Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 36, No. 1, pp. 9-17, February 2021
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2021.36.1.9

ISSN 1738-3803 (Print)
ISSN 2383-9953 (Online)
http://www.kosos.or.kr/jkosos

타워크레인 텔레스코핑 작업의 풍속 및 하중에 대한 구조 안전성 연구

정성룡* · 이도근** · 백신원***† · 신상연*

A Study on the Structural Safety of Tower Crane Telescoping Work according to Wind Speed and Load

Sung-Lyoung Jung* · Do-Geun Lee** · Shinwon Paik***† · Sang-Yeon Shin*

†Corresponding Author
Shinwon Paik
Tel : +82-31-670-5281
E-mail : paiksw@hknu.ac.kr

Received : December 17, 2020
Revised : January 14, 2021
Accepted : January 18, 2021

Copyright@2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : This study analyses the load imbalance of the tower crane used in telescoping work for structural safety, owing to the difference in wind speed and balance weight position. This is because wind speed and position of the balance weight have a significant impact on the structural stresses of a tower crane during telescoping work. Therefore, structural analysis was performed on the 290HC model, which is often used at construction sites and has only one cylinder installed. Moreover, two models were classified to determine the load acting on the connecting part of the telescopic cage to slewing platform and the cylinder. Five types of balance weight positions were applied at regular intervals from jibs; moreover, four types of wind load criteria were differently applied. Hence, the telescopic cage columns were destroyed at all balance weight positions at a wind speed of 30 m/s and only at certain locations at a wind speed of 20 m/s. Furthermore, failures occurred for cylinders, torsional, and bending at wind speeds of 30 m/s and 20 m/s, load imbalances above the allowable thresholds considering the safety factor. In addition, the load imbalance in the telescoping work also varied depending on the position of the balance weights. The results of these studies have validated that the current standards of adjusting the appropriate position of the balance weights on the jib are completely valid, with the telescoping work to be executed only at wind speeds of less than equal to 10 m/s.

Key Words : tower crane, telescoping work, structural safety, load imbalance, structural analysis

1. 서 론

건설현장의 규모가 고층화, 대형화 및 복잡화가 이루어지며 건설현장의 양중 작업 비중이 증가함과 동시에 타워크레인(Tower Crane)의 사용 비중이 증가하였다[1]. 특히, 건설현장 고층화에 따라 높은 수직 길이의 타워크레인이 요구됨에 따라 타워크레인 설치 공정 중 타워크레인을 상승시키는 텔레스코핑 작업(Telescoping Work)의 빈도가 증가하였다. 텔레스코핑 작업이란 마스트 상단에 설치된 텔레스코픽 케이지(Telescopic Cage)와 슬로윙 플랫폼(Slewing Platform) 등의 타워크레인 상부 구조를 실린더(Cylinder)로 상승시키는 작업을 의미하며, 이는 생성된 빈 공간에 새로운 마스트를 삽입하여 타워크레인 상부 구조를 요구 높이까지 상승시키기 위함이다[2].

한편, 타워크레인 사용 빈도, 텔레스코핑 작업 빈도의 증가와 함께 높아진 수직 길이에 따른 풍하중 증가 등으로 타워크레인 중대재해 사례가 증가하며, 이에 관한 연구의 필요성으로 타워크레인 작업 방법의 안전성[2-7] 및 구조 안전성[8-11] 그리고 풍하중 영향[12-14]을 분

*한경대학교 토목안전환경공학과 박사과정 (Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University)
**한경대학교 토목안전환경공학과 석사 (Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University)
***한경대학교 사회안전시스템공학부 교수 (School of Social Safety System Engineering, Hankyong National University)

석한 다양한 선행 연구들이 존재한다. 하지만, 이의 연구들은 타워크레인 설치 및 해체 공정의 위험성을 정성적으로 언급하고 이에 대한 정량적 분석이 없거나, 정량적 분석의 대상이 타워크레인의 정지 혹은 운전의 공정인 경우이다. 그러므로, 본 연구에서는 타워크레인의 설치 및 해체 공정에서 고위험 작업인 텔레스코핑 작업을 대상으로 하였으며, 풍하중 조건별 텔레스코픽 케이지 및 유압 실린더에 작용하는 하중으로 텔레스코핑 작업의 구조 안전성을 분석하였다.

텔레스코핑 작업의 주요 재해 사례로는 텔레스코픽 케이지와 슬로윙 플랫폼의 분리로 인한 추락, 붕괴 등이 존재하며, 이는 주로 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지를 연결하는 핀, 볼트 체결 방법 불량, 미체결 그리고 연식 등으로 인한 자재 성능 저하 등이 언급되었다. 또 다른 주요 사례는 텔레스코핑 작업 중 유압 실린더의 파손으로 타워크레인이 붕괴하는 경우로 다수의 타워크레인 기종이 텔레스코핑 작업을 오직 1개의 유압 실린더만으로 수행한다는 점에서 하중 균형이 매우 중시되고 있다. 그래서 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지의 체결 부위, 유압 실린더의 지지 부위의 작용 하중을 분석할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지의 체결 부위, 유압 실린더의 지지 부위에 작용하는 하중 및 회전 모멘트를 정량적으로 비교분석하고자 하며, 이에 영향을 미치는 밸런스 웨이트(Balance Weight)의 위치와 풍속에 따른 풍하중을 매개변수로 하였다. 풍하중 매개변수는 텔레스코핑 작업 중 상부구조의 회전을 고정하여 풍하중 영향이 클 수 있다는 점을 고려하기 위함이다. 분석 프로그램으로는 건축 및 토목 구조 해석에 자주 사용되는 MIDAS Civil 프로그램을 활용하였다.

2. 수치 예제

2.1 타워크레인의 모델링

본 연구에서 고려한 타워크레인 기종은 현재 건설 현장에서 많이 사용되고 있는 H사의 290HC를 선정하여 Fig. 1과 같이 모델링하였으며, 각 부재와 부재를 이루는

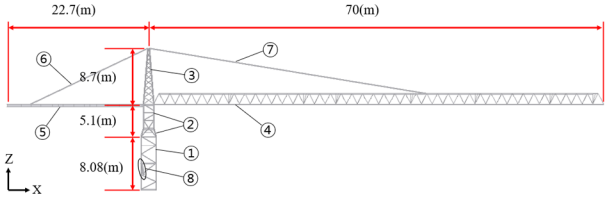


Fig. 1. Main member of tower crane.

