

갠트리 크레인의 CAE 통합설계에 관한연구

박경택, 김두형, 박찬훈(한국기계연구원), 한동훈, 홍성재(부산대학교)

A Study on CAE Integrated Design of Gantry Crane

K. T. Park, D. H. Kim, C. H. Park, D. H. Han(Automation Research Department, KIMM)
D. H. Han, S. J. Hong(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

This paper is to study the wind effect of the large scale gantry crane. It is used to control the sway of gantry crane in the loading/unloading job of containers. This is very important in the automated container terminal because the sway of handling equipments in yard is caused by the unexpected disturbance such as wind and dynamic inertia by deriving force. This study shows the process of the modelling simulation of the wind effect of the sway motion of the gantry crane. Pro-Engineer, ANSYS and DADS are used for 3D solid modelling and dynamic simulation. Though this study did not use the real parameters, the result shows the trend of the wind effect is very large in the large scale crane and should be considered in design of the large scale gantry crane. In future, if the study is done by using the real parameters, the result is much more useful for dynamic control and design of gantry crane.

Key Words : Gantry crane(갠트리 크레인), Sway(흔들림), Wind effect(풍영향), Modelling(모델링), Dynamic simulation(동역학 시뮬레이션), Crane design(크레인 설계)

1. 서론

갠트리 크레인은 항만에서 컨테이너를 운반적재를 하기 위한 장비이다. 트롤리의 운동으로 인한 컨테이너의 흔들림(Sway)을 제어하기 위해 수선 크레인의 동역학적 모델이 필요 할 것이다. 크레인이 하역 작업을 할 때 예측 불허한 외란이 발생한다. 예를 들면, 바람에 의한 크레인의 흔들림과 크레인파 트롤리 이동 중 발생하는 흔들림, 그리고 높이에 따른 크레인의 흔들림 등 여러 가지 외란이 스프레더의 작업시 흔들림(Sway)에 영향을 미친다. 보통 작은 크레인의 흔들림 작은 각을지 모르지만 거대한 구조물의 대해서는 이러한 영향을 무시할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 전체 크레인의 구조를 탄성체로 보고 각 물체를 탄성체로 모델링을 하였다. 그림 1에서 보인 것과 같이 크레인을 모델링을 하기 위해서는 3차원 형상 모델링, 유한요소 해석, 탄성체 동역학 해석으로 나누어지며 각각의 해석 결과를 통합하였다.

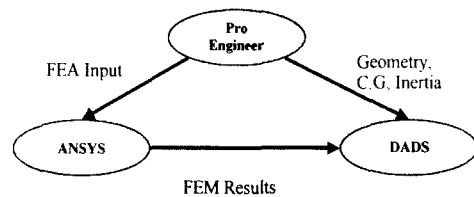


그림 1. CAE 통합설계

2. ProEngineer를 이용한 크레인의 3차원 솔리드 모델링

유한요소 해석과 탄성체 동역학 해석에서 좀더 정확한 입력을 제공하기 위해서 크레인에 대한 보다 정확한 정보들이 필요하다. 그리고, 여기서는 상용 프로그램인 ProEngineer 2000버전을 사용하였다. 그림 2는 ProEngineer에서 크레인의 형상을 모델링을 한 것이다.

3. 유한요소해석

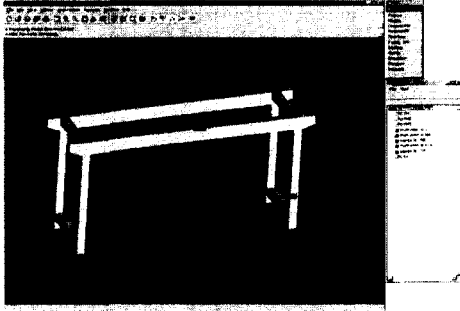


그림 2. ProEngineer에서 크레인
형상 모델링

3차원 솔리드 모델러인 ProEngineer는 범용 유한 요소 해석기인 ANSYS, NASTRAN, 그리고 NASTRAN의 PreProcessor인 PATRAN과의 인터페이스가 가능하므로, 앞으로 수행하게 될 유한요소 해석 시 정확한 형상정보를 제공할 수 있으며, 탄성체 동역학 해석 시에도 각 물체의 관성, 무게 중심 등 중요한 포인트들을 제공한다. 그리고 앞으로 사용하게 될 동역학 해석 프로그램인 DADS에 대해 형상 정보를 제공할 수 있다. 그림 3은 ProEngineer로 모델링을 한 후, 유한요소 해석을 위해 ANSYS의 입력을 생성하는 그림이며, 그림 4는 ProEngineer에서 지원하는 FEA 프로그램을 나타내는 창이다. 그림 3에서와 같이, Meshing 작업을 하게 되면 ProEngineer에서 형상을 모델링 한 것이 절점(node)과 요소(element)들로 이루어진 유한 요소 모델을 만들어주며, 그림 4에서와 같이 원하는 유한요소 모델의 입력을 제공하게 된다.

