

터닝센터에서 메인주축과 서브주축 간의 동기제어를 위한 최적화 연구

김성현*, 윤강섭**, 이만형***

The Optimization of Main and Sub Spindle's Synchronous Control in Turning Center

Sung Hyun Kim*, Kang Sup Yoon** and Man Hyung Lee***

ABSTRACT

This paper introduces that the turning center optimizes main and sub spindle's synchronized controller in Open-CNC. In view of optimal design, the mathematical modeling and the frequency domain analysis of spindle's system are simulated. For the minimizing of synchronized error in each spindle's speed, the study of control method and the related control parameter is proposed. By the experiment in prototype machines using the server/client program, the validity of the proposed synchronous error's compensation method is verified.

Key Words : Machine Tools's Spindle System (공작기계 주축계), Synchronous Error's Compensation (동기 오차 보정), Speed Control Loop (속도 제어기), DDE Program (DDE 프로그램), Opening-CNC (개방형 CNC)

1. 서론

최근의 공작기계는 다기능, 고효율, 고생산성을 요구하는 추세로서, 터닝센터의 경우 리드시간 단축을 통해 고생산성 목적을 달성하면서 복잡한 형상 가공이 가능한 복합 가공기가 개발되고 있다. 본 연구에서 시도하려는 터닝센터 가공기의 복합공정 중 1차 공정에서는 메인(Main)주축 척(Chuck)에 클램핑(Clamping)된 공작물을 황삭 목적의 선삭가공 또는 Mill축을 이용한 밀링가공을 한다. 2차 공정에서는 메인주축과 서브(Sub)주축간 고속회전상태에서 각도(Angle) 동기제어를 통하여 공작물을 전달받고 정삭 목적의 선삭가공 또는 밀링가공을

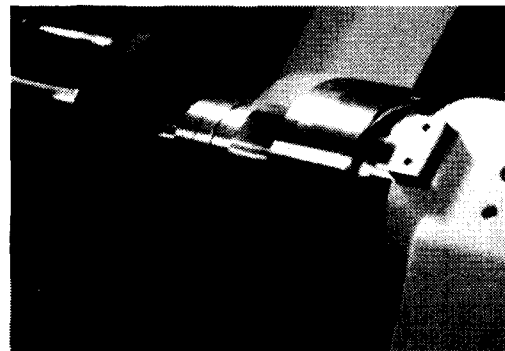


Fig. 1 Appearance of synchronous main and sub spindle in turning center

*** 2002년 7월 8일 접수

* 부산대학원 지능기계공학과

** 대구대 자동차산업기계공학과

*** 부산대 기계공학과

한다. 이러한 복합가공 시스템은 메인주축과 서브주축간의 고속/고정도 동기제어가 필수인데, 이를 위해 본 논문에서는 첫째로, 메인주축과 서브주축계의 동특성을 수학적으로 모델링하고 실 시스템과의 비교검증을 통해, 목표 동기제어 회전속도를 위한 부품 설계시 시스템 강성에 기인한 동특성을 모의함으로써 최적 설계를 시도하고자 한다.^{1,3,4,8} 둘째, 실험적 방법으로, 설계된 시작품에서 동기오차를 최소화하기 위해 사용할 모터 드라이브 제어기의 게인튜닝(Gain Tunning) 방법을 모색하고, 또한 개방형 CNC의 이점을 활용한 동기오차 보정 시스템을 개발하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 주축계 모델링

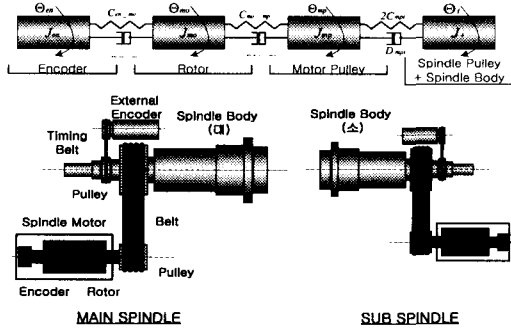


Fig. 2 Structure of main and sub spindles

공작기계의 주축계는 크게 스피들 모터(Spindle Motor)와 공작물을 물려 회전시키는 스피들 몸체(Spindle Body)로 나뉜다. 스피들 몸체는 공작물이 직접 물려 회전운동을 하므로, 고주파 성분의 진동에 강하고 회전 정도가 높은 특성을 얻기 위해 큰 회전 관성값을 갖도록 설계되며, 스피들 모터는 큰 회전 관성을 갖는 스피들 몸체를 구동하기 위해서는 큰 정격 출력이 필요하다. 영구 자석을 사용하는 서보 모터의 경우, 고풍력을 발생시키기 위해서는 모터 자체의 크기가 커지는 단점이 있기 때문에, 일반적으로 공작기계의 스피들 부에서는 작은 회전 관성값을 가지면서 고풍력을 발생시키기 용이한 유도 전동기가 주로 사용된다. 스피들 모터의 구동력을 스피들 몸체로 전달하기 위해서는 두 기계 요소를 적당한 방법에 의하여 연결하는데, 구동

