

# 점 데이터를 이용한 블레이드 곡면 모델링 시스템 개발

김영일\*,#

\*두산중공업 증기터빈설계팀

## Development of Blade Surface Modeling System Using Point Data

Yeoung-Il Kim\*,#

\*Steam Turbine Design Team, Doosan Heavy Industries & Construction

(Received 15 September 2019; received in revised form 20 September 2019; accepted 30 September 2019)

### ABSTRACT

Stationary and rotating blades can be found in a steam turbine generator and the airfoil shapes of these blades can be defined by point data from an aerodynamic design system. The main design process of blades is composed of two steps: first, the blade surface is modeled with the point data; and then, the section data is generated which contains composite curves with line segments and arcs for CAE of the blade. The surface is modeled by a curve-net defined by the point data, which may be extended to obtain the section data to model the blade. This paper presents methods for automating the above-mentioned steps, which have been implemented in the commercial CAD/CAM system, Unigraphics, with API functions written in C-language. Finally, the proposed methods have been applied to model the blade of a steam turbine generator.

**Key Words** : Blade(블레이드), Surface Fitting(곡면보간), Surface Extension(곡면연장)

## 1. 서 론

터빈발전기에는 고정 블레이드와 회전 블레이드가 있으며, 각각 이들을 파티션(partition)과 버킷(bucket)이라고 한다. 에어포일(airfoil) 형상의 파티션은 아우터 링(outer ring)과 이너 링(inner ring) 사이에 원형으로 조립되는데, 이 조립품을 다이어프램(diaphragm)이라고 한다. 버킷은 Fig. 1과 같이 에어포일 형상을 가진 베인(vane) 외에 커버(cover)와 도버테일(dovetail) 형상으로 이루어지며, 원형 배열로 로터(rotor)에 조립된다<sup>[1][2]</sup>. Fig. 2는 원형 배열된 버킷과 다이어프램을 보여준다.

터빈 내부로 공급되는 고온·고압의 증기 흐름은 파티션을 통과하면서 버킷을 회전시키기 위한 최적의 방향으로 바뀌게 된다. 이처럼 어떤 물체에 미치는 유체 흐름을 최적화하기 위하여 유체역학적으로 가장 적합한 에어포일 형상을 설계하는 것을 공력설계(aerodynamic design)라고 하며, 이 결과는 터빈발전기의 성능에 많은 영향을 끼친다<sup>[3]</sup>. 공력설계시스템에서 정의된 에어포일 형상은 3차원 모델링 이후, 강체해석을 통하여 최종 형상이 결정된다. 그런데 본 연구에서와 같이 에어포일 형상이 점 데이터로 출력될 경우, 많은 점 데이터의 입력과 곡면 생성의 수작업을 대체할 자동 모델링 기능이 요구되며, 강체해석 시스템에 입력하는 에어포일의 단면 정보 생성 역시 수작업에 의한 처리가 힘들다. 따라서 본 연구에서는 터빈발

