

# 반응면 기법을 이용한 경사진 리브가 부착된 삼차원 열전달유로의 최적설계

김 흥 민\* · 김 광 용†

(2004년 3월 20일 접수, 2004년 5월 24일 심사완료)

## Design Optimization of Three-Dimensional Channel Roughened by Oblique Ribs Using Response Surface Method

Hong-Min Kim and Kwang-Yong Kim

**Key Words :** Shape Optimization(형상최적화), Oblique Rib(경사진 리브), Turbulent Heat Transfer(난류열전달), Response Surface Method(반응면기법), Navier-Stokes Analysis(나비에-스톡스 해석)

### Abstract

A numerical optimization has been carried out to determine the shape of the three-dimensional channel with oblique ribs attached on both walls to enhance turbulent heat transfer. The response surface based optimization is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of fluid flow and heat transfer. Shear stress transport (SST) turbulence model is used as a turbulence closure. Numerical results for heat transfer rate show good agreements with experimental data. Four dimensionless variables such as, rib pitch-to-rib height ratio, rib height-to-channel height ratio, streamwise rib distance on opposite wall to rib pitch ratio, and the 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 coefficients with a weighting factor. D-optimal method is used to determine the training points as a means of design of experiment. Sensitivity of the objective parameters to each design variable has been analyzed. And, optimal values of the design variables have been obtained in a range of the weighting factor.

### 기호설명

$A$	: 리브의 엇갈림 거리	$Pi$	: 리브간 거리
$B$	: 채널의 폭	$Pr$	: 프란틀 수
$c_p$	: 유체의 비열	$q_0$	: 열유속
$D$	: 채널의 높이	$Re$	: 레이놀즈 수
$F$	: 목적함수	$S$	: 열전달 면적
$F_{opt}$	: 최적점에서의 목적함수 값	$T$	: 실제온도
$H$	: 리브 높이	$\hat{T}$	: 온도의 주기성분
$F$	: 목적함수	$\bar{U}$	: 축방향 평균속도
$k$	: 유체의 열전도율	$U_i$	: 속도성분 ( $i=1,2,3$ )
$p, \Delta p$	: 압력, 압력강하	$W$	: 리브 폭
$\hat{p}$	: 압력의 주기성분	$x_i$	: 좌표계
		$\alpha$	: 리브의 경사각
		$\beta$	: 가중계수
		$\gamma$	: 주유동 방향의 압력강하
		$\rho$	: 유체의 밀도
		$\sigma$	: 온도상승률

\* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

## 1. 서론

유동장 내에 난류발생 및 유동혼합을 촉진시켜 열전달을 향상시키기 위해 고온의 가스터빈 블레이드의 내부 냉각을 비롯해 판형 열교환기 및 전자부품 냉각장치 등에서 주기적인 유동간섭물인 리브(rib)를 열전달면 상에 부착하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이러한 유동간섭물은 열전달에 중요한 역할을 하는 난류운동에너지의 생성을 촉진시켜 유동혼합을 활발하게 하며, 주유동 방향의 와(vortex)를 발생시켜 대류를 통한 난류열전달을 증가시킨다. 그러나, 열전달 성능을 향상시키기 위해 인위적으로 유동장에 설치된 구조물은 열전달 성능의 향상과 함께 불가피하게 마찰계수의 증가를 야기하므로, 열전달면의 형상설계를 위해서는 열전달 계수와 마찰계수를 동시에 고려한 설계가 이루어져야 한다.

리브가 부착된 열전달면의 열전달 성능향상을 위해 많은 실험이 수행되어 왔다. Rau 등<sup>(1)</sup>은 Fig. 1과 같은 사각채널의 양쪽 벽에 경사각이 90°인 리브가 설치된 경우에 대한 실험을 수행하여 채널 내부의 속도분포와 국부적인 열전달계수의 분포를 상세히 제시하였다. Han 등<sup>(2)</sup>은 리브의 경사각과 리브간 거리 대 리브의 높이 비가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 실험하여, 리브의 경사각이 60°인 경우, 열전달은 최대가 되며, 리브간 거리가 증가할수록 마찰계수의 값은 감소함을 보였다. Cho 등<sup>(3)</sup>은 연속 리브와 불연속 리브가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 실험하여 열전달 성능은 채널의 두 벽에 대칭으로 설치된 리브가 유동과 수직이 되는 경우 최대가 된다고 보고하였다. 이 외에도 많은 수치적 연구<sup>(4-6)</sup>가 리브가 부착된 열전달면의 해석에 대해 수행되었다.

