

콘크리트 베드를 이용한 무심연삭기의 구조특성 해석

김석일*(한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부), 성하경(한국항공대학교 대학원)

Structural Characteristic Analysis of a Centerless Grinding Machine with Concrete Bed

Seok-II Kim* and Ha-Kyoung Seong (Hankuk Aviation Univ.)

ABSTRACT

This paper presents the structural characteristic analysis of a centerless grinding machine with concrete bed. The centerless grinding machine is composed of grinding wheel head, regulating wheel head, concrete bed, wheel dresser and so on. Especially, the concrete bed is introduced to improve the static, dynamic and thermal characteristics of the centerless grinding machine. The structural analysis model of centerless grinding machine is constructed by the finite element method, and the structural characteristics in the design stage are estimated based on the structural deformation and harmonic response under the various testing conditions related to gravity force and directional forces.

Key Words : Centerless grinding machine (무심연삭기), Concrete bed (콘크리트 베드), Structural characteristics (구조특성), Finite element method (유한요소법), Complex modal analysis method (복소모드해석법)

1. 서론

원통연삭기는 원통형 공작물을 센터나 척으로 지지하면서 연삭공정을 수행하기 때문에 연속적인 작업이 어렵지만, 무심연삭기는 원통형 공작물을 단순히 받침판으로 지지하기 때문에 연속적인 연삭작업이 가능하다. 특히 무심연삭기는 작업자의 숙련도와 관계없이 고정밀 부품을 고능률적으로 가공할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

무심연삭에 의해서 가공되는 대표적인 부품으로는 로울러베어링, 축, 피스톤핀 등과 같은 고정밀 기계류 부품이 주종을 이루고 있지만, 최근에는 광통신용 핵심부품으로 많은 주목을 받고 있는 페룰도 무심연삭에 의해서 가공되고 있다. 특히 페룰은 정보의 전송효율과 질을 결정하는 초정밀 부품이고, 세라믹 재료인 지르코니아(ZrO_2)로 제작되고 있기 때문에 전적으로 연삭가공에 의존하고 있다.

현재 페룰과 같은 초정밀 부품을 가공할 수 있는 수준의 CNC 무심연삭기는 Nissin, Koyo, NTC, Micron 등과 같은 일본 업체들로부터 거의 전량을 수입하고 있으며, 이러한 초정밀 장비기술의 부재가 가공/제작기술의 부족으로 이어지는 악순환을 초래하고 있다. 이와 같은 상황을 탈피할 수 있도록 국내

연삭기 제조업체들이 초정밀 CNC 무심연삭기를 국산화 개발하려면, 무엇보다도 정적/동적/열적 특성을 체계적으로 파악하고, 그와 관련된 문제점을 설계단계나 제작단계에서 개선할 수 있는 능력을 구비할 필요가 있다. 특히 설계단계에서 문제점을 해결하는 것은 개발 원가를 낮추고, 개발 시의 시행착오를 줄이는 데 크게 기여할 수 있기 때문에 초정밀 CNC 무심연삭기의 구조적 특성을 설계단계에서 해석 및 평가할 수 있는 기술이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 초정밀 CNC 무심연삭기의 구조특성 해석 및 평가기술을 정립하기 위한 노력의 일환으로 콘크리트 베드를 사용한 CNC 무심연삭기의 구조해석 및 평가를 설계단계에서 수행하였다. CNC 무심연삭기의 구조해석모델은 유한요소 패키지인 ANSYS 5.6^(1,2)을 이용해서 구축하였고, 정량적인 구조적 문제의 검토 및 구조적 설계자료의 도출을 위해서 콘크리트의 탄성계수와 재료감쇠율은 충격가진실험⁽³⁾과 실험적 복소모드해석⁽⁴⁾, 그리고 유한요소해석을 통해서 규명하였다. 특히 CNC 무심연삭기의 구조특성은 자중, 외부 하중 등이 구조변형 및 조화응답특성에 미치는 영향을 토대로 분석하였다.

2. 무심연삭기의 구조 및 콘크리트 재료특성

2.1 무심연삭기의 구조

본 연구의 해석대상인 초정밀 CNC 무심연삭기의 구조적인 특징은 통상적인 공작기계와는 달리 구조의 고강성화 및 고감쇠화를 위해서 주물 베드 내에 콘크리트를 충전시킨 콘크리트 베드를 사용하고 있다는 데 있다.

