

환형상 막냉각홀의 신경회로망 기법을 이용한 최적설계

이기돈^{*} · 김광용^{**†}

Design Optimization of a Fan-Shaped Film-Cooling Hole Using a Radial Basis Neural Network Technique

Ki-Don Lee^{*}, Kwang-Yong Kim^{**†}

Key Words : Film-cooling(막냉각), Design optimization(최적설계), RBNN(레이디얼 베이스 신경회로망 기법), Film-cooling effectiveness(막냉각 효율), Heat Transfer(열전달)

ABSTRACT

Numerical design optimization of a fan-shaped hole for film-cooling has been carried out to improve film-cooling effectiveness by combining a three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis with the radial basis neural network method, a well known surrogate modeling technique for optimization. The injection angle of hole, lateral expansion angle of hole and ratio of length-to-diameter of the hole are chosen as design variables and spatially averaged film-cooling effectiveness is considered as an objective function which is to be maximized. Twenty training points are obtained by Latin Hypercube sampling for three design variables. Sequential quadratic programming is used to search for the optimal point from the constructed surrogate. The film-cooling effectiveness has been successfully improved by the optimization with increased value of all design variables as compared to the reference geometry.

기호설명

D	막냉각 홀의 지름	β	홀의 측면방향 확장각도
L	막냉각 홀의 길이	ρ_2	냉각유체의 밀도
M	분사율: $(\rho_2 U_2)/(\rho_2 U_2)$	ρ_∞	주유동의 밀도
T_{aw}	단열벽면온도	η	막냉각 효율: $(T_{aw}-T_\infty)/(T_c-T_\infty)$
T_∞	주유동의 분사온도	η_1	측면방향으로 평균한 막냉각 효율: $(-3 \leq z/D \leq 3)$
T_c	냉각유체의 분사온도	η_s	막냉각면에서 평균한 막냉각 효율: $(-3 \leq z/D \leq 3; 2 \leq x/D \leq 12)$
U_2	홀 출구에서 냉각유체의 속도	ω_x	x방향 와동
U_∞	주유동의 속도		
x, y, z	직교좌표들		
α	홀의 분사각도		

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kykim@inha.ac.kr

1. 서론

가스터빈의 효율 및 성능을 높이기 위해 최근 가스터빈엔진은 1,500°C 이상의 높은 온도에서 작동되도록 설계되고 있으며, 열효율을 더욱 높이기 위해 터빈 입구온도를 연평균 20°C 씩 꾸준히 상승시켜 설계하는 추세이다. 따라서 높은 입구온도로부터 터빈 블레이드를 보호하기 위한 다양한 냉각기법들이 연구, 개발되고 있다. 그 중 막냉각(film-cooling) 방법은 매우 효과적인 냉각성능으로 인해 가장 보편적으로 사용되고 있으며, 막냉각 효율(film-cooling effectiveness)을 높이기 위해 다양한 홀 형상의 냉각성능에 대한 연구가 이루어지고 있다.

출구부분이 확장된 형상, 즉 팬(fan)형상의 막냉각 홀은 원통형 막냉각 홀과 비교해 향상된 냉각성능을 보인다고 알려져 있으며, 그 동안 확장된 형태의 출구형상을 갖는 홀의 형상 및 다양한 변수의 변화에 따른 막냉각 효율 및 특성에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 실험을 통해 이루어진 연구들을 살펴보면, Gritch 등⁽¹⁾은 막냉각 홀의 형상 및 교차유동(crossflow)의 마하수에 따른 냉각성능을 연구하였으며, Saumweber 등⁽²⁾은 원통형 홀, 측면방향으로 확장된 형태의 홀, 그리고 측면방향 및 유동방향으로 확장된 형태의 홀을 대상으로 분사율 및 입구의 난류강도에 따른 막냉각 특성을 보고하였다. Ryu 등⁽³⁾은 실험을 통해 홀 출구의 측면방향 확장각의 변화(0°~20°)에 따른 냉각성능을 평가하였으며, 10°에서 가장 높은 막냉각 성능을 보인다고 보고하였다. Saumweber 와 Schulz⁽⁴⁾는 원통형 홀과 팬형상의 홀을 대상으로 홀출구의 확장각, 홀의 분사각도, 그리고 홀의 길이 대 직경의 비에 따른 막냉각 효율 및 열전달 계수의 특성을 보고하였으며, Reiss 와 Bolcs⁽⁵⁾는 분사형(showerhead)으로 배열된 막냉각 홀의 형상 및 입구의 유동조건에 따른 열전달 성능에 대해 보고하였다. Saumweber 와 Schulz⁽⁶⁾는 원통형과 팬형상 홀에 대하여 다양한 경계조건에 따른 냉각성능을 평가하였으며, 디퓨저영역 홀 단면의 상, 하단부 사이의 높은 압력차에 의해 발생하는 출구부분의 박리에 의한 냉각성능의 특성을 보고하였다.

