

# 신경회로망을 이용한 채터 특성 및 안정영역 분석

윤문철\*, 김영국\*\*, 김광희#

## The Characteristics and Stability Boundary Analysis of Chatter using Neural Network

Moon-Chul Yoon\*, Young-Guk Kim\*\*, Kwang-Heui Kim<sup>#</sup>

### ABSTRACT

In this study, the analytic realization of chatter mechanism using radial basis neural network(RBNN) was introduced and compared with the conventional stability analysis. In this regard, the FFT and time series spectrum analysis was used as a criterion for the existence of chatter in end-milling force. The desired coded outputs of chatter was trained and finally converged to desired outputs. The output of the RBNN match well with the conventional desired stability lobe. Using this trained data, the stability boundary of the radial basis neural network was acquired using the contour plotting. As a result, the proposed stability lobe boundary using RBNN consists well with the conventional analytical boundary that is calculated in characteristic equation of transfer function in chatter dynamics. In this RBNN analysis, two input and three output parameters were used in this paper.

**Key Words :** RBNN(방사형기저신경회로망), Specific Cutting Coefficient(비절삭상수), Specific Cutting Force(비절삭저항), Stability Lobe(안정성로브)

### 1. 서 론

엔드밀 가공에서 채터에 관한 연구는 여러 방법으로 연구되어 왔다. 특히, 국내에서 Park<sup>[1]</sup>은 다층 퍼셉트론을 이용한 채터 연구를 하였고, Jeong<sup>[2]</sup>은 신경회로망을 이용하여 채터 감지에 대한 연구를 하였다. 채터 연구에서 이런 방법의 감지도가 중요하나 전체적인 가공조건에서 채터의 유무를 나타내는 채터 경

계영역 분석이 현장 사용자들에게는 더욱 실제적이고, 채터의 문제를 해결하는 개념을 얻기에는 더욱 유리하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이런 점을 고려하여 채터 안정영역을 구분하는 채터 안정성 로브를 구하는 방법을 주 연구 대상으로 하였다. 채터 안정영역에 대한 연구로는 국내에 그다지 많지 않으나 Kim 및 Yoon<sup>[3-6]</sup>에 의하여 기초적인 연구가 수행되어지고 있다. 이에 대한 그동안의 연구는 주로 Altintas<sup>[7]</sup>의 연구와 유사한 방법을 이용하였다. 즉, 비절삭저항(specific cutting force)을 고려한 동적인 절삭력을 입력으로 하고 출력을 진동 변위로 하여 입출력 간의 전달함수를 폐쇄회로(closed loop)로 구성하였으며, 이를 고려한 전체 전달함수의 분모 항을 영으로

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 대한상공회의소 부산인력개발원

# 교신저자 : 부경대학교 기계공학부

E-mail : khk@pknu.ac.kr

하는 특성방정식에서 절삭깊이 혹은 이송과 회전속도와의 경계영역을 나타내는 안정영역 로브(Lobe)를 표현하였다. 그러나, 이들 연구에 있어서 실제 시스템과 일치하는 비절삭저항의 값을 실제 실험에 맞추기 위해서는 실험을 고려하여 비절삭상수(specific cutting coefficient)를 구하여야 하고, 설사 한다 하더라도 이들 연구는 엔드밀 가공과 같은 경우의 비절삭저항을 직경이 전체적으로 몰려(full immersion) 가공하거나 반 정도 몰려(half immersion) 가공하여도 모두 같은 비절삭저항으로 가정하고 있다. 따라서, 이런 문제점을 해결하기 위해서는 각각의 가공마다 실험에 의한 비절삭저항을 구하여야 한다. 실제 연구에서는 같은 조건이라도 각 공작기계와 공작물 종류 및 가공 조건에 따라 달라지기 때문에 같은 조건으로 항상 가정한 기존 연구에는 문제가 발생할 수 있다. 또한 비절삭저항을 구하는 것은 매우 번거롭고 많은 시간이 필요하다. 따라서 이런 방법보다는 실험에 의한 실제 데이터를 스펙트럼으로 분석하여 채터의 유무를 판별하고 이를 실제 모든 회전속도 영역에서 그 유무를 나타낼 수 있다면 이 방법이 보다 간단하고 데이터 결과를 얻기가 더욱 유리하다고 할 수 있다. 문제는 이 채터의 유무를 쉽게 구분 지을 수 있는 방법을 사용하여야 한다는 것이다. 연구<sup>14,6)</sup>에 의하면 시계열 스펙트럼이 데이터가 적어도 FFT 보다 쉽게 구하여지며 특히 약한 입출력의 신호에도 쉽게 채터 모드 같은 고유 모드를 감지하여 유무를 결정할 수 있다.

