

압력감응 페인트를 이용한 평판에서의 막냉각 계수 측정

박승덕* · 이기선* · 조영신** · 김학봉*** · 곽재수**** · 김재환*****

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

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

ABSTRACT

Various cooling techniques have been applied to the gas turbine blade in order to reduce heat load to the blade. On the blade surface, film cooling method is used and the accurate information of film cooling effectiveness should be evaluated in order to predict the exact temperature distribution in the blade. In this study, pressure sensitive paint (PSP) was used to measure the film cooling effectiveness on a flat plate. Results showed that PSP technique successfully evaluated the distribution of film cooling effectiveness. Three blowing ratios of 0.5, 1, and 2 were tested and the film cooling effectiveness near holes decreased as the blowing ratio increased, however, increased far downstream from the holes.

초 록

고온 환경에서 작동하는 가스터빈 블레이드의 열부하 감소를 위해 다양한 냉각법이 적용되고 있다. 블레이드 외부에서는 작은 홀을 통해 저온의 냉각 유체를 분사시키는 막냉각법이 사용되는데, 블레이드 내부의 정확한 온도 예측을 위해서는 작동 조건과 위치에 따른 막냉각 효율을 정확히 산출하여야 한다. 본 연구에서는 압력에 따라 반사되는 빛의 강도를 달리하는 압력감응페인트를 이용하여 평판에서의 막냉각 효율을 측정하였다. 그 결과, 압력감응페인트를 이용한 막냉각 계수 측정법은 상세한 막냉각 계수의 분포를 측정 가능케 하였다. 0.5, 1, 2의 세 가지 분사비가 실험에 적용되었고, 분사비가 커질수록 막냉각 홀 근처의 막냉각 계수는 감소하였지만 하류의 막냉각 계수는 증가하였다.

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

* 한국항공대 항공우주 및 기계공학부 대학원

** 한국항공대 항공우주 및 기계공학부 학부

*** 한국항공대, 항공우주 및 기계공학부

**** 한국항공대, 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail: jskwak@kau.ac.kr

***** 한국항공우주연구원 엔진개발실

1. 서 론

고온 부품의 표면에 작은 홀을 뚫고 냉각 유체를 분사하여 뜨거운 외부 유체로부터 표면을

보호하는 막냉각은 여러 분야에서 응용되고 있다. 특히, 이 기술은 입구 온도를 높여 출력과 효율을 증가시키려는 가스터빈 내 고온 부품들의 파손을 방지하고 열부하를 줄이기 위하여 많이 사용되고 있다.[1] 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 퀀칭의 원리를 이용하여 표면의 압력 분포를 측정할 수 있다[2]. 1980년대 러시아의 모스크바 대학에서 공기역학 실험에 적용하면서 압력 측정에 적용되기 시작한 PSP는 현재 저속유동에서의 응용에도 많은 연구가 진행되고 있다. Morris등[3]과 McLaclan과 Bell[4]은 PSP 기술을 공기역학 실험에 적용하였고, Zhang과 Fox[5], Zhang등[6], Zhang과 Jaiswal[7]은 평판, 노즐, 끝벽에서 냉각 유체로 공기와 질소를 사용하는 기법을 이용하여 막냉각 계수를 측정하였다. Ahn등[8]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 막냉각 계수의 분포에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치

Figure 1은 실험 장치의 구성을 나타낸 것으로, 실험 장치는 난류 강도 증가를 위한 그리드, 막냉각 유체의 유량 측정을 위한 유량계, PSP의 강도 측정을 위한 CCD 카메라, PSP의 발광을 위한 LED 조명 등으로 구성되었다. 열선유속계(Kanomax)로 측정된 주유동의 난류강도는 7.2%이고 주유동의 속도는 20m/s로 고정하였다. 막냉각 홀은 직경이 5mm인 구멍 6개를 수평면에