위에서 언급된 실험과 수치해석은 그러나 선택된 몇 가지 형상에 대한 열전달 성능을 비교하여 최대의 열전달 성능을 보이는 형상을 제시하였을 뿐, 모든 설계변수의 영향을 동시에 체계적으로 고려하여 설계변수의 전역적인 최적값을 제시하지는 못하였다. 이에 반해, 열전달면의 설계에 최적화의 개념을 도입한 연구로, Kim 과 Kim<sup>(7)</sup>은 이차원 열 및 유동해석과 목적함수의 구배를 바탕으로 하는 수치최적화기법 (gradient-based optimization method)을 결합하여 한 쪽 벽면에 리브가 부착된 이차원 열전달면에서 리브의 폭대 높이비와 리브간 거리대 높이비 등 두가지 설계변수에 대한 최적설계를 수행하였고, Kim 과 Kim<sup>(8)</sup>은 이를 발전시켜, 양 쪽 벽면에 리브가 부착된 사각채널에서

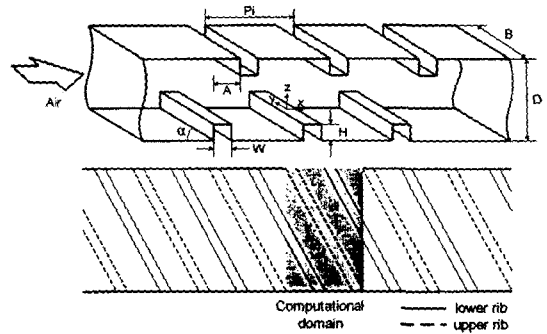


Fig. 1 Geometric parameters and computational domain

리브의 폭 대 높이비, 리브의 높이 대 채널의 높이, 그리고 리브의 엇갈림비 등 세 개의 설계변수에 대해 반응면기법을 이용한 최적설계를 수행하여, 수치최적설계기법이 효율적인 설계수단이 될 수 있음을 증명하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 양쪽 벽에 리브가 부착된 경우에 대해, 리브의 엇갈림 거리 대 리브간 거리 ( $A/Pi$ ), 리브의 높이 대 채널의 높이 ( $H/D$ ), 리브간 거리 대 리브의 높이 ( $Pi/H$ ) 및 리브의 경사각 ( $\alpha$ ) 등 네 개의 설계변수를 선택하고, RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations)를 바탕으로 하는 삼차원 열유동해석과 최근 효과적인 수치최적화기법으로 주목 받는 반응면기법 (Response surface method)<sup>(9)</sup>을 결합하여, 설계변수의 최적값을 도출하는 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 열전달 계수와 마찰계수의 선형 결합으로 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-5.6<sup>(10)</sup>을 사용하였다.

Fig. 1에 나타난 리브의 연속적인 배열에서 한 주기만을 계산영역으로 하여 해석하였는데, 이 경우 지속적인 압력강하와 온도상승에 대해 주기조건을 적용하기 위해 주유동 방향의 운동량 방정식과 에너지 방정식은 다음과 같이 변환되어야 한다.

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

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

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

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

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

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

또한,  $\gamma$  는 주유동 방향의 압력강하율을 나타내며,  $\sigma$  는 다음과 같이 벽으로 유입되는 열유속으로 인한 온도상승률을 나타낸다

$$\sigma = \frac{2q_0}{UD} \quad (6)$$

레이놀즈 응력항의 계산을 위하여 SST (Shear Stress Transport) 모델<sup>(11)</sup>을 사용하였다. SST 모델은  $k-\omega$  모델과  $k-\epsilon$  모델의 장점을 결합한 모델로서, 벽 근처에서는  $k-\omega$  모델이 사용되며, 나머지 영역에서는  $k-\epsilon$  모델이 사용된다. SST 모델은 역압력구배로 인한 유동박리 (flow separation)의 예측에 상당히 효과적인 것으로 보고되었는데,<sup>(12)</sup> 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 구성하였다. 그러나 벽 근처 속도구배의 정확한 해석을 위해 벽 근처의 격자는 육면체로 구성하였으며  $y$ 가 1 이하가 되도록 벽에서 첫 번째 격자는  $0.0002D$  에 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, 계산영역의 주기면에서는 주기조건 (periodic condition)을 사용하였고, 리브와 리브 사이의 표면은 일정 열유속조건 (constant heat flux condition)을 사용하였다.

