

모터전류를 이용한 드릴가공에서의 절삭이상상태 감시 시스템

김 화 영,* 안 중 환**

Monitoring System for Abnormal Cutting States in the Drilling Operation using Motor Current

H. Y. Kim,* J. H. Ahn**

ABSTRACT

The in-process detection of drill wear and breakage is one of the most important technical problems in unmaned machining system. In this paper, the monitoring system is developed to monitor abnormal drilling states such as drill breakage, drill wear and unstable cutting using motor current. Drill breakage is detected by level monitoring. Tool wear is classified by fuzzy pattern recognition. The key feature for classification of tool wear is the estimated flank wear which is calculated by the proposed flank wear model. The characteristic of the model is not sensitive to the variation of cutting conditions but is sensitive to drill wear state. Unstable cutting states due to the unsmooth chip disposal and the overload are monitored by the variance/mean ratio of spindle motor current. Variance/mean ratio also includes the information about the prediction of drill wear and drill breakage. The evaluation experiments have shown that the developed system works very well.

Key words : 드릴마멸(Drill Wear), 드릴파손(Drill Breakage), 절삭이상상태(Abnormal Cutting State), 모터전류(Motor Current), 퍼지패턴인식(Fuzzy Pattern Recognition), 예측 플랭크 마멸(Estimated Flank Wear), 분산/평균비(Variance/Mean Ratio)

1. 서 론

완전한 공장자동화를 이룩하기 위해서는 숙련된 작업자를 대신하여 작업상태를 감시진단하는 신뢰성 있는 감시시스템의 개발이 필요하다. 특히 공구파손, 공구마

멸과 같은 공구손상은 공작물 및 기계에 치명적 손상을 초래하고, 기계정지시간을 증가시키므로 공구파손, 공구마멸에 대한 실시간 감시는 가공 프로세스의 자동화와 신뢰성을 증가시키는데 가장 중요한 역할을 수행한다.⁽¹⁾ 드릴가공은 가장 중요하고 기본적인 가공공정중

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 정밀기계공학과, 정밀정형 및 금형가공 연구 센터

하나로, 전체 절삭가공의 약 25%를 차지한다. 드릴 이상상태에 대한 실시간 감시는 공구동력계,^(2,3) AE센서,^(4,5) 가속도계,⁽⁶⁾ 전류 센서^(7,8) 등을 이용하여 드릴의 기하학적 형상변화에 의해 발생하는 절삭현상의 변화를 간접적으로 검출하는 방법이 가장 일반적이다. 이중 절삭저항을 직접 측정하여 마멸량을 추정하는 공구동력계 방법이 가장 성능이 우수하지만, 공구동력계는 비싸며 설치할 때 작업에 지장을 초래하므로 산업현장에 적용하기에 곤란하다는 단점을 가지고 있다. 반면 절삭저항의 간접적 측정방법으로 모터전류를 이용하는 방법은 절삭저항의 변화를 서보계를 거쳐서 검출하게 되므로 공구동력계로 얻은 절삭력과 비교해서 S/N비와 대역폭이 떨어지는 단점을 가지고 있으나, 작업에 지장을 주지 않고, 저가이며 공작기계 구조물의 변경이 필요 없으므로 공구동력계를 대신하여 산업현장에 널리 이용되고 있다.⁽⁹⁾ 드릴마멸은 드릴과 가공될 공작물사이의 높은 온도와 기계적 마찰로 인해 드릴 날에 생기는 점진적 변화로 드릴마멸이 발생하는 위치에 따라 플랭크 마멸, 크레이터 마멸, 랜드 마멸, 치줄에지 마멸로 나누어지며, 일반적으로 플랭크 마멸이 드릴의 공구수명을 나타내는 기준으로 널리 사용된다. 드릴 파손은 점진적으로 일어나는 마멸과 달리 돌발적으로 발생하므로 예측이 어렵다. 특히 가공중 드릴 파손이 발생하게 되면 부러진 드릴이 공작물에 박힌 채 응집되어 버리기 때문에 드릴파손 감시가 더욱 중요하다. 드릴파손의 원인으로는 부적절한 절삭조건, 불 균일한 공작물 경도, 칩배출 불량, 불규칙한 절삭류 공급에 따른 열적 피로 등을 들 수 있다. 최근에는 감시의 신뢰성 향상을 위해 신경 회로망 이론 및 퍼지 이론을 이용한 패턴인식기법을 드릴상태 감시에 적용하는 연구가 널리 행해지고 있다.^(10,11,12)

본연구에서는 모터전류를 이용하여 드릴가공에서의 절삭상태를 감시하는 감시 시스템을 개발하고자 한다. 감시신호로는 주축 AC 서보 모터전류, Z축 AC 서보 모터전류를 사용하며, 공구파손, 공구마멸, 절삭상태를 대상으로 하여 감시를 수행하였다. 공구파손은 레벨감시를 이용하여 감시하였으며, 공구마멸 감시는 C-means 알고리즘을 이용한 퍼지패턴인식 기법으로 마멸상태를 분류하였다. 퍼지패턴인식을 위한 특징벡터는 본연구에서 개발한 드릴마멸 추정모델로 부터 얻어진 예측 마멸값을 사용하였다. 절삭상태 감시는 주축모터전류에 대한 진폭영역해석에서 구한 통계값을 이용하여

감시하였다.

