

논문 99-8-6-07

선삭에서 AE센서를 이용한 절삭성 평가

최 원 식*

Assessment of Cutting Performance Using AE Sensor in Turning

Won-Sik Choi*

요 약

공작기계의 자동화 고속화에 의해 절삭 작업은 향상되고 있지만 선삭시 발생하는 연속형 고속형칩은 작업능률을 저하시킴으로 AE센서를 이용한 절삭 실험을 통하여 절삭 조건에 따른 AE 신호의 특징을 분석하고 칩과 관련된 신호특성을 분석결과 칩 형상에 가장 중요한 요인이 되는 것은 AE진폭 신호와 AE 에너지 신호였음을 확인하였으며, AE진폭 신호와 AE에너지 신호를 통계적 처리한 결과 에너지신호 보다는 진폭 신호의 침도값이 선삭시 절삭특성을 잘 나타내 주고 있었으며, 비절삭에너지를 이용하여 절삭성능을 종합적으로 평가하였다.

Abstract

The chips may be produced in the form of either broken chips or unbroken chips in turning process. The unbroken chips are dangerous to the operator and difficult to handle at high speed machining. The signal of Acoustic Emission is related to cutting conditions, tool materials, test conditions and tool geometry in turning. The relationship between AE signal and chip formation was experimentally investigated. The experimental results show that two types of chip formations are possible to classify from the statistical analysis of the amplitude of AE signal. The AE-sensor could be used to monitor the chip condition in turning.

1. 서 론

공작기계와 절삭공구의 성능향상에 따라 절삭가공은 더욱 고속정밀화 되었으며 절삭공정의 무인화 추세로 인하여 절삭가공시 생성되는 칩(chip)의 효율적인 처리는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다⁽¹⁻³⁾. 칩은 크게 연속형(continuous type)칩과 불연속형(discontinuous type)칩으로 나눌 수 있으며, 고속절삭시 생성되는 연속형 칩은 처리 자체의 어려움이 있을 뿐만 아니라 절삭가공 표면을 손상시키며 공작기계 및 공작물에 영커 정상적인 절삭작업을 방해하기 때문에 주기적으로 이를 제거하지 않으면 안된다. 따라서 연

속형 칩이 생성되는 절삭방식에서는 절삭작업의 효율성과 원활한 진행을 위해서 주기적인 칩의 절단을 통하여 이러한 문제점을 해결함과 동시에 칩제거를 용이하게 해주어야 한다.⁽⁴⁻⁶⁾

한편 절삭가공이 무인화됨에 따라 가공 공정에 대한 감시의 중요성이 높아지고 있으며, 적절한 칩처리를 위하여 칩형상 모니터링이 절실히 필요하게 되었다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

기존의 연구를 살펴보면, Jawahir⁽⁹⁾는 고속카메라를 이용하여 칩절단기구, 칩굴곡, 칩브레이킹 사이클에 대한 연구를 하였으며 Nakayama⁽¹⁰⁾는 이론적으로 절삭역학에 의한 광범위한 절삭조건하에서 논리적으로 칩형상 예측에 대하여 고찰하였다. 한편 Andreasen⁽¹¹⁾ 등은 절삭과정에서 공구동력계에 의한 이송분력을 스펙트럼 분석하여 칩절단성 예측에 대해 연구한 바 있다.

* 경일대학교 기계공학부(School of Mechanical Eng., Kyungil Univ.)

<접수일자 : 1999년 10월 6일>

그러나 칩절단특성을 고주파영역에서 쉽게 감시하기 위해서 Dornfeld⁽¹²⁾ 등은 2차원 절삭시 절삭조건에 따른 이론적인 AE RMS 값을 소성변형에너지물과 관련시켜 유도하였고 실험 값과 비교 검토하였다.

