

# 크리깅 기법을 이용한 원통형 막냉각 홀의 최적설계

이기돈<sup>†</sup>·김광용<sup>\*</sup>

## Shape Optimization of Cylindrical Film-Cooling Hole Using Kriging Method

Ki-Don Lee and Kwang-Yong Kim

**Key Words:** Film-Cooling(막냉각), Optimization(최적화), Kriging Method(크리깅 기법), Film-Cooling effectiveness(막냉각 효율)

### Abstract

Cylindrical film-cooling hole is formulated numerically and optimized to enhance film-cooling effectiveness. The Kriging method is used an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of fluid and heat transfer with shear stress transport model. The hole length-to-diameter ratio and injection angle are chosen as design variables and spatially averaged film-cooling effectiveness is considered as objective function which is to be maximized. Twelve training points obtained by Latin Hypercube Sampling for two design variables. Optimum shape shows the film-cooling effectiveness increased.

### 1. 서 론

막냉각(film-cooling) 방법은 블레이드 표면과 일정한 각도를 이루는 홀(hole)을 통해 냉각유체를 분사함으로써 블레이드 표면에 냉각유체에 의한 막을 형성하여 고온의 주유동가스로부터 블레이드 표면을 보호하는 방법으로서 터빈 블레이드 냉각방법 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법이다.

일반적으로 막냉각은 막냉각홀의 확장각, 분사율, 주유동과 분사제트의 밀도비, 주유동의 난류강도, 홀의 길이 대 직경비, 분사각도 등이 냉각 효율에 많은 영향을 받는다. 그동안 이상의 변수들에 대한 막냉각의 냉각성능 및 특성에 대한 많은 연구가 수행되어왔다. Saumweber 등<sup>(1)</sup>은 원통

형 홀, 측면 방향으로 확장된 형태의 홀, 그리고 측면방향 및 주 유동방향으로 확장된 형태의 홀에 대해서 난류강도 및 분사율에 따른 막냉각 특성을 연구하였으며, Walters와 Leylek<sup>(2)</sup>은 실험 및 수치해석을 통해 원통형 막냉각 홀에 대한 연구를 하여 와류의 분석을 바탕으로 한 유동구조 및 특성을 보고하였다. Hale 등<sup>(3)</sup>은 길이가 짧은 홀에 대해 L/D, 분사각도에 따른 막냉각 효율을 측정하였으며, Lutum과 Johnson<sup>(4)</sup>은 L/D의 변화(1.75~18)에 따른 막냉각 효율을 측정하여 L/D가 5미만일 때는 길이가 길어짐에 따라 효율이 상승하지만 5이상일 경우엔 큰 차이가 없다고 보고하였다. Burd 등<sup>(5)</sup>은 홀의 L/D와 난류강도에 따른 막냉각 특성을 연구하였으며, Yuen과 Martinez-Botas<sup>(6)</sup>와 Rhee 등<sup>(7)</sup>은 실험을 통해 원통형 막냉각 홀 형상에 대해 분사율과 분사각도에 따른 막냉각 효율의 특성을 연구하였다. Mahmood 등<sup>(8)</sup>은 측면방향으로 확장된 형태의 홀에 대한 수치해석을 통해 다양한 난류모델과 격자계를 이용한 결과를 비교하여, 난류모델은 SST 모델과 realizable k- $\epsilon$  모델, 그리고 격자계는 육면체격자

<sup>†</sup> 인하대학교 대학원 기계공학과

E-mail : leekd@inhaian.net

TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

<sup>\*</sup> 회원, 인하대학교 기계공학과

를 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.

크리깅(Kriging) 모델을 비롯한 대리 모델들은 계산상의 경제성과 설계영역의 특성을 잘 나타낸다는 장점으로 인해 여러 분야에서 최적화를 위한 수단으로 널리 사용되어왔다.

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 크리깅(Kriging) 모델<sup>(9)</sup>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<sup>(10)</sup>을 사용하였다. 이 코드는 범용의 전산유체역학 코드로서 RANS 방정식들을 유한 체적법으로 수치계산한다. 난류모델로는 SST (Shear Stress Transportation)<sup>(11)</sup> 모델을 사용하였다.

