

# NC 工作機械 同時多軸制御에서의 오차 저감 A Study on Reducing Profile Error of Multi Spindle Control in NC Machine Tools

박종봉\*

Jong-Bong Park

<Abstract>

This paper presents reducing method of profile error on a mechanical tuning for multi-spindle control of NC machine tools. To reduce the profile error in the feed drive system, it is useful to adopt same transfer function of multi spindle machine tools. By selecting the correction vector of servo rigidity and natural vibration on JK map, multi spindle control can be tuned by mechanical parameters with small profile error.

**Key Word : Profile Error, Feed, Drive System, Servo Rigidity Natural Vibration, Mechanical Parameter**

## 1. 서론

NC공작기계의 이송구동계는 NC서보부와 이송구동기구부로 구성되어 있으며 제품의 정밀도에 큰 영향을 미친다.<sup>1,2)</sup> 이송구동계의 피드백 루프내에 이송구동기구의 전달 특성이 포함되어 있기 때문에 이송구동계의 서보 특성은 서보파라메타 뿐만 아니라 기구부의 특성에 의해 큰 영향을 받는다.<sup>3)</sup> 따라서 피드백 루프의 안정성을 고려한 서보파라메타 조정을 하는 경우는 이송구동기구의 전달 특성을 파악하는 것이 필요하며 높은 이송구동 성능을 얻기 위해서는 서보파라메타 뿐만 아니고 기구부의 최적화 정도모하는 것이 중요하다. 이를 위하여 응답성

을 이송방향 고유 진동수로 평가하여 볼스크류의 지름을 최적화하는 시도가 있었으나 최종적인 이송구동계의 평가치와 서보파라메타의 관계를 규명하지는 못했다.<sup>4)</sup> 따라서 본 연구에서는 평가치와 서보강성을 평가함수로 하여 서보파라메타 조정 방법에 관하여 고찰하고 실제 가공에서 많이 사용되는 동시다축 제어를 사용한 직선보간과 원호보간등 복수의 제어축을 대상으로 한 윤곽 오차 저감법을 제안하고자 한다.

## 2. NC공작기계의 기계적 파라메타 조정

### 2.1 고유진동수의 조작 변수.

\* 정회원, 경일대학교 기계공학부 교수, 工博  
인하대학교 대학원 졸업  
712-701 경북 경산시 하양읍 부호리33

Professor of Mech. Dpt. Kyungil University  
Science & Technology Ph. D.  
jongb@bear,kyungil.ac.kr



NC공작기계의 이송구동계의 모델은 Fig.1과 같고 고유진동수  $\omega$ 는 연립운동방정식의 고유값으로 식(1)과 같이 구해진다. <sup>5,6)</sup>

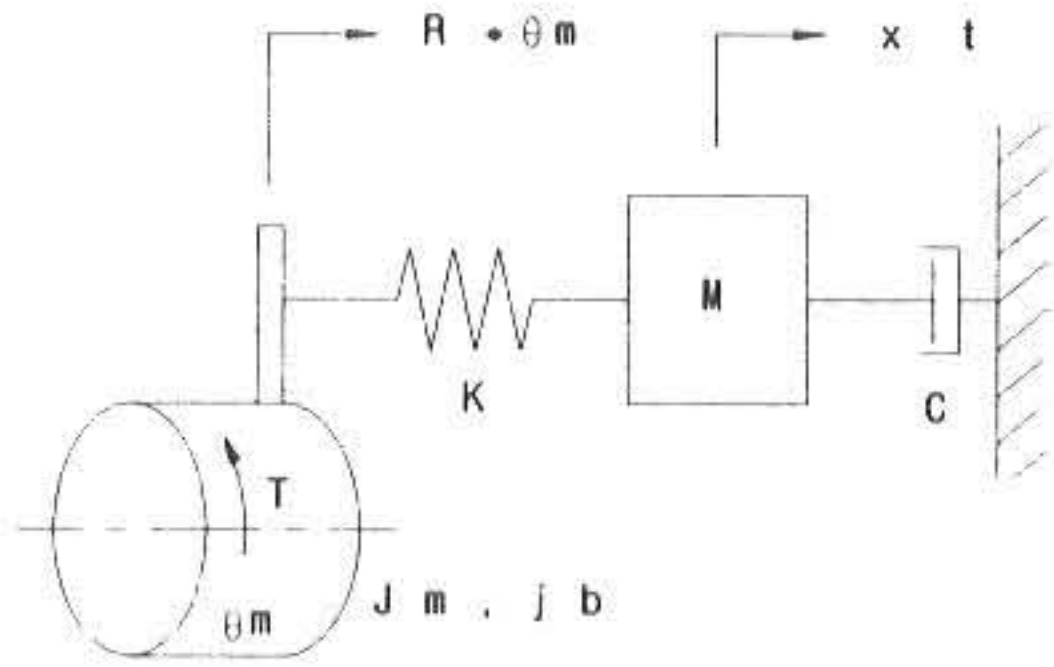


Fig.1 Model of feed drive mechanism

$$\omega = \frac{K_s \cdot (J/R^2 + M)}{(M + M_b) \cdot (J/R^2) + M \cdot M_b} \quad (1)$$