원통형 홀형상을 대상으로 수행된 연구로는, Walters와 Leylek⁽⁷⁾은 실험 및 수치해석을 통해 원통형 막냉각 홀에 대한 연구를 하여 와류의 분석을 바탕으로 한 유동구조 및 특성을 보고하였다. Lutum과 Johnson⁽⁸⁾은 홀의 길이 대 직경비(L/D)의 변화(1.75~18)에 따른 막냉각 효율을 측정하여 L/D가 5 미만일 때는 길이가 길어짐에 따라 효율이 상승하지만 5 이상일 경우엔 큰 차이를 보이지 않는다고 보고하였다. Burd 등⁽⁹⁾은 입구 유동의 난류강도 및 L/D에 따른 막냉각 성능을 수치적으로 해석하였으며, Yuen과 Martinez-Botas⁽¹⁰⁾와 Bernsdorf

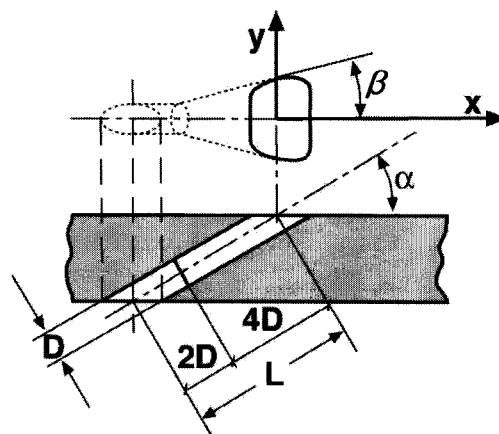


Fig. 1 Fan-shaped hole geometry from Saumweber et al. [2]

등⁽¹¹⁾은 홀의 분사각도와 분사율에 따른 막냉각 효율을 실험적으로 평가하였다. Bunker⁽¹²⁾는 그 동안 보고되어온 다양한 막냉각 홀의 형상 및 성능특성 등을 정리하였다.

수치해석적 연구로는 Bohn과 Moritz⁽¹³⁾, Hyams와 Leylek⁽¹⁴⁾, Azzi와 Jubran⁽¹⁵⁾, Miao와 Wu⁽¹⁶⁾ 그리고 Leedom와 Acharya⁽¹⁷⁾ 등에 의해 새로운 홀의 형상에 대한 냉각성능 및 특성을 평가하기 위한 연구가 수행되었다. 또한 Mahmood 등⁽¹⁸⁾은 팬형상의 막냉각 홀에 대한 수치해석을 통해 다양한 난류모델과 격자계를 이용한 결과를 비교하여, 난류모델은 SST (Shear Stress Transport) 모델과 realizable k-ε 모델, 그리고 격자계는 육면체격자를 사용하였을 때, 보다 더 실험결과에 근접한 값을 보인다고 보고하였다. 이상과 같이 막냉각 효율에 영향을 끼치는 여러 변수들의 특성에 대한 연구는 다양하게 수행되어왔지만, 다양한 설계변수들이 막냉각 효율에 미치는 영향을 동시에 고려하여 최적 설계변수를 도출하지는 못하였다.

대리모델(surrogate model)을 사용한 수치최적설계기법⁽¹⁹⁾은 계산상의 경제성과 설계영역의 특성을 잘 나타낸다는 장점으로 인해 여러 분야에서 최적화를 위한 수단으로 널리 사용되어왔으며, Quepo 등⁽²⁰⁾은 항공우주분야에 응용되어 온 다양한 대리모델에 대한 조사를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 팬형상의 막냉각 홀에 대해 막냉각 효율을 최대화하기 위한 수치최적설계를 수행하였다. 막냉각 효율의 계산은 삼차원 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 해석을 통해 수행하였으며, 실험결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하였다. 최적화를 위한 대리모델로는 RBNN(radial basis neural network) 모델⁽²¹⁾을 사용하였으며, Latin Hypercube sampling⁽²²⁾을 사용하여 세 개의 설계변수에 대한 실험점들을 생성하였다.

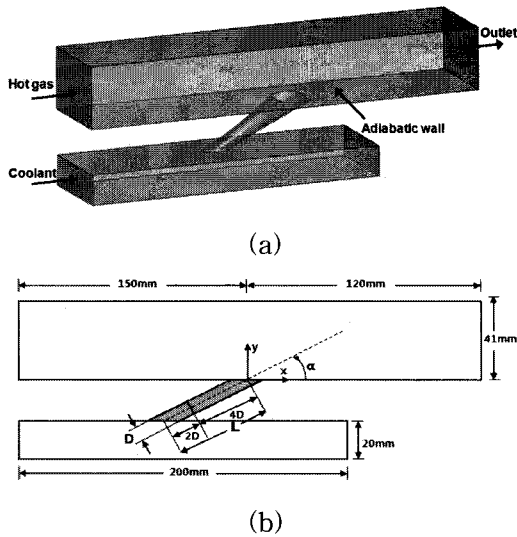


Fig. 2 Computational domain and geometric parameters

2. 수치해석방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 환형상의 막냉각 홀을 통한 막냉각의 삼차원 유동 및 열전달을 압축성 RANS 방정식을 이용하여 해석하였으며, 해석을 위해 상용 전산유체 역학 코드인 ANSYS CFX 11.0⁽²³⁾을 사용하였다. 이 코드는 압력기반 유한체적법(pressure-based finite volume method)을 이산화 하여 얻어지는 방정식을 algebraic multigrid coupled solver를 이용하여 수치계산한다. 난류모델로는 SST 모델^(24, 25)을 사용하였다. 기본적으로 SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점만을 취한 모델이다. k-ω 모델은 벽근처에서 사용되고, k-ε 모델은 그 이외의 영역에서 사용된다. 따라서 SST 모델은 역압력구배로 인한 유동박리의 예측이 상당히 효과적이고, 난류열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina 등⁽²⁶⁾에 의해 보고된 바 있다.

Fig. 1과 2는 환형상의 홀과 계산영역을 나타낸다. 계산영역은 고온가스가 흐르는 주유로 (main channel), 냉각유체 공급유로 그리고 환형상의 막냉각 홀로 구성하였으며, 홀 직경(D)은 10 mm, 유로의 폭은 60mm이다.

해석을 위한 격자계는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 비정렬 육면체격자로 구성하였다. 벽 근처 영역에서 empirical wall function을 사용하기위해 벽에서 첫 번째 격자점의 위치를 y+가 30이상 되도록 위치시켰으며, 홀 영역에는 O형 격자계를 사용하여 구성하였다.

