

절삭력 신호특성과 히스토그램 분석에 의한 공구마모와 파손 진단

정진용*, 유기현**, 서남섭***

Diagnosis of Tool Wear and Fracture Using Cutting Force Signal Characteristics and Histogram Analysis

Chin-Yong Cheong*, Ki-Hyun Yu**, Nam-Sup Suh***

ABSTRACT

Automatic monitoring the cutting state is one of the important problems to increase the reliability of modern machining processes. In this study, cutting force signals were used in order to monitor the tool wear and fracture in the turning process. Turning experiments were performed using cemented carbide insert tools(K20) and STS304 steel as a workpiece. Cutting force signal characteristics and histogram analysis method were used to recognize the cutting states. It was found that tool wear and fracture can be diagnosed from the cutting force signal coefficient of variation(C.V.) and histogram analysis.

Key Words : Cutting State(절삭상태), Monitoring(감시), Histogram Analysis(히스토그램분석), Diagnosis(진단), Coefficient of Variation(변동계수)

1. 서론

기계가공의 완전 자동화와 무인화를 실현하기 위해서는 절삭가공중에 발생하는 각종의 이상가공상태를 인-프로세스(in-process) 상태에서 검출하는 것이 필수적이다. 검출 항목으로는 절삭공구의 마모와 파손, 가공물의 표면 거칠기, 절삭 칩의 형태와 채터진동 발생, 구성인선 생성 등을 들 수 있다. 이와 같은 현상을 인-프로세스 상태로 검출하기 위해서 지금까지 각종 원리에 기초한 감시방법¹⁻⁴⁾이 연구·개발되고 있다. T.Sata⁵⁾ 등은 절삭력신호의 스펙트

럼분석을 통한 선형식별함수(linear discriminant function)를 이용하여 절삭상태를 인식하는 방법을 제시하고, S.Rangwala와 D.A.Dornfeld⁶⁾는 절삭력 및 AE 센서 신호의 융합에 의한 신경망 모델을 이용하여 공구상태 진단에 관한 연구를 발표하였다. I.Inasaki와 S.Yonetsu⁷⁾는 공구파괴가 AE신호에 미치는 영향을 연구하였고 T.Moriwaki와 M.Tobito⁸⁾는 AE신호의 측정으로 코팅공구 수명평가의 새로운 접근방법을 제시하였다. 그럼에도 불구하고 인-프로세스 상태로 검출 가능한 정보는 한정되어 있고 또한 신속하고 신뢰성 있는 진단

* 군장공업전문대학 자동차 시험과
 ** 전북대학교 기계공학과 대학원
 *** 전북대학교 기계공학과

방법이 적은 실정이다.

본 논문에서는 입력정보로부터 이러한 이상가공상태 중 공구의 마모와 파손상태의 진단을 위하여 절삭력 신호특성과 히스토그램 분석을 이용하면 보다 처리하기 쉽고 신속한, 신뢰성 있는 공구감시 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대하고 연구하였다.

2. 절삭력신호의 특성

절삭시 발생하는 절삭력은 절삭상태의 변화를 가장 민감하게 나타내는 요소이다. 이러한 절삭력 중 배분력을 이용하여 공구의 마모와 파손상태를 검출, 진단하였다. 절삭력신호의 평균값이 관측 데이터의 크기를 나타내는데 비하여 데이터의 변동성을 나타내는데는 절삭력표준편차 혹은 절삭력변동계수^①를 사용한다. 절삭력 데이터 중 표준편차는 절삭력평균이 증가함에 따라 증가하는 경향이 있으므로 변화에 민감하지만 순수한 변동량을 나타내기에는 어려움이 따르므로 순수 변동량을 알아보기 위해서 표준편차를 평균으로 나눈 변동계수(C.V., coefficient of variation) 값을 사용하고 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1)$$

$$C.V. = S / \bar{x} \quad (2)$$

여기에서,

S : 표준편차

n : 데이터 전체의 갯수

x_i : i 번째 데이터의 값

\bar{x} : n개 (전체) 데이터들의 평균

이다.

