

## 개방형 CNC에서 주축과 서브 주축 동기를 위한 최적화 연구

김 성 현\*(부산대학원 지능기계공학과), 윤 강 섭(대구대 자동차산업기계공학부),  
이 만 형(부산대 기계공학부)

### The Optimization of Main and Sub Spindle's Synchronous In Opening-CNC

S. H. Kim(Mech. Eng. Dept. PNU), K. S. Yoon(School of A.I.M.E., DGU)  
M. H. Lee(Mech. Eng. Dept. PNU)

#### ABSTRACT

This paper introduces that the lathe optimize for main and sub spindle's synchronous in Opening-CNC. In view of optimal design, the mathematical modelling and the frequency domain analysis of spindle's system are performed. For the compensation of synchronous error in compounded manufacture process, the optimization method of motor drive's control parameter and the related parameter is proposed. By the experiment in prototype machines using the server/client program, the validity of the proposed 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 추세로, 선반에서는 Lead Time 단축을 통한 고생산성 목적을 달성하면서 복잡한 형상을 가공할 수 있는 복합가공이 시도되고 있다. 일반적으로 선반가공은 2축 제어이지만, 본 연구에서 시도하는 복합가공은 다축 제어로 주축과 서브 주축간 고속 동기화 구현에 의해, 1차 가공에서 주축이 공작물을 물고 황삭가공 또는 Mill축을 이용한 복합가공을 한 후, 2차 가공에서는 주축이 고속회전하는 상태에서, 서브주축은 주축과 위치 동기화를 통해 공작물을 전달받아 정삭가공 또는 Mill축을 이용한 가공을 주로 한다. 이러한 복합가공 시스템은 주축과 서브주축간 고속 회전에서 고정도 위치 동기화가 필요한데, 본 연구에서는 이를 위해 첫째, 주축계와 서브 주축계를 수학적 모델링한 후 실 시스템과 비교를 통한 모델 검증을 하고, 이를 토대로 목표 동기속도를 위해 각 부품의 선정시 시스템 동특성을 모의함으로써 최적 설계를 구현하고자 하였다. 둘째, 모델링에서 제외된 비선형 요소들로 인한 동기오차를 최소화하기 위한 동기오차 보정 방안을 제안하였다.

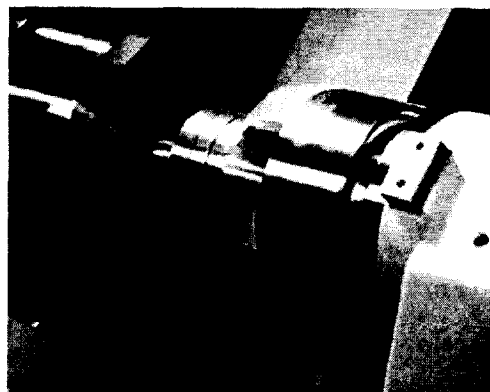


Fig 1.1 The appearance of synchronous main and sub spindle in lathe

#### 2. 주축계 모델링

공작기계의 주축계는 크게 스피들 모터(Spindle Motor)와 공작물을 물려 회전시키는 스피들 몸체(Spindle Body)로 나뉜다. 스피들 몸체는 공작물이

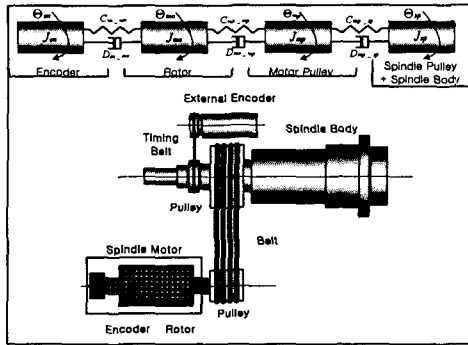


Fig. 2.1 The structure of main spindle / sub spindle

표 2.1 시험장비의 기계적 사양

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
Motor측 Pulley Inertia $J_{mp}$ [ $kgm^2$ ]	0.025	0.005
Spindle Total Inertia $J_u$ [ $kgm^2$ ]	0.155	0.056
Motor Torsional Stiffness $C_{mo-mp}$ [ $Nm/rad$ ]	239520	239520
Encoder Torsional Stiffness $C_{en-mp}$ [ $Nm/rad$ ]	2800	2800
Motor측 Pulley 반지름 $r_{mp}$ [ $m$ ]	0.079	0.06
Spindle측 Pulley 반지름 $r_{sp}$ [ $m$ ]	0.095	0.12

