

미세형상가공시 센서융합을 이용한 공구 마멸 및 파손 메커니즘 검출

The estimation of tool wear and fracture mechanism using sensor fusion in micro-machining

임정숙*(경남대 대학원 기계공학과), 왕덕현, 김원일, 이윤경(경남대 기계자동차공학부)
Jeong-suk Lim, Duck-hyun Wang, Won-il Kim and Yun-kyung Lee(Kyungnam Univ.)

ABSTRACT

A successful on-line monitoring system for conventional machining operations has the potential to reduce cost, guarantee consistency of product quality, improve productivity and provide a safer environment for the operator. In fine-shape machining, typical signs of tool problems such as vibration, noise, chip flow characteristics and visual signs are almost unnoticeable without the use of special equipment. These characteristics increase the importance of automatic monitoring in fine-shape machining; however, sensing and interpretation of signals are more complex. In addition, the shafts of the micro-tools break before the typical extensive cutting edge of the tool gets damaged.

In this study, the existence of a relationship between the characteristics of the cutting force and tool usage was investigated, and tool breakage detection algorithm was developed and the following results are obtained. In data analysis, didn't use a relative error compare which mainly used in established experiment and investigated tool breakage detection algorithm in time domain which can detect AE and cutting force signals more effective and accurate.

제 1장 서론

단위기계의 자동화를 비롯하여, FMS나 CIM 등과 같이 여러 대의 공작기계를 결합한 자동생산시스템에서는 한대의 공작기계에 이상이 생겼을 때 이로 인해 전체공정에 미치는 영향이 매우 크다. 시스템을 원활히 동작시키기 위해서는 가공공정이 정상으로 진행되고 있는지를 감시하여 이상이 있으면 경고를 하고 정상적인 상태로 돌아오게 하는 시스템의 유지 및 관리 기능이 절대적으로 필요하다. 특히, 미세공구를 이용한 가공에서는 공구마멸의 전형적인 신호인 진동, 잡음, 칩유동 특성, 가시적인 신호 등은 특수한 장치

를 사용하지 않고서는 거의 감지할 수 없으며, 공구의 절삭날이 극한 마멸상태가 되기 전에 미세공구의 축은 파손된다. 미세공구를 이용한 가공에서 이러한 특성들의 자동 모니터링의 중요성은 증가하고 있지만, 판독과 해석이 복잡하여 그 발전상태가 미비한 실정이다.

최근에는 공구의 이상상태 감지의 신뢰성을 증대시키기 위해 다수의 간접측정법을 동시에 이용하여 간접측정법 각각의 장점을 상호 보완적으로 이용하는 연구가 진행되어 오고있다. Dimla⁽¹⁻²⁾는 가속도계와 공구동력계를 사용하여 선삭공정에서의 절삭력과 진동을 분석하였고, 최덕기⁽³⁾는 선삭공정시 공구파손의 실시간 검출을 위하여 내장형 압전센서와 음향방출센서를, 김기대⁽⁴⁾는 선삭공정 중 채터발생의 검출을 위해 가속도계와 공구동력계를 각각 사용하였다.

본 연구에서는 실제 절삭 가공중에도 실시간 검출이 가능한 알고리즘을 개발하였으며, 검출의 신뢰도를 높이기 위한 복합센서 개념을 도입하였다.

제 2장 관련이론

2.1 공구변형 이론

블 엔드밀 공구는 절삭날에 존재하는 절삭날 홈(flute)에 의하여 매우 복잡한 형상을 나타내나, 블엔드밀의 간단한 공구변형 모델은 공구홀더를 강체로서 변형이 일어나지 않는다는 가정 아래 공구를 외팔보(cantilever beam)로 간주하여 Fig. 2.1(a)와 같이 나타낼 수 있다. Kline⁽⁵⁾은 Fig. 2.1(b)와 같이 절삭력의 작용점을 공구끝단으로 제한하지 않고 공구 끝에서 어느 위치만큼 떨어진 위치에 존재하는 경우의 공구변형모델로 공구의 끝단에서 Z만큼 떨어진 점 C에 나타나는 수평변형량 $\delta(z)$ 를 다음과 같이 근사적으로 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F}{2ER^4} [(z_F - z)^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - z_F)] \quad (1)$$

