

V-형 사각리브에 의한 난류열전달 해석

이영모* · 김광용**

Analysis of turbulent heat transfer over V-shaped ribs

Young-Mo Lee*, Kwang-Yong Kim**

Key Words : V-shaped rib(V-형 리브), Navier-Stokes analysis(나비에스톡스 해석), Turbulent heat transfer(난류열전달)

ABSTRACT

Numerical analysis of turbulent flow in three-dimensional channel with V-shaped ribs extruded on both walls has been carried out. Reynolds-averaged Navier-Stokes are calculated for analysis of fluid flow and heat transfer. Shear stress transport (SST) turbulence model is used as a turbulence closure. Computational results for heat transfer rate show good agreements with experimental data.

1. 서론

유동장 내의 유동간섭물은 일반적으로 난류 발생을 촉진시켜 열전달을 증가시킨다. 이런 원리를 이용하여 열교환기, 가스 냉각식 장치, 전자부품 냉각장치 및 터빈 블레이드 등에서는 내부 열전달면에 주기적인 유동 간섭물로서 리브, 덤플, 핀 등이 사용되어지고 있으며, 그 중 리브는 유동 박리를 유발하여 난류 생성을 촉진함으로써 열전달을 향상시킨다.

열전달 증진을 위해 사용되는 리브의 종류는 직각 리브(Perpendicular rib), 경사진 리브(Angled rib), 엇갈린 리브(Crossed rib), V-형 리브(V-shaped rib), 그리고 \wedge -형 리브(\wedge -shaped rib) 등이 있다. Jia 등⁽¹⁾ 등은 V-형 리브가 같은 형상의 직교된 다른 리브들보다 같은 크기의 채널에서 강한 이차 난류 형성을 촉진시켜 높은 열전달을 가진다고 보고 하였다. 또한 Han⁽²⁾ 등은 실험을 통하여 V-형 리브는 경사진

리브보다 두 배의 이차 난류 형성을 촉진시킨다고 보고 하였다. 아울러, 전술한 리브들을(직각 리브를 제외 한) 상하 같은 위치에 부착한 후 45° 와 60° 의 각도를 주고 실험을 하여 각각에 대한 열전달 계수를 보고 하였다. 그 결과 역시 V-형 리브가 가장 좋은 열전달을 보이며 가장 큰 압력 강하를 나타내고, 엇갈린 리브가 가장 작은 압력 강하를 보이지만, 열전달은 가장 떨어지는 것으로 보고하고 있다. Olsson 과 Sunden⁽³⁾, Gao 와 Sunden⁽⁴⁾도 사각채널에서 V-형상 리브가 가장 좋은 열전달을 가진다고 보고하고 있다.

수치 해석적 연구로는 Jia 등⁽¹⁾ 이 사각 채널 안에 상, 하 같은 위치에 V-형 리브를 배열하고 각도를 45° 와 60° 두 가지 경우에 대해 레이놀즈수 1400-3000 영역에서 RANS((Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 결과를 실험결과와 비교하였다. 또한 Iacovides 와 Raisse⁽⁵⁾ 등은 리브가 배열된 사각 덕트를 회전시켜 유동특성과 열전달 특성을 3가지 다른 난류 모델을 사용하여 분석하였다. Su 등⁽⁶⁾ 은 45° 각도의 V-형 리브를 가진 사각 채널을 회전시켜 RANS 해석 결과를 Lee 등⁽⁷⁾의 실험 결과와 비교 하였다.

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : leeym77@inhaian.net

본 연구에서는 수치최적화를 목적으로 Fig. 1에서와 같이 채널 상하 벽 동일한 위치에 리브가 부착된 경우에 대해 RANS 해석을 통해 삼차원 열 유동 해석을 수행하였다.

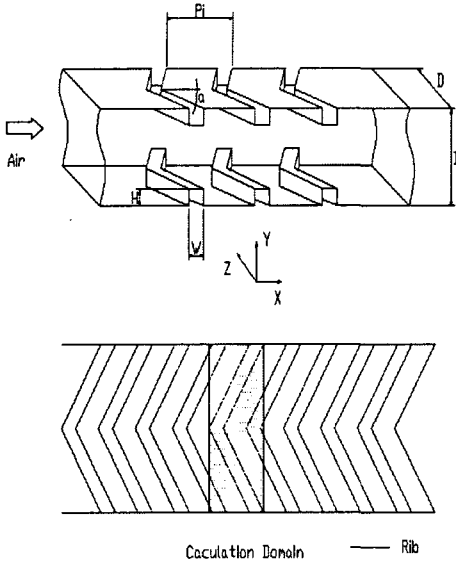


Fig. 1 Geometric parameters and calculation domain

2. 유동해석 방법

본 연구에서는 복잡한 삼차원 유동 및 대류열전달 해석을 위하여 비정렬 격자계(unstructured grid)를 채택한 범용소프트웨어인 CFX-5.7.1⁽⁸⁾을 사용하였다. 리브가 연속적으로 배열된 채널에서 한주기만을 계산영역으로 하여 해석하였는데, 이 경우 지속적인 압력강하와 온도상승에 대해 주기조건을 적용하기 위해 Kim과 Kim⁽⁹⁾이 사용한 방법을 사용하여 주유동 방향의 운동량 방정식과 에너지 방정식을 다음과 같이 변환하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

