

온수 취득용 물탱크에 자연대류 방식 도입을 위한 단일진공관 태양열집열기의 성능평가 연구

도승주*, 양영준**,#

*경남과학기술대학교 자동차공학과 대학원, **경남과학기술대학교 자동차공학과

Evaluation of Solar Collector to Introduce Natural Convection in Water Tank to Obtain Warm Water

Seung-Ju Do*, Young-Joon Yang**,#

*Graduate School, Gyeongnam National University of Science and Technology, Dept. of Automotive Engineering, **Gyeongnam National University of Science and Technology, Dept. of Automotive Engineering

(Received 2 January 2018; received in revised form 12 March 2018; accepted 23 March 2018)

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the performance of a solar collector to introduce natural convection in a water tank as a means of obtaining warm water. Numerical analysis was performed to predict the characteristics of the solar collector and its performance was verified using an experimental method. The single vacuum structure of the collector enabled natural convection when it was fitted on the water tank. Based on numerical analysis, warm water of 31-54°C was obtained when the inlet temperature of cold water was 20°C. Furthermore, the temperature of the warm water could be predicted under various conditions as well as the experimental conditions created for this study.

Key Words : Warm Water(온수), Natural Convection(자연대류), Solar Collector(태양열집열기), Water Tank(물탱크), Performance Evaluation(성능평가)

1. 서 론

신재생에너지는 태양, 풍력, 지열, 파력(波力) 등이 대표적이며 이 중에서도 태양에너지는 다른 신재생에너지보다 비교적 활용이 간단하고 비용이 저렴하다. 태양에너지는 태양광 에너지와 태양열 에너지로 구분할 수 있다. 태양광 에너지는 태양

에너지를 이용하여 발전을 하기 위한 것으로서 태양전지^[1,2], 태양광 전기자동차^[3] 및 태양광 가로등^[4] 등에 적용되어지고 있다. 태양열 에너지는 태양으로부터 복사에너지를 흡수해서 열에너지로 변환시켜 온수를 얻거나 또는 난방을 하기 위한 기술이다. 태양열 에너지를 활용하는 가장 보편적인 방법은 태양열 시스템을 이용하는 방법이다. 이와 같은 태양열 시스템 중에서 태양열 집열기의 성능은 중요 요소 중 하나인 것으로 알려져 있으며 많은 연구가 수행되어져 왔다^[5-7]. 평판형 태양열집열기는 이중진공관식 집열기에 비해 집열효율은

Corresponding Author : yangyj@gntech.ac.kr
Tel: +82-55-751-3646, Fax: +82-55-751-3649

낮지만 가격이 저렴하기 때문에 일반가정에 많이 이용되어지고 있으며 이중진공관식은 특히 등의 문제로 개발에 일부 제한이 있는 것으로 알려져 있다. 단일진공관식은 비교적 저렴한 가격 및 우수한 성능으로 여러 형태의 단일 진공관이 연구 및 개발되어지고 있다^[8-10].

본 연구는 온수 취득용 물탱크에 자연대류 방식을 도입하기 위하여 단일 진공관식 태양열집열기의 구조 및 성능 등을 이에 적합하게 고안하여 수치해석적 방법으로 그 특징 등을 예측하고 실험적 방법으로 이를 검증하고자 하는 것을 목적으로 한다. 단일진공관식 태양열 집열기를 이용하여 온수 취득용 물탱크에 자연대류 방식을 적용해 보고자 하는 시도는 과거에 연구되어진 바 없다.

