

# 신경회로망을 이용한 밀링 공정의 진동 예측

이 신 영\*

(논문접수일 2003. 4. 29, 심사완료일 2003. 6. 23)

## Vibration Prediction in Milling Process by Using Neural Network

Sin-Young Lee\*

### Abstract

In order to predict vibrations occurred during end-milling processes, the cutting dynamics was modelled by using neural network, and combined with structural dynamics by considering dynamic cutting state. Specific cutting force constants of the cutting dynamics model were obtained by averaging cutting forces. Tool diameter, cutting speed, feed, axial and radial depth of cut were considered as machining factors in neural network model of cutting dynamics. Cutting forces by test and by neural network simulation were compared and the vibration displacement during end-milling was simulated.

**Key Words** : Neural Network(신경회로망), Milling Process(밀링 공정), Cutting Dynamics(절삭동역학), Vibration(진동)

### 1. 서론

절삭 가공에 있어서 엔드밀을 이용한 가공은 널리 이용되고 있고, 엔드밀 가공시 다양한 절삭 조건들이 절삭력에 미치는 영향을 예측하기 위하여 많은 모델들이 개발되었다. Altintas 등<sup>(1)</sup>과 Minis 등<sup>(2)</sup>은 직선 날 엔드밀 가공에 있어서 일정한 비절삭 압력과 절삭력 비를 제시하였다. Tarng<sup>(3)</sup>은 증분식 접선력에 대한 비절삭 압력과 접선방향 힘에 대한 반경방향 힘의 비율을 회전 당 평균 칩 두께의 지수함수로써 표현하였고, Smith 등<sup>(4)</sup>은 일정한 절삭강성을 도입하였고 반경 방향 힘을 접선 방향 힘에 비례한다고 고려하였다.

이 모델의 비절삭력 계수는 절삭실험에서 얻어진 평균 절삭력으로부터 얻어진다. 본 논문에서는 엔드밀 가공시 절삭력을 예측하기 위하여 신경회로망을 이용한 머시닝 센터의 절삭동역학에 대한 모델을 제시한다. 절삭동역학은 칩 부하와 절삭 기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에서 모델링 된다. 이 모델을 가지고 엔드밀 공정의 절삭력을 예측하기 위하여<sup>(5-7)</sup> 다양한 절삭 조건에 대하여 직경 16mm와 20mm의 2 종류 2날 초경 엔드밀을 사용하여 각각 40 회의 절삭실험을 수행하였다. 각 절삭실험에 사용된 공구직경, 절삭속도, 이송률, 반경방향 절삭깊이, 축방향 절삭깊이를 신경회로망으로 학습시켜 절삭조건으로부터

\* 주저자, 군산대학교 기계공학부 (sinylee@kunsan.ac.kr)  
주소: 573-701 전북 군산시 미룡동 산 68

비절삭력계수를 구하는 프로그램을 작성하였다. 구조동역학의 모델을 수립하기 위하여 머시닝센터의 모달 실험을 수행하여 구조 동특성을 구하였으며, 절삭 특성과 구조 동특성을 이용하여 밀링 가공 중의 진동 변위를 예측하였다.

## 2. 구조 동역학

머시닝센터의 구조는 공작물이 설치되는 테이블 부분의 강성이 크고 주축에 지지된 공구계가 상대적으로 가장 유연한 부분이므로 Fig. 1과 같이 2 개의 직교 모드로 표현할 수 있다고 가정한다. 머시닝센터의 구조진동은 식 (1)과 같은 2 자유도 계로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} + c_1 \dot{x} + k_1 x &= F_x(t) \\ m_2 \ddot{y} + c_2 \dot{y} + k_2 y &= F_y(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $m_1$ ,  $c_1$ ,  $k_1$ 는  $x$ 축 방향(이송방향)의 질량, 감쇠, 강성을 나타내고,  $m_2$ ,  $c_2$ ,  $k_2$ 는  $y$ 축 방향(이송방향과 직교)의 질량, 감쇠, 강성을 나타내며, 이들은 모달 테스트를 통하여 구할 수 있다. Table 1과 같은 머시닝센터에 충격실험을 실시하여 구조동특성을 구하였으며, 충격해머로 가진한 신호와 가속도계에서 나온 신호를 Fig. 2와 같이 FFT변환하여  $x$ ,  $y$  각 방향으로의 주파수 응답함수를 얻었다. 사용한 충격해머는 PCB 086C20, 가속도계는 PCB 353B01, FFT분석기는 ACE DP104이다. 그 결과 얻

