

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME96 - E - 11)에 의하여 연구 되었음

## 엔드밀가공시 복합계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석

김정석\*, 강명창\*\*, 이기용\*\*\*, 구세진\*\*\*

### Chaotic Analysis of Tool Wear Using Multi-Sensor Signal in End-Milling Process

J. S. Kim\*, M. C. Kang\*\*, K. Y. Lee\*\*\*, S. J. Ku\*\*\*

#### 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 chaos by calculating Lyapunov exponents, Fractal dimension, Embedding dimension. And it will be investigated that the relation between characteristic parameter calculated from sensor signal and tool wear.

**Key Words:** Cutting Dynamics(절삭동역학), Tool Wear(공구마멸), End-Mill Machining(엔드밀가공), Multi-Sensor(복합계측), Chaotic Analysis(카오스 해석)

#### 1. 서론

기존의 절삭공정의 해석이나 모델링을 위한 시도는 실험적인 규명없이 단지 가정에 의한 선형적, 통계적 방법이 대부분이었다. 절삭공정에서 나타나는 현상은 비선형적 특성을 가지며 이러한 현상에 영향을 미치는 여러 가지 인자들이 복잡하게 상호 작용을 한다는 것을 고려할 때 선형이론에 바탕을 둔 해석방법들은 많은 한계를 가질

수 밖에 없다. 통계적인 방법의 경우도 방대한 데이터 베이스와 신뢰할 만큼의 공차를 두어야만 하는 것이 기존의 사실이다. 카오스 이론은 최근에 개발되어 비선형 현상을 해석하고, 모델링하는데 좋은 수단으로 많은 연구가 수행되어오고 있는 학문이다. 이 이론은 통계적인 해석과 결정론적인 해석의 중간적인 위치에서 정성적인 방법으로 현상을 이해하는데 많은 기여를 하고 있다.<sup>(1)</sup> 기존의 해석 방법으로 많은 한계를 가졌던 비선형적인 현상에서 결정

\* 부산대학교 기계기술 연구소/정밀정형 및 금형가공 연구센터  
 \*\* 부산대학교 기계기술연구소  
 \*\*\* 부산대학교 대학원

론적인 카오스거동을 보임을 증명하는 결과가 많이 나오고 있으며 단순한 규칙에서도 복잡한 현상이 발생한다는 결과는 다른 많은 복잡한 현상을 해석하는데 도움을 주고 있다.<sup>(2)</sup> 기존의 절삭현상에서의 연구는 절삭력 모델링에서 비선형항을 포함한 미분방정식이 카오스적인 거동을 보임을 증명하거나<sup>(3)</sup> 이러한 모델링된 식으로부터 절삭조건에 따른 채터링 발생시의 상태 규정에 관한 연구가 진행되었다.<sup>(4)</sup> 또한 절삭공정시의 AE신호가 카오스적이며 공구마멸의 진행에 따라 매립차원(Embedding Dimension)의 값이 증가한다는 연구 결과도 있다.<sup>(5,6)</sup> 그러나 엔드밀 공정에서 실험에 의한 실제 데이터인 절삭력 신호가 카오스적임을 규명하고 이 상태를 정량화하여 공구마멸과의 상관관계를 밝힌 바는 없으며 기초적인 연구도 미비한 실정이다. 엔드밀공정은 절삭기구 자체가 복잡하고 해석하기 어려우며 비선형적인 요소를 많이 가지고 있어 예측에 있어 센서신호의 정량화가 어렵고 신호처리에도 여러 가지 기법을 요한다.<sup>(7)</sup> 또한 공구마멸에 따른 센서신호의 변화를 감지하는데 있어서는 신호레벨의 증감을 이용하거나 스펙트럼분석 등의 연구가 주를 이루며 이는 선형이론에 근거한 것으로 많은 한계를 가지고 있다.<sup>(8-10)</sup>

본 연구에서는 초경 2날 엔드밀을 이용하여 측면가공시의 절삭력 신호가 저차원의 카오스적 거동을 보임을 규명하였다. 공구 마멸의 변화에 따른 절삭력의 동적인 변동을 위상공간에서 끌개를 구성하여 그 차이를 확인하고 정량화하여 값의 변동을 조사하였으며, 두개의 다른 공작기계에서 실험을 수행하여 정성적인 거동의 일치 여부를 조사하여 공구 마멸을 감시 할 수 있는 인자로서 상관차원(Correlation Dimension)값을 제시하였다. AE-RMS 신호도 측정하여 공구 마멸에 따른 특성과 공작기계의 특성파악에 이용하였다.

