

그래픽 환경을 이용한 상호 대화 방식의 증기 터빈 회전의 설계 패키지 개발

Development of steam turbine rotor blade design package using GUI
(graphic user interface)

*임형근¹⁾, 박구하²⁾, 나운학²⁾, 장근식¹⁾

Hyoung-Keun Lim¹⁾, Koo-Ha Park²⁾, Un Hak Nah²⁾, Keun-Shik Chang¹⁾

Abstract

The steam turbine rotor blade is designed using the Turbine Rotor Design Package developed by the authors. It can quickly accomplish blade shape design in the power plant industry. The quasi-3d code is employed for analysis of passage flow in the blade sections. Iterative change of each blade shape is made by moving position of control points in the Bezier curve under GUI(graphic user interface) environment. The full 3-D blade shape is obtained by stacking of the section blades.

Key Words : *Low Pressure Steam Turbine Bucket*(저압 증기터빈 버켓)
Bezier Curve(베지어 곡선), *GUI*(그래픽 사용자 인터페이스)

1. 서론

발전용 동력장치는 압축기, 연소기, 터빈으로 구성되어있다. 압축기에 의하여 고압을 만들고, 연소기에 의하여 가스 온도를 고온으로 만든 후 터빈에서 동력을 추출한다. 따라서 터빈 시스템에서의 성능 향상을 위하여 압축기, 연소기, 터빈 등의 효율을 향상시켜야 한다. 터빈의 효율을 떨어뜨리는 동력손실은 10%가 회전체 부품인 베어링 등에 의한 손실 때문이고, 20%가 틱 부분에서의 누설손실(leakage loss), 30%가 내부유동장의 혼합에 의한 2차유동 손실(secondary flow loss)이다. 그 외 40%정도는 형상손실(profile loss)로 구성된다. 가장 큰 비중을 차지하는 형상 손실은 터빈 익형의 설계에 따라 저감이 가능하다. 따라서 익형의 형상 설계에 대한 연구가 요구된다. [1]

익형의 설계 방법으로는 입출구에서의 조건을 결정하고 주어진 조건에 따라 익형을 형상화 하기 위하여 다차원곡선에 의하여 형상화하는 방법

과 형상변수를 사용하는 방법 및 표면에 분포되어 있는 압력을 가정하여 이에 맞도록 형상을 설계하는 역설계 방법 등으로 다양한 방법에 의하여 익형의 형상을 설계하고 있다. 그러나 익형의 형상 설계는 실질적으로 설계자의 경험에 많은 의존하고 있다. 이를 극복하기 위하여 최적화 기법이나 역설계 방법 등을 사용하여 설계자의 경험을 최소화 시키도록 하고 있으나 사용되는 디자인 방법이나 최적화 알고리즘의 경우 설계변수의 선택 및 목적함수의 선택에 따라 안정적인 해의 도출이 달라져 산업현장에 직접적으로 사용하기에는 무리가 있다. 또한, 새로운 증기 터빈에 대한 수요가 감소하게 됨에 따라, 기존의 터빈에 대하여 성능 향상, 디자인 및 생산 단가의 감소, 그리고 장비의 cycle time의 감소를 요구하는 방향으로 시장의 수요가 커지고 있다. 이에 따라 증기 터빈의 설계 방법에 있어서도 높은 성능, 낮은 설계단가, 그리고 적은 cycle time의 감소를 위하여 자동화된 익형 설계 기법이 요구되고 있다.

1) 한국과학기술원 기계공학부 항공우주공학과

2) 두산 중공업 터빈 기술팀

특히, 국내에서 수행되고 있는 증기 터빈의 대부분의 설계 기술은 GE로부터 이전된 것이며, 증기 터빈 LP(Low Pressure)의 마지막 단인

Long Bucket의 신기술 분야에 있어서 GE에서의 기술이전의 회피에 따라 국내에서의 대체 기술개발이 시급해졌다. Long Bucket은 Bucket의 최저 고유 진동수(Natural Frequency)가 운전속도의 3~8배 범위에 들어 있는 Bucket을 말하며 통상 LP(Low Pressure)터빈의 마지막 단인 L_0, L_1, L_2단의 Bucket들이 이 범주에 속한다. Long Bucket은 터빈의 효율에 지대한 영향을 미치고 특성상 Bucket 주위를 흐르는 유체 유동이 복잡하며, 그 길이가 길고 비틀림이 심하여 구조적으로도 취약하므로 고도의 Bucket 설계 기술이 요구된다.