2. 수치해석 및 실험 방법

2.1 온수 취득용 물탱크에 자연대류 방식 도입 원리

Fig. 1에 온수 취득용 물탱크에 자연대류 방식을 도입하기 위해 고안한 자연대류형 단일진공관 태양열집열기의 구조 및 작동원리를 나타내었다. 본 연구에서 고안한 단일진공관 태양열집열기는 온수 취득용 물탱크 내의 상하 부근의 온도차에 의해 밀도차 발생을 유도하여 물탱크 내의 물이 상하로 순환하면서 온수가 생산되는 원리이다. 단일진공관 태양열집열기는 원통형 알루미늄 외경부에 블랙크롬(black chrome)을 코팅하여 태양열흡수부의 역할을 하며 알루미늄 바깥쪽에 다시 원통형 투명 유리관을 설치하여 진공처리하였다. 태양광은 태양열흡수부에 의해 열이 흡수되어 태양열집열기 내부 물의 온도를 상승시킨다. 온도가 상승된 물은 밀도가 감소하여 물탱크 상부로 이동한다. 차가운 물 즉 아직 온도가 낮은 물은 밀도가 높으므로 물탱크 하부로 이동하여 태양열집열기의 유입구를 통해 물이 집열기 내부로 유입되어 태양열흡수부를 다시 통과함으로써 물의 온도를 더욱 상승시켜 물탱크 내부의 물을 온수(warm water)로 변환시키는 원리이다. 단일진공관 태양열집열기의 상세한 구조는 후술하기로 한다.

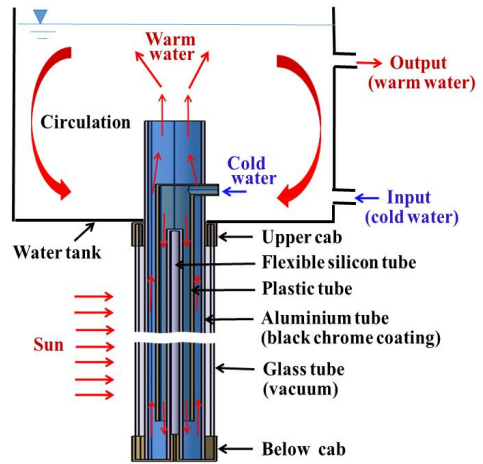


Fig. 1 Principle of solar collector with single vacuum type to introduce natural convection in water tank

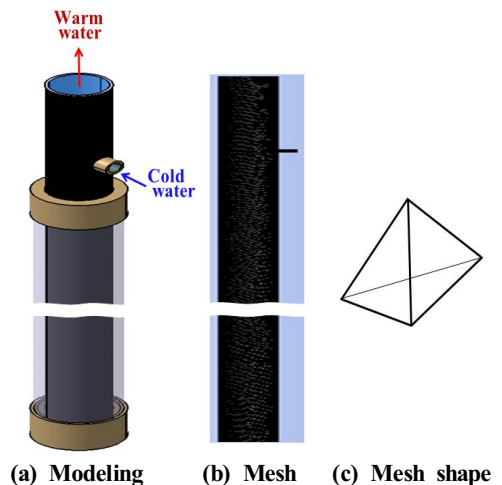


Fig. 2 Modeling and mesh of solar collector with single vacuum type

2.2 수치해석 방법

자연대류 방식 도입을 위한 단일진공관 태양열 집열기의 CATIA 모델링을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 전체 길이 1,800mm, 외경 47mm이며 전체 길이가

Table 1 Conditions of numerical analysis

Temperature of inlet water (°C)	Velocity of inlet water (m/s)	Temperature of black chrome coating (°C)
20	0.5	40, 60, 80
	1.0	40, 60, 80
	1.5	40, 60, 80

