

### 3 차원 측정 데이터를 이용한 자유곡면 가공물의 오차해석

김성돈\*, 이성근(경북대 대학원 기계공학부), 양승한 (경북대 기계공학부), 이재종(KIMM)

#### Error Analysis of Free-Form Artifact using 3D Measurement Data

Seong-Don Kim\*, Sung-Gun Lee(Graduate School, Kyungpook National Univ.)

Seung-Han Yang (Kyungpook National Univ.), Jae-Jong Lee(KIMM)

#### ABSTRACT

The Accuracy of a free-form artifact is affected by machine tool errors, machining process errors, environmental causes and other uncertainty. This paper deals with methodological approach about machine tool errors that are defined the relationship between CMM and OMM inspections of the free-form artifact. In order to analyze the measurement data, Reverse engineering was used. In other words, Surface of Free-Form Artifact is generated by NURBS surface approximation method. Finally, Volumetric error map is made to compare surface of CMM data with that of OMM data.

**Key Words :** Free-Form Artifact(자유곡면 가공물), Machine Tool Error(공작기계 오차), Reverse Engineering(역공학), CMM(3 차원 측정기, Coordinate Measuring Machine), OMM (기상측정, On-Machine Measurement), NURBS Surface Approximation(NURBS 곡면근사)

#### 1. 서론

일반적으로 공작기계로 가공한 가공물의 정밀도에 영향을 주는 오차 요소는 크게 공작기계 자체 오차와 가공공정에서 발생하는 오차로 구분된다. 그 중에서 공작기계 자체 오차는 기계 요소들의 부정렬 및 정적변형에 따른 기하학적 오차와 발생하는 열로 인한 기계 요소들의 열변형 오차 및 절삭하중에 의한 변형 등이 있다. 반면 가공공정에서 발생하는 오차는 절삭력, 공구의 변형 및 마모, 칩터 및 진동 등이 원인이 된다. 이러한 오차 요소들은 가공물에 복합적으로 작용되어 가공물의 품질을 저하시킨다. 따라서 이러한 오차 요소들이 가공물에 어느 정도의 영향을 미치는지 파악하고 이를 보상한다면 가공물의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

기존의 연구<sup>[1]</sup>에 의하면 가공물의 오차에 미치는 영향은 공작기계가 60-65%, 가공공정이 30-35%, 그 외의 환경요인이 5-10%로 공작기계 자체의 오차가 가공물의 오차에 가장 큰 영향을 주었다. 이런 이유에서 공작기계 자체 오차를 모델링하여 그

것을 보상하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.<sup>[2-5]</sup>

본 논문에서는 공작기계 자체 오차를 모델링하는 기존의 오차해석방법과는 다르게 공작기계를 사용해서 만들어진 자유곡면 가공물(Free-Form Artifact)을 고정밀 측정 장비인 3 차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)와 기상측정(OMM, On-Machine Measurement)을 통해 측정하여 그 둘 사이의 관계에서 발생하는 공작기계 자체 오차에 대해 정의하고 해석한다.

이를 위하여 역공학 방법(Reverse Engineering Method)을 도입하였다. 역공학이란 가공물의 CAD 모델을 얻기 위해 고정밀도를 가진 측정장치로 가공물의 곡면 형상에 대한 데이터를 추출한 후 형상 모델링(Surface Modeling) 과정을 거쳐 설계모델(계산 모형, Computational Model)을 만드는 것을 말한다. 이러한 역공학 방법은 기능적 또는 심미적인 요구에 의해 가공물 자체의 수정이 불가피하거나 쾌속조형(Rapid Prototyping)과 같이 모델의 생성방법이 유동적인 작업에 유용한 데이터를 제공한다.

본 논문에서는 NURBS 곡면근사(Surface Approximation)방법을 이용하여 CMM 측정 데이터로부터 곡면을 만들고 그 위에 OMM 측정 데이터를 맵핑하여 오차맵(Error Map)을 만들고 분석한다.

