

선삭가공시 플랭크 마모에 따른 AE 신호와 절삭력의 거동에 관한 연구

조종래*, 원종식*, 정윤교**

A Study on the Behaviors of Acoustic Emission Signals and Cutting Forces by Flank Wear in Turing Process

Jong-Rae Cho*, Jong-Sik Won*, Youn-Gyo Jung**

ABSTRACT

Automatic monitoring of cutting process is one of the most important technologies for increasing the stability and the reliability of unmanned manufacturing system. In this study, basic methods which use the acoustic emission (AE) signals and cutting forces were proposed to monitor flank wear (width of flank wear) quantitatively. First, in order to detect flank wear, it was investigated that the influence of cutting conditions, that is, cutting velocity, feed and depth of cut, on AE signals (AE_{rms}) and cutting forces. Furthermore, the relation between flank wear and the measured signals (AE_{rms} , cutting force) was discussed.

Key Words : Acoustic emission signal(음향방출신호), Cutting force(절삭력), Width of flank wear(플랭크마모 폭), Cutting velocity(절삭속도), Feed(이송), Depth of cut(절삭깊이), AE_{rms} (AE실효치전압)

1. 서론

절삭가공을 수행함에 있어 공구마모의 진행이 수반되므로 공구의 교환은 피할 수 없다. 따라서, 생산시스템의 고 능률화를 피하기 위해서는 공구교환의 회수를 최소한으로 억제하는 것이 중요하며 효과적인 수단이라 할 수 있다.

공구교환을 억제하기 위해서는, 공구의 마모로 인하여 가공품에 요구되는 표면품질 및 치수를 더 이상 획득하기 불가능하다고 판단될 때까지 공구를 사용할 필요가 있다. 그러나 합리적인 공구교환 시점을 판단한다는 것은 그리 단순하지 않기 때문에

실제의 가공 현장에서는 불량품이 발생한 후에야 공구를 교환하거나 또는 신뢰성의 면에서 안전율을 계산하여 조기에 공구를 교환하여 버리는 경우가 많다.

이러한 문제점을 타파하기 위하여 공구동력계⁽¹⁻²⁾나 AE 센서⁽³⁻⁹⁾를 이용한 공구마모 및 공구결손 감시에 관한 연구가 많이 진행되고 있으나 실용화 단계에는 아직 접어들지 못 하고 있는 실정이다. 그 이유로서는 공구마모에 미치는 절삭조건에 대한 정량적 파악의 미비함과, 적절한 공구마모량의 감시방법이 확립되지 않은 데에서 기인한다고 본다.^(3, 5) 이에 따라 최근에는 단일 센서보다는 다중센서를

* 창원대학교 대학원 기계공학과

** 창원대학교 기계공학과

사용하여 각 센서들의 감도, 안정성, 특성 등을 고려하여 보완하는 공구상태 감시 방법에 관한 연구⁽¹⁰⁾가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 다중센서에 의한 공구상태 감시를 위한 기초적인 단계로서 AE 센서를 이용하여 선삭가공에 있어서 절삭조건 즉, 절삭속도, 이송 및 절삭깊이가 플랭크 마모폭에 미치는 영향을 검토하여, 플랭크 마모폭과 AErms값과의 정량적인 관계를 규명하려고 노력하였다. 또한, 플랭크 마모폭과 절삭력과의 관계를 검토하여 AErms의 거동과 비교함으로써, 양자가 플랭크 마모폭에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는 주축모터의 소비동력이 7.5kW인 CNC 선반을 사용하였다. AErms는 PAC.社의 광대역형 AE 센서와 AE신호 샘플링을 위한 고속 신호처리용 DSP보드인 AEDSP-32/16 및 컴퓨터를 이용하여 측정하였다. AE 센서는 적절한 치구를 제작하여 공구홀더의 생크에 부착시켰다. 절삭력(주분력:F_c, 배분력:F_b, 이송분력:F_f)은 Kistler社의 9257B의 압전소자형 공구동력계, A/D Converter 및 컴퓨터를 이용하여 측정하였다. 공구동력계는 치구를 제작하여 선반에 부착시켰다. 공구인선에서의 플랭크마모폭은 삼원과학산업사의 실제 현미경으로 관찰하였다. 피삭재는 직경 100mm, 측정길이 50mm인 원형봉 형태의 STD11를 사용하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를, Table 1은 실험장치의 사양을 보여주고 있다.