직접 물려 회전 운동을 하므로, 고주파 성분의 진동에 강하고 높은 회전 정도 특성을 갖도록 하기 위해 큰 회전 관성값을 갖도록 설계되고, 스피들 모터는 큰 회전 관성을 갖는 스피들 몸체를 구동하여야 하므로, 큰 정격 출력을 발생시킬 수 있어야 한다. 영구 자석을 사용하는 서보 모터의 경우에 고출력을 발생시키기 위해서는 모터 자체의 크기가 커지는 단점이 있기 때문에, 일반적으로 공작 기계의 스피들부에서는 작은 회전 관성값을 가지면서 고출력을 발생시키기 용이한 유도 전동기가 주로 사용된다. 스피들 모터의 구동력을 스피들 몸체로 전달하기 위해서 두 기계 요소를 적당한 방법에 의하여 연결하는데, 구동력 전달 방식으로는 직접 구동 방식, 기어 구동 방식, Belt 구동 방식 등이 사용된다. 본 장비에서는 벨트(Belt) 시스템을 적용하였으며, 이와 관련한 수학적 모델을 유도하였다. 그림 2.1은 스피들 시스템의 간략한 모델을 도시한 것으로, 스피들 시스템을 네 개의 질량체로 구분하였으며, 스피들측 풀리(pulley)와 스피들 몸체를

하나의 질량체로 모델링 하였다. 외부 엔코더(encoder)는 스피들 몸체에 비하여 회전 관성이 작으므로, 스피들 몸체에 합산하여 간략화 하였다.

상태 방정식은 4-mass 시스템을 대상으로 하므로 식(2.1)과 같이 8차 상태 방정식이 된다.

$$\dot{X} = AX + BT_m \quad (2.1)$$

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

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

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_{en} \\ \theta_{mo} \\ \theta_{mp} \\ \theta_{sp} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad J = \begin{pmatrix} J_{en} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{mo} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{mp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{sp} \end{pmatrix}$$

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

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

스피들부에서 벨트의 초기 장력을 고려한, 벨트 시스템의 운동 방정식은 식(2.2)(2.3)과 같다.

Spindle Motor측 :

$$\begin{aligned} J_{mp}\ddot{\theta}_{mp} + r_{mp}C_{bt}(F_o + [r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}]) - r_{mp}C_{bt}(F_o - [r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}]) + r_{mp}D_{bt}(r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}) \\ = J_{mp}\ddot{\theta}_{mp} + 2r_{mp}C_{bt}(r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}) + r_{mp}D_{bt}(r_{mp}\dot{\theta}_{mp} - r_{sp}\dot{\theta}_{sp}) \\ = J_{mp}\ddot{\theta}_{mp} + 2C_{mpu}(\dot{\theta}_{mp} - \dot{\theta}_u) + D_{mpu}(\dot{\theta}_{mp} - \dot{\theta}_u) \\ = T_{mo} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Spindle Body측 :

$$\begin{aligned} J_{sp}\ddot{\theta}_{sp} + r_{sp}C_{bt}(F_o + [r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}]) - r_{sp}C_{bt}(F_o - [r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}]) + r_{sp}D_{bt}(r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}) \\ = J_{sp}\ddot{\theta}_{sp} + 2r_{sp}C_{bt}(r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}) + r_{sp}D_{bt}(r_{sp}\dot{\theta}_{sp} - r_{mp}\dot{\theta}_{mp}) \\ = J_u\ddot{\theta}_u + 2C_{mpu}(\dot{\theta}_u - \dot{\theta}_{mp}) + D_{mpu}(\dot{\theta}_u - \dot{\theta}_{mp}) = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

그림 2.2는 스피들 시스템의 블록선도이고, 표 2.1은 시험장비 스피들부의 기계적 사양이다.

스피들 시스템의 동특성 분석을 위해서, 식(2.1)~(2.3)을 이용하여 스피들 모터의 토오크로부터 엔코더 각속도까지의 주파수 응답을 구하였다.(그림 2.3, 2.4)

주파수응답을 살펴보면, 설계된 주축과 서브주축의 스피들 시스템은 약 3개 정도의 주 공진 모드를 가지며, 1차 공진점은 25[Hz]와 35[Hz]정도의 낮은 주파수 영역에서 존재한다. 주축측의 경우 약 450Hz의 2차 공진점 진폭비가 0dB보다 크므로 공진

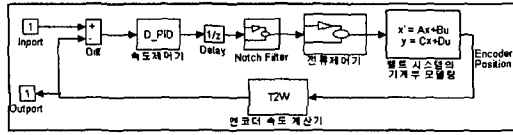


Fig 2.2 The block diagram of spindle system and motor / drive by Matlab

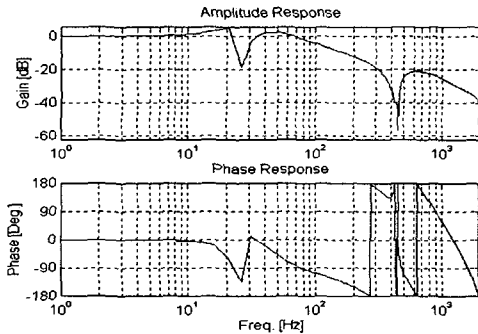


Fig 2.3 The frequency response of speed loop for simulatin of main spindle [Kp: 65, Tn: 1000]

