

압력감응페인트를 이용한 평판에서의 막냉각 계수 측정

박승덕* · 이기선* · 김학봉** · 콰재수*** · 김제환****

Measurement of the Film Cooling Effectiveness on a Flat Plate using Pressure Sensitive Paint

Seoung Duck Park* · Ki Seon Lee* · Hark-Bong Kim** · Jae Su Kwak*** · Jae Hwan Kim****

ABSTRACT

The film cooling effectiveness on a flat plate measured by pressure sensitive paint technique. Six film cooling hole were fabricated on a flat plate with 30 degree angle with respect to the surface and three blowing ratios of 0.5, 1, and 2 were tested. Results showed that PSP technique successfully evaluated the distribution of film cooling effectiveness and showed similar results with references. The film cooling effectiveness near the film cooling holes was higher for lower blowing ratio case. As the blowing ratio was increased, the film cooling effectiveness near the film cooling hole decreased due to the lift off of the coolant. At far downstream, the film cooling effectiveness for higher blowing ratio was higher due to the coolant reattachment.

초 록

본 연구에서는 압력감응페인트를 이용하여 평판에서의 막냉각 계수를 측정하였다. 6개의 막냉각 홀을 평판에 대해 30도의 각도를 갖도록 제작하였고, 평균 분사비는 0.5, 1, 2로 하였다. 그 결과, 압력감응페인트 기법으로 막냉각 계수의 분포를 성공적으로 측정할 수 있었고, 실험 결과는 기존의 참고 문헌의 결과와 유사한 경향을 보였다. 막냉각 홀 근처의 막냉각 계수는 분사비가 낮은 경우가 더 높게 나타났다. 분사비가 증가할수록 막냉각 홀 근처의 막냉각 계수는 낮아졌는데, 이는 높은 냉각 유체의 모멘텀에 의해 막냉각 유체가 주유동의 경계층을 뚫고 표면에서 멀어지기 때문이다. 하류에서는 높은 분사비의 경우가 높은 막냉각 계수를 보였는데, 이것은 막냉각 유체가 표면에 재부착되기 때문이다.

Key Words: Film cooling(막 냉각), Pressure Sensitive Paint(압력감응페인트), Blowing Ratio(분사비)

† 2007년 11월 30일 접수 ~ 2008년 8월 10일 심사완료
* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
** 중신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
*** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
**** 정회원, 한국항공우주연구원 엔진개발팀
연락처, E-mail: jskwak@kau.ac.kr

1. 서 론

고온 부품의 표면에 작은 홀을 뚫고 냉각 유체를 분사하여 뜨거운 외부 유체로부터 표면을 보호하는 막냉각은 여러 분야에서 응용되고 있

다. 특히, 이 기술은 입구 온도를 높여 출력과 효율을 증가시키려는 가스터빈 내 고온 부품들의 파손을 방지하고 열부하를 줄이기 위하여 많이 사용되고 있다[1, 2]. 블레이드 표면에서 막냉각 계수의 정확한 산출은 블레이드 열부하와 온도 분포의 예측에 필수적이며 막냉각 계수를 실험적으로 측정하기 위해 많은 연구자들에 의해 다양한 실험 기법이 시도되어 왔다.

압력감응페인트(Pressure sensitive paint, PSP)는 압력에 따라 반사되는 빛의 강도를 달리하는 물질로, 산소 퀘칭의 원리를 이용하여 표면의 압력 분포를 측정 할 수 있다[3]. 1980년대 러시아의 모스크바 대학에서 공기역학 실험에 적용하면서 압력 측정에 적용되기 시작한 PSP는 현재 저속유동에서의 응용에도 많은 연구가 진행되고 있다. Morris 등[4]과 McLaclan과 Bell[5]은 PSP 기술을 공기역학 실험에 적용하였고, Zhang과 Fox[6], Zhang 등[7], Zhang과 Jaiswal[8]은 평판, 노즐, 끝벽에서 냉각 유체로 공기와 질소를 사용하는 기법을 이용하여 막냉각 계수를 측정하였다. Ahn 등[9]은 블레이드 팁에서의 분사비에 따른 막냉각 효율을 측정하였다.