본 실험에서는 Table 2에 나타낸 실험조건으로 CNC 선반의 주축을 주속도 일정제어로 하여 공작물의 외주를 가공하였다. 또한, 절삭량(M)이 약 5, 15, 30, 45, 60, 75, 85, 100 (×103 mm³)일 때 AErms와 절삭력의 3분력을 획득하였고, 동시에 플랭크 마모폭을 실제현미경으로 관찰하였다. AE 신호는 고주파 신호이므로 Sampling rate를 2MHz로 충분히 크게 하였고, 절삭력은 Sampling rate를 200Hz로 하여 측정하였다. AE신호의 획득과정은, 센서로부터 감지된 AE신호를 Pre-Amplifier에서 증폭하고 Band Passfilter (100 ~1200KHz) 에서 필터링한 다음 AEDSP-32/16에서 Digital신호로 변환되어 컴퓨터에 입력되게 하였다. 입력된 Digital신호는 AE전용 Software인 Mistras 프로그램을 사용하여 처리하였

다. Mistras 프로그램은 PAC.社의 AEDSP-32/16을 제어하고 data의 출력 및 그래프로 나타내주는 프로그램이다.

Table 1 Experimental equipments

Instruments	Specifications
CNC lathe	Hi-ECO10 (Hwacheon Co.)
Workpiece	STD11(D:100mm, L:50mm)
Tool holder	PTGNL2525-M16(KorloyInc.)
Insert tip	NC30P NMG160404 (Korloy Inc.)
AE sensor	WD (PAC.)
Pre-amplifier	1220A (PAC.)
AE main	AEDSP-32/16 (PAC.)
Tool dynamometer	Piezo type 9257B(Kistler Co.)
Charge amplifier	5019A (Kistler Co.)
A/D converter	PCL-812PG (Advantech Co.)
Object microscope	KSZ-1A (Samwon Scientific Ind,Co.)

Table 2 Experimental conditions

Items	Conditions
Cutting velocity (m/min)	120, 140, 160, 180
Feed (mm/rev)	0.10, 0.15, 0.20, 0.25
Depth of cut (mm)	0.2, 0.4, 0.6
Coolant	Dry
Sampling rate	AE : 2MHz Cutting force : 200Hz

3. AErms의 측정방법

절삭중에서 발생된 AE 신호 파형으로부터 AErms값은 다음의 식에 의해 구하여진다.⁽¹¹⁾

$$AE_{rms} = \left[(1/\Delta T) \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right]^{1/2}$$

여기에서, V(t) : 신호함수 t : 시간

ΔT : 신호발생주기

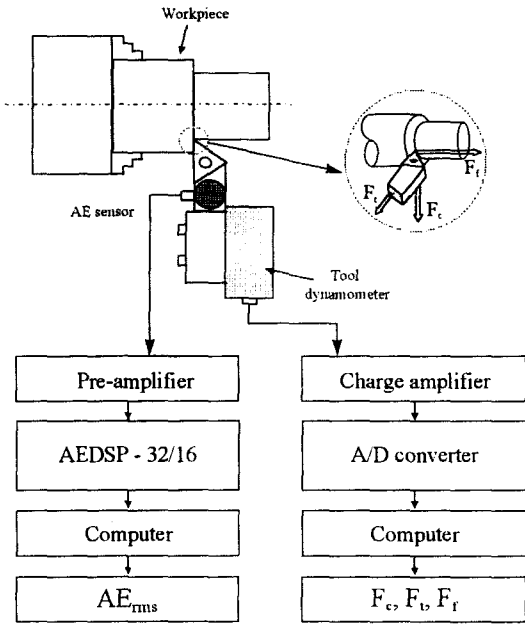


Fig. 1 Experimental setup

본 연구에서는 각 절삭조건마다 신호획득 시간을 약 5초로하고, 이 시간 내에서 0.256ms 시간의 AE 신호파형(Hit)을 30개 추출하여 각 Hit별로 AE_{rms}를 구한 다음, 이들의 평균값을 AE_{rms}로 정의하였다.

Fig. 2는 절삭조건을 절삭깊이 $d : 0.2\text{mm}$, 이송 $f : 0.1\text{mm/rev}$, 절삭속도 $V : 120\text{ m/min}$ 인 경절삭조건과 $d : 0.4\text{mm}$, $f : 0.2\text{ mm/rev}$, $V : 160\text{ m/min}$ 인 중절삭조건으로 하여 절삭을 수행하였을 때의 AE 신호파형(Hit)의 일부를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 것과 같이 경절삭의 경우(A)가 중절삭인 경우(B)에 비해 AE 신호 레벨이 작게 나타남을 알 수 있다.

