

가스터빈 2단 베인 슈라우드면 필렛 크기 변화에 따른 효과 분석

최석민* · 김태현** · 조형희**†

Analysis of Effect of Shroud Fillet Size of Gas Turbine 2nd Vane

Seok Min Choi*, Taehyun Kim**, Hyung Hee Cho**†

Key Words : Gas Turbine(가스터빈), Vane(베인), Fillet(필렛), Heat transfer(열전달), Thermal stress(열응력)

ABSTRACT

Damage of near leading edge and shroud of 2nd vane which exposed to high temperature is occurred. In this study, the effect of shroud fillet size was analyzed. The internal flow passage, external flow passage and 2nd vane were modeled for conjugate numerical simulations. The 5mm fillet size was the basic shape and 3mm and 7mm fillet size were compared. The flow, heat transfer and thermal stress characteristics were compared. The 7mm fillet size case showed the reduced occurrence of secondary vortex. Furthermore, the heat transfer distribution was decreased and non-uniformity was also decreased in 7mm fillet size case. As a result, the maximum thermal stress was reduced 14%. Therefore, if the fillet size is increased on the shroud of 2nd vane, the maximum thermal stress is reduced which results in increase of life time of 2nd vane.

1. 서 론

가스터빈의 터빈은 다수의 베인과 블레이드로 구성되어 있다. 이때 베인과 블레이드 사이로 고온의 유체가 흐르게 된다. 고온의 유체가 베인과 블레이드의 전단부에 도달하게 되면 발생하는 압력 구배로 인해 말발굽와류가 발생한다. 또한 터빈 유로를 흘러가면서 통로와류로 발달한다. 이러한 이차 와류들로 인해 실제 가동중인 터빈 블레이드에 손상을 일으키게 된다. 이에 선행 연구자들은 말발굽와류 통로와류와 같은 이차 와류의 발생을 억제할 수 있는 형상에 대하여 연구를 수행하였다.

Xuyang⁽¹⁾은 블레이드의 곡선바닥면 적용에 따른 유동 특성에 대하여 분석하였다. 그는 곡선바닥면형상 적용시 출구부에서 전압손실계수가 25% 가량 감소하는 것을 확인하였다. Babu 등⁽²⁾은 블레이드 비대칭 바닥면 적용에 따른 막냉각 효과에 대해서 분석하였다. 그들은 수치해석을 통해 비대칭 바닥면이 막냉각에 효과적임을 밝혀내었다. Gregory 등⁽³⁾은 비대칭 바닥면과 블레이드 기울임 형상의 효과에 대하여 분석

하였다. 그들은 이와 같은 형상 적용시 블레이드 내의 이차유동의 발달이 줄어드는 것을 확인하였다. Hussain 등⁽⁴⁾은 1단 베인의 비대칭 바닥면 적용에 따른 막냉각, 열전달, 압력손실 등에 대하여 분석하였다. 그들은 바닥면 형상 변화에 따라 이차 와류의 세기, 막냉각 성능의 향상, 열전달 감소가 영향을 미치는 것을 확인하였다. Shote 등⁽⁵⁾은 큰 필렛 형상 적용시 베인의 앞에 설치된 슬롯 막냉각의 효과에 대하여 분석하였으며, 전압손실의 감소와 막냉각 성능 향상 효과를 확인하였다. Zess 와 Thole⁽⁶⁾은 블레이드 전연부의 필렛 형상 적용시 말발굽와류 감소 효과를 수치해석과 실험을 통해 밝혀내었다. Mahmood 등⁽⁷⁻⁹⁾은 바닥면의 유동 및 열전달 특성을 블레이드 전연부의 필렛 형상 유무에 따라 비교하였다. 그들은 필렛에 의해 바닥면의 열전달계수가 감소하고, 압력손실이 줄어드는 것을 확인하였다. Han 과 Goldstein⁽¹⁰⁾은 전연부 필렛의 효과를 열/물질전달실험을 통해 밝혀내었다. 그들은 전연부 필렛에 의해 바닥면의 열전달이 영향을 미치는 것을 확인하였다. Becz 등⁽¹¹⁾은 블레이드 전연부 필렛 적용에 의해 바닥면 압력 손실이 감소하는 것을 확인하였다. Turgut와 Camci⁽¹²⁾

* 한국기계연구원 플랜트융합연구소 (Department of Plant Technology Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)

** 연세대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

† 교신저자, E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

는 터빈 1단 노즐에 전연부 필렛 적용에 대한 효과를 실험 및 해석을 통해 분석하였다. Wei 등⁽¹³⁾은 눈물방울 모양의 필렛 형상 적용시 바닥면에서 발생하는 압력 손실이 줄어드는 것을 해석을 통해 확인하였다.

