

신경회로망기법을 사용한 엇갈린 딴플 유로의 최적설계

신동윤* · 김광용**

Design Optimization of a Staggered Dimpled Channel Using Neural Network Techniques

Dong-Yoon Shin*, Kwang-Yong Kim**

Key Words : Numerical Optimization (수치최적화), Turbulent Heat Transfer (난류열전달), Staggered Dimpled Surface (엇갈림 딴플 표면), RBNN Method (라디얼베이스 신경회로망 기법), Latin Hypercube Sampling (라틴하이퍼큐브 샘플링)

ABSTRACT

This study presents a numerical procedure to optimize the shape of staggered dimple surface to enhance turbulent heat transfer in a rectangular channel. The RBNN method is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of fluid flow and heat transfer with shear stress transport (SST) turbulence model. The dimple depth-to-dimple print diameter (d/D), channel height-to-dimple print diameter ratio (H/D), and dimple print diameter-to-pitch ratio (D/S) are chosen as design variables. The objective function is defined as a linear combination of heat transfer related term and friction loss related term with a weighting factor. Latin Hypercube Sampling (LHS) is used to determine the training points as a mean of the design of experiment. The optimum shape shows remarkable performance in comparison with a reference shape.

기호설명

A_d : 열전달면의 면적

A_{in} : 채널입구 면적

d : 딴플의 깊이

d_b : 설계변수의 상대변화량

D : 딴플의 지름

D_h : 수력직경

f : 채널의 마찰계수

F : 목적함수

F_{opt} : 최적점의 목적함수

H : 채널의 높이

N_u : 국부 누셀트 수

N_{u0} : 평균 누셀트 수

N_{u0} : 기준 누셀트 수

P_i : 딴플의 주기

p : 압력강하

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

- q_0 : 열유속
- ReH : 레이놀즈수 ($=U_b H/\nu$)
- S : 주기방향 덩플사이의 거리
- U_b : 입구에서의 축방향 평균속도
- x, y, z : 방향 좌표계
- β : 가중계수

1. 서론

터빈 블레이드의 내부 냉각유로에는 다양한 유동간섭물이 부착되어 열전달을 촉진시킨다. 열전달 성능을 향상시키기 위해 사용되는 유동간섭물에는 리브 (rib), 핀 (pin), 덩플 (dimple) 등이 있는데, 이 중에서 덩플은 표면에 작은 와류 구조를 형성시켜 마찰에 의한 손실을 줄이면서 열전달 성능은 증가시켜 주는 장점을 가지고 있다.

Ligrani 등⁽¹⁾은 폭넓은 자료조사를 바탕으로 열전달 촉진장치들의 종류와 각각의 특징을 상세히 기술하고 있다. 열전달 성능에 대한 덩플의 효과에 대한 실험적 연구로 Mahmood와 Ligrani⁽²⁾는 채널 높이와 덩플 지름의 비를 변화시켜가며 열전달 성능을 비교하였다. 이들은 채널 높이와 덩플 지름의 비가 감소할수록 열전달 성능이 증가한다고 보고하였다. Burgess와 Ligrani⁽³⁾는 덩플의 깊이와 덩플 지름의 비를 변화시켜가며 덩플 깊이에 의한 열전달 성능을 비교하여, 덩플의 깊이와 덩플 지름의 비가 증가할수록 열전달 계수는 증가한다고 밝혔다.

한편, Park 등⁽⁴⁾은 덩플유로의 난류유동을 RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes Equations) 해석을 통해 예측하였다. 정상유동에 대한 이들의 해석결과는 중심에 쌍으로 위치한 와동의 구조를 보여준다. Park과 Ligrani⁽⁵⁾는 일곱 가지 서로 다른 덩플면에 대한 수치해석을 수행하여 열전달과 유동특성을 밝혔다. Patrick과 Tafti⁽⁶⁾는 난류의 직접수치모사를 이용하여 엇갈리게 배열된 덩플이 부착된 유동장을 해석하였으며, Isaev와 Leont'ev⁽⁷⁾는 수치해석을 통해 덩플 표면에 생기는 와류의 구조를 규명하였다.

