

전항력을 이용한 회전 블레이드 냉각성능 향상 방안 연구

박준수*

한국교통대학교 에너지시스템공학과

Advanced Internal Cooling Passage of Turbine Blade using Coriolis Force

Jun Su Park*

Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation,
50 Daehak-ro, Chungju, 27469, Korea

(Received 2016.04.11 / Accepted 2016.05.19)

Abstract : The serpentine internal passage is located in turbine blade and it shows the variety heat transfer distribution. Especially, the Coriolis force, which is induced by blade rotation, makes different heat transfer distribution of the leading and trailing surfaces of serpentine internal passage. The different heat transfer is one of the reasons why the serpentine cooling passage shows low cooling performance in the rotating condition. So, this study tried to design the advanced the serpentine passage to consideration of the Coriolis force. The design concept of advanced serpentine cooling is maximizing cooling performance using the Coriolis force. So, the flow turns from leading surface to trailing surface in advanced serpentine passage to match the direction of Coriolis force and rotating force. We performed numerical analysis using CFX and compared the existing and advanced serpentine internal passage. This design change is induced the high heat transfer distribution of whole advanced serpentine internal passage surfaces.

Key words : Coriolis force, Turbine, Internal passage cooling, Heat transfer

Nomenclature

h : convective heat transfer coefficient, W · K

\dot{q} : heat flux, W/m²

T_{wall} : wall temperature, K

T_{∞} : bulk temperature, K

1. 서론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위해서 연소가스의 온도는 지난 10년간 지속적으로 상승해 왔다. 현재는 초내열합금의 녹는점을 상회하는 1,500℃이상에서 운전되고 있으며, 고온의 연소가스로부터 고온부품

을 보호하기 위해서 다양한 냉각방식들이 적용되어 사용되어지고 있다.

특히 터빈 블레이드의 경우 고온 및 고압의 연소 가스에 의해 고속으로 회전하고 있어, 블레이드 냉각유로 설계 시 회전효과를 반드시 고려해야만 한다. 기존에는 회전하는 내부유로 내의 열전달 특성을 파악하기 위한 실험 및 해석 관련 연구가 주로 이루어졌다^{1)~5)}.

내부 유로가 회전할 경우 Coriolis력에 의해 입구 유동이 후연면 쪽으로 편향이 발생하여, 전연면에 비해 후연면에서 열전달이 높게 발생한다. 이차유로 이상의 Serpentine 유로가 형성될 경우 유로 내 들어가는 유동의 방향이 바뀌게 됨에 따라 Coriolis 력에 의한 유동의 편향 방향이 바뀌게 된다. 그 결과 이차유로에서는

*Corresponding author, E-mail: js_park@ut.ac.kr

전연면에서의 열전달이 상승하게 되는 현상이 발생하게 된다.⁶⁾ 그 결과 내부유로에 의해 블레이드를 냉각할 시 전연면과 후연면에서 냉각성능의 차이에 따른 온도차가 크게 발생하여 열응력에 의한 크랙이 발생하는 문제점이 있다.

회전에 의해 발생하는 냉각성능 차이를 해결하기 위해 기존 연구에서는 주로 난류 촉진제의 배열 및 형상을 변경하였다.⁷⁾ 최대의 냉각성능을 발현하고자 하는 기존의 설계방식이 아닌 균일한 냉각성능을 발현하기 위한 방향으로 설계를 제안하고 있다. 회전에 의해 유동이 편향되는 면에서 열전달 계수 값을 낮추어 반대면의 열전달 계수 값과 동일하도록 설계를 하는 것이다. 그 결과 블레이드 표면의 전반적인 온도차를 줄여 열응력을 감소시키는 효과를 보인다.

하지만 이러한 방식의 유로개선은 냉각성능을 극대화시키는데 한계가 존재한다. 그래서 본 연구에서는 회전에 의해 발생하는 Coriolis력을 이용하여 냉각성능을 극대화시킬 수 있는 냉각유로 설계 및 성능 검증을 위한 해석을 수행하였다.