2. 모터전류를 기초로한 드릴마멸 실시간 추정 모델

일반적으로 플랭크마멸이 진행되게 되면 공구와 가공면사이의 기계적 마찰과 온도상승으로 인해 절삭부하가 커지게 된다. 그러므로 다른 절삭변수들(공작물 재질, 절삭조건)이 일정하다고 가정하면 절삭부하와 플랭크 마멸사이에는 선형적인 관계가 성립되어 절삭부하로부터 플랭크 마멸을 예측할 수 있다. 서보계에서 모터의 출력 토크는 모터에 가해지는 전류에 비례한다. 정상상태에서 모터에 부하가 걸리게 되면 속도와 역기전력이 떨어지게 되며 이를 보상하기 위해 더 많은 전류가 모터에 가해지게 된다. 따라서 정상상태에서 모터 전류와 절삭부하사이에는 선형관계가 성립하면 모터전류로부터 절삭부하를 검출할 수 있다. 그러므로 플랭크 마멸과 절삭부하사이의 모델식과 절삭부하와 모터전류사이의 모델식을 구하게 되면 이를 이용하여 현재 공구마멸상태를 추정할 수 있다.

2.1 토크/추력을 이용한 드릴마멸의 추정^(13,14)

드릴에서의 절삭은 주절삭날과 치줄날에서 일어나며 두가지 운동- 이송, 회전 -에 의해 각 절삭날상에서의 운동방향이 각각 달라져서 해석이 복잡하게 된다. 절삭날의 바깥쪽에서는 이송속도에 비해 회전속도가 우세하나, 드릴센터 가까이 갈수록 점점 작아져서 드릴센터에서는 회전속도가 영이 된다. 치줄날은 이송속도가 회전속도의 20%가 되는 점을 경계로 보조 절삭날 영역과 압입 영역으로 나누어진다. 이러한 이유로 드릴은 Fig. 1처럼 주절삭날 영역, 보조 절삭날 영역, 압입 영역의 3부분으로 나누어서 각각 모델링 된다. 주절삭날 영역과 보조절삭날 영역은 2차원 절삭모델로 모델링할 수 있으며, 압입영역은 썩기가 이송만큼 파고 들어가는 압입모델로 모델링할 수 있다. Fig. 2는 트위스트 드릴 상에서의 절삭력 분포를 나타내며, 드릴에 가해지는 전체 토크 및 추력은 각각의 모델로 부터 구한 토크 및 추력을 합쳐서 구한다.

전체 토크:

$$T = T_{lip} + T_{ouner} = F_t \cdot \frac{2}{3} d + F_{tc} \cdot c \\ = (F_c + \tau_c Wb) \cdot \frac{2}{3} d + 0.18(F_c' \cos \gamma + F_t' \sin \gamma) \cdot d$$

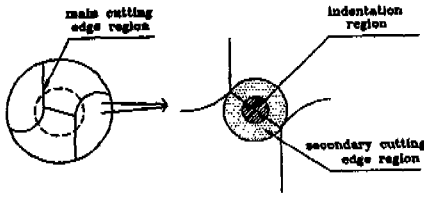


Fig. 1 Shape of twist drill point

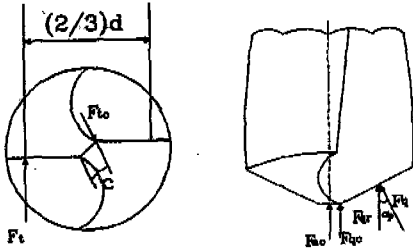


Fig. 2 Cutting force distribution on a twist drill

$$= f(\text{drill geometry, cutting condition, material hardness, flank wear}) \quad (1)$$

전체 추력:

$$\begin{aligned} F_z &= F_z)_{lip} + F_z)_{outer} + F_z)_{inner} \\ &= 2F_{qr} + 2F_{qc} + F_{ac} \\ &= 2F_c \tan(\beta - \alpha_p) \cos \alpha_p + 2(F'_c \sin \gamma + F'_c \cos \gamma) \\ &\quad + 12\tau_c f^2 \tan \alpha_w \\ &= f(\text{drill geometry, cutting condition, material hardness, flank wear}) \quad (2) \end{aligned}$$

따라서 절삭조건, 드릴형상, 공작물의 경도가 미리 주어지는 경우 토크와 추력은 단지 플랭크 마멸만의 함수가 되므로 플랭크 마멸기기를 토크와 추력의 측정에 의해 간접적으로 추정할 수 있다.

2.2 주축(Z축)모터전류를 이용한 토크(추력) 검출⁽¹⁶⁾

머시닝센터의 주축에는 IM형 AC서보모터가 사용되고, 이송축에는 SM형 AC서보모터가 사용된다. AC서보모터는 회전자와 동기해서 회전하는 dq 좌표변환에 의해 3상 전류 신호를 계자전류성분과 토크전류성분으로 나눈 후 벡터제어를 통해 제어한다. 모터 내부에서는 3상 교류가 흐르고 있지만, 교류와 동기해서 회전하는 dq축에서 생각하면 상대속도가 영이 되어 교류를 직류로 간주할 수 있으므로 모델링이 간단해진다. SM형

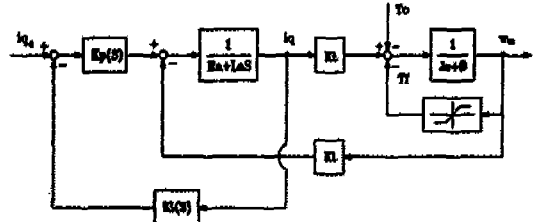


Fig. 3 Block diagram of AC servo motor velocity control system

AC 서보모터의 경우는 계자전류성분이 영이 되도록 제어하여 토크전류성분에 비례하는 토크를 발생시키며, IM형 AC 서보모터의 경우는 코일에 걸어준 1차 전압에 의해 유기된 2차 전류를 계자전류성분과 토크전류성분으로 분해한 뒤 계자전류성분이 일정하게 되도록 제어하여 토크전류성분에 비례한 토크를 발생시킨다. Fig. 3은 AC서보모터의 속도제어계의 블럭선도를 나타낸다. 모터 구동토크는 모터에 가해지는 토크전류성분에 비례하며, 모터축 관성량을 가속시키고 구동계 마찰토크와 모터축에 가해지는 절삭토크를 극복하는데 사용된다. 따라서 모터 구동토크는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_m = K_t \cdot I_q = J_c \frac{dw_m}{dt} + (T_c + T_f + T_b) \quad (3)$$