Table 1. Member properties of tower crane

Number	Member	Cross section size(*mm*)
①	Telescopic cage	□150×14t, □130×14t, □100×10t, ∅42.7×4.9t, …
②	Slewing platform	□110×12t, □80×8t, □80×8t, ∅42.7×4.9t, …
③	Tower head	□110×12t, □60×6t, ∅48.3×3.2t, …
④	Jib(70m)	□120×15t, □110×12t, ∅60.3×3.9t, …
⑤	Counter jib	H450×200×9/14, □60×6t, …
⑥	Counter jib suspension	□110×12t
⑦	Jib suspension	□110×12t
⑧	Cylinder	∅245×22.5t

Table 2. Material(SM490YA) properties of tower crane

Properties	Values
Modulus of elasticity	$2.06\times10^5(N/mm^2)$
Poisson's ratio	0.3
Thermal coefficient	$1.20\times10^{-5}(m/(m/℃))$
Weight density	$7.698\times10^{-5}(N/mm^3)$

단면 규격의 종류를 Table 1에 나타내었으며, 부재의 공통된 재료 물성치는 Table 2의 타워크레인의 구조 · 규격 및 성능에 관한 기준[15]을 참고하여 SM490YA 강종을 적용하였다.

타워크레인의 자중 외에 고정된 위치에서 타워크레인에 작용하는 하중으로는 호이스트 기어 프레임(Hoist Gear Frame), 호이스트 윈치(Hoist Winch), 카운터 웨이트(Counter weight) 그리고 삽입 용도의 마스트 1단(Mast section)을 고려할 수 있다. 그리고 매개변수로서 위치가 변하는 하중은 밸런스 웨이트 용도의 마스트 1단과 이를 인양하기 위한 트롤리(Trolley), 후크(Hook)가 존재하며 이의 작용 하중을 Fig. 2와 Table 3을 통해 나타내었다. Fig. 2에서 ④~⑧은 밸런스 웨이트의 인양 위치를 의미한다.

B1~B5의 작용 위치 변화에 따른 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지의 체결 부위, 유압 실린더의 지지 부위의 작용 하중을 확인하기 위해 경계 조건을 달리하여 모

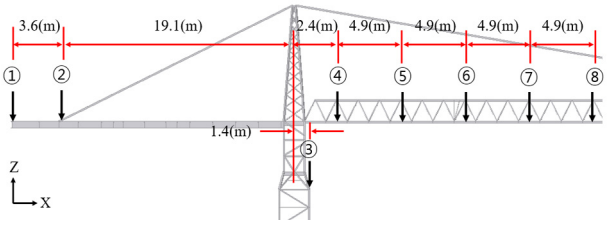


Fig. 2. Applied load of tower crane.

Table 3. Member properties of tower crane

Number	Load	Member		Weight(*kg*)	Load(*kN*)
①	L1	Hoist gear frame		4,790	46.94
		Hoist winch		648	6.35
②	L2	Counter weight		20,250	198.45
③	L3	Mast section		2,260	22.15
④	B1	Balance weight (Parameter)	Mast section	2,260	22.15
⑤	B2				
⑥	B3		Trolley	335	3.28
⑦	B4				
⑧	B5		Hook	520	5.10

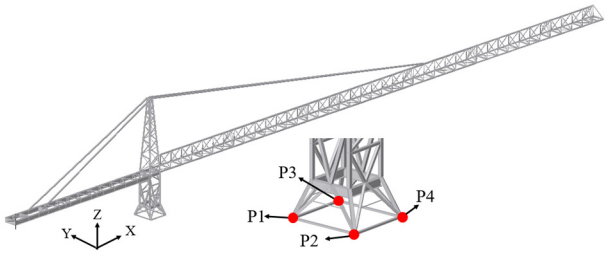


Fig. 3. Conceptual modeling of Modeling-1.

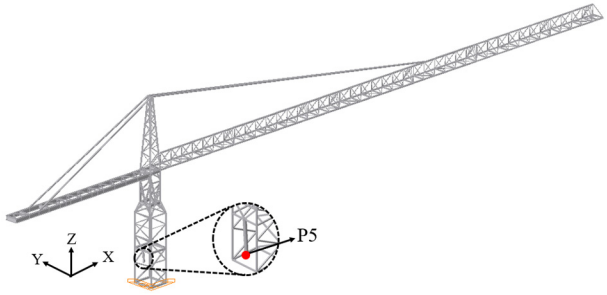


Fig. 4. Conceptual modeling of Modeling-2.

델링을 구분하였다. 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지의 체결 부위를 고정 지지점으로 한 모델링(Modeling-1)은 Fig. 3, 유압 실린더 지지 부위를 고정 지지점으로 한 모델링(Modeling-2)은 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 3의 고정 지지점은 방향에 따라 P1~P4로 구분되며, Fig. 4의 고정 지지점은 P5이다. 각 모델링의 요소는 보 요소를 적용하였으며, 요소 간 연결은 강접 연결이다. 요소의 개수는 텔레스코픽 케이지 모델링 여부의 차이로 Modeling-1이 640개, Modling-2가 693개이다.

2.2 타워크레인의 풍하중 조건

본 연구의 또 다른 매개변수로 풍속(*V*)을 고려하기 위해 타워크레인에 작용하는 풍하중(*W*)은 타워크레인의 구조·규격 및 성능에 관한 기준[15]을 적용하여, 식 1로 산정하였다.

$$W = q \times C \times A \tag{1}$$

여기서, q : 속도압(N/m^2)
C : 풍력계수
A : 풍압면적(m^2)

또한, 속도압 q는 타워크레인이 작동 시와 정지 시로 분류되어 식 (2)로 산정하여야 한다. 이때, h는 타워크레인의 바람을 받는 면의 지상으로부터의 높이를 의미한다.

$$q = 9.8 \times \mathrm{M} \times \sqrt[4]{\mathrm{h}} \tag{2a}$$

$$\mathrm{M} = \mathrm{V}^2/30 \tag{2b}$$

여기서, V: 설계기본풍속(m/s)
h : 타워크레인높이(m)

식 (2)에서 산정한 q를 식 (1)에 대입하여 텔레스코핑 작업에 영향을 미치는 W를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 풍속 매개변수를 10 *m/s*, 20 *m/s*, 30 *m/s*로 분류하였으며, 풍속에 따른 주요 부재별 W를 Table 3에 나타내었다.

