

금속 적층 가공 기법으로 제작된 팬 형상 막냉각 홀의 막냉각 효율 측정

류채현* · 조예림* · 이찬규* · 문영기** · 곽재수*†

Measurement of Film Cooling Effectiveness of Fan Shaped Film Cooling Holes Manufactured by Metal Additive Manufacturing

Chae Hyeon Ryu*, Ye Rim Jo*, Chan Gyu Lee*, Young Gi Mun**, Jae Su Kwak*†

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Metal additive manufacturing(금속적층제조), Film cooling(막냉각), Pressure Sensitive Paint(압력 감응페인트)

ABSTRACT

The film cooling effectiveness of fan-shaped film cooling holes fabricated using metal additive manufacturing was experimentally investigated. Four different hole geometries were analyzed, with their film cooling effectiveness measured using the pressure-sensitive paint technique. The influence of manufacturing materials was assessed by comparing the film cooling effectiveness of metal film cooling holes to that of plastic film cooling holes fabricated via stereolithography. Additionally, the film cooling effectiveness of metal film cooling holes with varying stacking angles was compared to examine the impact of process parameters in metal additive manufacturing. In this study, carbon dioxide was used to simulate a density ratio of 1.5, and the blowing ratios were set at 1.0 and 2.0. The results showed that larger hole exit areas and smaller injection angles enhanced film cooling effectiveness. However, metal film cooling holes with high surface roughness exhibited lower film cooling effectiveness compared to plastic film cooling holes. Furthermore, the study confirmed that film cooling effectiveness varied with the stacking angle, highlighting the importance of optimizing the build angle for each hole geometry.

기호 설명

C : 산소 질량 분율 (mass fraction)
 P : 정압 [Pa]
 w : 분자량 [kg/k·mol]
 M : 분사비
 DR : 밀도비 (density ratio)
 I : 발광 강도
 SEH : 단일 확장형상 홀 (single expanded hole)
 DEH : 이중 확장형상 홀 (double expanded hole)

그리스 문자

η : 막냉각 효율

하첨자

O_2 : 산소
 air : 공기
 blk : 암전 조건 (black condition)
 fg : 이종 기체 (foreign gas)
 mix : 공기-이종 기체 혼합물
 ref : 기준 상태

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과(Korea Aerospace University, School of Aerospace and Mechanical Engineering)

** 두산에너지빌리티 파워서비스 GT개발2팀(Doosan Enerbility, Power Service, GT Development Team 2)

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

1. 서 론

가스터빈 성능의 주요 지표 중 하나인 가스터빈 입구 온도(TIT, turbine inlet temperature)가 증가할수록 가스터빈의 출력과 효율이 높아진다. 가스터빈 입구 온도를 높이기 위해 터빈 부품의 소재, 냉각 기술 개선, 열차폐 코팅 등의 다양한 기술적 발전이 이루어져 왔으며, 최근 발전용 가스터빈의 경우 가스터빈 입구 온도는 약 1,650 °C 수준까지 증가되었다. 해당 수준은 이미 터빈 부품의 허용 온도를 넘어섰으며, 고온의 배기가스로부터 장시간 노출되는 부품의 요구 수명을 충족시키기 위해 다양하고 정교한 냉각 기법들이 연구되어 적용되고 있다. 그중 외부 냉각의 대표적인 막냉각은 베인과 블레이드의 표면에 형성된 막냉각 홀을 통해 상대적으로 낮은 온도의 공기를 분사함으로써 고온의 배기가스로부터 부품의 표면을 효율적으로 보호하는 기법이다. 이를 통해 부품의 표면 온도를 효과적으로 낮추고, 요구 수명을 확보할 수 있어 현대 터빈 부품에 필수적으로 적용되고 있다.

냉각 성능을 극대화하기 위해 다양한 형상의 냉각 홀이 제안되었으며, 단순 원형홀부터 확장부를 갖는 홀, 슬랏, 트렌치 홀 등 다양하고 복잡한 형상들이 연구되었다.⁽¹⁻²⁾ 이와 같은 연구를 통해 제시된 다양한 형상의 막냉각 홀은 가스터빈 입구 온도를 높이는 동시에 가스터빈 엔진 성능 향상에 대한 가능성을 보여주었지만, 터빈 부품 제작을 위한 주조 기술의 한계로 인해 복잡한 형상의 막냉각 홀을 실제로 구현하는 데에는 기술적 한계가 존재했다. 이를 해결하기 위해 금속 적층 가공 기법(metal additive manufacturing)이 가스터빈 부품 제작을 위한 혁신적인 기술로 주목받고 있다. 금속 적층 가공 기법은 금속 분말을 부분적으로 용융 및 적층하여 3차원의 형상을 제작하는 기법으로, 기존 방식으로 구현하기 어려운 복잡한 형상을 제작할 수 있다. 이를 통해 부품 제작의 유연성을 확보하고 성능을 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 제작 시간의 단축과 부품 경량화 역시 가능하다. 이러한 적층 기술의 특성은 전체 개발 시간을 단축시키고 자원 효율성을 높이는 데 기여할 수 있다.⁽³⁾

금속 적층 가공 기법은 제작하고자 하는 부품의 형상에 따라 적합한 공정을 고려해야 하는 기법이다. 특히 냉각 홀의 경우, 제작 공정에 따라 막냉각 홀 표면의 거칠기가 달라지며, 표면 거칠기의 증가는 압력 강하 및 냉각 유체의 불균일한 분사를 초래하여 냉각 효율 감소를 야기한다. 이에 따라, 금속 적층 가공 기법으로 제작된 터빈 부품의 특성을 분석하고 평가하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Snyder 등⁽⁴⁾은 공정 변수를 조정함으로써 표면 거칠기를 감소시킬 수 있음을 입증하였고, 이에 따른 전체 막냉각 효율 향상을 확인하였다. Schoroeder 등⁽⁵⁾은 막냉각 홀 내부의 거칠기가 막냉각 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 표면 거칠기와 분사비에 따른 막냉각 효율을 비교하였다. 그 결과, 막냉각 홀

의 거칠기가 크고 분사비가 높을수록 막냉각 효율이 낮아지는 것을 확인하였다. Vinton 등⁽⁶⁾은 표면 거칠기에 따른 막냉각 효율을 비교하고자 DMLS(Direct Metal Laser Sintering)로 제작된 금속 막냉각 홀과 Stratasys Object 30 Pro printer로 제작된 ABS 플라스틱 막냉각 홀의 냉각 효율을 비교하였다. Zamiri 등⁽⁷⁾은 Large eddy simulations(LES) 전산 해석을 통해 팬 형상 막냉각 홀의 표면 거칠기가 막냉각 효율에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. Shi 등⁽⁸⁾은 금속 적층 가공 기법을 통해 제작된 막냉각 홀 형상을 3차원 형상으로 스캔하여 냉각 성능 평가를 위해 전산해석을 진행하고, 막냉각 홀 내부에서의 유동을 분석하였다. Stimpson 등⁽⁹⁾은 L-PBF(Laser Powder Bed Fusion) 공정을 활용하여 실제 터빈에 적용되는 직경의 막냉각 홀을 제작하여 제작 방향과 홀 직경에 따른 막냉각 효율을 비교하였다.

