

# 정면밀링시 절삭신호측정에 의한 공구마모 검출에 관한 연구

김성일\*, 김승기\*

## A Study on Detection of Tool Wear by Cutting Signal Measurements in Multi-insert Face Milling

Seong-Il Kim\*, Seung-Ki Kim\*

### Abstract

The experimental investigation is mainly focused to detect tool wear by cutting signal measurements in multi-insert face milling SS 41 and STS 304.

This research have investigated the effects on the insert number, which has relationship with mean-cutting force, AE(acoustic emission) signal, tool life and surface roughness in machining SS 41 and STS 304. The cutting force and AE signal are monitored to analyse the cutting process. The surface roughnesses of the specimens machined by TiN coated tool with the various insert numbers measured at various cutting speeds, feed rates and depths of cut. The width of flank wear is also observed.

Keywords : multi-insert face milling(다인정면밀링), acoustic emission(음향방출), tool life(공구수명), coated tool(코팅공구), surface roughness(표면거칠기), flank wear(여유면마모)

### 1. 서론

많은 기계가공에 의한 제조공정에서 기계가공의 정밀도와 생산성을 향상시키기 위해 자기진단 기능과 조정기능을 갖춘 공작기계를 포함한 가공공정의 자동화와 무인화를 실현하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그 요소기술로서 기계가공시 발생하는 공구마모 및 파손 등의 이상상태 검출의 필요성이 최근 크게 강조되고 있다.

종래의 공구 이상상태를 검출하는 기법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나뉘어지는데, 직접적인 방법은 CCD(광학)센서, 전기저항센서, 공기압센서 등을 이용하여 마모면을 직접 관찰하거나 마모량을 직접 측정하는 것이고, 간접적인 방법은 공구마모 진전에 따른 절삭과정의 특성변화를 추적하여 간접적으로 마모량을 추정하는 것으로 공학적인 측정값으로는 절삭력, 진동, 절삭면의 거칠기, 또는 AE 신호 등이 있다. 이 중에서 직접적인 측정

\* 대불대학교 기계산업시스템공학부

방법은 마모량을 직접 측정할 수 있어 신뢰성이 높지만, 장치의 복잡성과 비용의 문제로 실용화되기까지는 어려움이 적지 않고, 간접적인 방법은 측정이 비교적 쉬우나 신뢰성과 정확성이 부족하다.

그러나 간접적인 측정방법으로 가공물의 직경의 변화를 감시함으로써 간접적인 공구마모를 측정하는 방법<sup>(1)</sup>과 시계열 분석법(time series analysis)을 통하여 절삭력을 해석하는 방법<sup>(2)</sup> 등이 사용되고 있으며, 비교적 근래에 제안된 것으로 AE 기법을 이용한 연구가 있다. 이에 대한 연구보고를 예로들면 선삭에서 공구파손 검출에 AE센서의 사용을 제안<sup>(3)</sup>한 것과 초경공구의 파손 검출에 AE 신호가 민감하다는 연구<sup>(4)</sup>, 선삭에서 공구파손을 감지할 수 있는 AE 검출방법<sup>(5)</sup>을 보고하였지만, 정면밀링 가공은 단속절삭이고, 여러개의 인서트로 절삭하며, 절삭과정중 칩의 두께가 변하게 되므로 선삭에서와 같은 신호처리 방법을 택하기는 여러가지 문제가 따른다<sup>(6)</sup>.

지금까지의 정면밀링의 연구동향은 해석의 난이성, 인서트 초기위치오차(run-out)의 영향, 인서트 수의 영향 등으로 인하여 대부분 단인(single-insert)절삭을 실시하여 다인(multi-insert)절삭의 결과를 예측하였다. 그러나 실제의 밀링작업은 단인으로 절삭하는 경우는 거의 없으므로 다인을 이용한 절삭의 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 실제 밀링가공에서 사용되는 다인절삭을 주대상으로 공구재질과 피삭재 등 각 절삭조건에서 절삭력 및 AE 신호를 병행 이용하여 공구마모에 따른 신호를 평가하고, 측정되어진 시편의 표면거칠기, 검출된 절삭력 및 AE 신호를 연계하여 제시된 검출인자가 공구마모 검출에 있어 신뢰성 있는 평가방법임을 밝히고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험을 위한 장비의 세부적인 배치상태와 획득되는 신호들의 처리과정을 보이고 있다. 가공재료는 자동차부품인 Torsion Beam에 용접한 후 가공하는 일반 구조용압연강 SS 41강, 난삭재인 STS 304이며, 절삭조건은 Table 1과 같다.

