

입구부 그루브가 적용된 원통형 홀의 길이-직경 비가 막냉각 성능에 미치는 영향

박지수* · 김준희** · 강창우***†

The Influence of the Length-To-Diameter Ratio on Film Cooling Performance for a Cylindrical Hole with an Inlet Groove

Jisu Park*, Junhee Kim**, Changwoo Kang***†

Key Words : Film-cooling(막냉각), Inlet groove(입구부 그루브), Film-cooling effectiveness(막냉각 효율), Numerical analysis(수치해석), Reynolds-averaged Navier-Stokes equations(레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

ABSTRACT

The influence of the hole length on film-cooling performance is numerically investigated in a cylindrical hole with an inlet groove. Numerical analysis of film-cooling effectiveness is carried out by solving three-dimensional Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS) with a realizable $k-\epsilon$ turbulence model. Rectangular and triangular grooves are applied to the inlet of the film-cooling hole, and the ratio of the hole length (L) to the diameter (D), i.e., L/D , is varied with $L/D = 6 \sim 12$ at blowing ratios of 0.5 to 1.5. The grooves enhance the film-cooling effectiveness by causing variations of flow structure inside the hole. In particular, the higher performance occurs at relatively short lengths ($L/D = 6, 8$).

1. 서 론

가스터빈에서 터빈 입구온도 (Turbine Inlet Temperature, TIT)의 상승은 더 높은 열효율을 얻기 위한 필수불가결한 요소이다. 높아지는 터빈 입구온도로 인하여 가스터빈이 고온 상태에서 장시간 운용됨에 따라 블레이드의 파손이 야기된다. 이러한 열 하중으로 발생하는 손상을 막고자 많은 냉각 기술이 연구 및 개발되고 있다.⁽¹⁾

터빈 블레이드를 보호하기 위한 냉각기술로는 블레이드 내부에 설치된 냉각 유로를 통한 내부냉각(Internal cooling)과 블레이드 표면에 냉각 유체를 분사하거나 열 차폐 코팅(Thermal barrier coating)을 통해 고온의 연소가스로부터 블레이드 표면을 보호하는 외부냉각으로 분류할 수 있다. 외부 냉각기법에 속하는 막냉각⁽²⁾은 블레이드 표면에 배치된 홀을 통해 냉각제를 배출하고, 이 배출된 냉각제가 표면에 냉각층을 형성하여 열전달을 차단하는 냉각기법이다.

막냉각에서 홀의 형상 또는 구조의 변화는 막냉각 성능에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 요소로 알려져 있다⁽³⁻¹⁰⁾. Walters와 Leylek⁽³⁾은 가장 기본적인 원통형 홀에 대한 실험 및 수치해석을 진행하였다. 주 유로에서의 속도분포와 와류분포에 따른 유동 구조변화를 분석하였고 홀의 길이-직경비(Length to diameter, L/D), 분사율(Blowing ratio, M), 분사 각도(Injection angle)가 홀 내부 복잡한 유동구조에 많은 영향을 준다고 보고하였다. Seo 등⁽⁴⁾은 홀의 길이가 $L/D=1.6, 4.0, 10$ 인 기본 원통형 홀에 대해 실험을 진행하였고, 분사율 1.0에서 홀의 길이가 감소함에 따라 냉각제 냉각면으로부터 더 멀리 떨어지는 것을 확인하였다. 또한, 막냉각 성능은 냉각제와 고온가스의 스트롤 수, 홀의 길이, 홀 출구에서 냉각제의 분출 경향, 분사율 등에 영향을 받는다고 보고하였다. Lutum과 Johnson⁽⁵⁾은 원통형 홀의 다양한 길이($L/D = 1.75, 3.5, 5, 7, 18$)에 따른 막냉각 효율을 분석하였고, 상대적으로 홀의 길이가 짧은 $L/D < 5$ 경우에

* 전북대학교 기계공학과

** 전북대학교 기계공학과

*** 전북대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : changwoo.kang@jbnu.ac.kr

는 홀의 길이가 증가할수록 막냉각 성능이 증가함을 보였다. $L/D = 5$ 이상의 경우에서 홀 길이의 증가는 막냉각 성능에 있어 큰 차이가 나타나지 않았고 $L/D = 18$ 인 경우 오히려 막냉각 성능이 미세하게 감소함을 나타내었다. Johnson 등⁽⁶⁾은 앞선 연구⁽³⁾에서 사용한 원통형 홀에서의 실험결과와 비교하여 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용한 RANS 해석의 정확성을 높이기 위해 요구되는 최적 격자 연구를 진행하였다. 여러 격자 시스템을 비교 및 분석한 결과 홀 내부와 벽면에서 격자를 조밀하게 주었을 경우 상대적으로 정확한 해석이 이루어진다고 보고하였다. 이와 더불어 막냉각 성능 향상에 있어 원통형 홀의 형상적인 한계로 인해 홀 출구부가 확장된 팬형상 홀 (Fan-shaped hole)에 대한 연구가 이루어졌다. Gritsch 등⁽⁷⁾은 기본적인 원통형 홀과 측면방향 확장된 팬형상 홀, 측면방향 및 유동방향으로 확장된 레이드백 팬(Laidback fan-shaped hole) 형상에서의 막냉각 성능을 비교하였다. 기본형 홀 보다 확장된 홀의 경우 냉각면에서 냉각제의 측면방향 확장이 개선되어 막냉각 성능에 긍정적인 영향을 보였다. 팬 형상보다 레이드백 팬 형상은 높은 분사율에서 향상된 막냉각 성능을 보였다. Saumbweber 등⁽⁸⁾은 원통형 홀, 팬 형상 홀과 레이드백 팬 형상 홀에 대해 다양한 분사율에서 난류 강도를 변화시키며 막냉각 성능을 비교하였다. 원통형 홀의 경우 난류 강도가 증가함에 따라 낮은 분사율에서는 막냉각 성능이 감소하였고, 높은 분사율에서는 막냉각 성능이 미세하게 증가하였다. 반면, 팬 형상과 레이드백 홀에서는 난류 강도의 증가는 낮은 분사율에서 뿐만 아니라 높은 분사율에서도 막냉각 성능에 부정적인 영향을 끼친다고 보고하였다. Schroeder와 Thole⁽⁹⁾은 홀 출구부 유동방향 확장각과 측면방향 확장각을 7° 로 설정한 7-7-7 형상 홀 (7-7-7 shaped hole)를 홀 형상의 기준(Baseline)으로 제시하고 다른 팬 형상 홀들과 비교 및 검토하여 연구를 진행하였다. 높은 분사율에서는 기본형 홀보다 높은 막냉각 성능을 보였지만, 더 넓게 확장된 홀보다는 낮은 막냉각 성능이 나타났다. Fraas 등⁽¹⁰⁾은 10-10-10 레이드백 팬 형상 홀 (10-10-10 deg laidback fan-shaped hole)에 대해 분사율 1.0~3.0 범위에서 냉각제의 레이놀즈 수와 냉각제 유동 방향이 막냉각 성능 및 열전달 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 냉각제의 유동 방향과 주유동의 방향이 평행인 경우 분사율이 증가할수록 높은 막냉각 성능을 보였고, 분사율 2.5 이상에서는 막냉각 성능이 감소함을 나타내었다. 냉각 유로와 주유로가 수직인 경우에 분사율 1.0에서 약 6% 감소한 막냉각 효율이 나타났고, 냉각제가 비대칭으로 분사되어 막냉각 성능에 있어 부정적인 영향을 주는 것을 확인하였다.