3. 실험장치 및 방법

가공재료로 스테인레스강(STS304), 공구로 초경인서트공구(K20)를 사용하였고, 공구와 홀더의 제원은 Table 1, 공구 설치시 공구기하학적 형상과 절삭조건은 각각 Table 2, Table 3과 같다. 또한 공구파손 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 공구 경사면에 방전가공기를 이용하여 슬롯(slot)을 가공하였다. 공구마모는 윤곽투영기

(Mitutoyo PJ 300)를 이용하여 여유면 마모(flank wear)를 측정하였으며 마모한계는 여유면 평균마모폭(VB=0.3mm)으로 설정하였다. 가공은 CNC선반(DAEWOO PUMA 6S)을 이용하고 가공물의 표면에 발생하는 가공경화를 고려하여 0.03mm로 수회 전절삭을 수행한 후 건식절삭으로 실험하였다. 절삭력신호(주분력:Fc, 배분력:Ft, 이송분력:Ff)는 공구동력계(Kistler 9257A)에서 측정된 신호를 증폭기에서 증폭하여 A/D 컨버터를 통하여 컴퓨터로 보내어 절삭력분석 프로그램과 히스토그램분석 프로그램으로 해석되어진다. 절삭력신호는 각 조건에서 5~20sec동안 절삭하며 0.1sec 단위로 블럭(block)화하여 획득하고 특성변수 계산을 위해 만들어진 프로그램에 의해서 절삭력평균, 표준편차, 변동계수를 구하였다. 히스토그램 분석은 0.1sec의 블럭화 데이터에서 200개의 절삭력 데이터를 2.5kg 단위로 분석하여 출력하고 데이터의 분포형태와 정도를 이용하여 절삭상태 판정 알고리즘에 의해 공구마모와 파손을 진단하였다. 최종적으로 절삭력 신호특성과 히스토그램 분석 결과를 이용하여 공구마모와 파손을 진단하는데, 이때 Fig. 2는 공구상태를 판정하기 위한 흐름도 이고 Fig. 3은 실험장치의 개략도이다.

Table 1. Specification of insert and tool holder

Grade	K 2 0
Standard	160304GN(ASA 322) • Cutting edge length: 16mm • Thickness : 3mm
Tool holder	CTGPR(Korea tungsten)

Table 2. Tool geometry

Major cutting edge angle	0°
Back rake angle	0°
Effective rake angle	6°
Side relief angle	5°
Inclination angle	0°
Nose radius(mm)	0.4

Table 3. Cutting condition

Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)
100, 150, 200	0.1, 0.25, 0.38	0.4, 0.8, 1.2

