

• 특집 • 난삭소재 가공 및 모니터링 기술

# 절삭 가공 공정 모니터링에서 이송 모터 구동 전류를 이용한 절삭력 추정

## Cutting Force Estimation Using Feed Motor Drive Current in Cutting Process Monitoring

송기형<sup>1</sup>, 이동윤<sup>1</sup>, 박경희<sup>2</sup>, 김재혁<sup>1</sup>, 최영재<sup>1, #</sup>

Ki Hyeong Song<sup>1</sup>, Dong Yoon Lee<sup>1</sup>, Kyung Hee Park<sup>2</sup>, Jae Hyeok Kim<sup>1</sup>, and Young Jae Choi<sup>1, #</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 공정플랫폼연구부 (Manufacturing Process Platform R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 지능형생산시스템연구부 (Intelligent Manufacturing System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

# Corresponding Author / E-mail: [youngjae@kitech.re.kr](mailto:youngjae@kitech.re.kr), TEL: +82-31-8040-6165

ORCID: 0000-0002-4646-1342

KEYWORDS: Cutting process monitoring (절삭 공정 감시), Cutting force (절삭력), Indirect force sensor (간접 힘 센서), Feed drive current (이송 구동 전류)

*The cutting force signal has traditionally served as a reference in conducting the monitoring studies using a variety of sensors to identify the cutting phenomena. There have been continuing studies on how to monitor the cutting force indirectly. It is because it is easier to access when considering an application to the actual machining site. This paper discusses a method of indirectly monitoring the cutting force using the feed drive current to analyze the change in the trend of the cutting force over the lapse of machining time. This enables the analysis of the cutting force by separating it in the X and Y axes of the machining plane. To increase the discrimination of the signal related to the actual cutting phenomenon from the feed drive current signal, a bandpass filter was applied based on the tooth passing frequency. The relationship between the feed drive current and the cutting force analyzed from the machining signal of actual machining conditions was applied to convert the feed drive current into the cutting force. It has been verified through experiments that the cutting load can be estimated with markedly high accuracy as a physical quantity of force from the feed motor current.*

Manuscript received: September 9, 2020 / Revised: September 28, 2020 / Accepted: October 6, 2020

### NOMENCLATURE

$\tau_m$  = Measured torque  
 $\tau_{m(air)}$  = Measured torque in air-cutting  
 $K_t$  = Torque constant  
 $i$  = Current  
 $i_{air}$  = Current in air-cutting  
 $J_e$  = Equivalent inertia  
 $\Omega$  = Angular velocity  
 $\tau_f$  = Friction torque  
 $\tau_c$  = Cutting torque

$F_r$  = Resistance force  
 $d$  = Diameter of ball screw  
 $\theta$  = Lead angle  
 $P$  = Work

### 1. 서론

4차 산업혁명 시대에 제조업분야에서 큰 관심을 갖고 있는 스마트 공장을 구축하기 위해서 선행되어야 하는 것들 중 하나가

장비 스마트화이다.<sup>1</sup> 장비 스마트화의 시작은 장비에서 이루어지는 현상의 현재 상태를 명확하게 인지하는 것이다. 가공 공정 간의 상태를 파악하기 위해서는 센서를 이용하여 신호의 변화를 모니터링하는 것이 기본이며, 최근의 동작기계들은 이를 위해 빌트인 센서를 탑재하도록 제작되기도 하는 추세이다.<sup>2</sup>

절삭 가공 공정의 감시에 있어서 절삭력의 측정은 가공 중의 절삭 부하의 변화를 직접적으로 파악할 수 있어서 아직도 많은 연구에 있어서 기준 신호로 활용되고 있다.<sup>3</sup> 그러나, 절삭력의 측정을 위해서는 가공 공간에 큰 부피의 센서가 설치되어야 하고 센서가 고가여서 실제 생산 공정에서 적용하기에는 많은 제약이 따른다.

가공 부하를 간접적으로 측정할 수 있는 방법으로 스핀들이나 이송축의 전류값의 변화를 모니터링하는 방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되어왔다.<sup>4,9</sup> 이송축의 전류값을 이용하여 가공 부하를 간접적으로 파악하는 방법은 가공 평면을 구성하는 두 축 방향으로 가공 부하를 분리하여 분석할 수 있다는 특징이 있다. Zhang<sup>10</sup> 등은 특정 방향의 절삭력 성분이 공구 마모의 증가와 큰 상관관계를 보여줌을 발견한 바 있는데, 절삭 부하의 성분을 나누어 분석하는 것은 가공 공정 상태의 진단 시 큰 장점으로 작용한다고 할 수 있다.

기존의 연구들에서는 모터의 전류 신호로부터 진단이나 제어 등과 같은 시스템 구현의 목적이 되는 유효인자를 도출하기 위하여 다양한 신호 처리를 적용하였다. Aslan<sup>9</sup>과 Altintas는 칼만 필터(Kalman Filter)를 적용하였고, Li<sup>11</sup>는 웨이블릿 변환(Wavelet Transform), Li<sup>12</sup> 등과 Kim<sup>13</sup> 등은 퍼지 논리(Fuzzy Logic)를 적용하였다. Dominguez<sup>14</sup> 등은 통계적 신호 처리를 활용하였다.

모터 전류 신호는 다양한 목적을 위해 활용되어왔다. Zhang,<sup>10</sup> Reñones,<sup>15</sup> Sevilla-Camacho,<sup>16</sup> Ogedengbe,<sup>17</sup> Xie<sup>18</sup>와 같은 많은 연구자들이 마모나 파손과 같은 공구 상태 감지를 위하여 모터 전류 신호를 이용하였다. Aslan<sup>9</sup>과 Altintas는 CNC의 구동 모터 전류 명령과 이송 모터 전류 측정을 통해 채터를 감지하는 연구를 수행하였다. Kim,<sup>20</sup> Wang,<sup>21</sup> Altintas<sup>22</sup> 등은 가공 장비의 제어에 활용한 사례를 소개하였으며, Dominguez<sup>14</sup> 등은 장비의 고장 진단을 시도하였다.

가공 공정 감시를 연구뿐만 아니라 실제 가공 현장에 적용하려는 노력은 지속적으로 이루어지고 있다. Xie<sup>18</sup> 등은 모니터링 시스템을 구성하면서 무선 센서를 사용하였고, Sevilla-Camacho<sup>16</sup> 등은 부피를 줄일 수 있는 FPGA (Field Programmable Gate Array) 기반으로 모니터링 시스템을 구성하였다. Xu<sup>23</sup> 등은 공정 모니터링을 위해 별도의 센서를 설치하지 않고, 동작기계에 기본적으로 구성되어있는 센서 신호를 이용하는 방법으로 연구 사례를 보였다. 인용한 논문들에서와 같이 센서의 설치가 제약되는 환경을 극복하는 방법을 찾거나 시스템 구성을 간소화하는 것은 모니터링 시스템의 현장 적용을 위해서 매우 중요하다.