절삭력의 측정은 공구동력계(dynamometer, KISTLER 9257A)를 사용하였으며, 공구동력계에서 나온 절삭력 신호를 증폭하기 위하여 증폭기(amplifier, KISTLER 5001)를 사용하였다. 절삭시 발생되는 신호는 오실로스코프를 통해 모니터링하였고, 동시에 A/D converter를 거쳐 이송속도와 절삭시간에 맞추어 최대를 받을 수 있는

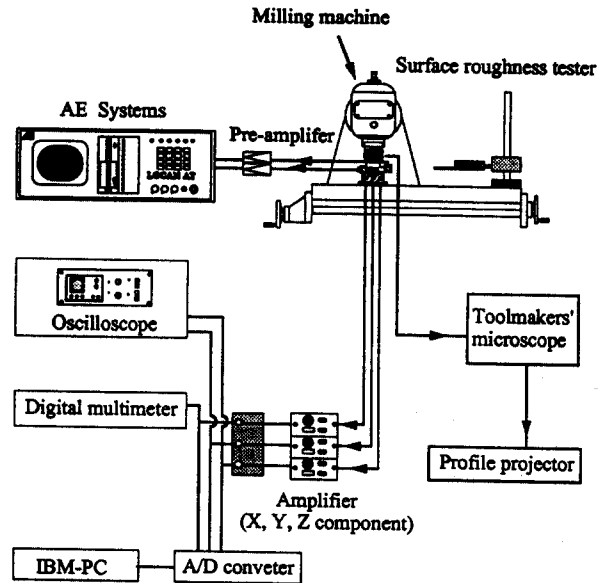


Fig. 1 Arrangement of cutting test

Table 1. Experimental conditions

Machine	Milling machine
Cutter	M115SP04R (φ 100mm, KOREA TUNGSTEN)
Milling insert	1. Uncoated tungsten carbide (A30, KORLOY, SPAN 1203 EDR) 2. TiN coated carbide (VIN, VALENITE, SPEN 1203 08)
Work material	SS41 : 80(L)×80(W)×40(H)mm STS304 : 80(L)×10(W)×40(H)mm
Environment	Dry
Cutting Conditions	Cutting speed : 83~311 m/min Feed rate:0.022~0.658 mm/insert Depth of cut : 0.5, 1.0, 1.5 mm Number of insert : 1, 2, 4 Center-milling

데이터인 초당 1,000~2,000개를 받아 IBM-PC에 저장하였다.

AE 신호를 획득하고 분석하기 위한 장비로서는 AE systems(LOCAN-AT), 공진형 광대역 센서, 100~300 kHz의 band pass filter인 프리앰프를 사용하였다. AE

센서는 high vacuum grease를 도포하여 시편에 1st channel, 공구동력계에 2nd channel을 부착하였다.

불필요한 잡음을 제거하기 위하여 절삭폭, 인서트 수에 따른 AE 신호와 오실로스코프 신호를 확인하였고, 여러번의 실험을 거쳐 잡음의 영역을 분석하였다. 따라서 잡음제거를 위하여 AE 센서로부터 나온 신호를 프리앰프에서 100-300 kHz로 필터링한 후 40 dB로 증폭하여 AE systems의 입력단자에 입력하고, 다시 AE systems에서 다시 20 dB 증폭하여 100-1200 kHz의 필터를 통한 후 시스템의 신호처리를 위해 A/D변환기를 통해 디지털 신호화하여 소프트웨어에 입력하였다. 그리고 이득과 threshold는 예비실험을 거쳐 실험조건에 맞추도록 설정하였다.

