

필름 냉각을 위한 리브드 채널의 홀 위치에 따른 열전달 특성 수치 해석

박지민, 문주현, 이형주, 이성혁*
중앙대학교 기계공학과

Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristics of Ribbed Channels with Different Film Cooling Hole Position

Jee Min Park, Joo Hyun Moon, Hyung Ju Lee, Seong Hyuk Lee*
Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

요약 본 연구에서는 가스터빈 블레이드의 필름 냉각에서 45도 리브가 있는 냉각채널의 필름 홀 위치가 블레이드의 표면 냉각 성능에 미치는 영향을 전산유체해석 기법을 통하여 분석하였다. 또한 냉각채널의 리브 유무의 영향을 동일 분사율에 대해서 고찰하였다. 수치해석 도메인은 3차원으로 구성하였고 상용코드(Fluent ver. 17.0)를 사용하여 정상상태 조건 하에서 수치해석을 진행하였다. 그 결과를 바탕으로 블레이드 표면에서의 냉각효율, 유속, 유선, 압력 계수를 비교 분석하였고 홀 위치의 변화가 리브 구조에 의해 유발되는 이차 유동의 토출에 미치는 영향을 고찰하였다. 수치해석 결과로부터 리브가 설치되어 있는 경우 냉각채널의 내부유동은 상부에서 반시계 방향 및 하부에서 시계 방향의 와류쌍을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 리브가 있는 채널의 경우 리브에 의하여 발생한 와류유동이 홀 출구 부근에서 더 높은 압력 차이를 유발하여 리브가 없는 경우보다 최소 12% 이상의 높은 냉각 효율을 나타냈다. 또한 리브가 있는 채널 중에서 홀이 좌측에 위치한 경우(Rib-Left) 리브에 의하여 발생한 이차 유동이 홀 부근의 벽면에 부딪혀 홀 경사각 방향으로의 유동이 형성되는 것을 확인하였다. 블레이드 표면으로 토출된 냉각기체가 주 유동 경계층 내부에서 머무는 영역이 다른 케이스에 비하여 넓기 때문인 것으로 사료된다. 또한 이 경우 홀 출구 부근에서 가장 큰 압력 계수 차이를 나타내었고 이로 인하여 냉각기체의 토출이 촉진되어 냉각효율이 다소 증가하였다.

Abstract The present study analyzed the effect of film hole position of 45 degree ribbed cooling channel on film cooling performance of gas turbine blades. We also investigated the influence of the ribs under the fixed blowing ratio. Three-dimensional numerical model was constructed and extensive simulation was conducted using the commercial code (Fluent ver. 17.0) under steady-state condition. Base on the simulation results, We investigated the cooling effectiveness, flow velocity, streamline, and pressure coefficient. Moreover, We analyzed the effect of cooling hole position on ejection of the secondary flow caused by the rib structure. From the results, It was found that internal flow of the cooling channel forms a vortex pair in the counterclockwise from the top side, and clockwise from the bottom side. For the channels with ribs, the vortex flow generated by the ribs caused a higher pressure difference near the hole outlet, resulting in at least 12% higher cooling effectiveness than the channel without ribs. Additionally, when the hole is located on the left side of the ribbed channel (Rib-Left), it can be found that the secondary flow generated by the ribs hits against wall surface near the hole to form a flow in the direction of the hole inclination angle. Therefore, It is considered that the region where the cooling gas discharged to the blade surface stays in the main flow boundary layer is wider than the other cases. In this case, The largest pressure coefficient difference was observed near the outlet of the hole, and as a result, the discharge of the cooling gas was accelerated and the cooling efficiency was slightly increased.

Keywords : Computational Fluid Dynamics (CFD), Film Cooling, Gas turbine, Hole position, Rib turbulator

본 논문은 2018년 기능성 재료 응용설계 전문인력 양성 사업팀의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

*Corresponding Author : Seong Hyuk Lee(Chung-Ang Univ.)

