

유기랭킨사이클(ORC)을 위한 주전열면 열교환기의 채널 종횡비에 따른 유동 및 열전달 특성

성민제,¹ 안준*²

¹국민대학교 대학원 기계공학과

²국민대학교 기계시스템공학부

EFFECTS OF CHANNEL ASPECT RATIO ON FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PRIMARY SURFACE HEAT EXCHANGER FOR ORC

M.J. Sung¹ and J. Ahn*²

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kookmin Univ.

²School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.

A series of numerical simulation has been carried out to study thermo-hydraulic characteristics of a primary surface type heat exchanger, which is designed for the evaporator and condenser of a geothermal ORC. Working fluid is geothermal water at hot side and R-245fa, which is a refrigerant designed for ORC, at cold side. Aspect ratio of the channel and Reynolds number are considered as design parameters. Nusselt number is presented for the Reynolds number ranging from 50 to 150 and compared to existing correlations. The result shows that higher aspect ratio channel gives better heat transfer performance within the range of investigation.

Key Words : 유기랭킨사이클(ORC), 주전열면 열교환기(Primary Surface Heat Exchanger), 종횡비(Aspect Ratio)

기호설명(Nomenclature)

AR : 채널 종횡비 (= H/S)
 c_p : 비열 [J/kg-K]
 D_h : 수력직경 [m]
 H : 채널 높이 [mm]
 h : 열전달 계수 [W/m^2-K]
 k : 열전도도 [$W/m-k$]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 Nu : 누셀트 수 (= hD_h/k)
 ΔP : 압력손실 [Pa]
 q : 열전달양 [W]
 Re : 레이놀즈 수 (= $\rho D_h U_b/\mu$)
 s : 채널 간격 [mm]

T : 온도 [K]
 ΔT_{lm} : 대수평균 온도차 [K]
 μ : 점도 [$N-s/m^2$]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 L : 채널 주기 [mm]

하첨자

i : 입구
 o : 출구
 b : 유동평균
 w : 채널벽면

1. 서론

화석연료의 고갈과 지구 온난화 문제를 해결하기 위하여 세계 각국은 신재생에너지의 개발 및 보급 활성화에 노력을 기울이고 있다. 신재생에너지 가운데 지열은 바이오매스, 대수력과 함께 가장 많은 에너지를 공급하고 있는 에너지원임에도 불구하고 우리나라에는 화산활동과 관련된 고온성 지열

Received: September 2, 2013, Revised: November 25, 2013,

Accepted: November 26, 2013.

* Corresponding author, E-mail: jahn@kookmin.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.035>

© KSCFE 2013

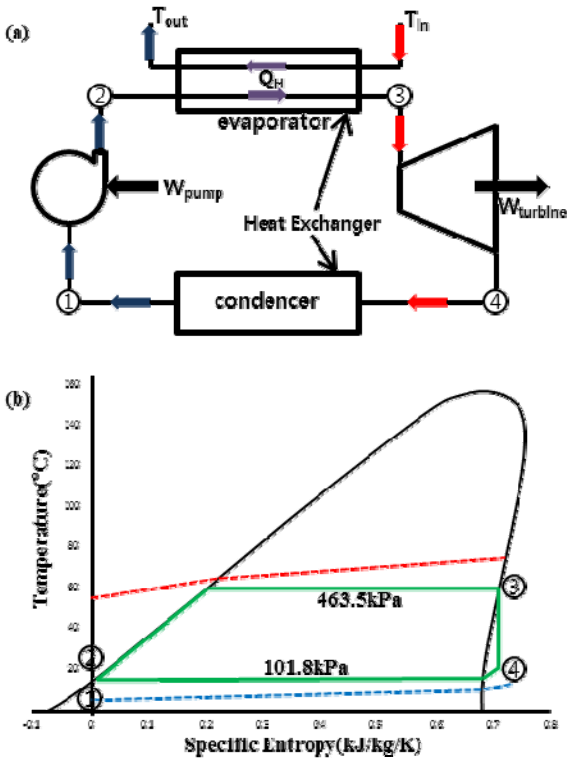


Fig. 1 Geothermal ORC system; (a) Schematic diagram; (b) Cycle in T-s diagram

에너지가 존재하지 않아 중요성이 상대적으로 저평가되어 있다[1]. 그러나 지열은 기상조건에 좌우되는 태양광이나 풍력과 달리 기존의 화력, 원자력 발전과 함께 기저부하를 담당할 수 있는 장점이 있어 미국의 경우 2050년이 되면 지열이 기저부하의 10%를 담당할 것으로 전망하고 있으며 이와 같은 전망이 현실화될 경우 현재보다 40배 많은 지열 발전이 건립될 것을 의미한다[2].

