

## 블레이드 앞전 3차원 형상 변형에 의한 터빈 캐스케이드 내의 이차유동 제어

김정래\* · 문영준† · 정진택\*\*

(2002년 3월 21일 접수, 2002년 9월 9일 심사완료)

### Secondary Flow Control in the Turbine Cascade with the Three-Dimensional Modification of Blade Leading Edge

Jeong-rae Kim, Young-june Moon, and Jin-taek Chung

**Key Words:** Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Secondary Flow Control(이차 유동 제어), Boundary Layer Fence(경계층 펜스), Blade Leading Edge(블레이드 앞전)

#### Abstract

The blade leading edge is modified to control the secondary flow generated in the turbine cascade with fence by intensifying the suction side branch of the horseshoe vortex. The incompressible Navier-Stokes equations are numerically solved with a high Reynolds number  $k-\epsilon$  turbulence closure model for investigating the vortical flows in the turbine cascade. The computational results of total pressure loss coefficients in the wake region are first compared with experiments for validation. The structure and strength of the passage vortex near the suction surface are examined by testing various geometrical parameters of the turbine blade leading edge.

#### 1. 서론

터빈 캐스케이드내의 유동은 블레이드 앞전의 끝벽 부근에서 발생하는 말굽와류와 높은 선회각을 갖는 통로를 따라 발달하는 통로와류 등으로 인해 Fig. 1과 같은 복잡한 3차원 유동구조를 갖는다. 이러한 3차원 유동은 이차유동으로 인한 추가적 공력손실을 유발할 뿐 아니라 벽면 경계층을 교란하여 벽면에서의 열전달을 국소적으로 높이는 역할을 하는 등, 터빈의 성능 및 효율을 낮추는 요인으로 작용하고 있어, 이를 억제하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다.<sup>(1-8)</sup>

Kawai 등<sup>(4,5)</sup>은 캐스케이드 통로내 끝벽 중앙에

경계층 펜스를 설치하여, 횡단류를 직접적으로 차단하고 통로와류가 더 이상 발달하지 못하도록 저지함으로써, 후류에서의 이차유동에 의한 공력손실이 감소함을 실험을 통해 확인하였다. 그러나 펜스의 설치로 인해, 펜스에 의한 경계층 손실이 추가됨과 함께 펜스와 블레이드 흡입면 사이의 통로에서 와류가 추가로 발생하여 이로 인한 추가적인 이차유동 손실이 발생함을 보고하였다.

한편, 이차유동을 제어하기 위한 또 하나의 방법으로, Sauer 등<sup>(6,7)</sup>은 블레이드 앞전의 끝벽쪽 형상을 변형하는 방법을 제안하였다. 그는 블레이드 앞전의 흡입면쪽 형상을 두툼하게 하였을 때, 흡입면쪽 말굽와류의 와도가 강화되어 이와 반대방향으로 회전하는 주 통로와류와의 상호작용을 증대시키므로, 주 통로와류가 흡입면으로부터 멀어지고 이로 인한 이차유동 손실의 감소가 이루어짐을 보였다.

본 연구에서는 앞의 Kawai의 연구에서 추가로 발생한 와류의 제어를 위해, 역시 앞에서 설명하였던 Sauer의 블레이드 앞전 끝벽 부근의 형상변형을 통한 이차유동의 제어방법을 전산해석을 통해 적

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
E-mail : yjmoon@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3358 FAX : (02)926-9290

\* 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학과

용해 보고자 하였다. 이러한 시도를 통해, 펜스가 있는 터빈 캐스케이드에서 발생하는 이차유동에 의한 추가적 손실의 감소를 기대함과 동시에, 블레이드의 앞전 형상변형을 통한 와류 제어 메커니즘을 자세히 관찰하고 이해하고자 하였다. 또한, 앞전 형상변형을 다양하게 변화해 봄으로써, 국부적 위치에서의 형상변형이 이차유동에 미치는 영향과 함께 효과적인 와류제어를 위한 형상변형의 방향에 대하여 알아보려고 하였다.

