

# 다이아몬드 선삭 가공기의 진단을 위한 대영역 표면 해석

김승우\* (KAIST 기계공학과), 장인철(KAIST 기계공학과 대학원), 김동식(삼성전자)

## Very Large Scale Analysis of Surfaces for Diamond Turned Machine Diagnosis

Seung-Woo Kim(KAIST), In-Cheol Chang(Graduate School, KAIST), Dong-Sik Kim(Samsung Electronic)

### ABSTRACT

Diamond turning machines for manufacture of precision optics require deliberate diagnosis to ensure that all the machine elements are properly operating, kinematically, dynamically and thermally, to produce demanded work qualities. One effective way is to directly inspect topographical features of work surfaces that have been carefully generated with prescribed machining conditions intended to exaggerate faulty consequences of any ill-operating machine elements. In this research, a very-large-scale phase measuring interferometric system that has been developed for years at Korea Advanced Institute of Science and Technology is used to fulfill the metrological requirements for the surface analysis. A special stitching technique is used to extend the measuring range, which integrates all the patches that are separately sampled over the whole surface while moving the stage. Then, the measured surface profile is analyzed to related the machine error sources. For this, zernike polynomial fitting is used together with the wavelet filter and the fourier transform. Experimental results showed that the suggested technique in this study is very effective in diagnosing actual diamond turning machines

**Key Words** : Machine diagnosis(기계진단), Diamond turning process(다이아몬드선삭가공), Surface analysis(표면해석), Tool vibration error(공구진동오차), Stitching Technique(스티칭 기법), Zernike polynomial fitting(저니크 다항식 맞춤)

### 1. 서론

공작기계의 오차요인을 진단하는 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나눌 수 있다. 직접적인 방법은 테이블 이송오차, 주축 회전오차 등과 같은 요인을 직접적으로 측정하는 것이고, 간접적인 방법은 주어진 조건과 경로에서 가공되어진 피삭재의 표면형상을 측정 분석하여 오차요인을 찾아내는 방법이다. 이중 간접방법은 측정된 표면의 형상정보에 의존하므로 간단하고 빠르게 분석이 가능하며, 특히 가공공정 중 발생하는 역학이 표면형상에 나타나고 이에 대한 정보를 포함해서 얻을 수 있다는 장점이 있다. 기존의 간접방법에 대한 연구는 접촉식 방법이나 광 측정 장비들이 이용이 되었는데 그 성능이 초정밀 가공기의 진단을 위한 형상측정의 요구사항을 만족하지 못하였다. 접촉식 방법<sup>[1]</sup>의 경우 측정되어진 데이터는 반경방향의 정보만을

포함하므로 가공표면의 원주방향에 대한 정보와 주축회전수에 비해 고주파의 오차성분에 대한 정보가 포함되지 않는 한계를 갖는다. 광측정<sup>[2,3]</sup>의 경우에는 원주방향을 포함한 정보를 얻을 수 있지만 측정분해능이 수백  $\mu\text{m}$  이상으로 표면에 대한 정밀한 분석에는 제한적일 수 밖에 없다.

다이아몬드 선삭 가공 조건을 고려하였을 경우에 진단을 위한 측정을 위해서는 수직방향으로의 측정분해능(measurement resolution)은 나노미터 단위, 3 차원 측정영역의 최소단위인 공간분해능(spatial resolution)은 적어도 마이크로미터 단위로서 표면형상의 고 공간주파수 성분의 정보를 포함되는 3 차원 측정이 되어야 진단을 위한 표면해석이 가능하다. 이를 위하여 본 연구에서는 광위상간섭계를 이용하고 대영역의 스티칭 기법<sup>[4]</sup>을 사용하여 측정을 수행하였다.

측정되어진 고공간분해능, 대영역의 형상정보를 웨이브렛 필터를 이용하여 표면거칠기(roughness),

파상도 오차(waviness error) 그리고 형상오차(shape error)로 구분을 하였다. 형상오차는 저니크(Zernike) 다항식 맞춤을 한 후 그 계수값들을 이용하여 회전각에 대하여 변하지 않는 회전불변형상(Rotational Invariant Profile)과 회전수와 동기되어 1 회전에 N 의 주기를 갖는 N 배 회전대칭형상(N fold Rotational Symmetric Profile)을 각각 구분하여 낸다. 그리고 파상도 오차에서는 공구진동(Tool Vibration) 성분에 표면생성 모델을 통하여 회전에 비대칭이며 주축 회전수에 비해 고주파수의 오차요인을 찾아낼 수 있다. 제시된 방법에 의해 측정결과를 이용하여 다이아몬드 선삭 가공기에 대한 정확한 진단을 수행할 수 있게 된다.

