

선삭공정에서 음압을 이용한 공구마멸 파손의 상태감시

이성일*, 정성종**

Condition Monitoring of Tool Wear and Breakage using Sound Pressure in Turning Processes

S. I. Lee*, S. C. Chung**

Abstract

In order to make unmanned machining systems with satisfactory performances, it is necessary to incorporate appropriate condition monitoring systems in the machining workstations to provide the required intelligence of the expert. This paper deals with condition monitoring for tool wear and breakage during turning operation. Developing economic sensing and identification methods for turning processes, sound pressure measurement and digital signal processing technique are proposed. The validity of the proposed system is confirmed through the large number of cutting tests.

Keywords : Chipping(미소파손), Condition Monitoring(상태감시), Sound Pressure(음압), Tool Life(공구수명), Wear Index(마멸지수)

1. 서론

선삭가공 중 발생하는 여러 이상상태 중 공구의 마멸과 파손 감시는 공장자동화 및 무인화에 있어서 매우 필요한 부분임에도 불구하고 온라인감시 (On-line monitoring) 가 어려운 부분이다. 이는 공구상태가 절삭조건에 따라 다양하면서도 불규칙적인 반응을 보일 뿐만 아니라 칩 및 절삭유 등 열악한 환경 속에서 작업되기 때문에 센서의 장착과 적용이 어렵기 때문이다. 더욱이 최근의 절삭 공정

이 고속화, 고정도화 됨에 따라 공구수명에 이르기 전에 예측지 못한 파손과 손상이 일어나 경제성과 생산성에 영향을 미치므로 이에 대한 효과적인 감시 대책이 요구된다.⁽¹⁾

마멸 및 공구파손에 관한 연구는 주로 적용되는 센서에 많은 비중을 두고 진행되어 왔다. Ulsoy, Koren 등은 절삭력을 이용한 마멸의 모델링을 통해 마멸을 예측하였으며^{(2),(3)}, Dornfeld, Moriwaki 등은 AE 센서를 이용한 공구파손 연구 결과가 있었다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 그리고 Altintas는 이

* 한양대, 기계설계학과 대학원

** 한양대, 기계공학부

송계 전류를 측정하여 절삭력을 예측하고 이로써 공구파손신호를 검출하고자 했다.^[6] 이 외에도 비전센서에 의한 마멸길이의 측정 등이 있다.^[7]

이러한 이상 절삭상태 감시를 위한 연구들은 한정된 절삭상태와 환경에 대한 우수한 연구결과에도 불구하고 각기 적용된 센서의 한계로 인하여 다양한 생산현장에 적용될 수 있는 경제성 있는 기술개발이 늦추어 지고 있는 상황이다. 이러한 상태감시 센서의 한계조건으로는 설치조건, 비용, 주파수 대역폭, S/N 비 등이 있으며 각각의 이상상태와 상황에 부합해야 한다. 따라서 최근에는 복수개의 센서들을 이용한 복합적인 계측과 판단 알고리즘을 고안하고 있는 추세이다.^[8]

본 논문에서는 상태감시 센서로서 마이크로폰의 우수성을 확인하고, 무인가공에서 전문가를 대신할 수 있는 신뢰성 있는 공구마멸, 미소파손 (Chipping) 그리고 파손 감시장치를 연구하였으며, 경제적이며 효율적인 감시시스템에 대하여 연구하였다.

채터제어에 효율적이었던^[9] 음압을 이용한 공구 마멸 및 파손 감시 실험장치를 범용선반에 설치하고, 기존 센서 신호들과의 비교를 통해 공구마멸 및 파손 신호의 거동 특성을 규명하였다. 또한 음압 신호만을 채취한 후 신호처리 기법을 이용한 처리를 통해 마멸기준을 세울 수 있는 차원·무차원 특징인자를 추출하여 공구의 수명한계 제시와 아울러 마멸과 파손예측의 적용가능성을 제시하였다.