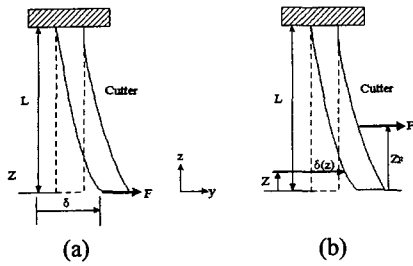


Fig. 2.1 Simple tool deflection models

여기서, $(z_F - z)^3$ 은 z 의 특성함수이다. 또한 z_F 는 공구끝단에서 절삭력 F 가 작용하는 점까지의 거리이고, L 은 공구길이이다.

Feng⁽⁶⁾은 Fig. 2.2와 같이 볼엔드밀의 공구 변형모델을 가정하여 볼엔드밀의 절삭계(Cutting system) 변형을 완전 단일체로 생각하여 그 변형을 고려한 공구변형량을 식(2)와 같이 구하였다.

$$\delta_y(z) = \delta_{cutter,y}(z) + \delta_{eff,y} \quad (2)$$

여기서, $\delta_{cutter,y}(z)$ 는 z 에서의 y 방향 공구변형을 나타내고 식(1)과 동일하며, $\delta_{eff,y}(z)$ 는 완전단일체의 y 방향 변형량을 나타낸다. 콜렛, 스피indle 베어링, 공작기계구조의 완전단일체, $\delta_{eff,y}$ 는 완전단일체의 유효강성으로 식(3)에 의해서 결정된다. K_{eff} 값은 커터에 하중을 가하여 변형량을 측정하여 얻을 수 있는 값이다.

$$\delta_{eff,y} = (F_{yb} + F_{yn}) / K_{eff} \quad (3)$$

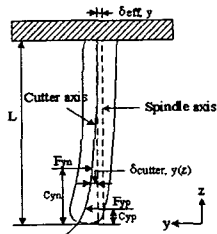


Fig. 2.2 A deflected ball end mill in y direction

2.2 공구의 마멸과정에 의한 음향방출신호

한 개의 금속이 다른 금속 위를 미끌어질 때 마찰 기구로서 다음과 같은 두 과정을 관찰할 수 있다. 하나는 접촉점들의 접합과 접합을 파괴하는데 필요한 응력, 그리고 한쪽 재료의 높은 점들이, 접촉하고 있는 상대편 금속의 연한 재질에서 높은 점들을 깎아내는 현상들이다. AE의 가능한 발생원은 절삭이 시작되면서 칩은 공구의 윗면을, 그리고 가공면은 플랭크면과 주절삭날을 갈아내면서 지속적인 마찰작용을 일으키고 있다.

절삭에서 일어나는 마멸현상은 지극히 작은 규모의 매끈한 금속이 서로 미끄러져 지나갈 때

형성되는 민감한 응착으로 생기는 것이라고 설명할 수 있다. 이와 같은 과정에서 생기는 마멸은 접촉점에서 파손될 때 재질이 표면으로부터 떨어져 나가는 것이므로 대단히 미세한 입자들을 만들어 낸다. 미세한 이동으로 생기는 표면의 최종 완성가공 또한 매끈하다. Fig. 2.3은 접촉부를 2개의 서로 다른 입자가 엉켜 붙은 그림으로 공구의 마멸 특성을 보여주고 있다.

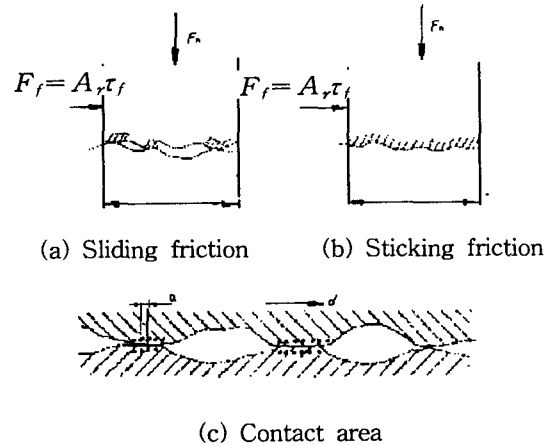


Fig. 2.3 Schematic diagram of contact area.

