

## 난삭재인 SKD11의 정면밀링 가공시 절삭특성에 관한 연구 (A Study on the Cutting Characteristics in the Machining of SKD11 by Face Milling)

김 형 석\*, 문 상 돈\*, 김 태 영\*\*

\* 전북대학교 정밀기계공학과 대학원, \*\* 전북대학교 정밀기계공학과

### ABSTRACT

Wear and fracture mode of ceramic tool for hardened SKD11 steel was investigated by face milling in this study. The cutting force and Acoustic Emission(AE) signal were utilized to detect the wear and fracture of ceramic tool. The following conclusions were obtained: (1) The wear and fracture modes of ceramic tool are characterized by three types: ① wear which has normal wear and notch wear, ② wear caused by scooping on the rake face, ③ large fracture caused by thermal crack in the rake face. (2) The wear behaviour of ceramic tool can be detected by the increase of mean cutting force and the variation of the AE RMS voltage. (3) The catastrophic fracture of ceramic tool can be detected by the cutting force(Fz-component). (4) As the hardness of work material increased, Acoustic Emission RMS value and mean cutting force(Fz) increased linearly, but the tool life decreased.

\* Key words : difficult-to-cut material, finish machining, ceramic tool, cutting force, tool wear, tool fracture, face milling

### 1. 서 론

최근 들어 각종 형태의 금형과 기계구조물들에서 고강도, 고경도가 요구되는 사례가 증가하여 열처리를 하고 사용하는 경우가 많아졌다. 또한 열처리와 함께 변형이 피할 수 없는 경우 기계기구에 의한 형상 수정이 필요하다. 이런 종류의 가공은 현재의 경우 연삭가공이 주류를 이룬다. 이 연삭가공을 절삭가공으로 교체하면 생산성의 향상, 설비비의 절감 등 총합적인 성과가 기대된다. 그러나 열처리 강과 같은 고경도재의 절삭가공에는 절삭공구, 절삭조건 및 절삭방법 등의 특별한 검토가 필요하다. 일반적으로 고경도강의 절삭가공에는 CBN공구나 세라믹공구가 사용되어야 하고, CBN공구는 공구자체가 대단히 고가이면서 인성이 약하므로 단속절삭을 하는 공정에서 부적합하리라 생각된다. 또한 세라믹공구는 고경도를 유지하나 충격에 잘 견디지 못해 단속절삭에는 부적합하다고 알려져 있다. 따라서 경화강에 대한 세라믹공구의 고속 절삭 및 수행능력에 관한 연구<sup>(1,2)</sup>, 마모거동 및 마모 메커니즘에 관한 연구<sup>(3)</sup>, 세라믹공구의 초기파손 특성에 관한 연구<sup>(4,5)</sup>와 파손 특성에 관한 연구<sup>(6)</sup>, 경화강의 다듬질 선삭시 절삭력의 특성에 관한 연구<sup>(7)</sup>는 주로 선삭에서 적용되어졌다. 그러나 최근에 세라믹 제조기술의 많은 발달로 적절한 가공조건을 설정하여 혹세라믹공구를 밀링에서의 단속절삭에 적용하는 것은 불가능하지 않다고 생각된다. 밀링에서 세라믹공구의 파손 형태 및 적정 절삭속도 범위에 관한 연구<sup>(8)</sup>가 수행되었다. 하지만 세라믹공구에 대한 밀링에서의 연구는 미진한 편이다.

한편 오늘날 생산공학 분야에서 기계가공의 정밀도와 생산성을 향상시키기 위하여 자동화기술이 급진적으로 추진되고 있는 추세에서 공장자동화 및 무인화 공장을 실현할 때 기본적이고 중요한 것은 시스템의 모니터링 기술이며 그 요소 기술로서 기계가공중 발생하는 공구파손 및 마모의 효과적인 검출이 강조되고 있다. 특히 고경도강의 절삭가공시 공구의 절연에 이상손상이 발생하는 사례가 빈번히 발생하고 있어 가공 중 공구상태의 이상진단의 효과적인 감지기술이 반드시 필요하다.