이상과 같은 연구들은 덩플이 부착된 열전달면의 유동구조를 해석하고, 각각의 기하학적 변수가 열전달 성능 및 압력강하에 미치는 영향을 평가하였을 뿐, 모든 설계변수의 영향을 체계적으로 고려하여 설계변수의 최적값을 유도하지 못하였다. 리브의 경우에는 그간 Kim과 Kim에 의해 일련의 수치최적화 연구^{(8)~(12)}가 수행되

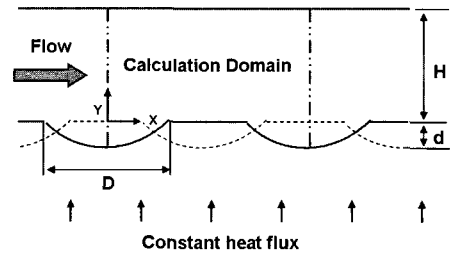
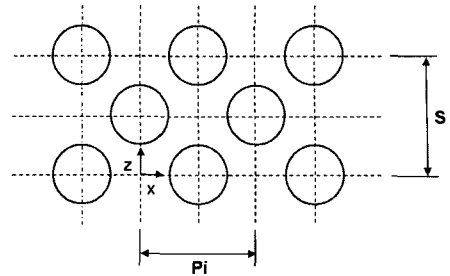


Fig. 1 Geometry and design variables

었다. 이들은 리브가 부착된 열전달면의 기하학적 변수들을 최적화하여 열전달 성능을 극대화하는 과정에서 초기 연구⁽⁸⁾에서 수치최적화법으로 사용한 구배법에 비해 후속 연구^{(9)~(12)}에서 사용한 반응면기법이 경제성과 정확성에서 우수한 성능을 나타냄을 보여주었다. 덩플의 경우에도 Kim과 Choi⁽¹³⁾는 In-line 배열을 가진 덩플 유로를 반응면기법을 사용하여 최적화한 바 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 엇갈린 덩플들이 한쪽면에 부착된 삼차원 유로의 형상을 RANS해석과 최적화기법을 사용하여 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 덩플의 깊이 대 덩플 지름의 비, 덩플의 지름 대 주기방향의 덩플과 덩플사이 거리의 비 및 유로의 높이와 덩플 지름의 비 등 세 개의 설계 변수에 대해 신경회로망기법을 사용하여 최적설계를 수행하였다. 열전달성능의 최대화와 압력손실의 최소화를 동시에 추구하기 위해 열전달과 압력손실에 관련된 두 가지 항들이 선형적으로 결합된 목적함수를 사용하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 주어진 덩플 유로에서 삼차원 유동 및 대류열전달 해석을 위해 비정렬격자계를 채택한 범용소프트웨어인 CFX-10.0⁽¹⁴⁾을 사용하였다. Fig. 1과 같이 엇갈림 덩플이 연속적으로 배열된 채널에서 한 주기만을 계산영역으로 하여 해석하였는데, 이 경우 지속적인

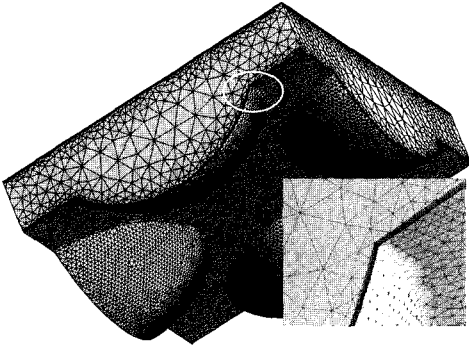


Fig. 2 Example grids

압력강하와 온도상승에 대해 주기조건을 적용하기 위해 Kim 등⁽⁸⁾에 의해 기술된 바와 같이 주유동 방향의 운동량 방정식과 에너지 방정식을 다음과 같이 변환하여 사용하였다.

