

심층수 이용 열교환기 개발을 위한 기초연구: 열교환기 재질이 열교환기 성능에 미치는 영향

권정태¹, 이창경¹, 허철², 조맹익², 김기영³, 권영철^{3*}

¹호서대학교 기계공학부, ²한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양CCS연구단,
³선문대학교 기계공학과

A Fundamentals Study on Heat Exchanger using Deep Ocean Water: Effects of Material on Heat Transfer Performance

Jeong-Tae Kwon¹, Chang-Kyung Lee¹, Cheol Huh², Meang-Ik Cho²,
Ki-Young Kim³ and Young-Chul Kwon^{3*}

¹School of Mechanical Engineering, Hoseo University

²Offshore CCS Research Unit, Maritime & Ocean Engineering Research Insititue,
Korea Institute of Ocean Science and Technology

³Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

요 약 본 논문은 심층수 이용 열교환기 개발을 위해 열교환기의 구성 재질로서 티타늄, 알루미늄, 스테인리스, 철, 구리와 알루미늄의 전착코팅 관 등을 이용한 이중관 열교환 실험 장치를 구성하여 열교환 성능을 실험하였다. 기존 심층수 이용 열교환기는 대부분 티타늄 금속으로 이루어져 있다. 티타늄의 재질은 해양 심층수에 적합하나 고가의 금속이다. 티타늄 금속을 대체할 금속으로 알루미늄, 스테인리스, 철, 구리와 알루미늄 전착코팅 관 등을 고려하여 시험하였다. 또한 EES 프로그램을 사용하여 각 관들의 열전달률을 해석하고 이중관 열교환 실험결과와 비교 분석하였다. 열교환시의 성능에 대한 해석값과 실험값을 비교해 보았을 때 10% 내외의 오차범위 내에서 잘 일치하였다. 또한 티타늄 대비 구리관이 가장 좋은 결과치를 보였고 알루미늄 전착코팅 관은 다소 낮은 열전달 수치를 보여 주었으나, 전착처리된 코팅관의 내부식성이 우수한 것을 고려한다면 티타늄 대체가능성이 충분하다고 사료된다.

Abstract This paper presents the effects of the tube materials on the heat transfer performance of double-tube heat exchangers for the development of heat exchangers using deep sea water. Heat exchangers made of titanium, aluminum, stainless steel, iron, copper, and aluminum with carbon black 0.015mm and 0.15mm coating were tested. Also, the heat transfer rate of each heat exchanger was calculated by using EES program. The calculated values were compared with the experimental ones, and the deviations were less than 10%. From the above experiment and analysis, aluminum with carbon black 15 coating can be considered the most promising candidate for the replacement of titanium heat exchanger.

Key Words : Deep ocean water, Heat exchanger, Heat transfer, Material

기 호 설 명

h : 열전달계수 [W/m²·℃]
Pr : Prandtl 수

Re : Reynolds 수
V : 속도 [m/s]
D : 직경 [m]

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 '해양심층수의 에너지 이용 기술 개발' 결과임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Young-Chul Kwon(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-10-8523-0923 email: yckweon1@sunmoon.ac.kr

Received September 9, 2013

Revised October 2, 2013

Accepted October 10, 2013

- k : 열전도도 [$W/m \cdot ^\circ C$]
- L : 길이 [m]
- \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
- C_p : 비열 [$J/kg \cdot ^\circ C$]
- T : 온도 [$^\circ C$]

그리스 문자

- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- μ : 동점성 계수 [$kg/m \cdot s$]
- ϵ : 유용도

하첨자

- H_i : 내관 입구
- C_i : 외관 입구
- H_o : 내관 출구
- C_o : 외관 출구

1. 서론

우리나라는 2008년부터 저탄소 녹색성장을 화두로 삼아 태양광, 지열, 풍력, 해양 에너지 등 신재생에너지 기술개발 및 보급 확대를 통한 에너지 자립국가를 구현하고자 노력하고 있다. 삼면이 바다인 우리나라에서는 신재생 에너지원 중 해양에너지의 파급효과가 우수할 것으로 예상된다. 이러한 해양에너지는 조력, 조류, 파력, 및 심층수를 이용한 온도차 발전 등 다양한 방법으로 영구적 이용이 가능하다[1].