력 전달 방식으론 직접(Direct) 구동 방식, 기어(Gear) 구동 방식, 벨트(Belt) 구동 방식 등이 사용된다. 본 장비에서는 벨트 방식을 적용하고, 이와 관련된 수학적 모델을 유도하였다. Fig. 2는 양 주축 시스템의 간략한 모델을 도시한 것으로, 스피들 시스템을 네 개의 질량체로 구분하고, 스피들축 풀리(Pulley)와 스피들 몸체를 하나의 질량체로 모델링하였다. 외부 엔코더(External encoder)는 스피들 몸체에 비하여 회전 관성이 작으므로, 스피들 몸체에 합산하여 간략화하였다. 상태 방정식은 4-mass 시스템을 대상으로 하므로 식 (1)과 같이 8차 상태 방정식이 된다.

$$\dot{X} = AX + BT_{mo} \quad (1)$$

$$X = \begin{pmatrix} \Theta \\ \dot{\Theta} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0_{4 \times 4} & I \\ -J^{-1}C & -J^{-1}D \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0_{4 \times 1} \\ JF \end{pmatrix},$$

$$\Theta = \begin{pmatrix} \Theta_{en} \\ \Theta_{mo} \\ \Theta_{mp} \\ \Theta_t \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad J = \begin{pmatrix} J_{en} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{mo} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{mp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_t \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{en-mo} & -C_{en-mo} & 0 & 0 \\ -C_{en-mo} & C_{en-mo} + C_{mo-mp} & -C_{mo-mp} & 0 \\ 0 & -C_{mo-mp} & C_{mo-mp} + 2C_{mpt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{mpt} \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} D_{en-mo} & -D_{en-mo} & 0 & 0 \\ -D_{en-mo} & D_{en-mo} + D_{mo-mp} & -D_{mo-mp} & 0 \\ 0 & -D_{mo-mp} & D_{mo-mp} + D_{mpt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{mpt} \end{pmatrix}$$

주축계에서 벨트의 초기 장력을 고려한 벨트 시스템의 운동 방정식은 식 (2), (3)과 같이 유도된다.

Spindle Motor축 : (2)

$$\begin{aligned} J_{mp}\ddot{\theta}_{mp} + r_{mp}C_{bt}(F_o + [r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}]) - r_{mp}C_{bt}(F_o - [r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}]) + r_{mp}D_{bt}(r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}) \\ = J_{mp}\ddot{\theta}_{mp} + 2r_{mp}C_{bt}(r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}) + r_{mp}D_{bt}(r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}) \\ = J_{mp}\ddot{\theta}_{mp} + 2C_{mpt}(\dot{\theta}_{mp} - \dot{\theta}_t) + D_{mpt}(\dot{\theta}_{mp} - \dot{\theta}_t) \\ = T_{mo} \end{aligned}$$

Spindle Body축 : (3)

$$\begin{aligned} J_{sp}\ddot{\theta}_{sp} + r_{sp}C_{bt}(F_o + [r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}]) - r_{sp}C_{bt}(F_o - [r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}]) + r_{sp}D_{bt}(r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}) \end{aligned}$$

$$= J_{sp} \ddot{\theta}_{sp} + 2r_{sp} C_{bt} (r_{sp} \dot{\theta}_{sp} - r_{mp} \dot{\theta}_{mp}) + r_{sp} D_{bt} (r_{sp} \dot{\theta}_{sp} - r_{mp} \dot{\theta}_{mp})$$

$$= J_t \ddot{\theta}_t + 2C_{mpt} (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_{mp}) + D_{mpt} (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_{mp}) = 0$$

$$(\because \theta_t = \frac{r_{sp}}{r_{mp}} \theta_{sp} = \lambda \theta_{sp}, J_t = \frac{J_{sp}}{\lambda^2},$$

$$r_{mp}^2 C_{bt} = \frac{r_{mp} C_{bt}}{\frac{1}{r_{mp}}} = \frac{r_{mp} F_{mo}}{\frac{\Delta l_b}{r_{mp}}} = C_{mpt}$$

$$= \frac{T_{mo}}{\Delta \theta_{mp}},$$

$$C_{bt} \cdot \Delta l_b = C_{bt} (r_{mp} \cdot \theta_{mp} - r_{sp} \cdot \theta_{sp})$$

