

## 어트랙터 사분면법을 이용한 비철금속의 초정밀 절삭특성 평가에 관한 연구

고준빈#, 김건희\*, 윤인식\*\*

### The Study on Ultra-Precision Cutting Characteristics Evaluation of Non-Ferrous Metals Using Attractor Quadrant Method

Jun Bin Go<sup>#</sup>, Geon Hee Kim<sup>\*</sup>, In Sic Yun<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

This study proposes the construction of attractor quadrant method for high-precision 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, 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 fractal characteristics and attractor quadrant characteristics.

In quantitative quadrant feature extraction, 1,309 point in the case of Al7075 (one quadrant) and 1,406 point (one quadrant) in the case of brass were proposed on the basis of attractor reconstruction.

Proposed attractor quadrant method can be used for high-precision cutting characteristics evaluation of non-ferrous metals.

**Key Words :** Attractor quadrant(어트랙터 사분면), Embedding dimension(임베딩차원), Fractal dimension(프랙탈 차원), Diamond turning machine(다이아몬드선반), Non-ferrous metal(비철금속), Time series data(시계열데이터)

#### 1. 서론

최근 기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 등의 분야에 초정밀 절삭가공에 의한 구성부품의 사용이 점점 증가하고 있다.<sup>1</sup> 초정밀 절삭가공은 1962년 미국의 Union carbide사가 프랑스의 Dupont사와 협동으로 고정밀도 가공이 가능한 기계를 개발하여 1966

년 M.T.D.R.에 발표한 것이 최초이다.<sup>2</sup> 1983년에 Taniguchi<sup>3</sup>가 제창한 후, 1984년에 Loewendl<sup>4</sup>이, 1987년에는 McKeon<sup>5</sup>이 초정밀 공학의 중요성을 강조하였다. 우리나라는 1990년 초부터 이 분야에 관심을 갖기 시작하여<sup>6</sup> 산업현장에서 초정밀절삭가공 기술에 의하여 VCR드럼, 레이저빔(laser beam), 프린터의 폴리곤(polygon)미러, 자기디스크, 복사기

.. 2002년 7월 24일 접수  
# 교신저자, 한밭대학교 기계설계공학과  
Email : kjb1002@hanbat.ac.kr, Tel : (042) 824-0351  
\* 한국기초과학지원연구원  
\*\* 경기공업대학 메카트로닉스과

드럼, 광학용품 등이 생산되고 있으며, 이들 부품의 재료로서는 전자 산업과 정보 산업의 발달로 인하여 고정밀도가 필요하게 된 알루미늄, 구리 등의 비철금속이 사용되고 있다. 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정밀도를 확보하는 것이 대단히 어려운 실정이다. 따라서 더욱 엄격해지는 가공 정밀도를 만족시키기 위하여 다이아몬드 공구를 이용한 비철금속의 초정밀절삭 과정의 해석을 위한 체계적인 연구가 요망된다. 초정밀 절삭에 있어서 중요한 것은 가공시에 주인자로서 작용하는 주분력 획득 데이터에 대한 정량적 해석을 들 수 있다. 이러한 해석에 있어서 최근 신호해석 분야에서 우수성이 입증된 어트랙터 사분면법<sup>7</sup>을 이용함으로써 실시간 절삭성평가가 가능하다. 카오스 해석을 확장한 어트랙터 사분면법은 전체 파형으로부터 신호가 갖는 고유의 성질을 시계열 데이터로 하여 계의 상태 공간(state space) 내에 내재한 특성을 평가하게 되며, 이러한 특성을 파악하고, 해석하는 프랙탈 특징 추출과 어트랙터 재구성에 대한 제적을 정량화함으로써 절삭성 평가에 대한 정밀도를 향상시킬 수 있다.<sup>8</sup>

따라서 본 연구에서는 알루미늄합금(AI7075)과 황동재에 대하여 획득한 주분력 신호로부터 그 특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 어트랙터 재구성에 의한 정량적 사분면 특징과 공간상의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원을 추출하여 절삭성 평가의 결과로부터 어트랙터 사분면법을 이용한 비철금속재의 절삭평가 가능성에 대하여 제시하고자 한다.

