

기초앵커 불량시공에 따른 타워크레인 사고의 원인분석

이명구 · 노민래*

서울보건대학 산업안전과 · *한국산업안전공단 산업안전보건연구원

1. 서 론

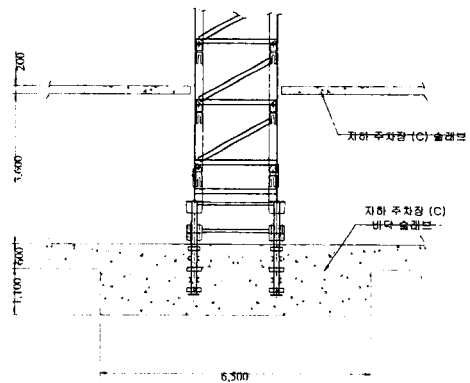
타워크레인은 빌딩, 아파트, 교하공간이 높은 교량, 플랜트 공사 등 고소작업이 이루어지는 공사에서 유익하게 사용되는 건설장비이다. 타워크레인은 단면에 비하여 그 설치높이가 높아서 매우 세장한 구조물이며, 마스트 상부에 설치되어 있는 상부구조물(타워 헤드, 지브, 카운터 지브, 카운터 웨이트, 기계장치 등)의 자중이 매우 크기 때문에 하중균형, 풍하중, 인양하중 등에 아주 민감한 강구조물이다. 따라서 이러한 타워크레인의 특성에 대한 이해의 부족과 안전한 작업방법의 불이행 등으로 인한 사고가 가끔 발생되고 있으며, 타워크레인의 사고는 곧바로 중대재해로 이어지고 있다.

본 연구의 목적은 타워크레인의 사고사례 중 기초앵커 설치의 오류로 인하여 발생한 재해를 대상으로 현장조사, 관련자료의 수집, 현장관계자의 질의응답, 구조해석 등 일련의 과정을 수행하여 사고원인을 분석함으로써 동일유형의 사고를 예방하고자 하는 것이다.

2. 사고현황조사

건설현장에서는 <그림 1>과 같이 타워크레인의 기초콘크리트를 지하주차장의 바닥콘크리트와 일체로 타설하였으며, 기초콘크리트에는 290HC(12ton)용 기초앵커를 매립하였고 앵커상부에 보조프레임을 용접한 후 HT380F(14ton)를 조립하여 사용하였던 것으로 확인되었다.

위의 상황으로 판단할 때 지하주차장을 건설할 때에는 290HC(12ton) 기종의 타워크레인을 설치하여 사용하려고 계획되었으나 그 이후 현장사정으로 인하여 HT380F를 설치하여 사용하였던 것으로 판단된다. 이러한 상황은 공사현 <그림 1> 사고 타워크레인의 설치 단면도장의 관리상 문제점으로써 발생할 수 있는 것으로 판단되며, 이미 타설한 기초콘크리트



를 해체하고 새롭게 HT380F의 기초앵커를 매립하는 데에는 큰 경제적인 손실을 초래하게 되므로 보조프레임을 사용한 것으로 판단된다. 사고 당시 타워크레인은 Anchor System이 없는 상태에서 마스트 14단 높이(설계상 자립고)로 설치 운용되고 있었다.

파단형상을 조사한 결과, 4개의 앵커중 2개는 파단된 필렛용접재가 검게 녹이 슬어 있었고 다른 하나의 앵커 용접재는 L형의 모서리부분은 검게 되어 있으나 나머지 길이방향은 금방 파단된 것처럼 은빛색을 나타내고 있었으며, 나머지 하나의 앵커는 용접재에서 파단되지 않고 290HC 앵커부재가 파단되었다.

이러한 파단형상으로 판단할 때 타워크레인의 붕괴는 일상적인 작업하중에 의한 반복하중으로 인하여 피로파괴를 일으켰으며, 작은 균열이 일단 발생되고 나면 이 부분에 응력집중이 되어 더욱 균열이 성장하고 마침내 작은 하중에서도 견디지 못하고 붕괴로 이어졌던 것으로 판단된다.

