

## 운반하역 크레인의 설계해석 자동화 시스템 개발

Development of Design and Analysis System for Material Handling Cranes

임 동 준\*                      박 정 연\*\*                      이 충 동\*\*\*  
Lim, Dong Joon              Park, Jung Yean              Lee, Choong Dong

---

### ABSTRACT

A material handling crane is composed of many complex structural components which require sufficient strength, stiffness and stability throughout its service life and need to be light in weight, and satisfy the required functions under the entire range of operating conditions. In this study, the analysis system for material handling cranes is presented. This program integrate various structural analyses modules with the GUI(Graphic User Interface) concept. Utilizing basic variables as input data, the analysis system performs quasi-static, eigenvalue, buckling, fatigue and stability analysis. Using this program, the designer can generate optimal design data for the cranes without any actual measurements. This system will also be extended to other mechanical structures with kinematic motion like crane.

---

### 1. 서    론

크레인과 같은 운반하역설비는 수많은 구조부재와 구동장치로 이루어져 있으며, 항만과 같은 하역 작업장에 설치한 후 정기적인 보수작업을 제외하고는 상시 운영되는 구조물로서 정상 작동상태 뿐만 아니라 태풍, 지진 등의 돌발하중에 대해서도 충분한 구조적 안전성을 유지해야 한다. 그러므로 적절한 크레인설계를 위해서는 설계자의 풍부한 구조설계지식과 경험을 바탕으로 다양한 하중조건하에서 발생 가능한 구조적 문제점이 충분히 고려되어야 한다. 이와 같이 복잡한 크레인의 설계작업을 수작업에 의존하거나 단편적인 설계 프로그램을 이용할 경우 부정확한 결과로 인한 설계의 오류 가능성이 높으며, 과도한 설계시간이 소요되고 적절한 구조설계가 불가능한 문제점이 발생할 수 있다.

본 연구는 상기와 같은 문제를 해결함은 물론 여러 가지 형태의 운반하역용 크레인 설계를 위한 기본데이터 선정과 해석에 사용되는 입력데이터 작성 및 수정, 구조해석 모델의 자동생성, 계산결과와 확인과 구조안전성 평가, 설계자료 작성 등 일련의 설계해석 관련 작업을 간편하고 효율적으로 일괄 처리할 수 있는 설계해석 자동화 시스템을 개발하기 위하여 수행되었다.

크레인 설계해석 시스템은 GUI(Graphic User Interface) 개념과 일관성 있는 화면처리(Graphic Display) 기능을 사용하여 설계자가 쉽게 사용할 수 있도록 개발되었으며, 외국 크레인 전문설계회사의 설계자료와 비교 검증하였다. 또한 다수의 실제 설계해석 업무적용을 통하여 설계기간의 대폭적인 단축과 적절한 구조설계를 구현함으로써 생산된 제품의 경쟁력 제고에 큰 기여를 하였으며, 설계자뿐만 아니라 국내·외의 크레인 발주자로부터 본 프로그램의 신뢰성과 우수성을 인정받은 바 있다.

---

\* 현대중공업(주) 연구원    \*\* 현대중공업(주) 선임연구원    \*\*\* 현대중공업(주) 수석연구원

## 2. 크레인 설계해석 시스템의 개요

크레인 설계해석 시스템은 크게 컨테이너 크레인, Transtainer, BTC(Bridge Type Crane), 천장크레인 (Overhead Crane) 등의 전·후처리 프로그램인 CSTAR와 LLC(Level Luffing Crane), Dericking Type Crane, Swing Lever Type Crane 등 다양한 형태의 Jib 크레인을 해석할 수 있는 LSTAR 및 유한요소 해석 프로그램으로 구성되어 있다. 또한 임의의 형상을 가진 보의 단면특성치를 계산하는 프로그램과 지브크레인의 초기 기하학적 형상 생성용 프로그램 등 여러 가지 보조 프로그램이 포함되어 있다. 유한요소해석의 경우 본 설계해석 시스템에 내장된 해석 프로그램을 사용하거나 EMRC/NISA와 SACS 등과 같은 상용의 범용 유한요소 해석 프로그램과 연계하여 사용할 수 있도록 개발되었으며, 준정적해석과 고유치해석, 해상운송해석 등을 수행한다.

