

ADI 절삭시 AE신호에 의한 플랭크 마멸폭의 인프로세스 검출

예규현*, 전태옥**

In-Process Detection of Flank Wear Width by AE Signals When Machining of ADI

Ye, Gyoo-Hyeon*, Jun, Tae-Ok**

Abstract

Monitoring of Cutting tool wear is a critical issue in automated machining systems and has been extensively studied for many years. An austempered ductile iron(ADI) exhibits the excellent mechanical properties and the wear resistance. ADI has generally the poor machinability due to the characteristic. This paper presents the in-process detection of flank wear of cutting tools using the acoustic emission sensor and the digital oscilloscope. The amplitude level of AE signal(AERms) is mainly affected by cutting speed and it is proportional to cutting speed. There have been the relationship of direct proportion between the amplitude level of AE signals and the flank wear width of cutting tool. The flank wear width corresponding to the tool life is successfully detected with the monitoring system used in this study.

Key Words : Tool Wear(공구마멸), ADI(오스템퍼링한 구상흑연주철), Acoustic Emission(음향방출), Flank Wear Width(플랭크마멸 폭), In-process Detection(인프로세스 검출)

1. 서론

공작기계의 발전과 함께 우수한 공구재료가 개발되어 고강도재의 절삭가공이 가능하게 되었지만 이들 고강도재의 선삭이나 드릴가공 등의 절삭가공에서는 높은 절삭저항이나 공구마멸 등의 문제점을 가지고 있다. 이 때문에 제품생산에 막대한 지장을 초래하게 되며 더욱이 산업기

계 부품이나 자동차용 부품에 사용되기 위해서는 2차 가공이 필수적이고, 2차 가공의 대부분을 차지하고 있는 선삭의 경우 그 절삭특성과 공구마멸과의 관계는 실용적 견지에서 매우 중요하다. 그러나 실제 현장에서의 공구수명에 따른 공구교환 시기는 공구마멸의 인 프로세스(in process) 검출이 현실화되어 있지 못하기 때문에 일정 수량의 부품을 가공할 때 가공된 부품의 치수를 매회 측정하

* 원주대학 동력기계과
** 한양대학교 대학원

여 치수정도의 오차에 따라 공구보정 및 공구교환 시기를 결정하고 있는 실정이다. 따라서 숙련된 작업자를 대신하여 가공공정 상태를 감시하고 생산시스템의 원활한 운영을 위해서는 절삭가공 중 공구마멸이나 파손 등과 같은 이상 상태를 신속하게 검출할 수 있는 자동화된 시스템의 구축이 절실히 요망된다.

특히 가공중 이상상태 감시에 AE법의 이용이 유효한 것으로 알려져 본 연구에서도 이를 사용하여 오스텸퍼링 한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron, ADI)의 절삭에 적용하여 실험을 행하였다.

ADI재는 일반의 구상흑연주철에 합금원소를 첨가하여 베이나이트 변태구역인 370℃에서 2시간 동안 유지시켜 항온 열처리한 것으로 기지조직이 베이나이트(bainite)와 잔류오스테나이트(retained austenite)로 구성되어 있기 때문에 같은 조성을 가진 일반의 구상흑연주철에 비하여 연성과 인성의 감소 없이 강도를 2배로 증가시킬 수 있다. 그러나 그 강도 특성이 향상된 반면에 절삭가공시 공구마멸에 대한 문제와 자동화 시스템에서의 공구마멸의 실시간 검출 시스템에 대한 확립은 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 ADI재를 피삭재로 하여 AE 신호 특성을 규명하여 디지털 오실로스코프의 파형분석 기능을 이용한 공구마멸량의 인프로세스 검출법의 타당성을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

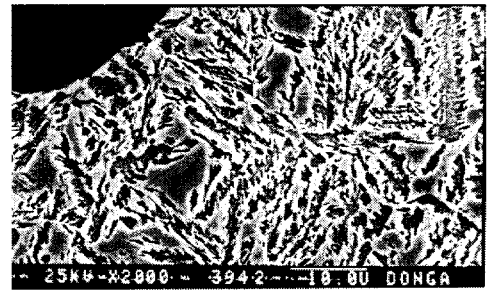
2.1 실험재료

본 실험에 사용한 실험재료는 Mg을 첨가한 일반의 구상흑연주철 용탕에 순도 99.9%인 Cu와 Ni 및 Fe-60% Mo를 첨가하여 용해한 후 Y형 생사형에 주입하여 직경 60mm, 길이 160mm의 환봉시료를 얻었으며, 이의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

