한국항해항만학회 제29권 제1호 춘계학술대회논문집 pp. 433~438, 2005. 4

# 풍속변화가 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향

이성욱* · 심재준** · 한동섭*** · 한근조**** · 김태형*****

*, **, ***동아대학교 대학원, ****동아대학교 기계공학부 교수, *****경남정보대학 기계자동차산업계열 조교수

# The Effect of the Variation of a Wind Speed on the Stability of a Container Crane

*Seong-Wook Lee* · Jae-Joon Shim** · Dong-Seop Han*** · Geun-Jo Han**** · Tae-Hyung Kim*****

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

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

*****Department of Mechanical Engineering, Kyung-Nam College of Information & Technology, Busan 617-701, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 풍속의 변화가 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향이 분석되었다. '항만시설장비기준 / 크레인강 구조 부분 설계 기준(KS A 1627)'과 건설교통부의 '건축물하중기준'에 의거한 풍하중이 산정되었으며, 이러한 풍하중이 컨테이너 크레인에 작용할 때, 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생되는 반력을 분석함으로써 구조적 안정성을 평가하였다. 해석에 사용된 모델은 현재 항만에서 널리 사용되는 50톤급 컨테이너 크레인이다.

**핵심용어** : 컨테이너 크레인, 풍하중, 설계풍속, 전도력, 구조 안정성

**ABSTRACT** : *This study was carried out to analyze the effect of the variation of a wind speed on the stability of a container crane. The wind load according to 'The Requirement of Port Facilities and Equipments / Specification for the design of crane structures (KS A 1627)' and 'Load Criteria of Structures' enacted by the ministry of construction & transportation was evaluated. And the uplift forces of a container crane under this wind load were calculated by analyzing reaction forces at each supporting point and compared with each other. The analytic model was a container crane with uplift capacity of 50ton which was widely used in port.*

**KEY WORDS** : *container crane, wind load, design wind speed, uplift force, structural stability*

## 1. 서 론

컨테이너를 선박에 양·적하하는 장비인 컨테이너 크레인은 일반적으로 차폐물이 거의 없는 항만에 설치되어 사용되고 있으며, 자체 높이가 현재 항만에서 주로 사용되고 있는 50ton급 컨테이너 크레인의 경우 계류 시(붐(Boom)을 올렸을 경우) 최대 100m에 달하게 되므로 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다. 특히 2003년 태풍 '매미' 내습 시에는 부산항의 신감만 및 자성대부두에서 강풍에 의하여 총 11기의 컨테이너 크레인이 파손되어 부산항 기능이 일부 마비됨으로써 막대한 물류 손실이 발생하기도 하였다.

그러므로 위와 같은 바람의 영향을 최소화시키기 위하여 컨테이너 크레인에는 타이다운(Tie-down)과 스토이지 핀(Stowage pin)과 같은 계류장치를 설치하여 강풍으로 인하여 작업이 중지될 경우(휴지 시) 컨테이너 크레인을 지정된 위치에 고정시켜 전도와 이탈을 방지하고 있다.

그러나 이러한 컨테이너 크레인용 계류장치 및 부두의 기초를 설계하기 위해 설정되어 있는 국내 풍하중 기준에서 풍속 설정이 모호하여 적용 시 여러 가지 혼란을 야기 시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 컨테이너 크레인을 포함한 항만장비에 보편적으로 적용되는 '항만시설장비검사기준'과 건축물 및 교량의 내풍설계에 적용되는 '건축물하중기준'에 의거하여 풍하중이

*정회원, lsw1126@korea.com 051)200-6989
**정회원, shimjj@donga.ac.kr 051)200-6989
***정회원, dshan@paran.com 051)200-6989
****정회원, gjhan@dau.ac.kr 051)200-7650
*****정회원, kimth@kit.ac.kr 051)320-1275

컨테이너 크레인에 작용될 때 풍속변화가 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 분석하였다*(해양수산부, 2000), (건설교통부, 2000).*

