

풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향 분석

이성욱*, 심재준*, 한동섭*, 박종서*, 한근조**, 이권순#, 김태형***

The Effect of Wind Load on the Stability of a Container Crane

Seong Wook Lee*, Jae Joon Shim*, Dong Seop Han*, Jong Seo Park*, Geun Jo Han**,
Kwon Soon Lee# and Tae Hyung Kim***

ABSTRACT

This study was carried out to analyze the effect of direction of wind load and machinery house location on the stability of container crane loading/unloading a container on a vessel. The overturning moment of container crane under wind load at 50m/s velocity was estimated by analyzing reaction forces at each supporting point. And variations of reaction forces at each supporting point of a container crane were analyzed according to direction of wind load and machinery house location. The critical location of machinery house was also investigated to install a tie-down which has an anti-overturning function of container crane at the land side supporting point.

Key Words : Container crane (컨테이너 크레인), Wind load (풍하중), Overturning moment (전도모멘트), Structural stability (구조 안정성), Machinery house (기계실), Tie down (타이다운)

1. 서론

경제의 세계화 진전에 따라 세계 컨테이너 물동량은 연평균 7% 내외의 높은 성장세가 지속되고 있으며, 이에 따라 컨테이너선박의 투입이 증가되고 있으나, 1984년 미국 신해운법 발효 이후 세계 정기선해운의 경쟁심화로 인한 저운임 환경에서도 경쟁력을 갖추기 위해 컨테이너 단위당 운송비가 저렴한 컨테이너선의 대형화가 크게 진전되어 2004년에는 10,000TEU급 선박을 포함하여 6,000 TEU급 이상 선박이 30~40척 이상 인도될 예정이

며, 향후 10년 이내에는 12,000TEU급의 초대형 컨테이너선박이 취항할 것으로 전망되고 있다.

컨테이너선박이 이와 같이 초대형화됨에 따라 해상물류와 항만에도 큰 영향을 미치게 되어 초대형 컨테이너선의 기항 항만 수는 적어지는 대신 항만에서 이루어지는 양적화 컨테이너 화물 수는 증가하게 되었다. 즉 초대형 컨테이너선이 기항하는 항만은 물류중심항만(Hub Port)이 되고, 인근의 타 항만은 피더항(Feeder Port)으로 구분되면서 항

접수일: 2004년 5월 31일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 동아대학교 대학원 기계공학과

** 동아대학교 기계공학과

교신저자: 동아대학교 전기공학과

E-mail kslee@daunet.donga.ac.kr Tel. (051) 200-7739

*** 경남정보대학 기계자동차산업계열

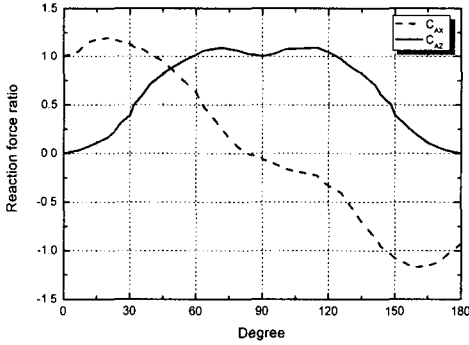


Fig. 1 Reaction force ratio with respect to the direction of the wind

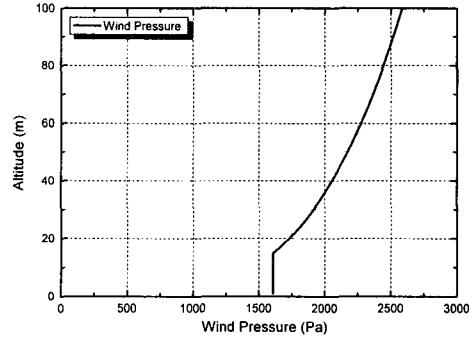


Fig. 2 Wind pressure distribution with respect to the altitude

만의 기능 및 기존 처리물동량 서열이 바뀌게 될 것으로 예상되고 있다.