또한 초정밀 CNC 무심연삭기를 구조적인 측면에서 살펴볼 때 Fig. 1과 같이 운동축 배열에 있어서 조정숫돌 헤드는 X축 테이블 위에 설치하고, 연삭숫돌 헤드는 베드 위에 설치하고 있다. 또한 공작물의 이송속도를 조정하기 위한 방법으로 X축 테이블 위에서 조정숫돌 헤드가 선회할 수 있는 구조가 되도록 B축 선회대를 설치하여 조정숫돌의 설치각을 부여하고 있다. 아울러서 연삭숫돌을 드레싱하기 위해서 연삭숫돌 헤드 후면에 드레서가 반경방향과 좌우방향 운동을 할 수 있도록 U축과 W축을 설치함으로써 구조의 단순화와 연삭작업의 효율성을 도모하고 있다.

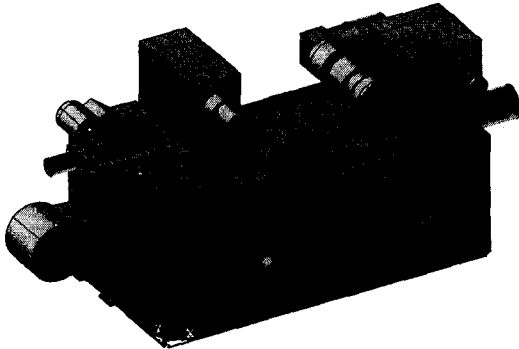


Fig. 1 Centerless grinding machine

2.2 콘크리트의 재료특성

본 연구에서는 CNC 무심연삭기의 베드에 충전된 콘크리트의 재료특성을 실험적으로 규명하기 위해서 Fig. 2와 같이 고무줄로 양단을 지지한 콘크리트 빔 (가로×세로×높이: 60×60×1,500mm)에 대한 충격 가진실험⁽³⁾을 수행하였다. 실험장치는 충격해머, 가속도계, 증폭기, FFT 분석기 등으로 구성되어 있으며, 그 형태는 Fig. 3에 나타내었다. 또한 진동실험에서는 콘크리트의 재료특성이 보다 명확하게 얻어지도록 가진점과 응답측정점을 서로 반대편 단에 위치시켰으며, 실험모델을 지지하는 고무줄의 특성이 진동응답에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 수평방향으로 가진하고 수평방향으로 응답을 측정하였다.

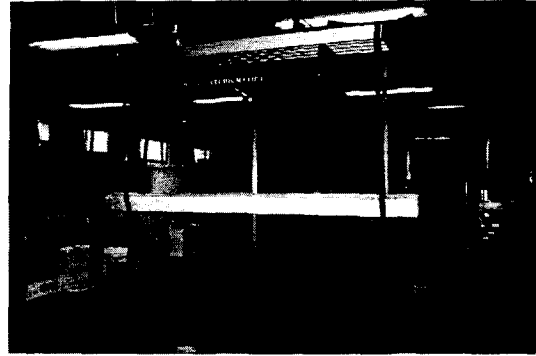


Fig. 2 Experimental setup for modal testing

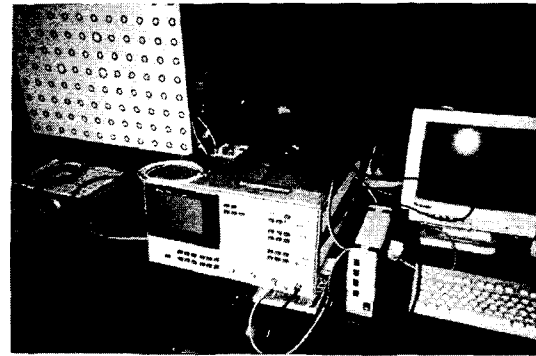


Fig. 3 Modal testing equipments

Table 1 Modal parameters of concrete beam

Mode	Natural frequency	Damping ratio
1st	145.3Hz	0.0223
2nd	402.1Hz	0.0163
3rd	782.6Hz	0.0176
4th	1277.0Hz	0.0158