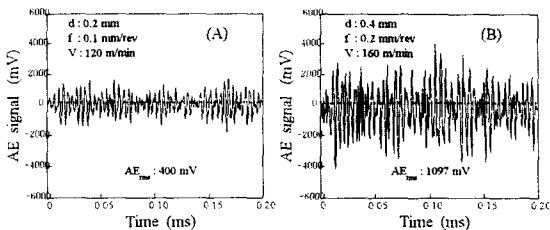


Fig. 2 AE signal during turning process

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭조건이 AE_{rms} 및 절삭저항에 미치는 영향

본 절에서는 절삭조건 즉, 절삭속도, 절삭깊이 및 이송이 AE_{rms} 및 절삭력에 미치는 영향을 검토한다. Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5는 각각 절삭깊이, 이송 및 절삭속도를 변화시킬 때의 AE_{rms}의 거동을 나타내는 그림이다.

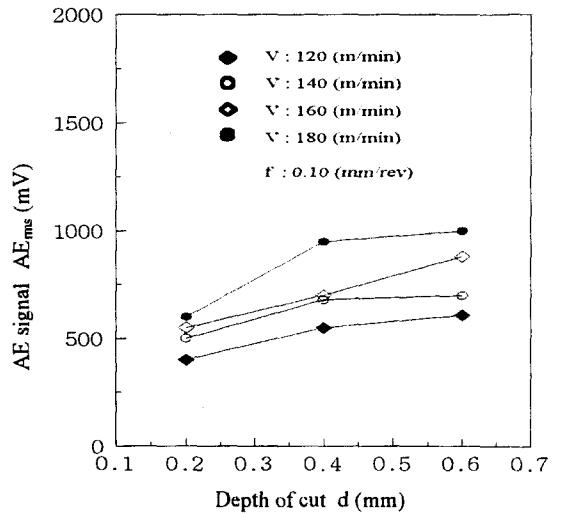


Fig. 3 AE signal versus depth of cut

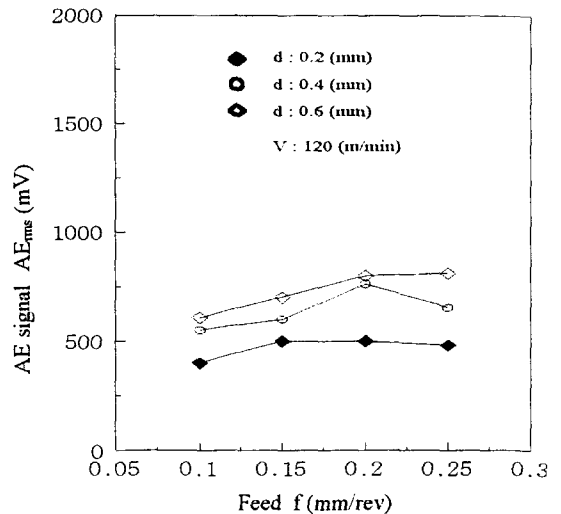


Fig. 4 AE signal versus feed

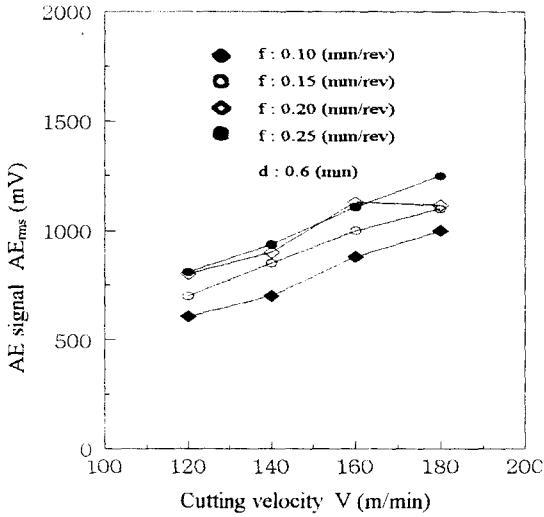


Fig. 5 AE signal versus cutting velocity

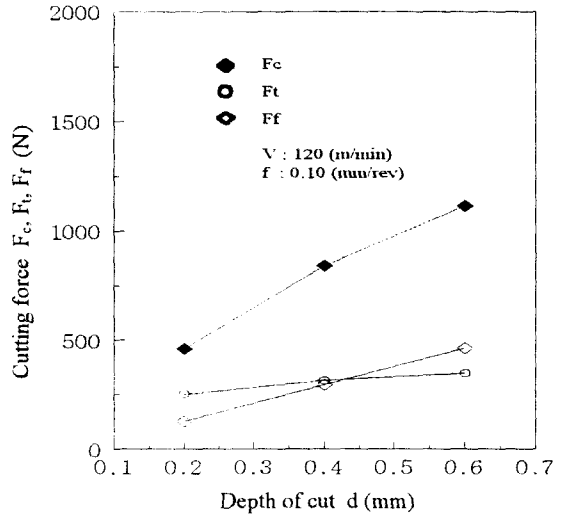


Fig. 7 Cutting force versus depth of cut

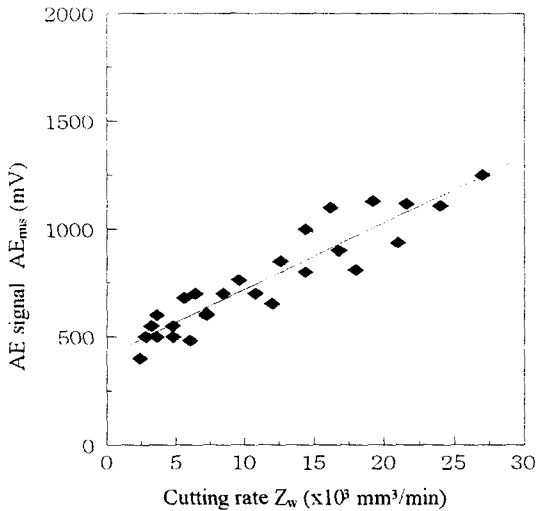


Fig. 6 AE signal versus cutting rate

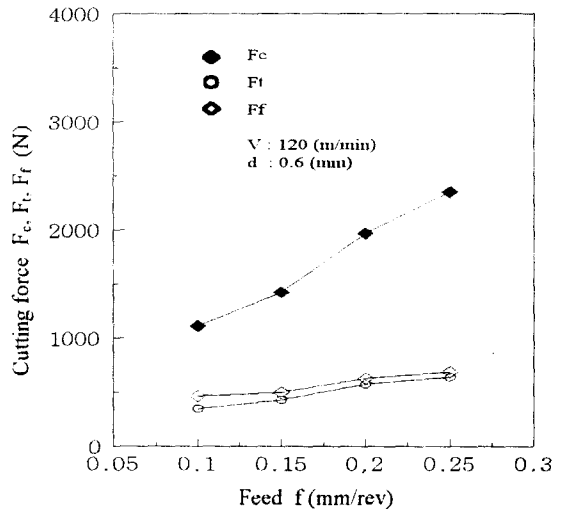


Fig. 8 Cutting force versus feed