## 2. 카오스 이론

카오스 이론이 본격적으로 연구되기 시작한 것은 컴퓨터의 발전에 따른 최근의 일로서 초기조건의 민감성의 성질에 의해서 결정론적 동역학계에 긴 시간의 예측할 수 없는 거동을 연구하는 학문이다<sup>(2)</sup>. 이러한 성질때문에 과거 많은 카오스적인 현상은 해석할 수 없거나 잡음등으로 분류되어 왔었다. 하지만 무작위적인 거동과 구별되어 결정론적인 법칙에서 복잡한 현상이 발견된다는 사실과 이를 해석하기 위한 기법의 발전은 비선형동역학 분야에의 응용에 많은 가능성을 주는 것이다.<sup>(1)</sup> 많은 자연현상에서

시계열 신호로부터 카오스적인 거동을 판단하는 기준으로는 리야프노프 지수가 있고 이때 프랙탈 차원을 이용하여 매립차원을 결정지을 수 있다. 또한 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 수렴한다고 볼 수 있는데 시계열 신호에 대해서는 리야프노프 지수  $\lambda$ 는 다음식으로 구할 수 있다.

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

여기서

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

$L'(t_k)$  : 시간  $t_k$  경과후의 거리 ( $t_k = t_{k-1} + \Delta$ )를 계산하기 위한 궤적의 전개 시간(Evolution Time)

$M$  : 전체 수행 횟수

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

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

여기서  $Df(x)$  : 미분행렬

$v$  :  $x$ 점에서의 직교 벡터

$n$  :  $n$ 차 미분차수

단위 시간당 궤적간의 발산율인  $\lambda$ 를 리야프노프 지수라고 하며  $\lambda > 0$ 인 것이 하나라도 존재하게 되면 카오스운동을 의미하며 주기적인 거동에 대해서는 모든  $\lambda < 0$ 인 결과를 보인다.  $\lambda > 0$ 인 경우는 바이퍼케이션(Bifurcation)상태인 경우이다. 따라서, 리야프노프 지수  $\lambda$ 의 값의 크기에 따라 얼마나 카오스적인가 하는 정량적인 척도가 될 수 있다. 지금 현재 널리 알려진 알고리즘은 단일 시계열의 경우만 구할 수 있으며 동역학적 거동

을 충분히 결정지을 수 있는 매립차원과 적절한 시간지연 (Time Delay)을 구해야 하는데 매립차원은 상관 차원의 수렴위치에 의해 구할 수 있다.<sup>(11)</sup>

## 2.2 프랙탈 해석

### 2.2.1 시간 지연을 이용한 상태공간 재구성

이산계에서 카오스를 발견하고 분석하는 가장 중요한 방법중의 하나는 끌개의 재구성이다. 즉, 분석하고자 하는 계의 시간의 변화에 따른 운동상태(Dynamical State)를, 운동변수를 각축으로 하는 위상공간에 각 점들로 대응시킴으로써 계의 궤적(Phase Trajectory)을 파악하는 것이다. 이로써 계의 운동양상이 보이는 기하학적인 특징을 추출해 낼 수 있으며 시스템의 운동을 지배하는 배후의 질서를 가시화 할 수 있다. 또한 분석대상의 상태가 정성적으로 비슷할 경우 관측신호의 파형이 다를 지라도 끌개의 기하학적 모양특성(Topological Property)은 비슷하며 이러한 끌개의 형태로부터 관측대상 상태의 정보를 얻을 수 있다. 시계열 자료로부터 계의 운동양상이 보이는 기하학적인 특징을 추출해 내는 방법으로는 시간 t에서의 상태 벡터  $\xi(t)$ 를 다음 식과 같이 재구성하여 위상공간에 도시하면 된다. 시스템 운동이 불규칙 운동이 아닌 경우 재구성된 위상공간에서 시스템을 지배하는 배후의 숨은 질서를 파악할 수 있다.

$$\xi(t) = (x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (d - 1)\tau)) \quad (3)$$

여기서  $\tau$ 는 t의 정수배인 시간 지연이며, d는 매립 차원이다. 최소의 최적인 매립차원에 이르게 되면 프랙탈 차원은 일정량에 수렴하는 특성을 보인다. 이로써 매립차원을 결정지을 수 있다.<sup>(11)</sup>

