

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.1.025>

90° 곡관에서의 경계층 판을 이용한 열유동 환경 개선

조종재* · 김귀순**†

Improvement of the Aerothermal Environment for a 90° Turning Duct by an Endwall Boundary Layer Fence

Jongjae Cho* · Kuisoon Kim**†

ABSTRACT

An endwall boundary layer fence technique was adapted to improve the aerothermal environment of a gas turbine passage. The shape optimization of the fence was performed to maximize the improvement. The turbine passage was simulated by a 90° turning duct (ReD=360,000). The main purpose of the present investigation was to focus on finding a endwall boundary layer fence with minimum total pressure loss in the passage and heat transfer coefficient on the endwall of the duct. Another objective function was to minimize the area 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 aerodynamic environment can be achieved through the application of the fence. Improvement of the thermal environment was smaller than that of the aerodynamic environment.

초 록

본 논문에서는 가스터빈 유로의 열유동 환경을 개선하기 위해 끝벽면 경계층 판을 이용한 방법을 적용하였으며, 이 방법에 의한 효과를 최대화하기 위해 경계층 판의 형상에 대한 최적화를 수행하였다. 터빈 유로를 모사하기 위해 90° 곡관을 이용하였다. 터빈 유로에서의 전압력 손실과 유로 끝벽면에서의 열전달 계수, 그리고 끝벽면 면적을 최소화하는 경계층 판 형상 도출을 연구의 목적으로 하였으며, 최적화 과정의 효율성을 위해 근사 최적화 기법을 적용하였다. 연구결과를 통해, 최적화된 경계층 판에 의한 상당한 공력환경 개선을 확인할 수 있었으며, 열환경 개선 정도는 공력환경 개선정도에 비해 작게 나타났다.

Key Words: Endwall Boundary Layer Fence(끝벽면 경계층 판), Optimization(최적화), Secondary Flow(2차 유동), 90° Turning Duct(90° 곡관)

접수일 2011. 7. 19, 수정완료일 2012. 1. 3, 게재확정일 2012. 1. 11

* 정희원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과

** 종신회원, 부산대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: kuskim@pusan.ac.kr

1. 서 론

터빈 익렬의 진동 특성 향상과 깃하중 및 터

빈 단 출력 향상을 위해 터빈 익렬을 설계하는 오늘날의 추세로, 2차 유동이 터빈 내부의 유동에 미치는 영향이 더 커지고 있다. 특히, 터빈 내부 유동 및 열전달 특성과 연계된 2차 유동은 터빈의 수명과 효율, 그리고 운용유지 비용에 직·간접적인 영향을 미치므로, 터빈의 열유동 환경을 개선하기 위해서는 2차 유동에 대한 제어가 중요하다.

이러한 2차 유동 손실을 줄여 터빈의 열유동 환경을 개선시키기 위해 많은 방법들이 개발·적용되었으며, 본 연구에서는 끝벽면 경계층 판(Endwall boundary layer fence)를 이용한 방법을 적용하였다. 경계층 판을 이용하여 2차 유동을 제어하는 방법은 1950년대에 후퇴각을 가진 제트 전투기의 두꺼워진 경계층에 의한 날개 팁에서의 실속을 방지하기 위해 도입되었으며, 이러한 경계층 판의 효과를 최근 들어 터빈에 적용하기 시작하였다.

Kawai et al.[1]은 레이놀즈 수가 450,000인 터빈 유동에 대해 터빈 동익 양쪽 끝벽면에 얇은 경계층 판을 설치하여, 경계층 판의 높이와 설치 위치에 따라 어떠한 유동특성이 나타나는지 실험을 통해서 연구하였다. 실험을 통해 판을 설치하지 않은 경우와 비교하여, 최적 형상의 판을 설치한 경우가 22% 정도 2차 유동 손실이 감소함을 확인하였다. Chung and Simon[2]은 자유 흐름의 난류강도가 큰 유동에 끝벽면 경계층 판을 설치하고, 그 유동특성에 대해 연구하였다. 난류강도의 증가와 상관없이 유로와류는 여전히 2차 유동의 주된 부분을 차지하며, 경계층 판 역시 유로와류의 강도와 공력 손실을 줄이는데 효과적임을 확인하였다. Moon and Koh[3]는 끝벽 경계층 판이 있는 경우와 없는 경우에 대한 터빈 익렬에서의 3차원 난류유동특성을 전산해석을 통해 연구하였다. 경계층 판의 높이를 조절하여 유로와류의 발달 특성을 살펴보는 방법으로 연구를 수행하였다. 연구를 통해, 경계층 판의 높이가 입구 경계층 두께의 1/3인 경우가 가장 효과적으로 2차 유동을 줄일 수 있음을 확인하였다. Camci and Rizzo[4]는 레이놀즈 수가 360,000인 90° 곡관에서 끝벽면 경계층 판이 2차

유동과 끝벽면 열전달 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 실험결과, 경계층 판에 의해 유로 평균 전압력 손실이 감소되었으나, 경계층 판에 의해 발생한 2차 유동으로 끝벽면에서의 열전달 계수는 증가하였다. Ko et al.[5]는 경계층 판이 층류 강제 대류와 엔트로피 생성에 미치는 영향을 분석하고자 이에 대한 전산해석연구를 수행하였다. 연구 결과를 통해, 끝벽면에 적용한 하나의 경계층 판이 엔트로피의 생성을 줄이는데 가장 효과적임을 확인하였으며, 추가적인 경계층 판의 적용은 엔트로피의 생성을 줄이는데 도움을 주지 못한다는 결론을 도출하였다.

