

CNC선반에서 연속절삭 및 단속절삭시 공구손상에 대한 음향방출신호 특성 연구

김 태 복*, 강 신 엽*, 왕 덕 현**, 김 원 일**, 이 윤 경**

A Study on the Characteristics of AE Signals of Tool Failure for Continuous and Interrupted Cutting under CNC Lathe

Tae-bok Kim*, Shin-youb Kang*, Duck-hyun Wang**, Won-il Kim**, Yun-kyung Lee**

ABSTRACT

Automatic monitoring of cutting process is one of the most important technology in machining. AE sensing technology has been applied to monitoring process and proved to be effective in detecting tool abnormalities such as tool wear and fracture. In this experimental study, AE signals were detected from the tool holder for continuous and interrupted cutting, which obtained from changing workpiece material configuration, under control of constant cutting speed from CNC lathe. From statistical and frequency analysis, the AE signals were analyzed to obtaining the characteristics of continuous and interrupted cutting conditions and tool failure. The Kurtosis values decreased but RMS voltages increased as the cutting speed increased, in both continuous and interrupted cutting. RMS voltage is suddenly increased but Kurtosis value is suddenly decreased when tool failure condition. Power spectrum density of AE signals when tool failure reaches extreme value around 0.065 cycles/ μ m.

Key Words : Continuous Cutting(연속절삭), Interrupted Cutting(단속절삭), Acoustic Emission(AE, 음향방출), Tool Failure(공구손상)

1. 서 론

제품의 생산성 및 정밀도를 향상시키기 위해서 유연성 생산시스템(FMS), 컴퓨터 통합생산(CIM)등의 새로운 시스템이 개발되어 운영될 단계에 있다. 이러한 생산시스템은 아직도 많은 부분에서 off-line 상태로 운영되고 있

고, 전반적인 시스템의 최적 조건에서 벗어난 경우에 대한 모니터링 기술이 미흡한 경우가 많이 있다. 시스템 모니터링 기술은 공장자동화 및 무인화공장의 완성의 기본이 되며, 특히 공구의 마멸 및 파손시 on-line 측정은 중요한 단계중 하나이다. 절삭가공중 공구의 상태를 모니터링 하는 방법에는 광학, 전기저항등에 의한 직접적인 방

* 경남대학교 대학원 기계공학과

** 경남대학교 공과대학 기계공학과

법과 가속도, 온도 등에 의한 간접적인 방법이 있으며, 음향방출(Acoustic Emission : AE) 신호에 의한 방법은 가동중인 설비의 진단 및 검사가 가능하고, 절삭공정의 감시와 해석에 효과적으로 이용될 수 있다.

음향방출신호를 이용한 절삭과정에 대한 연구는 1970년대 후반부터 이루어지기 시작하였으며 두 가지 기본 방향으로 구분할 수 있다. 즉 하나는 절삭조건 혹은 공구의 여러 가지 매개변수와 AE신호 특성과의 정량적인 관계를 설정하는 것이고, 다른 하나는 공구마멸 및 파손을 예측하기 위하여 사용하는 것이다. 생산공정의 온라인 측정으로 Iwata⁽¹⁾ 등은 가공중 공구의 여유면마멸에 대한 음향방출 신호 특성에 대한 연구가 이루어졌다. 한편, Dornfeld^(2,3) 등은 기본적인 절삭기구에 대한 AE신호와와의 관계를 수식적으로 정립하여 직교선삭과정에서 실험적으로 연구하였다. 선삭가공에서 공구마멸에 대한 AE신호의 통계학적 해석이 연구되었으며⁽⁴⁾, 공구파손에 대한 통계학적인 연구와 주파수 영역에서의 해석이 또한 이루어졌다^(5,6). 절삭과정의 파라미터들의 변화는 AE신호의 변화에 상관 관계가 있음을 보였고, 2차원 절삭에서 AE신호의 RMS값은 절삭속도, 변형률속도에 깊은 관계가 있음을 보였다. 단속절삭과정인 밀링가공중 공작물 측면에서 절삭조건에 따른 공구의 특성이 연구되었으며, 이 연구는 공구의 회전에 의한 측정의 어려움 때문에 공작물에서 간접적으로 측정이 되었다. 국내적으로는⁽⁷⁻⁹⁾ 90년대에 공구파손과 공구마멸의 측면에서 연구되고 있으며, 연속절삭은 선삭가공의 공구쪽에서, 단속절삭은 밀링가공의 공작물쪽에서 AE신호를 측정하고 있다.