타워크레인 모델링에 풍하중(*W*)은 Y축 방향으로 적용하였으며, 이는 텔레스코핑 작업 도중 측면에서 풍하중이 작용하는 최악의 상황을 가정하기 위함이다. 따라서, 기존의 정지 시 풍하중에 대한 구조 해석은 지브와

Table 3. Wind load of tower crane in change of wind speed

Member	h(m)	A(m^2)	C	V(m/s)	q(N/m^2)	W(N)
Jib	56.18	37.87	1.2	10	89.43	4,064.22
				20	357.73	16,256.86
				30	804.90	36,577.95
Counter jib	55.38	15.34	1.2	10	89.11	1,640.40
				20	356.45	6,561.60
				30	802.02	14,763.60
Tower head	57.98	4.49	1.2	10	90.14	485.68
				20	360.57	1,942.73
				30	811.27	4,371.14
Slewing platform	52.23	8.73	1.6	10	87.82	1,226.65
				20	351.27	4,906.58
				30	790.36	11,039.81
Telescopic cage	45.49	39.42	1.6	10	84.84	5,350.82
				20	339.35	21,403.28
				30	763.53	48,157.39
Mast section	52.23	4.38	1.6	10	87.82	615.43
				20	351.27	2,461.72
				30	790.36	5,538.87

카운터 지브를 Z축 방향의 회전을 풀어 최소 면적의 부재별 A를 고려하나, 본 연구에서는 부재 면적이 큰 X-Z 평면의 A를 고려하였다. 이때, 풍하중(W)은 각 부재의 X-Z 평면의 절점 수만큼 나누어 적용하였다.

2.3 타워크레인의 하중 조합

2개의 타워크레인 모델링(Modeling-1, Modeling-2)은 해석 시에 밸런스 웨이트 위치(B1~B5)에 따라, 풍속 조건에 따라 하중 조합이 달리 적용된다. 따라서, 본 연구에서는 풍속 10 *m/s*, 20 *m/s*, 30 *m/s*에 대해 산정한 풍하중을 각각 S1, S2 그리고 S3로 명명하고, 2×4×5개의 하중 조합을 분류하여 총 40번의 해석을 수행하였다. 이의 하중 조합은 Table 4로 나타내었다.

Table 4. Load combination of tower crane modeling

Modeling (Analysis point)	Wind speed(*m/s*)	Load combination
Modeling-1 (P1~P4) Modeling-2 (P5)	0	L1+L2+L3+B1
		L1+L2+L3+B2
		L1+L2+L3+B3
		L1+L2+L3+B4
		L1+L2+L3+B5
	10	L1+L2+L3+S1+B1
		L1+L2+L3+S1+B2
		L1+L2+L3+S1+B3
		L1+L2+L3+S1+B4
		L1+L2+L3+S1+B5
	20	L1+L2+L3+S2+B1
		L1+L2+L3+S2+B2
		L1+L2+L3+S2+B3
		L1+L2+L3+S2+B4
		L1+L2+L3+S2+B5
	30	L1+L2+L3+S3+B1
		L1+L2+L3+S3+B2
		L1+L2+L3+S3+B3
		L1+L2+L3+S3+B4
		L1+L2+L3+S3+B5

이때, 각 하중 조합에는 부재의 자중도 포함되어 있으며, Modeling-1의 경우에 텔레스코픽 케이지는 고려되지 않으므로 텔레스코픽 케이지의 자중은 제외된다.

3. 해석 결과

3.1 텔레스코픽 케이지의 작용 하중 분석

3.1.1 수직재 체결 부위의 작용 하중 검토

슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지의 체결 부위를 구현한 Modeling-1을 해석하여 P1~P4 지지점의 Z축의 압축 및 인장 반력을 해석하였다. 식 (3)은 수직재의 허용 반력을 검토하기 위한 기준으로 타워크레인의 구조 · 규격 및 성능에 관한 기준[15] 허용 응력식을 고려하였다. 또한 이에 대해 단면적을 곱해 식 (4)로 변환하였다.

허용인장응력(*MPa*)	$\sigma_{ta} = \sigma_e \div 1.5$	(3a)
허용휨인장응력(*MPa*)	$\sigma_{bat} = \sigma_{ta}$	(3b)
허용압축응력(*MPa*)	$\sigma_{ca} = \sigma_{ta} \div 1.15$	(3c)
$20 < \lambda$, 허용좌굴응력(*MPa*)	$\sigma_k = \sigma_{ca}$	(3d)
$20 \le \lambda < 200$, 허용좌굴응력(*MPa*)	$\sigma_k = (1 \div \omega) \times \sigma_{ca}$	(3e)
허용인장반력(N)	$P_{ta} = \sigma_{ta} \times A$	(4a)
허용휨인장모멘트(kNm)	$M_{bat} = \sigma_{bat} \times Z$	(4b)
허용압축반력(N)	$P_{ca} = \sigma_{ta} \times A$	(4c)
$20 < \lambda$, 허용좌굴반력(N)	$P_k = P_{ca}$	(4d)
$20 \le \lambda < 200$, 허용좌굴반력(N)	$P_k = P_{ca} \div \omega$	(4e)

여기서, A는 텔레스코픽 케이지 수직재의 단면 넓이, Z는 단면 계수이며 s_e는 텔레스코픽 케이지의 강종인 SM490YA의 항복 응력, λ와 ω는 각각 텔레스코픽 케이지의 규격을 고려한 유효세장비와 좌굴 계수로 Table 5에 나타내었다. 식 (4)를 통해 산정한 허용 반력 기준의 절댓값은 Table 6에 해당한다.

