

다항식회귀분석을 이용한 기능성곡면의 모델링

윤상환*(창원대 산업대학원 산업기계공학과), 황중대** (창원대 대학원 기계공학과)
정윤교*** (창원대학교 메카트로닉스공학부)

Modeling of functional surface using Polynomial Regression

* S. H. Yoon, ** J. D. Hwang, ***Y. G. Jung

ABSTRACT

This research presents modeling of a functional surface which is a constructed free-formed surface. The modeling introduced in this paper adopts polynomial regression that is utilizing approximating technique. The measured data are obtained from measuring with Coordinate Measuring Machine. This paper introduces efficient methods of Reverse Engineering using Polynomial Regression.

Key Words : Reverse Engineering(역공학), Polynomial Regression(다항식회귀분석), Interpolation(보간), Approximation(근사)

1. 서론

CAD 모델이 존재하지 않는 자유곡면 형상의 제품을 신속하고 정확하게 개발하기 위한 효과적인 방법의 하나로 역공학(reverse engineering) 기법이 제시되어 현재 상당한 기술적 진전이 이루어졌다^{(1)~(10)}. 레이저스캐너를 비롯한 비접촉식 측정기는 측정속도가 빠르고 많은 데이터를 얻을 수 있어 최근 심미적인 자유곡면의 역공학에 적용되어 많은 연구가 진행중이다^{(6)~(8)}. 그러나 측정물이 함몰되어 있거나 꼬여있는 경우에는 빛이 투과되지 않아 측정이 불가능한 단점을 가지고 있어 블레이드, 프로펠러, 임펠러, 로우터와 같이 복잡형상인 기능성 곡면의

역공학 적용에는 어려움이 있으며, 관련연구도 미비한 상태이다. 이에 반해 접촉식 좌표측정기는 비접촉식에 비해 매우 정밀하며 측정물이 복잡한 형상으로 꼬여있을 경우에도 여러개의 회전프로브를 생성하여 측정할 수 있고 또한 이들의 보정을 통해 하나의 좌표계를 사용할 수 있어 정합과정에서의 오차가 적다. 그런데 임펠러와 같이 블레이드가 심하게 꼬여있는 경우에는 프로브와의 간섭 때문에 자동 스캐닝 측정이 불가능하므로 수동 측정을 해야하며 이 과정에서 오차가 발생한다. 따라서 수동측정 과정에서 발생하는 오차를 최소화하는 방법으로 '다항식회귀분석' 알고리즘을 적용하고 이 알고리즘을 통해 생성된 데이터로 다시 프로그램 측정의 과정을 거쳐, 최종의 적합화된 근사곡선을 얻음으로써 역공학에 의한 모델링의 정밀도를 향상시키는 것을 본 논문의 목적으로 한다.

2. 도면 모델의 모델링 및 5축가공

역공학은 도면 모델이 존재하지 않는 제품을 측정하여 모델링한 후 제작함으로써 원래의 형상으로 복원하는 과정이지만 본 연구에서 제시한 알고리즘 적용의 타당성을 검증하기 위하여 도면 모델이 존재하는 임펠러의 master model을 먼저 가공한 후 이 모델에 대하여 역공학 기법을 적용하였다.

임펠러는 터빈이나 압축기에서 고속으로 회전하며 유체에너지를 압축에너지로 변환하여 사용하는 부품이며 Fig. 1과 같이 복잡한 형상으로 꼬여있다. 물론 임펠러의 도면 모델은 블

레이드의 상, 하면에 해당하는 shroud line과 hub line의 점데이터로 주어지며 본 연구에서는 이 점데이터를 상용 소프트웨어인 CATIA (Dassalt systems)에 입력하여 모델링하였으며 Fig. 1에 제시한 바와 같다.

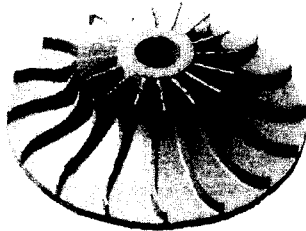
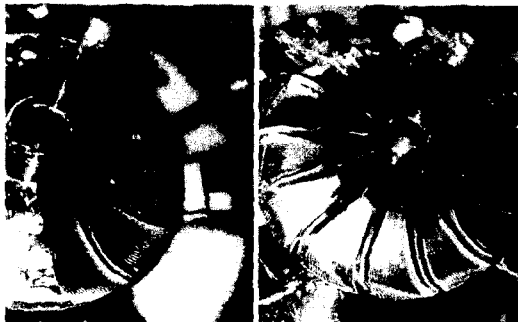


Fig. 1 임펠러의 CAD model

이와 같은 임펠러의 가공은 5축이 동시에 제어되는 5축 동시제어 가공(5-axes simultaneous controlled machining)을 통해서만 가능하다. Fig. 2는 임펠러의 5축 동시제어 가공 장면을 보여주는데 (a)는 허브면의 가공을 (b)는 블레이드면의 가공 장면을 보여주고 있다. 5축가공용 CAM software는 EUKLID(EUKLID software)를 사용하였으며 가공검증은 Vericut (CGtech)을, 5축가공기는 T-35(Cincinnati-milacron)를 사용하였다.



