韓國精密工學會 '97年度 春季學術大會論文集 pp.817~821

엔드밀가공시 복합계측 신호에 의한 공구 마멸의 카오스적 해석

Chaotic Analysis of Multi-Sensor Signal in End-Milling Process

구세진*, 이기용, 김경수(부산대 원), 강명창(부산대 기계기술연구소), 이득우, 김정석(부산대 ERC/NSDM)
Se-Jin Ku*, Ki-yong Lee, Kyeong-soo Kim(Graduated School, Pusan Univ.),
Myeong-Chang Kang(RIMT, Pusan Univ.), Deug-woo Lee, Jeong-Suk Kim(ERC/NSDM, Pusan Univ)

Abstract

Ever since the nonlinearity of machine tool dynamics was established, researchers attempted to make use of this fact to devise better monitoring, diagnostics and control system, which were hitherto based on linear models. Theory of chaos, which explains many nonlinear phenomena comes handy for furthering the analysis using nonlinear model. In this study, measuring system will be constructed using multi-sensor (Tool Dynamometer, Acoustic Emission) in end milling process. Then, it will be verified that cutting force is low-dimensional deterministic chaos by calculating Lyapunov exponents, Fractal dimension, Embedding dimension. And it will be investigated that the relations between characteristic parameter calculated from sensor signal and tool wear.

Key Words : Cutting Dynamics(절삭동역학), Cutting Force(절삭력), Tool Wear(공구마멸), End-Mill Machining(엔드밀가공), Chaotic Analysis(카오스 해석), Fractal Dimension(프랙탈 차원)

1. 서 론

절삭공정의 해석이나 모델링을 위한 기존의 시도는 실험적인 규명없이 단지 가정에 의한 선형적, 통계적 방법이 대부분이었다. 이러한 시도는 절삭공정이 비선형적이라는 사실을 생각할 때 오차를 가질 수 밖에 없는 것이다.

카오스 이론은 비선형 현상을 해석하고, 모델링하는데 좋은 수단으로 많은 연구가 수행되어오고 있는 학문이다. 또한 비선형적인 현상에서 결정론적인 카오스거동을 보임을 증명하는 결과가 많이 나오고 있다. 즉, 단순한 규칙에서도 복잡한 현상이 발생한다는 것은 다른 많은 복잡한 현상을 해석하는데 희망을 주는 것이다. 기존의 절삭현상에서의 연구는 카오스 이론에 기초하여 절삭력 모델링에 의한 미분방정식이 카오스적인 거동을 보임을 증명하거나[2] 채터링의 현상을 모델링한 연구 결과가 있다.[3]

그러나 실험을 통하여 엔드밀 공정에서의 절삭력 신호가 카오스적임을 규명하고 이 상태를 정량화하여 공구마멸과의 상관관계를 밝힌 바는 없다.

본 연구에서는 절삭력 신호가 저차원의 카오스적임을 보일 것이다. 카오적임을 증명하는 방법으로는 각 분력에 대하여 매립차원(Embedding Dimension)에 따른 상관 차원을 구하고, 이를 기준으로 리야프노프 지수(Lyapunov Exponents)를 계산하여 카오스적임을 보일 것이다. 또한, 삼분력을 이용하여 포잉카레 절단면(Poincare Section)을 구성하고 여기서의 프랙탈 차원(Correlation Dimension, Capacity Dime-nsion, …)을 계산하여 공구마멸에 따른 변화를 조사하였다. 또한 두개 다른 공작기계에서 실험을 수행하여 정성적인 거동의 일치 여부를 조사하였다. AE Rms신호는 공구 마멸에 따른 특성과 공작기계의 특성파악에 이용하였다.

