

풍동실험에 의한 갠트리 크레인의 풍력계수 산출과 구조 해석

이재환^{1,†} · 김태완¹ · 장인권² · 한순흥²
충남대학교 선박해양공학과¹
한국과학기술원²

Wind Force Coefficients Computation of Gantry Crane by Wind Tunnel Experiment and Structural Analysis of the Crane

Jae-hwan Lee^{1,†} · Tae-Wan Kim¹ · In-Geun Jang² · Soon-hung Han²
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea¹
The Cho Chun Shik Graduate School of Green Transportation, KAIST, Daejeon, Korea²
Division of Ocean Systems Engineering, KAIST, Daejeon, Korea²

Abstract

In this paper, wind force coefficient by wind tunnel experiment is obtained to compute the accurate wind force of the gantry crane model to be used for mobile harbor ship. The first crane model was tested under 20, 30, 40, 52m/s, partially 58m/s and the wind force coefficient is about 2.0 which is very close to the suggested theoretical value. The other is the more reliable crane model and tested under 20, 30, 40m/s also giving the similar realistic wind force coefficient. Also structural analysis of crane model was performed giving the reliable stress level. Since the rolling effect is important for mobile harbor ship, the safety of the crane on the ship needs to be guaranteed. For this, using the computed reaction forces, a tie-down design is suggested which connects the crane and ship to resist the turnover motion of the crane.

Keywords : Mobile harbor(모바일하버), Gantry crane(크레인), Wind force coefficient(풍력계수), Wind tunnel experiment(풍동실험), Tie-down(타이다운)

1. 서론

최근 시도되고 있는 모바일하버는 모선에 갠트리 크레인을 설치하여 임의 해역의 컨테이너 운반선의 컨테이너를 하역/적재한 후 육상 부두로 운송한다. 모바일하버 선박에 설치될 크레인의 경우 육지와 달리 바다의 기상 상황이 일정치 않고, 해상상태(sea state)에 따라 모선이 동적운동을 하게 되는데, 그 운동이 파도와 바람의 크기에 따라 달라지기 때문에, 풍하중에 대한 엄밀한 해석이 필요하다. 크레인 구조의 안정성을 확보하기 위해서는 구조해석시 풍하중 산출이 필요한데 이론에 의한 방법도 있으나 본 연구에서는 풍동실험에 의한 방법을 소개한다. 크레인에 관한 풍하중에 관해서는 산업안전보건법과 한국선급의 강선규칙이 있는데 선박에 설치되는 크레인에는 선박의 운동과 관련하여 보수적인 하중을 적용하는 한국선급 규칙을 적용해야 한다(KR, 2009).

통상 구조해석용 풍하중 산출은 건축 분야에서 많이 사용되는데(Kim et al., 2002; Kim 2003)는 태풍 매미에 의한 피해 유형과 대책 방안을 제시하였다. (Ha et al., 1998)은 기상관측에

관한 개선 제안을 하고 (Ha 2000)는 풍하중 산출 신기준 제정에 관한 내용들을 담고 있다. 계측 지점을 최적화하고, 산이 위치한 곳에는 유효높이를 고려하며 각 지점에 Gumbel의 적률법에 의해 100년 재현값을 사용하였다. (Ha 2005)는 타워나 크레인과 같은 가늘고 긴 건물에는 공력진동실험도 추천하고 있다.

크레인에 관한 풍동실험 논문에서 (Kang et al., 2004)은 대기 경계층을 모사하였고 모형에 60 m/s의 풍속을 가했을 때, 레이놀즈수가 5×10^5 보다 커지게 되면 공력계수들이 레이놀즈수에 거의 무관하다는 사실을 발표하였다. 기는 봉재로 구성된 크레인의 경우 유동박리가 일어나는 부분이 유속에 따라 거의 변하지 않기 때문에 특정한 레이놀즈수보다 크게 되면 공력계수는 거의 일정한 값을 가지게 된다는 것이다. (Kwon et al., 2005)은 고효율 갠트리 크레인에 대한 풍동실험으로 크레인의 어느 지점의 반력이 풍하중에 의한 전도를 방지하기 위해 중요항기를 도출하였다. (Han et al., 2006)에 의해 수행된 풍동실험은, 계류시 붐이 위로 세워지는 일반 컨테이너 크레인의 1/200의 축소모형을 이용하고 풍속은 5.6 m/s, 재질은 발사나무로 모형의 고유진동수를 높이기

위해 가볍고 강성이 큰 모형을 사용하였다. 10° 간격으로 0°에서 180°까지의 풍향에 대해 실험한 결과, 풍하중 계수 0.4~0.6인 범위가 도출되었는데 이는 통상 2.0인 값에 비해 너무 작은 것으로 보인다. 또한 크레인 골조에 풍압력계를 설치하여 풍압을 계측하였는데 모델이 작아 신뢰성 있는 값이 도출된 것으로 보이지 않는다.