일반적으로 크레인 설계시 적용되는 설계기준은 AISC<sup>(1)</sup>, BS2573<sup>(2)</sup>, BS5400<sup>(3)</sup>, F.E.M<sup>(4)</sup>, CMAA<sup>(5)</sup> 등이다. 본 설계해석 시스템에서는 사용자가 이들 설계기준의 규정을 선택하여 설계해석을 수행할 수 있도록 개발되었으며, 응력 및 좌굴, 처짐하중, 안정성, 피로수명, 고유치 평가 등 크레인 설계에 필요한 여러 가지 항목을 일괄적 또는 선별적으로 평가할 수 있다. Fig. 2.1은 크레인 해석 시스템의 해석 절차를 나타낸 그림이다.

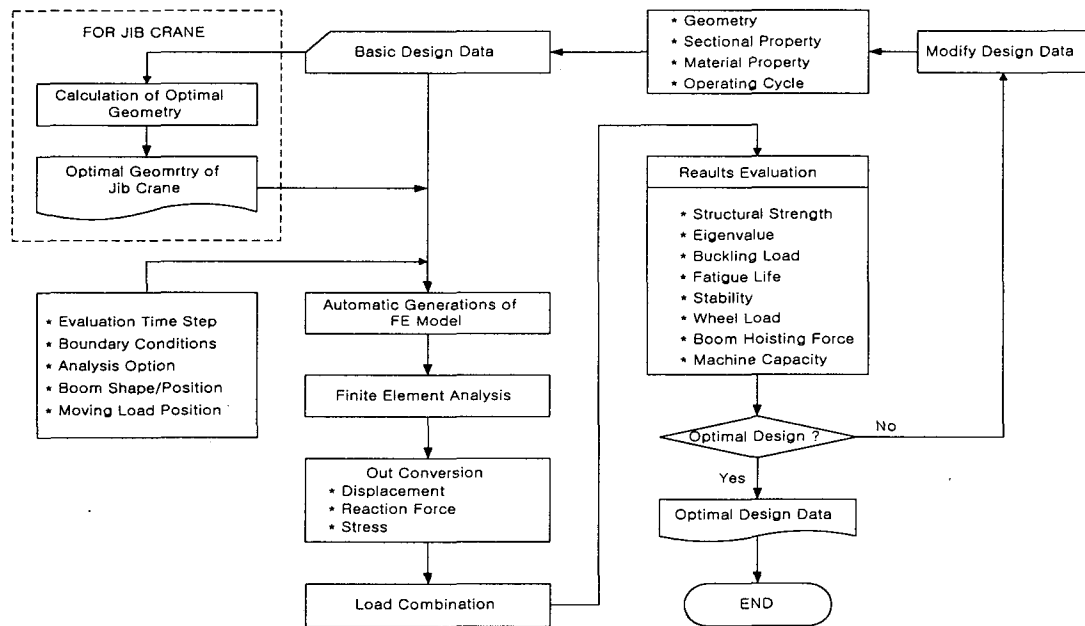


Fig. 2.1 Analysis Procedure

## 3. 전처리 모듈

전처리 모듈에서는 크레인 각 부재의 물성치와 보단면특성치, 기하학적 데이터를 입력하고 각종 하중과 경계조건 등을 정의하여 유한요소 모델을 생성하며, 후처리 작업에 필요한 입력 데이터를 생성한다. Fig. 3.1은 CSTAR를 사용한 컨테이너 크레인 해석과정과 LSTAR를 사용한 Level Luffing Crane 해석 과정을 나타낸 그림으로 GUI를 이용하여 사용자가 화면상에서 각종 데이터를 입력·수정할 수 있도록 구성되어 있다.

