

가중평균 대리모델을 사용한 딴플 유로의 최적설계

이기돈* · 김광용**

Design Optimization of a Channel Roughened by Dimples Using Weighted Average Surrogate Model

Ki-Don Lee*, Kwang-Yong Kim**

Key Words : Design Optimization(최적설계), Dimple(딴플), Weighted Average Surrogate Model(가중평균 대리모델), Latin Hypercube Sampling(라틴 하이퍼큐브 샘플링), Heat Transfer(열전달), Friction Factor(마찰계수)

ABSTRACT

Staggered dimples printed on opposite walls of an internal cooling channel are formulated numerically and optimized to enhance heat transfer performance. Nusselt number and friction factor based objectives are considered and a weighted average surrogate model is used to approximate the data generated by numerical simulation. The dimpled channel shape is defined by three geometric design variables, and the design point within design space are selected using Latin hypercube sampling. A weighted-sum method for multi-objective optimization is applied to integrate multiple objectives into a single objective. By the optimization, the objective function value is improved largely and heat transfer rate is increase much higher than pressure loss increase due to shape deformation. Channel with vertically non-symmetric optimum dimples is tested and found that the best appears if dimples on opposite wall are displaced by one quarter of dimple spacing.

1. 서론

딴플(dimple)은 Ligrani 등⁽¹⁾에 의해 조사된 바와 같이 리브(rib), 핀핀(pin-fin) 등과 함께 열전달성능을 향상시키기 위한 유동간섭물로서 열경계층의 발달 억제 및 난류운동에너지의 발생을 촉진시키기 위한 목적으로 터빈 블레이드 내부의 냉각유로에 부착되어 많이 사용되어 왔다.

그러나 딴플유로는 열전달 촉진과 더불어 표면의 형상변형으로 인해 불가피하게 압력손실을 증가시킨다. 따라서 딴플면의 형상최적화는 압력손실의 감소와 열전달 향상을 동시에 고려하여 이루어져야 한다.

그동안 실험 및 수치해석적 연구에 의해 딴플면의 열전달에 대한 연구가 많이 수행되었다. Ridouane와 Campo⁽²⁾에 의해 상하면에 원형 그루브가 설치된 유로에 흐르는 층류에 대한 연구가 이루어졌다. 일반 유로와 비교해 열전달성능은 30% 상승하였지만, 압력손실이 19% 증가하였으며, 윗면과 아랫면에 원형그루브가 주 유동방향으로 비대칭하게 부착된 유로가 대칭적으로 부착된 유로보다 더 좋은 열전달 성능을 나타낸다고 보고하였다. Silva 등⁽³⁾은 전자장비의 미세유로

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

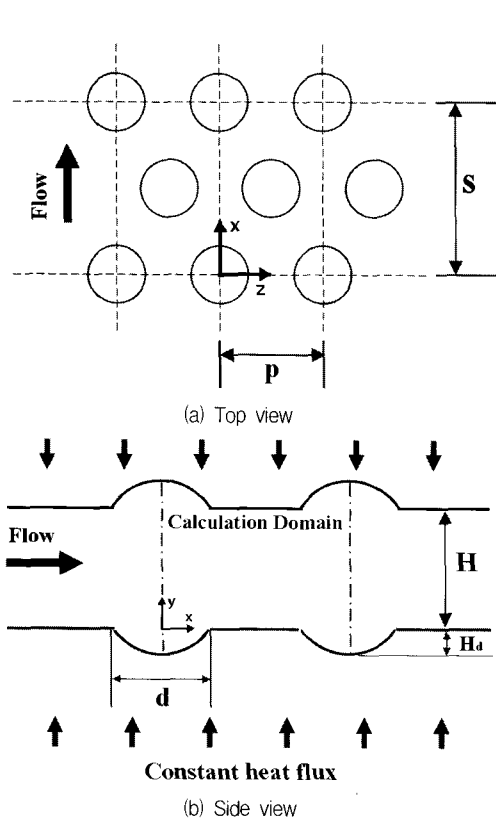


Fig. 1 Geometric parameters and computational domain

냉각을 위한 열발산판 표면의 딴플에 대한 연구를 통해 층류와 천이지역에서 열전달성능이 2.5 배 증가된다고 보고하였다. 냉각유로 내부의 딴플면과 딴플형상으로 돌출된 면에 대한 실험적 연구가 Hwang과 Cho⁽⁴⁾에 의해 이루어졌으며, 그들은 압력강하 및 열전달효율을 고려한 열효율을 측정하여 상하면에 딴플이 부착된 유로가 한쪽 면에 딴플이 부착된 유로 또는 상하면에 딴플형상으로 돌출된 유로에서 보다 좋은 성능을 나타낸다고 보고하였다. Mahmood 등⁽⁵⁾은 딴플면과 딴플형상으로 돌출된 면이 서로 반대쪽 벽에 부착된 유로의 열전달 특성에 대해 보고하였으며, 한쪽 면에 부착된 엇갈린 딴플면에 대한 실험적 연구가 Burgess와 Ligrani⁽⁶⁾에 의해 보고되었다.

