

공작기계 주축계의 구조특성 해석시스템 SpindleX

김석일*(한국항공대학교), 조재완, 이원재((주)이앤소프트)

Structural Characteristics Analysis System "SpindleX" for Machine-Tool Spindle System

S. I. Kim(Hankuk Aviation Univ.), J. W. Cho and W. J. Lee(E&Soft, Inc.)

ABSTRACT

In this study, a structural characteristics analysis system for motor-integrated high-speed spindle systems, "SpindleX", is developed based on the Timoshenko theory and the multi-layered finite element method. Since "SpindleX" has the various analysis modules related to static deflection analysis, modal analysis, frequency response analysis, unbalance response analysis and so on, it is useful in performing systematically and quantitatively the design and evaluation processes of spindle system under the windows GUI environment. Also, to enhance the user-friendliness, "SpindleX" possesses the various additional functions such as the DXF file interface for auto-importing the shape and geometric data of spindle system from the DXF file, the bearing database for auto-importing the mechanical properties and geometric data of bearing by the bearing number, and the graphical visualization for certificating the imported and analysed data of spindle system.

Key Words : 모터내장형(Motor-integrated), 고속주축계(High-speed spindle system), 정적 변형(Static deflection), 모드해석(Modal analysis), 주파수응답(Frequency response), 불균형응답(Unbalance response)

1. 서론

최근 공작기계는 머시닝센터를 중심으로 고속화 경향이 두드러지게 나타나고 있는데, 그 이유는 광범위한 가공조건으로의 대응, 가공능률의 향상, 공구의 발달, 경합금 가공의 증가, 소경 공구로 가공할 공작물의 증가, 머시닝센터에 의한 연삭가공, 그리고 초고속절삭 등에서 찾을 수 있다. 그리고 이러한 공작기계의 고속화 기술을 구현하기 위해서는 무엇보다도 공작기계를 구성하는 핵심 운동기구인 주축계와 이송계의 고속화가 선행되어야 한다.⁽¹⁾

공작기계 주축계의 고속화 측면에서 볼 때 윤활 기술, 냉각기술, 구동기술 등의 발전도 필수적으로 요구되지만, 주축계 자체의 구조설계기술도 매우 중요한 핵심기술의 하나가 된다. 즉 공작기계 주축계의 고속화를 지향하기 위해서는 현재의 주축계 또는 원형이 되는 주축계에 대해서 지금까지의 경험이나 어떠한 측정에 기초를 두고 수정 및 개선을 수행하는 것만으로는 불충분하며, 여러 가지 특성들, 특히 정강성 및 동강성 등을 설계단계에서 파악하고, 명확한 평가기준을 토대로 최적의 구조설계를 만들어

내는 것이 필요하다.

지금까지 대부분의 공작기계 관련 기관들은 주축계의 구조적 특성을 설계단계에서 해석할 때 범용적인 용도를 갖는 상용 FEM 패키지(package)를 이용하고 있다. 그러나 이러한 상용 FEM 패키지들은 일반적인 구조물의 특성을 파악하기 위해서 개발되었기 때문에 주축계와 같이 세장비가 비교적 작은 회전축계의 특성을 체계적이고 정량적으로 해석하는 데에는 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 사용자의 편의성을 고려해서 DXF 파일을 이용한 주축계의 구조정보 입력모듈, 주축, 베어링 및 내장형 모터의 물성정보 입력모듈, 베어링 정보의 DB 모듈, 입출력정보의 가시화 모듈, Timoshenko 이론⁽²⁾과 다층 유한요소 개념⁽³⁾에 기반을 둔 유한요소 해석모듈 등으로 구성된 공작기계 주축계의 구조특성 해석시스템 SpindleX를 개발하였다. SpindleX는 일반적인 주축계만이 아니라 모터내장형 고속주축계까지도 해석 대상으로 하고 있으며, 정보의 입출력이 GUI(Graphic User Interface) 환경에서 JIT(Just-in-Time) 방식으로 이루어지기 때문에 시스템 사용법의 습득이 용이하고, DB 환경 하