따라서 마찰과정에서 발생하는 AE는 접촉면적, 상대운동, 접촉재료의 성질, 접촉면의 하중, 마찰속도 등에 의존할 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

이러한 AE신호의 분석 방법으로는 미리 설정된 기준치 이상의 진폭을 갖는 펄스 혹은 펄스율(count or count rate), RMS값(혹은 average 값), 진폭의 분포 혹은 절대값, 스펙트럼 등 여러 가지가 있다. 절삭시험과 관련하여, AE신호의 여러 특성 중 어느 것을 사용하는 것이 보다 효과적인지에 대한 객관적인 정보는 아직 충분치 않은 상태로서, 본 연구에서는 AE신호의 진폭의 절대값을 비교함으로써 그 특성을 파악하여 공구의 마멸을 검출하고자 한다.

2.3 센서융합(Sensor fusion) 이론

일반적으로 기술적인 공정을 모니터링하기 위한 센서는 요구되는 매개변수를 측정하도록 설계되어있고 관심이 되며 측정하고자 하는 공정과 연관하였다. 예를 들어, 가속도계의 경우 진동특성으로 원하는 변수를 측정하는 것이다. 공학적인 응용에서 얻을 수 있는 접근은 다른 신호발생원으로부터 같은 매개변수를 감지하는데 하나 이상의 센서를 이용하는 것이고, 이를 복합센서 혹은 센서융합이라 한다.⁽⁷⁾ 센서융합은 더 나은 결과의 도출을 위해 각각의 신호를 보통의 국면을 가진 다른 신호들과 결합시킨다.⁽⁸⁾

적당한 유형의 센서의 선택과 마찬가지로 센서가 적용될 위치의 선택은 특정한 신호가 가장 높은 집중력과 최상의 산출을 하는 적합한 위치와 매우 밀접한 관계에 있다. 그러나, 베어링, 윤활, 연동장치 등의 기계적인 구조 때문에 어떤 한계가 존재한다. 그러므로 여러 센서들로부터 들어오는 다양한 정보들을 수집하여야 하고 각각의 신뢰도 있는 신호들이 집적되어야 한다.

단일 신호로부터 하나 이상의 마멸의 민감도를 인지하고 추출함으로써 신호의 수의 증가로써 특징을 적용하는 것은 논쟁의 여지가 있다. 첫째로, 단일 신호로부터 다중특징을 추출하는 것은 다중감지가 아니다. 요약하면 단일 신호에서 독립적인 확률 분포의 통계적인 표현이나 하나 이상의 신호로부터 추출된 특징과 비교하여 최소한의 상호관계가 있는 정보 등과 같은 관찰들은 특정부분의 영역에 의해 만들어졌다.⁽⁹⁾

센서가 융합되면, 계속되는 융합된 데이터의 구조를 정규적으로 결정하는 일이 요구된다. Tanner와 Loh⁽¹⁰⁾는 융합데이터로부터 경제적이고, 상호보완적이며, 유일하게 출력에 독립적이라는 이 세 가지의 기능을 알아냈다. 경제적인 융합이란 각 융합된 센서의 데이터가 모든 다른 센서의 데이터를 부인하고 가치가 증가하는 것이다. 경제적인 방법의 융합 데이터는 다변량의 TCMS에 유용하다. 왜냐하면, 여러 가지 센서의 신호들이 복합되면, 그것들은 개개의 센서 신호로서 서로 강화하거나 반박하기 때문이다. 예를 들어, 모든 센서 신호들이 공구마멸과 같은 파라미터를 측정하도록 설치되었다면, 공구 마멸에 대해 같은 행동의 유형에 대해 여러 보고가 증가하게 되고 마멸 변수의 신뢰도는 더욱 증가하게 되고 발전하게 된다. 만약 센서들이 다른 값을 보고한다면, 불일치의 이유가 확립되어야 한다. 독립적인 복합 데이터는 하나의 센서가 특정한 특징을 감지할 때는 단순하다. 명확하게 이것은 데이터가 전혀 복합되지 않은 상황을 나타내므로 좋지 않은 방법이다. 상보적인 센서융합은 센서 상호간의 장점은 향상시키는 반면, 단점은 보완하는 다른 관계를 추출한다.

