

풍동실험을 이용한 붐 형상 변화에 따른 컨테이너 크레인 구조 안정성 평가에 관한 연구

이성욱* · 한근조*** · 한동섭**** · 김태형*****

*동아대학교 대학원, **동아대학교 기계공학부 교수, ***동아대학교 대학원, ****경남정보대학 기계자동차계열 부교수

A Study on the Estimation of the Structural Stability of a Container Crane according to the Change of the Boom Shape using Wind Tunnel Test

Seong-Wook Lee* · Geun-Jo Han** · Dong-Seop 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

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

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

요 약 : 본 연구는 75m/s의 풍하중이 컨테이너 크레인에 작용할 때, 붐 형상 변화에 따라 풍하중이 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 미치는 영향을 풍동실험을 통하여 분석하여 컨테이너 크레인의 내풍설계 시 필요한 자료를 제공하기 위해 수행되었다. 풍동실험에 적용된 데이터 수집조건은 상사법칙에 준하여 설정되었으며, 컨테이너 크레인 모형, 풍속 및 시간의 축척률은 각각 1/200, 1/13.3 및 1/15로 하였다. 그리고 실험은 11.25m²의 측정부 단면을 갖는 개방형 대기경계층풍동을 사용하여 수행하였다. 풍향에 따른 컨테이너 크레인의 풍력계수 및 전도모멘트계수가 조사되었으며, 풍하중에 의해 각 지지점에서 발생하는 전도력이 분석되었다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 풍동실험, 풍하중, 전도모멘트, 전도력

ABSTRACT : This study was carried out to analyze the effect of wind load on the structural stability of a container crane according to the change of the boom shape using wind tunnel test and provided a container crane designer with data which can be used in a wind resistance design of a container crane assuming that a wind load at 75m/s wind velocity is applied on a container crane. Data acquisition conditions for this experiment were established in accordance with the similarity. The scale of a container crane dimension, wind velocity and time were chosen as 1/200, 1/13.3 and 1/15. And this experiment was implemented in an Eiffel type atmospheric boundary-layer wind tunnel with 11.25m² cross-section area. Each directional drag and overturning moment coefficients were investigated and uplift forces at each supporting point due to the wind load were analyzed.

KEY WORDS : container crane, wind tunnel test, wind load, overturning moment, uplift force

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) 최

대 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 풍하중은 컨테이너 크레인의 설계 시 적용되는 각종 하중조건에서 가장 중요하게 고려되고 있다. 예를 들면, 풍하중이 컨테이너 크레인 각 부재의 강도에 미치는 영향뿐만 아니라 컨테이너 크레인의 전도를 방지하기 위하여 설치되는 타이다운(Tie-down)과 스토이지 핀(Stowage pin)과 같은 계류장

* 정회원, lsw1126@korea.com 051)200-6989

** 정회원, gjhan@dau.ac.kr 051)200-7650

*** 정회원, dshan@paran.com 051)200-6989

**** 정회원, kimth@kit.ac.kr 051)320-1275

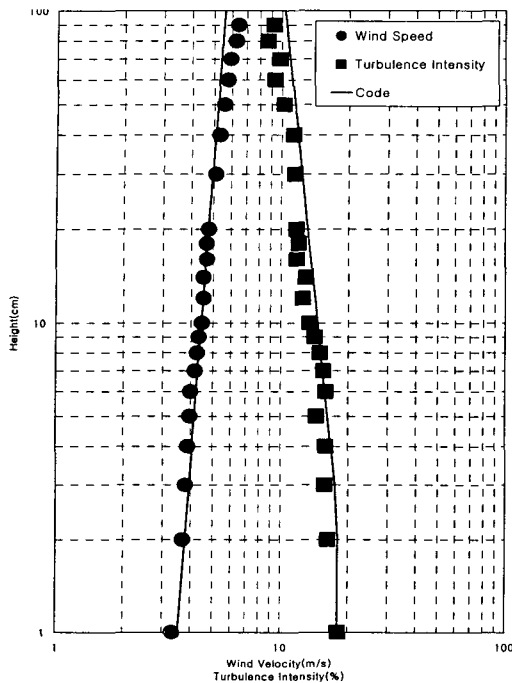


Fig. 1 Mean wind velocity and turbulence intensity according to height

치의 설계에도 풍하중이 적용되고 있다(한 등, 2004).

컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 정확하게 산출하기 위해서는 풍동실험과 기본 설계가 모두 이루어져야 하나, 현재 국내 컨테이너 크레인 제작업체는 일반적으로 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중 계산 시 'BS2573' 기준에 의거하여 기본 설계를 하고 국외의 컨테이너 크레인 설계 자문기관에서 유사한 모델로 실시한 풍동실험 자료를 활용하고 있다.

그러나 국외 자문기관의 풍동실험 자료는 국내에서 생산하는 컨테이너 크레인의 모델과는 차이가 있으므로 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다.

따라서 본 연구에서는 현재 항만에서 널리 사용되고 있는 컨테이너 크레인 50ton급 'I'자형 붐을 가지는 컨테이너 크레인과 주변 환경으로 인하여 컨테이너 크레인의 최대 고도가 제한될 경우에 사용되는 관절형 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 부산지역의 대기경계층을 모사한 풍동(풍력)실험을 통하여 풍하중에 대한 안정성을 분석하고 컨테이너 크레인의 내풍설계 시 적용할 수 있는 자료를 확보하고자 한다.

2. 풍동실험

2.1 설계풍속 및 기류특성

본 연구는 순간최대 75m/s의 바람이 컨테이너 크레인에 작용할 때를 가정하여 풍동실험을 수행하였다.

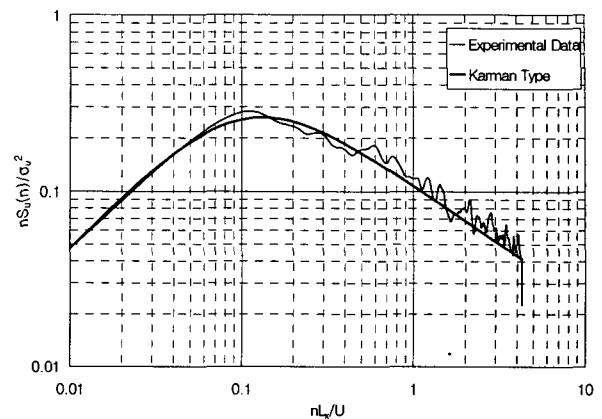


Fig. 2 Wind velocity spectrum at 32cm height in the wind tunnel

그리고 평균풍속의 수직분포는 '도로교설계기준'에 따랐으며, 난류강도의 수직분포와 풍속스펙트럼은 '건축물하중기준'에 제시 되어있는 기준을 적용하였다(건설교통부, 2000).

컨테이너 크레인은 일반적으로 해안에 설치되므로 도로교설계기준에서 제시한 노풍도 I 과 건축물하중기준의 노풍도 D에 해당하도록 풍동 내부의 경계층을 구성하였다.

Fig. 1은 풍속 및 난류강도의 수직분포를 나타내며, Fig. 2는 컨테이너 크레인의 Apex beam에 해당하는 64m 높이(모형의 경우 32cm 높이)에서의 풍속스펙트럼을 나타내고 있다.

2.2 실험장치 및 측정장치

컨테이너 크레인의 풍력측정에 사용된 풍동은 현대건설기술연구소의 대형 경계층풍동(Boundary layer wind tunnel)으로 전체 길이 53m, 측정부의 크기는 폭 4.5m, 높이 2.5m, 길이 25m의 개방형(Eiffel type)이며, 풍속범위는 0.3 ~17.5m/s이며, 난류강도는 0.7% 이하이다. Fig. 3은 실험에 사용된 풍동을 나타내고 있다(장 등, 1997).