우리나라에서 지열은 열펌프를 이용한 냉난방목적에만 활용되고 있으나 경북 포항이나 인천 석모도 지역에서 지온 증가율 40°C/km에 이르는 경제성을 갖춘 지열원이 나타나 있어 향후 지열발전을 기대할 수 있을 것으로 보고되고 있다[2]. 지열발전을 위해서는 180°C 이상의 고온이 필요한데 시추 비용 및 기술, 지열수 확보 등의 문제로 우리나라에서는 어려운 것으로 보고되고 있다. 180°C가 되지 않는 저온 열원의 경우 작동유체로 물 대신 냉매를 활용하는 유기 랭킨 사이클(ORC: Organic Rankine Cycle)을 적용할 수 있는데 2007년 미국 알래스카에서 74°C의 지열원으로 작동하는 ORC 기반 저온 지열 발전에 성공함으로써 국내 적용에 대한 기대감이 높아지고 있다[3].

유기 랭킨 사이클은 Fig. 1(a)와 같이 펌프, 증발기, 팽창기, 응축기로 구성된다. 시스템에 따라서는 팽창 후에 남은 열을

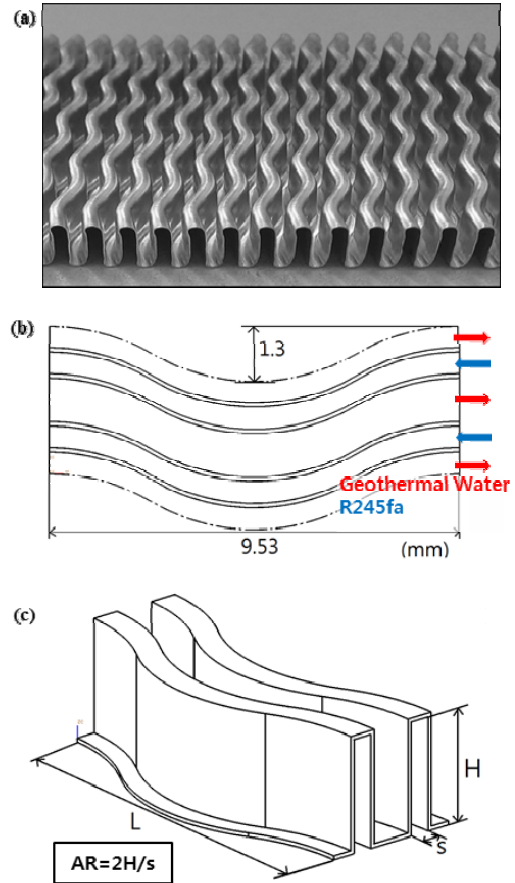


Fig. 2 Primary surface heat exchanger; (a) Photograph; (b) Cross-section in flow direction; (c) Geometric parameters

재활용하기 위해서 재생기를 사용하기도 하지만[4] 100°C 이내의 저온을 활용하는 시스템에서는 사용하지 않는 것이 일반적이다[5]. 저온의 열원을 활용할 경우 작동유체와 열원의 온도차가 감소하여 Fig. 1(a)에 증발기, 응축기로 제시한 열교환기의 체적이 과도하게 커지게 된다. 앞서 언급했던 알래스카에 설치된 시스템의 경우 200 kW급의 체적이 6 m × 2.5 m × 3.5 m에 이르고 중량도 15톤이나 나간다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 증발기 및 응축기에 마이크로 가스터빈에 적용되는 주전열면 형태의 열교환기[6]를 적용하는 방안이 제안되었다. 주전열면 열교환기는 Fig. 2에 보인 것과 같이 얇은 금속판으로 주름진 형태의 작은 채널을 구성하여 만들어진 열교환기로서 현존하는 열교환기 중에서 유용도가 가장 높은 것으로 평가받고 있다[7].