# Corresponding Author : yeoungil.kim@doosan.com  
Tel: +82-55-278-6635, Fax: +82-55-278-6735

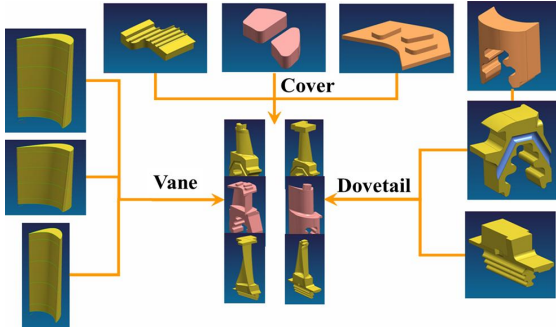


Fig. 1 Buckets

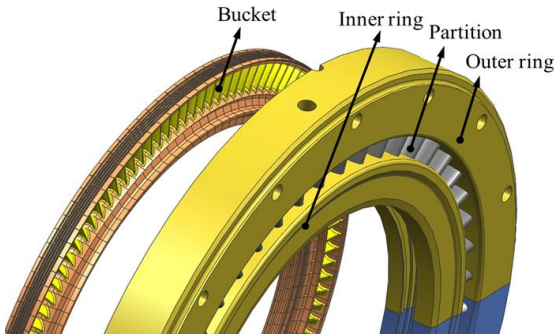


Fig. 2 An array of buckets and a diaphragm

전기 내에서 중요한 역할을 담당하고 있는 두 종류의 블레이드의 에어포일 형상인 파티션과 베인 곡면을 자동으로 모델링하고, 강체해석 시스템의 입력 데이터를 생성하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 상용 CAD/CAM 시스템인 Unigraphics 기반으로 API와 C 언어를 이용하여 구현하였다<sup>[4]</sup>.

## 2. 블레이드 곡면 생성과 연장

Fig. 3은 공력설계시스템에서 생성된 파티션과 베인의 프로파일을 도시하고, 파티션에 의해 흐름이 바뀐 증기로 회전하는 베인의 회전 방향을 보여주고 있다. 파티션과 베인용 점 데이터는 같은 파일에 저장되며, 각각 +z 방향으로 나열된 7개의 프로파일(profile)로 정의된다. 한 개의 프로파일은 Fig.4와 같이 에어포일 형상의 역할에 따라 4개로 구분된 영역에서 추출된 719개의 점 데이터로 구성되며, 시작점과 끝점은 같고 프로파일 내의 점

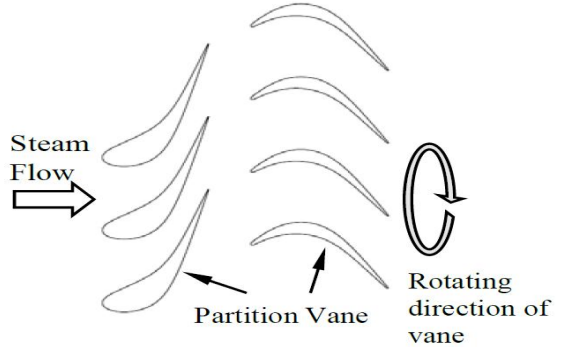


Fig. 3 Partion and vane

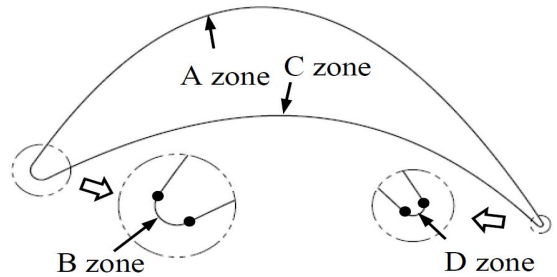


Fig. 4 Four zones of an airfoil profile

들의 높이가 서로 다른 경우도 있다.

점 데이터를 이용한 곡면 생성에 관한 연구는 CAD/CAM 분야에서 가장 기본이 되는 주제로써 국내에서도 활발히 진행되었으며<sup>[5]</sup>, 특히 그 대표적인 예가 블레이드라고 할 수 있다<sup>[6][7]</sup>. 본 연구에서는 Unigraphics API에서 제공하는 곡면 생성 기능 중에서 “through curve mesh” 기능을 이용하였다. 이것은 Fig. 5와 같이 curve-net 방식의 곡면 보간 기능으로써 두 방향으로 배치된 곡선(primary and cross string)을 지나는 G<sup>2</sup>연속의 양3차 곡면을 생성한다.

