

# 공작기계의 이상상태 감시 및 진단현황

주 증 남\*, 권 원 태\*\*

## Monitoring and Diagnosis for Abnormal States of Machine Tools

C. N. Chu\*, W. T. Kwon\*\*

### 1. 서 론

NC 공작기계가 생산현장에 도입된 이래 이를 Computer와 연결함으로써 CAD/CAM/CAE의 결합이 실현되어가고 있다. 최근에는 CAD/CAM/CAE와 더불어 생산공정에 있어서 여러 대의 NC공작기계, 로봇, 운송장치를 결합하고 공구관리나 생산관리까지도 Computer를 이용하고자 하는 소위 CIM(Computer Intergrated Manufacturing)시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 여기에 생산가공 시스템의 상태 변화량의 감지를 통하여 공정상태를 종합적으로 감시, 진단할 수 있는 시스템(M & D: Monitoring and Diagnosis)에 대한 필요성도 증대되고 있다. 이는 생산공정에 있어서의 궁극적 과제인 생산 자동화 혹은 무인 자동화의 가능성을 한층 높여준다.

생산공정의 완전한 자동화와 무인화를 달성하기 위해서는 공작기계에서 발생할 수 있는 자체의 고장이나 절삭과정중에 이상상태 등을 실시간으로 검출하여 원인을 자동적으로 진단할 수 있는 시스템의 도입이 필수적이다. 이러한 시스템이 생산자동화의 핵심기술에도 불구하고 국내외적으로 학술적인 연구는 활발히 진행되고 있지만 실제로 상품화 또는 실용화된 예는 많지 않다. 더우기 선진국들이 고도 기술 이전을 기피하고 있는 실정이므로 국내에서의 기술개발이 시급하다 할 수 있다. 따라서 국내의 이상상태 감시 및 진단 기술의 습득 및 제고를 위하여 국내외적으로 관련된 연구내용과 개발된 기술 그리고 앞으로의 연구 방향을 살펴보고자 한다.

### 2. M & D 시스템의 개요

생산 현장에서의 M & D 시스템의 적용은 <그림 1>에서 보다시피 실제 공작기계의 유효절삭시간을 10%에서 65%까지 증대시킨다(1). 이러한 중요성을 인식하여 시스템의 개발과 현장에의 적용에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그중에는 단순한 가능성의 제시에서 머문 연구도 있으며 실제 현장에 적용되어 부분적으로 이상검출기능을 수행하고 있는 연구도 있다. 그러나 아직까지는 좀더 효율적이고 유연한 현장 적용성과 향상된 신뢰성을 가지고 있는 이상진단 시스템의 개발이 시급하다.

일반적인 M & D 시스템은 센싱부(Sensing)와 신호

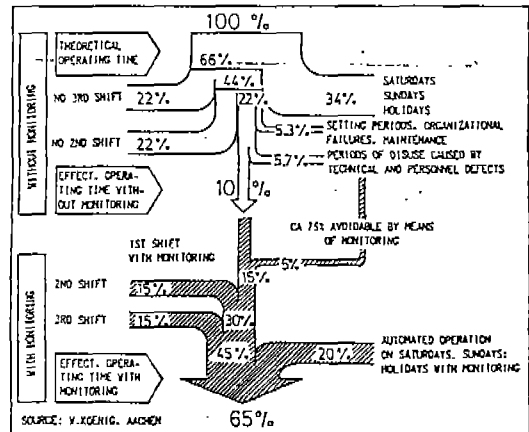


그림 1 생산공정에 있어서의 M & D 시스템의 중요성 (1)

\* 서울대학교 기계설계학과

\*\* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

표 1 M & D 시스템 구성에 주로 쓰이는 센서 종류<sup>(2)</sup>

검출파라미터	센서
절삭력	공구동력계, 로드셀
절삭도오크	토오크미터, 전류계, 회전속도계
공구/공작물변위	진기간극측정기, 인덕티브 근접센서, 공압측정기
진동	가속도계
음향	마이크로폰
AE	압전형 AE센서
온도	열전대, 방사온도계
표면거칠기	광학센서, 레이저 측정장치
image	CCD 카메라

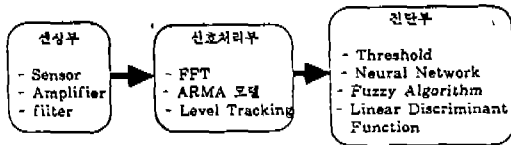


그림 2 M & D 시스템의 구조

처리부(Signal Processing) 그리고 진단부(Diagnosis)로 구성된다<sup>(2)</sup>. 센싱부는 시스템의 구성요소중 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 대상으로 하는 이상상태를 잘 반영하는 물리적 성질의 선정이 시스템 성능을 결정짓는 요소가 된다. 물론 이 선정에는 검출의 용이성이란가 센싱 장치의 경제성, 내구성, 실용성 등이 고려되어야 하지만 대개의 경우에는 이 두가지 측면이 상반되는 경우가 많다. 따라서 시스템의 신뢰성과 실용성간의 tradeoff를 통하여 사용센서를 선정함이 필요하다. <도표 1>에 일반적으로 고려되는 검출인자로서의 물리적 성질과 해당 센서를 나타내었다. 센싱부에서 획득한 신호는 이상상태를 명확히 나타내주지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 다양한 신호처리를 통한 이상상태와 상관관계를 가지는 특성치 추출(Feature Selection)은 센서의 선정 못지 않게 중요하다고 할 수 있다. 이러한 특성치는 폭넓은 절삭조건이나 주위환경, 외란등에 가능한한 영향을 받지 않으며 대상으로 하는 이상상태에 대한 정보를 충분히 가지고 있어야 한다.

특성치 추출은 많은 실험과 주의깊은 신호해석을 요구하는데 일반적으로 많이 쓰이는 방법은 시간영역 해

석, 주파수영역 해석등을 들 수 있다. 시간영역 해석방법에서 고려될 수 있는 특성치로는 신호자체의 레벨추적(Level Tracking)을 통한 진폭이나 파워 또는 상대적인 비(Ratio), 차(Difference)등을 들 수가 있고 AR계수, 잔차(Residual)등과 같이 시계열 분석에 주로 쓰이는 ARMA 모델링으로부터 얻을 수 있는 파라미터(Parameter)들이 있다. 주파수영역 해석에서는 파워스펙트럼으로 부터의 피크 주파수 또는 그 해당 주파수에서의 파워, 전체파워, 밴드별파워 등이 쓰일 수 있다. 그외에 셉스트럼(Cepstrum), 확률밀도함수를 통한 모멘트 해석 등 다양한 방법이 제시되고 있다. 이상상태의 발생여부의 판정은 진단부에서 이루어지는데 단순하게 임계치(Threshold)를 고려할 수도 있고 또는 신호의 패턴이 선형식별함수(Linear Discriminant Function)나 신경회로망(Neural Network), 퍼지(Fuzzy) 알고리즘을 통하여 인식(Recognition)될 수 있다. 신호처리부에서 추출된 특성치가 진단을 위한 패턴벡터(Pattern Vector)로서 입력이 된다. 이러한 과정을 통하여 이상상태의 진단이 이루어지면 이에 대한 대책이 알람신호나 기계의 비상정지, 공구교환 나아가서는 적용제어로 구현된다.