따라서 각 나라의 주요 항만은 물류중심항만이 되기 위해서 컨테이너선박의 재항시간과 환적비용을 절감하기 위한 항만시설이나 장비, 하역시스템에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 항만하역장비분야에서는 컨테이너를 선박에 양·적하하는 장비인 컨테이너 크레인인 초대형 컨테이너선박에 적합한 구조와 작동방식 및 자동화, 흔들림 제어에 관한 연구가 수행되고 있다.^{2,3,4,5}

그러나 컨테이너 크레인은 차폐물이 거의 없는 항만에 설치되어 사용되고 있으며, 자체 높이가 현재 항만에서 주로 사용되고 있는 50ton급 컨테이너 크레인의 경우 계류 시(Boom)을 올렸을 경우 최대 100m에 달하게 되므로 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다. 특히 지난해 태풍 ‘매미’ 내습 시에는 부산항의 신감만 및 자성대부두에서 초속 50m에 이르는 강풍에 의하여 총 11기의 컨테이너 크레인이 파손되어 부산항 기능을 일부 마비시켜 막대한 물류 손실을 가져오기도 하였다.

따라서 본 연구에서는 강풍에 대비하여 고정장치를 설치하는 컨테이너 크레인의 계류상태(stowed mode)에서 설계 최대 풍속인 50m/s가 컨테이너 크레인에 작용될 때, 풍하중의 작용방향에 따른 컨테이너 크레인 지지점에서의 반력 분포를 분석하고 전체 자중의 15% 가량을 차지하는 기계실의 위치 변화가 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 분석하였다.

2. 유한요소해석

2.1 풍하중 분석

본 연구는 50m/s의 강풍이 컨테이너 크레인에 작용할 때 풍향과 기계실의 위치 변화에 따른 지지점에서의 반력을 검출하여 풍하중에 대한 컨테이너 크레인의 안정성을 분석하므로 풍하중을 설정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너 크레인 전문 제작 및 컨설턴트 기업인 미국 L社의 풍동시험 자료와 풍하중 계산식을 사용하여 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 계산하고 유한요소해석에 적용하였다.⁶

식(1)은 적용된 풍하중의 계산식을 나타내고 있다. 일반적으로 컨테이너 크레인은 해안에 설치되므로 설계시 풍하중은 개방된 평지, 초원, 해변 등에 적용할 수 있는 노풍도 C를 기준으로 하여 가스트 영향 계수, 고도분포계수 등을 선정하고 이를 식에 대입하여 이론적으로 계산하지만 본 연구에서는 L社에서 실시한 풍동실험 결과와 풍하중 산출식을 사용하여 컨테이너 크레인에 작용하는 풍하중을 실험식을 이용하여 계산하였다.^{7,8,9,10,11}

Fig. 1은 풍동실험을 통해 얻어진 풍향에 따른 컨테이너 크레인의 반력비를 나타낸 것으로 이를 식(1)과 같이 복합 풍력계수(C_{Ti} , Combined factor)에 대입하여 풍향에 따른 풍하중을 계산하였다. 그리고 Fig. 2는 본 연구에서 풍하중을 계산하기 위해 고도에 따른 풍압분포를 나타낸 것으로써 지상에서 15m까지는 일정한 풍압을 적용하였으며 그 이상부터는 식(2)를 사용하여 풍압분포를 계산하였다. 그

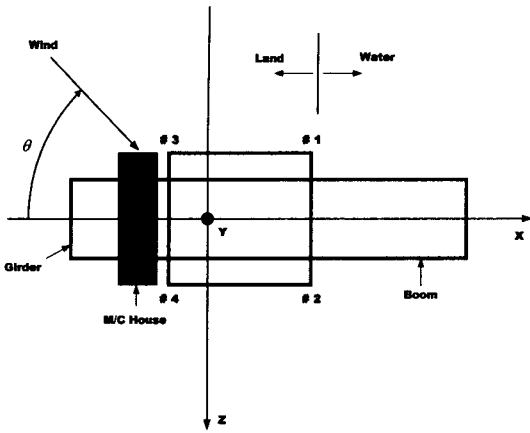


Fig. 3 Definition of an incidence angle of wind load

리고 본 연구에서는 컨테이너 크레인의 유한요소모델 생성시 절점간의 높이 차를 최대 6m 이하로 하여 해석시 풍하중을 각 절점 높이에 대응하는 풍압으로 적용하여 계산하였다.

