

신경회로망기법을 사용한 원통형 막냉각 홀의 최적설계

이 기 돈* · 김 광 용†

(2008년 8월 28일 접수, 2008년 10월 29일 수정, 2008년 11월 12일 심사완료)

Design Optimization of a Cylindrical Film-Cooling Hole Using Neural Network Techniques

Ki-Don Lee and Kwang-Yong Kim

Key Words: Film-Cooling(막냉각), Design Optimization(최적설계), RBNN Method(레이디얼베이스 신경회로망 기법), Film-Cooling Effectiveness(막냉각 효율), Heat Transfer(열전달)

Abstract

This study presents a numerical procedure to optimize the shape of cylindrical cooling hole to enhance film-cooling effectiveness. The RBNN 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 hole length-to-diameter ratio and injection angle are chosen as design variables and film-cooling effectiveness is considered as objective function which is to be maximized. Twelve training points are obtained by Latin Hypercube Sampling for two design variables. In the sensitivity analysis, it is found that the objective function is more sensitive to the injection angle of hole than the hole length-to diameter ratio. Optimum shape gives considerable increase in film-cooling effectiveness.

1. 서 론

터빈입구온도를 상승시킴으로써 가스터빈 엔진의 효율과 성능을 높일 수 있으므로, 최근 가스터빈엔진은 높은 입구온도에서 작동되도록 설계되고 있다. 따라서 높은 온도로부터 터빈 블레이드를 보호하기 위한 다양한 냉각기법들이 연구, 개발되고 있다. 그 중 막냉각(film-cooling) 방법은 블레이드 표면과 일정한 각도를 이루는 홀(hole) 또는 슬릿(slot)을 통해 냉각유체를 분사하여 블레이드 표면에 막을 형성함으로써 고온의 주유동가스로부터 표면을 보호하는 방법이다. 이 방법은 매우 효과적인 냉각성능으로 인해 가장 보편적으로 사용되고 있다.

막냉각 효율에 영향을 미치는 변수로는 확장각을 가지는 홀의 형상, 분사율(blowing ratio), 주유동과 분사제트의 밀도비, 주유동의 난류강도, 홀의 길이 대 직경비(L/D), 분사각도 등이 있으며, 그 동안 실험 및 수치해석을 통해 이러한 변수들의 변화에 따른 막냉각 특성에 대한 많은 연구가 수행되었다. Saumweber 등⁽¹⁾은 원통형 홀, 측면방향으로 확장된 형태의 홀, 그리고 측면방향 및 주 유동방향으로 확장된 형태의 홀에 대해서 난류강도 및 분사율에 따른 막냉각 특성을 연구하였으며, Walters와 Leylek⁽²⁾은 실험 및 수치해석을 통해 원통형 막냉각 홀에 대한 연구를 하여 와류의 분석을 바탕으로 한 유동구조 및 특성을 보고하였다. Hale 등⁽³⁾은 길이가 짧은 홀에 대해 L/D, 분사각도에 따른 막냉각 효율을 측정하였으며, Lutum과 Johnson⁽⁴⁾은 L/D의 변화(1.75~18)에 따른 막냉각 효율을 측정하여 L/D가 5미만일 때는 길이가 길어짐에 따라 효율이 상승하지만 5이상일

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : kykim@inha.ac.kr
TEL : (032)872-3096 FAX : (032)868-1716
* 인하대학교 대학원 기계공학과

경우엔 큰 차이가 없다고 보고하였다. Burd 등⁽⁵⁾은 홀의 L/D와 난류강도에 따른 막냉각 특성을 연구하였으며, Yuen과 Martinez-Botas⁽⁶⁾와 Rhee 등⁽⁷⁾은 실험을 통해 원통형 막냉각 홀 형상에 대해 분사율과 분사각도에 따른 막냉각 효율의 특성을 연구하였다. Mahmood 등⁽⁸⁾은 측면방향으로 확장된 형태의 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)은 계산상의 경제성과 설계영역의 특성을 잘 나타낸다는 장점으로 인해 여러 분야에서 최적화를 위한 수단으로 널리 사용되어왔다. Queipo 등⁽⁹⁾과 Li와 Padula⁽¹⁰⁾는 항공 우주분야에 응용되어 온 다양한 대리모델에 대한 조사를 수행하였으며, Samad 등^(11,12)은 열전달 촉진장치와 유체기계의 블레이드 형상을 여러 대리모델을 이용하여 최적화하여 각각의 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 원통형 막냉각 홀의 형상에 대해 막냉각 효율(film-cooling effectiveness)을 최대화하기 위한 수치최적설계를 수행하였다. 막냉각 효율의 계산은 삼차원 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 해석을 통해 수행하였으며, 실험 결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하였다. 최적화를 위한 대리모델로는 RBNN(radial basis neural network) 모델⁽¹³⁾을 사용하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 원통형 막냉각 홀을 통한 냉각유체의 삼차원 유동 및 열전달의 해석을 위해 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX 11.0⁽¹⁴⁾을 사용하였다. 이 코드는 범용의 전산유체역학 코드로서 RANS 방정식들을 유한 체적법으로 수치계산한다. 난류모델로는 SST 모델⁽¹⁵⁾을 사용하였으며 그 계산결과를 표준 k-ε 모델