- 여기서 J : 회전체의 관성모멘트
- Ks: 볼스크류의 이송방향의 강성
- R : 회전운동으로부터 직선운동으로의 변환 정수
- M : 피구동부 질량
- Mb: 볼스크류의 질량

全負荷 관성모멘트를  $J_a (Nm \cdot s^2)$  로 하면, 일반적으로  $M \gg M_b$ 이므로 고유 진동수  $\omega$ 는 식(2)와 같이 구해진다.

$$\omega = \sqrt{K_s/M \cdot (J/J_a)} \quad (2)$$

또 리드 p가 작은 경우 실용적인 개략계산에는  $J/J_a \approx 1$  이라면

$$\omega = \sqrt{K_s/M} \quad (3)$$

로 근사한다. 최근에는 고속의 이송속도를 얻기 위하여 리드 p를 크게 하는 경향이므로  $J/J_a \approx 1$  로 보지 않는 경우도 많다. 피구동질량 M과 회전체의 관성모멘트 J를 이송방향으로 환산한 질량 M', 식(2), (3)을 사용하여 고유진동수를 계산한 결과와 이들간의 비율을 Table 1에 나타냈다. 식(3)에서  $J/J_a=1$  로 한 고유진동수의 계산값과 식(2)를 사용하여 계산한 결과보다 약 5% 작았다. M/M'가 크게 될 수록 식(3)을 이용한 계산 결과와 식(2)를 이용

한 계산 결과가 근사하게 된다. 일반적으로 소형기계의 경우에는 볼스크류와 서보모터의 관성모멘트는 작으므로 식(2)를 사용하게 되고

Table 1 Mass and natural frequency of machine tools

| Axis | M(kg) | M'(kg) | $\omega$ |        |       |
|------|-------|--------|----------|--------|-------|
|      |       |        | Eq.(2)   | Eq.(3) | Ratio |
| X    | 241   | 3476   | 206.3    | 199.6  | 0.97  |
| Y    | 676   | 5829   | 132.9    | 125.8  | 0.95  |
| Z    | 1061  | 5998   | 105.5    | 98.3   | 0.93  |

中, 大型공작기계에는 식(3)으로도 상당히 정확한 고유진동수가 산출되어 질 수 있다. 본 연구에서는 보다 일반적인 식(2)에 의하여 이송구동계의 고유진동수를 산출하였다. 고유진동수  $\omega$ 를 조작시키는 것은 관성모멘트  $J_a$  (J를 포함) 및 이송 방향 강성  $K_s$ 이다. J K 지도상에 고유진동수  $\omega$ 가 같은 점을 연속적으로 연결한 곡선을  $\omega$ 곡선이라 하고 식(2)를 변형시킨 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$K = \omega^2 \cdot M \cdot (J/J_a) \quad (4)$$

여기서 K는 이송방향강성이다. 식(4)에 J, K의 값을 주어서 목표의 고유진동수  $\omega$ 로 되는 피구동부 질량 M을 구할수 있다. 구동체 질량을 저감시키기가 대단히 어려우므로 조작 변수로서 적절하지 않으나 테이블의 최대 적재질량의 변화로 질량을 증가시키는 것은 가능하다. J와 K의 수정벡터에 한계가 생길 경우 질량 M의 변경으로 고유진동수를 조정할 수도 있다.

## 2.2 加減速時의 최대 負荷質量

서보모터의 토크는

$$T = J \cdot (d\omega/dt) \quad (5)$$

로 표현된다. 서보모터의 최대토크  $T_{max}$ 는 다음식으로 나타낼수 있다.



$$T_{max} = \frac{2\pi \cdot N_{max}}{6 \cdot tr} \cdot (J + R^2 \cdot M) = \frac{p^2 \cdot N_{max}}{377 \cdot tr} (M + M) \quad (6)$$

여기서  $N_{max}$  : 모터의 최고회전수( $\text{min}^{-1}$ )  
 $tr$ :가감속시 정상이 될 때까지의 소요시간  
 서보모터가 구동할수 있는 최대 부하 질량  $M_{max}$ 는

$$M_{max} = (M + M)_{max} = 337 \cdot T_{max} \cdot tr / p^2 \cdot N_{max} \quad (7)$$

로 나타낼수 있다.  
 식(7)을 중력가속도  $G$ 를 사용하여 식(8)과 같이 나타낼수 있다.

$$M_{max} = 0.64 \cdot T_{max} / p \cdot G \quad (8)$$

### 2.3 調整 手順

공작기계의 파라메타를 조정(tuning) 하기 위하여 다음 수순의 과정을 거친다.

