

에너지 수요처의 사용특성에 따른 태양열 급탕시스템의 효율분석

전용준* · 박경순***

*동의대학교 건축공학과 대학원

**동의대학교 건설공학부 건축공학전공

Analysis of Efficiency of Solar Hot Water System based on Energy Demand

Yong-Joon Jun* · Kyung-Soon Park***

*Department of Architectural Engineering, Dong-Eui University

**Architectural Engineering Major, Division of Urban, Architecture and Civil Engineering, Dong-Eui University

†Corresponding author: pks2180@deu.ac.kr

Abstract

In a hot water system using solar energy, solar heat is not simply collected by the heat collecting plate, but by heat exchange between the solar collector (flat or vacuum type) and the hot water storage tank. Therefore, the amount of collected solar energy depends on the hot water usage patterns that determine the temperature of the thermal storage tank. Also, if the temperature of the hot water stored in the storage tank exceeds the dangerous temperature during the summer, the heat must be released for safety. If the temperature of the hot water in the storage tank is low, it is necessary to heat by the auxiliary heat source. In this study, three buildings are defined as hotel, swimming pool, and school facilities. And we calculated the released heat energy, auxiliary heat source, and pure storage heat energy based on different hot water usage patterns and installation angle of the solar collectors.

Keywords: 태양열(Solar energy), 급탕시스템(Hot water system), 시뮬레이션(Simulation), 방열에너지(released heat energy)

기호설명

Q_{ab} : Collected heat flux [W]

Q_{loss} : Flux of heat loss [W]

Q_{cool} : Released heat flux [W]

Q_{backup} : Auxiliary heat flux [W]

h : Convective heat transfer coefficient [W/m²K]

r_1 : Inner diameter of pipe [m]

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.5, pp.39-47, October 2017
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.5.039>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 12 September 2017

Revised: 18 October 2017

Accepted: 24 October 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- r_2 : Outer diameter of pipe [m]
- k_1 : Heat transfer coefficient of pipe [W/mK]
- k_2 : Heat transfer coefficient of storage tank insulation [W/mK]
- L : Length of pipe [m]
- d : Diameter of storage tank [m]
- H : Height of storage tank [m]
- C_h : Specific heat of heat medium [kJ/kgK]
- C_w : Specific heat of water [kJ/kgK]
- T_H : Temperature of Heated water [°C]
- T_C : Temperature of Cold water [°C]
- T_m : Temperature of water storage tank [°C]
- T_a : Temperature of air [K]
- T_o : Outlet temperature of solar collector [K]
- T_i : Inlet temperature of solar collector [K]
- V : Volume of storage tank [m³]
- m_1 : Mass flow rate of heat medium [kg/hr]
- m_2 : Mass flow rate of water [kg/hr]

1. 서론

신재생에너지 중에 태양열 에너지는 태양의 복사에너지를 바로 활용할 수 있기 때문에 효율이 높고 사용이 간편하다. 그러나 한국과 같은 사계절이 존재하는 국가의 경우 동절기의 에너지 수요에 맞추어 시스템을 설계할 경우 난방 및 급탕사용량이 급감하는 하절기에는 태양열 축열 시스템이 과열되게 되고, 시스템을 보호하기 위하여 태양열 집열판을 차광막으로 가리거나 축열조의 과열된 물을 강제배출 하거나 방열팬의 가동이 불가피하다. Bai et al. (2013)은 이중진공관형 태양열 집열기가 과열되는 것을 방지하기 위하여 반사판의 각도를 조정하면서 온도상승의 제한 효과에 대한 연구를 수행하였다¹⁾. 또 동절기 또는 우천으로 인한 태양열 축열조의 온도가 급탕에 필요한 온도만큼 가온되지 않을 경우 온수를 사용하기 위해 보조열원이 사용되어야 하는데, 이때에는 전기 또는 화석연료가 필요하다.

