

# 축류형 터빈 익형의 역설계에 의한 최소 형상변수에 관한 연구

조수용\* · 오군섭\*\* · 윤의수\*\* · 최범석\*\*

## Study on the Minimization of Shape Parameters by Reverse Design of an Axial Turbine Blade

Soo-Yong Cho\*, Koon-Sup Oh\*\*, Eui-Soo Yoon\*\*, Bum-Seog Choi\*\*

*Key Words: Axial Type Turbine (축류형 터빈), Shape Parameters (형상변수), Reverse Design (역설계), Aerodynamic Design (공력설계), Blade Design (익형설계)*

### ABSTRACT

Several reverse design methods are developed and applied to the suction or pressure surface for finding design values of blade geometry for a given axial turbine blade. Re-designed blade profiles using shape parameters are compared with measured blade data. Essential shape parameters for blade design are induced by the procedure of reverse design for best fitting. Characteristics of shape parameters are evaluated through the system design method and restriction conditions of structural stability or aerodynamic flow loss. Some of shape parameters *i.e* blade radius or exit blade angle *etc.*, are classified to weakly adjustable shape parameters, otherwise strongly adjustable shape parameters which would be applied for controlling blade shape. Average deviation values between the measured data and re-designed blade using shape parameters are calculated for each design method. Comparing with the average deviation for a given blade geometry, minimum shape parameters required to design a blade geometry are obtained.

### 1. 서 론

축류형 터빈은 항공기 및 산업용으로 많이 사용되어지고 있으며 대용량의 작동가스에서 작동한다. 본 연구에서는 터빈의 핵심 부품인 축류형 익형의 형상설계에 관한 것으로 특히 사용중인 터빈의 익형을 보수하거나 향상에 초점을 맞추고 있다. 참고용으로 선정된 터빈은 170 MW급 대형 가스터빈의 1단 동익이다. 익형의 형상설계는 터빈 설계의 초기 단계에서부터 시

작하여 형상화된 익형은 기계적 안정성 뿐만 아니라 열적 안정성 및 공력 손실의 최소화를 위하여 반복 설계되어진다.

익형을 형상화하는데는 여러 가지 방법들이 존재한다. 익형 표면의 속도나 압력을 기준으로 형상화하는 inverse<sup>(1,2)</sup> 방법이 있고 익형의 형상을 한 개나 여러 개의 다항식으로 표현하는 방법<sup>(3)</sup>도 있다. 그 외에도 Joukowski의 형태를 이용하는 방법<sup>(4)</sup>과 캠버선을 정하고 캠버선 위에 두께를 가하는 방법<sup>(5)</sup>도 있다. 이러한 방법은 새로운 형상설계에 적용 가능한 방법이나 주어진 익형의 역설계에는 적절치 못하다. 역설계에서는 익형의 개설계 뿐만 아니라 향상을 위하여 익형의 설계변수를 찾아야 하기 때문이다. 역설계에 적용가능한

\* 경상대학교 항공기부품기술연구소(항공기계공학부)

\*\* 한국기계연구원 열유체환경연구부

E-mail : sycho@nonrae.gsnu.ac.kr

방법으로 형상변수를 활용한 설계기법<sup>(6,7)</sup>이 개발되었으나 단순한 익형의 형상화에 관한 연구만이 수행되었으므로 다양한 형태의 익형에는 적용되지 못한다. 따라서 본 연구에서는 여러 형태의 익형 형상 데이터를 기준으로 역설계 기법을 개발하여 필요한 형상변수들을 유추하였고 형상변수를 사용한 여러 설계방법에 관한 연구가 이루어졌다. 또한 시스템의 설계 과정이나 효율 손실에 대한 제한조건 및 기계적 안정성을 고려하여 유추된 형상변수의 특징을 분류하였을 뿐만 아니라 익형의 향상을 위하여 요구되어지는 최소의 형상변수에 대한 조건도 구하였다.

## 2. 익형의 역설계를 위한 형상변수 설정

새로운 익형의 설계는 터빈의 기본설계에서 얻어진 작동 가스의 유동각, 속도벡터 및 열역학적인 값들이 사용되어지므로 익형의 입출구각, 축방향 익현(chord), 원주방향 익현 등 형상을 결정 짓는 변수들은 바로 적용이 가능하다. 하지만 역설계를 수행하는 경우에는 측정되어진 형상 데이터만을 사용하므로 형상변수를 유추하여야 한다. 재 설계되어지는 익형 형상의 정밀도를 평가하기 위하여 측정점 이외의 영역은 내삽법에 의하여 구한다. 우선 축방향 익현과 원주방향 익현을 구하기 위하여 후연의 중심위치를 계산한다. 후연의 형상은 구조적으로 취약하지 않으면 가능한 얇게 하는 것이 공력학적으로 유리하므로 후연부의 형상은 원형의 형상변수를 사용한다. 원형의 중심은 흡입면과 압력면이 원형에 접할 때 접점에 수직한 직선들의 교차점으로 계산되었다.

