공기식 PVT 컬렉터의 디자인 및 성능에 관한 연구 동향 분석 연구

A Literature Review on Hybrid PV/Thermal Air Collector in terms of its Design and Performance

김진희*, 김준태**†
Kim, Jin-Hee*, Kim, Jun-Tae**†

(Submit date : 2014. 4. 7., Judgment date : 2014. 4. 14., Publication decide date : 2014. 6. 10.)

Abstract : PV/Thermal combined system is a solar energy device that uses photovoltaic module as thermal absorption plate, producing thermal energy as well as electricity which can be utilized in buildings. The system removes heat from PV module through air or liquid and its efficiency will vary dependant on the thermal medium. The heat as the forms of hot air or hot water can be utilized for building use, like space heating and hot water. A significant amount of research and development on hybrid PV/thermal(PVT) collectors has been carried out. This study reviews literature on the research of air-based hybrid PVT collectors in terms of their design and energy performance.

Key Words : 태양광·열 복합(Hybrid PV-Thermal), 공기식 집열기(Air collector), 문헌고찰 (Literature review), 집열기 설계(Collector design), 에너지 성능 (Energy performance), 열 및 전기 효율(Thermal and electrical efficiency)

1. 서 론

태양광·열 복합(PV-Thermal; PVT) 시스템은 태양에너지 이용효율을 높이고 효율

적인 공간사용을 위해, 한 모듈에 PV와 태양열 집열기가 결합된 기술이다. 따라서 PVT 시스템은 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에, 단독으로 설치되는 태양광발전(PV) 모듈과 태양열 집열기 보다 단위면적당 전체 태양

**† 김준태(교신저자) : 공주대학교 건축학부
E-mail : jtkim@kongju.ac.kr, Tel : 041-521-9333
*김진희 : 공주대학교 그린에너지기술 연구소

**† Kim Jun-Tae (corresponding author): Department of Architecture, Kongju National University.
E-mail: jtkim@kongju.ac.kr, Tel : 041-521-9333
*Kim Jin-Hee: Green Energy Technology Research Center, Kongju National University.

에너지 이용효율이 더 높다.

각각의 독립적인 PV와 태양열 시스템 대신 PVT 시스템을 설치하면 약 40%의 면적을 줄일 수 있다[1].

PVT 시스템은 현재까지 연구개발 측면에서 매우 활발히 이루어졌으며 세계적으로 다양한 제품이 상용화되고 있다. PVT 시스템에 대한 연구는 평판형 PVT 시스템의 분류, 디자인, 성능평가, 공기식과 액체식 컬렉터의 디자인 및 성능 비교 등 다양한 측면에서 이루어지고 있다[2]. 특히 여러 형태의 PVT 컬렉터 및 시스템에 대한 열 및 전기성능 분석이 수치해석과 실험적 평가를 통해 이루어져 왔다. 또한 전체 에너지 효율 및 유효이용도(Exergy efficiency; 엑서지 효율)도 평가되었다[3]. 그 외에, 공간난방 및 건조 목적을 위한 PVT 시스템에 대해 독립형 PV 또는 태양열 시스템과 비교한 성능이 평가되었다[4].

PVT 시스템은 일반적으로 열매체에 따라 공기식과 액체식으로 구분되며 흡열판 및 유리커버 유무에 따라 분류된다. 공기식 PVT 시스템은 건물적용에 있어 시공과 운영비용이 저렴하고 PV 모듈의 온도상승 문제에 보다 효과적으로 대응이 가능하여 액체식 보다 좀 더 광범위하게 연구되고 있다. 현재까지 다양한 디자인의 공기식 PVT 시스템의 성능이 실험 및 수치해석 등의 방법에 따라 다양하게 보고되고 있다. 따라서 공기식 PVT 시스템의 개발 및 개선된 연구를 위해, 선행 연구된 PVT 시스템과 그 성능에 대해 파악하는 것은 중요하다.

본 연구는 현재까지 발표된 공기식 PVT 시스템의 연구 문헌을 조사하고 디자인 및 성능 측면에서 공기식 PVT 시스템의 연구개발 동향을 분석하였다. 이를 위해 다양한 공기식 PVT 컬렉터의 유형을 조사하였으며 이론적 및 실험적 연구에 의한 컬렉터 디자인에 따른

열 및 전기효율을 분석하였다.