그 이외에도 다양한 형상을 가진 막냉각 홀이 개발 및 연구⁽¹¹⁻¹³⁾ 되었다. Sargison 등⁽¹⁴⁾은 콘솔(CONSOLE, Converging slot hole)형 홀을 제시하였고, 막냉각 효율과 공기역학적 손실에 대해 다른 홀들과 비교 및 분석하였다. 콘솔형 홀은 팬

형상과 비슷한 막냉각 성능을 보이지만 공기역학적 손실에 있어 다른 홀들과 비교하였을 때, 현저히 적은 수치를 나타내어 분명한 이점이 있음을 나타내었다. Lu⁽¹⁵⁾은 홀 출구부에 크레이터(Crater)를 적용하여 기본 원통형 홀보다 50% 향상된 막냉각 성능을 보였지만 냉각제의 측면방향 확장에는 영향을 주지 못했다. Kusterer⁽¹⁶⁾ 등은 새롭게 개발한 이중분사 막냉각 홀(Double jet film cooling)을 수치해석을 통해 분석하였다. 이중분사 막냉각 홀은 냉각제가 냉각면에 잘 부착하도록 도와주는 반-콩팥 와류(Anti-Kidney Vortex)를 형성하여 막냉각 성능을 증가시킨다고 보고하였다. 또한, Kusterer⁽¹⁷⁾ 등은 이중분사 막냉각 홀을 발전시켜 개발한 네코미미(NEKOMIMI)형상의 홀을 제시하였고, 분사율 1.5에서 이중분사 막냉각 홀보다 향상된 막냉각 성능이 나타났다.

이처럼 홀 출구부 형상과 관련된 많은 연구가 이루어졌지만, 홀의 입구부 형상에 대한 연구는 많이 진행되지 않았다. 이에 Kim과 Kim^(18,19)은 홀의 입구부 형상에 집중하여 연구를 진행하였고 확장된 입구부를 가지는 수렴형 막냉각 홀 (Converged inlet hole)을 제시하여 홀 내부 유동구조의 변화가 막냉각 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 수렴형 막냉각 홀에서 막냉각 성능에 부정적인 영향을 끼치는 제트 효과(jetting-effect)가 감소하여 향상된 막냉각 효율이 나타났다고 보고하였다. 또한, 수렴 분산형 홀 (Converging diverging hole)을 제시하였고 분사율 $M = 0.5, 1.0, 1.5$ 에서 각각 4.3%, 5.9%, 9.9% 향상된 막냉각 효율이 나타났다. Fraas⁽²⁰⁾ 등은 실험을 통해 레이드백 팬 형상 홀의 입구부 구조가 홀 내부유동에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 냉각제의 유동방향과 주유동의 방향이 수직인 경우 냉각제가 비대칭으로 분사되는 현상을 완화하여 막냉각 성능이 향상되었고 특히, 홀 주변에서 높은 막냉각 성능이 나타남을 보고하였다. 최근 Kim과 Kang⁽²¹⁾은 홀의 입구부에 사각 또는 삼각 단면을 가지는 그루브를 적용한 홀을 새롭게 제시하였다. 입구부 그루브는 제팅 효과를 반전시키며, 홀 내부 와류(In hole vortex)를 반전시키고 강화하여 막냉각 성능에 긍정적인 영향을 준다고 보고하였다.

막냉각 성능은 홀 내부의 유동 구조에 직접적인 영향을 받는다. 기존 연구에서 입구부 그루브는 홀 내부 유동 및 와류 구조의 변화를 야기하여 막냉각 성능에 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 홀 길이는 홀 내부 유동 발달 정도에 영향을 주어 홀 내부 유동 구조를 변화시키는 주요 형상 변수로 알려져 있고, 이에 대한 많은 연구들이 진행되었다^(4,5). 따라서 본 연구에서는 막냉각 홀 입구부에 그루브가 적용된 경우 홀의 길이 변화가 홀 내부 유동 및 와류 구조와 막냉각 성능에 끼치는 영향을 중점으로 연구를 진행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 계산 영역

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 계산 영역을 나타낸다. 홀의 형상변수와 경계조건과 같은 다양한 조건들을 고려하며 연구하기 용이한 평판 모델⁽²¹⁾(flat surface model)을 적용하였고, 계산 영역은 주 유로와 냉각 유로, 막냉각 홀로 구성되어 있다. 막냉각 홀은 가장 기본적인 원통형 홀을 사용하였고 그 입구부에는 그루브를 설치하였다. 주 유로의 입구에서 홀

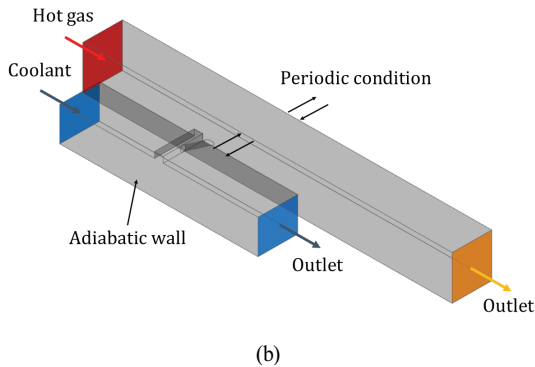
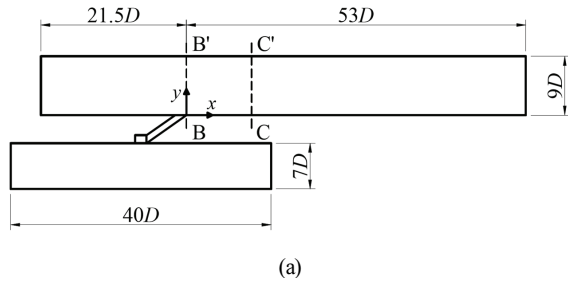


Fig. 1 (a) Numerical domain and (b) boundary conditions

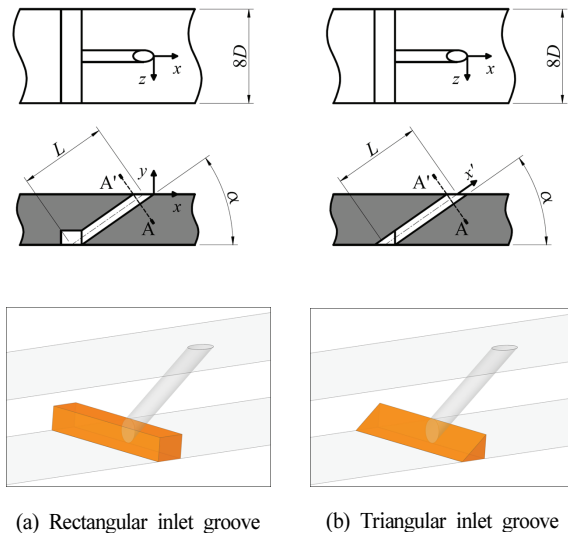


Fig. 2 Geometries of inlet groove

중심까지 거리는 $21.5D$ 이다. 주 유로와 냉각 유로의 총 길이는 각각 $74.5D$, $40D$ 이고 높이는 $9D$, $7D$ 이다. 원통형 홀과 홀 입구부에 설치된 그루브의 형상과 치수는 Fig. 2에 나타내었다. 원통형 홀의 입구부에 사각, 삼각 단면을 가지는 그루브를 홀에 접하도록 설치하였고 홀의 직경(D)은 10mm , 홀 분사각(α)은 35° , 홀의 피치는 $8D$ 로 설정하였다. 홀 입구부에 그루브가 적용되었을 경우 홀의 길이변화가 막냉각 성능에 끼치는 영향을 파악하기 위해 홀의 길이(L)를 주요 형상변수로 설정하여 $6D$, $8D$, $10D$, $12D$ 대한 연구를 진행하였다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 유동 및 열전달을 해석하기 위해 상용 전산 유체역학 코드인 ANSYS Fluent 2020R2를 사용하여 정상 상태, 비압축성 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 방정식 해석을 수행하였다. 난류 모델은 Realizable $k-\epsilon$ model을 사용하였다. 지배방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 이상기체 상태 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial u_i}{\partial x_i}(-\overline{\rho u'_i u'_j})$$

