

# 61ton 컨테이너 크레인의 전산유동해석을 통한 풍하중 분석

† 이수홍 · 이성욱\* · 한동섭\*\* · 김태형\*\*\* · 한근조\*\*\*\*

†, \* 동아대학교 대학원, \*\*동아대학교 BK21총괄사업단, \*\*\*경남정보대학 자동차산업계열, \*\*\*\*동아대학교 기계공학과

## Wind Load Analysis of 61ton-class Container Crane using the Computation Fluid Dynamics

† Su-Hong Lee · Seong-Wook Lee\* · Dong-Seop Han\*\* · Tae-Hyung Kim\*\*\* · Geun-Jo Han\*\*\*\*

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

\*\*institute of BK21, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*Subdivision of Mechanical & Automotive Industry Kyungnam college of Information & Technology, Busan 617-701, Korea

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

**요 약** : 컨테이너 크레인은 강풍으로부터 보호를 받기 위한 차폐물이 없는 곳에 존재하기 때문에 이상 기후 조건에 취약성이 있는 구조물이다. 본 연구에서는 풍향변화에 따라 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 분석하기 위하여 수행되었다. 사용된 모델은 61톤 급 컨테이너 크레인인 것으로 현재 항만시설에 많이 사용되는 모델이다. 유동장은 원통으로 모델링하였으며, 직경 500m, 높이 200m로 설정하였다. 본 연구에서는 건축물 하중기준의 풍하중 설계기준에 따라 풍하중을 적용하였으며 풍향에 따른 영향을 분석하기 위해서 유동장을 10°간격으로 분할하였다. 이를 바탕으로 CFX-10을 사용하여 전산유동해석을 수행하고 이를 통하여 얻어진 결과와 풍력실험 결과를 비교 연구함으로써, 컨테이너 크레인의 구조설계에 필요한 풍하중을 분석하였다.

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

**Abstract** : Container cranes are vulnerable structure about difficult weather conditions because there is no shielding facility to protect them from the strong wind. This study was carried out to analyze the wind load which have an effect on container crane according to the various wind direction. The container crane is a model of a 61-ton class that used broadly in the current ports. The external fluid field was figured as a cylinder which was set up 500m × 200m. 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 effect according to a wind direction. In this conditions, we carried out the computation fluid dynamic analysis using the CFX-10. As we compared computation fluid dynamic analysis with wind tunnel test, 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. 서 론

세계 경제 흐름의 추세로 세계 컨테이너 물동량은 약 4억 TEU로서 연평균 11.5%내외의 증가율이 지속되고 있으며, 우리나라의 경우에 부산항만공사의 부산항 컨테이너 물량 추이에 의하면 2007년도 부산항에서 처리한 컨테이너 물량은 약 1천3백만TEU(잠정치, 1TEU는 20피트 컨테이너 1개)로 전년도 같은 기간의 1천2백만TEU보다 약 8.3% 증가한 것을 알 수 있다.

이에 따라 증가된 물동량을 처리하기 위하여 컨테이너선의 증가와 더불어 규모 또한 커지게 되었다. 국내에서는 「5세대」(2000~2005년)가 되면서 최대 선형은 8,600TEU까지 커

지는 한편, 국내외의 조선소는 컨테이너선의 대형화에 더욱 박차를 가해 현재 1만 2천 TEU급의 초대형 컨테이너 선박이 취항하고 있다.

따라서 각 나라에서는 자국의 항만이 물류 중심항만으로 성장하기 위해 항만하역장비 분야 중 컨테이너를 하역하는 장비인 컨테이너 크레인에 대한 관심이 점점 커지고 있는 실정이다.

컨테이너 크레인은 일반적으로 차폐물이 거의 없는 항만에 설치되고 있으며 이에 따라 급변하는 기상환경의 변화에 따라 컨테이너 크레인의 안정성에 대한 관심이 높아지고 있다. 컨테이너 크레인과 같은 대형 구조물은 태풍 등에 의한 강한 바람에 매우 큰 영향을 받기 때문에 크레인의 설계 시 풍하중을

† 교신저자 : 이수홍(정회원), blackzone82@naver.com 011)9315-5388

\* 정회원, lsw1126@hyosung.com 055)268-9293

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

\*\*\* 정회원, kimth9814@kit.ac.kr 051)320-1377

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

다른 어떠한 하중조건보다 중요한 요인으로 고려한다. 실제로 2003년 태풍 ‘매미’ 내습 시에는 부산항의 신감만 및 자성대 부두에서 초속 50m에 달하는 강풍에 의하여 총 11기의 컨테이너 크레인이 파손되어 부산항 기능을 마비시켰다. 따라서 풍하중 산출을 위한 풍동실험은 필수적이며, 이를 기반으로 구조물의 풍하중에 관한 안정성과 구조요소들의 허용 강도를 검증하여야 한다.

본 연구에서는 건축물 및 교량의 내풍 설계에 적용되는 건축물 하중기준에 의거하여 75m/s의 풍속을 풍력실험과 전산유동해석에 동일하게 적용시킴으로서 산출되어지는 풍하중을 비교하여 신뢰성을 점검하였다.

향후 이 결과를 토대로 하여 발생되어지는 컨테이너 크레인의 지지점에서의 반력을 구하여 전도에 대한 구조적 안정성을 분석하고자 한다.

## 2. 전산유동해석

### 2.1 풍력실험

본 연구에서 적용되어지는 풍하중의 산출식은 식(1)과 같이 건설교통부 제정 ‘도로교설계기준’에 의해 산출하였으며, 적용되어지는 풍속은 태풍 “매미”의 영향으로 현재 컨테이너 크레인의 발주 시 설계풍속을 순간최대풍속 75m/s로 하고 있으므로 이와 동일하게 하였다.

