대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 853~858 KSME 00S296

터빈 캐스케이드 입구경계층 두께와 경계층 펜스 효과에 대한 실험적 연구

전용민*, 정진택**

(Experimental Study on Effects of Inlet Boundary Layer Thickness and Boundary Layer Fence in a Turbine Cascade)

Y. M. Jun(Grad. School, Korea Univ), J . T. Chung(Korea Univ.)

Key Words: Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Boundary Layer Fence(경계층 펜스), Secondary Flow and Loss(이차유동 및 손실), Inlet Boundary Layer Thickness(입구경계층 두께)

Abstract

The working fluid from the combustor to the turbine stage of a gas turbine makes various boundary layer thickness. Since the inlet boundary layer thickness is one of the important factors that affect the turbine efficiency. It is necessary to investigate secondary flow and loss with various boundary layer thickness conditions.

In the present study, the effect of various inlet boundary layer thickness on secondary flow and loss and the proper height of the boundary layer fences for various boundary layer thickness were investigated. Measurements of secondary flow velocity and total pressure loss within and downstream of the passage were taken under 5 boundary layer thickness conditions, 16, 36, 52, 69, 110mm. It was found that total pressure loss and secondary flow areas were increased with increase of thickness but they were maintained almost at the same position. At the following research about the boundary layer fences, 1/6, 1/3, 1/2 of each inlet boundary layer thickness and 12mm were used as the fence heights.

As a result, it was observed that the proper height of the fences was generally constant since the passage vortex remained almost at the same position. Therefore once the geometry of a cascade is decided, the location of the passage vortex and the proper fence height are appeared to be determined at the same time. When the inlet boundary layer thickness is relatively small, the loss caused by the proper fence becomes bigger than endwall loss so that it dominates secondary loss. In these cases the proper fence height is decided not by the cascade geometry but by the inlet boundary layer thickness as previous investigations.

기호설명

$\overline{CP_T}$: 피치 방향 질량 평균 손실 계수

$\overline{Cp_T}$: 평면 질량 평균 손실 계수

$\overline{Cp}_{total}$: 전체 압력 손실 계수 ($Cp_T + Cp_{sk}$)

η_f : 펜스에 의한 전체 압력 손실 감소율

1. 서 론

가스터빈의 성능과 신뢰성 향상을 위해 많은 연구가 Langston[1]등에 의해 수행되었으며 이차유동을 조절하여 이차손실을 감소시키고 나아가 터빈부의 열전달 특성을 향상시키려는 연구가 Kawai[2],[3]와 Chung[4],[5]등에 의해 이루어졌다. 끝벽에 이차유동을 조절할 수 있는 경계층 펜스를 설치하는 방법을 사용한 Kawai[3]등은 펜스를 이용하여 전체 손실의 약20% 가량을 감소시킬 수 있었다고 한다. Chung[4]등은 터빈부 냉각공기를 교란하는 이차유동이 경계층 펜스에 의해 약해져서 냉각 효과가 상승하는 효과를 얻었다고 한다. 이차유동에 영향을 미치는 인자로는 레이놀즈수, 난류강도, 입사각, 입구경계층 등이 있으며 이중 입구경계층은 통로내부에서 발생하는 3차원유동과 섞이면서 손실을 증가시킨다. 실제 가스터빈 연소기를 빠져 나온 작동 유체는 일정하지 않은

* 고려대 대학원 (현 항공우주연구소)

** 고려대 기계공학과

두께의 경계층을 형성하면서 터빈부로 유입된다.

