

주축 및 Z축 모터전류를 이용한 드릴파손 예측에 관한 연구

김화영*, 안중환*

Study on Prediction of Drill Breakage using Spindle and Z-axis Motor Currents

Hwa Young Kim*, and Jung Hwan Ahn*

ABSTRACT

A reliable and practical monitoring of drill breakage is a crucial technique in automatic machining system. In this study, a real-time monitoring system was developed to predict drill breakage using both spindle and z-axis motor current. Drill breakage is monitored by detecting the level of residual motor current which is obtained through the moving average filter algorithm. The residual exhibits a feature of sharp decrease just before drill breakage. Therefore, drill breakage can be predicted by detecting this characteristic of residual component. Z-axis motor current is better to predict the drill breakage than spindle motor current, because the former is faster in response than the latter when drill breakage is occurred. The evaluation experiments have shown that the developed monitoring system works very well.

Key Words : Drilling operation(드릴 공정), Drill breakage monitoring(드릴파손 감시), Z-axis motor current(Z축 모터전류), Spindle motor current(주축모터전류), Moving average inverse filter(이동평균 역필터)

1. 서론

자동화된 절삭가공 시스템에서의 신뢰성 있는 가공을 위해서는 가공 및 공구상태 감시기술의 개발이 필요하며 특히 불량품의 재발 방지, 공작기계 보호 및 기계정지시간 단축을 위해서는 공구파손의 실시간 검출이 중요하다. 드릴가공은 가공 특성상 밀링, 선삭과 같은 전 가공이 상당히 진행된 상태

에서 가공이 일어나므로 가공중 이상상태가 발생하면 경제적 손실이 크다⁽¹⁾. 특히 드릴파손의 경우 가공 중 파손이 일어나면 파손된 드릴날이 공작물에 박힌 채 용접되어 버리기 때문에 후처리가 어렵다. 따라서 드릴 가공의 경우 파손의 실시간 검출 뿐 아니라 파손 직전에 드릴 파손을 예측하는 게 매우 중요하다. 드릴파손의 실시간 검출에는 일반적으로 진동, AE, 온도, 파워, 토크, 추력 등과 같은 가공 중 발생한 신호를 이용하여 간접적으로 감시하는 방법을 사용하고 있다⁽²⁻⁶⁾. 이중 공구동력계를

* 부산대 기계공학부, 기계기술연구소(RIMT)

이용하여 측정된 토크와 추력 신호가 일반적으로 가장 많이 쓰이나 공구동력계가 너무 고가이고 설치에 제약이 많으므로 산업현장에 적용하기에는 적절치 못하다. 일반적으로 감시용 센서는 가능한 한 가공이 일어나는 곳과 가까운 위치에 설치해야 하며 공작기계의 구조의 변경이 없고 작업에 지장을 주지 않아야 하며, 유연성이 높고, 높은 감도와 우수한 S/N비를 갖고 있어야 한다⁽⁷⁾. 모터 드라이브계를 센서로 사용하여 검출한 모터전류는 비교적 감도와 S/N비가 우수하고, 작업에 지장을 주지 않으며, 센서 설치에 따른 공작기계 구조의 변경 없이 가공 중 소비된 모터전류를 쉽게 측정할 수 있으므로 산업 현장에 적합한 감시용 센서이다⁽⁸⁻⁹⁾. 모터전류를 이용하여 공구상태 감시^(10,11) 및 절삭력 간접 측정^(12,13)에 대한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 행하여 졌다. 드릴 파손 감시용 신호로 모터전류를 사용하는 경우에는 주로 주축 모터전류/파워를 감시 신호로 사용하는데, 그 이유는 주축 모터전류가 드릴의 주 절삭날에서의 변화를 잘 반영하기 때문이다⁽⁶⁾. 그러나 주축 모터전류는 이송축 모터전류에 비해 일반적으로 구동계의 관성이 크기 때문에 응답성이 조금 떨어지는 단점을 갖고 있다. 감시시스템의 성능은 감시용 센서의 선택과 진단 알고리즘의 신뢰성에 크게 의존한다. 이전의 드릴파손 감시 알고리즘으로 주로 사용된 레벨감시 방법은 신호처리가 간단하므로 실시간 처리에 적합한 방법이나, 경계치 선정에 따라 감시 시스템의 성능이 크게 좌우되므로 신뢰성 있는 감시가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최근 들어서는 센서융합기술 및 신경회로망, 퍼지 추론 등과 같은 인공지능 기법의 발달에 힘입어 다중센서에 의한 복합적이고 지능적인 감시에 대한 연구가 주를 이루고 있다^(14,15). 본 연구에서는 드릴 가공 중에 검출한 주축 파워 및 Z축 모터전류로부터 주축 파워 및 Z축 모터전류의 동적 신호를 이동평균(moving average : MA) 역 필터법을 이용하여 추출한 뒤, 이를 이용하여 드릴파손 직전에 파손을 예측하는 실시간 감시 시스템을 제안하였다. 감시센서로는 별도의 센서를 사용하지 않고 공작기계 내에 있는 AC 주축 및 Z축 모터 드라이브계를 사용하였다.