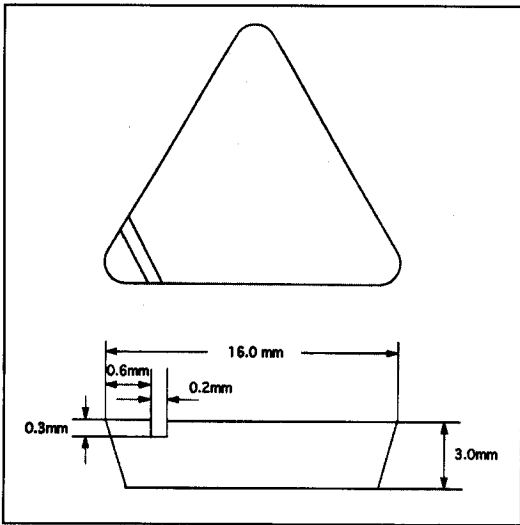


Fig. 1 Dimensions of slotted insert

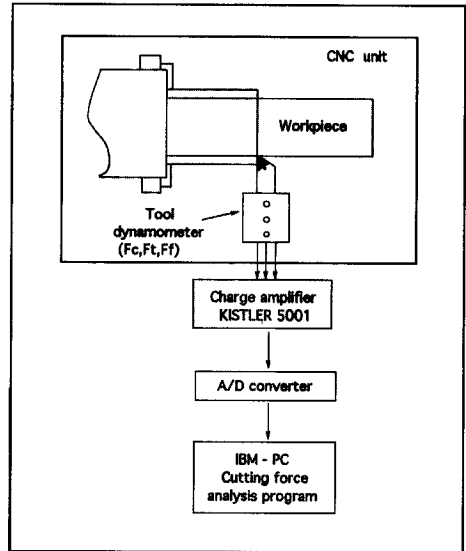


Fig. 3 Block diagram of the data acquisition

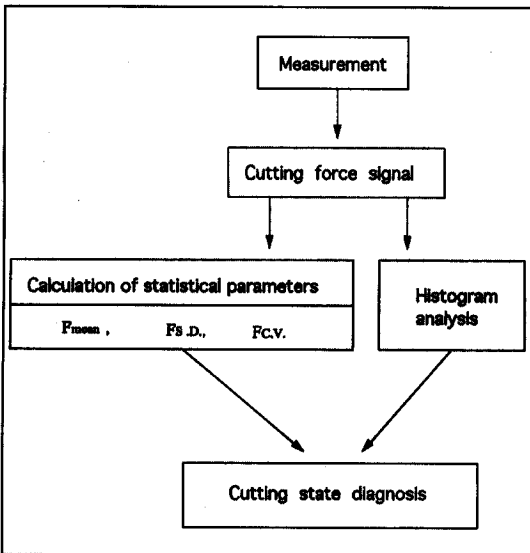


Fig. 2 Signal processing flow diagram

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭력신호특성 분석

Fig. 4는 절삭속도 $v=150\text{m/min}$, 이송 $f=0.25\text{mm/rev}$ 일 때 절삭깊이(a)의 변화와 마모의 진행에 따른 4회의 마모를 측정할 때의 절삭력변동계수 값을 나타낸 것이다. 절삭이 진행되는 동안 일정시간(0.1sec)의 변동계수를

블럭데이터화하여 판별 전후의 블럭데이터를 비교·판정하여 마모를 알아보기 위한 것으로 마모가 진행됨에 따라 점차로 변동계수가 증가함을 알 수 있고, 공구마모 한계인 $VB=0.3\text{mm}$ 에 도달하면 변동계수 값이 0.3을 넘기 시작한다.

Fig. 5는 절삭속도 변화에 따른 정상적인 공구와 파손시의 비교 그림으로 파손 순간, 직전, 직후의 변동계수 값이다. 그림에서 절삭속도 100m/min , 이송 0.1mm/rev , 절삭깊이 0.4mm 인 조건은 정상적으로 절삭이 이루어지고 있는 경우로 변동계수의 값이 거의 변화가 없으나 파손현상이 발생할 때는 파손 직전에 작은 값(0.2정도)을 갖던 변동계수가 파손시 0.6 이상으로 급증하고, 그 후 다시 감소하여 작은 값으로 되는 특징을 나타낸다. 따라서 변동계수가 급증하는 순간을 파손 점으로 검출할 수가 있다. Fig. 6은 절삭속도 150m/min , 절삭깊이 0.4mm 일 때 공구파손이 일어날 때 이송의 변화에 따른 파손 순간, 직전, 직후의 변동계수 변화를 나타낸 것으로 역시 파손 직전에는 변동계수의 값이 작은 값을 보이나 파손 순간 큰 값(0.5 이상)을 나타내다 다시 작아지는 경향을 보인다.

이것으로부터 절삭력변동계수의 경계값(threshold)을 이용하여 절삭가공 중 공구마모와 파손을 진단할 수 있음을 알 수 있으며($VB=0.3\text{mm}$ 이상의 공구마모시 0.3 이상, 공구파손시 0.5 이상), 이때 대부분 절인에 이상이 발

생하여 채터현상을 동반하는 등 이상가공 상태로 되는 경우가 많았다. 그리고 절삭력변동계수는 공구마모의 진전에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 보이는데 Fig. 4와 같이 느리게 마모가 진행되는 경우에는 초기 절삭시 변동계수가 점차 증가하다가 약간 감소하는 현상을 보인다. 이것은 초기 인선마모 후 공구인이 안정화됨에 따라 나타나는 현상으로 보인다. 공구마모가 적은 조건인 경우 이와 같은 현상이 늦게 나타나며 마모가 급속히 이루어지는 경우 이러한 현상이 조기에 나타난다. 또한 변동계수는 절삭속도나 이송, 절삭깊이에 따라 그 변화나 크기가 크게 달라지지 않으므로 변동계수는 절삭조건에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특징이 공구마모나 파손등 이상가공상태의 검출에 유리한 장점이 될 수 있다.

