

태양열 집열관 과열방지를 위한 지중열교환기 연구

황현창, Ri-Guang Chi, 이계복, 이석호*
충북대학교 기계공학부

A study of geothermal heat dump for solar collectors overheat protection

Hyun-Chang Hwang, Ri-Guang Chi, Kye-Bock Lee, Seok-Ho Rhi*
School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

요약 하절기 줄어드는 온수부하는 태양열 집열기 과열의 주된 원인이다. 과열방지목적으로 공냉 또는 차단막이 사용되는 데 이는 추가적인 기계적요소를 필요하게 되고 장기 운용 시 파손 등의 우려에 따라 그 신뢰도도 크게 저하된다. 지중열교환기는 지열을 열원으로 방열 또는 흡열을 진행하는데, 지열을 고 열원으로 하여 흡열을 목적으로 하는 연구가 대다수이며 지열원이 저열원으로 이용하는 방열에 대한 연구는 부족한 편이다. 그리하여 본 연구에서는 태양열집열관의 과열방지를 목적으로 하는 지중열교환기의 가능성 및 그 성능에 대한 연구를 진행하였다. 여름철 최대 150°C이상의 고온을 유지하는 태양열집열관의 열을 방출하기 위하여 1.2m의 하부 깊이를 갖는 50m 나선형 지중열교환기를 설치하였고 이를 통해 순간 냉각이 가능한 것으로 확인되었으며, 태양열집열관의 여름철 과열에 의한 파손을 방지할 수 있었다. 그리고 다양한 변수에 대한 이론적인 계산을 통하여 0.33kg/s의 최저 순환유량만 유지해주면 지열 열교환기의 길이에 따른 방열효과에 큰 영향을 미치지 않음을 판단할 수 있다. 또한 축열조와의 공동 사용시 냉각효과는 여름철 과열시 충분한 과열방지 제어가 가능한 것으로 조사되었다.

Abstract The heating load using solar hot water is lower in summer than in the other seasons. This decreased heating load leads to the overheating solar collectors and related components. To prevent overheating of the solar collectors, air cooling and shading shields were used. On the other hand, it requires additional mechanical components, and reduces the system reliability. The geothermal heat dump system to release the high temperature heat (over 150°C) transferred from the heat pipe solar collectors was investigated in the present study. Research on the heat dump to cool the solar collector is rare. Therefore, the present study was carried out to collect possible data of a geothermal heat dump to cool the solar collector. A helical type geothermal heat exchanger was buried at a 1.2m depth. Experimentally and numerically, the geothermal heat dump was investigated in terms of the effects of parameters, such as the quantity of solar radiation, aperture area of the collector and the mass flow rate. A pipe length of 50m on the geothermal heat exchanger was suitable with a 0.33 kg/s flow rate. The water reservoir was a possible co-operation solution linked to the geothermal heat exchanger.

Keywords : Geothermal heat dump, Overheating protection, Solar water collector, Heat Exchanger

이 논문(도서, 작품)은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2014)

*Corresponding Author : Seok-Ho Rhi (Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-2444 email: rhi@cbnu.ac.kr

Received April 5, 2016

Revised (1st May 2, 2016, 2nd June 2, 2016)

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

1. 서론

현재 에너지의 지나친 소비 및 그로 인한 환경문제로 세계 각국에서는 신재생에너지의 개발 연구에 몰두하고 있다. 태양열은 무궁무진한 에너지자원으로서 현재 난방과 온수에 널리 사용되고 있으며 진공관 내부 흡열관의 코팅과 집열기 성능실험 및 수치해석적 연구가 많이 진행되어 왔다.