2. 모터전류 이용 드릴 파손 감시시스템

2.1 이동평균 역 필터법을 이용한 모터전류의 동적 성분 추출

Fig. 1은 일반적인 드릴 가공 시 검출한 주축 모터 전류신호이다. 드릴가공 중 검출한 모터 전류신호에는 구동계 마찰을 극복하는데 필요한 tare전류 성분(I_{tare})과 절삭조건, 드릴마멸 상태, 가공면과 드릴 마진부의 마찰 등에 의해 가공깊이에 따라 점진적으로 증가하는 정상상태 모터전류 성분($I_s(t)$) 및 가공물 경도의 변화, 칩 배출 불량, 공구파손 발생과 같은 불규칙적이고 랜덤한 상태변수들에 의해 주어지는 동적 모터전류 성분($I_d(t)$)이 포함되어 있다. 따라서 검출된 모터전류 신호($I(t)$)는 식(1)과 같다.

$$I(t) - I_{tare} = I_s(t) + I_d(t) = I_c(t) \quad (1)$$

여기서, $I_c(t)$ 는 순수한 가공부하에 의해 상용하는 모터전류이다. 그러므로 동적 모터전류성분은 식(2)와 같이 구해진다.

$$I_d(t) = I_c(t) - I_s(t) \quad (2)$$

즉, 검출된 모터전류신호로부터 $I_c(t)$ 를 구한 뒤 동적 모터전류신호와와는 무관하게 가공진행에 따라 점진적으로 변하는 $I_s(t)$ 성분을 제거하면 드릴 파손이나 칩배출 상태 등에 의해 변하는 동적 전류성분을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 저주파 잡음성분에 해당하는 $I_s(t)$ 성분을 이동 평균법에 의한 디지털 필터를 이용하여 제거하였다⁽¹⁶⁾.

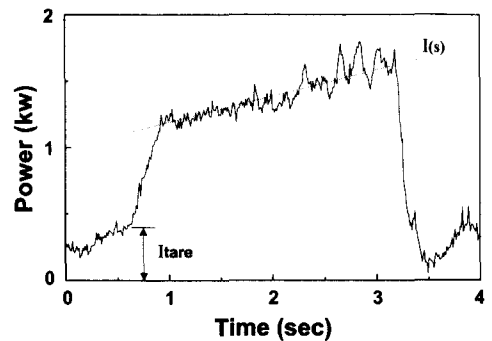


Fig. 1 Typical spindle motor current during drilling

Fig. 2는 동적 신호 검출을 위한 MA역 필터의 구성을 나타낸다. 컴퓨터 연산을 위해 식(2)를 이산화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_d(n) &= I_c(n) - I_s(n) \\
 &= I_c(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i I_c(n-i)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

즉 원 신호에서 이동 평균법에 의한 근사 신호를 빼면 저주파 잡음성분을 제거한 신호를 얻을 수 있다. 여기서 N은 이동평균을 취한 점의 개수이고 a_i 는 가중치이다. 본 연구에서는 a_i 를 전부 1로 두었다.