## 2. 풍하중 산정

본 연구에서 다루고자 하는 풍하중 기준은 해양수산부에서 2000년 고시한 '항만시설장비검사기준'과 건설교통부에서 2000년 제정한 '건축물하중기준'이다. 그런데 '항만시설정비검사기준'의 경우 풍속 기준은 '휴지상태에서 초당 50미터 이상'으로 설정되어 있으나 이것이 평균풍속(10분 평균)을 의미하는지 순간최대풍속(3초 평균)을 의미하는지를 정확히 규명하지 않고 있다. 그러나 특별한 기준이 없을 경우 한국산업표준규격(KS) 및 국제표준화기구(ISO)기준 등을 적용하게 되어 있으므로 본 연구에서는 관련 한국산업표준규격인 '크레인강 구조 부분의 계산 기준(KS A 1627)'을 적용하였다*(한국표준협회, 1994).*

### 2.1 '크레인강 구조 부분의 계산 기준'에 따른 풍하중

식(1)은 '크레인강 구조 부분의 계산 기준'에 따른 풍하중 산출식이다. 이 식에서 휴지 시 속도압은 식(2)로 정의된다.

$$W = c \cdot q \cdot F \tag{1}$$

$$q = 1000\sqrt{h} \tag{2}$$

$W$ : 풍하중 (N)
$c$ : 풍력계수
$q$ : 속도압 (Pa)
$F$ : 수압면적 ($m^2$)

이 기준에서는 풍속을 정의하지 않고 고도에 따른 속도압을 바로 정의하고 있으므로 기준풍속과 거스트 계수 등을 고려하지 않았다.

### 2.2 '건축물하중기준'에 따른 풍하중

식(3)~(5)는 '건축물하중기준'에 따른 풍하중 산출식이다.

$$W = C_f \cdot G_f \cdot q_z \cdot A \tag{3}$$

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2 \tag{4}$$

$$V_z = V_0 \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_\omega \tag{5}$$

$W$ : 설계풍력 (kgf)
$C_f$ : 풍력계수
$G_f$ : 거스트 계수
$q_z$ : 설계속도압 ($kgf/m^2$)

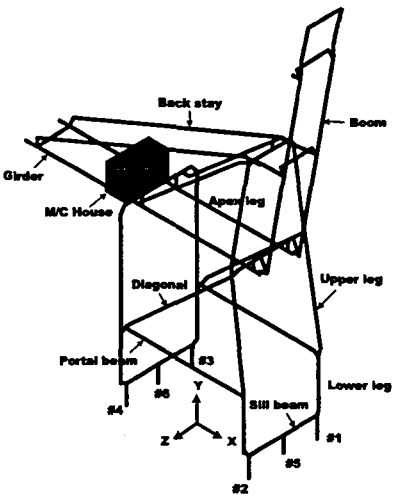


**Fig. 1** Structural skeleton drawing of a container crane

$\rho$ : 공기밀도 (0.125 $kgf \cdot s^2/m^4$)
$V_z$ : 높이 z에서의 설계풍속
$V_0$ : 기본풍속
$K_{zr}$: 풍속의 고도분포계수
$K_{zt}$: 지형에 의한 풍속할증계수
$I_\omega$: 중요도 계수

이 기준에서 기본풍속은 통계년수 20년 이상인 전국 56개 기상관측소의 측정 기록을 바탕으로 설정된 것으로 노풍도가 C인 지역의 지표면으로부터 10m 높이에서 측정한 10분간 평균풍속에 대한 100년 재현기대풍속을 지형을 고려하여 정한 풍속을 의미한다. 부산의 경우 기본풍속은 40m/s로 설정되어 있다.

