

## 준 3차원 유동해석을 통한 증기 터빈의 회전익 설계

### Steam Turbine Rotating Blade Design Using Quasi-3 dimensional Flow Analysis

조상현 · 김영상 · 권기범 · 임홍식

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

**Key Words** : *Steam Turbine*(증기 터빈) , *Bucket*(버켓) , *Throat*(목) , *Flow Angle*(유동각) , *Mach Number Distribution*(마하수 분포) , *Stack-up*(적층)

#### ABSTRACT

A rotating blade of steam turbines is designed using blade design system. To minimize the design time, quasi three dimensional flow analysis code is adopted to calculate blade section. The blade section lies on a streamline determined by previous steam turbine design precedures. The blade design system makes a transform of streamline coordinates,  $(m, r\theta)$ , to  $(m', \theta)$  coordinates and all design precedure except 3 dimensional stack-up is performed in the coordinates. Each designed blade section is stacked-up and whole 3 dimensional blade can be modified by correcting 2D section, repeatedly. The full 3D numerical analysis for the one stage including designed rotating blade will be performed later.

#### 1. 서 론

증기 터빈의 전형적인 설계는 열정산을 통해 증기 터빈의 전체적인 열역학적 상태량을 결정하는 것에서부터 출발한다. 열정산에서는 터빈의 형태를 충동식 혹은 반동식으로 결정한 다음 각각의 터빈에 대한 전체적인 추기위치 및 추기량 등을 정하게 되며 이 열정산을 이용하여 이후의 터빈에 대한 구체적인 stage수나 각 stage에서의 열역학적 상태량 및 속도 삼각형 등을 결정한다.

이 설계단계를 통칭 preliminary design이라고 한다. preliminary design은 여러 가지 단계<sup>1)</sup>로 구성되어 있다. 이들 단계에서는 평균경 설계, 유선곡률법을 이용한 관로해석 모델이나 관통유동 모델등을 이용하는데 이때 여러 가지 손실모델을 사용하여 stage에서의 실제 상황을 최대한 예측하도록 한다.

이렇게 preliminary design을 통하여 증기 터빈의 각 stage에 대한 열역학적 상태량 및 속도 삼각형이 결정되고 나면 이후에는 실제적으로 터빈 블레이드에 대한 형상 설계가 이루어진다.

터빈 블레이드의 형상 설계는 preliminary design에서 결정한 유선을 따라 유선면에서의 2차원 단면을 설계하고 이를 3차원으로 stacking하는 방법이 일반적으로 사용되어져 왔다. 그러나 최근에는 컴퓨터의 발전에 따라 2차원 단면 설계가 아니라 3차원으로 바로 형상을 설계하는 방법에 대한 연구도 이루어지고 있다. 3차원 형상 설계의 경우에는 블레이드의 lean이나 sweep등 3차원으로만 해석이 가능한 effect를 위해 유동 계산을 3차원으로 하고 블레이드의 형상은 2차원적으로 설계하는 방법<sup>2)</sup>과 Inverse method를 이용하여 3차원 유동계산을 이용하여 형상자체를 3차원에서 변경하는 방법<sup>3)</sup> 등이 있다. 그러나 이 방법들은 3차원 유동계산을 하기 때문에 계산시간이 길어서 실제 산업현장에서 사용하기에는 아직 적합하지 않다.

블레이드의 형상 설계는 state of art 로써 설계자의 경험에 많은 의존을 하고 있다. 이를 극복하기 위해 최적화 기법이나 inverse design method 등을 사용하여 설계자의 경험을 최소화시키도록 하고 있으나 최적화 알고리즘이나 방법등에 따라 안정적으로 solution 의 도출이 달라져서 3 차원 설계법의 경우처럼 산업 현장에 직접적으로 적용하기는 아직 무리가 있다.