이와 같이 다수의 연구자들이 가스터빈 블레이드 전연부 필렛 효과 적용 및 비대칭 바닥면 형상 적용에 따른 유동 및



Fig. 1 Damage of 2nd vane of gas turbine

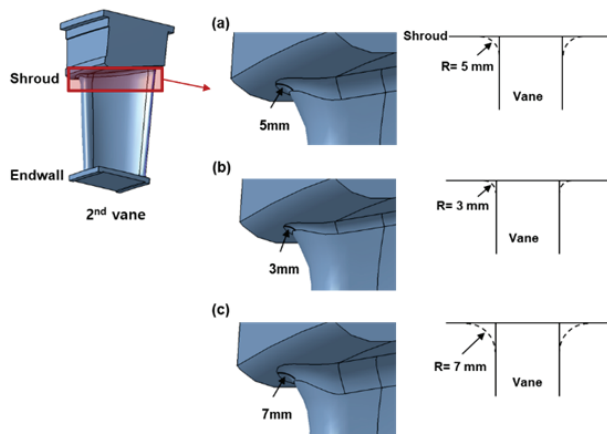


Fig. 2 Schematic of different shape and size of fillet; (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3

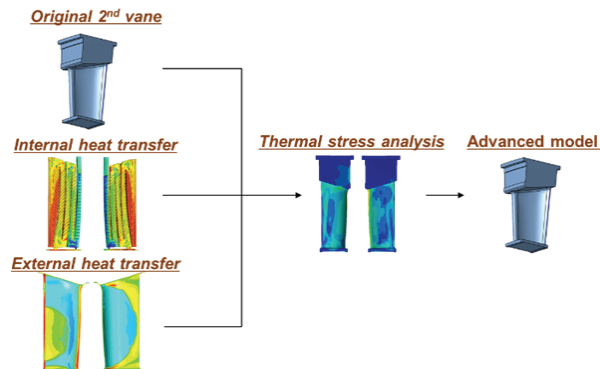


Fig. 3 Process of conjugate numerical simulation

열전달 특성에 대하여 분석하였다. 하지만 실제 가스터빈 블레이드 형상에 필렛을 적용하여 분석을 수행한 연구는 드물다. Fig. 1은 실제 가동중인 GT11 가스터빈의 2단 베인 사진이다. Fig. 1을 살펴보면 베인의 전단부 부근에서 모재의 탈락현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 2단 베인의 형상에 슈라우드면에 필렛의 크기 변화에 따른 영향을 분석하였다. 통합수치해석을 통해 유동, 열전달, 열응력분포를 분석하였다. 이에 대한 연구 결과는 향후 2단 베인 설계시 유용하게 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구 방법

2.1 슈라우드면 필렛 형상

본 연구에서 비교한 슈라우드면의 필렛 형상은 Fig. 2와 같다. 먼저 Fig. 2(a)는 5 mm 정도 크기의 슈라우드면 필렛이 적용된 기본 형태의 베인이며 case 1로 명명하였다. 베인은 GT 11의 2단 베인의 형상을 모사하여 설계하였다. 또한 Fig. 2(b)와 (c)는 슈라우드면의 필렛의 크기를 각각 3 mm와 7 mm로 변경한 형상으로 설계하였으며 case 2와 case 3로 명명하였다. 적용된 필렛의 크기는 베인의 슈라우드면의 전면에 걸쳐 변경하였다. 자세한 베인의 형상은 보안 문제로 공개할 수 없음을 밝힌다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 상용 해석 프로그램인 ANSYS (Ver. 15)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 통합수치해석을 진행한 절차는 Fig. 3과 같다. 먼저 기본 형상으로부터 내부 유동장, 외부 유동장, 2단 베인 형상을 각각 모델링 하였다. 이후 2단 베인 형상을 제외한 내부, 외부 유동장을 동시에 해석하였다. 다음으로 얻어낸 열전달계수(h) 값을 2단 베인 형상에 대입하여 전도 및 열응력 해석을 수행하였다. case 1~3에 대해서 이와 같은 통합수치해석을 진행하였으며, 이에 대한 결과값을 비교하였다.

