한국공작기계학회 2002 춘계학술대회 논문집 pp. 261~265

모드합성법을 이용한 공작기계구조물의 동적 거동 해석

이영우*, 성활경**

Dynamic Analysis of Machine Tool Structure by Mode Synthesis Method

YeongWoo Lee*, HwalGyeong Seong**

*창원대학교 메카트로닉스공학부, **창원대학교 기계공학과

Abstract

In the machining tool avoid vibration problem have an effect on high precision as well as statical and thermal characteristics. Therefore overcome this problem is essential to advance of machine tool and machining skill. Even though vibration arises owing to a variety of causes, in this paper vibration analysis of column as a major part of machine tool structures is presented. At this procedure vibration analysis applied to mode synthesis method using a attachment mode.

Key words : Mode Synthesis Method(모드합성법), Vibrational Normal Mode(동적모드), Static Mode(정적모드), Attachment Mode(부착모드)

1. 서 론

공작기계와 같은 복합 기계구조물의 성능에 관한 최적설계를 할 경우, 설계자는 보통 가공정도 및 가공능률을 최우선으로 개선하고자 한다. 이들은 공작기계의 정강성, 동강성 그리고 열적 특성에 크게 의존하게 된다. 그 중에서도 동적인 측면에서의 요구 특성은 이상 진동이 없는 가공 성능, 정밀도, 표면 거칠기 및 최대 금속 제거율 등의 상대적 항목에 의해서 평가되고 있으며, 최적설계를 하기 위해서는 기계 제작 이전에 정확하고 합리적인 방법으로 평가할 필요가 있다.

그 중에서도 공작기계의 진동 문제는 기계의 내부적 그리고 외부적인 가진 요소에 의해 이루어지게 되는데, 공구와 공작물 사이에 상대 변위를 일으켜서 가공정밀도에 영향을 주는 강제 진동의 문제와, 절삭력과 절삭의 기구가 관여하고 절삭조건에 의하여 가진력이 없는 상태에서 가공점을 중심으로 진동이 발생하는 채터 진동의 문제로 구분할 수 있다. 하지만 이들은 상호간에 직접적으로 혹은 간접적으로 영향을 주고 있고, 그 사이에는 매우 복잡한 경합 또는 협조관계가 존재하기 때문에, 설계 문제로 정식화되기 이전에 이들의 관계를 명확하게 해둘 필요가 있다.

특히, 크고 복잡한 공작기계 구조물일수록 여러 부분 구조로 이루어지는데, 이들은 독립적으로 설계되고 서로의 결합부를 통해서 제한되는 상대적인 운동을 하게 된다. 이처럼 복잡한 공작기계구조물의 동적 가진에 대한 응답해석은 유한요소모델을 해석함으로써 가능하게 되는데 여기에서는 많은 자유도를 포함할 수 있으므로 그만큼 시간과 노력을 필요로 한다.

본 연구에서는 각 부분 구조들의 결합부 상대운동에 의해 발생되는 동적 거동에 대하여, 그리고 공작기계 구조물의 동적 거동에 대한 문제점은 시

간의 변화에 따라 힘의 크기와 방향 그리고 힘의 작용 범위가 계속 변화할 수 있다는 점에서 모드 합성법을 이용한 탄성체 동력학적 해석방법을 적용하여 동적 성능을 예측하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 탄성체 동력학적 해석

기계구조물의 동역학적 해석을 위하여 기계구조물 각 부분은 Body로 정의되고 이 Body들은 조인트에 의해 상호 연결된 후 외부로부터 힘과 운동을 받게된다. 이때 Body들은 대개 강체로 간주되지만, 정밀기계인 경우 기계장치의 거동을 좀더 면밀하게 예측하기 위하여 선택된 Body들은 탄성체(Flexible-body)로 취급할 수 있다. 탄성체로 취급되는 Body들은 강체 운동(Rigid-body motion)과 동시에 탄성체 운동(Elastic motion)을 하게된다.