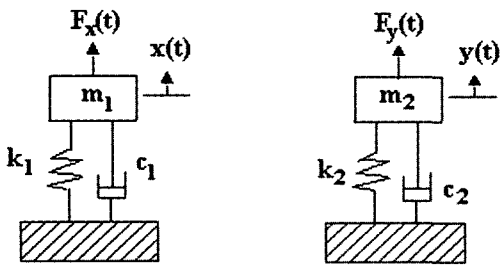


Fig. 1 F.B.D. of Structural model

Table 1 Specifications of machining center

Machining center	Tongil TNV-40
Spindle speed	40~4000 rpm
Tool	2 Flutes End mill D16, D20

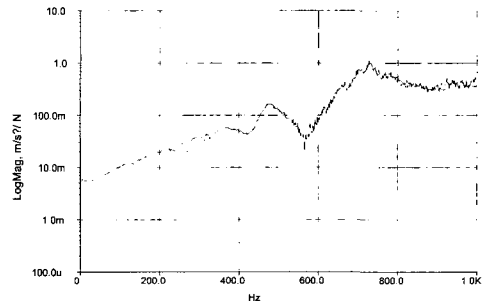
어진 모달상수를 Table 2에 나타낸다.

## 3. 절삭동역학과 신경회로망

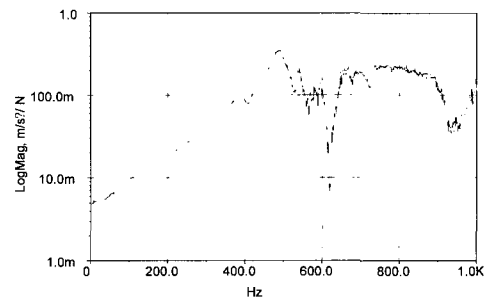
절삭력 예측의 기본 요소는 Fig. 3과 같이 공구에 작용되는 칩 부하(chip load)이고 식 (2)와 같이 설정하였다.

$$t_c = f \sin \beta \quad (2)$$

여기에서  $t_c$ 는 순간적인 칩의 두께,  $f$ 는 날 당 이송,  $\beta$ 는 절삭 중 공구날의 위치각을 나타낸다. 절삭력은 접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력으로 구성된다.



(a) X direction



(b) Y direction

Fig. 2 Modal testing of tool system

Table 2 Modal parameters of a machining center

	Equivalent mass (kg)	Equivalent damping (Ns/m)	Equivalent stiffness (N/m)
x-direction	91.8	14700	8.22E08
y-direction	28.3	10080	2.62E08

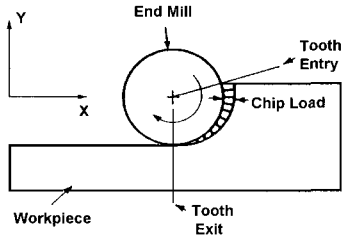


Fig. 3 Concept of end milling

$$\Delta F_{\tan} = K_T D_z t_c \quad (3)$$

$$\Delta F_{rad} = K_R \Delta F_{\tan} \quad (4)$$

위 식에서  $\Delta F_{\tan}$ 는 해당 날의 접선방향 힘,  $\Delta F_{rad}$ 는 날에 대한 반경방향 힘,  $D_z$ 는 축방향으로 절단한 미소절삭 폭,  $t_c$ 는 칩두께,  $K_T$ 와  $K_R$ 은 상수이다. 반지름이  $Rad$ , 날 수가  $N_f$  이고 나선각이  $\alpha_{hx}$ 인 공구에 의한 하향절삭의 경우에 대하여  $\beta$ 를 구하면

$$\beta(i, k, t) = -\theta(t) + 2\pi(k-1)/N_f + (i-0.5)D_z \tan \alpha_{hx} / Rad \quad (5)$$

여기에서  $i$ 는 축방향 미소원판의 번호,  $t$ 는 경과시간,  $k$ 는 날의 번호이다. 이  $\beta(i, k, t)$ 값 중에서 절삭범위 안에 해당하는 경우만이 절삭력에 기여하게 된다. 접선방향과 반경방향은 전체좌표계  $X, Y$ 로 분해될 수 있고, 그 합이 절삭력이 된다.