2. 음압신호와 마멸지수

2.1 마멸기구

절삭공구의 마멸 메카니즘은 주로 기계적인 연마작용 (Abrasion)에 의한 것과 고온, 고압에 의한 응착 (Adhesion) 및 확산 (Diffusion)작용에 의한 것으로 알려져 있다.^[10] 이 외에도 미소파손^[11]에 의한 마멸 원인을 들 수 있다. 이 세가지 마멸 메카니즘은 복합적으로 나타나지만 절삭조건에 따라 열적 특성이 강해지기도 하며 기계적 특성이 두드러지기도 한다.

일반적으로 마멸의 기준은 Fig.1에 보인 것처럼 VB(Flank wear length)와 KT(Crater wear length)로 주어지며 VB가 0.3mm에 이르렀을 때를 공구수명으로 보고 있다. VB는 여유면이 공작물과 연마되어 나타나며 KT는 경사면이 칩에 의해 고온, 고압으로 응착, 확산되어 일어난다. 마멸이 진행될수록 VB와 KT 뿐만 아니

라 여유각 α 와 경사각 β 도 증가하며 이러한 공구기하 (Tool geometry)의 변화로 인하여 진동특성에 영향을 미치게 된다.

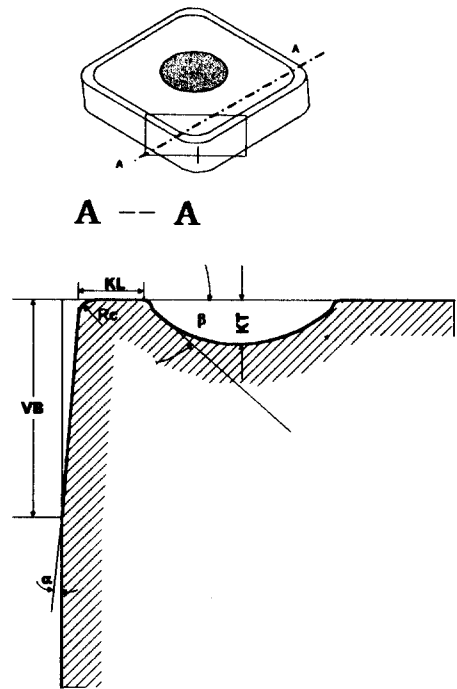


Fig.1 Flank wear and crater wear of a tool

2.2 마멸지수

마멸이 발생할 때의 이상진동은 공작물, 공구, 공작기계 구조부를 진동시키고 이때 발생하는 소음은 공기중으로 전달되어 음압의 변화로 나타난다. 절삭공 중 발생하는 음압신호에는 여러 음원 (Sound source)들의 특성정보가 포함된다. 그 중에는 스피들과 공작물의 회전으로 인한 진동, 기어박스, 공작기계의 여러 요소들, 공구와 공작물 사이의 마찰, 칩의 생성과 절단으로 인한 소음 등이 있다. 공구여유면 마멸이 발생될 때는 주로 공구와 공작물의 진동이 주요원인이 되므로, 이로 인해 야기되는 소음의 특징을 추출하기 위해서는 다음과 같은 5가지의 마멸지수 (Wear index)들의 정의가 필요하다.

Fig.2는 선삭작업에서 절삭이 이루어지는 횟수에 따라서 발생하는 공구여유면 마멸량을 보인 것이다. 음압의 마멸량에 따른 변화를 관찰하고 그에 따른 마멸지수를 규명

하기 위해 소음 에너지양의 척도로서 다음과 같은 음압의 실효치를 정의하였다.

