

## 타원형원-원형관 열교환기의 강제대류 열전달 특성

강 희 찬,<sup>\*1</sup> 이 종 휘<sup>2</sup>CONVECTIVE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF OVAL  
FIN-CIRCULAR TUBE HEAT EXCHANGERH.C. Kang<sup>\*1</sup> and J.H. Lee<sup>2</sup>

*The purpose of the present study is to investigate the flow resistance and the heat transfer characteristics of oval fin-tube heat exchanger. Six kinds of oval fin having the same fin area and different diameter ratio tested numerically. Test data for the heat transfer, pressure drop and fin temperature were shown and discussed. The pressure drop and heat transfer increased for increasing the oval fin diameter ratio(diameter of span-wise direction to diameter of longitudinal diameter) up to 50% and 45% respectively.*

**Key words** : 열전달(Heat Transfer), 열교환기 (Heat Exchanger), 타원형원 (Oval fin), 원 효율(Fin Efficiency), 수치계산 (Numerical Simulation)

## 1. 서 론

산업의 발달에 따라 에너지 사용이 급증하고 있으며 이는 에너지 자원의 고갈과 환경문제로 이어지고 있다. 열에너지를 이용하는 기기에서 열교환기는 가격, 성능, 효율, 내구성 등에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 열교환기 중에서 공기를 대상으로 열전달을 하는 열교환기는 주요 열저항이 공기 측에 있으므로 열저항을 줄이기 위하여 원의 사용이 불가피하다. 그 중에서도 원형원-원형관 열교환기(circular fin-tube heat exchanger)는 형상이 간단하고, 설치가 용이하며, 가격이 비교적 저렴하고, 특허의 제약이 거의 없어 산업용 보일러, 조선, 공정기에 널리 사용된다.

원형원-원형관 열교환기의 제작방법은 전조(form roll), 절삭, 용접, 접착 등 다양하다. 전조는 Fig. 1과 같이 연성이 큰 시료를 회전시키면서 형상롤러(form roller)로 성형하는 방법이다[1]. 이 전조공정으로 원형원-원형관 열교환기를 제작하는

경우 재료의 손실이 적고, 생산성이 높고, 형상이 정확하며, 원 뿌리부분에서 접촉열저항이 없으며, 원형관 내부에서 돌기가 형성되어 열전달이 촉진되는 등 장점이 많다. 따라서 전조는 간단한 시설로 효과적으로 원형원-원형관 열교환기를 제작하는데 유용한 방법이다.

원형원-원형관 열교환기에 대하여 많은 연구가 수행되었다. 이들의 연구는 원형원 형상에 대한 열유동 특성에 집중되었다. Wang과 Chen[2]은 원-관 열교환기에 대하여 열전달과 압력강하 특성실험을 수행하였다. Wang와 Fu 그리고 Chang[3]은 파형 원에 대한 열유동 실험을 하였으며, 이후 Wang와 Lee, 그리고 Chang[4]은 평관원의 열유동 특성을 이해하는데 기여하였다. 강희찬과 조도영 등 연구자들은 원형원-원형관 열교환기에 대하여 실험과 수치적으로 연구하였다[5-6]. 강희찬과 강민철[7]은 단일 원형원-원형관에 대한 강제대류열전달 상관식을 제시하였다. 원 붙이 열교환기에서 원은 면적의 증가에 따른 열전달의 증가가 주요 목적이다. 그러나 동일한 원의 재료 또는 면적을 사용하더라도 열전달계수와 원효율의 증가는 가능하며 이는 열교환기의 효과적인 설계에 매우 중요하다[8].

본 연구에서는 원형원-원형관 열교환기를 대상으로 원형원을 면적이 동일한 타원형원으로 대체하였을 경우 압력강하와 열전달 특성을 비교하는 것을 주요 목표로 하였다. 해석방법