Tel: +82-2-823-5332 email: shlee89@cau.ac.kr

Received May 28, 2018

Revised (1st August 7, 2018, 2nd September 5, 2018)

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

1. 서론

가스터빈은 타 내연기관에 비해 대기오염이 적고 효율이 높기 때문에 차세대 엔진으로 각광받고 있다. 최근 국내외적으로 가스터빈의 효율 및 출력을 증대시키기 위하여 터빈의 입구온도를 높이는 추세이다. 고성능 가스터빈에 사용되는 가스의 온도는 금속의 한계치를 상회한다[1]. 금속 재료인 블레이드의 허용 작동온도 범위를 초과할 수 있다[2]. 따라서 터빈 블레이드의 과열 및 열변형을 방지하기 위하여 다양한 내부 및 외부 냉각에 관련된 기술이 제안되고 있다. 내부 냉각 기법(internal cooling)은 주로 리브 냉각, 핀-핀 냉각, 제트 충돌 냉각에 대한 연구들이 진행되고 있으며 외부 냉각 기법(external cooling)으로는 블레이드 표면의 냉각효율을 향상시키기 위한 실험적, 수치해석적 연구들이 활발하게 이루어지고 있다[1-3]. 특히 표면 냉각효율의 극대화를 위하여 냉각채널의 종횡비(aspect ratio) 및 리브의 각도를 변경하여 필름 냉각을 제어하는 연구와 홀의 형태 변화가 블레이드 표면 냉각 성능에 미치는 영향을 연구하고 있다. 적절한 방향의 리브를 갖는 냉각채널의 경우 리브에 의해 형성된 이차 유동은 홀 경사각 방향으로의 와류를 형성하며 냉각기체가 주 유동 경계층 및 열경계층 내부에서 이탈하는 현상을 방지한다. 고온의 가스와 블레이드의 직접적인 접촉을 차단하여 과도한 온도 상승을 막는 역할을 한다. 따라서 이와 연관된 많은 실험 및 수치해석 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1-4].

Park 등[3]은 리브가 설치된 사각 채널의 단면형상과 리브의 간격이 열전달 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 리브가 설치된 정사각형 냉각채널은 직사각형 채널에 비해 열전달 성능이 더욱 큰 것으로 나타났다. Ahn 등[4]은 냉각채널의 리브 위치를 단면, 양면 및 4면에 설치하여 리브의 배치가 냉각효율에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 실험 결과에 따르면 4면에 리브를 설치한 경우의 냉각효율이 가장 높은 것으로 나타났다. Klavetter 등[5]은 리브가 설치된 사각 채널에서 리브 형상과 홀 배열이 이차 유동 및 열전달 성능에 미치는 영향을 평가하였으며 홀 배열과 유동 방향이 블레이드 내부 열전달 성능에 상당한 영향을 준다는 사실을 실험적으로 입증하였다. Lee 등[6]은 유동 가시화 기법을 이용하여 필름 냉각 홀의 크기가 냉각기체의 주 유동 경계층 내부 거동에 미치는 영향을 확인하였다. 홀 출구 크

기가 작을수록 토출되는 냉각기체의 유속이 빨라지며 주 유동 경계층을 빠르게 이탈하는 현상을 관찰하였다. 다양한 문헌들에서 실험을 통하여 냉각 채널의 종횡비 변화가 블레이드 표면 냉각 성능에 영향을 미친다고 보고했다[7-9]. 하지만 표면 열전달에 영향을 미치는 내부유동의 다양한 파라미터를 분석하기 위해서는 수치해석적 연구가 추가적으로 필요하다.

리브의 배열 및 배치에 따른 열전달 효과를 확인하기 위해 다양한 수치해석 연구도 진행되고 있다[10-12]. Liu 등[10]은 실험 및 수치해석적 방법을 통해 리브 각도에 따른 냉각 성능의 변화를 비교 분석하였다. 135° 및 45°의 각도를 갖는 리브를 형상화하여 리브의 배열과 냉각기체 유속에 따라서 필름 냉각효율이 달라지는 것을 수치해석 기법을 통해 확인하였다. Xie 등[11]은 수치해석을 통해 필름 냉각에 대한 연속 및 비연속 리브의 영향을 조사하였다. 분사율(blowing ratio)이 낮은 작동 조건에서 불연속 리브를 배치할 경우 연속적 리브보다 필름 냉각 성능이 다소 개선된다는 사실을 확인하였다. 또한 수치해석 결과를 통해 작동 분사율 조건이 변화하면 채널의 종횡비와 리브의 형상 변화가 표면 냉각 성능에 미치는 영향이 다른 경향을 나타낸다는 사실을 입증하였다. 리브에 관한 연구는 주로 채널 내부에서 냉각기체의 유동을 제어하기 위하여 제안되었으나 리브의 배열 및 배치에 따라 달라지는 냉각기체의 유동은 필름 홀을 통과하는 유동에 상당한 영향을 미치게 되고 필름 홀의 크기, 경사각 등의 인자와 함께 필름 냉각효율에 복합적인 영향을 미친다는 사실이 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 리브의 유무와 필름 홀의 위치 변화가 블레이드의 외부 표면의 냉각 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 리브가 없는 채널 형상을 기준으로 하여 문헌[11]의 실험데이터와 수치해석 모델을 검증하였으며 리브 유무와 홀 위치가 채널 내부의 와류쌍 형성 및 홀 출구 부근에서의 압력계수 분포에 미치는 영향을 파악하여 필름 쿨링 성능에 변화를 일으키는 요인을 분석하였다. 또한 홀을 통과하는 냉각기체의 유선 및 속도 분포를 파악하여 블레이드 외부 표면에서의 냉각기체의 거동을 확인하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 도메인 및 격자 생성