본 연구에서는 일정하지 않은 입구경계층 두께가 이차유동과 손실에 미치는 영향을 살펴보았으며 또 이차손실 감소를 위해 경계층 펜스를 사용했을 때 일정하지 않은 입구경계층 두께에 의해 경계층 펜스의 효과가 어떻게 영향을 받는가를 관찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig.1은 개방형 풍동 내에 장착된 선형 캐스케이드 시험부로서, 6개의 블레이드는 Table.1과 같다. Fig.2의 경계층 펜스 두께는 0.6mm 이고 이[6]와 Kawai[3]가 제안한 바와 같이 블레이드 캠버라인 형태로 각 통로 중앙에 설치하였다. 본 실험에서는 주기성을 확보하기 위하여 미드스팬에서 속도 분포와 끝벽에서의 정압분포를 측정하였으며 유동 조절판을 이용하여 주기성을 조절하였다. 입구 경계층 두께 조건은 시험부 입구에 설치한 trip wire용 봉으로 조절하였다. 경계층 두께와 난류강도는 I형 열선유속계를 사용하여 측정했으며 유동측정은 tip 외경이 3.2mm인 원추형 5공 프로우브와 PSI사 9000 series 압력장치를 이용하여 측정하였다.

Table.1 Geometry of the blade

Chord (C)	230mm
Axial chord to chord ratio (C_{ax}/C)	0.704
Aspect ratio (H/C)	2.0
Solidity (C/S)	1.33
Blade Inlet angle (β_1)	-35°
Blade outlet angle (β_2)	72.5°
Turnimg angle	107.5°
Incidence angle	0°

측정평면은 통로 상류에 1번과 하류에 11번이 설정되어 있으며 통로 내부에만 9개가 있는 것을 Fig.2에서 볼 수 있다. 경계층 두께 변화에 의한 이차유동과 손실의 변화를 보기 위해서 5가지 경계층 두께에 대해 통로 내부와 하류에서 유동을 측정하였으며 적절한 경계층 펜스의 높이를 찾기 위해서 각 경계층 두께에 대해 3~4가지씩의 펜스를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 유동의 유입속도는 10m/s

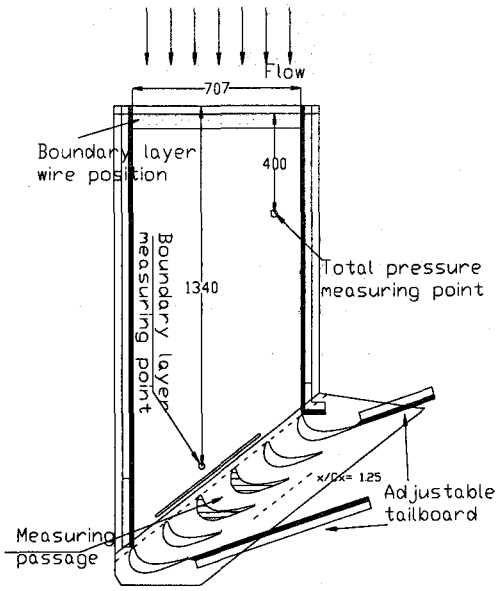


Fig.1 Top view of the cascade test section

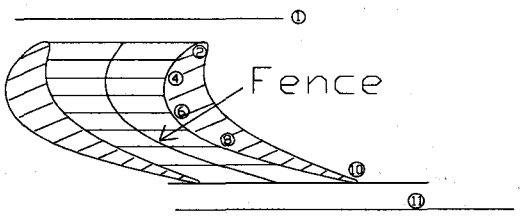


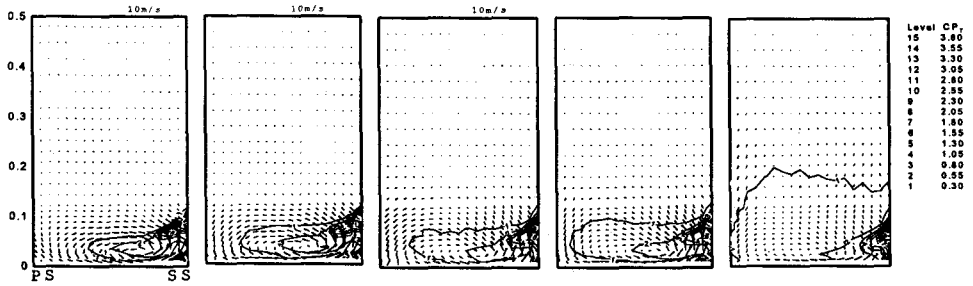
Fig.2 Top view of measuring passage

이며 레이놀즈수(Rec)는 1.5× 105이다. 입구 경계층 두께 조건은 Table.2와 같으며 이때의 난류강도는 case 1~case 4는 0.6%이내이며 case5는 0.9%이내이다.

