

## 비철금속의 절삭성 평가를 위한 어트랙터 시뮬레이터의 구축

고준빈\*, 윤인식\*\*

### Construction of Attractor Simulator for Cutting Characteristics Evaluation of Non-Ferrous Metals

Jun Bin Go\*, In Sik Yun\*\*

#### ABSTRACT

This study proposes the construction of attractor simulator for cutting characteristics evaluation of non-ferrous metals. Also this paper aims to find the optimal cutting conditions of diamond turning machine by measuring surface form and roughness to perform the cutting experiment of non-ferrous metals, which are aluminum, with diamond tool. As well, according to change cutting conditions such as feed rate, cutting force and surface roughness are measured by tool dynamometer. Trajectory changes in the attractor indicated a substantial difference in fractal characteristics.

Constructed attractor in this study can be used for cutting characteristics evaluation of non-ferrous metals

**Key Words** : Attractor(어트랙터), Fractal dimension(프랙탈 차원), diamond turning machine(초정밀가공기), non-ferrous metal(비철금속), Time series data(시계열데이터)

#### 1. 서론

최근에 정밀기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련 기기를 비롯한 영상, 정보 및 항공 우주 산업 등의 급속한 발달로 인하여 그 구성 부품들의 고정도 가공에 대한 필요성이 증대되고 있다.<sup>[1]</sup> 초정밀 절삭 가공은 1962년 미국의 Union carbide사가 다이아몬드(diamond) 절삭가공기술을 계획하고 프랑스의 Du pont사와 협동으로 고정도 기계를 개발하여 1966년 M.T.D.R.에 발표한 것이 최초이다.<sup>[2]</sup> CIRP에서 1983년에 Taniguchi<sup>[3]</sup>가 제창한 후 1984년에 Loewen<sup>[4]</sup> 1987년에는 McKeow7n<sup>[5]</sup>이 각각 의견을

발표한 바 있으며 초정밀 공학의 중요성을 제기하였다. 우리나라는 1990년 초부터 이 분야에 관심을 갖기 시작하여<sup>[6,7]</sup> 산업현장에서 초정밀절삭 가공기술에 의해 생산되어지는 제품으로는 VCR드럼, 레이저빔(laser beam), 프린터의 폴리곤 미러(polygon), 자기디스크, 복사기 드럼, 광학용품 등으로 이들 부품의 재료로서는 전자 산업과 정보 산업의 발달로 인하여 고정밀도가 필요하게 된 알루미늄, 구리, 무전해 니켈 등의 비철금속 및 플라스틱, 실리콘, 게르마늄 등의 비금속 등 대부분 연질재료가 사용되고 있으며, 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정도를 내기가 어렵다.

☞ 2002년 7월 12일 접수  
\* 한밭대학교 기계설계공학과  
\*\* 경기공업대학 메카트로닉스과

이와 같은 단점들을 해소하기 위해 최근에는 고정도, 고정성을 지닌 초정밀 가공기와 내마모성이 큰 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀절삭 가공기술이 급속히 발전하고 있다.<sup>[8]</sup> 앞으로 사용범위가 점차 확대되고 더욱 엄격해지는 가공정도를 만족시키기 위하여 다이아몬드 공구를 이용한 비철금속의 초정밀절삭 과정의 해석을 위한 체계적인 연구가 요망된다.

따라서, 본 연구에서는 비철금속인 알루미늄합금을 초정밀가공기로 절삭하여, 초정밀 절삭조건에 따른 절삭특성을 분석하기 위하여 2차원과 3차원 어트랙터 시뮬레이터를 구축하고자 하였다. 가공시 획득한 주분력 시계열 데이터로부터 그 특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 위상공간상의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원을 추출하여 절삭성을 평가 할 새로운 방법에 대하여 제시하고자 한다.