끝벽면 경계층 판에 의한 설계는 앞서 언급한 바와 같이 2차 유동에 의한 손실을 감소시키기 위해 적용되었으며, 그 성능특성 또한 우수한 것을 앞선 연구를 통해 확인할 수 있었다. 하지만 끝벽면 경계층 판에 대한 대부분의 연구가 공력 특성에 주안점을 두고 연구되었는데, 그 이유로 경계층 판을 설치하였을 경우, 경계층 판이 유체가 흐르는 유로의 중간에서 장애물 역할을 함에 따라 부수적인 2차 유동이 발생하며, 이에 의해서 열전달 계수가 증가하기 때문이다.

본 논문에서는 끝벽면 경계층 판을 이용한 기법으로 터빈의 유로에서의 공력 및 열전달 환경을 모두 개선하는 동시에, 경계층 판에 의한 끝벽면 면적 증가를 최소화하기 위해 연구를 수행하였다. 열유동 환경 개선을 최대화하고 끝벽면 면적 증가를 최소화하는 끝벽면 경계층 판의 형상을 효과적으로 찾기 위해 근사 최적화(Approximate optimization) 기법을 사용하였다. 최적설계 상용 프로그램인 iSIGHT™(Engineous Software Inc. [6])를 최적화 과정에 이용하였으며, 형상 모델링 및 격자생성은 상용 프로그램인 Gambit™ (Fluent Inc.[7])을 사용하였다. 유동해석은 상용 프로그램인 FLUENT™(Fluent Inc.[8])를 이용하였다. 그리고 모든 최적화 과정이 자동적으로 실행될 수 있도록 각 프로그램을 통합하였으며, 터빈 유로를 모사하기 위해 정사각단면을 가지는 90° 곡관을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 수치해석 기법 및 모델

Wiedner과 Camci[9]의 연구에서 사용된 형상을 본 연구의 기준모델로 이용하였다. Fig. 1의 90° 곡관은 기준모델의 형상으로 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 2.8이다.

전산해석을 위한 경계조건으로 끝벽면의 열전달 특성을 살펴보기 위해 Fig. 1과 같이 가열된 끝벽을 적용하였으며, 나머지 벽면은 단열벽면으로 자유류의 온도와 같은 298 K로 설정하였다. 그리고 유입 유동은 Velocity inlet 조건을, 유출 유동은 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 [9]의 값을 사용하였다. 곡관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 360,000이다.

3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하였으며, 3차의 공간정확도를 갖는 MUSCL 기법[10]을 적용하였다. 그리고 난류 처리를 위해 재순환유동 및 박리유동의 예측성능이 뛰어난 것으로 보고되고 있는 2방정식 모델인 RNG k- ϵ 모델[11]을 사용하였으며, 이 난류모델은 Zess와 Thole[12]의 연구에서 검증되었다. 벽면에서는 비평형벽함수[13](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 사

용하였다. 계산 수렴조건은 에너지 방정식(10^{-6})을 제외한 모든 방정식이 10^{-4} 까지 수렴하도록 하였다.

본 연구에서 사용된 전산해석 프로그램 및 기

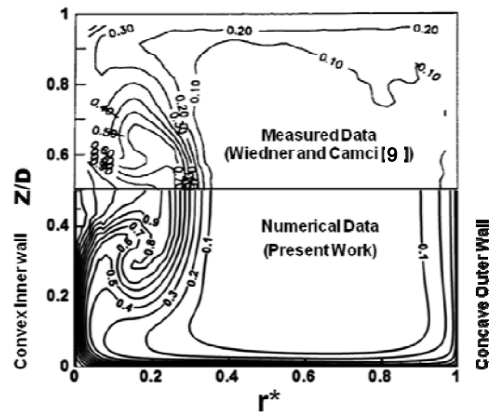
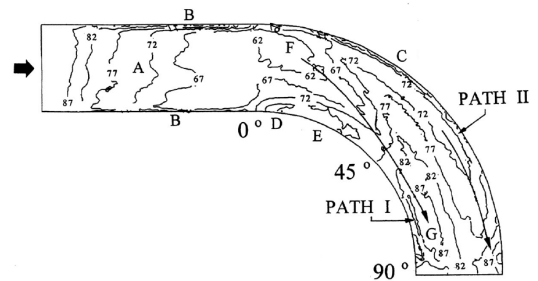
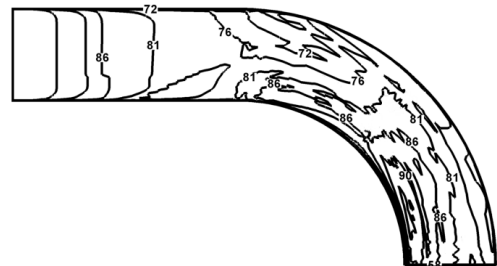


Fig. 2 Comparison of Measured and Numerically Predicted Total Pressure Coefficient (CPT) at 90° Cross-section Plane