에서 일괄적인 정보의 관리, 분석 및 출력이 가능하기 때문에 주축계의 구조특성을 해석 및 평가하는데 소요되는 시간과 노력을 크게 줄일 수 있다. 그리고 SpindleX는 플랫폼으로 IBM PC 586, 오퍼레이팅 시스템으로 윈도우즈 98/NT, 컴퓨터 언어로 Visual C++6.0 등을 사용하여 개발하였다.

2. 시스템의 구성 및 내용

2.1 개요

머시닝센터에 적용되고 있는 모터내장형 고속주축계의 구조에는 Fig.1에서 볼 수 있다. 기본적으로 모터내장형 고속주축계는 주축, 베어링, 내장형 모터, 베어링 간격을 유지시키는 스페이서, 베어링을 축방향으로 지지하는 스텝 슬리브 등으로 구성된다. 따라서 이러한 주축계의 구조특성을 설계단계에서 효율적으로 평가하기 위해서는 구성요소들에 대한 형상/치수정보와 물성정보 입력, 입력정보의 검증, 정량적인 구조특성 해석, 해석결과에의 가시화 등과 관련된 기술들을 필요로 한다. Fig.2에는 본 연구에서 개발한 공작기계 주축계의 구조특성 해석시스템 SpindleX의 구성과 작업흐름을 나타내었다.

주축, 베어링, 내장형 모터, 스페이서(spacer), 스텝 슬리브(step sleeve) 등과 같은 주축계의 구성요

소들에 대한 형상/치수정보들은 CAD 파일(DXF 파일)로부터 자동 추출하여 SpindleX의 자료구조에 입력하는 방법을 채용하였다. 베어링에 대한 상세정보들도 시스템 사용자의 편의성을 고려해서 Microsoft사의 Access97 기반으로 구축한 전용 DB로부터 추출하는 방법을 이용하였다. 주축계의 구성요소에 대한 형상/치수정보 입력이 모두 완료된 후에는 주축계의 3차원 가시화를 통해서 입력결과를 검증할 수 있다. 그리고 주축계의 구성요소들에 대한 물성정보들도 GUI 상에서 대화방식으로 입력된다. 특히 입력정보들을 토대로 모터내장형 고속주축계의 구조특성을 정량적으로 평가하기 위해서 세장비가 비교적 작은 주축계의 구조특성 해석에 적합한 Timoshenko 이론, 그리고 여러 장의 얇은 철심용 강판들로 적층된 내장형 모터의 회전부와 주축의 물성값 차이를 체계적으로 반영할 수 있는 다층 유한요소 개념을 적용하였다. 아울러서 주축계의 정적 변형, 모드해석, 주파수응답특성, 불균형응답특성 등과 같은 구조특성 해석결과들은 모두 JIT 분석 및 가시화가 가능하도록 하였다.

2.2 DXF 파일의 해석 및 변환

Autodesk사가 개발한 파일 포맷인 DXF(Drawing Interchange Format)는 CAD 프로그램의 정보로 사용하기 위해서 개발되었지만, 지금은 많은 프로그램들이 서로 다른 형태의 CAD 정보를 호환하기 위한 기본적인 포맷의 하나로 이용되고 있다. 현재 많은 공작기계 관련 기관들이 AutoCAD 기반으로 주축계를 설계하고 있기 때문에 주축계의 설계정보를 효율적으로 획득하기 위해서는 DXF 파일의 해석과 변환기술이 필요하다. 따라서 SpindleX에서는 DXF 파일을 해석하고, 그 결과를 주축계의 구조특성 해석을 위한 정보로 변환시키는 모듈을 개발하였다.

