

2차원 파형 채널의 형상변화에 따른 열유동 특성

김기완*[†] · 김선주*

* 국방과학연구소

Thermo-Hydraulic Characteristics of Two-Dimensional Wavy Channels with Different Shape Parameters

Ki-Wan Kim*[†] and Sun-Ju Kim*

*Agency for Defense Development

(Received November 12, 2012 ; Revised October 29, 2013 ; Accepted November 11, 2013)

Key Words: Wavy Channel(파형 채널), Laminar Flow(층류유동), Avionics Cooling(항공전자장비 냉각), Periodic Fully Developed Flow(주기적 완전발달유동)

초록: 본 연구에서는 2차원 파형 채널의 여러 형상($0.5 \leq \epsilon \leq 1.5$, $0.1 \leq \gamma \leq 0.4$)에 대한 층류 열유동 수치해석을 수행하고, 형상변화에 따른 열유동특성을 비교 분석하였다. 전자장비 냉각용으로 적용되고 있는 PAO(Polyalphaolefin)를 작동유체로 고려하였고, 균일한 물성치와 주기적으로 발달한 유동 및 채널벽면에서의 등온 조건을 가정하였다. 층류유량조건($1 \leq Re \leq 1000$)에서 레이놀즈수에 따른 유선 및 온도 분포, 등온 Fanning 마찰계수, Colburn 계수를 제시하였고, 분석 결과 낮은 레이놀즈($Re < 50$) 구간에서는 채널주름비가 크고 채널간격비가 작을수록, 높은 레이놀즈($Re \geq 50$) 구간에서는 채널주름비와 채널간격비가 모두 클수록 열전달이 향상되었다.

Abstract: Two-dimensional laminar numerical analyses were carried out for investigating the thermo-hydraulic characteristics of wavy channels with different shape parameters ($0.5 \leq \epsilon \leq 1.5$, $0.1 \leq \gamma \leq 0.4$). PAO (polyalphaolefin), which is used for electronics cooling, is considered as the working fluid. In addition, constant properties, periodically developed flow, and uniform channel wall temperature conditions are assumed. Streamline and temperature fields, isothermal Fanning friction factors, and Colburn factors are presented for different Reynolds numbers in the laminar region ($1 \leq Re \leq 1000$). The results show that heat transfer is enhanced when the channel corrugation ratio (γ) is large and channel spacing ratio (ϵ) is small in the low Reynolds number region ($Re < 50$) and when γ and ϵ are large in the high Reynolds number region ($Re \geq 50$).

- 기호설명 -

A : 채널 골깊이 [m]

c_p : 비열 [J/kg·K]

d_h : 수력직경(=2S) [m]

f : Fanning 마찰계수(= $\frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho u_m^2}$)

H : 채널 높이 [m]

h : 열전달계수(= $q/\Delta T_{LMTD} \cdot A_p$) [W/m²K]

j : Colburn 계수(= $Nu/RePr^{1/3}$)

k : 열전도도 [W/m·K]

L : 채널 길이 [m]

\dot{m} : 질량유량(= $\rho A_c u_m$) [kg/s]

NX : x 방향 격자수

NY : y 방향 격자수

Nu : Nusselt 수(= hd_h/k)

Pr : Prandtl 수(= $c_p \mu/k$)

q : 열전달양(= $\dot{m} C_p (T_{b,o} - T_{b,i})$) [W]

Re : 레이놀즈 수(= $\rho u_m d_h/\mu$)

S : 채널 간격 [m]

T_b : 매질평균온도 [K]

ΔT_{LMTD} : 대수평균온도차 [K]

u : x방향 속도[m/s]

[†] Corresponding Author, kiwankim@add.re.kr

u_m : 평균속도 [m/s]
 v : y방향 속도[m/s]

그리스문자

γ : 채널주름비(=2A/L)
 ϵ : 채널간격비(=S/2A)
 μ : 점성계수 [N·s/m²]
 ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

m : 평균
 o : 출구
 i : 입구
 w : 벽

1. 서론

열전달을 증대시키는 연구는 열교환기 성능 향상 및 이에 따른 크기 감소를 위한 중요한 연구 분야이다. 열전달을 증대시키다는 것은 열전달계수 또는 열전달이 발생하는 면적을 증가시키는 것으로, 크게 세가지로 나눌 수 있다. 첫째는 열전달이 발생하는 표면의 거칠기를 조절하여 면적은 유지하면서 열전달계수를 증가시키는 방법이며, 둘째는 핀(fin)과 같은 형상을 추가하여 열전달계수는 유지하면서 면적을 증가시키는 방법이다. 마지막으로 offset strip, louvered, pin 형태의 핀과 같이 면적과 열전달계수를 동시에 증가시키는 방법이 있다.⁽¹⁾

