◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: https://doi.org/10.5293/kfma.2023.26.3.015
ISSN (Print): 2287-9706

막냉각 효율 측정을 위한 천이 IR 카메라 기법과 PSP 기법 비교

임원석* · 이대희* · 이아현* · 조예림* · 강민석* · 정진영* · 곽재수*†

Comparison of the Transient IR Camera and the PSP Techniques in Film Cooling Effectiveness Measurement

Won Seok Lim*, Dae Hee Lee*, Ah Hyeon Lee*, Ye Rim Jo*, Min Seok Kang*,
Jin Young Jeong*, Jae Su, Kwak*†

Key Words : Gas turbine(가스터빈); Flim Cooling(막냉각); IR Camera(IR 카메라); PSP(압력감응페인트); Fan-shaped hole(팬형상 홀)

ABSTRACT

Film cooling has been widely applied to the hot sections of gas turbines to protect those components from hot combustion gas. Various methods have been proposed to measure the film cooling effectiveness accurately. The transient infrared (IR) camera technique is a heat transfer method solving 1D transient heat conduction equations. On the other hand, the pressure sensitive paint (PSP) technique is a mass transfer technique, in which the concentration of oxygen is measured by the PSP and the film cooling effectiveness is calculated from the variation of concentration. In this study, the film cooling effectiveness of a fan shaped hole was experimentally measured using both heat and mass transfer methods under conditions of M = 1.0, 1.5 and 2.0, DR = 1.5. Both techniques showed a good agreement in film cooling effectiveness. In the case of the PSP technique, higher resolution and lower uncertainty were obtained compared to the transient IR technique. The maximum difference between the overall averaged film cooling effectiveness measured by the two methods was about 6%.

기호 설명

C	질량 분율(mass fraction)
DR	밀도비(Density ratio, ρ_c/ρ_m)
h	대류 열전달 계수 [W/m^2 K]
I	발광하는 빛의 강도(Intensity)
k	열전도율 [W/m K]
M	분사비(Blowing ratio, $(\rho_c u_c)/(\rho_m u_m)$)
P	정압 [Pa]
D	원형홀 직경 [mm]
d	그루브 깊이 [mm]
p	그루브 간격 [mm]

그리스 문자

α	분사 각도
η	막냉각 효율
ρ	밀도

하첨자

air	공기 분사
fg	이종기체(foreign gas)분사
o	산소
ref	기준 상태
m	주유동
c	냉각유체

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(Korea Aerospace University, School of Aerospace and Mechanical Engineering)
† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 3, June 2023, pp.15~22(Received 14 Mar. 2023; revised 10 May. 2023; accepted for publication 14 May. 2023)
한국유체기계학회 논문집: 제26권, 제3호, pp.15~22, 2023(논문접수일자: 2023.03.14, 논문수정일자: 2023.05.10, 심사완료일자: 2023.05.14)

1. 연구 배경

가스터빈의 연소 효율 향상을 위한 터빈 입구 온도(TIT)의 상승은 불가피하며, 높은 온도로 인해 발생하는 열부하는 고온 부품의 수명 단축과 파손을 야기한다. 이를 방지하여 고온 부품의 요구 수명 확보를 위해 고온 부품 냉각 기술에 대한 중요성이 대두되고 있으며, 연구자들은 다양한 방식의 고온 부품 냉각 기법을 제시하였다. 터빈의 고온 부품을 냉각하는 방식은 크게 내부 냉각, 외부 냉각으로 구분된다. 막냉각은 그중 외부 냉각의 일종으로 고온 부품 표면에 설치된 냉각 홀을 통해 주유동 보다 상대적으로 낮은 온도의 냉각유체를 분사하여 부품 표면을 덮음으로써 고온의 주유동과의 직접적인 대류 열전달을 차단하는 냉각 방식이다. 고온 부품 표면의 막냉각 효율 측정은 온도 분포 및 열부하 예측을 위해 필수적이며 정확한 측정을 위하여 다양한 실험 기법이 여러 연구를 통해 제시되었다. 막냉각 효율 측정 기법은 열전달 기법과 물질전달 기법으로 구분되며, 대표적인 열전달 기법과 물질전달 기법으로 천이 IR(Infrared) 기법 그리고 압력감응페인트(Pressure sensitive paint, PSP) 기법이 제시되었다.

천이 IR 기법은 물체가 적외선 영역에서 방사하는 복사에너지를 검출기로 감지 후 온도 에너지로 나타내주는 비접촉식 열전달 기법이다. Ekkad 등[(1)]은 막냉각 효율과 열전달 계수를 모두 계산하는 열전달 계수 측정 기법을 제시하였다. IR 카메라를 이용하여 초기 온도 분포와 실험 시작 후 2개의 시간에서 각각 온도 분포를 촬영하고 1차원 반무한 고체의 방정식을 풀이함으로써 열전달 계수와 막냉각 효율을 한차례에 측정하였다. Kwak 등[(2)]은 Duhamel의 중첩법과 1차원 열전도 방정식을 이용하는 천이 액정법을 통해 블레이드 팁의 막냉각 효율을 실험적으로 측정하였다. 액정을 이용하여 표면 온도가 초기 온도로부터 기준 온도까지 변화하는 시간을 측정하여 열전달 계수를 계산하였으며, Duhamel의 중첩법을 이용하여 시간에 따른 주유동 온도의 변화를 고려하였다. Xue 등[(3)]은 주유동 온도에 따른 고체 표면의 온도 변화를 IR 카메라를 이용하여 촬영하였고, 시간에 따른 고체 표면의 온도 분포를 이용하여 열전달 계수와 막냉각 효율을 계산하였다. O'Dowd 등[(4)]은 IR 카메라를 사용하는 4개의 열전달 기법의 열전달 계수를 비교하였으며, 4가지의 측정 기법 모두 유사한 열전달 계수 분포를 보였다. 이러한 열전달 기법은 막냉각 효율과 열전달 계수를 함께 측정할 수 있다는 장점을 가져 다양한 연구에 사용되고 있다.[(5-8)]