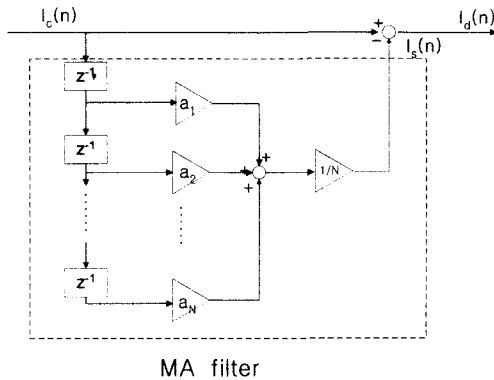


Fig. 2 Structure of MA(Moving Average) inverse filter

2.2 드릴파손 예측 알고리즘

가공 중 드릴에 걸리는 부하가 드릴의 비틀림 파괴강도를 넘어서게 될 때 파손이 일어나게 되는데 파손이 일어나기 직전, 드릴에 걸리는 과부하로 인해 드릴 척에서 약간의 슬립 현상이 생긴 후 곧바로 파손이 일어나게 된다. 모터전류도 드릴에 걸리는 부하에 비례하여 변하며, 드릴 척에서의 슬립 현상이 생기면 주축 및 Z축 모터에 걸리는 전류가 약간 감소한 후 급격히 증가하여 드릴파손이 발생하게 된다. 따라서 파손 직전에 나타나는 모터전류 신호의 이런 변화 특성을 이용하면 파손이 일어나기 전에 미리 드릴파손을 검출하는 것이 가능하다. 이를 위해서는 파손 직전에 나타나는 모터전류의 변화를 높은 신뢰성을 가진 채 검출하는 실시간 검출 방법이 필요하다. 본 연구에서는 모터전류 신호로부터 드릴파손 상태에 민감한 동적 모터 전류 성분을 추출한 뒤, 이를 드릴파손의 예측 감시를 위한 신호로 사용하였다. MA 역필터를 이용하여 구한 동적 모터전류신호의 경우 드릴파손 직전에 전류신호가 급격히 감소한 후 증가하는 경향을 띠는

데, 이 전류신호의 급격한 감소를 검출하면 드릴파손을 미리 예측할 수 있다. 즉, 동적 모터전류 값이 주어진 경계치 보다 작으면 드릴파손의 위험이 있다고 판단한다. 경계치 설정은 정상상태에서의 학습실험이나 이전의 경험 데이터를 이용하여 얻을 수 있으며, 여기서는 학습실험을 통해 주축모터전류의 경우 -0.3, Z축 모터전류의 경우 -2를 경계치로 선정하였다. Fig. 3은 드릴파손 예측 알고리즘의 흐름도이다.

