

# 타워크레인 붕괴사고의 구조적 분석

이명구<sup>†</sup> · 노민래<sup>\*</sup>

서울보건대학 안전시스템공학과 · <sup>\*</sup>산업안전보건연구원 안전공학연구소  
(2001. 11. 14. 접수 / 2001. 12. 17. 채택)

## Structural Analysis for the Collapse Accident of Tower Crane

Myeong-Gu Lee<sup>†</sup> · Min-Lae Ro<sup>\*</sup>

Department of Safety System Engineering, Seoul Health College · <sup>\*</sup>Occupational Safety & Health Research Institute  
(Received November 14, 2001 / Accepted December 17, 2001)

**Abstract :** The tower cranes are the very useful construction machine in the high place works. But they are very susceptible to the load balance, the wind load and the hanging load because they are the very slender structures and those center of gravity is located in the upper part. Therefore, the collapse accidents of tower crane have repeatedly happened during the assemble or disassemble works. The correcting frame may has often used in order to correct the error in the setting of foundation anchors. The goal of this study is that propose the methods preventible the collapse accident of tower crane which is constructed by using the correcting frame. In order to accomplish the goal of this study, the field survey, the reference investigation and the structure analysis were performed for the collapse accident of tower crane using the correcting frame. This study result in the methods preventible the same accident.

**Key Words :** tower cranes, collapse accident, correcting frame, foundation anchors

### 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 상부 구조물(타워 헤드, 지브, 카운터 지브, 카운터 웨이트, 기계장치 등)의 자중이 매우 크기 때문에 하중 균형·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 질

의응답, 구조해석 등 일련의 과정을 수행하여 사고 원인을 분석함으로써 동일유형의 사고를 예방하고자 하는 것이다.

### 2. 사고현황 조사

사고현장에서는 Fig. 1과 같이 타워크레인의 기초 콘크리트를 지하주차장의 바닥콘크리트와 일체로 타설하였으며, 기초콘크리트에는 290HC(12tonf)용 기초앵커를 매립하였고 앵커상부에 보조프레임을 설치한 후 HT380F(14tonf)를 조립하여 사용하였던 것으로 확인되었다.

Fig. 1의 상황으로 판단할 때 지하주차장을 건설할 때에는 290HC(12tonf) 기종의 타워크레인을 설치하여 사용하려고 계획되었으나 그 이후 현장사정으로 인하여 HT380F를 설치하여 사용하였던 것으로 판단된다. 이러한 상황은 공사현장의 관리상 문제점으로써 발생할 수 있는 것으로 판단되며, 이미 타설한 기초콘크리트를 해체하고 HT380F의 기초앵커를 새롭게 매립하는 데에는 큰 경제적인 손실을 초래

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
LMG@shjc.ac.kr

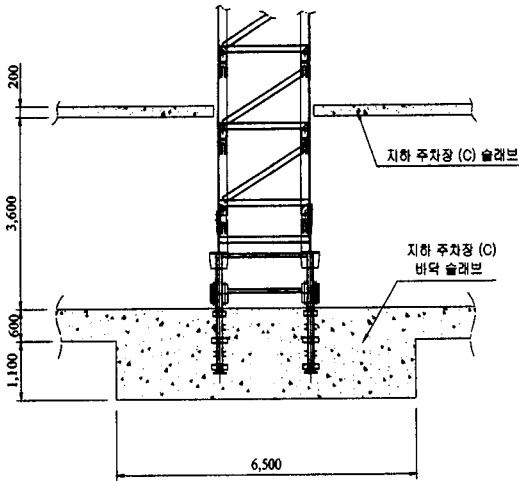


Fig. 1. Cross section of the collapsed crane

하게 되므로 보조프레임을 사용한 것으로 판단된다. 사고 당시 타워크레인은 Anchor System이 없는 상태에서 마스트 14단 높이(설계상 자립고)로 설치·운영되고 있었다.

파단형상을 조사한 결과, 4개의 앵커 중 2개는 파단된 필렛용접재가 검게 녹이 슬어 있었고 다른 하나의 앵커 용접재는 L형의 모서리부분은 검게 되어 있으나 나머지 길이방향은 방금 파단된 것처럼 은빛 색을 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 나서 이 부분에 응력집중이 되어 균열이 더욱 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, 기

초앵커를 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 사고건과 동일한 경우임)

### 3.2. 해결방안

#### 3.2.1. 상기 1)의 경우

Fig. 2와 같이 이미 설치된 앵커의 수평도를 보정할 수 있도록 오차의 크기만큼 길이의 차를 갖는 보조프레임을 제작하여 앵커 상부에 조립한 후 보조프레임의 상단에 베이직-마스트를 조립하면 된다. 이러한 경우에는 보조프레임의 단면은 앵커의 단면 또는 베이직-마스트의 단면과 동일한 크기로 제작하고, 연결형식도 사용되는 타워크레인과 동일하게 제작하면 되므로 비교적 간단한 방법으로써 제작 및 설치가 가능하다. 보조프레임의 길이도 비교적 짧게 제작되어도 되며, 구조적인 안전성 검토도 하나의 짧은 마스트가 추가로 연결된 것으로 가정하면 된다.

