[Research Paper]

누출사고 방지를 위한 위험물 탱크의 기초 안정성 분석

임종진 · 구재현^{*†}

한국소방산업기술원 과장, *목원대학교 소방안전관리학과 교수

Stability Analysis of the Foundation of Hazardous Material Storage Tank for Preventing Leakage Accidents

Jong-Jin Lim · Jae-Hyun Ku^{*†}

General Manager, Korea Fire Institute,

*Professor, Department of Fire Safety Management, Mokwon Univ.

(Received July 28, 2020; Revised August 9, 2020; Accepted August 10, 2020)

요 약

산업단지내 위험물 저장탱크 기초의 결함으로 인한 위험물질의 유출사고는 인근 지역의 대형 인명사고 및 대형화재를 일으킬 수 있으므로 기초의 설계 및 시공단계에서 세심한 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서는 기존 위험물탱크 단지가 건설된 대표지반을 선정하여 3차원 모델링에 의한 유한요소 수치해석을 수행하였으며, 위험물 저장탱크 기초의 안정성 평가를 위하여, 대표적인 탱크 기초 유형을 4종류로 분류하고 각 유형에 대한 해석을 수행하였다. 결과적으로, 탱크기초의 응력 및 침하량 크기와 분포 특성은 링월기초의 경우 옆판 직하부분이 탱크 중심부에 비해 40배 이상의 응력이 집중되는 경향을 보였으며, 침하영향범위는 수평방향으로 탱크 반경만큼, 수직방향으로 탱크 직경만큼으로 나타났다. 본 분석결과를 활용하여 각 기초 유형별로 위험물 저장탱크의 설계 및 품질관리 가이드라인을 제시하였다.

ABSTRACT

The leakage of hazardous materials due to the defect in storage tank foundations is likely to cause tremendous fire disasters in the industry cluster area. Thus, adequate design and construction of the tank foundation is required for preventing tank leakage. In this study, four types of typical tank foundations were classified and modeled for 3D FEM analysis to perform stability evaluation on tank foundations. Furthermore, numerical analysis indicated that stress concentration just below the tank shells is 40 times that at the tank center. The settlement influence zone is about the tank radius and tank diameter in the horizontal and vertical directions, respectively. Thus, the appropriate guidelines for the design and construction of tank foundations were suggested via a comparison assessment of the numerical analysis results on the stress distribution and displacement of the tank foundations.

Keywords : Hazardous material, Storage tank foundation, FEM analysis, Leakage

1. 서 론

위험물 관련 대형사고는 저장탱크의 누출사고와 관련이 많으며, 저장탱크가 대단위 단지 내에 위치할 경우 개별 탱크의 누출사고는 대형 화재 폭발 및 인명사고를 발생시키는 데 따라 국가 재난상황으로 이어질 수 있다⁽¹⁾. 위험물 탱크 누출사고의 원인은 크게 탱크 본체 및 연결부의 결함, 그리고 탱크 기초의 결함으로 구분⁽²⁾할 수 있다.

Figure 1은 기초 결함에 의한 탱크 구조물 파손 사례이며, 이러한 탱크 기초의 결함은 지반 침하나 기초 구조물의 파괴를 발생시킬 수 있는 요인이 됨에 따라, 이를 예방하기 위해서는 위험물탱크 저장소의 설치 예정 지반에 대한 철저한 검증과 적합한 기초 설계 및 시공이 수반⁽³⁾되어야 한다. 위험물탱크의 기초는 상부 구조물의 특성상 셸의 형태로 거의 모든 하중을 분담하는 구조⁽⁴⁾로 되어 있다. 다만, 현재 정확한 계산 근거에 의해 설계되기보다는 경험에 근

[†] Corresponding Author, TEL: +82-42-829-7707, FAX: +82-42-829-7705, E-Mail: kujhhh@empas.com

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Figure 1. The failure of tank foundation.

거하여 시공되는 경우가 많으며, 현장 특성상 시험을 수행하기도 매우 어려우므로, 체계적인 위험물탱크의 기초 설계를 위한 현장시험 데이터베이스가 매우 미흡한 실정⁽⁵⁾이다.

