

AE法에 의한 工具損傷 및 壽命의
監視技術에 關한 研究

韓 應 教* · 金 祺 中* · 方 泰 圭**

A Study on the Monitoring Technique in Tool
Failure and Tool Life by AE Method

Eung-Kyo Han, Ki-Choong Kim, Tae-Gyu Bang

Abstract

This is a study on the monitoring technique in tool failure and tool life by AE method.

The relation between amplitude level of AE signal and flank wear width was studied by experiments. The relation between amplitude level of AE signal and tool life was also studied.

As the result, it was observed that amplitude level of AE signal was only affected by cutting velocity. Amplitude level of AE signal was directly proportional to flank wear width and the increasing rate was related to cutting velocity. So, the relation between amplitude level of AE signal and tool life was represented as follow:

$$CT^n = AE_{rms}$$

$$\text{where, } n = 0.35 \quad C = 9.5 * 10^{-2}$$

1. 序 論

最近 NC 및 CNC(Computer Numerical Control) 工作機械의 使用이 增加함에 따라 切削加工이 점차 自動化되어가고 있으며 여러대의 工作機械를 결합하여 自動生産 System을 開發하는 것이 要求되고 있다. 이러한 自動生産 System에서는 1대의 工作機械의 異常도 System 全體에 미치

는 影響은 매우 크므로 System을 원활히 動作시키기 위해서는 加工 Process가 正常으로 進行되고 있는지를 監視하여 異常이 있으면 警告를 하여 정상적인 狀態로 돌아오게 하는 機能이 必要하게 된다. 특히 製品에 直接 影響을 미치는 工具의 損傷狀態를 無人運轉狀態에서 監視하고 적당한 조치를 취하게 하는 것이 꼭 必要하게 되었다. 工具의 損傷을 監視하는 方法은 工具의 機何學의 形狀變化

* 漢陽大學校 教授

** 漢陽大學校 大學院

를 직접 測定하는 方法과 그것에 따라 發生하는 切削現象의 變化를 間接測定하는 方法으로 나누어진다. 間接測定の 工具損傷用 sensor는 다음과 같은 性能을 具備하고 있어야 한다.

- (1) 고장이 적고 安定한 性能을 維持할 것
- (2) 切削中에 Chip, 切削液, 振動 등의 影響을 받지 않을 것.
- (3) 作業에 방해가 되지 않을 것.
- (4) 經濟的일 것.

이러한 加工 Process의 監視技術에 관해서는 지금까지 많은 方法이 提案되어 왔지만 實用되고 있는 것은 그 原理가 극히 간단한 것에 限定되고 있다. 信賴性, 操作性, 經濟性 등의 點에서 解決되어야 할 問題點이 남아 있기 때문이다.

따라서 本 研究에서는 諸般 問題點이 비교적 적은 間接測定法인 AE法을 使用하여 切削中에 發生

하는 Acoustic Emission을 計測하여 自動 System에 影響을 주는 工具損傷 및 壽命에 대한 監視技術을 報告하는 데에 그 目的을 두었다.

2. 測定原理

2-1. AE 理論解析

AE 파의 발생과 전파에 대한 彈性波 方程式은 彈性-연속체 역학적 측면에서 얻어질 수 있다. System의 機械的 energy는 각 단위체적의 Kinetic energy와 elastic potential energy의 總和로 나타낼 수 있다.

변위 vector는 다음과 같다.

$$\vec{U}(x, y, z, t) \equiv [U(x, y, z, t), V(x, y, z, t), W(x, y, z, t)] \dots\dots\dots(1)$$

(x, y, z) 주위의 미소단위 체적과 그 밀도를 각각 $d_x d_y d_z$ 와 ρ 로 나타낸다면 system의 kinetic energy는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \rho \iiint \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} d_x d_y d_z \dots\dots\dots(2)$$

potential energy는

$$U = \int \left\{ \frac{1}{2} \lambda (\sum e_{ij})^2 + \mu (\sum e_{ij})^2 \right\} d_x d_y d_z, (i = x, y, z) \dots\dots\dots(3)$$

로 주어진다.

여기에서 λ 와 μ 는 상수이고 e_{ij} 는 스트레인 tensor의 ij 요소이다. 보존력장의 운동방정식은 다음 變分法으로부터 얻을 수 있다.