Table 5. Properties of Telescopic cage column

Index	Result
σ_e	352.8 3600 *kg/MPa*(cm^2)
A	3600 mm^2(□100×10t)
Z	81,333 mm^3
λ	37.11
ω	1.16

Table 6. Allowable load of connection part in Telescopic cage

Allowable Load	Result
P_{ta}	846.72 *kN*
M_{bat}	19.13 *kNm*
P_{ca}	736.28 *kN*
P_k	634.72 *kN*

텔레스코픽 케이지 수직재의 안전성은 매개변수별 P1~P4의 반력 결과가 Table 6의 허용치를 초과하지 않아야 하며, P_{ta}와 M_{bat}를 동시에 고려한 조합 응력에 대해서도 검토하여야 한다. 따라서 조합 응력식을 참

고한 식 (5)의 조합 허용치가 1 이하인지를 검토하여 구조 안전성을 확인하였다. 인장력이 작용하는 경우에는 식 (5a), 압축력이 작용하는 경우에는 식 (5b)를 사용하였다.

$$\left\| \frac{P}{P_{ta}} \right\| + \left\| \frac{M}{M_{bat}} \right\| \leq 1, \text{ Safe} \quad (5a)$$

$$\left\| \frac{P}{P_{ca}} \right\| + \left\| \frac{M}{M_{bat}} \right\| \leq 1, \text{ Safe} \quad (5b)$$

Table 7. Reaction load of P1~P4

Axis	Wind speed(*m/s*)	Point	B1	B2	B3	B4	B5
X (*kNm*)	0	P1	-2.4	-2.2	-1.9	-1.7	-1.4
		P2	3.1	2.9	2.4	2.0	1.6
		P3	1.1	0.9	0.6	0.4	0.1
		P4	-1.9	-1.5	-1.1	-0.7	-0.4
	10	P1	-3.3	-3.1	-2.8	-2.6	-2.3
		P2	2.3	1.9	1.5	1.1	0.7
		P3	1.6	1.4	1.1	0.9	0.7
		P4	-1.4	-1.0	-0.6	-0.2	0.2
	20	P1	-5.9	-5.7	-5.5	-5.3	-5.1
		P2	-0.3	-0.8	-1.2	-1.6	-2.1
		P3	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
		P4	0.0	0.4	0.9	1.3	1.7
	30	P1	-10.5	-10.5	-10.3	-10.2	-10.1
		P2	-5.0	-5.6	-6.0	-6.5	-7.0
		P3	6.0	6.0	5.7	5.6	5.5
		P4	2.9	3.6	4.0	4.5	5.0
Y (*kNm*)	0	P1	-5.5	-5.4	-4.7	-3.9	-3.0
		P2	-7.2	-6.2	-5.2	-4.2	-3.2
		P3	-5.4	-4.5	-3.7	-2.8	-1.9
		P4	-6.1	-5.1	-4.1	-3.1	-2.2
	10	P1	-5.5	-4.6	-3.7	-2.8	-1.9
		P2	-8.2	-7.3	-6.3	-5.3	-4.4
		P3	-4.2	-3.3	-2.4	-1.5	-0.6
		P4	-7.3	-6.3	-5.4	-4.4	-3.5
	20	P1	-2.3	-1.4	-0.4	0.6	1.6
		P2	-11.3	-10.4	-9.6	-8.7	-7.8
		P3	-0.7	0.3	1.3	2.3	3.2
		P4	-10.8	-10.0	-9.1	-8.2	-7.3
	30	P1	3.7	5.0	5.9	7.0	8.1
		P2	-17.3	-16.8	-15.8	-15.1	-14.3
		P3	6.0	7.3	8.2	9.3	10.4
		P4	-17.5	-17.0	-16.0	-15.2	-14.5
Z (*kN*)	0	P1	361.8	327.5	293.1	258.7	224.4
		P2	350.1	317.1	284.1	251.1	218.2
		P3	-96.2	-61.9	-27.5	6.9	41.2
		P4	-84.5	-51.5	-18.5	14.6	47.4
	10	P1	365.6	331.2	296.7	262.3	227.8
		P2	346.3	313.4	280.5	247.6	214.8
		P3	-83.2	-48.8	-14.3	20.1	54.6
		P4	-97.5	-64.6	-31.7	1.2	34
	20	P1	377.1	342.4	307.6	272.8	238
		P2	334.8	302.2	269.7	237.1	204.6
		P3	-44.3	-9.5	25.3	60	94.9
		P4	-136.4	-103.8	-71.3	-38.7	-6.2
	30	P1	384.9	349.6	314.3	279	243.6
		P2	327	294.9	262.9	230.9	198.9
		P3	15.3	50.6	85.9	121.3	156.6
		P4	-196	-164	-132	-100	-68

Table 8. Combined allowable threshold of P1~P4

Wind speed(*m/s*)	Point	B1	B2	B3	B4	B5
0	P1	0.78	0.73	0.64	0.56	0.46
	P2	0.85	0.75	0.66	0.56	0.46
	P3	0.40	0.31	0.23	0.16	0.16
	P4	0.42	0.33	0.24	0.18	0.18
10	P1	0.78	0.69	0.60	0.50	0.43
	P2	0.90	0.81	0.71	0.61	0.52
	P3	0.32	0.23	0.14	0.11	0.11
	P4	0.50	0.41	0.32	0.23	0.23
20	P1	0.82	0.76	0.71	0.65	0.59
	P2	1.05	0.95	0.87	0.78	0.69
	P3	0.21	0.16	0.17	0.21	0.30
	P4	0.73	0.65	0.56	0.47	0.39
30	P1	1.07	1.02	0.97	0.91	0.86
	P2	1.35	1.28	1.18	1.10	1.02
	P3	0.33	0.45	0.55	0.65	0.76
	P4	1.15	1.08	0.99	0.91	0.84

MIDAS를 통한 해석 결과는 Table 7에 축 방향으로 나누어 나타내었다. Table 7의 부호는 Fig. 3에 도시된 축 방향에 따라 결정되었으며, Z축 반력의 (+) 부호는 압축, (-) 부호는 인장을 의미하고, X축과 Y축의 부호는 회전 방향을 의미한다.