본 연구에서는 현장에서 직접 사용할수 있는 상호 대화 방식의 증기 터빈의 Bucket의 설계 Tool 개발에 주안점을 두었다. 이를 위해서 빠른 시간에 Bucket의 형상 설계가 가능하도록 형상을 재생성하는 형상 함수로서 Bezier곡선을 사용하였다. 주어진 형상에 대한 유동 해석을 위하여 준 3차원 유동해석 방법을 사용하였다. 이에 부가하여 기존의 Bucket 설계에서 요구되던 설계자의 경험을 최소화하기 위하여 Bezier 곡선에 의한 Bucket의 형상 및 제어점의 변화와 유동해석 등의 Engineering Process를 설계자가 사용하기 쉬운 상호 대화방식의 인터페이스(Graphic User Interface) 방식으로 Data를 입력력 하도록 구축하였다.

2. 프로그램 개발 환경 및 그래픽 라이브러리

준 3차원 유동해석을 위한 격자 생성 및 유동해석은 상당히 많은 계산시간을 요하게 된다. 이에 따라 고성능 워크스테이션 급의 컴퓨터 환경이 일반적이며, 이러한 컴퓨터 환경하에서 주로 사용되는 운영체제(OS)로서는 UNIX가 사용되고 있다. 따라서, UNIX환경하에 작동할수 있는 프로그램 개발을 기본 근간으로 하였다. 사용된 워크스테이션으로는 한국에 많이 보급된 HP 기종을 기반으로 하였으며, 사용자에게 친숙한 환경을 제공하고 다양한 UNIX환경은 물론 PC에서 많이 사용되는 LINUX에서도 이식성 및 호환성이 가능한 기본 그래픽 라이브러리인 X와 OSF/Motif를 사용하였다.[2,3]

또한, 생성된 익형의 형상 및 다양한 해석 결과, 격자계등의 가시화는 3차원 그래픽 기능을 가진 Silicon Graphics사의 OpenGL과 동일한 기능을 제공하면서도, 상용으로 제공되고 있는 OpenGL 라이브러리와는 달리 그 소스가 공개되어 있어 손쉽게 구할수 있는 Mesa4.0.1의 라이브러리를 이용하여 구현하였다.

프로그래밍을 위해 사용된 기본 언어는 C를 사용하였으며, 다양한 C 컴파일러들에 대해 가장 표준이라고 할수 있는 ANSI C를 근간으로 하여 전체적인 프로그램을 구축하였다.[4]

3. 유동해석

3.1 지배 방정식

본 연구에서는 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 x축에 Ω 의 각속도를 회전하는 회전익에 고정된 상대 관성 좌표계에 대하여 수식화한 후, 다시 직교좌표계에서의 절대유동변수에 대해 해를 구하도록 하였다. 절대속도를 $u=(u,v,w)$, 회전속도를 $u_\Omega=(u_\Omega, v_\Omega, w_\Omega)=(0, \Omega_z, \Omega_y)$ 로 기술하면 상대속도는 $u_r=(u_r, v_r, w_r)=(u-u_\Omega, v-v_\Omega, w-w_\Omega)$ 이 되며, 이를 직교 좌표계(x, y, z)에서 미분형태의 보존형 지배 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_c}{\partial x} + \frac{\partial G_c}{\partial y} + \frac{\partial H_c}{\partial z} \tag{1}$$

$$= E + \frac{\sqrt{\gamma} M_{ref}}{Re_{ref}} \left[\frac{\partial F_r}{\partial x} + \frac{\partial G_r}{\partial y} + \frac{\partial H_r}{\partial z} \right]$$

여기서

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad F_c = \begin{pmatrix} \rho u_r \\ \rho u_r u + p \\ \rho u_r v \\ \rho u_r w \\ \rho u_r h + u \rho p \end{pmatrix}$$

$$G_c = \begin{pmatrix} \rho v_r \\ \rho v_r u \\ \rho v_r v + p \\ \rho v_r w \\ \rho v_r h + v \rho p \end{pmatrix}, \quad H_c = \begin{pmatrix} \rho w_r \\ \rho w_r u \\ \rho w_r v \\ \rho w_r w + p \\ \rho w_r h + w \rho p \end{pmatrix}$$

$$E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \rho w \\ -\Omega \rho v \\ 0 \end{pmatrix}, \quad F_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \Pi_x - q_x \end{pmatrix}$$

$$G_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ \Pi_y - q_y \end{pmatrix}, \quad H_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ \Pi_z - q_z \end{pmatrix}$$

U는 구하고자 하는 해이고, F_c, G_c, H_c 는 대류항이며, F_v, G_v, H_v 는 점성항, 그리고 E 는 좌표계의 회전을 포함하는 항이다.

