

## 부등각 엔드밀 가공시 음향방출신호와 절삭력 거동에 관한 연구

### A study on the behaviors of acoustic emission and cutting force signals in different helix angle endmilling

김영수\* (경남대 산업대학원 기계공학과), 김원일, 이윤경, 왕덕현 (경남대 기계자동화공학부)  
Young-soo Kim, Won-il Kim, Yun-kyeong Lee and Duck-hyun Wang (Kyungnam Univ.)

**Key words** : Acoustic emission signal(음향방출신호), Helix angle(헬릭스각), Cutting force(절삭력), End milling(엔드밀가공), AErms(AE실효치전압)

#### Abstract

This study shows how the change of helix angle for different helix angle end mill affects machining accuracy. It was verified that cutting forces are remarkably low when endmill has helix angle of different helix angle 25°, 31°, 37° and AE signals have less relationship with the change of helix angle. Moreover, as the number of rotations are increased, the AE signals are increased with the proportion to the number but cutting forces are inversely proportional to the rotation.

#### 1 서론

다양한 제품의 형태를 요구하고 있는 현대산업의 구조는 종래의 소품종 다량생산 시스템에서 다품종소량 생산시스템으로 전환되어 왔다. 제품의 생산성 및 가공정밀도 뿐만 아니라 미래의 변화하는 생산 시스템에 적극적으로 대응하기 위하여, 제품가공의 유연성 있는 생산시스템(FMS), 컴퓨터종합시스템(CIM)등이 생산현장에 개발 도입되어 운영이 절실히 필요하다. 생산시스템의 자동화 과정에서 선택공구 운영의 자동화로 먼저 해결해야 할 중요한 문제이다. 여러 가지 기계가공중 밀링에 의한 엔드밀가공은 절삭가공에서의 중요성이 커가고 있으며, 엔드밀가공은 2개 이상의 절삭 날로 구성된 공구에 의해 단속절삭공정에 주기적으로 미변형칩두께(chip thickness)

가 변하며, 경우에 따라 여러 개의 절삭 날이 동시에 절삭을 하기 때문에 절삭공정에 대한 해석이 칩두께가 일정한 연속절삭공정에 비해 매우 복잡하다.<sup>1,2)</sup>

엔드밀절삭 해석에 대한 연구는 Martellotti가<sup>3)</sup> 상향 및 하향 밀링 공정에서의 공구경로에 따른 미변형 칩두께 변화에 대한 기하학적 관계로 정립하였다. Tlusty은<sup>4)</sup> 상향 엔드밀공정에서의 공구형상 상관관계를 이용하여, 절삭력을 비절삭저항과 미변형 칩단면적의 곱으로 나타내는 절삭력 예측모델을 제시하고, 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토한바 있다. 간접적인 측정방법 가운데 음향방출(Acoustic Emission:AE)신호측정과<sup>5,6)</sup>, 공구동력계에 의한 절삭력 측정은 가동중인 설비의 진단 및 검사가 가능하고, 실시간 처리가 가능하며, 시험경비를 획기적으로 절감할 수 있고, 절삭공정의 감시와 해석에 효과적으로 이용될 수 있다. 단속절삭과정인 밀링가공중 공작물 측면에서 절삭조건에 따른 공구의 특성이 연구되었으며, 이 연구는 공구의 회전에 의한 측정의 어려움 때문에 간접적으로 측정이 되었다.

본 연구는 등각엔드밀과 부등각엔드밀을 사용하여 회전수변화에 영향과 상향·하향 절삭시 가공정밀도에 어떤 영향을 주는지를 파악하고자 하며, 같은 절삭 조건 하에서 등각 엔드밀과, 부등각 엔드밀의 절삭상태인 칩터량과 절삭력을 비교분석하며, 또한 부등각 엔드밀에서도 최적의 헬릭스 각도의 엔드밀로 절삭하여 가공특성을 연구하고자 하였다. 힘의 변화를 가공중에 취득해 절삭력과 공구칩터의 관계를 쉽게 알아