where $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ (2)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \left(h + \frac{1}{2} u_i u_i \right) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right]$$

where $k_{eff} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$ (3)

$$P = \rho RT \quad (4)$$

계산에 사용된 격자계를 Fig. 3에 나타내었다. 격자계는 육면체 격자로 구성하였고, 해석의 정확성을 높이기 위해 홀 내부와 주 유로의 냉각 면에 격자를 조밀하게 배치하였다. Enhanced wall function을 사용하였고, 벽면으로부터 첫 번째 격자점의 y^+ 값을 1.0 이하로 설정하였다. 격자 수에 대한 독립성을 확보하기 위해 격자 의존성 테스트를 수행하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 총 노드수를 약 500만개에서 2000만개까지의 격자들에 대해 측면평균 막냉각 효율을 비교한 결과 1000만개 이상의 결과에서 큰 차이가 나지 않아 1000만개의 격자를 최적격자로 선정하여 해석을 수행하였다.

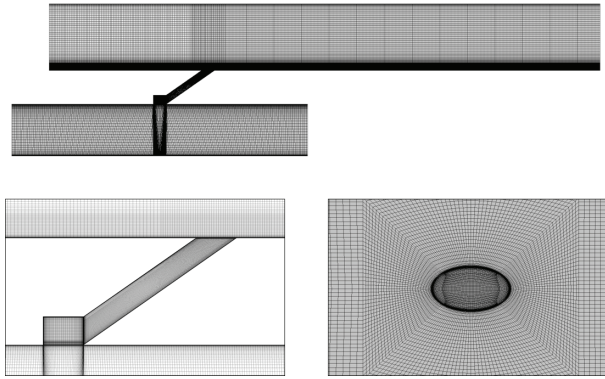


Fig. 3 Example of computational grid system

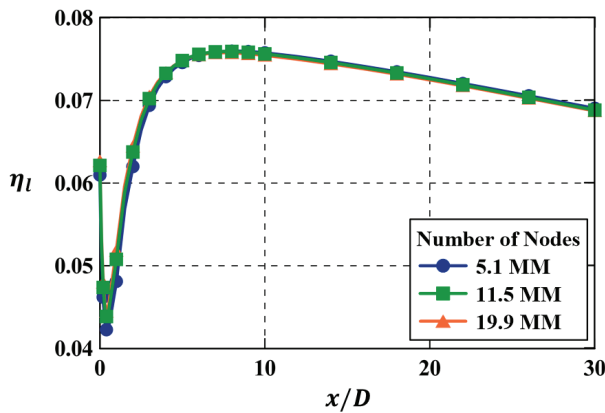


Fig. 4 Grid-dependency test for film-cooling hole with rectangular groove of $L/D = 8$ at $M = 1,0$

2.3 경계조건

본 수치해석에 사용된 경계조건은 Kim과 Kang⁽²²⁾이 선행 연구에서 고려한 조건과 같으며 해당 경계조건은 Frass⁽²³⁾ 등의 실험 조건과 동일하게 구성하였다. 작동 유체는 이상기체인 공기로 가정하였고 유로 입구에서의 고온가스와 냉각제의 난류 강도(turbulence intensity)는 8.2%, 난류 길이 척도(turbulence length scale)는 0.0073m를 사용하였다. 온도는 각각 510K, 300K로 설정하였다. 주유로의 입구에는 $Re_{D,h} (= \rho_h u_h D / \mu_h) = 13,000$ 의 균일 속도조건을 주었고 출구에는 대기압의 정압조건을 주었다. 냉각제 공급유로의 입구에는 $Re_{D,cc} (= \rho_{cc} u_{cc} D / \mu_{cc}) = 5,000$ 의 균일 속도조건을, 출구에는 고려된 분사율을 맞추기 위한 유량조건을 부여하였다. 본 연구에서는 1.0~1.5 범위의 분사율을 적용하였고 분사율 ($M = \rho_c u_c / \rho_h u_h$)은 홀 내부 냉각제와 주유동의 질량 유속(Mass flux)의 비로 정의된다. 고온가스에 대한 냉각제의 밀도 비($DR = \rho_c / \rho_\infty$)는 1.7이고 벽면에는 단열조건(Adiabatic conditions)과 점착조건(No-slip conditions), 유로 양 측면에는 주기조건(Periodic conditions)을 부여하였다.

2.4 성능 지표

막냉각 성능을 측정하기 위해 대표적인 성능지표인 단열막냉각 효율⁽²⁾(adiabatic film-cooling effectiveness, η)을 사용하였다. 유동방향에 따른 성능을 평가하기 위해 측면평균 막냉각 효율(η_l)을, 종합적인 성능을 평가하기 위해 면적평균 막냉각 효율(η_s)을 사용하였고 그 정의는 다음과 같다.

$$\eta\left(\frac{x}{D}, \frac{z}{D}\right) = \frac{T_{aw}\left(\frac{x}{D}, \frac{z}{D}\right) - T_h}{T_c - T_h} \quad (5)$$

$$\eta_l\left(\frac{z}{D}\right) = \frac{\int_{-4}^4 \eta\left(\frac{x}{D}, \frac{z}{D}\right) d\left(\frac{z}{D}\right)}{8} \quad (6)$$

$$\eta_s\left(\frac{x}{D}, \frac{z}{D}\right) = \frac{\int_0^{50} \int_{-4}^4 \eta\left(\frac{x}{D}, \frac{z}{D}\right) d\left(\frac{z}{D}\right) d\left(\frac{x}{D}\right)}{50 \times 8} \quad (7)$$

여기서 T_{aw} 는 단열 벽면에서의 온도를, T_h 는 고온가스의 온도를, T_c 는 냉각제의 온도를 나타낸다.

3. 결과 및 분석

3.1 입구부 그루브의 특징

수치해석의 신뢰성을 입증하기 위해 Saumweber 등⁽²⁴⁾의 실험결과와 해석데이터의 측면평균 막냉각 효율을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 홀의 길이가 6D인 원통형 홀에 대해 동일한 경계조건에서 수치해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다.

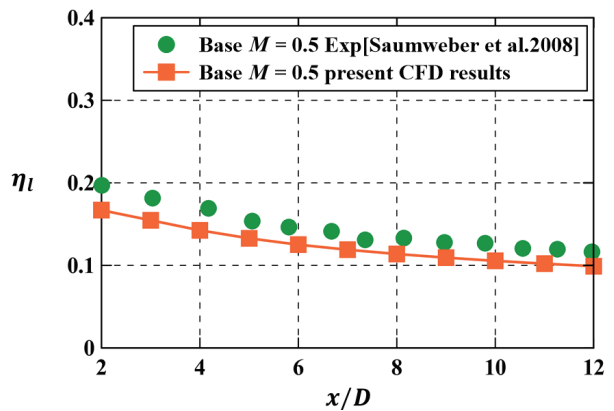


Fig. 5 Comparisons of laterally averaged film cooling effectiveness between numerical results and experimental data⁽²⁴⁾ for cylindrical holes without a groove