대리모델은 계산상의 경제성과 설계영역의 특성을 잘 나타낸다는 장점 때문에 여러 분야에 걸쳐 최적화를 위한 방법으로 널리 사용되어왔다. Queipo 등⁽⁷⁾과 Li와 Padula⁽⁸⁾는 항공우주분야에 응용되어온 다양한 대리모델에 대한 조사를 수행하였다. Goel 등⁽⁹⁾은 반응면

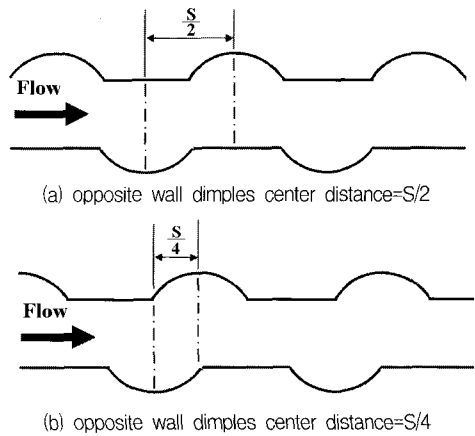


Fig. 2 Non-symmetric staggered dimples on opposite walls

(response surface approximation)(RSA)모델, 크리깅(Kriging)(KRG)모델, 그리고 신경회로망(radial basis neural network)(RBNN)모델과 같은 기본적인 대리모델을 사용하여 가중평균모델을 개발하였고, 가중평균방식이 기본적인 대리모델보다 더 안정적인 예측방법이라고 결론지었다. Samad 등^(10,11)은 열전달면과 유체기계의 블레이드 형상을 여러 대리모델을 이용하여 최적화하여 각각의 성능을 평가하였으며, Goel 등⁽⁹⁾에 의해 개발된 가중평균 대리모델이 안정적인고 뛰어난 예측성능을 보인다고 보고하였다. Kim과 Choi⁽¹²⁾는 한쪽 면에 바둑판 모양으로 정렬된 딴플에 대해 반응면 기법을 사용한 최적화를 시도하였고, Samad 등⁽¹⁰⁾의 연구에서는 한쪽 면에 엇갈린 딴플이 부착된 열전달면의 형상최적화에 관한 연구가 수행되었으나 양쪽 면에 모두 딴플이 부착된 열전달 유로에 대한 형상최적화와 상하면의 딴플이 엇갈린 경우에 대한 연구는 아직 보고되지 않았다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 엇갈린 딴플들이 상하면에 부착된 삼차원 유로의 형상의 최적설계를 위해 RANS 해석과 최적화 기법을 사용하였으며, 딴플의 깊이 대 딴플 지름의 비, 딴플의 지름 대 주 유동방향의 딴플과 딴플사이 거리의 비 및 유로의 높이와 딴플

Table 1 Design variables and design spaces

Design variable	Lower bound	Upper bound
H/d	0.2	1.5
H_d/d	0.1	0.3
d/S	0.30	0.57

지름의 비 등을 세 개의 설계 변수를 결정하였다. 열 전달성능의 최대화와 압력손실의 최소화를 동시에 추구하기 위해 열전달성능과 압력손실에 관련된 두 가지 항들이 가중계수를 이용하여 선형적으로 결합된 목적 함수를 사용하였으며, 이러한 과정을 통해 얻어진 최적형상에 대해 Fig. 2와 같이 윗면과 아랫면에 엇갈린 덩플들이 주 유동방향으로 비대칭하게 부착된 유로들에 대한 유동해석을 통해 각각의 성능을 비교하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 엇갈림 덩플들이 상 하면에 연속적으로 부착된 유로에서의 삼차원 유동 및 대류열전달의 해석을 위해 비정렬격자계를 채택한 범용소프트웨어인 ANSYS-CFX 11.0⁽¹³⁾을 사용하였다. 난류모델로는 SST(Shear Stress Transportation)⁽¹⁴⁾ 모델을 사용하였다. 기본적으로 SST 모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점만을 취한 모델이다. $k-\omega$ 모델은 벽근처에서 사용되고, $k-\epsilon$ 모델은 그 이외의 영역에서 사용된다. 따라서 SST 모델은 역압력구배로 인한 유동 박리의 예측이 상당히 효과적이고, 난류열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina 등⁽¹⁵⁾에 의해 보고된 바 있다. 난류열유속 모델링으로는 Lai 와 So ⁽¹⁶⁾의 수치모델이 사용되었다. 계산영역은 Fig. 1에 나타내었으며, 경계조건으로는 엇갈림 덩플이 위치한 고체면에는 일정 열유속 조건을, 나머지 면들에서는 주 유동방향과 측면방향에 대해 모두 주기조건(periodic condition)을 적용하여 비대칭 유동구조의 계산을 가능하게 하였다. 압력의 지속적인 강하와 온도의 지속적인 상승으로 인해 주기조건이 성립하지 않는 문제를 해결하기 위해, Kim과 Kim⁽¹⁷⁾에 의해 기술된 방법과 동일한 방법을 사용하여 운동량방정식과 에너지 방정식을 변환하여 사용하였다.

