

# 붐의 유연성을 고려한 트럭크레인의 설계 전용 동력학 해석 프로그램 개발

박찬종\*, 박태원\*\*, 김종현\*\*\*

## Development of Truck Crane Analysis Program with Boom Flexibility

Chan-Jong Park\*, Tae-Won Park\*\*, Jong-Hun Kim\*\*\*

### Abstract

Computer simulation technique has been applied on the various engineering fields to reduce cost and development period. On this paper, we introduce a crane analysis program. Using this program, we can predict reaction force of each part or supporting force of truck crane on a personal computer system without exclusive knowledge of multi-body dynamics. In order to consider the effect of boom flexibility according to each working condition, flexible dynamic theory is applied to the program. Actual crane model is analyzed on special work condition using this program and the results are compared with those of rigid boom model.

Key Words : Bryant Angle, Differential-Algebraic Equation(대수-미분방정식), Flexible Effect(유연체 효과), Vibration Mode(진동모드), Modal Synthesis Method(모드합성법)

### 1. 서론

최근 각종 건설 및 토목 공사에서 크레인의 활용이 크게 증가됨에 따라 크레인의 성능향상 설계에 많은 관심이 집중되고 있다.

국내의 크레인 설계 기술은 그 역사가 짧아 현재까지도 대부분의 설계가 정력학적 해석을 바탕으로 한 설계가 이

루어지고 있다. 그러나 실제 크레인의 연결부 및 지지부는 작업 상태에 따라 동적 하중이 중요한 작용을 한다. 따라서 기존의 정력학적 설계 기술로는 동적 하중에 의한 장비의 거동을 제품 개발 단계에서 예측하고 평가하여 실제 설계에 반영하기가 어려운 실정이다. 또한 동적 거동을 예측하여 설계에 적용하기 위한 모의 실험을 수행하기 위해서는 장비와 거동을 예측하게 해주는 컴퓨터 모델링에 대

\* 아주대 대학원

\*\* 아주대 기계 및 산업공학부

\*\*\* 삼성중공업

한 전문적 지식이 필요하다.

본 연구는 크레인의 신뢰성 제고 및 경량화, 최적화, 고기능화에 대비하여 장비의 동특성 해석 및 설계기술의 확립을 목표로 장비의 거동시 각 부위에 발생하는 동적인 하중과 운동 등을 사전에 예측할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 설계자가 쉽게 이용할 수 있도록 널리 보급되어 있는 개인용 컴퓨터에서 크레인 전용 프로그램을 이용해 설계자가 필요한 요소만 설정하고 그 이외의 부분을 자동적으로 모델링하여 해석, 확인이 가능한 통합 환경의 프로그램을 개발하여 설계자가 설계업무에 쉽게 응용할 수 있게 하였다.

## 2. 크레인의 기구학 해석

크레인의 동적 안정성을 확인하기 위한 동역학 해석을 위해서는 임의의 자세에 대해 연결부의 위치 및 작업 장치의 질량 중심에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 크레인 기구학 해석 프로그램을 사용하게 된다. 크레인 전용 기구학 해석 프로그램을 구성하기 위해 Fig. 1과 같은 크레인의 기구학적 운동을 Bryant Angle을 이용하여 수식화하였다.

작업 시 5개의 지지장치에 의해서 하부 프레임은 고정되어 있고 상부 프레임이 A점에서 하부 프레임과 회전조인트에 의해 연결되어 있다. 상부 프레임은 B점에서 회전조인트로 4단으로 구성된 붐과 연결되어 있으며 derick cylinder의 구동에 의해 붐의 작업 각도를 결정한다. 또한 4단 붐은 병진 구동장치에 의해 상대운동을 하면서 작업물체의 위치를 결정한다.

크레인의 각 작업 조건에 따른 부품들의 위치를 결정하기 위해 붐과 관련된 점들을 표시하면 다음 그림과 같다.