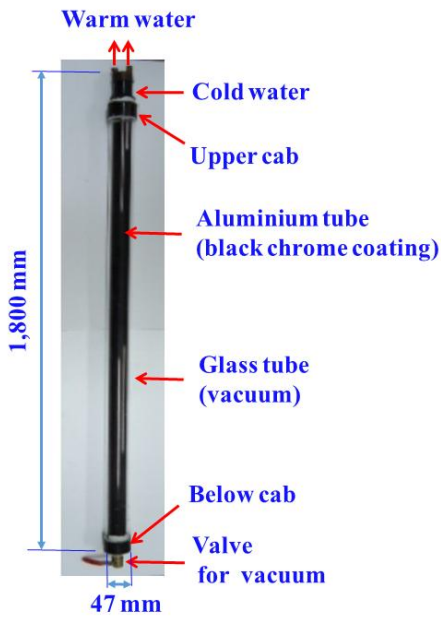


Fig. 3 Photograph of solar collector with single vacuum type

길기 때문에 집열기의 상부 및 하부만을 나타내었다. 자연대류 방식 도입을 위한 단일진공관 태양열집열기의 주요 부분은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 신축성 있는 실리콘 튜브, 플라스틱 관, 알루미늄 관(알루미늄 관의 바깥쪽에 블랙크롬 코팅), 진공 투명유리관 및 상하 고정용 캡 등으로 구성된다. 태양열집열기의 가장 내측에 있는 신축성의 실리콘 원형 튜브는 동절기에 물이 얼었을 경우, 팽창되는 체적에 의해 집열기 전체가 파손되지 않도록 팽창 체적을 흡수하기 위한 용도이다. 수치해석 시에는 태양열집열기 구성요소 중 물이 흐르는 부분과 태양열흡수부인 블랙크롬이 코팅된 알루미늄 부분만 수치해석을 적용하였다. Fig. 2(b)

에 물이 흐르는 부분 및 블랙크롬이 코팅된 알루미늄에 생성시킨 격자(mesh)를 나타내었다. 격자는 사면체 (tetrahedron), 총 격자수는 548,408개이며, 해석 프로그램은 ANSYS CFX를 사용하였다.

본 수치해석 조건을 Table 1에 나타내었다. 태양열집열기로 유입되는 냉수의 온도는 모든 경우 상온인 20°C로 가정하였다. 태양열집열기로 유입되는 냉수의 속도는 냉수 유입구에 각각 0.5, 1.0, 1.5m/s로 하였으며 이것은 냉수의 양이 각각 약 70, 140, 210 l/hr에 해당한다. 또한 유입되는 냉수를 가열하는 부분인 태양열흡수부(블랙크롬 코팅 부분)의 표면온도가 각각 40, 60, 80°C인 경우를 가정하여 수치해석을 수행하였다.

2.3 실험 방법

수치해석 결과를 실험과 비교하기 위하여 물탱크내 자연대류 방식 도입을 위해 제작한 단일진공관 태양열집열기의 모습을 Fig. 3에 나타내었다. 앞에서 거론한 바와 같이 전체 길이는 1,800mm, 진공을 위한 유리관의 외경은 47mm, 내경은 43mm 등 형상 및 치수는 모두 수치해석과 동일하다. 태양열흡수부는 알루미늄 관 바깥쪽에 글라스비드(glass bead)를 이용하여 표면거칠기를 가한 후 블랙크롬을 도금하여 태양열흡수율을 높였다.

Fig. 4에 실외에서 단일진공관 태양열집열기의 온도 측정 모습을 나타내었다. 온도 측정을 위해 data logger (midi Logger GL220)와 열전대

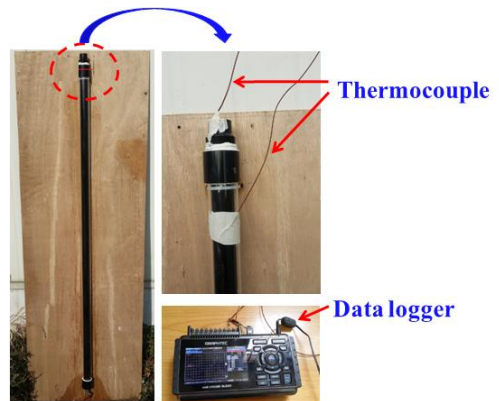


Fig. 4 Measurement of temperature

(thermocouple)를 사용하였다. 온도 측정 위치로서 태양열집열기의 내부에 있는 알루미늄 관 바깥쪽의 태양열흡수부를 직접 측정하는 것이 가장 바람직하나 알루미늄 관을 둘러싸고 있으면서 동시에 진공을 유지하고 있는 투명 유리관(glass tube)의 내부로 열전대를 삽입할 수 없었기 때문에 투명유리관의 외부 표면 온도를 측정하는 것으로 대체하였다. 이것은 오차의 원인이 될 것으로 예상된다. 그러나 진공이 형성되는 외부의 투명유리관과 블랙크롬 코팅된 알루미늄 관 사이의 간극은 약 5mm이므로 유리관 표면온도를 측정함으로써 발생하는 오차는 작을 것으로 판단된다. 또한 온수의 온도로서 태양열집열기 내부에 물을 채운 후 그 물의 온도변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 5에 냉수의 유입속도가 0.5m/s, 태양열흡수부의 온도가 40℃인 경우 태양열집열기의 전체 온도분포를 나타내었다. 냉수는 유입구를 지나 플라스틱 관을 따라 하부 방향으로 흐른다. 단면 A의 그림에서 유입되는 부분인 중앙 부분보다 하부를 거쳐 다시 상승하는 바깥 부분의 온도가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 냉수의 출구 지점인 단면 C에서는 단면 A 및 B 지점보다 모든 영역에서 온도가 상승하였음을 확인할 수 있다. 본 조건에서는 유입온도 20℃의 물이 태양열집열기 내부를 유동함에 의해 유출온도는 약 33℃로서 13℃의 온도 증가가 발생하였다.