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

계산에 사용된 격자계는 육면체격자로 구성하였다. 유동장 및 온도장의 변화가 크게 발생하는 벽 근처 영역은 다른 영역보다 조밀하게 격자를 구성하였고, 홀 영역에는 O형 격자계를 사용하였다. 격자수의 영향을 받지 않는 최소의 격자수를 찾기 위해 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 601,524 이다.

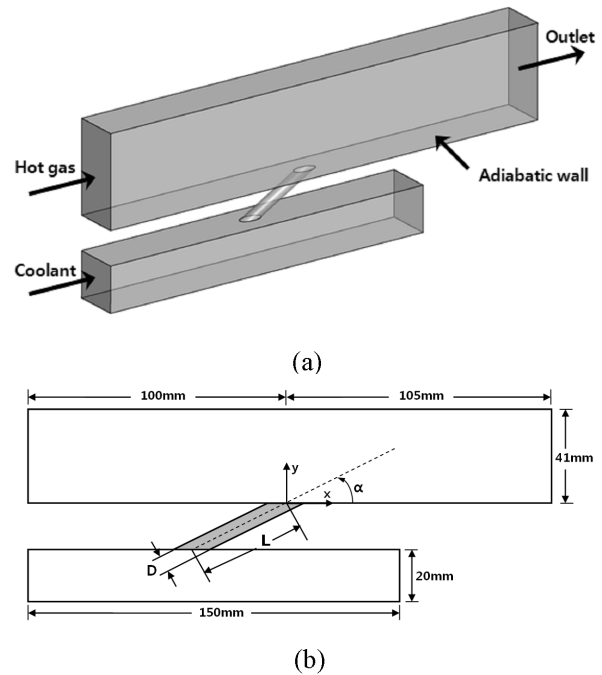


Fig. 1 Computational domain and geometric parameters

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 100,400Pa, 출구의 정압력은 93,000Pa 로 고정하였다. 고온가스와 냉각유체의 온도는 각각 540K, 310K이며, 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 평균막냉각효율 ( $\eta_s$ , spatially averaged film-cooling effectiveness)로서 다음과 같이 정의된다.

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

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

여기서,  $T_{aw}$ 는 단열벽면온도를 의미하며,  $T_{\infty}$ 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 ( $\alpha$ )를 최적설계를 위한 설계변수로 선정하였으며, 각 설계변수의 범위를 Table 1에 나타내었다. 설계변수의 범위는 예비계산을 수행하여  $4 \sim 8(L/D)$ ,  $15^\circ \sim 40^\circ(\alpha)$ 로 각각의 설계변수 범위를 결정하였다.

#### 4. 최적설계기법

크리깅 메타모델(Kriging metamodel)로 알려진 KRG 모델<sup>(9)</sup>은 최적화를 위한 대리모델 기법의 일종이다. Gauss 상관함수를 사용한 선형 다항식 함수가 이 모델의 구축을 위해 사용되었다. 크리깅의 가정은 다음과 같이 전역모델  $f(x)$ 와 이탈  $Z(x)$ 의 합으로 나타낸다.

$$F(x) = f(x) + Z(x) \quad (3)$$

여기서  $F(x)$ 는 미지의 함수이고,  $f(x)$ 는  $x$ 의 알려진 함수, 그리고  $Z(x)$ 는 평균은 영(zero)이지만 공분산을 갖는 확률적인 과정의 실현이다.  $f(x)$ 는 전역적인 설계공간을 나타내고  $Z(x)$ 는 국부적인 분산을 나타낸다. 공분산 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$cov(z(x_i), z(x_j)) = \sigma^2 \exp\left(-\sum_{k=1}^N \Theta_k (x_i^k - x_j^k)^2\right) \quad (4)$$

여기서  $N$ 은 설계변수  $x$ 의 집합에서 차원의 수이고,  $\sigma$ 는 모집단의 표준편차이며,  $\Theta_k$ 는  $k$ 방향 데이터의 상관도를 나타낸다.