작동유체는 공기이며, 경계조건으로 벽면에 단열조건과 점착(no-slip)조건을 적용하였다. 주유로의 입구에는 속도조건을 부여하였으며, 냉각유체 공급유로의 입구에는 유량조건을

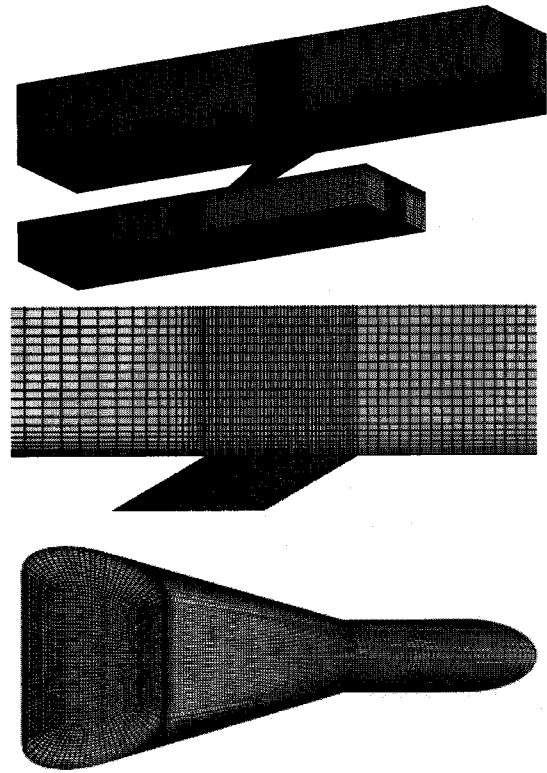


Fig. 3 Computational grids for analysis

Table 1 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
$\alpha(^{\circ})$	20	50
$\beta(^{\circ})$	12	24
L/D	5	8

부여하였다. 주유로의 출구에는 정압력조건을, 측면 벽면에는 주기조건을 부여하였다. 고온가스의 마하수(Mach number)를 실험조건⁽⁴⁾과 같은 0.6으로 맞추기 위해 입구의 속도는 139 m/s로 하였다. 냉각유체와 고온가스의 전온도(total temperature)는 각각 290 K, 540 K이며, 밀도비는 1.75이다. 입구의 난류강도 및 홀의 지름을 기준으로 한 주유로의 레이놀즈수는 각각 5.2%, 32,000이다.

3. 목적함수 및 설계변수

최적설계를 위해서는 설계변수와 목적함수의 선정이 우선되어야 한다. 따라서 막냉각 홀의 형상을 최적화하기 위한 목적함수는 막냉각 면에서 평균한 막냉각 효율(spatially averaged film-cooling effectiveness)로 결정하였으며, 다

음과 같이 정의된다.

$$\eta_s = \frac{\int_{-3}^3 \int_2^{12} \eta(x/D, z/D) d(x/D) d(z/D)}{6 \times 10} \quad (1)$$

$$\eta(x/D, z/D) = \frac{T_{aw}(x/D, z/D) - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (2)$$

여기서, T_{aw} 는 단열벽면온도를 의미하며, T_∞ 와 T_c 는 각각 고온가스와 냉각유체의 분사온도를 나타낸다.

Fig. 1에 나타난 막냉각 홀의 형상에서 홀의 분사각도 (α), 홀의 측면방향 확장각 (β) 그리고 홀의 길이 대 직경의 비 (L/D)를 최적설계를 위한 설계변수로 결정하였으며, L/D 의 경우 원통형의 직선부의 길이만 변화된다. Table 1은 각 설계변수의 범위를 나타내며, 각 설계변수의 범위는 예비계산을 통해 상대적으로 높은 막냉각 효율을 나타낸 영역을 대상으로 결정하였다.

4. 최적설계기법

대리모델을 사용한 최적설계의 과정을 Fig. 4에 순서도로 나타내었다. 우선 목적함수를 선택하고, 설계영역을 결정하게 된다. 이후 적절한 샘플링 과정을 통하여 설계영역 내에서 실험점들을 얻게 되는데 이 실험점에서의 유동해석을 통하여 목적함수가 계산되어지고, 이 값들을 바탕으로 RBNN모델⁽²¹⁾을 사용하여 자료곡면을 구성하여 이 곡면 상에서 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다.

신경회로망의 기본개념은 경험으로부터 배우고 기존자료로부터 예측하는 인간의 지능을 모사하는 것이다. 신경회로망의 기본요소는 뉴런인데, 각 뉴런의 출력은 여기에 저장되거나 도착하는 국부적인 정보에만 의존한다. 망의 예측능력은 가중치들에 의해 반영된다. 망의 훈련은 데이터를 통한 반복에 의해 수행된다.

RBNN은 래디얼베이스 전달함수와 선형 출력으로 구성되는 두 겹의 망이다. 본 연구에서는 신경회로망을 MATLAB⁽²⁷⁾의 함수 newrb를 사용하여 구성하였다. 여기서 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$a = \text{radbas}(\|w - p\| b) \quad (3)$$

여기서 b 는 바이어스이고, w 는 뉴런가중치벡터, p 는 입력벡터이다. 래디얼베이스 함수 radbas 는 다음과 같다.