보고자 하였으며, 가공 후에는 표면 거칠기 측정기를 이용하여 표면 거칠기를 측정하고, 실제 가공에 있어 가장 적절한 공구를 선정, 경제적이고, 고정밀 가공을 가능하게 하고자한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 헬리컬각도 변화와 회전수 및 절삭방향변화에 따른 절삭력과 체터량 및 표면조도 상태를 알아보기 위한 실험장치의 구성 및 실제 절삭과정을 Fig. 2.1과 Photo. 2.1에 나타내었다. Fig. 2.1은 TiN으로 코팅된 HSS 엔드밀 가공 중에 AE신호와 절삭력을 검출하기 위해 CNC 머시닝센터(TNV-40A)에서 공구가 공작물을 절삭하는 동안 절삭력과 AE신호를 공구동력계와 AE 센서로 측정하여 DAQ board를 통해 PC에 저장하는 구조로 되어 있는 것을 도시적으로 나타내고 있다. 실험은 수직형 머시닝센터를 사용하여 피삭재를 가공하였으며, 절삭력은 머시닝센터의 베이스위에 공구동력계(KISTLER-9257BA)를 설치하고, Control unit(kister-5233A)에 의해 절삭력 간섭을 보정하여, 절삭력 성분을 측정하였다. AE의 부가장치로 전치증폭기(PAC-1220A) 처리장치가 부착되어있다. 또한 데이터 저장과 분석을 LabVIEW로 프로그램한 후 데이터를 저장 분석 디스플레이 하여 모니터를 통해 그 변화를 눈으로 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 2.2는 AE신호와 절삭력을 저장하기 위해 LabVIEW로 프로그램된 프론트패널을 보여주고 있고, Table 2.1은 실험에 사용한 실험기기 재원을 나타내었다. 절삭공구는 4날의 각각의 부등각 엔드밀과 30°의 등각 엔드밀( $\varnothing 16\text{mm}$ )을 사용하였고, 피삭재는 일반 패삭강(SM30C)를 사용하였다.

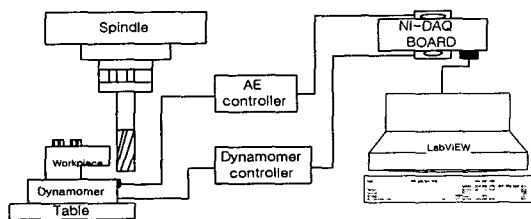


Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental setup



Photo. 2.1 AE and cutting force measurement setup

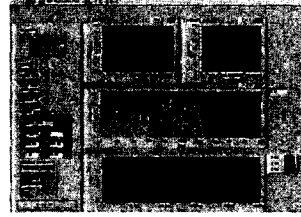


Fig. 2.2 Front panel of LabVIEW

Table 2.1 Specification experimental equipments

Machining center	TNV-40A(Tongil Heavy Ind, Korea)
AE Sensor	Physical Acoustic Co 1220A
AE Sub unit	signal amplifier(PAC-1220A)
A/d Converter	PCI-6024E(National Instrument U.S.A)
Tool dynamometer	KISTLER-9257BA
Tool dynamometer control unit	kister-5233A

### 2.2 절삭공구 및 피삭재

본 실험에 사용된 절삭공구는 기계구조용 탄소강재 SM30C를 가공하기 위하여 공구마멸을 최소화하고, 표면정밀도를 높일 수 있는 TiN으로 코팅된 고속도 공구강재 SKH2를 소재로한 평엔드밀을 다양하게 헬리컬각도의 변화를 주어 특수가공 제작하여 사용하였다. 특수가공 제작된 SKH2 고속도공구강의 End Mill은 photo. 2.2와 같다. SKH2 고속도공구강은(High-speed tool steel) 일반절삭용, 기타각종공구에 사용되는 공구재료로 쉽게 구할 수 있고, 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 또한 본 실험의 요구에 맞게 체터 흡수가 적어 발생하는 체터량을 쉽게 얻을 수 있고, 공구강재에 코팅된 TiN의 코팅재는 경도가 높아 공구강재의 내마모에 강하며, 강에 대한 마찰이 적어 칩에 의한 간섭을 적게 받는 특징이 있다. 공구규격은 Table 2.2 와 Fig. 2.2에 나타난 것과 같이 지름이 16mm의 4날의 평엔드밀을 사용하였고, Table 2.3는 SKH2 고속도공구강에 코팅을 시킨 코팅재 재원이다.