여기서, $C_{bt}[Nm]$: 벨트의 tension stiffness

$T_{mo}[Nm]$: 모터 축 풀리 발생 토크

$\Delta l_b[m]$: 모터축 풀리와 스피들 몸체 축 풀리의 변위차

$\theta_{sp}[Deg]$: 스피들 몸체의 각변위

$\theta_{mp}[Deg]$: 모터 몸체의 각변위

$\theta_t[Deg]$: 스피들 몸체의 각변위 θ_{sp} 를 모터 축으로 환산

$J_t[kgm^2]$: 스피들 몸체의 관성모멘트 J_{sp} 를 모터 축으로 환산

λ : 모터축 풀리와 스피들축 풀리의 회전비

F_o : 벨트 초기 장력

$C_{mpt}[Nm/rad]$: 충분히 긴장된 벨트의 상단 혹은 하단 equivalent torsional stiffness이다.

일반적으로 구동력 전달을 위하여 사용되는 벨트는 보통 고무 재질로 이루어져 있다. 따라서 벨트의 강성(stiffness)은 다른 기계적 구성 요소들의 강성에 비하여 작은 편이다. 본 연구에서는 특성 해석시 필요한 벨트의 강성계수는 인장력을 측정하는 코린스사의 CLAVIS TYPE-5 계측기를 이용하여 구하였다. 메인주축 벨트는 일본 MITSUBOSHI사의 3V-belt를 사용하였으며, 벨트와 풀리간의 슬립을 줄이고, 구동력의 전달 손실을 억제하기 위하여 6개의 벨트를 충분히 긴장하여 사용하였다. 풀리간의 기준 축간 거리(L)는 0.742[m]이며, 벨트를 해머(Hamer)로 임펄스(Impulse) 가진 후 측정

된 진동 주파수(H)는 약 44.8Hz를 얻었으며, 사용된 벨트의 물성치(M)와 측정된 주파수를 이용하여 식 (4)로 강성계수를 구하였다.

$$2C_{mpt}(Nm/rad) = 8 \cdot M \cdot L^2 \cdot H^2 \quad (4)$$

($\because M$ = 벨트 total 무게 / 벨트 전체 길이)

서브주축은 Ribstar 벨트를 사용하여, 동일한 방법으로 물성치와 측정된 주파수를 통해 강성계수를 구하였다. 여기서 사용된 텐션 게이지는 벨트 인장력(Tension)을 일정하게 줄 수 있어 공작기계 제조업체에서 많이 사용하고 있다.

2.2 시뮬레이션 결과

Fig. 3은 Matlab의 Simulink를 이용한 모터 드라이브를 포함한 주축계의 모의 실험 블록 구성도이고, Table 1 은 시험장비 스피들부의 기계적 사양들로서 모터와 엔코더의 관성모멘트, 강성계수는 제조사 카탈로그에서 구하였고⁶, 스피들은 Body와 실린더, 칩, 풀리 등을 포함한 관성모멘트 합이다. 주축계 시스템의 동특성 분석을 위해, 앞절에서 구한 식 (1)~(4)를 적용하였으며, 스피들 모터로부터 엔코더 각속도까지의 속도루프 주파수 응답과 스텝 응답을 설정한 게인(Kp : 속도루프 비례게인, Tn : 적분게인)을 통해 구하였다(Fig. 4,5,6,7).

Table 1 Specification of prototype machine's main and sub spindles

Parameter	Main Spindle	Sub Spindle
Motor Inertia $J_m [kgm^2]$	0.19	0.017
Encoder Inertia $J_{en} [kgm^2]$	2.5e-6	2.5e-6
Motor축 Pulley Inertia $J_{mp} [kgm^2]$	0.025	0.005
Spindle Total Inertia $J_t [kgm^2]$	0.155	0.056
Motor Torsional Stiffness $C_{mo-mp} [Nm/rad]$	173894	48520
Encoder Torsional Stiffness $C_{en-mp} [Nm/rad]$	2800	2800
Spindle/Motor축 Pulley 반지름 $r_{sp} [m] / r_{mp} [m]$	0.095/0.079	0.12/0.06
벨트 Stiffness $2C_{mpt} [Nm/rad]$	4358	2575

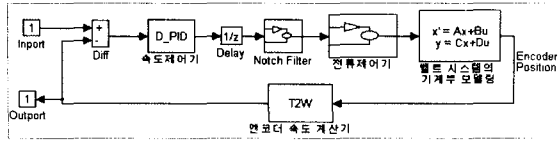


Fig. 3 Block diagram of spindle system included motor and driver by Matlab

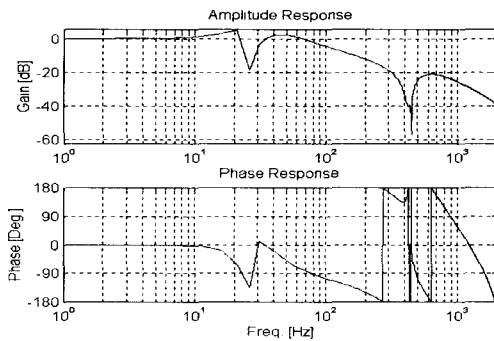


Fig. 4 Frequency response of speed loop for simulation of main spindle [Kp:65,Tn:1000]

