

컨테이너 크레인의 안정성에 대한 풍동실험과 유한요소해석의 비교 Comparison of finite element analysis with wind tunnel test on stability of a container crane

한동섭 · 이성욱 · 한근조
D. S. Han, S. W. Lee and G. J. Han

(접수일 : 2008년 10월 29일, 수정일 : 2008년 11월 26일, 채택확정 : 2008년 12월 1일)

Key Words : Container Crane (컨테이너 크레인), Wild Load (풍하중), Uplift Force (전도력), Wind Tunnel Test (풍동실험), Fluid-Structure Interaction (유동-구조연성해석)

Abstract : This study is conducted to provide the proper analysis method to evaluate the stability of a container crane under wind load. Two analysis method, namely structure analysis and fluid-structure interaction, are adopted to evaluate the stability of a container crane in this investigation. To evaluate the effect of wind load on the stability of the crane, 50-ton class container crane widely used in container terminals is adopted for analysis model and 19-values are considered for wind direction as design parameter. We conduct structure analysis and fluid-structure interaction for a container crane with respect to the wind direction using ANSYS and CFX. Then we compare the uplift forces yielded from two analysis with it yielded from wind tunnel test. The results are as follows:

- 1) A correlation coefficient between structure analysis and wind tunnel test is lower than 0.65 (as 0.29~0.57), but between fluid-structure interaction and wind tunnel test is higher than 0.65 (as 0.78~0.86).
- 2) There is low correlation between structure analysis and wind tunnel test but very high correlation between fluid-structure interaction and wind tunnel test.

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 최대 100m에 달하게 되므로 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다¹⁾. 또한 전 세계적으로 엘리뇨(El-nino), 라니냐(La-nina)와 같은 기상 환경의 변화로 인하여 태풍의 위력이 점차 증대되고 있으며, 부산의 경우에도 이러한 기상변화에 의하여 순간 최대풍속이 증감을 반복하면서 조금씩 증가추세에 있다.

따라서 이와 같은 풍하중의 영향을 최소화시키기

위하여 컨테이너 크레인에는 타이다운(tie-down)과 스토이지 핀(stowage pin)과 같은 계류장치를 설치하여 강풍으로 인하여 작업이 중지될 경우(휴지 시) 컨테이너 크레인을 지정된 위치에 고정시켜 전도와 이탈을 방지하고 있다²⁾. 이와 같은 계류장치는 일반적으로 유한요소해석을 이용한 구조해석을 통하여 설계 최대 풍하중이 컨테이너 크레인에 작용할 때를 가정하고 각 지점에서 발생하는 전도력(uplift force)을 분석하여 컨테이너 크레인의 전도를 방지하는 타이다운의 직경을 설계하거나 지점의 전단력(수평력)을 구하여 컨테이너 크레인의 이탈을 방지하는 스토이지 핀 등을 설계하고 있다.

그러므로 풍하중에 의한 컨테이너 크레인의 전도 방지를 위한 계류장치 설계를 위해서는 무엇보다도 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 따라서 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중에 의한 지점의 전도력과 전단력을 정확하게 도출하기 위해서는 풍동실험을 수행하여

한근조(책임저자) : 동아대학교 기계공학과
E-mail : gjhan@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7650
한동섭 : 동아대학교 BK21총괄사업단
이성욱 : 효성중공업(주) 연구원

야 하나 일반적으로 제작될 모든 컨테이너 크레인에 대하여 풍동실험을 수행한다는 것은 경제적인 면에서나 실용적인 면에서 사실상 불가능하므로 시뮬레이션을 통한 내풍 설계를 수행해야 한다.

태풍 ‘매미’ 이후 풍하중을 받는 컨테이너 크레인의 구조 안정성에 관한 중요성이 부각됨으로써 Lee^{3,4)} 등은 유한요소해석을 이용하여 컨테이너 크레인의 구조적 안정성을 분석하였으며, 축소모형에 대한 풍력실험을 실시하여 그 결과를 발표하였다.

