

## 3차원 유동 해석을 이용한 증기 터빈 설계

권기범\* 김영상\* 조상현\* 임홍식\* 나운학\* 김현민\*

### Steam Turbine Design Using 3-Dimensional Flow Analysis

G.B. Kwon, Y.S. Kim, S.H. Cho, H.S. Im, U.H. Nah and H.M. Kim

**Key Words** : Nozzle(노즐), Bucket(버킷), CFD(전산유체역학), Secondary Flow Loss(이차유동손실)

#### ABSTRACT

High efficient steam turbine stage has been developed with the help of the 3-dimensional design tool. In this stage design, the compound leaned stacking method has been adopted to reduce the secondary flow loss of a turbine passage and to increase the performance efficiency for the turbine nozzles. And the turbine buckets have been designed with the quasi-3-dimensional turbomachinery blade design method. To verify the stage design, therefore, the 3-dimensional numerical simulation of a steam turbine stage was conducted. In this design, CFX-TASCflow was employed to predict the turbulent flow of a steam turbine stage. The analysis was performed in parallel calculation using the HP N4000 8 CPUs machine. The result showed CFX-TASCflow could be used as the 3-dimensional flow analysis tool of steam turbine design.

#### 1. 서 론

현재 증기 터빈 및 가스 터빈 업체에서는 고효율의 터빈을 설계하기 위하여 advanced vortex stage<sup>1)</sup>라는 새로운 설계 개념을 개발하였다. 이러한 설계 개념은 이전에 사용된 conventional stage에서 성능이 개선 및 향상된 것이다. 터빈 설계 개념의 발달사는 1950년대부터 free vortex design으로부터 시작된다. 이는 반경방향의 속도 성분이 없고, 반경과 접선방향 속도의 곱은 항상 일정하다는 가정을 포함하고 있다. 이러한 설계 개념은 컴퓨터의 발달과  $Wu^2)$ 에 의하여 유동 해석 방법이 정립됨에 따라 다양한 실험이 가능하게 된다. 이러한 다양한 실험 결과 나타난 새로운 설계 개념들이 등장하고 이를 controlled vortex design이라 부른다. 이 후 현대로 오면서 3차원 전산유체역학 프로그램들의 발달로 인하여 정확한 유동 해석이 가능함에 따라 3차원 설계도구들이 발달하게 된다.

전산유체역학의 발달과 성능 향상을 시키기

위한 노력으로 새로운 설계 개념이 등장하게 되는데 이를 advanced vortex design이라 부른다. 이는 3차원 전산유체역학 프로그램과 3차원 설계도구를 이용하여 설계된 것으로 1 단(stage)의 형상은 Fig. 1과 같다.

이러한 stage 형상을 살펴보면 nozzle(혹은 stator) 형상이 Fig. 1과 같이 휘어져 있는 것을 볼 수 있다.

이렇게 휘어져 있는 stacking 방법을 compound leaned stacking(혹은 bowed stacking)이라고 부른다. Compound leaned stacking 방법은 증기 터빈 유로에서 발생하는 이차 유동 손실(secondary flow loss)<sup>3)</sup>을 감소시키기 위하여 고안된 것이다<sup>4)</sup>. 여기서 이차 유동은 Fig. 2와 같이 유체 점성에 의하여 벽면에서 발생하는 것으로 특히 증기 터빈과 같이 압력면(pressure surface)과 흡입면(suction surface)의 압력차가 심할 경우 이차 유동의 강도가 커서 주유동에 손실을 발생시킨다.

이렇게 휘어져 있는 stacking 방법을 compound leaned stacking(혹은 bowed stacking)이라고 부른다.

