

설계풍속 상향 조정에 따른 50ton급 컨테이너 크레인의 구조 안정성 평가

권순규* · 이성욱** · 한동섭*** · 심재준**** · 한근조*****

*, **, ***, **** 동아대학교 기계공학과 대학원, ***** 동아대학교 기계공학과 교수

The Analysis of a Structural Stability of a 50ton Container Crane according to an Increased Design Wind velocity

Soon-Kyu Kwon* · Seong-Wook Lee** · Dong-Seop Han*** · Jae-Joon Shim**** ·
Geun-Jo Han*****

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

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

요 약 : 본 연구는 컨테이너 크레인이 강풍에 대비하여 크레인을 고정하는 계류 시에 75m/s의 풍하중이 50ton급 컨테이너 크레인에 작용될 때, 풍향변화와 기계실의 위치 변화가 50ton급 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에 적용된 설계 풍하중은 “건축물 하중 기준”에 의거하여 산출하였으며, 풍향은 0° ~ 180°를 15° 간격으로 적용하여 각 지지점에서의 반력을 분석하였다. 그리고 전체 자중의 15%를 차지하는 기계실의 위치 변화가 컨테이너 크레인의 구조 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 이 결과들을 바탕으로 컨테이너 크레인의 전도방지장치인 타이다운(Tie-down)의 설계기준을 제시하였다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 풍하중, 전도모멘트, 타이다운, 기계실

ABSTRACT : This study is carried out to analyze the stability of a container crane in according to the change of a wind direction and a machinery house location when a wind load of a wind velocity, 75m/s was applied on the state stowing a container crane by a heavy wind. A design wind load applied to this study was calculated in observance of “Load Criteria of Building Structure”. And we analyzed the reactions of each supporting points according to applying a wind direction to an interval of 15° in 0° ~ 180° and the structure stability of a container crane according to changing a machinery house location occupying 15% of a container crane weight. From a results of this study, we presented a design criteria of an overturning disturbance equipment, tie-down.

KEY WORDS : container crane, wind load, overturning moment, tie-down, machinery house

1. 서 론

컨테이너를 선박에 양·적하는 항만 장비인 컨테이너 크레인은 일반적으로 차폐물이 거의 없는 해안에 설치된다. 이 컨테이너 크레인은 계류 시(Boom을 올렸을 경우) 높이가 최대 100m이며

자중이 850ton에 이르는 거대 구조물로서 바람에 큰 영향을 받는다. 특히 2003년 태풍 ‘매미’ 내습 시에는 부산항의 신감만 및 자성대 부두에서 강풍에 의하여 총 11기이 컨테이너 크레인이 전도되어 부산항의 기능을 마비시킴으로써 막대한 손실을 가져 오기도 하였다.

그러므로 강풍에 의한 영향을 최소화시키기 위하여 컨테이너 크레인에는 전도방지장치인 타이다운(Tie-down)이나 스토이지핀(Stoage pin)과 같은 계류장치를 설치하여 강풍으로 인하여 작업이 중지될 경우 컨테이너 크레인을 지정된 위치에 고정시켜 전도와 이탈을 방지하고 있다. 그러나 현재 설치된 전도방지