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_f} \{-\Delta F_{rad}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)] + \Delta F_{\tan}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)]\} \quad (6)$$

$$F_y(t) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_f} \{+\Delta F_{rad}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)] + \Delta F_{\tan}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)]\} \quad (7)$$

특정한 절삭조건에 대하여 평균절삭력을 구하면, 평균 절삭력은  $K_T, K_R$ 의 함수이므로 1회의 실험에서 1쌍의  $K_T, K_R$ 을 구할 수 있다.

한편, 신경회로망<sup>(8-13)</sup>은 다 입력 1출력의 뉴런(neuron)이라고 부르는 단위소자로 구성되고, 각 층 내의 뉴런의 내부 상태  $U_i^n$ (제  $n$ 층  $i$ 번째)와 출력  $O_i^n$ 은 결합계수  $W_{j,i}^{n-1,n}$

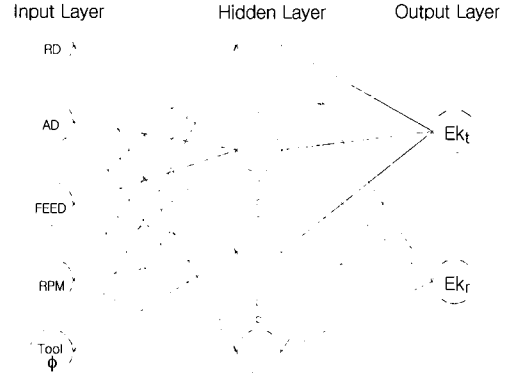


Fig. 4 Diagram of neural network architecture

(제  $n-1$ 층  $j$ 번과 제  $n$ 층  $i$ 번 사이의 가중치)와 역치를 사용하여 다음 식과 같이 표현된다<sup>(10,11)</sup>

$$U_i^n = \sum_{j=1}^{m^{(n-1)}} W_{j,i}^{n-1,n} O_j^{n-1} + \theta_i^n \quad (8)$$

$$O_i^n = f(U_i^n) \quad (9)$$

식 (8)에서  $m^{(n-1)}$ 은  $n-1$ 층의 뉴런의 수를 나타낸다. 본 논문에서는 활성화함수로 다음과 같은 시그모이드(sigmoid) 함수를 사용하였다.

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-ax}} - 1 \quad (10)$$

여기에서  $a$ 는 함수의 기울기를 나타내는 상수이고 각 뉴런마다 다른 값을 갖는다. 최종 층에서의 오차의 제곱을 평가함수로 놓고 이 평가함수가 최소로 되도록 각 층간의 결합계수 및 역치를 최급강화법을 이용하여 학습하는 것을 고려한다. 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 반경방향 및 축방향 절삭깊이, 공구직경, 절삭속도 및 이송속도를 입력으로 하여 비절삭력계수를 출력으로 하는 신경회로망을 구성하였고, 관성 항을 고려한 모멘트 방법을 이용하여 학습하였다<sup>(10)</sup>.

#### 4. 동적 절삭상태

동적 절삭상태(dynamic cutting state)를 고려하면, 절삭력으로 인하여 계의 거동이 발생하고 다시 이것이 절삭력에 영향을 미쳐서 절삭깊이에 변화를 주게 된다<sup>(1,14)</sup>. 재생(regeneration)이 없는 경우 칩두께의 변화를 나타내는 1차

피드백 편차  $u_p$ 는 식 (11)과 같다.

$$u_p(i, k, t) = +x(t)\sin\beta - y(t)\cos\beta \quad (11)$$

여기에서 양(+)의 부호는 상대진동 시 칩 두께의 증가를 나타내고, 음(-)의 부호는 감소를 나타낸다.

