

경사진 사각리브가 부착된 열전달면의 수치최적화기법을 이용한 형상설계

김 홍 민* · 김 광 용†

(2004년 1월 28 일 접수, 2004년 7월 12일 심사완료)

Shape Design of Heat Transfer Surfaces with Angled Ribs Using Numerical Optimization Techniques

Hong-Min Kim and Kwang-Yong Kim

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

Abstract

A numerical optimization procedure for the shape of three-dimensional channel with angled ribs mounted on one of the walls to enhance turbulent heat transfer is presented. The response surface method is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analyses of flow and heat transfer. SST turbulence model is used as a turbulence closure. Computational results for local heat transfer rate show reasonable agreements with experimental data. The pitch-to-height ratio of the rib and rib height-to-channel height ratio are set to be 9.0 and 0.1, respectively, and width-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. Full-factorial experimental design method is used to determine the data points. Optimum shapes of the channel have been obtained in the range from 0.0 to 0.1 of weighting factor.

———— 기호설명 ————

<p>B : 채널의 폭</p> <p>D : 채널의 높이</p> <p>D_h : 수력직경</p> <p>f : 마찰계수</p> <p>F : 목적함수</p> <p>H : 리브 높이</p> <p>Nu : 국부 누셀트 수</p> <p>Nu_a : 평균 누셀트 수</p> <p>Nu_s : 기준 누셀트 수</p> <p>Pi : 리브간 거리</p> <p>Δp : 압력강하</p> <p>q_0 : 열유속</p> <p>Re : 레이놀즈 수</p>	<p>U_b : 입구에서의 축방향 평균속도</p> <p>W : 리브 폭</p> <p>α : 리브의 각도</p> <p>β : 가중계수</p> <p>ρ : 유체의 밀도</p> <p>η : 반응</p>
---	--

1. 서 론

날로 증가하는 에너지 절약에 대한 관심과 더불어, 핀, 주름진 표면, 선회기 및 리브 등 열전달 증진을 위한 다양한 방법들이 실제 산업현장에서 사용되고 있다. 이 중, 주기적인 유동간섭물인 리브를 열전달면 상에 부착함으로써, 유동장 내에 난류발생을 촉진시켜 열전달을 증진시키는 방법은 터빈 블레이드의 내부 냉각을 비롯해 열교환기, 가스냉각 장치 및 전자부품 냉각장치 등 넓은 분야에 응용되고 있다. 그러나, 열전달 성능을 향상

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

시킴을 위해 인위적으로 유동장에 설치된 구조물은 열전달 성능의 향상과 함께 불가피하게 마찰계수의 증가를 수반하므로, 설계자의 의도에 부합되는 열전달면의 형상설계를 위해서는 열전달 계수와 마찰계수를 동시에 고려해야만 한다.

리브가 부착된 열전달면의 성능은 열전달면의 형상과 유동구조 등에 따라 달라지므로 열전달면의 설계를 위해서는 유동 및 열전달에 대한 정확한 해석이 뒷받침되어야 한다. 최근, 전산유체역학의 발전으로, Navier-Stokes 방정식을 사용한 유동 및 열전달 해석이 복잡한 현상에 대해 실용화되고 있다. 그러므로, 실험이나 근사적 해석에 의존하던 기존의 열전달면 설계방식은 이에 비해 매우 경제적이고 효율적 방식 즉, 전산유체역학과 수치최적화기법이 결합된 설계방식으로 전환될 수 있을 것으로 기대된다.

