

실험 및 해석적 방법을 이용한 컨테이너 크레인의 풍하중 분석

이성욱* · 권순규** · 한동섭*** · 한근조****

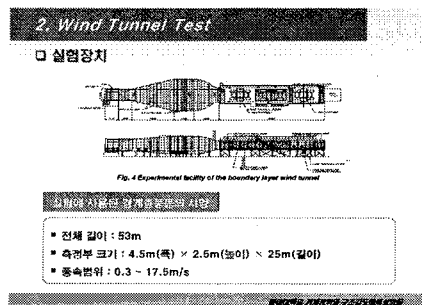
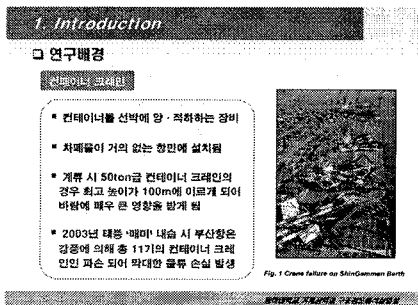
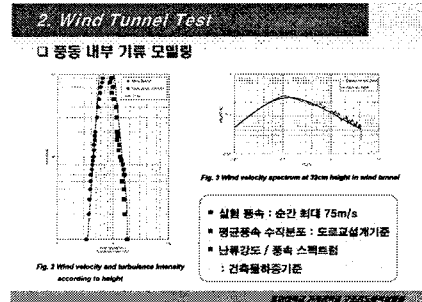
*, **동아대학교 대학원 기계공학과, ***동아대학교 BK21 총괄사업단, ****동아대학교 기계공학부 교수

요약 : 컨테이너를 선박에 양·적하하는 장비인 컨테이너 크레인은 차폐물이 거의 없는 항만에 설치되며, 계류시 전체 높이가 100m에 달하게 되므로 풍하중에 매우 큰 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너 크레인에 작용하는 풍하중을 정확하게 분석하기 위하여 풍력실험과 유한요소해석, 전산유동해석을 통하여 컨테이너 크레인이 받는 풍하중을 분석하였다. 우선 대기 경계층 풍동을 이용한 풍력실험을 수행하여 풍향 및 기계실 위치에 따른 풍력계수를 측정하고, 이를 이용하여 컨테이너 크레인이 받는 풍하중을 분석하였다. 그리고 풍력실험에서 얻어진 반력비를 이용하여 유한요소해석을 수행함으로써 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중과 지지점에서의 전도력을 계산하였다. 마지막으로 전산유동해석을 수행함으로써 컨테이너 크레인 주위의 유동현상을 고찰하고 컨테이너 크레인 표면에서의 풍압력과 풍하중을 실험결과와 비교·분석하였다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 풍하중, 풍력실험, 유한요소해석, 전산유동해석

실험 및 해석적 방법을 이용한 컨테이너 크레인의 풍하중 분석

이성욱 (동아대학교 대학원 기계공학과)
 권순규 (동아대학교 대학원 기계공학과)
 한동섭 (동아대학교 BK21 총괄사업단)
 한근조 (동아대학교 기계공학과)



* 대표저자 : 이성욱(정회원) lsw1126@korea.com

** 정회원 skkwon@korea.com

*** 정회원 dshan@dau.ac.kr

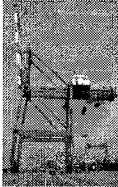
**** 정회원 gjhan@dau.ac.kr

2. Wind Tunnel Test

□ 실험모형

실제 모형

- Out Reach : 51m
- Rail Span : 30.5m



실험 모형

- Out Reach : 255mm
- Rail Span : 152.5mm



1/200 축소

동해대학교 기계공학부 구조공학실험실

2. Wind Tunnel Test

□ 실험 풍향

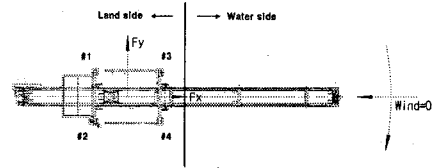


Fig. 6 Definition of an incidence angle of the wind load

- 컨테이너 크레인이 최우대칭 형상이므로 0° 에서 180° 까지 10° 간격으로 19개 풍향에 대하여 측정 수행

동해대학교 기계공학부 구조공학실험실

2. Wind Tunnel Test

□ 측정방법

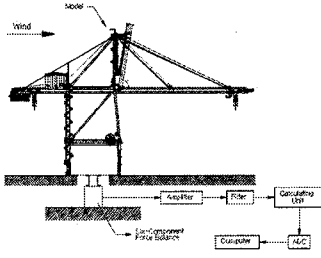


Fig. 5 Measuring process of wind tunnel test

동해대학교 기계공학부 구조공학실험실

2. Wind Tunnel Test

□ 기계실 위치 변화

- 거더와 붐, 래그가 만나는 위치로부터 기계실이 떨어진 위치를 변화
 - Case 1 : 6m(실물) / 30mm(모형)
 - Case 2 : 13m(실물) / 65mm(모형)
 - Case 3 : 33m(실물) / 165mm(모형)



