

## 풍하중이 관절형 봄을 가진 컨테이너 크레인의 구조 안정성에 미치는 영향 분석

이정명\* · 이성욱\*\* · 한동섭\*\*\* · 한근조\*\*\*\*

\*동아대학교 대학원, \*\*동아대학교 대학원, \*\*\*동아대학교 대학원, \*\*\*\*동아대학교 기계공학부 교수

## The Analysis of the Effect of Wind Load on the Structural Stability of an Articulation type Container Crane

Jung-Myung Lee\* · Seong-Wook Lee\*\* · Dong-Seop Han\*\*\* · Geun-Jo Han\*\*\*\*

\*, \*\*, \*\*\*Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**요약 :** 관절형 컨테이너 크레인은 계류 시 Boom이 그자 형태인 크레인을 말한다. 즉, 계류 시 Inner Boom은 거의 수직이고, Outer Boom은 거의 수평이다. 이 크레인은 보통의 컨테이너 크레인과는 달리 주변 환경의 원인으로 인해 컨테이너 크레인의 고도가 제한될 경우에 사용된다. 관절형 컨테이너 크레인의 높이는 계류 시 70m에 달하기 때문에 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다. 이에 따라 풍하중이 컨테이너 크레인에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 풍하중이 작용할 때, 풍하중의 작용 방향에 따라 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생하는 반력 분포와 기계실의 위치변화가 관절형 컨테이너의 구조 안정성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하였다.

**핵심용어 :** 관절형 컨테이너 크레인, 풍하중, 전도모멘트, 기계실, 구조 안정성

**ABSTRACT :** Articulation type container cranes are the boom forms an inverted L shape when raise. The inner boom section is nearly vertical when raise and the outer boom section is nearly horizontal. Articulation type container cranes were developed as a lower height crane to meet aircraft clearance requirements. Because the height of an Articulation type container crane is about 70m, the crane is subjected to the effect of Wind load. Therefore, the problem on the effect of Wind load is receiving carefully study. The researches for the effect of wind load on the structural stability of a conventional container crane are conducted. In this study, we carried out the investigation for an articulation type container crane. When a wind load is applied to a container crane, we analyzed the reaction force distribution at each supporting point of a crane with respect to a wind load direction and the effect of the change of the machinery house location on the structural stability of a crane by carrying out Finite Element Analysis.

**KEY WORDS :** articulation type container crane, wind load, overturning moment, machinery house, structural stability

### 1. 서 론

컨테이너선과 부두 사이의 컨테이너를싣고 부리는 가장 핵심적인 하역장비인 컨테이너 크레인(Container Crane)은 격자구

조의 Boom이 있는 Box Girder의 전형적인 A-Frame으로 그 종류는 크레인의 형상에 따라 Modified A-Frame Type, Articulation Type, Lower Profile Type으로 구분한다. 이 중 관절형(Articulation Type)은 계류 시 Boom이 그자인 형태 즉, Inner Boom은 거의 수직이고, Outer Boom은 거의 수평인 형태의 크레인을 말한다. 이 크레인은 보통의 컨테이너 크레인과는 달리 주변 환경의 원인으로 인해 컨테이너 크레인의 고도가

\*정희원, jmlee@donga.ac.kr 051)200-6989

\*\*정희원, lsw1126@korea.com 051)200-6989

\*\*\*정희원, dshan@donga.ac.kr 051)200-6989

\*\*\*\*종신희원, gjhan@dau.ac.kr 051)200-7650

제한될 경우에 사용된다. Fig. 1은 관절형 컨테이너 크레인을 나타낸 것이다.

최근 들어, 컨테이너 물동량이 증가하고 컨테이너선이 대형화됨에 따라 컨테이너 크레인 및 이 크레인을 지지하는 안벽에 큰 변화가 초래하였다. 즉, 컨테이너선의 대형화로 Boom이 대형화될 수 밖에 없고 Boom의 대형화는 컨테이너 크레인의 안정성에 문제를 초래하였다. 관절형 컨테이너 크레인의 높이는 계류 시 70m에 달하기 때문에 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다. 이에 따라 풍하중이 컨테이너 크레인에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 풍하중이 작용할 때, 풍하중의 작용 방향에 따라 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생하는 반력 분포와 기계실의 위치변화가 관절형 컨테이너의 구조 안정성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하였다.