#### 3.2.2. 상기 2)의 경우

우선 하부와 상부간에 연결방식이 서로 상이하기

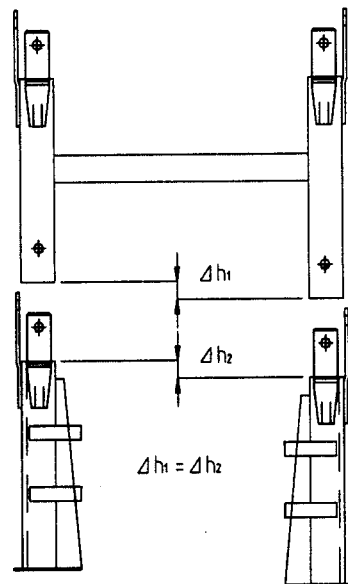


Fig. 2. Correcting frame for the level error of foundation anchor

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.

- 1) 편심축하중으로 인하여 하부 앵커에 발생하는 부재력의 검토
- 2) 전도에 대한 안전성을 확보하기 위한 하부 기초콘크리트의 넓이 및 크기
- 3) 용접부의 응력 검토
- 4) 마스트의 높이가 보조프레임의 높이만큼 높아진 영향에 대한 기타 부재들의 부재력 검토

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

보조프레임의 부위를 콘크리트로 타설할 경우에는 베이직-마스트의 바로 하부가 지점이 되기 때문에 상부에 설치하는 타워크레인의 원래 설계조건과

동일하게 되어 마스트의 높이에 따른 별도의 전체 해석이 필요치 않게 되며, 보조프레임 앵커부재의 수평변위가 구속되게 되므로 편심하중에 의한 응력 증가현상이 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

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.

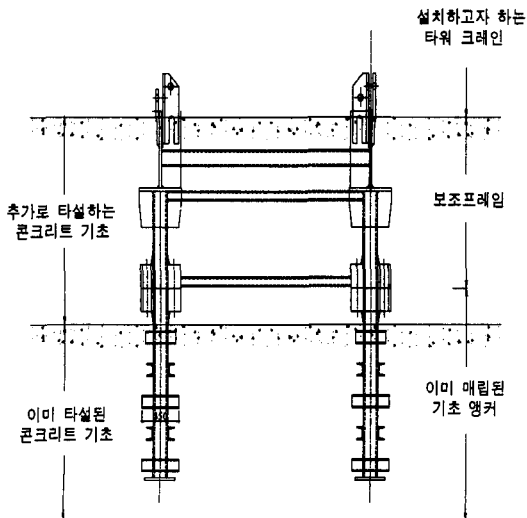


Fig. 3. Correcting frame for the error on kinds of machines

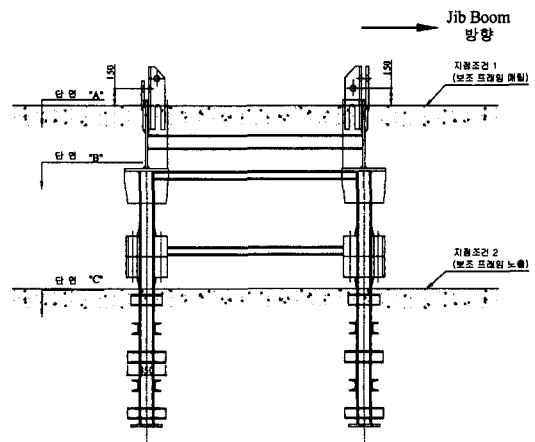


Fig. 4. Support conditions in the foundation anchor

Table 1. Load conditions for the structural analysis

하중조건	구조해석의 조건		사하중	정격 하중				풍하중의 풍속 (m/s)	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			자 중	○	-	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
3		운전상태	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			자 중	○	-	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
8		운전상태	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			자 중	○	-	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
13		운전상태	자 중	-	○	-	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
14			자 중	-	-	○	-	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$
15			자 중	-	-	-	○	16	$\Delta t=40^{\circ}\text{C}$

구조해석은 보조프레임 부위가 콘크리트에 매립된 조건과 보조프레임이 지상에 노출된 조건에 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.