공정 감시 및 이상 상태 감지에 있어서 돌발적인 신호의 분석과 함께 시간에 따른 신호 경향의 분석은 가장 보편적으로 이용되는 방법이다. 시간의 경과에 따른 신호 경향의 변화를 관찰

Table 1 Doosan nx5500II feed axis servo motor specifications (Fanuc  $\alpha$ F 22/3000-B)

Parameter	Value	Unit
Continuous torque (At low speed)	22.0	Nm
Maximum speed	3,000	m <sup>-1</sup>
Torque constant	1.2	Nm/A (rms)
Static friction	1.2	Nm

하는 방법은 기본적으로 가공 공정 동안 지속적으로 누적된 데이터를 기반으로 하므로 외란에 의한 영향 여부를 고려하여 비교적 신중한 판단을 하여야 하는 돌발적인 발생 신호에 비해 동작기계 및 가공 공정의 상태 변화를 보다 강건하게 판단할 수 있게 해준다. 또한, 이런 변화 경향을 바탕으로 앞으로의 상태를 예측하고 미리 대비할 수 있게 해준다.

본 연구에서는 현장 적용이 용이한 모니터링 시스템을 구성하는 관점에서 절삭력의 변화를 간접적으로 파악할 수 있는 방법에 대하여 살펴보았다. 이송 모터 전류를 이용하여 간접적으로 절삭 부하를 파악하는 방법은 모니터링 시스템의 현장 적용에 있어서 하나의 대안이 될 수 있다. 일반적으로 전류 센서는 공구동력계(Tool Dynamometer)에 비해 매우 저렴하며, 또한 실제 가공이 이루어지는 공간이 아닌 전기 패널 부위에 설치되므로 가공 작업에 전혀 불편을 발생시키지 않는다. 본 논문에서는 이송 모터 구동 전류를 이용하여 절삭 부하의 경향 분석을 수행하기 위하여 신호의 변별력을 높이고 실제 물리량인 힘의 크기로 정확하게 변환하는 방법에 대하여 논하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 가공 실험 장치

이송축의 구동 전류를 모니터링하는 실험은 3축 머시닝 센터에서 수행되었다. 두산공작기계의 nx5500II이며, 직선 3축(X, Y, Z) 및 하나의 스핀들로 구성된 문형 구조의 금형 가공 수직형 머시닝 센터이다. 가공기는 X, Y축의 직선 이송축에 동일한 사양의 AC 서보 모터를 이용한다. 장비에 사용된 AC 서보 모터는  $\alpha$ F 22/3000-B (Fanuc)이며 주요 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 실험에 사용된 동작기계의 구조를 나타낸 것이다. 두산의 nx5500II는 테이블이 Y축 이송만 가능하며 스핀들 모듈이 X축과 Z축 이송을 하는 형태이다.

실험에 사용된 공구는 지름 20 mm의 두 날 솔리드 엔드밀이다. 가공 소재는 SM45C를 사용하였다.

실험에 사용된 데이터 수집 장치는 NI사의 USB 통신을 지원하는 cDAQ-9178 새시와 NI 9205 아날로그 입력 모듈을 이용하였다. 동작기계 이송축의 구동 전류를 측정하기 위한 센서는 Seri2b사의 scc-U2를 사용하였다. 이 전류 센서는 분리 및 결합이 가능한 형태여서 설치를 위해 동작기계의 배선을 탈거하지

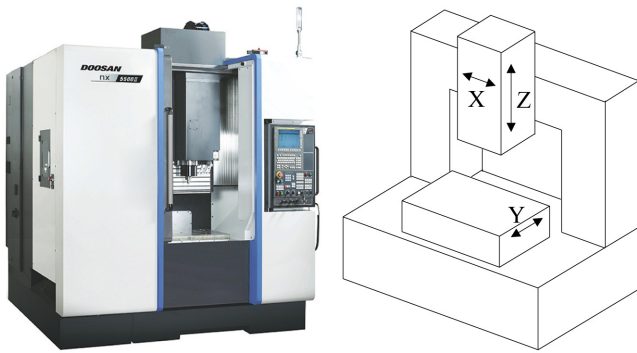


Fig. 1 Photo and structure of the machine tool used in the experiments (Doosan nx5500II)

가공 실험은 직선 및 원호 가공과 3차원 형상의 윤곽 가공을 실시하였고, 가공 실험 간에 이송축 구동 전류 및 절삭력의 크기 변화를 12,800 Hz의 샘플링 속도로 동기화하여 계측하였다.

### 3. 이송축 전류를 이용한 절삭 부하 감시

#### 3.1 이송 전류 기반 절삭 부하 추정 이론

절삭 가공 공정 간에 공작기계 이송축을 구동시키는 서보 모터에서 발생하는 토크는 아래 식(1)과 같은 식들로 정의될 수 있다.<sup>5,7</sup> 서보 모터에서 발생하는 토크에는 절삭 공구가 가공 소재에서 칩을 발생시키는 것에 대한 저항을 위해 소요되는 것만이 아니라 모터의 회전에 따른 관련 부품들의 관성 모멘트와 각 부품의 접촉부에서 발생하는 마찰의 영향이 모두 포함되어 있다.

$$\tau_m = K_t i = J_e \frac{d\Omega}{dt} + \tau_f + \tau_c \quad (1)$$

절삭칩의 생성에 대한 저항으로 인한 절삭 토크항을 제거하면 실제로 가공이 이루어지지 않는 상태에서 이송축의 구동에 따른 토크는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{m(air)} = K_t i_{air} = J_e \frac{d\Omega}{dt} + \tau_f \quad (2)$$

이로부터 실제 가공 저항으로 인해 발생하는 순수 토크는 다음 식(3)과 식(4)와 같이 정리할 수 있다. 가공 시에 측정된 토크에서 공절삭(Air Cutting) 시의 토크를 빼주는 방식인데, 식(4)가 의미하는 것은 결과적으로 가공 시에 측정된 이송축의 전류 값에서 기본 구동에 의한 전류값을 뺀 실제 가공에 소요된 전류의 크기에 모터의 토크상수를 곱하면 가공에 소요된 전류를 토크로 변환할 수 있다는 것이다.