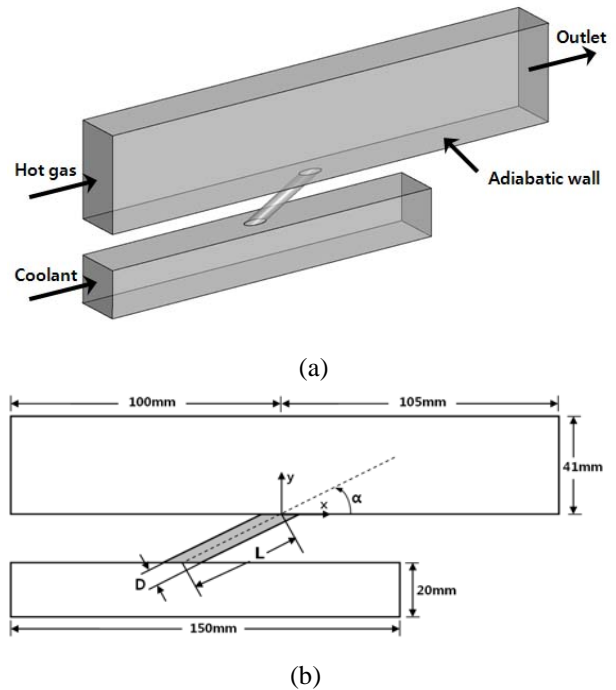


Fig. 1 Computational domain and geometric parameters

의 결과 및 실험결과와 비교하여 평가하였다. SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점을 취한 모델이다. 이 모델에서 k-ω 모델은 벽 근처에서 사용되고, k-ε 모델은 그 이외의 영역에서 사용된다. 따라서 SST 모델은 역압력구배로 인한 유동 박리의 예측이 상당히 뛰어나다고 Bardina 등⁽¹⁶⁾에 의해 보고된 바 있다.

계산영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 고온가스가 흐르는 주유로 (main channel), 냉각유체 공급유로 그리고 원통형 막냉각 홀로 구성하였으며, 홀 직경(D)은 5 mm, 유로의 폭은 20 mm이다.

계산에 사용된 격자계는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 육면체격자로 구성하였다. 유동장 및 온도의 변화가 크게 발생하는 벽 근처 영역은 다른 영역보다 조밀하게 격자를 구성하였고, 홀 영역에는 O형 격자계를 사용하였다. 격자수의 영향을 받지 않는 최소의 격자수를 찾기 위해 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 22만개~100만개의 격자점 사이에서 격자의존성 테스트를 수행하여 최적의 격자점을 결정하였다. 최적 격자계는 x, y, z 방향으로 주유로가 198×44×50, 냉각유체 공급유로가 143×44×20의 점들로 구성되었으며, 총 격자점의 수는 601,524이다.

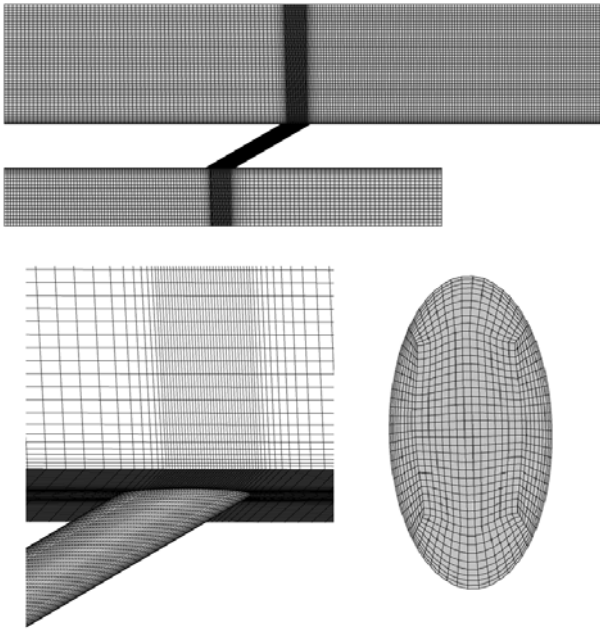


Fig. 2 Computational grids for analysis

작동유체는 공기이며, 경계조건으로 벽면에는 단열(adiabatic)조건과 점착(no-slip)조건을 적용하였고, 냉각유체 공급유로의 입구에는 유량조건을 부여하였다. 주유로의 입구에는 전압력(total pressure) 조건을, 출구에는 정압(static pressure) 조건을 주었으며, 고온가스의 마하수(Mach number)를 실험조건과 같은 0.3으로 맞추기 위해 입구의 전압력은 100,400 Pa, 출구의 정압력은 93,000 Pa로 고정하였다. 고온가스와 냉각유체의 온도는 각각 540 K, 310 K이며, 주유동의 난류강도(turbulence intensity)와 길이척도(length scale)는 각각 3.6%, 2.7D 이다.