Kim과 Kang⁽²²⁾의 선행 연구에서 새롭게 제시한 홀 입구부 그루브는 제팅 효과(Jetting effect)를 반전시키고 홀 내부 와류를 반전 및 강화하여 막냉각 성능에 긍정적인 영향을 준다고 보고하였다. 본 연구에서도 동일한 결과를 보였다 (Figs. 6~8). Fig. 6은 분사율 1.0에서 홀 길이가 8D인 막냉각 홀의 입구부에 그루브가 적용되었을 경우와 그루브가 적용되지 않은 기본형(Base)의 면적평균 막냉각 성능을 비교한 것이다. 모든 분사율에서 그루브가 없는 경우보다 그루브가 있는 경우에 높은 막냉각 성능을 보였으며, 사각(REC)인 경우보다 삼각(TRI)인 경우에 더 높은 막냉각 성능을 보였다. 막냉각 홀 중심부 단면에서의 속도벡터와 속도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 많은 이전 연구^(4,25)에서 알려진 바와 같이 기본형 홀에서는 홀 상부로 쏘리는 제팅 효과가 발생하여 높은 운동량과 낮은 운동량을 가지는 영역이 분리되는데,

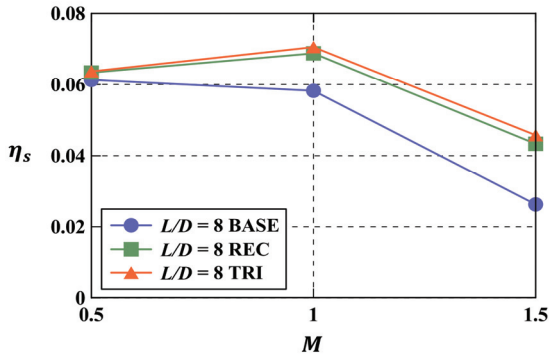


Fig. 6 Variations of the spatially averaged film-cooling effectiveness with the blowing ratio

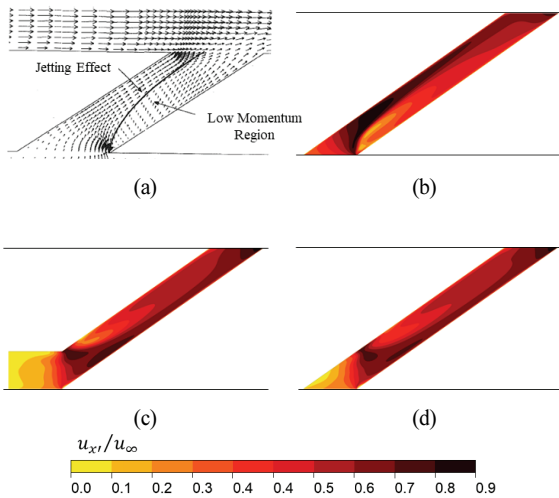


Fig. 7 (a) Velocity vectors for base hole (Leylek and Zerkle³) and normalized velocity ($u_{x'}/u_{\infty}$) contour for (b) base hole (c) rectangular groove (d) triangular groove

이때 높은 운동량을 가지는 홀 상부에서 냉각제의 침투성이 강화되어 막냉각 성능에 부정적인 영향을 끼친다(Fig. 7(a)). Fig. 7(b)에서와 같이 본 연구에서도 그루브가 적용되지 않은 기본 홀의 경우 홀 상부에 높은 운동량이 나타났으나, 그루브가 적용되었을 경우 제팅 효과가 반전되어 하부에 높은 운동량을 가지는 영역이 나타났다(Figs. 7(c), (d)).

Fig. 8은 홀 출구 직전의 단면 A-A', 홀 출구 직후의 주유로에서의 단면 B-B', x 방향으로 10D만큼 떨어진 C-C' 단면에서의 와류분포를 각각 나타낸 그림이다. Fig. 8(a)에 나타낸 기본 원통형 홀의 B-B' 단면에서 양쪽으로 방향이 반대인 와류 (Counter-Rotating Vortex Pair, CRVP)가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 콩팥 와류(Kidney Vortex)로 불리는 이 와류는 냉각유체를 상승시켜 냉각면에 원활히 밀착하지 못하게 하고 냉각제와 고온가스의 혼합을 촉진하여 막냉각 효율에 부정적인 영향을 준다. 반면에 Fig. 8(b)과 8(c)에서와 같이 그루브가 적용된 경우 홀 내부 단면인 A-A'에서의 와류분포를 보면 제팅 효과의 반전으로 인해 홀 내부 와류의 반전이 일어나고 그 강도가 강화된 것을 볼 수 있다. 이 홀 내부 와류가 주 유로로 이어져 나와 콩팥 와류 안쪽으로, 방향이 반대인 반-콩팥 와류(Anti-Kidney Vortex)가 형성된다. 삼각 그루브인 경우 더 강한 홀 내부 와류로 인해 더 강한 반-콩팥 와류가 형성되었다(Fig. 8(c)). 이 반-콩팥 와류는 콩팥와류의 세기를 약화시키고 냉각유체를 냉각면으

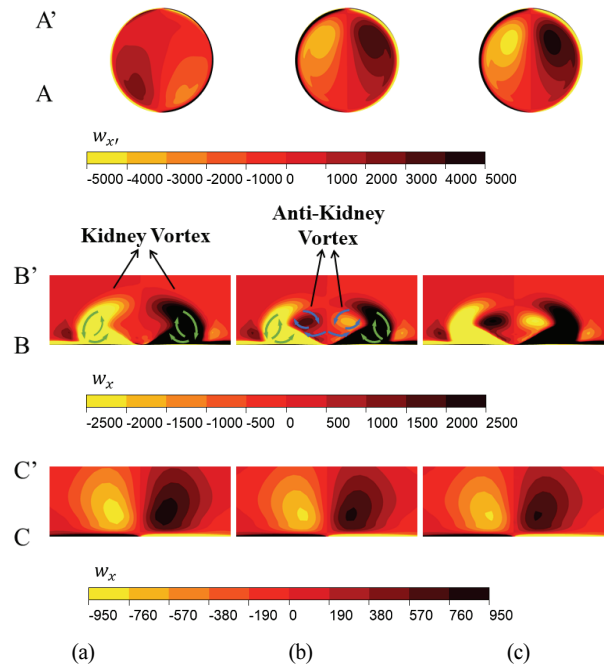


Fig. 8 Hole-axial Vorticity($w_{x'}$) distribution at A-A' plane and Vorticity(w_x) distribution at B-B' plane, C-C' plane for (a) base hole (b) hole with rectangular groove (c) hole with triangular groove

로 누르는 역할을 하여 막냉각 성능에 긍정적인 영향을 준다. 이에 따라 유동방향으로 10D만큼 진행된 C-C' 단면에서 와류분포를 보면 기본형 홀에서 콩팥 와류가 가장 강하게 나타나고 그루브가 적용된 홀의 경우 콩팥 와류가 약화된 것을 확인할 수 있다.

3.2 홀 길이에 따른 유동구조 변화

Fig. 9는 기본형, 사각 그루브, 삼각 그루브가 적용된 홀에서 분사율에 따른 면적평균 막냉각 효율을 나타낸 그래프다. 기본형보다 그루브가 있는 경우 모든 분사율에서 높은 막냉각 효율을 보였고, 사각 그루브 보다 삼각 그루브를 적용한 경우 막냉각 성능이 약간 더 향상되었다. 기본형 홀의 경우 분사율 0.5에서 가장 높은 막냉각 성능이 나타났고, 그루브가 적용된 홀은 분사율이 1.0에서 가장 높은 막냉각 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 길이변화에 따른 영향을 명확하게 보기 위해 각 분사율($M = 0.5 \sim 1.5$)에서의 면적 평균 막냉각 효율 그래프를 Fig. 10에 순서대로 나타내었다. 모든 분사율에서 기본형은 홀 길이가 증가할수록 대체로 향상된 막냉각 성능을 보였지만 그루브가 적용된 경우 대체로 길이가 증가할수록 막냉각 성능이 감소하는 경향이 나타났다. 본 연구에서는 상대적으로 높은 막냉각 성능을 가지고 길이변화에 대한 영향이 잘 나타나는 분사율 1.0인 경우에 대해 중심으로 분석을 진행하였다.

