

# 홈의 형상에 따른 센서 감지거리 변화를 이용한 공구상태 모니터링에 관한 연구

손길호\*, 김미루\*, 이승준\*\*, 정재호\*\*\*, 류경희\*\*\*\*, 이득우\*\*\*\*\*.#

\*부산대학교 나노융합기술학과, \*\*부산대학교 첨단정밀공학협동과정, \*\*\*경남정보대학교 기계계열,  
\*\*\*\*창원문성대학교 기계자동차학부 메카트로닉스과, \*\*\*\*\*부산대학교 나노메카트로닉스공학과

## A Investigation into Tool State Monitoring by Sensing Changes according to Groove

Gil-Ho Son\*, Mi-Ru Kim\*, Seung-Jun Lee\*\*, Jae-Ho Jeong\*\*\*, Kyung-Hee Lew\*\*\*\*, Deug-Woo Lee\*\*\*\*\*.#

\*Department of Nano Fusion Technology, Pusan National Univ.,

\*\*Interdisciplinary Department for Innovative Manufacturing Engineering, Pusan National Univ.,

\*\*\*Subdivision of Mechanical engineering, Kyungnam college of Information&Technology,

\*\*\*\*Mechanical&Automotive Engineering, Changwon Moonsung Univ.,

\*\*\*\*\*Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National Univ.

(Received 23 August 2017; received in revised form 8 September 2017; accepted 15 September 2017)

### ABSTRACT

Research in the machine tool industry has focused on ICT-based smart machines rather than hardware technologies related to machine tools. Real-time tool-status monitoring is representative of this type of technology and has become important for measuring sensors during cutting processes. In this paper, we studied several research areas and used a round bar to conduct fundamental research into the axial displacement of the main spindle of a tool when it was subjected to a machining load. We were able to use the gap sensor to detect the axial displacement indirectly by using grooves with various shapes on the round bar and sensing the gaps between the grooves. We then determined the optimal groove shape for monitoring the tool state.

**Key Words :** Machine Tool(공작기계), Groove(홈), Tool State Monitoring(공구상태 모니터링), Sensing Change (감지거리 변화)

### 1. 서 론

제조업에서 머시닝센터, 라인센터 등의 공작기계는 부가가치가 높은 중요한 산업이고 현재 높은 정

밀도와 가공속도 등과 같은 하드웨어적인 부분은 예전부터 높은 기술수준을 가지고 있기 때문에 점점 스마트 생산기술에 대한 관심이 집중되면서 ICT (Information and Communications Technologies) 기반의 스마트 기계에 대한 연구가 늘어나고 있는 추세이다<sup>[1]</sup>. 대표적인 기술로 고장이 잦은 절삭공구의 가공 시 마멸로 인해 부하가 걸릴 경우 공구 상태

# Corresponding Author : [dwoolee@pusan.ac.kr](mailto:dwoolee@pusan.ac.kr)

Tel: +82-55-350-5281, Fax: +82-51-510-3129

를 효과적으로 모니터링하고 자동적으로 공구교환을 하는 실시간 공구상태 모니터링 기술이 있다<sup>[2]</sup>. 공구의 모니터링에 대한 연구는 공작기계 산업이 발달과 더불어 오랫동안 연구가 수행되고 있다<sup>[3-7]</sup>. 기존에 자주 사용되는 방법으로는 공구동력계를 사용하여 가공 시 발생하는 절삭력을 직접적으로 측정하거나 변위센서를 절삭공구에 설치하여 공구상태를 모니터링 하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법들은 공구교환, 절삭유 영향, 센서와의 간섭 등의 다양한 문제가 발생된다<sup>[8]</sup>. 따라서 한번 설치 후 가공 시 공구와 센서의 간섭이나 설치 수정 등 부수적인 작업을 하지 않는 방법이 필요하다. 이러한 연구 방안으로, 공구 마모로 인해 가공부하가 걸릴 때 공작기계의 메인 스피indle에 나타나는 축 방향 변위 측정을 통해 공구 상태를 파악하는 사례가 있다<sup>[9]</sup>. 특히 NSK사의 경우 메인 스피indle 내부의 베어링 사이 공간(Bearing spacer)에 V자 또는 사선방향 홈(Groove)을 내고 작은 변위센서를 부착하여 공구에 부하가 걸렸을 때 나타나는 축방향 변위를 통해 공구 상태를 파악하는 결과가 있다<sup>[10]</sup>. 메인 스피indle은 가공 시 반경 방향으로의 변형이 거의 없으므로 마모된 공구 사용 시 나타나는 축 방향 변화로 공구 상태를 모니터링 하는데 효과적이다.

따라서 본 논문에서는 가공 시 공구 변형에 따라 공구에 부하가 걸렸을 때 나타나는 메인 스피indle의 축 방향의 변위 변화를 파악하여 공구 교환시점 예측 및 상태 모니터링을 위한 기초 연구로, 메인 스피indle을 대신하여 일반 환봉에 여러 가지 모양의 홈을 가공하여 홈 형상에 따라 간접적으로 변위센서를 사용하여 감지된 검출거리 및 신호형상을 분석하여, 공구상태를 가장 잘 파악하기 위한 최적의 홈 형상을 알아보았다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 앞서 소개한 NSK사의 연구내용으로, 가공 시 공구에 마모가 발생할 때 축 방향으로 변형하는 변위량을 메인 스피indle 위에 홈을 가공하여 홈의 움직임을 통해 간접적으로 변위센서를 사용하여 신호 수신량의 차이로 공구의 상태를 감지할 수 있다고 언급하였다<sup>[10]</sup>. 본 연구에서는 메인 스피indle의

홈을 대신하여 본 실험 장치와 맞는 시험용 환봉을 제작하여 여러 종류의 홈을 가공하여 센서로 수신되는 신호에 대한 분석을 하였고, 변위감지를 위한 최적의 홈 형상을 파악하는 연구를 수행했다.