Inasaki⁽¹³⁾ 등도 2차원 절삭에서 같은 방법으로 연구하였으나 절삭폭과 이송을 부가시켜서 검토하였으며 Moriwaki⁽¹⁴⁾ 최기상⁽¹⁵⁾ 등도 AE를 절삭과 관련시켜 연구하였으나 절삭가공에 있어 대부분의 연구들이 공구의 마멸과 파손검출 및 소성거동등 절삭조건에 따른 AE특성 혹은 절삭현상과 AE특성에 대한 연구가 대부분이며 칩제어(Chip control)에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그리하여 본 연구에서는 선삭시 발생하는 칩형상과 AE센서를 이용한 신호를 분석하고 또한 압전형공구동력계를 사용하여 절삭력을 측정후 비절삭 에너지를 이용하여 절삭성을 평가하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 AE신호

구조물 내에 저장된 에너지가 방출되는 탄성파는 AE(Acoustic Emission)이라고 하며 때로는 SWE (Stress Wave Emission) 이라고 한다. AE신호는 Fig.1 과 같이 매우 고주파라서 보통10KHz에서 2MHz 의 영역을 가지며 그 원인은 재료내의 과도적인 불안정성에 의한 것으로 물질계의 전체가 불안정한 상태로 되기 전에 에너지는 항상 최저상태로 이동하려는 경향이 있어서 재료내의 마찰, 전위이동, 상변화, 소성변형, 쌍정, 균열의 생성과 전파, 개재물의 분리(decollation) 및 파괴 등이 AE 의 발생원인 인데 발생형태에 따라 연속형(continuous type)과 돌발형(burst type) 으로 나눌 수 있다. 연속형은 저진폭 고주파 형태의 신호로서 주로 소성변형에 의한 것으로 변형의 증가와 함께 진폭과 발생률이 증가하고 항복점부근에서 높은 발생률을 나타낸다. 돌발형은 고진폭 저주파형태의 신호로서 물체내의 미시적 파괴에 의한 것이며 파괴에 가까워지면 발생률이나 진폭이 함께 증가한다.

AE 의 출력신호는 수마이크로볼트 (μv)에서 수밀리볼트(mv)로 매우 약하기 때문에 40 ~ 100dB정도 증폭하여 처리한다. 그리고 증폭기 내에는 기계 및 각종 잡음(noise)을 피하기 위해 대역통과필터(band pass filter)를 설치한다. 실험중 어떤 에너지를 가진 시간 함수인 한 개의 AE파가 발생하면 A/D변환기를 통하여 AE신호로 관측된다. AE 신호의 매개변수로는 AE

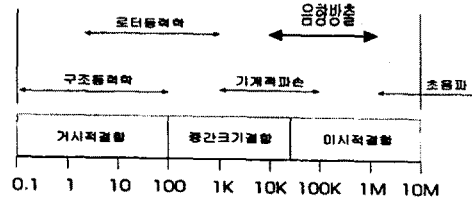


Fig.1 Frequency Range (Hz)

Hits, Energy, 진폭, 지속시간, 상승시간, 쇠퇴시간등이 있다. AE에너지는 음향방출 파형 아래의 면적을 말하며 다음식(1)과 같이 정의한다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \tag{1}$$

V(t)는 신호함수이며 t는 시간을 말한다. 그리고 에너지 평균값개념을 가진 RMS값은 식(2)와 같이 정의된다.

$$RMS_{AE} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt} \tag{2}$$

Hits 어떤 주어진 문턱값(threshold value)이상의 진폭을 가지는 개수를 헤아리는 방법이다. 식(2)로부터

AE신호의 에너지 변화율 $\frac{dU}{dt}$ 는

$$\frac{dU}{dt} \propto [RMS]^2 \tag{3}$$

로 된다.

단위체적당 소성변형으로 생기는 일

$$d\omega_i = \sigma_i \cdot d\epsilon_i = \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 + \sigma_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_3 \tag{4}$$

여기서 σ_i 는 주편차응력 ϵ_i 는 주변형을 성분이다.

그러나, 소성변형을 증분 $d\epsilon_{ij}$ 을 발생시키는 응력 σ_{ij} 을 받는 경우

체적 dV에 대한 일의 증분 dW는

$$dW = \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij} \cdot dV \tag{5}$$

전체일량 W는

$$W = \int_V \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij} \cdot dV \tag{6}$$

만약 일정한 응력 σ 을 받고 변형률속도가 $\dot{\epsilon}$ 라면 (6) 식은

$$\dot{W} = \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot V \quad (7)$$

이때 소성변형에 의해 발생하는 일률과 소비되는 에너지 변화율은 일정하며 식 (3)과 (7)로부터

$$\frac{dU}{dt} \propto [RMS_{AE}]^2 = C \cdot \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot V \quad (8)$$

따라서 에너지 변화율(dU/dt)은 편차응력(σ_i)과 에너지 변형률속도 및 재료와 체적에 의존함을 알 수 있다.