Fig. 7 Wind tunnel test model with respect to the machinery house location

동해대학교 기계공학부 구조공학실험실

2. Wind Tunnel Test

□ 데이터 수집 조건

- 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
- Number of measurement : 10 times

동해대학교 기계공학부 구조공학실험실

3. Finite Element Analysis

□ 풍하중 산출식 및 풍향에 따른 반력비

풍하중 산출식

$$P = C_f \cdot C_d \cdot G_f \cdot q_z \cdot A$$

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

$$v_z = v_b \cdot K_z \cdot K_{xt} \cdot I_w$$

풍향에 따른 반력비

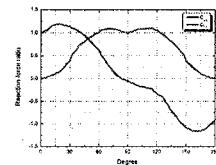


Fig. 8 Reaction force ratio investigated in the wind tunnel test

- 건축물하중기준 참고
- 설계풍속 : 75m/s
- 풍향에 따른 반력비 적용

동해대학교 기계공학부 구조공학실험실

3. Finite Element Analysis

□ 유한요소모델 및 경계조건

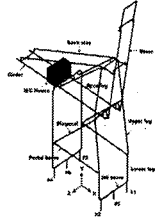


Fig. 9 Structure skeleton drawing of a container crane

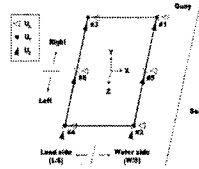


Fig. 10 Boundary condition of a container crane

중대형연립기항만크레인구조모형해석결과

5. Results and Discussions

□ 평균풍력계수

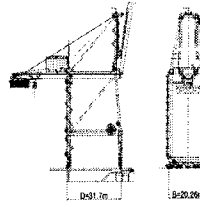


Fig. 12 Representational length of a container crane

□ 항력계수

$$C_{Dx} = \bar{F}_x / (q_0 B H) \quad (1)$$

$$C_{Dy} = \bar{F}_y / (q_0 D H) \quad (2)$$

□ 전도모멘트계수

$$C_{Mx} = \bar{M}_x / (q_0 D H^2) \quad (3)$$

$$C_{My} = \bar{M}_y / (q_0 B H^2) \quad (4)$$

중대형연립기항만크레인구조모형해석결과

4. Computational Fluid Dynamics

□ 컨테이너 크레인 주변의 유동장

- 유동장 형상 : 원통형상 (d=600m, h=200m)
- 격자 및 절점수 : 258만개 / 67.7만개
- 경계층 영향을 고려하기 위해 Prism Layer 형성
- 외부 유동장을 원통으로 구성함으로써 각도별 모델에 따른 격자망 생성 작업의 반복 회피
- 격자수가 동일하므로 분석 결과의 신뢰성 향상

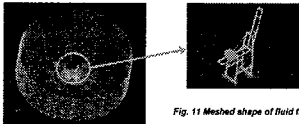


Fig. 11 Meshed shape of fluid field

중대형연립기항만크레인구조모형해석결과

5. Results and Discussions

□ 항력계수

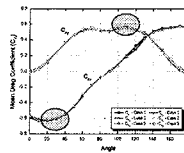


Fig. 13 Drag coefficient according to an incidence angle of wind load

- X 방향 항력계수
 - 최대값 발생 풍향 : 10° ~ 20°
 - 각 case별도 입사각 0° 보다 6.9%, 10%, 8.6% 가량 더 크게 발생됨
- Y 방향 항력계수
 - 최대값 발생 풍향 : 110°
 - 각 case별도 입사각 90° 보다 13.5%, 9.9%, 7.2% 가량 더 크게 발생됨

- Case별 항력계수의 분포는 모든 각도에서 거의 동일하였음
- 항력계수의 최대값은 풍하중이 컨테이너 크레인의 X나 Y방향 정면이 아니라 10° ~ 20° 경사지게 작용할 때 발생함

중대형연립기항만크레인구조모형해석결과

4. Computational Fluid Dynamics

□ 난류모델 및 경계조건

□ 난류모델

- 해석프로그램 : ANSYS CFX 10
- 난류모델 : K-ε 모델

□ 경계조건

- 지면과 컨테이너 크레인 표면은 No Slip 경계조건 적용
- 윗면은 Opening 경계조건을 적용하여 유동장 내외부 조건이 동일하게 구성함
- 고도에 따른 풍속변화를 고려하기 위해 '건축물허용기준에 의거한 풍속 프로파일 구성