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} (T - U) dt = 0 \dots\dots\dots(4)$$

變位 vector를 x와 t의 함수로 가정하면 一次元 彈性波動方程式은 變分法에 의해 얻어지는 三次 미분방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \dots\dots\dots(5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

이 방정식에서 $\rho, (\lambda + 2\mu), \mu$ 는 양수이다. 그때 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h(x, t) = 0 \dots\dots(6)$$

2次 미분방정식인 식(6)의 exact solution은 초기조건이 다음과 같고 경계조건이 주어졌을 때 구해진다.

$$h(x, 0) = h_0 \quad \frac{\partial}{\partial t} h(x, 0) = 0 \dots (7) \quad \tau = \tau_0 e^{-t/T} \dots (8)$$

AE source mechanism과 연관이 있는 초기조건과 경계조건은 직접적으로 AE의 주파수 spectrum과 관계가 있다.

AE source Model로 하여 step변위가 Gaussian type function으로 주어졌을 때 AE강도를 정의했다. Gaussian stress pulse는

$$h = \begin{cases} 0 & t < -T \\ \frac{h_0}{2T^2} (t+T)^2 & -T < t < 0 \\ \frac{-h_0}{2T} (t-T)^2 + h_0 & 0 < t < T \\ 0 & T < t \end{cases} \dots (9)$$

이때 particle velocity는 다음과 같다.

$$\frac{dh}{dt} = \begin{cases} 0 & t < T \\ \frac{h_0 t}{T^2} + \frac{h_0}{T} & -T < t < 0 \\ \frac{-h_0 t}{T^2} + \frac{h_0}{T} & 0 < t < T \\ 0 & T < t \end{cases} \dots (10)$$

式(10)을 fourier transform하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dh}{dt} e^{2\pi i f t} dt &= \int_{-T}^0 \left(\frac{h_0 t}{T^2} + \frac{h_0}{T} \right) e^{2\pi i f t} dt = \int_0^T \left(-\frac{h_0 t}{T^2} + \frac{h_0}{T} \right) e^{2\pi i f t} dt \\ &= \frac{2h_0}{(2\pi f)^2 T^2} \left(1 - \frac{e^{2\pi i f T} + e^{-2\pi i f T}}{2} \right) \\ &= \frac{2h_0}{(2\pi f)^2 T^2} (1 - \cos 2\pi f T) \dots (11) \end{aligned}$$

$$I(f) = \rho c \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dh}{dt} e^{-2\pi i f t} dt \right)^2 = (h_0 E/C) e^{-(2\pi f T)^2} / 2 \dots\dots\dots (12)$$

여기서 h_0 와 T 는 step 변위와 그때의 시간이다.

2-2. 實効值電壓 (R, M, S 電壓)

實効值電壓은 信號電壓을 熱電對式電壓計에 의해 單位熱 energy 를 變換하여 그 直流 energy 로 表示하는 것이다.

時定數는 約 100~200 m sec 로 하며 突發形 AE 와 같은 빠른 현상에는 추적이 곤란하지만 가장 簡便히 AE 發生舉動을 알기에는 適合하다. 구해진 波高值 V_p 에 따라 E_{AE} & V_p^2 으로서 상대치를 評價하는 方法이 많이 이용되고 있다. 다음과 같이 rms 전압은 plastic strain rate $\dot{\epsilon}$ 함수로 나타낼 수 있다.

$$AE_{rms} = \dot{\epsilon}$$

$$\dot{\epsilon} = T^{-1}$$

3. 實驗方法

3-1. 供試超硬合金工具팁 P 20 과 被削材 供試品으로 使用한 tool 의 機械的 性質은 table 1 과 같다.

Table 1. Mechanical Properties of Tool

Hardness H _R A	Trasverse rupture strength σ_r (kg/mm ²)	Compressi- ve strength σ_c (kg/mm ²)
91.0	165.1	490

被削材는 $\phi 100\text{ mm} \times 550\text{ mm}$ 의 中硬鋼 SM 45 C 를 사용했으며 化學成分과 機械的 性質은 Table 2 와 같다.

