

원통형과 변형된 분사홀을 갖는 터빈 블레이드의 막냉각 특성에 관한 연구

김성민* · 김윤제** · 조형희***

Studies on the Film Cooling Characteristics of Turbine Blade Cylindrical and Shaped Holes

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

Key Words: Film Cooling(막냉각), Shaped Hole(변형된 분사홀), Blowing Ratio(분사비), Spanwise-Averaged Film Effectiveness(스팬방향 평균 막냉각 효율)

ABSTRACT

In order to investigate the effects of various injection hole shapes on the film cooling of turbine blade, three test models having cylindrical and shaped holes were used. A three-dimensional Navier-Stokes code with standard $k-\epsilon$ model was used to compute the film cooling coefficient on the film cooled turbine blade. Over 330,000 grids were used to compute the flow over the blade. Mainstream Reynolds number based on the cylinder diameter was 7.1×10^4 . The turbulence intensity kept at 5.0% for all inlets. The effect of coolant blowing ratio was studied for various blowing ratios. For each blowing ratios, wall temperatures around the surface of test model were calculated. Temperature was visualized using cartesian cut-cell method to obtain traces of the injected secondary air on the test surface, so we could interpret the film effectiveness as temperature distributions.

1. 서 론

막냉각(film cooling)은 압축공기가 연소실로 유입되기 전에 빼내어 블레이드의 표면에 뚫은 분사홀(injection hole)을 통해 블레이드 표면으로 분사시킴으로서 고온의 가스유동으로 블레이드 표면을 보호하는 냉각방법이다. 이때 연소실을 통과한 고온의 가스는 매우 강한 난류가 된다. 고효율 가스터빈 엔진의 구현을 위해 가스터빈 엔진 설계자들은 막냉각 시스템에서 최소한의 냉각공기로 최대한의 냉각효과를 얻기 위한 노력의 일환으로 변형된 분사홀(shaped injection hole)과 분사각(injection angle)의 영향에 대한 많

은 실험적, 수치적 연구를 수행하고 있다.

Goldstein⁽¹⁾은 1971년까지의 막냉각에 관한 연구를 체계적으로 정리하였고, 국내에서는 조형희⁽²⁾가 막냉각의 유동 및 열전달 특성과 최근의 연구동향에 관해 정리한 바 있다.

수치적 연구로는, Thakur 등⁽³⁾이 반원봉 모델선단에서의 막냉각 특성을 저 레이놀즈수(Low Reynolds number) $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 해석하였다. 그들은 정체선으로부터 유동방향으로의 분사각과 분사홀의 배열을 변화시키며 해석함으로써, CFD 기법이 막냉각의 기하학적 최적설계에 사용될 수 있음을 제시하였다. Bohn 등⁽⁴⁾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. 최근에는 유동방향으로 분사되는 원통형 홀(Walters와

* 성균관대 대학원

** 성균관대학교

*** 연세대학교

Leylek⁽⁵⁾, 복합각도로 분사되는 원통형 홀(McGovern과 Leylek⁽⁶⁾), 유동방향으로 분사되는 변형된 홀(Hyams와 Leylek⁽⁷⁾), 그리고 복합각도로 분사되는 변형된 홀(Brittingham과 Leylek⁽⁸⁾)에 관한 일련의 수치적 연구가 수행되었다. 그들은 막냉각의 유동특성을 상세하게 밝혔고, 여러 가지 변형된 홀과 분사각도의 영향을 체계적으로 연구하였다.

본 연구에서는 Westing House의 137MW급 W501F 가스터빈 블레이드를 모사한 원봉 모델을 이용하여 분사비와 분사홀 형상 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

2. 단일 막냉각 효율 및 분사비

단일 막냉각 효율 (adiabatic film cooling effectiveness, η_{aw})은 다음과 같은 무차원 온도분포로부터 구할 수 있다.

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

막냉각 효율에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나로 분사비(blowing ratio, B)를 들 수 있고, 이는 주유동과 막냉각 유체의 질량유속비(mass flux ratio)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

3. 수치해석

3.1 지배방정식

막냉각의 유동장과 온도장 계산에 사용된 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 난류변수 κ 와 ϵ 에 대한 방정식은 일반적인 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi \vec{V}) - \nabla \cdot (\Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi} \quad (3)$$

여기서, Γ_{ϕ} 는 변수 ϕ 에 대한 유효확산계수이며, S_{ϕ} 는 생성항을 나타내고 있다. 또한 난류장 해석을 위하여 본 연구에서는 표준 $\kappa-\epsilon$ 난류모델을 채택하였다.