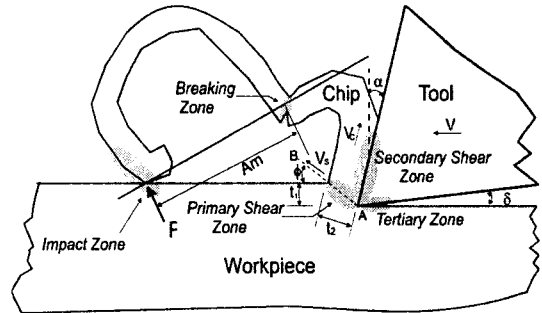
2.2 chip의 생성과정과 AE 신호

칩은 Fig.2와 같이 절삭공구날이 공작물과 상대운동할 때 전단면에서 전단소성변형에 의하여 생성되는데 칩의 형태는 가공의 난이성, 기계 및 제품의 손상여부, 절삭력, 절삭온도, 공구수명, 칩의 처리난이도, 생산성의 고려, 가공된 표면의 거칠기, 작업자의 안전성 등을 결정하는 중요한 요소이다. 절삭시 칩의 선단은 Fig.2과 같이 공작물에 닿은 후 절단되지 않고 원통처럼 말려서 나중에는 자중에 의해서 끊어지거나 혹은 마구 영켜서 작업을 불가능하게 하기도 하지만 Fig.2와 같이 짧게 절단되기도 한다.

칩의 절단은 Fig.2에 나타난 바와 같이 생성된 칩이 공작물 또는 공구와 접촉하였을 때 발생하는 접촉력(F)에 의해 발생하는 모멘트의 작용에 의해 일어나며, 연속형칩은 Fig.2와 같이 칩의 선단이 공작물에 닿는 순간 칩에 작용하는 굽힘 모멘트가 칩의 절단을 일으킬 만큼 크지 않아 계속되는 칩의 생성과 함께 불규칙적으로 영키기도 하고 규칙적인 튜블라(Tubular)형태로 생성되기도 한다.

이상과 같이 칩이 발생할 때 AE발생과 관련되는 것은 전위, 확산, 미끄럼, 쌍정등에 의한 소성변형과 균열의 생성과 전과, 개재물의 분리 및 파괴,상변태,마찰등으로 Fig.2와 같이 절단형 칩에서는 제1전단영역에서의 소성 변형, 제2영역에서의 공구경사면과 칩사이의 소성변형과 마찰에 의한 발생,공구여유면과 공작물사이 마찰에 의한 제3영역, 칩의 선단이 공작물과 부딪히는 제4영역, 그리고 칩이 절단되는 경우 칩의 파단영역이 AE발생원이라 생각할 수 있으며, Fig.2와 같이 연속형 칩에서도 절단형 칩의 경우와 같이 생각할 수 있으나

파단영역 대신 미끄럼과 마찰영역으로 AE발생원을 생각할 수 있다. 그리고 이⁽¹⁶⁾는 칩의 형태를 Fig.3과 같이 연속형칩을 과소제어된칩(under controlled chip)이라 하였고 불연속칩은 다시 세가지로 나누었는데 6,9 type, C type, Arc type 로 분류하였는데 6,9type 과 C type를 적정제어된칩(good controlled chip)이라 하였고 Arc type 칩을 과잉제어된칩(over controlled chip)으로 구분하였다.