본 연구에서는 공작물의 형상을 변경하여 CNC 선반에서 연속 및 단속절삭을 실행하여 이에 따른 AE신호를 측정하여 통계적 방법과 주파수 영역에서 분석하려고 한다. 즉, 연속절삭과 단속절삭에서 발생하는 AE신호를 통계학적 방법인 RMS, Kurtosis 및 확률밀도로 분석하고, 또한 파워 스펙트럼 밀도의 주파수 영역에서도 해석하려고 한다. 또한 공구쪽에 방전가공으로 작은 슬롯을 만들어 공구가 조기 파손될 수 있도록 하여 공구파손 전후의 발생하는 AE신호에 대한 특성을 파악하려고 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

연속절삭과 단속절삭을 같은 조건하에서 실행하기 위하여 Fig. 1에 나타난 것처럼 공구홀더 부분에 AE센서를

부착하여 공구마멸 및 파손시 신호의 특성을 연구하였다. 실험에 사용한 AE실험장치는 Physical Acoustic Corp.에서 제작한 장치로, 계측에 있어서 3단계로 분류할 수 있다. AE센서를 중심으로 하는 입력부, 아주 미세한 입력신호에 대해서 증폭을 하는 증폭부, 그리고 신호처리부로 나눌 수 있다. 증폭부는 preamplifier와 AE main system에 증폭부가 있으며, 신호처리부는 STR*825의 A/D converter로 AE전용 소프트웨어인 SONIX 프로그램으로 신호 데이터를 취득한 후 처리를 하였다. Table 1에 본 실험에 사용된 실험 장치를 나타내었다.

Table 1 Experimental Equipments

Equipments	Model/Manufacturer
CNC Lathe	Hi-ECO11(Hwacheon,Korea)
AE Main	1200A(PAC,USA)
Preamplifier	1220A(PAC,USA)
AE Sensor	R15,150KHz(PAC, USA)
A/D Converter	STR*825(USA)
PC	486DX2-8M RAM

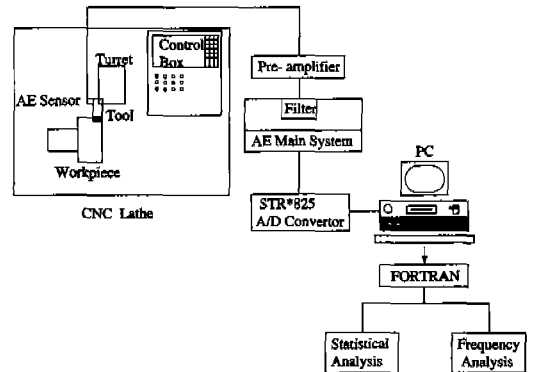


Fig. 1 Experimental Setup of AE Signal Measurement

파삭재는 SM45C강을 사용하였으며, 연속절삭에서는 Fig. 2(a)에 나타난 형태로, 그리고 단속절삭인 경우에는 Fig. 2(b)와 같이 공작물의 형상을 변형하여 단속절삭을 선반에서 같은 조건에서 실험을 실행하였다. 실험에 사용한 절삭공구는 정상적인 공구를 가지고 정상마멸 과정에서 음향방출신호를 분석하였으며, 또한 Fig. 3에서 보는 것처럼 Insert끝에서 5mm 되는 부근에 방전가공으로 폭 1mm 깊이 3mm의 작은 홈을 내어서 공구를 조기 파손시켜서 파손전후의 AE신호를 측정하여 분석하였다.