식에서 사용한 변수들은 특성길이 L_{ref} , 밀도 ρ_{ref} , 압력 P_{ref} , 그리고 점성계수 μ_{ref} 로 무차원화 하였다. 유동상태를 나타내는 'ref'는 내부 유동의 경우 정체상태의 값을, 외부유동의 경우 자유류의 값을 의미한다.

h 는 엔탈피로 내부에너지 e 와 $h = e + p/\rho$ 의 관계식이 성립한다. 그리고 압력은

$p = (\gamma - 1)(\rho e - 1/2\rho(u \cdot u))$ 의 관계식으로부터 구한다. 회전보다는 상대적 운동만 고려할 경우는 $\Omega = 0$ 으로 두고 $u_\Omega, v_\Omega, w_\Omega$ 에 블레이드의 운동속도만 고려한다.

열 플럭스 관계식은 다음과 같다.

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\rho} \right) \quad (2)$$

여기서 전도 열전달 계수는 $\kappa = \mu C_p / Pr$ 이며, C_p 는 정압비열, Pr은 Prandtl 수이다.

Boussinesq 가정 도입 시 점성계수는

$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t$ 와 같이 층류와 난류 두 항으로 나눌 수 있다. 같은 방법으로 전도 열전달 계수도 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa_{eff} = C_p \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \quad (3)$$

층류 점성 계수는 국소온도의 함수로 가정하면 Power law나 Sutherland 법칙으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{Pr} \quad \text{or}$$

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2} \frac{T_{ref} + S_1}{T + S_1} \quad (4)$$

여기서 Pr은 외부 입력값으로 설정되어 있으며, $S_1 = 110.3$ 이다. 온도를 상태방정식을 이용 압력과 밀도로 치환 후, 본 계산에 편리하도록 무차원화 하였다. 난류 점성계수는 난류모델링을 통해서 구해진다. 사용된 수치해석 기법으로는 외양적(explicit) 다단계 시간적분법(multi-stage time-stepping schemes)에 기초를 둔 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였다. 공간 이산화 과정으로 Jameson et al.[5]의 중앙차분법과 수렴의 더딤과 계산시간의 길어지는 단점을 가지고 있으나 강력한 충격파나 불연속면이 발생하는 유동문제를 다루는데 효과적인 Harten-Yee[6]의 upwind TVD 스킴을 회전효과를 고려하여 선택적으로 사용하였다. 계산시간의 절감을 위하여 국소시간전진기법(local time stepping methods), implicit residual smoothing 등을 사용하고 다중격자법은 선택적으로 사용하였다. 점성효과와 난류효과를 고려하기 위해 대수적 난류 모델인 Baldwin-Lomax[7] 난류모델을 사용하여 유동장 해석을 수행하였다. 3차원 점성유동에 있어서 박리가 적고 Reynolds수가 큰 유동장해석에 유용한 박층근사법(thin layer theory)을 선택적으로 사용함으로써 계산시간의 절감을 가져올수 있도록 하였다.

3.2 코드의 검증

유럽의 4개의 풍동에서 실험 검증을 거친 VKI 천음속 터빈 케이스케이드에 대해 upwind TVD스킴을 사용하여 비점성 압축성 Quasi-3D 유동장을 검증하였다. Inlet flow angle이 30° , 계산 입구 마하수가 0.279 출구 마하수가 0.969인 경우이다. Fig.1은 케이스케이드 형상과 계산 격자의 단면을 보이고 있다. Fig.2는 계산결과 마하수의 등고선으로서, 뒷전에서 충격파가 발생함을 알수 있다. Fig.3은 surface Mach number 분포로서, 계산된 결과 값이 점 데이터로 표현된 실험값과 전반적으로 잘 일치 하고 있음을 보여 준다. Fig.4는 Exit flow angle값을 주어진 M_2 에서의 계산값과 비교한 것이다.[8]