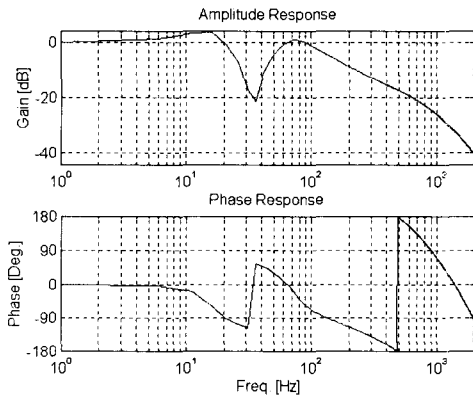


Fig. 5 Frequency response of speed loop for simulation of sub spindle [Kp:8,Tn:800]

주파수 응답을 살펴보면, 설계된 메인주축과 서브주축의 스피들 시스템은 약 3개 정도의 주 공진(Resonance) 모드를 가지며, 1차 반공진점(Anti-resonance)은 각각 25[Hz]와 35[Hz] 정도의 낮은 주파수 영역에서 존재한다. 메인주축계의 경우 약 450Hz의 2차 공진점이 존재하며, 진폭비가 0dB보다 크므로 노치 필터(Notch filter)를 이용하여 공진 영향을 제거하였다. 따라서 유도된 수학적 모델이

검증된다면 이를 이용한 주요 사양 변경에 따른 시스템의 동특성(이득, 대역폭, 공진 모드 등)을 추론할 수 있으므로 설계 최적화가 가능하게 된다.

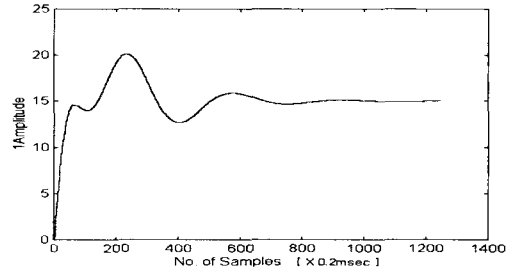


Fig. 6 Step response of speed loop for simulation of main spindle [Kp:65,Tn:1000]

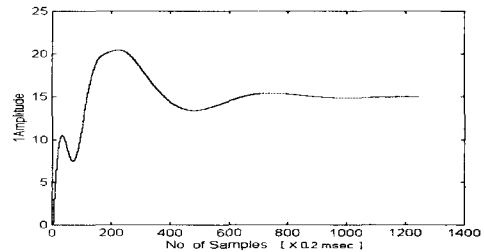


Fig. 7 Step response of speed loop for simulation of sub spindle [Kp:8,Tn:800]

3. 실험

3.1 동기 실험

실험 대상 장비인 현대공작기계 HIT-250MS에 대해 실험을 통한 동기오차를 줄이는 방안에 대해 논하고자 한다. 이를 위해, 먼저 장비에 탑재된 SIEMENS사의 SIMO-DRIVE 제어기의 Cascade(위치, 속도, 전류 Loop)형태로 구성된 피드백 제어기(Feed-back controller)와 피드 포워드 제어기(Feed-forward controller)의 관계를 살펴보고자 한다.⁶ 피드백 제어기는 입력에 대한 출력값의 차를 이용하여 안정된 제어를 할 수 있으며, 가장 일반적인 피드백 제어기는 PI 제어기로, 외란이나 시스템의 불확실성 또는 시스템 매개변수의 변화가 있어도 이를 잘 극복하여 안정하게 만들 수 있는 강인한(robust)한 특성이 있다.⁷ 그러나, 피드백 제어기는 디지털 제어기처럼 시스템 내부의 시간지연이 있는 경우,

입력 신호를 정확하게 추종하지 못하는 문제점을 지니고 있어, 이를 보완할 수 있는 피드 포워드 제어기와 함께 사용된다.