## 2. 어트랙터 재구성 이론

해석 대상 시계열 데이터에 대한 어트랙터 시뮬레이터의 구축을<sup>[9]-[10]</sup> 위해서는 어트랙터의 재구성과 프랙탈 차원을 구하는 것이 필요하다. 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 프랙탈 외적 구조를 평가하게 된다.<sup>[11]-[12]</sup> 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상공간으로 표현하는 것을 말하며, 어트랙터 재구성 방법은 Takens<sup>[13]</sup>의 시간지연 방법을 사용하였다. 즉,  $i$ 개의 데이터가 주어졌을 때, 식(1)과 같이 주어지는  $m$  차원 벡터  $\bar{X}(i)$ 를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로써 어트랙터가 재구성된다.

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}(1) &= [x(1), x(1+\tau), \dots, x(1+(m-1)\tau)] \\ \bar{X}(2) &= [x(2), x(2+\tau), \dots, x(2+(m-1)\tau)] \\ &\vdots \\ \bar{X}(i) &= [x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서  $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며,  $m$ 은 임베딩 차원(embedding dimension: 해석대상의 시스

템차원)을,  $\tau$ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

시간 지연  $\tau$ 를 이용한 어트랙터 상의 점은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X}(n) = [x(n), x(n+\tau), \dots, x(n+(m-1)\tau)] \quad (2)$$

기준점  $\hat{X}(n)$  과 최근접 이웃점  $\hat{X}(q)$ 는 식(3)과 같이 설정한다.

$$\hat{X}(q) = [x(q), x(q+\tau), \dots, x(q+(m-1)\tau)] \quad (3)$$

기준점  $\hat{X}(n)$  과 최근접 이웃점  $\hat{X}(q)$  사이의 유클리디안 거리는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_m(n) &= \|\hat{X}(n) - \hat{X}(q)\| \\ &= \sqrt{\sum_{k=0}^{m-1} \{x(n+k\tau) - x(q+k\tau)\}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $m$ 은 임베딩 차원,  $\tau$ 는 시간지연이다. 식(5)는 임베딩 차원을 1차원 높은 상태를 나타낸다.

$$R_{m+1}(n) = \sqrt{R_m^2(n) + (x(n+m\tau) - x(q+m\tau))^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{R_{m+1}^2(n) - R_m^2(n)}{R_m^2(n)}} &= \\ \frac{|x(n+m\tau) - x(q+m\tau)|}{R_m(n)} &> R_{tot} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $R_{tot}$ 는 FNN(임의의 임베딩차원에서는 두 어트랙터 상의 점이 근접점이지만 임베딩차원이 증가하면 근접점이 되지 않는 점)에 대한 평가 임계 값이다.

시간지연은 Liebert와 Schuster<sup>[14]</sup>가 제안한 상관적분 방법을 이용하여 결정하였으며, 이는 시간지연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부 최소점(local minima)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다.

임베딩차원 및 시간 지연을 계산함으로써 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원을 추출하여 시계열 데이터의 기하학적 특성을 평가 할 수 있게 된다. 프랙탈 차원은 정수 값이 아닌 실수로

표현되며 신호의 성질과 변화의 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프랙탈 차원을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procaccia<sup>(15)</sup>가 제안한 식(7)을 이용한 상관적분법을 사용하였다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(r - |\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|) \quad (7)$$

여기서,  $\theta$ 는 계단함수(step function)이며,  $\bar{X}(i)$ 와  $\bar{X}(j)$ 는  $i$ 와  $j$ 번째 어트랙터를 구성하는 점이다. 또한,  $N$ 은 데이터의 수,  $r$ 은 전체원상의 반지름, 그리고  $|\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|$ 는 두 점사이의 유클리디안 거리를 나타낸다.

또한  $\theta(t)$ 의 조건으로는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (8)$$

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이  $r$ 인 구를 그리고 구 내부점의 수를 구하는 과정을 어트랙터상의 각 점에서 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다.