이때 태양열 급탕 시스템은 태양에너지의 입사각도에 따라 시스템의 효율 및 성능이 크게 좌우되므로 태양열 집열기의 최적 설치각도 및 방위각에 따른 최적 효율에 대한 연구가 수행되었다. Jo et al. (2011)는 태양열 급탕시스템이 설치되는 장소의 위도에 따른 최적 설치각도를 찾기 위하여 한 지역을 선정하여 1996년 8월부터 2005년 12월까지 9년 5개월간 매 시간마다 측정된 경사면상에 입사하는 총 일사량을 측정하고, 직달 일사량과

산란 일사량을 분리시켜 경사면 일사량을 예측한 결과와 실험 측정값을 비교하였다²⁾. Khorasanizadeh et al. (2014)은 Iran의 Tabass지역에서 태양열 집열기의 설치각도에 따른 경사면 일사량 계산 알고리즘을 제안하였으며³⁾ Loutzenhisser et al. (2007)은 태양열 집열기의 설치각도에 따른 건물 태양열 급탕 시스템의 성능을 상용 에너지 시뮬레이션 프로그램을 통해 예측하는 연구를 수행⁴⁾하였다. Zhang et al. (2014)은 건구온도, 상대습도, 일조시간 및 운량의 기상관측 변수를 가지고 수평면 전 일사량을 예측하는 방법을 연구하고 그 관계식을 제안하였으나,⁵⁾ 한국의 기상관측소에는 운량을 측정하지 않는 곳이 많으므로 Kim et al. (2016)은 운량의 정보 없이도 태양광 자원량을 예측할 수 있는 수정 상관식을 제안하였다⁶⁾. Yoon et al. (2014)은 대기권을 통과하여 지표면에 도달하는 태양열 에너지를 계산하기 위해 운량을 산출하는 알고리즘을 연구하였다⁷⁾.

또한 태양열 시스템은 태양광 발전 시스템과는 달리 태양열 축열조와 태양열 집열기 사이의 열교환을 통해 에너지를 저장하기 때문에 태양열 집열기의 효율은 태양열 축열조의 온도변화와 직결되므로 Lee et al. (2014)은 축열조의 온도변화와 태양열 집열기의 효율에 대한 연구를 수행하였다⁸⁾.

이에 본 연구에서는 에너지 사용패턴에 따른 최적 태양열 집열기의 설치 각도를 연구하기 위하여 각기 다른 급탕사용패턴을 가진 세 가지 용도의 건물을 정하고, 이에 따른 태양열 과열 방열에너지, 추가 보조 에너지, 순수하게 사용되는 태양열 축열 에너지를 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 알고리즘

2.1 시뮬레이션 계통도 및 지배방정식

본 연구를 위해 고안된 시스템 계통도는 Fig. 1과 같으며 태양열 집열을 위한 태양열 집열기, 태양열을 급탕 또는 난방으로 사용하기 위해 열을 저장하기 위한 태양열 축열조, 태양열 축열조의 온도가 허용온도 이상으로 과열될 경우 과열 에너지를 배출시키기 위한 방열팬 등으로 구성되며 에너지방정식은 아래와 같다.

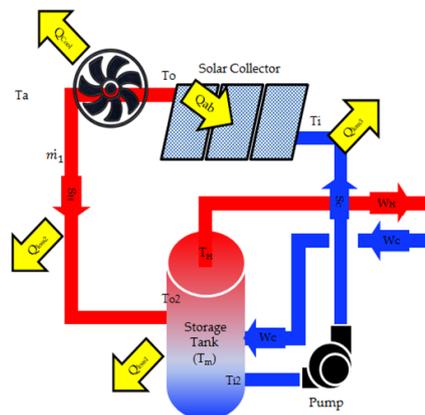


Fig. 1 Schematic diagram of solar water heating system in this study

$$m_1 C_h (T_{m,n-1} - T_{o2,n}) \times x_{day} + VC_w (T_{m,n} - T_{m,n-1}) + m_2 C_w (T_m - T_c) \times x_{day} + Q_{loss} - Q_{Cool} + Q_{backup} = 0 \quad (1)$$

$$Q_{ab,n} = m_1 C_h (T_{o,n} - T_{i,n}) \quad (2)$$

$$\frac{T_a - T_o}{\left(\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{1}{2\pi r_2 h_2 L} \right)} = m_1 C_h (T_{o2,n} - T_{o,n}) \quad (3)$$

$$Q_{loss1,2} = \frac{(\pi d^2/4 + \pi dH)}{(1/h_1 + g_1/k_2)(T_{m,n} - T_a)} \quad (4)$$

$$Q_{backup} = m_2 C_w (T_H - T_m) \{ \text{if } T_m < T_H \} \quad (5)$$

$$h = 3.95 + 5.8v (W/m^2 K) \{ v \leq 5m/s \} \quad (6)$$

$$\frac{T_{i2} - T_a}{\left(\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{2\pi r_1 h_2 L} \right)} = m_1 C_h (T_{i2} - T_i) \quad (7)$$