계산에 사용된 격자계는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 사면체의 비정렬격자계로 구성하였으며, 유동장 및 온도장의 변화가 크게 발생하는 벽 근처 영역에서는 정확한 해석을 위해 육면체로 구성하였다. 난류모델로 사용한 SST모델에 대해 저레이놀즈수 모델을 적용하기 위해 벽에서 가까운 첫 번째 격자점에서의 y^+ 값을 1 이하로 유지하였고 이를 위해 이 격자점을 벽면으로부터 0.002H 이내인 지점에 위치시켰다. 입구 난류강도(turbulent intensity)와 수력직경(D_h)을 기준으로 한

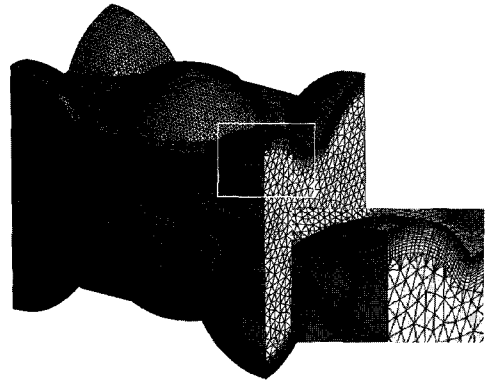


Fig. 3 Example grids

레이놀즈수는 각각 0.5와 10,000으로 하였다. 격자수는 형상에 따라 다르나 20만 개에서 30만 개까지 사용되었으며, 한 번 해석에 소요되는 계산시간은 P4-3.0 GHz CPU를 사용하였을 때 약 10시간 정도 소요되었다.

3. 설계변수 및 목적함수

Fig. 1에 나타난 덩플유로에서 형상변수로는 유로높이(H), 덩플의 지름(d), 덩플의 깊이(H_d), 주 유동방향의 덩플간의 거리(S), 측면방향의 덩플간의 거리(P)가 있는데, 이들로부터 H/d , H_d/d , d/S 및 S/P 등 4개의 무차원수를 얻을 수 있다. 이중 본 연구에서는 S/P 를 Hwang과 Cho⁽⁴⁾의 실험과 동일한 1.73으로 고정시키고, 덩플의 형상과 채널의 높이에 대한 나머지 세 개의 변수를 설계변수로 사용하였다. 각 설계변수의 범위는 Table 1에 나타내었다.

덩플유로의 냉각성능을 최적화하기 위해 Nusselt수와 마찰계수를 고려한 목적함수를 각각 F_{Nu} 와 F_f 라고 정의하였다. 열전달 증진을 위한 목적함수 F_{Nu} 는 다음과 같이 정의 된다.

$$F_{Nu} = 1/Nu_a \tag{1}$$

여기서,

$$Nu_a = \frac{\int_{A_d} Nu/Nu_o dA}{A_d} \tag{2}$$

Nu_a 는 열전달면의 평균 Nusselt수를 나타내며 Nusselt 수, Nu_o 는 수력직경을 사용해 구한다. Nu_o 는 매끈한 원관 내에서 완전 발달된 난류유동에 의한 Nusselt 수이며, A_u 는 열전달면의 면적이다.

한편 F_f 는 마찰손실의 크기를 나타내는 항으로 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, f_o 는 매끈한 관에서 완전 발달된 유동에 대한 마찰계수이며, f 는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta PD_h}{2\rho U_b^2 P} \quad (4)$$

$\Delta P, D_h, \rho, U_b$ 그리고 P 는 각각 압력강하, 유로의 수력직경, 유체 밀도, 축 방향 평균속도, 딥플의 주기이다.

목적함수인 F_{Nu} 와 F_f 를 감소시키는 것이 최적화의 주목적이다. 가중합계방식을 적용하여 위의 두 목적함수를 단일목적함수로 통합하였으며, 대리모델을 이용하여 최적화를 수행하였다.