리브가 부착된 열전달면의 열전달 성능향상을 위해 많은 실험적 연구가 수행되어 왔다. Rau 등⁽¹⁾은 Fig. 1과 같은 사각채널의 한쪽 벽에 리브가 유동방향에 수직으로 설치된 경우에 대한 실험을 수행하여 리브 사이의 속도분포와 국부적인 Nusselt 수의 분포를 상세히 제시하였고, 리브간 거리 대 리브의 높이비 (Pi/H)가 6, 9 그리고 12 인 경우의 열전달 성능을 비교하여 Pi/H 가 9인 경우, 리브 사이의 벽면에서 최대 열전달 성능을 보인다고 보고하였다. Han 등⁽²⁾은 리브의 각도 ($\alpha=15\sim90^\circ$)와 리브간 거리 대 리브의 높이비 ($Pi/H=10, 20$)가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 실험하여, 리브의 각도가 60° 에서 열전달은 최대값을 가지며, 리브간 간격이 증가할수록 마찰계수의 값은 감소함을 보였고, 열전달 계수와 마찰계수의 비로 정의되는 열전달 성능은 Pi/H 에 관계없이 리브의 각도가 30° 와 45° 인 경우 최대값을 보인다고 보고하였다. Cho 등⁽³⁾은 연속적으로 설치된 리브와 불연속적으로 설치된 리브가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하여 열전달 성능은 채널의 두 벽에 대칭으로 설치된 리브의 각도가 90° 인 경우 최대가 된다고 보고하였다.

이상의 실험들은 선택된 몇 가지 형상에 대해 열전달 성능을 비교하여 최대의 열전달 성능을 보이는 형상을 제시하였을 뿐, 모든 설계변수의 영향을 동시에 체계적으로 고려하여 전역적인 설계변수의 최적값을 유도해 내지는 못하였다. 이에 반해, 열전달면의 설계에 최적화의 개념을 도입한 연구로, Kim과 Kim⁽⁴⁾은 이차원 열 및 유동해석과 최적화기법을 결합하여 한 쪽 벽면에 리브가 부착된 이차원 열전달면의 최적설계를 수행하였다. 그들은 W/H 와 Pi/H 를 설계변수로 선정하고, 열전달

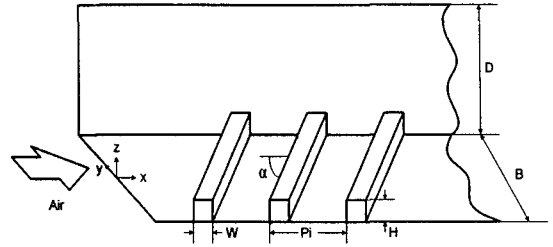


Fig. 1 Geometric variables of rib-roughened channel

계수와 마찰계수로 정의된 목적함수를 최소화함으로써 최적의 열전달면 형상을 설계하여, 수치최적설계기법이 효율적인 설계수단이 될 수 있음을 증명하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 한쪽 벽에 리브가 부착된 경우에 대해, 리브의 폭 대 높이 (W/H)와 리브의 각도 (α) 등 두 개의 설계변수를 선택하고, 삼차원 열 및 유동해석을 최근 효과적인 수치최적화기법으로 주목 받는 반응면기법 (Response surface method)⁽⁵⁾과 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. 연속방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식 등의 지배방정식은 유한체적법으로 이산화되며, 대류항과 확산항의 이산화 방법으로는 각각 수정된 상류차분도식과 중심차분법이 사용되었다. 기본적인 격자구조는 사면체를 이용한 비정렬격자로 구성하였으며, 속도구배가 큰 벽 근처의 정확한 해석을 위해 벽면에서는 15개의 프리즘을 이용한 육면체 격자를 이용하였다.

레이놀즈 응력항의 계산을 위하여 SST (Shear Stress Transportation) 모델⁽⁶⁾을 사용하였다. SST 모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델의 장점을 결합한 모델로, 벽 근처에서는 $k-\omega$ 모델이 사용되며, 나머지 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델이 사용된다. SST 모델은 역압력구배로 인한 유동박리의 예측에 상당히 효과적인 것으로 보고되었는데,⁽⁷⁾ 이를 통해 난류 열전달 성능의 예측에 필수적인 벽 근처 난류유동해석의 정확성을 높일 수 있다.