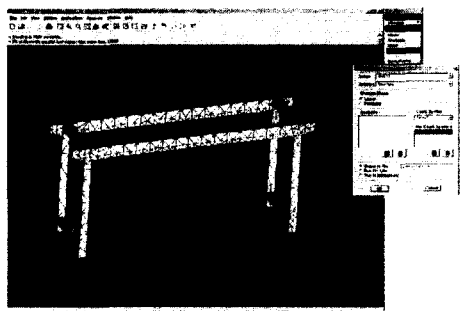


그림 3. ProEngineer에서
유한요소 입력생성

본 연구에서는 유한요소 해석시 ANSYS 입력 파일을 생성하여 사용한다.

3.1 유한요소 해석의 정의

유한요소 해석(FEA; Finite Element Analysis)이란 구조물내의 무한개의 미지수점들을 유한 개의 이산화된 위치들을 절점(node)으로 나타낸다. 이 절점들간의 서로 유기적인 관계를 맺어주는 요소(element)를 이용하여 전체 구조물이나 실제의 물리적 시스템을 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식으로 나타낼 수 있다. 이를 계산하여 각 절점에서의 변위를 구함으로써 구조물 내의 임의의 점에서의 변위, 응력, 변형률 등의 결과값은 수치적인 근사화를 통해 얻어낼 수 있다. 우선 재질이 등방성(isotropic)인 선형 탄성 재료에 대하여 응력과 변형률의 관계를 후크의 법칙(Hook's Law)에 의하여 다음 식 (1.1)~(1.6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y - \sigma_z)] \quad (1.1)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z - \sigma_x)] \quad (1.2)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x - \sigma_y)] \quad (1.3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (1.4)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz} \quad (1.5)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{zx} \quad (1.6)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

여기서, E는 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν 는 프와송비(Poisson ratio)이며, 이 값들은 실험을 통해 얻어진 상수 값들이다. 위 식들을 나중에 유한요소 해석에 사용하기 위하여 선형대수(행렬)식으로 표현하면 (1.7)식과 같이 정리할 수 있으며, 이 행렬식의 역은 다음 (1.8)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

이 식에서 E 와 ν 는 상수이므로 임의의 점에서의 변형률을 구하면 그 점에서의 응력도 쉽게 계산할 수 있음을 알 수 있다. 식(1.8)을 간단히 축약하여 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (1.9)$$

여기서, $\{\sigma\}$ 와 $\{\epsilon\}$ 는 응력과 변형률 벡터, $[D]$ 는 탄성행렬식(Elasticity matrix)이다. 이제 임의의 점에서의 변형률을 구하면 되는데 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있고 앞에서와 마찬가지로 행렬식으로 나타내면 (1.10)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\{\epsilon\} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

이 식에서는 임의의 점에서의 변위량을 안다면 그 점에서의 변형률을 구할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 구조물 내부의 임의의 요소 내부의 변위 분포를 나타내는 매개 변수식이 그 요소를 구성하는 절점들의 변위로부터 계산될 수 있는데, 이를 식으로 정리하면 식 (1.11)과 같고 이를 간단히 축약하면 식(1.12)와 같다.

$$\begin{pmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

$$\{a(x,y)\} = [M]\{a\}^e \quad (1.12)$$

여기서, $[M]$ 을 형상함수(Shape function)라고 부르며, ANSYS에서는 해석에 사용될 요소의 종류를 어떤 것으로 선택하느냐에 따라 이 형상함수와 앞에서 언급했던 탄성 행렬이 결정된다.

3.2 ANSYS를 이용한 크레인의 유한요소해석

이제 ProEngineer에서 얻은 FEA정보로 유한요소 해석을 수행하게 될 것이다. 유한요소 해석은 ANSYS, NASTRAN, ABAQUS등 여러 가지가 있으나, 여기서는 범용 유한요소 프로그램으로 많이 알려진 ANSYS를 사용하게 될 것이다. 유한요소

해석의 절차는 크게 PreProcess, Solver, Post-Process로 나뉘어 지는데, Pre-Process에서는 해석할 모델의 형상으로부터 절점과 요소의 생성 그리고 재료의 물성치 입력, Solver에서는 유한요소 해석, PostProcess에서는 해석결과 출력 등을 말한다. 여기에서는 PreProcess 작업을 ProEngineer에서 하게 된다. ANSYS에서도 기본적인 PreProcess가 있으나 위에서 언급한 바와 같이 정확한 3차원 모델링을 위해 ProEngineer에서 하도록 하였다. 그림4에서는 ProEngineer에서 모델링한 정보를 ANSYS에서 불러온 그림을 나타낸다. 그림 4에서와 같이 ANSYS에서 크레인의 유한 요소모델을 볼 수 있다. 표2는 유한요소 해석시 필요한 재료의 물성치들이다.