본 연구에서는 기존방식의 채터 유무를 표현한 안정성로브 경계형상과 절삭조건에 따른 채터 특성을 FFT 및 시계열 스펙트럼으로 우선 분석하고, 그 결과로 채터 유무를 판단 한다. 이 분류 된 데이터는 신경회로망의 입출력으로 사용되어 채터의 경계영역을 표현할 수 있고 이 제안된 방법을 전자의 기존방식과 비교 분석하여 장단점을 밝히고자 한다. 연구 결과 본 연구에서 제안하는 신경회로망을 이용한 방법으로 채터 영역 분석이 충분히 가능함을 밝혔다.

## 2. 신경회로망

엔드밀 가공시 채터현상은 공구와 공작물의 상대운동을 통하여 발생하는 현상으로 공구와 공작물과의

마찰, 소성변형, 칩 생성에 의한 과도상태, 절삭 시 진동 등 수많은 비선형요소를 내포하므로 채터 현상을 명확하게 설명할 수 있는 정확한 모델링을 하는 것은 매우 어렵다.

방사형 기저 신경회로망 (radial basis neural network : RBNN)을 이용한 RBNN 안정영역법을 이용하여 분석하였고 본 연구에서 제안한 이 방법은 안정성로브 경계영역의 수렴시 이용되는 기존의 BP (back propagation)학습 알고리즘보다 빠른 수렴성을 가지고 있으며 오차도 작게 할 수 있는 특징이 있다. 또한 전방향 신경회로망에 속하며 내부에 2개의 은닉 층이 있으며 이 두 은닉 층의 각각의 뉴런은 기저함수인  $f(n) = e^{-n^2}$ 과 같은 방사형 기저함수(radial basis function)와 선형함수(linear function)를 갖고 있다.

RBNN 방법은 각 뉴런이 갖게 되는 가중치와 함수의 학습에 의하여 그 출력결과가 결정된다. RBNN은 입력벡터  $p$  와 가중치 행렬  $w$ 에 의하여 가중치와 바이어스  $b$ 를 고려한 값  $\|w - p\|b$ 이 방사형 함수를 통하여 네트워크의 기저함수의 독립변수 값이 되어 종속변수 값인 첫 번째 층의 출력  $a$ 이 얻어진다. 이 출