(a) 허브면의 가공 (b) 블레이드면의 가공

Fig. 2 임펠러의 5축가공

3. 단면곡선의 적합화

3.1 임펠러의 측정

Fig. 3의 (a)는 MERIN(IMS) CMM을 사용한 측정장면을, (b)는 MERIN CMM을 구동하는 소프트웨어인 Virtual DMIS의 화면이다. Fig. 3의 (b)에서 보이듯이 수동측정에 의해 생성된 단면곡선은 블레이드 면상에서 들쭉날쭉하게 측정되어 있다.

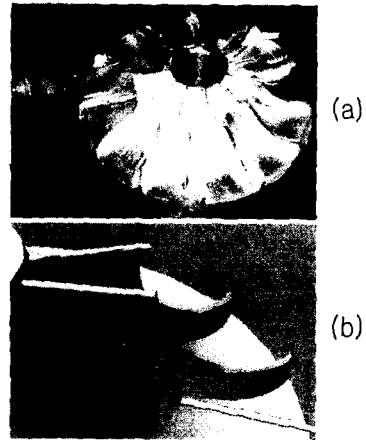


Fig. 3 임펠러의 측정

임펠러의 경우와 같이 수동측정에 의해 생성된 단면곡선의 점데이터는 부정확하므로 곡면 모델링을 위한 입력 데이터로 사용할 경우 오차가 증가하게 된다. 따라서 곡면의 품질을 양호하게 할 수 있는 곡선의 적합화 과정을 필요로 한다.

3.2 다항식회귀분석에 의한 근사곡선

알려진 대로 보간(interpolation)은 주어진 측정점이 매우 신뢰할만 할 때 곡선이 측정점을 모두 지나면서 fitting하는 것을 의미하며, 근사(approximation)는 주어진 측정점을 신뢰하기 힘들 때 측정점 사이를 최대한 근사적으로 지나면서 fitting하는 것을 의미한다.

점 데이터를 사용한 근사 알고리즘의 대표적인 방식은 최소자승법(least squared method)이다. 그러나 최소자승법은 직선적인 데이터의 배열에서 사용할 수 있으며, 최소자승법 자체로는 3차원상의 자유공간곡선을 근사할 수 없다. 다만 최소자승법의 알고리즘을 매개변수식의 곡선보간 알고리즘인 B-spline 등에 적용하여 곡

선의 적합성을 향상시키는 연구가 나와 있는 상태다.⁽⁷⁾

데이터의 배열이 직선적이지 않은 자유곡선을 근사하기 위하여 다항식 회귀분석 (polynomial regression) 알고리즘을 사용할 수 있으며 식(1)의 e를 측정점과 근사점과의 잔차라고 하면 식(2)와 같이 잔차의 제곱의 합을 구할 수 있고 이값을 각각의 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_i$ 로 미분하면 식(3)과 같은 선형대수 방정식이 된다. 이렇게 구해진 [a] matrix를 식(1)에 대입하면 구하고자 하는 근사 곡선이 생성된다.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_ix^i + e \quad (1)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2^2 - \dots - a_ix_i^i)^2 \quad (2)$$

$$= \sum_{i=1}^n e_i^2$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

그런데 다항식 회귀분석은 매개변수식이 아닌 양함수식이므로 독립변수와 종속변수가 각각 하나씩인 식이 된다. 즉 평면상의 곡선으로는 표현할 수 있으나 공간상의 자유곡선으로는 나타낼 수 없는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 독립변수 하나에 대하여 두 개의 종속변수를 사용하여 각각을 다항식 회귀분석 알고리즘에 적용하여 fitting하는 방법을 택하였다. 즉 x_i 와 y_i 를 사용하여 근사점들인 y_i 을 찾고 마찬가지로 x_i 와 z_i 를 사용하여 z_i 을 찾은 후 각각의 x_i 에 대하여 y_i 및 z_i 을 일대일 대응하는 방식이다.

차수가 커지면 곡선이 overshoot하는 경향이 있으므로 3차로 고정하였으며 하나의 곡선을 fitting하는데 6개의 점을 사용하였는데 이는 경험적으로 선택한 갯수이다. 두번째 곡선을 fitting할 때부터는 이전의 곡선에 사용하였던 마지막 두 개의 점과 새로운 네 점을 사용하여 fitting하고 출력은 새로운 네 번째 점이 시작되는 좌표로부터 이어나갔는데 그 이유는 곡선의 연속성을 어느 정도 이어나가기 위한 것이다.

