

컨테이너 크레인의 전산유동해석과 풍동실험에 의한 풍하중 분석

이수홍* · 한동섭** · 한근조†

* 동아대학교 대학원, **동아대학교 BK21 총괄사업단, † 동아대학교 기계공학부 교수

Wind Load Analysis owing to the Computation Fluid Dynamics and Wind Tunnel Test of a Container Crane

Su-Hong Lee* · Dong-Seop Han** · Geun-Jo Han†

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

** BK21 Project, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

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

요약 : 컨테이너 크레인은 강풍으로부터 보호를 받기 위한 차폐물이 없는 곳에 존재하기 때문에 이상 기후 조건에 취약성이 있는 구조물이다. 본 연구에서는 붐 각도의 변화에 따라 풍동실험과 전산유동 해석을 사용하여 컨테이너 크레인의 구조물에 대한 풍하중의 영향을 수행하였다. 그리고 75m/s의 풍속을 컨테이너 크레인에 적용하였다고 가정하였을 때 컨테이너 크레인의 풍력 내구성 설계에 사용되는 데이터를 컨테이너 크레인 설계자에게 제공하고자 한다. 본 연구에서는 건축물 하중기준의 풍하중 설계기준에 따라 풍하중을 적용하였으며 풍향에 따른 영향을 분석하기 위해서 유동장을 10° 간격으로 분할하였다. 이를 바탕으로 풍동실험과 전산 유동해석을 수행하였으며 얻어진 결과들을 비교 연구함으로써 컨테이너 크레인의 구조설계에 필요한 풍하중을 분석하였다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 전산유동해석, 풍압력, 풍하중, 풍동실험

Abstract : Container cranes are vulnerable structure to difficult weather conditions because there is no shielding facility to protect them from strong wind. This study was carried out to analyze the effect of wind load on the structure of a container crane according to the change of the boom shape using wind tunnel test and computation fluid dynamics. And we provide a container crane designer with data which can be used in a wind resistance design of a container crane assuming that a wind load 75m/s wind velocity is applied in a container crane. In this study, we applied mean wind load conformed to 'Design Criteria of Wind Load' in 'Load Criteria of Building Structures' and an external fluid field was divided as interval of 10 degrees to analyze the effect according to a wind direction. In this conditions, we carried out the wind tunnel test and the computation fluid dynamic analysis and then we analyzed the wind load which was needed to design the container crane.

Key words : Container Crane, Computation Fluid Dynamics, Wind Pressure, Wind Load, Wind Tunnel Test

1. 서론

컨테이너 크레인은 컨테이너를 선박에 양·적하하는 항만 장비로서, 일반적으로 차폐물이 거의 없는 항만에 설치, 운용되고 있다. 현재 항만에서 사용되고 있는 61ton급 컨테이너 크레인의 경우 높이가 계류 시 최대 115m에 달하며 자중이 1177.5ton 에 이르는 거대 구조물로서 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다. 특히, 2003년 태풍 '매미' 내습 시에는 부산항의 신감만 및 자성대 부두에서 초속 50m에 달하는 강풍에 의하여 총 11기의 컨테이너 크레인이 파손됨으로서 부산항 기능이 마비되어 막대한 물류 손실이 발생하였다.

따라서 이와 같은 풍하중의 영향을 최소화시키기 위하여 컨테이너 크레인에는 계류장치를 설치하여 컨테이너 크레인의

전도와 이탈을 방지하고 있는데 이러한 계류장치 설계를 위해서는 무엇보다도 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 정확하게 산정하는 것이 중요하다.