기존 주조 기법으로 제작이 어려운 막냉각 홀 형상을 평가하기 위해 Snyder 등⁽³⁾은 니켈 합금 소재를 이용한 금속 적층 가공 기법으로 막냉각 홀을 제작하고, IR카메라 기법을 활용하여 막냉각 효율을 측정하였다. 그 결과, 적층 제작된 홀과 설계 형상의 차이를 보였으며, 막냉각 효율 측정값과 설계 의도 간의 불일치 가능성을 확인하였다. Castelli 등⁽¹⁰⁾은 금속 적층 가공 기법으로 제작된 새로운 냉각 홀 형상을 설계하고, 전산해석 결과와 유사한 막냉각 효율을 위한 재설계 과정을 진행하였다. Lee 등⁽¹¹⁾은 전산 해석을 통해 금속 적층 가공 기법 공정으로 발생할 수 있는 표면 거칠기와 부분적인 막힘이 막냉각 효율에 미치는 영향을 평가하였다.

본 연구에서는 국내 가스터빈 제작사에서 보유한 금속 적층 제조 장비를 활용하여 제작된 금속 막냉각 홀의 막냉각 효율을 평가하였으며, 3가지의 주요 변수에 따른 막냉각 효율을 분석하였다. 먼저, 형상 변수의 영향을 분석하기 위해 네 가지의 팬 형상에 대한 막냉각 효율을 비교하였다. 또한, 금속 적층 가공 기법으로 제작된 금속 막냉각 홀과 광경화성 수지 조형 방식(SLA, stereolithography)을 이용하여 제작된 플라스틱 막냉각 홀의 막냉각 효율을 비교함으로써 표면 거칠기가 막냉각 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로, 공정 방식의 차이에 따른 막냉각 효율을 비교하기 위해 두 가지 적층 각도로 제작된 막냉각 홀 형상의 막냉각 효율을 측정하였다.

2. 막냉각 효율 측정 방법 및 실험 장치

2.1 압력감응페인트 기법

본 연구에서는 금속 및 플라스틱 막냉각 홀의 막냉각 효율을 측정하기 위해 물질전달 기법인 압력감응페인트(PSP, Pressure Sensitive Paint) 기법을 활용하였다. 압력감응페인트(UniFIB-400, ISSI)는 표면의 압력을 측정하는 광학 센

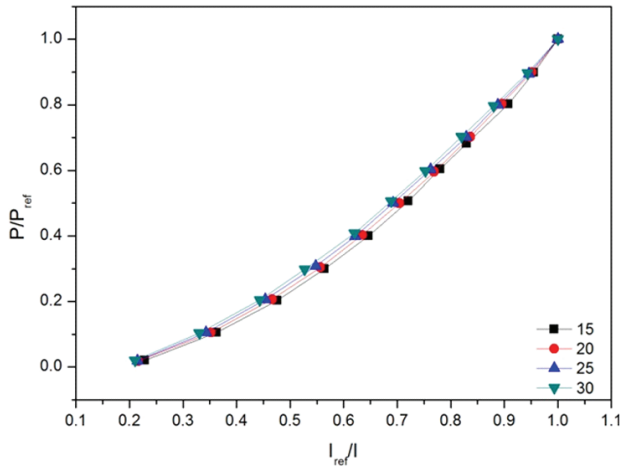


Fig. 1 PSP calibration curve

서로, 산소 투과성 바인더와 산소에 반응하는 발광 분자로 구성되어 있다. 압력감응페인트 내 발광 분자는 400nm 파장의 LED 광원을 흡수하여 여기 상태에 도달한 후, 600nm 파장의 빛을 방출하며 바닥상태로 회복된다.⁽¹²⁻¹³⁾ 이때 압력감응페인트가 발광하는 정도는 표면 산소 분압에 반비례하며, 발광강도(I)와 산소 분압(P_{O_2}) 간의 관계는 식 (1)로 나타낸다. I_{ref} 는 주변 유동이 없고 LED를 조사했을 때의 발광 강도이며, I_{blk} 은 LED 조사 없이 카메라의 자체 노이즈를 제거하기 위해 측정하는 발광 강도이다.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾ 한편, 식 (1)에 나타낸 계수 A, B, C는 주변 온도에 따라 변동하므로 다양한 온도 조건에서 계수값을 보정하였으며, 보정 곡선 결과는 Fig. 1에 제시되어 있다.

$$\frac{P_{O_2}}{P_{O_2ref}} = A(T) + B(T)\left(\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I - I_{blk}}\right) + C(T)\left(\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I - I_{blk}}\right)^2 \quad (1)$$

앞서 언급한 바와 같이, 압력감응페인트는 산소 분압을 측정하는 물질전달 기법이며, 난류 경계 조건에서 열전달과 물질전달 간의 유사성을 이용하여 막냉각 효율은 식 (2)로 나타낼 수 있다. 최종적으로 막냉각 효율은 이중 기체와 공기의 산소 분압 및 물질량 비를 활용하여 식 (3)으로 계산된다.^(14,15) 해당 수식 및 실험 방법에 관한 자세한 내용은 Kim 등⁽¹⁴⁾의 연구에서 제시하고 있다.

$$\eta \approx \frac{C_{mix} - C_{air}}{C_{fg} - C_{air}} = \frac{(P_{O_2})_{air} - (P_{O_2})_{mix}}{(P_{O_2})_{air}} \quad (2)$$

$$\eta \approx 1 - \frac{1}{\left(\frac{(P_{O_2})_{air}}{(P_{O_2})_{fg}} - 1\right) \frac{w_{fg}}{w_{air}} + 1} \quad (3)$$