$$\text{radbas}(n) = e^{-n^2} \quad (4)$$

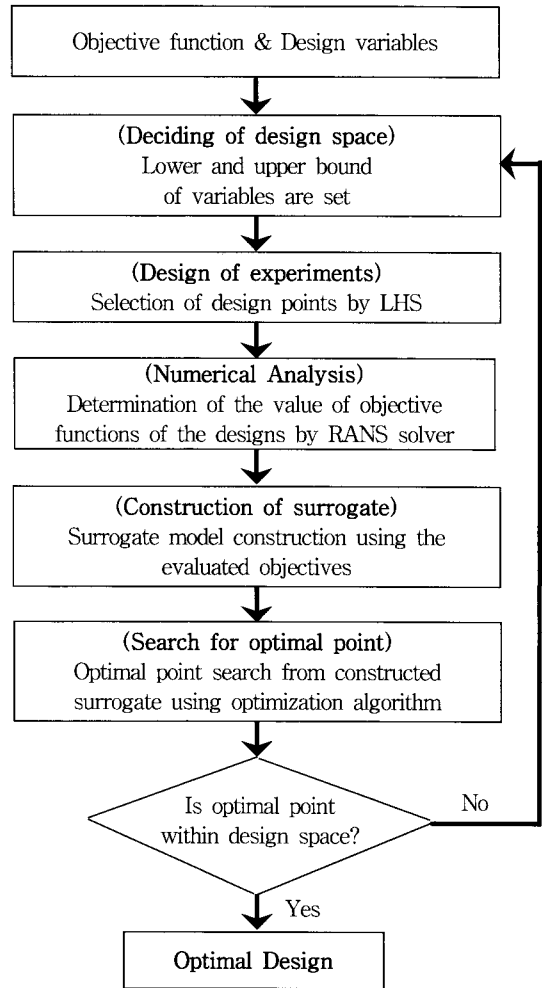


Fig. 4 Optimization procedure

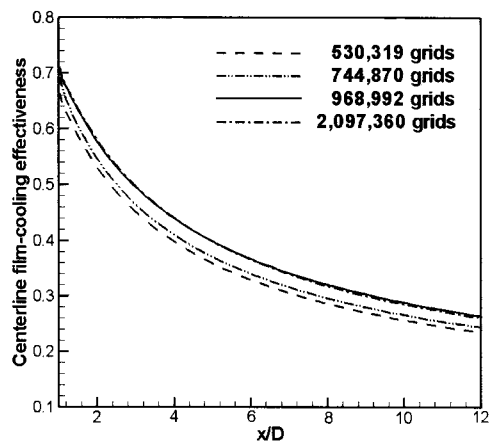


Fig. 5 Grid dependency test

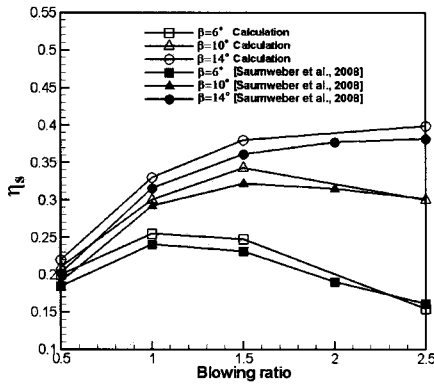


Fig. 6 Comparison between numerical and experimental results

이 방법을 사용할 경우의 가장 큰 장점은 함수의 선형성으로 인해 계산시간을 줄일 수 있다는 것이다. 이 함수에 대한 선형모델 f 는 N 개 기본함수들의 선형결합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \sum_{j=1}^N w_j y_j \quad (5)$$

여기서 w_j 는 가중치이고 y_j 는 기본함수이다. 기본함수를 선택하는 데는 여러 가지 방법이 있다. 만일 기본함수와 다른 변수들이 훈련과정에서 고정된 값을 가지면 모델은 선형이다. 그러나 기본함수가 훈련과정에서 변한다면 비선형 모델이 된다. 학습과정은 다차원 공간에서 훈련 데이터를 가장 잘 맞추는 곡면을 찾는 과정과 동일하고, 이 곡면은 최적화의 기반이 되는 자료곡면이 된다. SQP(Sequential quadratic programming)가 자료곡면 상에서 최적점을 찾기 위한 방법으로 사용되었다.

RBNN과 같은 대리모델을 구성하기 위해서는 설계공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있다. 이 점들을 얻기 위해 실험계획법이 사용되는데, 본 연구에서는 실험계획법으로 Latin hypercube sampling (LHS)⁽²²⁾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.

5. 결과 및 검토

우선 수치해가 격자수의 영향을 받지 않는 최소의 격자수를 찾기 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 약 5.3×10^5 와 2.0×10^6 개의 격자점 사이에서 격자의존성 테스트를 수행하였으며, 이 결과를 통해 최적의 격자점을 결정하였다. 선택된 최적의 격자계는 x, y, z 방향으로 메인채널이 $190 \times 33 \times 80$ 의 점들로 구성되었고, 홀과 냉각유체 공급채널은 각각 $48 \times 98 \times 48$ 과 $151 \times 20 \times 80$ 로 구성되었으며, 총 격자점의 수는 968,992이다.

최적설계에 앞서 유동해석의 타당성을 검증하기 위해 같은 형상($L/D=6.0, \alpha=30^\circ$)에 대해 Saumweber와 Schulz⁽⁴⁾의 실험결과와 비교하여 Fig. 6과 7에 나타내었다. Fig. 6은 분사율과 측면방향 확장각의 변화에 따른 평균 막냉각 효율의 분포를 나타낸다. 수치해석결과는 분사율과 측면방향 확장각에 따라 실험치와 비교해 0.01~0.03 높은 값을 예측하였으나, 전체적으로 실험치와 상당히 유사한 경향을 보이며 막냉각 효율에 끼치는 분사율과 홀의 확장각의 영향을 잘 예측하고 있다. Fig. 7은 분사율 ($M=0.5$ 와 2.5)과 측면방향 확장각 ($\beta=6^\circ$ 와 14°)에 따른 막냉각 면에서의 막냉각 효율의 분포를 나타낸다. 일반적으로 행형상의 홀에 의한 막냉각은 내부에서 발생하는 "jetting effect"에 의해 홀의 디퓨저 중앙에 박리가 발생하게 되고, 그로 인해 높은 막냉각 효율을 보이는 영역이 두 갈래로 나뉘어져 분포하게 된다⁽⁶⁾. Fig. 7에 나타난 수치해석결과는 이러한 영향을 잘 보여주고 있으며, 홀의 측면방향 확장각이 6° 일 때 이러한 경향이 사라지는 것 역시 잘 예측함에 따라 실험결과와도 좋은 일치성을 보여주고 있다.