하지만 심층수의 열원을 이용한 시스템들은 기존 시스템들에 비해 배관, 장비 등의 초기 투자 비용이 상대적으로 많이 소요됨으로 인해 향후 보급 확대를 위해 기존방법보다 비용절감 및 효율증대를 나타낼 수 있는 기술개발이 필요하다. 특히 열교환기 부분은 부식이 잘되지 않는 재질로써 가격이 고가인 티타늄(Titanium)으로 만들어지기 때문에 다른 재질에 비해 많은 비용이 든다.

Kim 등[2]의 부식특성 실험을 바탕으로 티타늄(Ti), 스테인리스강(SUS304), 알루미늄(Al), 구리(Cu)관을 선정하였고 부식을 고려하여 알루미늄 관을 카본블랙으로 전착 코팅하여 고온에서 장기부식에 따른 실험을 수행하였다.

본 연구는 심층수를 이용한 열교환기를 기존 열교환기에 비해 효율을 증대시키며 비용을 줄이기 위한 목적으로 기초연구를 수행하고 있으며, 이중관 열교환기를 이용하여 다양한 재질의 열전달률을 비교하였다.

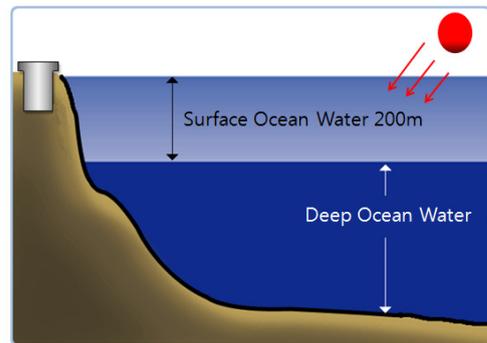
2. 해양 심층수를 이용한 냉난방 시스템

해양 심층수(Fig. 1)란 태양광이 도달하지 못하는 수심 200m 이상의 깊은 곳에 존재하는 바닷물로서, 태양열, 풍력 등의 자연 에너지와 마찬가지로 자원으로서 저밀도 저농도이며 그 양은 막대하여 다양한 자원적 가치를 보유하고 있다[3,4].

해외의 해양심층수에 대한 개발사례로는 섬으로 이루어져 바다와 접한 일본의 코치현, 오키나와현 등이 있으며, 미국 하와이의 NELHA(자연에너지 연구기구)에서도 실시되고 있다. 또한 우리나라에서도 강원도 삼척, 울릉도 등에서 해양 심층수에 대한 연구가 이루어지고 있다.

해수 열에너지는 일반적으로 그 보존량이 무한하다고 볼 수 있으며, 우리나라 인천, 부산, 울산, 강릉, 군산, 목포, 서귀포시 등 7개 도시에서의 해수 열에너지 보존량은 27,160 Tcal/year 정도인데, 이는 우리나라 가정 및 산업용 냉난방, 급탕에너지소비량의 약 10%에 해당하는 막대한 에너지다. 따라서 해수 열원 에너지는 우리나라 해안의 인구밀집 도시에서 그 이용가능성이 상당히 크며 해수에너지의 냉난방, 급탕열원으로서 우수한 장점을 가지고 있다. 또한 건물의 냉난방, 급탕 열원 외에도 지역냉난방, 공장 열원 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 이에 해양에너지를 이용할 수 있는 냉난방 시스템의 연구가 해양 심층수 이용 시스템의 기초자료로서 중요한 것이다.

해수 냉난방 시스템은 표층수의 온열과 심층수의 냉열을 열교환하는 시스템으로, 미국, 일본 등의 선진 국가에서는 지역 냉난방 및 발전 시스템으로 사용되고 있다[5]. 우리나라의 경우, 삼면이 바다인 것을 고려한다면 심층수의 냉열은 사용 가능성이 충분한 실정이지만 선진국에 비하여 기술개발이 아직 부족하다고 볼 수 있다.



[Fig. 1] The concept of deep ocean water

히트펌프를 이용한 냉난방 시스템은 겨울철 난방시에

는 응축기의 배열, 여름철 냉방시에는 증발기의 냉열을 이용하여 냉난방할 수 있는 시스템이다. 일반적으로 해수는 수심 25~50미터에서 약 7℃의 수온을 유지하기 때문에 여름철 건물의 냉방 시스템과 열교환을 통하여 냉방 에너지를 절약할 수 있다. 이 방식은 온도차가 비교적 적게 나오는 곳에서도 사용할 수 있으므로 우리나라에도 적용이 가능하다.

해양에너지를 이용한 냉난방시스템은 심층수를 이용하기 때문에 기존의 열교환기와는 다른 부식, 파울링, 열교환기의 재질 및 형태에 따른 다양한 고려 사항을 검토하여야 한다.