M & D 시스템은 크게 대상에 의한 분류와 방법에 의한 분류로써 나뉘어진다. M & D 대상에 의한 분류는 다양한 이상상태의 종류에 근거한다. 가공시스템에서 언급되는 이상상태는 절삭공정에서 발생하는 이상상태와 공작기계 자체의 이상상태로 대별된다. 절삭공정에서 발생하는 이상상태는 공구마모, 공구파손(크랙, 칩핑, 파괴), 표면거칠기, 공작물의 기하학적인 오차등과 같은 공구/공작물의 결합과 연속형 칩발생, 체터링, 빌트업에지, 공구와 공작물간의 충돌등과 같은 이상공정(Abnormal Process)을 들 수 있다. 공작기계 자체의 이상상태는 주축의 변형, 베어링의 결합, 기타 구조의 기하학적인 오차를 의미한다. M & D 방법에 의한 분류는 온-라인 검출을 기준으로 할 때 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나뉘어진다. 직접적인 방법은 마모폭이나 깊이를 직접 측정하거나 공구의 volumetric loss를 계산하고 또 공구의 유무를 감지하는 방법이고 간접적인 이상상태를 검출하는 방법이다. 직접적인 방법은 측정이 어렵고 측정장치의 설치가 용이하지 않으며 비용도 많이 들어 실제 현장 적용에 많은 제약이 따른다. 그에 반하여 간접적인 방법은 비교적 측정이 용이

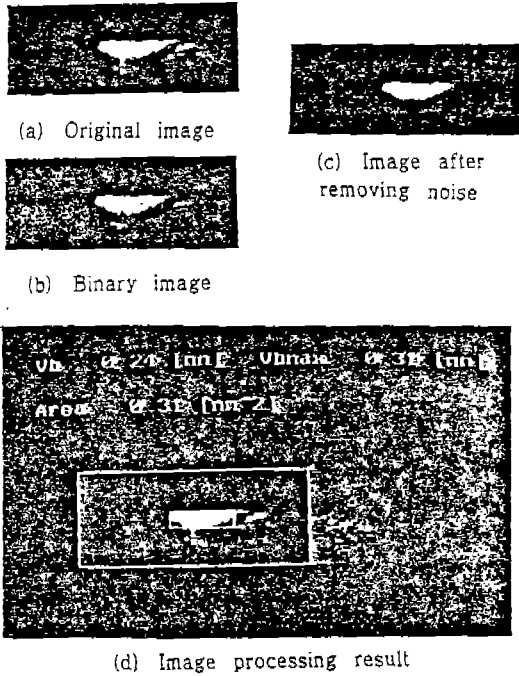


그림 3 비전 시스템을 이용한 플랭크마모폭 측정<sup>(6)</sup>

하지만 이상상태와 가공변수간의 상관관계의 불완전함, 외란(Disturbance), 신뢰성 등이 문제가 되어 실제 현장 적용연구가 더 필요한 실정이다.

## 6. 공구 이상상태 감시 및 진단 기술

### 3-1. 공구마모

절삭공구는 고온, 고압상태의 가혹한 조건 때문에 마모속도가 현저히 크다. 이로 인하여 가공정밀도나 표면 정도의 불량은 물론 심지어는 공구파손을 초래함으로써 절삭시스템의 전반적인 성능저하를 가져다 준다. 마모는 발생위치에 크게 크레이터마모와 플랭크마모로 나뉘어진다. 크레이터마모는 칩이 공구의 윗면을 따라 유동함으로써 공구 경사면에 패인 마모형태가 나타나는 것으로 고속 절삭시 공구수명을 좌우하고 플랭크마모는 공작물과 측면사이의 마찰에 의해 발생하는 마모형태로 경제적인 절삭시 공구수명 판정의 기준이 된다. 공구수명판정 기준으로 ISO가 추천하는 기준은 평균플랭크마모폭(VB), 0.3mm이고 최대플랭크마모폭(VBmax)은

0.6mm이며 크레이터마모의 여러 기하학적 인자로 정의되는 크레이터지표(KI)는 0.15로 정의된다.

#### (1) 직접적인 방법

광학적인 방법(Optical Method): 레이저나 고광도 빛을 공구에 비추어 반사되는 마모부분을 TV카메라 또는 광섬유센서 등으로 측정하여 마모량을 측정하는 방법으로써 이 방법은 절삭 도중에는 사용하지 못하고 공구가 공작물에서 떨어질 때만 사용할 수 있으므로 엄격한 의미에서의 인-프로세스(In-Process) 방법이라고 할 수 없다. 그러나 이 방법은 다른 방법에 비하여 비교적 신뢰도가 높고 정확하다. 단점은 빌트업에지(Built-Up Edge)같이 공작물이 공구에 붙어 있을 경우에는 정확한 측정이 어렵다는 것이다. 국내에서도 이와 관련된 연구가 활발히 수행되었다. 한국과학기술원<sup>(3)</sup>, 한국기계연구원, 국립공업기술원<sup>(4, 5)</sup>, 연세대학교<sup>(6)</sup> 등에서 화상처리기법을 적용한 비전 시스템의 개발로 주로 선삭과정의 공구마모를 측정하였다. 이들은 카메라로 공구의 플랭크면이나 크레이터면을 촬영한 후 화상처리기법을 통해 마모량을 검출하였는데 광원으로는 주로 레이저를 이용하였고 연세대학교는 발광다이오드, 국립공업기술원은 할로겐 램프를 이용한 가능성을 제시하기도 하였다. 또한 숭실대학교<sup>(7, 8)</sup>에서는 드릴링, 밀링 공정시의 공구마모측정에 비전시스템을 적용하였다.

화학적 해석법(Chemical Method): 공구의 마모된 분말의 양을 측정하는 방법이다. 이 방법은 크게 두 과정으로 나뉘는데 첫번째 과정은 용재를 이용하여 칩에서 공구분말을 분리해 내는 과정이고 두번째는 용액에서 공구분말을 걸러내는 과정이다. 그러나 이 방법은 단시간에 공구마모를 알아내기에는 적합치 않고 마모 분말의 크기가 0.1mm보다 작아지면 부정확해지는 단점이 있다.

접촉저항을 이용한 방법(Contact Resistance Method): 마모가 진행됨에 따라 공구와 공작물사이의 접촉면적이 넓어지고 이에따라 공구와 공작물사이의 전기저항이 변하는 특징을 이용하여 공구마모를 측정하는 방법이다. 그중 한 방법은 얇은 전도체판을 공구에 부착한 이후 전기저항의 변화량을 측정하는 방법이다<sup>(1)</sup>. 공구가 마모됨에 따라 전도체판도 마모되고 이에따라 전기저항도 증가하게 된다. 결과적으로 전기저항의 증가량을 측정함으로써 공구의 마모량을 알아낼 수가 있다. 하지만 이 방법은 실제 절삭을 하는 동안에 절삭력이

계속 변하기 때문에 이 변화하는 힘이 공구, 공작물간의 접촉저항에 영향일 미치게 되어 정확한 마모량을 계산해내지 못할 수 있다는 단점이 있다.