- (1) 공작기계의 사양에 나타난 제원으로 식(2)을 사용하여 각축의 고유 진동수를 계산하여 그중 가장 낮은 값을 가진 축부터 조정한다.
- (2) 현재의 설계값( $J_0, K_0$ )를 중심으로  $J, K$ 를 점차 증가시켜 그때의 조건으로 얻어질 수 있는 최대 서보 강성값을 등고선으로 연결하여 JK지도를 작성한다.
- (3) 수정 벡터를 계산하여 JK 지도에 추가 기록한다. 설계 목표의 서보 강성, 시작하는 시간을 만족하도록 수정 벡터를 선택한다.
- (4) 고유 진동수가 그 다음으로 낮은 축을 조정한다. JK지도상에 식(3)에 의한  $\omega$ 곡선을 그린다.
- (5) 조정의 목표 조건을 만족하는 범위내에서  $\omega$ 곡선에 근접하도록 기계적 조정을 행한다. 서보 강성 값을 목표 조건을 만족하는 범위라면 현재의 값보다 작은 값으로 하여도 상관없다.
- (6) 위의 (4)의 조작을 나머지 축에 행하여 얻어진 각축의 설계 파라메타를 최종적인 설계값으로 결정한다.

## 3. 다축동시제어에서의 윤곽오차 저감

### 3.1 正常 常態에서의 윤곽 오차를 저감

多軸同時制御에 있어서 追從오차의 비가 이송

방향과 일치하지 않을 경우 그림2에서와 같이 윤곽오차가 생긴다. 추종오차의 정상값  $e_t$ 는 식(9)에 나타난 것과 같이 위치 루프의 응답 지연에 기초한 추종오차의 정상값  $e_p$ 에, 가감속에 기초를 둔 추종오차를 더한 것이다.