Fig. 2는 여러 가지 홈이 가공된 환봉을 가공장치에 장착하여 회전 시 나타나는 신호를 변위센서를 통해 수집하는 실험 장치 개요를 나타낸다. 환봉을 머시닝센터의 스피indle에 장착하고 측정거리가 2 mm이고 분해능이 0.5  $\mu\text{m}$ 인 와류형 변위센서(Gap sensor : PU-05, Converter : AEC5505)를 실험 테이블 상면에 고정된 후 변위 센서를 홈의 끝단 위치에 절반정도 걸쳐서 세팅한다. 환봉을 200 rpm 조건을 기본으로 회전을 하여 Z축 방향으로 일정한 간격으로 순차적으로 이동을 시키면서 변위 센서의 검출 거리변화를 비교하였다. 환봉이 Z축 방향으로 올라갈수록 변위센서가 홈을 커버하는 영역이 달라지면서 신호 수신량이 변하게 된다.

Fig. 3은 변위 센서의 축 방향 수신량 변화를 위해 제작한 환봉 위의 여러 가지 홈의 종류를 나타낸다. A 지점은 환봉의 런아웃을 알아보기 위해 홈이 없는 부분을 만들었고, B-D 부분은 홈의 직경과 깊이는 같으나 사선방향의 각도를 다르게 하여 각각 가공하였다. E-F 부분은 홈의 각도가 0인 수평 방향으로 직경만 다르게 가공하였고, G-J 부분은 B

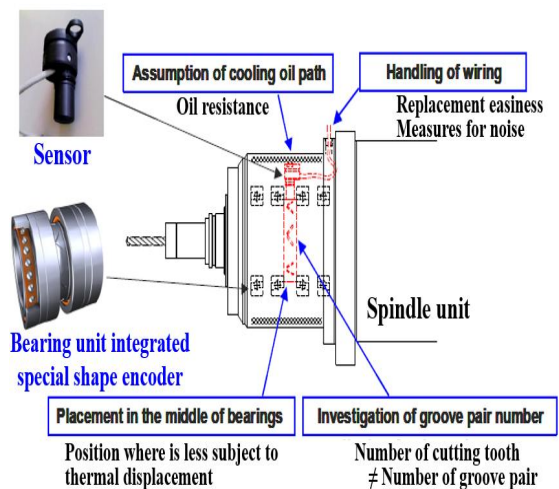


Fig. 1 Measures for intelligent spindle of NSK Ltd. <sup>[10]</sup>

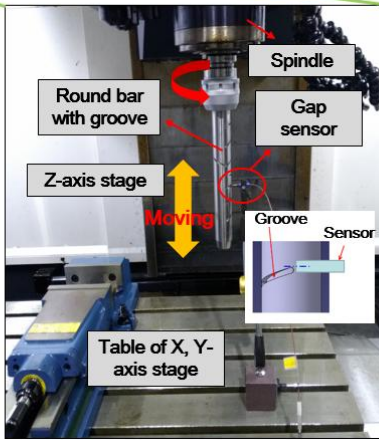
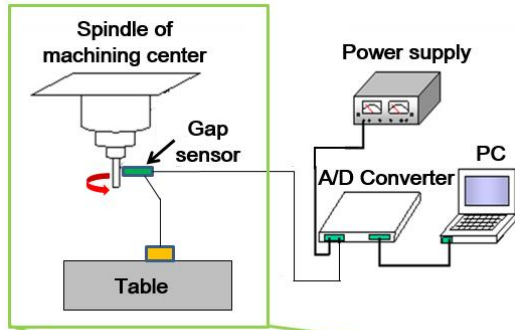


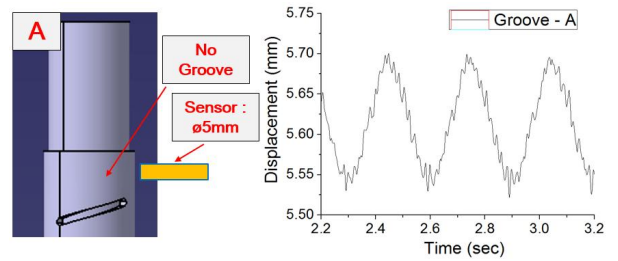
Fig. 2 Experimental setup

부도 홈과 같이 경사의 차이로 축 방향 변위 확인이 가능하기 때문에 경사부 부분을 포함하여 시험용 환봉을 제작하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 축 방향 변위 측정 실험 및 실험결과

환봉을 이용한 홈의 형상에 따라서 각각 홈 부분을 변위센서로 축 방향의 움직임의 신호수집 후 파형 및 이동거리를 분석하였다. 먼저, 환봉을 200 rpm으로 회전시킨 후 +Z축 방향으로 1  $\mu\text{m}$ 씩 4번, 5  $\mu\text{m}$ 씩 4번, 10  $\mu\text{m}$ 씩 2번, 100  $\mu\text{m}$ 씩 2번을 연속적으로 이동시키면서 이동 거리에 따라 센서에 의해 감지되는 홈의 움직임의 변화를 측정하였다.

