◎ 논 문

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.2.041
ISSN (Print): 1226-9883

이산화탄소를 이용한 가스터빈 블레이드 막냉각 특성 연구

김상권* · 이종철** · 김윤제***†

A Numerical Study on the Film-Cooling Characteristics of Gas Turbine Blade using CO_2

Sang-Gwon Kim*, Jong-Chul Lee**, Youn-Jea Kim***†

Key Words : Film-Cooling(막냉각), Gas Turbine(가스터빈 블레이드), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

In order to cool the turbine blade under high temperature operating conditions, the film-cooling method is generally applied. In this study, CO_2 was used as working fluid and it helped the operating system to prevent the loss of compressed air. The trapezoidal diffuser shape was adopted at the cross section of hole and the characteristics of heat flow with various working fluids were numerically studied. In particular, the different mixture ratios of CO_2, such as various density ratios of 0.2, 0.8, and 1.0, respectively, were considered. Numerical results are graphically depicted with various conditions.

1. 서 론

가스터빈 엔진의 열효율과 출력을 향상시키기 위하여 운전 온도를 지속적으로 상승시켜 왔다. 하지만, 터빈 입구 온도(Turbine Inlet Temperature, TIT)의 상승은 블레이드(blade)의 열전달을 상승시켜 열응력 증가와 함께 기계 수명을 단축시키는 영향을 미치고 있다. 따라서 운전 온도는 상승시키면서 블레이드 온도를 낮추기 위한 냉각 방법의 개발이 연구되어 왔다.

여러 가지 냉각 방법 중 막냉각(film-cooling) 방법은 블레이드 표면의 홀(hole)을 통해 냉각유체를 분사시킴으로써 고온의 작동유체로부터 터빈 블레이드 표면을 보호하고 열전달을 감소시키는 대표적인 냉각 방법이다[1]. 이러한 막냉각 효율에 영향을 미치는 요인으로는 주유로의 작동유체와 냉각유체의 분사비(blowing ratio), 분사각도(injection angle), 운동량(momentum), 후류효과(wake effect), 주유동의 난류강도, 분사홀의 직경 및 형상, 그리고 밀도비 등이 있으며, 이와 관련하여 냉각 효율을 높이기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다.

* 성균관대학교 대학원 기계공학과
** 강릉원주대학교 기계자동차공학부
*** 성균관대학교 기계공학부
† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

Han과 Ekkad[2]는 터빈 블레이드 막냉각에 관한 연구 개발과 유동 및 열전달 특성에 대한 연구동향을 분석하였다. Kim과 Kim[3]은 분사비와 자유유동 난류강도의 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각에 미치는 영향을 연구하였으며, 특히 적외선 열화상 장치를 사용하여 홀 형상에 따른 원봉 모델 표면의 온도 분포를 가시화 하였다. Salcudean 등[4]은 냉각유체의 밀도가 효율에 미치는 영향을 연구하였고, CO_2와 같이 공기보다 높은 밀도의 기체는 분사비가 커질수록 막냉각 효율이 증가함을 밝혔다. Ekkad 등[5,6]은 원봉 모델을 이용하여 자유유동 난류강도와 냉각유체 밀도에 대한 막냉각 특성을 연구하였다. 또한 분사각도의 변화에 따른 막냉각 효과와 밀도가 다른 공기와 CO_2를 이용하여 실험 연구를 수행하였다. Silieti 등[7]은 계산 격자계 구조와 난류 모델 변화에 따른 막냉각 효율성을 분석하였으며, Lee와 Kim[8]은 LHS(Latin Hypercube Sampling) 기법과 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘을 이용하여 막냉각 홀의 최적 형상 설계를 제시하였으며, 삼차원 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 해석기법을 통하여 타당성을 검증하였다.