3. 목적함수 및 설계변수

최적설계를 위해서는 설계변수와 목적함수의 선정이 우선되어야 한다. 막냉각 홀의 형상을 최적화하기 위한 목적함수는 막냉각 면에서 평균한 막냉각효율(η_s , spatially averaged film-cooling effectiveness)로서 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_s = \frac{\int_{-2}^2 \int_0^{20} \eta(x/D, z/D) d(x/D) d(z/D)}{4 \times 20} \quad (1)$$

Table 1 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
L/D	4	8
α	15°	40°

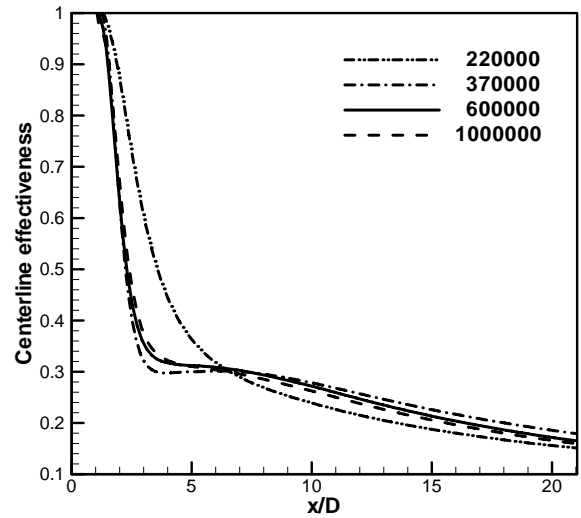


Fig. 3 Grid dependency test

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

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

Fig. 1에 나타난 막냉각 홀의 형상에서 홀의 길이 대 직경의 비 (L/D)와 홀의 분사각도 (α)를 최적설계를 위한 설계변수로 선정하였으며, 각 설계변수의 범위를 Table 1에 나타내었다. 설계변수의 범위를 결정하기 위해 홀의 길이 대 직경비는 2~10, 홀의 분사각도는 10°~80°의 범위 내에서 예비 계산을 수행하였으며, 최적화기법의 정확성을 높이기 위해 상대적으로 높은 냉각효율을 나타낸 영역인 4~8 (L/D), 15°~40° (α)로 각각의 설계변수 범위를 축소하였다.

4. 최적설계기법

원통형 막냉각 홀의 최적설계를 위해 신경회로망 기법의 일종인 RBNN 기법⁽¹³⁾을 사용하였다.

대리모형을 사용한 최적화 과정은 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. 대리모형, 즉 RBNN모형을 사용하여 자료곡면을 구성하고, 이 곡면 상에서 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다.

신경회로망의 기본개념은 경험으로부터 배우고 기존자료로부터 예측하는 인간의 기능을 모사하는 것이다. 신경회로망의 기본요소는 뉴런인데, 각 뉴런의 출력은 여기에 저장되었거나 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⁽¹⁷⁾의 함수 newrb를 사용하여 구성하였다. 여기서 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

이 방법을 이용할 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.

$$f = \sum_{j=1}^N w_j y_j \tag{5}$$

여기서 w_j 는 가중치이고 y_j 는 기본함수이다. 기본함수를 선택하는 데는 여러 가지 방법이 있다.