### 2. 수치해석 기법

터빈 캐스케이드내의 유동해석을 위해, 시간중속 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하여 전산해석 하였으며, 점성유동 해석을 위한 난류모델은 표준  $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다. 시간적분에는 외재적 4단계 Runge-Kutta 방법을 사용하였고, 대류항의 계산에는 2차 상류 차분법(2nd order upwind scheme)을 사용하였으며, 집중격자계에서 발생할 수 있는 압력장 떨림 현상을 제거하기 위하여 운동량 선형 보간법(momentum linear interpolation)을 사용하였다. 비정상 전산해석 기법으로는 시간 진행을 2단계로 나누어 정확도를 높이고, MAC기법에서의 압력의 Poisson 방정식을 간략화시킨 SMAC 방법을 사용하였다. 캐스케이드 끝벽 위에 설치된 펜스를 모사하기 위해 다중 격자계를 사용하였고, 이러한 격자계의 연산을 위해 Multi-block 기법을 적용하였다.

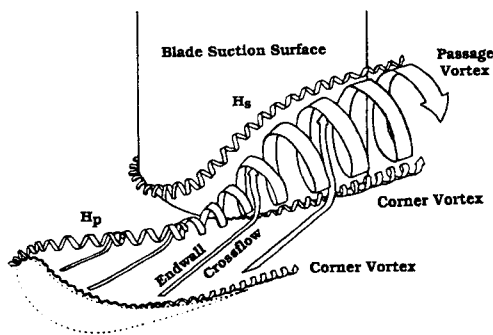


Fig. 1 Vortex system in the turbine cascade (Kawai, 1989)

### 3. 터빈 캐스케이드의 제원과 유동조건

전산해석에 사용된 터빈 캐스케이드의 제원과 유동조건은 이<sup>(8)</sup>의 실험에서의 것과 같은 것으로, 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 여기서, Table 2의 경계층 두께는 블레이드 앞전으로부터 유입방향으로 -0.4m 떨어진 위치에서 측정된 값이다. Fig. 2는 캐스케이드의 단면 형상과 이에 적용된 이차원 좌표계를 나타낸다. 경계층 펜스는 캠버라인의 형상과 길이를 가지고 끝벽 중앙에 위치하며, 유동방향에 수직인 단면에서의 폭은 5mm이고, 높이는 경계층 두께의 1/3인 8mm이다.

Table 1 Cascade design data

Blade chord ( $C$ )	230 mm
Axial chord / chord ( $C_{ax} / C$ )	0.704
Pitch / chord ( $P / C$ )	0.75
Aspect ration ( $H / C$ )	2.0
Blade inlet angle ( $\beta_1$ )	$-35^\circ$
Blade exit angle ( $\beta_2$ )	$72.5^\circ$
Turning angle	$107.5^\circ$

Table 2 Flow condition

Reynolds number ( $Re_C$ )	190,000
Boundary layer thickness ( $\delta$ )	24 mm
Displacement thickness ( $\delta^*$ )	3.20 mm
Momentum thickness ( $\delta^{**}$ )	2.47 mm
Shape factor ( $H_{sf} = \delta^* / \delta^{**}$ )	1.29
Turbulent intensity	0.7 %

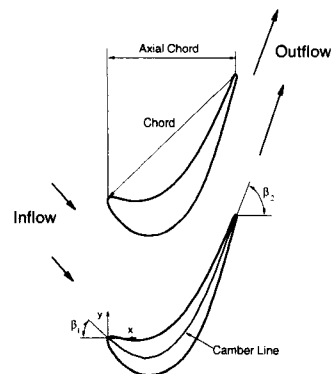


Fig. 2 Cascade geometry and coordinate system

4. 결과 및 고찰

4.1 실험과의 비교 검증

Fig. 3은  $x=1.25 C_{ax}$  평면상의 단면을 지나는 유동에 대해 질량평균된 전체압력손실계수를 나타낸 것으로, 펜스가 없는 경우와 경계층 두께의 1/3 높이의 펜스가 있는 경우에 대하여 각각 전산해석 결과를 이<sup>(8)</sup>의 실험 결과와 비교한 그림이다. 여기서, 전체압력손실계수는 다음과 같이 정의된다.

