

유동 해석을 이용한 증기 터빈 Stage 설계

Steam Turbine Stage Design Using Flow Analysis

권 기범 · 김 영상 · 조 상현 · 임 홍식

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

Key Words : Steam Turbine(증기 터빈), Nozzle(노즐), Bucket(버킷), Stage(단)

ABSTRACT

The high efficient steam turbine stage has been analyzed with the help of the 3-dimensional analysis tool. To increase the efficiency of steam turbine stage, the nozzle has to be designed by using the 3-dimensional stacking method. And the bucket has to be designed to cope with the exit flow of nozzle. To verify the stage design, therefore, the numerical analysis of the steam turbine stage was conducted. In this design, CFX-TASCflow was employed to predict the steam flow of the steam turbine stage. The numerical analysis was performed in parallel calculation by using the HP N4000 8 CPUs machine. The result showed the numerical analysis could be used to help to design the steam turbine stage.

1. 서 론

현재 증기 터빈 업체에서는 고효율의 터빈을 설계하기 위하여 3차원 유동 해석을 이용한다. 이는 고효율 증기 터빈 단을 설계하기 위해서는 3차원 설계 도구를 이용하게 되고, 이렇게 설계된 것을 확인하기 위해서는 3차원 유동 해석 방법만이 유일하기 때문이다. 이러한 설계 방법으로 인하여 advanced vortex stage¹⁾라는 새로운 설계 개념을 개발되었다.

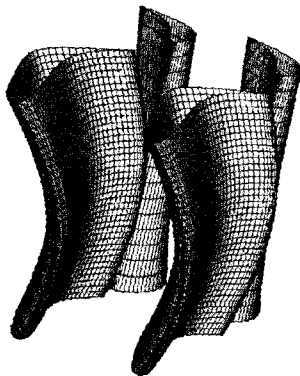


Fig. 1 A advanced vortex stage turbine

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

이와 같은 설계 개념은 이전에 사용된 conventional stage에서 성능이 개선 및 향상된 것이다. 1950년대부터 반경방향의 속도 성분이 없고, 반경과 접선방향 속도의 곱은 항상 일정하다는 가정을 포함한 free vortex stage design²⁾으로부터 시작된 터빈 단 설계는 컴퓨터의 발달과 Wu²⁾의 유동 해석 방법이 정립됨에 따라 다양한 실험이 가능하게 된다. 이러한 다양한 실험 결과 나타난 새로운 설계 개념들이 이 후 현대로 오면서 3차원 전산유체역학 프로그램들의 발달로 인하여 정확한 유동 해석이 가능함에 따라 3차원 설계 개념으로 발전하게 된다.

이러한 3 차원 설계 개념에는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 휘어져 있는 stacking 방법인 compound leaned stacking(혹은 bowed stacking)이 있다. Compound leaned stacking 방법은 증기 터빈 유로에서 발생하는 이차 유동 손실(secondary flow loss)³⁾을 감소시키기 위하여 고안된 것이다⁴⁾.

또한 bucket(혹은 rotor)은 compound leaned nozzle의 출구 유동 특성에 적합하게 각 단의 형상을 준 3 차원 설계 도구로 설계를 한다. 이는 각 단의 nozzle 출구 유동 특성에 맞추어 고성능 터빈을 설계하기 위함이다. 이와 같은 3 차원 설계 도구를

권기범 : 두산중공업(주) 기술연구원
김영상 : 두산중공업(주) 기술연구원
조상현 : 두산중공업(주) 기술연구원
임홍식 : 두산중공업(주) 기술연구원

이용하여 설계된 nozzle 과 bucket 으로 고효율의 advanced vortex stage 터빈을 구성하게 된다.

본 연구에서는 3 차원 유동 해석을 이용하여 advanced vortex stage 터빈을 설계하였다. 최적의 단을 설계하기 위하여 3 차원 설계 도구를 이용하여 두 가지 단을 설계하였다. 이렇게 설계된 두 가지 단에 대한 유동 해석을 통하여 최적의 단을 선정하였다. Advanced vortex stage 의 유동 특성 해석에 사용한 3 차원 상용 전산유체역학 프로그램은 CFX-TASCflow 이고, HP N4000 8 CPU 기기를 사용하였다.