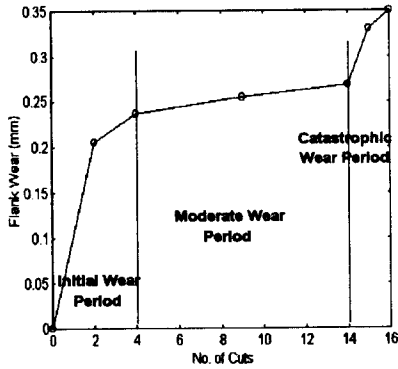


Fig.2 Flank wear and wear mode

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

여기서, x_i : i 번째 음압신호, N : 데이터 수

절삭소음은 그 평균치가 증가함에 따라 표준편차가 증가하는 경향이 있으므로 평균치에 따른 표준편차의 변동값으로 다음과 같은 무차원 변동계수 (Coefficient of Variation, CV)를 정의하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

여기서, σ : 표준편차, \bar{x} : 평균치

절삭소음 중에는 미소파손이나 공구파손 등으로 인한 충격파가 실려 있으므로 신호의 평균치를 중심으로 한 왜곡성을 나타내는 무차원 비대칭분포 (Skewness)와 첨예성을 나타내는 도수분포의 첨도 (Kurtosis)를 정의하였다.

$$\beta_1 = \frac{\mu^3}{\sigma^3} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu^4}{\sigma^4} \quad (5)$$

$$\mu^k = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^k \quad (6)$$

여기서, β_1 : Skewness, β_2 : Kurtosis

μ^k : k-th moment

절삭소음은 백색잡음이 입력으로 작용할 때 발생하는 출력으로 가정할 수 있으며, 이는 자동회귀모형 (Autoregressive model)으로 모델링 된다. 마멸의 진전에 따라서 특정한 AR계수에 변화가 야기되며⁽¹²⁾, 이를 이용하면 소음신호의 모델링을 통한 마멸을 정의할 수 있다.

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} \dots + \phi_n x_{t-n} + e_t \quad (7)$$

여기서, x_t : 계의 응답

$\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n$: 자동회귀 계수

e_t : 백색잡음

3. 실험장치 및 방법

Fig.3은 공구마멸 및 파손실험을 위한 절삭소음 측정 장치를 보인 것이다. 1회 (1pass)절삭에 50초씩 16회 가공하였으며 환봉의 선삭시 직경 감소에 따른 절삭속도의 저하를 줄이기 위해 실험 선반의 최대 허용 공작물 직경인 150mm 되는 공작물을 선택하였다.

마멸량은 2회 절삭마다 공구현미경으로 공구여유면 마멸길이(VB)를 측정하였다. 절삭력과 절삭진동, 절삭소음을 각각 테이프레코더에 저장한 후 디지털 오실로스코프로 신호를 감시하면서 테이프레코더의 A/D변환기를 통하여 PC에 저장하였다. 저장된 데이터를 2.2 절에 정의된 5가지의 마멸지수들을 이용하여 PC상에서 신호처리 및 분석하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 사양을 보인 것이다. 공구는 중절삭용 칩브레이커 (Chip breaker)를 사용하였고 마멸이 일어나기 쉽도록 코팅처리가 안된 초경공구를 사용하였다. Table 2에는 마멸실험의 절삭조건을 보인 것인데 마멸현상을 현저하게 나타내기 위해 중절삭조건을 적용하였다.

공구파손 규명은 Fig.4와 같이 EDM으로 흠을 낸 공구인서트를 장착하여 실험하였다. Table 3은 파손실험의 절삭조건이다.

