



## 터빈 블레이드 냉각시스템에 관한 수치해석적 연구

김 광 용,<sup>\*1</sup> 이 기 돈,<sup>2</sup> 문 미 애,<sup>2</sup> 허 만 응,<sup>2</sup> 김 현 민,<sup>2</sup> 김 진 혁,<sup>2</sup> Afzal Husain<sup>2</sup>

## NUMERICAL STUDY OF TURBINE BLADE COOLING TECHNIQUES

K.Y. Kim,<sup>\*1</sup> K.D. Lee,<sup>2</sup> M.A. Moon,<sup>2</sup> M.W.Heo,<sup>2</sup> H.M. Kim,<sup>2</sup> J.H. Kim<sup>2</sup> and A. Husain<sup>2</sup>

*This paper presents numerical analysis and design optimization of various turbine blade cooling techniques with three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) analysis. The fluid flow and heat transfer have been performed using ANSYS-CFX 11.0. A fan-shaped hole for film-cooling has been carried out to improve film-cooling effectiveness with the radial basis neural network method. 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. The impingement jet cooling has been performed to investigate heat transfer characteristic with geometry variables. Distance between jet nozzle exit and impingement plate, inclination of nozzle and aspect ratio of nozzle hole are considered as geometry variables. The area averaged Nusselt number is evaluated each geometry variables. A rotating rectangular channel with staggered array pin-fins has been investigated to increase heat transfer performance and to decrease friction loss using KRG modeling. Two non-dimensional variables, the ratio of the height diameter of the pin-fin and ratio of the spacing between the pin-fins to diameter of the pin-fins selected as design variables. A rotating rectangular channel with staggered dimples on opposite walls are formulated numerically to enhance heat transfer performance. The ratio of the dimple depth and dimple diameter are selected as geometry variables.*

**Key words :** 전산유체역학(CFD), 막냉각(Film Cooling), 충돌제트냉각(Impingement Jet Cooling), 내부냉각(Internal Cooling), 열전달(Heat Transfer)

## 1. 서 론

가스터빈의 효율을 향상시키고 고온의 작동유체로부터 터빈 블레이드를 보호하기 위하여 다양한 냉각 기법이 연구되어 왔다. 그 결과 막냉각(Film cooling), 충돌냉각(Impingement cooling), 내부냉각유로(Internal cooling) 등과 같은 다양한 냉각 기법들이 개발 및 발전되어 블레이드 냉각에 응용되고 있다.

막냉각은 고온가스과 접촉하는 부품 표면과 일정한 각도를 이루는 막냉각 홀을 통해 냉각유체를 유출시켜 저온의 얇은 막을 형성하여 고온의 가스로부터 블레이드를 보호하는 방법이다. 막냉각은 홀의 형태에 따라 다양한 냉각 성능을 나타내

므로, 막냉각 효율(film cooling effectiveness)을 높이기 위해 다양한 홀 형상의 냉각 성능에 대한 연구가 이루어지고 있다. 충돌제트냉각은 대류냉각의 한 형태로, 노즐을 통해 분사된 냉각유체를 블레이드 내부 벽에 충돌시켜 냉각효과를 극대화하는 냉각방식이다. 충돌제트냉각은 국소적으로 매우 높은 냉각효과를 얻을 수 있기 때문에 블레이드 전연면과 같이 열부하가 크게 작용하고 공간이 제한되는 부분에 주로 사용된다. 내부냉각유로를 이용한 대류냉각방식은 블레이드 내부에 열전달 촉진장치(리브, 핀, 뎀플 등)를 설치하여 열전달 성능을 향상시킴으로써 블레이드에 전달되는 열을 흡수·방출시키는 역할을 하게 된다. 열전달 촉진장치가 장착된 내부냉각유로의 경우 열전달 성능의 향상과 더불어 압력 손실을 유발하게 되고, 그 종류에 따라 다양한 유동 특성을 가지게 된다.