칩 두께는 앞의 날에서 남겨진 양에 의해서도 변화하고 이것을 재생이라고 한다.  $(k-1)$ 날에 의하여 남겨진 양은  $T$ 초 후에  $k$ 번째 날이 이 위치에 올 때  $k$ 번째 날의 칩두께를 증가시킨다. 이것을 재생 피드백(regeneration feed-back)이라고 한다. 재생 피드백에 의한 편차, 즉 재생편차  $u_R$ 을 수식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$u_R(i, k, t) = -\mu x(t-T)\sin\beta + \mu y(t-T)\cos\beta$$

단,  $T = 60/(n \cdot N_f)$  (12)

칩 두께의 총 편차는 1차 및 재생편차의 합이고, 순간적인 칩 두께는 공칭 칩 두께와 총 편차의 합이다.

$$t_c(i, k, t) = fs\sin\beta + \{u_p(i, k, t) + u_R(i, k, t)\}$$

$$= [\sin\beta, \cos\beta] \begin{Bmatrix} x(t) - \mu x(t-T) + f \\ -y(t) + \mu y(t-T) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

절삭력을 정리하면 다음의 식 (14) 및 (15)와 같다.

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \{-K_R K_T D_z \sin\beta(i, k, t) + K_T D_z \cos\beta(i, k, t)\} t_c(i, k, t)$$

(단,  $\alpha_{ex} \leq \beta \leq \alpha_{en}$ ) (14)

$$F_y(t) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \{+K_R K_T D_z \cos\beta(i, k, t) + K_T D_z \sin\beta(i, k, t)\} t_c(i, k, t) \quad (15)$$

따라서 식 (16)과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{Bmatrix} = K_T D_z \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \begin{bmatrix} -K_R s_b^2 + c_b s_b & K_R s_b c_b + c_b^2 \\ K_R c_b s_b + s_b^2 & K_R c_b^2 + s_b c_b \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} +x(t) - \mu(x(t-T) + f) \\ -y(t) + \mu y(t-T) \end{Bmatrix} \quad (16)$$

여기에서  $s_b = \sin\beta$ ,  $c_b = \cos\beta$ 이고, 식 (16)을 식 (1)에 대입하면 최종적으로 머시닝센터에 대한 운동 방정식을 얻을 수 있다.

### 5. 절삭력 및 진동 변위 예측

머시닝센터에서 다양한 조건의 절삭실험에 의하여 비절삭력 계수를 실험적으로 결정하였다. 실험장비로 공구동력계는 Kistler 9257B, 증폭기는 Kistler 5019A를 사용하였다. 절삭실험에 사용된 절삭 조건은 Table 3과 같고, Fig. 5는 절삭실험의 개요를 나타낸다.

주어진 절삭조건에 대한 절삭실험으로부터 얻어진 평균 절삭력은 Table 4와 같다. 평균 절삭력으로부터 비절삭력 계수를 구할 수 있으며, 이때의 절삭조건과 비절삭력계수 사이의 관계를 신경회로망 학습으로 구하였다. 절삭실험에서 사용된 반경 방향 절삭깊이, 축 방향 절삭깊이, 이송, 주축 회전수, 공구직경을 입력으로 하고, 중간층(hidden layer) 유닛 수 30, momentum 0.9로 설정하였다.

Figs. 6~9는 Table 5와 같은 조건에 대하여 실험으로부터

Table 3 Cutting conditions for tests

End mill	$\phi 16$	$\phi 20$
No. of flutes	2	2
Radial depth of cut (mm)	2, 4, 6, 8, 10	
Axial depth of cut (mm)	12, 20	
Feed rate (mm/min)	85, 120	67, 85
spindle speed (R. P. M.)	600, 900	480, 600

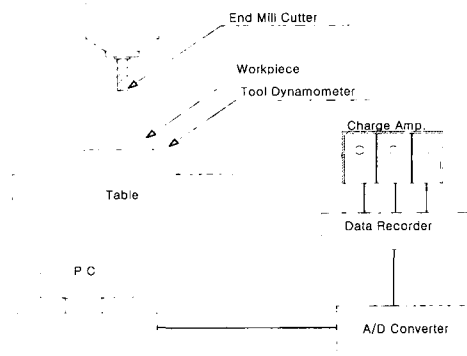


Fig. 5 Schematic diagram of the cutting tests

터 구한 절삭력과 시뮬레이션으로 구한 절삭력을 비교하여 나타낸 것이다. Figs. 6~9의 결과를 보면, 실험결과에 약간의 잡음이 있는 것을 제외하면, 절삭력 평균치를 이용하여 학습하였음에도 불구하고 시간영역에서 절삭력의 패턴이 실험치와 신경회로망의 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

신경회로망 학습의 경우 은닉층 뉴런의 수에 따라 작은 차이가 발생하지만, 학습 결과 얻어진 평균 절삭력은 실험에서 얻은 평균 절삭력과 잘 일치하였으며 학습결과 얻어진 평균 절삭력의 오차비율은 Table 6과 같다.