그러나 기존의 내풍설계 방법은 단순한 보요소를 사용하여 컨테이너 크레인을 구성하고 작용되는 풍하중을 설계기준을 참고로 수식적으로 계산하여 적용하게 됨으로써 풍하중을 받는 컨테이너 크레인의 구조적 안정성 문제와 같이 유동과 구조적인 문제가 복합적으로 발생하는 경우에는 해석결과의 정확성과 신뢰성이 떨어지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 유동-구조연성해석(FSI:Fluid-Structure Interaction)이라는 새로운 해석기법이 최근에 제시되었다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 현재 항만에서 널리 사용되고 있는 권상용량 50ton급 컨테이너 크레인의 안정성에 대하여 축소모형을 이용한 풍력실험과 시뮬레이션을 통한 구조해석(SA:Structural Analysis) 및 유동-구조 연성해석을 수행하여 컨테이너 크레인 각 지점의 전도력을 비교·분석함으로써 컨테이너 크레인의 내풍설계 시 결과의 정확성과 신뢰성이 보장받으면서 현장에서의 적용이 용이한 내풍구조 안정성 평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 모델 및 하중조건

2.1 대상모델

본 연구에서는 풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 항만에서 널리 사용되고 있는 50ton급 컨테이너 크레인을 대상으로 선정하였으며, 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 풍하중

컨테이너 크레인에 작용하는 풍하중(F_i)은 식(1)을 사용하여 산정한다.

$$F_i = q_H \cdot G_f \cdot C_f \cdot A \quad (1)$$

여기서 q_H 는 기준풍압 (351.56 kg/m^2), G_f 는 거스트계수, C_f 는 풍력계수, A 는 수평면적(m^2)이다.

식(1)에서 거스트계수는 ‘항만 및 어항 설계기준’에는 제시되어 있지 않으며, 풍압산정시 평상시와 폭풍시에 대해서만 구분을 하고 있으므로 풍력계수를 이용한 풍하중 산정시에 사용되는 거스트계수는 1.0으로 간주한다. 본 연구에서는 태풍 ‘매미’ 이후 강화된 항만장비설계기준에 따라 75 m/s 의 풍속을 작용하였다.

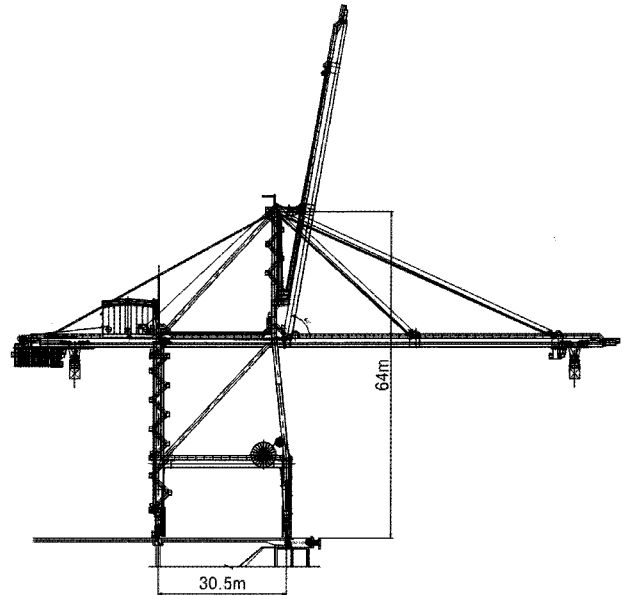


Fig. 1 Schematic of a 50-ton class container crane

2.3 설계변수 및 연구방법

연구를 위해 풍하중의 입사각을 설계변수로 선정하고, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 해풍이 불 때를 0° 로 하여 반시계방향으로 180° 까지 10° 간격으로 총 19가지 풍향조건에서 연구를 수행한다. 그리고 세 가지 연구방법에 따른 연구결과를 비교하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 컨테이너 크레인의 4곳의 계류지점(#1, #2, #3, #4)에서의 부상력을 평가한다.