각 설계변수의 영향을 평가하기 위해 예비계산을 수행하였으며, 이를 Fig. 8에 나타내었다. 넓은 범위에서 설계변수들의 변화에 따른 평균 막냉각 효율을 측정하였으며, 이 결과를 토대로 최적설계를 수행하기 위한 설계변수의 범위를 결정하였다.

막냉각 효율에 영향을 미치는 변수로는 홀의 형상, 분사율, 주유동의 난류강도 등이 있다. 일반적으로 막냉각을 위해서는 압축기로부터 추출된 고압의 냉각공기가 사용되어지며, 냉각을 위한 과도한 양의 압축공기의 사용은 가스터빈의 효율의 감소를 수반하게 된다. 따라서 적은 양의 냉각유체로 높은 효율을 얻기 위해 본 연구에서는, Fig. 1에 나타난 행형상의 막냉각 홀을 대상으로 낮은 분사율 ($M=0.5$)에서의 최적설계를 수행하였으며, 그 외의 조건은 동일한 상태에서 최적설계를 수행하였다. Table 1에 나타난 설계영역 내에서 LHS를 사용하여 선택한 20가지 형상에 대한 유동해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 식 (5)로 제시된 RBNN의 반응함수를 구성하였다.

원형상 막냉각홀의 신경회로망 기법을 이용한 최적설계

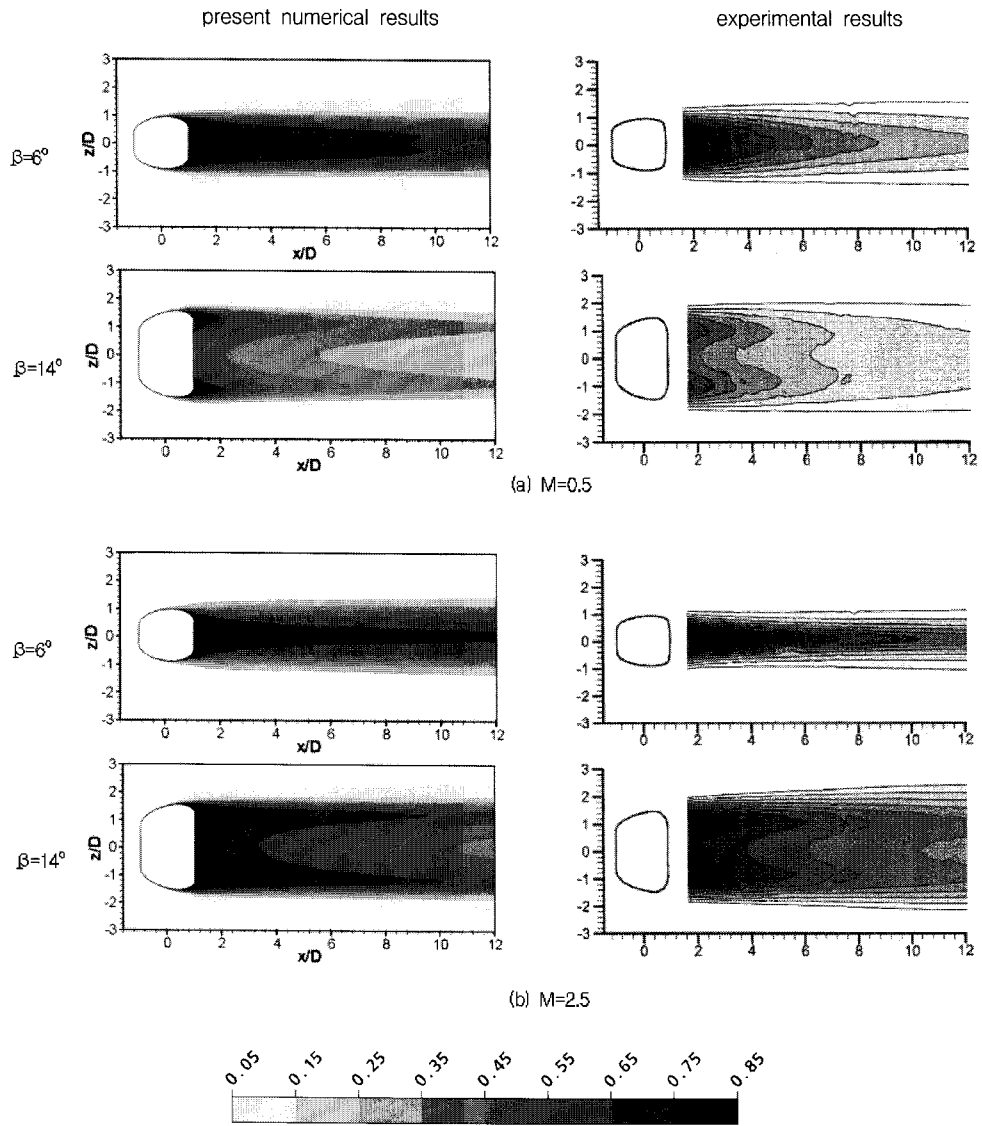


Fig. 7 Film-cooling effectiveness distributions ($L/D=6.0$, $\alpha=30^\circ$)