AE_{rms} 는 절삭속도 및 절삭깊이가 증가함에 따라 비교적 큰 폭으로 증가하나 이송의 증가에 따라서는 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 이들 3가지 조건의 영향을 종합적으로 검토한 그림이 Fig. 6이다. Fig. 6은 절삭률 Z_w (절삭깊이×이송×절삭속도)의 변화에 대한 AE_{rms} 의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보듯 바 와 같이 AE_{rms} 의 값은 절삭률의 증가에 거의 비례함을 알 수 있다.

절삭조건이 절삭력에 미치는 영향을 나타낸 그

림이 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9이다.(그림에서 F_c , F_t , F_r 는 각각 주분력, 배분력, 이송분력을 나타냄) 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭력의 경우에는 절삭깊이와 이송의 증가에 대하여서는 절삭력의 선형적인 증가를 가져오지만, 본 실험조건 범위에서는 절삭속도의 증가에 대해서는 절삭력의 변화가 거의 없다. 대체적으로 절삭속도가 증가하면 절삭력이 작아지는 것이 상론임에도 본 실험에서 절삭력의 변화가 거의 없는 현상은, 공구의 경사각이나

이송의 조건에 따라서 절삭력이 감소하기 시작하는 절삭속도 범위가 달라 질 수 있음⁽¹²⁾과 피삭재의 종류 및 절입깊이 등이 절삭속도의 증가에 따른 절삭력의 변화 범위가 크지 않은 조건이기 때문이라고 사료된다. 즉, 절삭력은 공구와 공작물의 간섭면적에 크게 의존한다고 사료되며, 공구와 공작물의 간섭면적을 나타내는 인자인 절삭면적 A(절삭깊이×이송)의 변화에 대한 절삭력의 변화를 도시한 것이 Fig. 10이다. 이 그림에서 절삭면적의 증가에 따라