익형의 전연부가 기하학적으로 단순한 원형이나 타원인 경우라면 입구 썸기각으로부터 익형 입구각은 쉽게 추정이 가능하다. 하지만 입구에서의 최고 속도 제한이나 냉각을 고려하여 압력면에 비하여 흡입면의 곡률이 작도록 조절되었다면 입구 썸기각으로부터 단순히 익형 입구각을 찾지 못하게 된다. 따라서 전연부 형상의 중심선이 압력면으로 치우치게 되므로 이에 대한 보상을 하여야 한다. 이를 위하여 전연에서부터 익형 입구각 방향으로의 거리와 그 위치에서 수직한 익형의 두께와의 역비를 1.6으로 설정하여 이 영역 내부의 흡입면과 압력면에 있는 데이터간의 길이들이 최소가 되도록 하여 익형 입구각을 선정하였다.

터빈의 작동조건에 따라 전연의 형상은 원형으로 설계하지만 입구에서의 속도 및 냉각 등의 제한조건에

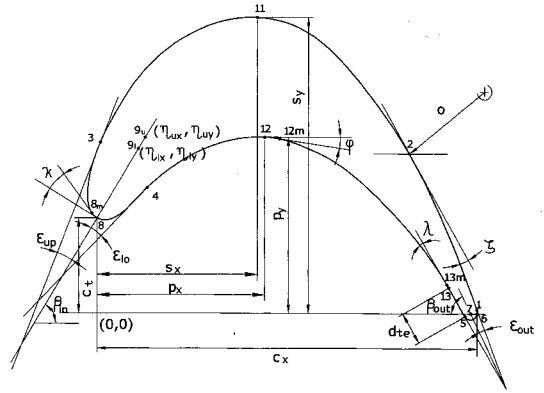


Fig. 1 Shape parameters for blade profile

따라 타원을 적용하기도 한다. 이러한 경우 타원의 중심은 입구 유동각을 따라 장축과 단축을 조정하여 찾는다. 설계시 전연부의 곡률 조절을 심하게 한 경우에는 3차 다항식을 적용하였는데 기울기의 조절을 위하여 전연부 회전각( $\kappa$ )의 형상변수를 사용하였다. 이와 같은 방법을 적용하면 전연부의 형상은 실제 측정된 데이터와 상당히 잘 일치하게 된다.

Fig. 1은 익형의 형상설계와 관련된 변수의 위치를 나타내고 있다. 후연부에서는 확산계수와 구조적인 제한 조건을 만족하기 위하여 흡입면에 스톱트(throat)의 위치를 설정한다. 피치에 의하여 스톱트의 위치를 계산하고 스톱트에서부터 후연까지 흡입면의 설계를 위하여 출구 썸기각( $\epsilon_{out}$ )과 흡입면의 출구 회전각( $\zeta$ )을 사용한다. 따라서 흡입면의 형상은 곡률에 의하여 직접 조절되기보다는 경계점에서의 기울기에 의하여 조절된다. 익형의 출구 썸기각은 후연 구조의 제한조건으로 인하여 조절의 범위가 한정되어 있으므로 흡입면의 출구 회전각을 조절하여 곡률의 변화를 얻도록 하였다. 이 영역의 형상은 원형이나 3차 다항식에 의하여 역설계 할 수 있도록 하였으며 필요에 따라서 직선의 선택도 가능하다.

흡입면의 입구 썸기각에 접하는 접점(pt3, pt4)의 위치는 흡입면이나 압력면의 형상에 크게 영향을 미친다. 설계시에는 이들 접점의 선정은 단순하지만 역설계의 경우에는 선택의 경우가 많다. 역설계에서는 전연부의 타원과 뒷부분 영역의 3차나 5차 다항식으로 하였을 때 측정 데이터와의 차이를 최소화 할 수 있는 접점으로 선정하였다. 이들 접점에서 흡입면과 압력면의 형상화를 위하여 5차 다항식을 사용하는 경우에는 경계점에서의 기울기를 고정하고 익형의 두께 조절을 위하여

Table 1 Essential shape parameters for blade design

Shape Parameters
Blade Radius ( $R$ )*
Axial and Tangential Chord ( $c_x, c_t$ )
Unguided Turning Angle ( $\zeta$ )
Inlet and Exit Blade Angle ( $\beta_{in}, \beta_{out}$ )
Upper and Lower Inlet Wedge Angle ( $\epsilon_{up}, \epsilon_{lo}$ )
Exit Wedge Angle ( $\epsilon_{out}$ )
Leading and Trailing Edge Radius ( $r_{le}, r_{te}$ )
Major and Minor Axis of Upper and Lower Ellipse at Leading Edge ( $\eta_{ux}, \eta_{uy}, \eta_{lx}, \eta_{ly}$ )
Number of Blades ( $N$ )*
Throat ( $o$ )
Peak Point on Suction Surface ( $s_x, s_y$ )
Peak Point on Pressure Surface ( $p_x, p_y$ )
Leading and Trailing Edge Turning Angle ( $\kappa, \lambda$ )
Turning Angle on Pressure Surface ( $\varphi$ )
Straight Section of Trailing Edge ( $d_{te}$ )

\* ; configuration parameters

여 최고점을 조절하는 방법으로 형상의 변화를 주었으며 3차 다항식의 경우에는 경계점에서 기울기와 위치를 변경하여 형상화를 하였다. 이상의 방법으로 익형의 형상을 역설계 하는 경우에 필요하게 되는 형상변수들을 Table 1에서 보여주고 있다.