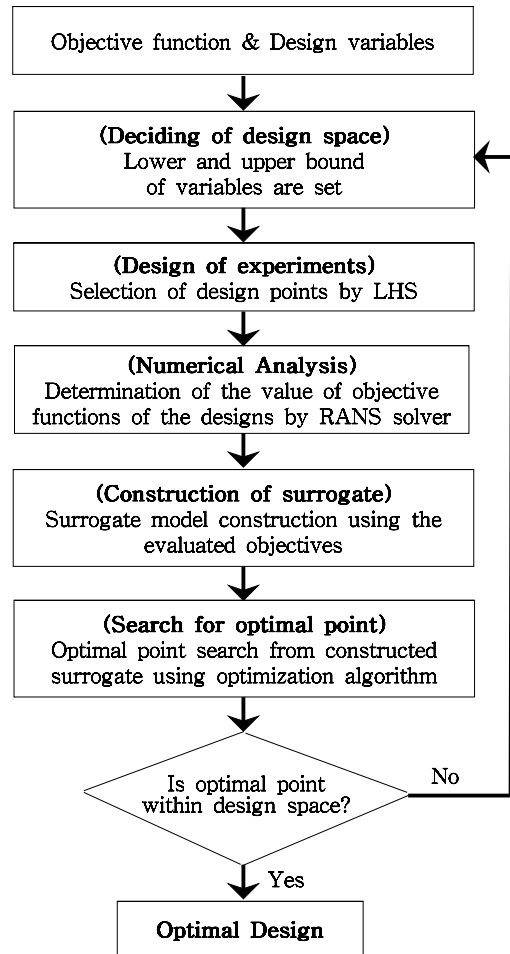


Fig. 4 Optimization procedure

만일 기본 함수와 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 대리모형을 구성하기 위해서는 설계공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있다. 이 점들을 얻기 위해 실험계획법 (design of experiment)이 사용되는데, 본 연구에서는 실험계획법으로 Latin Hypercube Sampling (LHS)⁽¹⁸⁾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

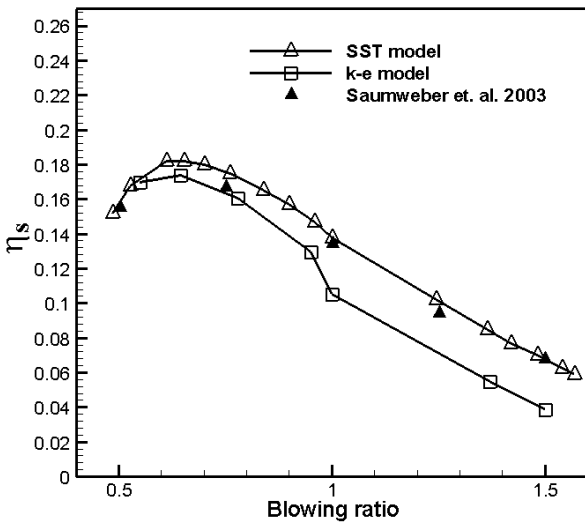


Fig. 5 Comparison between computational and experimental data for spatially averaged film-cooling effectiveness

각각은 Latin Hypercube를 구성하기 위해 임의로 짝지어진다. 결국 설계공간의 모든 부분을 대표하는 설계점들이 이 과정을 통해 얻어진다.

5. 결과 및 검토

최적설계에 앞서 난류모델과 유동해석의 타당성을 검증하기 위해 Saumweber 등⁽¹⁾의 실험과 동일한 조건에서 SST 모델을 사용해 얻은 결과를 그간 널리 사용되어 온 표준 k-ε 모델의 결과 및 실험결과와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 분사율에 따른 막냉각면에서의 평균막냉각효율을 나타내며 분사율의 정의는 다음과 같다.

$$M = \frac{\rho_2 U_2}{\rho_\infty U_\infty} \tag{6}$$

여기서 ρ_2 와 U_2 는 각각 냉각 유체가 분사되는 점에서 측정된 냉각유체의 밀도와 속도를 나타내며, ρ_∞ 와 U_∞ 는 각각 고온가스의 입구부근에서 측정된 밀도와 속도를 의미한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 k-ε 모델은 실험값과 비교해 전반적으로 낮은 값을 예측하였으며, 특히 난류의 발생이 큰 1.0 이상의 높은 분사율에서 실험값과 큰 차이를 보이고 있다. 이는 유선의 곡률이 큰 유

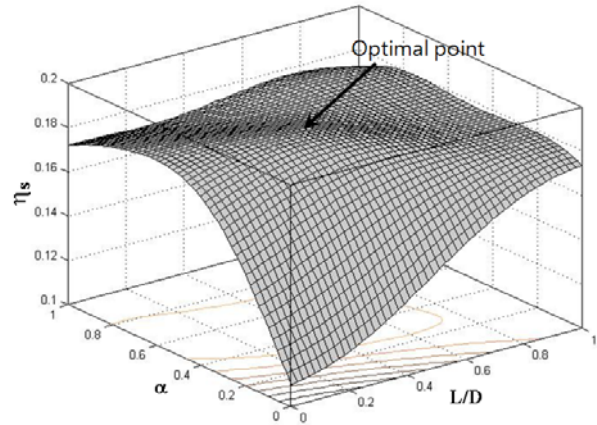


Fig. 6 Three-dimensional plot of RBNN

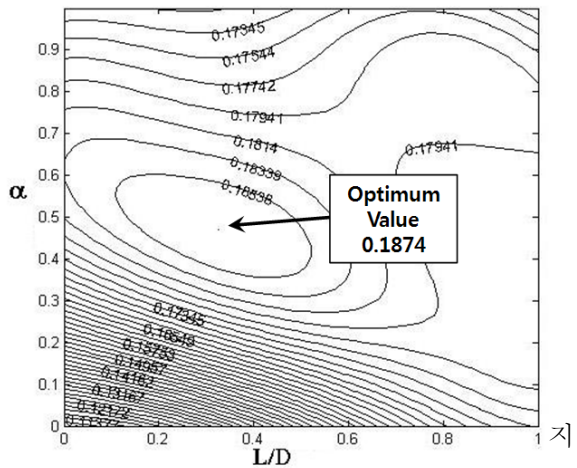


Fig. 7 Contour plot of RBNN

동영역에서 k-ε 모델이 실제보다 낮은 난류운동 에너지 생성을 예측하기 때문이라고 사료된다. 이에 반해 SST 모델은 다양한 분사율에서 실험값과 좋은 일치성을 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 원통형 막냉각 홀은 분사율이 0.65일 때 가장 좋은 막냉각 효율을 보여주었다. 따라서 최적설계를 위한 막냉각 홀의 분사율은 0.65로 결정하였다.