### 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, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, D는 프랙탈 차원으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

또한, 일반화된 프랙탈 차원  $D_q$ 는 다음과 같이 정의되어진다.<sup>(12)</sup>

$$D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log(\sum_i P_i^q)}{\log r} \quad (6)$$

여기서 r : 영역의 크기

$P_i$  : i제 영역의 끌개의 척도

위의 차원정의는  $-\infty < q < \infty$ 에 대해 불변적인 전체 스펙트럼을 나타낸다.  $q=0$ 인 경우는 용량차원(Capacity Dimension)이라 하며,  $q=1$ 일 때를 정보차원(Information Dimension),  $q=2$ 일 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  $n_i$ 는 영역의 점의 갯수이며, n은 전체 점의 개수이다. 실제의 해석에서는 차원을 계산하기 위한 데이터의 개수 N은 다음과 같다.

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

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.<sup>(13)</sup>

## 3. 실험 장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

절삭력신호를 얻기 위한 머시닝 센터에서의 실험 장치 개략도는 Fig. 1과 같다. 공구동력계를 공작물의 밑부분에 장착하여 측정하였다. AE센서는 전치 증폭기가 내장되어 있는 센서를 사용하였으며, 공작물의 옆면에 부착하여 신호를 RMS 변환기를 거쳐서 획득하였다. 공구의 마멸을 정확히 측정하기 위해서는 공구의 칩탈시 런아웃(Run-Out)의 변화에 따른 공구 마멸에의 영향을 줄이기 위해서 공구를 가공후 장착한 채 마멸량의 측정을 요한다. 따라서 CCD카메라를 이용하여 영상신호를 모니터와 비디오 프린터를 연결하여 공구마멸측정과 동시에 공구의 상태를 사진으로 프린터하였다. 공구의 2날 각각에 대하여 공구의 끝단에서부터 0mm, 3mm, 5mm, 10mm 부분을 측정하였다.

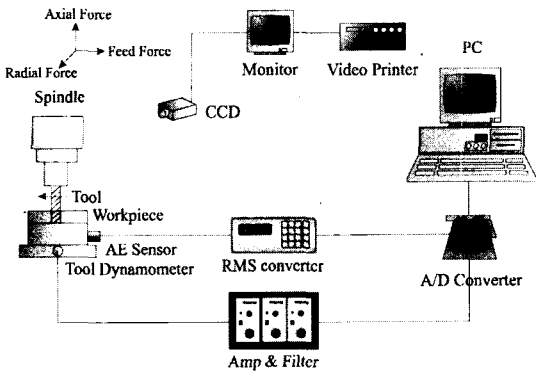


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Set-up

3.2 실험방법

3.2.1 실험조건

본 실험에서 사용된 실험조건은 Table 1과 같다. 공구 동력계는 kistler 9257B를 사용하였으며, 앰프는 kistler 5019A를 사용하였다. 주 실험은 국내의 화천기계 머시닝센터 (HVN-850F0)에서 수행하였고, 몇가지 절삭조건에 대해서 일본의 고속가공기(Makino V-55)에서 수행하여 비교하였다.

3.2.2 실험 및 해석방법

플랫 엔드밀을 사용하여 머시닝센터의 테이블 위에 공구동력계를 장착하여 0.06ms의 샘플링시간으로 0.36초

Table 1 Experimental Conditions

| Item  | Specification   |
|---|---|
| Cutting Process                             | End-Milling Machining   |
| Tool  | Carbide 2 Fluted Flat Endmill   |
| Workpiece                                   | SKD11   |
| Machine Tool                                | Vertical CNC Milling Machine<br>Hwacheon (HVN-850F0)<br>Makino (V-55) |
| Cutting Speed<br>V (m/min)                  | 20, 25, 30, 35  |
| Feed per Tooth<br>F <sub>z</sub> (mm/tooth) | 0.02, 0.03, 0.04  |
| Axial Depth(mm)                             | 10  |
| Radial Depth(mm)                            | 1   |
| Tool Overhang(mm)                           | 36  |
| Cutting Fluid                               | Dry Run   |