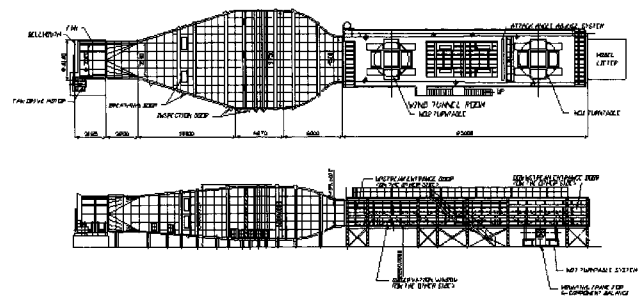


Fig. 1 Boundary layer wind tunnel

* 대표저자 : 이수홍(정회원), blackzone82@nate.com 011)9315-5388

** 정회원, dshan@dau.ac.kr 051)200-6989

† 교신저자 : 한근조(중신회원), gjhan@dau.ac.kr 051)200-6989

따라서 본 연구에서는 건축물 및 교량의 내풍 설계에 적용되는 건축물 하중기준에 의거하여 75m/s의 풍속을 풍동실험과 전산유동해석에 동일하게 적용하여 풍하중을 비교하여 신뢰성을 점검하였다.

2. 풍동실험

본 연구에서 사용된 풍동은 현대건설기술연구소의 대형 경계층풍동(Boundary layer wind tunnel)으로 전체 길이 53m, 측정부의 크기는 폭 4.5m, 높이 2.5m, 길이 25m의 개방형 풍동으로 Fig. 1에 나타나 있다.

풍동내의 기류특성으로는 일반적으로 컨테이너 크레인이 해안에 설치되므로 '도로교설계기준'에서 제시한 노풍도 I과 '건축물 하중기준'에서 제시된 노풍도 D에 해당하도록 풍동 내부의 경계층을 구성하였다.

풍력의 측정조건으로는 각 모델을 풍동 측정부의 폐쇄효과(blockage effect)를 고려하여 모형 스케일(scale)은 1/200로 축소 제작하였으며, 공진현상을 최소화시키기 위하여 난관 및 스테이 일부를 제외한 대부분의 구조물을 발사나무(balsa wood)로 제작함으로써 가볍고 강성이 큰 모형이 되도록 하였다. 풍속 스케일은 1/13.3, 설계풍속은 75m/s, 풍동풍속은 5.6m/s, 시간 스케일은 1/15, 측정시간은 40초로 실제시간을 600초로 두었고 샘플링 주파수(sampling frequency)는 120Hz, 계측횟수는 10회, 풍속의 범위는 0.3 ~ 17.5m/s, 난류강도는 0.7%이하로 설정하여 풍동실험을 수행하였다.

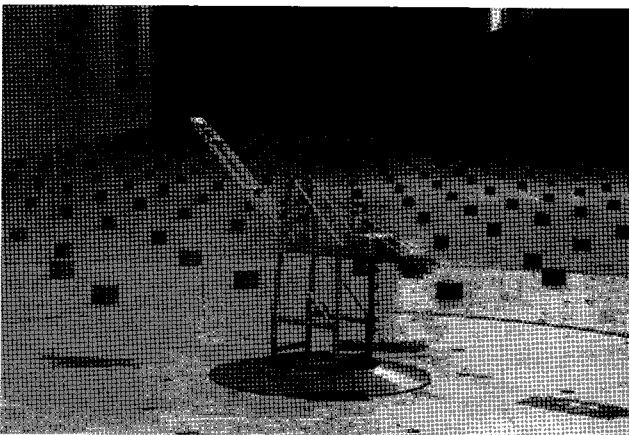


Fig. 2 Model of Container Crane for wind tunnel test

풍향에 따른 영향을 분석하기 위하여 풍력실험을 통해 얻어진 풍향계수를 추가로 고려하였으며, 이를 통하여 풍압력인 q_z 를 산출함으로써 컨테이너 크레인의 풍압력을 제시하고자 한다(건설교통부, 2000).

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

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

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

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_{zr} : 풍속고도분포계수

K_{zt} : 풍속할증계수

I_w : 중요도 계수

ρ : 공기밀도

식 (1)에서 거스트계수 G_f 는 항만설계기준에는 제시되어 있지 않으며, 풍압산정시 정상시와 폭풍시에 대해서만 구분을 하고 있으므로 풍력계수를 이용한 풍하중 산정시에 사용되는 거스트계수는 1.0으로 간주하였다. 또한, 풍압력 q_z 에서 공기밀도 ρ 는 0.125 kgf · s²/m⁴로 하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 크레인 모델의 축소모형을 나타내고 있다.

