

경사 슬롯의 폭과 분사각이 평판 막냉각 효율에 미치는 영향

이경태* · 양희문* · 이상선* · 강민석* · 김기문* · 곽재수*†

Effects of Slot Width and Injection Angle of the Inclined Slot on the Film Cooling Effectiveness of a Flat Plate

Kyung Tae Lee*, Hee Mun Yang*, Sang Sun Lee*, Min Seok Kang*, Gi Mun Kim*, Jae Su Kwak*†

Key Words : Gas turbine(가스 터빈); Film cooling(막냉각); Pressure sensitive paint(압력감응페인트); Slot width(슬롯 폭); Injection angle(분사각)

ABSTRACT

The present study was carried out to examine the effects of slot width and injection angle of an inclined slot on the film cooling effectiveness. Three levels of variation were adopted for each design parameter (the wall thickness-to-slot width ratio $H/S=5.0, 7.0,$ and $15.0,$ and injection angle $\alpha=30^\circ, 45^\circ,$ and 60°). Film cooling effectiveness was measured using the pressure sensitive paint technique in a flat plate test rig under 30 m/s of mainstream velocity condition. Four blowing ratios ($M=0.25, 0.5, 0.75,$ and 1.0) defined as the mass flux ratio between the coolant and the mainstream were considered. Carbon dioxide gas was used as the coolant, resulting in a coolant-to-mainstream density ratio of approximately 1.5 . The results showed that higher film cooling effectiveness was observed for a wider slot at a constant blowing ratio condition because more amount of coolant was injected through the wider injection area. In contrast, a narrower slot had a benefit for film cooling effectiveness at a constant mass flow ratio condition. Results also indicated that a steeper injection angle caused lower film cooling effectiveness due to stronger mixing between the coolant and the mainstream.

1. 서론

현대의 가스터빈에 적용되는 높은 터빈 입구 온도는 터빈의 출력과 효율 향상에 긍정적인 영향을 미쳤지만, 재료의 허용 온도를 상회하는 조건에 노출된 터빈 구성품의 파손을 초래할 수 있다. 이에 따라 터빈의 각 구성품에는 적절한 냉각기법들이 적용되고 있다.

막냉각은 가장 대표적인 외부 냉각기법으로, 홀 또는 슬롯을 통해 분사된 공기가 구성품 벽면에 형성하는 막(Film)이 고온의 터빈 작동유체와 벽면 사이의 직접적인 열전달을 차단함으로써 구성품을 보호하는 냉각기법을 일컫는다. 막냉각의 냉각효능은 매우 우수하기 때문에 터빈의 익렬(Blade), 끝 벽(Endwall), 슈라우드(Shroud) 등과 같이 높은 열부하를 겪는 터빈 고온 냉각에 적용되고 있다.

슬롯 분사는 냉각 홀 분사에 비해 냉각유체가 균일하게

유입되고 주유동과의 혼합이 적기 때문에 보다 이상적인 막냉각 성능을 보이므로 막냉각 성능의 비교기준이 될 수 있다⁽¹⁾.

이러한 슬롯 분사를 통한 막냉각 효율은 슬롯 분사각(또는 경사각)과 슬롯 폭, 슬롯 입/출구 형상 등과 같이 슬롯의 형상에 크게 의존하는 것으로 알려졌다. Jia 등⁽²⁾은 전산해석과 LDV(Laser doppler velocimetry) 측정을 통해 $16^\circ \sim 90^\circ$ 범위의 분사각을 갖는 평판 슬롯의 유동장을 분석하였고, 전산해석을 통해 막냉각 효율을 예측하였다. Sarkar와 Bose⁽³⁾는 평판 슬롯 분사각과 주유동의 난류 강도가 막냉각 효율에 미치는 영향을 전산해석을 통해 고찰하였다. 그들은 분사각 클수록 냉각유체와 주유동의 혼합이 강해지기 때문에 막냉각 효율이 감소한다고 설명했다.

Hyams 등⁽⁴⁾은 평판 슬롯의 입구와 출구 모서리 형성(Edge shaping)의 영향을 고찰하기 위해 날카로운 경사 슬

* 한국항공대학교(Korea Aerospace University)

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

롯과 곡물이 있는 경사 슬롯의 막냉각 효율을 비교하였다. 슬롯 입구와 출구 모서리의 성형은 냉각 유체가 슬롯 내부로 매끄럽게 유입되어 분사될 수 있도록 하여 막냉각 효율 향상에 긍정적인 영향을 미쳤다. Shalash 등⁽⁶⁾은 슬롯 홀의 출구 단면 형상이 슬롯의 막냉각 효율에 미치는 영향을 연구하였다.

한편, Fig. 1의 예시와 같이 터빈 고정자와 회전자 간극에서는 압축기로부터 바이 패스된 압축공기가 주유로로 누설된다. 이 누설 유동의 주된 목적은 고온의 주유동이 간극을 통해 내부로 역류하는 것을 방지하는 것이다. 뿐만 아니라 고온의 주유동에 비해 상대적으로 온도가 낮은 압축공기의 누설을 통해 하류의 끝 벽에 대한 막냉각 효과를 부수적으로 기대할 수 있다.

이에 따라 고정자와 회전자 간극의 누설유동을 고려한 터빈 끝 벽(또는 슈라우드) 막냉각 연구들이 수행되어 왔다. 이 누설유동은 단순한 구조의 슬롯 분사를 통해 구현되었으며, 주로 슬롯 형상변수의 영향이 연구되었다.

