

# 난류열전달 증진을 위한 리브형상의 수치최적화

김선수\* · 김광용\*\*

## Numerical Optimization of Rib Shape to Enhance Turbulent Heat Transfer

S. S. Kim and K. Y. Kim

**Key Words :** Numerical Optimization Method(수치최적설계기법), Rib(리브), Turbulent Heat Transfer(난류열전달), Navier-Stokes Analysis(나비에-스톡스 해석)

### Abstract

This paper presents a numerical optimization method to design geometric shape of streamwise periodic ribs mounted on one of the principal walls to enhance turbulent heat transfer in a rectangular channel flow. The golden section method is used for the one dimensional search. The optimization is based on Navier-Stokes analysis of turbulent forced convection with  $k-\epsilon$  turbulence model. The width-to-height ratio of a rib is chosen as a design variable. The object function is defined as an inverse of average Nusselt number. An optimum shape of the rib has been obtained with reasonable computing time.

### 기호설명

$D$	half height of channel [m]
$De$	hydraulic diameter [m], $4D$
$H$	rib height [m]
$W$	rib width [m]
$Pi$	rib pitch [m]
$PR$	rib pitch-to-rib height ratio, $Pi/H$
$U_{av}$	average mean velocity [ $m\ s^{-1}$ ]
$T_{av}$	average mean temperature [K]
$T_w$	wall temperature [K]
$k_f$	conductivity [ $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ]
$Nu$	local Nusselt number
$Re$	Reynolds number
$Pr$	Prandtl number
$F$	object function, $1/Nu_s$
$X$	axial coordinate
$Y$	transverse coordinate
$S$	surface fitted coordinate
$q_w$	local wall heat flux [ $W\ m^{-2}$ ]

### 1. 서론

유동장에서의 주기적인 유동간섭은 일반적으로 난류발생을 촉진시켜 열전달을 증진시킨다. 이러한 현상을 이용하여 열교환기, 가스냉각식 장치, 전자부품 냉각장치 등에서 열전달 효율을 높이기 위해 주기적인 유동간섭물(rib)을 열전달면 상에 장치하고 있다.

리브(rib)가 부착된 열전달장치의 성능은 열전달면의 넓이와 유동박리의 재부착거리, 레이놀즈수에 따라 달라진다. 따라서, 열전달 증진을 위한 리브의 형상최적화를 위해서는 정밀한 유동 및 열전달 해석이 뒷받침되어야 한다. 최근 유체역학과 수치해석법 및 컴퓨터가 결합된 전산유체역학<sup>(1)</sup>이 큰 발전을 거듭한 결과, Navier-Stokes 방정식을 통한 유동장의 해석법이 복잡한 유동장 해석에 실용화되고 있다. 이러한 전산유체역학적 유동 및 열전달의 수치모사기법이 발전함에 따라 실험이나 근사적 해석에 의존하던 기존의 열전달면 설계방식은 전산유체역학과 수치최적화기법이 결합된 매우 경제적이고 효율적인 방식으로 전환될 것으로 기대된다.

최적설계기법의 일종인 수치최적설계기법

\* 인하대 기계공학과 대학원

\*\* 인하대 기계항공자동차공학부

(Numerical optimization method)은 최적설계점에 대한 정보를 미리 알지 못해도 최소화 또는 최대화 할 함수를 정해 놓고 이를 만족하는 설계변수를 찾을 수 있다. 구조설계에서는 이 방법이 오래 전부터 보편적으로 이용되어 왔으나 열유체유동관련 장치의 설계에서는 해석에 소요되는 계산시간의 과다로 인해 그 실용성이 제한되었다. 그러나, 최근 컴퓨터의 성능향상으로 이러한 단점이 해소되어 감으로써 자동설계가 가능한 이 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 연구는 대부분 공력학적 형상설계에 집중되고 있고, 열전달 문제에 대한 적용사례는 아직까지 찾기가 쉽지 않다.