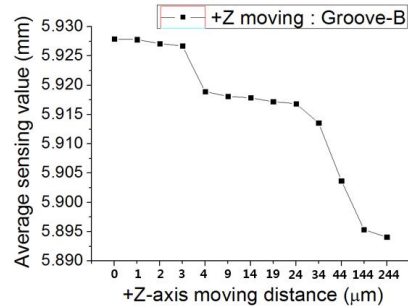
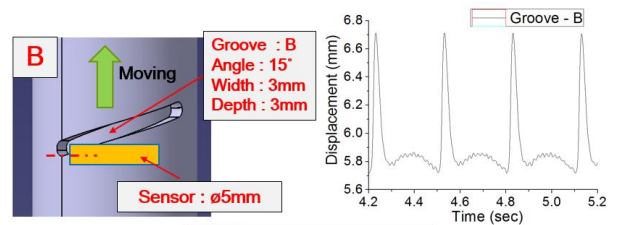


(a) No groove

Position	Configuration of Groove
A	No Groove (for run-out)
B	Angle 15°, Width 3mm, Depth 3mm
C	Angle 28°, Width 3mm, Depth 3mm
D	Angle 24°, Width 3mm, Depth 3mm
E	Angle 0°, Width 3mm, Depth 3mm
F	Angle 0°, Width 5mm, Depth 3mm
G	Angle 15°, Width 5mm, Depth 3mm
H	Angle 28°, Width 5mm, Depth 3mm
J	Angle 15°, Width 5mm, Depth 0.3mm
K	10° Taper

Fig. 3 Shape of groove on the round bar

~D와 비교하여 홈의 직경과 깊이를 다르게 하였다. 마지막으로 K부분은 경사를 가지는 경사부(Taper)로 가공하여 홈과 신호 수신량을 비교하였다. 경사



(b) Groove B

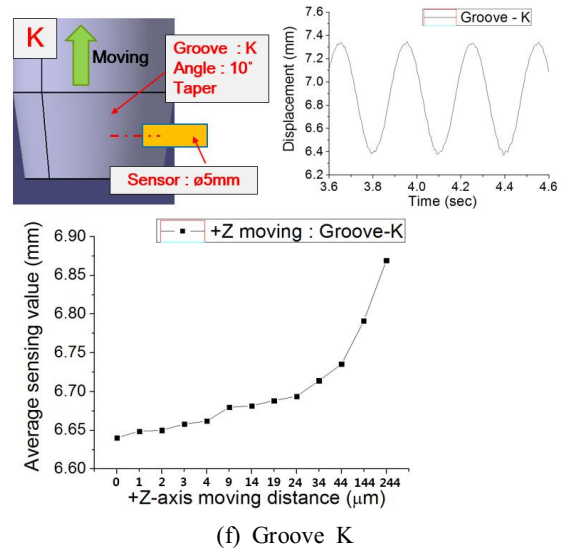
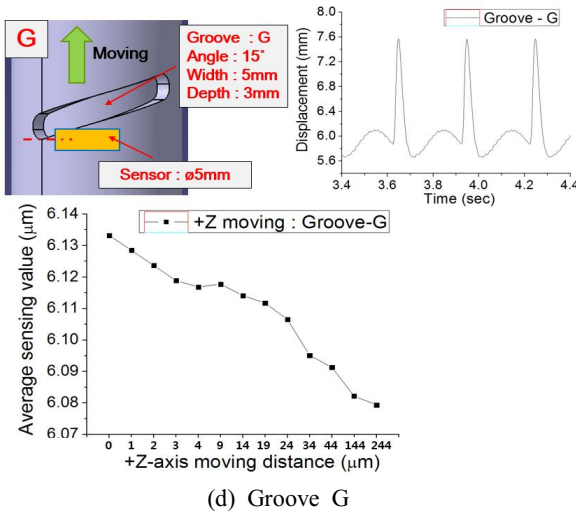
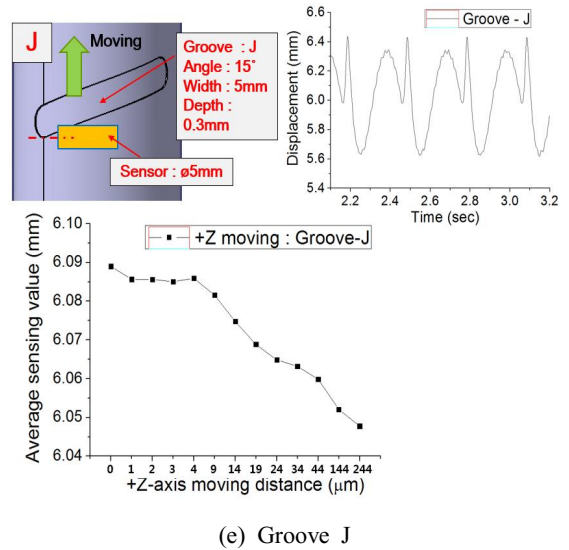
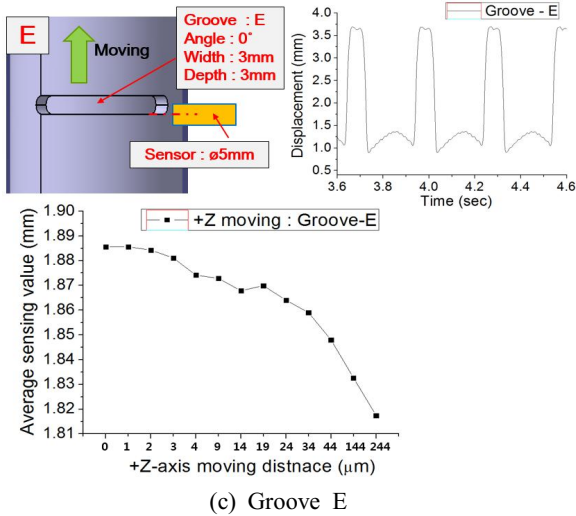