파형(wavy)채널 형태의 핀(fin)도 면적 및 열전달계수를 동시에 증가시키는 방안으로 직관형 채널보다 열전달 면적이 증가하면서, 채널을 지나가는 유동의 박리 및 재부착에 의한 재순환영역의 생성 및 발달로 열전달이 증가하는 특징이 있다.⁽²⁾ 또한, Louvered 나 offset strip 핀과 같이 장기간 사용 시 이물질이 미세한 틈에 끼게 되어 유동을 방해하는 구조를 갖지 않고, 제작이 용이하여, 판-핀(plate-fin) 또는 핀-튜브(fin & tube) 형태의 열교환기에 많이 적용되고 있다.^(3,4) 이로 인해 파형 또는 주름을 갖는 채널에 관한 연구가 많이 진행되고 있는데, Ismail, L. S.⁽³⁾ 등은 공기를 작동유체로 하는 항공기용 판-핀 열교환기에 적용할 여러 형태의 파형채널들에 대한 난류(2000 ≤ Re ≤ 10000) 영역의 열유동해석을 수행하

고 설계 데이터(f, j) 및 감항인증 관련 규격들을 제시하였다. Zhang, J. Z. 등⁽⁵⁾은 공기를 작동유체로 하는 2차원 파형 채널들(0.1 ≤ ε ≤ 3.0, 0.125 ≤ γ ≤ 0.5)에 대한 층류(10 < Re < 1000) 영역의 열유동해석을 수행하고 파형 채널의 형상변화에 따른 열유동특성을 분석 및 제시하였다. Metwally, H. M. 등⁽⁶⁾은 2차원 파형 채널들(ε=0.5, 0 ≤ γ ≤ 1)에 대한 층류영역(10 < Re < 1000)의 열유동해석을 수행하고 여러 유체(Pr=5,35,150)에 대한 열유동특성을 비교하였다. Xin, R. C.⁽⁷⁾ 등은 동일한 단면적을 갖는 파형채널에 대한 층류영역의 열유동해석을 수행하고 형상에 따른 열유동특성을 분석하였다. 대부분의 연구가 공기를 작동유체로 하며, 주기적으로 발달한 유동을 고려하였고, 에너지방정식의 경계조건으로 등온조건을 가정하였다.

항공용 전자장비 냉각을 위해서 사용되는 냉각매체는 주로 공기이다. 최근 들어 방열밀도가 증가하면서 전자장비 냉각매체로 EGW나 PAO⁽⁸⁾를 이용한 수냉방식이 채택되고 있다. EGW는 물에 부동액을 첨가한 형태로 열전달 능력이 PAO보다 우수하나, 누설 시 전자장비 단락의 위험이 있고 알루미늄의 부식을 방지하기 위한 부가물을 첨가

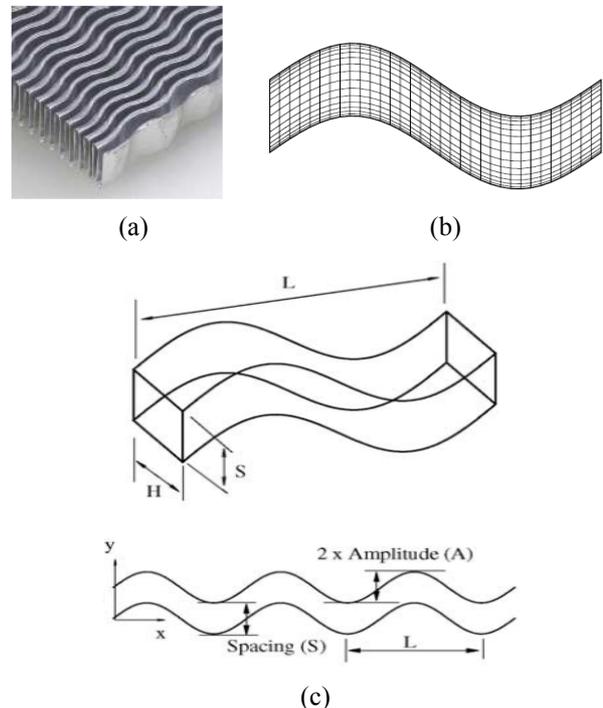


Fig. 1 Wavy-plate channels: (a) Typical sinusoidally corrugated plate fins, (b) typical grid in the computational domain, and (c) geometrical description and a two-dimensional representation of flow channel

하여 사용하며, 주기적으로 점검 및 교환해야 한다. PAO는 비전도성 액체로 누설 시 전자장비의 손상을 방지할 수 있으나, 열전달 능력이 EGW에 비해 떨어지고 저온에서 점성이 증가하는 특징이 있다. SAAB나 ELTA같은 유럽 및 이스라엘 업체는 EGW를, Raytheon이나 Northrop Grumman과 같은 미국 레이더 업체는 PAO를 선호하고 있다. 김기완 등⁹⁾은 주어진 파형채널의 형상에서 수치 해석 절차를 기존의 해석결과와 비교하여 검증하고, 공기와 EGW, PAO에 대한 열적 특성을 비교 및 분석하였다.