한편 크레인의 하부 지지구조는 중요한데 이에 관한 관심이나 연구 결과는 적은 편이다. (Kim et al., 2004, 2005), (McCarthy 2004)는 크레인의 전도 방지에 큰 역할을 하는 타이다운(Tie-down)과 풍속과의 관계를 수식화하여 이의 중요성을 강조하였다. 타이다운의 전도력은 풍속 변화율의 제곱으로 비선형적으로 증대되는 것으로 알려지고 있다. 본 연구는 모바일 하버용 크레인의 풍하중 산출에 관한 풍동실험과 구조해석, 하부구조 보강에 대한 연구 내용이다.

2. 구조물에 적용하는 풍하중

KR-Rules(2009) 규정에 의한 크레인의 설계하중으로 사용되는 풍하중은 다음 식 (1)에 의하여 계산된다.

$$F = PA \times 10^{-3} \text{ (kN)} \tag{1}$$

$$P = \frac{1}{16} C_h C_{s,g} V^2 \text{ (Pa)}$$

- F : 풍하중(kN)
- A : 풍압을 받는 투영면적의 합(m²)
- V : 풍속 (m/sec), 51.5m/s 이상을 요구
- Ch : 높이에 따라 결정되는 고도계수
- Cs : 하역장치 및 화물의 형상에 따라 결정되는 형상계수
- g : 해양구조물용 집 크레인에 대한 추가의 충격계수 (=0.6)

2.1 크레인 모형의 풍동 실험

Fig. 1은 250개 컨테이너를 운송할 모바일하버 모선에 설치하기 위한 크레인 초기모델 A1-D5 와 변경모델 A1-D6 로 각각의 갠트리 크레인의 측면면적은 432.36m², 589.64m², 정면면적은 232.75m², 368.82m² 이고 높이, 폭, 길이는 두 모델 모두 43.2m, 70m, 24.4m이다. 첫번째 모델은 크레인 지지 기둥이 전방 4개 후방 2개로 다소 취약한 구조로 판단되어 중량이 증가된 두번째 모델은 후방 기둥이 4개로 보강되었다.

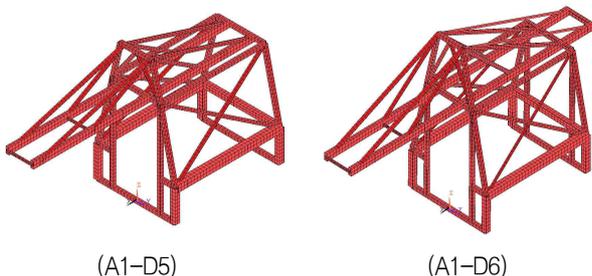


Fig. 1 Gantry crane CAD models

Fig. 2는 충남대학교 중형 무향풍동의 그림과 사양으로 1차와 2차 챔버의 크기는 각각 1.25x1.25x4m와 1.8x1.8x5.2m이고 최대풍속은 65m/s와 35m/s이며 실험은 고속풍속을 위해 챔버 1에서 수행되었다. 또한 시험체 모델 형상에 대한 좌표축의 설정과 풍향, 모델의 회전과 관련된 Yaw 각의 정의, 풍동의 시험부에 설치된 모델, 하중 측정장치의 구성을 보이고 있다. 풍동실험에서는 풍향이 고정되어 있고 (X방향), 시험체의 각도를 변경하기 위하여 NI Compact DAQ 장비를 이용하여 각 센서의 출력 신호를 측정하고, 스텝 모터의 제어를 통해 모델이 10° 간격으로 회전하며 풍향의 변화에 따른 반력을 측정하게 된다. 모델의 무게 중심점에 설치된 폴브리지형 6분력계의 스트레인 게이지에서 6초간 취득된 전압은 NI compact DAQ 장비로 제어 프로그램에 입력된다. 풍동에서의 벽면 효과나 봉쇄비 등을 고려하여 100:1 축소모형을 사용하였고 재질은 발사나무이다.