Fig. 3은 L社의 풍동실험과 본 연구의 유한요소 해석시 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중의 방향을 정의하고 있다.

$$F = C_D \times C_S \times C_{Ai} \times q \times A \quad (1)$$

$$= C_{Ti} \times q \times A$$

$$q = V^2 \times \frac{z}{30}^{\frac{1}{4}} \times 9.81 \quad (2)$$

F : 풍하중(N)

C_D : 항력계수(Drag coefficient)

C_S : 차폐계수(Shielding coefficient)

C_{Ai} : 풍하중에 대한 i방향 최대 반력 비

C_{Ti} : Combined factor($C_D \times C_S \times C_{Ai}$)

q : 속도에 따른 풍압(Pa)

A : 수평면적(m^2)

z : 풍하중 작용 고도(m)

2.2 유한요소모델

본 연구의 모델로 사용된 컨테이너 크레인은 컨 상용량(Lifting capacity)이 50ton이며, 전체 자중이

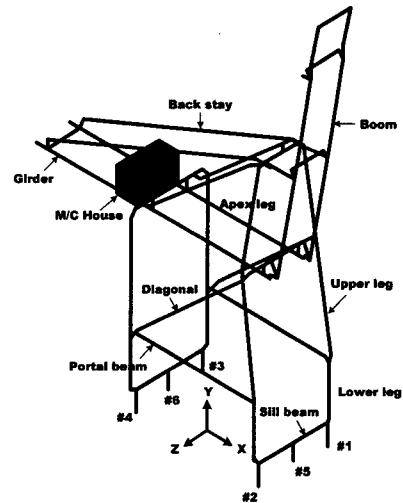


Fig. 4 Structure skeleton drawing of a container crane

890ton, 아웃리치(Out reach)가 51m, 레일 스패ن(Rail span / 해측과 육측 레그간의 거리)이 30.5m, 지상에서 붐(Boom) 및 거더(Girder)까지의 높이가 40m, 계류시 지상에서 붐 끝단까지의 높이가 100m에 달하며 해측(X 방향) 수평면적이 863 m^2 , 레일측(Z 방향) 수평면적이 997 m^2 에 달하는 대형 구조물이다.

따라서 본 연구에서는 해석시간을 단축하면서도 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 컨테이너 크레인의 각 부재를 각기 특성에 맞는 요소를 선택하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 7.1을 이용하여 유한요소모델을 구성하고 해석을 수행하였다. 컨테이너 크레인 상·하부의 레그(Leg)나 붐과 거더를 연결하는 스테이(Stay), 실 빔(Sill beam), 포탈 빔(Portal beam)등은 부재의 단면이 대칭형상을 가지고 있으므로 절점당 6개의 자유도(ux, uy, uz, rotx, roty, rotz)를 가지는 3차원 대칭 보요소를 사용하였으며, 붐과 거더 등은 스프레더를 이송시키기 위한 레일이 설치되어야 하는 구조상의 특징으로 인하여 부재의 단면이 비대칭형으로 되어 있으므로 이러한 특징을 효과적으로 나타낼 수 있는 3차원 비대칭 보요소를 사용하였다.¹² 그리고 전체 자중의 15% 가량을 차지하며 거더 상부에 위치한 기계실은 자체의 자중을 고려하기 위하여 절점당 3개의 자유도를 가지는 육면체 요소를 사용하여 적합한 밀도를 부과하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 50톤급 컨테이너

크레인의 개략도를 나타내고 있으며 Table 1은 해석에 적용된 재료의 기계적 물성치이다.

Table 1 Material properties of each material

Material	Elastic Modulus	Density	Yield Strength	Tensile Strength
SM490Y	210 GPa	7800 kgf/m ³	350 MPa	490 MPa
STK400	210 GPa	7800 kgf/m ³	235 MPa	400 MPa

2.3 기계실의 위치

전체 자중의 15% 가량을 차지하며 육측에 위치하고 있는 기계실의 위치가 변화할 때 풍하중에 대한 컨테이너 크레인의 안정성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 상부 레그(Upper leg), 붐, 거더가 만나는 지점을 원점으로 하고 기계실(Machinery house) 중심까지의 거리를 D로 할 때 D=13, 20, 36, 43m의 4가지 경우에 대하여 지지점에서의 반력을 비교, 분석하였다.