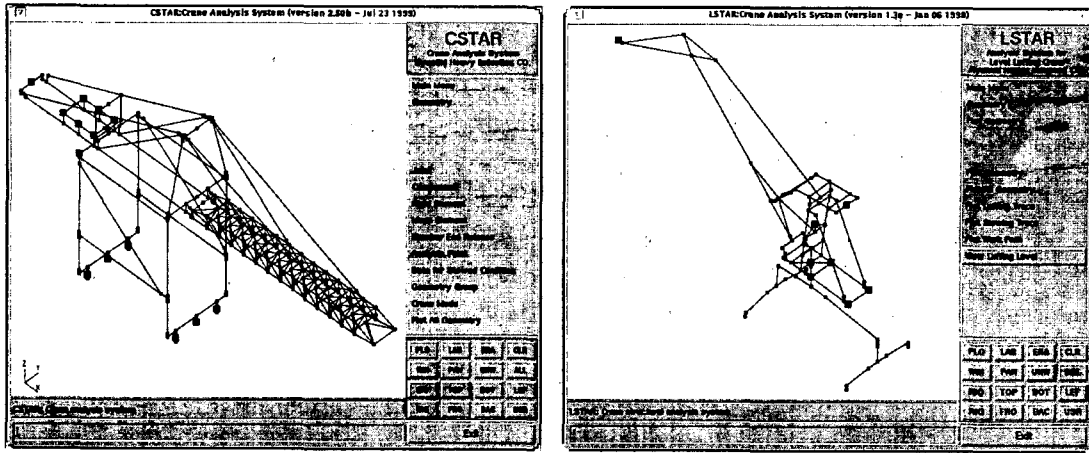


Fig. 3.1 크레인 설계해석시스템

### 3.1 보 단면 계산프로그램 및 물성치 입력

크레인 설계해석 시스템에서는 크레인을 3차원 보요소와 트러스, 질량요소 등으로 모델링하고 있으며, 대부분의 구조부재에는 보요소를 사용하고 있다. 일반적으로 크레인에 사용되는 보의 단면형상은 표준형 단면보다 목적에 맞게 특수 제작된 임의 형상의 단면을 많이 사용하기 때문에 보의 단면특성치를 구하는 SECTION 모듈이 크레인 설계시스템에 포함되어 있으며, 유한요소 해석과 후처리에 필요한 도심, 단면적, 관성모멘트 등을 계산한다. Fig. 3.2는 SECTION 모듈을 나타내고 있으며, 사용자가 단면의 형상을 확인하면서 값을 입력하게 되어 있으므로 오류를 최소화하고 결과를 즉시 확인할 수 있다.

운반하역용 크레인에는 일반적으로 여러 종류의 자재를 사용하기 때문에 각각의 재질특성을 효율적으로 관리하기 위한 프로그램이 필요하다. 본 설계해석 시스템의 자재관리 프로그램은 해석에 필요한 탄성계수, 밀도, 항복응력 등과 같은 일반적인 부재의 물성치 이외에도 크레인을 보요소로 가정하여 모델링할 때 발생하는 중량 및 길이의 오차를 보정하기 위한 보정계수를 고려하여 해석시 처리되도록 구성되었다.

