

태양전지·열(PVT) 시스템 기술의 동향

차 중 회

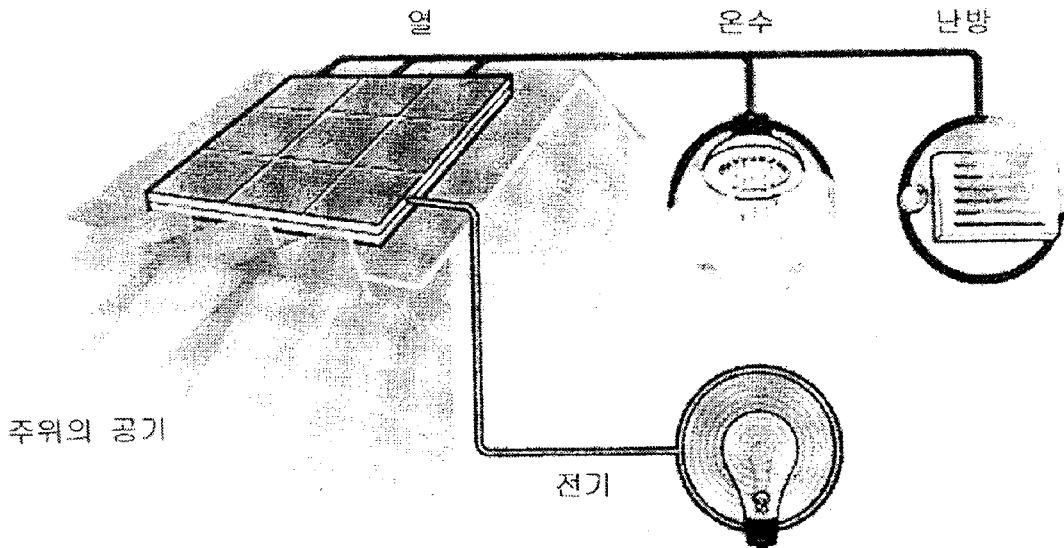
한국과학기술정보연구원

전문연구위원

1. PVT 기술의 개요

- PVT(PhotoVoltaic-Thermal) 기술의 원리는 그림 1-1과 같이 태양전지와 열전달기구를 일체화하여 태양전지로부터의 전력과 열전달기구로부터의 열을 동시에 생산하는 것이다. 따라서 태양전지에 의한 전력만을 생산하는 경우보다 태양에너지의 이용률이 높아지며, 전력과 열을 분리하여 생산하는 경우보다 설치면적이 적게 든다.

그림 1-1 PVT 기술의 원리



- PVT 시스템은 기본적으로 태양전지, 인버터(inverter), 열전달기구인 집열기와 열전달매체, 축열장치 및 보조가열기로 구성된다. 태양전지는 태양에너지를 전기에너지로 변환하는 반도체이며, 인버터는 태양전지에서 나오는 직류전기(DC)를 일반 전력계통과 같은 교류(AC)로 변환하는 장치이다. 집열기는 평판형(平板型) 집열기가 일반적으로 널리 사용된다.
- 집열기는 열전달매체에 따라 여러 가지 구조의 것이 있다. 열전달매체는 액체식에서는 물, 또는 글리콜(glycol)이 사용되며, 공기식에서는 공기가 사용된다. 축열장치(蓄熱裝置)는 잉여열을 일시 저장하는 장치이며, 현열식과 잠열식이 있다. 잠열식에는 축열재로서 상변화물질을 사용한다. 시스템의 가열효과가 불충분할 때는 보조가열기를 사용하여 부족분을 보충한다.

- 일반적으로 평판형 PVT 집열기는 종래의 열적 집열기와 유사하다. 다만 다른 점은 PV 모듈이 금속흡수판 위에 부착되어있는 것이다. 액체식 평판형 PVT 집열기의 상부에는 유리덮개가 있는 경우와 없는 경우가 있다. 한 장 내지 두장의 유리덮개가 있으면 상부로부터의 열손실을 상당히 감소시킬 수 있다. 그러나 반면 유리에서의 입사광선의 반사로 PV의 출력의 감소를 초래할 수 있다.
- 유리덮개가 있는 경우의 집열기의 구성은 그림 1-2와 같이 일반적으로 유리덮개+PV+접착제+흡수판+열전달기구+열절연재+프레임 등으로 구성되어있다. 액체식 PVT의 경우는 흡수판의 하부, 또는 상부를 열전달매체인 액체가 흐르도록 되어있다. 열전달기구로서는 흡수판 하부에 관을 부착하여 관내를 액체가 유동하면서 열을 흡수하도록 되어 있는 관이 붙은 판형(sheet-and-tube)과 그 밖의 채널유동형, 자유유동형 등이 있다(그림 1-3 참조). 액체식 평판형 PVT 시스템은 전력생산 외에 주택의 난방과 온수공급에 적합하다.

그림 1-2 액체식 평판형 PVT 집열기의 예

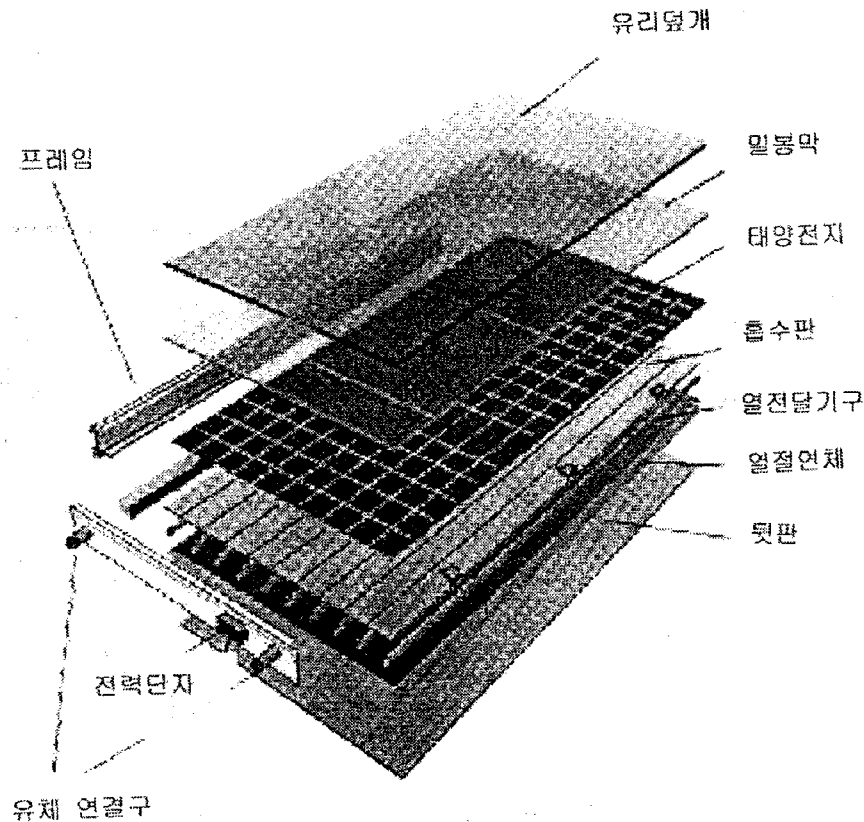
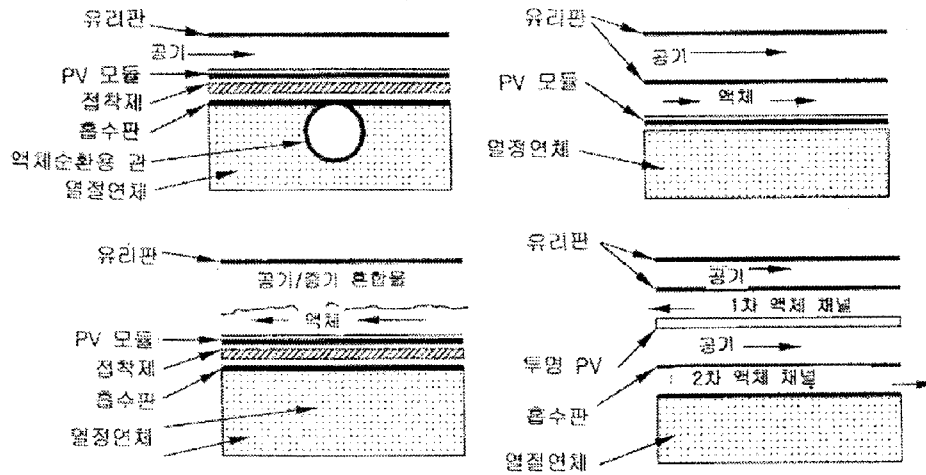