본 연구에서는 현장에서 직접 사용할 수 있는 증기터빈 회전익(rotating blade, 충동식 터빈의 경

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

우 bucket 이라고도 함)의 설계법에 대해 주안점을 두었다. 이를 위해서 빠른 시간에 bucket 의 형상 설계가 가능하도록 형상을 준 3 차원에서 설계하도록 하였으며 준 3 차원 유동계산을 수행하도록 하여 유동계산과 형상 변경과의 반복작업에서 유동계산이 차지하는 부분이 최소화 되도록 하였다.

회전의 경우, 고정익(stationary blade, 증동식 터빈의 경우 nozzle 이라고도 함)과는 달리 active length 가 10 인치를 넘는 경우가 자주 있으며 원심력에 의한 stress 가 크게 작용하여 blade leaning 이나 sweep 을 할 수 없는 경우가 많다. 특히 발전소용 증기 터빈의 경우, 터빈의 구조적인 안정성이 아주 중요하므로 active length 가 작은 bucket 을 포함한 모든 bucket 에 무게중심이 바닥면의 단면의 그것과 일치하거나 그 편차가 허용한계 이내에 있도록 하는 stacking 방법을 사용한다.

이와 같은 증기 터빈의 bucket 의 특성에 의해, 3 차원으로 해석할 수 밖에 없는 blade lean 이나 sweep 을 적용할 필요가 없으므로 3 차원 유동해석에 의한 형상 변경은 bucket 설계 후 최종 검증단계에서 적용하도록 하였으며 본 연구에서 이 설계 절차를 연구범위에서 제외시켰다.

## 2. 준 3차원 유동 해석

본 연구에서 유동 해석은 준 3차원 해석 코드인 MISES<sup>4)</sup>를 이용하여 수행하였다. 이 해석 코드는 stream surface radius, streamtube thickness, wheel rotation 등에 대한 준 3차원 효과를 고려하여 해석이 수행된다. 이를 위해 유선면을 따라가는  $(m, r, \theta)$  면을  $(m', \theta)$  면으로 변환을 하여 해석을 수행한다. 이를 Fig.1에 나타내었다. Fig. 1에서  $m$ 은 유선면을 따라가는 좌표축이며  $m'$ 은 유선면에서 반경 방향의 효과를 없앤 mapping된 좌표계인데 이들의 관계는 식 (1)과 같다.

$$m' = \int \frac{dm}{r} = \int \frac{\sqrt{dr^2 + dz^2}}{r} \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 좌표계를 mapping할 경우에도 각도  $\theta$ 는 보존된다. 이와 같은 변환된 좌표계에서 수행되는 유동계산의 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

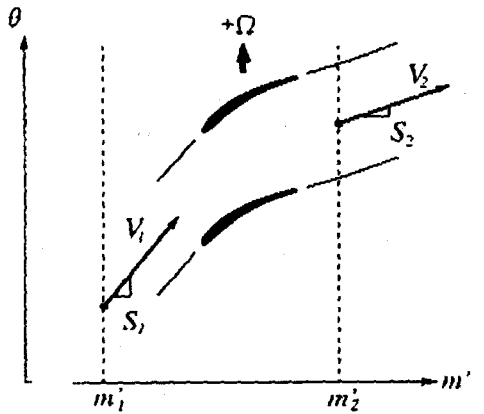
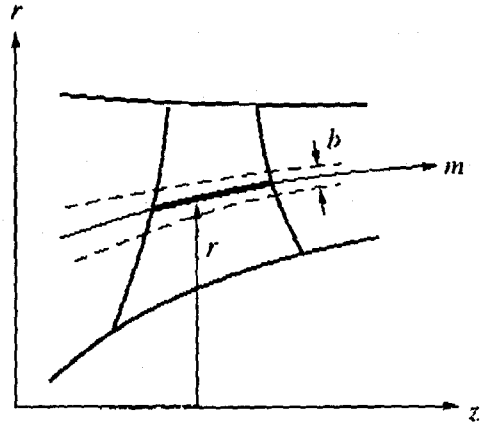