주기조건을 사용한 계산에서는 유동에 특정한 유량을 부과하기 위해 운동량 방정식의 생성항 수



Fig. 2 Example of grid system ( $A/\Pi=0.25$ ,  $H/D=0.25$ ,  $\Pi/H=12.5$  and  $\alpha=60^\circ$ )

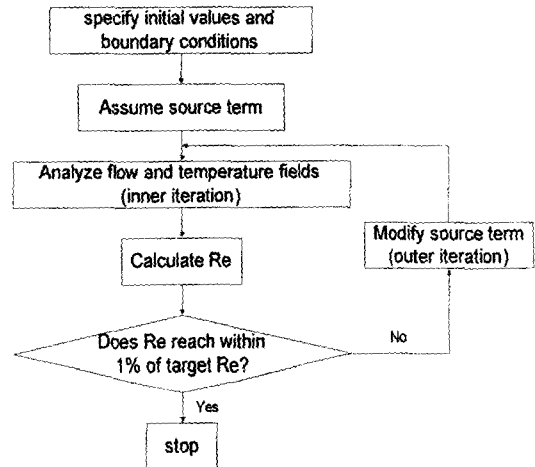


Fig. 3 Flowchart of calculation with periodic conditions

정을 통한 반복계산이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서 사용된 계산방법을 Fig. 3에 나타내었다. 계산시간을 절감하면서, 유동 및 열전달 해석의 정확성을 보장하기 위해, 외부 반복계산 (outer iteration) 횟수를 결정하는 레이놀즈수의 허용 오차와 내부 반복계산 (inner iteration) 횟수를 결정하기 위한 선행연구를 수행하여 내부 반복계산의 횟수와 레이놀즈수의 허용오차를 각각 80 회와 1%로 결정하였다.

## 3. 최적설계기법

### 3.1 반응면기법

본 연구에서 사용된 반응면기법은 최근 단일 또는 다목적 최적설계에 많이 적용<sup>(13-15)</sup>되는 방법으로, 목적함수를 매끄러운 다항 함수로 모델링하기 위해 물리적 또는 수치적 실험을 통하여 도출된 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다. 수치최적화에는 다양한 기법들이 사용되고 있는데, Table 1에는 널리 사용되는 두가지 반응면 기법들과 다른 최적설계기법의 장단점을 비교하였다. 반응면 기법 중 다항식 (polynomial)을 이용한

Table 1 Comparison of characteristics of optimization techniques

	Gradient-based optimization	Neural network-based RSM	Polynomial-based RSM	Genetic algorithm
Computing time and resources	Poor	Poor	Good	Poor
Numerical noise	Poor	Poor	Good	Good
Applicability to complex problem	Poor	Good	Poor	Good

기법은 다목적 변수의 최적화를 제외한 모든 분야에서 그 성능이 우월함을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Kim과 Kim<sup>(8)</sup>이 사용한 방법과 동일한, 다항식에 근거한 반응면 기법을 사용하였다. 반응면 함수는 이차의 다항식으로 구성하였으며, 각 항의 미지 상수는 최소자승법(least square method)<sup>(9)</sup>을 이용하여 결정하였다.

주어진 설계공간 상에서 반응면을 구성하는데 필요한 정보를 얻기 위해 정해진 실험점을 대상으로 수치실험이 수행되어야 하는데, 네 개의 설계변수를 사용한 본 연구에서는 이미 그 장점이 널리 알려진 D-optimal 기법<sup>(9)</sup>을 이용하여 27 개의 실험점을 선택하였다. 본 연구에서 사용된 반응면 기법의 전체적인 흐름을 Fig. 4에 나타내었다.