$$\tau_c = \tau_m - J_e \frac{d\Omega}{dt} - \tau_f \quad (3)$$

$$\tau_c = \tau_m - \tau_{m(air)} = K_t (i - i_{air}) \quad (4)$$

이렇게 변환된 토크에 해당 이송축 볼스크류의 지름과 리드 각을 적용하여 계산하면 볼스크류 회전 방향의 토크를 너트의 이송 방향의 힘으로 변환할 수 있다. Fig. 3에서 모터의 토크가 볼스크류의 반지름 위치에서 가지는 힘이 하는 일이 손실 없이 볼스크류의 축 방향으로 전달된다고 가정하면 볼스크류의 축 방향으로 너트에 미치는 힘의 크기는 식(5)와 같이 정의될 수 있다. 이 이송 방향(볼스크류 축 방향)으로의 힘이 절삭 부하에 대응하여 발생하는 반력이다.

$$F_r = \frac{\tau_c \left( \frac{d}{2} \right)}{\tan \theta} \quad (5)$$

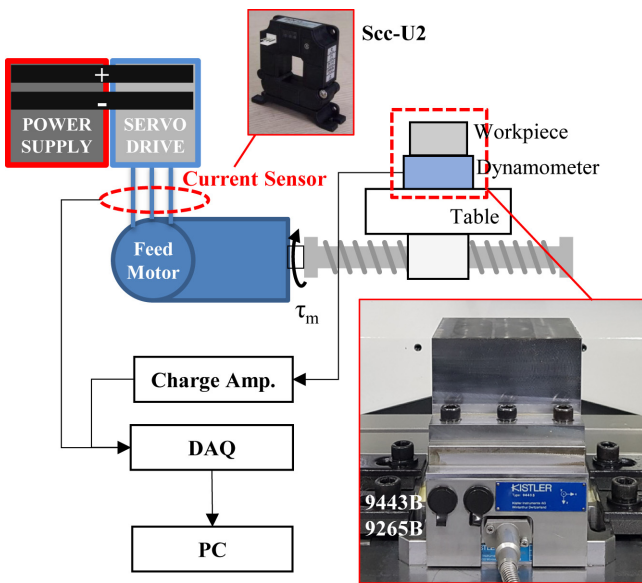


Fig. 2 Device installation and schematic diagram for experiments

않아도 되므로 현장 적용이 용이한 장점을 가지고 있다.

가공 중의 절삭력 측정은 Kistler사의 9265B (Tool Dynamometer) 와 9443B (Clamping Plate)를 사용하였다. Kistler사의 9265B와 9443B의 조합은 공작기계의 테이블에 설치하며 센서의 상부면에 가공 소재를 고정시킬 수 있는 형태의 공구동력계 모듈이다. 이 센서는 높은 강도를 가지고 있으면서도 감도가 높고, 절삭유 노출과 같은 오염된 환경에서의 사용을 고려하여 패키징이 되어 있어서, 거친 가공 환경에서 신뢰성 있는 신호 응답성을 기대할 수 있다.

#### 2.2 신호 수집 장치 및 신호 수집 방법

이송축 구동 전류 변화를 계측하기 위한 전류 센서는 서보 드라이브의 출력단에 설치하였다. 그리고, 가공 시의 절삭력을 측정하기 위하여 공구동력계를 공작기계의 테이블 위에 설치하고 가공 소재는 공구동력계 윗면에 볼트를 이용하여 체결하였다. Fig. 2는 공작기계에 센서가 설치된 모습을 보여주는 사진과 실험을 위한 장치 설치의 개념도이다.

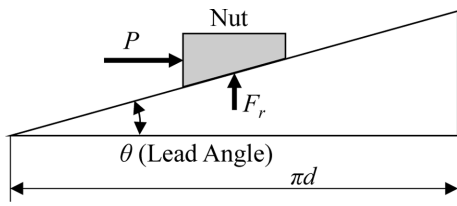


Fig. 3 Schematic diagram of ball screw

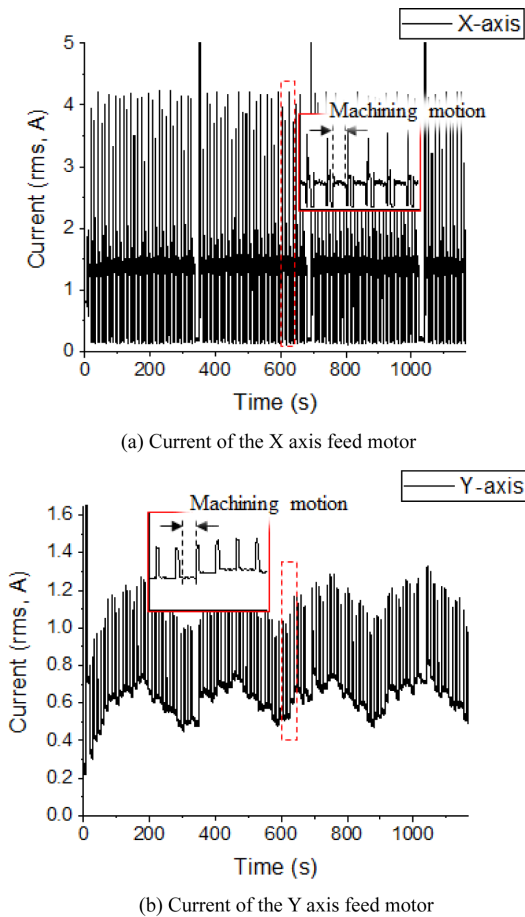


Fig. 4 Current of the feed motors when X-axis motor is rotating and Y-axis motor has remained stationary

3.2 공작기계의 기본 이송 전류 특성

실험에 사용되는 공작기계의 특성을 파악하기 위하여, 실제 가공 조건을 설정하여 공절삭을 진행하면서 가공 부하가 없는 경우의 기본 전류값을 취득하였다. X, Y 각 이송축에 대하여 축에 나란한 방향으로 0.1 mm 간격으로 동일한 가공 동작을 반복하여 수행하면서 각 구동 모터의 전류를 측정하였다.