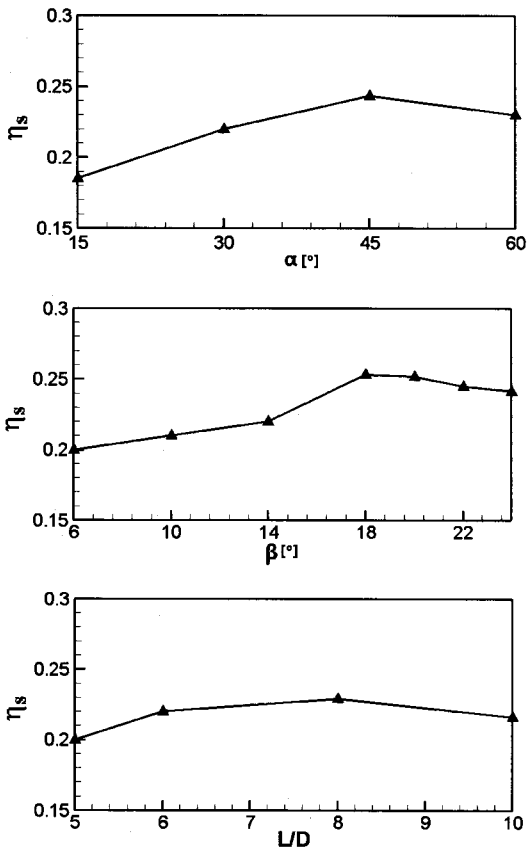


Fig. 8 Effect of design variables on the spatially-averaged film-cooling effectiveness of a fan-shaped hole (M=0.5)

Table. 2는 기준형상과 최적형상에 대한 설계변수와 목적함수의 값을 보여준다. Saumweber 와 Schulz⁽⁴⁾에 의해 발표된 형상이 기준형상으로 사용되었다. 막냉각면에서의 평균 막냉각효율로 정의된 목적함수값은 최적형상이 기준형상과 비교해 18.0 % 증가하였으며, RBNN을 통해 예측된 값은 RANS 해석결과와 비교해 0.1% 이하의 오차를 보이며, 뛰어난 예측의 정확성을 보여주었다. 세 가지 설계변수들의 값은 기준형상과 비교해 공히 높은 값을 보였다.

Table 2 Results of optimization (M=0.5)

	Design variables			η_s	
	α (°)	β (°)	L/D	RANS	RBNN
Reference	30.00	14.00	6.00	0.2201	-
Optimized	42.38	19.55	7.45	0.2598	0.2622

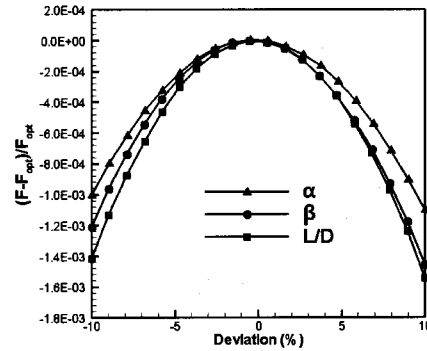


Fig. 9 Sensitivity analysis of objective function for optimal shape

Fig. 9는 각 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 분석을 나타낸다. 여기서 설계변수의 변화를 나타내는 x축의 'Deviation'은 최적값인 '0'을 기준으로 $\pm 10\%$ 범위 내에서 변화하고, 하첨자 opt는 최적형상을 나타낸다. 이 결과로부터 목적함수는 최적점 근처에서 α 보다 β 와 L/D에 보다 더 민감하게 반응함을 알 수 있다.

Fig. 10은 기준형상과 최적형상의 막냉각 효율을 나타낸다. 그래프의 좌측은 막냉각면 중앙선에서의 막냉각 효율을 나타내고, 우측은 다음과 같이 정의되는 측면방향으로 평균한 막냉각 효율(laterally-averaged film-cooling effectiveness)의 분포를 나타낸다.