4. 최적설계기법

최적화 과정을 Fig. 4에 순서도로 나타내었다. 우선 목적함수와 설계변수를 선택하고 설계영역을 결정하게 된다. 이후 적절한 샘플링 과정을 통하여 설계영역 내에서 설계점들을 얻게 되는데 이 설계점에서의 유동해석을 통하여 목적함수가 계산된다. 대리모델을 사용하여 자료곡면을 구성하고, 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다. 아래에 이 최적화과정들에 대해 자세하게 설명한다.

4.1 Latin Hypercube Sampling (LHS)

최적화를 위한 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)⁽¹⁸⁾을 사용하였다. 이 기법은 $m \times n$ 의 행렬을 구성하는데 여기서 m 은 각

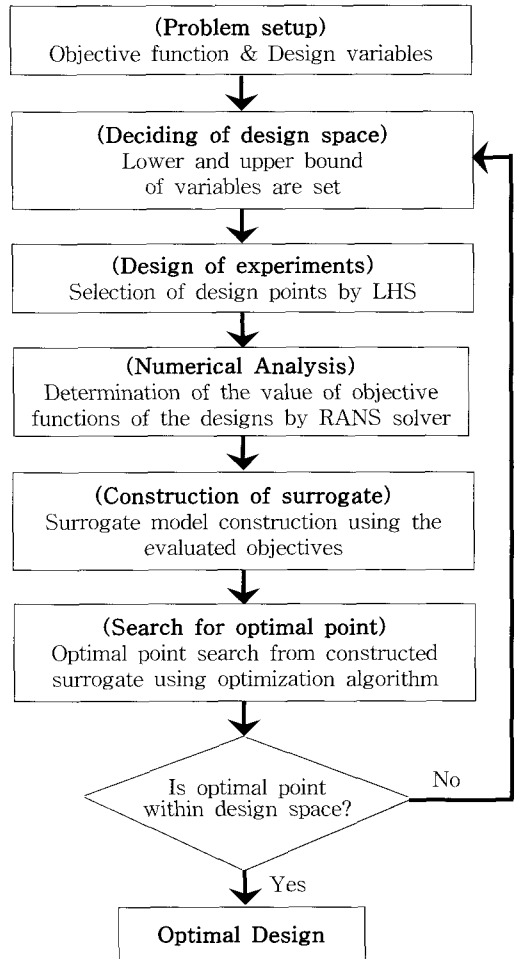


Fig. 4 Surrogate based optimization procedure

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.

4.2 목적함수

여러 목적함수를 가중합계방식을 이용하여 단일목적함수로 통합하는 방법은 열전달해석^(12,19)에서 많이 사용되어왔으며, 본 연구에서는 목적함수인 F_{Nu} 와 F_f 를 가중계수 β 를 이용한 선형적인 결합방식을 이용하여 다음과 같이 단일목적함수 F 로 통합하였다.

$$F = F_{Nu} + \beta F_f \quad (5)$$

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

4.3 Weighted average surrogate model (WTA1)

Goel 등⁽⁹⁾에 의해 제안된 세 가지 가중평균 대리모델 중 첫 번째 모델인 WTA1은 기본 대리모델들을 가중평균 함으로써 구해지며, 기본 대리모델로는 RSA, KRG, 그리고 RBNN 등 세 가지 모델을 사용하였다. 가중평균대리모델에 의해 예측되는 반응 함수 \hat{F} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{F}_{wt.avg}(x) = \sum_i^{N_{SM}} w_i(x) \hat{F}_i(x) \quad (6)$$

여기서 N_{SM} 은 가중평균모델을 구성하는데 사용된 기본 대리모델들의 개수이다. 설계점 x 에 위치한 i 번째 대리모델은 $w_i(x)$ 의 가중치가 적용되며, $\hat{F}_i(x)$ 는 i 번째 대리모델이 예측한 목적함수이다. 큰 오차(error)를 갖는 대리모델에는 낮은 가중치를 적용하고, 작은 오차를 갖는 대리모델에는 높은 가중치를 적용하는 방식으로 각 대리모델에 적합한 가중치를 결정하여 적용하게 된다. 가중치들은 오차의 크기에 관련된 함수로서, i 번째 대리모델의 가중치는 다음과 같이 정의된다.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_{SM}} E_j}{(N_{SM}-1) \sum_{j=1}^{N_{SM}} E_j} \quad (7)$$

가중치를 구하기 위해 사용되는 오차값(E_j)은 각 기본 대리모델로부터 얻은 generalized mean square cross-validation error(GMSE)를 이용하여 다음과 같이 계산 된다.

$$E_j = \sqrt{GMSE_j}, j = 1, 2, \dots, N_{SM} \quad (8)$$

$$GMSE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (F_i - \hat{F}_i^{(-i)})^2 \quad (9)$$

여기서 k 는 설계점들의 수이다. F_i 는 i 번째 설계점에서의 RANS 해석을 통한 계산값이며, $\hat{F}_i^{(-i)}$ 는 i 번째 설계점을 제외한 나머지 설계점을 이용하여 구성된 j 번째 대리모델을 통해 구한 i 번째 설계점에서의 예측값을 나타낸다.

