

## 엔드밀의 마모와 신호변화에 관한 실험적 연구

이창희\*(대전기능대학 메카트로닉스과), 조택동(충남대학교 기계설계공학과)

A experimental study on the detection of the signals which are the new and worn end mills working in the machining center.

C. H. Lee(Mechatronics. Dept., TJPC), T. D. Cheo(Machine design Dept., CNU)

### ABSTRACT

This paper studies the indirect parameters when the new and worn end mill working in the machining center. The parameter output methods are cutting force, current values and AE signals. In the result, when the worn end mill operating, cutting forces increase the 14.71[N], current values increase the 2.917[A] and 1.168[A] according to the spindle motor and feed motor, and AE signals increase the  $0.588 \times 10^{-5}$  [A]. We can use these parameters in the detection of end mill wear.

Key Words : End mill deterioration phenomena(엔드밀 손상현상), Flank wear(측면마모), Cutting force (절삭력), Current probe(전류 탐침기), Acoustic emission(AE)

### 1. 서론

FMS(flexible manufacturing system), FMC(flexible manufacturing cell)와 같은 유연 생산 시스템 뿐만 아니라 공장자동화(FA)의 최하위 단위인 절삭가공 공작기계에 대한 무인화의 실현은 멀지 않은 장래에 완성된 IMS(intelligent manufacturing system)의 구축에 있어서 최대의 걸림돌이 되고 있다. 전통적인 생산시스템에서는 경험을 가진 작업자에 의해 절삭 공정이 감시되어지며, 만약 이상이 발생했을 때에는 그 상태에 따른 적절한 조치를 즉시 취할 수 있었다. 그러나 급속도로 연구가 진행되는 무인생산 시스템에서는 이러한 작업자의 역할이 컴퓨터에 의한 자동적인 감시 및 제어 시스템으로 대체되어야 한다. 특히 공구의 수명이 끝났을 때 공구 교환을 위한 최적 의사결정 전략(decision making strategy)은 그 중요성이 점차 커지고 있다. 한편 공구는 마멸의 진행에 따라 그 수명을 예측하여 교환해주는 것이 바람직하다. 그러나 공구의 마멸은 여러 가지 요인들의 복합적 작용에 의해 발생하는 현상이므로 그것을 정확히

예측한다는 것은 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 머시닝 센터(machining center)에서 엔드밀(end mill) 작업 중 공구가 마모되었을 때 그 신호가 어떻게 변화하는지를 실험을 통하여 연구 하고자 한다. 즉 마모되지 않은 새 공구(엔드밀)와 공구 수명이 일정량에 달한 마모된 공구와의 신호 변화가 어떻게 되는지를 공구동력계를 사용하여 절삭력의 변화를, 주축 스피들 모터 와 이송모터에서 전류 신호변화를, AE센서를 이용하여 그 신호의 변화를 연구하는데 그 목적이 있다.<sup>(1)</sup>

### 2. 관련지식

#### 2.1 엔드밀의 마모현상

엔드밀링 공구의 손상에는 마모, 치핑, 열균열, 피로균열 등이 있으며, 엔드밀에 있어서 공구마모는 선삭에서의 공구마모와 거의 동일하나 단속 절삭인 특성으로 인해 공구는 항상 가열과 냉각을 반복한다. 따라서 온도 의존성이 높은 크레이터 마모(crater wear)의 발생은 적은 편이다. 엔드밀 공구

에 있어서 여유면 마모는 미소입자의 탈락에 따른 마모, 공작물과의 용착과 분리가 반복됨에 의한 미소치핑, 충격에 의한 손상 등이 동시에 작용하여 복합적으로 발생한다. table 1은 ISO 8688-2에서 나타내고 있는 엔드밀 공구 손상 현상들을 나타내고 있다.<sup>(2)</sup>