본 연구에서는 시스템의 과열온도(T_{SF})를 65°C로 계산하였으며 축열조의 평균온도가 위험온도보다 높을 경우($T_m > T_{SF}$) 태양열 시스템이 과열된 것으로 판단하여, 시스템 외부로 방열기 또는 고온수를 배출하여 에너지를 방열한다. 이는 일반적인 용도의 건물에서 급탕 사용온도가 40°C일 때 온도상승에 따른 축열조 내부의 압력 팽창이 1.5배가 되는 온도가 65°C이기 때문이다. 급탕 사용온도는 40°C를 고려하였으며 시간에 따른 재실율(x_{day})은 Table 1과 같으며 이는 상용 에너지 해석 프로그램인 Design Builder의 Occupancy library를 사용하였다.

Table 1 Occupancy rate (School, Swimming Pool, Hotel data of Design builder libraries)

Hr	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	etc.
School	0.1	0.25	0.75	1	1	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5	0	0	0	0
Pool	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Hotel	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1

수평면 전 일사량의 기하학적 해석을 통한 경사면 일사량의 도출, 태양열 집열기의 집열 효율식 계산 등은 본 연구의 선행연구⁹⁾의 알고리즘을 사용하였다.

2.2 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 부산(위도 35.1047°)에 위치한 학교, 수영장, 호텔 건축물을 대상건축물로 가정하였으며 시스템 용량 및 용도별 사용인원은 Table 2와 같다. 에너지 사용량에 대한 정량적인 비교를 위하여 학교, 수영장, 호텔 건축물의 일일 급탕사용량은 3,000 l로 통일하였으며 용도별 부하용량은 사용 용도에 맞게 변환하였다¹⁰⁾.

Table 3 Simulation specifications of each parts

Classification	Details
Azimuth angle of solar collector	Due south
Specifications	Solar Collector : 1,000 * 2,000 * 92 mm * 40 EA Flat type Optimum angle of solar collector 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 Capacity of heat release fan : 14,000 kcal/hr
Capacity of hot water load	School : 1,300 students Pool : 30 tons of water Hotel : 50 ~ 60 Rooms
Heat storage capacity	3,000 ℓ / day

3. 시뮬레이션 결과

이상의 알고리즘을 이용하여 작성한 시뮬레이션 프로그램을 통하여 각 건축물 별 분석한 태양열 에너지 집열 패턴은 다음과 같다.

3.1 집열기 설치각도별 연간 집열량

태양열 집열기의 설치각도별 집열 되는 태양열 에너지의 년 간 집열량은 Fig. 2와 같다. 학교와 수영장의 경우 비슷한 태양열 집열량을 보이고 있으나 호텔의 경우에는 에너지 집열량이 낮은 것을 알 수 있다. 이는 태양열 축열 시스템의 원리가 태양열 집열기의 온도가 태양열 집열기의 축열조의 온도보다 높을 때에만 열교환이 가능하기 때문에 태양열이 집열 되는 낮 시간 동안 급탕사용량이 낮은 호텔의 경우에는 상대적으로 태양열 축열조의 온도가 높고, 그에 따라 집열 되는 태양열 에너지의 양이 낮은 것으로 판단된다. 에너지의 집열량이 가장 많은 설치각도는 30도인 것으로 나타났다.