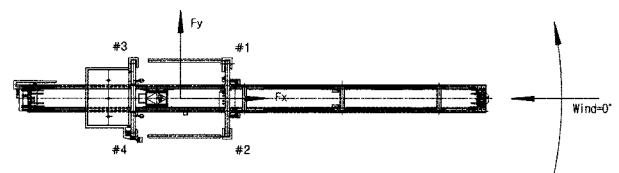


Fig. 2 Definition of incidence angle wind load

연구순서는 먼저 축소모형을 이용한 풍력실험을 수행하여 풍향에 따른 크레인 각 계류지점의 부상력을 살펴본 후 다음으로 구조해석(SA)만을 수행한 결과와 유동-구조 연성해석(FSI)을 수행한 결과를

각각 실험값과 비교·분석한다.

3. 풍동실험

3.1 실험장치 및 실험조건

컨테이너 크레인의 풍동실험을 위해 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 현대건설기술연구소의 대형 대기경계층풍동을 사용하며, 전체 길이 53 m, 측정부의 크기는 폭 4.5 m, 높이 2.5 m, 길이 25 m의 개방형(Eiffel type)이고, 풍속범위는 0.3 ~ 17.5 m/s, 난류강도는 0.7% 이하이다.

풍동실험 결과 수집을 위해 상사법칙⁶⁾을 적용하며, 적용내용을 살펴보면 모형 scale을 1/200, 풍속 scale을 1/13.3 (설계풍속 75 m/s일 때, 풍동풍속은 5.6 m/s), 시간 scale은 1/15 (실제시간이 600 sec일 때, 풍동시간은 40 sec), scaling frequency는 120 Hz이다. 각 조건에서 계측횟수는 10회로 하여 총 데이터 수는 한 채널 당 48,000개(120 Hz×40 sec×10 회)를 측정한다. Fig. 4는 측정을 위해 제작한 축소 모형과 풍동내부를 나타낸다.