DXF 파일은 헤더(Header), 클래스(Classes), 테이블(Tables), 블록(Blocks), 엔티티(Entities), 오브젝트(Objects), 썸네일이미지(Thumbnailimage)와 같이 7개의 섹션(Section)으로 구성되어 있다. DXF 파일은 그룹 코드(Group code)와 그에 해당하는 값이 기본적인 정보의 단위이고, 파일 내에서 한 줄마다 하나의 값만을 가지고 있다.

각 섹션은 그룹 코드 "0"과 그에 해당하는 문자인 "SECTION"으로 시작한다. 다음 그룹 코드 "2"와 섹션의 이름을 표시하는 문자(예: HEADER)가 나온다. 각 섹션은 그룹 코드들과 각 요소들을 정의한 값들로 구성되어 있다. 또한 그룹 코드 "0"과 이에 해당하는 문자인 "ENDSEC"이 각 섹션의 마지막임을 알려준다. DXF에서 정의된 엔티티와 그룹 코드에 관한 정보는 AutoCAD 온라인 도움말(Online help)나 Autodesk 홈페이지의 매뉴얼에서 찾을 수 있다.

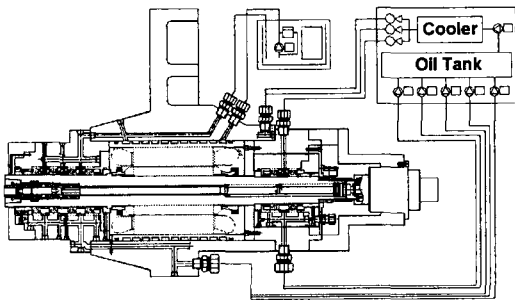


Fig. 1 Motor-integrated high-speed spindle

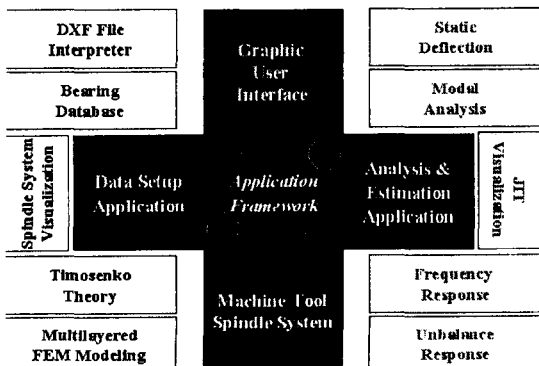


Fig. 2 System configuration of SpindleX

DXF에서는 모든 엔티티가 필요한 정보를 자체적으로 가지고 있고, 이 정보는 그룹 코드에 의해서 속성이 구별된다. 따라서 별도의 자료구조가 필요없이 엔티티의 정보를 임시로 저장하기 위한 버퍼(Buffer)만으로 DXF 파일을 해석 및 변환할 수가 있다. Fig.3은 DXF에서 정의된 엔티티들을 해석 및 변환하는 개념을 보여주고 있다.

Fig.3에서 볼 수 있는 가장 하위의 블록들은 DXF에서 정의된 개체를 나타내는 엔티티들로서 이들을 DXF_Entity라는 가상 클래스를 이용하여 하나의 정보형으로 관리한다. 그리고 이러한 DXF_Entity들은 DXF_EntityList의 한 노드(Node)로서 레이어(Layer)를 구분하여 모델링한 경우에는 레이어에 대한 정보를 포함할 수 있도록 하였다. 따라서 DXF_EntityList는 DXF 파일에서 표현하고자 하는 개체가 된다. Fig.4는 SpindleX의 DXF 해석/변환모듈을 이용해서 DXF 파일로 주어지는 모터내장형 고속주축계의 반단면 형상을 가시화한 결과를 보여주고 있다.

