

장착되어 있다. 우선, 타이다운(Tie-down)은 크레인 하부와 안벽의 상부콘크리트를 연결하는 장치로서 강풍에 의한 크레인의 전도를 방지하도록 고안된 것이며 스토이지핀(Stowage pin)은 크레인이 레일을 따라 활주하는 일종의 활동파괴를 방지하기 위하여 안벽 상부에 핀킵을 만들어 크레인하부와 핀으로 연결하므로써 크레인의 이동을 억제하는 장치이다. 그러나, 이들 장치는 어느 하나가 기능을 못하는 상황에서는 나머지 다른 장치도 그 기능을 발휘할 수 없도록 되어 있다. 즉, 타이다운이 어떤 이유로든 그 역할을 할 수 없는 상황에서는 약간의 전도가 발생하면 스토이지핀이 핀킵에서 이탈될 수 있어 곧바로 활동파괴를 이어질 수 있으며, 반대로 스토이지 핀이 그 기능을 못하는 경우에는 타이다운이 전단력을 받게 되어 있어 쉽게 파괴 될 수 있다. 이처럼 안전장치 간에 어떠한 상호 보완 기능이 없다는 취약점이 있다.

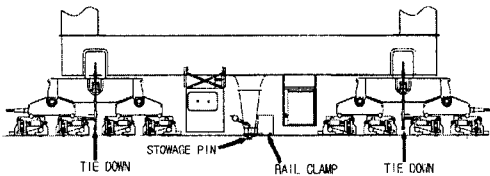


Fig. 2 크레인 안전장치

3. 태풍시 안전장치의 거동

3.1 설계풍압

태풍시 크레인에 작용하는 풍압을 산정하기 위해서 식 1은 같은 풍압산정식을 이용하였다(BSI, 1983).

$$q = 0.613 V^2 \quad (1)$$

여기서, V 는 풍속(m/s)을 q 는 단위면적에 작용하는 풍압(N/m^2)을 나타낸다. 즉, 구조물에 작용하는 풍압의 크기는 작용하는 풍속의 제곱에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 또한, 위 식을 이용한 풍속 50m/s(지상 20m)에 대한 풍압의 수직분포 다음과 같다.

$$q = 1530 \left(\frac{h}{20} \right)^{0.16} \quad (2)$$

여기서, h 는 지상으로부터의 높이(m)이다. 앞의 두식을 이용하여 높이에 따른 풍속과 풍압의 변화를 나타내면 Fig. 3과 같다. 지상 20m까지는 풍속의 변화가

크지만 그 이상에서는 변화가 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다.

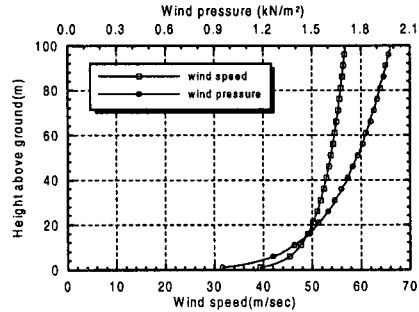


Fig. 3 높이에 따른 풍속 및 풍압변화

3.2 풍속에 따른 거동

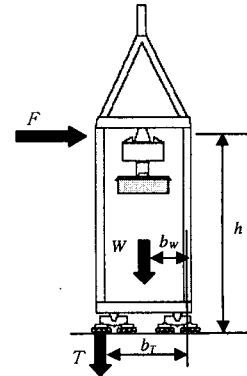


Fig. 4 크레인의 자유물체도

풍속변화에 따른 크레인 안전장치의 거동을 분석하기 위하여 Fig. 4의 자유물체도를 이용하였다. 설계풍속(V_d)의 바람이 작용하는 상태에서 크레인의 오른쪽 지점에 대한 모멘트 평형관계식을 쓰면 다음식과 같다.