그림 1-3 여러 가지 액체식 PVT의 열전달기구



- 공기식 평판형 PVT 집열기는 열전달매체로서 공기를 사용한 것이다. 공기식 평판형 PVT 집열기는 공기 채널의 상부 덮개의 기능을 하는 PV 박판을 가진 종래의 저류(底流) 공기식 집열기와 유사하다. PV 박판은 덮개판의 안쪽, 또는 흡수판 위에 풀로 붙이거나, 또는 PV 박판 자체가 덮개판, 또는 흡수판 역할을 할 수 있다. 공기는 자연대류 또는 강제대류에 의해 순환시킨다. 공기식 평판형 PVT 집열기에서도 유리덮개가 있는 경우와 없는 경우가 있다.
- 공기식 PVT 시스템은 건물의 외벽, 또는 지붕과 일체화하여, 전기 생산과 함께 열을 환기용 공기를 가열하여 난방에 사용할 수 있다. 종래의 PV-외벽, 또는 PV-지붕에 추가하여 공기의 자연대류, 또는 강제대류에 의해 PV 이면에 공기통로를 둔 것이다. PV로부터 열을 회수하여 건물에 사용할 수 있으며, 따라서 PVT 시스템을 구성하게 된다.
- 반도체재료의 층으로 구성된 태양전지, 또는 PV 셀(cell)은 태양에너지를 광기전력효과(photovoltaic effect)에 의해 전기로 변환하는 장치이다. 태양전지의 어셈블리를 캡슐로 싼 것(encapsulation)을 PV 모듈(PV module)이라고 부르며, 여러 개의 PV 모듈을 연결한 것을 PV 어레이(PV array)라고 부른다. 이들 태양전지는 태양에너지를 전기로 변환하는 고유의 효율을 가지며, 종류에 따라 효율은 대략 5~17%의 범위에 있다.

2. PVT 시스템 기술의 동향

2-1. PVT 시스템 기술의 역사적 동향

가. 액체식 평판형 PVT 시스템

- 1976년 미국의 Martin Wolf는 처음으로 액체식 평판형 PVT 집열기와 연속전지로 된 시스템을 사용한 주택의 난방을 해석하고, 이 시스템이 기술적으로 타당하다는 결론을 내렸다. 1978년에 MIT의 Lincoln 연구소 및 Sandia 연구소는 ARCO사와 공동으로 평판형 PVT 시스템의 원형을 제작, 시험하여 전기효율 6.7%, 열효율 60%의 성능을 얻었다.
- 그 후 MIT에서는 두 대의 액체식, 두 대의 공기식 및 세 대의 신형 액체식 PVT(유리덮개 없는, 2중 유동, 2상 프레온 사용, 히트펌프 연결) 등 제2세대 PVT 집열기를 Spire Co., SDA(Solar Design Associates) 등 제작회사와 함께 개발하였다. 1979년에 일본의 Sharp사에서는 두 대의 평판형 PVT 원형을 개발하였다. 같은 해에 독일의 Karl이 AEG와 함께 c-Si를 사용한 유리덮개 있는 PVT 집열기를 개발하였다.
- 1980년대는 유가의 하락으로 세계적으로 PVT의 연구활동은 거의 없었다. 1990년대에 들어서면서 지구 온난화와 관련하여 재생에너지 개발에 다시 관심을 가지게 되었으며, PVT에 관한 연구는 주로 유럽에서 다시 시작되었다.
- 1989년 네덜란드의 TNO(응용과학연구기관)는 HES(교육기관)와 공동으로 유리덮개 없는 PVT 집열기+히트펌프에 관한 연구가 시작되었다. 1994~1998년간에 EUT(Eindhoven University of Technology)에서 PhD 프로젝트로서 주택의 온수공급을 위한 유리덮개 있는 액체식 PVT 모듈의 개발이 수행되었다. EUT의 PVT 연구는 ECN(Energy Research Center of the Netherlands)로 이전되었으며, ECN은 Shell Solar, ZEN Solar와 함께 대규모의 모듈 설계와 시스템의 연구를 수행하였다.
- 2003~2005년 동안 PV-Catapult 프로젝트에서는 EU FP 6(6th Framework Programme)에 의해 ECN의 주도 하에 7개 기관이 공동으로 PVT Roadmap 및 PVT 성능 시험의 지침서를 작성하였다. 독일에서는 1990년대에 들어서 제작사인 Zenith, Solarwerk 및 Solarwatt사들이 PVT 집열기 원형을 개발하였으나 상용화에는 이르지 못하였다. 일본에서는 1989년에 Hayakashi 등에 의한 PVT 시범 프로젝트를 통하여 PVT 모듈과 PVT를 열원으로 한 히트펌프의 연구를 수행하였다.
- 덴마크에서는 2000년에 태양열 집열기 제작사인 Batec사와 PV 제작사인 Racell사 및 Esbensen Consulting사와 공동으로 PVT 집열기의 시험과 설치 등의 연구를 수행하였다. 이스라엘에서는 유리덮개 없는 PVT 집열기를 상용화하였다. 이 개발에서는 이스라엘 사막에서 심각한 문제인 PV의 과열을 극복하는데 중점을 두었다. 이 PVT 시스템은 1991~1992년 겨울에 Kll에 설치되었다. 인도에서는 1994~1995년에 IIT(Indian Institute of Technology)의 Garg 등의 PVT에 대한 서모사이폰 적용 연구가 대규모로 수행되었다.
- 2000~2005년간에 미국에서는 PV:BONUS(Building Opportunities in the US for Photovoltaics) 프로그램 하에서 Power Light 및 SDA가 PVT 프로젝트를 수행하였다. Power Light는 강철기관의 a-Si 태양 전지를 사용한 유리덮개 없는 PVT 모듈을 개발하여 수영장의 물을 가열하는데 사용하였다. 그러나 제작비와 제품의 신뢰성에 문제가 있어 제품생산은 못하고 있다. SDA 프로젝트는 United Solar의 a-Si와 SunEarth의 집열기에 근거하여 유리덮개 있는 PVT 집열기를 개발하였다.