그리하여 본 논문에서는 고경도로 열처리한 SKD11을 세라믹공구로 다듬질 밀링가공시, 세라믹 공구손상의 특성 및 절삭특성에 대해서 밝히고 공장자동화의 일환으로서 세라믹공구의 다듬질 절삭시 공구의 마모 및 갑작스러운 파손에 대한 절삭력과 AE센서의 관계를 제시하려 한다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

피삭재는 대표적인 금형재인 SKD11강(경도 HRC 45, 50, 55)을 밀링머신을 사용하여 가공하였다. 단속의 효과를 극대화하기 위해 시편의 규격을  $150 \times 65 \times 16^T$ 의 규격으로 가공한 후 경도 HRC45, HRC50, HRC55로 열처리하였다.

정면 밀링머신은 주축회전수를 9단으로 변환할 수 있고 이 속도를 12단으로 변환할 수 있는 만능밀링머신을 사용하였고, face milling cutter로는 대한중식 M415SN04R/L-12를 사용하였다. Insert는  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$  ceramic (SNGN120412)를 사용하였다.

절삭력 측정을 위해 공구동력계 (KISTLER type 9257A)를 사용하였고, 공구동력계에서 나온 절삭력 신호를 증폭하기 위하여 charge amplifier(KISTLER 5001)를 사용하였고 절삭력 데이터의 저장 및 분석을 위해 IBM-PC 486을 사용하였다.

AE 신호를 획득하고 분석하기 위한 AE 측정 장비로서 LOCAN-AT를 사용하였으며 AE sensor로는 공진형 광대역 sensor를 사용하였고 100~300 kHz의 band pass filter를 갖는 preamplifier를 사용하였다. Fig. 1에 절삭실험을 위한 실험장비의 세부적인 배치상태를 나타냈고 획득된 신호들의 처리과정을 나타낸다. Fig. 2는 실험을 위한 SKD11강의 체결과 fly cutting의 형태를 보여준다.

Table 1은 피삭재의 화학적 성분과 경도를 나타낸다.

Table 2는 절삭조건을 나타낸다.

절삭조건에 따라 절삭실험을 수행한 후 공구현미경을 통해 공구의 마모현상을 기록하고 조건에 따라 풀랭크마모를 측정하였다. 또한 공구마모 형태를 현미경위에 CCD 카메라를 장착 마모형태를 PC를 통해 저장하였다.

공구의 수명판단은 다음걸 가공의 관점에서 볼때 표면 거칠기가 나빠지는  $VB_{max}=0.2\text{mm}$ 로 정해 공구수명에 도달할 때까지 절삭을 수행하였다.

가공물의 표면거칠기 측정은 밀링 머신으로 피삭재를 절삭후 Surface roughness tester(Surftest 201)를 고정 프레임에 설치하고 밀링머신 테이블위에 설치하여 cut off 값을 0.8mm로 한 후 피삭재의 단면을 3회 측정하여 중심선 평균 거칠기( $R_a$ ), 최대높이표면거칠기( $R_{max}$ )를 구했다. 정확한 표면거칠기를 획득하기위하여 각각의 데이터의 평균값을 사용했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 세라믹공구의 손상 특징

공구의 마모진전 및 파손의 형태는 크게 3형태로 구별된다. 첫째로 풀랭크면상에 정상적인 마모와 함께 절입깊이부분에 깊게 패인 노치마모가 형성되는 형태이고, 둘째로는 고경도 재료의 절삭으로 인해 풀랭크면에 절입부의 경계부에 깊게 물이 패인 형태이고, 셋째로는 풀랭크마모가 진전하다가 열크랙으로 인하여 공구 경사면에 조개껍질 모양으로 크게 떨어져 나가는 박리형 손상이다.