막냉각 효율 불확도(uncertainty)는 측정된 발광 강도의 불확도를 바탕으로 식 (4)를 통해 계산된다.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾ 막냉각 효율이 $\eta = 0.8$ 과 0.2 일 경우, 각각 0.3%, 0.98%의 불확도를 갖는다.

$$\Delta \eta = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial I_{ref}} \Delta I_{ref}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I_{blk}} \Delta I_{blk}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I_{air}} \Delta I_{air}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I_{fg}} \Delta I_{fg}\right)^2} \quad (4)$$

2.2 실험 장치

Fig. 2는 본 연구에서 팬 형상 막냉각 홀을 대상으로 막냉각 효율을 측정하기 위해 사용된 실험 장치의 개략도를 보여준다. 주유동은 시험부 상류에 설치된 난류 그리드를 통해 속도 30 m/s에서 약 12%의 난류 강도를 가진다. Fig. 3은 열선유속계(StreamLine Pro, Dantec)를 이용하여 막냉각 홀 출구로부터 80mm 상류에서 측정된 주유동 유속과 난류 강도가 제시되어 있다. 냉각 유체는 전자식 질량유량제어기(FMA-2600A, OMEGA)를 통해 제어되며, 시험부 하단의 플레뉴 챔버로부터 공급된다. 주유동에 대한 냉각 유체의 분사비(M)는 2가지(M = 1.0, 2.0) 실험 조건으로 선정하였으며, 밀도비(DR) 1.5를 모사하기 위해 CO₂를 냉각 유체로 사용하였다. 또한, 압력감응페인트를 활용한 막냉각 효율 측정을 위해, 시험부 상단에는 400nm 파장의 빛을 방사하는 공랭식 UV LED(LM2X-DM-400, ISSI)와 발광 강도 측정을 위한 CCD 카메라(PCO edge 3.1, PCO)를 설치하였다.

본 연구에서는 네 가지 팬 형상 막냉각 홀에 대한 막냉각 효율 측정을 진행하였으며, 각 막냉각 홀의 형상은 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4(a)와 (b)는 전방향 및 횡방향으로 각각 한 번 확장되는 단일 확장형상 홀(SEH, single expanded hole)이며, Fig. 4(b)는 (a)보다 확장 정도가 더 큰 형상을

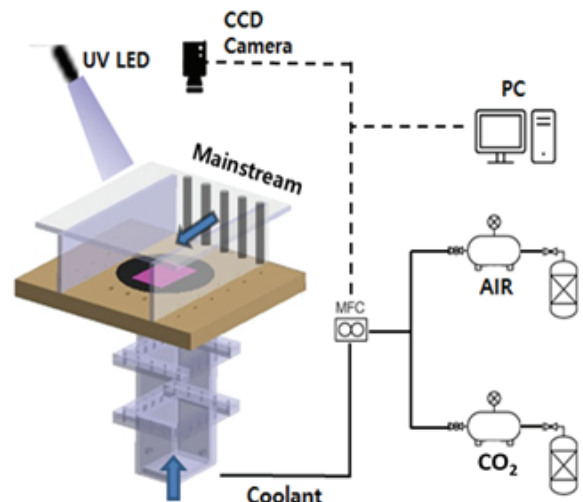


Fig. 2 Schematic of test section

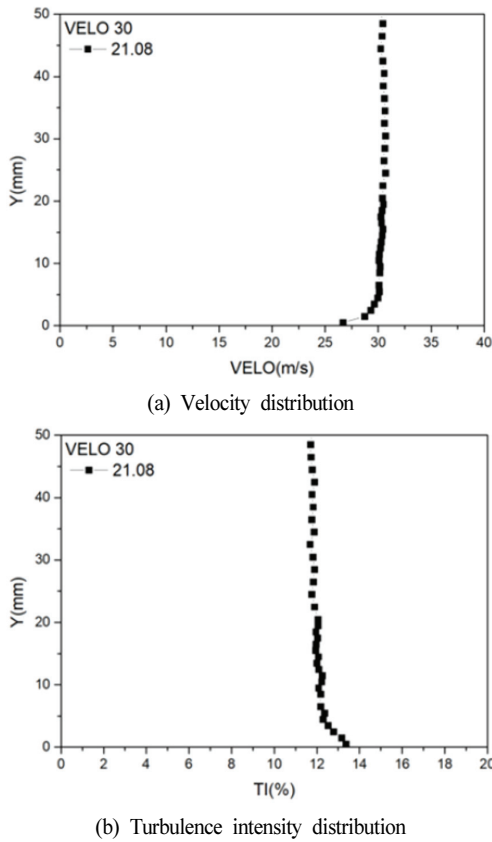


Fig. 3 Mainstream velocity and turbulence intensity distribution

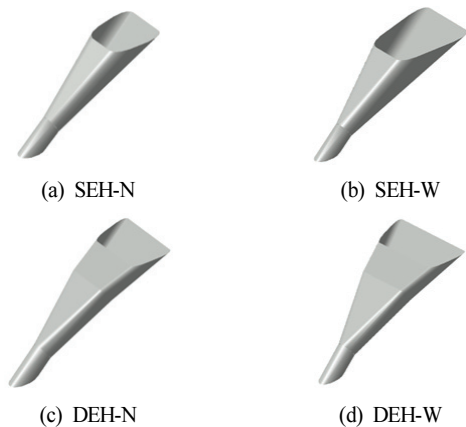


Fig. 4 Geometrical configurations of fan shaped film cooling holes

보여준다. Fig. 4(c)와 (d)는 전방향 및 횡방향으로 각각 두 번 확장되는 이중 확장형상 홀(DEH, double expanded hole)을 나타내며, Fig. 4(d)는 (c)보다 확장되는 정도가 더 크다. Fig. 4의 'N'은 확장 정도가 작은(narrow) 홀을, 'W'는 확장 정도가 큰(wide) 홀을 나타낸다.