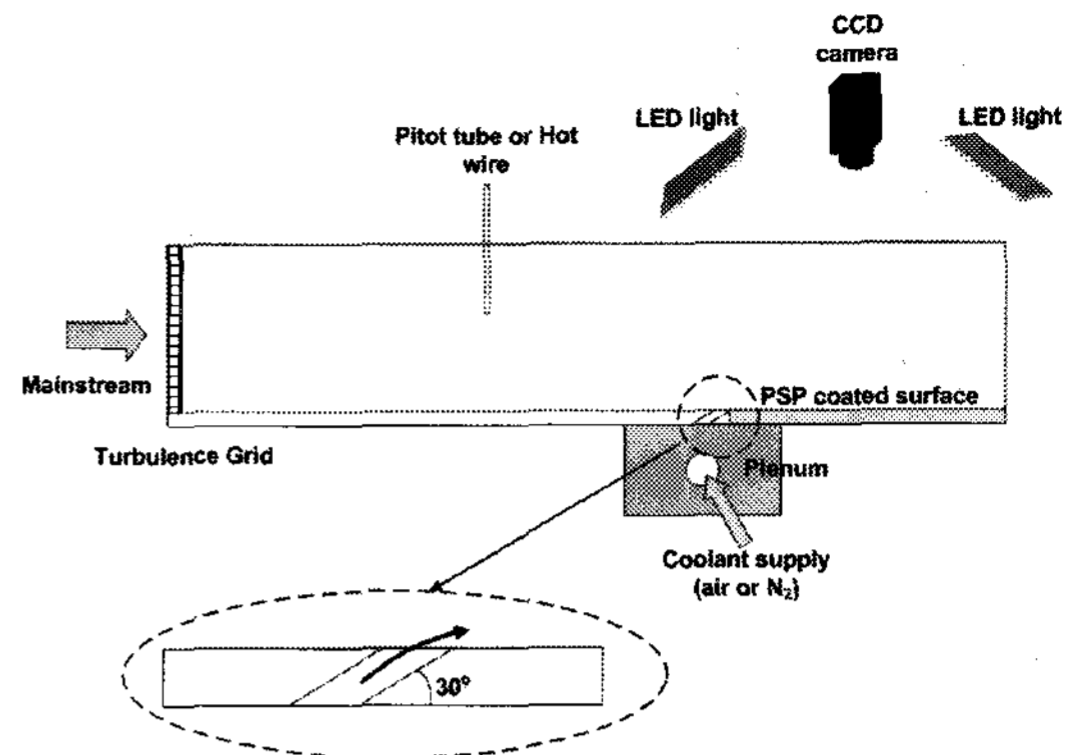


Fig. 1 Schematic of test section (not to scale)

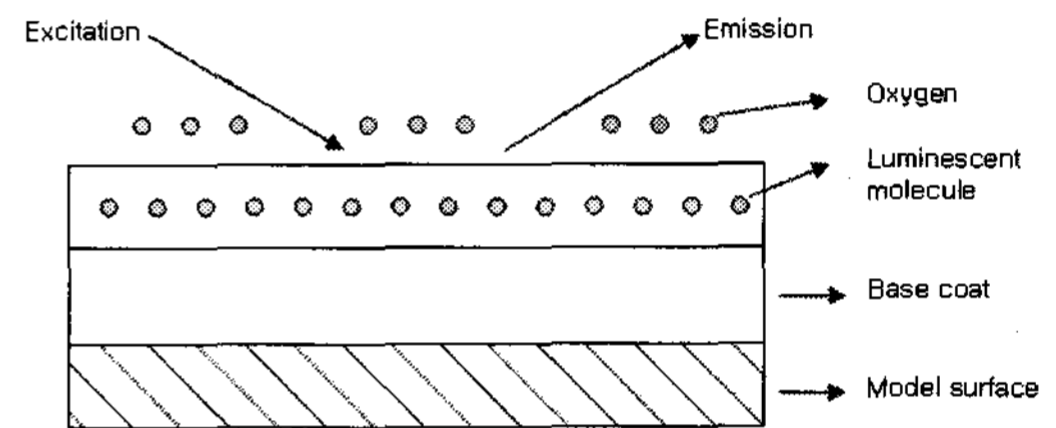


Fig. 2 Schematic of a luminescent PSP

대해 30° 각도로 설치하였고 식(1)로 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 14bit CCD 카메라를 설치하여 PSP가 방사하는 빛의 강도를 컴퓨터로 저장하였다.

3. 막 냉각 계수 측정 이론

3.1 압력감응 페인트 (pressure sensitive paint)

PSP는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 표면에 페인트를 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 반비례하여 발광분자에서 방사한다. 즉, 압력이 높아지면 표면에서 방사되는 빛의 세기는 줄어든다. 압력과 방사되는 빛의 강도의 관계식은 다음과 같이 다항식으로 표현할 수 있다.