터빈 블레이드 내부의 열전달 계산을 위해 리브가 설치된 전체 영역을 계산하는 방법이 사용된

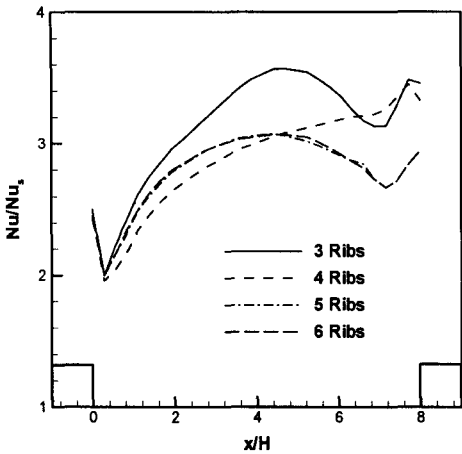


Fig. 2 Comparison of heat transfer coefficients according to the number of ribs

바 있으나,⁽⁸⁻¹⁰⁾ 이 방법에는 격자수의 증가로 인해 계산시간이 상당히 소요되므로 본 연구에서는 Fig. 2 에서와 같이 계산영역내 리브의 갯수에 따른 열전달 계수의 변화를 마지막 두 개의 리브 사이에서 비교하여, 계산영역내의 리브수를 5 개로 결정하였다.

채널의 입구에는 25℃의 공기가 9.272 m/s 의 일 정속도로 유입되도록 지정하였고, 출구에는 대기 압 조건을 사용하였다. Iaccarino 등⁽¹¹⁾은 리브표면 이 단열과 일정 열유속 조건을 갖는 경우와, 리브 내부의 전도를 고려한 경우 등의 서로 다른 세 가지 리브 표면의 경계조건에 대한 해석을 수행하여 리브 내부의 전도를 고려한 경우, 가장 정확한 해석결과가 얻어진다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 리브가 설치된 벽면에 일정 열유속조건을 지정하여, 벽으로부터 리브 내부로의 전도와 벽과 유체사이의 대류현상을 동시에 고려하였다.

3. 최적설계기법

3.1 반응면기법

반응면기법은 목적함수를 매끄러운 다항 함수로 모델링 하기 위해 물리적 또는 수치적 실험을 통하여 도출된 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다. 반응면을 구성하는 반응면 함수는 일반적으로 다항식의 형태를 갖고 있으며, 각 항의 미지 상수는 회귀분석을 통하여 구하게 된다. 본 연구에서는 이차 다항식으로 반응면 모델을 형성하였다. 일반적으로 다항식의 계수는 실험 데이터로부터 최소사승법을 사용하여 결정된다.

주어진 설계공간 상에서 반응면을 구성하는데

필요한 정보를 얻기 위해 정해진 실험점을 대상으로 수치실험이 수행되어야 하는데, 두 개의 설계변수를 사용한 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 완전계승법⁽¹²⁾을 이용하여 9 개의 실험점을 선택하였다.

3.2 설계변수 및 목적함수

수치최적설계기법을 수행하기 위해서는 최적화하고자 하는 설계변수와 목적함수 등이 먼저 정의되어야 한다. Fig. 1과 같이 한쪽 벽에 삼차원 리브가 배열된 채널유동에서의 형상변수는 모두 6 개로 채널 높이 (D), 채널 폭 (B), 리브 높이 (H), 리브 폭 (W), 리브간 거리 (P_i) 및 리브 각도 (α)이다. 따라서, H/D , B/D , W/H , P_i/H 와 α 등 5 개의 무차원 설계변수가 구성될 수 있다. 이 중 H/D 는 0.1 로 고정하였는데, 이는 Lopez 등⁽¹³⁾ 이 보고한 바와 같이 H/D 가 커질 경우 열전달 증가에 비해 압력강하가 상당히 증가하여 효율이 떨어지기 때문이다. 또한, B/D 는 터빈 블레이드의 내부구조, 열교환기의 형상 등 열전달면의 적용대상에 따라 고정되는 값으로써 설계변수로 사용하기에는 부적합하므로, 본 연구에서는 B/D 를 1.0 으로 고정하였다. 그리고, P_i/H 는 많은 실험^(1,14,15)을 통해 최대의 열효율을 보이는 것으로 알려진 9.0 으로 고정하였다. 따라서, 본 연구에서는 5 개의 무차원 설계변수 중 Metzger 등⁽¹⁶⁾에 의해 리브가 설치된 열전달면의 성능에 가장 영향이 큰 것으로 알려진 리브 각도 (α)와 실험을 통해 그 영향이 잘 다루어지지 않았던 W/H 등 두 개의 변수를 설계변수로 사용하였다.