$$Cp_{total} = Cp_t + Cp_{sk} \quad (1)$$

이 때,  $Cp_t$ 와  $Cp_{sk}$ 는 각각 전압손실계수와 이차 유동에 의한 손실계수로 다음과 같이 정의된다.

$$Cp_t = \frac{P_{t_0} - P_t}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2} \quad (2)$$

$$Cp_{sk} = \frac{\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{1}{2} \rho u^2}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2} = \frac{v^2 + u^2}{U_{\infty}^2} \quad (3)$$

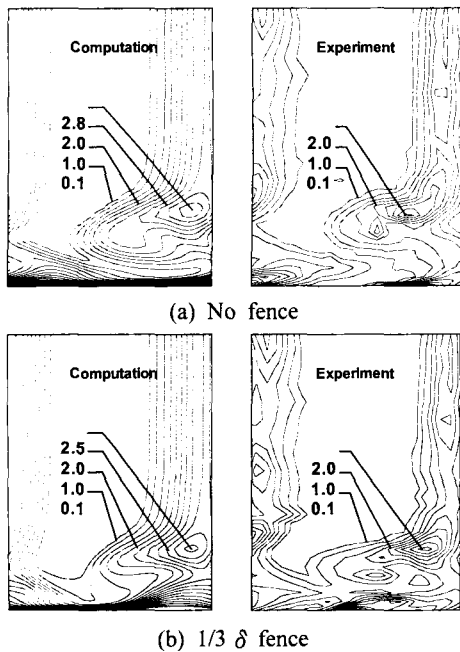


Fig. 3 Comparison of total pressure loss coefficient contours at  $x=1.25 C_{ax}$

여기서,  $P_{t_0}$ 는 입구유동의 전압이고,  $P_t$ 는 측정점에서의 전압이다. 이차유동에 의한 손실영역의 크기와 위치 등이 거의 일치하고 있는 것으로부터, 계산 결과가 캐스케이드내의 유동현상을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 앞전 형상변형에 의한 이차유동 제어

블레이드 앞전의 형상변형의 정도와 범위를 규정하기 위해, Fig. 4와 같이 블레이드 앞전의 단면 형상과 스패ن형상에 대하여 형상변수를 정의하였다. 여기서, 변형된 블레이드의 형상을 결정하는 두께 profile은 삼각함수를 기본으로 정의된다. 본 연구에서는 앞전의 형상 변형시 항상 두툼하도록 하기 위해 Fig. 4(a)의 점선에 해당하는 기본 두께를 더하였고, 흡입면 말굽와류의 신장을 많게 하기 위해 흡입면 형상이 압력면 형상보다 더 두툼하도록 흡입면에만 추가 두께를 더하여 변형하였다. 앞전 형상변형에 의한 영향을 알아보기 위한 형상변형의 선정은, Sauer의 연구를 참조하여 흡입면에서 말굽와류가 자연스럽게 신장하는 형상이 되도록 하였고, 이에 대한 형상변수 값들을 Table 3에 나타내었다. 여기서, c와 d의 값은 각각 흡입면과 압력면의 블레이드 변형구간으로 블레이드 앞전으로부터의 x축방향 거리이다.