나. 공기식 평판형 PVT 시스템

- 1973~1974년에 미국 Delaware대학교의 Böer 교수는 CdS/Cu₂S 태양전지를 가진 공기식 PVT 집열기를 처음으로 개발하여 “Solar One” 주택에 설치한바 있다. 그 후 1970년대 후반에서 1980년대 초반에 걸쳐 Hendrie의 그룹에 의해 Sandia연구소와 Brown대학교에서 공기식 PVT에 관한 연구가 수행되었다. 1978년에는 MIT의 Lincoln연구소와 Sandia연구소는 ARCO 및 Spectrolab와 공동으로 공기식 평판형 PVT 집열기의 원형을 개발, 제작하였다.
- 1993년에 일본의 Ito & Miura는 부분적으로 투명한 PV를 상부 덮개로 한 공기식 PVT 시스템을 개발하여 40% 정도의 열효율을 얻었다. 1994년에 프랑스의 Cythelia사의 Capthel 등은 공기식 PVT를 개발하여 열효율 66%를 얻었다. 1990년대 초에 이스라엘의 Elazari는 공기식 PVT 집열기를 개발하여 액체식과 함께 상용화하였다.
- 독일회사인 Grammer Solar와 덴마크 회사인 Aidt Miljo는 1996년에 휴가용 오두막집의 제습을 목적으로 설계된 공기식 PVT 집열기를 개발하였다. 이 장치에서 PV는 팬(fan)을 구동하여 오두막집을 제습할 수 있을 정도의 작은 출력을 가졌다. Grammer Solar는 이를 토대로 흡수관 전체를 PV로 피복한 공기식 PVT 집열기를 상용화하였다.
- 1998년 캐나다의 Conserva Engineering사는 Bechtel 및 CANMET와 함께 PV SOLARWALL 시스템을 개발하였다. 원형의 PV-Solarwall 모듈에 대한 실험적 연구가 수행되었으며 몇몇 곳에 설치되었다. 1996년 미국의 Miami대학교의 Sopian은 2중 채널을 가진 공기식 PVT 집열기를 연구하였으며, 2001년 그리스의 Patras대학교에서는 난방용의 유리덮개 없는 공기채널식 PVT 시스템을 개발하였다.
- 이집트의 Hegazy는 2000년에 네 가지 공기식 PVT 집열기의 성능을 비교 연구하였으며, 인도의 IIT의 Bhargava 등은 건조(乾燥) 목적의 공기식 PVT 시스템을 개발하였다. Tiwari & Sodha는 유리덮개가 있는 것과 없는 공기식 PVT의 성능비교연구를 수행하여 유리덮개가 있는 공기식 PVT가 거의 2배의 열적 성능을 얻었는데, 반면 전기효율은 10% 감소되었다. 한국에너지기술연구원에서는 2006년에 유리덮개 없는 PVT 시스템의 성능시험을 수행한바 있다.

다. 건물과 일체화된 PVT 시스템

- 1990년대 초에 와서 건물과 일체화된 공기식 PVT 시스템이 중요시하기 시작하였다. 유럽에서는 스위스의 Atlantis Energy가 1991년에 지붕과 일체화된 공기식 PVT 시스템을, 1992년에는 외벽과 일체화된 공기식 PVT 시스템을, 그리고 1993년에는 2건의 지붕과 일체화된 공기식 PVT 프로젝트를 수행하였다. 지붕 모두를 PV로 단일화된 것을 Atlantis Energy는 PV Sunslates라고 불렀으며, Sunslates는 EU의 PV-HYBRID-PAS 프로젝트에 의해 시험되었다.
- 덴마크에서는 1993년 Cenergia 등 3개 기관이 지원하는 EU-Thermie 프로그램에 의해 20kW_p 규모의 외벽 일체화 PVT를 설치하였다. 1996~2000년 동안 이 프로젝트는 EU-Joule 프로젝트에 인계되어 Cenergia 등 9개 기관에 의해 기존 건물에 대해 저비용의 환기용 PVT 시스템의 설치를 수행하였다. 덴마크의 지자체 및 에너지부가 재정 지원하는 Ålborg Urban Ecology 프로젝트에 의해 Esbensen Consulting Engineers는 건물의 수직벽에 PV를 설치하여 환기용 공기를 예열하였다.
- 1994~1995년에 이탈리아 Ispra 내 JRC(Joint Research Centre)의 ELSA 건물은 770m²의 외벽이 PV와 일체화되었다. ELSA 건물의 연구는 영국의 Strathclyde대학교와 스웨덴의 Gävle대학교에서 수행되었다. 1996~1998년간에는 공기식 PVT에 관한 연구는 EU Joule-3 프로그램의 재정지원을 받은

PV-HYBRID-PAS프로젝트 내에서 주로 건물과 일체화된 PVT의 성능을 평가하기 위해 수행되었다. 동시에 1996~1998년간에는 JRC Ispra 등이 PV-HYPRI 프로젝트에 의해 지붕과 일체화된 PVT의 연구를 수행하였다.

- 스페인에서는 1994~1995년에 EU Joule-2 프로그램 하에서 TFM 등 4개 기관에 의해 Mataro도서관의 지붕과 일체화된 PVT가 설치되었다. 다음 프로젝트로서 1998~2000년에는 EU Joule-3 하에 CREST 등 5개 기관에 의해 건물 외벽과의 일체화된 PVT의 설계와 성능시험이 수행되었다. 2000~2002년간에는 Hochschule für Technik Stuttgart 등 7개 기관의 참여로 Mataro건물에 태양에너지 냉방 시스템의 살치를 수행하였다.
- 미국에서는 PV: BONUS 프로그램에 의한 재정지원으로 Innovation Design 및 North Carolina State University에 의해 두 가지 시범 프로젝트를 수행하였다. 하나는 1996년에 Central Carolina Bank에 25m² 공기식 PVT 시스템을 설치한 것으로 겨울철에 환기용 공기의 예열을 목적으로 한 것이고, 다른 하나는 1997년에 한 식당에 40m² 공기식 PVT 시스템을 설치하고 열교환기를 사용하여 온수를 생산한 것이다.
- 영국에서는 2001~2004년 동안 Brockshill Environment Centre에서 Cartmell 등에 의해 37m²의 PV와 12.5m²의 태양열 집열기를 결합하여 환기용 공기를 가열하고 동시에 온수도 생산하는 시스템의 시범 프로젝트를 수행하였다. 이 들은 또한 PVT 시뮬레이션 프로그램인 PV TRNSYS의 개발에도 참여하였다.
- 이탈리아에서는 2004년에 Politecnico di Milano와 제작회사인 Secco Sistemi가 지붕과 일체화된 PVT 시스템을 상용화하였다.
- 2004년에 프랑스에서는 CNRS(Centre National de la Recherche Scientifique)의 에너지 프로그램 하에서 GENEC 등 6개 기관이 참여하여 건물과 일체화된 PVT 복합 시스템 프로젝트가 시작되었다. 관련 연구로서 EdF(Electricite de France) 주관 하에 Ecol de Mines de Paris의 참여와 ADEME의 지원으로 PVT 시뮬레이션 도구인 TRNSYS의 개발도 수행되었다. 일본에서는 2001~2003년에 Hokkaido대학교에서 외벽과 일체화된 PVT 시스템의 연구가 수행되었다.