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

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

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

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

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

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

γ 는 주 유동방향의 압력강하율을 나타내며, σ 는 다음과 같이 벽으로 유입되는 열유속으로 인한 온도상승률을 나타낸다.

$$\sigma = \frac{q_0 A_d}{Pi U_b A_m} \quad (6)$$

난류모델로 SST (Shear Stress Transportation)⁽¹⁵⁾ 모델을 사용하였다. 기본적으로 SST모델은 k- ϵ 모델과 k- ω 모델의 장점만을 취한 모델이다. k- ω 모델은 벽근처에서 사용되고, k- ϵ 모델은 그 이외의 영역에서 사용된다.

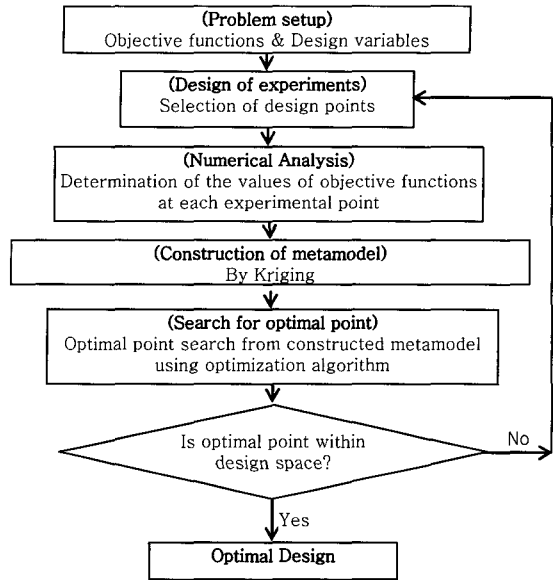


Fig. 3 Flow chart showing optimization procedure

따라서 SST모델은 역압력구배로 인한 유동박리의 예측에 상당히 효과적이고, 난류열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina⁽¹⁶⁾ 등에 의해 보고된 바 있다. 난류열유속 모델링으로는 Lal⁽¹⁷⁾의 수치모델이 사용되었다.

Figure 2는 계산에 사용된 사면체의 비정렬격자계의 구성 예를 보여주는데, 유동장 및 온도장의 변화가 큰 벽 근처 영역의 정확한 해석을 위해 벽 근처 격자는 육면체로 구성하였다. 경계조건으로는 주 유동방향의 주기면에서는 주기조건 (periodic condition), 측면에서는 대칭조건을 사용하였으며, 엇갈림 덤플이 위치한 면에 일정 열유속 조건을 사용하였다. 격자 수는 형상에 따라 다르나 12만개에서 18만개까지 사용되었으며, 한 번 해석에 소요되는 계산시간은 P4-3.0 GHz CPU를 사용하였을 때 6시간에서 8시간 정도 소요되었다.

3. 최적설계기법

최적화 과정을 Fig. 3에 순서도로 표시하였다. 우선 목적함수와 설계변수를 선택하고 설계영역을 결정하게 된다. 이후 적절한 샘플링 과정을 통하여 설계점을 얻게 되는데 이 설계점에서 유동해석을 통하여 목적함수가 계산된다. RBNN (radial basis neural networks) 모델과 같은 surrogate 모델이 사용하여 자료곡면을 구성하고, 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다. 아래에 이 과정들에 대해 자세하게 설명한다.

