



## 단을 가진 원형 핀환이 부착된 냉각유로의 형상 최적 설계

문미애,<sup>1</sup> 김광용\*<sup>2</sup>

### SHAPE OPTIMIZATION OF INTERNAL COOLING CHANNEL WITH STEPPED CIRCULAR PIN-FINS

M.A. Moon<sup>1</sup> and K.Y. Kim\*<sup>2</sup>

*This study presents a numerical procedure to optimize the shape of stepped circular pin-fins to enhance turbulent heat transfer. The KRG method is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of fluid flow and heat transfer with shear stress transport turbulent model. The objective function is defined as a linear combination of heat transfer and friction loss related terms with a weighting factor. Ten training points are obtained by Latin Hypercube Sampling for two design variables. Optimum shape has been successfully obtained with the increased objective function.*

**Key Words :** Turbulent Heat Transfer(난류열전달), Stepped Circular Pin-fin(단을 가진 원형 핀환), Design Optimization(최적설계), Latin Hypercube Sampling(라틴 하이퍼큐브 샘플링)

#### 1. 서 론

고온의 연소가스로부터 터빈 블레이드를 냉각시키기 위하여 터빈 블레이드 내부 냉각유로에 설치된 유동 간섭물은 난류발생을 촉진시켜 열전달을 증진시킨다. 이러한 유동 간섭물로 주로 사용되는 핀환은 핀과 밀면 접촉부에서 형성되는 와류들로 인해 핀의 표면과 밀면의 열전달은 증가하는 반면, 형상 변화로 인하여 압력손실도 함께 증가하는 결과를 낳는다 [1-3].

열전달을 최대화하고 압력손실을 최소화하기 위해서 단을 가진 원형 핀환 (stepped circular pin-fin)에 대한 연구가 예전부터 활발히 진행되어 왔다. Metzger 등[4,5]과 Goldstein 등[6]은 엇갈리게 설치된 단을 가진 원형 핀환의 열전달에 대하여 연구하였다. 단을 가진 원형 핀환은 핀과 상하면 접촉부, 핀환의 중간 단에서 형성되는 와류들로 인해 단면이 일정한 핀에 비해 더 큰 강도의 난류를 발생시킬 수 있어 열전달 능력이 증가된다[7].

삼차원 열유동해석을 바탕으로 한 수치최적화기법은 컴퓨

터의 발달과 최적설계에 대한 관심 등에 힘입어 최근 큰 발전을 거듭하고 있다. 특히, 다양한 수치 최적화 기법 중 대리모델 (surrogate model)을 사용한 방법이 관심을 모으고 있다. 대리모델의 일종인 크리깅(KRG)모델은 Afzal과 Kim[8]의 미세유로 최적설계, Wasim와 Kim[9]의 원자로 원료봉다발 최적설계 등을 통하여 그 정확성과 우수성이 입증된 최적설계 기법이다.

Park 등[10]은 BFGS method를 이용한 최적화를 통해 기존의 사각형 핀환 보다 열전달 성능은 37.7% 증가하고, 압력 손실은 28.5% 감소한 최적형상에 대하여 보고하였다. 이와 같이 여러 형상의 핀환에 대해 수치최적화기법을 이용한 최적설계는 많이 진행되었으나, 단을 가진 원형 핀환의 형상최적화에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 단을 가진 원형 핀환의 형상최적화를 위해 RANS 해석과 최적화 기법을 사용하였다. 기존 연구에 따르면 열전달과 압력 손실은 중간단의 높이, 중간단의 지름 등에 민감하게 반응하므로 이 두 가지를 설계변수로 결정하였다. 열전달성능의 최대화와 압력손실의 최소화를 동시에 추구하기 위하여 가중계수를 이용한 선형적인 목적함수를 사용하였다.

