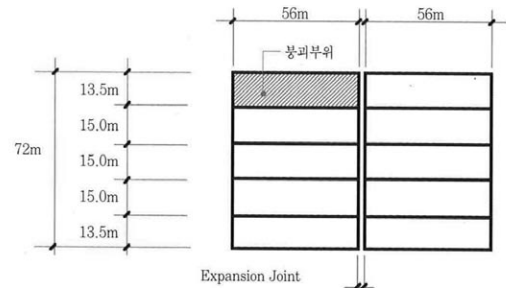
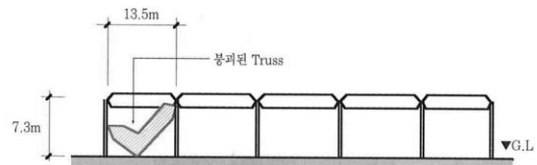


3. 구조기술사 승인없는 시공도면 작성

본 사례는 국부적인 적설하중을 고려하지 않은 구조설계자와 구조기술자의 검토없이 이음부 위치를 바꾸어 시공도면(Shop Drawing)을 작성한 시공자의 실수에 의하여 발생한 실패사례이다. 사소하다고 간과해 버리는 이러한 작은 변경 속에도 커다란 인명과 재산의 손실을 야기하는 실패는 숨어있다. 다행히 신속한 조치로 인명등 큰 피해는 없었던 사고이다.



〈그림1〉 붕괴부위 평면도



전체면적: 8.064m²(2.414py) 붕괴면적: 756m²(229py)

〈그림2〉 붕괴부위 단면도

1. 건물개요

지붕 트러스 붕괴사고가 일어난 공장은 1970년대 후반에 준공된 건물로 기둥은 철근콘크리트 구조이고, 지붕은 철골구조로 설계 및 시공되었다. 지붕의 구조는 ㄱ형강(angle)으로 짜여진 트러스(truss) 위에 샌드위치패널(sandwich panel)을 얹은 형태이다. 전체적인 건물의 특징은 딱딱한 공장 분위기를 줄이기 위하여 외벽을 적벽돌로 시공하였고, 지붕은 일반적인 공장지붕형태(△형)가 아닌 평트러스(flat truss)형태로 설계되었다. 또한, 지붕 테두리를 따라 1.3m 높이의 철근콘크리트 난간벽(parapet)을 둘러 외관상 공장 분위기를 느끼지 않도록 만든 건물이다.

2. 붕괴현황

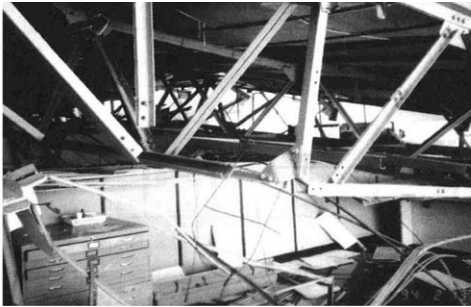
1994년 2월 11일, 밤늦은 시간인 23:30경 그날따라 평상시보다 많은 눈이 내렸고 문제의 트러스에서 심한 처짐이 발견되었다. 처짐 크기나 형태가 심각하다는 판단아래 곧바로 변전실등에 대한 안전조치를 취하고 주요물품과 자재를 안전한 곳으로 이동시켰다. 최초 처짐 발견 후 약 2시간만인 2월 12일 01:35분경 지붕은 완전히 붕괴되었다. 자칫하면 크나큰 사고가 될 수 있었으나 신속한 대처로 인해 그나마 피해를 줄인 경우이다. 2월 12~13일에 걸쳐 현장조사를 하고 붕괴원인에 대한 분석을 하였다.(붕괴부위사진: 〈사진1〉~〈사진4〉)



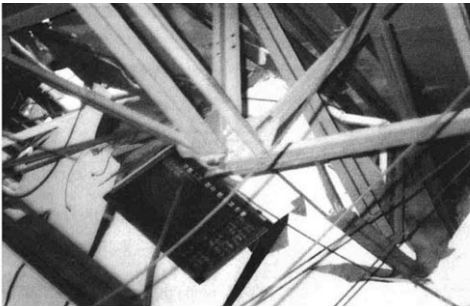
〈사진1〉 붕괴사고부위를 크레인으로 정리하고 있는 모습



〈사진2〉 붕괴된 지붕의 현황



〈사진3〉 트러스 붕괴현황



〈사진4〉 트러스 붕괴현황

3. 붕괴원인분석

구조물의 실패를 분석하는 일반적인 순서는 다음과 같다.