2.4 경계조건

Fig. 4의 컨테이너 크레인에서 차륜(Truck)부와 타이 다운(Tie down)으로 이루어진 #1~#4 지지점은 모든 축방향 변위가 고정($u_x=u_y=u_z=0$)되었으며, 스토이지 핀(Stowage pin)으로 구성된 #5, #6 지지점은 핀이 핀 컵에 꽂혀 있으므로 u_x, u_z 방향만을 고정하였다.

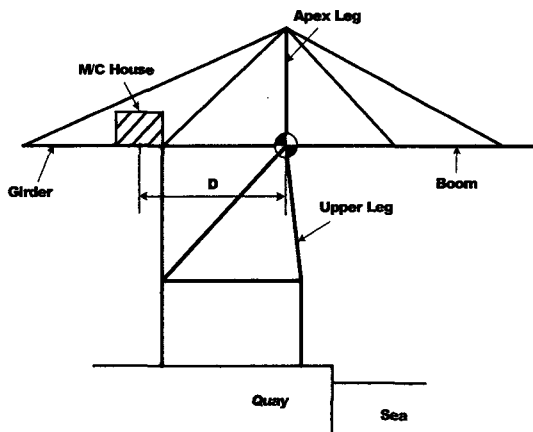


Fig. 5 Definition of machinery house location

그리고 붐과 거더의 연결부는 핀으로 연결되므로 서로의 연결부는 각각 모델링하여 절점의 u_x, u_y, u_z 병진 자유도만을 일치시켜 연결부에서 회전 변위 구속으로 인한 모멘트가 발생하지 않도록 하였으며, 거더 및 붐과 연결되는 스테이들도 핀으로 연결되므로 동일한 방법으로 각각의 실제 변형을 구현할 수 있도록 적절한 병진 자유도를 일치시켰다.

Fig. 6은 각 지지점에 적용된 경계조건을 나타내고 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 풍향 변화에 따른 컨테이너 크레인의 안정성 분석

3.1.1 각 지지점의 반력 비교

Fig. 5에서 정의된 기계실의 위치(D)가 원점에서 36m 떨어진 경우 풍향 변화에 따른 각 지지점의 Y방향 반력 변화와 반력의 합을 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 각도는 Fig. 3에서 설명된 것과 같이 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중의 방향을 나타낸다. 따라서 풍향이 0°인 경우는 컨테이너 크레인 뒤편 육지쪽(-X 방향)에서 풍하중이 작용되는 경우이며, 180°인 경우는 그 반대로 바다쪽(X 방향)에서 컨테이너 크레인 방향으로 풍하중이 작용되는 경우이다. 그리고 풍향이 90°일 때는 레일방향(Z 방향)으로 풍하중이 작용되는 것을 의미한다.

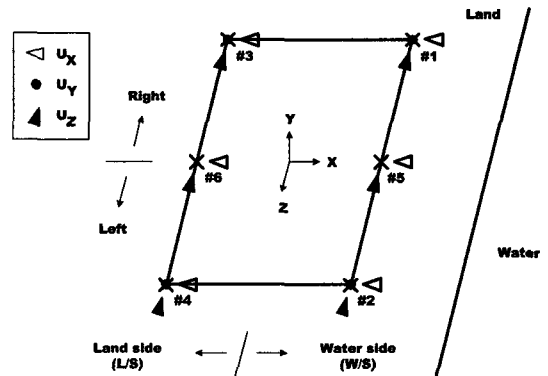


Fig. 6 Boundary conditions of a container crane

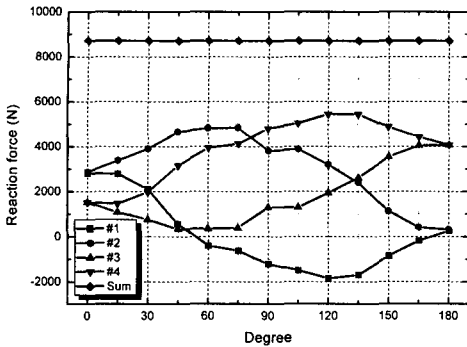


Fig. 7 Reaction force distribution at each supporting point according to the direction of wind load