3. 열교환기 설계 및 해석 방법

3.1 이중관 열교환기 설계

3.1.1 설계 방법

이중관 열교환기 설계에서 Reynolds 수는 아래와 같다.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \tag{1}$$

여기서 관직경은 Ø12.7 × 0.7T로 설정 하였다. 위에서 구한 Reynolds 수에 대하여 Nusselt 수를 구한 후 열전달 계수는 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$h = \frac{k}{D} Nu \tag{2}$$

관의 열저항(3)과 열용량률(4), 최대 열전달 계수(5)를 다음과 같이 구하였다.

$$R = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} \tag{3}$$

$$= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$C = \dot{m} C_p \tag{4}$$

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{H,in} - T_{C,in}) \tag{5}$$

이중관 열교환기는 대향류로 설계하였고 열전달은 아래 (6), (7)식과 같이 구하였다.

최종적으로 구해진 열전달률을 비교하여 이중관 열교환기를 설계하였다.[6]

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C)]}{1 - C \exp[-NTU(1 - C)]} \tag{6}$$

$$\dot{Q} = \epsilon \dot{Q}_{max} \tag{7}$$

3.1.2 실험 방법

Table 1은 이중관 실험의 실험관으로써 선정된 관의 재질이다. 관 재질로서는 지금 해양 심층수 이용 열교환기에 많이 쓰이고 있는 티타늄을 중점으로 SUS304, Al과 Carbon black 코팅 처리된 Al 등으로 정한 뒤, 이를 이중관 열교환기로 실험하여 열전달률을 구하였다.

[Table 1] Thermal conductivity of materials and diameter of the tube

Tube Type	k[W/mK]	Diameter of the tube[mm]
Ti	22	12.7 * 0.7t * 1500L
SUS304	16.2	12.7 * 0.9t * 1500L
Al	237	12.0 * 1.0t * 1500L
Cu	385	12.7 * 1.0t * 1500L
Al_Carbon_15	30.8	12.0 * 1.0t * 1500L
Al_Carbon_150	3.9	12.1 * 1.1t * 1500L

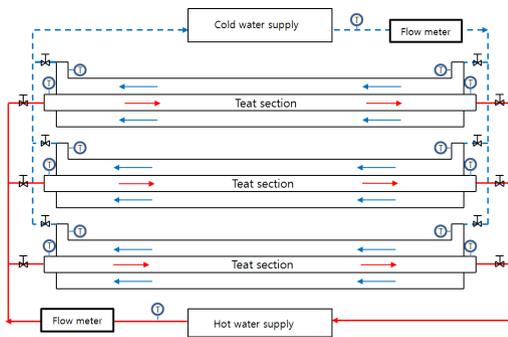
해양 심층수 시스템 열교환기에서 가장 많이 쓰이는 재질로는 티타늄을 들 수 있다. 철보다 약 60% 정도로 가볍고 알루미늄보다 1.6배 무거운 특징이 있고, 가격은 1kg당 약 7,000원으로 고가의 재질에 해당된다.

스테인리스 강은 최소 11%의 크롬이 들어가는 강철 합금으로, 1kg당 가격은 약 2,500원이며 철의 최대 결점인 내식성의 부족을 개선할 목적으로 만들어 진 내식성 강의 총칭이다.

알루미늄은 철에 이어 구리와 함께 가장 널리 사용되는 어지는 비철 중 가장 가벼운 금속이다. 가격은 1kg당 약 1,950원이며 대기 중의 산소와 반응하여 표면에 얇고 치밀한 산화피막을 형성함으로 인해 부식을 방지한다.

붉은색의 광택이 나는 구리는 비교적 무른 금속으로, 가공하기 쉬우며 전성과 연성이 풍부하다. 구리는 열과 전기의 전도율이 높아 실생활에 널리 사용되고 있으며 가격은 1kg당 약 7,800원으로 스테인리스강과 알루미늄보다는 비싼 편이다.

이중관 열교환 실험장치는 Fig. 2와 같이 개략도로 표시할 수 있다. 내관에서는 온수공급 장치로부터 30℃의 고온수를 흘려보내고, 외관의 경우 저온수를 심층수의 온도를 고려하여 7℃로 설정하여 실험하였다.