## 2. 관련 이론

초정밀 절삭에서는 연질의 금속 피삭재를 표면 거칠기 0.01 $\mu\text{mRa}$ , 형상정밀도 0.1 $\mu\text{m}$ 이하의 다듬질이 요구된다. 이 기술의 기본은 극히 높은 정밀도와 강성을 가진 공작기계의 운동을 다이아몬드 공구를 사용하여 피삭성이 좋은 공작물상에 충실히 전사하는 것이다. 이 경우의 절삭조건은 절입깊이 5~50 $\mu\text{m}$ , 이송 속도 1~40 $\mu\text{m/rev}$ , 절삭속도 2~5 $\text{m/s}$ 의 범위이다. 따라서 칩의 생성 및 마찰 등의 가공현상이 발생하는 규모는 일반절삭에 비하여 1/10~1/100에 달하여 수 $\mu\text{m}$  혹은 그 이하의 극히 작은 범위이고 이러한 현상 자체가 정밀도를 좌우하는 최대 요인의 하나이므로 그 특이성을 충분히 이해하는 것은 중

요하다. 수 mm이상의 칩 두께가 보통인 일반 절삭에서는 절삭공구 날 끝의 예리함 정도로 취급하던 것도 수  $\mu\text{m}$ 이하의 칩을 발생시키는 미소절삭에서는 그러한 모델이 성립되지 않는다. 여기서는 일반절삭의 경우와 비교하여 초정밀 절삭에서 나타나는 절삭 현상의 특징을 고찰한다. 이러한 메카니즘에 대하여 해석 대상 시계열 데이터를 이용한 어트랙터 재구성으로 절삭성을 평가한다. 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상공간으로 표현하는 것을 말하며, 어트랙터 재구성 방법은 Takens<sup>9</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 연결시킴으로서 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)을,  $\tau$ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

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

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

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

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

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

여기서  $R_{tot}$ 는 FNN(현재의 임베딩차원에서는 최근접 이웃점이지만, 임베딩차원이 한차원 높아졌을 때 최근접 이웃점이 되지 않는 어트랙터상의 점)에 대한 평가 임계 값이다.

$$R_m(n) = \| \bar{X}(n) - \bar{X}(q) \|$$

$$= \sqrt{\sum_{k=0}^{m-1} \{x(n+kt) - x(q+kt)\}^2} \quad (4)$$

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

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

시간지연은 Liebert와 Schuster<sup>10</sup>가 제안한 상관 적분 방법을 이용하여 결정하였으며, 이는 시간지 연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부 최소점(local minima)이 되는 점을 주어진 시 계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다. 임베딩차원 및 시간 지연을 계산함으로써 어트랙터 를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원을 추출하여 시계열 데이터의 기하학적 특성을 평가 할 수 있게 된다. 프랙탈 차원은 정수 값이 아닌 실수로 표현 되며 신호의 성질과 변화의 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프 랙탈 차원을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙 탈 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procaccia<sup>11</sup>가 제안한 식(7)을 이용한 상관적분 방법을 사용하 였다.

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

여기서,  $\Theta$ 는 계단함수(step function)이며,  $\bar{X}(i)$ 와  $\bar{X}(j)$ 는  $i$ 와  $j$ 번째 어트랙터를 구성하는 점이 다. 또한,  $N$ 은 데이터의 수,  $r$ 은 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.

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트 랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이  $r$ 인 구를 그 리고 구 내부점의 수를 구하는 과정을 어트랙터 상

의 각 점에서 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다.