하지만 여름철 온수부하의 저하로 진공관 내부의 히트파이프가 과열되어 손상되는 문제가 발생하고 있으며 이를 방지하기 위해 차광막 또는 방열팬을 가동하거나, 그리고 축열조의 물을 배수함으로써 열에너지를 버리는 등 방법이 있다[1]. 곽희열[2]의 연구에서 차광막 대신 태양광 집열관을 사용하여 가변형 집열부를 가지는 태양열·태양광 복합시스템을 연구 및 특허 출원 하였다. 배상은 등[3]은 하절기 이중진공관형 집열기의 과열방지에 관한 연구로 집열관의 반사판의 각도만 조절하여 반사된 태양광의 초점이 이중진공관을 벗어나도록 하여 집열량을 줄이는 방안을 연구하였다. 고광수 등[4]은 태양열 난방과 같이 규모를 늘릴 경우의 과잉 열에너지 및 겨울철의 동파위험 등을 방지하기 위하여 태양열원과 공기열원을 이용한 복합열원을 가지는 히트펌프를 사용하여 문제를 해결하기 위한 방안을 연구하였다.

히트파이프를 이용한 진공관은 300℃ 이하 고온에서 사용되지만 우리나라 하절기에 건물의 온수 및 난방 부하가 급격히 줄어들고 집중된 집열량으로 인해 축열조의 물의 온도는 급상승하게 된다. 이로 인해 집열기와 축열조 사이의 온도차가 작아져 열교환이 제대로 안됨으로써 집열기의 온도가 상승하여 집열기 전체에 나쁜 영향을 미치는 과열문제가 발생한다. 현재 대부분의 진공관형 집열기는 이러한 과열문제를 해결하기 위해 주로 대형 방열 팬을 설치하여 강제적으로 상승된 작동유체의 온도를 낮추는 시스템으로 작동된다.[3-4]

그러나 추가적인 냉각으로 인해 순환펌프의 작동전력 외에 추가적인 전력이 필요하며 방열 팬의 수명도 고려되어야 한다. 이외에 집열기 차광막 같은 경우 태양열을 완전히 차단시켜 순간적으로 집열기 온도를 낮추는 것이 가능하나 이 시스템도 추가적인 전력과 동절기 눈 쌓임으로 인해 빈번한 고장의 원인이 된다. 그리고 집열기를 완전히 차단하는 것은 전체 시스템 측면에서 비효율적이며 집열량에 따른 차광면적비율이 설계에 중요한 인자이

나 이는 작동환경 및 사용 환경에 따라 변하기 때문에 많은 어려움이 존재한다. 그러므로 추가적인 전력사용 없이 전체 시스템 효율을 높이면서 집열기에 축적된 열을 효과적으로 제거하는 연구가 필요한 실정이다.[1-6]

땅은 공기에 비해 높은 열전도도와 비열을 갖고 있어 최근에는 히트펌프의 열원으로 많이 사용되고 있다. 이렇게 고열원으로 흡열의 연구는 많이 진행되고 있으나 저열원으로 방열목적의 연구는 부족한 편이다. 따라서 본 연구에서는 태양집열관 과열방지 목적으로 하는 지중열교환기에 대하여 가능성과 성능에 대한 연구를 진행하였다.

2. 연구방법

2.1 설계이론

땅은 열교환기에 비해 무한한 체적을 갖고 있어 땅의 열저항은 이론적으로 구하기 힘들다. 그리하여 여기서는 열교환기 파이프 외벽의 온도를 일정하다고 가정하였다.

본 연구에서는 땅에 작은 부피로 많이 심는 것을 목적으로, 열교환기 파이프를 코일형태로 취하였다. 지중열교환기는 코일형태로 코일에서의 유동형태는 직선 관내 유동과 다르며 원심력에 의해 이차적 흐름(secondary flow)이 발생한다[7]. 코일에서의 유동특성을 설명하기 위해 다음과 같은 Dean 수가 정의된다[8].

$$De = Re \sqrt{\frac{d_i}{D_{coil}}} \quad (1)$$

코일형태의 관내유동에서 딘 와류(Dean vortex)에 의해 층류에서 난류로 바뀌는 현상이 늦어지며, 이때의 임계 Reynolds 수는 곡률비(curvature ratio)의 함수가 되고, 이를 결정하기 위해 많은 연구가 수행되어졌다[9]. 본 연구에서는 곡관에서의 임계 Reynolds 수를 계산하기 위해 Srinivasan et al.(1968)이 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다[7].