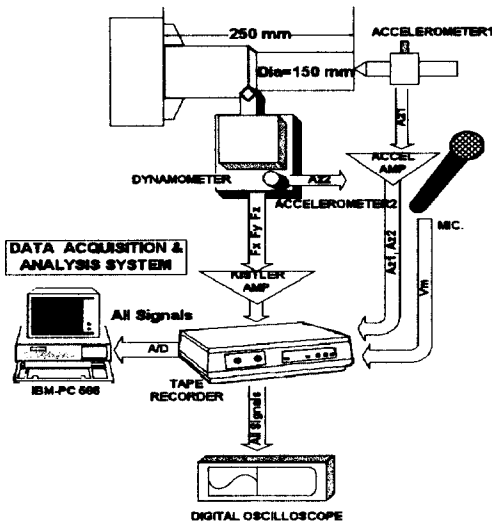


Fig.3 Schematic diagram of experimental setup

Table 1. Specification of experimental setup

Turning Machine	Hwacheon.co. 380B Lathe
Workpiece	SM45C (dial150×length250)
Insert	Korea Tungsten SNMG120408, P20 TNMG160404, KT250
Tool holder	Korea Tungsten PSDNN2020K12 entering angle 45° point angle 90° backrake angle -7°
Tool Dynamometer	KISTLER 9257B
Accelerometer	PCB 303A03, 342A
Microphone	DM835 Condenser Microphone
Personal Computer	IBM-PC 586
Charge Amplifier	KISTLER 5019A(3-channel)
Tape Recorder	TEAC RD-135T
Microscope	Toolmakers Microscope TM-301, MITUTOYO. Zoom Stereo Microscope SZ4045TR, OLYMPUS.

Table 2. Cutting conditions for tool wear

Cutting speed	292.2 (m/min)
Feed	0.3 (mm/rev)
Depth of cut	1.2 (mm)

Table 3. Cutting conditions for tool fracture

Cutting speed	201 (m/min)
Feed	0.15 (mm/rev)
Depth of cut	1.5(mm)

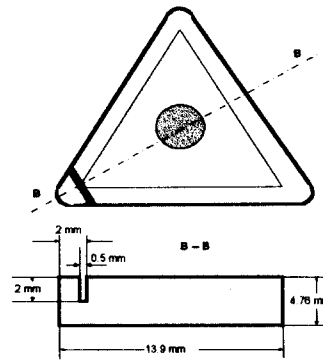


Fig.4 Slotted insert for fracture test

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 마멸실험 결과

Fig. 5는 Fig.2에서 정의된 마멸상태에 따라 마멸과정을 세 상태로 분류하여 각 과정의 대표적인 음압신호 변화를 보인 것이다. 스펀들 1회전(0.1sec) 동안 200개의 데이터를 샘플하여 1회 절삭, 50초 동안의 RMS치를 보인 것이다. 초기마멸상태에서는 Fig.2에서 볼 수 있듯이 일정한 비율로 마멸이 빠르게 진전되어 감을 볼 수 있으며 중간상태에 이르면 미소파손에 의한 일정한 마멸이 이루어 짐을 보여준다. 최종에는 급격하면서도 단속적인 RMS의 증가를 나타내고 있는데 이 때 높은 주파수의 진동이 나타난다. Fig.6은 마멸이 진행되는 과정에서 주파수의 변동을 절삭회수에 따라 보인 것이다.

마멸이 진행될수록 공구의 인선이 마모되어 댐핑이 증가하면 공작물의 고유진동수인 564Hz와 공구홀더의 고유

진동수인 4,928Hz에서 스펙트럼의 최고치가 증가되어 감을 알 수 있다.

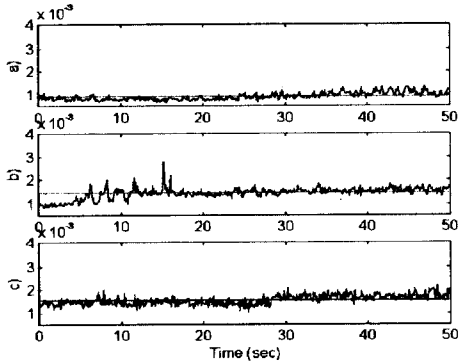


Fig. 5 Sound pressure(RMS) according to wear state
a) initial wear, b) moderate wear, c) catastrophic wear

