

V-형 리브가 부착된 냉각유로의 형상 최적설계

이영모* · 김광용**

Shape Optimization of Cooling Channel with V-shaped Ribs

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

Key Words : Shape optimization(형상최적화), V-shaped rib(V-형 리브), Turbulent heat transfer(난류 열전달), Response surface method(반응면 기법), Navier-Stokes analysis(나비에-스톡스 해석)

ABSTRACT

A numerical procedure for optimizing the shape of three-dimensional channel with V-shaped ribs extruded on both walls has been carried out to enhance the turbulent heat transfer. The response surface based optimization is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-stoked analysis. Shear stress transport (SST) turbulence model is used as a turbulence closure. Computational results for average heat transfer rate show good agreements with experimental data. The objective function is defined as a linear combination of heat transfer and friction loss-related terms with a weighting factor. Three dimensionless variables such as, rib pitch-to-rib height ratio, rib height-to-channel height ratio, and the attack angle of the rib are chosen as design variables. Nineteen training points obtained by D-optimal designs for three design variables construct a reliable response surface. In the sensitivity analysis, it is found that the objective function is most sensitive to the ratio of rib height-to-channel height ratio. And, optimal values of design variables have been obtained in a range of the weighting factor.

기호설명

A, A_{in}, A_w : 각각 리브가 위치해 있는 벽의 모든 표면적, 채널 입구면적, 리브가 위치하지 않은 벽의 표면적
 B : 채널의 폭

C_p : 유체의 비열
 D, D_h : 각각 채널의 높이, 수력직경
 F : 목적함수
 f : 마찰계수
 H : 리브높이
 k : 유체의 열전도율
 Nu : Nusselt 수
 $p, \Delta p$: 압력, 압력강하
 \hat{p} : 압력의 주기성분
 q_0 : 열유속

* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 인하대학교 기계공학부, 책임저자, 회원
E-mail : kykim@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

- Pr : 프란틀 수
- Pl : 리브간 거리
- Re : 레이놀즈 수, $\overline{U}D_h/\nu$
- S : 열전달 면적
- T : 실제온도
- \hat{T} : 온도의 주기성분
- \overline{U} : 축방향 평균속도
- U_i : 속도성분 ($i=1,2,3$)
- W : 리브 폭
- x_i : 좌표계
- α : 리브의 경사각
- β : 가중계수
- γ : 주유동 방향의 압력 강하
- ν : 유체의 동점성계수
- ρ : 유체의 밀도
- σ : 온도상승률

1. 서론

가스터빈의 성능을 향상시키기 위해서는 시스템 최고온도인 고온의 터빈입구온도가 필요하지만, 이 온도가 터빈 블레이드의 용융점을 초과 할 수 있기 때문에 온도를 높이기 위해서는 터빈 블레이드의 냉각이 매우 중요하다. 터빈 블레이드의 냉각을 위해서는 일반적으로 블레이드 내부에 냉각 유로를 설치한다.

내부 냉각 기술로는 대류냉각 (convection cooling), 충돌냉각 (impingement cooling), 막냉각 (film cooling) 등이 있다. 대류냉각에서는 대부분의 경우 리브 (rib), 핀-핀 (pin-fin), 딴플 (dimple) 등의 열전달증진장치를 설치한다. 이러한 장치들은 주로 유동을 교란함으로써 난류열전달을 촉진하는 역할을 수행한다. 이 중에서 리브는 블레이드의 중간부분 냉각을 위해 주로 사용되며, 그 적용 면적이 가장 넓다. 리브는 가스터빈 블레이드 뿐만 아니라 관형 열 교환기 및 전자부품의 냉각장치 등의 냉각을 위해서도 널리 사용되고 있다.