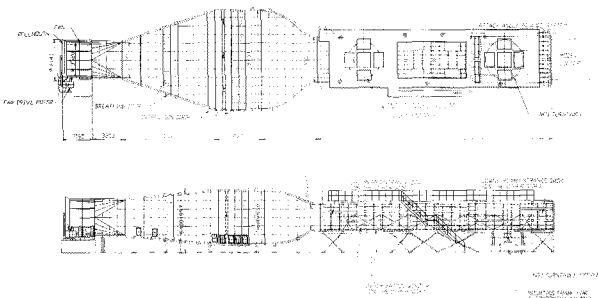


Fig. 3 Boundary layer wind tunnel

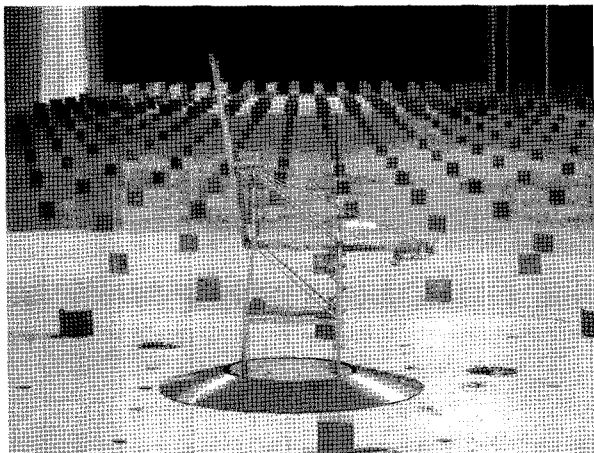
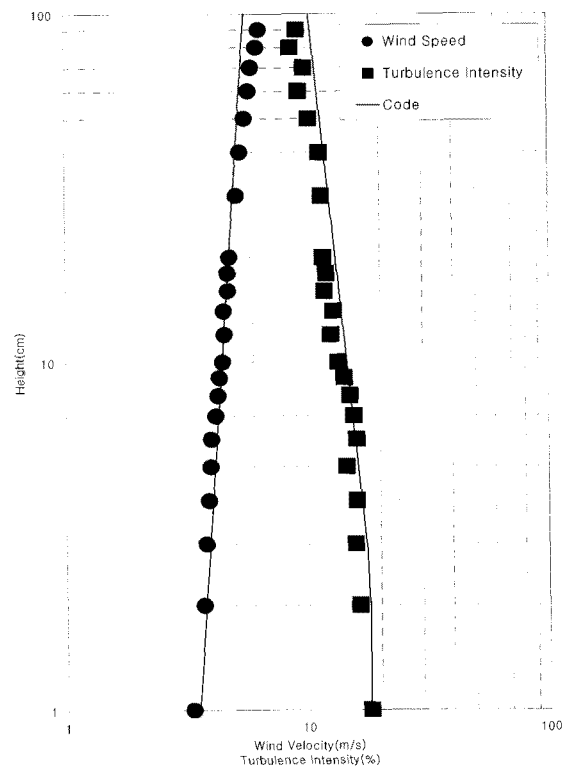
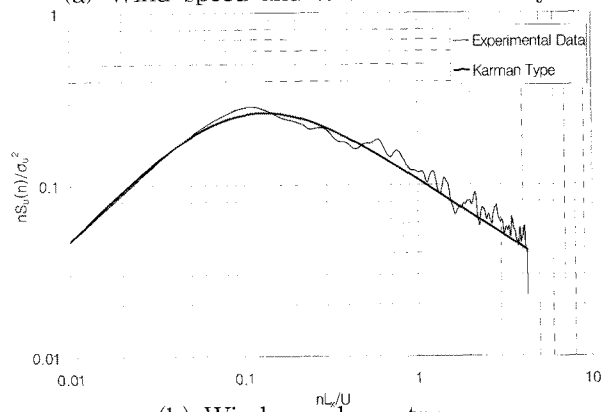


Fig. 4 Container crane models used for the wind tunnel test

Fig. 5는 풍동내부 풍속분포와 난류강도 측정 결과와 풍속스펙트럼의 모사정도를 각각 나타낸다. Fig. 5(a)의 왼쪽 실선은 ‘도로교설계기준’에 제시된 고도 변화에 따른 평균풍속의 수직분포 변화이며, 오른쪽 실선은 ‘건축물하중기준’에 제시된 고도 변화에 따른 난류강도의 수직분포 변화를 나타낸 것이다. 그리고 원형과 사각형마크는 각각 풍동내부에서 각 고도별로 측정된 평균풍속과 난류강도를 표시한 것으로 설계기준에 부합되는 기류가 조성된 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)에서 이론값과 풍동내부 측정값이 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.



(a) Wind speed and turbulence intensity



(b) Wind speed spectrum

Fig. 5 Wind speed and turbulence intensity and Wind speed spectrum in the wind tunnel

3.2 실험결과

풍하중에 대한 컨테이너 크레인의 구조적 안정성을 평가하기 위해서는 크레인 전체에 작용되는 풍하중을 Fig. 2에 나타낸 각 지점에서의 풍하중으로 치환하여 전도력을 의미하는 부상력을 분석하여야 한다. 풍동실험에서 측정된 풍하중은 자중을 무시한 값이므로 각 지점에서의 자중을 고려한 후 부상력을 계산하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Uplift force at each supporting point according to wind direction (unit : kN)

Wind Direction	Supporting Point			
	#1	#2	#3	#4
0	2,167	2,343	-6,721	-6,499
10	2,539	2,425	-6,804	-6,871
20	2,972	2,179	-6,558	-7,304
30	3,012	1,693	-6,072	-7,344
40	3,108	702	-5,081	-7,440
50	2,780	-485	-3,893	-7,112
60	2,017	-1,538	-2,841	-6,348
70	1,597	-2,178	-2,201	-5,928
80	1,593	-2,191	-2,188	-5,924
90	67	-3,472	-906	-4,399
100	-423	-4,268	-110	-3,908
110	-981	-5,055	676	-3,350
120	-1,571	-5,790	1,411	-2,761
130	-2,563	-6,305	1,927	-1,769
140	-3,439	-6,412	2,034	-893
150	-4,251	-6,316	1,938	-81
160	-4,405	-5,711	1,332	73
170	-5,336	-5,729	1,350	1,005
180	-5,281	-5,317	938	949