구상흑연주철의 오스텸퍼링 처리에 있어서는 오스테나이트화 하기 위한 가열이 필요하며, 이 온도의 범위는 일반적으로 850~900℃가 적당하다^(1,2)고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 오스테나이트화 온도를 900℃로 하고 기지조직 내의 탄소량이 평행에 도달할 수 있게 하기



(a) Not austempered



(b) Austempered

Fig.1 Scanning electron micrograph of test materials

위하여 1시간 30분 동안 유지한 후, 오스텸퍼링 온도 370℃에서 2시간 동안 유지시켜 급랭시켰다. 여기서 오스텸퍼링 온도를 370℃로 한 것은 이 온도 부근에서 연성 및 강도적 성질에서 우수한 특성을 나타내기 때문이다.⁽³⁾

Fig.1은 구상흑연주철의 오스텸퍼링 처리 전과 후의 현미경 조직을 나타낸 것으로 (a)의 오스텸퍼링 전의 현미경 조직에서 기지조직은 페라이트(ferrite)가 형성되어 있고 그 주위에는 미세한 퍼얼라이트(pearlite)와 탄화물 입자가 존재하고 있다. 그리고 오스텸퍼링한 현미경 조직인 (b)에서는 흑연 주위에 미세한 침상의 하부베이나이트와 조대한 침상 및 판상의 상부베이나이트가 형성되어 있으며 기지조직내 잔류오스테나이트도 함유되어 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2는 오스텸퍼링 온도 370℃에서 열처리한 ADI 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 2 Mechanical properties of ADI

Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
125	4.4	408

Table 1 Chemical compositions of ADI(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni	Mg
3.52	2.50	0.35	0.02	0.02	0.26	0.21	0.7	0.04

2.2 실험방법

Fig.2는 본 실험에 사용한 실험장치 중 AE 센서를 부착한 공구홀더를 나타낸 것이다. CNC선반(화천 HI-ECHO10)에서 재료의 외주 길이 방향 절삭에서 공구마멸의 In-process 검출을 위하여 공구생크 후부에 공진주파수 1MHz의 AE-905S형 AE 센서를 부착하고 여기서 발생된 AE 신호를 전치증폭기(Pre-amplifier) 및 AE-922형 디스크리미네이터에서 총 60dB 증폭하고, 100KHz~1MHz의 밴드 패스 필터로 처리한 후 반파장류한 포락선검파 파형을 데이터레코더에 저장함과 동시에 디지털오실로스코프(LeCroy 9310)로 파형 관찰을 하였다. 그리고 디지털오실로스코프를 이용하여 20ks/s의 샘플링 레이트(sampling rate)로 AE 신호 전압의 RMS 값을 측정하고, 또 공구현미경으로 바이트의 플랭크마멸 폭의 측정과 주사전자현미경(S.E.M.)을 사용하여 공구마멸 상태를 조사하였다.

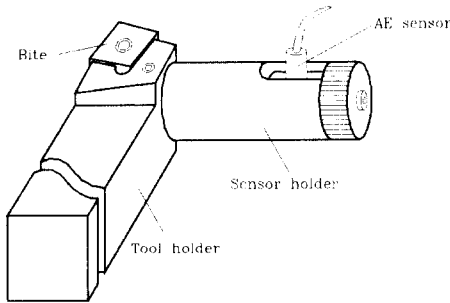


Fig. 2 Location of AE transducer attached to tool holder

Table 3은 본 실험에 사용한 공구의 형상과 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Cutting condition

Tool angle	-5, -6, 6, 5, 15, 15, 0.8)
Tool material	CERAMIC(Al ₂ O ₃ =TiC)
Cutting speed	50~200(m/min)
Depth of cut	0.3 ~ 1.5(mm)
Feed	0.02 ~ 0.2(mm/rev)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절삭속도에 따른 AE의 변화

Kannatey-Asibu⁽⁴⁾는 절삭가공에 있어서 AE신호의

에너지량을 AE 발생원의 일량으로 해석하고, 에너지 척도로써 AE신호 진폭레벨을 AE교류파의 AERms로 나타내고 다음과 같이 정의하였다.

$$AERms = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt} \quad (1)$$

여기서 $V(t)$: 시간함수, ΔT : 평균 시간이다.