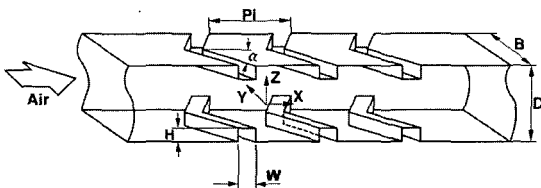


Fig. 1 Geometric parameters and computational domain

유동간섭물들은 열전달에 중요한 역할을 하는 난류 운동에너지의 생성을 촉진시켜 유동혼합을 활발하게 하며, 주 유동 방향의 와 (vortex)를 발생시켜 대류를 통한 난류 열전달을 증가시킨다. 그러나 열전달 성능을 향상시키기 위해서 인위적으로 유동장에 설치된 구조물은 열전달 성능의 향상과 함께 불가피하게 마찰계수의 증가를 야기하므로, 열전달면의 형상설계를 위해서는 열전달계수와 마찰계수를 동시에 고려한 설계가 이루어져야 한다.

열전달 촉진장치로서의 리브는 여러 가지 형상과 배열이 가능한데 그간 수행된 일련의 연구들^{(1)~(4)}은 V-형 리브 (V-shaped rib)가 다른 형상에 비해 열전달 효율이 높다고 보고하고 있다. V-형 리브가 부착된 열전달면의 성능향상을 위해 많은 실험이 수행 되어져 왔다. Han등⁽¹⁾, Taslim과 Wadsworth⁽⁵⁾은 V-형 리브가 일자형 리브들보다 같은 크기의 채널에서 강한 이차 난류 형성을 촉진 시켜 높은 열전달을 가진다고 보고 하였다. 특히, Han등⁽¹⁾은 서로 다른 형상의 리브들을 상하 같은 위치에 부착한 후, 45°와 60°의 각도를 주고 실험을 하여 각각의 열전달 계수와 마찰계수를 비교한 결과, V-형 리브가 열전달 성능이 가장 좋다고 보고하였다. 이외에도 많은 수치적 연구^{(6)~(8)}가 V-형 리브가 부착된 열전달면의 해석에 대해 수행되었다.

위에서 언급한 실험과 수치해석은 선택된 몇 가지 형상에 대한 열전달 성능을 비교하여 최대의 열전달 성능을 보이는 형상을 제시하였을 뿐, 모든 설계 변수의 영향을 동시에 체계적으로 고려하여 설계변수의 전역적인 최적값을 제시하지 못하였다. 이에 반해 Kim과 Kim은 일련의 연구^{(9)~(13)}를 통해 수치최적화기법과 정밀한 유동해석을 바탕으로 일자형 리브의 몇 가지 배열에 대해 최적형상을 제시하였다. 이들은 리브가 부착된 열전달면의 기하학적 변수들을 최적화하여 열전달 성능을 극대화하는 과정에서 초기연구⁽¹⁴⁾에서 수치최적화법으로 사용한 구배법 (gradient-based method)에 비해 후속 연구^{(9)~(12)}에서 사용된 반응면 기법 (response surface method)이 경제성과 정확성에서 월등히 우수한 성능을 나타냄을 보여주었다.

본 연구에서는 열전달성능을 최적화 할 수 있는 V-형 리브의 기하학적 형상을 수치최적화에 의해 결정하기 위해 Fig. 1과 같이 양쪽 벽에 V-형 리브가 부착된 경우에 대해, 세 개의 설계변수를 선택하고, RANS (Reynolds-averaged Navier-stokes equations)를 바탕으로 하는 삼차원 열유동해석과 최근 효과적인 수치최

적화 기법으로 주목 받는 반응면 기법 (response surface method)⁽¹³⁾을 결합하여, 설계변수의 최적값을 도출하는 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 열전달 계수와 마찰계수의 선형결합으로 구성하였고, 설계자의 의도를 반영하기 위한 가중계수를 도입하였다.

2. 유동해석방법

2.1. 지배방정식 및 난류모델

본 연구에서는 복잡한 삼차원 유동 및 대류열전달 해석을 위하여 비정렬격자계 (unstructured grids)를 채택하는 범용 소프트웨어인 CFX-5.7.1⁽¹⁵⁾을 사용하였다. Fig. 1에 나타난 리브의 연속적인 배열들에서 한 주기만을 계산영역으로 하여 해석하였는데, 이 경우 지속적인 압력강화와 온도상승에 대해 주기조건을 적용하기 위해 주유동 방향의 운동량 방정식과 에너지 방정식은 다음과 같이 변환되어야 한다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{ii} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p U_j \hat{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_j} \right] - \sigma U_j \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서 변환된 압력 $\hat{p}(x, y, z)$ 과 변환된 온도 $\hat{T}(x, y, z)$ 는 유동의 주기성을 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{p}(x, y, z) = p(x, y, z) + \gamma x \quad (4)$$

$$\hat{T}(x, y, z) = T(x, y, z) - \sigma x \quad (5)$$

여기서 γ 는 주유동 방향의 압력강하율을 나타내며, 는 다음과 같이 벽으로 유입되는 열유속으로 인한 온도 상승율을 나타낸다.