1 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학부

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

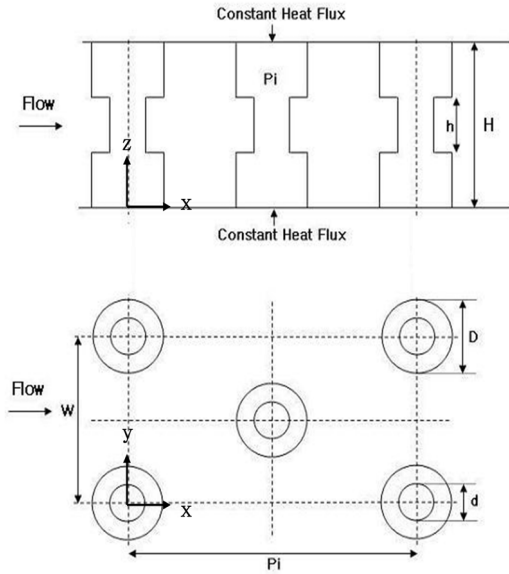


Fig. 1 Geometry of short pin-fin

## 2. 유동 해석 방법

본 연구에서는 단을 가진 원형 핀핀의 삼차원 유동 및 대류열전달 해석을 위해 비정렬격자계를 채택한 범용소프트웨어인 ANSYS-CFX 11.0[11]을 사용하였다. Fig. 1과 같이 단을 가진 원형 핀핀이 연속적으로 배열된 채널에서 한 주기만을 계산영역으로 정하여 해석을 수행하였다. 경계조건으로 주기 조건을 적용하기 위하여 Cho와 Kim[12]에 의해 기술된 바와 같이 주유동 방향의 운동량 방정식과 에너지 방정식을 변환하여 사용하였다.

난류 모델로는 SST(Shear Stress Transportation)모델[18]을 사용하였다. SST모델은 역압력구배로 인한 유동박리의 예측이 상당히 효과적이고, 난류열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina 등[13]에 의해 보고된 바 있다.

계산에 사용된 격자계는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 대부분의 영역에서 사면체의 비정렬격자계로 구성하였으나, 유동장 및 온도장의 변화가 큰 벽 근처영역에서는 정확한 해석을 위해 육면체 격자로 구성하였다. 경계조건으로는 주 유동방향과 측면에는 대칭조건을 사용하였으며, 단을 가진 원형 핀핀

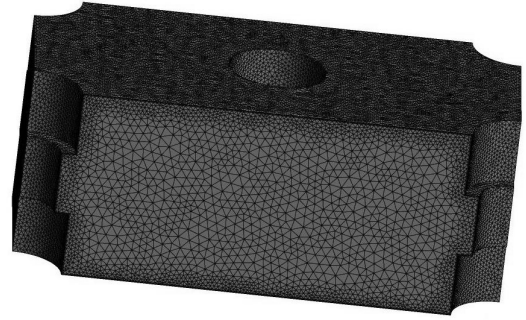


Fig. 2 Example of grid system

이 부착된 윗면과 아랫면에는 열유속 조건을 사용하였다. 수치해가 격자수의 영향을 받지 않는 최소의 격자수를 찾기 위하여 Cho와 Goldstein[7]의 실험모델과 동일한 기준형상에 대하여 격자 의존성 테스트를 수행하여 약 33만개의 최적의 격자수를 선택하였다.

Fig. 3은 레이놀즈수에 따른 Cho와 Goldstein[7]의 실험결과와 유동해석 결과의 평균 Nusselt수를 비교해 놓은 그래프이다. 결과에서 볼 수 있듯이  $Re = 25,000$ 에서는 유동해석의 계산결과가 실험결과를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는  $Re = 25,000$ 를 기준으로 최적설계를 수행하였다.

## 3. 설계 변수 및 최적 설계

### 3.1 설계 변수

Fig. 1에 나타난 핀핀 유로에서의 형상변수로는 유로높이(H), 중간단의 높이(h), 중간단의 지름(d), 핀핀의 지름(D), 유동방향의 핀핀 사이의 거리(Pi), 측면방향의 핀핀 사이의 거리(W)가 있는데 이들로부터  $h/H$ ,  $d/H$ ,  $Pi/D$ ,  $W/D$  등 4개의 무차원수를 얻을 수 있다. 본 연구에서는  $Pi/D$ 와  $W/D$ 를 Cho와 Goldstein[7]의 실험과 동일한 6과 2.5로 각각을 고정시키고, 중간단에 대한 나머지 두 개의 변수를 설계변수로 하여  $h/H$ 는 0.1과 0.9 사이의 값,  $d/H$ 는 0.2와 0.45 사이의 값으로 정하였다.