어트랙터상의 특성이 결정되는 것으로부터 식(9)와 같은  $\log_2 r$  대  $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙탈 차원( $v$ )으로 나타낸다.

$$v = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (9)$$

### 3. 실험시스템의 구성

선삭가공시 절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험시스템은 Fig. 1과 같으며, 초정밀 가공기(DTM)에 공구동력계를 장착 할 수 있도록 지그(Jig)를 설계 제작하여 부착하였다. 실험은 단결정 Diamond 공구로 알루미늄을 단면절삭방법으로 절

삭실험을 실시하였다. DTM에 설치된 압전형 공구동력계(Kistler 9257B)를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호는 증폭한 후 A/D변환기를 통하여 PC로 전송하여 데이터 처리하였으며, Fig. 2는 초정밀가공시 절삭력 측정 실험을 나타내는 사진이다. 초정밀 가공기 자체의 특성파악을 위하여 가공을 하지 않는 상태에서 주축회전수에 따른 공구동력계의 신호를 측정하고, 1500rpm부근에서 안정적인 경향을 보여서 이송에 대한 절삭력 측정을 1500rpm에서 실시하였다. 회전수에 따른 비철금속의 표면거칠기를 측정하고, 이송속도 변화에 대한 알루미늄의 절삭력을 분석하였으며, 절삭가공 후 절삭 조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 WYKO사의 비접촉식 표면조도 측정기인 NT2000으로 측정하였다.

본 실험은 단결정 Diamond 공구로 가공이 가능한  $\phi 40 \times 20$  크기의 알루미늄 7075를 사용하였다.

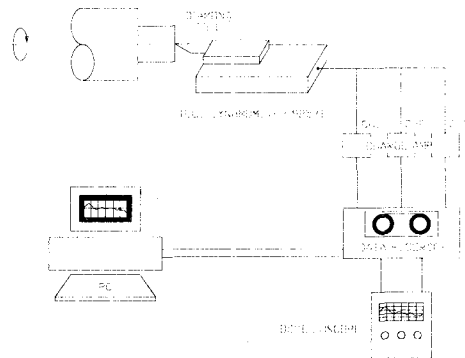


Fig. 1 Experimental device of setup of the DTM

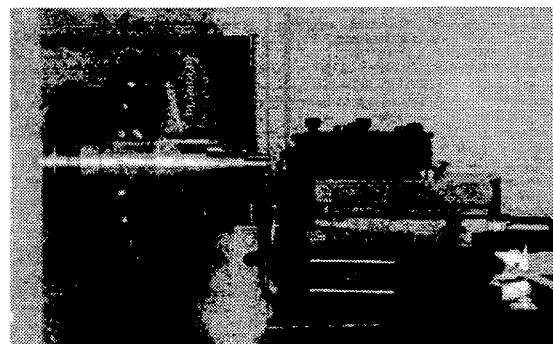


Fig. 2 Tool Dynamometer

실험에 사용된 공구재료는 천연다이아몬드이며, 공구의 기하학적 형상 및 크기는 경사각 0°, 여유각 10°와 선단반경 2mm의 공구를 사용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 알루미늄합금의 시뮬레이션

초정밀가공기를 이용한 알루미늄합금의 최적조건을 찾기 위하여 주축회전수와 절삭깊이를 일정하게 하고 이송속도 변화에 따른 초정밀가공시 발생하는 절삭력과 표면거칠기 특성을 고찰하였다. 주축회전수와 절삭깊이는 초정밀가공에서 주로 사용하고 있는 회전수 1500 rpm, 절삭깊이 10 μm의 가공조건을 이용하였다. Fig. 3은 이송속도변화에 따른 절삭력의 측정 결과를 나타낸다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송속도가 빠를수록 절삭력이 크게 나타나는데, 이는 이송이 클수록 절삭면적이 증가하기 때문이다. 각 분력에 대한 평균값은 주분력 0.51N, 배분력 0.43N, 이송분력 0.37N으로 나타나고 있다. 이송속도증가에 따른 절삭력의 증가율은 분력에 따라 약간의 기울기 차이는 있으나 이송속도가 2.5 mm/min 이상에서 비례적으로 증가하고 있다.