Fig. 3은 HRC45의 피삭재를 370rpm, feed 127mm/min, 절삭깊이( $a_p$ ) 0.08mm로 670sec 절삭했을때 공구손상형태이다. 풀랭크마모와 함께 절입깊이 경계부에 노치웨어의 형태를 보여준다.

Fig. 4는 HRC55의 피삭재를 715rpm, feed 87mm/min,  $a_p$  0.08mm로 절삭했을때 공구손상형태이다. 고경도 재료로 인해 초기부터 풀랭크면상에 깊게 물이 패인 형태의 손상이다.

Fig. 5-1과 5-2는 HRC50의 피삭재를 520rpm, feed 87mm/min,  $a_p$  0.08mm 절삭했을때 공구손상형태이다. 풀랭크마모의 진전과 더불어 공구 경사면에 열크랙이 발생하여 공구경사면에 조개껍질 모양으로 크게 떨어져 나가는 박리형 손상이다.

#### 3.2 공구의 마모 및 파손감지

Fig. 6은 HRC50을 715rpm, feed 127mm/min,  $a_p$  0.08mm로

절삭할 때 공구 파손시의 각방향의 절삭력을 나타낸다. 이때의 공구파손 형태는 공구의 경사면에 큰 박리형 손상이 발생할 때이고 각방향의 분력중 배분력이 가장 파손에 민감하게 반응하는 것을 나타낸다. 따라서 세라믹공구의 갑작스러운 파손을 절삭력 성분중 배분력의 큰 감소로 감지할 수 있다.

Fig. 7은 HRC45를 520rpm, feed 127mm/min,  $a_p$  0.08mm로 절삭시 공구 파손시까지 절삭력과 공구마모의 관계를 나타낸다. 공구의 마모가 증가함에 따라 절삭력이 증가함을 보여준다.

Fig. 8은 경도 HRC50의 시편을 520rpm, feed 41mm/min,  $a_p$  0.08mm로 가공했을때 평균절삭력과 표면거칠기와의 관계를 나타낸다. 공구의 마모가 증가됨에 따라 평균 절삭력은 증가되고 표면 거칠기도 나빠지며 공구가 파손될때 표면 거칠기는 급격히 나빠진다.

Fig. 9는 경도 HRC45의 시편을 715rpm, feed 41mm/min,  $a_p$  0.08mm의 절삭깊이로 가공했을때 절삭시간과 AE RMS 전압과의 관계를 보여준다. 공구의 마모가 진전됨에 따라 평균 AE RMS 값은 미소하게 증가하였다.

Fig. 9-1은 Fig. 9조건의 절삭시간과 AE RMS 값의 변화를 보여준다. 공구의 손상이 없는 초기에 AE RMS 전압값은 signal amplitude에서 큰 편차를 보이지 않다가 공구가 마모됨에 따라 signal amplitude는 큰 편차를 나타낸다. 이는 마모가 되지 않았을 때 인선이 반복적으로 피삭재를 절삭하여 AE RMS 전압값은 주기적으로 일정하게 나타나지만 공구가 마모되면 절삭인이 무뎌지고 공구면을 형성하는 풀랭크면에 마모가 진전되어 불규칙적인 인선으로 절삭을 수행하기 때문이다. 범용절삭시 공구의 마모 증가에 따른 평균 AE RMS 전압값의 증가와 달리 다듬절 절삭시 공구 마모의 증가에 따른 평균 AE RMS 전압값의 증가는 민감하게 나타나지 않았다.

#### 3.3 경도에 따른 절삭특성

Fig. 10은 990rpm, feed 127mm/min,  $a_p$  0.08mm으로 64sec 절삭했을때 경도에 따른 AE RMS 평균값과 최대값, 그리고 평균 절삭력의 변화를 보여준다. 경도가 증가함에 따라 AE RMS 평균값과 최대값, 그리고 평균 절삭력이 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 11은 feed 41mm/min,  $a_p$  0.08mm의 조건에서 경도에 따른 공구수명의 관계를 보여준다. 본 실험조건에서 경도가 증가함에 따라 공구수명은 짧아졌다. 또한 절삭속도가 증가함에 따라 공구수명은 길게 나타났다.

