

냉각홀 형상 변화에 따른 원형봉 선단의 막냉각 특성 연구

김성민* · 김윤제** · 조형희***

A Study of Film Cooling of a Cylindrical Leading Edge with Shaped Injection Holes

S.-M. Kim*, Youn-J. Kim**, H.-H. Cho***

Key Words: Film Cooling (막냉각), Turbine Blade (터빈 블레이드), Blowing Ratio (분사비), Infrared Thermography (적외선 열화상 장치), Adiabatic Film Cooling Effectiveness (단열 막냉각 효율)

ABSTRACT

Dispersion of coolant jets in a film cooling flow field is the result of a highly complex interaction between the film cooling jets and the mainstream. In order to investigate the effect of blowing ratios on the film cooling of a turbine blade, cylindrical body model is used. Mainstream Reynolds number based on the cylinder diameter is 7.1×10^4 . The effects of coolant flow rates are studied for blowing ratios of 0.7, 1.0, 1.3 and 1.7, respectively. The temperature distribution of the cylindrical model surface is visualized with infrared thermography (IRT). Results show that the film cooling performance could be significantly improved by the shaped injection holes. For higher blowing ratio, the spanwise-diffused injection holes are better due to the lower momentum flux away from the wall plane at the hole exit.

1. 서 론

막냉각 (film cooling)은 압축공기가 연소실로 유입되기 전에 일부를 빼내어 블레이드의 표면에 뚫린 분사홀 (injection hole)을 통해 블레이드 표면으로 분사시킴으로써 고온의 가스유동으로부터 블레이드 표면을 보호하고 단열 막을 형성하여 블레이드로의 열전달을 억제하여 블레이드 벽면 근처에서의 기체 온도를 저하시키는 냉각방법이다.

터빈 블레이드의 막냉각 특성은 많은 변수들에 의해 좌우되는데, 이런 변수로는 익형의 곡률 분포, 분사

홀 직경, 분사홀 형상, 분사홀 사이의 간격, 분사 각도, 블레이드 표면 거칠기, 주유동의 레이놀즈 수, 주유동의 난류강도 스케일, 후류 효과 (wake effect), 주유동과 막냉각 유체의 분사비, 운동량 유속비 그리고 밀도비 등이 있다. 본 연구에서는 기하학적 변수인 분사홀 출구의 형상 변화와 분사비 변화를 통해 막냉각 효율을 높이는 방법을 제시하고자 한다.

터빈 블레이드 분사홀 출구에서의 유동은 크게 다음과 같은 메카니즘에 의해 결정된다. 정체선 (stagnation line)에 위치한 분사홀의 분사 제트는 분사홀 출구의 역압력 구배 영역과 박리 영역을 만나게 된다. 또한 제트와 주유동의 상호 작용에 의해 첫 번째 분사홀 근처에서 말굽 와류 (horseshoe vortex)가 형성되게 된다. 말굽 와류에 의해 주유동이 블레이드 표면으로 유

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

*** 연세대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : yjkim@skku.edu

입되고, 막냉각 효율은 떨어지게 된다. 정체선으로부터 하류에 위치한 분사홀은 공기실과 막냉각 홀의 압력차가 정체선에 위치한 분사홀보다 크므로 분사 제트 상대 속도가 빠르다. 막냉각 유체의 강한 운동량에 의해 막냉각 유체가 벽에서 분리되고, 주유동과 막냉각 유체의 강한 전단작용으로 막냉각 효율은 많이 떨어지게 된다. 이런 원리로 막냉각 유체에 의해 주유동이 블레이드 표면에 유입되고, 막냉각 효율은 급격히 떨어지게 된다. 따라서 변형된 분사홀을 이용하여 막냉각 유체와 주유동의 상호작용에 의한 주유동의 유입을 최소화하여, 막냉각 효율을 높이려고 한다.