Webb 과 Eckert⁽¹⁷⁾는 펌프동력, 열전달량, 열전달면적과 열전도의 관계로부터 열전달면의 성능을 결정하는 인자는 열전달 계수와 마찰계수임을 밝혔다. 따라서, 목적함수는 열전달 효과와 압력강하를 동시에 고려하기 위해 열전달 계수와 마찰계수의 조합으로 다음과 같이 정의하였다.

$$F = F_{Nu} + \beta F_f \quad (1)$$

위 식의 우변 첫째 항은 열전달 효과를 나타내며, 본 연구에서는 목적함수를 최소화하는 방향으로 최적설계를 수행하기 위해, Nusselt 수의 역수로 정의하였다.

$$F_{Nu} = \frac{1}{Nu_a} \quad (2)$$

여기서,

$$Nu_a = \frac{\int_A \frac{Nu}{Nu_s} dA}{A} \quad (3)$$

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4)$$

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

두 번째 항은 마찰손실이 열전달면의 성능에 미치는 영향을 나타내는 항으로 Webb 과 Eckert⁽¹⁷⁾는 다음과 같이 정의하였다.

$$F_f = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

여기서,

$$f = \frac{\Delta p D}{2 \rho U_b^2 P i}, f_0 = 2(2.23 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (6)$$

이며, f_0 는 매끈한 관에서 완전발달된 유동에 대한 마찰계수이다.⁽¹⁸⁾

가중계수 β 는 에너지의 경제성을 고려하여 열전달과 압력강하 사이의 비중을 조절하기 위해 설계자가 결정해야 할 변수로서 시스템의 특성에 따라 다른 값을 가진다.

4. 결과 및 검토

4.1 열전달해석의 정확성 검증

열전달해석의 격자의존성을 제거하기 위해 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 리브각도가 45°인 유동장을 대상으로 다섯 가지의 격자분포에 대한 격자의존성 테스트를 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 3.5×10^5 개의 격자수에서 격자의존도가 사라짐을 알 수 있다.

최적설계에 앞서 난류 열전달해석의 타당성검증을 위해, Nusselt 수의 분포를 Rau 등⁽¹⁾의 실험결과와 비교하였다. 여기서, 채널의 높이 (D)는 0.05m, 리브의 폭 (W)는 0.005m 이며, 리브의 각도는 90°이다. 작동유체는 상온의 공기이며, 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 30,000 이다. Fig. 4 는 Nusselt 수에 대한 계산결과를 Rau 등⁽¹⁾의 실험값과 비교하고 있다. 리브 사이의 벽에서 계산된 Nusselt 수는 대체적으로 실험값에 비해 작게 예측