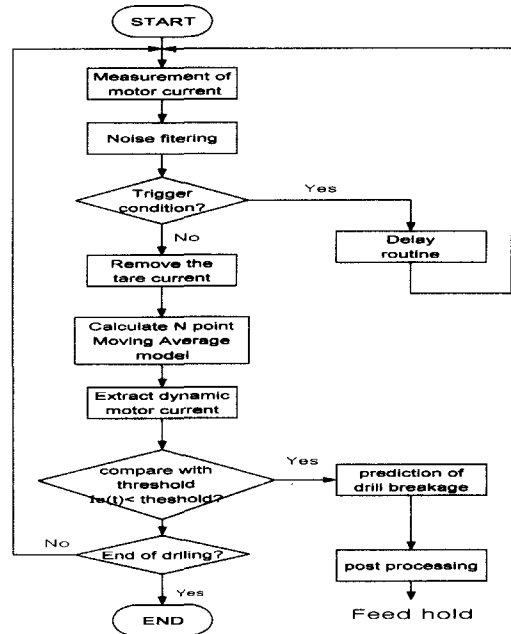


Fig. 3 Flow chart of drill prediction monitoring algorithm

- ① NC장치내의 주축/Z축 모터 드라이브계로 부터 모터전류를 검출한다.
- ② 불필요한 고주파 잡음 성분을 제거하기 위해 저역 통과필터(LPF)를 이용하여 필터링한다.
- ③ Z축 모터전류가 40A이상이고 동시에 주축 모터 전류가 tare 전류 근처이면 시간 지연 루틴을 수행하여 감시를 행하지 않는다.
- ④ ③의 조건을 만족치 않는 경우, 모터전류 신호로부터 구동계가 마찰을 극복하는데 필요로 한 tare 전류성분을 뺀다. tare 전류의 크기는 비절삭 구간의 평균치로 결정하였다.

- ⑤ 가공에 따라 점진적으로 변하는 정상상태 모터 전류성분($I_s(t)$)에 대한 근사식을 N점 단순 이동 평균법을 이용하여 구한다. 본 연구에서는 N=5로 하였다.
- ⑥ 모터전류신호($I_c(t)$)로부터 이동 평균법으로 정상상태 모터전류성분($I_s(t)$)에 대한 근사식을 뺀으로써 드릴파손에 민감한 동적 모터전류성분($I_d(t)$)을 추출한다.
- ⑦ 동적 모터 전류신호와 경계값을 이용한 레벨감시를 통해 드릴파손을 예측한다. 동적 모터 전류값이 주어진 경계값 보다 작으며 드릴파손이 일어날 위험이 있다고 판단하여 이송정지 명령과 같은 후처리를 행하며, 이상이 없는 경우에는 드릴링 작업이 끝났는지를 판단하고 끝나지 않았으며 계속해서 드릴파손 감시를 수행한다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 4는 실험 장치도를 나타낸다. 드릴링 작업은 수직형 머시닝 센터(Daewoo AV-30)에서 수행하였으며, 모터전류는 오프라인 분석을 위해 데이터 레코더(Racal V-store)에 기록하였다. 주축 및 Z축모터전류는 모터 드라이브계로 부터 검출하였으며, 지역 통과필터(cut-off freq. 30Hz)를 거친 후 샘플링 주파수 500Hz로 샘플링 하였다. 공작물은 S45C를 사용하였으며 드릴은 직경 3mm, 6mm인 표준 트위스트 드릴을 사용하였다.

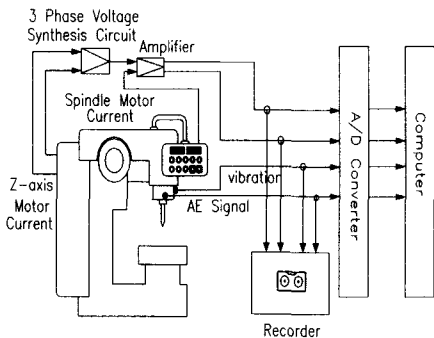


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

Table 1은 실험에 사용한 절삭조건을 나타낸다. 모터전류의 성능을 평가하기 위해 드릴파손과 같은 급격한 절삭 상태 변화에 민감하게 반응하는 AE신호 및 진동신호를 모터전류와 같이 검출하였다. AE 및 가속도 센서는 절삭이 일어나는 곳 가까운 위치인 주축대 하단부에 밀랍을 이용하여 고정하였다. AE신호는 앰프 내장형 AE센서(MURATA, 피에조 타입 M-4W AMP)를 이용하여 검출하였으며 RMS컨버터를 이용하여 RMS값으로 변환한 뒤 A/D 변환하였다. 진동신호는 가속도 센서(B&K, 4371)를 이용하여 검출한 뒤, 전하 증폭기(B&K, 2650)를 거쳐 A/D변환하였다.

Table 1 Cutting conditions for experiments

	Diameter (mm)	Depth of cut (mm)	Cutting speed (rpm)	Feedrate (mm/rev)
I	6	12	1800	0.12
II	3	6	3300	0.1
III	6	12	1900	0.15

4. 실험결과 및 고찰

실제 가공작업과 동일한 환경 하에서 드릴파손을 감시하기 위해 새 드릴로 구멍 뚫기 작업을 시작하여 드릴파손이 발생할 때까지 계속 작업을 수행하였으며, 제안한 알고리즘을 이용하여 드릴파손 감시를 수행하였다. 드릴 파손의 형태는 예기치 못한 가운데 발생하는 돌발적 파손과 드릴마멸 초과로 인한 파손으로 크게 분류할 수 있으며 본 실험에서는 이 두 가지 형태 각각에 대해 평가 실험을 수행하였다.