(a) Measured data by Wiedner and Camci[9]



(b) Numerically Predicted Data by Present Work

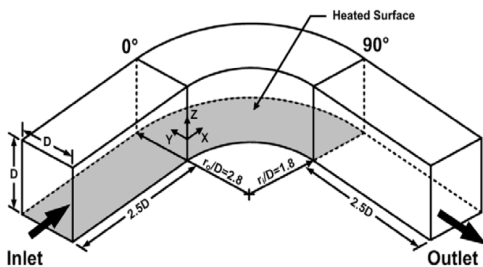


Fig. 1 90° Turning Duct Geometry, Coordinate System

Fig. 3 Comparisons with Measured and Numerically Predicted Endwall Heat Transfer Coefficient(h)

법의 신뢰성 검증을 위해 Wiedner and Camci[9]의 실험결과와 전산해석결과를 Fig. 2와 Fig. 3에서 비교하였다. Fig. 2는 곡관의 90° 단면에서의 전압력 계수 분포를 나타낸 것이다. 곡관의 내벽면(Convex inner wall)에서 두 개의 역회전하는 유로와류와 끝벽면의 상호작용에 의해 버섯모양의 높은 전압력 손실 영역이 나타나며, 전산해석결과에서도 이를 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 90° 곡관 끝벽면에서의 열전달 계수의 분포를 나타낸 것이다. 곡관의 내벽면 부근 5°~30° 영역에서 보이는 높은 Nusselt 수의 분포 영역이 전산해석결과(Fig. 3(b))에서도 실험결과(Fig. 3(a))와 유사하게 나타나며, 유로와류의 발달과 이에 수반된 모서리와류의 영향으로 인해 55°~80° 영역에서 보이는 높은 Nusselt 수의 분포 영역 또한 전산해석결과와 실험결과가 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 전산해석 프로그램 및 기법으로 90° 곡관의 열유동을 모사하는데 있어서 큰 문제가 없다고 판단하였다.

2.2 근사최적화 기법

근사최적화 기법은 선정된 설계변수를 바탕으로 적절한 설계변수 분포를 선택하는 실험계획법(Design of experiments, DOE)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[14] 방법을 이용하였으며, 총 86개의 샘플점을 선정하였다. 인텔 코어 i7 프로세서를 사용하여 계산한 결과, 샘플점 하나당 90분이 소요되었다. 근사해석모델 기법으로는 널리 사용되고 있는 반응표면모델 기법(Response surface model)[15]을 이용하였다. 최적화 기법으로 경사 탐색 알고리즘(Gradient based algorithm)과 달

리 여러 지점의 국부적인 최적값을 구분할 수 있으며, 최적화의 수렴성, 신뢰성 그리고 안정성 등이 뛰어나 가장 널리 사용되고 있는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하였다. 생성된 반응면의 신뢰성은 수정결정계수(R_{adj}^2)를 이용하여 판단하였으며, 수정결정계수 값이 1에 근접할수록 반응면은 실제함수에 근접하다고 할 수 있다.

2.3 설계변수 및 목적함수

끝벽면의 면적 증가를 최소화하고 열유동 환경 개선을 최대화하기 위한 끝벽면 경계층 판의 최적 형상을 도출하기 위해 Fig. 4와 같은 설계변수를 적용하였다. 설계변수의 개수를 최소화하여 최적설계과정에서의 소요시간을 줄이고, Camci and Rizzo[4]의 연구와 비교하기 위해 총 5개의 설계변수를 사용하였다. 선택된 설계변수는 판의 시작 위치각(α), 판의 길이각(β), 판의 반경방향 위치(F_R), 판의 높이(F_H), 판의 두께(F_T) 등이다. 판의 시작 위치각은 90° 곡관의 회전각(90°)으로 무차원화 하였으며, 판의 길이각은 곡관의 회전각에서 판의 시작 위치각을 뺀 값(90°- α)으로 무차원화 하였다. 판의 반경방향 위치 및 두께는 곡관 직경(D)으로 무차원화 하였으며, 판의 높이는 경계층 두께(δ_{99})로 무차원화 하였다. 판의 단면형상은 판의 시작부터 끝까지 동일하게 하였다. 각 설계변수들에 대한 제약조건은 Eq. 1과 같으며, 제약조건은 기존의 선행연구를 참고하여 정하였다. 최적화의 목적함수는 Eq. 2~4와 같이 곡관 90° 면에서의 질량 가중 평균(Mass-weighted average)된 전압력 계수(C_{Pt})와 끝벽면에서의 면적 가중 평균(Area-weighted average)된 Nusselt(Nu_D) 수 및 곡관 회전부의 위쪽 끝벽면을 제외한 면의 면적을 최소화하는 것이다. 그리고 최적화의 목적함수는 Eq. 2~4와 같이 곡관 90° 면에서의 질량 가중 평균된 전압력 계수와 끝벽면에서의 면적 가중 평균된 Nusselt 수 및 곡관 회전부의 위쪽 끝벽면을 제외한 면의 면적을 최소화하는 것이다.