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

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

에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho H) - \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H) = \\ -\frac{\partial}{\partial x_j} (q_j + \overline{\rho u_j h'}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \{u_i (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) + \overline{u_i \tau_{ij}}\} \\ + S_E \end{aligned} \quad (3)$$

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

term($\overline{u_i \tau_{ij}}$)들은 아래와 같이 표현되어 전체 방정식계는 완결된다.

The Reynolds Stress Term

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

The Turbulent Energy Term

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

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., μ_t 는 난류 점성을 의미한다. 난류 점성은 아래와 같이 표현된다.

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

여기서 ε 는 난류에너지 소산, C_μ 는 모델 상수이다.

상기의 식들에서 나타난 바와 같이 CFX-TASCflow의 난류 모델은 기본적으로 난류 운동에너지 k 와 난류에너지 소산 ε 으로 표현되는 two-equation model을 사용한다. 이외에도 k-w two-equation model과 2nd Closure model인 Reynolds Stress Model을 사용한다. 이 중에서 기본적인 k-ε two-equation model에 대한 수송 방정식은 아래와 같다.

난류 운동에너지 수송 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

난류에너지 소산 수송 방정식

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) \quad (9)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1} P_k - \rho \varepsilon C_{\varepsilon 2})$$

여기서 Γ , P_k 및 C 는 각각 diffusion 계수, 난류운동 에너지의 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 Stage 형상 및 경계 조건

형상 모델링 및 격자 형성을 위하여 CFX-TASCflow의 preprocessor인 CFX-TurboGrid가 사용되었다. 본 연구에서 설계된 두 가지 단계에 대하여 유동 해석을 수행하였고, 사용된 각 단계의 형상은 Fig. 2 및 3에 나타나 있다.

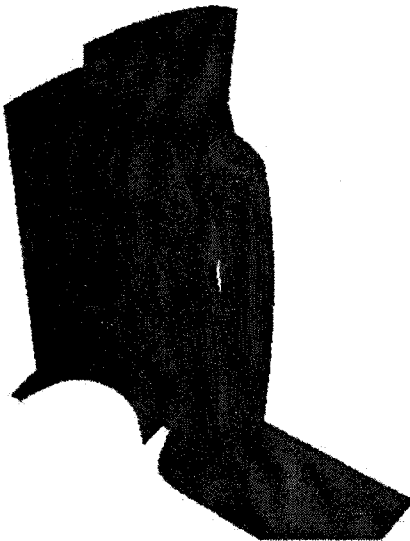


Fig. 2 Modeling of the first designed stage



Fig. 3 Modeling of the second designed stage

격자는 각각 60만 nodes 정도의 hexahedral 정렬 격자를 형성시켰다. Blade 내부에서 발생하는 이차 유동을 정확히 예측하기 위하여 각 endwall 및 blade 표면에 격자를 밀집시켰다

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 원주 평균(circumferential averaging)을 취하는 CFX-TASCflow의 Stage MFR(Multiple Frame of Reference)를 사용하였다. 이 방법은 Daves code⁹⁾에 사용되었던 방법으로 반경방향의 변화는 유지하면서 원주 방향에 대하여 평균을 취하고, 질량 유량을 보전하면서 값을 넘겨주는 방법이다. Daves는 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 기