접수일: 2009년 12월 1일, 수정일: 2010년 6월 2일,

게재확정일: 2010년 6월 11일

1 정회원, 군산대학교 기계자동차공학부

2 정회원, 군산대학교 대학원 기계공학과

\* Corresponding author, E-mail: hckang@kunsan.ac.kr

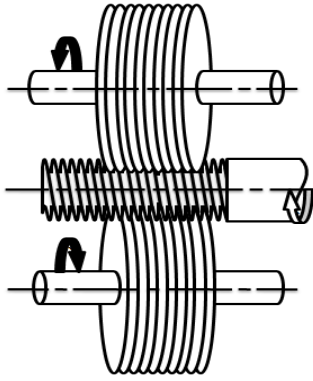


Fig. 1 Form rolling method

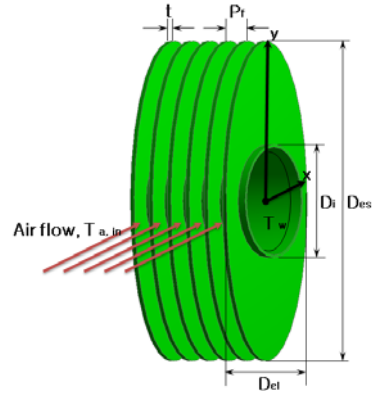


Fig. 2 Schematic diagram of oval fin-tube heat exchanger

으로 상용 프로그램을 이용하여 원형관과 4가지 타원형관 형상에 대하여 수치해석을 하였고 압력강하와 열전달계수를 비교하고 검토하였다.

## 2. 수치계산

### 2.1 해석대상

본 연구의 해석 대상인 타원형관-관 열교환기의 개략도는 Fig. 2와 같다. 두께( $t$ )가 일정한 다수의 타원형관이 일정온도( $T_w$ )를 갖는 원형관에 부착되어 있다. 관의 재질은 구리( $k=401$  W/m·K)이고 유체는 공기이다. 해석형상은 Table 1과 같이 원형관의 직경은 25.4 mm이고 관의 두께가 1.0 mm이고 원피치가 2.54 mm인 7종류의 타원형관과 원형관이 붙어 있는 형상이다. 타원형관의 흐름방향 직경( $D_{el}$ )에 대한 흐름수직방향 직경( $D_{es}$ )의 비( $D_{es}/D_{el}$ )는 0.62, 0.75, 1.00, 1.33, 1.62, 2.00, 3.00 및 4.00 이다. 여기서 타원형관은 기본형인 원형관(DR100)과 관의 면적이 같다. 입구온도( $T_{a,in}$ )가 균일한 유체는

Table 1 Dimensions of the fin-tube heat exchanger tested in the present work (unit in mm)

ID	Tube diameter	Span-wise diameter	Longitudinal diameter	Fin pitch	Fin thickness
Symbol	$D_i$	$D_{es}$	$D_{el}$	$P_f$	$t$
DR062	25.4	39.9	64.6	4.8	1.0
DR075	25.4	44.0	58.7	4.8	1.0
DR100	25.4	50.8	50.8	4.8	1.0
DR133	25.4	58.7	44.0	4.8	1.0
DR162	25.4	64.6	39.9	4.8	1.0
DR200	25.4	71.8	35.9	4.8	1.0
DR300	25.4	88.0	29.3	4.8	1.0
DR400	25.4	101.4	25.4	4.8	1.0

원형관에 직교하여 균일한 속도( $u$ )로 흐른다. 본 연구의 수치 해석 범위는 Table 2와 같다.

### 2.2 해석방법

본 연구의 계산영역은 입구, 양측면의 영역은 공기가 충분히 안정된 상태에서 열교환기를 지날 수 있도록 영역을 선정하였으며, 출구는 후류에서 생기는 역유동이 발생하지 않도록 충분한 거리를 두었다. Fig. 3과 같이  $x$ 와  $y$ 방향에 대하여 입구영역, 출구영역 그리고 양쪽 측면 영역에 대해서 각각  $5, 12D_i, 5D_i$ 로 하였고,  $z$ 방향은 원피치( $P_f$ )로 하였다. 본 수치해석은 상용코드인 ANSYS CFX 11[9]을 사용하였다. 수치해석에 사용된 수학적 모델은  $k-\omega$  SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 적용하였다.