## 2. 풍하중 분석

본 연구에서 풍하중 산정을 위해 건축물하중기준에 따른 풍하중 산출식을 사용하였다. 부산의 경우 기본풍속은 40m/s로 설정되어 있다. 또한 2003년 태풍 매미 이후 컨테이너 크레인의 설계 시 계류장치의 경우 순간 최대 75m/s, 구조물의 경우 설계풍속을 60m/s로 적용하고 있으며 이에 관련된 규정도 설계풍속을 상향 조정할 예정에 있다.

따라서 본 연구에 적용된 풍속은 순간 최대 75m/s이며 L社의 풍동실험결과를 참고하여 컨테이너 크레인 각 부재의 풍압계수를 산정하였으며 식 (1)에 대입하여 각 부재에 작용하는 풍하중을 계산하여 유한요소해석에 적용하였다.

$$W = C_f \cdot C_A \cdot G_f \cdot q_z \cdot A \quad (1)$$

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2$$

$$V_z = V_0 \cdot K_{\alpha} \cdot K_{\omega} \cdot I_w$$

$W$  : 설계풍력

$C_f$  : 풍력계수

$C_A$  : 풍향계수

$G_f$  : 거스트계수

$q_z$  : 설계속도압

$A$  : 수압면적

$V_z$  : 설계풍속

$V_0$  : 기본풍속

$K_{\alpha}$  : 풍속고도분포계수

$K_{\omega}$  : 풍속활증계수

$I_w$  : 중요도계수

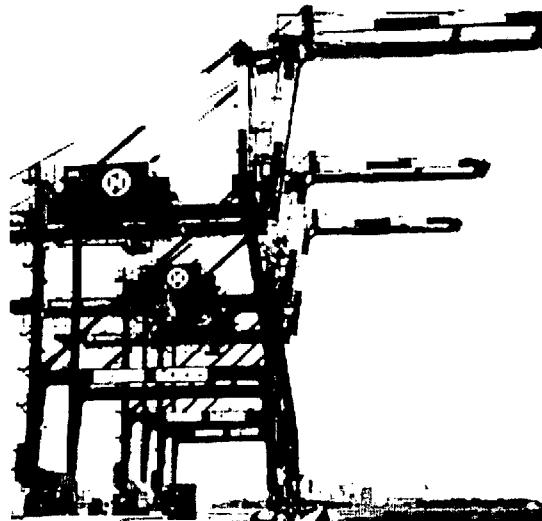


Fig. 1 Configuration of an Articulation Type Container Crane

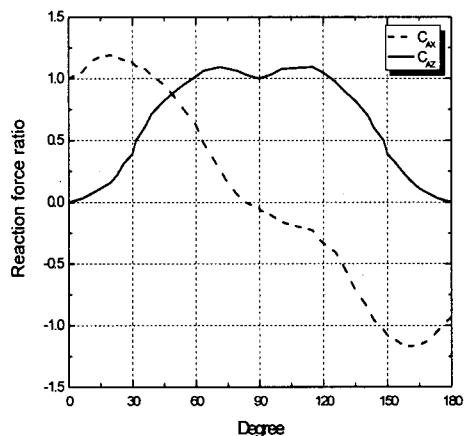


Fig. 2 Reaction force ratio investigated by a Wind tunnel test

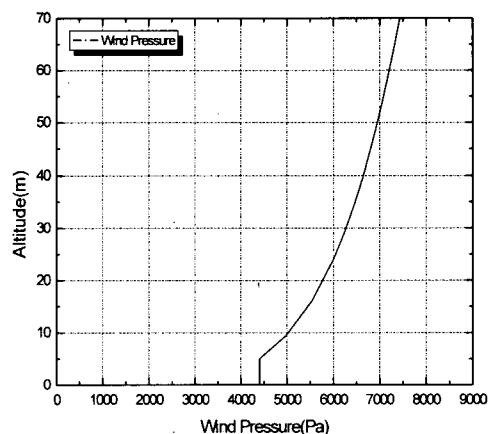


Fig. 3 Wind pressure distribution with respect to the altitude

Fig. 2는 L社의 풍동실험을 통해 얻어진 풍향에 따른 컨테이너 크레인의 반력비를 나타내고 있다. 본 연구에서는 이 결과를 참조하여  $0^\circ \sim 180^\circ$  사이를  $15^\circ$  간격으로 분할하여 풍향 변화에 따른 컨테이너 크레인의 영향을 분석하였다. Fig. 3은 본 연구에서 풍하중을 계산하기 위해서 고도에 따른 풍압분포를 나타낸 것으로 지상 5m까지는 일정한 풍압을 적용하였으며 그 이상의 고도에서는 고도에 따른 풍압분포를 고려하였다. 그리고 본 연구에서는 컨테이너 크레인의 유한요소모델 생성 시 절점간의 높이 차를 최대 6m이하로 하여 해석 시 풍압분포에 따른 영향을 최소화하였다. Fig. 4는 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중의 방향을 나타내고 있다. 풍향의 입사각인  $\theta$ 는 육측을 기준으로  $0^\circ$ 에서부터 시계방향으로  $180^\circ$ 까지 변화하도록 하였다. 또한 풍하중 산출 시 거스트계수는 차폐물이 거의 없는 해안가이므로 노풍도 D를 적용하였다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소모델