2-2 액체식 PVT 시스템 기술의 연구동향

가. 모듈의 열효율

- Furbo & Jivan Shah는 태양열 집열기의 덮개용 유리로서 철 함유량이 낮은(low-iron) 유리를 사용하여 91~92%의 투과율을 얻었다. 또한 Furbo 등은 최근 Flabeg & Sunarc사로부터 입수한 유리의 투과율이 96%였다고 보고하였다. 이 유리는 PV의 피복과 PVT의 유리덮개로서 적합하다.
- SDA 프로젝트에서 USSC의 a-Si 모듈에 대한 흡수율의 측정이 수행되었다. 알몸(bare)의 a-Si에 대한 흡수율은 70%였고, 기타 피복재료(Urethane, Tefzel, 및 fibreglass)를 가진 모듈에 대해서는 67~75%의 범위로 측정되었다. Hendrie는 PV전지의 피복재로서 Teflon을 사용하였는데 운전온도에서 불안정이 발견되었다.
- 태양전지의 실리콘은 전지 상부에서의 반사를 감소시키기 위해 반사방지제로 피복한다. 반사방지제 피복의 효과는 입사광 파장에 강하게 의존한다. Zondag에 의하면 광의 파장이 피복의 광학적 두께의 4배일 때 반사는 최소가 된다. 실리콘 표면에서의 반사를 감소시키는 다른 기술은 표면에 무늬를 내는 것이다. 무늬는 특히 긴 파장의 반사를 감소시키므로 PVT 시스템에서 효과적이다.
- Zondag에 의하면 결정질 실리콘은 0.5-1.1 μ m의 스펙트럼 범위에서 좋은 흡수체이나 1.1 μ m보다 긴 파장

의 광은 거의 투과시킨다. PV 시스템에서는 긴 파장의 에너지는 전기에너지 생산에 거의 기여하지 못하나 PVT 시스템에서는 열 생산에 기여한다. 결정질 실리콘 셀의 경우 고유의 성질 때문에 태양 스펙트럼의 약 70%만이 실리콘에 의해 흡수된다.

- Affolter 등 및 Platz 등에 의해 태양전지의 흡수율이 측정되었다. 여러 가지 a-Si 전지에 대해 Affolter 등은 태양 스펙트럼에 걸친 흡수율로서 71%~91%의 범위로 측정되었다. Platz 등은 여러 가지 캡슐로 싸인 a-Si 전지에 대해 78~85%의 범위이고, 캡슐로 싸인 다결정 Si 전지에 대해 88%를 얻었다.
- PV 내에 모든 에너지가 흡수되는 것은 아니고, 긴 파장의 일부 일사량은 밑의 2차 흡수체로 나간다. Lalovic 등은 a-Si PVT 시스템에서 PV 전지 뒷면을 알루미늄으로 전기도금 한 즉 입사광선의 29%가 반사됨을 발견하였다. 그래서 그들은 ITO(Indium Tin Oxide)의 뒷면 전기도금을 권하였다. 그들의 실험에서 알루미늄의 뒷면 전기도금으로 열효율은 52%를 얻었으나, ITO의 뒷면 전기도금으로 66%의 열효율을 얻은 것이다.
- 열전달을 증가시키기 위해 De Vries는 산화알루미늄으로 채운 2 성분 에폭시(epoxy)로 채래의 PV 박판을 판이 붙은 판(sheet-and-tube)형의 흡수판에 접착시켰다. 산화알루미늄으로 인하여 접착제의 열전도율은 0.85W/mK이나 실체는 이보다 낮았다. 이로 인하여 전지와 흡수판 간의 열전달계수는 45W/m²K가 되었다. 수치해석에 의하면 이로 인하여 유리덮개가 있는 액체식 PVT의 연간 평균 열효율은 4% 감소됨을 제시하였다.
- Raghuraman은 태양전지를 흡수판에 접착제에 의해 직접 접착시킨 액체식 PVT 시스템에 대해 보고하고 있다. 판과 태양전지 사이에는 PV 박판과의 단락을 막기 위해 실리콘 포탄트(silicon pottant) 층으로 된 전기 절연층을 두었다. 실리콘의 전기전도율은 0.2W/mK 이고, 이 층의 두께는 0.5cm이며, 열전달계수는 40W/m²K이다. 이 층의 높은 열 저항 때문에 흡수판과 태양전지간의 온도차는 12°C이고 열효율은 10% 이상 감소되었다.
- 열전달의 견지에서서는 이상적 방법은 PV 재료를 흡수판에 직접 증착시키는 것이다. 그러나 이것은 박막 기술에 의해서만 할 수 있으며, 절연 코팅 또는 셀 간의 갈바니 분리(galvanic separation)를 필요로 한다. Lalovic 등은 PVT 모듈에서 알루미늄으로 피복된 흡수판에 직접 a-Si를 증착시키고, 이를 전기절연을 위해 산화막을 피복하였다고 보고하였다. 그러나 그 결과에 대해서는 보고 된 바가 없다.
- 1980년대 후반부터 태양전지의 직접 증착에 대한 상당한 연구개발이 있었다. USSC(United Solar Systems Corporation)는 강(鋼) 박막에 a-Si를 피복하여 상업적으로 생산하였으며, Affolter 등은 PVT 적용을 위해 강 박막 기관 위에 피복한 유연성 a-Si 박막의 가능성을 조사하였고, 이 유연성 PV 박막은 PV-BONUS 프로젝트와 같은 몇몇 PVT 프로젝트에서 사용되었다.
- 흡수판으로부터 액체로의 열전달을 위해 태양열 집열기에서는 관습적으로 판이 붙은 판(sheet-and-tube)의 설계를 사용하였다. 이 형의 집열기의 열효율은 W/D 비에 의존한다. 여기서 W는 튜브 간의 간격이고 D는 튜브의 직경이다. W/D 비는 최적 열전달과 경제적 관점에서 절충하여 사용한다. Huang 등은 유리덮개 없는 PVT 원형에서 W/D 비를 10 및 6.2의 열전달기구를 사용하여 실험하였으나 결과는 만족스럽지 못하였다.
- Hendrie는 PV 박판 하부를 유동한 물이 다시 PV 박판 상부를 유동하는 2중유로 구조를 가진 액체식 PVT 집열기 개념을 제안하였다. 이 집열기는 상부유로를 보호하기 위해 또 한 장의 유리덮개를 사용하였다. 축소된 원형이 제작되고 측정 결과로부터 69%의 열효율을 얻었고, 20°C에서의 전기효율은 10% 이상을 얻었다.
- De Vries는 Hendrie의 것과 같은 2중 유동 PVT 집열기 이나 물의 유동은 역방향(PV 위로 유입하고 PV 아래로 유출)이었다. 그리고 그는 PV와 아래쪽 채널 사이에 추가의 열 절연을 위한 공기층을 두었다.

