음향방출을 이용한 칩 발생 기구의 예측

맹 민 재
동서울대학 기계공학부
(2001. 3. 26. 접수 / 2001. 6. 4. 채택)

Prediction of Chip Formation Mechanism Using Acoustic Emission

Min-Jae Maeng
Division of Mechanics, Dong Seoul College
(Received March 26, 2001 / Accepted June 4, 2001)

Abstract : The machining process can be considered as a planned interaction of the workpiece, the tool and the machine tool. In an unmanned situation, the results of this interaction are to be continuously monitored so that any changes in the machining environment can be sensed to corrective actions. In order to design the process monitoring system for unmanned manufacturing, the identification of chip formation is proposed. The system proposes the method of using acoustic emission(AE) signal analysis to identify the chip formation during cutting.
Key Words : machine tool, chip form, acoustic emission, unmanned

1. 서 론

절삭가공이 자동화, 무인화 됨에 따라 여러 대의 CNC 공작기계를 유기적으로 결합함으로써 융통성 있는 다품종 소량 생산 시스템을 개발하는 것이 매우 바람직하다. 생산 공정의 완전한 자동화, 무인화를 달성하기 위해서는 공작기계에서 발생할 수 있는 자체의 고장이나 절삭중에 발생하는 이상상태를 실시간으로 검출하여 원인을 자동적으로 진단할 수 있는 시스템의 도입이 필수적이다. 현재 절삭가공 분야에서 널리 이용되고 있는 AE(acoustic emission) 측정법은 여러 방법들 중에서도 측정이 비교적 용이하며 반응성이 우수하기 때문에 공구마멸, 파손 등 미시적 변화에 민감한 AE신호가 많이 이용되었다.

선삭중에 칩 발생 상태를 검출하는 기술이 필요하다. 칩 파단이 발생되지 않고 칩이 길게 형성되는 상황은 바람직하지 못하다. 칩 파단이 진행되지 않는 유동형 칩은 그 자체로서 공작물의 표면 정밀도를 저하시킬 우려가 있으며, 공작물에 엉키게 되면 공작물 손상은 물론 절삭 시스템 전체에 공정 효율을 저하시킨다. 이러한 이유로 칩 형태에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다. Andreasen과 Chiffre[1] 등은 절삭력 주파수 분석에 의한 칩 형태를 검출하고자 하였다. 鄭儀植 등[2]은 절삭력의 동적 성분의 평균 최대 진폭과 칩 형태의 상관성을 실험에 의해 검증하고, 인프로세스 인식을 위한 가능성을 제시하였다. 절삭력을 이용하는 방법 외에 자동측정에 의한 칩 형태의 검출에 관한 연구가 이루어 졌다. 新井實[3]은 적외선 방사 온도계를 이용하여 절삭점 부근의 고온 절삭 칩이 방출하는 열 에너지를 측정함으로서 발생하는 칩 형태를 검출하였다. 廣田平一[4]은 공구와 피삭재 사이에 발생하는 열 기전력의 파워 스펙트럼을 이용하여 칩 절단 주파수를 검출하는 방법이 연구되었다.

칩 파단이 발생하는 경우, 돌발형 AE신호에 연속형 AE신호가 포함되어 발생된다. 돌발형 신호는 피삭재의 집중적인 전단을 동반하여 상대적으로 레벨이 높은 신호가 검출[5]된다. 이러한 돌발형 AE신호를 연속형 AE신호와 구분하기 위해 경계값을 채택해야 한다. 이 채택된 경계값을 이용함으로서 칩 발생 기구 기준을 AE event의 수로 활용할 수 있다. 따라서 경계값을 돌발형 AE신호와 연속형 AE신호 사이에 설정해서 돌발형 AE신호만을 검출함으로써 칩 발생 기구의 검출이 가능하다. 본 연구의 목적은

mjmaeng@dsc.ac.kr

칩 발생 기구를 3개의 그룹으로 나누어 구분하고, 칩 파단시 발생하는 AE신호의 특징적 변화를 파악하여 선삭 가공중에 칩의 유형을 자동으로 감지할 수 있는 방안을 도출하는 것이다.