5. 결과 및 검토

우선 수치해가 격자수의 영향을 받지 않는 최소의 격자수를 찾기 위하여 Hwang과 Cho⁽⁴⁾의 실험과 동일한 조건을 가진 형상에 대하여 격자 의존성 테스트를 수행하여 Fig. 5에 나타내었다. 이 수행결과를 토대로 약 20만 개를 최적의 격자수로 선택하였다.

본 연구에서는 최적설계에 앞서 난류 열전달해석의 타당성 검증을 위해 상하면에 주기적으로 엇갈린 담플들이 부착된 유로의 유동장을 해석하여 Hwang 등⁽⁴⁾의 실험결과와 비교하였다.

Fig. 6은 수치해석결과를 실험치와 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 Nusselt 수와 마찰계수 값 모두 실험치와 좋은 일치성을 보이는 것으로 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 레이놀즈수 10,000 이상에서 Nusselt 수와 마찰계수는 레이놀즈수의 변화에 따라 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 기존의 연구결과^(6,20,21)와 일치하는 결과이다. Moon 등⁽²¹⁾은 Fig. 6에 제시된 바와 같은 Nusselt 수는 레이놀즈수의 함수가 아니며 마찰계수도 레이놀즈수에 비교적 독립적이라고 보고했다.

최적설계는 수력저항(D_h)을 기준으로 레이놀즈수가 10,000이고, 담플이 부착된 면에 일정 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행하였다. 최적설계를 위한 반응함수는 Table 1에 나타난 각 설계영역 내에서 구성된다. 설계변수들의 범위인 설계영역은 이전에 보고된 실험 및 수치 해석적 연구결과^(3~6)를 바탕으로 담플의 형상이 유지되는 영역 내에서 결정되었다. Latin Hypercube Sampling을 사용하여 선택된 20 가지 형상에 대한 유동해석을 수행하여 얻은 결과를 사용하여 식 (6)에 제시된 WTA1의 반응함수를 구성하였다.

Table 2 에는 가중계수(β)가 0.12인 경우에 대한 최

적형상과 기준형상에 대한 설계변수들과 목적함수의 값을 제시하였다. Nusselt수는 기준 형상에 비해 74% 증가하였으며, 마찰손실 관련항(F_f)은 9.9% 증가하여, 결과적으로 목적함수 값은 최적형상이 기준형상에 비해 25.4% 감소하였다. 기준형상에 비해 H/d 가 크게 감소하였는데, 이는 H/d 가 감소할수록 열전달 성능이 증가한다고 보고한 Mahmood와 Ligrani⁽⁵⁾의 실험결과와 일치하는 결과이다. 아울러, 이는 inline배열의 딥플⁽¹²⁾과 엇갈린 배열의 딥플⁽¹⁰⁾을 유로의 한쪽 면에만 설치한 경우의 최적화를 통해 얻은 결과와 일치한다. 최적형상의 H_a/d 역시 기준형상보다 작은 값을 보였는데, Silva 등⁽³⁾에 의해 딥플의 깊이가 깊을수록 열전달 성능이 증가한다고 보고된 것과는 상반되는 데, 이는 최적설계를 위해 세 가지 설계변수를 조합하였고 열전달 성능과 압력손실을 함께 고려하였기 때문이다.