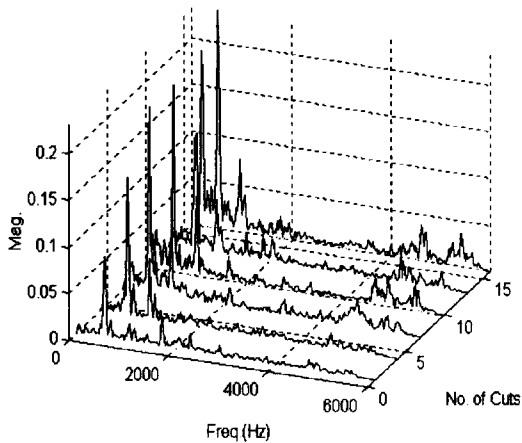


Fig. 6 Waterfall spectrum of sound pressure

Fig.7은 배분력의 평균치를 마멸량 VB에 따라 보인 것이다. VB 0.255mm에서 절삭력이 크게 줄어든 것은 공작물을 교체했기 때문이다. 한 공작물을 연속적으로 가공할 경우 직경의 감소로 절삭속도가 감소하여 오차를 유발할 가능성이 있다. 따라서 절삭속도가 약 10% 감소한 부근에서 새 공작물로 교체하였다. 이 때 절삭저항이 갑자기 저하되어 절삭력이 줄어드는 것은 열경화현상이 일어나지 않았기 때문이라 사료되며 곧 열경화로 인하여 절삭력이 증가하는 것으로 보아 연속된 신호라 보아도 무방할 것이다. 또한 VB 0.33mm에 이르렀을 때는 공구선단이

파손되었다.

Fig.8, Fig.9는 마멸의 진행에 따른 음압을 이용한 마멸지수들의 변화를 보인 것이다. 절삭력의 변화와 유사한 변화를 나타내고 있으며, VB값이 0.24mm를 초과할 때 급격한 마멸지수 (RMS, CV)의 증가를 보이는데 그 경향은 Fig.7에서 절삭력 변화보다 더욱 뚜렷한 경향을 보인다. 그리고 마멸상태는 최종마멸상태로 진입하는 것을 알 수 있다. 실시간에서 음압을 이용한 마멸 여부 평가시 급격한 마멸지수 (RMS, CV)의 변화가 일어나는 이 지점을 공구수명으로 볼 수 있다.

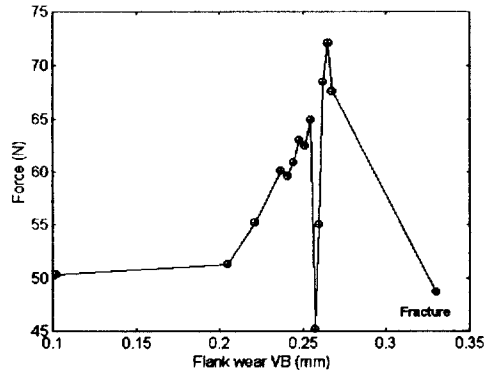


Fig. 7 Radial force according to wear length

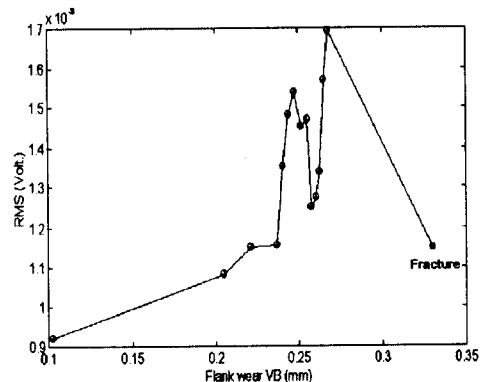


Fig. 8 Sound pressure(RMS) according to wear length

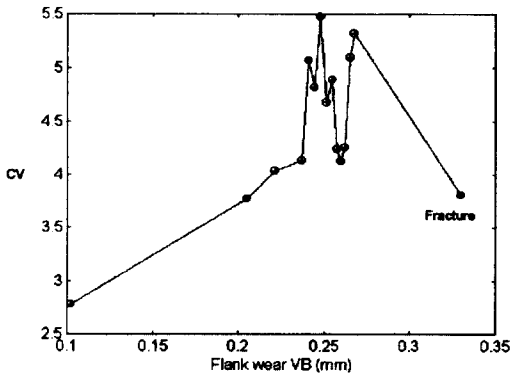


Fig. 9 Sound pressure(CV) according to wear length

Fig.10에는 절삭시간에 따른 비대칭분포와 도수분포의 첨도 변화를 보인 것이다. 마멸 중간상태의 초기와 최종상태의 초기부분에서 미소파손이 많이 발생했음을 보여주고 있으며(Fig.11 참조) 13분경에는 파손되었음을 나타내고 있다.