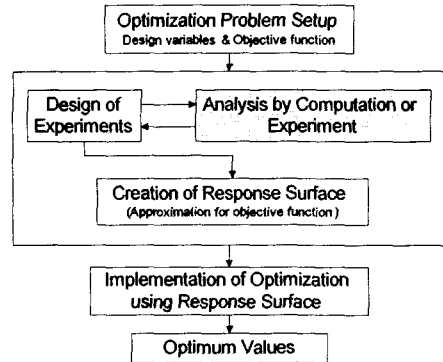


Fig. 4 Response surface method

3.2 설계변수 및 목적함수

수치최적설계를 수행하기 위해서는 최적화하고자 하는 설계변수와 목적함수 등이 먼저 정의되어야 한다. Fig. 1과 같이 양쪽 벽에 삼차원 리브가 부착된 채널유동에서의 형상변수는 모두 7개로 채널 높이 (D), 채널 폭 (B), 리브 높이 (H), 리브 폭 (W), 리브간 거리 (Pi), 리브의 잇갈림 거리 (A) 및 리브의 경사각 (α)이다. 따라서, H/D, B/D, W/H, Pi/H, A/Pi 와 α 등 6 개의 무차원 설계변수가 구성될 수 있다. 이 중 W/H 와 B/D는 1.0으로 고정하였는데, 이는 계산시간 상의 이유 외에도 W/H의 경우 다른 설계변수에 비해 열전달 및 압력강하에 미치는 영향이 비교적 작고, B/D는 터빈 블레이드의 내부구조, 열교환기의 형상 등 열전달면의 적용대상에 따라 고정되는 값으로서 설계변수로 사용하기에는 부적합한 면이 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 A/Pi, H/D, Pi/H 및 α 등 네 개의 설계변수를 사용하였다.

목적함수는 열전달 효과와 압력강하를 동시에 고려하기 위해 Kim 과 Kim<sup>(8)</sup>이 정의한 바와 같이 가중계수를 이용한 열전달 계수와 마찰계수의 조합으로 다음과 같이 정의한다.

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

이 목적함수를 최적화 과정에서 최소화하기 위해 열전달과 관련된 우변 첫째항은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서,

$$Nu_a = \frac{\int_s \frac{Nu}{Nu_s} dS}{A} \tag{9}$$

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \tag{10}$$

Nu<sub>s</sub>는 매끈한 원관 내에서 완전발달된 난류유동에 대한 Dittus-Boelter 식을 나타내고, A는 열전달면의 면적을 나타낸다.

두 번째 항은 마찰손실과 관련된 항으로 다음과 같이 정의된다.

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

여기서,

$$f = \frac{\Delta p D}{2\rho U_b^2 Pi} , f_0 = 2(2.23 \ln Re - 4.639)^{-2} \tag{12}$$

이며, f<sub>0</sub>는 매끈한 관에서 완전발달된 유동에 대한 마찰계수이다.

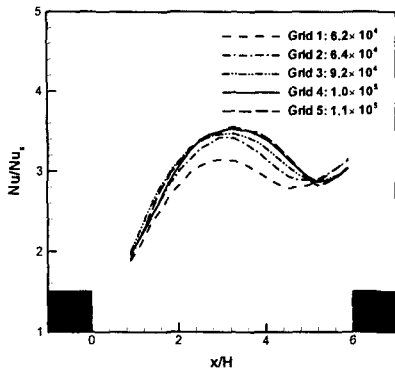


Fig. 5 Grid dependency test

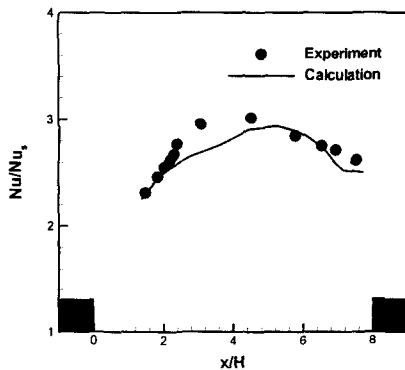


Fig. 6 Validation of computed local nusselt number

가중계수,  $\beta$  는 열전달과 압력강하 사이의 비중을 조절하기 위해 설계자가 결정해야 할 변수로서 시스템의 특성에 따라 다른 값을 가진다.