본 논문의 목적은 PAO를 작동유체로 사용하는 항공기용 열교환기 및 전자장비 주요 발열원의 냉각관에 적용가능한 파형채널의 형상변화에 따른 열유동특성을 비교하고, 설계데이터를 도출하는데 있다. 이를 위해 2차원 파형 채널의 여러 형상($0.5 \leq \epsilon \leq 1.5$, $0.1 \leq \gamma \leq 0.4$)에 대한 층류 열유동 수치해석을 수행하였다. 작동유체가 균일한 물성치를 갖으며, 주기적으로 발달한 유동 및 채널벽면에서의 등온 조건을 가정하였다. 층류유동 조건($1 \leq Re \leq 1000$)에서 레이놀즈수에 따른 유선 및 온도 분포, 등온 Fanning 마찰계수, Colburn 계수를 비교하여 열유동 특성을 분석하였다. 이 과정에서 설계데이터를 획득하였고, 이는 PAO를 작동유체로 하고 파형채널을 적용하는 열교환기 및 냉각관 설계에 유용한 데이터가 될 것으로 사료된다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

그림1은 일반적인 파형 채널의 편형상(a)과 파형 채널에 대한 기하학적 설명(b), 그리고 격자형상의 예(c)를 나타내었다. 파형채널 형상파라미터로는 채널간격비(channel spacing ratio, ϵ)과 채널주름비(channel corrugation ratio, γ)를 정의하고, 파형채널 제작사에서 제작 가능한 범위⁽¹⁰⁾인 $0.5 \leq \epsilon \leq 1.5$ 와 $0.1 \leq \gamma \leq 0.4$ 에 해당하는 해석 모델들을 생성하였다. Fig. 1의 (b)에 제시된 좌표계에서 파형 채널의 형상 설계 식은 다음과 같다.^(5,6)

$$y = y' + A \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \quad (1)$$

여기서, y' 는 0(밑면) 또는 S(윗면)의 값을 갖는다.

Table 1 Thermal-Hydraulic properties of PAO

ρ	c_p	k	μ	Pr
770	2150	0.137	0.009	141

Table 2 Grid matrix corresponding to each channel spacing ratios and channel corrugation ratios

ϵ	NY	γ	NX	Grading : double sided ratios - 1.1
0.5	50	0.1	400	
1.0	100	0.25	200	
1.5	150	0.4	200	

2.2 해석조건

채널의 높이(H)가 채널 간격(S)보다 크다고 가정하여 2차원 해석을 수행하였다. 비압축성 층류 점성 유동을 고려하였고, 균일한 물성치와 채널 경계가 등온조건을 갖는 주기적으로 발달한 유동을 가정하였다. 등온조건 가정 시 colburn 계수의 값이 등열유속(constant heatflux)조건 보다 작으므로⁽¹¹⁾, 본 논문의 계산결과는 보수적인 설계데이터로 사용가능하다. 본 열유동해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

파형채널 벽의 경계조건은 $u = v = 0$ 와 $T = T_w$ 이고, 입구와 출구는 아래식과 같이 주기적으로 반복되는 조건을 부여하였다.

$$u(x, y)|_{x=0} = u(x, y)|_{x=L} \quad (5)$$

$$v(x, y)|_{x=0} = v(x, y)|_{x=L} \quad (6)$$

$$\frac{T(x, y) - T_w}{T_b(x) - T_w}|_{x=0} = \frac{T(x, y) - T_w}{T_b(x) - T_w}|_{x=L} \quad (7)$$

$$T_b(x) = \frac{\int u(x, y) T(x, y) dy}{\int u(x, y) dy} \quad (8)$$

위의 지배방정식과 경계조건을 해석하기 위해

서 상용 프로그램인 GAMBIT⁽¹²⁾과 FLUENT⁽¹³⁾를 사용하였다. 또한, 해석에서 사용된 PAO의 열유동 물성치는 Table 1과 같다.⁽¹⁴⁾

2.3 해석절차

기존의 연구 결과와의 비교 및 검증⁽⁹⁾을 통해 수치해석 절차를 수립하였으며, 각각의 단계에서 사용한 소프트웨어와 주요 설정값을 아래와 같이 정리하였다.

Step 1. 전처리(GAMBIT)

- 형상파라미터에 따른 모델형상 생성 및 형상 파라미터에 적합한 격자 생성(Table 2 참조).

Step 2. 해석(FLUENT)

- double precision 2차원 해석 선택
- 주기(periodic) 조건 생성 및 레이놀즈수에 대응하는 질량유량 및 입구 평균 온도 입력
- 벽경계조건으로 온도입력
- 압력 및 속도 계산: SIMPLE 알고리즘
- Under-relaxation 조건: 압력 (0.3), 운동량 (0.7), 에너지 (0.9)
- 이산화 조건: 압력 (standard), 운동량 및 에너지 (1차 upwind)
- 초기치 조건: 속도 (0), 온도는 매질유입온도와 벽온도의 평균값
- 수렴조건으로 질량 및 운동량방정식 ($1.e^{-8}$), 에너지방정식 ($1.e^{-9}$)입력 후 유동장해석
- 운동량 2차 upwind 선택 및 유동장해석
- 에너지 2차 upwind 선택 및 열해석

Step 3. 후처리(FLUENT, EXCEL)

- Fanning 마찰계수(FLUENT): Report > Surface Integrals > Area-Weighted Average > Skin Friction Coefficient
- Colburn 계수(EXCEL): 식(7)~(9) 이용 계산.