4.1 돌발적 파손

Table 1의 I 절삭조건으로 드릴링 작업 수행 중 3번째 구멍 가공 중 예기치 못한 파손이 발생하였다. Fig. 5는 공구 파손시 모터전류신호와 진동신호의 변화를 나타낸다.

A는 공회전, B는 치끝에 부분이 공작물로 파고 들어가고, 주절삭날에서 가공이 시작되는 부분, C는 주절삭날이 가공물을 파고 들어가는 부분, D는 드릴이 요구된 깊이만큼 가공한 상태에서 치끝에 의해만 가공이 일어나는 부분을 나타낸다.

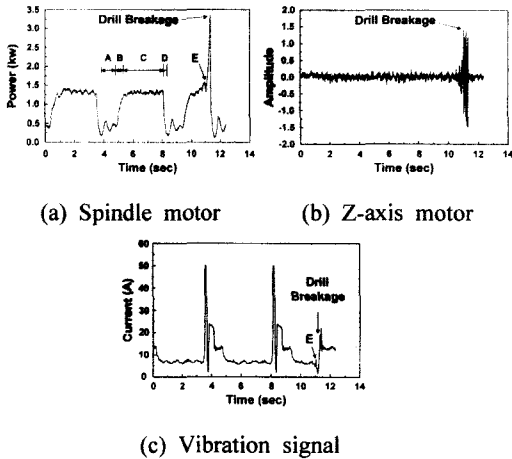


Fig. 5 Variation of motor current and vibration signal at drill breakage due to sudden abnormal state

Z축 모터전류에서의 급격한 증가는 모터의 정, 역회전으로 인해 생긴 것이다. 파손직전 E에서 주축, Z축 모터전류가 약간의 감소 및 증가함을 보이는데 이는 공구파손 직전 공구에 가해지는 과부하가 드릴 칩에서의 체결력 보다 크므로 인해 드릴 칩에서의 슬립이 발생하여 일시적으로 토크 및 추력이 감소함을 나타낸다. 절삭날 부분과 드릴 생크 부분에서의 비틀림으로 인해 결국 드릴파손이 일어나게 된다. 진동신호의 경우 드릴파손 직전에 과부하로 인해 큰 진폭으로 진동하기 시작하며 공구파손이 발생하면 뚝 떨어지는 형태를 띤다. 주축 모터전류와 진동신호에서의 드릴파손 검출 시점을 비교해본 결과 둘 다 11.3초 되는 시점에서 드릴파손이 발생한 것으로 나타났다. 그러므로 드릴파손 직전에 나타나는 주축모터전류의 급격한 증가와 Z축 모터전류 신호의 급격한 감소를 검출하므로 드릴파손에 대한 실시간 감시가 가능하다.

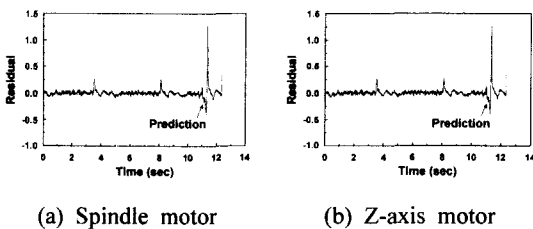


Fig. 6 Dynamic component of motor currents on an unexpected drill breakage

Fig. 6은 이동 평균법을 이용하여 구한 동적 모터전류신호를 나타낸다. 안전한 상태에서의 가공인 경우에는 평균이 영(zero) 근처인 작은 진폭의 변동 신호를 나타내나, 파손 직전이 되면 진폭이 크게 떨어진 후 크게 증가하는 형태를 띤다. 본 연구에서 제안한 감시 알고리즘을 이용하여 드릴파손을 감지한 결과 약 11초 되는 시점에서 드릴파손이 예측되었으며, 예측 후 약 0.4초 뒤에 드릴파손이 발생하였다.