Fig. 4는 각 홈에서 위의 조건으로 +Z축 방향으로 이동시키면서 측정된 파형 및 이동거리에 따라 나타나는 변위 변화량의 평균값 결과를 나타낸다. 먼저 환봉의 홈 형상 중 “A”부분인 홈이 없는 부분을 이용하여 환봉의 런아웃을 알아보기 위해 +Z축 이동 없이 회전 후 변위신호를 수집하고 이를 기초로 하여 나머지 홈들의 파형을 확인하였다. 환봉의 런아웃 편차가 있으므로 아래 그림과 같이 측정 데이터는 기본적으로 Fig. 4 (a)와 같이 사인(Sine) 곡선을 그렸다.

**Fig. 4 Results of sensing change according to Z-axis moving of each Groove shape**

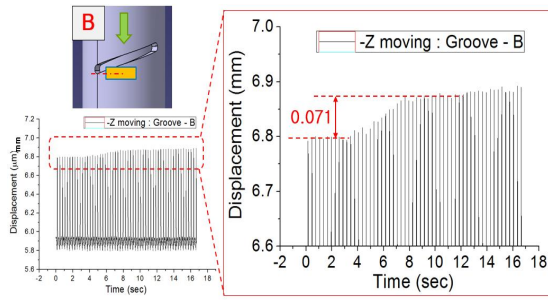
그 다음으로 홈의 각도에 따른 신호수집 차이를 알아보기 위해 작은 각도를 가지는 B (15°) 홈, 큰 각도를 가지는 C (28°) 홈 부분을 비교하였다. B, C 부분의 측정은 Kim. M. R.과 Lee. D. W의 선행 연구에 의해 수행되었으며<sup>[11]</sup>, B와 C의 홈의 이동에 의한 변위 변화량의 평균을 계산한 측정 결과는 15°

흡인 B 일 때가 조금 더 축 방향 변위를 명확하고 크게 감지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 흡의 각도가 작을수록 변위 센서 위를 지나가는 흡의 면적이 더 커지기 때문에 B ( $15^\circ$ ) 흡의 신호 감지가 더 용이하다고 판단된다. 따라서 B ( $15^\circ$ ), C ( $28^\circ$ ), D ( $24^\circ$ ) 중에서 B 부분을 위주로 측정을 하였으며 측정 결과를 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 파형은 기존 런아웃 파형에서 흡 깊이로 인한 최대지점 (Peak)이 주기적으로 짧게 나타났다. 파형의 아래 그래프는 각 +Z 방향의 이동거리에 따라 나타나는 변위 변화량의 평균값으로, +Z방향으로 환봉이 올라갈수록 센서와 흡이 중첩되는 면적이 줄어들기 때문에 전체 거리감지 평균값의 크기는 작아진다. 그러나 +Z축 방향 이동거리가  $1\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ 로 거리 폭이 커질수록 거리를 감지하는 전체 평균값의 증가 폭도 같이 점점 커져야 한다. 하지만 흡 B는 +Z 방향으로  $1\ \mu\text{m}$ 씩 증가할 때와 비교하여  $5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ 씩 점점 큰 값으로 변할 때 마다 전체 평균값의 증가 값도 점점 폭이 커져야 하는데  $1\ \mu\text{m}$  일 때와  $100\ \mu\text{m}$ 일 때의 평균값의 폭 차이가 불규칙적으로 크지 않다는 걸 볼 수 있다. 그 다음으로 흡 각도가  $0^\circ$ 인 수평일 때(흡 E)의 신호 수집량을 측정하여 Fig. 4 (c)에 나타내었다. 각도를 갖는 흡 B와는 달리 변위 센서와 중첩되는 흡 면적이 넓으므로 회전 시 감지되는 파형은 기존의 런아웃에 사각 모양의 비교적 긴 주기를 갖는 Peak이 나타났다. +Z 방향으로 이동할 때마다 나타나는 평균값의 크기는 점점 작아진다. 그러나 흡 B와 비교하면 비교적 양호하기는 하나, +Z 방향으로  $1\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ 씩 점점 큰 값으로 변할 때 마다 전체 증가 값도 조금씩 커지는 하지만 일부 영역에서 신호가 불규칙적으로 조금씩 역으로 커지는 현상을 볼 수 있었다. Fig. 4 (d)는 흡 B와 비교하여 흡의 직경이 3 mm에서 5 mm로 커졌을 때 신호수집의 변화를 알아보기 위해 흡 G 부분을 측정한 결과이다. 파형은 흡 B와 큰 차이가 없었으며 갈수록 평균값이 작아지는 현상은 공통적으로 나타난다. +Z 방향으로  $1\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ 씩 점점 큰 값으로 변할 때 마다 나타나는 평균값 폭 차이는 흡 E와 같이 불규칙적으로 평균값이 일부 구간에서 커지는