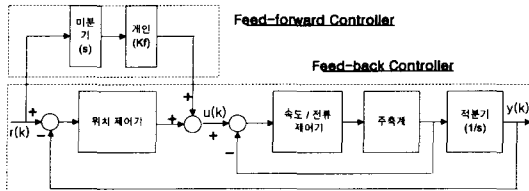


Fig. 8 Block diagram of feed-forward and feed-back controller system

금형가공을 위한 초고속 가공을 하게 되면 추종 문제가 중요한데, 빠른 속도로 가공이 이루어지게 되면, 시스템의 시간 지연에 의해 기준 궤적을 제대로 추종하지 못하여 큰 윤곽 오차를 발생시킬 수 있다. 피드 포워드 제어기는 이론적으로 피드백 제어를 포함한 전체 제어 시스템의 모델을 구한 후, 모델의 역을 앞먹임하여 줌으로써 전체 시스템의 다이내믹스(Dynamic)를 “1”로 만들어 정확한 추종을 가능하게 할 수 있다. Fig. 8은 기준 궤적을 미분하여 피드 포워드하는 경우의 전체 시스템 구조를 간략화한 것으로, 연속시간계의 경우 피드포워드 제어기는 $F(s) = K_f \cdot S$ 형태로 기준궤적을 미분한 후 적당한 이득을 곱한다. 이산시간계의 경우는 식 (5)와 같은 형태이다.⁵

$$F_{FF} = K_f \frac{1}{T_s} (1 - z^{-1}) \quad (5)$$

따라서 입력과 출력 사이의 시간지연에 의한 위상오차를 줄일 수 있도록 피드포워드 되는 값을 피드포워드 이득(K_f)으로 조절하여 넣어주면 원하는 성능을 만족시킬 수 있다.

이러한 공작기계 제어기에서 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 피드 포워드 제어기는 사용하지 않고 동일한 게인값으로 피드백 제어기만 사용하여, 드라이브에 내장된 가진 방법을 통한 기계계인 메인주축과 서브주축계를 연결한 속도루프 주파수 응답과 스텝응답을 Fig. (9, 10, 11, 12)과 같이 얻었다. 시뮬레이션 결과와 유사하게 1차 공진점이 약 25[Hz]와 35[Hz], 메인주축계의 2차 공진점이 450[Hz]에 나타남으로, 앞장에서 언급된 모델식을

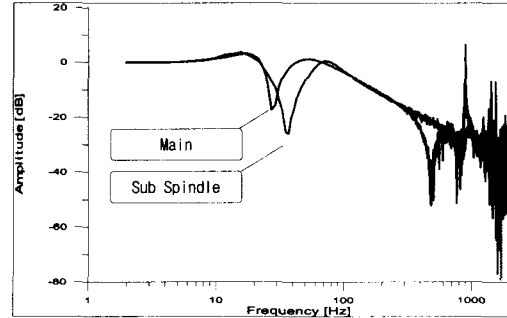


Fig. 9 Frequency response of speed loop for prototype machine's main/sub spindle [Kp:65,Tn:1000/ Kp:8,Tn:800]

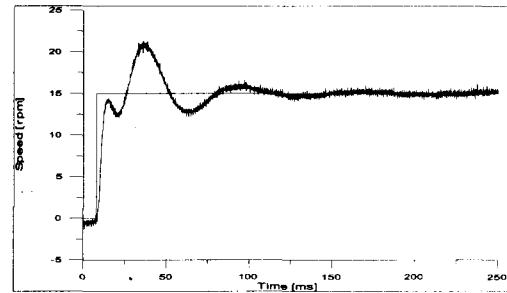


Fig. 10 Step response of speed loop for prototype machine's main spindle

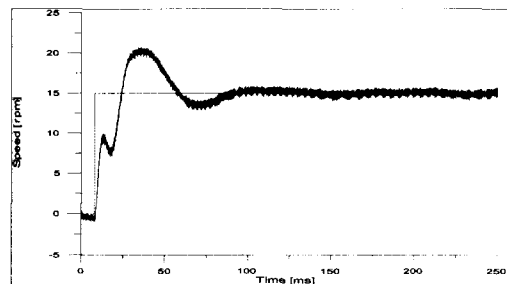


Fig. 11 Step response of speed loop for prototype machine's sub spindle

이용하여 시스템 동특성을 모의 할 수가 있다. 구체적으로 사용된 제어기에서 본 연구의 목적인 고속 / 고정도 동기 제어를 위한 게인 튜닝 방법으론 첫째, 피드백 제어기의 게인은 다음과 같이 메인주축과 서브주축간의 동특성이 일치되도록 동기제어 모드에서 메인주축과 서브주축의 위치제어루프 이득을 일치시켜야 한다. 두 주축의 위치제어루프의