$$\sigma = \frac{q_0(A + A_w)}{PiU_b A_m} \quad (6)$$

레이놀즈 응력항의 계산을 위하여 난류모델로 SST (Shear Stress Transportation) 모델⁽¹⁶⁾을 사용하였다.

SST 모델은 k- ω 모델과 k- ϵ 모델의 장점을 결합한 모델로서, 벽 근처에서는 k- ω 모델이 사용되며, 나머지 영역에서는 k- ϵ 모델이 사용된다. SST 모델은 역압력구배로 인한 유동박리 (flow separation)의 예측에 상당히 효과적인 것으로 보고⁽¹⁷⁾되고 있는데, 이 모델의 사용으로 난류 열전달 해석에서 중요한 역할을 하는 벽 근처 난류유동해석의 정확성을 높일 수 있다.

2.2. 격자계 및 경계조건

격자계는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 사면체의 비정렬 격자계로 구성하였으며, 벽 근처 속도 구배의 정확한 해석을 위해 벽 근처 격자는 육면체로 구성하였으며 y+가 1 이하가 되도록 벽에서 첫 번째 격자는 0.0002D에 위치시켰다. 특히 리브각이 작은 경우에는 계산영역에 여러 개 리브의 잘린 단편들이 포함되므로, 주기 경계면 상에서 다수의 유동박리가 발생하여, 계산의 수렴성이 저하되므로, 수렴보장을 위해 신중한 격자구성이 요구된다. 경계조건으로는, 앞서 언급한 바와 같이, 계산 영역의 주기면에서는 주기조건 (periodic condition)을 사용하였고, 리브의 표면을 포함한 모든 벽면에 일정 열유속 조건을 사용하였다. 주기조건을 사용한 계산에서는 유동에 특정한 유량을 부과하기 위해 운동량 방정식의

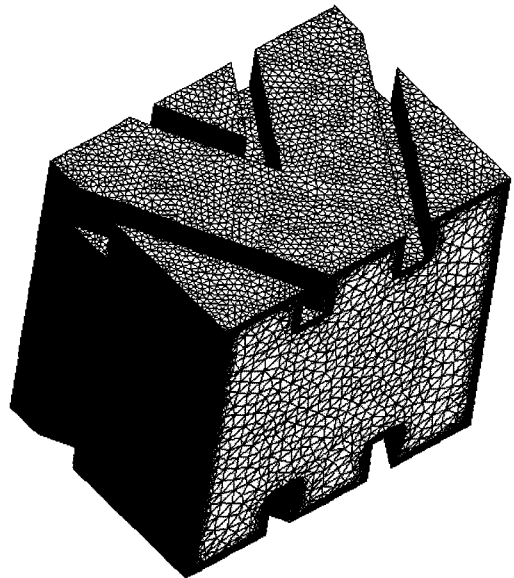


Fig. 2 Example of grid system (H/D=0.15, Pi/H=5.0 and $\alpha=30$)

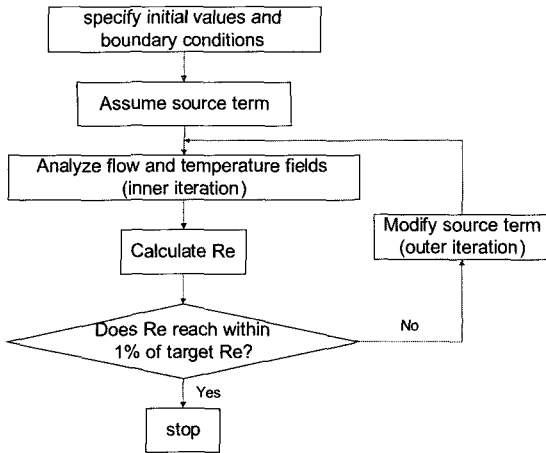


Fig. 3 Flowchart of calculation with periodic conditions

생성항 수정을 통한 반복계산이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서 사용된 계산방법을 Fig. 3에 나타내었다.