2. 카오스 이론

카오스 이론의 기원은 19세기 말까지 거슬러 올라가지만 본격적으로 연구되기 시작한 것은 최근의 일이다. 일반적으로 카오스란 초기조건의 민감성의 성질에 의해서 결정론적 동역학계에 긴 시간의 예측할 수 없는 거동을 말한다[1]. 즉, 동역학계를 결정지을 수 있는 초기조건을 완벽하게 알 수 없다는 것은 여러 자연적 현상에서 예측 불가능성과 연관되어진다. 또한, 실험상에서 측정대상을 완전하게 결정지을 수 있는 모든 정보를 획득할 수 없고, 단일 시계열이나

이의 조합으로 획득할 수 있는 경우가 많다.

기존의 많은 자연현상에서 시계열 신호로부터 카오스적인 거동을 판단하는 기준으로 리야프노프 지수가 있으며, 프랙탈 차원을 이용하여 매립차원을 결정지을 수 있으며 포잉카레 절단면, 시간지연을 이용한 위상공간 재구성에 의해 동역학계의 거동이 카오스적임을 확인할 수 있다. 이런 모든 인자들이 동역학계를 나타내는 불변량으로서 상태의 정량화를 기할 수 있다.

2.1 리야프노프 지수

리야프노프 지수를 구하는 것은 위상 공간에서 궤적을 구성하는 점들의 시간에 따른 구조를 검사하는 것이다. 리야프노프 지수를 구하는 방법에는 기본적으로 두가지가 있다. 첫째는 위상공간에서 인접한 두 궤적의 점들간의 거리는 시간이 지남에 따라 지수함수적으로 발산 혹은 수렴하게 되는데 시계열 신호에 대해서는 리야프노프 지수 λ는 다음식으로 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{1}{t_M - t_0} \sum_{k=1}^{M} \log_2 \frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})} \qquad (1)$$

여기서

$L(t_{k-1})$: 기준 궤적의 초기위치와 가장 가까운 궤적간의 유클리디안 거리

$L'(t_k)$: 시간 t_k 경과후의 거리($t_k = t_{k-1} + \Delta$)

Δ : λ를 계산하기 위해 사용하는 궤적의전개 시간 (Evolution Time)

M : 전체 수행 횟수

다른 방법으로는 주어진 궤적의 접선 벡터의 증가율을 측정하는 것이다. 즉, 임의의 m차원 위상공간으로의 사상을 고려할 때 지수는 다음식으로 구할 수 있다.

$$\lambda(x, v) = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \ln | (Df^n (x)\, v | \qquad (2)$$

여기서 Df(x) : m차 미분 행렬

v : x점에서의 탄젠트 벡터

단위 시간당 궤적간의 발산율인 λ를 리야프노프 지수라고 하며 $\lambda > 0$인 것이 하나라도 존재하게 되면 카오스 운동을 의미하며 주기적인 거동에 대해서는 모든 λ가 $\lambda < 0$인 결과를 보인다. λ가 0인 경우는 바이퍼케이션(Bifurcation)상태인 경우이다. 따라서, 리야프노프 지수 λ는 값의 크기에 따라 얼마나 카오적인가 하는 정량적인 척도가 될 수 있다. 지금 현재 널리 알려진 알고리즘은 단일 시계열의 경우만 구할 수 있으며 동역학적 거동을 충분히 결정지을 수 있는 매립차원과 적절한 시간지연(Time Delay)을 구해야 하는데 매립차원은 상관 차원의 수렴위치에 의해 구할 수 있다.

2.2. 프랙탈 해석

2.2.1 시간 지연을 이용한 상태공간 재구성

이산계에서 카오스를 발견하고 분석하는 가장 중요한 방법중의 하나는 끌개의 재구성이다. 즉, 시계열 자료로부터 계의 운동양상이 보이는 기하학적인 특징을 추출해 내는 과정이 그것이다. 배후의 알려지지 않은 동역학계의 시계열 자료에 대해 시간 t에서의 상태 벡터 $\xi(t)$는 다음 식과 같이 재구성되어지며, 이때의 시스템 운동이 불규칙 운동이 아닌 경우 재구성된 위상공간에서 시스템을 지배하는 배후의 숨은 질서를 파악할 수 있다.

$$\xi(t) = (x(t), x(t+\tau), \cdots, x(t+(d-1)\tau)) \qquad (3)$$

여기서 τ는 t의 정수배인 시간 지연이며, d는 매립차원이다. 최소의 최적인 매립차원에 이르게 되면 프랙탈 차원은 일정량에 수렴하는 특성을 보인다. 이로서 매립차원을 결정지을 수 있다.