* 정회원, skkwon77@korea.com 051)200-6989

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

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

**** 정회원, shimjj@donga.ac.kr 051)200-6989

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

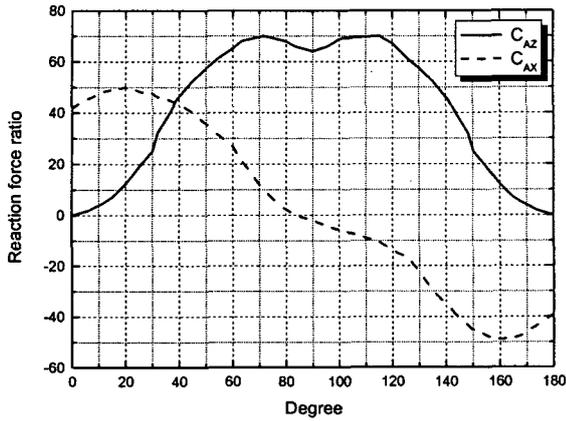


Fig. 1 reaction force ratio investigated by a wind tunnel test

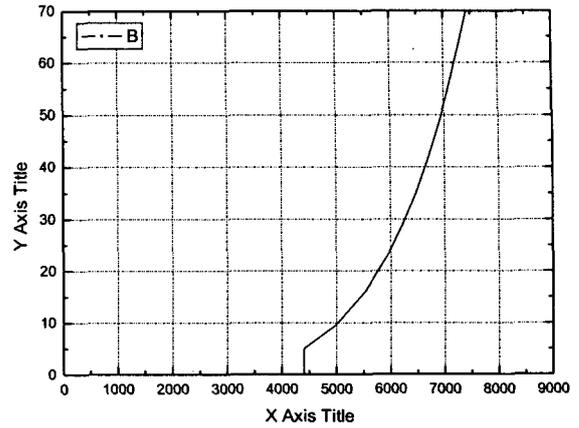


Fig. 2 Wind pressure distribution with respect to the altitude

장치는 태풍 '매미'에 불었던 풍속 60m/s에 적합하지 않으므로 설계변경이 요구된다.

현재 '건축물 하중 기준'에 따르면, 부산지역의 설계풍속은 40m/s(10분 평균풍속)이며, 순간최대풍속으로 환산하면 55m/s이다(하영철, 2003), (김종락, 2003). 이 풍속을 강풍에 대비하기 위하여 컨테이너 크레인의 설계 시 계류장치의 경우 순간최대 70~75m/s, 구조물의 경우 설계풍속을 순간최대 60m/s 로 상향조정할 예정에 있다.

따라서 본 연구에서는 건축물 및 교량의 내풍 설계에 적용되는 '건축물 하중 기준'에 의거하여 75m/s의 풍속에서의 풍하중이 컨테이너 크레인에 작용되었을 때, 컨테이너 크레인의 안정성을 분석하였으며, 컨테이너 크레인을 포함한 항만장비에 적용되는 '항만 시설 장비 검사 기준'에 의거하여 전도방지장치인 타이다운(Tie-down)의 설계치수를 제시하였다(해양수산부, 2000), (건설교통부, 2000).

2. 풍하중 산정

본 연구에서 적용되는 풍속은 75m/s(순간최대풍속)이며, 이 풍속에 따른 풍하중은 식 (1)과 같이 '건축물 하중 기준'에 의해 산출하였으며, 풍향에 따른 영향을 분석하기 위하여 미국 컨테이너 크레인 전문 제작 및 컨설턴트 기업인 L社의 풍동실험결과를 통하여 얻어진 풍향계수를 추가로 고려하였다.

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

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

$$v_z = v_0 \cdot K_{zt} \cdot K_{zt} \cdot I_w$$

P : 설계풍력 (kgf)

C_f : 풍력계수

G_f : 거스트 계수

C_A : 풍향계수(angle factor)

q_z : 설계속도압 (kgf/m²)

A : 수압면적

v_z : 설계풍속

v_0 : 기본풍속

K_z : 풍속고도분포계수

K_{zt} : 풍속할증계수

I_w : 중요도 계수

Fig. 1은 L社의 풍동실험을 통해 얻어진 풍향에 따른 컨테이너 크레인의 반력비를 나타내고 있다. 본 연구에서는 이 결과를 참조하여 0° ~ 180° 사이를 15° 간격으로 분할하여 풍향 변화에 따른 컨테이너 크레인의 영향을 분석하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 '건축물 하중 기준'에 의거하여 풍하중을 계산하기 위해서 고도에 따른 풍압분포를 나타낸 것으로써 지상에서 5m까지는 일정한 풍압을 적용하였으며, 그 이상의 고도에서는 풍압의 분포를 고려하였다. 그리고 본 연구에서는 컨테이너 크레인의 유한요소모델 생성 시 절점간의 높이 차를 최대 6m 이하로 하여 해석 시 풍압분포에 따른 영향을 최소화하였다.