2.4 결과분석

2차원 관형채널의 열유동특성을 비교하기 위해서 Fanning 마찰계수(f)와 Colburn 계수(j)를 사용하였고, 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{2\bar{\tau}_w}{\rho u_m^2} = \frac{2}{L\rho u_m^2} \int_0^L \tau_w ds = \frac{2}{L\rho u_m^2} \int_0^L \mu \frac{\partial V_t}{\partial \hat{n}} ds \quad (9)$$

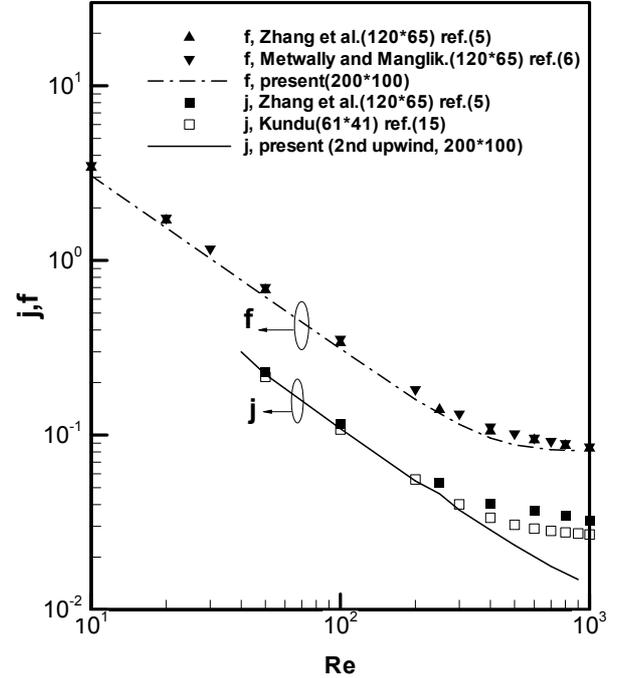


Fig. 2 Comparison of Isothermal Fanning friction factors and Colburn factors for periodically developed laminar airflows in a wavy channel with the various reference results

여기서, $\bar{\tau}_w$ 는 평균벽전단응력, \hat{n} 는 벽과 수직인 방향벡터, 그리고, V_t 는 벽과 수평인 속도성분이다.

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} = \frac{1}{RePr^{1/3}} \frac{\dot{m}c_p(T_{b,o} - T_{b,i})d_h}{kA_p\Delta T_{LMTD}} \quad (10)$$

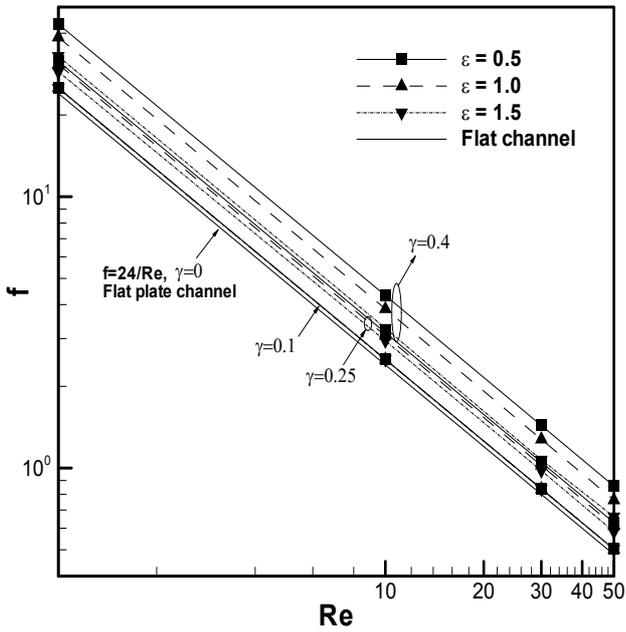
여기서, 대수평균온도차와 매질평균온도는 각각 다음과 같이 계산한다.^(5,6)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_w - T_{b,o}) - (T_w - T_{b,i})}{\ln((T_w - T_{b,o}) / (T_w - T_{b,i}))} \quad (11)$$