제 3장 실험장치의 구성 및 실험방법

실험장치는 Fig. 3.1의 블록다이어그램에서 보여진 바와 같이 질화티타늄 코팅된 마이크로 엔드밀 가공 중에 AE신호와 절삭력을 검출하기 위해 CNC머시닝센터(Tongil H. I. - TNV40A)에 PC에서 NC코드를 전송시켜 공구가 공작물을 절삭하는 동안 절삭력과 AE신호를 공구동력계와 AE센서로 측정하여 DAQ보드를 통해 다른 PC에 저장하는 시스템으로 구성하였다.

AE센서(Physical Acoustic Co., 1220A)는 예비실험을 통하여 잡음의 영향을 가장 적게 받는 위치인 공작물에 부착하였으며, AE신호와 절삭력의 신호의 크기가 매우 작아 각각의 신호를 100배와 10배로 증폭하였다. 공구동력계는 Kistler 9527BA로 3축의 절삭력을 측정할 수 있으며, 각 절삭력의 간섭은 내부 콘트롤러에서 보정된다. 그리고 AE신호와 절삭력 신호를 수집하여 컴퓨터에 저장하기 위한 DAQ Board(National Instruments, AT-MIO-16E-1)는 보드에 내장된 A/D변환기에서 각 채널의 신호를 이산신호로 바꾸어 터미널을 통해 컴퓨터로 입력시킨다. 데이터의 저장과 분석은 공구의 마멸과 파손을 실시간 검출할 수 있는 알고리즘을 개발하여 LabVIEW로 프로그램한 후 데이터를 저장, 분석, 프레젠테이션 한다. Fig. 3.2는 공구의 마멸 및 파손 검출을 위한 AE신호와 절삭력신호를 저장하기 위해 LabVIEW로 작성한 VI (Virtual Instrument)의 프린트패널을 나타낸 것이다.

본 실험에서 절삭공구는 직경 1mm인 2날 초경합금 볼 엔드밀을 사용하였고, 공작물은 어닐링 열처리한 일반 구조용 탄소강(SM45C)과 전자부품의 키트에 주로 쓰이는 알루미늄(6061T6)를 사용하였다.

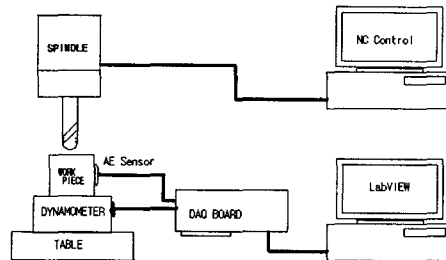


Fig. 3.1 Block diagram of experimental set-up

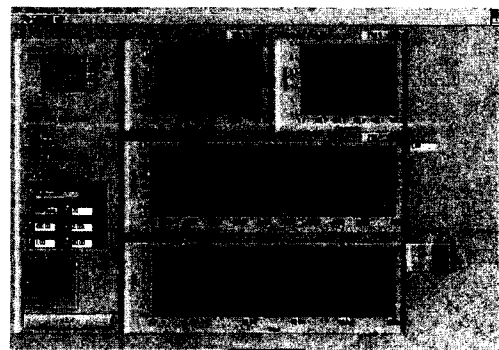


Fig. 3.2 Synchronized measurement virtual instrument to detect tool wear and fracture

NC데이터를 머시닝센터로 전송시켜 Fig. 3.3 과 같은 형상의 곡면을 가공하였는데, 이 곡면을 가공하기 위하여 사용된 가공조건은 Table 3.1에 나타내었으며 가공조건 선정은 공구의 마멸을 산출하기 위한 것이므로 예비실험으로 공구수명 과 절삭력 신호를 고려하여 채택하였다. Fig. 3.4 는 실시간 공구 마멸검출을 위해 개발한 알고리즘을 나타내고 있다.