그러므로 본 연구에서는 '건축물하중기준'의 경우 기본풍속인 40m/s와 이보다 10m/s 더 증가된 50m/s의 풍하중이 컨테이너 크레인에 작용될 경우에 대하여 유한요소해석을 통하여 컨테이너 크레인의 안정성을 분석하였으며, '크레인강 구조 부분의 계산 기준'에 의한 결과와도 비교하였다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 유한요소모델

본 연구의 모델로 사용된 컨테이너 크레인은 권상용량(Lifting capacity)이 50ton이며, 전체 자중이 890ton, 아웃리치(Out reach)가 51m, 레일 스팬(Rail span / 해측과 육측 레그(leg)간의 거리)이 30.5m, 지상에서 붐(Boom) 및 거더(Girder)까지의 높이가 40m, 계류 시 지상에서 붐 끝단까지의 높이가 100m에 달하며 해측(X 방향) 수풍면적이 863$m^2$, 레일측(Z 방향) 수풍면적이 997$m^2$에 달하는 대형 구조물이다*(한진중공업, 2000).*

따라서 본 연구에서는 해석시간을 단축하면서도 해석의 신뢰

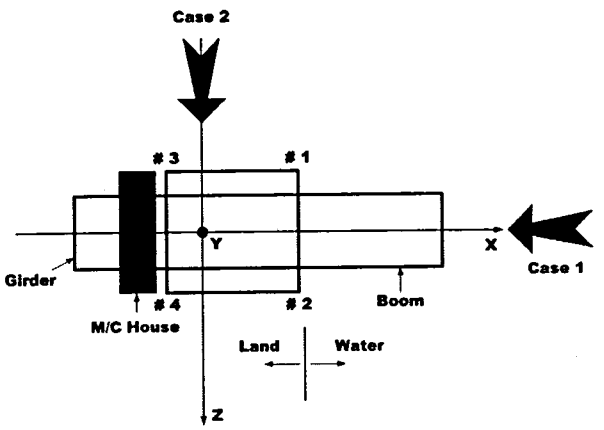


Fig. 2 Boundary conditions of a container crane

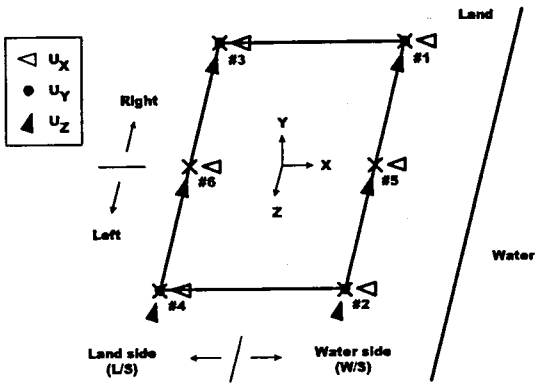


Fig. 3 Boundary conditions of a container crane

성을 높이기 위하여 컨테이너 크레인의 각 부재를 각기 특성에 맞는 요소를 선택하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 이용하여 유한요소모델을 구성하고 해석을 수행하였다. 컨테이너 크레인 상·하부의 레그나 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*(ANSYS Inc. 1992)*. 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. 1은 본 연구에서 사용된 50ton급 컨테이너 크레인의 개략도를 나타내고 있으며 Table 1은 유한요소해석에 사용된 재료의 기계적 물성치이다.

**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 |

3.2 하중 및 경계조건

본 연구에서는 2장에서 제시된 2가지 기준을 적용하여 Fig. 2와 같이 해측에서 육측으로 풍하중이 작용하는 경우인 Case 1과 레일방향으로 작용하는 경우인 Case 2에 대하여 각각 컨테이너 크레인의 구조적 안정성을 분석하였다.

지상에서 컨테이너 크레인 붐 끝단까지의 높이가 100m에 달하므로 고도에 따라 부재가 받게되는 풍하중도 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 각 고도에 해당하는 풍압력을 계산하였으며, 세로로 솟아있는 부재의 경우 약 5m 간격으로 분할하여 해당 고도의 풍압력을 작용하였다.

Fig. 6은 유한요소해석 시 각 지지점에 적용된 경계조건을 나타내는 것으로 Fig. 1의 컨테이너 크레인에서 차륜(Truck)부와 타이 다운으로 이루어진 #1~#4 지지점은 모든 축방향 변위가 고정(ux=uy=uz=0)되었으며, 스토이지 핀으로 구성된 #5, #6 지지점은 핀이 핀 컵에 꽂혀 있으므로 ux, uz 방향만을 고정하였다.