Papa 등⁽⁶⁾과 Wright 등⁽⁷⁾은 각각 30°와 45° 경사 슬롯이 구비된 선형 회전익 캐스케이드에서 끝 벽 막냉각 효율을 측정하였다. 그 결과, 상류 누설유동이 주유로에서의 유동장을 변화시키고 이에 따라 하류 끝 벽의 막냉각 효율에도 상당한 영향을 미친다고 발표하였다. Kim 등⁽⁸⁾은 터빈 고정익 조립체와 회전부 케이싱 간극을 통해 누설되는 유동이 슈라우드 전방영역의 막냉각 효율에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

본 연구에서는 가스터빈 고정자와 회전자 사이 간극을 모사하는 슬롯 막냉각에 대한 기초연구로써, 슬롯 폭과 분사각의 변화가 평판 막냉각 효율에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 슬롯 폭과 분사각은 각각 3 수준의 변화를 고려하였다. 슬롯 막냉각 효율은 주유동 속도 30 m/s 조건에서 압력감응페인트 기법을 이용하여 막냉각 효율을 측정하였다.

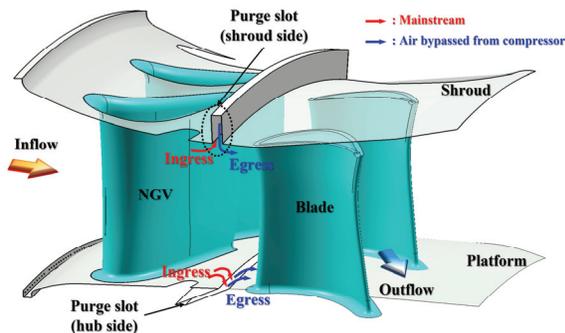


Fig. 1 The schematic of hub and shroud purge slots in a gas turbine stage

2. 막냉각 효율 측정이론 및 실험장치 구성

2.1 압력감응페인트 기법

막냉각 효율은 구성품 표면에 형성된 냉각유체 막 온도 (Film temperature, T_f)의 무차원화된 형태로 정의된다. 이때, 벽면의 재료가 낮은 열전도도를 갖는다고 가정하면 식 (1)에서와 같이, 막 온도는 단열 벽면 온도(Adiabatic wall temperature, T_{aw})로 대체 가능하다⁽⁸⁾.

$$\eta = \frac{T_\infty - T_f}{T_\infty - T_c} \approx \frac{T_\infty - T_{aw}}{T_\infty - T_c} \quad (1)$$

압력감응페인트(PSP, Pressure sensitive paint)는 다공성 중합체에 발광분자가 분포되어 있는 도료로, 이 발광분자들은 주변의 산소 농도에 반비례하여 빛을 방사하는 특징을 갖는데, 이를 산소 퀸칭(Oxygen quenching)이라고 한다. 발광분자가 나타내는 빛의 강도(I)와 산소분자의 농도, 즉 산소분압(P_{O_2})의 반비례 관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 식 (2)에서 하첨자 ref 는 주변의 유동은 없고 LED 조사만 있는 기준조건을 의미하고, blk 는 주변 유동과 LED 조사가 없는 암실조건을 의미하며, 각각 LED의 영향과 카메라 자체의 노이즈 영향을 배제하기 위해 고려되는 조건이다. 한편, 계수 A, B, C는 주변 온도 T 에 의존성이 있으므로 실제 실험조건과 동일한 온도조건에서 압력감응페인트 보정을 선행하여 계수 A, B, C를 도출해야 한다.

$$\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,ref}} = A(T) + B(T) \left(\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I - I_{blk}} \right) + C(T) \left(\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I - I_{blk}} \right)^2 + \dots \quad (2)$$

본 연구에 사용된 압력감응페인트(UniFIB-400, ISSI)는 400 nm 파장대 자외선에 노출된 조건에서 약 600 nm의 빛을 방사하는 특징을 가지며, 막냉각 효율 측정 실험과 동일

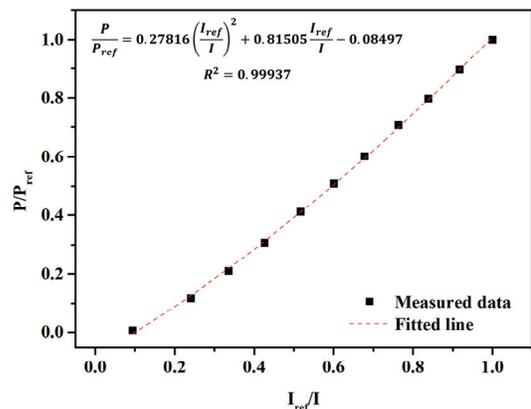


Fig. 2 PSP calibration curve measured at 297 K

한 온도조건에서 수행한 압력감응페인트의 보정곡선과 계수 값이 Fig. 2에 제시되어 있다.

압력감응페인트는 온도가 아니라 산소분압을 측정할 수 있으므로 물질전달의 범주에 포함되지만, 특정한 경계조건에서 성립하는 열전달과 물질전달의 유사성을 가정한다면 식 (1)에서 온도의 항으로 정의된 막냉각 효율은 식 (3)과 같이 산소분자의 농도 항으로 표현이 가능하다. 압력감응페인트를 이용한 막냉각 효율 측정에서는 산소를 포함하지 않는 이종기체를 분사하므로 더 많은 이종기체가 벽면을 덮을수록 식 (3)의 벽면 산소 농도 ($C_{O_2,fg}$)는 적어지고, 우수한 막냉각 효율이 나타난다. 압력의 항을 이용하여 식을 다시 정리하면, 막냉각 효율은 식 (4)에서와 같이 표현할 수 있다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 이 때 분모의 w_{fg}/w_{air} 는 이종기체와 공기의 물질량 비 (Molar mass fraction)로 이종기체와 공기의 밀도비(ρ_{fg}/ρ_{air})를 의미한다. 이 때, 하첨자 fg 와 air 는 각각 이종기체와 공기를 의미한다.