경계층 펜스의 높이는 각 입구 경계층 두께에 따라 경계층 두께의 1/6, 1/3, 1/2 높이인 펜스와 경계층 두께와 무관하게 일정한 높이의 펜스(12mm) 등이 사용되었다. Case 2,4에서는 경계층

Table.2 Inlet flow condition

	δ_{99}	δ	Θ	H
CASE 1	16	1.05	0.93	1.13
CASE 2	36	2.99	2.58	1.16
CASE 3	51	4.38	3.79	1.16
CASE 4	69	5.43	4.74	1.15
CASE 5	110	7.26	6.6	1.11



(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5

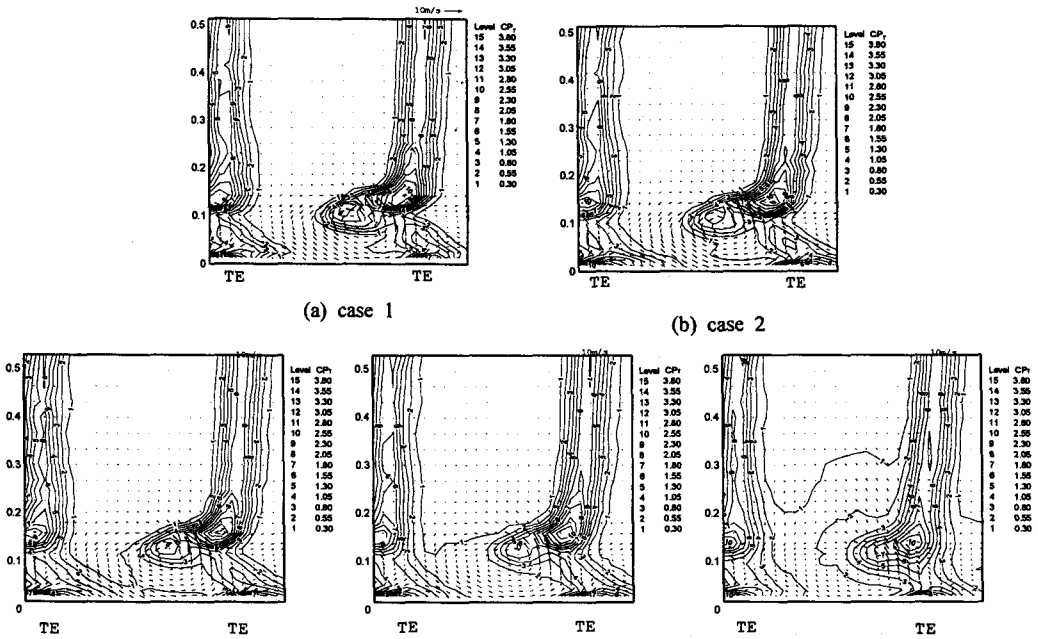
Fig.3 Secondary flow field and Cpt contour at plane 9 for all cases without fence

두께의 각각 1/3과 1/6이 12mm로, 일정한 높이의 펜스인 12mm 펜스 같다.