리브가 부착된 열전달 면의 성능에 관한 연구로 Drain 과 Martin<sup>(2)</sup>은 사각채널의 한쪽 면에 주기적인 리브를 부착시켜 완전 발달된 물의 유동을 LDV(Laser-Doppler velocimetry)로 측정하고 이를  $k-\epsilon$  난류모델을 이용하여 해석하였다. Fodemski<sup>(3)</sup>는 한쪽 면에 리브가 부착된 채널 내의 공기유동의 온도장을 상용코드인 FLOW3D를 이용하여 해석하였으며, Lockett 와 Collins<sup>(4)</sup>는 이 유동을 LHI(Laser holograph interferometry) 측정으로 실험하였다. Liou 등<sup>(5)</sup>은 리브형태와 레이놀즈수를 몇가지 변화시켜 리브면 상의  $Nu$  수 분포를 계산하였다. 그러나 이러한 지금까지의 연구들은 몇 가지 제한된 미리 정해진 리브형상에 대해 이루어졌기 때문에 열전달면의 최적설계에는 미치지 못하는 것이었다.

본 연구에서는 전산유체역학적 열 및 유동해석 기법을 사용하여, 한쪽 벽면의 열유속이 일정한 리브 채널 내의 열전달을 최대화하기 위해 리브형상의 수치최적설계를 수행하였다. 최적설계에 앞서 유동해석 코드를 검증하고, 설계변수인 리브의 형상비를 변화시켜, 열전달면의 평균  $Nu$  수의 역수로서 정의된 목적함수를 최소화하였다.

## 2. 유동해석방법

정상상태 비압축성 난류유동에 대한 연속방정식과 운동량방정식 그리고 에너지방정식을 유한체적법으로 이산화하였고 난류모델로는  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 수치스킴으로는 Power-Law 스킴, 그리고 압력-속도 보정에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 유동장과 온도장에 대해 공허 난류의 벽법칙을 사용하였으며, 격자계는 직교좌표계를 이용하였고, 속도에 대해서는 엇갈림 격자계

(staggered grid)를 이용하였다.<sup>(6)</sup>

## 3. 최적설계기법

수치최적설계기법에서는 최소화시킬 목적함수와 설계변수 등이 정의되어야 한다. 2차원 리브 채널에서의 형상변수는 총 4개로 채널 높이( $D$ ), 리브높이( $H$ ), 리브폭( $W$ ), 리브간 거리( $Pi$ )이다. 본 연구에서는 나머지 변수들은 고정시키고 리브의 높이에 대한 리브폭의 비( $W/H$ )만을 설계변수로서 사용하였다. 목적함수( $F$ )는 리브면을 따라 정의되는 좌표( $S$ )에 대한 평균  $Nu$  수의 역수이다.

본 연구에서는 리브가 부착된 열전달면의 수치최적설계를 위하여 다음과 같이 최적화문제를 정의하였다.

$$\text{최소화 : } F = \frac{1}{Nu_a}$$

여기서

$$Nu_a = \frac{\int_0^{6+Pi+2H} [Nu/Nu_s] \cdot dS}{[Pi + 2H]}$$

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

여기서  $Nu_s$ 는 매끈한 원관 내의 완전발달한 난류에서의  $Nu$  수, 즉 위에 주어진 Dittus-Boelter 실험식에서 얻어지는 값이다.

수치최적설계기법에서 목적함수의 최적값을 찾기 위한 일차원탐색기법으로 황금분할법을 사용하였다.<sup>(7)</sup>

## 4. 결과 및 검토

본 연구에서 최적설계에 앞서 열유동해석의 대상이 된 유동장은 Fig. 1과 같다. 계산영역은 완전 발달된 난류의 한 피치(pitch)에 해당하는 구간으로 입구와 출구에 주기(periodic)경계조건을 적용하였고 리브가 있는 면에 일정 열유속을, 리브가 없는 면에는 단열경계조건을 적용하였다. 리브의 표면에는 Webb 과 Ramadhyani<sup>(8)</sup>가 제시한 리브벽면의 열유속분포를 1차함수로 근사시켜 적용하였다. 일정 열유속을 적용하였기 때문에 채널내의 온도장은 계속 증가하게 된다. 이를 주기경계조건에

적용시키기 위해 주 유동방향으로 그 수직한 면에서의 평균온도가 선형적으로 증가한다는 가정을 도입하여, 온도 방정식의 소스항에 적용, 반복계산 시 유입된 열량만큼 전체에서 빼주어 주기경계조건을 만족시켰다. 좌표로는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 공간상의 절대좌표인 X-Y 좌표와 리브가 있는 벽면을 따라 정의되는 S 좌표가 사용되었다.

