

NSGA-II를 통한 딴플채널의 다중목적함수 최적화

이기돈* · 압두스 사마드** · 김광용***

Multi-Objective Optimization of a Dimpled Channel Using NSGA-II

Ki-Don Lee*, Abdus Samad** and Kwang-Yong Kim***

Key Words : Fluid Engineering(유체공학), Dimple(딴플), Heat Transfer(열전달), Pressure Loss(압력손실), Optimization(최적화)

Abstract

This work presents numerical optimization for design of staggered arrays of dimples printed on opposite surfaces of a cooling channel with a fast and elitist Non-Dominated Sorting of Genetic Algorithm (NSGA-II) of multi-objective optimization. As Pareto optimal front produces a set of optimal solutions, the trends of objective functions with design variables are predicted by hybrid multi-objective evolutionary algorithm. The problem is defined by three non-dimensional geometric design variables composed of dimpled channel height, dimple print diameter, dimple spacing and dimple depth to maximize heat transfer rate compromising with pressure drop. Twenty designs generated by Latin hypercube sampling were evaluated by Reynolds-averaged Navier-Stokes solver and the evaluated objectives were used to construct Pareto optimal front through hybrid multi-objective evolutionary algorithm. The optimum designs were grouped by k-mean clustering technique and some of the clustered points were evaluated by flow analysis. With increase in dimple depth, heat transfer rate increases and at the same time pressure drop also increases, while opposite behavior is obtained for the dimple spacing. The heat transfer performance is related to the vertical motion of the flow and the reattachment length in the dimple.

1. 서론

터빈 블레이드 내부 냉각유로에 주기적인 유동간섭물을 부착하여 열전달 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 유동간섭물로 많이 사용되는 딴플(dimple)은 열경계층의 발달 억제 및 난류운동 에너지의 생성을 증가시켜 열전달 성능을 향상시킨다고 Ligrani 등[1]은 기술하고 있다. 그러나 이러한 유동간섭물은 열전달 성능의 향상과 함께 불가피하게 압력손실의 증가를 가져오므로 설계자의 의도에 부합되는 열전달면의 형상을 설계하기 위해서는 열전달계수와 마찰계수를 동시에 고려한 종합적인 설계가 이루어져야 한다.

그동안 딴플에 대한 많은 연구가 진행되었다. 냉각유로 내부에 딴플과 딴플형상으로 돌출된 면에 대한 실험적 연구가 Hwang과 Cho[2]에 의해 이루어졌으며, 그들은 압력강하 및 열전달성능을 고려한 열효율을 측정하여 상하면에 딴플이 부착된 유로가 한쪽 면에 딴플이 부착된 유로 또는 상하면에 딴플형상으로 돌출된 유로에서 보다 좋은 성능을 나타낸다고 보고하였다. Mahmood 등[3]은 딴플면과 딴플형상으로 돌출된 면이 서로 반대쪽 벽에 부착된 유로의 열전달 특성에 대해 보고하였으며, 한쪽 면에 부착된 엇갈린 딴플면에 대한 실험적 연구가 Burgess와 Ligrani[4]에 의해 보고되었다.

최적화에 대한 연구로 Kim과 Choi[5]는 반응면 기법을 사용

하여 한쪽 면에 바둑판 모양으로 정렬된 딴플이 부착된 유로의 최적화에 대한 연구를 보고하였으며, Samad등[6]의 연구에서는 한쪽 면에 엇갈린 딴플이 부착된 열전달면의 형상최적화에 관한 연구가 수행되었다. 리브가 부착된 냉각유로에 대해서는 Kim과 Lee[7] 그리고 Kim과 Kim[8]이 형상최적화를 수행하였다.

공학적 설계는 일반적으로 여러 분야를 포함하며 시스템의 최적화를 위해서는 각 분야에 관련된 목적함수들을 함께 고려해야 한다. 이러한 다중목적함수 최적화의 해는 파레토 최적해(Pareto-optimal solutions)라 불리는 많은 최적해로 구성된다. 설계자의 목적은 설계영역 내에서 가능한 한 많은 최적해를 찾는 것이며, 이것은 파레토 최적선(Pareto-optimal front)을 찾는 것을 도와준다. hybrid MOEA(multi-objective evolutionary algorithm)을 풀기 위해 부분탐색법과 NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)이 사용되었다. 이러한 알고리즘의 적용은 Kicinger 등[9]에 의해 조사되었으며, Marler와 Arora[10]에 의해 공학분야의 다중목적함수 최적화에 적용되었다. Foli 등[11]은 압력손실과 열전달 성능을 고려한 마이크로 열교환기의 최적화를 위해 NSGA-II를 적용하였다.