3. 전산유동해석

3.1 크레인 구조와 모델링

Fig. 3은 본 연구의 모델로 사용된 컨테이너 크레인으로 컨 상용량이 61ton이며, 전체 자중이 1177.5ton, 아웃리치(Out reach)가 63m, 백리치(Back reach)가 최소 20m 이상, 포탈 빔 하부통과 높이가 16.3m, 레일 스패ن(Rail span, 해측과 육측 레그간의 거리)이 30.5m, 지상에서 붐(Boom) 및 거더(Girder)까지의 높이가 46m, 계류시 지상에서 붐 끝단까지의 높이가 약 120m에 달하며 기계적 처리능력이 시간당 40 ~ 45개에 해당하는 대형 구조물이다. (한진중공업, 2004)

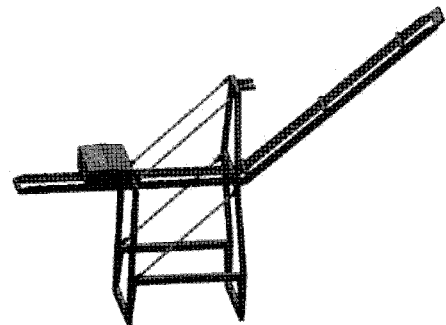


Fig. 3 Structure modeling of a container crane

Fig. 3은 이 구조물을 기초로 하여 모델링을 한 것으로 가능한 한 실제 컨테이너 크레인과 유사하게 모델링하였으며 붐 각도가 45°일 때의 풍하중을 분석하기 위하여 붐 위치를 변경하였다. 요소망 생성을 고려하였을 때 하중에 크게 영향을 주지 않고 바람에 대하여 전체적인 컨테이너 크레인에 비해 매우 적은 영향을 미칠 것으로 고려되는 미세한 구조물인 케이블 릴(Cable reel)과 인너/아웃터 포 스테이(Inner/Outer fore stay), 백 스테이(Back stay), 엘리베이터(elevator)등을 생략하였다.

3.2 전산유동해석

본 연구에서는 고도에 따라 75m/s의 풍속이 작용할 때를 고려하여 컨테이너 크레인의 각 부재에 대해서 가장 충분한 영향을 적용시킬 수 있도록 유동장을 원통형으로 모델링하였다.

Fig. 4은 원통의 지름과 높이가 500m × 200m으로 모델링된 유동장으로서 본 연구에 사용된 모델이다.

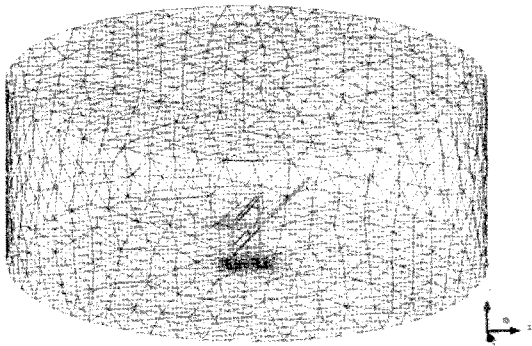


Fig. 4 Fluid state around the container crane

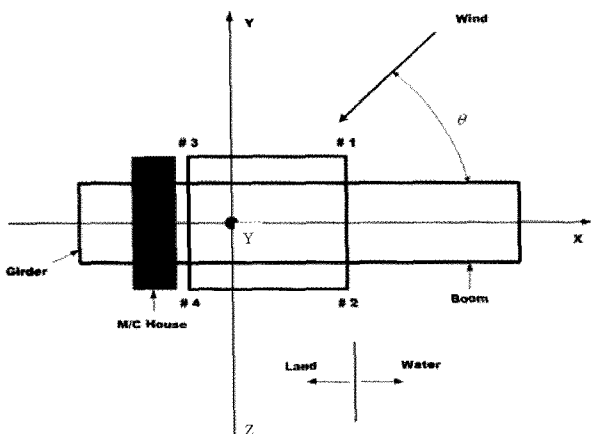


Fig. 5 Definition of an incidence angle of a wind load

주변 유동장을 컨테이너 크레인에 대비하여 경계면 간섭으로 인해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있도록 크기를 설정함으로써 컨테이너 크레인의 부재의 정확도를 향상시키도록 노력하였다.