Table 1 Design variables and design spaces

Design variable	Lower bound	Upper bound
H/D	0.2	1.0
d/D	0.1	0.3
D/S	0.4	0.7

3.1. 목적함수와 설계변수

Figure 1 에 나타난 채널 유동에서 형상변수는 모두 5개로 채널높이 (H), 덤플의 지름 (D), 덤플의 깊이 (d), 덤플간의 거리 (S), 덤플의 주기 (Pi)이다. 따라서, 무차원 변수는 H/D, d/D, D/S와 S/Pi 등 네 가지인데, 이 중 본 연구에서는 S/Pi를 1 로 고정시키고, 나머지 세 개의 변수를 설계변수로 사용하여 반응면을 구성하였으며, 각 설계변수의 범위는 Table 1에 나타내었다.

목적함수는 열전달 증진과 압력손실의 감소를 동시에 고려하기 위하여 가중법을 이용하여 열전달계수와 마찰계수의 조합으로 다음과 같이 정의하였다.

$$F = F_{Nu} + \beta F_f \quad (7)$$

이 식의 β 는 열전달증진과 마찰손실 사이의 상대적 비중을 결정해 주는 가중계수로서 설계자에 의해 결정되어야 할 상수이다. F_{Nu} 는 열전달 효과를 나타내는 항으로 평균 Nusselt 수의 역수로 정의된다.

$$F_{Nu} = 1 / Nu_a \quad (8)$$

여기서

$$Nu_a = \frac{\int A_s / Nu_0 dA}{A_d} \quad (9)$$

Nusselt수 Nu 는 수력직경을 사용해 구한다. Nu_0 는 매끈한 원관 내에서 완전 발달된 난류유동에 의한 Nusselt 수로서 Dittus-Boelter식에서 얻어진다. 한편, F_f 는 마찰손실의 크기를 나타내는 항으로서 Gee와 Webb⁽¹⁸⁾는 다음과 같이 정의하였다.

$$F_f = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \quad (10)$$

여기서, 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2 \rho U_b^2 P_i} \quad (11)$$

그리고, f_0 는 매끈한 관에서 완전 발달된 유동에 대한 마찰계수로 Petukhov⁽¹⁹⁾의 실험식에 의해 다음과 같이 정의된다. 이 항은 Karman-Nikuradse 관련식에 의해 수정되었는데 레이놀즈수 10^4 에서 10^6 사이에서 가장 잘 일치하는 것으로 보고되었다

$$f_0 = 2(2.3 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (12)$$

3.2. Latin Hypercube Sampling (LHS)

RBNN과 같은 대리 모델 (surrogate model)을 구성하기 위해서는 설계공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있다. 이 점들을 얻기 위해 실험계획법 (DOE)이 사용되는 데 본 연구에서는 실험계획법으로 Latin Hypercube Sampling (LHS)⁽²⁰⁾을 사용하였다. 이 기법은 $m \times n$ 의 행렬을 구성하는데 여기서 m 은 각 변수에 대한 레벨의 수 (샘플의 수)이고 n 은 설계변수의 수이다. 1부터 m 까지의 레벨을 포함하는 행렬의 n 개 열 각각은 Latin Hypercube를 구성하기 위해 임의로 짝지어진다. 결국, 설계공간의 모든 부분을 대표하는 설계점들이 이 과정을 통해 얻어진다.

3.3. Radial basis neural network (RBNN)

신경회로망의 기본개념은 경험으로부터 배우고 기존 자료로부터 예측하는 인간의 기능을 모사하는 것이다. 신경회로망의 기본 요소는 뉴런 (neuron)인데, 각 뉴런의 출력은 여기에 저장되었거나 도착하는 국부적인 정보에만 의존한다. 망의 예측능력은 가중치들에 의해 반영된다. 망의 훈련은 데이터를 통한 반복에 의해 수행된다.