Table 1 Classified end mill deterioration phenomena

Deterioration phenomena		symbol
Flank wear (VB)	Uniform flank wear	VB1
	Non-uniform wear	VB2
	Localized flank wear	VB3
Face wear (KT)	Crater wear	KT1
	Stair-formed face wear	KT2
Chipping (CH)	Uniform chipping	CH3
	Non-uniform chipping	CH2
	Localised chipping	CH3
Flaking		FL
Cracks (CE)	Comb cracks	CR1
	Parallel cracks	CR2
	Irregular cracks	CR3
Catastrophic failure		CF

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장비와 실험방법

사용된 주요실험장비, 공구와 시험편은 Table2와 같으며 머신인센터에서  $\phi 12$  엔드밀을 사용하였다. 처음에는 엔드밀의 수명을 알기 위한 실험을 하였으며, 두 번째는 공구동력계에서 새 엔드밀과 공구 수명이 다된 엔드밀을 사용하여 절삭력을 비교하였으며, 세 번째는 머신인 센터의 스피들축 모터와 이송축 모터의 인입선에 current probe를 설치하고 새 엔드밀과 공구수명이 다된 공구를 사용하여 절삭 할 때 전류 값 변화를 관찰하였다. 세 번째는 AE 센서를 이용하여서 새 엔드밀과 공구수명이 다된 공구를 사용하였을 때의 신호 변화를 관찰하였다.<sup>(3)</sup>

Table 2 Equipments for experiment

name	specification
Machining center	TNV 40A(SAIL HEAVY IND.)
End mill	SKH51, $\phi 12$ , 2flute standard
Tool microscope	Mitutoyo 529-601
Cutting oil	Water-soluble cutting oil
Work piece	KS-SM490(20*18*40)
Tool dynamometer	Kistler instrument 9257B(piezo type)
	Charge amplifier 5019A
	Easy Das 98
Digital oscilloscope	LeCroy LTS 84L
Current prove	Apoll (band width DC 120KHZ, max current 150A peak)
Spindle motor	AC 5.5kw servo motor (Mitsubishi SJ-75A)
Feed motor	AC servo motor (Yaskawa,USAMED-06M)
AE sensor	Lattron R15(Shape code 20245)

#### 3.2 엔드밀 수명실험

ISO에서는 flank wear(VB)를 마모되는 현상에 따라 VB1(uniform flank wear), VB2(non-uniform flank wear), VB3(localized flank wear)로 구분하고 있으며 공구를 재 연삭 하거나 교체해야하는 공구수명(tool life)을 VB1은 평균0.3mm, VB3는 최대 0.5mm를 기준으로 추천하고 있다. 공구 제조회사에서는 VB1값을 공구직경과 절삭구분(범용,정밀,라핑)에 따라 0.1-0.6mm로 하고 있으며 본 실험에서는 공구 제작회사가 추천하는 일반 절삭 가공을 할 경우를 기준으로 하여 flank wear(VB1)가 0.2mm가 될 때를 기준으로 하였다. 마모측정은 Fig. 1과 같이 밀 날 부터 3mm 간격으로 마모량을 측정하였으며, 측정된 값의 평균으로 마모 기준을 삼았다. ISO규정에서 flank wear는 날 부분(edge)에서 수직거리를 마모량으로 표시한다.<sup>(2)</sup> 엔드밀 형상은 날이 대부분 helix 각을 갖는 비틀림 날로 되어 있으며 본 논문에 사용된 엔드밀은 모두 helix 각이 30°이다. 따라서 공구 현미경으로 측정된 값은 ISO에서 규정하는 flank wear와는 다음과 같은 관계를 갖게 되므로