2. 공기식 PVT 시스템의 개요

2.1 특징 및 장단점

공기식 PVT 시스템은 BIPV 시스템의 후면 열기를 얻기 위해 팬을 이용해 단순히 공기를 순환시키거나 공기식 태양열 집열기의 전면에 기존 유리대신 PV 모듈을 적용하는 형태이다. 즉, 공기층의 상단 또는 하단에 PV 모듈이 놓여진 것으로, 기존의 공기식 태양열 집열기와 유사한 형태이다. 공기식 PVT 시스템은 액체식 PVT 시스템과 비교하여 열적 효율이 낮지만, 상대적으로 제작이 쉽고 비용이 적게 드는 장점을 가지고 있다. 또한 팬 이외에 별도의 주변장치 없이 가열된 공기를 실내에 직접 이용하는 것이 가능하다. 열전달 매체로서 공기를 이용하기 때문에 동결이나 과열에 대한 우려가 없고 누수에 의한 시스템의 손상도 없다. 그러나 공기식 PVT 시스템은 열전도 특성과 열용량을 고려할 때, 높은 열효율을 얻기 위해 많은 양의 공기유입이 요구될 수 있다. 또한 공기순환을 위한 송풍 팬에서 소음이 발생할 수 있다. 공기식 PVT 시스템은 주로 공기난방, 농산물의 건조, 공기냉각 등을 위해 적용되며, 현재 공기난방은 가열된 공기를 직접 사용하거나 기존 공조시스템과 연동하는 형태로 활용되고 있다. 그리고 상업용 건물, 스포츠센터, 학교 등 대규모 건물에서 약 15~25℃의 환기 예열원으로 이용되고 있다[5].

2.2 공기식 PVT 컬렉터 유형

공기식 PVT 시스템은 후면 환기구조를 갖는 BIPV 시스템과 적용방식 측면에서 구분하기는 어렵다고 할 수 있다. 그러나 PV의 근본적인 기능인 전기생산 이외에 집열기로써

역할을 추가하게 되어 집열효율을 갖는 공기식 PVT 컬렉터는 후면 환기구조의 BIPV 시스템과 구분될 수 있다.

공기식 PVT 시스템(이하 컬렉터)은 컬렉터 내부의 공기 흐름 방식에 따라 구분할 수 있는데, 공기층의 구성 및 PV 모듈의 위치에 따라 다양한 유형의 공기식 PVT 컬렉터가 개발되었다. 공기유동층이 흡수판 위쪽 또는 아래쪽으로 구성된 형태와 공기층이 단일 또는 이중으로 구성되는 형태 등이 있다(Fig. 1). 또한 이러한 공기식 PVT 컬렉터의 열효율을 높이기 위해 공기층에 방열핀(fin)과 알루미늄시트(sheet) 및 금속흡수판을 부착하는 등 다양한 형태가 제안되기도 하였다[7].

Fig. 1 Longitudinal cross-section view of common design of air based PVT collector [6]

Fig. 2 Air base PVT collector with SolarWall [8]

Fig. 3 Air based PVT collector with V-groove, rectangular tunnel and honeycomb heat exchanger [9]

Fig. 4 Improvement of PVT design by Tripanagnostopoulos [10]

한편, 태양전지를 SolarWall™에 부착한 PVT 컬렉터(Fig. 2)가 개발되었으며, 실험을 통해 PV 효율 증진과 함께 컬렉터의 전체 효율은

약 50%이상으로 발표되었다[8].

또 다른 형태로서 Fig. 3과 같이 사각의 공기채널과 벌집구조, V자 흡열판 등의 공기채널을 이용하여 PV 모듈과의 열교환을 촉진시키도록 디자인된 공기식 PVT 컬렉터도 제안되었다[9]. 더 나아가 공기 채널 내부에 성능개선을 위해, 물결모양 시트(corrugated sheet), 와이어메시(RIB) 그리고 금속소재의 에어튜브를 결합한 공기식 PVT 컬렉터가 제안되기도 하였다(Fig. 4).

3. 공기식 PVT 컬렉터의 성능

공기식 PVT 컬렉터는 기존 PV나 BIPV 시스템과의 성능비교 연구를 시작으로, 수치해석 모델을 통해 다양한 디자인이 제시되었고 실험을 통해 그 성능이 규명되었다. 한 연구에서는 PVT 컬렉터의 공기유동, 공기채널 깊이, 길이 그리고 흡수판의 영향에 대해 에너지 평형식을 기초로 한 수치해석 모델이 제시되었다[11]. 공기식 PVT 컬렉터의 효율에 영향을 미치는 요소와 열적 손실과의 관계를 포함하여 컬렉터의 전반적인 효율에 대한 관련성이 규명되었으며, PVT 컬렉터의 성능을 기존 PV 모듈과 비교하였다. 이후 다양한 측면에서 공기식 PVT 컬렉터에 대해 이론적, 실험적 성능을 규명하는 연구가 이루어지고 있다.