주전열면 열교환기는 주름진 채널로 구성되어 주름비[8], 꺾임각[9], 종횡비[10]에 대한 연구 결과가 발표된 바 있다. 발표된 기존 연구들은 마이크로 가스터빈의 리큐퍼레이터를 대상으로 하고 있어 작동유체를 공기로 가정하였고 본 연구에

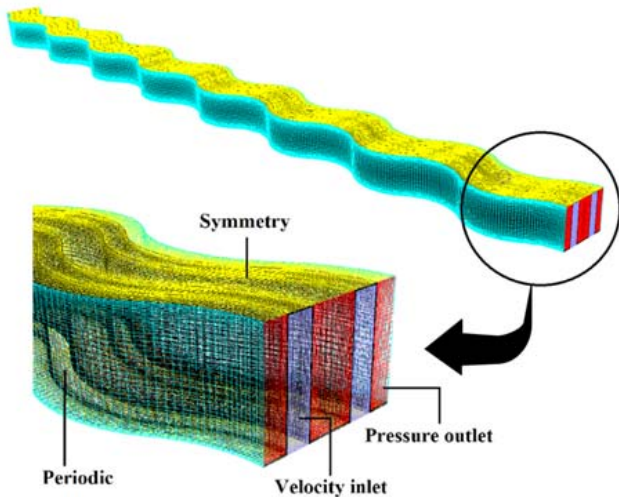


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

서 관심이 있는 영역보다 높은 300에서 3,000까지 Reynolds수에서 해석 또는 실험이 수행되어 기존 연구 결과를 Prandtl수 및 Reynolds수의 범위가 다른 지열 ORC를 위한 증발기 또는 응축기의 설계에 직접 활용하기에는 무리가 있다. 또한 기존 연구[8-10]에서는 벽면의 온도 경계조건으로 등온 조건(또는 일정한 온도조건)을 부과하고 한 쪽 채널만을 대상으로 연구를 수행하였는데 층류 유동의 경우 경계조건에 따라 열전달 특성이 달라진다. 따라서 정확한 설계를 위해서는 지열수 측 및 냉매 측을 모두 포함하고 열교환의 전도를 고려한 복합열전달 해석 또는 실험이 필요하다.

이에 본 연구에서는 주전열면 열교환기에 대하여 ORC에 적용할 경우에 해당하는 Prandtl수와 Reynolds수에 대하여 복합열전달 해석을 수행하였다. 증발기와 응축기에서는 냉매 측에서 상변화가 발생하지만 본 연구에서는 단상유동에 대한 해석만을 수행하였다. 주전열면 열교환기의 열전달 특성에는 주름비, 꺾임각, 종횡비 등이 영향을 주는데 본 연구에서는 채널의 종횡비가 열전달 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서 수치해석을 수행한 주전열면 열교환기는 Fig. 2(a)에 제시한 형태를 갖는데, 시작품의 설계 조건인 Fig. 2(b)에 제시한 사양을 기준으로 해석을 수행하였다. 열교환기의 특성상 폭방향으로 같은 형상이 반복되므로 본 연구에서는 2개의 유로만을 계산영역으로 설정하였고 유동방향으로는 입구영역을 고려하여 143 mm에 대하여 계산을 수행하였다.

주전열면 열교환기는 0.1 mm 수준의 두께를 갖는 박판으로 제작되므로[7] 전도를 포함한 복합열전달 해석을 위해서는

많은 수의 격자가 요구된다. 본 연구에서는 300만개 이상의 육면체격자를 사용하여 격자계를 구성하였다(Fig. 3). 앞서 기술한 바와 같이 계산 영역은 반복되는 열교환기 내부의 2개의 유로로 설정하였고, 주기적으로 반복되는 유로의 측면에 주기조건을 부과하였다. 또한 전열면이 상하 대칭적으로 쌓이는 구조이므로 상하면은 대칭조건을 주어 경제적인 계산이 되도록 하였다. 유로의 입구와 출구에는 각각 속도 입구조건과 압력 출구조건을 부과하였다.

본 연구에서는 수치 해석을 위하여 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 적용된 지배방정식은 연속 방정식, 비압축성 Navier-Stokes 방정식 및 에너지방정식을 사용하였으며, 연속방정식과 운동량 방정식은 SIMPLE해법으로 연결하였다. 레이놀즈수가 작은 층류유동이므로 별도의 난류모델은 사용하지 않았고, 고온부와 저온부의 온도차도 작으므로 복사 열전달 또한 고려하지 않았다.