최종적으로 압력감응페인트의 발광분자가 방사하는 빛의 강도를 측정하고, 식 (2)~(4)을 통해 막냉각 효율을 계산할 수 있다.

$$\eta \approx \frac{C_w - C_\infty}{C_C - C_\infty} = \frac{C_{O_2,air} - C_{O_2,fg}}{C_{O_2,air}} \quad (3)$$

$$\eta \approx 1 - \frac{1}{\left(\frac{(P_{O_2})_{air}}{(P_{O_2})_{fg}} - 1\right) \frac{w_{fg}}{w_{air}} + 1} \quad (4)$$

본 연구에서 막냉각 효율 계산을 위한 발광강도는 각 조건마다 100 장의 이미지를 촬영하여 그 평균값을 사용하였다. 한편, 막냉각 효율의 측정 불확도는 국소 위치의 발광강도가 정규분포를 따른다는 가정 아래, 95 %의 신뢰구간을 적용하여 추산하였고, 막냉각 효율 $\eta=0.8$ 과 $\eta=0.2$ 인 경우에 각각 $u=\pm 0.26\%$, $u=\pm 3.3\%$ 수준의 측정 불확도를 갖는 것으로 추산되었다. 압력감응페인트 기법을 이용하여 측정한 막냉각 효율의 측정 불확도는 Johnson과 Hu⁽¹¹⁾가 제안한 방법을 이용하였다.

2.2 실험장치 구성

본 연구의 경사 슬롯은 총 5가지로, 슬롯 폭은 벽두께에 대한 역수를 무차원 변수(H/S)로 고려하였다. 슬롯 폭에 대한 무차원 변수 H/S 와 분사각 α 에 대하여 3 수준의 변화를 고려하였다. 슬롯의 폭과 분사각에 따라 달라지는 출구 면적과 위치가 달라지므로 슬롯 출구의 상류쪽 모서리의 위치를 슬롯의 기준위치로 선정하였다. 경사 슬롯의 형상과 치수 정보는 Fig. 3과 Table 1에 각각 제시되어 있다.

경사 슬롯은 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 시험부에 장착되고, 슬롯 하류의 평판에서 막냉각 효율 측정을 수행하였다. 평판 시험부의 상부에는 압력감응페인트가 도포된 평판을 조사하기 위한 광원(LM2x-DMHP-400, ISSI)과 발광분자의 발광강도를 측정하기 위한 sCMOS 카메라(pco.edge 3.1, PCO)가 설치되었다(Fig. 4(b)).

냉각유체는 평판 시험부 하부에 위치한 플래넘 챔버를 통해 경사 슬롯으로 공급되며, 냉각유체의 유량은 전자식 질량 유량 조절기(Mass flow controller)를 통해 제어된다. 본 연구에서는 주유동에 대한 냉각유체의 질량 유속 비율인 분사비($M=\rho_c u_c / \rho_\infty u_\infty$) 네 경우($M=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)를 고려하였다. 또한, 이산화탄소를 이종기체로 사용하여 주유동과의 밀도비(ρ_c / ρ_∞)는 약 1.5에 근사하였다.

막냉각 효율 측정 시험은 약 30 m/s의 주유동 속도 조건에서 수행되었다. 풍동 출구와 평판 시험부 사이에 위치한 난류 그리드는 Roach⁽¹²⁾의 연구를 참고하여 평행한 사각 그

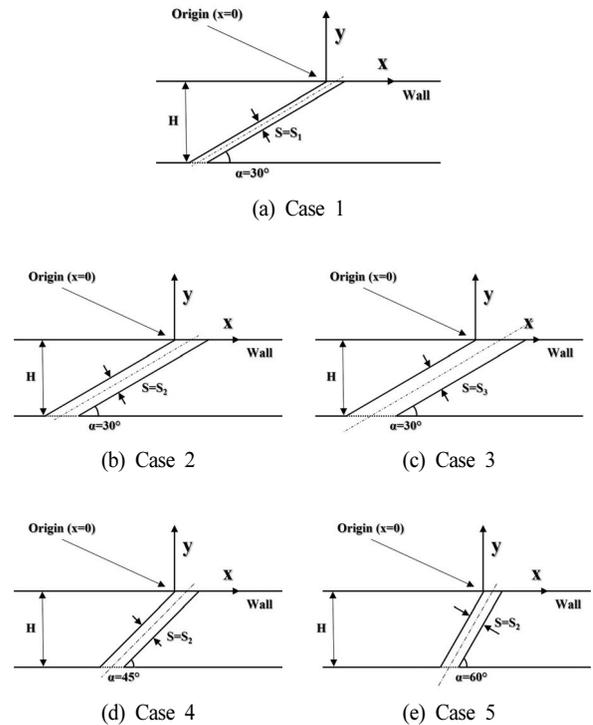


Fig. 3 Schematic of the tested slots

Table 1 Information of non-dimensional design parameters

	Wall thickness-to-slot width, H/S	Injection angle, α [deg]	Blowing ratio
Case 1	15.0	30	0.25 ~ 1.0
Case 2	7.5	30	
Case 3	5.0	30	
Case 4	7.5	45	
Case 5	7.5	60	