Fig. 4는 주축속도와 절삭깊이를 일정하게 하고 이송속도 변화에 따른 표면거칠기 결과를 나타낸다. 이송이 커짐에 따라 표면거칠기가 커지게 되는데, 이는 절삭면적의 증가와 재질에 따른 조직내부에 함유된 불순물의 량에 따라 증가되는 것으로 사료된다. 본 실험을 통하여 주축회전수 1500 rpm, 이송 2.5 mm/min, 절삭깊이 10 μm에서 9 nmRa의 표면

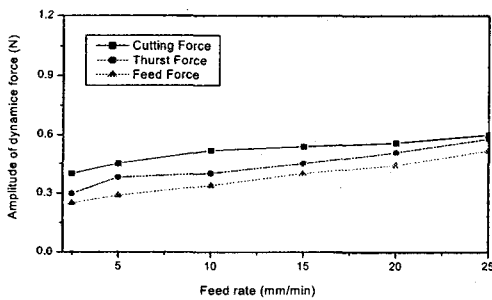


Fig. 3 Dynamic cutting force of Al-alloy according to feed rate(Spindle rotational speed : 1500rpm, Depth of cut : 10μm)

거칠기를 얻을 수 있었다.

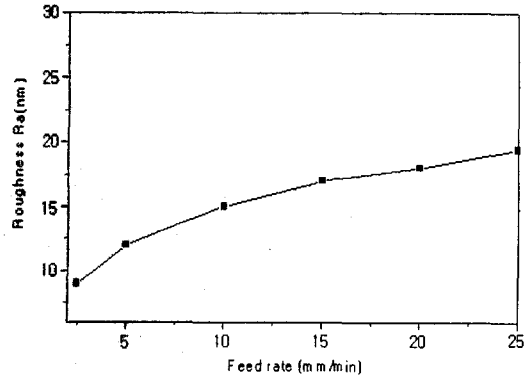


Fig. 4 Roughness(Ra: nm) corresponding of Al alloy to feed rate (Spindle rotational speed: 1500rpm, Depth of cut : 10μm)

##### 4.2 어트랙터 시뮬레이터의 구축 및 평가

어트랙터 시뮬레이터의 구축을 위하여 로렌츠 어트랙터 모델을 도입하였으며, 이에 대한 기존의 결과들과 비교를 하면서 본 논문에서 프로그래밍화한 어트랙터 시뮬레이터를 검증하였다. 프로그램은 Matlab 버전 4.2c1이상에서 시뮬레이션할 수 있도록 Matlab으로 프로그래밍하였으며, 획득 데이터에 대하여 최대 20,000개까지 처리할 수 있도록 하였다. 데이터의 인터페이스는 로딩시킨 데이터 파일명(확장자명 제외), 대상 데이터의 시작 점, 대상 데이터의 전체 길이, 시간지연, 플로팅 형식(점 또는 선)의 순서로 하여 어트랙터를 구성할 수 있도록 하였다. 확장 카오스 시뮬레이터 구축을 위한 샘플로 로렌츠 어트랙터를 고려하면, 이것은 외부 입력이 없는 3자유도의 자율계로써 운동방정식(비선형 진동)은 다음의 식(10), (11), (12)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = F_1(x, y, z) = 10(x - y) \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dt} = F_2(x, y, z) = -y + (28 - z)x \quad (11)$$

$$\frac{dz}{dt} = F_3(x, y, z) = -\frac{8}{3}z + xy \quad (12)$$

위의 방정식들로부터 해의 데이터를 얻어 그

플로팅하면 Fig. 5, 6과 같은 로렌츠 어트랙터를 얻을 수 있다.