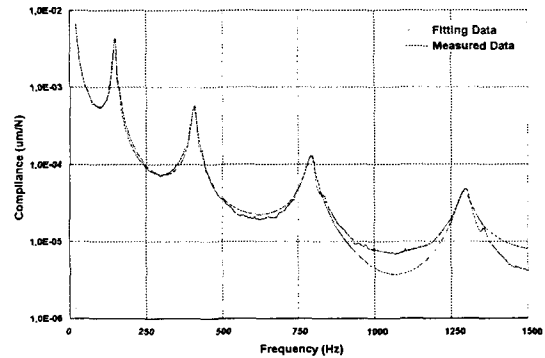


Fig. 4 Compliance of concrete beam

표 1은 콘크리트 실험모델에 대한 모드 매개변수인 고유진동수와 감쇠비를 보여주고 있다. 이 결과들은 실험을 통해서 측정된 실험모델의 주파수 응답 특성인 컴플라이언스(compliance)를 일반점성감쇠계에 대한 실험적 복소모드해석법⁽⁴⁾에 적용시킴으로써 도출한 결과이다.

표 1에서 알 수 있듯이 콘크리트 실험모델의 1차 고유진동수와 감쇠비는 145.3Hz와 0.0223, 2차 고유진동수와 감쇠비는 402.1Hz와 0.0163, 3차 고유진동수와 감쇠비는 782.6Hz와 0.0176, 그리고 4차 고유진동수와 감쇠비는 1277Hz와 0.0158로 각각 나타났다. 이러한 콘크리트 실험모델의 모드 매개변수들은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 측정된 컴플라이언스와 모드 매개변수로부터 재구성한 컴플라이언스가 잘 일치한다는 사실로부터 신뢰성이 높게 얻어졌다고 판단된다.

궁극적으로 콘크리트 실험모델로부터 얻어야 할 정보는 CNC 무심연삭기의 구조해석모델을 구축하기 위해서 필요한 콘크리트의 재료특성인 탄성계수와 재료감쇠율이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 실험모델에 대한 유한요소모델을 구축한 후, 그 유한요소모델로부터 얻어지는 모드 매개변수들이 실험모델의 모드 매개변수들과 오차가 최소화될 때까지 콘크리트의 탄성계수와 재료감쇠율을 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 이러한 과정을 통해서 규명된 콘크리트의 탄성계수와 재료감쇠율은 27GPa와 0.00005이다.

3. 무심연삭기의 구조해석

2.1 무심연삭기의 유한요소모델

본 연구에서는 CNC 무심연삭기의 구조변형특성 및 조화응답특성을 설계단계에서 파악하고, 그 결과를 토대로 구조를 개선할 수 있도록 유한요소기법을 이용한 CNC 무심연삭기의 구조해석을 수행하였다. 해석 대상인 CNC 무심연삭기의 형태는 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 콘크리트 베드, X축 테이블, B축 선회대, 연삭스툴 헤드, 조정스툴 헤드, 스톱 드레서 등으로 이루어져 있으며, 조정스툴 헤드와 B축 선회대는 그 자중이 X축 테이블과 접하는 위치, 스톱 드레서는 그 자중이 베드 상에 설치된 킬럼과 접하는 위치, X축 테이블과 연삭스툴 헤드는 그 자중이 베드의 안내면과 접하는 위치에서 하중으로 작용한다고 가정하였다. 그리고 본 연구에서는 이러한 형태의 CNC 무심연삭기의 구조해석 수단으로서 상용 유한요소 해석시스템인 ANSYS 5.6^(1,2)을 이용하였다.

Fig. 5는 CNC 무심연삭기의 유한요소모델을 보여주고 있는데, 본 연구에서는 이러한 구조해석모델

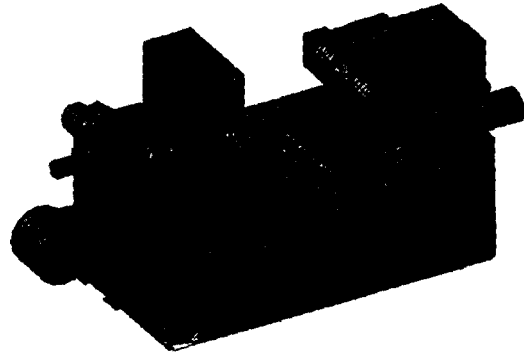


Fig. 5 FEM model of centerless grinding machine

Table 2 Node and elements of FEM model

Node number		71,675
Element number	Shell element (shell63)	9,409
	Solid element (Solid95)	18,668
	Matrix element (Matrix27)	86
	Summation of elements	28,163