Fig.1 Streamsurface definition

$$\oint_{\partial V} \rho(\vec{q} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (2)$$

운동량방정식

$$\oint_{\partial V} [\rho(\vec{q} \cdot \vec{n})\vec{q} + p\vec{n}] dA = -\int_V \rho \vec{f} dV \quad (3)$$

에너지 방정식

$$\oint_{\partial V} \rho(\vec{q} \cdot \vec{n}) I dA = 0 \quad (4)$$

여기서  $\rho, \vec{q}, \vec{f}$  는 각각 밀도, 속도, Coriolis와 centrifugal force를 의미한다. I는 rotaphy로 정의는 다음과 같다.

$$I = h + \frac{q^2}{2} - \frac{(\Omega r)^2}{2} \quad (5)$$

여기서  $h, \Omega$ 는 각각 엔탈피와 각속도이다.

또한 경계층 방정식을 이용하여 점성항을 고려하도록 하였다. 이와 같은 방법을 하면 유동해석을 하는데 있어 걸리는 시간은 1분이내이다.

### 3. 블레이드 형상 생성

블레이드의 2차원 형상 생성에 관한 방법은 여러 가지가 있다. 그 중에서 전형적인 방법은 형상을 leading edge, trailing edge, throat전후의 suction side와 pressure side의 다섯 부분으로 나누어 연결하는 방법이다. 그외에 미리 설정한 형상의 곡률을 만족하도록 형상을 결정하는 방법<sup>9)</sup>이 있다. 그러나 이런 방법은 만들어진 형상의 변경등이 자유롭지 못해 실질적으로 적용하기가 다소 까다롭다. 그래서 본 연구에서는 일반적으로 알려진 Bézier curve를 이용하여 bucket을 suction side, pressure side, trailing edge의 세 부분으로 나누어 형상을 생성하도록 하였다. 그러나 trailing edge의 경우 원호로 처리하므로 실질적으로 suction side와 pressure side의 두 부분으로 나누어 생성한다.

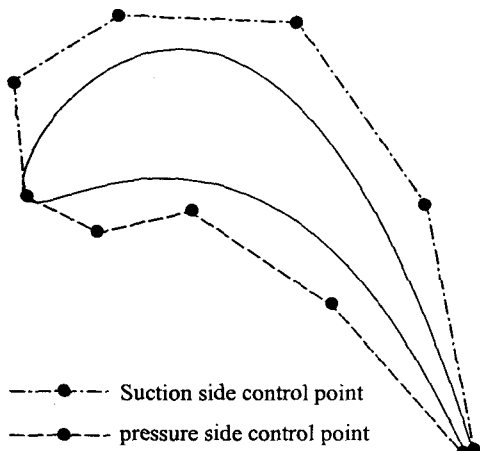
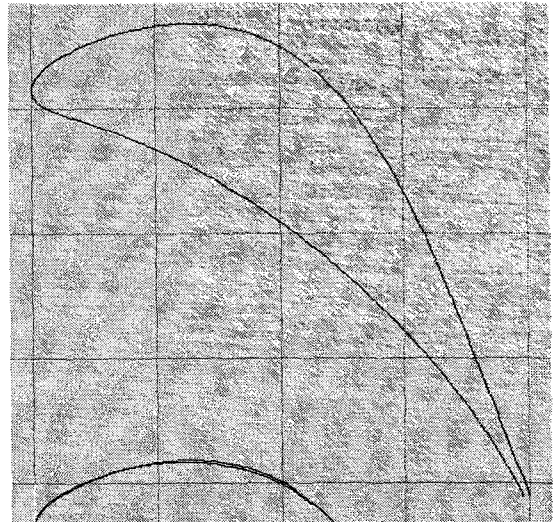
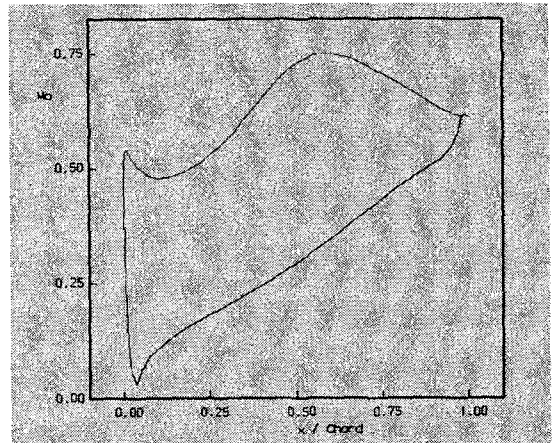