Fig. 5는 풍하중의 방향을 나타내고 있으며, θ 는 육측을 기

준으로 0 ~ 180° 까지 변화하는 풍향을 나타내고 있다.

이에 따른 해석의 경계조건으로는 난류모델로서 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 바닥과 크레인의 표면은 슬립이 발생하지 않도록 노슬립(no-slip)조건을 부여하였으며, 윗면은 개방(Opening)조건을 사용하여 유동장 내부와 외부와의 조건이 동일하도록 하였다.

또한 원통의 외부 벽면 극도를 컨테이너 크레인을 기준으로 회전될 수 있도록 적용하였으며, 풍향변화에 따른 유동해석 격자망이 동일하게 됨으로써 격자의 형상 및 수의 차이로 인한 오차를 줄일 수 있으므로 결과의 신뢰성을 향상시켰다.

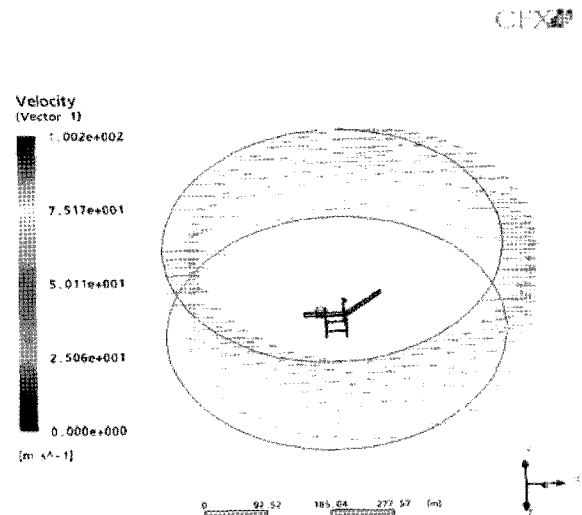


Fig. 6 The boundary condition applied to a computation fluid dynamics of a container crane

4. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 붐 각도가 45°인 컨테이너 크레인의 풍향에 따른 풍압분포를 통하여 풍하중을 산출할 수 있었다.

Fig. 6은 전산유동해석에서 컨테이너 크레인에 바람의 영향을 적용시키는 속도벡터를 나타낸 것으로서 컨테이너 크레인에 직접적으로 힘을 가하는 것이 아니라 외부의 유동장을 통하여 분포적인 힘을 가하는 것이다. 즉, 일정한 속도값이 유동장의 중심을 원점으로 방향만 달라지는 것이다.

Table. 1과 Table. 2는 풍동실험과 전산유동해석의 결과인 풍하중을 나타낸 것이다. 이 값들을 이용하여 그래프로 나타낸 것이 Fig. 7과 Fig. 8이다.

Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 풍하중이 컨테이너 크레인의 붐 정면으로 작용되는 0°에서는 음(-)의 값을 보이거나 점차 증가하여 컨테이너 크레인의 측면인 레일방향 +Z방향으로 작용하는 90°에서 0의 값을 가지며, 후방에서 풍하중이 입사되는 180°에서는 양(+)의 값을 가지게 된다. 그리고 X방향 풍하중의 경우 이론상으로는 바람을 맞는 면적이 가장 큰 정면과 후면인 0°와 180°에서 최대값을 나타내어야 하나 실험 및 해석결과 20°부근과 160°부근에서 최대값을 나타내었다.