Figs. 4와 5는 이송축 볼스크류의 리드에 해당하는 약 10 mm 구간에서의 전류값 변화를 나타낸 것이다. AC 서보 모터의 전류 신호는 3상으로 구성되어 있는데, 이를 실효치(Root Mean Square)인 등가의 DC 전류로 변환하여 나타내었다. 이의 계산식은 식(6)과 같다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (6)$$

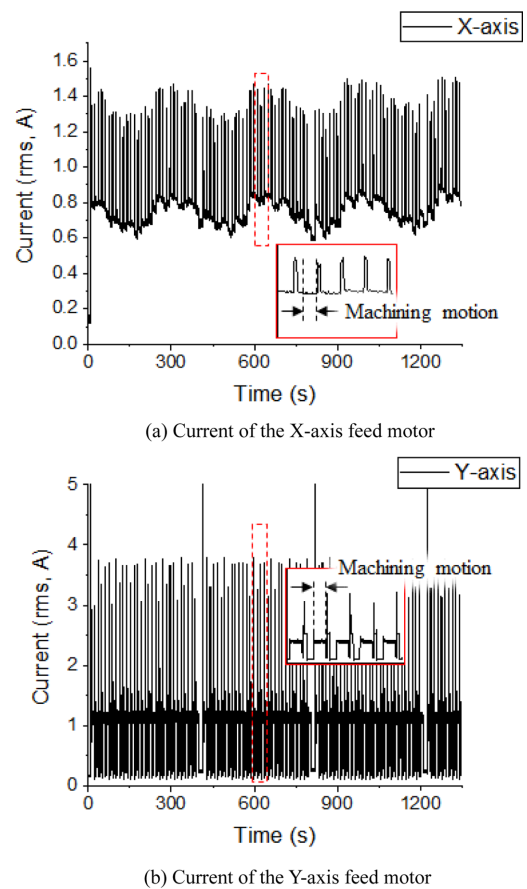


Fig. 5 Current of the feed motors when X-axis motor has remained stationary and Y-axis motor is rotating

측정 결과 공작기계 축 방향과 나란한 방향으로의 단 방향 직선 가공 동작에서는 정지되어있는 축의 구동 모터 전류의 크기가 공작기계 테이블의 위치에 따라 다르게 나타났다. X축 방향으로의 가공 동작에서는 정지 상태인 Y축 모터의 전류 신호가 이런 현상을 보였고, Y축 방향으로의 가공 동작에서는 정지 상태인 X축 모터의 전류 신호가 이와 같은 현상을 보였다. 볼스크류 나사산의 1피치만큼 테이블의 위치가 이동되면서 가공 동작을 반복하는 동안의 전류값의 변화는 4주기의 반복된 파형을 갖는 것으로 보여진다. 이러한 현상은 모터의 정류(Commutation)와 모터 자기극 수(Number of Magnetic Pole)의 영향이 반영되어 나타나는 것으로 사료된다. 가공 동작 중에 이동하는 축의 구동 모터 전류 신호는 테이블의 위치 변화와 무관하게 균일한 크기를 갖는 것으로 나타났다.

이송하는 축에서 측정된 전류의 크기는 X축이 Y축보다 0.1 A 정도 크게 나타났다. 이러한 현상은 Jeong, Y. H.과 Cho, D. W.에 의해서도 논의되었다.<sup>7</sup> 정지되어있는 축의 전류의 크기도 테이블의 위치에 따라 변화하기는 하지만, 변화하는 구간의 위치를 살펴보면 X축이 Y축보다 0.1 A 정도 크게 나타났다.

3.3 기초 윤곽 가공 실험 및 신호 처리

형상 가공에 있어서 가장 기초가 되는 직선 가공과 원호 가공을

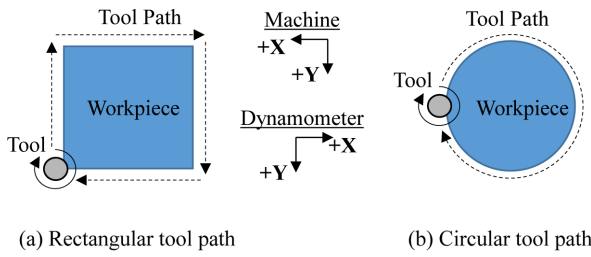
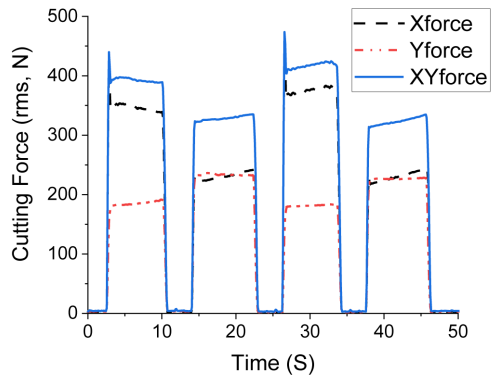
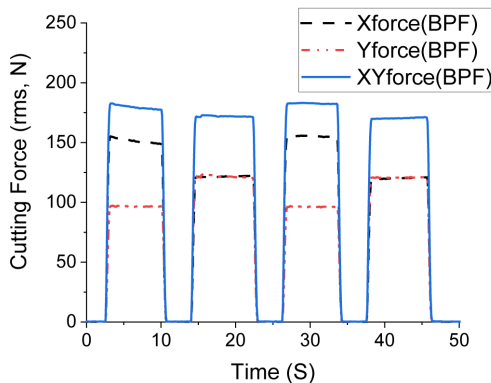


Fig. 6 Tool paths for experimentations



(a) RMS result of cutting force

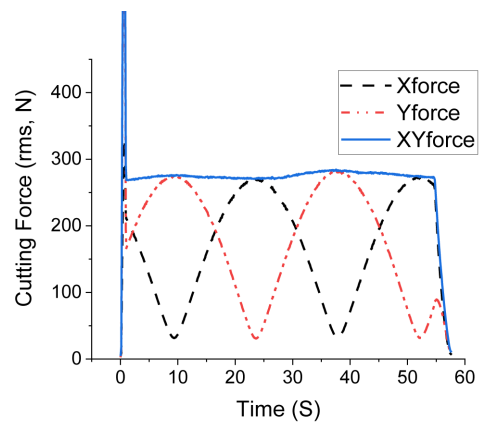


(b) RMS result of bandpass filtered cutting force

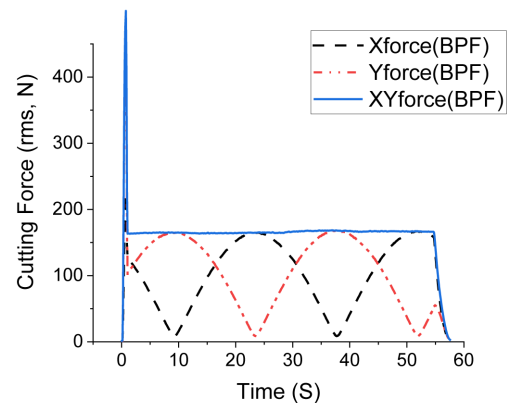
Fig. 7 Measured cutting force for the rectangular tool path

수행하면서 절삭력 신호를 취득하였다. Fig. 6은 직선 가공 실험과 원호 가공 실험에서의 공구 경로를 보여준다. Fig. 6의 공구 경로를 따라서 SM45C 소재에 Shoulder Milling을 Down Milling으로 수행하였다.