Table 7의 결과에서 Z축 압축 반력의 절댓값은 허용 압축 반력 P_{ca}, 허용 좌굴 반력 P_k과 비교하였으며, 인장 반력의 절댓값은 허용 인장 반력 P_{ta}과 비교하였다. X축과 Y축 모멘트 반력의 절댓값은 M_{bat}와 비교하였다.

Table 8은 식 (5)의 조합 허용치를 계산한 결과로 M_{bat}는 동일한 매개변수 조건에서 X축과 Y축의 절댓값 중 큰 값을 M_{bat}로 고려하였다.

Table 7의 비교 결과로 모든 풍속 조건, 밸런스 웨이트 위치 조건에서 P1~P4에 작용하는 압축 반력, 인장 반력 그리고 모멘트 반력은 각각의 허용 기준보다는 작았다. 반면에 표 8에서는 음영으로 표시한 조합 허용치가 1을 초과하여 구조 안전성이 확보되지 못하였다. 풍속이 30 *m/s*인 경우에는 모든 밸런스 웨이트 위치에서 수직재의 파괴가 발생하며, 풍속이 20 *m/s*인 경우에는 B1의 밸런스 웨이트 위치에서 수직재의 파괴가 발생한다.

따라서, 실험 조건에서 텔레스코픽 케이지 수직재의 구조 안전성을 확보하기 위해서는 풍속이 10 *m/s* 이하인 경우에서만 텔레스코핑 작업을 수행하여야 한다.

3.1.2 수직재 연결 재료의 작용 하중 검토

텔레스코핑 작업의 주된 재해 원인은 텔레스코픽 케

이지의 수직재 파괴 외에도 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지를 체결하는 연결 재료의 변형 및 파괴가 존재한다. 그러므로 연결 재료가 전단 파괴되는 경우를 고려하기 위해 Table 7의 P1~P4에 작용하는 인장 반력을 검토하였다.

290HC 기종은 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지를 연결핀으로 체결하므로 연결핀의 허용 전단 반력을 산정하였다. 기존의 원형 연결핀의 최대 전단 응력은 식 (6a)로 산정한다. 따라서, 전단 허용 응력식[15]을 변환하여 식 (6b)로 산정하였다. 연결핀의 강종 S45C에 대한 s_e, 연결핀의 규격 ∅50*240*175s에 대한 A는 양면 전단을 고려하여 표 8에 나타내었다. 식 (6)을 통해 산정한 연결핀의 허용 전단 반력 P_τ는 Table 9이다.

$$\tau = \frac{4P_\tau}{3A} \tag{6a}$$

$$P_\tau = \sigma_e \div 1.5 \div \sqrt{3} \times A \times \frac{3}{4} \tag{6b}$$

Table 9. Properties of connection pin

Index	Result
σ_e	343 *MPa*(3500 kg/cm^2)
A	1963.50 mm^2×2(double shear)

Table 10. Allowable load of connection pin

Allowable Load	Result
P_τ	388.83 *kN*

388.83 *kN*의 허용치를 Table 7의 인장력 절댓값과 비교한 결과, 모든 매개변수의 경우에서 이를 초과하지 않는다. 따라서 불량품이 아닌 연결핀을 사용하고 이를 제대로 체결한 경우에는 밸런스 웨이트의 위치와 풍속에 의해 전단 파괴되지 않으므로 구조 안전성을 확인할 수 있다.

3.2 유압 실린더의 작용 하중 분석

전 절에서는 텔레스코핑 작업 시 슬로윙 플랫폼과 텔레스코픽 케이지 체결 부위의 구조 안전성을 확인하였다. 이 절에서는 290HC 기종에 오직 1개만 설치되는 유압 실린더의 안전성을 검토하였다. 이를 위해 유압 실린더를 구현한 Modeling-2(Fig. 4)의 구조 해석을 통해 매개변수별 유압 실린더 하단(P5)에 발생하는 축력 및 모멘트를 산정하였다.

모멘트에 대한 허용치를 산정하기 위해서 모멘트를 Z축에 대한 허용 비틀림 모멘트 $M_{torsion}$와 X축과 Y축에 대한 허용 굽힘 모멘트 M_{bac}(압축면), M_{bat}(인장면)로 분류하였다. $M_{torsion}$는 식 (7)의 Z축에 대한 비틀림 응력 t_Z 수식을 참고하여 산정하였으며, M_{bac}, M_{bat}는 식 (8)의 압축면에서의 굽힘 응력 s_{bac}, 인장면에서의 굽힘 응력 s_{bat} 수식을 참고하여 산정하였다. 축력에 대해서는 식 (4)를 참고하였다. 여기서, D_1과 D_2는 각각 외경 및 내경이며, J와 I는 중공 원형의 극관성 모멘트, 2차 단면 모멘트이다.

$$\tau_Z = \frac{\sigma_{ta}}{\sqrt{3}} = \frac{M_Z \times D_1}{J \times 2}, \quad J = \frac{\pi(D_1^4 - D_2^4)}{32} \tag{7a}$$

$$M_Z = \frac{\tau_Z \times J \times 2}{D_1} \tag{7b}$$

$$\sigma_{bat} = \sigma_{ta} = \pm \frac{M_{bat}}{I} \times \frac{D_1}{2}, \quad I = \frac{\pi(D_1^4 - D_2^4)}{64} \tag{8a}$$

$$M_{bat} = \pm \frac{\sigma_{ta} \times I \times 2}{D_1} \tag{8b}$$

$$\sigma_{bac} = \sigma_{ca} = \pm \frac{M_{bac}}{I} \times \frac{D_1}{2} \tag{8c}$$

$$M_{bac} = \pm \frac{\sigma_{ca} \times I \times 2}{D_1} \tag{8d}$$

또한, 유압 실린더의 안전성을 검토할 때 파괴에 대한 허용치뿐만 아니라 유압 실린더의 출력 기준을 검토하여야 한다. 이는 타워크레인의 실제 하중이 출력 기준보다 낮아야 텔레스코핑 작업 중 타워크레인 인상이 원활하여 불안정한 상태로 비상 정지하지 않고, 실린더의 성능 한계로 인한 피로가 줄어들기 때문이다. 따라서 출력을 검토하기 위한 수식은 식 (9)에 해당한다. 여기서, $F_{cylinder}$는 유압 실린더의 허용 출력 기준이며, $P_{cylinder}$와 h는 해당 기종 유압 실린더의 작동 압력 및 효율이다.