그러나 막냉각을 위하여 사용되는 냉각유체는 압축기에서 압축된 공기를 일부분 빼내어 사용함으로써 엔진효율 저하 및 출력성능에 부정적인 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 연구에서는 CCS(Carbon Capture and Storage)[9] 기술을 연계한 CO_2 활용으로 압축 공기의 손실을 방지하여

2011 유체기계 연구개발 발표회 발표 논문, 2011년 11월 30일-12월 2일, 경주
유체기계저널:제15권, 제2호, pp. 41~44, 2012(논문접수일자: 2011.09.23, 심사완료일자: 2012.01.20)

가스터빈의 성능을 높이고자 한다. Gritsch 등[10]이 실험 모델로 삼은 형상을 기본으로 Silieti 등[7]의 해석 조건을 참고하여 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 분사홀 형상을 나타내었다. 3차원 형상으로, 고온의 작동유체가 흐르는 주유로와 냉각유체가 공급되는 공급유로가 있다. 주유로 전체의 길이는 270 mm이며, 막냉각 홀까지 150 mm이다. 막냉각 홀 직경은 10 mm이며, 디퓨저(diffuser) 형상을 가지고 있다.

2.2 지배방정식

본 연구에서는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방법을 이용한 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX-Ver. 13을 사용하였다. 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 사용하여 적용된 지배 방정식은 다음과 같이 연속 방정식, 운동량 방정식, 그리고 에너지 보존 방정식으로 기술된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot})+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h_{tot} u_j)=\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij}+\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) \tag{3}$$

여기서 응력 텐서τ_{ij}는 다음과 같다.

$$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{4}$$

2.3 해석조건

난류 모델은 Menter[11]에 의해 제안된 SST(Shear Stress Transport)를 사용하였다. SST 모델은 k-ε과 k-ω 난류모델의 장점을 Johnson-King 모델과 결합한 것으로서, 역압력 구배에서 유동 박리현상의 모사와 역류(back flow)현상을 잘 예측한다.

본 연구에서 사용된 해석 조건으로 주유로에서는 공기가 사용되었으며, 입구에서의 전압력(total pressure)은 100,400 Pa이고, 전온도(total temperature)는 540K가 적용되었다. 공급유로에는 공기와 CO_2가 사용되었으며, 입구에서의 전압력은 109,750 Pa이 사용되었고, 전온도는 290 K이다. 주유로의 출구는 정압(static pressure)으로 68,000 Pa이며, 벽면

Table 1 Mass fraction condition

CASE	Mass fraction	
	Air	CO_2
CASE 1	1.0	0
CASE 2	0.8	0.2
CASE 3	0.2	0.8
CASE 4	0	1.0