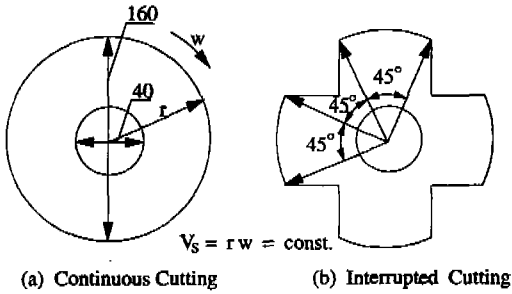


Fig. 2 Workpiece Material Configuration

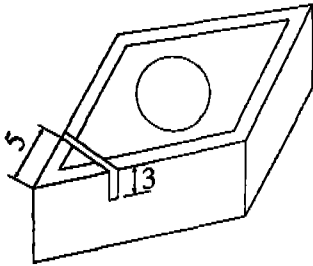


Fig. 3 Tool Configuration for Fracture

2.2 실험 방법

절삭작업시 AE센서의 위치는 여러면에서 중요하며, 센서의 위치에 따라 AE신호의 특성이 다르게 나타날 수 있으므로, 신호처리를 하는데 있어서 최대한의 Noise는 줄이고, 절삭신호만을 얻을 수 있는 위치에 AE센서를 부착하여 보다 더 정확한 AE신호를 얻을 수가 있다. CNC선반의 경우, AE센서를 설치할 수 있는 위치로는 공구의 날부분, 공구의 홀더부, 그리고 ATC(Automatic tool change)부에 설치가 가능하며, 본 실험에서는 공구 홀더부에 칩의 충격을 완화하기 위해서 마그네틱으로 AE센서를 누름으로서 센서의 움직임과 칩에 의한 AE센서의 충격을 방지하였다. 절삭실험은 AE센서를 CNC선반의 공구홀더 부근에 부착한 후 초경 Insert팁을 사용해서 절삭조건을 변화해 가면서 실행하였다.

2.3 실험 조건

절삭가공시 방출되는 AE신호는 절삭속도, 피삭재의 재질 및 절삭공구의 상태 등에 의해서 직접적인 영향을 받으므로 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도 등의 절삭조건에 변화에 따른 공구의 파손을 예측하는 것은 중요한 일이다. 본 연구에서는 이송속도를 0.2mm/rev로 일정하게

하고 연속 및 단속절삭의 특성평가에서는 절삭깊이를 1mm로 파손실험에서는 2mm로하여 실험을 실행하였다. 즉, 본 연구에서는 CNC선반에서 Program을 작성하여 절삭속도를 120, 150, 200, 250m/min으로 단계적으로 변화하면서 실험을 수행하였다. CNC선반에서 절삭이 진행됨에 따라서 공작물의 반경이 작아지고 그 결과 절삭속도가 감소한다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 절삭속도를 항상 일정하게 유지시키는 G96기능으로 주속 일정제어를 하였다. 또한 Fig. 3에서 보는 것처럼 임의적으로 공구에 결함을 주어 공구파손 실험을 실행하였다. Table 2는 단속절삭과 연속절삭시의 가공조건들과 공구파손시의 가공조건들을 나타내고 있다. 공구파손 실험은 150 m/min에서 절삭깊이를 2mm를 주어 실행하였으며, gate length를 2000usec로 600개의 신호들을 동시에 취득하여 해석을 하였다.

Table 2 Cutting and Data Acquisition Conditions

	General	Tool Failure
Cutting Speed [m/min.]	120,150,200,250	150
Feedrate[mm/rev.]	0,2	0.2
Depth of Cut[mm]	1	2
Sampling Rate[MHz]	3.125	1.563
Number of Waveforms	1	599
Gate Length[usec]		2000

3. 음향방출신호의 해석 방법

3.1 통계학적 해석

음향방출신호는 매우 불규칙적이고, 비주기성을 띠고 있으므로 이러한 신호를 정량적으로 분석하기는 매우 어렵다. 이 음향방출신호를 정량적으로 나타내는 기본적인 방법중의 하나는 음향방출신호의 에너지를 측정 분석하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이러한 에너지량의 편리한 측정방법이 신호의 실효치 전압값이다. 실효치 전압값은 RMS(Root Mean Square)값으로 나타내며, 이 RMS값을 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$RMS = \left[\frac{1}{\Delta L} \int_0^{\Delta L} z^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

한편, 확률밀도함수의 모양은 통계학적으로 특성을 나타내며, 이는 다음과 같이 모멘트의 형태로 나타낸다.