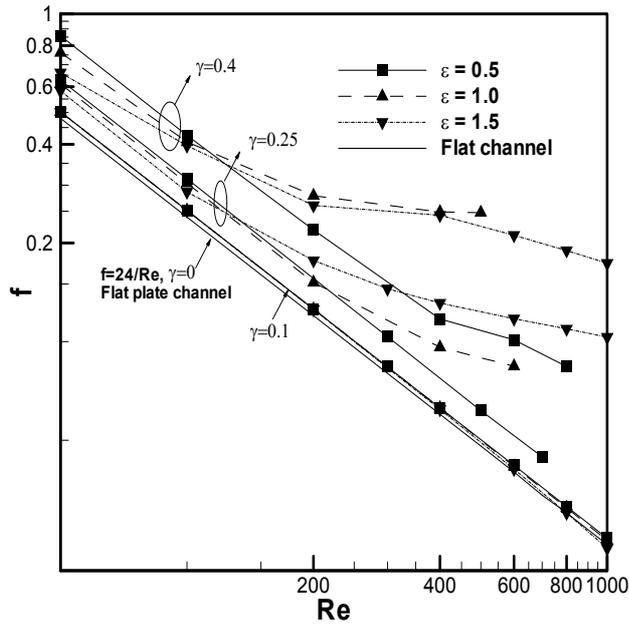
3. 결과 및 분석

3.1 해석결과검증

본 연구에서 제시한 해석절차의 타당성을 검증하기 위하여 해석 결과를 기존의 결과와 비교하였다. 형상조건 $\epsilon=1.0$, $\gamma=0.25$ 에서 레이놀즈 수 250에서 공기에 대한 열유동 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 3 Isothermal Fanning friction factors for periodically developed laminar flow in sinusoidal wavy channels at the ranges of (a) $Re \leq 50$ and (b) $50 \leq Re \leq 1000$

Fanning 마찰계수가 기존의 결과와 잘 일치하였고, Colburn 계수의 경우 해석에 적용된 격자수에 따라 저자에 따른 차이가 발생하며 특히 레이놀즈수가 클수록 그 차이가 증가함을 알 수 있

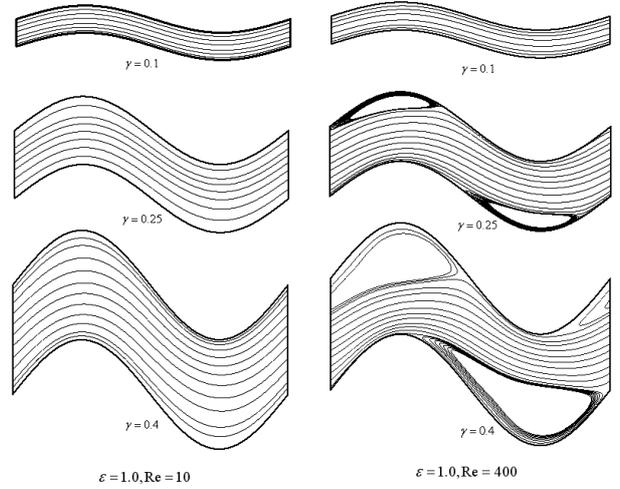


Fig. 4 Effect of channel corrugation ratio(γ) on the streamline distribution in wavy channels with $\epsilon = 1.0$, and $Re = 10$ and 400

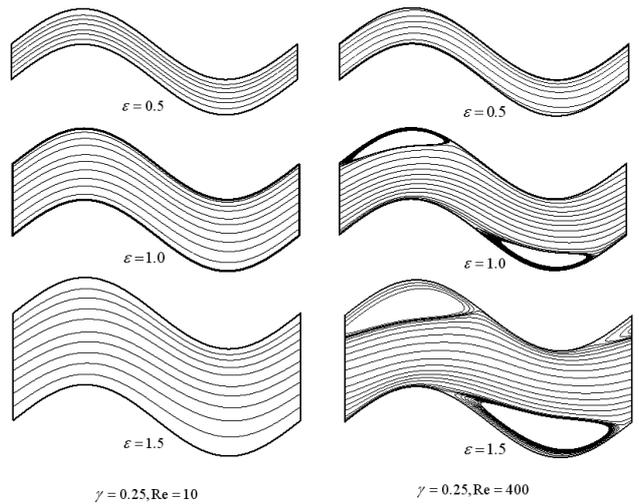
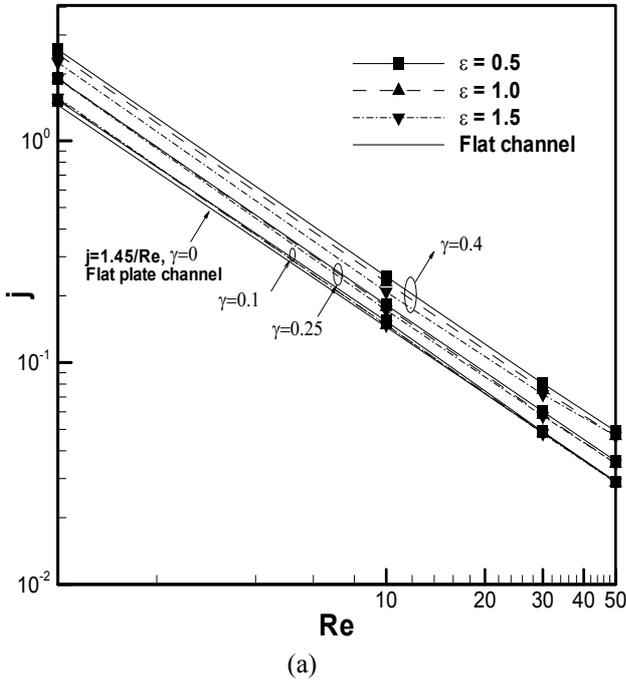


