

금속의 절삭성 평가를 위한 2-3차원 어트랙터 시스템의 구축

윤인식*, 이종대⁺

(논문접수일 2004. 11. 15, 심사완료일 2005. 1. 11)

Construction of 2-3 Dimensional Attractor System for Cutting Characteristics Evaluation of Metals

In-Sik Yun*, Jong-Dae Lee⁺

Abstract

This study proposes the construction of 2-3 dimensional attractor system for cutting characteristics evaluation of 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 metals, which are aluminum, with diamond tool. As well, according to change cutting conditions such as feed rate, using diamond turning machine to perform cutting processing, by measuring cutting force and surface roughness and according to cutting conditions the aluminum about cutting properties. Trajectory changes in the attractor indicated a substantial difference in attractor characteristics. Constructed 2-3 dimensional attractor system in this study can be used for cutting characteristics evaluation of metals.

Key Words : Attractor System(어트랙터 시스템), Embedding Dimension(임베딩 차원), Time Delay(시간지연), Diamond Turning Machine(다이아몬드 가공기), Metal(금속), Time Series(시계열)

1. 서론

최근 초정밀 절삭가공에 대한 산업적 요구와 관심이 높아지고 있다. 특히 산업에서 고부가가치를 할 수 있는 가공 분야에 있어서는 초정밀 절삭가공에 대한 고도의 기술이 요구되고 있는 실정이며, 비구면 초정밀절삭, 광학소자의 초정밀 절삭 등의 분야에서는 초정밀 절삭에 대한 가공기

술은 필수적이라 할 수 있다. 또한 산업의 연관성에 있어서도 정밀기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련 기기를 비롯한 영상, 정보 및 항공 우주 산업 등의 구성 부품들에 고정밀 가공의 중요성이 증대되고 있다. 초정밀 가공기술은 기존의 가공 범위와 다른 초소형, 초정밀 부품을 그 가공의 대상으로 하고 있으므로 기존의 장비가 아닌 새로운 개념의 장비 및 급형, 가공 재료, 청정 환경 등을 요구하기도 한다.

* 경기공업대학 메카트로닉스과 (jongdae@kinst.ac.kr)
주소 : 429-792 경기도 시흥시 정왕동 시화공단 2121-3
+ 경기공업대학 정밀기계시스템과

우리나라의 경우 전기, 전자, 통신과 관련된 초소형, 초정밀 부품의 경우, 생산 기술의 부족으로 대부분을 미국, 일본 등 외국에서 수입하고 있는 실정인데, 마이크로 가공 기술에 관하여 더 활발한 연구가 이루어져서, 생산 기술의 자립과 함께 초소형, 초정밀 부품의 수입대체 및 수출을 통한 국가 경쟁력의 확보가 필요하다. 이러한 초정밀 가공을 실현하기 위해서 초정밀급의 공작기계 기술이 필요하며, 최근 초정밀 공작기계의 개발로 인해서 의료분야, 정보 통신분야 등 다양한 분야에서 획기적인 기술혁신이 이루어지고 있다.

초정밀 절삭가공은 1962년 미국의 Union carbide사가 다이아몬드(diamond) 절삭가공기술을 계획하고 프랑스의 Dupont사와 협동으로 고정도 기계를 개발하여 1966년 M.T.-D.R.에 발표한 것이 최초이다⁽¹⁾. CIRP에서 1983년에 Taniguchi⁽²⁾가 제창한 후, 1984년에 Loewen⁽³⁾, 1987년에는 McKeon⁽⁴⁾이 각각 의견을 발표한 바 있으며, 초정밀 공학의 중요성을 제기하였다. 우리나라는 1990년 초부터 초정밀 절삭 분야에 관심을 갖기 시작하여^(5,6) 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 정밀도를 내기가 어렵다. 이와 같은 단점들을 해소하기 위해 최근에는 고정밀도, 고 강성을 지닌 초정밀 가공기와 내마모성이 큰 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀절삭 가공 기술이 급속히 발전하고 있다. 앞으로 사용범위가 점차 확대되고 더욱 엄격해지는 가공정도를 만족시키기 위하여 다이아몬드 공구를 이용한 비철금속의 초정밀절삭 과정의 해석을 위한 체계적인 연구가 요망된다.