$$\begin{aligned} F_{cylinder} &= P_{cylinder} \times A \times \eta \\ &= P_{cylinder} \times \frac{\pi}{4} \times D_2^2 \times \eta \end{aligned} \tag{9}$$

해당 기종 유압 실린더의 강종은 SCM415이며, 규격은 ∅245×22.5t로 이에 대한 인장 응력 및 단면 넓이는 Table 11에 나타내었다. S는 해당 유압 실린더 기종의 안전율이며, 모멘트 및 출력에 대한 허용치는 Table 12에 나타내었다. 괄호 안의 수치는 허용치를 안전율로 나눈 값을 의미한다.

Fig. 5는 텔레스코핑 작업 중 텔레스코픽 케이지를

Table 11. Properties of cylinder

Index	Result
σ_{ta}	833 *MPa*(8500 *kg/cm*^{2})
σ_{ca}	724.35 *MPa*
τ	480.93 *MPa*
A	15727.60 *mm*^{2}×2(∅245×22.5t)
λ	35.03
ω	1.13
η	0.98
$P_{cylinder}$	29.4 *MPa*(300 *kg/cm*^{2})
S	5

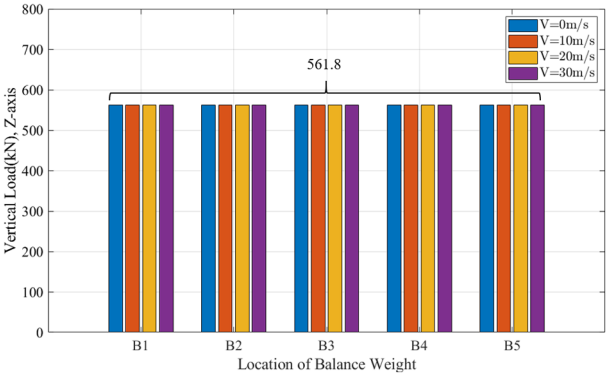
Table 12. Allowable load and moment of cylinder

Allowable value	Result
P_{ta}	104730.26 *kN*(20946.05 *kN*)
P_{ca}	91069.79 *kN*(18213.958 *kN*)
P_k	80592.73 *kN*(16118.55 *kN*)
$M_{torsion}$	772.02 *kNm*(154.40 *kNm*)
M_{bac}	668.59 *kNm*(133.72 *kNm*)
M_{bat}	581.38 *kNm*(116.28 *kNm*)
$F_{cylinder}$	904.70 *kN*

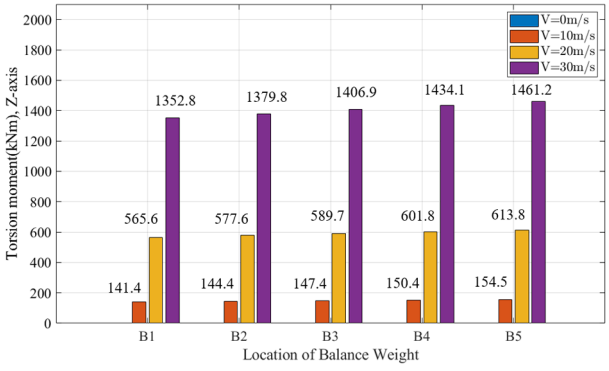
포함한 타워크레인 상부 구조물이 밸런스 웨이트와 풍속의 매개변수에 따라 유압 실린더 하부(P5)에 작용하는 수직 및 모멘트 반력을 막대 그래프로 나타내었다. 풍속 매개변수를 파란색 막대(0 *m/s*), 주황색 막대(10 *m/s*), 노란색 막대(20 *m/s*) 그리고 보라색 막대(30 *m/s*)로 분류하였다. 각 그림의 수평축은 밸런스 웨이트의 위치(B1~B5), 수직축은 반력의 값을 의미하며 Fig. 5(a)는 Z축 수직 반력, Fig. (5b)는 Z축 비틀림 모멘트 반력, Fig. (5c)는 Y축 굽힘 모멘트 반력 그리고 (5d)는 X축 굽힘 모멘트 반력을 나타내었다.

Fig. 5(a)에서 텔레스코핑 작업 중 텔레스코픽 케이지를 포함한 타워크레인 상부 구조물이 밸런스 웨이트 위치와 풍속에 따라 유압 실린더 하부에 발생하면 수직 반력을 비교하였다. 그 결과, 수직 하중에 영향을 미치는 매개변수가 없었으므로 P5에 발생하는 수직 반력이 561.8 *kN*로 동일하였다. 또한, 이의 값들이 표 12의 허용 압축 반력 기준 91069.79 *kN*(20946.05 *kN*), 허용 좌굴 반력 기준 80592.73 *kN*(16118.55 *kN*)보다 낮으므로 이에 대한 안전성을 확인할 수 있다. 그리고 해석값이 유압 실린더의 규격을 고려한 출력 기준 904.70 *kN*보다 낮으므로 텔레스코핑 작업의 원활한 작업이 가능하다고 사료된다.