$$Re_{cr} = 2100 \left(1 + \frac{12}{\lambda^{0.25}} \right), \lambda < 200 \quad (2)$$

코일형태 관내유동에서의 누셀트수(Nusselt number) 및 열전달계수는 다음 식으로 구할 수 있다.[5]

$$\overline{Nu}_c = \frac{\bar{h}d_i}{k} = 0.328 Re^{0.58} Pr^{0.4}, 6,000 < Re < 180,000 \quad (3)$$

벽온도가 일정하기에 작동유체와의 평균 온도차를 구하기 위하여 산술평균온도차(Arithmetic Mean Temperature Difference, AMTD)를 사용하였다.[6]

$$\Delta T_{AMTD} = T_b - T_s, \quad T_b = \frac{T_{IN} + T_{OUT}}{2} \quad (4)$$

따라서 지중열교환기에 필요한 파이프의 길이는 다음 식으로 구할 수 있다.[3]

$$\dot{m}_p (T_{IN} - T_{OUT}) = \frac{T_b - T_s}{\frac{1}{h\pi d_i L_{coil}} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k L_{coil}}} \quad (5)$$

이론 설계에서 지중열교환기 파이프 길이계산의 오차 분석을 위해 실험장치의 오차를 사용하였고, 명시되지 않은 오차는 태양열 온수시스템의 성능평가를 위해 한국 에너지기술연구원과 한국표준협회에서 정한 기준[10]에 따라 허용오차범위를 사용하여 오차분석을 수행하였는데 그 결과는 Table-1과 같다. 표에서 볼 수 있듯이 전체 오차 중에서 관내경과 일사량이 전체 오차에 대한 오차 비중이 컸다.

Table 1. Error Analysis for the variable

Variables	Uncertainty (%)	Weight of Uncertainty (Total Sum: 100%)
Area	±1 %	2.12 %
Pipe Inner Diameter	±1 %	40.98 %
Flow rate	±5 %	0.01 %
Irradiation Rate	±5 %	52.93 %
Inlet Temperature	±0.8 %	3.47 %
Surface Temperature	±0.8 %	0.49 %

2.2 시뮬레이션 방법

Fig. 1은 지중열교환기 시뮬레이션을 위한 형상이다. 실제 지중열교환기의 윗부분은 대기에 접해있기에 대기의 영향을 고려하여 다양한 열교환기 파이프의 코일형태에 대해 해석을 진행하였다. 지표면에서의 자연대류 열전달 계산은 Vliet, G. G.와 D.C. Ross 관계식을 사용하였다.[11]

$$Nu = 0.17 (GrPr)^{1/4} (10^{10} < GrPr < 10^{15}) \quad (6)$$

그리고 땅을 고체로 가정하였고 손병후 등[12]에서의 물성치를 사용하였다.

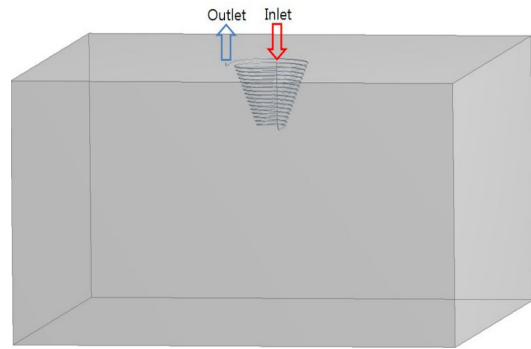


Fig. 1. Model of geothermal heat dump

2.3 실험장비

태양열 온수시스템의 과열방지 실험을 위해서 기존 산업현장 및 가정집에 쓰이는 단일진공관형 태양열 온수시스템을 설치하였으며 주요하게 태양열 집열부, 축열부, 지중열교환부, 그리고 이를 제어하는 제어부 및 각 부위를 연결한 파이프로 구성되었다. 그리고 태양열 온수시스템 및 지중열교환기의 온도상태를 확인하기 위해 K-type(정확도는 0.75%) 열전대를 사용하였고 데이터 기록장치는 요코가와 MX100 Recorder(정확도 0.05%)를 사용하였다. 데이터를 기록을 위한 Sampling data는 500 ms이며 열전대의 위치는 Fig. 2와 같다. 아울러 설치된 지중열교환기는 Fig. 3과 같이 나선형으로 매립되었다.