#### 4. 결과 및 검토

열전달해석의 격자의존성을 제거하기 위해 Fig. 5에 나타난 바와 같이 리브의 경사각이  $60^\circ$ 인 유동장을 대상으로 다섯 가지의 격자분포에 대한 격자의존성 테스트를 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이  $1.0 \times 10^5$  개의 격자수에서 격자의존도가 사라짐을 알 수 있다.

최적설계에 앞서 난류 열전달해석의 타당성검증을 위해, Fig. 6과 같이 열전달계수에 관한 계산결과를 Rau 등<sup>(1)</sup>의 실험결과와 비교하였다. 여기서, 각 설계변수의 값은  $A/Pi=0.0$ ,  $H/D=0.1$ ,  $Pi/H=9.0$  및  $\alpha=90^\circ$  이고, 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 30,000이다. 국부적인 Nu 수는 실험에 비해 최대값을 작게 예측하고 있으나, 정성적인 경향은 잘 일치하고 있다. 이는 Ooi 등<sup>(6)</sup>이 한쪽 면에 리브가 부착된 채널유동에 대한 연구에서 보

Table 2 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
A/Pi	0	0.5
H/D	0.05	0.25
Pi/H	5.0	20.0
$\alpha$	$30^\circ$	$90^\circ$

Table 3 Results of ANOVA and regression analysis

$\beta$	R	$R^2$	$R^2_{adj}$
0.04	0.985	0.981	0.956

고한 k- $\epsilon$ , S-A 및 v2f 모델의 예측 성능을 증가하는 것으로서, 최적설계를 수행하기에는 만족할 만한 성능으로 사료된다.

최적설계는 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수가 30,000이고, 리브가 설치된 채널의 두 벽으로 일정한 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행하였다. 최적설계를 위한 반응함수는 Table 2에 나타난 각 설계변수의 영역 내에서 구성되며, 반응함수를 구성하기 위해, 앞서 언급한 바와 같이, D-optimal 기법을 이용하여 27 개의 실험점을 선택하였다. 리브의 엇갈림비, A/Pi의 최소값과 최대값은 0과 0.5로써, 각각 양쪽 벽에 부착된 리브가 서로 대칭인 위치와 정확히 엇갈린 위치를 나타낸다. 유로 막힘을, H/D는 실제 열교환기에서의 사용에와 압력강하에 대한 Lopez 등<sup>(16)</sup>의 계산결과를 바탕으로 설계범위를 0.05에서 0.25로 결정하였다. 계산영역의 크기를 결정하는 Pi/H는 선행된 실험들<sup>(14,17)</sup>에서 최대의 효율을 보이는 5에서 20까지의 범위로 선택하였다. 또한, 리브의 경사각의 설계범위는 Han 등<sup>(2)</sup>과 Cho 등<sup>(3)</sup>의 실험 및 Tatsumi 등<sup>(18)</sup>의 수치해석 결과를 분석하여 최대값과 최소값을 각각  $30^\circ$ 와  $90^\circ$ 로 설정하였다.

최적설계는 가중계수 0.0 ~ 0.1의 범위에 대해 수행되었으며, 각각의 미지상수는 통계학 상용 소프트웨어인 SPSS를 사용하여 결정하였다. 완성된 반응함수는 t-검정과 adjusted R2 법<sup>(9)</sup>을 사용하여 신뢰도를 향상시켰다. Table 3에는 가중계수가 0.04인 경우에 대해 ANOVA와 회귀분석의 결과를 나타내었다. 반응면 기법에 의한 반응값이 정확히 예측된 경우  $0.9 \leq R^2_{adj} \leq 1.0$ 을 갖는다고 알려져 있다.<sup>(19)</sup> 따라서 본 연구에서 형성된 반응면과 설계변수의 최적값은 신뢰할 만한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 분석을 나타낸다. 여기서 설계변수의 변화를 나타내는 dv는 최적값의  $\pm 10\%$  범위 내에서 변화시켰고, 하첨자 opt는 가중계수가 0.05인 경우

Table 4 Results of optimization for  $\beta=0.02$

	Design variable				Average Nu	Friction factor	Objective function
	H/D	Pi/H	A/Pi	$\alpha$			
30° rib	0.25	12.5	0.50	30.0°	2.3444	2.2978	0.4725
90° rib	0.21	12.7	0.14	90.0°	1.9533	2.3265	0.5585
Optimal rib	0.21	12.7	0.14	55.4°	2.8013	2.7381	0.4117