3. 보조프레임

3.1 보조프레임을 사용하게 되는 경우

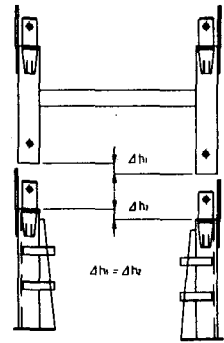
보조프레임은 설계검사에 의하여 검증받지 않은 프레임이기 때문에 근원적으로는 사용할 수 없는 부재이나 현장의 여건상 어쩔 수 없이 사용하게 되는 경우가 가끔 발생하고 있는데 다음과 같은 경우이다.

- 1) 이미 설치된 기초앵커와 상부에 설치하고자 하는 타워크레인의 구조체가 기종은 일치하지만, 기초앵커를 기초콘크리트에 매립한 후 4개의 기둥에서 수평도(level)의 오차가 발생했을 때
- 2) 이미 설치된 기초앵커와 상부에 설치하고자 하는 타워크레인의 구조체가 서로 기종이 일치하지 않을 뿐만 아니라 기초앵커와 마스트의 설치간격 및 연결형식도 일치하지 않을 때(본 사고 건과 동일한 경우임)

3.2 해결방안

▣ 상기 1)의 경우

<그림 2>와 같이 이미 설치된 앵커의 수평도를 보정할 수 있도록 오차의 크기만큼 길이의 차를 갖는 보조프레임을 제작하여 앵커 상부에 조립한 후 보조프레임의 상단에 베이지-마스트를 조립하면 된다. 이러한 경우에는 보조프레임의 단면은 앵커의 단면 또는 베이지-마스트의 단면과 동일한 크기로 제작하



<그림 2> 기초앵커의 수평도 오차보정용 보조프레임

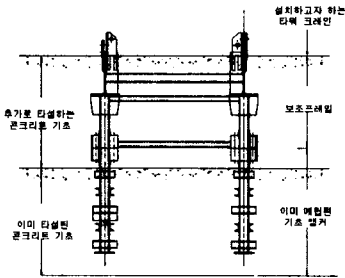
고, 연결형식도 사용되는 타워크레인과 동일하게 제작하면 되므로 비교적 간단한 방법으로 제작 및 설치가 가능하다. 보조프레임의 길이도 비교적 짧게 제작되어도 되며, 구조적인 안전성 검토도 하나의 짧은 마스트가 추가로 연결된 것으로 가정하면 된다.

▣ 상기 2)의 경우

우선 하부와 상부간에 연결방식이 서로 상이하기 때문에 이를 해결하기 위하여 보조프레임의 하부측은 이미 매립된 앵커부재와 연결시킬 수 있고(본 사고 건은 볼트연결) 보조프레임의 상부측은 상부에 설치하고자 하는 타워크레인의 베이직-마스트와 연결할 수 있는 구조(본 사고 건은 편연결)로 제작되어야 한다. 상부와 하부의 기둥부재 간격이 일치하지 않고 단면의 형태도 일치하지 않기 때문에 상하부로 하중을 전달시키기 위해서는 중간에 플레이트를 삽입하여 용접하는 구조로 제작한다.

이를 제작할 때에는 다음과 같은 사항을 반드시 검토하여야 한다.

- a. 편심축하중으로 인하여 하부 앵커에 발생하는 부재력의 검토
- b. 전도에 대한 안전성을 확보하기 위한 하부 기초콘크리트의 넓이 및 크기
- c. 용접부의 응력 검토
- d. 마스트의 높이가 보조프레임의 높이만큼 높아진 영향에 대한 기타 부재들의 부재력 검토



이러한 사항들을 검토하기 위해서는 보조프레임을 장치한 상태에서 전체 타워크레인을 모델링하고 구조 해석을 수행하여야 정확한 검토가 될 수 있으나, 이러한 불편함을 간단히 해결할 수 있는 방법은 <그림 3>과 같이 보조프레임의 부위에 콘크리트를 타설하는 것이다.