본 연구에서는 절삭조건에 따라 세라믹공구의 AE신호 진폭레벨을 알기 위하여 공구의 플랭크마멸 폭 V_B 를 "0"이라고 가정할 수 있는 초기상태의 공구를 사용하였다.

Fig. 3은 이송속도 f 가 0.2mm/rev일 때 각 절삭깊이 t 에 대하여 절삭속도 V 를 단계적으로 변화시켰을 때 AE신호 전압의 실효치 AERms값을 나타낸 것이다. AERms 값은 각 실험마다 공구마멸이 없는 새 공구를 사용하였기 때문에 AE 신호의 주 발생원으로는 절삭중 피삭재의 전단변형을 영역, 칩과 공구경사면 및 여유면과 피삭재의 접촉부로 생각된다. 그리고 그림에서 보는 바와 같이 절삭깊이에 관계없이 AERms 값은 절삭속도가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 절삭깊이와 이송속도가 일정하고 절삭속도만을 변화시키면 변형 영역의 크기는 변화하지 않지만 변형을 속도가 변한다. 즉 절삭속도가 증가하면 변형률 속도가 크게 증가하게 되어 AERms 값도 비례하여 선형적인 증가 현상을 나타낸다. 따라서 AERms 값은 금속 절삭 중에 피삭재가 칩으로 될 때 받는 전단변형 속도에 의해 크게 좌우된다고 볼 수 있으며, 이런 현상은 금속의

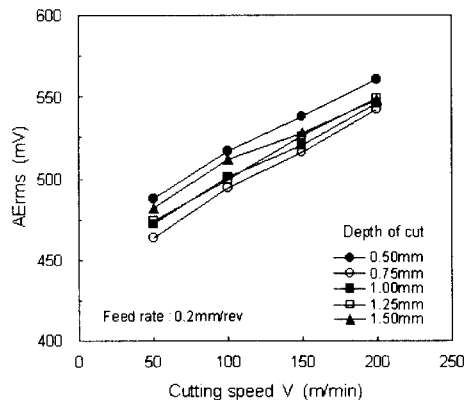


Fig. 3 Variations of AERms on the different cutting speed at $f=0.2\text{mm/rev}$

인장시험의 경우 AE 신호 진폭은 변형속도의 영향을 받는 것과 같이 금속 절삭가공에 있어서도 동일한 결과를 나타낸다.⁽⁵⁾

3.2 이송속도 및 절삭깊이에 따른 AE의 변화

Fig. 4는 절삭깊이 t 가 0.5mm로 일정하게 하고, 각 절삭속도 V 에 있어서 이송속도 f 의 변화에 따른 AErms 값을 나타낸 것이다. 그리고 이송속도 f 가 0.2mm/rev로 일정하게 하고, 각 절삭속도 V 에 있어서의 절삭깊이 t 의 변화에 따른 AErms 값을 Fig. 5에 나타내었다.

이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 AErms 값은 이송속도와 절삭깊이의 변화에 크게 영향을 받지 않고 있음을