표면거칠기의 측정은 표면조도계(surface roughness tester, Surftest 201)로 중심선 평균거칠기(Ra), 최대 높이거칠기(Rmax)를 절삭실험이 종료한 후 시편의 정해진 3곳에서 하였다. 절삭실험은 표면거칠기 해석과 절삭력 신호, AE 신호의 효율적인 획득 및 해석을 위해 1차로 단인절삭(single-insert cutting)을 실시하고, 인서트의 수를 2, 4개로 증가시켜 실험을 수행하였다.

밀링공구의 마모는 인서트의 축방향 및 반경방향 초기 위치오차 때문에 여러가지의 형태로 나타난다. 즉, 모든 인서트가 동일하게 마모되기도 하고, 한개 또는 두 개나 세 개의 인서트만 특히 많이 마모되기도 한다. 이러한 현상을 가능한 한 방지하기 위하여 Fig. 2와 같이 커터를 지그위에 놓고 다이얼 게이지(1/1000 mm)로 초기위치 오차를 확인한 후 장착하였다.

공구마모 측정은 실험을 종료한 후 인서트가 장착된 상태로 밀링커터를 분리하여 1차로 공구현미경에서 관찰하

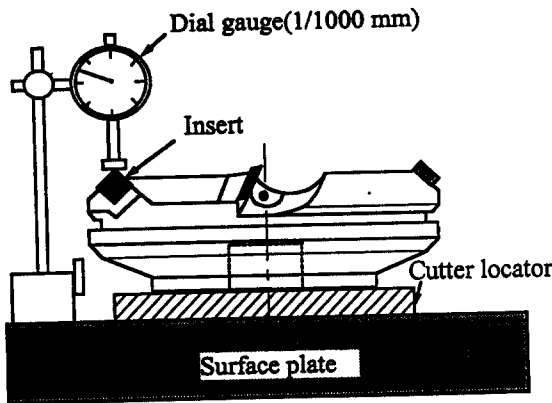


Fig. 2 Clamping method of insert

고 더욱 자세한 마모의 측정을 위해 윤곽투영기(profile projector)를 사용하였다. 예비실험 결과 마모는 거의 여유(flank)면에서 발생됨으로 여유면 마모 및 파손여부를 관찰하였다. 공구수명 판단기준은 평균여유면마모폭(VB) 0.3mm나 표면거칠기(Rmax) 30 $\mu$ m로 하였다. 인서트가 다수인 경우는 공구마모가 각 인서트마다 다르기 때문에 각 인서트의 마모를 측정한 후 여유면마모평균값(VBav)을 취하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 절삭속도 225 m/min, feed rate 0.131 mm/insert, 절삭깊이 0.5 mm, 인서트 2개의 조건에서, 초경공구를 사용한 STS 304의 가공시 공구마모에 따른 절삭력을 보여준다. 공구마모가 증가하면서 평균절삭력(Fy-mean, Fz-mean)이 증가하고 있음을 보이고 있고, 공구마모 검출에 평균절삭력이 사용될 수 있음을 보이는 것이다.

Fig. 4는 절삭속도 163 m/min, feed rate 0.167 mm/insert, 절삭깊이 1.0 mm의 조건에서 코팅공구 1개를 삽입하여 SS 41 가공시 공구마모에 따른 절삭력과 표면거칠기(Ra, Rmax)와의 관계를 보여주는 것이다. 마모가 진행되면서 표면거칠기 Ra는 미소하게 증가하는 반면, Rmax는 급격히 증가하고 있다.

또한 공구마모가 진행됨에 따라 표면거칠기 Rmax가 Ra보다 민감함을 보여주고 있는데, 이는 표면거칠기에 가장 큰 영향을 주는 부절인인 여유면이 마모되어 공구와 공작물간의 불필요한 진동과 공구기하학적 형상의 변화로 가공면이 뜯기는 현상이 발생되기 때문이다.