공구와 공작물간의 간극을 이용한 방법(Gap Detection Method) : 공구마모가 진행됨에 따라 절삭되는 공작물의 크기도 바뀌게 되는데 이렇게 변화된 공작물의 크기를 측정함으로써 공구마모량을 계산하는 방법이다. 레이저나 전자기장을 이용한 프로브를 사용하여 공작물의 지름을 측정하고 그 변화량으로 공구의 마모량을 측정하는데 이 경우 공작물의 열변형에 의한 크기 변화나 공작기계의 위치오차에 의해 정확도가 떨어지게 된다. 또한 공작물과 공구 홀더(Tool Holder)간의 간격도 공구가 마모됨에 따라 변하게 되는데 그 간격을 전기 간극측정기(Electric Feeler Micrometer), 공압측정기(Pneumatic Gauge) 또는 인덕티브 근접센서(Inductive Proximeter) 등을 이용하여 측정함으로써 공구마모량을 알아낼 수가 있다. 하지만 이 방법은 공작물의 온도, 공작물의 표면조도, 공구의 진동 그리고 공작물의 직경등에 영향을 받을 수 있다.

(2) 간접적인 방법

절삭력을 이용한 방법(Cutting Force) : 공구가 마모되면 절삭력도 변화하는데 이것을 공구상태감시에 이용할 수가 있다. 절삭가공중 주절삭력, 이송분력, 배분력을 측정하여 그 힘들과 마모량과의 관계를 알아내는 방법이다. 몇몇 논문<sup>(9)</sup>에서는 이송방향 절삭력과 배분력이 주절삭력 보다 공구마모에 민감하다고 밝힌 반면 다른 논문<sup>(10)</sup>에서는 주절삭력만이 공구마모 감시에 유용할 뿐 다른 두 방향 절삭력은 적합치 않다고 밝히고 있어 대조를 이루고 있다. 또한, 절삭신호의 미분값, 파워 그리고 자기상관함수의 계수등이 공구의 마모량을 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 카바이드 공구마모를 감시하는 마모감시지수가 다음 식으로 표현된다.

$$F_r = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z}$$

여기서  $F_x$ 는 배분력,  $F_y$ 는 이송분력,  $F_z$ 는 주절삭력이다.

정상공구일 때  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  값을 구한뒤 그 값으로  $F_r$  값을 구하고 그것을 기준으로 하여 계속 새로운  $F_r$  값을 구한다. 그후  $F_r/F_r'$ 의 비율을 구함으로써 공구마

모 다이아몬드공구의 마모상태를 검출하였다. AR모델을 적용하여 파워와 dispersion, 뎀핑(damping)등을 특성치로 추출한 후 퍼지 알고리즘에 의하여 상태를 진단하였다. 이와같이 절삭력을 측정하여 공구마모를 감시하는 것은 가장 일반적인 방법이다. 그러나 절삭력들과 공구마모와의 관계는 매우 복잡할 뿐 아니라 공작물과 공구의 성질, 절삭조건 등에 많은 영향을 받으므로 현장에의 적용에는 좀 더 연구가 필요하다.

AE를 이용한 방법(Acoustic Emission) : AE는 탄성체의 파괴나 소성 변형중에 나타나는 탄성파이다. 이와 같은 탄성파는 물체의 물리적 내부변화에 따라 나타나므로 공구상태를 해석하는 효과적인 도구로 사용될 수 있다. AE신호는 방향성이 없으며 신호의 감쇠가 거의 없이 빠른 속도로 표면으로 균일하게 전달되므로 센서의 설치가 용이하다. AE의 발생원은 보통 소성변형과 파괴를 들 수 있는데 소성변형에 의한 AE신호는 연속형태(Continuous Type Signal)이고 파괴에 의한 AE신호는 불연속적인 돌발형 형태(Burst Type Signal)를 나타낸다. 연속형 칩을 갖는 2차원절삭에서 AE에너지와 가공변수간의 정량적인 모델이 Kannatey-Asibu와 Dornfeld<sup>(12)</sup>에 의하여 제시되었다. 이들은 절삭시 칩생성에 소모되는 소성변형에너지의 일부가 AE에너지로 변환된다는 가정에 기존에 절삭모델로부터 RMS AE값을 유도하였다. Lan과 Naerheim<sup>(13)</sup>은 통계적 해석으로부터 플랭크마모가 진행됨에 따라 RMS AE값의 Kurtosis가 빠르게 증가한다고 보고하였다. AE신호의 다른 특적인 event의 빈도 또한 공구마모와 밀접한 관계를 보이고 있는데 Iwata와 Moriwaki<sup>(14)</sup>에 의하면 플랭크마모가 약 0.12mm에 이르기까지는 event rate가 마모에 비례하지만 0.12mm 이상에서는 거의 일정한 값을 나타낸다고 하였다. 또한 event의 전체 갯수가 플랭크마모와 함께 증가한다고 보고하였다. 한국과학기술원<sup>(15)</sup>은 밀링가공시 공구마멸과 AE신호의 특성변화에 대하여 연구를 수행하였는데 밀링공구마모에 민감한 인자로서 신호의 평균값에서 표준편차를 뺀 신호를 선정하였다. 또한 마모의 증가에 따라 AE신호는 플랭크마모량 0.2mm-0.3mm에 도달할 때까지는 점진적으로 증가하다가 마모량이 그 이상이 되면 갑자기 신호 크기의 변화가 심해지거나 일정한 수준을 유지하는 두가지의 유형을 보인다고 보고하였다.

진동신호를 이용한 방법(Vibration) : 절삭이 계속되는

동안 공작물과 칩이 공구에 계속 접촉함에 따라 진동이 발생하고 이 진동을 감시함으로써 공구상태를 감시하는 연구가 폭넓게 이루어졌는데 그중에는 진동을 DDS기법 (Dynamic Data System) (16)을 이용하여 처리함으로써 공구마모를 감시하는 방법이 있다. 이 방법은 공구마모에 예민한 진동모델을 만들어 내고 그것의 파위를 계산하여 그 변화량을 살펴보는 것이다. Pandit의 연구결과 (17)에 의하면 이 파위값은 처음에 마모가 증가함에 따라 줄어들다가 최소량에 도달한 이후 그 이후의 마모증가에 따라서는 다시 증가하는 형태로 마모곡선의 시간에 대한 변화량과 일치한다. 결과적으로 파위곡선의 최소량 즉 공구의 최소가속도량에 도달하게 되는 마모량을 임계 마모량으로 사용할 수 있다. Rao (18)는 온-라인으로 공구마모를 감시하는 방법으로 공구마모지수(WI : Wear Index)를 다음과 같이 선정하였다.

$$WI = \frac{\text{공구홀더의 첫번째 고유진동수에서의 절삭력 진폭}}{\text{공구홀더의 첫번째 고유진동수에서의 진동 진폭}}$$

이 식에서 진동진폭을 이용한 것은 그것이 공구마모량에 비례하기 때문이다. 이 방법은 95%의 신뢰성을 가지고 있다고 발표되었다.