입구( $x=0$ )에는 일정한 속도조건을 적용하였으며, 출구( $x=18D$ )에는 유출(outflow) 경계조건을 부여하였다(Fig. 2). 그리고 네 개의 면( $y=0, y=11D, z=0, z=P_f$ )에 대해서는 대칭조건을 적용하였다. 산업에서 사용하는 예를 기준으로 원형관의 벽 온도( $T_w$ )를  $100^\circ\text{C}$ 로 입구의 공기온도( $T_{a,in}$ )는  $0^\circ\text{C}$ 로 하였다. 입구속도는 0.663, 1.326, 1.989, 3.315, 4.641 m/s이며, 이는 Reynolds 수는 1,270-8,890에 해당한다. 수치해석에 사용된 공기의 물성치는 대기압,  $0^\circ\text{C}$ 를 기준으로 밀도는  $1.29 \text{ kg/m}^3$ , 정압비열은  $1004.4 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ , 열전도율은  $0.025 \text{ J/m}\cdot\text{K}$ , 그리고 점성계수는  $1.71 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$  이다.

Table 2 Test conditions of the heat exchangers in the present work

Parameter	Unit	Dimension
Thermal conductivity of fin, $k$	W/m·K	401
Wall temperature, $T_w$	$^\circ\text{C}$	100.0
Inlet fluid temperature, $T_{a,in}$	$^\circ\text{C}$	0.0
Velocity of fluid, $u$	m/s	0.663, 1.33, 1.99 3.32, 4.64

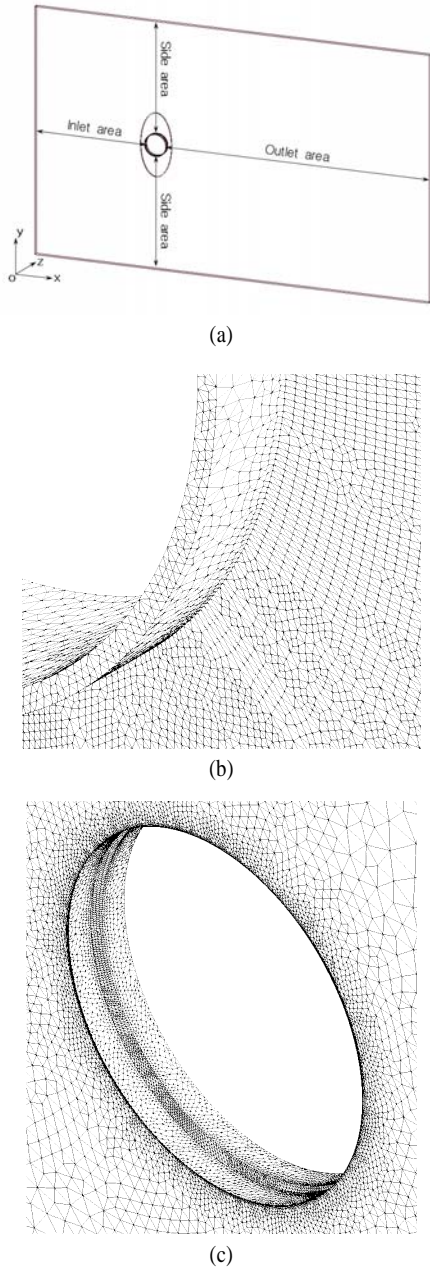


Fig. 3 Numerical domain and grid in the present study  
(a) computational domain, (b) fin domain, (c) air domain

해석요소는 Fig. 3과 같이 사면체를 사용하였고, 원형관 벽 부근에서는 격자를 조밀하게 구성하였다. 기준 열교환기 형상인 경우 핀과 공기 영역은 각각 요소 1,132,858개 (node 235,469개)와 요소 2,832,801개 (node 804,934개) 이다.

수렴조건은 질량잔류항의 합이  $10^{-4}$ 이하이고 에너지 균형

99% 이상인 조건으로 하였다. 해석 장비는 일반 PC(CPU 3.0 GHz, RAM 8GB)를 사용하였으며, 각각의 경우에 대하여 계산은 약 5,400s 정도 소요되었다.

