

# 유한요소법을 이용한 고속 스위스형 공작기계 스피들 시스템의 클램핑 특성 해석

## Clamping Analysis for High Speed Spindle System of Swiss-type Machining Center using FEM

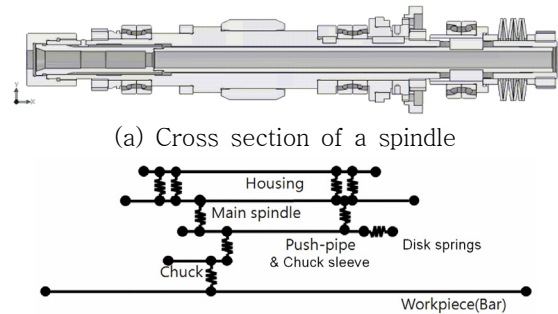
이재훈\* · 김무수\* · 박성훈\* · 이시복†

Jae-Hoon Lee, Musu Kim, Seonghun Park and Shibok Lee

### 1. 서 론

최근 자동 공작기계 분야에 있어서 생산성과 정밀성 향상을 위해 소형화와 고속화가 급속히 이루어지고 있다. 이에 따라 고속 회전을 위한 스피들 시스템의 주축 및 각 지지부들의 고강성 확보, 회전정밀도와 chatter 안정성(chatter stability) 향상을 위한 연구 및 실험들이 많은 연구자들에 의해 진행되고 있으며 주목할 만한 성과들도 나타나고 있으나 대부분의 연구들에서 그 대상은 CNC 밀링머신(milling machine)의 고속스피들 시스템으로 한정되고 있는 경향이 있다.

스위스형 CNC 자동선반(Swiss-type CNC automatic lathe)의 경우, 주축에 절삭 공구가 결합되는 것이 아니라 세장비가 큰 가공 소재(work-piece)가 장/탈착되고 가공시에 주축과 함께 고속 회전한다. 긴 가공 소재는 소재의 장/탈착 횟수를 줄일 수 있어 제품가공 시의 소요시간(lead time)을 줄여주므로 생산성 향상에 기여할 수 있고 다양한 길이의 제품에 적용될 수 있어 유연성이 뛰어나다는 장점이 있다. 반면 전체 스피들 시스템의 고유진동수를 하향시키는 경향을 가지며 가공 중 길이가 변화하게 되므로 밀링머신에서와 같이 초기 공구의 길이가 스피들 시스템에 미치는 영향에 대해 고찰하는 방식으로는 가공공정 중 일어날 수 있는 모든 경우에 대해 고려하지 못하는 문제점이 발생한다. 그러므로 스위스형 CNC 자동선반에서 소재의 효과를 고려한 스피들 시스템 전체의 동적 거동을 파악하는 것은 중요한 의미를 가진다. 본 연구는 그 기초연구로서 우선적으로 유한요소 모델을 생성하고 고속회전에 의한 클램핑력의 거동에 대해 살펴보고자 한다.



(a) Cross section of a spindle  
(b) Schematic diagram of spindle system with work-piece  
Fig. 1 Spindle system for Swiss-type CNC lathe

### 2. 소형 고속 CNC 선반 스피들

Fig. 1 (a)는 본 연구의 대상인 스위스형 CNC 자동선반의 주축 단면도로 주축 자체가 전동기의 역할을 할 수 있는 내장형 모터(built-in motor) 시스템으로 주로 고속회전을 요하는 스피들 시스템에서 기어(gear)나 풀리(pulley), 벨트(belt)를 배제하여 마찰, 마모 및 소음을 감소시키기 위해 많이 적용된다. 주축 중심부에는 중공이 있으며 이곳에 가늘고 긴 소재가 장/탈착 될 수 있으며, 소재는 주축 선단부의 척(chuck)에 의해 클램핑되고 주축과 함께 회전할 수 있게 된다. Fig. 1 (b)는 개념도로서 주축의 각 부품들과 소재의 연결 관계를 나타낸다. 이때 초기 소재의 클램핑력은 스피들 주축의 후미에 있는 판스프링(Disk spring)에 가해지는 예압에 의해 결정된다. 판스프링력은 푸시-파이프(push-pipe)와 척슬리브(chuck sleeve)에 의해 전달되어 척의 경사면에 접촉력으로 작용하고 결과적으로 척이 중심부로 오므라들어 소재를 고정하게 된다. 척에 작용하는 힘은 푸시-파이프, 척슬리브, 주축 및 척 자체의 강성과 형상을 포함하여 상호 작용/반작용 및 접촉에 의해 결정되므로 수식화하여 연기가 쉽지 않으므로 유한요소법을 이용하는 것이 효율적이라 판단된다. Table 1은 연구대상인 스피들 시스템의 대략적인 성능을 나타내며 최대 회전속도는 20,000 rpm 이다

† 교신저자; 부산대학교 기계공학부  
E-mail : sblee@pusan.ac.kr  
Tel : (051) 510-2315, Fax : (051) 514-7640

\* 부산대학교 기계공학부

Table 1 The specification of spindle system

Property	Value
Max. cutting diameter (mm)	7
Max. cutting length (mm)	70/40
Through hole diameter (mm)	12
Max. rotating speed (rpm)	20,000
Motor (kW)	0.75/1.1