Fig. 3은 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중의 방향을 나타내

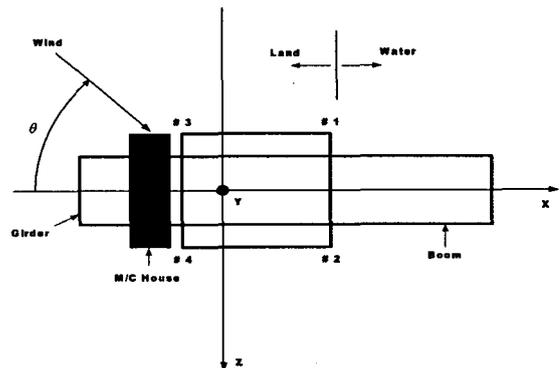


Fig. 3 Definition of an incidence angle of wind load

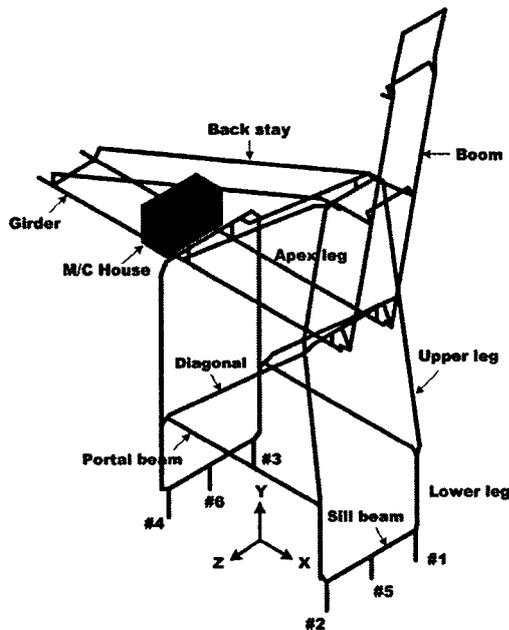


Fig. 4 structure skeleton drawing of a container crane

고 있다. 풍향의 입사각인 θ 는 육측을 기준으로 0° 에서부터 시계 방향으로 180° 까지 변화하도록 하였다.

또한 풍하중 산출시 컨테이너 크레인 설치되는 곳은 차폐물이 거의 없는 해안이므로 있으므로 노풍도 D 를 적용하여 산출하였다.

3. 컨테이너 크레인의 유한요소해석

3.1 유한요소모델

본 연구의 모델로 사용된 컨테이너 크레인은 Fig. 4와 같이 계류 시 형상을 기준으로 유한요소모델을 구성하였다.

이 컨테이너 크레인은 권상용량(Lifting capacity)이 50ton, 아웃리치(Out-reach) 51m, 레일 스패ن(Rail Span, 해측과 육측 레그(leg)간의 거리) 30.5m, 지상에서 붐(Boom) 및 거더(Girder)까지의 높이가 40m, 계류 시 지상에서 붐 끝단까지의 높이가 100m에 달하며, 해측(X 방향) 수평면적이 863m^2 , 레일측(Z 방향) 수평면적이 997m^2 에 달하는 대형 구조물이다.(한진중공업, 2000)

따라서 본 연구에서는 해석 시간을 단축하면서도 해석의 신뢰성을 높이기 위해 컨테이너 크레인의 각 부재를 각기 특성에 맞는 요소를 선택하여 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 이용하여 유한요소모델을 구성하고 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 Stay(스테이), Sill beam(실 빔), Portal beam(포탈 빔)등은 부재의 단면이 대칭형상을 가지고 있으므로 절점당 6개

