

90° 곡관에서의 비축대칭 끝벽과 끝벽 경계층 판을 이용한 유동특성 향상

조종재* · 김상조* · 서종철* · 김귀순**† · 정은환***

Improvement of the flow characteristics for a 90° turning duct by the nonaxisymmetric endwall and endwall boundary layer fence

Jongjae Cho* · Sangjo Kim* · Jongchul Seo* · Kuisoon Kim**† · Eunhwan Jeong***

ABSTRACT

This paper presents the shape optimization of a nonaxisymmetric endwall and endwall boundary layer fence which improve the aerothermal environment of a gas turbine passage. The endwall and fence methods were used simultaneously. The turbine passage was simulated by a 90° turning duct ($Re_D=360,000$). The main purpose of the present investigation was to focus on finding a nonaxisymmetric endwall and boundary layer fence with minimum total pressure loss in the passage and heat transfer coefficient on the endwall of the duct. An approximate optimization method was used for the investigation to secure the computational efficiency. Results indicated that a significant improvement in aerothermal environment can be achieved through the application of a nonaxisymmetric endwall and boundary layer fence.

초 록

본 논문에서는 가스터빈 유로의 공력열환경을 개선시키기 위해서 비축대칭 끝벽과 끝벽 경계층 판의 형상 최적화를 수행하였다. 터빈 유로 모사를 위해 90° 곡관을 이용하였다. 본 연구는 터빈 유로에서의 전압력 손실과 유로 끝벽에서의 열전달 계수를 최소화하기 위한 비축대칭 끝벽과 끝벽 경계층 판의 형상을 찾는 것이다. 최적화 과정의 효율성을 위해 근사 최적화 방식을 사용하였다. 최적화된 비축대칭 끝벽과 끝벽 경계층 판을 통해, 상당한 공력열환경 개선을 확인할 수 있었다.

Key Words: Endwall Boundary Layer Fence(끝벽 경계층 판), Optimization(최적화), Secondary Flow(이차유동)

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 부산대학교 항공우주공학과

*** 한국항공우주연구원 터보펌프 그룹

교신저자 E-mail: kuskim@pusan.ac.kr

1. 서 론

최근의 가스터빈 엔진 설계는 높은 터빈 입구

온도와 터빈 블레이드 중횡비를 증가시키는 추세로 진행되고 있다. 이러한 설계 경향은 터빈의 수명과 내구성에 영향을 미치며, 터빈유로의 유동에서 이차 유동이 미치는 영향을 더욱 크게 만들었다. 이러한 이차 유동에 의해 발생하는 손실은 터빈 익렬 전체 공력손실의 30~50%를 차지할 정도로 크다[1]. 또한 이차 유동은 터빈 유로 끝벽의 열전달 분포에도 큰 영향을 미치므로, 이차 유동은 터빈의 공력열환경(aerothermal environment)을 개선하는데 있어 중요한 요소이다.

이차 유동 손실을 줄여 터빈의 효율을 높이기 위해 많은 방법들이 개발·적용되었다. 그 중에서 Kawai et al.[2]은 얇은 끝벽 경계층 판(endwall boundary layer fence)을 터빈 익렬의 양쪽 끝벽에 적용하였으며, 높이와 피치가 다른 각각의 판에 대해 전압력 손실과 3차원 유동 속도를 측정하였다. 측정 결과, 이차 유동 손실이 22% 감소하였으며, 전체 운동에너지 손실이 또한 25% 감소하였다. Cami and Rizzo[3]는 90°곡관에서 두께와 높이, 그리고 폭이 각각 다른 끝벽 단일 경계층 판에 대해 이차 유동 및 열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. 연구결과, 유로의 전압력 손실이 줄어들었으며, 동시에 열전달 계수는 증가하였다.

