



## 곡면에서의 열전달성능 향상을 위한 충돌제트의 최적설계

허 만 용<sup>1</sup>, 이 기 론<sup>1</sup>, 김 광 용<sup>2\*</sup>

### Design Optimization of an Impingement Jet on Concave Surface for Enhancement of Heat Transfer Performance

M.W. Heo, K.D. Lee and K.Y. Kim

In the present work, a numerical study of fluid flow and heat transfer on the concave surface with impinging jet has been performed by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) equations. The constant temperature condition was applied to the concave impingement surface. The inclination angle of jet nozzle and the distance between jet nozzles are chosen as design variables under equivalent mass flow rate of working fluid into cooling channel, and area averaged Nusselt number on concave impingement surface is set as the objective function. Thirteen training points are obtained by Latin Hypercube sampling method, and the PBA model is constructed by using the objective function values at the training points. And, the sequential quadratic programming is used to search for the optimal point from the PBA model. Through the optimization, the optimal shape shows improved heat transfer rate as compared to the reference geometry.

**Keywords:** 전산유체역학(CFD), 수치최적화(Numerical Optimization), 충돌제트(Impinging Jet), 삼차원 레이놀즈 평균 나비어-스톡스 방정식(Three-Dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation), 누셀트 수(Nusselt Number)

### 1. 서 론

일반적으로, 충돌제트기술은 큰 강제대류 열전달율을 발생시키기 때문에 다른 내부냉각기술들보다 높은 열전달계수를 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 이유 때문에 충돌제트기술은 터빈 블레이드의 내부냉각시스템을 포함한 여러 열전달분야에 널리 사용되고 있다. 특히, 높은 온도의 자동유체에 의해 매우 큰 열부하가 발생되는 블레이드의 전연부에 사용되고 있으며, 충돌제트시스템의 열유동 특성을 파악하기 위한 여러 실험 및 수치적 연구들이 수행되어왔다. 가스터빈 블레이드 내부냉각유로에서 전연부 냉각을 위해 적용된 충돌제트유동은 일반적으로 평판에서의 유동특성과 차이를 보인다. Fenot 등[1]은 제트출구와 충돌면사이의 거리와 곡면의 곡률의 변화에 따른

충돌제트시스템의 곡면에서의 열전달 특성을 조사하기 위한 실험을 수행하였다. Lee 등[2]은 제트출구와 충돌면사이의 거리와 기울어진 제트노즐의 기울기 각도변화에 따른 열유동 특성을 조사하였고, 그들은 정체점의 누셀트수는 제트출구와 곡면사이의 거리가 제트노즐 홀의 직경에 대해 6배일 경우에 최대값을 갖는다는 것을 확인하였다. 또한, Kumar 와 prasad[3]는 오목한 형상을 대상으로 충돌제트의 열유동 특성을 조사하기 위하여 수치해석을 수행하였고, Alvarea 등[4]은 엇갈리게 분사되도록 제트노즐을 배열시킨 상태에서 실함과 수치해석의 결과치들을 비교였다. 이들은 수치해석을 위한 난류모델로 실험치와의 비교를 통해 SST 모델을 추천하였다.

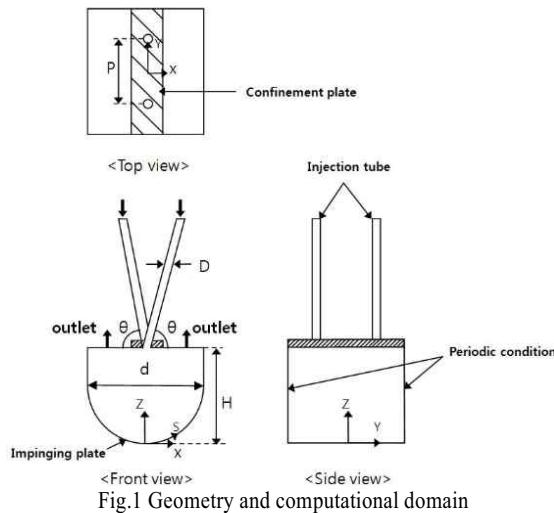
위에서 언급한 것처럼 충돌제트의 형상변수에 따른 열유동 특성을 조사하기 위한 많은 연구들이 수행되었다. 하지만, 충돌제트의 성능향상을 위한 최적화를 수행한 연구는 매우 드물다. 최근에, Heo 등[5]은 단일충돌제트시스템에 대한 성능향상을 위한 최적화를 통해 약 7.89%만큼 열전달율이 향상된 최적형상을 도출했다. 이와 같이, 유동장과 열전달에 대한 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS)해석을 통한 수치최적화

1 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학부

\* TEL : 032) 860-7317

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



방법은 여러 열전달 분야의 성능향상을 돋기 위해 반드시 필요한 과정이라고 할 수 있었다.