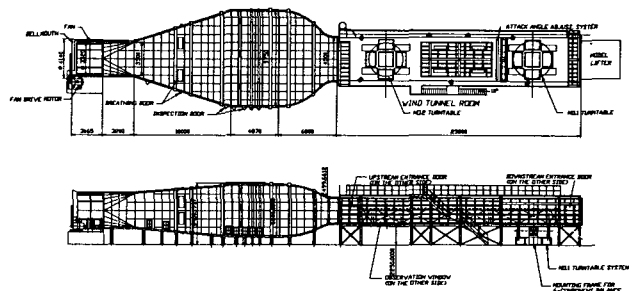


Fig. 3 Boundary layer wind tunnel

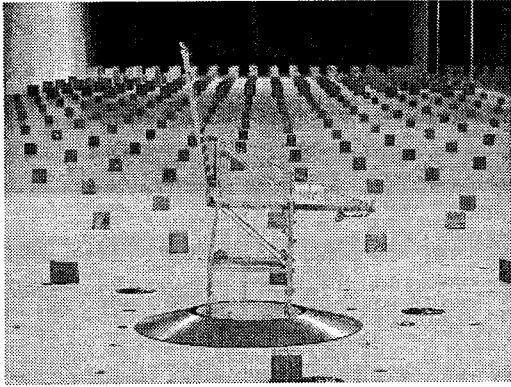


Fig. 4(a) The container crane model with '1' type boom

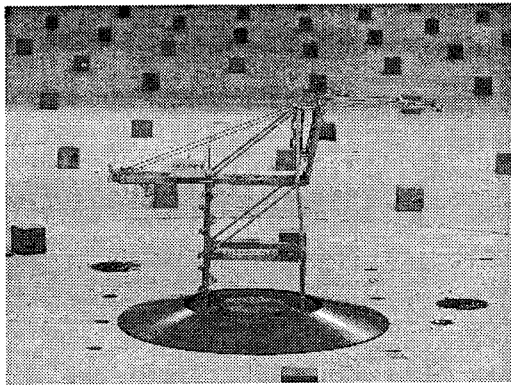


Fig. 4(b) The container crane model with articulation type boom

그리고 실험에 사용된 측정장치는 다음과 같다.

- 6-component load cell : LMC-6524-10S(NEW)
- Hot wire anemometer : Model 1008(KANOMAX)
- Digital micro manometer : DP-20A(Okano)
- Dynamic strain amplifier : DSA-100(NEW)
- Low pass filter : 9B02(NEC)
- Digital barometer : BN60705(S.I.)
- ADC : AT-MIO-16XE-50(N.I.)

2.3 실험모형

Fig. 4(a)와 (b)는 실험에 사용된 컨테이너 크레인의 모형을 나타내고 있다. 모형은 현재 국내 항만에서 널리 사용되고 있는 권상용량(Lifting capacity) 50ton, 전체 자중 890ton, 아웃리치(Out reach) 51m, 레일 스패ن(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) 수평면적이 863m², 레일측(Y 방향) 수평면적이 997m²에 달하는 '1'자형 붐을 가진 컨테이너 크레인(Fig. 4(a))과 최대 고도 제한으로 인하여 붐이 'ㄱ'자로 꺾여져 붐 끝단의 최대 고도가 65m인 관절형 컨테이너 크레인(Fig.

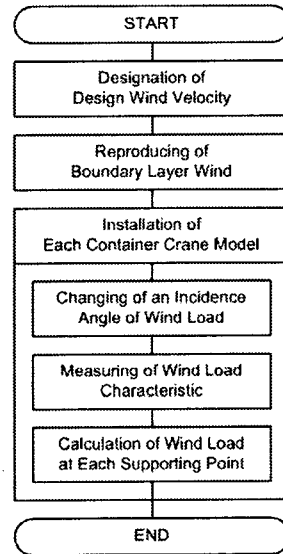


Fig. 5 Flow chart of the wind tunnel test of a container crane

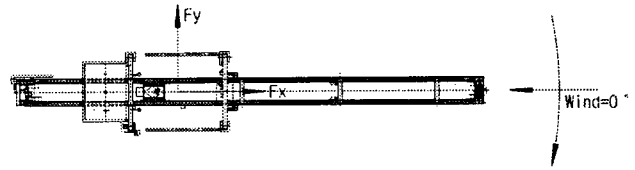


Fig. 6 Definition of an incidence angle of wind load

4(b))을 1/200로 축소시킨 것으로 재질은 발사(balsa)이며, 모형의 고유진동수를 높이기 위해 가볍고 강성이 큰 모형이 되도록 하였다(한진중공업, 2000).