열전달 기법과 더불어 열전달과 물질전달의 상사를 기반으로 하여 막냉각 효율을 측정하는 실험 기법들 또한 널리 제시되었다. Goldstein 등[(9)]은 공기 중 함량이 아주 낮은 헬륨을 냉각 홀에서 분사하였고, 홀 하류의 표면의 헬륨 농도를 측정함으로써 막냉각 효율을 계산하였다. Cho와 Goldstein[(10-11)]은 나프탈렌 승화 기법과 열 및 물질전달의 상사를 이용하여 냉각 홀 내부 및 외부의 Sherwood 수와 막냉각 효율을 실험적으로 측정하였다. Han과 Rallabandi[(12)]는 PSP 기법을 상세히 설명하였는데, 냉각 홀에서 산소를 포함하지 않는 유체를 분사하였고, PSP를 통해 표면의 산소 분압을 측정함으로써 막냉각 효율을 계산하였다.

PSP 기법은 물질전달 기법의 하나로, 3차원적인 열전도 효과를 배제한 막냉각 효율 측정이 가능한 점에서 큰 장점이 있으므로 다양한 연구에서 활용되고 있다.[(13-16)]

천이 IR 카메라 기법은 표면 온도를 촬영함으로써 열전달 계수와 막냉각 효율을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 3차원적인 열전도를 1차원으로 가정하여 해를 구하기 때문에 홀 부근이나 시험부에서는 발생하는 3차원 열전도의 영향을 배제할 수 없다. 반면, PSP 기법은 표면의 압력 분포를 촬영함으로써 3차원적인 열전도 효과를 배제하기 때문에 단열 막냉각 효율을 측정할 수 있는 장점이 있지만, 열전달 계수 측정이 불가하다는 단점이 존재한다.

이처럼 막냉각 효율을 측정하기 위해 제시된 다양한 실험 기법들은 크게 열전달 기법과 물질전달 기법으로 구분된다. 물질전달 기법은 열전달과 물질전달이 상사하다는 것을 전제로 하여 수행되지만, 상사 실험의 정확도에 대한 우려가 여전히 존재하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 막냉각 측정 기법 중 대표적인 열전달 기법인 천이 IR 카메라 기법과 물질전달 기법인 PSP 기법을 활용하여 동일 조건에서 막냉각 효율을 측정하고, 두 기법으로 얻어진 결과를 정성적, 정량적으로 비교하여 두 기법의 장단점을 고찰하였다.

2. 본론

2.1 천이 IR(Infrared) 카메라 기법 실험 방법

본 연구에서는 열전달을 기반으로 하여 막냉각 효율을 측정하기 위한 기법으로 천이 IR 카메라 기법을 채택하였다. 송풍기에서 배출되는 주유동은 확장부와 정체실을 거쳐 유속의 균일도를 확보하였고, 고전류 전원공급장치(MKS-3500A, 1500 A at 35 V)를 이용하여 메쉬히터(700 mm × 700 mm)에 전원을 공급하여 IR 카메라를 활용한 측정 실험 중 주유동은 300 K에서 330 K까지 가열되었다. 본 실험에서 주유동의 온도 분포는 4개의 열전대를 활용하여 측정하였다. 수축부를 통해 가속된 주유동의 유속은 20 m/s, 난류 강도는 2.7 %이다.

Fig. 1은 실험 장치의 개략도로 시험부의 냉각 홀로 공급되는 냉각유체의 유량은 MFC (FMA-2600 series, Omega)로 조절되었다. 냉각유체는 막냉각 홀을 통해 분사되기 전 플레넘 챔버의 메쉬 스크린과 허니컴을 통과한다. 막냉각 실험의 조건은 밀도비(ρ_c/ρ_m) 1.5에서 분사비($(\rho_c u_c)/(\rho_m u_m)$)