또한 풍동실험과 전산유동해석을 비교하여 본 결과 전체적인 경향은 근사한 형태를 나타내고 있지만 최대 지점인 20°에서 풍동실험과 전산유동해석의 값이 각각 306ton, 273ton으로 약 33ton의 차이가 발생하였다.

Table 1 Wind load of the computational fluid dynamics

구분	X-방향[ton]	Z-방향[ton]
0°	-233	1
30°	-275	177
60°	-165	341
90°	13	308
120°	170	358
150°	259	213
180°	226	2

Table 2 Wind load of the wind tunnel test

구분	X-방향[ton]	Z-방향[ton]
0°	-275	-43
30°	-297	224
60°	-160	489
90°	6	491
120°	168	529
150°	288	264
180°	279	-19

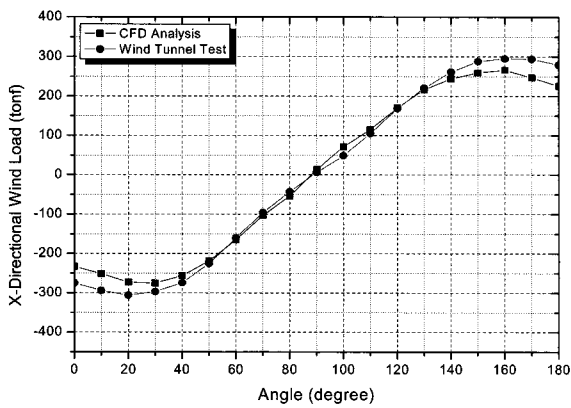


Fig. 7 X-directional wind load of container crane

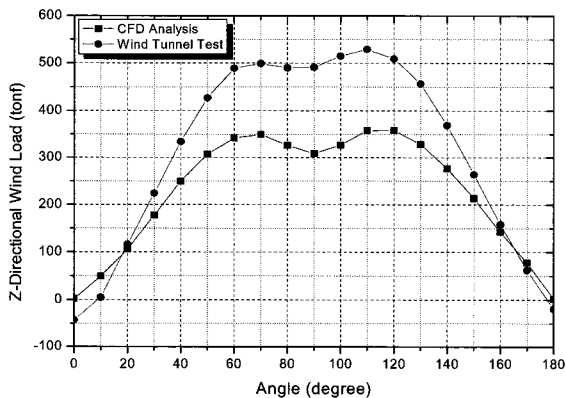


Fig. 8 Z-directional wind load of container crane

Fig. 8에서는 컨테이너 크레인이 전도되려고 하는 X방향의 전도력에 영향을 미치는 Z방향의 풍하중을 그래프로 나타낸 것으로 풍향계수에 따른 속도를 벡터값으로 입력을 하였기 때문에 실제 컨테이너 크레인의 돐 정면과 후면으로 작용되는 0°와 180°에서는 0과 근사한 값을 가진다. Z방향의 풍하중의 경우 이론상으로는 바람을 맞는 면적이 가장 큰 90°에서 최대값을 나타내어야 하지만 실험 및 해석결과 70°와 110°부근에서 최대값을 나타내었다.

또한 풍동실험과 전산유동해석을 비교하여 본 결과 전체적인 경향은 근사한 형태를 나타내고 있지만 최대 지점인 110°에서 풍동실험과 전산유동해석의 값이 각각 528ton, 358ton으로 약 32%의 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 풍동실험에서 컨테이너 크레인의 돐의 박리점 뒤에서 발생하는 난류의 영향이 큰 것으로 생각된다. 이 오차의 원인에 대해서 현재 연구를 진행 중이며, 추후에 이에 대한 논문을 발표할 예정이다.

최대값이 예상했던 지점과 약 10° ~ 20° 차이가 발생하는 현상은 동일한 부재가 유동방향으로 나란하게 놓여 있을 경우 앞에 있는 부재의 영향으로 뒤에 있는 부재는 차폐효과가 발생하여 앞의 부재에 비해 낮은 압력을 가지게 됨으로서 발생한 것이라 생각되어진다.