본 연구에서는 터빈 블레이드 내부에 엇갈린 딴플들이 상하면에 부착된 냉각유로의 형상을 RANS해석과 hybrid MOEA를 사용하여 열전달 성능과 압력손실을 고려한 최적설계를 수행하였다.

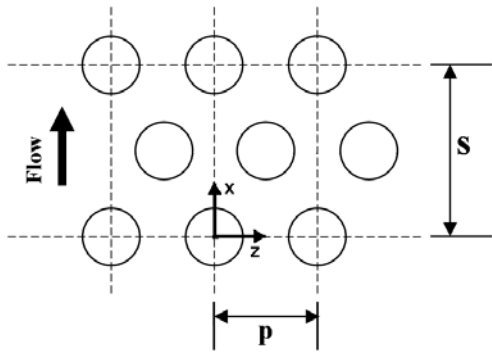
2. 유동해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 엇갈린 딴플들이 상하면에 연속

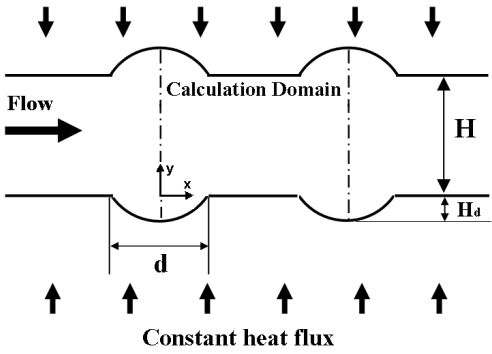
* 인하대학교 대학원 기계공학과, leekd@inhaian.net

** 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 인하대학교 기계공학과



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 1 Geometric parameters and computational domain

적으로 부착된 유로에서의 삼차원 유동 및 열전달 해석을 위해 비정렬격자계를 채택한 범용 소프트웨어인 ANSYS-CFX 11.0[12]을 사용하였다. 난류모델로는 SST(Shear Stress Transportation)[13] 모델을 사용하였다. 기본적으로 SST 모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점만을 취한 모델이다. $k-\omega$ 모델은 벽 근처에서 사용되고, $k-\epsilon$ 모델은 그 이외의 영역에서 사용된다. 따라서 SST 모델은 역압력구배로 인한 유도박리의 예측이 상당히 효과적이고, 난류열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina 등[14]에 의해 보고된 바 있다. 난류열유속 모델링으로는 Lai와 So[15]의 수치 모델이 사용되었다. 계산영역은 Fig. 1에 나타내었으며, 경계조건으로는 엇갈림 덩플들이 위치한 열전달면에는 일정 열유속 조건을, 나머지 면들에는 주 유동방향과 측면방향에 대해 모두 주기 조건을 적용하여 비대칭 유동구조의 계산을 가능하게 하였다.

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. 입구 난류강도(turbulent intensity)와 수력직경(D_h)을 기준으로 한 레이놀즈수는 각각 0.5와 10,000으로 하였다. 격자수는 형상에 따라 다르나 20만개에서 30만개까지 사용하였다.

3. 설계변수 및 목적함수

Fig. 1에 나타난 덩플채널에서 형상변수로는 채널 높이(H), 덩플의 지름(d), 덩플의 깊이(H_d), 덩플간의 거리(S), 덩플의 주기(P)가 있는데, S/P 를 1.73으로 고정시키고 나머지 세 개의 변수를 설계변수로 사용하였으며, 각 설계변수의 범위는 Table 1에 나타내었다.

채널성능의 최적화를 위해 Nusselt수와 마찰계수를 고려한 목

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

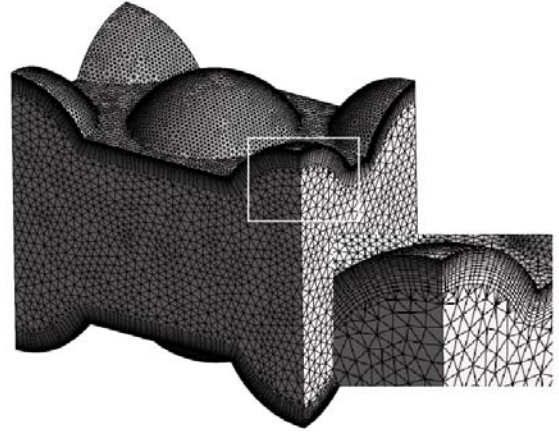


Fig. 2 Example grids

적함수를 각각 F_{Nu} 와 F_f 라고 정의하였다. 열전달 증진을 위한 목적함수 F_{Nu} 는 다음과 같이 정의 된다.