## 2. 다이아몬드 선삭 표면의 대영역 측정

### 2.1 대영역 측정시스템

Fig.1 는 본 연구에서 사용한 고 공간분해능, 대영역의 광위상간섭 측정 시스템을 보여 준다. 측정물체의 이송을 위한 초정밀 x-y-θ 구동스테이지에 표면형상 측정을 위한 PSI(Phase Shift Interferometry)방식의 비접촉 프로브가 z 축에 장착이 되어 있다. x, y, z 축은 각기 다른 서보시스템에 의하여 구동되면서 측정물의 표면을 측정하게 된다.

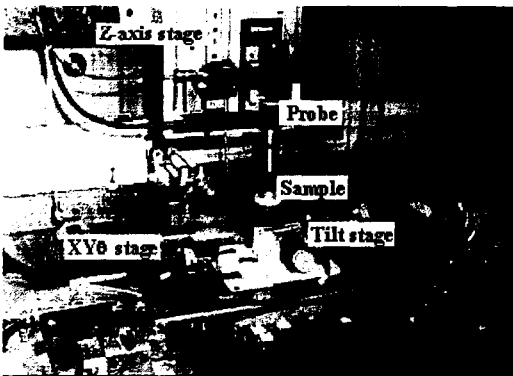


Fig. 1. Overview of ultra-precision 3-D measurement system

PSI 에 의한 측정에서는 높은 공간분해능(High Spatial Resolution)을 유지하기 위해서 측정프로브의 시야(Field of View)는 매우 작아진다. 본 측정시스템에서는 640×480 의 픽셀(Pixel) 조합을 갖는 CCD 를 사용하였고 측정물 대 픽셀 사이의 비율이 10 배인 간섭대물렌즈를 사용하였다. 본 연구에서는 3.9 μm의 공간분해능을 유지하며 수십 mm 의 측정영역을 확보하기 위하여 스티칭

기법(Stitching technique)을 사용하였다.

스티칭 기법은 고공간분해능과 대영역의 측정을 만족하기 위하여는 좁은 영역에서의 고공간분해능을 가지는 측정을 수행하고 일정한 거리를 움직여 반복해서 측정하여 전체 대영역의 정보를 얻을 수 있을 것이다. 측정영역을 확장하기 위하여는 시편을 이동하여서 측정을 하게 되는데, 측정된 데이터들의 좌표계는 시스템이 갖는 오차성분에 의해 현재 측정위치의 주위에 있는 측정 데이터들이 갖는 좌표계와는 다르게 된다. 즉, 측정 데이터들은 측정위치에 따라 각각 다른 고유의 좌표계를 갖게 되는 것이다. 이러한 좌표계의 불일치는 기준 좌표계를 기준으로 하여 구동시 발생하는 오차성분에 의해 측정면이 강제운동을 한 것과 같다. 이 때의 강제운동은 인접한 측정면에 겹쳐진 영역(overlap)을 두고 서로의 형상을 비교하여 좌표변환 행렬을 구하여 보상할 수 있다. 두 가지 데이터를 비교하기 위해서, 일련의 좌표변환을 구하여 측정 데이터의 기준을 일치시켜주는 작업을 통하여 측정된 각각의 형상들을 통합하여 전체 대영역의 측정 형상정보를 얻을 수 있다. Fig.2 은 16 개의 측정된 형상(0.1×0.1mm<sup>2</sup>) 들을 일련의 스티칭 과정을 통하여 0.3×0.3mm<sup>2</sup> 의 면적으로 측정영역을 확장한 결과를 보여 주는 것이다