먼저 내부 냉각 유로는 1천 5백만개 가량의 격자를 형성하였다. 또한 벽면 근처에서의 유동 및 열전달 분석의 정확도를 높이기 위하여 벽면근처의 y^+ 값은 1이 되도록 격자를 형성하였다. 입구에는 13 atm의 정압 조건과 683K의 온도 조건을 주었다. 또한 출구에는 6.3 atm의 정압 조건과 900K의 온도 조건을 주었다. 다음으로 외부 유동장에는 1천 만 개 가량의 격자를 형성하였으며, 마찬가지로 벽면 근처의 y^+ 값은 1이 되도록 격자를 형성하였다. 또한 입구는 1단 블레이드로부터 나오는 속도 및 온도 프로파일을 대입해 조건을 입력하였다. 또한 출구에는 6.3 atm의 정압 조건과 900K의 온도 조건을 설정하였다. 마지막으로 2단 베인의 전도 및 열응력

Table 1 Thermal properties of Inconel 738LC

Temperature [°C]	Thermal expansion coefficient [10 ⁻⁵ /°C]	Young's Modulus [10 ⁹ Pa]	Poisson's ratio	Thermal conductivity [W/m K]
204	1.33	1.90	0.27	11.5
316	1.4	1.85	0.28	13.3
127	1.56	1.79	0.28	15.1
538	1.62	1.75	0.30	17.2
649	1.64	1.67	0.30	19.2
760	1.75	1.60	0.30	20.9
871	1.94	1.51	0.30	22.7
982	2.16	1.39	0.30	24.6

해석을 진행하기 위하여 물성치를 입력하였다. 2단 베인의 모재는 Inconel 738LC이며, 해석을 위해 온도에 따른 열팽창계수(α), 영률(E), 포아송비(ν), 열전도도(k) 값을 입력하였다. 자세한 물성치는 Table 1과 같다.

3. 연구 결과

3.1 유동 특성

Fig. 4 는 2단 베인 전단부 근처에서의 스월유동의 특성을 나타낸다. 스월유동의 정의는 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{V} \quad (1)$$

Fig. 4(a) 결과를 살펴보면 전단부 부근에서 스월 유동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 전단부에서 발생하는 압력 구배로 인해 말발굽와류가 발생하고 통로와류로 발달하기 때문이다. 반면 Fig. 4(b)와 같이 슈라우드면의 필렛 크기가 줄어드는 경우에는 스월유동의 세기가 더 크게 나타나는 것을

알 수 있다. 이는 필렛의 크기가 작아지게 되어 상대적으로 베인 전단부 부근의 압력 구배가 더 크게 발생하게 때문에 스월유동의 크기가 더 크게 나타나게 된다. 반면 Fig. 4(c)와 같이 슈라우드면의 필렛의 크기가 크게 나타나는 경우에는 스월 유동의 세기가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 필렛의 크기가 커짐에 따라 상대적으로 베인 전단부 부근의 압력 구배가 작아지기 때문이다. 따라서 이와 같은 유동 특성의 변화로 인해 열전달계수 및 열응력에 영향을 미치게 된다.

3.2 열전달계수 특성

다음으로 Fig. 5는 전단부 근처에서의 열전달계수를 나타낸다. 먼저 Fig. 5(a) 를 살펴보면 유동이 부딪히는 영역에서 가장 높은 열전달계수를 보이는 것을 알 수 있다. 이후 유동이 발달함에 따라 점차 열전달계수가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 5(b)를 살펴보면 바닥면과 맞닿아 있는 부근의 열전달계수가 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 필렛의 크기가 작아지게 되어 이차와류의 발생이 더 크게 나타나기 때문이다. 반면 Fig. 5(c)를 살펴보면 열전달계수가 상대적으로 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 필렛의 크기가 커짐에 따라 이차와류의 발생이 상대적으로 줄어들기 때문이다.

3.3 열응력 특성

Fig. 6은 2단 베인 전단부 근처의 무차원화한 열응력 분포를 나타낸다. 먼저 무차원화한 열응력값의 정의는 다음과 같다.