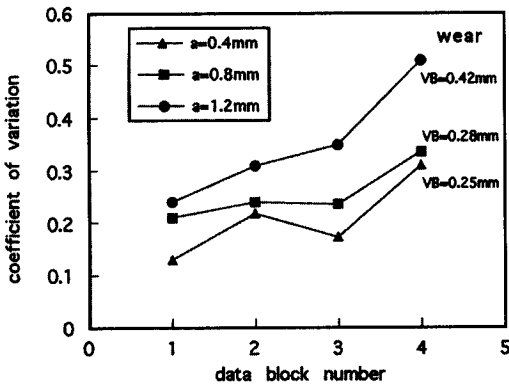


Fig. 4 Coefficient of variation vs. data block number ($v=150\text{m/min}, f=0.25\text{mm/rev}$)

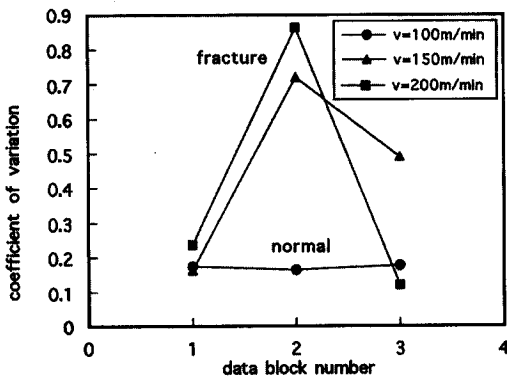


Fig. 5 Coefficient of variation vs. data block number ($f=0.1\text{mm/rev}, a=0.4\text{mm}$)

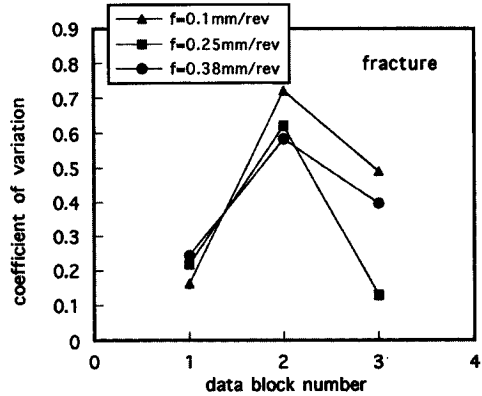


Fig. 6 Coefficient of variation vs. data block number ($v=150\text{m/min}, a=0.4\text{mm}$)

4.2 절삭력 히스토그램 분석

(1) 정상적인 가공중 공구마모 및 미소 파손이 발생한 경우; 절삭속도 150m/min, 이송 0.25mm/rev, 절삭깊이 0.4mm일 때 160sec동안 가공 Fig. 7은 절삭초기의 절삭력신호 모습으로 공구가 마모되지 않아 정상적인 절삭이 이루어지는 경우이다. 세 절삭력 신호 모두 작은 절삭력표준편차 값을 가지며 안정된 절삭이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 8의 히스토그램 분석에서도 세분력 신호가 비슷한 경향을 보이며 실험의 분석에는 주분력을 이용하였다. 절삭력 히스토그램으로 분석한 결과도 절삭력표준편차가 작기 때문에 절삭력분포가 정규분포 모습이 아니고 아주 첨도(kurtosis)가 큰 모습의 분포를 보여준다. 또한 변동계수의 값도 아주 작게 나타난다. 이것으로 공구가 마모되지 않았을 때의 특징을 파악할 수 있다.

Fig. 9는 마모가 점차 심화되어 공구인 미소 파손에 이르고 이에 따라 채터가 발생한 경우이다. 절삭력평균값이 증가하고 절삭력 신호가 점차 불안정해져 절삭력표준편차도 증가하고 있음을 보여준다. 공구가 파손에 이를 때 절삭력 감소현상이 발생하였으며 절인의 불안정으로 채터가 발생하면 절삭력신호는 큰 진폭을 갖는 형태가 된다. Fig. 10의 히스토그램을 보면 분포형태에서 상당히 첨도가 낮아진 분포를 보이며 미소파손에 따라 절삭력분포가 두 부분으로 나뉘어지려는 경향을 보이거나 큰 파손이 아니기 때문에 뚜렷한 구분은 되지 않았다. 마모의 증가에 따른 변동계수의 값은 절삭력의 증가를 보다 절삭력표준편차의 증가율이 크기 때문에 꽤 큰 값(0.37)을 보인다.