Fig.2 The blade shape and curve control points

Bézier curve는 몇 개의 control point를 이용하여 곡선을 생성하는 방법중의 하나이다. 일반적으로  $n+1$ 개의 조절점이 있을 경우에 이에 해당하는 곡선의 좌표는 다음과 같이 계산된다.



(a) initial blade shape



(b) Mach number distribution of initial blade

Fig. 3 Initial blade and its Mach number distribution

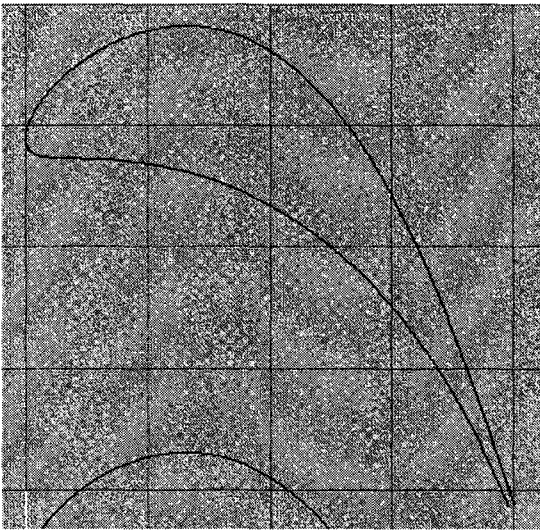
$$\bar{x}(u) = \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \bar{X}_i, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (6)$$

Bézier curve는 적은 수의 조절점으로 원하는 곡선을 표현할 수 있기 때문에 실제 현장에서 설계자가 형상을 변경하기가 용이하다. 반면에 Bézier curve에서 하나의 조절점 변경이 전체의 곡선에 영향을 끼치지만 조절점과의 거리가 멀수록 그 영향이 미미해진다. 또한 Bézier curve는 NURBS나 B-spline과는 달리 곡선이 구간별로 나누어져 있는 것이 아니어서 블레이드의 곡률이 연속적으로 변화하게 된다. 블레이드의 곡률변화가 유동에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있는

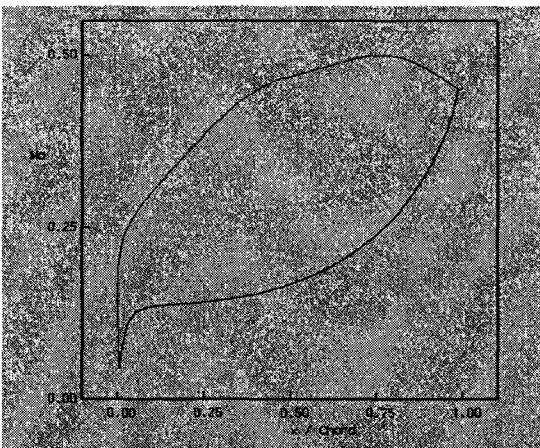
것<sup>6)</sup>을 감안하면 Bézier curve가 블레이드의 형상 표현에 적합함을 알 수 있다.