$$e_t = (K_a + T_s) \cdot F \quad (9)$$

여기서  $K_a$  :  $\frac{D/(V_g \cdot K_t) + 1 - K_f}{K_p}$

$K_t$  : 서보 모터의 토크 정수

$K_f$  : 피이드 포워드 게인

$K_p$  : 위치 증폭 게인

$T_s$  : 加減速時定數

$D$  : 피구동체 섭동면의 점성계수를 볼스크류의 축회전으로 환산한 값

$V_g$  : 속도비례게인

$F$  : 이송속도

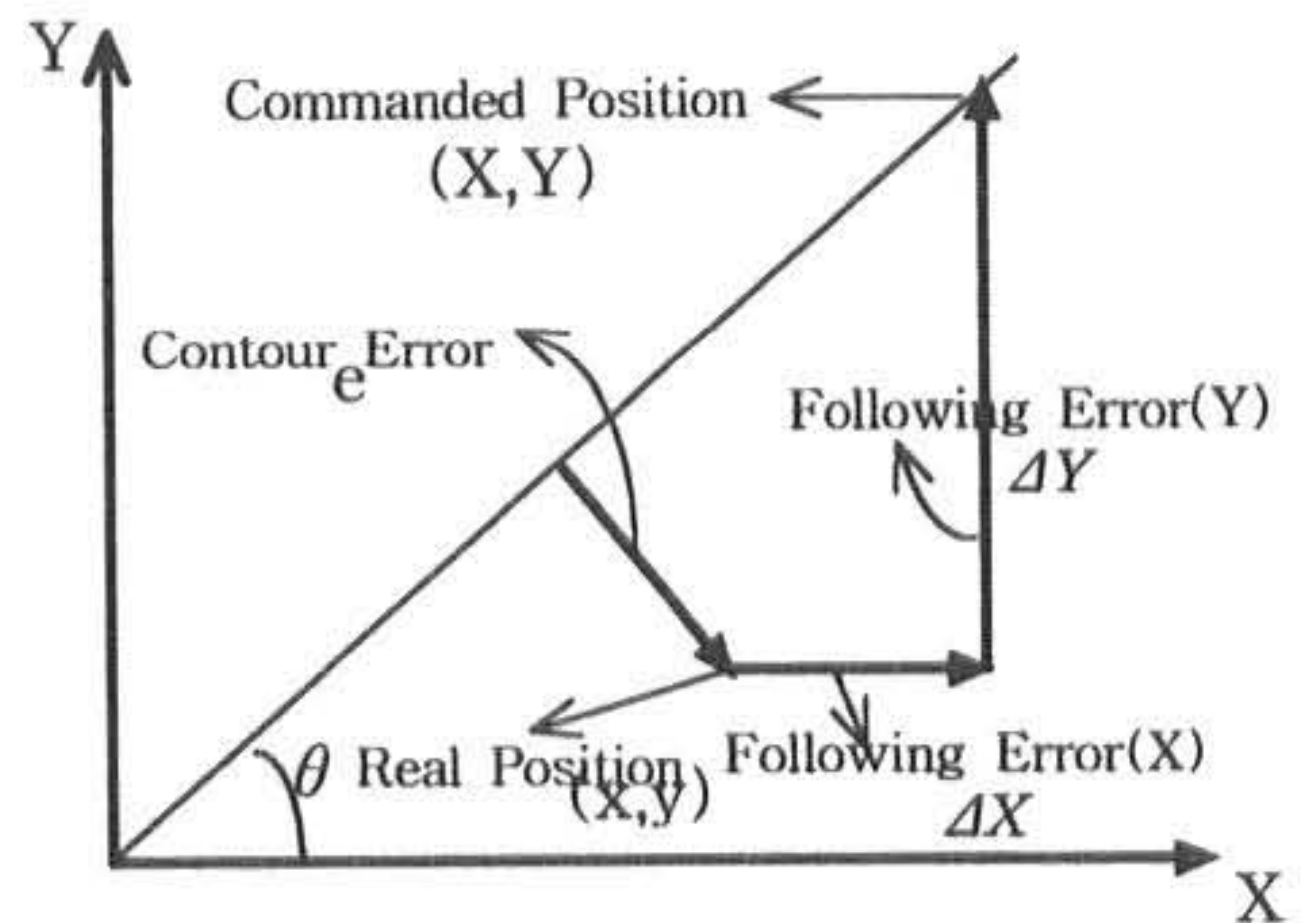


Fig.2 Profile error of multi spindle control

이송속도  $F$ 의 軸分配比는 이송속도 방향의 기울기와 같으므로 각축의 추종오차의 비를 이송 방향의 기울기와 일치시키기 위해서는 각축의  $K_a$ 를 거의 같게 해야한다.  $K_f, T_s$ 의 설정은 다른 파라메타에 의존되므로 우선  $K_p$ 를 일치시킨다. 직선 보간시의 추종오차를 거의 없게 하기 위하여 식(10)과 같이 피이드포워드게인을 줄수 있다.

$$K_f = 1 + D / (V_g \cdot K_t) \quad (10)$$

### 3.2 過渡應答時의 윤곽오차의 저감

과도응답시의 윤곽오차를 고려하는 경우의 조정은 정상상태에서 "각축의 속도제어기의 전달함수  $K_v(s)$ 와 전류-각속도 사이의 전달함수



Gw(s)를 곱한 값을 같게 한다.”라는 제약이 가해지지 않으면 안된다.<sup>7)</sup> 서보강성이 최대가 되도록 각 루프내의 서보 파라메타를 설정하여 Kf를 식(10)에 의하여 구한다. Kv(s)·Gw(s)를 2축에 같게 하기 위한 구체적인 방법에 대하여 검토하면 전류와 각속도간의 전달함수Gw(s)는 식(11)에 나타난 1차 지연형의 전달함수 Gw2(s)로 근사되어 진다.

$$Gw_2(s) = Kt/(Ja \cdot s + D) \tag{11}$$

이때 Kv(s)·Gw2(s)는

$$Kv(s) \cdot Gw_2(s) = \frac{a \cdot Vg \cdot Kt \cdot (Tv \cdot s + bVt + 1)}{(ja \cdot s + b)(Tv \cdot s + 1)} \tag{12}$$

이 된다. 식(12)에 의하여 Kv(s)·Gw2(s)를 2축이 같게 하는 제약 조건은 아래와 같다.

$$Vgx/Vgy = Jax/Tay \tag{13}$$

$$\frac{s + (b \cdot Vix + 1)/Tv}{s + Dx/Jax} = \frac{s + (b \cdot Viy + 1)/Tv}{s + Dy/Jay} \tag{14}$$

일반적으로  $Dx/Jax \neq Dy/Jay$ 이므로 임의의 s로 식(13), (14)가 성립되기 위해서는 아래 식이 성립되어야 한다.

$$Vix = (Tv \cdot Dx/Jax - 1)/b \tag{15}$$

$$Viy = (Tv \cdot Dy/Jay - 1)/b \tag{16}$$

1축만을 고려할 경우에는 실현가능 범위내에서 속도 루프파라메타에 관하여 안정성을 만족하는 최대의 Kp를 각각 구하고 평가함수인 서보강성H가 최대가 되는 Vg, Vi, Kp를 선택한다. 2축을 동시제어하는 경우는 Kp값이 큰 축의 값을 다른 축의 Kp값으로 변경한다. Kpx를 작게 하는 경우 Vgx, Vix이외에 H가 최대가 되는 가능성이 있으므로 다시 한번 실현 가능 영역내의 루프파라메타(Kp, Vi)의 조합에 관하여 서보 강성H를 구하여 H가 최대가 되는 조합을 선택할 필요가 있다.