3.2 보조열량

태양열 축열조의 온도가 급탕사용온도보다 낮을 때 기름이나 전기와 같은 보조에너지를 이용하여 축열조에서 공급되는 급탕수를 가열하여야 한다. 집열기의 설치각도 별 년 간 필요한 보조에너지는 Fig. 3과 같다. 호텔의 경우 년 간 필요한 보조에너지가 가장 많은 것으로 나타났으며, 이는 호텔의 경우 에너지의 소비시간이 야간에 집중되어 보조에너지의 사용이 더 많아지기 때문인 것으로 판단된다. 태양열 집열기의 설치각도는 45°일 경

우가 대체로 보조에너지의 사용이 가장 적은 각도로 나타났는데 이는 집열기의 설치각도가 낮을수록 태양고도가 높아지는 하절기 수요에 대응하기가 쉽지만 그만큼 과열로 방출되는 양이 많고 급탕수요가 실제로 높은 난방시즌에 대응성이 높으면서 집열량이 많은 각도가 45°인 것으로 판단된다.

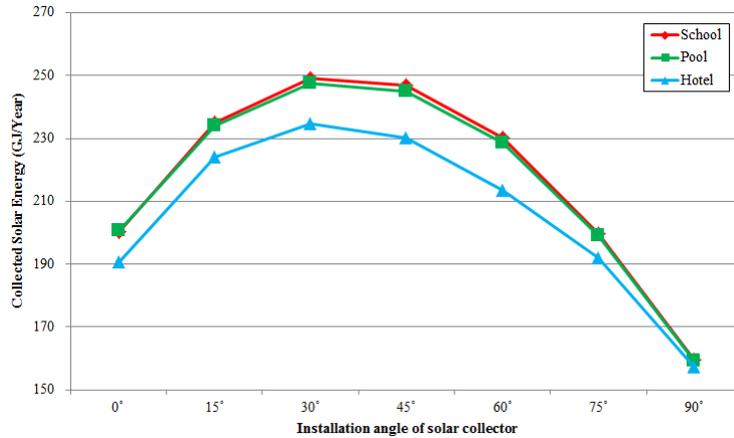


Fig. 2 Collected solar energy based on installation angle of solar collector (GJ/year)

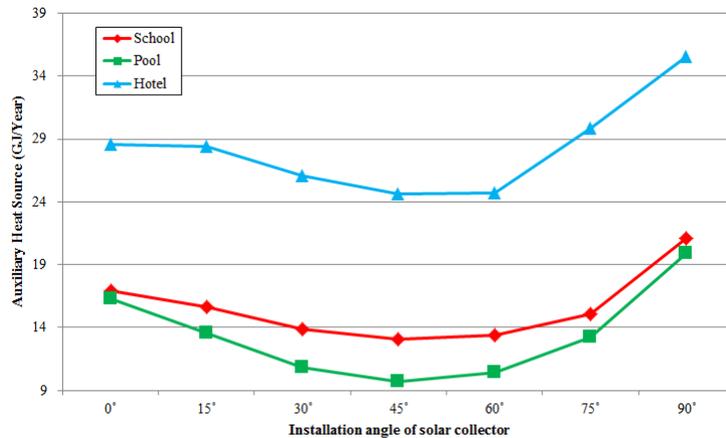


Fig. 3 Auxiliary heat source based on installation angle of solar collector (GJ/year)

3.3 과열 방열량

태양열 축열조의 온도가 설정한 위험온도보다 높을 때 과열의 방출이 이루어지며, 태양열 집열기의 설치각도에 따른 과열 방열에너지의 양은 Fig. 4와 같다. 년 간 과열방열에너지가 가장 많은 곳은 호텔 건물이며 이때 태양열 집열기의 설치각도는 30°이다. 그리고 학교와 수영장 건물에서 과열방열에너지가 가장 많은 설치각도는 15°로 나타났다. 집열기의 설치각도가 낮을수록 태양고도에 의한 하절기의 과열방열량이 증가하며, 반대로 동절기에는 유효하게 사용할 수 있는 에너지가 많다는 것을 의미하며 이는 학교와 수영장의 에너지 사용 시간이 집열되는 시간과 에너지의 사용시간이 유사하게 겹쳐 있기 때문으로 판단된다.

