

# 石油탱크의 安全管理(下)

## 3. 파손사고의 특징

과거의 파손사고를 조사해 보면 탱크는 지진시에 발생하는 경우가 많으나 통상 가동시나 수장(水張) 검사시에도 발생하고 있다.

해석에 의해 사고가 어떠한 과정을 거쳐 일어났는가를 명확히 하는 것은 가능하나, 그 원인을 어디까지 파고들어 나타내는 것이 적당할까 하는 것은 여러 가지 문제가 되는 경우가 있다. 여기에서는 직접파괴 현상에 결부된 사상(事象)에 착안하여 보기로 하고 파손의 원인을

1. 부재의 부식발생
2. 탱크기초의 국소침하
3. 이상외력의 작용
4. 가동부분의 충돌 등

으로 분류해 본다. 여기에서 “부재의 부식발생”은 지지해야 할 하중은 불변하나 판두께 단면적의 감소에 의해 부재에 발생하는 응력의 증가, 혹은 국소적인 감육부(減肉部)가 깎이게 되어 응력집중발생을 초래하고 파손의 촉진 요인이 되는 것이다.

“탱크기초의 국소침하”는 바닥판이나 환상판에 접하는 기초가 국소적으로 침하하여 그 침하 부근의 바닥판이나 환상판에 큰 응력을 발생시키는 것이다.

또한 “이상외력의 작용”이라는 것은 설계시에 고려된 크기를 초과한 지진동, 적설하중, 풍하중이나 탱크기상부(氣相部)의 불활성가스 등에 의한 것이다. 더우기 지진시에는 액면이 파도를 치고 그 결과 플로팅 루프가 측판 등에 충돌하는 것이다.

파손 부위는 저장유의 유출에 관계있는 바닥판(환상판)이나 측판 외에 지붕, 배관, 플로팅 루프에 부착된 각종 부속 설비이다.

파손 형식으로서의 균열 발생을 동반한 파괴, 측판 하부나 플로팅 루프의 좌굴·변형 등이 있다.

## 4. 석유탱크의 파손 사례

### 4.1 통상 가동시에 발생한 사례

기초가 국소적으로 침하하면 탱크 본체에 과대 하중이 작용한다. 다음에 나타낸 3가지 사례는 이같은 현상에 의해 발생한 것으로 간주된다.

**事例 1 :** 사용을 개시한 후 약 9개월 경과한 중유 탱크가 돌연 파괴되어 저장유 약 43,000kl가 유출되었다. 파단부는 그림 7에 표시한 바와 같이 측판과 환상판과의 용접 이음매의 환상측 지단부(止端部)에 면한 부분과 환상판을 횡단한 바닥판까지 달하는 부분이 비게되어, 전체적으로는 T자형을 하고 있다. 본 탱크에서는 본체 완성 후에 직립 계단을 건설하기 위해 탱크 직근의 기초가 굴삭되어 있다.(탱크 외주에 면하여 약 5m, 측판으로부터 탱크 중심 방향으로 0.4m) 이 직립 계단의 기초는 탱크 수장 수위가 12m

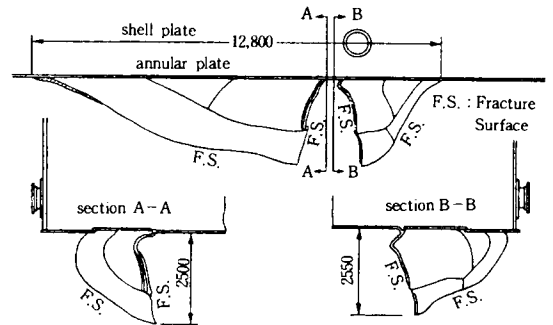


그림 7 파괴된 환상판 모양

일 때 타설(打設)되었다. 굴삭된 구멍은 계단의 기초가 완성된 후 다시 매장되었지만 작업의 곤란도 있어 충분히 단단하게 다지지 못했기 때문이라고 간주되고 있다. 이 부분의 기초는 탱크 하중에 의해 점차로 침하가 진행되고 국소적으로 과대 하중이 발생하여 파괴에 이르렀다고 생각된다.

