

선반가공에서 모터 전류를 이용한 공구 파손 감지에 관한 연구

(A Study on the Monitoring of Tool Fracture using Motor Current in Turning)

윤재웅^{1)*}, 김홍석²⁾, 김승기³⁾

(Jae-Woong Youn, Hong-Seok Kim, and Seung-Gi Kim)

요약 본 논문에서는 선반가공에서 모터전류 신호를 이용하여 공구 파손을 감지하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 먼저, 다양한 환경 변화에 대한 모터 전류 신호의 특성을 명확하게 파악하기 위해 신뢰성을 갖고 있는 절삭력과 모터전류 사이의 상관관계를 분석하였으며, 이를 기준으로 하여 공구파손 시의 모터 전류 신호에 대해 분석하였다. 다양한 가공 실험을 통하여 절삭조건 변화에 따른 절삭력 신호와 주축 모터전류 신호의 정적 성분에 대한 상관관계를 분석하였다. 그 결과 절삭력과 모터전류 사이에 비례관계가 존재한다는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 모터 전류 신호만으로도 공구 파손을 감지 할 수 있을 것으로 판단하였다. 한편, 다양한 공구 파손 실험을 통해 절삭력과 모터전류 신호 사이에도 높은 상관관계가 존재함을 확인하였다. 이러한 공구파손 신호와 일반적인 선반가공의 가공신호를 분류하기 위해 본 논문에서는 새로운 방식의 감지 방법을 제시하였다. 제시한 분류 방법에 대해 여러 차례에 걸친 검증을 통해 공구파손 감지를 위한 모터 전류신호의 감지 신뢰성을 평가하였다.

핵심주제어 : 모터전류 신호, 공구파손, 감지시스템, 선반가공

Abstract In this paper, monitoring method of tool fracture using motor current was proposed for turning process. In order to take more reliable current signal, cutting force signal was compared as reference signal because cutting force signal is reliable, and analysis of signal correlation between cutting force and motor current was performed. The static components of the cutting force and motor current signals were correlated very well for different cutting conditions, and it was proven to use the motor current as an proper sensor for monitoring of tool fracture. To understand the characteristics of motor current, various kinds of cutting experiment were performed including tool fracture experiments. As a result, a new method to detect tool fracture using motor current in turning was proposed, and a large number of fracture experiments were carried out to evaluate the reliability of the proposed method. Finally, it can be possible to detect the tool fracture reliably.

Key Words : Motor current, Tool fracture, Monitoring system, Turning process

1. 서론

* Corresponding Author : jwyoun@daegu.ac.kr

† 이 논문은 2013년 대구대학교 학술연구비의 지원에 의해 연구되었음.

Manuscript received Aug 01, 2016 / revised Aug 23, 2016 / accepted Aug 31, 2016

1) 대구대학교 기계공학부, 제1저자, 교신저자

2) 대구대학교 기계공학부, 제2저자

3) 대구대학교 기계공학과, 제3저자

현재 공작기계 및 정밀가공 산업에서는 가공 정밀도 및 생산성 향상과 불량률 감소에 대한 수요가 증가하고 있다. 생산성 저하와 불량품에 대한 원인으로는 다양한 요소들이 존재하지만, 가

공 시 공구 파손에 의한 불량률이 매우 큰 비중을 차지한다고 할 수 있다. 따라서 공구의 파손시기를 인지하고 대처하기 위한 공구 파손 모니터링이 중요하다고 할 수 있다. 이러한 공정 관리를 위한 모니터링에 관한 연구가 진행 중이며[1,2], 이를 생산 현장에 적용하여 생산성 향상 및 불량률 감소에 기여하기 위한 노력이 진행 중이다.

공구 파손을 감지하는 방법으로서 가공 중 측정(In-process) 방식과 가공 후 측정(Off-process or Inter-process) 방식이 있는데, 일반적으로 가공의 생산성에 영향을 주지 않기 위해서는 간접적인 방법의 센서를 활용한 가공 중 측정방식이 선호되고 있다. 그러나 이를 위해서는 일반적으로 공구 파손을 감지하기 위한 시스템의 가격이 고가이거나, 낮은 신뢰성으로 인해 오히려 생산성이 저하되는 문제를 갖고 있다. 이러한 문제로 인해 가장 선호되고 있는 측정 방식은, 신뢰성이 높은 공구동력계를 이용하여 절삭부하를 측정하고 공구파손을 감지하는 방법이며 이러한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면, 이렇게 활용도가 높은 공구동력계는 고가이기 때문에 산업현장에서의 적용성이 낮고, 또한 공작기계 내부에 설치하여야 하므로 고정 지그 및 배선 등 설치에 제약이 있다. 이러한 공구동력계를 대체하기 위해 음향방출센서(Acoustic emission sensor), 전류 및 전압 센서, 진동 또는 가속도계, 토크 센서 등 다양한 센서를 활용하여 가공부하를 간접적으로 측정하기 위한 연구들이 활발히 진행 중이다 [3,4,5,6,7,8,9]. 그러나 가공부하의 간접적 측정은 규칙적인 가공신호가 검출되는 밀링(Milling)과 달리[8,9], 정적인 가공신호인 선반가공에서는 공구마모 및 파손에 대한 검출이 어려워 활용도가 낮은 실정이다. 따라서 추가적인 보조센서를 활용하고, 다양한 센서 신호의 융합을 위해 인공지능 기법을 활용하는 연구도 활발히 진행 중에 있다[3].