Fig. 11은 기본 원통형 홀과 사각, 삼각 그루브가 적용된 홀에서 측면평균 막냉각 효율을 나타낸 그래프다. 모든 경우 홀 출구 근처($0 \leq x/D \leq 3$)에서 낮은 막냉각 성능이 나타나는데 이는 홀로부터 분출된 냉각제가 냉각면으로부터 박리(separation)되는 현상으로, 후류($3 \leq x/D$)에서 냉각제의 재부착(reattachment)으로 다시 막냉각 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.^(3,5,26) 원통형 홀의 경우 홀의 길이가 길어질수록 홀 출구 근처에서 더 낮은 막냉각 효율을 보이며, 후류에 서는 홀의 길이와 상관없이 비슷한 수준의 막냉각 효율을 보인다. 이는 기본 원통형 홀의 경우 막냉각 성능에 있어 박리의 정도가 주된 요인으로 적용하는 것을 의미한다. 반면 그루브가 적용된 경우 홀 출구 근처에서는 기본 원통형 홀과 동일하게 홀 길이가 짧을수록 막냉각 효율이 낮아지고 길이가 길어질수록 막냉각 효율이 증가한다. 후류에서는 역전되어 홀의 길이가 짧을수록 더 높은 막냉각 효율이, 길이가 길어질수록 더 낮은 막냉각 효율이 나타나고 사각 그루브 보다 삼각 그루브의 경우에 후류에서 막냉각 효율의 더 강한 반등이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 그루브가 적용된 경우 홀 출구부 근처에서 냉각제의 박리로 인한 국소적인 부분에서 차이보다 재부착된 후류에서의 차이로 인해 Fig. 10 (b)에서와 같은 면적평균 막냉각 효율의 변화가 발생함을 알 수 있다.

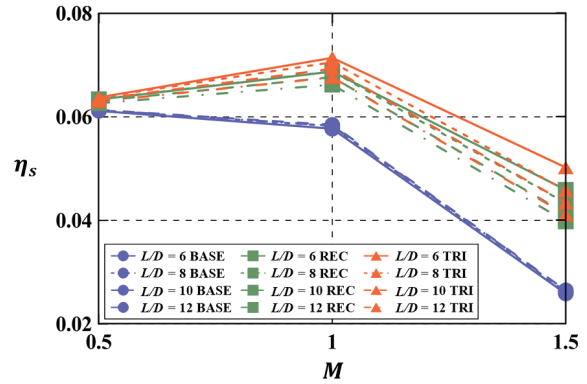


Fig. 9 Variations of the spatially averaged film-cooling effectiveness with the blowing ratio

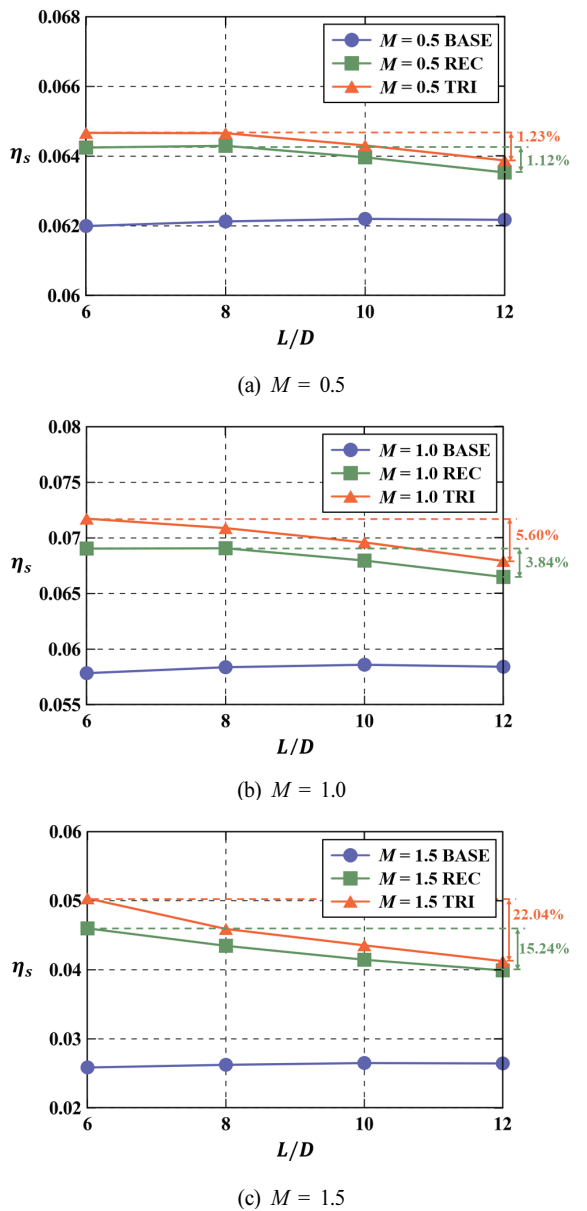
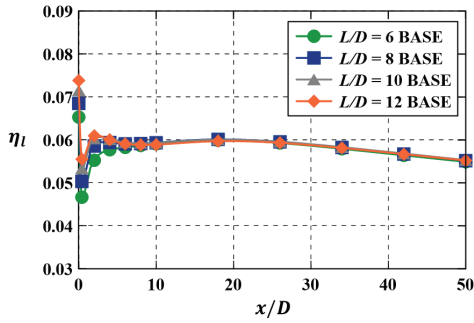
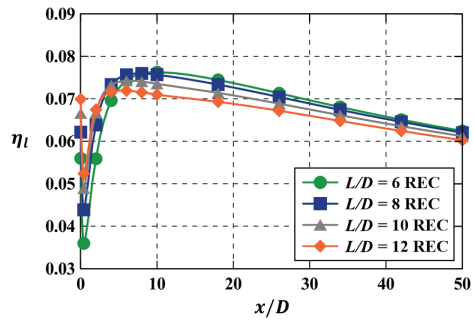


Fig. 10 Variations of the spatially averaged film-cooling effectiveness with hole length-to-diameter

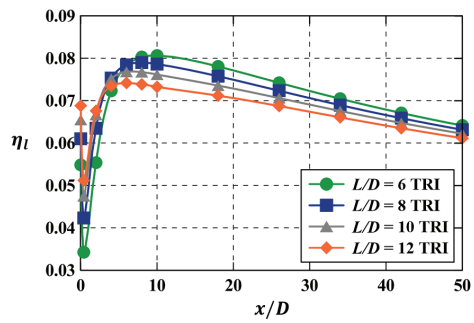
입구부 그루브가 적용된 원통형 홀의 길이-직경 비가 막냉각 성능에 미치는 영향



(a) Base cylindrical hole



(b) with rectangular groove



(c) with triangular groove

Fig. 11 Distributions of laterally averaged film-cooling effectiveness at $M = 1.0$