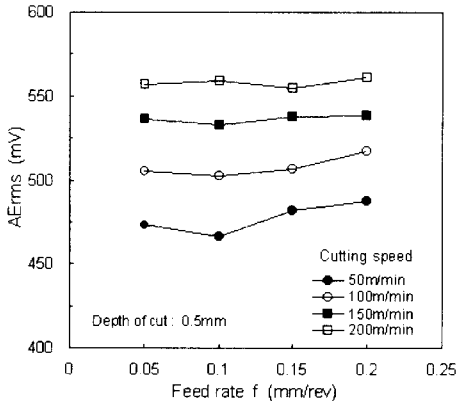


Fig. 4 Effect of feed rate on the AErms at $t=0.5$ mm

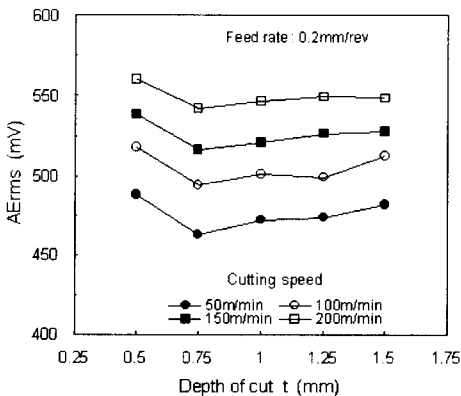


Fig. 5 Variation of AErms on the depth of cut at $f=0.2$ mm/rev

볼 수 있다. 동일 절삭속도에서 이송속도와 절삭깊이가 변하면 칩이 형성될 때 발생하는 전단변형 영역의 크기가 변하는데도 불구하고 AErms 값이 거의 일정하게 되는 것은 절삭깊이와 이송속도의 변화는 AErms 값의 변화에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 많은 연구자들에 의해 보고되고 있는 것과 같이 초기 플랭크 마멸량이 작은 공구에 있어서 AE 신호의 발생은 주로 변형률 속도에만 의존하고 있다는 연구 결과와도 일치하고 있다.⁽⁶⁻⁸⁾

3.3 가공시간에 따른 플랭크마멸의 변화

세라믹 공구를 사용하여 절삭깊이 t 는 0.3mm, 이송속도 f 는 0.02mm/rev로 일정하게 하고 각 절삭속도 V 에 있어서 절삭 시간별로 연속가공을 행하여 가공시간 T 와 플랭크 마멸폭 V_B 와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서는 피삭재 형상의 크기에 제한이 있기 때문에 30분 이상의 가공량이 되도록 하기 위하여 절삭깊이와 이송속도는 가능한 낮게 선택하여 실험을 행하였다.

이 그림에서처럼 공구의 플랭크 마멸폭은 절삭시간이 경과함에 따라 거의 직선적으로 증가하며, 또한 근사직선의 기울기도 절삭속도가 빠를수록 커진다는 것을 알 수 있다. 세라믹 공구의 경우 공구 마멸기구는 주로 연삭마멸과 같은 기계적 마멸이 주로 작용하여 초경공구 등에서와 같은 소성변형이나 확산마멸 등은 잘 나타나지 않는 것으로 보고되고 있다.^(9,10) 이러한 결과로 직선적인 정상 마멸이 진행되고 있다고 생각된다.

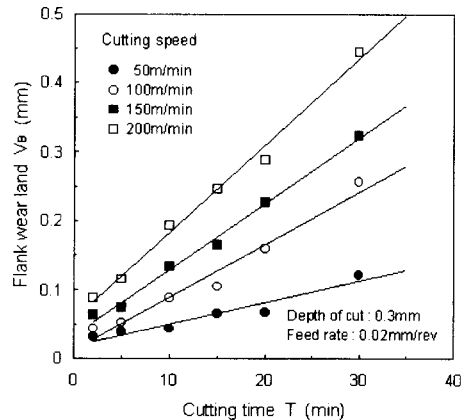


Fig. 6 Effect of cutting time on the flank wear land for ceramic tool

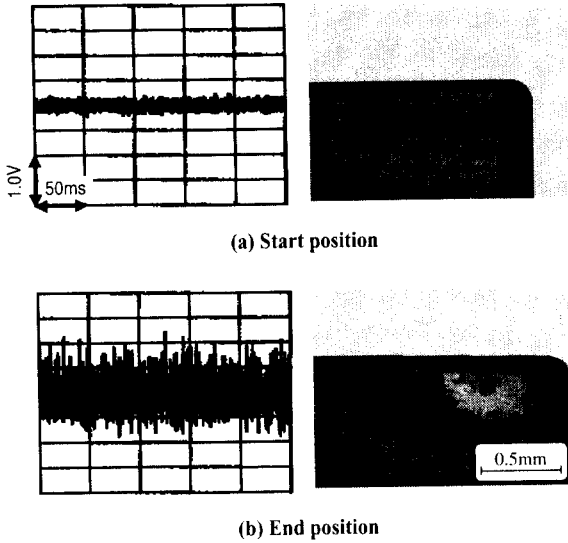


Fig. 7 Wave form of AE signal and flank wear land for ceramic tool($V=150\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$, $t=0.5\text{mm}$)

3.4 플랭크 마멸의 인 프로세스 검출

Fig. 7에는 절삭속도 V 가 150m/min , 이송속도 f 가 0.1mm/rev 및 절삭깊이 t 가 0.5mm 일 때 20분 동안 연속 가공하였을 때의 세라믹 공구에 대한 AE 신호 파형과 공구 인선 형상을 나타낸 것이다.