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} z^n p(z) dz \quad (2)$$

Kurtosis값은 4차의 중앙 모멘트값의 표준상태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_n = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 p(z) dz \quad (3)$$

여기서, $p(z)$: 확률밀도함수 (Probability density function)
 σ^2 : 분산 (Variance)

Kurtosis는 중앙값의 뾰족한 정도를 나타내는 변수이다. 이 값이 3이면 Gaussian 분포를 나타내며, 3보다 크면 중앙값에서 보다 뾰족한 정도를 나타내며 Leptokurtic이라 하며, 3보다 작으면 Platykurtic이라 한다.

3.2 주파수영역에서 해석

자기상관관계(Autocorrelation)함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{\sigma^2} \quad (4)$$

여기서, $R(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{L} \int_0^L z(x)z(x+\tau)dx \right]$

한편 Power spectrum 밀도 함수는 다른 형태로 자기상관관계함수의 의미를 나타낸다.

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

0.2mm/rev의 일정한 이송속도에서, 피삭재의 형상을 변경하여 연속 및 단속절삭을 행하였을 경우 절삭속도의 변화에 따른 AE신호들의 특성을 연구하였다. Fig. 4는 반복 실험을 통하여 얻은 연속 및 단속절삭시 AE신호의 RMS값들의 범위를 나타낸 것이다. 연속절삭인 경우 신호들의 RMS값들은 절삭속도에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 연속절삭인 경우의 AE신호의 RMS값들이 단속절삭인 경우보다 크게 나타났다. 또한 단속절삭인 경우 절삭과 비절삭을 반복하고 있기 때문이며, 절삭속도가 증가함에 따라 완만하게 증가한다. Fig. 5는 연속 및 단속절삭시 AE신호의 Kurtosis값들을 나타내고 있으며, 절삭속도가 증가함에 따라 연속 및 단속절삭 모두 감

소하여 Gaussian분포를 나타내고 있으며, 연속절삭인 경우 더욱 Gaussian분포에 접근한다.