비축대칭 끝벽(nonaxisymmetric endwall)은 끝벽의 압력구배를 균등하여 이차 유동을 감소시키기 위해 Rose[4]에 의하여 처음 소개되었다. Brennan et al.[5]와 Rose et al.[6]은 고압 터빈에 비축대칭 끝벽을 적용하였다. 그리고 전산해석과 실험을 통해 각각 0.4%와 0.59%±0.25%의 단효율 증가를 확인하였다. Germain[7]은 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘을 이용한 최적화를 통하여 비축대칭 끝벽을 설계하였다. 최적화 결과, 1%±0.4%의 단효율 향상을 확인하였다.

대부분의 선행연구에서는 열전달 특성 또는 공력 특성 중 하나에만 초점을 두고 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 터빈의 열전달 특성 및 공력 특성을 모두 개선시키기 위해 연구를 수행하였다. 이를 위해 끝벽 경계층 판과 비축대칭

끝벽을 동시에 적용하였으며, 공력열환경을 효과적으로 개선시키기 위해 근사 최적화(approximate optimization) 기법을 이용하였다. 최적화를 위해 최적화 상용프로그램인 iSIGHT™(Engineous Software Inc. [8])를 이용하였으며, 상용 프로그램인 Gambit™(Fluent Inc.[9])을 형상 모델링 및 격자생성을 위해 사용하였다. 유동 해석을 위해서는 상용 프로그램인 FLUENT™(Fluent Inc.[10])를 사용하였다. 그리고 모든 최적화 과정이 자동적으로 실행될 수 있도록 각 프로그램을 통합하였다. 터빈 유로를 모사하기 위해 정사각단면을 가지는 90° 곡관을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 수치해석 기법 및 모델

기본 형상은 Wiedner과 Camci [11]에 의해 연구된 형상을 사용하였다. Figure 1에서 볼 수 있듯이, 연구에 사용된 90° 곡관은 정사각단면($D \times D = 203 \times 203 \text{ mm}^2$)을 가지며, 내부 반지름 비율(r_i/D)은 1.8, 바깥 반지름 비율(r_o/D)은 2.8 이다.

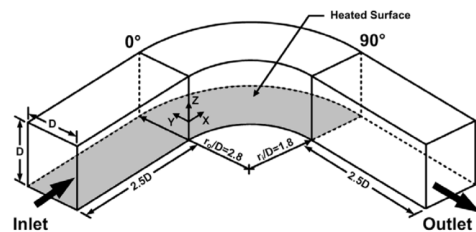


Fig. 1 90° turning duct geometry, coordinate system, and electrically heated heat transfer surface

끝벽면의 열전달 특성을 살펴보기 위해 Fig. 1과 같이 가열된 끝벽을 적용하였으며, 나머지 벽면은 단열벽면으로 자유류의 온도와 같은 298 K로 설정하였다. 곡관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 360,000이다. 경계조건은 유입유동의 경우, velocity inlet 조건을, 유출유동은 outflow

조건을 적용하였다. 입구 속도 (U_{in})는 27.2 m/s 이며, 이때의 경계층의 두께 (δ_{99})는 25.4 mm, 난류강도는 0.7%이다. 입구의 난류 강도와 속도 분포는 참고문헌 및 실험데이터[11]의 값을 사용하였다.

3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하였으며, 3차의 공간정확도를 갖는 MUSCL 기법[12]을 적용하였다. 그리고 난류 처리를 위해 재순환유동 및 박리유동의 예측성능이 뛰어난 것으로 보고되고 있는 2방정식 모델인 RNG k- ϵ 모델[13]을 사용하였으며, 이 난류모델은 Zess와 Thole[14]의 연구에서 검증되었다. 벽면에서는 비평형벽함수[15](none-equilibrium wall function)기법을 적용하였다. 격자는 y^+ 값과 전압력 계수(c_{pt})값에 대해 적응격자기법을 적용하여 생성하였으며, 총 계산격자는 1.28×10^6 개를 사용하였다. 계산 수렴조건은 에너지 방정식(10^{-6})을 제외한 모든 방정식이 10^{-4} 까지 수렴하도록 하였다.