Table 3 Material properties of FEM model

Cast iron (GC30)	Young's modulus	90GPa
	Density	7,300kg/m ³
	Poisson's ratio	0.25
Steel (SS400)	Young's modulus	200GPa
	Density	7,850kg/m ³
	Poisson's ratio	0.32
Concrete	Young's modulus	27GPa
	Density	2,320kg/m ³
	Poisson's ratio	0.15
	Material damping factor	0.00005

을 구축하기 위해서 쉘요소, 솔리드요소 및 매트릭스요소를 병용하였다. 그리고 Table 2는 CNC 무심연삭기의 유한요소모델을 구성하는 절점과 요소의 수를 모두 보여주고 있는데, 절점수와 요소수는 각각 71,675개와 28,193개이다. 또한 CNC 무심연삭기를 구성하는 주요 구조물의 재료는 베드의 재료인 강재(SS400)와 콘크리트(Concrete), 그리고 슬라이드 베이스 등의 재료인 주철(GC30)과 같이 크게 3가지로 분류된다. 본 연구에서 CNC 무심연삭기의 유한요소모델에 적용한 주철, 강재 및 콘크리트의 물성값들은 Table 3에 제시하였다.

3.1 무심연삭기의 구조변형특성

본 연구에서는 CNC 무심연삭기의 구조변형특성 해석시의 경계조건으로서 베드와 지면이 만나는 3개

의 지지점들의 자유도를 모두 고정시켰다. Fig. 6은 자중만을 고려해서 해석한 CNC 무심연삭기의 구조변형을 보여주고 있으며, 그 결과들을 정리한 것은 Table 4에 제시하였다.

자중에 의한 CNC 무심연삭기의 구조변형 해석결과로부터 조정숫돌 헤드 후단부의 변위(298 μ m)이 가장 큰 것을 알 수 있으며, 그 변위는 대부분 상하방향 처짐(265 μ m)에 의해서 일어나고 있다. 이러한 구조변형의 원인은 조정숫돌 헤드가 탑재되는 X축 테이블이 조정숫돌 헤드의 자중 때문에 베드의 중심부 쪽으로 처짐이 발생한다는 데 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 무엇보다도 X축 테이블과 조정숫돌 헤드의 구조강성이 개선되어야 한다.

그리고 자중에 의한 구조변형 때문에 발생하는 연삭숫돌축 중심의 변위는 수직방향 -8.6 μ m, 폭방향 9.1 μ m, 길이방향 -0.5 μ m이며, 조정숫돌축 중심의 변위는 수직방향 -76.1 μ m, 폭방향 97.5 μ m, 길이방향 43.8 μ m로 나타났다. 결과적으로 연삭숫돌축 중심과 조정숫돌축 중심 사이의 상대변위량(연삭숫돌 기준)은 수직방향 -67.5 μ m, 폭방향 88.4 μ m, 길이방향 44.3 μ m이다.

또한 최대 등가응력이 나타나는 부위는 모두 베드와 지면이 만나는 지지점 근처인 것으로 나타났으며, 주어진 해석조건에서의 최대 등가응력은 52.5 MPa로 예측되었다. 이 값은 베드의 끌격을 이루는 강재(SS400)의 허용응력인 875MPa보다 매우 작기 때문에 구조적으로 문제를 일으킬 가능성은 없다고 판단된다.

CNC 무심연삭기의 가공특성과 관련된 수평방향의 구조강성을 평가하기 위해서 연삭숫돌과 조정숫돌의 중앙위치에 반경방향으로 각각 1N의 수평력을 서로 반대방향으로 작용시킨 후, 구조변형을 해석하였다. 이 해석에서는 수평력에 의한 구조변형만을 파악하기 위해서 자중의 효과는 무시하였다. 해석결과는 Fig. 7에 제시하였는데, 연삭숫돌과 조정숫돌 사이의 상대변위(연삭숫돌 기준)는 수직방향 0.029 μ m, 폭방향 -0.002 μ m, 길이방향 0.032 μ m로 나타났다. 이 값들은 수평력 1N에 대한 상대변위량이기 때문에 반경방향의 연삭력을 지지하는 CNC 무심연삭기의 수평방향 구조강성은 0.032 μ m/N으로 생각할 수 있다.