RBNN 은 radial basis transfer function과 선형 출력으로 구성되는 두 겹의 망이다. 본 연구에서는 신경회로망을 MATLAB⁽²¹⁾의 함수 newrb를 사용하여 구성하였다. 여기서 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$a = \text{radbas} (\| w-p \| b) \quad (13)$$

여기서 b 는 바이어스 (bias)이고 w 는 뉴런 가중치벡터, p 는 입력벡터이다. radial basis function, radbas는 다음과 같다.

$$radbas(n) = e^{-n^2} \quad (14)$$

이 방법을 이용할 경우의 가장 큰 장점은 함수의 선형성으로 인해 계산시간을 줄일 수 있다는 것이다. 이 함수에 대한 선형 모델 f 는 N 개 기본 함수들의 선형결합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \sum_{j=1}^N w_j y_j \quad (15)$$

여기서 w_j 는 가중치이고 y_j 는 기본 함수이다. 기본함수를 선택하는 데는 여러 가지 방법이 있다. 만일 기본 함수와 다른 변수들이 훈련과정에서 고정된 값을 가지면 모델은 선형이다. 그러나, 기본 함수가 훈련과정에서 변한다면 비선형 모델이 된다. 학습과정은 다차원공간에서 훈련 데이터를 가장 잘 맞추는 곡면을 찾는 과정과 동일하고, 이 곡면은 최적화의 기반이 되는 자료곡면이 된다.

SQP (Sequential Quadratic Programming) (MATLAB⁽²¹⁾)의 함수 `fmincon`이 자료곡면 상에서 최적점을 찾기 위한 방법으로 사용되었다.

4. 결과 및 검토

수치해가 격자수의 영향을 받지 않는 최소의 격자수를 찾기 위하여 Burgess⁽³⁾의 실험형상과 같은 조건을 가진 한쪽면에 엇갈림 덩플이 부착되어 있는 형상에 대하여 격자의존성 테스트를 수행하여 12만개의 격자수를 최적의 격자수로 선택하였다.

본 연구에서는 최적설계에 앞서 난류 열전달 해석의 타당성 검증을 위해, 한쪽 면에만 주기적으로 엇갈림 덩플이 부착된 유동장을 해석하여 Burgess 등⁽³⁾의 실험결과와 비교하였다. 여기서 H/D 는 1.0, d/D 는 0.2이며, D/S 와 D/Pi 는 공히 0.618이다. 작동유체는 상온의 공기이다. Fig. 4는 동일한 해석기법을 사용한 선행연구⁽²²⁾에서 수행한 수치해의 타당성 검증결과를 보여준다. 레이놀즈수에 따른 덩플표면에서의 평균 Nusselt 수와 평균 마찰계수를 Burgess 등⁽³⁾의 실험치와 비교한 결과를 나타내고 있다. Nusselt 수를 서로 비교해본 결과, 실험치

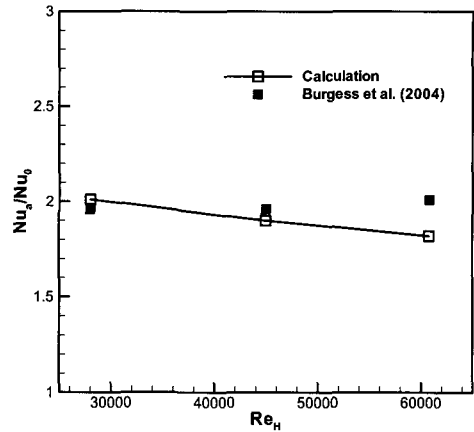


Fig. 4 Comparison between predicted and measured Nusselt number distributions

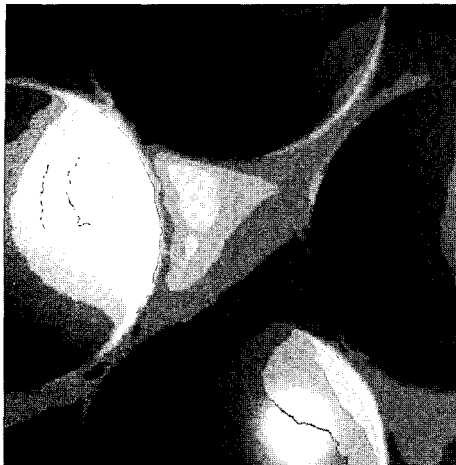
와 계산치는 낮은 레이놀즈수 범위에서 좋은 일치성을 보이고 레이놀즈수 60,000에서는 다소의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