**事例 2:** 완성 1년 후에 공업용수 저장용으로서 사용을 시작한 탱크가 액체로 가득찬 상태에서 2개월 경과 후에 파괴되었다. 균열 발생 개소는 측판과 환상판 사이 용접 이음매 환상판 측 용접 지단부에 면해있고 길이는 24m였다. 그림 8은 수장 검사 전부터 사고 후에 이르기까지의 탱크 부등 침하 기록을 나타낸 것이다. 균열의 발생 부위가 현저하게 침하하고 있는 영역과 일치하고 있기 때문에 부등 침하가 파괴 원인이라고 간주된다.

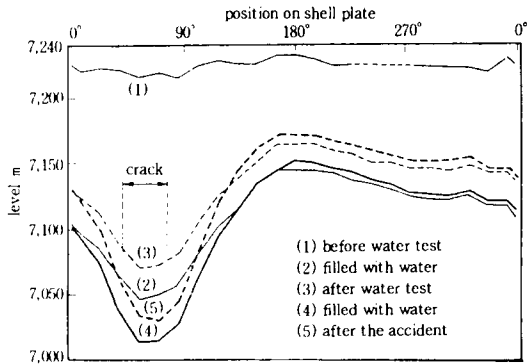


그림 8 환상판 돌출부위 끝위치에서의 원주방향 전개도  
(수장시험 전에는 부등침하는 인정되지 않는다)

#### 4.2 수장시험시에 발생한 사례

**事例 3:** 65,000kℓ 탱크의 수장시험을 행한지 얼마 안되어서 250mm의 부등 침하가 생겼기 때문에 기초 수정을 시작했다. 공사는 탱크를 만수한 채로 기초가 높은 부분의 모래를 그림 9와 같이 뽑아내서 자중을 이용하여 높이를 균일화 하려고 했다. 이 작업을 2일간 행하고나서 얼마 안되어 그 다음날 화재가 났다. 바닥판은 9개 블럭으로 갈라진 상태로 파단되었다.

이것은 만수 상태로 측판 하부를 뚫었기 때문에 그림 4에 가까운 상태로 되고 환상판에 높은 응력이 발생하여 균열을 유발한 것으로 간주된다. 갈라진 부분에서 물이 누설되면 기초가 연화되어 지지력이 저하된다. 그 결과 바닥판이 국소적으로 크게 침하하여 막응력이 발생하고 이 막응력이 재료의 허용 하중을 초과했기 때문에 급격한 파단에 이른 것으로 추정된다.

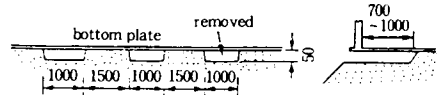


그림 9 부등침하 수정 작업 방법

#### 4.3 지진시에 발생한 사례

**事例 4:** 1978년 6월 12일에 발생한 지진(M 7.4)에 의해, 어떤 제유소 3기의 탱크가 대파하고 중유 약 68,100kℓ가 유출되었다. 사업소의 진도는 5였다. 파단은 모든 탱크가 환상판 구석 부분 용접 이음새의 지단부에 면해 있고 그 길이는 20~40m에 달했다. 그림 10에 파단부 부근의 단면 모양을 나타냈다.

일단 환상판에 균열이 발생하면 그 개구부로 부터 유출한 기름에 의해 균열 선단 전방의 기초가 씻겨나가고 씻겨나간 직상부의 환상판에 액압 하중이 작용하여 과대한 응력이 발생하고 균열 확대를 용이하게 한다. 이러한 공정을 계속 반복하여 원주 방향으로 점차 확대되어 갔다.

