

石油탱크의 安全管理(上)

1. 서 론

석유탱크의 손상을 유형별로 보면 부식에 의한 것과 파괴나 좌굴 등의 파손에 의한 것으로 분류된다. 많은 석유탱크는 비교적 부식환경이 심한 장소에 설치되어 있고 대부분이 저탄소강으로 만들어져 있기 때문에 방식관리가 불충분한 경우에는 현저한 부식을 발생하며, 경우에 따라서는 관통공(貫通孔)이 형성되고 누유에 이를 수 있다.

한편 부드러운 기초위의 각 구조물내에 극히 다량의 기름을 저장하고 있기 때문에 하중환경도 혹독하다. 일반적으로 구조물이나 기기의 파손은 역학적인 인자가 주요인이 되어 일어나지만, 부식환경하에서는 부식감육(腐食減肉)에 의해서 하중 지지력이나 부식 촉진 인자의 관여 원인으로 재료의 파괴강도 저하를 초래한다.

여기에서는 강도의 관점에서 석유탱크가 놓여 있는 하중 환경과 파손사례에 대하여 소개하고 그 방지 대책을 기술하고자 한다.

2. 석유탱크가 놓여 있는 환경

2.1 구 조

여기에서 대상이 되는 석유탱크는 지상에 설치된 종원통형으로서 지붕이 있고 강판을 용접하여 만들어져 있는 것으로 한다. 석유탱크 시설은 탱크본체, 탱크기초 및 이들을 둘러싸고 있는 방유제까지 해당된다.

기초는 장시간에 걸쳐 탱크본체를 지지하지 않으면 안되기 때문에 부동침하나 지하수에 대한 대책, 내진성 등에 대하여 배려가 되어 있다.

탱크본체는 지붕, 측판, 바닥판, 환상판 및 부속물로 구성되어 있다. 바닥부위에 설치된 판 가운데 외주부위에 링형태로 배치되어 측판과 결합된 것을 환상판이라고 한다. 환상판으로 둘러싸인 원반형의 바닥부위를 바닥판이라고 한다. 측판에는 저장액체의 압력에 의한 응력이 작용하고 그 응력은 바닥부위에 가까울수록 크다. 따라서 판의 두께는 바닥부위에 가까운 측판일수록 두껍게 되어 있다. 환상판은 측판의 최하단판과 동일재질로서 그 판두께는 바닥판 보다 두꺼운 것이 사용된다. 지붕, 측판, 바닥판의 재질은 SS400이나 SM400이 자주 사용된다. 다만 소형탱크를 제외하고 환상판과 측판 최하단에는 60kg/mm²급의 고장력강이 많이 사용되고 있다.

구조상세에 대하여는 "JIS B 8501", "API1650"에 나타나 있다. 또한 각종 설계하중이나 부재의 최소 판두께 등에 관하여는 법령에 따라 규제되고 있다.

2.2 작용하는 하중과 발생응력

석유탱크에 작용하는 하중은 정하중과 변동하중으로 대별된다. 정하중으로서는 저장액체에 의한 하중, 단열재에 의한 하중, 적설하중 등이 있다. 변동하중으로서는 지진에 의한 것과 바람에 의한 것이 있다.

2.2.1 정하중

정하중에서도 가장 큰 것은 저장유의 압력에 기인하는 하중이다. 탱크 본체의 중량은 저장된 액체의 중량에 비하면 극히 작지만 측판 하단부 근방 및 직하근방의 환상판, 그리고 주변기초에 집중하여 작용하기 때문에 무시할 수 없다.

60,000kℓ정도 규모의 탱크에서 저장유의 압력에

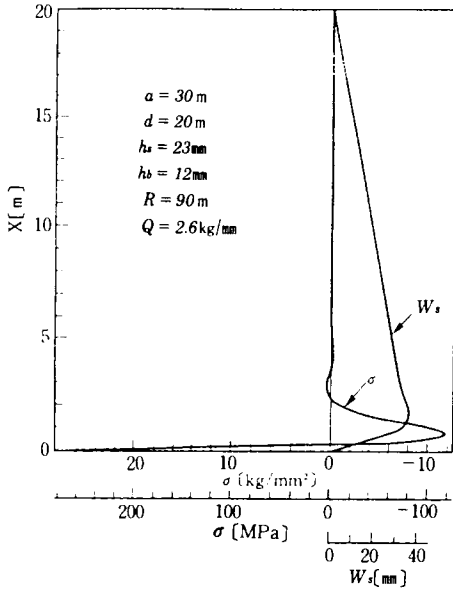


그림 1. 측판변형(팽창)과 굴곡응력의 예
(용량 60,000kl, 직경 60m, 액면높이 20m)