### 3.3. 조정 알고리즘

동시 다축 제어에 있어서 정상 상태에서의 윤곽오차를 저감시키기 위하여는 각 제어 축 간에 (1) Kp (2) Ts (3)  $\{D/(Vg \cdot Kt) + 1 - Kf\}$

의 3개의 값을 같게 하지 않으면 안 된다.

이 제약 조건하에 1축만의 고려한 경우와 같이 서보 강성이 최대한 크게 되도록 각 루프내의 서보 파라메타를 설정하여 Kf를  $\{1 + D/(Vg \cdot Kt)\}$ 보다 작은 최대값으로 크게 잡는다. 1축만을 고려한 결과 보다 Kp, Kf를 작게, Ts를 크게 하는 것은 문제가 없으나 Kp, Kf를 크게, Ts를 작게 하면 안정성과 진동 때문에 불가능하다. 따라서 각축간에 Kp, Ts를 같게 하려면 Kp를 가장 작은 값으로 맞추고 Ts를 가장 큰 축에 맞추지 않을수 없다. X, Y 축 가운데 1축만을 고려한 서보파라메타 조정(조정1)을 행하여 얻어진 서보파라메타의 값은 Table 2와 같다.

Table 2 Servo parameter after tuning 1

| Axis | Kp(s <sup>-1</sup> ) | Ts(s) | Vg (A · s/rad) | Vi(-) | Kf(-) |
|------|----------------------|-------|----------------|-------|-------|
| X    | Kpx                  | Tx    | Vgx            | Vix   | Kfx   |
| Y    | Kpy                  | Ty    | Vgy            | Viy   | Kfy   |

동시 다축제어에서의 정상오차 및 과도응답시의 윤곽오차 저감을 위한 조정 알고리즘은 아래와 같다.

- (1) 식(15) (16)을 이용하여 Vix, Viy를 결정한다.
- (2) Vg, Vi의 실현 가능영역 및 (1)에서 결정된 V로부터 각축의 Vg의 최대값을 구한다.  
Vgx/Vgy는 식(14)의 관계를 만족해야 하므로 어느쪽의 값이던 작게 하여 조정한다.
- (3) 이상의 속도루프파라메타를 사용하여 안정조건을 만족하는 최대의 Kp를 구하여 각축의 Kp중 작은 것을 공통의 값으로 잡는다.
- (4) 1축의 서보파라메타 조정법으로부터 각축마다 Kf, Ts를 계산한다.
- (5) Ka를 각축에 일치시킨다.
- (6) 가감속시정수 Ts를 각축에 일치시킨다.  
Ts를 작게하는 것은 기계진동의 관점에서 문제가 있으므로 각축의 Ts를 비교하여 가장 큰 값으로 조정한다.

### 3.4 다축조정의 확인 실험

다축동시제어에서의 다축조정의 효과를 확인하



기 위하여 사용한 공작기계는 금형가공용 머시닝센터로서 사양은 Table 3과 같다. 정상상태만을 고려하는 경우는 Table 2로부터 Y축의  $K_p$ 가  $46(s^{-1})$ 로 가장 작으므로 X, Z축도 실현 가능 영역의 속도 루프파라메타에 관하여  $K_p = 46(s^{-1})$ 로 고정한 뒤 서보강성 H가 최대가 되는  $V_g, V_i$ 를 구한다. 결과로서 H가 최대가 되는  $V_g, V_i$ 는 1축만을 고려한 경우(조정1)와 결과와 큰 변함이 없었다. 조정1의 완료후의 서보파라메타는 Table 4와 같다.

Table 3 Specification of Machining Center for experiments

| Axis                                   | X                   | Y     | Z     |
|--|---------------------|-------|-------|
| Ball screw diameter(mm)                | 36                  | 36    | 36    |
| Distance between bearing of ball screw | 877.5               | 690.5 | 703.5 |
| CPU                                    | 32 Bit              |       |       |
| Servo control                          | Closed loop control |       |       |

Table 4  $K_p, V_g, V_i$  after tuning 1

| Axis | $K_p(s^{-1})$ | $V_g (A \cdot s/rad)$ | $V_i(-)$ |
|------|---------------|-----------------------|----------|
| X    | 46            | 186                   | 1705     |
| Y    | 46            | 171                   | 1805     |
| Z    | 46            | 181                   | 1405     |

NC공작기계 제조회사에서 추천되는 표준 설정치에 비하여 조정 완료후의 서보 강성은 X축에서 약 4.1배, Y축에서 4.1배, Z축에서 약 3.4배 정도되었다. 다음으로 피드포워드 이득  $K_f$  및 가감속 시정수  $T_s$ 를 설정한다. 지수함수 가감속의 경우  $K_p, V_g, V_i$ 를 Table 4에 나타난 값으로 설정하여 각축의  $K_f, T_s$ 를 구하면 Table 5와 같이  $T_s$ 는 일치되지 않았다.