금속 막냉각 홀은 국내 가스터빈 제작사가 보유한 금속 적층 제조 장비인 EOS M400-4를 사용하여 제작되었다. 제작

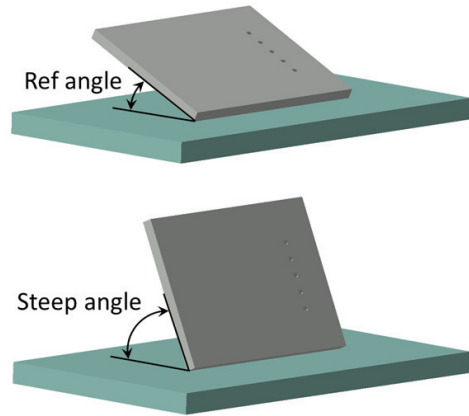


Fig. 5 Manufacturing angles of metal holes

공정에 따른 막냉각 효율을 비교하기 위해 두 가지 적층 각도로 막냉각 홀을 제작하였으며, Fig. 5는 적층 각도에 대한 모식도를 나타낸다. Fig. 5 상단의 'ref angle'은 기준 적층 각도를 의미하며, 하단의 'steep angle'은 기준 적층 각도보다 지면과 이루는 각도가 더 큰 고각 적층 각도를 나타낸다.

3. 실험 결과

3.1 금속 막냉각 홀 형상에 따른 막냉각 효율 비교

Fig. 6는 네 가지의 금속 막냉각 홀 형상에 대한 막냉각 효율 분포를 나타낸다. 본 실험에서 사용된 금속 막냉각 홀 형상은 금속 적층 가공 기법을 통해 제작되었으며, 후처리 과정을 거치지 않았다. 이로 인해 동일한 형상으로 설계된 동일 시편의 막냉각 홀 사이에도 형상 차이가 발생하며, 이러한 차이는 막냉각 효율 분포의 비대칭성을 야기한다.

Fig. 7은 분사비 $M = 1.0$ 과 2.0 조건에서의 각 막냉각 홀 형상의 횡방향 평균 막냉각 효율을 나타낸다. 횡방향 평균 막냉각 효율은 횡방향으로 홀 직경의 30배 범위($-15 < y/D < 15$)에서 계산된 막냉각 효율 평균값을 의미하며, 홀 출구부터 전방향으로 홀 직경의 40배 범위($0 < x/D < 40$)까지 계산하였다. 모든 막냉각 홀 형상에서 분사비가 증가할수록 막냉각 효율이 높아지는 경향이 확인되었다. 이는 분사비 증가로 더 많은 양의 냉각 유체가 분사되며, 분사된 유체가 부유되지 않고 표면에 안정적으로 부착되어 하류까지 도달했기 때문이다.⁽¹⁸⁾

전방향 및 횡방향으로 한 번 확장된 SEH의 경우, 확장 정도가 작은 SEH-N은 확장각이 큰 SEH-W에 비해 홀 출구부($x/D = 0$) 근방에서 약 5.7% 높은 막냉각 효율을 보이나, 하류로 갈수록 그 차이는 감소하였다. 분사비 $M = 2.0$ 의 경우, 홀 출구부($x/D = 0$)에서는 분사비 $M = 1.0$ 과 유사한 경향을 보였으나, 하류 영역($x/D > 0.15$)에서는 SEH-W가 상대적으로 더 높은 막냉각 효율을 보였다. 이는 확장각과 출

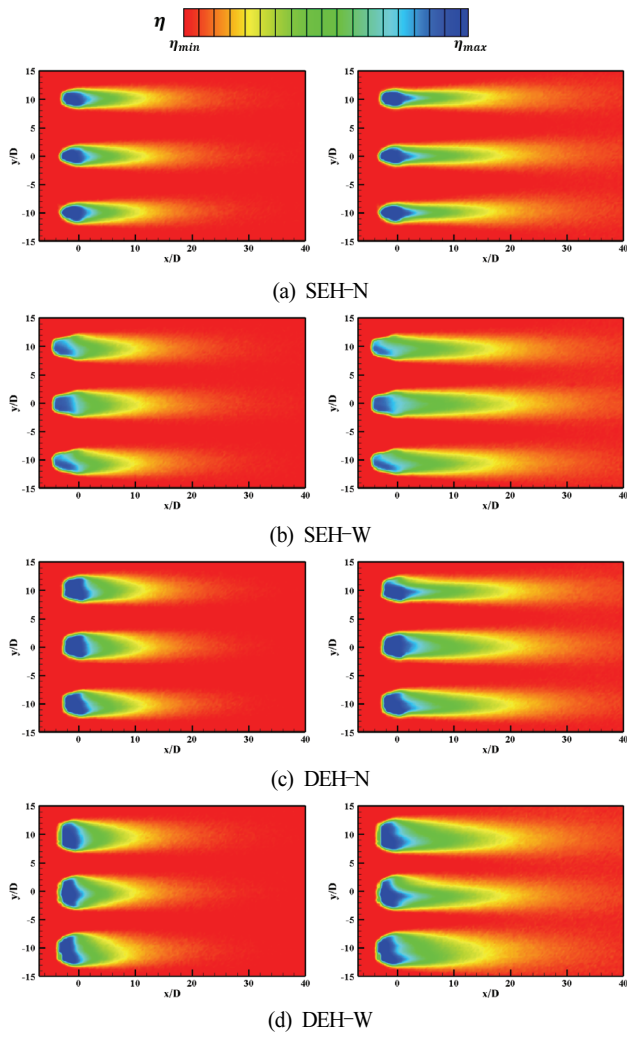


Fig. 6 Distribution of film cooling effectiveness for different holes manufactured by metal additive manufacturing(AM) at $M = 1.0$ (left) and $M = 2.0$ (right)

구 면적이 큰 SEH-W에서 분사된 냉각 유체의 낮은 모멘텀으로 인해 냉각 유체가 표면에 부착되어 넓게 퍼졌기 때문이며, 하류로 갈수록 냉각 효율이 감소하였다.

전방향 및 횡방향으로 두 번 확장된 DEH의 경우, 분사비 $M = 1.0$ 에서 상류 영역($x/D < 10$)에서는 출구 면적이 큰 DEH-W이 DEH-N 대비 횡방향으로 더 넓게 분사되며, 홀 출구부($x/D = 0$)에서 약 16.2% 높은 막냉각 효율을 보였다. 그러나, $x/D > 10$ 인 영역에서는 두 막냉각 홀의 막냉각 효율은 유사하였다. 분사비 $M = 2.0$ 조건에서는 SEH와 동일하게 확장각과 출구 면적이 큰 DEH-W에서 상대적으로 높은 막냉각 효율을 보였으며, 출구부($x/D = 0$)에서의 막냉각 효율은 DEH-N 대비 약 23.1% 높다.