본 연구에서는 복잡한 형상에 대한 막냉각 계수 측정에 선행하여, 막냉각 분사비가 평판의 막냉각 계수 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 PSP를 이용하였다. 이를 위해 3가지 막냉각 분사비를 적용하고, 분사비가 막냉각 계수의 분포에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치

Figure 1은 실험 장치의 구성을 나타낸 것으로, 실험 장치는 막냉각 유체의 유량 측정을 위한 유량계, PSP의 방사 강도 측정을 위한 CCD 카메라, PSP의 발광을 위한 LED 조명 등으로 구성되었다. 열선유속계(Kanomax)로 측정된 주유동의 난류강도는 0.5%이고 주유동의 속도는 20 m/s로 고정하였다. 막냉각 홀은 직경이 5 mm인 구멍 6개를 수평면에 대해 30° 각도로 설

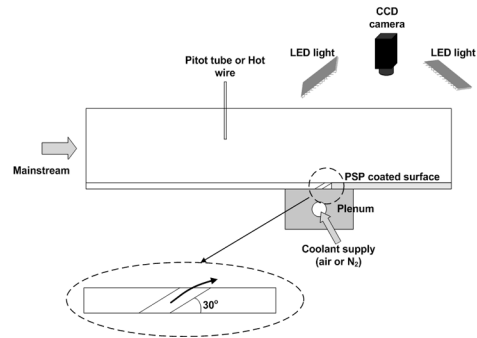


Fig. 1 Schematic of test section (not to scale)

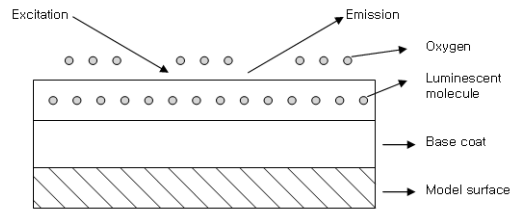


Fig. 2 Schematic of a luminescent PSP

치하였고 Eq. 1로 정의되는 분사비를 0.5, 1, 2로 변화시키며 막냉각 계수를 측정하였다.

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_\infty u_\infty} \quad (1)$$

여기서 M 은 분사비, ρ_c 와 ρ_∞ 는 각각 막냉각 유체와 주유동의 밀도, u_c 와 u_∞ 는 각각 막냉각 유체와 주유동의 속도를 나타낸다.

시험부 위에는 LED 조명과 14 bit CCD 카메라를 설치하여 PSP가 방사하는 빛을 컴퓨터로 저장하였으며, 저장된 이미지의 모든 픽셀에 대해 50장의 이미지를 평균한 값을 사용하여 막냉각 계수 계산에 사용하였다.

3. 막냉각 계수 측정 이론

3.1 압력감응 페인트 (pressure sensitive paint)

PSP는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 표면에 페인트

를 고정 시켜주는 기본 코팅 막인 고착제와 발광분자가 들어 있는 층으로 구분된다. 산소에 민감한 발광분자는 바인더라는 합성 고분자 내부에 고르게 분포 되어 있고, 페인트 표면에 짧은 파장의 빛을 조사하면 산소의 양에 반비례하는 강도로 빛을 방사한다. 즉, 압력이 높아지면 표면에서 방사되는 빛의 세기는 줄어든다. 압력과 방사되는 빛의 강도의 관계식은 다음과 같이 다항식으로 표현할 수 있다.

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

여기서, P_{ref} 와 I_{ref} 는 기준 압력과 기준 압력에서의 빛의 강도를 나타내고 P 와 I 는 주어진 압력과 그 압력에서의 빛의 강도를 나타낸다. 상수 A, B, C 는 보정계수로 PSP의 종류나 조명, 실험 조건 등에 따라 달라진다.