마찬가지로 CNC 무심연삭기의 가공특성과 관련된 수직방향의 구조강성을 평가하기 위해서 연삭숫돌과 조정숫돌의 중앙위치에 수직방향으로 각각 1N의 하중을 서로 반대방향으로 작용시킨 후, 구조변형을 해석하였다. 이 해석에서는 수직력에 의한 구조변형만을 파악하기 위해서 자중의 효과는 무시하였다. 해석결과는 Fig. 8에 제시하였는데, 연삭숫돌과 조정숫돌 사이의 상대변위(연삭숫돌 기준)는 수직방향 -0.049 μ m, 폭방향 -0.0059 μ m, 길이방향 -0.029 μ m로 나타났다. 이 값들은 수직력 1N에 대한 상대변위량

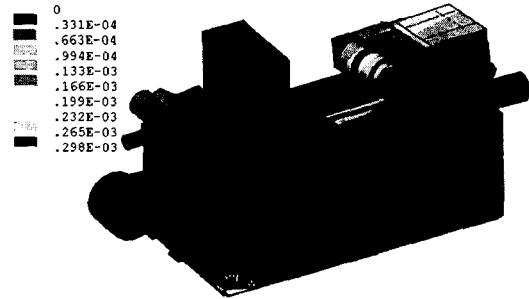


Fig. 6 Structural deformation of grinding machine (Gravity force)

Table 4 Structural characteristics of grinding machine

Maximum displacemen	Maximum deflection	Maximum stress	Comment
298 μ m (R/W rear)	265 μ m (R/W rear)	52.5MPa (Bed support)	Gravity force

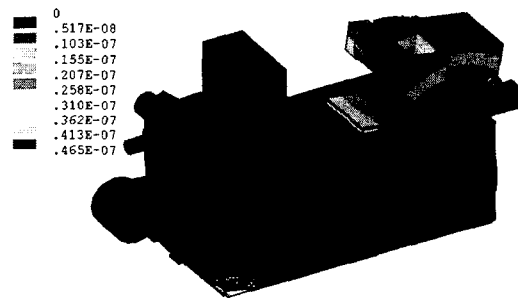


Fig. 7 Structural deformation of grinding machine (Horizontal force : 1N)

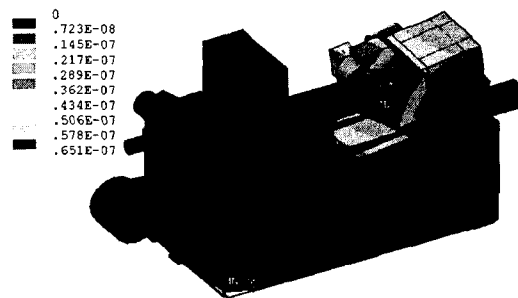


Fig. 8 Structural deformation of grinding machine (Vertical force : 1N)

이기 때문에 수직방향의 연삭력을 지지하는 CNC 무심연삭기의 수직방향 구조강성은 0.049 μ m/N으로 생각할 수 있다.

3.2 무심연삭기의 조화응답특성

본 연구에서는 CNC 무심연삭기의 조화응답특성 해석시의 경계조건으로서 구조변형특성 해석시의 경계조건과 동일하게 베드와 지면이 만나는 지지점들의 자유도를 모두 고정시켰으며, 조화응답특성 해석 모델은 구조변형특성 해석모델과 동일한 유한요소모델을 사용하였다.

본 연구의 해석대상인 CNC 무심연삭기는 연삭숫돌의 최대 회전수가 1,800rpm이다. 따라서 연삭숫돌의 회전과 관련된 연삭부하의 변동이 CNC 무심연삭기의 가공정밀도에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위해서 조화응답 해석을 수행하였다. 특히 조화가진력은 연삭숫돌과 조정숫돌의 중앙위치에서 진폭 1N과 주파수 30Hz의 반경방향 수평가진력이 서로 반대방향으로 작용하는 것으로 모사하였다.