Fig. 6에 Fig. 5와 동일조건(유입속도 0.5m/s, 태양열흡수부 온도 40℃)인 경우 태양열집열기의 유속분포를 나타내었다. 단면 A에서 물의 유입속도는 0.5m/s이며 유입구를 통과한 후 와류(vortex) 등에 의해서 0.89m/s의 최대유속을 나타내었다.

온도의 영향을 알아보기 위하여, 물의 유입속도는 위와 동일한 0.5m/s이지만 태양열흡수부의 온도를 80℃로 증가시킨 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 5와 비교하였을 때 최대온도는 상승하지만 전체적인 온도분포 형상은 별 차이가 발생하지

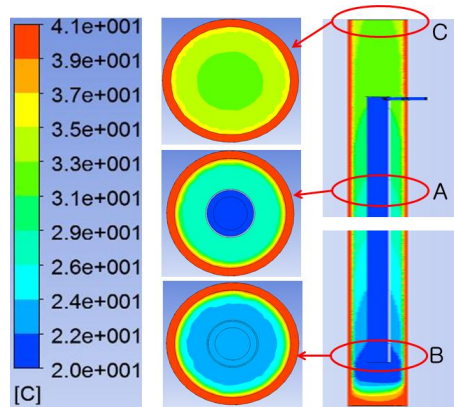


Fig. 5 Temperature distribution of solar collector in case of inlet velocity 0.5m/s and temperature of solar absorption part 40℃

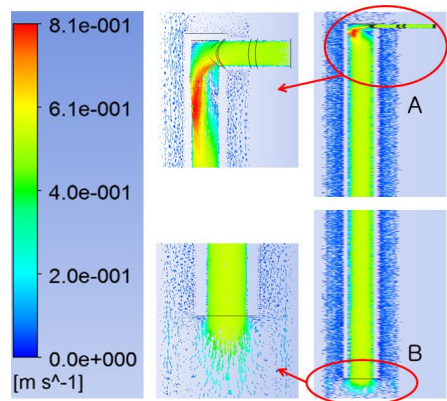


Fig. 6 Velocity distribution of solar collector in case of inlet velocity 0.5m/s and temperature of solar absorption part 40℃

않음을 알 수 있다.

온도분포 형상의 차이를 관측하기 위하여 태양열흡수부의 온도를 위와 동일하게 80℃로 하고 물의 유입속도를 1.5m/s로 증가시킨 경우를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교하면, 태양열집열기 하단부의 온도분포 형상 및 온도차이가 발생함을 알 수 있다. 따라서 위의 결과들로부터 본 수치해석이 정상적으로 수행되어지고 있는 것으로

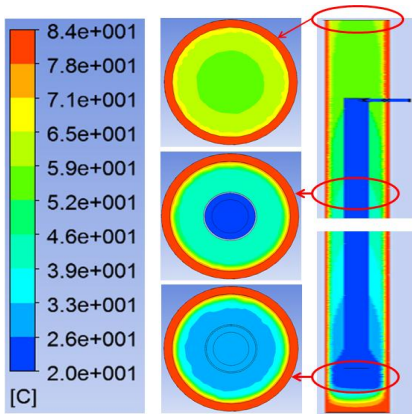


Fig. 7 Temperature distribution of solar collector in case of inlet velocity 0.5m/s and temperature of solar absorption part 80°C

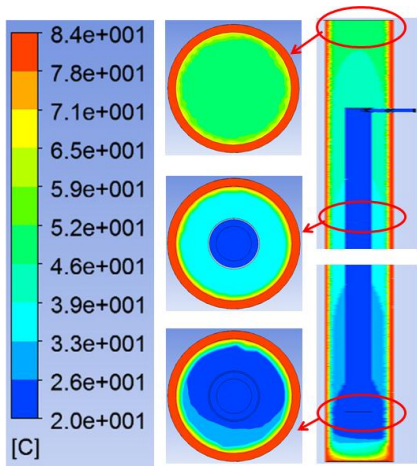


Fig. 8 Temperature distribution of solar collector in case of inlet velocity 1.5m/s and temperature of solar absorption part 80°C

판단된다.