그리고 붐과 거더의 연결부는 핀으로 연결되므로 서로의 연결부는 각각 모델링하여 절점의 ux, uy, uz 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*(이 등, 2005)*.

## 4. 해석결과 및 고찰

4.1 풍하중 분석

Table 2는 평균풍속과 순간최대풍속을 '크레인강 구조 부분의 계산 기준'과 '건축물하중기준'에 따라 정리한 것이다.

**Table 2** Comparison of each design wind speed

| Criterion | | Average wind speed(10min.) | Fastest wind speed(3sec.) | Gust factor |
|---|---|---|---|---|
| Specification for the design of crane structures | | - | 52.02m/s | 1.0 |
| Load Criteria of structures | 40m/s | 40m/s | 55.14m/s | 1.9 |
| | 50m/s | 50m/s | 68.92m/s | 1.9 |

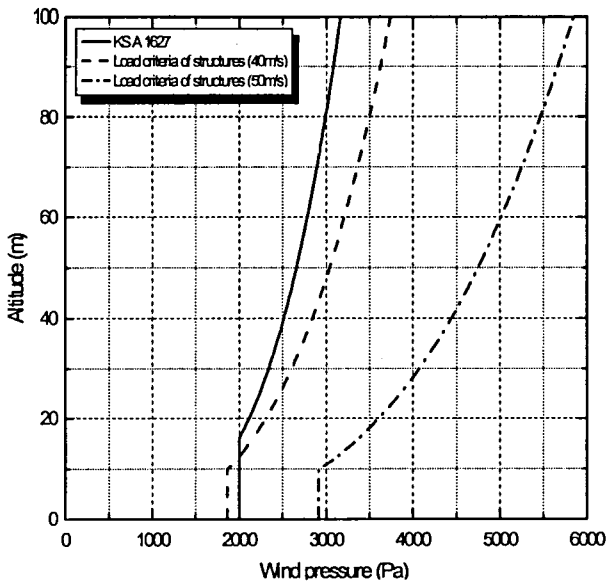


**Fig. 4** Wind pressure distribution with respect to the altitude

'크레인강 구조 부분의 계산 기준'의 경우 거스트 계수를 별도로 정하지 않고 속도압만을 제시하고 있으므로 본 연구에서는 거스트 계수를 1로 설정하여 이에 따른 순간최대풍속을 계산하여 나타내었다.

Table 2에 제시된 바와 같이 '크레인강 구조 부분의 계산 기준'의 경우 순간최대풍속으로 환산 시 약 52m/s의 설계기준풍속을 갖는 것으로 확인되었으며, '건축물하중기준'에서 부산지역의 경우 설계기준풍속이 10분 평균풍속으로 40m/s로 설정되어 있으나 거스트 계수가 노풍도 C일 경우 1.9로 되어 있으므로 순간최대풍속으로 환산 시 약 55m/s의 풍속에 해당하는 것으로 확인할 수 있었다. 그러나 동 기준에서 부산지역의 설계기준풍속을 50m/s로 할 경우에는 순간최대풍속이 69m/s로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다*(김종락, 2003), (하영철, 2003)*.

Fig. 4는 각 기준에 따라 얻어지는 속도압에 거스트 계수를 곱한 풍압력을 고도에 따라 나타낸 것이다.