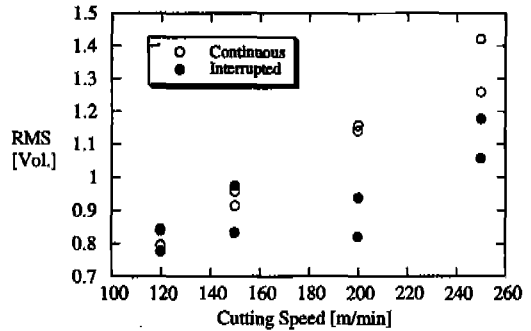


Fig. 4 RMS Voltage of Measured Signals vs. Cutting speed

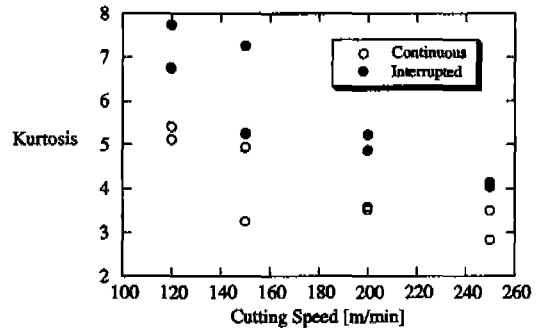


Fig. 5 Kurtosis of Measured Signals vs. Cutting Speed

Fig. 6은 연속 및 단속절삭시 이송속도 0.2 mm/rev와 절삭속도 150m/min인 경우의 AE신호 특성을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 연속절삭시 측정된 AE신호이며 연속적인 칩이 배출되다가 절단이 되나, 단속절삭에서는 불연속적인 칩이 배출되어 Fig. 6(b)와 같은 경향으로 나타난다. Fig. 6(c)는 파워 스펙트럼 밀도 함수를 나타내고 있으며, 연속절삭인 경우에 더 높은 밀도를 나타내고 있다. Fig. 6(d)는 AE신호들의 누적확률분포함수에 대한 것이며, 연속절삭시 측정된 AE신호들이 거의 연속적으로 나타나고 있으며, 단속절삭과 달리 Fig. 6(d)의 누적확률분포함수에서 보듯이 중앙값(zero)에서 낮은 분포를 하고 있다. 이것은 연속절삭인 경우의 Kurtosis값들이 단속절삭인 경우보다 낮은 값인 3에 접근한 Fig. 5와 연관지을 수 있다.

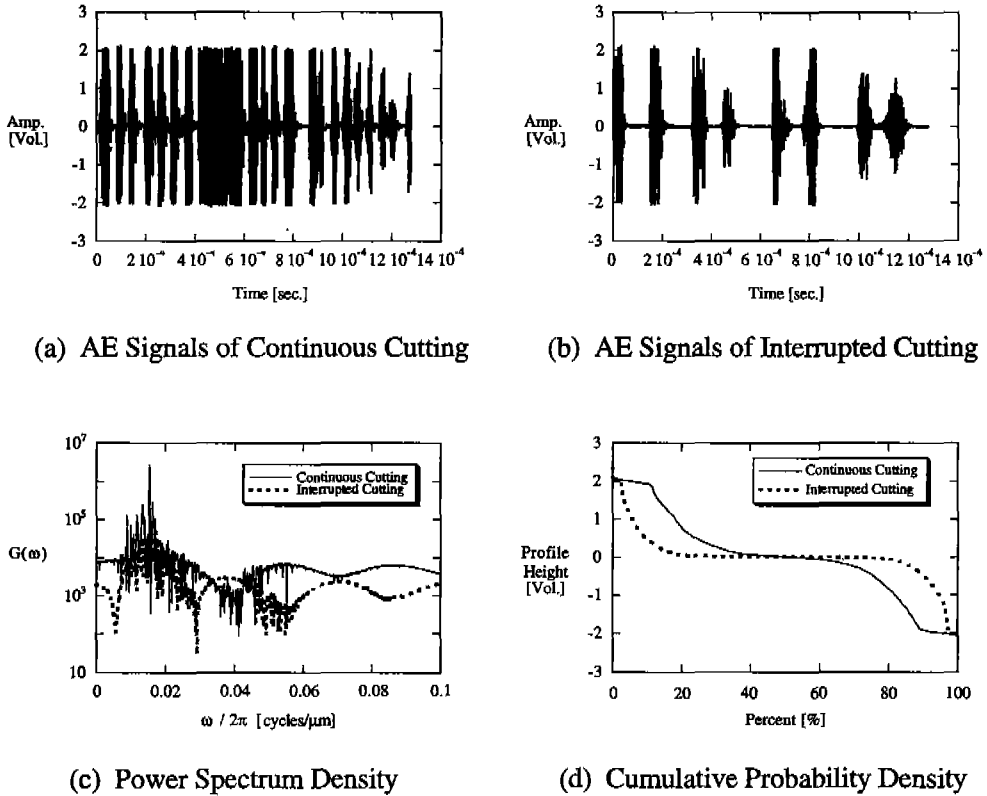


Fig. 6 Signal Characteristics of Continuous and Interrupted Cutting

연속절삭에서 공구에 작은 흠을 내어 공구의 파손이 일어날 때 발생하는 AE신호에 대해서 연구를 하였다. 이 공구파손 실험에서 gate length를 2000 μ sec로 하였으며, 이러한 AE신호를 599개를 file로 저장하였다. 저장된 599개의 신호를 관찰하여 돌발적 AE신호가 발생하였을 때 그 순간을 공구파손점으로 추정할 수 있다. 저장된 599개의 신호에 대해서 공구의 파손, 즉 돌발형 AE신호가 발생한 점을 기준으로 전후의 9개의 AE신호를 A/D 변환기로 변환하여 여러 가지 특성을 분석하였다.