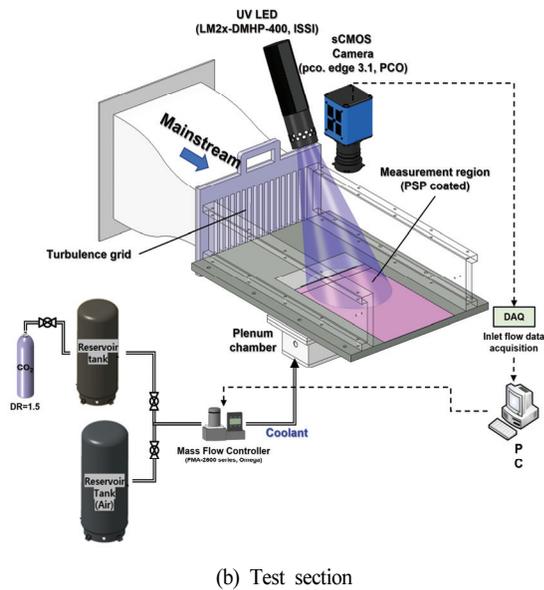
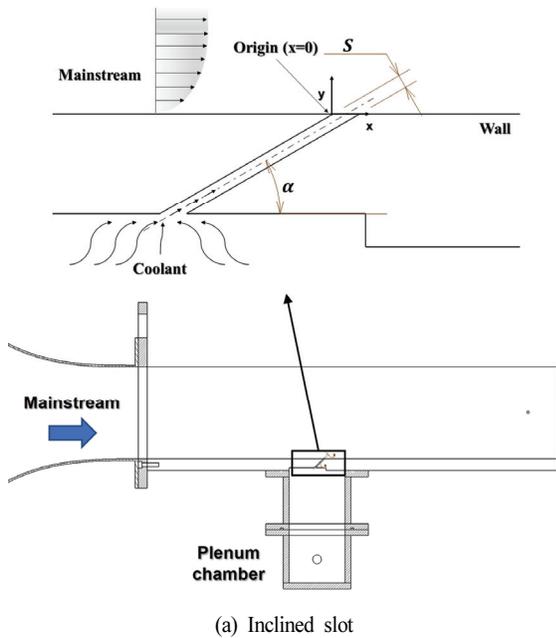


Fig. 4 Schematic of test apparatus

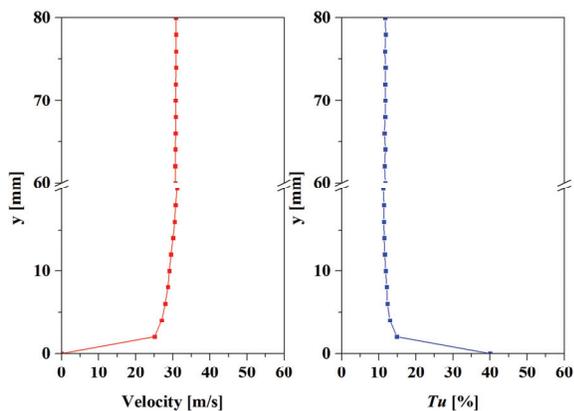


Fig. 5 Mainstream velocity and turbulence intensity

리드 형상으로 설계하였다. Fig. 5는 실제 시험과 동일한 주유동 조건에서 열선유속계(Hot-wire anemometer)를 통해 측정된 주유동의 속도와 난류강도 분포형상으로, 주유동의 경계층 두께는 약 8 mm, 난류 강도는 약 12 % 수준이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 슬롯 폭 영향

Fig. 6은 분사각이 30 °로 동일하지만 슬롯 폭에 대한 무차원 변수 H/S가 서로 다른 경사 슬롯(Cases 1~3)의 막냉각 효율 분포도이고, Case 3을 제외한 나머지 경우에 횡방향(Lateral direction, z-axis)으로 균일한 분포가 관찰되었다. Case 3에서는 슬롯 중앙 부근의 막냉각 효율이 비교적 낮게 분포하는 것으로 관찰되는데, 이는 슬롯 폭이 가장 넓은 Case 3의 분사면적이 플레넘 챔버가 냉각유체를 일정한 압력으로 균일하게 공급할 수 있는 분사면적보다 크기 때문에 플레넘 챔버 내의 압력이 충분히 균일해지기 전에 냉각유체가 분사되었기 때문으로 판단된다.

홀 분사와는 달리 슬롯 분사는 균일한 시트와 같은 형태로 냉각유체가 분사되기 때문에 홀 분사보다 주유동과의 혼합이 적고, 이에 따라 우수한 막냉각 효율을 보인다⁽¹⁾. 슬롯의 양 끝단($z/L = \pm 0.5$) 근방에서는 막냉각 효율이 낮은 영역이 존재한다. 이러한 형태의 분포는 슬롯의 끝단 근방에서 주유동과의 상호작용에 의한 와류들이 냉각유체를 부유(Lift-off)시켰기 때문이다. Kim 등⁽¹³⁾도 이와 유사한 형태의 슬롯 막냉각 효율 분포를 제시하였다.

일반적으로 분사비가 증가할수록 막냉각 효율도 증가한다. 그러나 과도한 분사비 조건에서는 주유동과 냉각유체의 상호작용에서 비롯된 와류에 의한 냉각유체의 부유현상과 과도한 모멘텀을 갖는 냉각유체의 경계층 관통에 의해 막냉각 효율이 감소한다⁽¹⁴⁾.

L'Ecuyer와 Soechting⁽¹⁴⁾는 분사비와 원통형 홀의 평균 막냉각 효율의 관계에 대해 고찰하였다. 그들은 냉각유체의 유동 및 주유동과의 혼합의 특성에 따라 mass addition regime, mixing regime, penetration regime으로 구분하였다. Mass addition regime은 냉각유체의 분사비가 증가할수록 냉각유체의 열용량이 증가되고 이에 따라 막냉각 효율이 증가하는 특성을 갖는다. 분사비가 점차 증가하여 mixing regime에 이르면, 분사비 증가에 따른 냉각유체의 열용량 증가 효과와 주유동과의 혼합의 증가 효과가 서로 상충하여 막냉각 효율의 경향이 일관적이지 않은 특성을 갖는다. 마지막으로 penetration regime은 과도한 분사비에 의해 냉각유체와 주유동의 혼합이 지배적이고 이에 따라 막냉각 효율이 점차 감소하는 특성을 갖는다.