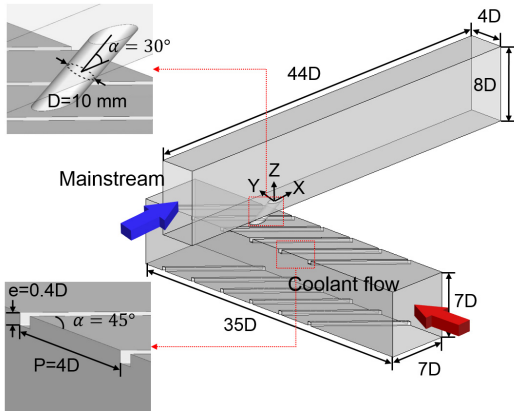


Fig. 1. Geometry of coolant flow and mainstream

본 연구에서 사용한 수치해석 기법을 검증하기 위하여 Xie 등[11]이 진행한 실험의 결과를 본 수치해석 결과와 비교하였다.

도메인의 총 크기는 10 mm의 필름 홀 직경 D 를 기반으로 설정하였으며 냉각채널의 크기는 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ 이고 주 유동이 지나가는 채널은 직사각형으로서 $40\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 440\text{ mm}$ 크기로 구성되어 있다.

격자는 ICEM CFD (ver. 17.0)로 제작하였으며 격자의 개수는 640만개로 설정하였다. 블레이드 외부 표면 근처에서의 유동 및 열전달 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 그림 2와 같이 프리즘 격자를 생성하여 주 유동 경계층 내부에서 발생하는 필름 냉각을 정밀하게 묘사하였다.

2.2 해석 조건

냉각기체 유동 및 주 유동은 비압축성으로 가정하였고 정상상태(steady-state) 조건에서 수치해석을 수행하였다. 해석프로그램은 상용코드 Fluent (ver. 17.0)를 이용하였다. 그림 3과 같이 리브가 없는 채널 및 리브가 있는 채널의 3가지 홀 위치에 대하여 해석을 진행하였다. 리브는 45° 로 구성하였고 홀의 위치는 리브 면을 따라서 1/4, 1/2, 3/4 지점에 배치하였다. 4가지 케이스에 대해서 주 유동 속도는 17 m/s 이며 레이놀즈수는 1×10^5 이고 주 유동 분사율은 0.5로 설정하였다. 리브는 냉각채널의 윗면 및 아랫면에 설치하였다. 속도와 압력의 연결 조건은 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였고 QUICK 알고리즘을 이용하여 대류항을 이산화하였다.