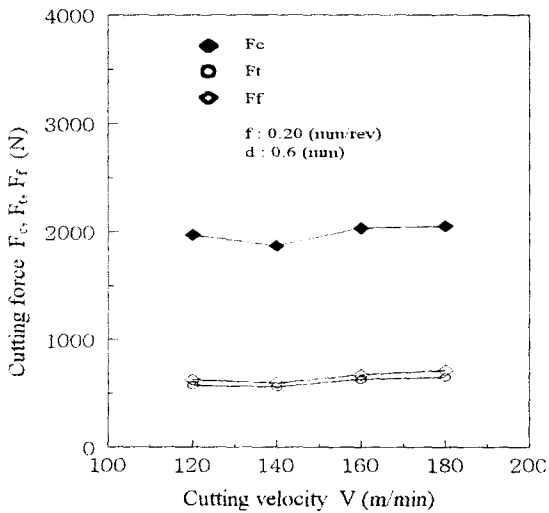


Fig. 9 Cutting force versus cutting velocity

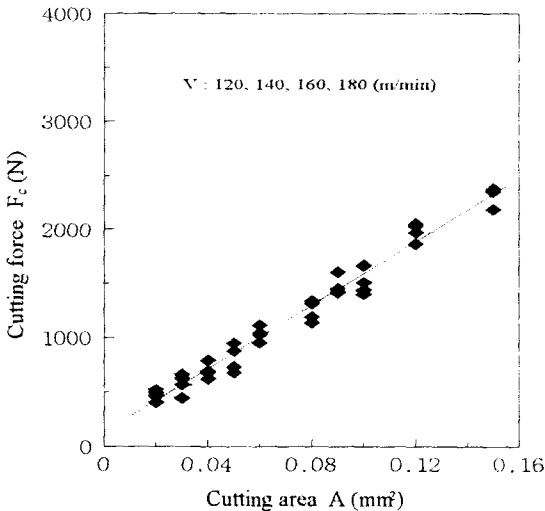


Fig. 10 Cutting force versus cutting area

절삭력은 절삭속도의 변화에 관계없이 산포가 적게 증가하는 양상을 보임을 확인 할 수 있으며, 이러한 결과는 주분력, 배분력 및 이송분력 어느 것이나 같은 경향을 보였다.

Fig. 6과 Fig. 10을 비교할 때 Fig. 6의 AE_{ms} 값이 Fig. 10의 절삭력에 비하여 상대적으로 산포가 큰 것을 알 수 있는데 이는 칩생성이나 칩 배출 과정 등에서 생성되는 불균일성을 갖는 신호들도 전달하는 AE 센서의 민감한 특성에서 기인한다고 생각된다.

4.2 절삭조건이 플랭크 마모폭에 미치는 영향

플랭크 마모폭은 절삭속도, 절삭깊이, 이송 및 절삭량 M에 의존할 것으로 생각되며, 본 절에서는 이러한 조건들이 플랭크 마모폭에 미치는 영향에 대하여 고찰한다. Fig. 11의 (A)는 플랭크 마모의 형태를 나타 내는 모식도이며, Fig. 11의 (B)는 플랭크 마모부를 실제현미경으로 관찰한 사진이다. 그림에서 보는바 와 같이, 플랭크 마모폭은 날끝에서 플랭크 마모 평균 경계선까지의 길이로 정의하였다.

Fig. 12, Fig. 13은 이송 및 절삭속도의 변화에 따른 플랭크 마모폭을 도시한 그림이다. 이송 및 절삭속도가 증가할 수록 플랭크 마모폭도 증가하는 양상을 보이며 예상된 바와 같이 절삭량이 많아질 수록 플랭크 마모폭도 커지며, 그 증가 추세는 절

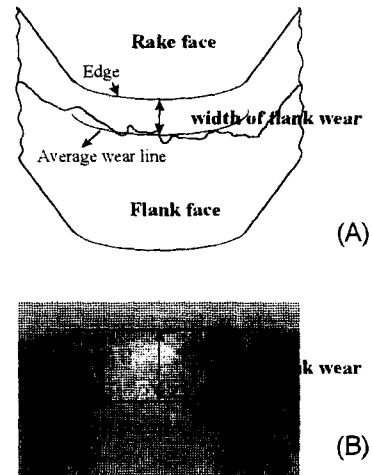


Fig. 11 Schematic and photograph of tool wear

삭량의 증가에 따라 더욱 더 현저해 짐을 알 수 있다. 그러나 절삭깊이의 변화는 플랭크 마모폭에 주목할 만한 영향을 주지 못한다(Fig. 14).

야기 시키고 이에 따라 플랭크 마모폭의 증가가 촉진된다고 사료된다.