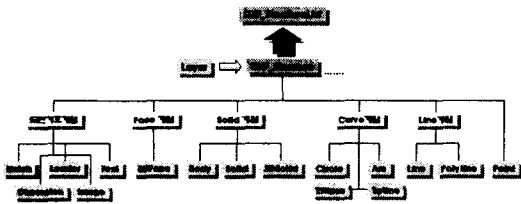


Fig. 3 DXF file interface

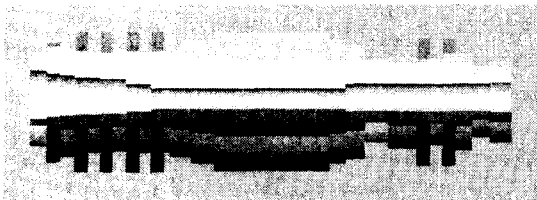


Fig. 4 Visualization of spindle system

2.3 베어링 정보의 DB화

주축계의 구조특성에 큰 영향을 미치는 베어링들은 표준화가 많이 진행되어 있는 상태이지만, 동일한 규격의 베어링이라도 제조회사마다 호칭번호가 다르고, 형상이나 치수의 일부가 다르며, 그 종류도 대단히 많기 때문에 베어링 정보를 관리하는 DB는 주축계의 구조특성 해석에서의 작업능률을 좌우하는 요소이다. 따라서 SpindleX에서는 Access97에 기반을 둔 베어링 정보의 DB 모듈을 구축한 후 베어링 호칭번호를 이용해서 베어링 정보를 DB로부터 자동 추출하는 방식을 채용하였다.

SpindleX의 베어링 DB에 저장되는 내용은 베어링 형식에 따라서 차이가 있지만, 앵글러 콘택트 볼

베어링의 경우에는 제조회사, 호칭번호, 내경, 외경, 폭, 기본 동정격하중, 기본 정정격하중, 허용회전수, 내륜 외경, 외륜 내경, 라운드부 반경, 접촉각, 예압 상태, 반경방향 강성, 축방향 강성 등이 있다.

2.4 주축계의 구조특성 해석

공작기계 주축계는 주축, 스페이서, 스텝 슬리브 등과 같은 회전부품들과 주축을 지지하는 베어링들로 구성된다. 일반적으로 공작기계 주축계는 세장비가 비교적 작기 때문에 정량적인 진동특성 해석을 위해서는 구성요소들에 대한 회전관성과 전단변형 효과를 모두 고려할 필요가 있다.⁽²⁾ 따라서 SpindleX에서는 주축계의 구조특성 해석을 위해서 Euler 이론이나 Rayleigh 이론이 아닌 Timoshenko 이론을 도입하였다.

주축과 억지끼워맞춤 상태로 조립되는 내장형 모터의 회전부는 여러 장의 얇은 철심용 강판들로 적층된 구조를 갖기 때문에 그 물성값이 일체형으로 만들어지는 주축과 크게 다르다.⁽³⁾ 특히 모터회전부의 탄성계수와 전단계수는 주축과 큰 차이를 나타내기 때문에 SpindleX에서는 그 영향을 고려할 수 있도록 주축, 모터회전부, 베어링 내륜, 스페이서, 스텝 슬리브 등과 같은 회전요소의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬을 독립적으로 계산한 후 중첩시키는 다층 유한요소 개념을 사용하였다.

공작기계 주축계의 회전요소와 베어링의 운동방정식들을 절점에서의 연속조건과 평형조건을 토대로 조합하면 공작기계 주축계의 운동방정식은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Q \quad (1)$$

여기서 M 은 주축계의 질량행렬, C 는 감쇠행렬, K 는 강성행렬, q 는 변위벡터, 그리고 Q 는 외력벡터를 의미한다.