Fig. 5는 펜스가 있는 터빈 캐스케이드에서 앞전 형상이 변형된 경우의 유동을 전산해석하기 위해

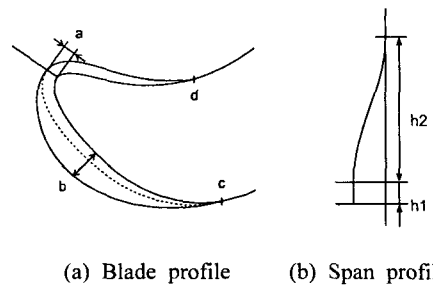


Fig. 4 Geometrical parameters of the blade leading edge

Table 3 Modification parameters

$\times C_{ax}$				$\times \delta$	
a	b	c	d	h1	h2
0.02	0.08	0.60	0.32	0.5	2.0

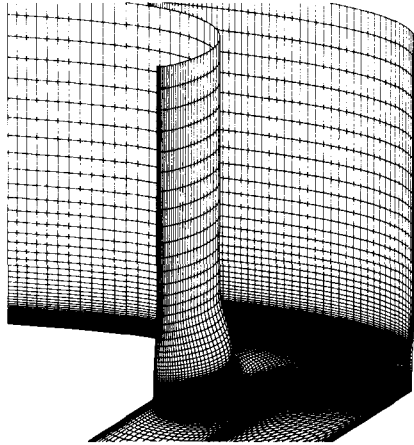


Fig. 5 Meshes with leading edge modification (1/3  $\delta$ -fence,  $160 \times 60 \times 48$ )

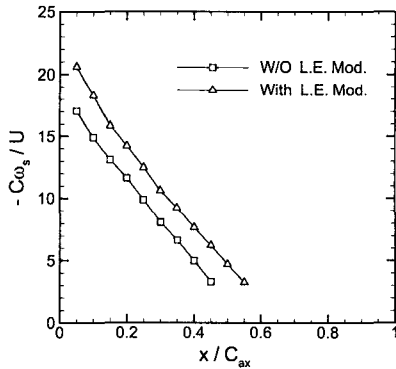


Fig. 6 Streamwise vorticity distribution (suction side leg of the horseshoe vortex)

Fig. 5는 펜스가 있는 터빈 캐스케이드에서 앞전 형상이 변형된 경우의 유동을 전산해석하기 위해 만든 계산 격자이다. 펜스를 모사하기 위해 17개의 다중 격자계를 사용하였고, 펜스 주위를 포함한 벽면 경계층에는 격자를 밀집시켰다.

계산 결과로부터 얻어낸 캐스케이드 통로내에서의 흡입면 말굽와류의 축방향 위치에 따른 중심와도의 분포는 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 수직축에서  $\omega_3$ 는 유선방향 와도이고,  $U$ 는 자유유동장 속도이다. 앞전의 형상을 변형한 경우에서 흡입면 말굽와류의 중심와도가 보다 강화되고 와류가 더욱 길어진 것을 알 수 있다.

펜스가 설치된 터빈 캐스케이드 내에서 발생하

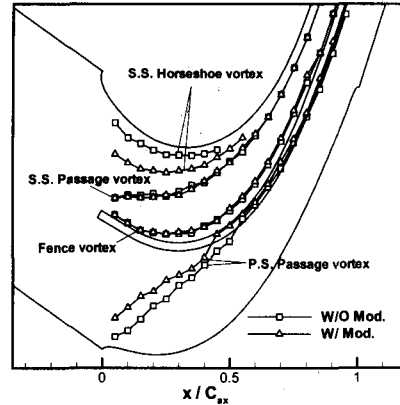
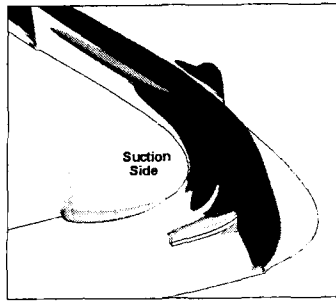