보조프레임의 부위를 콘크리트로 타설할 경우에는

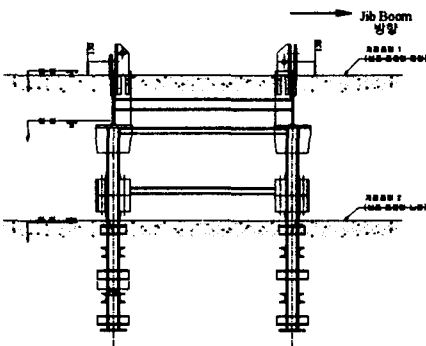
<그림 3> 앵커구조와 상부구조의 기중보정용 보조프레임

베이직-마스트의 바로 하부가 지점이 되기 때문에 상부에 설치하는 타워크레인의 원래 설계조건과 동일하게 되어 마스트의 높이에 따른 별도의 전체해석이 필요치 않게 되며, 보조프레임 앵커부재의 수평변위가 구속되게 되므로 편심하중에 의한 응력증가현상이 방지되어 축력에 의한 응력검토만 수행하여도 된다. 물론, 타워크레인의 전도에 대한 안전성을 검토하기 위하여 이미 타설한 기초콘크리트의 크기 및 넓이에 대한 검토가 수행되어야 하지만 보조프레임의 위치에 콘크리트를 별도로 타설하였기 때문에 콘크리트 구체의 자중이 증가하는 효과를 나타내게 되므로 전도에 대한 안전성이 증가하게 된다.

따라서 상기 2)와 같은 경우에 사용되는 보조프레임의 구조적 안전성과 타워크레인의 사용성을 충분히 확보하기 위하여 보조프레임 위치에 콘크리트를 타설하는 것이 바람직하다고 평가되며, 그렇지 않을 경우에는 별도의 전체해석을 수행하여 안전성을 검토하여야 할 것이다.

4. 구조해석

4.1 해석조건



<그림 4> 기초앵커부위의 지점조건

구조해석은 본 사고의 직접적인 원인이 되었던 보조프레임의 용접부에 발생하는 응력상태를 검토하기 위하여 실시하였다. 구조해석에 사용된 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였으며, 전체 구조체를 Frame구조로 모델링하여 수행하였다. 구조해석을 위한 하중조건 및 강도검토는 「크레인 제작기준·안전기준 및 검사기준」을 준수하였다.

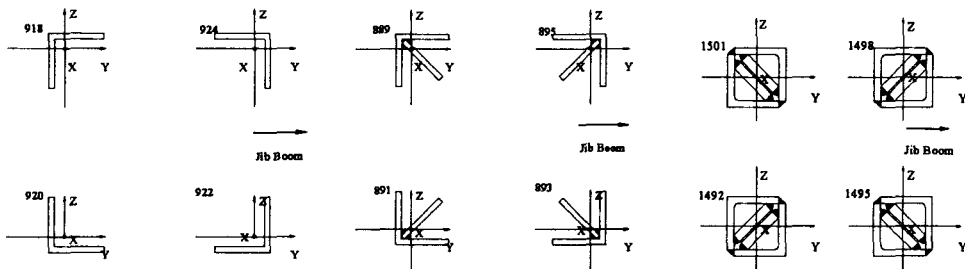
구조해석은 보조프레임 부위가 콘크리트에 매립된 조건과 보조프레임이 지상에 노출된 조건에

<표 1> 구조해석을 수행한 경우별 하중조건

하중조건	구조해석의 조건	사하중	정 격 하 중				풍하중의 풍속 (m/sec)	온도 하중	
			14ton (20.2m)	12ton (26.3m)	6ton (48.0m)	3ton (72.0m)			
1	지점조건 1 보조프레임이 매립되었을 때	정지상태	자 중	-	-	-	-	55	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
2		운전상태	자 중	○	-	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
3			자 중	-	○	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
4			자 중	-	-	○	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
5			자 중	-	-	-	○	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
6	지점조건 2 보조프레임이 노출되었을 때 (T/Cage가 하단에 있을 때)	정지상태	자 중	-	-	-	-	55	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
7		운전상태	자 중	○	-	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
8			자 중	-	○	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
9			자 중	-	-	○	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
10			자 중	-	-	-	○	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
11	지점조건 2 보조프레임이 노출되었을 때 (T/Cage가 상단에 있을 때)	정지상태	자 중	-	-	-	-	55	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
12		운전상태	자 중	○	-	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
13			자 중	-	○	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
14			자 중	-	-	○	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
15			자 중	-	-	-	○	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
16	현장조건	운전상태	자 중	72m 위치에 2ton 부하			8.4	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$	

대하여 각각 수행하였다. 보조프레임이 콘크리트에 매립된 조건은 보조프레임이 없을 때와 동일한 상태로써 사고 타워크레인 제작사의 설계조건과 동일한 조건이며, 이때의 지점은 HT380F 앵커부재의 위치가 된다. 보조프레임이 콘크리트에 매립되지 않고 지상에 노출된 조건은 사고당시의 설치상태와 동일한 것으로써 290HC의 앵커부재가 지점이 된다.