Fig. 7은 시간의 변화에 따른 RMS값의 변화를 나타낸 것이며, 그림에서 보는 것과 같이 2000 μ sec씩의 4번째 순간에 아주 높은 RMS값을 나타내고 있는데, 이것은 돌발적인 AE신호로 이 순간을 공구의 파손으로 추정할 수 있다. 공구가 파손된 후 5번째의 급작스런 RMS값의 감소는 공구의 날끝이 떨어져 나가면서 공구와 공작물간의 비접촉 상태로 가공되어지고 있음을 짐작할 수 있다. Fig.

8은 공구가 파손되는 순간을 전후하여 AE신호를 4차 중앙 모멘트값인 Kurtosis값으로 나타낸 것이다. RMS값이 갑자기 상승하는 순간, 즉 공구가 파손되는 점에서의 Kurtosis 값은 갑자기 감소하는 경향을 나타낸다.

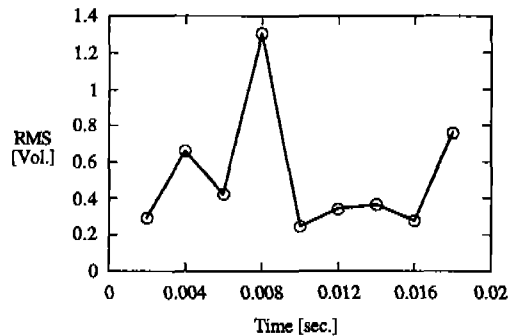


Fig. 7 RMS Trend around Tool Failure, Cutting Speed: 150m/min. Depth of Cut: 2mm

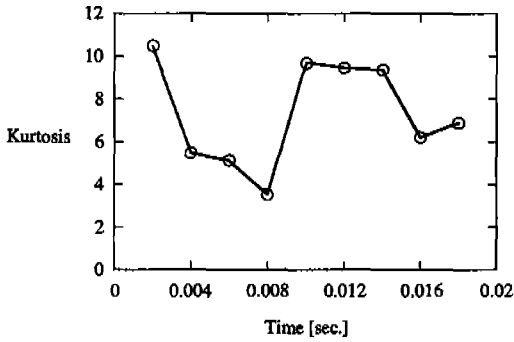
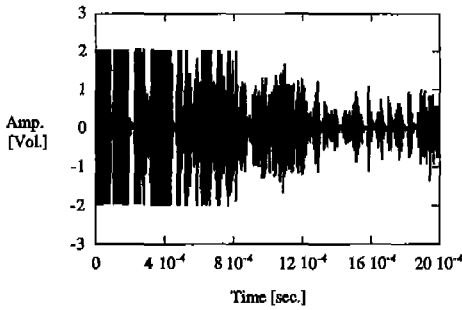
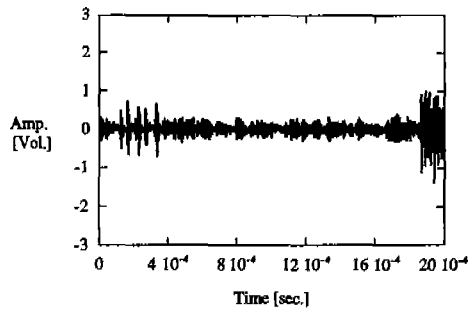


Fig. 8 Kurtosis Trend around Tool Failure, Cutting Speed:150m/min. Depth of Cut:2mm.

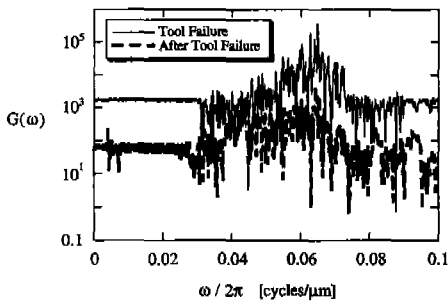
Fig. 9는 연속절삭시 공구파손 순간의 전후의 AE측정값의 특성을 분석한 그림들이다. Fig. 9(a)는 공구파손시 측정된 AE신호를 나타내고 있고 Fig. 9(b)는 공구파손 후의 AE신호값이다. 공구파손시 파워 스펙트럼 밀도