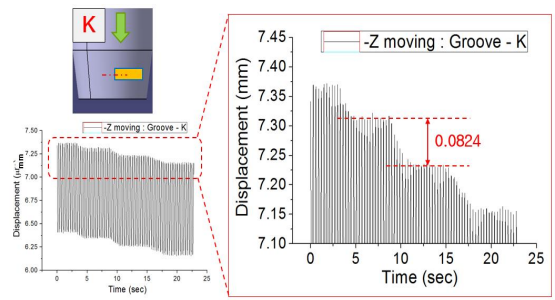
현상이 나타나거나  $1\ \mu\text{m}$ 와  $100\ \mu\text{m}$ 일 때 변화폭이 큰 차이가 없이 나타났다. Fig. 4 (e)는 흡 G와 비교하여 흡의 깊이에 따라 나타나는 차이를 알아보기 위해 흡 J 부분을 측정한 결과이다. 흡 J는 깊이가  $0.3\ \text{mm}$ 로 작기 때문에 측정된 파형도 최대지점 값이 낮게 나타났다. +Z축 방향으로 이동할 때 마다 측정된 평균값은 똑같이 작아졌으며,  $1\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ 만큼 이동하였을 때 나타나는 변화폭이  $1\ \mu\text{m}$ 씩 이동할 때에는 변화폭이 작게 나타나지만,  $5\ \mu\text{m}$  이후로는 비슷한 변화폭을 나타내며 흡 G와 비슷한 경향을 보였다. 마지막으로 Fig. 4 (f)는 일반 흡이 아닌 각도  $10^\circ$ 를 갖는 경사부 부분인 흡 K에 변위 센서를 세팅하고 측정을 한 결과를 나타낸다. 측정된 파형은 경사부에는 경사진 것 이외에 흡과 같이 깊이변화가 없기 때문에 Fig. 4 (a)의 런아웃과 같이 사인파형을 나타냈다. Fig. 4 (a)~(e)까지의 다른 흡 측정 결과들은 환봉이 +Z축 방향으로 이동할 때 마다 흡과 센서의 중첩 면적이 작아져 신호의 전체 평균값이 낮아졌지만 경사부의 경우는 +Z축 방향으로 환봉이 올라가면 센서와 경사부 면 사이의 거리가 멀어지므로 신호량의 전체 평균값은 점점 증가하게 된다. 그리고 +Z축 방향으로 단계적으로  $1\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ 만큼 이동시켰을 때 각 구간별로 나타나는 평균값의 증가 폭 차이가  $1\ \mu\text{m}$ 와  $5\ \mu\text{m}$ 만큼 이동시켰을 때 나타나는 폭 차이는 크지 않지만 전반적으로 다른 흡들에 비해 가장 양호하고 구분이 가능하게 나타났다.

Fig. 4에서 환봉을 이동시킬 때 마다 감지되는 신호의 세기(평균값)가 달라지고 +Z축 이동 폭에 따라 신호 평균값의 변화 폭이 달라지는 것을 확인하였다. 다음은 이러한 평균값의 차이가 생기는 원인을 알아보기 위해 Fig. 4의 (b)~(f)까지의 환봉 흡들을 200 rpm으로 회전시키고 -Z축 방향으로 일정 구간의 시간동안  $0.1\ \text{mm}$ 씩 단계를 나눠 연속적으로 이동을 시키면서 나타나는 전체적인 신호의 파형을 측정하였다. 센서와 흡의 중첩면적이 변하면서 신호 파형의 움직임에 변화가 있을 것이라 예상된다. Fig. 5는 환봉을  $0.1\ \text{mm}$ 씩 아래로 내리면서 발생하는 신호의 변화를 수집한 결과를 나타낸다.



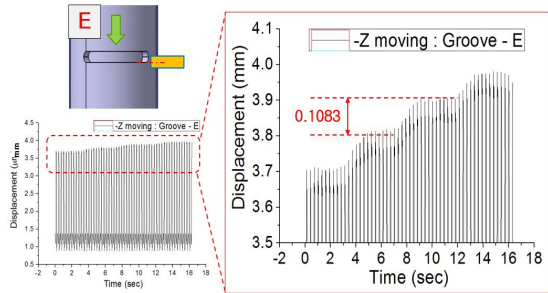


(a) Groove B

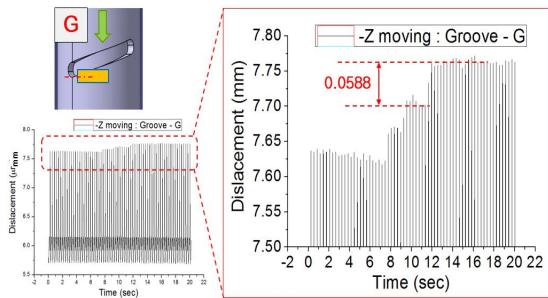


(e) Groove K

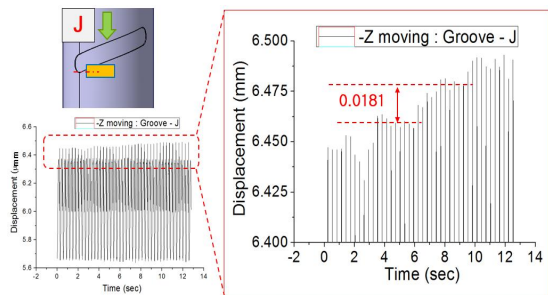
**Fig. 5 Results of sensing displacement in 0.1 mm moving according to Groove shape**