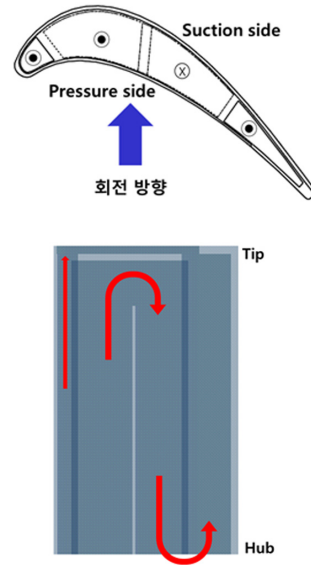
2. 연구 방법

2.1 냉각유로 설계 방안

Fig.1(a)에서 보이는 바와 같이 기존의 냉각유로의 경우 냉각 유체가 Hub면에서 주입되어 Tip 근처에서 Trailing edge 으로 연결되어 있는 2차 유로 쪽으로 회전하여 흐르도록 유로가 배치되어 있다. 그 결과 앞서 설명한 바와 같이 각 유로에서의 열전달 값이 균일하게 분포되지 않고, 회전에 의해 냉각 유체가 편향된 쪽에서만 열전달이 상승하는 경향을 보이게 된다.

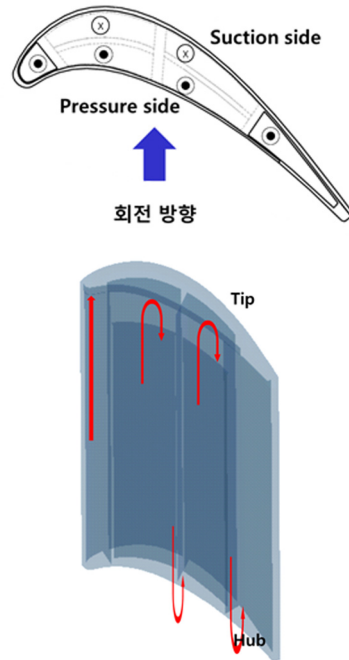
하지만, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 1(b)에서와 같이 지그재그 형태의 유로를 제안 및 검증하고자 한다. 지그재그 형태의 유로는 기존의 유로 내에 격벽을 설치하여 압력면 쪽에서 공급된 냉각 유체가 Tip 부근에서 회전하여 흡입면 쪽으로 넘어갈 수 있도록 배치하는 것이 핵심이다. 이와 같이 유로를 배치할 경우 블레이드 회전에 의해 내부 냉각 유체가 편향되는 쪽이 모두 블레이드 외부 벽면이 되는 것이다. 그 결과 실제로 냉각이 필요한 모든 면에서 Coriolis력에 의한 열전달 상승효과를 기대할 수 있게 된다.

• 기존의 Serpentine 유로



(a) Original serpentine cooling passage design

• 개선된 Serpentine 유로



(b) Advanced serpentine cooling passage design

Fig. 1 Comparing cooling passage designs

2.2 해석 조건

본 연구에서는 개선된 냉각유로 내에서의 냉각 성능을 예측하기 위해서 상용전산해석 프로그램인 ANSYS CFX14.0을 이용하여 전산해석을 수행하였다. 이를 위해 5,000,000 ~ 6,000,000개의 정렬격자를 해석 모델에 맞춰 생성하였다. 특히 벽면 근처에서의 열 경계층 예측이 대류 열전달 계수 예측에 매우 중요한 요소이므로 전 영역에서 $y^+ < 1.0$ 이하가 되도록 격자를 생성하였다. 전산해석 시 사용한 난류모델은 유동의 천이 및 박리 예측 시 많이 사용되는 SST (Shear Stress Transportation) 천이모델을 사용하였다.