Fig. 7(a)는 직선 가공을 수행하면서 공구동력계로 측정된 절삭력 신호를 실효값(Root Mean Square)으로 나타낸 것이다. 공구동력계의 X, Y 방향 힘의 크기뿐만 아니라 두 축 방향 힘의 합력의 크기도 가공 방향에 따라 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 가공 조건이 동일함에도 X축 방향으로 이송하면서 가공할 때와 Y축 방향으로 이송하면서 가공할 때의 전체 절삭력의 크기가 서로 다르게 나타나는 것은 공구와 소재가 맞물리면서 실제로 칩이 생성되는 물리적 현상을 생각해볼 때 부합되지 않는 결과로 보여진다.



(a) RMS result of cutting force



(b) RMS result of bandpass filtered cutting force

Fig. 8 Measured cutting force for the circular tool path

이것은 실제 절삭 현상과는 무관한 주변 외란으로 인한 것으로 사료된다. 실제 절삭 현상과 관계성이 높은 절삭력 신호만을 선별하기 위하여 가진원으로 작용하는 공구날의 통과 주파수(Tooth Passing Frequency)에 해당하는 신호만을 거를 수 있도록 분석 소프트웨어에서 디지털 대역 통과 필터(Band Pass Frequency)를 적용하였다. 필터를 적용한 결과가 Fig. 7(b)이다. 필터의 적용으로 인해 절삭력의 크기는 작아졌으나 X축과 Y축 방향으로 가공 시의 절삭력 편차도 감소되어 실제 가공 현상에 더욱 부합되는 결과를 보여준다.

Fig. 8(a)는 원호 가공을 수행하면서 공구동력계로 측정된 절삭력 신호를 실효값으로 나타낸 것이다. 직선 가공과는 다르게 두 축 방향 힘의 합력의 크기가 모든 가공 방향에서 비교적 유사한 크기로 나타난 것을 볼 수 있다. 가공 방향에 따라서 약간의 힘의 크기 차이가 존재하는데, 위의 직선 가공 데이터의 처리 방법과 마찬가지로 디지털 대역 통과 필터를 적용하면 Fig. 8(b)와 같이 편차가 감소함을 알 수 있다.

### 3.4 3차원 형상 가공에서의 전류 신호 기반 절삭 부하

3차원 형상에 대한 밀링 가공을 수행하면서 이송 모터 구동 전류 신호를 분석하였다. 머시닝 센터의 가공 정확도를 시험하기

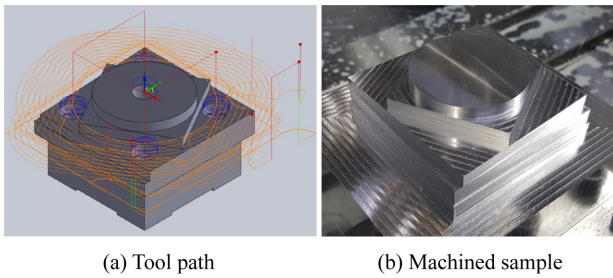


Fig. 9 The tool path and machined result of ISO10791-7 M1 80 test specimen

위하여 사용되는 ISO10791-7 M1 80 시편에 대하여 홀가공은 제외하고 시편 상부 형상의 윤곽 가공만을 수행하였다. 가공 시의 공구 경로는 모니터링된 신호의 분석에 용이하도록 시편 형상의 외곽으로부터 일정 간격으로 소재를 제거해 들어가는 형태로 비교적 단순하게 설계하였다. Fig. 9는 ISO10791-7 M1 80 시편의 공구 경로와 이를 통해 SM45C 소재에 가공된 시편의 모습을 보여준다.

시험 시편을 가공하면서 측정된 이송축 전류 데이터는 3.3절의 절삭력 신호의 경우와 같이 대역 통과 필터를 적용하였다. 공구날 통과 주파수(Tooth Passing Frequency)를 기준으로 대역 통과 필터(Band Pass Filter)를 적용한 전류 신호는 가공 공정에서 주요 가진원으로 작용하는 공구와 소재의 맞물림으로 인해 발생하는 신호를 제외한 나머지를 거르기 때문에 3.1절의 식(4)를 통해 얘기한 바와 같이 실제 가공에 소요된 전류 신호만 남게 된다. 또한 3.2절에서 얘기한 정지 상태 모터에서 발생하는 테이블 위치에 따른 기본 전류 크기의 변화 현상도 낮은 주파수 영역에 속하기 때문에 걸러지게 된다.

Fig. 10은 측정된 전체 구간의 신호 중에서 시험 시편의 가장 위쪽 원호 가공에 해당되는 부분의 신호를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 공구동력계를 이용하여 측정된 절삭력이다. 원호 가공 구간이기 때문에 측정된 절삭력은 3.3절에서와 동일하게 X축과 Y축 방향으로의 절삭력이 유사한 크기를 갖는 모습을 보여준다.

Fig. 10(b)는 전류 신호를 이용하여 3.1절의 식(4)와 식(5)를 적용하여 추정된 절삭력이다. 그런데, 공구동력계를 이용하여 측정된 절삭력과는 다르게 X축과 Y축의 절삭력의 크기가 매우 다르게 나타났다.

3.2절에서 언급한 이송하는 축에서 측정된 전류의 크기가 X축과 Y축에서 다르게 측정되는 현상으로 인한 영향인지 명확하게 살펴보기 위하여 Fig. 11에 나타난 것과 같은 실험을 실시하였다. 경사진 면을 갖는 SM45C 소재를 일정한 가공 속도와 공구 이송 속도 상태에서 가공하게 되면 소재 제거량이 점진적으로 증가하게 된다. 이를 통해 다양한 가공 부하 조건에서의 이송 모터 전류와 절삭력과의 관계를 살펴볼 수 있는 데이터를 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 실험 방법은 Kim<sup>5</sup>에 의해 고안된 바 있다. 이러한 방법의 실험을 X축과 Y축 방향으로 각각 수행하였다.