3.2 막냉각 계수

시험부의 코팅된 PSP에서 방사하는 빛의 세기 변화를 통해 시험부의 압력을 계산하는 방법은 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.[9]

$$\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I_{air} - I_{blk}} = f \left(\frac{(P_{O_2})_{air}}{(P_{O_2})_{ref}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{(P_{O_2})_{air}}{(P_{O_2})_{ref}} = \frac{(0.21 \times P)_{air}}{(0.21 \times P)_{ref}} = \frac{P_{air}}{P_{ref}} \quad (4)$$

$$\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I_{mix} - I_{blk}} = f \left(\frac{(P_{O_2})_{mix}}{(P_{O_2})_{ref}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{(P_{O_2})_{air}}{(P_{O_2})_{ref}} = \frac{(0.21 \times P)_{air}}{(0.21 \times P)_{ref}} = \frac{P_{air}}{P_{ref}} \quad (6)$$

Table 1. Images required for film cooling measurement by PSP

Images	Light	wind tunnel	coolant
black image	OFF	OFF	OFF
reference image	ON	OFF	OFF
air image	ON	ON	air
air/nitrogen image	ON	ON	nitrogen

여기서, $I_{ref}, I_{blk}, I_{air}, I_{mix}$ 는 각각 기준 이미지, black 이미지, 공기 이미지, 공기/질소 이미지를 나타내고, 각각의 획득 조건은 Table 1에 나타내었다. $(P_{O_2})_{air}$ 와 $(P_{O_2})_{mix}$ 는 각각 공기 이미지, 공기/질소 이미지와 Fig. 3의 보정 결과를 이용해 얻은 산소의 분압($P_{O_2} = 0.21P$)이다. $(P_{O_2})_{air}$ 와 $(P_{O_2})_{mix}$ 의 측정을 위해 실험을 별도로 수행하였으며 동일한 실험조건의 확보를 위하여 조명과 풍동을 정지하지 않고 냉각유체를 바꾸어 각 냉각유체의 경우에 대한 실험을 수행하였다.

막냉각 유체로 질소와 공기를 각각 분사하고 각각의 경우에 대한 산소 분압을 비교하면 막냉각 계수를 측정할 수 있다. 즉, 질소를 막냉각 유체로 분사하였을 경우 표면이 질소로만 덮히게 되는 영역에서는 산소 분압이 0이 되고 막냉각 계수는 1이 된다. 반대의 경우, 공기를 분사하였을 경우와 질소를 분사하였을 경우의 산소 분압이 같게 되면 막냉각 유체의 영향을 받지 않는 부분이므로 막냉각 계수가 0이 된다. 따라서 막냉각 유체에 따른 산소의 분압을 이용하면 막냉각 계수를 구할 수 있고, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{C_{O_{air}} - C_{O_{mix}}}{C_{O_{air}}} = \frac{(P_{O_2})_{air} - (P_{O_2})_{mix}}{(P_{O_2})_{air}} \quad (7)$$

여기서, η 는 막냉각 계수이고 $C_{O_{air}}$ 와 $C_{O_{mix}}$ 는 막냉각 유체가 각각 공기와 질소일 때 시험부 표면에서의 산소 농도이다.

Equation 7을 이용하여 PSP로 코팅 된 시험부

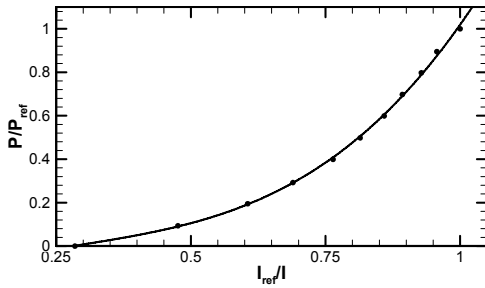


Fig. 3 Calibration curve for PSP

의 막냉각 계수의 계산을 위해서는 Table 1에 나타난 네 가지 경우의 이미지가 필요하다. 여기서 black 이미지는 카메라 자체의 노이즈를 고려하기 위한 것으로, 모든 측정된 이미지에서 black 이미지의 밝기를 빼주었다.

