

시설하우스의 폐열을 이용한 열펌프시스템의 성능평가에 관한 연구

A Study on the Performance Evaluation of Heat Pump System Using Waste Heat in Greenhouse

조기현* · 박윤철**† · 고광수***
Kihyun Jo* · Youn Cheol Park**† · Gwang-Soo Ko***

(Received 01 July 2015; accepted 24 August 2015)

Abstract : This study was conducted to develop a heat pump system to utilize waste heat within the greenhouse during the daytime in winter season. The system runs at 8 am to 6 pm for the heat storage operation, and from 6 pm to 8 am of the next day for the heat radiant work. In the case of the heat storage operation, the average solar radiation was 168.3W/m² with 16.3°C outside temperature. The COP_s of the system shows 4.59 in this operation mode. When the temperature goes up to 18.6°C, the system COP_s reached at 5.10. On the other hand, the COP_h of the system in heat radiation mode shows 2.63. In this case, the inside of the greenhouse temperature was reaches at 24.7°C when the outside temperature was 12.9°C.

Key Words : 열펌프시스템(Heat pump system), 폐열(Waste heat), 시설하우스(Greenhouse), 일사량(Solar radiation), 축열조(Heat storage tank)

기 호 설 명

COP_s : 축열운전성능계수
COP_h : 난방운전성능계수

1. 서 론

시설원예용 하우스는 농한기라 불리는 겨울철에도 작물의 재배가 가능하고 1년에 4-5회

**† 박윤철(교신저자) : 제주대학교 기계공학과
E-mail : ycpark@jejunu.ac.kr, Tel : 010-7378-8147

* 조기현 : 제주대학교 대학원 기계공학과

*** 고광수 : 제주대학교 대학원 기계공학과

**† Youn Cheol Park(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Jeju National University.

E-mail : ycpark@jejunu.ac.kr, Tel : 010-7378-8147

* Kihyun Jo : Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Jeju National University.

*** Gwang-Soo Ko : Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Jeju National University.

작이 가능하도록 해주기 때문에 고소득을 희망하는 농민들의 수요요구에 의해 자연스럽게 도입되었다. 하지만 대부분의 시설하우스 난방기의 연료가 석유자원인 요즘 시설원에 농가들이 유류가격상승⁽¹⁾으로 인해 동절기에 작물 생산비 중 30% 이상이 난방비로 소비된다.

Kwon et al.⁽²⁾의 남부지역 시설과채류재배 하우스의 보온 및 난방실태조사에 따르면 경유를 이용한 온풍가온이 거의 대부분이라고 조사되었으며, 작물에 따라서는 수익성에 비해 연료비 비중이 높은 작물도 있다는 발표를 하였다. 작물의 생산원가 절감 및 경쟁력 확보를 위하여 생산비 중에서 적지 않은 비중을 차지하는 난방비 절감방안의 모색이 절실히 요구되고 있다.⁽³⁾

시설원예용 하우스는 일반 건축물에 비해 피복재의 단열이 취약하고 개방성이 강한 투명재료로 마감되므로 주간 일사, 야간의 복사냉각과 같은 외기조건의 변화에 민감한 반응을 보인다.⁽⁴⁾

최근 많은 연구를 통해서 시설원예용 난방장치가 다양해졌지만 아직도 난방비 절감과 난방효율향상을 위한 연구가 요구되고 있다. 시설원예는 태양에너지를 온실에 저장하여 작물의 성장을 돕는 것을 목적으로 제작된 것으로 태양에너지를 효율적으로 이용하기 위하여 시설원예온실 내부의 복사열을 충분히 이용하는 방법도 태양에너지의 이용효율을 높이는 방법이다. 시설원예용 난방장치 중에서 보조열원으로 태양에너지를 이용하는 여러 가지 방법이 강구되고 있으며, 지금까지의 태양열 시스템에 관한 연구를 살펴보면 대부분의 연구가 태양열 집열기의 효율을 향상시키고자 하는데 주로 이루어져 왔지만^(5,6) 시설하우스 구조상 태양열에 의하여 자연적으로 축적되는 열을 이용한다면 설치면적 및 초기투자비용을

아낄 수 있다.^(7,8)