본 장에서는 수치해석 및 이론적 연구와 실험적 연구에 대한 주요 문헌을 통해 공기식 PVT 컬렉터의 성능에 대해 분석하였다.

3.1 수치해석 및 모델링

1970년 발표된 한 연구[12]에서 기존 방식의 태양열 집열기 기술을 이용해 PVT 컬렉터의 이론적 모델이 제시되었다. 이 연구에서

는 이론적인 상관관계식을 통해 공기식 및 액체식 PVT 컬렉터의 성능을 평가하였는데, 공기식 PVT 컬렉터의 경우 전기 생산이 없을 때 열효율이 42.5%, 전기를 생산하는 조건에서는 열효율과 전기효율이 각각 40.4%, 6.8%라고 밝혔다.

단결정 실리콘 태양전지를 이용한 공기식 PVT 컬렉터의 디자인을 위해, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하고 최적의 디자인이 제시되기도 하였다[13]. 이 연구는 선택 흡수막 표면처리(selective absorber coating)된 집열판의 65% 이상을 태양전지로 덮으면 열효율이 감소된다고 밝혔다. 그리고 공기식 PVT 컬렉터를 위해 최적의 조합은 표면처리를 하지 않은 집열판위에 태양전지를 격자로 배치하고 투과율이 높은 유리커버를 덮는 것이라고 밝혔다. 관련된 다른 연구[14]에서는 PVT 컬렉터의 최적면적에 대해 분석하였으며, 온도와 함께 셀 효율의 변화를 1차원 관계식을 통해 계산하였다. 이 연구는 컬렉터의 길이, 공기층 깊이, 유량 등의 컬렉터 설계요소에 따라 태양전지로 커버되는, 컬렉터의 최소 필요면적을 분석하였다. 그리고 공기식 PVT 컬렉터의 충분한 효율을 위해서는 공기층 깊이가 10cm 이상 되어야 한다고 결론지었다.

단일 또는 이중 유리층 타입의 PVT 컬렉터에 대한 시뮬레이션 연구결과가 Garg와 Adhikari에 의해 발표되기도 하였다[15],[16]. Fig. 5는 시뮬레이션 연구를 위해 개발된 공기식 PVT 컬렉터, 단일 또는 이중 유리층 타입의 시뮬레이션 모델 단면을 보여주고 있다. 이들 연구에서는 컬렉터의 길이, 면적, 유량, 공기층 깊이 등 설계요소가 컬렉터의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과, 열효율은 컬렉터의 길이와 유량에 따라 증가하고,

공기층 깊이의 증가에 따라 감소된다고 밝혔다. 그리고 연간 시뮬레이션 기상조건에서 이중 유리층 모델이 단일 유리층 모델 보다 더 나은 성능을 갖는다고 결론지었다. 추가적으로, 다른 연구[17]에서 선택흡수막 표면처리된 흡열판과 검정페인트가 칠해진 흡열판이 각각 적용된 두 단일 유리층 PVT 컬렉터의 성능을 비교하였다. 열손실이 없는 조건에서 두 모델의 열효율은 각각 70%, 55%로 분석되어, 선택흡수막 표면처리된 흡열판이 공기식 PVT 컬렉터의 열효율 증진에도 많은 도움이 되는 것으로 확인되었다.

Fig. 5 Schematic configuration of air based PVT collectors [18]

또 다른 연구[19]에서는 4가지 유형의 공기식 PVT 컬렉터의 열적, 전기적 성능을 열평형방정식에 의한 수치해석 방법으로 비교 평가하였다. 공기유량 변화에 따른 열과 전기효율의 변화와 함께 집열기 내부 공기 온도 상승에 대한 내용이 분석되었다. 이 연구에서 다른 PVT 컬렉터는 Fig. 6과 같으며 PV 모듈과 유리카버 사이 단독 공기채널, PV 모듈 후면 공기채널, PV 모듈 상하부로 분리된 공기채널(single pass), PV 모듈 상하부가 이어진 공기채널(double pass) 등을 적용한 형태이다. 이 연구는 분석된 모델 중에 PV 위에 공기 채널을 둔 모델(Fig. 6 c)의 성능은 다른 세 모델들과 비교해, 열효율은 낮지만 높은 전기효율을 가지므로 PVT 컬렉터로서 가장 적합한 디자인이라고 결론지었다. PVT 컬렉

터의 성능은, 생산된 전력량에서 팬 동력으로 사용한 전기사용량을 감한 총 전기생산량과 열량을 종합하여 PVT 컬렉터의 총 효율을 분석하였다. 다양한 공기유량별 성능 중 공기유량 0.02kg/s^2 기준에서 총 효율은 46~52% 수준이며, PV 모듈 상하부로 공기채널이 분리된 싱글패스 모델(c)이 52%로 가장 높은 것으로 분석되었다.