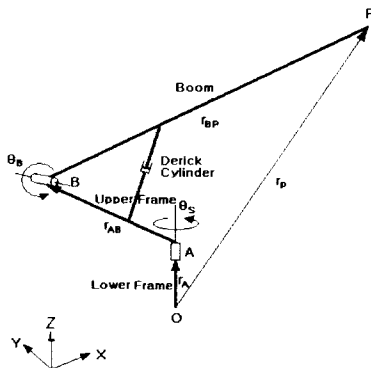


Fig. 1 Crane Kinematics

Swing과 붐의 회전 운동을 고려한 붐 상의 임의의 점 P의 위치 벡터를 Bryant Angle을 이용하여 표시하면 다음과 같다.

$$r_p = r_A + T_s r'_{AB} + T_s T_b r'_{BP} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} x'_{AB} \cos \theta_S + x'_{BP} \cos \theta_S \cos \theta_B - y'_{BP} \sin \theta_S - z'_{BP} \cos \theta_S \sin \theta_B \\ x'_{AB} \sin \theta_S + x'_{BP} \sin \theta_S \cos \theta_B + y'_{BP} \cos \theta_S - z'_{BP} \cos \theta_S \sin \theta_B \\ z'_A + z'_{AB} + x'_{BP} \sin \theta_B + z'_{BP} \cos \theta_B \end{bmatrix}$$

여기서,

$\theta_B$  : Swing Angle

$\theta_S$  : Boom Angle

A : 상부 프레임과 트럭 프레임 사이에 연결된 회전 조인트

B : 상부 프레임과 붐 사이에 연결된 회전 조인트

P : 붐 상에 있는 점

O : 원점

이와 같이 크레인의 입력 조건에 대한 기구학 자료를 계산하여 동역학 해석에 필요한 입력 자료를 만든다.

## 3. 동역학 해석

### 3.1 강제 동역학 해석

일반적으로 기계계는 특정한 운동을 할 수 있도록 여러개의 부품들이 기구학적 조인트나 고무부싱, 스프링 같은 힘요소들로 연결되어 구성된다. 크레인과 같이 구축된 기계계의 동적 거동을 예측하기 위해서는 다음과 같은 대수-미분방정식 (Differential-Algebraic Equation)을 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ -\lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} g \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\Phi(q, t) = 0 \quad (3)$$

여기서,

[M] : 질량행렬

[ $\Phi$ ] : 구속식 벡터

[ $\Phi_q$ ] : 구속식의 Jacobian행렬

{q} : 일반좌표벡터

{ $\lambda$ } : Lagrange 승수벡터

{g} : 일반 힘벡터

{γ}는 구속식의 우변항으로써 아래의 식으로 표시할 수 있다.

$$\{\gamma\} = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_H \quad (4)$$

구속된 기계계의 동적 거동을 계산하기 위해서는 구속식 (3)을 만족하면서 상미분 방정식(Ordinary Differential Equation)인 식 (2)를 동시에 풀어야만 한다. 이러한 대수-미분 방정식을 해석하기 위한 여러 가지 수치해석 알고리즘이 개발되어 공학분야에 적용되고 있다. 본 논문에서는 이미 개발되어 널리 사용되고 있는 대수-미분방정식해법인 일반좌표분리법(Generalized Coordinate Partitioning Method)을 적용하였다.<sup>[4,5]</sup>

### 3.2 유연체 동역학 해석

기계계를 이루고있는 부품이나 구조물에서 발생하는 탄성 변형이 전체 계의 운동에 비해 그 영향이 작을 경우에는 강체(rigid body)로 간주하여 해석을 수행한다. 그러나, 기계계가 고속, 경량화 되고 크레인의 붐과 같이 큰 하중의 구조물이 작업 길이가 길 경우 유연체효과(flexible effect)는 계의 전체 운동에 결정적인 영향을 미치게되며, 이러한 부품의 유연성을 고려한 해석 이론은 이미 개발되어 널리 응용되고있다.<sup>[7]</sup>

부품의 유연성 효과는 수많은 진동모드(vibration mode)의 조합으로 표현할 수 있으나 해석상의 경제성과 해석 결과의 정확성을 고려하여 특정 운동에 가장 큰 영향을 미치는 유한개의 모드로 대신하여 사용한다.

