

다항식회귀분석을 통한 임펠러의 역공학 적용에 관한 연구

윤상환*(창원대 대학원 산업기계공학과), 황종대**(창원대 대학원 기계공학과), 정윤교*** (창원대 기계공학과)

Study on Application of Reverse Engineering of Impeller using Polynomial Regression

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

ABSTRACT

This research presents Reverse Engineering of a Impeller. 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 : Impeller(임펠러), Reverse Engineering(역공학), Polynomial Regression(다항식회귀분석), NUBS(너브스),

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.^{1,2}

역공학을 적용하는 범위는 매우 다양하며 주로 금형의 자유곡면과 같이 여러번의 수정 및 가공에 의하여 최초의 설계데이터가 무의미한 경우에 많이 적용되고 있으며, 역공학의 정밀도가 개선됨에 따라 심미적인 자유곡면만이 아닌 높은 정밀도를 요하는 기계부품의 개발에도 적용하는 추세이다. 터보기계의 핵심부품인 임펠러는 심미적인 형상을 갖는 금형류의 곡면과 달리 매우 높은 정밀도를 요하며 측정에 있어서도 빛의 산란과 굴절 및 간섭 문제 때문에 레이저스캐너의 적용이 어려우며, 따라서 측정 정밀도가 우수한 CMM을 사용한 접촉식 좌표 측정으로부터 역공학을 수행할 수 있다. 그런데 임펠러와 같이 블레이드가 심하게 꼬여있는 경우에는 프로브와의 간섭 때문에 자동 스캐닝 측정이 불가능하므로 수동 측정을 해야 하고, 이 과정에서 오차가 발생한다. 오차를 포함한 점데이터를 사용하여 곡선을 fitting하면 생성되는 곡면의 품질을 저하하는 원인이 되므로 곡

선의 fairing 기법이 사용된다.

다양한 fairing 기법에 대한 연구가 진행되었는데 순정기준을 결정하는 문제와 이에 따른 순정척도를 결정해야 하는 문제에 대한 고려가 뒤따라야 하므로 설계상의 어려움으로 작용하며 경우에 따라서는 설계자의 주관이 개입되어 역공학의 정밀도를 떨어뜨리는 원인이 된다.

본 연구에서는 3차 다항식 회귀분석 알고리즘에 의한 곡선의 fairing 기법을 적용하여 측정점을 순정하고 이 알고리즘을 통하여 생성된 데이터로 다시 프로그램 측정의 과정을 거쳐, 설계자의 주관이 개입되지 않도록 하며, 근사곡선의 점데이터를 사용하여 NUBS 곡면을 생성함으로써 역공학의 정밀도를 향상시킬 수 있는 방법을 제시한다. 또한 원형모델과 역공학에 의한 모델의 상호비교를 통하여 본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 단면곡선의 근사

2.1 임펠러의 측정

Fig. 1의 (a)는 Merin(IMS) CMM을 사용한 측정장면을, (b)는 CMM을 구동하는 소프트웨어인 Virtual

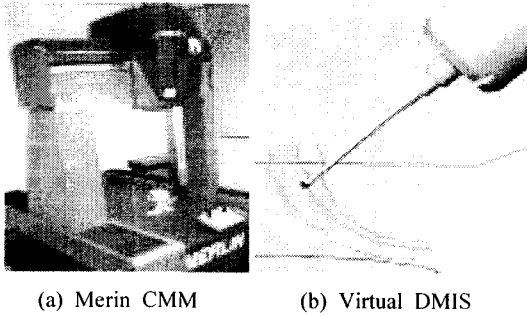


Fig. 1 Measurement of Impeller

DMIS의 화면이다. Fig. 1의 (b)에서 보이듯이 수동측정에 의해 생성된 단면곡선은 블레이드 면상에서 들쭉날쭉하게 측정되어 있다. 임펠러의 경우와 같이 수동측정에 의해 생성된 단면곡선의 점 데이터는 부정확하므로 곡면모델링을 위한 입력 데이터로 사용할 경우 오차가 증가하게 된다. 따라서 곡면의 품질을 양호하게 할 수 있는 곡선의 순정 및 적합화 과정을 필요로 한다.