온도를 이용한 방법(Temperature) : 공구마모는 절삭 온도에 크게 영향을 받는다. 따라서 절삭시의 온도의 상승을 감시함으로써 마모로 인한 공구의 수명을 감지하는 방법이 제시되었다. Bileti (19)는 공구와 공작물간의 열기전력(Thermal Electromotive Force)을 측정함으로써 마모검출을 시도하였다. 그러나 이 방법은 재료의 변화에 따른 일관성이 부족하고 매 절삭마다 calibration을 수행하여야 하는 단점이 있다. 또한 칩 curl로 인한 노이즈가 심하다. 또 다른 방법은 열간대(Thermo-Couple)을 공구자체에 심음으로써 온도를 측정하는 방법이 있다. 이 방법은 민감도가 떨어져 공구마모 측정에 별로 적합하지 않다. Ueda는 절삭온도 측정법으로서 적외선 측정방법을 제안하였다. 절삭날에서 복사되는 적외선으로부터 절삭영역의 온도를 측정하는 것이다. 이 방법은 포커싱의 난점과 절삭유동으로 인하여 실제 사용이 어렵다는 단점이 있다.

### 3-2. 공구파손

위에서 언급된 공구의 마모는 점진적으로 진행되는 예측가능한 현상이므로 preventive maintenance에 의하여 관리될 수가 있지만 공구파손은 예기치 않게 발생

하는 현상이므로 예측 및 이에 따른 관리가 어렵다. 또한 공구마모와는 달리 공작물에는 물론 공작기계 나아가서는 작업자에게 치명적인 손상을 입힐 수 있으므로 실시간 검출이 필수적이라 할 수 있다.

절삭가공중 절삭칩의 두께변화 및 뒷면 경사각에서의 공구-칩 접촉면적의 변화, 단속적인 절삭에 의한 충격 등으로 인하여 열 및 기계적 하중이 반복하여 작용하게 된다. 또한 갑작스러운 충격력 또는 공구마모의 점진적인 증가에 따른 과도한 절삭력 등의 원인으로 인하여 절삭날이 파손되는 경우가 생기는데 이러한 파손은 크랙, 칩핑, 파괴등으로 나눌 수 있다. 작은 규모의 크랙 또는 칩핑이 발생할 때는 절삭을 계속할 수는 있으나 결국은 절삭날이 무디어져 절삭온도가 상승하기 때문에 마모의 속도가 증가된다. 파괴의 경우에는 절삭날의 대부분이 떨어져 버리므로 계속적인 절삭이 거의 불가능하며 단속절삭, 강인한 재료의 중절삭시 많이 나타나게 된다. 이러한 공구손상의 주요 원인으로는 공구재료 자체의 취성, 절삭력, 열충격 및 피로, 과도한 공구마모의 진행, 채터링, 칩의 유출방향, 공구의 형상 및 기타 취급 불량등을 들 수 있다.

#### (1) 직접적인 방법

공구마모 검출방법에서 소개한 광학적인 방법이 쓰일 수 있으나 그보다는 Touch센서를 부착하여 공정사이에 절삭날의 offset이나 공구의 유무를 확인하는 방법이 간단하면서도 확실한 방법으로 실제 현장에 적용되고 있다.

#### (2) 간접적인 방법

절삭력을 이용한 방법(Cutting Force) : 절삭력은 검출신호로서 가장 많이 연구되어 왔으며 지금도 사용되고 있다. 그것은 Martin (20)이 지적하다시피 일반적으로 절삭력이 절삭상태를 가장 잘 나타내고 있으며 진동이냐 모터전류 보다 칩핑이나 파괴에 대한 민감도가 우수하기 때문이다. Lan과 Dornfeld (21)는 선삭에서 주분력 및 이송분력이 공구파손에 민감한 변화를 보이며 특히 주분력이 일관되게 감소 현상을 나타내고 있음을 보고하였다. 그런데 한국과학기술원의 연구 (22)에 의하면 공구파괴의 부위에 따라 주절삭력, 이송분력, 배분력의 변화가 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 절삭력을 이용한 검출 연구의 대부분은 공구동력계(Tool

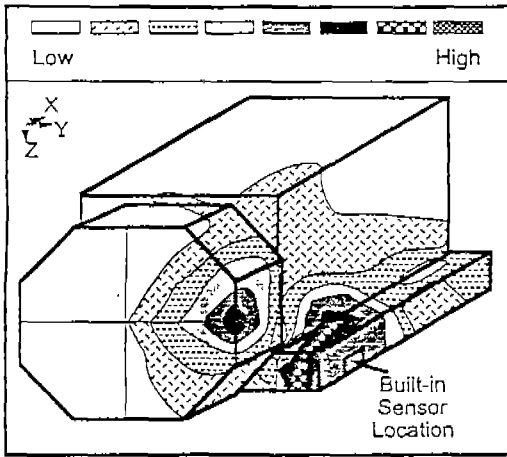


그림 4 터렛하우징의 응력분포 해석(24)

Dynamometer)를 사용하여 이루어져 왔는데 이 방법은 터렛이 장착된 일반 NC선반에서는 실용적이지 못할 뿐더러 고가로 인하여 경제적이지 못하다. 따라서 터렛하우징에 소형 압전형 힘센서를 설치하여 공구파괴를 검출하는 방법이 서울대학교(23)에서 연구되었다. <그림 4>에서 보듯이 FEM해석을 통하여 공구에 걸리는 절삭력을 가장 민감하게 전달되는 부위를 해석하고 그 부위에 센서를 설치하여 절삭력을 측정하고 동시에 AE신호를 감시함으로써 공구파괴 검출시스템의 실용가능성을 제시하였다.

Lan과 Naerheim(24)은 밀링공정에서 피이드분력을 측정하여 AR(15th) 필터링을 수행한 후 AR계수와 잔차(Residual)를 감시함으로써 공구파괴 검출을 시도하였다. 그러나 이 방법은 과도한 AR치수로 인하여 절삭조건 변화나 공구의 진입, 이탈같은 절삭전이현상을 공구파괴와 분리해 내지 못하였다. 이에 Altintas(25)는 밀링 절삭력의 주기적인 특성을 이용하여 주기적인 성분을 제거한 후 AR 1차 모델을 적용함으로써 절삭전이현상을 공구파괴현상을 분리시킬 수 있음을 보고하였다.