본 논문에서는 공작기계 주축 및 이송축 모터의 전류신호를 이용하여 NC선반 가공에서 모터 전류신호를 이용하여 가공부하를 간접적으로 측정하기 위한 시스템을 구축하고, 가공 상태를 모니터링(Monitoring)하여 공구파손을 검출하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이를 위해 다양한 절삭조건에서 절삭력과 모터 전류 사이의 상관관계를 분석

하고, 저가의 모터 전류를 이용한 공구 파손 감지 방법을 제안하였으며, 다양한 실험을 통해 실제 생산 현장에서의 활용 가능성을 검증하였다.

2. 절삭력과 모터전류 사이의 상관관계 분석

2.1 시스템 구성

일반적으로 절삭력에 비해 모터 전류에는 다양한 잡음(Noise)이 실려 있어 신호의 신뢰성을 떨어뜨리는 문제가 있다. 따라서 다양한 절삭조건에서 모터 전류 신호의 특성과 신뢰성을 검증할 필요가 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는, 공작기계 모터의 전류신호로만 절삭부하를 감지하는 것의 실현여부를 판단하기 위해, 먼저 신뢰성이 높고 잡음이 적은 절삭력과 주축 및 이송축 모터 전류 사이의 상관관계를 분석하고자 하였다. 두 신호의 상관관계를 분석하기 위한 조건으로는 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이와 같은 절삭조건을 변화하여 가공부하의 변동이 일어날 때 전류신호의 거동을 관측하였다.

절삭상태에서의 절삭부하를 감지하기 위해 아래 Fig. 1과 같이 터렛형 NC선반(DOOSAN Lynx22-0)에 공구동력계(Kistler 9129A)를 내부에 설치하고, 전류신호 측정을 위한 공작기계 주축 및 이송축 모터의 3상 U, V, W상에 각각 1개의 센서, 총 6개의 전류센서(Hioki 9272-10)를 설치하였다. 이렇게 측정된 신호를 저주파통과 필터(Low-pass filter) 및 A/D converter (National instrument NI USB 6341)를 이용하여 신호변환을 거쳐 PC에서 신호를 수집하여 신호분석을 실시하였다. 이러한 계측시스템을 통하여 측정된 절삭부하의 크기 특성을 이용하여 절삭상태를 파악하고, 모터 전류신호와 절삭부하와의 상관관계를 분석하여 모터 전류만을 이용하여 절삭부하의 간접적 측정에 대한 가능성을 판단하였다.

본 연구의 목표는 공작기계 주축 및 이송축의 모터전류를 이용하여 공구의 파손여부를 판단하는 것으로서 모터전류를 측정하는 것이다. 이는 기존의 시스템보다 저가의 구성이면서 별도의 시스템을 장착할 필요가 없고, 가공에 방해가 되는

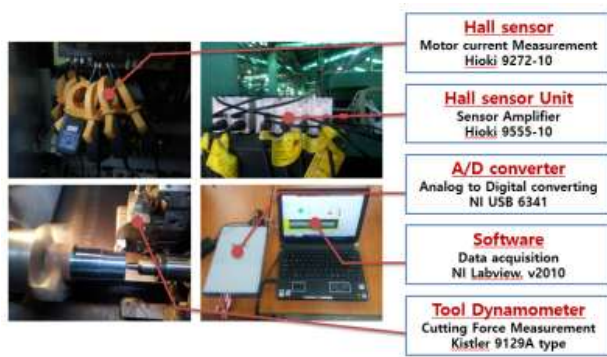


Fig. 1 The devices setup for measurement of cutting force and motor current signal

별도의 센서가 불필요하기 때문이다. 그러나 모터 전류 신호에는 가공 부하뿐만 아니라 모터 구동 및 가감속에 필요한 모터의 부하와 기타 다양한 잡음(Noise) 등이 포함되어 신호의 분석을 어렵게 한다. 따라서, 모터 전류신호의 동적 성분을 활용하는 것에는 한계가 있으며, 정적 특성을 이용하는 것이 더 효과적이라 판단된다. 모터 전류신호의 정적 성분은 가공 부하를 의미하는 신호로서 그 특성을 이해하기 위해서는 사전에 절삭력과 모터 전류 사이의 명확한 상관관계 분석이 필수적이라고 할 수 있다. NC 선반가공에서의 가공조건으로 주축의 회전속도 변화, 이송속도 변화, 절삭깊이 변화로 분류할 수 있으며, 실제 가공 시 절삭부하는 세 가지 인자 모두의 변동 영향을 받으므로, 본 연구에서는 가공 조건을 독립적으로 변화 시키며 절삭력과 모터전류 신호를 취득하여 두 신호의 상관관계를 분석하고자 한다.