Table 2. Chemical Composition & Mechanical Properties of Works

Chemical Composition (wt %)					
C	Mn	Si	P	S	V
0.44	0.86	0.39	0.023	0.018	0.08

Mechanical Properties of Works		
Hardness H _R C	Tensile strength σ_t (kg/mm ²)	Elongation δ (%)
37.4	65.4	22.8

3-2. AE와 工具磨滅과의 관계

工具磨滅의 影響을 고려하기 전에 工具가 磨滅하지 않았다고 가정할만한 未使用工具를 利用하여 各 切削條件의 變化에 대해 AE 信號振幅 level이 어떻게 影響받는가를 조사했다. 먼저 被削材를 선반에 물리고 工具 shank 後部側面에 500 KHz 의 共振周波數를 가지는 AE sensor 를 붙여 chip 의 影響을 받지 않도록 하였다. 檢出된 信號는 pre-amplifier 에서 20 dB, discriminator 에서 20 dB 增幅하여 總合 40 dB 增幅한다. 다음에 外部로부터의 振動, 騒音에 따른 잡음을 除去하기 위하여 100 KHz~1 MHz Band pass filter를 통과시켜 全波整流한 것을 AC Volt meter 로 測定했다. 이때 discrimination level 은 0.03 V였다. 切削速度, 切削깊이, 移送速度를 各 變化시키면서 AE 信號振幅 level의 AE_{rms} 의 r.m.s 値를 計測했다.

Fig. 1은 AE計測 system의 Block diagram 을 表示하고 있다.

다음에 磨滅幅 (V_B)와 AE 信號振幅 level (AE_{rms})와의 關係를 조사했다. Oscilloscope 에서 波形을 관찰하면서 AE_{rms} 가 變할때 切削을 中止하고 그때의 AE_{rms} 를 測定하였으며 工具顯微鏡을 사용하여 V_B 를 測定하였다. 또한 波形을 그려내기 위하여 Wave Memory(model : WM 852)

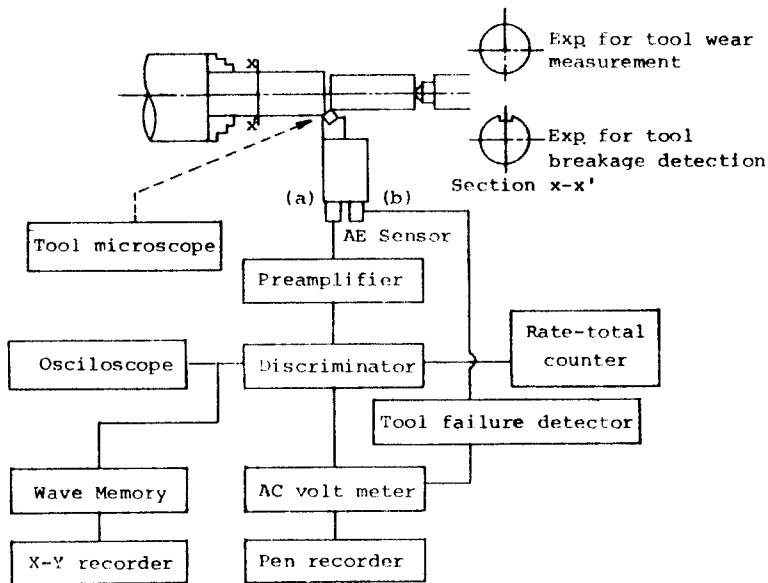


Fig. 1. Block diagram of AE measuring system

를 이용하여 증폭된 AE sensor의出力信號를 X-Y recorder에 그려냈다. Sampling time은 $1 \mu \text{ sec}$ 로 하였다.

3-3. AE와 工具破損과의 關係

工具의 破損은 一定時間 切削했다고 해도 반드시 일어나는 것이 아니므로 人爲的으로 破損을 빨리 일어나게 하기 위해서 被削材의 길이 방향으로 幅 3 mm 의 홈을 만들었다.

이 實驗에서는 共振周波數 1 MHz 의 Active sensor [model : AE 905 A]를 사용하여 Tool failure detector에서도 AE計測하였으며 Rate-total counter를 이용하여 0.1 秒當 threshold值를 넘는 AE事象數를 計數하였다.

Threshold值 電壓은 0.15 V 로 하였다.