Fig. 7 Traces of vortices in the cascade flow passage

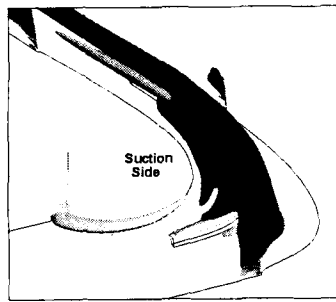
는 주요 와류성분들의 중심위치를 추적하여 그 이동경로를 Fig. 7에 나타내었다. 흡입면 말굽와류가 피치방향으로의 강한 압력구배로 인해 흡입면 벽면에 붙어 발달하므로, 앞전의 형상을 따라 와류의 중심이 이동하고 있는 것을 볼 수 있다. 한편, 흡입면 통로와류는 형상변형을 해도 중심의 위치가 거의 변하지 않는데, 이는 펜스와 펜스와류에 의해 흡입면 통로와류의 이동이 차단되기 때문이다. 그러므로 형상변형을 한 경우, 형상변형에 의해 흡입면 말굽와류가 강화된 데다 흡입면 말굽와류와 흡입면 통로와류사이의 거리가 더욱 가까워지게 되므로, 두 와류간의 상쇄 및 배척 작용으로 인해 흡입면 통로와류의 발달이 억제될 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 8은 펜스가 있는 터빈 캐스케이드에서 블레이드 앞전의 형상변형을 한 경우와 하지 않은 경우의 주 유동방향 와류의 등와도면을 각각 나타낸 그림이다. 그림에서 옅은 색은 시계방향, 진한 색은 반시계방향의 와류를 의미한다. 두 그림을 비교해보면, 앞에서 살펴본 바와 같이 앞전 형상을 변형하였을 때 흡입면쪽 말굽와류가 더 크고 길어진 것을 볼 수 있고, 반면에 펜스와 블레이드 흡입면 사이의 통로에 위치하는 흡입면 통로와류는 상대적으로 위축되어 있는 모습을 관찰할 수 있다.

유선방향 와도의 3차원 등표면도에서 관찰하기 어려운 각 와류들의 자세한 형태와 위치, 크기 및 강도를 알아보기 위해, 다양한 평면에서의 유선방향 와류의 와도선도를 앞전 형상변형의 유무에 대

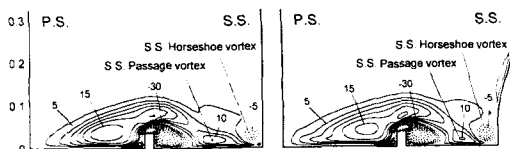


(a) Without L.E. modification

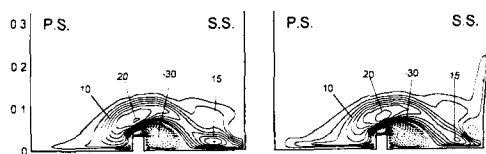


(b) With L.E. modification

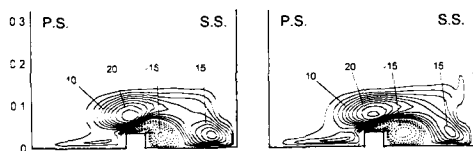
Fig. 8 Iso-surfaces of the non-dimensional streamwise vorticity ( $C\omega_s/U = -10, 10$ ) along the cascade flow passage



(a)  $x = 0.3 C_{ax}$



(b)  $x = 0.5 C_{ax}$



(c)  $x = 0.7 C_{ax}$

Fig. 9 Streamwise vorticity contours (left: w/o mod. right: with mod.)

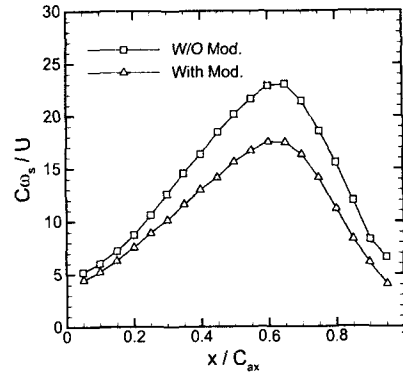


Fig. 10 Streamwise vorticity distribution (passage vortex between the suction side wall and the fence)

하여 Fig. 9에서 비교해 보았다. 앞전으로부터  $0.3 C_{ax}$  만큼 떨어진 평면에서의 그림인 Fig. 9(a)에서, 흡입면 모서리에 위치하고 있는 흡입면 말굽와류가 형상변형을 한 경우에 더 크게 존재하며, 옆에 위치한 흡입면 통로와류와의 거리 또한 짧아진 것을 볼 수 있다. 그로 인해, 하류 지역인 Fig.9 (b), (c)에서 형상변형을 한 경우에 흡입면 통로와류가 위축된 채 중심강도가 상대적으로 약해져 있는 것을 볼 수 있다.