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

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.[8]

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

$$\frac{I_{ref} - I_{blk}}{I_{mix} - I_{blk}} = func((P_{O_2})_{mix}) \quad (4)$$

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 분압이다. 막냉각 유체로 질소와 공기를 각각 분사하고 각각의 경우에 대한 산소

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

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.

$$\eta = \frac{C_{O_{air}} - C_{O_{mix}}}{C_{O_{air}}} = \frac{(P_{O_2})_{air} - (P_{O_2})_{mix}}{(P_{O_2})_{air}} \quad (5)$$

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

식(5)를 이용하여 PSP로 코팅 된 시험부의 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

압력과 PSP에서 방사되는 빛의 세기의 보정을 위한 별도의 실험을 수행하였다. 온도 조절이 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 카메라

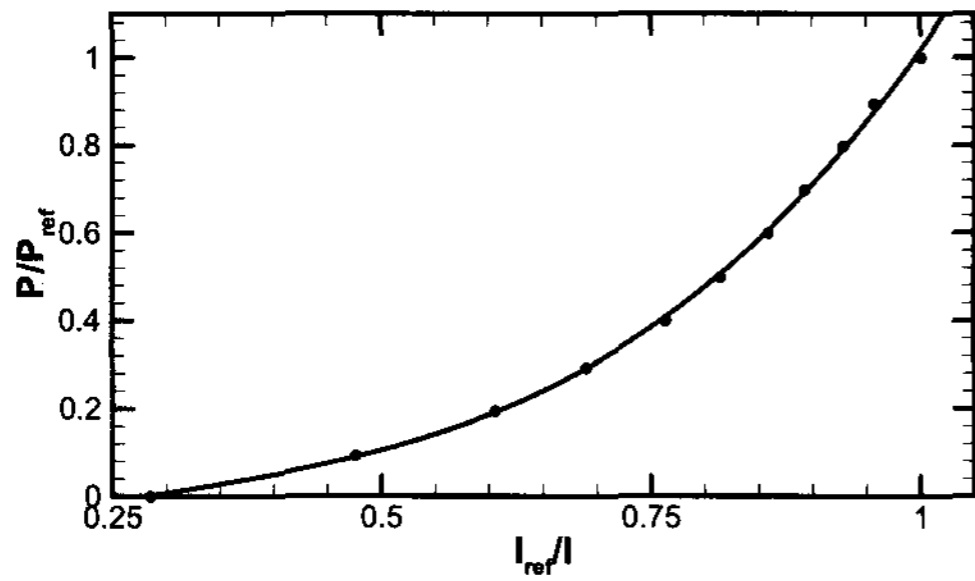


Fig. 3 Calibration curve for PSP

라와 조명을 사용하여 압력에 따른 밝기의 변화를 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. Figure 3은 보정 결과로, 압력비를 명도비의 3차항으로 나타내었다.

4. 막냉각 실험 결과

Figure 4는 분사비에 따른 막냉각 계수의 분포를 나타낸다. 세 경우 모두 막냉각 유체에 의한 효과를 선명히 보여주고 있다. 분사비가 0.5인 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 낮아지게 된다. 분사비가 증가하면 막냉각 유체의 모멘텀이 커지게 되어 분사된 막냉각 유체가 주유동의 경계층을 뚫게 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, 분사