$$\sigma_{Nom} = \sigma / \sigma_{max} \quad (2)$$

전체적인 열응력 값을 case 1에서 계산된 최대 열응력 값으로 나눈 값으로 정의하였다. 먼저 Fig. 6(a) 값을 살펴보면

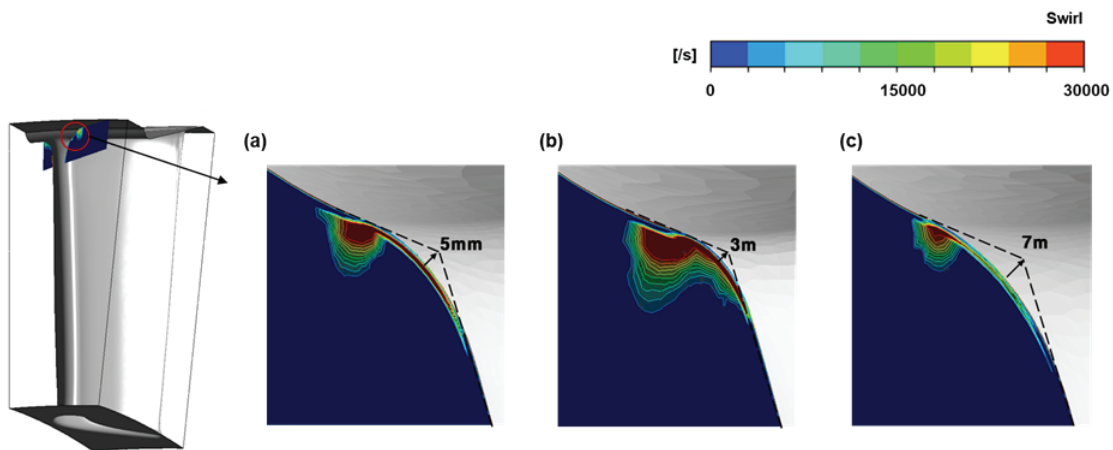


Fig. 4 Swirling flow of different fillet size; (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3

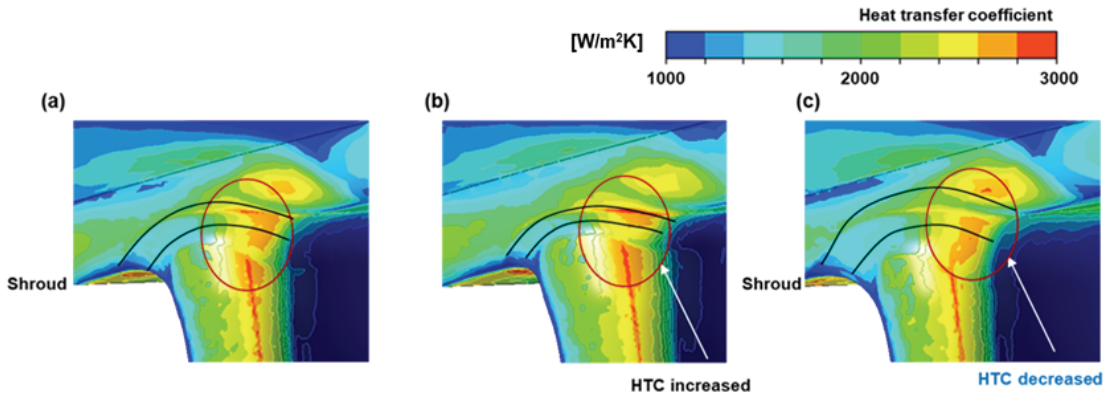


Fig. 5 Local heat transfer distribution of leading edge of vane; (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3

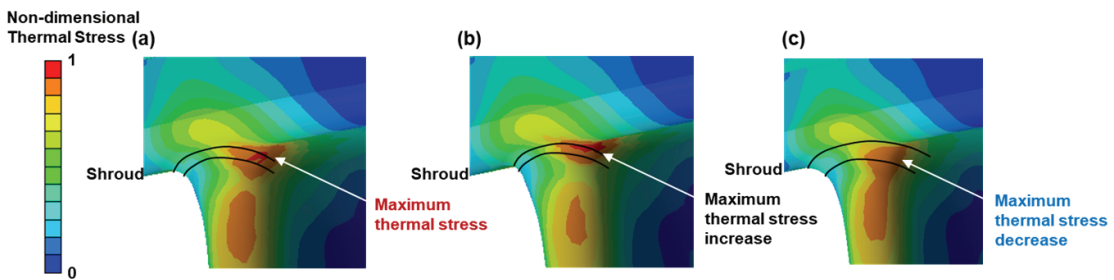


Fig. 6 Non-dimensional thermal stress distributions of vane; (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3

슈라우드면과 베인이 인접한 부위에서 최대 열응력이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 해당 영역에서의 열전달계수가 높으며, 불균일한 분포를 보이기 때문이다. 반면 Fig. 6(b) 값을 살펴보면 최대 열응력이 상대적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 해당 영역에서의 열전달계수와 불균일도가 상대적으로 증가하기 때문이다. 반면 Fig. 6(c) 값을 살펴보면 최대 열응력이 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 해당 영역에서의 열전달계수와 불균일도가 상대적으로 감소하기 때문이다. 따라서 이러한 최대 열응력 값을 정량적으로 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 결과를 살펴보면 case 2의 경우 case 1에 비해 최대 열응력 값이 약 13% 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 case 3의 경우 case 1에 비해 최대 열응력이 14% 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 슈라우드면의 필렛의 크기를 기존 형상보다 크게 설계하였을 시 최대 열응력이 감소하는 효과를 보이는 것을 확인하였다. 향후 2단 베인 설계 시 슈라우드면의 필렛의 형상을 키운다면 최대 열응력이 감소하며, 수명 또한 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스터빈 2단 베인 슈라우드면 필렛 형상 변화에 따른 효과를 수치해석을 통해 비교 분석하였다. 2단