2.2 절삭조건 변화에 따른 전류신호 특성

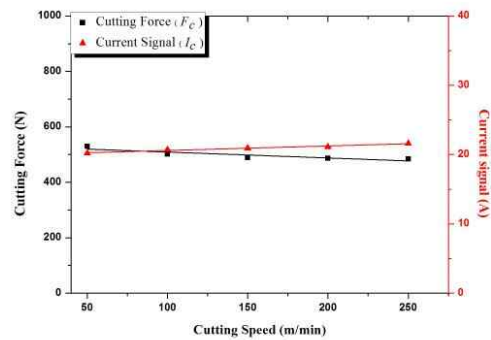
2.2.1 절삭속도 변화에 따른 절삭력과 모터 전류 사이의 상관관계 분석

먼저, 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이 세 가지 절삭조건 가운데 절삭속도만을 50m/min에서부터 250m/min까지 50m/min씩 점차 증가시키고, 반대로 250m/min에서부터 50m/min까지 50m/min 간격으로 감소시키는 실험을 진행하였다. 세부적인 절삭 조건은 아래 Table 1과 같으며, 절삭력 RMS(Root mean square)의 평균값 및 모터전류 RMS의 평균

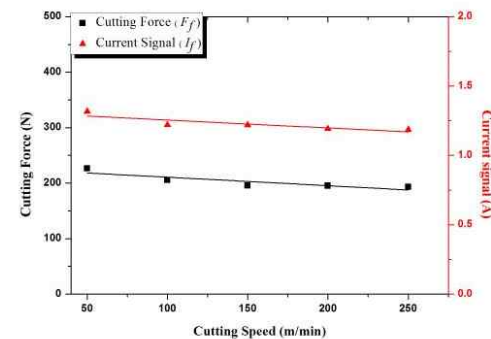
값을 아래 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Experimental condition for different cutting speeds

Cutting condition	
Cutting speed	50, 100, 150, 200, 250 [m/min]
Feed rate	0.1 [mm/rev]
Depth of cut	1 [mm]



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)



(b) Thrust force(F_f) and feed motor current(I_f)

Fig. 2 The correlation between motor current and cutting force for different cutting speeds

Fig. 2(a)는 절삭속도가 변화할 때의 주분력 RMS의 평균값과 주축 모터전류 RMS의 평균값을 속도별 3회의 반복실험에 대한 평균값이며 두 신호 사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 주축회전속도가 증가됨에 따라 절삭부하의 크기는 감소하지만 주축 모터전류의 크기는 회전속도가 빨라

Table 2 The motor current value and cutting force value for different cutting speeds

Cutting speed	$F_c(N)$	$I_c(A)$	$F_f(N)$	$I_f(A)$
50m/min	530.2	20.2	226.2	1.31
100m/min	501.7	20.7	205.3	1.22
150m/min	489.2	20.9	195.6	1.21
200m/min	486.3	21.1	195.1	1.19
250m/min	484.5	21.6	193.2	1.18

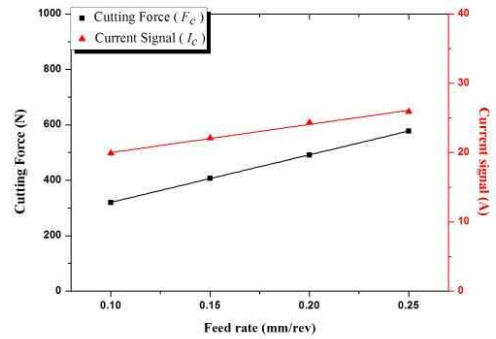
질수록 커져 절삭력과 모터전류는 반비례하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 2(b)에서는 절삭속도가 증가하면서 이송분력과 이송축 모터의 전류 값이 함께 감소함으로써 비례관계인 것으로 나타났다. 이것은 절삭속도가 빨라지면 가공에서 발생하는 열에 의해 절삭력의 성분들은 일부 감소하지만, 주축 모터는 회전 속도 증가에 따라 모터 전류가 증가하고, 이송축의 모터 전류는 부하 감소에 의해 절삭력과 같이 감소하는 것으로 판단된다.

2.2.2 이송속도 변화에 따른 절삭력과 모터 전류 사이의 상관관계 분석

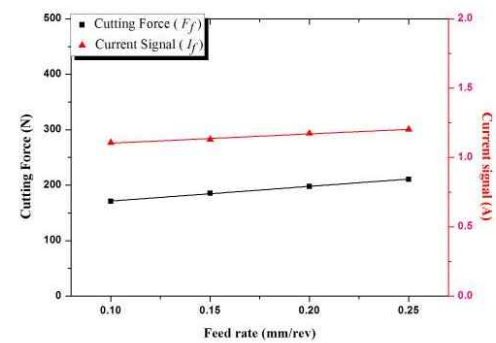
다음은 이송속도를 0.1mm/rev에서부터 0.25mm/rev까지 0.05mm/rev간격으로 증가시키고, 반대로 0.25mm/rev에서부터 0.1mm/rev까지 0.05mm/rev 간격으로 감소시키는 실험을 진행하였으며 세부적인 절삭조건은 아래 Table 3에 나타내었다. 이에 따른 절삭력 및 모터전류 값은 아래 Fig. 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Experimental condition for different feed rates

Cutting condition	
Cutting speed	100 [m/min]
Feed rate	0.1, 0.15, 0.2, 0.25 [mm/rev]
Depth of cut	1 [mm]



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)



(b) Thrust force(F_f) and feed motor current(I_f)

Fig. 3 The correlation between motor current and cutting force for different feed rates

Table 4 The motor current value and cutting force value for different feed rates

Feed rate	$F_c(N)$	$I_c(A)$	$F_f(N)$	$I_f(A)$
0.1mm/rev	319.9	19.9	171.0	22.2
0.15mm/rev	407.4	22.1	185.3	27.7
0.2mm/rev	491.2	24.3	197.9	32.1
0.25mm/rev	577.7	25.9	210.8	36.6

Fig. 3은 이송속도 변화에 따른 절삭력 RMS 평균값과 모터전류 신호 RMS 평균값의 상관관계를 보여주고 있다. Fig. 3 (a)와 (b)는 주절삭방향과 공구 이송방향을 각각 비교한 것으로, 그래프와 표에서 볼 수 있듯이 이송속도가 증가하면 절삭력이 증가됨에 따라 전류 값도 증가하는