표 2. 유한요소 해석시 재료 물성치

Young's Modulus	204E9
Density	78.5
Poisson's Ration	0.3

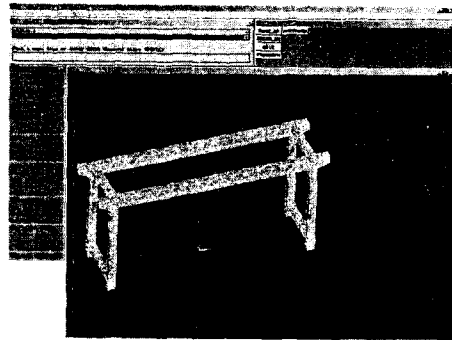


그림 4. ANSYS에서 유한요소해석 모델

탄성체 동역학 해석을 위해 모드 해석을 하여야 한다. 모드 해석은 고유치를 계산하는 것이므로 고유치를 계산하는 방법을 선택하여야 한다. 고유치를 계산하는 방법에는 여러 가지 방법이 있으나 이 문제에서는 일반적인 경우에 가장 많이 사용하는 "Block Lanczos" 방법을 사용하기로 한다. ANSYS의 메뉴를 이용하여 고유치 계산 방법을 선택하고 여기에서 계산할 고유치의 개수, 즉 노드의 개수를 설정한다. 또한 해석이 완료된 뒤 계산한 고유치 및 고유 모드를 출력할 개수도 설정한다. 이 설정이 완료되면 해석을 수행한다.

3.3 해석결과와 출력

모드 해석을 수행하게 되면 각 모드에 대한 결과가 저장된다. 변형 형상을 출력하면 모드 형상과 해당 모드에 대한 고유 주파수가 그림 5에서 그림 6과 같이 출력된다.



그림 5. 1차 모드

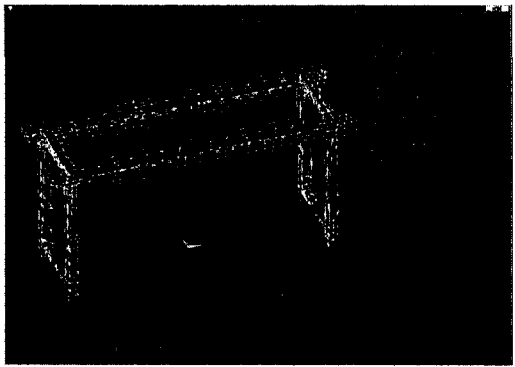


그림 6. 2차 모드

따라서, 각 모드별 고유 주파수와 각 절점의 변위를 얻을 수 있다.

4. 탄성 다물체 동역학 해석

4.1. 탄성체의 운동 방정식

N개의 절점을 갖는 i 번째 탄성체의 각 절점 k 는 집중질량 m^{ki} 와 회전 관성 행렬 J^{ki} (Rotary inertia matrix)를 가진다. 여기서, 가상일의 원리를 사용하여 집중질량으로 가정한 탄성체의 운동 방정식을 변분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^N \{ -\delta r^{kiT} m^{ki} \ddot{r}^{ki} - \delta \pi^{kiT} (J^{ki} \dot{\omega}^{ki} + \tilde{a}^{ki} J^{ki} \omega^{ki}) + \delta r^{kiT} F^{ki} + \delta \pi^{kiT} T^{ki} \} = \delta W \quad (4.1)$$

여기서, F^{ki} 와 T^{ki} 는 k 번째 절점에 작용하는 힘과 토크를 의미한다. δW 는 내력(Internal

force)에 의한 가상일을 의미한다. 그림7에서는 DADS에서 크레인의 탄성체 모델링을 나타낸다.