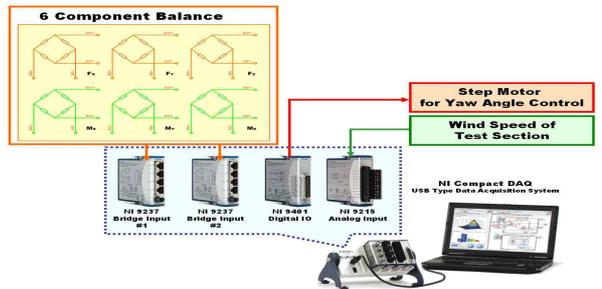
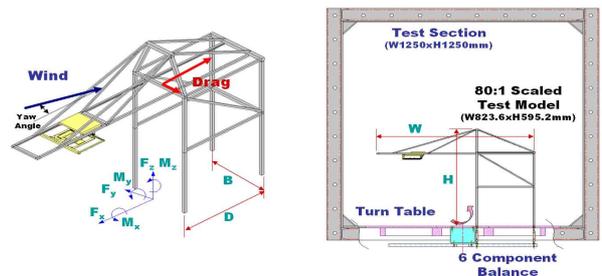


Fig. 2 Wind tunnel system and crane model

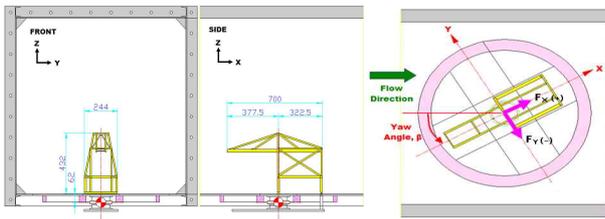


Fig. 3 Wind direction and rotation angle

Fig. 3은 모델의 풍동내의 설치된 형상과 유속 방향, 각도별 힘의 방향을 나타낸다. X방향 풍속은 20m/s로 시작해서 10m/s씩 증가되며 각 풍속별로 10°씩 회전시 각 방향 반력, 모멘트가 풍속별로 표시되었다. 실험 중 A1-D5 모델은 58m/s, A1-D6 모델은 50m/s에서 파손되었는데 발사나무 재질로 계속 반복 실험을 함으로써 풍하중을 받는 시간이 점차 늘어났고, 피로가 쌓이면서 목표 풍속에 이르기 전에 파손이 발생하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각 풍속별 각 힘의 성분값이다. 각 그림에서 바람이 크레인의 정면으로 불때가 0°이고 90°가 측면에서 부는

바람에 해당된다. Fx는 0°에서 최대, 90°에서 0 N에 근접하고 90°~180°는 모델이 회전하여 반대가 되므로 -Fx로 대칭이 된다. 또한 180°~360°는 0°~180°와 대칭이 된다. 여기서 측정값들이 완전히 대칭이 되지 않는 것은 0°는 전면에서 보는 크레인이고 180°는 후면에서 보는 크레인이므로 수평 면적이 서로 다르기 때문이다. 또 예를 들어 30°에서는 0°와 달리 크레인의 수평형상(바람을 받는 형상)이 바뀌어 Fx가 30°부근에서 최대가 되지만 대신에 Fy가 발생하여 풍력계수 계산시 보정되어 진다. XY 평면의 풍하중을 받는 모델의 특성상 Fz의 크기는 무시할 만한 수준이다.

Fy는 0°에서 0 N이고 90°부근에서 최대값이 되고 180°에서 0 N으로 수렴하고 180°~360°의 경우 대칭을 보임을 알 수 있다. 여기서 Fy 값이 (-)임은 풍향이 반대쪽 측면임을 의미한다. XY 축에 대한 모멘트 Mx, My, Mz도 유사한 과정을 보인다. 실제 크레인의 경우 바뀌로 지지되어 경계조건이 자유로운 관계로 모멘트가 발생하지 않고 풍동실험의 경우는 바닥 고정이라 발생하는 Mx, My 값들은 크레인의 전도 모멘트라고 보면 되며 Mz의 경우에는 값들이 0N·m 근처로 Mx, My 보다 작음은 당연하다.