3.1 입구 경계층 두께가 이차유동 및 손실에 미치는 영향

Fig.3과 Fig.4에서 입구 경계층 두께가 두꺼워질수록 손실영역이 증가하고 통로와류의 와도가 약해지는 것을 볼 수 있다. 그러나 입구 경계층 두께가 상대적으로 매우 두꺼운 case 5를 제외한 나머지 네 경우는 통로와류와 이차손실의 중심이 거의 입구 경계층 두께에 영향을 받지 않고 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

Fig.5와 Fig.6은 피치방향 질량평균 전압손실계수와 피치방향 질량평균 유동회전각이다. Fig.5의 두 최대값은 각각 끝벽과의 점성과 통로와류, 뒷전와류등에 의해 나타나는 것이다. Fig.6에서는 경계층 두께가 두꺼워질수록 최대 오버터닝과 최대 언더터닝의 차이가 줄어들어 이차유동이 약해지는 것을 볼 수 있다. Fig.5와 Fig.6 모두, 최대값은 경계층 두께에 영향을 받고 있으나 Fig.5의 미드스팬쪽의 최대손실값이나 Fig.6의 최대 언더터닝 모두 경계층 두께와 무관하게 거의 일정한 위치에 있다. Fig.3~6의 실험결과를 통해 이차유동 및 손실의 위치, 즉 통로와류의 위치는 입구 경계층 두께에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.



(a) case 1 (b) case 2

(c) case 3 (d) case 4 (e) case 5

Fig.4 Secondary flow field and Cpt contour at plane 11 without fence

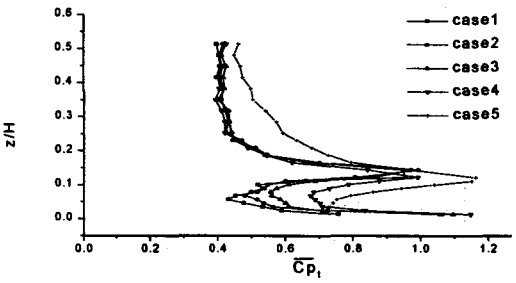


Fig.5 Pitchwise averaged Cp_t at plane 11

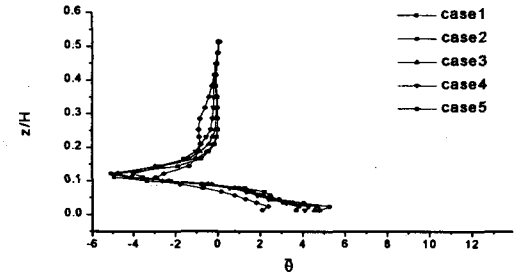


Fig.6 Pitchwise averaged turning angle at plane11

3.2 각 경계층 두께에 대한 적절한 높이의 경계층 펜스 결정

본 실험에서는 각 입구 경계층 두께 조건에 대해 11번 평면에서 측정한 전체 손실을 이용하여 펜스의 성능을 평가하여 적절한 높이의 팬스를 결정하였다.(결과는 지면관계상 case4에 국한하였다) Fig.7은 case 4에서 δ /6, δ /3, δ /2, 3가지 경계층 펜스를 사용한 결과이다 이 경우 12mm 펜스를 δ /6인 경우로 사용했기 때문에 3가지 펜스 조건을 사용하였다.

(a)에서 펜스에 의해 횡단류가 차단되어 통로와류가 통로의 압력면 쪽에 갇혀있으며 펜스에 의한 부가손실인 펜스와류와 펜스 코너와류 역시 확인할 수 있다.

(b)에서는 통로의 흡입면 쪽에 통로와류와 반대방향으로 회전하는 유동이 보이며 이 회전유동이 미드스팬 쪽으로 상승하면서 압력면 쪽으로 진행하는 유동을 만들고 있다.

(c)는 펜스가 적절한 팬스보다 높은 경우로 통로의 압력면 쪽에는 펜스근방에 강한 상승류가 보이며 통로 흡입면 쪽에는 통로와류와 반대되는 회전유동이 강하게 발달하여 끝벽 근처의 유동을 스팬중앙 쪽으로 빨아들이고 있다. 펜스와류는 뒷전와류 위에 나타난다.