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

여기서,

$$Nu_a = \frac{\int_{A_d} Nu/Nu_o dA}{A_d} \quad (2)$$

Nu 와 Nu_o 는 각각 국부 Nusselt수와 열전달면의 평균 Nusselt수를 나타낸다. Nu_o 는 매끈한 원관 내에서 완전발달된 난류유동에 의한 Nusselt수이며, A_d 는 열전달면의 면적이다.

한편 F_f 는 마찰손실의 크기를 나타내는 항으로 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, f_0 는 매끈한 관에서 완전 발달된 유동에 대한 마찰계수이며, f 는 다음과 같이 정의된다.

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

Δp , D_h , ρ , U_b 그리고 P 는 각각 압력강하, 유로의 수력직경, 유체밀도, 축 방향 평균속도 그리고 덩플의 주기이다.

Table 2 Results of Pareto optimal designs

Designs	Variables			Objective function values			
				Hybrid method		RANS computed	
	H/d	H_d/d	d/S	F_f	F_{Nu}	F_f	F_{Nu}
Opt A	0.709	0.112	0.300	0.746	0.542	1.035	0.535
Opt B	0.253	0.229	0.470	2.493	0.157	2.200	0.160
Reference	1.155	0.289	0.499	-	-	1.708	0.427

4. 최적설계기법

MOEA(Multi-objective evolutionary algorithm)[16] 최적화 과정은 우선 설계변수가 선택되어지고, 설계변수의 범위가 결정된다. 이후 Latin hypercube sampling(LHS)⁽¹⁷⁾에 의해 설계영역 내에서 실험점들을 얻게되고, 유동해석을 통해 이 실험점들에서의 목적함수가 계산된다.

다중목적함수 최적화는 단일 최적해가 아닌 다수의 최적해를 제공한다. 이 최적해들은 파레토 최적해라 불리고 이들의 함수적인 표현을 파레토 최적선(Pareto-optimal front)이라 한다. 다중목적함수 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } \bar{f}(\bar{x}), \text{ (M function to be optimized)} \\ &\text{Subject to } \bar{g}(\bar{x}) \leq 0, \text{ (m inequality constraints)} \\ &\quad \quad \quad \bar{h}(\bar{x}) = 0, \text{ (p equality constraints)} \end{aligned}$$

여기서, $\bar{f}(\bar{x}) = \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x}), \dots, f_M(\bar{x})\}$ 는 실제 목적함수들의 벡터이고, \bar{x} 는 n 설계변수의 벡터이다. $\bar{x} \in R^n, \bar{g}(\bar{x}) \in R^m, \bar{h}(\bar{x}) \in R^p$. 다중목적함수의 집합 \bar{x} 의 각 가능한 해는 지배해 또는 비지배해이다. 모든 비지배해는 파레토-최적해라 불리어진다.

본 연구에서는 Deb 등[17]에 의해 개발된 NSGA-II 코드를 사용한 hybrid MOEA가 열전달성능과 압력손실을 고려한 목적함수에 대한 파레토 최적해를 얻기 위해 사용되었다.

5. 결과 및 고찰

최적설계는 수력직경(D_h)를 기준으로 레이놀즈수가 10,000이고, 덤플이 부착된 면에 일정 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행하였다. 형상 최적화를 위해 세 개의 설계변수($H/d, H_d/d, d/S$)와 두 개의 목적함수(F_{Nu}, F_f)를 선택하였으며, 격자 의존성 테스트와 예비계산을 통해 최적의 격자수와 설계변수의 범위(Table 1)를 결정하였다. LHS(Latin hypercube sampling)를 사용하여 선택된 20가지 형상에 대한 유동해석을 수행하여 얻은 목적함수 값을 사용하여 RSA(Response Surface Approximation)의 반응함수를 구성하였다. 이 반응함수들은 NSGA-II의 입력함수로 사용되어 파레토 최적선이 구하여진다.

파레토 최적선은 Fig. 3에 나타내었다. 곡선은 hybrid MOEA를 통해 구하여진 모든 최적해들을 나타낸다. clustering을 통해 6개의 점을 구하였으며, 그중 A와 B점에 대한 해석을 수행하였다. Opt B는 높은 압력손실과 높은 열전달성능을 나타내며, Opt A는 낮은 열전달성능과 낮은 압력손실을 보여준다. 따라서 설계자는 자신의 의도에 따라 파레토 최적선으로부터 원하는 최적점을 선택할 수 있다.