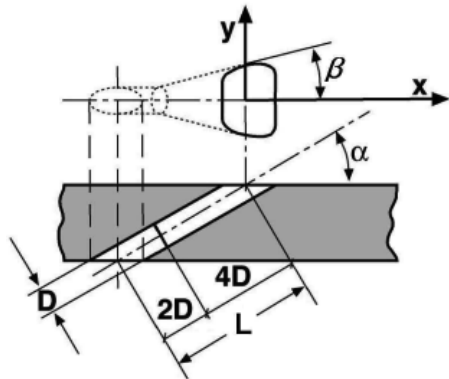
1 정희원, 인하대학교 기계공학과

2 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

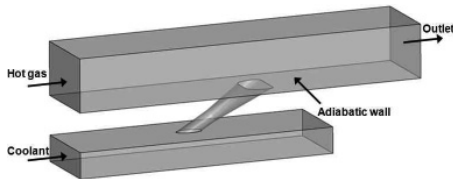
\* TEL : (032) 872-3096

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

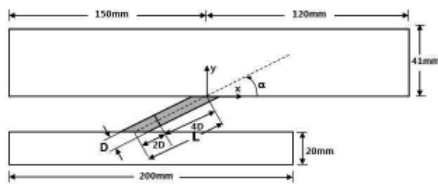
## 2. 수치해석방법



(a) Fan-shaped hole geometry



(b) Boundary conditions



(c) Computational domain

Fig. 1 Geometry of fan-shaped hole

본 연구에서는 다양한 냉각기술의 삼차원 유동 및 열전달 해석을 위해 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX-11.0[1]을 사용하였다. 난류모델로는 SST 모델[2]과 standard k-ε 모델[3]을 사용하였다.

### 3. 경계조건

#### 3.1 막냉각

작동유체는 공기이며, 주유로의 입구에는 속도조건을 부여하였으며, 냉각유체 공급유로의 입구에는 유량조건을 부여하

Table 1 Results of optimization (M = 0.5)

|           | Design variables   |                   |      | $\eta_s$ |        |
|-----------|--------------------|-------------------|------|----------|--------|
|           | $\alpha(^{\circ})$ | $\beta(^{\circ})$ | L/D  | RANS     | RBNN   |
| Reference | 30.00              | 14.00             | 6.00 | 0.2201   | -      |
| Optimized | 42.38              | 19.55             | 7.45 | 0.2598   | 0.2622 |

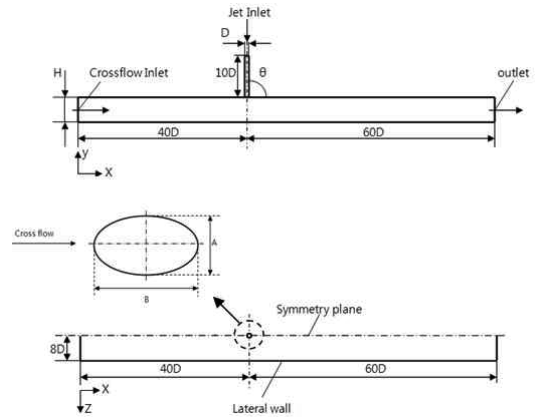


Fig. 2 Computational domain and geometric variables

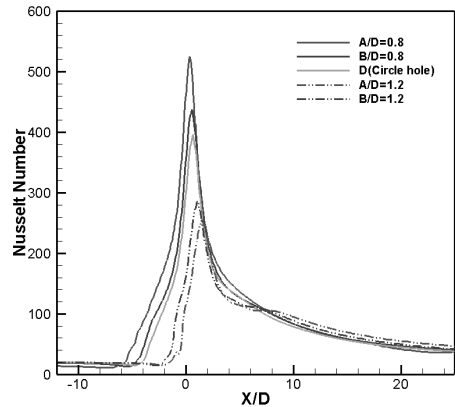


Fig. 3 Nusselt number distribution with aspect ratio

였다. 주유로의 출구에는 정압력조건을, 측면 벽면에는 주기 조건을 부여하였다. 고온가스의 마하수(Mach number)를 실험 조건[4]과 같은 0.6으로 동일하게 하였으며, 냉각유체와 고온 가스의 온도(total temperature)는 각각 290K, 540K 이며, 밀도비는 1.75이다.

#### 3.2 총돌제트냉각

횡방향 유로와 제트유동 입구에는 질량유량비(blowing ratio  $= \rho_j U_j / \rho_{\infty} U_{\infty}$ )를 입구조건으로 부여하였으며, 입구온도는 298K으로 적용하였다. 열전달면인 평판에는 일정 열유속 조건과 점착조건(no-slip condition)을 적용하였으며, 횡방향 유로의 출구는 대기압 조건을 사용하였다.