### 3. 역설계 방법과 형상

익형의 형상으로부터 앞서 설정된 형상변수들을 사용하여 설계된 값들을 유지하는 데는 여러 가지 방법들이 가능하다. Table 2는 흡입면의 형상을 구하는 7가

지의 방법을 보여주고 있다. 역설계의 초기단계(step 1)에서 구하여야 하는 점점(pt3)은 방법 1에서 5까지는 전연부에 타원을 적용하고 흡입면에 5차 다항식을 적용하여 두 방정식이 동시에 충족데이터와의 편차가 가장 적은 위치로 선정하였다. 방법 6과 7은 적용하는 곡선을 바탕으로 점점(pt3)을 구하였다. [ ]안에 있는 변수는 형상화 과정에서 조절되어지는 변수를 표시한다.

압력면의 경우는 휘어지는 정도가 흡입면에 비하여 심하지 않고 전단부에서의 곡률 조정도 크지 않으므로 필요한 형상변수의 개수도 흡입면에 비하여 적다. Table 3은 압력면의 형상을 설계하는 여러 방법에 대하여 나타내고 있다. 흡입면과 마찬가지로 초기 설계단계에서 결정하여야 할 점점(pt4)은 방법2에서 5까지는 흡입면을 5차 다항식으로 적용하고 전연부는 타원을 적용하여 점점을 정하였다. 방법 1에서는 적용하는 3차 다항식을 사용하여 구하였다.

Fig. 2는 재 설계 되어진 익형의 형상과 측정된 형상을 보여주고 있으며 괄호안의 숫자는 흡입면과 압력면을 역설계하면서 Table 2와 3에 있는 방법들 중에서 사용되어진 방법을 나타내며 앞의 숫자가 흡입면에서의 방법이다. Z는 허브측에서의 거리를 나타내며 음수는 터빈이 후연으로 가면서 팽창되어지기 때문에 나타난 값이다. 측정되어진 터빈의 허브 반경은 1054 mm였다. 대형의 가스터빈 익형이므로 반경방향으로 비틀림이 있기 때문에 반경 방향을 변경하면서 측정되어진 익형은 다양한 형태의 축류형 익형을 포함하게 된다. 반경방향의 변화에 따른 비교 그림으로부터 역설계의

Table 2 Procedure of a suction surface design with controllable shape parameters

Method	step1	step2	step3	step4	remark
1	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \epsilon_{out}$	pt1→pt2, circle [ $\zeta$ ]	pt2→pt3, 3rd-order polynomial [ $\epsilon_{up}$ ]	pt3→pt8, ellipse	
2	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \epsilon_{out}$	pt8→pt3, ellipse [ $\epsilon_{up}$ ]	pt3→pt2, 3rd-order polynomial [ $\zeta$ ]	pt2→pt1, circle	
3	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \epsilon_{up}$	pt3→pt2, 5th-order polynomial [pt11]	pt2→pt1, 3rd-order polynomial [ $\epsilon_{out}$ ]	pt3→pt8m, 3rd-order polynomial [ $\kappa$ ]	good for blade thickness control
4	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \zeta$	pt8→pt3, ellipse [ $\epsilon_{up}$ ]	pt3→pt2, 5th-order polynomial [pt11]	pt2→pt1, 3rd-order polynomial [ $\epsilon_{out}$ ]	good for blade thickness control
5	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \epsilon_{up}, \zeta$	pt8→pt3, ellipse	pt3→pt2, 5th-order polynomial [pt11]	pt2→pt1, 3rd-order polynomial [ $\epsilon_{out}$ ]	good for blade thickness control
6	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \epsilon_{up}, \epsilon_{out}$	pt8→pt3, ellipse	pt3→pt2, 3rd-order polynomial [ $\zeta$ ]	pt2→pt1, circle	
7	$\beta_{in}, pt8, pt3, o, \epsilon_{up}$	pt3→pt8m, 3rd-order polynomial [ $\kappa$ ]	pt3→pt2, 3rd-order polynomial [ $\zeta$ ]	pt2→pt1, 3rd-order polynomial [ $\epsilon_{out}$ ]	good for leading edge thickness on suction surface

Table 3 Procedure of a pressure surface design with controllable shape parameters

Method	step1	step2	step3	step4	remark
1	$\beta_{in}$ , pt8, pt4, $\epsilon_{lo}$	pt8→pt4, ellipse	pt4→pt5, 3rd-order polynomial [ $\epsilon_{out}$ ]		
2	$\beta_{in}$ , pt8, pt4, $\epsilon_{lo}$ , $\epsilon_{out}$	pt8→pt4, ellipse	pt4→pt5, 5th-order polynomial [pt12]		
3	$\beta_{in}$ , pt8, pt4, $\epsilon_{lo}$ , $\epsilon_{out}$	pt8→pt4, ellipse	pt4→pt12, 3rd-order polynomial [-pt12]	pt12→pt5, 3rd-order polynomial [+pt12]	good for linear part control
4	$\beta_{in}$ , pt8, pt4, $\epsilon_{lo}$ , $\epsilon_{out}$	pt8→pt4, ellipse	pt4→pt12, 3rd-order polynomial [pt12]	pt12m→pt5, 3rd-order polynomial [ $\varphi$ ]	
5	$\beta_{in}$ , pt8, pt4, $\epsilon_{lo}$ , $\epsilon_{out}$	pt8→pt4, ellipse	pt5→pt13, linear	pt4→pt13m, 5th-order polynomial [pt12, $\lambda$ ]	good for structure control near trailing edge