본 연구에서는 모든 슬롯 형상들에서 공통적으로 분사비

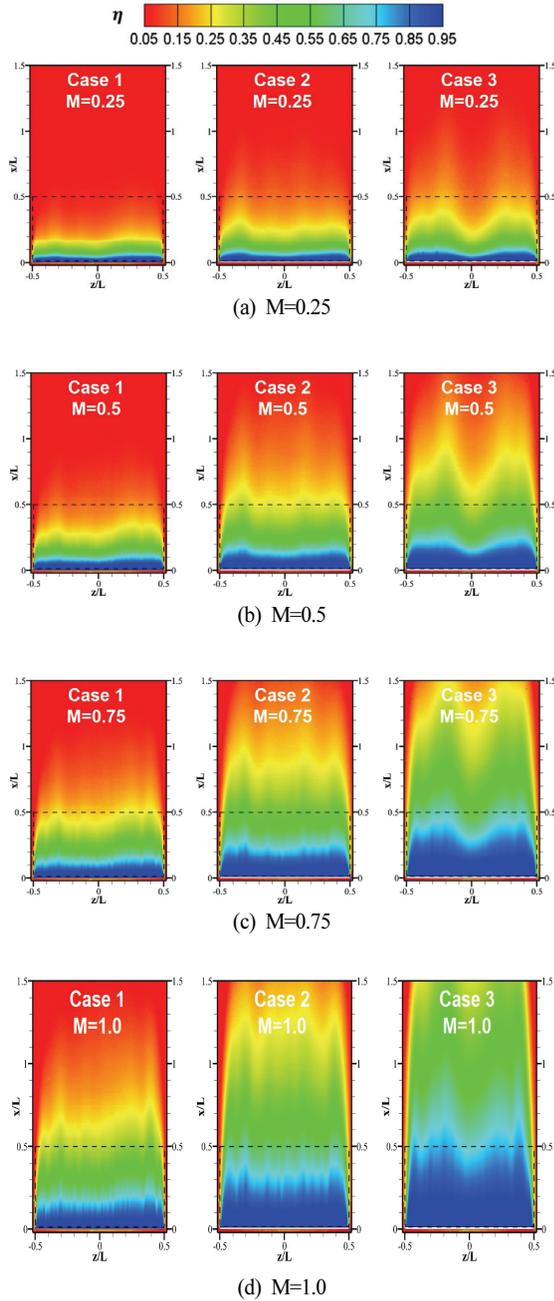


Fig. 6 Distribution of film cooling effectiveness for different slot H/S ratios

증가에 따른 막냉각 효율 증가의 경향이 확인되었는데, 이는 본 연구의 냉각유체 분사비 조건들이 mass addition regime의 영역에 속한 것으로 추정된다.

한편, 모든 분사비 조건에서 슬롯 폭이 넓을수록 즉, H/S 비가 낮을수록 높은 막냉각 효율을 보였다. 이는 동일한 분사비 조건에서는 단위면적 당 분사되는 냉각유체의 질량유량이 동일하기 때문에, 분사면적이 넓을수록 많은 양의 냉각유체가 분사됨을 의미한다. 즉, 슬롯 폭이 넓을수록 더 많은 양의 냉각유체가 분사되고, 이에 따라 막냉각 효율도 증가한다.

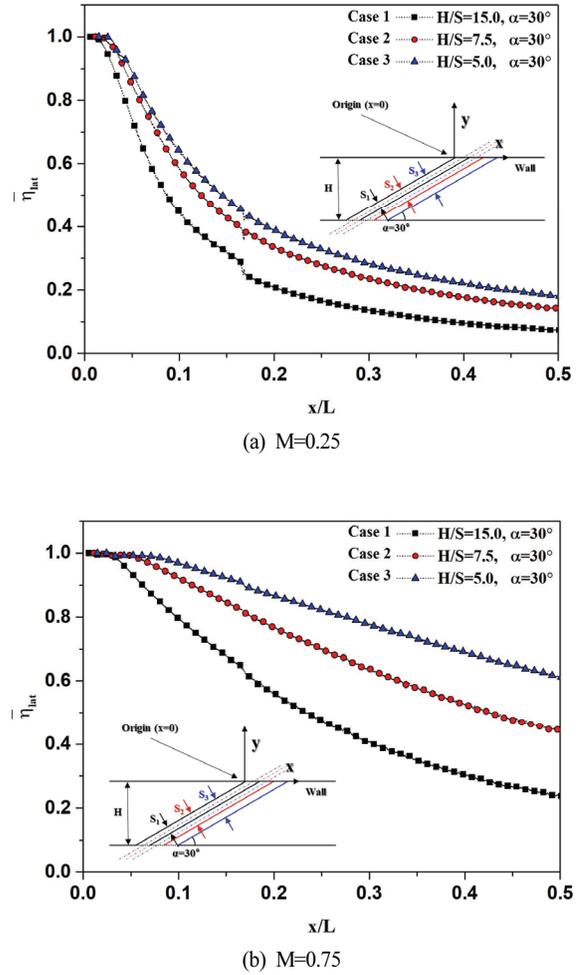


Fig. 7 Laterally averaged film cooling effectiveness for different slot H/S ratios

Fig. 7은 Cases 1~3의 결과 중, 분사비 M=0.25와 0.75 조건에서의 횡방향 평균 막냉각 효율 선도를 나타낸다. 평균은 Fig. 6의 백색 점선으로 표시된 영역($-0.5 < z/L < 0.5$, $0.014 < x/L < 0.5$)에 걸쳐 계산되었다.