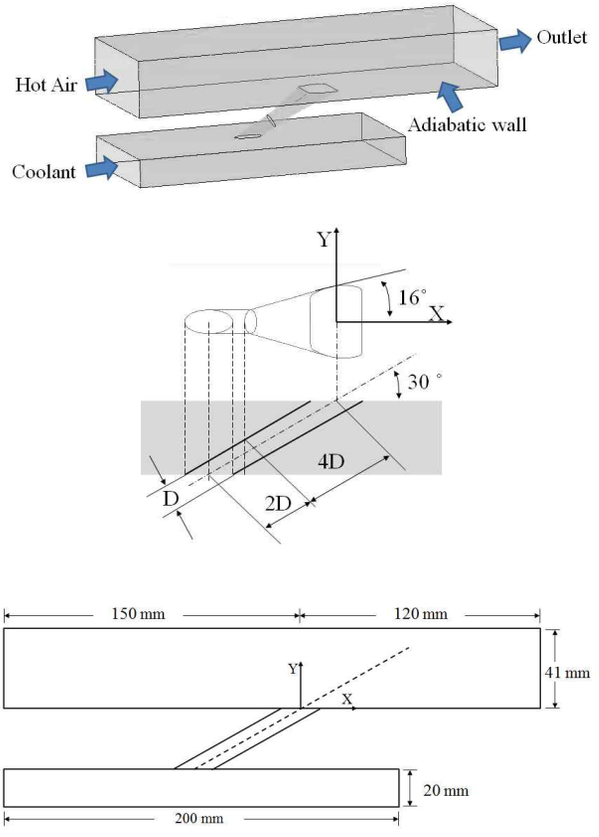

Fig. 1 Schematic of the modeled geometry

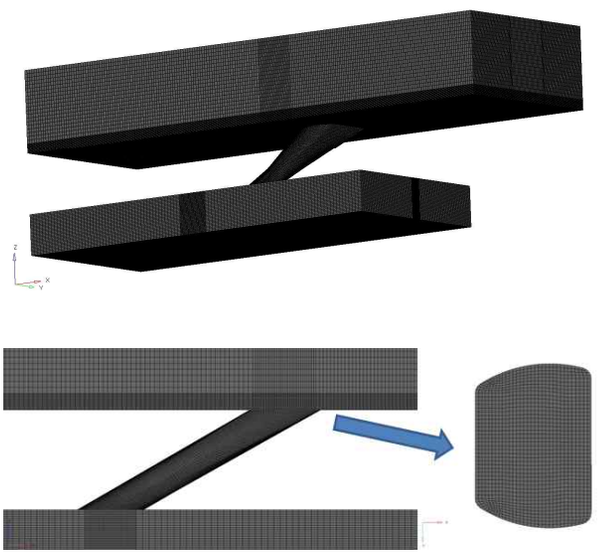

Fig. 2 Computational grid systems

은 단열(adiabatic)과 점착(no-slip) 조건이 적용되었다. 냉각유체는 다성분(multi-component) 방법을 적용하여 질량을 변화시켰으며, 세부사항을 Table 1에 나타내었다.

계산에 사용된 격자로는 HyperMesh-Ver. 9.0으로 육각형(hexahedral) 격자를 사용하였으며, Fig. 2에 도시하였다. 격자수는 계산 결과에 영향을 미치지 않는 조건으로 막냉각 현상이 발생하는 표면에서 해석을 향상시키기 위하여 조밀 격자계를 구성하였다. 전체 격자수는 약 190만 개이며, 수렴 조건은 RMS의 잔류치가 10^{-5} 이하일 때로 설정하였다.

2.4 단열 막냉각의 효율 및 분사비

단열 막냉각 효율 η와 효율에 영향을 미치는 분사비 M은 다음과 같은 무차원 수로 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty} \tag{5}$$

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \tag{6}$$

여기서 T_{aw}는 단열벽 표면의 온도이며, T_∞은 주유동 온도이다. T_c는 막냉각 유체의 온도를 나타낸다. 또한 ρ_c와 ρ_∞는 막냉각 유체와 고온의 작동유체 밀도를 나타내며, U_c와 U_∞는 공급유로와 주유로의 속도를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 CO_2 사용량에 따른 막냉각 효율을 수치적으로 해석하였으며, 공기를 대체할 수 있는지 여부에 대하여 조사하였다. Fig. 3은 공기를 냉각 유체로 사용하여 해석한 결과의 검증을 위하여 Gritsch 등[10]과 Silieti 등[11]의 결과값을 함께 비교한 것이다. 중심선 상의 효율 값들이 실험값에 비하여 낮게 예측되었으나, 수치해석과는 비교적 비슷한 경

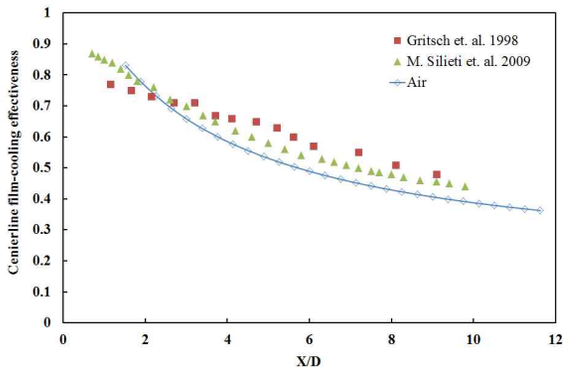

Fig. 3 Comparison of the film cooling effectiveness between the computed and experimental results