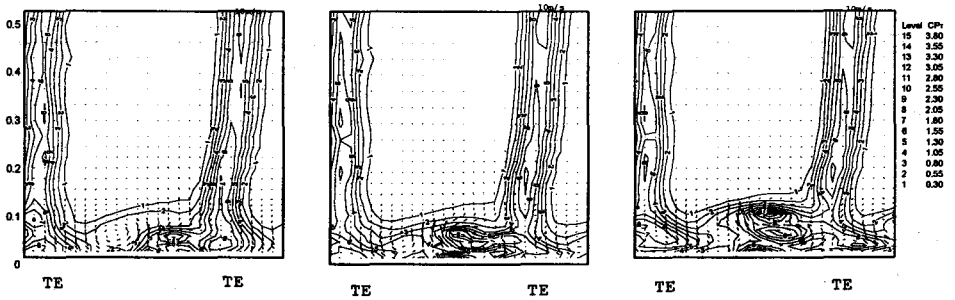
다른 입구 경계층 두께 조건에서도 일정한 높이의 펜스를 사용했을 경우의 이차유동과 손실분포는 모두 비슷한 경향을 보였으며 펜스가 적절한 펜스보다 낮으면 압력면에서 흡입면으로 횡단류가 넘어왔으며 높으면 펜스주위에 강한 상승류가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

Fig.8은 피치방향 질량평균 전압손실계수가 펜스의 높이변화에 따라 어떤 영향을 받는가를 보여주고 있다. 펜스를 사용하게 되면 미드스팬 쪽의 최대손실은 그 값이 작아지면서 끝벽쪽으로 이동하는 반면 끝벽에 설치한 팬스에 의한 부가손실이 증가하게 된다. 적절한 펜스는 이러한 미드스팬쪽의 손실을 최대로 감소시키면서 팬스에 의한 부가손실을 최소로 하는 높이를 갖는다.

Fig.9는 피치방향 질량평균 유동편이각으로 펜스를 사용하게 되면 이차유동이 급격히 감소한다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig.10에서 적절한 높이의 경계층 펜스를 결정하기 위해서 11번 평면에서 측정한 평면평균 전압손실계수와 평면평균 이차운동에너지의 합인 평면평균 전체손실계수를 볼 수 있다.

실험결과 적절한 펜스의 높이는 입구 경계층 두께에 영향을 받는 경우와 영향을 받지 않고 일



(a) δ /6(=12mm) (H_f/H= 0.026) (b) δ /3 (H_f/H= 0.05) (c) δ /2 (H_f/H= 0.076)

Fig.7 Secondary flow field and Cpt contour of case 4 for all fence conditions

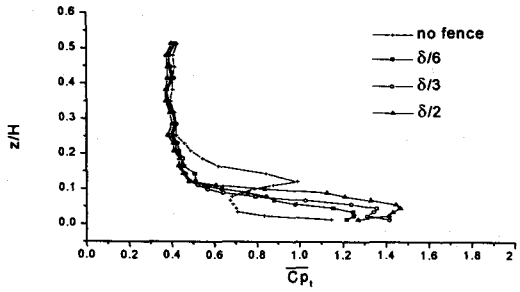


Fig.8 Pitchwise averaged Cp_t of case 4 at plane11

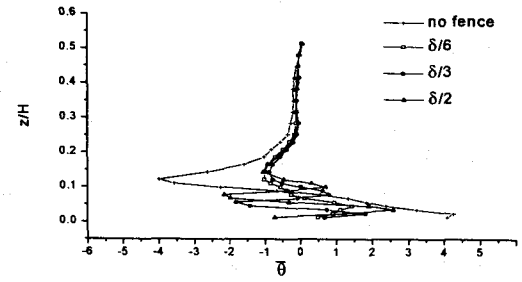


Fig.9 Pitchwise averaged turning angle of case 4 at plane 11

정한 경우, 두 가지로 나타났다. 입구 경계층 두께에 영향을 받지 않는 경우란, 통로와류를 조절하는 것이 주된 목적인 경계층 펜스에 대해, 통로와류의 위치가 입구 경계층 두께 변화와 거의 무관하게 일정하므로 펜스의 높이 역시 일정하게 유지되는 경우를 말한다. 이 경우 적절한 펜스의 높이는 통로와류의 위치와 함께 캐스케이드의 형상이나 유동조건 등에 의해 결정되는 것으로 생각된다. 입구 경계층 두께에 영향을 받는 경우란 형상이나 유동조건 등에 의해 결정된 펜스가 발생시키는 부가손실이, 얇은 입구 경계층에 의해 발생하는 펜스가 없는 경우의 손실보다 상대적으로 커서 전체손실을 증가시키는 경우를 말한다. 이 경우 적절한 펜스의 높이는 입구 경계층 두께의 1/3로 나타났다.