시설하우스의 난방 대체에너지의 연구 사례로 Song et al.⁽⁹⁾은 겨울철 그린하우스 난방의 화석에너지 의존도를 줄이고, PCM축열조, 그리고 열펌프를 자연에너지 이용을 위한 그린하우스 난방의 주요 단위요소로 하고, 이들 3요소를 조합하여 난방시스템을 구성하여 단계별로 실험 분석을 하였다. Song et al.⁽⁹⁾ 연구에서는 PCM축열조와 열펌프시스템의 난방효과에 의하여 50~60%의 에너지 절감효과와 이에 상응한 농업환경보존효과를 얻을 수 있다는 결론을 도출하였다. 이와 같이 시설하우스 난방비 절감을 위한 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 시설하우스 내에서 주간에 발생하는 폐열을 회수하고 야간에 회수된 폐열을 이용한 난방용 열펌프시스템을 개발하기 위해 시설하우스 내부에서 발생하는 폐열의 패턴을 분석하고 시스템을 설계하여 성능평가를 실험한 연구이다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 일사량에 따른 내·외부 온도변화 데이터해석 결과를 토대로 설계한 공기열 및 태양열을 열원으로 사용하는 열펌프시스템의 개략도로 태양일사량이 높은 경우 태양열에 의하여 가열되어 생성된 시설하우스의 폐열을 열펌프를 사용하여 축열한 후 야간에 보조열원으로 공급하는 시스템이다. 폐열은 축열조에 저장되게 되며, 야간이나 겨울철에 난방이 필요한 경우 열펌프시스템의 요소기기인 사방밸브가 유동의 방향을 바꾸어 시설하우스에 난방을 하게 된다. 축열조에 온수가 난방에 직접 이용할 수 있을 정도의 높은 온도로 축열되어 있을 경우 이차유체의 배관중에 있는 삼

방밸브(3 way valve)의 작동에 의하여 2개의 판형열교환기에서 순환하던 이차유체를 직접 시설원예온실에 장착된 팬코일유닛으로 공급하여 직접 난방을 하는 방식으로 시스템을 설계하였다. 작동유체는 R-410a이다.

열펌프시스템은 스크롤압축기(Scroll compressor), 판형열교환기(Plate heat exchanger), 팬코일유닛(Fan coil unit), 사방밸브(4 way valve), EEV(Electronic expansion valve), 펌프(Pump) 등으로 구성되어있다. 시스템에 관한 자세한 사양은 Table. 1에 제시하였다.

열펌프시스템 내의 압력 및 온도의 측정을 위하여 요소 부품의 입·출구 배관 내부에 압력센서 및 온도센서를 설치하였다. 또한 열펌프시스템의 압축기에서 소비되는 동력을 측정하기 위하여 전력을 전류와 전압으로 디지털화 할 수 있는 전력변환기를 사용하였고, 측정된 신호를 데이터로거에 입력하여 컴퓨터에 기록하였다. 기록된 데이터를 식(1) 및 식(2)를 이용해 COP를 계산하였다.

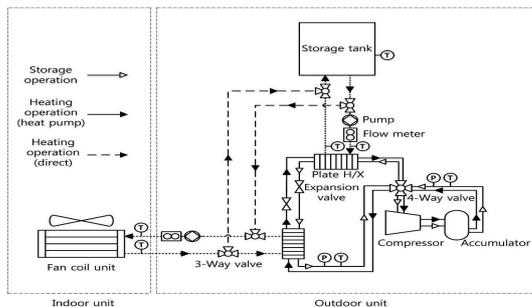


Fig. 1 Heat pump system of the air and solar heat

Table 1 System specification

Compressor(HP)	3
Expansion valve(RT)	3
Plate heat exchanger(RT)	3 × 2ea
Fan coil unit(RT)	1 × 3ea
Storage tank(L)	4000

$$COP_s = \frac{\text{축열열량}(Q)}{\text{소비동력}(W)} \quad (1)$$

$$COP_h = \frac{\text{방출열량}(Q)}{\text{소비동력}(W)} \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 일사량에 따른 내·외부 온도변화

열펌프시스템의 성능평가를 위해 시설하우스에서 실험을 수행하였다. 시설하우스의 종류는 비닐하우스(단동형)이며 규격은 높이 4 m, 폭 5.5 m 및 길이는 25 m이다.

