

밀링공구의 마모 감시에 관한 연구

백 대균*

A Study on the monitoring of tool wear in face milling operation

Baek, Dae Kyun*

Abstract

In order to monitor the tool wear in milling operation, cutting force is measured as the tool wear increased. The digital signal processing methods are used to detect the tool wear. As AR parameter extract the feature of tool wear, it can be used as input parameter of pattern classifier. The FFT monitors the tool wear exactly, but it can not do real time signal processing.

The band energy method can be used to real time monitoring of tool wear, but it can degrade the exact monitoring.

Keyword : Monitoring(감시), Flank wear(여유면 마모), Time series(시계열 분석), Band energy method (대역 에너지법)

1. 서 론

최근 가공시스템이 유연제조시스템(Flexible Manufacturing System)으로 변화함에 따라, 생산라인은 점차 자동화 무인화 되고 있다. 생산시스템을 자동화하여 무인운전을 이루기 위해서는 지능형 공작기계의 출현이 요구되고 있다. 이의 실현을 위해서는 공작기계 및 가공시스템 전반에 걸친 현상태의 자동인식, 즉, 절삭가공중에 수시로 변화하는 각종 절삭 상태에 대한 In-Process 계측의 필요성이 매우 강조되고 있다. 가공공정에서 일어나는 이상

현상(Malfunction) 즉, 절삭공구의 마모, 파손, 채터 발생등은 공정자동화에 매우 큰 장애가 될 뿐아니라 가공정밀도나 가공원가등에도 결정적인 영향을 미친다.

공구마모에 대한 연구를 살펴보면 Y. Yao. 등은 선반에서 3축 방향의 절삭력 신호를 시계열 분석에 의하여 공구의 마모에 관하여 연구하였고¹⁾, 신경회로망을 이용하여 선반에서 칩 형상과 공구마모에 관하여 연구하였다²⁾. 조동우 등은 퍼지 알고리즘을 이용하여 다이아몬드 선삭에서 절삭공구의 마모인식에 관하여 연구하였고³⁾, 신경회로망을 이용하여 밀링에서 공구마모에 관하여 연구하였다⁴⁾.

* 안동공업전문대학 기계과

최기상은 절삭력 및 AE센서의 센서융합에 의한 AR계수 행렬의 변화를 특징으로 신경회로망 모델에 적용시켜 선삭공구의 감시시스템에 관하여 연구하였다¹⁵⁾.

본 연구에서는 절삭능률이 우수한 다인절삭(Multi-point machining)기구인 밀링공정에서 공구의 마모감시에 대하여 연구하고자 한다. 절삭가공시 발생하는 공구마모를 감시하기 위해서는 공구의 마모에 따라 그 기하학적 형상의 변화로 기인되는 절삭력의 변화를 측정된 절삭력으로 분석하여 공구마모의 특징을 추출한다. 마모의 진행에 따라 절삭력의 특징을 추출하기 위하여 신호처리를 수행하게 되는데 실시간 검출을 위하여 디지털 필터(Digital filter)를 이용한 대역에너지(Band energy method)법을 적용하고 다른 신호처리법과 성능을 비교하고자 한다.

II. 마모의 정의 및 형태

밀링작업에서 발생하는 공구의 마모는 가공조건이나 피삭재 및 절삭공구의 재질에 따라 각기 다른 모양으로 나타나지만, 초경공구를 사용한 일반적인 정삭가공이나 경제적인 절삭상태에서는 ISO추천 공구수명 판정기준에 근거하여 여유면 마모를 공구교환 시기나 공구수명 판정기준으로 삼는다.

여유면 마모의 정의는 CIRP규정과 ISO규정이 주로 사용되고 있는데, CIRP규정에서는 Fig.1에서 보는 바와 같이 절입부의 1/2인 부분에서의 마모폭을 취하고 있고, ISO의 규정에서는 노즈(Nose) 반경부와 절입경계부의 1/4을 제외한 절입부의 마모 평균폭으로 정의하고, 또한 JIS규정에서는 비교적 균일한 마모의 경우 그 평균치로 하는 것이 원칙이나 불균일한 경우 최대의 마모폭을 취하는 등의 각기 다른 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 ISO정의에 따라 공구마모의 측정은 노즈부와 절입경계부를 제외한 나머지 절입부의 마모의 평균폭을 여유면 마모(V_B)로 규정하였다.