Fig. 6 Numerical analysis models for PVT by Hegazy [19]

또 다른 연구[20]는 수치해석을 통해 공기식 PVT 컬렉터의 Tedlar(테들러) 유무(Fig. 7)에 따른 성능을 평가하였다. 분석결과, 테들러가 없는 유리카버형 모델(Fig. 7 b-ii)의 열효율이 약 40%이며 다른 모델들은 12~25% 수준으로, 테들러가 없는 유리카버형 컬렉터의 열성능이 월등히 높은 것으로 분석되었다.

이와 관련된 다른 연구[21]에서는 기후데이터와 공기층, PV 타입 등 PV 모듈의 물리적 파라미터에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 전기효율 계산을 위한 수치해석 모델이 개발되었다. 이에 따라 Glass to Glass (G/G)와 Glass to Tedlar(G/T) PV 후면의 공기층 유무에 의한 4 가지 모델에 대한 전기효율이 에너지 평형

식을 기초로 한 계산식에 의해 평가되었으며 실험결과와 함께 비교되었다. 공기층 유무에 따라 연간 평균효율이 10.41%, 9.75%로 분석되었으며, 0.66%의 효율차이는 추가적으로 열 에너지를 생산하면서 더 높은 전기효율을 제공하기 때문에 큰 차이로 할 수 있다. 또한 G/G 모델과 G/T 모델의 효율차이는 공기층이 있는 경우는 0.24%, 없는 경우는 0.086% 차이로 분석되었다.

Fig. 7 Cross-section of unglazed air base PVT(a):(i) with tedlar and (ii) without tedlar and (b):(i) glazed with tedlar and (ii) without tedlar [20]

한 연구[22]는 실험결과를 바탕으로 에너지 평형 방정식에 의한 이론적 계산을 통해 정상 상태에서 열 및 전기의 전체효율이 모델링 되

었다. 이를 통해 공기유량, 덕트길이, 덕트깊이 등이 전체효율에 미치는 영향에 대해 분석되었다. 공기식 PVT 컬렉터는 12%의 전기효율에 약 18%의 열효율이 추가되어 약 30%의 전체효율을 갖는 것으로 분석되었다.

또 다른 연구[23]에서 언글레이즈 PVT 컬렉터의 에너지 및 엑서지 효율이, 겨울철 인도 지역에서 측정된 일사량을 기반으로 계산식에 의해 평가되었다. 성능평가 결과, 에너지 및 엑서지 효율은 각각 55~65%, 12~15%로 분석되었다. PVT 컬렉터는 12%의 전기출력에 추가된 열에너지로 인해 약 2~3%의 연간 엑서지 효율이 증가하여, 전체 전기효율은 약 14~15%라고 밝혔다.

한편, 공기식 PVT 컬렉터의 열효율과 엑서지 효율이 생애주기 비용분석(Life Cycle Cost Estimate), 에너지 페이백 기간(Energy Payback Time) 등을 이용한 수학적 계산식을 통해 평가되었다[24]. 5개 지역에서, 공기식 PVT 컬렉터의 연간 열에너지 효율은 47~60%, 엑서지 효율은 11~15% 수준으로 평가되었다. 또한 일사량의 변화에 따라 각각 약 10%, 5%의 열 및 엑서지 효율이 저하되며, 엑서지 효율은 열효율보다 40~45% 낮은 것으로 분석되었다(Fig. 8). 관련된 다른 연구[25]에서는 시간별 기후데이터를 갖고 MATLAB 프로그램을 통해 공기식 PVT 컬렉터의 연간 열효율과 함께 엑서지 효율이 모델링되었다. 그리고 공기흐름이 한방향인 싱글패스와 양방향인 더블패스의 공기식 PVT 컬렉터의 성능이 비교되었다. 이 연구에서, 더블패스 PVT 컬렉터의 전기 및 열 그리고 엑서지 효율은 각각 10~12%, 40~45% 그리고 13~17%로 싱글패스 PVT 컬렉터 보다 더 높은 것으로 분석되었다.