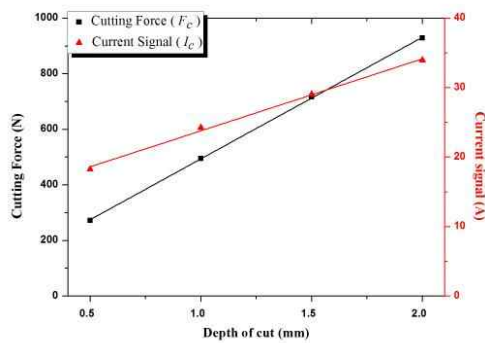
비례관계를 나타내고 있다.

2.2.3 절삭깊이 변화에 따른 절삭력과 모터 전류 사이의 상관관계 분석

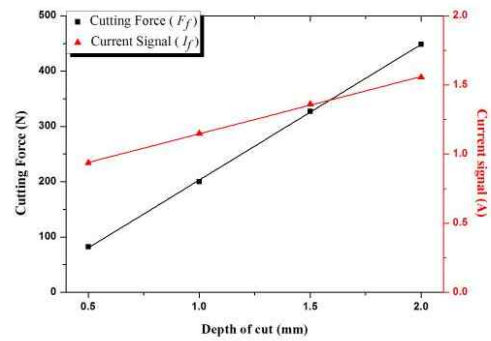
마지막으로 선삭가공에서 절삭깊이를 0.5mm에서부터 2mm까지 0.5mm간격으로 증가 및 2mm에서 0.5mm까지 감소시키는 실험을 진행하였고, 그 세부적인 절삭조건은 아래 Table 5와 같다. 절삭깊이의 증가 및 감소 실험에 사용된 소재의 형상은 직경 100mm에 길이 190mm의 S45C 재질의 환봉소재를 0.5mm 간격으로 절삭깊이가 증가 및 감소하도록 소재를 계단 구조로 미리 제작하여 실험하였다. 이에 대한 절삭력 및 모터전류 값은 아래 Fig. 4와 Table 6에 나타내었다.

Table 5 Experimental condition for different depth of cuts

Cutting condition	
Cutting speed	100 [m/min]
Feed rate	0.1 [mm/rev]
Depth of cut	0.5, 1, 1.5, 2 [mm]



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)



(b) Thrust force(F_f) and feed motor current(I_f)

Fig. 4 The correlation between motor current and cutting force for different depth of cuts

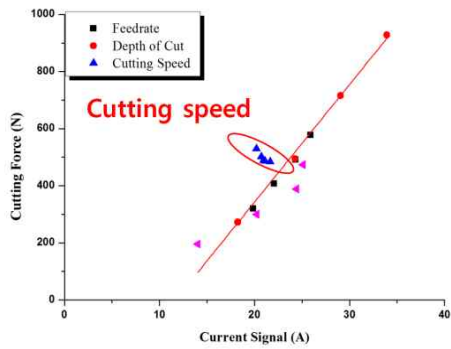
Table 6 The motor current value and cutting force value for different depth of cuts

Depth of cut	F_c (N)	I_c (A)	F_f (N)	I_f (A)
0.5mm	196.1	14.0	153.6	0.78
1.0mm	300.1	20.2	188.5	0.82
1.5mm	389.0	24.4	202.5	0.92
2.0mm	474.1	25.1	221.3	0.99

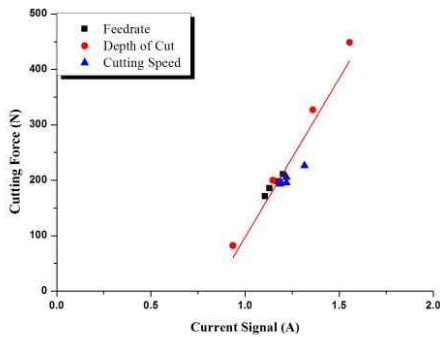
Fig. 4는 절삭력과 모터전류의 상관관계분석을 나타내고 있다. Fig. 4 (a)와 (b)는 위의 다른 절삭조건 변화 실험과 같이 주축 모터 전류와 Z축 이송 모터 전류의 값은 절삭부하의 변화와 같이 비례하게 변화되는 것을 확인 하였다.

2.3 절삭조건 변화에 따른 전류신호와 절삭력의 상관관계

위의 실험에서 각 절삭조건이 변화될 때 외경 및 단면가공에서의 절삭력과 주축/이송축 모터 전류의 변화를 측정하였다. 그 결과를 바탕으로 절삭 부하의 세 분력과 주축/이송축 모터 전류사이의 상관관계를 각 분력 및 모터별로 나누어 분석하였다.