전체적으로 풍력실험과 전산유동해석은 비슷한 경향의 결과를 얻어낼 수 있었지만 약간의 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

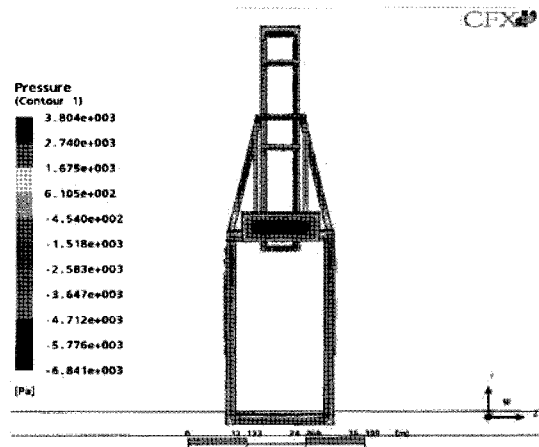


Fig. 9 Wind pressure distribution in 0-degree

이러한 오차가 발생하는 것에 대하여 몇 가지 원인을 분석하여 보았다. 첫째, 실험 모델과 전산유동해석 모델의 외형적 형상의 차이인 것으로 생각된다. 전산유동해석 모델은 실험 모델과 비교하여 미세한 부분을 간략화했기 때문에 발생했을 가능성이 있다. 두 번째로 전산유동해석에서 바람의 입력에 대한 영향을 주게 되는 유동장과 크레인 사이의 격자망에서 나타나는 오차에 의한 것으로 볼 수 있다. 풍동 실험의 경우 실제 바람을 통해 나타나는 값이지만 전산유동해석의 경우 바람에 대한 경로를 임의로 설정하여 주며 유동장과 크레인 사이의 격자망

의 크기가 큰 영향을 미친다. 따라서, 이러한 격자망에 대한 오차가 발생할 것이라 판단된다. 세 번째로 조건에 따른 영향이 있을 것이라 생각된다. 풍동실험의 경우 바람의 방향을 고정시키고 축소시킨 모형을 회전시키면서 풍동실험을 하지만 전산유동해석의 경우는 컨테이너 크레인 모델을 고정시켜 놓고 유동장에서 입사각을 변화시키기 때문에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 마지막으로, 실제적인 실험과 시뮬레이션 사이에서 발생할 수밖에 없는 결과의 차이이다. 실제적 실험인 풍력실험의 경우 바람에 의하여 발생되어지는 풍압력만이 나타나는 것이 아니라 진동 등의 다른 요인들도 고려될 수 있다. 이에 반해 시뮬레이션인 전산유동해석의 경우 다른 영향들은 무시한 채 오직 풍하중에 의한 압력의 결과만을 나타나기 때문에 이러한 차이가 나타난 것이라 판단된다.