Table 5 Feedforward gains and acceleration constants

|          | Logarithm function acceleration |        |        | Linear function acceleration |        |        |
|----------|---------------------------------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|
|          | X Axis                          | Y Axis | Z Axis | X Axis                       | Y Axis | Z Axis |
| $K_f(-)$ | 1.008                           | 1.0012 | 1.009  | 0.72                         | 0.67   | 0.71   |
| $T_s(s)$ | 0.026                           | 0.027  | 0.028  | 0.048                        | 0.054  | 0.047  |

지수함수 가감속의 경우 Z축의  $T_s$ 가 최대가 되므로 X, Y축의  $T_s$ 를 Z축의  $T_s$ 와 일치시킨 조정 결과는 Table 6과 같다. 직선가감속의 경우에는 Table 5에서와 같이 Y축의  $K_f$ 가 최소가 되었다.  $(1 + D/(V_g \cdot K_f) - K_f)$ 를 각축에 일치시키기 위해서 X축 및 Z축의  $K_f$ 를 0.70으로 한다.  $T_s$ 는 X, Z축의  $T_s$ 를 54(ms)로 변경하여 조정한 결과는 Table 7과 같다

Table 6 Parameters after tuning with logarithm function acceleration

| Axis | $K_p(s^{-1})$ | $T_s(s)$ | $V_g (A \cdot s/rad)$ | $V_i(-)$ | $K_f(-)$ |
|------|---------------|----------|-----------------------|----------|----------|
| X    | 46            | 0.028    | 186                   | 1710     | 1.0008   |
| Y    | 46            | 0.028    | 171                   | 1810     | 1.0012   |
| Z    | 46            | 0.028    | 181                   | 1410     | 1.0009   |

Table 7 Parameters after tuning with linear function acceleration

| Axis | $K_p(s^{-1})$ | $T_s(s)$ | $V_g (A \cdot s/rad)$ | $V_i(-)$ | $K_f(-)$ |
|------|---------------|----------|-----------------------|----------|----------|
| X    | 46            | 0.054    | 186                   | 1710     | 0.67     |
| Y    | 46            | 0.054    | 171                   | 1810     | 0.67     |
| Z    | 46            | 0.054    | 181                   | 1410     | 0.67     |

3.5 過渡 응답시를 고려한 조정(조정2)

이송구동기구의 파라메타 同定 결과로부터 유도된 각축의  $J_a, D$ 의 값을 사용하여 식(15), (16)으로부터 각축의  $V_i$ 를 결정하면 Table 8과 같이 되었다.

Table 8 Parameters after tuning 2

| Axis                       | X      | Y      | Z      |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| $J_a(N \cdot m \cdot s^2)$ | 0.0057 | 0.0056 | 0.0048 |
| $D(N \cdot m \cdot s)$     | 0.168  | 0.252  | 0.170  |
| $V_i(-)$                   | 423    | 649    | 509    |
| $V_s(A \cdot s/rad)$       | 188    | 186    | 159    |
| Max. $K_p(s^{-1})$         | 71     | 63     | 68     |



Table 9 Kp, Vg, Vi after tuning 2

| Axis | Kp(s <sup>-1</sup> ) | Vg(A · s/rad) | Vi(-) |
|------|----------------------|---------------|-------|
| X    | 63                   | 189           | 432   |
| Y    | 63                   | 186           | 658   |
| Z    | 63                   | 159           | 518   |

Table 10 Feedforward gains and acceleration constants

|       | Log. function acceleration |        |        | Linear function acceleration |        |        |
|-------|----------------------------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|
|       | X axis                     | Y axis | Z axis | X axis                       | Y axis | Z axis |
| Kf(-) | 1.030                      | 1.0028 | 1.0029 | 0.52                         | 0.50   | 0.59   |
| Ts(s) | 0.026                      | 0.027  | 0.028  | 0.026                        | 0.027  | 0.028  |

Table 11 Parameters after tuning 2 with logarithm acceleration

| Axis | Kp(s <sup>-1</sup> ) | Ts(s) | Vg (A · s/rad) | Vi(-) | Kf(-)  |
|------|----------------------|-------|----------------|-------|--------|
| X    | 63                   | 0.028 | 187            | 425   | 1.0029 |
| Y    | 63                   | 0.028 | 172            | 649   | 1.0029 |
| Z    | 63                   | 0.028 | 161            | 509   | 1.0029 |