Goldstein⁽¹⁾은 1971년까지의 막냉각에 관한 연구를 체계적으로 정리하였고, 국내에서는 조형희⁽²⁾가 막냉각의 유동 및 열전달 특성과 최근의 연구동향에 관해 정리한 바 있다. 분사홀 출구의 형상 변화에 대한 많은 연구가 수행되고 있으며, Bohn 등⁽³⁾은 실제 터빈 블레이드 선단 막냉각에서 유동방향 분사시 분사홀 하류에 대칭형태의 신장와류(kidney vortex)가 발생하고, 축방향 분사각을 갖는 경우 비대칭 형태의 와류가 발생함을 밝혔다. 선단 막냉각에 관한 실험적인 연구로는 Ou와 Han⁽⁴⁾, Ekkad 등⁽⁵⁾, Ou와 Rivir⁽⁶⁾에 의해 수행되었으며, 특히, Cruse 등⁽⁷⁾은 열화상 장치를 사용하여 선단 표면의 온도 분포를 가시화하였다. 최근에는 유동방향으로 분사되는 원통형 홀, 복합각도로 분사되는 원통형 홀, 유동방향으로 분사되는 변형된 홀, 그리고 복합각도로 분사되는 변형된 홀에 관한 일련의 수치적 연구가 수행되었다. 그들은 막냉각의 유동특성을 상세하게 밝혔고, 여러 가지 변형된 홀과 분사각도의 영향을 체계적으로 연구하였다.

본 연구에서는 가스 터빈 블레이드 선단에서 갖는 열유동 특성을 고찰하고자, 원봉으로 모사한 모델을 이용하여, 분사비와 분사홀 형상 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 특히, 적외선 열화상 장치를 사용하여 원봉 모델 표면의 온도 분포를 가시화 하였다.

2. 단열 막냉각 효율 및 분사비

터빈 블레이드의 막냉각 성능을 평가하는 단열 막냉각 효율(adiabatic film cooling effectiveness) η_{aw} 는 다음과 같은 무차원 온도분포로부터 구할 수 있다.

$$\eta_{aw} = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \quad (1)$$

여기서 T 는 온도를 나타내며, 하첨자 aw 는 단열벽, c 는 막냉각 유체, ∞ 는 주유동을 나타낸다.

막냉각 효율에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나인 분사비(blowing ratio, B)는 주유동과 막냉각 유체의 질량유속비(mass flux ratio)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{\rho_c U_c}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \quad (2)$$

본 연구에서는 공기를 막냉각 유체로 사용하였기 때문에, 분사비는 막냉각 유체와 주유동의 속도비를 나타내고 있다. 또한 막냉각 유체의 유량은 공기실 입구에 설치된 오리피스 유량계로 측정하였으므로, 분사비는 각 분사홀의 평균값을 나타낸다.

3. 실험 장치 및 방법

원봉 모델의 막냉각 홀 형상과 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 전도(conduction)에 의한 영향을 최대한 줄이고 단열벽을 만들기 위해, 원봉 모델은 열전도율이 $k=0.15 \text{ W/m-K}$ 로 매우 낮은 폴리아세탈(polyacetal)을 사용하여 가스 터빈 블레이드 선단을 원봉으로 모사하였고, 원봉의 직경(D)을 80 mm , 원봉의 두께를 16 mm , 막냉각 홀 피치(p)를 $7.5d$ ($d=4 \text{ mm}$), 원봉 모델 길이를 350 mm 로 가공하였다. 막냉각 홀의 길이-직경비(L/d)는 8이고, 막냉각 홀 직경-원봉 직경비(d/D)는 0.05 이다. 막냉각 홀은 3열로 27개를 가공하였으며, 원봉 선단의 정체선으로부터 유동 방향으로 (a) 각각 0° , $\pm 23^\circ$ 에 위치하며, 축방향 분사각은 모두 30° 로 하였다. x 축은 원봉 모델 표면을 따르는 유동 방향을, y 축은 원봉 모델 표면에 수직한 방향을, z 축은 표면을 따르는 스펙방향 거리를 나타낸다. 분사홀 출구 형상 변화가 막냉각 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 총 5개의 분사홀 모델을 사용하였으며, 각각 Shape A, B, C, D, E로 명명했다. Shape A는 일반적인 원통형 분사홀을, Shape B는 $y=-0.87d$ 의 위치에서 스펙방향으로 10° 확장된 분사홀, Shape C는 Shape B에서 유동방향으로 $\pm 10^\circ$ 확장된 분사홀, Shape D는 $y=-1.2d$ 의 위치에서 스펙방향으로 10° 확장된 분사홀, Shape E는 Shape D에서 유동방향으로 $\pm 10^\circ$ 확장된 분사홀을 나타내고 있다.