본 연구에서는 각 프로파일의 점들을 지나는 곡선(primary string)과 각 프로파일의 i번째 점들을 지나는 곡선(cross string)을 만들었으며, 이들을 이용하여 블레이드 곡면을 완성하였다. Fig. 6 (a)의 좌측과 우측은 파티션과 베인을 보여준다. 그런데 Fig.6 (a)의 파티션과 같이 첫 번째와 마지막 프로파일의 점들의 높이가 다른 경우에는 해당 영역에서 강체해석을 위한, 같은 높이의 곡면 단면 정보

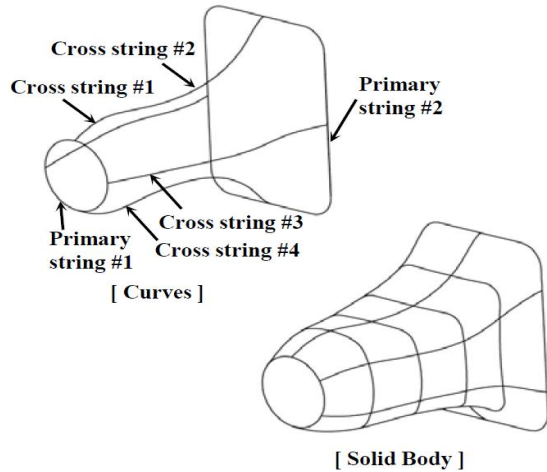


Fig. 5 Through curve mesh

를 얻을 수 없다. 또한, 파티션의 에어포일 형상만으로 아우터 링과 이너 링에 조립할 수 없고, 베인 역시 버켓의 다른 부분과의 구조적인 조합을 이루기 위해 공력설계시스템의 점 데이터로 정의된 곡면을 높이 방향으로 연장해야 하는 경우도 있다.

곡선과 곡면의 연장은 대부분의 상용 CAD/CAM 시스템에서 제공하는데, CAM 작업 시공구 진입과 잔삭 가공용 경로 생성을 위해 이용되기도 한다. 곡선을 주어진 점까지 연장하는 경우, 기존 곡선의 끝에  $G^1$  연속인 베지어 곡선을 추가하고 이것을 하나의 NURBS<sup>[8]</sup> 곡선으로 변환하는 것이 일반적이다. Shetty와 White<sup>[9]</sup>는 곡선과 곡면의 형상 및 파라미터를 변경하지 않고 이들을 연장하는 방법을 제안하였고, Hu<sup>[10]</sup> 등은 de Boor 알고리즘 등을 이용한 곡선 및 곡면에 대한 연장 방법을 제안하였다. 그런데 본 연구에서의 곡면연장은 기존 곡면을 특정 위치까지 연장한다기보다는 기존 곡면 형상을 유지하면서 면의 모서리가 특정 높이 이하 혹은 이상으로 연장되지만 하면 된다. 따라서 양방향의 곡선을 이용한 곡면을 생성하는 본 연구에서는 높이 방향의 곡선들을 결정된 길이만큼 연장한 곡선으로 곡면을 생성하는 것이 자연스럽다고 판단하였고, 이것을 위해 Unigraphics의 “curve length” 기능을 사용하였다.

전체적인 곡면의 생성 절차는 다음과 같다.