Fig. 9는 조화가진력에 의해서 야기되는 연삭숫돌축 중심과 조정숫돌축 중심에 대한 길이방향의 조화응답을 보여주고 있다. X축 테이블의 구조강성이 상대적으로 취약하기 때문에 조정숫돌축 중심의 변위가 연삭숫돌축 중심의 변위보다 매우 큰 것으로 나타났다. 조정숫돌축 중심의 변위는 수직방향 진폭이 0.108 μm 로 가장 크고, 길이방향 진폭이 0.091 μm , 폭방향 진폭이 0.002 μm 이다.

또한 조화가진력에 대한 조화응답의 위상차가 -0.0063° 이하로 매우 작게 나타났는데, 이러한 사실은 콘크리트의 재료감쇠율이 매우 작기 때문에 콘크리트 자체만으로는 CNC 무심연삭기의 감쇠특성이 크게 향상되는 것이 아님을 의미한다. 따라서 실제 콘크리트 베드의 감쇠특성은 콘크리트 베드를 구성하는 강재 골조와 콘크리트 사이의 결합면 특성에 기인한다고 판단된다.

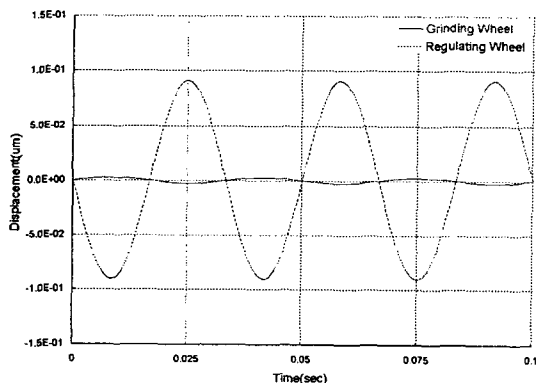


Fig. 10 Harmonic response in longitudinal direction

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 베드를 사용한 CNC 무심연삭기의 구조변형특성 및 조화응답특성을 설계단계에서 파악하고, 그 결과를 토대로 구조를 개선할 수 있도록 유한요소기법을 이용한 CNC 무심연삭기의 구조해석을 수행하였다. 그리고 본 연구를 통해서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- ① CNC 무심연삭기의 베드 내에 충전되는 콘크리트의 탄성계수와 재료감쇠율은 충격가진실험, 실험적 복소모드해석 및 유한요소해석을 통해서 규명하였다. 본 연구에서 규명한 콘크리트의 탄성계수와 재료감쇠율은 27GPa과 0.00005이다.
- ② 자중에 의해서 발생하는 CNC 무심연삭기의 최대 변위량은 298 μm 로 조정숫돌 헤드 후단부에서 발생하며, 그 변위의 대부분은 상하방향 처짐(265 μm)에 의한 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 X축 테이블과 조정숫돌 헤드의 구조강성을 개선할 필요가 있다.
- ③ CNC 무심연삭기의 최대 등가응력은 베드 지지부에서 발생하며, 52.5MPa로 예측되었다. 이 값은 베드의 골격을 이루는 강재(SS400)의 허용응력인 875MPa보다 매우 작기 때문에 구조적으로 문제를 일으킬 가능성은 없다.
- ④ 단위 하중에 대한 연삭점에서의 구조변형을 분석한 결과, CNC 무심연삭기의 수평방향과 수직방향 구조강성은 0.032 $\mu\text{m}/\text{N}$ 과 0.049 $\mu\text{m}/\text{N}$ 으로 예측되었다.
- ⑤ 조화가진력에 대한 조정숫돌축 중심의 변위가 연삭숫돌축 중심의 변위보다 매우 큰 것으로 나타났다. 또한 조화가진력에 대한 조화응답의 위상차가 매우 작다는 사실로부터 콘크리트 자체의 재료특성 때문에 CNC 무심연삭기의 감쇠특성이 크게 향상되는 것이 아님을 확인하였다.

참고문헌

1. "ANSYS Verification Manual," Swanson Analysis Systems, Inc, 1999.
2. 박형진, "ANSYS를 이용한 유한요소해석," 광문각, 2001.
3. 工作機械技術振興財團, "インパルス應答法による工作機械動剛性の評價に関する研究," 1982.
4. 김석일, 박병만, 이후상, 정재호, "공작기계 주축계의 진동특성 해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제8권, 제2호, pp. 57-68, 1991.