Table 1에서 양(+)의 값은 지점에서 크레인이 위로 뽑히려는 전도력을 나타내며, 음(-)의 값은 반대로 크레인이 지점의 지반을 압축하는 성향을 나타내며, 풍하중의 작용방향에 위치한 #1 지점의 경우 풍하중이 90°가 될 때까지 (+)방향 전도력이 발생하고, #2 지점의 경우 40° 이하의 풍향에서 전도력이 발생한다. 그리고 #3과 #4는 각각 100°와 150° 이상의 풍향에서 (+)방향 전도력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4. 유한요소해석

4.1 구조해석

4.1.1 해석모델 및 하중조건

본 구조해석의 모델로 사용된 컨테이너 크레인은 내풍 구조 안정성 평가 방법 간의 특성을 비교·분석하기 위하여 풍동실험에서 적용된 것과 동일한 모델로 설정한다. Fig. 6과 같이 컨테이너 크레인의 프레임은 부재의 단면이 대칭형상을 가지고 있으므로 절점당 6개의 자유도를 가지는 3차원 대칭 보 요소를 사용하였으며, 붐과 거더 등은 부재의 단면이 비대칭형으로 되어 있으므로 이러한 특징을 효과적으로 나타낼 수 있는 3차원 비대칭 보 요소를 사용한다. 그리고 전체 자중의 15% 가량을 차지하며 거더 상부에 위치한 기계실은 자체의 자중을 고려하기 위하여 절점당 3개의 자유도를 가지는 육면체 요소를 사용하여 적합한 밀도를 부과한다.

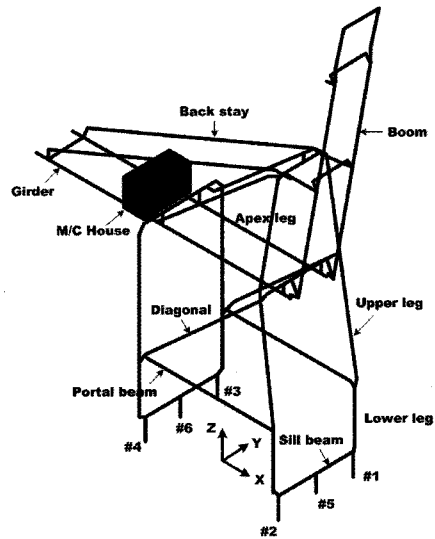


Fig. 6 Finite element model for structural analysis

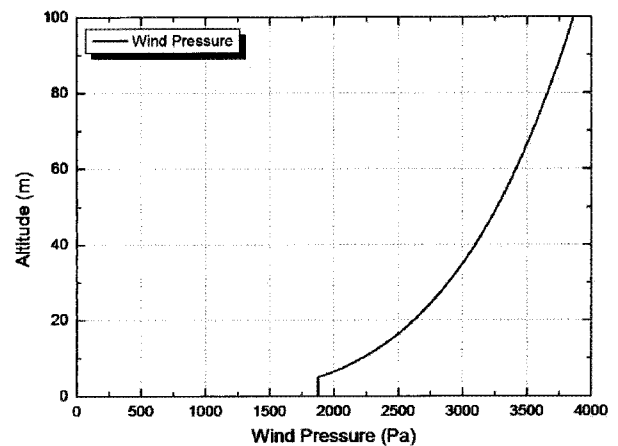


Fig. 7 Wind pressure variation according to altitude

Fig. 7은 '도로교설계기준'에 의거하여 풍하중을 계산하기 위해서 고도에 따른 풍압분포를 나타낸 것으로서 지상에서 5m까지는 컨테이너 크레인에 일정한 풍압을 적용하였으며, 그 이상의 고도에서는 '도로교설계기준'에 제시된 풍압의 분포를 고려한다.