호텔의 경우 동절기에 집열량이 많은 집열 각도 30°에서 과열 방열량이 많이 발생하는데 이는 집열되는 시간에는 에너지 사용빈도가 낮기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5는 각 건물별 가장 과열방열에너지가 많은 설치각도에서의 월별 과열방열에너지를 나타낸 것이다. 호텔의 경우 년 간 꾸준히 과열방열에너지가 발생하고 있으며, 이는 동절기에도 집열기의 설치각도가 높아 집열량이 많아지는 반면 집열 되는 시간에는 에너지 사용빈도가 낮기 때문이다. 학교와 수영장의 경우 집열되는 시간에 에너지 사용빈도가 높기 때문에 집열기 설치각도 15° 정도로 설치각도가 낮을 경우 동절기에는 과열 방열량이 발생하지 않고 있다.

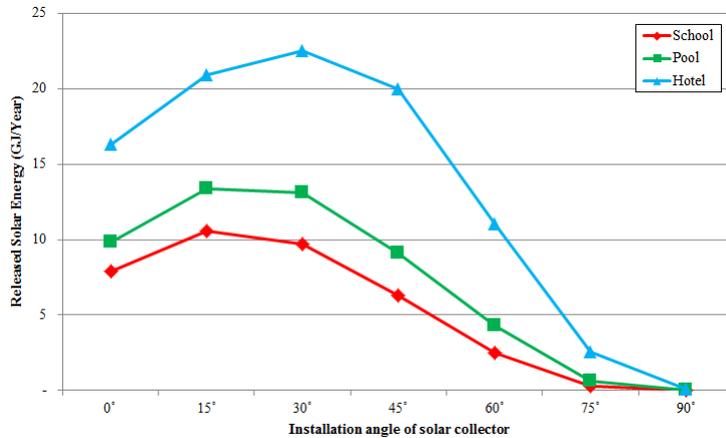


Fig. 4 Released solar energy based on installation angle of solar collector (GJ/year)

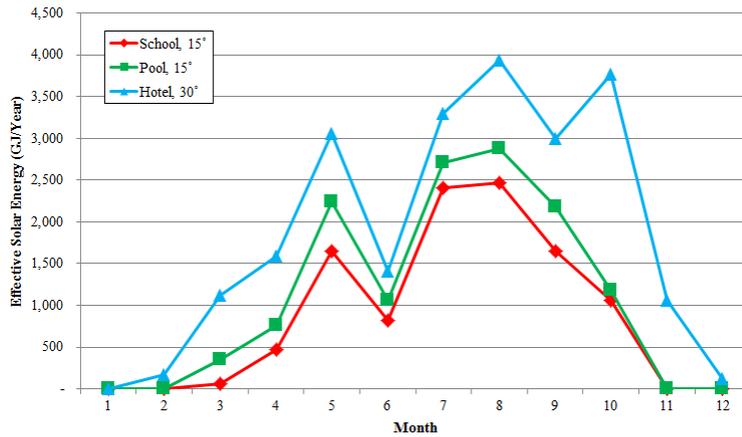


Fig. 5 Monthly released solar energy (MJ/year)

3.4 유효 태양열 집열량

유효 집열량은 태양열 집열기로 집열한 에너지에서 보조에너지 사용량과 과열 방열량을 뺀 것이며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 집열된 태양열 에너지에서 순수하게 사용된 태양열 에너지 사용량을 나타낸다. 주간 태양열 사용량이 많은 학교와 수영장 건물이 태양열에너지를 집열하여 순수하게 사용할 수 있는 용량이 가장 많은 것

으로 나타났으며, 호텔의 경우는 태양열 에너지의 집열 시간은 낮인데 반하여 에너지의 사용시간은 야간에 집중되어 있어 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 이때 최적 설치각도는 호텔의 경우 30°, 학교와 수영장은 45°인 것으로 나타났다.

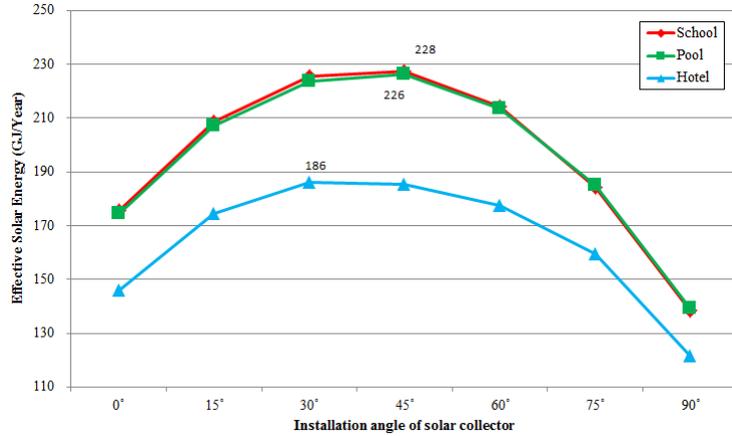


Fig. 6 Effective solar energy based on installation angle of solar collector (GJ/year)