최적설계는 채널의 높이 (H)를 기준으로 한 레이놀즈수가 22,500이고, 덩플 벽에서 일정 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행하였다. 최적설계를 위한 반응함수는 Table 1에 나타낸 각 설계변수 영역 내에서 구성되며, 반응함수를 구성하기 위해, Latin Hypercube Sampling (LHS)을 사용하여 선택된 20가지 형상에 대한 유동해석을 수행하였다. 최적설계는 가중계수 0.08-0.12의 범위에 대해 수행하였다.

Table 2 에는 가중계수 0.09에 대해 기준형상과 최적 설계형상의 설계변수 값과 열전달계수 및 마찰손실 관련 항의 크기를 나타내었다. 최적 설계 결과 Nusselt 수는 기준 형상에 비해 거의 두 배 가까이 증가하였으나, 마찰손실 관련항 (F_f)도 약 80 % 증가하였다. 결과적으로 목적함수 값은 최적형상의 경우 기준형상에 비해 14.7 % 감소하는 것으로 나타났다. 기준형상에 비해 H/D 와 D/S 의 감소가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 H/D 의 값이 감소할수록 열전달 성능이 증가한다고 보고한 Mahmood 와 Ligrani⁽²²⁾의 실험결과와 일치하

Table 2 Results of optimization for $\beta=0.09$

	Design variable			Nu _a	F _f	F
	H/D	d/D	D/S			
Reference	0.58	0.23	0.68	1.97	1.96	0.68
Optimized	0.20	0.25	0.62	3.80	3.53	0.58



(a) Reference



(b) Optimum



Fig. 5 Nusselt number contours ($\beta=0.09$)

는 결과이다.

Figure 5은 가중계수가 0.09인 경우에 대한 최적형상과 기준형상의 딴플 표면에서 Nu수 분포를 나타낸다. 딴플 선단에서 발생한 박리로 인해 딴플 내에서 열전달이 급격히 감소하였다가 후반부로 갈수록 열전달계수가 증가하는 현상을 보이고 있다. 또한 열전달계수 분포가 상하 대칭을 이루고 있지 않는 것은 비대칭적인 유동구조에 기인하며, 이는 Isaev와 Leont'ev⁽⁷⁾가 밝힌 것처럼 딴플 표면에서 외류가 한쪽으로 치우쳐서 발생하는 현상 때문인 것으로 사료된다.

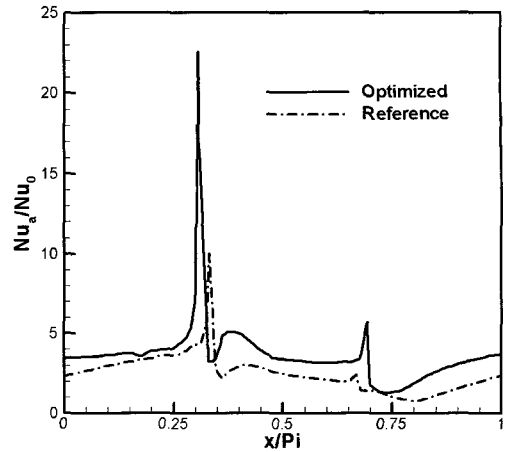


Fig. 6 Comparison of local Nusselt number distributions along the diameter between reference and optimum shapes (dotted circles indicate the location of the rims of dimple)