공작기계 주축계의 정적 구조변형은 정강성과 정적 하중의 관계로 표현할 수 있기 때문에 식 (1)에서 관성항과 감쇠항을 무시한 후 식 (2)와 같은 형태로 변환하면 그 해석이 가능하다.

$$q = K^{-1}Q \quad (2)$$

그리고 주축계의 주파수응답특성은 동강성과 동적 하중의 관계를 나타내는 것이기 때문에 식 (1)을 아래와 같이 변환함으로써 해석할 수 있다.

$$q = (-\omega^2 M + j\omega C + K)^{-1}Q \quad (3)$$

여기서 ω 는 동적 하중의 가진주파수이다.

특히 공작기계 주축계의 모드해석을 위해서는 2계 미분방정식인 식 (1)을 다음과 같은 1계 미분방정식의 형태로 재구성할 필요가 있다.

$$\dot{p} + Dp = P \quad (4)$$

여기서 $D = \begin{pmatrix} 0 & -I \\ M^{-1}K & M^{-1}C \end{pmatrix}$, $p = \begin{pmatrix} q \\ \dot{q} \end{pmatrix}$, $P = \begin{pmatrix} 0 \\ Q \end{pmatrix}$ 이다.

그리고 주축계의 모드매개변수는 식 (4)에 대한 고유 값 문제의 표준형인 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$\dot{p} + Dp = 0 \quad (5)$$

3. 시스템의 적용례 및 고찰

Fig.5는 DXF 파일로부터 얻어지는 주축, 베어링, 스페이서, 스템 슬리브 등과 같은 회전요소의 형상/치수정보, Fig.6은 베어링 DB로부터 얻어지는 베어링의 치수정보와 물성정보, 그리고 Fig.7은 집중질량, 외부하중, 운전조건, 재료 감쇠특성 등과 같은 부가적인 해석조건에 대한 SpindleX의 정보 설정례를 보여주고 있다. 특히 주축계에 대한 정보 입력이 구조특성 해석에서 많은 시간과 노력을 필요로 했다는 점을 고려하면 이러한 CAD 파일과의 인터페이스와 베어링 DB의 적용은 주축계의 구조특성 해석에 대한 작업능률을 대폭 개선시킬 수 있다고 생각한다.

그리고 Fig.8은 DXF 파일과 베어링 DB로부터 입력된 주축계의 정보를 재구성하여 주축계의 형상을 3차원적으로 가시화한 결과를 보여주고 있다.

Fig.9, 10, 11, 12는 각각 모터내장형 고속주축계의 정적 구조변형, 진동모드, 구조진동 애니메이션, 주파수응답에 대한 SpindleX의 해석결과를 보여주고 있다. 이러한 결과들은 Timoshenko 이론과 다층 유한요소 개념에 기반을 둔 유한요소 해석방법을 통해서 얻어진다.

이상과 같은 적용례에서 알 수 있듯이 SpindleX는 주축계의 설계단계에서 요구되는 다양한 형태의 JIT 분석이 가능하며, 정보의 입출력이 모두 GUI 환경에서 이루어지기 때문에 초보자인 경우에도 시스템 사용법의 습득이 용이하다는 점, 일괄적인 정보의 관리, 분석, 출력이 가능하기 때문에 주축계의 구조특성을 해석 및 평가하는 데 소요되는 시간과 노력을 크게 줄일 수 있다는 점 등이 그 특징이다. 특히 해석결과로서 제공되는 그래프들은 프린터 출력이 가능하며, 메타파일(metafile)로의 저장이나 클립보드(clipboard)로의 복사가 가능하기 때문에 보고서