2.2 다항식회귀분석 알고리즘

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 곡선의 적합성을 향상시키는 연구가 나와 있는 상태다.

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

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1)$$

$$S_e = \sum (y - a_0 - a_1 x - a_2 x^2 - \dots - a_n x^n)^2 = \sum e^2 \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \sum x^0 & \sum x^1 & \sum x^2 & \dots & \sum x^n \\ \sum x^1 & \sum x^2 & \sum x^3 & \dots & \sum x^{n+1} \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \dots & \sum x^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x^n & \sum x^{n+1} & \sum x^{n+2} & \dots & \sum x^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2 y \\ \vdots \\ \sum x^n y \end{bmatrix} \quad (3)$$

그런데 다항식 회귀분석은 매개변수식이 아닌 양함수식이므로 독립변수와 종속변수가 각각 하나씩이다. 즉 평면상의 곡선으로는 표현할 수 있으나 공간상의 자유곡선으로는 나타낼 수 없다. 따라서 x_1 와 x_2 를 사용하여 근사점인 x_3 을 찾고 마찬가지로 x_1 와 x_2 를 사용하여 x_4 을 찾은 후 각각의 x_3 에 대하여 x_1 및 x_2 을 일대일 대응하는 방식을 사용하였다.

차수가 커지면 곡선이 overshoot하는 경향이 있으므로 3차로 고정하였으며 하나의 곡선을 fitting하는데 6개의 점을 사용하였다. 두번째 곡선을 fitting할 때부터는 이전의 곡선에 사용하였던 마지막 두 개의 점과 새로운 네 점을 사용하여 fitting하고 출력은 새로운 네 번째 점이 시작되는 좌표로부터 이어나갔다.

Fig. 2는 이와 같은 방법으로 다항식 회귀분석법을 사용하여 근사화한 효과를 보여주고 있다. 'x'로 표기된 측정점은 임펠러 블레이드의 임의의 점을 수동 측정하여 획득한 것으로 그림과 같이 들쭉날쭉하게 산포되어 있다. Fig. 2의 파선으로 표기한 곡선은 들쭉날쭉하게 산포한 측정점을 모두 지나고 '보간 곡선'으로 CATIA에서 fitting한 B-spline curve이다. 또한 Fig. 2의 실선으로 표시된 곡선은 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.

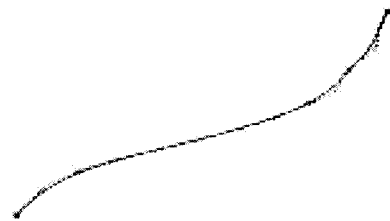


Fig. 2 Comparison of curves according to fitting method

2.3 CMM을 사용한 프로그램 측정

다항식 회귀분석을 통해 생성한 점데이터들로 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 수행하였으며 Fig. 3 CMM 구동 소프트웨어인 Virtual DMIS의 화면을 나타내었다. Fig. 3의 "Proper measured curve"로 표기된 곡선들은 다항식 회귀분석 근사 곡선의 점데이터를 입력점으로 하여 다시 CMM에서 프로그램 측정을 하여 얻어진, 적합화한 곡선들이며 "Improper measured curve"로 표기된 곡선들은 이상과 같은 적합화 과정을 거치지 않고 수동측정에 의해서 생성된 곡선들이다. 그림에서 볼 수 있듯이 적합화한 곡선들이 곡면상에서 들쭉날쭉하지 않고 가지런하게 fitting되었음을 알 수 있다.

CMM을 사용한 프로그램 측정의 효과는 근사 곡선의 점데이터를 실제 곡면상의 점으로 fitting 하여준과 동시에 설계자의 주관에 의해 근사곡선의 순정도가 달라지는 영향을 배제하여 주는 효과를 나타낸다.