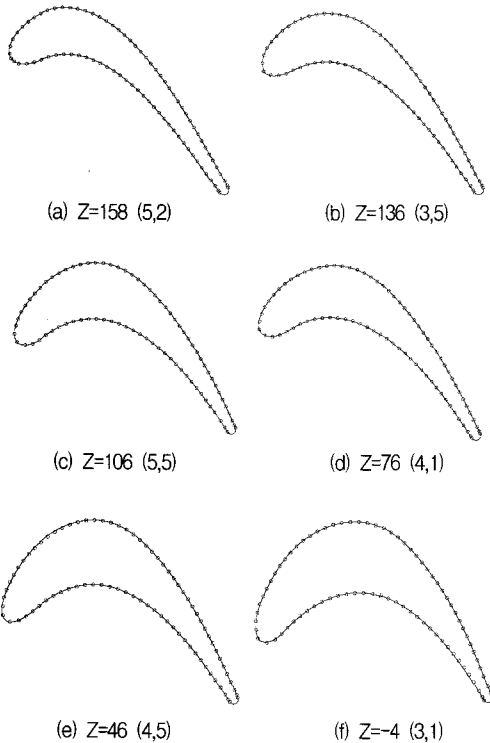


Fig. 2 Blade profiles along the radial direction. Circles are measured points and lines show re-designed blade profiles with shape parameters

방법은 측정 결과를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 Z=46의 높이에서의 역설계를 위한 형상 변수의 설계값을 나타내고 있다. 역설계의 초기단계에서 결정된 스토트나 익현의 길이 등은 변화가 없으며 스토트로부터 흡입면의 후연부 조절을 위하여 회전각 ( $\zeta$ )을 변경함에 따라 익형 출구각과 출구 췌기각의 미

소한 변화를 보여주고 있다. 입구 췌기각은 압력면의 경우 변화폭이 적은 것은 설계시 조절되어지지 않았음을 의미하며 반면에 흡입면의 경우는 곡률을 조절하였기에 선택하는 설계 방법에 따라 변화가 나타난다. 전연부의 익형은 원형으로 설계 되어지지 않았기에 원형은 적용하지 않았으며 타원이나 3차 다항식에 의하여 잘 일치하는 결과를 얻었다. 여러 방법의 적용에 따른 오차값은 5절에 나타내었다.

#### 4. 형상변수의 특성

익형의 설계 과정에서 선정된 많은 형상변수들 중에서 시스템의 기본설계 과정에서 설정되어질 수 있는 형상변수도 있고 반면에 익형의 설계 과정에서 고려하여야 할 조건에 의하여 결정되어지는 변수들도 있다. 이러한 변수는 익형의 형상 설계시 조절할 수 있는 범위가 제한되어진 형상변수(weakly adjustable shape parameter)가 된다. 따라서 설계 과정이나 제한 조건을 고려하여 형상변수의 특성에 대하여 살펴본다.

터빈 설계시 출력을 기준으로 공기량과 엔탈피 변화를 결정하게 된다. 결정된 공기량은 가스의 축방향 유동 속도를 고려하여 허브와 팁 반경이 결정되어진다. 따라서 익형의 반경(R)은 기본 설계시 선정되어지는 변수라 하겠다. 또한 엔탈피의 변화값은 터빈의 회전 속도를 바탕으로 가스의 유동각을 결정하게 된다.

가스의 유동각은 익형의 입·출구에서의 속도 삼각형을 형성하지만 이 속도 삼각형이 익형의 입·출구각을 의미하지는 않는다. 운전시 가스의 유동방향이 요구하는 속도 삼각형을 형성 할 수 있도록 하기 위하여 후연에서의 가스흐름의 편차각(deviation angle)과 전연에서의 입사각에 대한 고려를 하여 효율의 감소가

Table 4 Design values of shape parameters for re-designing a blade profile at Z=46 [unit:mm]

Shape Parameters	(3,5) method	(5,5) method	(4,5) method	(5,2) method	(7,1) method	(2,4) method
(R) Z=46	1104.125	1104.125	1104.125	1104.125	1104.125	1104.125
$C_x, C_t$	102.95, 33.83	102.95, 33.83	102.95, 33.83	102.95, 33.83	102.95, 33.83	102.95, 33.83
$\zeta$	13.22	13.22	13.22	13.22	11.53	14.35
$\beta_{in}, \beta_{out}$	53.20, 61.59	53.20, 61.59	53.20, 61.59	53.20, 62.08	53.20, 62.36	53.20, 62.08
$\epsilon_{up}, \epsilon_{lo}$	0.29, 12.93	0.29, 12.93	1.94, 12.93	0.29, 12.93	0.45, 12.52	1.95, 12.93
$\epsilon_{out}$	5.03	5.03	5.03	4.55	4.27	4.55
$\Gamma_{le}, \Gamma_{te}$	-, 2.00	-, 2.00	-, 2.00	-, 2.00	-, 2.00	-, 2.00
$\eta_{ux}, \eta_{uy}$	-, -	24.32, 9.29	26.54, 9.33	24.32, 9.29	-, -	26.54, 9.33
$\eta_{lx}, \eta_{ly}$	21.63, 8.24	21.63, 8.24	21.63, 8.24	21.63, 8.24	23.69, 8.58	21.63, 8.24
N	97	97	97	97	97	97
o	30.25	30.25	30.25	30.25	30.25	30.25
$S_x, S_y$	38.75, 77.37	38.75, 77.37	38.57, 77.37	38.75, 77.37	-, -	-, -
$D_x, D_y$	38.42, 49.48	38.42, 49.48	38.42, 49.48	38.75, 49.48	-, -	40.67, 49.48
$\kappa, \lambda$	28.94, 1.40	-, 1.40	-, 1.40	-, -	46.73, -	-, -
$d_{te}$	13.22	13.22	13.22	-	-	-