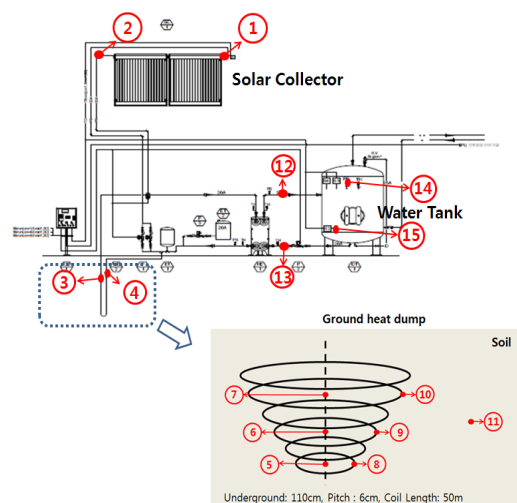


Fig. 2. Positions of thermocouples for solar water heat system



Fig. 3. Geothermal heat dump

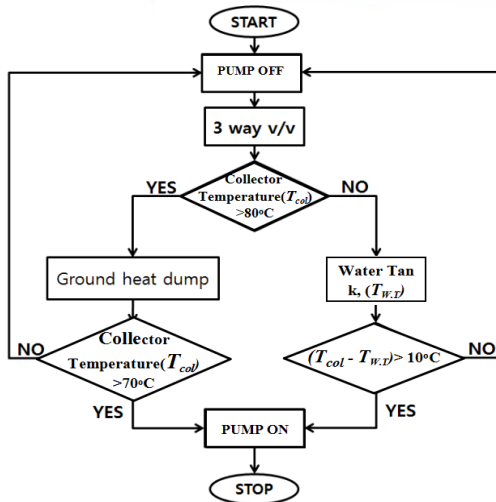


Fig. 4. Control logic of solar water heating system

본 시스템의 작동제어를 위한 온도측정에서는 Pt100 Ω를 사용하였으며 오차율은 0.1% 미만이다. Fig. 4에서처럼 온수시스템은 집열관 출구온도와 축열조온도를 바탕으로 제어가 이루어졌다. 축열조 축열 시, 순환펌프는 집열관출구-축열조하부의 온도차로 작동하는데 일반적인 작동 온도차는 10℃, 정지 온도차는 5℃이다. 그리고 축열조가 과열되게 되면 냉각이 안 되는 상황이기때문에 집열관이 과열되게 된다. 이때 3way 밸브가 작동하여 온수순환을 축열조에서 지중열교환기로 바꿔 과열된 집열관의 열을 지중으로 보내도록 설치되었다. 태양열 모니터링에 사용된 운영체제는 Window C이고 사용된 언어는 C+이며 상황에 따라 작동되는 모든 데이터는 텍스트 파일로 하루단위로 자동 저장된다.

본 연구에 사용된 집열기는 히트파이프식 단일 진공관형 집열기(SEIDO 1-16, Heat pipe vacuum tube with flat absorber)로 이중진공관형에 비해 유지보수가 쉽고 파이프에 걸리는 압력강하가 적기 때문에 작은 용량의

펌프만으로도 순환이 가능하다. 태양열집열관의 흡수 면적은 2.77m²로서 총16개의 집열관수로 이루어졌다.

그리고 지중열교환기의 파이프는 엑셀 파이프(20A)이고 1.1m 깊이에 설치하였으며 코일의 최대/소 직경은 1.5m/0.5m이고 간격은 6cm이며 총 50m 이다. 파이프내부 작동유체의 최대 유량은 0.75kg/s 이다.