본 연구에서 Reynolds수와 함께 변수로 파악한 채널종횡비는 Fig. 2(c)에 정의하였다. 종횡비가 열전달 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 2(b)를 기준으로 냉매측 유로의 너비만을 각각 1.2, 1.4, 1.5, 2.0배로 늘려가며 총 5개의 종횡비를 갖는 형상에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석을 수행한 채널의 크기 및 종횡비는 Table 1에 정리하였다. Reynolds수의 경우 지열수 측을 100으로 고정한 상태에서 냉매(R-245fa, Table 2)측의 Reynolds수를 50에서 150까지 25간격으로 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

종횡비 및 Reynolds 수에 따른 열교환기의 성능 특성을 비교하기 위하여 Nusselt 수와 마찰계수를 사용하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$f = \Delta P \times \frac{D_h}{L} \times \frac{2}{\rho \cdot V^2} \quad (1)$$

$$N = \frac{h D_h}{k} \quad (2)$$

Table 1 Geometric Parameters

AR (2H/s)	s (mm)	H (mm)
5.686	1.02	5.8
7.582	0.765	5.8
8.123	0.714	5.8
9.477	0.612	5.8
11.373	0.51	5.8

Table 2 Properties of R-245fa

ρ	c_p	k	μ
1373.7	1311.8	0.094165	0.00048211

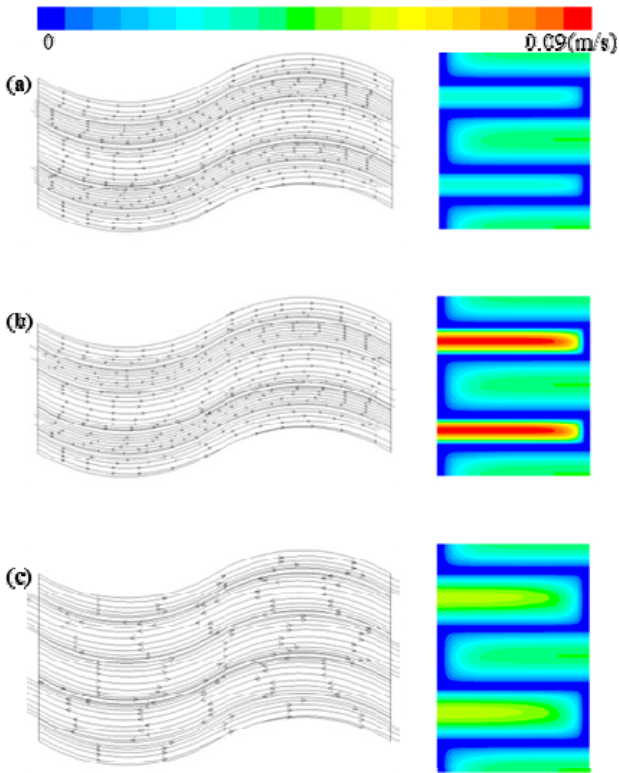


Fig. 4 Flow fields from CFD pathline (left) and streamwise velocity (right); (a) AR=11.373, Re = 50; (b) AR = 11.373; Re = 150; (c) AR = 5.686, Re = 150