Fig.3에는 preliminary design에서 주어진 설계값을 기초로 하여 버킷의 한 단면의 초기 형상과 이에 따른 mach number distribution을 나타내었다. Initial blade는 전술한 것처럼 blade의 곡선을 몇 개의 영역으로 분할하여 생성하였으며 이 때 유체역학적인 고려를 많이 하지 않고 단지 기하학적인 형상의 생성에 주안점을 두었으므로 Fig. 3(b)에서 보듯이 Mach number distribution이 좋지않음을 알 수 있다.

Bézier curve를 이용하여 bucket을 만들고 나면 만



(a) final blade shape



(b) Mach number distribution of final blade

Fig. 4 Final blade and its Mach number distribution

들어진 bucket의 형상에 대한 각종 형상인자들이 계산될 수 있다. 그 중에서 throat은 preliminary design에서 이미 설정되는 값으로 bucket 설계시 항상 이 값이 설계값을 만족하도록 형상을 수정해야 한다. 그리고 주어진 설계값으로 유동계산을 한 후 유동의 flow angle 역시 속도삼각형을 만족하도록 해야 한다. 이러한 형상의 제한 조건 때문에 단순히 곡선의 조절점만으로 형상을 변경하는 것 보다는 제한 조건으로부터 역으로 형상을 계산하는 방법이 유효하다.

블레이드의 형상 곡선을 5개의 부분으로 나누어 생성하지 않고 본 연구에서 처럼 Bézier curve나 NURBS등의 곡선을 사용할 경우에는 형상 조건에서 형상을 계산하는 것이 쉽지 않다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 곡선의 좌표는 곡선의 조절점의 함수이나 그 역함수는 반드시 존재하는 것이 아니다. 이에 따라 블레이드의 형상 인자들에서 역으로 곡선을 구하는 것 역시 역함수의 관계가 성립하지 않으므로 일반적인 numerical method로도 쉽게 구할 수 없다.

본 연구에서는 이와 같이 설계자에 의해 변경된 형상 인자들의 값을 가지는 새로운 블레이드를 구하기 위해 형상인자와 조절점에 대한 비선형 방정식을 설정하고 이를 비선형 Newton-Raphson method를 이용하여 계산하도록 하였다. 일반적으로 알려진 비선형 방정식  $\vec{F}(\vec{x}) = 0$ 의 해를 구하기 위한 비선형 Newton-Raphson method의 절차는 다음과 같다.

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i - J(\vec{x}_i)^{-1} \vec{F}(\vec{x}_i) \quad (7)$$

여기서  $J(\vec{x})$ 는 Jacobian matrix,  $\vec{x}$ 는 방정식의 미지수이며  $i$ 는 반복계산 단계를 의미한다.

이와 같은 방법을 이용하여 최종적으로 버킷의 단면 형상을 설계한 것을 Fig. 4에 나타내었다. 단면의 초기 형상인 Fig. 3과 비교하면 Mach number distribution이 많이 개선되었음을 알 수가 있다. 이렇게 초기 형상에서 유체역학적으로 좋은 형상을 만드는데 걸린 시간은 최적화 기법을 사용하여 설계<sup>7)</sup>한 시간에 비해 약 1/3 ~ 1/6로 단축되었다.

Fig. 5에는 최종적으로 각 단면의 형상을 설계한 것을 나타내었다. 그림에서 보면 설계된 형상이 비교적 부드럽게 변화하고 있음을 알 수 있다. 참고로 Fig. 5에서 두꺼운 단면 형상일수록 바닥면에 가까운 단면이다.