그림에서 (a)는 플랭크 마멸이 발생하지 않았다고 가정했을 때 절삭초기의 AE 신호 파형과 공구 여유면의 사진이고, (b)는 절삭종료 시점에서의 AE 신호 파형과 절삭종료 후에 촬영한 플랭크 마멸의 사진이다. 즉 플랭크 마멸폭이 증가하는 것에 따라 AE 신호의 원 파형의 진폭도 크게 됨을 알 수 있다. 이 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 AE신호 발생은 플랭크 마멸폭과 비례관계에 있음을 알 수 있다.

이송속도 f 가 0.1mm/rev , 절삭깊이 t 가 0.5mm 로 일정할 때 각 절삭속도 V 에 대하여 플랭크 마멸폭 V_B 에 따른 AE 신호의 AERms 값을 Fig. 8에 나타내었다.

그림에서 절삭속도에 관계없이 플랭크 마멸폭이 증가함에 따라 AERms 값도 거의 직선적으로 증가하고 있고, 또한 절삭속도가 클수록 근사직선의 기울기도 크게 된다는 것을 알 수 있다. 플랭크 마멸폭이 증가할수록 AERms 값이 증가하는 것은 플랭크 마멸에 따른 공구 여유면과 가공면 사이의 접촉면적이 크게 되며, 이것은 공구 여유면과 가공면의 두 접촉면 사이의 마찰에 의한 AE

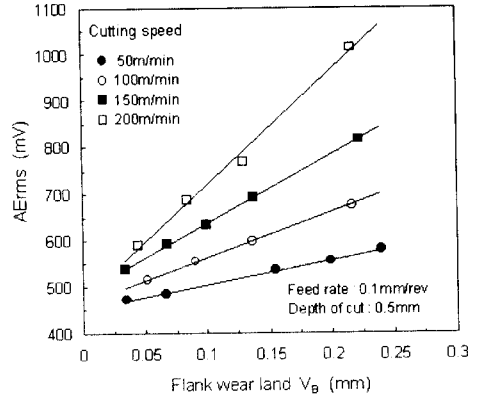


Fig. 8 Variation of AERms on the flank wear land for different cutting speed

가 크게 발생하였기 때문이다.⁽¹¹⁾ AE 신호에 대한 지금까지의 결과에 의하면 금속절삭 중에 발생하는 AE 신호는 절삭조건 중 절삭속도와 가공 중에 발생되는 플랭크 마멸폭에만 주로 의존한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 세라믹 공구에 대한 공구수명을 플랭크 마멸폭 $V_B=0.2\text{mm}$ 로 가정했을 때 각 절삭속도 V 에 대하여 공구수명인 플랭크 마멸폭 V_B 가 0.2mm 일 때의 AERms 값을 이송속도 f 가 0.1mm/rev , 0.2mm/rev 에 대하여 각각 나타낸 것이다.

그림 중에 표시된 식은 최소자승법에 의한 근사직선의 식으로 절삭가공시 절삭조건이 결정되면 각 절삭속도에 있어서 공구수명에 해당하는 AE 신호의 AERms 값을 알 수 있다. 즉 이 값을 본 연구에 사용한 디지털 오실로스코프의 PASS/FAIL 파형분석 기능에서 공구수명을 결정하는 AE 신호의 기준치로 설정함으로써 플랭크 마멸량에 따른 공구수명을 인 프로세스 검출할 수 있다고 생각된다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각 절삭속도 V 에 대하여 전술한 바와 같이 디지털 오실로스코프를 이용한 모니터링 시스템으로 공구수명에 상당하는 플랭크 마멸폭 V_B 를 인 프로세스로 검출한 것 중 절삭속도 V 가 각각 100m/min 및 150m/min , 절삭깊이 t 가 0.5mm 및 이송속도 f 가 0.1mm/rev 일 때의 AE 신호 파형을 나타낸 것이다. 이것은 공구수명에 해당하는 AE 신호의 AERms 값을 660mV 와 770mV 로 각각 설정했을 때 이 설정값을 초과하여 670mV 와 778mV 에서 검출된 것이다. 즉 오실로스코프의 파형분석 기능에서 설정한 조건을 만족하면서 실