AE를 이용한 방법(Acoustic Emission) : AE의 발생 원중 재료의 파괴에 인하여 생기는 AE신호의 형태는 돌발형 신호형태(Burst Type Signal)를 나타낸다. 따라서 공구파손시 상당량의 돌발형 신호는 background 신호의 상당량을 차지하는 전단면의 연속형 신호와 구별되므로 적절한 임계값(Threshold)의 설정으로 효과적인

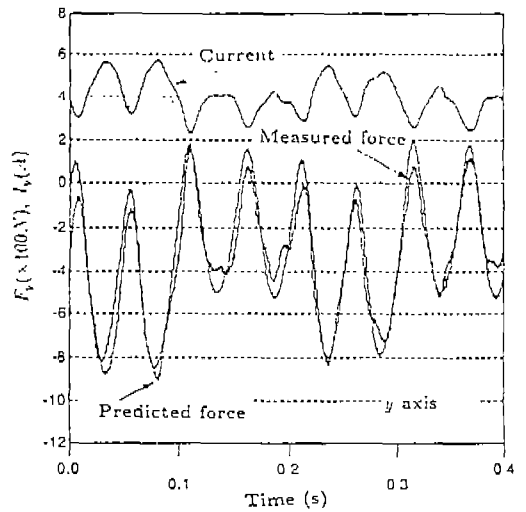
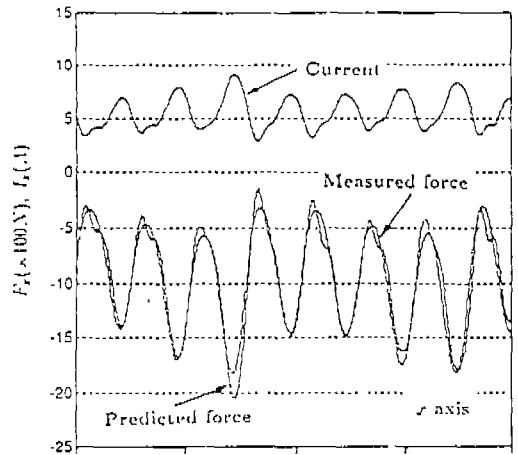


그림 5 측정 절삭력신호, 예측 절삭력신호(전류로부터), 측정 전류신호(x-축, y-축)(29)

검출이 가능하다. 그러나 칩핑이나 공구의 미세한 파괴는 정상적인 절삭과정에서 칩파괴나 충돌에서와 비슷한 돌발형 신호가 발생하므로 검출이 용이하지 않다. Inasaki와 Yonetsu(26)는 공구파괴가 AE신호에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 이들에 의하면 공구파괴가 발생하면 발생전의 AE신호 진폭에 비하여 적어도 1.8 배 정도 큰 돌발형 신호가 발생한다고 보고하였다. 또한 플랭크 마모에 민감한 300kHz 미만의 AE주파수영역을 HPF(High Pass Filter)를 사용하여 제거함으로써

써 파괴로 인한 돌발형 AE신호의 영향을 더 확실하게 식별하였다. Moriwaki<sup>(27)</sup>는 돌발형 AE신호의 최대 진폭이 파괴면적과 직접적인 상관관계를 가지고 있음을 선삭실험을 통하여 입증하였다. 또한 AE신호의 진폭은 파괴를 일으키는 용력증가율이나 충격속도에는 무관하고 공구재료에 따라서 다양한 크기를 갖는다고 발표하였다.

모터 전류를 이용한 방법(Motor Current) :

Matsushima와 Sata<sup>(28)</sup>은 정상절삭시의 주축모터 전류를 AR 28차로 모델링하고 이 필터로부터의 잔차의 갑작스런 변화를 감지함으로써 공구파괴를 검출하였다. 그런데 너무 높은 차수를 갖는 시계열 필터로 인하여 실시간 추적이 힘들 뿐만 아니라 절삭천이현상과 공구파괴를 식별할 수가 없었다. 따라서 이를 해결하기 위하여 Altintas<sup>(29)</sup>는 밀링 절삭력의 주기적인 특성을 고려하여 AR 1차 모델을 제시하였고 절삭력과 상관관계를 갖는 이송모터 전류신호의 성분예 이 알고리즘을 적용함으로써 수직밀링에서 공구파괴를 검출하였다. 이 연구에 따르면 선삭과 달리 밀링공정은 동적인 신호를 발생시키므로 주축모터 전류가 갖는 낮은 bandwidth로는 절삭력 변화를 추적할 수 없기 때문에 상대적으로 높은 bandwidth를 갖는 이송모터 전류를 사용함으로써 <그림 5>와 같은 절삭력의 예측이 가능하다고 보고하였다.

부산대학교<sup>(30)</sup>에서는 이송축 직류서보모터의 전류신호와 NC정보를 이용하여 선삭가공상태를 감시하는 시스템을 개발하였다. 모터전류의 레벨의 한계값을 설정하여 파부하를 방지하고 예측 전류레벨값과 실제 전류레벨값을 비교하여 정상작업의 여부를 감시하도록 하였다.

4. 이상 공정상태 감시 및 진단 기술

4-1. 칩상태

선삭과정에서의 바람직하지 못한 현상중에 하나는 연속형 칩의 발생이다. 연속형 칩은 그 자체로서 공작물의 표면정도를 저하시키지만 공작물에 엉키게 되면 공작물의 손상은 물론 절삭시스템 전체에 악영향을 초래한다. 따라서 적절한 칩의 발생상태의 검출이 필요하다.

AE를 이용한 방법(Acoustic Emission) :

Dornfeld와 Pan<sup>(31)</sup>은 연속형 칩과 불연속적인 칩의 형태를 AE의 event rates를 이용하여 식별하였다. 또한 가공변수와 RMS AE의 event rate간의 관계를 이용하여 칩형태 검출을 위한 선형식별법을 제시하였다. Uehara

Chip form classification

	Chip Form	Length (mm)
Long		L > 200
Short		50 < L < 200
Loose		L < 50

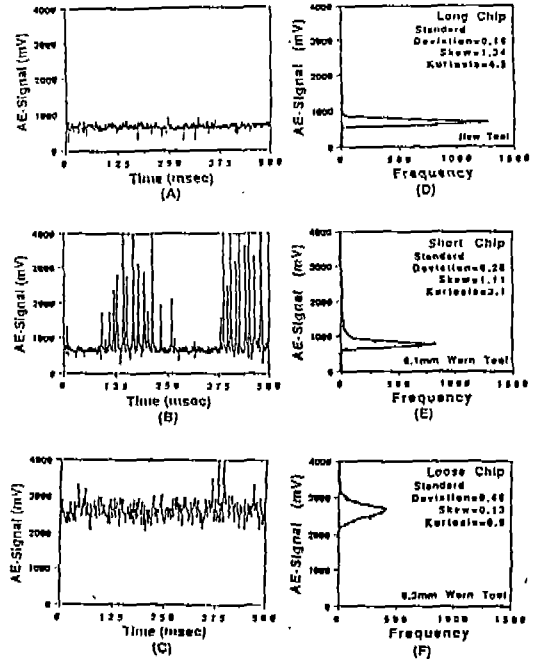


그림 6 칩형태 분류와 해당하는 AE신호의 진폭분포곡선 (33)

(32)는 공작물 끝부분과 공구 부분에 각각 AE센서를 설치하여 실험을 하였는데 공구측의 AE센서로부터 칩절단 주파수와 동등한 돌발형 AE신호가 나타나고 공작물측의 AE센서로부터는 아무런 변화가 없음을 볼 수 있었다. 이는 돌발형 AE신호가 칩과 공구의 접촉부에서의 stick-slip현상에 의하여 발생되고 있고 이 신호는 제1전단영역에 의하여 공작물측 AE센서의 전달이 차단되고 있기 때문이라고 해석하였다. Inasaki<sup>(33)</sup>는 AE신호의 진폭분포곡선(Amplitude Distribution Curve)으로부터 표준편차, skew, kurtosis, AE mode를 구하고 이들을 특성치로 한 퍼지진단기법으로 연속형 칩과 불연속형 칩을 검출하였다. <그림 6>는 연구에서 수행한 칩형태 분류와 해당하는 AE신호의 진폭분포곡선을 나타낸 것이다.