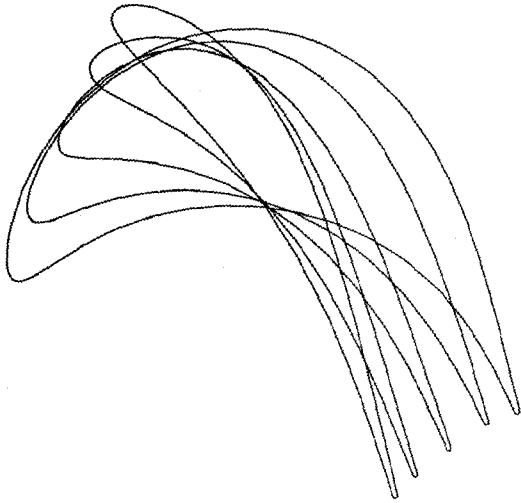


Fig. 5 XY plane view of designed blade

한편, 이렇게  $(m', \theta)$ 면에서 만들어진 bucket의 단면은 실제 공간인  $(x, y, z)$  좌표계로 변환을 하여 3차원으로 stacking을 수행한다. stacking은 버킷의 경우 일반적으로 각 단면의 무게중심이 반경방향으로 일치하도록 stacking한다. 그러나 개별적으로 설계된 단면의 무게중심을 강제로 일치시킬 경우 고정익과의 간섭이 발생할 수도 있다. 이럴 경우에는 간섭이 일어나는 단면을 재설계하거나 설계된 형상은 그대로 두고 stacking시 무게중심을 약간 어긋나게 하여 간섭을 없애는 방법의 두가지가 있다. 전자의 경우에는 형상의 재설계로 인한 설계시간의 증가가 단점이며 후자의 경우에는 버킷의 경우 leading edge와 trailing edge가 반경방향으로 smooth하게 stacking되지 않는다는 것이 단점이다. 반면에 장점으로서는, 전자의 경우, 구조적으로 보다 안정하여 바닥면의 블레이드 형상의 단면적을 줄일 수 있어 전체적으로 블레이드의 무게에 의해 발생하는 원심력을 줄일 수 있다는 점이다. 후자의 경우에는 형상을 재설계하지 않아도 되므로 전체적인 설계시간을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 전술한 두가지 방법을 복합하여 stacking하는 방법을 채택하였다. 즉, leading edge와 trailing edge의 반경방향의 smoothness가 유지되도록 stacking하여 실제 형상을 만든 후, 무게 중심의 반경방향의 편차가 큰 단면의 형상을 형상의 smoothness와 고정익과의 간섭을 고려하여 이동할 수 있도록 하였다.