<표 1>은 설계기준에 적용되는 하중조건을 나타낸 것이며, 하중조건 16은 현장의 작업조건을 반영한 것이다. <그림 4>는 구조해석상 사용된 지점의 위치를 나타낸 것이며, <그림 5>는 주로 검토하여야 할 부위인 HT380F 앵커부재, 290HC 앵커부재 및 용접부의 절점번호와 구조해석상 사용된 국부좌표계를 나타낸 것이다.



a) 단면 A (HT380F 기초앵커) (b) 단면 B (필렛용접부) (c) 단면 C (290HC 기초앵커)

<그림 5> 기초앵커부위의 절점번호 및 국부좌표계

4.2 해석결과 및 고찰

총 16가지의 하중조건에 따라 구조해석을 실시하고 발생된 부재력을 이용하여 각 부재의 강도검토를 수행하였다. 강도검토는 기초앵커부재의 모재와 보조프레임의 용접재로 구분하여 실시하였으며, 용접재는 논란의 대상이 된 용접불량을 고려하여 용접치수 6mm인 경우와 제작사의 기준인 용접치수 10mm에 대하여 각각 실시하였다.

HT380F 기초앵커 부재는 L200×20t(SS540)이며, 290HC 기초앵커 부재는 2L130×15t+2PL 200×20t(SWS490YA)이다.

앵커 부재의 모재에 대한 강도검토를 수행한 결과, <표 2>와 같이 하중조건 11에

<표 2> 모재의 휨강도 검토 결과

하중 조건	HT380F 앵커부재(단면A)				290HC 앵커부재(단면C)			
	부재 번호	인장용량 (kg/cm ²)	압축용량 (kg/cm ²)	판 단	부재 번호	인장용량 (kg/cm ²)	압축용량 (kg/cm ²)	판 단
11	918	2323	-	Good	1501	2323	-	Good
	920	2365	-	Good	1492	2365	-	Good
	922	-	-2994	Good	1495	-	-2994	N.G
	924	-	-3167	N.G	1498	-	-3167	N.G

서 허용응력을 상회하는 응력이 발생하였으며 그 이외의 경우에는 안전한 것으로 평가되었다.

사고의 원인이 되었던 보조프레임의 필렛용접부 구조는 축력, 전단력 및 휨모멘트가 동시에 작용하도록 설치되어 있다. 용접부의 목두께를 이음면에 전개하고 그 단면의 특성을 이용하여 용접부의 전단응력을 검토한 결과 용접부가 노출되었을 경우에는 모든 경우에서 공장용접의 허용전단응력인 800kg/cm^2 를 초과하는 것으로 나타났다. 대표적인 예를 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 필렛용접부의 전단응력 검토 결과

하중조건	절점번호	용접치수 6mm일 때		용접치수 10mm일 때	
		전단응력(kg/cm^2)	판단	전단응력(kg/cm^2)	판단
6	889	1908	N.G	1144	N.G
	891	1746	N.G	1047	N.G
~		중	간	생	략
15	889	867	N.G	519	Good
	891	1626	N.G	976	N.G
16	889	596	Good	357	Good
	891	798	Good	478	Good

5. 결 론

- (1) 사고의 원인은 보조프레임의 필렛용접부가 콘크리트에 매립되지 않고 지상으로 노출되었기 때문에 발생한 것으로 판단되며, 다소의 용접결함이 있었다고 하더라도 이 부위를 콘크리트로 매립하였다면 붕괴사고는 발생하지 않았을 것으로 판단된다.
- (2) 보조프레임을 노출시켜 설치하고자 할 때에는 설치하고자 하는 HT380F 타워크레인의 설계조건과 일치하지 않으므로 보조프레임 그 자체는 안전하다고 하더라도 보조프레임 이외의 부재는 안전성을 상실할 수 있다.
- (3) 현장의 여건상 보조프레임을 사용하여야 할 경우에는 보조프레임을 콘크리트 속에 묻는 구조로 설계·시공하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

1. 노동부, “크레인 제작기준·안전기준 및 검사기준”, 고시 제1997-32호
2. 이덕윤, “실용 크레인 편람”, pp.28~35, 1997.
3. 한국강구조학회, “강구조공학”, pp.204~211, 2000.