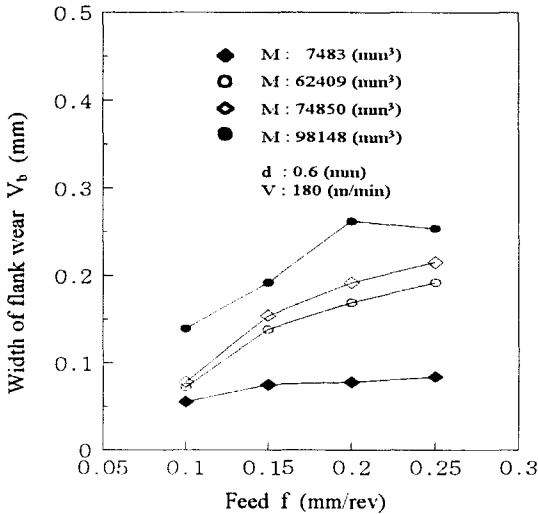


Fig. 12 Width of flank wear versus feed

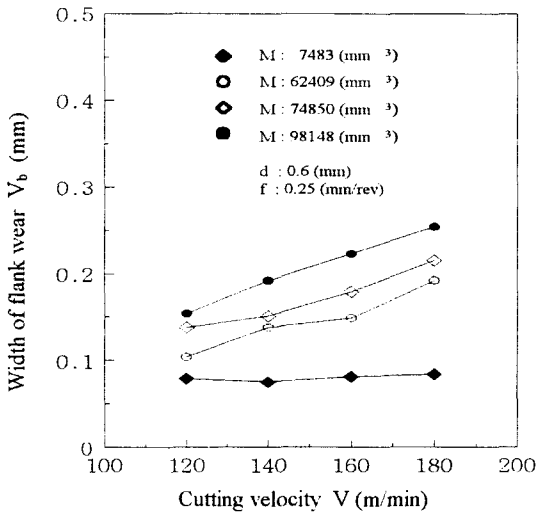


Fig. 13 Width of flank wear versus cutting velocity

이는 절삭깊이의 증가가 플랭크 마모 길이의 증가는 초래하지만 플랭크 마모폭의 증가에는 영향을 주지 못하기 때문이다.

반면, 이송의 증가와 절삭속도의 증가는 공구수명에 중요한 역할을 하는 공구인선의 온도 상승을

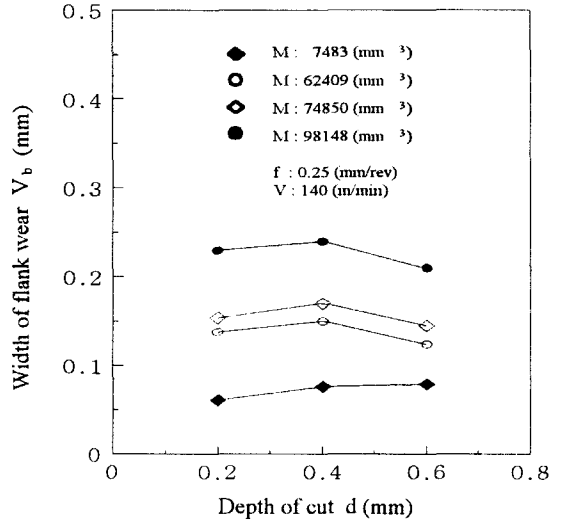


Fig. 14 Width of flank wear versus depth of cut

4.3 플랭크 마모폭과 절삭력 및 AE_{rms} 와의 관계

Fig. 15는 $d : 0.6 \text{ mm}$, $f : 0.10 \text{ mm/rev}$, $V : 120 \text{ m/min}$ 의 조건에서 플랭크 마모폭을 증가시켰을 때의 절삭저항의 3분력 F_c , F_t 및 F_r 의 변화를 보여주는 그림이다. 3분력 모두가 플랭크 마모폭의 증가에 따라 증가하는 양상을 보이며, 그 중 주분력 F_c 의 증가추세가 현저하다. 따라서, 주분력 F_c 를 사용하여 플랭크 마모폭과 절삭력의 관계를 규명하였다.

4.1 절에서 언급한 바와 같이, 절삭력의 크기는 절삭면적 A 에 의존하며, AE_{rms} 의 크기는 산포를 가지고 있으나 절삭률에 의존함을 알았다. 따라서, 측정되어진 절삭력 혹은 AE_{rms} 의 값으로부터 플랭크 마모폭을 추정하기 위해서는, 절삭력의 경우는 절삭면적을, AE_{rms} 의 경우에는 절삭률을 이용하여 기타 여러가지 절삭조건이 신호(절삭력, AE_{rms})에 미치는 영향을 배제하는 것이 바람직하다.