공구수명의 판정기준으로 삼는 V_B 의 길이는 공구와 공작물 및 가공정밀도에 따라 다르고 또한 각국의 규격마다 다르지만 ISO규격에서는 V_B 가 0.3mm일 때를 공구교환 시기로 규정하고 있으나, 현장에서는 JIS규격을 근거로 하여 일반구조용 강을 절삭할 때에는 V_B 의 길이가 0.7mm일 때를 공구의 교환시기로 책정하고 있다.

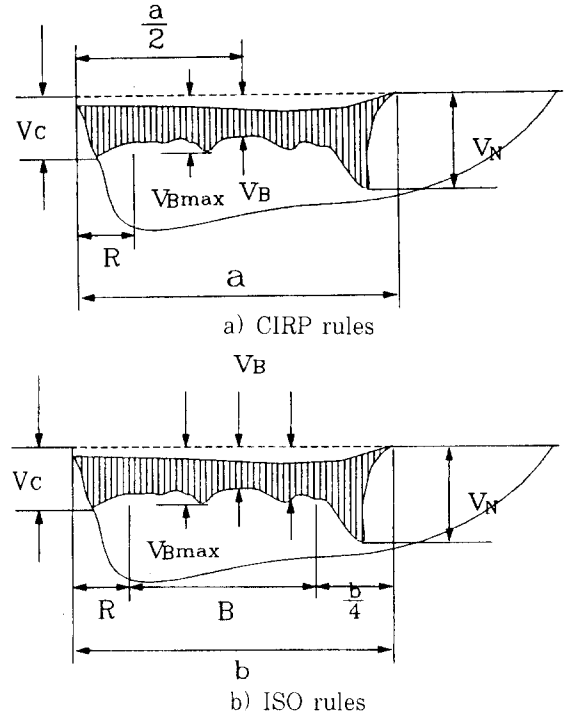


Fig.1 The criteria of flank wear(ISO,CIRP)

III. 신호처리 방법

3.1 시계열 분석(Time Series Analysis)(6,7)

어떤 일정한 시간 간격을 두고 관측된 시계열 데이터로부터 그 자료의 특정해석이나 물리적의미를 파악하기 위해서는 수학적 모델을 필요로 한다.

시계열 데이터로부터 구해진 수학적 모델은 자기회귀 이동평균(Autoregressive Moving Averaged) 모델이라 부르는 통계적 차분방정식으로 나타내고 ARMA(n,m)으로 표시한다.

이때의 차분방정식은 다음과 같다.

$$\phi(B)X_t = \theta(B)a_t \quad (1)$$

여기에서 ϕ : autoregressive parameter
 θ : Moving average parameter
 B : backshift operator
 $E(a_t) = 0$

ARMA 모델에서 AR부분을 바꾸어 쓰면

$$\begin{aligned} \phi(B) &= 1 - \phi_1(B) - \phi_2(B)^2 - \dots - \phi_n(B)^n \\ &= \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i B) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\lambda_i (i=1,2,\dots,n)$ 는 n 차 차분방정식의 특성해이다. 특성해 λ_i 가 복소수라면 그에 해당되는 고유진동수와 감쇠비는 다음과 같다.

$$W_i = \frac{1}{\Delta t} \sqrt{\frac{[\ln(\lambda_i \cdot \lambda_i^*)]^2}{4} + [\cos^{-1}(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2(\lambda_i \cdot \lambda_i^*)})]^2} \quad (3)$$

$$\zeta_i = \sqrt{\frac{[\ln(\lambda_i \cdot \lambda_i^*)]^2}{[\ln(\lambda_i \cdot \lambda_i^*)]^2 + 4 [\cos^{-1}(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\sqrt{\lambda_i \cdot \lambda_i^*})]^2}} \quad (4)$$

복소 특성근 λ_i, λ_i^* 은 절삭시스템의 진동원(vibration source)으로 부터 발생하는 동적모델(dynamic model)을 나타내고 Δt 는 샘플링시간이다.