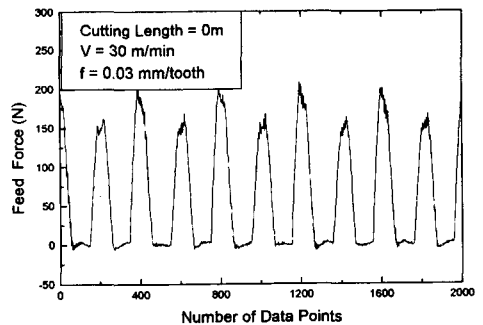
동안 A/D변환기를 거쳐 PC를 통해 획득하였다. 절삭력의 해석은 시간지연 좌표계를 재구성하여 매립차원에 따른 상관 차원의 값을 계산하여 수렴위치를 기준으로 리야프노프 지수를 구하였다. 절삭력의 세분력을 이용하여 포잉카레 절단면을 구성하였으며, 공구 마멸에 따른 끝개의 변화를 프랙탈차원을 계산하여 측정하였다.

Liebovich L. and Toth T.<sup>(5)</sup>의 알고리즘을 이용하여 이러한 끝개의 프랙탈 차원을 계산하였고, 리야프노프 지수는 Alan Wolf의 알고리즘<sup>(6)</sup>을 이용하였다.

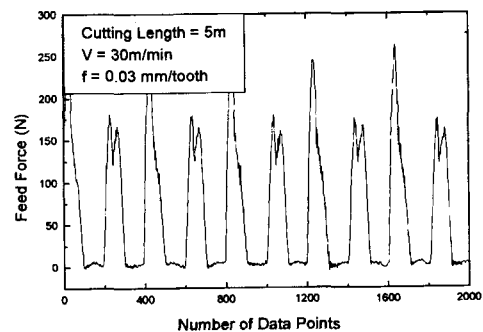
4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭력 신호의 선형적인 해석

Fig. 2는 공구마멸이 진행됨에 따라 이송방향의 절삭력의 변동을 원신호로 비교한 것이다. 거시적으로는 절삭력의 크기가 커졌으며 신호의 형태가 변동한다는 것을 알 수 있다. 이는 공구 마멸이 진행됨에 따라 크기의 변동뿐만 아니라 신호의 국부적인 변화도 일으킨다는 것을 나타내며 절삭상태를 파악하기 위해서는 다른 접근법도 필요



(a) Fresh tool ( $V_{Bmax} = 0$  mm)



(b)  $V_{Bmax} = 0.1$  mm

Fig. 2 Comparison of Feed Force According to Flank Wear

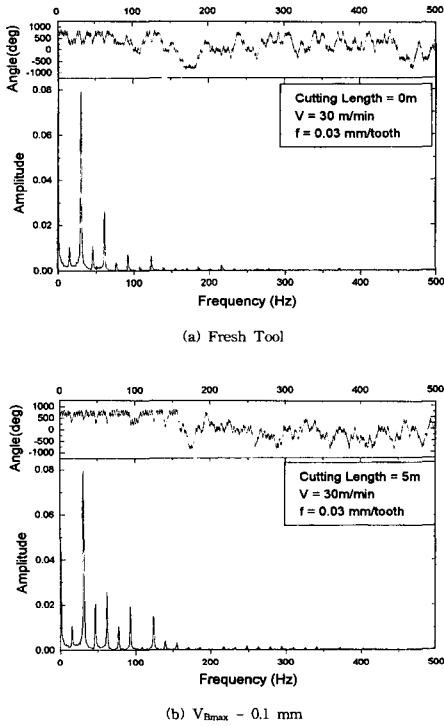


Fig. 3 Results of FFT Analysis for Cutting Force According to Flank Wear

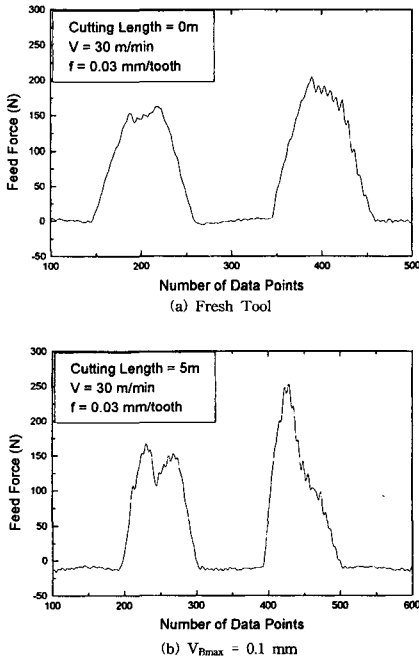


Fig. 4 Local Figure of Cutting Force According to Flank Wear

함을 나타낸다. Fig. 3은 Fig. 2의 절삭력 신호를 주파수 분석한 결과이다. 절삭날 주파수의 하모닉 성분 이외 절삭력의 변동에 의해 47Hz성분의 주파수가 커졌음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 4에서 보여지듯이 날당 신호를 좀 더 확대하여 관찰하면 신호의 국부적인 변동이 심하며 위의 두가지 결과 모두 이러한 현상을 반영하기에는 한계가 많음을 알 수 있다.