Fig. 16은 절삭면적을 0.02 mm^2 , 0.04 mm^2 , 0.08 mm^2 로 일정하게 유지하였을 때, 절삭량의 변화에 따른 절삭력의 변화와 플랭크 마모폭의 변화를 비교한 그림이다. 이 그림에서 절삭량의 증가에 따라 플랭크 마모폭과 절삭력이 둘다 증가하는 양상을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 17은 절삭면적을

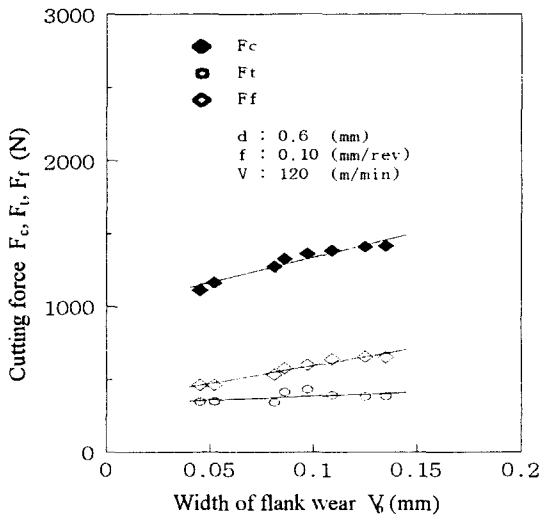


Fig. 15 Cutting force versus width of flank wear

변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서도 절삭량의 증가에 따라 AE_{rms} 및 플랭크 마모폭이 증가함을 알 수 있다. Fig. 19에서는 절삭률이 $7200(\text{mm}^3/\text{min})$ 일 경우 플랭크 마모폭과 AE_{rms} 와의 관계를 도시하고 있다. 선삭가공에서 절삭률을 알고 그때의 AE_{rms} 의 값을 측정할 수 있으면 플랭크 마모폭을 추정할 수 있고, 한계 플랭크 마모폭을 설정하여 두면 적절한

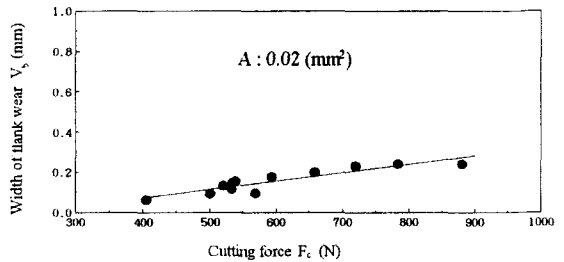


Fig. 17 Width of flank wear versus cutting force

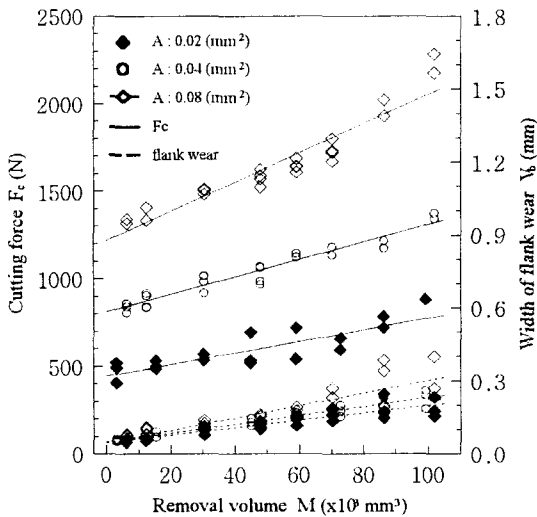


Fig. 16 Variations of cutting force and width of flank wear versus removal volume

0.02 mm^2 로 일정하게 하였을 때 양자간의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 주어진 절삭면적으로 절삭 중 공구 마모가 발생하였다면 그때의 절삭력을 측정함으로써 절삭속도에 무관하게 플랭크 마모폭을 추정할 수 있음을 뜻한다. Fig 18은 절삭률을 $2400(\text{mm}^3/\text{min})$, $4800(\text{mm}^3/\text{min})$, $7200(\text{mm}^3/\text{min})$, $14400(\text{mm}^3/\text{min})$ 로 일정하게 하였을 때 절삭량의 변화에 대한 AE_{rms} 및 플랭크 마모폭의

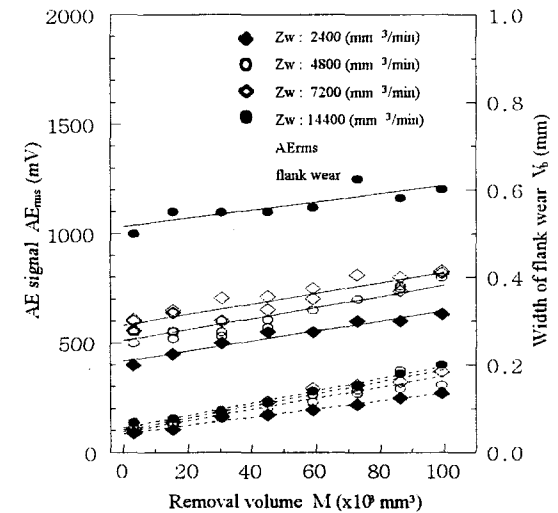


Fig. 18 Variations of AE signal and width of flank wear versus removal volume

시기에 공구를 교환할 수 있으리라 판단된다.