3-4. AE와 工具壽命과의 關係

AE_{rms} 에 의한 工具壽命을 알아보기 위하여 다음과 같이 실험하였다. 實用切削速度 範圍 ($90 \sim$

120 m/min)內에서 切削깊이 0.4 mm , 移送速度를 0.23 mm/rev 로 하고, 60 分씩 旋削하였으며 每15分마다 AE信號振幅 level을 測定하였다.

4. 實驗結果 및 考察

4-1. AE와 磨滅幅과의 關係

Fig. 2는 切削速度를 各各 $42, 70, 105, 130, 174, 205 \text{ m/min}$ 로 變化시킨 것으로 切削速度와 AE信號振幅 level 사이에는 比例關係가 成立한다는 것을 나타내고 있다.

이 實驗은 工具가 磨滅되지 않은 狀態에서 한 것이기 때문에 AE發生信號原으로서의 切削中の 工作物의 前단변형영역, chip와 工具面의 접촉영역 등을 생각할 수 있다. 먼저 工作物의 前단변형영역에 대해서 생각해 보면 移送速度와 切削깊이를 變化시킨 경우 변형영역의 크기가 변한다. 그러나

AE_{rms}는 변화하고 있지 않기 때문에 변형영역의 크기는 AE_{rms}에는 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 한편切削速度를 변화시키면 변형영역의 크기는 변하지 않는데 변형速度가 변화한다.

따라서 AE_{rms}는切削中에工作物이 chip으로 되는 때에 받는 전단변형속도에 의해 크게 좌우된다고結論지을 수 있다. 금속의 인장시험의 경우 AE信號振幅은 변형速度의 영향을 받는 것이 확실한데, 이實驗結果에 의해切削加工에 있어서도 똑같다고 할 수 있다. 다음에 공구경사면상의 chip과의 접촉영역에 대해 생각해 보면 여기에서發生하는 AE信號는 마찰에 의한 것이라고 생각한다.