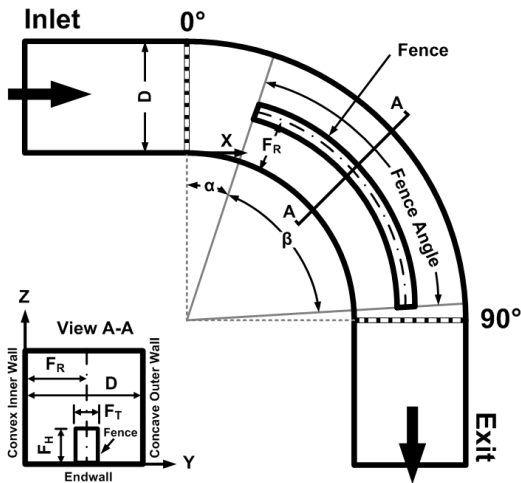


Fig. 4 Geometric Design Parameters for Optimization

Subject to

$$\begin{aligned}
 0.05 &\leq \alpha/90^\circ \leq 0.70 \\
 0.25 &\leq \beta/(90^\circ - \alpha) \leq 0.85 \\
 0.40 &\leq F_R/D \leq 0.80 \\
 0.20 &\leq F_H/\delta_{99} \leq 0.80 \\
 0.005 &\leq F_T/D \leq 0.025
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Minimize

$$F(\vec{X}) = \frac{\int C_{Pt} \rho \vec{u} \cdot d\vec{A}_i}{\int \rho \vec{u} \cdot d\vec{A}_i}
 \tag{2}$$

$$F(\vec{X}) = \frac{\int Nu_D \cdot d\vec{A}_i}{A}
 \tag{3}$$

$$F(\vec{X}) = Area
 \tag{4}$$

3. 결과 및 고찰

Table 1은 생성된 반응표면의 수정결정계수 값이므로, 전압력 계수 및 Nusselt 수, 그리고 면적에 대한 수정결정계수 값이 모두 허용치인 0.9보다 크므로, 생성된 반응표면을 기반으로 최적설계를 수행하였다.

Table 1. Summary of Error Analysis

	C_{Pt}	Nu_D	Area
R_{ad}^2	0.972	0.970	0.997

실험계획법을 통해 획득한 설계변수에 따른 목적함수 값을 바탕으로, 설계변수들이 각각의 목적함수에 미치는 영향을 Table 2에 표시하였다. 목적함수 중의 하나인 곡관 회전부 끝벽면과 경계층 판의 면적 합의 경우, 경계층 판의 높이가 면적의 변화에 미치는 영향이 가장 크며, 그 다음으로 경계층 판의 시작 위치각과 길이각의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그리고 상대적으로 경계층 판의 반경방향 위치와 두께는 면적의 변화에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

일반적으로 유동 영역에서 경계층 판이 장애물 역할을 하므로, 유동이 판과 부딪히면서 발생하는 유동과 끝벽면을 가로지르는 유동인 횡단류가 판을 넘어가면서 발생하는 유동에 의해 높은 열전달 계수가 끝벽면에서 나타나게 된다. 따라서, 목적함수인 끝벽면의 Nusselt 수의 경우는 판의 높이가 끝벽면의 열전달 특성에 미치는 영향이 가장 크게 나타난다. 그리고 그 다음으로 판의 반경방향 위치가 미치는 영향이 크게 나타나는데, 이는 반경방향 위치가 작을수록 끝벽면 횡단류가 발달됨에 따라 판을 넘어가면서 발생하는 유동에 의해 발생하는 2차 유동이 더욱 강해지고, 이에 따라 끝벽면의 열전달 계수가 증가하기 때문이다. 반면에 경계층 판의 두께와 길이가 끝벽면의 열전달 특성에 미치는 영향은 본 연구의 설계영역 하에서는 작은 것을 확인할 수 있다.

목적함수인 전압력 계수의 경우에는 전반적으로 설계변수가 미치는 영향이 대부분 크게 나타났다. 그 중에서도 2차 유동에 의해 발생하는 끝벽면 횡단류를 저지하기 위해 적용된 끝벽면 경계층 판 기법의 원리를 반영하여, 경계층 판의 높이가 전압력 계수에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 그 다음으로 경계층 판

Table 2. Influence of Design Variables on Objective Functions(%)

	Area	Nu_D	C_{Pt}
$\alpha/90^\circ$	31	16	25
$\beta/(90^\circ-\alpha)$	30	7	15
F_R/D	5	39	20
F_H/δ_{99}	33	31	35
F_T/D	1	7	5

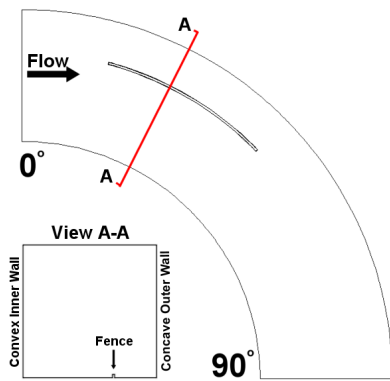


Fig. 5 Shape of Optimized Boundary Layer Fence

의 시작위치가 전압력 계수에 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 처음 45° 구간에서 난류 중심의 가속이 유로 내부의 난류 유동을 지배한다는 기존 연구결과와도 부합되는 것이다 [16]. 본 연구의 설계영역 하에서는 경계층 판의 두께에 의한 영향이 다른 설계변수들에 대한 영향에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