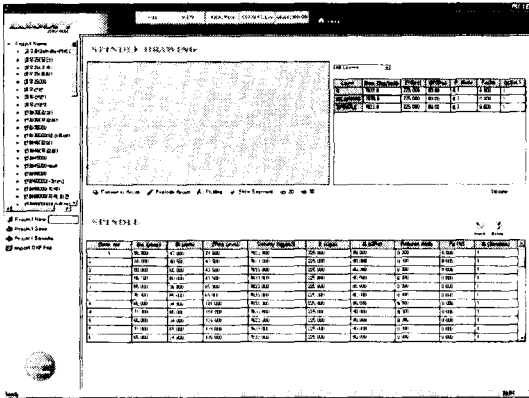


Fig. 5 Setup of spindle data

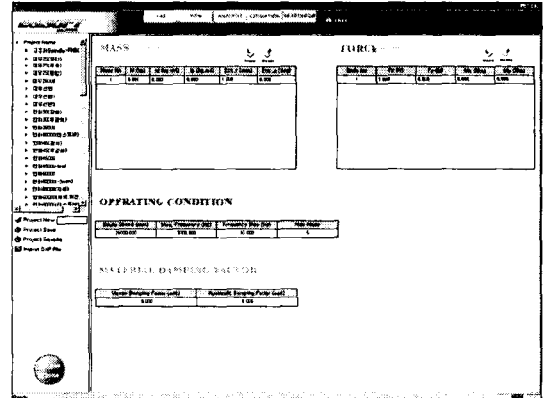


Fig. 7 Setup of analysis conditions

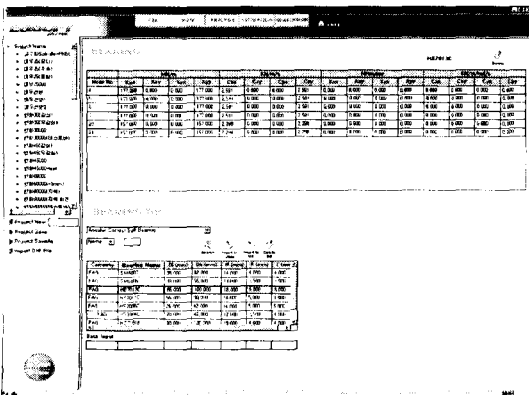


Fig.6 Setup of bearing data

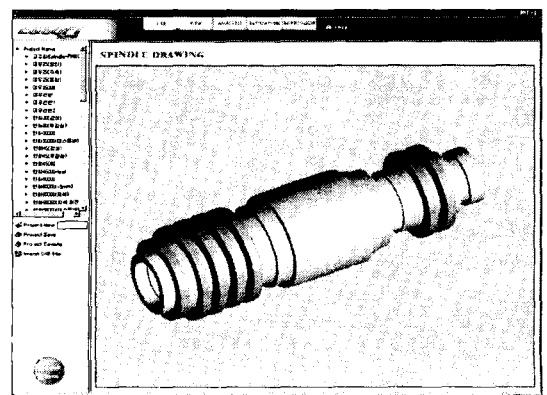


Fig. 8 Visualization of spindle system

작성에 필요한 시간과 노력을 대폭 줄일 수 있다

4. 결론

본 연구에서는 공작기계 주축계의 정적 구조변형, 진동모드, 주파수응답, 불균형응답 등을 JIT 분석할 수 있는 기반을 구축하기 위한 목적으로 공작기계 주축계의 구조특성 해석시스템 SpindleX를 개발하였다. SpindleX의 특징과 장점은 다음과 같다.

- (1) 주축계의 구조특성 해석에 대한 작업능률을 향상시키기 위해서 주축계의 구성요소들에 대한 형상/치수정보들은 DXF 파일로부터 자동 추출하여 시스템의 자료구조에 입력하는 방법을 적용하였다.
- (2) 주축계의 구조특성 해석에 대한 작업능률을 향상시키기 위해서 베어링의 상세정보들은 Access97 기반으로 구축한 전용 DB로부터 시스템의 자료구조에 입력하는 방법을 적용하였다.
- (3) DXF 파일과 베어링 DB로부터 입력된 주축계의 정보를 재구성하여 주축계의 형상을 3차원적으로 가

시화시킬 수 있기 때문에 입력정보의 검증이 용이하다.