Table 1 Mechanical 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

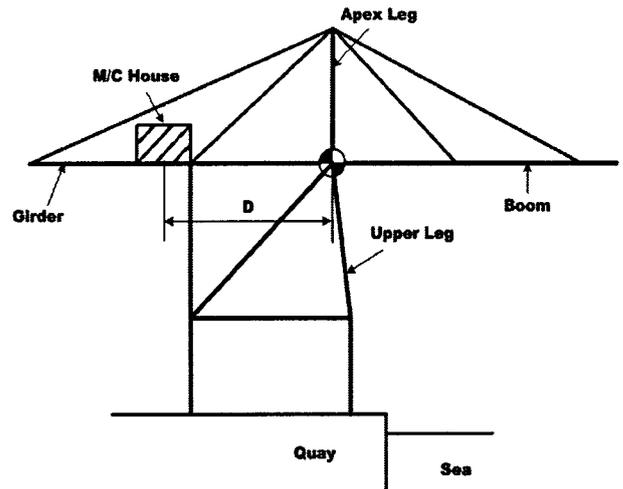


Fig. 5 Definition of machinery house location

의 자유도($u_x, u_y, u_z, \text{rot}_x, \text{rot}_y, \text{rot}_z$)를 가지는 3차원 대칭 보요소를 사용하였으며, 붐과 거더 등은 스프레더 이송을 위한 레일이 설치되어야 하는 구조상의 특징으로 인하여 부재의 단면이 비대칭형으로 되어 있으므로 이러한 특징을 효과적으로 나타낼 수 있는 3차원 비대칭 보요소를 사용하였다.(ANSYS Inc. 1992) 자중의 15%를 차지하는 기계실은 자체의 자중을 고려하기 위하여 절점당 3개의 자유도를 가지는 육면체 요소를 사용하여 적합한 밀도를 부과하였다.

Table 1은 유한요소 해석에 사용된 재료의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

3.2 기계실 위치 변화

전체 자중의 15%를 차지하는 기계실의 위치 변화를 통해서 컨테이너 크레인의 각 지지점의 반력 변화를 분석하였다. 기계실의 위치 변화의 기준은 Fig. 5와 같이 상부 레그(upper leg), 붐(boom), 거더(girder)가 만나는 지점을 원점으로 하고 기계실(machinery house)의 중심까지의 거리를 D 로 하여 13m, 20m, 36m의 3가지의 경우에 대하여 각 지지점의 반력을 비교 분석하였다. 그리고 기계실의 위치는 최대 36m, 최소 13m를 벗어날 때

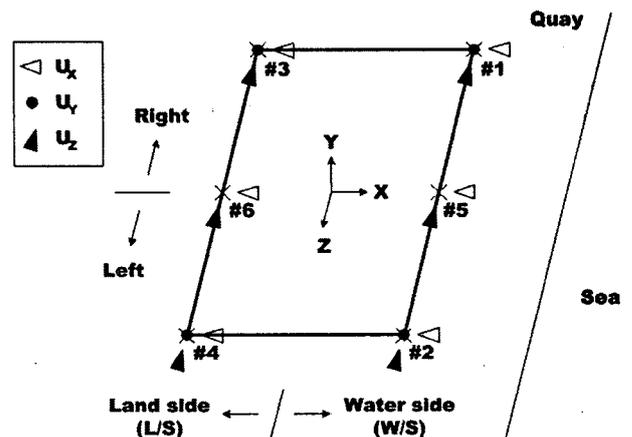


Fig. 6 Boundary condition of a container crane

는 주변의 장치의 간섭에 의해 기계실이 위치할 수 없다.

3.3 경계조건

컨테이너 크레인에서 각 부재는 용접으로 연결되어 있으나, 붐(Boom)과 거더(Girder)의 연결 부분은 핀으로 연결되어 있기 때문에 유한요소해석에서는 이러한 연결 부분을 최대한 실제 구조물과 유사하게 고려하기 위하여 절점의 u_x , u_y , u_z 병진 자유도를 일치시켜 연결부에서 회전변위 구속으로 인한 모멘트가 발생하지 않도록 하였으며, 거더(Girder) 및 붐(boom)과 연결되는 스테이(stay)들도 핀으로 연결되므로 동일한 방법으로 각각의 실제 변형을 구현할 수 있도록 병진자유도를 일치시켰다.(이 등,2005)

Fig 6에서와 같이 컨테이너 크레인의 각 지지점의 경계조건을 살펴보면, #1, #2, #3, #4 지지점은 차륜(truck)부와 타이다운(tie-down)부로서 모든 축방향 변위가 고정($u_x=u_y=u_z=0$)되었으며, #5, #6 지지점은 핀이 핀 컵에 꽂혀 있으므로 u_x 와 u_z 방향만을 고정($u_x=u_z=0$)하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 풍향에 따른 각 지지점 반력 분석

Fig. 7은 기계실 위치가 36m인 지점에서의 각 지지점의 Y 방향 반력 변화 및 반력의 합을 나타낸 것이다. 여기서 음의 값은 인장반력이 발생하는 구간이므로 각 지지점의 지지부가 이러한 인장력을 견디지 못하여 파손되면, 컨테이너 크레인이 전도될 수 있다. 그리고 각 지지점별 반력의 값을 합하면, 컨테이너 크레인의 자중에 해당하는 850ton으로 일정하게 나타난다.