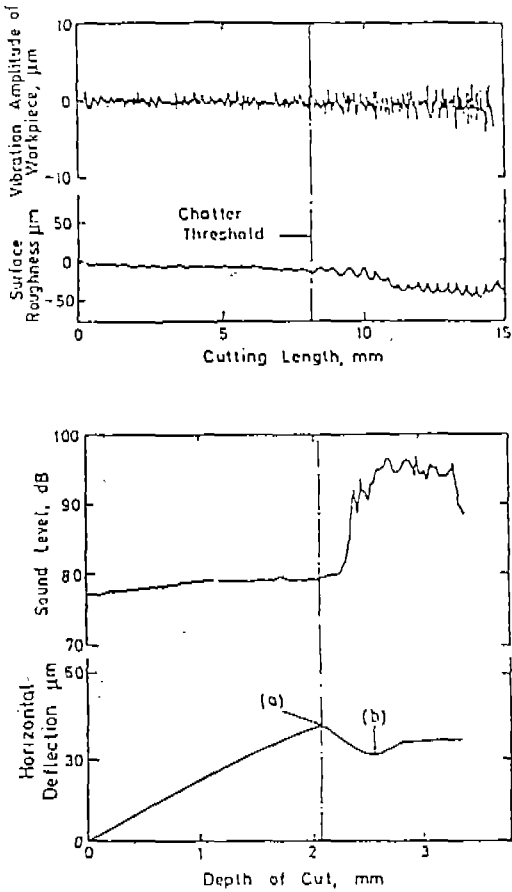


그림 7 채터 발생개시의 검출(42)

절삭력을 이용한 방법(Cutting Force) : 鄭儀植(34) 등은 절삭력의 동적 성분의 평균 최대진폭과 칩형태의 상관성을 실험을 통하여 검증하고 인-프로세스인식을 위한 가능성을 제시하였다. 인천대(35)는 절삭력의 스펙트럼상에서의 밴드별 파워최대값과 절삭조건을 입력으로 하는 신경회로망 패턴인식기법으로 5가지의 칩형태와 채터를 검출하였다.

온도를 이용한 방법(Temperature) : 新井實(36)은 적외선 방사온도계를 이용하여 절삭점부근의 고온 절삭칩이 방출하는 열에너지를 측정함으로써 연속형 칩과 불연속형 칩을 검출하였다. 廣田平(37)은 공구와 피삭재사이에 발생하는 열기전력(Thermal EMF)의 파워스펙트럼을 이용하여 칩절단주파수를 검출하였다.

#### 4-2. 채터

절삭가공중에 생기는 이상진동 현상을 채터라 하는데, 이것은 절삭과정에서 발생하는 다른 이상상태와 함께 공작물의 표면거칠기, 공구수명, 가공오차 그리고 특히 절삭과정의 안정성에 해로운 영향을 주게 된다. 밀링작업에서는 모터의 회전수와 같은 이플림주파수(Tooth Passing Frequency : 주축회전수, 절삭날수)로 절삭하면 공진현상이 생기고 진폭이 크게 된다. 따라서, 절삭과정중에 실시간으로 이를 검출하여 주축회전수를 조절함으로써(38, 39) 채터를 억제하기 위한 연구가 많이 이루어져 왔으나 아직 실용화된 예는 많지가 않다.

절삭력을 이용한 방법(Cutting Force) : 포항공대(40)는 절삭력과 가속도신호를 이용한 밀링공정 감시에 대한 연구를 수행하였다. 센서신호의 AR필터링으로부터 얻어지는 AR계수와 절삭속도, 이송속도를 특성치로 추출하고 신경회로망 패턴인식기법을 이용하여 공구마모와 채터를 검출하였다.

AE를 이용한 방법(Acoustic Emission) : Dornfeld에 의하면 채터의 발생과 함께 정상 절삭에 비하여 고주파수 영역에서 AE신호의 파워가 상당히 상승한다. 이 현상은 공구가 심하게 마모된 경우와 유사하다고 할 수 있다. 그러나 이에 대한 이론적 규명은 제시하지 못하였다.

진동신호를 이용한 방법(Vibration) : D. W. Cho와 K. F. Eman(41)은 밀링공정에서의 채터발생을 패턴인식기법을 이용하여 검출을 수행하였다. 채터에 민감한 공작물측의 이송방향의 진동신호를 측정하여 DDS기법에 의하여 구한 전체 파워와 첫번째, 두번째 모드의 dispersion을 식별함수의 패턴벡터로 사용하여 절삭상태를 안정영역, 전이영역, 불안정영역으로 나누어 인식하였다.

공작물의 수평변위를 이용한 방법(Gap Detection Method) : Rahman(42)은 채터발생을 검출하기 위하여 절삭력, sound, 공작물의 수평변위, 표면거칠기 등을 측정하여 분석한 결과 공작물의 수평변위가 가장 확실하고도 빠른 응답성을 갖는다는 결과를 발표하였다. 이 연구에 따르면 공작물을 칩작업할 때 수평방향의 공작물변위가 점차적으로 증가하다가 채터가 발생하기 직전에 최대값을 갖고 채터가 발생하면 감소하기 시작한다고 하였다. 따라서 수평변위의 최대점이 채터발생 개시점이 된다. <그림 7>에서 보다시피 다른 신호보다 확실하면



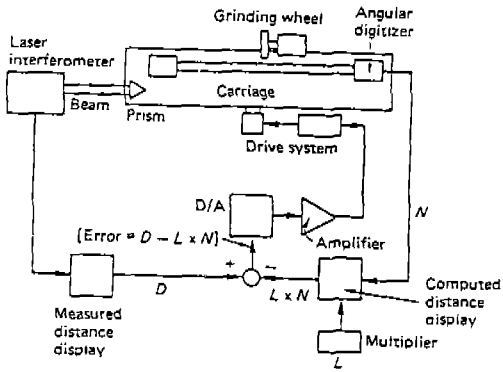


그림 8 레이저 간섭계를 이용한 위치 오차 보정 시스템 (43)

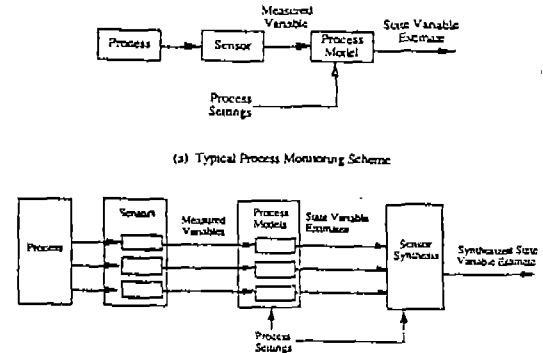


그림 9 단일센서 M & D 시스템과 복수센서 M & D 시스템의 비교(463)

서 응답이 빠른 경향을 보이고 있다.