따라서, 본 연구에서는 금속 중에 알루미늄합금을 대상으로 초정밀가공기로 절삭하여, 초정밀 절삭조건에 따른 절삭 특성을 분석하기 위하여 Matlab을 이용한 2-3차원 어트랙터 시뮬레이터를 구축하고자 하였다^(7,8). 이를 위하여 Matlab 상에서 어트랙터의 2차원 시뮬레이터와 3차원 시뮬레이터용 시스템을 개발하고, 여기에 알루미늄 가공시 획득한 주분력 시계열 데이터로부터 절삭특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 Matlab상에서 기하학적 구조를 나타내는 어트랙터 구조 등의 결과로부터 절삭성을 평가 할 수 새로운 방법^(9,10)에 대하여 제시하고자 한다.

2. 2-3차원 어트랙터 이론

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

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

여기서 $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며, m 은 임베딩 차원(embedding dimension)을, τ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

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

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

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

$$\hat{X}(q) = [x(q), x(q+\tau), x(q+2\tau), \dots, x(q+(m-1)\tau)] \quad (3)$$

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, τ 는 시간지연이다.

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

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

여기서 R_{tor} 는 FNN에 대한 평가 임계 값이다.

3. 신호 획득 시스템의 구축

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 $\phi 40 \times 20$ 크기의 알루미늄을 단면절삭방법으로 절삭실험을 실시하였다. DTM에 설치된 Fig. 2와 같은 압전형 공구동력계(Kistler 9257B)를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호는 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 PC로 전송하여 데이터 처리하였다. 초정밀 가공기 자체의 특성파악(rpm 기준설정)을 위하여 가공을 하지 않는 상태에서 주축회전수에 따른 공구동력계의 신호를 측정된 결과, 1500rpm부근에서 안정적인 경향을 보여서 이송에 대한 절삭력 측정을 1500rpm에서 실시하였다.

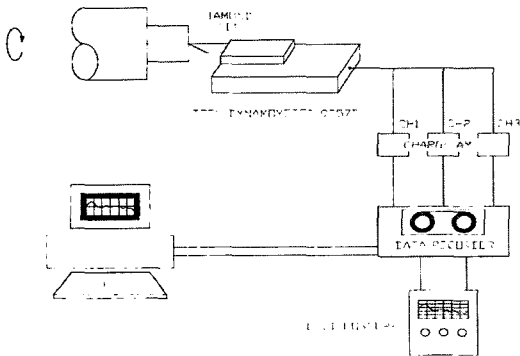


Fig. 1 Experimental device of setup of the DTM

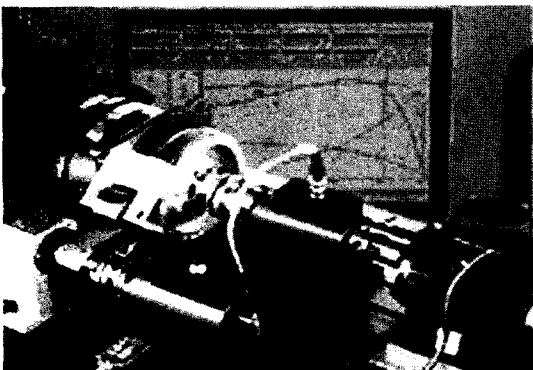


Fig. 2 Tool Dynamometer

회전수에 따른 비철금속의 표면거칠기를 측정하고, 이송속도 변화에 대한 알루미늄의 절삭력을 분석하였으며, 절삭가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 WYKO사의 비접촉식 표면거칠기 측정기인 NT2000으로 측정(우리나라 기준)하였으며, 이러한 실험제반사항은 표 1과 같다.

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

실험에 사용된 공구재료는 천연다이아몬드이며, 공구의 기하학적 형상 및 크기는 경사각 0° , 여유각 10° 와 선단반경 2mm로 제작하였다.