(4) 세장비가 비교적 작은 주축계의 정량적인 구조특성 해석을 위해서 전단변형과 회전관성 효과를 모두 고려한 Timoshenko 이론을 적용하였다.

(5) 주축계의 구성요소별 물성정보를 다룰 수 있다는 점을 고려해서 회전요소의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬을 독립적으로 계산한 후 중첩시키는 다층유한요소 개념을 적용하였다.

참고문헌

1. 김석일 외, 최신 공작기계 설계기술, 반도출판사, 1995.
2. 김석일, 조정준, 최대봉, 모터내장형 주축의 동특성 해석, 한국정밀공학회 논문집, 제11권 3호, 1994, pp.184~190.
3. 이재윤, 김석일 외, “머시닝센터용 고속주축 개발에 관한 연구, 통상산업부 연구보고서, 1996.

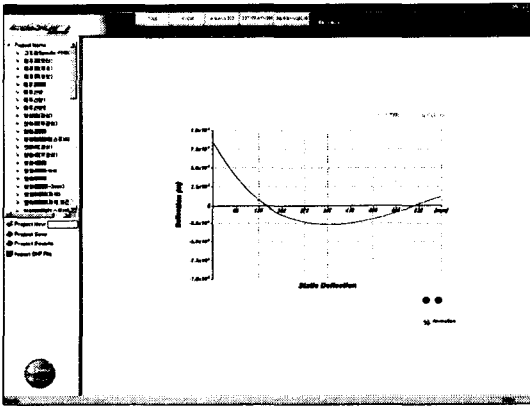


Fig. 9 Static deflection analysis

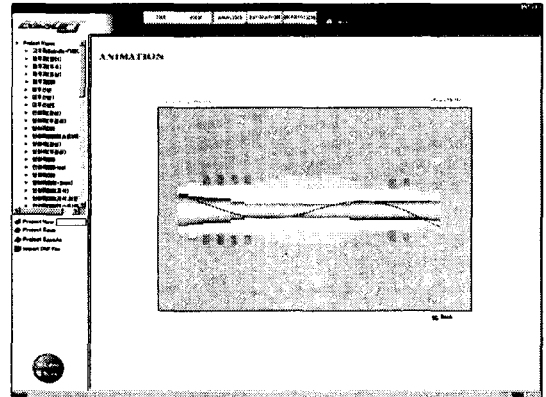


Fig. 11 Animation of structural vibration

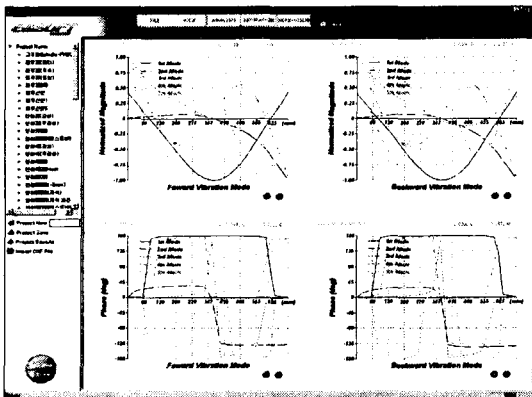


Fig. 10 Modal analysis

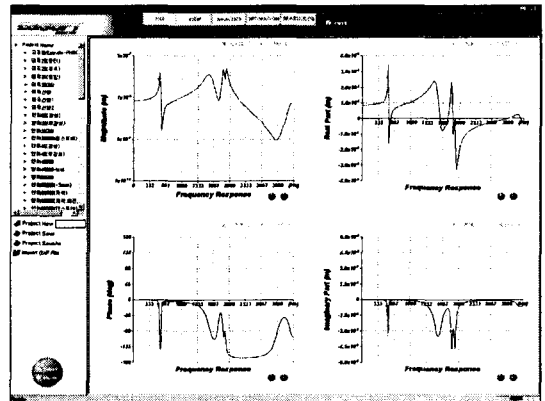


Fig. 12 Frequency response analysis