

임펠러의 역공학과 5축가공

신재광*(전북대원), 홍성균(전북대원), 장동규(전북대원), 이희관(전북대 TIC),
양균의(전북대 기계공학과)

Reverse Engineering and 5-axis NC machining of impeller

J. K. Sin(CBNU), S. K. Hong(CBNU), D. K. Jang(CBNU), H. G. Lee(CBNU TIC),
G. E. Yang(Mech. Eng. Dept., CBNU)

ABSTRACT

This paper presents a method for impeller modeling by the reverse engineering and the 5-axis machining. The impeller is composed of pressure surface, suction surface and leading edge, and so on. The impeller is modeled by using the characteristic curves of impeller such as hub curves, shroud curves and leading edge. The characteristic curves are extracted from the scanned data. The hub curves and shroud curves are generated by intersection between blade surface and hub boundary and shroud boundary, respectively. A sample impeller machining is performed by tool path plan and post-processing with inverse kinematic solution.

Key Words : Impeller(임펠러), Reverse Engineering(역공학), Characteristic curve(특성곡선), Tool path generation(공구경로 생성), Ruled surface(롤드서피스)

1. 서론

임펠러는 고온, 고압의 환경에서 사용되며 터보엔진이나 제트엔진과 같은 터보기기류의 중요한 부품이다^[1]. 이러한 임펠러의 보수를 위해서는 임펠러의 형상을 복원하여 재가공하거나 수정을 행하게 된다. 형상 복원을 위해서는 임펠러를 측정하고 그 형상의 특성을 파악하여 모델링하는 절차가 필요하게 된다. 이때 사용하는 방법이 역공학이다. 역공학(Reverse Engineering)이란 이미 존재하는 제품 형상을 측정하여 공학적 개념이나 형상 모델을 추출하는 기술이며, 물리적인 모델로부터 수학적 모델을 얻는 공학이라 말할 수 있다^[2]. 이것은 설계와 생산 과정에서 새로운 모델을 개발하거나 수정하는 과정에서 RP(Rapid Prototyping)나 NC가공 등에 적용되어 개발기간을 단축하였으며, 기존의 금형이나 제품의 복제 또는 검사(inspection), 더 나아가서 의료분야에도 적용되어 왔다^[3]. 역공학의 공정은 주로 4단계로 이루어지는데, 그 첫 번째가 대상물의 측정 데이터를 얻는 것이다. 그 다음 단계로, 얻어진 측정 데이터를 전처리(preprocessing)하고, 이를 바탕으로 영역을 분할하여 표면생성 단계를 거쳐 최종적으로 하나의 모델을 생성하게 된다.

임펠러의 가공은 형상특상상 3축으로 가공하지 못하고 5축으로 가공하게 된다. 임펠러와 같은 터보기기의 5축가공에 대한 연구들은 주로 정삭에서의 공구경로 생성 및 공구간섭 제거에 관한 연구들이 수행되어 왔다^[4].

본 논문은 역공학을 이용하여 측정된 데이터에서 임펠러의 특성곡선을 추출하여 모델링하는 방법과 임펠러 가공경로 생성에 대해 제시하고 있다.

2. 역공학을 이용한 임펠러 모델링

2.1 레이저 스캐너를 이용한 측정전략

비접촉식 레이저 스캐너는 짧은 시간에 많은 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면 레이저의 주사방향이 한 방향으로 고정되어 있기 때문에 임펠러와 같이 복잡한 형태로 구성된 제품은 한번의 측정으로 필요한 형상 데이터를 얻을 수 없다. 따라서, 임펠러 측정시 모델링에 필요한 특정형상에 대한 정보를 얻기 위해선 최소 2번 이상의 측정을 실시해야 한다. 각각 측정된 데이터군은 어느 한 부분의 측정 정보만을 가지고 있기 때문에 필요한 모든 정보와 형상을 얻기 위해서는 각각의 측정 데이터군을 레지

스트레이선 시켜준다. 레지스트레이션은 툴링볼이라는 정밀한 구형의 보조물을 사용한다. 임펠러에 툴링볼을 부착한 후 측정하면 임펠러와 툴링볼의 곡면정보를 얻게된다. 이렇게 측정된 툴링볼의 데이터를 구로 fitting한 다음 각각의 측정 데이터군에서 동일 툴링볼에 대한 위치를 일치시키면 측정하고자 했던 모델의 최종 형상을 얻을 수 있다.