본 연구에서 사용된 모델은 Fig. 1과 같은 관절형 컨테이너 크레인의 계류 시 형상을 기준으로 유한요소모델을 구성하였다. 이 컨테이너 크레인의 Lifting Capacity은 50ton, Out Reach는 51m, Rail Span은 30.5m, 지상에서 Boom 및 Girder까지의 높이는 40m, 계류 시 지상에서 Boom 끝단까지의 높이가 70m에 달하는 대형 구조물이다.

따라서 본 연구에서는 해석 시간을 단축하면서도 해석의 신뢰성을 높이기 위해 컨테이너 크레인의 각 부재를 각기 특성에 맞는 요소를 선택하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 이용하여 유한요소모델을 구성하고 해석을 수행하였다. Stay, Sill Beam, Portal Beam 등은 부재의 단면이 대칭을 이루고 있으므로 절점당 6개의 자유도( $ux, uy, uz, rot_x, rot_y, rot_z$ )를 가지는 3차원 대칭 보요소를 사용하였으며, Boom과 Girder 등은 Spreader 이송을 위한 레일이 설치되어야 하는 구조상의 특징으로 인하여 부재의 단면이 비대칭형으로 되어 있으므로 이러한 특징을 효과적으로 나타낼 수 있는 3차원 비대칭 보요소를 사용하였다. 자중의 15%를 차지하는 기계실은 자체의 자중을 고려하기 위하여 절점당 3개의 자유도를 가지는 유효체 요소를 사용하여 적합한 밀도를 부과하였다. Table 1은 유한요소해석에 사용된 재료의 기계적 물성치를 나타낸다.

#### 3.2 기계실 위치 변화

전체 자중의 15%를 차지하는 기계실(Machinery House)의 위치가 변할 때 풍하중에 대한 컨테이너 크레인의 안정성을 분석하기 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 Upper Leg, Boom, Girder가 만나는 지점을 원점으로 하고 기계실의 중심

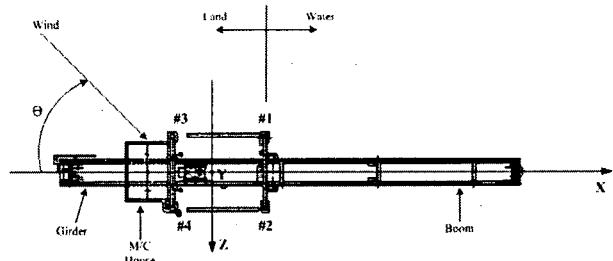


Fig. 4 Definition of an Incidence angle of Wind load

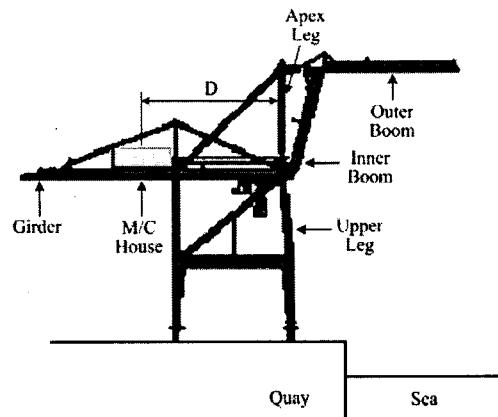


Fig. 5 Definition of a Machinery House location

Table 1 Mechanical Properties of each material

Material	Elastic Modulus	Density	Yield Strength	Tensile Strength
SM490Y	210 GPa	7800	350 MPa	490 MPa
STK400	210 GPa	7800	235 MPa	400 MPa