II. 실험장치의 구성 및 방법

2.1. 실험장치 구성

Fig. 1은 선삭 가공에서 칩 발생 기구와 AE신호와의 관계를 제시하기 위해 CNC선반(KIA- KT20S)에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. AE센서(PAC-R15)는 공구 홀더 측면에 설치하였다. 기타 실험장치는 전치증폭기(PAC-1220A), AE신호처리장치(LOCAN 320-AT), 오실로스코프(HITACHI V-212 20MHz) 등이다. 절삭공구는 홀더(PCJNR2525M12)에 P20 계열의 소결탄화물팁(CNMG120408)을 건식 절삭하였다. 공작물은 일반 구조용 탄소강 강재(SM45C), 난삭재인 스테인레스강(SUS304), 알루미늄(Al6061-T6)을 사용하였다. 칩의 발생기구는 디지털 카메라(SAMSUNG 210SE)로 촬영하였다.

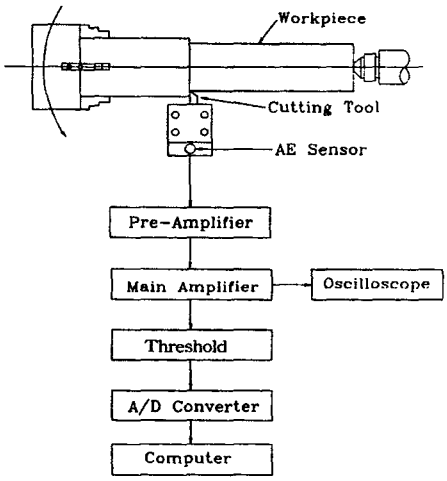


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up

2.2 실험방법

AE센서는 공구 홀더의 측면에 부착하였다. 음향방출의 발생원에 가깝게 부착하는 것이 바람직하나 칩에 의한 직접적인 영향을 피하기 위해 공구 끝에서 약 100mm 정도 떨어진 공구의 측면에 마그네틱 홀더를 사용하여 고정하였다. 공구 홀더에 센서를 부착할 때 센서와 홀더의 밀착을 위해 그리스 막을 생기게 한 후 부착하였다. 칩의 개수 측정은 정량적으로 측정하기 위해 1회 절삭 후 칩 박스에 있는 개수를 확인하고, 다시 절삭을 개시하였다. 이와 같은 방법으로 각각의 절삭조건에 4회 측정하여 평균값을 사용하였다. 절삭실험에 선정된 절삭조건은 절삭가공 기술 데이타 핸드북에서 추천하는 절삭조건을 채택하였다. 실험은 27가지의 절삭조건, 즉 절삭속도 V=100, 150, 200m/min, 이송속도 f=0.05, 0.1, 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23 0.25 0.27mm/rev, 축직각 반경방향 절삭깊이 dr=1mm에 대하여 일반 구조용 탄소강 강재(SM45C), 스테인레스강(SUS304), 알루미늄(Al6061-T6)을 건식 절삭하면서 수행되었다.

2.3. 신호처리

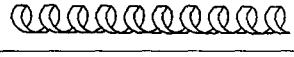
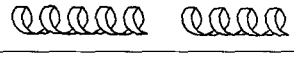
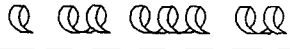
AE센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 주파수 영역 100-300kHz에서 여과한 후 AE신호처리장치에 입력하였다. 입력된 AE신호를 신호처리장치내의 주증폭기에서 20dB 증폭한 후 0.1 μs 간격으로 검출하였다. 검출된 AE신호가 100ms 동안에 경계값(threshold value) 100mV를 통과하는 횟수를 검출하여 AE event 수로 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 칩의 발생 기구