여기서, T_m : 구동토크(Nm), T_c : 절삭토크(Nm)
 T_f : 마찰토크(Nm), T_b : 점성감쇠토크(Nm)
 w_m : 모터축의 회전각속도(rad/sec)
 J_c : 동가 관성량(Nmsec²/rad)
 K_t : 토크상수(Nm/A)
 I_q : 토크전류 성분(A)

정상상태에서, 절삭토크의 변화로 인한 모터전류의 변화(δI_q)를 구하면 (4)식처럼 구해진다.

$$\delta I_q = \frac{1}{K_t} (\delta T_c + \delta T_f + \delta T_b) \quad (4)$$

일반적으로, 정상상태에서 절삭토크 변화가 작으면 T_f 와 T_b 가 절삭토크 변화로 인해 받는 영향이 무시할 정도로 작아져서 식(4)는 (5)식처럼 단순화 된다.

$$\delta I_q = \frac{1}{K_t} \delta T_c \quad (5)$$

$$I_q(t) = I_{q0} + \frac{1}{K_t} T_c$$

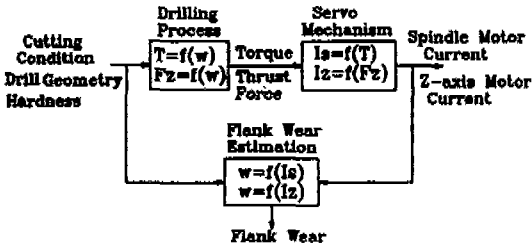


Fig. 4 Construction of flank wear estimation model

여기서, I_{s0} 는 무부하 상태에서 모터가 일정속도로 회전하는데 필요로 하는 정상상태 전류(tare전류)를 나타낸다.

즉 절삭토크는 정상상태에서의 모터전류에 비례한다는 것을 알 수 있다. 따라서 주축모터전류의 변화를 검출함으로써 공구마멸로 인한 절삭토크의 증가를 간접적으로 검출할 수 있다.

2.3 모터전류를 기초로 한 플랭크 마멸 추정모델

Fig. 4는 모터전류를 기초로 한 플랭크 마멸 추정모델을 나타낸다. 공작물의 경도, 드릴의 기하학적 형상, 절삭조건과 작업 중 측정된 모터전류값을 이용하여 실시간에 플랭크 마멸크기를 추정한다.

3. 감시 알고리즘

본연구에서는 감시 알고리즘을 계층적 구조로 구성하였으며, 절삭공정에 가까운 부 시스템(Sub-system)일 수록 감시주기를 짧게함으로써 공구상태의 변화에 대해서는 민감하게 대처하여 파급 영향을 줄일 수 있도록 하였다. Fig. 5는 감시 알고리즘에 대한 흐름도이다.

3.1 공구파손 감시

공구파손의 경우는 급작스럽게 일어나는 돌발적인 이상으로 예측이 어렵기 때문에 실시간 감시가 굉장히 중요하다. 일반적으로 공구파손의 경우 파손 직전 급격히 부하가 증가하므로 모터전류의 변화가 크게 나타나게 된다. 따라서 공구파손의 경우는 레벨감시를 통해 신속하게 감시할 수가 있다. 공구파손이 발견되면 NC장치로 급정지 명령을 내리며 이상이 없으면 현재 수행중인 블럭의 작업이 끝난지를 판단한 후 끝났으면 공구마멸 감시를 행한다. 레벨감시를 위한 경계치는 학습 실험이나 경험 데이터로부터 구한다. 본연구에서는 주축

모터전류의 경우 정상값의 200%, Z축 모터전류의 경우 정상값의 20%를 경계값으로 하였다.

3.2 공구마멸감시

공구마멸은 공구파손과 달리 점진적으로 일어나는 프로세스로 공구파손에 비해 예측이 쉬우며, 순간적인 모터전류의 상승보다 전반적인 추세변화가 더 중요한 정보를 가지게 된다. 드릴 작업의 경우 NC프로그램의 한 블럭이 끝날 때까지 레벨감시를 통해 공구파손을 감시하고 이상이 없으면 현 블럭 작업에 대한 전류 데이터를 이용하여 평균값을 구한뒤 전체적인 경향을 얻기위해 지수 평활화법을 이용하여 평활화한다. 평활화된 모터전류 평균값을 플랭크 마멸 예측 모델에 보내어 플랭크 마멸크기에 대한 예측값을 구한다. 모델에서 구한 플랭크 마멸에 대한 예측값은 퍼지 패턴 인식부로 보내어 공구마멸 상태를 분류하는데 이용된다. 퍼지패턴인식은 Bezdek이 제안한 퍼지 C-means 알고리즘을 사용하였다.^(17,18) 공구마멸 상태를 초기(initial), 약간(small),