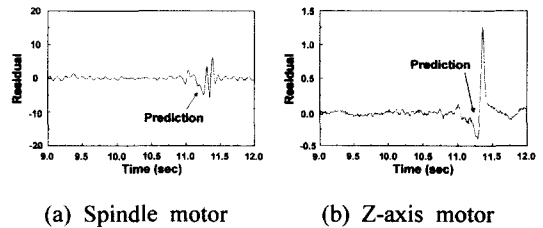
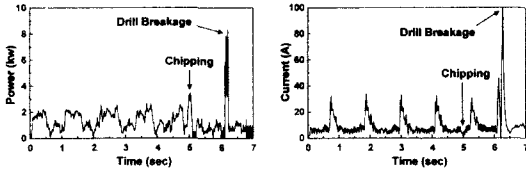


Fig. 7 Dynamic component of motor currents during 3rd hole drilling

Fig. 7은 파손이 발생한 3번째 구멍가공에 대해 얻은 동적 전류 신호를 확대한 그림이다. Fig. 7(a),(b)에서 공구파손 직전 과부하가 최대로 걸린 시점을 비교해본 결과 Z축 모터전류가 주축모터전류보다 약 17msec만큼 빨리 나타남을 보인다. 이는 공구파손 직전에 생기는 토크 및 추력의 증가가 구동계를 거쳐 모터에 절삭부하로 작용하는데 까지 걸리는 시간지연의 차로 Z축 모터전류가 주축모터전류보다 응답성이 좋음을 나타낸다. 주축모터전류의 응답성이 Z축 모터전류의 응답성보다 나쁘는데, 그 이유는 주축계의 관성이 Z축 이송계의 관성보다 크기 때문이다. 주어진 작업에서 주축 1회전하는데 33msec가 걸리므로 Z축 모터전류에서 드릴파손이 예측된 후 약 1/2바퀴 안에 주축모터전류에서도 드릴파손이 검출되기 때문에 큰 문제는 없으나, 작은 직경의 드릴(3mm~5mm)로 고속 가공할 경우, 주축 1회전하는데 걸리는 시간에 비해 시간지연이 상대적으로 크기 때문에 이 시간 지연의 차가 문제가 된다. 모터전류를 이용한 드릴 가공상태 감시의 경우 드릴의 직경이 작아지면 tare 전류 성분의 크기에 비해 절삭부하 전류의 크기가 상대적으로 작기 때문에 가공 상태와 비 가공 상태를 구분하기가 곤란해진다. 모터전류를 이용한 드릴 가공상태 감시 한계는 사용하는 공작기계의 구동계의

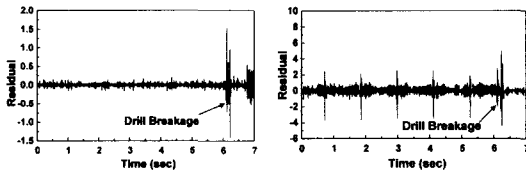
특성에 따라 달라지나 일반적으로 $\Phi 2\sim 3\text{mm}$ 정도가 한계인 것으로 알려져 있다.



(a) Spindle motor (b) Z-axis motor

Fig. 8 Variation of motor currents on an unexpected drill breakage(3mm drilling operation)

Fig. 8은 Table 1의 II절삭조건에서 수행한 3mm 드릴가공에서의 드릴 파손시 모터전류의 변화를 나타낸다. 다소 가혹한 절삭조건에서의 작업인 관계로 모터전류의 변동이 크며 작업상태가 좋지 않음을 간접적으로 알 수 있다. 그림에서 5번째 구멍 가공 중 나타나는 모터 전류의 큰 변화는 칩핑에 의한 것으로 추정되며, 칩핑 후 가공이 제대로 이루어지지 않은 채 6번째 구멍 가공 중 드릴파손이 발생하였다. Fig. 9는 MA 역필터를 이용하여 구한 동적 모터전류 신호이다.