### 5. 공작기계 자체의 이상상태 검출 및 진단 기술

공작기계의 기하학적 오차는 공작물의 정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 주로 구조물의 오차나 안내면, 구동시스템의 증량이나 절삭력, 열 또는 진동등에 의하여 변형을 일으킴으로써 결과적인 공작기계의 오차를 발생시킨다. 따라서 이들에 대한 측정기술이 다양하게 개발되었다. 구동부에 해당하는 리이드스크류의 진격도나 백래쉬, 피치오차 등은 레이저 간섭계를 이용함으로써 측정될 수 있다. <그림 8>은 그 예를 보여 주는데 이 시스템의 측정부는 dual-beam 레이저 간섭계와 광학 엔코더로 구성된다(43). 레이저는 삼압대가 움직인 직선거리를 측정하고 리이드스크류의 회전량은 엔코더에서 측정된다. 구동시스템이 오차가 없다면 리이드스크류에 의해 움직인 직선거리는 회전수와 리이드의 곱과 같아야 한다. 비교 회로에 의하여 계산된 오차는 서보모터의 보정량으로 피이드백 된다. 그런데 레이저 간섭계는 주위환경의 영향에 상당히 민감하므로 실제 현장에서의 적용이 곤란하다.

회전시스템에서 베어링의 변형을 측정하기 위하여 인덕티브(Inductive)센서, 에디-전류(Eddy-Current)센서 등이 주로 쓰이고 있다. 베어링의 파손은 가속도센서로부터 진동신호 해석을 통하여 검출될 수 있다. 손상되지 않은 베어링과 손상된 베어링의 진동스펙트럼에서 주파수정보는 별 차이가 없지만 파워패턴은 확연한 차이

를 보인다. 또한 베어링의 예압이 베어링 손상에 따른 진동신호의 파워스펙트럼 패턴에 크게 영향을 미치게 됨이 보고 되었다(44). 열변형으로 인한 스퍼들의 예압 증가는 베어링 성능을 저하시키는데 그러한 과부하를 검출하기 위하여 스트레인 게이지가 사용되었다(45). 이 게이지는 베어링 하우징에 설치되었는데 스트레인 게이지에 대한 온도 보정의 신뢰성 문제로 인하여 별로 사용되지 않았다.

### 6. M & D 연구의 추이

지금까지 단편적으로 소개된 방법외에도 다양하게 많은 연구가 이루어지고 있다. 최근의 연구추이를 살펴보면 센서융합(Sensor Fusion)기법이 사용되고 있다. 기존에 사용되었던 단일 센서로부터의 정보만으로는 복잡한 가공공정에서 발생하는 여러 현상들로부터 대상으로 하는 이상상태를 식별해 내는 것이 쉽지 않다. 따라서 시스템의 신뢰성을 향상 시키기 위하여 복수개의 센서로부터의 종합적인 정보가 필요하다. 또한 다양한 정보의 획득은 적절한 특징치 추출(Feature Selection)기법과 분류기법(Classifier) 등을 통한 정보의 종합화 기술개발을 요구한다(46). 이상상태에 대한 정보의 비선형성으로 인하여 신경회로망(Neural-Network)(47), 퍼지(Fuzzy)(11) 또는 퍼지-뉴로기법(Fuzzy-Neuro) 등이 주로 이용되고 있다. 그러나 앞서서 언급되었듯이 시스템의 신뢰성은 실용성에 대한 문제를 제기시킨다. 많은 연구에도 불구하고 실제 현장에서의 적용에 미미한 것은

장비의 고가에 따른 비경제성, 설치에 따른 작업의 비효율성, 다양한 공정과의 비결합성 등을 그 주 요인으로 들 수 있다. 이러한 문제점은 좀 더 실용적인 센서 개발을 필요로 한다. 또한 이상상태의 종합적인 M & D를 위해서는 이상상태 상호간의 correlation을 분리시킬 수 있는 특성치 선정이 주의깊게 이루어져야 한다. 그리고 다양한 공정을 갖는 기공시스템의 전반적인 M & D는 NC 가공정보를 필요로 하는데 이를 위하여 NC 콘트롤러와의 유기적인 인터페이스가 이루어져야 한다.

### 참고문헌

1. H. K. Tonshoff, J. P. Wulfsberg, H. J. J. Kals, W. Konig, C. A. Luttervelt, "Developements and Trends in Monitoring and Control of Machining Process", Annals of CIRP, Vol. 37, No. 2, 1988, pp.611~622
2. 박동삼, "M & D 시스템의 구성과 그 과제", 제1회 기계상태 감시 및 이상상태 진단 워크샵, 1993
3. 전종업, 김승우, "절삭공구 플랭크 마모의 광전자학적 측정 시스템의 개발", 한국정밀공학회지, 제4권, 제3호, 1987, pp.60~67
4. 김영일, 김세진, 유봉환, "선삭가공에서 디지털 이미지를 이용한 경사면 마모 측정에 관한 연구", 대한기계학회 '92 춘계학술대회 논문집 (I), pp.215~220
5. 김영일, 유봉환, "선삭에서 컴퓨터비전을 이용한 플랭크마모 측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제10권, 제3호, 1993, pp.168~174
6. 이상조, 조창연, 이종향, "회상의 블럭처리방법을 이용한 공구마멸 측정기술", 한국정밀공학회지, 제10권, 제3호, 1993, pp.81~86
7. 양승배, 김영일, 유봉환, "이미지 프로세싱을 이용한 드릴마모 측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지 '93추계학술대회 초록집, pp.298~301
8. 사승운, 최영규, 김영일, 유봉환, "밀링가공에서 다인공구의 파손 검출을 위한 기법개발에 관한 연구", 대한기계학회 '93추계학술대회의 논문집 (I), pp.683~687
9. H. Takeyama, W. Dia, T. Mitsoka and H. Sekiguchi, "Sensors of Tool Life for Optimization of Machining", Proc. 8th Int. Machine Tool Design and Research Conf., 1967, pp.191~208
10. P. M. Lister and G. Barrow, "Tool Condition Monitoring System", Proc. 26th Int. Machine Tool Design and Research Conf., 1986, pp.271~288
11. Tae Jo Ko, Dong Woo Cho, "On the Monitoring of Single Crystal Diamond Tool Wear in Ultra-Precision Machining by Fuzzy Pattern Recognition Technique", 대한기계학회 '91추계학술대회 논문집, pp.218~222
12. Kannatey, Asibu and D. A. Dornfeld, "Quatitative Relationship for Acoustic Emission from Metal Cutting", ASME Journal of Eng. Ind., Vol. 103, 1981, pp.330~341
13. M. Lan and Y. Naerheim, "Application of Acoustic Emission Monitoring in Machining", Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference, University of California, Berkeley, 1985, pp.310~313
14. Iwata and Moriwaki, "Application of Acoustic Emission to in Process Sensing of Tool Wear", Annals of CIRP, Vol. 26, No. 1, 1977, pp.21~26
15. 황홍연, 이병찬, 김광준, "밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제12권 제5호, 1988, pp.1035~1042
16. S. M. Pandit, "Data Dependent Systems approach to Stochastic Tool Life and Reliability", ASME Journal of Eng. for Ind., Vol. 100, 1982, pp.318~322
17. S. M. Pandit and S. Kashou, "Variation in Friction Coefficient with Tool Wear", Wear, Vol. 84, 1983, pp.65~79
18. S. B. Rao, "Tool Wear Monitoring through the Dynamics of Stable Turning", ASME Journal of Eng. for Ind., Vol. 108, 1986,