동적 절삭상태 방법에 의하여 절삭 중의 진동 변위를 예

Table 4 Average cutting force samples

Tool dia. (mm)	Radial depth (mm)	Axial depth (mm)	RPM	Feed (mm/min)	Fx (N)	Fy (N)
16	2	20	600	85	294.2	409.4
16	6	20	600	85	455.8	1123.
16	10	20	600	85	117.4	1897.
16	4	20	900	85	325.6	611.5
16	8	20	900	85	204.7	1272.
16	4	20	600	120	576.9	1035.
16	8	20	600	120	406.5	2139.
16	4	20	900	120	376.9	539.3
16	8	20	900	120	254.1	1369.
20	4	12	480	67	389.8	542.5
20	2	12	600	67	210.1	218.9
20	8	12	600	67	262.2	1061.
20	6	12	480	85	480.5	1221.
20	2	12	600	85	168.3	199.1
20	4	20	480	67	557.4	884.4
20	4	20	600	67	420.2	859.6
20	10	20	600	67	165.8	2413.
20	8	20	600	85	542.9	2998.

Table 5 Cutting conditions applied at Figs. 6~9

Figs.	RPM	Tool dia. (mm)	Radial depth (mm)	Axial depth (mm)	Feed (mm/min)
6, 7	600	16	4	12	120
8, 9	900				

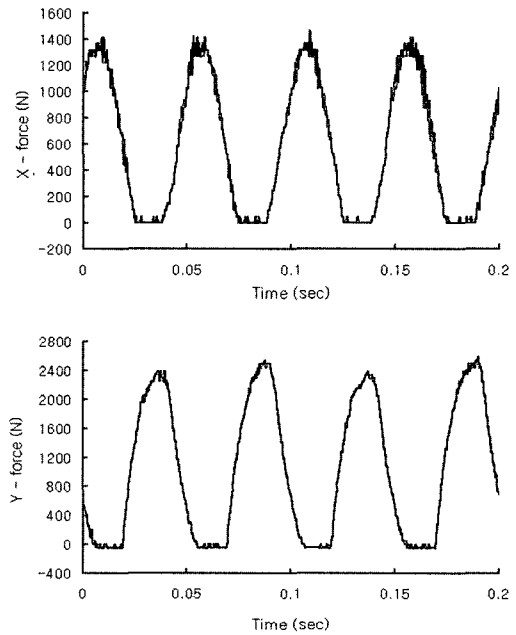


Fig. 6 Measured cutting force in end milling experiment A

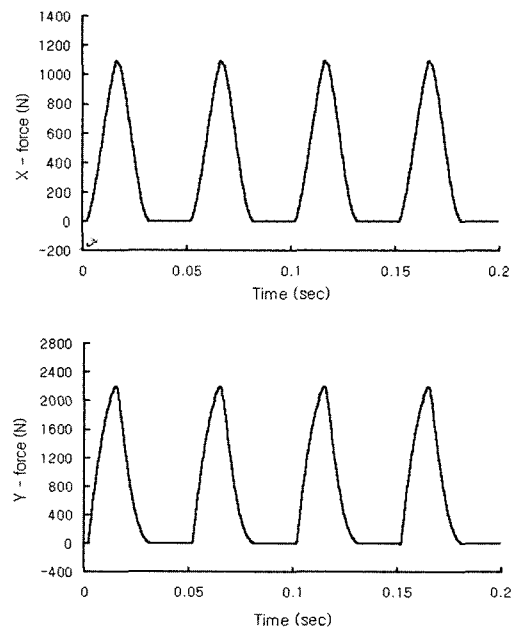


Fig. 7 Simulated cutting force for the test given in Fig. 6

측하는 프로그램을 작성하였고, 그 프로그램에 의하여 여러 절삭조건에 대한 진동 변위를 시뮬레이션 하였으며, 그 중 두 가지의 경우를 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 나타내었다.