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

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

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

### 3. 실험시스템의 구성

절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험시스템 은 Fig. 1과 같으며, 초정밀 가공기(DTM)에 공구동 력계를 장착 할 수 있도록 지그(Jig)를 설계 제작하 여 부착하였다. 실험은 단결정 Diamond 공구로  $\phi 40 \times 20$  크기의 알루미늄을 단면절삭방법으로 절삭 실험을 실시하였다. DTM에 설치된 압전형 공구동 력계(Kistler 9257B)를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호는 증폭한 후 A/D변환기를 통하여 PC 로 전송하여 데이터 처리하였으며, Fig. 2는 공작물 의 가공을 나타내는 사진이다. 초정밀 가공기 자체 의 특성파악을 위하여 가공을 하지 않는 상태에서 주축회전수에 따른 공구동력계의 신호를 측정할 결 과, 1500rpm부근에서 안정적인 경향을 보여서 이송 에 대한 절삭력 측정을 1500rpm에서 실시하였다. 회전수에 따른 비철금속의 표면거칠기를 측정하고, 이송속도 변화에 대한 알루미늄의 절삭력을 분석하 였으며, 절삭가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표 면거칠기는 WYKO사의 비접촉식 표면조도 측정기 인 NT2000으로 측정하였다.

본 실험은 단결정 Diamond 공구로 가공이 가능 한  $\phi 40 \times 20$  크기의 Al7075과 황동재를 사용하였다. 실험에 사용된 공구재료는 천연다이아몬드이며, 공 구의 기하학적 형상 및 크기는 경사각  $0^\circ$ , 여유각  $10^\circ$ 와 선단반경 2mm로써 국내 다이아몬드 공구 제 작사(참피온다이아몬드)에 의뢰하여 제작하였다.

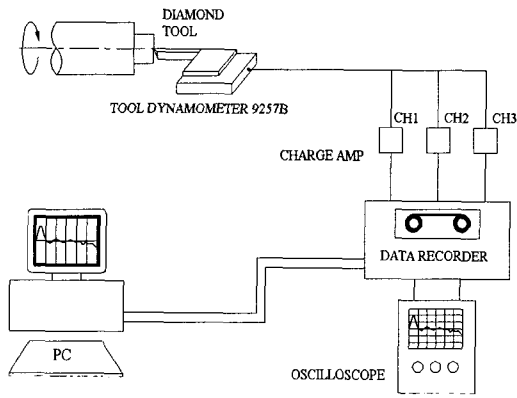


Fig. 1 Experimental device of setup of the DTM

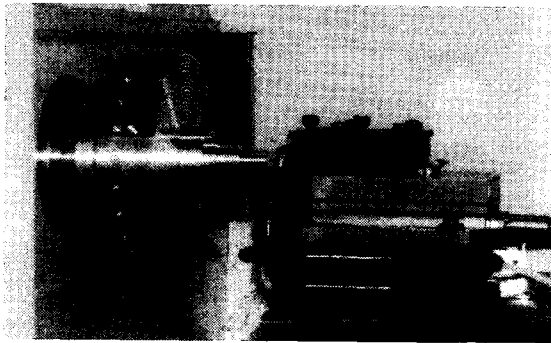


Fig. 2 Tool Dynamometer

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 Al7075와 황동의 시뮬레이션

Al7075와 황동재에 대하여 회전수 1500rpm, 절삭깊이 10 $\mu$ m의 조건하에서 이송속도의 변화에 따른 동적상태의 절삭력을 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송이 클수록 절삭력이 크게 나타나는데, 이는 이송이 클수록 절삭 면적이 증가하기 때문이다. 각 분력의 비를 보면, 약간의 분력의 기울기 차이는 있으나 이송속도가 2.5mm/min이상에서 비례적으로 증가하고 있다.