또 다른 연구[26]에서도 정상상태의 수치해

석 모델을 통해 싱글 및 더블패스 공기식 PVT 컬렉터의 성능을 비교하였는데, PV셀의 냉각효과 차이로 인해 더블패스 디자인은 싱글패스의 디자인 보다 더 나은 성능을 갖는 것으로 나타났다. 이후 싱글 및 더블패스 수치해석 모델의 성능이 실험을 통해 규명되었다[27]. 더블패스의 PVT 컬렉터는, 공기유량 0.036kg/s , 일사량 800W/m^2 의 실험조건에서 컬렉터의 효율은 60%로 분석되었다.

수학적 모델을 통해 집광판(CPC)과 방열핀이 구성된 공기식 PVT 컬렉터(Fig. 9)에 대한 성능이 평가되기도 하였다[28]. 이 연구에서 집광판과 방열핀의 적용으로 열과 전기의 전체효율은, 일사량 400W/m^2 , 입구온도 30°C , 공기유량 $0.0316\sim 0.09\text{kg/s}$ 조건에서 각각 26.6%~39.13%로 분석되었다.

Fig. 8 Effect of solar radiation on thermal and exergy efficiency [24]

Fig. 9 Single pass PVT air collector with compound parabolic concentrator(CPC) and fins [28]

3.2 실험적 연구

Fig. 10과 같이 흡열판 구성이 다른 두 가지의 PVT 컬렉터가 제안되고 그 성능이 실험을 통해 평가되었다[29]. 제안된 컬렉터는 금속 집열판에 0.25 cm 직경의 구멍을 통한 공기흐름으로 집열하는 방식(Fig. 10a)과 V자형 흡수판으로 구성된 방식(Fig. 10b)이다. 실험결과, a형은 열과 전기효율이 각각 42%, 8.9%, b형은 각각 40%, 7.8%로 분석되었다. 흡열판의 변형이 PVT 컬렉터의 열적, 전기적 성능을 향상시키는 것으로 확인되었다.

Fig. 10 Air type PVT collector with impinging jet and V-corrugated absorber [29]

한 연구에서 PV 후면에 공기층만으로 이루어진 기본적인 공기식 PVT 컬렉터의 공기층 중간에 금속시트를 추가하여, 열효율은 35%에서 38%로, 전기효율은 10%에서 10.5%로 효율이 향상되는 것이 확인되었다[30]. 이에 따라 집열효율을 높이기 위해 공기채널 사이에 금속시트를 구성하거나 공기채널 후면에 핀(FIN)이 부착되는 등 흡열판에 따른 열성능과 전면에 유리커버 구성에 의한 열성능이 함께 비교되었다(Fig. 11)[32, 33]. 실험을 통해 기본 모델(REF: Reference)과 금속시트

모델(TMS: Tin Metallic Sheet) 그리고 핀(FIN)을 배열한 모델들의 열효율이 25%, 28%, 30% 순으로 나타났으며, 개선된 모델들은 PV 냉각효과로 더 나은 전기성능과 함께 더 높은 열효율을 갖는 것으로 분석되었다[31]. Table 1은 이 연구에서 분석된 다양한 모델의 실험성능과 이론계산에 의한 성능을 함께 나타낸 것이다. 분석결과, 전면 유리 없는 TMS 모델과 FIN 모델은 REF 모델에 비해 열효율이 각각 13%, 18% 증가하고 전면 유리커버 구성에 의해 열성능이 각각 12%, 40% 증가되는 것으로 분석되었다[32].

Fig. 11 Air type PVT by Tonui et al. [32]

Table 1. Comparison of PVT collector performance

PV/T type	실험 및 이론 열 성능
PVT-REF	$\eta_{th}=0.247-7.31\Delta T/G$ $\eta_{th}=0.257-6.95\Delta T/G$
PVT-TMS	$\eta_{th}=0.280-7.14\Delta T/G$ $\eta_{th}=0.290-6.61\Delta T/G$
PVT-FIN	$\eta_{th}=0.297-6.14\Delta T/G$ $\eta_{th}=0.303-6.42\Delta T/G$
PVT-REF+GL	$\eta_{th}=0.364-4.79\Delta T/G$ $\eta_{th}=0.367-4.76\Delta T/G$
PVT-TMS+GL	$\eta_{th}=0.399-4.93\Delta T/G$ $\eta_{th}=0.411-5.15\Delta T/G$
PVT-FIN+GL	$\eta_{th}=0.504-6.44\Delta T/G$ $\eta_{th}=0.515-6.65\Delta T/G$