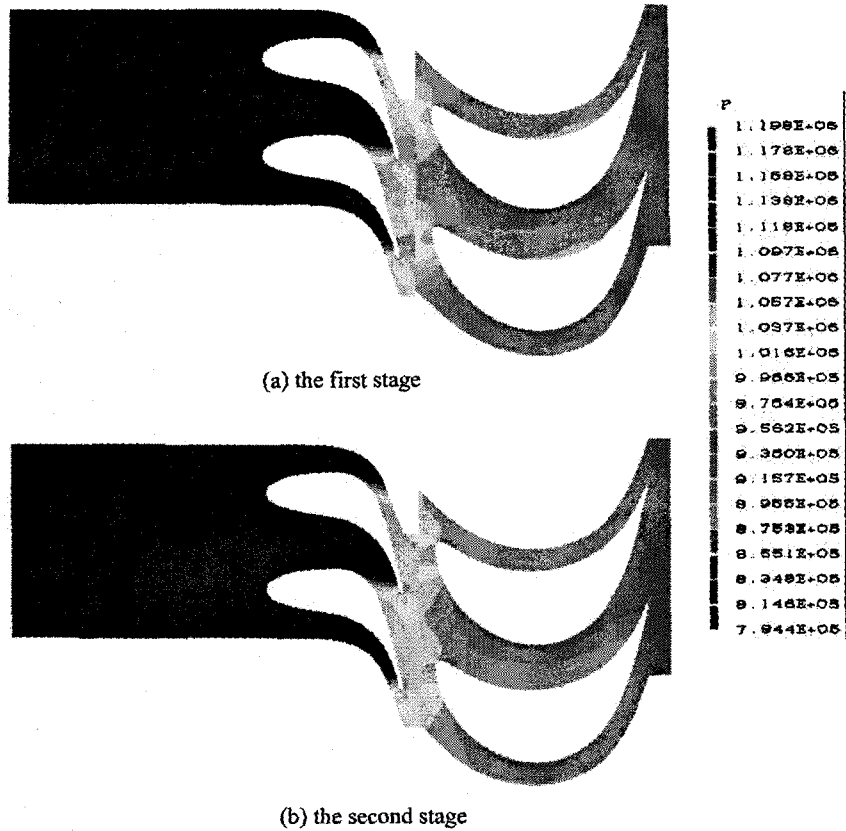


Fig. 4 static pressure contours at the root of (a) the first stage and (b) the second stage

체라고 가정하지 않고, CFX-TASCflow의 real gas option을 사용하여 실제 기체로 해석을 수행하였

다. 이 option은 CFX-TASCflow 내부에 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 모델에 정체점 (stagnation point)부분에 좀더 정확히 예측할 수 있는 Kato and Launder production term을 사용하였다.

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

3. 유동 해석 결과 비교

상기와 같은 경계 조건을 이용하여 기설계된 두 가지 단에 대하여 유동 해석을 수행하였다. 계산 결과 나타난 두 가지 단에 대한 효율은

Table 1 과 같다.

Table 1 Stage efficiency comparison of two different stages

Stage No.	Normalized Efficiency
1st	99.9%
2nd	100%

이와 같은 계산 결과 2 번째 단의 효율이 약 1% 정도 높다는 것을 알 수 있다.

각각 span 방향에 대한 blade-to-blade 단면의 정압력 분포는 각각 Figs. 4, 5 및 6 에 나타나 있다. Root 부분의 정압력 분포는 Fig. 4 에서 확인할 수 있다. Root 부분의 bucket 형상은 조금 다른 것을 확인할 수 있지만 정압력 분포는 leading edge 부분을 제외하고는 큰 차이를 보여주지 않는다. Midspan 부분의 형상은 Fig. 5에서 확인할 수 있다. Midspan 형상에서는 두 가지 단 모두 큰 차이를 보여주지 않고, 정압력 분포 역시 큰 차이를 보여주지 않는다. 하지만 Tip 부분에서는 두 가지 단

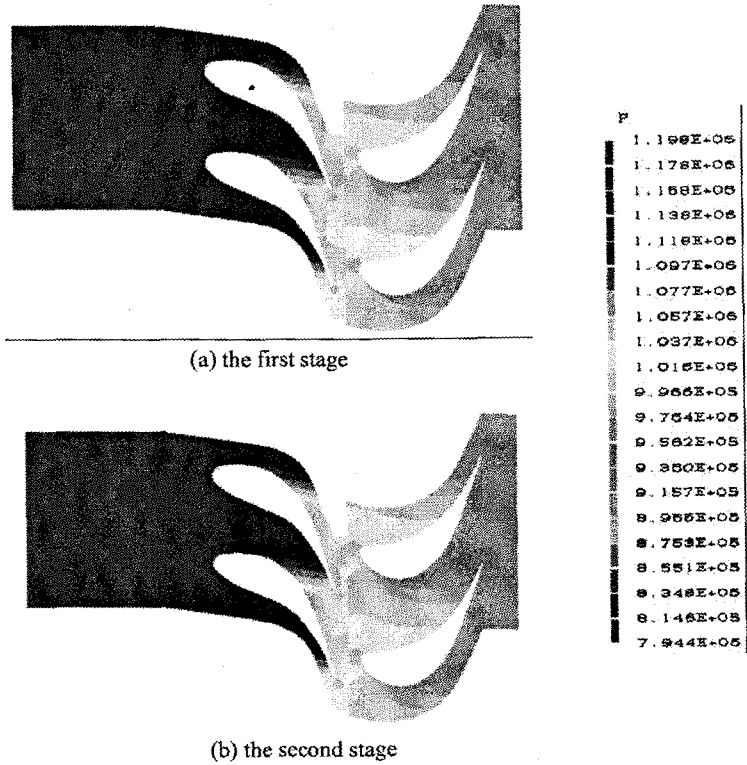


Fig. 5 static pressure contours at the midspan of (a) the first stage and (b) the second stage