캐스케이드 통로내에서의 흡입면 통로와류의 중심강도 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 블레이드 앞전의 형상변형을 통해 결과적으로 흡입면 통로와류가 상당히 약화된 것을 확인할 수 있다.

4.3 형상변형의 변화가 유동에 미치는 영향

앞전 형상의 변화에 따른 유동의 변화양상을 알아보고, 이를 통해 효과적인 와류제어를 위한 형상변형의 방향에 대해 알아보려고 하였다. 다양한 형상변형의 영향을 알아보기 위해, Fig. 11과 같이 형상변형의 일부 위치에 대하여 국부적으로 변화하여 이를 케이스별로 구분하고 각각에 대해 전산해석을 수행하였다. 이 때, 각 케이스에서 중간치 변형에 해당하는 A2, B2, C2 및 H2는 앞 절에서 선정한 형상으로 서로 같다. 각 형상에 대한 형상변수는 Table 4와 같다.

Fig. 12은 캐스케이드 통로내에서의 통로와류의 중심강도 분포를 각 케이스별로 나타낸 것이다. 형상변형의 변화에 따른 흡입면 통로와류의 강도변

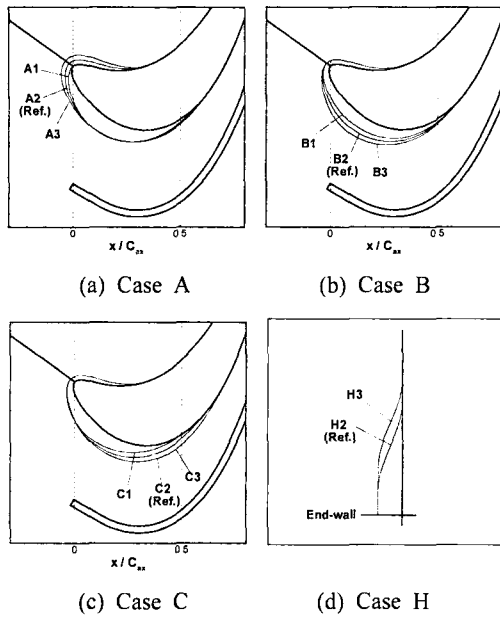


Fig. 11 Modification test cases

Table 4 Geometry modification parameters of the leading edge near the endwall

	$\times C_{ax}$				$\times \delta$	
	a	b	c	d	h1	h2
Ref.	0.02	0.08	0.60	0.32	0.5	2.0
A1	0.00	0.08	0.60		0.5	
A3	0.04	0.08	0.60		0.5	
B1	0.02	0.06	0.60		0.5	
B3	0.02	0.10	0.60		0.5	
C1	0.02	0.08	0.50		0.5	
C3	0.02	0.08	0.70		0.5	
H3	0.02	0.08	0.60		1.0	

화가 Case B와 Case C에서 상대적으로 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 형상변형의 변화에 따른 흡입면 말굽와류의 강도의 차이보다는 이동경로의 변화에 의한 흡입면 통로와류와의 거리의 변화가 와류간의 상호작용에 더욱 민감한 영향을 주었기 때문이다.

흡입면 통로와류를 가장 많이 약화시킨 경우는 B3로써, 형상변형을 하지 않은 경우에 비해 흡입면 통로와류의 중심와도가 최대인 지점에서 29.7% 감소하였으며, 이 때의 와도 등표면도는 Fig. 13과 같다.