본 연구에서는 직경 20 m, 높이 10 m의 원형 중형탱크의 기초에 대한 안정성 분석을 통해 설계 및 시공시의 가이드 라인을 제시하고자 하였다. 이를 위해 현재 시공되고 있는 위험물탱크 기초의 대표적인 형태를 조사하고 각 유형에 따른 대표 단면을 설정한 후 3차원 모델링에 의한 유한요소 수치해석을 수행하였다. 그리고 각 기초 유형에 따른 수치해석 결과를 분석하여 응력 크기 및 침하량 분포를 비교 검토하였으며, 그 결과를 통해 각 기초유형에 해당하는 설계 및 시공시의 유의 사항을 제시하였다.

2. 모델링 및 수치해석

2.1 해석 대상 및 수치해석 방법

위험물 저장탱크의 기초의 형태로는 쉐어링 기초, 링월 기초, 슬래브 기초, 매트기초 및 말뚝 기초 등이 있다.

Figure 2는 국내에서 일반적으로 사용되는 위험물탱크 기초를 4가지로 유형화 한 것으로, 현재 기초의 유형으로 사용하지 않는 쉐어링 기초를 제외하고 링월 기초(Ring wall), 링월 슬래브 기초(Ring slab), 매트 슬래브 기초(Mat-slab), 말뚝 기초(Pile)를 해석 대상으로 선정하였다. 이러한 4종류의 위험물탱크 기초유형에 대하여 유한요소법(Finite element method, FEM) 기반의 Pentagon 3D 프로그램을 사용하여 수치해석을 실시하였다.

2.2 해석조건 및 가정

위험물 저장탱크는 직경 20 m, 높이 10 m의 원형 중형탱크를 해석 대상으로 선정하였으며, 대상 탱크의 자중은 지주, 사다리 등의 부대설비를 포함하여 총 100 t으로 하였다. 위험물 저장용량은 3,000 m³ (충수 시를 가정하여 비중은 1로 함)로 하였으며, 탱크 옆판은 6~12 mm의 10단, 바닥판은 10 mm, 앵글러판은 12 mm, 지붕판은 6 mm의 강재로 제작하는 것으로 설정하였다. Figure 3은 시공 후의 지반상

Figure 2. Four types of tank foundation.

Figure 3. Modeling tank and ground.

태 탱크 및 기초 구조물을 모델링한 그림으로 각 단면의 형상 및 하중조건 등이 대칭인 점을 감안하여 반단면을 3차원으로 모델링하였다.

운용 중인 탱크에 작용하는 예상 최대 풍하중은 위험물안전관리법 세부기준과 American Society of Civil Engineering (ASCE)에서 제안한 식⁽⁶⁾을 사용하였으며, 이때의 설계풍속은 50 m/s (2003년 태풍 매미를 기준)로 하였다. 또한 탱크 바닥판의 앵글러(Annular) 부분은 탱크 기초에 앵커로 고정하여 기초와 동일하게 거동하는 것으로 가정하였다.

지반 및 탱크의 거동 해석에 적합한 수치해석 모델을 구현할 수 있도록 지반 및 콘크리트에 특화된 구성모델 중 소성영역을 반영한 모어쿨롬 모델(Tension cut-off Mohr-Coulomb model)을 적용⁽⁷⁾하고, 탱크 및 파일 재질은 강재 재질로 가정하여 탄성 모델을 적용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 지반의 물성은 국내 위험물탱크 단지가 건설된 매립지에 대한 현장시험과 실내시험을 통해 얻어진 986건의 데이터를 분석하고, 대표단면으로 매립층(깊이 0~4 m, N치 5), 퇴적층(깊이 4~16 m, N치 12), 풍화토층(깊이 16~26 m, N치 33), 풍화암층(깊이 26~30 m, N치 50)의 순으로 수평지층 지반을 구성하였다. 매질의 항복 이후 거동은 완전소성(Perfectly Plastic Model)으로 가정하였다. 또한 해석대상 기초의 링월은 폭 2 m × 높이 2 m로 설정하고, 쉘의 위치는 링월의 중앙으로 설정 하였다. 해석 공간의 범위