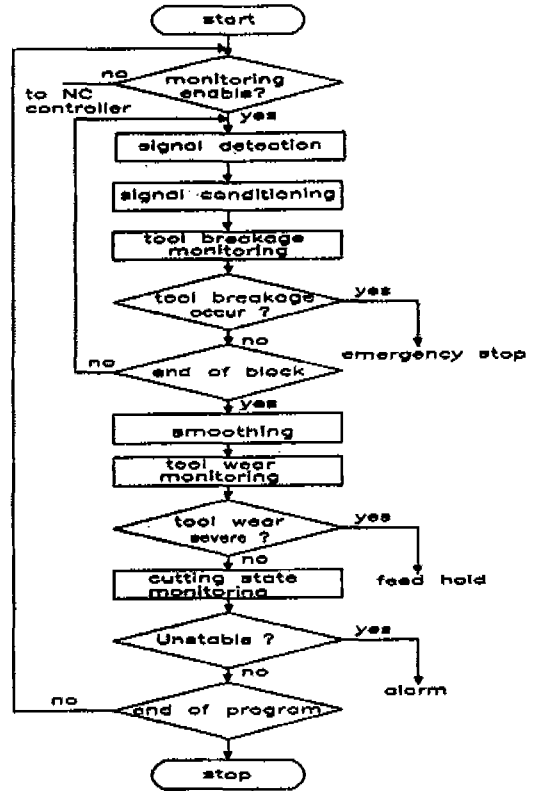


Fig. 5 Flow chart of monitoring algorithm

정상(normal), 심각(severe) 4단계로 인식하였으며 심각단계의 값이 0.9이상이 되면 공구교환시점으로 진단하여, 이송정지 명령을 NC장치에 보낸다. 공구마멸이 심각하지 않으면 절삭상태 감시를 행한다.

3.3 절삭상태 감시

드릴의 경우 원할치 못한 칩 배출과 과부하는 공구파손의 원인이 되므로 작업중 칩배출 불량, 과부하를 감시하는 것이 중요하다. 이러한 칩배출 불량 및 과부하의 원인으로는 부적절한 절삭조건, 공구마멸등을 들 수 있다. 칩배출이 원할하지 못하거나 과부하가 걸리게 되면 이로인해 토크성분의 변동이 커지므로, 주축모터전류의 동적성분으로부터 칩배출 불량 및 과부하에 대한 정보를 얻을 수 있다. 본연구에서는 주축모터전류의 분산을 이용하여 과부하 및 칩배출 상태 감시를 수행하였다. 칩배출 불량이나 과부하가 생기게 되면 변동 절삭부하가 발생하게 되어 주축모터전류의 동적성분에 대한 분산값이 커지게 된다. 따라서 분산값을 이용한 레벨감시를 통해 절삭상태를 감시할 수 있다. 절삭상태 감시를 위한 경계치는 학습실험이나 경험 데이터를 이용하여 얻을 수 있으며 본연구에서는 학습실험을 통해 0.8를 경계치로 취하였다. 공구마멸감시 뒤 이상이 없으면 현블록 작업에 대한 전류 데이터로부터 분산을 구하여 이를 평균으로 나눈 뒤, 분산/평균비를 이용하여 절삭상태 감시를 수행한다. 분산/평균비의 값이 0.8를 넘으면 절삭상태가 불안정하다고 판단하여 경보를 발생시켜 작업자에게 이를 알려준다. 절삭상태가 양호하면 작업이 끝나는 지를 판단한 후 작업이 끝나지 않았으면 다른 감시 명령을 기다리게 한다.

4. 실험장치 및 방법

Fig. 6은 실험장치도이다. 머시닝 센터는 수직형 AV-30(대우 중공업제)이고, 데이터 레코더는 비디오 카세트 데이터 레코더(LACAL V-store)이다. 모터전류는 NC장치에 내장된 홀센서를 이용하여 검출하였으며 평가작업에 사용한 공작물의 재질은 S45C(HB 170-220)이다. 드릴은 직경이 6mm인 표준 트위스트 드릴이며, 드릴의 재질은 고속도강이다. 머시닝 센터의 주축 AC 서보모터의 토크상수는 10 kgf cm/A이고, Z축 AC 서보모터의 경우는 15.7 kgf cm/A이다. Table 1은 평가실험에 사용한 절삭조건을 나타낸다.

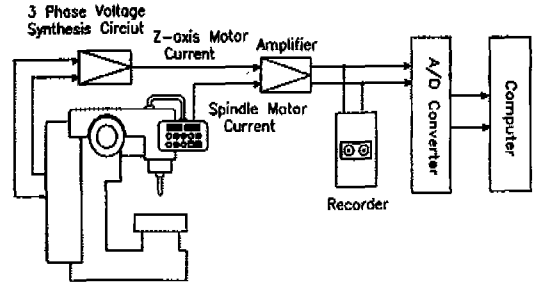


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Cutting conditions for experiments

	Cutting speed (rpm)	Feedrate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Tool life (holes)	
Training	1900	0.15	12	330	
Test	Test 1	1900	0.15	12	475
	Test 2	1800	0.12	12	665
	Test 3	1900	0.2	12	390

4.1 모터전류의 신호처리

주축모터전류는 내장된 홀센서로부터 검출된 3상 전류에 대한 합성전류가 NC 장치내 로드미터 단자로 나와 있으므로 로드미터 단자에서 검출하였다. 검출된 모터전류에 포함되어 있는 캐리어(carrier) 주파수로 인해 생긴 고주파의 잡음신호를 제거하기 위해 50 Hz의 저대역 통과 필터(low pass filter)에 통과시켜 잡음을 제거하였다.

Z축 모터전류는 내장된 홀센서로부터 검출된 2상(Is, Ir)전류에 고주파 잡음신호를 제거하기 위해 50 Hz의 저대역 통과 필터를 거친 후 자체 제작한 3상 전류합성회로를 통과시켜 합성전류를 검출하였다. 절삭 토크 성분에 해당하는 모터전류를 얻기 위해 주축모터전류의 경우 tare전류성분을 빼주었으며, Z축모터전류에서는 tare전류성분에서 현재의 모터전류를 뺀 뒤 절삭 토크에 해당하는 전류를 구하였다.