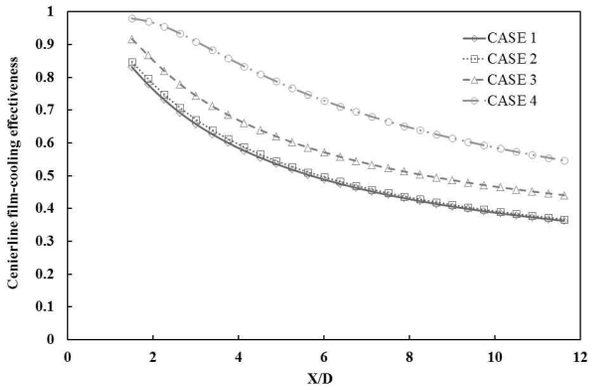

Fig. 4 Comparison of the cooling effectiveness at the centerline

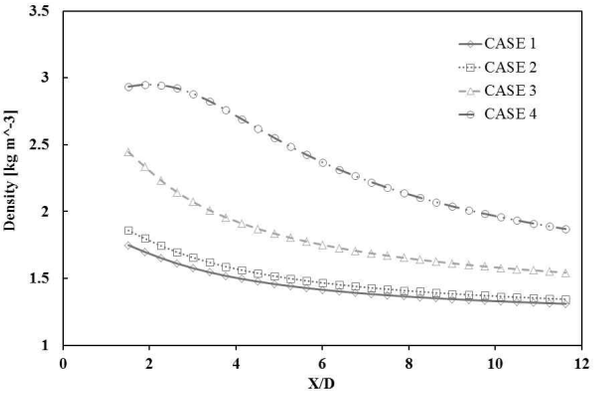

Fig. 5 Comparison of the density distribution at the centerline

향을 나타내었다. 공기를 이용한 막냉각 효율의 해석 결과와 경향을 확인한 후, 다음 조건의 수치해석을 수행하였다.

CO_2 질량 변화에 따른 중심선에서의 막냉각 효율을 Fig. 4에 나타내었다. 냉각 유체의 분출구에서 가장 높은 막냉각 효율을 보였으며, 점차 효율이 감소하는 경향을 나타내었다.

또한, 공기를 냉각 유체로 사용하였을 때 보다 CO_2를 사용하였을 때 최대 약 22 %의 효율 증대를 나타내었다. CO_2의 질량이 높아질수록 막냉각 효율이 높아지는 것은 밀도 변화에 따라 효율이 달라질 수 있음을 나타낸다. CO_2와 공기의 밀도비는 1.52이며, CO_2 질량 변화에 따른 중심선에서의 밀도값을 Fig. 5에 나타내었다. 이와 같이 밀도가 높아질수록 막냉각 효율이 높아짐을 알 수 있었으며, 동일한 압력과 속도에서 밀도의 증가는 분사비의 증가와 같은 효과를 나타내었다.

Fig. 6에 질량 변화에 따른 온도 분포를 나타내었다. 이 같은 결과는 기존 디퓨저 분출구 양쪽에서 길게 나타나는 냉각 유체의 형상이 CO_2의 증가에 따라 중심선에서도 냉각재가 길게 형성되는 분포를 볼 수 있다. 공기만을 사용했을 때는 양쪽으로만 길게 형성되던 냉각재가 CO_2 사용 증가에 따라 세 군데로 냉각재가 길게 형성되어 중심선상의 효율이 증대됨을 알 수 있다.