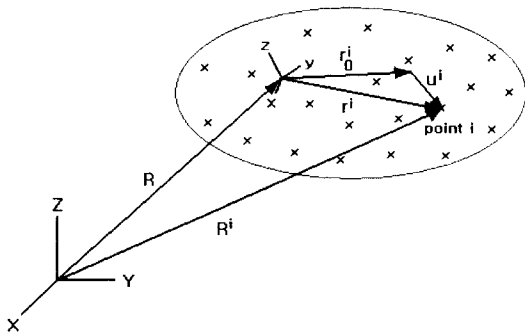


Fig. 2 Coordinate of a Flexible Body

유연체 상의 임의의 절점 i의 위치를 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R^i &= R + A(r_0^i + u^i) \\ &= R + A\left(r_0^i + \sum_{j=1}^m \phi^j a_j\right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $\phi^j$ 는 물체에 고정된 좌표계 xyz에서의 j 번째 모드변형에 의한 절점 i의 변형벡터를 표시한다.

이와같이 탄성변형에 의한 각 절점의 거동을 모달좌표로 표시하여 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M^* & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}^* \\ -\lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q^* \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

[M\*] : 유연체를 포함한 계의 질량행렬

{q\*} : 모달좌표를 포함한 일반좌표벡터

[Q\*] : 모달힘을 포함한 일반힘벡터

강체 동역학 운동방정식에서와 마찬가지로 구속식을 만족하면서 위의 식을 해석하여 동적 거동을 예측할 수 있다.

## 4. 사용자 위주의 해석환경 구축

설계자가 크레인 설계시 간단한 입·출력 형식을 통해 PC Windows 환경에서 동적 거동을 해석할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 크게 자료 입력부, 해석부 그리고 해석결과 출력부로 나뉘어져있다.

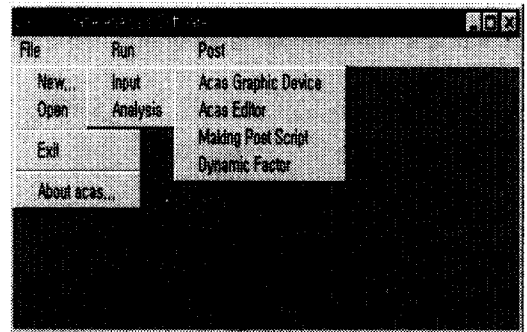


Fig. 3 Main Menu of Crane Analysis Program

### 4.1 자료 입력부

크레인을 구성하고 있는 물체와 연결부의 위치에 관련

된 자료는 한 개의 파일로 제공된다. 입력부에서는 이러한 초기의 자료를 기초로 크레인의 작업 조건을 결정짓는 Boom Angle, Swing Angle, Boom Length를 입력받아 최종 작업자세에 해당하는 입력 파일을 생성한다. 여기에는 추가적으로 해석시간, 작업물체 관련 자료 및 로프의 개수를 입력하도록 되어있다.

봄의 유연성을 고려한 해석을 수행하기 위해서는 이에 필요한 자료를 입력할 수 있도록 Fig. 4 에서와 같이 별도의 입력부를 구성하였다.