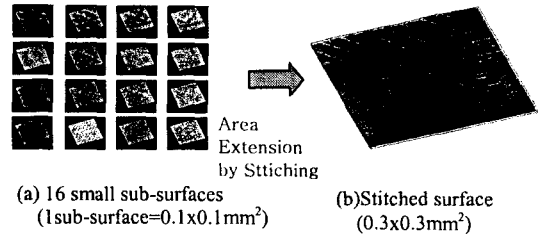


Fig.2. Integration of measured sub-surfaces by stitching technique

### 2.2 초정밀 가공기와 시편제작

초정밀 가공기의 진단을 위하여, 다이아몬드 선삭기(DTM;Diamond Turning Machine) Nanoform 600 에서 시편을 제작하였다. 본 연구의 목적은 가공 시편의 형상정밀도 및 표면거칠기 향상이 아니며, 가공시스템에 존재하는 오차요인을 찾아 내는 것이므로, 이와 같은 공구진동오차 성분 검출을 위하여 표면에 이송성분과 재절삭에 의한 왜곡이 가능한한 나타나지 않도록 가공조건과 공구의 형상을 적절하게 결정하여야 한다. 따라서, 다이아몬드 공구의 인선

반경( $R$ )는 2(mm)로 하였으며, 이송속도( $s$ )는 0.010-0.026(mm/rev), 주축회전수( $n$ )는 16.7, 25.0, 33.3(rps)로 하였다. 시편의 재질은 알루미늄 합금(Al6061T6)으로 외경이 50(mm)인 원통형 시편을 평면절삭(face cutting)하였다.

### 3. 표면형상에 대한 오차요인 분석

#### 3.1 개요

Fig.3 에서는 다이아몬드 선삭기의 오차요인과 표면에 생성되는 형상과의 관계를 연계시켰다. 여러 오차요인에 의한 표면형상은 크게 회전불변형 운동오차, N 배 회전대칭형 운동오차, 회전 비대칭형 운동오차등의 형태로 구분할 수가 있다.

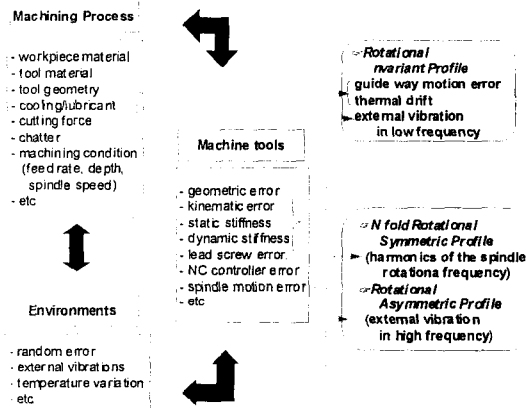


Fig.3. Relationship between Relative Vibrations and Machine Error Components

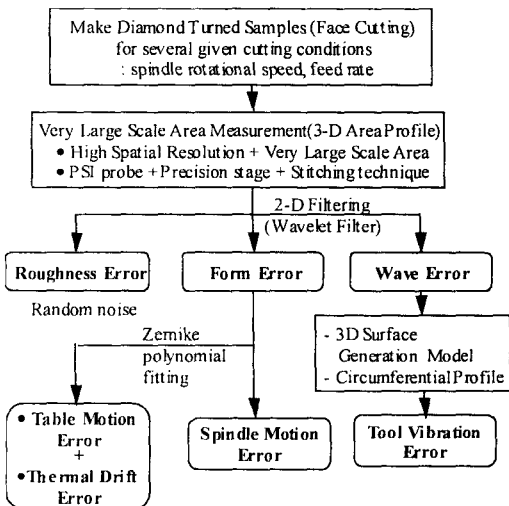


Fig.4. Flowchart of machine diagnosis

Fig.4.는 측정 데이터로부터 초 정밀 가공기의 여러 오차 요인들을 진단하는 전체흐름도를 나타낸 것으로, 이 장에서는 Fig. 4. 에도시된 순서에 의해 각 부분을 설명하겠다.

#### 3.2. 표면거칠기, 파상도, 형상오차의 분리

초정밀 다이아몬드 선삭가공된 표면에서 표면거칠기는 공구의 형상이 표면에 전사되어져 나타나는 것으로 공구흔적(tool mark)이 나타나게 된다. 파상도는 중간파장 성분으로서 외부진동이나 공구채터 등에 기인되어 공구흔적과 유사하게 여러 개의 나선형 형상으로 나타난다.<sup>[5]</sup> 형상오차는 가장 긴 파장 성분으로서 이송테이블의 오차 등과 같은 시스템 오차에 의하여 나타난다.