Photo. 2.2 Photograph of coated TiN flat end mill

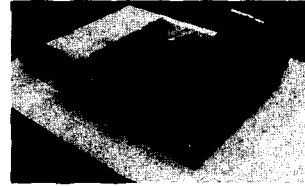


Photo. 2.3 Photograph of Machined workpiece

Table 2.2 Terms of end mill

Angle			Length			Blade	
Helix Angle A(°) B(°)	Rake Angle D(°)	Clear Angle C(°)	Outside Dia N(mm)	Length L(mm)	Length of cut M(mm)	Num Blade	Minor cutting edge
A=30° B=30°	8	8	16	80	25	4	flat
A=30° B=25°	8	8	16	80	25	4	flat

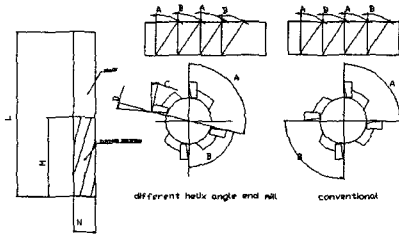


Fig. 2.2 Utilized end mills

Table 2.3 Mechanical properties of specimen

코팅 재질	경도 (Hv)	마찰계수 (건식)	코팅 두께	내부 응력	최대 온도	색상
TiN	2,300	0.4	1~2	-2.5	400°C	황금색

시편으로 사용된 기계구조용 탄소강 강재 (Carbon steel for machine structural use) SM30C는 인장강도가 55kg/mm<sup>2</sup> 이상이고, 볼트, 너트 기계부품용 모터주축 로드, 레버류등 일반적 가공 재료로 많이 사용되고 있으나 연성이 크기 때문에 절삭 날에 대한 용착이 심해서 가공면 거칠기의 저하 현상을 일으킨다. 본 실험에 사용된 시편은 먼저 Face Mill 커터를 사용하여 60×60×16mm의 육면체로 가공한 후 다시 End Mill로 한쪽 면을 가공하여 실험가공면 60×10mm를 남겨두고, 공구동력계에 Clamping 하기 위하여, 10mm드릴로 25mm의 간격을 두어 구멍가공을 한 그림이 Photo 2.3과 같다.

### 2.3. 실험방법

기계가공에서 End Mill로 피삭재 절삭과정중 경하고, 질긴 성질의 재료는 절삭공구를 쉽게 마모시키고, 칩에 의한 절삭방해를 일으켜 올바른 채터량과 절삭력, 절삭표면정도를 얻기 어려우므로 이를 감안하여 생산현장에서 많이 사용되는 SM30C의 연강재로 사용하였다. 절삭조건의 변화를 주기 위하여 등각30°의 4날의 헬리컬각과 부등각30°의 2날과25° 2날을 비롯하여 30° 2날의 헬리컬각을 고정하여 2° 간격으로 27° 29° 31° 33° 35°의 헬리컬각을 변화한 부등각 엔드밀로 회전수/분(200, 300, 400, 500)를 4가지로 하였고, 절삭깊이는 1mm, 이송속도는 120mm/min의 조건을 가지며, 머시닝센터(TNV40A)에서 MDI 모드에서 회전수를 지정, 수동모드에서 이송속도를 정한다음 상·하향으로 가공방향을 나누어 가공하였다. 가공조건은 Table 2.4에 나타내었으며, AE센서의 부착은 예비실험을 통하여 노이즈가 가장 적게 발생하는 공구동력계에 부착하였다, AE신호는 잡음의 영향을 최소화하기 위해 LabVIEW로 프로그램에 의해 개발한 알고리즘으로 주파수100이상의 High pas로 Filtering한 다음 40db로 증폭시켰으나 신호의 크기가 매우작아 AE신호를 100배 스케일링하였다. AE에 의한 채터량과 공구동력계에 의한 절삭력을 실시간 검출할 수 있는 알고리즘을 개발하여 측정된 신호를 분석 채터량과 절삭력 크기여부를 파악하였으며, 실험을 통해 증명하였다. 신호처리는 실험과 동시에 AE센서와 공구동력계에서 컨트롤러를 거쳐 NI-DAQ board(U.S.A)에서 A/D변환되어 PC에 저장되어있는 Labview프로그램을 통해 AE신호와 EndMill의 절삭날이 받는 절삭력을 볼 수 있도록 초당4000개의 데이터를 수집하는 방법으로 scan rate를 4000으로 주고 수집한 데이터 중에 실제 읽을 데이터 수를 제한하기 위해 num of

scans to read를 획득하는 방법으로 PC 하드디스크에 저장한 다음 excel 프로그램에서 그래프화하여 작업한 후 절삭공구별로 절삭조건에 따라 비교 분석한다.