본 연구의 타원형핀-원형관 열교환기에서 열전달은 원형관에서 열전달과 핀에서 열전달의 합으로 다음과 같이 구한다.

$$Q = (A_t + \eta_f A_f) h (T_w - T_{a,in}) \tag{1}$$

여기서  $A_t$ ,  $A_f$ ,  $\eta_f$ 와  $h$ 는 각각 원형관의 면적, 타원형핀의 면적, 핀효율 및 열전달계수이다. 위 식에서 핀효율은 Schmidt의 근사식을 사용하였다.

$$\eta_f = \frac{\tanh(mr\phi)}{mr\phi} \tag{2}$$

무차원수 Reynolds수 및 Nusselt수는 각각 다음과 같다.

$$Re_D = \rho u D / \mu \tag{3}$$

$$Nu_D = h D / k \tag{4}$$

수력직경은 다음과 같이 정의하였다.

$$D_h = 4V / (A_f + A_t) \tag{5}$$

수력직경에 의한 Reynolds수는 다음과 같다.

$$Re_{D_h} = \rho u D_h / \mu \tag{6}$$

본 논문에서  $Re_D$ 와  $Re_{D_h}$ 를 병기하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압력강하

Fig. 4는 타원형핀-원형관에서 타원형핀의 직경의 비 ( $D_{es}/D_{el}$ )의 변화에 따른 압력강하의 변화를 비교하였다. 면적이 동일한 타원형핀-원형관의 압력강하는 공기의 유속과  $D_{es}/D_{el}$ 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 타원형핀이 공기의 흐름에 수직인 방향으로 돌출된 길이가 증가할수록 압력강하는 증가한다. 공기의 유속이 4.64 m/s에서 원형핀을 기준으로 할 때 타원형 핀이 압력강하에 미치는 영향은 원형핀-원형관의 압력강하의 약 50% 수준이다. 이는 공기의 흐름에 타원형 핀의 돌출로 인한 형상저항과 타원형

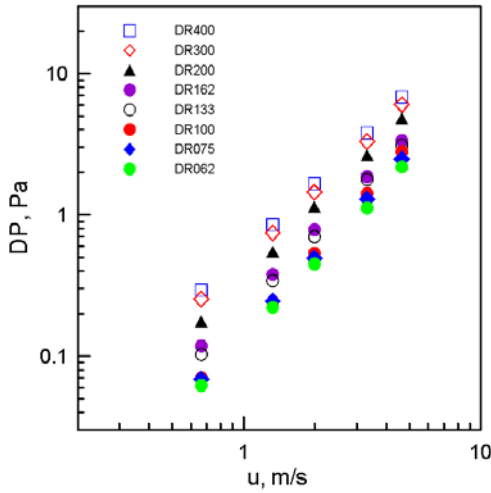


Fig. 4 Comparison of pressure drop for diameter ratio ( $D_{es}/D_{el}$ ) of oval fin

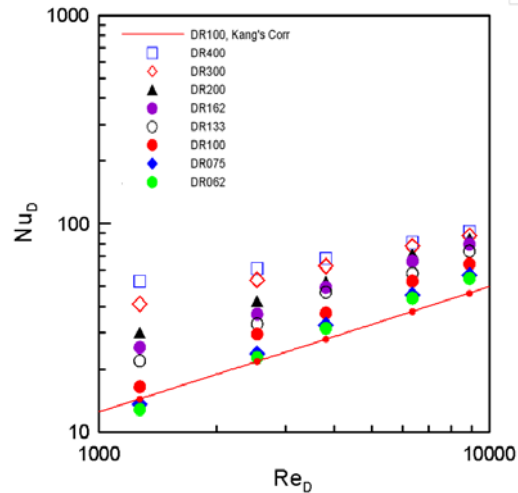


Fig. 6 Comparison of Nusselt number for diameter ratio ( $D_{es}/D_{el}$ ) of oval fin

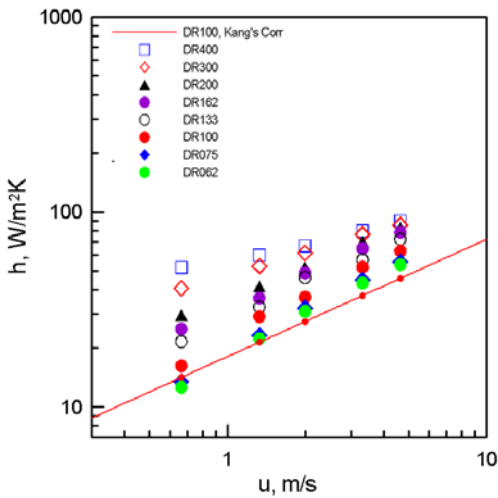


Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficient for diameter ratio ( $D_{es}/D_{el}$ ) of oval fin