본 실험에서, 일정한 높이의 적절한 펜스는 12mm를 사용했으며 36mm를 기준으로 이보다 작은 경계층에서는 상대적인 높이의 펜스가, 이보다 큰 경계층에서는 일정한 높이의 펜스가 적절한 펜스로 나타났다. 적절한 펜스를 사용했을 때, 경계층 펜스의 효과(η_f)는 case1에서 case5까지 각각 12.2%, 7.9%, 2.5%, 4.1%, 9.1% 등으로 나타났다.

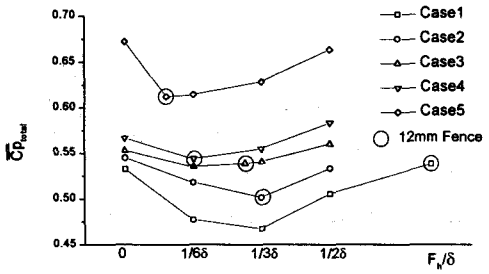


Fig.10 Plane mass averaged $\overline{Cp_{total}}$ at plane 11

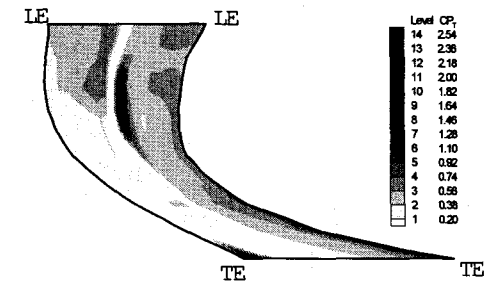


Fig.11 Contour plot of total pressure loss at z/H= 0.013 (case 4, with fence)

Fig.11는 전압손실분포로 펜스를 사용하지 않았을 경우 손실이 주로 흡입면쪽에서 발생하며 펜스를 사용한 경우 펜스의 곡률이 작은 곳에서 큰 전압손실이 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig.12와 13는 통로와류 성장과정을 펜스를 사용하지 않은 경우와 사용한 경우에 대해 추적한 것이다. 측정평면 2,4,6,8,9번의 결과를 사용한 것으로 펜스를 사용하지 않았을 경우 통로와류가 압력면에서 흡입면으로 이동하는 것을 관찰 할 수 있다. 펜스를 사용했을 경우 펜스에 의해 통로와류가 통로의 압력면에 갇혀서 하류로 진행하는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

1) 입구 경계층 두께변화가 이차유동과 이차손실에 미치는 영향

a) 입구 경계층 두께를 5가지로 변화시키면서 통로 내에서 이차유동 및 손실을 측정한 결과 경계층이 두꺼워짐에 따라 통로와류 회전 중심 영역과 이차손실 영역이 확장되는 것으로 나타났다. 그러나 통로와류 회전 중심과 이차손실 중심

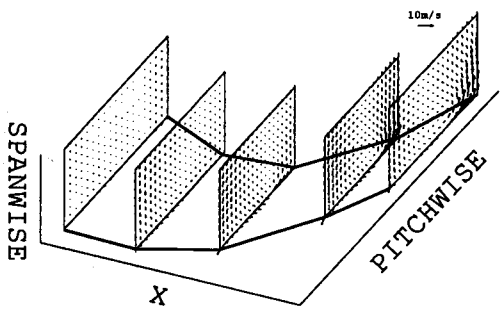


Fig.13 Secondary flow in passage (case 4, without fence)