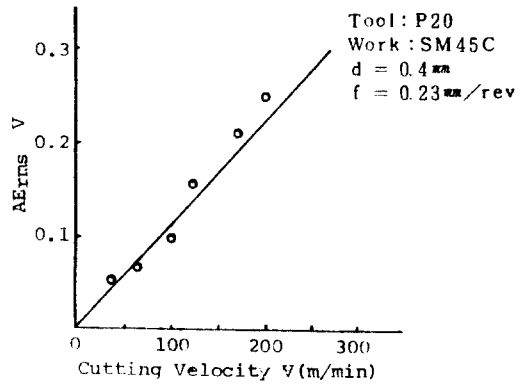


Fig. 2. Relation between cutting velocity & AE_{rms}

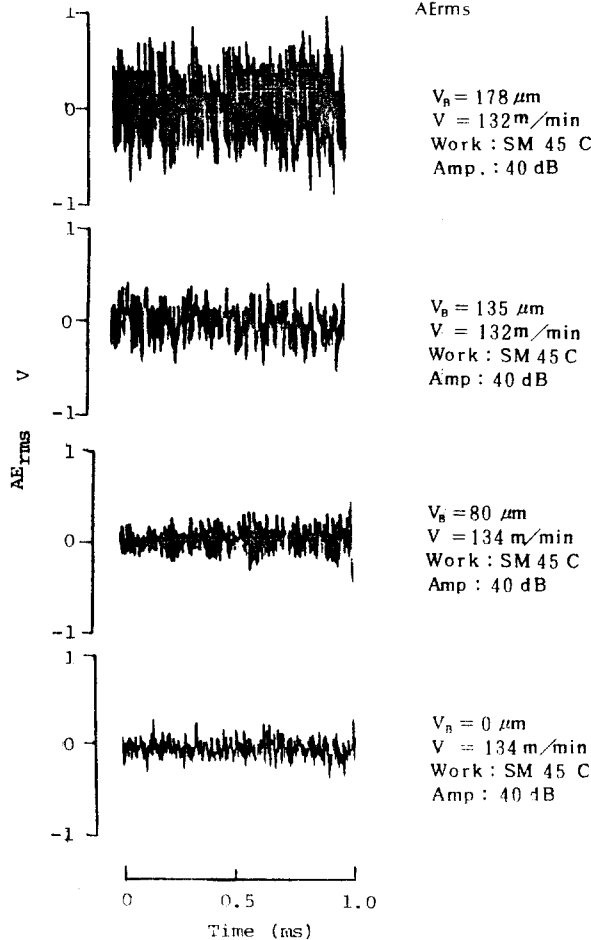


Fig. 3. Source wave form

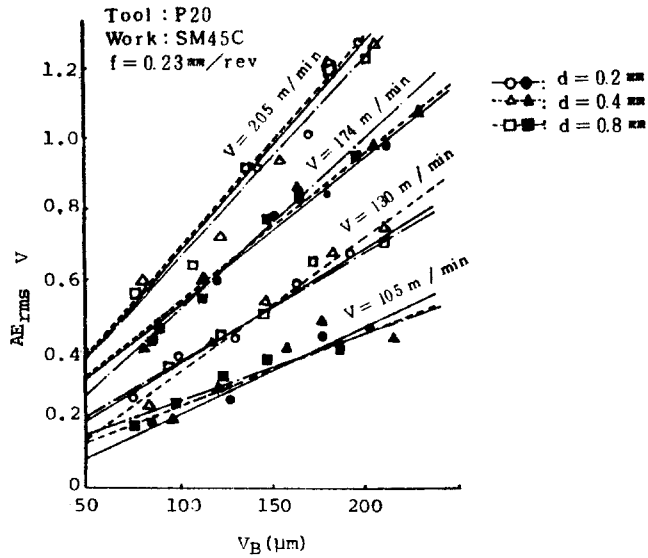


Fig. 4. Relation between flank wear width & AErms

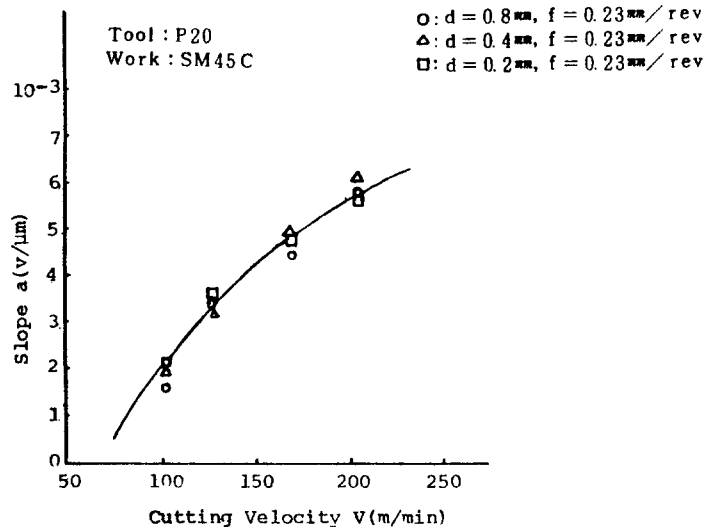


Fig. 5. Relation between slope & cutting velocity

그러나切削比에 의해 마찰속도는 수분의 1이 되기 때문에 이 영역에서 발생하는 AE信號는工作物의剪斷變形으로부터 발생하는 AE信號에 비해 level이 낮고 무시할 수 있다고 생각된다.

Fig. 3은切削中에 발생하는原波形을 나타내고

있다.磨滅幅이 커짐에 따라서原波形이 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 d를 0.2, 0.4, 0.8 mm로變化시킨 경우의 각각의 근사직선을 나타낸 것이다. d가變化해도切削速度가 똑같이 되면磨滅幅과 AE_{rms} 의

關係는 거의 同一直線 關係로 보였다.

磨滅幅과 AE 信號振幅 level 은 切削速度에만 影響을 받는데 Fig. 5에 나타난 비와 같이 그 增加率, 즉 직선의 기울기도 切削速度에 크게 依存한다. 따라서 $AE_{rms} = f(V_B, V)$ 라는 關係를 얻을 수 있다. 여기에서 切削速度 V를 決定하면 Fig. 2에서 $V_B \approx 0$ 일때의 AE_{rms} 가 구해지고 Fig. 4에서 근사직선의 절편 B가 구해진다. 또 Fig. 5에서 기울기 A가 얻어지고 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_B = \{ AE_{rms} - B \} / A \dots\dots\dots (13)$$

이 式을 기초로 AE 信號를 검출하고 V_B 를 추정할 수 있다. 따라서 AE 를 監視하는 것에 의해 工具磨滅을 Inprocess 에서 追跡할 수가 있다.