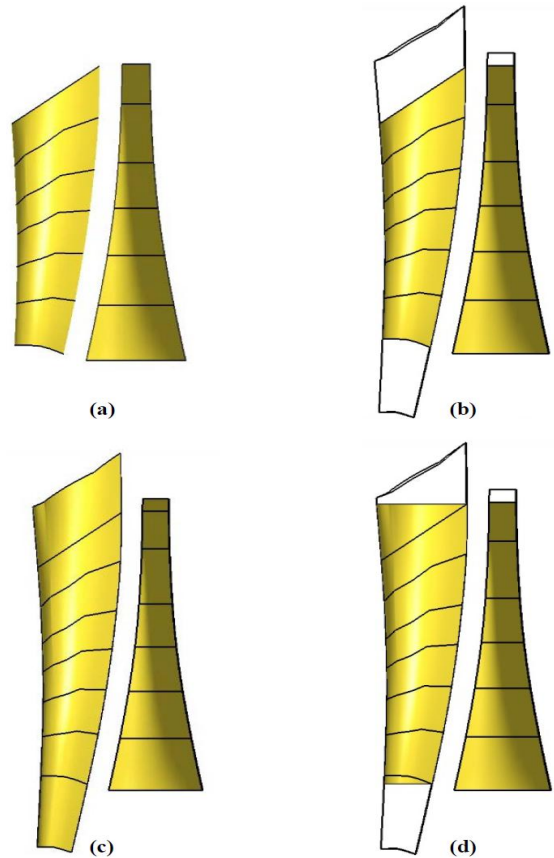


Fig. 6 The step of generating blade surfaces

- 1) 입력된 점 데이터에서 프로파일 별로 점들을 보간하여 “through curve mesh”용 primary string을 만든다. Cross string의 경우, 각 프로파일의  $i$ 번째에 해당하는 7개의 점을 보간하여 만들게 되면 하나의 프로파일을 이루는 점들의 개수인 719개의 cross string이 생성되게 된다. 본 연구에서는 “through curve mesh”에서 지원하는 cross string 개수의 제약과 모델링의 효율성을 고려하여 각 프로파일에서 Fig. 4의 B zone의 중간 점과 D zone의 양 끝점과 지나는 점들만을 보간하여 3개의 cross string만을 이용하였다.
- 2) 입력된 점 데이터에서 최하와 최상의 프로파일 데이터를 검색하여 같은 높이인가를 판단한다.
- 3) 상단과 하단 프로파일을 이루는 점들의 높이로서 다르거나 설계자의 필요에 따라 곡면을

- 연장해야 하면 각 프로파일의  $i$ 번째 점들을 보간한 곡선을 입력된 길이만큼 균일하게 연장한다. 이 경우 연장된 곡선의 끝점들을 보간한 새로운 곡선이 “through curve mesh”의 primary string으로 추가된다. Fig. 6 (b)는 연장된 곡선과 추가된 primary string을 보여준다.
- 4) 3)과정까지 거친 곡선들을 이용하여 “through curve mesh” 기능을 이용하여 Fig. 6 (c)와 같은 곡면 형상을 완성한다.
  - 5) 3)의 과정에서 연장된 곡선이 있는 경우는 각각 입력된 점들의 최하점과 최상점을 기준으로 절단하여 나머지 부분을 제거한 후 Fig. 6 (d)와 같은 최종 곡면 형상을 완성한다.

Fig. 6 (d) 우측의 베인 곡면은 높이가 다른 최상단 부분만 연장되었고, 좌측의 파티션 곡면은 최상단과 최하단에서 연장된 것을 곡선 형태로 보여주고 있다.

### 3. 곡면의 단면 정보 생성

강체해석시스템의 입력 데이터로 블레이드 곡면의 단면 정보가 필요하다. Fig. 7은 단면의 구조를 보여주고 있다. 단면 곡선은 XY 평면과 평행한 평면과의 교선으로서 원호 또는 선분으로 구성되어 있다. 이들은 연속된 점들과 그 점들 사이의 반경으로 정의되는데 선분의 경우 반경이 0으로 설정된다. 단면 곡선의 방향은 시계방향(clockwise)으로 설정되며, 본 연구에서는 이 단면 정보 데이터를 XYR 데이터라고 부른다. 주어진 높이에서 “곡면/곡면 교선” 과정을 통해 얻은 단면 곡선은

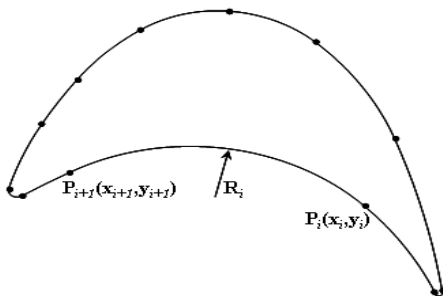


Fig. 7 Section data of a blade

Table 1 The format of section data

	0.000 33.031 0 11 33.031	
Blade Information	0.000	z range of Blade
	33.031	
	11	number of Section
	33.031	
	0.000 46 0.010	
Section Information	0.000	z propostion in Blade Height
	46	number of segment
	K	sumbol of section
x data	x1, x2, x3, .....	
y data	y1, y2, y3, .....	
r data	z1, z2, z3, .....	
	.....	