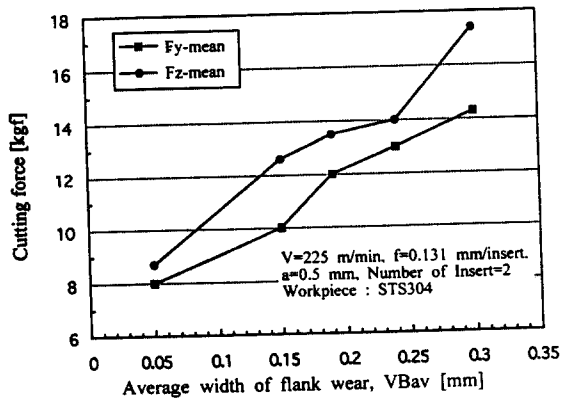


Fig. 3 Cutting force vs. average width of flank wear

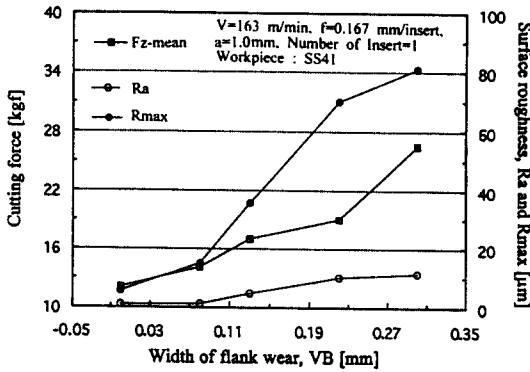


Fig. 4 Cutting force and surface roughness vs. width of flank wear

Fig. 5은 코팅공구를 사용한 SS 41의 단인밀링시 절삭속도 83 m/min, 절삭깊이 1.0 mm, feed rate 0.706 mm/insert 조건에서 공구마모의 진전에 따른 평균절삭력과 AE RMS와의 관계를 보여주는 것으로, 공구가 마모됨에 따라 평균절삭력이 증가하고, 또한 AE RMS 값이 증가함<sup>(7)</sup>을 보이고 있다. 이는 공구가 마모됨에 따라 마모된 공구와 가공물이 접촉하는 면에서 마찰운동이 증대되어 접촉면적이 커지기 때문이다.

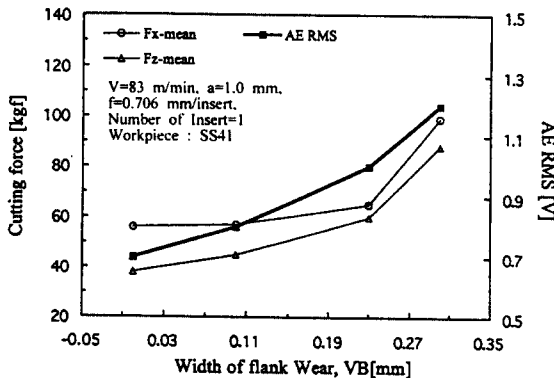


Fig. 5 Cutting force and AE RMS vs. width of flank wear

Fig. 6~7은 코팅공구를 사용한 SS 41의 단인밀링시 절삭속도 311 m/min, feed rate 0.189 mm/insert, 절삭깊이 1.0 mm 조건으로 가공하였을 때, 공구마모 진전(VB=0.08mm, VB=0.15mm, VB=0.3mm)에 따른

AE 신호를 살펴본 것이다.

Fig. 6은 AE 신호중 count rate와 average frequency와의 관계를 공구마모의 진전에 따라 살펴본 것으로, 공구마모 초기에 거의 일정하던 count rate가 공구수명한계에 달할 때 0~180 kHz 주파수 대역에서 급격히 증가함을 볼 수 있다. Fig. 7은 counts와 average