Fig. 12는 715rpm,  $a_p$  0.08mm로 시편을 6cm절삭했을때 경도와 이송의 변화에 대한 표면거칠기의 변화를 보여준다. 이송의 증가에 따라 표면거칠기는 나빠진다. 또한 고경도재료 일수록 표면거칠기는 나빠진다.

### 4. 결 론

정면밀링머신을 이용하여 SKD11강을 세라믹공구로 절삭 가공하였을때 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 세라믹구의 파손의 형태는 크게 3가지로 나눠진다.  
 첫째, 플랭크면상에 정상적인 마모와 함께 절입깊이 부분에 깊게 패인 노치마모가 형성되는 형태  
 둘째, 고경도 재료의 절삭으로 인해 플랭크면에 절입부의 경계부에 깊게 골이 패인 형태  
 셋째, 플랭크웨어가 진전하다가 얼크랙으로 인해 공구경사면에 조개껍질모양으로 크게 떨어져 나가는 박리형 손상의 형태
- ② 공구의 마모는 평균절삭력 성분의 증가로 감지할 수 있었다. 공구의 마모는 평균 AE RMS 전압값의 증가보다는 AE RMS 전압값의 진폭의 편차에 민감히 반응하였다.
- ③ 세라믹 공구로 다듬질 절삭을 할 때 파괴의 검출은 절삭력으로 감지가 가능하였고, 특히 절삭력 중에서 배분력을 공구의 파손에 민감하게 반응하였다.
- ④ 경도의 증가에 따라 AE RMS값 및 평균절삭력은 선형적으로 증가하였으나, 공구수명은 반비례하여 감소하였다.

#### 참고문헌

- [1] High-Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools; N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitagawa, Annals of the CIRP Vol. 42/1/1993
- [2] The Performance of Ceramic Tool Materials for the Machining of Cast Iron; S. K. Bhattacharyya, E. O. Exugwu and A. Jawaid, Wear, 135(1989) pp. 147~159
- [3] Wear Behaviour and Wear Mechanism of Ceramic Tools In Machining Hardened Alloy Steel; Hong Xiao; Wear, 139(1990) pp.439~451
- [4] A Study on the Early Fracture Characteristics of Ceramic Tool for Carbon Tool Steel Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 12. No. 6. June. 1995. 김 광 래, 유 봉 환
- [5] Early Fracture of Ceramic Tools in Turning of Hardened Steel(1st Report) Kenji Oishi and Toshihumi Nishida JSPE-55-09 '89-09-1657 ; 精密工學會誌 55/9/1989
- [6] Study on the fracture characteristic of ceramic cutting tools (first report); Kenji Oishi and Toshihumi Nishida; Wear, 154 (1992) pp. 361~370
- [7] Cutting Force Characteristics in Finish Machining of Hardened Steel, Toshiaki Ohtani, Kenryo Fujise and Hiroshi Yokogawa, JSPE-54-10 '88-10-pp. 1969
- [8] Face Milling of Hardened Steels by TiC Added Alumina Ceramic Tool (1st Report) Yasuo Yamane, Tetsuhiko Okano and Norihiko Narutaki; JSPE-56-03 '90-03-539
- [9] 切削工具와 加工技術-機電研究社, 姜求鳳著
- [10] 金屬切削理論- 東明社, 徐南燮著