본 연구에서 사용한 풍동은 개방형 아음속(subsonic)

냉각홀 형상 변화에 따른 원형봉 선단의 막냉각 특성 연구

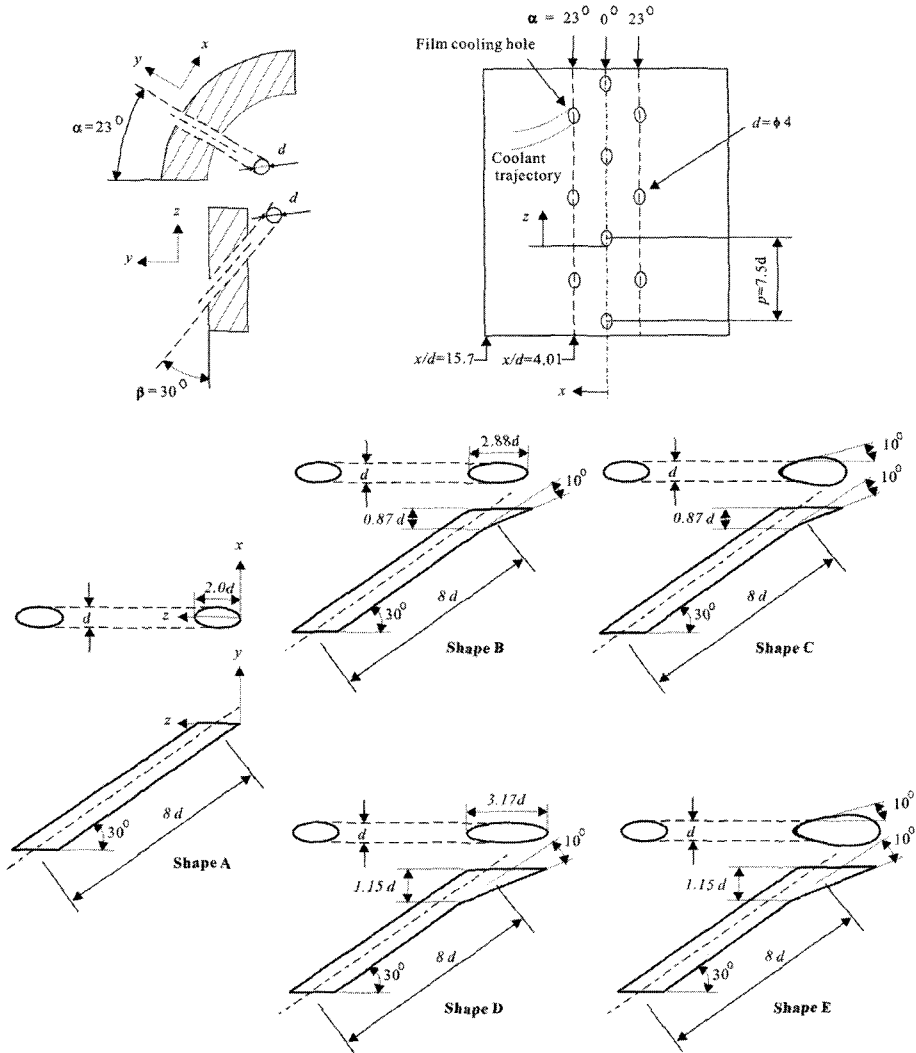


Fig. 1 Overview of showerhead geometries

풍동으로 단면수축비 (contraction ratio)는 7:1이며, 균일한 유동을 공급하기 위해 하나의 허니콤 (honeycomb)과 4개의 스크린 (screen)이 장착되어 있다. 시험부의 단면적은 $450\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ 이며, 유속은 45 m/s까지 연속적으로 조절이 가능하다. 난류강도는 약 0.4% 이내이고, 평균속도의 공간 균일도는 경계층 부분을 제외하면 약 $\pm 1.0\%$ 이내이다. 시험부는 아크릴로 제작하였으며 전체 시험부의 길이는 4.3 m이다.