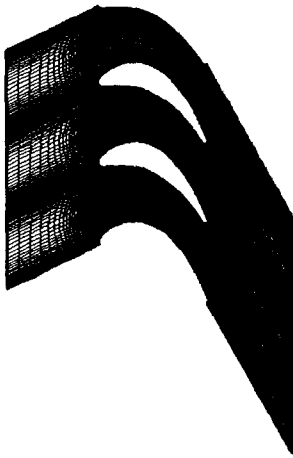


Fig. 1 VKI Turbine Grid(209x65x3)

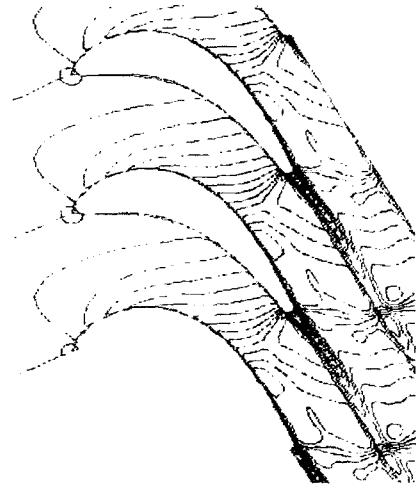


Fig. 2 Mach Number Contour

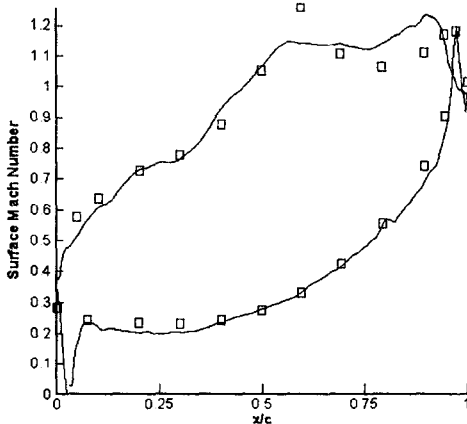


Fig.3 Surface mach number distribution

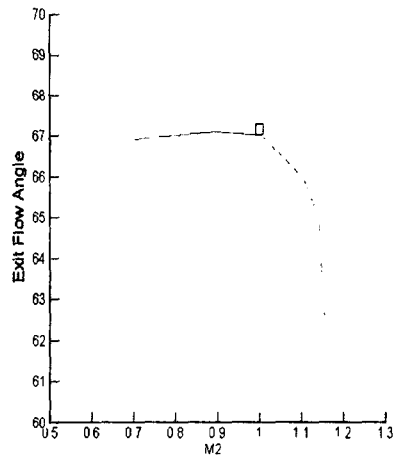


Fig. 4 Exit flow angle(Inlet=30deg)

4. 블레이드 형상 생성

2차원에서의 블레이드 형상 생성 방법으로서 는 Fig 5와 같이 5개의 surface function으로서 각각의 블레이드의 부분들을 표현하는 방법이 있다. 즉 leading edge, trailing edge를 원으로서 표현하고, suction side의 throat전후를 각각 third polynomial 및 circular arc, pressure side 를 third polynomial로 연결하는 방법이다.[9]

그러나 이런 방법은 만들어진 형상의 변경 및 곡률에 있어서의 연속성을 유지하는 것이 까다롭다. 본 연구에서는 상대적으로 적은 수의 설계 변수로서 복잡한 물체 형상을 정확하게 표현할 수 있는 Bezier 곡선을 사용하였다. 이를 사용하면 곡선의 제어점을 통해 재생성된 익형의 형상 변경이 용이하며, 익형의 곡률이 high order of continuity에 의해 연속적으로 변화한다. [10,11]