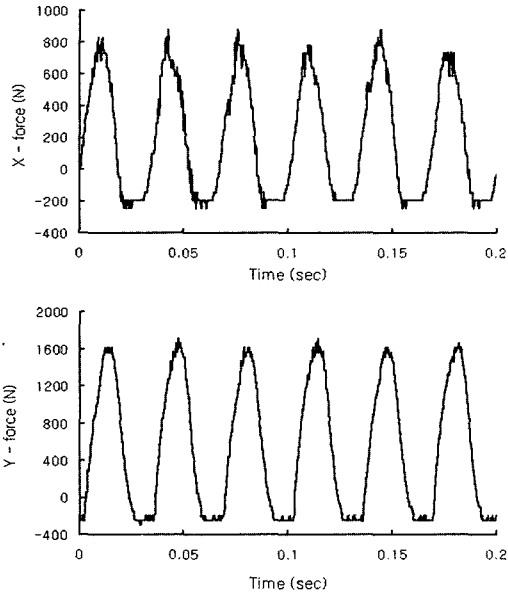


Fig. 8 Measured cutting force in end milling experiment B

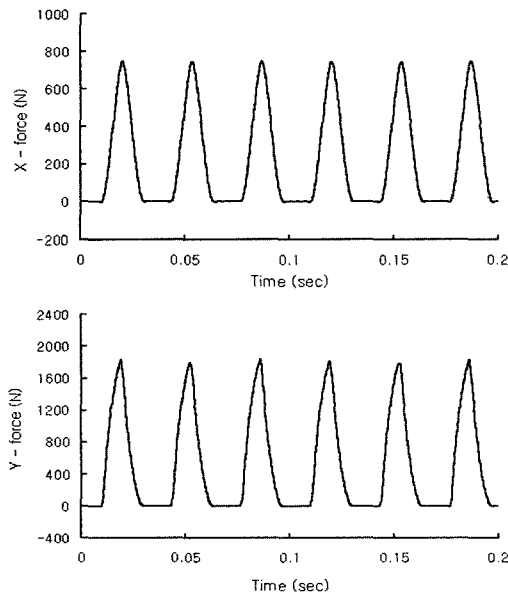
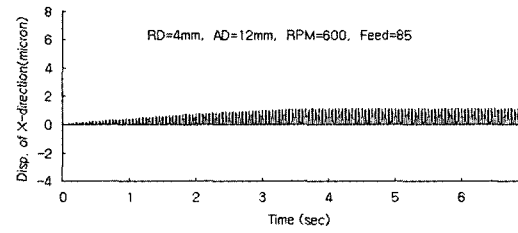


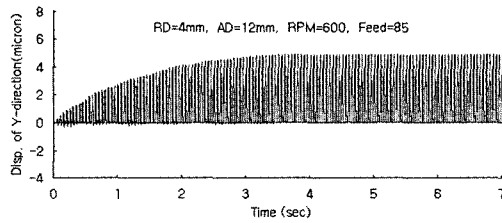
Fig. 9 Simulated cutting force for the milling test given in Fig. 8

Table 6 Average errors of neural network

No. of units in hidden layer	Average error in Fx	Average error in Fy
30	0.19%	0.15%
35	0.13%	0.11%

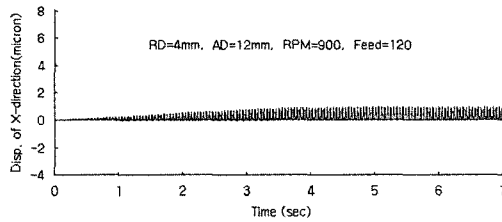


(a) Feed direction

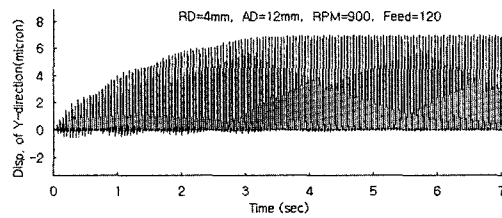


(b) Normal to feed direction

Fig. 10 Dynamic displacement prediction (Tool dia. 20, RD=4, AD=12, 600 rpm, feed 85 mm/min)



(a) Feed direction



(b) Normal to feed direction

Fig. 11 Dynamic displacement prediction (Tool dia. 16, RD=4, AD=12, 900 rpm, feed 120 mm/min)

여기에서 RD는 반경방향 절삭깊이를, AD는 축방향 절삭 깊이를 나타낸다.