까지의 거리를 D로 하였다. 기계실의 위치는 최대 36m, 최소 13m를 벗어날 때는 주변의 장치의 간섭에 의해 기계실이 위치할 수 없기 때문에 13m, 20m, 36m의 3가지의 경우에 대하여 각 지지점의 반력을 비교 분석하였다.

#### 3.3 경계조건

컨테이너 크레인의 각 부재는 용접으로 연결되어 있으나, Boom과 Girder의 연결 부분은 핀을 연결되어 있기 때문에 유한요소해석에서는 이러한 연결 부분을 최대한 실제 구조물과 유사하게 고려하기 위하여 절점의  $ux, uy, uz$ 의 자유도만을 일치시켜 연결부에서 회전변위 구속으로 인한 모멘트가 발생하지 않도록 하였으며, Girder 및 Boom과 연결되는 Stay들도 핀으로 연결되므로 동일한 방법으로 각각의 실제 변형을 구현할 수 있도록 병진자유도를 일치시켰다.

Fig. 6에서와 같이 컨테이너 크레인의 각 지지점의 경계조건을 살펴보면, #1, #2, #3, #4지점은 차륜부와 Tie Down부로서

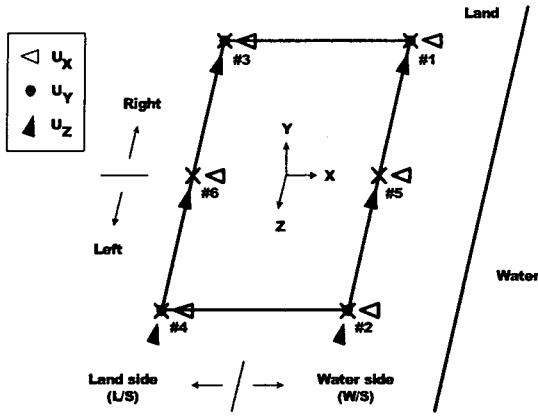


Fig. 6 Boundary Condition of a Articulation type Container Crane

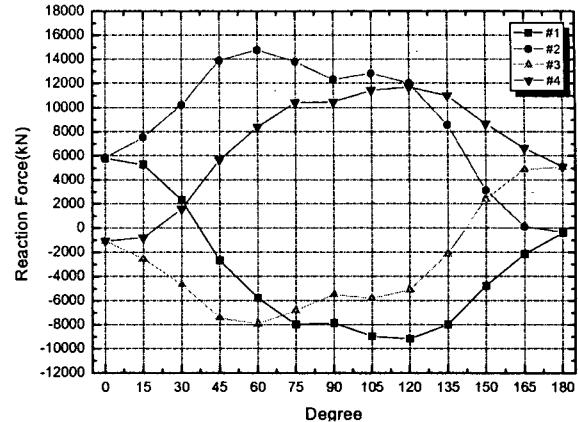


Fig. 8 Reaction force at each supporting points when a Machinery House location is 20m

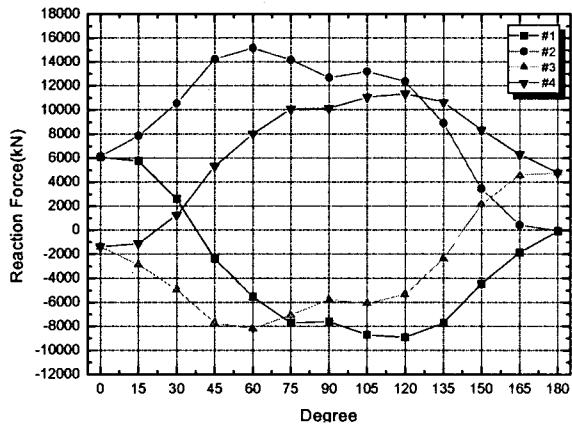


Fig. 7 Reaction force at each supporting points when a Machinery House location is 13m