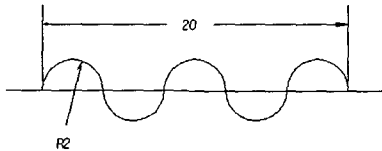


Fig. 3.3 Topography of curved surface

Table 3.1 Experimental conditions

	Aluminum	Steel
Tool	1mm carbide ball endmill	1mm carbide ball endmill
Depth of cut(mm)	0.35, 0.4	0.055, 0.075
Spindle speed(rev/min)	4000	4000
Feed rate(mm/min)	120	65
Path interval(mm)	0.2	0.2
Cutting direction	down milling	down milling

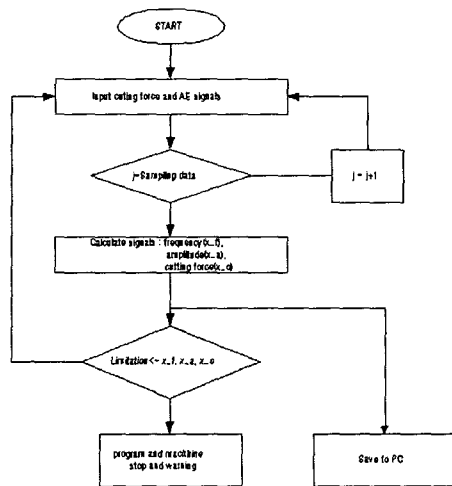


Fig. 3.4 Tool breakage detecting algorithm in time domain

제 4장 실험결과 및 고찰

4.1 음향방출신호와 절삭력신호 특성

절삭가공 도중 칩의 두께 변화 및 경사면에서의 공구-칩 접촉면적의 변화 등으로 인하여 공구에는 열 및 기계적 하중이 반복하여 작용하게

된다. 또한, 갑작스런 충격력 또는 공구마멸의 점진적 증가에 따른 과도한 절삭력 등의 원인으로 인하여 절삭날이 파손되는 경우가 생기는데 이러한 현상은 주로 크랙, 칩핑, 파괴 등으로 구별된다. 그런데 작은 양의 크랙 또는 칩핑이 발생할 때는 절삭을 계속할 수 있으나 이로 인하여 절삭날이 무디어져 절삭온도가 상승되기 때문에 이후에 마멸속도가 증가된다. 파괴의 경우에는 절삭날의 대부분이 떨어져버리므로 이후 절삭은 불가능하며 단속절삭, 강인한 재료의 중절삭시에 많이 나타나게 된다. 이러한 공구손상의 중요원인으로는 공구 재료 자체의 취성, 절삭력이나 열충격, 피로, 과도한 공구마멸의 진행, 채터링 등을 들 수 있다. 일반적으로 힘의 변화에 의하여 재료의 손상이 발생했을 때 AE가 민감하게 발생한다.

모든 실험은 건식절삭으로 이루어졌고, 절삭속도는 일정하게 유지시킨 채 절입깊이를 증가시킴으로써 공구파괴가 일어나도록 하였다. 구조용강의 경우 절삭속도는 65m/min으로 유지하고, 절입깊이는 0.075, 0.055mm로 변화시키며 파손실험을 수행하였고, 알루미늄의 경우 절삭속도는 120m/min으로 유지하고, 절입깊이는 0.4, 0.35mm로 변화시키며 파손실험을 수행하였다.

4.2 알고리즘 개발에 의한 공구 마멸 및 파손 검출

실험을 통하여 각 절삭조건에 대해 공구가 견딜 수 있는 한계치를 알 수 있었다. AE신호의 진폭의 변화는 각 조건에 따라 다소 차이가 있었지만 절삭력의 신호의 경우 대부분 $0.49 \times 0.1N$ 이상의 값에서 공구의 마멸이 급격히 일어나 결국 공구의 축이 파손된다는 사실을 알 수 있었으며 이를 Table 4.1에 나타내었다.

Table 4.1 Limitation of tool breakage

Material	Steel		Aluminum	
	Cutting speed(mm/min)	65	65	120
Depth of cut(mm)	0.075	0.055	0.4	0.35
Amplitude of AE signals	3.9	2.8	3.0	3.75
X-dir. cutting force(x0.1N)	0.48	0.49	0.49	0.49
Y-dir. cutting force(x0.1N)	0.3	0.49	0.49	0.43

