# 평판형 태양광발전 · 열(Photovoltaic-Thermal) 복합 컬렉터의 개발현황

■김 준 태 / 공주대학교 건축학과 교수, jtkim@kongju.ac.kr
■김 진 희 / 공주대학교 건축학과 박사수료, jiny@kongju.ac.kr

태양광발전과 태양열을 동시에 이용하는 태양광 · 열(PVT) 복합 컬렉터 중 평판형에 대한 국내외 연구 개발 현황을 소개하고자 한다.

태양광발전(PV) 시스템은 신재생에너지 이용 기술 중 비교적 낮은 효율의 설비로, 전체 효율을 결정짓는 주된 요소는 태양전지(Solar Cell) 및 태양광발전(PV) 모듈의 효율이라 할 수 있다. 현재 시중에 일반적으로 보급되고 있는 결정질계 PV모듈은 표준실험조건(Air mass 1.5, 일사량 1000 W/$m^2$, 셀 온도 25℃) 하에서 약 12 ~ 14%의 전기변환효율을 갖고 있으며, 건물에 적용되는 경우 그 효율은 더 낮아지는 경향이 있다. 최근 고효율 태양전지 개발과 함께 건물에서 태양광발전(PV) 모듈의 고효율화를 실현하기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 건물에 적용된 PV모듈은 건물일체형 태양광발전(BIPV, Building Integrated Photovoltaic, 이하 BIPV)시스템으로서, 건물과 통합된 디자인형태로 건물외피에 부착되거나 외피재를 대체하여 적용된다. 그러나 PV모듈의 낮은 효율에도 불구하고 구조적으로 건물에 통합된 PV모듈의 효율은 온도상승에 의해 더 낮아지게 된다. 이러한 배경으로, BIPV시스템의 열기를 배출하여 건물에서 온도상승에 의한 효율저하 방지를 위한 노력이 시작되었다. 또한 BIPV시스템의 열기를 좀 더 적극적으로 배출하여 PV모듈의 발전효율을 높이고 배출된 열원을 건물에서 필요한 열원으로 이용하기 위한 태양광 · 열(photovoltaic-thermal: PVT) 복합 시스템이 개발되기 시작하였다. 한편, 기존 연구들에서는 태양광 · 열(PVT) 복합 시스템은 PVT유형 및 디자인 형태에 따라 PVT 컬렉터, PVT모듈 또는 하이브리드 PVT 시스템이라 명명하기도 한다. 본 글에서는 이러한 PVT시스템을 PVT컬렉터로 칭한다.

PVT컬렉터는 PV모듈의 전기생산과 동시에 발생되는 열을 효율적으로 이용하여 급탕이나 난방에 활용하기 위한 장치이다. PVT컬렉터는 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에 태양광발전 시스템과 태양열 집열기를 개별적으로 설치하는 것에 비해 설치면적을 줄일 수 있다. 기존의 연구에 의하면 PVT컬렉터의 전기와 열성능은 단독적인 시스템으로 구성되는 태양광발전 시스템이나 태양열 집열기의 단독적인 성능과 비교할 때 상대적으로 낮은 것으로 보고되었다. 그러나 PVT컬렉터는 각각의 시스템을 개별적으로 적용하는 것이 아니고 두 기능을 결합하여 복합적으로 이용하기 때문에 설치면적을 고려하게 되면 보다 많은 양의 에너지를 동시에 생산한다. 따라서 PVT컬렉터의 전체효율은 기존 단독으로 적용되는 시스템보다 높다고 할 수 있다. 이미 성능실험과 에너지 해석 모델링 기법을 통해 다양한 형태의 PVT컬렉터가 여러 연구를 통해 소개되었다. 이 중에서 액체식 평판형 PVT컬렉터의 경우 최근 유럽 및 미국을 중심으로 몇몇 회사들을 통해 상용화 제품들이 꾸준히 출시되고 있다. 또한 비교적 유지관리가 용이한 공기식 PVT컬렉터도 BIPV시스템과 함께 상용화제품

을 위한 개발이 꾸준히 이루어지고 있다.

## 평판형 PVT컬렉터의 분류

평판형 PVT컬렉터는 건물 입면 및 지붕에 일체화시켜 적용하는 것이 용이하며 기존 평판형 태양열 집열기와 유사한 형태로 설치된다. 평판형 PVT컬렉터는 태양열 집열에 사용되는 유체에 따라 공기식과 액체식으로 분류할 수 있으며, 유리커버의 유무에 따라 유리커버형(glazed)과 유리커버가 없는 형태(unglazed)로 구분되기도 한다.