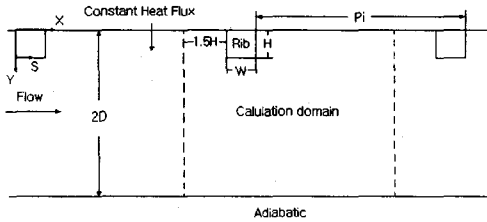


Fig. 1 The ribbed channel geometry, the calculation domain and the boundary conditions

#### 4.1 유동해석코드의 검증

본 연구에서는 최적설계에 앞서 유동해석코드의 타당성을 검증하였다. 속도장에 대해서는 Drain과 Martin<sup>(2)</sup>의 실험치, 온도장에 대해서는 Liou 등<sup>(5)</sup>의 실험치와 비교하였다.

Fig. 2과 같이 비등간격 격자계를 이용하여 벽쪽에 격자를 조밀하게 배치하였다. Fig. 3는 Drain과 Martin<sup>(2)</sup>의 실험에 맞추어 수치해석한 유동장의 속도벡터와 유선들이다. Fig. 4는 몇 개의 단면에 대한 결과를 실험치와 비교한 것이다. 계산결과는 박리구역을 제외한 나머지 영역에서 대체적으로 실험치와 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 적용유체는 물이며, 격자수는  $81 \times 36$ ,  $Re=37200$ ,  $H/De=0.1$ ,  $W/H=1.0$ ,  $PR=7.2$  이다.

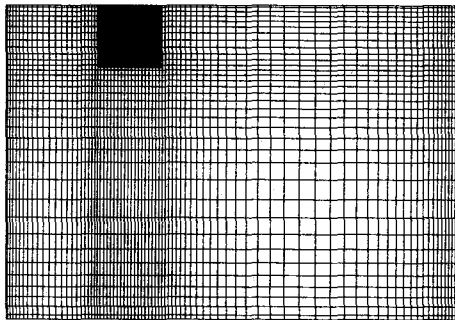


Fig. 2 Computational grids

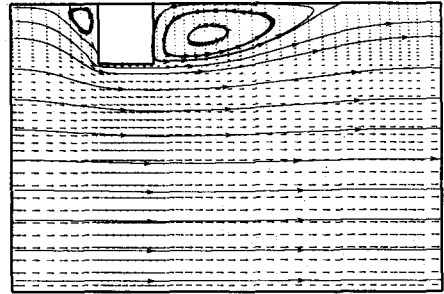


Fig. 3 Velocity vectors and streamlines

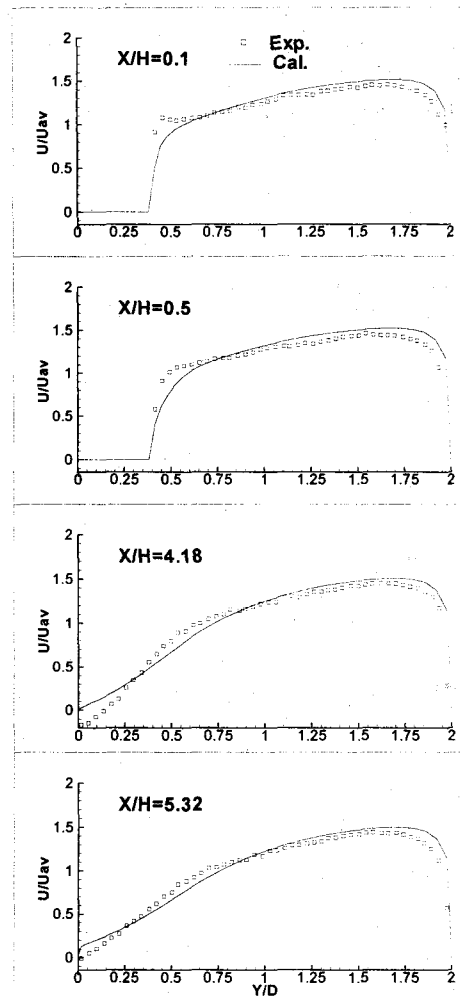


Fig. 4 Comparison of predicted and measured streamwise mean velocity profiles at selected axial stations

Fig. 5는 Nu 수 분포에 대해 Liou 등<sup>(5)</sup>의 실험치와 비교한 결과이다. 적용유체는 공기이며, 격자수는 42x41 이고,  $Re=12600$  이다. 침자  $S$ 는 열전달면을 따라 정의되는 좌표이다. 여기서  $-1 < S/H < 2$  구간은 리브의 표면을 나타낸다.