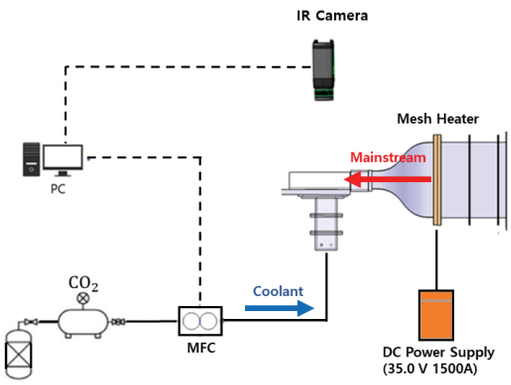


Fig. 1 Experimental setup for the transient IR camera technique

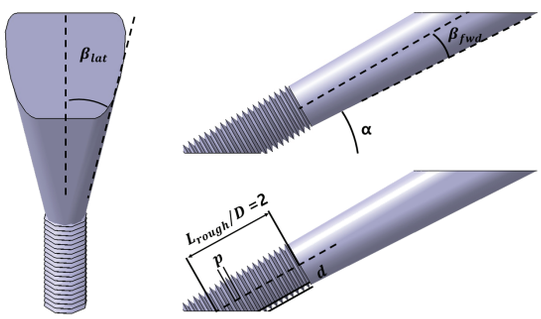


Fig. 2 Schematic of fan-shaped hole

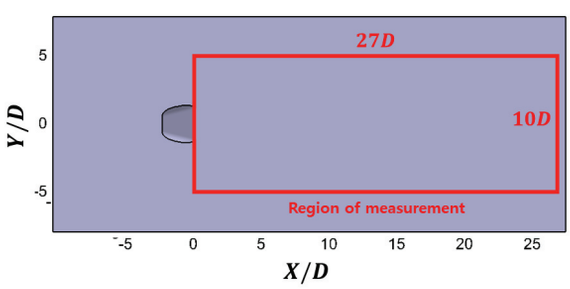


Fig. 3 Region of measurement

1.0, 1.5, 2.0의 총 3 case로 진행하였다. 냉각유체의 밀도비는 이산화탄소를 사용해 모사하였다.

적층 기법을 활용해 제작한 시편(TSR-832, 190 mm × 80 mm)은 Park 등[17]의 연구를 통해 도출한 최적화 홀을 선정하였고 유로 형상은 Fig. 2와 같다. 팬 형상 홀의 원형부 지름(D)은 4.5 mm, 전방 확장 각(β_{fwd})은 3.54 °, 횡방향 확장 각(β_{lat})은 12.64 °, 분사각(α)은 30 °이다. 막냉각 홀의 원형부는 Kang 등[18]의 논문에서 우수한 막냉각 성능을 보인 그루브를 갖도록 제작되었으며, 그루브 형상의 깊이(d)는 0.6 mm, 간격(p)은 0.6 mm이다.

시편 표면의 온도 측정은 IR 카메라(FLIR T540, FLIR)를 이용하여 촬영하였다. 주유동과 냉각유체의 온도는 T-type 열전대(SCPSS-040E-6, Omega)를 이용하여 측정되었으며 시편의 열확산 계수(α)는 0.128 mm^2/s, 열전달 계수(k)는 0.203 W/m K이다. 정량적으로 막냉각 효율을 비교하기 위해 면적 평균 막냉각 효율을 구하였으며, 측정 영역은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 홀 원형부 직경(D) 대비 유동 방향 길이(X/D)와 직경 대비 횡방향 길이(Y/D) 영역을 각각 $0 < X/D < 27$, $-5 < Y/D < +5$로 정의하였다.

열전달을 기반의 천이 IR 카메라 기법을 통해 열전달 계수와 막냉각 효율을 측정하기 위하여 시편을 1D 반무한 고체로 가정하였다. 식 (1)은 시편 내부의 1차원 열전도 방정식이고 식 (2)와 (3)은 각각 초기 조건과 경계 조건이다.

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \tag{1}$$

$$T(\infty,t) = T_i \tag{2}$$

$$T(z,0) = T_i \tag{3}$$

$$-k\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = h(T_m - T_w) \tag{4}$$

식 (1)을 유한차분방정식으로 나타내면 식 (5)와 같으며 F_0는 푸리에 수의 유한 차분 형식이다. 표면에서 막냉각이 이뤄지는 경우 경계 조건인 식 (4)는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_m^{P+1} = F_0(T_{m+1}^P - T_{m-1}^P) + (1-2F_0)T_m^P \tag{5}$$

$$F_0 = \alpha \Delta t/(\Delta z)^2 \tag{6}$$

$$-k\frac{\partial T(0,t)}{\partial z} = h(T_f - T_w) \tag{7}$$

$$q'' = h[(T_m - T_w) - (T_m - T_f)] \tag{8}$$

$$\frac{q''}{T_m - T_c} = h\frac{T_m - T_w}{T_m - T_c} - h\eta, \quad \eta = \frac{T_m - T_f}{T_m - T_c} \tag{9}$$

식 (5)와 경계 조건(식 (7))을 통해 해를 구하면 표면의 열유속을 식 (8)로 나타낼 수 있고 양변을 주유동과 냉각유체의 온도 차로 나눠주어 기울기가 열전달 계수, y-절편이 열전달 계수와 막냉각 효율로 표현된 식 (9)로 정리된다.[19]

천이 IR 카메라 기법은 실험 데이터를 선형회귀(Fig. 4)하여 막냉각 효율의 측정과 동시에 열전달 계수를 측정 가능하다는 장점이 있다.