- 다. 시뮬레이션에 의하면 이 공기층으로 인하여 약간의 열효율의 증가가 있었고, PV 셀이 집열기의 저온측에 있었기 때문에 전기효율은 비교적 높았다. 열효율은 판이 붙은 판형 집열기보다 10% 높았다.
- Zondag는 펌프의 고장이나 시스템의 열저장 능력이 초과하면 유체유동이 정체되어 온도가 급상승하는 사례가 있다고 보고하였다. 경험에 의하면 유리덮개가 있는 PVT 집열기의 경우 정체온도는 200°C까지 도달한다. 이와 같은 온도에서는 PV의 손상과 캡슐재료의 변질 등을 초래한다. 또한 정체 기간이 지난 후 PVT 수집기를 재가동할 때 찬 물이 뜨거운 집열기 내부로 갑자기 유입하면 집열기 내부는 급냉에 의한 열충격을 받을 수 있다고 하였다.
 - 여러 가지 덮개 재료에 대한 적외선 투과의 스펙트럼이 Bansal & Sharma에 의해 발표되었다. 스펙트럼 곡선과 관련있는 부분은 Wien의 법칙에 의해 추정할 수 있다. 즉 최대의 복사에너지 밀도를 가진 파장 λ_{max} 는 복사하는 흑체의 온도(T)의 함수로서 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉 $\lambda_{max}=2.898 \times 10^{-3}/T$. 대표적 흡수체의 온도는 30~70°C이므로 이에 상당하는 파장은 9.6~8.4 μ m이 된다.
 - 상부 유리덮개에서의 방사(emission)를 감소시킬 수 있으면 좋을 것이다. 예를 들어 상부 유리덮개에서 스펙트럼 선택성 코팅의 반사에 의해 흡수판으로 적외선을 되돌릴 수 있을 것이다. 그러나 이와 같은 코팅은 태양 스펙트럼의 투과를 감소시킨다. LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory) 내 WINDOW 프로그램의 유리 데이터베이스에서는 30% 방사율의 유리가공에 대해 76% 투과가 최적으로 되어있으며, 5% 방사율의 유리가공은 60% 투과가 최적으로 되어 있다.
 - 많은 연구자들이 스펙트럼 선택성 PV 재료의 사용을 시도하였다. Affolter 등 및 Platz 등은 몇 가지 PV 재료의 방사율(emissivity, %)을 측정하였는데, 예를 들면 ZnO를 코팅한 a-Si에 대해 41%, SnO₂를 코팅한 a-Si에 대해 17%, ITO(Indium Tin Oxide)를 코팅한 a-Si에 대해 60~65%의 방사율을 얻었다. SDA는 코팅이 없는 USSC a-Si의 방사율은 56%라고 보고하였다.
 - 그러나 특히 a-Si와 같은 태양전지는 습기로부터 보호되어야 하기 때문에 실제로 스펙트럼 선택성 전지를 사용하기 곤란하다. 이것은 전지 위의 공기층이 외기로부터 밀봉되었을 때만 가능하다. 최근 시장에는 흡수판과 유리덮개 사이를 가스로 충만하여 밀폐한 집열기가 도입되고 있는데, 앞으로의 유망한 연구대상이다.
 - PVT 집열기의 성능 향상을 위한 방법으로서 모듈에 평면의 반사체를 추가하는 것이다. 이 문제에 대해 Tripanagnostopoulos 등은 물과 공기에 대해 실험적으로 연구하였다. 그들은 PV에 대한 균일한 조사(照射)를 위해 확산 반사체를 사용할 것을 강조하였다. 알루미늄 반사체는 제로 감소 온도에서 유리덮개 없는 경우 성능이 55%에서 65%로 증가하였고, 유리덮개 있는 경우 70%에서 80%로 증가하였다고 한다.

나. 모듈의 전기효율

- 유리덮개가 있는 PVT 모듈의 전기효율은 PV만의 모듈보다 낮다. 이것은 유리덮개의 설치로 태양 복사의 반사가 추가되었기 때문이다. 효율은 철분이 낮은 유리의 경우 8% 감소하고, 고 투과성 유리의 경우 4%가 감소된다. 또한 PV 전력은 PVT 흡수체 온도의 영향을 받으나 실제에 있어 이 효과는 열적 시스템 설계에 따라 양성 또는 음성 일 수 있다.
- PV의 성능은 일차적으로 PV의 형에 의해 영향 받는다. 고 효율의 c-Si형이 a-Si형보다 높은 전기효율과 높은 전기-열비를 가져온다. 재래의 집열기에서 집열기 테두리는 흡수체에 그늘을 만드나 성능에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 PVT 집열기에서는 PV 전지의 하나가 그늘이 생기면 전체 전기출력이 크게 감소하는 효과를 준다고 한다.
- Tripanagnostopoulos 등은 a-Si형 및 c-Si형의 PV를 액체식 및 공기식 PVT에 각각 사용하여 효율을

실험적으로 측정하였다. 그들은 제로 감소 온도에서 액체식 PVT 집열기에 대해 c-Si 원형의 효율은 55%이고, a-Si 원형의 효율은 60%이며, 공기식 PVT 집열기에 대해 c-Si 원형의 효율은 38%이고, a-Si 원형의 효율은 45%였다. 그러나 c-Si 모듈의 전기효율은 12%이고, a-Si에 대해서는 6%이다. Ji 등의 실험에서는 c-Si보다 a-Si의 경우 열효율이 낮았다.

- 결정질 실리콘(c-Si) 셀의 효율, η_{PV} 는 온도의 증가에 따라 다음과 같이 감소한다. 즉 $\eta_{PV} = \eta_{PV, T=25} [1 - \beta(T - 25^\circ\text{C})]$, 여기의 온도계수 β 는 결정질 실리콘에 대해 0.45%/K, CIS(CuInSe₂)에 대해 0.35%/K이며, CdTe에 대해 0.25%/K, a-Si에 대해 0.2%/K이다. PV와 집열기 유체 간의 열 저항은 온도에 따라 증가한다.
- Zondag 등은 같은 PV 형에 대해 재래의 PV 모듈, 유리덮개 없는 PVT 모듈 및 유리덮개 있는 PVT 모듈의 전기효율을 비교하였다. 평균 연간 전기효율은 각각 7.2%, 7.6% 및 6.6%였다. 계산에서 92%의 투명도를 가진 유리를 사용하였으므로, 재래의 PV 모듈에 비해 유리덮개가 있는 PVT 모듈에서의 전기성능의 감소는 추가적인 반사손실 때문으로 예상된다. 유리덮개가 있는 PVT 모듈에서의 온도의 영향은 연중에 걸쳐 상쇄 될 것으로 예상되고, 유리덮개가 없는 PVT 모듈에서는 냉각효과로 인한 온도의 영향이 나타나 있다.
- PV 셀이 직렬로 연결되었을 때는 같은 전류에서 운전되어야 하며, 병렬로 연결되었을 때는 같은 전압에서 운전되어야 한다. PVT에 걸쳐 온도 경사도가 있으므로 모든 전지가 동시에 최대의 출력으로 운전하기 곤란하다. Lambarski는 직렬연결의 경우는 온도 경사도의 영향이 적으나(<1%), 병렬연결의 경우는 약 17%의 큰 손실이 있음을 발견하였다.
- PVT 집열기의 흡광률(吸光率)은 집열기 유리덮개의 투명도에 비례한다. 이것은 유리덮개층 밑에 있는 PV의 열적 흡광률과 전기적 성능에 관계된다. 전기효율은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉 $\eta_{el} = \tau \eta_{PV}$, 여기의 τ 는 유리덮개의 투과율이다. 투과율은 철분이 낮은 유리에서 92%이고 고 투명 유리에서 96%이다. Nagano 등은 겨울 철 유리덮개에서의 응축으로 인하여 9%의 전기효율 저하를 관찰하였다.

2-3. 공기식 PVT 시스템 기술의 연구동향

- 공기식 PVT 시스템에는 다음의 여러 가지 형식이 있다. 즉 (1) 유입 환기용 공기의 가열, (2) 태양열 집열기를 통한 실내 공기의 순환, (3) 건물의 외벽, 또는 바닥 내의 캐비티를 통한 가열된 공기의 순환, (4) 공기-액체 열교환기를 통한 물의 가열(가열된 물은 온수 또는 난방에 사용할 수 있다). 공기식 PVT 시스템 기술에 관한 연구는 액체식 PVT 시스템 기술과 공통되는 부분이 많고, 공기식 PVT의 시장 점유율이 낮아 별로 많지 않다.
- Prakash는 채널형 PVT 집열기에서 공기(100~300kg/h) 및 물(40~120kg/h)을 사용하여 열적 성능을 해석하였다. 덕트의 높이를 3cm에서 1cm로 감소시킨 결과 공기(100kg/h)에 대해 열적 성능은 17%에서 34%로 증가하고, 물(40kg/h)에 대해서는 50%에서 64%로 증가하였다. 공기에 대해 유량을 100에서 300kg/h로 증가한 결과 열 성능은 34%에서 51%로 증가하고 물에 대해서는 40에서 120kg/h로 증가한 결과 64%에서 67%로 증가하였다.
- Loferski 등은 핀(fin)을 각 태양전지 뒷면에 연결한 공기식 PVT 시스템에 대해 보고하였다. 핀으로 인한 표면적은 4배 증가하였으며, PVT의 열적 수익은 핀이 없는 경우에 비해 2배 더 얻었다. 핀은 120°C 이상의 온도에서 견디는 Dow Corning RTV silicon에 의해 연결되었다.
- Younger 등은 공기 채널 상부측을 PV 박판으로 구성한 공기식 PVT 시스템에서 PV 박판과 공기간의 열전달을 증가시키기 위해 PV 박판의 뒷면을 거칠게 한 Teflon으로 구성하였다. Hendrie는 공기식

PVT 집열기에서 V자형으로 주름지게 한 2차 흡수판을 설치하고 V자의 끝이 PV와 접촉하도록 배치하여 열전달면적을 채널 유동 시에 비해 크게 하였다. 이 설계에서 열효율은 40%이고, 전기효율은 7.8%를 얻었다.