이러한 한계는 절삭력 신호가 비선형적인 요소에 영향을 많이 받기때문이며 비선형적인 해석이 수반되어야만 보다 좋은 결과를 도출할 수 있을 것이다.

#### 4. 2 절삭력 신호의 카오스적 거동 규명

##### 4.2.1 절삭력의 리아프노프 지수

절삭상태를 적절하게 나타낼 수 있는 상태공간을 구성하기 위해서는 센서신호의 최적의 매립차원을 결정해야만 한다. Fig. 5는 한 조건에서의 각 절삭력 분력의 매립차원에 따른 상관 차원의 변화를 나타낸 것이다. 매립차원이 증가함에 따라 상관 차원의 값은 매립차원이 4~5 정도에서 수렴함을 알 수 있으며, 잡음의 영향을 고려하면 5이하의 값으로 추측할 수 있다.

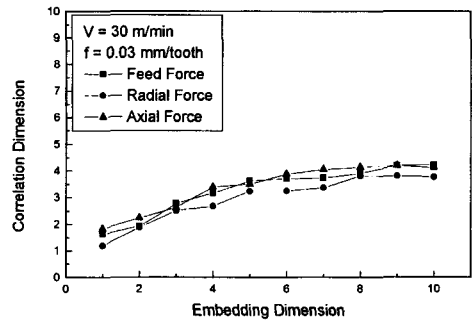


Fig. 5 Relation Between Correlation Dimension and Embedding Dimension

이러한 현상은 실제 실험에 의한 데이터를 해석하였으므로 약간의 차이는 있지만 모든 조건에서 비슷하게 나왔다. 위의 결과를 토대로 매립차원을 4로하여 계산한 리아프노프 지수의 결과를 Table 2에 나타내었다.

리아프노프지수는 모두 양으로 나왔으며, 이는 절삭력의 세분력 모두가 카오스적인 거동임을 나타내며, 일반적으로 알려진 저차원의 카오스신호 값과 비교할 때 작은 값으로 적절한 비선형 모델링을 통하여 절삭력 신호의 단기예측이 가능할 것이라 사료된다.<sup>(11)</sup> 또한, 매립차원이 4라고 하면

Table 2 Range of Lyapunov Exponents for each Cutting Force

| Cutting Force | Lyapunov exponent |
|---------------|-------------------|
| Feed Force    | 0.083 ~ 0.157     |
| Radial Force  | 0.042 ~ 0.116     |
| Axial Force   | 0.091 ~ 0.232     |

절삭상태를 결정하기 위한 상태 변수의 공간차원이 비교적 작은 저차원적인 카오스적 거동을 보임을 나타낸다.<sup>(14)</sup>

4.2.2 시간 지연 좌표계를 이용한 끌개의 재구성

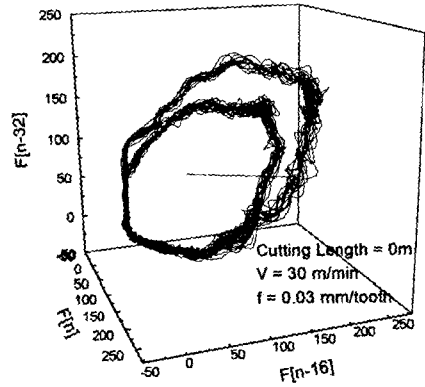
카오스를 발견하고 확인할 수 있는 가장 중요하고 간단한 방법중에는 시간지연 좌표계를 이용해서 끌개의 유무를 확인하는 것이 있다. 4.1절에서 예로 든 절삭력 신호를 시간 지연 좌표계를 사용해서 재구성한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 매립차원이 4~5정도의 값이 나왔기 때문에 가시화할 수 있는 삼차원상에 도식할 경우 위상 겹침이 일어날 수 있지만 두 신호형태의 변화를 명확하게 알 수 있다. 이러한 위상 공간에서의 상태 변화를 프랙탈 차원 값으로 정량화할 수 있으며 미세한 끌개의 변동이라도 프랙탈 차원 값으로 반영된다.<sup>(14)</sup>