중대형연립기항만크레인구조모형해석결과

5. Results and Discussions

□ 전도모멘트계수

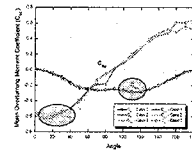


Fig. 14 Overturning moment coefficient according to an incidence angle of wind load

- X 방향 전도모멘트계수
 - 최대값 발생 풍향 : 110° ~ 120°
 - 각 case별 최대값 : -0.2842(case1), -0.2847(case2), -0.2737(case3)
- Y 방향 전도모멘트계수 최대값은 X 방향보다 2배 가량 크게 발생하였음

- 기계설 위치가 변화더라도 전도모멘트계수는 Y 방향의 일부 구간을 제외하고 거의 모든 각도에서 유사한 분포를 보였음
- 전도모멘트계수의 최대값은 풍하중이 X나 Y방향에서 10° ~ 20° 경사지게 작용할 때 발생하였음

중대형연립기항만크레인구조모형해석결과

5. Results and Discussions

□ 각 case별 항력 및 전도모멘트계수

Table 1. Wind load coefficients according to each case

Case		0°	90°	180°	Max
Case 1	C_{pe}	-0.5851	-0.0093	0.6530	-0.8343
	C_{ps}	-0.0272	0.5039	-0.0212	0.5720
	C_{pe}	0.0154	-0.2379	0.0001	-0.2842
	C_{ps}	-0.5433	0.0159	0.5241	-0.5886
Case 2	C_{pe}	-0.5873	0.0015	0.5490	-0.8243
	C_{ps}	-0.0182	0.5341	-0.0064	0.5930
	C_{pe}	0.0017	-0.2469	0.0071	-0.2847
	C_{ps}	-0.5828	0.0291	0.5172	-0.6181
Case 3	C_{pe}	-0.5789	-0.0065	0.5447	-0.8299
	C_{ps}	0.0019	0.5091	-0.0026	0.5485
	C_{pe}	0.0001	-0.2377	-0.0145	-0.2727
	C_{ps}	-0.5823	0.0167	0.5508	0.6508

충청대학교 기계공학과 구조진동학실험실

5. Results and Discussions

□ FEM을 이용한 풍향에 따른 각 지지점의 반력

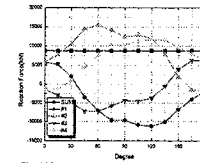


Fig. 18 Reaction force at each supporting point according to the wind direction

- 전체 반력의 합
 - 모든 각도에서 반력의 합은 일정함
 - 컨테이너 크레인의 자중과 일치함
- 풍하중의 입사각: 180° ~ 360°
 - #1, #2와 #3, #4의 반력이 바뀜

- 최대 인장 반력 발생 지점
 - 해측 지지점(#1): 120° 지점
 - 육측 지지점(#3): 60° 지점

충청대학교 기계공학과 구조진동학실험실

5. Results and Discussions

□ 풍하중에 의한 지지점에서의 전도력

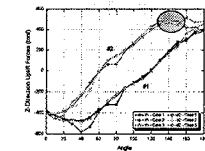


Fig. 15 Uplift forces of #1, #2 supporting points according to an incidence of the wind load

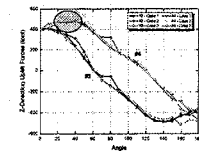


Fig. 16 Uplift forces of #3, #4 supporting points according to an incidence of the wind load

- 컨테이너 크레인은 좌우대칭형상이므로 #1과 #2, #3과 #4 지지점의 전도력은 서로 크기는 동일하나 반대 방향으로 발생됨
- 자중을 고려하지 않을 때 발생하는 최대 전도력: 490tonf
 - #2: 130° ~ 150° 부근 / #4: 20° ~ 40° 부근

충청대학교 기계공학과 구조진동학실험실

5. Results and Discussions

□ FEM을 이용한 기계실 위치 변화에 따른 전도력 변화

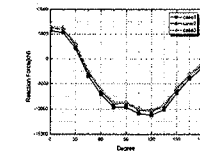


Fig. 19 Reaction force of #1 supporting point according to the MC house location

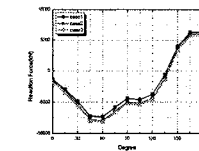


Fig. 20 Reaction force of #3 supporting point according to the MC house location

- 기계실의 위치가 해측에 가까워질수록 (Case 1 → Case 3)
 - 해측 지지점(#1)의 인장반력 970kN 감소
 - 육측 지지점(#3)의 인장반력 740kN 증가