3.3 PSP의 보정 및 측정 불확도

Liu와 Sullivan[3], Ahn 등[9] 으로부터 소개된 PSP 보정법으로 압력과 PSP에서 방사되는 빛의 세기의 보정을 위한 별도의 실험을 수행하였다. 온도조절이 가능하도록 열전소자가 부착된 알루미늄 시편(30mm×30mm)에 PSP를 코팅하고 압력 챔버에 넣은 후 진공 펌프로 0atm에서 1atm 까지 압력을 조절하면서 시험에 사용된 동일한 CCD 카메라와 조명을 사용하여 압력에 따른 밝기의 변화를 측정하였다. 챔버 내 압력은 정확도가 ±0.04%인 Rosemount사의 압력계 (Rosemount 3051T)을 이용하여 측정하였다. PSP는 압력 뿐 만 아니라 온도에도 반응하므로, 막냉각 계수 측정 실험에서의 공기 온도와 동일한 온도에서 보정이 수행되도록 열전소자를 이용하여 PSP가 코팅된 표면의 온도를 조절하였다. Fig. 3은 보정 결과로 Eq. 2에서 압력비를 명도비의 2차항으로 나타내었다.

Liu와 Sullivan[3] 및 Dunn[10]에 의해 소개된 방법으로 막냉각 계수의 측정 불확도 계산을 수행하였다. 압력감응페인트의 보정과 시험부에 코팅된 압력감응페인트의 강도비에 의해 Eq. (7)로 계산되는 막냉각 계수의 측정 불확도는 ±5.77%로 계산되었다.