막냉각 유체를 공급하기 위한 이차유동 공급장치는 온풍기 (heating blower)와 막냉각 유체의 유량을 측정하기 위한 유량계, 원봉 모델로 막냉각 유체를 공급하기 위한 배관으로 구성하였다. 온풍기는 시로코 웬 (sirocco

fan)과 히터, 그리고 원하는 온도를 일정하게 유지하기 위한 자동 온도 조절 장치로 구성하였다. 공기실 내 분사홀 입구 근처에 T형 열전대 (T-type thermocouple)를 설치하여 자동 온도 조절 장치에 연결, 자동 제어하게 함으로써 분사 유체의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 주유동 속도는 열선 유속계 (hot-wire anemometer)와 피토판을 이용하여 측정하였으며, 후류가 원봉 모델 선단의 열전달에 미치는 영향을 줄이기 위해 원봉 모델의 하류에 테일보드를 설치하였다. 적외선 열화상 장치의 교정을 위해, 원봉 모델의 벽면을 따라 T형 열전대를 x/d 가 ± 1.00 , ± 2.01 , ± 4.67 , ± 9.27 인 지점에 모두 20개를 부착하였으며, 열대용 분석기인

DR230 (YOKOGAWA)을 이용하여 데이터를 획득하였다. 원봉 모델 표면의 온도 분포는 적외선 열화상 장치인 VARIOSCAN 3011 (JENOPTIK)을 이용하여 측정하였다. 이 장치의 스펙트럼 감도는 8-12 μm 이며, 30°C 흑체 복사체에서 $\pm 0.03\text{K}$ 의 열해상도를 가지고 있다. 열화상 장치는 원봉 모델 표면의 방사율에 매우 민감하며, 또한 표면의 곡률, 주위 물체에 의해서도 영향을 받는다. 본 연구에서는 원봉 모델 표면의 방사율을 높이기 위해 검정색 페인트를 표면에 도포하였고, 모델 표면의 곡률에 의한 영향을 줄이기 위해, 열화상 장치의 각도를 바꿔가면서 촬영하였고, 각각 RGB 데이터를 추출하고, 결과를 보정하여 표면 온도 분포를 구하였다. 실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 Goldstein⁽⁸⁾에 의해서 제시된 방법을 사용하였다. 열전대의 오차는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이며, 열화상 장치로 측정한 온도 분포는 원봉 모델 표면을 따라 부착된 20 지점의 열전대와 온도 차이가 0.1°C 미만일 때 측정되었다. 열화상 데이터는 110 × 170 픽셀로 측정되었으며, 공간해상도는 픽셀당 0.29 mm × 0.33 mm이며, 온도해상도는 0.2°C이다. 단열 막냉각 효율의 오차는 $\eta_{aw}=0.2$ 일 때 ± 0.013 이며, $\eta_{aw}=0.5$ 일 때 ± 0.012 이다.

주유동의 속도를 14 m/s로 고정시키고, 분사비를 0.7, 1.0, 1.3, 1.7로 변화시키며 실험을 수행하였다. 이때, 원봉 모델 선단 직경을 기준으로 한 Re_D 는 약 7.1×10^4 의 값을 갖는다. 본 연구에서는 Funazaki 등⁽⁹⁾의 선행 연구자들과 같이 막냉각 유체의 온도를 주유동보다 20°C 높게 가열하였고, 자동 온도 조절 장치를 이용하여 주유동과 막냉각 유체간의 온도차를 항상 일정하게 유지하도록 하였다. 막냉각 유체를 가열하면 실제 밀도비를 모사할 수 없는 단점이 있지만, 본 연구에서처럼 분사비가 1인 경우, Froude 수는 약 267정도가 되므로 부력은 막냉각 유체의 궤적에 영향을 주지 않는다고 가정하였다⁽¹⁰⁾.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 적외선 열화상 장치로 측정한 원봉 모델 선단 표면의 온도 분포를 나타내고 있다. 공기실 입구에서 출구까지 유동 저항이 변하기 때문에 스펙 방향으로 각 분사홀마다 분사비 차이가 있지만, 표면 온도 분포는 스펙 방향으로 비교적 일정한 패턴을 유지하였다. 원봉 표면의 압력 분포의 영향으로 첫 번째 분사

열과 두 번째 분사열의 분사비 차이가 있으며, 막냉각 유체의 궤적은 분사비가 증가할수록 z 방향에 대해 비대칭적으로 편향되는 것을 알 수 있다. 표면 온도 분포 그림을 통해서 모든 분사비에 대해 변형된 분사홀이 원통형 분사홀보다 원봉 표면의 넓은 면적을 보호하였으며, 이런 현상은 분사비가 증가할수록 커졌다. 분사비 1.0와 1.3일 때, 정체선 근처에서는 Shape B가 높은 효율을 보이고 있으며, 이는 원통형 분사홀의 출구를 스펙 방향으로 10° 확장시킨 결과 출구에서 막냉각 유체의 운동량을 줄여 막냉각 유체가 표면에 잘 부착되기 때문이다.