4.3 공구 마멸의 형태

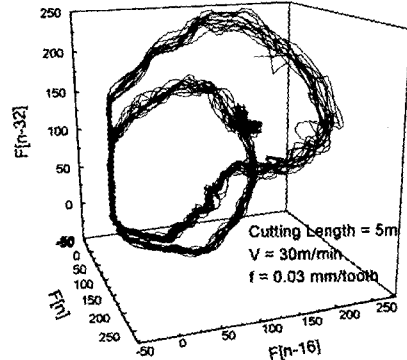
Fig. 7은 비디오 프린터로 찍은 여유면 마멸의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 8은 절삭각이에 따른 여유면 마멸의 변화를 나타낸다. (a)는 한 공구에 대하여 각 부위에 따른 마멸의 거동을 나타내며 (b)는 각 조건에 따른 최대 플랭크 마멸량을 나타낸다. 초기의 급속한 마멸(Minute Chipping)의 진전 이후 점진적인 마멸이 일어나고 있음을 알 수 있다. 다른 공작기계에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

4.4 공구 마멸과 프랙탈 차원의 상관 관계

Fig. 9와 Fig. 10은 두 개의 다른 공작기계에서 동일한 가공조건으로 가공한 결과에서 절삭력의 세분력으로 구성된 공구 마멸에 따른 포잉카레 절단면이다. 상태공간의 변수로서 공구 동력계의 세 분력을 이용하여 구성하였다. 최적의 최소인 매립차원이 4정도이므로 3차원 공간상에서는 위상겹침이 일어날 수 있지만 가시적으로 끌개의 변화가 현연함을 알 수 있으므로 3차원 공간상에서 결과를 도출하였다. Fig. 10은 V55 고속가공기에서 수행한 결과로서, 끌개의 형태가 다르지만 비슷한 패턴을 형

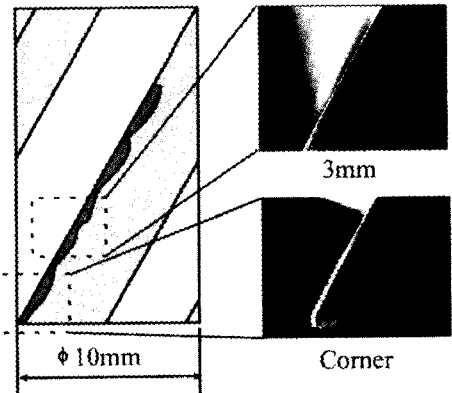


(a) Fresh Tool

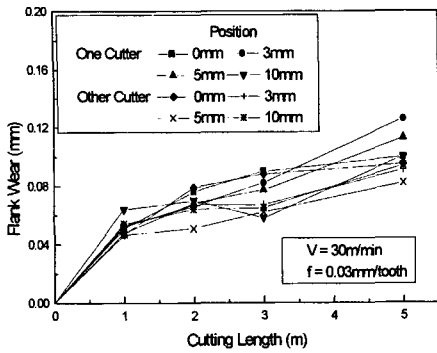


(a)  $V_{Bmax} = 0.1$  mm

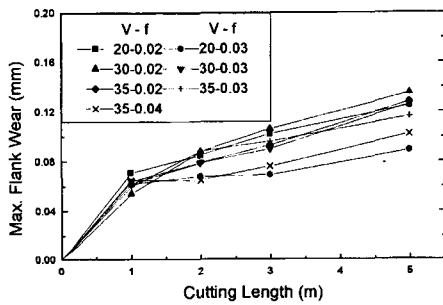
Fig. 6 Attractor by Phase Space Reconstruction of Feed Direction Cutting Force According to Flank Wear using Time-delay Coordinates.



Flank Wear  
Fig. 7 Type of Flank Wear



(a) V=30m/min, f=0.03mm/tooth



(b) Behavior of Flank Wear in Variable Cutting Condition

Fig. 8 Flank Wear According to Cutting Length

사항을 알 수 있다. 두 결과에서 (a)는 새로운 공구에 대해 끌개이며 (b)는 최대 플랭크 마멸량이 0.14mm, 0.12mm인 경우이다. 끌개의 형태가 약간 다른것은 가공 조건의 차이로, V55 고속가공기에서는 절삭시 본 공작 기계의 특성(Air-Spindle)인 공기를 분사시켜 칩을 제거 하였기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 11에 나타난 바와 같이 마멸에 따른 AE-RMS의 변동을 보면 다른 영향이 많은 것을 알 수 있는데 칩의 영향인 것으로 사료된다. 즉 Fig. 11의 (b)의 경우 V55 고속가공기에서 수행한 결과이며 마멸에 따라 최대 AE-RMS 값의 점진적인 증가를 볼 수 있으나 주 실험을 수행한 공작기계에서의 결과에서는 마멸에 따른 특성을 볼 수 없다.