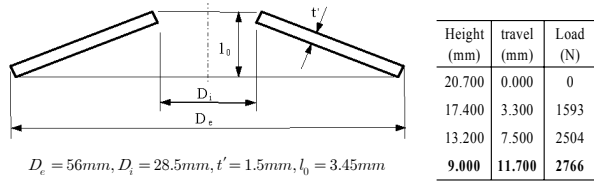


Fig. 2 Dimensions, applied travel and load of disk springs

척의 클램핑력을 위해 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 스피ndl의 후미에 총 6개의 판스프링이 설치되며 Fig. 2는 클램핑력을 제공하는 판스프링의 치수와 변위에 따른 스프링력의 변화에 대한 실험식에 의한 결과를 나타낸다. 판스프링은 하중에 따라 비선형적인 거동을 보이지만 대칭적인 형상을 가지므로 회전체에 적용할 때 질량 불평형을 감소시킬 수 있어서 회전정밀도에 있어서 유리하다.

### 3. 유한요소 해석

#### 3.1 유한요소 모델

Fig. 3은 스피ndl 주축과 그 조립품들의 유한요소 모델을 나타내며 아래쪽에 소재를 클램핑하는 척이 나타나 있다. 척은 앞쪽 끝이 세 갈래로 갈라져 있는 형상을 하고 있으므로 푸쉬-파이프가 앞으로 밀려나올 때 경사면에 접촉이 일어나며 갈라진 부분이 쉽게 오므라들 수 있어 소재를 지지할 수 있는 구조를 하고 있다. 본 연구에서는 초기 클램핑 작업에 의한 척의 변화에 대해 유한요소해석을 이용하여 알아보고, 또한 소재가 삽입되어 스피ndl과 함께 고속 회전할 때 작용할 수 있는 원심력효과를 고려하여 소재의 클램핑에 일어나는 효과를 알아본다.

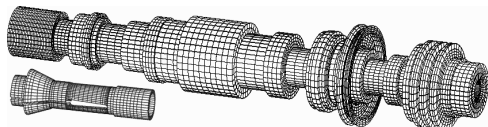


Fig. 3 Finite element model of main spindle Assy.

#### 3.2 해석결과

##### (1) 척의 클램핑 거동 해석

Fig. 4는 판스프링에 작용된 예압에 의한 척의 변형 결과이다. 판스프링을 7.5mm만큼 조절나사로 예압을 걸었을 때의 하중인 2504N이 작용되었을 때의 척 선단부의 반경은 0.559mm 중심부 쪽으로 이동했다는 것을 알 수 있다. 척의 변화량은 척의 두께와 형상에 따라 변화할 수 있다.

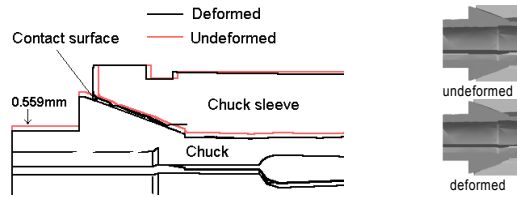
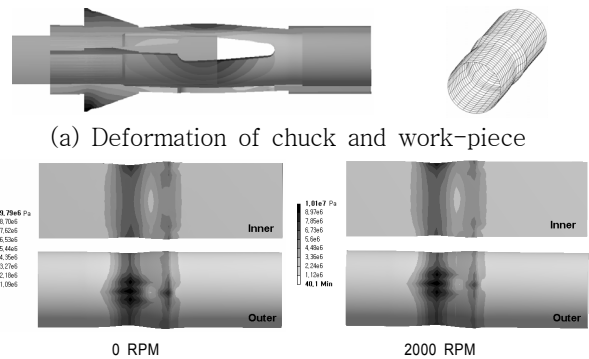


Fig. 4 Deformation shape of chuck by disk springs' preload

##### (2) 고속회전에 의한 클램핑 거동 해석

Fig. 5는 직경 7mm, 길이 30mm의 소재를 삽입시켜 클램핑력을 가했을 때와 고속에서의 원심력효과를 고려했을 때의 유한요소해석 결과를 나타낸다. Fig. 5 (a)는 척과 소재의 변형 형상을 나타낸다. 원심력과 클램핑력에 의해 척의 중심부 쪽이 바깥쪽으로 휘어지는 현상을 확인할 수 있으며 소재 또한 척의 접촉에 의한 클램핑력에 의해 표면형상에 변형이 발생했다. Fig 5 (b)에서는 정지상태와 고속에서 클램핑에 의해 소재에 발생하는 응력이 3.1%정도 감소되었으며, 이는 원심력에 의해 클램핑력이 감소되었음을 의미한다. 실험결과는 차후 소재에 작용하는 접촉력 추출을 통한 고속에서의 소재 클램핑 강성변화를 관찰하고, 또한 클램핑 메커니즘과 소재의 직경, 척 및 주축의 형상 변경에 의한 고속회전에서의 클램핑력 감소를 줄일 수 있는 방안에 대해 연구하는 데 이용할 수 있을 것이다.



(b) Von-mises stress contour of work-piece

Fig. 5 FEM analysis results

### 4. 결 론

스위스형 자동선반 스피ndl 시스템의 소재 클램핑력이 고속회전에서 감소될 수 있음을 전산해석으로 확인하였으며, 차후 소재의 클램핑력 향상을 위한 연구에 이용할 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임