Table 2에 기준형상과 최적형상 및 그에 따른 RANS해석을 통해 계산된 목적함수값과 hybrid MOEA를 통해 예측된 목적함수 값을 나타내었다. RANS해석을 통해 계산된 기준형상과 최적

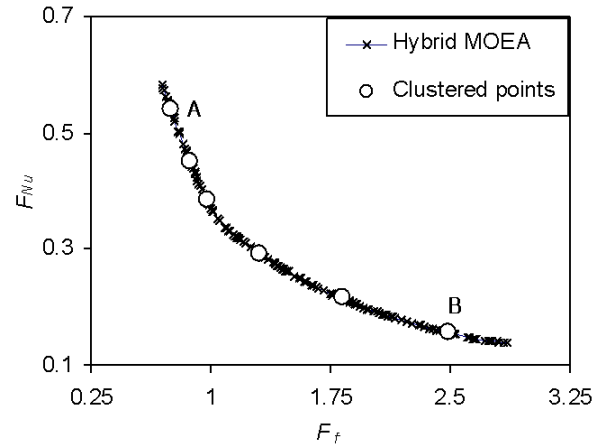


Fig. 3 Pareto optimal solutions using hybrid MOEA

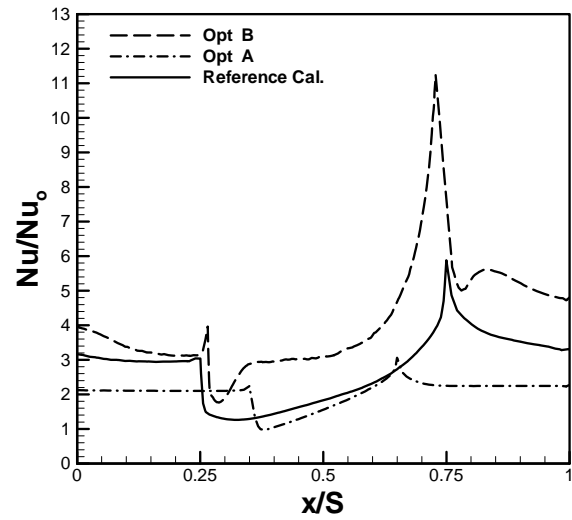


Fig. 4 Normalized local Nusselt number distribution along dimple diameter

형상의 목적함수 값을 비교해보면 F_{Nu} 값은 Opt A가 기준형상에 비해 25.3%증가하였으며, Opt B는 기준형상에 비해 62.5%감소하였다. F_f 값은 Opt A는 기준형상에 비해 39.4%감소하였고, Opt B는 기준형상에 비해 28.8%증가하는 결과를 보여주었다. hybrid MOEA를 통한 예측값과 RANS해석을 통한 계산값을 비교해보면 F_{Nu} 경우 2%이내의 오차를 보여주었으며, F_f 는 상대적으로 큰 오차를 나타냈다.

Fig. 4는 주 유동방향($z/P=0.5$)의 덤플면에서의 Nusselt수 분포를 나타낸다. A와 B형상 모두 기준형상에 비해 덤플의 지름이 작아졌으며, 채널의 높이 또한 작아졌다. Opt B는 대부분의 영역에서 기준형상보다 더 큰 Nusselt수를 나타냄으로써 전체적으로

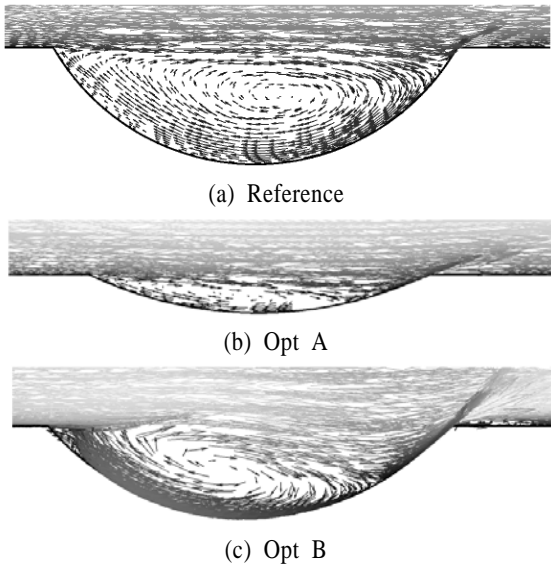


Fig. 5 Velocity vectors

향상된 열전달 성능을 보이고 있으며, Opt A는 기준형상에 비해 낮아진 열전달 성능을 보여주고 있다.