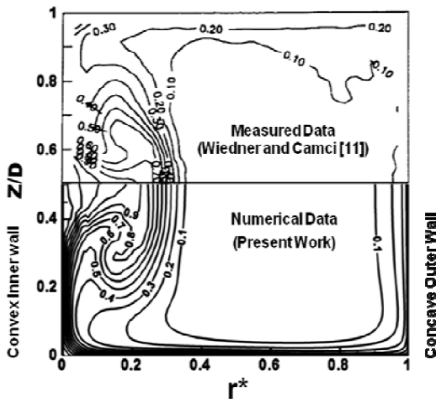


Fig. 2 Comparison of measured and numerically predicted total pressure coefficient (c_{Pt}) at 90° cross-section plane

본 연구에서 사용된 전산해석 프로그램의 신뢰성 검증을 위해 Wiedner and Camci [11]의 실험결과와 전산해석결과를 Fig. 2에서 비교하였다. Figure 2는 곡관의 90° 단면에서의 전압력 계수 분포를 나타낸 것이다. 곡관의 안쪽면(convex inner wall)에서는 두 개의 역회전하는

유로와류 상호작용에 의해 버섯모양의 높은 전압력 손실 영역이 나타나며, 전산해석결과에서도 이를 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 전산해석 프로그램이 90° 곡관의 유동을 잘 묘사할 수 있는 것으로 판단하였다.

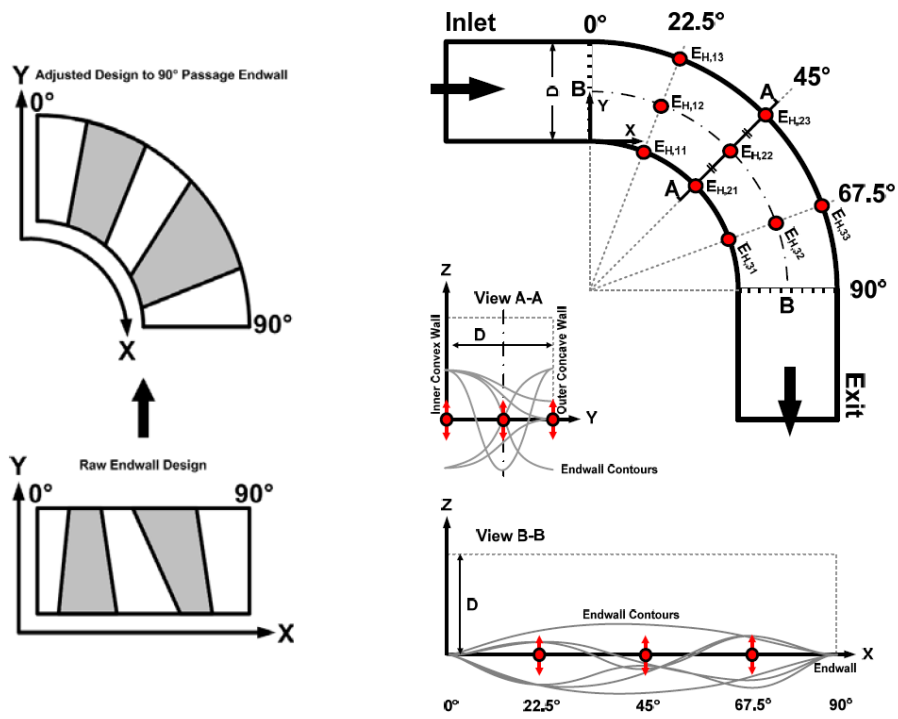
22 근사최적화 기법

근사최적화 기법은 선정된 설계변수를 바탕으로 적절한 설계변수 분포를 선택하는 실험계획법(design of experiments)과 실험계획법을 통해 만들어진 설계변수 분포와 목적함수 사이의 관계를 수학적 모델로 근사화하여 근사면을 모델링하는 근사해석모델 기법, 그리고 근사해석모델 기법으로 만들어진 근사면에 대해 최적화를 수행하는 최적화 기법으로 구성된다.