Fig. 12에는 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 구성된 포잉카려 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.

칩에 의한 요인이 적은 것으로 사료되는 Makino-V55

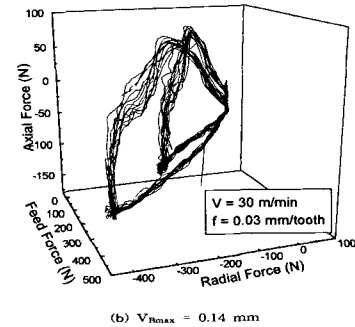
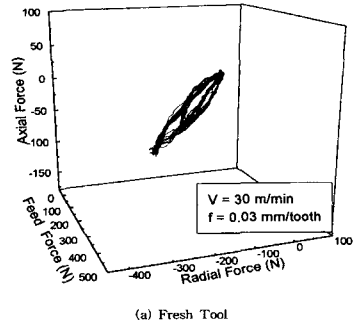


Fig. 9 Poincare Section Plot According to Flank Wear in HVN-850F0 Machine Tool

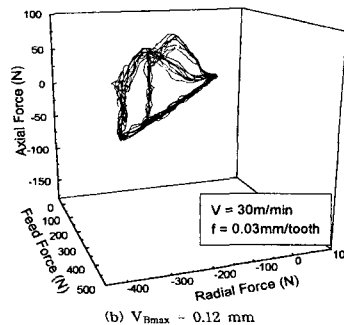
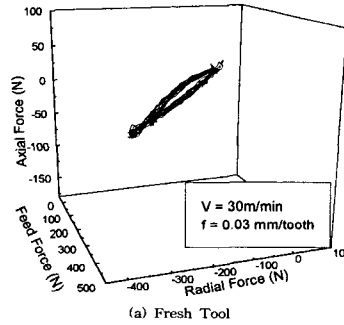


Fig. 10 Poincare Section Plot According to Flank Wear in V-55 Machine Tool

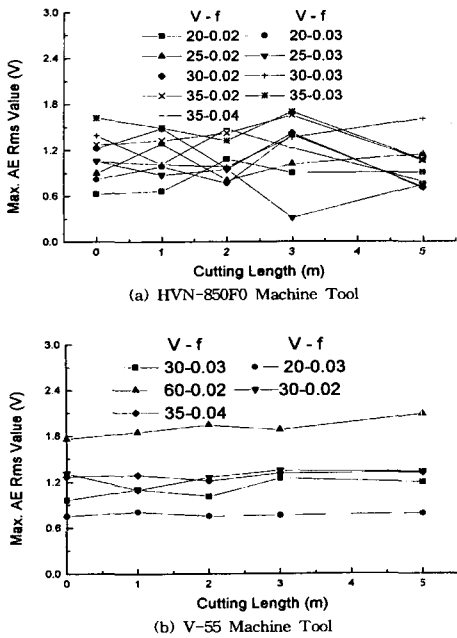


Fig. 11 Comparison of Maximum AE RMS Value for Other Machine Tool According to Cutting Length

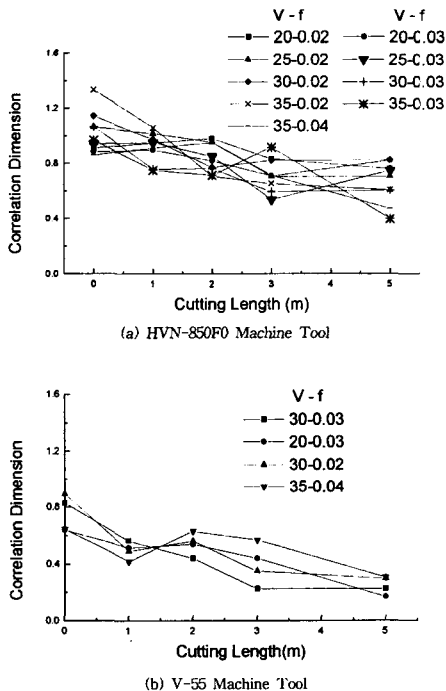


Fig. 12 Comparison of Correlation Dimension for other Machine Tool According to Cutting Length

에서 수행한 결과인 Fig. 9(b)에서 보면 공구 마멸에 따라 그 차이가 확연함을 알 수 있다.