다른 연구[33]는, 공기식 PVT 컬렉터의 FIN 유무에 따른 성능에 대해 에너지평형 식

을 개발하고, 이를 통해 성능평가 결과를 나타냈다. FIN의 유무에 따른 PV 온도와 열 및 전기효율의 차이를 Fig. 12와 같이 나타냈다. 핀을 추가하여, 확장된 핀의 면적으로 PV 온도는 82°C에서 66°C로 감소되었으며 이에 따라 열 및 전기효율이 각각 15.5%, 10.5% 증가되었다. 또한 이중유리로 마감된 FIN 타입의 공기식 PVT 컬렉터에 대해, 유량과 경사각에 따른 에너지(열효율)와 엑서지 효율에 대한 성능이 분석되었다[34]. 모든 경사각에서 유량증가에 따라 열효율은 증가되었으며, 유량 100 m³/m² 기준에서 평균 에너지 효율이 39%로 분석되었다. 그러나 엑서지 효율은 유량이 25~50 m³/m²·h에서 유사한 수준이지만 100m³/m²·h으로 증가되었을 때 공기누설에 의해 크게 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 큰 유량을 갖는 공기식 PVT 시스템은 공기누설이 없도록 해야 한다고 결론지었다.

Fig. 12 Comparison of values of various efficiencies and the rise in air and cell temperatures for PVT collector with and without fins [33].

Othman et al. 은 표면 한쪽에 FIN이 부착된 흡열판에 PV를 부착한, 더블패스 공기식 PVT 컬렉터에 대해 실험과 함께 수학적 해석을 통해 FIN의 중요성을 강조하였다[35]. 또한 성능개선을 위해 집광관(CPC)이 적용된 공기식 PVT 컬렉터에 대한 실험성능을 분석하였다[36]. 이를 통해 컬렉터의 작동 온도에 의해 발생할 수 있는 PV 성능저하 문제를 FIN을 이용해 해결 할 수 있다고 설명하였다. Fig. 13은 이들 연구에서 제

안된, 이중 공기층의 더블패스 공기식 PVT 컬렉터로서 열효율을 높이기 위해 FIN 또는 FIN과 CPC가 함께 적용된 컬렉터를 나타낸 것이다. 이와 관련하여 한 연구[37]는, 더블패스의 CPC+FIN이 적용된 PVT 컬렉터에 대한 이론적 성능과 함께 실험결과를 분석하였다. 일사량 500W/m^2 , 유량 $0.015\sim 0.2\text{kg/s}$ 의 조건에서 전체효율은 각각 $45\sim 60\%$, $39\sim 70\%$ 로 분석되었다.

단일 공기층으로 PV 모듈 후면 공기층을 V자형 채널을 구성한 형태(Fig. 3)는 다른 싱글패스의 공기식 PVT 컬렉터 보다 전기효율은 1%, 열효율은 30% 가량 향상된 것으로 분석되었다[39]. 또한 싱글패스 사각채널(Fig. 3) 집열판을 이용한 공기식 PVT 컬렉터가 개발되었으며[40] 쏘라 시뮬레이터에서 열 및 전기효율 성능이 평가되었다. 이 연구는 PV 냉각을 위한 적절한 공기유량을 확인하기 위해 유량변화에 따른 성능을 비교 분석하였다. 일사량 및 유량 817W/m^2 , 0.0287kg/s 조건에서 열 및 전기효율은 각각 54.7% , 10.2% 로 분석되었으며 사각채널을 통해 기존 PVT 컬렉터 보다 더 높은 성능을 갖는다고 결론지었다.

Fig. 13 Double pass PVT collector for the performance improvement by Othman et al [38]

한편, 한 연구[41]는 공기식 PVT 컬렉터를 시제작하고 쏘라 시뮬레이터를 통한 실내조건에서 실험방법을 개발하였으며, 외기조건에서 실험결과와 비교하여 유사한 결과를 얻었다고 밝혔다. 이 연구는 정상상태까지 도달하여 더 이상 효율변화가 없을 때까지 유량을 증가시켜 실험하였다. 그 결과, 일사량 600W/m^2 , 컬렉터 입구온도 38°C 조건에서 열 및 전기효율은 각각 42% , 8.4% 로, 컬렉터의 전체효율은 약 50% 로 분석되었다.

4. 결 론

공기식 PVT 컬렉터에 대한 연구로서, 다양한 디자인에 대한 성능이 이론 및 실험을 통해 분석되었다. 뿐만 아니라 초기 연구단계 디자인을 바탕으로 성능개선을 위한 새로운 디자인이 지속적으로 제시되었다.