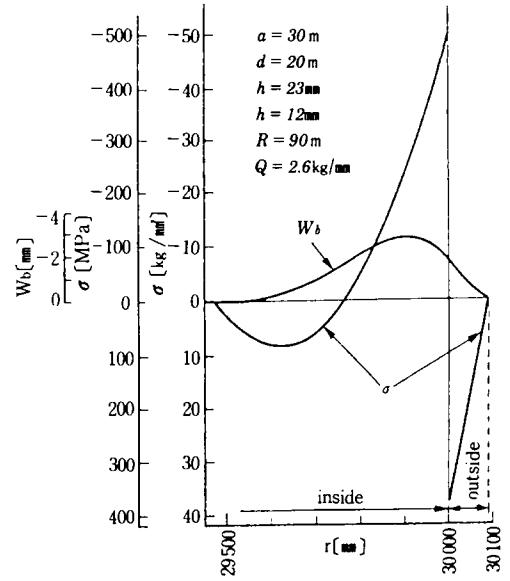


그림 2. 환상판의 변형(팽창)과 굴곡응력의 예
(용량 60,000kl, 직경 60m, 액면높이 20m)

부재에 작용하는 응력에 대하여 살펴보기로 한다. 여기에서는 탱크 크기로서 직경 $2a$ 가 60m, 높이 d 가 20m라고 상정한다. 또한 측판 최하단의 판두께 $h_a=23\text{mm}$, 환상판의 판두께 $h_b=12\text{mm}$, 환상판의 달아낸 부분 길이 $R=90\text{mm}$, 측판의 원주 방향 단위길이 당 중량 $Q=2.6\text{kg/mm}$ 로 한다.

그림 1과 그림 2는 각 측판 및 환상판에 발생하는 응력의 해석결과를 나타냈다. 그림 1에서 종축 X 는 바닥판으로부터의 높이를 표시하고 횡축의 σ 는 응력을, W_s 는 측판의 반경방향의 팽창량을 나타내고 있다. 측판에는 이 팽창에 대응하는 후프응력과 굴곡응력이 생기는데 최하단에 걸쳐 굴곡응력이 가장 큰 것을 알 수 있다.

그림 2에서 횡축 r 은 환상판의 위치를 탱크 중심으로부터의 거리로 나타낸 것이다. 종축의 σ_1 은 환상판에 생기는 응력이고 W_b 는 환상판의 상하방향의 변위량이다. 환상판에서는 측판과 이음매 부위에서 가장 높은 굴곡응력이 발생한다. 대부분의 탱크에서 이 응력은 측판에서 생기는 응력보다 크다. σ_1 , σ_2 를 각각 환상판, 측판에 생기는 최대응력으로 하고 환상판의 판두께를 변화시켰을 때의 σ_1 , σ_2 의 크기를 나타낸 것

이 그림 3이다.

환상판을 얇게 하면 σ_1 은 급격히 증대하는 것을 알 수 있다. 어떤 이유에 의해 측판최하근방의 기초가 국소적으로 그림 4에 나타나 있는 바와 같이 환상판을 지지할 수 없는 상태이면 σ_1 은 정상적인 상태에 비해 현저하게 큰 값을 나타낸다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 발생응력의 증가량은 지지할 수 없는 기초 길이 L_R 이 길수록 크게 된다.(다만 그림 5에서는 $\sigma_{lm}=\sigma_1$ 으로 한다)

측판 직하 근방을 제외하고 바닥판에는 응력발생은 없다고 생각해도 좋다. 다만 기초가 국소적으로 침하하고 있는 경우에는 기 기초상의 바닥판에 막응력(膜應力)이 생기고 또한 국소적인 요철이 존재하면 굴곡응력이 발생한다. 이들은 파괴원인이 된다.

저장유의 가온(加溫)에 의해 부재에 발생하는 열응력도 정하중(靜荷重)으로 작용한다. 가온탱크에는 측판에 단열재가 설치되어 있다. 단열재에 의한 하중의 크기는 그 재료의 물성으로부터 구할 수 있고 이것에는 단열재를 지지하는 금구나 보호하는 피복재의 중량도 포함한다.