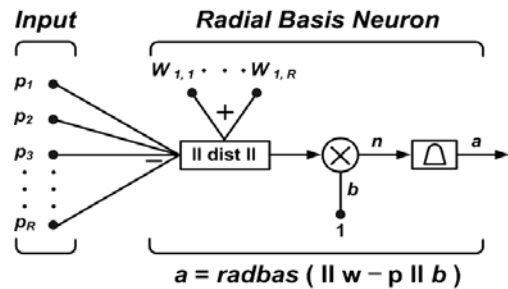


Fig. 1 Architecture of radial basis function network

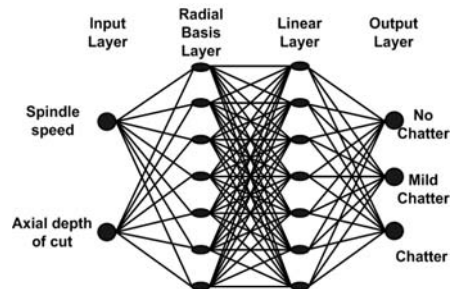


Fig. 2 Architecture of neural network

력  $a$ 는 두 번째 선형 층의 새로운 입력으로 되고 가중치와 바이어스가 고려되어  $a \cdot w + b$ 의 값이 선형함수의 독립변수가 되어 두 번째 층의 출력을 얻게 된다<sup>[8]</sup>. Fig. 1은 RBNN의 첫 번째 층의 방사형 기저함수의 기본 뉴런구조를 나타내고 있다. 그림의 오른쪽 부분의 정규분포 모양의 함수가 방사형 기저 함수이다. 첫 번째 은닉 층은 이 뉴런으로 구성 되어있다. 두 번째 은닉 층은 선형함수를 쓰고 있으며 이 두 층의 조합으로 전체 신경회로망인 RBNN이 구성된다. Fig. 2는 전체 네트워크의 구성을 나타내고 있으며 입력부에서 2개의 노드를 가지는 입력 층, 각각의 층이 방사형 기저함수와 선형함수를 갖고 각각 7개의 단위(unit)를 가지는 2개의 층 그리고 3개의 단위를 가지는 출력 층으로 구성되어 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 엔드밀은 직경  $\phi 15 \text{ mm}$ 이고 절삭력을 샘플링 주파수  $10 \text{ kHz}$ , 엔드밀의 축 방향 깊이로  $1\sim 8 \text{ mm}$ , 주축의 회전속도는  $100\sim 1500 \text{ rpm}$ , 반경방향의 절삭 깊이는  $7.5 \text{ mm}$ , 분당이송은 16, 24, 36, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 88, 96, 104, 112, 120  $\text{mm/min}$ , 날당 이송은  $0.02 \text{ mm/tooth}$  으로 하여 가공하였고, 이때 엔드밀 오버행은  $48.3 \text{ mm}$  로 하였다. Table 1은 실험기기의 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Experiment specification

Instrument	Specification
End-mill	$\phi 15$ , 4-flutes
Workpiece	SM45C
Machining center	Doosan machinery co.
Dynamometer	Piezo type 9272B(Kistler co.)
Charge amplifier	Type 5019A - 4 channels
A/D converter	DT3001

### 4. 채터 해석

#### 4.1 채터의 안정성 해석

Fig. 3에서 로브 경계선은 특성방정식의 근이 되는

조건인 경우의 정수  $k=1, 2, \dots, n$  값 등의 조건에서 얻어지고 그 경계영역을 도식한 것이다. 감쇠계수를 증가시킬수록 경계영역곡선이 위로 움직이며 안정영역이 넓어짐을 알 수 있으며, 감쇠계수가 감소되면 곡선이 아래로 내려가 안정영역이 줄어들고 불안정 영역이 넓어진다. 또한 절삭동력학 모델의 고유진동수가 크면 안정성 로브 곡선이 우측으로 움직이며 고유진동수가 작으면 안정영역을 나타내는 로브 곡선이 좌측으로 이동하는 것을 알 수 있다<sup>[4]</sup>.