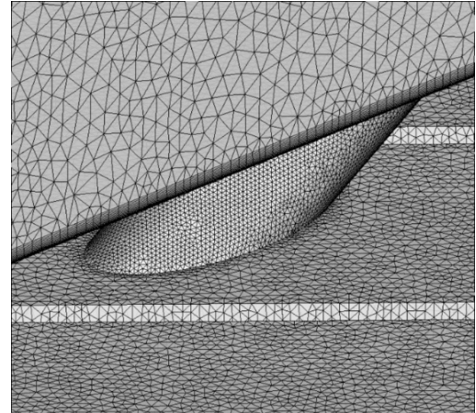


Fig. 2. Grid generation near the hole

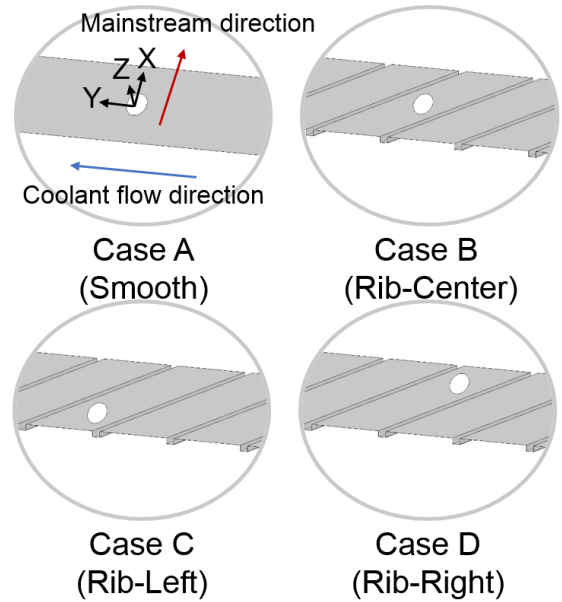


Fig. 3. Simulation cases with varying hole position

출구 조건은 냉각 채널 및 주 유동 채널 모두 압력출구 조건(pressure outlet)으로 설정하였다. 이 외에 다른 경계면들은 모두 비 침착조건 및 단열조건을 적용하였다. 한편 비압축성 정상 유동에 대한 연속방정식과 운동량방정식 그리고 에너지방정식은 식 (1)-(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu_{eff} \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{u} \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, \vec{u} 는 유체의 속도, k_{eff} 는 유효 열전도 계수를 의미한다. 난류모델은 Realizable k- ϵ 모델을 적용하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 홀 위치에 따른 열전달 특성

홀 위치에 따른 열전달 특성을 파악하기 위해서 블레이드 외부 표면에서의 냉각효율을 비교하였다. Xie 등 [11]은 다음과 같이 필름 냉각효율 식을 제안하였다.

$$\eta = \frac{T_h - T_w}{T_h - T_c} \quad (4)$$

수식에 따르면 T_h 는 주 유동의 온도이고 T_w 는 블레이드 표면의 온도를 의미하며 T_c 는 냉각기체의 입구 온도이다. 문헌에 따르면 주 유동과 냉각유동의 온도 차이는 20°C이며 분사율이 0.5일 때 일반적인 냉각효율은 0.05~0.15 정도로 알려져 있다[10].

그림 4는 블레이드 표면의 냉각효율을 나타낸 그림이다. 홀 출구 부근에서는 냉각기체의 토출로 인하여 높은 냉각효율을 나타내며 홀에서 멀어질수록 주 유동과의 열전달 및 냉각기체의 주 유동 경계층 이탈로 인하여 점차 냉각효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 홀 출구 부근에서 Case D의 경우 Case A, B, C의 경우보다 넓은 냉각기체 분포를 보여 가장 높은 냉각효율을 나타내는 것을 파악하였다.

그림 5는 홀 출구부터 주 유동 진행 방향을 따라서 횡방향 평균 냉각효율을 나타낸 그래프이다. 문헌에 따르면 냉각기체에 의한 유효 냉각범위는 $x/D < 30$ 정도로 알려져 있다[11]. 그림 5(a)에 나타난 것과 같이 문헌[11]과 동일한 형상으로 수치해석을 진행한 Case A 경우 본 수치해석을 통해 예측한 냉각효율 값과 실험으로부터 얻은 냉각효율 값의 평균 오차는 약 15%였다. $18 < x/D < 20$ 구간에서 다소 높은 오차율을 보였는데 이 구간은 냉각기체가 난류 유동인 주 유동과 매우 복잡한 유동혼합 현상이 발생하는 구간이다. 따라서 실험적 불확실성 및 수

치 해석적인 오차를 고려하였을 때 전반적인 경향 및 수치가 실험값과 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다. 그림 5(b)에 따르면 리브가 없는 경우보다 리브가 있는 경우에 냉각효율이 최소 12% (Case C, $x/D=2$)에서 최대 38% (Case C, $18 < x/D < 28$) 정도 증가한 것을 알 수 있다. 또한 리브가 있는 채널에서 홀이 좌측에 위치한 Case C의 경우 $5 < x/D$ 영역에서 가장 좋은 효율을 나타냈다.