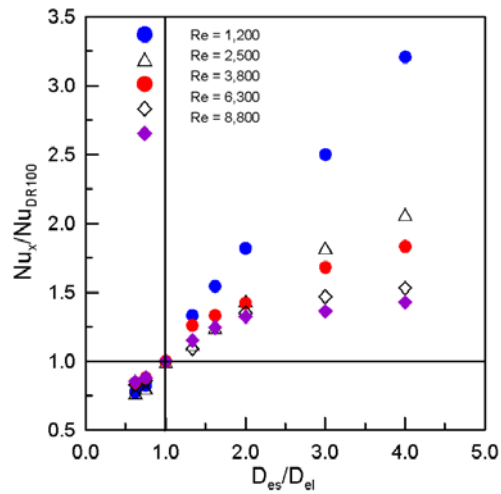


Fig. 7 Heat transfer enhancement according to diameter ratio ( $D_{es}/D_{el}$ ) of oval fins

원 표면의 마찰저항의 증가에 기인한다. 타원형 원에서 마찰 저항의 증가는 원을 가로질러 통과하는 공기 유로의 평균길이 이 짧아지기 때문이다. 공기 유로의 평균 길이가 짧아지면 원 표면에 형성되는 경계층의 평균 두께가 감소하고 마찰은 증가한다.

### 3.2 열전달계수

Fig. 5와 6은 본 연구의 타원형원-원형관에서 타원형원의 직경의 비( $D_{es}/D_{el}$ )가 변화함에 따른 열전달계수와 Nusselt수를 비교한 것이다. 본 연구에서 열전달계수는 식 (1)에서 정의한 열전달계수이다. 전달계수는 원의 열전도율과 무관하며 고체의 형상, 유체의 종류와 유속과 같은 유동특성에 관계하

는 인자이다.

원형원-원형관의 수치계산 결과는 Kang[7]의 상관식과 비교하였으며, 단일 원형원-원형관의 실험결과로부터 Nusselt수에 대한 상관식과 적용범위는 다음과 같다.