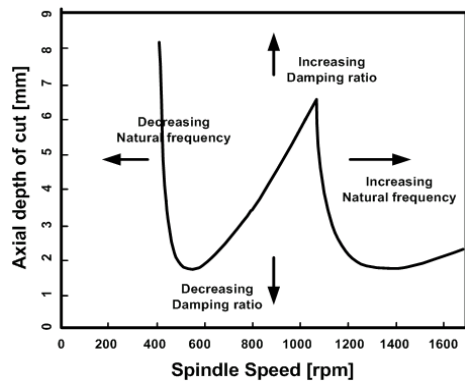


Fig. 3 Stability lobe behavior according to natural frequency and damping ratio

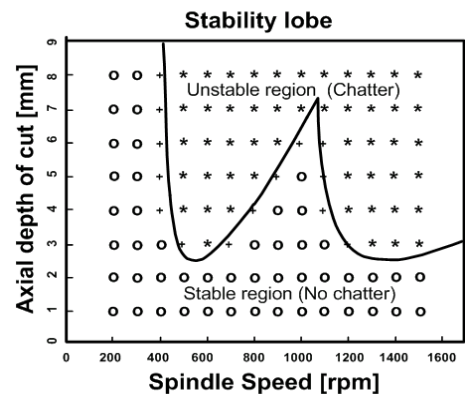


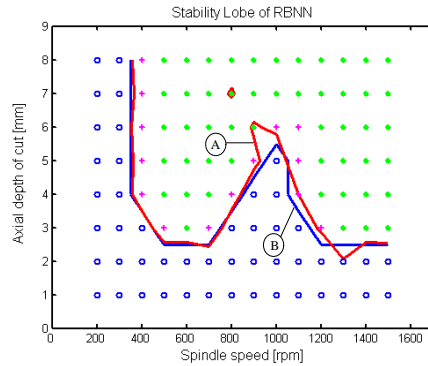
Fig. 4 Distribution of chatter using experimental data and stability lobe for end-milling force  $F_x$

Fig. 4는 특성방정식의 근을 나타내는 안정경계영역을 나타낸 후 여기에 각 회전수 절삭조건에서의  $x$  방향의 절삭력 신호를 스펙트럼을 분석하여<sup>[6]</sup> 채터가 없

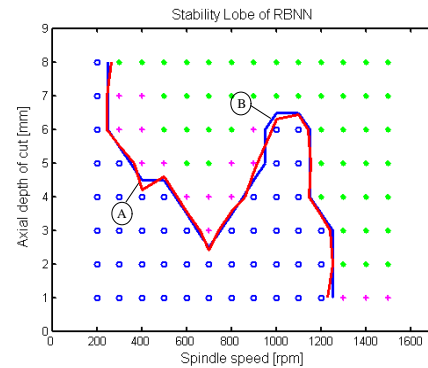
는 신호(o)와 스펙트럼의 채터 주파수 파워가 미약하지만 표현되는 경우로 이때를 채터가 시작되려는 신호(+)로 분류하였고, 채터 모드가 있는 신호(\*)로 구분지어 나타내었다. 경계 로브영역과 일치시키기 위하여 비절삭상수  $K_f$ , 고유진동수  $\omega_n$  및 감쇠계수  $\zeta$ 를 조절하여 로브의 위치가 일치 되도록 하였다. 채터 실험 분석과 일치 시킨 때의 상수 값은 각각 고유진동수  $\omega_n$ 은 234 Hz, 감쇠계수  $\zeta$ 는 0.33, 비절삭상수  $K_f$ 는  $2100 N/mm^2$ 로 계산되었다<sup>[4-7]</sup>. 이와 같은 조절을 통하여 특성방정식에서 구한 안정성을 나타내는 채터 로브영역 결과와 채터 유무 스펙트럼 실험분석에서 얻어진 결과를 일치시켜 나타낼 수 있었다.