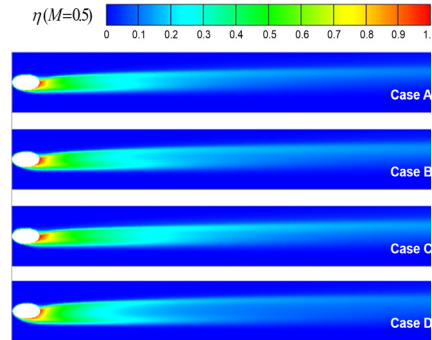


Fig. 4. Contours of cooling effectiveness

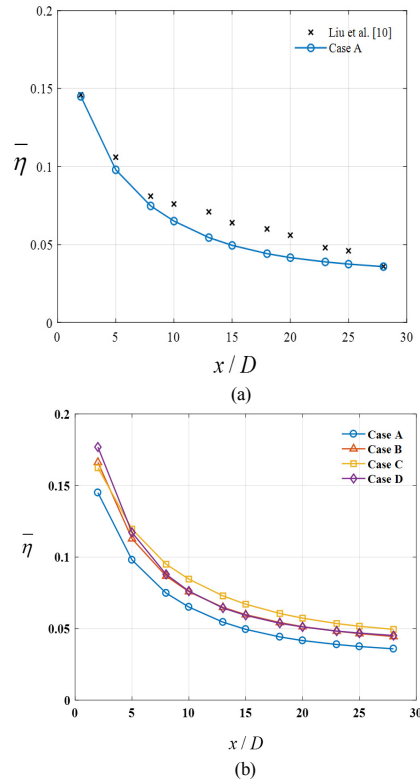


Fig. 5. (a) results of validation, (b) Averaged cooling effectiveness according to mainstream direction

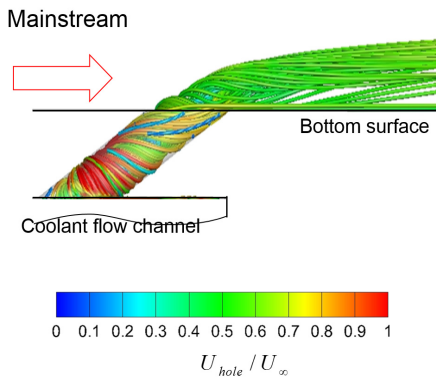


Fig. 6. Velocity and streamline near the hole (Case A)

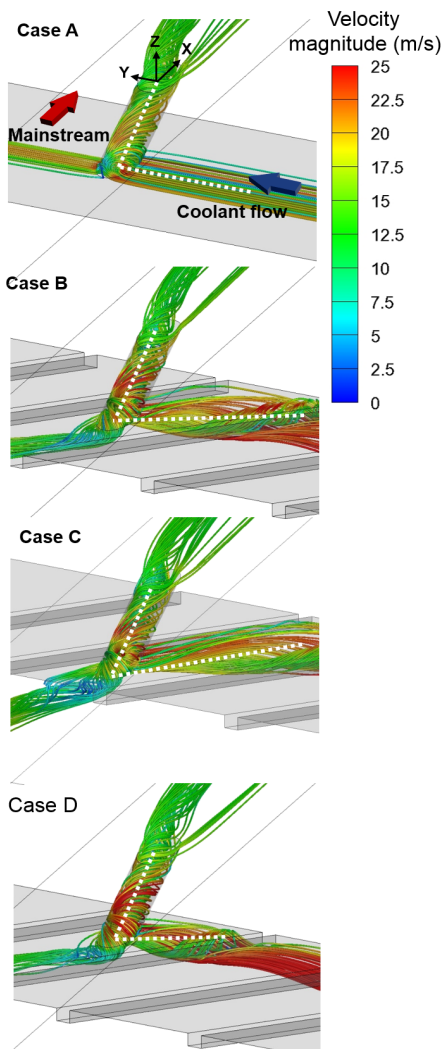


Fig. 7. Streamline variation by rib and hole position

3.2 주 유동 및 냉각기체 유동 특성

그림 6은 필름 홀을 통해 토출되는 유체의 속도와 유선의 분포를 ZX 단면에 나타낸 그림이다. 4가지 케이스 모두 상당히 유사한 속도 및 유선 분포를 나타냈다. 그림 7은 리브 유무와 홀의 위치 변화에 따른 속도 및 유선 분포를 나타낸 그림이다. 리브가 없는 Case A의 경우에 채널 진행방향으로 흐르는 냉각기체가 홀 입구 부근에서 급격한 형상 변화로 인한 수직방향 이차 유동이 발생한다. 리브가 있는 Case B, C, D의 경우도 마찬가지로 채널 상부에서 리브에 의하여 홀 경사각 방향과 반대 방향인 반시계 방향의 와류가 형성되고 홀 입구 부근에서 수직 방향 이차 유동이 발생한다.