3. 최적설계기법

3.1. 반응면 기법

본 연구에서 사용된 반응면기법은 최근 단일 또는 다 목적 최적설계에 많이 적용^{(18)~(20)}되는 최적화방법으로, 목적함수를 매끄러운 다항 함수로 모델링하기위해 물리적 또는 수치적 실험을 통하여 도출된 결과들을 이용하

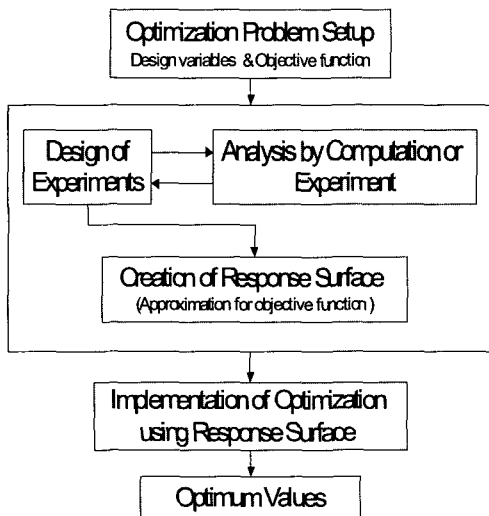


Fig. 4 Response surface method

는 일련의 수리통계적 기법이다. 따라서, 본 연구에서는 Kim과 Kim⁽¹²⁾이 사용한 방법과 동일한, 다항식에 근거한 반응면 기법을 사용하였다. 반응면 함수는 이차의 다항식으로 구성하였으며, 각 항의 미지 상수는 최소자승법 (least square method)⁽¹³⁾을 이용하여 결정하였다. 주어진 설계공간 상에서 반응면을 구성하는데 필요한 정보를 얻기 위해 정해진 실험점을 대상으로 수치실험이 수행되어야 하는데, 세 개의 설계변수를 사용한 본 연구에서는 이미 그 장점이 널리 알려진 D-optimal 기법⁽¹³⁾을 이용하여 19개의 실험점을 선택하였다. 본 연구에서 사용된 반응면 기법의 전체적인 흐름을 Fig. 4에 나타내었다.

3.2. 설계변수 및 목적함수

수치최적설계를 수행하기 위해서는 최적화하고 자 하는 설계변수와 목적함수 등이 먼저 정의되어야 한다. Fig. 1과 같이 양쪽 벽에 삼차원 리브가 부착된 채널 유동에서의 형상변수는 모두 6개로 채널 높이 (D), 채널 폭 (B), 리브 높이 (H), 리브 폭 (W), 리브간 거리 (Pi), 리브의 경사각 (α)이다. 따라서 H/D, B/D, W/H, Pi/H, α 등 5개의 무차원 설계변수가 구성될 수 있다. 이 중 W/H와 B/D 는1.0으로 고정하였는데, 이는 계산시간 상의 이유 외에도 W/H의 경우 다른 설계변수에 비해 열 전달 및 압력강하에 미치는 영향이 비교적 작고, B/D는 터빈 블레이드의 내부구조, 열교환기의 형상 등 열전달 면의 적용대상에 따라 고정되는 값으로서 설계변수로 사용하기에는 부적합한 면이 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 H/D, Pi/H, α 등 세 개의 설계변수를 사용하였다. 목적함수는 열전달 효과와 압력강하를 동시에 고려하기 위해 Kim 과 Kim⁽¹²⁾이 정의한 바와 같이 가중계수를 이용한 열전달계수와 마찰계수의 조합으로 다음과 같이 정의한다.

$$F = F_{Nu} + \beta F_f \tag{7}$$

F_{Nu} 는 열전달 효과를 나타내는 항으로 다음과 같이 평균 Nusselt 수의 역수로 정의 된다.

$$F_{Nu} = \frac{1}{Nu_a} \tag{8}$$

여기서,

$$Nu_a = \frac{\int_A Nu_s dA}{A} \quad (9)$$

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

Nu_s 는 매끈한 원관 내에서 완전 발달된 난류유동에 대한 Dittus-Boelter 식을 나타내고, A는 리브가 부착된 상하면적의 면적을 나타낸다.