NURBS 곡선이다. 따라서 이 곡선을 XYR 데이터로 변환하기 위하여 근사 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 Unigraphics의 “simplify” 기능을 이용하는데 허용오차와 근사할 곡선을 입력하면 원호와 선분을 얻을 수 있다. 이 과정에서 각 블레이드의 중심점으로 최하단 단면 곡선에서 구한 질량 중심점(centroid)이 이용된다. XYR 데이터는 하단 단면에서부터 기록되며 포맷은 Table 1과 같다.

### 4. 시스템 구현

제안된 방법을 바탕으로 터빈발전기 블레이드 곡면 모델링 시스템을 개발하였다. Fig. 8은 시스템의 구조 및 절차를 보여준다. 공력설계시스템에서 생성된 점 데이터가 입력되면, 이 점들을 지나가는 양방향의 곡선을 생성하여 블레이드의 곡면 형상을 완성하고, 필요한 단면 정보인 XYR 데이터를 생성한다. 마지막으로 생성한 XYR 데이터를 화면상에 그린 후 형상 검증을 거치게 된다.

#### 4.1 블레이드 곡면 생성(연장면 포함)

곡면 생성 모듈은 2가지 기능을 수행한다. 첫 번째는 입력된 점 데이터를 이용하여 Fig. 6 (a) 처럼 곡면을 생성하는 것이다. 이 기능은 공력설계시스템에서 완성된 점 데이터의 기본 형상을 일차적으로 검증하는 데 사용된다. 두 번째는 연장된 면을 포함하는 블레이드 곡면의 최종 형상을

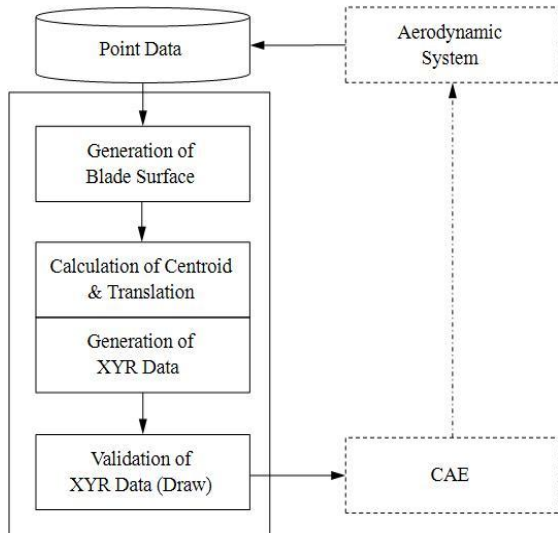


Fig. 8 The structure of system

완성하는 기능이다. 입력 데이터를 반영하는 점들 및 곡면 생성에 사용된 각종 곡선을 그대로 유지하여 곡면 생성 과정에 대한 검증이 가능하도록 하였다.

#### 4.2 XYR 데이터 생성

XYR 데이터는 설계 데이터와 보간 데이터로 구분된다. 설계 데이터는 입력된 점 데이터 중에서 높이가 같은 프로파일에 해당하는 높이에서 구한 단면 곡선 정보로서 실제 입력된 형상을 곡면이 그대로 반영하고 있는지를 검증하는 데 사용된다. 보간 데이터는 프로파일들 사이에서 구한 단면 데이터로써 단면 형상 확인뿐만 아니라 다이어그램의 부품별 조립성 검증과 버켓 구조설계의 참고 데이터로 사용된다.