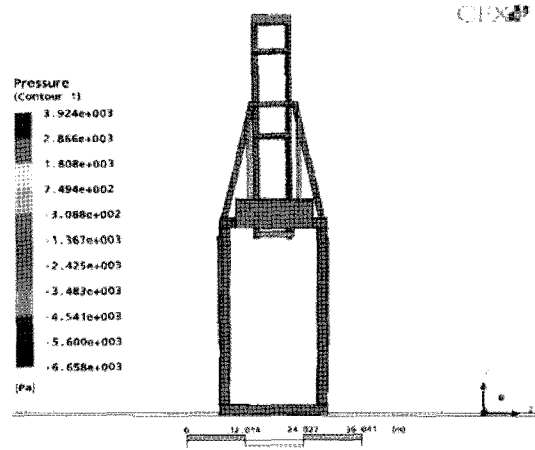


Fig. 12 Wind pressure distribution in 180-degree

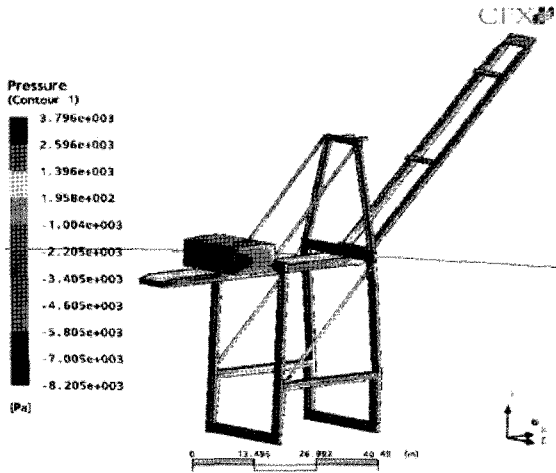


Fig. 10 Wind pressure distribution in 60-degree

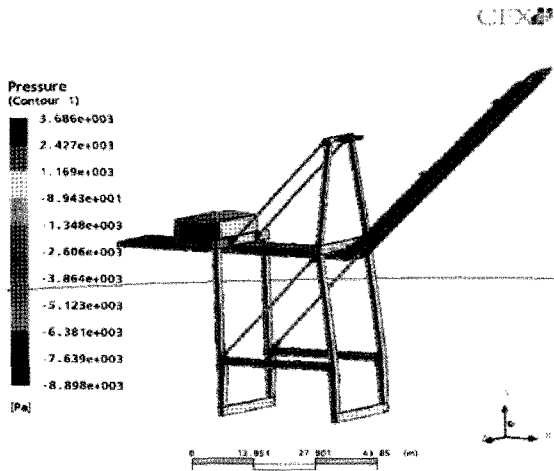


Fig. 11 Wind pressure distribution in 120-degree

Fig. 9 ~ Fig. 12는 입사각도에 따라서 컨테이너 크레인의 주요 풍압력 분포를 나타내고 있다. 입사각별 최대 압력 차이는 거의 없으며, 컨테이너 크레인의 최대 풍압력은 풍향에 수직인 방향에서 최대 압력이 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 사용된 컨테이너 크레인은 권상용량 61ton급으로 현재 항만에서 사용하고 있는 모델이다. 크레인의 경우 붐이 항상 똑같은 위치를 유지하고 있는 것이 아니기 때문에 붐의 위치를 바꾸었을 때의 바람의 영향을 알아보고자 하였으며 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 풍동실험과 전산유동해석을 수행하였고, 두 가지 방법을 비교 분석하였다. 실제 컨테이너 크레인을 가지고 실험을 하기에는 무리가 있기 때문에 시뮬레이션을 통한 구조 안정성을 알아보기 위한 전 단계로서 그에 맞는 조건들의 신뢰성을 추구하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 향후 본 연구를 발전시켜 풍압력을 구조 해석 분야에 적용함으로써 컨테이너 크레인의 구조 안정성 평가에 기여를 할 수 있으리라 기대되어 진다.

후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 건설교통부(2000), 건축물하중기준
- [2] 김경환, 이영진, 이진우, 이권순(2000), “고효율 갠트리 크레인 설계 및 성능 분석”, 한국항만학회지, 제14권, pp. 395-406.
- [3] 양창호, 김창곤, 최종희, 최상희, 최용석, 이주호(2002), “초대형 컨테이너선 운항에 대비한 차세대 항만 하역시스템 기술개발 전략 연구”, 한국해양수산개발원.
- [4] 이성욱, 심재준, 한동섭, 박종서, 한근조, 이권순, 김태형(2005), “풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향 분석”, 한국정밀공학회지 제 22권 제 2호, pp. 148-155.
- [5] 이수홍, 이성욱, 한동섭, 김태형, 한근조(2008), “61ton 컨테이너 크레인의 전산유동해석을 통한 풍하중 분석”, 한국항

해항만학회지 제 32권 제 3호, pp. 251-255.

[6] 한진중공업(2004), 광양항 61ton 컨테이너 크레인 구조 및 기계부문 계산서.

원고접수일 : 2008년 7월 28일

심사완료일 : 2009년 3월 19일

원고채택일 : 2009년 4월 1일