2.2.2 프랙탈 차원

수학적으로 프랙탈 차원은 부피나 질량과 같은 용적 치수(Bulk) V와 길이 치수(Length) L과의 비례적인 관계를 나타내는 변수라 할 수 있다. 즉, 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$V \propto L^D \qquad (4)$$

여기서, D는 프랙탈 차원으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \lim_{r \to 0} \frac{\log(V)}{\log(L)} \qquad (5)$$

또한, 일반화된 프랙탈 차원 D_q는 다음과 같이 정의 되어진 다.[4]

$$D_q = \lim_{r \to 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log(\sum_i p_i^q)}{\log r} \qquad (6)$$

여기서 r : 영역의 크기

p_i : i째 영역의 끌개의 척도

위의 차원정의는 $-\infty < q < \infty$에 대해 불변적인 전체 스펙트럼을 나타낸다. q=0인 경우는 용량차원(Capacity Dimension)이라 하며, q=1일 때를 정보차원(Information Dimension), q=2일 때를 상관 차원(Correlation Dimension)이라고 한다. 실제 계산에서는 극한의 계산을 할 수가 없기 때문에 영역의 크기 r은 충분히 작은 값으로 선정한다. 유한한 데이터에 대해서 i번째 영역에서 $P_i = n_i/n$로 간주되어진다. 여기서 n_i는 영역의 점의 갯수이며, n은 전체 점의

개수이다. 실제의 해석에서는 차원을 계산하기 위한 데이터의 개수 N은 다음과 같다.

$$N \geq 10^{\frac{D_q}{2}} \qquad (7)$$

프랙탈 차원은 주어진 끌개에서의 공간채움성의 척도(Measure space filling)라 볼 수 있으며 동역학계의 거동을 정량화하는 척도로 많이 이용되고 있는 것으로서 미세한 끌개의 변동을 프랙탈 차원값에 반영한다.

3. 실험 장치 및 실험방법

3.1 실험장치

절삭력신호를 얻기 위한 머시닝 센터에서의 실험장치 개략도는 Fig. 1과 같다. 공구동력계를 공작물의 밑부분에 장착하여 측정하였다. AE센서는 전치증폭기가 내장되어 있는 센서를 사용하였으며, 공작물의 옆면에 부착하여 신호를 RMS 변환기를 거쳐서 획득하였다. 공구의 마멸을 정확히 측정하기 위해서는 공구의 착탈시 런아웃(Run-Out)의 변화에 따른 공구 마멸에의 영향을 줄이기 위해서 공구를 가공후 장착한 채 마멸량을 측정해야 한다. 따라서 CCD카메라를 이용하여 영상신호를 모니터와 비디오 프린터를 연결하여 측정과 동시에 칩핑이라든지 공구의 상태를 사진으로 프린터하였다.

공구의 2날 각각에 대하여 공구의 끝단에서부터 0mm, 3mm, 5mm, 10mm 부분을 측정하였다.

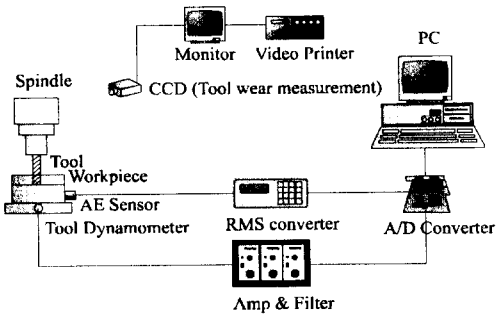


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Set-up

3.2 실험방법

3.2.1 실험조건

본 실험에서 사용된 실험조건은 Table 1과 같다. 공구동력계는 kistler 9257B를 사용하였으며, 앰프는 kistler 5019A를 사용하였다. 주 실험은 머시닝센터(VN-850F0)에서 수행하였고, 몇가지 절삭조건에 대해서 Markino사의 V-55 공작기계에서 수행하여 비교하였다.