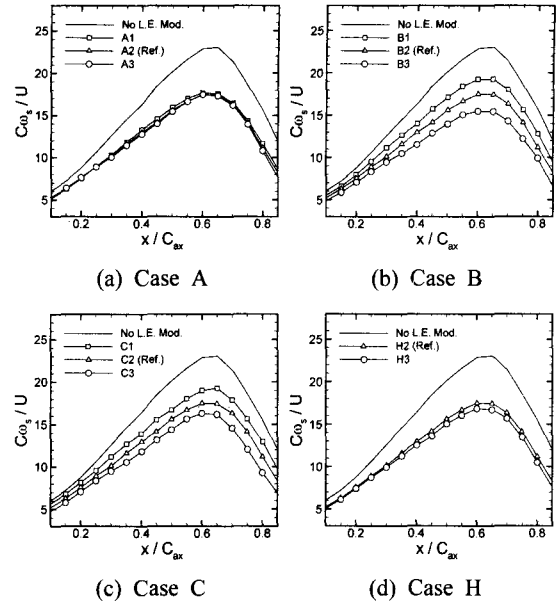


Fig. 12 Streamwise vorticity distribution (passage vortex between the suction side wall and fence)

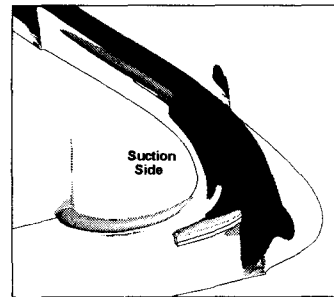


Fig. 13 Iso-surfaces of the non-dimensional streamwise vorticity ( $C_{\omega_s}/U = -10, 10$ ) along the cascade flow passage (Case B3)

### 5. 결론

터빈 캐스케이드내의 경계층 펜스에 의해 생성되는 이차유동을 제어하기 위한 시도로, 블레이드 앞전의 형상을 변형하여 전산해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 블레이드 앞전의 형상변형에 의해, 흡입면 말굽와류의 중심와도가 강해지고 동시에 흡입면 말굽와류와 흡입면 통로와류 사이의 거리가 근접

해짐을 관찰하였다. 이로 인해 두 와류간의 상호상쇄 및 배척 작용이 증대되고 결과적으로 흡입면 통로와류가 상대적으로 약해짐을 확인하였다.

(2) 앞전 형상변형을 국부적으로 다양하게 변화해 봄으로써, 본 캐스케이드 형상에 대해서는 흡입면 말굽와류의 강화보다는 흡입면 말굽와류의 흡입면 통로와류로의 근접을 유도하는 형상이 와류 제어에 더 효과적임을 확인하였다.

### 참고문헌

- (1) Koh, Sung Ryong and Moon, Young J., 1997, "Computational Analysis of Turbulent Flows in the Turbine Cascade with Fence," in the *Proceedings (B) of KSME Fall Meeting*, pp. 582~589.
- (2) Moon, Y. J., and Koh, S. R., 2001, "Counter-Rotating Streamwise Vortex Formation in the Turbine Cascade with Endwall Fence," *Computers & Fluids*, Vol. 30, pp. 473~490.
- (3) Chung, J. T., 1992, "Flow and Heat Transfer Experiments in the Turbine Airfoil/Endwall Region," Ph.D. Thesis. Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN.
- (4) Kawai, T., Adachi, T., and Shinoki, S., 1989, "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.
- (5) Kawai, T., Adachi, T., and Shinoki, S., 1990, "Visualization Study of Three Dimensional Flow in a Turbine Cascade Endwall Region," *JSME International Journal, Series II*, Vol. 33, No. 2, pp. 256~264.
- (6) Sauer, H., and Wolf, H., 1997, "Influencing the Secondary Flow in Turbine Cascades by the Modification of the Blade Leading Edge," 2nd European Conference on Turbomachinery, Antwerpen.
- (7) Sauer, H., Müller, R., and Vogeler, K., 2001, "Reduction of Secondary Flow Losses in Turbine Cascades by Leading Edge Modifications at the Endwall," *Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 207~213.
- (8) Lee, Y. J., 1997, "Experimental Study on Effects of the Boundary Layer Fence on the Three-dimensional Flow in Gas Turbines," M.S. Thesis, Korea University, Seoul, Korea.