- Tripanagnostopoulos 등은 그들의 공기식 PVT 집열기에서 공기채널의 전 길이에 따라 채널의 반 높이에 검게 한 금속판을 삽입하여 열전달을 증진시켰다. 즉 금속판은 PV로부터의 열복사에 의해 가열되므로 추가의 효과적 열전달면적을 얻게 되어 열효율은 35%에서 40%로 증가하였다.

3. PVT 시스템 기술의 연구개발 전략

3-1 PVT 시스템 기술의 문제점

가. PVT 모듈의 열효율

- PVT 집열기의 열효율은 재래의 집열기보다 낮다. 이 감소는 다음의 세 가지로 분석된다. (1) PV 표면의 흡수계수는 PV 박판의 여러 층에서의 반사 때문에 재래의 집열기의 흡수계수보다 낮다. (2) PV 표면은 스펙트럼 선택성(spectrally selective)이 아니기 때문에 열복사의 방사손실이 크다. (3) 흡수면과 열전달 매체 간의 열 저항은 추가의 재료 층 때문에 증가한다. 재래의 집열기의 열효율이 대략 80%대인데 비해 PVT 집열기의 열효율은 60%대로서 약 20% 정도의 효율 차가 있다. 그러나 열효율의 향상은 정체온도의 증가를 가져올 수도 있다.
- 공기식 PVT 집열기에서 PV 패널 뒤의 캐비티에서의 PV 패널부터 공기로의 열전달은 시스템 효율에 결정적 영향을 준다. 공기식 태양열 집열기의 개발에서 열전달면의 확장을 위해 융기부(ridge)나 핀(fin) 등 여러 가지 방법을 써왔다. 이러한 융기부나 핀은 PV 패널의 뒷면에서 일체화하여야 한다.

나. 모듈의 신뢰성 - 정체온도

- 일반적으로 PV 시스템과 태양열 시스템은 동력의 상실이나 능동적 냉각시스템의 고장 시에 능동적 냉각 없이 태양의 직접 일사(日射)에 견디어야 한다. 이것은 특히 유리덮개 있는 PVT 시스템이나 집광형 PVT 시스템에서 중요하다. 종래의 집열기 시스템에서도 일년에 수시간씩 여러 번 저장장치가 완전히 충전하였을 때 정체온도(stagnation temperature)가 발생하였다. 종래의 집열기에서의 정체온도는 약 180~200°C이다. 유리덮개가 있는 PVT 시스템에서의 높은 정체온도 조건에서는 캡슐재료, 또는 상부 막의 손상이 일어날 수 있다.
- PVT 시스템의 펌프가 시동할 때 찬 집열기 유체가 고온의 정체온도 하의 집열기로 유입할 수 있다. 이때 PV 박판을 가로질러 큰 온도차가 발생할 수 있으며, 이에 상당하는 열응력이 발생하여 PV 박판이 손상되거나 파열될 수 있다. 이를 열충격(thermal shock)이라한다.

다. 태양전지 성능의 온도의존성

- 대부분의 태양전지는 결정질 실리콘(단결정질이거나 다결정질)으로 만들었다. 이 재료의 전기생산은 온도 증가에 따라 감소한다. 온도계수는 1°C 상승마다 전기효율은 약 0.4~0.5% 정도씩 감소한다. PVT 모

들에서는 온도는 표준 PV 모듈보다 연 평균에 걸쳐 높다. 온도 상승으로 인한 전력 감소는 c-Si를 a-Si로, 또는 온도계수가 좋은 다른 재료로 바꿈으로서 감소시킬 수 있다. 그러나 PVT는 c-Si의 전기효율만큼 좋지 않다.

라. PVT 시스템의 경제성

- Bakker 등에 의하면 PVT 시스템의 1m^2 당 가격은 1m^2 PV 단독 + 1m^2 재래 집열기의 가격 보다 \$29(Canadian) 더 비싸다고 한다. 가격인하를 위한 기술적 대책은 PVT 시스템에 적합한 값싼 PV의 개발이 중요하다고 본다.

마. 설계 도구

- PVT 시스템의 적용에 대한 좋은 설계 도구(소프트웨어)는 필수적이다. 설계 도구는 특히 건물에 대한 적용 과정에서 PVT 시스템의 설치를 촉진해 준다. 설계 도구는 다음이 포함되어야 한다. 즉 설계도구는 건축 설계자를 위해 치수를 정해주어야 한다. 치수는 건물의 외벽과 지붕에 꼭 맞도록 계산되어야 한다. 설계 도구는 가능한 한 건물과 일체화된 PVT 시스템은 가시화(可視化)되어야 한다. 정교한 성능 모델링 도구는 엔지니어링을 위해 PVT 시스템의 상세 계산이 포함되어야 한다.

바. PVT와 히트펌프의 결합

- 저 온도 응용으로서 관심 있는 기술은 PVT와 히트펌프의 결합이다. 히트펌프의 사용에 의해 저온의 유리 덮개 없는 PVT 집열기는 난방 또는 온수생산과 같은 고온에서 사용할 수 있다. 이 시스템에서는 히트펌프와 태양열 공급 간의 대형 저장장치가 필요하다. 저장장치로서는 애틱(attic) 내에 들 수 있는 열음 저장(약 2m^3), 또는 열교환기를 가진 지하저장장치가 적합하다.

3-2 액체식 PVT 시스템의 연구개발 전략

가. 모듈의 열효율 향상

- 단기적으로는 태양열의 흡수율이 높은 태양전지를 사용할 것이며, 반사방지 유리를 사용한 2중 덮개의 PVT를 개발하고, 고 투명, 저 방사(low-e) 코팅기술을 개발하는 것이다. 그리고 공기식 PVT에 대해서는 PV 모듈의 뒷면에 열전달을 증진시킬 수 있는 구조(예를 들면 금속 핀(fin))를 추가하는 것이다. 또한 태양전지와 집열기 유체간의 열 저항을 최소화하는 접착기술을 개발하는 것이다.
- 중기적으로는 태양전지의 일광흡수의 최적화에 의해 PVT 전용의 태양전지를 개발하는 것이고, 고 투명의 저 방사코팅을 실제 적용하는 것이다. 그리고 PV 모듈의 생산과정에서 열전달 증진장치를 모듈과 일체화하는 것이다. 또한 태양전지와 흡수체가 완전히 일체화된 모듈을 개발하는 것이다. 장기적으로는 최적화된 태양열 흡수체를 가진 PVT 모듈을 실제 사용하는 것이다.