4.1.2 해석결과

Table 2는 구조해석을 통해 산출한 각 지점에서의 부상력을 나타낸다. Table 2에서 풍하중의 작용방향에 위치한 #1 지점의 경우 풍하중이 10~150°의 범위에서 (+)방향 전도력이 발생하고, #3은 30~160°의 범위에서 (+)방향 전도력이 발생한다. 그러나 #2와 #4는 압축력만 발생되는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Uplift force at each supporting point according to wind direction (unit : kN)

Wind Direction	Supporting Points			
	#1	#2	#3	#4
0	-470	25	-4,302	-3,954
10	206	-430	-4,034	-4,471
20	1,320	-1,576	-3,262	-5,183
30	2,984	-3,303	-2,097	-6,286
40	4,333	-4,968	-931	-7,136
50	5,304	-6,508	194	-7,692
60	5,648	-7,546	1,003	-7,807
70	5,708	-8,364	1,676	-7,722
80	5,126	-8,319	1,735	-7,243
90	4,559	-8,132	1,672	-6,801
100	4,966	-8,981	2,314	-7,000
110	4,917	-9,532	2,782	-6,868
120	4,256	-9,314	2,709	-6,353
130	3,328	-9,112	2,694	-5,612
140	1,804	-8,124	2,122	-4,503
150	281	-6,759	1,235	-3,458
160	-1,274	-5,300	274	-2,403
170	-2,624	-4,013	-576	-1,489
180	-3,487	-3,118	-1,180	-917

4.2 유동-구조연성해석

4.2.1 해석모델 및 해석방법

전산유동해석을 위한 유동장은 Fig. 8과 같이 원통형상으로 구성하고 하중에 크게 영향을 주지 않는 미세한 구조물과 백 스테이는 생략한다. 또한, 컨테이너 크레인 외부 유동장의 크기를 직경 600 m, 높이 200 m로 크게 함으로서 경계면 간섭으로 인해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있다. 풍속은 풍동 실험 및 구조해석과 동일한 조건을 적용 하고, 고도에 따른 풍속은 '도로교설계기준'에 의거하여 변화

될 수 있도록 기류를 모델링한다. 풍향은 반시계방향으로 0°에서 180°까지 10°간격으로 작용시키고, 공기 밀도는 1.225 kg · /m³로 한다. 유동해석을 위한 격자는 ANSYS ICEM CFD 11, 전산유동해석은 ANSYS CFX 11을 사용한다.

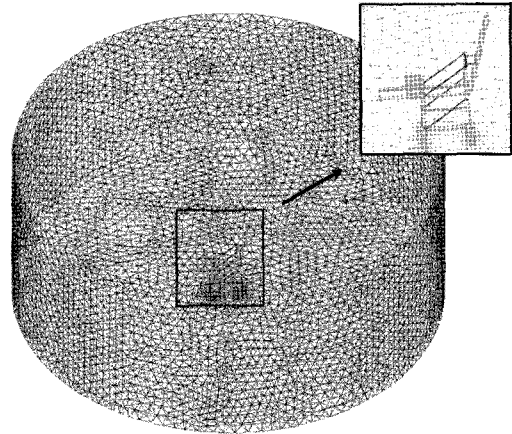


Fig. 8 Meshed shape of the full fluid field

4.2.2 해석결과

Table 3은 유동-구조연성해석을 통해 산출된 각 지점에서의 부상력을 나타낸다.