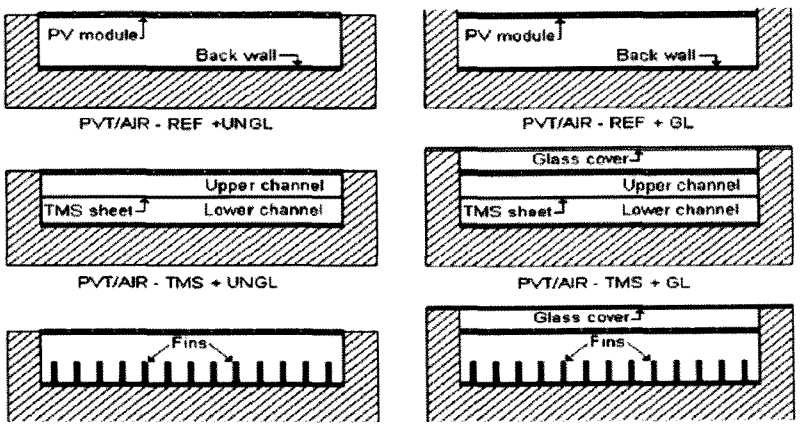
### *1) 공기식 PVT컬렉터*

공기식 PVT컬렉터는 PV모듈 후면에 공기층 및 채널을 두는 형태로, 열매체로 공기를 이용하는 것이다. 공기식 PVT컬렉터의 경우 PV모듈에서 발생하는 열기를 후면부의 공기층으로 전달하고 가열된 공기를 이용하는 방식이다. 공기식 PVT컬렉터를 건물에 적용하는 경우, 높은 열효율을 얻기 위해서 많은 양의 공기유입이 요구되어 큰 면적의 덕트가 요구된다. 또한 공기순환을 위해 필요한 주요 장치인 송풍팬에서 소음이 발생할 수 있다. 반면, 동결 및 과열에 의한 피해가 없고 누수에 대한 문제가 발생하지 않는 장점이 있다.

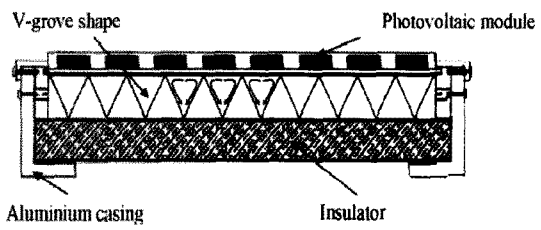
공기식 PVT컬렉터의 집열효과를 높이기 위한 다양한 시도가 이루어졌다. 공기식 PVT컬렉터에 대한 연구 개발은 BIPV시스템의 열기 배출 방법과 함께 다양하게 이루어져왔다. **그림 1**은 집열효율을 증진시키기 위한 노력의 일환으로 Tonui (2007)에 의해 제시된 공기식 PVT컬렉터의 유형을 보여주고 있다. 공기식 PVT컬렉터는 내부의 공기 흐름 방식에 따라 구분할 수 있는데, 공기유동층이 흡수판 위쪽 또는 아래쪽으로 구성된 형태, 공기층이 단일(single pass) 또는 이중(double pass)으로 구성되는 유형 등이 있다. 또한 이러한 공기식 컬렉터의 열효율을 높이기 위해 공기층에 방열핀(fin)과 집광판을 부착한 다양한 형태가 제안되기도 하였다. **그림 2**는 Othman에 의해 제안된 다양한 디자인의 공기식 PVT컬렉터로서, 이중 공기층과 함께 열효율을 높이기 위해 방열판과 집광판(CPC)이 적용된 형태 등이 있다. 또한 단일 공기층으로 PV모듈 후면 공기층을 V자형 채널을 구성한 형태(**그림 2 a**)는 기존 공기식 컬렉터 보다 효율이 30% 가량 높은 것으로 보고된 바 있다.