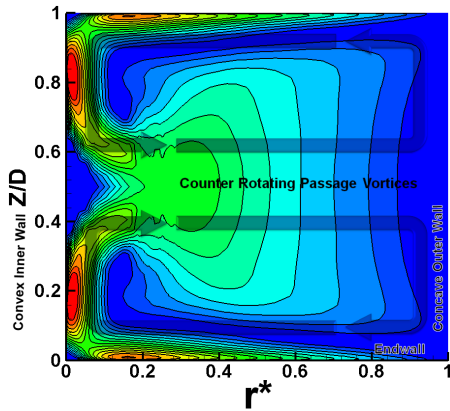
Figure 5는 최적설계 과정을 통해 획득한 설계변수 값을 바탕으로 생성한 끝벽면 경계층 판의 형상이다. Fig. 5의 결과는 경계층 판에 대한 기존 연구인 Kawai et al.[1], Moon and Koh[3]의 연구결과와 유사하게 나타났다.

Figure 6은 90° 단면에서의 평균 2차 유동 속도(Mean secondary velocity) 분포를 나타낸 것이다. 기준모델의 경우는 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 유로와류와 곡관의 내벽면 및 끝벽면의 상호 작용에 의해 높은 평균 2차 유동 속도 영역이 내벽면과 끝벽면 근처에서 관측되는 것을 알 수 있다. 경계층 판의 형상을 최적설계한

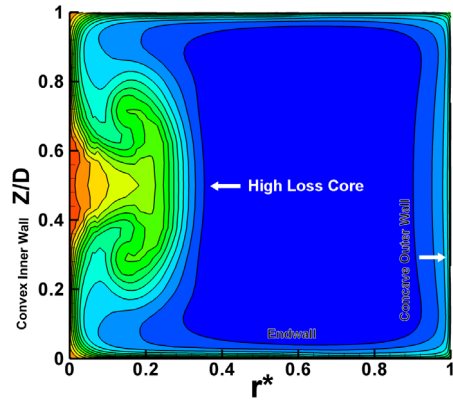
Fig. 6(b)의 경우, 경계층 판에 의해 끝벽면을 따라서 흐르던 2차 유동이 차단·교란됨에 따라 기준모델의 내벽면에서 관찰되던 높은 속도 영역이 줄어들었다. 그리고 내벽면에서 주 유동영역으로 확산되는 영역의 크기도 기준모델에 비해 작아진 것을 확인할 수 있다. 반면에 끝벽면에 설치된 경계층 판에 의해 발생되는 2차 유동이 후류영역으로 확산되면서 끝벽면과 상호작용하여, 끝벽면 $r^*=0.2$ 부근에서 기준모델에 비해 약간 높은 평균이차유동속도 영역이 관찰된다.

Figure 7은 90° 단면에서의 전압력 계수의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 보이는 바와 같이 낮은 운동량을 갖는 영역이 유로와류에 의해 외벽면(Concave outer wall)에서 내벽면으로 확산되는 것을 볼 수 있으며, 이로 인해 내벽면의 중심선 부근에 높은 손실 영역이 집중되는 것을 알 수 있다. 이 영역에서는 유로와류에 의해 속도 기울기가 심해지며, 역회전하는 유로와류의 상호간섭이 발생한다. 경계층 판의 형상을 최적설계한 Fig. 7(b)의 경우, 최적설계된 경계층 판에 의해 끝벽면의 횡단류가 차단·교란됨에 따라 끝벽면 경계층의 낮은 운동량을 갖는 영역이 주유동으로 확산되는 것을 억제하였으며, 이로 인해 내벽면의 중심선 부근에서 나타나는 높은 손실 영역의 크기가 확연히 줄어든 것을 볼 수 있다.

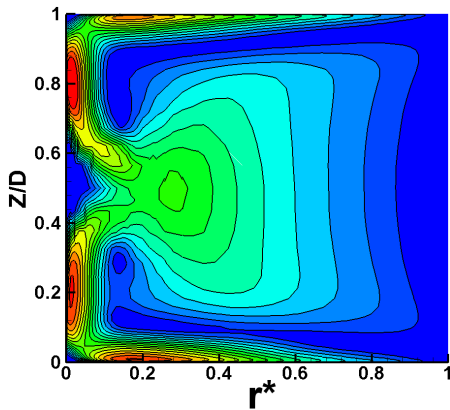
Figure 8은 기준모델과 최적설계된 모델의 Pathline을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 기준모델의 Pathline으로 반경 방향의 압력 구배에 의해 0° 에서 45° 구간에서 끝벽면의 유동이 급격하게 외벽면에서 내벽면으로 흐르는 것을 볼 수 있다. 그리고 압력 구배에 의해 발생한 유로와류에 의해 유동이 후류로 흘러감에 따라 끝벽면과 내벽면을 타고 회전하는 것을 볼 수 있으며, 역회전하는 두 유로와류가 후류 내벽면의 대칭면에서 만나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)의 최적설계 모델의 경우, 경계층 판에 의해 외벽면에서 내벽면으로 흐르는 끝벽면의 유동이 차단되면서 유로와류의 발생이 감소되는 것을 볼 수 있으며, 경계층 판에 의한 2차 유동 또한 부수적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다.