Table 3 Uplift force at each supporting point according to wind direction (unit : kN)

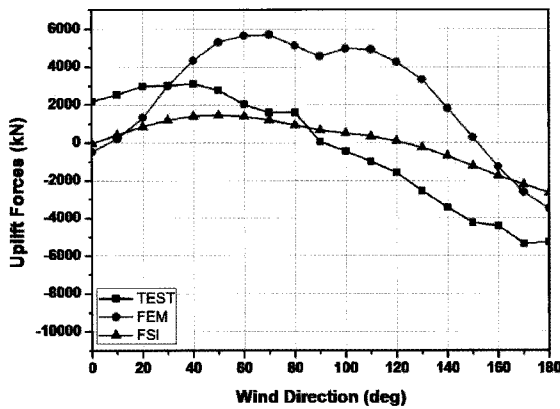
Wind Direction	Supporting Points			
	#1	#2	#3	#4
0	-21	18	-4,190	-4,166
10	419	-357	-3,773	-4,637
20	852	-783	-3,302	-5,106
30	1,183	-1,326	-2,713	-5,514
40	1,399	-1,887	-2,112	-5,810
50	1,462	-2,396	-1,579	-5,928
60	1,382	-2,789	-1,168	-5,876
70	1,190	-3,008	-917	-5,685
80	918	-3,128	-764	-5,412
90	661	-3,292	-585	-5,150
100	506	-3,598	-362	-4,985
110	346	-3,912	4	-4,797
120	105	-4,115	218	-4,500
130	-244	-4,194	288	-4,101
140	-687	-4,122	165	-3,638
150	-1,217	-3,911	-116	-3,108
160	-1,751	-3,598	-512	-2,559
170	-2,220	-3,168	-1,018	-2,068
180	-2,662	-2,673	-1,566	-1,590

Table 3에서 풍하중의 작용방향에 위치한 #1 지점의 경우 풍하중이 10~120°의 범위에서 (+)방향 전도력이 발생하고, #3은 120~140°의 범위에서 (+)방향 전도력이 발생한다. 그러나 #2와 #4는 압축력만 발생되는 것을 확인할 수 있다.

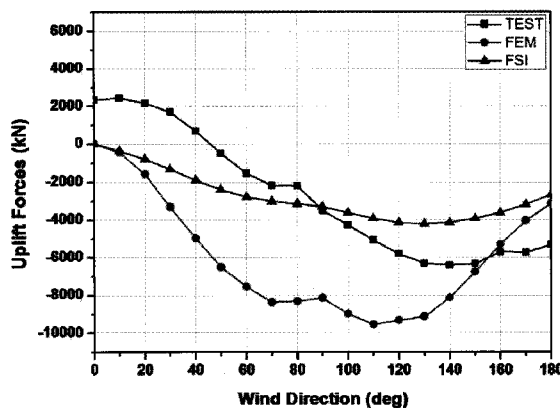
5. 결과 및 고찰

풍향에 따른 컨테이너 크레인의 구조안정성 평가에 있어서 해석방법에 따라 실험결과와의 상관성을 분석하기 위하여 풍동실험과 구조해석 및 유동-구조연성해석을 수행하여 산출된 컨테이너 크레인의 각 지점에서의 부상력을 비교하여 Fig. 9에 나타낸다.

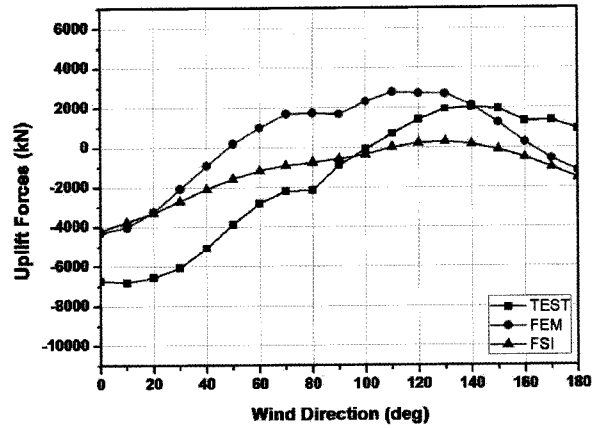
컨테이너 크레인의 내풍 구조 안정성 평가를 위해 사용되던 방법인 구조해석을 통해 얻어진 결과와 풍력실험결과와 비교했을 때에는 최대 전도력 편차가 각각 5,900 kN, 6,184 kN, 4,145 kN, 3,842 kN이 발생되나, 유동-구조연성해석의 경우 풍력실험결과와의 최대 전도력 편차는 각각 3,116 kN, 3,018 kN, 3,352 kN, 3,077 kN으로 기존 방법인 구조해석보다 실험결과에 더 근접한 것을 알 수 있다.