첫째는 「구조설계」상의 오류를 검토하는 것으로 설계하중은 적절히 고려했는가? 부재선정은 적절한가? 부재간의 접합상세가 적절한가? 등으로 구분해 볼 수 있다.

둘째는 계산서상에 표현된 구조설계자의 의도가 구조도면에 적절히 반영되었는가? 그리고 구조도면과 구조계산서가 일치하는가? 등과 관련한 「구조도면」 검토이다.

셋째는 「시공」이 구조도면대로 정확하게 이루어졌는가 하는 현장조사이다. 참고로 설계검토(design review)를 해보면 거의 모든 프로젝트(project)에서 구조계산의 실수와 구조도면의 표현미숙 및 오키, 현장에서의 시공실수 등을 확인할 수 있다. 이는 구조도면이 구조설계자에 의해 작성되지 않고 건축설계사무소에서 그려지는 데 그 1차 원인이 있다. 더구나 건축설계사무소에서 구조도면을 그리는 사람은 설계입문 단계에 있는 초보자가 대부분이다. 따라서, 구조계산서 및 구조설계자의 의도를 충분히 이해하지 못하는 상태에서 그려진 부실한 구조도면이 현장에서 제대로 이해되고 시공되기는 더욱 힘들 것이다. 이런 문제점은 구조도면이 구조기술자가 아닌 건축설계자에 의해 그려지는 한 해결될 수 없을 것이다.

3.1 현장조사

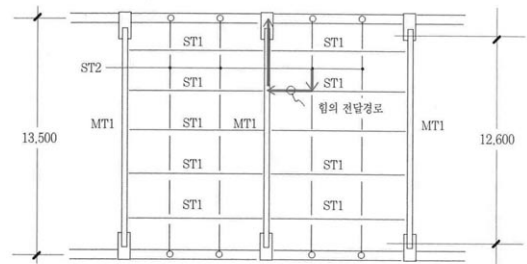
주트러스(main truss)의 변형형태, 부재접합점, 상현재(top chord),

하현재(bottom chord), 수직재, 사재(diagonal chord), 볼트(bolt), 가셋플레이트(gusset plate), 보조트러스(sub truss), R.C기둥과 트러스의 접합부분 등 원인이 될만한 모든 부위를 상세히 조사하였다. 이러한 현장조사의 결과를 항목별로 살펴보기로 한다.

3.1.1 보조트러스

지붕하중의 흐름은 〈그림3〉처럼 2차 보조트러스(ST2)에서 시작하여 1차 보조트러스(ST1)로, 1차 보조트러스(ST1)에서 주트러스(MT1)로 흐르게 되어있다.

따라서, MT1이 붕괴되면 ST1과 ST2는 지지점 상실로 인해 붕괴될 수 밖에 없다.



〈그림3〉 트러스에서의 힘의 흐름
ST2 → ST1 → MT1

ST1 붕괴시 ST2는 자동붕괴되지만 MT1은 변형되기는 하여도 파괴까지는 도달하지 않는다. 마찬가지로 ST2 붕괴시에도 ST1의 변형을 초래할 수는 있어도 MT1의 붕괴는 기대할 수 없다. 즉, 지붕붕괴는 보조트러스가 먼저 파괴된 것이 아니라 주트러스인 MT1이 붕괴됨에 따라 ST1, ST2가 연속적으로 붕괴된 것이다.

3.1.2 주트러스의 상현재, 하현재, 사재, 수직재

붕괴되면서 각 부재에 변형을 초래하였으나, 압축에 의한 부재의 좌굴 또는 인장에 의한 부재절단 등의 현상은 발견하지 못했다.