- t_1 : undeformed chip thickness
- δ : relief angle
- V : cutting velocity
- F : chip breaking force
- A_m : chip breaking moment arm
- t_2 : chip thickness
- α : rake angle
- ϕ : shear angle
- AB : shear line
- V_c : chip velocity
- V_s : shear velocity

Fig.2 AE Source in Metal Cutting Process

CONTINUOUS TYPE	
6 & 9 TYPE	
C TYPE	
ARC TYPE	

Fig.3 Classification of the various chip forms

3. 실험장치와 실험방법

3.1 실험장치

본 실험은 2차원절삭시 절삭조건과 공구종류에 따른 칩이 형상과 AE신호와의 관계를 분석검토하기 위한 것으로 10HP의 범용선반에서 외경85mm, 두께2mm 가공한 탄소강관(SPPS 38)을 사용하였다. AE센서로서는 대역폭이 100-1000KHz인 광대역센서(WD)를 사용하였고 AE 시스템은 미국의 PAC(Physical Acoustic Corporation) 제품인 AEDSP-32/16을 사용하였다. 본 실험에서의 절삭조건은 Table1과 같이하였고 실험장치는 Fig.4와 같다. 그리고 사용한 공구는 홈형공구(G-Type)와 랜드앵글형공구(LACB-Type)를 사용하였으며 그 단면 형상은 Fig.5와 같이 랜드길이와 홈의 깊이를 각각 0.3으로 하였다. 그리고 절삭력을 측정하기위해서 압전형공구동력계(Kistler,9257A)를 사용하였다.

Table 1 Experimental Conditions

1. Lathe	
Spindle Speed	: 25 - 1600 rpm
Feed Range	: 0.07 - 0.57 mm/rev
Moter Power	: 10 HP
2. Cutting Conditions	
Cutting Speed	: 117 m/min
Feed Rate(9 steps):	: 0.07 0.11 0.15 0.19 0.23 0.30 0.37 0.42 0.53 mm/rev
Width of Cut	: 2.0 mm
Side Cutting	
Edge Angle	: 0 deg
Back Rake Angle	: 0 deg
Side Rake Angle	: -6 deg
Cutting Fluid	: none
3. AE Instrument	
AE Sensor	: WD (PAC)
AE System	: AEDSP-32/16(PAC)
Pre-amplifier	: 1220A(PAC) Gain 40/60dB, Band width 100-1200KHz
4. Tool Microscope : Measuring Accuracy-0.001mm (Mitutoyo)	

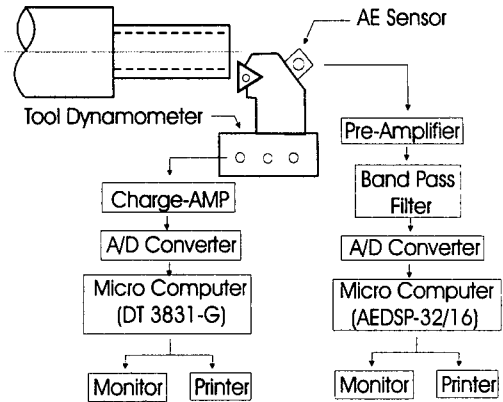
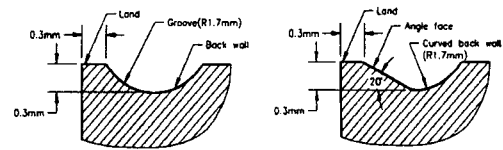


Fig.4 Experimental Setup



(a) G - Type (b) LACB - Type

Fig.5 Sectional view of Inserts

3.2 실험방법

절삭실험은 10마력인 범용선반으로 절삭속도 117m/min으로 일정하게 하고 이송은 Table1과 같이 0.07에서 0.53까지 9단계로 실시하였다. 공구의 형상과 절삭조건이 동일하더라도 절삭시 발생하는 절삭력과 AE신호 및 생성되는 칩의 형태란 공구마멸에 의해 변화되기 때문에 절삭실험전후 공구의 마멸상태를 확인하여서 마멸되지 않은 공구에 의해 절삭실험을 하였다. AE 센서는 공구홀더의 측면에 부착하였으며 Band Pass Filter를 통과시켜 절삭시 발생하는 전기적 잡음과 기계적 잡음을 제거하였다. 필터를 통과한 AE신호는 A/D Converter를 거쳐 AE Hits 와 AE Energy등을 AEDSP-32/16(PAC)을 통해 Micro Computer 에 저장하고 모니터로 관찰하였다. 한편 절삭성능을 평가하기 위하여 압전형공구동력계(Kistler,9257A)를 사용하거나 신호를 전하증폭기(Kistler,5807A)를 통해 증폭하고 다시 A/D 변환기(Data translation,DT3831-G)의 의해 디지털화한 후 컴퓨터에 저장하고 모니터로 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭성능과 칩의 형상