Fig. 5는 $z/P=0.5$ 인 위치에서 단면의 속도벡터를 나타낸다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 딴플 내부의 선단 영역은 유동의 박리로 인해 낮은 열전달 성능을 보이며, 박리 후 재부착되는 영역에서 급격한 열전달 계수의 상승을 보이게 된다. 그림에서 확인할 수 있듯이 Opt B는 기준형상에 비해 재순환 영역이 작게 형성되어 낮은 열전달 성능을 보이는 영역이 줄어들었으며, 딴플 내부를 빠져나가는 유동이 기준형상과 Opt A 보다 강하게 형성되어 주유동과의 혼합이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 상하면에 주기적으로 엇갈린 딴플이 설치된 열전달 유로를 삼차원 RANS 해석과 hybrid MOEA를 이용하여 수치최적설계를 수행하였다. LHS를 사용하여 20개의 실험점이 선택되었으며, 열전달성능과 압력손실에 관련된 목적함수가 모두 최적화 되었다. Opt A는 기준형상에 비해 열전달 성능은 저하되었지만 압력손실이 크게 감소하였으며, Opt B는 기준형상에 비해 압력손실은 증가하였지만 열전달 성능은 크게 증가한 결과를 보여주었다. 본 다중목적함수 최적화는 딴플이 부착된 냉각 채널의 열전달 성능과 압력손실을 고려한 설계에 있어서 효과적으로 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

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

참고문헌

[1] Ligrani, P. M., Oliveira, M. M. and Blaskovich, T., "Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques," AIAA J., Vol.41, No.3(2003), pp. 337-362.
 [2] Hwang, S. D. and Cho H. H., "Heat Transfer Enhancement of Internal Cooling Passage Using Dimple/Protrusion," 13 International Heat Transfer Conference, Sydney, Australia,

HTE24(2006).
 [3] Mahmood, G. I., Sabbagh, M. Z. and Ligrani P. M., "Heat Transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.15, No.15(2001), pp. 274~283.
 [4] Burgess, N. K. and Ligrani, P. M., "Effects of Dimple Depth on Nusselt Numbers and Friction Factors for Internal Cooling Channel," ASME Paper, No.GT2004-5432(2004).
 [5] Kim, K. Y. and Choi, J. Y., "Shape Optimization of a Dimpled Channel to Enhance Turbulent Heat Transfer," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.48, No.9(2005),pp. 901~915.
 [6] Samad, A., Shin, D. Y., Kim, K. Y., Goel, T. and Haftka, R. T., "Surrogate Modeling for Optimization of a Dimpled Channel to Enhance Heat Transfer Performance," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.21, No.3(2007), pp. 667~670.
 [7] Kim, K. Y. and Lee, Y. M., "Design Optimization of Internal Cooling Passage with V-shaped Ribs," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.51(2007), pp. 1103~1118.
 [8] Kim, H. M. and Kim, K. Y., "Shape Optimization of Three-Dimensional Channel Roughened by Angled Ribs with RANS Analysis of Turbulent Heat Transfer," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.49(2006),pp. 4013~4022.
 [9] Kicinger, R., Arciszewski, T. and Jong, K. D., "Evolutionary Computation and Structure Design: A Survey of the State-of-the-art," Computers and Structures83(2005), pp. 1943~1978.
 [10] Marler, R. T. and Arora, J. S., "Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering," Structural and Multidisciplinary Optimization, 26(2004), pp. 369~395.
 [11] Foli, K., Okabe, T., Olhofer, M., Jin, Y., and Sendhoff, B., "Optimization of Micro Heat Exchanger: CFD, Analytical Approach and Multi-objective Evolutionary Algorithms," International Journal of Heat and Mass Transfer 49(2006), pp. 1090-1099.
 [12] CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., (2006).
 [13] Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, Inc., New York(2003).
 [14] Bardina, J. E. and Huang, P. G., Coakley, T., "Turbulence Modeling Validation," AIAA Paper 97-2121.(1997).
 [15] Lai, Y. G. and So, R. M. C., "Near-Wall Modeling of Turbulence Heat Fluxes," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.33(1990), pp. 1429~1440.
 [16] Collette, Y. and Siarry, P., "Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies," New York, Springer(2003).
 [17] JMP® 5.1, SAS Institute, Inc.(2004).
 [18] Deb, K., "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms," 1sted., John Wiley & Sons Inc.(2001).