최적설계는 Fig. 1에 나타난 원통형 막냉각 홀의 형상을 대상으로 분사율이 0.65인 경우에 대해 수행하였다. Table 1에 나타난 설계영역 내에서 LHS를 사용하여 선택한 12가지 형상에 대한 유동해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 식 (5)로 제시된 RBNN의 반응함수를 구성하였다. Fig. 6과 7에 RBNN 모델 상의 최적점을 표시하였다. Fig. 6에서 바닥면의 두 축 좌표는 L/D와 α 의 값을 0과 1사이의 값으로 변환한 값을 나타

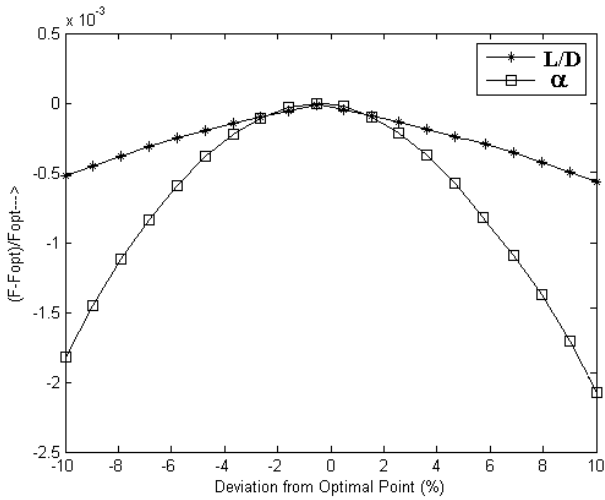


Fig. 8 Sensitivity analysis of objective function for optimal shape

낸다. 최적점은 (0.3385, 0.464862)에 위치함을 알 수 있다. 이 곡면 상에서 두 설계변수 L/D와 α 가 0에 접근할수록 구배가 크게 증가하여 목적함수 값이 급격하게 감소함을 알 수 있다. Fig. 7은 RBNN의 반응곡면을 이차원 설계변수 평면에 투영한 그래프를 보여준다. 이 그림에서도 최적점을 중심으로 상하로 나뉘어진 두 부분에서 목적함수의 구배가 크게 차이가 남을 알 수 있다.

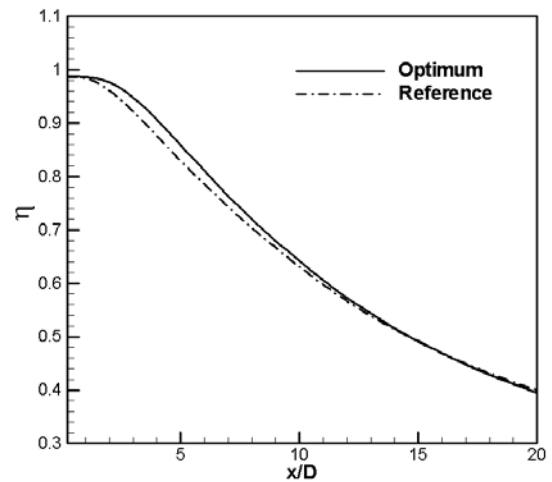
Table 2는 최적형상과 기준형상, 즉 실험조건⁽¹⁾의 형상에 대한 설계변수들과 목적함수의 값을 보여준다. 목적함수인 막냉각면의 평균막냉각효율은 기준형상에 비해 3.3% 증가하였으며, 최적 목적함수에 대한 RBNN의 예측값은 RANS 해석치와 비교해 약 0.2%의 작은 오차를 보이며 뛰어난 예측 성능을 보여주었다. L/D는 최적형상이 기준형상에 비해 미세하게 증가하였고 α 값은 3.38° 감소한 값을 보였다.

Fig. 8은 각 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 분석을 나타낸다. 여기서 설계변수의 변화를 나타내는 x축의 'Deviation from Optimal Point'는 최적값의 ±10% 범위 내에서 변화되고, 하첨자 opt는 최적형상을 나타낸다. 이 결과로부터 목적함수는 최적점 근처에서 L/D 보다 α 에 보다 더 민감하게 반응함을 알 수 있다.