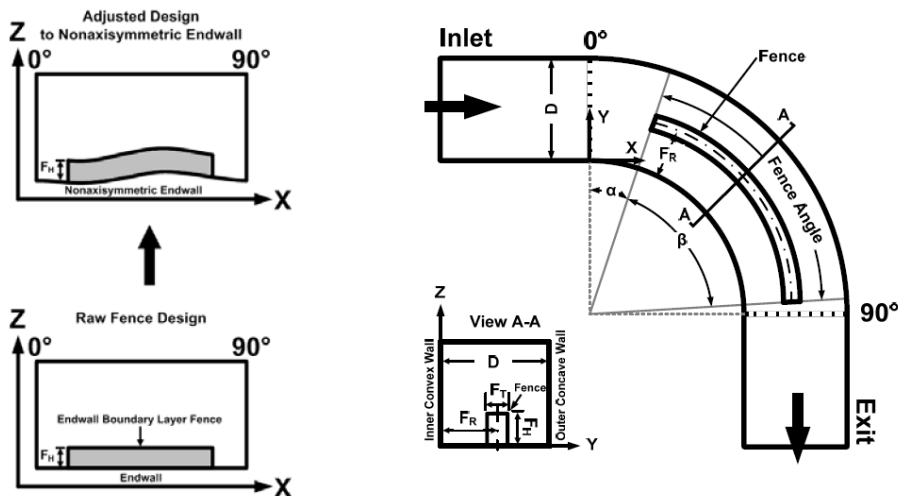
실험계획법으로는 설계영역 내의 실험점들을 균일하게 분포되도록 선택하는 optimal latin hyper cube[13] 방법을 이용하였으며, 총 181개의 샘플점을 선정하였다. 인텔 코어 i7 프로세서를 사용하여 계산한 결과, 샘플점 하나당 90분이 소요되었다. iSIGHTTM에 포함된 근사해석모델 기법으로는 반응면 기법(Response surface model)[14]과 RBF (Radial basis function approximation)기법이 있으며, 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 반응면 기법을 이용하여 근사면을 생성하였다. 최적화 기법으로 경사탐색 알고리즘(Gradient based algorithm)과 달리 여러 지점의 국부적인 최적값을 구분할 수 있으며, 최적화의 수렴성, 신뢰성 그리고 안정성 등이 뛰어나 가장 널리 사용되고 있는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하였다.

23 설계변수 및 목적함수

최적화를 위한 설계변수로 비축대칭 끝벽면의 경우에는 반경방향 및 유체흐름방향으로의 언덕(hump)과 골(trough)를 생성하기 위해 Fig. 3(a)와 같이 9개의 설계변수를 사용하였다. 그리고 각 설계변수 점들을 NURBS[18] (Non-uniform rational basis spline) 곡선을 이용하여 연결하였으며, 이를 바탕으로 비축대칭 끝벽면을 형성하였



(a) Nonaxisymmetric endwall



(b) Endwall boundary layer fence

Fig. 3 Geometric design parameters for optimization

다. 비축대칭 끝벽면의 설계 변수(E_H)는 곡관 직경(D)으로 나누어 무차원화 하였다. 끝벽면 경계층 판은 최적화를 설계변수로 Fig. 3(b)와 같이 총 5개를 선택 하였다. 선택된 설계변수는 판의 시작 위치 (α), 판의 길이 (β), 판의 반경방향 위치(F_R), 판의 높이 (F_H), 판의 두께 (F_T) 등이다. 판의 시작 위치는 곡관의 회전각($\Theta-\beta$)으로 무차원화 하였으며, 판 각은 (Θ)으로 무차원화 하였다. 판의 반경방향 위치 및 두께는 곡관 직경으로 무차원화 하였다. 그리고 판의 높이는 경계층 두께(δ)로 무차원화 하였다. 판의 반경방향 위치는 판의 시작부터 끝까지 동일하며, 같은 사각 단면형상과 같은 두께를 가지고 있다.