Fig. 12는 사각 및 삼각 그루브가 적용된 홀 내부의 단면들에서의 축 방향 와류분포를 나타낸다. 그루브의 적용으로 인하여 반전되고 강화된 홀 내부 와류가 나타나는데 사각 그루브가 적용된 경우(Fig. 12(a))보다 삼각 그루브가 적용되었을 때(Fig. 12(b)) 더 강한 홀 내부 와류가 생성되었고, 홀의 길이가 길어질수록 유동이 발달하여 홀 출구부 직전 A-A' 평면에서 와류 강도가 약화되는 것을 확인하였다. 앞선 결과에서 보았듯이 이 반전된 홀 내부 와류는 주 유동으로 이어져 반-콩팥 와류를 형성하게 된다. 홀 출구 바로 직후 B-B' 평면에서의 와류분포와 온도분포를 나타낸 Fig. 13을 보면, 홀 길이가 짧은 경우 홀 내부 와류가 상대적으로 강하게 형성되어 강한 반-콩팥 와류가 형성되고, 홀의 길이가 길어질수록 분사 직전의 와류가 약해지면서 약한 반-콩팥 와류를 형성하는 것을 알 수 있다. 반-콩팥 와류는 Fig. 8에 나타난 것처럼 주 유동의 중심부(Center line, $z/D = 0$)에서 냉각면 방향으로 하강하였다가 측면으로 퍼지는 회전방향을 가지게 되는데 12D보다 6D에서 상대적으로 강하게 형성된 반-콩팥 와류로 인해 중심부 근처에서 온도층의 두께가 더 얇게 나타난다. Fig. 14는 B-B' 단면으로부터 x 방향으로 10D만큼 떨어진 C-C' 단면에서 $|\omega_x| = 300$ 의 등고선을 나타낸 것이다. 홀 길이가 짧아질수록 CRVP의 크기가 작아지는 것을 통해 6D에서 가장 약한 콩팥 와류가 형성된다는 것을 추측할 수 있다. Fig 14(b)를 보면 삼각인 경우도 사각 그루브와 동일한 경향으로 나타나지만 모든 길이에 대해서 사각인 경우보다 그 크기가 대체로 더 작게 나타났다. 이것은 삼각 그루브가 적용된 경우 사각 그루브 보다 반-콩팥 와류가 더 강하게 형성되어 막냉각 성능에 부정적인 영향을 끼치는 콩팥 와류가 약화된 것을 의미한다. Fig. 15는 냉각면에서 막냉각 효율 분포를 나타낸 그림이다. 홀의 길이가 짧을수록 냉각면 중심부에서 막냉각 효율이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는콩팥 와류 안쪽으로 생

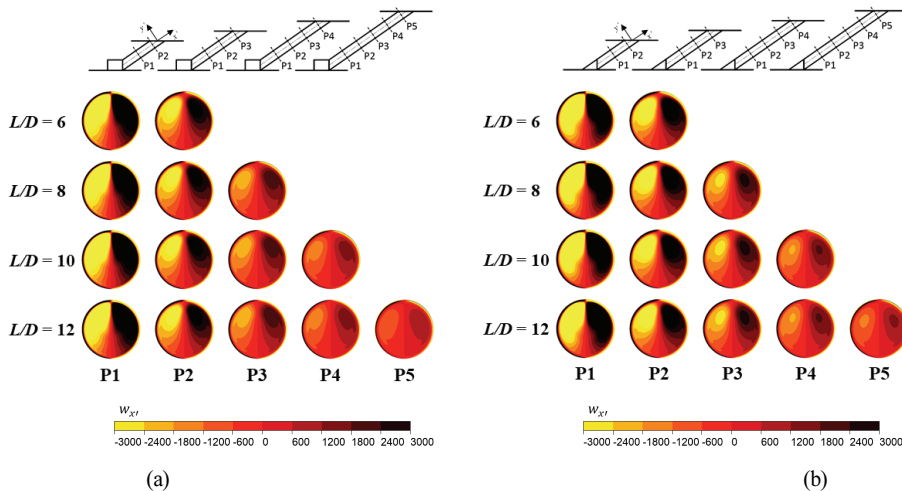


Fig. 12 Hole-axial vorticity contours (w_x) inside the hole with (a) rectangular groove and (b) triangular groove

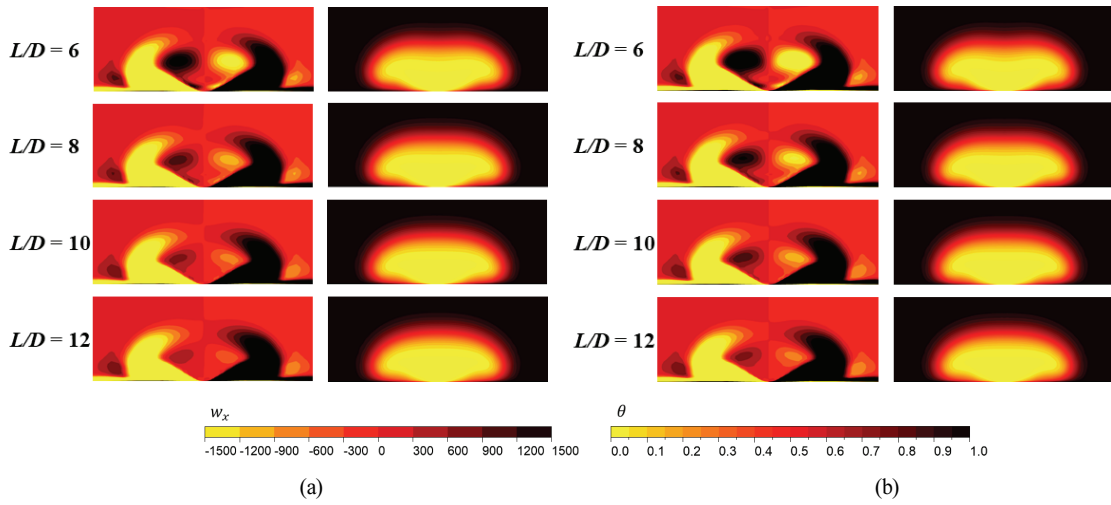


Fig. 13 Vorticity (w_x) distribution & Normalized temperature (θ) distribution at B–B' plane ($x/D=0$) for hole with (a) rectangular groove (b) triangular groove

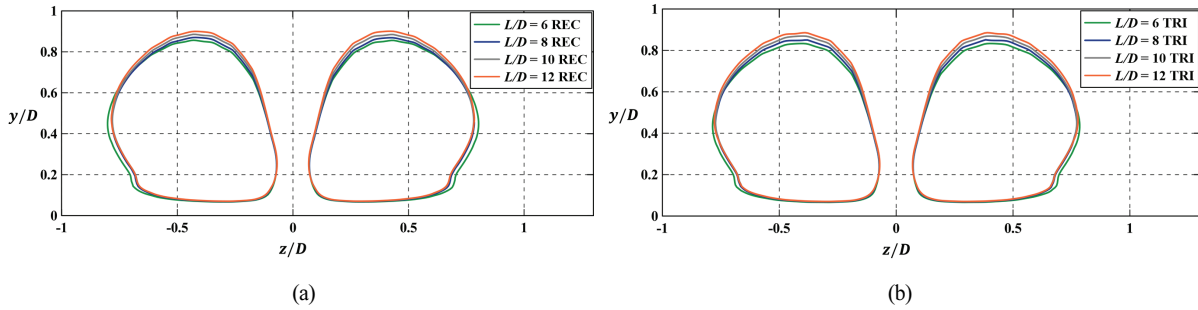


Fig. 14 Plot of vorticity $|w_x|=300$ at C–C' Plane ($x/D=10$) for hole with (a) rectangular groove and (b) triangular groove