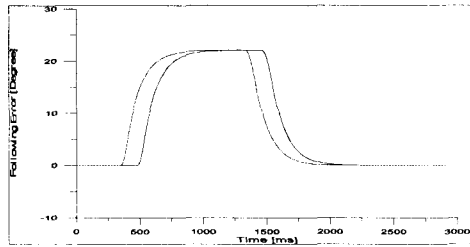


Fig. 12 Following error of main and sub spindle

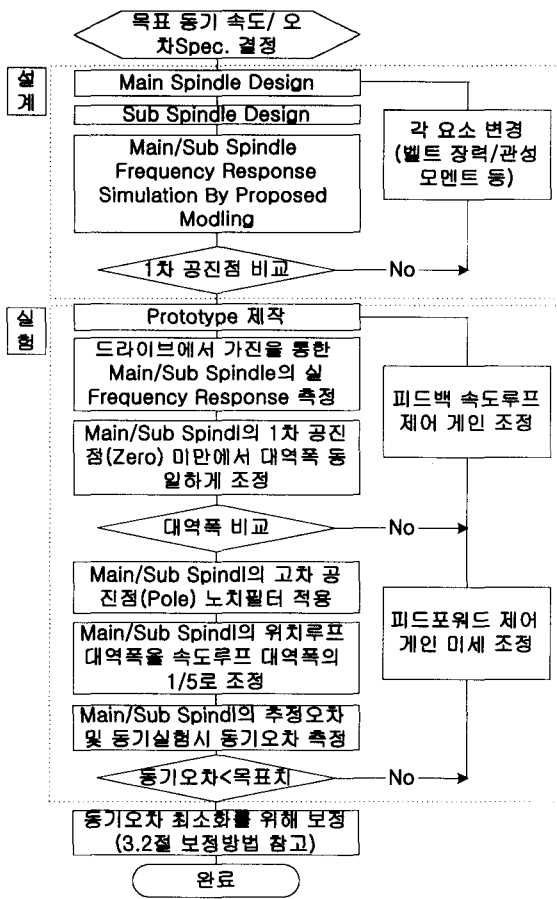


Fig. 13 Total flow of optimizing method

이득이 동일하더라도 내측 루프인 속도제어루프의 동특성에 따라 위치응답이 달라질 수 있으므로, 속도 제어루프의 게인 조정을 통하여 동특성도 일치시켜야 한다. 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 두 주축계의 속도 제어 루프 대역폭(Bandwidth)을 1차 반공

진점 미만(약 20Hz)에서 동일하게 하였고, 메인주축계에서 2차 공진점의 영향을 줄이기 위해 노치 필터를 마찬가지로 사용하였다. 둘째, 피드 포워드 제어기는 마찰이나 떨림과 같은 비선형 영향을 최소화 하고자 고속/고정도 동기제어를 위해, 앞에서 언급된 피드포워드 이득을 이용하여 메인주축측의 추종오차와 서브주축측의 추종오차를 동일하게 미세 조정함으로써 동일한 대역폭을 얻을 수 있었고, 또한 정상상태에서 동기오차를 줄이는 데 사용하였다. Fig. 12는 시험 장비에서 메인주축과 서브주축에 대한 추종오차의 측정 결과를 일정한 시간간격으로 구분하여 표시한 그림이다.