3.1.3 볼트(일부볼트)

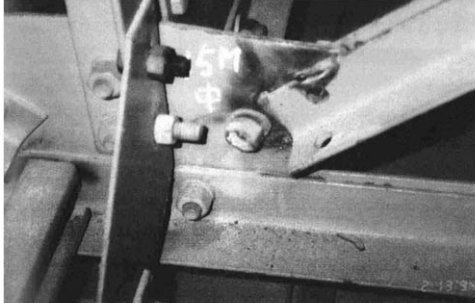
볼트구멍은 있었지만 볼트가 미체결되어 있거나 볼트구멍이 규정에 정한 것보다 훨씬 크게 용접기로 조잡하게 뚫려있었다. 볼트체결이 안된 것은 공사초기부터 체결이 안된 것이 아니라 공사후 사용중 열팽창 및 수축의 반복작용에 따라 나사가 풀린 것이다. 또한, 〈사진5〉처럼 붕괴가 안된 다른 지붕 곳곳에서 볼트가 풀린 곳을 용접으로 보강했거나 고력볼트로 다시 체결한 것을 볼 수 있다.

주트러스의 중앙부 하현재에서도 〈사진6〉에서 보는 것처럼 볼트구

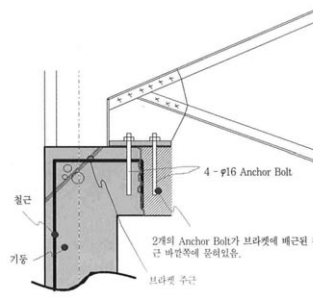
멍은 있으나 전혀 손상을 입지 않았으면서도 볼트가 없는 것을 볼수 있다.

〈사진5〉 볼트부위 용접보강

〈사진6〉 볼트구멍은 있으나 전혀 손상을 입지 않고 또 볼트역시 없다.



〈사진8〉 브라켓콘크리트 일부가 파손된 모습을 볼수 있다.

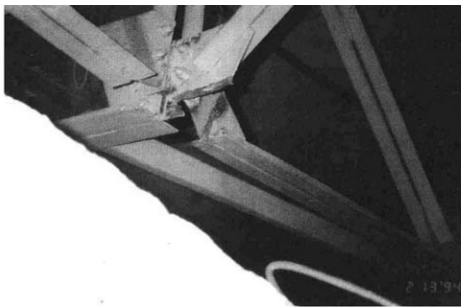


〈그림4〉 브라켓 파손현황

이는 〈그림4〉에서 보듯 접합부 콘크리트가 붕괴되어 트러스가 붕괴된 것이 아니라 트러스 붕괴에 따라 2차 파괴로 브라켓콘크리트의 일부가 파괴된 것이다. 따라서, 그림과 같이 브라켓 주근 안쪽에 정착된 정착볼트(anchor bolt) 부분은 콘크리트가 거의 파괴되지 않고 정착볼트가 파단되거나 베이스 플레이트(base plate)가 파단되는 형태가 되었을 것이다.

3.1.4 가셋트레이트

주트러스의 중앙부 하현재 연결부분에서 플레이트가 볼트구멍을 따라 파단된 모습을 〈사진7〉에서 볼 수 있다.



〈사진7〉 주트러스 중앙부 하현재 연결부분에서 플레이트가 볼트구멍을 따라 파단되었다.

3.1.5 브라켓(주트러스의지점(SUPPORT))

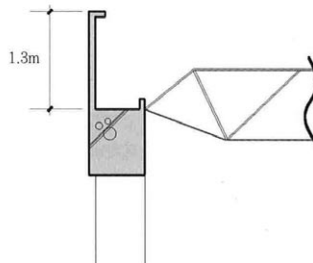
〈사진8〉에서 보이는 것처럼 브라켓콘크리트 일부가 파손되었다. 하지만 브라켓콘크리트가 파손되어 트러스가 붕괴된 것이 아니며, 트러스 붕괴에 따른 여파로 브라켓이 파손된 것으로 조사되었다. 즉, 브라켓콘크리트는 일종의 피해자인 것이다.