곡선간의 미분연속이나 곡률연속까지는 고려하지 않았는데 본 연구에서 다항식 회귀분석 알고리즘을 통하여 얻고자 하는 것은 곡선이 아니라 곡선을 이루는 점데이터들이기 때문이다.

Fig. 4는 이와 같은 방법으로 다항식 회귀분석법을 사용하여 근사화한 효과를 보여주고 있다. 'x'로 표기된 측정점은 임펠러 블레이드의 임의의 점을 수동 측정하여 채취한 것으로 그림과 같이 들쭉날쭉하게 산포되어 있다. Fig. 4의 파선으로 표기한 곡선은 들쭉날쭉하게 산포한 측정점을 모두 지나는 '보간 곡선'으로 CATIA에서 fitting한 것이다. 또한 Fig. 4의 실선으로 표시된 곡선은 동일한 측정점 데이터를 입력점으로 하여 다항식회귀분석 알고리즘을 통해 Visual C++로 구현한 출력점들을 CATIA에서 곡선으로 fitting한 것이다. 그림과 같이 다항식 회귀분석에 의한 근사 곡선은 들쭉날쭉하게 산포한 측정점의 사이를 부드럽게 지나는 것을 알 수 있다.

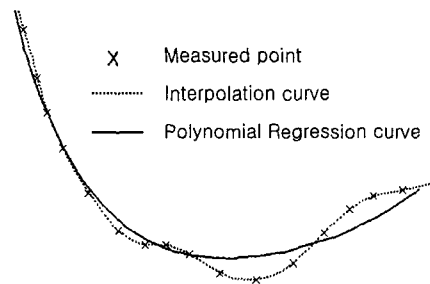
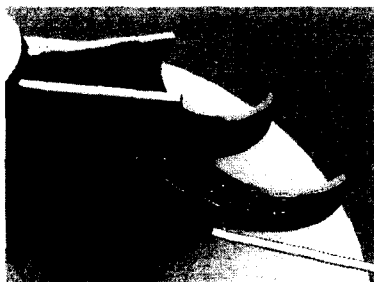


Fig. 4 다항식 회귀분석 근사 곡선

3.3 다항식 회귀분석 근사 곡선의 점데이터를 사용한 프로그램 측정 다항식 회귀분석을 통해 생성한 점데이터들

로 이루어진 곡선은 곡면상에서 들쭉날쭉하게 산포되어 있는 수동측정점의 사이를 지나는 부드러운 근사 곡선이긴 하지만 실제 곡면상의 곡선이 아닌 곡면의 상하를 통과하는 부정확한 곡선이다.

이러한 오차를 보상하여 실제 곡면상의 곡선으로 재생성하기 위하여 다항식 회귀분석 근사 곡선에 의해 출력된 점데이터를 사용한 프로그램 측정을 수행하였다. Fig. 5의 (b)는 다항식 회귀분석 근사 곡선의 점데이터를 입력점으로 하여 다시 CMM에서 프로그램 측정을 하여 얻어진 블레이드의 단면곡선이며 (a)는 이상과 같은 적합화 과정을 거치지 않고 수동측정에 의해서 생성되는 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 (a)에 비하여 (b)가 곡면상에서 들쭉날쭉하지 않고 가지런하게 fitting되었음을 알 수 있다.



(a) 수동측정에 의한 곡선



(b) 수동측정점을 다항식회귀분석에 의해 근사한 후 프로그램측정한 곡선

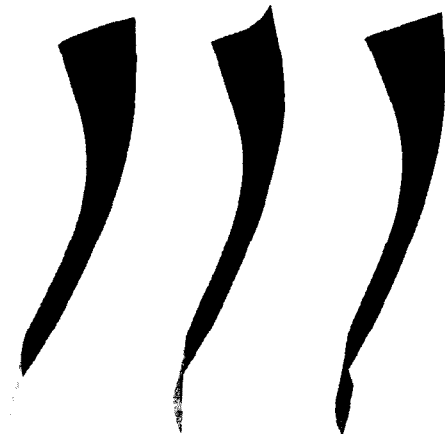
Fig. 5 프로그램측정의 효과

4. 곡면 생성 및 적합화 효과의 검증

이상과 같이 다항식 회귀분석에 의한 근사 곡

선을 얻고 여기서 얻은 점데이터를 통한 프로그램측정의 과정을 거쳐 적합화된 곡선의 점데이터를 사용하여 곡면을 생성하였다. 곡면 생성 방법은 Ferguson, Bezier, NUBS 등의 방법이 있지만 본 연구에서는 NUBS 알고리즘을 적용하여 곡면을 생성하는 상용 모델러인 CATIA를 사용하였다. Fig. 6의 (a), (b) 및 (c)는 각각 CAD model(도면모델), 수동측정점에 의한 역공학 모델 및 다항식 회귀분석과 프로그램 측정 프로세스를 거쳐 적합화한 역공학 모델을 보여준다. 그림과 같이 수동측정점에 의한 역공학 모델은 끝부분에서 곡면이 솟아오른 현상을 볼 수 있으며 적합화 과정을 거친 역공학 모델은 그렇지 않음을 가시적으로 확인할 수 있다.