Fig. 9에 태양열흡수부(solar absorption part)의 온도와 각 유입속도 조건에서의 최대속도를 나타내었다. 태양열흡수부의 온도가 각 40, 60, 80°C인 경우 물의 유입속도가 각 0.5, 1.0, 1.5m/s 일 때, 모든 경우에 있어서 최대유속은 거의 일정하다. 즉 본 조건의 온도범위에서 유체의 온도와 유체의

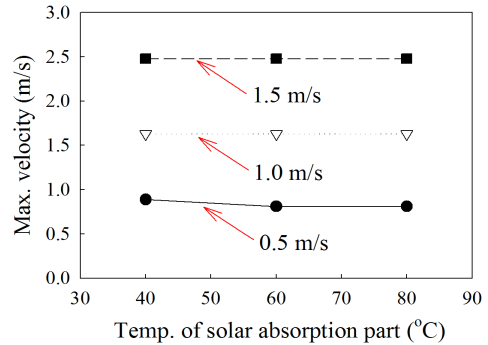


Fig. 9 Relations between maximum velocity in each inlet velocity and temperature of solar absorption part

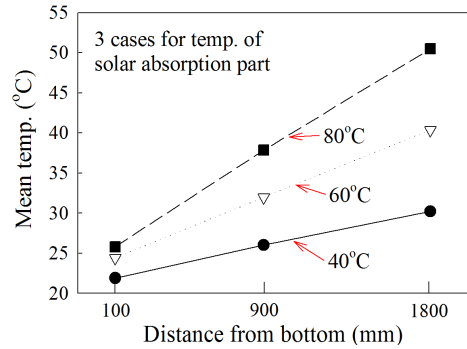


Fig. 10 Relations between mean temperature of water and distance from bottom in case of inlet velocity of water 1.0 m/s

유속은 서로 영향을 끼치지 않는다는 것을 본 수치해석을 통해 확인할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10에 물의 유입속도가 1.0m/s인 경우 태양열집열기의 하부(bottom)에서 상부 끝부분인 출구까지 거리에 따른 물의 평균온도를 나타내었다. 그림에서 100, 900, 1800mm 지점은 물이 하부에서 상부로 흐르는 지점에서의 평균온도이며 X축의 1,800mm 지점은 태양열집열기의 출구를 나타낸다. 그림을 관측하면 하부에서 출구까지 온도는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 태양열흡수부의 온도가 40°C인 경우보다 80°C인 경우의 직선 기울기가 더 크다. 이것으로부터 태양열흡수

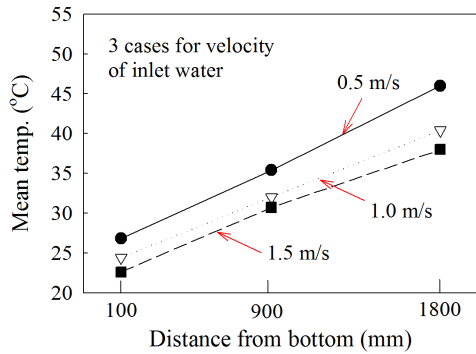


Fig. 11 Relations between mean temperature of water and distance from bottom in case of temperature of solar absorption part 60°C

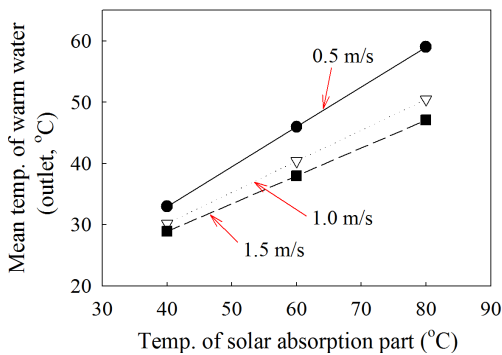


Fig. 12 Relations between mean temperature of warm water(outlet) and temperature of solar absorption part

부의 온도가 증가할수록 더 높은 온도의 온수를 얻을 비율이 커지는 것으로 판단된다.