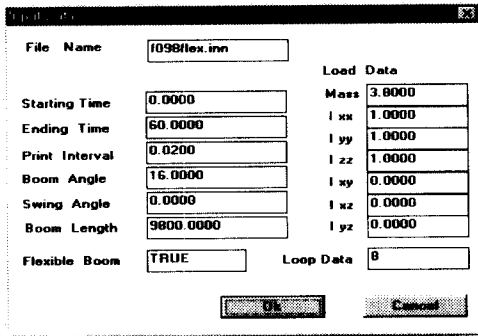


Fig. 4 Auxiliary Input Window for a Flexible Boom Analysis

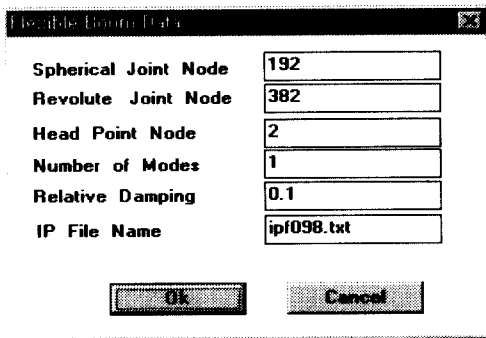


Fig. 5 Input Data for the Flexible Boom

입력 사항을 모두 마치고되면 크레인의 작업 자세를 결정하는 기구학 해석이 수행되고 이것을 기초로 하여 동력학 해석을 위한 준비가 끝난다.

#### 4.2 해석부

입력부에서 정의한 작업조건에서 크레인의 동특성을 해

석하기 위해서 Run → Analysis 메뉴를 선택하면 앞에서 설명한 해석 알고리즘에 따라 동력학해석이 수행된다.

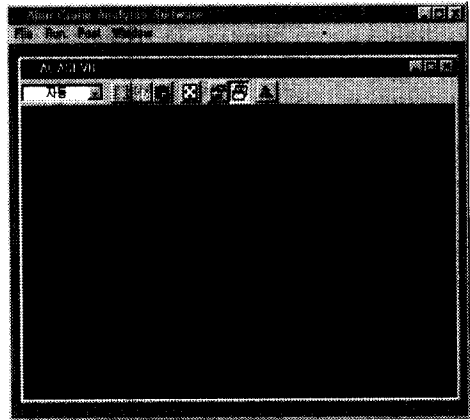


Fig. 6 Execution of the Dynamic Solver

#### 4.3 해석결과 출력부

동력학 해석이 끝나면 해석된 결과를 확인할 수 있도록 여러 가지 출력형식이 가능하도록 하였다. 우선 Fig. 7과 같은 그래프출력과 이들 결과자료를 텍스트 파일로 확인할 수 있도록 하였으며 그래프를 출력하기 위한 방식으로 널리 사용되는 Postscript형식도 지원 가능하도록 하였다. 또한 설계에 직접 필요한 특정 자료형식으로 하부 프레임의 지지부 반력에 대한 충격 정도를 표시할 수 있는 Dynamic Factor값을 계산하여 표로 제공할 수 있도록 하였다

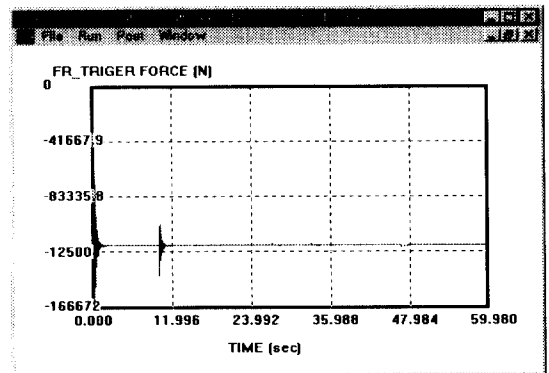


Fig. 7 Reaction Force of Front Right Outrigger

	UP	DOWN
FR_TRIGER	1.200377	1.004378
FL_TRIGER	1.200537	1.004376
RR_TRIGER	1.805442	1.034891
RL_TRIGER	1.756374	1.033167

OK

Fig. 8 Dynamic Factor Table

### 5. 예제 적용

크레인 전산 모델은 작업 장치 별로 크게 6개의 강체로 구성되어 있으며 로프와 지지부를 스프링으로 대체하였다. 붐 끝단에서부터 작업 물체까지의 길이에 따라 로프의 강성을 변화하도록 하였으며 유압 지지부는 실험에서 얻은 자료를 이용하여 스프링으로 모델링하였다.