#### 4.2 신경회로망에 의한 채터 안정성 해석

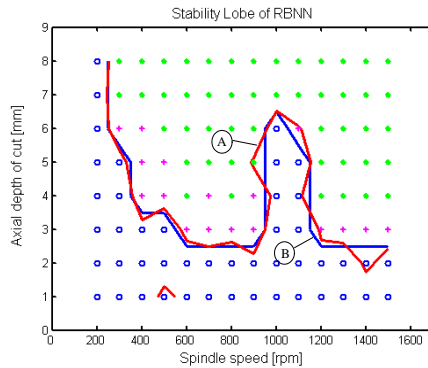
본 연구에서 사용된 데이터는 절삭실험에 의한 절삭력 신호를 FFT 및 ARMA 알고리즘으로 분석한 뒤 절삭조건에서 채터가 없는 신호와 채터가 시작되는 신호, 채터가 있는 신호로 구분<sup>[6]</sup>하여 우선적으로 채터의 안정성 여부를 알 수 있는 안정성 영역 형상을 나타냈으며, 채터가 없는 절삭력, 채터가 시작되는 절삭력, 채터가 있는 절삭력 데이터를 패턴 추출하여 이 데이터를 신경회로망에 학습시켰다. 학습 알고리즘은 RBN (radial basis neural) 알고리즘을 사용하였고, 사용된 전달함수로는 방사형기저함수(radial basis function)와 선형함수를 사용하였다. 총 오차가 0.01%이하가 되거나 반복횟수에 의해 목표치에 수렴될 경우 학습을 종료하였다. Fig. 5의 그림은 세부부의 영역이 표현되어 있으며 채터가 없는 신호(o)와 약한 채터가 시작되는 신호(+), 채터가 있는 신호(\*)로 절삭력 실험결과 데이터를 시계열 스펙트럼 처리를 하여 신경회로망 입력 데이터를 표현하였다 이 데이터를 신경회로망을 통과시켜 출력치를 구하였다. 그 결과는 반복횟수에 따라 달리 나오게 된다. 본 연구에서는 입력 데이터와 목표치와 출력치 결과를 동시에 나타내고자 하였으며, 이 신경회로망결과를 기존의 안정영역법과 비교하면 비슷한 영역 결과가 나타냄을 알 수 있고 보다 실험결과를 잘 나타내는 결과임을 알 수 있다. 이 결과는 더욱 자세한 실험조건 영역에서 처리한 데이터를 이용하면 전체적인 신경회로망 안정영역이 부드럽게 나타나게 된다.



(a) Stability lobe surface for  $F_x$



(b) Stability lobe surface for  $F_y$



(c) Stability lobe surface for  $F_z$

**Fig. 5 Stability lobe by the neural network**

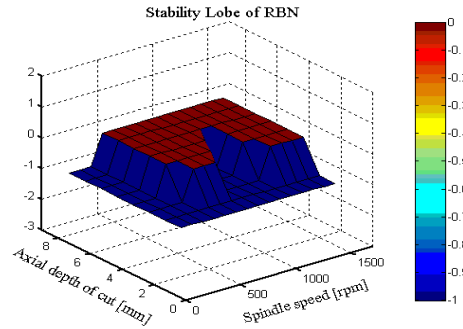
Fig. 5(a)는 x축 방향의 절삭력 신호의 경우로 분석된 입력패턴을 신경회로망에 의해 채터 유무의 계산 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타낸 ①, ②는 신

경회로망을 통과시킨 결과이다. 주어진 가중치 및 바이어스 값을 고정시켰을 때 반복횟수에 따라 ㉔는 10,000회를 한 경우이고 ㉕는 30,000회를 반복하여 수립시킨 결과이다. 반복 횟수를 높여 신경회로망을 처리하면 원하는 목표치로 수립하는 것을 알 수 있고 실험결과와 거의 일치하게 되는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 마찬가지로 방법으로  $y$  축 방향의 절삭력 신호를 이용하여 같은 학습입력 패턴으로 하여 신경회로망을 계산한 결과로 ㉕는 반복횟수 30,000회이고 ㉔는 10,000회 반복 수행하여 최종 신경회로망 결과를 보여 주고 있다. 마찬가지로 가중치 및 바이어스에 의해 반복횟수를 10,000회 및 30,000회를 한 결과이고 반복횟수를 30,000회로 하면 목표치로 근사하게 되는 것을 알 수가 있다.