\* 한국중공업(주) 기술연구원

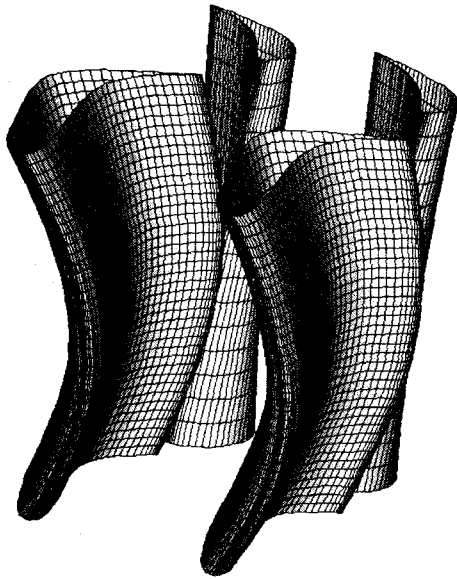


Fig. 1 A advanced vortex stage turbine

Compound leaned stacking 방법은 증기 터빈 유로에서 발생하는 이차유동손실(secondary flow loss)<sup>3)</sup>을 감소시키기 위하여 고안된 것이다<sup>4)</sup>. 여기서 이차 유동은 Fig. 2 와 같이 유체 점성에 의하여 벽면에서 발생하는 것으로 특히 증기 터빈과 같이 압력면 (pressure surface)과 흡입면(suction surface)의 압력차가 심할 경우 이차 유동의 강도가 커서 주유동에 손실을 발생시킨다. 또한 advanced vortex design 에서 bucket(혹은 rotor)은 compound leaned nozzle 의 출구 유동 특성에 적합하게 각 단의 형상을 준 3 차원 설계도로 설계를 한다. 이는 각 단의 nozzle 출구 유동 특성이 서로 다르므로 인하여 고성능 터빈을 설계하기 위해서는 각 단마다 최대의 일이 발생할 수 있는 blade 형상을 설계하기 때문이다. 이와 같은 3 차원 설계 도구를 이용하여 설계된 nozzle 과 bucket 으로 고효율의 advanced vortex stage 터빈을 구성하게 된다.

본 연구에서는 상기에서 언급한 바 있는 advanced vortex stage 의 유동 특성을 3 차원 유동 해석으로 이해하고자 한다. Advanced vortex stage 의 유동 특성을 이해하기 위해 사용된 3 차원 상용 전산유체역학 프로그램은 CFX-TASCflow 이다.

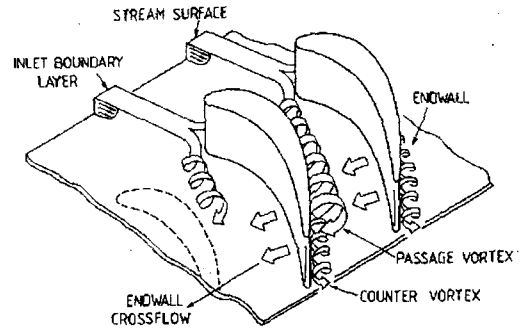
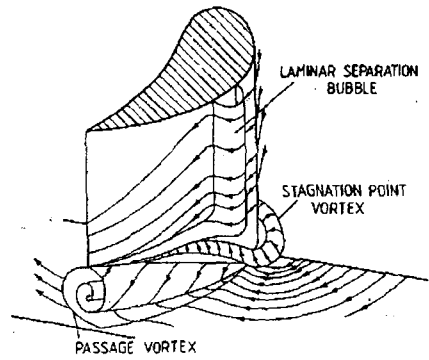


Fig. 2 Secondary flow models by Klein and Langston<sup>3)</sup>

## 2. 유동 해석 조건

### 2.1 지배 방정식 및 계산방법

증기 터빈의 내부 유동을 지배하는 방정식은 3차원 정상상태 압축성 난류 Navier-Stokes 방정식이다. 이를 tensor form으로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) + S_{ui} \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) - \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H) = -\frac{\partial}{\partial x_j} (q_j + \overline{\rho u_j h'})$$