또한 모델링에서 작업 장치별 연결은 파이프 구조를 피하면서 작업 장치의 움직임을 나타낼 수 있도록 조인트를 선정하여 모델을 구성하였다.

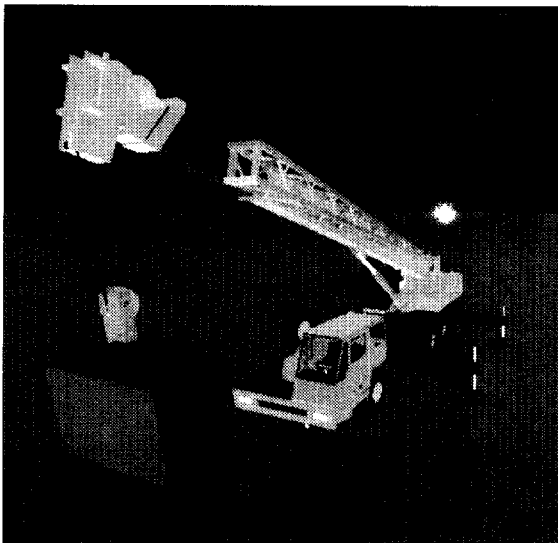


Fig. 9 Crane Model

로프의 길이 변화와 작업시 사용되는 줄 수에 따라 변

화되는 로프의 강성 변화는 아래의 식으로 대체하였다.<sup>(11)</sup>

$$k_0 = \frac{n^2 A_0 E_0}{n \times l_0 + l_{SD}} \quad (7)$$

여기서,

$n$  : 로프의 단수

$A_0$  : 로프의 단면적(804.2 mm<sup>2</sup>)

$E_0$  : 로프의 탄성 계수 (102.9 GPa)

$l_0$  : 작업물체와 붐 끝 단 사이의 거리

$l_{SD}$  : 드럼과 붐 끝단 사이의 거리

#### 5.1 붐의 탄성효과 고려

크레인에서 탄성 효과를 고려해야 할 부분은 붐의 처짐이다. 이로 인한 작업 반경의 변화가 크레인의 지지부에 미치는 반력의 변화가 클 것이다. 따라서, 붐의 탄성 효과를 고려할 수 있도록 고유진동수 해석을 통해 모드 특성을 구하고 이를 동력학 해석에 응용할 수 있도록 하였다.

Table 1 Kinematic Connectivity

Joint Name	Body 1 Name	Body 2 Name
Revolute Joint	Truck Frame	Upper Frame
	Upper Frame	Base Boom
Translational Joint	D/Cyl.	D/Tube
	1st T/Cyl.	1st T/Tube
	2nd T/Cyl.	2nd T/Tube
	3rd Boom	Top Boom
Spherical Joint	Base Boom	D/Cyl.
Universal Joint	D/Tube	Upper Frame

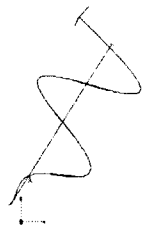
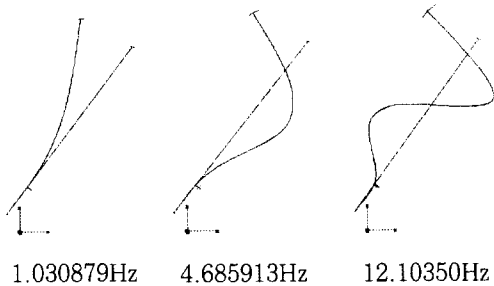
Table 2 Force Element

Force Name	Body 1 Name	Body 2 Name
Translational Spring(4)	Ground	Truck Frame
Translational Spring	Object	Top Boom

붐의 유한 요소 모델은 UAI/Nastran으로 구성하였으며 rigid element 24개, bar element 378개로 구성하였다. 상부 프레임과 트럭 프레임과의 연결부를 변위와 회

전을 모두 구속하였다. 동력학 해석 프로그램과의 연계를 위해 붐과 상부 프레임, 붐과 derick cylinder 연결부의 자유도를 모두 구속하였으며 붐을 이루는 부분은 Bar Element를 사용하여 모델링하였다.