F_f 는 마찰손실과 관련된 항으로 다음과 같이 정의된다.

$$F_f = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \quad (11)$$

여기서,

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2 \rho U_b^2 P i}, f_0 = 2(2.23 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (12)$$

f_0 는 매끈한 관에서 완전발달된 유동에 대한 마찰계수이다. 가중계수 β 는 열전달과 압력강하 사이의 비중을 조절하기 위해 설계자가 결정해야 할 변수로서 시스템의 특성에 따라 다른 값을 가진다.

4. 결과 및 검토

열전달 해석의 격자의존성을 제거하기 위해 Fig. 5에 나타난 바와 같이 V-형 리브의 경사각이 60°인 유동장을 대상으로 세 가지의 격자분포에 대한 격자 의존성 테스트를 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 1.2×10⁵개의 격자수에서 격자 의존도가 사라짐을 알 수 있다. 최적설계에 앞서 난류 열전달 해석의 타당성 검증을 위해, Fig. 6과 같이 양쪽 면에 V-형 리브가 부착된 경우의 열전달 계수에 관한 계산결과를 Han 등⁽¹¹⁾이 수행한 실험결과와 비교하였다. 여기서 각 설계변수의 값은 H/D=0.0625, Pi/H=10.0, α=60°이며, 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 15,000에서 80,000까지이다. 저레이놀즈 수 영역에서는 계산결과가 다소 실험값보다 높게 예측하고 있으나, 레이놀즈 수 48,000 이상의 영역에서는 실험결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

최적설계는 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수가 48,000이고, 모든 벽면에서 일정한 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행하였다. 최적 설계를 위한 반응함수는 Table 1에 나타난 각 설계변수의 영역 내에서 구성되며, 반응함수를 구성하기 위해, 앞서 언급한 바와

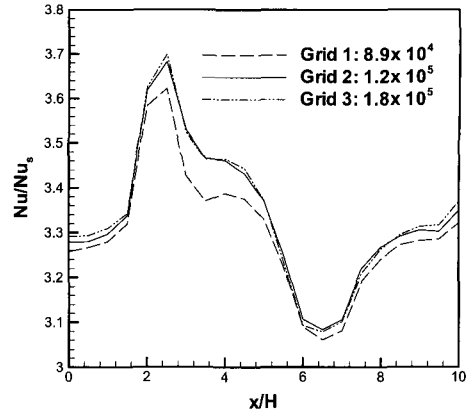


Fig. 5 Grid dependency test

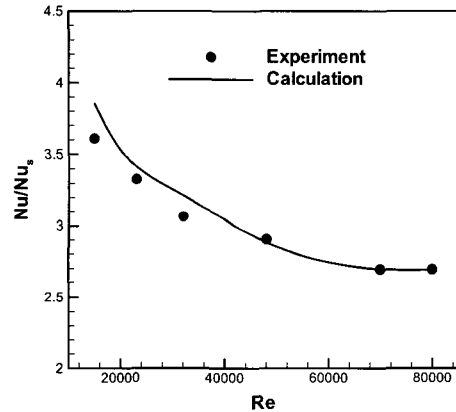


Fig. 6 Validation of computed local nusselt number

같이, D-optimal 기법을 이용하여 19개의 실험점을 선택하였다. 유로막힘을 H/D는 실제 열교환기에서의 사용예와 압력강하에 대한 Lopez et al⁽²¹⁾ 등의 계산결과를 바탕으로 설계범위를 0.05에서 0.25로 결정 하였다. 계산 영역의 크기를 결정하는 Pi/H는 선행된 실험^{(22)~(24)}들에서 최대의 효율을 보이는 5.0에서 20.0까지의 범위로 선택하였다. 또한, 리브의 경사각의 설계범위는 Cho 등⁽²⁵⁾의 실험 및 Tatsumi 등⁽²⁶⁾의 수치해석 결과를 분석하여 최대값과 최소값을 각각 30°와 90°로 설정하였다. 최적설계는 가중계수 0.0 0.1의 범위에 대해 수행하였으며, 각각의 미지상수는 통계학 상용 소프트웨어인 SPSS를 사용하여 결정하였다. 완성된 반응함수는 t-검정adjusted R2 법⁽¹⁴⁾을 사용하여 신뢰도를 향상시켰다. Table 2에는 가중계수가 0.07인 경우에 대해 ANOVA와 회귀분석의 결과를 나타내었다. 반응면 기법에 의한 반응값이 정확