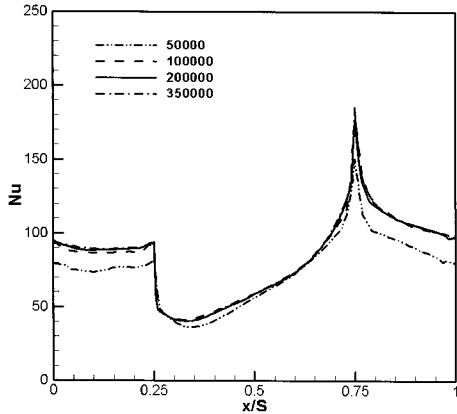


Fig. 5 Grid dependency test

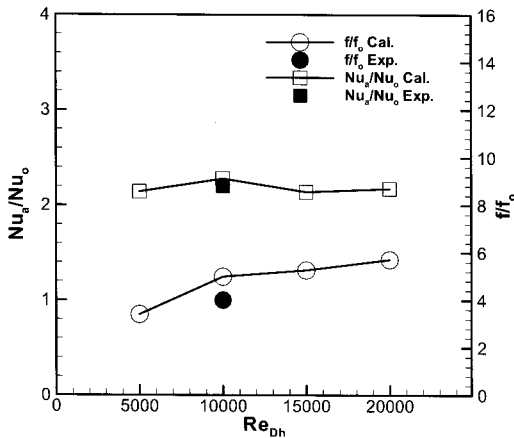


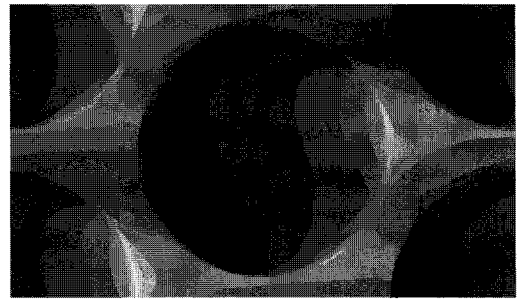
Fig. 6 Comparison between experimental and numerical results

Fig. 7은 가중계수가 0.12인 경우에 대한 기준형상과 최적형상의 딥플표면에서의 Nusselt 수 분포를 나타낸다. 기준형상에 비해 최적형상의 향상된 열전달 성능을 확인할 수 있으며, 딥플 선단에서 발생한 박리코인해 딥플 내에서 열전달이 급격히 감소하였다가 후반부로 갈수록 열전달계수가 증가하는 경향을 보이고 있다.

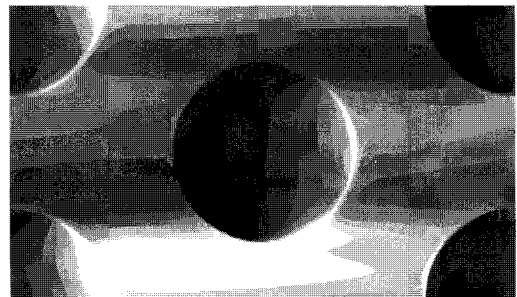
Fig. 8은 주 유동방향($z/P=0.5$)과 측면방향($x/S=0.5$)에서의 딥플면에서의 Nusselt 수 분포를 나타낸다. 기준형상의 계산값과 실험값은 좋은 일치성을 보이고 있으며,

Table 2 Results of optimization for $\beta=0.12$

	Design variable			Nu _a	F _f	F
	H/d	H _a /d	d/S			
Reference_A	1.155	0.289	0.499	2.34	1.71	0.63
Optimized_A	0.381	0.245	0.360	4.08	1.88	0.47



(a) Reference



(b) Optimized

Fig. 7 Nusselt number contours ($\beta=0.12$)

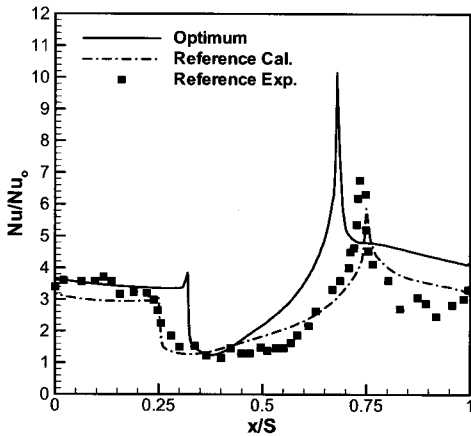
최적형상은 대부분의 영역에서 기준형상보다 더 큰 Nusselt 수를 나타냄으로써 전체적으로 향상된 열전달 성능을 보이고 있다. 두 형상에 대하여 모두 Nusselt 수는 공히 딩플의 후단에서 최대치를 나타내고 이후 급격히 감소함을 알 수 있다. 최적형상에서는 기준형상에서 보다 딩플 후반부에서의 상승이 상대적으로 매우 크다. Figs. 7과 8의 (b)에서 확인할 수 있듯이 Nusselt 수의 분포가 대칭을 이루고 있지 않는 것은 비대칭적인 유동구조에 기인하며, 이는 Isaev 와 Leont'ev⁽²²⁾가 밝힌 것처럼 딩플표면에서 와류가 한쪽으로 치우쳐서 발생하는 현상 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 9는 $z/P=0.5$ 위치에서 단면의 속도벡터를 나타낸다. 딩플 내부의 선단 영역은 유동의 박리로 인

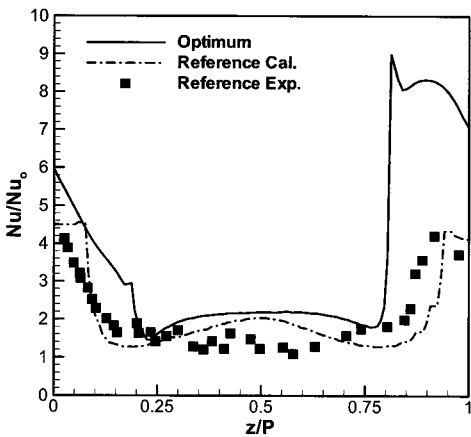
해 낮은 열전달 성능을 보이며, 박리 후 재부착되는 영역에서 급격한 열전달계수의 상승을 보이게 된다. 그림에서 확인할 수 있듯이 최적형상은 기준형상에