시스템의 제어인자를 파악하기 위하여 시설하우스 외부에 일사량계(Albedometer)를 설치하고, 시설하우스 내·외부에 T-type의 열전대를 설치하여 시설하우스의 온도 및 일사량을 데이터로거(Data logger)에 저장하였다.

시설하우스의 폐열을 이용하기 위하여 폐열이 발생하는 내부온도 18℃를 설정온도로 정하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 2월부터 5월까지의 월별 시설하우스 내·외부 평균 온도(주간/야간)를 측정한 그래프이다. 주간에는 3월 중순부터 온도 및 일사량이 설계조건에 부합함을 알 수 있고, 야간에는 5월까지도 내부온도가 18℃를 넘지 않기 때문에 난방이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 온도 및 일사량이 평균적인 특정한 날의 시설하우스 내부의 높이별 일간온도 변화를 나타낸 그래프이다. 주간에는 4 m에서 온도가 가장 높고, 2 m에서 온도가 가장 낮음을 알 수 있으며, 야간에는 반대의 경향을 보인다.

Fig. 5는 측정기간 동안 특정일의 태양 일사량의 변화에 따른 시설하우스 내·외부온도변화 그래프이다. 시설하우스의 폐열을 이용하기 위해서는 외기온도 15℃, 일사량 270 W/m²

이상이 되어야 설정온도인 내부온도 18℃ 이상이 되어 폐열이 이용 가능한 것을 알 수 있다.

히트펌프를 정지시킨 후 팬코일유닛만을 운전하여 일사량 및 외기온도에 따른 축열운전과 난방운전을 통한 성능측정실험을 실시하여 직수운전성능을 측정하였다. Fig. 6은 외기조건(일사량, 외기온도)에 따른 직수운전을 팬코일유닛을 통한 흡열량의 변화로 일사량이 높은 구간에는 흡열량은 증가하지만 일사량이 없고 내·외부온도가 감소하는 구간에서는 흡열량이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 직수운전을 통한 실내온도변화는 미미하다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 주간 외기온도에 따른 팬코일유닛을 통한 발열량의 변화로써 발열량은 주간의 흡열량보다 높게 나타남으로 실내온도는 외기온도보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

시설하우스 내의 폐열확보를 위해 히트펌프 시스템을 운전하였을 때 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 운전시간이 길어짐에 따라 축열조 출구온도가 증가하였고, 이로 인해 히트펌프의 고압이 증가하여 고압트랩이 발생하여 고압차단기에 의해 압축기가 정지되는 결과가 나타났다. 출구온도 증가폭 감소를 위해 축열조의 용량을 1,000 L에서 4,000 L로 증가시켰다.

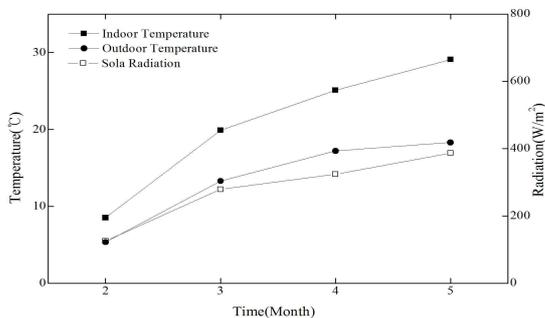


Fig. 2 Monthly temperature and solar radiation(Day)

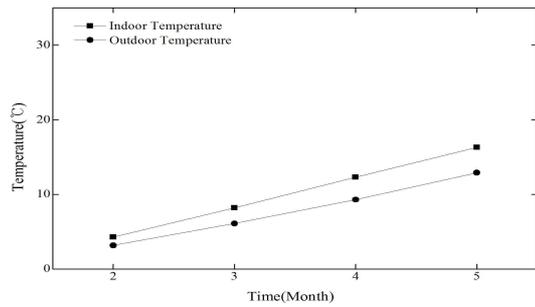


Fig. 3 Monthly temperature(Night)

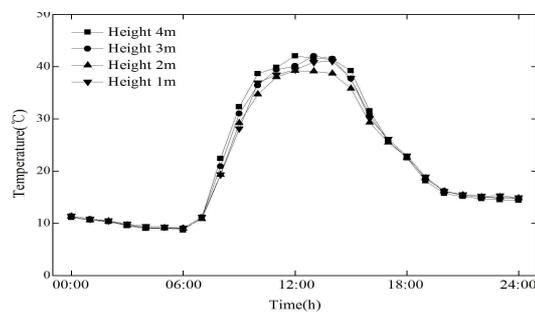


Fig. 4 Indoor temperature by height(April 15)