### *2) 액체식 PVT컬렉터*

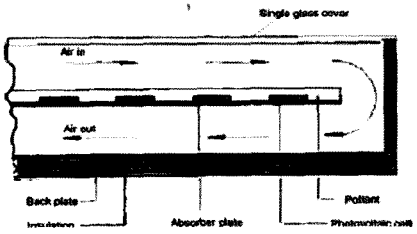
액체식 PVT컬렉터는 일반적으로 기존의 태양열 집열기와 유사한 형상을 하며, PV모듈이 금속 흡수판 위에 부착되는 차이점이 있다. 따라서 열매체관이 결합된 흡수판, PV모듈, 유리 순으로 구성된다. 액체식 PVT컬렉터는 PV모듈에서 발생하는 열기를 액체에 전달하기 위해 열매체 도관이 있는 집열판을 PV모듈 후면에 부착하는 형태로 열매체로 물이나 부동액 등을 이용한다.



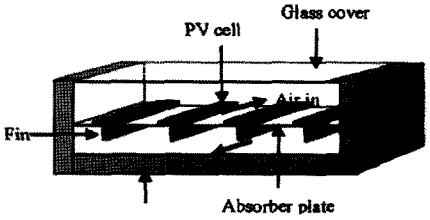

[그림 1] 다양한 공기식 PVT컬렉터 디자인



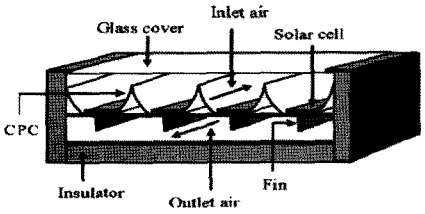

a) V자형 공기채널 형태




b) 이중 공기층(double pass)



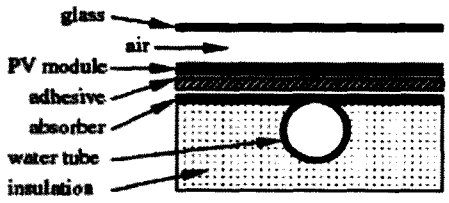

c) 이중 공기층에 핀(fin)부착형



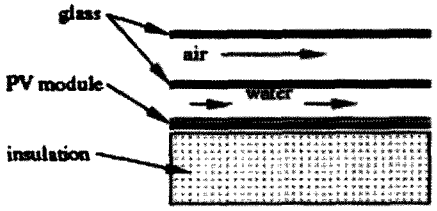

d) 이중 공기층에 집광판(CPC) 부착형

[그림 2] 집열효율을 높이기 위해 제안된 공기식 PVT컬렉터

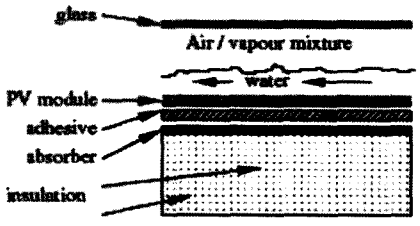
액체식의 경우 기존의 태양열 집열기와 유사한 방법으로 건물에 적용하는 것이 가능하다. 반면 공기식에 비해 누수와 동결에 따른 문제가 발생할 수 있으며, PV모듈과 집열기 유체 사이에 열적 저항이 적은 흡수판이 통합적으로 결합되어야 한다. **그림 3**은 Zondag(2003)에 의해 제시된 모델이며, 유체흐름 패턴에 따라 그림에서 보여주는 것처럼 흡수판에 열매체관이 용접된(sheet and tube)