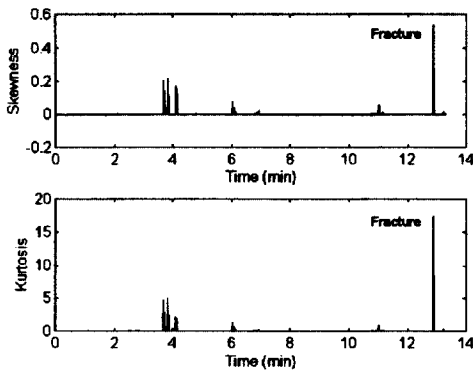


Fig.10 Skewness and kurtosis of sound pressure according to cutting time

Fig.12에는 식 (7)과 같은 모델링을 통하여 음압신호를 AR(8)로 모델링한 결과를 마멸상태에 따라 보인 것이다. 마멸이 진전됨에 따라서 5, 6번째 계수가 증가함을 알 수 있고 절삭중 AR모델의 5, 6번 계수의 변화를 감지하면 마멸을 실시간 감시할 수 있을 것이다.

4.2 파손실험 결과

파손실험에서도 앞서의 마멸실험에서 정의한 지수들을

사용하여 파손될 때의 한계치를 규명하였다. Fig.13은 파손된 공구를 보인 것이며 Fig.14는 파손이 일어났을 때 절삭력의 주분력과 음압신호이다. 0.7sec에서 파손이 발생했으며, 1.5sec에서는 공구가 완전히 파단되었다.

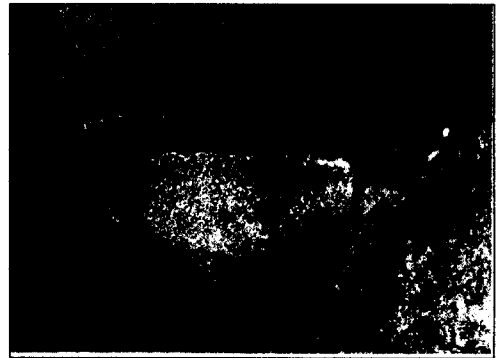


Fig. 11 Flank wear surface

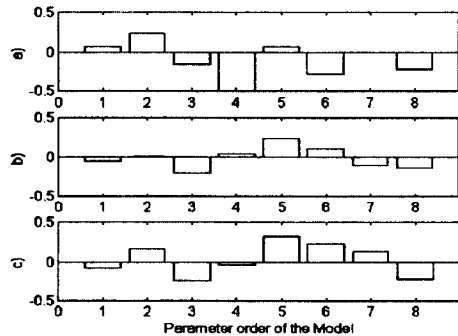


Fig.12 AR parameters of sound pressure
a) initial wear, b) moderate wear, c) catastrophic wear