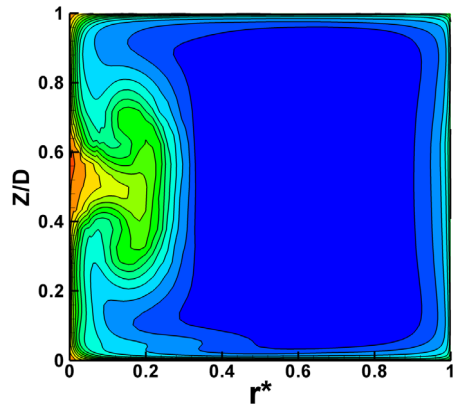
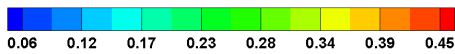
(a) Baseline Case



(a) Baseline Case



(b) Optimized Case



(b) Optimized Case

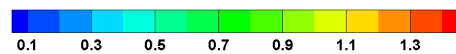
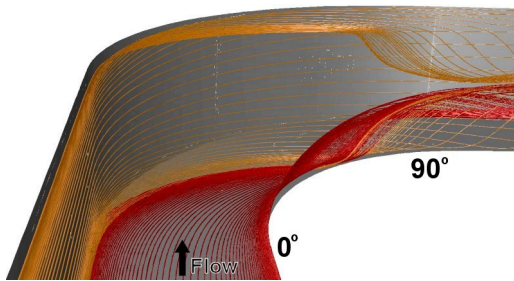
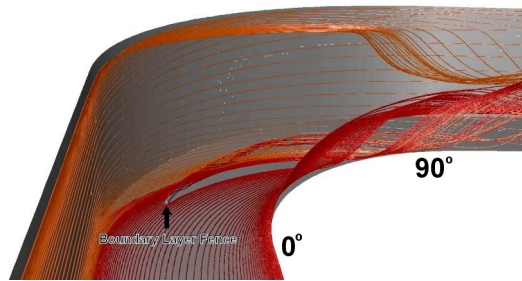


Fig. 6 Comparison of Mean Secondary Velocity $\sqrt{(V^2 + W^2)}/U_{in,d}^2$ Contours (90° Cross-section Plane)

Fig. 7 Comparison of Total Pressure Coefficient(CPT) $((P_{t,in,d}-P_t)/0.5\rho U_{in,d}^2)$ Contours (90° Cross-section Plane)

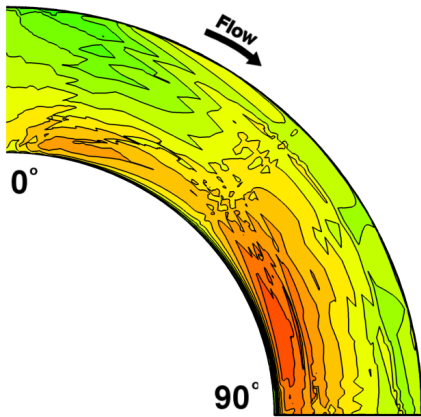


(a) Baseline Case

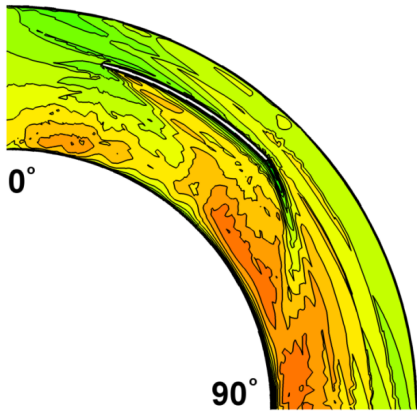


(b) Optimized Case

Fig. 8 Comparison of Pathlines



(a) Baseline Case



(b) Optimized Case

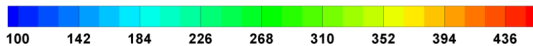


Fig. 9 Comparison of Nusselt Number(Nu_b) (hD/k_f) Contours (Endwall)

Figure 9는 90° 곡관에서 유로와류와 끝벽면의 상호작용에 의한 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. 기준모델인 Fig. 9(a)의 외벽면 0°~20° 영역에서 낮은 Nusselt 수의 분포가 나타나는 영역을 확인할 수 있다. 그리고 내벽면 5°~30°에서는 유동의 급격한 방향 전환으로 인한 가속의 영향으로 높은 Nusselt 수의 분포 영역이 나타나며, 55°~80° 영역에서는 유로와류의 발달과 이에 수반된 모서리 와류의 영향으로 인해 높은 Nusselt 수의 분포를 보이는 영역이 보이는 것을

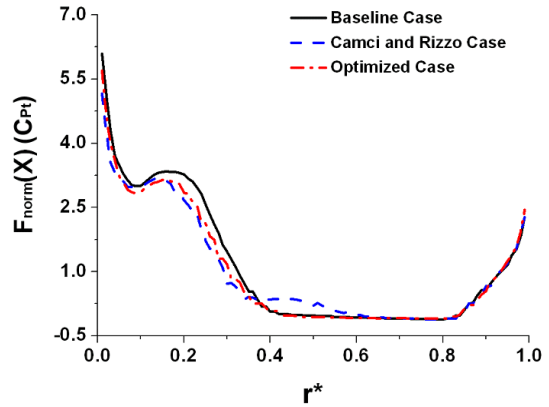


Fig. 10 Spanwise Averaged Total Pressure Coefficient(C_{Pt}) Distributions at 90° Cross-section Plane