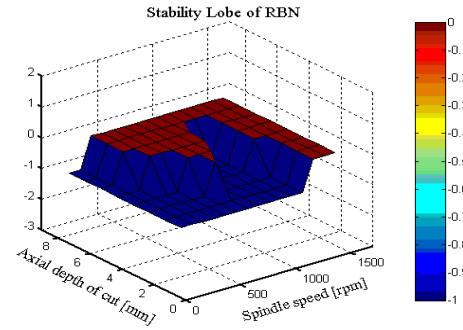
Fig. 5(c)는 마찬가지로  $z$  축 방향의 절삭력 신호를 학습 입력 패턴으로 하여 신경회로망을 계산한 결과로 반복횟수를 10,000회 30,000회를 한 결과로서 10,000회 반복이 신경회로망을 통과 후 결과와 30,000회 반복이 근사하게 접근하는 것을 알 수가 있었다. 따라서, 본 연구에서 이용한 RBNN 안정영역 범은 수립시 사용하는 기존에 많이 사용되는 BP (back propagation) 학습 알고리즘보다 보다 빠른 수립성을 가지고 있으며 오차도 작게 얻을 수 있는 특징이 있다. 본 연구로서 얻은 결과를 각각의 방향의 경우 비교 분석한 결과로 기존의 채터 유무를 판별하는 안정성 로브형상과 비교적 잘 일치됨을 알 수가 있었다.

Fig. 6의 결과는 각각  $x, y, z$  축 방향의 절삭력 신호를 학습 입력 패턴으로 하여 신경회로망을 계산한 결과로 반복횟수를 30,000회를 한 결과 Fig. 6과 같은 3차원 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 6 (a)는  $x$  방향의 절삭력 신호  $F_x$  를 분석하여 채터 유무를 판단한 입력 데이터를 신경회로망을 통과하여 채터 영역을 3차원적으로 나타낸 그림이다. 신경회로망을 통해 나타낸 결과로 진한 저면 부분은 채터가 없는 부분이고, 상면 부분의 영역은 채터가 있는 영역을 나타낸 것이다. Fig. 6 (b)는  $y$  방향의 절삭력 신호를 이용하여 신경회로망을 통해 나타낸 결과로 마찬가지로 높이가 낮은 영역은 채터가 없는 조건의 영역이고 그 외의 높은 영역은 채터가 있는 영역을 나타내고 있다. Fig. 6(c)는  $z$  방향의 절삭력  $F_z$  신호를 신경회로망을 통해 3차원표면 형상으로 나타낸 결과로  $F_x$  및  $F_y$ 의 경우와 비슷

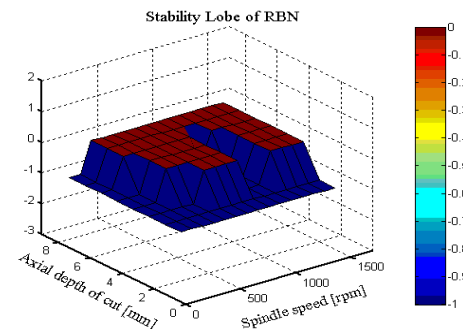
하게 높이가 낮은 영역은 채터가 없는 조건의 영역이고 그 외의 높은 영역은 채터가 있는 영역을 나타내고 있다.



