

타워크레인의 위험요인별 컴퓨터 구조적 안정성 분석

김용국 · 박대식 · 고광일*

한국산업안전공단 산업안전보건연구원 · *아이엘엔지니어링

1. 연구 목적

타워크레인은 장주(長柱) 형태의 수직구조물과 이에 조합되는 상부 수평 구조물의 기하학적 형상과 이동하중 및 동적특성 때문에 상부의 불평형 모멘트(Unbalanced Moment)인 전도 모멘트(Overturing Moment)와 회전 모멘트(Slewing Moment)가 발생되어진다. 이러한 외적요인을 구조물이 내적으로 흡수하여야 하나, 이런 자체균형의 한계를 넘는 경우에는 전도 및 붕괴의 위험이 있으므로 여러가지 하중조합을 고려하여 구조적 안정성을 분석하여 현장에서 안전한 사용방법을 제시하기 위함이다.

2. 타워크레인 구조적 안정성 평가의 연구 방법

본 연구과제에서는 타워크레인 구조물을 3차원 입체 모델링 작업을, 전용프로그램인 Solidworks 에 의해서 실물에 가장 근접한 구조해석용 입체도면화 작업을 실행하고, 이와 연계하여 유한 요소 해석 프로그램인 Cosmosworks에 의해서 구조해석을 수행한다. Cosmosworks의 유한요소 해석은 유한요소 모델링(Pre-processing), 유한요소 해석(Analysis), 해석결과 후처리(Post-processing)의 3단계로 처리하였다.

Cosmosworks 의 해석절차를 요약하면 다음과 같다.

Study (Solver 선택) → Element (Type 설정) → Material (재료의 물성치)
→ Load/Restraint(경계조건설정) → Mesh → Run(Analysis) → Solution (해석결과)

3. 타워크레인의 모델링 및 구조해석 전개

본 연구에서는 수평지브형 타워크레인에 대한 구조 부분의 안정성을 규명하기 위하여 연구대상 기종을 Hanyang Liebherr 220HC (고정식)으로 하였다. 구조해석에 사용된 프로그램은 Solidworks(모델링용)과 Cosmosworks(구조해석용)을 사용하였다.

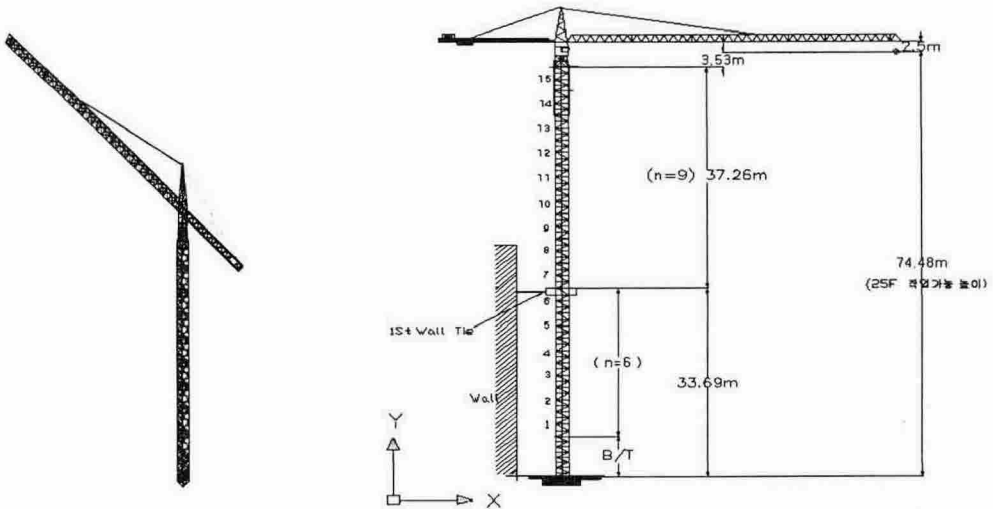
- Hanyang Liebherr 220HC 제원
 - 용량 : 10 Ton_r
 - 지브길이 : 60 m
 - 자립양정 : 45.5 m (Basic Tower + 8 Tower Section)
 - 타워섹션 크기 : 2.3 m(B) X 2.3 m(H) X 4.14 m(L)

최대 구조검토 양정 : 74.48 m (25층 아파트 양중작업기준)

Overhang (벽지지대위의 훅크높이) : 40.79 m(9개 Tower Section)

3.1 타워크레인 유한요소 모델링

타워크레인의 개략도는 (그림 1)과 같으며 본 연구에서는 타워크레인 전체구조물에서 구조부재에 대해서만 모델링하였다.