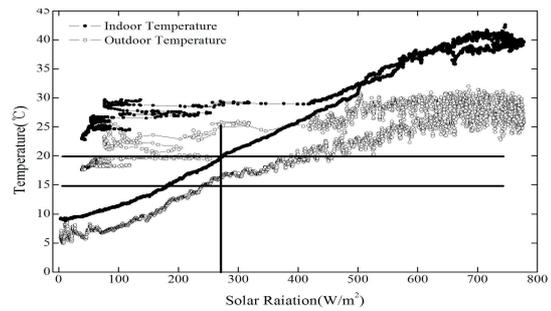


Fig. 5 Greenhouse and outside temperatures of the solar radiation

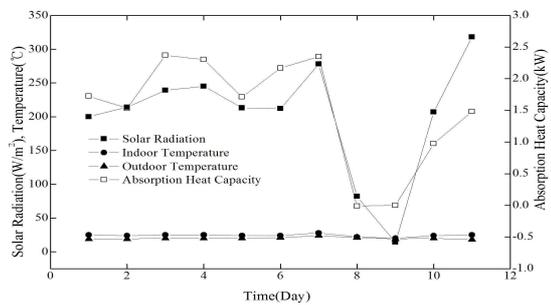


Fig. 6 Amount of heat absorption according to outdoor condition(October 3 - October 14)

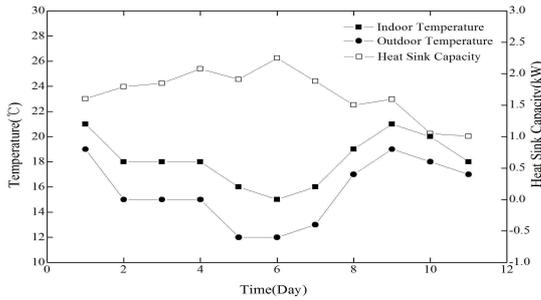


Fig. 7 Radiant value according to outdoor temperature(October 3 - October 14)

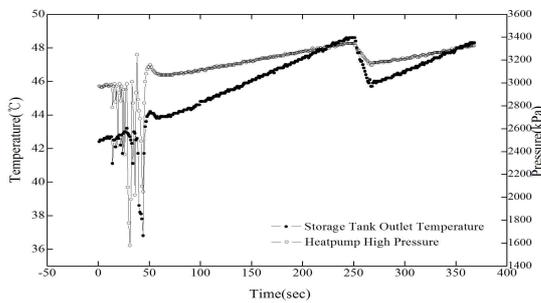


Fig. 8 Heat pump high pressure and storage tank outlet temperature over time

3.2 시설하우스용 히트펌프의 성능평가

시설하우스의 일사량 변화에 따른 열적성능 평가를 거친 후 히트펌프 시스템을 연속적으로 운전하여 성능평가를 실시한 결과는 다음과 같다. 시스템은 일사가 있는 주간에는 오전 8시부터 오후 6시까지 축열운전을 수행하였으며, 오후 6시부터 다음날 오전 8시까지 야간에는 난방운전을 수행하여 하나의 사이클이 구성되도록 하였다.

Fig. 9는 주간의 축열운전을 할 때 축열온도에 따른 고압 및 저압을 측정된 그래프이다. 고압의 경우 평균 2216.3 kPa으로 나타났고, 저압의 경우 평균 666.9 kPa이며, 고압과 저압의 압력차는 1549.5 kPa으로 나타났다. 반면에 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 야간의 난방운전 시 축열온도에 따른 고압 및 저압을 측정된 결과 고압의 경우 평균 3422.5 kPa으로 나타났고, 저압

의 경우 1029.7 kPa이며, 고압과 저압의 압력차는 2392.8 kPa으로 나타났다. 축열운전에 비해 난방운전의 압력차가 크게 나타났다.