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)



(b) Thrust force(F_f) and feed motor current(I_f)

Fig. 5 The correlation between motor current and cutting force

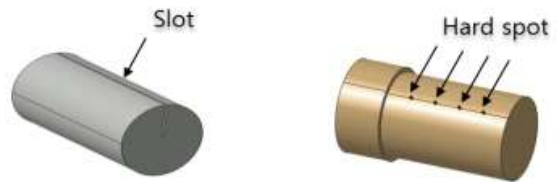
위의 Fig. 5의 (a)는 주분력과 주축 모터 전류 신호를 절삭조건별로 나타낸 것이다. 이때 절삭속도가 변화되는 성분을 제외하고 이송속도 및 절삭깊이가 변화하는 실험에서는 하나의 기율기로 변화되는 것을 볼 수 있는데 일부 오차의 값은 실험적인 오차 값으로 보인다. 절삭속도의 경우, 절삭속도가 빨라질수록 절삭력은 감소하지만 모터 속도가 빨라질수록 모터 토크는 증가하고, 이는 모터의 전류량 증가를 초래하기 때문이다. 이와 같이, 일반적으로 절삭속도를 제외한 다른 절삭조건 변화에 대한 모터의 전류값은 절삭력과 비례하지만, 절삭속도에 대한 모터 전류값의 변화는 절삭력과 일부 반비례하게 된다, 그러나, 본 연구에서 공구파손을 감지하기 위한 전류값의

변화는 큰 폭으로 변화하는데 비해, 절삭속도의 증가에 따른 전류의 변화는 그 변화량이 크지 않기 때문에 공구파손의 감지에는 큰 영향을 주지 않으며 이는 4절에서 상세하게 기술하였다.

Fig. 5의 (b)에서 이송분력과 Z축 전류값 또한 일정한 기율기로 변화되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 주축과 이송축 모터전류와 절삭력은 비례관계를 가지므로 모터전류 신호만으로 충분히 절삭력을 간접적으로 측정이 가능하다고 판단된다. 따라서 절삭속도의 변화를 제외하고, 절삭조건 변화에 대해 절삭력과 모터전류는 서로 비례 관계가 있음을 확인할 수 있었으며, 향후 공구파손을 감지할 때 절삭속도 변화 부분만 별도로 고려하면 된다는 사실을 확인할 수 있었다. 이와 같이 모터 전류 신호의 정적 성분은 절삭 부하를 그대로 나타내고 있고, 정적 성분을 이용한 절삭 부하의 변동을 측정함으로써 공구 파손을 감지할 수 있을 것이라 판단된다.

3. 공구 파손에 따른 절삭력 및 모터전류 신호 특성분석

선반가공에서 공구파손은 랜덤(Random)하게 발생하기 때문에 다양한 공구파손 실험을 하기 위해서는 인위적으로 공구를 파손시킬 필요가 있다. 인위적인 공구파손을 위해 Fig. 6 (a) 에서와 같이 직경 100mm 환봉소재의 공작물에 폭 2mm, 깊이 45mm 슬롯(Slot) 가공을 하여 절삭시 단속절삭이 일어나도록 함으로써 충격에 의해 공구가 파손되도록 하였다. 또한, Fig. 6 (b)에서와 같이 동일한 환봉소재에 경도가 높은 소재를



(a) Machined slot (b) Hard spots
Fig. 6 Workpiece preparations for artificial tool fracture

삽입하여 절삭공구가 삽입된 지점을 가공하면서 공구에 충격을 주어 인위적으로 공구파손을 야기시켰다.

슬롯 가공된 소재의 단속가공을 절삭속도 300m/min, 절삭깊이 1mm, 이송속도 0.2mm/rev의 조건으로 가공을 한 경우, 가공이 이루어지다 어느 순간 갑자기 공구의 파손이 일어났으며 파손의 크기가 0.87mm 정도로 작은 크기의 파손이 일어났다. 이때의 공구를 아래 Fig. 7에 나타내었으며, 파손 시의 절삭력 및 모터전류 신호를 Fig. 8에 나타내었다.

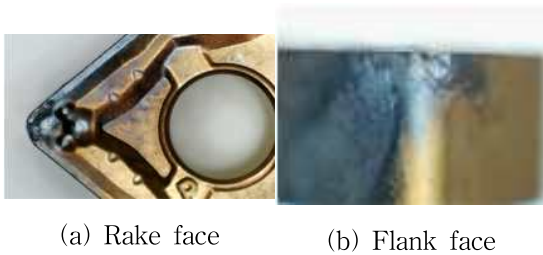
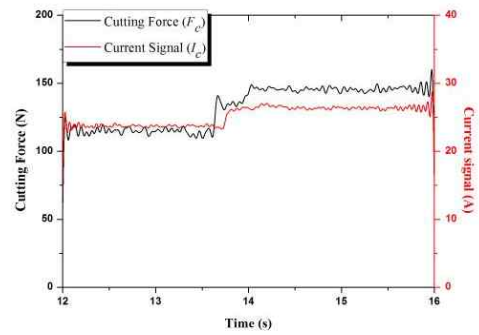


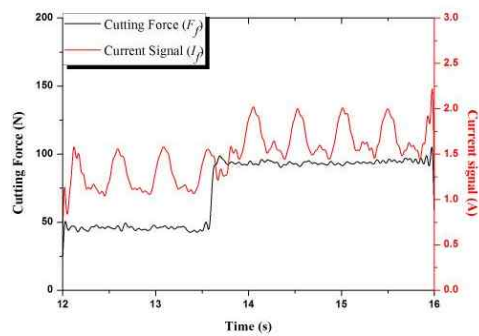
Fig. 7 Fractured tool in the interrupt cutting