Table 3.1 Experimental condition for machining center

Item	Specification	Value
Cutting condition	Spindle speed(RPM)	200, 300, 400, 500
	Feed rate(mm/min)	120
	Cutting depth(mm)	1
Tool	Coated TiN for bifereat Helix Angle End Mill	Ø16×4F
Workpiece	carbon steel for machine structural use	SM30C
Cutting direction		down-cut up-cut

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 AE신호 및 절삭력 특성

본 절에서는 헬리컬 $30^\circ$ 의 등각엔드밀과 2날을  $30^\circ$ 로 고정된 2날의 헬리컬각도 변화에서 절삭방향 및 회전수변화에 따른 절삭시 각각의 엔드밀이 AE신호 및 절삭력 변화에 미치는 영향을 검토한다. Fig. 3.1~Fig. 3.8까지는 각각 상·하향 절삭시 회전수 변화에 따라 헬리컬각도가 다른 엔드밀에 미치는 AERms(V)와 절삭합력의 거동을 나타내는 그림이다. 또한, Fig. 3.9, Fig. 3.10은 상향절삭시 절삭력  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 과 하향절삭시 절삭력  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 를 0.3sec동안 data300개를 저장하여 그래프화한 그림이다.

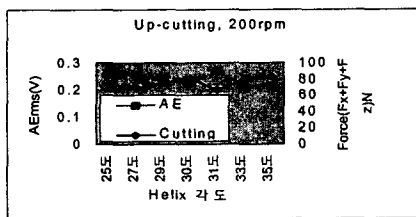


Fig. 3.1 Up-cutting, 200rpm

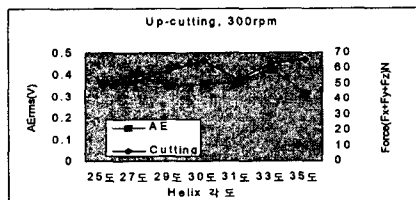


Fig. 3.2 Up-cutting, 300rpm

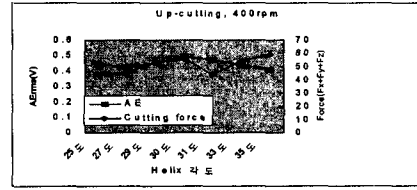


Fig. 3.3 Up-cutting, 400rpm

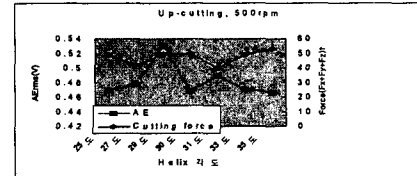


Fig. 3.4 Up-cutting, 500rpm

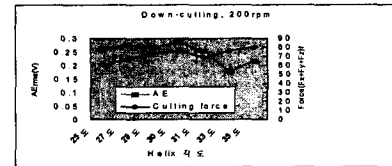


Fig. 3.5 Down-cutting, 200rpm

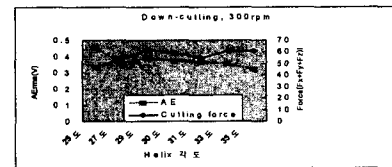


Fig. 3.6 Down-cutting, 300rpm

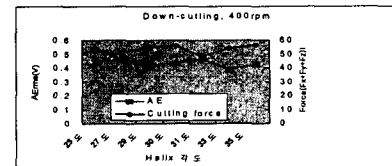


Fig. 3.7 Down-cutting, 400rpm

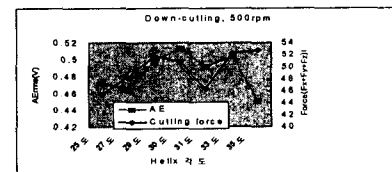


Fig. 3.8 Down-cutting, 500rpm

Fig. 3.9와 3.10은 상향절삭시  $F_y$ 는 +방향의 힘을 크게 받고  $F_z$ 는 -방향의 힘을 받으나  $F_x$ 는 주기적으로 +, -양방향의 힘을 골고루 받는 것을 볼 수 있다. 또한 하향절삭에서는  $F_x$ ,  $F_y$ 는 비슷한 크기의 +방향의 크기를 가지며,  $F_z$ 는 상향절삭과 같은 -방향의 크기를 갖는다. 여기서 상·하향 모두 합력은 비슷하지만 하향절삭은 3축의

힘이 분산된 반면, 상향절삭은  $F_y$ 의 힘이 편중해서 받고있는 것을 알 수 있다.