3. 결과 및 분석

3.1 실험결과

실험은 태양열 집열관의 과열 방지를 목표로 하였기에 기온이 가장 높고 집열 및 과열효과가 큰 8월과 9월을 기준으로 진행하였다.

Fig. 5와 6은 축열조와의 열교환 없이 지중열교환기만 작동하였을 때의 태양열시스템과 지중열교환기, 땅의 온도 변화이다. 열교환기의 지속적인 작동결과를 통해 태양열 집열관의 최고 온도는 100℃, 지중의 온도는 40℃ 미만임을 알 수 있다.

Fig. 7은 지중열교환기 파이프 외부 표면온도를 변수로 파이프길이, 입구 온도에 따른 계산결과이다. 즉 표면온도가 54.64℃이며, 길이가 50m인 실험과 비교해보면 거의 일치한 결과를 가진다는 것을 판단할 수 있다.

Fig. 8은 일사량과 지중 온도를 변수로 필요한지중열교환기의 길이에 대한 계산결과이다. 즉 최대 이론일사량 1350W/m²와 65℃ 지중온도의 악렬한 조건하에서도 50m의 길이만 만족시켜도 충분한 방열효과가 있음을 판단할 수 있다.

Fig. 9로부터 최소유량인 0.33kg/s만 만족시키면 본 연구에서 시도된 내부 지열원온도 범위에서는 파이프의 길이에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 지중열원의 방열능력이 여름철 집열관 과열 부하를 충분히 해소할 정도의 열용량이 되는 것으로 판단되었다.

Fig. 10은 지중열교환기의 형상에 따른 시뮬레이션에서의 온도 결과이다. Type 1은 실험과 같은 형상이고, Type 2는 Type 1을 거꾸로 한 형상이며, Type 3은 수직으로 놓인 직경이 1m인 코일이며, Type 4는 수평으로 놓인 직경이 1m인 코일이다. 입/출구 온도차는 대개 0.23-0.28℃ 범위로서 비슷한 결과를 보여주었다. 따라서 굴토량 및 설치 용이도 등을 고려한 결과 나선형의 열교환기가 지중열원을 이용한 방열부로서 적정한 것으로 연구되었다.