(B) Groove E



(c) Groove G



(d) Groove J

먼저 Fig. 5 (a)는 홈 B의 끝단 부분에 센서를 설치하고 -Z방향으로 0.1 mm만큼 이동시켰을 때 얻어지는 신호의 결과이다. 왼쪽 그림은 측정된 파형의 전체 모습이고 해당 파형을 국소부위 만큼 확대를 하면 Fig. 4의 확대파형과 같은 모습이 나타난다. 오른쪽 그림은 0.1 mm만큼 이동에 의해 나타나는 파형의 감지거리가 변화된 부분을 확대한 그림이다. 환봉을 -Z축 방향으로 이동시킬 때 마다 계단모양으로 계단(Step)이 형성되고 파형의 높이차이가 발생한다. 이 부분은 센서와 홈 사이의 중첩되는 면적이 변화하면서 생기는 신호크기의 변화이며 홈 B의 경우 0.071 mm만큼의 높이차이가 발생하였다. Fig. 5 (b)는 동일한 방법으로 홈 E의 끝단부분에서 신호를 얻은 결과이다. 마찬가지로 0.1 mm만큼 이동시킬 때마다 일정 거리만큼 파형의 높이차이가 규칙적으로 발생했다. 홈 E는 홈 각도가 0이므로 센서와 수평방향으로 가장 많은 중첩영역을 가진다. 즉, 센서에 의해 감지되는 영역이 많으므로 -Z축 방향으로 0.1 mm 이동시켰을 때 홈 E의 움직임도 약 0.1 mm만큼 큰 계단을 가지는 현상을 나타냈다. Fig. 5 (c)는 홈의 직경이 더 큰 홈 G부분의 측정 결과를 나타낸다. 측정된 파형의 모습은 Fig. 5 (a)의 홈 B와는 다르게 움직임이 약간 불안정한 파형과 계단을 가졌다. -Z축 방향으로 이동시킬 때 마다 약 0.0588 mm의 움직임이 감지되었다. Fig. 5 (d)는 홈의 깊이가 작은 홈 J에서의 측정결과를 나타낸다. 홈 J는 마찬가지로 -Z축 방향으로 0.1 mm씩 이동할 때마다 step을 가지며 감지거리가 변화하지만 Fig. 5 (c)와 비슷하게 신호가 울퉁불퉁하고

불규칙한 모습을 보였다. 측정된 하나의 step 거리는 약 0.0181 mm로 매우 작은 값을 가졌다. 이는 흡의 깊이가 작아서 센서에 의해 감지되는 변화의 세기도 작아지는 것으로 판단된다. 마지막으로 Fig. 5 (e)는 경사부 부분인 흡 E에서 측정한 결과를 나타낸다. 경사부는 단차가 있는 다른 경사부와는 다르게 기울기가 있으므로 -Z축 방향으로 이동할수록 신호 전체에 계단이 발생한다. 0.1 mm만큼 이동시킬 때 마다 약 0.0824 mm만큼의 이동량이 발생했으며 규칙적이고 안정적인 신호가 얻어졌다.

### 3.2 고찰

앞서 환봉 위의 흡과 변위 센서를 이용하여 Z축 방향으로의 이동에 따른 거리변화를 감지하여 축 방향의 변화에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 4에 대한 결과는 흡 형상에 따라 +Z축 방향으로 순차적으로 움직이면서 측정한 파형 및 발생 변위 변화량의 평균값을 그림으로 나타내었다. Fig. 5는 -Z축 방향으로 순차적으로 움직일 때 발생하는 파형의 전체적인 변화를 측정하였다. 두 가지 방법으로 Z축 방향의 변화에 따라 신호 세기가 달라지므로 공구 상태에 따른 영향을 신호 세기로 파악 가능하다.

따라서 Fig. 4와 Fig. 5의 두 가지 결과를 두고 각 흡의 움직임을 분석하였다. 먼저 15°의 각도를 가지는 흡 B (Fig. 4 (b)), 흡 G (Fig. 4 (d)), 흡 J (Fig. 4 (e))를 비교하였을 때 파형의 형태는 센서가 흡의 끝단을 감지하기 때문에 3가지 모두 흡의 깊이만큼 감지가 되고 비슷한 형태를 가졌다. 발생 변위 변화량의 평균값은 1 μm, 5 μm, 10 μm, 100 μm 만큼 점점 크게 +Z방향으로 이동시킬 때 이동량이 점점 커지므로 평균값의 변화 폭도 점점 더 커져야 한다. 기본적으로 +Z 방향으로 움직이기 때문에 3가지 흡 모두 평균값 자체는 갈수록 점점 작아진다. 그러나 평균값의 변화 폭은 +Z 방향의 이동 폭과는 관계없이 큰 규칙성은 보이지 않았고 일부 구간에서는 오히려 평균값 변화 폭이 커지는 게 아니라 더 작아지는 경우가 발생했다. -Z축 방향으로 0.1 mm 씩 순차적으로 움직이면서 파형의 움직임을 측정한 결과는 흡 B (Fig. 5 (a))가 흡 G (Fig. 5 (c))와 흡 J (Fig. 5 (d))보다 파형이 이동하