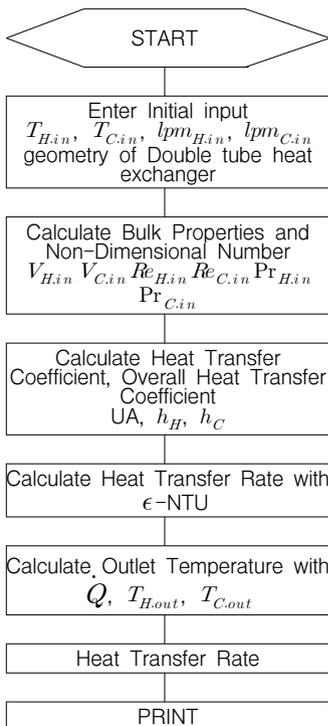


(a)



(b)

[Fig. 2] (a) Schematic diagram of the experimental apparatus, (b) experimental apparatus

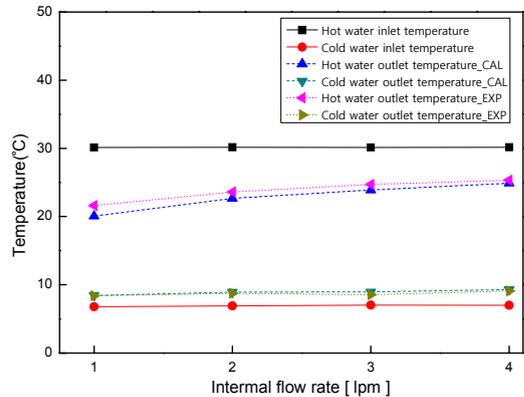


[Fig. 3] Analysis algorithm of double pipe heat exchangers

Fig. 2와 같이 입출구의 온도를 측정하였으며 1차 실험은 내관 고온수의 입구온도를 30℃, 외관 저온수의 입구온도를 7℃로 유지했을 때, 각각 내관의 유량을 1, 2, 3, 4 lpm으로 니들 밸브를 통하여 조절하면서 외관의 유량은 10 lpm으로 유지하였고, 2차 실험은 내관 고온수의 유량을 2 lpm로 유지하고 외관 저온수의 유량을 니들밸브를 사용하여 각각 6, 8, 10, 12 lpm으로 변화시키면서 고온수 및 저온수의 입·출구 온도차와 열전달률 확인하였다. 실험 시 온도센서와 유량센서의 보정과 반복 측정 및 단열로 불확실성을 최대한 줄였다.

3.2 해석 방법

Fig. 3은 실험데이터를 해석하기 위해 작성된 알고리즘 과정을 설명한 순서도이다. 해석은 설계 시 수행하였던 식(1)~식(7)까지의 계산 과정, 즉 $\epsilon-NTU$ 방법을 사용하였다. 해석수행 알고리즘은 내관의 고온수를 기준으로 하여 열전달률 및 물의 출구온도를 계산하였다. 성능 예측 프로그램에서 내관 및 외관의 유동의 열전달 계수는 Dittus-Boelter 상관식 (8)을 사용하였다.



[Fig. 4] Outlet temperature according to changes in flow rate

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3} \quad (8)$$

다양한 유량 및 온도 조건에 대한 해석방법으로 EES(Engineering Equation Solver) 프로그램을 사용하여 도출하였다.

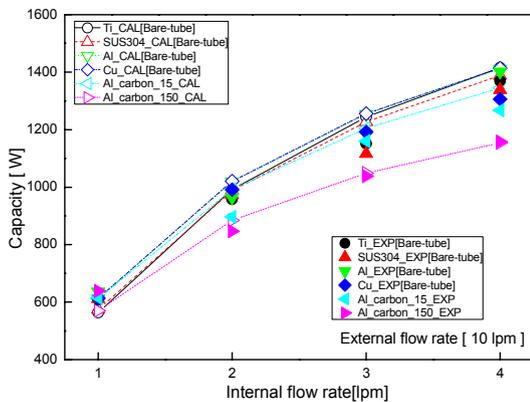
Fig. 4는 내관의 유량에 따른 고온측과 저온측의 입·출구 온도변화이다. 내관의 유량이 많을수록 입출구의 온도차는 줄어들며 열전달률은 증가한다. 고온측과 저온측의 실험으로 측정한 고온수와 저온수의 출구온도를 EES로 계산한 출구온도와 비교한 그래프로 각각의 출구온도 값

이 유사하게 거동함을 알 수 있다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 내관의 유량이 증가함에 따라 내관의 입출구 온도차는 줄어드는 반면 외관의 입출구 온도차는 다소 늘어났다. 이는 내관의 유량이 증가함에 있어 열이 전달되는 시간이 줄어들음으로 내관의 출구온도가 입구온도와 가까워지는 것이다. 외관의 온도는 내관의 온도변화가 적음으로 열이 전달되는 온도가 높아지기 때문에 출구의 온도가 높아지는 현상을 볼 수 있다.