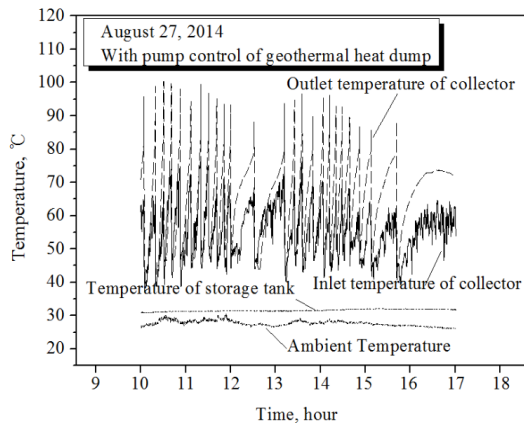


Fig. 5. Temperature variation of solar water heating system

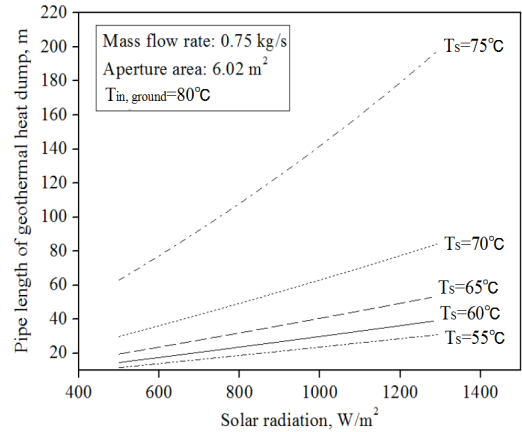


Fig. 8. Effect of solar radiation on the pipe length of geothermal heat dump

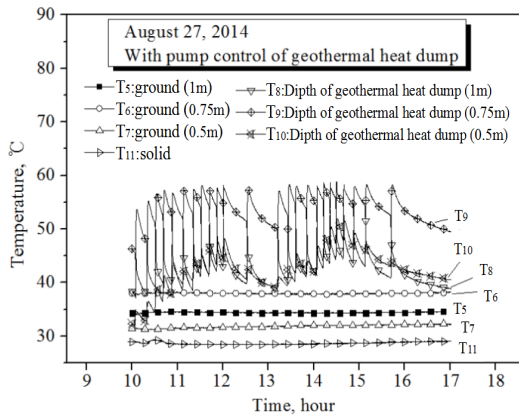


Fig. 6. Temperature variation of geothermal heat dump and ground

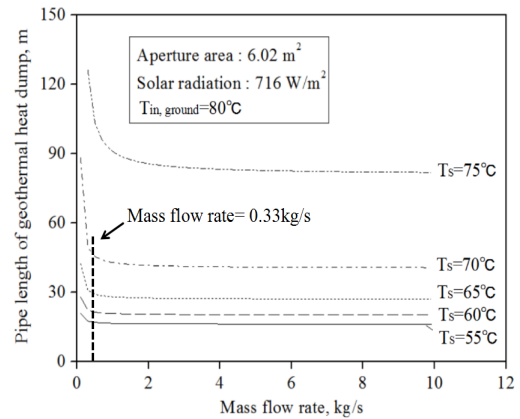


Fig. 9. Effect of mass flow rate on the pipe length of geothermal heat dump

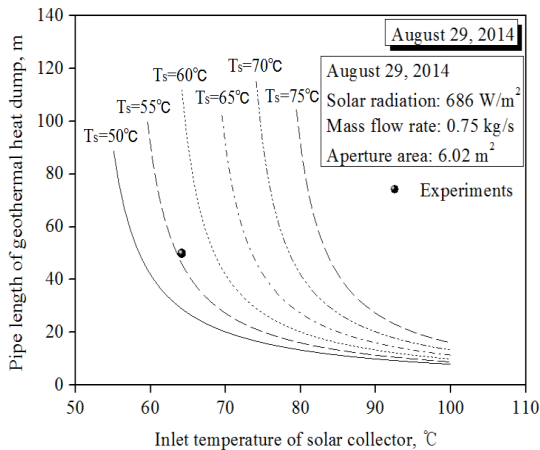


Fig. 7. Effect of inlet temperature on the pipe length of geothermal heat dump

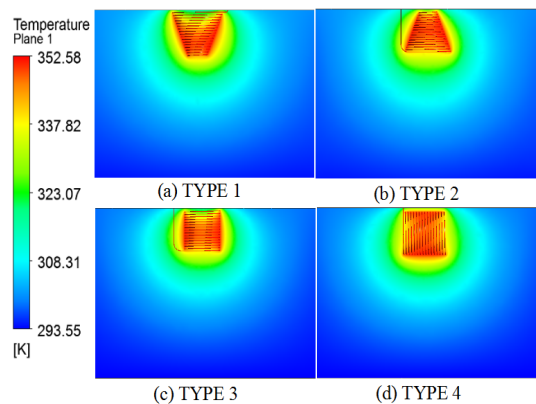


Fig. 10. Temperature contour of various type

4. 결론

본 연구에서는 이론계산, 시뮬레이션, 실험의 방법으로 태양열집열관에서의 과열방지를 위한 지중열교환기 연구를 진행하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 지중열교환기는 1.2m 깊이의 지중에서도 충분하며 최대 이론일사량 하에서도 가능하다.
2. 순환펌프가 0.33kg/s의 최저유량만 만족시키면 파이프의 길이는 방열효과에 큰 영향을 미치지 않음을 판단할 수 있다.
3. 실험에서 축열조의 영향을 무시하였지만, 실제 태양열시스템에서 함께 사용하였으면 훨씬 우수한 방열효과를 얻을 수 있을 것이다.

