

## 공조용 핀-관 열교환기의 공기측 열유동특성에 대한 수치모사

김승택 · 최윤호\*

아주대학교 대학원 기계공학과, \*아주대학교 기계 및 산업공학부

### Numerical Modeling for Air-Side Flow Characteristics of Fin-Tube Heat Exchangers for Air-Conditioning Applications

Seung-Tech Kim and Yun-Ho Choi

Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ajou University

#### 요 약

핀-관 열교환기의 효율을 증대시키기 위하여는 열저항을 결정하는 데 있어서 중요한 역할을 하는 공기측 열전달 특성의 향상이 필요하다. 본 연구에서는 핀-관 열교환기의 공기측 성능을 해석하기 위해서 3차원 비압축성 Navier-Stokes 코드를 개발하였으며 이 코드는 시간항에 스칼라 내재적 근사분해법(scalar implicit approximate factorization)절차, 공간항에 유한체적법과 2차의 풍상차분법(upwind differencing)을 사용한다. 서로 다른 3개의 핀형상(평판핀, 슬릿핀, 파형핀)을 고려하였고 이들의 유동 및 열전달 특성을 연구하였다.

**Abstract** — In order to improve the efficiency of the fin-tube heat exchanger, the enhancement of air side heat transfer characteristics which play a major role in determining the thermal resistances is necessary. In the present study, a three dimensional incompressible Navier-Stokes code is developed to analyze the air-side performance of the fin-tube heat exchanger. It employs scalar implicit approximate factorization, finite volume formulation and second order upwind differencing in space. Three different types of fin configurations (plane fin, slit fin, wavy fin) were considered and their flow and heat transfer characteristics were investigated.

#### 1. 서 론

룸에어컨, 패키지 에어컨 등의 공조기기의 구성요소 중에서 열교환기는 압축기, 송풍기와 함께 에너지 절감 및 제조원가 면에서 중요한 요소이며, 현재와 같은 에너지 자원의 고갈, 에너지 소비의 증가 추세에 비추어 고효율, 에너지 절약형의 열교환기를 개발하는 노력은 어느 때 보다 중요하다. 일반적으로 공기와 액체 열매체 사이의 열전달을 목적으로 사용되는 핀-관 열교환기의 전열성능과 관계되는 열저항은 전열관측 열저항과 공기측 열저항, 그리고 핀과 관 접촉부의 열저항으로 대별된다. 그 중에서 공기측 열저항은 열교환기 전체 열저항의 대부분을 차지하며 따라서 열교환기의 전열성능을 향상시키기 위하여는 공기측의 전열성능의 향상이 대단히 중요하다. 이를 위하여 현재 미국과 일본 등 선진국에서는

새로운 형상의 핀을 개발하는 데 있어 많은 연구를 진행시켜 왔으나, 국내에서는 이에 대한 연구가 아직 일천하며 따라서 열교환기의 자체적인 설계기술을 확보하기 위하여 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

현재 고효율, 에너지 절약형의 열교환기를 개발하는 노력은 대부분 예비설계 및 실험을 거쳐, 수정하는 과정을 되풀이하여 필요한 열교환기 성능을 구하는 데 소요되며, 이와 같은 방법은 시간 및 비용적 측면에서 많은 어려움을 내포하고 있다. 그러나 최근에는 컴퓨터 및 수치기법의 급속한 발달에 따라, 열교환기 설계에 수치모사를 이용하는 사례가 점증하고 있으며, 이는 많은 시간과 경비가 필요한 실험횟수를 감소시키며 또한 실험으로 얻기 어려운 국소적인 유동 및 열전달 현상을 제 공함으로써 열 교환기의 열유동 특성을 이해하는 데 큰 도움이 되고 있다.

본 연구에서는 핀-관 열교환기의 공기측 유동 및 열 전달 특성을 예측할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 근래에 들어 일반적인 3차원 점성유동해석을 위하여 많은 범용 프로그램들(FLUENT, PHEONICS, FLOW3D, FIDAP 등)이 상업적으로 판매되고 있고, 이러한 범용 프로그램들이 열교환기 개발에도 일부 응용되고 있지만, 구미 선진국에서는 각 회사의 노하우나 신기술을 독자적으로 확보하고, 또한 신속히 적용하기 위하여 개발 팀들이 각자의 목적에 맞는 전용 프로그램을 확보하고 이를 연구개발에 응용하고 있다. 그러므로 국내에서도 우리의 현실에 맞는 전용 프로그램의 확보가 필요하며, 따라서 본 연구에서는 이러한 노력의 일환으로 열교환기의 공기측 유동 및 열전달의 구조적 특성을 정확히 예측할 수 있는 전산유체 코드의 개발을 도모하였다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 가상압축성 방법을 이용한 3차원의 Navier-Stokes 지배방정식의 해를 구한다. 수치해석 방법으로는 시간항에는 Euler의 내재적 방법을 사용하여 수치 안정성을 높이고, 공간항에 대하여는 유한체적법과 풍상차분법(upwind differencing)을 사용한다. 또한 복잡한 형상에 따른 단일 격자계 생성의 문제점 및 경계조건 적용의 복잡성을 감안하여 다중 블록기법을 사용하였다. 이와 같이 개발한 코드를 이용하여 세가지 핀 형상, 평판핀, 슬릿핀, 파형핀에 대한 공기측 유동을 해석하고 그 성능을 비교하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1. 3차원 Navier-Stokes 지배방정식

핀-관 열교환기 내부 유동해석을 위하여 지배방정식으로 가상압축성을 이용한 3차원 비압축성유동의 연속 방정식, 운동량방정식과 에너지방정식을 고려한다. 지배 방정식은 보존형을 사용하여, 다음과 같은 직교좌표계의 벡터식으로 표시할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$\Gamma_v \frac{\partial U_v}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

여기서 독립변수 및 종속변수 벡터  $U_v$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$ 와 예조 전화 행렬  $\Gamma_v$ 는 다음과 같다.