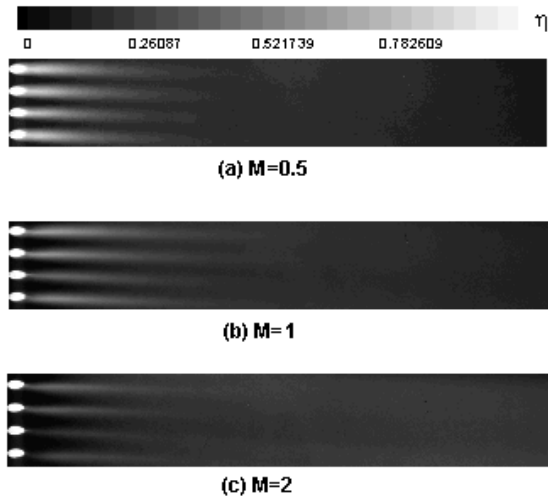


Fig. 4 Distribution of film cooling effectiveness

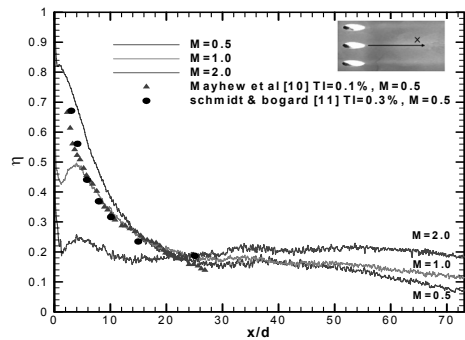


Fig. 5 Film cooling effectiveness along the center of hole

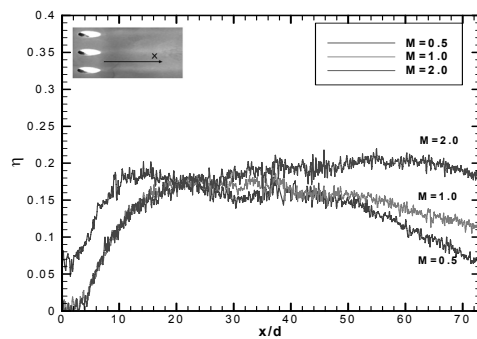


Fig. 6 Film cooling effectiveness along between holes

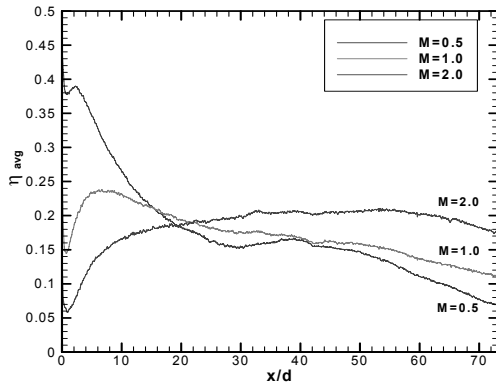


Fig. 7 Span averaged film cooling effectiveness

4. 막냉각 실험 결과

Figure 4는 분사비에 따른 막냉각 계수의 분포를 나타 낸 것이다. 세 경우 모두 막냉각 유체에 의한 효과를 선명히 보여주고 있다. 분사비가 0.5 인 경우에는 막냉각 홀에서 가까운 부분은 막냉각 계수가 크게 나타나지만 하류로 갈수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 낮은 분사비로 인한 낮은 냉각 유체의 모멘텀에 의해 분사된 직후에는 주유동의 경계층 내에 막냉각 유체가 존재하게 되어 높은 막냉각 계수가 나타나지만 하류로 갈수록 주유동과 혼합되면서 막냉각 계수가 급격히 낮아지기 때문에 발생한다. 분사비가 증가하면 막냉각 유체의 모멘텀이 커지게 되어 분사된 막냉각 유체가 주유동의 경계층을 뚫고 되고, 이에 의해 분사된 직후의 막냉각 계수는 낮아지게 된다. 하지만 냉각 유체가 하류에서 표면에 재부착됨에 따라 낮은 분사비의 경우(Fig. 4(a))에 비해 높은 막냉각 계수를 나타낸다.

Figure 5는 막냉각 홀 중심을 따라 홀에서의 거리에 따른 막냉각 계수를 나타낸 것으로, 분사비가 커질수록 분사된 직후의 막냉각 계수는 작아지지만 하류로 갈수록 막냉각 계수가 커지는 것을 볼 수 있다. 분사비가 1, 2인 경우, 분사 직후에 냉각 유체가 표면에 박리되어 낮은 막냉각 계수를 나타내지만 $x/d = 5$ 부근에서 다시

다소 증가하는 경향을 보이는데, 이는 막냉각 유체의 재부착에 의한 것으로 판단된다. 분사비가 0.5일 경우 Mayhew등[11]과 Schmidt와 Bogard 등[12]의 실험 결과와 유사한 경향의 실험 결과를 보였다.

Figure 6은 두 개의 막냉각 홀 사이의 하류에서 거리에 따른 막냉각 계수를 나타낸 것으로, 분사 직후에는 낮은 분사비의 경우가 좋은 막냉각 계수를 보이지만 하류로 갈수록 높은 분사비의 경우가 높은 막냉각 계수를 나타낸다.

Figure 7은 거리에 따른 스펀 방향의 평균 막냉각 계수를 나타낸 것으로, 앞서 언급한 바와 같이 분사 직후에는 낮은 분사비의 경우가 높은 막냉각 계수를 나타내지만 하류로 갈수록 높은 분사비의 경우가 좋은 막냉각 효율을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 분사된 막냉각 유체의 모멘텀 크기와 밀접한 관련이 있다. 낮은 분사비의 경우, 냉각 유체의 모멘텀이 주유동에 비해 작기 때문에 분사된 냉각 유체는 주유동의 경계층 내에 머물게 되고, 높은 막냉각 계수를 나타낸다. 하지만 낮은 모멘텀에 의해 막냉각 유체가 쉽게 흩어지게 되므로 하류에서는 낮은 막냉각 계수를 나타낸다. 분사비가 높아짐에 따라 냉각 유체의 모멘텀이 증가하게 되고, 분사된 냉각 유체는 주유동의 경계층을 뚫고 나가게 되어 표면에서 분리되고 하류에서 표면에 재부착이 된다. 이에 의해 분사 직후에는 낮은 막냉각 계수를 갖게 되지만 하류에서는 낮은 분사비의 경우에 비해 높은 막냉각 계수를 띄게 된다. 이러한 경향은 주유동의 난류 강도나 표면의 형상, 주유동의 압력 구배, 홀의 형상이나 배치 등에 의해 달라진다. 따라서 다양한 유동 조건에 대한 막냉각 계수의 예측은 터빈 블레이드의 열설계에 있어 필수적인 과정이고 추후 이러한 유동 조건에서의 막냉각 계수 측정을 수행할 예정이다.