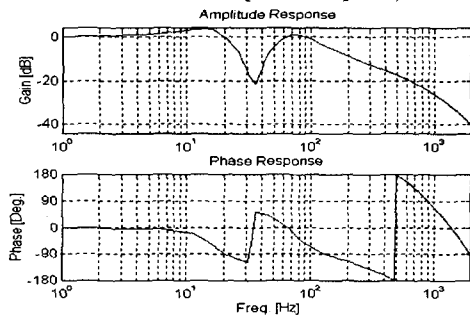


Fig 2.4 The frequency response of speed loop for simulatin of sub spindle [Kp: 8, Tn: 800]

의 영향을 제거할 필요가 있다.

이상에서 유도한 수학적 모델을 이용하여 여러 중요 파라메터의 변화에 따른 시스템의 동특성(이득, 대역폭, 공진 모드 등)을 추론할 수 있으므로, 이를 활용한 설계 최적화가 가능하게 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 결과

주축과 서브 주축계의 속도루프 주파수응답을 실험 측정 결과는 그림 3.1과 같으며, 시뮬레이션 결과와 유사하게 1차 공진점이 약 25[Hz]와 37[Hz], 주축계의 2차 공진점이 450[Hz]에 나타나므로, 앞장에서 언급된 모델식을 이용하여 시스템 특성을 모의 할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 목적인 고속/고정도 동기를 위해선 사용 가능한 회전속도범위까지 정속, 가감속, 비상정

지 시에도 일정 미만의 오차 범위에서 동기화가 계속 유지되도록 제어 최적화를 해야 한다. 이를 위해서는 주축과 서브 주축간의 동특성이 일치되도록 동기 모드에서 주축과 서브 주축의 위치제어루프의 이득을 일치시켜야 한다. 또한 두 주축의 위치제어루프의 이득이 동일하더라도 내부루프인 속도제어루프의 동특성에 따라 위치응답이 달라질 수 있으므로, 속도제어루프의 동특성도 일치시켜야 한다.

본 연구에서는 우선 두 주축계의 속도제어루프 대역폭을 1차 공진점 미만(약 20Hz)에서 동일하게 하고, 위치제어루프는 낮은 대역폭을 갖는 주축 쪽에서 피드포워드 이득의 미세한 조정을 통하여 동일한 동특성이 얻어지도록 하였다. 아울러 주축계에서 2차 공진점의 영향을 줄이기 위해 notch filter를 사용하였다. 이러한 동특성 일치작업을 통하여 고속/고정도 동기화를 구현하였다.

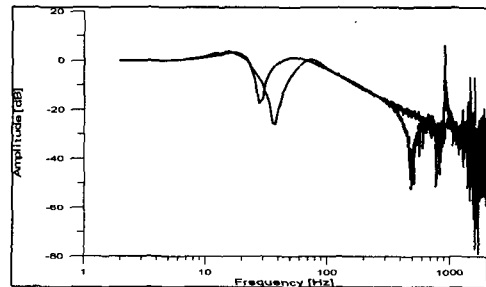


Fig 3.1 The frequency response of speed loop for prototype machine's main / sub spindle

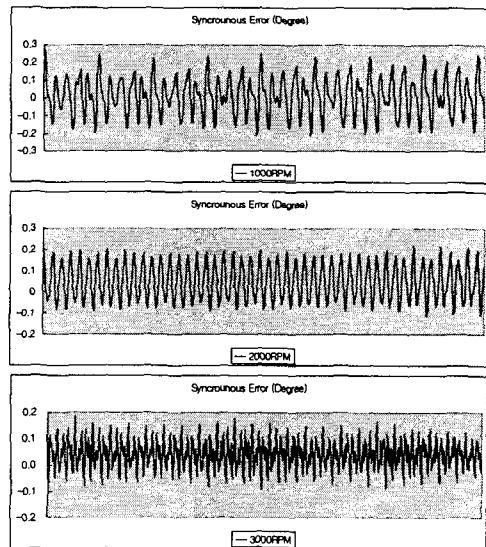


Fig 3.2 The synchronous error of each speed

그림 3.2는 각 지령 속도에서 발생된 동기 오차의 측정값이다. 오차값은 약  $\pm 0.3\text{deg}$  이내에 존재하나, 2차 가공시 공작물 반경에 비례하여 가공오차가 커지므로 가능한 최소로 줄여야 한다. 측정된 결과의 경향을 보면 주축의 1250rpm 부근에서 1차 공진점에 기인한 표준편차 오차량이 비록 크게 발생되었지만 가감속, 급정지 시에도 동기 유지가 잘 되었다.