4.1 원통형 분사홀

분사비가 증가할수록, 두 번째 분사홀 하류의 막냉각 제트의 궤적은 가늘어지고, z 방향에 대해 비대칭적으로 편향되는 것을 알 수 있다. 또한 막냉각 제트의 강한 운동량에 의해, 막냉각 유체가 벽에서 분리되고, 주유동이 블레이드 표면에 유입되어, 두 번째 분사홀 근처에서는 막냉각 효율이 떨어지게 된다. 한편, 원봉 모델의 정체 지역에 위치한 첫 번째 분사홀 하류에서는 분사비가 증가할수록 낮은 효율 분포를 보이는데, 이는 막냉각 유체가 벽에서 분리되어 재부착하기 때문이라고 판단된다.

4.2 변형된 분사홀

변형된 분사홀에서도 분사비가 증가할수록 두 번째 분사홀 하류의 막냉각 유체의 궤적은 z 방향에 대해 편향되며, 스펙방향으로 확산이 줄어들고, 막냉각 효율이 떨어지게 된다. z 방향으로 막냉각 유체의 편향은 스펙방향으로 확장한 분사홀인 Shape B와 D에서 Shape C와 E보다 크게 나타났다. 변형된 분사홀은 모든 분사비에서 원통형 분사홀보다 표면에 넓게 부착하였고, 더 높은 막냉각 효율 분포를 나타내었다. 분사비가 0.7일 때, Shape D인 경우 스펙방향으로 막냉각 유체의 확산이 가장 넓게 일어났다. 분사비가 1.0일 때, 첫 번째 분사홀 하류에서는 출구를 원봉 모델의 스펙방향으로 확장시킨 홀 (Shape B, D)의 경우에 출구를 원봉 모델의 스펙방향과 유동방향으로 확장시킨 홀 (Shape C, E)의 경우보다 원봉 모델 선단에서 막냉각 유체가 고르게 분포하는 것을 알 수 있다. 그러나 분사비가 1.7로 강해지면 모든 변형된 분사홀에서 막냉각 효율