4. 결론

본 연구에서는 에너지 사용패턴이 다른 세 가지의 건물을 모델로 하여 태양열 에너지의 집열 및 사용 패턴에 대한 에너지 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 태양열 집열기로 집열 되는 전체 태양열 집열량에서 유효하게 사용되는 에너지만을 산출하여 설치 용도건물 별 최고의 성능을 낼 수 있는 태양열 집열기의 설치각도를 도출하였다.

- (1) 태양열 집열 시간과 사용시간의 간격이 클수록 태양열 집열 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 태양열 집열 효율은 부산지역의 위도에서 약 30°일 때가 가장 높은 것으로 나타났다.
- (2) 보조에너지의 사용량은 야간 에너지 사용이 집중된 호텔 건물에서 가장 높게 나타났으며, 태양열 집열기의 설치각도가 45°일 때가 가장 낮게 나타났다.
- (3) 과열 방열 에너지는 호텔일 경우 45°, 학교 및 수영장은 15°일 때가 가장 높은 것으로 나타났다.
- (4) 유효하게 사용가능한 태양열 집열량은 학교와 수영장의 경우 비슷한 것으로 나타났으나 호텔 건물의 경우 최대값 대비 최대 22% 이상 낮은 것으로 나타났다. 태양열 집열기는 호텔 건물은 30°, 학교 및 수영장은 45° 각도로 설치하였을 때 가장 효율이 높은 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B03932661).

REFERENCES

1. Bai, S. E., Bai, C. H., Nam, H. K., and Shin, K. Y., A Study on Reducing Temperature Rise of Twin-glass Evacuated Tube Solar Collector During Summer Time, *Journal of the Korean Solar Energy Society* Vol. 33, No. 3, pp. 36-41, 2013.
2. Jo, D. K., Yun, C. Y., Kim, K. D., and Kang, Y.H., A Study on the Estimating Solar Radiation Using Hours of Bright Sunshine for the Installation of Photovoltaic System in Korea, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, No. 4, pp. 72-79, 2011.
3. Khorasanizadeh, H., Mohammadi, K., and Mostafaeipour, A., Establishing a Diffuse Solar Radiation Model for Determining the Optimum Tilt Angle of Solar Surfaces in Tabass, Iran. *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 805-814, 2014.
4. Loutzenhiser, P. G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P. A., Frank, T. H., and Maxwell, G. M., Empirical Validation of Models to Compute Solar Irradiance on Inclined Surfaces for Building Energy Simulation, *Solar Energy*, Vol. 81, No. 2, pp. 254-267, 2007.
5. Zhang, Q., Joe, H., Lang, S., Development of Typical Year Weather Data for Chinese Locations/Discussion. *ASHRAE transactions*, 108: 1063, 2002.
6. Kim, H. Y. and Kim, J., Correlation to Predict Global Solar Insolation and Evaluation of that Correlation for Korea (I), *New & Renewable Energy*, Vol. 10, No. 12, pp. 30-35, 2016.
7. Yoon, K., Yun, G., Jeon, J., and Kim, K.S., Evaluation of Hourly Solar Radiation on Inclined Surfaces at Seoul by Photographical Method, *Solar Energy*, Vol. 100, 203-216, 2014.
8. Lee, K. H. and Baek, N. C., A Modified Efficiency Equation of Solar Collectors, *Energy Procedia*, Vol. 48, pp. 145-149, 2014.
9. Jun, Y. J., Song, Y. H., and Park, K. S., A Study on the Prediction of the Optimum Performance of a Small-scale Desalination System Using Solar Heat Energy, *Energies*, Vol. 10, No. 9, 1274, 2017.
10. The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea. *Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea; SAREK: Seoul, Korea, 2011; ISBN 978-89-98049-01-0.*