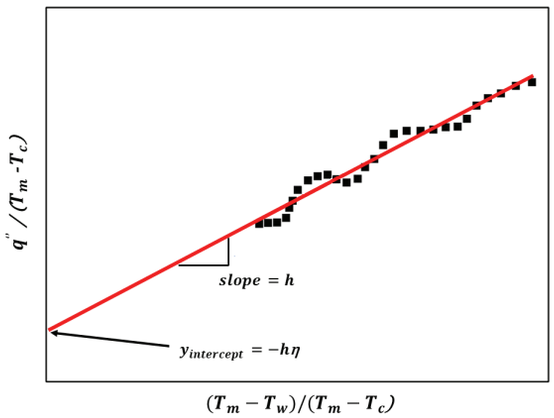


Fig. 4 Linear regression between heat flux and wall temperature

본 연구에서는 Dollinger 등[20]의 방식을 참고하여 IR 카메라와 열전대의 불확도를 고려한 막냉각 효율의 측정 불확도를 계산하였다. 천이 IR 카메라 기법의 막냉각 효율 측정 불확도는 η = 0.7일 때 4.76 %, η = 0.2일 때 13.17 %, 열전달 계수의 측정 불확도는 h = 150 W/m^{2}K일 때 10.43 %, h = 80 W/m^{2}K일 때 9.21 %로 계산되었다.

2.2 PSP(Pressure Sensitive Paint) 기법 실험 방법

PSP 기법은 물질전달이 열전달에 대한 상사가 이뤄진다는 것을 전제로 하여 수행되며 열전달 계수에 대한 측정이 불가능하다. 풍동에서 균일하게 공급되는 주유동이 수축부를 통해 가속되었을 때의 유속은 20 m/s, 난류 강도는 2.7 %이다. MFC (FMA-2600 series, Omega)를 통하여 공급되는 냉각유체는 균일한 분사를 위해 플레넘 챔버의 메쉬 스크린과 허니컴을 통과하였으며, 분사비($(\rho_c u_c)/(\rho_m u_m)$) 1.0, 1.5, 2.0, 밀도비($\rho_c/\rho_m$) 1.5의 조건에서 실험이 진행되었다.

Fig. 5는 실험 장치의 개략도로, 시편에 도포한 압력감응 페인트(Uni-FIB 400, ISSI)의 발광 분자는 LED에서 발생하는 단파장 가시광선(400nm)을 흡수하여 들뜬 상태가 되고 600nm 파장대의 빛을 방사하며 안정화된다. 방사된 빛을 CCD 카메라(PCO 1600, PCO)를 통해 촬영하여 시편 표면의 압력 분포를 측정하였다.

식 (10)은 Stern-Volmer 방정식으로 산소 분압과 발광 강도의 관계를 나타낸 식으로, 보정 계수는 온도의 영향을 받는다. 따라서 PSP 보정 실험과 막냉각 효율 측정 실험은 동일 온도 조건에서 수행되었으며 보정 곡선은 Fig. 6과 같다.[14] 주변 환경과 장비의 노이즈를 제거하고 발광 강도를 무차원화 하기 위해서는 총 4개의 이미지가 필요하며, 촬영 조건은 Table 1과 같다. Black 이미지와 Reference 이미지는 Air 이미지와 Foreign gas 이미지를 무차원화하기 위해

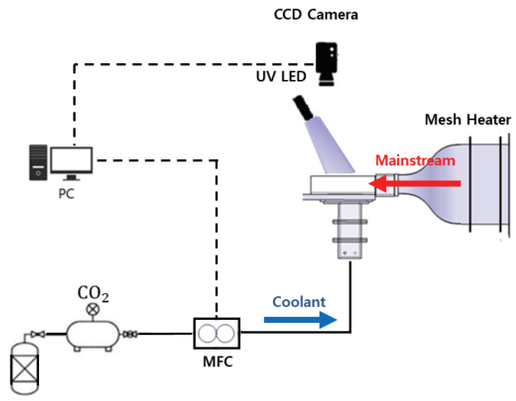


Fig. 5 Experimental setup for the PSP technique

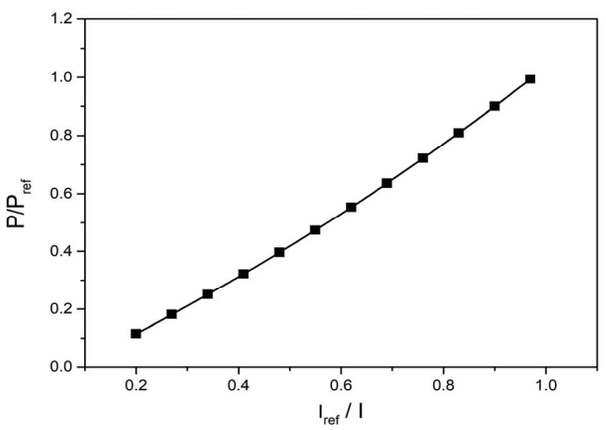


Fig. 6 Calibration curve of the PSP

Table 1 Image collecting conditions

Images	Wind Tunnel	Coolant	LED Light
Black	OFF	OFF	OFF
Ref	OFF	OFF	ON
Air	ON	AIR	ON
Foreign Gas	ON	Foreign Gas	ON

활용된다. 무차원화된 Air 이미지와 Foreign gas 이미지는 식 (10)을 통해 산소 분압으로 환산되고 식 (11)을 통해 막냉각 효율 분포를 얻을 수 있다.[21] 식 (10)과 (11)에서 P_{O_2}는 산소 분압, C는 농도를 의미한다.[22]

$$\frac{P}{P_{ref}} = \frac{(P_{O_2})}{(P_{O_2})_{ref}} = A(T) + B(T)\left(\frac{I_{ref}}{I}\right) + C(T)\left(\frac{I_{ref}}{I}\right)^2 \tag{10}$$

$$\eta = \frac{C_{O_{2,air}} - C_{O_{2,fg}}}{C_{O_{2,air}}} = \frac{(P_{O_2})_{air} - (P_{O_2})_{fg}}{(P_{O_2})_{air}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{(P_{O_2})_{air}}{(P_{O_2})_{fg}} - 1\right)\frac{\rho_{fg}}{\rho_{air}} + 1} \tag{11}$$

Johnson 등[23]의 방식을 참고하여, PSP 기법의 막냉각 효율 측정 불확도를 계산하였다. 이 과정에서 압력 측정 센서와 빛의 강도의 불확도를 고려하였으며, PSP 기법의 막냉각 효율 측정 불확도는 η= 0.7일 때 1.69 %, η= 0.2일 때 4.34 %로 계산되었다.