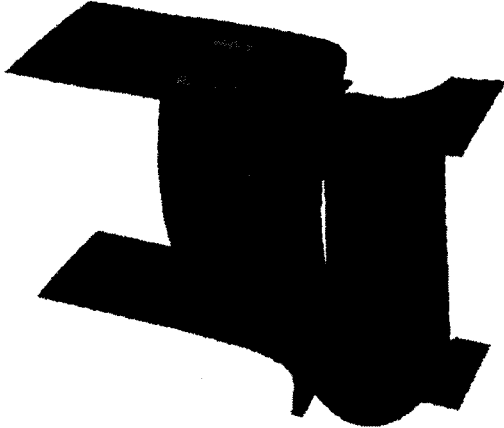


Fig. 3 Schematic view of a advanced vortex stage

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \{u_i(\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) + \overline{u_i \tau_{ij}}\} + S_E \quad (3)$$

여기서  $\rho, u_i, P, \tau_{ij}, H, q$  및  $S$  는 각각 밀도, 속도 성분, 압력, viscous stress tensor, 전엔탈피, 열전달률 및 source term을 의미한다. 상기의 방정식에서 Reynolds stress Term( $\overline{\rho u_i u_j}$ ), turbulent energy flux term( $\overline{\rho u_i h}$ ) 및 fluctuating viscous work term( $\overline{u_i \tau_{ij}}$ )들은 아래와 같이 표현되어 전체 방정식계는 완결된다.

#### The Reynolds Stress Term

$$\overline{\rho u_i u_j} = -\mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \delta_{ij} \quad (4)$$

#### The Turbulent Energy Term

$$\overline{\rho u_i h} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (5)$$

#### The Fluctuating Viscous Work Term for homogeneous isotropic turbulence

$$\frac{\partial(\overline{u_i \tau_{ij}})}{\partial x_j} \approx \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 난류 운동에너지,  $Pr_t$ 는 난류 Prandtl No.,  $\mu_t$ 는 난류 점성을 의미한다. 난류 점성은 아래와 같이 표현된다.

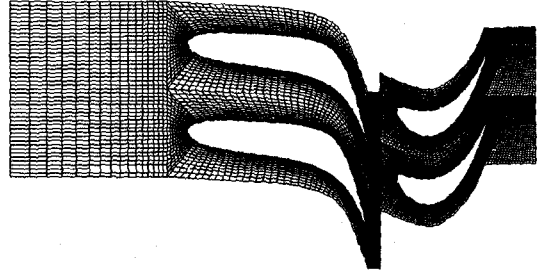


Fig. 4 Surface grid generation of a advanced vortex stage at 50% span

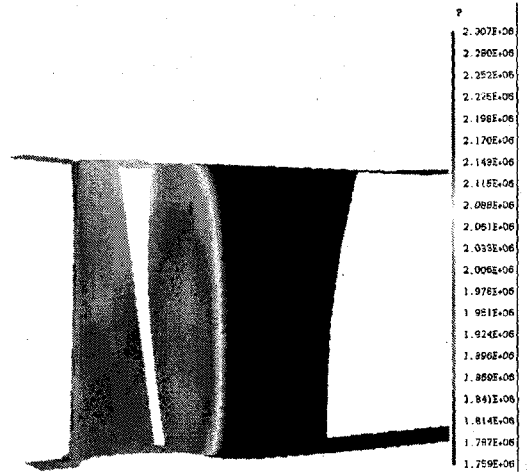


Fig. 5 Static pressure contours on the suction surface

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

여기서  $\varepsilon$ 는 난류에너지 소산,  $C_\mu$ 는 모델 상수이다.

상기의 식들에서 나타난 바와 같이 CFX-TASCflow의 난류 모델은 기본적으로 난류 운동에너지  $k$ 와 난류에너지 소산  $\varepsilon$ 으로 표현되는 two-equation model을 사용한다. 이외에도 Kato-Launder production term을 포함한 two-equation model, k- $\omega$  two-equation model과 2nd Closure model인 Reynolds Stress Model을 사용한다. 이 중에서 기본적인 k- $\varepsilon$  two-equation model에 대한 수송 방정식은 아래와 같다.