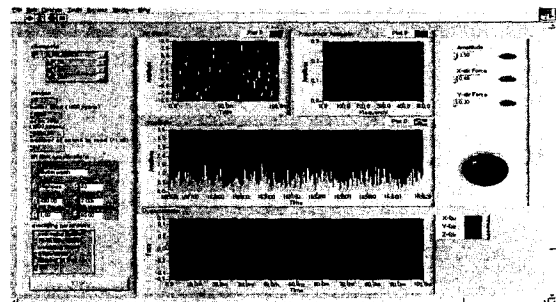
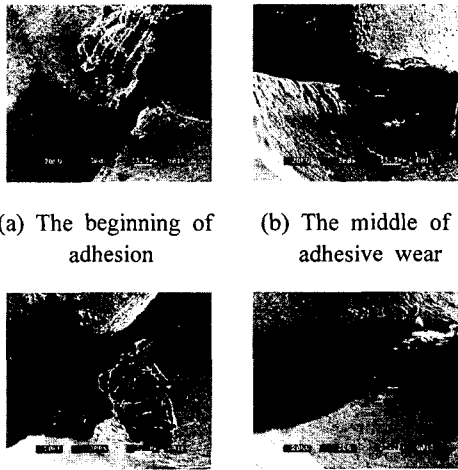


Fig. 4.1 Virtual instrument based on tool breakage detection algorithm

Fig. 4.1은 실시간 공구 마멸 및 파손 알고리즘에 기반하여 LabVIEW로 프로그램한 프론트 패널로써 절삭 공정시 검출되는 AE신호와 절삭력신호가 미리 설정해둔 한계값의 이상이 되면 모든 공정이 멈추도록 하였다. 그 결과 공구 축이 파손되기 직전에 작업을 종료할 수 있었다.

4.3 주사전자현미경에 의한 공구 마멸 특성 관찰

공구 마멸 및 파손의 원인을 더 파악하기 위해 공구 마멸의 진척에 따른 변화를 주사전자현미경으로 관찰하였다. Fig. 4.2은 엔드밀의 노우즈 부분을 관찰한 것인데 Fig. 4.2(a)에서 Fig. 4.2(d)의 순으로 마멸이 진척될수록 공구의 여유면에 용착이 많이 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 4.2(a)는 절삭이 시작되면서 AE신호의 진폭이 급격히 변하는 처음 순간인데 공구 날부에 약간의 용착이 발생한 것을 볼 수 있다. Fig. 4.2(b)는 Fig. 4.2(a)보다 시간이 더 경과한 뒤의 경우인데 공구 날부에 전반적인 용착이 발생하고 있다. Fig. 4.2(c)의 경우는 용착이 더욱 심해져 공구 날부가 무디어진 상태이고, Fig. 4.2(d)는 이러한 용착이 계속된 후 절삭공정에 의해 뜯겨져 공구의 마멸을 일으킨 상태이다. 이러한 용착은 접촉점에서 파손되게 되며 공구의 재질이 떨어져나가게 되고 이렇게 발생된 노치에 응력이 집중되게 되면 공구는 반복되는 응력을 견디지 못하고 결국 파손되게 된다.



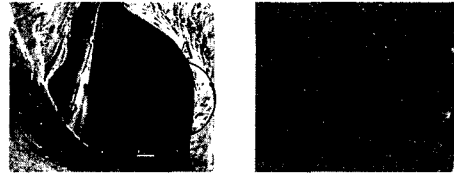
(a) The beginning of adhesion (b) The middle of adhesive wear
(c) The last period of adhesive wear (d) The development of adhesive wear

Fig. 4.2 The adhesion processing of tool wear

4.4 주사전자현미경에 의한 공구 파손 특성 관찰

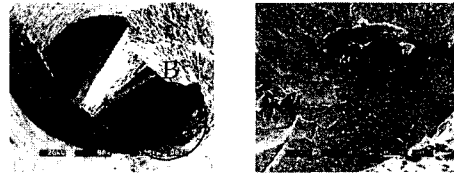
Fig. 4.3에서부터 Fig. 4.6까지는 Table 3.1의 절삭조건에 따라 가공한 후 공구가 완전히 파손되었을 때의 형상을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 각각의 그림들을 살펴보면 모든 파손은

공구 내부의 공공에서부터 시작하여 방사형으로 진척됨을 확인할 수 있다. 즉, 공구에 지속적인 반복하중과 피로하중이 가해지면 가장 취약한 공공에 응력이 집중되어 공구의 극한응력에 다다르게 되고 점차 파단응력에 다다르면 결국 공구는 파손되게 된다.