3.2 구조설계검토

구조도면은 있었으나 구조계산서는 분실되어 참고할 수 없었다. 공사진행중인 건물 및 완공된 건물일지라도 구조계산서와 도면을 보관하고 있어야 증축이나 설계변경에 참고할 수 있으며, 혹 발생할지 모르는 사고에 대해서도 좀더 정확한 조사가 가능할 것이다.

3.2.1 설계이중

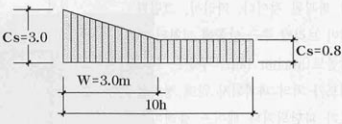
구조계산서가 없어 설계 당시 적설하중을 알 수 없으나 지붕난간이 〈그림5〉처럼 1.3m나 되어 바람의 방향에 따라 국부적으로 적설량이 법규에서 정한 적설깊이를 초과할 수 있다. 실제 현장조사결과 지붕난간 쪽으로 적설량이 많음을 알 수 있었다.



〈그림5〉 지붕난간 형상

지붕모양에 따른 적설량의 증가를 계산해 보면 다음과 같다.

- $250 \times (h/g) = 250 \times (1.3/30)$
 $= 10.8, 3.0 \therefore C_s = 3.0$
- $W = 2h$
 $h < 1.5\text{m}$ 일 때 $W = 3\text{m}$ 적용
 $h < 4.5\text{m}$ 일 때 $W = 9\text{m}$ 적용
 $h < 1.5\text{m}$ 이므로 $W = 3.0\text{m}$
 여기에서
 h : 지붕높이차(m) = 1.3m
 g : 지역별 적설하중(kg/m²) = 30kg/m²
 C_s : 지붕형상에 따른 적설하중 증가계수



〈계산1〉 지붕모양에 따른 캐노피의 적설하중 분포

결론적으로 지붕난간으로부터 3.0m 구간내에는 적설량이 최대로 설계치의 3배까지 증가될 수 있다. 법규에 규정된 이 지역의 적설하중은 적설깊이 30cm에 30kg/m²이며, 이날 이 지역의 적설량이 설계치에 근접한 것으로 확인되었다. 따라서, 난간근처에는 설계하중의 3배에 이르는 90kg/m²의 눈이 쌓였을 것이다. 또한, 수평지붕으로 인해 초저녁에 내린 눈이 녹으면서 생긴 물이 원활하게 배수되지 않아 일부위치에 고이게 되면서 뜻하지 않은 하중증가까지 초래했을 것이므로 지붕트러스에 상당한 무리가 가해진 것이다.

3.2.2 계산에 의한주트러스부재검토

■ 부재 재질(당시 여건을 고려한 가정치)

콘크리트 강도(F_c) = 180kg/cm²
 철골의 항복강도(F_y) = 2400kg/cm² (SS400 : 당시 SS41)
 접합볼트 : SS400

■ 설계하중

지붕재	30kg/m ²
중도리(purlin)	4kg/m ²
보조트러스(KT)	8kg/m ²
천장마감	20kg/m ²
주트러스	40kg/m ²
	67kg/m ²
설계적설하중 ($h = 30\text{cm}$)	30kg/m ²

※ 설계시에는 풍하중도 고려하였지만 이번 사고의 직접피해원인은 눈에 의한 것이므로 검토대상에서 제외했다.

■ 설계하중조건

설계시에는 일반적으로 장기고정하중

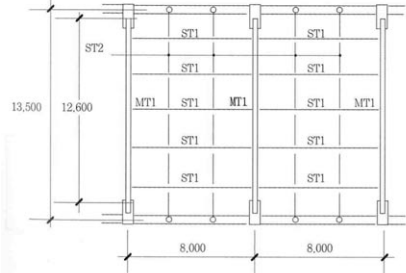
: 67kg/m²

단기하중(고정하중+적설하중)/1.5

: 64.7kg/m² (97/1.5)

의 2가지 값 중 큰 것으로 설계하는 것이 원칙이지만 붕괴가 적설하

중에 의한 것이므로(고정하중+적설하중)을 장기하중으로 치환한 64.7kg/m²을 적용하여 검토하였다.