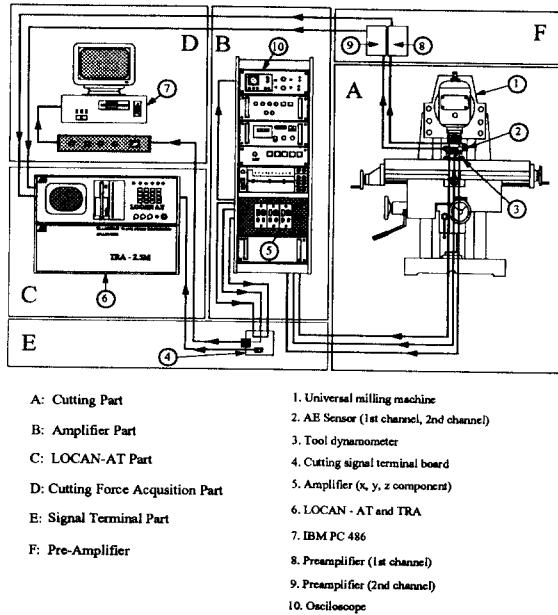


Fig. 1 Arrangement of cutting test.

	Chemical composition (%)								Hardness (HRC)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	
SKDII	14~16	0.4	0.6	0.03	0.03	11~13	0.8~1.2	0.2~0.5	45,50,55

Table 1 Chemical composition and hardness of work materials

Machine	Universal Milling Machine
Environment	Dry
Milling Cutter	M415SN04R/L-12(KT $\phi$ 100 mm) <ul style="list-style-type: none"> <li>● lead angle : 15°</li> <li>● axial rake angle : -7°</li> <li>● radial rake angle : -5°</li> </ul>
Milling Insert	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC ceramic (Inserts-SNGN120412)
Work Material	SKD 11 (150×65×16 <sup>T</sup> )
Cutting Conditions	RPM : 370, 520, 715, 990 Feed speed (mm/min): 41, 87, 127 Depth of cut : 0.08 mm Center milling

Table 2 Experimental Condition

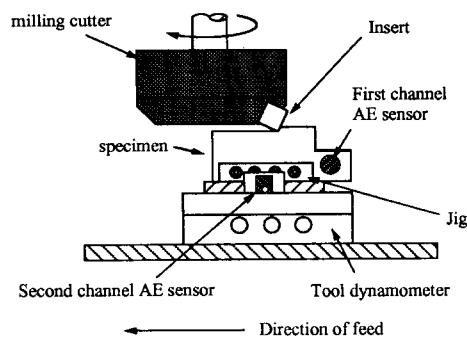


Fig.2 Fly cutting and specimen clamping

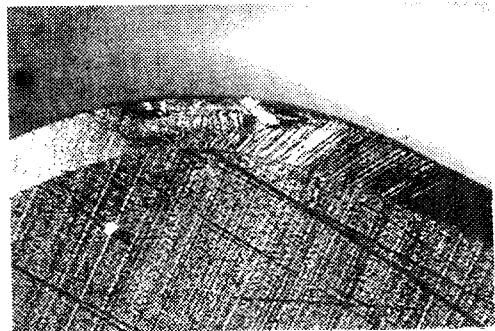


Fig. 5-1 Wear type of ceramic tool (thermal cracks in the rake face, HRC=50, RPM=520,  $f=87, a_p=0.08$ )



Fig. 3 Wear type of ceramic tool (HRC=45, RPM=370,  $f=127, a_p=0.08$ )



Fig. 5-2 Fracture type of ceramic tool



Fig. 4 Wear type of ceramic tool (HRC=55, RPM=715,  $f=87, a_p=0.08$ )

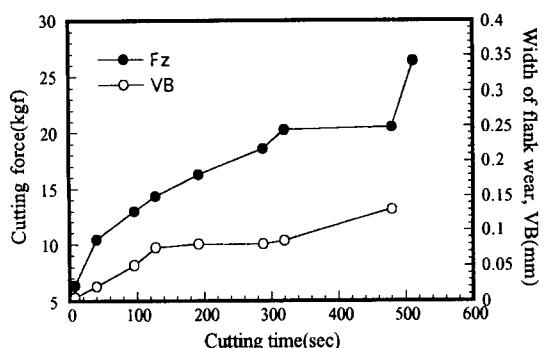


Fig. 7 The relation between cutting force and tool wear (HRC=45, RPM=520,  $f=127, a_p=0.08$ )