충청대학교 기계공학과 구조진동학실험실

5. Results and Discussions

□ 자중을 고려할 경우 지지점에서의 전도력

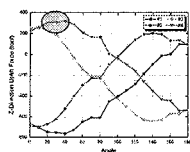


Fig. 17 Uplift forces considering the weight of a container crane

- 컨테이너 크레인의 자중을 고려할 경우
 - 자중으로 인한 압축력이 풍하중에 의한 전도력을 상쇄하게 됨
 - 최대 전도력: 320tonf (case 3)
- 기계실이 해측으로 이동할 경우
 - 육측 지지점(#1, #2): 압축력 감소
 - 해측 지지점(#3, #4): 압축력 증가

Table 2. Compressive forces of each supporting point caused by the weight of a container crane

Supporting Point	#1	#2	#3	#4
Compressive Force	286.7tonf	287.0tonf	152.8tonf	153.0tonf

충청대학교 기계공학과 구조진동학실험실

5. Results and Discussions

□ CFD를 이용한 풍향별 컨테이너 크레인 표면 압력 분포

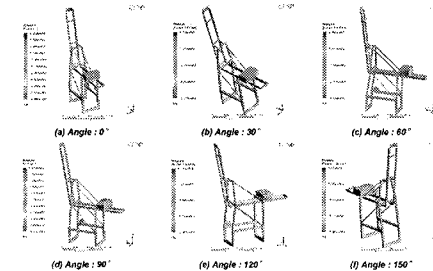


Fig. 21 Wind pressure distribution of a container crane according to wind direction

충청대학교 기계공학과 구조진동학실험실

5. Results and Discussions

□ CFD를 이용한 컨테이너 크레인의 각 방향 풍하중

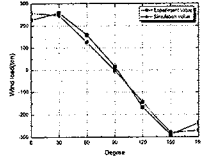


Fig. 22 X directional wind load according to the wind direction

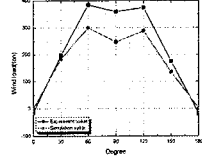


Fig. 23 Y directional wind load according to the wind direction

- 전산유동해석과 풍력실험을 통한 풍하중 비교
 - 0° (풍하중이 X방향으로 작용되는 경우) : 10% 낮음
 - 90° (풍하중이 Y방향으로 작용되는 경우) : 46% 낮음

풍하중의 경우, 기둥과 보의 구조적 특성에 따라

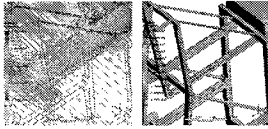
6. Conclusions

- 50톤급 컨테이너 크레인의 풍동(풍력)실험을 통하여 풍향과 기둥 위치 변화에 따른 항력계수와 전도모멘트계수를 측정하였음
- 풍력실험을 통하여 얻어진 평균풍력계수를 이용하여 50톤급 컨테이너 크레인 각 지지점에서 풍하중에 의해 발생하는 전도력을 계산하고 풍향과 기둥 위치 변화에 의한 특성을 분석하였음
- 유한요소해석을 통하여 지지점의 인장력을 분석한 결과 해측 지지점(#1)의 최대 인장력은 약 11,200kN이며, 육축 지지점(#3)은 약 7,300kN이 발생하였음

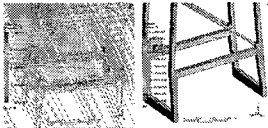
풍하중의 경우, 기둥과 보의 구조적 특성에 따라

5. Results and Discussions

□ 컨테이너 크레인 부재의 차폐효과



(a) Girders



(b) Portal beam

- 차폐효과
 - 컨테이너 크레인의 기둥, 보, 포탈빔의 경우 풍하중이 작용하는 방향에 마주보고 있는 부재사이의 간격이 좁아 풍상측 부재에 비해 풍하측의 부재가 받는 풍압력이 감소하게 됨

풍하중의 경우, 기둥과 보의 구조적 특성에 따라

6. Conclusions

- 전체 지중의 15%를 차지하는 기둥 위치 변화에 의해 해측 지지점(#1, #2)의 인장 반력값은 약 970kN 증가하지만, 육축 지지점(#3, #4)은 약 740kN 감소되었음
- 전산유동해석 결과 풍하중이 정면으로 받는 부분은 양의 압력을 받지만, 부재의 뒷면은 유동박리에 의한 후류로 인하여 음의 압력이 발생하였음
- 컨테이너 크레인에서 마주보고 있는 부재 사이의 간격이 좁은 Boom, Girders, Portal Beam에서는 차폐효과에 의해 풍하측의 풍압력이 풍상측에 비하여 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었음

풍하중의 경우, 기둥과 보의 구조적 특성에 따라