확인할 수 있다. 최적화 과정을 통해 획득한 Fig. 9(b)의 경우, 높은 Nusselt 수 분포를 나타내는 영역이 내벽면 5°~20°, 45°~90° 영역에서 관찰되었으며, 경계층 판에 의해 끝벽면의 횡단류가 차단됨에 따라 기존모델에 비해 Nusselt 수가 감소하였다. 하지만 경계층 판에 의해 발생하는 2차 유동에 의해 경계층 판 근처의 20°~40° 영역에서 Nusselt 수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

최적설계한 모델의 열유동 환경 개선정도를 확인하기 위해 최적설계한 모델을 기준모델, 그리고 Camci and Rizzo[9]의 모델과 비교하였다. Camci and Rizzo[9]의 모델($\alpha/90^\circ=0.5$, $\beta/(90^\circ-\alpha)=0.5$, $F_H/\delta_{99}=0.5$, F_R/D , $F_T/D=0.025$)은 실험적 연구를 통해 획득한 것으로, 연구에서 파악된 최대의 전압력 계수 감소율을 나타내는 것이다. 본 논문에서 사용한 전산해석 프로그램으로 위에서 언급한 Camci and Rizzo[9]의 모델에 대해 전산해석을 실시하였으며, 그 결과를 최적설계한 모델과 비교하였다.

Figure 10은 곡관의 90° 단면에서 높이방향으로 평균한 전압력 계수 값을 반경방향에 따라 표시한 것이다. 그래프에서 $r^*=0$ 인 지점은 곡관의 내벽면을, $r^*=1$ 인 지점은 외벽면을 나타낸다. 경계층 판에 의해 유로와류가 차단됨에 따라 r^* 가 0.0에서 0.35인 구간에서 비교 대상인 다른 두 모델의 전압력 계수 값의 크기가 기준모델에

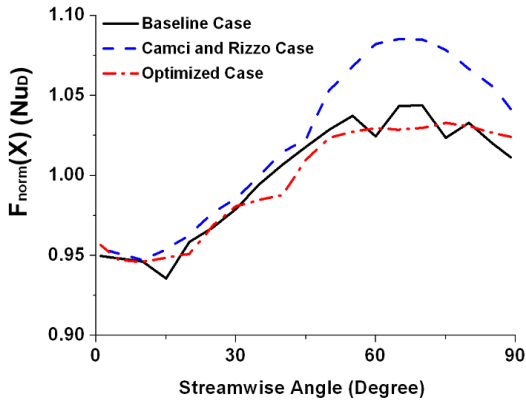


Fig. 11 Radialwise Averaged Nusselt Number (Nu_D) Distributions Along the Duct Streamwise

비해 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 경계층 판으로 인한 2차 유동으로 Camci and Rizzo[9]의 모델은 r^* 가 0.35에서 0.65인 구간에서 기준모델보다 큰 전압력 계수 값이 나타난다. 최적설계된 모델은 전반적으로 기준모델에 비해 전압력 계수 값이 낮게 나타나며, r^* 가 0.15에서 0.35인 구간에서는 Camci and Rizzo[9]의 모델이 최적설계된 모델에 비해 전압력 계수 값이 약간 더 작게 나타났다.

Figure 11은 반경방향으로 평균한 끝벽면에서의 Nusselt 수를 유동 흐름각(Streamwise angle)에 따라 나타낸 것이다. Camci and Rizzo[9]의 모델은 경계층 판에 의해 발생한 2차 유동과 경계층 판 근처 끝벽면과의 상호작용으로 Nusselt 수가 증가함에 따라 45° 이후 구간부터 Nusselt 수가 기준모델보다 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 반면에 최적설계된 모델의 경우는 Camci and Rizzo[9]의 모델과 달리 경계층 판에 의한 Nusselt 수의 증가는 관찰되지 않았으며, 전체적으로 Nusselt 수의 분포가 기준모델과 비슷하게 나타났다.

Table 3은 곡관의 90° 단면에서 질량 가중 평균한 전압력 계수, 끝벽면에서의 면적 가중 평균한 Nusselt 수와 그 최대값, 그리고 곡관의 회전부 끝벽면 및 경계층 판의 면을 합한 면적을 나타낸 것이다. 끝벽면 경계층 판을 적용하여 최적화한 경우, 전압력 계수값이 기준모델에 비해

Table 3. Summary of Benefit for the Optimized Shape

Cases	C_{Pt} at 90° plane (% Ch.)	Nu_D on endwall (% Ch.)	Max. Nu_D on endwall (% Ch.)	Area (% Ch.)
Baseline case	0.1643	362.10	441.76	0.4451
Camci and Rizzo[4] case	0.1572 (-4.3%)	369.67 (+2.1%)	500.49 (+13.3%)	0.4680 (+5.2%)
Optimized case	0.1516 (-7.7%)	361.06 (-0.3%)	425.82 (-3.6%)	0.4491 (+0.9%)

7.7% 감소하였으며, Camci and Rizzo[9]의 모델에 비해서 더 큰 감소율을 나타냈다. 끝벽면에서의 Nusselt 수의 경우, 끝벽면의 열전달 계수를 상승시키는 경계층 판의 특성상 기준모델에 비하여 0.3% 감소하는데 그쳤으나, Nusselt 수가 증가한 Camci and Rizzo[9]의 모델에 비해서는 열전달 특성이 개선되었다. 그리고 최대 Nusselt 수는 기준모델에 비해 3.6% 감소하였다. 면적의 경우, 5.6%가 증가한 Camci and Rizzo[9]의 모델에 비해 최적설계된 모델은 0.9%가 증가하는데 그쳤다.