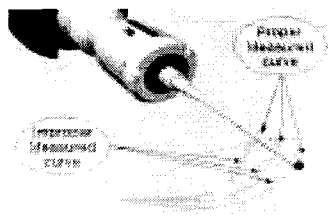


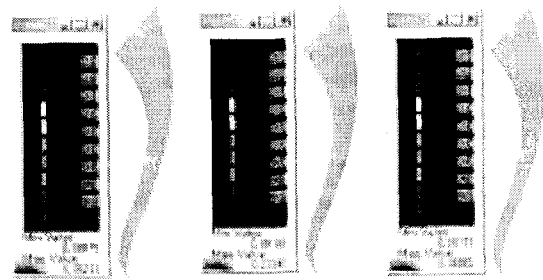
Fig. 3 Effect of program measurement by CMM

3. 곡면 생성 및 적합화 효과의 검증

이상과 같이 다항식 회귀분석에 의한 근사 곡선을 얻고 여기서 얻은 점데이터를 통한 프로그램 측정의 과정을 거쳐 적합화된 곡선의 점데이터들을 사용하여 곡면을 생성하였다. 곡면을 생성하는 방법은 NUBS(Non-Uniform B-spline)⁵ 알고리즘을 적용하여 Visual C++로 구현하여 곡면의 점데이터를 출력하였다. 출력점은 다시 상용 모델러인 CATIA에 입력하여 곡면모델링에 적용하였다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 각각 원형모델(master model), 수동측정점에 의한 역공학 모델(improper reverse model) 및 다항식 회귀분석과 프로그램 측정 프로세스를 거쳐 적합화한 역공

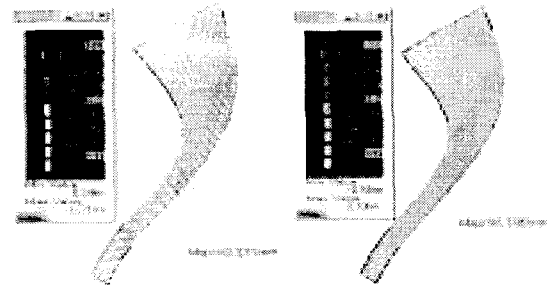
학 모델(proper reverse model)을 보여준다. 곡률해석 결과 Improper R/M(reverse model)의 최대곡률은 0.23으로 Master model의 최대곡률인 0.05의 약 4배가량 큰 반면 Proper R/M의 최대곡률은 0.06으로 근사치에 가깝게 곡률이 부드러워진 것을 알 수 있다.

또한 곡면생성 과정에서의 적합화 정밀도를 검증하기 위하여 Fig. 5의 (a)에서는 Master model과 Improper R/M의 오차를 비교하였고 Fig. 5의 (b)에서는 Master model과 Proper R/M의 오차를 비교하였다.



(a) Master model (b) Improper R/M (c) Proper R/M

Fig. 4 Comparison of curvature analysis according to fitting method



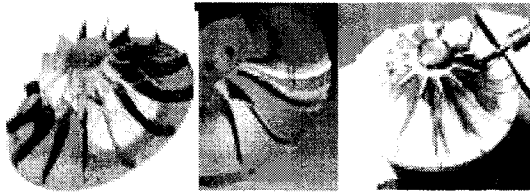
(a) Master vs Improper R/M (b) Master vs Proper R/M

Fig. 5 Comparison of deviation between master model and reverse models according to fitting method

비교 결과 다항식 회귀분석과 프로그램측정 등 적합화 과정을 거친 Proper R/M과 Master model의 최대 오차는 0.196mm인 반면 수동측정점에 의한 Improper R/M과 Master model의 최대오차는 0.271mm로 나타났다. 즉 적합화 과정을 거친 역공학 모델이 적합화 과정을 거치지 않은 역공학 모델에 비하여 약 0.075mm 가량 원형모델에 근접하는 정밀도를 보여줄 수 있다.