없도록 하여야 한다. 이를 위하여 입사각의 변화에 따른 익형의 형상손실을 참조하여야 하는데 캐스케이드 실험의 결과<sup>(8)</sup>는 반동터빈의 경우는  $\pm 15^\circ$ 의 입사각 변화에 대해 형상손실의 변화는 차이를 보이지 않고 증동터빈은  $5^\circ$ 의 입사각에서 형상손실이 최소가 됨을 보여준다. 부분부하의 경우에 대비하여 적절한 입사각을 선정하여야 하므로 익형의 입구각( $\beta_{in}$ )은 입사각의 설정에 따라 설계시 조절량이 큰 형상변수가 된다.

익형의 출구각( $\beta_{out}$ )은 가스의 출구각에 대하여 편차각을 고려하여야 한다. 편차각은 익형의 형상과 유동속도에 따라 달라지나 Carter의 실험식을 적용하거나 실험의 결과<sup>(8)</sup>를 참조하여 정할 수 있다. 하지만 익형의 출구각 선정에 영향을 주는 편차각 크기의 변화는 그다지 크지 않음으로 익형의 출구각은 조절범위가 적은 형상변수가 된다.

기본 설계 후 익형의 설계를 위하여 결정하여야 할 주요한 변수가 현절비(solidity)이다. 현절비( $\sigma=c/s$ )의 값으로부터 익형의 설계를 위한 축 방향 및 원주 방향 익현을 결정하여야 하기 때문이다. 현절비의 설정은 시스템의 효율 증가 뿐만 아니라 제작비용의 감소와 관련이 있기 때문에 최적값을 선정하여야 한다. 중량 감소에 따른 제작비용의 저감 및 익형의 냉각을 고려하여 현절비를 최소화 하는 것이 좋으나 구조적인 문제와 흡입면에서의 확산계수 증대에 의한 손실의 증가를 초래하기 때문에 상호보완에 따라 설정된다.

현절비는 익형의 압력면과 흡입면에서의 압력 차에 의한 회전력과 가스의 운동량 변화와 같다고 가정하고 Zweifel 부하계수를 0.9에서 1정도 적용하여 구할 수

있다. 그 외에는 캐스케이드 실험<sup>(9)</sup>의 결과를 이용하여 형상손실이 최소가 되는 현절비를 구할 수 있다. 다른 형상이나 3차원 형상의 익형을 적용하게 되면 최적의 현절비는 달라지겠지만 상기의 방법으로 설정한 결과는 시스템의 성능에 큰 차이를 나타내지 않는다.

현절비로 부터 익형의 설계를 시도 할 수는 없다. 따라서 명확히 익현을 알아야 한다. 익현의 길이는 익형의 종횡비(aspect ratio)와 함께 결정되어지는데 종횡비( $AR=h/c$ )는 비록 성능에 미치는 영향이 크지 않다 하여도 아주 큰 값과 작은 값은 피하여야 한다. 종횡비가 아주 작은 경우에는 익형의 높이가 상대적으로 적기 때문에 틱간극에 의한 누설손실과 2차 유동 손실의 영향이 크게 된다. 반면에 종횡비를 크게 하면 익형의 진동 문제를 야기하게 되므로 이러한 제한조건을 고려하여 종횡비를 선정하게 된다. 종횡비는 현절비와 함께 익형의 익현과 피치를 결정하게 되며 피치는 터빈 익형의 개수(N)를 결정하게 된다. 익형의 입·출구각에 의한 설치각으로부터 익형의 원주방향의 익현( $\alpha$ )과 축방향의 익현( $\alpha_x$ )을 결정하게 된다. 이상에서 현절비와 종횡비는 익형의 개수 및 축방향과 원주방향의 익현을 결정하게 되나 형상변수로 선정된 이들은 설계 방식에 의하여 결정되어짐을 알 수 있다.

스포트의 폭은 익형의 흡입면에서의 형상과 후연의 두께( $t_{te}$ )에 따라 다소 달라진다. 하지만 스포트에서 후연까지 흡입면이 직선적으로 변화한다고 가정하여 후연에서의 출구 유동각과 피치와의 관계식을 적용하는 경우에 출구각이  $60^\circ$  이상이면 상당히 잘 맞으며 출구각이  $35^\circ$  이하인 경우에는 약간의 차이가 발생되어진다.

그러므로 출구각이 결정되면 후연의 두께와 피치를 참고하여 스포트의 폭을 구할 수 있게 된다.