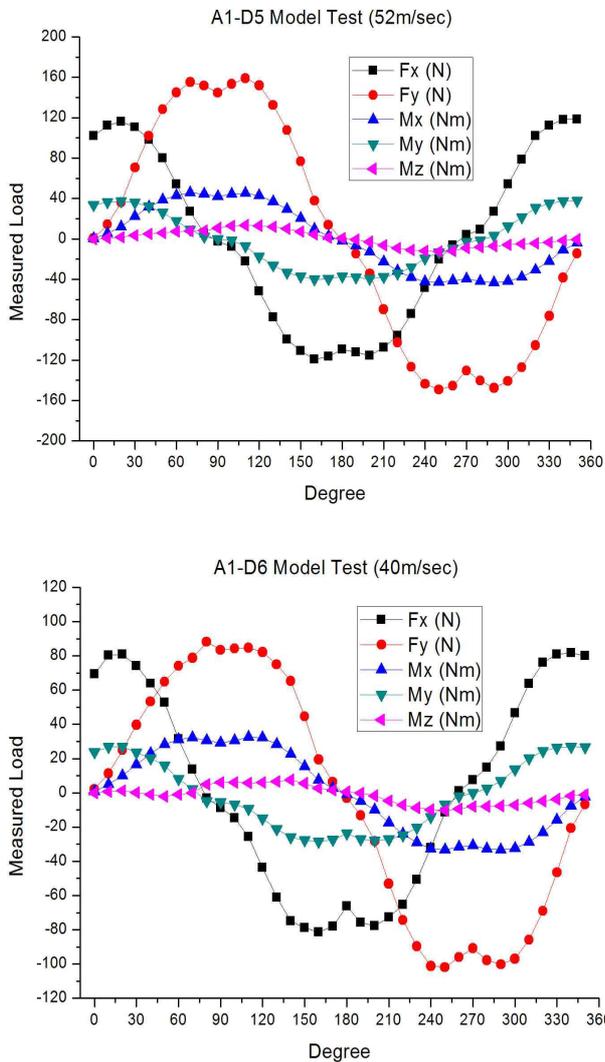


Fig. 4 Force component value by wind tunnel model test

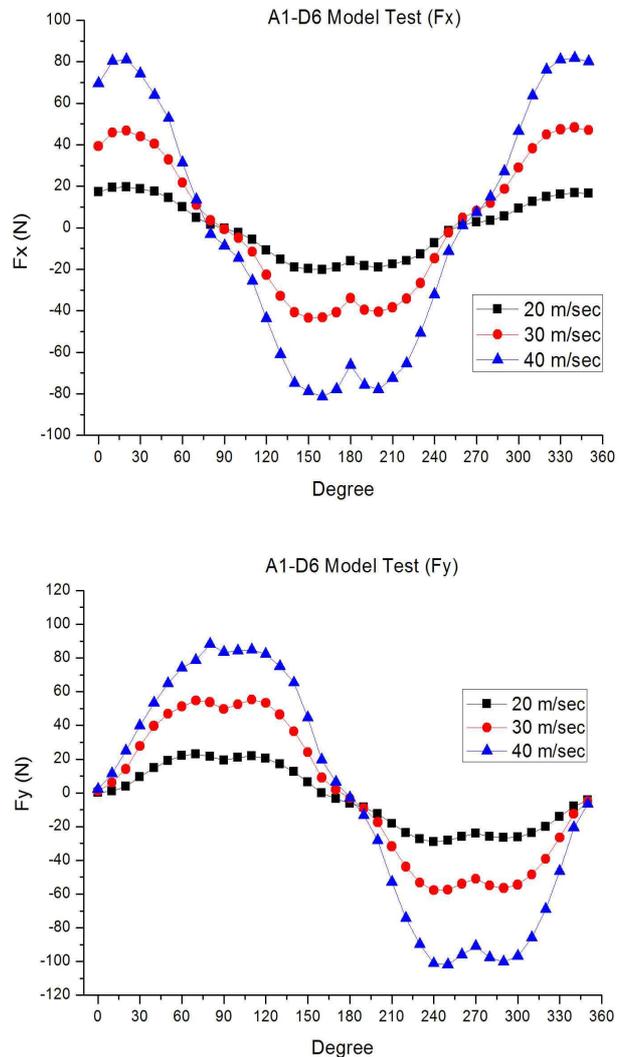


Fig. 5 X, Y-Axis force component value by wind tunnel model test (A1-D6)