3. 실험 결과

3.1 천이 IR(Infrared) 카메라 기법을 이용한 막냉각 효율 및 열전달 계수 측정 결과

Fig. 7은 시편의 측정 영역(Fig. 3)에서 횡방향 평균 열전달 계수($h_{lateral}$) 분포 그래프로 막냉각이 이뤄지지 않는 영역의 열전달 계수(h_0)는 주변 영역($-7 < Y/D < -5$), $+5 < Y/D < +7$)의 평균 열전달 계수이다. 이를 통하여 모든 분사비에서 홀 주변의 열전달 계수가 높고 서서히 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 동일 형상의 막냉각 홀에 대하여 밀도비 1.5, 세 가지 분사비(1.0, 1.5, 2.0)에서 천이 IR 카메라 기법으로 측정된 막냉각 효율 분포 결과다. 막냉각 효율 역시 홀 출구 부근에서 높은 값을 보이지만 하류로 갈수록 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 불연속적인 막냉각 효율 분포를 보이는데, 이는 주유동과 표면 온도의 측정 정확도가 결과에 큰 영향을 끼치기 때문이다.

Fig. 9는 막냉각 효율 측정 영역에서의 횡방향 평균 막냉각 효율 그래프로, 냉각유체의 분사비가 높아지면 횡방향 평균 막냉각 효율이 높게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 팬형상 막냉각 홀은 분사비가 높을 때도 냉각유체의 부유 현상을 억제하며, 하류에서도 냉각유체가 표면에 잘 부착되는 특징을 가지고 있기 때문이다. 반면, 분사비가 낮아질수록 냉각유체의 모멘텀이 감소하며, 이로 인해 주유동과의 혼합이 이뤄지고 냉각유체가 산란되기 때문에 낮은 막냉각 효율을 보였다.

3.2 Pressure Sensitive Paint 기법을 이용한 막냉각 효율 측정 결과

Fig. 10은 동일 형상의 막냉각 홀에 대하여 밀도비 1.5, 세 가지 분사비(1.0, 1.5, 2.0) 조건에서 PSP 기법으로 측정된 막냉각 효율 분포 결과이다. PSP 기법의 측정 결과는 천이 IR 카메라 기법에 비해서 높은 해상도와 연속적인 막냉각 효율 분포를 보였다. Fig. 11은 횡방향 평균 막냉각 홀 그래프로, 천이 IR 카메라 기법 측정 결과와 같이 높은 분사비에서 하류까지 냉각이 효과적으로 이뤄지는 것이 관측되었다.

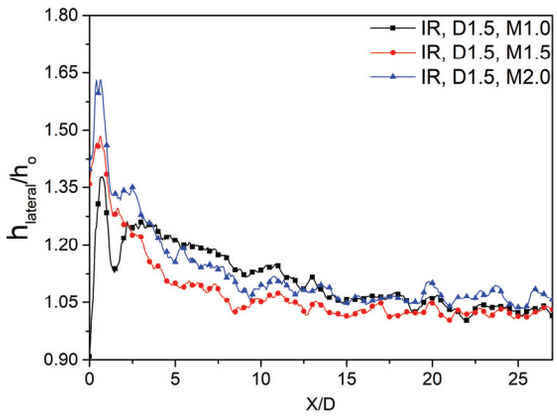
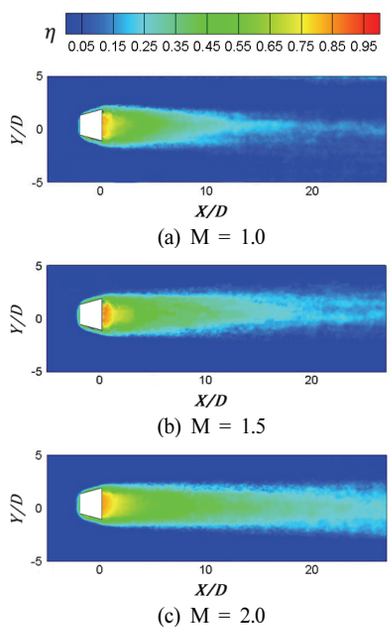


Fig. 7 $h_{lateral}/h_o$ for different blowing ratios



(a) M = 1.0

(b) M = 1.5

(c) M = 2.0

Fig. 8 Distribution of film cooling effectiveness measured by the transient IR camera technique