진동신호의 이론적인 분산 γ_0 및 i 번째 모우드의 세기를 나타내는 d_i 는 다음과 같다.

$$\gamma_0 = \sum_{i=1}^n d_i \quad (5)$$

$$d_i = \sum_{j=1}^n \frac{g_i \cdot g_j}{1 - \lambda_i \cdot \lambda_j} \sigma_a^2 \quad (6)$$

$$\text{여기서 } g_i = \left. \frac{\theta(B)}{\prod_{k=1}^n (1 - \lambda_k B)} \right|_{B=\lambda_i}$$

측정신호에서 한 모우드가 전체모우드에 대하여 상대적인 세기(relative power)를 나타내는 dispersion은 d_i/γ_0 이다.

분산 γ_0 를 푸리에 변환(Fourier Transform)을 하면 측정 신호의 이론적인 파워 스펙트럼(power spectrum)을 알 수 있다.

$$S(f) = \frac{\sigma_a^2 \cdot \Delta t}{2\pi} \left| \frac{\theta(B)}{\varphi(B)} \right|_{B=\exp(-j2\pi f \Delta t)}^2 \quad (7)$$

이상에서 알 수 있는 바와 같이 어떤 시계열 데이터의 적합한 ARMA 모델이 주어지면 이로부터 분산 γ_0 , 고유

진동수, 감쇠비, dispersion 및 어느 진동모우드의 절대적 세기등을 산출할 수 있다.

따라서 ARMA 모델의 매개변수들이 산출되면 몇개의 동적 모우드가 그 신호안에 있으며 각 모우드가 차지하는 비율이 어느 정도인지 알 수 있다. 일반적으로 계(system)가 불안정 또는 비정상상태에 이르게 되는 것은 여러개의 모우드가 아니고 하나의 모우드이며, 또한 그 모우드의 상대적 세기 및 감쇠율에 의존하므로 매개변수들의 변화상태를 분석함으로써 가공상태의 이상에 따른 측정신호의 특징을 추정할 수 있다.

3.2 FFT analysis

가공상태의 이상에 따라 발생하는 측정신호를 FFT 분석기 및 FFT알고리즘을 이용하여 센서신호의 주파수 변화와 그 파워치의 변화상태를 분석한다. 시간영역에 나타난 신호들을 각 주파수별 특징으로 분석함으로써 신호 발생원에 대한 해석이 가능한 기법으로 널리 사용되고 있는 방법이다.

3.3 디지털 필터에 의한 대역에너지⁽⁸⁾

필터에는 여러 종류가 있으며, 그 성질이 시간과 더불어 변화하는 적응 필터와 같은 시변(Time variant) 필터와, 메디언(Median) 필터와 같이 비선형 필터도 있다. 그러나 본 연구에서 다루는 필터는 주파수 선택성을 정의할 수 있는 선형으로서, 또한 시간에 따라 성질이 변화하지 않는 시불변(Time invariant) 필터를 이용한다.

절삭상태의 이상에 따른 특징은 특정대역의 주파수성분에서 두드러지게 나타나는데, 대역주파수 에너지법(frequency band-energy method)을 주로 이용한다.

특정 대역주파수의 에너지는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E_{x,BPF} = \int_{f_1}^{f_2} G_x(f) df \quad (8)$$

여기서 $G_x(f)$ 는 신호 $x(t)$ 의 파워스펙트럼 밀도함수이고, f_1, f_2 는 관심의 주파수의 저역과 고역의 주파수를 나타낸다. (8)식은 FFT를 수행한 후 대역주파수에서 에너지를 추출하는 방법을 채택하고 있으므로 신호처리에 많은 시간이 걸리게 된다. 디지털필터를 이용하게 되면 관심의 대역주파수를 추출하여 시간영역에서 에너지값을 구

할 수 있는데, 계산시간이 짧아지게 되어 실시간 처리에 이용할 수 있는 장점이 있다.

$$E_{xBPF} = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_0^T X^2(t)_{BPF} dt \quad (9)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n^2(t)_{BPF}$$

IV. 실험장치 및 방법

수직밀링의 테이블 위에 공구동력계를 부착하고, 그 위에 시편을 고정하였다. 정면절삭을 행할 때 절삭력을 Charge Amplifier에서 증폭시킨 후 A/D Converter를 통해서 샘플링 시간 0.0005초로 컴퓨터에 저장하였다. 밀링 커터는 8 개의 날이 같은 간격인 커터를 사용하였고, 8 날 중 2 날이 공작물과 물리도록 하여 절삭폭 50mm를 상향절삭하였다. 절삭실험 조건은 절삭속도 370 RPM, 피이드 87mm/min, 절삭깊이 1mm에서 절삭을 하였다. 실험장치에 대한 규격은 Table 1에 나타내었고 실험장치의 개략도는 Fig.2와 같다.