(1)

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x_i} \right] = \gamma \delta_{ij}$$

(2)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C_p U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] - \sigma U_j \delta_{ij}$$

(3)

여기서 변환된 압력 $\mathcal{P}(x, y, z)$ 과 변환된 온도 $\mathcal{T}(x, y, z)$ 는 유동의 주기성을 고려하여 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathcal{P}(x, y, z) = \langle p(x, y, z) \rangle + \gamma x$$

(4)

$$\mathcal{T}(x, y, z) = \langle T(x, y, z) \rangle - \sigma x$$

(5)

γ 는 주 유동방향의 압력강하율을 나타내며, σ 는 다음과 같이 벽으로 유입되는 열유속으로 인한 온도상승률을 나타낸다.

$$\sigma = \frac{q_w (A_d + A_w)}{P_i U_b A_{in}}$$

(6)

레이놀즈 응력항을 계산하기 위하여 난류모델로 SST(Shear Stress Transport) 모델⁽¹⁰⁾을 사용하였다. SST모델은 역 압력구배로 인한 유동박리(flow separation)의 예측에 상당히 효과적이고⁽¹¹⁾ 난류 열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 보고된 바 있다. 이 모델의 사용으로 난류 열전달 해석에서 중요한 역할을 하는 벽 근처의 난류유동해석의 정확성을 높일 수 있다.

격자계는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 사면체의 비정렬 격자계로 구성하였으며, 벽 근처 속도구배의 정확한 해석을 위해 벽 근처 격자는 육면체로 구성하였으며 벽에서의 첫 번째 사면체 격자는 y^+ 가 1이하⁽¹²⁾가 되도록 0.0002D에 위치시켰다. 특히 리브각이 작은 경우에는 계산영역에 여러 개의 리브들이 잘린 단편들이 포함되므로 주기 경계면 상에서 다수의 유동박리가 발생하여, 계산의 수렴성이 저하되므로 수렴보장을 위한 신중한 격자구성이 요구된다.

경계조건으로는 주유동방향의 주기면에서 주기조건(periodic condition)을 사용하였고, 리브가 위치한 면과 위치하지 않은 면 모두에서 일정한 열 유속(constant heat flux condition) 조건을 사용하였다. 격자 의존성을 없애기 위한 격자테스트를 거친 후 총 11만 9천개의 격자가 사용되었다. Fig. 3은 격자테스트의

결과를 나타내고 있다.

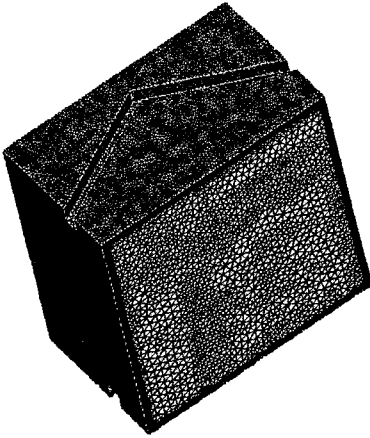


Fig. 2 Example grids

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 V-형 리브를 지나는 유동 및 열전달을 해석하여 Han 등⁽²⁾의 실험 결과와 비교하였다. 채널길이 대 채널의 수력직경(L/D) 비를 20, 리브의 높이 대 수력직경(H/D)의 비를 0.0625, 리브간 거리 대 리브의 높이비(Pi/H)를 10, 리브의 중심 경사각 α 를 60° 으로 하여 해석을 수행하였다. Fig. 4에서는 레이놀즈수에 따른 Nusselt 수의 변화를 실험치와 비교하고

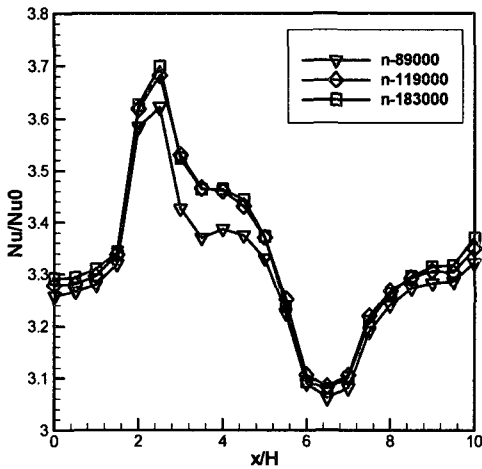


Fig. 3 Grid dependency test: $Pi/H=10.0$, $H/D=0.0625$, $W/H=1.0$, $\alpha=60^\circ$ and $Re=23,000$