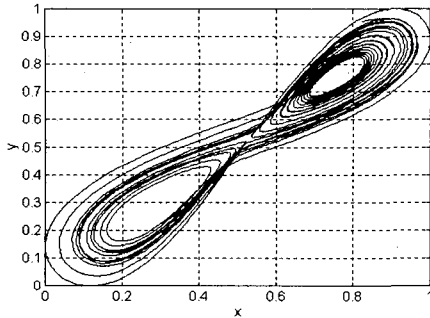


Fig. 5 Two dimensional attractor

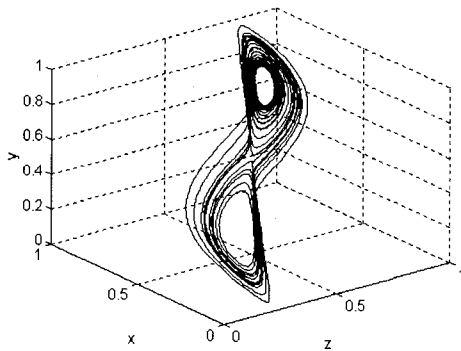


Fig. 6 Three dimensional attractor

Fig. 5는 로렌츠 어트랙터의 2차원적 구조, Fig. 6은 로렌츠 어트랙터의 3차원적 구조를 나타낸다.

본 논문에서는 이상에서 구축한 어트랙터 시뮬레이터를 절삭가공시에 주요인자로 작용하는 주분력의 특성평가에 적용하였다.

알루미늄에 대한 특수가공시 관여하는 주요인자인 주분력과 이에 대한 절삭특성에 대하여 어트랙터 해석을 하고자 하였으며, Fig. 7은 주분력에 대한 시계열 데이터(1 포인트당 0.03초 샘플링 : 총 3400)를 나타낸다.

Fig. 8은 획득한 시계열에 대한 2차원적 어트랙터 재구성을 나타낸다. 횡축은 상대힘(절삭력에 대한 데이터 플로팅), 종축은 상대힘과 시간지연을 인자로 하며, 밖에서 안으로 휘돌아 가는 형상을 나

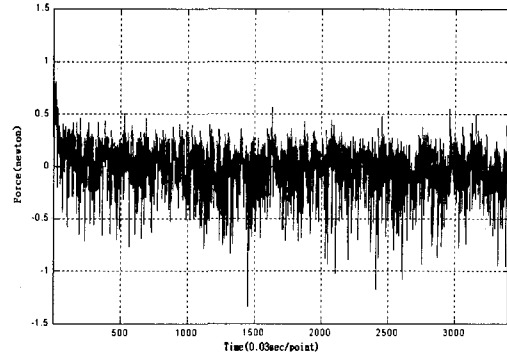


Fig. 7 Time series data in cutting force

타내고 있다. 어트랙터 재구성에 관계되는 시간지연과 임베딩차원은 어트랙터 시뮬레이터에 획득 데이터를 입력하면 자동으로 설정되도록 하였다.

정밀 절삭에 대한 특성을 어트랙터에 재구성하게 되면, 어트랙터 상의 운동은 추상적이지만 실제계의 운동을 알 수 있게 하는데 어트랙터의 형태를 기준으로 하여 루프는 시스템의 주기성을, 꼬임은 변화를, 빈 공간은 물리적으로 불가능한 상태를 나타낸다.

전체 4000샘플 중에 결함 신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3,400샘플씩을 적용하였으며, 2차원과 3차원의 두가지 경우가 모두 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 변화를 동반하면서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 알루미늄의 절삭에 대한 궤적특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 시계열 데이터에서는 10개 정도의 링잉(ringing:진동형의 파형)이 나타났으나, 2차원과 3차원 어트랙터를 재구성하였을 경우의 궤적은 무차원화한 최대값을 기준으로 좌측 하단과 우측상단에 대부분이 나타났다.