Fig.6은 이송에 따른 칩의 형태를 나타낸 것으로 이송이 낮은 영역에서는 연속형칩이 형성되다가 이송이 어느 한계를 넘게 되면 칩은 절단되기 시작한다. 홈형(G)공구의 경우 이송이 낮은 0.07, 0.11, 0.15mm/rev 에서는 Fig.3에 구분한 연속형칩이 생성되며, 0.19mm/rev 에서는 칩이 절단되기 시작하여 이송이 커짐에 따라 칩의 형태는 6,9형태에서 C형 arc 형으로 이행된다. 랜드앵글형(LACB)공구에서도 같은 경향을 나타내고 있다.

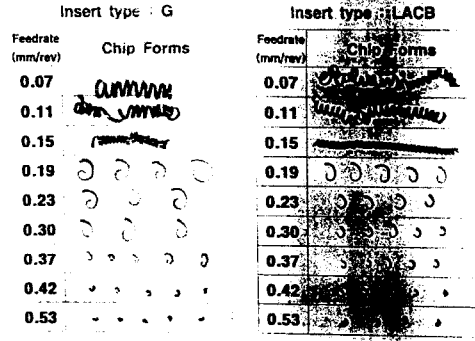


Fig.6 Chip forming vs. Feedrate for G and LACB

칩의 절단은 칩의 선단이 공작물표면에 닿게 되면 Fig.2와 같이 칩에 작용하는 힘 F에 의한 굽힘 모멘트가 발생하고 모멘트 값이 칩의 절단에 필요한 크기에 이를 때까지 칩은 성장하게 되는데 식(9)과 같은 조건이 되면 칩은 파단이 일어나게 된다.

$$FA_m \geq \sigma_f \frac{b_c t_c^2}{6} \quad (9)$$

여기서 F : 칩에 작용하는 힘(N)

Am : 칩절단 모멘트 암(mm)

σ_f : 칩의 파단응력(N/mm²) 이다.

Fig.6에서 보는 바와같이 이송이 증가함에 따라 칩두께가 두꺼워지므로 나카야마, 李 등에 의한 칩절단특성에 따른 절단한계를 넘어섰기 때문이라고 판단되며 절삭성능을 평가하기 위한 기준으로 가장보편화 된 것이 비절삭에너지로서 다음식 (10)과 같이 정의 된다.

$$u = \frac{Fp}{fb} \quad (10)$$

여기서 u : 비절삭에너지(N/mm²)

Fp : 주절삭분력(N)

f : 이송(mm/rev) b : 절삭폭(mm)

Fig.7(a)(b)은 이송에 따른 비절삭에너지를 나타낸 것으로 이송이 증가함에 따라 비절삭에너지는 감소하다가 이송이 0.3mm/rev부근에서는 최소를 나타낸 후 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 칩포머의 랜드부에 의한 칩-접촉제한 효과가 커지다가 이송이 0.3mm/rev부근에서 가장 크게 나타나고 그 이후는 칩공구 마찰이 커지기 때문에 다시 증가함을 보여주고 있다.