스포트부에서 후연까지 연결하는 흡입면의 결정은 후연부의 구조적인 문제와 확산계수에 따른 손실의 크기를 파악하여야 한다. 낮은 확산계수가 요구되는 높은 아음속이나 천이 영역에서 작동하는 경우에는 직선적으로 설계하여 유동의 가속을 억제한다. 하지만 이 부분에 곡률을 가하게 되면 확산계수의 증대에 의하여 손실은 다소 증가하지만 구조적으로 안정되며 부하를 증가하게 된다. 마하수가 0.8이하에서는 곡률변화에 따른 손실의 발생이 그다지 크지 않음으로<sup>(10)</sup> 흡입면 출구 회전각( $\zeta$ )은 조절 범위가 큰 형상변수가 된다.

익형 출구에서의 썰기각(wedge angle)은 후연부의 흡입면 형상을 결정하는데 영향을 준다. 출구 썰기각은 후연에서의 구조적인 문제를 후연 반경과 함께 결정한다. 후연 반경은 공력학적인 관점에서 얇게 하는 것이 유리하나 고온에서 작동하는 터빈의 경우에는 얇은 후연이 구조적으로 가장 취약하며 냉각홀의 설치도 어렵게 한다. 또한 제작을 위하여 최소한의 반경을 필요로 하므로 이러한 제한 조건에 따라 결정된다. 출구 썰기각도 후연 반경과 마찬가지로 후연부의 구조적인 안정성에 따라 제한된 형상변수가 된다.

익형 입구 부분의 형상은 원형의 경우가 적용되는 경우가 많다. 하지만 원형의 경우는 곡률이 크므로 전연부의 압력면이나 흡입면에서 높은 속도가 발생된다. 높은 속도는 후연부로 가면서 가속되어 마하수가 증대되어 익형의 내부에서 초크가 발생할 수도 있다. 이러한 경우에는 확산계수의 증대에 의하여 손실이 급격히 증가한다. 터빈의 경우에는 입구에서의 유동속도가 후연부에 비하여 상대적으로 적으므로 전연부 형상설계의 중요성이 상대적으로 떨어지나 반동도가 낮은 경우나 입구 마하수가 높은 경우에는 전연부에서 피크 마하수를 제한 할 수 있도록 설계한다.

전연부에서 곡률이 큰 경우에는 구조적으로 안정성은 증대하게 되고 냉각공기의 흡을 제작하는데도 유리하나 피크 속도를 제한하기 위하여서는 곡률이 적은 형상으로 설계하여야 한다. 그러므로 원형 대신에 타원의 형상을 채용 할 수 있다. 하지만 피크 속도의 발생이 주로 흡입면에서 발생되어지므로 입구부에서의 흡입면과 압력면의 형상을 다르게 채택할 수 있으며 압력면은 흡입면에 비하여 곡률이 큰 형상으로 설계할 수 있다. 따라서 전연부 형상은 설계시 작동 조건에 따라 효율 감소를 방지하기 위하여 적극적으로 형상의

변화를 시도하여야 하는 부분임을 알 수 있다.

익형 전연부에서의 썰기각은 익형의 두께 뿐만 아니라 전체 압력면과 흡입면의 형상을 결정하는 중요한 형상변수가 된다. 입구 썰기각의 증가는 익형의 두께를 증대시키고 썰기각의 감소는 익형의 두께를 감소시킨다. 익형에서 고려하여야 할 원심력에 의한 인장력, 압력차에 의한 굽힘 모멘트 및 비틀림 모멘트에 대응하는 주요 변수가 된다. 또한 전연부의 흡입면과 압력면의 곡률을 다르게 선정한 경우에는 흡입면에서의 접점과 압력면에서의 접점의 위치도 설정하는 썰기각에 따라 위치의 이동이 크게 되므로 입구 썰기각은 조절의 범위가 큰 형상변수가 된다.

흡입면이나 압력면에서 최고점의 위치를 변경하기 위한 방법으로써 전연부나 후연부에서 결정된 형상변수의 변화 없이 익형의 부하, 확산계수, 두께를 조절할 수 있다. 따라서 5차 다항식을 사용하여 익형의 형상을 표현한다. 최고 위치의 조절을 위한 형상변수는 익형의 역설계시 효과적인 방법이 되나 설계시에는 최고점의 위치를 선택하는 것보다는 경계영역의 형상변수를 조절하는 것이 유리하므로 조절 범위가 약한 형상변수가 되어진다.

반동도가 적은 경우나 입구 마하수가 큰 유동의 경우에는 익형의 냉각과 관련하여 단순한 기하학적인 형상만으로는 곡률을 감소시키기가 어렵다. 곡률의 감소를 위하여 썰기각의 감소에만 의존한다면 익형의 전체 형상이 구조적으로 취약하게 된다. 따라서 곡률 조절을 위하여 작은 원형을 조절하여 3차원 다항식이 이 원형에 접하도록 하면 곡면은 전체적으로 매끈하여진다. 곡면의 연결을 위한 반경은 형상 선정에 큰 영향을 미치지 않지만 입구 회전각( $\kappa$ )은 곡률을 결정하는 조절의 정도가 큰 형상변수가 된다.

압력면의 형상조절을 위한 다른 방식으로 후연부 pt5에서 pt13까지 직선적으로 변화를 주는 경우이며 출구에서 유동의 혼합에 의한 손실을 감소할 수 있는 장점도 있다. 또한 구조적으로도 다소의 보강이 이루어진다. 하지만 직선거리가 길어지게 되면 후연부가 시작되는 영역은 오히려 구조적으로 취약하게 되므로 적당한 거리가 필요하다. 이 부분의 변화는 상당히 적은 변화를 만들고 있으므로 조절의 변화 폭이 적은 형상변수가 된다. 후연의 직선부와 연속성 있는 곡면을 만들기 위하여서는 새로운 접점(pt13m)을 사용하고 압력면 후연부에 회전각( $\lambda$ )를 설정하면 압력면 형상에 큰 영향을 주게 된다.