해측(water side) 오른쪽 #1 지지점의 반력은 120°까지는 감소하다 이후 구간에서는 증가하며 해측 왼쪽 #2 지지점의 반력은 75°까지 증가하다 이후 감소하여 180°지점에서는 #1, #2 지지점의 반력이 서로 동일하게 나타났다. 그리고 육측(land side) 오른쪽 #3 지지점의 반력은 120°구간까지는 증가하다 이후 감소하였으며, 왼쪽 #4 지지점에서는 75°구간까지 감소하다 이후 증가하였다. 그리고 180°에서는 해측 지지점과 마찬가지로 동일한 반력이 발생되었다. 이는 컨테이너 크레인의 형상이 좌우 대칭이기 때문에 풍하중이 +X(0°/ 육풍) 방향이나 -X(180°/ 해풍) 방향에서 입사되면 #1, #2 지지점 반력과 #3, #4 지지점 반력이 서로 동일하게 되는 것이다.

3.1.2 구조적 안정성 고찰

Fig. 7에서 모든 풍하중 방향에서 발생하는 각 지지점의 반력 합은 8,720kN으로 컨테이너 크레인의 자중과 동일하게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 기계실의 위치가 Fig. 5에서 정의된 것과 같이 원점에서 36m 떨어져 있을 경우 #1 지지점을 제외한 모든 지지점에서 풍하중의 방향이 변화하더라도 압축(+)반력만이 발생되었으나 해측 오른쪽 #1 지지점에서는 풍하중의 작용방향이 60~175°구간에서 컨테이너 크레인이 전도되려는 경향을 나타내는 인장(-)반력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 컨테이너 크레인 설계시에는 이러한 인장력을 견딜 수 있도록 전도방지장치(타이 다운

등)를 설치하여 컨테이너 크레인의 전도를 방지하고 있다. 하지만 설계 풍하중 조건을 최악의 방향으로부터 최대의 풍하중이 작용될 때로 규정하고 있어 경사지게 작용되는 풍하중은 고려하지 않고 있다. 그러나 Fig. 7에서 #1 지지점의 최대 인장반력은 풍하중의 작용방향이 0°(+X), 90°(+Z), 180°(-X)가 아닌 120°에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 어느 한 방향에서 입사되는 풍하중만으로 전도방지장치의 설계가 이루어진다면 경사지게 작용되는 풍하중으로 인하여 이것이 파괴되어 컨테이너 크레인이 전도될 수 있다.

3.2 기계실 위치 변화에 따른 컨테이너 크레인의 안정성 분석

3.2.1 각 지지점의 반력 비교

Fig. 5와 같이 상부 레그, 붐, 거더가 만나는 지점을 원점으로 할 때 기계실 중심까지의 거리 D가 가장 멀리 떨어진 43m일 때를 case 1, 36m(case 2), 20m(case 2), 13m(case 1)으로 하여 50m/s의 풍하중을 컨테이너 크레인에 작용시킬 때 #1~#4 지지점의 반력을 Fig. 8~11까지 나타내었다.

기계실의 위치가 육측 레그 뒤쪽(case 1, 2)에서 육측과 해측 레그 사이(case 3, 4)로 이동하게 되더라도 모든 반력의 합은 컨테이너 크레인의 자중과 동일하였으나 각각의 지지점 반력은 다음과 같이 변화하였다. 육측 #3, #4 지지점의 압축(+)반력은 점차 감소하게 되었으나 해측 #1, #2 지지점의 압축반력은 반대로 무게 중심 이동으로 인하여 증가하게 되었다. 그리하여 Fig. 8과 같이 기계실의 위치가 해측으로 점차 이동함에 따라 컨테이너 크레인이 전도되려는 경향을 나타내는 인장반력이 해측 오른쪽 #1 지지점에서 점차 감소되는 것을 확인할 수 있었으나 Fig. 10에 나타난 육측 오른쪽 #3 지지점에서는 그 반대로 발생하지 않았던 인장반력이 case 3과 4에서 풍하중이 60°로 입사하게 되면 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 육측 Tie-down 설계를 위한 기계실의 입계위치

컨테이너 크레인이 전도되려는 경향을 나타내는 인장반력은 컨테이너 크레인에서 이를 방지하기 위한 장치인 타이 다운의 설계와 밀접한 연관이 있다. 이는 풍하중 작용시 지지점에서 발생하는 인장반력을 분석함으로써 육측과 해측에 설치해야