(a) Fractured surface (b) The magnified surface of area A by 500 times

Fig. 4.3 The photographs of the fractured surface of micro-tool (material:steel, cutting speed: 65mm/min, depth of cut:0.075mm)



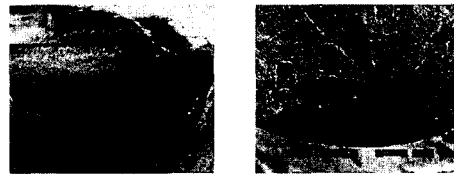
(a) Fractured surface (b) The magnified surface of area B by 500 times

Fig. 4.4 The photographs of the fractured surface of micro-tool(material:steel, cutting speed: 65mm/min, depth of cut:0.075mm)



(a) Fractured surface (b) The magnified surface of area C by 500 times

Fig. 4.5 The photographs of the fractured surface of micro-tool (material:steel, cutting speed: 65mm/min, depth of cut:0.075mm)



(a) Fractured surface (b) The magnified surface of area D by 500 times

Fig. 4.6 The photographs of the fractured surface of micro-tool (material:steel, cutting speed: 65mm/min, depth of cut:0.075mm)

제 5장 결 론

복합센서의 사용과 공구 마멸의 실시간 검출 알고리즘을 개발하여 실험을 하여 이들의 효용성을 검증하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

데이터 분석에 있어서 기존의 연구에서 주로 사용한 상대값 비교를 사용하지 않고 AE신호의 진폭의 크기와 절삭력의 절대값을 측정할 수 있는 실시간 알고리즘을 개발하여 실험을 함으로써 좀 더 효율적이고 정확한 측정이 가능함을 제시하였으며 이의 효용성을 검토하였다. 단일 신호를 사용하지 않고 복합 신호의 사용을 시도함으로써 마멸 정보의 질을 향상시킬 수 있었다. 절삭깊이가 깊을수록 AE신호의 진폭의 절대치는 더 크며 마멸이 진행될수록 각 축에 대한 절삭력이 커졌으며 결국 공구는 파손되게 된다. 공구 마멸의 원인은 절삭칩의 융착이며, 융착은 접촉점에서 미소 파손되게 되며 공구의 재질이 떨어져 나가게 되고 이렇게 발생된 노치에 응력이 집중되게 되면 공구는 반복되는 응력을 견디지 못하고 결국 부러지게 된다. 공구에 지속적인 반복 하중과 피로하중이 가해지면 가장 취약한 공공(孔空)에 응력이 집중되어 공구의 극한응력에 도달하게 되고 결국 공구는 파손되게 된다.

References

1. D. E. Dimla Sr., P. M. Lister, "On-line metal cutting tool condition monitoring. Part I: force and vibration analyses", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 739-768, 2000.
2. D. E. Dimla Sr., P. M. Lister, "On-line metal cutting tool condition monitoring. Part II: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 769-781, 2000.
3. 최덕기, 주종남, 이장무, "선삭공정시 공구파손의 실시간 검출에 관한 연구", *한국정밀공학회지* 제12권 제3호, pp.130-143, 1995.
4. 김기대, 권원태, 주종남, 이장무, "복합센서를 이용한 선삭가공중 채터발생의 검출", *대한기계학회논문집* 제18권 제7호, pp. 1618-1631, 1994.
5. W. A. Kline, R. E. DeVor, and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des.*, Vol. 22, pp. 7-22, 1982.
6. H. Y. Feng, C. H. Menq, "A flexible ball end milling system model for cutting force and machining error prediction," *Trans. of ASME J. of Manuf. Sci. and Engr.*, Vol. 118, pp. 461-469, 1996.
7. Dimla E., Dimla Snr., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1073-1098, 2000.
8. P. Holmborn, O. Pedersen, B. Sandel, A. Lauber, "Fusing sensor systems : promises and problems", *Sensor Reviews*, Vol. 9, No. 3, pp. 143-152, 1989.
9. L. Parra, G. Deco, S. Miesbach, "Statistical independence and novelty detection with information preserving nonlinear maps", *Neural Computation*, Vol. 8, pp. 260-269, 1996.
10. R. Tanner, N. K. Loh, "A taxonomy of multi-sensor fusion", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 5, pp.314-325, 1994.