AE_{rms} 혹은 절삭력 어느 쪽을 측정해도 플랭크 마모폭을 추정할 수 있지만 양자는 일장일단이 있다. AE 센서를 사용하는 경우에는 신호전달 경로에 영향을 받기 쉬워 측정값의 산포가 크지만(Fig. 9), 사용이 간편하고 경제성이 있는 것이 큰 장점이다. 반면 공구동력계를 사용하는 경우는 강성이 크고 측정장치의 안정성에 있어 비교적 정확한 Data를

얻을 수 있지만(Fig. 17), 현재로서는 경제성이 결여되어 있는 것이 실용화의 장애로 되어 있다.

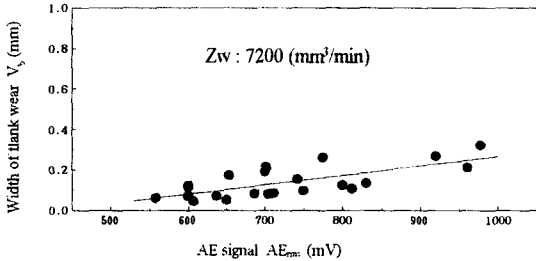


Fig. 19 Width of flank wear versus AE signal

5. 결 론

본 연구에서는 공구마모의 감시를 위한 시스템을 개발할 목적으로, AE 센서와 Force 센서를 이용하여, 선삭가공시 발생하는 양자의 신호 즉, AE_{rms} 및 절삭력과 절삭조건 및 공구마모량과의 관계를 비교, 검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) AE_{rms} 는 절삭속도 및 절삭깊이가 증가함에 따라 비교적 큰 폭으로 증가하나 이송에 대해서는 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 본 실험 조건 및 절삭속도 범위 내에서 절삭속도의 변화가 절삭저항에 끼치는 영향은 크지 않다.

(2) 절삭깊이의 변화는 플랭크 마모 길이에만 영향을 줄뿐 플랭크 마모폭에는 직접적으로 영향을 주지 않는다.

(3) 플랭크 마모폭과 AE_{rms} 및 절삭저항과의 사이에는 선형적인 관계가 있으나, AE_{rms} 의 경우 신호 전달경로에 영향을 받기 쉬워 그 정량적인 값에 산포가 크다.

(4) 선삭가공시, 공구마모를 감시할 수 있는 기초적인 토대를 마련할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. A. D. Filippi and R. Ippolito, "Adaptive Control in Turning: Cutting Forces and Tool Wear Relationship for p10, p20, p30 Carbides," Annals of the CIRP, Vol. 17, pp. 377-385, 1969.
2. K. Tarawan, R. Swando and W. Yamauchi, "Relationship between Tool Forces and Flank

- Wear," SME Technique Paper, MR74, pp. 704-713, 1974.
3. K. Iwata and T. Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-process Sensing of Tool Wear," Annals of the CIRP, Vol. 26, No. 1, pp. 21-26, 1977.
4. T. Moriwaki, "Detection for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement," Annals of the CIRP, Vol. 29, No. 1, pp. 35-39, 1980.
5. 稻崎一郎, "AEによる切削プロセスの監視," 日本機械學會論文集(C編), 51卷, 466號, pp. 1163-1169, 1985.
6. 相田收平, 稻崎一郎, 福岡眞一郎, "AEを利用した工具チップソグ検出システムの開発," 日本機械學會論文集(C編), 52卷, 481號, pp. 2563-2569, 1985.
7. E. N. Diei and D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Face Milling Process-the Effects of Process Variables," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, MAY, pp. 92-99, 1987.
8. T. Blum, I. Suzuki and I. Inasaki, "Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor," Bull. Japan oc. of Prec. Eng., Vol. 22, No. 4, pp. 301-308, 1988.
9. T. Blum, and I. Inasaki, "A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, AUGUST, pp. 203-211, 1990.
10. S. Rangwala, D. Dornfeld, "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring," Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, AUGUST, pp. 219-228, 1990
11. Hamstad. M. A, "On Energy Measurement of Continuous Acoustic Emission," Lawrence Liver more Laboratory, Report No. UCRL-76286, 1974.
12. 서남섭, 금속절삭이론, 동명사, p.77, 1994.
13. M. C. Shaw, E. Usui and P. A. Smith, "Free Machining Steel Cutting Forces, Surface Finish and Chip Formation," Trans ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 83, 1961.