Fig. 5 Effect of channel spacing ratio(ϵ) on the streamline distribution in wavy channels with $\gamma = 0.25$, and $Re = 10$ and 400

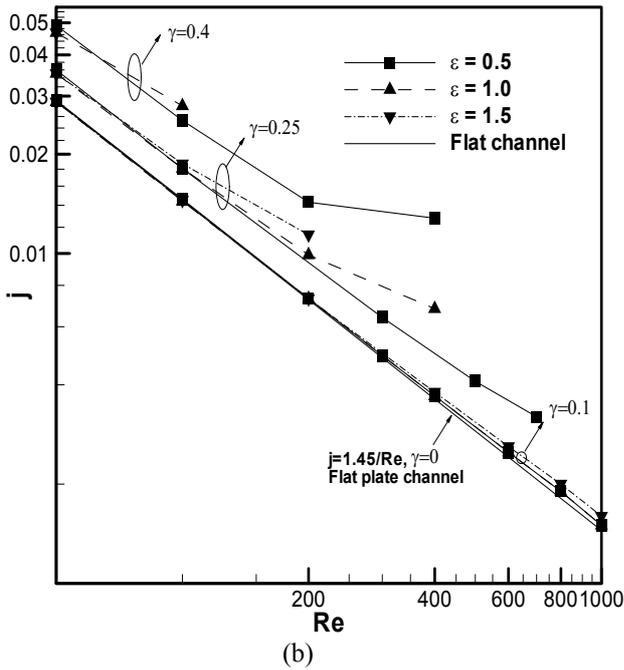
다. 2차 upwind 차분 시 기존의 결과보다 Colburn 계수의 선형성이 더 유지됨을 확인하였다. 본 연구에서 적용된 격자의 최대 skewness는 0.43이다.

3.2 유동특성

Fig. 3에 레이놀즈수의 증가에 따른 Fanning 마찰계수의 변화를 나타내었으며, Fig. 3(a)는 레이놀즈수 50까지의 결과이다. 이 구간에서는 동일한 레이놀즈수에서 채널주름비가 증가할수록 Fanning 마찰계수가 큰 값을 갖으며, 가장 큰 값



(a)



(b)

Fig. 6 Colburn factors for periodically developed laminar flow in sinusoidal wavy channels with constant wall temperature at the ranges of (a) $Re \leq 50$ and (b) $50 \leq Re \leq 1000$

을 보이는 형상($\gamma=0.4$, $\epsilon=0.5$)에서는 평균 채널($\gamma=0$) 대비 최대 1.8배 정도의 수준이다. 이러한 현상은 채널주름비가 증가할수록 유동의 진행방향의 변화가 심하여지기 때문이다.

같은 채널주름비에서는 채널간격비가 작을수록

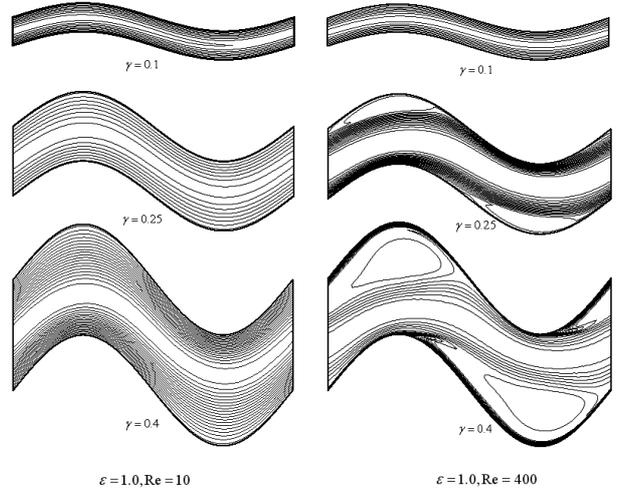


Fig. 7 Effect of channel corrugation ratio(γ) on the temperature distribution in wavy channels with $\epsilon=1.0$, and $Re=10$ and 400

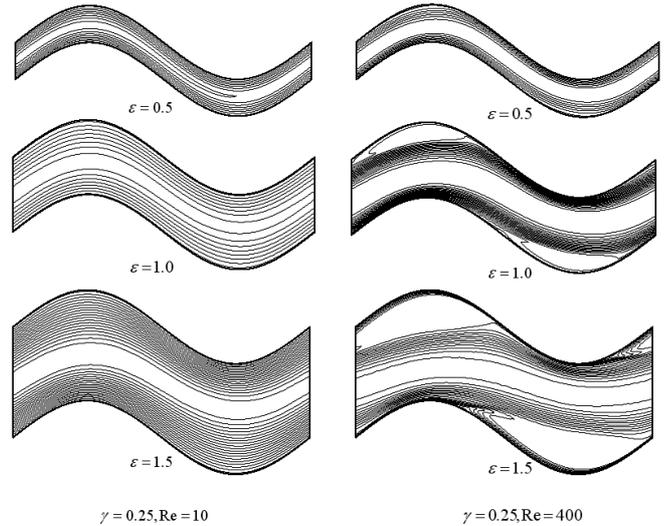


Fig. 8 Effect of channel spacing ratio(ϵ) on the temperature distribution in wavy channels with $\gamma=0.25$, and $Re=10$ and 400