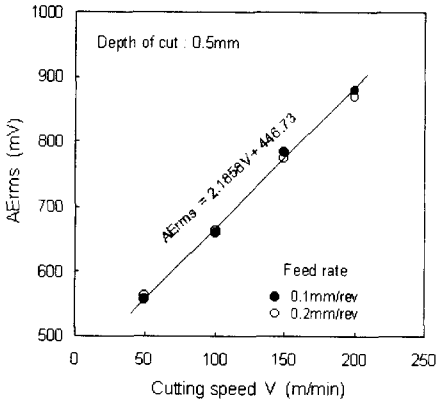
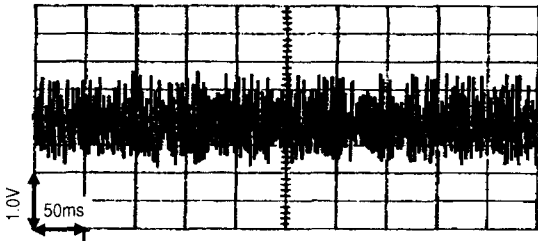


Fig. 9 Relation between cutting speed and AErms at VB=0.2mm



1 failed of 1104 sweeps Test failed
Fail if rms(1) > 666mV 670mV

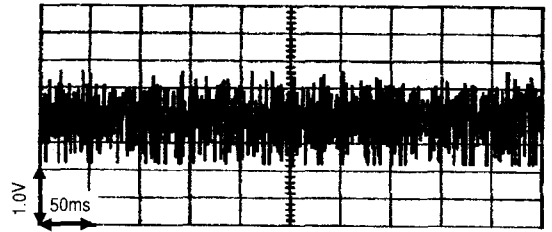
If FAIL : Stop, Store (1 -> M1), Beep

Fig. 10 In process detection of flank wear at V=100m/min

시간으로 검출한 결과이며 목적하는 플랭크 마멸에 따른 공구수명 검출에 아주 유효한 방법으로 판명되었다.

또한 Fig. 12는 Fig. 10에 대한 공구 여유면의 사진을 나타낸 것이다. (a)는 공구 인선부에 나타난 공구 여유면의 플랭크 마멸이고 (b)는 (a)의 그림 중에 A로 표시된 부분을 확대시킨 것으로 연삭마멸 현상과 같이 경질입자 등에 의해 긁힌 흔적과 같은 마멸현상을 볼 수 있었다. 여기서 기준치로 설정한 플랭크 마멸폭은 0.2mm이었지만 실제 측정된 공구의 플랭크 마멸폭은 대략 0.213mm정도로 약간의 차이는 있지만 비교적 근사치를 얻을 수 있었다.

Fig. 13은 Fig. 11의 절삭속도 V가 150m/min에 대한 공구 여유면의 사진으로 실제 측정치와 기준치로 설정

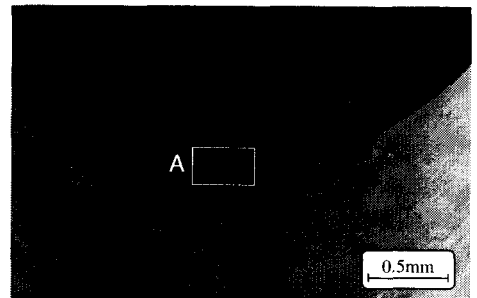


1 failed of 1248 sweeps Test failed
Fail if rms(1) > 770mV 778mV

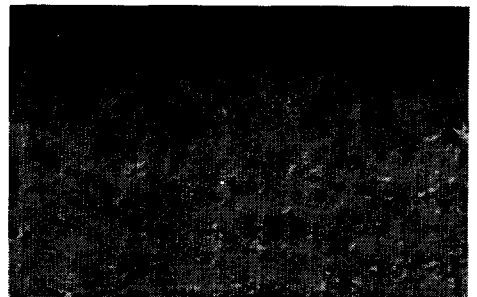
If FAIL : Stop, Store (1 -> M1), Beep

Fig. 11 In process detection of flank wear at V=150m/min

한 값과 근사한 값을 보여주고 있다. 따라서 임의의 절삭속도에서 ADI재의 가공시 디지털 오실로스코프의 파형 분석 기능을 이용함으로써 공구수명을 예측할 수 있음을 알았다.