이번 연구에서는, 수치해석을 통해 제트노즐들 사이의 거리와 노즐기울기각도의 변화에 따른 곡면에서의 충돌제트 열유동 특성을 조사하였다. 그리고 PBA 대리모델[6]을 사용하여 두 개의 설계변수를 고려한 곡면에서의 충돌제트에 대하여 열전달성능을 향상시키기 위한 형상최적설계를 수행하였다.

## 2. 유동해석방법

본 연구에서는 블레이드 전연부 내부냉각유로의 형상을 고려하여 오목면에 충돌제트시스템의 삼차원 유동 및 열전달 특성을 RANS 방정식을 통해 해석하였다. 해석을 위해 상용 CFD코드인 ANSYS CFX 11.0을 사용하였고, 난류해석을 위해 SST 난류모델을 적용하였다.

이번 연구에서 고려한 기준형상[1]은 Fig. 1과 같다. 주기조건을 적용하여 그림에 나타낸 것과 같이 두 개의 노즐만을 포함한 영역에 대하여 계산을 수행하였다. 노즐 홀의 직경( $D$ )에 대한 체널의 높이( $H$ )와 충돌면의 직경( $d$ )은 각각 7배와 10배이다. 격자계는 비정렬 육면체격자로 구성하였으며, SST 난류모델의 저레이놀즈수 모델을 적용하기 위하여, 벽면으로부터 첫 번째 격자점을  $y^+$ 가 2이하가 되도록 위치시켰다. 그리고 제트유동의 정확한 예측을 위하여 충돌이 발생되는 영역에 격자를 조밀하게 구성하였다.

경계조건으로는 노즐입구에 등온의 균일유속 조건을 부여

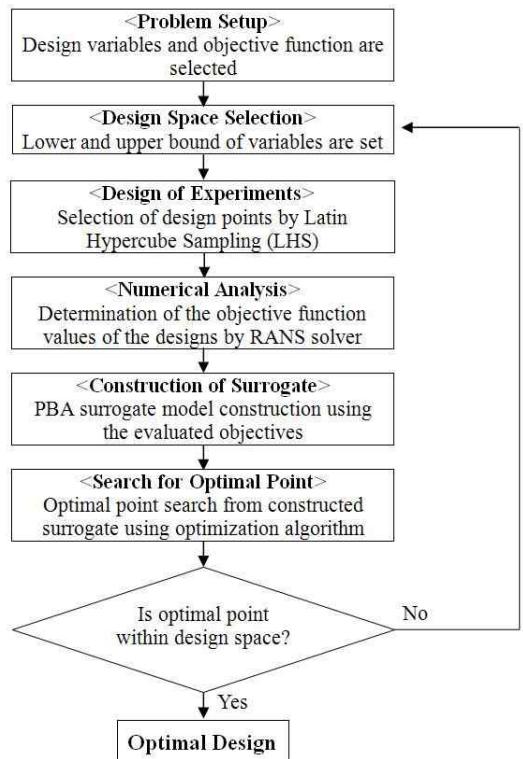


Fig.2 Optimization procedure

하였고 출구에는 일정한 압력조건을 적용하였다. 모든 벽면에는 접착(no-slip)조건을 갖고 제트유동과 충돌면의 온도차는 38°C이며 작동유체는 이상기체로 가정하였다.

## 3. 설계변수와 목적함수

곡면에 대한 충돌제트의 형상변수가 Fig. 1에 나타나있다. 최적화를 위해 제트노즐 홀에 대한 노즐들 사이의 거리의 비( $P/D$ )와 기울어진 노즐의 기울기 각도( $\theta$ )가 설계변수로 선택되었다.  $P/D$ 의 경우에는 노즐 홀의 직경을 고정시키고 노즐사이의 거리만 변화시켰다. 목적함수는 곡면에서의 면적평균 누셀트수를 결정하였고, 이를 최대화시키기 위한 형상 최적화를 수행하였다. 목적함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}D}{\lambda} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 열전도율이고 면적평균 열전달계수는 다음과 같이 정의된다.