Table 1은 선삭중에 발생되는 칩 발생 기구를 3개의 그룹으로 나누었다. 긴 칩과 짧은 칩의 구분은 선삭 가공시 공작물의 1회전 길이 보다 길 때를 긴 칩으로 정의하기 위해 공작물의 직경 φ60mm일 때의 1회전 길이 180mm를 기준으로 구분하였다.[6,7] 긴 칩은 L〉 180mm, 짧은 칩(short I)은 40≤L≤180, 짧은 칩(short II)은 L 〈40으로 채택하였다. 여기서 L= 칩 길이이다. 칩 길이가 180mm 이상에서 발생되는 AE event 수는 경계값으로 제거할 수 있다. 이때 경계값은 100mV이다. 경계값 이하에서 검출되는 연속형

Table 1. Chip formation classification

	Chip formation	Length(mm)
Long		L>180
Short I		40<L<180
Short II		L<40

AE신호의 측정값은 0이 된다. 짧은 칩이 발생될 때는 돌발형 AE신호가 발생한다. 돌발형 신호는 진폭이 큰 AE신호를 발생시킨다. 따라서 진폭 크기에 의해 칩 발생 기구를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2. AE신호의 신뢰성

선삭시 AE신호는 칩이 형성되는 전단영역, 칩과 공작물이 공구의 상면 및 여유면과 접촉하면서 발생하는 소성 변형 및 마찰, 칩 형성의 초기에 발생하는 절삭날과 공작물의 충돌, 그리고 칩 형성의 말기에 발생하는 파괴에 의해 주로 생성된다[8]. Fig. 2는 이송속도가 증가 할 때 100, 150, 200m/min 절삭속도에서 칩의 파단에 따른 AE event 수와 칩 개수의 변화를 보여준다. AE event의 수 N은 다음의 식으로 표현할 수 있다.[9]

$$N=\frac{t^*}{2\pi/\omega}=\frac{\omega}{2\pi\gamma}\ln\frac{V_o}{V^*} \qquad (1)$$

여기서, t=측정시간, V_o=초기 신호의 진폭, ω=각주파수, γ=감쇠상수(>0), $V^*=V_oe^{-\gamma t^*}$, $t^*=\frac{1}{\gamma}\ln\frac{V_o}{V^*}$ 이다. Fig. 2(a)의 경우는 AE event의 수와 칩의 발생 개수가 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 절삭속도 100m/min 에서는 칩의 파단 작용이 완전하게 발생하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 2(b)의 경우 칩 발생이 AE event의 수와 비교할 때 미미한 차이로 칩이 많이 발생하였다. 그 이유는 절삭속도가 증가함으로써 단위 시간당 절삭되는 칩 두께가 감소하고, 공작물의 회전이 증가함으로서 절삭에 소요되는 실제 시간이 증가하기 때문이다. Fig. 2(c)의 경우 절삭속도 200m/min, 이송속도 0.15mm/rev 이상에서는 절삭구역의 온도가 상승하고, 가공재료는 더 큰 변형을 일으키므로 칩 형성에 많은 영향을 받아 AE event의 수와 칩의 발생 개수가 정량적으로 일치되지 않는다. 이와 같이 절삭속도가 고속인 경우에는 이송속도의 영향을 받아 절삭속도가 저속의 경우 보다 칩 발생 개수와 AE event의 수와 차이가 나타난다. 이러한 이송속도 0.15mm/rev의 경계를 임계 이송속도라 한다. 따라서 절삭속도가 증가하면 임계 이송속도가 빠르게 나타난다.

Fig. 3은 절삭속도 200m/min에서 이송속도 변화에 따른 칩의 파단 개수, AE event의 수, 그리고 AE energy의 변화를 보여준다. AE energy는 다음의 식