초기 균열은 저싸이클 피로에 의해 생긴 것으로 추정된다. 즉 지진시에 환상판은 다음과 같은 사실로부터 그림 6에 나타난 바와 같은 상하 반복 굴곡 변형을 일으킨 것으로 간주된다. 지진 후 측판이 침하되어 갔기 때문에 환상판 아래 방향의 변형이 있었다. 또한 위 방향의 변형에 대하여는 환상판의 단부와 동일 수준에 부설되어 있는 아스팔트가 지진후에 환상판의 밑으로 말려 들어가 있었다.

측판 직하 부근의 환상판은 모든 탱크에서 기초에 면하는 측이 그림 11과 같이 현저하게 부식되어 있다. 이와같이 판이 얇게되면 환상판의 발생응력은 그

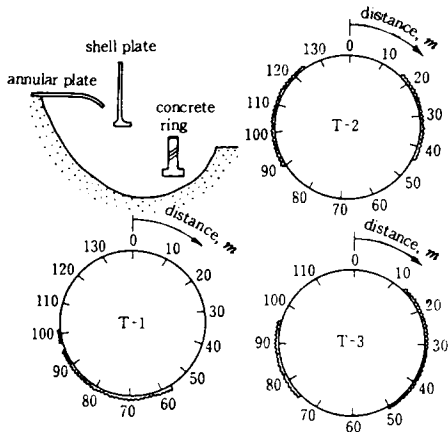


그림 10 구석안쪽 용접이음매에 의한 파괴

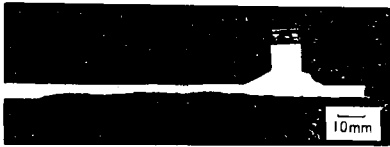


그림 11 측판직하부근의 환상판 부식감육 예

림 3에 표시한 바와 같이 증대되기 때문에 부식감육이 이 사고의 원인이었다고 간주되고 있다.

**事例 5 :** 1980년 9월 25일에 발생한 지진(M 6.1)에 의해 중유탱크 측판이 좌굴되고 깨진 구멍이 생겨 저

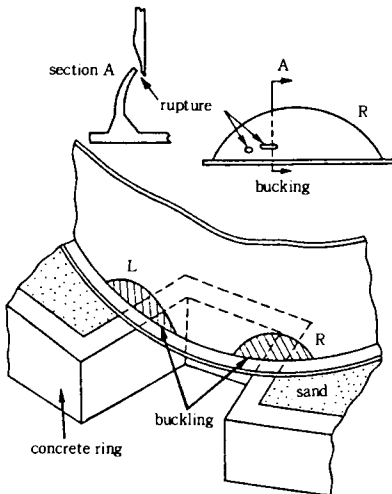


그림 12 좌굴탱크 피트부근의 상태

장유 약 11.5kl가 유출되었다. 진도는 4였다. 파손부의 모양은 그림 12와 같다.

좌굴되었던 측판 하부에 심한 부식이 발생되어 있던 것과 그림 9에 표시된 바와 같이 국소적으로 콘크리트링이 측판 밑으로 들어가는 구조로 되어 있는 것이 내진 강도를 저하시키고 있었다. 측판의 좌굴은 통상 그림 6과 같이 외측에 부풀어 있으나 이 경우는 비교적 내압이 낮고 또한 부식에 의해 외측으로부터 감육되어 파손부에서는 판의 중립면이 이 둘레의 측판부에 비하여 내측으로 편향되어 있기 때문에 내측으로 좌굴되었다.

**事例 6 :** 1983년 5월 28일 발생한 지진(M 7.7)에 의해 경유탱크 측판에 균열이 발생하여 저장유가 배어났다. 진도는 4였다. 균열 발생부는 배수피트 배관 직상의 측판과 바닥판 사이 이음새의 측판측 용접 끝 부분이었다.(그림 13참조)

용접 끝 부분에 면하여 그림 14에 표시한 바와 같이 도랑 모양으로 부식이 발생하여 있었던 것이 발생의 2차적 요인이라고 간주된다. 또한 배수피트 구조이기 때문에 그림 4와 같이 이 부분의 바닥판은 기초

