

열전달성능 향상을 위한 엇갈린 딴플 유로의 최적설계

신 동 윤¹, 김 광 용²DESIGN OPTIMIZATION OF A STAGGERED DIMPLED CHANNEL
TO ENHANCE TURBULENT HEAT TRANSFERD.Y. Shin¹ and K.Y. Kim^{*2}

This study presents a numerical procedure to optimize the shape of a staggered dimpled surface to enhance the turbulent heat transfer in a rectangular channel. A optimization technique based on neural network is used with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of the fluid flow and heat transfer with Shear Stress Transport turbulence model. The dimple depth-to-dimple print diameter ratio, channel height-to-dimple print diameter ratio, and dimple print diameter-to-pitch ratio are chosen as design variables. The objective function is defined as a linear combination of terms related to heat transfer and friction loss with a weighting factor. Latin Hypercube Sampling is used to determine the training points as a mean of the Design of Experiment. Optimal values of the design variables were obtained in a range of the weighting factor.

Key Words : Numerical Optimization(수치최적화), Turbulent Heat Transfer(난류열전달), Staggered Dimpled Surface (엇갈린 딴플 표면), RBNN Method(래디얼베이스 신경회로망 기법), Latin Hypercube Sampling(라틴하이퍼-큐브 샘플링)

1. 서 론

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

Park 등[1] 은 딴플유로의 난류유동을 RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes Equations)해석을 통해 예측하였다. Park 과 Ligrani[2]는 일곱 가지 서로 다른 딴플면에 대한 수치해석을 수행하여 열전달과 유동특성을 밝혔다. Patrick 과 Tafti[3]는 난류의 직접수치모사를 이용하여 엇갈리게 배열된 딴플이 부착된 유동장을 해석하였으며, Isaev 와 Leont'ev[4]는 수치해석을 통해 딴플 표면에 생기는 와류의 구조를 규명하였다.

이상과 같은 연구들은 딴플이 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[5-9]가 수행되었다. 딴플의 경우에도 Kim 과 Choi[10]는 In-line 배열을 가진 딴플 유로를 반응면기법을 사용하여 최적화한 바 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 엇갈린 딴플들이 한쪽 면에 부착된 삼차원 유로의 형상을 RANS해석과 최적화기법을 사용하여 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 세 개의 설계 변수에 대해 신경회로망기법을 사용하여 최적설계를 수행하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 주어진 딴플 유로에서 삼차원 유동 및 대류 열전달 해석을 위해 비정렬격자계를 채택한 범용소프트웨어인 CFX-10.0[11]을 사용하였다. Fig. 1과 같이 엇갈린 딴플이

1 학생회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

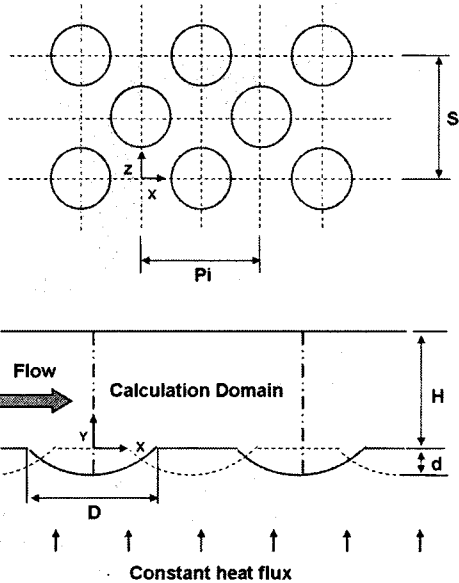


Fig. 1 Geometry and design variables

연속적으로 배열된 채널에서 한 주기만을 계산영역으로 하여 해석하였는데, 이 경우 지속적인 압력강하와 온도상승에 대해 주기조건을 적용하기 위해 Kim과 Kim[5]에 의해 기술된 바와 같이 주유동 방향의 운동량 방정식과 에너지 방정식을 변환하여 사용하였다. 난류모델로 SST (Shear Stress Transportation)[12]모델을 사용하였다.

계산에는 사면체의 비정렬격자계를 사용하였는데, 유동장 및 온도장의 변화가 큰 영역의 정확한 해석을 위해 벽 근처 격자는 육면체로 구성하였다. 경계조건으로는 주 유동방향의 주기면에서는 주기조건 (periodic condition)을 그리고, 측면에서는 대칭조건을 사용하였으며, 엇갈림 덩플이 위치한 면에 일정 열유속 조건을 사용하였다. 격자 수는 형상에 따라 다르나 12만개에서 18만개까지 사용되었으며, 한번 해석에 소요되는 계산시간은 P4-3.0 GHz CPU를 사용하였을 때 6시간에서 8시간 정도 소요되었다.

3. 최적설계기법

최적화 과정에서 우선 목적함수와 설계변수를 선택하고 설계영역을 결정하게 된다. 이후 적절한 샘플링 과정을 통하여 설계점을 얻게 되는데 이 설계점에서 유동해석을 통하여 목적함수가 계산된다. RBNN모델과 같은 surrogate 모델이 사용하여 자료곡면을 구성하고, 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다. 아래에 이 최적화과정들에 대해 자세하게 설명한다.