3.2.3 실험 및 해석방법

플랫 엔드밀을 사용하여 머시닝센터의 테이블 위에 공구동력계를 장착하여 0.06ms의 샘플링시간으로 0.36초 동안 A/D변환기를 거쳐 PC를 통해 획득하였다. 절삭력의 해석은 시간지연 좌표계를 재구성하여 매립차원에 따른 상관 차원의 값을 계산하여 수렴위치를 기준으로 리야프노프 지수를 구하였다. 절삭력의 세분력을 이용하여 포잉카레 절단면을 구성하였으며, 공구 마멸에 따른 끌개의 변화를 프랙탈차원을 계산하여 측정하였다.

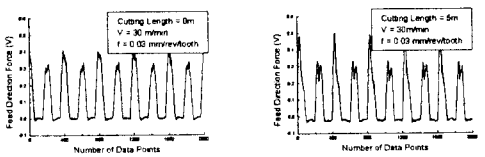
Liebovich L. and Toth T.[5]의 알고리즘을 이용하여 이러한 끌개의 프랙탈 차원을 계산하였고, 리야프노프 지수는 Alan Wolf의 알고리즘[6]을 이용하였다.

Table 1 Experimental Conditions

Item	Specificatoin
Cutting Process	EndMilling Machining
Tool	Carbide 2Fluted Flat Endmill
Workpiece	SKD11
Machine	Vertical CNC Milling Machine (HVN-850F0 Hwacheon Machinery co.) (V-55 Markino co.)
Cutting Condition	· Cutting Speed(m/min) : 20,25,30,35 · Feed Rate(mm/Rev) : 0.04, 0.06, 0.08 · Axial Depth(mm) : 10mm · Radial Depth(mm) : 1mm · Overhang(mm) : 36mm · Cutting Fluid : Dry Run

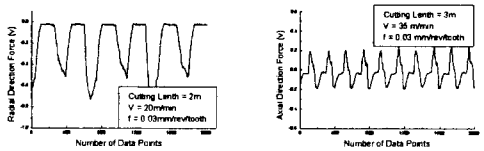
4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 공구마멸이 진행됨에 따라 이송방향의 절삭력의 변동을 나타낸 것이고, Fig. 3은 각기 다른 조건의 다른 마멸 양일 때의 반지름 방향과 축방향의 절삭력 신호이다.



(a) V_{Bmax} = 0 mm (b) V_{Bmax} = 0.1 mm

Fig. 2 Comparision of Feed Force for Flank Wear



(a) V_{Bmax} = 0.068 mm (b) V_{Bmax} = 0.095 mm

Fig. 3 Radial and Axial Direction Force Signal

절삭력의 동적 성분의 변화가 공구 마멸의 진전에 따라 정도가 심하며, 평균치나 피크값은 현재의 절삭상태를 나타내는 압축된 정보를 충분히 담지 못한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 한 조건에서의 각 절삭력 분력의 매립차원에 따른 상관 차원의 변화를 나타낸 것이다. 매립차원이 증가함에 따라 상관 차원의 값은 매립차원이 4~5정도에서 수렴함을 알 수 있으며, 잡음의 영향을 고려하면 5이하의 값일 것으로 추측할 수 있다.

