

냉각효율 향상을 위한 경사진 리브의 형상최적설계

김홍민, 김광용

Shape optimization of angled ribs to enhance cooling efficiency

Hong-Min Kim, Kwang-Yong Kim

Key Words : Shape Optimization(형상 최적화), Turbulent Heat Transfer(난류열전달), Response Surface Method(반응면기법), Rib(리브), SST Turbulence Model(SST 난류모델)

ABSTRACT

This work presents a numerical procedure to optimize the shape of three-dimensional channel with angled ribs mounted on one of the walls to enhance turbulent heat transfer. The response surface method is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of flow and heat transfer. SST turbulence model is used as a turbulence closure. The width-to-height ratio of the rib, rib height-to-channel height ratio, pitch-to-rib height ratio and attack angle of the rib are chosen as design variables. The objective function is defined as a linear combination of heat-transfer and friction-loss related terms with weighting factor. D-optimal experimental design method is used to determine the data points. Optimum shapes of the channel have been obtained for the weighting factors in the range from 0.0 to 1.0.

1. 서론

유동장 내에 난류발생을 촉진시켜 열전달을 증진시키기 위해 터빈 블레이드의 내부 냉각을 비롯해 열교환기, 가스냉각 장치 및 전자부품 냉각장치 등에서 주기적인 유동간섭물(rib)을 열전달면 상에 부착하고 있다. 그러나, 열전달 성능을 향상시키기 위해 인위적으로 유동장에 설치된 구조물은 열전달 성능의 향상과 함께 불가피하게 마찰계수의 증가를 야기하므로, 설계자의 의도에 부합되는 열전달면의 형상설계를 위해서는 열전달 계수와 마찰계수를 동시에 고려해야만 한다.

Rau 등⁽¹⁾은 사각채널의 한쪽 벽에 리브가 유동방향에 수직으로 설치된 경우에 대한 실험을 수행하여 속

도분포와 누셀트 수의 분포를 비교적 상세히 제시하였고, Pi/H 가 9.0인 경우 리브사이의 벽면에서 최대의 열전달 성능을 보인다고 보고하였다. Han 등⁽²⁾은 리브의 각도와 리브간 간격이 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 실험하여, 리브의 각도가 75°에서 열전달은 최대 값을 가지며, 리브간 간격이 증가할수록 마찰계수의 값은 감소함을 보였다. 연속적으로 설치된 리브와 불연속적으로 설치된 리브가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향에 대해 Cho 등⁽³⁾에 의하여 실험이 수행되었는데, 이들은 열전달과 마찰계수의 비로 정의되는 열효율은 채널의 두 벽에 대칭으로 설치된 리브의 각도가 90°인 경우 최대가 된다고 보고하였다.

날로 증가하는 에너지 절약에 대한 관심으로 리브가 설치된 유동장 내에서의 열효율에 대한 많은 실험들이 수행되었으나, 대부분의 실험들이 선택된 몇 가지 형상에 대해 각각의 설계변수가 열전달 성능 및 압력강하에 미치는 영향을 평가하였을 뿐, 모든 설계변

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

수의 영향을 동시에 고려하여 설계변수의 최적값을 유도해 내지는 못하였다. 이에 반해, 열전달면의 설계에 최적화의 개념을 도입한 연구로, Kim과 Kim⁽⁴⁾은 이차원 열 및 유동해석과 목적함수의 구배를 바탕으로 하는 수치최적화기법 (gradient-based optimization method) 을 결합하여 한 쪽 벽면에 리브가 부착된 경우에 대한 최적설계를 수행하였다. 그들은 리브의 폭대 높이비 (W/H)와 리브간 간격대 리브의 높이 (Pi/H)를 설계변수로 선정하고, 열전달 계수와 마찰계수로 정의된 목적함수를 최소화함으로써 최적의 열전달면 형상을 설계하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 한쪽 벽에 리브가 부착된 경우에 대해, 리브의 폭대 높이(W/H), 리브의 높이대 채널의 높이(H/D), 리브간 거리 대 리브의 높이 (Pi/H)와 리브의 각도 (α) 등 네 개의 설계변수에 대해 삼차원 열 및 유동해석과 수치최적화기법으로 구배법에 비해 최근 그 장점이 부각되고 있는 반응면기법 (Response surface method)⁽⁵⁾을 결합하여, 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 열전달 계수와 마찰계수의 선형 결합으로 구성하였고, 설계자의 의도를 반영하기 위한 가중계수를 도입하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 삼차원 열 및 유동해석을 위하여 상용 소프트웨어인 CFX-5.6을 사용하였다. 각각의 지배방정식은 유한체적법에 의하여 이산화되며, 격자는 사면체와 육면체 그리고 프리즘으로 구성되는 unstructured grid로 구성하였다. 레이놀즈 응력항의 계산을 위하여 scalable 벽함수를 이용한 SST (Shear Stress Transportation) 모델⁽⁶⁾을 사용하였다. 계산영역은 Fig. 1과 같이 다섯 개의 리브가 설치된 영역으로 선정하였고, 채널의 입구에 난류강도 5%, 유속 9.272 m/s의 조건을 지정하였고, 출구에는 대기압 조건을 사용하였다. Iaccarino 등⁽⁷⁾은 리브표면에서 단열조건, 일정 열유속 조건과 전도조건을 고려한 경우의 해석을 수행하여 리브 내부에서 전도를 고려한 경우 보다 정확한 해석결과가 얻어진다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 리브가 설치된 벽면에 600 W/m²의 일정 열유속조건을 사용하여, 벽으로부터 리브의 내부로의 전도와 벽면과 유체사이의 대류현상을 동시에 고려하였다.