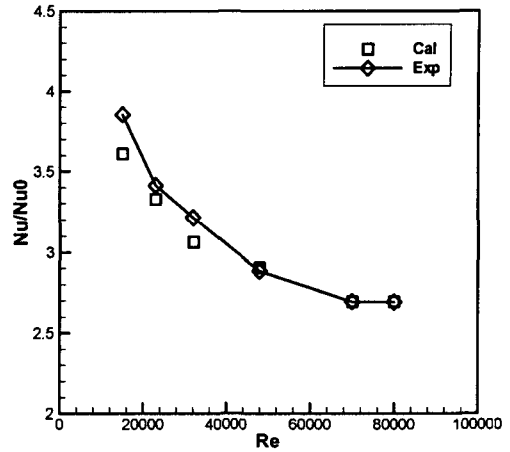


Fig. 4 Comparison of local nusselt number distributions: $Pi/H=10.0$ $H/D=0.0625$ $W/H=1.0$ $\alpha=60^\circ$

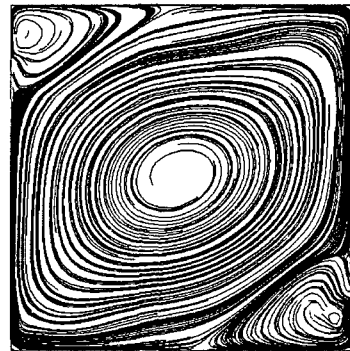


Fig. 5 streamlines on x-y plane

있다. 계산결과는 저 레이놀즈수 영역에서는 실험치와 다소의 차이를 보이고 있으나, 5,000 이상의 레이놀즈수에서는 실험치와 매우 잘 일치하고 있다. 입구에서 유입되어 들어온 열 유동은 리브를 지나면서 강한 삼차원 유동특성을 나타내게 됨을 주 유동에 수직한 단면에서의 유동구조를 나타내는 Fig. 5를 통해 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 V-형 사각리브를 지나는 삼차원 난

류유동에 의한 열전달을 수치 해석하였다. SST 난류 모델을 사용해 계산한 Nusselt 수는 5,000 이상의 레이놀즈수에 대해 실험치와 매우 잘 일치하는 결과를 보였다. 리브를 지난 유동은 주 유동방향에 수직인 단면에서 큰 속도의 유동을 형성하여 강한 삼차원성을 나타내고 있으며 이로 인해 형성된 난류가 열전달을 촉진하고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Rongguang Jia, Arash Saidi, and Bengt Sunden 2002, "Heat Transfer Enhancement in Square Ducts with V-shaped Ribs of Various Angles," Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam, June 3-6, GT-2002-30209.
- (2) J. C. Han, Y. M. Zhang, C. P. Lee "Augmented Heat Transfer in Square Channels With Parallel, Crossed, and V-Shaped Angled Ribs," Journal of Turbomachinery, Vol. 113, AUGUST 1991, pp. 590-596.
- (3) Olsson, C. O., And Sunden, B. 1998, "Experimental Study of flow and Heat Transfer in Rib-Roughened Rectangular Channels," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 16, No. 4, pp. 349-365
- (4) Gao, X., and Sunden, B. 2001, "Heat Transfer and Pressure Drop Measurements in Rib-Roughened Rectangular Ducts," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 24, No. 1-2, pp. 25-34.
- (5) Iacovides, h., Raisee, M., 1999, "Recent Progress in the Computation of Turbine Blades," International J. Heat and Fluid Flow, Vol 20, No. 3, pp. 320-328.
- (6) Guoguang Su and Shuye Teng, Hamn-Chin Chen, Je-Chin Han "Computation of Flow and Heat Transfer in Rotating Rectangular Channels(AR=4) with V-shaped Ribs BY A Reynolds Stress turbulence Model," Proceedings of ASME Turbo EXPO 2003, Atlanta, June 16-19, GT2003-38348.
- (7) Lee, E., Wright, L.M., and Han, J.C., 2003, "Heat Transfer in Rotating Rectangular Channels (AR=4:1) with V-shaped and Angled Rib Turbulators with and without Gaps," ASME Paper Number GT-2003-38900.
- (8) CFX 5.7.1 Solver Theory Ansys Inc., 2004
- (9) Hong-Min Kim and K. Y. Kim, 2004, " Optimization of Three-Dimensional Angled Ribs with RANS Analysis of Turbulent Heat Transfer," Proceedings of ASME TURBO EXPO 2004, Vienna, Austria, GT2004-53346.
- (10) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," 16th Bazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Uberlandia, Brazil.
- (11) Bardina, J. E., Huang , P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," AIAA Paper 97-2121.
- (12) 김홍민, 김광용 2004, "난류 열전달 향상을 위한 각진 리브가 부착된 내부냉각유로의 형상 최적 설계," 한국유체공학학술대회, pp. 53-56