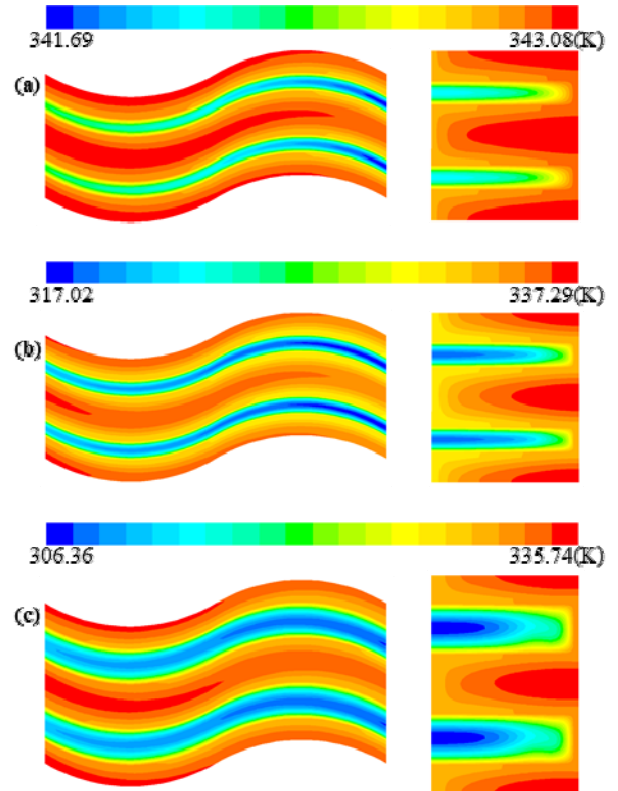


Fig. 5 In streamwise cross-section (left) and in streamwise normal plane (right); (a) AR = 11.373, Re = 50; (b) AR = 11.373, Re = 150; (c) AR = 5.686, Re = 150

$$q = \dot{m} C_p \Delta T = h A \Delta T_{lm} \quad (3)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{w,o} - T_{b,o}) - (T_{w,i} - T_{b,i})}{\ln((T_{w,o} - T_{b,o}) / (T_{w,i} - T_{b,i}))} \quad (4)$$

본 연구에서 해석을 수행한 열교환기의 경우 Reynolds수가 작아 입구거리가 전체 유로에 비해 매우 작으므로 대부분의 유로에서 완전발달 유동이 형성되어 있다고 할 수 있다. 완전 발달 영역에 대한 관계식을 얻기 위하여 지열수측 입구에서부터 66.71 mm에서 76.24 mm까지 한주기의 결과를 분석하였다. 분석을 수행한 영역의 유동장과 온도장을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 제시하였다.

유적선의 경우 Reynolds수가 가장 높고 종횡비가 작아 유동박리가 발생할 가능성이 가장 높은 Fig. 4(c)의 경우에도 유동 박리가 관찰되지 않았다. Fig. 4, 5 우측에 제시한 유동방향에 수직한 단면에서 속도 및 온도 분포를 보면 Poiseuille 유동[11]에 가까운 유동 및 온도 분포를 보이고 있다.

Fig. 5의 (a)와 (b)를 비교하여 보면 Reynolds수가 커지면서 열전달이 더 활발하게 일어나며 최고온도가 더 낮음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 5의 (b)와 (c)를 비교하여 보면 채널종횡비가 낮아졌음에도 불구하고 온도장의 최고 온도가 더 낮아, 열

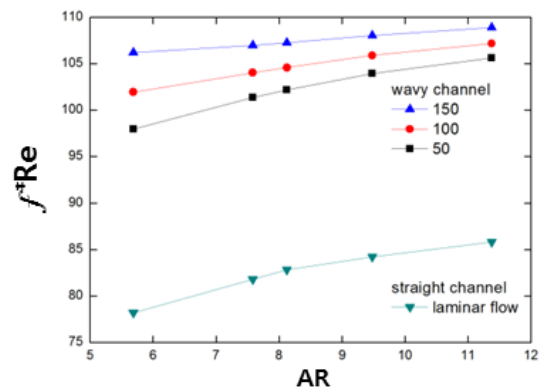


Fig. 6 Friction factor for wavy and straight channel

전달이 더 많이 이루어졌음을 알 수 있다.

층류유동의 경우 직선의 사각덕트에서는 채널종횡비가 일정하면 마찰계수와 Reynolds수의 곱이 일정한 값을 갖고 종횡비가 증가하면 값이 커지는 것으로 알려져 있다[11]. 수치해석 결과 주전열면 열교환기에 사용되는 파형채널의 경우 마찰계수가 직선 덕트보다 큰 값을 보이고 종횡비가 일정한 경우에도 Reynolds수에 따라 증가하는 경향을 보인다(Fig. 6).