그림 6과 같이 4가지 케이스 모두 동일한 방향의 와류 및 유사한 속도 분포가 나타나는 것을 확인하였다. 본 연구와 같이 상대적으로 낮은 높이의 리브를 사용할 경우 0.5의 분사율에서는 냉각채널에서 발생한 와류유동이 박리 없이 유동의 재부착(reattachment)이 발생하여 유속이 감소한다는 사실을 확인하였다[3-5, 10].

그림 7에 따르면 리브가 없는 경우와 달리 리브가 있는 경우에 리브 면을 따라 발생한 와류유동이 홀 입구로 진입한다. 또한 홀 입구의 진입 속도는 리브가 없는 경우보다 다소 높게 나타는 것을 알 수 있으며 상대적으로 높은 냉각효율을 나타낸다.

특히 Case C의 경우 리브에 의한 홀 경사각 방향의 반대인 반시계방향 와류는 홀 부근의 벽을 만나 홀 경사각 방향으로 이차 유동을 발생시켜 다소 높은 효율을 나타낸다.

그림 8은 리브에 의해 발생하는 냉각채널 내부 이차 유동을 분석하기 위하여 홀을 중심으로 주 유동 및 냉각기체 유동의 유선을 ZX 단면에 표시하였다. 리브가 없는 Case A는 채널 내부에서 균일한 속도 분포를 나타내며 홀 입구로 진입한 유체는 유동 속도가 감소하고 급격한 형상 변화에 따라 이차 유동을 형성한다.

리브가 설치된 Case B, C, D에서는 냉각채널 내부에서 시계 방향 및 반시계방향의 와류쌍이 발생하며 냉각채널 내부유동의 유속이 전반적으로 감소한다. 상부의 반시계방향으로 회전하는 와류는 리브를 만나 분리되어 유속이 더욱 감소한다. 따라서 급격한 형상 변화에 의하여 홀 내부에서 강한 와류를 형성하는 Case A의 경우보다 리브가 있는 경우 홀 벽면을 따라 상대적으로 약한 와류 유동이 형성된다.

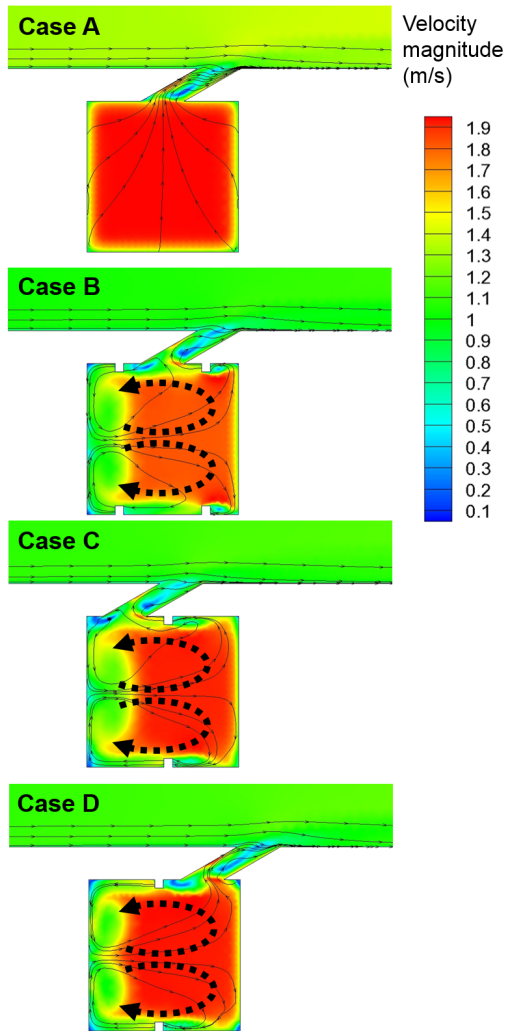


Fig. 8. Velocity contour and streamline vectors

Case C와 같이 벽면 근처에 홀이 위치하는 경우 와류쌍이 벽면을 만나 재순환 영역을 생성한다. 이때 홀 경사 각 방향이 반전 와류쌍 형성 방향과 유사하여 반시계방향으로 순환하는 와류는 벽을 만나 재순환되고 상대적으로 균일한 유속분포를 갖고 홀 내부로 진입한다[10]. 따라서 냉각효율이 다소 높게 나타나는 것으로 사료된다.