그리고 기계실의 위치에 따른 영향을 분석하기 위해 기계실이 거더와 붐, 레그가 만나는 위치로부터 6m(모형 30mm)/Case 3, 13m(모형 65mm)/Case 2, 33m(모형 165mm)/Case 1 떨어진 곳에 설치될 수 있도록 하였다.

2.4 실험방법

실험방법은 순간최대 75m/s의 설계풍속과 해안지역에 맞도록 모사된 경계층 풍동 내부에 Fig. 4와 같은 컨테이너 크레인의 1/200 축소모형을 6축 로드셀 상부에 장착하였다.

그리고 기계실의 위치가 육측 레그 바깥에 위치하는 Case 1에서부터 풍향변화에 따라 변화하는 컨테이너 크레인의 각 방향 항력계수와 전도모멘트계수를 측정하였다. 이 때 실험풍향은 컨테이너 크레인이 좌우대칭 형상이므로 0°에서 180°까지 10°간격으로 하여 19개 풍향에 대해 측정을 수행하였다.

기계실의 위치가 해측 레그 주변으로 이동되는 나머지 Case에 관하여서도 동일한 방법으로 풍력실험을 수행하여 데이터를 측정하고 이 결과를 이용하여 컨테이너 크레인에 작용되는 풍

하중 및 전도모멘트, 각 레그 지지점에 작용되는 전도력을 계산하고 결과를 검토하였다.

Fig. 5는 컨테이너 크레인 풍력실험의 순서도이며, Fig. 6은 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중의 방향을 나타내고 있다.

실험에 적용된 데이터 수집조건은 다음과 같다.

- Model scale : 1/200
- Wind velocity scale : 1/13.3
 - Design wind velocity : 75m/s (at 64m height)
 - Wind tunnel test velocity : 5.6m/s (at 32cm height)
- Time scale : 1/15
 - Actual time : 600sec
 - Wind tunnel test time : 40sec
- Scaling frequency : 120Hz
- Number of measurement : 10times
- Total number of data : 120Hz × 40sec × 10times
= 48,000EA/ch

3. 해석결과 및 고찰

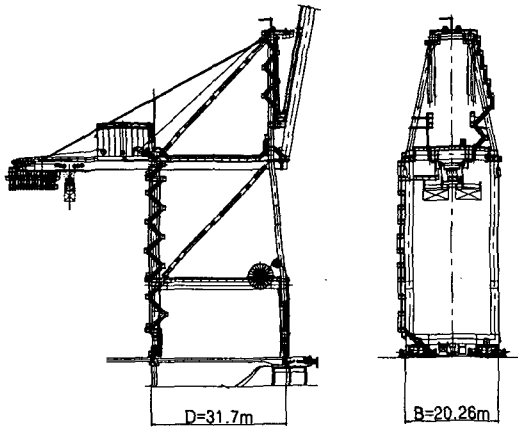


Fig. 7 Representational length of a container crane

50ton급 컨테이너 크레인의 풍력실험을 통해 측정된 결과를 토대로 각 방향의 항력계수와 전도모멘트계수를 식(1)~(4)를 이용하여 산출하였다. 이 때, B와 D는 Fig. 7에 나타난 컨테이너 크레인의 대표길이이며, H는 기준높이(64m), q_H 는 기준속도압을 나타낸다.