기본적인 레지스트레이션 알고리즘은 3점을 이용한 방법, 3개의 구를 이용한 방법, 3개의 평면을 이용한 방법이 제안되었다. 이 세 가지 방법 중 3개의 구를 이용한 방법이 다양한 측정모델에 적용할 수 있다는 면에서 가장 유용한 방법이기 때문에 본 논문에서 적용한다.

툴링볼 데이터를 이용해 모델의 측정데이터를 레지스트레이션 시킬 때는 한번의 측정 데이터군에 세 개 이상의 툴링볼이 모두 포함돼 있어야 한다. 임펠러는 하나의 블레이드가 hub면을 따라 일정각도씩 360° 회전하여 만들어지기 때문에 측정 역시 하나 또는 두 개의 블레이드를 대상으로 실시해 필요한 정보를 얻으면 된다.

툴링볼을 임펠러에 부착해서 측정할 때 툴링볼의 가림현상에 의한 특정형상의 데이터 손실을 막기 위해서 데이터가 없어도 충분히 예측 가능한 형상의 위치에 툴링볼을 부착한다. 본 논문에서 측정에 사용한 임펠러는 허브의 측면 실린더 부분과 위쪽의 평면부가 가림현상을 피할 수 있는 위치에 해당하기 때문에 툴링볼 부착위치로 정한다.

2.2 형상정보 추출 및 임펠러 모델링

Fig. 1에서와 같이 임펠러는 Hub surface, 블레이드면(pressure surface, suction surface), shroud curve, leading edge, trailing edge로 구성된다. 따라서 임펠러의 역설계는 측정된 데이터에서 모델링에 필요한 특정 형상정보(axis, hub boundary, shroud boundary, hub curve, shroud curve, leading edge)를 추출하여 수행된다.

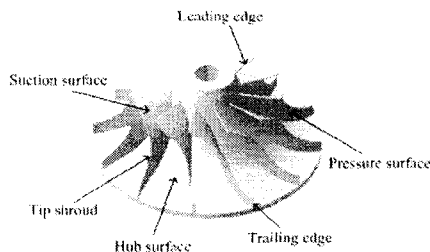


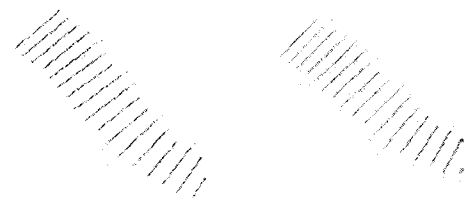
Fig. 1 The components of impeller

Fig. 2는 레지스트레이션 후 데이터를 보여준다. 임펠러 회전 중심 축은 hub의 평면과 실린더 데이터를 이용하여 구할 수 있다.



Fig. 2 Registration data of impeller

Hub curve와 shroud curve를 구하기 위해서는 블레이드 데이터, shroud boundary와 hub의 boundary가 필요하다. 블레이드 데이터는 shroud curve를 구성하는 점들을 추출하여 B-spline으로 연결한 후 이 곡선과 normal한 평면들을 이용해 측정된 데이터를 Fig. 3(a)와 같이 세분화하여 각각 B-spline curve를 생성한다. 이 curve들을 이용하여 (b)와 같이 NURBS곡면으로 만든 후 hub 방향과 shroud 방향으로 확장시킨다.



(a) B-spline curves (b) NURBS surface

Fig. 3 Generating blade surface

Hub curve는 hub boundary의 회전면과 축을 지나는 임의의 평면과 교차하는 데이터를 이용해 구한다. shroud boundary는 위에서 구한 shroud 중심선을 축을 중심으로 회전시킨 데이터와 축을 지나는 평면과의 교차 곡선으로 구한다. 블레이드면과 hub boundary를 회전시킨 hub면의 교차선은 hub curve가 되고 shroud boundary의 회전면과의 교차선은 shroud curve가 된다. 블레이드는 추출한 형상정보를 이용하여 ruled surface로 만든다.