Table 3 Results of vertically non-symmetric staggered dimples on oppsite walls

	Nu_a	F_f	F
Optimum	4.08	1.88	0.470
Optimum non-sym._S/2	4.09	1.86	0.468
Optimum non-sym._S/4	4.16	1.73	0.448



(a) Streamwise variation



(b) Spanwise variation

Fig. 8 Normalized local Nusselt number distributions along dimple diameter ($\beta=0.12$)

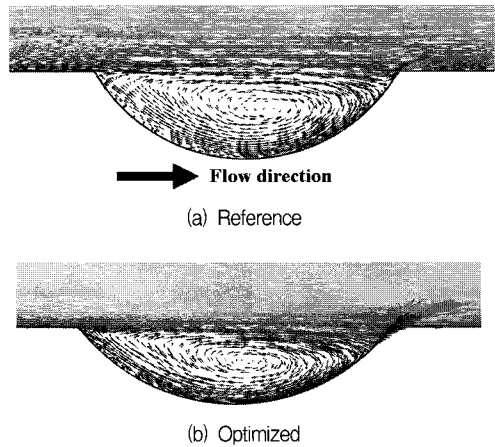


Fig. 9 Velocity vectors at cross section ($z/P=0.5$)

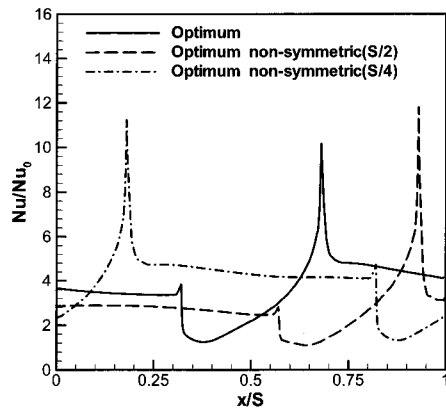


Fig. 10 Normalized local Nusselt number distributions along dimple diameter ($\beta=0.12$)

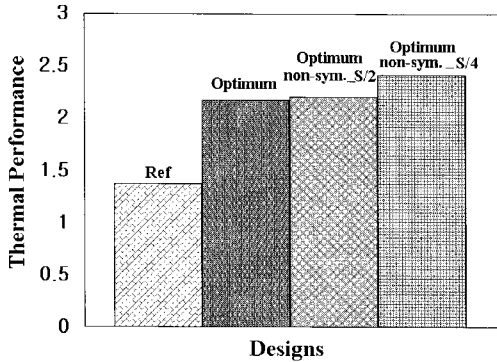


Fig. 11 Thermal performances with $\beta=0.12$

비해 재순환영역이 줄어들어 낮은 열전달 성능을 보이는 영역이 줄어들었음을 알 수 있다. 최적화를 통해 얻은 딴플유로의 최적형상을 가지고 Fig. 2에 나타나 바와 같이 윗면의 딴플을 주 유동방향으로 S/2와 S/4 만큼 이동시켜 윗면과 아랫면의 딴플들이 서로 비대칭하게 부착된 유로에 대한 성능을 대칭인 경우와 비교해 평가하였다. 유동해석을 통해 얻은 결과를 Table 3 과 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에 나타난 Nusselt 수의 분포를 보면 최대값은 S/2로 비대칭한 경우가 가장 높게 나타났지만 그 외의 영역에서는 상대적으로 낮은 Nusselt 수 분포를 보임에 따라 전체 열전달면의 평균 Nusselt 수는 Table 3에 나타난 바와 같이 S/4로 비대칭하게 배열된 유로가 가장 높았다. Table 3에서 볼 수 있듯이 두 경우 모두 기존의 대칭적인 유로와 비교해서 향상된 열전달 성능을 보였으며, 마찰손실 관련 항 역시 감소함으로써 목적함수 값은 S/2와 S/4만큼 이동하였을 경우에 대칭인 경우와 비교하여 각각 0.4% 와 4.7% 감소하였다.