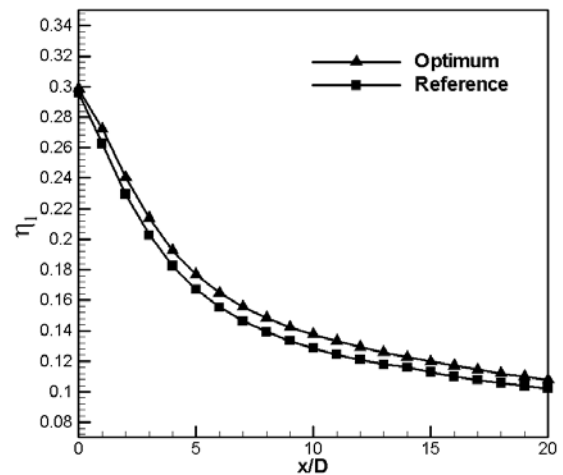
Fig. 9는 기준형상과 최적형상에서의 막냉각 효율 분포를 보여준다. Fig. 9(a)에서 막냉각면 중앙선에서 막냉각 효율을 살펴보면 $x/D=15$ 상류 영역에서 최적형상이 기준형상에 비해 높은 막냉각

Table 2 Results of optimization

	Design variables		Objective function	
	L/D	$\alpha(^{\circ})$	RANS	Surrogate
Reference	6.000	30.00	0.1810	-
Optimized	6.031	26.62	0.1870	0.1874



(a) Centerline film-cooling effectiveness



(b) Laterally averaged film-cooling effectiveness

Fig. 9 Film-cooling effectiveness distributions

효율을 보임을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 다음과 같이 정의되는 측면 방향(z)으로 평균한 막냉각 효율 (laterally averaged film cooling effectiveness)의 분포를 나타낸다.