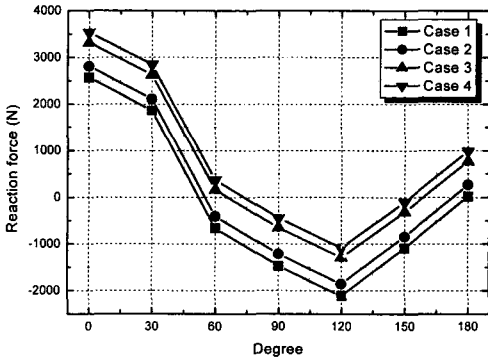


Fig. 8 Reaction force of #1 supporting point with respect to machinery house location

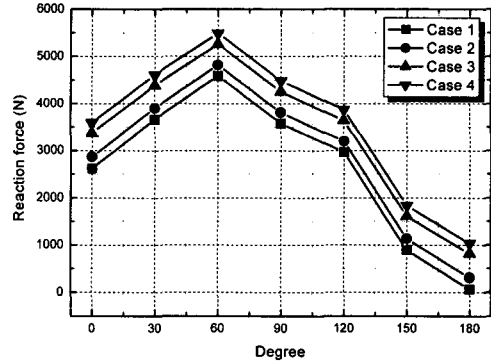


Fig. 9 Reaction force of #2 supporting point with respect to machinery house location

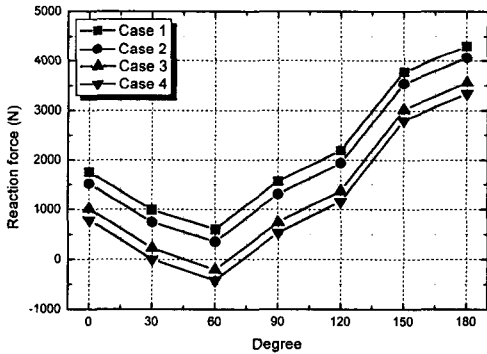


Fig. 10 Reaction force of #3 supporting point with respect to machinery house location

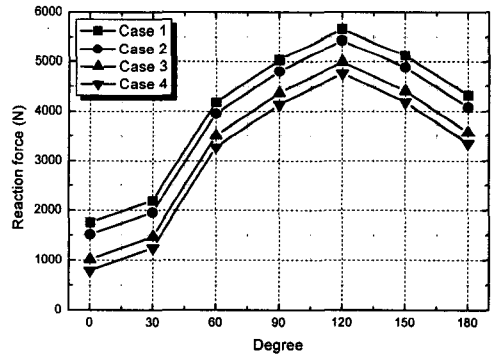


Fig. 11 Reaction force of #4 supporting point with respect to machinery house location

할 타이 다운의 직경 및 수량, 재료 등을 선정할 수 있기 때문이다.

특히 Fig. 8과 같이 case 1, 2의 경우 해측에는 타이 다운의 설치가 필요하나 육측에는 인장반력이 발생하지 않으므로 굳이 설치할 필요가 없다. 이는 컨테이너 크레인 자중의 15% 가량을 차지하는 기계실이 육측 레그 뒤편에 위치하여 무게중심이 육측 레그 부근에 위치하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 육측 지지점에서 타이 다

운의 설치가 필요 없는 기계실의 임계위치를 계산하기 위하여 Fig. 12와 같이 컨테이너 크레인으로 입사되는 풍향이 60°일 때 #3 지지점의 각 case별 반력을 선형 커브피팅하여 수직반력이 0이 되는 위치를 도출하였다. 그 결과 본 연구에서 사용된 50ton급 컨테이너 크레인의 경우 육측 레그 지지점에서 인장반력이 발생하지 않는 기계실의 중심 위치는 원점에서 육측으로 25.75m 떨어진 지점임을 확인할 수 있었다.