드릴마멸은 예기치 못한 드릴파손과 달리 점진적으로 진행하므로 가공구멍단위로 드릴마멸 크기를 검출하였다. 모터전류는 500 Hz의 샘플링 주기로 12비트 A/D 변환한 뒤, 드릴구멍단위로 평균전류값을 구한 다음 전체적인 변화의 경향을 얻기 위해 (6)식과 같이 지수평활화법을 이용하여 평활화하였다.

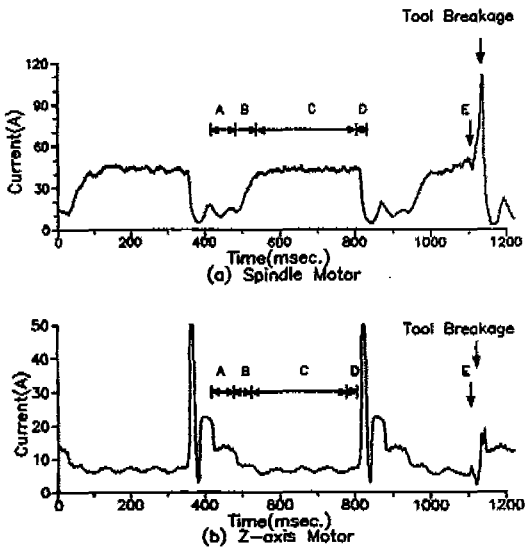


Fig. 7 Level variation of motor current at tool breakage (spindle speed 1800rpm, feedrate 0.12mm/rev)

$$y_i = \rho y_{i-1} + (1 - \rho)x_i \quad (6)$$

여기서 x_i 는 모터전류의 평균값, y_i 는 평활화된 모터전류 평균값이고, ρ 는 가중치 인데, 전체적인 변화형태를 약간 강조하기 위해 ρ 를 0.65로 정하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 공구파손 감시

Fig. 7은 공구파손시 모터전류의 레벨값 변화를 나타낸다. A는 공회전, B는 치출에지부분이 공작물로 파고 들어가고, 주절삭날에서 가공이 시작되는 부분, C는 주절삭날 전부에서 가공이 일어나는 부분, D는 드릴이 요구된 깊이만큼 가공한 상태에서 치출에지에 의해서만 가공이 일어나는 부분을 나타낸다. C에서는 칩의 단면적이 변하지않고 일정하게 유지되므로 이상적인 경우에는 모터전류가 일정하게 유지되어야 한다. C부분에서 나타나는 모터전류의 진동성분은 칩 배출이 원활하지 않기 때문에 생긴 것으로 거의 일정하게 반복되어 나타난다. Z축모터전류에서의 급격한 증가는 모터의 정,역회전으로 인해 생긴 것이다. 공회전시 주축 및 Z축모터전류는 각각 11A, 12A이며, 가공중 주축 및 Z축모터전류는 각각 40A, 8A이다. 처음에는 정상적인 작업이

이루어지나 3번째 구멍 가공시 공구파손이 일어났다. 이때 주축 모터전류는 110A까지 급격히 증가한후 정상값보다 낮게 쪼 떨어지고, Z축모터전류는 2.5A까지 크게 감소한후 정상값보다 크게 증가한다. 이는 공구파손 직전에는 주축 및 Z축모터에 각각 큰 토크와 추력(thrust force)이 가해지나, 공구파손이 생기면 주축 및 Z축모터에 토크와 추력이 걸리지 않기 때문이다. Z축모터 전류의 경우 추력 방향의 부하가 커질수록 모터에 흐르는 전류의 크기는 그에 비례하여 작아진다. 이는 Z축모터의 구조적인 특성상 추력이 자중의 반대 방향으로 작용하므로 추력이 클수록 실제 모터에 걸리는 부하는 감소하기 때문이다. 파손직전 E에서 주축, Z축모터전류가 약간의 감소 및 증가함을 보인다. 이는 공구파손직전 공구에 가해지는 과부하가 드릴척에서의 체결력(holding force)보다 큼으로 인해 드릴척의 잠아름이 약간 느슨해져서 생긴 것으로 추정된다. Fig. 7의 경우 Z축모터전류는 주축모터전류보다 약 17msec만큼 빨리 공구파손이 검출된다. 이는 공구파손에 의해 생긴 토크 및 추력의 증가가 구동계를 거쳐 모터에 질산부하로 작용하는데 까지 걸리는 시간지연의 차로 Z축모터전류가 주축모터전류보다 응답성이 좋다는 것을 알 수 있다. 주축모터전류의 응답성이 Z축모터전류의 응답성보다 나쁜데, 이는 주축계의 관성이 Z축이송계의 관성보다 크기 때문이다. Fig. 7 작업에서 주축 1회전하는데 33msec가 걸리므로 Z축 모터전류에서 공구파손이 검출된 후 약 1/2바퀴 안에 주축모터전류에서도 공구파손이 검출되기 때문에 큰 문제는 없으나, 작은 직경의 드릴(3mm이하)로 고속 가공할 경우에는 이 시간지연의 차가 문제가 된다. 따라서 미소경 드릴 파손의 실시간 검출에는 주축모터전류보다 Z축모터전류가 더 좋은 신호임을 알 수 있다.