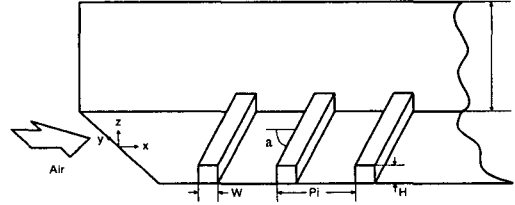


Fig. 1 Rib arrangement

3. 최적설계

3.1 반응면 기법

반응면기법은 실제실험 또는 수치해석의 결과를 이용하여 목적함수를 다항 함수로 근사화하는 통계적 기법으로 반응면을 구성하는 반응면 함수는 다음과 같은 다항식의 형태로 구성된다.

$$\eta = \alpha_0 + \sum_{j=0}^n \alpha_j y_j + \sum_{j=0}^n \alpha_{jj} y_j^2 + \sum_{i \neq j}^n \alpha_{ij} y_i y_j \quad (1)$$

여기서 y_j 는 설계변수, η 는 측정된 반응값이고, n 은 설계변수의 수를 나타낸다. 위 식의 계수는 실험 또는 수치해석의 결과로부터 최소자승법(least square method)을 사용하여 결정된다. 주어진 설계공간 상에서 반응면을 구성하는데 필요한 실험점을 결정하기 위해 D-optimal 기법을 사용하여 32개의 설계점을 결정하였다.

3.2 설계변수

Fig. 1과 같은 채널유동에서의 형상변수는 모두 5개로 채널 높이(D), 리브높이(H), 리브폭(W), 리브의 간격과 리브의 각도 (α)이다. 따라서 W/H, H/D, Pi/H 및 α로 정의되는 네 개의 설계변수를 사용하였으며 반응면을 구성하는 데 필요한 설계점들을 얻기 위한 각 설계변수의 범위는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1 Design variables and design spaces

Design variable	Lower bound	Upper bound
W/H	0.2	2.0
H/D	0.1	0.3
Pi/H	5.0	20.0
α	45°	90°

3.3 목적함수

목적함수는 열전달 효과와 압력강하를 동시에 고려하기 위해 가중법을 이용하여 열전달 계수와 마찰계수의 조합으로 다음과 같이 정의하였다.

$$F = F_{Nu} + \omega F_f \quad (2)$$

위 식의 우변 첫째항은 열전달 효과를 나타내며 평균 Nusselt 수의 역수로 정의된다.

$$F_{Nu} = \frac{1}{Nu_a} \quad (3)$$

$$Nu_a = \frac{\int_A Nu/Nu_s dA}{A}$$

Nu_s 는 매끈한 원관 내에서 완전발달된 난류유동에 대한 Dittus-Boelter 식을 나타낸다.

우변의 두 번째 항은 마찰손실의 영향을 나타내는 항으로 Webb과 Eckert⁽⁸⁾는 다음과 같이 정의하였다.

$$F_f = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

여기서,

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2\rho U_b^2 P_i}, \quad f_0 = 2(2.23 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (5)$$

이며, f_0 는 매끈한 관에서 완전발달된 유동에 대한 마찰계수이다.

위 식에서 ω 는 설계자의 의도에 따라 조절 가능한 가중계수(weighting factor)인데, 가중계수가 작을수록 설계자의 의도는 열전달 증진을 의미하며, 가중계수가 클수록 설계자의 의도는 압력강하의 감소에 있음을 의미한다. 본 연구에서는 가중계수가 0.0 ~ 1.0의 범위에 대한 최적설계를 수행하였다.

4. 결과 및 검토

Table 2에는 가중계수가 0.4인 경우에 대한 최적설계의 결과를 나타내었다. 본 연구에서 수행한 최적설계의 결과, 가중계수가 0.4인 경우 기준형상에 비해 열전달 성능은 46.8% 향상되었으며, 마찰계수는 24.7% 감소하였다

가중계수의 변화에 따른 설계변수의 최적값을 Fig. 2~5에 나타내었다. 가중계수가 감소함에 따라, 즉 설계자의 의도가 열전달 효율의 증가에 있는 경우, 리브의 최적형상은 폭이 감소하고, 높이가 증가하여 일반적으로 널리 사용되는 핀(fin)의 형상을 가지며, 유동