$$U_v = \begin{pmatrix} p \\ u \\ v \\ w \\ T \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{11} \\ \rho uv - \tau_{21} \\ \rho uw - \tau_{31} \\ (E+p)u - q_1 - \tau_{11}u - \tau_{12}v - \tau_{13}w \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{12} \\ \rho v^2 + p - \tau_{22} \\ \rho vw - \tau_{32} \\ (E+p)v - q_2 - \tau_{21}u - \tau_{22}v - \tau_{23}w \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw - \tau_{13} \\ \rho vw - \tau_{23} \\ \rho w^2 + p - \tau_{33} \\ (E+p)w - q_3 - \tau_{31}u - \tau_{32}v - \tau_{33}w \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_v = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u\beta & \rho & 0 & 0 & 0 \\ v\beta & 0 & \rho & 0 & 0 \\ w\beta & 0 & 0 & \rho & 0 \\ H_v\beta - I & \rho u & \rho v & \rho w & \rho c_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에 나타나는 모든 변수는 밀도  $\rho$ , 속도성분  $u, v, w$ , 압력  $p$ , 온도  $T$  그리고 단위 체적당 전에너지  $E$ 를 포함하여 표준 기호로 정의되어 있다. 또한 전단응력 텐서  $\tau_{ij}$ 와 열속 성분  $q_i$ 는 직교 텐서(cartesian tensor) 표기법으로 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$q_i = k \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

여기서  $\mu, \lambda$ 는 각각 점성 계수와 2차 점성계수이며,  $k$ 는 열전도계수이다. 2차 점성계수는 Stokes 가설에 의해  $\lambda = -2/3 \mu$ 이다.

또한 식(2)의 예조전화 행렬  $\Gamma_v$ 에 나타나는 변수  $\beta$ 는 가상압축성 변수이며, 이 변수는 수치기법의 수렴속도를 향상시키기 위하여 지배방정식의 고유값을 같은 크기로 조절할 수 있게 하며 다음과 같다(자세한 유도과정은 참고문헌 1과 같다).

$$\beta = \frac{1}{V_r^2} \quad (4)$$

여기서  $V_r$ 은 입구 유동속도에 대한 기준값이다.

### 2.2. 일반 곡선좌표계 변환

입의의 형상을 가진 물체에 대한 유동장 해석시 변환

$(x, y, z) \leftrightarrow (\xi, \eta, \zeta)$ 와 같은 일반 곡선좌표계를 도입하는 것이 편리하며, 식(1)은 다음과 같은 보존법칙 형태의 벡터식으로 표시된다.

$$\Gamma_v \frac{\partial U_v}{\partial t} + J \left[ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial \zeta} \right] = 0 \quad (5)$$

여기서 종속변수 벡터  $\bar{F}$ ,  $\bar{G}$ 와  $\bar{H}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{F} &= (F\xi_x + G\xi_y + H\xi_z)/J \\ \bar{G} &= (F\eta_x + G\eta_y + H\eta_z)/J \\ \bar{H} &= (F\zeta_x + G\zeta_y + H\zeta_z)/J \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $J$ 는 직교좌표계와 곡선좌표계 사이의 변환 자코비안  $J = 1/\det[\partial(x, y, z)/\partial(\xi, \eta, \zeta)]$ 이다.

### 3. 수치해석 방법

본 연구에서는 수치해석 방법으로 내재적기법의 시간 전진법을 사용하며, 시간항에 스칼라 내재적 근사분해법 (scalar implicit approximate factorization)<sup>[2]a</sup>, 공간항에 2차의 풍상차분법을 이용한 유한체적법을 사용하였다. 스칼라 내재적 근사분해법 절차는 계산의 효율성을 위하여 ADI<sup>[4]</sup>와 Pulliam과 Chaussee<sup>[5]</sup>의 대각화 절차를 이용하여 일반적인 내재적 기법에 요구되는 내재변의 블록 행렬 계산을 피하고 스칼라 행렬로 변환하는 방법으로서 식(5)에 대하여 다음과 같은 3단계로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} [I + J\delta t \left( \frac{\Lambda_\xi + |\Lambda_d|}{2} \frac{\partial^-}{\partial \xi} + \frac{\Lambda_\xi - |\Lambda_d|}{2} \frac{\partial^+}{\partial \xi} \right)] S_\xi \delta U^* &= S_\xi \Gamma^{-1} \Delta U \\ [I + J\delta t \left( \frac{\Lambda_\eta + |\Lambda_n|}{2} \frac{\partial^-}{\partial \eta} + \frac{\Lambda_\eta - |\Lambda_n|}{2} \frac{\partial^+}{\partial \eta} \right)] S_\eta \delta U^{**} &= S_\eta \delta U^* \\ [I + J\delta t \left( \frac{\Lambda_\zeta + |\Lambda_d|}{2} \frac{\partial^-}{\partial \zeta} + \frac{\Lambda_\zeta - |\Lambda_d|}{2} \frac{\partial^+}{\partial \zeta} \right)] S_\zeta \delta U &= S_\zeta \delta U^{**} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $S_\xi$ ,  $S_\eta$ 와  $S_\zeta$ 는 역 예조건화 행렬  $\Gamma_v^{-1}$ 와 비점성 플럭스벡터의 자코비안의 곱 행렬  $\Gamma^{-1}A$ ,  $\Gamma^{-1}B$ 와  $\Gamma^{-1}C$ 의 고유벡터 행렬이며,  $\Lambda$ 는 이의 고유치 행렬이다(여기서  $A = J(\partial \bar{F} / \partial U)$ ,  $B = J(\partial \bar{G} / \partial U)$ ,  $C = J(\partial \bar{H} / \partial U)$ ). 내재변에 나타나는 미분항의 상첨자(+, -)는 고유치의 부호에 따른 풍상차분의 방향을 표시하며, 이는 내재변이 스칼라 삼선 대각 행렬 (scalar tridiagonal matrix)로 나타날 수 있도록 미분항에 대하여는 1차의 풍상차분을 적용하였다. 정상상태의 잔여항  $\Delta U$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta U = -\delta t J \left( \frac{\partial \bar{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial \zeta} \right) \quad (8)$$