DEH는 SEH 대비 막냉각 홀을 통해 분사되는 냉각 유체와 주유동이 이루는 각도가 작다. 이로 인해 냉각 유체와 주유동의 혼합이 감소하여, 냉각 유체가 하류까지 효과적으로 도달할 수 있다. 따라서, DEH는 SEH에 비해 높은 막냉각 효율이

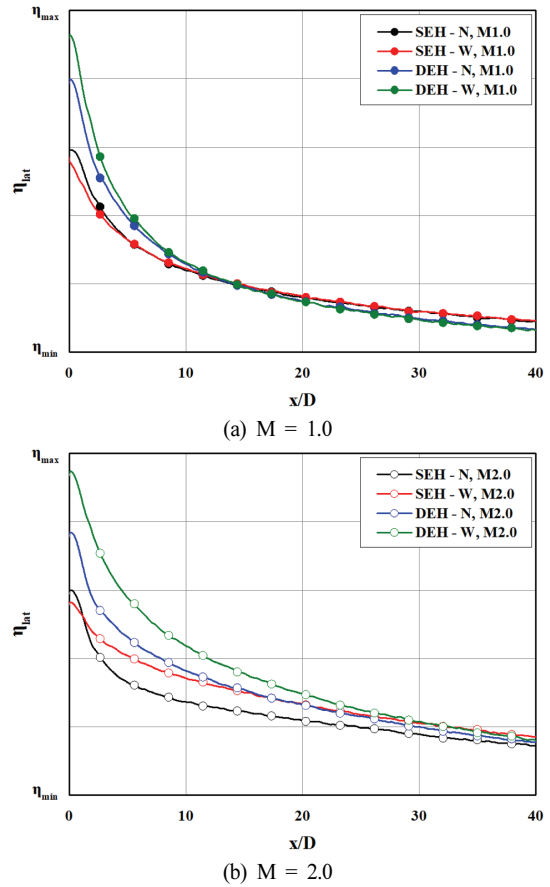


Fig. 7 Laterally averaged film cooling effectiveness for different holes

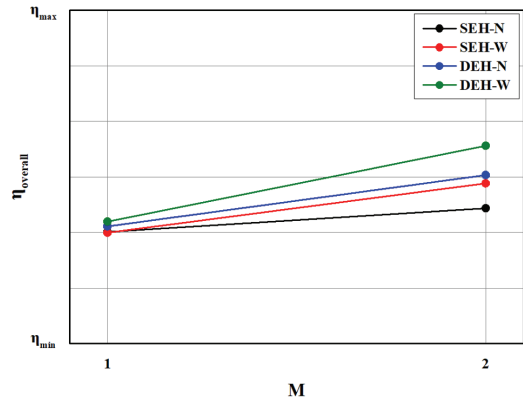


Fig. 8 Overall averaged film cooling effectiveness

예상되었으며, 실험 결과에서도 이러한 경향이 확인되었다.

Fig. 8은 각 막냉각 홀 형상의 전체 평균 막냉각 효율을 나타낸다. 전체 평균 막냉각 효율은 횡방향으로 홀 직경의 30배($-15 < y/D < 15$), 전방향으로 홀 직경의 40배($0 < x/D < 40$) 범위를 기준으로 계산하였다. 모든 분사비 조건에서 DEH는 SEH보다 높은 전체 평균 막냉각 효율을 보인다. 특히, DEH-W는 SEH-N에 비해 분사비 $M = 1.0$ 에서 약 9.2%, $M = 2.0$ 에서 약 46.2% 높은 전체 면적 효율을 보인다.

3.2 표면 거칠기에 따른 막냉각 효율 비교

본 3.2절에서는 표면 거칠기에 따른 막냉각 효율을 비교하기 위해, 광경화성 수지 조형 방식으로 제작된 플라스틱 막냉각 홀과 금속 적층 가공 기법으로 제작된 금속 막냉각

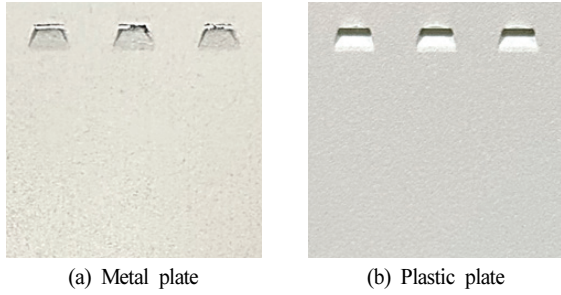


Fig. 9 Surfaces of metal and plastic plates

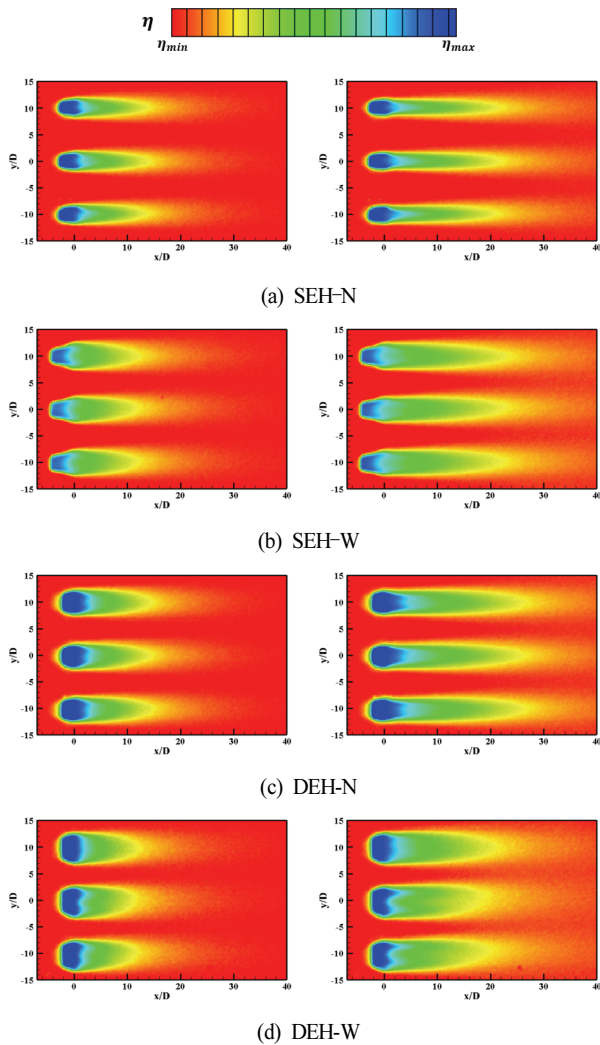


Fig. 10 Distribution of film cooling effectiveness for different holes manufactured by stereolithography(SLA) at $M = 1.0$ (left) and $M = 2.0$ (right)

홀의 막냉각 효율을 측정하였다. Fig. 9는 각각의 제작 방식으로 적층된 막냉각 홀 형상을 보여주며, 금속 막냉각 홀의 표면이 플라스틱 막냉각 홀의 표면보다 상대적으로 거칠게 나타났다.