$$VB1=VB1' \times \cos 30^\circ$$

여기서, VB1 : ISO rule of flank wear  
 VB1' : measuring flank wear

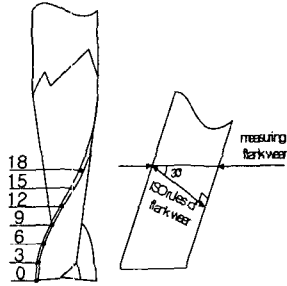


Fig. 1 Measuring flank wear

측정된 flank마모 폭이(VB1') 0.23mm가 됐을 때를 공구 수명으로 하였다. 엔드밀 수명실험은 수용성 절삭유를 사용한 습식 상향절삭으로 측면을 절삭하였다. flank 마모의 진행현상과 공구수명(tool life,엔드밀 재 연삭 시기)을 파악하기 위하여 연강(KS-SM490B)을 3200mm 씩을 절삭하고 랜드부분의 마모값을 측정하였다. 측정에 사용된 공구 현미경은 MITUTOYO TF510이며 절삭조건은 1180rpm, feed는 202mm/min, 축 방향 깊이는 18mm, 공구경 방향깊이는 1.2mm이다. fig.2는 절삭 가공길이와 엔드밀의 랜드부의 마모관계를 2개의 엔드밀을 실험하여 평균한 값을 그래프로 나타낸 것이다. 마모량을 측정할 때 0.23mm일때 그래프에 의한 보간법으로 계산하면 φ12엔드밀로 연강을 가공할때는 18000mm절삭 할 때가 공구 수명으로 판정 할 수가 있었다.<sup>(2)</sup>

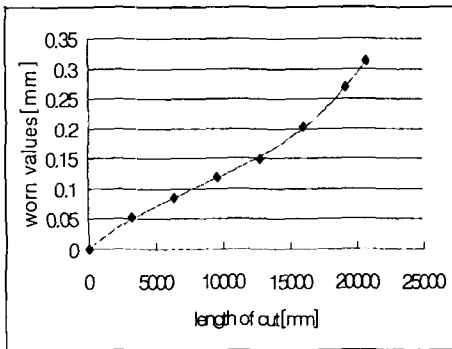


Fig.2 The graph of the length of cut vs worn values

### 3.3 절삭력 변화 실험

먼저 공구 동력계를 머시닝 센터 테이블 위에 설치

하고 공구 동력계위에 공작물을 견고하게 고정하였다. 공작물은 Y축 방향으로 이송하면서 절삭이 되도록 하였으며 상향 건식 절삭을 하였다. 절삭 과정 동안에 절삭력 성분은 공구 동력계(tool dynamometer)를 통하여 나오게 되고, 여기서 나온 절삭력(cutting force) 성분들은 증폭기(charge amplifier)에서 증폭되어지고, A/D converter로 입력된다. A/D converter에서 나온 절삭력 성분들은 PC에 전기적인 신호로 입력된다. 획득된 절삭력 데이터는 분석 프로그램에 의해 x, y, z축 각각의 최대값, 최소값, 평균값, 절삭력 RMS 값으로 변환하여 PC에 저장된다. 본 실험에서 사용된 장비는 KISTLER INSTRUMENT 사의 제품이며 table 2와 같다. 취득한 자료는 조인테크 회사의 Easy Das98 프로그램에서 분석처리 하였다. 실험결과 새 엔드밀을 사용했을 때 절삭력은 Fx 1.2[N] Fy 7.4[N]인데 비하여 마모된 공구(18000mm절삭)를 사용했을 때에는 Fx 10.73[N] Fy 22.77[N]로 변화가 생겼다. 마모된 공구를 사용했을 때 절삭력이 Fx 9.53[N] Fy 14.71[N] 증가되는 것을 알 수 있었다. table.3은 그 변화를 표로 나타낸 것이다.<sup>(4)(5)</sup>

Table 3 Average values of cutting force

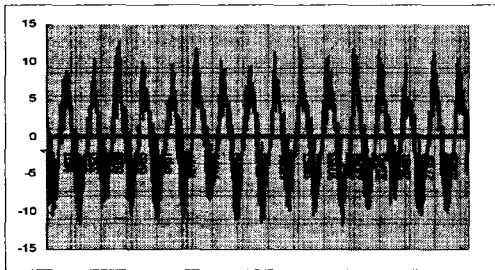
classify	new tool	worn tool	change
Fx	1.2	10.73	9.53
Fy	7.4	22.11	14.71
remark	-30초 취득한 데이터 평균값 -단위:[N] -Y축 feed 82.6mm/min, 826rpm -건식 상향 절삭		