Figure 6은 기준형상과 최적형상에 대해 주유동방향의 지름 ($z/Pi=0.5$)을 따른 Nu수의 분포를 나타낸다. 여기서 $x=0$ 는 딴플 중심부를 나타낸다. 기준형상은 최적형상에 비해 딴플의 지름이 작아졌으며, 채널의 높이 또한 작아졌다. 대부분 영역에서 최적형상이 더 큰 Nu수를 나타냄으로써 전체적으로 향상된 열전달 특성을 보이고 있다. 그림에 표시된 점선의 작은 원들은 각 경우에 대한 딴플의 경계를 나타낸다. 두 형상에 대하여 모두 열전달계수는 공히 딴플의 후단에서 최대치를 나타내고 이후 급격히 감소함을 알 수 있다. 그런데, 최적형상의 경우, 딴플 후단에서의 급감하 이후 다시 재상승하는 경향이 나타나는 데 이는 이 영역에서의 규모는 작지만 또 다른 박리와 재순환이 나타나기 때문이다. 이는 Fig. 7의 유선의 구조에서도 확인할 수 있다. 딴플의 후단에서 박리된 유선이 하류에서 재부착하는 것을 확인할 수 있다.

Figures. 8과 9는 각 설계변수에 대한 목적함수의 민감도분석 결과를 나타낸다. 여기서 설계변수의 상대적 변화를 나타내는 dv 는 최적값의 $\pm 5\%$ 범위 내에서 변화시켰고, F_{opt} 는 최적형상에서의 목적함수 값을 나타낸다. Figs. 8과 9는 각각 목적함수의 열전달관련 항과 마찰계수 관련항의 민감도를 나타낸다. 이 그림들에서 열전달의 경우와 마찰계수의 경우 모두 d/D 에 가장 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. H/D 에 대해서는 두 경우 모두 낮은 민감도를 나타낸다.



Fig. 7 Streamlines on x-y plane in optimal channel

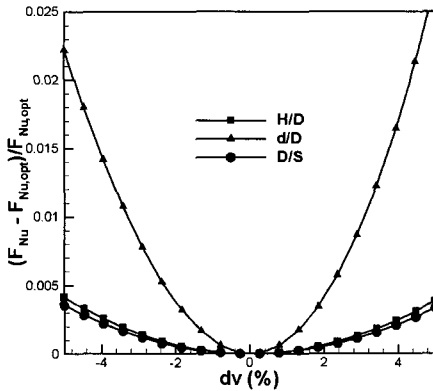


Fig. 8 Sensitivity analysis of FNu for optimal shape ($\beta=0.09$)

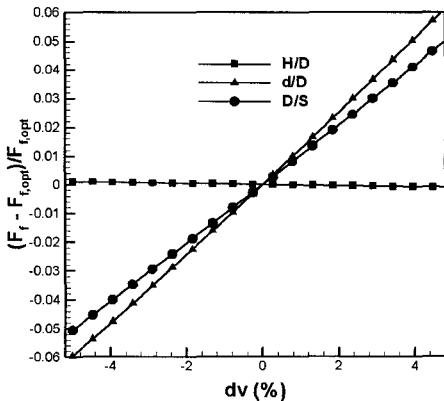


Fig. 9 Sensitivity analysis of Ff for optimum shape ($\beta=0.09$)

5. 결론

한쪽 면에 주기적인 엇갈림 딴플이 설치된 사각채널에 대한 형상 최적화를 삼차원 RANS 해석과 RBNN 기법을 통하여 수행하였다. 몇 가지 레이놀즈수에 대하여 계산한 Nusselt 수는 실험치와 만족할 만한 일치를 보였다. 세 가지 기하학적 설계변수에 대해 20개의 실험점을 얻었으며 이 점들에서 평균한 목적함수 값을 바탕으로 최적설계를 수행함으로써 신뢰할 만한 최적치를 얻었다. 목적함수는 가중계수를 도입한 열전달 계수와 마찰계수