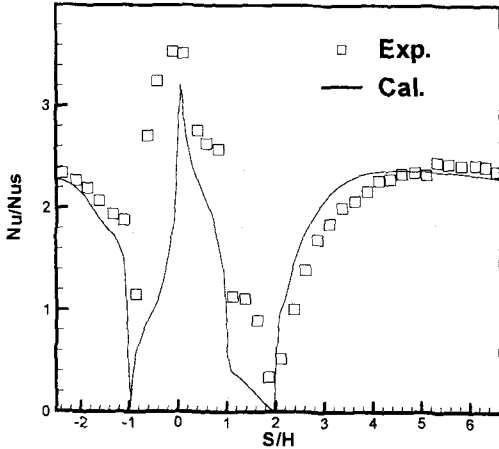


Fig. 5 Comparison of predicted and measured local Nusselt number distributions

$Re$  수와  $Nu$  수의 정의는 다음과 같다.  $Nu$  수와  $T_w$ ,  $T_{av}$  등은 유동방향에 수직인 면에서 평균된 값들이다.

$$Re = \frac{U \cdot De}{\nu}$$

$$Nu = \frac{\dot{q}_w \cdot De}{[k_f \cdot (T_w - T_{av})]}$$

$$T_{av} = \frac{\int_D T \cdot |U| \cdot Y \cdot dY}{\int_D |U| \cdot Y \cdot dY}$$

Fig. 5에서 온도장에 대해서는 리브벽면에서 열 유속경계조건을 가정했기 때문에 어느정도 오차가 나타나고 있으나 정성적인 경향은 잘 일치하고 있다.

#### 4.2 최적설계결과

Fig. 6는 초기 유동장이 갖는 리브형태에 대한 최적설계결과, 목적함수의 변화과정을 보여주고 있다. 설계변수가 하나이므로 단 두 번 만에 최적점에 도달함을 알 수 있다. Fig. 7은 최적설계과

정에서 유동해석코드 사용횟수를 보여준다.

첫번째 반복횟수는 탐색방향을 구하기 위해 초기 형상과 그 근처의 형상으로 목적함수를 구하고 있고, 두번째 반복횟수는 황금분할법으로 탐색거리를 조정해가면서 최적점에 근접해가고 있으며, 세번째 반복횟수에 목적함수의 변화가 거의 없이 최적설계가 수렴되고 있다

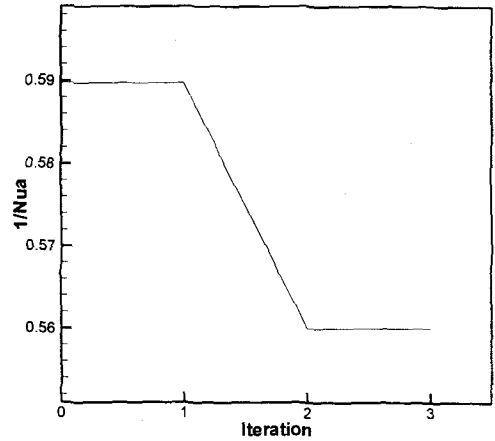


Fig. 6 History of object function

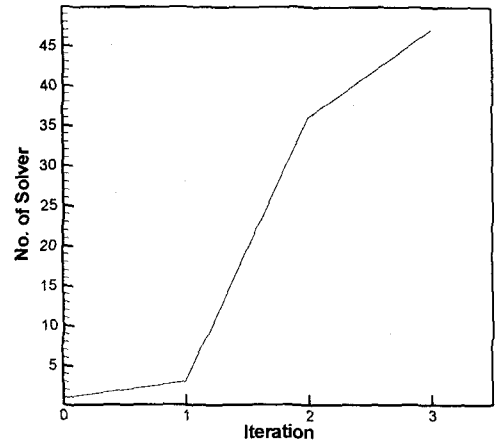


Fig. 7 History of number of solver

Fig. 8은 최적설계 이전과 이후의  $Nu$  수의 변화를 보여준다. 리브폭이 더 작아지면 리브 상단의 면적 감소로 인한  $Nu$  수의 감소가 리브 후류의 재발달영역의 증가보다 더 큰 영향을 주고, 또한 채널벽과 리브가 교차하는 코너, 즉 유동의 재순환영역에서 더욱 열전달이 정체되므로 리브의 옆벽면에서의 열전달효과도 더불어 감소하게 되어 전체적으로 열전달 효과가 감소될 것으로 예상된다.