낮은 분사비 M=0.25의 경우, 슬롯 출구 근방에서는 1에 가까운 높은 막냉각 효율을 보이지만, 하류로 갈수록 냉각유체의 모멘텀이 충분하지 않아 막냉각 효율이 급격히 감소하게 된다. 반면, 높은 분사비 M=0.75의 경우에는 상대적으로 높은 모멘텀으로 인해 더 많은 양의 냉각유체가 하류에 도달할 수 있었고, 이에 따라 하류로 갈수록 막냉각 효율의 쇠퇴(Decay)가 비교적 감소하는 것으로 나타났다.

3.2 슬롯 분사각 영향

Fig. 8은 슬롯 폭에 대한 슬롯 폭에 대한 무차원 변수 H/S는 동일하고, 분사각이 서로 다른 Cases 2, 4, 5의 막냉각 효율 분포도이다. 슬롯 폭이 동일한 Cases 2, 4, 5는 동일한 분사비 조건에서 동일한 양의 냉각유체가 분사되기 때

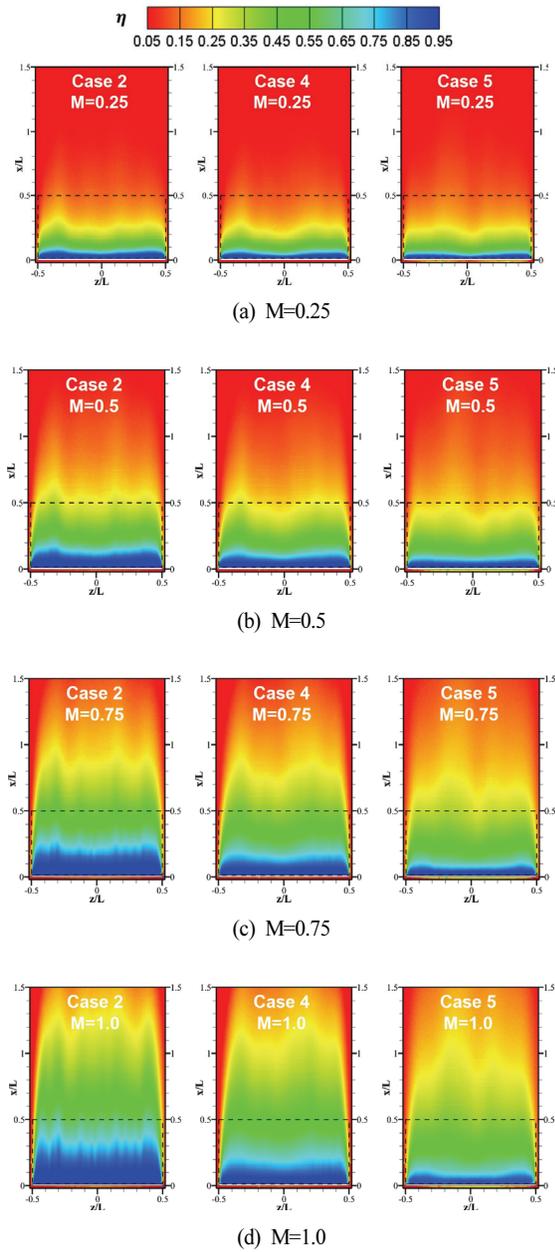


Fig. 8 Distribution of film cooling effectiveness for different slot injection angles

문에, 냉각유체의 분사각의 영향을 비교할 수 있다.

낮은 분사비 $M=0.25$ (Fig. 8(a))에서는 분사각에 따른 막냉각 효율이 유사한 수준의 값과 분포형상을 보였다. 특히 슬롯 출구 근방($0 < x/L < 0.2$)에 냉각유체가 집중되어 있다. 따라서, 분사비가 낮은 조건에서는 냉각유체가 충분한 모멘텀을 갖지 못하기 때문에 슬롯 출구 근방에만 머무르게 되어, 낮은 분사비 조건에서 분사각은 주목할만한 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

반면, 분사비가 증가할수록 슬롯 분사각의 영향이 점차 뚜렷해졌다. 특히 높은 분사비의 경우(Fig. 8(c), (d)), 분사각이 적은 Case 2($\alpha=30^\circ$)의 냉각유체가 가장 멀리까지 도

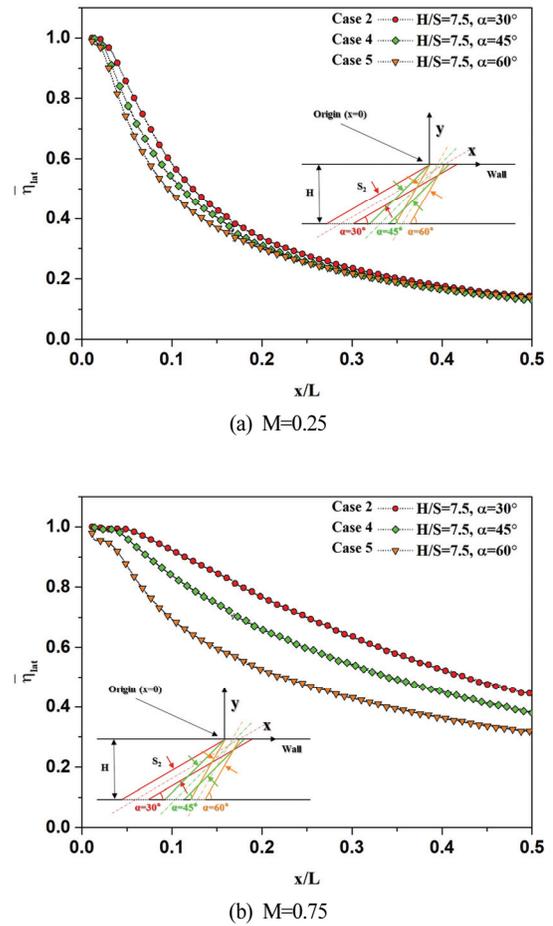


Fig. 9 Laterally averaged film cooling effectiveness for different slot injection angles