Body의 공간에서의 강체 운동을 기술하기 위해서는 Body당 6개의 좌표가 필요하며, 이중 3개는 평행운동을 그리고 나머지 3개는 회전운동을 기술하기 위하여 필요하다. 한편 Body의 탄성체 운동은 효율적인 기술을 하기 위하여 모드좌표(Modal coordinates)가 사용되며, 탄성체 운동의 정확도는 사용된 모드의 적절한 선택에 의해 좌우된다. 여기서 적절한 선택이란 탄성체 운동을 기술하기 위해 선택된 모드들이 해당 Body의 운동을 얼마나 잘 대표할 수 있느냐를 나타낸다. 모드는 생성 방법에 따라 동적모드(Vibration normal mode)와 정적모드(Static mode)로 구별할 수 있다.[2]

2.1 동적모드 및 정적모드

동적모드는 고유치 문제의 해로서 얻어지며 Body내에서 강성과 공간상의 질량분포에 따라 결정된다. 유한요소법을 이용하여 고유치 문제를 풀 경우 강성행렬과 질량행렬을 정의하여야 하며, 이때 질량행렬은 연속질량 접근 또는 집중질량 접근 방법에 의해 정의된다. 연속질량 접근 방법에서는 질량이 요소 내에 연속적으로 분포되어 있다고 가정하는 반면, 집중질량 접근 방법에서는 질량이 절점에 집중되어 있다고 가정하므로 회전에 대한 관성력은 0이 된다. 일반적으로 집중질량 접근 방법으로 해를 얻기 위해서는 비교적 조밀한 격자망을 사용해야 하지만, 경계조건의 개수가 Body의 강체 운동을 방지할 수 없을 만큼 충분하지 못할 경우엔 강체모드가 발생하게 되고, 그러한 경우, 동적모드는 강체모드를 제외시킨 것 중에서 선택하게 된다.

Body는 인접하는 Body와 조인트 및 스프링 또는 감쇠기 등으로 구성된 힘 요소에 의해 연결되어지며, 이들 연결점에서 비교적 큰 반력을 받게 된다. 경우에 따라서 국부적으로 큰 탄성변형이 발생될 수도 있다. 일반적으로 적은 동적모드 수만으로 국부적으로 크게 발생된 탄성변형을 나타내기는 어렵다.

정적모드(Static mode)는 특정 자유도 방향으로 하중 또는 변위를 적용시킨 상태에서 Body에 대한 정적 평형방정식을 풀어 얻을 수 있는 모드를 말한다. 정적모드는 무엇을 작용시켰느냐에 따라 Constraint mode와 Attachment mode로 나뉘어 진다. 정적모드를 정의하기 위하여 총 자유도 중에서 s개의 자유도를 선택한다.

Constraint mode를 정의하기 위해서는 몇 개의 특정 절점들을 선택하게 되는데, 이들의 수는 문제의 특성에 따라 다르다. 절점들에 순차적으로 한 개씩 단위 변위를 부여하고, 선택된 절점의 나머지 것들에는 0변위를 준 상태로 Body 전체에 대한 정적 평형방정식을 풀면, 선택된 절점 수만큼의 모드를 구할 수 있고, 이들이 Constraint mode이다.

또한 Attachment mode를 정의함에 있어서는, 위의 Constraint mode를 구할 때와 같이 먼저 몇 개의 특정 절점을 선택한 뒤 경계조건을 정한다. 그리고 선택된 절점들을 순차적으로 한 개씩 택하여 특정방향으로의 단위 하중을 적용시키고, 선택된 절점들 중 나머지 절점에는 0 하중을 작용시킨 상태에서 선택된 절점 수만큼의 모드를 구할 수 있고, 이들을 일컬어 Attachment mode라 한다. Attachment mode를 구할 경우 주어진 경계조건이 강체 운동을 방지할 수 없는 경우에는 강체 모드를 이용하여 관성력이 제거된 정적모드를 생성시켜야 한다.