실제 가스터빈 블레이드 운전 조건과 동일하도록 냉각 유체 유량 및 온도는 각각 0.1kg/s와 400℃으로 설정하였다. 또한 외부 벽면의 온도는 연소가스에 의해 가열되는 현상을 묘사하기 위해 1,000℃로 설정하여 계산을 수행하였다. 회전하는 블레이드를 묘사하기 위해 60Hz 발전소 가스터빈 회전 속도 3,600 RPM 조건을 부가하여 해석을 수행하였다. 더불어 정지상태에서도 해석을 수행하여 베인 냉각유로에 적용가능성도 검토를 하였다

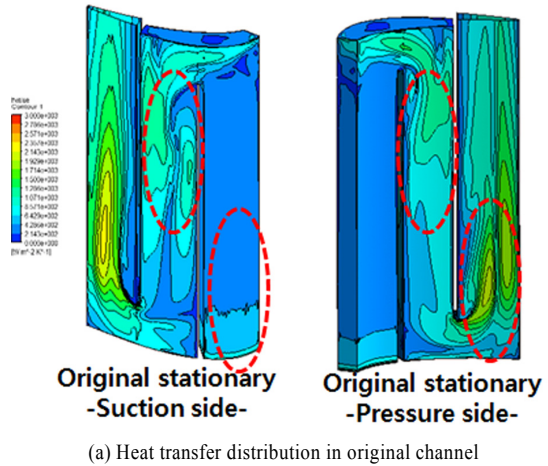
본 연구에서는 벽면의 대류열전달 계수(h)를 통하여 덕트 내의 열전달 성능을 평가하였다. 대류 열전달 계수는 다음과 같이 정의된다. 계산에 사용되는 단위 면적 당 열량은 전산해석을 통해 획득한 값을 사용하여 대류열전달 계수 값을 계산하였다.

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_{wall} - T_{\infty})} = \frac{\dot{q}}{(1,273[k] - 673[k])} \quad (1)$$

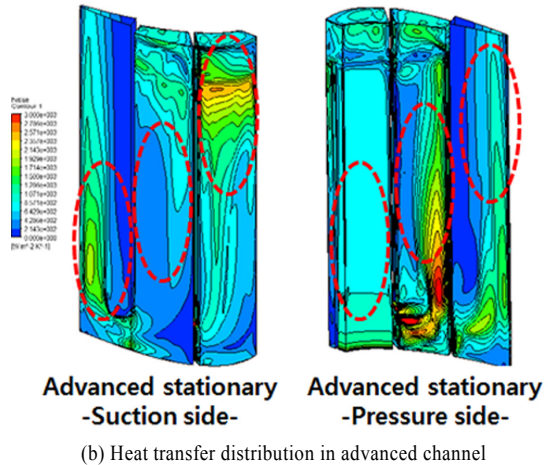
3. 결과 및 검토

3.1 정지 상태 결과

Fig. 2 (a)에서 보이는 바와 같이 일반적으로 정지상태에서는 유체의 편향이 발생하지 않아 베인의 흡입면 및 압력면에서 열전달 분포가 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 베인의 냉각유로 설계 시에는 회전효과를 고려하지 않고 단순히 냉각효율을 최대로 상승시키기 위한 설계가 이루어진다. 그러나 기존의 Serpentine 유로의 경우 구조의 특성상 유체의 터닝 영역에서의 국소적 열전달 상승 및 유동 박리에 의한 열전달 감소현상이 발생하는 것을 본 해석 결과를 통해 확인이 가능하다. 냉각성능 향상을 위해서는



(a) Heat transfer distribution in original channel



(b) Heat transfer distribution in advanced channel

Fig. 2 Heat transfer distributions in stationary condition

국소적인 열전달 변화를 조절 할 수 있는 능동적인 냉각 방법이 필요하다.