식(8)의 잔여항을 계산하는 데 있어서는 비점성항에 대

하여는 2차의 풍상차분법을 사용하며, 점성항에 대하여는 중심차분법을 적용한다. 비점성항은 Coakley의 특성 변수에 기초한 소산항을 이용한 2차의 풍상차분법을 사용한다<sup>[2]</sup>. 예를 들어 식(8)에서  $\xi$ -방향의 플럭스 벡터  $\bar{F}$ 에 대한 미분을 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \xi} = \bar{F}_{i+1/2}^* - \bar{F}_{i-1/2}^* \quad (9)$$

여기서  $\delta \xi = 1$ 로 놓았으며, 상첨자 asterisk는 인공감쇄항이 포함되어 있음을 의미한다. 따라서,

$$\bar{F}_{i+1/2}^* = \frac{1}{2} (\bar{F}_i + \bar{F}_{i+1} - D_{i+1/2}) \quad (10)$$

여기서 소산함수  $D_{i+1/2}$ 를 계산하는 데 특성이론을 기초로 하는 상사변환이 사용되었으며<sup>[2]</sup>, 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{i+1/2} &= S_\xi^{-1} \left[ |\Lambda_d| \delta W_{i+1/2} + \frac{1}{2} (\Lambda_\xi - |\Lambda_d|) \delta W_{i+3/2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} (\Lambda_\xi + |\Lambda_d|) \delta W_{i-1/2} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $S_\xi$ 는 전술한  $\xi$ -방향의 고유벡터의 행렬이며,  $\Lambda_\xi$ 는  $\xi$ -방향의 고유치를 나타내는 대각 행렬이다.  $S_\xi^{-1}$ 와  $\Lambda_\xi$ 의 요소들은 Roe averaging<sup>[6]</sup>을 사용하여  $(i + 1/2)$ 의 격자면 (cell face)에서 계산되며 특성치 증분  $\delta W_{i+1/2} = S_\xi \cdot (U_{i+1} - U_i)$ 로 정의된다. 위와 유사한 식을  $\eta$ 와  $\zeta$  방향에도 적용할 수 있다.

### 4. 경계조건

본 연구에서 고려한 핀-관 열교환기의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같으며 이는 열교환기의 공기측 유로를 단 순화시킨 것으로서, 관배열은 엇갈린 2열관이다. 전체 유로의 길이는  $L$ 이며 관경, 중간격, 횡간격, 핀간격 및 핀 두께는 각각  $D$ ,  $S_u$ ,  $S_b$ ,  $F_p$ ,  $F$ 로 표기하였다. 계산영역은  $x$  방향으로 관벽면의 영향을 배제하고 관 후류에서 발생하는 재순환영역을 적절히 포착하기 위하여 입구면은 1열관으로부터 약 5D 앞쪽에 위치하며, 출구면은 핀의 종류에 따라 2열관으로부터 10D와 35D 사이에 위치하도록 하였다.  $z$  방향의 계산영역은 핀의 종류에 따라 대칭성 또는 반복성을 고려하였다. 입구면과 출구면의 경계조건은 특성곡선해법 (method of characteristics)을 이용하여 입구면에는 정체압력, 일정한 온도, 유동각도 ( $v/u$ ) 조건을 사용하였고, 출구면에서는 일정한 압력 조건을 부과하였다. 모든 관과 핀 벽면에서는 점착조건을 주었으며 일정한 온도를 유지하는 것으로 처리하였다. 이상의 경계조건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

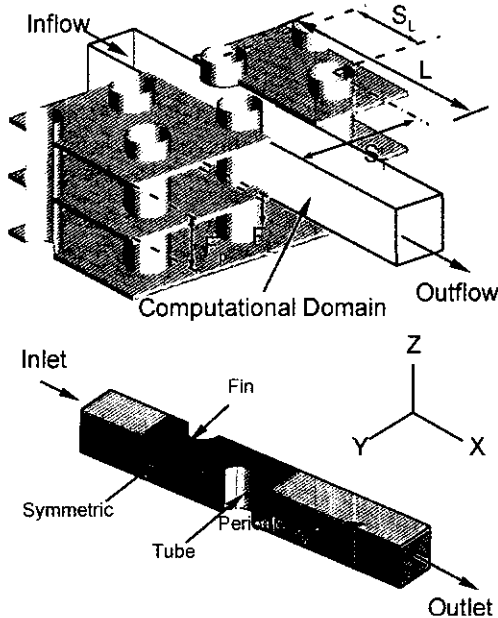


Fig. 1. Schematic of a fin-tube heat exchanger and boundary conditions.

- 입구면 : 정체압력( $p^0 = p_m^0$ ), 일정온도( $T = T_m$ ), 유동차도( $v/u, w/u = \text{const}$ ), Riemann Invariant Extrapolation
- 출구면 : 일정 압력( $p = p_{\text{exit}} = 1 \text{ atm}$ ),  $u, v, T$  외삽법
- 대칭면 : 대칭 조건
- 주기면 : 주기 조건
- 관, 평판 및 핀 벽면 : 점착조건( $u = v = w = 0$ ),

$$\text{일정온도}(T = T_{\text{wall}}), \partial p / \partial n = 0 \quad (12)$$

### 5. 결과 및 검토

본 연구에서는 판경 9.52 mm의 엇갈린 2열관에 대하여 3차원 유동장 해석을 수행하였다. 고려하는 판형상은 평판핀, 슬릿핀, 파형핀이며, 이들에 대한 기하학적 형상의 기본 치수는  $S_L = 21.65 \text{ mm}$ ,  $S_T = 25.0 \text{ mm}$ ,  $F_p = 1.3 \text{ mm}$ ,  $F_f = 0.11 \text{ mm}$ 이다(Fig. 2 참조). 공기의 유입속도는 0.7 m/s에서 2.0 m/s의 범위에서 4가지 유속 (0.7, 1.0, 1.5, 2.0 m/s)을 고려하였고, 유입되는 공기의 온도는 21°C, 벽면의 온도는 45°C이다. 본 연구에서 제시한 열전달 계수는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$h = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) / A \Delta T_{AM} \quad (13)$$

여기서  $\dot{m}$ 은 질량유량, A는 전열면적,  $T_1$ 은 입구온도,  $T_2$ 는 출구온도이며,  $\Delta T_{AM}$ 은 벽면과 공기 사이의 산술평균 온도차이다.