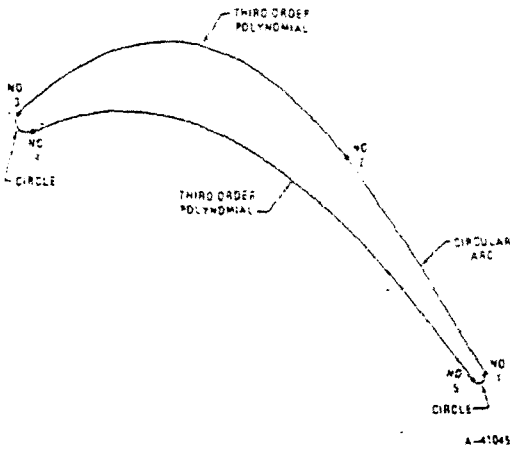


Fig. 5 Modeling blade shape using five surface function

Bezier를 사용하여 표현된 Bucket의 형상은 leading edge, suction side, pressure side 의 세 부분의 형상으로 재생성 하였으며, trailing edge 는 형상 변경 후 최종적으로 원호로 재생성 되도록 하였다. Bezier 곡선은 몇 개의 조정점을 통하여 곡선의 제어가 가능한 방법이다. 이 조정점들을 그래픽 화면에 나타내어, 사용자가 이 점들을 움직여 곡선을 예측가능한 형상으로 조절할수 있도록 허용한다. 일반적으로 k+1개의 조정점에 의해 정의되는 n차 Bezier 곡선은 다음과 같은 식으로 표현된다.[12]

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n V_i B_{i,n}(t) \quad (4)$$

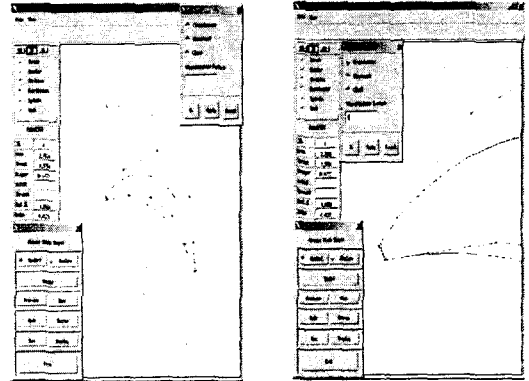
여기서 벡터 V_i 는 n+1개의 조정점을 나타낸다. 함수 $B_{i,n}(t)$ 는 Bezier 표현을 위한 blending 함수로서 Bernstein polynomial에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5)$$

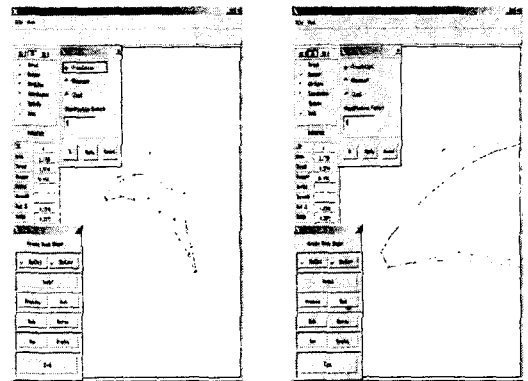
본 연구에서는 Preliminary design에서 주어진 Bucket의 단면의 형상을 Bezier curve로 재생성 하였다. 데이터 포인트 $[Q(t_i)]$ 에 대해 n+1개의 조정점은 다음 식으로부터 직접적으로 구할 수 있다.

$$[V_i] = [B_{i,k}(t_i)]^{-1} [Q(t_i)] \quad (6)$$

이 방법에서는 적절한 n+1개의 조정점을 생성시키기 위하여 요구되는 n+1개의 데이터점의 수보다 주어진 데이터점의 수가 많다는 문제점이 수반된다.[13] 이러한 문제의 해결을 위하여 조정점의 개수는 GUI 환경상에서 사용자에게 의한 외부 입력값으로 설정하여 6-10개의 조정점 중 초기 형상에 가장 근사한 모양을 임의적으로 선택할 수 있게 하였다. Fig. 6 (a),(b)는 각각 6개 및 9개의 조정점을 선택하였을 때 재생성된 Bezier Curve의 형상이다. Bezier Curve를 생성시키기 위하여 사용된 블레이드 초기형상 데이터는 두산 중공업에서 디자인된 Low Pressure Fourth Stage의 Bucket 데이터를 사용하였다.



(a) Bezier curve using 6 control point



(b) Bezier curve using 9 control point

Fig. 6 Blade shape using bezier curve

앞전형상에 있어서 9개의 조정점을 선택한 형상이 6개의 조정점을 선택한 커브보다 초기 형상과 더욱 유사한 형태로 재 생성됨을 알 수가 있다. 선택된 블레이드에 대하여 유동해석을 위한 입구조건으로 전압력, mass flowrate, 입구 마하수, inlet flow angle을 주었으며, 출구 조건은 정압력, 출구 마하수를 주었다. 각 단면별 조건은 두산 중공업에 주어진 각 블레이드 단면별 설계 데이터를 이용하였다.