(a) Stability lobe surface for  $F_x$



(b) Stability lobe surface for  $F_y$



(c) Stability lobe surface for  $F_z$

Fig. 6 Stability lobe surface by RBNN

Fig. 6의 3개 그림을 모두 분석하여 보면  $F_z$ 의 채터

영역이  $F_x$ ,  $F_y$  보다 넓게 나타나며  $F_y$  가 가장 작게 나타나고 있다. 이는 똑 같은 조건에서 실험할 경우  $F_z$  로는  $F_x$ ,  $F_y$  에서는 chatter가 없는 신호로 판명되었으나  $F_z$  에서는 chatter가 있는 신호로 나타났고 이는  $F_z$  에서는 미세한 chatter 성질이 더 많이 신호에 포함되어 공구동력계에서 검출되고 있음을 나타내고 있다. 이는 직감적인 chatter 성질이  $F_x$  나  $F_y$  에 더 많이 나타날 것 같은 결과와 상반되는 것이라고 할 수 있다. 따라서 chatter 분석은  $F_z$  절삭력을 이용하는 것이 더 유리함을 보여주는 결과이다. 따라서 이런 결과를 기초로 하여 절삭력을 이용한 chatter 연구를 하면 더 효율적인 chatter 검출을 할 수 있음을 알 수가 있다. 또한 실험 데이터를 이용한 신경회로망 구성을 통하여 분석하면 적절한 절삭조건을 선정하여 chatter를 피할 수 있는 최적의 가공을 할 수가 있으며 공구, 공작물, 공작기계 강성을 달리 선택한 경우에도 실험을 통하여 적용되는 기계로 가공하는 주축회전수에서 각각의 공작물인 경우 chatter가 일어나는 임계 절삭깊이를 알 수 있고, 따라서, 이 깊이를 고려하여 절삭조건을 택하면 chatter를 피할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 chatter 유무를 판별하는 방식으로 기존의 방식인 안정성 로브 형상과 신경회로망을 통해 chatter 유무를 판별하는 방식을 비교 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) chatter의 안정 및 불안정 영역을 방사형기저신경회로망(RBNN)을 이용한 경계영역 해석을 통하여 회전수와 임계 절삭폭 간의 안정 및 불안정영역을 구분하여 안정성 로브 영역을 표현하는 방법을 제안 하였다.
- (2) chatter 유무를 판별하는 방사형기저신경회로망은 2개의 단위를 가지는 입력 층과 각각 7개의 단위를 가지는 2개의 은닉 층, 그리고 3개의 단위를 가지는 출력 층으로 구성하였다. 제안된 신경망을 적용한 결과 비교적 잘 일치하는 안정성 로브를 구할 수 있었다. 또한 신경회로망의 가중치 및 바이어스는 랜덤하게 주어지므로, 학습율과 반복횟수를 많이 함으로서 목표치에 근사하게 접근하는 것

을 알 수가 있었다.

- (3) 방사형기저신경회로망에 의해 각 세 방향의 안정성 로브 경계영역을 구하였고, 각 세 방향에서 chatter가 없는 부분, chatter가 시작되는 경계부분 및 chatter가 있는 부분으로 안정영역을 구분하였다. 또한 기존의 안정영역 분석결과와 비교할 때 비교적 잘 일치하는 것을 알 수가 있었다.

## 후 기

이 논문은 2005학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

1. 박동삼, “다층퍼셉트론을 이용한 절삭칩 형상과 chatter검출에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 추계학술대회논문집, pp. 293-297, 1993.
2. 정의식, 고준빈, 김기수, “신경회로망을 이용한 엔드밀 공정에서의 chatter검지,” 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 10, pp. 149-156, 1995.
3. Kim, Y. G., Cho, H. G., Chin, D. H. and Yoon, M. C., “Chatter stability analysis using neural network,” Proceeding of KSMPE Autumn Conference, pp. 150-154, 2004.
4. Yoon, M. C. and Kim, Y. K., “Chatter Modeling and its Diagnostics in End-milling,” Proceedings of ASPE, Vol. 23, pp. 481-484, 2001.
5. Kim, Y. G., Yoon, M. C., Ha, M. K. and Sim, S. B., “A Study on the Modeling and Diagnostics on Chatter in End-milling Operation,” Proceeding of KSPE, pp. 971-974, 2001.
6. Yoon, M. C. and Chin, D. H., “Time series modeling and spectrum analysis for chatter mode in endmilling dynamics,” I. J. of AMT, will be published. 2006.
7. Altintas, Y., Manufacturing Automation, Cambridge Univ. Press, 2000.
8. Matlab Manual, Mathwork Inc, 1997.