이송에 따른 표면거칠기를 파악하고자 하였으며, Fig. 4는 이에 대한 결과를 나타낸다. 표면거칠기 이론식  $R_{max} = \frac{f^2}{8R}$ 의 결과와 유사한 결과로써 이송이 증가함에 따라 비례적으로 표면거칠기가 약

화됨을 알 수 있다. 그리고 황동이 알루미늄보다 약 7nm 정도 높게 나타나는 것은 황동이 알루미늄에 비하여 조직이 치밀하지 않고, 불순물의 함유량이 많기 때문이다. 회전수 1500rpm, 이송 2.5mm/min, 절입 10 $\mu$ m에서 9nmRa의 표면거칠기를 나타내었다.

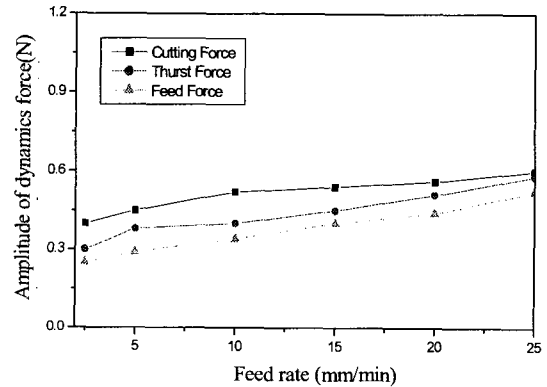


Fig. 3 Dynamic cutting force of Al-alloy according to feed rate (Spindle rotational speed : 1500rpm, Depth of cut : 10 $\mu$ m)

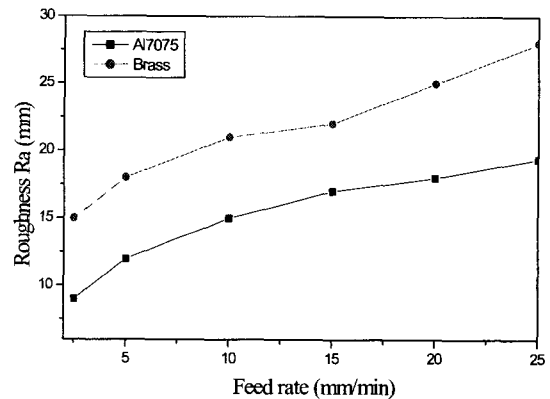


Fig. 4 Roughness(Ra: nm) corresponding of Al7075 and brass metal to feed rate (Spindle rotational speed: 1500rpm, Depth of cut : 10 $\mu$ m)

##### 4.2 어트랙터 사분면 특성평가

Al7075와 황동재의 절삭시 획득한 주분력 신호에 대한 데이터 평가를 위하여 위상공간상에 재구성한 어트랙터 각 축의 변수 설정 및 형상 시뮬레

이션을 하였으며, 전체 구성은 크게 3 단계로 이루어지게 된다.

첫번째 단계에서 이루어지는 사항으로는 1) 대상 신호에 대하여 충분한 샘플이 될 수 있는 시계열 데이터로 획득하고, 2) 획득한 데이터에 대하여 정보의 상관량을 나타내는 시간지연을 설정하며, 3) 전체 시스템을 결정하는 변수의 차원에 관련된 임베딩 차원을 결정하고, 4) 타켄스 매입정리에 의한 어트랙터 재구성을 한 후, 5) 재구성한 어트랙터의 궤적에 대하여 정량적 궤적 평가를 위한 어트랙터 재구성시스템에 적용하여 최종 결과를 출력하게 된다.

Fig. 5는 어트랙터 재구성의 평가를 위한 예로서  $x$  축과  $y$  축을 시간지연과 에너지(진폭)에 대한 변수로 설정한 노이즈 시뮬레이션의 결과이다.