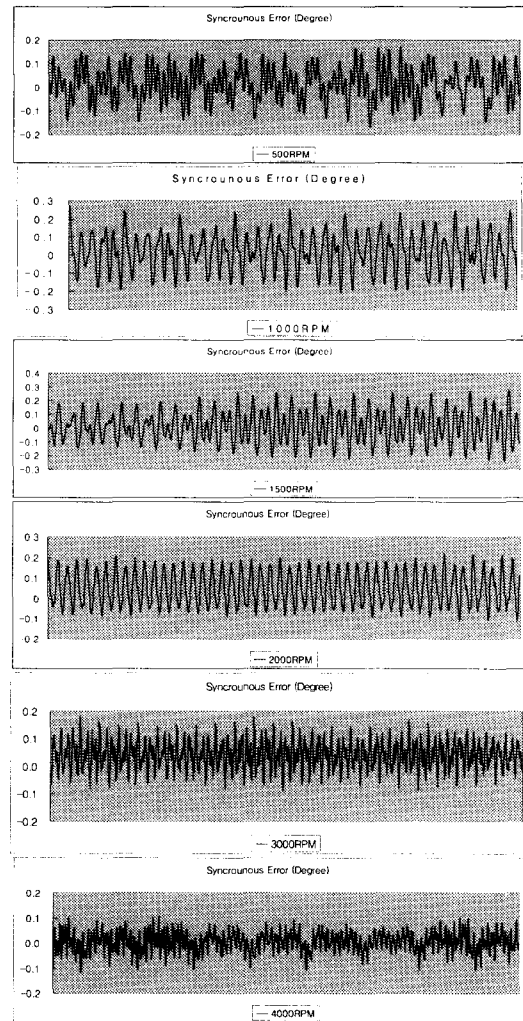


Fig. 14 Synchronous error of each speed

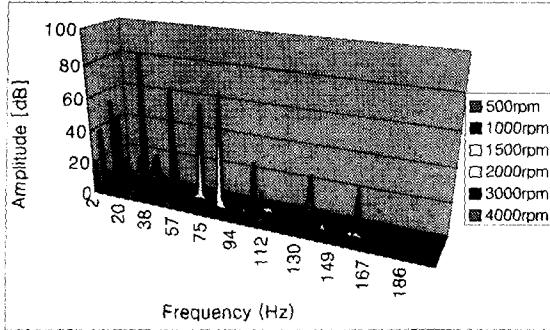


Fig. 15 Power spectrum of synchronous error in each speed

이러한 제어가 튜닝 작업으로 동특성 일치작업을 통하여 고속/고정도 동기화가 가능하게 되었으며, Fig. 13의 흐름도는 전체적으로 설계 단계에서 실험을 통한 동기 오차 최소화 방안까지 최적화 과정을 나열한 것이다. Fig. 14는 최적화 과정을 거친 후 메인주축과 서브주축 간 각각 지정한 속도에서 발생된 동기 오차의 측정값이다. 오차값은 약 $\pm 0.3\text{deg}$ 이내에 존재하나, 2차 가공시 공작물 반경에 비례하여 가공오차가 커지므로 가능한 동기 오차를 최소화해야 한다. Table 2와 Fig. 15의 동기 속도 오차에 대한 power spectrum 경향을 보면, 주축의 속도 1250rpm 부근에서 1차 공진점에 기인한 표준편차 오차량이 크게 발생되었지만, 20Hz 대역폭 이내인 즉 1200rpm까지는 가감속, 급정지 시에도 동기 유지가 잘 되었다.

반면에 대역폭을 벗어난 1500rpm 이상 속도에서 정상 상태 도달 후인 정속에서는 오차가 아주 적으나, 가감속이나 급정지 시처럼 속도 변경 영역에서는 동기 오차가 크게 발생되었다.

Table 2 Result of synchronous error (unit : Deg)

동기속도	평균값	표준 편차	최대 오차 (Peak)
500rpm	0.014	0.058	± 0.10
1000rpm	0.001	0.060	± 0.20
1500rpm	0.009	0.109	± 0.28
2000rpm	0.018	0.078	± 0.20
3000rpm	0.041	0.047	± 0.10
4000rpm	0.024	0.047	± 0.08

따라서, 현재 보다 고속 회전에서 가감속 시 동기 오차를 최소화하기 위해서는 주축계 시스템의 강성을 높게 설계할 필요가 있다.

3.2 동기 오차 보정

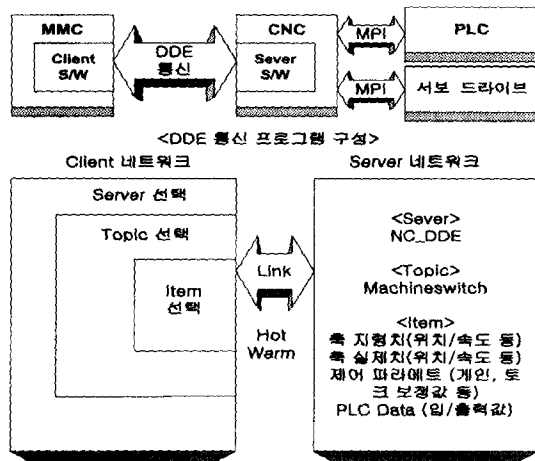


Fig. 16 Structure of Client's Program

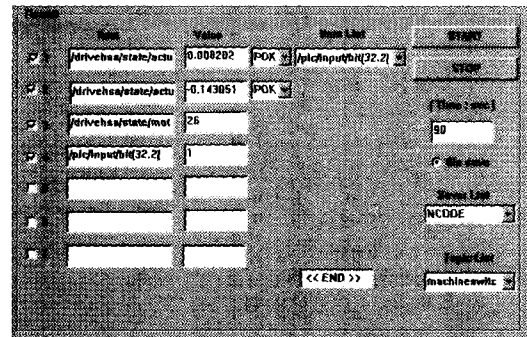


Fig. 17 Monitoring display of input/output by DDE's communication

실험 장비에서 사용하고 있는 CNC는 개방형 시스템의 SIEMENS 840D이다.⁶ 본 연구에서는 동기오차 보정을 위해 Visual C++ 언어를 사용하여 Server와 통신할 수 있는 Fig. 16, 17과 같은 구조의 Client 프로그램을 개발하였다. 프로그램에서 사용한 DDE(Data Dynamic Exchange) 통신 방식은 Server, Topic, Item으로 구성되어 Data 전달을