Table 5 Characteristics of shape parameters for blade design

Shape Parameters	Characteristics
Blade Radius (R)	Weak
Axial and Tangential Chord ( $c_x, c_t$ )	Weak
Unguided turning Angle ( $\zeta$ )	Strong
Inlet Blade Angle ( $\beta_{in}$ )	Strong
Outlet Blade Angle ( $\beta_{out}$ )	Weak
Inlet Wedge Angle ( $\varepsilon_{in}, \varepsilon_{lo}$ )	Strong
Exit Wedge Angle ( $\varepsilon_{out}$ )	Weak
Leading Edge Radius ( $r_{le}$ )	Strong
Trailing Edge Radius ( $r_{te}$ )	Weak
Major and Minor Axis of Ellipse ( $\eta_{ux}, \eta_{wy}, \eta_{lx}, \eta_{ly}$ )	Strong
Number of Blades (N)	Weak
Throat ( $\sigma$ )	Weak
Peak Point on Suction ( $s_x, s_y$ )	Weak
Peak Point on Pressure ( $p_x, p_y$ )	Weak
Turning Angle ( $\kappa, \lambda$ )	Strong
Turning Angle ( $\varphi$ )	Weak
Straight Section ( $d_{te}$ )	Weak

압력면의 최고 위치를 기준으로 분리하여 설계를 하는 경우에 각각 3차 다항식으로 표현가능하나 뒷부분에 변화를 얻고자 하는 경우에 연속성 있는 곡면의 형성을 위하여 작은 원형에 접하는 점점(pt12m)을 활용한다. 그리고 회전각( $\varphi$ )를 사용하게 되는데 이러한 방법은 역설계시에서는 유리하게 작용하나 설계시에는 입구 썸기각과 출구 회전각( $\lambda$ )를 사용하여 조절 가능하다. 이상의 형상변수들이 설계과정의 제한조건에 의하여 조절의 범위가 다르게 된다. Table 5는 각 형상변수의 특징을 나타내고 있으며 익형의 형상은 여러 형상변수들의 특징이 종합되어 설계된다<sup>(11)</sup>.

### 5. 형상변수의 영향

익형의 재설계에 적용하는 방법에 따라 형상변수의 설계값들을 Table 4에 나타내었지만 어떤 값들은 미세한 변화를 보이고 그렇지 않은 값들도 있다. 이러한 차이는 Table 5에서 보여주는 형상변수의 특징과 관련이 있음을 나타내고 있다. 하지만 이들을 사용한 재설계의 정확도는 설계된 익형의 형상만으로는 파악하기가 곤란하다. 따라서 적용된 방법에 대한 차이를 평균편차를 사용하여 각각의 형상과 방법에 따른 차이를 구하였다

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\tilde{u} - \hat{u})^2}{P}} \quad (1)$$

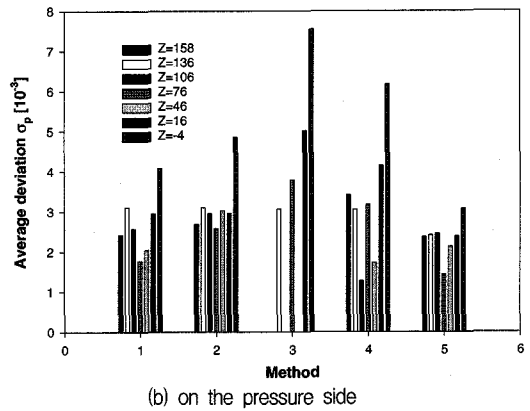
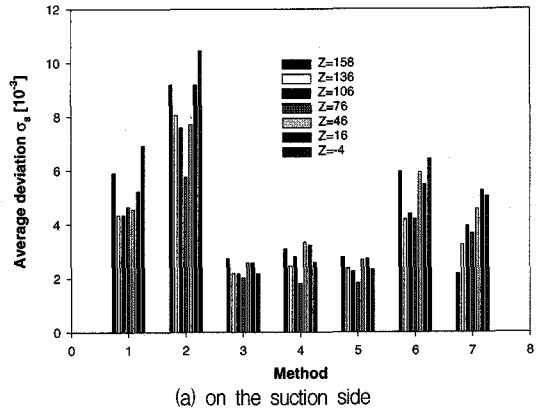


Fig. 3 Average deviations according to chosen methods

식 (1)에서의  $P$ 는 비교되어진 개수를 의미하고  $\tilde{u}$ 와  $\hat{u}$ 는 측정되어진 데이터와 재설계되어진 데이터를 각각 의미한다. Fig. 3은 선택되어지는 방법에 따라 평균편차를 나타내고 있다. 흡입면의 경우는 방법 1과 2에서 사용된 형상변수보다 2개의 형상변수를 추가하는 방법 3~5의 경우는 평균편차가 줄어들고 있음을 보여준다. 따라서 설계변수를 증가하지 않고 평균 편차를 줄이기 위하여 방법 6이나 7을 사용하는 경우를 보면 설계 방법에 따라 평균편차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 특히 방법 7의 경우는 조절 범위가 큰 변수를 줄이게 되는 장점도 있다. 압력면은 방법 5가 좋은 결과를 보여주나 형상변수를 많이 적용하게됨에 따라 평균편차의 폭이 그다지 크지 않으므로 형상변수를 가장 적게 사용하는 방법1이 적절하다는 것을 알 수 있다.