본 연구에서는 이들 세가지 성분에 대한 구분은 기준길이를와 형상의 특성에 의하여 구분하였다. 먼저 기준길이를 근거로 하였을 경우에 가장 짧은 파장성분인 표면거칠기는 외부의 진동이 전혀 없는 상태에서 공구의 형상이 그대로 피삭재에 전사된다는 가정하에 표면에 생성되는 공구흔적을 나타내는 것이다. 초정밀 다이아몬드 선삭에 의하여 평면가공된 표면을 살펴보면, 미세한 진동성분의 진폭의 크기가 이상적인 최대표면거칠기와 비슷하므로 차단파장을 이송거리와 동일하게 설정하여야 한다.

형상오차는 표면거칠기와 파상도 보다도 큰 파장길이를 가지며 전체 시편 형상의 휨을 규제하는 것이다. 파상도와 형상오차의 구분을 위한 차단 파장길이에 대한 명확한 규정은 없다. 파상도는 진동성분의 크기에 의하여 다른 차단 파장길이를 갖게 된다. 본 연구에서는 형상오차를 다시 8 차의 저니크 다항식 맞춤을 이용하므로 파상도 오차의 최대 차단 파장의 길이를 해석하고자 하는 표면의 전체 길이의 1/8 미만으로 정하고 진동성분에 의한 표면형상이 가장 잘 표현될 수 있는 파장길이를 설정하여 파상도와 형상오차를 구분하였다.

위와 같이 파장길이에 따라 표면형상을 구분하기 위하여 2 차원에서 효율적으로 사용되는 웨이블릿 필터를 사용하였다.<sup>[6]</sup>

#### 3.3. 회전 불변형 운동오차(Rotational Invariant Type Motion Error) 와 N 배 회전 대칭형 운동오차 (N Fold Rotationally Symmetric Type Motion Error)

다이아몬드 평면선삭가공은 회전에 의한가공이므로 형상오차성분은 회전불변형 정보와 회전 대칭형 정보로 구분을 할 수 있다.

먼저 회전불변형 정보는 가공시 시편의 중심에서 외경까지 공구가 시편의 수직방향으로 꺾는 경로와 동일하게 된다. 공구가 시편의 수직방향으로 꺾는 경로는 다이아몬드 선삭기에서는 X 축 이송테이블의 수평방향(주축방향) 경로로서 여기에는 X 축 테이블의 이송오차 즉 진직도 오차와 열변형오차 성분이 포함되게 된다.

회전 대칭형 오차는 주축의 회전운동에 의해 나

타난다. 다이아몬드 선삭기의 경우는 90% 이상이 공기 정압 베어링 주축을 사용하고 있는데 이 베어링 주축의 경우는 주축의 질량 불균형등에 의해 매 회전의 운동오차가 반복적으로 잘 나타나서 1 회전마다 반복적으로 나타나는 동기오차운동이 지배적이다.

3 차원 표면형상 정보에서 중심을 기준으로 회전 대칭형 정보를 추출하기 위하여 저니크 다항식 맞춤을 사용하였다. 형상오차에 대한 저니크 다항식 맞춤을 수행하고 얻어진 저니크 계수중 회전에 불변하는 성분들을 더하여 회전불변형 운동오차를 구하였고 N 배 회전방향으로 1 배, 2 배, 3 배 등의 주기를 갖는 성분들을 각각 더하여 구하였다. 본 연구에서는 8 차항까지 표현되는 저니크 다항식 맞춤을 사용하였다.

### 3.5 회전비대칭형 운동오차(Rotationaly Asymmetric Type Motion Error)

웨이블렛 필터에 의해 분리되어진 파상도 성분은 형상오차와는 달리 회전에 대해 비대칭 형상을 갖게 된다. 파상도 오차는 일반적으로 주축의 회전수보다 고주파인 진동성분으로 주로 공구의 채팅에 의해 발생한다. 이에 대한 해석은 가공중에 공구와 피삭재의 상대변위가 일정한 주파수로 진동되어 표면에 변조되어 나타나는 형상을 해석하여 구할 수 있다. 선행연구<sup>[5]</sup>에서 변조되는 형상은 여러 개의 나선형 형상으로 나타남을 밝혔으며 나선형상의 개수와 나선형상간의 피치를 구함으로써 상대진동성분의 정량적인 값을 구할 수 있다. 정량적인 값을 구하기 위하여 표면형상정보에서 일정한 반경거리에서의 원주방향으로의 정보를 구하고 이에 대한 주파수 분석을 통하여 구하였다.