난류 운동에너지 수송 방정식

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) \quad (8)$$

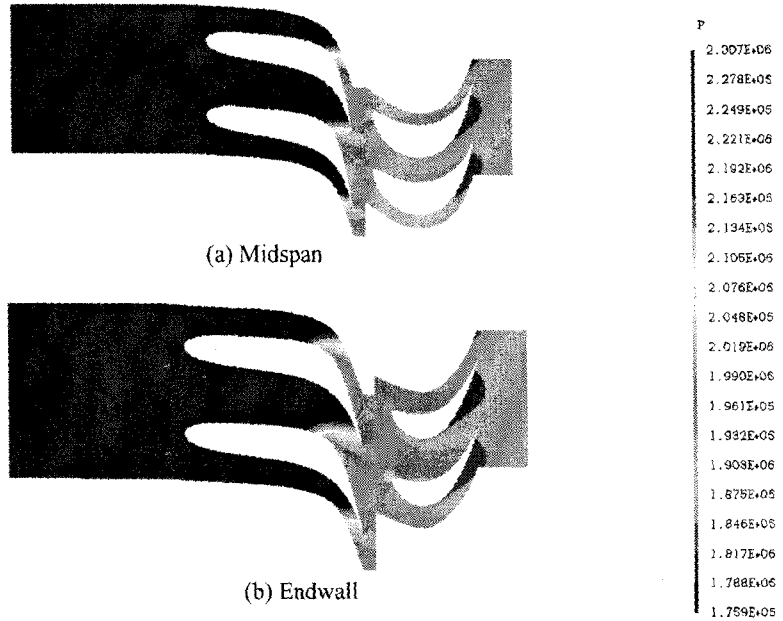


Fig. 6 static pressure contours on the midspan and the endwall

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon$$

난류에너지 소산 수송 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{e1} P_k - \rho \epsilon C_{e2}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\Gamma$ ,  $P_k$  및  $C$ 는 각각 diffusion 계수, 난류운동에너지의 production rate 및 모델 상수를 의미한다.

CFX-TASCflow에서 사용하는 discretization 방법은 형상을 표현하는 부분에 유한 요소(finite element) 접근 방법을 사용한 유한 체적법(finite volume method)을 사용하고, pressure-velocity coupling으로 계산을 수행한다.

## 2.2 Blade 형상 및 경계 조건

형상 모델링 및 격자 형성을 위하여 CFX-TASC flow의 preprocessor인 CFX-TurboGrid가 사용되었다. 본 연구에서 사용된 한 단의 형상은 Fig. 3에 나타나 있다.

격자는 60만 nodes의 hexahedral 정렬 격자를 형성시켰다. Blade 내부에서 발생하는 이차

유동을 정확히 예측하기 위하여 각 endwall 및 blade 표면에 격자를 밀집시켰다(Fig. 4 참조).

경계 조건은 endwall면과 blade 표면에는 no slip과 adiabatic, 입구 조건은 전압력, 전엔탈피 및 입구 속도 방향을 지정하였고, 출구 조건은 정압력을 주었다. 이를 제외한 영역은 periodic 경계 조건을 주었다.

Nozzle과 bucket의 접촉면에는 원주평균(circumferential averaging)을 취하는 CFX-TASCflow의 Stage MFR(Multiple Frame of Reference)를 사용하였다. 이 방법은 Dawes code<sup>9)</sup>에 사용되었던 방법으로 반경방향의 변화는 유지하면서 원주 방향에 대하여 평균을 취하고, 질량 유량을 보전하면서 값을 넘겨주는 방법이다. Dawes는 이 부분을 'Mixing Plane'이라 명한 바 있다. 이 방법은 모든 blade를 계산 영역에 두지 않을 뿐만 아니라 현실적인 계산에 문제점이 있는 비정상 상태(unsteady state)를 풀지 않아도 계산 할 수 있는 방법이다. 따라서 경제적이고, 빠른 시간내에 계산 결과를 확인할 수 있으므로 multiple blade row 계산시 가장 많이 사용하는 방법이다.