(a) Spindle motor (b) Z-axis motor

Fig. 9 Dynamic component of motor currents on an unexpected drill breakage (3mm drilling operation)

4.2 드릴마멸 초과로 인한 파손

Table 1의 III절삭조건에서 작업을 수행한 결과 약 100번째 구멍가공 후 드릴마멸로 인해 공구수명이 다 된 것으로 판단되었으며, 계속적인 가공으로 인해 110번째 구멍가공에서 드릴이 파손되었다. Fig. 10은 파손시 과부하로 인해 파손된 드릴날이 공작물에 박힌 채 붙어 버린 사진을 나타낸다. 드릴 파손이 일어나면 이처럼 파손된 날이 용접되어 버리기 때문에 후처리가 거의 불가능하다.



Fig. 10 Photo of a broken drill tip merged into a hole



(a) fractured surface (b) sank with white slipped traces

Fig. 11 Photos of the broken drill

Fig. 11은 파손된 드릴의 사진이다. Fig. 11(b)의 드릴 생크 부분에 나있는 미끄럼 자국은 파손 직전 과부하로 인해 드릴이 드릴 척에서 미끄러질 때 생긴 흔적이다. Fig. 12는 드릴마멸 초과로 인해 파손이 일어났을 때의 모터전류 신호 및 AE신호의 변화를 나타낸다. 주축 및 Z축 모터전류 값의 정적 성분의 증가 및 작업진행에 따른 동적 성분의 변동이 새 드릴로 작업했을 때 얻은 주축 및 Z축 모터전류 신호와는 다른 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 주축모터전류와 AE신호의 RMS값에서의 드릴 파손 검출 시점을 비교해본 결과 같은 시점에서 드릴파손이 발생한 것으로 검출되었다. 이는 AE신호와 비교할 때 모터전류가 AE 신호만큼 드릴파손에 민감하게 반응한다는 것을 나타낸다. 일반적으로 공구 파손 시 발생하는 탄성에너지의 변화를 검출하는 AE 신호가 절삭력 변화로부터 공구파손을 검출하는 모터전류보다 공구 파손 검출에 대한 응답성 및 감도가 뛰어난 것으로 알려져 있으나, AE 신호의 경우 센서의 부착위치에 따라 응답성 및 민감도가 달라진다. Fig. 12의 결과는 주축대 하단부에 부착한 AE 센서로부터 얻은 결과로써 AE 센서를 공작물이나 공구에 부착하여 얻은 신호들보다는 응답성과 민감도에서 조금 차이가 있을 것으로 생각한다.

Fig. 13은 이때의 동적 모터전류신호를 나타낸다. 제안한 알고리즘에 의해 감시한 결과 약 10.9초 되는 지점에서 파손이 예측되었으며, 약 0.3초 후인 11.2초 되는 지점에서 파손이 발생하였다.

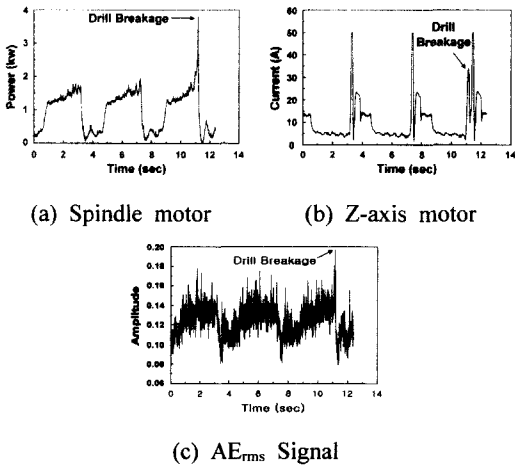


Fig. 12 Variation of motor currents and AErms signal on drill breakage due to excessive wear