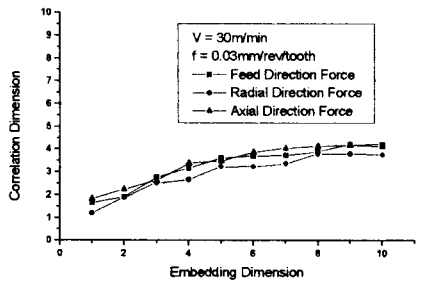


Fig. 4 Relation Between Correlation Dimension and Embedding Dimension

이러한 현상은 다소 차이는 있지만 모든 조건에서 동일하게 나타났다. 위의 결과를 토대로 매립차원을 4로하여 계산한 리야프노프 지수의 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Range of Lyapunov Exponents for each Cutting Force

Cutting Force	Lyapunov Exponents
Feed Direction Force	0.083 ~ 0.157
Radial Direction Force	0.042 ~ 0.116
Axial Direction Force	0.091 ~ 0.232

리야프노지수는 모두 양으로 나왔으며, 이는 절삭력의 세분력 모두가 카오스적인 거동을 보임을 나타내며, 일반적으로 알려진 저차원의 카오스신호 값과 비교할 때 작은 값으로 적절한 비선형 모델링을 통하여 단기예측이 가능할 것이라 사료된다. 또한, 매립차원이 4라는 결과는 절삭상태를 결정하기 위한 상태 변수의 공간차원이 비교적 적은 저차원적인 카오스적 거동을 보임을 알 수 있다.

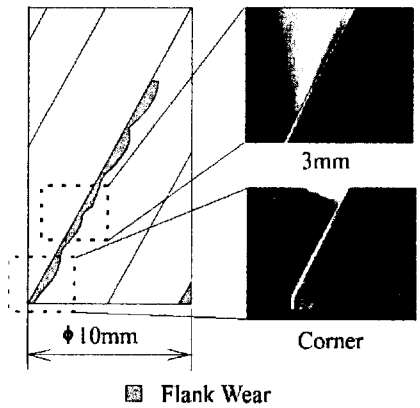
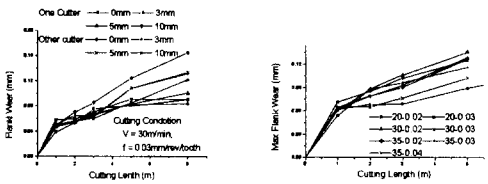


Fig. 5 Figure of Flank Wear

Fig. 5는 비디오 프린터로 찍은 여유면 마멸의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 6은 절삭길이에 따른 여유면 마멸의 변화를 나타낸다. (a)는 한 공구에 대하여 각 부위에 따른 마멸의 거동을 나타내며 (b)는 각 조건에 따른 최대 플랭크 마멸량을 나타낸다. 초기의 급속한 마멸(Minute Chipping)의 진전 이후 점진적인 마멸이 일어 나고 있음을 알 수 있다. 다른 공작기계에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

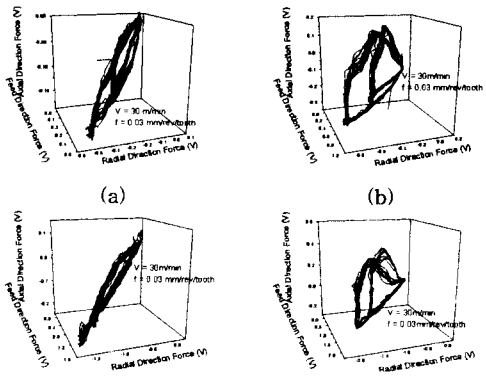


(a) (b)

Fig. 6 Flank Wear According to Cutting Length

Fig. 7은 두 개의 다른 공작기계에서 동일한 가공조건으로 가공한 결과에서 절삭력의 세분력으로 구성한 공구 마멸에 따른 포잉카레 절단면이다. 최적의 최소인 매립차원이 4정도이므로 완전하게 절삭상태를 나타낸다고는 할 수 없지만 끌개의 변화가 확연함을 알 수 있다. Fig. 7의 (c), (d)는 비교실험의 결과로서, 끌개의 형태가 다르지만 비슷한 패턴을 형성함을 알 수 있다. 왼쪽의 (a), (c)는 새로운 공구에 대한 끌개이며 (b), (d)는 최대 플랭크 마멸량이 0.14mm, 0.12mm인 경우이다. 끌개의 형태가 다른것

은 가공상태가 동일 하지 않다는 것을 나타낸다.

