부에 설치된 단열 분리판 등으로 구성되어 있다 (Fig. 3).

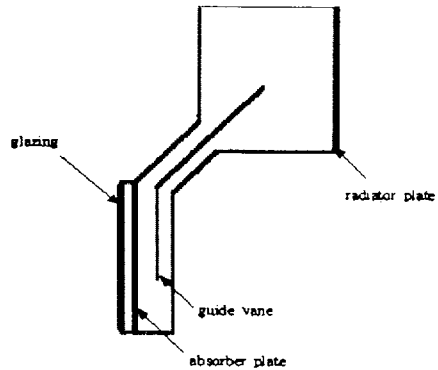


Fig. 3 Component parts of a Bayonet thermo-diode.

이 장치 내에 단열분리판은 상승하는 따뜻한 유체와 하강하는 차가운 유체 사이의 열 교환과 혼합을 방지한다. Bayonet형 열다이오드는 또한 루프형과 동일한 작동 메카니즘을 갖고 열전달을 수행한다. Bayonet형 열다이오드에서 열 흐름의 방향을 바꾸는 것은 Loop형 열다이오드에서처럼 용이한 문제가 아니다. 이를 해결하기 위하여 두 개의 열다이오드가 상하로 놓인 상태에서 연결부의 중앙에 Two-way 밸브를 설치하고, 밸브의 개폐 방향에 따라 유체의 흐름을 달리하여 그 열흐름의 방향을 조절하는 구성 등이 필요하다.

III. 스마트 모듈 제작

Smart Module의 기본 개념은 Fig. 4에 잘 나타나 있는데 기후의 변화에 대응하여 시스템을 작동할 수

있도록 그 열흐름의 방향, 태양열의 흡수 등이 효율적으로 상황에 맞게끔 인위적(자동적)으로 조절될 수 있어 태양열 이용의 극대화를 꾀할 수 있다. 광센서와 열전대(thermocouple)나 thermistor 등의 온도센서에서 감지된 입력을 분석하여 실내의 온도가 최적조건을 유지할 수 있도록 시스템을 자동 제어하도록 하였다. 난방이 필요한 때에는 태양열의 집열이 용이하도록 집열부의 표면이 태양을 향하게 하고 열흐름의 방향도 실외에서 실내로 향하도록 한다. 한편, 동절기 야간의 경우에는 집열부의 표면이 방사율이 낮은 특성을 갖도록 하고 열흐름의 방향도 실내의 열손실이 최소화 될 수 있도록 하여 난방부하를 줄일 수 있게 한다. 하절기 주간 경우, 집열부의 표면은 동절기 야간의 경우와 같으나 그 열흐름의 방향이 반대가 되도록 한다.

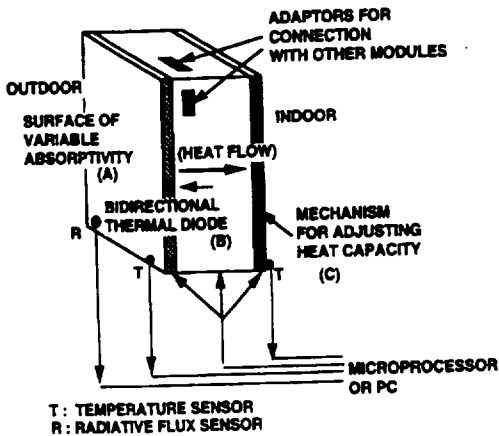


Fig. 4 A schematic diagram of the energy efficient Smart Module.

Smart Module은 또 그 이름에서도 알 수 있듯이 시스템을 모듈화해 제작하여 다른 모듈과의 접속이 간단할 뿐 아니라 조립이 용이하며, 한 모듈에는 하나 또는 그 이상의 열다이오드가 장착될 수 있다.

루프형 열다이오드는 사각형태의 파이프의 연결구조를 가지며, 루프 내 자연대류에 의해 열전달을 수행하게 된다.