먼저 본 연구에서 개발한 코드의 검증을 위하여 판경 7 mm인 평판핀에 대하여 계산을 수행하였고 이를 다양한 수치해석 결과 및 실험결과와 비교하였다. Fig. 3은 본 계산의 결과 중 압력강하량 및 열전달 계수를 윤준원 등<sup>17)</sup>의 계산결과, 강희찬 등<sup>18)</sup>의 실험결과 및 상용코드인 Fluent의 계산결과<sup>19)</sup>와 비교한 그림으로서 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

이러한 검증을 바탕으로 판경 9.52 mm인 평판핀에 대해서 계산을 수행하였다. 그 기하학적 형상 및 사용한 격자계는 Fig. 2(a)와 같으며, 19개의 다중 블록과 128x21x10의 H형 격자계를 사용하였다(본 연구에서는 x방

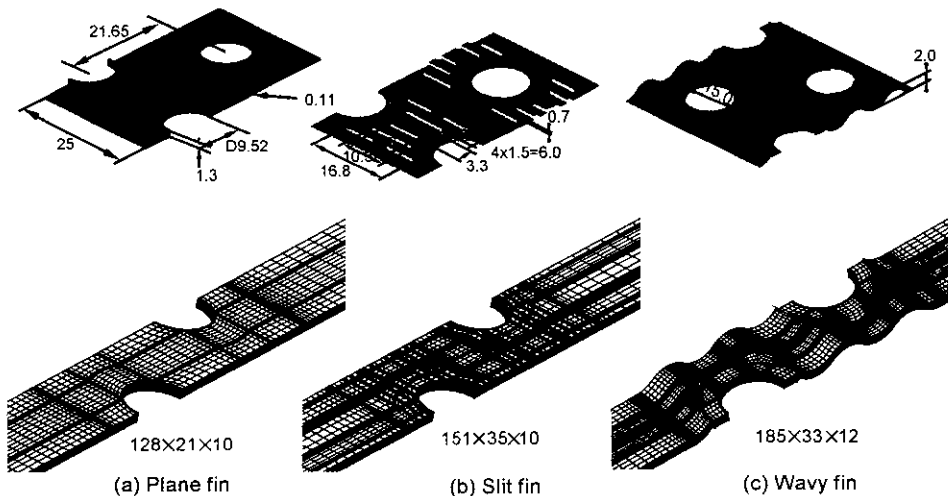


Fig. 2. Geometries and grid systems for plane, slit and wavy fins.

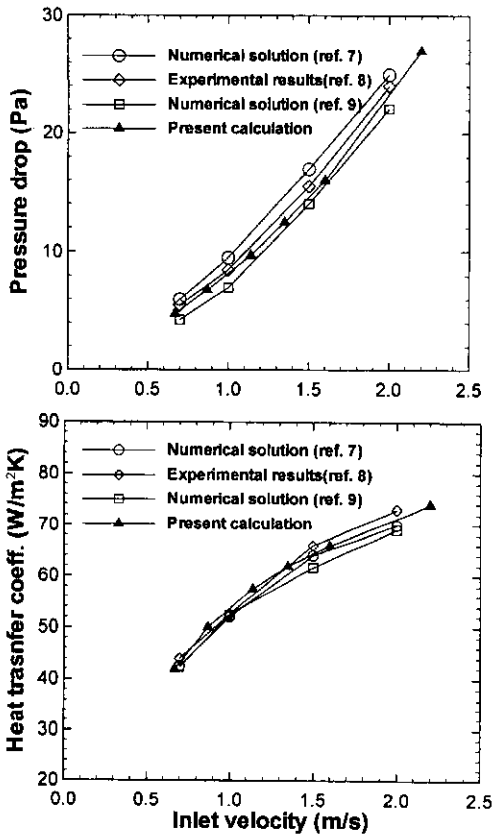


Fig. 3. Comparison of pressure drop and heat transfer coefficient with other numerical and experimental results ( $D = 7.0$  mm).

향의 격자수를 약 30% 줄여 계산하여 보았으며, 현재의 격자수를 이용한 결과와 비교하여 압력강하량과 열

전달계수가 1% 미만에서 일치함을 볼 수 있었다.). Fig. 4(a)는 공기 유입속도 1 m/s에서의 평판면, 대칭면 그리고 평판면과 대칭면의 중간지점 위치에서의 속도분포를 보여준다. 대칭면 쪽으로 이동할수록 관 주위의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있고 이는 평판면에서 멀어질수록 핀에 의한 점성의 영향이 감소하기 때문이다. Fig. 4(b)는 같은 경우의 유선분포를 나타내고 있다. 1열관 후류의 재순환 영역은 그 크기가 미약하나, 2열관 후류에서는 비교적 큰 재순환 영역을 볼 수 있으며 그 크기는 대칭면에서 약 8D 정도이다. 또한 같은 그림에서는 2열관 바로 뒤와 하류 쪽에 2개의 vortex가 형성되는 것을 볼 수 있으며, 이와 같은 vortex의 분리는 핀의 영향인 것으로 보인다. Fig. 5는 각각의 면에서의 온도분포를 보여준다. 대칭면에 다가갈수록 강제대류의 영향이 증가하여 1열, 2열관 사이에서 찬 공기의 분포가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 6은 공기의 유입속도 변화에 따른 유선분포와 온도분포를 보여준다. 유선분포에서는 0.7 m/s의 저속의 경우 관 후류에서 재순환 영역이 형성되지 않으나, 1.0 m/s 이상의 속도에서는 1열관 후류에 작은 재순환 영역이, 2열관 후류에서는 상당히 큰 재순환 영역이 형성하여 입구속도의 증가에 따라 그 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 온도분포의 경우, 속도의 변화에 따른 온도분포의 변화는 확인하며, 속도의 증가에 따라 강제대류의 영향이 커지게 되어 하류 쪽의 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