Fig. 12는 Fig. 11의 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12(b)를

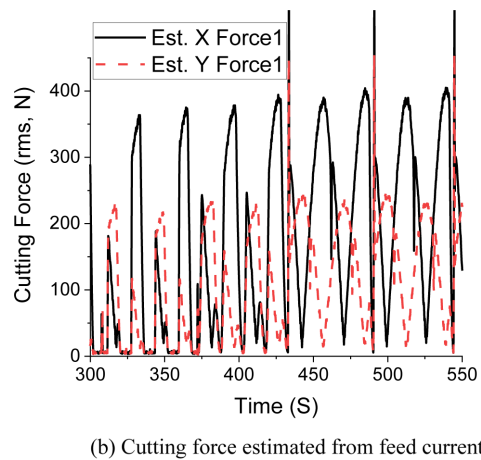
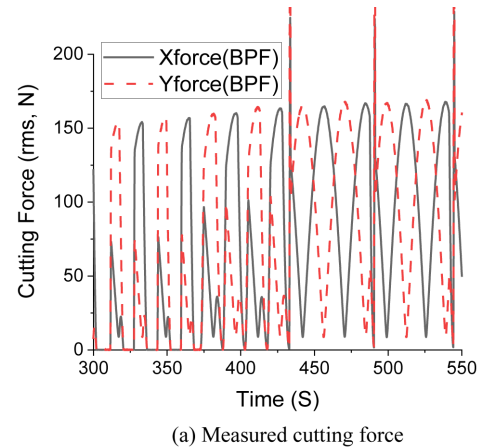


Fig. 10 Measured sensor signals

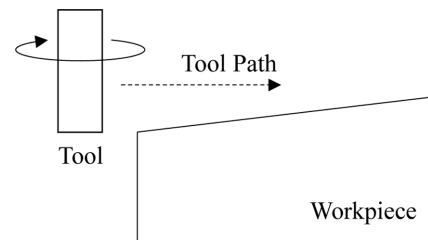
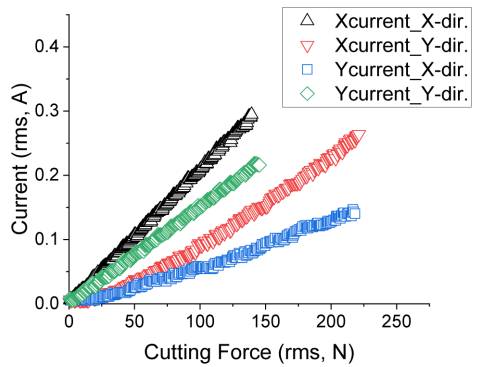


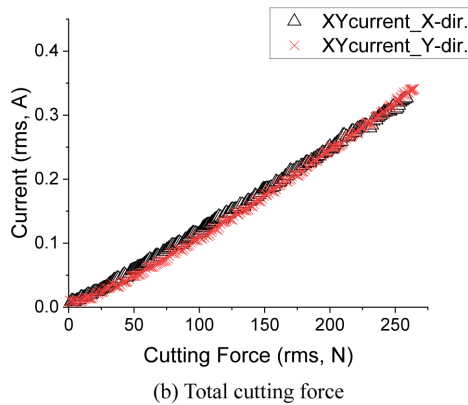
Fig. 11 Schematic diagram of an experiment to examine the relationship between feed current and cutting force

보면 두 축 방향으로의 실험에서 X축과 Y축에서 출력된 전류 신호를 하나로 합성된 크기는 거의 유사하게 나타난다. 그러나, Fig. 12(a)를 보면 이송 모터가 회전 상태일 때 동일한 크기의 가공 부하에 저항하기 위하여 X축 서보 드라이브는 Y축보다 더 큰 전류를 출력함을 알 수 있다. 이로 인해 Fig. 10(b)와 같은 결과가 유도된 것이다.

센서를 통해서 측정된 이송 모터 전류 신호에 대역 통과 필터를 적용하는 것이 가공 신호의 변별력은 향상시켰으나, 관성 모멘트나 마찰로 인한 영향까지 걸러내지는 못한 것으로 판단된다. X축과 Y축의 서로 다른 구조 및 환경으로 인해 관성 모멘트와 마찰력이 다르게 나타날 수 있으며, 이것이 동일한 크기의



(a) Cutting force in the X-axis and Y-axis directions



(b) Total cutting force

Fig. 12 Relationship between the cutting force and the current (1,273 rpm, Feed rate 254.6 mm/min)

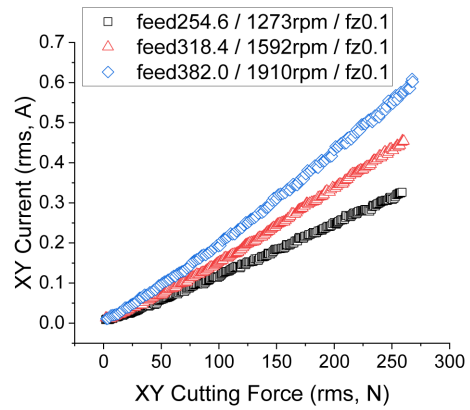
가공 부하에 저항하기 위하여 출력하는 전류의 크기가 각 이송 모터에서 서로 다르게 나타나는 것으로부터 확인된 것이다.

X축과 Y축에서 각각 서로 다른 크기로 출력되는 전류값을 보정해서 사용할 수 있는 보완책으로 다양한 크기의 가공 부하에 대한 이송 모터 전류와 절삭력과의 관계를 직접 적용하는 방법을 시도하여 보았다. Fig. 13(a)는 Fig. 11의 실험을 이송 속도 별로 X축 방향으로 실시한 결과이다.

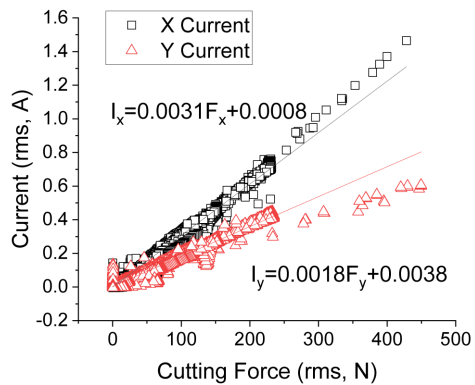
이송 모터 전류와 절삭력과의 관계는 Fig. 13(a)에서 보는 것과 같이 이송 속도에 따라 다르게 나타난다. 이러한 현상은 Y축의 경우에도 마찬가지로 발생한다. 그러므로 ISO10791-7 M1 80 시편 가공 시 측정된 전류값에 가장 잘 맞는 이송 모터 전류와 절삭력과의 관계는 시편 가공 시에 측정된 신호들로부터 분석된 데이터일 것이다.