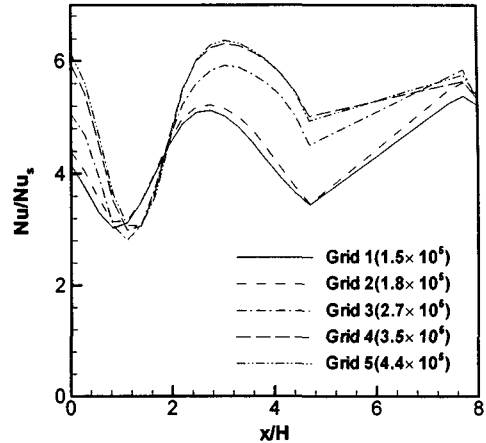


Fig. 3 Grid dependency test

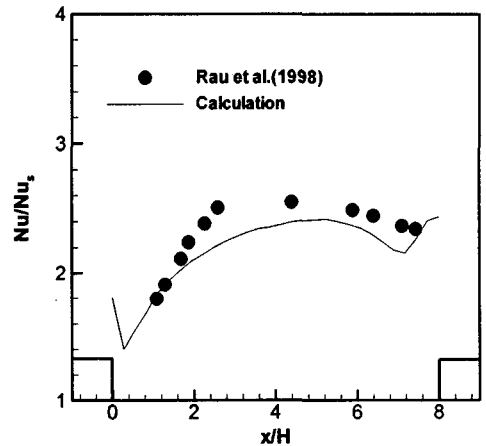


Fig. 4 Validation of computational Nusselt number

되고 있으나, 정성적인 경향은 잘 일치하고 있다.

4.2 민감도 분석

최적설계에 앞서 각 설계변수에 대한 열전달계수와 마찰계수의 민감도를 분석하였고, 그 결과를 Fig. 5 ~ 8 에 나타내었다.

Fig. 5 와 6 은 리브 폭 대 높이비 (W/H)에 대한 평균 Nusselt 수와 마찰계수의 민감도를 나타낸다. 리브각이 90°인 경우, 평균 Nusselt 수는 W/H의 변화에 큰 영향을 받지 않는으나, 리브각이 30°와 60°인 경우는 W/H 가 1.5 보다 작은 범위에서 열전달 성능에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 리브각에 대해 W/H 가 증가할수록 마찰계수는 감소하는 경향을 보이며, 리브각이 60°인 경우 마찰계수는 최대값을 갖는데, 이는 Han 등⁽²⁾의 실험결과와 동일하다.