$$Nu = 0.157Gz, Gz < 10 \tag{7}$$

$$Nu = 0.388Gz^{0.6}, Gz > 10 \tag{8}$$

여기서

$$Nu = h(P_f - t)/k \tag{9}$$

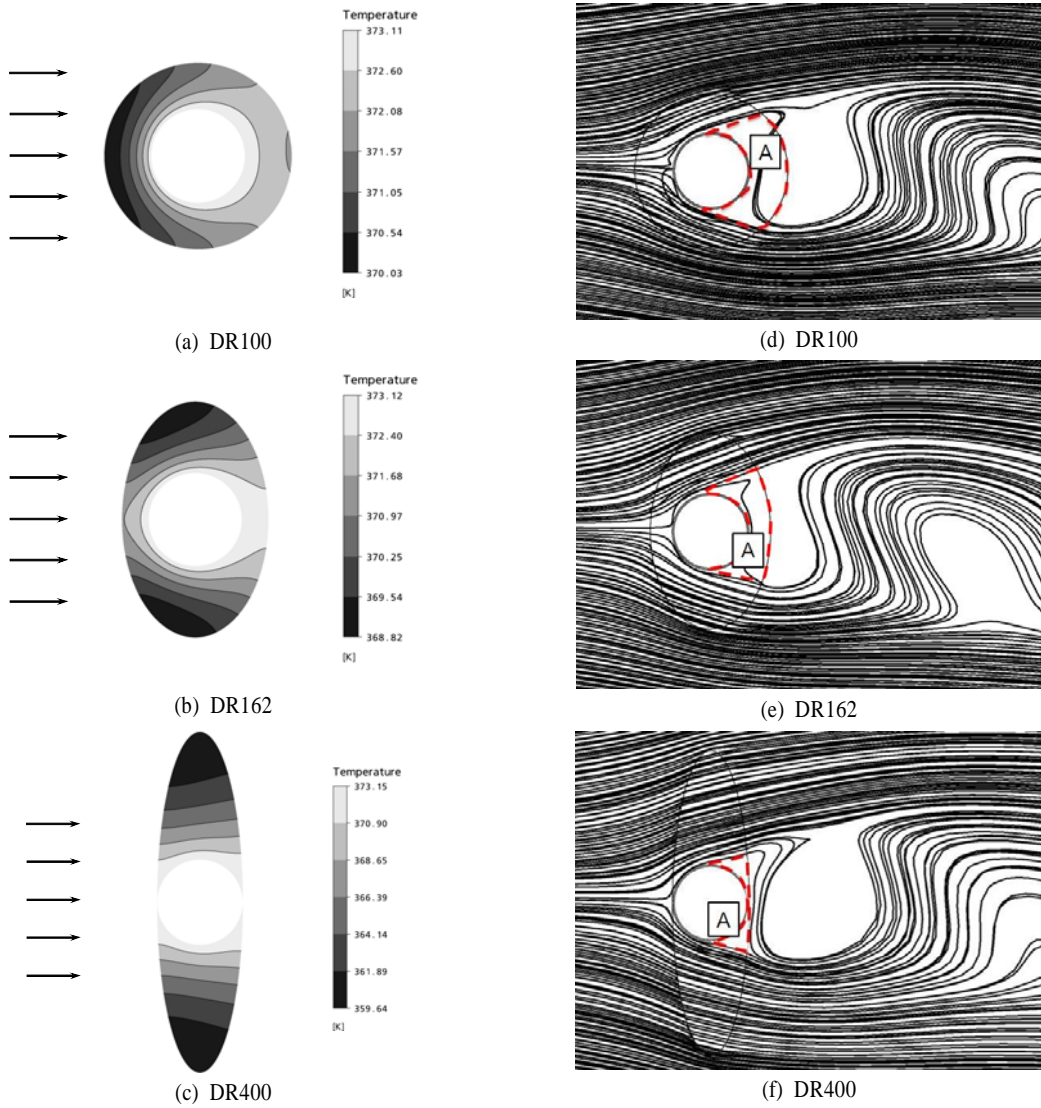


Fig. 8 Isotherm lines of the fins and streamlines in the present numerical experiment at  $Re_D = 3800$

$$Gr = u(P_f - t)^2 / \alpha L \tag{10}$$

$$L = (D_o + D_i) / 2 \tag{11}$$

$$u = (u_f + u_c) / 2 \tag{12}$$

$$1.50 < D_o / D_i < 2.25$$

$$0.10 < P_f / D_i < 0.210$$

$$3 < Gz < 135 \tag{13}$$

층류모델 결과는 Kang의 상관식보다 평균 22% 높게 예측

하고 있으나 Reynolds수에 대한 Nusselt수의 경향은 대체로 유사하다. 그림에서 열전달 계수는 유속과 타원형환의 직경비 ( $D_{es}/D_{ei}$ )가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 열전달의 변화수준은 약 30% 수준이며 유속이 증가함에 따라 변화 폭은 감소한다. 이는 유체의 흐름방향으로 공기의 평균 유동 길이가 감소하면 환에서 발생하는 경계층의 두께가 얇아지며 열전달계수가 증가하기 때문이다. 또한 공기의 흐름에 수직인 방향으로 돌출한 타원형환은 열전달이 취약한 외류 영역을 회피하고 면적을 효과적으로 활용할 수 있다. 원형환에서 열전달이 취약한 부분은 원형관의 후류에 존재하는 외류의 영역이다.

Fig. 7은 공기의 유속이 일정할 때 타원형관의 직경비 ( $D_{es}/D_{el}$ )가 증가함에 따른 열전달의 증가비율을 나타낸 것이다. 열전달 증가비율의 기준 형상은 원형관이다. 타원형관의 직경비가 증가할수록 열전달이 증가하는 것을 알 수 있으며, Reynolds수가 낮을수록 열전달이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 DR400( $D_{es}/D_{el}=4.0$ )인 경우 Reynolds수가 1,200 이하로 낮은 경우 열전달은 3.2 배까지 증가하나 Reynolds수가 8,800으로 큰 경우 열전달의 증가는 1.4배에 접근한다. 본 연구에서 제안한 타원형관은 직경비가 클수록 열전달에 효과적인 것을 알 수 있다. 이는 공기의 유속이 증가함에 따라 유효율이 감소하기 때문이다. 직경비가 크고 유속이 큰 경우 유효율의 검토가 필요하다.