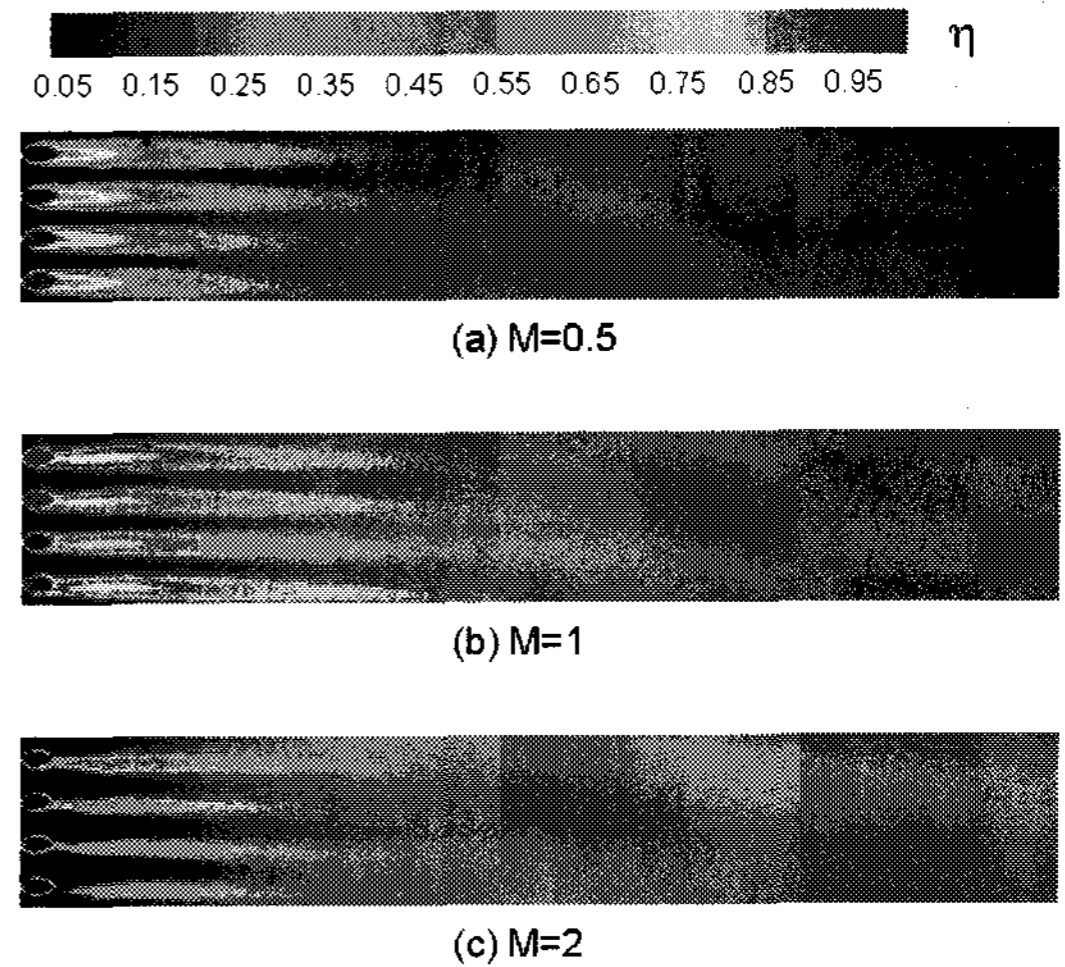


Fig. 4 Distribution of film cooling effectiveness

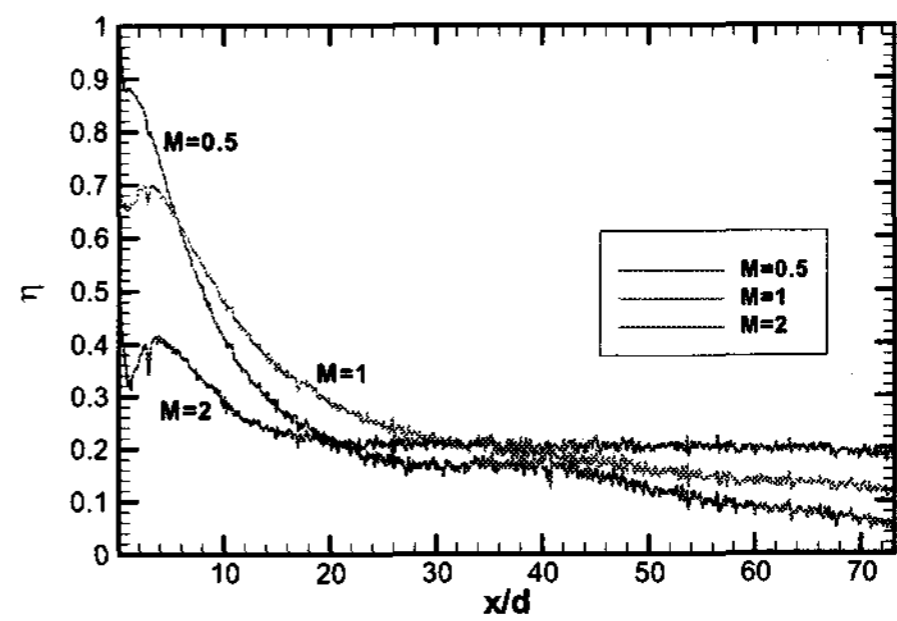


Fig. 5 Film cooling effectiveness along the center of hole

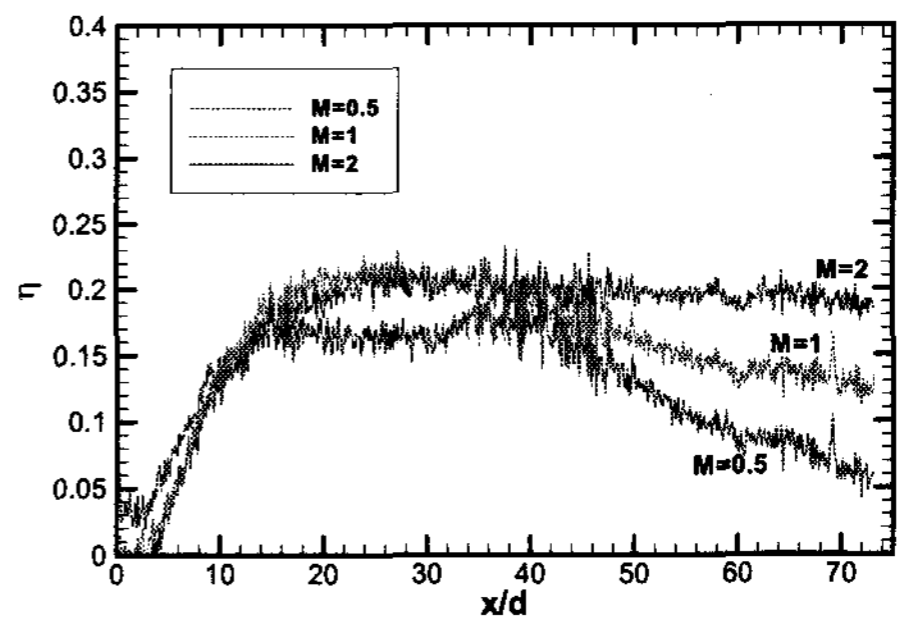


Fig. 6 Film cooling effectiveness along between holes

비가 커질수록 분사된 직후의 막냉각 계수는 작아지지만 하류로 갈수록 막냉각 계수가 커지는 것을 볼 수 있다.

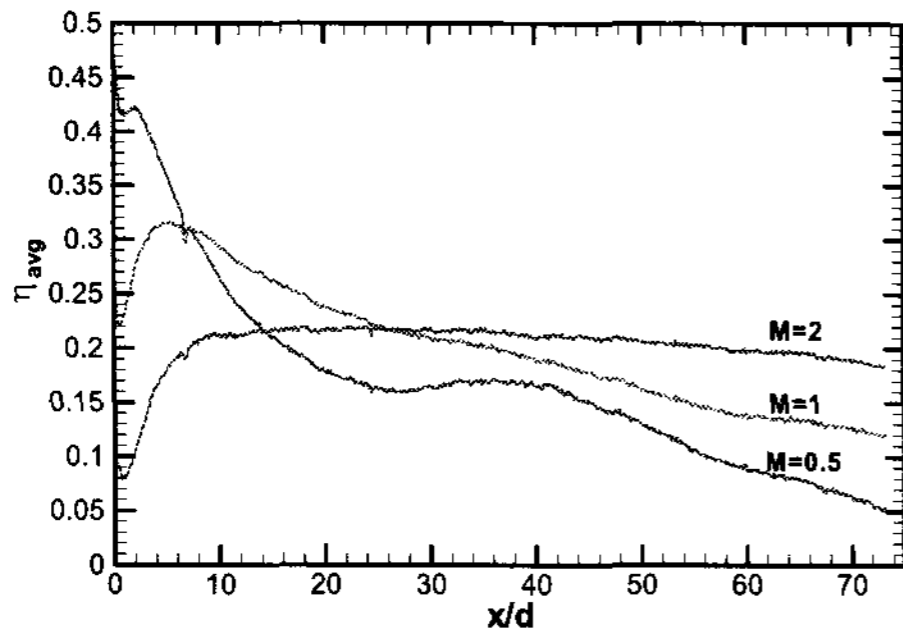


Fig. 7 Span averaged film cooling effectiveness

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 월등히 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 강도를 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 성공적으로 산출할 수 있었다. 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 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 분사비가 높은 경우에는 분사 직후의 막냉각 계수는 낮지만 하류에서는 낮은 분사비의 경우에 비해 높은 막냉각 계수의 분포를 나타내었다.

본 연구에서는 PSP가 막냉각 계수의 측정에 효과적으로 적용될 수 있음을 보였고, 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

1. Han, J. C., Dutta, S., and Ekkad, S. V., 2000, Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology, Taylor & Francis, New York.
2. T. Liut, J. P. Sullivan, 2005, Pressure and Temperature Sensitive Paint, Springer.

3. Morris, M., Donovan, J., Schwab, S., Levy, R., and Crites, R., 1995 "Aerodynamic Applications of Pressure Sensitive Paint," AIAA paper NO. 92-0264.
4. McLachlan, B., and Bell, J., 1995, "Pressure Sensitive Paint in Aerodynamic Testing," *EXP. Therm. Fluid Sci.*, 10, pp. 470-485.
5. 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.*
6. 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.
7. Zhang, L. J., Jaiswal, R. S., 2001, "Turbine Nozzle Endwall Film Cooling Study Using Pressure Sensitive Paint," *ASME J. of Turbomachinery*, 123, Paper. 730-738.
8. Ahn, J. Y., S. Mhetras., Han, J. C., 2004, "Film-Cooling Effectiveness On a Gas Turbine Blade Tip Using Pressure Sensitive Paint," *Turbo Expo*, Paper No. GT2004-53249.