또한 2개 이상의 궤적에 대해서는 심한 변화를 동반하며, 안쪽으로 휘돌아 들어가는 형상을 나타내고 있다.

2차원 어트랙터는 대상 데이터의 고유 특징을 나타내어 주는 것은 사실이나 어트랙터의 형상을 가장 저차원으로 보여 주게 되며, 따라서 어트랙터의 차원을 높여 고찰하는 것이 필요하다.

Fig. 9와 같이 구성한 3차원 어트랙터에 있어서 2차원과는 다른 형상을 나타내고 있으며, 이러한 형상특징은 2차원 어트랙터에 대한 평가만으로 부

족한 부분을 한차원 높게 해석 및 평가를 할 수 있게 된다.

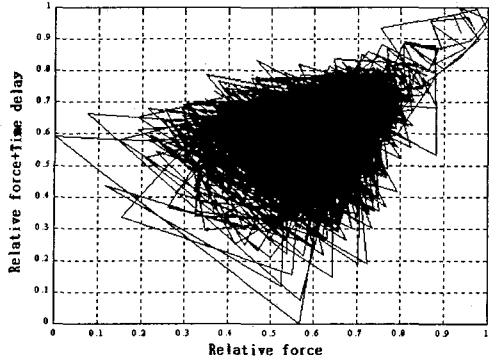


Fig. 8 Two dimensional attractor (cutting force)

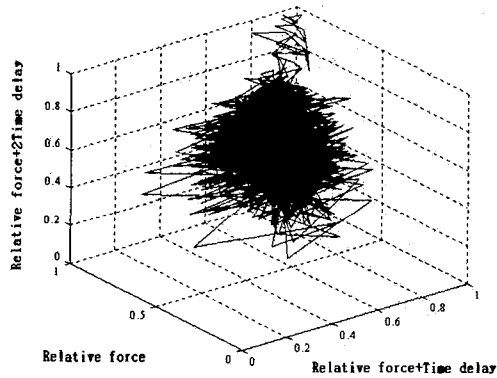


Fig. 9 Three dimensional attractor (cutting force)

재구성된 어트랙터의 기하학적 형상은 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 데이터의 특성 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라지게 된다. Fig. 10에서 어트랙터의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원은 2.087의 값으로 나타났으며, 이는 알루미늄의 절삭 가공 시에 어트랙터의 기하학적 특성과 절삭특성에 대한 상관관계를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 2.087은 알루미늄의 적합 절삭을 나타내는 프랙탈 차원 기준이 되며, 이로부터 알루미늄의 절삭성을 평가할 수 있다.

따라서 이러한 어트랙터의 특징을 이용함으로써 알루미늄 절삭 시에 실시간 데이터의 획득으로부터 절삭성에 대한 상태를 정량적으로 평가하는 것

이 가능하다.

본 논문에서는 알루미늄의 절삭성을 평가하는데 있어서 획득한 주분력 시계열 데이터를 이용하여 어트랙터 특징 추출에 의한 정량적이고도 정밀도 높은 해석을 하고자 하였다.