는 폭이 더 명확하고 신호 크기도 크고 안정적으로 감지되었다. 각도 15°의 흡을 기준으로 비교하면, 흡의 직경과 깊이는 신호수집에 지배적으로 큰 영향을 주지 않으나, 변위센서의 감지거리 내로 들어 온다면 흡의 깊이는 작은 것 보다 깊은 것이 좋고 센서의 직경에 포함이 될 정도의 크기이면 흡의 직경은 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다. 흡의 각도가 0°인 흡 E (Fig. 4 (c), Fig. 5 (b))는 같은 흡 직경과 깊이를 가지는 흡 B (Fig. 4 (b), Fig. 5 (a))와 비교해 보면 전체적인 신호의 세기도 더 강하고 +Z축 방향으로 순차적으로 이동 폭을 늘려 가며 움직이면서 측정한 발생 변위 변화량의 평균값도 5 μm의 이동구간을 제외하면 비교적 이동량에 비례하여 변화 폭이 점점 더 커지는 현상을 보여준다. 일자형 긴 흡으로 인해 흡 면적의 감지영역이 커서 확대 파형 또한 완만한 사각형태가 나오며 -Z축 방향으로 0.1 mm 씩 순차적으로 움직이면서 파형의 움직임도 0.1 mm에 가까운 규칙적인 움직임을 보여주었다. 마지막 흡 J인 경사부 부분은 나머지 흡 B, E, G, J와 비교하였을 때 +Z축 방향으로 이동 폭을 순차적으로 늘려가며 측정한 발생 변위 변화량의 평균값이 이동 폭에 비례하여 평균값 증가 폭도 커지고 -Z축 방향으로 0.1 mm 씩 움직이면서 나타나는 파형의 변화 모습이 전체적으로 가장 명확하게 감지되었다.

Fig. 4와 Fig. 5의 측정 결과들 중 이동 방향에 따라 변위 변화량의 평균값이나 파형 변화가 경향성 있게 규칙적으로 감소하거나 증가하는 게 아닌, 불규칙적으로 평균값 폭이 커졌다가 작아지거나 파형이 울퉁불퉁한 부분이 발생하는 등 불안정한 현상이 감지되는 부분이 있다. 특히 1 μm, 5 μm, 10 μm 부분에서 불안정한 현상이 주로 측정되었는데 이러한 부분은 환봉이 스핀들과 돌면서 면 방향으로의 변형과 환봉의 형상정밀도, 회전정밀도 등을 포함하여 센싱이 이루어지므로 약간의 오차가 발생할 수 있다. 하지만 실제 공작기계에서 가공이 이루어 질 때는 환봉이 아니라 메인스핀들 내부에 흡이나 경사부가 적용되며, 또한 메인스핀들 내부의 베어링 사이공간에서는 반경방향의 진동과 변형이 거의 없고 회전정밀도 또한 우수할 것이므로 환봉 측정과 비교하여 불안정한 부분이나 오차발생이

매우 작아져 축 방향으로 발생하는 변형을 측정하기 더 용이할 것으로 판단된다. 축 방향 변형을 감지하는 최적의 홈 형상은 여러 가지 측정 결과를 고려하였을 때, 홈 E와 홈 K가 가장 양호하게 나왔으며 메인스핀들 내부에 가공의 용이성을 고려할 때 경사부인 홈 K가 가장 적합하다고 판단된다.

현재까지 환봉 위의 홈을 이용한 실험은 모두 회전속도 200 rpm에서 이루어졌다. 하지만 실제 드릴링과 같은 공작기계에서의 가공은 1000 rpm 이상의 수 천 rpm 영역에서도 가공이 이루어진다. 비교적 낮은 영역인 200 rpm과 비교하여 고 rpm에서의 측정 결과가 200 rpm과 비슷한 경향을 보이는지 알아볼 필요가 있다. Fig. 6은 5000 rpm에서 5 μm를 +Z축 방향으로 순차적으로 이동시켜주면서 측정된 파형과 변위 변화량의 평균값 변화를 나타낸 결과이다. 200 rpm의 실험결과인 Fig. 4 (f)와 유사하게 파형은 주기가 더 짧은 사인 파형을 나타내었고 5 μm 만큼 이동시켰을 때 변위 평균값도 유사한 값을 가지며 변화하는 것을 알 수 있었다. 따라서 실제 가공에 적용되는 고 rpm에서도 변위센서 측정을 통해 축 방향으로 발생하는 변화량을 감지할 수 있음을 알 수 있다.