일반적으로 동적모드는 Body의 광범위에 걸쳐 발생되는 변위를 기술할 수 있는 반면, 국부적으로 발생되는 변위는 정적모드에 의해 보다 효과적으로 기술될 수 있다.

2.2 모드합성법

모드 합성법(Mode synthesis method)은 모드들의 선형 결합을 말하며, 만약 i번째 Body에 대하여 n개의 동적모드(Vibration normal mode)와 m개의 정적모드(Static mode)를 사용한다면 i번째 Body에 발생하는 변형 $\overrightarrow{u_i}$는 다음과 같다.

$$\overrightarrow{u_i} = \Psi_n \overrightarrow{a_n} + \Psi_m \overrightarrow{a_m} \quad (1)$$

여기서 Ψ_n은 n개의 동적모드를 각 행으로 하는 모드행렬(Modal matrix)이고 Ψ_m은 m개의 정적모드를 각 행으로 하는 모드행렬이며, a_n과 a_m은 각 모드에 관한 모드좌표 벡터이다. 합성된 모드행렬을 Ψ라 하면

$$\Psi = [\Psi_n, \Psi_m] \quad (2)$$

로 정의되며, 이를 이용하면 모드질량행렬 $\hat{M}$와 모드 강성행렬 $\hat{K}$는 직교관계에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{M} = \Psi^T M^i \Psi = \begin{bmatrix} I_{nn} & 0 \\ 0 & \Psi_m^T M^i \Psi_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\hat{K} = \Psi^T K^i \Psi = \begin{bmatrix} \Lambda_{mm} & 0 \\ 0 & \Psi_m^T K^i \Psi_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 M과 K는 Body의 질량행렬 및 강성행렬이며 I_{nn}은 크기가 $n \times n$인 단위행렬이며 Λ_{mm}은 크기가 $m \times m$인 대각행렬로써 대각선상에 고유치를 갖는다.

탄성체 동역학적 해석에서 사용되는 모드 수가 증가할수록 연산시간은 급증한다. 일반적으로 동적 모드만을 사용할 경우에는 많은 수의 모드를 필요로 하나, 동적모드와 함께 잘 선택된 적은 수의 정적모드를 사용하면 전산효율 및 정확도를 모두 높일 수 있다. 특히 Attachment mode의 정의를 위해서는 조인트 및 힘 요소(Force element) 또는 집중된 Non-structural mass 등의 위치에 있는 절점에 힘의 작용방향으로 단위하중을 작용시켜 모드를 구한다.

3. 적용례

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 공작기계 구조물의 해석모델이다. 베드, 칼럼, 크래들, 퀼, 스핀들 그리고 백 칼럼의 6개 구조 부분으로 이루어지고, 칼럼이 x축, 크래들이 y축, 그리고 퀼은 z축 방향으로의 운동을 담당한다. 그리고 이와 같은 공작기계에 있어서, 칼럼의 역할은 다른 독립적인 구조에 비해서 상당히 크다고 할 수 있다. 즉 모든 방향으로 행해지는 운동의 영향을 다 받게 되므로 정적 및 동적 강성의 요구가 커지게 된다. 더욱이 각 축 방향으로의 고속이송이 이루어질 때는 관성의 영향도 무시할 수 없게 된다.

실제 절삭점에 힘이 가해질 때 제일 많은 변형이 일어나는 곳이 Column 부로서, Column의 설계에 있어서는 절삭점에 가해지는 힘의 특성에 대응할 수 있는 굽힘과 비틀림에 강한 설계가 요구된다고 할 수 있다. 즉 설계에 따라서 수배 이상의 강도차가 나타나게 되는데 이는 탄성변형의 가장 큰 원인이 되기도 한다. 또한 고속이송을 하는 공작기계에서는 이송부의 중량이 가장 큰 문제가 되고, 이는 정강성 및 동강성에 대하여 상반되는 요구조건으로서, 주어진 중량을 초과하지 않으면서 최대의 강성을 달성해야 하는 다목적 최적화 문제로 발전하게 된다.