조사된 연구에 따르면, 공기식 PVT의 열효율은 최소 $15\sim 65\%$ 수준이며, 컬렉터 내부에 추가된 디자인 요소들에 의해 최소 5% 에서 최대 40% 의 효율이 개선되었다. 그리고 전체성능(열과 전기효율)은 컬렉터의 디자인 형태 및 설계요소 그리고 실험조건 등 평가방법에 따라 $25\sim 75\%$ 수준으로 다양하다. 따라서 공기식 PVT 시스템은 건물에서 효율적으로 이용되기 위해, 컬렉터 성능에 따라 최적으로 운영될 수 있도록 적절한 제어가 필수적으로 고려되어야 한다. 특히, 공기유량 변화에 의한 컬렉터의 에너지 및 엑서지 효율특성에 대한 면밀한 검토가 요구된다. 언글레이즈 PVT 컬렉터는 글레이즈 PVT 컬렉터에 비해 전기성능이 우수하지만, 열 및 전체 성능은 글레이즈 PVT 컬렉터가 월등히 우수한 것으로 확인되었다. 또한 방열핀 등 흡열판의 구성은 PVT 컬렉터의 전체 성능에 크게 영향

을 미치는 것으로 밝혀졌다.

최근 몇 년 사이 현재까지 개발된 PVT 컬렉터에 대한 엑서지 효율분석과 함께 경제성 평가가 활발히 이루어지고 있다. 공기식 PVT 컬렉터에 대한 실험조건에서 성능뿐만 아니라 건물에서 사용 외기조건 및 시스템 적용에 따른 유효한 에너지효율을 위한 것이다. 그리고 회수기간을 평가하여 경제성 분석이 추가적으로 이루어지고 있다. 따라서 공기식 PVT 컬렉터 자체의 성능뿐만 아니라, 건물에서 활용되는 부하의 열원 및 설비 시스템에 따른 성능분석은 중요하다. 특히, 액체식과 다르게 열원을 저장하지 않는 공기식 PVT 컬렉터는 건물에서 사용 목적에 따라 에너지 획득 및 효율에 대한 차이가 클 수 있다.

향후, 이를 바탕으로 공기식 PVT 컬렉터의 개발 및 효율적 활용을 위해 건물 설비시스템의 연계 및 열원 이용에 따른 성능분석이 종합적으로 이루어져야 할 것이다. 더불어 공기식 PVT 컬렉터의 이론적 해석모델 및 실험에 의한 수식 등 평가방법에 대해 다루어져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2009-0093825)과 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012R1A1A3015046) 지원을 받아 수행된 것임.

Reference

1. Affolter P, Eisenmann W, Fechner H, Rommel M, Schaap A, Sorensen H, et al., PVT roadmap, Edition of ECN 2006, Netherlands, <http://www.pvtforum.org/>
2. Ibrahim A., Othman M. Y., Ruslan M. H. and Sopian K., Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2011, p.352-365.
3. Tiwari G. N., Mishra R. K. and Solanki S. C., Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modeling, *Applied Energy* 88, 2011, p.2287-2304.
4. Kumar R. and Rosen M. A., A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy* 88, 2011, p.3603-3614.
5. Hasan M. A. and Sumathy K., Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2010, p.1845-1859.
6. Chow T. T., Pei G., Fong K. F., Lin Z., Chan A. L. S., Ji J., Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy* 86, 2009, p.310-316.
7. Tonui J. K. and Tripanagnostopoulos Y., Air-cooled PVT solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 81, no.4, 2007, p.498-511.
8. Hollick J. C. Solar cogeneration panels, *Renewable Energy* 15, 1998, p.195-200.
9. Hussain F., Othman M. Y., Sopian K., Yatim B., Ruslan H. and Othman H., Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PVT) air base solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Review* 25, 2013, p.431-441.
10. Tripanagnostopoulos Y., Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy* 81, no.9, 2007, p.1117-1131.
11. Prakash J., Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy Conversion and Management* 35 no.11, 1994, p.967-972.
12. Hendrie S. D., Evaluation of Combined Photovoltaic/Thermal Collectors. *Proceedings of the ISES International Congress* 3, 1979, p. 1865-1869.
13. Cox C. H. and Raghuraman P., Design considerations for flat-plate-photovoltaic /thermal collectors.