절삭 초기에는 구성인선과 칩핑이 발생하였으므로 절삭 유 등을 사용하여 정상 마멸이 일어날 때에는 보다 가시적인 결과가 나올 것으로 사료된다. 즉, 이러한 상태 변화에 의한 프랙탈 차원의 변동은 공구 마멸에만 국한되어 영향을 받지 않고 다른 인자의 영향도 받을 수 있다는 것이며 적절한 신호처리에 의한 잡음의 제거, 칩핑 등에 의한 돌발적인 신호 패턴의 분류 등을 통하여 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 이상의 결과에서 절삭력의 세분력을 이용한 상관차원은 공구마멸량과 연관지을 수 있을 것으로 기대되며 피크값, 주파수 변동 등 선형적인 처리 결과와 함께 비선형 감시 틀인 신경회로망 등을 구성할 때 유용한 입력인자가 될 것으로 사료된다.

## 5. 결론

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) 시간 지연 좌표계를 사용하여 위상공간에서 재구성한 결과 끌개의 존재를 확인하였으며 공구 마멸량에 따라 형태의 변화를 확인하였다.
- 3) 절삭력의 세분력을 이용하여 구성한 포잉카레 절단면의 상관차원의 값은 플랭크 마멸의 증가에 따라 감소한다.
- 4) 정상마멸 거동에서 최대 AE-RMS값은 서서히 증가하는 경향을 보인다.
- 5) 상관 차원은 공구 마멸을 감시에 유용한 인자로서 새로이 제안하였다.

## 참고 문헌

1. Marzochi, W., Mulargia, F., "Detecting Low-dimensional Chaos in Time Series of Finite Length Generated from Discrete Parameter Processes", Physica D, Vol. 90, pp.31-39, 1996.



2. Kellert, S. H., "In the Wake of Chaos : Unpredictable Order in Dynamical System", the University of Chicago Press, pp.21-52, 1993.
3. Igor Grabec, "Chaotic Dynamics of the Cutting Process", Int. M.T.M. Vol. 28, No. 1, pp.19-32, 1988.
4. Lin, J. S., Weng, C. I., "Nonlinear Dynamics of the Cutting Process", Int. J. Mech. Sci. Vol. 33, No. 8, pp.645-657, 1991.
5. Igor Grabec, "Prediction of Chaotic AE Signals by a Neural Network", The Japanese Society for NDI, pp.17-24, 1992.
6. Danilo Zupan i , Igor Grabec, "Identification of a Manufacturing Process by AE Analysis", The Japanese Society for NDI, pp.377-384, 1992.
7. Di Yan, El-Wardany, T. I., Elbestawi, M. A., "A Multi-Sensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling", Int. MTM, Vol. 35 No. 3, pp.383-398, 1995.
8. Oraby, S. E., Hayhurst, D. R., "Development of Models for Tool Wear Force Relationship in Metal Cutting", Int. J. Mech. Sci 33(2), pp.125-138, 1991.
9. Uehara, K., Kiyosawa, F. and Takeshita, H., "Automatic Tool Wear Monitoring in NC Turning", Ann. CIRP 28, pp.39-42, 1979.
10. Lister, P. M. and Barrow, G., "Tool Condition Monitoring System", Proc. 26th Int. MTDR Conf., pp.271-288, 1986.
11. Wolf, A., Swift, J. B., "Determining Lyapunov exponents from a time series", Physica D, pp.286-308, Vol. 16, 1985.
12. Fernando J. Pineda, "Estimating Generalized Dimensions and Choosing Time Delays : A Fast Algorithm", Time Series Prediction : Forecasting the Furture and Understanding the Past, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Comparative Time Series Analysis held in Santa Fe, New Mexico, May 14-17, pp.367-385, 1992.
13. Liebovitch, L. S. Toth, T., "A Fast Algorithm to Determine Fractal Dimension by Box Counting", Phys. Lett. A, Vol. 141, No. 8, pp.386-390, 1989.
14. Abarbanel, D. I., "Analysis of Observed Chaotic Data", Springer-Verlag, pp. 13-21, 1996.