의 선형 결합으로 정의하였는데, 민감도 분석결과, 목적함수는 세 개의 설계변수 중 딴플의 깊이와 지름의 비에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 최적설계 결과는 목적함수의 가중계수에 따라 다른 결과를 보여준다. 가중계수의 한 가지 예에서 최적형상이 기준형상에 비해 열전달과 압력손실이 동시에 증가하는 경향을 보였으나 열전달의 증가가 커서 최종적으로 목적함수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 신경회로망기법을 사용한 최적설계가 딴플을 사용한 냉각유로의 설계에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

후기

이 논문은 2006년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2006-000-10039-0)

참고문헌

- (1) Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T., 2003, "Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques," AIAA J., Vol. 41, pp. 337~362.
- (2) Mahmood, G. I., and Ligrani, P.M., 2002, "Heat Transfer in a Dimpled Channel: Combined Influences of Aspect Ratio, Temperature Ratio, Reynolds Number, and Flow Structure," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, No. 10, pp. 2011~2020.
- (3) Burgess, N. K. and Ligrani, P. M., 2004, "Effects of Dimple Depth on Nusselt Numbers and Friction Factors for Internal Cooling Channel," ASME Paper No. GT2004~5432.
- (4) Park J., Desam P.R., Ligrani P.M., 2004, "Numerical Predictions of Flow Structure above a Dimpled Surface in a Channel," Numerical Heat Transfer A, Vol. 45, pp. 1~20.
- (5) Park J., Ligrani P.M., 2005, "Numerical predictions of heat transfer and fluid flow characteristics for seven different dimpled surfaces in a channel," Numerical Heat Transfer A, Vol. 47, pp. 209~232.
- (6) Patrick, W. V. and Tafti, D. K., 2004, "Com-

- putations of Flow Structure and Heat Transfer in a Dimpled Channel at Low to Moderate Reynolds Number," Proceeding of HT-FED04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, USA, ASME Paper No. HT-FED04-56171.
- (7) Isaev, S. A. and Leont'ev, A. I., 2003, "Numerical Simulation of Vortex Enhancement of Heat Transfer Under Conditions of Turbulent Flow Past a Spherical Dimple on the Wall of a Narrow Channel," *High Temperature*, Vol. 41, No. 5, pp. 665~679.
- (8) K. Y. Kim and S. S. Kim, 2002, "Shape optimization of rib-roughened surface to enhance turbulent heat transfer", *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2719~2727.
- (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," *Transactions 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," *Transactions of KSME B*, Vol. 28, NO. 7, pp. 879~886.
- (12) H. M. Kim and K. Y. Kim, 2003, "Optimization of Heat Transfer Surfaces with Staggered Ribs to Enhance Turbulent Heat Transfer," *Transactions of KSME B*, Vol. 27, No 9, pp. 1351~1359.
- (13) K. Y. Kim and J. Y. Choi, 2005, "Shape Optimization of a Dimpled Channel to Enhance Turbulent Heat Transfer," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 48, pp. 901~915.
- (14) CFX-10.0 Solver Theory, Ansys inc., 2005
- (15) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Uberlandia, Brazil.
- (16) J. E. Bardina, P. G. Huang, T. Coakley, "Turbulence modeling validation," AIAA Paper 97~2121, 1997.
- (17) Y. G. Lai and R. M. C. So, "Near-Wall Modeling of Turbulent Heat Fluxes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 33, pp. 1429~1440, 1990.
- (18) D. L. Gee and R. L. Webb, "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 23, pp. 1127~1136, 1980.
- (19) Petukhov, B. S., 1970, "Advances in Heat Transfer," Academic Press, New York, Vol. 6, pp. 503~504.
- (20) McKay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J., 1979. "A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code," *Technometrics*, Vol. 21, pp. 239~245.
- (21) MATLAB®, The language of technical computing, Release 14. The Math Works Inc.
- (22) K. Y. Kim and D. Y. Shin, "Optimization of a Staggered Dimpled Surface in a Cooling Channel Using a Model," *International Journal of Thermal Science*, 2007.