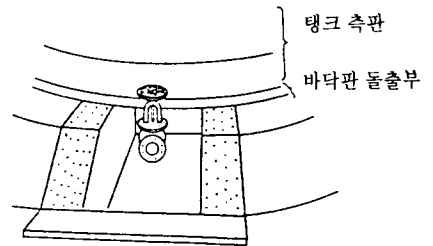


그림 13 균열발생탱크 피트부근의 상태

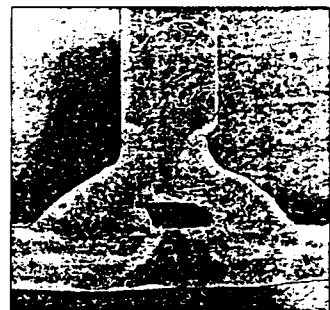


그림 14 측판하단부에 발생한 균열

에 의해 지지되고 있지 않기 때문에 이음부에 과대하중이 생긴 것도 균열발생의 요인중의 하나였다.

事例 7: 1994년 1월 15일에 발생한 지진(M 7.8)에 의해 아스팔트 탱크 측판이 그림 6에 도시되어 있는 것처럼 코끼리 발모양으로 좌굴하고 2개소에 균열이 생겨 160℃로 가온 저장된 아스팔트 971통이 유출되었다.

## 5. 대책

4에 기술된 사례를 정리해 보면 파손은 부재의 강도저하 혹은 이상하중의 작용 또는 이들 양쪽이 관련되어 발생하고 있다.

부재의 강도 저하 원인은 모두 경년열화(부식)에 의한 것(사례 4, 5, 6)이다. 이들의 사례는 지진시에 생긴 것이나 경년변화가 안되었으면 지진하중에 견딜 수 있었다고 판단된다. 또한 이상하중 발생 원인은 기초가 부적절한 구조에 의해 유발된 것(사례 1, 6), 부적절한 기초 보수 방법에 의해 유발된 것(사례 3), 경년열화(부등침하)에 의한 것(사례 2), 지진에 의한 큰 가속도에 의한 것(사례 7)로 분류할 수 있다.

이와같은 원인을 제거하기 위한 대책은 다음과 같이 요약된다.

- (가) 구조적으로 과대 하중을 유발하도록 하는 상태를 만들지 말 것.
  - (나) 경년열화 정도를 강도적으로 안전한 범위에 이르도록 필요에 따라 적절히 보수를 할 것.
- 상기 (가)에 관하여는 각종 설계매뉴얼, 기준, 관계법령등에 따르면 해결되는 것이고 여기서는 다루지 않는다.

### 5.1 부식방식 관리

문제는 (가)의 부식, 균열의 발생, 기초의 부등침하 등 경년열화의 대책이다. 탱크 내면 저부 강판의 부식에 대하여는 최근 강판을 코팅 시공하는 것에 의해 防食하는 방법이 사용되도록 하여, 코팅재료에 의해 상당히 실적을 높이고 있다. 다만 코팅도 열화되

는 것을 염두에 두고 防食이 유효한 상태임을 반드시 평가하여 관리해야 한다.

低部裏面은 빗물침입 방지용 씰시공, 아스팔트샌드에 의한 防食 등이 행해지고 있으나 이들의 효과를 과신하는 것은 위험하다. 전기防食은 원리적으로는 효과적이나 충분한 방식관리가 꼭 필요하다. 코팅의 열화나 강판 부식의 평가·관리는 법령에 따라 탱크를 개방하여 행할 필요가 있다.

### 5.2 균열 검사

손상사례에서는 다루지 않았지만 경년변화의 한 현상으로 균열의 발생이 일어날 수 있다. 균열은 고장력 강 및 스테인레스 탱크의 용접부에서 발생하고 있다. (다만 이와같은 균열의 존재가 주 요인이 되어 일어났다고 판단된 파손사고의 예는 지금까지 보고되지 않은듯 하다.) 균열은 용접시공시 외에 탱크에 작용하는 각종 하중에 의해서도 발생할 것으로 생각되기 때문에 이것도 정기적으로 검사가 필요하다.