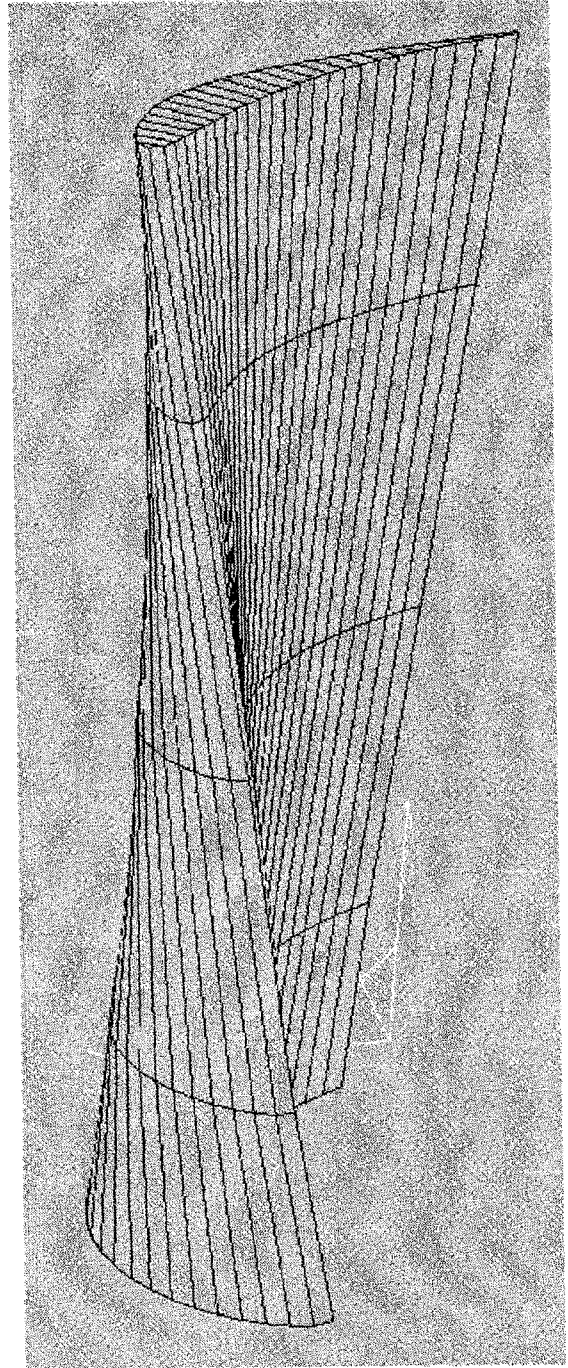


Fig. 6 Stack-up of designed blade

이와 같은 방법으로 stacking한 후의 최종적인 블레이드의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 예측하였듯이 각 단면의 형상이 smooth하게 변하고 있으므로 stacking한 후의 형상 역시 smooth하게 변하고 있음을 알 수 있고 3차원 유동이 나

지 않을 것으로 예측할 수 있다.

이렇게 하나의 버켓에 대해 형상 설계를 마치고 나면, 3차원 유동해석을 통해 형상을 수치적으로 검토하는 절차가 필요하다. 왜냐 하면 준 3차원 유동해석에서는 알 수 없는 2차유동에 의한 손실, tip leakage에 의한 손실, 고정익과의 interaction 등을 고려할 수 없기 때문이다. 그러므로 본 연구에서와 같은 방법으로 설계를 할 경우에는 반드시 3차원 해석 절차가 있어야 한다. 그러나 3차원 유동해석은 본 연구의 범위를 벗어나 그 결과를 서술하지는 않았다.

#### 4. 결론

실제 산업 현장에서 적용이 가능하도록 증기터빈의 회전익 설계법에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 준 3 차원 유동해석 기법을 이용한 유동해석기법을 실제 설계에 적용해도 좋을 것임을 알 수 있었다.
- (2) 블레이드의 단면 설계시 최적화 기법이나 inverse design 에 비해 직접적인 형상 설계가 설계시간이 적게 소요되었다.
- (3) 무게중심을 이용한 stack-up 과 smoothness 를 고려한 stack-up 기법을 병행한 결과 좋은 3 차원 회전익의 형상을 얻을 수 있다.
- (4) 증기 터빈의 회전익의 경우, 회전익의 특성상 3 차원적인 설계기법을 적용하지 않아도 되어 전체적인 설계시간을 단축시킬 수 있다.

#### 참고문헌

1. 윤의수, “축류 및 혼합류 터보기계의 손실모형에 관한 연구,” 박사학위논문, 한국과학기술원, 1997
2. Denton, J.D. , Xu, L., “The exploitation of three-dimensional flow in turbomachinery design,” Proc. Instn. Mech. Engrs., 1999, Vol. 213, Part C, pp. 125-137
3. Demeulenaere, A., Van den Braembussche, R., “Three-dimensional inverse method for turbomachinery blading design,” J. of Turbomachinery, 1998, Vol. 120, pp. 247-255
4. Youngren, H. H., “Analysis and design of transonic cascades with splitter vanes,” MS thesis, MIT, 1991
5. Korakianitis, T., “Prescribed-curvature-distribution airfoils for the preliminary geometric design of axial-turbomachinery cascades,” J. of Turbomachinery, 1993, Vol. 115, pp. 325-333
6. Korakianitis, T., Papagiannidis, P., “Surface-curvature-distribution effects on turbine-cascade performance,” J. of turbomachinery, 1993, Vol. 115, pp. 334-341
7. 조상현, 외, “증기터빈 블레이드 2 차원 공력 최적설계,” 추계학술대회 논문집, 2000, 한국동력기계공학회, pp. 38-42