풍력실험에서 사용된 풍동은 현대건설기술연구소의 대형 대기경계층풍동으로 전체 길이 53m, 축정부의 크기는 폭 4.5m,

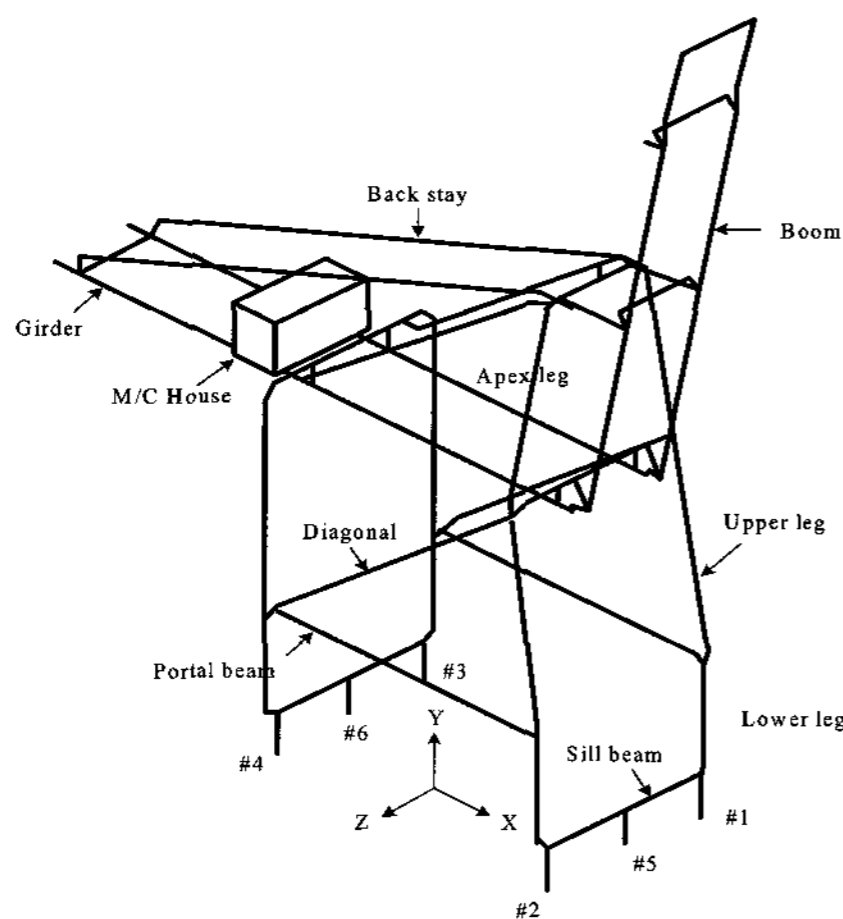


Fig. 1 Structure skeleton drawing of a container crane

높이 2.5m, 길이 25m의 개방형이며, 풍속범위는 0.3~17.5m/s, 난류강도는 0.7%이하이다. 그리고 측정조건으로는 모형 Scale을 1/200로 하였으며, 풍속 Scale은 1/13.3으로서 설계풍속은 75m/s, 풍동풍속은 5.6m/s로 설정하였고, 시간 스케일은 1/15로서 실제시간은 600초, 풍동시간은 40초로 설정하였다. 또한 샘플링 주파수는 120Hz, 계측횟수는 10회, 총 Data 수는 48,000개/ch 이다.

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 ( $\text{kgf}/\text{m}^2$ )

$A$  : 수압면적

$v_z$  : 설계풍속

$v_0$  : 기본풍속

$K_{zr}$  : 풍속고도분포계수

$K_{zt}$  : 풍속할증계수

$I_w$  : 중요도 계수

식 (1)에서 거스트계수  $G_f$ 는 항만설계기준에는 제시되어 있지 않으며, 풍압산정시 평상시와 폭풍시에 대해서만 구분을 하고 있으므로 풍력계수를 이용한 풍하중 산정시에 사용되는 거스트계수는 1.0으로 간주하였다. 또한, 풍압력  $q_z$ 에서  $\rho$ 는 공기밀도이므로  $0.125 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 로 하였다.

### 2.2 크레인 구조와 모델링

Fig. 1은 본 연구의 모델로 사용된 컨테이너 크레인으로 권상용량이 61ton이며, 전체 자중이 1177.5ton, 아웃리치(Out reach)가 63m, 백리치(Back reach)가 최소 20m 이상, 포탈 빔 하부통과 높이가 16.3m, 레일 스패н(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. 2는 이 구조물을 기초로 하여 모델링을 한 것으로 가능한 한 실제 컨테이너 크레인과 유사하게 모델링하였으나 요소망 생성을 고려하여 하중에 크게 영향을 주지 않으며 바람에 대하여 전체적인 컨테이너 크레인에 비해 매우 적은 영향을 미칠 것으로 고려되는 미세한 구조물인 케이블 릴(Cable reel)와 인너/아웃터 포 스테이(Inner/Outer fore stay), 백 스테이(Back stay), 엘리베이터(elevator)를 생략하였다.