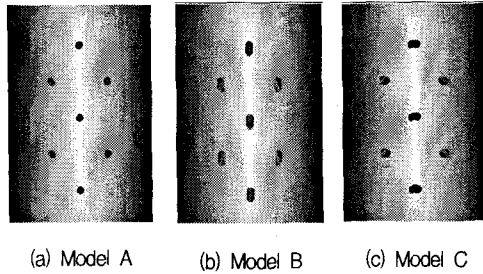


Fig. 1 Overview of model geometries

3.2 해석모델

본 연구의 해석모델은 W501F 블레이드 선단을 4배 확대한 원봉으로 모사하였고, 원봉모델의 직경(D)은 80mm, 두께는 16mm, 막냉각 홀의 피치-직경비(p/d)는 10, 막냉각 홀의 길이-직경비(L/d)는 4.62, 막냉각 홀 직경-원봉 직경비(d/D)는 0.05로 설계하였다. 막냉각 홀은 원봉 선단의 정제선으로부터 각각 0° , $\pm 23^\circ$ 에 위치하며, 스펜방향 분사각은 모두 30° 로 하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 3가지 원봉 모델을 나타내고 있다. 모델 A는 원통형 분사홀, 모델 B는 스펜방향으로 15° 확장된 분사홀, 모델 C는 정제선에 위치한 분사홀이 유동방향으로 $\pm 10^\circ$ 확장된 분사홀, 정제선에서 $\pm 23^\circ$ 에 위치한 분사홀이 유동방향으로 15° 확장된 분사홀을 나타내고 있다.

3.3 수치해석 방법

주유동 속도 14m/s, 난류강도 5%, 온도를 27°C에 고정하고, 분사비를 0.5, 0.9, 1.3으로 변화시키며 수치해석을 수행하였다. 이때, 원봉 모델 선단 직경을 기준으로 한 Re_D 는 약 7.1×10^4 의 값을 갖는다. 막냉각 유체는 47°C로 고정하여 주유동과 20°C 차이를 유지하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 약 33만개의 격자를 도시하고 있다. 출구에는 압력조건과 종속변수의 구배가 0인 조건(Neumann condition)을 사용하였고, 모든 벽면은 단일벽으로 가정하였으며, 벽 경계면에서 속도성분은 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

Garg와 Rigby⁽⁹⁾의 연구에서처럼, 해석을 정확히 모사하기 위해 공기실과 막냉각 유체의 통로를 계산영역에 포함시켰다. 본 연구에서는 격자 생성 및 모델링 작업에 많은 시간과 노력이 요구되는 일반 곡선 좌표

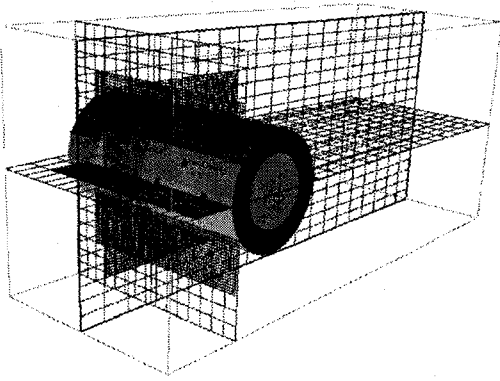
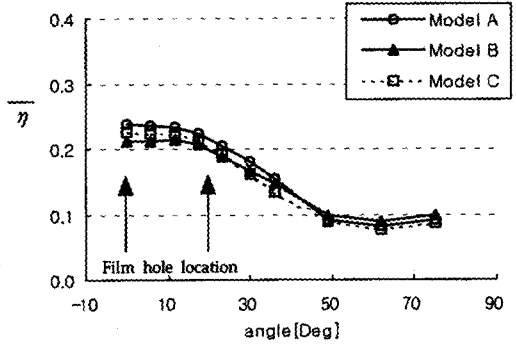


Fig. 2 Computational domain using cartesian cut-cell method

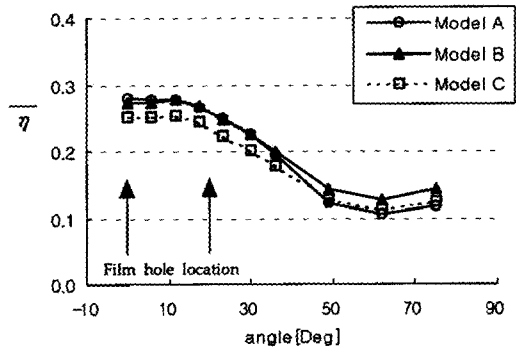
계(body-fitted coordinate)를 사용하지 않고, 결과 도출이 어려운 문제에 보다 쉽게 접근할 수 있는 직각좌표계에서의 분할격자기법(Cartesian cut-cell method)을 이용하였다. 터빈 블레이드의 원봉 모델은 CAD 프로그램을 사용하여 모델링 하였고, 분할격자기법을 제공하는 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS-VR(virtual reality)을 이용하여 COMPAQ SP750 (Intel P3 Xeon 733MHz of 2CPU, 1GB memory)에서 계산을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