$$hF_d - b_w W - b_T T_d = 0 \quad (3)$$

여기서, 첨자 d 는 설계풍속에 대한 값을 의미하며 F 는 풍압의 총합, T 는 그림상의 왼쪽 타이다운에 작용하는 인장력 총합을 각각 의미한다. 마찬가지로 설계풍속이 아닌 임의의 풍속(V_x)에 대한 평형관계식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$hF_x - b_w W - b_T T_x = 0 \quad (4)$$

한편, 크레인에 작용하는 풍압의 총합은 풍속의 제곱에 비례하므로 식(4)를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$T_x = \frac{h}{b_T} \left(\frac{V_x}{V_d} \right)^2 F_d - \frac{b_W}{b_T} W \quad (5)$$

식 (3)에서 풍압력 F_d 의 관계를 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_x = \left(\frac{V_x}{V_d} \right)^2 T_d + \left(\frac{V_x}{V_d} \right)^2 - 1 \left(\frac{b_W}{b_T} \right) W \quad (6)$$

일반적으로 무게중심이 크레인의 가운데에 있다고 가정하고 위 식을 T_d 로 나누면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{T_x}{T_d} = \left(\frac{V_x}{V_d} \right)^2 + \left(\frac{V_x}{V_d} \right)^2 - 1 \frac{W}{2T_d} \quad (7)$$

만일 식 (7)에서 자중이 설계풍속에서의 타이다운 인장력(T_d)에 비해 매우 작다면 타이다운 인장력은 풍속의 제곱에 비례하여 증가한다고 말할 수 있다. 그러나, 일반적으로 컨테이너 크레인의 자중은 T_d 에 비해 매우 크기 때문에 식 우측의 마지막 항을 무시할 수 없으며 이것은 결국 타이다운에 작용하는 인장력이 풍속의 제곱에 비례하지 않고 더 급속히 증가한다는 사실을 말해 주고 있는 것이다.

위의 식을 더 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$\tau = \nu^2 + \frac{\nu^2 - 1}{2\gamma} \quad (8)$$

여기서, τ 와 ν 는 각각 타이다운 인장력비와 풍속비를 나타내며 $\gamma = T_d/W$ 로서 설계인장력비라고 한다.

Fig. 5는 γ 가 0.1에서 0.4까지 변할 때 타이다운 인장력의 변화를 보여주고 있다.

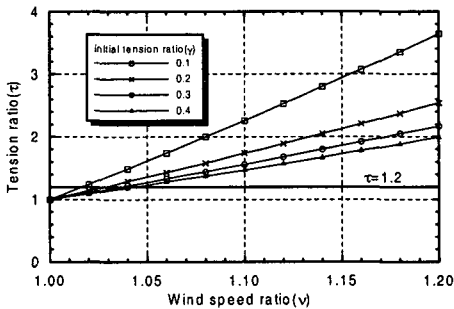


Fig. 5 풍속과 타이다운 인장력

γ 가 0.1에서는 풍속이 20% 증가할 때 타이다운 인장력은 3.64배 증가하며 γ 가 0.4에서도 약 2배 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 풍속이 조금만 변하더라도 타이다운에 미치는 인장력이 빠른 속도로 증가할 수 있다는 사실을 보여주는 것으로 설계시 매우 중요한 의미를 가진다.

타이다운은 폭풍시 충분한 안전율을 가지도록 설계된다. 이 때 타이다운이 가질 수 있는 최대허용인장력과 설계풍속에서의 인장력 비를 안전율(F_s)로 이해할 수 있다. 따라서, 임계상태의 인장력비를 안전율로 표현하고 식 (8)을 풍속비에 대하여 정리하면 임계 풍속비를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\nu_c = \sqrt{\frac{2\gamma F_s + 1}{2\gamma + 1}} \quad (9)$$

만일, 어떤 크레인이 설계인장력비 0.4, 타이다운의 안전율 1.2로 설계되었다면 임계풍속비는 1.043으로 풍속증가 4.3%에서 임계속도에 이르게 된다. Fig. 6은 설계풍속이 50m/s일 때 타이다운의 안전율에 따른 임계풍속을 보여주고 있다.