'크레인강 구조 부분의 계산 기준'의 경우 '건축물하중기준(기준풍속 40m/s)'에 비해 저고도에서의 값은 7% 가량 크게 설정되어 있으나 고도가 12m 이상이 되면 오히려 더 낮게 되어 고도가 50m일 경우에는 '건축물하중기준'에 비해 14% 가량, 100m일 경우에는 18% 가량 낮게 설정되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 동일한 '건축물하중기준'에서도 기준풍속이 40m/s에서 50m/s로 상향되면 전체 풍압력이 56% 가량 크게 상승되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 컨테이너 크레인에 작용하는 풍하중을 산정하기 위해서는 기준풍속을 10분 평균풍속이나 순간최대풍속의 값으로 정의하고, 고도에 따른 풍압력의 분포를 정확하게 규정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

### 4.2 각 지지점의 수직반력 비교

Fig. 5는 각 기준에 의거한 풍하중이 Fig. 2의 Case 1과 같이 해측에서 육측으로(X 방향) 컨테이너 크레인에 작용할 때 각 지지점에서 발생되는 수직방향(Y 방향) 반력을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 6은 Fig.2의 Case 2인 레일방향(Z 방향)으로 작용할 때의 수직반력을 나타내고 있다.

Fig. 5에서 풍하중이 해측에서 육측으로 작용(Case 1)하게 되

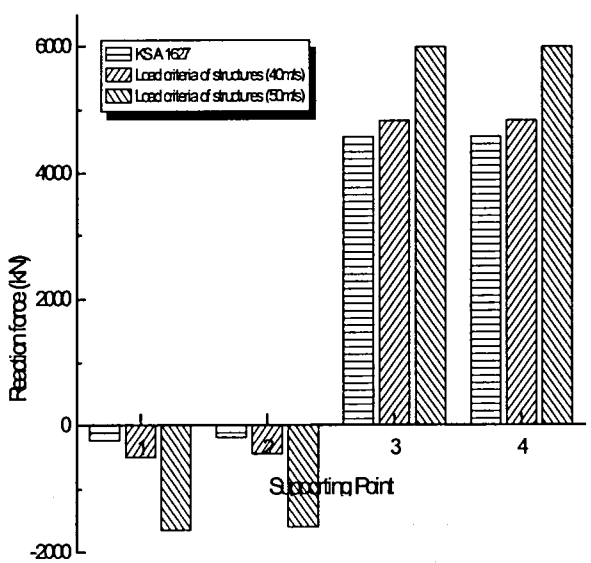


**Fig. 5** X-direction reaction forces of each supporting point with respect to the design criterion of wind force

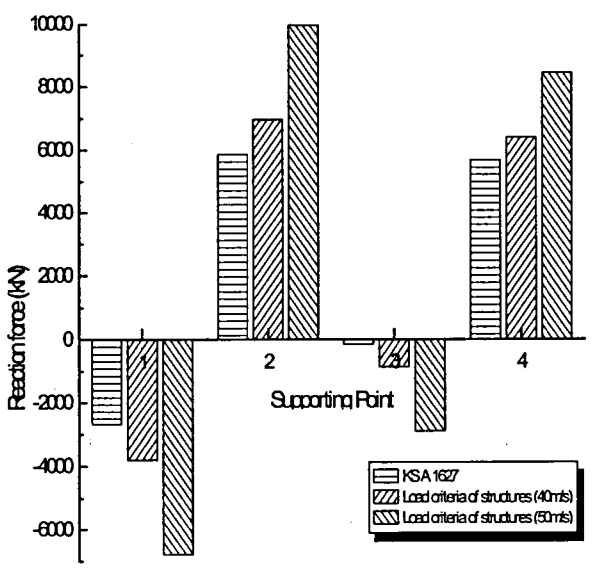


**Fig. 6** Z-direction reaction forces of each supporting point with respect to the design criterion of wind force

면 컨테이너 크레인이 #3, #4 지지점을 기준으로 -X 방향으로 전도되려고 하므로 #1, #2 지지점에서 인장(-)반력이 발생하고 #3, #4 지지점에서는 반대로 압축(+)반력이 발생하게 되었다.