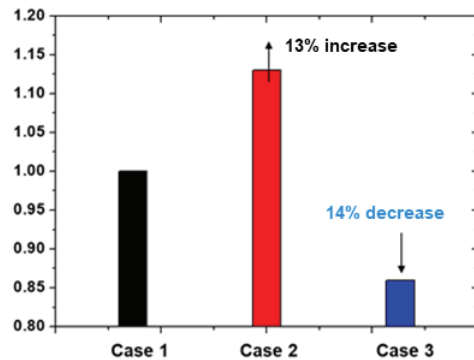


Fig. 7 Maximum thermal stress of different case

베인의 내부유로, 외부유동장, 2단 베인 형상을 각각 모델링하였으며, 통합수치해석을 수행하였다. 해석 결과 슈라우드면의 필렛의 크기가 증가될수록 전단부에서 발생하는 이차유동의 크기가 줄어드는 경향을 확인하였다. 이로 인해 전단부 외부의 열전달계수가 감소하는 것을 확인하였으며, 최대 열응력의 크기도 14% 가량 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 향후 2단 베인 설계시 슈라우드면의 필렛 형상을 키운다면 최대 열응력이 감소하며, 수명 또한 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2020년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20193310100090) 및 인력양성사업 연구 과제(No.20204030200110)의 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- (1) Xuyang, Z., 2020, "The Design of Curved Endwall with Leading-edge Deformation" *International Journal of Energy and Power Engineering*, Vol.9, No.1, pp. 1-10.
- (2) Babu, S., Kiran, K. N., Tom, J. K., and Anish, S., 2020, "Numerical Investigation on Effects of Profiled Endwall Over Purge Flow in Linear Turbine Cascade" *Recent Asian Research on Thermal and Fluid Sciences*, pp. 161-172, Springer, Singapore.
- (3) Gregory-Smith, D., Bagshaw, D., Ingram, G., and Stokes, M., 2008, "Using profiled endwalls, blade lean and leading edge extensions to minimize secondary flow," *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 43161, pp. 1301-1311.
- (4) Hussain, S., Liu, J., and Sundén, B., 2020, "Study of effects of axisymmetric endwall contouring on film cooling/heat transfer and secondary losses in a cascade of first stage nozzle guide vane" *Applied Thermal Engineering*, Vol.168, 114844.
- (5) Shote, A. S., Mahmood, G. I., and Meyer, J. P., 2020, "Influences of large fillets on endwall flows in a vane cascade with upstream slot film-cooling" *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.112, 109951.
- (6) Zess, G. A., and Thole, K. A., 2002, "Computational design and experimental evaluation of using a leading edge fillet on a gas turbine vane" *Journal of Turbomachinery*, Vol.124, No.2, pp. 167-175.
- (7) Mahmood, G. I., Gustafson, R., and Acharya, S., 2005, "Experimental investigation of flow structure and Nusselt number in a low-speed linear blade passage with and without leading-edge fillets" *Journal of Heat Transfer*, Vol.127, No.5, pp. 499-512.
- (8) Mahmood, G. I., and Acharya, S., 2007, "Experimental investigation of secondary flow structure in a blade passage with and without leading edge fillets" *Journal of Fluids Engineering*, Vol.129, No.3, pp. 253-262.
- (9) Mahmood, G. I., and Acharya, S., 2007, "Measured endwall flow and passage heat transfer in a linear blade passage with endwall and leading edge modifications" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 47950, pp. 917-930.
- (10) Han, S., and Goldstein, R. J., 2005, "Influence of blade leading edge geometry on turbine endwall heat (mass) transfer" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 47268, pp. 547-561.
- (11) Becz, S., Majewski, M. S., and Langston, L. S., 2003, "Leading edge modification effects on turbine cascade endwall loss" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 36894, pp. 359-367.
- (12) Turgut, Ö. H., and Camcı, C., 2012, "Experimental investigation and computational evaluation of contoured endwall and leading edge fillet configurations in a turbine NGV" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 44748, pp. 1443-1458.
- (13) Wei, Z. J., Qiao, W. Y., Zhao, L., and Shi, P. J., 2015, "Numerical investigation of endwall losses control in turbine by leading edge fillet based on teardrop curves" *Journal of Aerospace Power*, Vol.30, pp. 473-482.