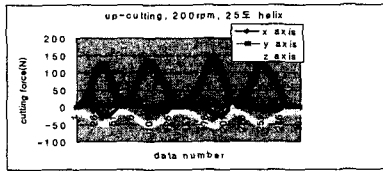


Fig. 3.9 Up-cutting, 200rpm 25deg helix

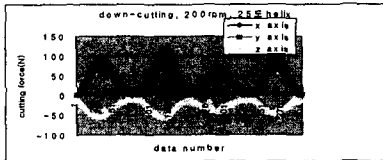


Fig. 3.10 Down-cutting, 200rpm 25deg helix

Fig. 3.11과 3.12는 상·하향, 회전수 200rpm에서 AE신호의 거동을 나타내는 그림이다. Fig. 3.1~Fig. 3.8의 그림을 보면 절삭방향과 회전수변화에 따른 각각의 헬리컬각도가 변화한 엔드밀이 AErms와 절삭평균합력을 종합적으로 나타낸 그림으로 절삭합력은 상향 500rpm을 제외한 모든 상·하향절삭시 회전수에서 헬리컬각도 25° 27° 31°의 부등각 엔드밀에서 절삭합력이 작고, 특히 31°의 부등각은 30°의 등각 엔드밀가공에서보다 절삭합력이 급격히 떨어짐을 나타내고 있다. AErms값은 상·하향 모두 35°의 부등각 엔드밀에서 적은 값을 나타내는 경향을 보이고 있으나 전체적으로는 큰 변화를 주지 못하고 있다. Fig. 3.4의 그림에서 헬리컬25°의 부등각엔드밀가공에서만 절삭력이 큰 것은 순간적인 칩의 방해 받은 것으로 사료된다.

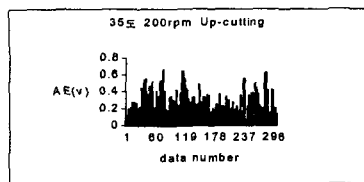


Fig. 3.11 35deg, 200rpm Up-cutting

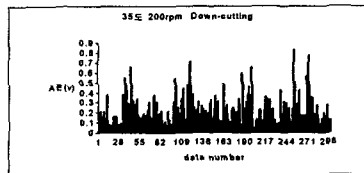


Fig. 3.12 35deg, 200rpm Down-cutting

Fig. 3.13과 3.14그림은 절삭방향에 따라 회전수변화시 절삭평균합력의 평균값을 나타내는 그림이다. 이 그림에서 상·하향절삭 모두 AErms의 평균값은 회전수가 증가할수록 점차적으로 비례하여 증가하고<sup>7)</sup> 절삭력 평균합력의 평균값은 회전수가 증가할수록 반비례하여 절삭력이 적어지는 경향을 나타내고 있다. 즉 AErms값은 헬리컬각도변화에 관계가 적음을 확인할 수 있었고, 절삭력 평균합력  $F_n$ 은 25° 27° 31°의 헬리컬각도를 가진 부등각 엔드밀에서 절삭력 평균합력이 현저히 낮음을 알 수 있었다. 또한 일반적 경향으로 회전수가 높아갈수록 AE신호는 증가하고, 절삭력은 작아지는 경향을 보였다.

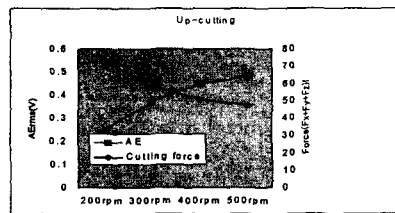


Fig. 3.13 Up-cutting

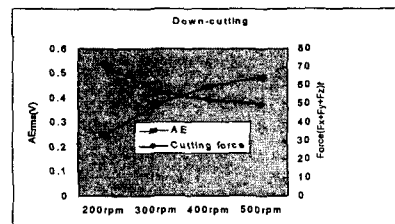


Fig. 3.14 Down-cutting

### 3.2 헬리컬각도에 따른 표면정밀도

Fig. 3.15과 3.16은 절삭방향 및 회전수변화에 따라 헬리컬각도가 다른 엔드밀 가공시 공작물의 가공표면에 어떠한 영향을 미치는지 나타내주는 그림이다.