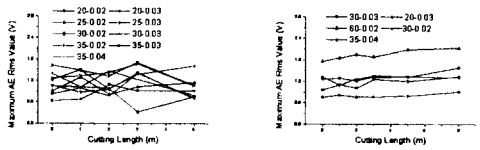


(a) (b)

(c) (d)

Fig. 7 Poincare Section Plot According to Flank Wear in other Machine

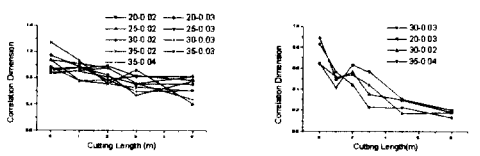
Fig. 8에 나타난 바와 같이 마멸에 따른 AE RMS의 변동을 보면 다른 영향이 많은 것을 알 수 있다. 즉 Fig. 8의 (b)의 경우 비교실험을 수행한 결과이며 마멸에 따라 최대AE RMS 값의 점진적인 증가를 볼 수 있으나 주 실험을 수행한 공작기계에서의 결과에서는 마멸에 따른 특성을 볼 수 없다.



(a) (b)

Fig. 8 Maximum AE RMS Value for Other Machine According to Cutting Length

Fig. 9에는 Fig. 7과 같이 구성된 포잉카레 절단면의 절삭길이에 따른 상관차원의 변동을 나타내었다. 각각의 절삭길이에 따라 각 공구의 여유면 마멸량이 증가하므로 공구 여유면 마멸의 증가가 상관 차원의 감소를 가져온다는 것을 알 수 있다. .



(a) (b)

Fig. 9 Correlation Dimension with Cutting Length

외적 요인이 적은 것으로 사료되는 비교실험 수행 결과인 Fig. 9 (b)에서 보면 공구 마멸에 따라 그 차이가 확연함을 알 수 있다.

절삭 초기에는 구성인선과 침핑이 발생하였으므로 절삭유 등을 사용하여 보다 정상 마멸이 일어 날 때에는 보다 가시적인 결과가 나오리라 사료된다

이상의 결과에서 절삭력의 세분력을 이용한 상관차원은 공구마멸량과 연관지을 수 있을 것으로 기대되며 비선형 감시 툴인 신경회로망 등을 구성할 때 유용한 입력인자가 될 것으로 사료된다.

5. 결 론

엔드밀가공시 복합계측 신호에 의한 공구마멸의 카오스적 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 엔드밀 가공에서 절삭력 신호에서 최소의 최적인 매립차원이 4이고, 리야프노프 지수의 값은 0.042 ~ 0.232정도의 값으로 저차원의 카오스적 거동을 보임을 증명하였다.

2) 절삭력의 세분력을 이용하여 구성한 포잉카레 절단면의 상관차원의 값은 플랭크 마멸의 증가에 따라 감소한다.

3) 정상마멸 거동에서 최대 AE RMS값은 증가하는 경향을 보인다.

4) 상관 차원은 공구 마멸을 감시에 유용한 인자로서 제안하였다.

참고문헌

1) Stephen H. Kellert, "In The Wake of Chaos : Unpredictable Order In Dynamical System",the University of Chicago Press. 1993

2) Igor Grabec, "Chaotic Dynamics of The Cutting Process", Int..M.T.M. Vol. 28, No. 1, 1988.

3) J.S.Lin, C.I.Weng "Nonlinear Dynamics of The Cuting Process", Int.J.Mech.Sci, Vol.33, No.8, 1991.

4) Fernando J. Pineda " Estimating Generalized Dimensions and Choosing Time Delays : A Fast Algorithm", Proceedings on Comparative Time Series Analysis , New Mexico, May 14-17, 1992

5) L.S.Liebovitch, T.Toth, "A Fast Algorithm to Determine Fractal Dimension by Box Counting ", Phys.Lett. A, Vol. 141, No. 8, 1989.

6) A. Wolf, J.B.Swift, "Determining Lyapunov exponents from a time series", Physica D, Vol. 16, 1985