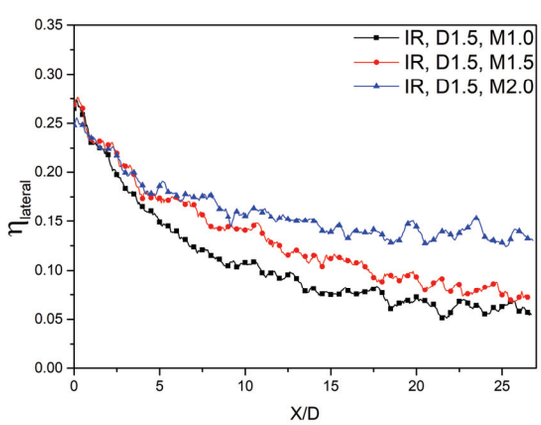


Fig. 9 Lateral averaged film cooling effectiveness measured by the transient IR camera technique

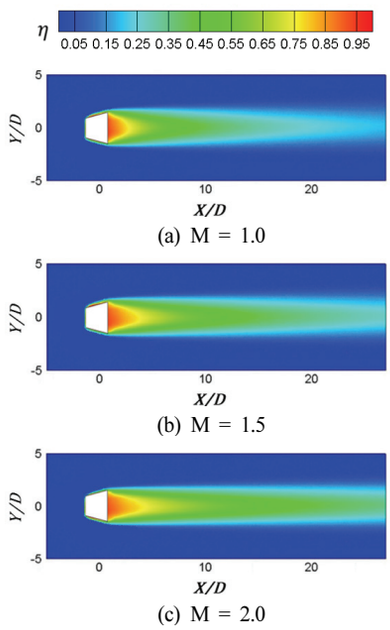


Fig. 10 Distribution of film cooling effectiveness measured by the PSP technique

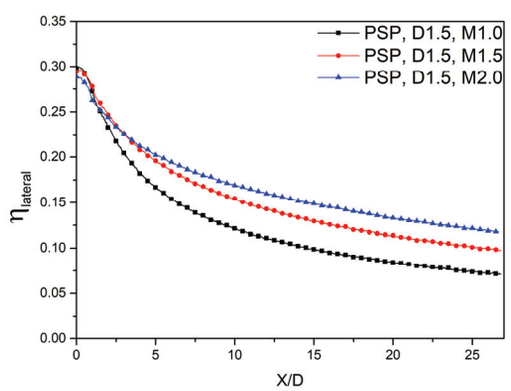


Fig. 11 Lateral averaged film cooling effectiveness measured by the PSP technique

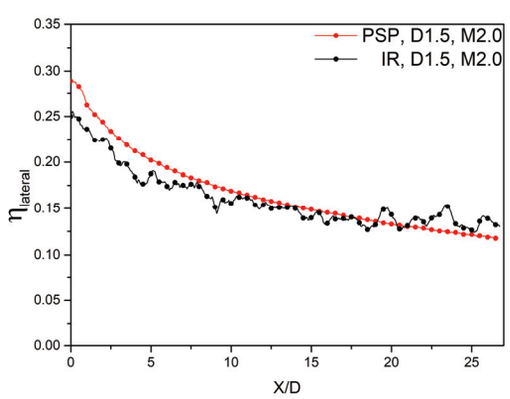


Fig. 12 Lateral averaged film cooling effectiveness measured by the transient IR camera technique and the PSP technique (M=2.0)

3.3 천이 IR 카메라 기법과 PSP 기법의 측정 결과

Fig. 12는 밀도비 1.5, 분사비 2.0 조건에서 천이 IR 카메라 기법과 PSP 기법으로 측정된 횡방향 평균 막냉각 효율 그래프로, 두 기법으로 측정된 횡방향 평균 막냉각 효율 그래프는 전도의 효과가 상대적으로 큰 홀 출구 부분을 제외하면 유사한 경향과 값을 보이는 것을 확인하였다. 홀 주변에서는 3차원 열전도로 인해 천이 IR 카메라 기법이 상대적으로 낮은 막냉각 효율을 보였다. 실험에서 분사된 냉각유체의 온도는 주유동에 비해 낮기 때문에 막냉각 효율이 높은 영역에서는 주변과 온도 구배가 크게 나타난다. 따라서 홀 주변부($-5 < Y/D < -2$, $+2 < Y/D < +5$)에서 주변으로의 3차원 열전도가 커지게 되고, 이에 의해 막냉각 효율이 과소 평가된다.