Endwall boundary layer fence

$$\begin{aligned} 0.05 &\leq \alpha/\Theta &\leq 0.61 \\ 0.35 &\leq \beta/(\Theta-\alpha) &\leq 0.86 \\ 0.40 &\leq F_R/D &\leq 0.80 \\ 0.20 &\leq F_H/\delta_{99} &\leq 0.60 \\ 0.005 &\leq F_T/D &\leq 0.025 \end{aligned} \quad (1)$$

Nonaxisymmetric endwall

$$-0.1 \leq E_{H,11-33}/D \leq 0.1 \quad (2)$$

Equation 1과2는 설계변수들에 대한 제약조건들이다. 제약조건은 기존의 선행연구들 참고하여 정하였다.

$$\text{Minimize } F(\vec{X}) = \frac{\int c_{Ff} \rho |\vec{u} \circ d\vec{A}_i|}{\int \rho |\vec{u} \circ d\vec{A}_i|} \quad (3)$$

$$F(\vec{X}) = \frac{\int N_D \circ d\vec{A}_i}{A} \quad (4)$$

최적화의 목적함수는 Eq. 3, 4와 같이 관의 90° 면에서의 질량 가중 평균된 전압력 계수와 끝벽면에서의 면적 가중 평균된 Nusselt(Nu_D) 수이다.

3. 최적화 결과

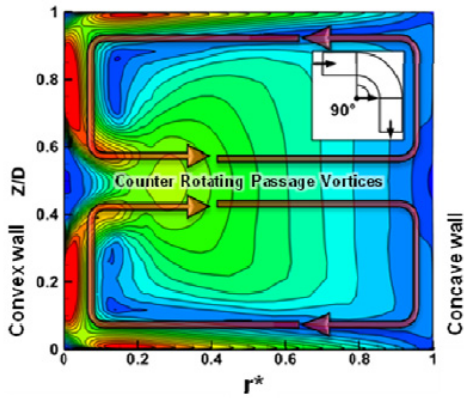
Table 1은 각각의 실험점에 대한 전산해석결과를 바탕으로 형성된 근사면에서의 수정결정계수(R_{ad}^2) 값이다. 전압력 계수 및 Nusselt 수에 대한 수정결정계수 값이 모두 허용치인 0.9 보다 크므로, 반응면 기법으로 생성된 근사면의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

Table 1 Summary of Error Analysis

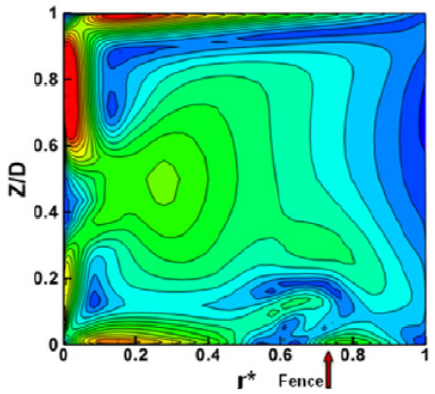
	C_{Pt}	Nu_D
R_{ad}^2	0.990	0.963

Figure 4는 90° 면에서의 평균 이차 유동 속도 (mean secondary velocity) 분포를 나타낸 것이다. Figure. 4(a)에서 보는 바와 같이, 높은 이차 유동 속도 영역이 안쪽면(convex inner wall)과 끝벽면 사이 모서리 부분에서 관측되는 것을 알 수 있다. 이는 유로와류와 곡관 안쪽면 및 끝벽의 상호 작용에 의한 것이다. 최적화된 Fig. 4(b)의 경우, 흡입면과 끝벽면 영역의 높은 속도 영역이 기본 경우에 비해 줄어든 것을 알 수 있다. 최적화를 통해 획득한 끝벽과 판의 형상이 끝벽면을 따라서 흐르던 이차 유동의 강도를 약화시켰으며, 유로와류에 의해 끝벽면 경계층에서의 낮은 운동량을 갖는 영역이 주유동으로 확산되는 것을 방해하였다.