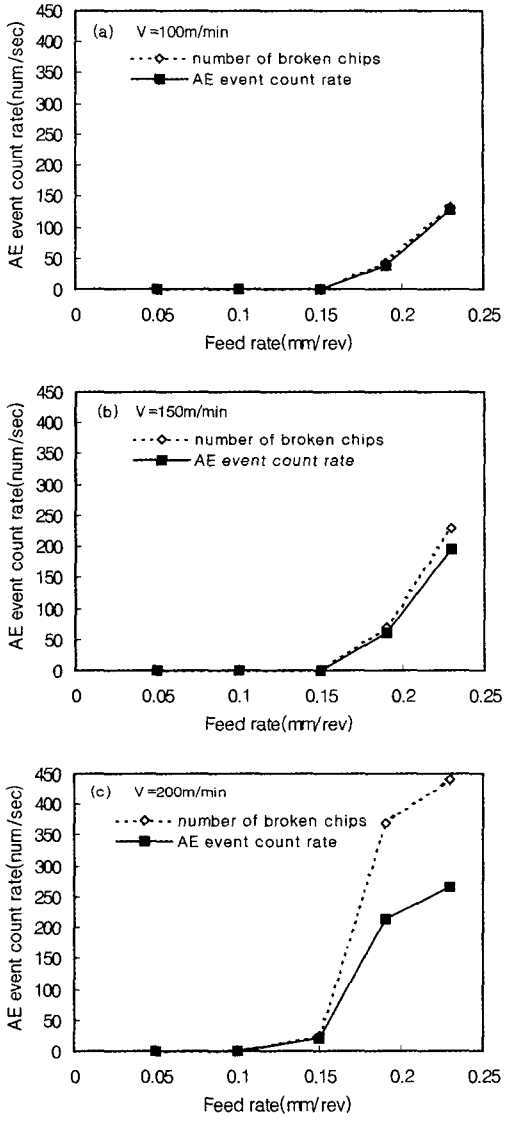


Fig. 2. Variation of AE event count rate versus feed rate in SM45C

으로 표현할 수 있다.[9]

$$E=\frac{V^{*2}\omega^2}{4R\gamma(\gamma^2+\omega^2)}e^{4\pi\gamma N/\omega} \qquad (2)$$

여기서, R=상승시간, N=AE event의 수, ω=각주파수, γ=감쇠상수(>0), $V^*=V_oe^{-\gamma t^*}$, $t^*=\frac{1}{\gamma}\ln\frac{V_o}{V^*}$ 이다. AE event 수는 경계값 이상의 돌발형 AE

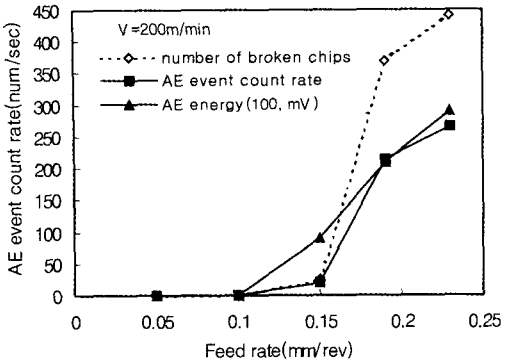


Fig. 3. Variation of AE event count rate versus feed rate in SM45C

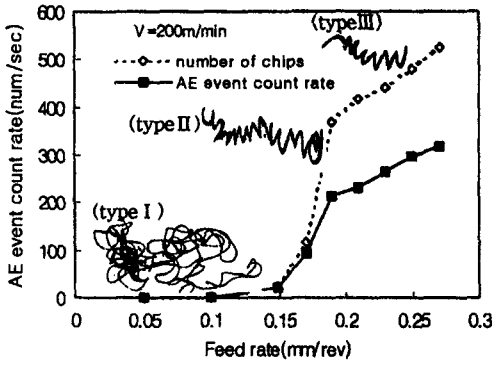


Fig. 4. Variation of AE event count rate versus feed rate in SM45C

신호를 나타내고, 돌발형 AE신호를 발생시키는 칩 파단과 직접적인 관련이 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 AE energy는 경계값을 넘는 파형의 면적을 나타내므로 발생되는 칩의 개수와 구체적인 관련성을 유추하기 어려울 것으로 사료된다. 경계값을 넘는 AE신호의 크기라고 말할 수 있는 AE energy는 절삭조건이나 공작물의 재질에 따라 그 값이 달라지게 된다. 모든 절삭조건에서 AE energy의 정량적인 값을 구하고, 이것을 이용하여 칩의 개수를 검출한다는 것은 불가능한 것으로 사료된다. 이상의 결과를 종합하면 칩의 발생기구는 AE event의 수로 검출하면 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있다고 결론지을 수 있다.