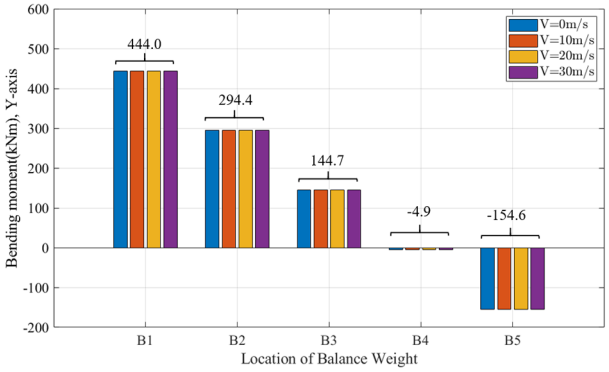
Fig. (5b)에서 Z축 비틀림 모멘트 반력 중 안전율을



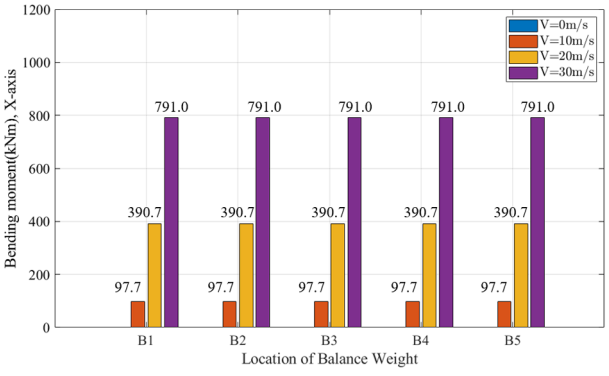
(a) Vertical(Z-axis) load of P5.



(b) Torsion(Z-axis) moment of P5.



(c) Bending(Y-axis) moment of P5.



(d) Bending(X-axis) moment of P5.

Fig. 5. Reaction load and moment of P5.

Table 13. Change ratio of torsion moment in balance weight parameter

Parameter	B1→B2	B1→B3	B1→B4	B1→B5
0 *m/s*	0%	0%	0%	0%
10 *m/s*	2.12%	4.24%	6.36%	9.25%
20 *m/s*	2.12%	4.26%	6.40%	8.52%
30 *m/s*	2.01%	4.01%	6.03%	8.03%

Table 14. Change ratio of torsion moment in wind speed parameter

Parameter	10 *m/s*→20 *m/s*	10 *m/s*→30 *m/s*
B1	300.00%	856.58%
B2	300.00%	855.54%
B3	300.07%	854.48%
B4	300.13%	853.52%
B5	297.28%	845.76%

고려하지 않을 때에는 풍속 30 *m/s*의 결과만이 모든 밸런스 웨이트 위치에서 Table 12의 허용 비틀림 모멘트 772.02 *kNm*를 초과하며 비틀림 파괴가 발생함을 의미한다. 반면에, 안전율을 고려할 때에는 20 *m/s*의 결과와 10 *m/s* 결과 중 B5의 결과가 안전율을 고려한 허용치 154.40 *kNm*를 초과하며 하중 불균형이 존재함을 의미한다. 또한, 비틀림 모멘트 반력은 밸런스 웨이트 위치와 풍속 매개변수에 동시에 영향을 받으며 B1의 밸런스 웨이트 위치와 10 *m/s*의 풍속 조건을 기준으로 변화율은 Table 13, 14에 나타내었다.

여기서, Table 13의 밸런스 웨이트 위치에 따른 변화율보다 Table 14의 풍속 변화에 따른 변화율이 상대적으로 크므로 비틀림 모멘트 반력에는 풍속의 영향이 더욱 크게 작용하며, 풍속이 10 *m/s*에서 20 *m/s*로 100% 증가하면 비틀림 모멘트 반력은 약 300%가 증가, 풍속이 10 *m/s*에서 30 *m/s*로 200% 증가하면 비틀림 모멘트 반력은 약 850% 증가하였다. 즉, 풍속 증가량보다 비틀림 모멘트 반력 증가량이 매우 크다.

Fig. (5c)에서 Y축 굽힘 모멘트 반력은 Y축 위치가 달라지는 밸런스 웨이트 위치의 영향을 받으며 밸런스 웨이트 위치가 B1에서 B5로 멀어질수록 점차 감소하다 B4 위치를 넘어서며 반대 회전 방향으로 굽힘 모멘트 반력이 증가하게 된다. 또한, B1~B5에서 굽힘 모멘트 반력에 대한 표 12의 허용치가 압축면에서 668.59 *kNm*(133.72 *kNm*), 인장면에서 581.38 *kNm*(116.28 *kNm*)로 안전율을 고려하지 않을 경우에는 모든 위치에서 굽힘 파괴가 발생하지 않지만, 안전율을 고려할 경우에는 B4의 위치에서만 하중 균형이 보장됨을 알 수 있다. 또한, 이의 결과는 모든 풍속 결과에서도 동일하므로 풍속이 0 *m/s*일 때에도 밸런스 웨이트 위치가 중요함을 의미한다.

Table 15. Change ratio of bending(X) moment in wind speed parameter

Parameter	10 *m/s*→20 *m/s*	10 *m/s*→30 *m/s*
B1	299.90%	709.62%
B2	299.90%	709.62%
B3	299.90%	709.62%
B4	299.90%	709.62%
B5	299.90%	709.62%

Fig. (5d)에서 X축 굽힘 모멘트 반력은 X축에서 작용하는 풍속에 영향을 받으며 풍속이 0 *m/s*에서 30 *m/s*로 증가할수록 X축 굽힘 모멘트 반력도 증가한다. 그 결과, 압축면 668.59 *kNm*(133.72 *kNm*), 인장면 581.38 *kNm*(116.28 *kNm*)의 기준에 대해 안전율을 고려하지 않을 경우에는 풍속 30 *m/s* 조건에서만 X축 굽힘 파괴가 발생하며, 안전율을 고려할 경우에는 10 *m/s* 풍속 기준에서만 하중 균형을 확인할 수 있다. 이에 대한 풍속 영향을 비교하기 위해 10 *m/s*의 풍속 조건을 기준으로 X축 굽힘 모멘트의 변화율은 Table 15에 나타내었다.

여기서, 풍속이 10 *m/s*에서 20 *m/s*로 100% 증가하면 X축 굽힘 모멘트 반력은 약 300%가 증가하였으며, 풍속이 10 *m/s*에서 30 *m/s*로 200% 증가하면 X축 굽힘 모멘트 반력은 약 709% 증가하였다. 즉, 굽힘 모멘트의 증가량 또한 역시 풍속 증가량보다 큼을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

이 연구에서는 텔레스코핑 작업을 구현한 Modeling-1과 Modeling-2의 구조 해석을 동시에 고려하여 텔레스코픽 케이지, 연결 재료의 안전성 여부를 확인하였으며, 유압 실린더에 대해서는 안전율을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 유압 실린더의 안전성과 하중 균형을 확인하였다.