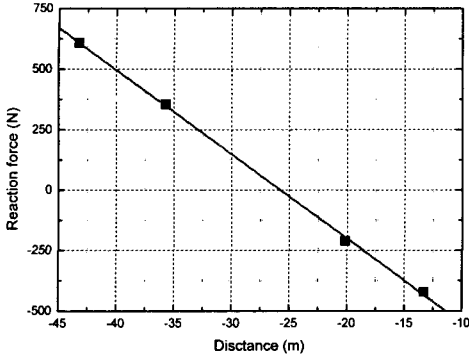


Fig. 12 Reaction force of #3 supporting point according to a change of case at 60 degrees of wind direction

4. 결론

컨테이너 크레인이 강풍에 대비한 고정장치를 설치하는 계류상태에서 풍하중의 작용방향과 기계실의 위치 변화가 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중의 방향과 기계실의 위치가 변화하더라도 각 지지점에서 구해진 반력의 합은 컨테이너 크레인의 자중과 동일하다.
- 2) 컨테이너 크레인의 풍하중 설계 기준은 X축(해풍, 육풍)이나 Z축(레일방향) 중 최악의 방향으로부터 최대의 풍하중이 작용될 때로 규정되어 있으나 풍하중이 120°로 작용될 때 해측 오른쪽 #1 지지점에서 최대 인장반력이 발생하였다.
- 3) 컨테이너 크레인이 풍하중에 의해 전도되는 것을 방지하기 위해서는 해측 지지점(#1, #2)의 전도방지장치가 풍하중에 의해 발생하는 인장력에 충분한 강도를 가져야 한다.
- 4) 기계실의 위치가 육측에서 해측으로 이동함에 따라 무게중심도 동일한 방향으로 이동하여 육측 지지점의 압축반력은 점차 감소하고 해측 지지점의 압축반력은 점차 증가하였다.
- 5) 기계실이 육측과 해측 레그 사이에 위치하는 Case 3, 4의 경우에는 컨테이너 크레인이 전도되

려는 경향을 나타내는 인장반력이 해측 레그 지지점인 #1에서는 점차 감소되나, 반대로 육측 레그 지지점인 #3에서는 발생하지 않았던 인장반력이 풍하중이 60°로 입사되면 발생되었다.

- 6) 본 연구에 사용된 50ton급 컨테이너 크레인의 경우 육측 지지점에서 타이 다운의 설치가 필요 없는 기계실의 입계위치는 상부 레그, 붐, 거더가 만나는 지점인 원점에서 거더 방향으로 25.75m 떨어진 지점이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정 연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Yang, C. H., Kim, C. G., Choi, J. H., Choi, S. H., Choi, Y. S. and Lee, J. H., "A Study on Technology and Development Strategy of Next-Generation Port Loading and Unloading System to Prepare for Ultra Large Container-ship," Korea Maritime Institute, 2002.
2. Yoon, J. S. and Park, B. S., "Velocity Trajectory Planning for the Implementation of Anti-swing Crane," J. of KSPE, Vol. 11, No. 5, pp. 143-152, 1994.
3. Kim, Y. B., "A Study on the Sway Control of a Crane Based on Gain-Scheduling Approach," J. of KSPE, Vol. 18, No. 7, pp. 53-64, 2001.
4. Park, K. T., "Intelligent Technology of Port Logistics System," J. of KSPE, Vol. 19, No. 2, pp. 41-48, 2002.
5. Kim, K. H., Lee, Y. J., Lee, J. W. and Lee, K. S., "A Design and Characteristic Analysis of High Efficiency Gantry Crane," J. of KINPR, Vol. 14, No. 4, pp. 395-406, 2000.
6. Hanjin Heavy Industries & Construction Co., Ltd., "Structural & Mechanical Calculation for 50Ton Container Crane for Pusan Port," 2000.
7. Dyrbye, C. and Hansen, S. O., "Wind Loads on Structures," John Wiley & Sons, pp. 19-48, 1996.
8. Simiu, E. and Scanlan, R. H., "Wind Effects on Structures," John Wiley & Sons, pp. 327-382, 1996.

9. KS B ISO 4302, "Cranes-Wind Load Assessment," 2001.
10. Moon, D. H. and Hur, C. W., "Static and Dynamic Analysis for a Double Link Type Level Luffing Jib Crane," J. of KSSC, Vol. 12, No. 6, pp. 715-725, 2000.
11. Ha, Y. C., "Design Wind Speeds and Wind Loads for Structural Frames in Korea," J. of WEIK, Vol. 7, No. 1, pp. 13-25, 2003.
12. ANSYS User's Manual, ANSYS Inc., 1992.