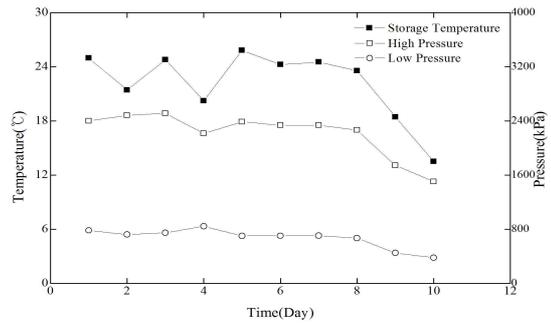


Fig. 9 High pressure and low pressure according to storage temperature(Day)

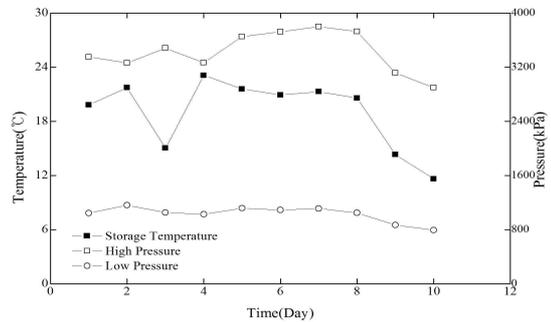


Fig. 10 High pressure and low pressure according to storage temperature(Night)

Fig. 11 및 Fig. 12는 외기온도에 따른 압축기 소비동력변화를 측정된 그래프이다. 주간에 축열운전일 경우 평균 소비동력은 1655.3W로 나타났고, 야간에 방열운전일 경우 평균 소비동력은 2523.8W로 나타났으며, 외기온도 변화에 따른 압축기의 소비동력 변화가 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 폐열회수를 위한 축열운전을 10일간 시운전한 경우이며, 평균 일사량은 358.2 W/m² 이고, 외기온도가 18.6°C일 때 축열조의 COP_s는 5.10으로 나타났다. 전체일수를 평균 하면 일사량이 168.3 W/m², 외기온도가 16.

3°C일 때 축열조의 COP_s는 4.59로 나타났다.

반면에 방열운전인 난방운전의 경우 COP_h는 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 전체 운전기간 동안의 평균 외기온도가 12.9°C이지만, 평균 내부온도는 24.7°C로 나타났으며, 난방 평균 COP_h는 2.63으로 나타났다.

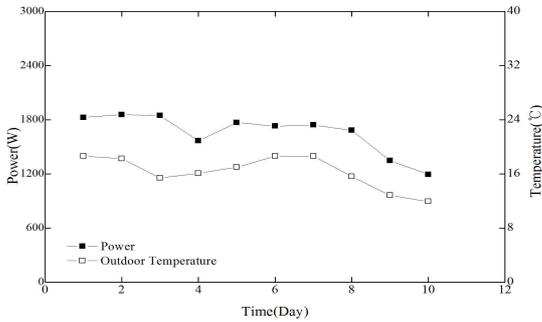


Fig. 11 Compressor power according to outdoor temperature(Day)

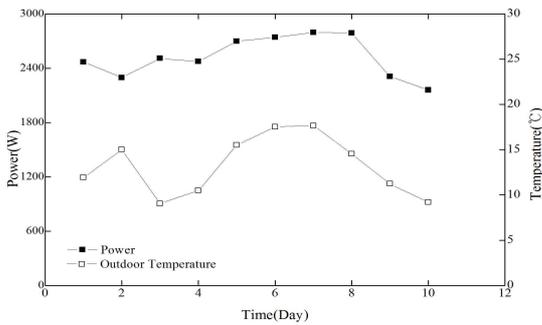


Fig. 12 Compressor power according to outdoor temperature(Night)