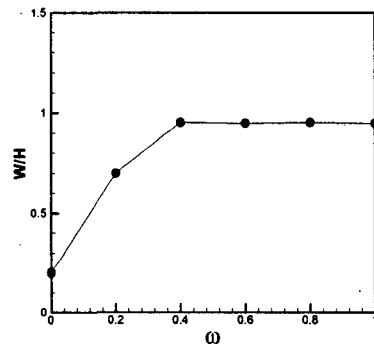


Fig. 2 Optimal values of W/H

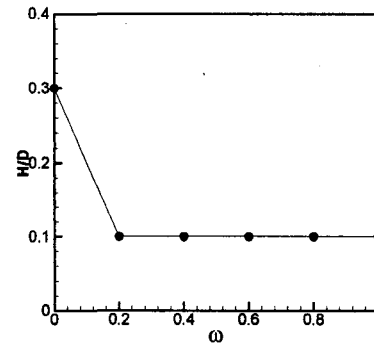


Fig. 3 Optimal values of H/D

Table 2 Result of optimization for $\omega=0.4$

	Design variable				Nu_a	F_f	Object function value
	W/H	H/D	Pi/H	α			
Reference	1.0	0.3	5.0	90.0	1.31211	2.62164	1.81079
Final	0.9523	0.1	17.673	52.953	1.92645	2.00087	0.70365

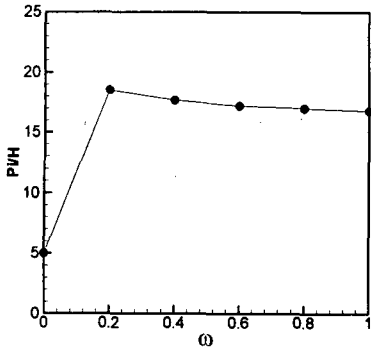


Fig. 4 Optimal values of Pi/H

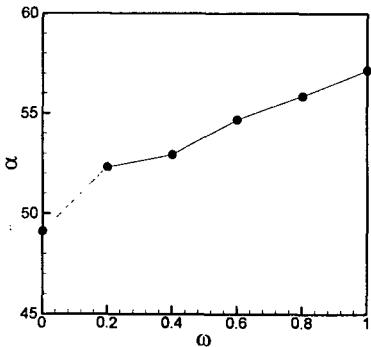


Fig. 5 Optimal values of α

방향과 리브의 각도가 작아짐을 알 수 있다. 이와는 반대로 압력강하를 감소시키기 위해서는 리브의 폭과 각도를 증가시키고, 리브의 높이를 감소시켜야 함을 알 수 있다.

5. 결론

상용 소프트웨어인 CFX-5.6을 이용한 난류열전달 해석과 수치최적설계기법인 반응면 기법을 결합하여 사각채널의 한쪽 벽에 리브가 설치된 열전달면의 형상 최적화를 수행하였다. 리브의 폭 대 리브의 높이비 (W/H), 리브의 높이 대 채널의 높이비(H/D), 리브의 간격 대 리브의 높이(Pi/H) 및 리브의 각도(α)를 설계 변수로 사용하였고, 목적함수는 무차원화된 열전달 계수와 마찰계수의 함수로 구성하였으며, 설계자의 의도를 반영하기 위해 가중계수를 도입하였다. 반응면을 구성하기 위해 D-optimal 기법을 이용하여 32개의 실험점을 선택하였고, 이를 바탕으로 최적설계를 수행하

여 가중계수가 0.0 ~ 1.0의 범위에 대한 설계변수의 최적값을 도출하였다.

본 연구에서 제시된 수치해석과 최적설계기법의 결합은 주어진 조건하에서 전역적인 최적값을 도출함으로써 실험에 의존하는 설계방식에 비해 상당한 시간을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T., 1998, "The Effect of Periodic Ribs on the Local Aerodynamic and Heat Transfer performance of a Straight Cooling Channel," J. Turbomachinery, Vol. 120, pp. 368-375
- (2) Han, J. C., Park, J. S. and Lei, C. K., 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channels With Turbulence Promoters," J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp 628-635
- (3) Cho, H. H., Lee, S. Y. and Wu, S. J., 2001, "The Combined Effects of Rib Arrangements and Discrete Ribs on Local heat/Mass Transfer in a Square Duct," Proceedings of ASME Turbo Expo 2001, June 4-7, Louisiana, USA.
- (4) Kim, K. Y. and Kim, S. S., 2002, "Shape Optimization of Rib-Roughened Surface to Enhance Turbulent Heat Transfer," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp. 2719-2727
- (5) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 1995, "Response Surface Methodology : Progress and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons.
- (6) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," 16thBrazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Nov. 2001, Uberlandia, Brazil.
- (7) Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P. A. and Behnia, M., 2002, "Conjugate Heat Transfer Predictions in Two-Dimensional Ribbed Passages", Int. J Heat Mass Transfer, Vo. 23, pp. 340-345
- (8) Webb, R. L. and Eckert, E. R. G., 1972, "Application of Rough Surfaces to Heat Exchanger Design," Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp.1647-1658