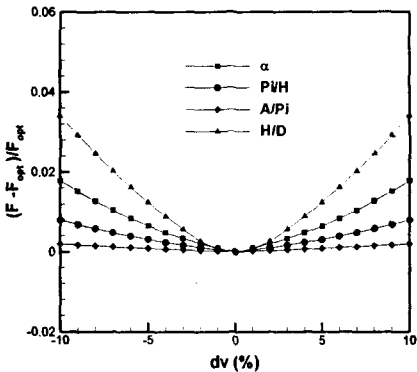


Fig. 7 Sensitivity analysis of objective function for optimal shape ( $\beta=0.05$ )

에 대한 최적형상에서의 목적함수 값을 나타낸다. 민감도 분석으로부터, 목적함수는 네 개의 설계변수 중 리브의 높이에 가장 민감하게 반응함을 알 수 있다.

Table 4 는 가중계수가 0.02 인 경우에 대한 최적 설계의 결과를 임의로 선택된 리브의 경사각이 각각 30°와 90°인 경우에 대한 결과와 비교하였다. 최적설계결과, 열전달 성능은 30° 리브에 비해 19.5% 증가하였으며, 리브의 경사각이 90°인 경우보다 43.4% 향상되었다. 마찰계수는 최적형상에서 가장 크게 나타나는데, 이는 리브의 경사각이 60°인 경우 마찰계수가 최대가 된다고 보고한 Han 등<sup>(2)</sup>과 Tatsumi 등<sup>(18)</sup>의 결과와 유사하다. 결과적으로 목적함수는 두 개의 비교형상에 비해 최적형상이 각각 12.9%와 26.3% 작은 값을 나타내었다.

Fig. 8 은 가중계수가 0.02 인 경우의 최적 형상에 대해 열전달이 일어나는 두 벽에서 Nu 수의 분포를 나타낸다. 리브 후방의 유동박리 구역에서 열전달이 급격히 감소함을 볼 수 있으며, 재부착점(reattachment point)을 중심으로 최대 열전달 구역이 형성되고 이후 서서히 감소함을 알 수 있다. 이로부터 재부착거리가 짧을수록 평균열전달계수는 증가함을 알 수 있다. Fig. 9 와 10 은 각각 가중계수가 0.02 인 경우의 최적형상에 대한 x-z 평면과 y-z 평면에서의 속도벡터를 나타낸다. Fig. 9 에서 보는 바와 같이 유동은 중심부에 비해 벽에 인접

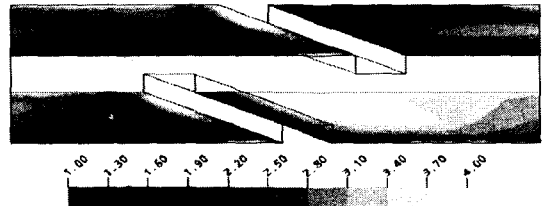
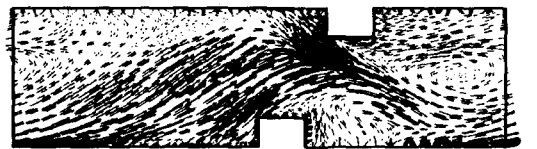
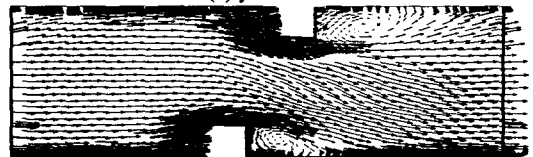


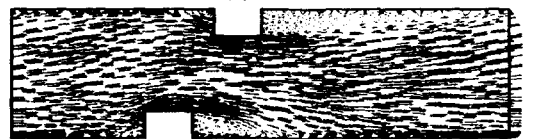
Fig. 8 Nusselt number contours for optimal shape ( $\beta=0.02$ )