- pp. 183~190
19. Billetti, R. A., "Studies of tool wear rate under conditions of constant interface thermal E. M. F.", *Int. J. of Prod. Research*, Vol. 20, No. 5, 1982, pp. 565~574
  20. Martin K. F., Brandon J. A., Grosvenor B. I. and Owen A., "A Comparison of In-Process Tool Wear Measurement Methods in Turning", *Proc. 26th, Int. Machine Tool Design and Research Conf.*, 1986, pp. 289~296
  21. Lan, M. S. and Dornfeld, D. A., "In-Process Tool Fracture Detection", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 16, 1984, pp. 111~118
  22. 양민양, "선삭가공의 이상상태 감시시스템", 제1회 기계상태 및 이상진단 워크샵, 1993
  23. 최덕기, 박동삼, 주종남, 이장무, "내장형 절삭형 센서와 AE센서를 이용한 인-프로세스 공구파괴 검출에 관한 연구", 한국정밀공학회 '93추계학술대회 초록집, pp. 344~348
  24. Ming-Shong Lan and Yngve Naerheim, "In-Process Detection of Tool Breakage in Milling", *ASME, Journal of Eng. for Ind.*, Vol. 108, 1986, pp. 191~197
  25. Altintas, "In-process Detectionm of Tool breakage Using Time Series Monitoring of Cutting Forces", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 28, No. 2, 1988, pp. 157~172
  26. I. Inasaki and S. Yonetsu, "In-process Detection of Cutting Tool Damage by Acoustic Emission Measurement", *Proceedings of the 22nd International machine Tool Design and Research Conference*, Manchester University, 1981, pp. 261~268
  27. Moriwaki, "Detection of Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement", *Annals of CIRP*, Vol. 29, No. 1, 1980, pp. 35~40
  28. Matsushima, K., Bertok, P. and Sata, T., "In Process Detection of Tool Breakage by Monitoring Spindle Motor Current of a Machine Tool", *Measurement and Control for Batch Manufacturing*, The Winter Annual Meeting of ASMR, Phoenix, Arizona, 1982, pp. 14~19
  29. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement", *ASME, Journal of Eng. for Ind.*, Vol. 114, 1992, pp. 386~392
  30. 안중환, 김화영, "NC정보와 이송축 모터 전류를 이용한 선삭가공상태 감시", 대한기계학회논문집, 제16권, 제1호, 1992, pp. 156~161
  31. D. A. Dornfeld and C. Pan, "Determination of Chip Formation States Using a Linear Discrimination Function Technique with Acoustic Emission", *Proc. 13th North American Manufacturing Research Conference*, SME, 1985, pp. 299~303
  32. K. Uehara, "Identification of Chip Formation Mechanism through Acoustic Emission measurement", *Annals of CIRP*, Vol. 33, No. 1, 1984, pp. 1~21
  33. I. Inasaki, "Monitoring of Turning Process", *CIRP '92 Workshop on Tool Condition Monitoring*
  34. 鄭儀植, 南宮拓, 伊東鎔, "切削抵抗の動的成分による切りくず形態イプロセス認識", *日本機械學會論文集, (C編)*, 55卷 518號, 1989, pp. 2632~2636
  35. 박동삼, "다중퍼셉트론을 이용한 절삭칩의 형상과 채터검출에 관한 연구", 한국정밀공학회 '93추계학술대회 초록집, pp. 293~297
  36. 新井實, 中山一雄, 塚田康夫, 加賀美信明, "放射溫度計による切りくず排出状態の監視", *精密機械*, 51卷, 4號, 1985, pp. 784~789
  37. 廣田平一, 鈴木重信, 條崎襄, "切りくず切斷と工具-被削材 熱起電力の相關", *精密機械*, 42卷, 8號, 1979, pp. 925~931
  38. K. Jemielniak and A. Widota, "Suooression of Self-Excited Vibration by the Spindle-

- Speed Variation Method", *Int. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 24, No. 3, 1984, pp.207~214
39. S. Smith, J. Tlusty, "Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation", *Annals of CIRP*, Vol. 41, No. 1, 1992, pp.433~436
40. 고태조, 조동우, "신경회로망을 이용한 밀링공정의 감시", *대한기계학회 '92춘계학술대회 논문집(I)*, pp.197~201
41. D. W. Cho and K. F. Eman, "Pattern Recognition for On-Line Chatter Detection", *Mechanical systems and Signal Processing*, Vol. 1, No. 3, 1988, pp.279~290
42. M. Rahman, "In-Process Detection of Chatter Threshold", *ASME Journal of Eng. for Ind.*, Vol. 110, 1988, pp.44~50
43. M. Shirashi, "Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining process-Part 3: In-process techniques for cutting processes and machine tools", *Precision Engineering*, Vol. 11, No. 1, 1989, pp.39~47
44. Y-T Su, Y-T Sheen, "On the detectability of roller bearing damage by frequency analysis", *Journal of Mechanical Engineering Science, Part C*, Vol. 207, pp.23~32
45. Tlusty, J. and Andrews, G. C., "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining", *Annals of CIRP*, Vol. 32, No. 2, 1983, pp.563~572
46. G. Chryssolouris, M. Domroese, P. Beaulieu, "Sensor Synthesis for Control of Manufacturing Processes", *ASME Journal of Eng. for Ind.*, Vol. 114, 1992, pp.158~174
47. S. Rangwala, D. Dornfeld, "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring", *ASME Journal of Eng. for Ind.*, Vol. 112, 1990, pp.219~228
48. Li Dan and J. Mathew, "Tool Wear Failure Monitoring Techniques for Turning-A Review", *Int. J. Mach. Tools Manufat.*, Vol. 30, No. 4, 1990, pp.579~598
49. M. Shirashi, "Scope of In-Process Measurement, Monitoring and Control Techniques in Machining Processes-Part I: In-Process Technique for Tools", *Precision Engineering*, Vol. 10, No. 4, 1988, pp.179~189