Table 1. Information of Tank and Input Condition of Numerical Analysis

Tank (D × H)	Material	Steel depth (mm)	Empty load (ton)	Wind speed (m/s)
Cylinder type (20 m × 10 m)	A283-C	Shell : 6~12 Bottom : 10 Annular : 12 Roof : 6	100	50

Table 2. Max Settlement and Stress of Each Foundation Types

Type of foundation	Max. settlement (mm)	Max. stress (MPa)
Ring wall	10	0.40
Ring-slab	8	0.19
Mat-slab	9	0.18
Pile	3	0.20

는 경계조건의 영향을 최소화하기 위하여 지반면상으로는 탱크직경(20 m)의 3배인 60 m로 하였으며, 깊이 방향 해석 경계면의 길이는 사실상 지반의 경계면이라고 할 수 있는 암반층이 30 m 이하에서 나타나므로 30 m로 설정하였다.

본 연구에서는 상기의 해석조건 및 해석방법을 통하여 위험물탱크 기초별 최대 연직 침하량과 최대응력의 크기 및 각 기초 및 기초하부 지반의 연직침하량 분포와 응력크기의 분포를 분석하였다.

3. 해석결과 및 분석

Table 2는 위험물탱크의 각 기초별 최대 연직 침하량과 최대응력의 크기를 해석한 결과이다. 말뚝기초의 침하량과 비교하여 링월 기초는 3.3배, 링월 슬래브 기초는 2.7배, 매트 슬래브 기초는 3배 이상 큰 것으로 분석하였다. 이는 세 유형 탱크의 경우 기초 침하량이 상대적으로 크므로, 탱크 외관의 위치 이동으로 인해 배관 연결부위 등에서의 파손으로 인한 누출 위험이 가장 크다는 것을 의미한다.

반면 기초 침하에 따라 발생한 최대응력의 크기는 링월 기초가 가장 큰 것으로 나타났으며, 나머지 세 기초의 유형에서는 링월 기초 대비 약 1/2 크기의 최대응력 값을 나타냈다. 이에 따라 링월 기초의 경우가 기초침하량 및 최대응력 측면 모두 가장 불리한 것으로 평가되었다.

Figure 4는 각 기초 및 기초하부 지반의 연직침하량 분포의 해석결과를 나타낸 것으로, 미량의 차이는 있으나 모든 기초 유형에서 지반침하의 수평방향 영향범위는 기초의 외곽선에서 탱크 반경만큼 벗어난 지역까지 나타났으며, 지중방향으로는 탱크 직경만큼 침하영향의 범위가 나타났다.

본 해석은 수평지층일 때를 가정하였으며 실제로는 수평지층이 아닌 경우가 대부분이므로 탱크의 직경을 따라 지반의 강성의 차이가 있으므로 부등 침하 발생의 가능성이 있을 것으로 분석된다. 따라서 수평지층이 아닌 지반에

링월기초나 링월슬래브, 매트슬래브 기초를 할 경우, 최소한 지중방향으로 탱크직경 깊이까지 지반을 치환 다짐하면서 평판 재하시험 등을 통해 지반의 견고성을 반드시 확인하여야 할 것으로 분석된다.

말뚝기초의 경우에는 Figure 4의 (d)에서 보는 바와 같이 침하의 양상이 파일부분까지 하나의 구조물처럼 거동하는 양상을 보였다. 말뚝기초와 다른 기초와의 옆판 직하부의 침하량을 비교해보면 말뚝기초의 경우에는 3 mm로 나타났으며 다른 기초의 경우에는 8~10 mm로 나타났다. 따라서 말뚝기초의 경우에는 다른 기초 유형에 비해 침하량이 약 1/3 정도 경감되는 효과를 나타냈다. 침하는 말뚝기초의 끝부분이 안착되는 지중부분에서 침하가 수평으로 일어나고 있으며 탱크의 가장자리 즉 옆판의 아래쪽에 위치한 파일의 연직침하가 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 말뚝기초의 경우에는 옆판 하부 혹은 기초의 외곽에 위치한 파일 기초의 침하관리에 주의하여 시공하여야 한다.