## 2. CMM 과 OMM 비교

오늘날 3 차원 측정기술은 대상 물체와의 접촉 여부에 따라 접촉식과 비접촉식으로 크게 구분된다. 접촉식 측정기술은 측정 프로브와 대상 물체와의 접촉을 통해 형상 데이터를 얻는 방식으로 일반적으로 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 CMM 이 대표적이다 비접촉식 기술은 대상 물체와의 접촉이 없이 형상 데이터를 얻는 방식으로 레이저 스캐너, 모아레, CT(Computed Tomography) 등이 있다. 접촉식 측정기술은 비접촉식에 비해 데이터의 정밀도가 높은 장점이 있으나 데이터 획득에 많은 시간이 걸리는 단점이 있다 따라서 CMM 과 같은 접촉식 측정 장비는 많은 점 데이터가 필요하지 않는 특정 형상의 가공물에 더욱 적합하다. 논문에서는 가공물에 대한 정확한 형상모델링을 위해 전체 패치에 대해 X, Y 축 각각 1 mm 간격으로 데이터를 측정하였다.

Table 1 Specifications of CMM & OMM

System Components	Specifications
Machine Tools	Horizontal Machining Center
CMM	Leitz PMM(Brown&Sharpe) U1( $\mu m$ ) = 0.5 + L/700 U3( $\mu m$ ) = 0.5 + L/700 Probe Radius : 1 mm
Touch Probe	MP7 (Renishaw) Optical Type MI7 Interface unit Star Type Stylus (L=50mm) Probe Radius : 3 mm

보통 CMM 에서는 공작기계에서 가공된 가공물을 측정기의 테이블로 이동시켜 측정하게 된다. 이런 작업에는 고도의 숙련자가 필요하게 되며 또한 금형가공 공정과 같이 가공과 측정이 반복적으로 수행되어야 하는 작업에서는 측정과 점사를 위한 가공물의 빈번한 이동은 생산성의 저하요인이 된다 이런 이유에서 공작기계에서 가공이 완료된 후 공구를 프로브로 교환하여 가공물의 형상을 자동으로 측정하는 OMM 측정기술이 최근에 많이 연구되고 있다. [4,5]

일반적으로 공작기계의 정밀도가 CMM 에 비해 낮기 때문에 공작기계 위에서 이루어지는 OMM 에

의한 측정결과는 CMM 보다 정밀하지 못하다 Table 1 은 본 연구에서 사용한 CMM 과 OMM 에 대한 구성이다.

사용된 접촉식 프로브는 정도가 1  $\mu m$  이며, 기초실험을 통해 프로브가 가지고 있는 오버트러블 오차(over travel error), 프로빙 오차 및 반경오차, 측정오차를 보정하였다. [4,5]

실제 가공물에는 공작기계 자체 오차(  $E_{Machine}$  )와 가공오차(  $E_{Process}$  )가 모두 포함되어 있다.

$$E_{Total} = E_{Machine} + E_{Process} \quad (1)$$

CMM 측정 데이터에는 이상적인 CAD 모델에 공작기계 자체 오차 및 가공오차가 포함되어 있으며 측정시의 불확정 오차(Uncertainty Error,  $E_{Uncert1}$ )가 포함되어 있다. 반면 OMM 데이터는 공작기계 상에서 측정되기 때문에 공작기계 자체 오차를 인식할 수 없으며 CMM 과는 또 다른 측정상의 불확정 오차( $E_{Uncert2}$ )를 가진다

$$CMM_{Data} = CAD_{Data} + E_{Machine} + E_{Process} + E_{Uncert1} \quad (2)$$

$$OMM_{Data} = CAD_{Data} + E_{Process} + E_{Uncert2} \quad (3)$$

기초실험을 통해 오버 트러블 오차, 프로빙 오차, 프로브 반경오차 및 측정오차 등을 보정함으로써 CMM 과 OMM 에서 발생할 수 있는 불확정 오차를 최대한 줄였으며 만약 이러한 불확정 오차가 거의 제거되었다고 가정하면  $CMM_{Data}$  과  $OMM_{Data}$  의 차이는 결국 공작기계 자체 오차  $E_{Machine}$  이 된다.