Table 2와 같이 기준에 따른 풍하중을 동일한 조건으로 비교하기 위해 제시된 순간최대풍속을 바탕으로 풍하중에 의한 컨테이너 크레인의 안정성을 분석하면 세 가지 조건 모두에서 동일하게 #1, #2 지지점에서는 인장반력이 #3, #4 지지점에서는 압축반력이 발생하였다. 그리고 #1, #3과 #2, #4 지지점의 반력은 거의 동일하게 발생하였는데 이는 컨테이너 크레인이 X축을 중심으로 좌우대칭형으로 이루어져 있기 때문이다.

그리고 풍속이 증가 할수록 컨테이너 크레인이 전도되려는 성향을 나타내는 지지점의 인장반력은 '크레인강 구조 부분 계산 기준'에 비해 '건축물하중기준'의 기준풍속을 40m/s와 50m/s로 하였을 때 #1 지지점의 경우 111%, 607% 증가하였으며, #2 지지점의 경우에는 141%, 774%로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

그런데 풍하중이 컨테이너 크레인에 레일방향으로 작용(Case 2)하게 되면 #1, #2 지지점이 아닌 #1, #3 지지점에서 Fig. 6과 같이 인장반력이 발생하고 전도점이 되는 #2, #4 지지점에서는 압축반력이 발생하였다.

그리고 풍속이 증가 할수록 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생되는 인장반력은 '크레인강 구조 부분 계산 기준'에 비해 '건축물하중기준'의 기준풍속을 40m/s와 50m/s로 하였을 때 #1 지지점의 경우 41%, 153% 증가하였으며, #3 지지점의 경우에는 518%, 1,975%로 크게 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

이 때, Case 1과 달리 #1과 #3, #2와 #4 지지점의 반력이 서로 다른 이유는 #3, #4 지지점 상부에 위치하고 있는 기계실의 영향과 컨테이너 크레인 자체의 구조적 영향 때문인 것으로 판단된다.

먼저 기계실은 자체 중량이 120ton으로 전체 컨테이너 크레인 자중의 15% 가량을 차지하는 부분인데 기계실이 육측 레그 지지점인 #3, #4 지지점 상부에 위치하기 때문에 컨테이너 크레인의 무게 중심이 육측으로 이동되어 해측 지지점보다 육측 지지점에 컨테이너 크레인의 자중에 의한 반력이 더 크게 작용한다. 이러한 사항을 분석하기 위해 하중을 작용시키지 않고 자중만을 작용할 때 각 지지점에서 발생되는 반력을 분석한 결과 해측 레그 지지점인 #1, #2 지지점에 비해 육측 레그 지지점인 #3, #4 지지점에서 압축반력이 71~77% 가량 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 압축반력이 풍하중에 의한 인장반력을 일정부분 상쇄하여 #3 지지점에서 컨테이너 크레인의 전도성향을 나타내는 인장반력이 작게 발생되는 것으로 판단할 수 있다.

그리고 컨테이너 크레인 자체의 구조적 영향은 붐의 영향이 큰 것으로 판단된다. 붐은 길이가 51m에 달하는 긴 부재로써 계류 시 컨테이너 크레인은 붐을 세워두기 때문에 최대 고도가 100m에 달하게 되므로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 고도에 따라 작용되는 풍하중이 증가하게 된다. 이로 인하여 붐이 장착되는 해측의 #1 지지점에서 인장반력이 #3 지지점에 비해 크게 발생되는 것으로 판단된다.

그리고 Fig. 6에서 기준풍속이 50m/s(순간최대 68.92m/s)인 경우 #2 지지점에서의 압축반력은 9,975kN, #4 지지점에서는 8,436kN이 발생하게 된다. 이는 '컨테이너강 구조 부분 계산 기준(순간최대 52.02m/s)'보다 각각 70%, 49% 가량 증가된 것으로 컨테이너 크레인의 전체 자중이 8,720kN인 점을 감안한다면 전체 자중보다 더 크거나 유사한 하중이 해당하는 지지점이 위치한 지반에 작용한다는 것을 의미한다. 따라서 컨테이너 크레인의 설계기준풍속 설정 시에는 구조적 안정성 외에도 지반의 안정성도 고려하여야 하므로 풍하중이 작용할 때 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생하는 최대 반력도 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