5.2 공구 마멸 감시

평가실험을 위해 Table 1에서의 절삭조건으로 공구가 심각하게 마멸될 때까지 계속 가공하였다. 공구마멸이 심각하여 더 이상 가공할 수 없다는 판단은 운전중 들리는 가공음과 로드미터의 레벨을 가지고 판단하였으며 각각 475, 665, 390개 가공후 공구수명이 다 된 것으로 판단하였다. Fig. 8은 작업진행에 따른 주축(Z축)모터전류의 평균값 변화를 나타낸다. 공구 마멸이 진행됨에 따라 모터 전류의 평균값이 초기엔 증가가 빠르나 정상상태에 도달하면 작업의 진행에 따라 완만히

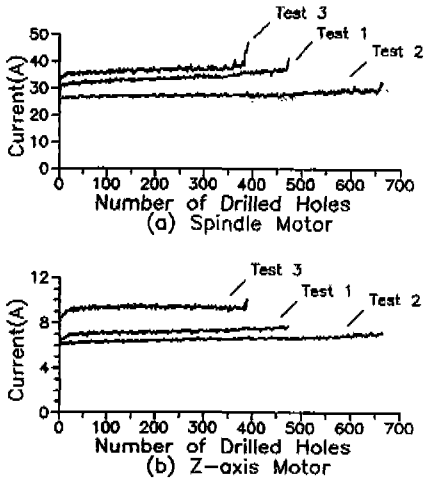


Fig. 8 Variation of mean current with drilling time

증가하고 공구 수명이 다 되면 다시 급격히 증가함을 보여준다. 이는 일반적인 공구마멸 곡선의 경향과 일치하는 것으로 모터전류의 평균값이 공구마멸과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며, 또한 절삭조건변화에 대해서도 민감함을 알 수 있다. 공구마멸 감시를 위한 특징

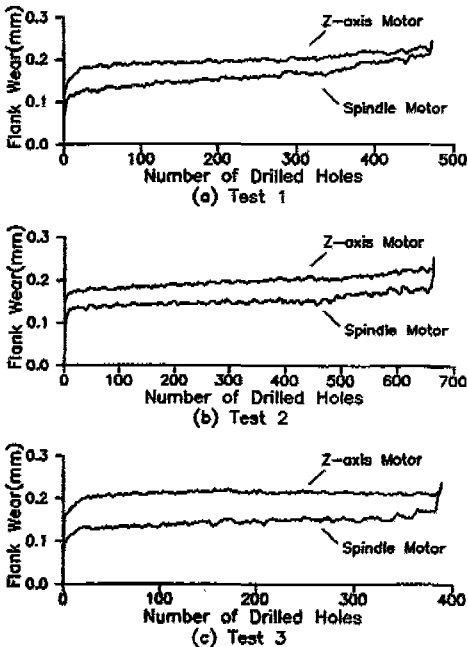


Fig. 9 Online estimation of flank wear with drilling time

Table 2 Cluster center

	Spindle motor current	Z-axis motor current
initial	0.439	0.608
small	0.627	0.804
normal	0.825	0.917
severe	0.956	0.978

은 공구마멸상태에는 민감하나 절삭조건 변화에 대해서는 둔감한 것이 좋다. Fig. 9는 드릴마멸 예측모델을 통해 얻은 작업진행에 따른 플랭크마멸 예측값을 나타낸다. 플랭크 마멸 예측값의 변화형태가 공구마멸 곡선과 일치하며, 약 VB 0.24mm가 공구교환시점이 됨을 알 수 있다. 플랭크 마멸 예측값은 공구마멸에 민감하나, 절삭조건 변화에는 둔감하다. 따라서 플랭크 마멸 예측값이 공구마멸 감시를 위한 특징으로 적절함을 알 수 있다. 실시간 마멸 상태 감시를 위해 학습실험에서 얻은 데이터를 이용하여 퍼지 C-means 알고리즘에 의해 클러스터 센터를 구한 뒤, 각각의 클러스터 센터를 이용하여 평가 실험에 대해 공구마멸 상태를 감시하였다. Table 2는 클러스터 센터를 나타낸다. Fig. 10은 학습조건과 같은 절삭조건 작업에 대한 공구마멸상태를 실시간 감시한 결과이다. 처음에는 초기 클러스터의 퍼지 등급이 크나 작업이 진행될수록 심각 클러스터의 퍼지 등급이 커짐을 알 수 있으며, 472개 가공후 공구교환시점으로 인식되었다. Fig. 11, Fig. 12는 학습조건과 다른 절삭조건 작업에 대해 공구 마멸상태를 실시간 감시한 결과로 각각 662, 388개 가공후 공구교환시점으로 진단되었다. 따라서 학습조건과 다른 절삭조건 작업에 대해서도 공구마멸상태를 비교적 잘 분류할 수 있음을 알 수 있다. 또한 제안한 퍼지패턴인식방법이 크리스프 패턴인식방법보다 드릴마멸 상태에 대한 더 적절하고 실질적인 정보를 포함한다. 예를들어 Fig. 10의 350, 460번째 가공시 멤버십 함수는 각각 $u_{350} = (0.01, 0.41, 0.56, 0.02)$, $u_{460} = (0.0, 0.01, 0.55, 0.44)$ 으로, u_{350} 는 마멸상태가 small과 normal사이에 있고, u_{460} 는 normal과 severe사이에 있음을 보여준다. 이 경우 u_{460} 가 u_{350} 보다 공구마멸상태가 더 심각함을 알 수 있다. 그러나 크리스프 패턴인식의 경우 둘다 normal상태로 인식되게 되므로 두 상태의 차이점을 구별하지 못한다. 크리스프 패턴인식은 마멸상태를 어느