Fig. 7 과 8 은 리브각에 대한 평균 Nusselt 수와

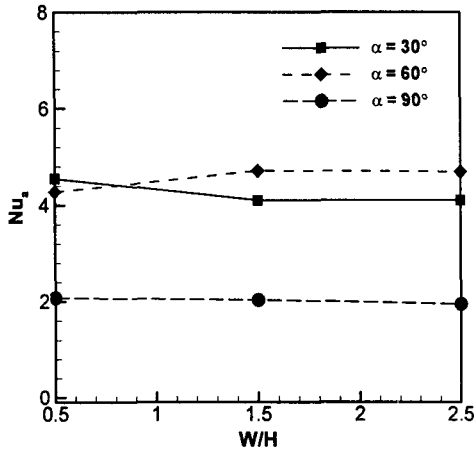


Fig. 5 Effect of W/H on average Nusselt number

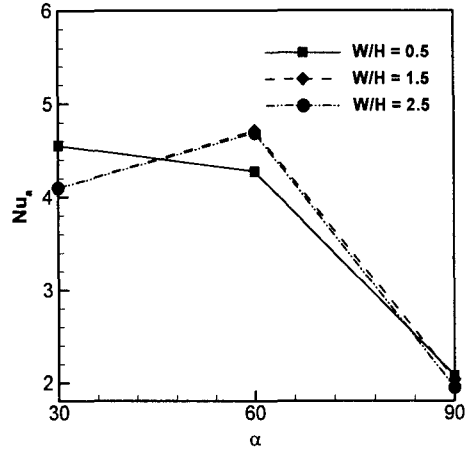


Fig. 7 Effect of α on average Nusselt number

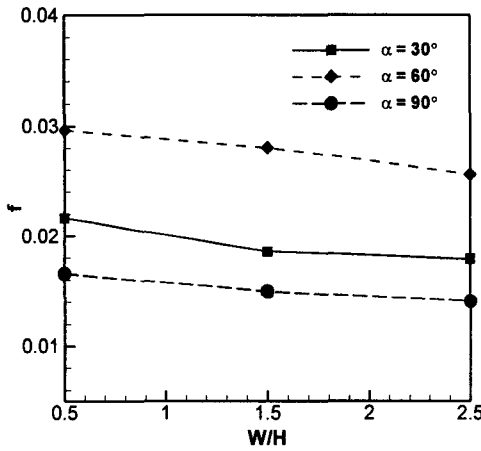


Fig. 6 Effect of W/H on friction factor

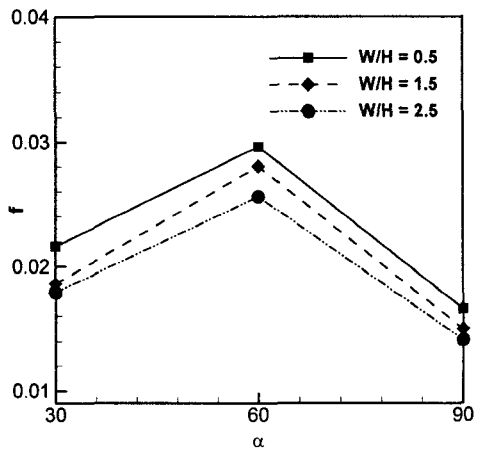


Fig. 8 Effect of α on friction factor

마찰계수의 민감도를 나타낸다. W/H 가 0.5 인 경우를 제외하고 리브각이 60°인 경우 평균 Nusselt 수는 최대값을 갖는데, Han 등⁽²⁾ 과 Cho 등⁽³⁾ 도 이와 유사한 결과를 보고한 바 있다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이, 리브각이 60°인 경우는 열전달 성능과 더불어 마찰계수도 최대값을 갖는다. 따라서 최적설계는 열전달 성능의 향상과 마찰계수 감소 사이의 타협의 통해 이루어져야 함을 알 수 있다.

4.3 최적설계

최적설계는 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수가 30,000 이고, 마주보는 채널의 두 벽으로 일정한 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행되었다.

반응면기법에서 반응면을 구성하기 위해 완전계승법을 이용하여 선택한 9 개의 실험점에 대한 설

계변수의 범위는 Table 1 에 나타내었다. 리브각의 설계범위는 Han 등⁽²⁾ 과 Cho 등⁽³⁾ 의 실험을 분석하여 최대값과 최소값을 각각 30°와 90°로 설정하였다. 또한 W/H 의 최소값은 W/H 가 작은 경우 생길 수 있는 수치해석의 발산을 막기 위해 0.5 로 선택하였으며, 이 값이 커지면 리브 상단에서 열전달 성능을 저하시키는 열경계층이 성장하므로 최대값을 2.5 로 설정하였다.

최적설계는 가중계수 0 ~ 0.1 의 범위에 대해 수행되었으며, 각각의 미지상수는 통계학 상용 소프트웨어인 SPSS 를 사용하여 결정하였다. 완성된 반응함수는 t-검정과 adjusted R² 법⁽¹²⁾ 을 사용하여 신뢰도를 향상시켰다. Table 2 에는 가중계수가 0.02 인 경우에 대해 ANOVA 와 회귀분석의 결과를 나타내었다. 반응면 기법으로 반응값이 정확히 예측

Table 1 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
α	30.0°	90.0°
W/H	0.5	2.5

Table 2 Results of ANOVA and regression analysis

β	R	R ²	R ² _{adj}	Std. error of the estimate
0.02	0.997	0.993	0.982	1.819E-0

Table 3 Results of optimization for $\beta=0.02$

	Design variable		Nu _a	F _f	Objective function
	W/H	α			
Ref.	1.500	90.0°	2.0349	0.8459	0.50834
Opt.	0.855	45.9°	5.4431	2.0064	0.22384

된 경우 $0.9 \leq R^2_{adj} \leq 1.0$ 을 갖는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 따라서 본 연구에서 형성된 반응면과 설계 변수의 최적값은 신뢰할 만한 것으로 판단된다.