Fig. 5는 여러 개의 사각형 형태의 루프 다이오드로 구성된 양방향성 열다이오드를 보여주고 있다. 이

다이오드는 두 개의 수직 평판과 이에 부착된 유체로 채워져 있는 여러 개의 루프로 구성되어 있다. 한편 루프는 수평부와 경사부로 나눌 수 있는데, 수평부는 열 전달효율을 높이기 위해 평판(흡열판 혹은 방열판)과 용접되어 있다. 루프의 수평부는 구리나 알루미늄 같은 열전도도가 높은 금속으로 만들어져 있으며, 수평부를 연결하는 경사부는 열전도도가 낮은 물질의 얇은 관으로 되어 있다. 수평부와 경사부를 연결하는 연결 부분은 관이 자유롭게 회전할 수 있도록 되어 있으며, 작동 유체가 누수되는 것을 방지하도록 설계·제작되어 있다. 루프의 수평 부분과 연결된 평판은 겨울철 낮 시간에는 태양열의 흡열판으로 그리고 여름 밤 시간에는 방열판의 기능을 수행한다. 이와 같이 하나 또는 다수의 루프의 기울기를 변화시켜 그 열 흐름의 방향을 조절한다.

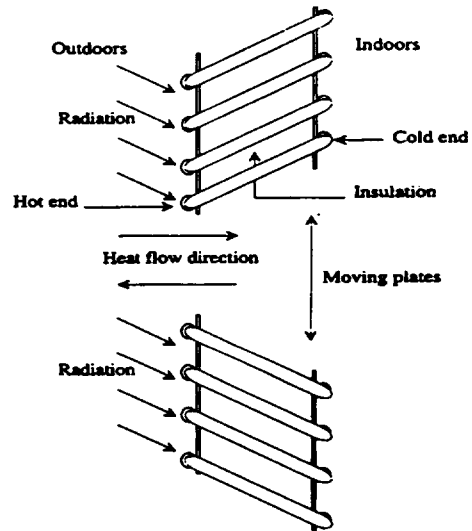


Fig. 5 A bidirectional rectangular thermo-diode design.

이 루프형 스마트모듈은 크게 집열부, 방열부, 연결부, 몸체 이 네 부분으로 구성되며, 각 부의 부분품들도 조립 및 분해가 편리하도록 제작하였다.

집열부의 흡열판(absorber plate)은 동(銅)재질의 판과 관으로 구성된다. 태양으로부터 직접 열을 흡수하는 흡열판은 동관과 단단히 밀착되어 작동유체에 열을 전달하게 된다. 우선 흡열판(3mm 동판) 중심에

흡을 만들어 동판(외경: 0.5inch)을 덧댄 후, solder(95% Tin, 5% Antimony)로 용접(welding)을 하였다. 그리고 반대편에 다시 폭이 좁은 동판을 덧댄 후 리벳팅하여 흡열판과 동판과의 열전달 면적이 최대가 될 수 있도록 하였다. 이 밖에 집열부는 과열 방지를 위한 통풍막과 대류손실을 방지하기 위한 유리덮개(glazing) 등으로 구성된다.

방열부의 방열판은 집열판과 동일하게 제작되어지며, 방열부는 열의 흐름을 조절할 수 있도록 방열판이 상하로 이동할 수 있게끔 설계되었다.

연결부는 폴리우레탄 튜브와 회전자유도가 있는 회전 엘보우(swivel elbow)로 구성되어 집열부와 방열부를 연결하게 된다. 전체 몸체(body)와 각 부의 사시는 알루미늄으로 제작하여 시스템의 경량화를 꾀하였다.

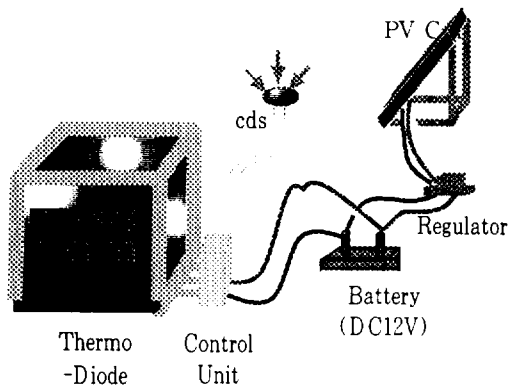


Fig. 6 System configuration of the Loop type Smart Module.