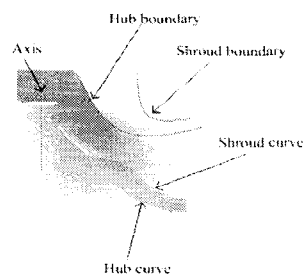


Fig. 4 Characteristic curves of impeller

Fig. 5는 leading edge를 추출하는 과정을 보여준다. leading edge를 생성하기 위해 블레이드의 suction면과 pressure면을 연장하고 leading edge의 center line을 찾는다. 이 직선에서 블레이드면과 normal한 평면을 생성하고 블레이드의 hub쪽과 shroud쪽에서 각각 블레이드의 shroud line과 normal 평면의 세 line이 접하는 fillet 곡선을 생성한다. leading edge는 블레이드의 ruling line과 연속되지 않기 때문에 단면 형상에 따라 sweep곡면이나 loft곡면을 이용하여 생성한다. 완성된 블레이드를 중심축을 중심으로 회전시켜 모델링을 완성한다.

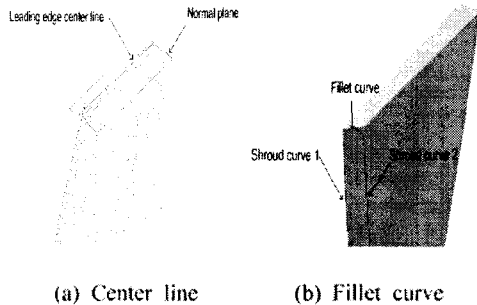


Fig. 5 Generating leading edge

3. 임펠러 가공

3.1 가공경로 계획

본 연구에서는 가공경로 계획으로 황삭과 정삭의 2단계로 나누어 수립하였다. 황삭가공에서 생산성 향상을 위하여 가공영역에서 간섭이 없는 최대 크기의 공구를 선정하였다. 공구크기 선정은 가공영역에서 이웃하는 블레이드의 최단거리를 구해 그 최단거리에서 공구간섭을 고려한 허용공차를 제거한 크기로 선정한다. 공구가 선정되면 가공 경로를 생성한다. 초기 공구축벡터는 ruled surface와 평행하게 설정하고 경로간격간 공구축벡터는 블레이드 양쪽의 공구축벡터를 기준으로 선형적으로 설정이 되도록 산출한다.

정삭가공은 히브먼, 블레이드면, leading edge로 나누어 경로를 생성하였다. 임펠러는 유체의 유동에 관점이 있으므로 표면기질기는 유체의 유동에 방해가 되지 않을 정도로 유지하면 된다.

히브먼의 정삭가공은 유체의 흐름을 방해하지 않을 정도의 표면기질기를 유지하면서 가공속도를 향상시키는 것에 중점을 두고 연구를 수행하였다. 유체의 흐름과 같은 방향을 주기 위하여 공구 경로는 iso-parametric가공 경로로 생성하였다. 블레이드면의 정삭가공은 side cutting가공방법으로 경로를 생성하

았다. 모델링된 블레이드면은 ruled surface로 모델링되어 있으므로 공구축 벡터는 ruling line과 평행하도록 설정하여 경로를 생성하였다.

Leading edge부는 두께가 얇아 가공시 과단열 일으키기 쉬우며 측면날 전삭시 가공부하로 인한 휨이 발생하게 된다. 이러한 과단이나 가공부하로 인한 휨을 방지하기 위해서는 공구가 leading edge의 수직방향에서 접근하여 가공하는 point milling방법을 수행한다. Point milling 수행시 전삭 부하를 줄이기 위하여 공구는 leading edge의 수직 방향으로 접근하여 가공하도록 하였으며 shroud에서부터 hub로 가공이 되도록 one-way 가공 경로를 산출하였다.

3.2 후처리(Post-processing)

공구경로 생성에서 생성된 데이터는 CL데이터 (P_x, P_y, P_z) 와 공구축벡터 (u_x, u_y, u_z) 로 출력된다. 이러한 데이터를 NC가공이 가능한 NC code로 변환하기 위해서는 계산된 공구 경로를 기계 형태에 맞게 NC format으로 바꾸어 주어야 한다. 이러한 작업을 후처리라고 한다. 5축 공작기계는 pivot point의 위치가 서로 다르며 어느 축이 경사되거나 회전되는가에 대한 변화량을 공구축벡터로부터 구하는 kinematic solution이 필요로 하게 된다. 이러한 kinematic solution은 기계의 구조를 이용하여 변환행렬을 구하게 된다.