Table 1은 설계기준에 적용되는 하중조건을 나타낸 것이다. Fig. 4는 구조해석상 사용된 지점의 위치

를 나타낸 것이며, Fig. 5는 주로 검토하여야 할 부위인 HT380F 앵커부재, 290HC 앵커부재 및 용접부의 절점번호와 구조해석상 사용된 국부좌표계를 나타낸 것이다.

### 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 용

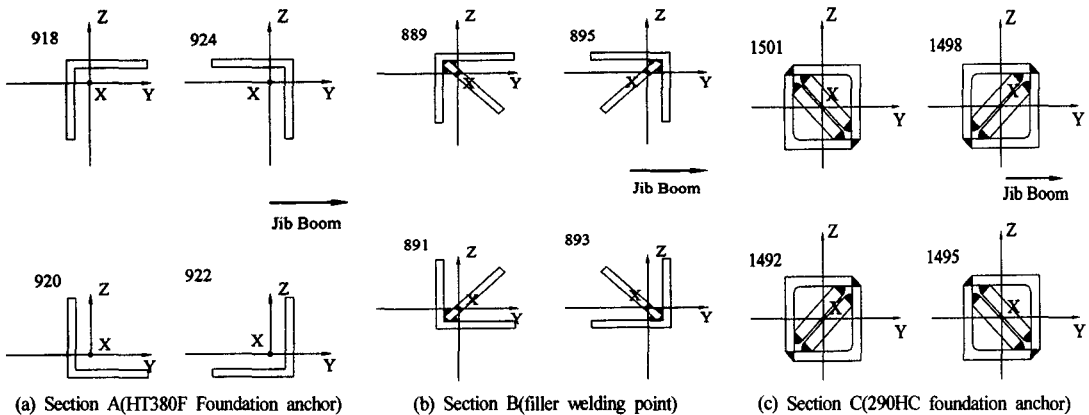


Fig. 5. Node numbers and local coordinates on the foundation anchor

Table 2. Properties of the used members

부재	치수	A (cm <sup>2</sup> )	y <sub>1</sub> (cm)	y <sub>2</sub> (cm)	Z <sub>13</sub> (cm <sup>3</sup> )	Z <sub>2</sub> (cm <sup>2</sup> )
HT380F 앵커	L200×20t	76.00	5.73	14.27	502.6	201.8
290HC 앵커	2L130×15t 2PL200×20t	110.20	6.60	6.60	277.3	277.3

Table 3. The kinds and allowable stresses of the used members

부재	강재의 종류	항복강도 σ <sub>e</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	허용응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
			σ <sub>ta</sub> (σ <sub>e</sub> /1.5)	σ <sub>ca</sub> (σ <sub>e</sub> /1.15)	τ (σ <sub>e</sub> /√3)	σ <sub>da</sub> (1.4 σ <sub>e</sub> )
HT380F 앵커	SS 540	4100	2730	2370	1570	3820
290HC 앵커	SWS 490YA	3700	2460	2140	1420	3440

접치수 6mm인 경우와 제작사의 기준인 용접치수 10mm에 대하여 각각 실시하였다.

각 부재의 단면특성과 부재의 종류 및 허용응력은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

앵커 부재의 모재에 대한 강도검토를 수행한 결과, Table 4와 같이 하중조건 11에서 허용응력을 상회하는 응력이 발생하였으며 그 이외의 경우에는 안전한 것으로 평가되었다. 하중조건 11의 결과는 보조프레임을 노출시켜 설치할 경우에는 보조프레임을 사용하지 않을 때에는 안전하게 설계되었던 부재에서조차 허용응력을 상회하는 응력이 발생됨을 보여주고 있다.

사고의 원인이 되었던 보조프레임의 필렛용접부 구조는 축력·전단력·휨모멘트가 동시에 작용하도록 설치되어 있다. 용접부의 목두께를 이음면에 전개하고 그 단면의 특성을 산출하였으며, 이를 Fig. 6과 Table 5에 각각 나타내었다. 현장조사에 의하면

Table 4. Results from the examination of bending strengths in the basic materials

하중조건	HT380F 앵커부재(단면A)				290HC 앵커부재(단면C)			
	부재번호	인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	압축응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	판단	부재번호	인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	압축응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	판단
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