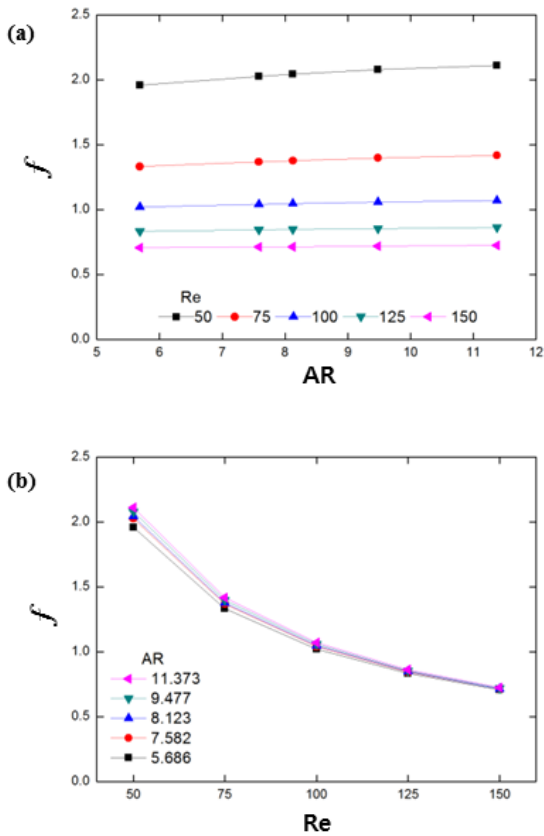


Fig. 7 Friction factor;
(a) for $5.686 < AR < 11.373$; (b) for $50 < Re < 150$

따라서 마찰계수는 Reynolds수와 종횡비의 함수가 되며 기존 관계식에서 -1이었던 Reynolds수의 지수에도 수정이 필요하게 된다. 마찰계수를 Reynolds수 및 종횡비의 함수로 표현한 관계식을 구하기 위하여 분석을 수행하였고 분석에 사용한 자료를 Fig. 7에 제시하였다. 제시한 결과를 바탕으로 비선형회귀분석을 수행하여 마찰계수를 Reynolds수와 종횡비의 함수로 표현한 식 (5)와 같은 관계식을 얻었으며, R^2 값은 0.998이다.

$$f = 76.69 Re^{-0.92} - 2.05 AR^{-1.70} \quad (5)$$

$(50 \leq Re \leq 150, 5.686 \leq AR \leq 11.373)$

종횡비에 따른 열전달특성을 비교하기 위하여 Nusselt 수를 이용하였다. 완전 발달된 층류유동에서의 일정한 채널종횡비를 가지는 직선형 사각덕트에서 Nusselt수는 Reynolds수에 관계없이 일정한 값을 갖는다[11]. 그러나 파형 채널의 경우 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Reynolds수가 커질수록 Nusselt수 또한 증가하는 결과를 얻었다. 또한 $Re = 125$ 이하의 경우에는 채널종횡비가 커질수록 Nusselt수가 증가하는 경향을 보인

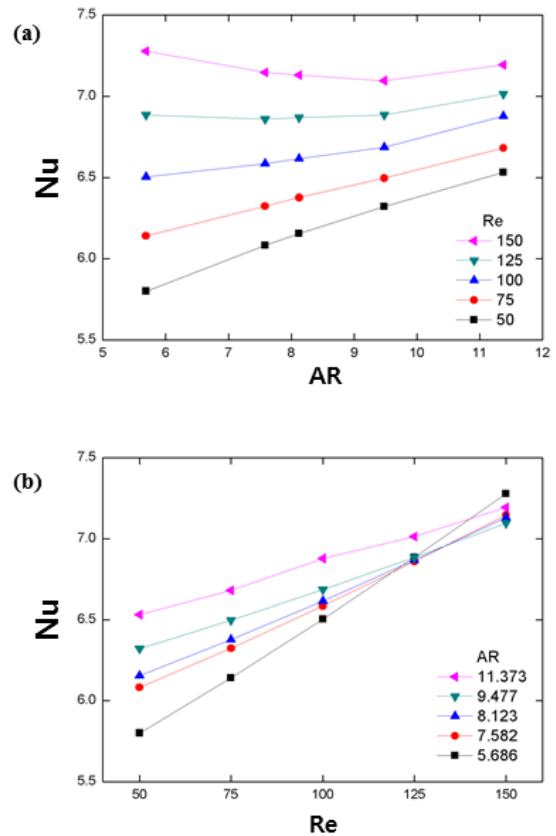


Fig. 8 Nusselt number;
(a) for $5.686 < AR < 11.373$; (b) for $50 < Re < 150$

다. 그리고 채널 종횡비가 작아질수록 Reynolds수에 대한 Nusselt수의 변화가 민감해 짐을 알 수 있는데, 이는 채널종횡비가 작아질수록 단면적이 증가하여 유량 또한 급격히 변화하게 되어 이러한 경향을 보이는 것으로 판단된다. Fig. 8에 제시한 결과에 대하여 비선형회귀분석을 수행하여 Nusselt수를 Reynolds수와 종횡비의 함수로 표현한 다음과 같은 관계식을 얻었으며, R^2 값은 0.924이다.