Fig. 11에 태양열흡수부의 온도가 60°C인 경우 태양열집열기의 하부에서 출구까지 거리에 따른 물의 평균온도를 나타내었다. 물의 유입속도가 감소할수록 흐르는 물의 평균온도는 증가하며, 모든 경우에 있어서 직선의 기울기는 거의 동일하다. 따라서 Fig. 10의 결과와 비교하였을 때 태양열집열기에서 생산되는 온수의 온도를 높이기 위해서는, 본 조건에서는 물의 유속을 감소시키는 것보다 태양열집열기 흡수관의 성능을 개선하는 것이

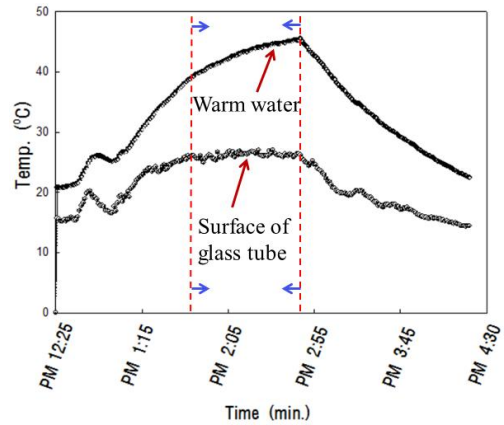


Fig. 13 Experimental results for temperature measurement

더 효과적일 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 수치해석이 아닌 실제 적용 시에는 태양열집열기의 흡수관의 성능 개선에 한계가 있으므로 물의 유속 즉 유량조절이 현실적일 수 있다.

본 연구 대상을 실생활에 적용하여 얻고자 하는 것은 최종적으로 태양열집열기 출구에서 나오는 온수(warm water)이다. Fig. 12에 태양열흡수부의 온도에 따른 태양열집열기 출구지점에서의 평균 온수온도를 나타내었다. 태양열흡수부가 40°C일 때 물의 출구온도는 유입속도 3 경우(0.5, 1.0, 1.5m/s)를 평균하면 약 31°C를 나타내었다. 동일하게 태양열흡수부가 60°C 및 80°C일 때 각각 약 41°C 및 54°C를 나타내었다. 즉 본 수치해석 조건에서는 20°C의 물을 태양열집열기에 유입시켜 31~54°C의 온수를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

3.2 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 수행한 수치해석 결과가 어느 정도의 신뢰성을 갖는지 알 수 없다. 따라서 앞에서 기술한 Fig. 3 및 Fig. 4와 같은 태양열집열기 및 측정방법을 이용하여 실험을 수행하였다. 그 측정 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 오후 약 12시 30분 경부터 약 4시 30분 까지 태양열집열기의 투명 유리관 외부 표면온도와 태양열집열기 출구지점에서 물의 온도 변화를 측정하였다. 그림에서 알 수 있