본 연구에서는 퀼과 크래들의 y 및 z축의 운동을 받으면서 x축으로 고속 운동을 행하는 Column 요소에 대해서, 크래들과의 각 접촉부의 반력에 기인하는 변형의 특성을 Attachment mode를 이용한 모드합성법을 통해서 규명해보고자 한다.

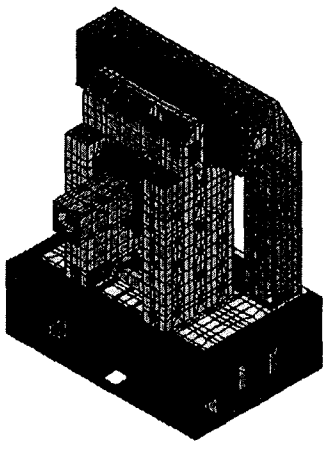

Fig. 1 Simulation Model of Back Column & Quill Type High-Speed Line Center

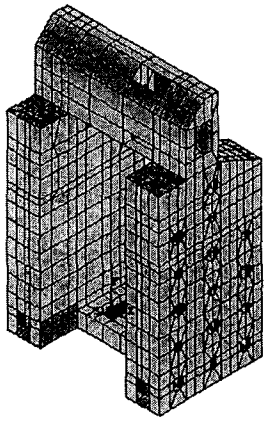

Fig. 2 FE Model of Column

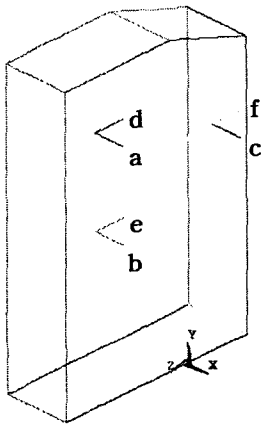

Fig. 3 Unit Force for Attachment Force Definition

Fig. 2는 탄성체로 정의되는 Column 요소를 나타내고 있다. 여기서 탄성변형을 나타내기 위해서 6 개의 정적모드가 사용된다. Attachment mode가 정적모드로 사용되며, 이것은 Fig. 3과 같은 방향으로의 단위 하중에 의해 정의된다. 그림에서 $a \sim f$는 크래들과의 접촉부로서 그사이에서 발생되는 힘을 나타내기 위해 도입된다. a, c, d에 의해 정의되는 정적모드를 구하면 Fig. 4 ~ Fig. 6과 같다.

Column의 탄성변형 $\vec{u_i}$ 는 사용된 모드들의 합성에 의해 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{u_i} = \sum_{j=1}^{m} \vec{\psi^j} a_j^i \qquad (5)$$

여기서 m은 사용된 모드의 총 수이고, $\vec{\psi^j}$는 j번째 모드 형상 벡터이며 a_j^i는 모드 좌표로 시간의 함수이다. 또한 모드좌표를 살펴보면 각 모드의 탄성변형에 미치는 영향을 알 수 있으며, 따라서 가장 중요한 모드를 알 수 있다.