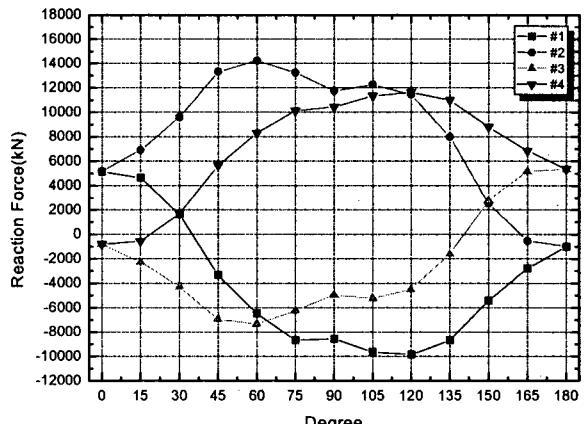


Fig. 9 Reaction force at each supporting points when a Machinery House location is 36m

모든 축방향 변위가 고정( $u_x = u_y = u_z = 0$ )되었으며, #5, #6지점은 편이 편법에 꽂혀 있으므로  $u_x$ 와  $u_z$ 방향만을 고정( $u_x = u_z = 0$ )하였다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 풍향의 변화에 따른 크레인의 안정성 분석

컨테이너 크레인이 전도되려는 경향을 나타내는 인장반력은 컨테이너 크레인에서 이를 방지하기 위한 장치인 Tie Down의 설계와 밀접한 경향이 있다. 이는 풍하중 작용 시 각 지지점에서 발생하는 인장반력을 분석함으로써 육측과 해측에 설치해야 할 Tie Down의 직경, 수량, 재료 등을 선정할 수 있기 때문이다. 75m/s의 풍하중이 관절형 컨테이너 크레인에 작용할 때 풍향의 변화에 따른 컨테이너 크레인의 각 지지점에서의 반력을 분석하기 위해 기계실의 위치를  $D=13m$ ,  $20m$ ,  $36m$ 의 3가지로 나누어 각 경우마다 풍향의 변화에 따른 컨테이너 크레인의 반력을 분석하였다. Fig. 7, 8, 9에 나타낸 것처

럼 기계실의 위치에 관계없이 풍향의 변화에 따른 컨테이너 크레인의 #1지점의 Y방향 반력은  $120^\circ$ 까지는 계속해서 감소하다가 이후 구간에서는 증가하고 #2지점의 Y방향 반력은  $60^\circ$ 까지는 계속해서 증가하다가 이후 구간에서는 감소하여  $180^\circ$ 에서는 #1, #2지점의 값이 같아지는 것을 볼 수 있다. 육측 오른쪽 Tie Down부인 #3지점의 Y방향 반력은  $60^\circ$ 까지는 감소하다가 이후 구간에서는 증가하며 해측 왼쪽 Tie Down부인 #4지점의 Y방향 반력은  $120^\circ$ 까지는 증가하다가 다시 감소하여  $180^\circ$ 에서는 #3, #4지점의 값이 같아지게 된다. 이는 컨테이너 크레인의 형상이 X축을 기준으로 대칭이기 때문에 풍향이  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ 일 때에는 #1, #2지점의 Y방향 반력과 #3, #4지점의 Y방향 반력이 서로 동일하게 되는 것이다. 또한 #1지점은 풍향이  $0^\circ \sim 40^\circ$ 사이에서 압축반력,  $40^\circ \sim 180^\circ$ 사이에서 인장반력이 발생한다. 기계실의 위치가 13m일 때 최대 인장반력 8905kN, 기계실의 위치가 20m일 때 최대 인장반력 9156kN, 기계실의 위치가 36m일 때 최대 인장반력 9859kN임을 알 수 있었다. 그러나 이 때 #1지점이 이러한 인장반력을 견디지 못하여 파손