Figure 5(a)에 나타난 바와 같이 링월 기초를 설치한 경우의 최대압축응력은 탱크 옆판의 직하부 응력(0.37~0.40 MPa)이 탱크 중심부 응력(0.01~0.05 MPa)에 비해 40배 이상 집중되어 있다. 따라서 링월 기초가 하중을 지지하는 주된 역할을 하므로, 이에 대한 설계 시 전단응력, 압축응력, 편칭에 대한 안전성을 반드시 검토하여야 한다. 또한 링월 기초 하부 지반의 응력은 콘크리트링월 쪽에 집중되어 있는 것으로 나타나므로, 설계시 총하중에 가중치를 설정하여 콘크리트링월이 지지하는 것으로 설계하여야 할 것이다. 이와 함께, 콘크리트링월에 작용하는 하중을 결정하는 가중치는 탱크의 직경 및 지반의 강성에 따라 변동성이 있으므로 보다 세부적인 연구결과를 토대로 가중치를 정하여야 할 것이다.

Figure 5(b)에 나타난 링월슬래브의 응력분포 해석결과에서, 링월 부분이 슬래브 부분에 비해 침하가 더 일어나게 되어 슬래브 부분 응력은 중심부에서 더 크게 나타나는 양상을 보여준다. 최대압축응력은 옆판의 직하부인 링월 부분의 응력(0.19~0.10 MPa)이 슬래브 부분(0.05~0.10 MPa)에 비해 약 2배 정도 집중되어 나타났다. 이러한 해석결과는 슬래브 부분에서 응력을 분산시켰기 때문으로 추정되나, 링월 부분과 슬래브 부분의 접합부가 일체화된 구조라는 가정 하에 해석한 것이므로 시공 시에도 반드시 콘크리트 링월부와 슬래브 부분의 접합부에 배근이 연결구조로 되게 하여야 링월슬래브의 기능을 다 할 수 있을 것이다.

또한 링월슬래브기초 직하부 지반은 링월기초와는 달리

(a) Ring wall

(b) Ring-Slab

(c) Mat-Slab

(d) Pile

Figure 4. Settlement of tank foundation and ground.

응력이 슬래브와 링월부에 분산되어 나타났으므로, 링월슬래브기초의 경우에는 슬래브와 링월 부분이 탱크하중을 균등하게 지지하도록 설계가 가능하다. 다만, 기초 내부의 성토재료가 강성을 나타낼 수 있도록 잘 다짐하여 탱크 하중이 기초의 전 면적에 걸쳐 균일하게 전달될 수 있어야 한다. 따라서 링월슬래브의 경우는 링월슬래브 안의 다짐에 관한 품질관리에 주의를 기울여야 할 것이다.

(a) Ring wall

(b) Ring-Slab

(c) Mat-Slab

(d) Pile

Figure 5. Stress of tank foundation and ground.

매트슬래브 기초의 경우 Figure 5(c)에서 보는 바와 같이 링월슬래브 기초와 침하량 및 응력분포의 양상이 유사하게 나타났다. 따라서 대등한 효과에 시공비가 더 적게 드는 링월슬래브가 더 바람직한 공법으로 판단된다. 단, 탱크 바닥 판에 인위적인 기능 및 형상을 부여하고자 하는 경우에는 매트슬래브 기초가 불가피하게 적용될 수도 있을 것이다.

Figure 5(d)에서 말뚝기초의 경우 철근콘크리트 구조물의

응력분포에 대하여, 옆판의 직하부분인 링월 부분에 다소 응력이 집중되는 양상을 보이거나 링월슬래브 기초와 거의 동일한 응력분포 형태를 보이고 있다. 그러나, 철근콘크리트 구조물 하부지반에서는 링월 부분 직하부와 슬래브 부분 직하부에서 모두 거의 동일한 응력을 나타내어 응력분포가 수평한 분포를 보이고 있다. 이는 파일이 링월슬래브 기초를 지지하는 형태의 기초유형이어서, 하중을 대부분 파일이 지지하기 때문으로 파악된다. 따라서 말뚝기초의 경우에는 링월슬래브의 철근콘크리트 구조물이 완벽하게 시공되었다고 가정하였을 때, 파일의 완벽한 시공만 확보되면 가장 안전한 기초유형으로 나타났다.