Fig. 6은 본 연구에서 궁극적으로 개발하고자 하는 Smart Module 전체 시스템의 개념도를 보여주고 있다. Loop형 Smart Module 시스템은 태양의 일사량과 실내적정온도에 따라 태양열의 흡수 및 실내로의 열을 방출이 용이하도록 되어있다. 동절기 낮동안에 태양의 일사량이 일정 이상이면 자동으로 집열면이 태양을 향하게 함으로써 태양열을 흡수하고, 밤이나 흐린 날씨에는 복사로 인한 열손실을 줄이기 위해 블라인드로 흡열판을 가리거나 흡열판을 돌려놓는다. 이러한 작동 메커니즘을 통하여 흡수한 태양열은 빠르

게 실내로 투입되고 또한 흡수된 열이 외기로 빠져나가지 못하게 된다. 하절기에는 태양 빛을 차단함으로써 흡열 요인을 줄이고, 열다이오드의 역방향 열전달 특성을 이용하여 열의 이동을 원천적으로 차단시킬 수도 있다. 즉 방열판의 위치를 흡열판보다 낮게 위치시킴으로써 루프형 열다이오드의 순방향(forward bias) 열전달을 실외측을 향하게 하여 태양열이 집열부로 유입되더라도 실내측으로의 열전달은 거의 이루어지지 않는다. 또한 하절기 야간동안 실내의 더운 열은 열다이오드의 순방향 열전달로 외기로 빠져나가게 된다. 즉, 동절기에 Smart Module은 열다이오드의 순방향 열전달(forward bias) 상태로 동작하여 난방모드를 취하게 된다. 반대로, 고온부가 저온부의 상부에 위치하게 되어, 고온부와 저온부 사이에 열적인 성층화가 이루어져 열은 단지 열전도(conduction)에 의해서만 전달되는데, 이것은 열다이오드의 역방향(reverse bias) 열전달 조건이며, 그 열수송량은 순방향 자연대류 열전달에 비해 매우 작다. 하절기에 스마트 모듈 시스템은 이 형태로 동작하여 열이 실내로 들어오는 것을 막는다.

이러한 시스템의 동작은 일사량과 실내 적정온도에 의해 결정이 된다. 일사량과 온도는 광전관(cds)과 서미스터(thermistor)를 이용하여 각각 측정하고 여기서, 검출된 신호를 비교한 그 결과를 가지고 동작모드를 택하게 된다.

난방 모드시 흡열판이 태양을 향하며 방열부는 상부로 이동하게 된다. 하절기 냉방모드시 태양열의 유입을 막기 위해 흡열판은 단열면이 정면을향하고 통풍막은 열리게 된다. 통풍막은 여름철 집열부의 과열을 방지하기위해 제안된 설계이다. 방열부는 아래로 내려와 열다이오드 순방향 열전달을 실외측을 향하게 한다.

이와 같이 시스템 제어회로는 네 가지 형태를 갖는데, 방열판의 상승 혹은 하강, 흡열판의 정회전 혹은 역회전을 제어하도록 되어 있다. 집열부의 통풍막은 방열부의 상하이동과 개폐를 같이한다. Table 1은 이 시스템 제어의 동작조건을 나타낸 것이다.

또한 전자제어와 모터 구동을 위한 전력을 태양전지(solar cell)를 이용하여 공급함으로써 완전한 독립 시스템(stand-alone system)이 되도록 구성하였다.

Table 1 Control condition of the brain circuit

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	asorber plate	radiator plate
$T_i < T_r$	$I > I_r$	close	black	upward
	$I < I_r$	close	reflective	upward
$T_i > T_r$	$I > I_r$	open	reflective	downward
	$I < I_r$	open	reflective	downward

IV. 실험 결과 및 고찰

4.1. 옥내 실험

스마트모듈에 대한 옥내 실측 실험은 4kW급 인공 태양(solar simulator)을 이용하였다. 열속은 $800W/m^2$ 로 고정시켰으며, 공간이 충분히 넓은 실험실을 택하여 안정적인 열침원을 만들어 실험중간의 대기온도를 거의 일정하게 유지할 수 있도록 하였다(Fig. 7). 온도 측정을 위한 열전쌍(thermocouple)은 흡열판, 방열판, 작동유체 그리고 대기온도를 모니터링할 수 있도록 설치하였고, 자료획득시스템(HYDRA: Data Aquisition System)을 이용하여 매 1분마다 자료를 수집·기록하였다.



Fig. 7 Heating test of the Loop type thermo-diode.

부로 들어오는 물의 온도가 실험 시작 약 12분 경과 후에 거의 $20^{\circ}C$ 이상 갑자기 상승함을 볼 수 있다. 이것은 열다이오드 내에서 유체의 유동(circulation)이 시작됨을 보여주는 것이다. 유동이 시작되면서 가열되었던 집열부 출구 근처의 유체가 방열부로 유입되면서 눈에 보이는 현격한 온도차이를 나타내는 것이다. 다시 유체의 온도는 정점을 기점으로 조금 떨어져서 서서히 증가함을 볼 수 있는데, 활발한 유동 때문에 방열부에 들어있던 차가운 유체가 집열부로 지나면서 미처 데워지지 않아 다시 방열부 입구의 유체 온도가 하락한다. 이 CP(동작점, Circulation Point)에 다다른 시간과 온도차는 루프의 경사각의 영향과 집열부의 집열성능, 방열부의 방열성능 그리고 작동유체의 특성들이 복합적으로 작용하게 된다.