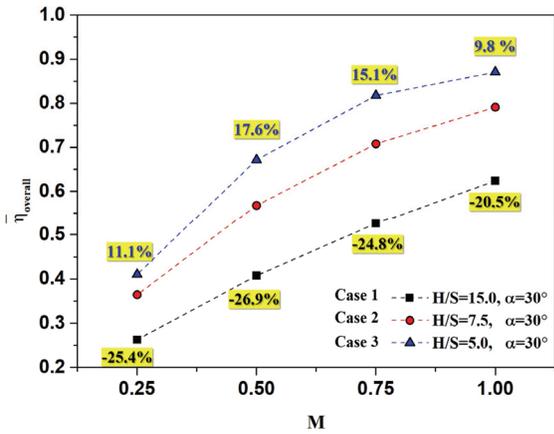
달하는 한편, 슬롯 출구 근방에서도 0.8 이상의 높은 막냉각 효율을 보이는 영역($0 < x < 70$)이 가장 넓었다. 반대로 분사각이 가장 큰 Case 5($\alpha=60^\circ$)은 가장 좁은 영역의 막냉각 효율 분포를 보였고, 이는 슬롯의 분사각이 클수록 냉각유체가 주유동과의 혼합이 더 강해지는 한편, 경계층을 더 쉽게 관통해 나갈 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 분사각의 이러한 경향은 선행연구들에서도 확인된 바 있다^(3, 4, 13).

Fig. 9는 Fig. 8의 결과를 정량적으로 보여주는 횡방향 평균 막냉각 효율 선도이다. 낮은 분사비 조건(Fig. 9(a))에서는 슬롯 분사각이 적은 순서(Cases 2, 4, 5)로 막냉각 효율이 높았으나, 슬롯 출구 근방의 일부 영역($0 < x/L < 0.2$)에서 약간의 차이가 있지만 $x/L > 0.3$ 이상의 하류 영역에서는 막냉각 효율의 차이가 매우 미미하였다.

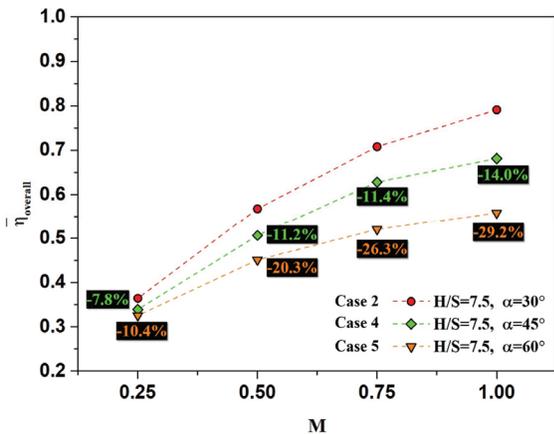
높은 분사비 조건에도 슬롯 분사각이 적을수록 높은 막냉각 효율을 보였으나, 낮은 분사비 조건에서와는 다르게 높은 분사비 조건에서 슬롯 분사각에 따른 막냉각 효율의 현격한 차이가 존재하였다.

3.3 면적평균 막냉각 효율

Fig. 10(a)와 (b)는 각각 슬롯 폭과 분사각에 따른 면적 평균 막냉각 효율을 분사비에 따라 나타낸 선도로, Case 2



(a) Slot H/S ratio



(b) Slot injection angle

Fig. 10 Overall averaged film cooling effectiveness at varying blowing ratio conditions

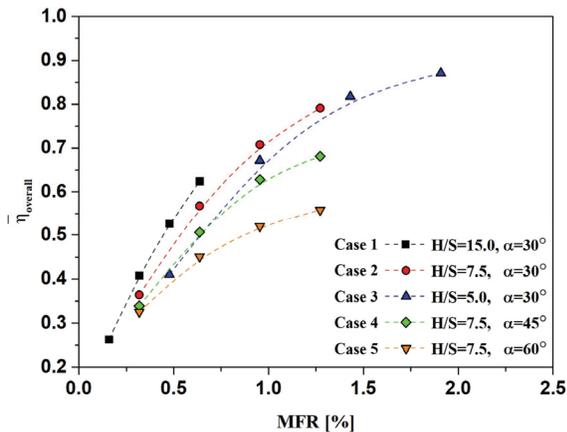


Fig. 11 Overall averaged film cooling effectiveness at varying MFR [%] conditions

의 면적평균 막냉각 효율에 대한 변화율도 함께 제시되어 있다. 모든 경우에 분사비 증가에 따른 막냉각 효율 증가 경향이 확인되었으나, 분사비가 증가할수록 막냉각 효율 증가율 즉, 선도에서의 기울기는 점차 줄어들었다. 분사비 M=1.0을 초과하는 어느 분사비 조건에서부터는 막냉각 효율이 다시 감소 추세를 보이는 mixing regime이나 penetration regime 범주에 접어들 가능성을 암시하고 있다.

Fig. 10으로부터, 동일한 분사각과 분사비 조건에서는 더 넓은 분사면적을 갖는 넓은 폭의 슬롯이 유리하고, 동일한 슬롯 폭과 분사비 조건에서는 주유동과의 혼합을 감소시킬 수 있는 완만한 분사각의 슬롯이 유리한 것으로 나타났다.

한편, Figs. 6과 8의 결과를 분사비가 아닌 주유동에 대한 냉각유체의 질량유량비(Mass flow ratio, $MFR = \dot{m}_c / \dot{m}_\infty \times 100$ [%])를 이용하여 Fig. 11과 같이 도시화하였다. Cases 2, 4, 5는 슬롯 폭이 동일하기 때문에 고정된 분사비에서는 분사되는 냉각유체 질량유량도 서로 동일하므로, 질량유량비에 따라 나타낸 Fig. 11의 결과는 Fig. 10(b)의 결과와 경향이 유사하였다.