Table 1 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
H/D	0.05	0.25
Pi/H	5.0	20.0
α	30°	90°

Table 2 Results of ANOVA and regression analysis

β	R	R^2	R^2_{adj}
0.07	0.979	0.959	0.919

히 예측된 경우 $0.9 \leq R^2_{adj} \leq 1.0$ 을 갖는다고 알려져 있다.⁽²⁷⁾ 따라서 본 연구에서 형성된 반응면과 설계변수의 최적값은 신뢰할 만한 것으로 판단된다.

Figure 7은 각 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 분석을 나타낸다. 여기서 설계변수의 변화를 나타내는 dv는 최적값의 $\pm 10\%$ 범위 내에서 변화시켰고, 하첨자 opt는 가중계수가 0.07인 경우에 대해 최적형상에서의 값을 나타낸다. 목적함수는 H/D에 대해 가장 민감하고, Pi/H와 α 에 대한 민감도는 유사한 수준이나 H/D에 비해 상대적으로 매우 낮게 나타난다.

Table 3은 가중계수가 0.07인 경우에 대한 최적설계의 결과를 임의로 선택된 기준형상의 경우와 비교하였다. 최적 설계 결과, 열전달 성능은 기준형상에 비해 약 86.4% 증가하였으나, 마찰계수도 최적형상에서 가장 크게 나타난다. 이는 리브의 경사각 (a) 45°와 60° 사이에서 열전달 뿐 아니라 마찰계수 또한 가장 크게 나타난다고 보고한 Han등⁽¹⁾의 결과에 부합된다. 결과적으로 목적함수는 기준형상에 비해 10.8% 감소함을 알 수 있다.

Figure 8은 가중계수가 0.07인 경우의 최적 형상에 대해 열전달이 일어나는 두 벽에서 Nu수의 분포를 나타낸다. 상하면 모두 리브 후방의 유동박리 구역에서 열전달이 급격히 감소함을 볼 수 있으며, 재부착점 (reattachment point)을 중심으로 최대 열전달 구역이 형성되고 이후

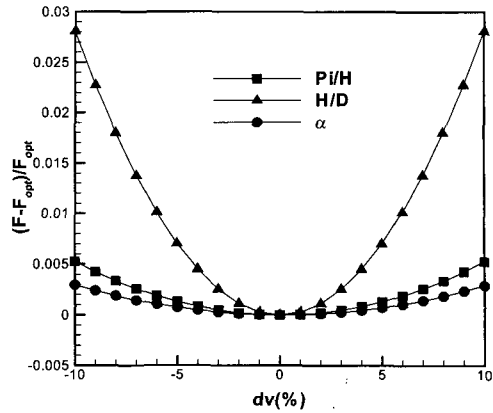


Fig. 7 Sensitivity analysis of objective function for optimal shape ($\beta=0.07$)

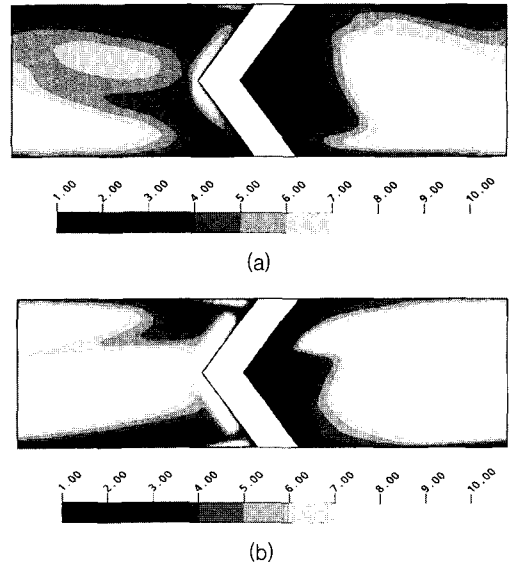


Fig. 8 Nusselt number contours for optimal shape ($\beta=0.07$); (a) $z/D = 0.05$, (b) $z/D = -0.05$