Table 1 실험제반사항

구분	내용
실험조건	초정밀 가공기(DTM)+지그(Jig)부착
공구	단결정 Diamond
피삭재	$\phi 40 \times 20$ mm 크기의 알루미늄
실험장치	<ul style="list-style-type: none"> • NT2000-WYKO사의 비접촉식 표면거칠기 측정기 • 공구동력계
측정결과	1500rpm부근에서 안정적

4. 결과 및 고찰

4.1 알루미늄 합금의 시뮬레이션

알루미늄합금에 대하여 회전수 1500rpm, 절삭깊이 $10 \mu\text{m}$ 의 조건 하에서 이송속도의 변화에 따른 동적 상태의 절삭력을 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송 클수록 절삭력이 크게 나타나는데, 이는 이송이 클수록 절삭 면적이 증가하기 때문이다. 각 분력의 비를 보면, 약간의 분력 기울기 차이는 있으나 이송속도가 25mm/min이상에서 비례적으로 증가하고 있다.

이송에 따른 표면 거칠기를 파악하고자 하였으며, Fig. 4는 이에 대한 결과를 나타낸다. 이송이 커짐에 따라 표면거칠기가 커지는 경향을 나타내며, 회전수 1500rpm, 이송 25 mm/min, 절입 $10 \mu\text{m}$ 에서 9mmRa의 표면거칠기를 나타내었다.

4.2 2-3차원 어트랙터 시스템의 구축 및 시뮬레이션

2-차원 어트랙터 시스템의 구축을 위하여 로렌츠 어트랙

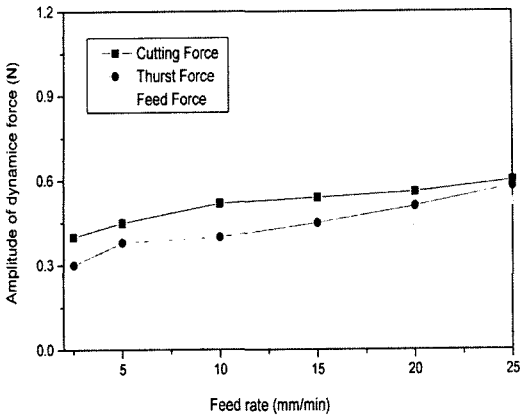


Fig. 3 Dynamic cutting force of Al-alloy according to feed rate (Spindle rotational speed : 1500rpm, Depth of cut : 10 μm)

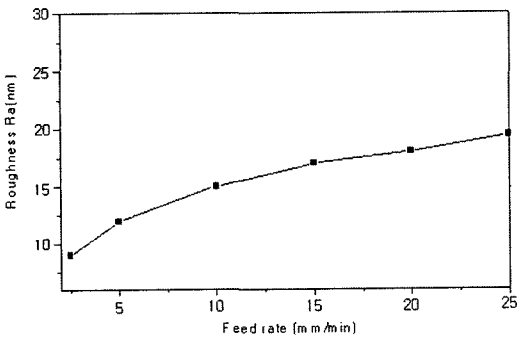


Fig. 4 Surface roughness(Ra: mm) correspond -ing of non-ferrous metal to feed rate (Spindle rotational speed: 1500rpm, Depth of cut : 10 μm)

터 모델을 도입하였으며, 이에 대한 기존의 결과들과 비교를 하면서 본 논문에서 프로그래밍화 한 어트랙터 시뮬레이터를 검증하였다. 프로그램은 Matlab ver4.2이상에서 시뮬레이션할 수 있도록 Matlab으로 프로그래밍하였으며, 획득 데이터에 대하여 최대 20,000개, 최소 2,000까지 처리할 수 있도록 하였다. 특히 데이터 포인트에 있어서 최대 에너지를 100% 기준으로 하여 10%이하에 대해서는 파형의 전체적인 특징을 파악한 후, 어트랙터를 디스플레이하는 특징형 데이터 처리 서브디렉토리를 포함시켰다.

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

Table 2 Programming of Two-three dimensional attractor system

```

(Two-Three Dimensional Attractor System)
%Two Dimensional Attractor System
function attrac(samp,start,len,delay,st)
samp = samp-min(start+len+delay);
samp = samp / max(start+len+delay);
if len>length(samp-delay-start)
    break;
end;
xx = samp(start+len);
yy = samp(start+delay:start+len+delay);
if (st==1)
plot(samp(start+len),samp(start+delay:start+len+delay),'');
elseif (st == 0)
end;
% Three Dimensional Attractor System
.
xx = samp(start:start+len);
yy = samp(start+delay:start+len+delay);
zz = samp(start+delay:start+len+delay);
    
```

구성할 수 있도록 하였으며, 프로그래밍의 주요사항은 아래의 Table 2과 같다.