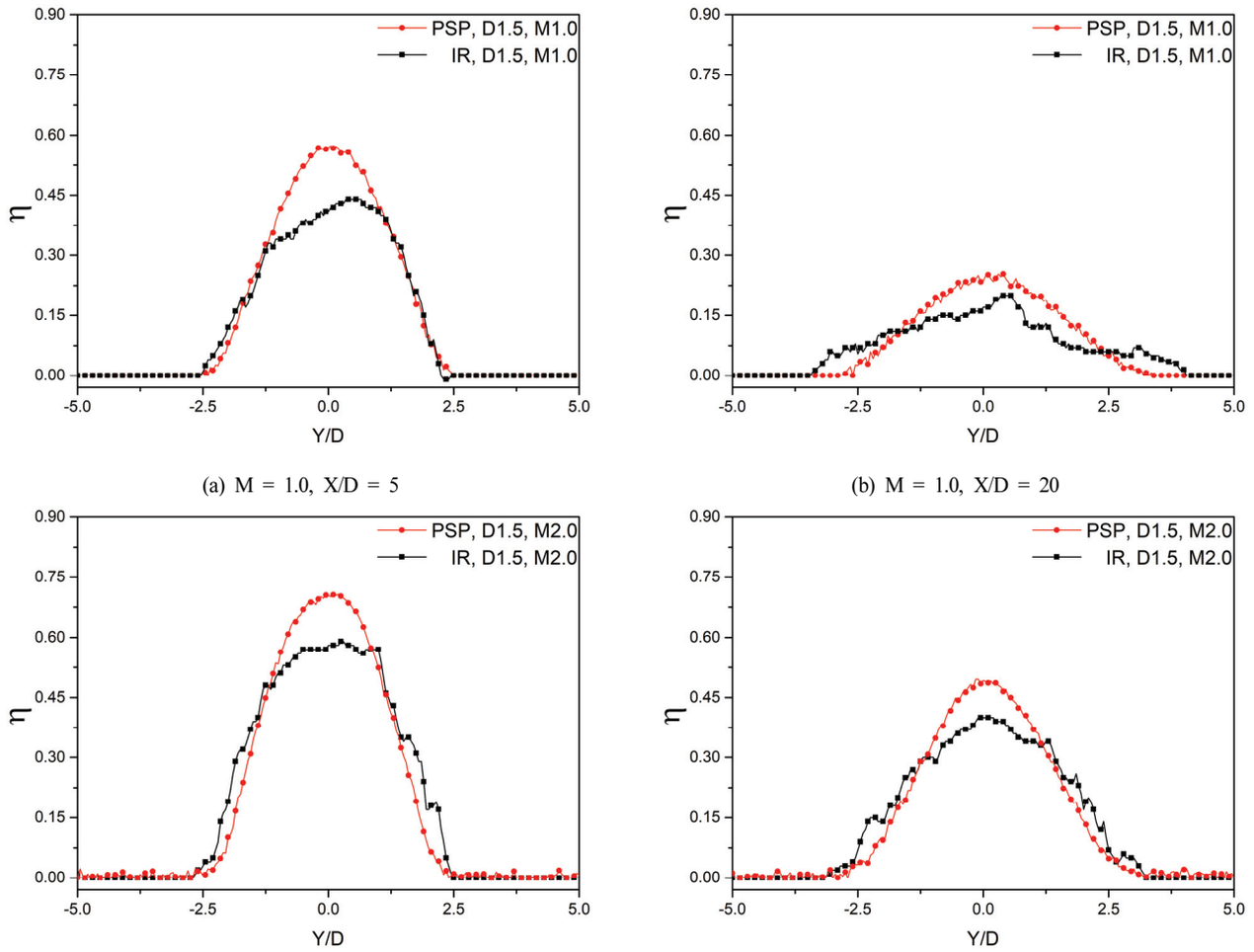
Fig. 13은 X/D = 5, X/D = 20에서 두 기법을 통해 측정된 횡방향 막냉각 효율 분포를 나타낸다. PSP 기법으로 측정된 결과에 비해 천이 IR 카메라 기법으로 측정된 막냉각 효율은 중앙부(Y/D = 0)에서의 피크 값이 낮고 막냉각 효율 분포 영역이 넓게 측정되었다. 이는 열의 3차원적인 열전도로 인해 완전한 단열 막냉각 효율이 측정되지 않기 때문이다.

위의 결과를 바탕으로 본 연구에서 고려된 두 가지 막냉각 측정 기법의 특징을 Table 2에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 막냉각 효율 측정을 위한 열전달 및 물질전달 기법의 정량적 결과와 장단점 비교를 위해 팬 형상 막냉각 홀에 대한 실험을 수행하였고, 다음의 결론을 도출하였다.

1. 천이 IR 카메라 기법을 활용한 막냉각 효율 분포 측정은 막냉각 효율과 대류 열전달 계수가 동시에 측정될 수 있다. 하지만 시험부의 표면과 주유동 온도 측정의 불확도로 인해 상대적으로 큰 측정 불확도와 불연속적인 분포를 보였다.
2. PSP 기법은 3차원적 열전도 현상의 영향을 배제하여 단열 막냉각 효율 분포 측정이 가능하지만 대류 열전달 계수 측정이 불가능하다는 단점이 존재한다. 하지만 막냉각 효율 측정에 있어서 낮은 측정 불확도를 보였다.
3. 두 기법 모두 막냉각 효율이 낮은 영역에서는 측정 불확도가 높게 계산되었다. 전반적으로 PSP 기법의 측정 불확도가 천이 IR 카메라 기법에 비하여 낮게 계산되었다.
4. 천이 IR 카메라 기법은 3차원 열전도를 1차원으로 모사하여 막냉각 효율을 계산하므로, 3차원적 열전도의 영향이 큰 막냉각 홀 부근과 시험부 중앙부에서 상대적으로 낮은 막냉각 효율이 측정되었다.



(a) M = 1.0, X/D = 5

(b) M = 1.0, X/D = 20

(c) M = 2.0, X/D = 5

(d) M = 2.0, X/D = 20

Fig. 13 Lateral distributions of film cooling effectiveness measured by the transient IR caemra technique and the PSP technique

Table 2 Comparison of the measurement methods

기법	IR Camera	PSP
원리	열전달	물질전달
측정 가능 항목	막냉각 효율, 대류 열전달 계수	막냉각 효율
결과의 해상도	중간	높음
측정값 분포	비연속적	연속적
측정 불확도	높음	낮음

후 기

본 연구는 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원(UD220004JD)과 2023년 산업통산자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0020647, 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행된 연구임.