(a)  $y/B=-0.4$



(a)  $y/B=0.0$



(a)  $y/B=0.4$

Fig. 9 Velocity vectors of optimal shape at x-z planes for  $\beta=0.02$

한 위치에서 복잡한 형태를 보인다. 특히, 리브가 측면과 예각으로 교차하는  $y/B=-0.4$ 에서 강한 재순환유동들이 나타나고 있다. 이를 Fig. 10 과 연관시키면 벽근처에서 발생한 강한 와(vortex)가 스펀 방향으로 이동함으로써 강한 삼차원유동을 발생시키고 있음을 알 수 있다. 이러한 유동은 벽근처와 채널 중심 사이의 유동혼합을 증가시킴으로써 열전달을 향상시키는 역할을 한다. Fig. 10 에서 경사진 리브를 지나면서 세 개 이상의 와가 형성됨을 볼 수 있으며, 하류로 갈수록 이 와들의 중심이 활발하게 이동함을 알 수 있다. Fig. 11 은 Table 4 에 제시된 세 가지 형상에 대한 국부적인 Nu 수의 분포를 나타내는데 최적형상에서 전 영역에 걸쳐 상당한 열전달 증진이 일어남을 볼 수 있다.

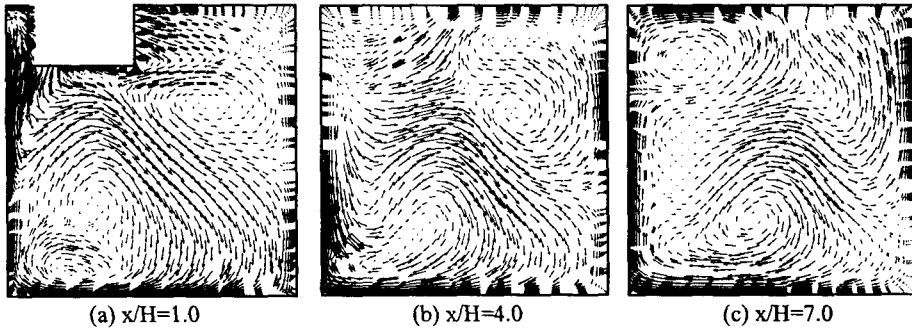


Fig. 10 Velocity vectors of optimal shape at y-z planes for  $\beta=0.02$

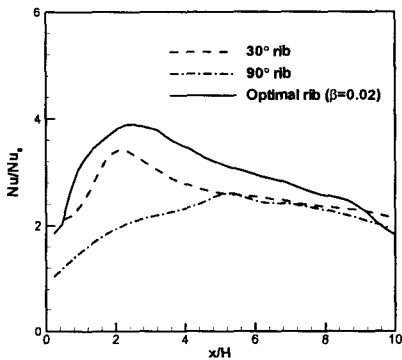


Fig. 11 Local nusselt number distributions

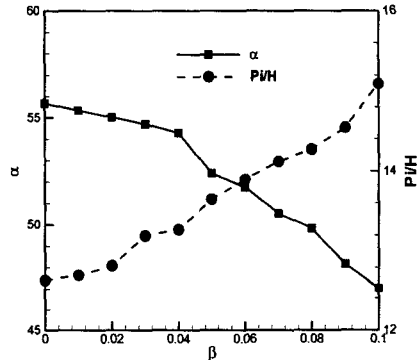


Fig. 12 Variations of optimal values of  $\alpha$  and  $Pi/H$

가중계수에 따른 최적값의 변화를 Fig. 12 와 13 에 나타내었다. 가중계수가 증가함에 따라, 리브간 거리와 엇갈림비는 증가하는 반면, 리브의 경사각과 리브의 높이는 감소함을 볼 수 있다. 리브간 거리가 증가할수록, 유동박리 이후 압력회복이 충분분이 일어나므로, 가중계수가 증가함에 따라  $Pi/H$ 의 최적값은 증가하는 것으로 사료된다.  $H/D$ 는 이와 반대의 경향을 보이는데, 이는 리브의 높이가 작을수록 리브전후의 압력강하가 작아지기 때문이다. Han 등<sup>(2)</sup>은 실험을 통해 경사진 리브가 부착된 열전달면의 평균 Nu 수는 리브의 경사각이 30°와 45°인 경우, 90°인 경우에 비해 각각 5%와 25% 크게 나타난다고 보고하였다. Tiggelbeck 등<sup>(20)</sup>은 열전달 향상에 중요한 역할을 하는 벽에서의 와는 리브의 경사각이 70° 이후에서는 발견되지 않는다고 보고한 바 있다. 또한 Tatsumi 등<sup>(18)</sup>은 경사진 리브가 부착된 채널유동에 대한 수치해석을 통해 최대 열전달은 리브의 경사각이 45°인 경우 발생하며, 리브의 경사각이 60°일 때 마찰계수는 최대가 됨을 밝혔고, 벽에서의 와는 리브의 경사각이 60° 이하인 경우에만 발생한다고 보고하였다. 이러한 여러 실험 및 수치해석 결과로 판단해 볼 때