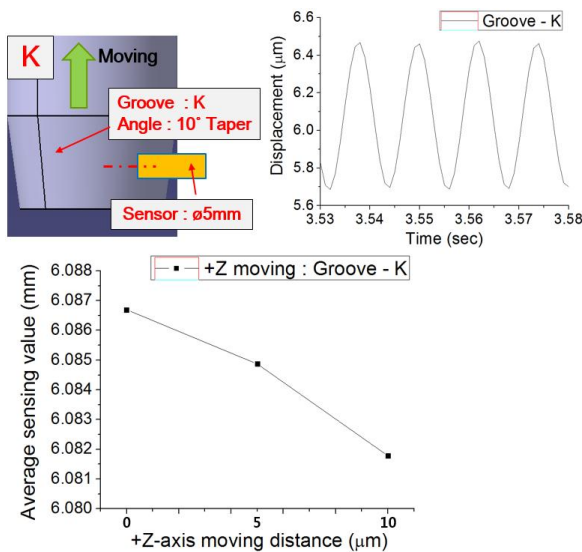


Fig. 6 Results of sensing change according to Z-axis moving of Groove-K in 5000 rpm

## 4. 결론

공작기계의 가공 시 공구상태 모니터링을 위한 방법 중 하나로, 공구에 축 방향으로 부하가 걸려 축 방향 변위 변화가 발생하였을 때, 변위 센서로 공구상태에 따른 축 방향 변화를 감지하여 공구교환 시점을 예상할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이는 가공 시 반경방향의 변화가 거의 없고 센서에 의한 가공간섭이 없는 메인스핀들 내에 적용되어야 할 부분이지만, 기초연구로써 여러 종류의 홈과 경사부가 가공된 환봉을 이용하여 변위신호를 수집하고 분석하여 홈 형상에 따라 나타나는 최적의 결과에 대해 알아보았다.

환봉을 200 rpm으로 회전시킨 후 홈은 각도, 직경, 깊이를 다르게 하여 4종류로 가공을 하였고 경사부를 포함하여 5가지를 대상으로 축 방향 변위 변화를 측정하였다. 측정 결과는 15° 각도를 가지는 홈 보다 0° 홈과 경사부 부분이 축 방향 이동량에 대한 평균값과 파형의 변위 변화량이 가장 양호한 결과를 나타냈다. 메인 스펄들 위에 홈의 가공을 적용한다면, 홈의 끝단과 센서가 겹쳐지는 (Overlap) 부분을 측정에 이용하는 홈 보다는 경사부 가공이 가공과 센서의 셋팅 작업이 더 용이하므로 축 방향 변위 확인에 가장 유리함을 알 수 있었다. 실험 결과 중 일부 구간에서 규칙적이지 못한 데이터가 있기는 하나 이것은 장비의 백래쉬와 같이 가이드 이송문제나 환봉의 가공오차, 회전정밀도 문제로 판단된다. 또한, 5000 rpm에도 적용이 가능하기 때문에 실제 가공에서도 문제없이 메인스핀들 내부의 경사부의 축 방향 측정을 통해 공구상태 모니터링에 적용이 될 가능성이 높다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 산업통상자원부의 산업핵심 기술개발사업인 “수직형 머시닝센터의 고신뢰화 핵심기술 개발”사업[과제번호 : 10063361] 과 산업통상자원부의 산업핵심 기술개발사업인 “ICT 기반 스마트 공작기계 및 유연자동화 시스템 기술 개발”사업의 지원으로 수행되었습니다[과제번호 : 10060188].



## REFERENCES

1. Song, C., Gehlbach, P. L., Kang, J. U., "Active tremor cancellation by a "smart" handheld vitreoretinal microsurgical tool using swept source optical coherence tomography," *Optics express*, 20:21, pp. 23414-23421, 2012.
2. Jantunen, E., "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 997-1010, 2002.
3. Choi, D., Kwon, W. T., Chu, C. N., "Real-time Monitoring of Tool Fracture in Turning using Sensor Fusion," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 4, pp. 305-310, 1999.
4. Hong, I. J., Kwon, W. T., "Speed-sensorless Torque Monitoring on CNC Lathe using Internet," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 99-105, 2004.
5. Lee, K. J., Yang, M. Y., "Tool Wear Monitoring System in CNC End Milling using Hybrid Approach to Cutting Force Regulation," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineer*, Vol. 3 No. 4 pp. 20-28, 2004.
6. Kim, J. S., Kang, M. C., Kim, J. H., Jung, Y. S., Lee, J. H., "Signal Characteristics of Measuring System for Condition Monitoring in High Speed Machining," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineer*, Vol. 2, No. 3, pp. 13-19, 2003.
7. Yang, J. Y., Yoon, M. C., Kim, B. T., "Dynamic and Static End-milling Force Analysis According to Workpiece Geometry," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Precess Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 13-19, 2012.
8. Yoon, S. H., Cho, S. P., Lyu, S. G., "A Study on Real Time Cutting Monitoring using Profibus," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineer*, Vol. 15, No. 3, pp. 1-7, 2016.
9. "Science GATE-Measuring the thermal extension in spindles,"(2016)  
<http://www.scigate.com.sg/products/5-products/1783-micro-e?pd=true>.(accessed 13, Dec., 2016)
10. Shinya, N.(2012), "Technology development and future challenge of machine tool spindle," Retrieved 30, Sep., 2012, from  
<http://www.sme-japan.org/journal1-nakamura-eng.pdf>
11. Kim, M. R., Lee, D. W., Lee, S. J., Li. L., Son, G. H., Lew, K. H., "A study on sensing change according to groove on the round bar for tool state monitoring," *Proc. of KSMTE Spring conference*, pp. 207, 2017.