### 3.2 최적설계

최적화 과정에 앞서 목적함수와 설계변수를 선택하고 설계

Table 1 Results of optimization for  $\beta = 0.4$ 

	Design variable		$F_{Nu}$	$F_f$	F
	$h/H$	$d/H$			
Reference	0.3333	0.7046	0.6720	1.8042	1.3937
Optimized	0.7864	0.4500	0.6613	1.3467	1.2001

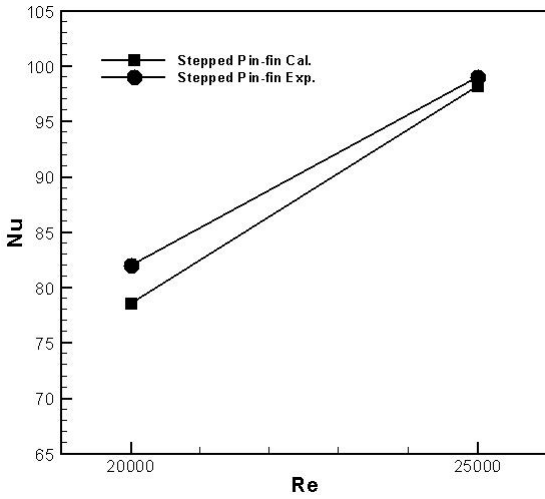
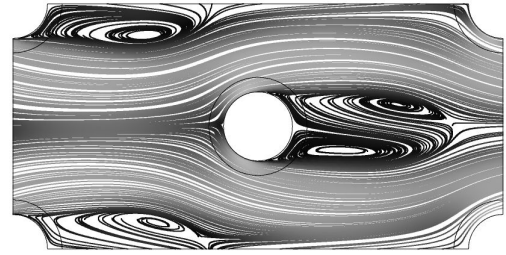
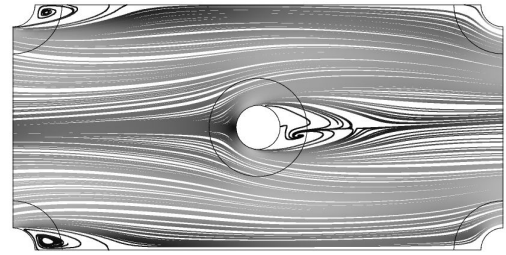


Fig. 3 Comparison between predicted and measured Nusselt numbers



(a) Reference Stepped Pin-fin



(b) Optimized Stepped Pin-fin ( $\beta = 0.4$ )

Fig. 5 Streamlines on x-y plane

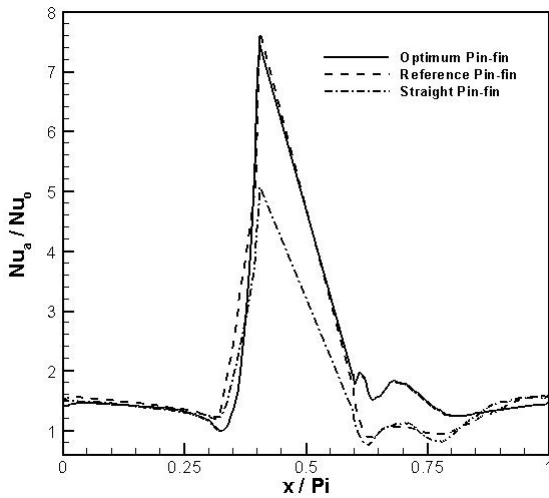


Fig. 4 local Nusselt number along flow direction

영역을 결정하게 된다. 이후 Latin Hypercube Sampling(LHS)를 통하여 설계영역 내에서 설계점들을 얻게 되는데 이 설계점에서의 유동해석을 통하여 목적함수가 계산된다. 대리모델 중 하나인 크리깅(KRG) 모델을 사용하여 자료 곡면을 구성하고, 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다.

#### 4. 결과 및 검토

Table 1에는 가중계수( $\beta$ )가 0.4인 경우에 대한 최적형상과 기준형상에 대한 설계변수들과 목적함수의 값을 제시하였다.

Nusselt수 관련항 ( $F_{Nu}$ )은 기준형상에 비해 1.6% 감소 (Nusselt수는 증가)하였고, 마찰손실 관련항( $F_f$ )은 25.4% 감소하였다. 결과적으로 목적함수 값은 기준형상에 비해 최적형상이 13.9% 감소하였다.