Fig. 2 Structure modeling of a container crane

### 2.3 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. 3은 원통의 지름이 500m×200m으로 모델링된 유동장으로서 본 연구에 사용된 모델이다.

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

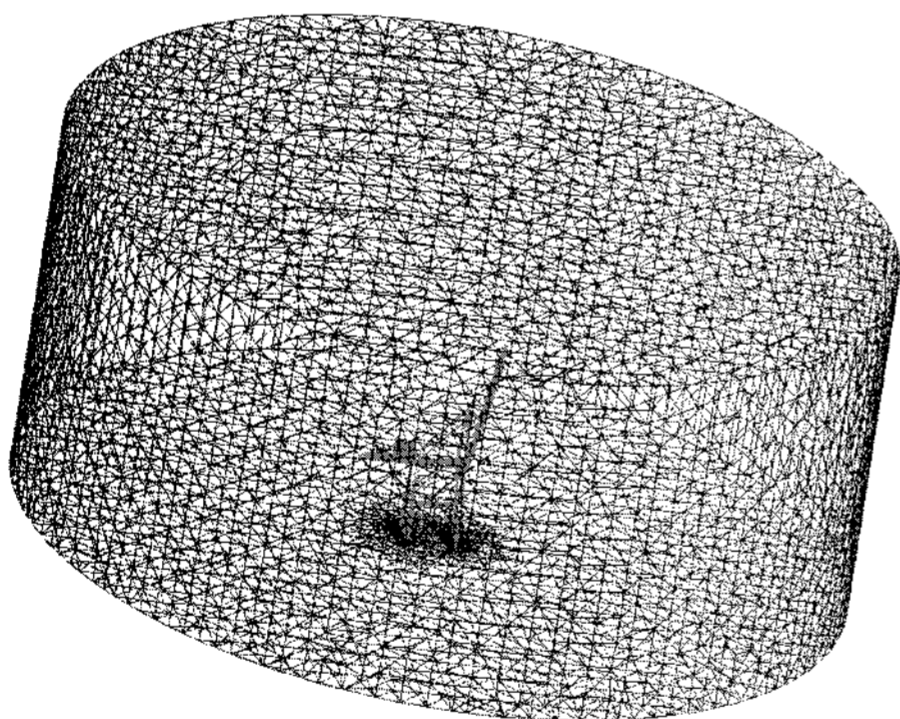


Fig. 3 Fluid state around the container crane

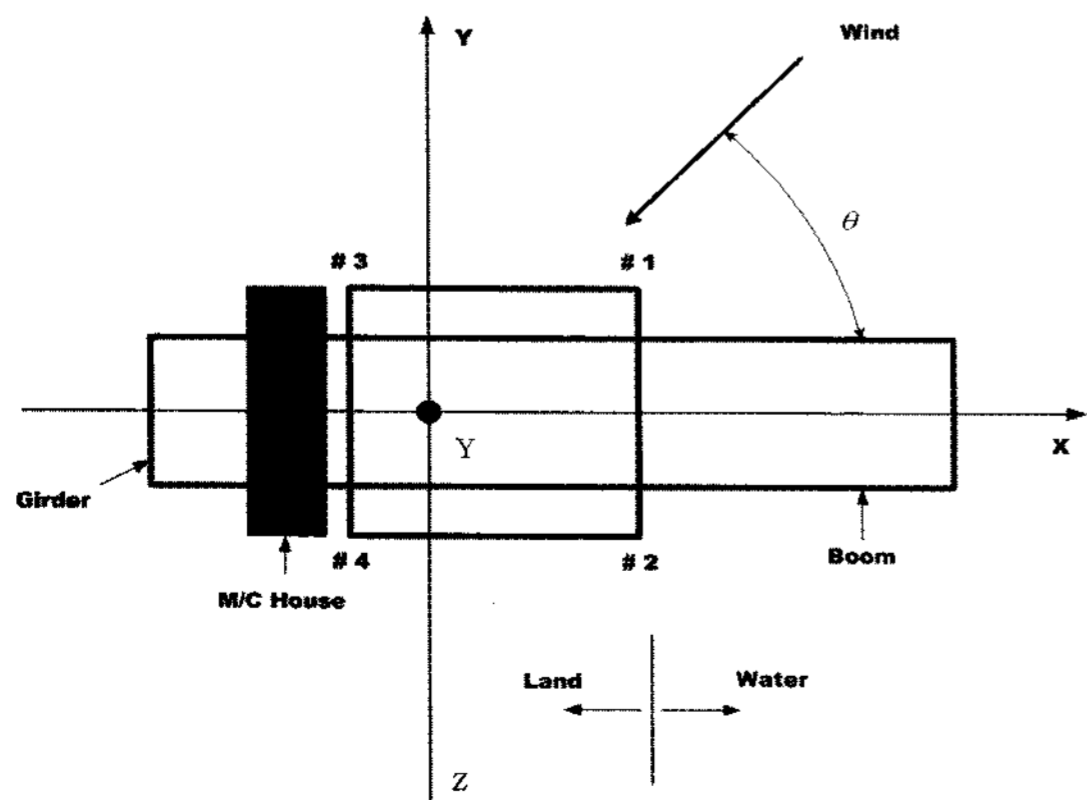


Fig. 4 Definition of an incidence angle of a wind load

Fig. 4는 풍하중의 방향을 나타내고 있으며,  $\theta$ 는 육측을 기준으로 0 ~ 180°까지 변화하는 풍향을 나타내고 있다.

이에 따른 해석의 경계조건으로는 난류모델로서  $k-\epsilon$  모델을 사용하였고, 바닥과 크레인의 표면은 슬립이 발생하지 않도록 하였으며, 윗면은 개방(Opening)조건을 사용하여 유동장내부와 외부와의 조건이 동일하도록 하였다.

또한 원통의 외부 벽면의 속도를 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.