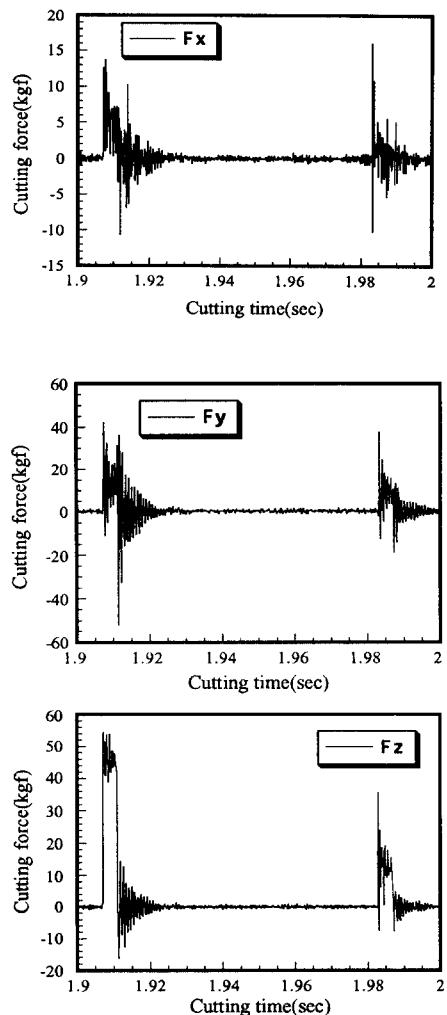


Fig. 6 The trend of  $F_x, F_y, F_z$  when cutting edge breaks(HRC=50,RPM=715,f=127, $a_p=0.08$ )

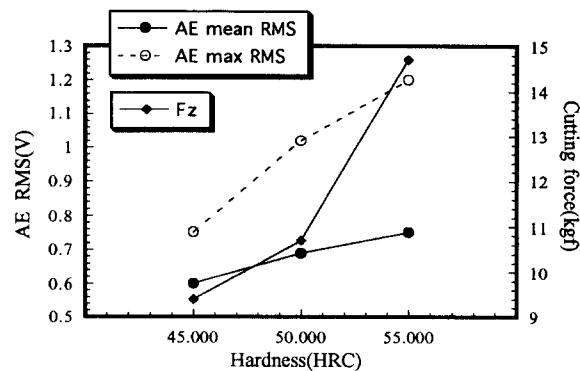


Fig.10 The relation between AE voltage and cutting force according to hardness  
(RPM=990, feed=127,  $a_p = 0.08$ )

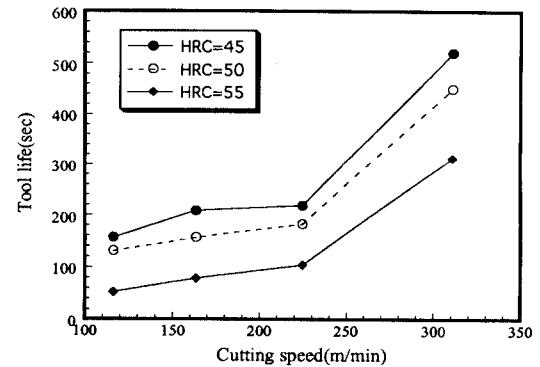


Fig. 11 The relation between tool life and cutting speed according to hardness(feed=41, $a_p = 0.08$ )