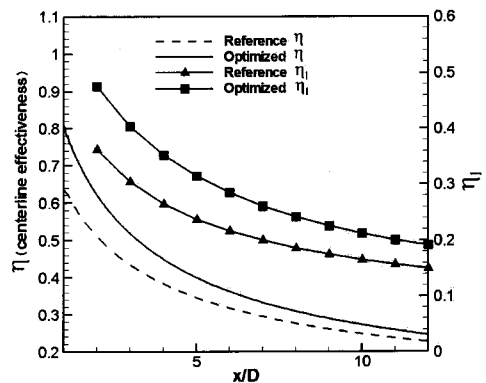


Fig. 10 Axial distributions of film-cooling effectiveness

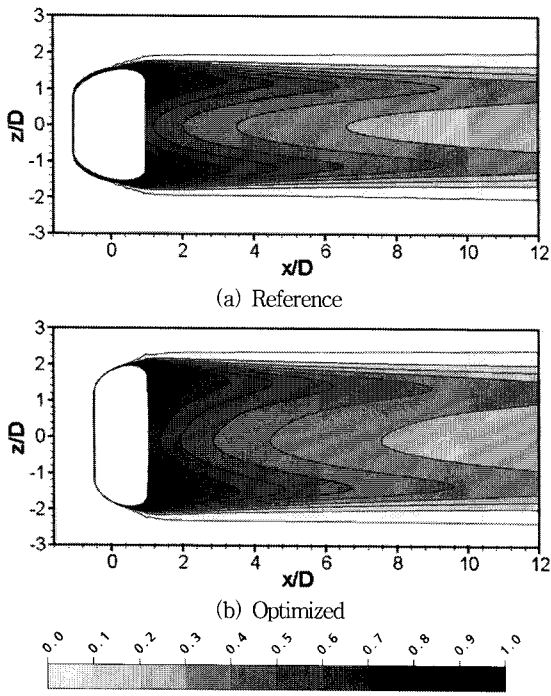


Fig. 11 Film-cooling effectiveness

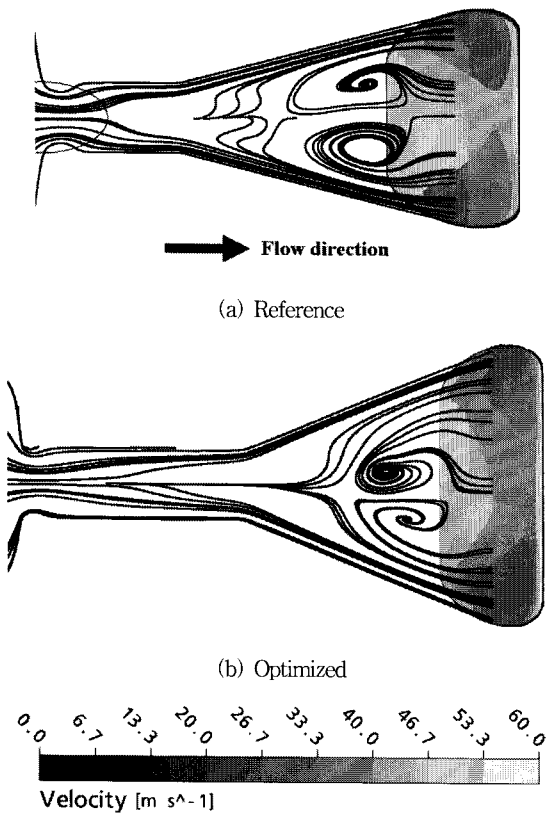


Fig. 12 Velocity distributions at exit of hole and streamlines on the plane passing through the center of cooling hole

$$\eta(x/D) = \frac{1}{6} \int_{-3}^3 \eta(x/D, z/D) d(z/D) \quad (6)$$

그림을 통해 최적화된 형상이 기준형상과 비교해 중앙선의 경우 0.05~0.14, 측면방향으로 평균한 경우 0.03~0.1 만큼 상승한 막냉각 효율을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 막냉각면에서의 기준형상과 최적형상의 막냉각 효율 분포를 나타낸다. 기준형상과 비교해 최적형상에서 높은 막냉각 효율을 보이는 영역이 넓게 분포함에 의해 전반적으로 높은 막냉각 효율을 보이고 있으며, 특히 막냉각 홀의 출구 부근 근처에서 높은 막냉각 효율을 보인다.

Fig. 12는 홀 출구에서의 속도분포와 홀의 중앙을 지나는 평면에서의 유선분포를 나타낸다. 그림을 통해 홀의 디퓨저 부분의 중앙에서 역압력 구배에 의한 박리가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 홀 출구의 양 끝단 영역에서 낮은 속도 분포를 보이고 중앙 부분은 높은 속도 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

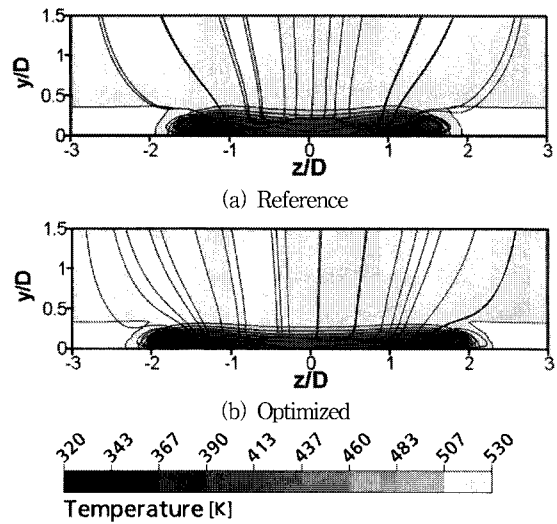


Fig. 13 Streamlines and temperature contours on the y-z plane at x/D=2

최적형상의 경우 기준형상과 비교해 원통형 홀의 영역이 길어짐에 따라 보다 더 균일한 유동을 보이며, 이로 인해 기준형상이 최적형상과 비교해 출구에서 더 큰 속도차이를 보인다. 특히 최적형상과 비교해 출구 앞쪽 끝단의 중앙부분에서 높은 속도분포를 보이고 있다.

Fig. 13은 x/D=2인 위치에서 y-z평면의 온도분포와 유선 분포를 보여주고 있다. 유선 및 온도분포를 살펴보면, 중앙부분에서 유동이 막냉각면으로부터 분리되면서 상대적으로 높은 속도분포를 보이고 있는 것을 확인할 수 있으며, 최적형상과 비교해 기준형상에서 이러한 효과가 더 크게 발생하고 있

다. 이는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 중앙부분의 높은 속도에 의해 야기되며, 이로 인해 Fig. 11에 나타난 바와 같이 막냉각 면의 중앙부분에서 낮은 막냉각 효율을 보이는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 행형상의 막냉각 홀에 대해 삼차원 RANS 해석을 바탕으로 대리모델인 RBNN을 사용한 최적화기법을 사용하여 막냉각 효율을 상승시키기 위한 수치최적설계를 수행하였다. 분사율 및 형상에 따른 계산 결과는 실험결과의 특성을 잘 나타내며, 만족할 만한 결과를 보여주었다. 세 가지 기하학적 설계변수에 대해 LHS를 사용하여 20개의 실험점을 얻었으며, 이 점들에서 평가한 목적함수 값을 바탕으로 최적설계를 수행함으로써 신뢰할 만한 최적치를 얻었다. 목적함수는 막냉각 효율로 정의하였고, 민감도 분석결과 목적함수는 홀의 분사각도(α) 보다 홀의 측면방향 확장각(β)과 홀 길이 대 지름의 비(L/D)에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 최적형상의 설계변수 값은 기준형상과 비교해 공히 큰 값을 보였으며, α , β , L/D가 각각 42.38°, 19.55° 그리고 7.45 로 결정되었다. 최적형상의 수치해석 결과 최적형상은 기준형상에 비해 냉각유체가 막냉각면에 넓게 분포하였으며, 중앙에서 냉각유체가 분리되는 현상이 감소되면서 평균 막냉각 효율이 18.0% 증가하였다. RANS해석을 통해 얻은 최적형상의 목적함수값은 RBNN기법을 통해 예측한 최적점의 목적함수값과 비교해 0.1%이하의 오차를 보이며, 뛰어난 예측성능을 보여주었다. 본 연구를 통해 3차원 해석과 체계적인 최적화기술을 사용한 수치최적설계기술을 막냉각 홀의 형상최적화에 도입함으로써 효과적이고 경제적인 최적설계를 수행할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, S., 1998, "Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes With Expanded Exits," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 549~556.
- (2) Saumweber, C., Schulz, A., and Wittig, S., 2003, "Free-stream Turbulence Effects on Film Cooling With Shaped Holes," ASME Journal of Turbomachinery, Vol.