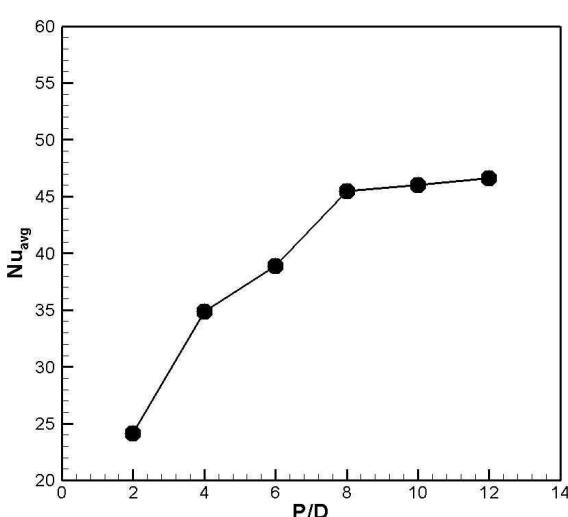


Fig.3 Area averaged Nusselt number with jet to jet spacing

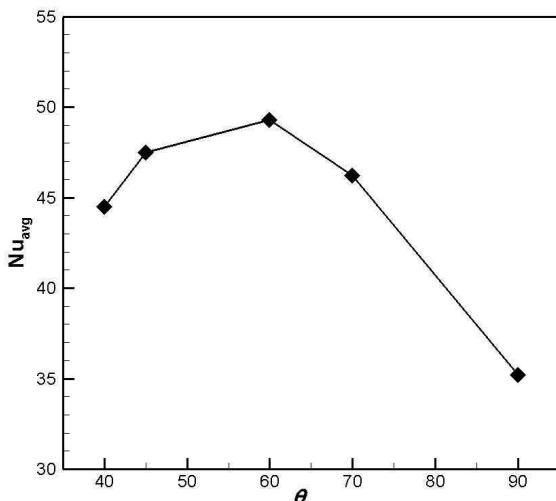


Fig.4 Area averaged Nusselt number with angle of inclined jet nozzle

Table. 1 Results of the design optimization

	Reference	Optimal design
P/D	4	8.074
θ	90°	59.088°
Objective Fn: PBA	-	53.946
Objective Fn: RANS	34.874	55.198
Enhancement	-	58.28%

$$\bar{h} = \frac{\int_{-\frac{\pi D}{4}}^{\frac{\pi D}{4}} \int_0^{2P} \frac{q}{T_j - T_w} dy ds}{A} \quad (2)$$

$q$ 는 열유속이고,  $T_j$ 와  $T_w$ 는 각각 제트유동과 벽면의 온도를 나타낸다. 그리고  $A$ 는 곡면의 면적이다.

#### 4. 최적화 방법

최적화 과정을 Fig. 2에 순서대로 나타내었다. 우선 설계변수와 목적함수를 선택하고 각각의 설계변수에 대한 설계영역 ( $P/D:4\sim12$ ,  $\theta:40\sim90$ )을 결정한다. 이후 실험계획법(experiments)을 통하여 설계영역 내에서 13개의 실험점을 얻고 각 실험점에서 유동해석을 통해 목적함수를 계산한다. 각 실험점에서 계산된 목적함수를 PBA 대리모델을 사용하여 자료곡면을 구성한다. PRESS(predicted error sum of squares)-Based Averaging (PBA) 모델은 이차다항식인 반응면 (RSA) 모델과 크리깅 (KRG) 모델 그리고 신경회로망 (RBNN) 모델을 가중 평균한 모델이다. PBA 모델이 구성된 후에 최적화 알고리즘을 통하여 찾은 최적점이 설계영역 내에 존재하면 최적화 과정은 종료된다.

#### 5. 결과 및 검토

Fig. 3은 90도의 제트노즐 기울기에서 노즐들 사이의 거리 변화에 따른 목적함수 값의 변화를 보여준다. 채널로 유입하는 전체질량유량을 고정시키기 위하여 노즐피치가 변화할 때 단일노즐로 유입되는 유량을 조절하였다. 예를 들어,  $P/D=8$ 의 경우는  $P/D=4$ 의 경우보다 단일노즐로 두 배의 질량유량을 유입시켰다. 반대로,  $P/D=2$ 의 경우는  $P/D=2$ 의 것보다 절반의 질량유량이 유입된다.  $P/D<8$ 에서는 노즐 피치의 증가에 따라 목적함수 값이 크게 증가하는 경향을 보이지만  $8$  이상에서는 목적함수 값의 변화가 거의 보이지 않는다. 이는 제트유동이 곡면에 충돌 후에 생성되는 재순환유동이 노즐피치가  $8$  이상부터는 윗벽에 닿을 만큼 충분히 크게 형성되어 노즐피치가 증가하여도 목적함수 값은 크게 변하지 않는 것으로 판단된다. Fig. 4는 노즐피치가  $4$ 의 경우에서 기울어진 노즐의 기울기 각도변화에 따른 목적함수 값의 변화를 보여준다. 기울기가  $60$ 도의 경우에 목적함수 값이 최대값을 가짐을 확인할 수 있고, 이는 재순환유동이 가장 크게 형성되기 때문에 열전달 성능이 가장 좋은 것으로 판단된다. Table. 1은 최적형상에 대해 대리모델을 통해 예측된 목적함수 값과 RANS 해석 결과 값을 나타낸다. 최적화를 통해 최적점은  $P/D=8.074$ ,  $\theta=59.088^\circ$