Fig. 8은 단속가공에서 발생된 공구의 파손상황에서의 절삭력 RMS 신호와 모터전류의 RMS 신호를 나타내고 있으며, (a)에서는 주분력과 주축 모터전류 신호를 (b)에서는 각각 이송분력과 Z축 모터전류를 나타내고 있다. (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 공구 파손이 일어나면 가공면이 거칠어지면서 절삭력이 증가함을 알 수 있다. 이에 따른 전류신호 또한 증가를 보이고 있다. 특히 (b)의 이송분력과 Z축 모터전류에서 이전의 실험들에서는 Z축의 모터전류가 0.8~1.5A내로 값이 변하는데 비해 파손상황에서는 전류 RMS 값이 2A 이상으로 크게 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 6 (b)에서와 같이, 직경 3mm의 고경도 소재를 임의의 곳에 삽입한 후 가공을 실시하여 가공 중 공구와 충돌하여 파손을 발생시키는 실험을 진행하였다. 하드스팟(Hard spot) 파손실험을 위의 단속실험과 동일한 가공조건으로 진행하여, Fig. 9와 같이 파손의 크기를 비교해 보았을 때 단속가공에서는 공구파손의 크기가 약 0.9mm인 것에 비해 하드 스팟에서는 약 2mm로 2배 이상의 차이가 나는 큰 파손임을 알 수 있었



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)

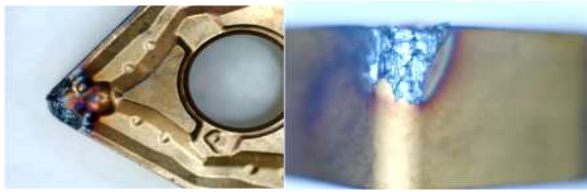


(b) Thrust force(F_f) and feed motor current(I_f)

Fig. 8 Motor current and cutting force signal at tool fracture for interrupt cutting

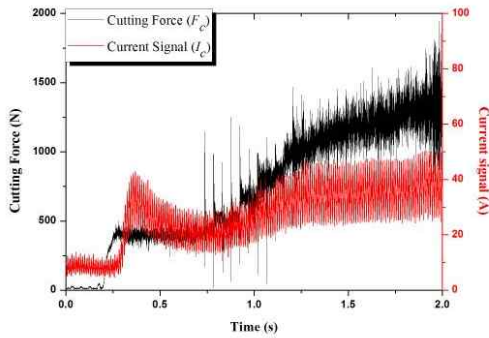
으며, 이때의 주분력 RMS와 주축 모터전류신호 RMS는 Fig. 10과 같다.

Fig 10의 (a)와 (b)에서 공구가 하나의 하드스팟을 지나갈 때 직경 3mm의 고경도 재료와 절삭공구가 한번 이상, 많게는 15번 정도 충돌하게 된다. 실제로 실험을 할 때에는 공구와 하드스팟이 접촉하고 지나간 직후에 NC선반을 정지시켰다. 일반적인 상황에서 절삭부하의 크기는 큰 순서대로 주분력, 배분력, 이송분력 순서이다. 하지만 공구의 파손이 일어나는 상황에서는 이송분력의 크기가 주분력의 크기보다 커지는 것을 확인할 수 있으며, 모터전류 값의 변화도 주축 모터전류 값의 변화보다 이송축의 모터전류 값의 변화가 큰 것을 볼 수 있다.

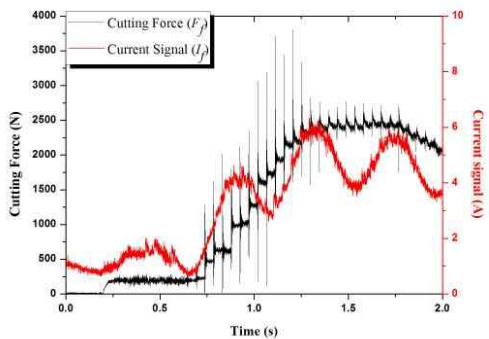


(a) Rake face (b) Flank face

Fig. 9 Fractured tool in the hard-spot cutting



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)

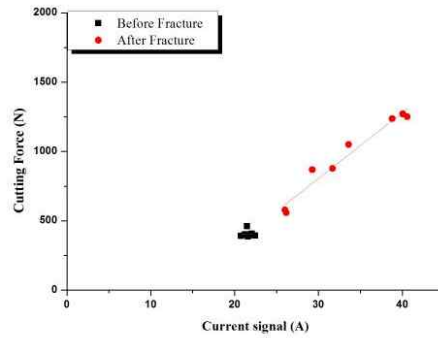


(b) Thrust force(F_f) and feed motor current(I_f)

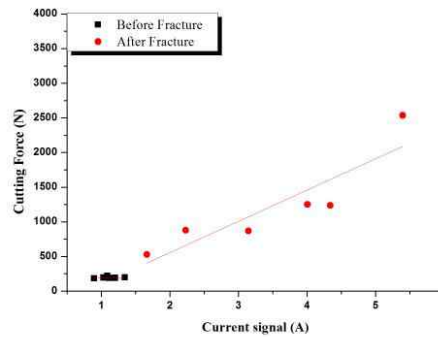
Fig. 10 Motor current and cutting force signal at tool fracture for hard spot cutting

공구파손 이전과 이후에 대한 절삭력과 모터전류의 신호 변화 상관관계 분석에서 Fig 11의 (a), (b)는 동일한 조건의 실험을 6회 반복하여 종합한 결과이다. Fig. 11 (a)는 주분력과 주축 모터전류, Fig. 11 (b)는 이송분력과 이송축 모터전류를 나타내고 있으며, 파손 전에는 각 분력이

모두 비슷한 값으로 밀집되어 있다. 반면, 파손이 일어난 후의 값은 하나의 기울기를 가지지만 각 데이터 별 편차가 크게 나타난다. 이는, 공구 파손 당시의 상황을 잘 보여준다고 할 수 있는데, 공구 파손의 크기 또는 충격에 의한 절삭부하의 증가와 비례하게 변화하는 것을 파악하였다.