Table 1에는 40 m/s 까지의 실험에 의한 반력값이 있는데 풍속과 반력값의 관계에서 선형의 관계가 있음을 볼 수 있고, 선형 비례를 사용하면 70 m/s 에서의 반력값을 추정할 수도 있다. 풍하중계수 C_D 는 식 (2)에서 반력을 풍속의 제곱과 CAD 도면에서 산출된 수평면적 등으로 나누어 구한다. 모멘트 계수 C_{Mp} 역시 계산된 반력 모멘트를 나누되 모멘트 암(거리)이 추가되고 Table 2에 계산된 풍력계수가 있다. 0°의 경우, 각 속도별로 풍력계수가 1.96으로 선급에서 제시하는 값 2.0에 근접하는데 비해 다른 각도 특히 측면 하중인 90°, 270°에서 차이가 크다. 이러한 결과는 다음 원인으로 사료된다. 0°의 경우는 크레인이 풍하중에 견디기에 가장 견고한 구조로 수평면적도 제일 작다. 많은 수의 긴 봉 구조들이 있는 크레인 구조에서 봉 구조의 유연성이 가장 문제가 되지 않는 형태라서 반력값의 정확도가 유지된 것으로 보인다. 즉 풍동내의 모델 강성이 잘 유지되고 또한 바람을 받는 수평면적과 CAD에서 산출한 수평면적의 상사관계가 일치하여 반력값도 정확히 산출된 것으로 보인다. 반면 90°의 경우 바람이 크레인의 옆에서 직각으로 불어 수평면적이 가장 크고 긴 봉 부재들이 많아 모델의 강성이 실제에 비해 유연하여 반력의 정확도가 감소한 것으로 보인다. 모델의 강성에 의해 발생한 일부 오차를 제외하고 풍력계수는 대부분 1.7~2.0 근처의 값이 계산되어 실험과정이 정상적으로 수행된 것을 알 수 있다.

Table 1 Reaction force value from the wind tunnel test (Model A1-D6)

Wind Speed (m/s) Force		Wind (N)			
		20	30	40	70 (Estimate)
Head Wind	0°	17.2	39.2	69.2	211.6
	180°	16.0	33.9	66.0	201.8
Lateral Wind	90°	19.4	49.6	83.4	254.7
	270°	24.0	51.0	90.7	277.2

Table 2 Wind force coefficient from the wind tunnel test (Model A1-D6)

Degree(°)		Wind Speed(m/s)			
		0	90	180	270
Wind Speed(m/s)	20	1.95	1.38	1.82	1.70
	30	1.97	1.56	1.70	1.60
	40	1.96	1.48	1.87	1.60
	70 (Estimate)	1.96	1.48	1.87	1.60

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad C_{M_p} = \frac{M_p}{\frac{1}{2}U_0^2 AH} \quad (2)$$

- F_D : 항력(N)
- M_p : 피칭 모멘트(N·m)
- ρ : 공기 밀도 (20°C, 1.2kg/m³)
- U_0 : 균일 유동 속도 (m/sec), 20, 30, 40
- A : 수평면적 (m²)
- H : 지면에서 크레인 꼭대기까지의 높이 (m)

2.2 크레인 모델의 풍하중 구조해석

Fig. 6과 Fig. 7의 구조해석모델의 재질은 일반강이고 주요부재는 보 요소, 기둥요소 같은 중량물은 질량요소, 크레인 부재를 연결하는 와이어나 봉 같은 부재는 링크요소가 사용되었다. 실험에서 0°시 산출된 풍력계수가 1.96으로 선급에서 제시된 사각형 부재의 풍력계수 2.0과 거의 일치하므로 구조해석시 풍력계수는 2.0을 사용하였고, 풍속은 20~70m/s로 각 10m/s 간격으로 해석하였다. 정면과 측면 방향 70m/s 풍하중 해석에서 가장 큰 변위가 발생하는 부분은 크레인 붐을 지탱해주는 버팀대 빔으로 정면풍 하중시는 6.6cm, 측면풍하중시는 8.7cm이었고 평균응력이 최대치로 나오는 부분은 기둥 및 크레인 평형추가 설치되는