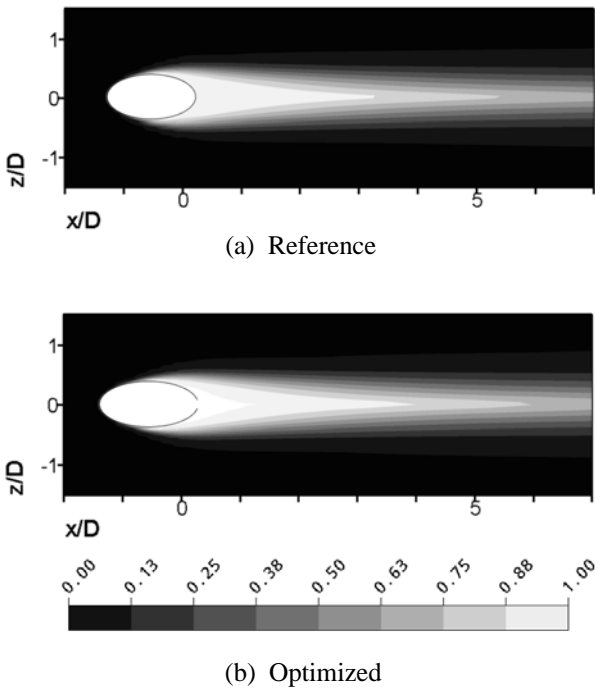


Fig. 10 Film-cooling effectiveness contours

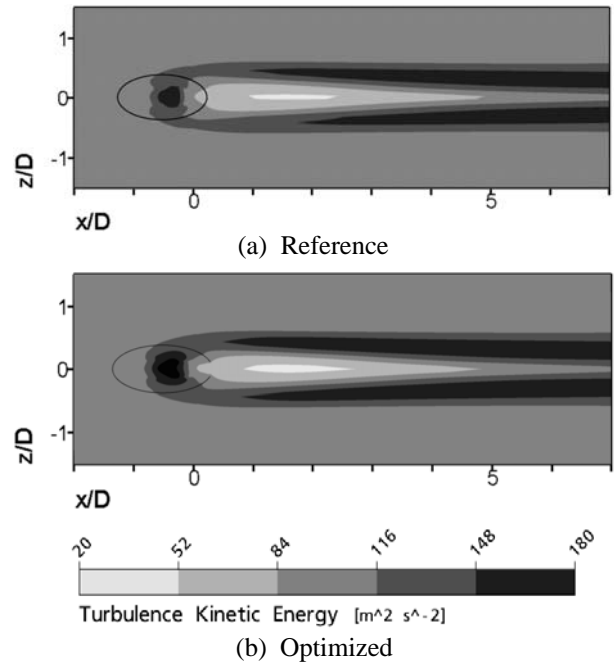


Fig. 11 Turbulence kinetic energy contours at $y/D=0.2$

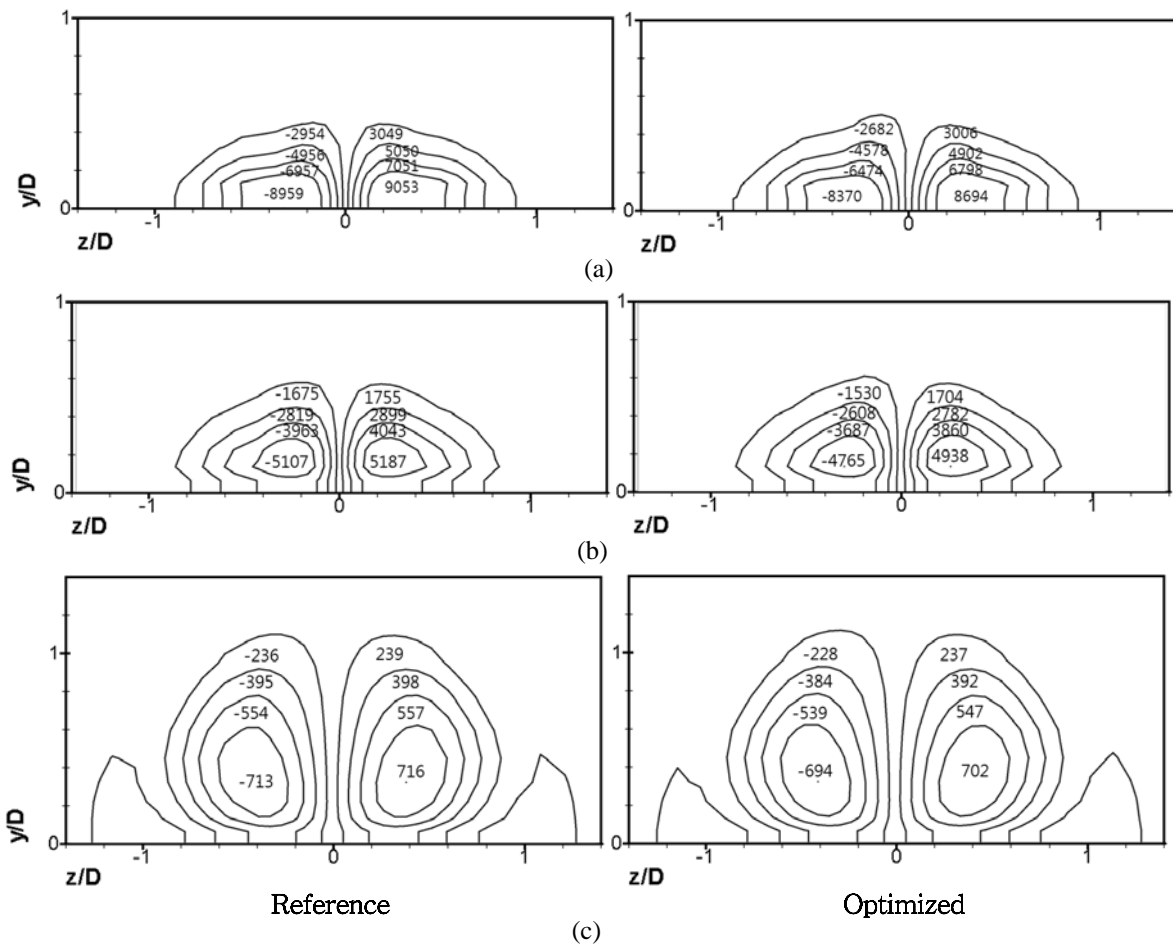


Fig. 12 Spanwise vorticity contours on $y-z$ planes: (a) $x/D=2$, (b) $x/D=4$, (c) $x/D=16$

$$\eta_l(x/D) = \frac{1}{4} \int_{-2}^2 \eta(x/D, z/D) d(z/D) \quad (7)$$

이 그림의 최적화된 형상의 측면방향 평균 막냉각 효율은 기준형상에 비해 홀의 상류 부근을 제외하고 전 영역에 걸쳐 0.005~0.009 만큼 상승된 값을 나타내고 있다.

Fig. 10은 막냉각면에서 기준형상과 최적형상의 막냉각 효율 분포를 나타낸다. 기준형상과 비교해 최적형상에서 고 막냉각효율 영역이 하류 방향으로 확장됨을 알 수 있다. Fig. 11은 막냉각면 근처 ($y/D=0.2$)에서의 난류운동에너지(turbulence kinetic energy) 분포를 보여주고 있다. 난류운동에너지의 증가는 난류열전달 성능의 향상과 밀접한 관련이 있으며, 그림을 통해 최적형상이 기준형상에 비해 홀 출구영역 및 하류에서 더 높은 난류운동에너지 분포를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 일반적으로 막냉각의 유동구조를 살펴보면, 주유동과 분사되는 냉각유체 사이의 마찰과 상호작용으로 인해 서로 다른 부호를 가진 콩팥와동(kidney and anti-kidney vortices)이 발생하는데, Fig. 11에서 하류의 난류운동에너지 분포가 콩팥와동의 존재로 인해 두 와동이 경계를 이루는 중심선 상에서 낮은 값을 갖고, 와동에 의한 원심력으로 난류운동에너지의 생성이 촉진되는 영역이 두 갈래로 나타나는 현상이 주목할 만하다. 와동의 세기가 약해지는 하류로 갈수록 이 두 갈래 영역은 서로 가까워지고 있다.