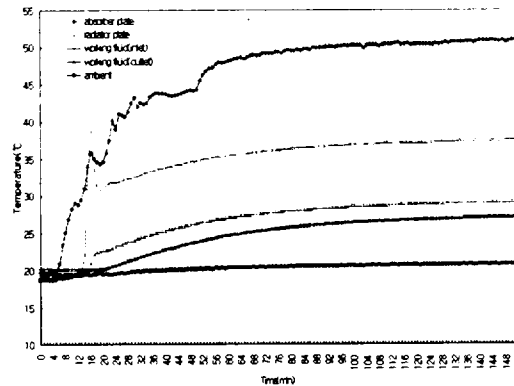


Fig. 8 Laboratory test results for the Loop-type thermo-diode.

4.1.2 옥외실험

조립 및 분해가 가능한 조립식 패널로 두개의 test cell(이동식 소형건물) 만들어 옥외에 설치하여 실측 실험에 이용하였다. cell의 전체 크기는 $1605 \times 1705 \times 2210mm$ 이다.

한 cell에는 실험장치를 설치하고, 태양 복사열 측정을 위한 일사량계와 각 부분의 온도 측정을 위한 열전쌍도 설치하여 휴대용 자료획득장치와 연결하여 data를 수집·기록하였다. 나머지 한 cell은 빈 채로 두어 열다이오드를 설치한 cell과의 data를 비교, 검증하였다.

Fig. 8은 실측 실험 데이터를 보여주고 있다. 방열

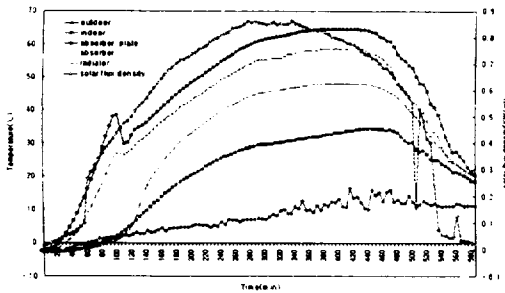


Fig. 9 Result of the outdoor test for thermo-diode.

Fig. 9는 루프형 열다이오드의 옥외 실측 결과를 보여주고 있다. 루프형 열다이오드의 옥내 실험 결과로부터 예상되었던 결과를 또 보여주고 있는데, 실험을 시작하지 1시간 30분 가량 급격히 흡열판의 온도가 상승하다 CP (circulation point)를 만나면서 다시 하락하는 루프형 열다이오드의 특징을 뚜렷하게 보여주고 있다. 이 때를 기점으로 흡열판의 온도는 서서히 증가하는 반면 방열판의 온도는 매우 빠르게 상승하고 있다. 그 후로는 방열판과 흡열판의 온도가 대략 10°C를 차이를 유지하면서 서서히 증가한다.

또한 일사량은 실험 6시간이후부터 줄기 시작했으나 열다이오드의 모든 부분의 온도는 그 보다 2시간 가량을 더 상승하다 하락하고 있다. 이것은 열다이오드가 시스템을 통하지 않은 열전달을 허용하지 않고 있음을 보여주고 있다.

한편, 외기와 최고 20°C의 온도차를 보이는 실내 온도는 test cell의 열용량이 그리 크지 않아 거의 열다이오드의 온도 추세를 따르고 있다.

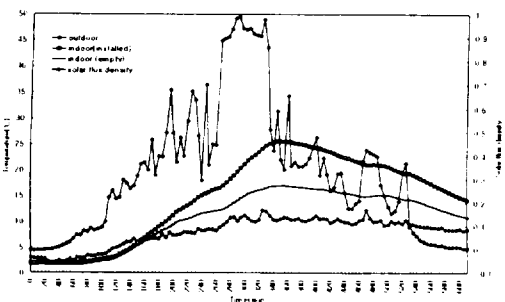


Fig. 10 Indoor temperature comparison of two test cell(with and without Smart Module).