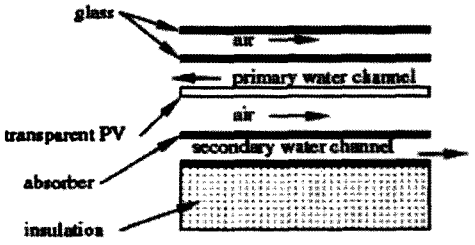

a) 열매체관이 용접된 형태




b) 수식채널 형태




c) 자유유동 형태



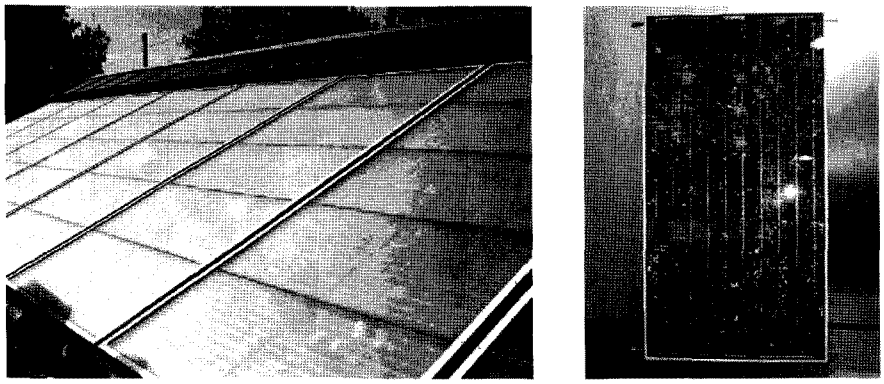

d) 이중 흡수판 형태

[그림 3] 다양한 액체식 PVT 컬렉터

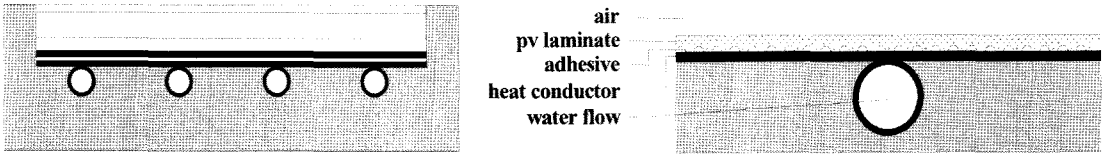
형태(a)와 수식채널(channel)형태(b), 자유유동(free flow)형태(c) 그리고 이중 흡수판(d) 등의 다양한 형태가 연구 개발되었다. 열매체로 사용되는 공기와 액체를 개별적으로 사용하지 않고 하나의 모듈에서 동시에 사용이 가능한 형태의 PVT컬렉터가 제안되었는데, 이는 액체식 PVT컬렉터의 효율을 증진시키기 위한 노력의 일환으로 액체식과 공기식을 통합한 형태이다.

액체식 PVT컬렉터의 경우 일반적으로 유리커버 유무에 따라 Glazed형과 Unglazed형으로 분류할 수 있으며, **그림4**는 일반적인 Glazed 와 Unglazed PVT컬렉터 외관 모습이다. Glazed PVT컬렉터는 기존의 태양열 집열기와 매우 유사한 외관을 가지며 **그림 5**에 나타낸 바와 같이 집열기 내부의 태양열 흡수판 위에 PV모듈이 부착된 것이다. 집열판과 결합된 PV모듈 전면에 일정한 공간을 두고 유리커버가 추가적으로 구성되므로 집열기 내의 열손실을 줄여 열효율이 높게 유지될 수 있다. 그러나 유리커버에 의해 일사에너지의 투과가 감소되고 내부에 있는 PV모듈의 온도가 상승할 수 있어 상대적으로 Unglazed형보다 전기적인 효율은 낮아지게 된다.

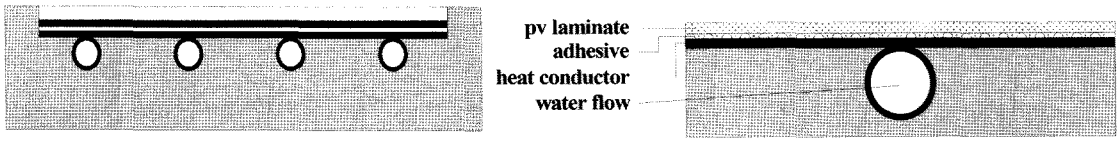
Unglazed PVT컬렉터는 기존 PV모듈과 유사한 외관이며 저철분 강화유리로 마감된 PV모듈이 집열판과 결합된 채 그대로 외기에 면하게 되는 형태이다(**그림 6**참조). 따라서 대류에 의한 PV모듈



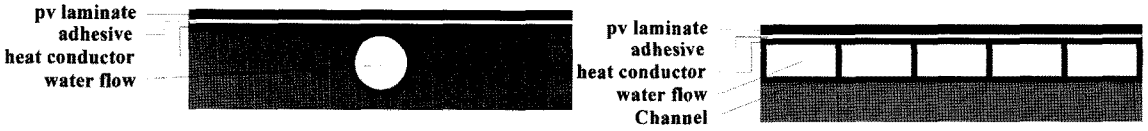
[그림 4] Glazed 와 Unglazed PVT컬렉터




[그림 5] Glazed PVT컬렉터의 단면과 상세




[그림 6] Unglazed PVT컬렉터의 단면과 상세




[그림 7] 튜브부착형(좌)과 전면 액체식(우) 흡열판이 부착된 Unglazed PVT컬렉터의 단면 상세

의 냉각이 보다 용이하여 기존 PV모듈보다 전기효율이 증진되어 Glazed PVT컬렉터보다 전기효율 측면에서 유리하다. 그러나 집열기 자체의 열손실은 Glazed형보다 높아 열성능 측면에서는 불리하다.