Fig. 10은 광경화성 수지 조형 방식으로 제작된 플라스틱 막냉각 홀에 대한 막냉각 효율 분포를 나타낸다. 해당 분포도는 금속 막냉각 홀의 분포(Fig. 6)와 비교했을 때, 동일 시편에 제작된 세 개의 막냉각 홀에서 형상 차이가 나타나지 않으며, 세 개의 막냉각 홀에서 유사한 막냉각 효율 분포를 보였다.

광경화성 수지 조형 방식으로 제작된 플라스틱 막냉각 홀의 막냉각 효율은 금속 적층 가공 기법으로 제작된 금속 막냉각 홀보다 전반적으로 높은 경향을 나타냈다. Fig. 11은 DEH-N의 횡방향 평균 막냉각 효율 선도로, 홀 출구부($x/D = 0$)에서 금속 막냉각 홀의 막냉각 효율은 플라스틱 막냉각 홀 대비 약 13% 낮으며, 하류에서도 금속 막냉각 홀의 막냉각 효율이 플라스틱 막냉각 홀에 비해 저조하게 나타났다.

Fig. 12는 네 가지 막냉각 홀 형상에 대해 제작 기법별 전체 평균 막냉각 효율을 나타낸다. 분사비 $M = 1.0$ 조건에서 금속 막냉각 홀의 막냉각 효율은 플라스틱 막냉각 홀 대비 약 19.8% 이상 낮았으며, 분사비 $M = 2.0$ 에서는 약 20.6% 이상의 막냉각 효율 감소를 보였다. 특히 DEH-N은 약 28.9%로 가장 큰 막냉각 효율 감소를 보였다.

이러한 금속 막냉각 홀에서의 낮은 막냉각 효율은 표면 거칠기로 인해 초래된다. 홀의 표면 거칠기는 홀 벽면의 전단 응력(wall shear stress)과 속도 섭동(velocity perturbation)을 증가시키며 홀 내부의 유동장을 변화시킨다. 이로 인해 홀 벽면 근처에서 강한 난류가 발생하고 경계층 두께가 증가한다. 두꺼워진 경계층은 홀 출구부에서 냉각 유체의 속도를 증가시켜 주유동으로의 빠른 분사(jet)를 유발하며, 이는 막냉각 효율 감소로 이어진다.⁽⁵⁻⁷⁾ 본 연구에서 사용된 금속 막냉각 홀은 금속 적층 가공 기법으로 제작된 후

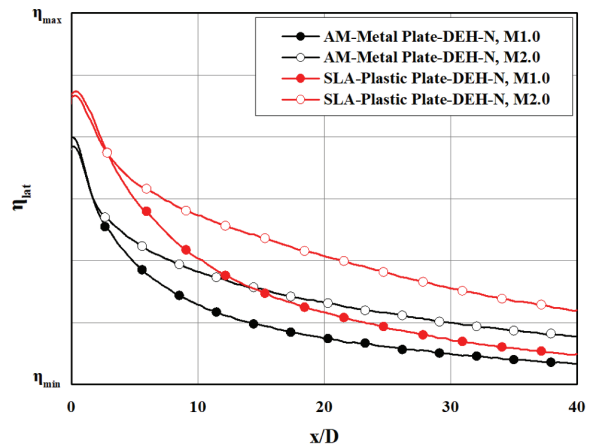


Fig. 11 Laterally averaged film cooling effectiveness for DEH-N

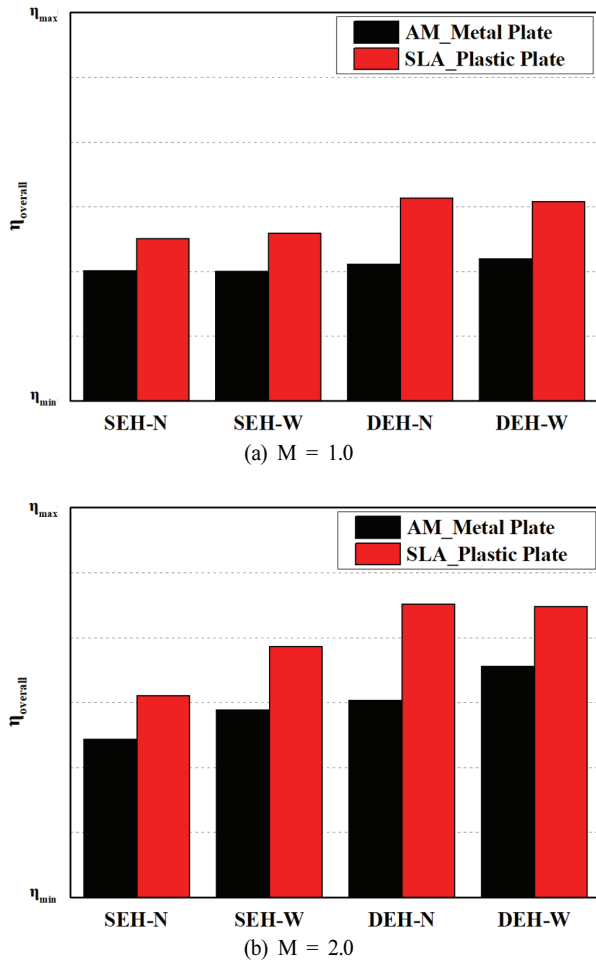


Fig. 12 Overall averaged film cooling effectiveness for different holes

추가적인 후처리 공정을 거치지 않았기 때문에 표면 거칠기의 영향이 더욱 두드러졌다. 따라서, 제작 공정 변수의 최적화와 후처리 공정을 통해 표면 거칠기를 개선할 필요가 있으며, 표면 거칠기에 따른 막냉각 효율 평가가 지속적으로 이루어져야 한다.