### 3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 컨테이너 크레인이 계류 시에 풍향에 따른 풍압분포를 통하여 풍하중을 산출할 수 있었다.

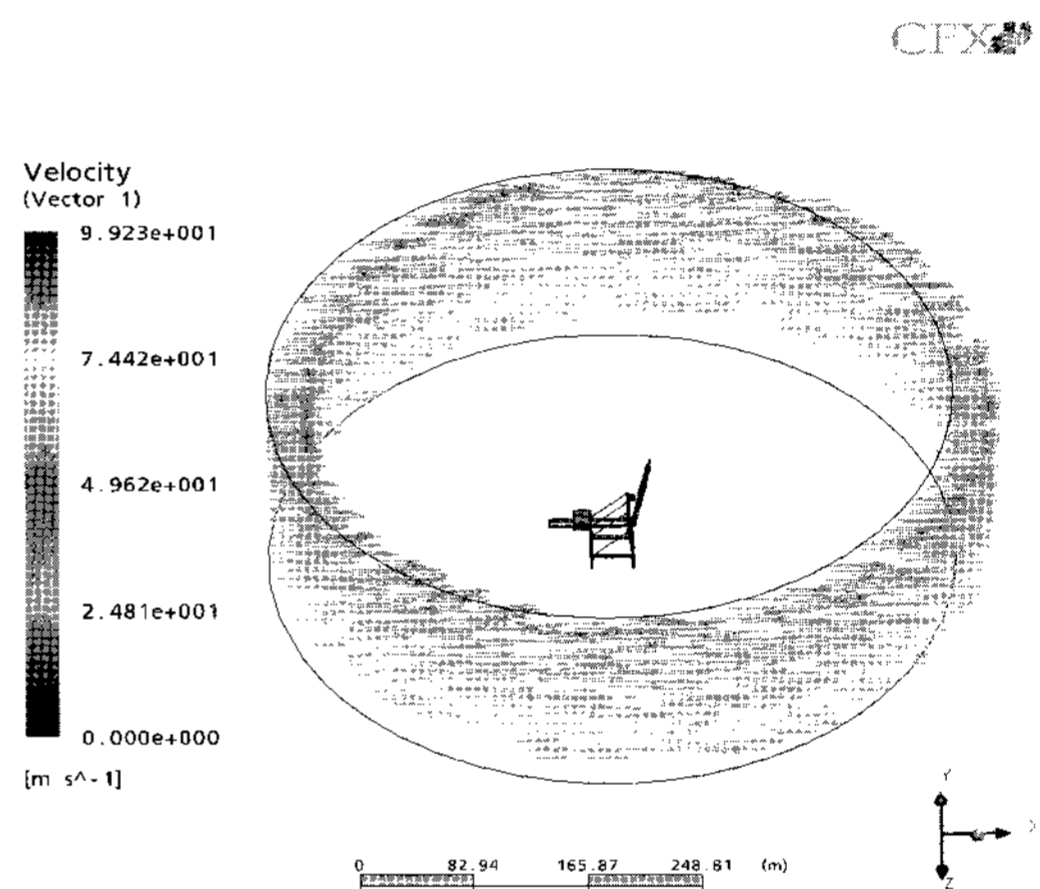


Fig. 5 The boundary condition applied to a computation fluid dynamics of a container crane

Table 1 Wind load of the computational fluid dynamics

구 분	X-방향[ton]	Z-방향[ton]
0°	-286	0
30°	-294	228
60°	-182	368
90°	-7	345
120°	198	378
150°	280	259
180°	285	1

Table 2 Wind load of the wind tunnel test

구 분	X-방향[ton]	Z-방향[ton]
0°	-351	-18
30°	-354	252
60°	-167	509
90°	15	492
120°	197	516
150°	325	275
180°	326	-30

Fig. 5는 전산유동해석상에서 컨테이너 크레인에 바람의 영향을 적용시키는 속도벡터를 나타낸 것으로서 컨테이너 크레인에 직접적으로 힘을 가하는 것이 아니라 외부의 유동장을 통하여 분포적인 힘을 가하는 것이다.

Table 1과 Table 2는 풍동실험과 전산유동해석의 결과인 풍하중을 나타낸 것이다. 이 값들을 이용하여 그래프로 나타낸 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다.

Fig. 6에서 보여지는 것과 같이 풍하중이 컨테이너 크레인의 뒀 정면으로 작용되는 0°에서는 음(-)의 값을 보이나 점차 증가하여 컨테이너 크레인의 측면인 레일방향 +Z방향으로 작용하는 90°에서 0의 값을 가지며, 후방에서 풍하중이 입사되는 180°방향에서는 양(+)의 값을 가지게 되었다. 그리고 X방향의 풍하중의 경우 이론상으로는 0°와 180°에서 최대값을 나타내어야 하지만 실험 및 해석결과 20°와 160°부근에서 최대값을 나타내었다.