반면 본 연구에서 제안한 지그재그 형태의 유로의 경우 Fig. 2(b)에서 보이는 바와 같이 유동이 터닝영역에서 회전을 한 후 흡입면 또는 압력면에 충돌하게 된다. 그 결과 국소적으로 충돌제트 효과에 따른 열전달 상승이 크게 발생하여 유로 벽면의 대류열전달 계수를 크게 향상시키게 된다. 또한 유동의 박리에 의한 데드존영역이 흡입면 및 압력면의 표면에서는 발생하지 않아 평균적인 냉각효율을 증가시키는 효과를 보인다. 이는 외부 열부하 위치에 따라 터닝유동에 의한 충돌 영역을 조절할 경우 맞춤형 냉각 유로 설계가 가능해져, 기존 유로에 비해 냉각성능 향상 측면에서 비약

적인 발전이 가능해진다.

3.2 회전 상태 결과

Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이 유로가 회전할 경우 공급되는 냉각공기의 편향이 발생하여 블레이드의 흡입면과 압력면에서 열전달 분포 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 1차 유로에서는 압력면에서 열전달이 높으나, 2차유로에서는 흡입면에서 열전달 분포가 높은 일반적인 특성을 본 해석 결과에서도 확인이 가능하다.

반면 개선된 유로에서는 유동 터닝에 의한 충돌제트 효과가 회전에 의해 발생하는 Coriolis력에 의해 극대화가 되면서 국소적으로 열전달이 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 더불어 전체적으로도 기존의 유

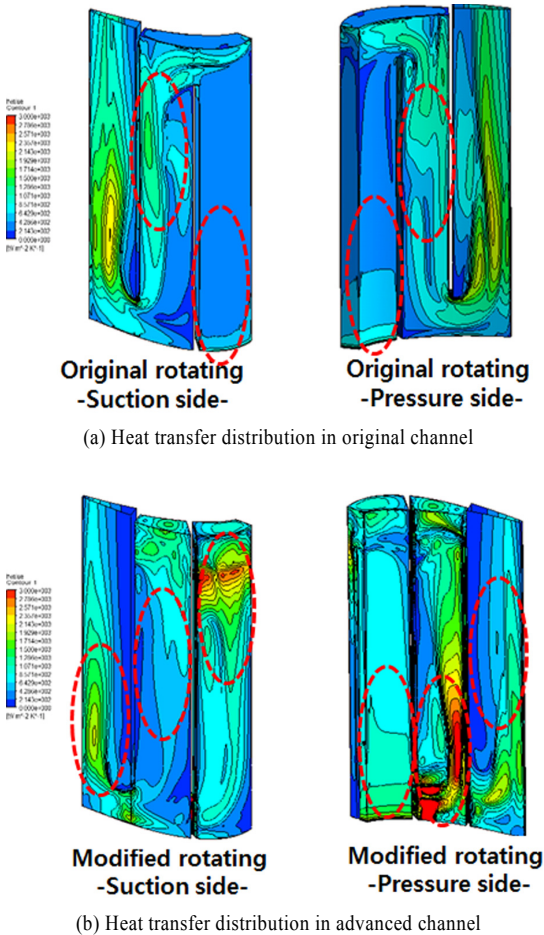
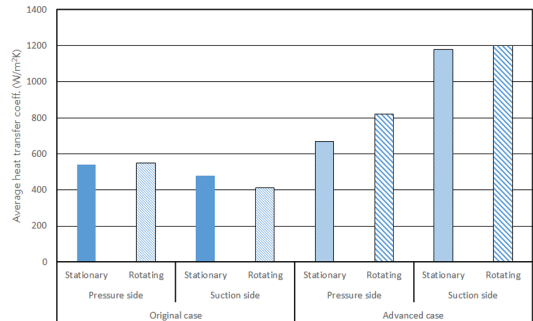


Fig. 3 Heat transfer distributions in rotating condition

Table 1 Average heat transfer coefficients



로에 비해 대류 열전달 계수가 높게 나타나는데 이는 회전효과에 의해 외벽으로 유동이 편향이 되는 지그재그 유로의 특징을 잘 나타내는 것으로 볼 수 있다.