지붕에 쌓여 있는 적설하중은 건설지점에 걸쳐 판

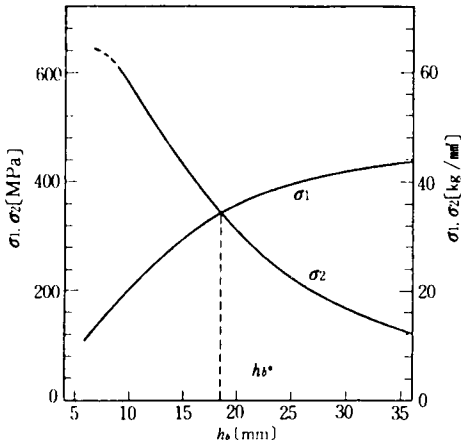


그림 3. 최대굴곡응력과 환상판의 관계
(σ_1, σ_2 : 환상판, h_b : 측판)

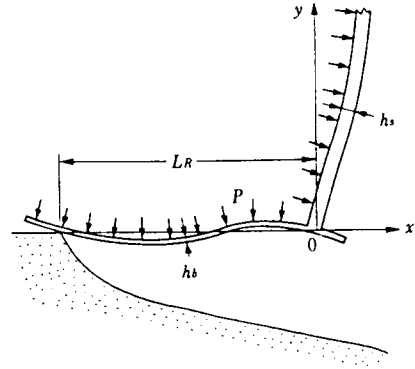


그림 4. 환상판 직하의 기초 붕괴모델

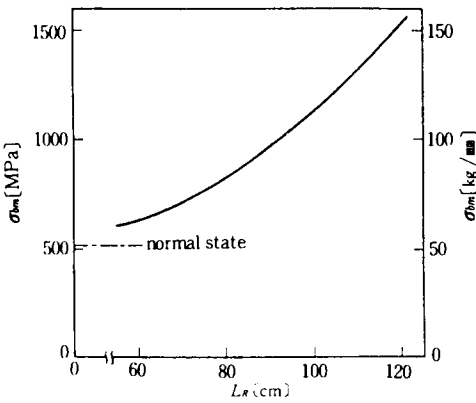


그림 5. 기초의 붕괴깊이와 환상판의 최대
굴곡응력관계

(L_R : 붕괴깊이, 그림 4참조, σ_1, σ_2 : 최대굴곡응력)

측자료에 기반하여 정해지는 적설높이, 눈의 비중량 및 지붕의 형상에 따라 결정된다.

2.2.2 변동하중(變動荷重)

변동하중으로서 강도상 가장 영향이 있는 것이 지진하중이다. 이 하중에는 지진동(地震動) 자체의 가속도에 의한 탱크본체의 관성력, 저장액체의 동액체 압력 및 지진에 의해 발생하는 저장액체의 슬로싱에 의한 동액체 압력이다. 이러한 힘은 수평방향의 성분

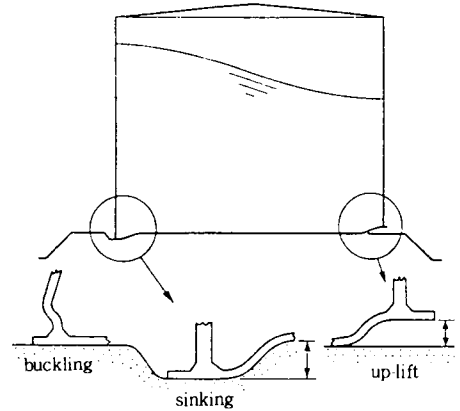


그림 6. 전도 모멘트에 의한 측판의 변형, 좌굴

및 수직방향의 성분으로서 본체에 작용한다.

수평력은 탱크를 기초에 대하여 미끄러짐을 발생시키고 탱크를 전도시키도록 작용하는 하중성분이다. 전도시키도록 작용하는 힘은 수평력이 작용하는 방향의 측판하방에서는 환상판을 기초에 밀어붙이도록 작용하고, 대항하는 측판에서는 환상판을 들어올리도록 작용한다. 이와 같은 힘이 과대하게 작용한 결과 손상의 형태로서는 그림6과 같이 측판의 팽창 좌굴이나 측판 직근의 환상판의 반복굽힘에 의한 파

피(저싸이클 피로파괴)가 있다.

탱크를 설계할 때에 탱크가 건너지 않으면 안되는 진도를 설계진도(設計震度)라고 한다. 일본소방법에 의한 설계진도는 탱크설치장소의 지진발생특성(지역과 지반의 특성에 따라 등급이 나뉜다)과 탱크의 직경, 최고액면 높이나 측판의 판두께 등의 제한(정확하게는 저장액체의 진동 고유주기를 고려한 응답배율)에 의해 결정된다.