### 3.4 전류값 변화실험

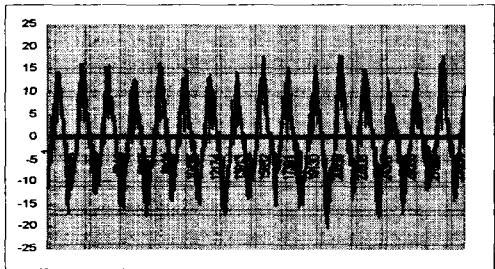
#### 3.4.1 스핀들축 전류 신호

간접적으로 절삭력을 측정하는 방법의 하나로 구동 모터 전류 신호를 이용하는 방법이 있다. 이는 주축 모터 전류를 이용하는 방법과 이송 축 모터 전류를 이용하는 방법으로 나눌 수 있으며 먼저 주축 전류 변화를 관찰하기 위하여 Fig.4와 같이 주축 모터 인입 전류선에 current probe를 설치한 뒤 디지털 오실로스코프를 이용하여 모터부하 전류를 관

찰하였다 Fig.3은 전류신호의 변화를 wave form으로 나타낸 것이며 Table 4는 RMS값의 변화를 나타낸 것이다. 표에서 보면 마모되지 않은 새 공구를 사용할 때 RMS값이 4.688[A] 인데 반해 마모된 공구(1800mm절삭)를 사용했을 경우 RMS 값이 7.605[A]가 되어 2.917[A]의 변화가 생겼다. 주축 모터 부하전류가 공구마모에 대한 유용한 정보를 갖고 있음을 확인할 수 있다.<sup>(6)</sup>



(a)new tool



(b)worn tool

Fig.3 Change of spindle motor current wave

Table4 Change of spindle motor current

remark	unload operating	new tool	worn tool
RMS	3.716A	4.688A	7.605A

1180rpm, feed:202mm/min, 축방향깊이:18mm, 경방향깊이:1.2mm, 상향습식

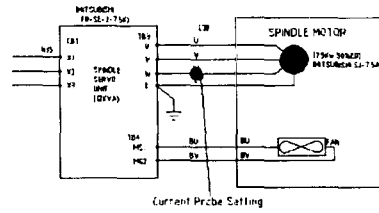


Fig.4 Current probe setting position of spindle motor

### 3.4.2 이송축 전류 신호

이송 축 모터의 전류 신호변화를 알아보기 위하여 이송모터 인입 전류선에 current probe를 설치한 뒤(Photo.1) 디지털 오실로스코프를 이용하여 모터 부하 전류를 관찰하였다. 공작물은 머시닝 센터 테이블이 x방향으로 이송하면서 가공 되도록 설치하였다. Table 5는 전류 신호변화의 RMS값을 나타낸 것이다. 공구가 마모되지 않은 새 엔드밀을 사용했을 때 1.992A이고 마모된 공구(1800mm를 절삭한 공구) 사용했을 때 3.160A이므로 1.168A만큼 변화가 생겼다. 이러한 신호 변화에서 알 수 있듯이 이송모터의 부하전류 또한 공구마모에 대한 정보를 갖고 있음을 확인할 수 있다.<sup>(6)</sup>