어트랙터 함수에서 고려하는 조건은 크게 5가지로 설정하였으며, 이에 대해서는 각각의 조건을 변수로 하는 데이터를 입력으로 받아 처리하도록 하였다. 설정한 5가지 조건 중에 samp는 전체 샘플 데이터의 어드레스를 나타내며, start는 데이터의 시작 구간을, len는 마지막 적용데이터의 번호를, delay는 시간지연을, st는 디스플레이를 하는 어트랙터의 형태를 나타내도록 하였다. 특히 디스플레이의 형태에 있어서는 포인트와 라인 궤적의 두 종류로 하여 어트랙터에 대한 에너지 분포를 파악 할 수 있도록 하였다. 에너지의 궤적을 디스플레이 하는데 있어서 대상포인트에 시간지연을 고려하여 1차, 2차, 3차원 상까지 플로팅을 하여 나온 결과를 이용하였다.

2-3차원 어트랙터 시뮬레이터 구축을 위한 샘플로 로렌츠 어트랙터를 고려하면, 이것은 외부 입력이 없는 3자유도의 자율계로써 운동방정식(비선형 진동)은 다음의 식 (7), (8), (9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = F_1(x, y, z) = 10(x - y) \tag{7}$$

$$\frac{dy}{dt} = F_2(x, y, z) = -y + (28 - z)x \tag{8}$$

$$\frac{dz}{dt} = F_3(x, y, z) = -\frac{8}{3}z + xy \quad (9)$$

위의 방정식들로부터 해의 데이터를 얻어 그 플로팅하면 Fig. 5, 6과 같은 로렌츠 어트랙터를 얻을 수 있다.

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

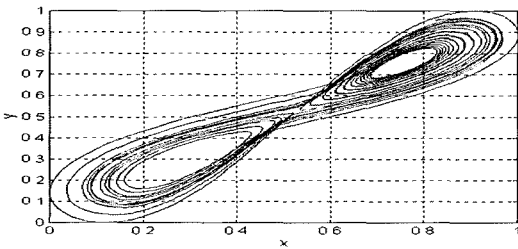


Fig. 5 Two dimensional attractor

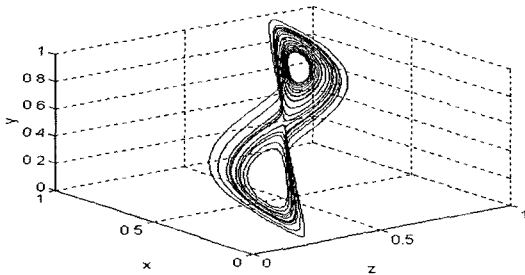


Fig. 6 Three dimensional attractor

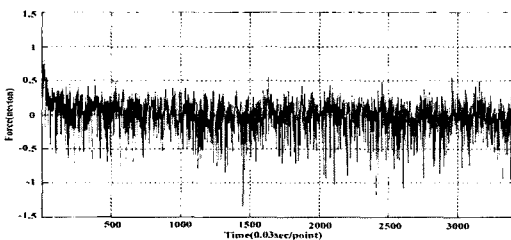


Fig. 7 Time series data in cutting force

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

전체 4000샘플 중에 결함 신호와 무관한 구간은 특징형 데이터 처리 서브디렉토리를 거쳐 샘플을 적절히 조절하여 3,400샘플씩을 적용하였으며, 2차원과 3차원의 두 가지 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 10개정도의 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 특성을 나타내어 주

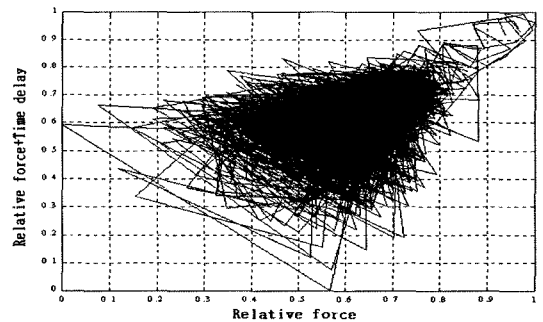


Fig. 8 Two dimensional attractor(cutting force)