또한 증기 터빈의 작동 유체는 증기임으로 계산을 정확하게 하기 위하여 증기 조건을 이상 기체라고 가정하지 않고, CFX-TASCflow의 real gas option을 사용하여 실제 기체로 해석을 수행하였다. 이 option은 CFX-TASCflow 내부에

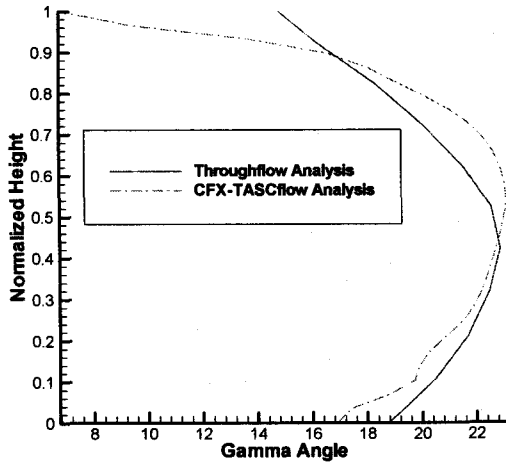


Fig. 7 Comparison of exit flow angle(gamma angle) between Throughflow analysis and CFX-TASCflow analysis

보유하고 있는 증기표를 이용하여 각각 계산점의 온도와 압력에 맞는 증기값 찾아 계산을 수행한다. 따라서 입구부터 출구까지 상태량이 동일한 이상기체와는 달리 정확한 유동 해석이 가능하다.

난류 모델은 Standard k-ε 모델보다 와류를 좀더 정확히 예측할 수 있는 RNG(ReNormalized Group) k-ε 모델을 사용하였다.

계산을 위하여 사용된 기기는 HP N4000으로 8cpu를 사용하여 병렬 연산을 수행하였다.

### 3. 유동 해석 결과 비교

상기와 같은 조건을 이용하여 advanced vortex stage 의 유동장을 계산하였다. 계산 결과 나타난 흡입면의 정압력 분포는 Fig. 5 에 나타나 있다. Compound leaned nozzle 경우 midspan 의 목(throat)에서 큰 영역에 걸쳐서 정압력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 midspan 이 endwall 보다 많은 유량이 흐른다는 것을 의미한다. 또한 compound leaned nozzle 은 span 방향으로 음정압력 구배(negative gradient of static pressure)가 발생됨에 따라 양전압력 구배의 크기가 줄어들게 된 것을 볼 수 있다. 따라서 vortex 의 크기 및 강도는 줄어들게 된다. 일반적으로 horseshoe vortex 강도를 결정하는 요소는 세 가지이다. 이는 벽면 점성에 의한 정체 효과(stagnant effect), 익렬 선단 벽면

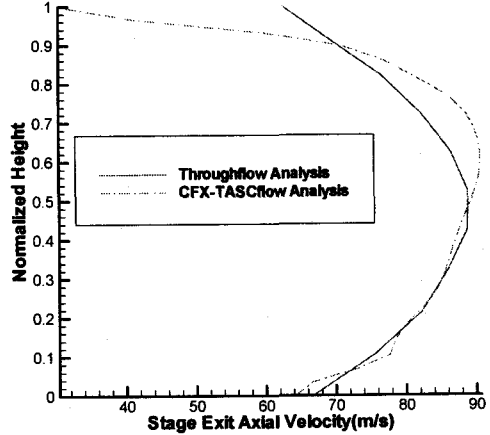


Fig. 8 Comparison of stage exit axial velocity between Through flow analysis and CFX-TASCflow analysis

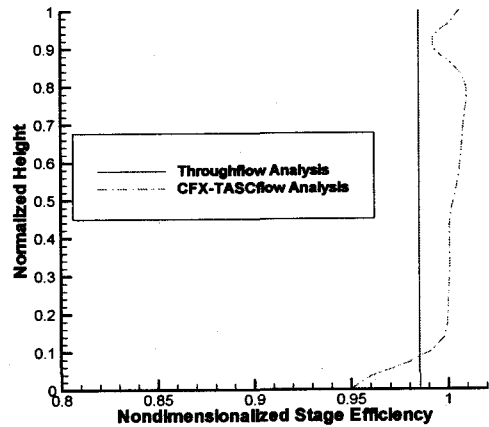


Fig. 9 Comparison of stage efficiency Throughflow analysis and CFX-TASCflow analysis