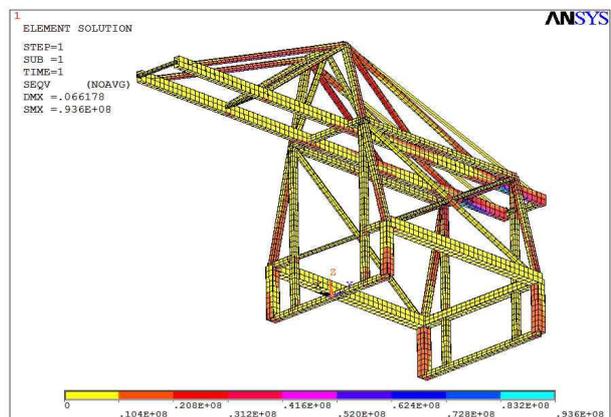
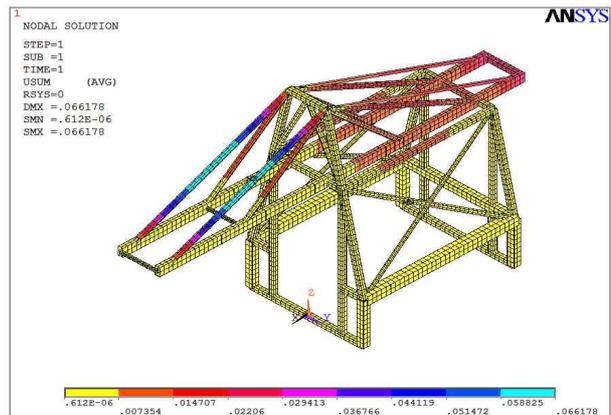


Fig. 6 Displacement and stress at 70m/s head wind condition by FEM (A1-D6)

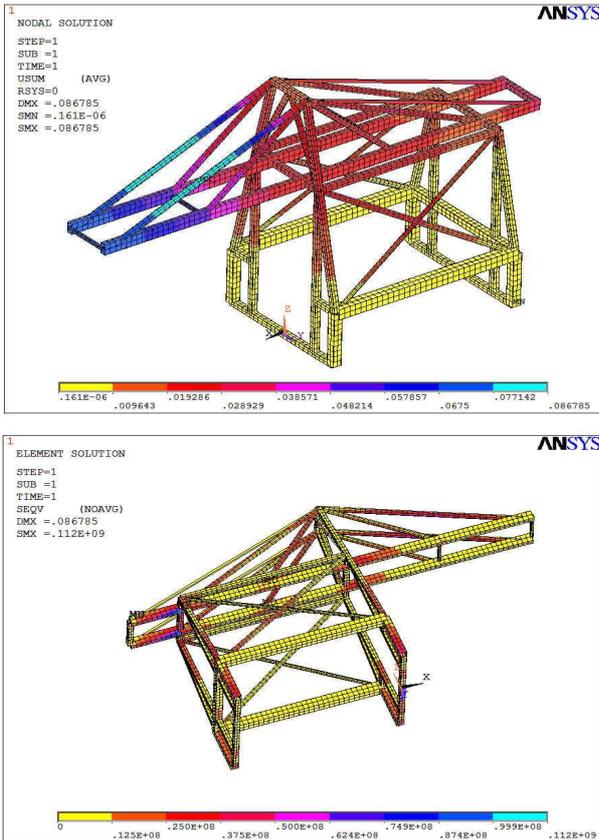


Fig. 7 Displacement and stress at 70m/s lateral wind condition by FEM (A1-D6)

크레인 뒤쪽 부분 빔과 크레인 뒷부분 기둥 연결부위로 나타났다. 정면풍하중시는 93.6MPa, 측면풍하중시는 112MPa 정도인데 이는 일반적인 구조용 강철의 항복응력인 250~350MPa 보다 낮은 값으로 크레인이 설계풍속에도 견딜 수 있음을 보여준다.

3. 타이다운 지지 구조 설계

Fig. 8은 항만용 갠트리 크레인을 항만 지표면에 고정시키는 타이다운(Tie-down)과 스토리지 핀(Stowage pin) 그림들이다.