Nomenclature

C_p	: heat capacity, $kJ/(kg \cdot K)$
d_i	: inner tube diameter, m
d_o	: outer tube diameter, m
$\bar{h}$	: average heat transfer coefficient, $W/(m^2 \cdot K)$
k	: thermal conductivity, $W/(m \cdot K)$
L_{coil}	: coil length, m
$\dot{m}$	: mass flow rate, kg/s
P_r	: prandtl number
Re	: Reynolds number
T_b	: bulk temperature, K
T_{IN}	: inlet temperature of geothermal heat dump, K
T_{OUT}	: outlet temperature of geothermal heat dump, K
T_s	: surface temperature, K
ΔT_{AMTD}	: arithmetic Mean Temperature Difference, K

References

- [1] D. W. Lee, "Overview and Status of solar system," The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol.40, No. 5, pp. 05-10, 2011.
- [2] H. Y Kwak, "Solar thermal and solar hybrid system for preventing solar overheating," Korean Association of Air Conditioning Refrigerating and Sanitary Engineers, Vol. 30, No. 11, pp. 63-69, 2013.
- [3] S. G Bae, "A study on reducing temperature rise of twin-glass evacuated tube solar collector during summer time," THE KOREAN SOLAR ENERGY SOCIETY, Vol. 33, No. 3, pp. 36-41, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7836/kse.2013.33.3.036>
- [4] K. G. Ko, "Solar assisted and air heat source using multi source heat pump system," The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 12, pp. 67-72, 2005.
- [5] L. Guo, X. Chen, Z. Feng and B. Bai, "Transient convective heat transfer in a helical coiled tube with pulsatile fully developed turbulent flow," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 19, pp. 2867-2875, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)80003-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(98)80003-3)
- [6] J. P. Holman, heat transfer, Mc Graw Hill, 2004.
- [7] S. Vashisth, V. Kumar, and K. D. P. Nigam, "A review on the Potential Applications of Curved Geometries in Process Industry", American Chemical Society, Vol. 47, No. 10, 3pp. 291-3337, 2008.
- [8] L. Guo, X. Chen, Z. Feng, and B. Bai, "Transient convective heat transfer in a helical coiled tube with pulsatile fully developed turbulent flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 19, pp. 2867-2875, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)80003-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(98)80003-3)
- [9] Y. K. Lee, J. H. Y, M. H. Kang, , "Flow analysis of turbomachinery based on CFX's Pressure-Based Coupled and Various turbulent Model", Journal of Turbomachinery, Vol. 7, No. 5, pp. 82-90, 2004.
- [10] S. S. Noh, "Demonstration research for heat pipe of simplicity type of a vacuum tube solar heat system", Chosun University, Master Thesis, 2014.
- [11] H. C. Hwang, "A Study on the Thermal-Flow Characteristics of Heat Pipe Energy System(Solar Water System and AMTEC)," Chungbuk National University Master's Thesis, 2015.
- [12] B. H. Sohn, S. W. Park, H. S. Choi, J. H. Wi, J. H. Lim, "Evaluation of Conventional Prediction Models for Soil Thermal Conductivity to Design Horizontal Ground Heat Exchangers," Korean Geotechnical Society, vol. 29, No. 2, pp. 5-14, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2013.29.2.5>

황 현 창(Hyun-Chang Hwang)

[정회원]



- 2013년 2월 : 충북대학교 공과대학 기계공학과 (기계공학사)
- 2015년 3월 : 충북대학교 공과대학 원 기계공학부 (기계공학석사)

<관심분야>

열전달, 응용열공학, 전산유체

CHI RIGUANG

[정회원]



- 2010년 7월 : 중국 하얼빈공정대학교 원자력공학과 (학사)
- 2015년 8월 : 한국 충북대학교 기계공학과 (석사)

<관심분야>

열 관련 에너지 분야

이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

난류유동, 유체기계, 전산유체

이 석 호(Seok-Ho Rhi)

[정회원]



- 1996년 3월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2000년 10월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

열교환기, 히트파이프, 열전발전, 열공학