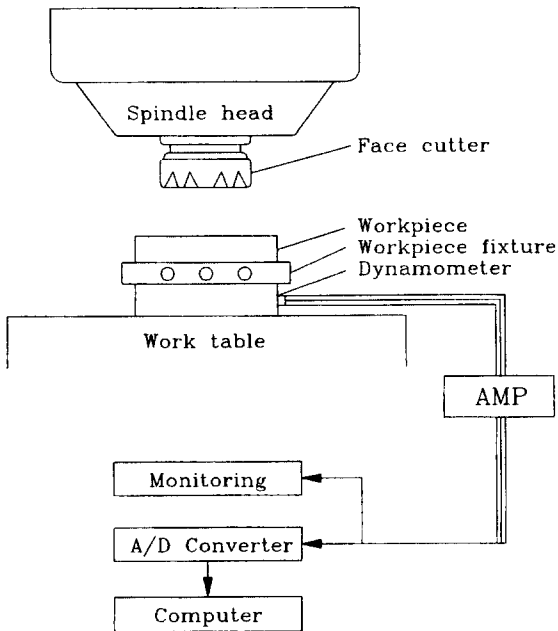


Fig.2 Schematic diagram for experimental set-up

Table 1 Specification of experimental set-up.

Milling machine	화천기계 WMV-1100 (1100 X 280 mm)
Tool dynamometer	Kistler(type 9257A)
Tool microscope	Mitutoyo type B1-5
A/D converter	Lab Master conversion rate:30KHz resolution:12bit input range:-10V-+10V
Amplifier	Kistler(type 5008E DPM-2300)
Computer	32 bit IBM compatible PC
Oscilloscope	Tektronix(2202 storage)

V. 실험결과 및 고찰

절삭속도 370 RPM, 이송 87mm/min, 절삭깊이 1mm에서 8개의 날로 절삭을 하였다. 마모가 진행되어감에 따라 마모량과 절삭력을 측정하였다. 마모량이 0.1mm에서 0.6mm까지 0.1mm간격마다 ISO규격에 따라 옆면마멸폭(Flank Wear)을 측정하고 그때에 절삭력을 측정하였다. 마모의 진행에 따른 절삭력중에서 Fig.3의 a)는 마모가 되지 않는 X방향의 절삭력을 나타내고 b), c), d)는 옆면마멸폭이 각각 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm 일 때의 X방향 절삭력을 대표해서 나타내었다.

마모의 진행에 따른 절삭력을 AR(8)모델에 적용하여 계수들을 각각 구하고, 이 계수들을 Fig.4에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 AR계수의 1, 5, 7번째의 계수들이 마모의 진행과 함께 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 AR계수는 마모에 따른 특징으로 추출하여 신경회로망이나 퍼지등의 패턴분류기에 바로 입력파라미터로 사용할 수 있다.

마모의 진행에 따른 절삭력을 FFT로 분석하여 그 결과를 Fig.5에 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 마모가 증가하면 공구인선의 접촉면적이 증가하여 절삭력의 인서트 주파수가 증가한다는 것을 알 수 있고, 이 인서트 주파수를 마모에 따른 특징으로 추출할 수 있다. 본 실험조건에서 인서트 주파수는 49Hz인데 Fig.5의 FFT를