### 3.3 흰 온도분포 및 유동장

Fig. 8은 수치해석 범위의 기준점인  $Re_D = 3,800$ 일 경우에 흰 온도분포 및 유동장을 나타낸다. 그림은 층류모델을 이용한 경우 흰 온도분포를 타원형 흰의 직경비 ( $D_{es}/D_{el}$ ) 변화에 따라 비교하였다. 흰 온도는 반경과 원주 방향으로 변화하는 2차원 온도분포를 보인다.  $D_{es}/D_{el}$ 가 1.0보다 작은 경우에는 원형관보다 열전달이 성능이 낮게 나타났다. Fig. 8(a)의 흰 온도분포는 대류의 영향으로 상류보다 하류가 높으며 원형관 후류의 흰에서 상대적으로 균일한 온도를 나타낸다. Fig. 8(b)의 흰 온도분포는 상류와 하류의 차이가 감소하였으며, 원형관 후류에서 균일한 정도는 Fig. 8(a)를 기준으로  $D_{es}/D_{el}$ 가 1.0보다 큰 경우에서 더 낮게 나타나고 이는 원형관 후류에서 공기의 와류와 관련이 있다. Fig. 8(c)는  $D_{es}/D_{el}$ 가 4.0인 경우로 흰 온도분포는 흰의 반경방향으로 변화가 크게 작용하며, 상류와 하류의 차이가 거의 없이 대칭을 이루고 있다. Fig. 8(d-e)와 (f)는 흰에 대한 유동장을 비교한 그림이다. 원형관 후류에 생기는 와류의 영향을 보면 Fig. 8(d-e)의 경우 원형관 후류에 바로 붙어서 와류의 영향을 크게 받게 되며, (f)의 경우 와류는 흰까지 미치지 못하므로 와류의 영향 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 원형관 후류의 열전달의 취약구간인 원형관의 면적(Fig. 8(d)의 A)과 타원형 흰의 면적(Fig. 8(d-e)의 A)을 비교해 보면 감소하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 타원형 흰의 장반경이 공기의 흐름과 수직하게 위치한 경우 흰 내부에서 열전도가 활발함을 알 수 있다.

## 4. 맺음말

타원형관-원형관 열교환기의 강제대류 열전달 및 유동 특성을 조사하고 원형관-원형관 열교환기와 비교하기 위하여 먼

적은 동일하고 형상이 다른 7종류의 타원형관에 대하여 수치 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 타원형관의 공기 흐름방향에 대한 흐름수직방향의 직경비 ( $D_{es}/D_{el}$ )가 증가함에 따라 압력강하와 열전달계수는 증가하였다.
- (2) 타원형관의 직경비가 크고 Reynolds수가 큰 경우 압력강하에 대한 열전달의 이득은 감소하며 설계에서 유효율의 고려가 필요하다.

향후 유효율과 흰 피치의 형상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력 양성사업의 연구결과입니다.

## 참고문헌

- [1] 2003, 서남섭, *최신 기계공학법*, 동명사.
- [2] 1996, Wang, C.C., Chen, P.Y. and Jang, J.Y., "Heat Transfer and Friction Characteristic of Convex-Louver Fin-and-Tube Heat Exchanger," *Experimental Heat Transfer*, Vol.9, pp.61-78.
- [3] 1997, Wang, C.C., Fu, W.L. and Chang, C.T., "Heat Transfer and Friction Characteristics of Typical Wavy Fin-and-tube Heat Exchanger," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.14, No.2, pp.174-186.
- [4] 1997, Wang, C.C., Lee, W.S. and Chang, C.T., "Heat and Mass Transfer for Plate Fin-and-tube Heat Exchanger with and without Hydrophilic Coating," *Working Paper*.
- [5] 2003, 강희찬, 조도영, 강민철, "원형관-원형관의 열전달 특성," *설비공학논문집*, Vol.15, pp.762-767.
- [6] 2008, 강희찬, 임복빈, 이종휘, 장병준, 안서욱, "원형관-원형관 열교환기의 유효율 이론에 관한 수치적 검증," *설비공학논문집*, Vol.16, pp.584-588.
- [7] 2004, 강희찬, 강민철, "단일 원형관-원형관에 대한 강제 대류열전달 상관식," *설비공학논문집*, Vol.16, pp.584-588.
- [8] 1994, Webb, R.L., *Principles of Enhanced Heat Transfer*, John Wiley and Sons.
- [9] 2006, *ANSYS CFX Training Manual*, Vol.124, ANSYS, Inc..