서서히 감소한 후 리브 직전에서 다시 상승함을 알 수 있다. 아랫 면상에 위치한 흰색 영역 즉 열전달이 큰 영

Table 3 Results of optimization for $\beta=0.07$

	Design variable			Nu_a	F_f	F
	H/D	Pi/H	α			
Reference Shape	0.15	5.0	60.0°	4.8251	2.6088	0.3898
Optimal Shape	0.24	11.8	57.4°	8.9954	3.3825	0.3479

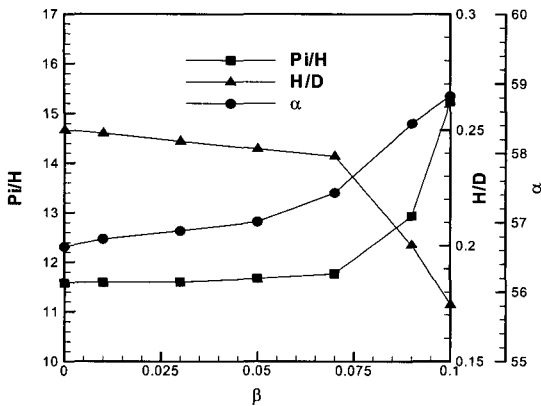


Fig. 9 Variations of optimal values of design variables

역이 윗면에 비해 눈에 떨 정도로 큼을 알 수 있고, 윗면 Fig. 8 (a)의 경우 하단부에서 리브 하류의 재부착이 빨리 이루어져 열전달이 비교적 일찍 상승함을 알 수 있고 아랫면 Fig. 8 (b)의 경우에는 상단부에 이러한 현상이 나타난다. 이는 하단부에서는 상승유동이 리브를 통과하고 상단부에서는 하강유동이 리브를 통과함으로써 발생하는 현상이다.

가중계수에 따른 최적값의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 가중계수가 증가함에 따라, 리브간 거리와 리브의 경사각은 증가하는 반면, 리브의 높이는 감소함을 볼 수 있다. 리브간 거리가 증가할수록, 유동박리 이후 압력회복이 충분이 일어나므로, 가중계수가 증가함에 따라 P/H 의 최적값은 증가하는 것으로 사료된다. H/D 는 이와 반대의 경향을 보이는데, 이는 리브의 높이가 작을수록 리브 전, 후의 압력강하가 작아지기 때문이다.

5. 결론

삼차원 난류 열전달 해석과 수치최적설계기법을 결합하여 사각 채널의 양쪽 벽에 V-형 리브가 부착된 열전달유로에 대한 형상 최적화를 수행하였다. 수치해석을 통해 얻은 열전달계수는 실험결과와 비교해 볼 때, 최적설계를 수행하기에 충분할 만한 신뢰도를 보였다. 민감도 분석결과, 목적함수는 세 개의 설계변수 중 리브의 높이 대 유로높이의 비에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 세 개의 설계변수에 대해 19개의 실험점을 활용하여 목적함수에 대해 신뢰할 만한 반응면을 구성하였으며 기준형상에 비해 만족할 만한 성능향상을 보이는 최적설계 결과를 얻을 수 있었다. 최적설계 결과

가중계수가 증가할수록, 즉 설계자가 마찰계수 감소에 보다 중점을 둘 경우, 리브간 거리와 리브 경사각의 최적치는 증가하며 리브 높이의 최적치는 감소하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000-10039-0) 지원으로 수행되었음을 밝힌다. 아울러, 본 연구를 위해 많은 조언과 도움을 준 김홍민 박사에게 감사드린다.