Table 3 은 예를 들어 가중계수가 0.02 인 경우에 대한 최적설계를 W/H=1.5, $\alpha=90^\circ$ 인 경우와 비교한 결과를 나타낸다. 최적설계결과 마찰계수의 증가에도 불구하고 열전달 성능이 상당히 증가함으로써 목적함수 값이 기준형상의 약 44%로 감소하였음을 볼 수 있다.

가중계수에 따른 최적값의 변화를 Fig. 9 에 나타내었다. 가중계수가 증가함에 따라, 리브의 폭은 증가하며, 리브각도는 감소함을 볼 수 있는데 이 결과는 Han 등⁽²⁾ 의 실험에서 나타난 경향을 잘 반영하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 난류열전달 해석과 수치최적설계 기법을 결합하여 한쪽 벽에 경사진 사각 리브가 부착된 삼차원 형상의 열전달면에 대한 형상 최적화를 수행하였다. 최적설계의 기본이 되는 열전달 해석의 정확성은 실험결과와 비교해 볼 때 신뢰할 만한 정확성을 보였으며, 이를 바탕으로 최적설계를 수행하여, 가중계수에 따른 최적값을 설계영역 내에서 반응면 기법을 이용하여 도출하였다. 최적설계 결과, 가중계수가 증가할수록, 즉 설계의 목표를 열전달 보다 압력강하를 감소시키는 방향으로 옮겨갈수록 리브의 높이에 대한 폭의 비는 증가하였으며, 리브각은 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시된 수치최적설계기법과 삼차원 유동해석의 결합은 신뢰성과 경제성을 동시에 만족시킴으로써 열전달면의 설계에 유용한 수단이

될 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," *ASME J. of Turbo-machinery*, 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) 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) 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.
- (6) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Uberlandia, Brazil.
- (7) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," *AIAA Paper 97-2121*.
- (8) Lin, Y. L., Shih, T. I. P., Stephens, M. A. and Chyu, M. K., 2001, "A Numerical Study of Flow and Heat Transfer in a Smooth and Ribbed U-Duct With and Without Rotation," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 219~232.
- (9) Bunker, R. S., Wetzel, T. G. and Rigby, D. L., 2002, "Heat Transfer in a Complex Trailing Edge Passage for a High Pressure Turbine Blade-Part 2: Simulation Results," *IGTI Turbo Expo Paper No. 2002-GT-30213*, Amsterdam, The Netherlands.
- (10) Iacovides, H. and Rasee, M., 1999, "Recent Progress in the Computation of Flow and Heat Transfer in Internal Cooling Passages of Turbine Blades," *Int. J Heat Fluid Transfer*, Vol. 20, pp. 320~328.
- (11) Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P. A. and Behnia, M., 2002, "Conjugate Heat Transfer Predictions in Two-Dimensional Ribbed Passages," *Int. J. Heat Fluid flow*, Vol. 23, pp. 340~345.
- (12) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 1995, "Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments," *John Wiley & Sons*.
- (13) 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.
- (14) Jia, R. and Sunden, B., 2003, "Prediction of Turbulent Heat Transfer and Fluid Flow in 2D Channels Roughened by Square and Deformed Ribs," *IGTI Turbo Expo Paper No. GT-2003-38226*, Georgia, USA.
- (15) Taslim, M. E. and Wadsworth, C. M., 1997, "An Experimental Investigation of the Rib Surface-Averaged Heat Transfer Coefficient in a Rib Roughened Square Passage," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 381~389.
- (16) Metzger, D. E., Chyu, M. K. and Bunker, R. S., 1988, "The Contribution of On-Rib Heat Transfer Coefficients to Total Heat Transfer from Rib," *Hemisphere Publishing Co.*
- (17) 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.
- (18) Petukhov, B. S., 1970, "In : Advances in Heat Transfer," *Academic Press*, New York, Vol. 6, pp. 503~504.
- (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.