5. 결 론

이 논문에서는 압력에 따라 방사하는 빛의 강

도를 달리하는 PSP를 이용하여 평판에서의 막냉각 계수를 측정하였다. 그 결과, PSP가 코팅된 표면에서 공기와 질소를 막냉각 유체로 사용하고 각각의 경우에 대한 산소 분압비를 비교하여 막냉각 계수의 분포를 산출하였다. 평판에 설치된 막냉각 홀을 통해 분사비를 0.5, 1, 2로 변화시키며 실험을 수행하였고, 분사비가 낮을수록 분사된 직후의 막냉각 계수는 높지만 하류로 갈수록 막냉각 계수가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 분사비가 높은 경우에는 분사 직후의 막냉각 계수는 낮지만 하류에서는 낮은 분사비의 경우에 비해 높은 막냉각 계수의 분포를 나타내었다.

본 연구에서는 PSP를 이용하여 평판에서의 막냉각 계수를 측정하였고, 이를 바탕으로 주유동의 난류 강도나 홀의 형상, 배치, 시험부의 곡률 등이 막냉각 계수에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구성품 개발사업 (KARI주관) 위탁 연구 결과 중 일부임.

참 고 문 헌

- Han, J. C., Dutta, S., and Ekkad, S. V., 2000, Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology, Taylor & Francis, New York
- Rhee, D. H., Kim, B. G., and Cho, H. H., "Effect of Stream Turbulence Intensity on Heat/Mass Transfer Characteristics Around a Film Cooling Hole," Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, v.2 no.2, 1998, pp.56-63
- Liu, T. and Sullivan, J. P., 2005, Pressure and Temperature Sensitive Paint, Springer
- Morris, M., Donovan, J., Schwab, S., Levy, R., and Crites, R., 1995, "Aerodynamic Applications of Pressure Sensitive Paint," AIAA paper No. 92-0264
- McLachlan, B., and Bell, J., 1995, "Pressure Sensitive Paint in Aerodynamic Testing," EXP. Therm. Fluid Sci., 10, pp.470-485
- Zhang, L. J., and Fox, M., 1999, "Flat Plate Film cooling Measurement Using PSP and Gas Chromatography Techniques," Proc. Fifth ASME/JSME joint Thermal engineering Conference, San Diego, CA
- Zhang, L. J., Blatz, M., Pudupatty, R., and Fox, M., 1999, "Turbine Nozzle Film Cooling Study Using the Pressure Sensitive Paint(PSP) Technique," ASME Paper No. 99-GT-196
- Zhang, L. J., Jaiswal, R. S., 2001, "Turbine Nozzle Endwall Film Cooling Study Using Pressure Sensitive Paint," ASME J. of Turbomachinery, 123, pp.730-738
- Ahn, J. Y., S. Mhetras., Han, J. C., 2004, "Film-Cooling Effectiveness On a Gas Turbine Blade Tip Using Pressure Sensitive Paint," ASME Paper No. GT2004-53249
- Dunn, P. F., 2004, "Measurement and Data Analysis for Engineering and Science," McGraw-Hill
- Mayhew, J. E., Baughn, J. W., and Byerley, A. R., 2003, "The effect of freestream turbulence on film cooling adiabatic effectiveness," International Journal of Heat and Fluid Flow, 24, pp.669-679
- Schmidt, D. L., Sen, B., Bogard, D. G. 1996, "Film cooling with compound angle hole: adiabatic effectiveness," ASME J. of Turbomachinery, 118, pp.807-813