유동해석을 위하여 블레이드 단면에 대한 grid 생성시 leading edge 및 trailing edge 부분은 계산의 신속성을 위하여 쉐기 형상으로 변환하여 해석하였으며, 계산후 선택된 단면에 대한 최종적 형상의 생성을 위하여 trailing edge 부분은 circle로서, leading edge 부분은 circle 또는 Bezier에 의해 생성된 곡선이 선택적으로 사용되게 하였다.

4번째 단면(30% Radial Height)에 대해 기하학적으로 설계된 블레이드 형상과 mach number distribution은 Fig. 7과 같다.

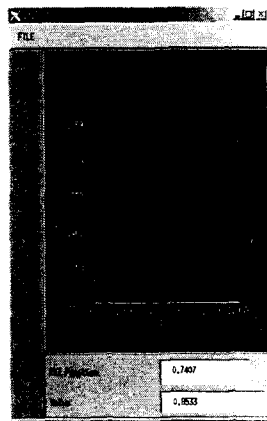


Fig 7. Initial blade shape and mach number distribution

초기 형상에 대한 mach number distribution이 앞전 및 뒷전에서 부드럽게 연결되고 있지 않음을 볼 수가 있다. 이는 초기 블레이드의 형상데이터가 단순히 기하학적인 면만을 고려하여 원호의 연결로 구성되었기 때문이다.

이 형상에 대하여 앞서 정의된 Bezier Curve

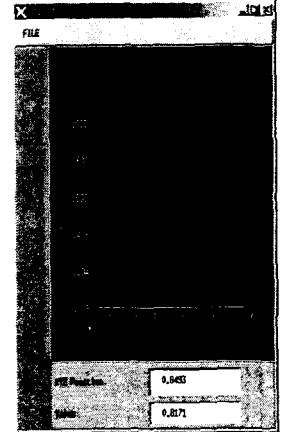


Fig 8. Remodeled blade shape and mach number distribution

및 GUI상에서 조정점을 재조정하여 생성된 블레이드 단면형상 및 mach number distribution은 Fig. 8과 같다. 앞선 초기형상과 비교하여 분포선이 많이 개선되어 있음을 알 수가 있다. 이와 같이 초기 형상에 대해 좀더 개선된 마하수 분포도를 가진, 즉 유체역학적으로 보다 나은 형상을 재생성하기 위해 초기 디자인부터 최종 디자인까지 소요되는 시간은 펜티엄 IV 1.4GHz에서 약 1-5분의 시간이 소요되었다.

LP Fourth Stage의 총 12개의 단면에 대하여 동일한 작업을 수행한 후 블레이드의 stacking을 수행하였다. 블레이드의 stacking을 위한 가장 일반적인 방법으로는 각 단면의 무게중심을 반경방향으로 일치하도록 하여 stack up하는 방법이 있다. 그러나 개별적으로 설계된 각 단면의 무게중심을 강제적으로 일치할 경우 고정익과의 간섭이 발생할 수 있다. 이때 간섭이 일어나는 단면을 재설계하거나 설계된 형상은 그대로 두고 간섭이 일어나는 단면을 무게 중심을 약간 어긋나게 하여 stack up을 하는 두 가지 방법이 있다.[14]

본 논문에서는 전체 단면의 무게 중심을 radial 방향으로 일치시켜 stacking한 후, 전체 단면상에서 leading edge, trailing edge를 보정해주는 방법을 사용하였다. 위의 방법을 수행한 최종적인 3차원 블레이드 형상은 Fig 9와 같다.