(a) Cutting force(F_c) and spindle motor current(I_c)



(b) Thrust force(F_f) and feed motor current (I_f)

Fig. 11 The correlation between motor current and cutting force for tool fracture

4. 모터 전류를 이용한 공구 파손신호 감지

센서 신호의 분석은 일반적으로 정적 신호와 동적 신호의 분석을 통해 이루어진다고 할 수 있다. 본 연구에서는 공구 파손 시의 신호를 감지하기 위해 동적인 신호보다는 정적인 신호의 분석에 초점을 맞추었다. 다양한 조건에서 수집된

주축 및 이송축 모터 전류신호 데이터들은 가공 조건의 변화 및 공구파손과 같은 가공 상황이 변화 하였을 때, 상황변화 이전과 상황변화 직후의 정적 신호 절대값과 신호의 변화량을 분석하였다. 한편, 주축 모터와 이송축의 모터는 기본적으로 구동 전류 값의 차이가 20배 정도 차이가 있어 동일한 값으로 분석을 하기에는 문제가 있어 이를 보상해 주기 위해 주축 전류 값에 20을 나누어 주었다.

이러한 정적성분 분석을 통하여 가공상황(절삭 조건의 변화 및 공구파손)을 감지하기 위해 각 조건의 해당 값들에 임계값(Threshold value)을 이용하여 항목별로 점수를 주었으며, 항목을 나누기 위하여 실험적 데이터를 기반으로 하여 항목 및 점수를 분배하였다. 또 정적 성분의 점수를 활용하여 일반적인 가공 상태와 파손 상태를 구분하고자 하였다. 평가하기 위한 항목으로서 M_1 과 M_2 를 정의하고 이 값으로 공구파손을 감지하고자 한다.

$$M_1 = \frac{I_f}{(I_c/20)}, M_2 = \frac{\Delta I_f}{(\Delta I_c/20)}$$

정적인 성분에서 M_1 은 주축 및 이송축의 전류 값의 비율을, M_2 는 주축 및 이송축의 전류값 변화량의 비율을 의미한다. 먼저, M_1 은 일반적인 가공상태를 반영하기에 가장 적합한 값이고, M_2 는 공구 파손상태를 감지하기에 보다 적합하다고 판단하였다. 그러나, 각각의 방법을 단일적으로 활용한다면 상태감시의 신뢰도가 낮아 높은 활용

도를 얻을 수 없다. 두 방법을 동시에 활용하여 절삭공정의 상태들을 구분한다면 보다 높은 신뢰도를 나타낼 수 있기 때문에 정적분석에서는 두 방법을 동시에 활용하였다.

Fig. 12는 영역별 기준을 활용하는 방법에 대한 신호처리 알고리즘을 보여주고 있다. Fig. 12에서와 같이 다양한 실험을 통해 정적신호 및 그 변화량의 임계값을 정하고, 그 임계값을 넘지 않으면 그것은 일반적인 가공조건의 변화를 의미하는 것이며, 그 임계값을 넘게 되면 공구 파손을 의미하게 되는 것이다.

공구파손 여부의 결정을 위해 본 연구에서는 M_1 과 M_2 값을 Table 7과 같이 정적 점수(Static score)로 정의하여 계산하였다. 이렇게 정해진 정적 점수를 실제 가공상태에 적용한 결과는

Table 7 Definition of static value

M_1 & M_2 value	Static score
value \geq 10	5
10 > value \geq 6	4
6 > value \geq 3	3
3 > value \geq 1	2
1 > value \geq 0.2	1
value < 0.2	0

Table 8 Experimental result

Cutting condition	M_1 & M_2	Value	Static score	Total score
Normal cutting	M_1	0.04	0	0
	M_2	0.07	0	
Change of cutting speed	M_1	1.32	2	3
	M_2	0.81	1	
Change of feed rate	M_1	0.93	1	2
	M_2	0.78	1	
Change of depth of cut	M_1	1.19	2	3
	M_2	0.98	1	
Tool fracture 1	M_1	4.97	3	6
	M_2	5.86	3	
Tool fracture 2	M_1	7.32	4	8
	M_2	8.18	4	
Tool fracture 3	M_1	11.32	5	10
	M_2	12.18	5	

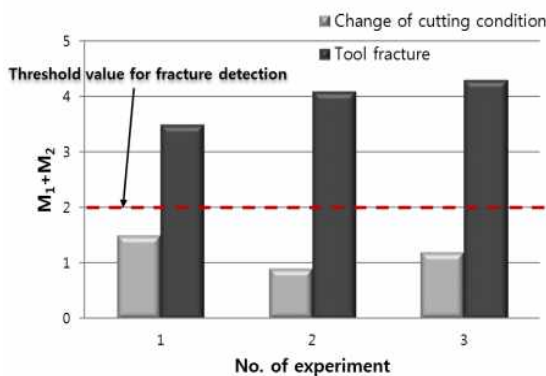


Fig. 12 Basic idea of tool fracture detection

Table 8과 같다. 본 연구에서는 두 가지의 정적 점수를 활용하고 있으며, 총 점수(Total score)는 두 정적 점수의 산술적 합계를 의미한다. 다양한 절삭시험을 통해, 공구 파손 시의 총 점수는 일반적인 가공상태 및 절삭조건 변화 시 보다 매우 큰 값을 보이고 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 이와 같은 방법을 통해 다양한 절삭 환경에서 모터 전류값의 비율을 이용하여 공구 파손을 감지할 수 있음을 알 수 있었다.