나. 정체온도의 대책

- 단기적으로는 PVT 흡수체의 모든 성분 내의 정확하고 신뢰할 수 있는 온도를 계산할 수 있는 도구를 개발하는 것이다. 그리고 고온에 견딜 수 있는 실리콘 베이스의 온도 저항 캡슐재료를 개발하고, 온도 상승 시에 저항할 수 있는 전기 절연재, 내부 연결 및 결선 기술들을 개발하는 것이다.
- 중기적으로는 캡슐이 없는 태양전지의 사용을 위하여 습기를 차단하는 기술을 개발하고, 열전달에 대한 최적 캡슐링 기술을 개발하며, 집광형 PVT에 대한 효과적 정체 방지기술을 개발하는 것이다. 장기적으로는 PV와 흡수체를 완전히 일체화하는 기술을 개발하는 것이다.

다. 태양전지 성능의 온도 의존성

- 단기적으로는 PVT의 운전온도를 고려하여 PVT에서 여러 가지 형의 PV에 대해 경제적 최적화 연구를 수행한다. 실제 설치 현장에서 증가한 태양전지 온도에 의해 실제 전기출력을 조사한다. 중기적으로는 정체조건에서 태양전지의 온도를 낮추는 방법을 찾는다. 장기적으로는 높은 온도에서 우수한 성능을 갖는 박막 PV를 개발하는 것이다.

라. 저가의 PVT 생산기술

- PVT 가격의 저하는 무엇보다도 새로운 PV 제조법의 개발로 극복해나가야 할 것이다. PV 박판의 가격 인하는 먼저 저렴한 a-Si 전지의 제조법 개발이다. 단기적으로는 a-Si 박막을 면적이 큰 흡수체 기판에 직접 증착시키는 것이다. 이 가공은 200°C 이하에서 가능하다. 중장기적으로는 c-Si 박막을 흡열체 기판에 직접 증착시키는 가공법을 개발하는 것이다. 이 가공법은 800~1,400°C 범위의 온도가 필요할 것이다.

마. 설계도구의 개발

- 단기적으로는 표준 PVT(액체식 평판형 PVT)에 대한 경험적 및 자료에 의해 설계 도구를 개발한다. 건축기술자를 위해 표준 PVT(액체식 평판형 PVT)에 대한 치수를 정하고 가시화법을 개발한다. 표준 PVT(액체식 평판형 PVT)의 모듈을 위한 TRNSYS 플랫폼에 대한 PVT의 모듈을 개발한다. 중기적으로는 완전한 물리적 모델로 시스템을 최적화하고 비표준 PVT 모델을 개발한다. 장기적으로는 비 표준 PVT의 물리적 모델의 시스템을 최적화하는 것이다.

바. PVT와 히트펌프의 결합

- 단기적으로는 히트펌프를 추가한 PVT의 적합한 운전조건을 수립한다. 히트펌프기술을 사용한 실제 시스템을 조립한다. 용해 절차를 개발하고 결빙을 방지하기 위한 모듈 온도 제어를 개발한다. 중기적으로는 적합한 히트펌프 기술을 개발하고, 응축과 결빙 조건에 견딜 수 있는 유리덮개 없는 PVT 모듈을 개발한다. 장기적으로는 PVT 모듈 위에 얼음 형성을 방지하기 위한 비 점착성 코팅을 개발한다.

4. PVT 시스템의 시장성 조사

4-1 PVT 시스템 시장의 현황

- 지난 수년간 PVT 시스템의 많은 개발이 진행되었으며, 그 중 몇 가지는 상용화 또는 상용화에 근접하고 있다. 유리덮개가 있는 것과 없는 것을 포함한 액체식에서부터 집광형에 이르는 대부분의 PVT 집열기가 상업적으로 입수가 가능하다. 건물과 일체화된 PVT 시스템도 상업적으로 얻을 수 있으나, 이 시스템은 아직 설계의 표준화가 안 되어 있어 특정 건물에 대해 특정 회사가 설계와 설치를 실시하고 있다.

가. 액체식 PVT 집열기

- 이스라엘의 Millennium Electric사는 유리덮개가 없는 PVT 모듈을 상업적으로 생산하고 있다. 이 회사는 Chromagen사로부터 생산을 인계받았다. 네덜란드의 ECN(Energy Research Centre of the Netherlands)의 자회사인 PVTWINS사는 유리덮개가 있는 PVT 집열기를 상업적으로 생산하고 있으며, ZEN Solar 및 Shell Solar와 함께 ECN에 의해 생산이 계속될 것이다.
- 덴마크의 Batee & Racell사는 Esbensen사, DTI 및 Novator사와 함께 1998- 2001년간 PVT의 개발 프로젝트를 수행해 왔다. 그러나 덴마크 시장의 부진으로 Batec사는 개발을 중단하였다. Racell사는 PVT의 개발을 계속할 것이다. 독일의 Solon사는 유리덮개가 없는 PVT 모듈을 상업적 제작을 위해 개발하였다. 이 회사는 Solarwerk사에 의해 개발된 유리덮개 있는 PVT 모듈의 개발을 계속할 것이다.
- Zenit사는 1997년에 PVT 원형을 제작하였으나 상용화는 하지 못했다. Sollektor사는 1999~2000년간에 PVT 집열기를 제작하여 설치 운전하였으나 상용화는 하지 않고 있다. Dunasolar사는 PVT 집열기를 제작하였으나 2005년에 공장을 폐쇄하면서 개발을 중단하였다. 스위스의 ICEC사는 1999년에 PVT 집열기를 개발하여 시험하였으나 아직 상용화는 못하고 있다.
- 미국의 SDA, Sunerth & Unisolar사는 다 같이 1997~2001년간 PV BONUS 프로그램 하에서 PVT 프로젝트를 수행하였는데 Unisolar의 PV 박판과 Sunearth의 집열기를 결합하는데 문제가 있어 상용화는 아직 못하고 있다. Powerlight사도 1997-2003년간 PV BONUS 프로그램 하에서 PVT 프로젝트를 수행하였는데 그들이 개발한 PVT는 유연성이 있는 Unisolar의 PV 박판과 유연성이 있는 EPDM의 흡수판으로 구성되어 있는데 기술적인 문제가 있어 상용화는 지연되고 있다.

나. 공기식 PVT 집열기

- 액체식 PVT 집열기의 수에 비해 시장에 도입된 공기식 PVT 집열기의 수는 적다. 그러나 상업화의 수준은 높다. 독일의 Grammer Solar사는 공기식 PVT 집열기를 상업적으로 생산하고 있으며, 이미 많은 수의 제품이 대형 시범프로젝트에서 사용되고 있다. 또한 이 회사는 독립된 오두막집의 환기를 위한 일체화된 PVT 시스템을 생산하고 있다.
- 캐나다의 Conserval Engineeribg사는 그들이 개발한 Solarwall 모듈의 상부를 PV 박판으로 덮은 공기식 PVT 집열기를 생산하고 있다. 이 제품은 태양전자 성능 향상에 주력하고 있으며, 이미 독립된 오두막집의 환기용으로도 사용되고 있다. 덴마크의 Aidt Miljo사도 독립된 오두막집의 환기용으로 공기식 PVT를 생산하고 있다. 프랑스의 Cytheelia사는 세 가지 공기식 PVT 집열기를 개발하였으나 아직 상업적 생산은 시작하지 못하고 있다.