콩팥와동은 냉각유체를 막냉각면에서 분리시키는 역할을 하므로 막냉각 효율을 저하시키는 요인이 된다.^(2,19,20) Fig. 12는 기준형상과 최적형상의 $x/D=2, 4, 16$ 인 위치에서 y - z 평면 와동의 분포를 나타낸다. 서로 다른 부호를 가진 비대칭의 콩팥와동의 발생을 확인 할 수 있으며, 기준형상에 비해 최적형상에서 막냉각 성능을 저하시키는 콩팥와동의 와도(vorticity)가 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 원통형 막냉각 홀에 대해 삼차원 RANS해석을 바탕으로 대리모델을 사용하는 최적화기법인 RBNN기법을 사용하여 최적설계를

수행하였다. 분사율에 따른 계산 결과는 실험치와 만족할 만한 일치를 보였으며 이를 통해 최적의 분사율, 0.65를 도출하였다. 두 가지 기하학적 설계변수에 대해 12개의 실험점을 얻었으며 이 점들에서 평가한 목적함수 값을 바탕으로 최적설계를 수행함으로써 신뢰할 만한 최적치를 얻었다. 목적함수는 막냉각 효율로 정의하였고, 민감도 분석결과 목적함수는 두 가지 설계변수 중 분사각도에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 최적형상의 설계변수 값은 홀의 길이 대 직경 비와 분사각도가 각각 6.031, 26.62°로 결정되었다. 최적설계의 결과 최적형상은 기준형상에 비해 막냉각 효율이 3.3 % 증가하였으며, 효율을 저하시키는 와동의 크기가 줄어들었음을 확인할 수 있었다. RBNN기법을 통해 예측한 최적점의 목적함수값과 RANS해석을 통해 얻은 최적점의 목적함수값은 0.2%의 차이를 보이며, 뛰어난 예측성능을 보여주었다.

참고문헌

- (1) Saumweber, C., Schulz, A. and Wittig, S., 2003, "Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling With Shaped Holes," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 65~73.
- (2) Walters, D. K. and Lylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics : Part 1-Streamwise Injection with Cylindrical Holes," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp.102~112.
- (3) Hale, C. A., Plesniak, M. W. and Ramadhyani, S., 2000, "Film Cooling Effectiveness for Shore Film Cooling Holes Fed by a Narrow Plenum," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 553~557.
- (4) Lutum, E. and Johnson, B. V., 1999, "Influence of the Hole Length-to-Diameter Ratio on Film Cooling With Cylindrical Holes," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 209~216.
- (5) Burd, S. W., Kaszeta, R. W. and Simon, T. W., 1998, "Measurements in Film Cooling Flows: Hole L/D and Turbulence Intensity Effects," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 791~798.
- (6) Yuen, C. H. N. and Martinez-Botas, R. F., 2003, "Film cooling characteristics of a single round hole at various streamwise angles in a crossflow: Part 1

- effectiveness," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 221~235.
- (7) Rhee, D. H., Kim, B.G. and Cho, H. H., 1998, "Characteristics of Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness Around a Single Film Cooling Hole with Compound Injection Angles," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1433~1444.
- (8) 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," IGTI Turbo Expo, Nevada, Paper GT2005-68431.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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, No. 3, pp. 667~670.
- (12) Samad, A., Kim, K. Y., Goel, T., Haftka, R. T. and Shyy, W., 2008, "Multiple Surrogate Modeling for Axial Compressor Blade Shape Optimization," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 2, pp. 302~310.
- (13) M. J. L. Orr, Introduction to radial basis neural networks, Center for cognitive science, Edinburgh University, Scotland, UK. <http://anc.ed.ac.uk/rbf/>.
- (14) CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006.
- (15) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction," 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering(COBEM), Uberlandia, Brazil.
- (16) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," Fluid Dynamics Conference 28th, AIAA-1997-2121, AIAA Paper 97-2121.
- (17) MATLAB, The language of technical computing, Release 14, The Math Works Inc.
- (18) JMP 5.1, 2004, SAS Institute, Inc.
- (19) Lee, S. W., Lee, J. S. and Ro, S. T., 1994, "Experimental Study on the Flow Characteristics of Streamwise Inclined Jets in Crossflow on Flat Plate," *Journal of Turbomachinery*, Vol.116, pp. 97~105.
- (20) Haven, B. A. and Kurosaka, M., 1997, "Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 352, pp. 27~64.