반력 결과를 보면, 해측(water side) 오른쪽 타이다운부인 #1 지지점의 Y방향 반력은 풍향이 15°에서부터 급격히 감소하며, 30° ~ 45°지점에서 압축반력이 인장반력으로 바뀌게 된다. 풍향이 120°인 지점에서 최대 인장반력이 발생하고, 그 이후 구간에서 증가하고 있다. 왼쪽 타이다운부인 #2 지지점의 Y방향 반력은 60° 지점에서 최대 압축반력을 받고 120° 지점 이후에 급격

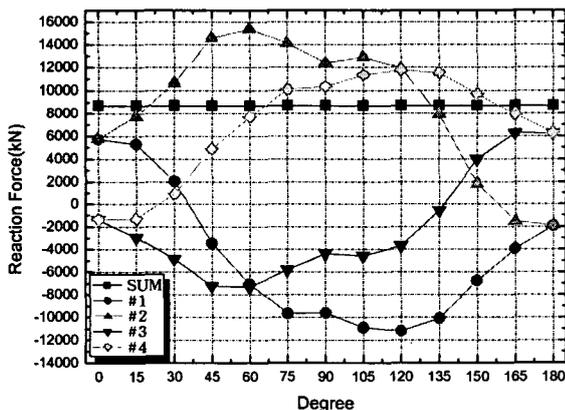


Fig. 7 Reaction force at each supporting points according to the direction of wind load

히 감소하여 180° 지점에서 #1, #2 지점의 값이 동일하게 된다. 육측 오른쪽 Tie-down부인 #3 지점은 45°까지 인장반력이 증가하고 그 이후 구간에서 감소하게 된다. 그리고 135° ~ 150° 구간에서 인장반력이 압축반력을 바뀌게 된다. 육측 왼쪽 타이다운인 #4지점의 Y방향 반력은 135°까지 증가 후 감소하여 180°지점에서 #3 지점의 값과 동일하게 된다. 또한, 15° ~ 30° 구간에서 인장반력이 압축반력으로 바뀌게 된다. 그리고 #3의 인장반력이 #1보다 크게 발생하지 않는 것은 전체 자중의 15%를 차지하는 기계실의 위치 때문인 것으로 판단된다.

또한, 컨테이너 크레인의 형상이 X축에 대하여 대칭 형상을 가지기 때문에 180° ~ 360° 구간의 Y방향의 반력 변화는 0° ~ 180°와 같은 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 그러나 Z방향의 풍향이 반대방향으로 작용하게 되기 때문에 #1, #2 지점과 #3, #4지점의 반력의 값은 서로 바뀌어져서 나타나게 된다. 그러므로 최대 인장력은 #2 지점에서 발생할 것으로 분석된다.

4.2 기계실 위치 변화에 따른 안정성 평가

Fig. 6을 참고하면, 상부 레그, 붐, 거더가 만나는 점을 원점으로 할 때 기계실 중심까지의 거리 D가 36m(case 1)에서부터 20m(case 2), 13m(case 3)로 하여 각각 75m/s의 풍하중에 따라 갠트리 크레인의 각 지지점의 반력이 Fig. 8~11에 나타내었다.

전체 자중의 약 15%를 차지하는 기계실의 위치를 육측에서 해측으로 이동하게 되더라도 모든 반력의 합은 컨테이너 크레인의 자중과 동일하지만, 컨테이너 크레인의 무게중심의 변화에 의해 각 지지점의 반력이 변화하였다. 즉 해측 지지점인 #1을 보면, 최초 기계실의 위치가 해측으로 가까워지면서(case 1 → case 3) 인장 반력이 약 970kN 감소하게 되었다. 반면 육측 지지점인 #3은 약 740kN 증가하는 것으로 판단된다. 이런 차이가 발생하는 것은 기계실 위치 변화에 의해 발생하는 무게중심의 변화인 것으로 판단된다. 또한, 기계실의 위치가 변화하더라도 각 지지점별 반력의 경향이 유사한 것을 Fig. 8~11에서 확인할 수 있다.