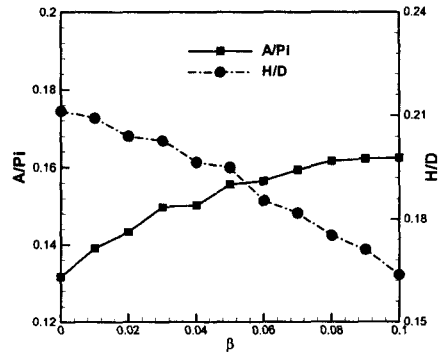


Fig. 13 Variations of optimal values of  $A/H$  and  $H/D$

경사각의 최적값은 45°에서 60° 사이에 존재함을 예측할 수 있는데, 본 연구에서 제시된 리브 경사각의 최적값은 이러한 경향을 잘 반영하고 있다.

### 5. 결론

삼차원 난류열전달 해석과 수치최적설계기법을 결합하여 사각 채널의 양쪽 벽에 경사진 리브가 부착된 열전달유로에 대한 형상 최적화를 수행하였다. 수치해석을 통해 얻은 열전달계수는 실험결

과와 비교해 볼 때, 최적설계를 수행하기에 충분할 만한 신뢰도를 보였다. 목적함수는 열전달 향상과 마찰계수 감소를 동시에 고려하여 열전달면의 성능을 최대화하기 위해 가중계수를 이용한 선형결합으로 정의하였다. 신뢰할 만한 반응면의 구성을 위해 D-optimal 실험설계법을 사용하여 설계영역 내에서 27 개의 실험점을 선택하였다. 민감도 분석 결과, 목적함수는 네 개의 설계변수 중 리브의 높이에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 최적설계 결과, 가중계수가 증가할 수록, 즉 설계자가 마찰계수의 감소에 보다 더 중점을 둘 경우, 리브간 거리와 리브간 엇갈림 거리의 최적치는 증가하며, 리브의 경사각과 리브의 높이의 최적치는 감소하였다.

### 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," *ASME J. of 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," *ASME J. of 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," *IGTI Turbo Expo Paper No. 2001-GT-0175*, Louisiana, USA.
- (4) 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*.
- (5) Iacovides, H. and Raisee, M., 1999, "Recent Progress in the Computation of Flow and Heat Transfer in Internal Cooling Passages of Turbine Blades," *Int. J. Heat Fluid flow*, Vol. 20, pp. 320-328.
- (6) Ooi, A., Iaccarino, G., Durbin, P. A. and Behnia, M., 2002, "Reynolds Averaged Simulation of Flow and Heat Transfer in Ribbed Ducts," *Int. J. Heat Fluid flow*, Vol. 23, pp. 750-757.
- (7) 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.
- (8) Kim, H. M. and Kim, K. Y., 2003, "Shape Optimization of Heat Transfer Surfaces with Staggered Ribs to Enhance Turbulent Heat Transfer," *Trans. KSME (B)*, Vol. 27, No. 9, pp. 1351-1359.
- (9) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 1995, "Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments," *John Wiley & Sons*.
- (10) CFX-5.6 Solver Theory, Ansys Inc., 2003.
- (11) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Uberlandia, Brazil.
- (12) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," *AIAA Paper 97-2121*.
- (13) 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.
- (14) Sobieszcanski-Sobieski, J. and Haftka, R. T., 1996, "Multi Disciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Development," *AIAA 96-0711*.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) 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.
- (20) Tiggelbeck, S., Mitra, N. K. and Fiebig, M., 1991, "Flow Structure and Heat Transfer in a Channel with Multiple Longitudinal Vortex Generators," *Proc. 2nd World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Dubrovnik, pp. 126-133.