## 6. 결론

본 논문에서는 밀링 공정 중 발생하는 진동 변위를 예측하기 위하여 구조 동특성을 모드 실험에 의하여 구하고, 절삭특성은 신경회로망을 이용한 학습에 의하여 구하였다. 신경회로망으로부터 구한 절삭 특성에 의하여 시뮬레이션한 평균 절삭력은 실험에 의하여 구한 평균 절삭력과 비교하여 오차 1%미만으로 잘 일치하였다. 구조동특성과 절삭 동특성의 상호 작용을 고려하는 동적 절삭상태 방법을 제안하였고, 이 방법에 의하여 구조동특성과 절삭 동특성을 조합해 절삭 중의 진동 변위를 예측하였다.

절삭 중의 진동을 실측하여 예측치와 비교 검토하는 연구는 공구가 고속회전하고 칩이 발생하는 등 여러 가지 난점으로 수행되지 못하여 차후 진행하고자 한다.

## 참고 문헌

- (1) Altintas, Y. and Ghan, P. K., 1992, "In Process Detection and Suppression of Chatter in Milling", *Int. J. Machine Tool Des. Res.*, Vol. 32, pp. 329~347.
- (2) Minis, I., Yanushevsky, R. and Tembo, A., 1990, "Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling", *Annals of CIRP*, vol. 39, pp. 459~462.
- (3) Tarnq, Y. S., Cheng, C. I. and Kao, J. Y., 1995, "Modeling of Three-Dimensional Numerically Controlled End Milling Operations", *Int. J. Machine Tool Des. Res.*, Vol. 35, pp. 939~950.
- (4) Smith, S. and Tlustý, J., 1993, "Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling", *Annals of CIRP*, vol. 42, pp. 463~466.
- (5) Namkoong, C. and Yellowley, I., 2001, "Contour Machining Error in NC Milling Process", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 6, pp. 116~125.
- (6) Choi, J. G., Yang, M. Y. and Youn, J. W., 2001, "A Study on the Characteristic of Machined Surface by High Speed Ball End Milling", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 6, pp. 126~134.
- (7) Hong, M. S., 2002, "A Study on the Instantaneous Shear Plane Based Cutting Force Model for End Milling", *Trans. of KSMTE*, Vol. 11, No. 4, pp. 34~43.
- (8) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., 1986, "Learning Representations by Back Propagating Errors", *Nature*, Vol. 323, pp. 533~536.
- (9) Murata, J., Fujii, H., Ikeda, K., Hirasawa, K. and Sagara, S., 1995, "A Structure Design Method for Multilayer Neural Networks Based on Redundancy Test", *Trans. of SICE(Japanese)*, Vol. 31, No. 2, pp. 236~243.
- (10) Shiotsuka, T., Ohta, K., Yoshida, K. and Nagamatsu, A., 1993, "Identification and Control of Four-Wheel-Steering Car by Neural Network", *Trans. JSME(Japanese)*, Part C, Vol. 59, pp. 708~713.
- (11) Lee, S. Y. and Jeong, H. S., 1996, "Vibration Control of Moving Structures by Neural Network", *Trans. of KSPE*, Vol. 13, No. 9, pp. 138~148.
- (12) Cha, Y. H., Kim, I. S., Kim, H. S., Lee, Y. S., Kim, D. J., Sung, B. S. and Suh, J. Y., 2000, "A Study on the Prediction of Welded Residual Stresses using Neural Network", *Trans. of KSMTE*, Vol. 9, No. 6, pp. 89~95.
- (13) Hong, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2001, "A Study on Fatigue Damage Model Using Neural Networks", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 4, pp. 14~21.
- (14) Kim, M. K., 2001, "Diagnosis of Chatter Vibration using Frequency Domain in a Milling Process", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 3, pp. 12~18.