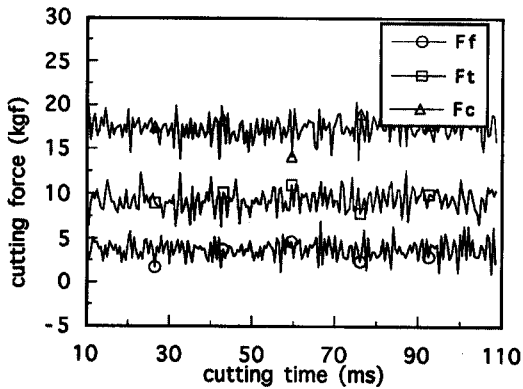


Fig. 7 Cutting force vs. cutting time(110ms)
($v=150\text{m/min}$, $f=0.25\text{mm/rev}$, $a=0.4\text{mm}$)

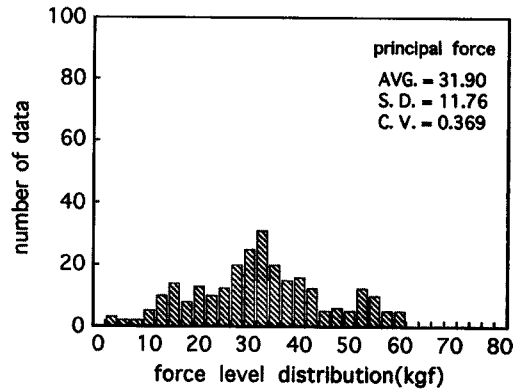


Fig. 10 Cutting force histogram(127.6sec)

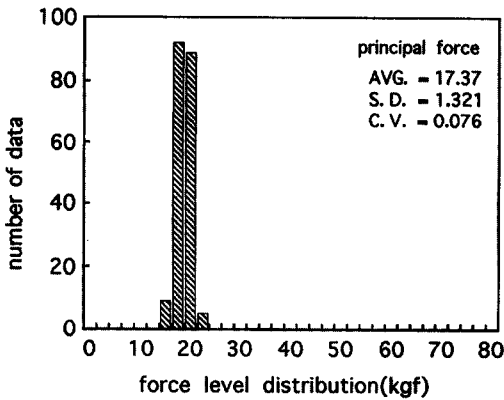


Fig. 8 Cutting force histogram(110ms)

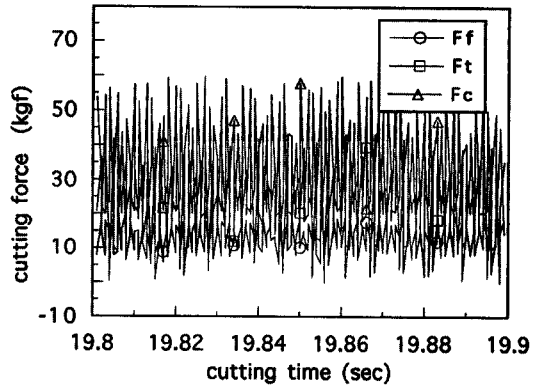


Fig. 11 Cutting force vs. cutting time (159.9sec)
($v=150\text{m/min}$, $f=0.25\text{mm/rev}$, $a=0.4\text{mm}$)

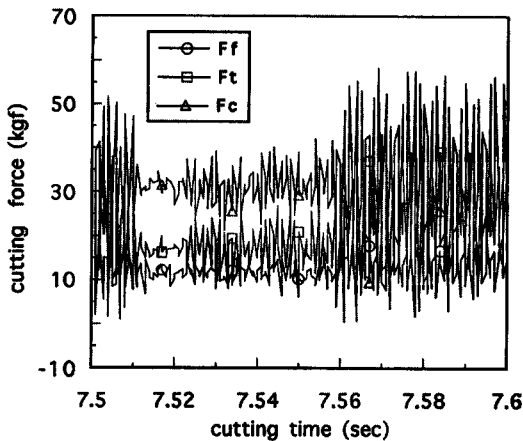


Fig. 9 Cutting force vs. cutting time(127.6sec)
($v=150\text{m/min}$, $f=0.25\text{mm/rev}$, $a=0.4\text{mm}$)

Fig. 11은 공구가 파손에 이른 후에도 계속 가공한 경우로 계속하여 채터현상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경우 특히 배분력의 변화가 심하고 이에 따라 표면거칠기에 좋지 않은 영향을 미친다. Fig. 12의 히스토그램 분석에서도 아주 수평적으로 절삭력이 분포함을 볼 수 있다. 이 경우 변동계수의 값도 0.5정도에 이르게 된다. 이와 같은 절삭력 분포형태로 채터발생의 유무 감지가 가능하다.