평판면에 이어 본 연구에서는 슬릿핀에 대한 계산을 수행하였다. 이와 같은 슬릿핀은 유동장 중에 단속적인 표면을 제공하여 경계층이 유동방향으로 발달하는 것을 단속하여 핀 표면에 전반적으로 얇은 경계층을 유지시킴으로써 높은 열전달계수를 얻을 수 있도록 하는 것으로 알려져 있다. 본 계산에 사용한 슬릿핀의 형상 및 격

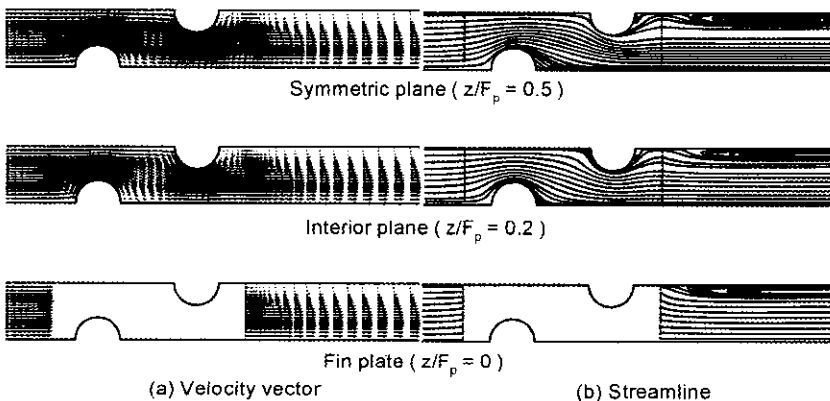


Fig. 4. Velocity vectors and streamline contours on symmetric, interior, and fin plate planes for the inlet velocity of 1 m/s (plane fine).

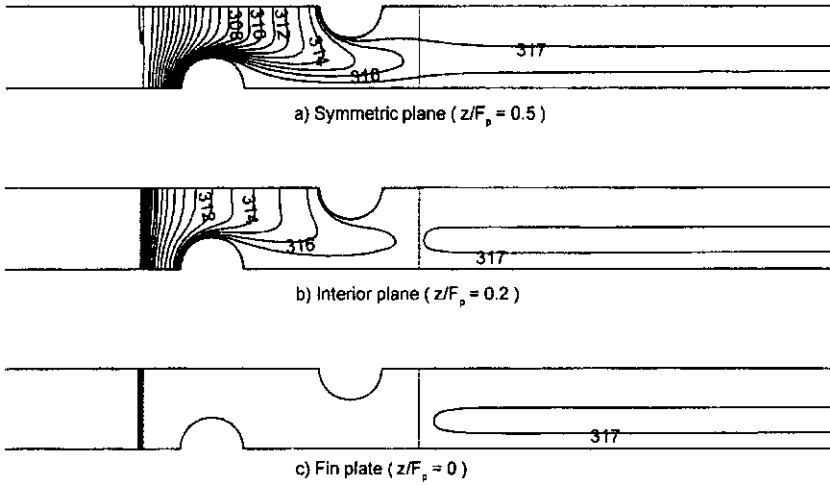


Fig. 5. Temperature contours on symmetric, interior, and fin plate planes for the inlet velocity of 1 m/s (plane fin).

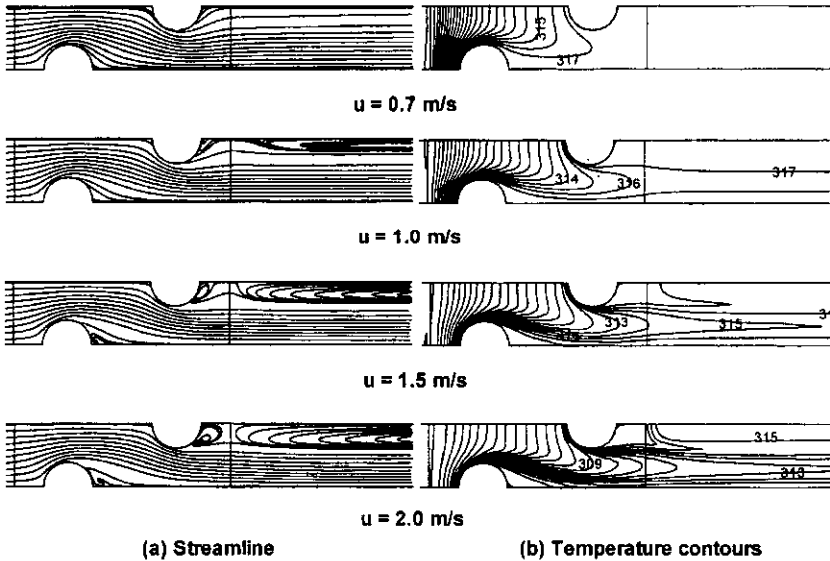


Fig. 6. Streamline and temperature contours for various inlet velocities on symmetric plane (plane fin).

차계는 Fig. 2(b)와 같으며, 1368개의 다중 블록과 151×35×10의 H형 격자계를 사용하였다.

Fig. 7은 입구속도 1 m/s에서 슬릿핀에 대하여 핀-핀 사이의 중간 단면과, 관-관 사이의 25% 단면에서의 속도분포, 유선 및 온도분포를 비교한 그림이다. Fig. 7(a)는 속도분포를 보여준다. 핀-핀 사이의 속도분포는 위의 평판핀과 유사하나 슬릿핀의 경우 유동의 흐름이 전체적으로 슬릿의 배열을 따르는 것을 볼 수 있으며, 또한 관과 슬릿 사이의 유동은 슬릿의 모서리 형상을 따라 지나가며 이는 비교적 크게 가속하고 있음을 볼 수 있다.