Fig. 13(b)는 ISO10791-7 M1 80 시편 가공 시 측정된 신호로부터 분석한 이송 모터 전류와 절삭력과의 관계이다. 가공 동안에 이송 속도는 일정하였다. 공구 경로에 따라 다양한 크기로 발생한 가공 부하에 저항하기 위하여 X축과 Y축 서보 모터에서 출력된 서로 다른 크기의 전류값에 대한 두개의 선형 관계식을 도출하였다. 이 두 개의 선형 관계식을 시편 가공 시 측정된 이송 모터 전류를 절삭력으로 변환하기 위하여 적용하였다.

Fig. 14는 이송 모터 전류와 절삭력과의 관계식을 이용하여 전류값으로부터 변환한 절삭력 결과이다. Fig. 14(a)는 측정된



(a) Relationship between feed motor current and cutting force by feed rate



(b) Relationship between feed motor current and cutting force from signals during ISO10791-7 M1 80 specimen machining (1,592 rpm, Feed rate 318.4 mm/min)

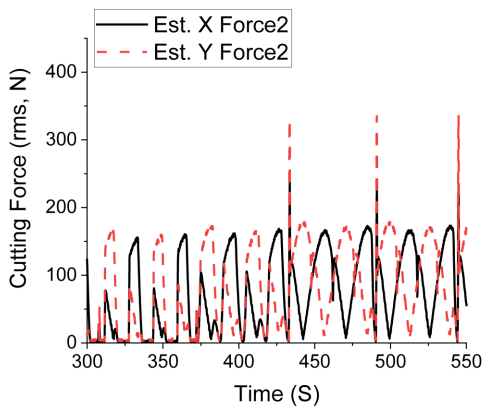
Fig. 13 Relationship between the cutting force and the current

전체 구간의 신호 중에서 시험 시편의 맨 위쪽 원호 가공에 해당되는 부분의 신호를 나타낸 것이다. 3.3절에서와 동일하게 X축과 Y축 방향으로의 절삭력이 유사한 크기를 갖는 모습을 보여준다.

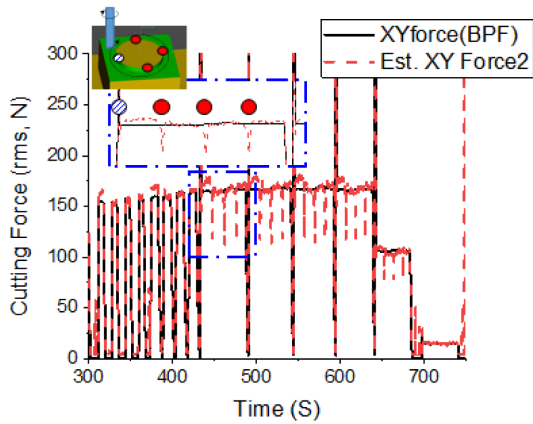
Fig. 14(b)는 측정된 시편 전체 구간의 신호 중에서 시험 시편의 맨 위쪽 원호 가공에 해당되는 부분에 대하여 측정된 절삭력과 전류값으로부터 변환된 절삭력을 비교하여 나타낸 것이다. 측정된 절삭력과 이송 모터 전류로부터 추정된 절삭력은 매우 유사한 값을 갖는 결과를 보여준다. Fig. 14(c)는 측정된 전체 구간의 신호 중에서 시험 시편의 맨 아래쪽의 축 방향 직선 가공에 해당되는 부분에 대하여 측정된 절삭력과 전류값으로부터 변환된 절삭력을 비교하여 나타낸 것이다. 원호 가공 구간에 비해서는 비교적 큰 차이를 보여준다.

Figs. 14(b)와 14(c)에서 일점쇄선으로 표시한 부분들이 비교적 오차가 크게 발생한 부분들인데, 이 부분들의 공통점은 X, Y 두 축의 서보 모터 중 어느 하나가 정지 상태에 돌입하는 상황이 발생하는 구간이라는 것이다. 이러한 구간의 절삭력 추정의 어려움에 대해서는 선행된 연구에서도 언급된 바 있다.<sup>7,24</sup>

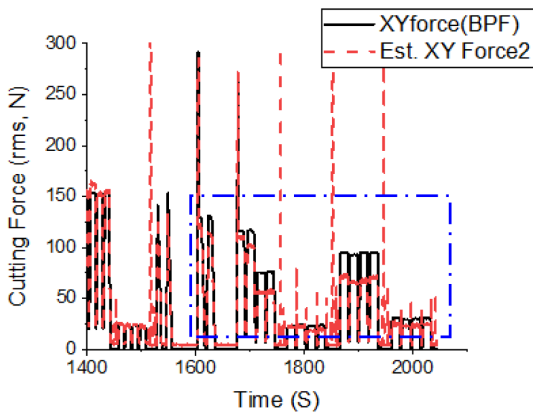
Fig. 14의 결과들은 공정 시간 경과에 따른 신호의 경향 변화를



(a) Relationship between feed motor current and cutting force by feed rate



(b) Comparison of measured and estimated cutting forces (Circular machining section)



(c) Comparison of measured and estimated cutting forces (Straight machining section in the axial direction)

Fig. 14 Relationship between the cutting force and the current

감시하는 것에 있어서 이송축 전류를 이용하여 매우 근사한 값으로 절삭 부하의 크기를 실제 힘의 물리량으로 추정할 수 있음을 보여준다. 물론 가공 중에 실시간으로 측정된 이송축 모터 전류로부터 즉시 절삭력을 추정해 내기 위해서는 사전에 해당 가공 조건에 대한 전류대 절삭력의 관계에 대한 데이터가 확보되어 있어야 한다.

#### 4. 결론

본 논문은 현장 적용성 향상을 위한 간소화된 장치 구성과 단순한 신호 처리를 추구하는 관점에서의 이송 모터 전류 기반 절삭력 추정 방법을 제안하였다. 본 논문에 제시된 방법은 가공 중 측정된 이송 모터 전류에 공구의 날 통과 주파수 기준의 대역 통과 필터와 해당 가공 조건에 대한 이송 모터 전류와 절삭력의 관계식만을 적용한다.

공구의 날 통과 주파수 기준의 대역 통과 필터는 가공 공정에서 주요 가진원으로 작용하는 공구와 소재의 맞물림으로 인한 신호의 변별력을 향상시키지만, 이송축 구성품들의 관성 모멘트나 마찰을 고려하기 위한 보완이 필요하다. 다양한 절삭 부하 조건에 대한 이송 모터 전류와 절삭력 간의 관계를 정의하는 선형방정식을 이용하여 가공 평면에서 X, Y 두 축 사이의 관성 모멘트와 마찰 환경이 다르므로 인한 토크 편차를 보완할 수 있다.