(2) 큰 공구파손 유발시의 경우(슬롯가공): 절삭속도 150m/min, 이송 0.1mm/rev, 절삭깊이 0.8mm일 때 Fig. 13은 절삭과정 중 급격한 파손에 이른 경우의 절삭력신호 모습이다. 돌발적인 공구파손에 대처하기 위한 실험으로 공구에 인위적인 파손을 유도하기 위하여 슬롯을

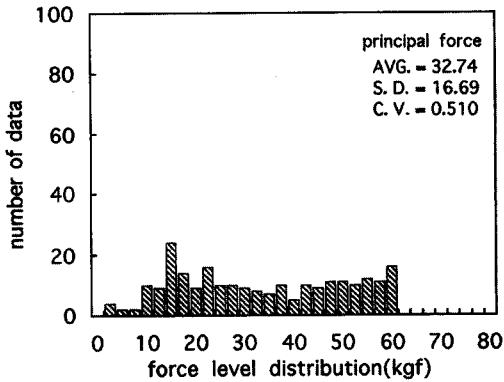


Fig. 12 Cutting force histogram(159.9sec)

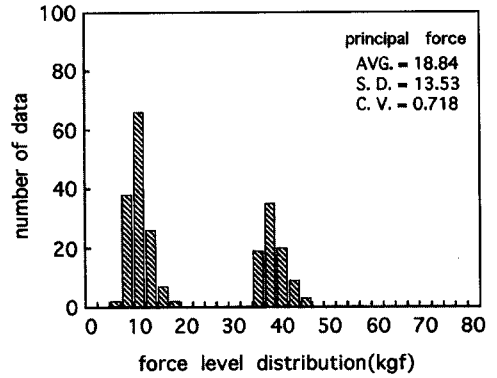


Fig. 14 Cutting force histogram

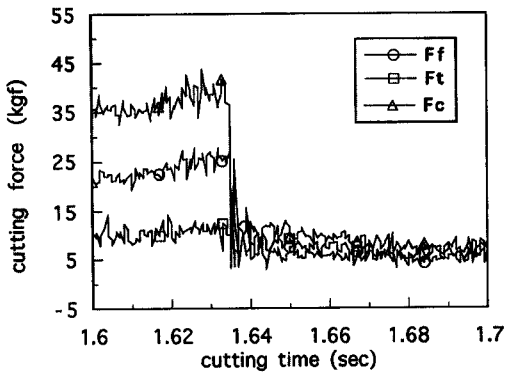


Fig. 13 Cutting force vs. cutting time
($v=150\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$, $a=0.8\text{mm}$)

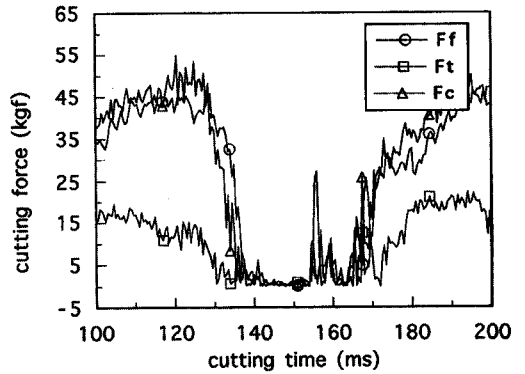


Fig. 15 Cutting force vs. cutting time
($v=150\text{m/min}$, $f=0.25\text{mm/rev}$, $a=0.8\text{mm}$)

낸 경우이다. 절삭깊이를 슬롯의 위치보다 크게 주어 큰 파손에 이르게 한 경우로, 절삭력신호를 보면 큰 마모는 발생하지 않고 바로 파손에 이르러 절삭력의 진폭이 크지 않고 큰 파손에 따른 절삭력 감소폭이 크게 나타남을 볼 수 있다. Fig. 14의 히스토그램 분석을 보면 절삭력 진폭이 크지 않아 첨도가 높은 분포 모습을 보이고 파손시 절삭력 차이가 크게 나타남으로 절삭력 분포가 둘로 완전하게 나뉘어짐을 볼 수 있다. 또한 공구의 파손에 따라 절삭깊이가 작아져 절삭력이 작아졌으며 따라서 절삭력 평균값은 작아지고 상대적으로 절삭력표준편차가 증가하여 큰 변동계수 값(0.72)을 나타낸다. 이러한 히스토그램 분석 특징으로 공구파손을 쉽게 감지할 수 있었다.