(그림1) 타워크레인의 모델링도

(그림 2) Wall Tie가 설치된 최대 양정시 (25층 작업높이 기준) 타워크레인 설치도

3.2 모델링 개요

<표 1>에서 보는 것과 같이 구조해석을 위하여 각 부분은 절점(Node)수와 요소(Element)수를 가지며 6자유도의 Solid(사면체)로 모델링 하였으며 물성치는 <표 2>와 같다. 그리고, 크레인은 가동시와 비가동시에 대하여 수직하중, 수평하중 및 모멘트의 조건이 각각 다르기 때문에 크레인의 가동조건과 설치상태에 따라 하중의 경우(Load case)수를 구분하여 해석한다.

<표 1> 타워크레인 구조해석용 유한요소 모델링 데이터

주요구조부분	Element Type	Node수 (절점수)	Element수 (요소수)	구속조건
Basic Mast	Solid(사면체)	248800	126198	연결부분 모든 자유도 구속
Mast	Solid(사면체)	7286	22452	'
Slewing Platform	Solid(사면체)	18970	59617	'
Tower Head	Solid(사면체)	69233	35587	'
Jib	Solid(사면체)	102280	306840	'
C/Jib	Solid(사면체)	21566	56909	'

<표 2> 주요구조재의 물성치

재질명	종탄성계수(E) kgf/cm ²	프와송 비 (V)	밀도 kg/cm ³	항복강도 kgf/cm ²	인장강도 kgf/cm ²
ST 52-3	2.1 x 10 ⁶	0.3	0.00785	3600	5200
SS400	2.1 x 10 ⁶	0.3	0.00785	2400	4100
STK4	2.1 x 10 ⁶	0.3	0.00785	2400	4100

<표 3> 재질에 따른 허용응력

재질명	허용응력	가동시 (16m/s)	비 가동시 (50m/s)
ST52-3		2760 kgf/cm ²	3120 kgf/cm ²
SS400		1840 kgf/cm ²	2080 kgf/cm ²
STK41		1840 kgf/cm ²	2080 kgf/cm ²

3.3 모델링 방법

- 1) 접합부를 일체형으로 모델링 (면대면 접합구조)
- 2) 해석결과 응력을 가지고 접합부를 상세 모델링
- 3) 원형 파이프를 등가의 사각 파이프로 치환하여 모델링
(단면2차모멘트 및 단면적이 동일한 특성유지)
- 4) 비구조재(사다리, 난간대 외)의 모델링 생략
- 5) 주요구동부 및 전장품은 외력으로 처리하므로 모델링에서 제외

4. 하중 조합

4.1 하중

- 1) 수직 정하중 : S_g
- 2) 수직 동하중 : $S_v = \Psi S_L$, 여기서, Ψ (impact factor)
 $\Psi = 1.3 + 0.3V$ (V =Hoisting rated speed(권상속도), m/s)
 권상하중 (Hoisting Load)
- 3) 수평 동하중 : $S_h = S_L \times V^2 / g \times R$
- 4) 풍하중(S_w) : S_w (풍속 16m/s), S_{wmax} (최대풍속 50 m/s)

4.2 하중계수

작업계수 : M (1.08)

충격계수 : Ψ (1.3)

4.3 하중 조합

- 1) 타워크레인에서 메인지브가 없고, 카운터지브 조립체만 메달았을 경우의 구조적 안정성 해석

$$S_g + S_w \quad (\text{풍속 } 16 \text{ m/s})$$

$$S_g + S_{w \max} \quad (\text{최대풍속 } 50 \text{ m/s})$$

- 2) 타워크레인에서 카운터 지브가 없고, 메인지브조립체만 매달았을 경우의 구조적 안정성 해석

$$S_g + S_w \quad (\text{작업풍속})$$

$$S_g + S_w \text{ max} \quad (\text{최대풍속})$$

- 3) 가동시(풍속 16 m/s)

$$M(S_g + \Psi S_L + S_h) + S_w$$

- 4) 비가동시(최대풍속 50 m/s)