그 결과, 텔레스코픽 케이지의 수직재는 30 *m/s*의 풍속에서는 모든 밸런스 웨이트 위치에서 파괴가 발생하였고, 20 *m/s*의 풍속에서는 B1의 밸런스 웨이트 위치에서만 파괴가 발생하였다. 이를 통해 10 *m/s* 이하의 풍속에서 구조 안전성을 확인할 수 있었다. 반면, 연결 재료는 모든 매개변수 조건에서 구조 안전성을 확인할 수 있었다.

유압 실린더에 작용하는 모멘트 반력은 풍속에 따라 매우 큰 영향을 받고 있으며, 안전율을 고려하지 않은

허용치와 비교하였을 때에는 30 *m/s*의 풍속을 제외하고 초과하지 않았으나 안전율을 고려한 허용치와 비교하였을 때에는 10 *m/s*의 풍속에서 텔레스코핑 작업을 수행할 때에만 하중 균형을 확보할 수 있었다. Z축 비틀림 모멘트 반력의 경우에는 10 *m/s*의 풍속에 대해서도 밸런스 웨이트 위치가 매우 멀면 하중 불균형이 발생하였다.

따라서, 유압 실린더의 허용치에 대해서는 안전율을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에는 텔레스코핑 작업 안전성에 대한 해석 차이가 매우 크다고 할 수 있다. 하지만, Table 14 및 Table 15와 같이 풍속 변화에 의한 모멘트 반력의 증가율을 통해 텔레스코핑 작업 중 풍속에 의한 영향이 매우 큰 것과 동시에 고도에 따라 풍속이 기하급수적으로 증가하는 것을 고려하면 안전율을 적용한 허용치 기준을 통해 하중 균형을 검토하는 것이 보다 적절하다고 사료된다. 또한, 안전율을 고려한 허용치를 통해 Fig. 5(c)의 결과와 같이 하중 균형을 유지하기 위한 특정 밸런스 웨이트 위치를 제시할 수 있다.

이러한 분석 결과는 산업안전보건기준에 관한 규칙[16]에서 "텔레스코핑 작업은 해당 위치에서 순간풍속이 10 *m/s*를 초과하면 작업을 중지한다"의 풍속에 관한 사항과 "타워크레인 기종에 따라 제시하는 하중(밸런스 웨이트)을 들어 트롤리를 메인지브의 안쪽 또는 바깥쪽으로 이동시키면서 타워크레인의 좌/우 지브의 균형을 유지"하라는 밸런스 웨이트 위치에 관한 현행 규정들이 매우 유효함을 의미한다.

결론적으로, 오직 1개의 유압 실린더로만 상승하는 타워크레인의 텔레스코핑 작업은 이에 대한 현행을 반드시 준수해야 하며, 그 외에도 밸런스 웨이트의 사용 및 적정 위치의 인양 그리고 연결 재료의 체결 확인 및 정품 사용 등을 철저히 이행하여야 한다. 이를 위해서 정부 기관의 철저한 이행 감독과 시공사에서 타워크레인 안전에 대한 경험 및 지식을 축적한 안전 전문가의 활동이 매우 중요하다고 사료된다.

References

1) K. I. Ko, W. H. Oh and E. T. Lee, "Wall Tie Member Force Curve for the Construction Tower Crane", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 18, No. 6, pp. 697-706, 2006.
2) D. H. Lee, J. H. Choi and S. K, Kim, "A Study on the Safety Risk of Telescoping Work of Tower Cranes", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 9, No. 1, pp. 9-13, 2009.
3) Y. M. An, "A Study on Safety for Tower Crane", Master Thesis, Chungbuk National University, 2019.
4) I. J. Shin, "Factors that affect Safety of Tower Crane Installation/Dismantling in Constriction Industry", Journal of Safety Science, Vol. 72, pp. 379-390, 2015.
5) V. W. Y. Tam and I. W. H. Fung, "Tower Crane Safety in the Construction Industry: A Hong Kong Study", Journal of Safety Science, Vol. 49, pp. 208-215, 2011.
6) S.W. Paik, "A Study on the Improvement of the System for Disaster Prevention in Tower Crane", The Korea Occupational Safety and Health Agency, 2009.
7) K. H. Shim and D. H. Rie, "A Quantitative Risk Analysis of Related Crane Using the FMEA", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 6, pp. 34-39, 2010.
8) S. S. An, "Seismic Behavior Analyse of Tower Crane using Dynamic Load", Master Thesis, Chungbuk National University, 2014.
9) K. J. Song, "Analysis on Seismic Design Method of Tower Cranes Using Dynamic Response Characteristics in Korea", Master Thesis, Chungbuk National University, 2018.
10) M. J. RO and M. G. Lee, "Structural Analysis for the Collapse Accident of Tower Crane", J. Korean Soc. Saf., Vol. 16, No. 4, pp. 147-152, 2001.
11) S. H, Kim and J. U. Cho, "Analysis on the Structure Safety of the Tower crane under Load", Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 11, No. 10, pp. 3641-3646, 2010.
12) W. K. Choi, "The Analysis of Working Load Based on Domestic Wind Load Standard for Construction Tower Cranes", Master Thesis, Chung-Ang University, 2015.
13) T. G. Mara, "Effects of a Construction Tower Crane on the Wind Loading of a High-Rise Building", Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No. 11, pp. 1453-1460, 2010.
14) E. J. Lee and S. W. Shin, "Field Survey on Suitable In-service Wind Speed Limit for Tower Crane Operation", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 1, pp. 103-108, 2018.
15) Ministry of Land, Infrastucture and Transport, "Structure, Specification and Performance of Tower Crane", 2015.
16) Ministry of Employment and Labor, "Rules of Industrial Safety and Health Standards", 2019.