풍하중은 측판에 탱크를 수평방향으로 미끄러지도록 작용한다. 플로팅루프 구조의 탱크에서는 측판의 풍하중에 의해 좌굴하는 것을 막기 위해 윈도우 개터를 설치하고 측판의 강성(剛性)을 높인다. 소방법에서는 설계최대풍속을 지반면에서 부터 25m의 위치(대형탱크의 상단부근)에서 약 70m/s로 한다. 플로팅 루프구조의 경우 측판상단을 넘은 바람이 지붕에서 회오리치고 이것을 동요시켜 지붕본체나 부속물을 파괴시키는 일이 있다.

2.3 부식환경(腐食環境)

지붕이나 측판에도 부식이 발생하여 방식관리가 필요하나, 강도와와의 관계에서 보면 바닥판과 환상판의 방식은 특히 중요하다. 여기에서는 바닥판과 환상판의 부식환경에 대하여 기술한다. 이 부위의 부식환경은 내면(저장액체 측)과 외면(기초에 접한 측)에서 다르다.

2.3.1 바닥판 및 환상판의 탱크내면측

탱크의 바닥에는 저장유 외에 수분(드레인)이 체류하고 있도록 원유에서는 슬러지가 퇴적되어 있다. 기름을 받아들일때 기름에 수분이 혼입되어 들어오는 일이 있다. 또한 콘 루프나 드럼 루프 등 고정식 지붕의 경우에는 대기중의 수증기가 통기관을 통하여 탱크액면 상부공간으로 유입되어 결로되는 것으로 여겨진다. 플로팅 루프의 경우에는 측판내면을 하강하는 빗물을 지붕에 설치된 설에 의해 막는 구조로 되어 있으나 다소의 침입은 피할 수 없다.

바닥판이나 환상판의 부식거동은 드레인수중의 용존산소, 수소이온 농도(pH), 염소이온 농도, 황산이온 농도, 탄소이온 농도나 강판상에 퇴적되어 있는

슬러지의 상태, 저장유의 교반 상태 등에 의존한다. 이와같은 부식환경으로 부터 강판을 차단하기 위해서 그 표면을 유리조각, FRP, 에폭시 등으로 코팅시공한 탱크가 증가하고 있다.

2.3.2 바닥판 및 환상판의 탱크기초면 측

빗물, 지하수, 대기중의 수증기 등이 공급원이 되어 강판의 기초측의 면에 수분이 도달하여 부식환경이 형성된다. 또한 미주전류(迷走電流)에 의한 부식환경이 형성되는 경우도 있다. 바닥판의 밑은 흙으로 설치되어 있으나, 그 흙에 포함된 염분이나 나무조각 등의 이물질은 부식촉진인자가 된다. 쌓아올린 흙의 표면에는 아스팔트 샌드 등 방식처치(防食處置)가 되도록 되어 있다.

2.4 부식환경에 놓여진 부재의 강도

부식환경에 놓여진 부재의 파괴거동은 ① 부식환경인자와 하중인자가 동시에 관여하여 그 부재에 균열을 발생, 진전시키는 경우와 ② 비교적 장시간 부식환경인자가 작용한 가운데 주로 하중인자에 의해 균열의 발생, 진전이 일어난 경우로 구별된다.

전자는 소위 환경파괴이다. 부재를 둘러싼 환경과 상태에 따라서 응력부식균열, 부식피로, 수소손상 등으로 불린다. 환경파괴는 부식인자와 재료조합에 의해 특징적인 거동을 나타내고 공업적으로 여러 분야에서 중요한 문제가 되고 있기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다.

후자는 부식재의 파괴이다. 부식재의 파괴거동에 관한 특징의 하나로서 고싸이클 피로, 저싸이클피로를 불문하고 피로강도저하 즉 파괴까지의 수명이 짧게되는 현상이 일어난다. 이것은 무부식 상태에 비하여 균열발생까지의 싸이클수가 짧기때문에 있는 것으로 알려져 있다. 균열발생시기는 심한 부식공(孔)을 갖는 부재일수록 빠르다. 또한 고싸이클 피로에서는 내구성의 저하도 인정된다.

부식재의 정적강도 감소는 초기 판두께에 대한 단면적의 감소량 비율정도이고 비교적 작은 부식공이 산재하는 정도라면 정적강도 저하는 문제가 되지 않는다.(다음호에 계속) ㉞