#### 4.3 XYR 데이터 검증

시스템에 의해 생성된 XYR 데이터를 화면상에 그려 주는 기능이다. XYR 데이터의 포맷 및 생성된 원호와 선분에 대한 검증을 수행한다. 또한, 각 단면 곡선의 시작 부분을 다른 색깔로 도시하여, Fig. 9와 같이 데이터의 작성 방향이 시계방향으로 되어 있는지를 확인할 수 있다

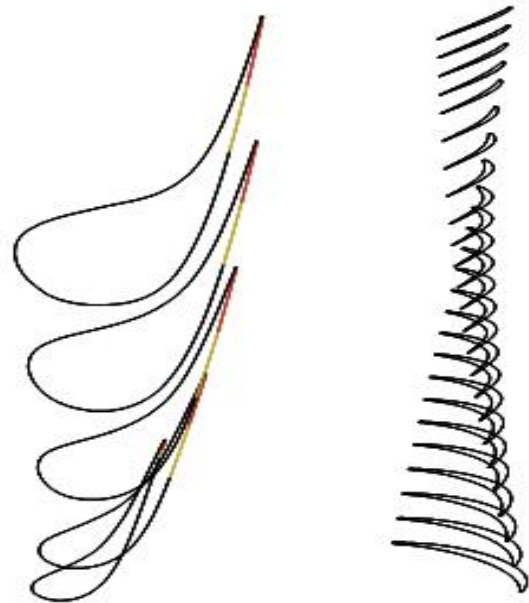


Fig. 9 The profiles of sections

### 5. 결론

본 연구에서는 점 데이터를 이용한 곡면 생성 및 연장 기능 등을 활용하여 터빈발전기의 블레이드 곡면용 모델링 시스템을 개발하였다. 터빈발전기의 성능에 직접적인 영향을 끼치는 파티션과 버켓은 한 대의 터빈발전기 내에 20종 이상이 필요하다. 기본 곡면 생성과 강체해석을 위한 곡면의 연장 및 단면 정보 생성 과정은 수작업으로 진행됨으로써 상당히 많은 시간이 소요되어 이것을 자동화할 수 있는 시스템의 필요성이 절실했으며, 본 연구에서는 상용 CAD/CAM 시스템인 Unigraphics 기반에서 C 언어와 API를 이용하여 시스템을 구현하였다.

본 시스템은 수년간 현업에 적용되어, 공력설계 시스템에서 생성된 점 데이터를 입력받아 블레이드 곡면과 강체해석용 입력 데이터를 자동 생성함으로써 대부분의 수작업 요소를 제거하는 효과를 보게 되었다. 이를 통해 설계 시간의 대부분을 성능과 구조 개선 등 블레이드 설계의 질적 향상을 위해 투입할 수 있는 환경이 조성되었다.

## REFERENCES

1. Kim, Y. I., Kim, L. R. and Jun C. S., "Parametric design of a part with free-from surfaces", Journal of Zhejiang of University SCIENCE A, Vol. 7, No. 9, pp. 1530-1534, 2006.
2. Kim, Y. I., Kim, D. S. and Jun, C. S., "A CAD/CAM System for Steam Paths of Turbine Generators", Korean Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 254-261, 2005.
3. Cotton, K. S., "Evaluation and improving steam turbine performance", Cotton Fact Inc., pp. 37-67, 1993.
4. Unigraphics, Open/API Reference Guide NX11, EDS, pp. 1-205, 2017.
5. Choi, B. K. et al., "CAD/CAM System and CNC machining", SciTech, pp. 402-403, 2001.
6. Jun, C. S., Ju, S. Y. and Jeon, M. G., "VC<sup>2</sup> Chord-Length Spline Surface Using Hermite Interpolant", Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 87-98, 1994.
7. Lee, J. H. and Lee, C. S., "A Study on Geometric Modeling and Generation of 4-axis NC Data for Single Setup of Small Marine Propeller", Korean Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 254-261, 2002.
8. Piegl. L. and Tiller. W., "The NURBS book". Springer-Verlag, pp. 5-35, 1997.
9. Shetty S. and White PR., "Curvature-continuous extensions for rational B-spline curves and surfaces", Computer-Aided Design, Vol. 23, No. 7, pp. 484-491, 1991.
10. Hu. S. M., Tai. C. L. and Zhang. S. H., "An extension algorithm for B-splines by curve unclamping", Computer-Aided Design, Vol. 34, pp. 415-419, 2002.