Fig. 4는 이송속도, 즉 f=0.05, 0.1, 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23, 0.25, 0.27mm/rev로 미소하게 증가시켜 절삭속도 200m/min에 대하여 절삭을 수행하면서 AE event 수와 칩 개수의 관계를 보여준다. 이송속도 0.15mm/rev부터는 짧은 칩이 발생하기 시작하여 0.19 mm/rev에서 칩의 개수가 급격히 증가한 후 그 이후부터는 완만하게 증가함을 알 수 있다. 칩은 3단계로 표현하였다. 첫 단계(type I)에서는 이송속도 0.05 ~0.1mm/rev의 경우로 경계값 이하의 AE신호가 검출되어 AE event 수는 0으로 나타났다. 두 번째 단계(type II)에서는 0.1~0.19mm/rev의 경우로 짧은 칩이 발생하기 시작하여 AE event 수가 계속적으로 증가하는 결과를 나타낸다. 마지막 단계(type III)에서는 이송속도 0.19~0.27mm/rev의 증가로 칩 두께가 크게 배출됨에 따라 AE event 수의 비율은 다소 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 보충 설명을 하기 위한 실험 결과이다. 칩 파단이 분명히 일어나는 절삭속도 80

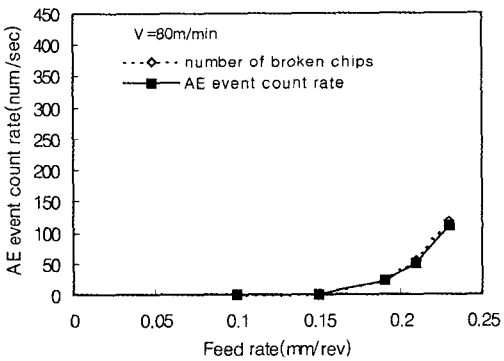
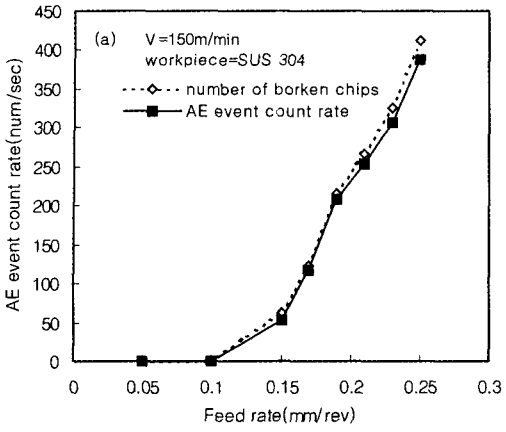


Fig. 5. Variation of AE event count rate versus feed rate in SM45C

m/min에서는 높은 검출률이 나타난다고 생각된다. 절삭속도 80m/min에서 이송속도를 변화시키면서 절삭 실험하여 칩의 개수를 조사하고, 측정된 AE event 수의 값과 비교하였다. 칩 개수에 대한 AE event 수의 비율은 약 94% 정도로 현저하게 높은 검출 비율을 나타내고 있다. 절삭속도가 하향 조건인 경우 이송속도 임계점이 크게 나타난다. 이와 같은 결과를 토대로 검토하면 칩 발생 기구에 영향을 미치는 임계 이송속도는 절삭속도에 의해 변화하며, 칩 발생 기구는 AE event 수의 값으로 경향을 찾을 수 있을 것으로 생각된다.