는 바와 같이, 측정 개시 즉 오후 약 12시 30분 경은 대기온도 8℃, 유리관 표면온도 16℃, 온수의 온도는 21℃를 나타내었으며, 유리관 표면온도가 증가함에 따라 온수의 온도도 증가하며 그 변화 거동이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 오후 약 2시 50분 경에 약 46℃의 최고온도를 나타내었다. 그림에서 점선 내의 유리관 표면온도는 약 25℃이며 이때 온수의 온도는 평균 약 42℃인 것으로 관측된다. 20℃의 물을 태양열집열기에 유입시켜 31~54℃의 온수를 얻은 수치해석 결과와 비교하면, 실험에 의한 온수 온도(42℃)는 해석결과(31~54℃)의 거의 평균값에 이르는 것을 알 수 있다. 따라서 해석결과와 실험결과는 근사적으로 일치하고 있는 것으로 판단된다. 실험결과를 바탕으로 수치해석 결과와 비교하면, 냉수유량은 140 l/hr, 태양열흡수부의 온도는 60~80℃일 때 최적의 효율을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 실험에서는 물이 정지된 상태에서 측정한 결과이기 때문에, 실제로는 온수를 소비함에 따라 물이 유동하므로 온수온도는 더 감소할 것으로 예측된다. 온수온도가 더 감소하는 것을 보완하기 위해서는 태양열집열기의 설치 개수를 1개 이상으로 늘리면 될 것으로 판단된다. 실제 태양열집열기의 경우 집열기 개수를 20~40개 사이로 설치하는 경우가 많다. 오차를 줄이기 위해서는 해석결과와 유동하는 물을 가열하는 집열기 개수와의 관계 등을 검증하는 것도 필요하다. 보다 엄밀하게 오차를 줄이기 위해서는 유리관 표면온도의 측정이 아닌 블랙크롬을 코팅한 내부 지점의 온도를 측정하는 것이 타당할 것이다. 이렇게 함으로서 본 수치해석에서 물의 유입속도(즉 유량)와 태양열흡수관의 온도 범위 이외의 조건에서도 온수온도를 예측할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단된다. 향후 진공을 유지하면서 태양열흡수부의 온도를 측정할 수 있는 방법 등에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 온수 취득용 물탱크에 자연대류 방식을 도입하기 위하여 태양열집열기의 구조 및

성능 등을 이에 적합하게 고안하여 수치해석 및 실험을 통해 이를 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 수치해석 조건 내 온수취득 측면에서 물의 유속(유량) 감소보다 태양열집열기 흡수관 성능의 영향을 더 받을 수 있다.
2. 본 수치해석 조건에서 20℃의 물을 태양열집열기에 유입시켜 약 31~54℃의 온수를 얻을 수 있었다.
3. 실험적 방법에 의해 태양열집열기 유리관 표면의 온도가 약 25℃일 때 평균 온수온도는 약 42℃를 나타내었다. 실험결과를 바탕으로 수치해석에서 냉수유량 140 l/hr, 태양열흡수부의 온도 60~80℃일 때 최적 효율을 나타낸다.
4. 본 연구의 수치해석과 실험적 방법사이의 오차를 줄이면, 물의 유입속도(유량)와 태양열흡수관의 온도 범위 이외의 조건에서도 온수온도를 예측할 수 있는 가능성이 있으며, 향후 추가연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Cho, Y. T. and Jung, Y. G., "Technology for Efficiency Enhancement of Crystalline Si Solar Cell using Nano Imprint Process," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 30-35, 2013.
2. Hur, J. W., Kim, D. W. and Choi, S. D., "A Study on the Residual Stress Analysis of a-Si Thin Film Solar Cell," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 14-19, 2013.
3. Sim, H. S., "A Study of on a Power Control System for a Solar-Electric Vehicle," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 70-76, 2014.
4. Yang, M. H. and Oh, B. W., "A Monitoring System for Solar Street Lights Using Mobile Devices," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3,

- pp. 15-21, 2014.
5. Kim, B. A., Choi, K. H. and Roh, S. H., "Thermal Performance Analysis of Glass Evacuated SolarCollector with a Finned Tube," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 3, pp. 9-16, 2006.
 6. Kim, K. C., Paeng, J. G. and Yoon, Y. H., "A Study on the Annual Storage Efficiency of Concentric Evacuated Tube Solar Energy Collector System," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 4, pp. 50-55, 2008.
 7. Chun, T. K. and Yang, Y. J., "Study on Power Device using Solar Collector," New & Renewable Energy, Vol. 10, No. 4, pp. 22-28, 2014.
 8. Joo, H. J., Kim, J. B., Kim, J. B. and Kwak, H. Y. "Thermal Performance Study of Various Heat Pipes Working Fluid for Evacuated Tubular Solar Collector," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 4, pp. 97-103, 2007.
 9. Choi, B. W. and Yang, Y. J., "Study on Thermal Efficiency according to Configuration Change and Contact Resistance of Solar Collector with Single Evacuated Tube Type," Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 189-195, 2014.
 10. Kwak, H. Y. and Joo, H. J., "A Study on Thermal Performance of Heat Pipes with Different Condenser Shape for Evacuated Tubular Solar Collector," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 2, pp. 28-33, 2008.