컨테이너 크레인의 계류 시 풍하중에 의한 영향을 분석하기 위해 '항만시설장비검사기준(크레인강 구조 부분의 계산 기준/KS A 1627)'과 '건축물하중기준'의 풍하중 평가 방법을 이용하여 풍하중을 산정하고 풍속에 따른 컨테이너 크레인의 구조적 안정성을 유한요소해석을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) '크레인강 구조 부분의 계산 기준'에 제시된 풍압력과 '건축물하중기준'에 따른 기준풍속을 40m/s, 50m/s로 할 때, 이를 동일한 조건으로 변경하기 위해 순간최대풍속으로 환산하면 각각 52.02m/s, 55.14m/s, 68.92m/s가 되었다.
2) '크레인강 구조 부분의 계산 기준'의 경우 고도에 따른 풍압력이 '건축물하중기준(기준풍속 40m/s)'에 비해 저고도의 값은 7% 가량 크게 설정되어 있으나 고도가 12m 이상이 되면 반대로 증가하여 고도가 50m일 경우 14%, 100m일 경우 18% 가량 낮게 설정되어 있다.
3) '건축물하중기준'에서 기준풍속이 40m/s에서 50m/s로 상향되면 전체 풍압력은 56% 가량 크게 상승되었다.
4) 풍하중이 해측에서 육측으로 작용(Case 1)되면 컨테이너 크레인의 #1, #2 지지점에서는 인장(-)반력이, #3, #4 지지점에서는 압축(+)반력이 X축을 중심으로 양 지지점에서 거의 동일하게 발생하였다.
5) Case 1의 경우 인장반력은 '크레인강 구조 부분 계산 기준'에 비해 '건축물하중기준'의 기준풍속을 40m/s와 50m/s로 하였을 때 #1 지지점의 경우 111%, 607% 증가하였으며, #2 지지점의 경우에는 141%, 774%로 크게 증가하였다.
6) 풍하중이 컨테이너 크레인에 레일방향으로 작용(Case 2)하게 되면 #1, #3 지지점에서 인장반력이 발생하고 전도점이 되는 #2, #4 지지점에서는 압축반력이 발생하였다.

7) Case 2의 경우 인장반력은 '크레인강 구조 부분 계산 기준'에 비해 '건축물하중기준'의 기준풍속을 40m/s와 50m/s로 하였을 때 #1 지지점의 경우 41%, 153% 증가하였으며, #3 지지점의 경우에는 518%, 1,975%로 크게 증가하였다.
8) Case 1과 달리 #1과 #3, #2와 #4 지지점의 반력이 서로 다른 이유는 #3, #4 지지점 상부에 위치하고 있는 기계실과 컨테이너 크레인 자체의 구조적 영향 때문이다.
9) 컨테이너 크레인의 설계기준풍속 설정 시에는 구조적 안정성 외에도 지반의 안정성도 고려하여야 하므로 풍하중이 작용할 때 컨테이너 크레인의 각 지지점에서 발생하는 최대 반력도 고려하여야 한다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

[1] 해양수산부(2000), 항만시설장비검사기준.
[2] 건설교통부(2000), 건축물하중기준.
[3] 한국표준협회(1994), 크레인강 구조 부분의 계산 기준(KS A 1627).
[4] 한진중공업(2000), 부산항 감만부두 확장구역 50톤 컨테이너 크레인 구조 및 기계부문 계산서.
[5] ANSYS Inc.(1992), ANSYS User's Manual.
[6] 이성욱, 심재준, 한동섭, 박종서, 한근조, 이권순, 김태형(2005), 풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향 분석, 한국정밀공학회지, 제22권, 제2호, pp.148-155.
[7] 김종락(2003), 풍하중 기준의 정비, 한국풍공학회지, 제7권, 제1호, pp.2-12.
[8] 하영철(2003), 한국의 설계풍속과 구조골조용 풍하중, 한국풍공학회지, 제7권, 제1호, pp.13-25.