#### 5. 결과 및 검토

최적설계에 앞서 난류모델과 유동해석의 타당성을 검증하기 위해 Saumweber 등<sup>(1)</sup>의 실험과 동일한 조건에서 SST 모델을 사용해 얻은 결과

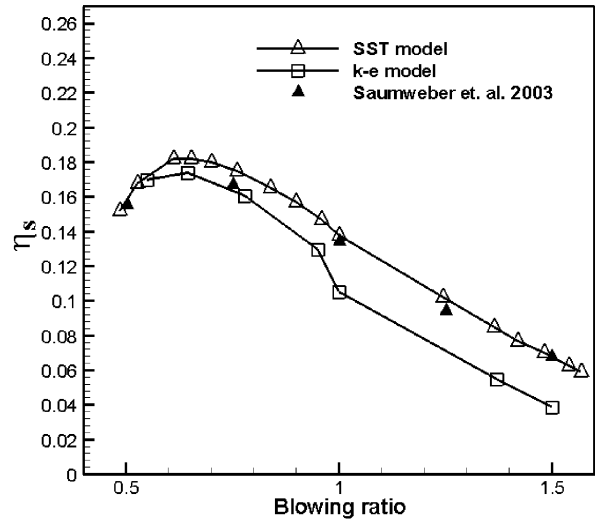


Fig. 2 Comparison between computational and experimental data for spatially averaged film-cooling effectiveness

를 그간 널리 사용되어 온 표준  $k-\epsilon$  모델의 결과 및 실험결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. SST 모델이  $k-\epsilon$  모델에 비해 실험값에 더 접근하는 경향을 보이며, 분사율이 0.65일 때 가장 좋은 막냉각 효율을 보여주었다. 따라서 최적화를 위한 분사율은 0.65로 결정하였다.

Table 1은 최적형상과 기준형상에 대한 설계변수들과 목적함수의 값을 보여준다. 목적함수인 막냉각면의 평균막냉각효율은 기준형상에 비해 3.6% 증가하였으며, 최적 목적함수에 대한 KRG의 예측값은 RANS해석치와 비교해 약 2%의 오차를 보였다.  $L/D$ 는 최적형상이 기준형상에 비해 1.219증가하였고  $\alpha$ 값은  $6.04^\circ$  감소한 값을 보였다. Fig. 3은 기준형상과 최적형상의 막냉각면 중앙선에서의 막냉각 효율을 나타내며,  $x/D=15$  상류 영역에서 최적형상이 기준형상에 비해 높은 막냉각 효율을 보임을 알 수 있다.

Table 1 Results of optimization

	Design variables		Objective function	
	$L/D$	$\alpha$	RANS	Surrogate
Reference	6.000	$30.00^\circ$	0.1810	-
Optimized	7.219	$23.96^\circ$	0.1876	0.1839

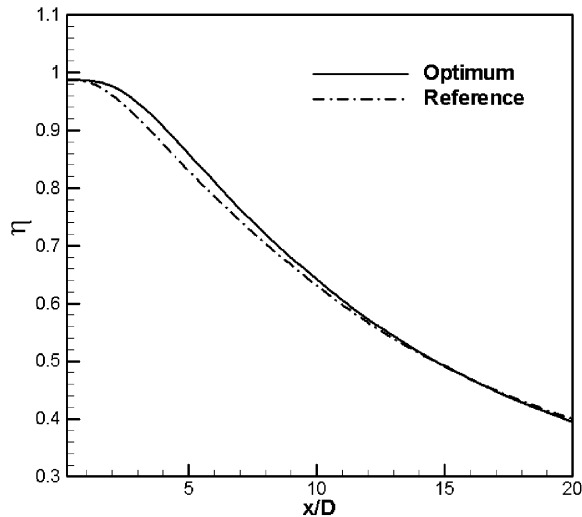


Fig. 3 Centerline film-cooling effectiveness

## 5. 결론

본 연구에서는 원통형 막냉각 홀에 대해 삼차원 RANS 해석을 바탕으로 대리모델을 사용하는 최적화 기법인 RBNN 기법을 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, 최적형상의 설계변수 값은 홀의 길이 대 직경 비와 분사각도가 각각 7.219, 23.96°로 결정되었다. 최적설계의 결과 최적형상은 기준형상에 비해 막냉각 효율이 3.6% 향상된 결과를 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) Lophaven, S. N., Nielsen, H. B. and Sondergaard, J., 2002, "a MATLAB Kriging Toolbox," *Technical Report IMM-TR2002-12*.

(10) CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006.

(11) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction," *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering(COBEM)*, Uberlandia, Brazil.