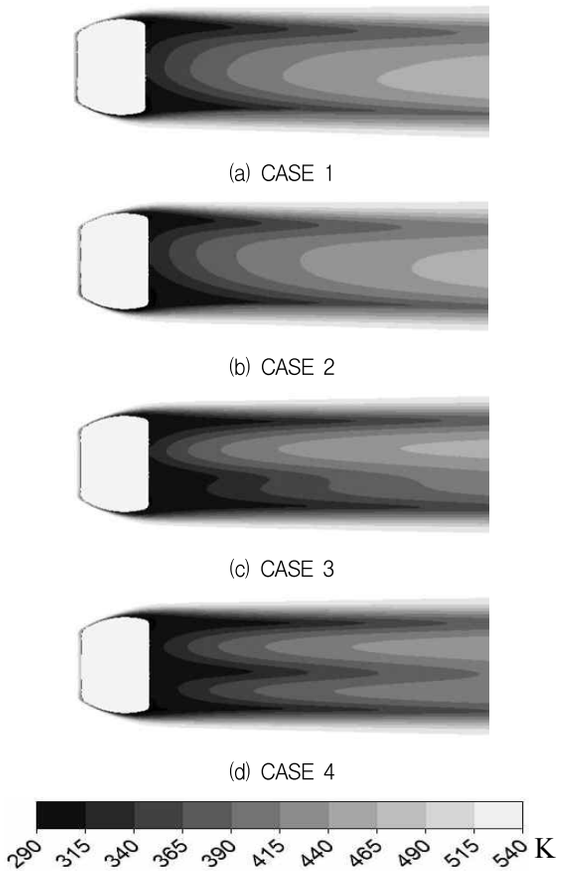

Fig. 6 Local film cooling temperature distributions with various conditions.(in Kelvin)

4. 결 론

본 연구에서는 지구 온실효과에 주된 영향을 끼치고 있는 CO_2의 재활용 수단으로 가스터빈 막냉각에서 압축공기의 손실을 줄이며, CO_2 사용에 따른 밀도 변화가 가스터빈 성능에 미치는 영향을 수치적으로 고찰하였다. CO_2 사용은 냉각 유체의 밀도 증가로 인하여 동일한 속도에서 분사비를 증가시켰으며, 분사비 증가는 효율의 증가로 나타났다. 공기만을 사용했을 때 양쪽으로 길게 늘어지는 분포에서 CO_2 사용량 증가는 중심선상에도 길게 냉각 유체가 형성되는 분포를 만들었다. 이 같은 결과는 냉각 유체 흐름을 변화시켰으며, 막냉각 효율을 상승시켰는데, 본 연구의 해석 조건 중에서는 CO_2만을 사용했을 때 가장 뛰어난 성능을 나타내었다.

참고문헌

(1) Cohen, H., Rogers, G. F. C. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1979, Gas Turbine Theory, Longman Group, 2nd Edition, pp. 232~240.
(2) Han, J. C. and Ekkad, S., 2001, "Recent Development in Turbine Blade Film Cooling," International Journal of Rotating Machinery, Vol. 7, No. 1, pp. 21~40.
(3) Kim, Y. J. and Kim, S. M., 2004, "Influence of Shaped Injection Holes on Turbine Blade Leading Edge Film Cooling," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 245~256
(4) Salcudean, M., Gartshore, I., Zhang, K. and Barnea, Y., 1994, "Leading Edge Film Cooling of a Turbine Blade Model Through Single and Double Row Injection: Effects of Coolant Density," ASME, No. 94-GT-2.
(5) Ekkad, 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," Journal of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 799~807.
(6) Ekkad, S. V., Zapata, D. and Han, J. C., 1997, "Film Effectiveness over a Flat Surface with Air and CO_2 Injection through Compound Angle Holes Using a Transient Liquid Crystal Image Method," Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp. 587~593.
(7) Silieti, M., Kassab, A. J. and Divo, E., 2009, "Film Cooling Effectiveness: Comparison of Adiabatic and Conjugate Heat Transfer CFD Models," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 2237~2248.
(8) Lee, K. D. and Kim, K. Y., 2010, "Shape Optimization of a Fan-Shaped Hole to Enhance Film-Cooling Effectiveness," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2996~3005.
(9) Gibbins, J. and Chalmers H., 2008, "Carbon Capture Storage," Energy Policy, Vol. 36, pp. 4317~4322.
(10) Gritsch, M., Schulz, A. and Wittig, S., 1998, "Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes with Expanded Exits," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 549~556.
(11) Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R., 2003, "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, pp. 652~632.
(12) CFX-13.0 Solver Theory Guide, ANSYS Inc., 2010.