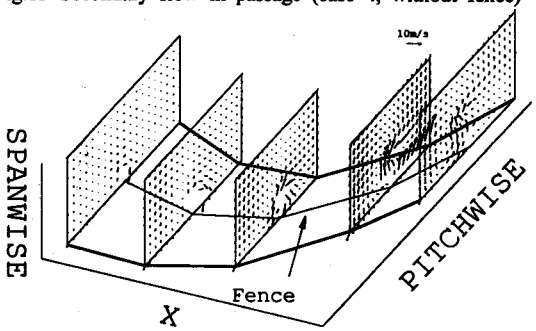


Fig.14 Secondary flow in passage (case 4, with fence)

의 위치는 대체로 일정하게 유지되고 있다.

b) 입구 경계층이 두꺼워짐에 따라 피치평균 손실계수의 최대값은 증가하고 피치평균 유동 회전각의 차이는 감소하는 것을 확인하였다. 최대값의 변화와 달리 최대 손실 위치와 최대 언더터닝의 위치는 대체로 일정하게 유지되었다.

c) a)과 b)의 결과로부터 본 연구에서는 통로와류가 입구 경계층 두께에 의해 그 크기는 영향을 받지만 위치는 거의 영향을 받지 않는다는 결론을 얻었다.

2) 각 경계층 두께에 대한 적절한 높이의 경계층 펜스 결정

a) 입구 경계층 두께와 상관없이, 펜스를 사용할 경우 언더터닝과 오버터닝의 차가 감소하였으며, 펜스의 크기가 클수록 감소효과가 컸고 언더터닝이 발생하는 위치가 끝벽 쪽으로 이동하였다.

b) 통로와류의 위치가 입구 경계층 두께와 무관하게 거의 일정하기 때문에 캐스케이드가 결정되면 적절한 경계층 펜스의 높이도 대체로 일정하게 결정되는 것으로 사료된다. 단 얇은 경계층의 경우 펜스에 의한 부가적 손실이 경계층에 의한 이차손실에 대해 상대적으로 크기 때문에 캐스케이드에 의해 결정되는 대체로 일정한 높이의 적절한 펜스를 사용하지 못하고 기존 실험 결과처럼 입구 경계층 두께를 기준으로 펜스의 높이를 결정하게 된다. 본 연구에서는 입구 경계층 두께가 36mm 이하인 경우 입구 경계층 두께의 1/3이 적절한 펜스의 높이로 제시되었으며, 36mm 이상인 경우 일정한 높이의 12mm 펜스가 적절한 펜스로 나타났다.

c) 펜스의 성능은 작게는 약 2%에서 크게는 약 12%까지 나타났다.

참고문헌

1)Langston, L. S., Nice, M. L., and Hooper, R. M., 1977, "Three - Dimensional Flow Within a Turbine Cascade Passage", ASME Journal of Engineering for Power, Vol.99, pp 21~28

2)Tatsuo KAWAI, Shuji SHINOKI, and Tsutomu ADACHI, 1990, "Visualization Study of Three-Dimensional Flows in a Turbine Cascade Endwall Region", JSME International Journal, Series II, Vol. 33, No. 2, pp 256~264.

3)Tatsuo Kawai, Tsutomu ADACHI and Shuji SHINOKI, "Secondary Flow Control and Loss Reduction in a Turbine Cascade Using Endwall Fences", JSME International Journal, Series II, Vol.32, No.3, pp 375~387

4)Chung, J. T., Simon, T. W. and Buddhavarapu, T., 1991, "Three Dimensional Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine: Application of a Boundary Layer Fence", ASME paper, No. 91-GT-45

5)Chung, J. T. and Simon, T. W., 1993, "Effectiveness of the Gas Turbine Endwall Fences in Secondary Flow Control at Elevated Freestream Turbulence Levels", ASME paper 93-GT-51

6)이용진, 정진택, 양동태, 1997, 경계층 내 장애물이 가스터빈 내 3차원 유동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp 557~562