참고문헌

- (1) J. C. Han, Y. M. Chang and C. P. Lee, 1991 "Augmented Heat Transfer in Square Channels with Parallel, Crossed and V-shaped Angled ribs," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, No. 3, pp. 590~596.
- (2) H. Sato, K. Hishida and M. Maeda, 1992, "Characteristics of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Rectangular Channel With Repeated Rib Roughness," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 1~16.
- (3) M. E. Taslim, T. Li and D. M. Kercher, 1996, "Experimental Heat Transfer and Friction in Channels Roughened with Angled, V-shaped, and Discrete Ribs on Two Opposite Walls," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 381~389.
- (4) R. T. Kukreja, S. C. Lau and R. D. Mcmillin, 1993, "Local Heat/mass transfer distribution in a square channel with full and V-shaped ribs," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 8, pp. 2013~2020.
- (5) M. E. Taslim, C. M. Wadsworth, 1997, "An Experimental Investigation of the Rib Surface-Averaged Heat Transfer Coefficient in a Rib Roughened Square Passage," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 381~389.
- (6) R. Jia, A. Saidi, and B. 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.

- (7) K. Abe, T. Kondoh and Y. Nagano, 1994, "A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching Flows-I Flow Field Calculation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 139~151.
- (8) G. Su and H. C. Chen, J. C. Han, 2003 "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.
- (9) H. M. Kim and K. Y. Kim, 2004, "Design Optimization of Rib-roughened Channel to enhance turbulent Heat Transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, Issue 23, pp. 5159~5168.
- (10) H. M. Kim and K. Y. Kim, 2004, "Shape Design of Heat Transfer Surfaces with Angled Ribs Using Numerical Optimization Techniques," *Transaction of KSME B*, Vol. 28, No. 9, pp. 1051~1057.
- (11) H. M. Kim and K. Y. Kim, 2004, "Design Optimization of Three-dimensional Channel Roughened by Oblique Ribs Using Response Surface Method," *Transaction of KSME B*, Vol. 28, No. 7, pp. 879~886.
- (12) H. M. Kim and K. Y. Kim, 2004, "Shape Optimization of Heat Transfer Surfaces with Staggered Ribs to Enhance Turbulent Heat Transfer," *Transaction of KSME B*, Vol. 27, No. 9, pp. 1351~1359.
- (13) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 1995, "Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons.
- (14) K. Y. Kim and S. S. Kim, 2002, "Shape Optimization of Rib-roughened Surface to Enhance Turbulent Heat Transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, Issue 13, pp. 2719~2727.
- (15) CFX-5.7.1 Solver Theory, Ansys Inc., 2005.
- (16) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial heat Transfer Predictions," 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Uberlandia, Brazil.
- (17) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," AIAA Paper 97-2121.
- (18) Ahn, C. S. and Kim, K. Y., 2003, "Aerodynamic Design Optimization of a Compressor Rotor with Navier-Stokes Analysis," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A - J. Power and Energy*, Vol. 217, pp. 179~184.
- (19) Sobieszcanski-Sobieski, J. and Haftka, R. T., 1996, "Multi Disciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Development," AIAA 96-0711.
- (20) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R. and Tucker, K., 2001, "Global Design Optimization for Aerodynamics and Rocket Propulsion Components," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 37, pp. 59~118.
- (21) Lopez, J. R, Anand, N. K. and Fletcher, L. S., 1996, "Heat Transfer in a Three-Dimensional Channel with Baffles," *Numerical Heat Transfer, Part A* 30, pp. 189~205.
- (22) 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," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 368~375.
- (23) Jia, R. and Sunden, B., 2003, "Prediction of Turbulent Heat Transfer and Fluid Flow in 2D Channels Roughened by Square and Deformed Ribs," *ASME GT-2003-38226*.
- (24) Berger, F. P. and Hau, L. F., 1979, "Local Mass /Heat Transfer Distribution on Surface Roughened with Small Square Ribs," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp. 1645~1656.
- (25) 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," *IGTI Turbo Expo Paper No. 2001-GT-0175*, Louisiana, USA

- (26) Tatsumi, K., Iwai, J. and Suzuki, K., 2003, "The Effects of Oblique Discrete Rib Arrangement on Heat Transfer Performance of a Square Duct," Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003, Tokyo, November 2-7, IGTC2003Tokyo TS-082.
- (27) Guinta, A. A., 1997, "Aircraft Multidisciplinary Design Optimization Using Design of Experimental Theory and Response Surface Modeling Methods," Ph. D. Dissertant, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.