### 3.2 동기 오차 보정

실험장비에서 사용하고 있는 CNC는 개방형 시스템 가진 Siemens 840D이다. 본 연구에서는 Visual C++을 사용하여 Server와 통신할 수 있는 그림 3.3, 3.4와 같은 구조의 Client 프로그램을 개발하였다.

사용한 DDE(Data Dynamic Exchange) 통신방식은 Server, Topic, Item으로 구성되어 Data 전달을 Hot, Warm Link 연결 방식 등이 사용된다. 선택할 수 있는 Item은 CNC에서 지령하는 위치, 속도와 실제 움직인 결과에 대한 Feedback 값, 드라이브에서 출력하는 전류치, 토크, Power 등을 Server의 통신 규약에 따라 설정할 수 있으며, 또한 제어 파라미터, PLC의 입출력 신호등도 선정할 수가 있다.

이를 활용한 동기오차 보정 알고리즘의 개념은 주축과 서브 주축간 공작물을 전달할 때 짧은 순간이지만 공작물을 서로 Clamping 하고 있으므로 이때의 동기오차는 거의 일정하다. 따라서 PLC에서 Clamping 신호를 Client 프로그램에서 입력 받은 후 주축의 위치값과 서브 주축의 위치값에서 동기각도 오차를 계산한다. 동기각도 오차는 일정 기간의 평균값으로 오차보정 Offset값을 CNC에서 제공하는 위치오차와 관련된 파라미터에 출력하여 보정하였다. 제안된 동기오차 보정 방안의 효과를 알아보기 위해서, 주축과 서브주축에서 엔드밀을 이용한 구멍가공을 실시한 후, 3차원 측정기로 동기각도오차를

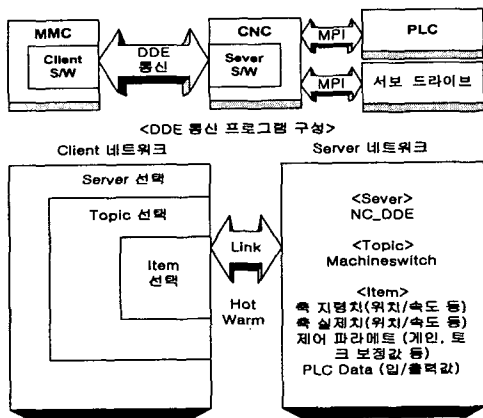


Fig 3.3 The structure of Client's Program

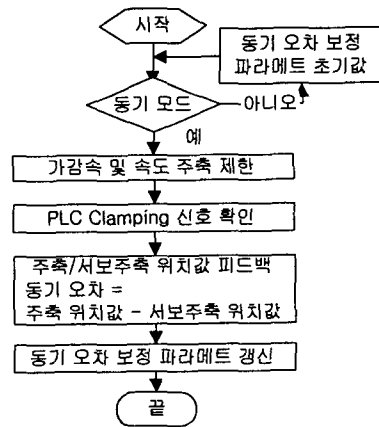


Fig 3.4 The flow of synchronous error compensation 측정하였다. 보정 후의 측정된 결과는 최대 0.05deg로, 보정 전의 결과보다 약 1/7이상 감소하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 개방형 CNC에서 주축과 서브 주축의 동기화를 통한 복합가공을 구현하기 위해서, (1) 주축계에 대한 모델링을 통하여 동특성을 분석하였고, 실험을 통하여 모델의 타당성을 입증하여 이를 활용한 설계 최적화를 할 수 있으며, (2) 설계를 바탕으로 시작품을 만들고, 주축과 서브 주축간 동기를 위해 제인튜닝을 통한 동일한 동특성을 갖도록 하여 동기오차를 최소화하였고, (3) DDE통신을 통해 CNC Server와 연결하여 실시간 Data 취득 및 동기오차 보정 기능을 가진 Client 프로그램을 개발하였다. 본 연구의 결과로 주축과 서브주축의 동기제어를 위한 설계적인 측면과 시작품에서 동기오차를 최소화하는 방안을 구체적으로 제시하였다.

## 참고문헌

- 이현철, 이동수, 최용석, 조필주, 권옥현 "유연성을 고려하는 CNC 이송시스템의 위치제어", 1997 KACC, pp.80-84, 1997.
- 박용환, 문희성, 최종률 "공작기계 시스템의 모델링과 동적 특성 분석", 97 한국정밀공학회 논문집 pp.100-104, 1997.
- Kailath T. "Linear Systems", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1980.
- N.N. "SIMODRIVE AC Motors for Feed and Main Spindle Drives", Siemens, 1993
- Koren, Y., and Lo, C. C., "Advanced Controllers for Feed Drivers", Annals of CIRP, Vol. 41, No. 2, pp.689-698, 1992.