#### 3.3 핀핀 혹은 딥플이 부착된 회전하는 냉각유로

입구에는 속도조건을 부여하였으며, 출구에는 정압력조건을 주었다. 열전달면인 상·하면에는 일정 열유속 조건과 점착

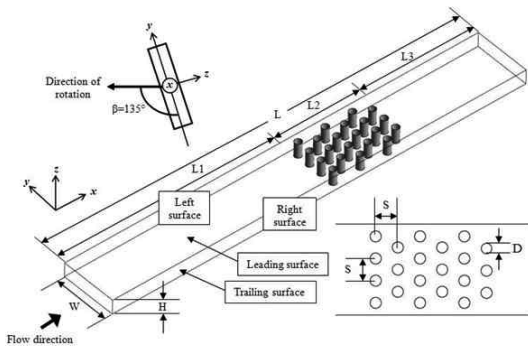


Fig. 4 Geometry of rotating rectangular channel with staggered pin-fins

조건을 사용하였고, 핀핀 및 딴플의 표면에는 단열조건과 함 조건을 사용하였고, 핀핀 및 딴플의 표면에는 단열조건과 함께 점착조건을 적용하였다. 채널의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수(Reynolds number)는 10,000이며, 냉각유로의 회전 속도와 냉각유로 입구에서의 유속 사이의 비를 나타내는 회전수(Rotation number,  $Ro = \Omega D_h / U$ )는 0.15이다.

## 4. 결과 및 검토

### 4.1 막냉각

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 환형상의 막냉각 홀에 대해 막냉각 효율을 최대화하기 위한 수치최적설계를 수행하였다. 계산영역은 고온가스가 흐르는 주유로(main channel), 냉각유체 공급유로, 그리고 환형상의 막냉각 홀로 구성하였다. Fig. 1에 나타난 막냉각 홀의 형상에서 홀의 분사각도( $\alpha$ ), 홀의 측면방향 확장각( $\beta$ ) 그리고 홀의 길이와 직경의 비( $L/D$ )를 최적설계를 위한 설계변수로 결정하였다. 최적설계를 통하여 얻어진 최적형상의 설계변수와 목적함수 값을 Table 1에 나타내었다.[5]

### 4.2 총돌제트냉각

총돌제트냉각의 연구를 위하여 사용된 기본 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 유동의 완전발달을 위하여 제트노즐의 출구로

Table 2 Results of optimization for  $\beta=0.25$

|           | Design variables |      | F      |        |
|-----------|------------------|------|--------|--------|
|           | H/D              | S/D  | RANS   | KRG    |
| Reference | 2.00             | 2.00 | 0.7689 | -      |
| Optimum   | 2.19             | 2.09 | 0.6781 | 0.6565 |