전체 샘플은 3,400개로 하였으며, 노이즈 발생 데이터는 Matlab을 이용하였다. 이렇게 생성한 데이터에 대하여 2차원적 어트랙터 재구성을 하였으며, 궤적이 전형적인 노이즈 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

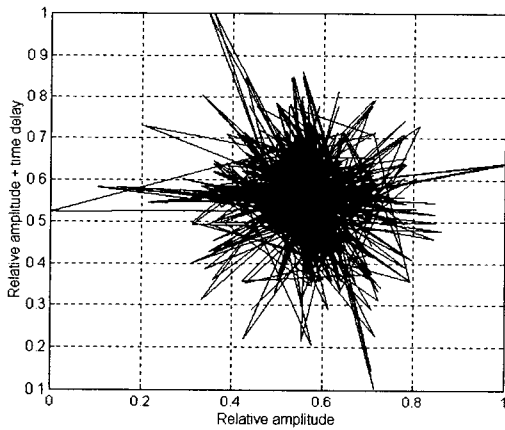


Fig. 5 2-dimensional attractor in case of noise

재구성한 어트랙터에 대하여 노이즈의 적용 타당성을 검토 한 후, A17075와 황동재에 대하여 2차원, 3차원 어트랙터와 사분면 특징을 추출하여 재질별에 따른 궤적특성을 파악하였다.

본 논문에서는 이상에서 구축한 어트랙터 재구성의 위상공간상에서 절삭가공시, 주요인자로 작

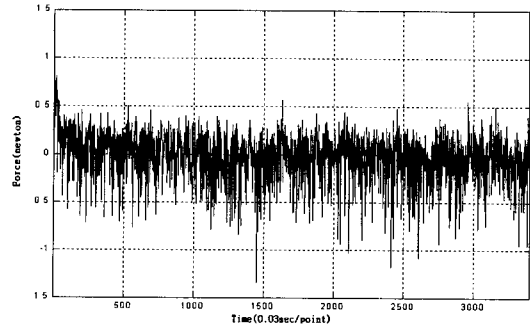


Fig. 6 Time series data in cutting force (A17075)

용하는 주분력의 특성평가를 하고자 하였다.

특히 본 연구에서 제시한 어트랙터 사분면법 해석 및 평가는 기존의 절삭평가에서 정성적으로 이루어지는 공구동력계에 의한 1차적인 절삭 방법과는 달리 절삭의 미소부분 및 경향 등에 대한 정량적 해석 및 평가가 가능한 것이 차이점이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 어트랙터 사분면법에 의한 절삭평가의 장점으로는 사분면상의 형상으로 절삭의 미소변화를 특징지을 수 있으며, 또한 적은 재질 샘플로도 정량적 절삭평가가 가능하다고 할 수 있다.

Fig. 6은 알루미늄합금의 주분력에 대한 시계열 데이터(1포인트당 0.03초 샘플링 : 총 3400)를 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8은 획득한 시계열에 대한 2, 3차원적 어트랙터 재구성을 나타낸다. 횡축은 상대힘(절삭력), 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 4,000샘플 중에 결함 신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3,400샘플씩을 적용하였으며, 두가지 경우가 모두 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 변화를 동반하면서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 절삭시 나타나는 주분력의 어트랙터 특징을 나타낸다고 볼 수 있다. 또한 궤적의 변화에 있어서 2차원과 3차원 모두 높은 에너지 부분들에서 여러개의 꺾임 형상으로 나타나는 것은 주분력이 높아질수록 절삭 메카니즘의 변화가 심해지는 것으로 생각할

수 있다. 시계열 데이터에서는 미소한 여러 개의 링잉(ringing)이 나타났으나, 2차원과 3차원 어트랙터를 재구성하였을 경우의 궤적은 무차원화한 최대 값을 기준으로 여러개의 꺾임 형상으로 나타나는 것을 알 수 있다.