관-관 사이의 유동에서는 슬릿의 존재로 인하여 유동이 크게 교란되며 따라서 상당한 유동의 혼합이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)의 유선에서는 평판핀과 달리 재순환 영역이 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있으며, 이는 슬릿의 부착된 모양이 관을 감싸는 형태로 설계되어 관주위에 유동로를 형성하여 관의 후류 쪽에 강제대류의 영향이 증가되기 때문인 것으로 보인다. Fig. 7(c)는 동일한 경우의 온도분포이다. 입구공기가 2열관 중간부분을 통과하면 하류의 온도분포는 평판핀에 비하여 더욱 균일하게 나타나며 또한 상대적으로 높아 거의

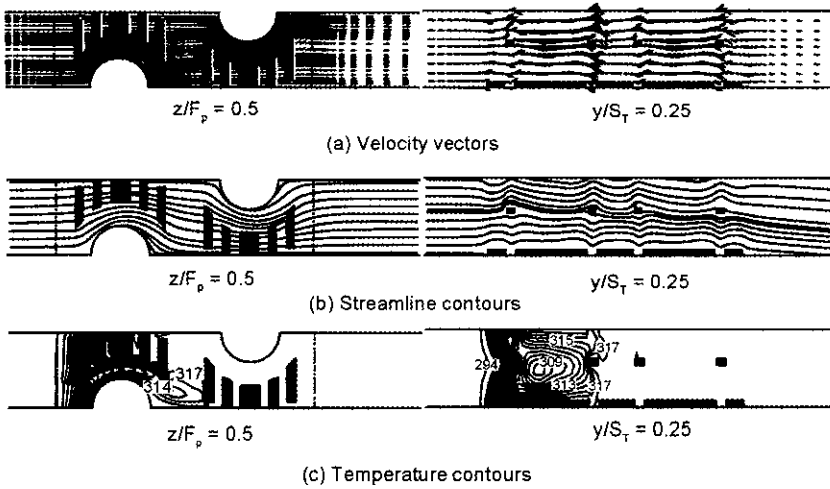


Fig. 7. Velocity vectors, streamline and temperature contours at  $z/F_p=0.5$  and  $y/S_f=0.25$  for the inlet velocity of 1 m/s (slit fin).

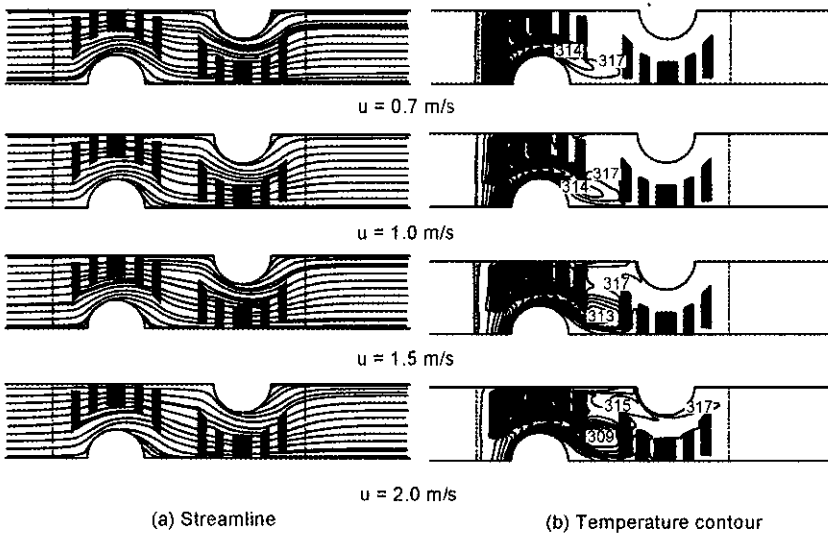


Fig. 8. Streamline and temperature contours for various inlet velocities on symmetric plane (slit fin).

관의 표면온도에 근접하는 것을 볼 수 있다(약 5D 후류에서 44.97°C로 나타난다). 이는 슬릿핀의 경우 평판 핀 보다 효과적인 열전달이 이루어지고 있음을 보여준다.

Fig. 8은 핀-핀 사이 중간 단면에서 공기의 유입속도 변화에 따른 유동장의 변화를 보여준다. Fig. 8(a)는 유선 분포이며 입구공기의 속도가 증가하여도 1열과 2열 관 후류에 재순환 영역이 형성되지 않음을 볼 수 있다. Fig. 8(b)는 동일한 경우의 온도분포로서 낮은 유입속도 ( $u=0.7$  m/s)에서는 하류의 온도가 거의 관벽의 온도와 같은 값을 가지며 입구속도의 증가에 따라 하류의 온도

가 약간 감소함을 볼 수 있다. 핀 하류 5D에서의 평균 온도는 속도 0.7 m/s에서의 44.97°C이며 속도 2 m/s에서는 44.5°C로 약 0.5°C가 감소된다.

본 연구에서 마지막으로 고려한 핀형상은 파형핀이다. 파형핀은 핀의 굴곡으로 인하여 복잡한 유동과 함께 난류가 촉진되므로 보다 높은 열전달 계수를 얻게 해주며, 슬릿핀에 비해 제조가 비교적 용이하므로 실제 제품에 많이 쓰이고 있다. 그러나 열전달 계수의 향상이 슬릿 핀에는 미치지 못하며, 성능의 대폭적인 증가에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 본 제산에 사용한 파형