4.3 전도방지장치(Tie-down)의 설계

전도방지장치인 타이다운은 항만장비에 적용되는 '항만 시설 장비 검사 기준'에 의거하여 설계되어진다.

이 기준에 의거하면, 재료의 선정에 관한 기준은 없지만, 재료의 허용응력은 항복점의 1/1.5배로 설계할 것으로 지정하고 있다. 따라서 타이다운에 주로 사용되는 재료인 SCM440을 선정하면, 이 재료의 항복점은 85kgf/mm²이므로 적용되는 허용응력은 56.6kgf/mm²임을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 분석한 결과에 의하면, 해측의 경우에는 최대 인장력이 약 11,200kN이며, 육측은 7,330kN이 작용하고 있다.

이 자료들을 토대로 타이다운의 유효면적을 산출 시에는 해측의 경우는 20,164mm²이고 육측은 13,195mm²이다. 하지만 실제로 타이다운은 해측에는 2개, 육측에는 1개가 설치됨으로 해측

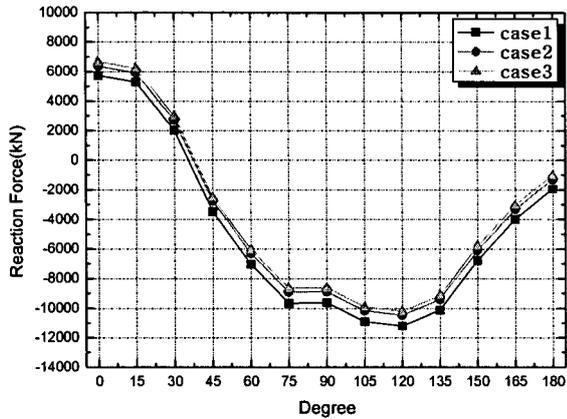


Fig. 8 Reaction force of #1 supporting point with respect to machinery house location

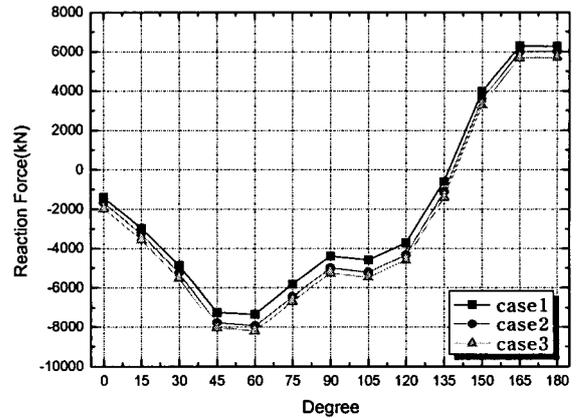


Fig. 10 Reaction force of #3 supporting point with respect to machinery house location

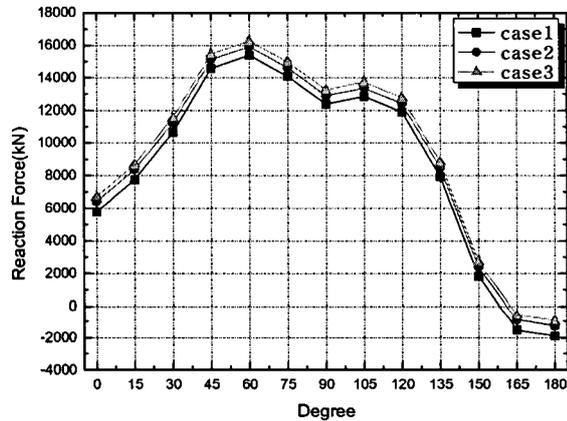


Fig. 9 Reaction force of #2 supporting point with respect to machinery house location

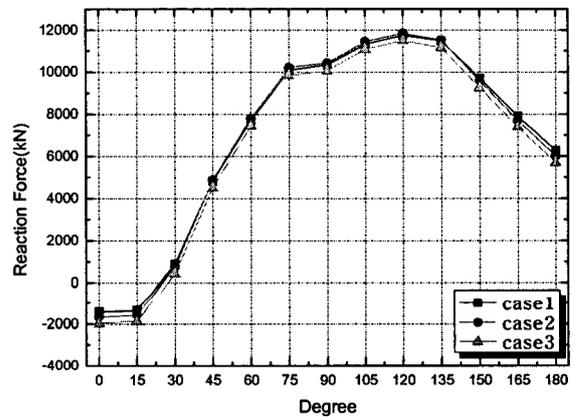


Fig. 11 Reaction force of #4 supporting point with respect to machinery house location

의 경우에 타이다운 한 개당 직경 $D=113.3\text{mm}$ 이며, 육축의 직경 $D=129.6\text{mm}$ 임을 알 수 있다.