〈그림6〉 주트러스(MT1) 구조평면도

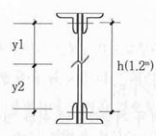
〈그림6〉을 참조하여 주트러스 부재에 작용하는 하중을 계산하면 계산1,2와 같다.

- 등분포하중(W) = $64.7 \times 8 = 517.6\text{kg/m}$ (-0.52t/m)
- 트러스 길이(span) = $13.5 - 0.45 \times 2 = 12.6\text{m}$
- 휨모멘트(M) = $0.52 \times 12.6^2 / 8 = 10.3\text{tm}$
- 지점반력(V) = $0.52 \times 12.6 / 2 = 3.3\text{ton}$

〈계산2〉 주트러스(MT1)에 작용하는 하중계산

상현재·하현재 및 수직재 등의 응력 및 처짐 등의 검토를 위한 주트러스의 단면성능은 〈계산3〉과 같다.

상현재 : 2-Ls90×90×7
 $A = 24.44\text{cm}^2$ $i_x = i_y = 2.76\text{cm}$



$y_2 = [24.4 / (24.4 + 15.1)] \times 120 = 74.1\text{cm}$
 $I = 15.1 \times 74.1^2 + 24.4 \times 45.9^2 = 134,317\text{cm}^4$
 $Z_c = 134,317 / 45.9 = 2,926\text{cm}^3$
 $Z_t = 134,317 / 74.1 = 1,813\text{cm}^3$

하현재 : 2-Ls65×65×6
 $A = 15.1\text{cm}^2$ $i_x = i_y = 1.98\text{cm}$

〈계산3〉 주트러스(MT1)의 단면성능계산

상기 계산 자료를 토대로 하여 각 부재의 응력을 검토하면 다음과 같다

■ 상현재(압축재)

좌골길이(ℓ_c) = 263cm
 $\lambda = 263 / 2.76 = 95.2 \rightarrow f_c = 0.937\text{ t/cm}^2$
 $\sigma_c = 10.4 \times 100 / 2,926 = 0.36\text{ t/cm}^2 < f_c \dots \text{O.K}$

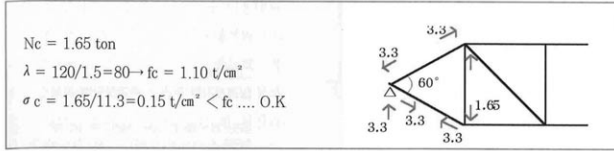
〈계산4〉 상현재(압축재) 부재응력 검토

■ 하현재(인장재)

$\sigma_c = 10.4 \times 100 / 1,813 = 0.57\text{ t/cm}^2 < f_t = 1.6\text{ t/cm}^2 \dots \text{O.K}$

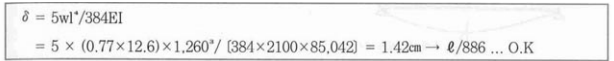
〈계산5〉 하현재(인장재) 부재응력 검토

■ 수직재(2Ls-50×50×6, A=11.3cm², ix=iy=1.5cm)



〈계산6〉 수직재 부재응력 검토

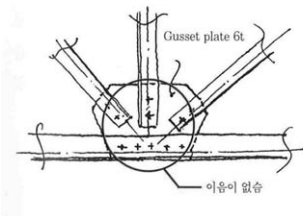
■ 처짐



〈계산7〉 주트러스 처짐검토

3.2.3 접합상세

전체 트러스가 일체로 되어 있으며 트러스의 이음에 대한 특별한 언급 내지는 상세도가 중앙 하단부를 제외하고는 없다. 이는 상현재 및 하현재가 이음없이 한 개의 부재로 되어 있음 말한다. 트러스의 중앙 하단부 상세는 〈그림7〉과 같이



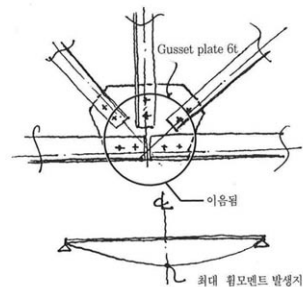
표현되었다.