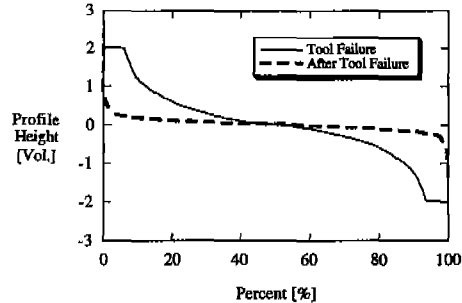
(a) AE Signals when Tool Failure



(b) AE Signals after Tool Failure



(c) Power Spectrum Density



(d) Cumulative Probability Density

Fig. 9 AE Signal Characteristics when Tool Failure, Measurement Count:4Pass(Tool Failure) 5Pass(After Tool Failure), Cutting Speed 150m/min. Depth of Cut:2mm

함수는 Fig. 9(c)에서 보는 것처럼 0.065cycles/ μ m에서 공구파손 후의 값보다도 100배 정도의 높은 주파수 특성을 나타내고 있다. Fig. 9(d)는 파손순간과 파손 후 AE 신호의 확률분포함수와 누적확률분포를 나타낸 것으로 파손 후에 중앙값에 집중되는 Gaussian분포에서 벗어나게 된다.

5. 결론

CNC선반에서 주속일정제어로 피삭재 형상을 변경하여 연속 및 단속절삭을 실행하면서, 공구홀더 부근에서 얻은 AE신호를 통계학적 분석과 주파수 영역에서의 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭속도가 증가함에 따라 AE신호의 RMS값은 증가하는 경향을 나타내고, 통계적 분석값인 Kurtosis값은 감소하는 경향을 나타낸다.
2. 공구가 파손된 순간과 파손된 후의 AE신호는,

RMS값이 갑자기 상승하고 있으며, 또한 Kurtosis값은 공구파손 순간에서 하강하며 Gaussian분포에 접근을 하고 파손 후에는 중앙값에 집중하는 Gaussian분포에서 벗어난 상태가 된다.

3. Power spectrum 밀도 함수는 연속절삭시 공구파손 순간에 0.065cycles/ μ m에서 높은 값의 주파수 특성을 나타내고 있다.

후 기

본 연구는 1994년도 경남대 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. K. Iwata and T. Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of the CIRP, Vol. 26, No. 1, pp. 21-26, 1977.
2. D. A. Dornfeld and E. Kannatey-Asibu, "Acoustic Emission during Orthogonal Metal Cutting", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 22, No. 5, pp.285-296, 1980.
3. E. Kannatey-Asibu and D. A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting",

- J. of Engg. for Industry, ASME, Vol. 103, pp. 330-340, 1981.
4. T. Moriwaki, "Application of Acoustic Emission Measurement to Sensing of Wear Breakage of Cutting Tool", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg. Vol. 17, No. 3, pp. 154-160, 1983.
5. T. Blum, I. Suzuki and I. Inasaki, "Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg, Vol. 22, No. 4, pp. 301-308, 1988.
6. E. N. Diei and D. A. Dornfeld, "A Model of Tool Fracture Generated Acoustic Emission during Machining", J. of Engg. for Industry, ASME, Vol. 109, pp. 227-233, 1987.
7. 윤종학, 강명순, "음향방출을 이용한 가공중의 엔드밀 파손 검출에 관한 연구", 한국정밀학회지, 제 7권, 제3호, pp. 75-82, 1990.
8. 김재열, 심재기, 박환규, 오환교, "2차원 절삭시의 각종 파라미터와 음향방출신호와의 상호 관계에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 8권, 제 1호, pp. 74-83, 1991.
9. 한응교, 이병성, 박준서, 김순기, "선삭가공에 있어서 AE 신호와 표면거칠기에 의한 공구손상에 대한 평가", 한국정밀공학회지, 제 9권, 제 4호, pp. 72-77, 1992.