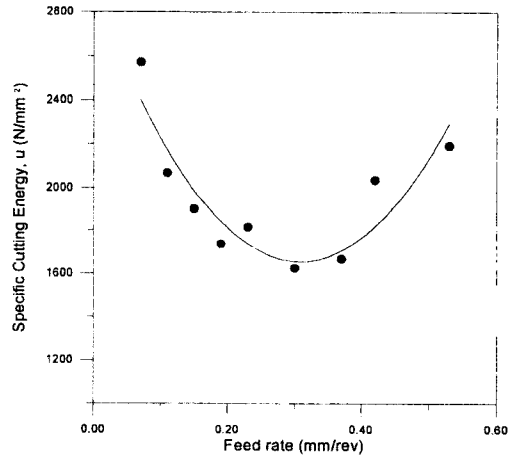


Fig. 7 (a) Specific Cutting Energy - G Type

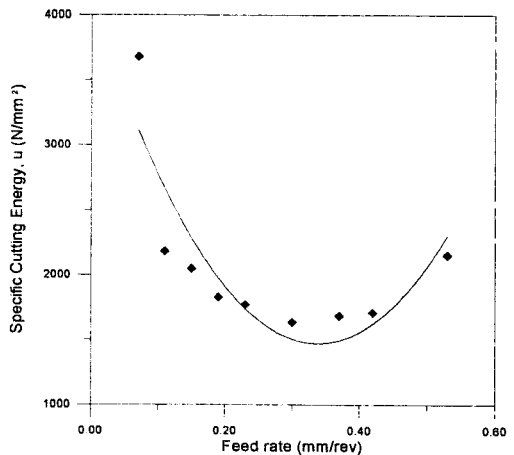


Fig. 7 (b) Specific Cutting Energy-LACB Type

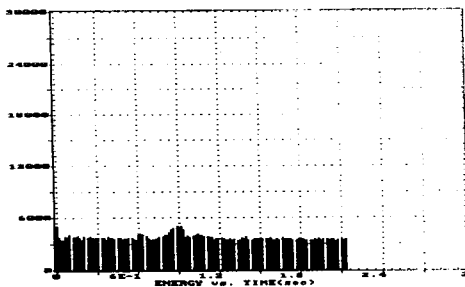
4.2 칩의 형상과 AE신호와의 관계

4.2.1 칩형상과 AE에너지

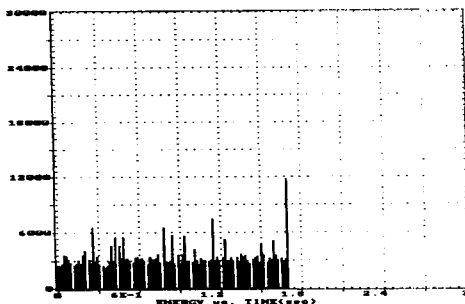
Fig.8은 절삭시 연속형칩과 절단형칩의 대표적인 형태의 AE에너지를 나타낸 것으로 이송이 낮은 영역에서는 즉 연속형칩이 생성되는 영역(0.11mm/rev)에서는 시간에 따른 AE에너지가 거의 일정한 값을 나타내다가 칩이 절단되면서 즉 0.30mm/rev에서는 시간에 따른 AE에너지의 산포가 심하게 나타남을 알 수 있다. 이는 식 (8)과 같이 일률의 변동이 AE에너지에 영향을 미치기 때문이라고 판단된다.

4.2.2 AE hits 와 칩형상

칩형상에 의한 AE Hits를 분석해보면 Fig9에 나타난 것처럼 연속형 칩이 생성되는 이송이 작은 영역(0.11mm/rev)에서는 특정한 Amplitude(dB)에 Hits가 집중되어 있음을 볼 수 있고 이송이 증가하여 불연속 칩이 형성되는 영역(0.30mm/rev)에서는 Hits가 연속 칩과는 달리 넓은 범위의 Amplitude(dB)에 Hits가 골고루 분포됨을 알 수 있다. 이는 칩이 절단되면서 발생되는 Amplitude(dB)가 다름을 알 수 있다.

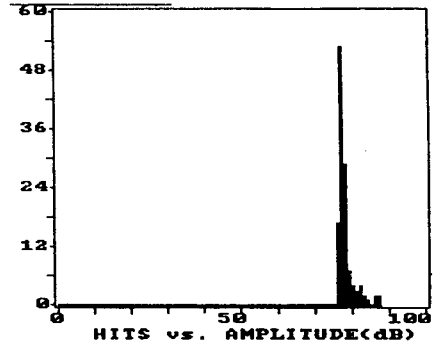


(a) continuous chip

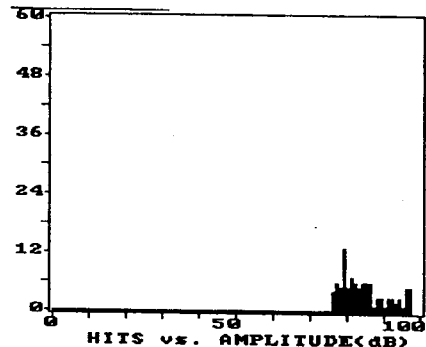


(b) discontinuous chip

Fig.8 AE Energy vs. Time for continuous chip(a) and discontinuous chip(b)