3.3. 공작물 재료에 따른 칩의 발생

Fig. 6은 칩 발생 기구를 예측하는 것이 다른 공작물 재료의 절삭가공에도 가능한지 확인하기 위하여 난삭재인 스테인레스강, 알루미늄합금에 대하여 실험을 수행하였다. 스테인레스강에 대한 절삭실험의 결과 칩의 개수에 대한 AE event 수의 비율은 약



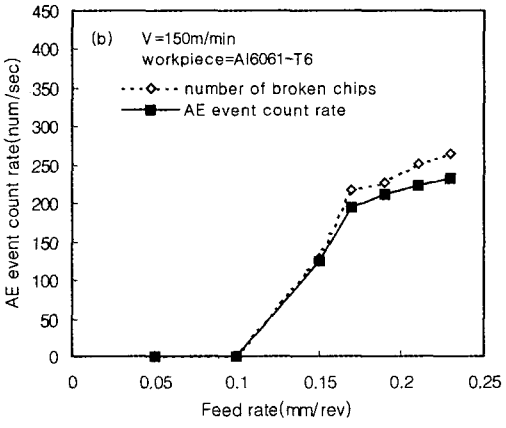


Fig. 6. Variation of AE event count rate versus feed rate in SUS304, Al6061-T6

95% 정도로 일반구조용 탄소강 강재일 때 보다 더 높은 검출률을 보였다. 그 이유는 스테인레스강은 칩의 파단 작용이 일반구조용 탄소강 강재보다 확실하게 일어나게 되는 것을 의미한다. 알루미늄의 경우에는 스테인레스강과 기계적 성질을 비교할 때 인장강도, 항복강도가 떨어지므로 칩 개수에 대한 AE event 수의 비율이 약 92% 정도로 스테인레스강보다 낮은 검출률을 보였다. AE event의 개수로 검출된 칩 형태의 구분은 공작물 재료에 따른 상이한 경향을 나타내지 않았다.

IV. 결 론

본 연구에서는 선삭 가공시 발생하는 칩 발생 기구와 AE event 수를 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) AE신호는 경계값을 이용하면 칩 발생 구분에 대해 신뢰성 있는 정보를 제공한다.

(2) AE event의 수와 칩 발생 개수의 관계는 비례적으로 변화한다.

(3) 칩 발생 기구에 영향을 미치는 임계 이송속도는 절삭속도에 의해 변화한다.

(4) 난삭재의 경우에는 짧은 칩이 발생하기 때문에 효과적으로 검출할 수 있다.

(5) 칩 발생 기구를 감시함으로써 절삭 시스템의 이상 상태를 감소시킬 수 있다.

참고문헌

1) J. L. Andreasen, L. D. Chiffre, "Automatic Chip-Breaking Detection in Turning by Frequency Analysis of Cutting Force", Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 45~48, 1993.
2) 鄭儀植, 南宮拓, 尹東鐘, "切削抵抗の 動的成分による 切りく 形態イプロセス 認識", 日本 機械學會 論文集(C編) 55券, 518號, pp. 2632~2636, 1989.
3) 新井實, 中山一雄, 塚田康夫 , 加賀美信明, "放射溫度計による 切りくず 排出狀態 の 監視", 精密機械, 51券, 4號, pp. 784~789, 1985.
4) 廣田平日, 鈴木重信, 倏崎裵, "切りくず切斷と 工具一板削材 熱起電力の 相關", 精密機械, 42券, 8號, pp. 689~714, 1976.
5) D. A. Dornfeld, C. Pan, "Determine of Chip Formation States Using a Linear Discrimination Function Technique with Acoustic Emission", Proc. 13th North American Manufacturing Research Conference, SME, pp. 299~303, 1985.
6) K. Uehara, "Identification of Chip Formation Mechanism through Acoustic Emission Machining", Annals of the CIRP, Vol. 33, No. 1, pp. 1~21, 1984.
7) R. Komanduri, R. H. Brown, "On the Mechanics of Chip Segmentation in Machining", ASME, Vol. 103, pp. 35~51, 1981.
8) E. N. Diei, and D.A. Dornfeld "Acoustic Emission From the Face Milling Process-the Effects of Process Variables", ASME Trans., Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 92~99, 1987.
9) R. A. Kline, "Acoustic Emission Signal Characterization", Canadian Crown Publish, pp. 105~137, 1981.
10) 맹민재, 정한규, 정준기, "선삭가공의 칩 발생기구의 예측", 대한기계학회 '95년도 춘계학술대회논문집, pp. 499~504, 1995.