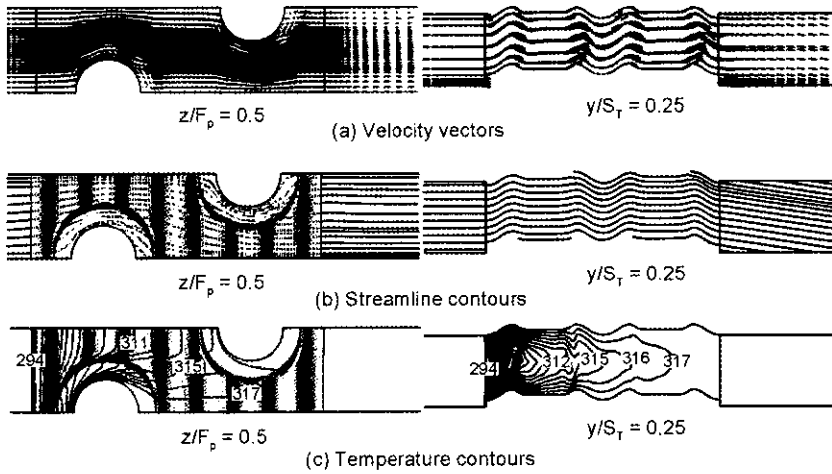


Fig. 9. Velocity vectors, streamline and temperature contours at  $z/F_p=0.5$  and  $y/S_f=0.25$  for the inlet velocity of 1 m/s (wavy fin).

핀의 형상 및 격자계는 Fig. 2(c)와 같으며, 25개의 다중 블록과  $185 \times 33 \times 12$ 의 H형 격자계를 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 파형핀은 굴곡 영역과 관 주위의 평판 영역, 그리고 두 영역의 연결부위로 나누어져 있어 복잡한 형상을 이루고 있다. 본 격자계는 이러한 형상을 잘 포착할 수 있도록 구성되었으며, 이 그림을 통해 평판핀에 비해 상대적으로 복잡한 유동과 우수한 열 전달 효과를 예측할 수 있다.

Fig. 9는 파형핀의 계산결과로서 입구공기 속도 1 m/s에서 핀-핀 사이의 중간 단면과, 관-관 사이의 25% 단

면에서의 속도분포, 유선과 온도분포를 나타낸 그림이다. 속도벡터, 유선에서는 유동의 흐름이 관 주위를 잘 감싸면서 흐르며 1열 및 2열 후류에 재순환 영역이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 파형핀도 슬릿핀과 마찬가지로 관 주위에 유동로를 형성하며, 이는 슬릿핀의 불연속적인 유로와 달리 관 주위의 평면영역과 굴곡영역의 높이차에 의한 연속적인 유로이다. 이러한 유로로 인해 유선은 관 주위를 완전히 감싸며 따라서 재순환 영역이 형성되지 않게 된다. 온도분포에서는 입구공기가 1 열관을 통과하면 하류의 온도분포는 거의 균일하게 나

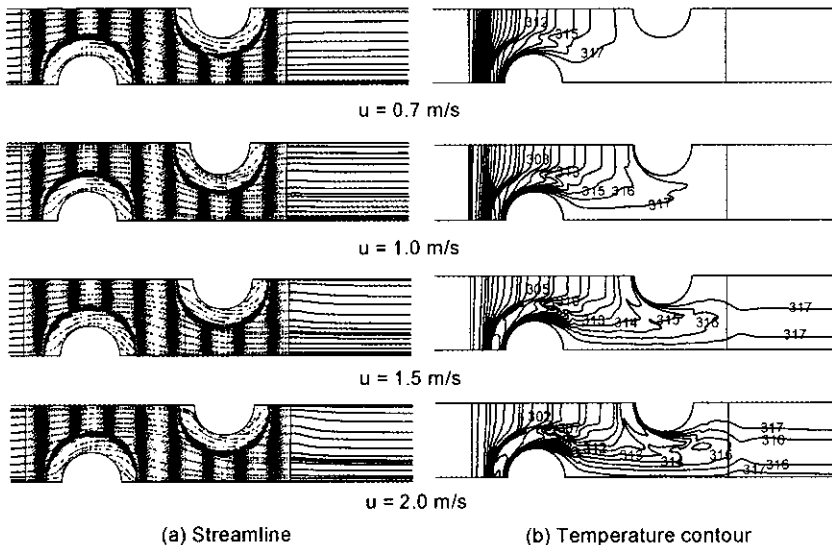


Fig. 10. Streamline and temperature contours for various inlet velocities on symmetric plane (wavy fin).



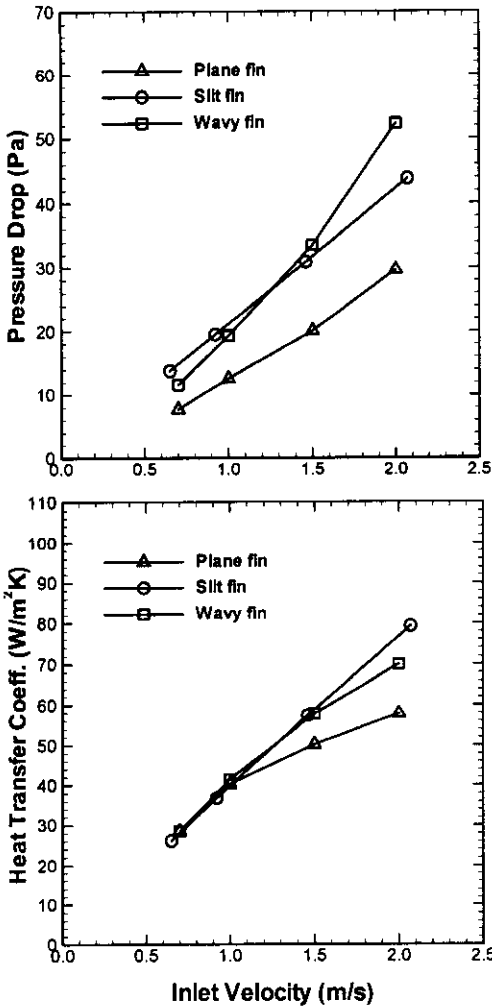


Fig. 11. Comparison of pressure drop and heat transfer coefficient for plane, slit and wavy fin.

타나며 관 표면온도에 근접하는 것을 볼 수 있다(5D 후류에서의 평균온도는 44.8°C이다).