본 연구에서 사용된 5축 기계는 Mazak VARIAXIS-630으로 Fig. 6과 같이 X축으로 경사되고 Z축으로 회전이 되는 형태이며 공구축벡터에서 경사각 및 회전각을 구하는 식은 (1)과 (2)를 이용하여 구하게 된다.

$$A = -\tan^{-1}\left(\frac{u_y}{u_z}\right) \quad (1)$$

$$C = \sin^{-1}u_x \quad (2)$$

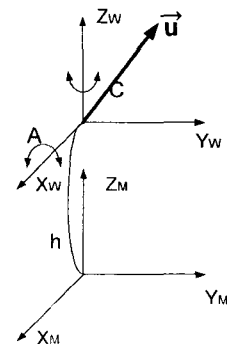


Fig. 6 Machine coordinate for calculating kinematic

좌표계가 형성어 되면 이동해야 할 좌표는 변환행렬 식 (4), (5), (6), (7)을 이용하여 식 (3)과 같이

구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X, Y, Z, 1 \\ P_x, P_y, P_z, 1 \end{pmatrix} M_x(-h)M(\theta)M(\phi)M_x(h) \quad (3)$$

$$M_x(-h) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -h & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_x(h) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & h & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, θ : X축 방향의 경사각(-A),
 ϕ : Z축 방향의 회전각(-C)
 h : pivot distance

4. 모델링 비교 및 임펠러 가공

역공학을 이용하여 특성곡선을 가지고 모델링한 ruled surface의 데이터와 가공을 위해 생성된 공구접촉점을 서로 비교하였다. 두 개의 데이터를 비교한 결과 최대 오차가 5 μ m이고 평균 오차는 2 μ m로 양호한 ruled surface가 만들어졌다는 것을 알 수 있었다.

임펠러 가공은 Mazak VARIAXIS-630 5축 가공기를 사용하여 가공하였다. 임펠러 가공은 먼저 소재를 선반을 이용하여 원추형으로 가공한 후 5축 가공을 수행하였다. 사용공구는 ball-end mill을 사용하였으며 Jig는 임펠러 5축가공기의 stroke와 간섭을 고려하여 바닥면에 설치하여 가공하였다. Fig. 7은 임펠러 가공 결과를 보여주고 있다.

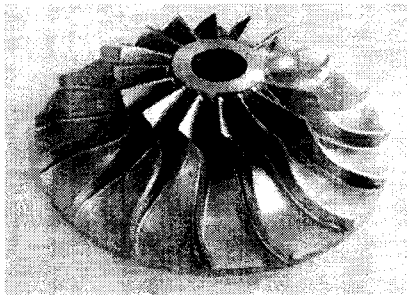


Fig. 7 Machined result

5. 결론

본 논문은 임펠러의 모델링을 위하여 역공학을 이용하여 측정된 점데이터에서 임펠러의 특성곡선을 추출하여 모델링하는 기법과 임펠러 가공을 위한 가공경로 생성에 대하여 연구하였다.

임펠러 측정을 위해서 한쌍의 측정데이터군에서 세 개이상의 불링블이 포함되어 있도록 하여 측정하였으며 3개의 구를 이용하여 레지스트레이션을 수행하였다. 측정된 데이터에서 hub curves, shroud curves와 leading edge를 모델링하기 위한 fillet curves 등의 특성곡선을 추출하고 추출된 특성곡선을 바탕으로 하여 임펠러 모델링을 실시하여 가공을 실시하였다.

모델링한 ruled surface와 가공을 위해 생성된 공구접촉점 데이터와의 비교시 최대오차 5 μ m로 양호한 ruled surface가 만들어진 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 전용태, 박세형, "Impeller 가공용 전용 CAM시스템 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 217-220, 1994.
- 2) 조현덕 외 5, "임펠러 5축 CNC가공에 관한 연구", 한국공작기계기술학회지, Vol. 6, No. 4, pp.19-26, 1997.
- 3) Tamas Varady, Ralph R Matrin and Jordan Cox, "Reverse engineering of geometric models - an introduction," Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
- 4) Bidanda, B and Hosni, Y A. "Reverse engineering and its relevance to industrial engineering: a critical review," Computers Ind Engng, Vol. 26, No. 2, pp. 343-348, 1994.
- 5) 전차수, 박재성, "터빈블레이드 가공을 위한 전용 CAM시스템 개발", 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 181-186, 2001
- 6) 이철수, 이재현, 박성도, "선박용 소형 프로펠러의 단일 셋업을 위한 4축 NC데이터 생성에 관한 연구", 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 187-194, 2001
- 7) 조현덕 외 6, "Ruled Surface로 형성된 임펠러 블레이드 전용 CAD/CAM시스템 개발 II(5축 가공에 관한 연구)", 한국공작기계학회 논문집, Vol. 11, No. 3, pp. 1-7, 2002