이 외에도 액체식 PVT컬렉터는 PV모듈 후면에 부착되는 태양열 집열판의 형태에 따라 튜브부착형 타입과 전면 액체식 타입으로 분류할 수 있다. **그림 7**은 서로 다른 유형의 집열판을 부착한 Unglazed PVT컬렉터의 단면 상세를 보여주고 있다. 튜브부착형 타입의 경우 기존 태양열 집열기와 동일한 집열판이며 일정한 간격을 두고 원형유로가 흡수판에 부착된 형태이다. 전면 액체식 타입의 경우 별도의 흡수판없이 사각 채널형태로 배열된 유로가 흡수판 역할을 하는 형태이다.

## 평판형 PVT컬렉터의 국내외 현황

### *국내현황*

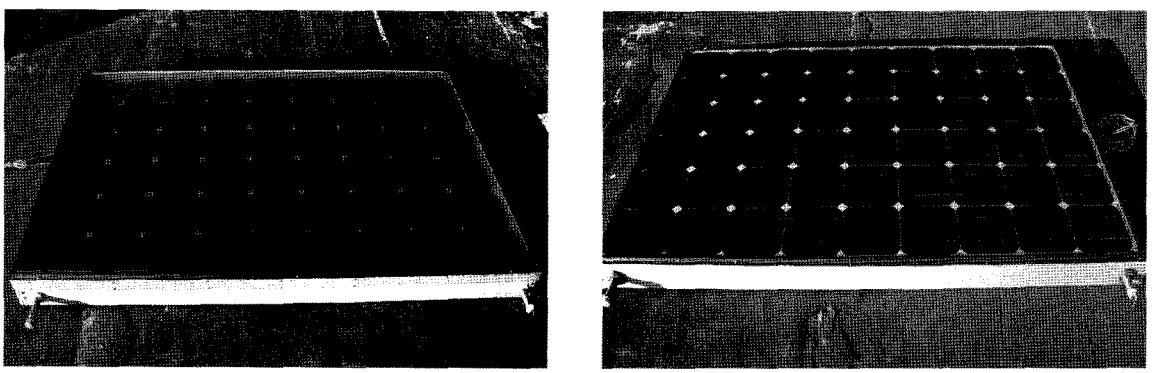
국내에서는 지난 몇 년 사이 PV시스템의 열기를 배출하여 성능개선을 위한 방안이 제시되기도 하였고, 이를 바탕으로 태양광발전과 태양열을 혼합시킨 시스템 개발이 시작되었다.

2008년 건물일체형 태양광발전(BIPV)용 모듈의 후면에서 데워진 열기를 건물의 난방열원으로 이용하기 위한 기초연구로서, 공기식 PVT지붕시스템이 연구되었다. 또한 공기식보다 열성능이 우수한 액체식 PVT컬렉터에 대한 연구들이 최근 몇 년간 활발히 진행되었다. 그러나 이러한 개발연구의 노력에도 불구하고 아직 상용화는 현실화되지 못하고 있으나 최근 상품화를 위한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

최근 발표된 연구에서는 건물일체형 공기식 PVT시스템을 지붕과 입면에 적용하여 성능을 비교하는 연구가 발표된 바 있다. 또한 액체식 PVT컬렉터로서 유리커버 유무에 따른 Glazed 및 Unglazed PVT컬렉터(**그림 8** 참조)의 성능을 규명 및 비교하는 다양한 연구가 발표되기도 하였다. 현재까지 발표된 연구들은 기존 태양열 집열기의 흡수판(튜브부착형 흡수판)을 이용해 제작된 Glazed 및 Unglazed PVT컬렉터가 대부분이다.