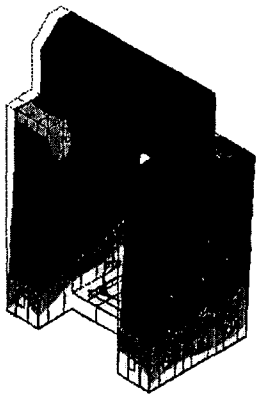

Fig 4. Static Mode by Unit Force a

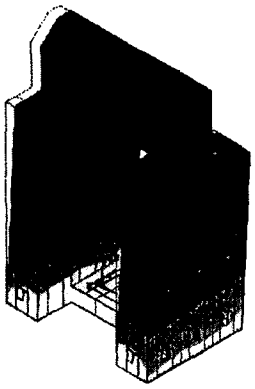

Fig 5. Static Mode by Unit Force c

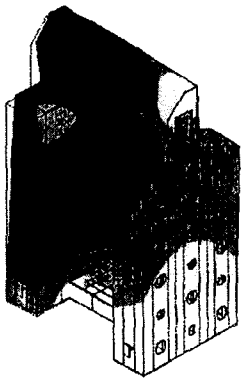

Fig 6. Static Mode by Unit Force d

Column의 2300 절점을 택하여 탄성변형을 살펴보았다. 선택된 지점은 Column의 상단 모서리 지점으로 x, y, z 방향의 변위는 Fig.7 ~ Fig. 9와 같고, x 방향의 변위가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

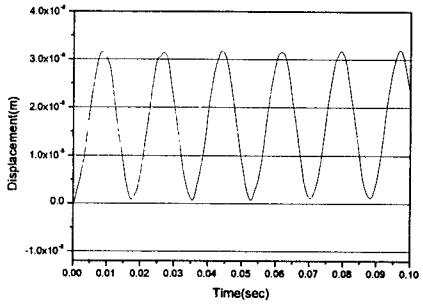

Fig 7. Displacement of x-direction

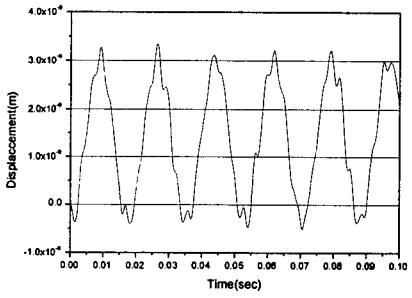

Fig 8. Displacement of y-direction

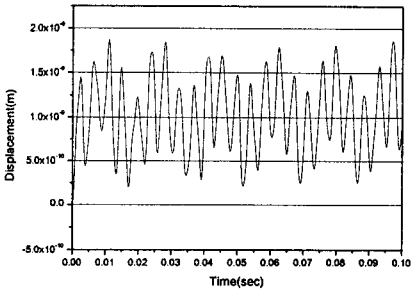

Fig 9. Displacement of z-direction

4. 결 론

본 연구에서는 공작기계구조물의 동특성을 해석하는 방법으로서 동적모드 및 정적모드를 구하고 모드합성을 통해서 동특성을 분석하는 방법을 제안했다.

해석을 통하여 제 1모드의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 Column의 이송 및 x축 방향의 절삭가공과 연관하여 많은 진동을 일으킬 수 있는 원인을 제공할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 및 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 이영우, 성활경,"유전자 알고리듬을 이용한 공작기계구조물의 정강성 해석 및 다목적함수 최적화(II)", 한국공작기계학회 2001년도 추계학술대회논문집,pp. 231-2236, 2001.
2. C.H.Chang,"A general procedure for structure Coupling in Dynamic Analysis",Ph.D Thesis, The University of Texas at Austin, 1977.
3. E.J.Haug,"Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical systems Volume I", Allen and Bacon, Needham Height, MA, 1989.
4. R.R.Craig, C.J.Chang,"On the Use of Attachment Modes in Substructure Coupling for Dynamic Analysis", Dynamics & Structural Dynamics, AIAA/ASME 18th Structures, Structural Dynamics & Material Conference, 1977.
5. 이영우, 성활경,"공작기계구조물의 동강성 해석 및 동적 최적화에 관한 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 63-66, 2001.
6. M. Yoshimura, T. Kondo and K. Kosugi,"Identification of Equivalent Spring Stiffness and Damping Coefficients in Sliding Joints by Simplified Slide Models",精密機械,47卷,10号,pp. 1203-1209, 1981.
7. S.A.Tobias,"Machine-Tool Vibration",John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.