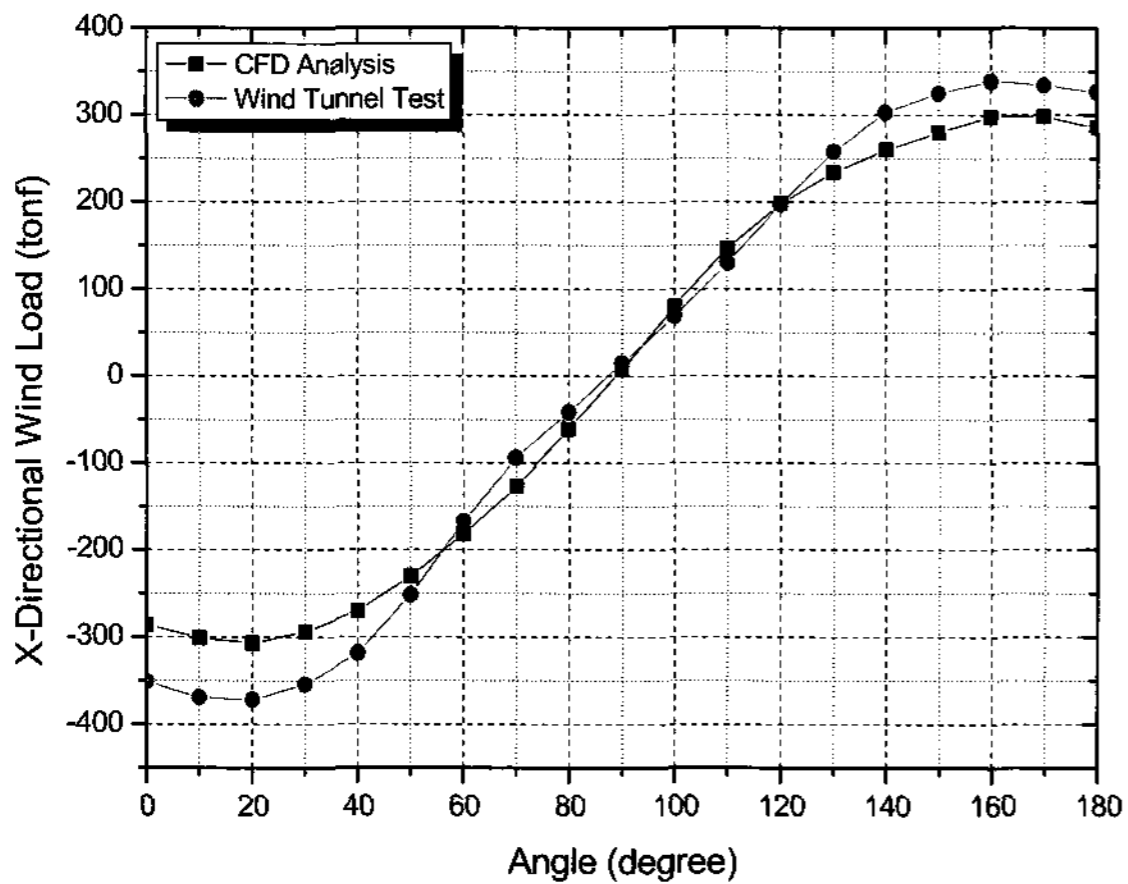


Fig. 6 X-directional wind load of container crane

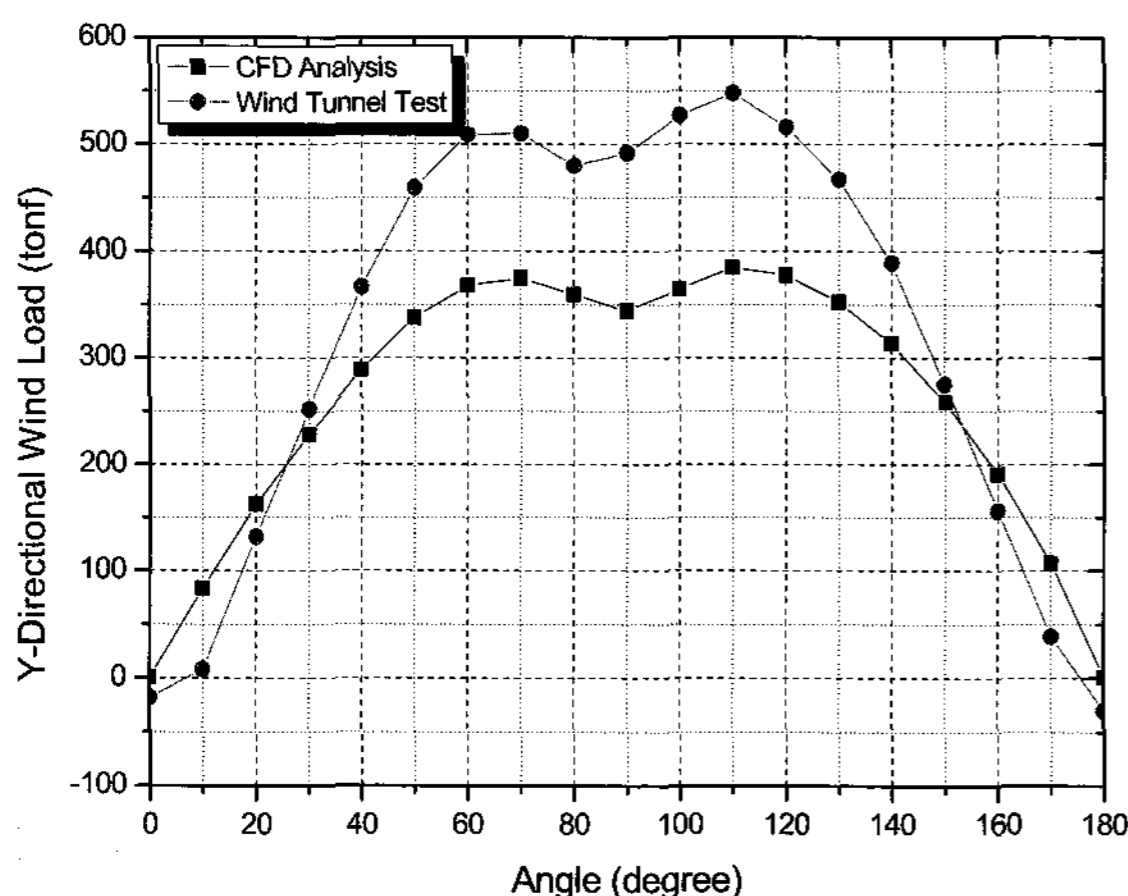


Fig. 7 Z-directional wind load of container crane

또한 풍동실험과 전산유동해석을 비교하여 본 결과 전체적인 경향은 근사한 형태를 나타내고 있지만 최대 지점인 20°에서 풍동실험과 전산유동해석의 값이 각각 -372ton, 307ton으로 약 65ton의 차이가 발생하였다.