의 bucket 형상이 크게 다르다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6 참조). 따라서 이러한 형상 차이로 인하여 정압력 분포는 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 이러한 bucket 부분의 형상 변화로도 단 효율을 약 0.1% 정도 차이가 난다는 알 수 있다.

계산 결과 나타난 compound leaned nozzle 의 정압력 분포를 살펴보면 root 나 tip 부분 보다 midspan 의 목(throat)에서 큰 영역에 걸쳐서 정압력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 midspan 이 각각의 root 나 tip 보다 더 많은 유량이 흐른다는 것을 의미한다. 또한 각각 root 및 tip 면과 midspan 면에 나타난 정압력 분포 비교시 root 나 tip 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 root 나 tip 에서 발생하는 이차 유동 손실이 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

3 차원 설계 도구를 이용하여 설계된 증기 터빈 두 가지 단에 대해 3 차원 유동 해석을 수행하였다. 이와 같은 해석 결과로부터 좀 더 효율이 높은 단을 설계할 수 있었다. 또한 bucket 부분의 형상 변화로도 단 효율이 약 0.1% 차이가 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서 3 차원 유동 해석은 증기 터빈 설계시 유용한 설계 도구로서 사용될 수 있음을 알 수 있다.

하지만 CFX-TASCflow 의 수치 해석 결과 신뢰성을 확인하기 위하여 실험을 수행할 예정이다. 실험은 air turbine 으로 수행하며 독일 RWTH Aachen 의 IDG 와 공동 연구를 수행할 예정이다. 따라서 이러한 연구를 통하여 실험 결과와 수치 해석 결과 비교하여 결과의 신뢰성을 확인할 예정이다.

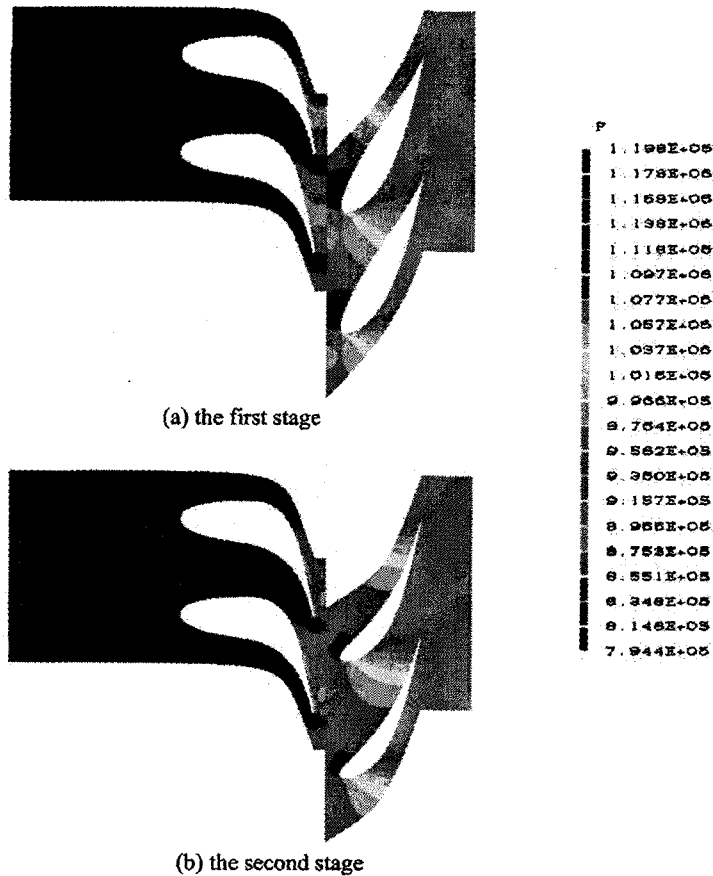


Fig. 6 static pressure contours at the tip of (a) the first stage and (b) the second stage

참고문헌

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