4-2. AE와 工具破損과의 關係

Fig. 6은 各 切削條件의 變化에 의한 破損發生後와 正常切削時의 level의 比 r의 變化를 나타내고 있다. (a)는 切削速度 V를 變化시킨 경우로 level의 比 r은 2~4 사이에 있고 切削速度에 거의 영향받지 않는다. level 比의 처짐은 工具破損의 形狀, 크기에 依存한다고 생각된다. (b)는 切削速度, 移送速度를 一定하게 하고 d를 變化시킨 경우인데 切削깊이가 크게되는 만큼 全體적으로 level은 크게되어 있고 工具破損의 程度가 크다고 생각된다. (c)는 feed를 變化시킨 경우인데 이 경우 level 比는 約 1.8 以上으로 되어 있다. 이상의 結果에서 AE 信號振幅 level의 正常切削時와 工具破損後의 比는 本實驗에 있어 切削速度, 切削깊이, 移送速度, 加工條件의 變化에 대해 적어도 約

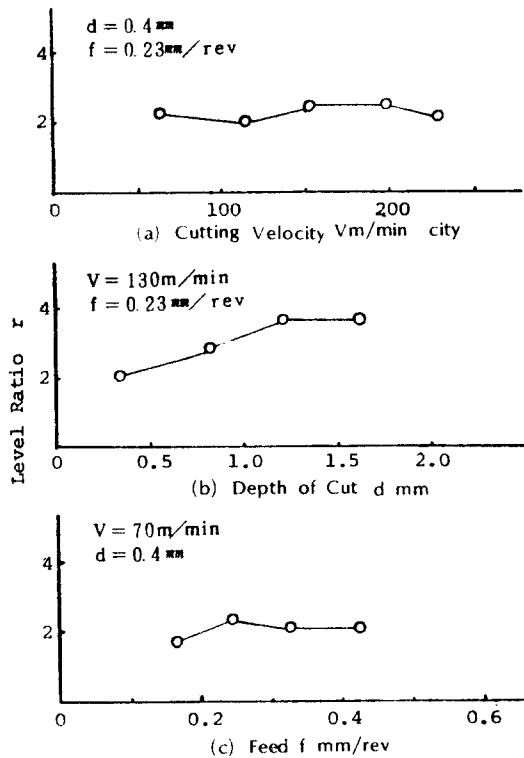


Fig. 6. Level ratio between Normal & Breakage

1.8 이상의 값을 갖는 것을 알았다.

4-3. AE와 工具壽命과의 關係

供試品을 15分마다 측정했을 때의 工具壽命時間 T와 AE_{rms} 의 關係를 log-log 線圖에 도시하면 Fig. 7과 같다

이때 工具壽命은 다음과 같다.

$$CT^n = AE_{rms} \dots\dots\dots (14)$$

n : 磨滅進行을 特定지우는 指數이며 log-log 線圖의 직선기울기이고 工具材料, 被削材에 따라 變하는 값
 C : 切削速度, 工具材料의 抗析力, 切削條件등에 따라 變하는 값이며, T = 1 min에 對한 AE_{rms}

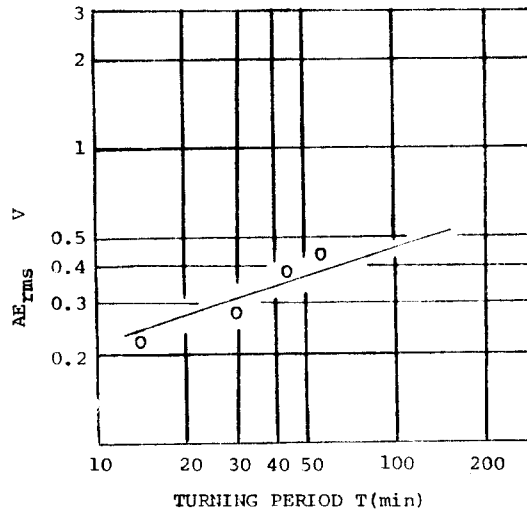


Fig. 7. Turning period vs. AE(V)

工具壽命을 再研削할 때까지 磨滅幅 0.3mm로 하여 式(13), 式(14), Fig. 7을 利用하여 工具壽命을 計算하면 다음 Table 3과 같다.