3.3 적층 각도에 따른 막냉각 효율 비교

금속 적층 가공 기법은 사용 재료, 레이저 강도, 적층 각도 등 다양한 공정 변수를 고려해야 한다. Snyder 등⁽⁴⁾은 레이저 분말 베드 융합(L-PBF, laser powder bed fusion) 장비를 이용하여 공정 변수에 따른 막냉각 홀의 막냉각 효율을 비교하며, 변수 조정의 중요성을 강조하였다. 또한, 적층 방향을 제외한 모든 변수를 동일하게 설정한 경우, 적층 방향에 따른 막냉각 효율 차이가 발생함을 보였다. 이는 금속 적층 가공 기법을 이용한 막냉각 홀 제작 시, 높은 막냉각 효율을 위해 공정 변수 최적화 과정이 필수적임을 의미한다.

본 절에서는 적층 각도에 따른 막냉각 홀의 막냉각 효율을 비교하였다. 적층 각도는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 국내

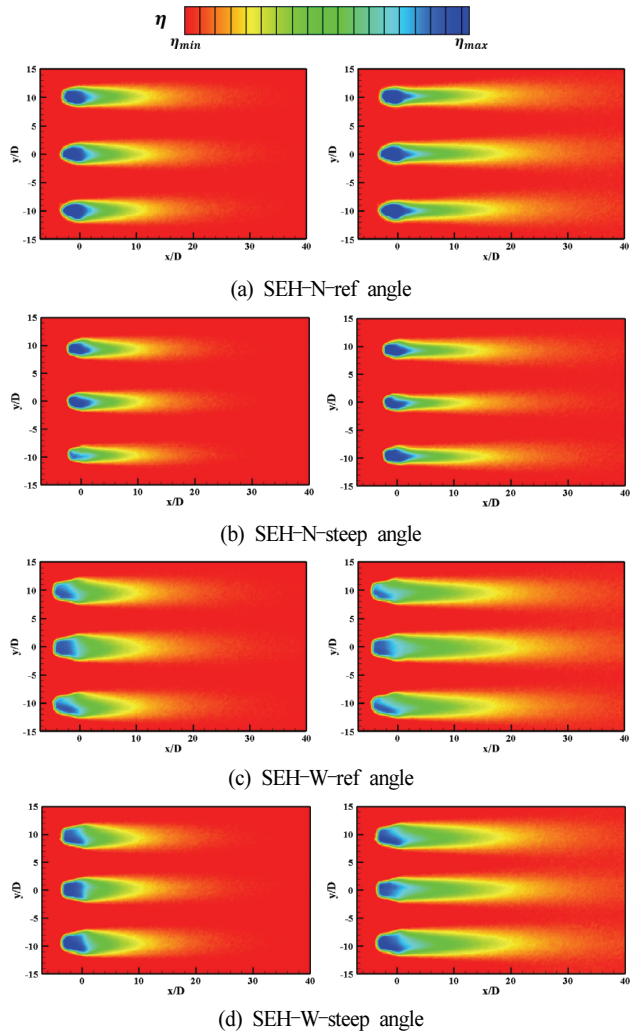


Fig. 13 Distribution of film cooling effectiveness for different manufacturing angles at $M = 1.0$ (left) and $M = 2.0$ (right)

가스터빈 제작사에서 설정한 기준 적층 각도(ref angle)와 기준 각도보다 시편이 지면과 이루는 각이 더 큰 고각 적층 각도(steeep angle)로 선정하였다. 막냉각 효율 비교 실험에는 전방향 및 횡방향으로 한 번 확장된 SEH를 사용하였으며, Fig. 13은 적층 각도에 따른 금속 막냉각 홀의 막냉각 효율 분포를 보여준다.

Fig. 14는 적층 각도에 따른 각 막냉각 홀 형상의 전체 평균 막냉각 효율 선도를 제시한다. SEH-N의 경우, 기준 적층 각도로 제작된 막냉각 홀이 고각 적층 각도로 제작된 막냉각 홀 대비 분사비 $M = 1.0$ 과 2.0 에서 각각 약 23.1%, 14.6% 높은 막냉각 효율을 보였다. 반면, SEH-W에서는 분사비 $M = 1.0$ 에서 기준 적층 각도로 제작된 막냉각 홀이 고각 적층 각도로 제작된 막냉각 홀 대비 약 2.5% 더 높은 막냉각 효율을 보였으나, 분사비 $M = 2.0$ 에서는 약 10.1% 낮은 결과를 보였다.

이와 같은 결과는 적층 각도나 방향에 따라 막냉각 홀 내부의 표면 거칠기와 형상 구현 완성도의 차이가 발생하기 때

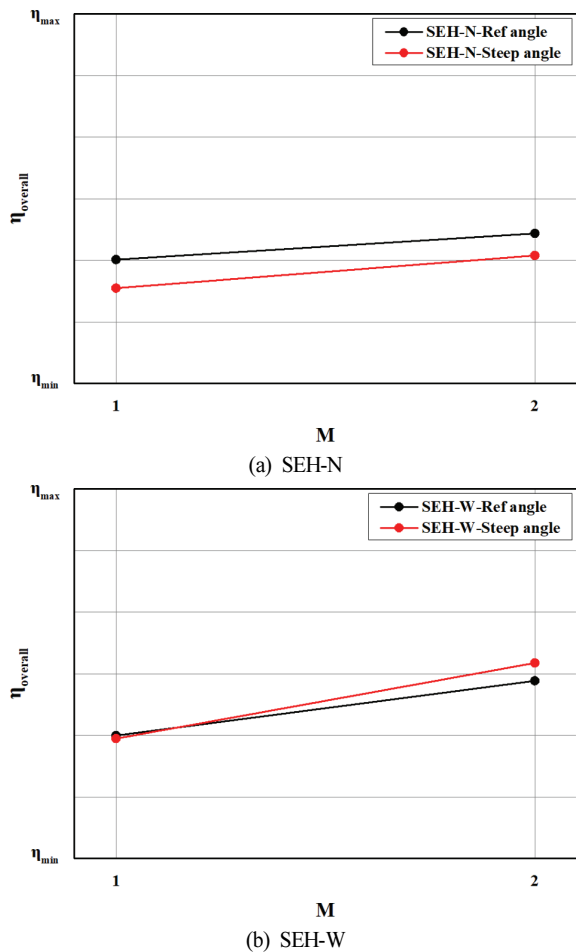


Fig. 14 Overall averaged film cooling effectiveness for different manufacturing angles