속도루프파라메타의 실현 가능한 영역을 참고하여 Vi에 대한 Vg의 상한값을 결정하면 X축 221(A · s/rad), Y축 186(A · s/rad), Z축 196(A · s/rad)이 된다. X축의 Vg를 1로 하면 Y축은 0.98, Z축은 0.84가 된다. 따라서 이 비와 각축의 Vg의 상한값으로부터 각축의 Vg가 구하여 진다. Vi, Vg의 속도 루프파라메타에 대하여 안정성의 제약을 만족하는 최대의 Kp를 구하면 Y축의 Kp가 가장 작으므로 X, Z축의 Kp를 Y축의 63(s<sup>-1</sup>)에 맞추어 조정 결과는 Table 9와 같다. 이들의 계산된 파라메타값과 NC공작기계 제조회사에서 추천되고 있는 표준 설정값과 비교하면 X축에는 1.5배 Y축에는 2.2배, Z축에는 1.5배로 향상되었다. Kf 및 Ts를 설정하기 위하여 지수함수가감속의 경우 Kp, Vg, Vi

를 Table 9의 값으로 설정하여 각축의 Kf, Ts를 구하면 Table 10과 같이 Z축의 Ts가 최대가 되므로 X, Y축의 Ts를 Z축의 Ts와 일치시켜 조정한 결과는 Table 11과 같다.

단 직선 가감속의 경우에는 Table 10에서와 같이 Y축의 Kf가 가장 작다. {1+D/(Vg · Vi)-Kf}를 각축에 일치시키기 위하여 X축과 Z축의 Kf를 0.50으로 한다. 또 Ts를 각축간에 일치시키기 위하여 X, Y축의 Ts를 Z축의 Ts와 일치시킨다. 이상과 같은 서보파라메타 조정을 한 결과는 Table 11과 같다.

Table 11 Parameters after tuning 2 with linear function acceleration

| Axis | Kp(s <sup>-1</sup> ) | Ts(s) | Vg (A · s/rad) | Vi(-) | Kf(-)  |
|------|----------------------|-------|----------------|-------|--------|
| X    | 63                   | 0.028 | 186            | 422   | 1.0008 |
| Y    | 63                   | 0.028 | 171            | 648   | 1.0012 |
| Z    | 63                   | 0.028 | 181            | 509   | 1.0009 |

X, Z축의 동시 2축 제어에서의 윤곽오차를 DBB (Double Ball Bar)로 측정된 결과는 Fig.3과 같고, 실측과 같은 조건으로 모델을 사용한 윤곽오차의 시뮬레이션 결과는 Fig.4와 같다. 윤곽오차의 실측 결과와 공진폭과 비교하면 표준설정값의 경우는 13.5(μm), 조정1의 경우 11.4(μm), 조정2의 경우는 7.1(μm)로 되어 다축 조정에 의한 윤곽오차의 저감 효과가 확인되었다. 조정2에 의한 윤곽오차 저감의 실측 결과는 약 0.2초이후에 1.5(μm)를 중심으로 진동이 남아 있어 그 성분을 무시하면 윤곽오차는 5.6(μm)정도임을 알수 있다. 이것으로 다축 동시제어에서의 조정으로 윤곽오차를 4%정도 저감할수 있음을 확인할 수 있었다.

## 6. 결론

NC공작기계의 동시다축제어에서 윤곽오차를 저감시키기 위하여 기계적 조정법을 유도하고 알고리즘을 구축하여 실제 공작기계에 적용시켜본 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.