References

(1) Ekkad, S. V., Ou, S., & Rivir, R. B., "A transient infrared thermography method for simultaneous film cooling effectiveness and heat transfer coefficient measurements from a single test." J. Turbomach., 126(4), pp. 597-603.

(2) Kwak, J. S., and Han, J., "Heat Transfer Coefficients and Film Cooling Effectiveness on the Squealer Tip of a Gas Turbine Blade." ASME. J. Turbomach. October 2003; 125(4): pp. 648-657.

(3) Xue, S., Roy, A., Ng, W. F., and Ekkad, S. V., "A novel transient technique to determine recovery temperature, heat transfer coefficient, and film cooling effectiveness simultaneously in a transonic turbine cascade." Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 7(1).

(4) O'Dowd, D. O., Zhang, Q., He, L., Ligrani, P. M., and Friedrichs, S., "Comparison of heat transfer measurement

techniques on a transonic turbine blade tip." ASME. J. Turbomach. April 2011; 133(2).
(5) Schulz, A. "Infrared thermography as applied to film cooling of gas turbine components." Measurement Science and Technology 11.7 (2000): 948.
(6) Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, S., "Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes With Expanded Exits." ASME. J.Turbomach. July 1998; 120(3): pp. 549–556.
(7) Brauckmann, D., & von Wolfersdorf, J., "Application of steady state and transient ir-thermography measurements to film cooling experiments for a row of shaped holes." Volume 3: Turbo Expo 2005, pp. 27-37.
(8) Nicklas, M., "Film-Cooled Turbine Endwall in a Transonic Flow Field: Part II—Heat Transfer and Film-Cooling Effectiveness ." ASME. J. Turbomach. October 2001; 123(4), pp. 720–729.
(9) GOLDSTEIN, R. J., ECKERT, E. R. G., TSOU, F. K., and HAJI-SHEIKH, A., "Film cooling with air and helium injection through a rearward-facing slot into a supersonic air flow." AIAA Journal, 4.6 (1996): pp. 981–985.
(10) Cho, H. H., and Goldstein, R. J., "Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness With Injection Through Discrete Holes: Part I—Within Holes and on the Back Surface." ASME. J. Turbomach. July 1995; 117(3), pp. 440–450.
(11) Cho, H. H., and Goldstein, R. J., "Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness With Injection Through Discrete Holes: Part II—On the Exposed Surface." ASME. J. Turbomach. July 1995; 117(3), pp. 451–460.
(12) Han, J. C., & Rallabandi, A., "Turbine blade film cooling using PSP technique." Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2010; 1(1).
(13) McLachlan, B., and Bell, J., "Pressure sensitive Paint in Aerodynamic Testing." Experimental thermal and fluid science, 10(4), pp. 470-485.
(14) Morris, M., Donovan, J., Schwab, S., Levy, R., and Crites, R., "Aerodynamic Applications of Pressure Sensitive Paint." AIAA journal 31.3 (1993), pp. 419-425.
(15) Zhang, L. J., and Fox, M., "Flat Plate Film cooling Measurement Using PSP and Gas Chromatography Techniques." Solar Turbine Inc., San Diego, CA (US), 1999.
(16) Jeong, J. Y., Kim, W., Kwak, J. S., and Park, J. S., "Heat Transfer Coefficient and Film Cooling Effectiveness on the Partial Cavity Tip of a Gas Turbine Blade." Journal of Turbomachinery, 141(7) (2019).
(17) Park. S. H., Kang, Y. J., Seo, H. J., Kwak, J. S., Kang, Y. S., "Experimental optimization of a fan-shaped film cooling hole with 30 degrees-injection angle and 6-hole length-to-diameter ratio." International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 144(2019): 118652.
(18) Kang. M. S, Song. Y. J, Kwak. J. S., "The Effect of Roughness inside the Circular Part of Fan-Shaped Film Cooling Hole on the Change in Film Cooling Effectiveness." The KSFM Journal of Fluid Machinery, 25(6), pp. 5-10.
(19) Kim, Y. S., Jeong, J. Y., Kwak, J. S., Chung, H., "The Effects of Hole Arrangement and Density Ratio on the Heat Transfer Coefficient Augmentation of Fan-Shaped Film Cooling Holes." Energies 14.1 (2021): 186.
(20) Dollinger, C., Sorg, M., Balaresque, N., and Fischer, A., "Measurement uncertainty of IR thermographic flow visualization measurements for transition detection on wind turbines in operation." Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 97, 2018, pp. 279-289.
(21) Seo, H. H., Kang, Y. J., Lee, H. C., Kwak, J. S., Park, J. S., and Lee, K. D., "Optimization of the configuration of the laidback fan-shaped film cooling hole with a lateral expansion angle of 10 degrees." Applied Thermal Engineering, Volume 153, 2019, pp. 379-389.
(22) Song, Y. J., Park, S. H., Kang, Y. J., Kwak, J. S., "Effects of trench configuration on the film cooling effectiveness of a fan-shaped hole." International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 178(2021): 121655.
(23) Johnson, B., Hu, H., "Measurement Uncertainty Analysis in Determining Adiabatic Film Cooling Effectiveness by Using Pressure Sensitive Paint Technique." ASME Jounal of Turbomachinery, Volume 138(2016): 121004.