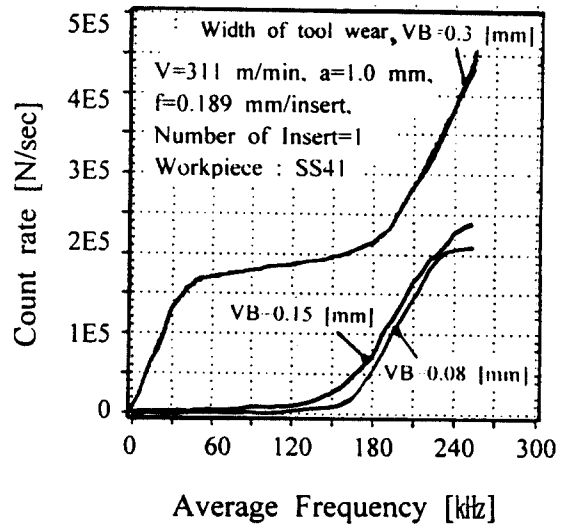


Fig. 6 Count rate vs. average frequency

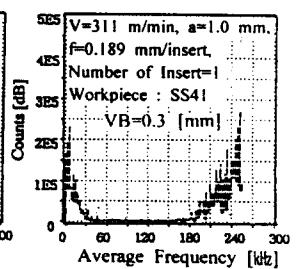
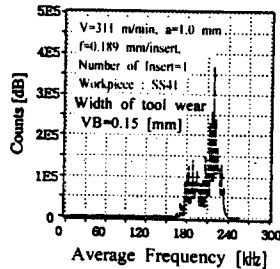
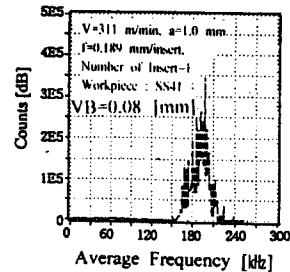


Fig. 7 Counts vs. average frequency

frequency와의 관계를 공구마모의 진전에 따라 살펴본 것으로, 공구마모가 진전됨에 따라 카운트의 피크값 주파수 대역이 190~205kHz, 215~230kHz, 240~250 kHz로 증가됨을 볼 수 있다. 이는 코팅층이 탈락하기 전까지는 마모량이 거의 변화가 없다가, 코팅층의 마모와 탈락이 증가하면서 공구수명한계에 근접할 때는 절삭면적이 커지고, 또한 절삭면적이 불규칙하기 때문이다.

Fig. 8~10은 초경공구 4개를 삽입한 STS 304의 정면밀링시 절삭속도 225 m/min, 절삭깊이 0.5 mm, feed rate 0.044 mm/insert 조건에서 평균공구마모 (VBav)의 진전에 따른 AE 신호의 거동을보인 것이다.

Fig. 8은 절삭시간과 AE RMS와의 관계를 공구마모의 진전에 따라 보인 것으로, 공구마모가 진전됨에도 불구하고 AE RMS는 거의 변화가 없음을 보이고 있다. 일반적으로 단인을 사용하는 선삭의 경우에 공구마모에 따라 RMS 값이 증가하지만, 그렇지 않은 경우도 있다<sup>(7)</sup>. 따라서 단인 이 아닌 다인밀링시 AE 신호로 공구마모를 검출하고자 할 때는 RMS를 사용하는 것보다 다른 인자를 사용함이 바람직함을 보여준다.

Fig. 9는 energy와 average frequency와의 관계를 공구마모의 진전에 따라 보인 것으로, 공구마모가 진전됨에 따라 energy의 피크값 주파수 대역이 180~210 kHz에서 220~230 kHz로 증가됨을 보인다. 또한 단인공구와는 다르게 power spectrum이 큰데 이는 초기 가공시 진동, run-out, 인서트 장착오차, 재료의 불균일 등 다양한 요소에 의하여 각 인서트마다의 마모폭이 달라 절삭면적의 변화에 따른 AE 신호의 불균일 때문이라 판단된다.