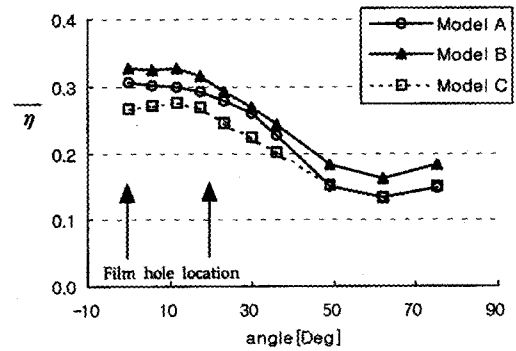
분사비와 분사홀 형상 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 3가지 분사비($B = 0.5, 0.9, 1.3$)에 대해 3가지 분사홀(Model A, B, C)을 갖는 원봉 모델의 효율 분포를 측정하였다. Fig. 3은 3가지 분사비에서 각 모델의 스펙방향 평균 막냉각 효율을 나타내고 있다. 분사비가 0.5인 경우, 각 분사홀의 효율분포는 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 스펙방향으로 출구를 확장시킨 홀은 원통형 홀에 비해 막냉각 유체의 유동방향으로의 영향이 하류까지 유지되고 있음을 알 수 있다. 분사비가 0.9인 경우,



(a) $B=0.5$

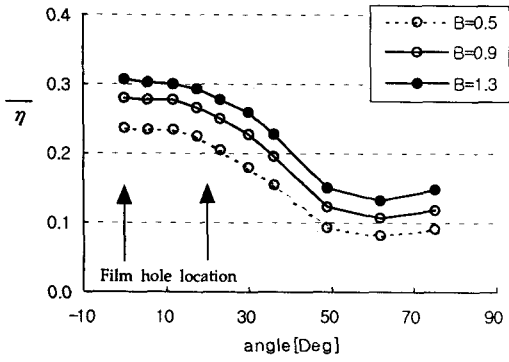


(b) $B=0.9$

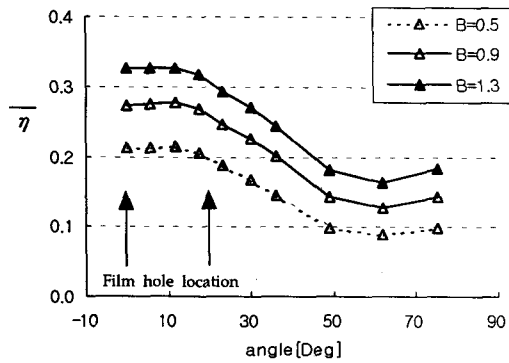


(c) $B=1.3$

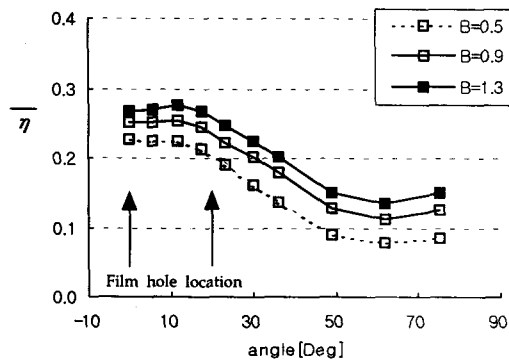
Fig. 3 Effects of various injection hole shapes on the spanwise-averaged film effectiveness