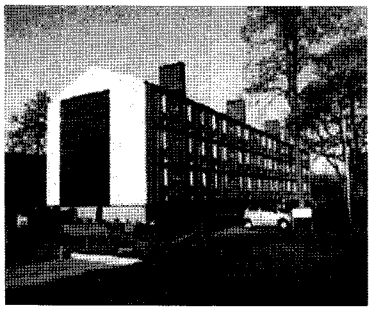
### *국외현황*

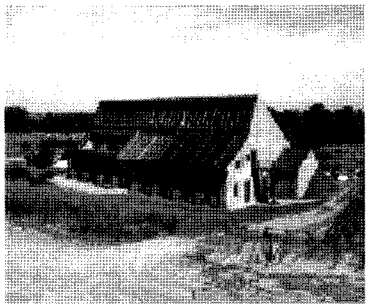
국외 태양광·열(PV Thermal) 복합 시스템은 캐나다,



[그림 8] 국내 개발된 액체식 Glazed 및 Unglazed PVT컬렉터

Solarwall by Conserval


Cenergia


Grammer Solar

[그림 9] 공기식 PVT 프로젝트

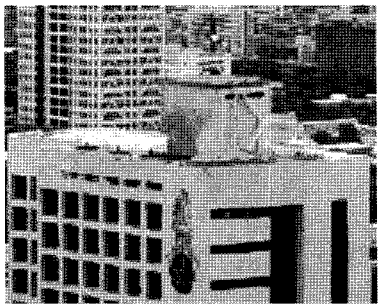
독일, 스웨덴, 네덜란드, 이스라엘, 미국 등에서 상용화가 진행되고 있다. 상업용 PVT시스템을 소개한 업체는 그리 많지 않으나 점차 많은 업체가 실증연구를 통해 제품을 시장에 소개하고 있다. 세계에너지기구(IEA) 태양열난방냉방(SHC) 프로그램의 Task 35 Photovoltaic/Thermal Solar Systems를 통해 액체식 및 공기식 PVT 시스템에 대한 70개의 설치 사례에 대한 내용이 소개되었다. 이 중 39개 프로젝트가 공기를 열원으로 사용한 것으로 주로 독일의 Grammar Solar가 개발한 유리커버가 없는 공기식 집열방식의 PVT시스템이 적용되었다. 다른 사례로는 덴마크 Cenergia사가 주관한 것으로 폐열회수 장치와 연동되어 건물 입면에 적용한 것이 있다. 공기식 PVT복합시스템(**그림 9**참조)의 경우 공기열원을 분배하기 위한 팬 이외에 별도의 주변장치 없이 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에 건물외피에 통합적용을 위해 매우 유리한 장점을 갖고 있다.

액체식의 경우 **그림 10**과 같이 여러 유형으로 설치되고 있다. 2000년대 후반 태국에서 정부건물을 대상으로 다양한 프로젝트가 수행되었다. 이 경우 NSTDA에서 개발된 아몰포스 실리콘 PV모듈이 적용된 유리커버형 PVT컬렉터가 주로 설치되었으며 대표적인 프로젝트로는 쳔부리의 Queen Sirikit병원에 집열면적 152㎡로 설치된 것이 있다.

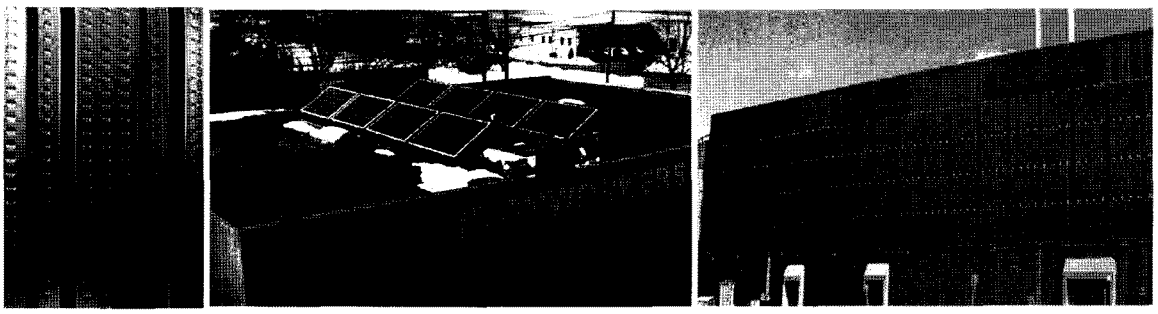
다른 형태의 PVT방식으로는 Solor사가 개발한 액체와 공기를 동시에 열원으로 사용하는 방식이 있으며 유리커버가 없는 이러한 PVT컬렉터가 다양한 프로젝트에 구현되었으며, 1999년 이래로 이