Table 1은 각 유로 표면에서의 평균 열전달 계수 분포를 비교한 표이다. 기존의 냉각유로의 경우 회전 효과에 의해 압력면에서는 정지상태보다 평균 열전달 계수가 증가하나, 흡입면에서는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 회전에 의해 발생하는 Coriolis력이 내부 유로 열전달 분포에 많은 영향을 주기 때문이다.

하지만 개선된 유로에서는 정지상태에 비해 회전 상태일 때 블레이드의 양쪽면 모두 열전달이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 회전에 의한 유동의 편향이 블레이드 외부 표면 열전달 상승하는 방향으로 이루어졌기 때문이다.

또한 기존 유로와 평균 열전달 계수를 비교하였을 때 최소 10%에서 최대 250%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 터닝영역에서 발생하는 충돌제트 효과에 의한 것으로 정지상태 및 회전상태 모두에서 지그재그 유로가 냉각성능을 향상시킬 수 있음을 보이는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 회전하는 블레이드 내 냉각유로의 냉각성능을 극대화시키기 위한 냉각유로 설계 및 성능검증을 해석적으로 수행하였다. 냉각성능을 극대화시키기 위해 블레이드 회전에 의해 발생하는 Coriolis력을 이용하기 위한 지그재그 형태의 유로를 제안 및 설계를 하였다. 지그재그 형태의 유로는 Coriolis력에 의한 유동 편향이 모두 블레이드 외부 벽면 쪽으로 이루어져 외부 벽면의 대류 열전달 계수가

향상되게 된다. 더불어 유동의 터닝 영역에서 충돌제트 효과가 발생할 뿐만 아니라 유동박리가 외부 벽면 표면에서 발생하지 않아 기존 유로대비 최대 250% 이상의 열전달 향상 효과가 있는 것을 확인하였다.

Acknowledgement

2016년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음

References

- 1) Chyu, M. K., Oluyede, E. O., and Moon, H. K., 2007, "Heat Transfer on Convective Surfaces With Pin-Fins Mounted in Inclined Angles," ASME Paper No. 2007-GT-28138.
- 2) Choi, I. K., Kim, T., Song, S. J., and Lu, T. J., 2007, "Endwall Heat Transfer and Fluid Flow Around an Inclined Short Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, pp. 919-930.
- 3) Wagner, J. H., Johnson, B. V., and Hajek, T. J., 1991, "Heat Transfer in Rotating Passages With Smooth Walls and Radial Outward Flow," *ASME J. Turbomach.*, 113, pp. 42-51.
- 4) Kim, K. M., Park, S. H., Jeon, Y. H., Lee, D. H., and Cho, H. H., 2008, "Heat/Mass Transfer Characteristics in Angled Ribbed Channels With Various Bleed Ratios and Rotation Numbers," *ASME J. Turbomach.*, 130, p. 031021.
- 5) Lee, D. M., Park, J. S., Lee, D. H., Kim, B. S., and Cho, H. H., 2011, "Heat Transfer Characteristics of a Non-Rotating Two-Pass Rectangular Duct with Various Guide Vanes in the Tip Turn Region," *ASME J. Turbomach.*, 134, p. 216-225.
- 6) Cho, H. H., Lee, S. Y., and Rhee, D. H., 2004, "Effects of Cross Ribs on Heat/Mass Transfer in a Two-Pass Rotating Duct," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, pp. 743-755.
- 7) Park, J. S., Kim, K. M., Lee, D. H., Cho, H. H., and Chyu, M. K., 2011, "Heat Transfer in Rotating Channel with Inclined Pin-Fins," *ASME J. Turbomach.*, 133, p. 021003.