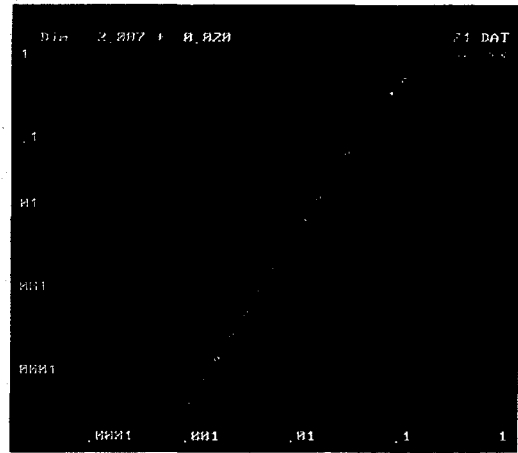


Fig. 10 Fractal dimension

어트랙터 해석은 저자들이 카오스 이론 중에 포함되어 있는 프랙탈 차원 평가 부분을 위상 공간상의 기하학적 구조와 형상 분포도로 확장시킨 분야로 여러 공학 분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다. 따라서 현재의 어트랙터 이론이 갖는 정성적 부분인 어트랙터의 내부를 고차원으로 해석할 수 있는 포앙카레 맵과 같은 초공간 해석에 대한 연구와 임베딩 차원, 시간 지연에 관계되는 파라미터 설정의 최적화 등에 대한 부분이 지속적으로 연구되어 보완된다면, 공학 해석의 분야에 있어서 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 초정밀가공에서 비철금속인 알루미늄의 절삭력 실험으로 가공에 미치는 영향을 파악하기 위하여 최근 데이터 해석분야에서 각광을 받는 어트랙터 시뮬레이터를 구축하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 2차원과 3차원 어트랙터를 재구성하여 이에

대한 궤적변화로부터 알미늄의 절삭성을 평가하는 최초의 어트랙터 시뮬레이터를 구축하였다.

- 2) 초정밀가공에서 이송속도 변화에 대한 절삭력 주분력, 배분력, 이송분력의 평균값은 0.51N, 0.37N으로 나타나는 것을 알 수 있었다.
- 3) 천연 다이아몬드공구를 이용한 초정밀가공시 주축 회전수 1500 rpm, 절삭깊이 10 $\mu$ m, 이송속도 2.5 mm/min 에서 9 nmRa의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- 4) 구축한 어트랙터 시뮬레이터로 알미늄의 주분력을 형상화한 어트랙터 궤적에 대한 고유특성을 나타내는 프랙탈차원값으로 2.087을 제시하였다.

#### 참고문헌

1. 이후상, "초정밀 절삭가공기술," 기계와 재료, 제 2권, 제3호, pp. 82-94, 1990.
2. L.G.Whitten, T.G.Lewis, "Machining and Measurement to Submicron Tolerance," Proc. M.T.D.R., Pergamon Press, pp. 491, 1966.
3. N. Taniguchi, "Current Status in and Future Trends of. Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing," Annals of the CIRP. Vol. 32, No. 2, pp. 573-582, 1983.
4. E.G.Loewen. "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 413-415, 1984.
5. P.A.Mckeown, "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future," Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 2, pp. 495-501, 1987.
6. 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al 합금의 경면절삭에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1515-1522, 1990.
7. 이경호, 윤영식, 이상조. "다결정 다이아몬드 공구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si함량의 영향," 한국정밀공학회지, 제12권, 제6호, pp. 20-26, 1995.
8. 김동원, "기계공작법," 청문각, 1986.
9. 이 원, 윤인식, 정의섭, 유영철, "신경회로망을 이용한 초음파 에코의 예측 및 평가," 대한기계학회 논문집, 제21권 제4호, pp. 586- 595, 1997.
10. 이 원, 윤인식, "산업체 적용을 위 초음파검사 기술 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 14권 제8호, pp. 49-56, 1997.
11. 이 원, 윤인식, 이병채, "카오스 특징추출에 의한 용접 결함의 초음파 형상 인식," 한국정밀공학회지, 제15권, 제6호, pp. 167-174, 1998.
12. 이 원, 윤인식, "초음파와 신경망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함검출 분류 최적화," 대한용접학회지, 제16권 제3호, pp. 192-201, 1998.
13. F.Takens, "Dynamical Systems and Turbulence," Lecture Notes in Mathematics, Vol. 898, pp. 266, 1981.
14. W.Liebert and H. G. Schuster, "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series," Physics Letters A, Vol. 142, pp. 107-11, 1989.
15. P. Grassberger and I. Procaccia, Characterization of Attractors," Physics Letters A, Vol. 50, No. 5, pp. 346-349, 1983.