$$Nu = 3.73 \times 10^{-3} Re^{1.178} + 4.88 AR^{0.082} \quad (6)$$

$(50 \leq Re \leq 150, 5.686 \leq AR \leq 11.373)$

4. 결 론

본 연구에서는 지열 ORC에 적용하기 위한 주전열면 열교환기에 대하여 복합열전달 해석을 통해 채널 종횡비의 영향을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 관찰한 Reynolds수 범위에서 주름진 채널 내부에서 유동 박리현상이 관찰되지 않았고 Poiseuille 유동

에 가까운 유동장 및 온도장이 관찰되었으나 유동 및 열 전달 특성은 직선 덕트와는 차이를 보였다.

- (2) 주전열원 열교환기 내부에서 마찰계수의 Reynolds수에 대한 의존성이 직선 덕트에 비해 8% 정도 변화하였고 중황비와 Reynolds수를 포함한 관계식을 제안하였다.
- (3) 열전달계수는 직선 덕트와 달리 Reynolds수에 따라 증가하는 경향을 나타내었고 Nusselt수를 Reynolds수 및 중황비의 함수로 나타낸 관계식으로 정리하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과이며 지원에 감사드립니다(B3-2434).

References

- [1] 2011, Baik, Y.-J., Kim, M., Chang, K.-C, Lee, Y.-S. and Ra, H.S., "Power Optimazation of Organic Rankine-cycle System with Low-Temperature Heat Source Using HFC-134a," *Trans. KSME B*, Vol.35-1, pp.53-60.
- [2] 2009, Baik, Y.-J., Kim, M., Chang, K.-C, Yoon, H.K., Lee, Y.-S. and Ra, H.S., "Analysis of HFC-245fa Organic Rankine Cycle for Geothermal Power Generation," *Trans. KSGEE*, Vol.5-1, pp.1-6.
- [3] 2007, Kim, J.-S. and Lee, C.-K., "A Study of the Influence of Condensing Water Temperature on Low Temperature Geothermal Power Generation," *Trans. KSGEE*, Vol.3-2, pp.17-23.
- [4] 2011, Park, C.Y., Hong, W.-K. and Kim, J.-M., "Thermodynamic Efficiencies of Organic Rankine Cycles with a Feed Liquid Heater or Regenerator," *Trans. SAREK*, Vol.23-10, pp.662-669.
- [5] 2012, Eom, H.S., Yoon, C.S., Kim, Y.M., Shin, D.G. and Kim, C.G., "Optimization Study on the Performance Analysis of Organic Rankine Cycle for Characteristics of Low Temperature Heat Sources," *Trans. SAREK*, Vol.24-1, pp.51-60.
- [6] 2008, Jeong, J.H., Kim, L.S., Ha, M.Y., Kim, K.S. and Cho, J.R., "Various Heat Exchangers Utilized in Gas-Turbine for Performance Enhancement," *Int. J. Air-Cond. Ref.*, Vol.16-1, pp.30-36.
- [7] 2000, McDonald, C.F., "Low-cost Compact Primary Surface Recuperator Concept for Microturbines," *Applied Thermal Eng.*, Vol.20, pp.471-497.
- [8] 2002, Utriainen, E. and Sunden, B., "A Numerical Investigation of Primary Surface Rounded Cross Wavy Ducts," *Heat Mass Transf.*, Vol.38, pp.537-542.
- [9] 2004, Jang, I.H., Hwang, S.D. and Cho, H.H., "Effects of Corrugation Angle on Local Heat/Mass Transfer in Wavy Duct of Heat Exchanger," *Trans. KSME B*, Vol.28-7, pp.789-799.
- [10] 2005, Jang, I.H., Hwang, S.D. and Cho, H.H., "Effects of Aspect Ratio on Local Heat/Mass Transfer in Wavy Duct," *Trans. SAREK*, Vol.17-6, pp.569-580.
- [11] 2005, Kays, W., Crawford, M. and Weigand, B., *Convective Heat and Mass Transfer 4th Ed.*, McGraw-Hill, pp.67-129.