진동모드 해석 결과로 유연체 동력학 해석에 적용된 모드와 고유진동수는 다음과 같다.



23.60126Hz

Fig. 10 Mode Shapes

### 5.2 작업조건

크레인의 작업 조건은 붐 길이 31.0m, 붐 각도 57도, 회전각도 0도, 작업 물체 무게 0.7ton이다. 또한 구동 조건은 권상 작업 시에는 2m를 들어올리고, 1초 동안 초기 속도를 선형적으로 줄이는 감속시간을 고려하였다. 이 조건을 그림으로 표시하면 다음 Fig. 11과 같다. 비슷한 조건으로 권하 작업일 때는 Fig. 12와 같다. 권상 작업시 속도를 계단식으로 증가시킨 것은 가속한 조건을 주기 위해 설정하였다.  $V_0$ 는 권수에 따라 변한다. 여기서서는 237.5mm/s이다.

## 6. 결과 고찰

작업조건으로 크레인을 구동한 뒤의 강체 모델과 유연체 모델의 해석 결과를 Table 3과 Fig. 13~14로 나타내었다.

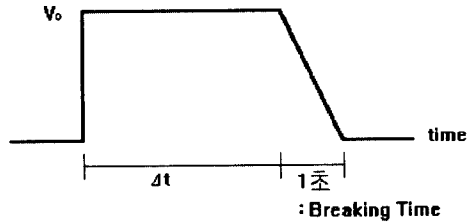


Fig. 11 Move-Up Working Condition

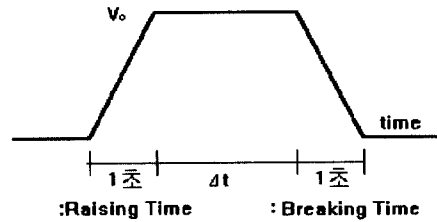


Fig. 12 Move-Down Working Condition

아래 그림에 강체 모델과 유연체 모델의 작업물 Z 방향 변위를 비교하였으며 유연체 모델이 붐의 탄성 효과로 인하여 약 21cm 가량 변형되었음을 알 수 있다. 아웃리거 반력에 대한 Dynamic factor가 강체 모델보다 유연체 모델에서 더 작게 나타났다. 각 트리거에 발생하는 반력 그래프에서도 붐의 정적 탄성 변형 및 탄성 효과가 동특성에 미치는 영향에 의하여 크레인의 안정도 해석 결과에 큰 영향을 미침을 알 수 있다