또한 적합화 효과를 검증하기 위하여 Fig. 7의 (a)에서는 도면모델과 수동측정점에 의한 역공학 모델을 비교하였고 Fig. 7의 (b)에서는 도면모델과 적합화 과정을 거친 역공학 모델을 상호 비교하였다



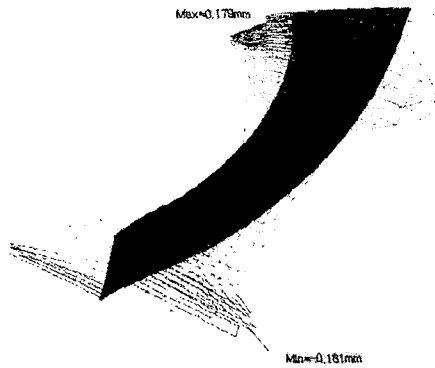
(a) 도면모델 (b) 수동측정모델 (c) 적합화 모델

Fig. 6 임펠러 블레이드의 곡면 모델링

상호 비교한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 도면 모델과 역공학 모델의 오차 비교

구분	도면 모델 vs	
	수동측정에 의한 역공학 모델	적합화 과정을 거친 역공학 모델
최대오차 (mm)	0.181	0.082



(a) 도면모델 vs 수동측정모델



(b) 도면모델 vs 적합화한 모델

Fig. 7 적합화 곡면의 비교

비교 결과 다항식 회귀분석과 프로그램측정 등 적합화 과정을 거친 모델과 도면모델을 비교해보면 모든 구간에서 허용오차인 0.1mm 이내로 fitting 되었음을 알 수 있다. 반면 수동측정점에 의한 모델은 도면모델과 비교할 때 곡면의 끝부분에서 허용오차를 벗어났음을 알 수 있다.(진한 선으로 표기된 부분은 0.1mm를 초과한 구간임) 또한 최대 오차도 적합화 과정을 거친 모델은 0.082mm인데 비해 수동측정에 의한 모델은 0.181mm로 나타났다. 즉 적합화 과정을 거친 모델이 도면모델에 근접하는 정밀도를 보여줌을 알 수 있다.

5. 결론

1. 수동측정에 의하지 않으면 측정자체가 불가능한 기능성 곡면인 임펠러의 수동측정에 의한 에러를 최소화하기 위하여 다항식 회귀분석 알고리즘을 적용하여 Visual C++로 구현한 후 CATIA로 fitting한 결과 수동측정점의 사이를

지나는 부드러운 근사곡선이 생성되었으며 프로그램측정의 과정을 거쳐 실제 곡면상의 점으로 재생성할 수 있었다.

2. 도면모델과 적합화한 모델 및 수동측정에 의한 모델을 상호 비교한 결과 수동측정에 의한 모델에 비해 적합화한 모델은 약 0.1mm의 오차를 줄임으로써 역공학의 정밀도를 향상시켰음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부, 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구소의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Tamas Varady, Ralph R Martin and Jordan Cox, "Reverse engineering of geometric models an introduction," Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp. 255~268, 1997.
2. 한동구, 이기현, 허성민, 이석희, "Reverse Engineering을 위한 단면데이터의 영상처리," 한국정밀공학회지, 99년도 춘계학술대회논문집, 계명대학교, pp.414~417, 1999.
3. 박정환, 고태조, "CAD 모델에 기초한 기상 측정 시스템," 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp37~pp42, 2001.
4. 박영근, 고태조, 김희술, "역공학에서 센서 융합에 의한 효율적인 데이터 획득," 한국정밀공학회지, 제18권, 제9호, 2001.
5. Les Piegl and Wayne Tiller, "Algorithm for approximate NURBS skinning," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 9, pp.699~706, 1996.
6. 허성민, 최재원, 이석희, "자유곡면 생성을 통한 역공학 적용에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제10호, pp168~177, 2001.
7. 이현직, 고태조, 김희술, "점데이터의 Rational B-spline 근사를 통한 역공학," 한국정밀공학회지, 제16권, 제5호, pp160~167, 1999.
8. 박상근, 이병규, "3차원 측정장치를 이용한 맞춤형 및 가발제작 시스템," 한국정밀공학회지, 제18권, 제5호, pp12~15, 2001.
9. 최병규, Surface Modeling for CAD/CAM, 1991.
10. 황종대, "기능성곡면의 역공학 적용에 관한 연구", 석사학위논문, 창원대학교, 2002. 8.