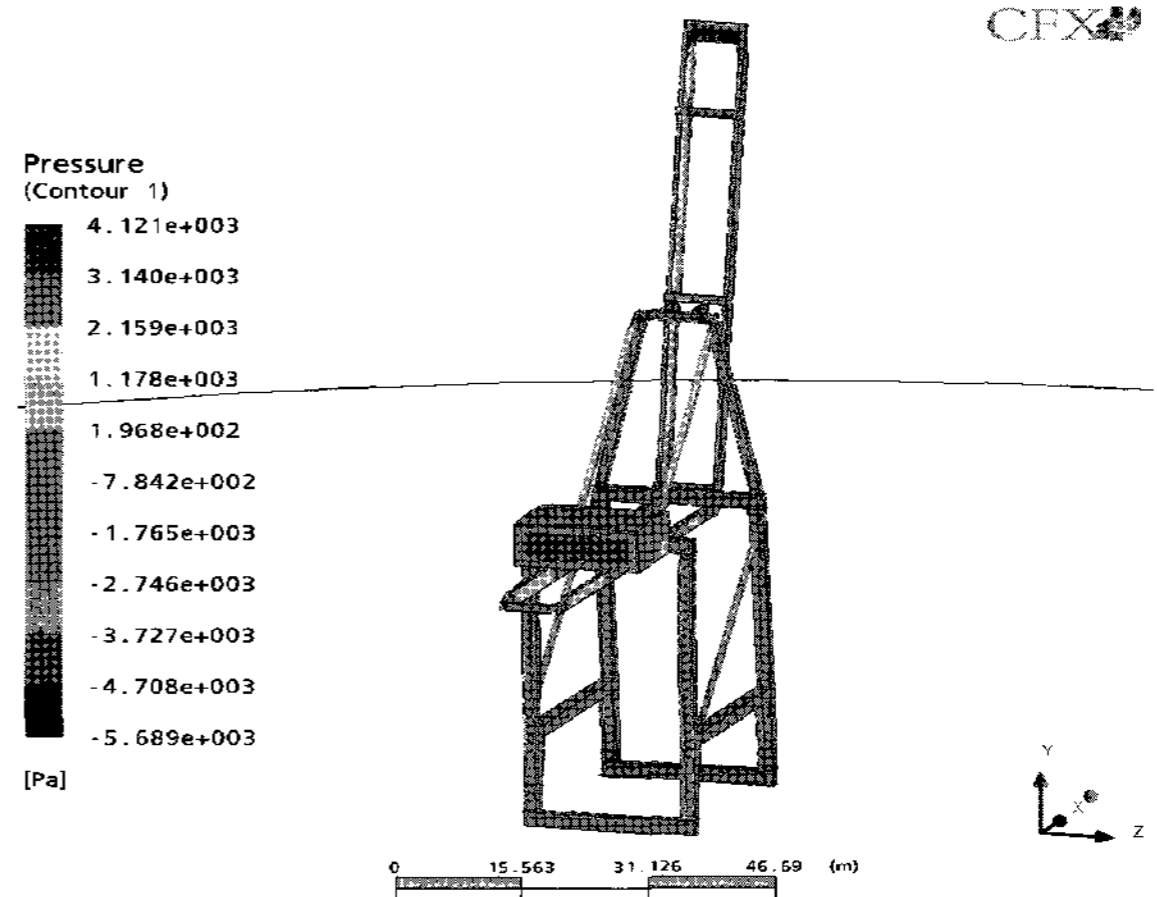


Fig. 8 Wind pressure distribution in 0-degree

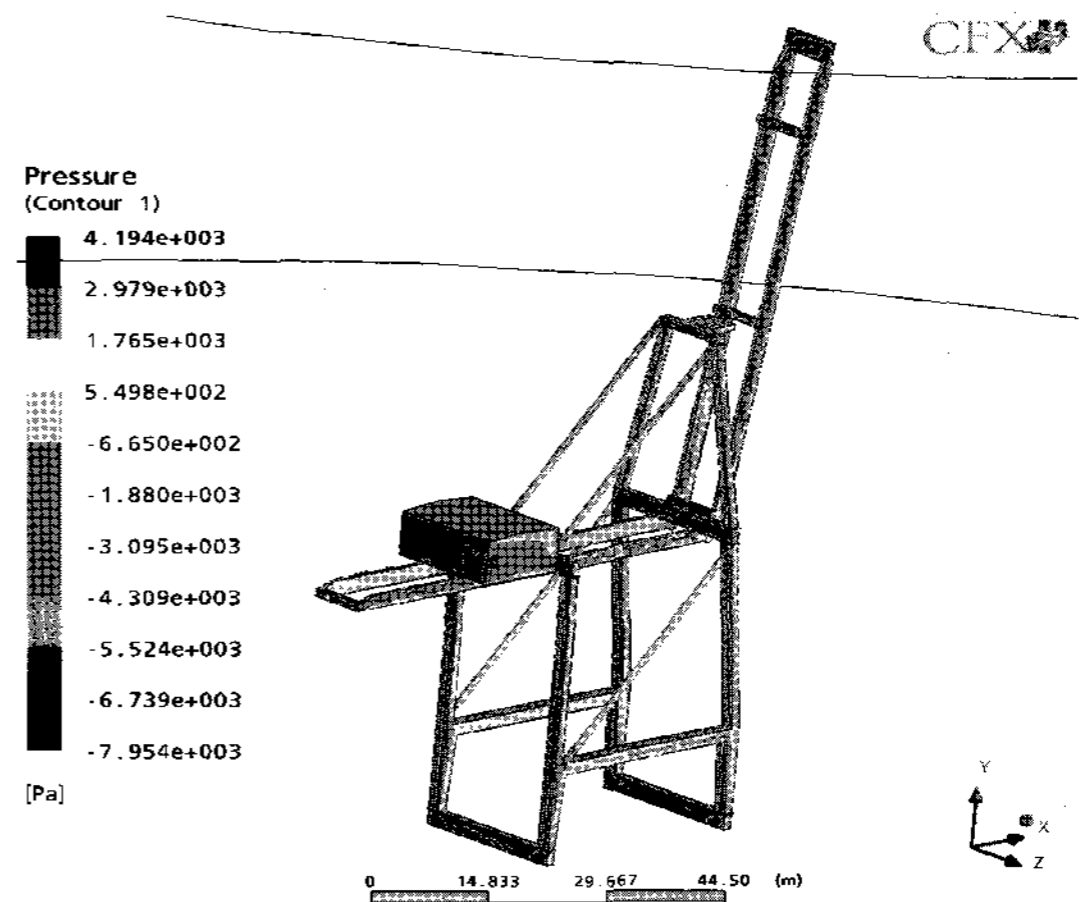


Fig. 9 Wind pressure distribution in 60-degree

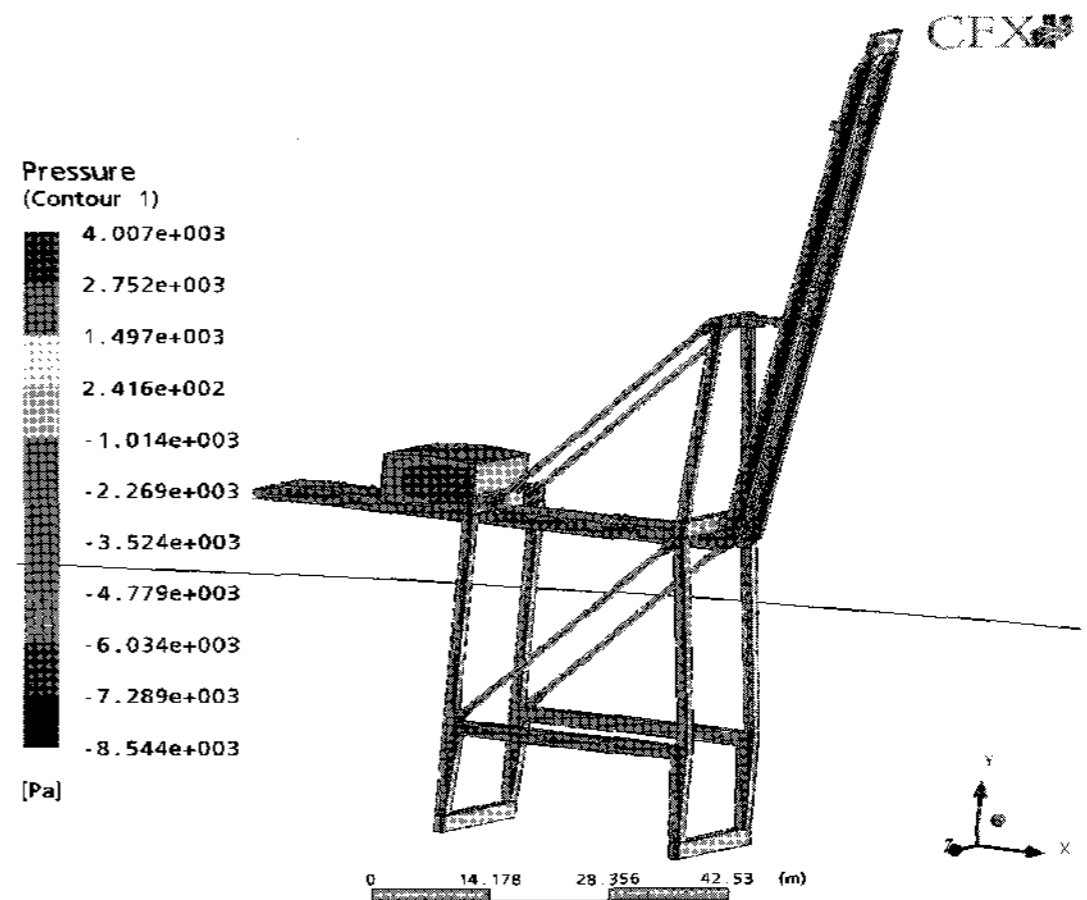


Fig. 10 Wind pressure distribution in 120-degree

Fig. 7에서는 컨테이너 크레인이 전도되려고 하는 X방향의 전도력에 영향을 미치는 Z방향의 풍하중을 그래프로 나타낸 것으로 풍향계수에 따른 속도를 벡터값으로 입력을 하였기에 실제 컨테이너 크레인의 뒀 정면과 후면으로 작용되는 0°와 180°에서는 0과 근사한 값을 가지며, Z방향의 풍하중의 경우

이론상으로는 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 548ton, 385ton으로 약 163ton의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

최대값이 발생되어지는 지점이 예상했던 것과는 달리 각각 10°~20°정도의 지점에서 발생하는 것은 동일한 두 개의 부재가 유동방향으로 나란하게 놓여 있을 경우 앞쪽 부재의 영향으로 뒤쪽 부재는 비록 형상은 동일하지만 차폐효과의 영향으로 인하여 상당히 낮은 압력을 가지게 되어 발생한 것이라 생각되어진다.