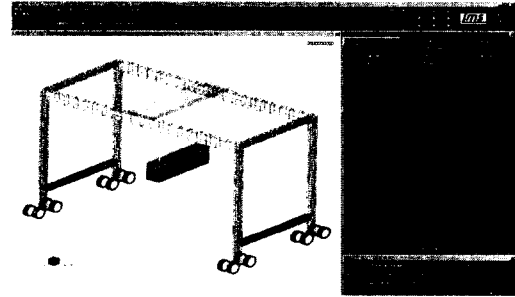


그림 7. DADS에서의 탄성체 모델링

4.3 풍영향 시뮬레이션

위와 같이 DADS상에서 모델링된 크레인에 대한 시뮬레이션을 한다. 우선 트롤리의 Y 방향 변위는 그림8과 같이 움직인다. 2초부터 10초 동안 12m 거리를 움직이며, X방향에서 바람이 불어오는 것으로 하였다.

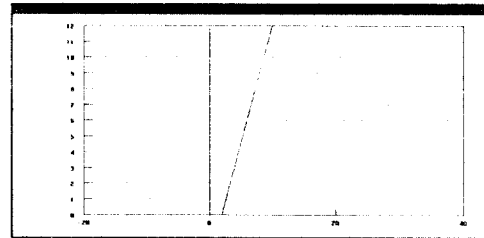


그림 8. Trolley의 Y방향 변위 입력

바람의 영향으로 인해 크레인이 X방향으로 움직이므로 트롤리와 연결된 컨테이너도 따라서 X방향으로 움직인다. 그림9에는 컨테이너의 X방향 변위를 나타내었고, 그림10과 11에서는 각각 Y방향, Z방향의 변위를 나타내었다. 그림10과 그림11과 같이 흔들림(Sway)이 생긴다. 이 흔들림 운동을 제어하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

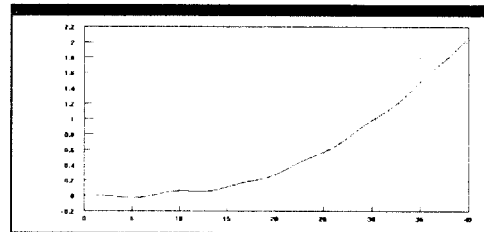


그림 9. 컨테이너의 X방향 변위

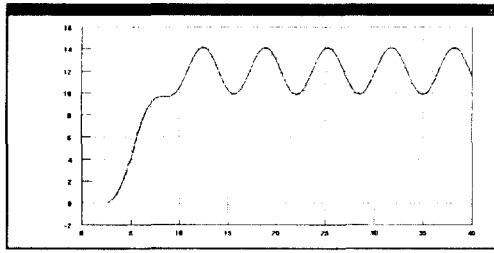


그림 10. 컨테이너의 Y방향 변위

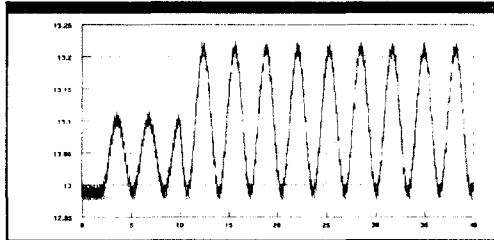


그림 11. 컨테이너의 Z방향 변위

다음은 크레인을 지지하고 있는 Leg 구조물의 모드들이다. 그림 12에서 그림 13까지는 Leg 구조물의 1차에서 2차 모드를 나타낸다.

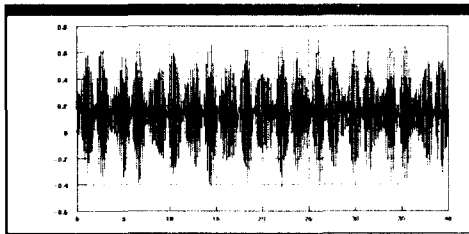


그림 12. Leg의 1차 모드

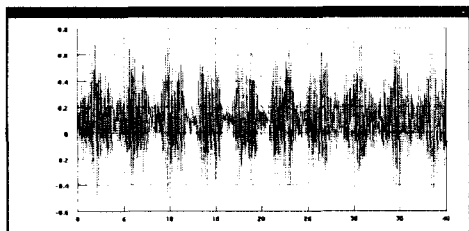


그림 13. Leg의 2차 모드

다음은 각 모드들을 주파수 영역에서 분석하기 위해 푸리에 변환(FFT)을 한 그림이다. 그림 14에

서 15까지는 각기 1차 모드에서 2차 모드의 푸리에 변환을 한 그림이다.