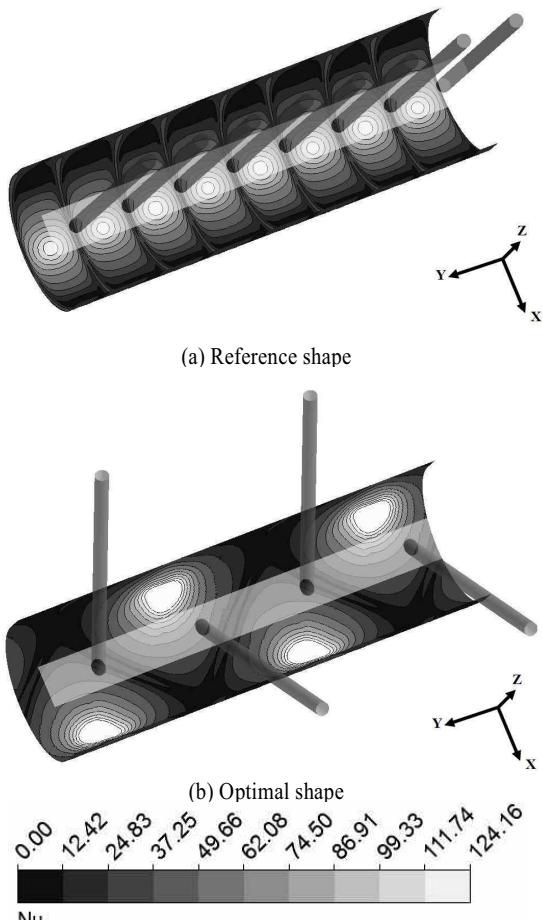


Fig. 5 Nusselt number contours on the concave surface

에서 발견되었고, PBA 모델에 의해 예측된 목적함수 값은 53.946으로 최적형상은 기준형상에 비해 58.28%만큼 향상된 결과를 보였다. Fig. 5는 기준형상과 최적형상의 곡면위에서의 누설트수 분포를 보여준다. 최적형상의 경우 기준형상에 비해 노즐피치가 증가하였고 이는 단일노즐에 더 많은 질량유량을 유입시켜 유동의 분사속도를 증가시킨다. 증가된 속도의 제트 유동은 충돌면에 열전달성능을 향상시킨다. 또한, 기울어진 노즐은 더 큰 재순환유동을 형성시킨다. 결국, 속도가 증가된 제트유동과 더 큰 재순환유동을 갖는 최적형상은 기준형상에 비해 향상된 열전달 성능을 보임을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 삼차원 RANS 해석과 대리모델을 사용한 최적화 기법을 바탕으로 곡면에 대한 충돌제트의 열전달 성능을 향상시키기 위한 형상최적설계를 수행하였다. 제트노즐들의 피치와 기울어진 노즐의 기울기 각도를 설계변수로 선정하였고, 이들과 각 설계점들에서 계산된 목적함수 값을 바탕으로 PBA 대리모델을 구축하였다. PBA 대리모델을 사용한 최적설계결과의 목적함수 값을 기준치와 비교하여 약 58.28% 증가시킴으로써, 곡면에서의 열전달성능을 크게 향상시킬 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 '다중현상 CFD연구센터(ERC)'의 과제로 수행된 연구임(No.20090083510).

## 참고문헌

- [1] 2008, Fenot, M., Dorgnac, E. and Vullierme, J.J., "An Experimental Study on Hot Round Jets Impinging a Concave Surface," *International Journal of heat and Fluid Flow*, Vol.29, pp.945-956.
- [2] 2007, Lee, C.H., Lim, K.B., Lee, S.H., Yoon, Y.J. and Sung, N.W., "A Study of the Heat Transfer Characteristics of Turbulent Round Jet Impinging on an Inclined Concave Surface Using Liquid Crystal Transient Method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.31, pp. 559-565.
- [3] 2006, Kumar, B.V.N.R. and Prasad, B.V.S.S.S., "Computational Investigation of Flow and Heat Transfer for a Row of Circular Jets Impinging on a Concave Surface," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2006*, GT2006-90851.
- [4] 2008, Alvarez, J.J., de la Calzada, P. and Krulic, G., "Heat Transfer and Flow Characteristics of a Leading Edge Impingement Cooling System for Low Pressure Turbine Vanes," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*, GT2008-50142.
- [5] 2011, Heo M.W., Lee K.D. and Kim K.Y., "Optimization of an Inclined Elliptic Impinging Jet with Cross Flow for Enhancing Heat Transfer," *Heat Mass Transfer*, published online.
- [6] 2007, Goel T., haftka R.T., Shyy W. and Queipo N.V., "Ensemble of Surrogates," *Structural and Multidisciplinary optimization*, Vol.33, No.2, pp.199-216.