Table 5 Change of feed motor current

remark	new tool	worn tool	비고
x축 RMS	1.992A	3.160A	X축 feed 202mm/min Y축은 변화 없음



Photo.1 Current probe setting position of feed motor

### 3.5 AE신호

AE(acoustic emission)신호는 어떤 물체가 내부 또는 외부의 응력에 의해 파괴되면 응력의 형태 및 물체의 물성치에 따라 독특한 소리를 발생하게 된다. 이러한 물체의 파괴 또는 변형이 일어나게 되면 재료내부에 축적 되어 있던 변형에너지(strain energy)는 파면 형성에너지, 열에너지, 격자 변형 에너지, 그리고 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이때 외부에서의 계측 장치의 힘에 의해서 가시적으로 검출된 탄성파를 AE신호라 한다. 여기서 AE신호는 공구마모현상을 간접적으로 측정하는 방법중의 하나로서 신호처리 과정과 노이즈로 인하여 신뢰성이 약간 떨어지나 마멸, 파손, 결함 등과 같은 절삭과정에서의 변화들에 매우 민감하게 반응한다. 특히 AE신호는 공작기계나 공구, 공작물 등의 동 특성에 거의 영향을 받지 않고 많은 정보를 포함할 수 있기 때문에 그 신호 처리 기법에 따라 가공 상태 감시의 응용범위가 넓다.<sup>(7)</sup> 본 실험에서는 공구 마모에 대한 신호 변화를 알아보기 위하여 동작물 뒷면 중앙에 AE센서를 설치하였으며 센서와 공작물과의 접촉부위에는 그리스(Dow Corning사의 high vacuum grease)를 바르고 마그네틱 홀더(magnetic holder)로 고정하였다. AE센서는 Lattron사의 R15이며 신호는 Lecroy사의 디지털 오실로스코프(LTS 84L)에 의하여 출력하였다. Fig.5는 새 공구와 마모된 공구의 AE신호를 FFT 분석하여 서로 비교하여 나타낸 것이다. Table 6은 디지털 오실로스코프에 나타난 평균전류 값을 표시한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 가공하지 않은 새 공구로 가공 할 때의 AE 신호 평균값은  $8.96667 \times 10^{-5}$  [A]이고 마모된 공구(18000mm 절삭한 공구)로 공작물을 가공할 때는  $9.52552 \times 10^{-5}$  [A]이다. 즉, 마모된 공구로 공작물을 가공할 때가  $0.55882 \times 10^{-5}$  더 큰 값이 나타났다.

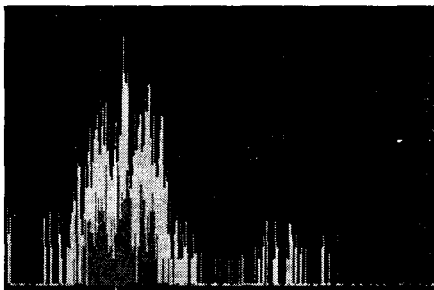


Fig.5 Compare the fft signals(red: new tool, blue: worn tool)

Table6 Compare the new and worn tools.

classify	new tool	worn tool	remark
average	$8.96667 \times 10^{-5}$	$9.52552 \times 10^{-5}$	30,000개 데이터비교

### 4. 결론

실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1.  $\phi 12$  엔드밀(SKH51)로 연강(KS-SM490)을 일정한 절삭 조건으로 절삭할 때 18000mm를 가공했을 때 공구 수명을 판정 할 수 있었으며,

2. 절삭력은 새엔드밀과 수명이 다된 엔드밀을 비교하여 본 결과 14.71[N]의 변화를 나타냈으며,

3. 전류값 변화 실험에서는 주축모터와 이송축모터에서 각각 2.917[A]와 1.168[A]만큼 변화를 나타냈으며, AE신호는 평균값이  $0.558 \times 10^{-5}$  [A]만큼 변화가 나타났다.

이러한 실험결과들에 의하여 공구 마모와 신호 변화를 유용한 정보로 활용 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. 정태성, "중소형 CIM을 위한 공구관리 시스템의 개발에 관한 연구," 한국과학기술원 석사학위논문, 1997.
2. ISO 8688-2, "Tool life testing in milling -Part2:End milling," 1989.
3. P.W.Prickett, C.Johns, "An overview of approaches to end milling tool monitoring," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol39, pp105-122, 1999.
4. 김태영, 정은철, 신형곤, 오성훈, " STS 304엔드밀 가공시 공구마멸을 고려한 절삭력 예측," 한국정밀공학회지, 제16권, 제12호, pp. 46-53, 1999.
5. 백대균, " 밀링공구의 마모 감시에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제7권, 제1호, pp. 69-74, 1996.
6. 박화영, 김선호, 안중환, 이만형, " 이송모터 전류 신호의 Wavelet 변환에 의한 공구 파손 식별," 한국정밀공학회지, 제13권, 제9호, pp. 31-37, 1996.
7. 황홍연, 이병찬, 김광준, " 밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 관한 연구," 대한기계학회지, 제12권, 제5호, pp. 1035-1042, 1988.