설계풍속시 크레인에 발생하는 모멘트의 평형관계식은 Fig. 9에서 다음 식 (3)이 된다.

$$hF_{DL} - b_{WL}W - b_{TL}T_{DL} = 0 \tag{3}$$

$$hF_{DH} - b_{WH}W - b_{TH}T_{DH} = 0$$

h : 지면에서 크레인 지지보의 높이(m)

W : 크레인 자중(ton)

F_{DL} : 크레인 횡방향 전도력(tonf)

b_{TL} : 크레인 횡폭(m), b_{WL} : 1/2크레인 횡폭(m)

T_{DL} : 크레인의 횡방향 지면 파지력(ton)

F_{DH} : 크레인 종방향 전도력(ton)

b_{TH} : 크레인 종폭(m), b_{WH} : 1/2크레인 종폭(m)

T_{DH} : 크레인의 종방향 지면 파지력(ton)

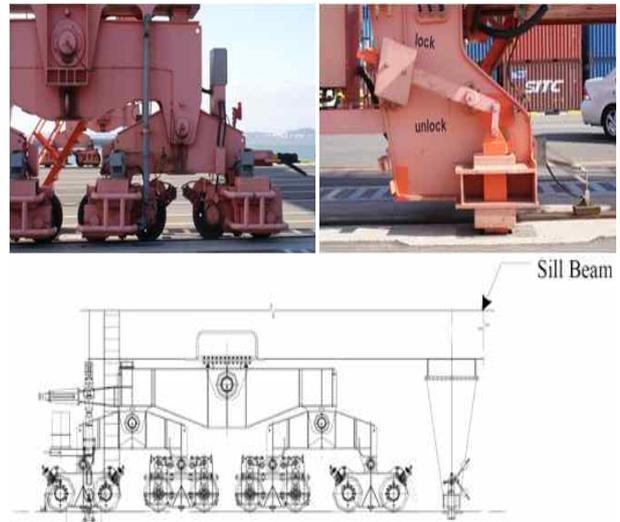


Fig. 8 Crane tie-down, stowage-pin, & sill beam

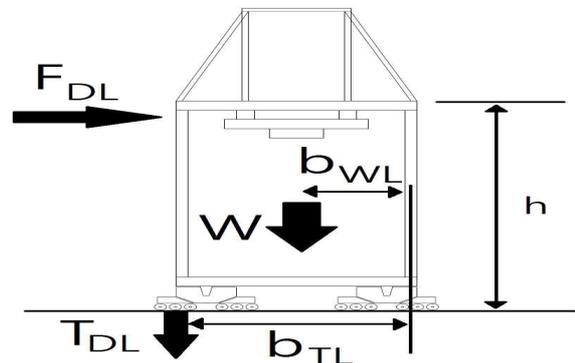


Fig. 9 Tie-down tensile strength free body diagram at lateral wind

A1-D6 모델의 경우에 대한 제원은 $h=34.4$, $b_{TL}=24.4$, $b_{WL}=12.2$, $b_{TH}=33$, $b_{WH}=6.5$ m, 설계풍속은 70m/s이다. 크레인의 전체하중은 $W=1036$ ton, Lateral wind에서 크레인 전도력 $F_{DL}=110$ ton, Head wind 시 $F_{DH}=52$ ton로 계산되었고, (3)의 식에 설계제원을 대입하면 크레인 지면 파지력 $T_{DL}=403.1$ ton, $T_{DH}=444.5$ ton이 된다. 크레인의 추기둥이 4개인데 기둥 양쪽에 타이다운을 설치하기 때문에 T값을 8로 나누어주면 50.3, 55.5ton이 산출된다. A1-D6 모바일 크레인의 하부 이동장치의 높이가 4.8m 이고 크레인 하부지지 수평 빔의 높이가 1m 일 때, 기둥 하부 최하단에서 2m 정도 더 올라간 위치에 연결한다고 가정할 길이의 합인 타이다운의 길이는 7.8m 로 가정한다. 세장기둥에 대한 좌굴 검증을 위하여 일반적인 재료역학에서 사용되는 기둥의 좌굴임계하중 계산식 $P_{cr} = \frac{\pi EI}{L^2}$, 유효길이 KL , 임계세장비식 $(KL/r)_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_Y}}$ 에 AISC의 안전계수식 $n = \frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8(KL/r)_c} - \frac{(KL/r)^3}{8(KL/r)_c^3}$ 와 허용축하중식 $P_{allow} = \sigma_{allow} A$ 를 적용하였다. 직경 200mm 두께 1.4mm로, 항복응력 400MPa 강으로 설정된 타이다운기둥의 좌굴임계하중과 허용축하중은 산출된 파지력 55 톤에 비해 2.6배, 2.2배로 안정성이 충분히 갖추어 졌다.