〈그림7〉 도면상의 트러스 중앙 하단부 상세

도면상 트러스 중앙하단부는 그림과 같이 하현재가 이음없이의 부재로 표현되어 있었다. 하지만, 실제시공은 〈그림8〉과 두 개의 부재가 이음으로 시공되었다.

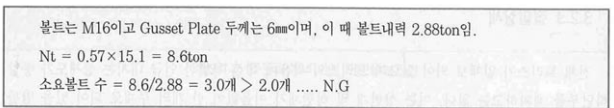
3.2 구조도면검토

트러스 중앙하단의 실제시공이 도면과는 다르게 〈그림8〉과 같이 하현재가 이음이 되도록 되어 있었다. 이 경우에 대해 필요한 볼트 수를 계산하고 실제와 확인해 본 결과 소요 개수보다 부족한 것을 알 수 있었다.(계산8)



〈그림8〉 실제시공된 트러스 중앙 하단부 상세

트러스 하현재를 중앙에서 이음한 것은 마치 RC 단순보의 철근을 중앙하단에서 이음한 것과 같이 힘이 가장 많이 걸리는 부분에서 이음이 되어 매우 취약하게 된다. 일반적으로 구조설계자는 중앙하부를 이음없이 하나의 부재로 가정하여 설계한다.



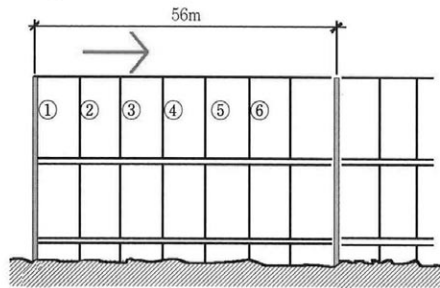
〈계산8〉 중앙하부 이음시 소요 볼트수 계산

중앙이음에서 하현재 및 상현재 이음시에는 3개의 M16볼트가 필요하지만 현재 상태는 2개로 체결되어 있다. 이음위치마다 소요볼트 수가 다르고 그에 대한 확인 및 검토는 당연히 구조기술자를 통해서 하여야 함에도 불구하고 현장에서 시공도면(shop drawing) 작성시 이를 무시한 결과이다.

4. 결론

종합적인 검토결과 건물의 가장 취약한 부위는 주트러스의 중앙부에서 이음한 하현재 접합볼트와 가셋플레이트임을 알 수 있었다. 평상시의 고정하중만으로도 허용내력을 훨씬 상회하여 항복내력(허용내력의 1.5배) 근처에 도달하여 있는 상태였는데, 적설하중, 특히 난간효과에 의한 초과적설하중이 가해짐에 따라 서서히 과도한 처짐과 함께 트러스 중앙하단부가 파괴된 것이다. 모서리 부분의 ①번 주트러스가 가장 먼저 파괴되고, 〈그림9〉와 같이 순차적으로 파괴된 것이다.

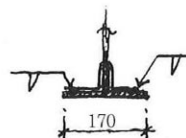
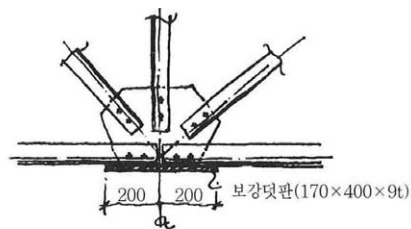
① → ② → ③ → ④ → ⑤ → ⑥



〈그림9〉 트러스의 파괴순서

5. 대책

붕괴부분은 H형강(H-450×200×9×14)으로 교체하여 재시공하였다. 기존의 다른 트러스에 대해서도 모두 조사하여 볼트가 빠진 부분은 고력볼트로 교체하였으며 특히 주트러스 중앙하부는 〈그림10〉과 같이 보강조치하였다.



〈그림10〉 주트러스 중앙하부 보강대책

〈자료제공 : 박정민 (한국구조대표)〉