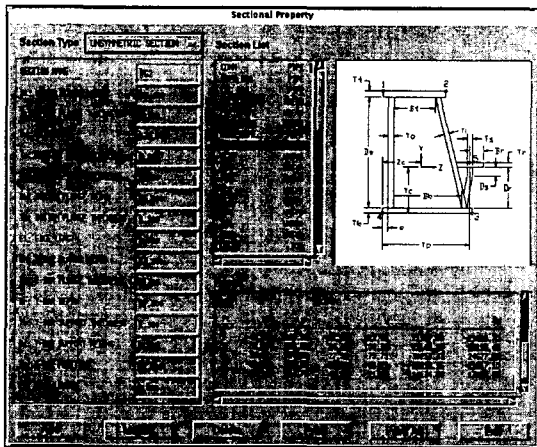


Fig. 3.2 Section Module

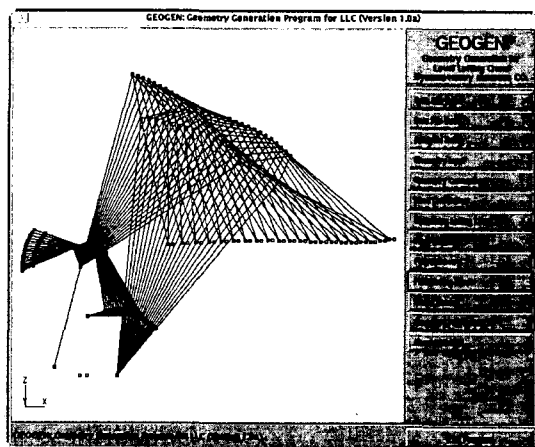


Fig. 3.3 LLC 상부부재의 이동 궤적

### 3.2 크레인 형상 데이터 입력

크레인 설계해석 시스템의 기하학적 형상 데이터는 중요지점의 절점좌표와 "COMPONENT" 로 정의된 부재이름, 단면이름, 재질이름, 유한요소 분할에 관련된 데이터 등으로 구성되어 있다. 이러한 형상 데이터의 입력은 화면상에서 이루어지며, 확대·축소, 복사·이동, 시점(View Point) 변경 등을 통하여 입력된 데이터의 이상 유무를 간단하게 판별할 수 있다. 특히 Level Luffing Crane과 같은 지브 크레인의 경우 초기 기구 운동에 따른 최적의 기하학적 형상과 지정 위치의 절점 좌표, 기계장치의 용량 등을 계산하기 위한 GEOGEN 모듈이 개발되어 있으며, 최적설계 기법을 이용하여 초기에 입력된 값으로부터 크레인의 기본 형상 데이터를 생성한다. Fig 3.3은 기하학적 형상의 최적값을 구하기 위해 사용되는 모듈인 GEOGEN이며, 인입운동(Luffing Motion)에 따른 적재하중의 상하 진폭을 화면에 표시하고 있다.

### 3.3 하중 및 경계조건

크레인에 작용하는 하중은 크레인의 자중, 해석위치에 따른 이동하중과 같이 일반적인 하중뿐만 아니라 태풍, 지진하중, 충격하중과 같이 돌발적인 하중이 있으며, 본 설계해석 시스템은 이러한 하중들을 간단하게 입력할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 무게중심, 풍력중심, 각 부재별 무게 등이 자동으로 계산되어 사용자가 간편하게 초기설계 자료로 활용할 수 있도록 구성되었다. LSTAR의 경우에는 지브의 회전(Swing)과 붐(Boom)의 이동에 따라 기하학적 형상이 변화하므로 이에 따른 풍하중(Wind Load), 무게중심 등이 사용자가 지정한 작업경로와 조건에 따라 자동 생성되므로 별도의 작업 없이 해석을 수행할 수 있다.

초기 입력되는 경계조건은 크레인의 작업상태나 해석하고자 하는 목적에 따라 달라진다. 본 프로그램에서는 전처리 모듈에서 강제변위와 지점에서의 지지조건, 붐 힌지와 같은 관절부의 결합조건을 하중상태 또는 크레인 작동조건에 따라 입력할 수 있도록 구성되어 있다. Fig. 3.4는 컨테이너 크레인 설계시 사용되는 이동하중계산 결과를 표시한 것이다.

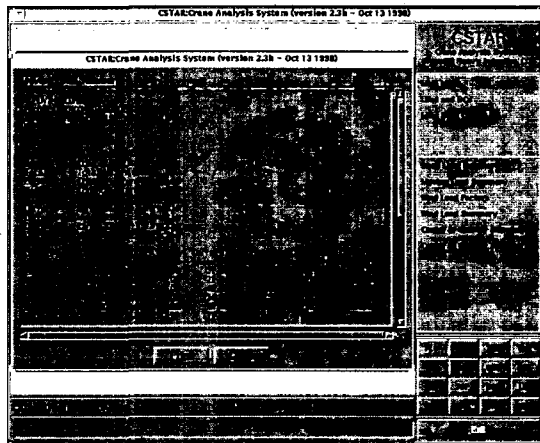


Fig. 3.4 이동하중 계산결과

## 4. 주처리 모듈

크레인 설계해석 시스템은 부재의 단면과 물성 데이터, 절점좌표와 요소의 구성 데이터 및 각종 하중조건과 경계조건 등이 입력되면 해석위치에 따라 요소를 재구성하여 유한요소모델을 자동 생성한다. 주처리 모듈은 이와 같이 전처리 모듈에서 작성된 유한요소해석 데이터로부터 준정적해석과 고유치 해석 및 해상운송해석등을 수행한다. 본 설계해석시스템에는 3차원 보요소와 트러스요소, 질량요소, 스프링요소로 구성된 유한요소 모델을 해석할 수 있도록 "DFEAP"로 명명된 해석 프로그램이 포함되어 준정적해석과 고유치해석을 수행한다. 본 해석 프로그램은 다양한 예제 문제와 기존의 상용 프로그램을 이용하여 충분히 검증하였다.