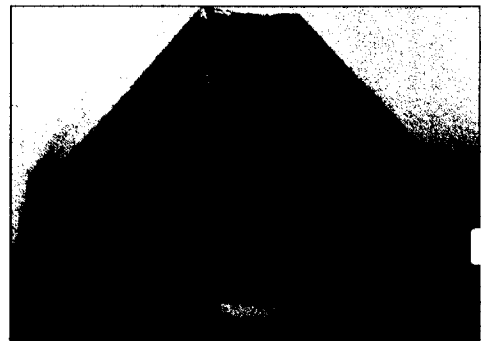


Fig. 13 Fractured insert

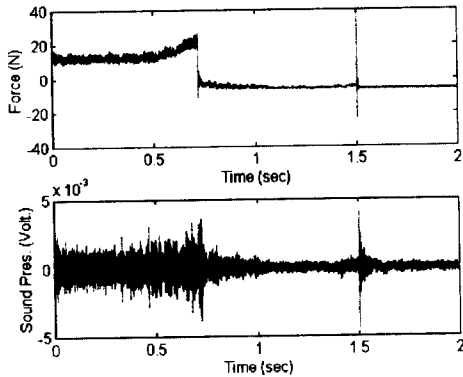


Fig. 14 Force and sound pressure signals during fracture

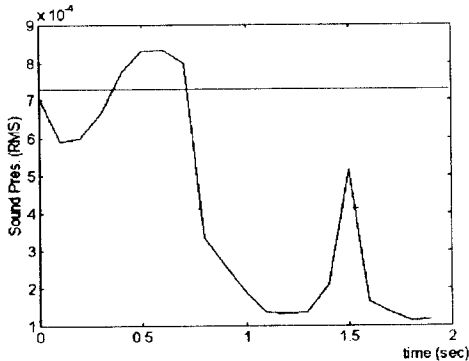


Fig. 15 Sound pressure(RMS) during fracture

Fig.15에서는 파손과정을 음압의 RMS로 나타내었다. 공구가 파손되는 시점인 0.7sec 보다 약 0.4sec (4회전) 전에 RMS값이 급히 상승하게 되며 파손을 예측할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

1. 선삭작업에서 음압을 이용한 마멸지수를 정의하고 절삭력 신호와 비교한 결과 마멸과 파손감시에서 음압신호의 유용성을 입증하였다.
2. 중절삭 조건에서의 마멸실험을 통해 음압을 이용하여 정의한 마멸지수가 공구수명 예측과 감시에 적합함을 입증하였다.
3. 음압의 kurtosis는 마멸과정 중 상태가 변하는 과도기 부분에서 일어나는 미소파손 현상을 잘 규명하였다.

4. 공구파손실험을 적용한 결과 음압의 RMS값을 이용하여 0.4sec 전에 파손을 예측할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] S.Smith, " Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control ", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.114, 1992, pp.146-157.
- [2] A.Galip Ulsoy, " On-Line Tool Wear Estimation Using Force Measurement and a Nonlinear Observer ", ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.114, 1992, pp.666-672.
- [3] Y.Koren, " Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.100, 1978, pp.103-109.
- [4] M.S.Lan, D.A.Dornfeld, " In-Process Tool Fracture Detection ", ASME, Journal of Engineering Materials and Technology", Vol.106, 1984, pp.111-118.
- [5] Toshimichi Moriwaki, " Sensing and Prediction of Cutting Tool Failure ", JSPE, Vol.18, No.2, 1984, pp.13-19.
- [6] Y.Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements ", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.114, 1992, pp.386-392.
- [7] Jong-Jin Park, A.Galip Ulsoy, " On-Line Flank Wear Estimation Using an Adaptive Observer and Computer Vision, Part 1, Part 2 ", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.115, 1993, pp.30-43.
- [8] Y.B.Chen, S.M.Wu, "A Real-Time Automated Diagnostic Monitoring System For Manufacturing Processes ", Manufacturing Intelligence, Vol.5, 1990, pp.51-56.
- [9] 이성일, 정성중, "음압을 이용한 선삭작업에서의 chatter 감시 및 제어", 1996년도 공작기계기술학회 추계 학술대회 논문집, pp.85-90.

- [10] P.A.Dearnley, "Rake and Flank Wear Mechanisms of Coated and Uncoated Cemented Carbides", ASME, Journal of Engineering Materials and Technology", Vol.107, 1985, pp.68-82.
- [11] Shintani, K., "Optimum Tool Geometry of CBN Tool for continuous Turning of Carburized Steel," Int.J.Mach. Tools Mfg., Vol.29, No.3, 1989, pp.403-413.
- [12] S.M.Wu and Pandit, Time Series and System Analysis with Application , John Wiley & Sons, Inc., 1983.