Figure 5는 전압력 계수 분포를 나타낸 것이다. Figure 5(a)에서 보는바와 같이 낮은 운동량을 갖는 영역이 유로와류에 의해 바깥쪽면(concave outer wall)에서 안쪽면으로 확산되는 것을 볼 수 있으며, 이로 인해 안쪽면의 중심선 부근에 높은 손실 영역이 집중되는 것을 알 수 있다. 이 영역에서는 유로와류에 의해 속도 기울기가 심해지며, 역회전하는 유로와류의 상호간섭이 발생한다. Figure 5(b)는 최적화 과정을 통해 획득한 경우이다. Figure 5(a)에 비해 유로 안쪽면의 중심선 부근의 높은 손실 영역이 줄어든 것을 알 수 있다. 그러나 끝벽면 경계층 판과 끝벽면 사이에서 발생하는 3차원 유동에 의해 r^* 이 0.7



(a) Baseline case



(b) Optimized case

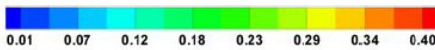
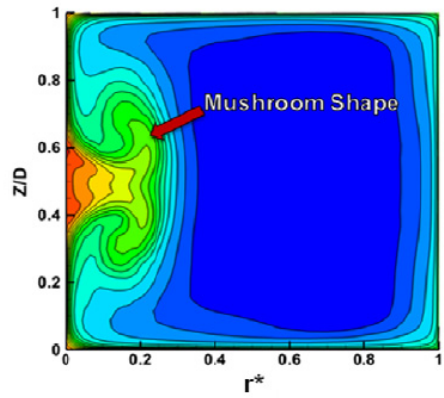


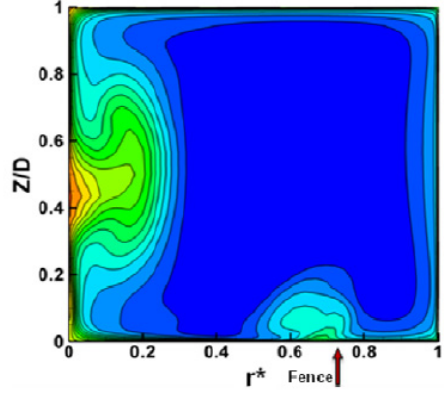
Fig. 4 Comparison of Mean Secondary Velocity Contours (90° Cross-section Plane)

인 부근의 전압력 계수가 주변에 비해 약간 높은 것을 볼 수 있다.

Figure 6은 곡관에서의 유로와류와 끝벽면의 상호작용에 의한 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. Figure 6(a)의 바깥쪽면 0°~20° 영역에서 낮은 Nusselt 수 분포를 보이는 영역을 확인할 수 있으며, 안쪽면 55°~80° 영역에서 유로와류와 끝벽면의 상호작용에 의해 높은 Nusselt 수 분포를 보이는 영역이 나타나는 것을 알 수 있다. 최적화 과정을 통해 획득한 Fig. 6(b)의 경우, 낮은 Nusselt 수 분포가 나타나는 영역이 유로 중간 부분의 0°~40° 영역에서 나타나며, 높은 Nusselt



(a) Baseline case



(b) Optimized case



Fig. 5 Comparison of Total Pressure Coefficient Contours (C_{p1}) (90° Cross-section Plane)

수 분포를 나타내는 영역은 안쪽면 5°~30°와 35°~40° 영역에서 관찰되었다. Fig. 6(a)의 안쪽면 55°~80° 영역에서 보인 높은 Nusselt 수 영역이 Fig. 6(b)에서는 눈에 띄게 줄어든 것을 알 수 있다.