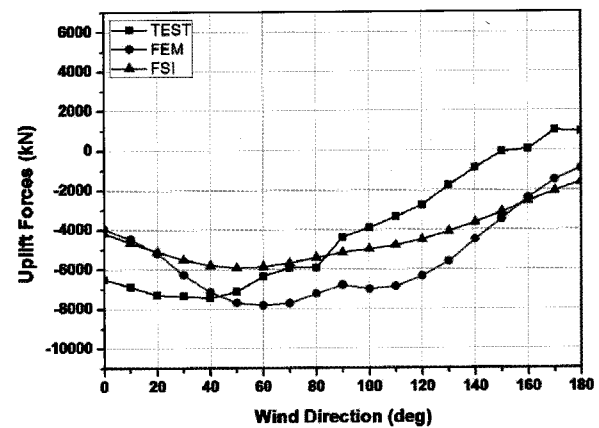
(a) #1 supporting point



(b) #2 supporting point



(c) #3 supporting point



(d) #4 supporting point

Fig. 9 Comparison of uplift force through finite element analysis with wind tunnel test

컨테이너 크레인을 설계하기 위하여 항상 풍동실험을 수행할 수는 없다. 따라서 유한요소해석을 수행하여 구조 안정성 평가를 수행하게 되는데 본 연구를 통하여 단순 구조해석보다는 유동-구조연성해석을 수행하는 것이 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 편차가 발생하므로 이를 보정하기 위한 방안이 연구되어야 할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 항만에서 널리 사용되고 있는 50ton급 컨테이너 크레인의 구조안정성 평가를 위해 풍동실험과 두 가지 해석방법을 수행하여 비교·분석한 결론은 다음과 같다.

1) 현재 일반적으로 수행되는 구조해석을 이용한 컨테이너 크레인 각 지점의 전도력 분석 방법은 해석에 적용되는 풍하중의 산출이 계산식에 의해 결

정됨으로써 실제 유동현상에 대한 고찰이 이루어지지 않아 많은 오차를 발생하게 된다.

2) 새로운 내풍 구조 해석 방법인 유동-구조연성 해석의 경우 풍력실험과의 전도력 평균편차는 1,793~1,921 kN으로 구조해석 대비 23~49% 가량 감소되며, 전체 전도력 분포도 풍력실험과 유사하다.

3) 본 연구에서 수행된 유동-구조연성해석은 컨테이너 크레인 주변의 유동현상이 해석에 직접 반영됨으로 인하여 기존의 유한요소해석에 의한 방법보다 결과의 정확성과 신뢰성이 우수하므로 향후 컨테이너 크레인의 내풍구조 안정성 평가 시에 적극 검토될 필요성이 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (ITA-2008-C1090-0801-0004).

참고 문헌

1. Tsinker, P. G., 2004, "Port Engineering : Planning, Construction, Matenance, and Security," John Wiley & Sons, Inc., pp. 37~41.

2. Lee J. M. et al., 2005, "A Study on the Wedge Angle of the Rail Clamp according to the Design Wind Sped Criteria Change," International Journal of Navigation and Port Research, Vol. 29, No. 7, pp. 641~646.

3. Lee S. W. et al., 2005, "The Effect of Wind Load on the Stability of a Container Crane," J. of KSPE, Vol. 22, No. 2, pp. 148~155.

4. Lee S. W. et al., 2005, "The Comparison of the Stability of a Container Crane according to various Wind Load Desing Codes," J. of KINPR, Vol. 29, No. 6, pp. 561~566.

5. Teixeira, P. F., Awruch, A. M., 2005, "Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction using the Finite Element Method," Computers & Fluids, Vol. 34, pp. 249~273.

6. Simiu, E., Scanlan, H. R., 1996, "Wind Effects on Structures; Fundamental and Applications to design," John Wiley & Sons, Inc., pp. 273~307.