4. 결 론

본 논문에서는 터빈 유로의 열전달 특성 및 공력 특성을 모두 개선시키기 위해 연구를 수행하였으며, 그 방법으로 유로의 끝벽면에 비축대칭 끝벽면을 적용하였다. 그리고 열유동 환경을 효과적으로 개선시키기 위해 근사 최적화 기법을 사용하였으며, 터빈 유로를 모사하기 위해 정사각단면을 가지는 90° 곡관을 사용하였다. 그리고 열유동 환경 개선을 최대화하고 끝벽면 면적 증가를 최소화하는 끝벽면 경계층 판의 형상을 효과적으로 찾기 위해 근사 최적화 기법을 사용하였다.

끝벽면 경계층 판에 대한 최적화의 경우, 끝벽면의 횡단류를 차단하여 2차 유동의 강도를 감소시킴에 따라 전압력 손실이 줄어들어 공력 성능이 향상되었으나, 끝벽면의 열전달 계수를 상

승시키는 경계층 판의 특성상 끝벽면의 열전달 계수 감소는 전압력 계수의 감소율에 비해 작게 나타났다. 하지만, 끝벽면 경계층 판에 대한 최적설계를 적용함으로써 이전 연구에 비해서 90° 곡관에서의 열유동 환경을 효과적으로 향상시킬 수 있었다.

최적설계과정에서 계산자원과 시간이 추가적으로 소요되겠지만, 설계변수를 추가하여 경계층 판의 반경방향 위치, 두께, 높이를 곡관의 위치에 따라 다르게 설계한다면 좀 더 향상된 열유동 환경을 획득할 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

본 연구는 "학연협력강화사업 성과창출형 과제 : KARI-University Partnership Program" Development of System Integration Program for Liquid Rocket Engine(2009-09-성과-2)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Nomenclature

α	: boundary layer fence starting angle (°)
β	: boundary layer fence angle (°)
C_{Pt}	: total pressure coefficient = $(P_{t,in,cl}-P_t)/0.5\rho U_{in,cl}^2$
D	: duct width (m)
F_H	: boundary layer fence height
F_T	: boundary layer fence thickness
F_R	: boundary layer fence radial position
h	: heat transfer coefficient ($W/K\cdot m^2$)
k_f	: thermal conductivity of the fluid ($W/K\cdot m$)
Nu_D	: Nusselt number = hD/k_f
P	: local static pressure (N/m^2)
R^2_{ad}	: adjusted coefficient of determination
r	: radius
r^*	: normalized radial position = $((r-r_i)/(r_o-r_i))$

U, V, W

: absolute velocity components

X, Y, Z

: streamwise, radial, and spanwise directions

δ_{99} : boundary layer thickness at the rate of $U/U_{in,cl}=0.99$

ρ : density (kg/m^3)

Subscripts

ad : adjusted

cl : duct centerline

D : duct width

i : inner side of duct

in : inlet

o : outer side of duct

t : total or stagnation

참고 문헌

1. Kawai, T., Shinoki, S. and Adachi, T., "Secondary Flow Control and Loss Reduction in a Turbine Cascade Using Endwall Fences," JSME International Journal, Series 11, Vol. 32, No. 3, 1989, pp.375-387
2. Chung, J.T. and Simon, T.W., "Effectiveness of the Gas Turbine Endwall Fences in Secondary Flow Control at Elevated Freestream Turbulence Levels," 93-GT-51, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio, 1993
3. Moon, Y. J., Koh, S. R., "Counter-rotating streamwise vortex formation in the turbine cascade with endwall fence," Computers & Fluids, Vol. 30, Issue 4, 2001, pp.473-490
4. 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, 2002, pp.831-843
5. Ko, T. H., "A numerical study on entropy generation and optimization for laminar forced convection in a rectangular curved duct with longitudinal ribs," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 45, 2006, pp.1113-1125
 6. iSIGHT Designer's Guide, Version FD 3.1, Engineous Software, Inc., 2008
 7. Gambit I Modeling Guide, Fluent Inc., 2004
 8. Fluent User's Guide, Version 6.3, Fluent Inc., 2006
 9. 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, 1997, pp.39-50
 10. van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov's Method," J. Com. Phys., Vol. 32, 1979, pp.101-136
 11. 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, 1992, pp.1510-1520
 12. 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, 2002, pp.167-175
 13. Kim, S. E. and Choudhury, D. A., "Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient," ASME FED, Vol. 217, 1995
 14. Iman, R. L., Davenport, J. M. and Zeigler, D. K., "Latin hypercube sampling (program user's guide)," OSTI 5571631., 1980
 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. Taylor, A.M.K.P., Whitelaw, J.H. and Yianneskis, M., "Curved Ducts With Strong Secondary Motion: Velocity Measurements of Developing Laminar and Turbulent Flow," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 104, 1982, pp.350-359