ECN/PVTWINS

Millennium Electric


NSTDA

[그림 10] 액체식 PVT 프로젝트



[그림 11] Solarwall 모듈, Solar Duct 및 Wall PVT

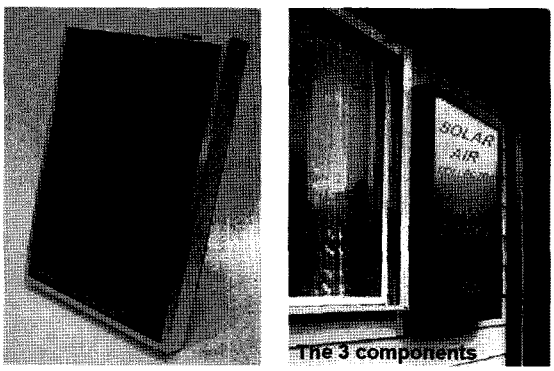
스라엘의 Millennium Electric사가 이어오고 있다.

현재 상용화된 공기식 PVT컬렉터 및 시스템은 독일의 Grammer Solar사, 캐나다의 Conserval Engineering사, 덴마크의 Aidt Miljo사의 공기식 PVT컬렉터 및 시스템이 주를 이루고 있다. Conserval Engineering(**그림 11** 참조)사는 자체 개발한 SolarWall 모듈의 상부를 PV모듈로 덮은 공기식 PVT컬렉터를 소개하고 있다. 이를 통해 태양전지 성능향상에 주력하고 있으며, 천공 금속판을 외벽에 부착하여 유입공기를 가열해 유입하거나 공조설비에 유입시키는 Hybrid 에너지시스템을 상용화하였다. Solar Wall의 경우 지붕이나 건물 입면의 적용에 따라 Solar Duct PVT 또는 Solar Wall PVT로 분류하여 PVT시스템을 건물과 통합하여 적용하는 공기식 PVT시스템이 상용화되었다.

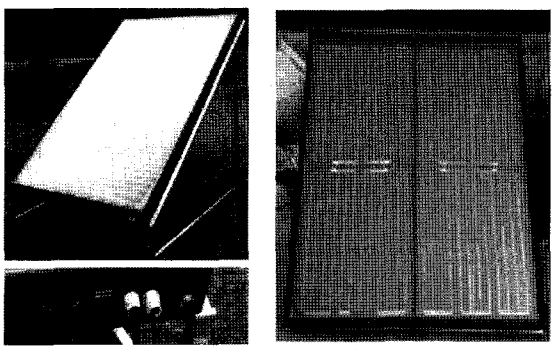
Aidt Miljo사(덴마크)의 SolarVenti는 공기식 집열 컬렉터의 이중공간에 태양광 모듈을 결합한 형태로, 팬(fan)과 PV패널, 공기집열기의 3가지 요소를 하나의 장치로 유닛화한 모듈을 개발하여 상품화하였다(**그림 12** 참조).

액체식 PVT컬렉터는 네덜란드 PVTWINS사, 이스라엘의 Millennium Electric사, 독일의 Solimpeks사, Solar Energy System사 등의 제품이 상용화되었으며, 이밖에도 다양한 국가에서 PVT복합 시스템 기술 개발이 이루어지고 있다. 독일 Solar Energy System사는 전기와 열획득량이 각각 제곱미터 당 140 $W_p$, 650 $W_{th}$인 PVT 하이브리드 컬렉터 제품을 출시하고 있으며, 네덜란드 PVT-WINS사는 1.38 ~ 6.88 $m^2$의 PVT컬렉터 제품을 상품화하였으며 전기와 열획득량이 각각 제곱미터 당 109 $W_p$, 558 $W_{th}$로 소개되고 있다(**그림 13** 참조).