공구 파손 여부의 결정을 위해 본 연구에서는 M_1 과 M_2 값을 정적 점수(Static score)로 정의하여 계산하였다. 다양한 절삭시험을 통해, 공구 파손 시의 총 점수는 일반적인 가공상태 및 절삭조건 변화 시 보다 매우 큰 값을 보이고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이와 같은 방법을 통해 다양한 절삭 환경에서 모터 전류값의 비율을 이용하여 공구 파손의 감지가 가능함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 선반가공에서 공작기계 각 축의 모터 전류값을 이용하여 공구 파손을 감지하고자 하였다. 일반적으로 가공 상태를 파악하기 위해서는 신뢰성 있는 센서를 활용해야 하는데, 이를 위해서는 고가의 측정장비가 필요하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 저가의 공구파손 감지 장치를 구현하기 위해 모터 전류를 활용하였다.

이를 위해 먼저 신뢰성이 높은 절삭력과 모터 전류 사이의 상관관계를 분석함으로써 모터 전류를 이용한 공구 파손 감지의 가능성을 확인하였다. 센서 신호는 일반적으로 정적 성분과 동적 성분으로 나누어 분석하게 되는데, 본 연구에서는 절삭 부하의 변화를 측정하기 위해 정적 성분을 이용하여 분석하였다. 다양한 절삭 조건 변화에 대한 절삭력 신호와 모터 전류 사이의 상관관계를 분석함으로써 모터 전류를 이용한 공구 파손 감지의 가능성을 확인하였다. 절삭력과 모터 전류의 상관관계를 분석한 결과 주축 회전속도가 변화되는 경우를 제외하고 대부분의 경우, 절삭력과 모터 전류는 비례하며, 모두 절삭 부하의 변동을 반영함을 알 수 있었다.

또한, 공구 파손을 인위적으로 발생시키기 위해, 공작물에 슬롯을 파거나 하드스팟을 만들어 실험을 수행하였다. 공구 파손의 크기가 0.87mm에서 2mm까지 다양한 파손의 검출 결과, 공구 파손 순간에 모터 전류값이 변화가 생기는 것을 확인하였고, 주축모터와 이송모터 전류값의 비율(M_1) 및 두 모터전류 값의 변동량 비율(M_2)이 공구파손을 나타냄을 확인하였다.

References

- [1] S. H. Cho, T. W. Chang, G. T. Shin, H. B. Na, J. W. Park, "Continuous improvement plan of manufacturing process through real-time data acquisition", Journal of the Korea Society of Industrial Information System, Vol. 14, No. 4, pp. 75-90, 2009.
- [2] J. K. Lee, S. W. Lee, "Downtime tracking for small-medium sized manufacturing company using shop floor monitoring", Journal of the Korea Society of Industrial Information System, Vol. 19, No. 4, pp.65-70, 2014.
- [3] Tamas. Szecsi, "A DC motor based cutting tool condition monitoring system," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92, No. 93, pp. 350-354, 1999.
- [4] Oriano. Bottauscio, Mario. Chiampi, Lorenzo. Donadio, Mauro. Zucca, "Experimental setup for measurement of induction motor cage currents," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 290, No. 291, pp. 1322-1325, 2005.
- [5] Xiaoli. Li, Gaoxiang. Ouyang, Zhenhu. Liang, "Complexity measure of motor current signals for tool flute breakage detection in end milling," International Journal of Machine tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 371-379, 2008.
- [6] Jinjiang. Wang, Shaopeng. Liu, Robert X.

Gao, Ruqiang. Yan, "Current envelope analysis for defect identification and diagnosis in induction motors", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 31, pp. 380-387, 2012.

- [7] T. Y. Kim, D. K. Choi, C. N. Chu, J. W. Kim, "Indirect Cutting Force Measurement by Using Servodrive Current Sensing and it's Application to Monitoring and Control of Machining Process," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 2, pp 15-27, 1996.
- [8] G. D. Kim, Y. J. Choi, Y. T. Oh, C. N. Chu, "Frictional Behavior and Indirect Cutting Force Measurement in a Machining Center Using Feed Motor Current," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 14, No. 4, pp 78-87, 1997.
- [9] G. D. Kim, W. T. Gwon, C. N. Chu, "Indirect Cutting Force Measurement and Cutting Force Regulation Using Spindle Motor Current," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 14, No. 10, pp 15-27, 1997.



윤재웅 (Jae-Woong Youn)

- 정회원
- 한양대학교 기계설계학과 공학사
- KAIST 기계공학과 공학석사
- KAIST 기계공학과 공학박사
- 대구대학교 공과대학 기계공학부 정교수
- 관심분야 : 정밀가공, 가공자동화 및 센서 응용

김홍석 (Hong-Seok Kim)



- 연세대학교 기계공학과 공학사
- KAIST 정밀공학과 공학석사
- KAIST 기계공학과 공학박사
- 대구대학교 공과대학 기계공학부 정교수
- 관심분야 : 단조공정 및 사출성형



김승기 (Seung-Gi Kim)

- 대구대학교 기계·자동차 공학부 학사
- 대구대학교 기계공학부 석사
- 관심분야 : 공장자동화, 공구 및 공정 모니터링.