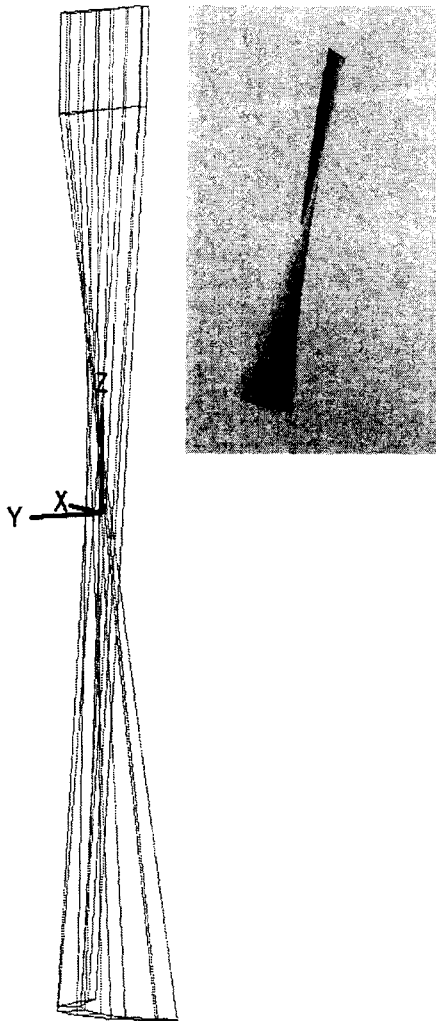


Fig 9. Final 3D Vane Shape

5. 결론

일반적인 역설계 방법이나 최적화 기법을 통한 블레이드 디자인은 설계 시간이 매우 길다는 점에서 현장에서 반복적으로 사용하기에는 무리가 있다. 본 논문에서는 현장에서 짧은 시간안에 손쉽게 사용가능한 블레이드 설계 프로그램의 개발에 목적을 두었다. 이를 위하여 익형형상의 생성 및 조정점을 통하여 손쉽게 제어가 가능한 Bezier 곡선을 이용하여 블레이드의 형상 변경을 용이하도록 하였다. 특히 준 3차원 유동 해석을 통하여 변경된 블레이드의 형상이 유체

역학적으로 타당한가를 검증하였으며, 이러한 형상들을 최종적으로 stack up함으로써, 부드러운 표면을 가진 3차원 블레이드를 구현 하였다. 설계 패키지의 개발에서 tool의 각종 기능을 graphic user interface를 사용함으로써 누구나 손쉽게 사용할 수 있게 하였다.

후기

이 논문은 2000 - 2002년 과학기술원 기계공학부의 BK과제로서 두산 중공업의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며, 산학협력에 감사를 표하는 바입니다.

참고 문헌

- [1] 조수용, 외, A Study on the Turbine Blade Optimization for Designing High Efficiency Gas Turbine, " 한국항공우주학회
- [2] Douglas A. Young, "The X Window System Programming and Applications with Xt, OSF/MOTIF Edition", (1992)
- [3] Mark J K "OpenGL Programming for the X Window System"
- [4] 이계영 "X-Window Applications Programming"
- [5] Jameson, A, Schmidt, W. & Turkel, E, "Numerical Solutions of the Euler Equations by Finite Volume Methods using Runge-Kutta Time Stepping Schemes" AIAA J. Paper 81-1259 (1981)
- [6] Harten A. "On a class of High Resolution Total-Variation-Stable Finite Difference Schemes." SIAM J. Num Anal, Vol.21 (1984) pp.1-23.
- [7] Baldwin, B.S & Lomax, H. "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows", AIAA J (1978) Paper78-257
- [8] Kiock, R. Lthaus, F. Baines, N.C, & Sieverding, C.H. "The Transonic Flow Through Flow Through a Plane Turbine Cascade as Measured in Four European Wind Tunnels", J. of Eng. for Gas



Turbine Power, Vlo. 108. pp.274-284

- [9] Prithcard, L.J "An Eleven Parameter Axial Turbine Airfoil Geometry Model", ASME 345 E. 47 St., New York. N.Y.10017
- [10] Burgreen, G .W "Aerodynamics Shape Optimization Using Preconditional Conjugate Gradient Methods," AIAA J. A Vol. 32
- [11] Sanjay Goel, John Cofer I. "Turbine Airfoil Design Optimization," General Electric Company Corporate Research & Development.
- [12] 이현찬, 채수원 "컴퓨터 그래픽스 및 형상 모델링"
- [13] 손명환, 이규진, "An Improved Method of Body Surface Representation in Shape Design Optimization of Transonic Airfoils and Wings", The 7th Symposium on Aircraft Development Technology(2000), pp.95-105
- [14] 조상현, 김영상 외, "Steam Turbine Rotating Blade Design Using Quasi-3 dimensional Flow Analysis," 유체기계 연구개발 발표회 논문집.(2001) pp. 303-308