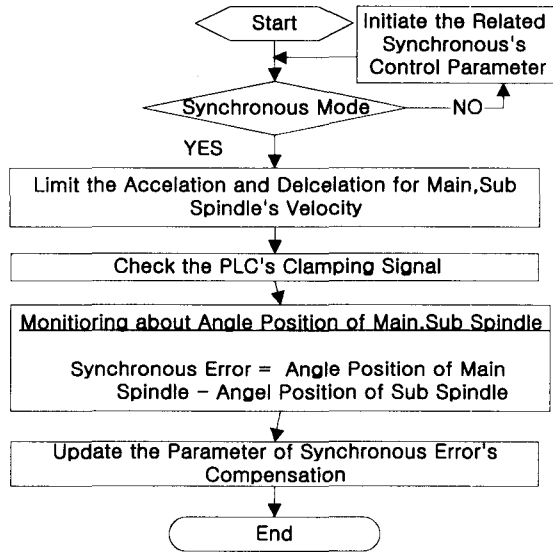


Fig. 18 Flow of synchronous error's compensation

Hot, Warm Link 연결 방식으로 구성된다. 선택 Item은 CNC에서 지령하는 위치와 속도, 실제 움직임 결과에 대한 위치와 속도의 Feedback 값, 드라이브에서 출력하는 전류치, 토크, Power 등을 Server의 통신 규약에 따라 설정할 수 있으며, 또한 제어 파라미터, PLC의 입출력 신호 등도 선택할 수 있다. 이를 활용한 동기오차 보정 알고리즘의 개념은 메인주축과 서브주축 간 공작물을 전달할 때 짧은 순간이지만 공작물을 서로 클램핑하고 있으므로, 이때의 동기오차는 거의 일정하다. 따라서 PLC에서 클램핑한 신호를 Client 프로그램에서 입력받은 즉시, 메인주축의 위치값과 서브주축의 위치값 차에서 동기각도 오차를 계산한다. 동기각도 오차는 일정 기간의 각도 오차를 평균한 값으로, 오차보정 Offset값을 CNC에서 제공하는 각도 오차와 관련된 파라미터에 출력하여 보정하였다. 제안된 동기오차 보정 방안의 효과를 알아보기 위해 동기 속도 1250rpm에서 대해 메인주축과 서브주축의 Mill축을 이용한 엔드밀 가공방식으로 동일한 방법으로 90 Deg 차이만큼 4군데 구멍가공하였다. 샘플(Sample)가공을 10개 실시한 후 3차원 측정기에서 각각 90 Deg에 대한 동기 오차를 측정된 결과, 보정 후의 측정된 결과는 최대 0.05deg으로, 보정 전의 결과보다 약 1/7이상 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 개방형 CNC에서 메인주축과 서브주축의 동기화를 통한 복합가공을 구현하기 위해서, (1) 주축계에 대한 모델링을 통하여 동특성을 분석하였고, 실험을 통하여 모델의 타당성을 입증하였으며, 이를 활용한 설계 최적화를 할 수 있었다. (2) 설계를 바탕으로 시작품을 만들고, 메인주축과 서브주축 간 동기를 위해 게인튜닝을 통한 동기오차를 최소화하였으며, DDE통신을 통해 CNC Server와 연결하여 실시간 Data 취득 및 동기오차 보정 기능을 가진 Client 프로그램을 개발하였다. 본 연구의 결과로 메인주축과 서브주축의 동기제어를 위한 실제적인 측면과 시작품에서 동기오차를 최소화하는 방안에 대해 구체적으로 제시하였다.

참고문헌

1. Bigley, W. J., "Wideband Base Motion Isolation Control via the State Equalization Technique," *Optical Engineering*, Vol. 32, No. 11, pp. 2805-2811, 1993.
2. Dhaouadi, R., Kubo, K. and Topise, M., "Analysis and Compensation of Speed Drive Systems with Torsional Loads," *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Yokohama, Japan, pp. 271-277, 1993.
3. 이현철, 이동수, 최용석, 조필주, 권옥현, "유연성을 고려하는 CNC 이송시스템의 위치제어," 1997 KACC, pp. 80-84, 1997.
4. 박용환, 신흥철, 문희성, 최종률, "공작기계 시스템의 모델링과 동적 특성 분석," 97 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 991-994, 1997.
5. Kailath T. "Linear Systems," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1980.
6. N.N. "SIMODRIVE AC Motors for Feed and Main Spindle Drives," Siemens. 1993.
7. Koren, Y. and Lo, C. C., "Advanced Controllers for Feed Drivers," *Annals of CIRP*, Vol. 41, No. 2, pp. 689-698, 1992.
8. 김성현, 윤강섭, 이만형, "개방형 CNC에서 주축과 서브주축 동기를 위한 최적화 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 991-994, 2002.