(4) 불완전 파손의 경우(슬롯가공): 절삭속도 150m/min, 이송 0.25mm/rev, 절삭깊이 0.8mm일 때 Fig. 15는 공구가 완전히 파손되어 떨어져 나가지 못하

고 비스듬하게 파손되면서 슬롯 틈과 공구사이에 칩이 끼어들어 절인 작용을 한 경우이다. 이와 같은 이유로 파손 후 다시 절삭력이 떨어진 상태에서 회복되었지만 절삭력 신호상태가 아주 불안정하여 표면거칠기는 아주 불량한 상태가 되고, 심한 채터도 수반되었다. Fig. 16의 히스토그램을 분석해보면 완전한 파손이 아니기 때문에 절삭력 분포가 나뉘어지려는 모습이 보이지만 뚜렷하게 이분된 모습은 아니고 채터발생에 따라 넓게 분포됨을 알 수 있다. 이상과 같이 절삭력히스토그램을 이용하여 공구마모와 공구파손을 신속하고 정확하게 진단할 수 있다.

이상으로 절삭력신호의 특징과 히스토그램 분석을 이용하여 아주 신속하고 용이한 신뢰성(90% 이상)있는 공구감시 시스템의 구축이 가능하였다.

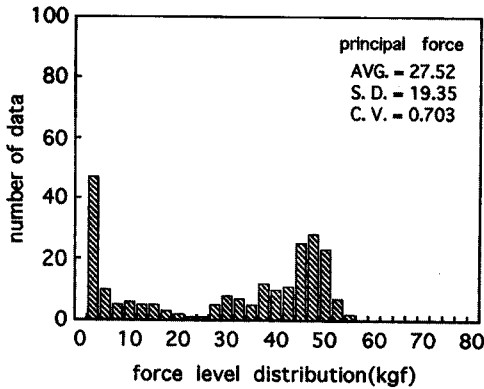


Fig.16 Cutting force histogram

5. 결론

선삭가공에서 이상가공상태 중 공구의 마모와 파손상태의 진단을 위하여 입력정보를 처리하기 쉽고 신뢰성 있는 공구감시 시스템으로 구축하고자 절삭력 신호특성과 히스토그램 분석을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 절삭과정이 정상적인 절삭과정에서 불안정영역으로 전이함에 따라 변화하는 절삭력변동계수를 이용하여 블럭화(0.1sec)된 표본화데이터 신호로 공구마모와 파손을 쉽게 진단할 수 있다.
2. 특히 절삭력변동계수의 경계값을 이용하면 공구마모 정도와 파손을 용이하게 진단할 수 있다.
3. 절삭력신호 분석과 히스토그램 분석으로 공구마모와 파손상태를 쉽게 진단할 수 있어 공구마모와 파손상태 진단에 히스토그램 분석의 도입이 유용함을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Y. Altintas, "In-Process Detection of Tool Breakages Using Time Series Monitoring of Cutting Forces", Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 28 No.2, pp. 157~172, 1988.

2. M. S. Lan, D. A. Dornfeld, "In-Process Tool Fracture Detection", J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, April, pp. 111~118, 1984.
3. J. Colgan, H. Chin, K. Danai and S. R. Hayashi, "On-Line Tool Breakage Detection in Turning : A Multi-Sensor Method", ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 116, FEBRUARY, pp. 117~123, 1994.
4. X. D. Fang, Y. L. Yao, "In-Process Evaluation of the Overall Machining Performance in Finish-Turning via a Single Data Source", S.M. Wu Symposium, Vol. I, pp. 185~192, 1994.
5. T. Sata, K. Matsushima, T. Nagakura, E.Kono, "Learning and Recognition of the Cutting States by the Spectrum Analysis", Annals of the CIRP, Vol. 22,1, pp. 41~42, 1973.
6. S. Rangwala and D.A. Dornfeld, "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring", ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 219~228, 1990.
7. I. Inasaki, S. Yonetsu, "In-Process Detection of Cutting Tool Damage by Acoustic Emission Measurement", Proc. 22nd MTDR conference, pp. 261~268, 1981.
8. T. Moriwaki, M. Tobito, "A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement," ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 112, AUGUST pp. 212~217, 1990.
9. 박성현, "회귀분석", 대영사, pp. 171~303, 1986.