(a) Flank wear



(b) Detail of A

Fig. 12 Photographs of in process detected tool wear (V=100m/min, f=0.1mm/rev, t=0.5mm)

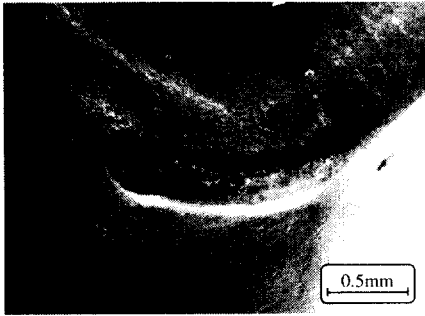


Fig. 13 Photographs of in process detected tool wear
($V=150\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$, $t=0.5\text{mm}$)

4. 결 론

오스템퍼링한 구상흑연주철(ADI)의 절삭에서 AE신호와 디지털 오실로스코프를 이용하여 공구수명에 상당하는 플랭크마멸폭의 In-process 검출을 위하여 플랭크마멸 폭, 절삭속도, 이송 및 절삭깊이 등을 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 세라믹 공구의 경우 AE신호 진폭레벨 AErms는 절삭조건 중에서 주로 절삭속도에만 영향을 크게 받으며, 절삭속도의 증가와 함께 거의 직선적으로 상승한다.
2. AErms와 플랭크마멸 폭과의 사이에는 정비례 관계를 가지며 그 증가율은 절삭속도와 함께 직선적으로 상승한다.
3. 공구수명에 상당하는 플랭크 마멸폭의 인프로세스 검출에 디지털 오실로스코프를 이용한 모니터링 시스템의 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) 和出 昇, 上田 琢完, "球狀黑鉛鑄鐵의 強じん化をため の オス テ ン パ-處 理 條 件, 鑄 鐵 の 磨 耗 と 材 料 特 性", 鑄 物 第 24 委 員 會 鑄 物 分 科 會, pp.192~193, (1984)
- (2) J.F.Janwak and P.A.Morton, "A Guide to Mechanical Properties Possible by Austempering 1.5%Ni-0.3%Mo Ductile Iron", AFS

- Trans., 92, pp.489~498, (1984)
- (3) Y.J.Park and P.A.Morton, "Continuous Cooling Transformation and Austempering Behavior of Cu-Mo Ductile Iron", AFC Trans., 123, pp.395~400, (1984)
- (4) 박홍식, "오스템퍼링한 저합금 구상흑연주철의 기계적 성질 및 마멸특성에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문, (1989)
- (5) T.Kaneeda and H.Tsuwa, "Study on Separation Process at Tool Tip in Metal Cutting(2nd Report)-Detecting Fracture Phenomena at Tool Tip in Separation Process by Acoustic Emission Techniques", JSPE, 第45卷, 第4號, pp.34~39, (1979)
- (6) J.R.Fredrick and D.K.Felbeck, "Dislocation Motion as a Source of Acoustic Emission", Acoustic Emission, ASTM STP505, pp.129~139, (1972)
- (7) T.Kishi and K.Kuribayashi, "Acoustic Emission and Inhomogeneous Deformation in Plastic Deformation", Fundamentals of Acoustic Emission, pp.105~128, (1979)
- (8) K.Sano and K.Fujimoto, "Microscopic Aspects of Fracture and Acoustic Emission in Models", Fundamentals of Acoustic Emission, pp.131~164, (1979)
- (9) I.R.Pashby, J.Wallbank and F.Boud, "Ceramic Tool Wear when Machining Austempered Ductile Iron", Wear, 162-164, pp.22~33, (1993)
- (10) 鳴瀧 則 彦, 間 田 泰 弘, "球 狀 黑 鉛 鑄 鐵 切 削 に お け る セ ラ ミ ッ ク 工 具 の 磨 耗", JSPE, 第 53 卷, 第 4 號, pp.589~594, (1987)
- (11) 전태옥, 박홍식, 이광영, 예규현, "오스템퍼링 처리한 구상흑연주철의 AE신호에 의한 절삭공구 손상의 검출에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제13권, 제11호, pp.25~31, (1996)