Fig. 1에 나타난 채널 유동에서 무차원 변수는 H/D, d/D, D/S와 S/Pi 등 네 가지인데, 이 중 본 연구에서는 S/Pi를 1로 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 정의 하였다.

$$F = F_{Nu} + \beta F_f \tag{1}$$

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 정의 된다.

$$F_{Nu} = 1 / Nu_a \tag{2}$$

여기서

$$Nu_a = \frac{\int A_s Nu / Nu_0 dA}{A_d} \tag{3}$$

Nusselt수 Nu는 수력직경을 사용해 구한다. Nu_0 는 매끈한 원관 내에서 완전 발달된 난류유동에 의한 Nusselt수로서 Dittus-Boelter식에서 얻어진다. 한편, F_f 는 마찰 손실의 크기를 나타내는 항으로서 다음과 같이 정의하였다.

$$F_f = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \tag{4}$$

여기서, 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2 \rho U_b^2 Pi} \tag{5}$$

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

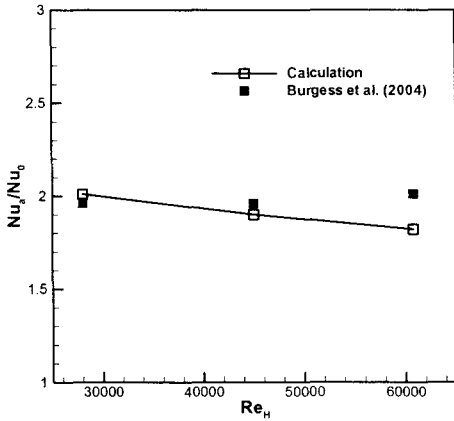


Fig. 2 Comparison between predicted and measured Nusselt number distributions.



Fig. 3 Nusselt number contours for optimum shape ($\beta=0.09$)

그리고 f_0 는 매끈한 관에서 완전 발달된 유동에 대한 마찰계수로 Petukhov[13] 의 실험식에 의해 다음과 같이 정의된다.

RBNN과 같은 대리 모델 (surrogate model)을 구성하기 위해서는 설계공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있다. 이 점들을 얻기 위해 실험계획법 (DOE)이 사용되는데 본 연구에서는 실험계획법으로 Latin Hypercube Sampling (LHS)[14]을 사용하였다.

RBNN (Radial basis neural networks)은 radial basis transfer function 과 선형 출력으로 구성되는 두 겹의 망이다. 본 연구에서는 신경회로망을 MATLAB[15] 의 함수 newrb를 사용하여 구성하였다. 이 방법을 이용할 경우의 가장 큰 장점은 함수의 선형성으로 인해 계산시간을 줄일 수 있다는 것이다.

SQP (Sequential quadratic programming) (MATLAB[15]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[16]의 실험형상과 같은 조건을 가진 한쪽 면에 엇갈림 덩플이 부착되어있는 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 Burgess등[16] 의 실험 결과와 비교하

였다. 여기서 H/D 는 1.0, d/D 는 0.2이며, D/S 와 D/Π 는 공히 0.618이다. 작동유체는 상온의 공기이다.

Fig. 2는 수행한 수치해의 타당성 검증결과를 보여준다. 최적설계는 채널의 높이(H)를 기준으로 한 레이놀즈수가 22,500 이고, 덩플 벽에서 일정 열유속이 유입되는 경우에 대해 수행하였다. 최적설계를 위한 반응함수는 Table 1에 나타난 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 최적설계형상의 설계변수 값과 열전달계수 및 마찰손실관련 항의 크기를 나타내었다. 최적 설계 결과 Nusselt 수는 기준 형상에 비해 거의 두 배 가까이 증가하였으나, 마찰손실 관련항 (F_f)도 약 80 % 가량 증가하였다. 결과적으로 목적함수 값은 최적형상의 경우 기준형상에 비해 14.7 % 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 3은 가중계수가 0.09인 경우에 대한 최적형상과 기준형상의 덩플표면에서 Nu수 분포를 나타낸다.

덩플 선단에서 발생한 박리로 인해 덩플 내에서 열전달이 급격히 감소하였다가 후반부로 갈수록 열전달계수가 증가하는 현상을 보이고 있다.

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

	Design variable			Nu _s	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

5. 결 론

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 평가한 목적함수 값을 바탕으로 최적설계를 수행함으로써 신뢰할 만한 최적치를 얻었다. 목적함수는 가중계수를 도입한 열전달 계수와 마찰계수의 선형 결합으로 정의하였다. 본 연구를 통해 신경회로망기법을 사용한 최적설계가 딴플을 사용한 냉각유로의 설계에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

후 기

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

참고문헌

[1] Park J., Desam P.R., Ligrani P.M., Numerical Predictions of Flow Structure above a Dimpled Surface in a Channel, Numerical Heat Transfer A, 45 (2004) 1 - 20.
 [2] Park J., Ligrani P.M., Numerical predictions of heat transfer and fluid flow characteristics for seven different dimpled surfaces in a channel, Numerical Heat Transfer A, 47 (2005) 209 - 232.
 [3] Patrick, W. V. and Tafti, D. K., 2004, "Computations 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
 [4] 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.

[5] 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, Issuepp. 2719-2727.
 [6] 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.
 [7] 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
 [8] 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
 [9] 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
 [10] K. Y. Kim and J. Y. Choi, 2005, "Shape Optimization of a Dimpled Channel to Enhance Turbulent Heat Transfer," Numerical Heat Transfer, Part A, 48: 901-915
 [11] CFX-10.0 Solver Theory, Ansys inc., 2005
 [12] Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," 16th Bazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Uberlandia, Brazil.
 [13] Petukhov, B. S., 1970, "Advances in Heat Transfer," Academic Press, New York, Vol. 6, pp. 503~504
 [14] 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. 21, 239-245
 [15] MATLAB®, The language of technical computing, Release 14. The MathWorks Inc.
 [16] 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.