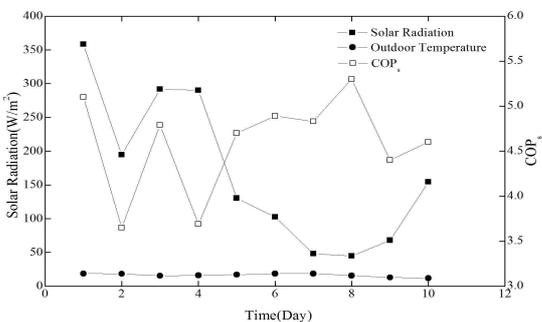


Fig. 13 Storage COP according to solar radiation and outdoor temperature

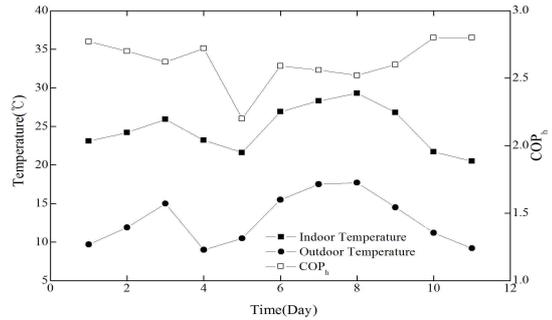


Fig. 14 Heating COP according to indoor temperature and outdoor temperature

4. 결 론

시설원예용 히트펌프의 축열운전과 난방운전이 가능한 열펌프 시스템을 개발하여 시스템의 제어인자를 파악하기 위하여 성능실험을 수행한 결과 시설하우스의 폐열을 이용하기 위해서는 외기온도 15°C, 일사량 270 W/m² 이상이 되어야 한다는 결과를 도출하였다. 결과를 토대로 시설하우스 내의 폐열을 이용하기 위한 시스템을 제작하여 오전 8시부터 오후 6시까지 폐열회수를 위한 축열운전을 수행하였고, 오후 6시부터 다음날 오전 8시까지 방열운전인 난방운전을 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 축열운전의 경우 하루 평균 일사량이 358.2 W/m² 이고 외기온도가 18.6°C일 때 축열 COP_s는 5.10으로 가장 높게 나타났으며, 전체일수평균값은 일사량이 168.3 W/m², 외기온도가 16.3°C일 때 축열 COP_s는 4.59이다.
- (2) 외기온도에 따른 실내온도 및 난방 COP_h 변화는 전체 일수 평균 외기온도가 12.9°C이지만 실내평균온도는 24.7°C로 나타났으며, 이 때 난방 평균 COP_h는 2.63이다.
- (3) 축열운전의 경우 평균 소비동력은 1655.3W 이고 고압과 저압의 압력차는 1549.5 kPa

이다. 난방운전의 경우 평균 소비동력은 2523.8W이고, 고압과 저압의 압력차는 2392.8 kPa이다. 난방운전의 경우 축열운전보다 소비동력 및 고압과 저압의 압력차가 커 COP가 더 낮게 나타남을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2015년도 농촌진흥청 연구사업(세부과제명 : 공기열, 태양열 등 복합열원 이용 시설원예용 히트펌프시스템 개발, 세부과제번호 : PJ010019)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

Reference

1. Sa Gyun Kim, Chil Koo Choi, Management Counterplan and Protected Horticulture Affected by Rising of Oil Prices, 2002, The Korean Society for Bio-Environment Control, Vol. 15, No. 1, pp. 1-8.
2. J. K. Kwon, Y. H. Choi, D. K. Park, J. H. Lee, K. Y. Kang, Y. C. Um, 1999, Survey on Insulation and Heating of Greenhouse Grown Fruit Vegetables in Southern Region, KSHS, pp. 218-218.
3. Byoung Woo Park, 1996, Flower Industry And development challenges, Monthly Bulletin of Nonghyup research, Vol. 12.
4. Choi Dong-Ho, Huh Joung-Chul, Lim Jong-Hwan, Suh Hyo-Duk, 1999, Evaluation of Heating Performance and Analysis of Heating Loads in Single Span Plastic Greenhouse with Electrical of Hot-Air Heating, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 8, No. 8, pp. 136-149.
5. Chi S.W., 1976, Heat Pipe Theory and Practice, Willey, pp. 15-34.
6. G. L. Morrison, I. Budihardjo and M. Bhnia, 2004, Water in glass Evacuated Tube Solar Water Heaters, Solar energy, Vol. 76, pp. 135-140.
7. S. B. Riffat, X. Zhao and P.S. Doherty, 2005, Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat pipe solar collector, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 899-915.
8. S. A. Kalogirou, 2003, The potential of solar industrial process heat applications, Applied Energy, Vol. 76, pp. 337-361.
9. H.K. Song, J.G. Ro, J.K. Park, Y.K. Kang, H.C. Kim, 1997, A Study on the Heat pump - Latent Heat Storage System for the Greenhouse Heating, Korean Society for Agricultural Machinery, pp. 113-120.