### 5.3 부등침하의 검사

경년열화의 범주에 들어가는 것은 부적당할지 모르나 경년적으로 축적하여 탱크 파손 안전상 유해한 현상에 기초의 부등침하가 있다. (다만 시간경과와 함께 침하속도는 일반적으로 적다) 바닥판과 환상판의 불균일한 침하(이것을 여기서는 부등침하로 부른다)는 이들 부재에 과대한 응력을 발생시키는 것이다. 과대응력 발생에 관한 안전관리의 목표로써 이 부등침하량이 계측되고 있다.

침하량은 부재의 높이를 측정함으로써 구할 수 있다. 탱크의 기초는 단정적으로 변위하기 때문에 액체 저장시와 공탱크시와는 높이가 다르지만 부등침하의 평가에는 공탱크시의 측정으로 부터 구해도 실제상 문제는 없다.

측판 직하 근방의 환상판의 부등침하는 그 돌출부의 높이를 측정함으로써 가동시에서도 조사할 수 있다. 측판에서 내측으로 들어간 영역의 환상판이나 바닥판의 기초의 부등침하는 탱크의 개방시에 행하지 않을 수 없다. (이것에 대하여 법적인 의무사항이 아니다) 이것은 강판 표면의 높이, 강판과 기초 사이의

공극량을 측정하여 구할 수 있다. 이 공극량은 중성 자선을 사용하여 비파괴적으로 측정하는 기술이 확립되어 있다.

## 6. 결 론

석유탱크의 안전관리는 저장유의 화재 발생 방지와 누설, 유출 방지 확보에 최선을 다한다. 신설 석유탱크에 관해서는 알맞은 기준과 법령에 준하여 설계시공하는 한 강도 관점에서의 안전성 문제는 발견

되지 않는다. 문제는 경년 열화에 따른 강도 저하 현상이다. 즉 부재의 부식과 파괴강도의 저하, 그리고 본체의 부등침하에 의한 이상하중의 유발이다.

여기에서는 석유탱크가 놓여있는 부식환경, 하중환경의 개략을 기술하고 관련되는 파손 사례를 소개하였으며 파손 대책에 대하여 그 요점을 고찰했다.

석유탱크를 안전하게 운용하기 위해서는 여러가지 분야에 걸친 식견이 필수적이다. 안전성을 한층 높이기 위해 금후 연구를 필요로 하는 과제가 적지 않다. ㉞

### 석유탱크의 최소두께

구 분	측 판	바 닥 판	지 붕
소방법 기준	■ 3.2mm	■ 3.2mm	■ 3.2mm
API 기준 (API Standard 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 탱크직경 15 m 미만 : 4.76mm</li> <li>■ - 15~36 m 미만 : 6.35mm</li> <li>■ - 36~60 m 미만 : 7.94mm</li> <li>■ - 60 m 이상 : 9.53mm</li> </ul> (부식여유율 제외)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 6.35mm</li> </ul> (부식여유율 제외)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 4.76mm</li> </ul> (부식여유율 제외)
일본 기준 (위험물고시 제4조의 17)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 측판두께 계산식</li> </ul> $t = \frac{D(H-0.3)\rho}{2S}$ (dashed box) <ul style="list-style-type: none"> <li>t : 최소두께(mm)</li> <li>D : 탱크내경(m)</li> <li>H : 최고액면 설계높이(m)</li> <li>ρ : 위험물의 비중량(g/cm<sup>3</sup>)</li> <li>S : 재료의 최소 항복점 또는 0.2% 내력의 60%치(kg/mm<sup>2</sup>)</li> </ul> * 위 식에 의한 값(최하단 측판은 1.18을 곱한 값)+부식여유율	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1,000ℓ ~ 1,000kℓ미만 : 9mm</li> <li>■ 1,000kℓ이상 : 12mm</li> </ul> (부식여유율 포함)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 4.5mm</li> </ul>