4. 결론

대부분 사각형 기둥 골재로 구성된 갠트리 크레인에 대해 풍동실험에 의해서 1.5~2.0 범위의 풍력계수 값이 산출되었다. 수풍면적이 제일 작고 풍향에 대해 구조적으로 안정된 0°(헤드방향)의 경우, 풍력계수 값이 1.96으로 한국선급에서 제시되고 있는 풍력계수 값 2.0과 같음을 알 수 있다. 풍동내의 모델 강성이 잘 유지되어 반력 값이 정확히 산출되고 바람을 받는 수풍면적과 CAD에서 산출한 수풍면적의 상사관계가 일치하는 경우 실험 풍력계수의 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 실험에 의한 풍력계수가 선급에서 제시하는 값과 근사하므로 구조해석에는 풍력계수 값 2.0을 적용하여 해석한 결과, 안전한 크레인 구조의 응력 값이 산출되었다. 한편 모선에 설치되는 크레인의 경우 해상상태에 따른 모선의 운동이 크레인의 좌우 횡동요를 유발할 수 있어 타이 다운뿐만 아니라 크레인과 모선을 연결해주는 특별한 지지 장치가 필요하다. 향후 와류에 의한 크레인의 진동을 검증할 수 있는 와류풍동실험도 필요하다. 즉 태풍의 경우 일정한 풍속이 아니고 와류를 동반하므로 현재 연구보다 한 단계 앞선 와류 풍동실험을 수행함이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 2009 모바일하버사업의 지원에 의한 것으로 연구지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Ha, Y.C. Kim, J.R. & Kim, K.S., 1998. Basic Wind Speed Map of Korea for Wind Resistant Design. *Journal of the wind engineering institute of Korea*, 1, pp.85-92.

Ha, Y.C., 2000. The Wind Force Explanation for 'Standards for Structural Load', revised by Ministry of Construction and Transportation. *Journal of the wind engineering institute of Korea*, 4(1), pp.11-22.

Ha, Y.C., 2005. Wind Tunnel Test for Wind Resistance Building Design. *Journal of the wind engineering institute of Korea*, 9(1), pp.11-19.

Han, K.J., et al., 2006. July, *An Estimation of the Structural Stability of Container Crane Using Wind Tunnel Test and Computational Fluid Dynamics*, Yeungnam University Sea Grant Annual Report.

Kang, J.H. Kim, Y.H. & Lee, S.J., 2004. Experimental Study of Wind Load on a Container Crane in Atmospheric Boundary Layers. *Journal of the wind engineering institute of Korea*, 8(2), pp.217-224.

Kim, D.H. Oh, B.C. Jeon, I.S. & Han, S.H., 2004. Tie-down tension of container crane under typhoon. *Proceedings of Coastal and Ocean Engineering in Korea*, pp.146-149.

Kim, D.H. Oh, B.C. & Jeon, I.S., 2005. Effect of Wind Velocity Variation on Safety Factor of Container Crane Tie-downs. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(6), pp.1127-1131.

Kim, D.W. Cho, S.K. Kim, J.R. & Ha, Y.C., 2002. Comparison of the Wind Loads on Buildings Evaluated by AIK Recommendation for Loads and Wind Tunnel Test. *Journal of the wind engineering institute of Korea*, 5, pp. 81-86.

Kim, J.R., 2003. Wind Resistance Design Learning from Typhoon Maemi. *Journal of the wind engineering institute of Korea*, 7(2), pp.150-156.

Korean Register of Shipping(KR), 2009, KR-Rules.

Kwon, S.K. et al., 2005. A Study on Stability of the Container Crain with respect to the Direction of wind Load. *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp.1984-1987.

McCarthy, P. & Vazifdar, F., 2004. *Securing Cranes for Storm Wind: Uncertainties and Recommendations*, Liftech Consultants Inc. (Ports May 2004, 23-26, Houston USA).



이재환

김태완

장인권

한순흥