문으로 판단된다. 따라서 금속 적층 가공 기법을 통해 막냉각 홀을 제작할 경우, 막냉각 홀 형상에 따라 최적의 적층 각도를 선정해야 하며, 높은 막냉각 효율을 위해 공정 변수를 최적화하는 과정이 필수적이다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 가스터빈 제작사에서 보유한 금속 적층 가공 기법을 활용하여 제작된 팬 형상의 막냉각 홀에 대한 막냉각 효율 측정 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 동일한 분사비 조건에서 확장각이 큰 막냉각 홀(wide)은 냉각 유체의 낮은 모멘텀으로 인해 부유되지 않고 표면을 따라 흐르며 높은 막냉각 효율을 보였다. 또한, 이중 확장형상 홀(double expanded hole)은 단일 확장형상 홀(single expanded hole)보다 높은 막냉각 효율을 보였으며, 이는 냉각 유체가 주유동과 상대적으로 나란한 방향으로 분사되어 하류까지 효과적으로 막냉

각 효율을 유지할 수 있었기 때문이다.

- 2) 금속 적층 가공 기법으로 제작된 금속 막냉각 홀은 광경화성 수지 조형 방식으로 제작된 플라스틱 막냉각 홀보다 낮은 막냉각 효율을 보인다. 이는 금속 막냉각 홀의 표면 거칠기로 인해 홀 내부 벽면의 경계층 두께가 증가하고, 이로 인해 분사되는 냉각 유체의 속도가 증가하면서 막냉각 효율이 저하되었기 때문이다.
- 3) 다양한 공정 변수 중 적층 각도에 따라 막냉각 홀의 막냉각 효율이 달라짐을 확인하였다. 특히, 막냉각 홀 형상에 따라 최적의 적층 각도가 존재하며, 이를 확보할 경우 높은 막냉각 효율을 가진 금속 막냉각 홀을 제작할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 금속 적층 가공 기법으로 제작된 팬 형상 막냉각 홀의 막냉각 효율에 대한 기초 연구로써, 현재 제작 공정을 통해 구현된 홀의 냉각 특성을 고찰하였다. 향후에는 금속 적층 가공 기법을 활용하여 제작된 베인의 막냉각 효율에 대한 추가적인 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 두산에너지리터의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Ekkad, S., & Han, J. C., 2013, "A review of hole geometry and coolant density effect on film cooling," American Society of Mechanical Engineers, In Heat Transfer Summer Conference, Vol. 55492, p. V003T20A003.
- (2) Ramesh, S., Ramirez, D. G., Ekkad, S. V., Alvin, M. A., 2016, "Analysis of film cooling performance of advanced tripod hole geometries with and without manufacturing features," International Journal of Heat and Mass Transfer, 94, 9-19.
- (3) Snyder, J. C., Thole, K. A., 2020, "Performance of public film cooling geometries produced through additive manufacturing," Journal of Turbomachinery, 142(5), 051009.
- (4) Snyder, J. C., Thole, K. A., 2020, "Effect of additive manufacturing process parameters on turbine cooling," Journal of Turbomachinery, 142(5), 051007.
- (5) Schroeder, R. P., Thole, K. A., 2017, "Effect of in-hole roughness on film cooling from a shaped hole," Journal of Turbomachinery, 139(3), 031004.
- (6) Vinton, K. R., Nahang-Toudeshki, S., Wright, L. M., Carter, A., 2016, "Full coverage film cooling performance for combustor cooling manufactured using DMLS," American

- Society of Mechanical Engineers, In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 49798, p. V05BT17A005.
- (7) Zamiri, A., You, S. J., Chung, J. T., 2021, "Surface roughness effects on film-cooling effectiveness in a fan-shaped cooling hole," *Aerospace Science and Technology*, 119, 107082.
- (8) Shi, W., Li, X., Wang, L., Ren, J., Jiang, H., 2020, "Large Eddy Simulation of Film Cooling for the Real Additive Manufactured Fan-Shaped Holes," *American Society of Mechanical Engineers*, In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 84171, p. V07BT12A036.
- (9) Stimpson, C. K., Snyder, J. C., Thole, K. A., Mongillo, D., 2018, "Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes," *Journal of Turbomachinery*, 140(1), 011009.
- (10) Castelli, N., Picchi, A., Facchini, B., Winchler, L., Morante, F., 2024, "Optimization of a Novel Design-For-Additive-Manufacturing Film Cooling Hole," *American Society of Mechanical Engineers*, In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 87998, p. V007T12A039.
- (11) Lee, S., Hwang, W., Yee, K., 2018, "Robust design optimization of a turbine blade film cooling hole affected by roughness and blockage," *International Journal of Thermal Sciences*, 133, 216-229.
- (12) Han, J. C., Rallabandi, A. P., 2010, "Turbine blade film cooling using PSP technique," *Front. Heat Mass Transfer*, 1(1), 013001.
- (13) Johnson, B., Hu, H., 2016, "Measurement uncertainty analysis in determining adiabatic film cooling effectiveness by using pressure sensitive paint technique," *Journal of Turbomachinery*, 138(12), 121004.
- (14) Kim, G. M., Kwak, J. S., Choi, J. U., 2022, "An experimental investigation on the effects of a slot exit protrusion on film cooling effectiveness," *International Journal of Thermal Sciences*, 172, 107306.
- (15) Kang, Y. J., Park, S. H., Jeong, J. Y., Kim, G. M., Kwak, J. S., 2022, "The effects of manufacturing tolerance on the film cooling effectiveness of a laidback fan-shaped hole," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(4), 2127-2137.
- (16) Johnson, B., Hu, H., 2016, "Measurement uncertainty analysis in determining adiabatic film cooling effectiveness by using pressure sensitive paint technique," *Journal of Turbomachinery*, 138(12), 121004.
- (17) Natsui, G., Little, Z., Kapat, J. S., Dees, J. E., Laskowski, G., 2016, "A detailed uncertainty analysis of adiabatic film cooling effectiveness measurements using pressure-sensitive paint," *Journal of Turbomachinery*, 138(8), 081007.
- (18) Fraas, M., Glasenapp, T., Schulz, A., Bauer, H. J., 2019, "Film cooling measurements for a laidback fan-shaped hole: effect of coolant crossflow on cooling effectiveness and heat transfer," *Journal of Turbomachinery*, 141(4), 041006.