$$S_g + S_w \text{ max} + S_{\text{hook+w/rope}}$$

- 5) 텔레스코핑(Telescoping) 작업시

$$S_g + S_w \quad (\text{Climbing 풍속 } 10 \text{ m/s})$$

- 6) 지진하중 작용시

$$M(S_g + \Psi S_L + S_h) + E$$

$$\text{여기서, } E=0.15 S_g$$

- 7) 후방 안정도 검토시

$$M(S_g - 0.3P) = M(S_g - 0.3\Psi S_L)$$

- 8) 항복풍속 검토

$$S_g + S_w \text{ yield} + S_{\text{hook}} + w/\text{rope}$$

5. 결 론

건설현장에서 정상적으로 설계, 제작 및 사용(설치·해체 포함)되고 있는 고정식 타워크레인(220HC기종)의 구조적 안정성에 관한 본 연구를 통하여 얻은 구조부분(기초부분 포함)의 안전성 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 타워크레인 가동시 불리한 조건(선회브레이크 잡은 상태)과 최대 풍압조건(풍속 50m/s)에서 구조적 안정성과 전도 모멘트에 대한 안정도를 가진다.
- 2) 타워크레인에서 메인지브가 없고, 카운터지브 조립체만 매달았을 경우 풍속 16m/s에서는 구조물의 구조적 안정성과 전도에 대한 안정도를 가진다.(구조물의 부재에 항복하중을 발생시키는 항복풍속을 검토한 결과 항복풍속은 39m/s 정도로 추정됨) 풍속 50m/s에서는 구조적으로 불안전하고 전도모멘트로 인하여 전도된다.
- 3) 타워크레인에서 카운터지브가 없고, 메인지브 조립체만 매달았을 경우 풍속 16m/s에서 구조물의 구조적 안정성과 전도에 대한 안정도를 가진다.
- 4) 지진하중(수직 정하중의 15%)에 대한 기초 앵커의 저항강도는 하중효과를 전달만큼 충분한 강도를 가지고 있음을 확인하였다.
- 5) 텔레스코핑(Telecoping)작업시에 있어서 정상작업시의 Telescopic Cage기둥의 응력(σ_n)과 비정상작업시기둥의 응력(σ_{exp})의 비는 1.86배이다. 응력비가 최대인 경우, 즉 Telescopic 상태 하에서 크레인을 회전동작 시켰을 경우 비틀림 응력이 부가되

어 휨응력이 커지며, 여기에 전후 불평형 모멘트에 의한 휨응력이 추가로 발생하게 되면 안정성을 기대하기가 어렵다고 보인다.

따라서, 상승작업시에는 반드시 고정볼트로서 Slewing Ring Support와 Top Mast를 체결한 다음에 크레인의 회전동작을 하여야 한다.

- 6) 자립고를 초과하는 타워크레인의 경우 벽지지대를 설치하여 타워크레인 양정을 증대시켜 사용하는 경우 마스트와 벽지지대의 응력상태는 최대응력기준으로 항복강도 대비 안전율 $S=1.64$ 로서 양호한 것으로 확인하였다.
- 7) 후방안정도 기준을 검토하기 위하여 수직 동하중(-0.3P)을 작용시켜 크레인 구조물의 응력 상태를 해석한 결과 정상 가동시(16m/s) 구조물의 응력상태보다 낮은 응력분포를 보이고 있으므로 타워크레인의 후방 안정도 기준은 대부분 타워크레인에서 만족될 것으로 판단된다.
- 8) 정상상태의 타워크레인(220HC)에서의 설계최대풍속(50m/s)을 초과하여, 구조물의 붕괴가 우려되는 항복하중을 발생시키는 항복풍속을 검토한 결과 본 220HC 크레인 항복풍속은 59 m/sec 정도로 추정된다.

참고문헌

- 1) KOSHA 크레인 제작 기준 안전기준 및 검사기준 (2002.2)
- 2) 타워크레인 설치·해체 작업안전 (KOSHA 안전 2003-45-339)
- 3) 강구조이론과 한계상태 설계 -김덕재, 이은택-
- 4) CosmosWorks Prof . Training Book -Web System-
- 5) Failure of materials in Mechanical Design -Jack A. Collins-
- 6) Liebherr Manual Book (220HC)
- 7) 일본 공업표준 규격 (JIS B8821)