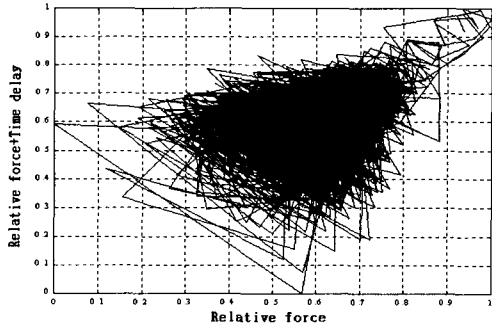


Fig. 7 Two dimensional attractor(AI7075))

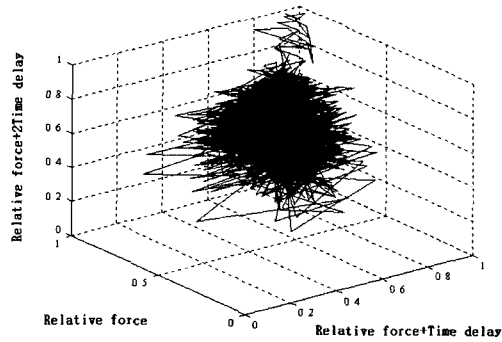


Fig. 8 Three dimensional attractor(AI7075)

Fig. 9와 Fig. 10은 황동에 대한 어트랙터 재구성의 결과이다. 에너지의 감소와 변화 상태는 AI7075의 경우와 거의 같으나, 궤적 형상은 상당히 다르게 나타남을 알 수 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.

구성한 3차원 어트랙터에 있어서 2차원과는 다른 형상을 나타내고 있으며, 이러한 형상특징은 2차원 어트랙터에 대한 평가만으로 부족한 부분을

한차원 높게 해석 및 평가를 할 수 있게 된다.

재구성된 어트랙터의 기하학적 형상은 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 데이터의 특성 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라지게 된다. Fig. 7과 Fig. 9에서 어트랙터의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원은 2.087과 2.145의 값으로 나타났으며, 이는 AI7075와 황동의 절삭가공 시에 어트랙터의 기하학적 특성과 절삭특성에 대한 상관관계를 나타내고 할 수 있다.

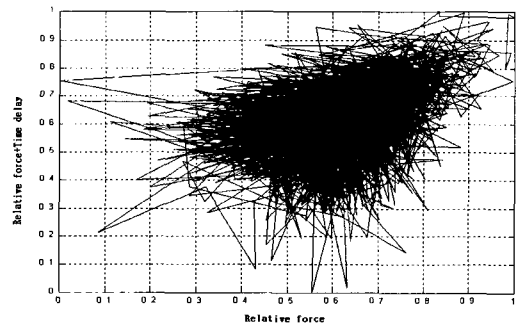


Fig. 9 Two dimensional attractor(brass)

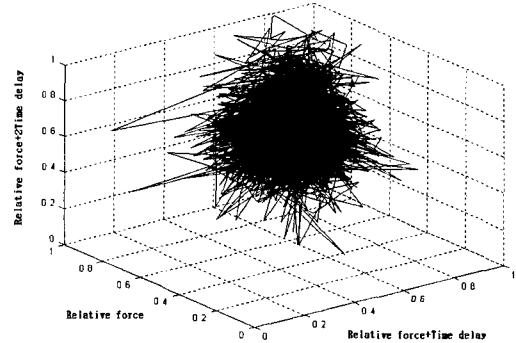


Fig. 10 Three dimensional attractor(brass)

Table 1은 어트랙터 사분면 특징 추출을 한 결과로서, 위상 공간상으로 재구성한 어트랙터에 대하여 각각의 축을 어트랙터 상의 중심으로 이동하여 사분면 상의 점들을 카운팅하였다. 1사분면과 3사분면을 기준으로 하였을 경우에는 황동의 경우가 더 많이 분포되어 있었으며, 2사분면과 4사분면의 경우는 AI7075의 경우가 더 많은 분포를 형성하고 있었다. 따라서 이러한 어트랙터 사분면 특징을 이

용함으로써 Al7075와 황동재의 절삭특성을 정량적으로 평가하는 것이 가능하다. 즉, 구성된 어트랙터 시스템을 통하여 Al7075와 황동재의 절삭특성에 대하여 실시간적 on-line 모니터링이 가능하다.