다. 건물과 일체화된 PVT 시스템

- 건물과 일체화된 PVT 시스템은 PV를 건물의 외벽, 또는 지붕과 일체화하여, 공기에 의한 PV의 냉각작용으로 전기생산을 극대화하고, 동시에 환기용 공기를 예열하여 난방을 지원하는 개념으로 설계되었다. 스위스의 Atlantis Energy사는 1991년에 Aerni 공장의 지붕에 적용하였으며, 1992년에 Scheidegger 건물의 외벽에 적용하였고 이어 1994년에는 Cottbus Umweltzentrum 외벽에 시공하였다.

<표 4-1> 현재 운영중인 평판형 PVT 제작회사

제조회사명	국명	형식	제품명	가격(Euro/m ²)
Conserval Engineering Inc.	Canada	Air	SOLARWALL	522-642
Conserval Engineeringl Inc.	Canada	Air	SolarRoof	-
Millenium Electric T.O.U. Ltd.	Israel	Water, Air	Multi Solar	850\$
PVTWINS	Netherland	Water	PVTWIN	980
Grammer Solar GmbH	Germany	Air	TWINSOLAR	542-849
Grammer Solar GmbH	Germany	Air	PV-Hybrid	-
Aldt Milja A/S Solar Heating	Denmark	Air	Solar-Venti	478-1000

4-2 PVT 시스템 시장의 전망

- 현재 PVT에 관한 시장은 얼마간 분산되어있으며, 매우 적은 수만이 공급되고 있다. 현재 시장 점유율이 큰 것은 독립된 오두막집용의 공기식 PVT 시스템이다. 유리덮개가 있거나 없는 액체식 PVT 집열기와 집광형 PVT 시스템은 상업적으로 입수할 수 있으나 생산되는 수는 매우 적다. 건물과 일체화된 공기식 PVT 시스템은 대부분 개별적 프로젝트에 의해 특정 건물에 적용하고 있다.

가. 유리덮개가 있는 액체식 PVT 집열기

- 가정용 온수생산, 또는 온수생산과 난방의 복합 용도로 액체식 PVT 시스템 시장이 가장 큰 잠재력을 가질 것으로 예상된다. 유럽에서는 현재 종래의 태양열 집열기의 약 90%는 주택용이며, 그 중 80%는 가정용 온수생산이고 10%는 온수생산과 난방의 복합 시스템에 이용되고 있다. 대부분의 집열기는 단독 주택에 설치되어 있으나, 집단적으로 사용할 수 있는 대형 시스템의 점유율이 증가할 것으로 기대된다.
- PVT Roadmap에서는 주택의 온수생산 시스템이 유리덮개 있는 PVT 시스템의 주 시장이고, 공중 화장, 병원, 캠프장, 양로원과 같은 시설의 대형 온수 시스템이 관심있는 가능성있는 시장이라고 지적하고 있다. 현재 유리덮개가 있는 액체식 PVT 집열기는 정체온도와 반사 및 열적 손실로 인한 비교적 큰 집열기 손실 문제가 해결되면 앞으로의 잠재력은 크다.

나. 유리덮개가 없는 액체식 PVT 집열기

- 종래의 유리덮개가 없는 액체식 집열기에 대한 시장은 일차적으로 수영장용 물의 가열용이다. 유럽에서의 유리덮개가 없는 액체식 집열기의 시장 잠재력은 작다. 유럽에서는 1990년대에 최대였으나 지난 10년간 네덜란드, 오스트리아 및 프랑스와 같은 유럽 국가에서는 사양길에 들었으며, 다만 독일 및 스웨덴에서는 일정수준을 유지하고 있다.
- 그러나 풀용 집열기 시장이 큰 미국 및 오스트레일리아에서는 앞으로도 잠재력이 클 것이다. 유리덮개가 없는 액체식 PVT 집열기에 대한 새로운 큰 시장은 이들 집열기가 히트펌프와 성공적으로 결합될 때 열릴 것이다. 이 경우 가정용 시장이 큰 잠재력을 가질 것이다.

다. 공기식 PVT 집열기

- 상업적으로 입수 가능한 PVT 모듈은 주로 유리덮개 없는 공기식 PVT이다. 이 경우 PV는 효과적으로 냉각되어 전기생산이 증가하고, 종래의 PV 모듈을 사용할 수 있어, 기존 PV 시장을 저가(低價)로 이용할 수 있다. 문제는 공기식 집열기가 세계적 태양열 집열기 시장에서 1% 이하의 점유율을 가지고 있어 가정용 시장에서 공기 난방 시스템의 사용이 제한을 받고 있는 것이다.
- 그러나 공기 난방 시스템은 건물과의 일체화가 용이하기 때문에 환기 시스템의 열원으로서 장차 시장이 성장되어 갈 것이다. 특히 자연형 주택에서 전체 난방수요를 가열된 환기용 공기로 충당할 수 있으며, 또한 이 시스템은 장차 표준화가 이루어질 수 있을 것이다.

라. 건물의 외벽과 일체화된 공기식 PVT 시스템

- 건물의 외벽과 일체화된 공기식 PVT 시스템에 대한 시장은 외벽과 일체화된 PV 기술의 경험의 축적과 PV 가격의 저하로 장차 상당히 성장될 것이다. 이 기술의 적용 잠재력은 주로 공공건물이 될 것이다. 이 시장의 강점은 난방수요와 일조시간이 근무시간과 일치한다는 것이다.

5. 결 론

- PVT 시스템의 잠재력은 크다. PVT 시스템은 기존의 태양에너지의 전기 및 열 이용 시장의 점유율 내에서 확대될 것으로 믿는다. 그리고 재생에너지이용의 실전을 위해 크게 공헌할 수 있을 것이다. 그러나 PVT 시스템은 보다 높은 효율과 경제성 및 신뢰성의 향상을 위해 많은 연구개발문제가 가로 놓여 있다.
- 유리덮개 있는 액체식 PVT 시스템에 대하여, 열효율이 향상되어야 한다. PVT 모듈의 흡수율이 향상되어야 하고, 스펙트럼 선택성 코팅, 또는 열 절연에 의해 열손실을 감소시켜야 한다. 또한 정체온도 문제는 대체 캡슐재료의 사용, 또는 능동적 과열방지법의 적용으로 해결되어야 한다. 장차 유망한 히트펌프와 결합한 유리덮개 없는 액체식 PVT 집열기에 대한 경험을 더 축적해야 할 것이다.
- 유리덮개 있는 공기식 PVT 모듈에 대하여도 유리덮개 있는 액체식 PVT에서와 같이 열효율 향상문제와 정체온도의 문제가 있으며, 정체온도에 저항성이 있는 캡슐 재료의 사용이 요구된다. 유리덮개 없는 공기식 PVT 시스템에서는 정체온도 문제는 없으며, 공기에 의한 열전달의 최적화가 중요한 문제이다.
- 건물과 일체화된 PVT 시스템에 대해서는 한정된 열 수익의 사용을 최적화하는 설계가 요구된다. PV로

부터 공기유동에 대한 낮은 열전달을 증진시키는 기술의 연구가 필요하다. 이 기술은 비용이 적게 들고 사용하기 쉬워야 한다. 또한 여름철에 건물의 환기를 지원하는 굴뚝효과의 이용에 대한 동찰력도 필요한 것 같다.

주요 참고문헌

1. P.G. Charalambous, et al. Photovoltaic-thermal(PV/T) collectors: A review, *Thermal Engineering*, 27, pp.275-284, 2007
2. H.A. Zondag, Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 891-959, 2008
3. H.A. Zondag, et al., PVT Roadmap - a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology, PV-Catapult, 2006
4. Miroslav, et al., Photovoltaic/Thermal Solar Collectors and Their Potential in Denmark, Final Report of EFP Project, 2003