Fig. 10은 다인밀링시 count rate vs. average frequency를 공구마모의 진전에 따라 보인 것으로, 공구마모가 진전됨에 따라 15~150 kHz 주파수 대역에서 count rate가 높아짐을 보여준다. 따라서 AE 신호를 이용한 공구마모 검출은 단인밀링시 RMS나 주파수분석을 이용할 수 있지만, 다인밀링의 경우는 RMS보다는 주파수

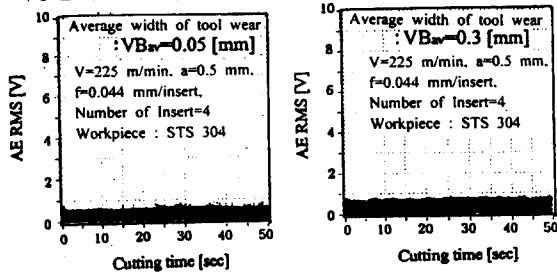


Fig. 8 RMS vs. cutting time

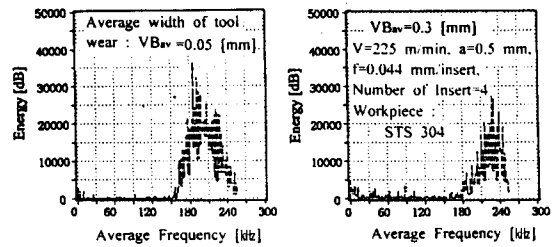


Fig. 9 Energy vs. average frequency

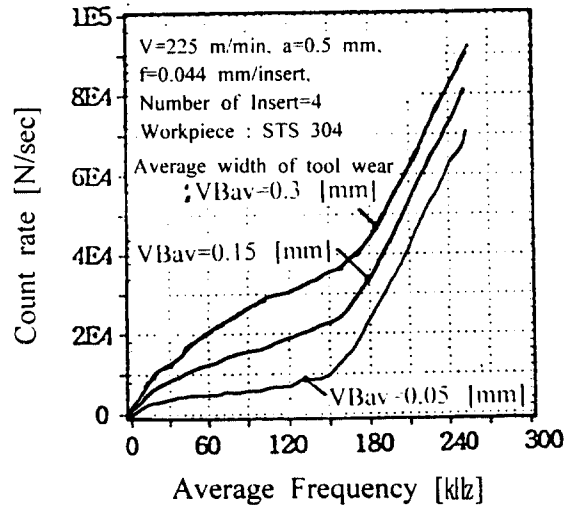


Fig. 10 Count rate vs. average frequency

분석이 유용함을 보여준다.

#### 4. 결론

SS41, STS 304의 다인 정면밀링 가공시 절삭신호(절삭력, AE신호 및 표면거칠기)를 측정하여 제시된 검출인자가 공구마모 검출에 있어 신뢰성 있는 평가방법임을 밝히고자 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 단인 코팅공구를 사용한 밀링가공시 공구마모 초기나 중기의 절삭신호는 공구마모가 진전됨에 따라 미소하게 증가하지만, 코팅층이 탈락하기 시작하여 공구수명 한계에 달할 때는 평균절삭력, 표면거칠기(Rmax), AE 신호가 뚜렷하게 증가된 변화를 보임으로 평균절삭력 및 AE RMS와 주파수 분석의 counts rate를 이용하여 공구마모를 검출할 수 있다.
- 2) 다인밀링시 AE 신호를 이용한 공구마모 검출은 시간에 따른 AE RMS를 이용하는 것보다 주파수분석의

AE energy, counts rate를 이용하는 것이 유용하다.

### 참 고 문 헌

1. J. I. Ei Gomayal, K. D. Bregger, "On-Line Tool Wear Sensing For Turning Operations", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, FEBRUARY, pp. 44~47, 1986.
2. Y. Altintas, "In-Process Detection of Tool Breakages Using Time Series Monitoring of Cutting Forces", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 28, No. 2, pp. 157~172, 1988.
3. Iwata, Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 21~26, 1977.
4. M. S. Lan, D. A. Dornfeld, "In-Process Tool Fracture Detection", ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, April, pp. 111~118, 1984.
5. T. Moriwaki, M. Tobito, "A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 212, Aug., pp. 212~218, 1990.
6. E. N. Diei and D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process - the Effects of Process Variable", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, MAY, pp. 92~99, 1987.
7. S. Somasundaram and Shivakumar Raman, "Acoustic Emission Studies While Machining with Coated Tools", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXI, pp. 83~94, 1993.