(a) continuous chip



(b) discontinuous chip

Fig. 9 AE Amplitude(dB) vs. AE Hits for continuous chip(a) and discontinuous chip(b)

5. 결 론

AE센서를 절삭실험에 이용하여 자동화 공작기계의 무인화에 걸림돌이 되고 있는 칩제어(Chip control)에 대한 AE신호가능성을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이송에 따른 절삭시 비절삭에너지가 가장 작은 영역에서 발생하는 칩의 형태는 불연속칩으로서 적정 제어된 칩(good controlled chip)임을 알 수 있었다.
- (2) 시간에 따른 AE에너지의 변동은 연속형칩에 비해 불연속형칩의 경우가 더욱 심하게 됨을 알 수 있었다.
- (3) AE Amplitude(dB) 대한 Hits 는 연속형칩에서는 특정영역에서 큰 Hits 값을 보이는 반면 불연속칩에서는 보다 넓은 AE Amplitude(dB)범위에서 Hits가 발생됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Jawahir, I. S., 1988 "A Study and Future predictions for the Use of chip breaking in Unmanned systems" Int. J. AMT 3(4), p87-104.
- (2) Kluff, W., Konig,W., Luttermelt, C.A., Nakayama,K., Pkelharing, A. J., 1979 "Present Knowledge of chip control" Annals of the CIRP, Vol.28/2, pp441-445.
- (3) Worthington, B., 1976 "A Comprehensive literature Survey of chip control in turning process", Metal Cutting Machine Tools Vol.1,pp103-116.
- (4) Nakayama, K., 1962 " A Study of the chip breaker", Trans. of JSME, Vol.5, pp142-150.
- (5) J. L. Andreasen, L. De Chiffre, 1993 "Automatic Chip-Breaking Detection in Turning by Frequency Analysis of cutting Force" Annals of the CIRP,Vol.42/1 pp45-48
- (6) Jawahir, I. S., 1988 "The tool restricted contact effect as a major influencing factor in the chip breaking an experimental analysis" CIRP, Vol.37/1, pp121-126.
- (7) 강철희, 1996 "공작기계기술의 현재와 미래(FMS) 한국정밀공학회지 제13권 제9호 pp13-30
- (8) I.S. Jawahir,1988, "A Survey and Future Predictions for the Use of Chip Breaking in Unmanned Systems",The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,3(4), pp87-104.
- (9) I.S.Jawahir, 1990, "On the Controllability of Chip Breaking Cycles and Modes of Chip Breaking in Metal Machining",CI계 Vol.39/1, pp47-51.
- (10) K.Nakayama, 1992, "Comprehensive Chip Form Classification Based on the Cutting Mechanism", CIRP Vol.41/1,pp71-74.
- (11) J.L.Andreasen, L.De Chiffre, 1993, "Automatic Chip-Breaking Detection in Turning by Frequency Analysis of Cutting Force" CIRP Vol.4/1, pp45-48.
- (12) Dornfeld and Asibu, 1981, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting" ASME Vol. 103, August pp.330-340.
- (13) T. Blum and I. Inasaki, 1990, "A Study on Acoustic Eemission from the Orthogonal Ccutting Process" ASME Vol. 112, August pp203-211
- (14) Moriwaki, 1980, "Detection of Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement" CIRP, Vol. 29, No. 1, pp.35-40.
- (15) 최기홍, 최기상, 1993 "다이아몬드 공구를 사용한 선삭에서 여유면의 접촉에 의한 AE발생" 대한 기계학회논문집 제17권 제3호 pp527-537.
- (16) 이영문, 최원식, 서석원, 1994 "절삭조건과 공구 형상인자로 구성된 무차원 파라미터에 의한 절삭 성능 및 칩절단 특성평가(1)" 한국정밀공학회 논문집 제11권 제6호 pp179-184.

著 者 紹 介



최 원 식

1958년 3월 16일생
 1981년 영남대학교 기계공학과 졸업 (학사), 1988년 영남대학교 기계공학과 졸업 (석사), 1996년 기계제작 기술사 취득, 1999년 경북대학교 기계공학과 졸업 (박사)

현재 경일대학교 기계공학부 겸임교수
 주관심분야 : 정밀가공, 공작기계, 기계설계, 기계공학 법