4. 열교환기 실험 및 해석 결과

위의 Fig. 5, 6은 유량에 따른 이중관 열교환기 실험값과 EES 해석값을 비교한 결과이다. 6개 관에 대한 열전달량은 금속의 열전도도에 따라 Cu, Al, Al_Carbon Black_15, Ti, SUS304, Al_Carbon Black_150 순으로 높았다.

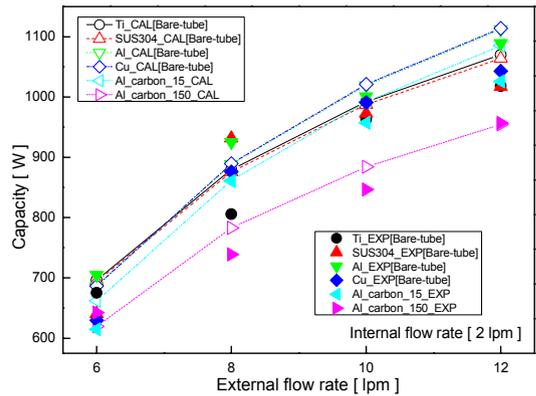
Fig. 5는 1차 실험으로 외관의 유량을 10 lpm으로 유지하며 내관의 유량을 1, 2, 3, 4 lpm으로 변화시키면서 실험과 해석을 하였다. 실험값과 EES 해석값을 비교하면 Cu의 경우에 내관 1 lpm에서 약 0.2%의 편차를 보였고 Al_Carbon Black_150의 경우에 약 12%의 편차를 보였다. 낮은 lpm에서는 열전달률이 적기 때문에 상대적으로 오차가 크게 나타난 것으로 보인다. 실험값과 해석값은 평균적으로 약 4.5%의 편차를 가졌다.



[Fig. 5] Comparison of experiment and analysis result by the heat transfer rate of each tube according to flow rate of the inner tube

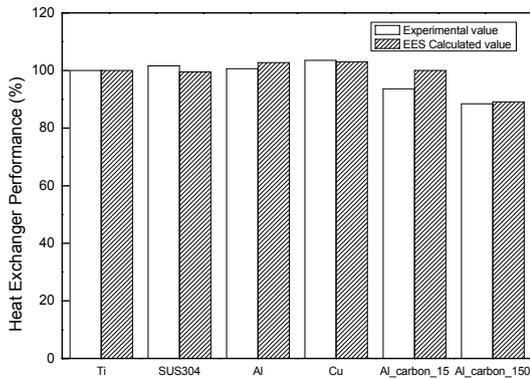
Fig. 6은 2차 실험으로 내관의 고온수 유량을 2 lpm으로 유지하며 외관의 저온수 유량을 6, 8, 10, 12 lpm으로 변화시키면서 실험과 해석을 하였다. 실험값과 EES 해석

값을 비교하면 Al_Carbon Black_15의 외관의 유량 12 lpm에서 약 0.3%의 편차를 보이며, Ti의 외관 8 lpm에서 약 8%의 편차를 보였다. 실험값과 해석값은 평균적으로 약 4%의 편차를 가졌다. Fig. 5, 6의 결과로부터 본 연구에서 개발된 EES 프로그램은 실험값을 해석하거나 예측하는데 충분한 신뢰성을 가지는 것으로 보인다.



[Fig. 6] Comparison of experiment and analysis result by the heat transfer rate of each tube according to flow rate of the outer tube

Fig. 7은 Fig. 5, 6에서 얻어진 열전달량을 종합하여 이중관 열교환기의 재질에 있어서 내관의 유량이 2 lpm, 외관의 유량이 10 lpm 인 경우에 실험값과 EES 해석값을 비교하여 열교환기 성능을 비교한 그림이다. 티타늄의 열전달률을 실험값과 해석값의 기준으로 설정하였다. 실험값에서는 티타늄 대비 SUS304, 알루미늄, 구리, 알루미늄 Carbon black 15 μ m, 150 μ m은 각각 1.5%, 0.6% 3.4% -6.4%, -11.7%로 구리에서 가장 높은 열전달률을 보이며 알루미늄 Carbon black 150 μ m이 가장 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 재질의 기본 물성치에 있어 열전도도가 가장 높은 구리, 가장 낮은 알루미늄 Carbon black 150 μ m과 같은 결과 값으로 열전도도가 가장 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. EES 해석값에서는 티타늄 대비 SUS304, 알루미늄, 구리, 알루미늄 Carbon black 15 μ m, 150 μ m은 각각 -0.5%, 2.7%, 2.9%, -0.1%, -10.9%으로 실험값과 동일하게 구리에서 가장 높은 열전달률을 보이며 알루미늄 Carbon black 150 μ m에서 가장 낮은 열전달률을 보여주고 있다. 1kg당의 티타늄, SUS304, 알루미늄 가격을 비교하게 되면 SUS304와 알루미늄의 가격이 약 2~3배 이상 저렴하면서 열전달률은 많은 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다.