Fanning 마찰계수가 큰 값을 보인다. 이는 채널간격비가 작을수록 유동의 단면적이 작으므로 속도가 증가하게 되어 결과적으로 압력강하의 증가를 가져오기 때문이다. 또한, 채널주름비가 증가할수록 채널간격비의 변화에 따른 마찰계수의 변화폭이 증가함을 확인하였다.

이 구간에서 선형성이 유지되는 이유는 Fig. 4와 5의 좌측 결과에서 볼 수 있듯이 레이놀즈수가 작은 영역에서는 형상에 관계없이 파형채널의

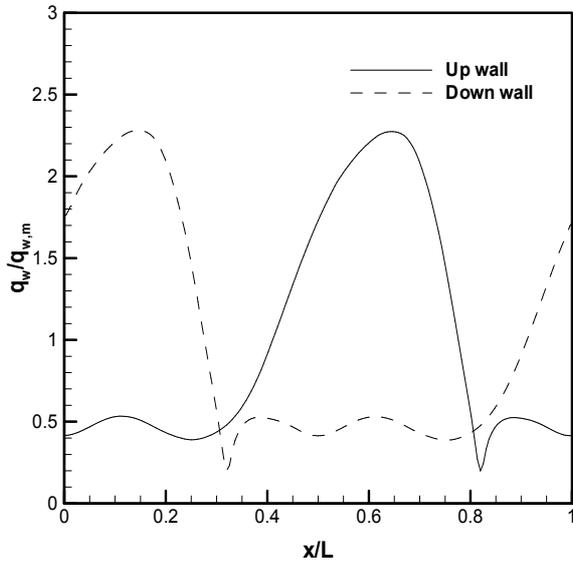


Fig. 9 Local wall heat flux distribution in wavy channels with $\gamma=0.25$ and $\epsilon=1.5$ at $Re=400$

형상을 따라 유선이 형성되기 때문이다.

Fig. 3(b)는 레이놀즈수 50이상에서의 유동특성을 보여준다. 채널주름비가 작은 형상($\gamma=0, 0.1$)에서는 모든 채널간격비에서 레이놀즈수의 증가에 따른 Fanning 마찰계수의 변화가 선형성이 유지되고 있는데, 이는 Fig. 4의 우측결과와 같이 채널주름비가 작은 경우에는 레이놀즈수가 증가하여도 유선이 파형채널의 형상을 따라 형성되기 때문이다.

채널주름비가 큰 형상($\gamma=0.25, 0.4$)에서는 레이놀즈수의 증가에 따라 마찰계수의 선형성이 유지되지 않고 평판채널($\gamma=0$)보다 점점 증가함을 알 수 있다. 이는 파형의 굴곡이 증가하여 유동 진행방향의 변화가 큰 것과 레이놀즈수가 증가하면서 재순환영역이 발생 및 발달하기 때문이다. 또한, 동일 채널주름비에서 Re 50이하의 현상과 반대로 레이놀즈수가 증가함에 따라 채널간격비에 따른 마찰계수의 크기가 역전됨을 알 수 있는데, 이는 레이놀즈수가 증가할수록 채널간격비가 큰 경우 동일한 레이놀즈수에서 상대적인 유동속도는 감소할지라도 벽면 점성력의 영향이 작아져 압력의 역구배로 인한 박리가 발생하고 이로 인한 재순환유동이 생성되기 때문이며, 이는 Fig. 5의 우측결과와 같이 유선분포를 통해 확인할 수 있다.

전체적으로 채널주름비가 채널간격비보다 마찰

계수에 미치는 영향이 큼을 알 수 있는데, 이는 채널주름비 증가 시 채널간격비 증가보다 재순환 영역이 더 크게 생성되기 때문이다.

3.3 열전달특성

Fig. 6에 레이놀즈수의 증가에 따른 Colburn 계수의 변화를 도시하였으며, Fig. 3의 유동특성과 유사한 경향을 보인다.

Fig. 6(a)의 결과와 같이 레이놀즈수 50까지의 구간에서는 채널주름비가 증가할수록, 그리고, 같은 채널주름비에서는 채널간격비가 작을수록 Colburn 계수가 큰 값을 가진다. 이는 Fig. 7의 좌측과 같이 채널주름비가 증가할수록 열경계층의 두께가 끝근처에서 얇아져 열전달이 증가하고, Fig. 8의 좌측과 같이 채널간격비가 작을수록 동일 레이놀즈수에서 유동의 단면적이 작아져 속도가 증가하게 되어 열경계층이 얇아지게 되고 채널벽에서 온도구배가 증가하여 결과적으로 열전달의 증가를 가져오기 때문이다.