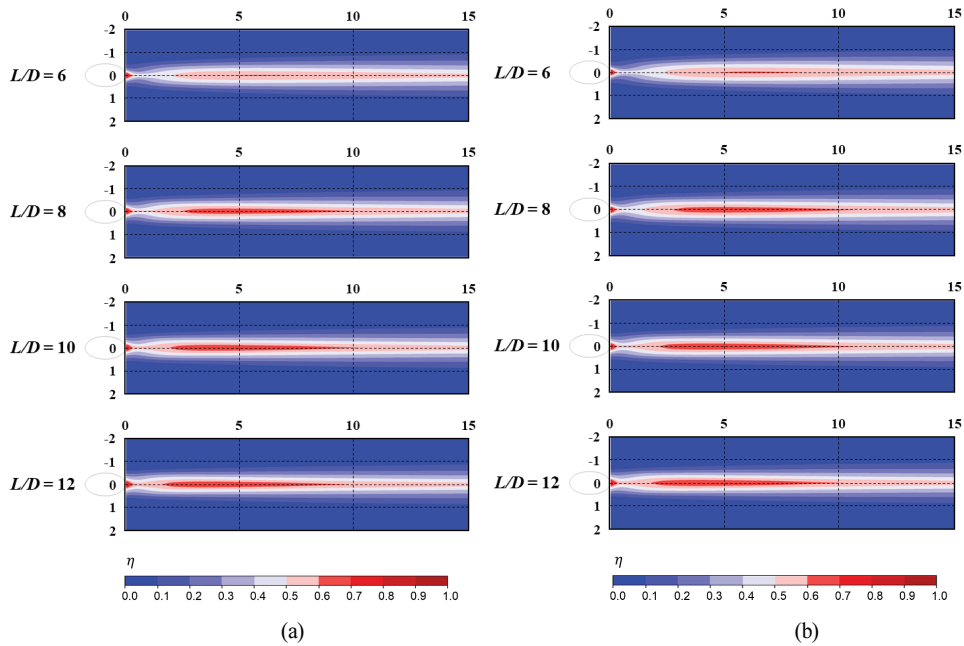


Fig. 15 Distributions of film-cooling effectiveness on the cooling surface for hole with (a) rectangular groove and (b) triangular groove

입구부 그루브가 적용된 원통형 홀의 길이-직경 비가 막냉각 성능에 미치는 영향

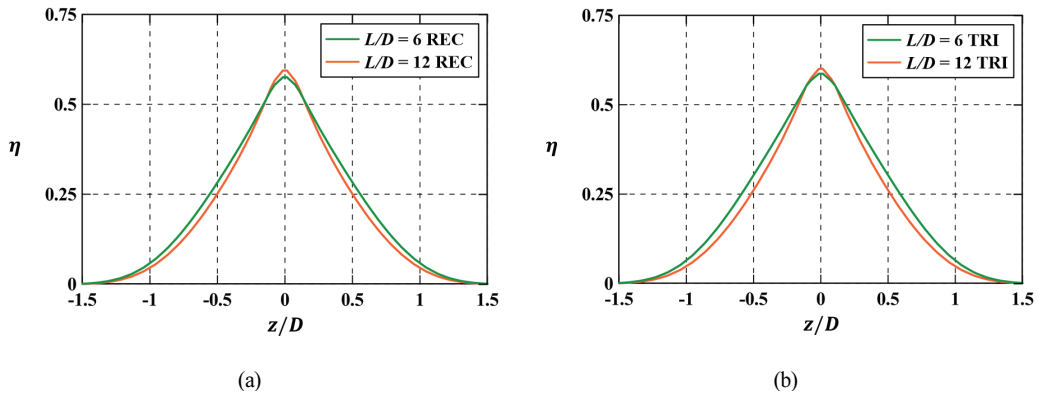


Fig. 16 Film cooling effectiveness at $x/D = 10$ for hole with (a) rectangular groove and (b) triangular groove

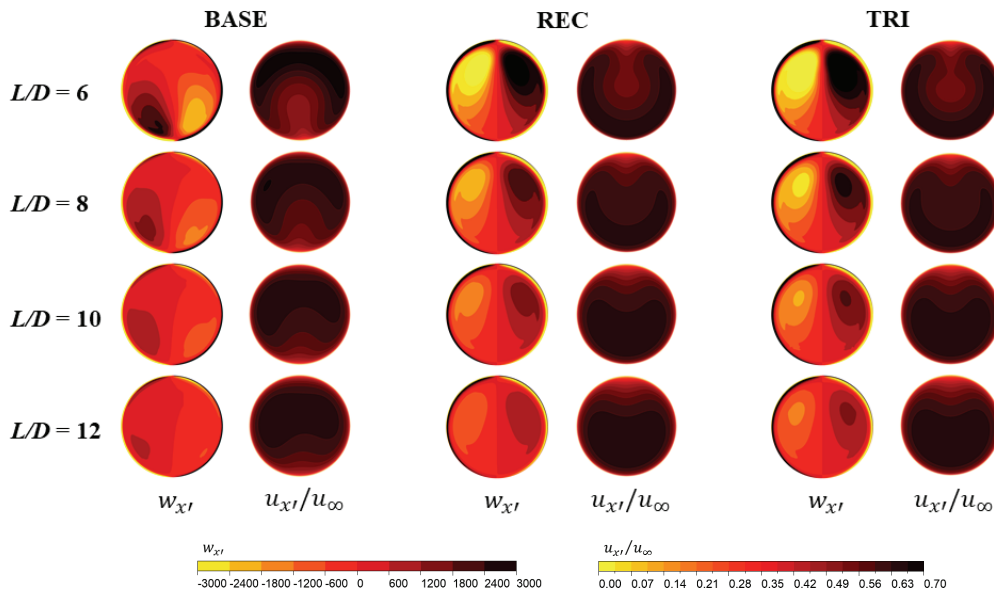


Fig. 17 Hole-axial Vorticity distribution and Normalized Velocity distribution at A-A' plane

성되는 반-공팔 와류가 냉각면 중심부 근처에서 고온가스의 유입을 유도하기 때문이다. 홀 길이가 길어짐에 따라 상대적으로 약한 반-공팔 와류가 형성되고 고온가스의 유입이 감소하여 냉각면 중심부에서 막냉각 효율이 높게 나타난다. 하지만 반-공팔 와류는 냉각제를 눌러주는 역할을 하여 냉각면의 측면방향으로 냉각제의 확장을 도와준다. $x/D=10$ 인 지점에서 냉각면의 국부 막냉각 효율을 나타낸 Fig. 16을 보면 홀의 길이가 짧은 6D의 경우 강한 반-공팔 와류가 형성되어 측면에서 높은 막냉각 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

홀 출구 직전 A-A' 단면에서의 와류분포와 속도분포를 Fig. 17에 나타내었다. 홀의 길이가 6D와 8D의 경우 대체로 홀의 길이가 짧아 유동이 발달하지 못하여 불균일한 속도분포를 가지게 된다. 기본형인 경우보다 그루브가 적용된 경우 상대적으로 강한 홀 내부 와류로 인해 운동량의 혼합이 일어나고, 보다 균일한 속도분포가 나타난다. 반면, 10D와

12D의 경우 제팅 효과 반전에 따른 축 방향 속도분포의 위치 차이만 있을 뿐 그 정도에 있어 큰 차이가 나타나지 않는다. 하지만, 앞선 결과에서 확인한 바와 같이 그루브가 적용된 경우 막냉각 효율이 향상되었고 이는 반전된 홀 내부 와류가 주유동으로 이어져서 생기는 반-공팔 와류의 영향으로 유사한 운동량 레벨을 가졌음에도 불구하고 내부 와류 구조에 따라 막냉각 성능이 달라질 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 홀 내부의 유동 및 와류 구조를 변화시켜 막냉각 성능을 향상시키는 것으로 밝혀진 입구부 그루브가 적용된 막냉각 구조에서 홀의 길이변화가 홀 내부 유동구조 및 막냉각 성능에 미치는 영향을 수치해석을 통해 살펴보았다. 기본 원통형 홀에 사각, 삼각단면을 가지는 그루브를 적용하였고 $L/D=6, 8, 10, 12$ 인 홀에 대해 분사율 0.5~1.5

범위에서의 막냉각 성능을 비교하였다.