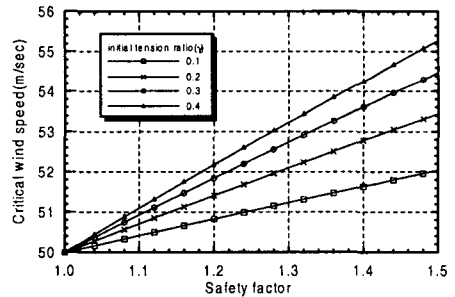


Fig. 6 안전율과 임계풍속

4. 수치해석

타이다운의 폭풍시 인장력 변화 관계식을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 크레인의 각 부재를 요소로 모델링 하였으며 유효단면에 대한 풍압을 분포하중으로 작용시켰다. 표 1과 2는 각각 태풍이 레일에 평행하게 불어올 때 스토이지핀에 작용하는 전단력과 타이다운에 작용하는 인장력의 총합을 이론과 해석으로 구하여 각각 비교한 것이다. 설계 풍속 50m/s일 경우 60m/s까지의 모든 영역에서 스토이지핀의 전단력은 소수점 이하 둘째자리까지 정확히 일치하였으며 타이다운 인장력은 오차가 0.01%이

Table 1 풍속과 스토이지핀 전단력

풍속 (m/s)		50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
전단력 (톤)	이론	279.12	290.40	301.90	313.62	325.57	337.74	350.13	362.75	375.59	388.65	401.93
	해석	279.12	290.40	301.90	313.62	325.57	337.74	350.13	362.75	375.59	388.65	401.93

Table 2 풍속과 타이다운 인장력

풍속 (m/s)		50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
인장력 (톤)	이론	305.10	336.04	367.58	399.75	432.52	465.91	499.91	534.52	569.74	605.58	642.03
	해석	305.10	336.04	367.59	399.76	432.53	465.91	499.92	534.53	569.76	605.59	642.04
	오차($\times 10^{-2}\%$)	0.000	0.116	0.142	0.348	0.232	0.076	0.289	0.239	0.325	0.193	0.190

하로 나타났다. 즉, 타이다운 인장력에 관한 이론식이 매우 정확하다는 것을 의미한다. 미소한 오차의 원인으로는 타이다운 인장력 관계식이 크레인을 강체거동하는 구조체로 가정하여 구한 것이나 실제 크레인은 풍압에 의해 변형이 발생하기 때문이다. 즉, 크레인 변형으로 인한 모멘트 또는 무게중심 등의 미소한 변화로 인해 오차가 발생한 것으로 추정된다.

5. 결 론

태풍내습시 컨테이너 크레인의 안전장치인 스토이지핀과 타이다운에 발생하는 전단력 및 인장력 변화를 분석하였다. 해석결과 타이다운 인장력은 풍속의 제곱보다 훨씬 빠르게 증가하여 매우 작은 풍속의 증가에도 안전율에 의한 여유치를 상회하는 인장력이 발생할 수 있으며 이러한 사실을 이론적인 방법과 수치적 방법을 통하여 검증하였다. 따라서, 크레인의 방재설계를 위해서는 우선 해당지역의 설계최대 풍속에 대한 적절한 설정이 필요하며 특히, 타이다운에는 일반적인 구조물 설계에서 보다 더 많은 안전율을 적용하는 것이 필요하다. 이것은 적은 비용으로 안전성 향상에 크게 기여할 수 있기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 한국컨테이너부두공단(KTCA)의 연구비 일부지원(PI38400)에 의하여 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

- BSI, 1983. Part 1. Specification for Classification, Stress Calculations and Design Criteria for Structures. British Standard: Rules for the Design of Cranes.
- Catherine, A., and Morris, S.E., 1997. The Future of Quayside Container Cranes. Liftech Consultants Inc., (http://isweb.net/~liftech/lpublications_cranes.html)
- Jordan, M.A., 1995. Dockside Container Cranes. In: Proc PORTS95, ASCE. Florida, pp. 826-837.
- Kim, N.H., and Kim J.T., 1995, Design and Construction of Offshore Concrete Structures, Goomi book Inc.