Case D는 반시계방향으로 흐르는 냉각유동이 벽면을 타고 홀 입구로 바로 진입하지만 홀 각도가 와류의 방향과 반대로 설치되어 있으므로 급격한 수직 상승 유동이 발생한다. 따라서 홀 내부유동이 상대적으로 불균일한 경향을 보인다.

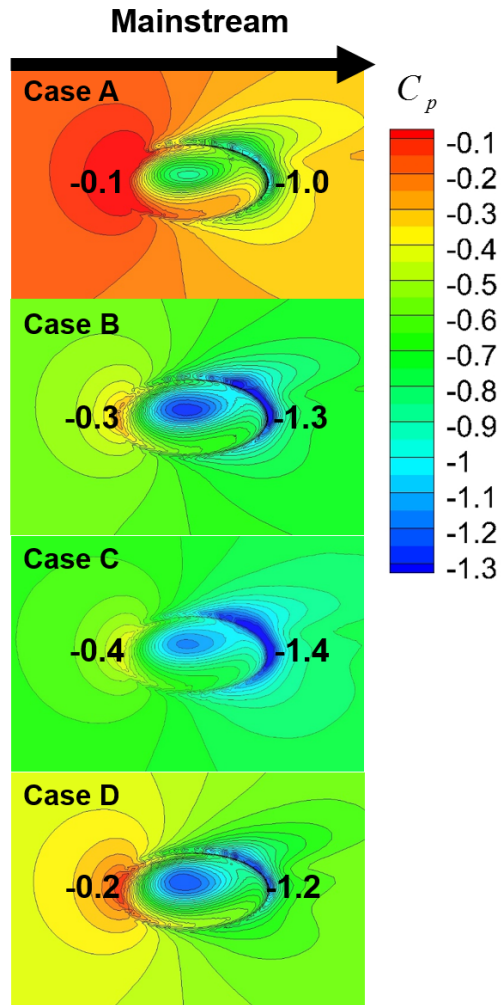


Fig. 9. Pressure coefficient contours near the hole outlet according to hole positions

3.3 홀 출구에서의 압력 강하 특성

그림 9는 리브 유무와 홀 위치 변화에 따른 홀 출구 부근에서의 압력 계수를 나타낸다. 압력 계수는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C_p = \frac{P_l}{\frac{1}{2} \rho_h U_h^2} \quad (5)$$

여기서 C_p 는 압력 계수를 의미하고 P_l 은 국부 압력, ρ_h 는 주 유동의 밀도, U_h 는 주 유동의 속도이다. 홀 출구 부근의 압력 계수가 낮을수록 냉각기체의 토출 및 열전달을 촉진한다[11]. 또한, 홀 출구 부근에서 주 유동 진행

방향의 압력 계수 차이가 클수록 토출되는 제트의 유동을 얇게 형성해 열전달 효율을 증가시킨다.

그림 9에 따르면 리브가 있는 경우 리브가 없는 경우보다 상대적으로 낮은 압력 계수를 가지며 홀 출구 전후 방의 압력 계수 차이가 1.0 정도로 다소 크게 나타났다. 특히 Case C의 경우는 홀 내부로 상대적으로 균일한 유동이 진입함에 따라 가장 낮은 압력 계수를 나타냈다. 상대적인 차이가 크지는 않지만 더 낮은 압력 계수를 나타내기 때문에 냉각기체의 토출이 촉진되고 열전달 효율이 다소 증가한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 냉각 홀의 위치 변화가 가스터빈의 블레이드 표면의 냉각 효과에 미치는 영향에 대한 수치해석을 진행하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 리브가 없는 경우보다 리브가 있는 경우 최소 12%에서 최대 38%의 평균 냉각효율이 향상하였다. 또한, 리브가 있는 경우에 홀이 좌측에 배치된 Case C가 다소 좋은 효율을 보이는 것으로 나타났다.
2. 리브가 있는 채널의 경우 냉각기체의 유동은 시계 방향 및 반시계방향으로 와류 쌍을 형성하면서 전반적인 유동 속도가 감소한다. 냉각효율이 가장 좋은 Case C의 경우 와류 쌍이 홀 입구 부근에서 벽면을 만나 재순환 영역을 생성하며 홀 경사각 방향과 유사한 방향의 유동이 홀로 진입한다. 따라서 Case A, B, D의 경우보다 토출된 냉각기체가 주 유동의 경계층 내부에 머무르는 영역이 더 길어지며 상대적으로 높은 냉각효율을 나타낸다.
3. 리브가 있는 경우에 리브가 없는 경우보다 홀 출구 부근에서 낮은 압력 계수가 나타났으며 주 유동 진행 방향으로의 압력 계수 차이가 다소 크다. 특히 Case C의 경우 홀 부근에서 가장 낮은 압력 계수를 가지며 냉각기체의 홀을 통한 유동이 촉진되어 냉각효율이 다소 증가한 것으로 사료된다.