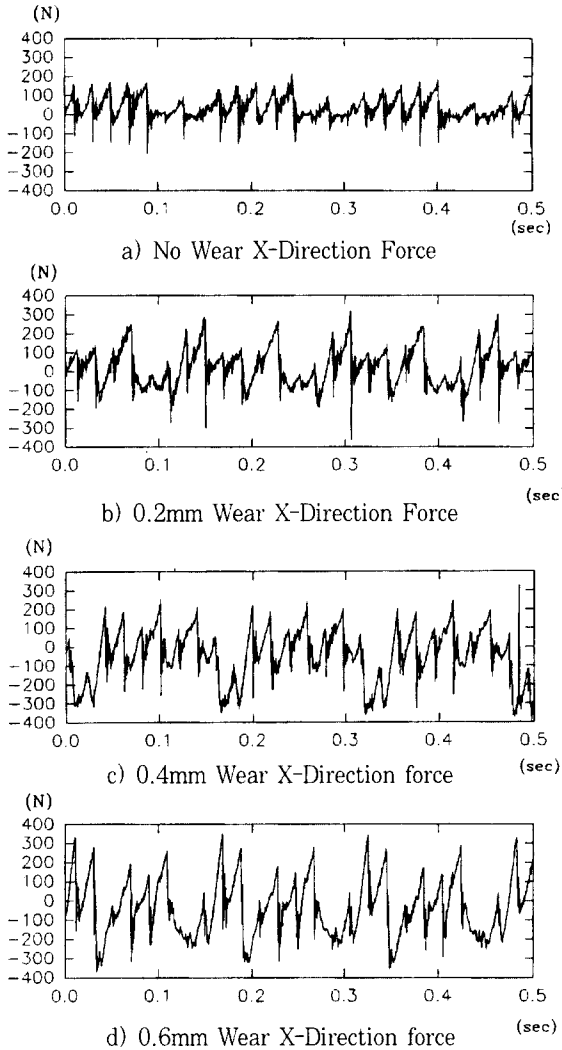


Fig.3 Measured X-direction force as wear increased

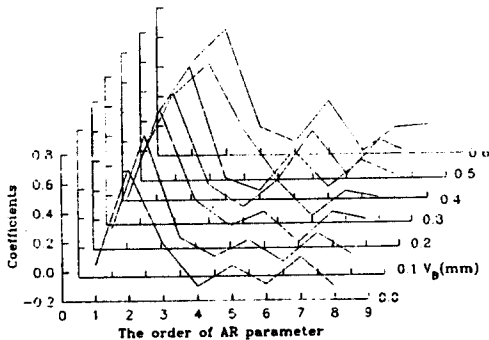


Fig.4 AR(8) Parameter as wear increased

살펴보면 49Hz와 함께 49Hz의 Harmonic성분이 나타나 는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 FFT는 마 모의 진행에 따라 인서트 주파수 성분이 뚜렷하게 증가하 므로 마모감시를 정확하게 수행할 수 있다. 그러나 FFT로 신호처리에 상당한 시간이 걸리게 되므로 In-Process 감시가 어렵게 된다. 마모의 진행은 급진적으로 일어나지 않기 때문에 공구마모 한가지 감시에는 FFT가 유용하게 사용될 수 있으나 공작기계의 감시는 일반적으로 복합적인 이상상태 감시이므로 신호처리시간에 많은 제약을 받 게된다.

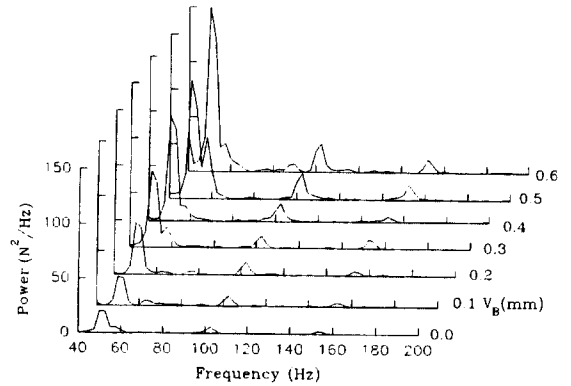


Fig.5 FFT of measured force as wear increased

Fig.6은 마모의 진행에 따른 절삭력을 베타워스 대역 통과(45-55 Hz) 필터로 인서트 주파수 부근의 대역을 통과한 절삭력을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 마 모가 진행됨에 따라 필터된 절삭력은 증가함을 알 수 있 다. 필터된 절삭력을 (9)식에 적용하여 대역에너지를 구 하여 Fig.7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 마모 가 진행됨에 따라 정확도는 FFT에 비하여 작지만 대역에 너지가 증가함을 알 수 있다. 이 방법을 사용하면 정확도 는 약간 떨어지지만 신호처리시간이 작게 걸리게 되므로 공구마모를 실시간으로 감시할 수 있다. 공구마모는 공구 의 몇회전 이내에 급격히 증가하지 않으므로 AR모델이나 FFT방법으로 마모를 감시할 수 있다. 그러나 절삭공정의 감시는 공구칩핑, 채터 그리고 공구마모와 같은 여러 가지 이상상태를 동시에 감시해야 하므로 실시간 감시를 위해 서는 대역에너지법이 효과적일 수 있다⁹⁾.