Table 1 Attractor quadrant characteristics

Part \ Quadrant	One quad.	Two quad.	Three quad.	Four quad.
Case of Al7075	1,309	342	1,333	376
Case of brass	1,406	252	1,480	258

어트랙터 사분면법은 저자들이 어트랙터 이론에서 언급하는 어트랙터 재구성을 위상 공간상의 기하학적 구조와 형상 분포도로 확장시킨 분야로 여러 공학 분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다. 따라서 현재의 어트랙터 이론이 갖는 정성적인 형상평가 부분을 수치로 정량화한 방법으로서 향후, 공학 해석의 분야에 있어서 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

### 5. 결론

본 논문에서는 비철금속인 Al7075와 황동의 초정밀 절삭가공시에 지배인자로 작용하는 주분력의 어트랙터 사분면 특성을 파악하기 위하여 최근 데이터 해석분야에서 각광을 받는 어트랙터 사분면법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 구축한 어트랙터 사분면 특성평가기로부터 Al7075와 황동의 어트랙터의 궤적 형상을 정량적 시뮬레이션하는 방법을 제시하였다.
- 2) 어트랙터의 형상을 결정짓는 사분면 특징 추출을 한 결과, 황동의 경우가 1사분면(1,406)과 3사분면(1,480)에서 Al7075의 경우보다 높게 나타났으며, 2사분면(342)과 4사분면(376)의 경우는 Al7075의 경우가 높은 분포도를 형성하였다. 따라서 이러한 결과로부터 본 연구에서 구성된 어트랙터 시스템을 통하여 Al7075와 황동재의 절삭특성에 대하여 실시간적 on-line 모니터링이 가능함을 제시하였다.
- 3) 어트랙터의 궤적을 기준으로 같은 비금속재라도 주분력의 특성과 궤적변화에 현저한 차이를 나타내었으며, 이러한 차이로부터 비금속재들의 절삭성을 평가할 수 있다.
- 4) 2차원과 3차원 어트랙터를 재구성하여 이에 대

한 궤적변화를 계수화하는 사분면법의 적용 결과로부터 Al7075와 황동의 절삭성을 평가하는 방법을 제시하였다.

### 참고문헌

1. Ko, J. B., Kim, G. H., "Cutting characteristics of Oxygen-Free Using the Ultra Precision Machining," KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 120-126, 2002.
2. Whitten, L. G., Lewis, T. G., "Machining and Measurement to Submicron Tolerance," Proc. M.T.D.R., Programon Press. pp. 491, 1966.
3. Taniguchi, N., "Current Status in and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing," Annals of the CIRP, 32/2 pp. 573-582, 1983.
4. Loewn, E. G., "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining," Annals of the CIRP, pp. 413-415, 1983.
5. Mckeown, P. A., "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future," Annals of the CIRP, pp. 495-501, 1987.
6. Kim G. H., Ko J. B., "A Study of Aluminum Reflector Manufacturing in Diamond Turning Machine," KSMTE, Vol. 11, No. 4, pp. 1-5, 2002.
7. Ko J. B., Yun I. S., "Construction of Attractor Simulator for Cutting Characteristics Evaluation of Non-ferrous Metals," KSPE, Vol. 20, No. 1, pp. 63-69, 2003.
8. Ko J. B., Yun I. S., "Chaotic evaluation of material degradation time series signals of SA508 steel considering the hyperspace," Journal of KWS, Vol. 16, No. 6, pp. 537-547, 1998.
9. Takens, F., "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, pp. 266, 1981.
10. Liebert, W. and Schuster, H. G., "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series," Physics Letters A, Vol. 142, pp. 107-111, 1989.
11. Grassberger, P. and Procaccia, I., "Characterization of Attractors," Rev. Lett., Vol. 50, No. 5, pp. 346-349, 1983.