$$C_{Fx} = \overline{F_x} / (q_H B H) \quad (1)$$

$$C_{Fy} = \overline{F_y} / (q_H D H) \quad (2)$$

$$C_{Mx} = \overline{M_x} / (q_H D H^2) \quad (3)$$

$$C_{My} = \overline{M_y} / (q_H B H^2) \quad (4)$$

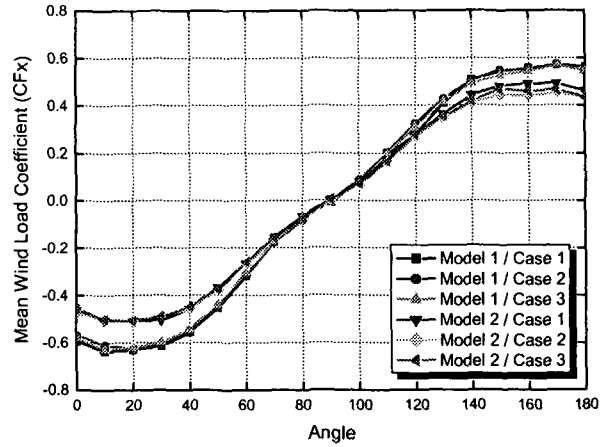


Fig. 8 X-directional drag coefficient according to incidence angle of wind load

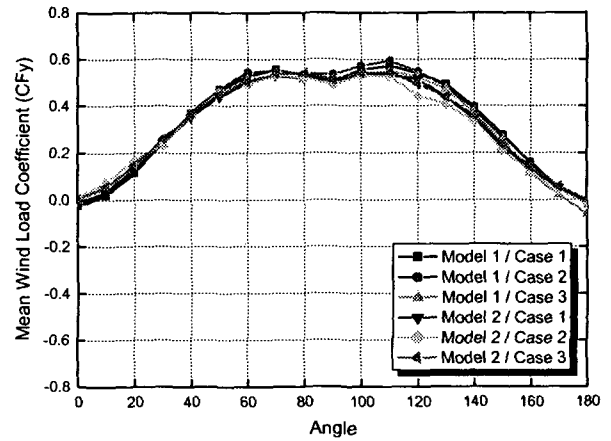


Fig. 9 Y-directional drag coefficient according to incidence angle of wind load

X방향 항력계수의 경우 모든 경우에서 Fig. 8과 같이 풍하중이 컨테이너 크레인의 붐 정면으로 작용되는 0°에서는 음(-)의 값을 보이나 점차 증가하여 컨테이너 크레인의 측면인 레일방향 +Y방향으로 작용하는 90°에서 0의 값을 가지며, 후방에서 풍하중이 입사되는 180°에서는 양(+)의 값을 가지게 되었다. 그리고 X방향 항력계수의 경우 이론상으로는 0°와 180°에서 최대값을 나타내어야 하나 실험결과 20°부근과 170°부근에서 최대값을 나타내었다.

그리고 '1'자형 붐을 갖는 Model 1과 관절형 붐을 갖는 Model 2의 경우 풍향이 0°와 180°일 경우 Model 1에 비해 Model 2의 항력계수가 약 20% 가량 낮게 발생하였다. 이는 Model 2의 붐이 관절형으로 꺾여 있기 때문에 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중이 낮아진 것으로 판단된다.

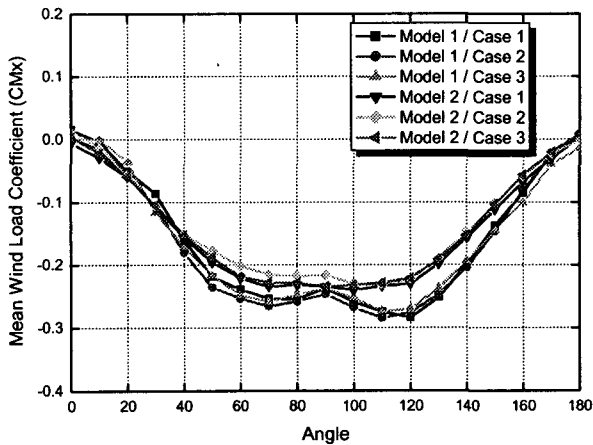


Fig. 10 Y-directional overturning moment coefficient according to incidence angle of wind load

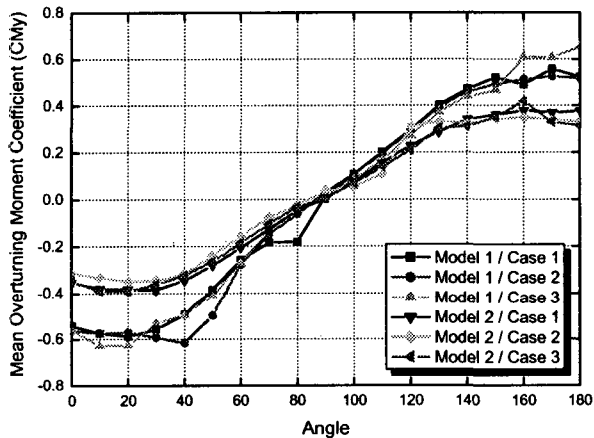


Fig. 11 Y-directional overturning moment coefficient according to incidence angle of wind load