여러 이송 속도 구간에 대한 다양한 절삭 부하 상황에서의 이송 모터 전류대 절삭력 관계에 대한 데이터만 준비된 상황이라면, 가공 평면의 두 축 방향으로의 절삭 부하를 이송 모터 전류로부터 힘의 물리량으로 매우 높은 정확도로 추정할 수 있음이 실험을 통해 검증되었다.

향후에는 가공 형상에 따른 이송축의 운전 및 정지 상태 변화 시점에서의 적용 방법과 다양한 장비와 공정 조건에 유연하게 적용하기 위한 연구가 추진되어야 할 것이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 “장비제어공정 통합 가상공작기계 기술 및 이에 기반한 공작기계 지능화 원천기술 개발(No. 20000285)” 과제의 후원으로 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Jeon, B., Yoon, J. S., Um, J., and Suh, S. H., “The Architecture Development of Industry 4.0 Compliant Smart Machine Tool System (SMTS),” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020. ([https://doi.org/ 10.1007/s10845-020-01539-4](https://doi.org/10.1007/s10845-020-01539-4))
2. DMG MORI, “Industry 4.0-Ready for the Next Industrial Revolution,” <https://www.dmgmori.co.jp/en/trend/detail/id=2548> (Accessed 8 OCTOBER 2020)
3. Song, K. H. and Lee, D. Y., “The State of the Art in Monitoring Technology of Machining Operations,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 293-304, 2018.
4. Stein, J., Colvin, D., Clever, G., and Wang, C. H., “Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors,” Vol.

- 108, pp. 279-288, 1986.
5. Kim, G. D. and Chu, C. N., "Indirect Cutting Force Measurement Considering Frictional Behaviour in a Machining Centre Using Feed Motor Current," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 7, pp. 478-484, 1999.
  6. Li, X., "Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 3. Cutting Force Estimation Using Current Sensors," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 9, pp. 659-664, 2001.
  7. Jeong, Y. H. and Cho, D. W., "Estimating Cutting Force from Rotating and Stationary Feed Motor Currents on a Milling Machine," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 14, pp. 1559-1566, 2002.
  8. Aggarwal, S., Nešić, N., and Xirouchakis, P., "Cutting Torque and Tangential Cutting Force Coefficient Identification from Spindle Motor Current," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 65, Nos. 1-4, pp. 81-95, 2013.
  9. Aslan, D. and Altintas, Y., "Prediction of Cutting Forces in Five-Axis Milling Using Feed Drive Current Measurements," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 2, pp. 833-844, 2018.
  10. Zhang, S., Li, J., Sun, J., and Jiang, F., "Tool Wear and Cutting Forces Variation in High-Speed End-Milling Ti-6Al-4V Alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, Nos. 1-4, pp. 69-78, 2010.
  11. Xiaoli, L., "On-Line Detection of the Breakage of Small Diameter Drills Using Current Signature Wavelet Transform," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 1, pp. 157-164, 1999.
  12. Li, X., Venuvinod, P. K., and Chen, M., "Feed Cutting Force Estimation from the Current Measurement with Hybrid Learning," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 859-862, 2000.
  13. Kim, D. and Jeon, D., "Fuzzy-Logic Control of Cutting Forces in CNC Milling Processes Using Motor Currents as Indirect Force Sensors," *Precision Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 143-152, 2011.
  14. Domínguez, A. R. and González, L. J., "Fault Diagnosis of Multitooth Machine Tool based on Statistical Signal Processing," *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 35, No. 1, pp. 197-202, 2002.
  15. Reñones, A., Rodríguez, J., and de Miguel, L. J., "Industrial Application of a Multitooth Tool Breakage Detection System Using Spindle Motor Electrical Power Consumption," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, Nos. 5-8, pp. 517-528, 2010.
  16. Sevilla-Camacho, P., Robles-Ocampo, J., Jauregui-Correa, J., and Jimenez-Villalobos, D., "FPGA-Based Reconfigurable System for Tool Condition Monitoring in High-Speed Machining Process," *Measurement*, Vol. 64, pp. 81-88, 2015.
  17. Ogedengbe, T. I., Heinemann, R., and Hinduja, S., "Feasibility of Tool Condition Monitoring on Micro-Milling Using Current Signals," *AU Journal of Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 161-172, 2011.
  18. Xie, Z., Li, J., and Lu, Y., "An Integrated Wireless Vibration Sensing Tool Holder for Milling Tool Condition Monitoring," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, Nos. 5-8, pp. 2885-2896, 2018.
  19. Aslan, D. and Altintas, Y., "On-Line Chatter Detection in Milling Using Drive Motor Current Commands Extracted from CNC," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 132, pp. 64-80, 2018.
  20. Kim, S. C. and Chung, S. C., "Robust Cutting Force Control Using Indirect Force and Disturbance Estimators in the End Milling Process," *Proc. of the ASPE Conference on American Society for Precision Engineering*, pp. 248-251, 1999.
  21. Wang, N., Ai, C., Ze, X., and He, G., "Adaptive Cutting Force Control for NC Machine based on the Current Restriction," *Neural Parallel and Scientific Computations*, Vol. 15, No. 3, pp. 299-318, 2007.
  22. Altintas, Y. and Aslan, D., "Integration of Virtual and On-Line Machining Process Control and Monitoring," *CIRP Annals*, Vol. 66, No. 1, pp. 349-352, 2017.
  23. Xu, X., Tao, T., Jiang, G., Huang, X., Liu, R., et al., "Monitoring and Source Tracing of Machining Error based on Built-In Sensor Signal," *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 729-734, 2016.
  24. Kim, T. Y., Woo, J., Shin, D., and Kim, J., "Indirect Cutting Force Measurement in Multi-Axis Simultaneous NC Milling Processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 11, pp. 1717-1731, 1999.



**Ki Hyeong Song**

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Precision machining, Sub-micro pattern cutting and Process monitoring.

E-mail: skhgood@kitech.re.kr



**Dong Yoon Lee**

Principal researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is CAD/CAM, Machining monitoring and Virtual machining.

E-mail: dylee@kitech.re.kr



**Kyung Hee Park**

Principal researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Intelligent manufacturing system.  
E-mail: kpark@kitech.re.kr



**Jae Hyeok Kim**

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Machining monitoring system.  
E-mail: vespa@kitech.re.kr



**Young Jae Choi**

Principal researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Precision Machining, Machining monitoring and Virtual machining.  
E-mail: youngjae@kitech.re.kr