## 3. NURBS 곡면근사 알고리즘

매개변수에 의한 곡면 생성하는 방법에는 크게 곡면보간(Surface Interpolation)과 곡면근사(Surface Approximation)로 나누어 진다. 일반적으로 측정 데이터 값을 항상 지나는 곡면보간이 더 정확한 형상 곡면을 생성할 것 같지만 측정 데이터에 오차가 포함된 경우라면 곡면근사가 실제 형상에 더욱 가까운 곡면을 만든다. 본 연구에서는 NURBS 식을 이용하여 CMM 데이터에 대해서 곡면근사를 하였다. 사용된 NURBS 식은 다음과 같다. [7,8]

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (4)$$

$S(u, v)$  는 곡면상의 점,  $P_{i,j}$  는 조정점(Control Point),  $N_{i,p}, N_{j,q}$  는 기저함수(Basis Function),  $w_{i,j}$  는 가중치(Weights) 이다.

먼저, 곡선근사에 대해 알아보면  $C(u_k)$  는 곡선상의 점으로서 식 (5)와 같이 표현된다.

$$C(u_k) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_k)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_k)w_i} \quad (5)$$

주어진 데이터가  $Q_0, \dots, Q_m (m > n)$  으로 주어질 때, 최소자승법을 이용하여 식(6)이 최소가 되도록 곡선상의 조정점을 구한다.

$$e = \sum_{k=1}^{m-1} |Q_k - C(\bar{u}_k)|^2 \quad (6)$$

곡선근사에 사용된 알고리즘을 곡면에 적용하면 곡면을 근사할 수 있다.

CMM 데이터로 곡면을 근사한 다음 OMM 데이터와 비교를 해야 하는데 이 때 OMM 데이터와 CMM 데이터에 의한 곡면과의 오차는 식 (7)과 같다.

$$d = \sqrt{(X_y - S_y^x(u, v))^2 + (Y_y - S_y^y(u, v))^2 + (Z_y - S_y^z(u, v))^2} \quad (7)$$

여기서,  $X_y, Y_y, Z_y$  는 OMM 데이터이며,  $S_y$  는 곡면상의 점이다.

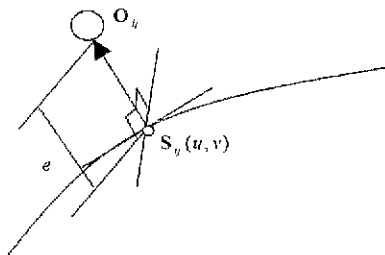


Fig. 1 Normal error between CMM approximation surface and OMM data

OMM 데이터는 곡면의 법선방향에 존재해야 하므로 해당하는 곡면상의 점은 식(8)의 두 조건을 만족해야 하고 Fig. 1 은 이를 나타낸다.

$$\begin{aligned} (O_y - S_y(u, v)) \cdot \frac{\partial S_y(u, v)}{\partial u} &= 0 \\ (O_y - S_y(u, v)) \cdot \frac{\partial S_y(u, v)}{\partial v} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

#### 4. 실험결과 및 고찰

먼저, 자유형상 가공물의 전체 패치에 대해 CMM 으로 측정하였다. 그 후에 NURBS 곡면근사 방법을 이용해서 CMM 데이터를 근사하였다.

(Fig 2)