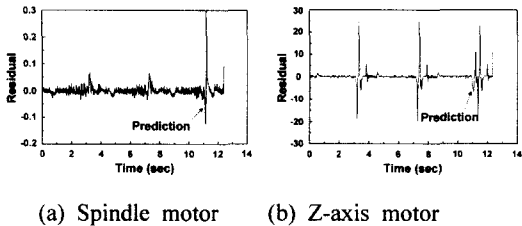


Fig. 13 Dynamic component of motor currents on drill breakage due to excessive wear

5. 결론

본 연구에서 이동평균 역필터를 이용하여 모터전류의 동적 성분을 구한 뒤 이를 이용하여 드릴 파손을 예측하는 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이동 평균법을 이용한 저주파 잡음 제거법을 이용하여 모터전류의 동적 성분을 검출하였다.
- (2) AE신호와 진동신호와의 비교 평가를 통해 모터전류 신호가 드릴파손에 대한 응답성이 뛰어난 것을 알 수 있으며, Z축 모터전류가 주축모터전류에 비해 드릴파손에 대한 응답성에 있어 더 빠르므로 소경 드릴의 실시간 파손 감시에는 Z축 모터전류가 더 좋은 신호임을 알 수 있다.
- (3) 모터전류의 동적 성분은 드릴 파손 직전에 급격

히 감소하는 특성을 지니고 있는데 이 특성을 이용하여 드릴 파손을 파손직전에 예측할 수 있었으며, 평가 실험으로부터 드릴파손을 0.4초 전에 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. H. K. Tonshoff, W. König, "Machining of Holes Developments in Drilling Technology," Annals of the CIRP, Vol. 43., No. 2, pp. 551-561, 1994.
2. W. König, K. Kutzner and U. Schehl, "Tool Monitoring of Small Drills with Acoustic Emission," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 32, No. 4, pp.487-493, 1992.
3. A. Thangraj and P. K. Wright, "Computer-assisted Prediction of Drill-failure Using In-process Measurements of Thrust Force," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, MAY, pp. 192-200, 1988.
4. T. Nagao, Y. Hatamura, and M. Mitsuishi, "In-Process Prediction and Prevention of the Breakage of Small Diameter Drills Based on Theoretical Analysis," Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp. 85-88, 1994.
5. E. Brinksmeier, "Prediction of Tool Fracture in Drilling," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 97-100, 1990.
6. Y. S. LIAO, "A Malfunction Monitoring Technique in Drilling Operations," Proceedings of the Twenty-Sixth International Machine Tool Design And Research Conference, pp. 339-345, 1986.
7. G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, "Tool Condition Monitoring(TCM)-The Status of Research and Industrial Application," Annals of the CIRP, Vol 44, No. 2, pp. 541-567, 1995.
8. J. L. Stein, C. H. Wang, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.112, pp. 239-248, 1990.
9. J. L.Stein, D. Colvin, G. Clever, C.H. Wang, "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108,

- DEC. pp. 108-288, 1986.
10. K. Matsushima, P. Bertok, T. Sata, "In-process Detection of Tool Breakage by Monitoring the Spindle Motor Current of a Machine Tool," ASME book Measurement and Control for Batch Manufacturing, pp. 14-19, 1982.
 11. 김화영, 안중환, "모터전류를 이용한 드릴가공에서의 절삭이상 상태 감시 시스템," 한국정밀공학회지, 제12권, 제5호, pp. 98-107, 1995.
 12. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, NOV., pp. 386-392, 1992.
 13. 김기대, 권원태, 주종남, "주축모터 전류를 통한 절삭력의 간접 측정 및 절삭력 추종제어," 한국정밀공학지, 제14권, 제10호, pp.15-27, 1997.
 14. I. N. Tansel, et al, "Monitoring Drill Conditions with Wavelet Based Encoding And Neural Networks," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 33, No. 4, pp. 559-575, 1993.
 15. I. N. Tansel, "Identification of the Pre-failure Phase in Microdrilling Operations with Multiple Sensors," Neural Networks in Manufacturing and Robotics, PED-Vol.57, pp. 23-36, 1992.
 16. 南 茂夫, 科學計測のための波形データ處理, CQ 出版社, pp. 86-90, 1986.