부근에서 유동방향에 대한 역압력 구배(adverse pressure gradient) 및 익렬 선단 벽면 수직방향으로의 양전압력 구배(positive gradient of stagnant pressure) 이다<sup>4)</sup>. 이러한 세가지 요소의 강도가 약화되면 vortex 의 강도도 약화되어 이차 유동 손실이 감소 된다. 이러한 압력 분포가 compound leaned nozzle 의 흡입면에 나타남으로 이차 유동의 강도가 감소하였다는 것을 알 수 있다.

계산 결과 나타난 compound leaned nozzle 의 endwall 및 midspan 면의 정압력 분포는 Fig. 6 과

같다. Endwall 면과 midspan 면에 나타난 정압력 분포 비교시 endwall 면에서는 최저 압력 영역이 목을 지난 후류 영역에 형성된 것을 볼 수 있다. 이러한 압력 분포는 횡방향 압력 구배를 감소시켜 횡방향 유로 유동의 강도를 약화시킨다. 따라서 endwall 에서 발생하는 이차 유동 손실이 감소함을 알 수 있다.

계산 결과 나타난 bucket 출구 유동각과 throughflow 해석 결과 나타난 bucket 출구 유동각은 Fig. 7 에 나타나 있다. 증기 터빈 한 단을 설계하기 위하여 계산한 결과와 실제 상세 설계후 나타난 결과 비교시 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 최대 출구 유동각의 위치는 각각 0.4 와 0.6 부근에서 나타나고 있다.

계산 결과 나타난 bucket 출구의 축방향 속도와 throughflow 해석 결과 나타난 bucket 출구의 축방향 속도는 Fig. 8 에 나타나 있다. 비교 결과 bucket 출구 유동각의 비교 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

CFX-TASCflow 수치 해석 단 효율과 throughflow 해석의 단 효율은 Fig. 9 에 나타나 있다. 각 효율은 CFX-TASCflow 의 단 효율 평균값으로 무차원화되어서 표시되어 있다. Throughflow 해석의 경우 bucket 출구는 root 부터 tip 까지 동일하게 나타남으로 Fig. 9 에는 직선으로 나타나 있다. 계산 결과 CFX-TASCflow 의 단 전체 효율은 throughflow 해석의 경우보다 크게 나타났다. 이와 같이 차이가 나타나는 것은 CFX-TASCflow 계산시 root leakage 와 tip leakage 손실이 고려되지 않았기 때문이다. 따라서 이들의 손실을 감안한다면 거의 유사한 결과임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

Throughflow 해석을 통하여 설계된 증기 터빈 한 단에 대해 3 차원 유동 해석을 수행하였다. 계산한 결과로부터 compound leaned nozzle 의 이차 유동 손실 감소 원리를 알 수 있었다. 따라서 3 차원 유동 해석은 증기 터빈 설계시 유용한 설계 도구로서 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

하지만 좀 더 명확한 결과 비교를 위해서는 tip sealing 및 root leakage 부분에 대한 3 차원 모델링 뿐만 아니라 실질적인 실험을 통한 비교가 요구된다. 이와 같은 연구는 향후 수행될 예정이다.

#### 참고 문헌

1. Cofer, J.I., IV, "Advanced in Steam Path Technology," ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol 118, pp.337-352, 1996
2. Wu, Ch. H., "A General Theory of Three-Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial-, Radial- and Mixed-Flow Types," NACA 1952 TN D-2546
3. Sieverding, C.H., "Recent Progress in the Understanding of Basic Aspects of Secondary Flows in Turbine Blade Passages," Trans. ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp.248-257, 1985
4. Han, W., Zhao, G., Xu, W., and Wang, Z., "Effect of Blade Curving on Vortices Streamwise in Cascade Exit Flow Field," International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 1990
5. Dawes, W.N., "Towards Improved Throughflow Capability: The Use of 3D Viscous Flow Solvers in a Multistage Environment," ASME 90-GT-18