[Fig. 7] Comparison of experimental and analytical values of the heat transfer performance

5. 결론

본 연구에서는 심층수 이용 열교환 시스템에 사용하기 위한 금속재질의 특성에 따른 기초연구를 수행하였다. 기존의 해양 심층수 이용 열교환기에서 많이 쓰이는 티타늄 열교환기의 대체금속을 알아보기 위하여 이중관 열교환기 실험 및 EES해석을 통해 열전달률을 비교해 보았다.

- (1) 실험과 EES 해석으로부터, 실험값 대비 해석값의 평균편차가 약 5% 미만으로 이중관 열교환기 해석에 있어 본 연구에서 개발된 EES 해석 프로그램의 신뢰성을 충분히 확보하였다.
- (2) 부식을 방지하기 위하여 알루미늄에 카본블랙 코팅은 두께가 두꺼워 질수록 부식에는 강하겠지만 열전달률에 있어서는 상당히 많은 열저항이 발생하는 것으로 판단되므로 실제 현장적용을 위한 추가 연구가 필요하다.
- (3) 티타늄을 대체할 수 있는 금속으로는 부식 및 환경을 고려하였을 때, SUS304와 알루미늄 그리고 알루미늄 Carbon black 코팅이 열전달 성능 및 열전도도 면에 있어서 그 대체 가능성을 확인할 수 있었다.

References

[1] J. Y. Park, S. H. Jin, S. Kim, H. j. Kim, LCC Evaluation for Cooling System using Deep Ocean Water, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 2, pp.357-362, 2010

[2] K. Y. Kim, K. W. Lee, Y. C. Kwon, J. T. Kwon,

C. Huh, Study on metal corrosion characteristics according to the long-term corrosion under high temperature, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 475-477, November, 2012

- [3] M. Y. Jo, Y. S. Suh, L. H. Jang, A Property Analysis on Spatial Distribution of Sea Water Temperature Difference for Site Selection of Ocean Thermal Energy Conversion Plant, Energy Engg., Vol. 8, No4, pp. 567~575, J(1999)
- [4] H. J. Kim, D. S. Moon, D. H. Jung, S. J. Yoon, Investigation and Analysis of the Characteristic Stability of Deep Ocean Water (I), Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 7, No. 1. pp.30~34, February 2004
- [5] H. J. Kim, G. T. Kim, S. H. Park, W. Y. Oh, H. J. Kim, A Feasibility Study on Thermal Energy Resource in Deep Ocean Water Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 1. pp. 9-18, February 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2012.15.1.009>
- [6] O. B. Kwon, Introduction to Thermodynamics & Heat Transfer, 4th ed, McGraw-Hill, pp 346-391, 2008

권 정 태(Jeong-Tae Kwon)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2005년 2월 : 남부대학교 자동차기계공학과 교수
- 2005년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

냉동공조, 열전달, 나노유체

이 창 경(Chang-Kyoung Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

냉동공조, 열전달

김 기 영(Ki-Young Kim)

[준회원]



- 2012년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (대학원)

<관심분야>

냉동공조, 열교환기, 전산 해석

허 철(Cheol Huh)

[정회원]



- 1995년 2월 : 경희대 원자력공학과 (공학사)
- 1997년 1월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 1월 ~ 2000년 4월 : 삼성 엔지니어링
- 2006년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)

- 2008년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양플랜트, 공정해석, 열전달, 이산화탄소 포집 및 저장

권 영 철(Young-Chul Kwon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한국전력 전력연구원

- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

냉동공조, 열전달, 전산해석

조 맹 익(Meang-Ik Cho)

[정회원]



- 2005년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학사)
- 2007년 6월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 7월 ~ 2008년 12월 : (주) 한라공조
- 2008년 12월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원

<관심분야>

이산화탄소 포집 및 저장, 열전달, 이상유동