본 연구에서는 풍하중(설계풍속 50 m/s)에 의한 영향도 함께 검토하였으나 본 연구의 대상(직경 20 m, 높이 10 m의 원형중형 탱크, 탱크 자중 100 t, 저장용량 3,000 m³)의 위험물탱크에서는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

석유화학산업단지 밀집지역에서 대규모 화재를 유발할 수 있는 위험물저장탱크 누출사고를 예방하기 위하여, 우선적으로 탱크의 기초가 침하 및 발생응력에 대하여 충분한 안정성을 확보하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 대표적인 기초 유형을 콘크리트링월, 링월슬래브, 매트슬래브, 말뚝기초의 4종류로 분류하고, 지반의 구성은 기존에 위험물탱크가 건설된 대표지반으로 구성하여, 각 기초유형별로 3D FEM 모델링을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 링월기초의 경우, 탱크 옆판의 직하부 응력(0.37~0.40 MPa)이 탱크 중심부 응력(0.01~0.05 MPa)에 비해 40배 이상 집중되므로 설계 시에는 안전율을 고려하여 탱크의 하중을 링월 부분의 지반에 작용하는 하중에 가중치를 두어 설계하여야 한다.

2) 링월슬래브기초의 경우, 옆판의 직하 부분 응력(0.19~0.10 MPa)이 슬래브 부분(0.05~0.10 MPa)에 비해 약 2배 정도 집중되어 나타나므로, 응력분담을 위해 링월과 슬래브가 일체화 구조로 될 수 있도록 설계 및 시공이 필요하다.

3) 말뚝기초의 경우, 응력값도 가장 작고 및 침하값도 가장 적게 분석되어 4종류의 기초 유형 중 가장 안전한 탱크 기초로 나타났으며, 이는 탱크와 말뚝기초 부분까지 하나

의 구조물처럼 거동하기 때문인 것으로 판단된다. 단, 기초의 최외곽 혹은 밀판의 하부에 설치된 파일에서 가장 큰 침하 및 응력분포가 나타나므로 시공 시에 기초의 최외곽 혹은 밀판의 하부에 설치된 파일의 품질관리에 세심한 주의가 필요하다.

4) 말뚝기초를 제외한 나머지 3종류의 기초 유형에서는 지중방향의 침하영향 범위가 탱크의 직경거리만큼 나타났으며, 실제 국내 지반의 경우 대부분 수평지층이 아니므로 적어도 지중방향으로 탱크직경만큼 지반의 견고성을 확인하여야 한다.

5) 본 연구의 대상인 4종류 유형의 기초 모두 연직침하의 영향범위가 수평방향으로 탱크기초 외곽에서 탱크 반경 거리 만큼 나타나므로 이 범위 안에서 기존탱크가 위치한 경우 및 추후 시공하여야 할 시설물이 존재한 경우에는 침하에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

References

1. J. D. Lee, J. Y. Ryu, S. W. Park, M. O. Yoon and C. W. Lee, "Study on the Evaluation of Radiant Heat Effects of Oil Storage Tank Fires Due to Environmental Conditions", Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 72-78 (2020).
2. API, "API Standard 650 - Welded Steel Tanks for Oil Storage", American Petroleum Institute (2003).
3. Earthquake Engineering Research Center, "Geotechnical Reconnaissance of the Effects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan", University of California at Berkeley (1995).
4. P. E. Myers, "Aboveground Storage Tanks", McGraw-Hill (1997).
5. T. Y. Wu and G. R. Liu, "Comparison of Design Methods for a Tank-Bottom Annular Plate and Concrete Ringwall", International Journal of Pressure Vessels & Piping, Vol. 77, Issue 9, pp. 511-517 (2000).
6. ASCE, "Minimum Design Loads for Buildings and other Structures", American Society of Civil Engineering (2010).
7. D. M. Pott, "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering", ASCE Press (2001).