Table 2는 곡관의 90° 단면에서 질량 가중 평균 전압력 계수와 끝벽면에서의 면적 가중 평균 Nusselt 수와 그 최대값을 나타낸 것이다. 비축대칭 끝벽면과 끝벽면 경계층 판을 적용하여 최적화한 경우, 전압력 계수값이 아무것도 적용하지 않은 기본 형상에 비해 10.2% 감소하였으며, 끝벽면에서의 Nusselt 수의 경우, 기본 형

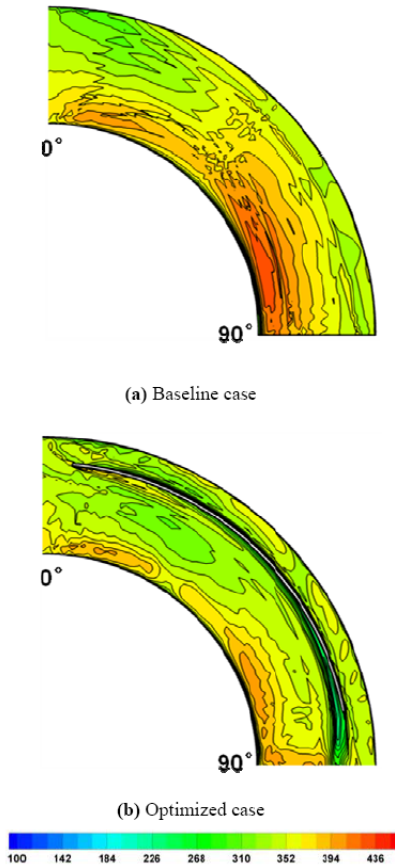


Fig. 6 Comparison of Nusselt Number Contours (Nu_D) (Endwall)

상에 비하여 5.7% 감소하였다. 그리고 최대 Nusselt 수 값은 기본 형상에 비하여 6.9% 감소하였다. 비축대칭 끝벽면과 끝벽면 경계층 판 각각에 대한 최적화 결과를 비교해보면, 끝벽면을 최적화한 경우가 경계층 판을 최적화한 경우보다 끝벽면에서의 Nusselt 수가 낮게 나타났으며, 전압력 계수의 경우, 경계층 판을 최적화한 경우가 끝벽면을 최적화한 경우보다 낮은 값을 가졌다.

4. 결 론

본 연구에서는 터빈 유로 내부에서의 공력열환경 개선을 위해 비축대칭 끝벽면과 끝벽면 경계층 판을 이용하였으며, 효과적인 공력열환경

Table 2 Summary of Benefit for the Optimized Shapes

Cases		C_{Pt} at 90° plane (% Reduction)	Nu_D on endwall (% Reduction)	Max. Nu_D on endwall (% Reduction)
Baseline		0.1643	362.10	441.76
Optimized case	End-wall	0.1521 (-7.4%)	345.28 (-4.7%)	427.17 (-3.3%)
	Fence	-0.1501 (-8.6%)	362.81 (0.2%)	430.80 (-2.5%)
	End-wall + Fence	0.1476 (-10.2%)	341.57 (-5.7%)	411.32 (-6.9%)

개선을 위해 최적화 기법을 적용하였다. 최적화 과정의 효율성을 위하여 근사 최적화 기법을 사용하였으며, 곡관의 90° 단면에서의 전압력 계수와 끝벽에서의 Nusselt 수를 최소화하는 것을 목적함수로 설정하였다. 그리고 터빈 유로를 모사하기 위해 90° 곡관을 사용하였다.