## 4. 가공표면에 대한 진단 분석

여러가지 조건에 의하여 실제 가공 제작된 시편을 측정하여 3 장에서 제시된 방법에 의하여 초정밀 가공기를 진단하였다. 측정은 최대지름이 30mm 이며, 4 $\mu$ m 의 공간분해능으로 수행되었으며, 회전속도 25rps 이고 이동주기가 20 $\mu$ m 인 경우의 결과를 보여주고, 마지막으로 7 개의 가공조건에서 측정되어진 결과를 통하여 본 연구에서 사용된 다이아몬드 선삭기에 대한 진단을 수행하였다.

Fig 5 는 측정된 3 차원 형상 데이터(a)를 웨이블렛 필터를 이용하여 형상오차(b)와 파상도 오차(c) 그리고 표면거칠기(d)로 분리된 형상을 보여준다. Fig.5(c)에서 공구진동에 의해 변조되어 나타나는 성분이 여러 개의 나선형 형상으로 나타남을 확인할 수 있다.

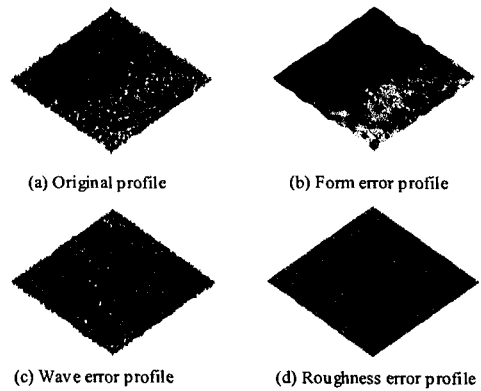


Fig.5. Measured 3D profile and error profiles classified by wavelet transformation filter

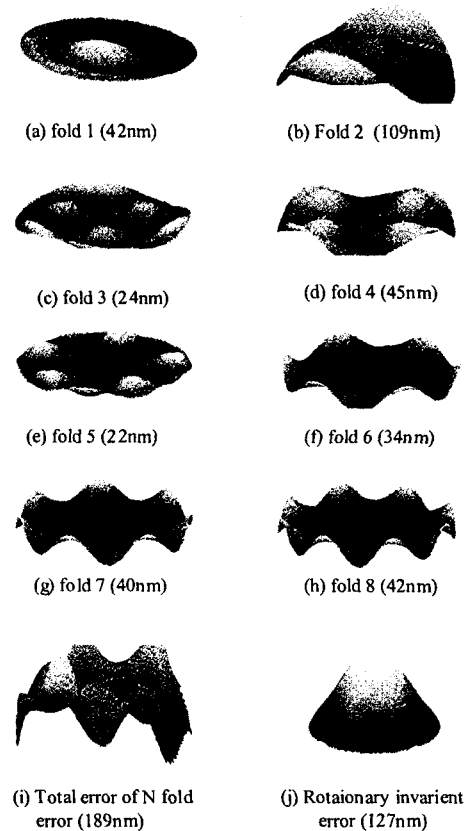


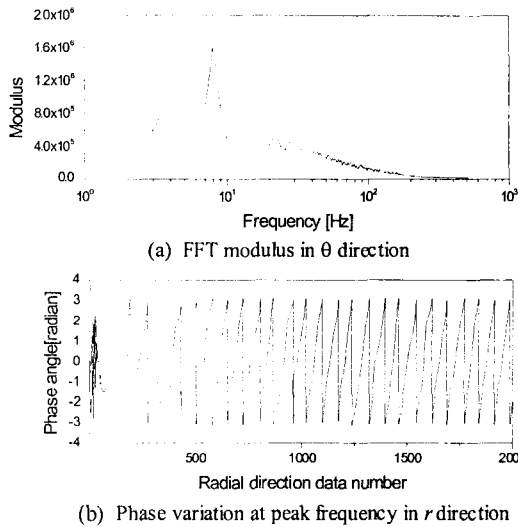
Fig.6. Profiles of Rotationally Invariant Motion and Fold Rotationally Symmetric Motion Error