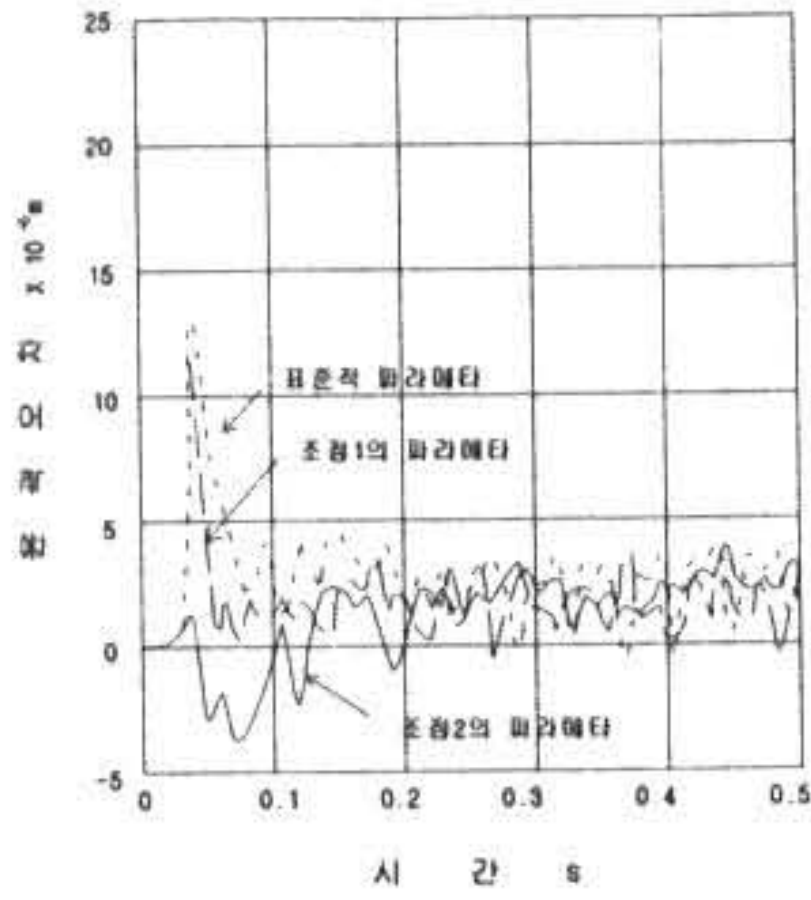


Fig.3 Profile error by measurement

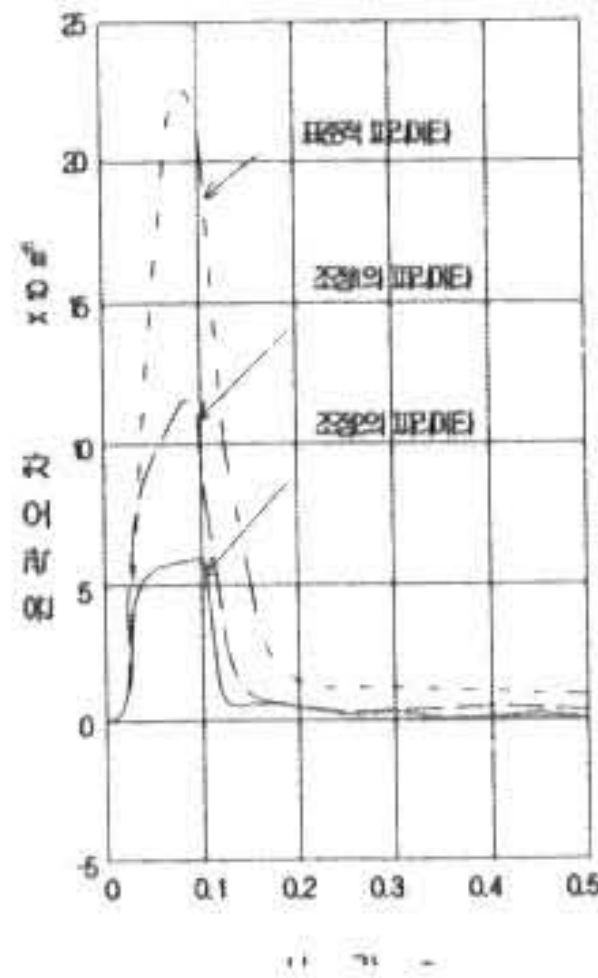


Fig.4 Contour Error by simulation(XY Plane)

(1) 동시 다축제어에서 윤곽오차를 작게 하기 위하여 각축의 전달함수를 거의 같게 할 필요가 있다.

(2) 기계적 조정을 하기 위하여 각축의 고유진동수를 거의 같게 하고 서보파라메타 조정을 행하는 것이 유효하다.

(3) JK지도상에 고유진동수가 일정한 곡선을 중첩시켜 서보강성과 고유진동수의 목표값을 동시에 만족하는 수정벡터를 선택함에 따라 동시다축 기계적 조정을 행할수 있다.

(4) 표준 서보파라메타의 기계에 대한 종합적인 조정을 시행한 결과 시뮬레이션에서는 윤곽 오차가 거의 나타나지 않으며 또 실측한 경우에도 윤곽오차가 4%정도 저감되어 조정의 효과가 확인되었다.

### 참고 문헌

- 1) 井澤實: 進展する位置め機構の高精度化, 國際技術情報誌, Vol.5, p.75, 1990
- 2) 稻崎一郎: 工作機械の靜, 動剛性が加工性能に及ぼす影響, 機械の研究, Vol.42, No.1, p.135, 1990
- 3) M. Shiraishi, E. Kume: Supression of machine tools chatter by state feed back control, Annal of the CIRP, Vol.37, p.399, 1988
- 4) 垣野義昭: NC工作機械運動精度に関する研究, 精密工學會誌, Vol.53, No.3, p.587, 1989
- 5) 中澤弘: 工作機械用高速テーブル送り機構の研究, 精密工學會誌, Vol.57, No.3, p.539, 1991
- 6) M. Mitsushi: Intelligent 3D-free form surface cutting toward high precision and high efficiency, Proceeding ASPE 1977 Annual Meeting, p.191, 1997
- 7) G. Pritschow, J. Bretchneider: A Self-tuning controller Electromechanical Servo Drives in Machine Tools, Annal of the CIRP, Vol.48, p.307, 1999

(2000년 1월 27일 접수, 2000년 5월 6일 채택)