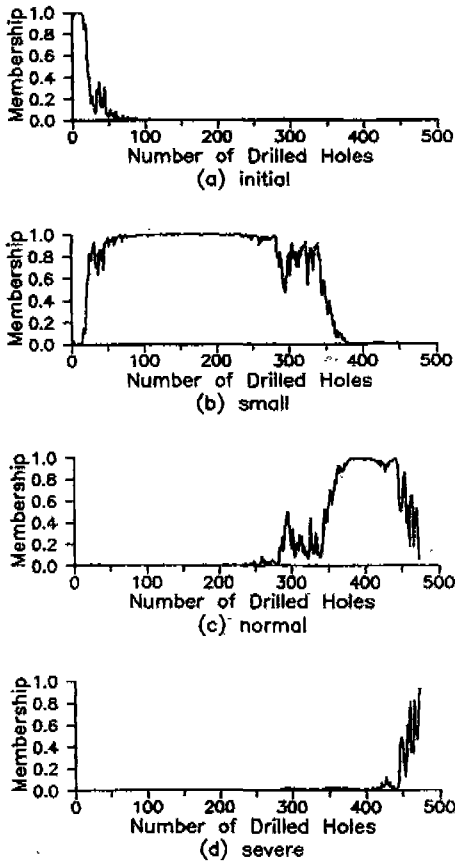


Fig. 10 Results of fuzzy recognition for test 1

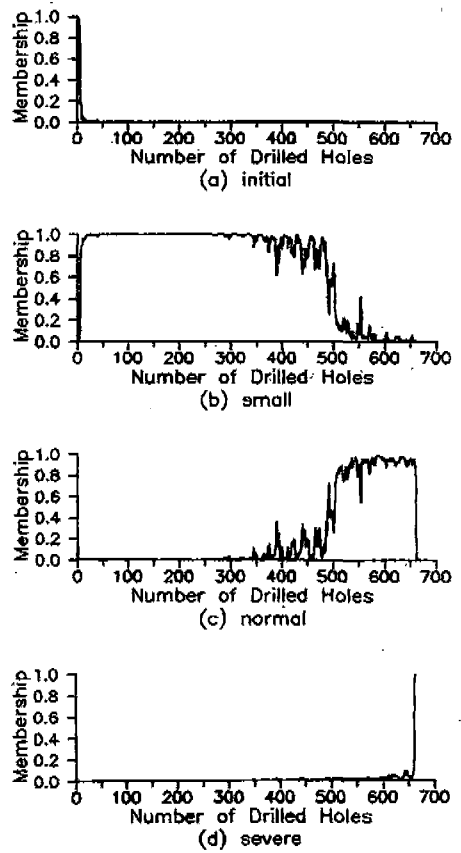


Fig. 11 Results of fuzzy recognition for test 2

한 클러스터에 속한 것으로 분류하는데 반해 퍼지패턴 인식의 경우는 마멸 상태를 각 클러스터의 멤버십 값으로 표현하므로, 애매한 마멸상태를 분류할 수 있는 장점이 있다.

5.3 절삭상태 감시

Fig. 13은 평가실험에 대한 절삭상태 감시결과이다. Test 1의 경우 분산/평균비가 0.8이하로 비교적 안정된 상태에서 작업이 진행되나 약410개 가공후부터 칩배출이 약간씩 나빠짐을 알 수 있으며, 공구마멸이 진행됨에 따라 분산/평균비가 0.8을 넘는 정도가 빈번해진다. 이는 공구마멸이 진행됨에 따라 칩 배출이 어려워짐으로 인해 생긴 것으로 추정된다. Test 2의 경우 분산/평균비가 0.6이하로 아주 안정된 상태에서 작업이 진행됨을 알 수 있으며, 양호한 절삭조건에서 가공이 이루어지고 있음을 나타낸다. 이 경우 약595개 이후부

터 분산/평균비가 0.8을 넘는 횟수가 빈번해져서 공구마멸로 인해 칩배출이 어려워졌음을 나타낸다. 따라서 분산/평균비는 전반적인 절삭상태에 대한 정보 뿐 아니라 공구마멸에 대한 정보도 포함하고 있음을 알 수 있다. Test 3에서는 분산/평균비가 처음부터 0.8을 넘는 경우가 빈번하게 나타난다. 이는 이송이 너무 크므로 인해 처음부터 공구에 과부하가 걸리고 있음을 나타내며, 약 290개 이후부터는 과부하로 인한 공구파손의 위험이 큼을 나타낸다. Test3의 경우 평균값에서는 공구파손의 위험에 대한 어떠한 예측(prediction)를 검출하기 어려우나, 분산/평균비에서는 공구파손 예측에 대한 정보를 알려준다. 따라서 분산/평균비를 이용하면 공구파손 예측도 가능함을 알 수 있다.