되면 컨테이너 크레인이 전도될 수 있다. 따라서 최대 인장반력을 견딜 수 있도록 전도방지장치를 설계하여야 함을 알 수 있다. Fig. 9에서 #1지점의 최대 인장반력은 풍향이  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ 가 아닌  $120^\circ$ 에서 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 한 방향에서 입사되는 풍하중만으로 전도방지장치의 설계가 이루어진다면 경사지게 작용하는 풍하중으로 인하여 전도방지장치가 파괴되어 컨테이너 크레인이 전도될 수 있다. 그런데, 컨테이너 크레인의 형상은 X축에 대하여 대칭이고 Fig. 2의 풍동실험 결과도  $0^\circ \sim 180^\circ$ 와 같은 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 그러나  $180^\circ \sim 360^\circ$  구간의 경우 Z방향의 풍압이 반대방향으로 작용하기 때문에 #1과 #2, #3과 #4지점의 반력은 서로 바뀌어 나타난다. 그러므로  $180^\circ \sim 360^\circ$  구간의 경우 Z방향의 풍향이 반대방향으로 작용하게 되기 때문에 #1과 #2지점과 #3과 #4지점의 반력은 서로 바뀌어 나타난다. 그러므로 풍향이 반대일 때 컨테이너 크레인이 전도되지 않고 충분히 안정성을 유지하기 위해서는 해측의 #1, #2지점에 전도방지장치가 최대인장반력에 견딜 수 있도록 충분한 강도로 설계되어야 한다.

#### 4.2 기계실의 위치변화에 따른 크레인의 안정성 분석

75m/s의 풍하중이 관절형 컨테이너 크레인에 작용할 때 기계실의 위치 변화에 따른 컨테이너 크레인의 각 지지점에서의 반력을 분석하기 위해 풍향을  $=0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ 의 3가지로 나누어 각 경우마다 기계실의 위치 변화에 따른 컨테이너 크레인의 반력을 분석하였다. 전체 자중의 약 15%를 차지하는 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동함에 따라 각 지지점들의 반력의 합은 컨테이너 크레인의 자중과 동일하지만 크레인의 무게 중심이 변화하기 때문에 각 지지점의 반력이 변화함을 알 수 있다. 즉, 풍향이  $0^\circ$ 인 경우, 컨테이너 크레인의 #3, #4지점에서는 Fig. 10과 같이 인장반력이 발생하고 #1, #2지점에서는 압축반력이 발생한다. 풍향이  $90^\circ$ 인 경우, 컨테이너 크레인의 #1, #3지점에서는 Fig. 11과 같이 인장반력이 발생하고 #2, #4지점에서는 압축반력이 발생한다. 또 풍향이  $180^\circ$ 인 경우, Fig. 12와 같이 컨테이너 크레인이 #3, #4지점을 기준으로 -X 방향으로 전도되려고 하므로 #1, #2지점에서 인장반력이 발생하고 #3, #4지점에서는 압축반력이 발생함을 알 수 있다.

또한 풍향이  $0^\circ$ 인 경우, 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동할수록 #3지점의 인장반력은 800kN에서 1361kN으로 증가하고 #4지점의 인장반력은 797kN에서 1357kN으로 증가함을 알 수 있고. 풍향이  $90^\circ$ 인 경우, 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동할수록 #1지점의 인장반력은 8538kN에서 7585kN으로 감소하고 #3지점의 인장반력은 4926kN에서 5744kN으로 증가함을 확인할 수 있고 풍향이  $180^\circ$ 인 경우, 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동함에 따라 #1지점의 인장반력은 1019kN에서 80kN으로 감소하고 #2지점의 인장반력은 968kN에서 30kN으로 감소함을 알 수 있다. 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동할수록 크레인의 무게 중심이 변화하기 때문에 각 지지점의 반력이 변한다는 것을 알 수 있다.

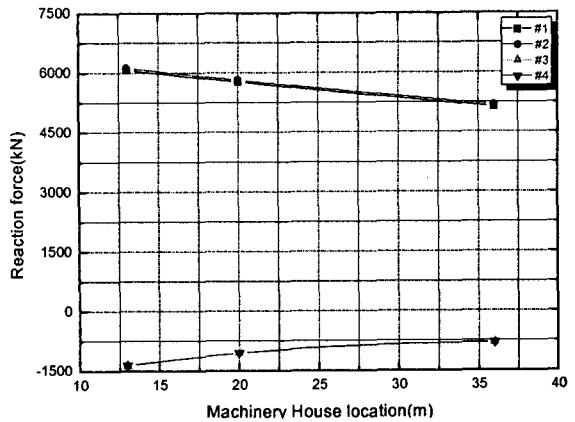


Fig. 10 Reaction force at each supporting points when a Wind load direction is  $0^\circ$