또한 개발된 설계해석 시스템에서는 사용자의 편의나 필요에 따라 EMRC/NISA나 SACS와 같은 상용의 범용 유한요소해석 프로그램과 연계하여 해석할 수 있도록 개발되어 있어 사용자가 선택적으로 사용할 수 있다.

## 5. 후처리 모듈

후처리 모듈에서는 전처리와 주처리 모듈을 통해 생성된 여러 가지 데이터와 유한요소 해석으로 얻어진 구조물의 지점반력, 변위, 부재내력, 고유진동수 등을 이용하여 구조강도 및 좌굴하중평가, 차륜하중, 안정성, 피로수명 등을 검토하며 그 결과를 화면에 표시하거나 문서로 작성한다. 후처리 작업에 필요한 입력 데이터는 프로그램에서 자동생성 되거나 설계자가 조건에 따라 입력하므로써 쉽게 사용할 수 있도록 구성되어 있다.

### 5.1 강도 평가

강도 평가 모듈은 크레인 해석시 일반적으로 사용되는 AISC, F.E.M., DIN, CMAA 등의 규정에 따라 크레인 구조물에 작용하는 다양한 형태의 하중들을 조합하여 부재에 작용하는 응력을 계산하고 이를 허용치와 비교하므로써 구조물의 안전성을 평가하는 모듈이다. 구조물의 강도평가는 여러 가지의 하중조합을 정의하여 주어진 시간간격(Time Step)에서 부재에 작용하는 하중과 모멘트를 구한다. 이 결과와 구조물의 단면특성을 고려하여 조합응력을 계산하고 물성치에 따른 허용응력과 비교함으로써 구조물의 강도를 평가한다. 하중조합은 여러 개의 기본하중으로부터 발생 가능한 하중을 구하는 과정이며, 좌굴하중 평가와 피로수명 평가, 안정성 및 차륜하중 평가등 다양한 후처리 작업시에도 유사한 방법으로 수행된다.

### 5.2 좌굴하중 평가

크레인은 축하중과 굽힘모멘트를 동시에 받는 골조구조로 이루어져 있으므로 이들의 복합하중을 동시에 고려하여 부재강도와 구조안전성을 평가해야 한다. 굽힘모멘트와 인장력이 결합되었을 경우, 부재의 불안정요인이 감소되어 항복응력만을 고려한 설계를 한다. 반면, 굽힘모멘트와 압축력이 결합되었을 경우에는 부재 불안정의 가능성이 커지므로 굽힘에 의한 부재처짐과 압축력이 작용하여 2차 굽힘모멘트를 유발시켜 내력을 감소시키므로 이를 고려한 설계가 이루어져야 한다. 본 크레인 설계해석 시스템에서는 좌굴하중평가를 크게 프레임좌굴과 평판좌굴로 나누어 평가한다. 프레임좌굴은 전체 구조물의 변위와 하중값으로부터 좌굴하중을 계산하는 반면에 국부좌굴하중은 보요소를 평판요소로 정의하여 해당 보의 주요 평가위치에 대하여 조합응력과 조합전단응력 값을 사용하여 좌굴에 의한 안전성 여부를 평가한다. Fig. 5.1은 F.E.M. 규준을 적용하여 부재(Element)별로 구한 평판요소에 대한 좌굴하중 평가를 위한 데이터 입력과정을 보여주고 있다.