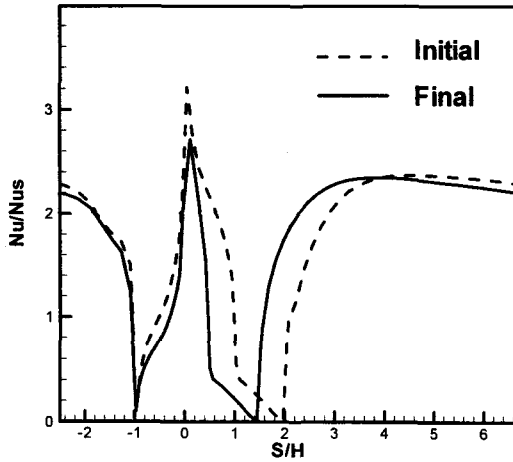


Fig. 8 Change of local Nusselt number distributions

Table. 1 은 최적설계 초기와 최종의 설계변수 및 목적함수 값을 표로 정리한 것이다. 목적함수 값은 0.5897182 에서 0.5599426 로 감소하였다.

Table. 1 Results of numerical optimization

	Design variable ( $W/H$ )	Object function ( $1/Nu_s$ )
Initial	1.0000000	0.5897182
Final	0.4788947	0.5599426

초기설정의 타당성 여부를 확인하기 위해 설계변수의 초기 형상이 0.3 와 1.5 인 경우에 대해서도 최적화를 반복 실행한 결과 설계변수와 목적함수의 오차가 각각 0.04%/0.001%, 0.05%/0.0003%로 매우 작은 것으로 나타나 최적설계 결과가 믿을 만한 것으로 보여진다. 전체 계산시간은 Intel Pentium-III 450 Processor 의 환경에서 약 2 시간 15 분이 소요되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Navier-Stokes 열유동해석코드를 이용하여 리브가 부착된 열전달면 형상의 수치최적설계를 수행하였다. 총 47 회의 반복적인 난류열유동해석을 통해 열전달효과를 최적화 할 수 있는 리브의 형상비를 얻을 수 있었다. 본 연구결과는 전산유체역학과 결합된 수치최적설계를 통해 열전

달 문제가 효과적으로 최적화될 수 있음을 보여준다. 앞으로 2 개 이상의 설계변수 채택과 다양한 목적함수의 시험을 통해 열전달장치의 최적설계에 유용하게 사용될 수 있는 최적설계기법이 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- (1) Kulter, P., 1985 "A Perspective of Theoretical and Applied Computational Fluid Dynamics." AIAA Journal. Vol. 23, No. 3, pp. 328-341.
- (2) Drain, L. E. and Martin, S., 1985, "Two-component Velocity Measurements of Turbulent Flow in a Ribbed-wall Flow Channel." Int. Conf. on Laser Anemometry-Advanced and Application, Manchester, U.K., pp. 99-112.
- (3) Fodemski, T. R., 1987, "The Simulation of Flow and Heat Transfer in Channels with Ribbed Surface." 2nd Int. Symp. on Transport Phenomena in Turbulent Flows, Tokyo, Japan.
- (4) Lockett, J. F. and Collins, M. W., 1990, "Holographic Interferometry Applied to Rib-roughness Heat Transfer in Turbulent Flow." Int. J. Heat Mass Transfer, 33, pp. 2439-2449.
- (5) Liou, T. M., Hwang, J. J., Chen, S. H., 1993, "Simulation and Measurement of Enhanced Turbulent Heat Transfer in a Channel with Periodic Ribs on One Principal Wall." Int. J. Heat Mass Transfer, 36, pp. 507-517.
- (6) Kim, K. Y. and Chang Y. S., 1997, "Prediction of Turbulent Heat Transfer in Swirling Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion." KSME International Journal, Vol. 11, No. 5, pp. 565-573.
- (7) Kalyanmoy, D., 1996, Optimization for Engineering Design, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi.
- (8) Webb, B. W. and Ramadhyani, S., 1985, "Conjugate Heat Transfer in a Channel with Staggered Ribs." Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 9, pp. 1679-1687.