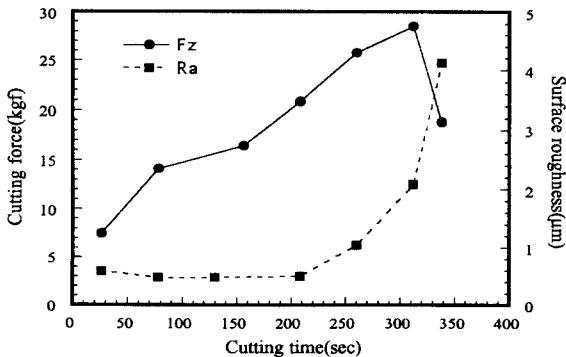


Fig. 8 The relation between cutting force and surface roughness (HRC=50, RPM=520, f=41, $a_p = 0.08$ )

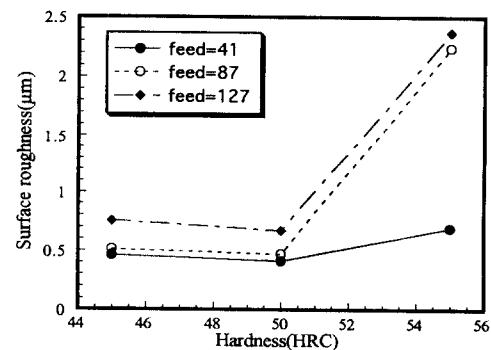


Fig. 12 The relation between roughness(Ra) and hardness when 6cm of workpiece was cut (RPM=715, $a_p = 0.08$ )

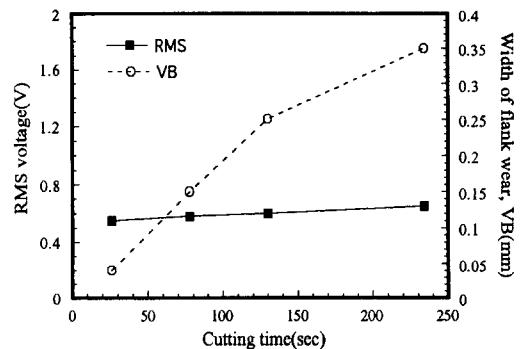
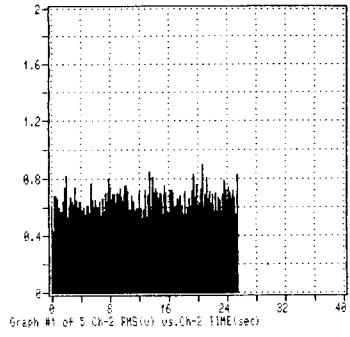
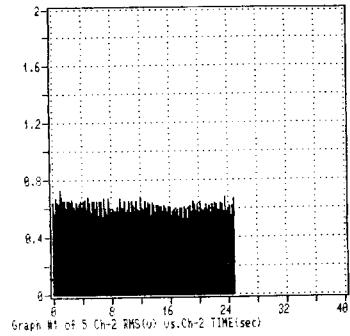
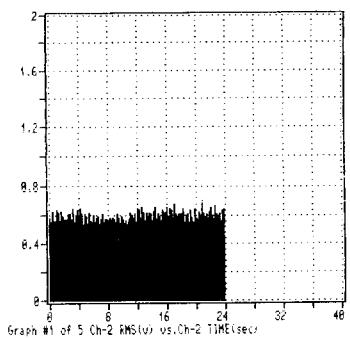
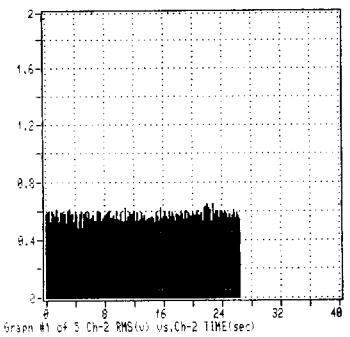


Fig. 9 The relation between AE mean RMS and tool wear (HRC=45, RPM=715, feed=41,  $a_p = 0.08$ )

Fig. 9-1 The relation between AE RMS and cutting time (HRC=45, RPM=370, f=127,  $a_p = 0.08$ )