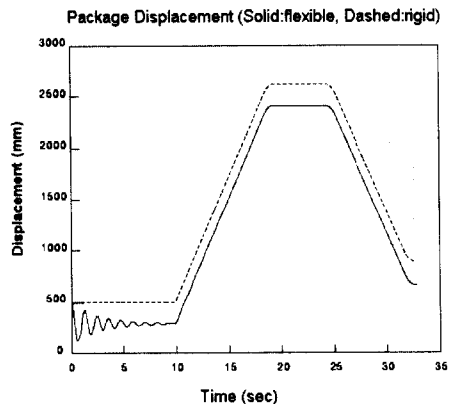


Fig. 13 Z-Displacement of Workpiece

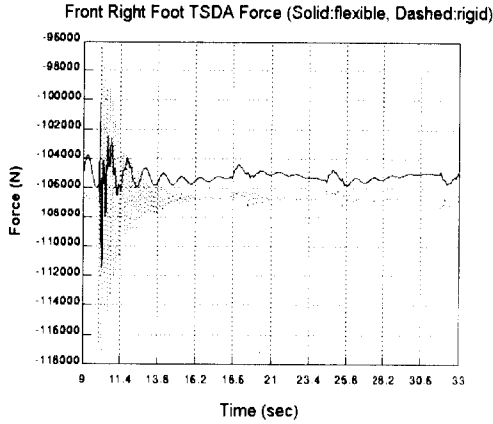


Fig. 14 Reaction Force of Front Right Outrigger

Table 3 Comparison of Dynamic Factor between Rigid and Flexible Model

	Dynamic Factor	
	flexible model	rigid model
오른쪽 앞 OUTRIGGER TSDA의 Force	1.06	1.09
왼쪽 앞 OUTRIGGER TSDA의 Force	1.02	1.10
오른쪽 뒤 OUTRIGGER TSDA의 Force	1.42	1.62
왼쪽 뒤 OUTRIGGER TSDA의 Force	1.36	1.74
작업물과 BOOM사이 ROPE의 Force	1.58	2.06

## 7. 결론

본 연구에서는 붐의 탄성 효과를 고려하기 위하여 유한 요소 모델의 진동 모드 해석 결과를 모드 합성법으로 동역학 해석을 수행하는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램으로 크레인 전산 모델을 해석하여 붐의 유연성을 구현하고 각 연결부 위치에서의 반력 및 지지부 반력을 도출해 낼 수 있었다.

특히 지지부 반력에 대한 정보를 이용하여 현 크레인 모델의 안정성 정도를 정량적으로 제시할 수 있다. 본 해석 프로그램에서 얻은 연결부의 정적 반력 뿐만 아니라 작업시의 동특성 자료를 기반으로 새로운 크레인 설계 업

무에 작업이 용이하도록 하였다.

본 연구의 성과를 다음 세 가지로 요약할 수 있다.

- 1) 탄성효과를 고려한 크레인 전용 동력해석 프로그램의 개발
- 2) 설계 적용이 용이한 인터페이스를 가진 크레인 전용 전·후처리기 개발
- 3) 붐의 탄성효과를 구현할 수 있는 크레인 모델의 구성 방법 제시

## 참고 문헌

- [1] Edward J. Haug, "Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems Vol. I : Basic Method", Allyn and Bacon, 1989.
- [2] Parviz E. Nikravesh, "Computer Aided Analysis of Mechanical Systems", Prentice-Hall, 1988.
- [3] Edward J. Haug, "Intermediate Dynamics", Prentice-Hall, 1992
- [4] Wehage, R. A. and Haug, E. J., "Generalized Coordinate Partitioning for Dimension Reduction in Analysis of Constrained Dynamic System," Trans. ASME, J. Mech. Design, Vol. 104, pp.247~256, 1982
- [5] Yen, J., "Numerical Methods for Constrained Equations of Motion in Mechanical Systems Dynamics," Ph.D. Thesis, Univ. of Iowa, 1990
- [6] Roy R. Craig, Jr., "Structural Dynamics : an introduction to computer method", John Wiley & Sons, 1981
- [7] W. S. Yoo, E. J. Haug, "Dynamics of Flexible Mechanical Systems Using Vibration and Static Correction Modes", J. Mech, Design, Vol. 108, pp.315~322, 1986
- [8] Charles Petzold, "Programming WINDOWS 3.1", Microsoft Corporation, 1993
- [9] Yoshio KATO and Hiroshi ITO, "트럭 크레인의 동적 안정성에 관한 연구", 일본기계학회논문집(C편) 49권 446호, pp.1816~1822, 1984
- [10] Hiroshi ITO and Mitsuhiro HASEGAWA, "Study on Dynamic Stability of a Truck Crane

Carrier ", Bull. of JSME, Vol. 28, No. 244,  
pp.2474~2479, 1985

[11] Hiroshi ITO , Mitsuhiko HASEGAWA and

Hiroo TADA," Dynamic Behavior of Truck  
Cranes Equipped with a Box Jib ", Bull. of  
JSME, Vol. 29, No. 257, pp.3866~3874, 1986