Table 6은 사용하는 방법에 따라 사용되어지는 형상변수들을 나타내고 있다. 방법에서의 괄호안의 숫자는 앞부분과 뒷부분이 각각 흡입면과 압력면의 선택방

Table 6 Numbers of shape parameters for chosen methods

Method	Basic variables	Strong variables	Weak variables	Total
(1,1)	$\beta_{in}, \beta_{out},$ $C_x, C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \eta_{ux}, \eta_{uy}, \epsilon_{up}$		14 (8,6)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$		
(2,2)	$\beta_{in}, \beta_{out},$ $C_x, C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \eta_{ux}, \eta_{uy}, \epsilon_{up}$	$P_x, D_y$	16 (8,8)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$		
(3,3)	$\beta_{in}, \beta_{out},$ $C_x, C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \kappa, \epsilon_{up}$	$P_x, D_y, \Gamma_{8m}$	19 (7,11)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$	$S_x, S_y, l_{2m}$	
(4,4)	$\beta_{in}, \beta_{out},$ $C_x, C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \eta_{ux}, \eta_{uy}, \epsilon_{up}$	$P_x, D_y$	20 (8,12)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$	$S_x, S_y, \varphi, l_{2m}$	
(5,5)	$\beta_{in}, \beta_{out}, C_x,$ $C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \eta_{ux}, \eta_{uy}, \epsilon_{up}$	$P_x, D_y$	21 (8,13)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$	$S_x, S_y, \lambda, d_{te}, \Gamma_{3m}$	
(6,1)	$\beta_{in}, \beta_{out}, C_x,$ $C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \eta_{ux}, \eta_{uy}, \epsilon_{up}$		14 (8,6)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$		
(7,1)	$\beta_{in}, \beta_{out}, C_x,$ $C_t, O, \Gamma_{te}, \epsilon_{out}$	$\zeta, \kappa, \epsilon_{up}$	$\Gamma_{8m}$	14 (7,7)
		$\eta_{lx}, \eta_{ly}, \epsilon_{lo}$		

법을 나타낸다. 총 개수에서의 괄호의 숫자는 조절범위가 강한 것과 약한 것들의 개수들을 나타낸다. 압력면의 역설계방법은 강 조절의 형상변수가 증대되어지지 않으나 선택에 따라서 많은 형상변수를 필요하게 됨을 알 수 있다.

### 6. 결 론

축류형 터빈 익형의 역설계를 통하여 익형의 재설계 및 향상을 위한 형상변수들을 유추하였다. 유추된 형상변수들로부터 설계과정이나 구조 및 효율의 제약 조건에 의하여 조절의 영향이 제한된 형상변수와 조절의 영향이 큰 형상변수로 분류하였다. 3차원적으로 비틀어진 익형을 참고하여 형상변수를 사용한 여러 역설계 방법에 의하여 익형을 재설계하였으므로 일반적인 익형의 설계에도 적용이 가능하다는 것을 보여 주었다. 형상변수를 줄이기 위하여 재설계의 정확도에 대한 비교를 통하여 최소의 형상변수를 사용하여 설계할 수 있는 방법이 제시되었으므로 익형의 설계 및 효율 향상을 위한 연구에 많은 도움이 될 것이다.

### 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

### 참고문헌

- (1) Demeulenare, A. and Braembussche, R., 1998, "Three-Dimensional Inverse Method for Turbomachinery Blading Design", *J. of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 247~254.
- (2) Jiang, J. and Dang, T., 1997, "Design Method for Turbomachine Blades with Finite Thickness by the Circulation Method", *J. of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 539~543.
- (3) Engeli, M., Zollinger, H. J., and Allemann, J. C., 1978, "A Computer Program for the Design of Turbomachinery Blades", *ASME Paper 78-GT-36*.
- (4) Spiegel, M., 1964, *Complex Variable*, McGraw-Hill.
- (5) Dunham, J., 1974, "A Parametric Method of Turbine Blade Profile Design", *ASME Paper 74-GT-119*.
- (6) Pritchard L. J., 1985, "An Eleven Parameter Axial Turbine Geometry Model", *ASME Paper 85-GT-219*.
- (7) Korakiantis, T., 1993, "Prescribed-Curvature-Distribution Airfoils for the Preliminary Geometric Design of Turbomachinery Cascades", *J. of Turbomachinery*, Vol. 115, pp. 325~333.
- (8) Cohen, H., Rogers, G. F. C. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1993, *Gas Turbine Theory*, Longman Scientific and Technical.
- (9) Stewart, L. and Glassman, A. J., 1973, *Turbine Design and Application*, Vol. 2 NASA SP-290.
- (10) Horlock, J. H., 1973, *Axial Flow Turbine*, Robert Krieger Publishing Co.
- (11) Cho, S. Y., Oh, K. S. and Choi, B. S., 2000, "Study of Design Parameters for Designing an Axial Turbine Blade Geometry", *ISROMAC-8* pp. 222~228