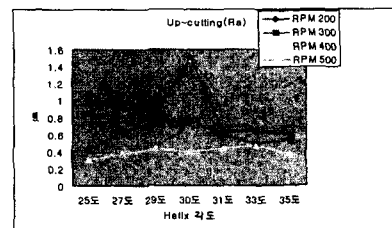


Fig. 3.15 Up-cutting(Ra)

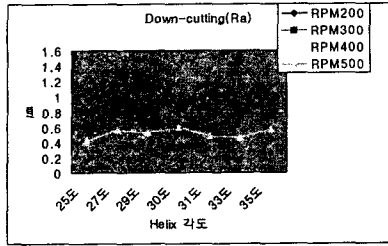


Fig. 3.16 Down-cutting(Ra)

Fig. 3.15와 3.16에서 보는 것과 같이 하향절삭 시 모든 회전수에서 헬리컬각도 25°의 부등각 엔드밀 가공이 표면조도 값이 낮은 것으로 나타나며, 상·하향 모두 회전수가 증가할수록 표면조도 값이 낮게 보여주는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 일반적인 30°의 등각 엔드밀에서 상향 200rpm, 300rpm 가공시 표면조도가 나쁜 것에 비해 하향절삭 200rpm, 300rpm에서는 상대적으로 양호한 표면조도를 나타내고 있는 것으로 보아 저속의 하향절삭가공이 실험을 통해 표면조도가 양호하다는 실험적 결과를 확인할 수 있었다. 그리고 같은 조건의 높은 회전수에서 가공면의 표면조도가 양호하게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 엔드밀가공에서 절삭력 및 칩터발생을 최소화하고, 가공표면조도를 향상시킬 엔드밀를 개발할 목적으로 정밀한 압전소자 공구동력계(Dynamometer)와 AE센서를 이용하여 엔드밀 측면절삭시 발생하는 신호로 절삭조건에 따라 절삭력과, AErms값 및 가공면조도를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

- (1) 절삭력Fn은 25° 27° 31°의 헬리컬각도를 가진 부등각 엔드밀가공에서 절삭력이 현저히 떨어졌고 절삭방향에 상관없이 회전수 증가에 따라 절삭력은 반비례하여 적어지는 경향을 나타낸다.
- (2) AE신호는 대체적으로 헬리컬각도 변화에 관계가 적으나 부등각35°에서 회전수 변화에 따른 상·하향절삭 시 AE신호가 가장 낮은 값을 나타냈으며, 회전수가 증가할수록 AE신

호는 점차적으로 비례하여 증가하는 상태를 보여주었다.

- (3) 가공표면조도는 헬리컬각도 변화에 따라 하향 절삭시 모든 회전수에서 헬리컬각도25°의 부등각 엔드밀 가공이 표면조도가 가장 양호하게 나타났음을 확인할 수 있었고, 회전수가 증가할수록 표면조도 상태도 좋아짐을 알 수 있었다.
- (4) 산업현장에서 고집해온 정제화 되어 있는 등각 엔드밀 가공에서 탈피하여 부등각 엔드밀의 장점을 선보임으로 절삭시 가공정밀도 취득과 공구수명을 연장시킬 수 있는 토대를 마련할 수 있었다.

#### 5. 참고자료

- (1) Gillespie, L. K. "The Formation and Properties of Machining Burrs" ASME Technical Report .MRR 75-03, 1973a
- (2) 최원식, 권순구, 정성원 "STD11강에 대한 엔드밀가공의 마찰 및 전단 특성 해석" 대한기계학회 2001년도 추계학술대회 논문집 pp.34-37
- (3) Martellotti, M.E, "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol 63, pp.677-700, 1941
- (4) Tlust, J. and Macneil, P, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol, 24.24, pp.21-25
- (5) Rangwala. S., and Dornfeld, D, "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Condition Monitoring" ASME Trans, Journal of Engineering for Industry Vol.112 PP.219-228 1990
- (6) 맹민재, 조성기, 정준기 "엔드밀가공시 절삭력과 절삭유를 통해 전파된 음향방출을 이용한 공구파손검출" 한국정밀 공학회지 제14권 11호 pp.163-170 1997
- (7) Kannatey-Asibu, E. & Dornfeld, D, Quantitative Relationships for AE from Orthogonal Metal Cutting ASME. J. of Engi. Ind., Vol. 103, 3, pp.330-340, 1981