Fig. 10에서는 계산결과 중 핀-핀 사이 중간단면에서의 유선과 온도분포를 입구공기의 속도변화에 따라 비교하였다. 입구속도에 따른 유동 특성의 변화는 슬릿핀의 경우와 유사한 것으로 보이며, 유속 2 m/s에서 2열관 후류 5D의 평균온도는 43.2°C로서 슬릿핀 보다 낮은 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 공기의 유입속도 변화에 따른 평판핀, 슬릿핀, 파형핀의 압력강하량과 열전달 계수를 비교한 그림이다. 압력강하량은 고려한 유입속도 범위에서 평판핀의 경우와 비교하여 슬릿핀은 약 1.5배, 파형핀은 약 1.5배~1.7배의 증가가 있으며, 열전달계수는 슬릿핀의 경우 1배~1.4배, 파형핀의 경우 1배~1.2배

증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 압력강하량이나 열전달 계수 측면 모두에서 슬릿핀이 가장 우수한 것을 볼 수 있다. 또한 슬릿핀, 파형핀과 같은 핀 형상의 변화는 전열 성능을 향상시키지만 그로 인한 유동저항의 증가는 전열성능의 향상에 비해 상대적으로 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 가상압축성을 이용한 3차원 Navier-Stokes 코드를 개발하여 공조기기의 중요 구성요소인 핀-관 열교환기의 공기측 유동 및 전열특성에 대한 수치 해석을 수행하였다. 지배방정식으로는 층류의 3차원 비압축성 유동의 연속 방정식, 모멘텀 방정식과 에너지 방정식을 고려하였으며, 이들 방정식은 강한 보존형을 사용하여 유동특성의 전체적인 보존을 용이하게 하였다. 수치해석 기법으로는 시간항에 Euler의 내재적 방법을 기본적인 적분방법으로 사용하고, 공간항에 대하여는 유한 체적법과 풍상차분법을 사용하였다. 이와 같이 개발한 코드를 사용하여 열교환기의 전열 성능에 큰 영향을 미치는 다양한 핀 형상(평판핀, 슬릿핀, 파형핀)에 대한 계산을 수행하고 그 성능을 비교하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 개발한 코드의 검증용 위하여 관경 7 mm인 평판핀에 대해서 계산을 수행하였고 기존의 실험결과 및 수치해석 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 이러한 검증을 통하여 개발한 코드의 신뢰성을 확인하였다.

(2) 핀-관 열교환기의 계산에 있어서 관경 9.52 mm인 3가지 핀형상(평판핀, 슬릿핀, 파형핀)에 대해서 해석하였다. 그 결과, 열전달 성능측면에서는 저속에서는 세 가지 핀형상의 성능이 비슷하나 고속으로 가면서 슬릿핀이 가장 우수한 것으로 나타났다.

(3) 압력강하량은 전속도 범위에서 평판핀이 가장 작으며, 슬릿핀과 파형핀은 저속에서는 그 크기가 유사하나, 고속에서는 파형핀이 크게 된다. 이는 본 연구에서 사용하는 파형핀의 경우 관 주위의 깊이는 유로와 파형의 높은 굴곡차에 의해 유동저항이 커지는 것으로 보인다. 또한 슬릿핀, 파형핀과 같은 핀 형상의 변화는 전열 성능을 향상시키지만 그로 인한 유동저항의 증가는 전열 성능의 향상에 비해 상대적으로 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.

### 사용기호

A : 전열 면적[m<sup>2</sup>]

- $C_p$  : 정압 비열[J/(kg · K)]  
 $D$  : 관경[mm]  
 $F_p$  : 핀간격[mm]  
 $F_r$  : 핀두께[mm]  
 $h$  : 대류 열전달계수[W/(m<sup>2</sup> · K)]  
 $\dot{m}$  : 공기의 질량유량[kg/s]  
 $p$  : 압력 [Kg/(m · sec<sup>2</sup>)]  
 $S_L$  : 열간격[mm]  
 $S_T$  : 단간격[mm]  
 $T$  : 온도[K]  
 $\Delta T_{AM}$  : 산술평균 온도차[K]  
 $\beta$  : 가상압축성 변수  
 $\tau_{ij}$  : 전단응력[N/m<sup>2</sup>]

### 참고문헌

1. Merkle, C.L.: "Preconditioning Methods for Viscous Flow Calculations, in Computational Fluid Dynamics Review", M. Hafez and K. Oshima (eds.), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 419-436 (1995).
2. Coakley, T.J.: "Implicit Upwind Methods for the Compressible Navier -Stokes Equations", AIAA Journal, 23, 374-380 (1985).
3. Choi, D. and Knight, C.J.: "Computation of Three Dimensional Viscous Linear Cascade Flows", AIAA Journal, 26, 1477-1482 (1988).
4. Douglas, J. and Gunn, J.E.: "A General Formulation of Alternating Direction Method -Part I- Parabolic and Hyperbolic Problems", Numerische Mathematik, 82, 428-453 (1964).
5. Pulliam, T.H. and Chaussee, D.S.: "A Diagonal Form of an Implicit Approximate Factorization Algorithm", Journal of Computational Physics, 39, 347-363 (1981).
6. Roe, P.L.: "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes", Journal of Computational Physics, 43, 357-372 (1981).
7. 윤준원, 윤점열, 김무환: "핀-관 열교환기의 공기축 유동 및 전열특성에 관한 수치해석적 연구", 공기조화 냉동공학회 동계 학술발표논문집, 74-79 (1995).
8. 강희찬, 김무환, 윤점열, 김현영: "공조기용 열교환기의 공기축 유동 및 열전달 특성을 고찰하기 위한 확대모형 실험", 공기조화 냉동공학회 동계 학술발표논문집, 42-47 (1995).
9. 손덕영: "핀-관 열교환기의 공기축 유동 및 열전달 특성에 관한 수치해석적 연구", 아주대학교 대학원 석사학위 논문 (1998).