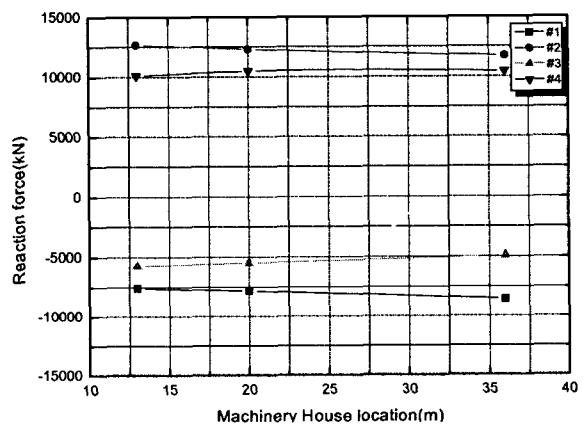


Fig. 11 Reaction force at each supporting points when a Wind load direction is  $90^\circ$

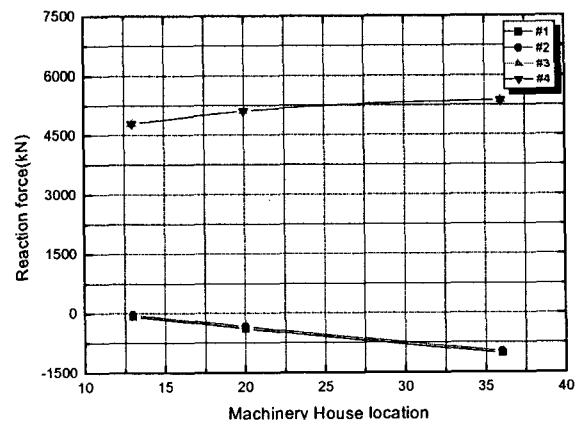


Fig. 12 Reaction force at each supporting points when a Wind load direction is  $180^\circ$

## 5. 결 론

본 연구에서는 풍하중이 작용할 때, 풍하중의 작용 방향에 따라 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생하는 반력 분포와 기계실의 위치변화가 관절형 컨테이너의 구조 안정성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 풍하중이 컨테이너크레인에 작용할 때 각 지지점에서 발생하는 인장반력을 분석함으로써 육측과 해측에 설치해야 할 Tie Down의 직경, 수량, 재료 등을 선정할 수 있다.
2. 풍하중이 작용할 때 풍하중의 작용 방향에 따라 컨테이너 크레인의 #1지점의 Y방향 반력은 120°까지는 계속해서 감소하다가 이후 구간에서는 증가하고 #2지점의 Y방향 반력은 60°까지는 계속해서 증가함을 알 수 있다.
3. 컨테이너 크레인의 형상은 X축을 기준으로 대칭이기 때문에 풍향이 0°, 180°일 때에는 #1, #2지점과 #3, #4지점의 Y 방향 반력은 동일함을 알 수 있다.
4. 컨테이너 크레인의 #1지점은 풍향이 40°~180°사이에서 인장반력이 발생하고 120°일 때 최대 인장반력이 발생한다.
5. #1지점의 최대 인장반력은 풍향이 0°, -90°, 180°가 아닌 120°에서 발생하기 때문에 전도방지장치의 설계 시 경사지게 작용하는 풍하중을 고려해야 전도방지장치가 파괴되어 컨테이너 크레인이 전도되는 것을 막을 수 있다.
6. 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동함에 따라 크레인의 무게 중심의 변화 때문에 크레인의 각 지지점의 반력이 변함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 해양수산부(2000), 항만시설장비검사기준
- [2] 건설교통부(2000), 건축물하중기준
- [3] 한진중공업(2000), 부산항 감만부두 확장구역 50ton 컨테이너 크레인 구조 및 기계부문 계산서
- [4] ANSYS Inc.(1992), ANSYS User's Manual
- [5] 이성욱, 심재준, 한동섭, 박종서, 한근조, 이권순, 김태형 (2005), 풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향 분석, 한국정밀공학회지, 제22권, 제2호, pp148-155
- [6] 하영철(2003), 한국의 설계풍속과 구조꼴조용 풍하중, 한국풍공학회지, 제7권, 제1호, pp13-25
- [7] 김종락(2003), 풍하중 기준의 정비, 한국풍공학회지, 제 7권, 제1호, pp2-12