전체적으로 풍력실험과 전산유동해석은 거의 비슷한 경향의 결과를 얻어낼 수 있었지만 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이것을 세 가지의 원인으로 분석하여 보았다. 먼저, 실험 모델과 전산유동해석 모델 형상의 차이인 것으로 판단된다. 전산유동해석 모델은 미세한 부분을 간략화한 반면, 풍동실험 모델에서는 미세한 부분까지 구현하였기 때문이다. 또한 조건에 따른 영향이 있을 것이라 판단되어 졌다. 풍력실험의 경우 바람의 방향을 고정시키고 축소시킨 모형을 회전시키면서 풍압력에 대한 결과를 알아보았지만 전산유동해석의 경우 컨테이너 크레인 모델을 고정시켜 놓고 유동장에서 입사각을 변화시켜 줌으로 인해서 어느 정도의 차이가 발생한 것이라 생각된다. 마지막으로, 실제적인 실험과 시뮬레이션 사이에서 발생할 수 밖에 없는 결과의 차이이다. 실제적 실험인 풍력실험의 경우 바람에 의하여 발생되어지는 풍압력만이 나타나는 것이 아니라 진동 등의 다른 요인들도 고려되어진다. 이에 반해 시뮬레이션인 전산유동해석의 경우 다른 영향들은 무시한 채 단순히 풍압력에 의한 결과만을 나타나기 때문에 이러한 차이가 나타날 것이라 판단되어진다.

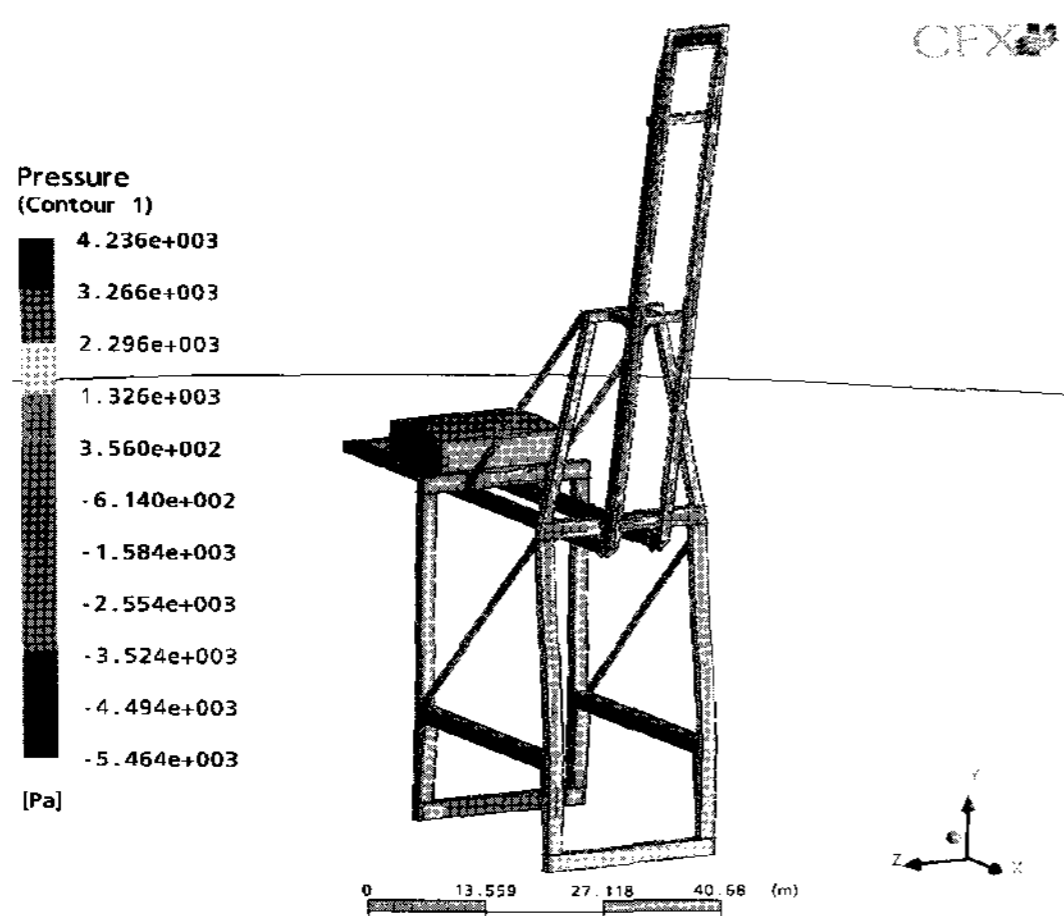


Fig. 11 Wind pressure distribution in 180-degree

Fig. 8 ~ Fig. 11은 입사각도에 따라서 컨테이너 크레인의 주요 풍압력 분포를 나타내고 있다. 입사각별 최대 압력 차이

는 거의 없으며, 컨테이너 크레인의 최대 풍압력은 풍향에 수직한 방향에서 최대 압력이 발생하는 것으로 판단되어진다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 사용된 컨테이너 크레인은 권상용량 61ton 급으로 현재 항만에서 사용하고 있는 모델이다. 이 크레인의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 풍력실험과 전산유동해석을 동시에 수행하였으며, 두 가지 방법을 서로 비교 분석하여 전산유동해석으로서 실 모델에 적용시킬 수 있는 신뢰성을 추구하기 위해 실시하였다. 향후 본 연구를 통해서 얻어진 풍향에 따른 압력을 바탕으로 풍하중의 주요 원인 중 하나인 풍향계수를 산출할 수 있을 것으로 판단되어지며, 풍압력을 구조 해석 분야에 적용함으로써 컨테이너 크레인의 구조 안정성 평가에 있어서 기존의 유한요소법과 비교, 분석할 수 있을 것으로 기대되어진다.

### 후 기

이 논문은 2006학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] 김경한, 이영진, 이진우, 이권순(2000), “고효율 갠트리 크레인 설계 및 성능 분석”, 한국항만학회지, 제14권, pp. 395-406.
- [2] 건설교통부(2000), “건축물하중기준”
- [3] 양창호, 김창근, 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] 한진중공업(2004), “광양항 61ton 컨테이너 크레인 구조 및 기계부문 계산서”.

원고접수일 : 2007년 11월 20일  
 원고채택일 : 2008년 3월 18일