Fig. 4는 주유동방향으로의 핀핀 전후의 Nusselt수 분포를 나타낸다. 유동이 핀핀을 지나기 전, 핀핀에서 유동이 정체됨에 따라 열전달계수가 급격히 증가하였다가 핀핀에서 발생하는 박리로 인해 핀핀의 후방에서 열전달이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 최적형상은 핀핀 후방에서 재부착점이 더 빨리 발생됨에 따라 핀핀 후방에서의 평균 Nusselt수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 최적형상이 단면이 일정한 핀핀과 기준형상보다 높은 평균 Nusselt수 분포를 나타냄으로써 전체적으로 향상된 열전달 성능을 보이고 있다.

Fig. 5는 채널의 x-y단면에서의 유선분포를 보여주고 있다. 최적형상의 경우 핀핀 후류의 박리구역이 기준형상에 비해 작게 형성됨을 알 수 있고 이로 인해 상대적으로 작은 압력강하가 유발됨을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 단을 가진 원형 핀핀이 설치된 열전달 유로 내 난류열전달을 수치해석한 후, 이를 바탕으로 핀핀 유로의 형상 최적화를 수행하였다. 수치해석을 통해 얻은 결과값은



실험결과와 비교해 볼 때, 최적설계를 수행하기에 충분할만한 신뢰도를 보였다. 두 개의 설계변수에 대해 10개의 실험점을 활용하여 얻어 낸 최적형상은 기준형상에 비해 만족할 만한 성능향상을 보였다.

### 참고문헌

- [1] 2002, Hwang, J.-J. and Jui, C.-C., "Measurement of Endwall Heat Transfer and Pressure Drop in a Pin-fin Wedge Duct," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45, pp.877-889.
- [2] 2004, Ames, F.E., Dvorak, L.A. and Morrow, M.J., "Turbulent Augmentation of Internal Convection over Pins in Staggered Pin Fin Arrays," *ASME Turbo Expo*.
- [3] 2007, Jeng, T.-M. and Tzeng, S.-C., "Pressure Drop and Heat Transfer of Square Pin-fin Arrays in In-line and Staggered Arrangements," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.50, pp.2364-2375.
- [4] 1982, Metzger, D.E., Berry, R.A. and Bronson, J.P., "Developing Heat Transfer in Rectangular Ducts with Arrays of Short Pin Fins," *ASME J. Heat Transfer*, Vol.104, pp.700-706.
- [5] 1993, Metzger, D.E., Kim, Y.W. and Yu, Y., "Turbine Cooling : an Overview and Some Focus Topics," *The 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering*.
- [6] Goldstein, R.J., Jabbari, M.Y. and Chen, S.B., "Convective Mass Transfer and Pressure Loss Characteristics of Staggered Short Pin-fin Arrays," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.37, s.1.
- [7] 1997, Cho, H.H. and Goldstein, R.J., "Heat Transfer and Friction Loss Characteristics of Shaped Short Pin-fin Arrays," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제9권, 제3호, pp.259-267.
- [8] 2007, Hussain, A. and Kim, K.-Y., "Shape Optimization of a Micro-channel Using Kriging Model," *대한기계학회 논문집 B권*, 제31호, 제9호, pp.733-740.
- [9] 2007, Raza, W. and Kim, K.-Y., "Evaluation of Surrogate Models in Optimization of Wire-wrapped Fuel Assembly," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.44, No.6, pp.819-822.
- [10] 2005, Park, K.W., Oh, P.K. and Lim, H.J., "Optimum Design of a Pin-Fins Type Heat Sink Using the CFE and Mathematical Optimization," *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.13, No.2, pp.71-82.
- [11] 2006, *CFX-11.0 Solver Theory*, Ansys inc.
- [12] 2008, Cho, A.T. and Kim, K.Y., "Analysis of Turbulent Heat Transfer from Staggered Pin-fin Arrays with Diamond Shaped Elements at Various Geometrical Configurations," *한국전산유체공학회지*, 제13권, 제2호, pp.20-26.
- [13] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T. "Turbulence Modeling Validation," *AIAA*, pp.97-2121.