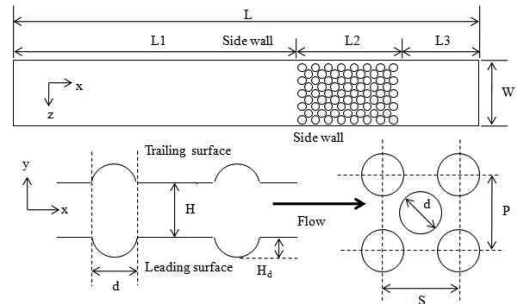


Fig. 5 Geometry of rotating channel with dimples

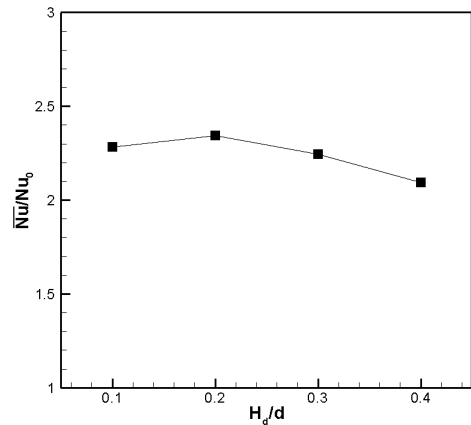


Fig. 6 Area-averaged Nusselt number comparison varying  $H_d/d$

부터 노즐 홀의 직경에 대해 횡 방향 유동의 입구는 40배 거리, 제트유동의 입구는 10배의 거리를 고려하였다. 채널은 노즐 홀의 16배의 폭으로 설정하였다. 형상변수 변화에 따른 누셀트수 분포를 알아보기 위하여 Fig. 3와 같이 노즐 출구가 타원형일 경우에 대하여 나타내었다.  $A/D$ 가 변화할 경우  $B$ 는  $D$ 로 고정하였으며,  $B/D$ 가 변화할 경우  $A$ 는  $D$ 로 고정하였다. Fig. 4를 통해 타원형의 장축이 가로방향으로 놓인 경우, 더 높은 열전달 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 핀핀이 부착된 회전하는 냉각유로

Fig. 4는 본 연구의 계산영역을 보여준다.[6] 핀의 지름( $D$ )은 6.34mm, 핀의 높이와 핀과 핀 사이의 거리는 12.68mm 즉,  $2D$ 의 값을 갖는다. 냉각유로의 중형비( $W/H$ )는 4.0이며, 수력 직경은 20.30mm이다. 냉각유로의 입구로부터 회전축까지의 거리와 수력직경의 비는 20.00이다. 본 연구에서는 핀의 높이와 지름 사이의 비( $H/D$ ), 핀과 핀 사이의 거리와 핀의 지름 사이의 비( $S/D$ )를 설계변수로 하여 최적설계를 수행하였다.[7]



이러한 최적화 과정을 통하여 얻어진 최적형상의 설계변수 값과 목적함수 값을 Table 2에 나타내었다.

#### 4.4 딩플이 부착된 회전하는 냉각유로

본 연구에서 해석한 회전하는 딩플유로의 형상은 Fig. 5과 같다.[8] 채널 높이와 딩플 지름의 비( $H/d$ )는 2.0, 딩플의 깊이와 디플 지름의 비( $H_1/d$ )는 0.3, 딩플의 지름과 유동 방향 간격의 비는 0.625이고, 딩플의 지름과 유동 방향으로의 딩플 상의 간격의 비( $d/S$ )는 1.0으로 고정하였다. Fig. 6은  $H/d$  변화에 따른 열전달면에서의 면적 평균 누셀트수를 비교한 그래프이다.  $H/d$ 가 0.2인 곳에서 가장 높은 값을 나타내고 있으며, 그 외의 영역에서는 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 다양한 터빈 블레이드 냉각 방식에 대해 3D RANS 해석을 사용한 수치해석을 수행하였으며, 다양한 형상변수가 열전달 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 대리모형을 사용하여 기준형상에 비하여 열전달 성능이 크게 향상된 최적형상을 도출하였다.

### 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD 연구센터(ERC)’의 과제로 수행된 연구임(No. 20090083510).

### 참고문헌

- [1] 2006, CFX-11.0 Solver Theory, Ansys Inc.,
- [2] 1994, Menter, F.F., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol.32, pp.1598-1605.
- [3] 1994, Sathyamurthy, P.S., Karki, K.C. and Patankar, S.V., "Prediction of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Rotating Square Duct with a 180 deg Bend," *The American Society of Mechanical Engineers*, New York, 94-GT-197.
- [4] 2008, Saumweber, C. and Schulz, A., "Effect of Geometry Variations on the Cooling Performance of Fan-Shaped Cooling Holes," *ASME Turbo Expo*, Berlin, GT2008-51038.
- [5] Orr, M.J.L. *Introduction to radial basis neural networks*, Center for cognitive science, Edinburgh University, Scotland, UK.
- [6] 2003, Wright, L.M., Lee, E. and Han, J.-C., "Effect of Rotation on Heat Transfer in Narrow Rectangular Cooling Channels (AR=8:1 and 4:1) with Pin-Fins," *ASME Turbo Expo*, Atlanta, GT-2003-38340.
- [7] 1989, Sack J., Welch W.J., Mitchell T.J. and Wynn H.P. *Design and Analysis of Computer Experiments*, Static Science, Vol.4, pp.409-435.
- [8] 2002, Griffith, T.S., Hadhrami, L.A. and Han, J.C., "Heat Transfer in Rotating Rectangular Cooling Channels (AR=4) with Dimples," *ASME Turbo Expo*, Amsterdam, GT2002-30220.