막냉각 홀의 길이변화와 관계없이 기본적인 원통형 홀 보다 입구부에 그루브를 적용한 경우 더 높은 막냉각 성능을 보였다. 기본적인 원통형 홀에서는 기존 연구결과들에서 알려진 바와 같이 홀의 길이가 증가함에 따라 막냉각 성능이 증가하였지만, 그루브가 적용된 홀의 경우 막냉각 성능이 감소하는 결과가 나타났다.

입구부 그루브의 영향으로 반전되고 강화된 홀 내부 와류가 형성되었다. 홀의 길이가 짧은 경우 분사 직전에 상대적으로 강한 홀 내부 와류가 나타났고, 이것이 주 유로로 이어져 강한 반-콩팍 와류를 형성하였다. 홀의 길이가 길어질수록 유동의 발달로 인해 분사 직전에 상대적으로 약한 홀 내부 와류가 생성되어 약한 반-콩팍 와류가 형성되었다. 따라서 입구부 그루브가 적용된 경우 홀의 길이가 길어짐에 따라 약한 반-콩팍 와류의 영향으로 낮은 막냉각 성능이 나타난다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2022R1A6A3A01087097) 및 2022 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구(20224000000220, 전북지역에너지 클러스터 인력양성사업)임.

References

- (1) T. S. Chowdhury, F. T. Mohsin, M. M. Tonni, M. N. H. Mita and M. M. Ehsan, 2023, "A Critical Review on Gas Turbine Cooling Performance and Failure Analysis of Turbine Blades," *International Journal of Thermofluids* pp. 100329.
- (2) R. J. Goldstein, 1971, "Film cooling," *Advances in heat transfer Elsevier* Vol. 7.
- (3) J. H. Leylek and R. D. Zerkle, 1994, "Discrete-Jet Film-Cooling: a Comparison of Computational Results with Experiments," *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme* Vol. 116 Issue 3 Pages 358-368.
- (4) H. J. Seo, J. S. Lee and P. M. Ligrani, 1999, "Effects of bulk flow pulsations on film cooling from different length injection holes at different blowing ratios," *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme* Vol. 121 Issue 3 Pages 542-550.
- (5) E. Lutum and B. V. Johnson, 1999, "Influence of the hole length-to-diameter ratio on film cooling with cylindrical holes," *Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME* Vol. 121 Issue 2 Pages 209-216.
- (6) P. L. Johnson, V. Shyam and C. Hah, 2011, "Reynolds-averaged Navier-Stokes solutions to flat plate film cooling scenarios," *NASA/TM-2011-217025*.
- (7) M. Gritsch, A. Schulz and S. Wittig, 2000, "Film-cooling holes with expanded exits: near-hole heat transfer coefficients," *International Journal of Heat and Fluid Flow* Vol. 21 Issue 2 Pages 146-155.
- (8) C. Saumweber, A. Schulz and S. Wittig, 2003, "Free-stream turbulence effects on film cooling with shaped holes," *Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME* 2003 Vol. 125 Issue 1 Pages 65-73.
- (9) R. P. Schroeder and K. A. Thole, 2014, "Adiabatic effectiveness measurements for a baseline shaped film cooling hole," *ASME Turbo Expo, Dusseldorf, Germany, GT2014-25992*.
- (10) M. Fraas, T. Glasenapp, A. Schulz and H.-J. Bauer, 2019, "Film cooling measurements for a laidback fan-shaped hole: effect of coolant crossflow on cooling effectiveness and heat transfer," *Journal of Turbomachinery* Vol. 141 Issue 4 Pages 041006.
- (11) R. S. Bunker, 2005, "A review of shaped hole turbine film-cooling technology," *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme* Vol. 127 Issue 4 Pages 441-453.
- (12) D. G. Bogard and K. A. Thole, 2006, "Gas turbine film cooling," *Journal of propulsion and power* Vol. 22 Issue 2 Pages 249-270.
- (13) J. Zhang, S. Zhang, W. Chunhua and T. Xiaoming, 2020, "Recent advances in film cooling enhancement: A review," *Chinese Journal of Aeronautics* Vol. 33 Issue 4 Pages 1119-1136.
- (14) J. Sargison, S. Guo, M. Oldfield, G. Lock and A. Rawlinson, 2002, "A converging slot-hole film-cooling geometry-part 1: low-speed flat-plate heat transfer and loss," *Journal of Turbomachinery* Vol. 124 Issue 3 Pages 453-460.
- (15) Y. P. Lu, A. Dhungel, S. V. Ekkad and R. S. Bunker, 2009, "Film Cooling Measurements for Cratered Cylindrical Inclined Holes," *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme* Vol. 131 Issue 1.
- (16) K. Kusterer, D. Bohn, T. Sugimoto and R. Tanaka, 2006, "Double-Jet Ejection of Cooling Air for Improved Film-Cooling," *ASME Turbo Expo, Barcelona, Spain, GT2006-90854*.
- (17) K. Kusterer, N. Tekin, D. Bohn, T. Sugimoto, R. Tanaka and M. Kazari, 2012, "Experimental and Numerical Investigations of the NEKOMIMI Film Cooling Technology," *ASME Turbo Expo Copenhagen, Denmark, GT2012-68400*.
- (18) J.-H. Kim and K.-Y. Kim, 2018, "Film-cooling performance of converged-inlet hole shapes," *International Journal of Thermal Sciences* Vol. 124 Pages 196-211.
- (19) J.-H. Kim and K.-Y. Kim, 2019, "Performance evaluation of a converging-diverging film-cooling hole," *International Journal of Thermal Sciences* Vol. 142 Pages 295-304.
- (20) M. Fraas, T. Glasenapp, A. Schulz, H.-J. Bauer, 2019,

- “Optimized inlet geometry of a laidback fan-shaped film cooling hole – Experimental study of film cooling performance,” *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 128 Pages 980–990.
- (21) Han, J. C., Dutta. S., and Ekkad. S, 2012, “Gas turbine heat transfer and cooling technology,” CRC press.
- (22) J.-H. Kim and C. W. Kang, 2021, “Performance analysis of a film-cooling hole with inlet groove,” KSFM winter conference.
- (23) M. Fraas, T. Glasenapp, A.Schulz and H.-J.Bauer, 2019, “Film cooling measurements for a laidback fan-shaped hole: effect of coolant crossflow on cooling effectiveness and heat transfer,” *Journal of Turbomachinery* Vol. 141 Issue 10 Pages 041006.
- (24) C. Saumweber and A. Schulz, 2008, “Comparison of the Cooling Performance of Cylindrical and Fan-Shaped Cooling Holes with Special Emphasis on the Effect of Internal Coolant Cross-Flow,” *ASME Turbo Expo*, Berlin, Germany, GT2008-51036.
- (25) A. Kohli and K. A. Thole, 1998, “Entrance effects on diffused film-cooling holes,” *ASME Turbo Expo*, Stockholm, Sweden, GT-402.
- (26) A. Brundage, M. Plesniak and S. Ramadhyani, 1999, “Influence of coolant feed direction and hole length on film cooling jet velocity profiles,” *ASME Turbo Expo*, Indianapolis, Indiana, USA, 99-GT-035.