Table. 3. Tool life for flank wear width 0.3mm by eqn. (14)

C	n	T(min)	Remarks
9.5×10^{-2}	0.35	234	$AE_{rms} = 9.5 \times 10^{-2} \times T^{0.35}$

5. 結 論

自動生産 system에 대한 監視技術로서 AE法을 利用하여 特히 工具損傷에 對해서 供試品을 旋

削하였을 때 發生하는 AE 信號振幅 level에 중점을 두어 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) AE 信號振幅 level은 주로 切削速度에만 影響받으며 AE 信號振幅 level과 磨滅幅과는 서로 正比例關係가 있고 그 增加率은 切削速度와 比例關係가 있다.

(2) 工具에 破損이 생기면 AE 信號振幅 level은 step 形態로 上昇하고 破損의 크기가 큰 만큼 AE 信號振幅 level이 크게 된다. 또 正常切削時와 破損時의 AE 信號振幅 level의 比 r은 本實驗에서는 1.8 이상이었다.

(3) 本實驗에 있어서 工具壽命時間 T (min)와 AE 信號振幅 level AE_{rms} 와의 關係는 다음

式으로 表示된다.

$$CT^n = AE_{rms}$$

여기서 $n = 0.35$, $C = 9.5 \times 10^{-2}$ 이다.

參 考 文 獻

1. 尾上守夫: "アコースティック, エミッションの基礎と應用", 1977, コロナ社
2. 垣野義昭, リュックディジョン, 小林昌彦: "アコースティックエミッションによる工具破損の檢出" 精密機械 46. 3 (1979) 344.
3. 佐田登志夫: 工作機械の適應制御のためのインプロセス測定法 精密機械, 38, 10 (1972) 788.
4. K. Iwata & T. Moriwaki: An Application of Acoustic Emission Measurement to Inprocess Sensing of Tool wear Ann, CIRP. 26(1977).
5. W. Koenig: Automate Detection of Tool-breakage in Turning Operations, presented at the Meeting of STC "Cutting" of CIRP (1978).
6. 岩田一明: 切削工具損耗のインプロセス測定, 日本機械學會誌 第82卷 731號 (1979).
7. 岩田一明: 群制御工作機械 システムの自動保守に関する研究, 日本機械學會 (1974).
8. 竹山秀彦, 山岐和雄, 澤井信重 切削音にとる工具磨耗のインプロセス測定, 精密機械學會 (1976).
9. H. Takeyama, H. Sekiguchi & K. Takada: One Approach for Optimizing Control in Metal Cutting Ann, CIRP, 18(1970) 345
10. E. I. Weller, H. M. Schrier & B. Weichbrodt: What Sound can be Expected from & Worn Tool Trans. ASME, J. Ind. (1969) 525.
11. 島律美樹, 佐藤: バイトの磨耗と振動騒音に関する研究, 精密學會 (1972).
12. J. Tlusty & Z Masood "Chipping and Breakage of Carbide Tools" ASME Vol. 100 (1978).
13. A. Bhattacharya & A. Ghosh, Inyoung Ham, "Analysis of Tool Wear" ASME 16 ~ 20 (1969).
14. Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems STP 697, ASTM (1979).
15. Y. Mori, K. Aoki, Y. Sakakibara, T. Kishi and K. Iida: "Acoustic Emission Monitoring in Mock-up Test of FBR Piping Component ASM (American Society for Metals) 1982. 345.
16. Hatano H. J. of the Acoustical Soc. of America. 57. 639 (1975).
17. H. Chandrasekaran & R. Nagarajan " Influence of Flank wear on the stresses in a Cutting Tool " ASME, Aug. 1977.
18. 江田弘, 垣野義昭, 藤原 彰彦: " AEを用いた砥石-工作物の タッチセンサ " センサ技術 Vol. 13. No 11 (1983).
19. 垣野義昭他: " アコースティックエミッションにとる 切削工具の損傷のインプロセス檢出に関する研究, 精密機械 46(1980).
20. 岸輝雄: " 塑性變形にとり生ずるアコースティックエミッション 塑性と加工, 19, 208 (1978).