냉각률 형상 변화에 따른 원형봉 선단의 막냉각 특성 연구

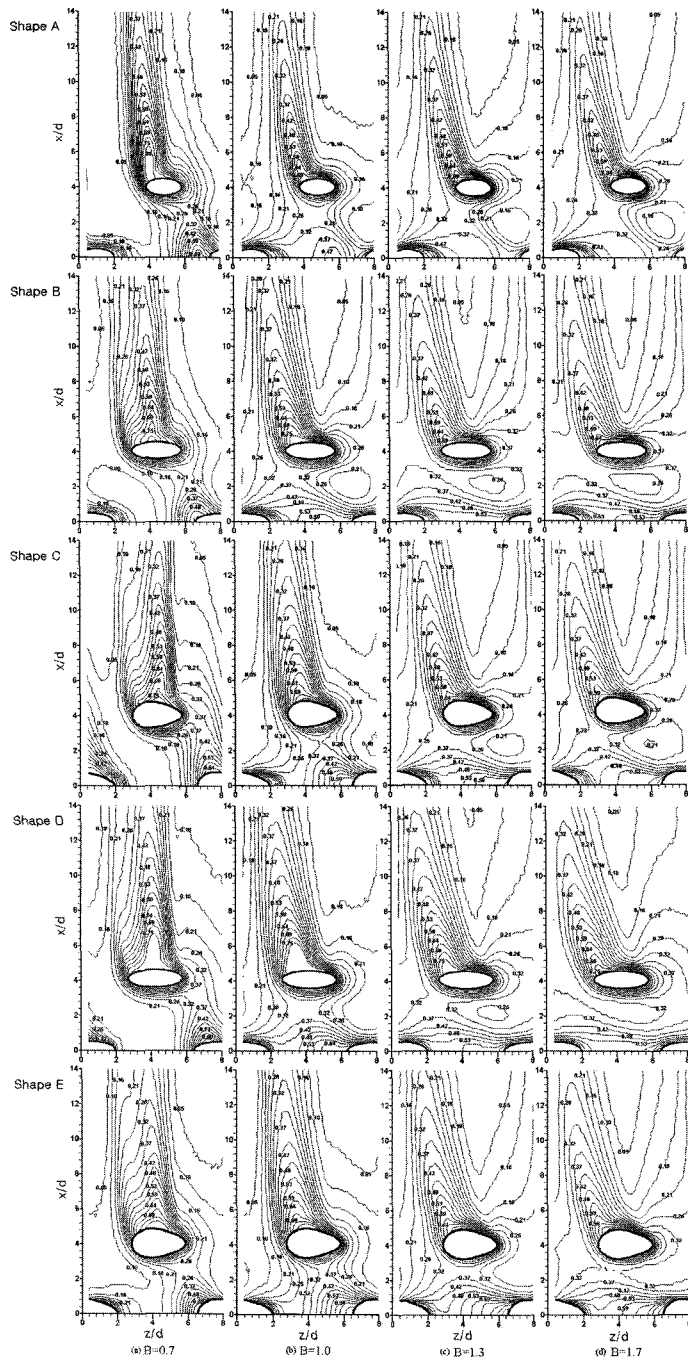


Fig. 2 Film cooling effectiveness distributions at the leading edge surface

의 고른 분포를 나타내었다. 두 번째 분사홀 하류에서는 첫 번째 분사홀보다 공기실과 분사홀 출구의 압력차가 크므로, 막냉각 유체의 분출 속도가 정체 지역에

위치한 첫 번째 분사홀보다 상대적으로 빠르게 되고, 강한 역압력 구배 영역에 의해 원봉 모델 표면에서 이탈하게 되며, 주유동과 막냉각 유체의 강한 전단 작용

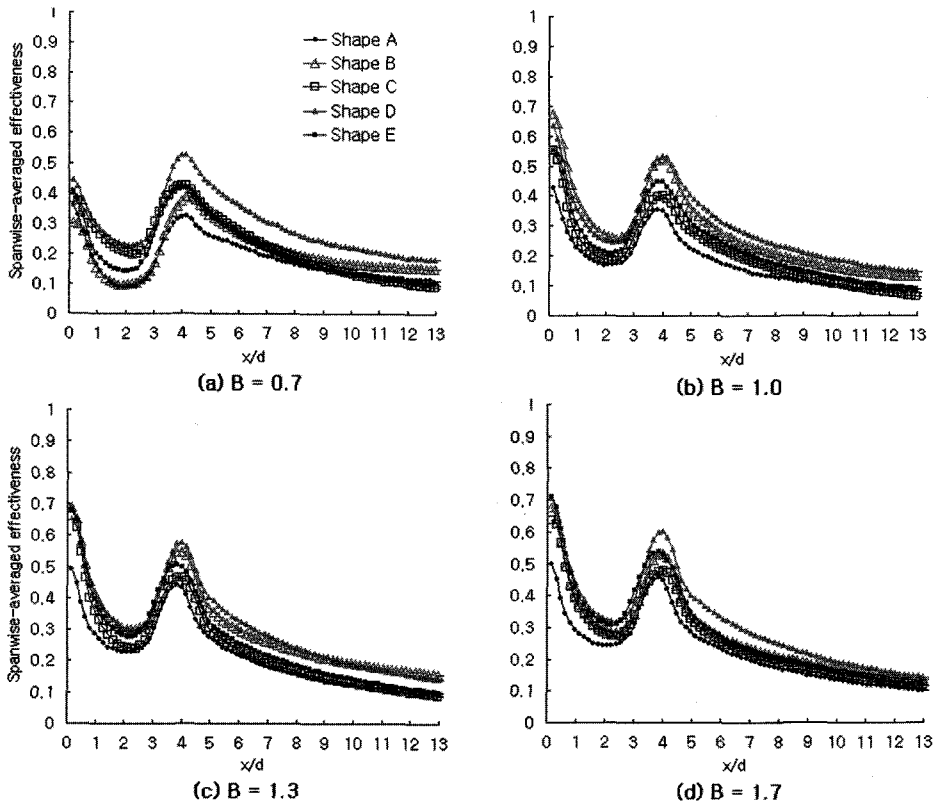


Fig. 3 Spanwise-averaged film cooling effectiveness for different blowing ratios

으로 막냉각 효율은 많이 떨어지게 된다. 변형된 분사홀의 경우 원통형 분사홀보다 분사홀 하류에서 높은 막냉각 효율 분포를 보이는데, 이는 출구 면적을 스펀방향 또는 유동방향과 스펀방향으로 확대함으로써 분사홀 출구에서 막냉각 유체의 운동량이 줄어 블레이드 표면에 넓게 분포하기 때문이다.