- 125, pp. 65~73.
- (3) Ryu, W. T., Kim, D. K., Kim, D. S., Kim, K. S., and Yoon, S. H., 2002, "The Characteristics of Film-Cooling Effectiveness on a Turbine-Blade -Shaped Surface," Trans. Of KSME(B), Vol. 26, No. 3, pp. 384~392.
- (4) Saumweber, C., and Schulz, A., 2008, "Effect of Geometry Variations on the Cooling Performance of Fan-Shaped Cooling Holes," ASME Turbo Expo 2008, Berlin, GT2008-51038.
- (5) Reiss, H., and Bolcs, A., 2000, "Experimental Study of Showerhead Cooling on a Cylinder Comparing Several Configurations Using Cylindrical and Shaped Holes," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp. 161~169.
- (6) Saumweber, C., and Schulz, A., 2008, "Free-Stream Effects on the Cooling Performance of Cylindrical and Fan-Shaped Cooling Holes," ASME Turbo Expo 2008, Berlin, GT2008-51030.
- (7) Walter, D. K., and Leylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics: Part1-Streamwise Injection with Cylindrical Holes," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp. 102~112.
- (8) Lutum, E., and Johnson, B. V., 1999, "Influence of the Hole Length-to-Diameter Ratio on Film Cooling With Cylindrical Holes," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 121, pp. 209~216.
- (9) Burd, S. W., Kaszeta, R. W., and Simon, T. W., 1998, "Hole L/D and Turbulence Intensity Effects," Journal of Turbomachinery, Vol. 129, pp. 791~798.
- (10) Yuen, C. H. N., and Martinex-Botas, R. F., 2003, "Film cooling characteristics of a single round hole at various streamwise angle in a crossflow: Part1 effectiveness," Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 221~235.
- (11) Bernsdorf, M. G. Rose, and Abhari, R. S., 2005, "Modeling of Film Cooling-PART 1: Experimental Study of Flow Structure," ASME Turbo Expo, Nevada, GT2005-68783.
- (12) Bunker, R. S., 2005, "A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology," Journal of Heat Transfer, Vol. 127, pp. 441~453.
- (13) Bohn, D., and Moritz, N., 2003, "Numerical Parametric Study on Full Coverage Cooled Multi-Layer Plates," Proceeding of the International Gas Turbine Congress 2003, Tokyo, IGTC2003 Tokyo TS-84.
- (14) Hyams, D. G., and Leylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film Cooling Physics: Part3-Streamwise

- Injection With Shaped Holes," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp. 122~132.
- (15) Azzi, A., and Jubran, B. A., 2007, "Numerical modeling of film cooling from converging slot-hole," Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 381~388.
- (16) Miao, J. M., and Wu, C. Y., 2006, "Numerical approach to hole shape effect on film cooling effectiveness over flat plate including internal impingement cooling chamber," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 919~938.
- (17) Leedom, D. H., and Acharya, S., 2008, "Large Eddy Simulation of Film Cooling Flow Field From Cylindrical and Shaped Holes," ASME Turbo Expo 2008, Berlin, GT2008-51009.
- (18) Mahmood, S., Kassab, A. J., and Divo, E., 2005, "Film Cooling Effectiveness from a Single Scaled-Up Fan-Shaped Hole: A CFD Simulation of Adiabatic and Conjugate Heat Transfer Models," ASME Turbo Expo, Nevada, GT2005-68431.
- (19) Vanderplaats, G. V., 1984, "Numerical optimization techniques for engineering design with applications," New York: McGraw-Hill.
- (20) 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 Science, Vol. 41, pp. 1~28.
- (21) Orr, M. J. L., "Introduction to radial basis neural networks," Center for cognitive science, Edinburgh University, Scotland, UK.
- (22) JMP ® 5.1, 2004, SAS Institute, Inc.
- (23) CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006.
- (24) Menter, F., and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction," 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), UberlandiaBrazil.
- (25) Wilcox, D. D., 1986, "Multiscale model for turbulent flows," In AIAA 24th Aerospace Science Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- (26) Bardina, J. E., Huang, P. G., and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," Fluid Dynamics Conference 28th, AIAA Paper 1997-2121.
- (27) MATLAB ®, The language of technical computing, Release 14, The Math Works Inc.
- (28) Lee, S. W., Lee, S. J., and Ro. R. T., 1994, "Experimental Study on the Flow Characteristics of Streamwise Inclined Jets in Crossflow in Flat Plate," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 97~105.
- (29) Haven, B. A., and Kurosaka, M., 1997, "Kidney and anti-Kidney vortices in crossflow jets," Fluid Mech., Vol. 352, pp. 27~64.