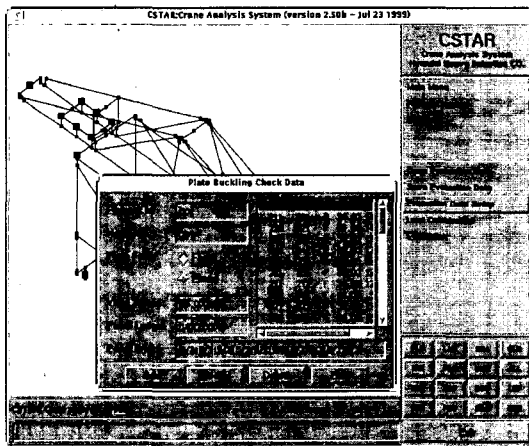


Fig. 5.1 Plate Buckling Analysis

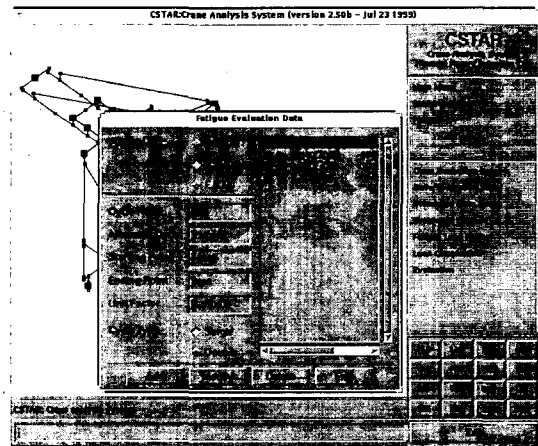


Fig. 5.2 Fatigue Analysis

### 5.3 피로수명 평가

구조물이 정적하중에서는 충분한 강도를 가져도 동적하중 즉, 반복하중, 교호하중, 맥동하중 등의 피로하중을 받으면 항복강도보다 훨씬 작은 하중에서도 파손을 일으킬 수 있다. 일반적으로 크레인의 경우 설치 후 20년 이상의 사용 안전성이 보장되어야 한다. 따라서 사용수명 내에서 하역작업이 안전하게 수행될 수 있는 구조물을 설계하기 위해 정확한 피로파손하중이 계산되어야 하며, 본 프로그램에서는 F.E.M., BS5400, BS2573 Code에서 규정하는 방법을 사용하여 구조물의 피로수명을 예측하였다.

### 5.5 차륜하중평가

차륜하중을 계산하는 목적은 크레인 운영시 발생가능한 하중조건에 대해 구조물을 안전하게 지지하고 이동시키기 위하여 필요한 바퀴의 허용강도를 평가하기 위함이다. 차륜하중 계산은 고정 지점에 대해서 정의된 차륜하중조합 조건 각각에 대하여 주어진 시간간격별로 지점반력을 구하고 차륜의 허용하중과 비교하므로써 바퀴의 안전성 여부를 평가한다.

### 5.6 안정성 평가

운반하역용 크레인은 대부분 야외에서 작업을 하기 때문에 태풍이 불거나 지진발생시 구조물이 전복될 우려가 있다. 그러므로 이를 방지하기 위해서는 반드시 안정성 여부를 평가해야 하며 다음과 같이 두 가지 방법으로 평가할 수 있다. 차륜과 연결된 4개의 지점에 대하여 정의된 안정성평가 하중조합식에 대하여 주어진 시간간격별 지점반력을 구하여 부(-)의 반력여부를 판단하여 안정성을 평가하거나 전도 모멘트와 안정화 모멘트의 크기를 비교함으로써 평가한다.

### 5.7 Boom 구동하중 평가

컨테이너 크레인의 경우 선박이 항만에 접안하거나 작업중지시 크레인의 붐을 들어올릴 필요가 있으며, 지브크레인의 경우에서도 붐을 들어올리는데 필요한 힘을 계산해야 한다. 후처리 모듈에서는 이때 필요한 힘을 계산하므로써 설계자가 적절한 구동장치의 용량을 선택할 수 있도록 하고 있다.

### 5.8 고유치 해석

대부분의 컨테이너크레인이나 지브크레인의 경우 항만에 설치되는 경우가 많기 때문에 바람에 의하여 구조물 전체 또는 국부적인 진동이 발생할 수 있다. 또한 중량물을 운반으로 인한 크레인의 흔들림이 발생할 우려가 크다. 따라서 안정된 크레인을 설계하기 위해서는 동적특성을 파악하여야 하며, 본 프로그램에서는 비감쇠조건에서의 고유치 해석을 수행하여 고유진동수, 고유진동모드, 모드질량기여도(Modal Mass Participation Factor, MMPF)를 구한다. 컨테이너크레인의 경우에는 주요 작업방향이나 사용자가 지정한 방향에 대한 최초의 고유진동수를 규정하여 허용치를 넘지 않도록 하고 있으며 일반적으로 고유주기가 1.7 초에서 2초 이상이면 크레인 작업자가 불쾌감을 느끼는 것으로 알려져 있다.