4.3 스펀방향 평균 막냉각 효율

Fig. 3은 분사비 증가에 대한 5가지 모델의 스펀방향 평균 막냉각 효율 분포를 나타내고 있다. 유동 방향 (x)으로 84곳의 지점에서 데이터를 추출했으며, 스펀방향 (z)으로는 80곳의 지점에서 국소 막냉각 효율의 평균을 구해서 결과를 얻었다. 분사비가 증가할수록 첫 번째 분사홀의 효율 분포는 원통형 홀을 제외하고, 나머지 변형된 분사홀에서 모두 증가하였지만, 두 번째 분사홀 하류에서는 분사비가 증가할수록 유동방향으로 확장시킨 분사홀의 효율이 스펀방향으로 확장한 분사홀에 비해 크게 떨어졌다. 분사비가 0.7일 때는

Shape D에서 가장 높은 효율 분포를 나타내었고, 분사비가 1.0과 1.3로 증가하면서 스펀방향으로 확장한 분사홀인 Shape B와 D에서 높은 효율 분포를 보였다. 분사비가 1.7로 증가하면, 다른 분사홀 형상에 비해 Shape D의 두 번째 분사홀 근처와 하류에서 높은 효율 분포를 유지하였다.

5. 결론

본 연구에서는 분사비와 분사홀 형상 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보기 위해, 적외선 열화상 장치를 사용하여 원봉 모델 표면의 온도 분포를 가시화하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 적외선 열화상 장치로 측정된 원봉 모델 표면 온도 분포는 열전대로 측정된 결과와 비교 시, 높은 정확도를 나타내었고, 여러 가지 분사비에 대해 표면 온도 분포를 측정된 결과, 변형된 분사홀은 분사홀 출

구를 넓혀서 막냉각 유체의 운동량을 줄이고, 벽에 잘 부착하여, 원통형 분사홀보다 높은 막냉각 효율 분포를 나타내었다.

- 2) 분사비가 증가할수록 스핀방향으로 확장한 분사홀인 Shape B와 D에서, 유동방향으로 확장한 분사홀보다 높은 막냉각 효율 분포를 나타내었다.
- 3) 첫 번째 분사홀 하류에서는 변형된 분사홀 모두 분사비가 증가할수록 높은 효율을 나타내었지만, 두 번째 분사홀 하류에서는 스핀방향으로 확장한 분사홀이 더 높은 막냉각 효율을 나타내었고, 특히 Shape D의 막냉각 효율이 높았다.

참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 321~379.
- (2) 조형희, 2000, "막냉각에서의 유동 및 열전달 특성," *대한기계학회 2000년도 유체공학부 학술회 강연집*, pp. 61~79.
- (3) Bohn, D. E., Moritz, N., Krüger, U. and Kusterer, K., 2000, "Numerical Analysis of Streamwise and Lateral Ejection of Cooling Fluid at the Leading Edge of a Turbine Blade Cascade," *Proceedings of the 8th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, ISROMAC-8*, Vol. II, pp. 793~800.
- (4) Ou, S. and Han, J. C., 1994, "Leading Edge Film Cooling Heat Transfer Through One Row of Inclined Film Slots and Holes Including Mainstream Turbulence Effects," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 561~569.
- (5) Elkad, S. V., Han, J. C. and Du, H., 1998, "Detailed Film Cooling Measurements on a Cylindrical Leading Edge Model: Effect of Free-Stream Turbulence and Coolant Density," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 799~807.
- (6) Ou, S. and Rivir, R. B., 2001, "Edge Film Cooling Heat Transfer with High Free Stream Turbulence Using a Transient Liquid Crystal Image Method," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 614~623.
- (7) Cruse, M. W., Yuki, U. M. and Bogard, D. G., 1997, "Investigation of Various Parametric Influences on Leading Edge Film Cooling," *ASME paper 97-GT-296*.
- (8) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3~8.
- (9) Funazaki, K., Koyabu, E. and Yamawaki, S., 1998, "Effect of Periodic Wake Passing on Film Effectiveness of Inclined Discrete Cooling Holes Around the Leading Edge of a Blunt Body," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 70~78.
- (10) 안 준, 1999, "반대 방향의 방향각을 갖는 2열 분사 구조의 막냉각 특성," *서울대학교 대학원 석사 학위 논문*.