Fig. 10은 스마트 모듈이 설치된 test cell과 빈 채로 둔 cell의 내부 온도 변화를 보여 주고 있다. 모듈이 설치된 cell의 실내 온도는 외기온보다 최대 15°C 이상 높아 빈 test cell의 온도와는 비교하여 10°C가량 차이를 보여주고 있다. 일사조건이 그다지 좋지 않은 것을 감안하며 두 셀의 온도는 상당한 차이를 보여 주고 있다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구는 그 열흐름의 방향, 태양 복사열의 집열 등이 조절 가능한 Thermo-diode식 태양열 이용 모듈 (Smart Module)의 개발을 위하여 수행되었으며, 이를 통하여 액체식 열다이오드에 대한 작동 메카니즘과 이를 적용한 태양열 이용 시스템의 효율적 작동과 그 가능성을 확인하였다. 우선, 기존의 열다이오드 시스템은 “다이오드”란 말 그 자체가 의미하듯 어느 주어진 한 방향으로만 열흐름이 가능하도록 설계되어 필요에 따라 그 열흐름을 차단할 수는 있어도 대부분 그 열흐름의 방향(순방향)을 역전시킬 수는 없도록 설계되어 왔다. 이는 그 제작의 어려움과 함께 열다이오드의 순방향 열흐름의 효율성을 극대화하기 위해서였다. 그러나, 이는 기존의 자연형 및 설비형 시스템에 대한 고정관념의 틀을 벗어나지 못하는 데에도 그 원인이 있으며 태양열을 보다 더 효율적이며 능동적으로 활용하기 위해서는 기계적인 분야 뿐만 아니라 다른 분야의 에너지 관련 소재를 복합적으로 활용하는 시스템의 개발이 필요하다. 본 연구에서 개발한 스마트 모듈 태양열 이용 시스템은 이러한 측면에서 기계분야 및 전기·전자 분야의 다양한 재료와 복합적으로 결합시켜 시스템을 구성하였으며, 태양열 이용의 극대화를 위하여 그 작동 메카니즘의 최적화 정도도하였다. 이 시스템은 또한 Modular 개념을 적용하여 제작 및 설치의 간편성과 시스템의 확장성을 제고하였다.

스마트 모듈 시스템의 개발을 위하여 본 연구에서는 시스템 이론분석 및 주요 요소에 대한 열성능 연구결과를 인용하여 prototype 시스템 설계와 제작 및 옥내 실측 실험을 수행하였으며 시스템의 효율성

과 적용성에 대한 그 간의 연구 결과를 종합하여 최적화 설계와 함께 시스템의 실용성을 극대화 할 수 있는 방안을 제시하였다. 스마트 모듈 시스템은 태양열 이용과 관련하여 Modular 개념의 효율적 적용에 대한 중요한 설계 자료를 제시하고 있다. 본 연구에서 얻어진 연구 결과를 Modular 제작이 가능한 부분의 태양열 시스템에 적용하면 보다 더 제작이 용이하고 그 확장성도 뛰어난 시스템을 구현할 수 있어 태양열 시스템 보급의 활성화를 한층 촉진할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) Welander, P., (1967) "On the Oscillatory Instability of a Differentially Heated Fluid Loop," *J. Fluid Mech.*, Vol. 29, part. 1, pp. 17-30.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Yin, S. H., Wung, T. Y. and Chen, K., (1978) "Natural Convection in Air Layer Enclosed within Rectangular Cavities," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 307-315.
- 5) 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.
- 6) Groll M., et al., (1979) "Development of a Liquid-Trap Heat Pipe Thermal Diode," *J. Spacecraft*, Vol. 16, No. 4, pp. 195-202.
- 7) Zvirin, Y. and Greif, R., (1979) "Transient Behavior of Natural Circulation Loops : Two Vertical Branches with Point Heat Source and Sink," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp. 499-504.
- 8) Bau, H. H. and Torrance, K. E., (1981) "Transient and Steady Behavior of an Open Symmetrically-Heated, Free Convection Loop," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 597-609.
- 9) Bau, H. H. and Torrance, K. E., (1981) "On the Stability and Flow Reversal of an Asymmetrically-Heated, Open Convection Loop," *J. Fluid Mech.*, Vol. 106, pp. 417-433.
- 10) Chen, K., (1985) "The Optimum Configuration of Natural convection Loops", *Solar Energy*, Vol. 34, No. 4/5, pp. 407-416.
- 11) Jones, G. F., (1986) "Heat Transfer in a Liquid Connective Diode", *J. Solar Energy Eng.*, Vol. 108, pp. 163-171.