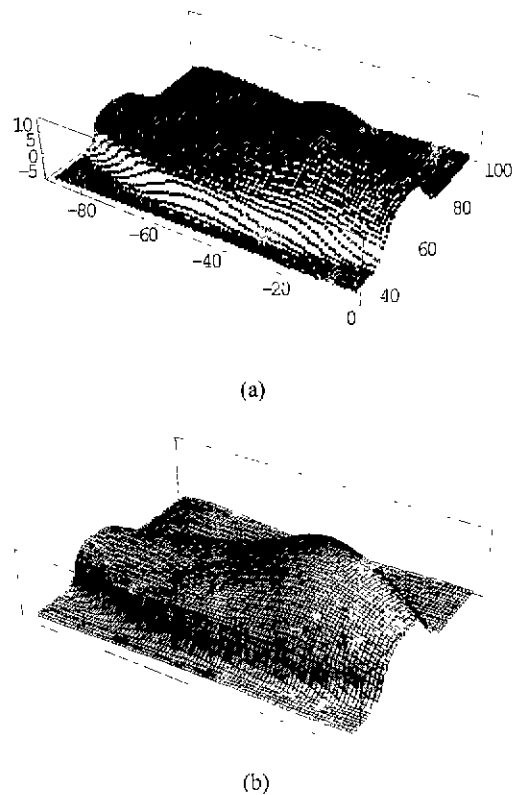


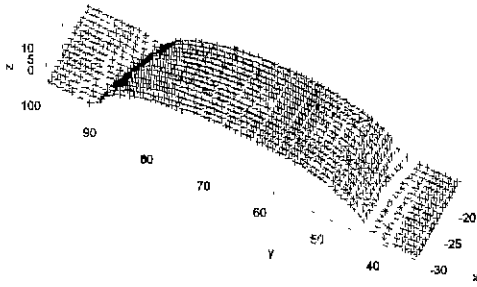
Fig 2 CMM data of CMM Inspection (a) Measurement point data. (b) NURBS surface approximation

여기에 측정된 OMM 데이터를 맵핑하여 식 (7) 과 (8)을 사용하여 오차맵(Error Map)을 만들었다. (Fig. 3) OMM 데이터는 측정시간과 효율을 고려하여 부분 패치에 대해 얻었다. 데이터는 X, Y 축으로 각각 1 mm 간격으로 얻었으며 전체 패치에 대한 CMM 데이터 수는 6006 개이고, 부분 패치에 대한 OMM 데이터 수는 990 개 이다.

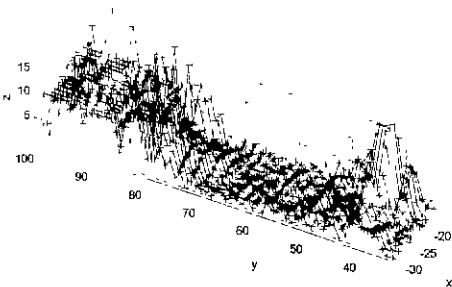
(2) 산업현장에서 사용되는 실제 가공물에 대한 측정값을 통해 가공기계의 오차를 해석하고 보정하는 방법을 제시하였다.

### 참고문헌

1. J. B. Bryan, "International Status of Thermal Error Research", *Annals of CIRP*, pp 645-656, 1990.
2. S. Yang, J. Yuan, and J. Ni. "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 113-124, 1996.
3. J. Mou, C. R. Liu, "A Methodology for Machine Tools Error Correction using Reference Parts", *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol 8, No. 1. pp. 64 - 77, 1995.
4. 이재중, 양민양, "기상계측 시스템을 이용한 머시닝센터의 기하오차 모델링 및 오차측정", *한국정밀공학회지*, 제 16 권, 제 2 호, pp. 201-210, 1999.
5. J. Lee, M. Y. Yang, "Measurement of the Volumetric Thermal Errors for CNC Machining Center using the Star-type-styluses Touch Probe", *Int. J. of KSPE*, Vol 1, No. 1, pp. 111-117, 2000
6. J. Mou, "A Systematic Approach to enhance Machine Tool Accuracy for Precision Manufacturing", *Int. J. Mach. Tools. Manufact.* Vol. 37, No. 5, pp. 669-685, 1997.
7. A. Werner, et al, "Reverse Engineering of Free-Form Surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 128-132, 1998.
8. L. Piegl, W. Tiller, "The NURBS Book", 2<sup>nd</sup> ed., Springer, New York, NY, 1997



(a)



(b)

Fig. 3 Machine tool errors (a) OMM data, (b) Error map between CMM and OMM

위의 결과에서 동작기계 자체 오차는 최대  $15\ \mu\text{m}$  정도가 발생했으며 가공물의 곡률이 크게 변하는 부분에서 큰 오차가 발생하였고 곡률이 평탄한 부분에서는  $5\ \mu\text{m}$  이하의 오차가 발생하였다.

곡률이 크게 변하는 부분에서 오차가 상승한 이유는 측정할 때 실제 가공면의 법선방향으로 프로브가 접근하기 힘들기 때문에 불확정 오차가 증가하기 때문이다.

### 5. 결론

본 논문에서는 기존의 동작기계 자체 오차를 모델링하는 방법과는 다른 CMM 과 OMM 측정을 통해 동작기계 자체 오차에 대해 정의하고 분석하는 방법론을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) CMM 과 OMM 을 통해 자유곡면 가공물의 형상을 측정하고 그 결과의 비교를 통해 동작기계 자체 오차에 대한 경향을 알 수 있었다.