Fig. 10은 Y방향 풍하중에 의해 컨테이너 크레인이 전도되려고 하는 X방향의 전도모멘트계수를 나타낸 것으로 풍하중이 -Y방향으로 컨테이너 크레인에 작용되었으므로 전도모멘트계수는 음(-)의 값을 나타내고 있다. 풍향 변화에 따른 X방향의 전도모멘트계수는 Fig. 9와 거의 유사한 형태를 나타내었으며, 120° 부근에서 최대값이 발생되었다.

그러나 Fig. 9의 Y방향의 항력계수는 모형에 따른 편차가 크지 않았으나 Fig. 3의 전도모멘트계수에서는 기준높이 H의 제곱에 반비례하게 되므로 110° ~ 160° 구간에서 그 편차가 16 ~ 31% 가량 더 크게 발생되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 풍향별 Y방향의 전도모멘트를 나타내는 것으로 X방향으로 작용되는 풍하중에 의한 전도 성향이므로 Fig. 8과 거의 유사한 형태를 나타내었다.

이 결과에서도 마찬가지로 0°와 180° 부근에서 X방향의 평균풍력계수에 비해 30 ~ 40% 가량 그 결과가 더 크게 발생되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 항만에서 널리 사용되고 이쓴 권상용량 50ton급 '1'자형 붐을 가지는 컨테이너 크레인과 주변 환경으로 인하여 컨테이너 크레인의 최대 고도가 제한될 경우 사용되는 관절형 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중이 각 크레인의 구조 안정성에 미치는 영향을 풍동(풍력)실험을 통하여 분석함으로써 컨테이너 크레인의 내풍설계 시 필요한 자료인 풍향에 따른 각 방향의 항력계수와 전도모멘트계수를 제시함으로써 국내 컨테이너 크레인 제작업체에서 설계 시 이를 적용할 수 있도록 하였다.

향후 본 연구에서 제시된 풍향에 따른 풍력계수를 이용하여 각 case별 컨테이너 크레인에 대한 유한요소해석을 실시하고 그 결과를 풍동실험 결과와 비교하게 되면 전도력을 보다 정확하게 계산하게 됨으로써 컨테이너 크레인의 전도방지장치 설계를 보다 정확하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 강신형, 이동호, 조광제, 좌성훈, 허종(1988), 풍동시험에 의한 콘테이너 크레인의 풍하중 예측 및 개량에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제12권, 제4호, pp.892-899.
- [2] 건설교통부(2000), 도로교설계기준.
- [3] 건설교통부(2000), 건축물하중기준.
- [4] 김영문(1998), 실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북, 한국풍공학회.
- [5] 이성욱, 심재준, 한동섭, 박종서, 한근조, 이권순, 김태형(2005), 풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향 분석, 한국정밀공학회지, 제22권, 제2호, pp.148-155.
- [6] 장효성, 김윤석, 황규석(1997), 현대건설기술연구소 풍동실험실 소개, 한국풍공학회지, 제1권, 제1호, pp.58-65.
- [7] 하영철(2003), 한국의 설계풍속과 구조골조용 풍하중, 한국풍공학회지, 제7권, 제1호, pp.13-25.
- [8] 한근조, 이호, 심재준, 한동섭, 안찬우, 전영환(2004), 컨테이너 크레인용 췌기형 레일 클램프의 췌기각에 대한 연구, 한국정밀공학회지, 제21권, 제9호, pp.119-126.

- [9] 한진중공업(2000), 부산항 감만부두 확장구역 50톤 컨테이너 크레인 구조 및 기계부문 계산서.
- [10] D. Voisin, G. Grillaud, C. Sollicec, A. Beley-Sayettat, J. L. Berlaud, A. Miton(2004), Wind Tunnel Test Method to Study Out-of-Service Tower Crane Behaviour in Storm Winds, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, Vol. 92, pp.687-697.
- [11] E. Simiu, R. H. Scanlan(1996), Wind Effect on Structures, John Wiley & Sons.