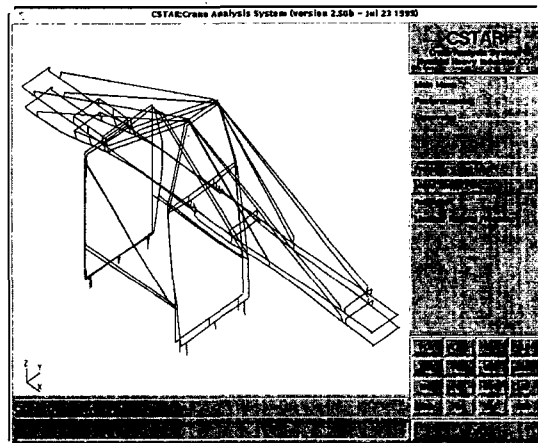


Fig. 5.3 컨테이너 크레인의 진동모드

## 6. 결론

해상 교역량의 증가에 따라 수출입 화물의 하역에 사용되는 컨테이너 크레인, Transtainer, 지브크레인과 같은 운반, 하역용 크레인의 수요가 매년 증가하고 있다. 본 연구는 이러한 운반하역용 크레인의 설계해석 과정 전반에 걸쳐 자동화를 꾀하고 관련 기술을 확보 하고자 수행되었다.

본 연구를 통하여 개발된 크레인 설계해석 시스템은 초기 설계변수 선정에서부터 유한요소 모델의 작성, 해석 수행 및 결과평가와 같은 일련의 설계·해석 과정을 자동화·전산화하여 간편하게 일괄 처리할 수 있는 통합 시스템으로서, 설계자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 개념으로 개발되었으며 설계기간을 대폭 단축할 수 있고 설계작업시의 오류를 최소화 할 수 있다. 따라서 본 설계해석 시스템을 사용할 경우 빠른 시간 내에 재설계 및 해석이 가능하므로 팔목할 만한 원가절감 효과를 통한 고부가가치를 창출할 수 있음은 물론 정확한 구조해석에 의한 크레인의 구조건전성을 확보 할 수 있다.

현재까지 국내는 물론 중국, 동남아, 미국, 파나마 등지에 납품된 수십기 이상의 크레인 설계해석에 사용하여 설계기간의 대폭적인 단축과 적절한 구조설계가 가능함을 확인하였으며, 이를 통하여 크레인의 품질 향상은 물론 제품의 경쟁력 제고에 큰 기여를 하므로써 설계자뿐만 아니라 국내·외의 크레인 발주자로부터 본 프로그램의 신뢰성과 우수성을 인정받은 바 있다.

크레인 설계해석 시스템 개발시 축적된 설계해석 자동화 기법은 타 구조물의 설계시 적용할 경우 기술력 향상은 물론 구조건전성이 보장된 경제적 설계가 가능할 것으로 판단되며, 향후 구조설계와 해석관련 전문가의 기술과 경험을 통합시킨 전문가시스템으로 발전시키는 것이 바람직할 것이다.

## 참고문헌

1. "Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design", American Institute of Steel Construction Inc.
2. "Rules for the design of cranes", BS 2573 : Part 1 : 1983.
3. "Steel, concrete and composite bridges", BS 5400 : Part 10 : 1980.
4. "Rules for the design of hoisting appliances", F.E.M. 3rd edition, 1987. 10.
5. "CMAA(Crane Manufacturers Association of America) Specification", #70, Revised 1983.
6. Howard I. Shapiro, "Cranes & Derricks", McGraw-Hill, 1980.
7. Josef Kogan, "Crane Design : Theory and Calculations of Reliability", John Wiley & Sons, 1976.
8. Edward J. Haug, "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System", Allyn and Bacon, 1989.
9. K.K. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.
10. Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill, 1989.
11. 박정연, 임동준, 이충동, "지브크레인 기본설계용 지적설계시스템 개발", 대한기계학회, 추계학술대회 논문집, 1995.
12. 임동준, 박정연, 신일상, 이충동, "컨테이너 크레인 지적설계시스템 개발", 대한기계학회, 추계학술대회 논문집, 1996.