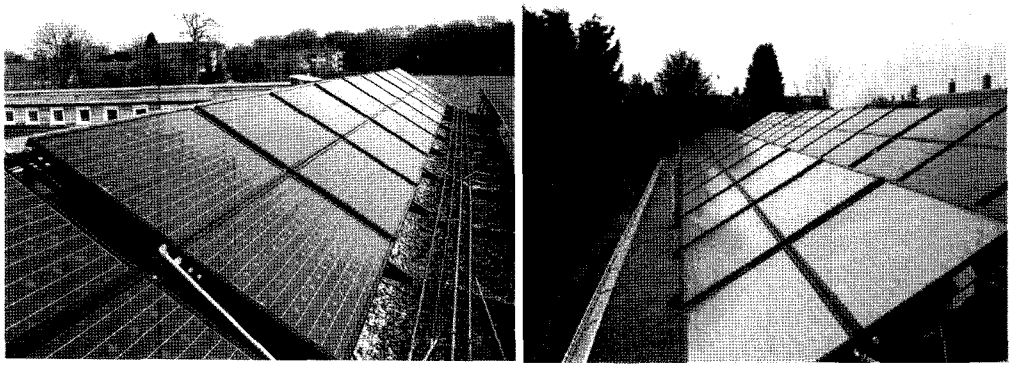
Solimpeks사(독일)는 각각 Powervolt와 Powertherm으로 명칭하는 유리커버형과 유리커버가 없



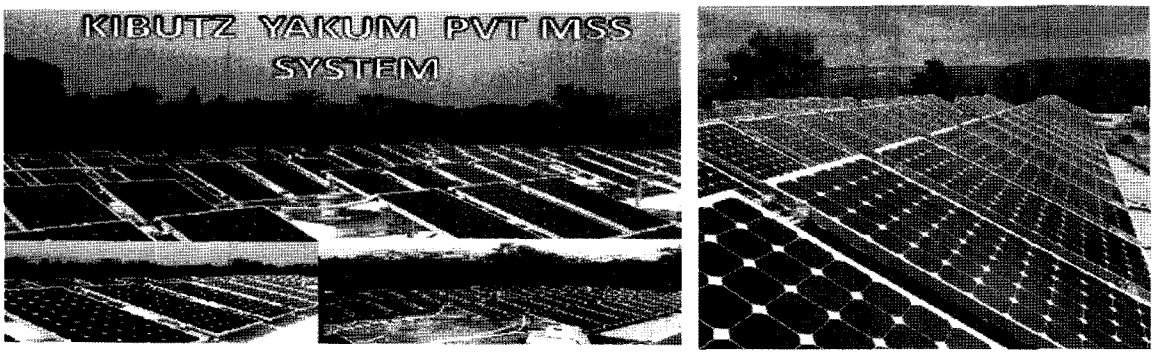

[그림 12] Aidt Miljo사의 공기식 PVT(SolarVenti)



[그림 13] 독일의 Solar Energy System 사와 네덜란드의 PVTWINS 사의 액체식 PVT Collector



[그림 14] Solimpeks사의 액체식 Unglazed 와 Glazed PVT컬렉터




[그림 15] Millennium Electric사의 대규모 액체식 PVT프로젝트

는 형태의 하이브리드 PVT모듈(**그림 14** 참조)을 각각 제품화하여 판매하고 있다.

이스라엘 Millennium Electric사는 액체식과 공기식을 결합한 MSS(Multi Solar System)시스템을 개발하여 지붕과 입면 적용을 위한 패널을 생산하고 있다. 2010년에는 PV 30 $kW_p$와 Thermal 120 kW, PV 50 $kW_p$와 Thermal 200 kW의 대규모 액체식 PVT시스템을 설치하여 전기뿐만 아니라 하루에 각각 9톤, 15톤의 온수를 생산하는 프로젝트를 수행하기도 하였다(**그림 15** 참조).

## 맺는 말

PVT컬렉터는 하나의 유닛에서 태양광발전과 태양열 집열을 동시에 수행하는 기술로 상대적으로 경제성이 낮은 PV시스템의 효율을 높이는데 공헌할 수 있다. 특히 건물에 적용하는 경우 전기와 열에너지를 동시에 확보하고 소비처인 건물에 바로 공급하게 되어 전체적인 시스템의 에너지 효율을 증진시킬 수 있다. 특히 두 에너지원의 확보를 동시에 이루어 태양에너지 이용 장치의 설치면적을 대폭적으로 줄일 수 있어 향후 과밀한 도시지역 등에 태양에너지 시스템을 공급하는데 유리할 것으로 기대된다.

국외에서는 이미 상용화 제품들이 출시되고 있으며, 다양한 PVT컬렉터 디자인을 통해 성능개선을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 국내에서는 PVT컬렉터의 인식부족과 함께 상용 제품을 위한 기술적 난제들이 완전히 해결되지 못하고 있다. 따라서 기존의 태양광발전과 태양열 기술을 결합한 고효율의 새로운 신재생에너지 이용기술로 PVT에 대한 연구개발 활성화가 필요하다.