딴플의 기준형상과 최적형상 및 비대칭하게 부착된 유로에 대한 열성능(Thermal performance)을 측정하여 Fig. 11에 나타내었다. 열성능은 열전달성능과 압력 손실을 모두 고려하여 얻어질 수 있으며, 다음과 같이 정의된다.

$$Th = \frac{Nu_a / Nu_0}{F_f} \quad (10)$$

각 경우의 열성능을 비교해 보면, 최적형상은 기준형상에 비해 58.4% 상승된 열성능을 보였으며, S/2 와 S/4 만큼 비대칭적으로 부착된 유로는 대칭적인 유로 보다 각각 열성능이 1.4% 와 10.6% 상승하였다. 따라

서 최적화를 통해 얻은 최적형상을 윗면과 아랫면이 S/4 만큼 비대칭으로 엇갈린 유로에서 가장 좋은 열성 능이 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 상하면에 주기적으로 엇갈린 딴플이 설치된 열전달 유로를 삼차원 해석을 바탕으로 한 가 중평균 대리모델(WTA1)을 사용하여 최적설계 하였다. 최적설계를 통해 얻은 최적형상에 대해 윗면을 주 유 동방향으로 이동시켜 상하면 딴플이 비대칭적으로 부 착된 경우의 성능을 평가하였다. 목적함수는 가중계수 를 도입한 열전달 계수와 마찰계수의 선형적인 결합으 로 정의하였으며, 세 가지 기하학적 변수들에 대해 20 개의 형상을 계산하여 최적설계를 수행하였다. 실험치 와 비교해볼 때 열전달 해석의 정확성은 신뢰할만한 결 과를 보였다. 최적형상은 기준형상에 비해 압력손실 이 증가하였으나 열전달성능이 크게 향상되어 목적함 수의 값은 25.4% 감소하였다. 최적형상의 상하면이 비 대칭인 유로에 대한 해석결과 주 유동방향으로 S/4만 큼 이동하였을 때 가장 좋은 성능을 보였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Ligrani, P. M., Oliveira, M. M. and Blaskovich, T., 2003, "Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques," AIAA J., Vol. 41, No. 3, pp. 337~362.
- (2) Ridouane, E. H., and Campo, A., 2007, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Laminar Air Flows Moving in a Parallel Plate Channel With Transverse Hemi-Cylindrical Cavities," International Journal of Heat and Mass Transfer, (Article in press).
- (3) Silva, C., Marotta, E. and Fletcher, L., 2007, "Flow Structure and Enhanced Heat Transfer in

- Channel Flow With Dimpled Surfaces: Application to Heat Sinks in Microelectronic Cooling,” *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 129, pp. 157~166.
- (4) Hwang S. D. and Cho H. H., 2006, “Heat Transfer Enhancement of Internal Cooling Passage Using Dimple/Protrusion,” 13 International Heat Transfer Conference, Sydney, Australia, HTE24.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R. and Tucker, P. K., 2005, “Surrogate-based analysis and optimization,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 41, pp. 1~28.
- (8) Li, W. and Padula, S., 2004, “Approximation Methods for Conceptual Design of Complex Systems,” Eleventh International Conference on Approximation Theory(eds. Chui, C., Neaumtu, M., Schumaker, L.), Tennessee, USA.
- (9) Goel, T., Haftka, R. T., Shyy, W. and Queipo, N., 2007, “Ensemble of Surrogates,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 33. No. 3, pp. 199~216.
- (10) Samad, A., Shin, D. Y., Kim, K. Y., Goel, T. and Haftka, R. T., 2007, “Surrogate Modeling for Optimization of a Dimpled Channel to Enhance Heat Transfer Performance,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 21, Number 3, pp. 667~670.
- (11) Samad, A., Kim, K. Y., Goel, T., Haftka, R. T. and Shyy, W., 2007, “Multiple Surrogate Modeling for Axial Compressor Blade Shape Optimization,” *Journal of Propulsion and Power*, (Accepted for publication).
- (12) CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006.
- (13) Menter, F. and Esch, T., 2001, “Elements of Industrial Heat Transfer Predictions,” 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Uberlandia, Brazil.
- (14) Bardina, J. E. and Huang, P. G., Coakley, T., 1997, “Turbulence Modeling Validation,” AIAA Paper 97~2121.
- (15) Lai, Y. G. and So, R. M. C., 1990, “Near-Wall Modeling of Turbulent Heat Fluxes,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 1429~1440.
- (16) Kim, H. M. and Kim, K. Y., 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.
- (17) JMP® 5.1, 2004, SAS Institute, Inc.
- (18) Kim, K. Y. and Choi, J. Y., 2005, “Shape Optimization of a Dimpled Channel to Enhance Turbulent Heat Transfer,” *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 48, No. 9, pp. 901~915.
- (19) Collette, Y. and Siarry, P., 2003, *Multiobjective Optimization, Principles and Case Study*, 1st ed., Springer-Verlag, New York.
- (20) Burgess, N. K., Oliveira, M. M., and Ligrani, P. M., 2003, “Nusselt Number Behavior on Deep Dimpled Surfaces within a Channel,” *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 11~18.
- (21) Moon, H. K., Connell, T. O., and Glezer, B., 2000, “Channel Height Effect on Heat Transfer and Friction in a Dimpled Passage,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122, pp. 307~313.
- (22) 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.