Fig.6 은 저니크 다항식 맞춤을 통하여 형상데이터를 회전불변오차와 주축회전수의 N 배 회전대칭오차로 분리되어진 형상과 그 크기를 (최대값-최소값)으로 나타내었다. 본 연구에서 사용된 저니크

다항식 맞춤은 45 개의 계수로 구성이 되며 8 차항 까지 구할 수 있으므로 그림에서도 8 차까지의 형상을 보여준다. 결과에서 주축 회전수에 2 배되는 오차요인이 있음을 보여준다.

Fig.7.은 원주방향에 대한 주파수 분석결과를 보여준다. Fig.7.의(a)는 원주방향에 대한 FFT 결과로서 변조되어진 주파수 성분에 의하여 돌출부(peak)가 형성됨을 알 수 있다. Fig.8.(b)는 (a)에서 돌출부에서 반경방향으로의 위상변화를 보여준다. 두 그래프의 결과를 합하여 상대진동성분에 대한 정량적인 값(192.5 Hz)을 구할 수 있다.

Fig.7. Experimental result of modulated 3-D



surface profiles and finding the relative vibration

Rot. speed $n$ (rps)	Feed rate $s$ ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )	Max N Fold error (nm)	Rot. invariant Error (nm)	Tool Vibration Frequency (Hz)
25.0	13	154	102	192.6
25.0	16	183	117	192.7
25.0	20	125	189	192.5
25.0	23	215	141.	192.6
25.0	26	100	180	192.5
16.7	20	89	150	192.8
33.3	10	116	152	192.3
average		140	147	192.5

Table 1. Results of machine diagnosis according to machining conditions from the measured surface profiles

7 개의 가공조건에서 가공된 시편을 이용하여 측정하고 제안된 방법에 의해 해석하여 본 연구에서 사용된 다이아몬드 선삭기를 진단한 결과가 Table.1.에 표시되어 있다.

## 5. 결론

(1) 다이아몬드 선삭기에서 제작된 시편을 광위상간섭계를 이용한 초정밀 삼차원 측정기에 의해 고공간분해능, 대영역의 표면의 형상정보를 획득하였다.

(2) 공작기계의 오차요인을 체계적으로 진단하는 방법으로써 웨이브렛 필터를 이용하여 표면거칠기성분, 파상도성분, 형상오차성분을 구분하였고 이를 통하여 분리된 형상오차성분에서 저니크 다항식 맞춤을 이용하여 회전불변오차와  $N$  배 회전대칭오차를 분류하였고 파상도성분으로부터 공구진동오차를 추출할 수 있는 방법을 제안하였다.

(3) 제안된 방법의 유효성을 실제 가공, 측정, 해석을 통하여 검증하였다.

## 참고문헌

1. T.Sato, M.Li, S.Takata, H.Hiraoka, C.Q.Li, X.Z.Xing, X.G.Xiao, Analysis of Surface Roughness Generation in Turning Operation and its Applications, Annals of the CIRP, Vol.34/1, p.473-476, 1985
2. M.Weck and K.Modemann, Surface quality as a function of static and dynamic machine-tool behaviour during the cutting process, Surface Topography 1, p.291-302, 1988
3. M.Weck, Performance analysis of feed-drive systems in diamond turning by machining specified test samples, Annals of the CIRP Vol.41/1, 1992, p.601-604
4. Shouhong Tang, "Stitching: High spatial resolution microsurface measurements over large areas," Proc. of SPIE Vol.3479, p.43-49, 1998
5. S.W.Kim, D.S.Kim, I.C.Chang, T.H.Keem and S.B.Yoo, Very Large Scale Phase Measuring Interferometry of Work Surfaces for Diagnostic Analysis of the Diamond Turning Process, 1<sup>st</sup> EuSPEN, Bremen Germany, Vol.1, p.24-27, 1999
6. Xiangyang Liu and Jay Raja, Analyzing engineering surface texture using wavelet filter, SPIE, Vol.2825, p942-949, 1996