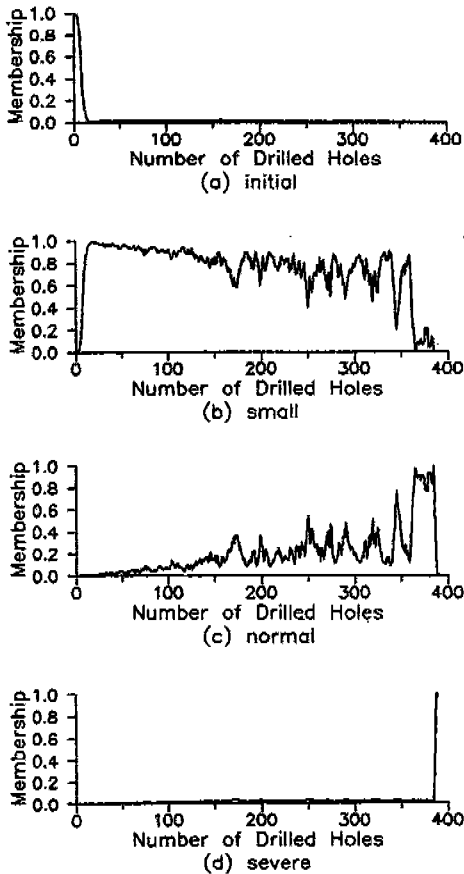


Fig. 12 Results of fuzzy recognition for test 3

6. 결 론

본연구에서는 모터전류를 이용하여 드릴가공시 절삭 이상상태를 감시하는 감시 시스템을 개발하였다. 감시 신호로는 주축(Z축) AC 서보모터전류를 이용하였으며, 플랭크 마멸 예측값, 평균, 분산등을 이용하여 공구상태를 포함한 절삭상태를 감시하였다. 본연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 모터전류의 레벨을 감시함으로써 공구파손을 실시간에 검출 할 수 있었다.
- (2) 플랭크 마멸 예측 모델을 통해 얻은 플랭크 마멸 예측값이 공구마멸 상태에는 민감하나 절삭조건 변화에 대해서는 둔감한 성질을 가지므로 공구마멸감시에 적절한 특징임을 알 수 있다.
- (3) 퍼지패턴인식 기법을 이용하여 공구마멸 상태를

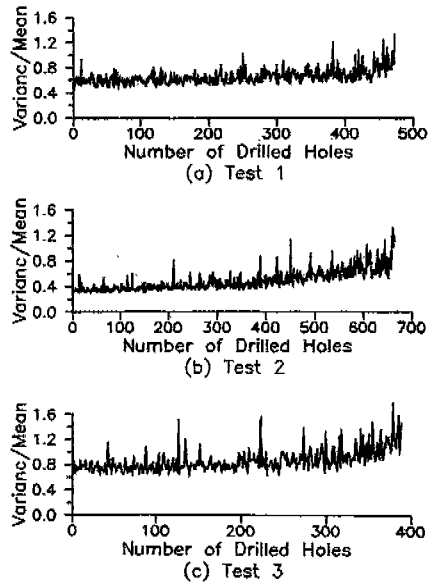


Fig. 13 Monitoring results of cutting states

신뢰성 있게 분류하였다.

(4) 주축모터전류의 분산/평균비를 이용하여 절삭상태를 감시할 수 있었다. 또 분산/평균비에는 공구마멸, 공구파손에 대한 예측 정보도 가지고 있음을 알았다.

참고문헌

1. H. K. Tonshoff, "Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes", Annals of the CIRP, Vol.37, No.2, pp.611-622, 1988.
2. 堅村辛辰, "ドリル損耗検出に関する研究(第1報)-監視システムの開発-", 日本精密工學會誌, 50卷, 6號, pp.25-29, 1984.
3. A. Thangaraj, P. K. Wright, "Computer-assisted Prediction of Drill-failure Using In-process measurements of Thrust Force", ASME, J. of Eng. for Industry, Vol.110, MAY, pp.192-200, 1988.
4. 小島浩二, 稻崎一郎, "アコースティックエミッションを利用したドリル折損の豫知", 日本機械學會論文(C編), 51卷, 467號, pp.1838-1843, 1984.
5. M.Takatsuto, N. Takada, "Judgement of

- Tool Life in Drilling Using Acoustic Emission", *Int. Journal JSME Series C*, Vol.37, No.1, pp.224-229, 1994.
6. R. W. Barker, G. Klutke, M. J. Hinich, "Monitoring Rotating Tool Wear Using Higher-Order Spectral Features", *ASME J. of Eng. for Industry*, Vol.115, FEB., pp.23-29, 1993.
 7. 안중환, 김화영, "공작기계 지능화를 위한 다중 감시 시스템의 개발-드릴가공에의 적용-", *한국정밀공학회지*, 제10권, 제4호, pp.142-151, 1993.
 8. Y. S. Liao, "A Malfunction Monitoring Technique in Drilling Operations", *Proceedings of the 26 Int'l Machine Tool Design and Research Conference*, pp.339-345, 1986.
 9. M. Kashimoto, C. Sakamoto, "Development of Tool Breakage Detection System", *Proceedings of the CIRP Seminars Manufacturing Systems*, Vol.12, No.3, pp.227-237, 1982.
 10. P. G. Li, S. M. Wu, "Monitoring Drilling Wear States by a Fuzzy Pattern Recognition Technique", *ASME J. of Eng. for Industry*, Vol.110, AUG., pp.297-300, 1988.
 11. E. Govekar, I. Grabec, "Self-organizing Neural Network Application to Drill Wear Classification", *ASME J. of Eng. for Industry*, Vol.116, MAY, pp.116-238, 1994.
 12. T. I. Liu, K. S. Anantharaman, "Intelligent Classification and Measurement of Drill Wear", *ASME J. of Eng. for Industry*, Vol.116, AUG., pp.392-397, 1994.
 13. K. Subramanian, N. H. Cook, "Sensing of Drill Wear and Prediction of Drill Life", *ASME, J. of Eng. for Industry*, MAY, pp.295-301, 1977
 14. R. A. Williams, "A Study of the Drilling Process", *ASME J. of Eng. for Industry*, NOV., pp.1207-1215, 1974.
 15. H. Funakubo, "Actuators for Control", *Gordon and Breach Science Publishers*, pp.254-284, 1991.
 16. 土手康彦, "ブラシレスサーボモータの基礎と應用", *総合電子出版社*, pp.100-110, 1985.
 17. J. C. Bezdek, "Prototype Classification and Feature Selection with Fuzzy Sets", *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol.SMC-7, pp.87-92, 1977.
 18. A. Kandel, "Fuzzy Techniques in Pattern Recognition", *John Wiley & Sons*, pp.119-129, 1982.