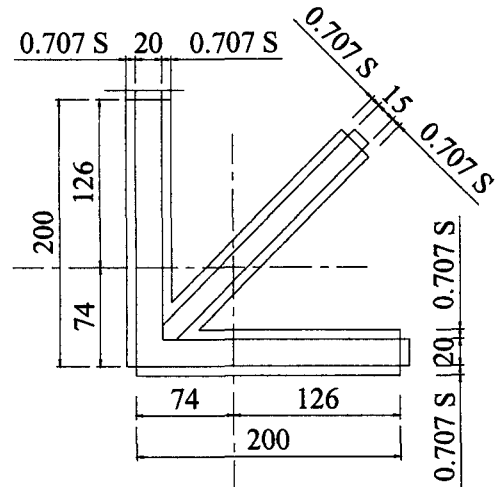


Fig. 6. Unfolding section of fillet welding point

Table 5. Properties of the efficient area for the fillet welding point

단면특성	용접치수(S)	
	6mm일 때	10mm일 때
유효목두께 (cm)	0.4242	0.707
단면적 A (cm <sup>2</sup> )	50.34	83.90
중립축에서의 거리 y <sub>1</sub> (cm)	7.4	7.4
중립축에서의 거리 y <sub>2</sub> (cm)	12.6	12.6
중립축에 대한 단면2차모멘트 I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	1917.03	3221.21

파단부의 용접치수가 설계값보다 다소 부족하였던 것으로 알려져 있다. 따라서 용접치수가 6mm인 경우와 10mm인 경우에 대하여 각각 검토하였다.

사고현장 설치조건과 동일한 상태인 보조프레임이 노출된 조건의 구조해석 결과를 이용하여 용접부의 전단응력을 검토하였다. 용접재의 전단응력 검토는 용접재로 하중이 전달되는 조건인 인장응력과 모멘트의 조합에 의해 검토하였으며, 순수 전단력에 의한 용접재의 전단응력도 발생되나 이는 상대적으로 매우 작은 값이기 때문에 계산에서 제외하였다. 하중경우별 필렛용접부에 발생하는 전단응력을 구하여 Table 6에 나타내었다.

용접부의 전단응력 검토 결과 용접부가 노출되었을 경우에는 모든 하중경우에서 공장용접의 허용전단응력인 800kgf/cm<sup>2</sup>를 초과하는 것으로 나타나 불안정한 상태가 되는 것으로 판단된다. 따라서, 보조프레임을 노출시켜 설치하여서는 안되며, Fig. 7과 같이 보조프레임 부위에 인장력과 휨모멘트가 발생

Table 6. Results from the examination of shear strengths in the fillet welding points at the condition exposed correcting frame

하중 경우	질점 번호	용접치수 6mm일 때		용접치수 10mm일 때	
		전단응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	판단	전단응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	판단
6	889	1908	N.G	1144	N.G
	891	1746	N.G	1047	N.G
7	889	982	N.G	588	Good
	891	1646	N.G	987	N.G
8	889	1255	N.G	752	Good
	891	1915	N.G	1148	N.G
9	889	952	N.G	570	Good
	891	1614	N.G	968	N.G
10	889	917	N.G	549	Good
	891	1578	N.G	946	N.G
11	889	2491	N.G	1493	N.G
	891	2335	N.G	1401	N.G
12	889	932	N.G	558	Good
	891	1694	N.G	1016	N.G
13	889	1205	N.G	722	Good
	891	1963	N.G	1177	N.G
14	889	902	N.G	540	Good
	891	1662	N.G	997	N.G
15	889	867	N.G	519	Good
	891	1626	N.G	976	N.G

지 않도록 추가적인 콘크리트를 타설하여야 그 안전성을 확보할 수 있으리라 판단된다.

### 5. 결론

1) 사고의 원인은 보조프레임의 필렛용접부가 콘크리트에 매립되지 않고 지상으로 노출되었기 때문

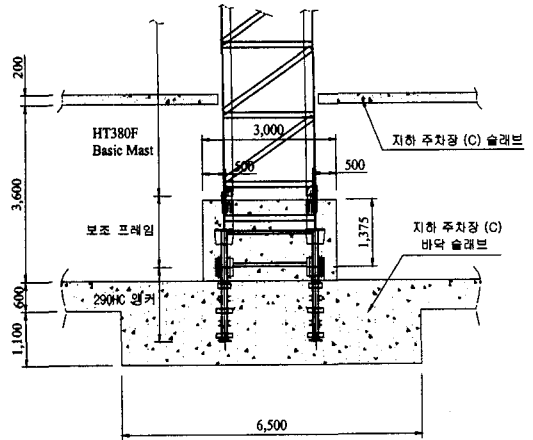


Fig. 7. Plan that ensure the structural safety for the tower cranes used correcting frame

에 발생된 것으로 판단되며, 다소의 용접결함이 있었다고 하더라도 이 부위를 콘크리트로 매립하였더라면 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.