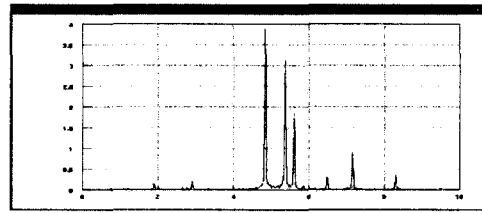


그림 14. 1차 모드의 FFT

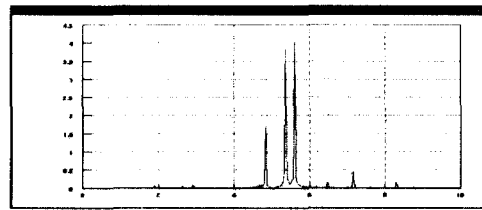


그림 15. 2차 모드의 FFT

그림 16은 각 푸리에 변환을 하나의 그래프로 나타낸 것이다. 그림과 같이 4.85, 5.35, 5.6 Hz 근처에서 피크치가 나타나고 있다.

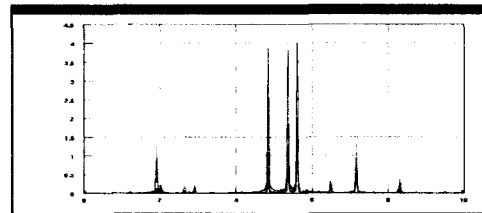


그림 16. 1에서 2차모드의 FFT

그림17은 Leg 구조물의 종단부(Top-end, node18)의 X방향 변위를 나타낸다. 다음과 같이 바람의 영향으로 인해 40초 동안 약 2미터 정도가 밀려감을 알 수 있다.

그림18은 Leg 구조물의 종단부 (top-end, node 18)의 X방향 변위를 나타낸다. 다음과 같이 바람의 영향으로 인해 40초 동안 약 2미터 정도가 밀려감을 알 수 있다.

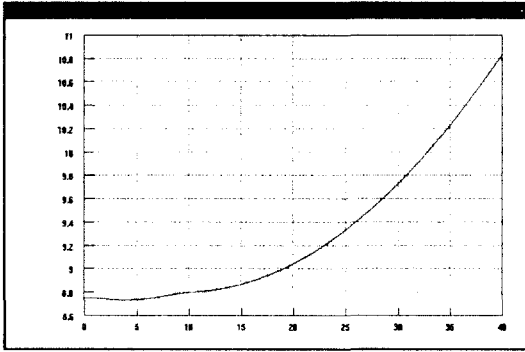


그림 17. Leg의 말단부의 X방향 변위

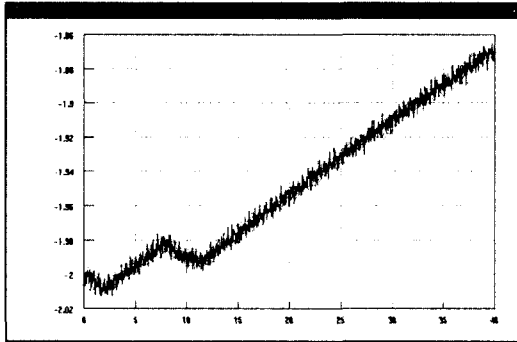


그림 18. X방향에서 크레인쪽으로 불어오는 풍속

5. 결과고찰 및 향후계획

갠트리 크레인의 흔들림에 의한 컨테이너의 흔들림을 제어하고자 하는 것이 본 연구의 최종 목적이다. 상용 프로그램, DADS를 사용하여 갠트리 크레인에 대해 탄성체로 하여 동역학 모델링을 하였다. 이 모델을 이용하여 갠트리 크레인의 풍영향에 대한 시뮬레이션을 한 결과, 풍영향은 갠트리 크레인이 가동될 때 풍속에 따라 영향이 크게 달라짐이 밝혀졌다. 특히, 크레인의 무인화를 할 경우 제어기법에서 Dynamic Inertia도 고려하여야 하지만, 풍영향에 대한 고려가 반드시 필요하다. 앞으로 풍영향에 대한 정확한 분석을 위해 모델링에 있어서 추가로 고려되어야 찾아 다시 재모델링을 하여 정확한 결과를 도출 할 것이다. 이러한 시뮬레이션 결과를 무인화를 위한 제어기 설계에 반영할 것이다.

후기

본 연구는 국가중점과제 “첨단항만핵심기술개발사업”으로부터 일부 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

1. S. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 2nd Edition, New York : McGraw-Hill Book Company, 1959.
2. Donald T. Greenwood, Principle of Dynamics, Prentice-Hall, Second Edition, 1998.
3. 한국기계연구원, 무인 갠트리 크레인 설계 및 제어 기술 개발, 2차년도 보고서, pp. 1-70, 2000.
4. T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineer, Inc., 1992
5. DADS, Dynamic Analysis and Design System, User's Manuals, Computer Aided Design Software Incorporated, Iowa, U.S.A.
6. LMS Korea, DADS Basic Training Note Revision 9.5, 1999.