Table 2는 각각의 기계실의 위치에 따라 변화하는 타이다운의 유효면적 및 직경(D)를 나타내고 있다. 타이다운 치수도 해측의 경우 최대 인장력이 감소함에 따라서 타이다운의 직경이 감소하며, 육축의 경우는 최대 인장력이 증가하여 직경이 증가한

다. 또한, case 1을 기준으로 기존에 설치되어 있는 타이다운의 직경과 비교하면, 해측의 경우 직경 $D=38.78$ 에서 113.3mm 로 약 3배 증가하였으며, 육축의 경우는 $D=21.2\text{mm}$ 에서 129.62mm 로 약 6배 증가할 것으로 분석된다.

5. 결론

50ton급 컨테이너 크레인 계류 시에 풍향에 따라 변화하는 풍하중이 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 유한요소해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 풍속 75m/s 의 하중이 적용되면 해측 지지점 #1은 120° 지점에서 최대 인장력이 약 $11,200\text{kN}$ 이 발생하며, 육축 지지점인 #3은 60° 에서 최대 인장력 $7,300\text{kN}$ 이 발생한다.
2. 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 Y방향 반력의 합은 자체 자중인 약 850ton 과 동일하다
3. $0^\circ \sim 180^\circ$ 사이의 풍향계수가 대칭이며, 컨테이너 크레인

Table 2 Design dimensions of each case

구분		case 1	case 2	case 3
해측 (#1)	최대인장력	11,200kN	10,460kN	10,209kN
	유효면적	$20,164\text{mm}^2$	$18,842\text{mm}^2$	$18,386\text{mm}^2$
	직경(D)	113.3mm	109.5mm	108.2mm
육축 (#3)	최대인장력	7,330kN	79,350kN	8,190kN
	유효면적	$13,195\text{mm}^2$	$18,196\text{mm}^2$	$14,750\text{mm}^2$
	직경(D)	129.6mm	134.9mm	137mm

의 형상도 X축에 대하여 대칭이므로 $180^\circ \sim 360^\circ$ 구간에 서는 #1, #2 지점과 #3, #4의 지점의 반력의 값은 서로 바뀌어져 나타나게 된다.

4. 기계실의 위치변화에 의해 해측 지지점(#1, #2)의 인장 반력값은 증가하고 반대로 육측 지지점(#3, #4)의 인장 반력이 감소하는 것은 전체 자중의 15%를 차지하는 기계실 위치 변화의 영향인 것으로 판단된다.
5. 기계실 위치가 변화하더라도 각 지지점의 반력들의 경향은 거의 유사하며, 각 case별 반력의 차이는 기계실 위치변경에 따른 무게 중심 변화의 크기인 것으로 판단된다
6. 전도 방지장치인 타이다운은 해측 지지점(#1, #2)의 경우 직경 $d=113.3\text{mm}$ 이며, 육측 지지점(#3, #4)은 $d=129.62\text{mm}$ 판단된다. 또한, 기계실 위치가 해측으로 가까워질수록 (case 1→ case 3) 해측 지지점(#1, #2)의 직경은 113.3mm, 109.5mm, 108.2mm로 감소하고, 육측 지지점(#3, #4)는 129.6mm, 134.9mm, 137mm로 증가할 것으로 판단된다.

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 안정서에 미치는 영향 분석, 한국정밀공학회지, 제22권, 제2호, pp148-155
- [5] 하영철(2003), 한국의 설계풍속과 구조골조용 풍하중, 한국풍공학회지, 제7권, 제1호, pp13-25
- [6] 김종락(2003), 풍하중 기준의 정비, 한국풍공학회지, 제 7권, 제1호, pp2-12