References

[1] W. Peng, X. Sun, P. Jiang, J. Wang, "Effect of ribbed and smooth coolant cross-flow channel on film cooling",

Nuclear Engineering and Design, Vol.316, No.5, pp.186-197, May, 2017.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.03.015>

- [2] T. E. Dyson, D. G. Bogard, S. D. Bradshaw, "Evaluation of CFD simulations of film cooling performance on a turbine vane including conjugate heat transfer effects", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.50, No.12, pp.279-286, December, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.08.010>
- [3] J. S. Park, J. C. Han, Y. Huang, S. Ou, R. J. Boyle, "Heat Transfer Performance Comparisons of Five Different Rectangular Channels with Parallel Angled Ribs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.35, No.11, pp.2891-2903, November, 1992.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90309-G](https://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(92)90309-G)
- [4] S. W. Ahn, H. K. Kang, S. T. Bae, D. H. Lee, "Heat Transfer and Friction Factor in a Square Channel with One, Two, and Four Ribbed Walls", *Journal of Turbomachinery*, Vol.130, No.3, pp.1-5, May, 2008.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1115/1.2775488>
- [5] S. R. Klavetter, J. W. McClintic, D. G. Bogard, J. E. Dees, G. M. Laskowski, R. Briggs, "The Effect of Rib Turbulators on Film Cooling Effectiveness of Round Compound Angle Holes Fed by an Internal Cross-Flow", *Journal of Turbomachinery*, Vol.138, No.12, pp.1-10, Jun, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1115/1.4032928>
- [6] J. Lee, J. S. Kim, H. Lim, J. S. Bang, J. Seo, J. L. Sohn, J. Lee, "Flow visualization of microscale effusion cooling within mainstream boundary layer on a flat plate", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.31, No.11, pp.5113-5121, November, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s12206-017-1005-4>
- [7] B. Lu, W. Peng, P. X. Jiang, J. Wang, Y. P. Wang, "Experimental and numerical study of the effect of conjugate heat transfer on film cooling", *Experimental Heat Transfer*, Vol.30, No.4, pp.355-368, March, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/08916152.2017.1283374>
- [8] B. T. An, J. J. Liu, X. D. Zhang, S. J. Zhou, C. Zhang, "Film cooling effectiveness measurements of a near surface streamwise diffusion hole", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.103, No.12, pp.1-13, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.028>
- [9] W. Yang, X. Shi, J. Zhang, "Experimental investigation on film cooling characteristics of ellipse-shaped tab", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.81, No.2, pp.277-290, February, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.10.018>
- [10] C. Liu, L. Ye, H. Zhu, J. Luo, "Investigation on the effects of rib orientation angle on the film cooling with ribbed cross-flow coolant channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.115, No.12, pp.379-394, December, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.063>
- [11] G. Xie, X. Liu, H. Yan, "Film cooling performance and flow characteristics of internal cooling channels with continuous/truncated ribs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.105, No.2, pp.67-75, February, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.065>

- [12] A. M. M. Abdala, F. N. M. Elwekeel, "Pressure distribution effects due to chevron fences on film cooling effectiveness and flow structures", *Applied Thermal Engineering*, Vol.110, pp.616-629, January, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.152>

박 지 민(Jee Min Park)

[정회원]



- 2017년 2월 : 중앙대학교 건설환경 공학과 (공학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 석사과정

<관심분야>
전산유체역학, 열전달

이 성 혁(Seong Hyuk Lee)

[정회원]



- 1993년 2월 : 중앙대학교 기계공학부 (공학사)
- 1995년 2월 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
전산유체역학, 열전달

문 주 현(Joo Hyun Moon)

[정회원]



- 2011년 2월 : 중앙대학교 기계공학부 (공학사)
- 2013년 2월 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : The University of Texas at Dallas 박사후 연구원

<관심분야>
다상유체역학, 전산유체역학

이 형 주(Hyung Ju Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 중앙대학교 기계공학부 (공학사)
- 2018년 2월 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 대학원 기계공학과 박사과정

<관심분야>
열교환기, 액적증발