4. 임펠러의 5축가공 및 비교 측정

Fig. 6의 (a)는 역공학에 의한 임펠러의 3-D 모델을 보여주며 (b)는 CATIA를 사용한 5축가공 툴패스의 시뮬레이션 장면을 (c)는 T-35 5축가공기를 사용한 실제 절삭가공을 보여준다.



(a) 3-D model (b) Tool path (c) 5-X machining

Fig. 6 Manufacturing of impeller using 5-axes MCT

Reverse model은 적합화한 모델과 그렇지 않은 모델의 2개를 가공하였으며 Fig. 7은 Master model과 각각의 Reverse model을 비교측정하는 장면을 보여준다. 비교측정 방법은 Master model의 임의의 점들을 샘플링하여 측정하고 측정점을 사용하여 자동측정 프로그램을 만든 뒤에 각각의 Reverse model에 적용하여 자동측정하게 하였으며 이에 따른 상호 오차는 Table 1과 같다.

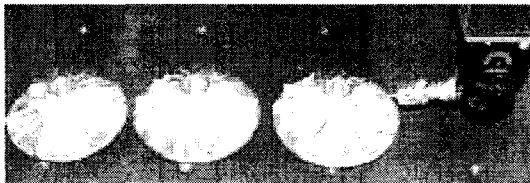
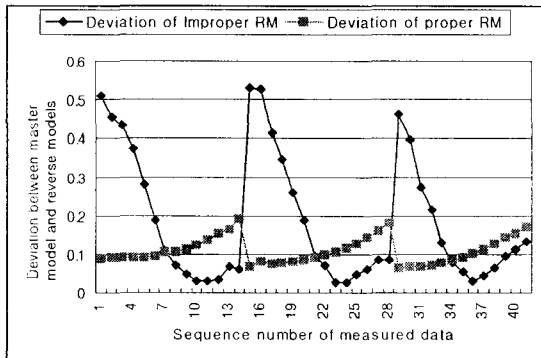


Fig. 7 Comparison measurement between master model and reverse models

Table 1 Comparison of deviation between master model and reverse models



Division	Master model vs	
	Improper R/M	Proper R/M
Ave. Dev.(mm)	0.185	0.109

비교결과 Master model과 Improper Reverse model의 평균오차가 0.185 mm 인데 비해 Proper Reverse model 과의 평균오차는 0.109 mm로 약 0.076 mm 개선되었다.

5. 결론

1. 임펠러의 수동측정에 의한 에러를 최소화하기 위하여 다항식회귀분석 알고리즘을 적용하여 Visual C++로 구현한 후 CATIA로 fitting한 결과 수동측정점의 사이를 지나는 부드러운 근사곡선이 생성되었으며 프로그램측정의 과정을 거쳐 설계자의 주관을 배제함으로써 실제 곡면상의 점으로 fitting할 수 있었다. 이는 기존의 곡선 fairing 방법에 비해 매우 손쉬운 수치해석적 방법과 정밀한 프로그램측정을 통해 가능하였다.

2. 원형모델과 적합화한 역공학모델 및 적합화하지 않은 역공학모델의 곡면을 상호 비교한 결과 적합화하지 않은 모델에 비해 적합화한 모델은 약 0.075mm의 오차를 줄임으로써 역공학의 정밀도를 향상시켰다. 또한 실제 5축가공을 통하여 원형모델과 각각의 역공학 모델을 비교측정한 결과 적합화를 거친 역공학 모델이 0.076 mm 향상된 정밀도를 나타내었다.

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. Park, J. W. and Ko, T. J., "OMM system based on CAD model," J. of KSPE, Vol. 18, No. 6, pp. 37-42, 2001.
3. Park, Y. G., Ko, T. J. and Kim, H. S., "Efficient Digitizing in Reverse Engineering By sensor fusion," J. of KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 61-70, 2001
4. Les Piegl and Wayne Tiller, "Algorithm for approximate NURBS skinning," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 9, pp. 699-706, 1996.
5. Choi, B. K., Surface Modeling for CAD/CAM, pp. 152-156, 1991.