비축대칭 끝벽면과 끝벽면 경계층 판을 동시에 적용하여 이를 최적화한 경우, 곡관의 바깥쪽 면에서 안쪽면으로 끝벽을 따라 흐르는 이차 유동의 강도가 약해졌으며, 유로와류에 의한 끝벽면 경계층의 높은 전압력 손실 영역의 확산도 줄어들었다. 그리고 안쪽면 중심선 부근의 집중된 높은 전압력 손실 영역 역시 비축대칭 끝벽면과 끝벽 경계층 판에 의해 줄어들었다. 따라서 비축대칭 끝벽면과 끝벽면 경계층 판의 최적화를 통해서 상당한 공력열환경 개선이 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- Sharma, P., Butler, T. L.: Predictions of Endwall Losses and Secondary Flows in Axial Flow Turbine Cascades, Journal of Turbomachinery, vol. 109, pp. 229-236, (1987).

2. Kawai, T., Adachi, T., Shinoki, S.: Secondary Flow Control and Loss Reduction in a Turbine Cascade Using Endwall Fences, *JSME International Journal, Series II.*, Vol. 32, pp. 375-387, (1989).
3. Camci, C., Rizzo, D. H.: Secondary Flow and Forced Convection Heat Transfer Near Endwall Boundary Layer Fences in a 90° Turning Duct, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 831-843, (2002).
4. Rose, M. G.: Non-Axisymmetric Endwall Profiling in the HP NGV's of an Axial Flow Gas Turbine, *ASME Paper No. 249-GT-94*, (1994).
5. Brennan, G. , Harvey, N. W., Rose, M. G., Fomison, N. and Taylor, M. D.: Improving the Efficiency of the Trent 500 HP Turbine Using Non-Axisymmetric End Walls: Part I: Turbine Design, *ASME Paper No. 2001-GT-0444*, (2001).
6. Rose, M. G., Harvey, N. W., Seaman, P., Newman, D. A. and McManus, D.: Improving the Efficiency of the Trent 500 HP Turbine Using Non - Axisymmetric End Walls: Part II: Experimental Validation, *ASME Paper No. 2001-GT-0505*, (2001).
7. Germain, T., Nagel, M., Raab, I., Schüpbach, P., Abhari, R. S. and Rose, M.: Improving Efficiency of a High Work Turbine Using Nonaxisymmetric Endwalls-Part I: Endwall Design and Performance, *Journal of Turbomachinery*, vol.132, No. 2, (2010).
8. iSIGHT Designer's Guide, Version FD 3.1, Engineous Software, Inc., (2008).
9. Gambit I Modeling Guide, Fluent Inc., (2004).
10. Fluent User's Guide, Version 6.3, Fluent Inc., (2006).
11. Wiedner, B. G. and Camci, C.: Passage Flow Structure and its Influence on Endwall Heat Transfer in a 90° Turning Duct: Mean Flow and High Resolution Endwall Heat Transfer Experiments, *Journal of Turbomachinery*, vol. 119, No. 1, pp. 39-50, (1997).
12. van Leer, B.: Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov's Method, *J. Com. Phys.*, vol. 32, pp. 101-136,(1979).
13. Yakhot, V., Orszag, S., Thangman, S., Gatski, T. B. and Speziale, C. G.: Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique, *Physics of fluids. A, Fluid dynamics*, Vol. 4, No. 7, pp.1510-1520, (1992).
14. Kim, S. E. and Choudhury, D. A.: Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient, *ASME FED*, Vol. 217, (1995).
15. Myers, R. H. and Montgomery, D. C.: Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York,(1995).
16. Zess, G. A., and Thole, K. A.: Computational Design and Experimental Evaluation of Using a Leading Edge Fillet on a Gas Turbine Vane, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 124, pp. 167-175, (2002).
17. Piegl, L. and Tiller, W.: The NURBS Book, Springer- Verlag, (1995).