(a) Model A

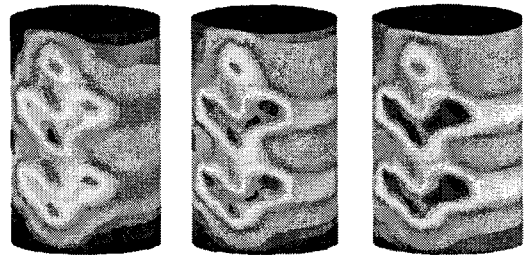


(b) Model B



(c) Model C

Fig. 4 Effects of blowing ratios on the spanwise-averaged film effectiveness

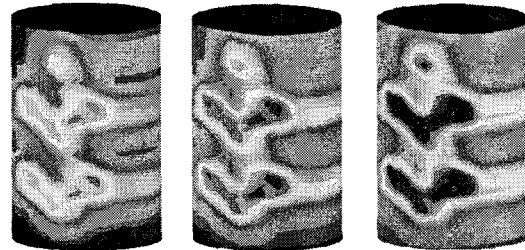


B = 0.5

B = 0.9

B = 1.3

(a) Model A

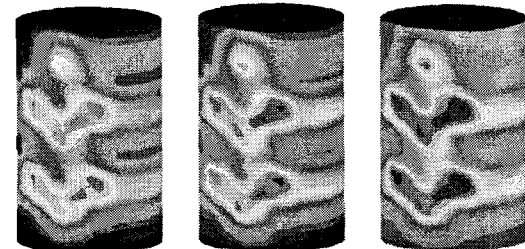


B = 0.5

B = 0.9

B = 1.3

(b) Model B



B = 0.5

B = 0.9

B = 1.3

Temperature



Fig. 5 Temperature distributions of model surface

원통형 홀과 스펀방향으로 출구를 확장시킨 홀의 출구 근처에서 막냉각 효율이 높게 유지되고 있는 것을 볼 수 있으나, 출구를 스펀방향으로 확장시킨 홀에 비해 원통형 홀의 하류에서 막냉각 유체의 영향이 감소하는 경향을 나타내었다. 분사비가 1.3인 경우, 3가지 분사 홀의 효율분포가 확연한 차이를 나타내고 있다. 원통

형 홀의 막냉각 효율은 하류로 갈수록 급격히 감소하였지만, 스펀방향으로 출구를 확장시킨 홀의 막냉각 효율은 높게 유지되었다. 분사비가 낮은 0.5일 때는 원통형 홀에서 가장 높은 효율 분포를 보였지만, 분사비가 증가할수록 스펀방향으로 출구를 확장시킨 홀의 효율이 모델 A와 C에 비해 커짐을 알 수 있다. 이러한 온도장의 특성으로 볼 때, 원통형 홀에 비해 출구를 스펀방향으로 확장시킨 홀이 더 효과적임을 알 수 있었다. 한편 출구를 유동방향으로 확장시킨 분사홀인 경우, 3가지 분사비에서 모두 낮은 효율 분포를 보이며, 분사비가 높아질수록 그 차이의 정도가 심해지는 경향을 나타내었다.

Fig. 4는 3가지 모델의 분사비에 대한 스펀방향 평균 막냉각 효율을 나타내고 있다. 분사비가 커질수록 막냉각 효율은 증가함을 알 수 있고, 출구를 스펀방향으로 확장시킨 분사홀의 경우, 막냉각 효율의 증가하는 폭이 가장 큼을 알 수 있었다. 한편 정채선으로부터 유동방향으로 70° 근처에서는 효율이 다소 높아지는데 이는 유동 박리에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 5에 원봉 모델의 표면 온도를 3차원으로 나타내었다. 분사비가 1.3인 경우, 분사홀 출구 근처 효율은 출구를 스펀방향으로 확장시킨 모델 B에서 가장 높음을 알 수 있었고, 이때 막냉각 유체의 영향이 하류까지 높게 유지되는 것을 알 수 있었다. 한편 분사비가 1.3인 경우, 모델 A와 C는 모델 B에 비해 하류의 온도가 낮게 분포하였다.

5. 결 론

원봉 모델을 이용하여 분사비와 분사홀 형상 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3가지 분사홀에서 모두 분사비가 증가할수록 높은 효율 분포를 보였고, 특히 분사비 1.3일 때 가장 높은 효율 분포를 나타내었다.
- 2) 스펀방향으로 출구를 확장시킨 분사홀은 막냉각 유체의 유동방향으로의 영향이 하류까지 유지되었고, 특히 분사비가 증가할수록 높은 효율분포를 보였다.
- 3) 유동방향으로 출구를 확장시킨 분사홀의 경우는 3가지 분사비에서 모두 낮은 효율 분포를 보였다.

참고 문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 321~379.
- (2) 조형희, "막냉각에서의 유동 및 열전달 특성," 2000, 대한기계학회 2000년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp. 61~79.
- (3) Thakur, S., Wright, J. and Shyy, W., 1999, "Convective Film Cooling over a Representative Turbine Blade Leading-Edge," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2269~2285.
- (4) 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.
- (5) Walters, D. K. and Lylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics : Part I-Streamwise Injection with Cylindrical Holes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 102~112.
- (6) McGovern, K. T. and Lylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics : Part II-Compound-Angle Injection with Cylindrical Holes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 113~121.
- (7) Hyams, D. G. and Lylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics : Part III-Streamwise Injection with Shaped Holes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 122~132.
- (8) Brittingham, R. A. and Lylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics : Part IV-Compound-Angle Injection with Shaped Holes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 133~145.
- (9) Garg, V. K. and Rigby, D. L., 1999, "Heat Transfer on a Film-Cooled Blade - Effect of Hole Physics," *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 10~25.