- Solar Energy 35, no.3, 1985, p.227-241.
14. Bhargava A. K., Garg H. P. and Agarwal R. K., Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cell. Energy Conversion and Management 31, no.5, 1991, p.471-479.
15. Garg H. P., and Adhikari R. S., Conventional hybrid photovoltaic/Thermal(PVT) air heating collectors. Renewable Energy 11, no.3 1997, p.363-385.
16. Garg H. P. and Adhikari R. S., Transient simulation of conventional hybrid photovoltaic /thermal(PVT) air heating collectors. International Journal of Energy Research 22, no.6, 1998, p.547-562.
17. Garg H. P., and Adhikari R. S., System performance studies on a photovoltaic/ thermal (PV/T) air heating collector. Renewable Energy 16, 1999, p.725-730.
18. Saffa, B. R. and Erdem, C., A review on hybrid photovoltaic/thermal collector and systems, International Journal of Low-Carbon Technologies 6, 2011, p.212-241.
19. Hegazy A. A., Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collector. Energy Conversion and Management 41, no.8, 2000, p.861-881.
20. Tiwari A. and Sodha M. S., Parametric study of various configurations of hybrid pv/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. Solar Energy Materials and Solar Cells 91, 2007, p.17-28.
21. Dubey S., Sandhu G. S. and Tiwari G. N., Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector. Applied Energy 86, 2009, p.697-705.
22. Tiwari A., Sodha M. S., Chandra A. and Joshi J. C., Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India. Solar Energy Materials and Solar Cells 90, no.2, 2006, p.175-189.
23. Joshi A. S., and Tiwari A., Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) air collector. Renewable Energy 32, no.13, 2007, p.2223-2241.
24. Raman V. and Tiwari G. N., Life cycle cost analysis of HPVT air collector under different Indian climatic conditions. Energy Policy 36, 2008, p.603 - 611.
25. Raman V. and Tiwari G. N., A comparison study of energy and exergy performance of a hybrid photovoltaic double-pass and single-pass air collector. Energy Research 33, no.6, 2009, p.605-617.
26. Sopian K., Yigit K. S., Liu H. T., Kakac S. and Veziroglu T. N., Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. Energy Conversion and Management 37, no.11, 1996, p.1657-1670.
27. Sopian K., Liu H. T., KaKac S. and Veziroglu T. N., Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems. Energy Conversion and Management 41, 2000, p.353-365.
28. Alfegi E. M. A., Sopian K., Othman M. Y. and Baharudin B. Y., Transient Mathematical Model of Both Side Single Pass Photovoltaic Thermal Air Collector. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 2, no.5, 2007, p.22-26.
29. Hendrie S. D., Photovoltaic/thermal collector development program: final report. Report. MIT, 1982.
30. Tripanagnostopoulos Y., Nousia T. H. and Souliotis M., Low cost improvement to building integrated air cooled hybrid PV-Thermal systems. 6th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, Scotland, vol.2, 2000, p.1874-1899.
31. Tonui J. K. and Tripanagnostopoulos Y., Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. Renewable Energy 32, no.4, 2007, p.623-637.
32. Tonui J. K. and Tripanagnostopoulos Y.,

- Air-cooled PVT solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 81, no.4, 2007, p.498-511.
33. Kumar R. and Rosen M. A., Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without Fins. *Applied Thermal Engineering* 31, 2011, p.1402-1410.
34. Alta D., Gilgili E., Ertekin C. and Yaldiz O., Experimental investigation of three different solar air heaters: energy and exergy analyses. *Applied Energy* 87, 2010, p.2953-2973.
35. Othman M. Y., Yatim B., Sopian K. and Bakar M. N. A., Performance studies on a finned double-Pass photovoltaic thermal (PV/T) solar collector, *Desalination* 209, no.1-3, 2007, p.43-49.
36. Othman MY, Yatim B, Sopian K, Bakar MNA. Double-pass photovoltaic-thermal solar air collector with compound parabolic concentrator and fins, *Journal of Energy Engineering* 132, 2006, p.116-120.
37. Othman M. Y. H., Yatim B., Sopian K. and Bakar N. A., Performance analysis of a double-Pass photovoltaic/thermal(PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy* 30, 2005, p.2005-2017.
38. Ibrahim A., Othman M. Y., Ruslan M. H. and Sopian K., Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal(PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, no.1, 2011, p.352-365.
39. Othman, M. Y, Performance study of photovoltaic-thermal(PV/T) solar collector with ∇ -grooved absorber plate. *Sains Malaysiana* 38, 2009, p.537-541.
40. Jin G. L., Ibrahim A., Chean Y. K., Daghigh R., Ruslan H., Mat S., Othman M. Y., Ibrahim K., Zaharim A. and Sopian K., Evaluation of single-pass photovoltaic-thermal air collector with rectangle tunnel absorber. *American Journal of Applied Sciences* 7, 2010, p.277-282.
41. Solanki S. C., Dubey S. and Tiwari A., Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors. *Applied Energy* 86, no.11, 2009, p.2421-2428.