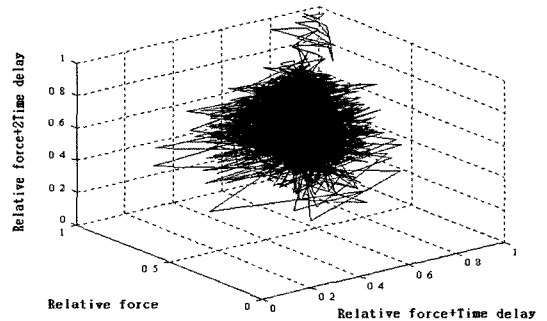


Fig. 9 Three dimensional attractor(cutting force)

는 것은 사실이나 어트랙터의 형상을 가장 저차원으로 보여 주게 되며, 따라서 어트랙터의 차원을 높여 고찰하는 것이 필요하다.

Fig. 9와 같이 구성된 3차원 어트랙터는 2차원과는 다른 형상을 나타내고 있으며, 이러한 형상특징은 2차원 어트랙터에서 평가가 불가능한 3차원 축에 대한 고찰이 가능하며, 따라서 2차원 평가만으로 부족한 부분을 한 차원 높게 해석 및 평가를 할 수 있게 된다.

6. 결 론

본 논문에서는 초정밀가공에서 금속인 알루미늄의 절삭력 실험으로 가공에 미치는 영향을 파악하기 위하여 최근 데이터 분석 및 해석분야에서 각광을 받는 어트랙터 평가 시스템을 구축하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 2-3차원 어트랙터 시스템의 구축에 있어서 전체를 samp(전체 샘플 데이터의 어드레스), start(데이터의 시작 구간), len(마지막 적용데이터의 번호), delay(시간 지연), st(디스플레이를 하는 어트랙터의 형태) 등의 5 가지를 변수로 하여 절삭성을 사분면 특성으로 나타내는 방법을 제시하였다.
- (2) 알루미늄 절삭시의 주분력을 데이터로 획득하여 이를 후처리하는 절삭데이터에 대하여 데이터 포인트의 최대 에너지를 100% 기준으로 하여 10% 이하에 대해서는 파형의 전체적인 특징을 파악한 후, 어트랙터를 디스플레이하는 특징형 데이터 처리 평가시스템을 최초로 구축하였다.
- (3) 구축한 어트랙터 평가시스템으로 로렌츠 모델을 도입하여 이에 대한 2-차원 어트랙터 궤적 시스템을 플로팅하는 시스템을 제시하였다.
- (4) 비철금속인 알루미늄을 초정밀 가공기에서 단면절삭을 하여 절삭력을 측정하고 분석한 결과, 주분력, 배분력, 이송분력 순서의 크기로 나타나는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Whitten, L. G. and Lewis, T. G., 1966, "Machining and Measurement to Submicron Tolerance." Proc. M.T.D.R., Programon Press. pp. 491.

- (2) Taniguchi, N., 1983, "Current Status in. and Future Trends of. Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing." *Annals of the CIRP*. Vol. 32, No. 2, pp. 573~582.
- (3) Loewn, E. G., 1984, "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining." *Annals of the CIRP*. Vol. 32, No. 2, pp. 413~415.
- (4) Mckeown, P. A., 1987, "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future." *Annals of the CIRP*. Vol. 36, No. 2, pp.495~501.
- (5) Kim, J. D., 1990, "A Study on the Oblique Face Cut of Aluminium Alloy by Edge Shape of Natural Diamond." *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp. 1515~1522.
- (6) Lee, S. J., 1995, "Influence of Si Content on Cutting Characteristics in Turning Process of Al-Si Alloy using Polycrystal Diamond Tool." *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp.20~26.
- (7) Yun, I. S., 1997, "Prediction and Evaluation of Ultrasonic Echo using Neural Network," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 586~595.
- (8) Yun, I. S., 1997, "A Study on the Technical Development of Ultrasonic Testing by Industrial Application," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 49~56.
- (9) Lee, B. C., 1998, "Ultrasonic Pattern Recognition of Welding Defects by Chaos Feature Extraction," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 167~174.
- (10) Yun, I. S., 1998, "The Defect Dection and Evaluation of Austenitic Stainless Steel 304 Weld Zone using Ultrasonic Wave and Neuro," *The Korean Welding Society*, Vol. 16, No. 3, pp. 192~201.
- (11) Takens, F., 1981, "Dynamical Systems and Turbulance," *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 898, pp. 266.