Fig. 6(b)는 레이놀즈수 50이상에서의 열적특성을 보여준다. 채널주름비가 작은 형상($\gamma=0, 0.1$)에서는 모든 채널간격비에서 레이놀즈수의 증가에 따른 Colburn 계수의 변화가 선형성이 유지된다. 채널주름비가 커질수록($\gamma=0.25, 0.4$) 레이놀즈수가 증가함에 따라서 Colburn 계수의 선형성이 유지되지 않고 평판채널($\gamma=0$)보다 점점 증가하는데, 이는 Fig. 7과 8의 우측과 같이 파형의 굴곡이 증가하여 재순환영역이 발생하지 않는 끝근처에서는 열경계층이 얇아지고 이로 인해 온도구배가 가파르게 형성되기 때문이다. Fig. 9에서의 위와 아래벽면의 열유속 분포를 통해 분명히 볼 수 있듯이 끝근처에서 열유속이 증가하고, 재순환영역에서는 상대적으로 낮은 열유속을 보여준다.

4. 결론

본 논문은 PAO를 작동유체로 사용하는 파형채널에 대한 형상 변화에 따른 열유동특성을 비교하고 설계데이터를 도출하기 위하여, 2차원 파형채널의 여러 형상($0.5 \leq \epsilon \leq 1.5, 0.1 \leq \gamma \leq 0.4$)에 대한 층류 열유동 수치해석을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 채널주름비가 작은 형상($\gamma=0, 0.1$)에서는 레이놀즈수가 증가하여도 유선이 파형채널의 형상을 유지하면서 형성되어 Fanning 마찰계수 및

Colburn 계수의 변화가 선형성이 유지되었다.

(2) 채널주름비가 큰 형상($\gamma=0.25, 0.4$)에서는 저 레이놀즈 수에서는 선형성이 유지되다가 레이놀즈 수가 증가할수록 재순환영역의 발생 및 발달이 채널벽근처에서 온도구배를 증가시켜 열전달이 향상되었다.

(3) 채널간격비의 영향은 채널주름비가 큰 형상에서 두드러지며 채널간격비가 작을수록 재순환영역이 발달하여 열전달이 향상되었다.

참고문헌

- (1) Webb, R. L., 1994, *Principles of Enhanced Heat Transfer*, Wiley Inter-Science, p.19.
- (2) Kays, W. M. and London, A. L., 1998, *Compact Heat Exchanger*, 3rd ed., McGraw-Hill, pp.157~161.
- (3) Ismail, L. S., Ranganayakulu, C. and Shah, R. K., 2009, "Numerical Study of Flow Patterns of Compact Plate-Fin Heat Exchangers and Generation of Design Data for Offset and Wavy Fins," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 3972~3983.
- (4) Jang, J. Y. and Chen, L. K., 1997, "Numerical Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow in a Three-Dimensional Wavy-Fin and Tube Heat Exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 16, pp. 3981~3990.
- (5) Zhang, J. Z., Kundu, J. and Manglik, R. M., 2004, "Effect of Fin Waviness and Spacing on the Lateral Vortex Structure and Laminar Heat Transfer in Wavy-Plate-Fin Cores," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1719~1730.
- (6) Metwally, H. M. and Manglik, R. M., 2004, "Enhanced Heat Transfer due to Curvature-Induced Lateral Vortices in Laminar Flows in Sinusoidal Corrugated-Plate Channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2283~2292.
- (7) Xin, R. C. and Tao, W. Q., 1988, "Numerical Prediction of Laminar Flow and Heat Transfer in Wavy Channels of Uniform Cross-Sectional Area," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 465~481.
- (8) MIL-PRF-87252C, 2004, "Coolant Fluid, Hydrolytically Stable, Dielectric."
- (9) Kim, K. W. and Kim, S. J., 2012, "Thermo-Hydraulic Characteristics of a Wavy Channel in Plate-Fin Heat Exchanger for Airborne Radar," *KIMST Conference*, pp.1845~1848.
- (10) Ruffled Fin Terminology for Robinson Fin, R600006, Robinson Fin Machines Inc.
- (11) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, p. 450.
- (12) GAMBIT User's Guide, Version 2.3, 2006, Fluent Inc.
- (13) FLUENT User's Guide, Version 6.3, 2006, Fluent Inc.
- (14) Mohapatra, S. C., 2006, "An Overview of Liquid Coolants for Electronics Cooling," *Electronics Cooling*, Vol. 12, No. 2.
- (15) Kundu, J., 2001, *Numerical Investigation of Laminar Forced Convection in Two-Dimensional and Three-Dimensional Sinusoidal Corrugated Ducts*, Thesis, University of Cincinnati.