반면, 슬롯 폭에 대한 무차원 변수 H/S가 서로 다른 Cases 1, 2, 3의 경우에는, 동일한 질량유량비 조건에서는 좁은 슬롯 폭이 더 유리한 것으로 나타났다. 즉, 동일한 막냉각 효율을 얻기 위해서는 폭이 좁은 슬롯이 더 적은 냉각유체를 사용하므로 터빈 열효율 손실을 감소시킬 수 있다는 관점에서 유리하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 경사 슬롯의 폭과 분사각이 하류의 막냉각 효율에 미치는 영향을 고찰하기 위해 평판 막냉각 시험을 수행하였다. 슬롯 폭과 분사각에 의한 막냉각 효율의 경향성을 확인하기 위해 슬롯 폭에 대한 무차원 변수와 분사각에 대해 각각 3수준의 변화를 부여하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과는 아래와 같다.

동일한 분사각과 분사비 조건에서는 슬롯 폭이 넓을수록 (H/S가 적을수록) 많은 양의 냉각유체가 분사되어 높은 막냉각 효율을 보였다.

동일한 H/S 값과 분사비 조건에서는 슬롯 분사각이 적을수록 높은 막냉각 효율을 보였으며, 이는 분사각이 주유동의 흐름 방향과 나란할수록 주유동과의 혼합이 감소하기 때문이다.

동일한 질량유량비 조건에서는 H/S가 클수록 즉, 슬롯 폭이 좁을수록 높은 막냉각 효율을 보였다. 달리 말하면, 동일한 막냉각 효율을 얻기 위해 더 적은 양의 냉각유체를 소모하기 때문에 터빈 열효율에 유리하다고 판단할 수 있다.

모든 경우에서 분사비가 증가할수록 막냉각 효율도 증가하는 경향을 확인하였는데, 이는 본 실험의 분사비 조건이

mass addition regime에 속하기 때문이며, 이를 초과하는 분사비 조건에서는 막냉각 효율이 되려 감소할 것으로 예측할 수 있다.

본 연구는 경사 슬롯의 막냉각 효율을 향상시키기 위한 기초연구로써, 슬롯의 폭과 분사각의 영향을 고찰하였다. 향후 더 다양한 설계변수와 변수 수준을 고려하는 후속 연구가 수행될 예정이다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구재단-미래국방혁신기술개발의 지원(NRF-2021M3F6A1085955)과 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(과제번호: 2022R1A6A1A03056784)을 받아 수행된 연구임.

References

- (1) Bogard, D. G., 2006, "Gas Turbine Film Cooling," AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 2, pp. 249-270.
- (2) Jia, R., Sunden, B., Miron, P., and Léger, B., 2005, "A numerical and experimental investigation of the slot film-cooling jet with various angles," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 127, No. 3, pp. 635-645.
- (3) Sarkar, S. and Bose, T. K., 1995, "Numerical simulation of a 2-D jet-crossflow interaction related to film cooling applications: Effects of blowing rate, injection angle and free-stream turbulence," Sadhana, Vol. 20, No. 6, pp. 915-935.
- (4) Hyams, D. G., McGovern, K. T., and Leylek, J. H., 1996, "Effects of Geometry on Slot-Jet Film Cooling Performance," ASME Turbo Expo, Birmingham, UK, 96-GT-187.
- (5) Shalash, K. M., El-Gabry, L. A., and Abo El-Azm, M. M., 2014, "Investigation of a novel discrete slot film cooling scheme," ASME Turbo Expo, Düsseldorf, Germany, GT2014-26019.
- (6) Papa, M., Srinivasan, V., and Goldstein, R. J., 2012, "Film Cooling Effect of Rotor-Stator Purge Flow on Endwall Heat/Mass Transfer," Journal of Turbomachinery, Vol. 134, No. 4, 041014.
- (7) Wright, L. M., Gao, Z., Yang, H., and Han, J. C., 2008, "Film Cooling Effectiveness Distribution on a Gas Turbine Blade Platform With Inclined Slot Leakage and Discrete Film Hole Flow," Journal of Heat Transfer, Vol. 130, No. 7, 071702.
- (8) Kim, G. M., Lee, S. I., Jeong, J. Y., Kwak, J. S., Kim, S., and Choi, J. U., 2021, "An experimental study of the leakage flow effect on the film cooling effectiveness of a gas turbine shroud," Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 13, No. 6, pp.061007.
- (9) Han, J. C. and Rallabandi, A., 2010, "Turbine blade film cooling using PSP technique," Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), Vol. 1, No. 1, 013001.
- (10) Charbonnier, D., Ott, P., Jonsson, M., Cottier, F., and Th. Köbke, T., 2009, "Experimental and numerical study of the thermal performance of a film cooled turbine platform," ASME Turbo Expo, Orlando, Florida, USA, GT2009-60306.
- (11) Johnson, B. and Hu, H., 2016, "Measurement Uncertainty Analysis in Determining Adiabatic Film Cooling Effectiveness by Using Pressure Sensitive Paint Technique," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 138, Paper No. 121004.
- (12) Roach, P. E., 1986, "The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 8, No. 2, June 1987, pp. 82-92.
- (13) Kim, G. M., Kwak, J. S., and Choi, J. U., 2022, "An experimental investigation on the effects of a slot exit protrusion on film cooling effectiveness," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 172, pp. 107306.
- (14) L'Ecuyer, M. R., and Soechting, F. O., 1985, "A Model for Correlating Flat Plate Film Cooling Effectiveness for Rows of Round Holes," The Propulsion and Energetic Panel 65th Symposium, Bergen, Norway, May 6-10, AGRAD Conference Proceedings, No. 390.