본 연구의 절삭조건에서 만약 여유면 마모 0.2mm를 공구교환시기로 정한다면 각 신호처리 방법에 대하여 다 음과 같이 공구교환 시기를 정할 수 있다. AR(8)파라메 터는 Fig.4의 V_B 0.2mm에 해당하는 입력패턴에서 어떤

패턴분류기가 교환시기를 판정할 수 있고, Fig.5의 FFT는 V_B 0.2mm에 해당하는 파워 50(N^2/Hz)에서 교환시기를 판정할 수 있고, Fig.6의 밴드에너지는 $1000(N^2)$ 에서 공구교환시기를 결정할 수 있다.

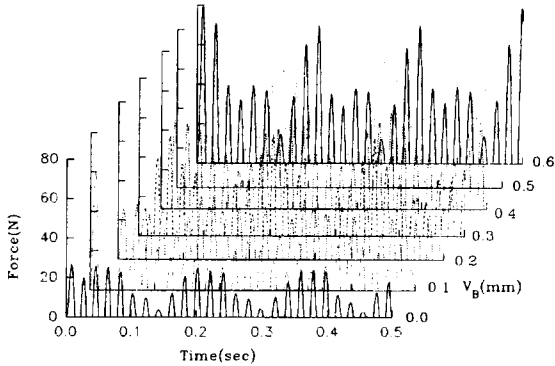


Fig.6 Band filtered force as wear increased

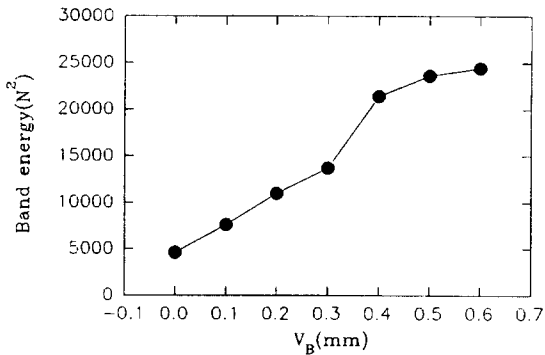


Fig.7 Band energy as wear increased

6. 결론

정면밀링작업에서 여유면 마모의 진행에 따라 공구인선의 접촉면적이 증가하여 절삭력의 인서트 주파수성분이 증가하여 절삭력이 커짐을 알 수 있었다. 마모에 따른 절삭력을 측정하여 시계열 분석법, FFT, 대역에너지법으로 분석하여 보았다.

AR(8)모델에 적용하여 본 결과 파라미터에 공구마모에 따른 특징이 뚜렷하게 나타나므로 패턴분류기의 입력 패턴으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다. FFT로 분석한 결과 인서트 주파수성분이 마모가 진전과 함께 증가하였고, 인서트 주파수의 대역에너지도 공구마모와 함께 증가하여 마모감시가 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Y.Yao, "Comprehensive Tool Wear Estimation in Finish-Machining via Multivariate Time-series Analysis of 3-D Cutting Process", Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, pp57-60, 1990.
2. Y.L.Yao and X.D.Fang, "Assessment of Chip Forming Patterns with Tool Wear Progression in Machining via Neural Networks", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.33, No.1, pp.89-102, 1993.
3. D.W.Cho and T.J.KO, "Fuzzy Pattern Recognition for Tool Wear Monitoring in Diamond Turning", Ann. of CIRP, Vol.41, No.1, pp.125-128, 1992.
4. T.J.Ko and D.W.Cho "Cutting State Monitoring in Milling by A Neural Network", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 34, No.5, pp659-676, 1994.
5. 최기상, 최기홍, "선삭공작을 위한 지능형 실시간 공구감시 시스템에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제9권, 제4호, pp.22-35, 1992.
6. S.M.Wu and S.M.Pandit, "Time Series and System Analysis with Applications", Jhon Wiley and Sons, 1983.
7. A.C.Harvey, "Time Series Models", The MIT Press, 1992.
8. E.C.Ifeachor and B.W.Jervis, "Digital Signal Processing", Addison-Wesley, 1993.
9. C.Y.Jiang, Y.Z.Nhang and H.J.Xu, "In-Process Monitoring of Tool Wear Stage by the Frequency Band-Energy Method", Ann. of CIRP, Vol.36, No.1, pp.45-48, 1987.