

B-7

## 위험물탱크 화재방지를 위한 기초 안정성 분석연구

최정수\* · 임종진\* · 최영석\*\*  
한국소방검정공사\*, 유신코퍼레이션\*\*

### Safety Analysis of Hazmat Tank Foundation to Prevent Tank Fire

Choi, Jeong Soo\* · Lim, Jong Jin\* · Choi, Young Seok\*\*  
Korea Fire Equipment Inspection Co.\*, Yousin Co.\*\*

#### 요 약

위험물저장 탱크기초의 결함으로 인한 인화성물질의 유출사고는 산업단지의 대형화재를 야기시킬 수 있으므로 탱크기초의 설계 및 시공단계에서 세심한 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서는 위험물저장탱크 기초의 설계 및 시공 가이드라인을 제시하기 위하여, 대표적인 탱크기초 유형을 분류하고 각 유형에 따른 대표단면을 모델링한 수치해석(3D FEM)을 수행하였으며, 수치해석 결과로 나타난 탱크기초의 응력 및 침하분포를 비교 평가하여 각 기초 유형별로 위험물저장탱크 설계 및 시공단계에서 유의 하여야 할 사항을 검토하였다.

#### Abstract

Leakage incidents due to the fault of hazmat tank foundations are likely to cause the tremendous fire disaster in the national industry cluster area. The proper design and construction of tank foundation should be required to prevent the tank fire. In the study, the types of typical tank foundations were classified and modeling the individual tank type for 3D FEM analysis was performed to suggest the guideline for the design and construction of tank foundations. Matters to be attended of the foundation design and construction are reviewed through the comparison assessment of the numerical analysis results of the foundation types.

#### 1. 서 론

위험물 저장탱크 누출사고 발생시 위험물의 인화성으로 인해 화재가 발생하기 쉽다. 특히 위험물 저장탱크는 대부분 탱크단지 내에 위치하고 있어 개별 탱크 누출사고가 대형 화재를 일으킬 수 있으며, 나아가 국가산업단지에서의 재난상황이 초래된다. 일례로 2005년에 발생

한 영국의 Buncefield 탱크단지 화재사고로 막대한 인명·재산손실, 환경파괴 등의 국가적 재난이 발생하였다(그림 1). 위험물 누출사고의 원인은 탱크본체의 결함과 탱크기초의 결함으로 구분할 수 있으며, 탱크기초의 결함(그림 2)이 발생할 경우에는 다량의 위험물 누출이 발생하여 그 문제의 심각성이 커진다. 기초의 결함은 지반이 침하되거나 기초구조물이 파괴되어 발생하며, 이를 방지하기 위해 위험물탱크 저장소의 설치 예정지반에 대한 철저한 검증과 기초의 적합한 설계 및 시공이 수반되어야 한다.



그림 2. Buncefield 탱크단지 화재 사고



그림 3. 탱크기초의 결함

이에 본 연구에서는 위험물 저장탱크의 안전성 확보 및 탱크단지의 대형화재를 예방하기 위한 목적으로 위험물 저장탱크 기초의 안정성 분석을 통해 설계 및 시공시 가이드라인을 제시하고자 한다. 이를 위해 현재 시공되고 있는 위험물탱크 기초의 대표적인 형태를 분류하고 각 유형에 따른 대표단면을 선정 및 3차원으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 각 기초 유형에 따른 수치해석결과를 이용하여 응력 및 침하분포를 비교검토 하였으며 안정성 평가를 통해 각 기초유형에 해당하는 설계 및 시공시 유의해야 할 사항을 분석하였다.

## 2. 수치해석 및 결과분석

### 2.1 수치해석 방법 및 해석대상 선정

위험물 저장탱크 기초는 크게 쇠석링기초, 콘크리트링월기초, 콘크리트슬래브기초, 말뚝기초로 나눌수 있다. 위험물탱크 기초는 상부구조물의 특성상 쉘로 거의 모든 하중을 분담하는 구조로 되어있으나 그 정확한 근거에 대해 아직 밝혀진바 없으며 이에 막연한 경험에 근거하여 기초를 시공하고 있다. 이를 밝혀 내기위한 구체적인 현장시험 등의 자료가 없는 실정이며 현장시험을 수행하기도 매우 힘든 것이 현실이므로 본 연구에서는 수치해석을 통해 기초 주변의 응력분포 및 침하양상 등을 분석하여 향후 위험물탱크 기초 설계 및 시공시 참고자료로 활용하고자 한다.

본 연구에서는 사실상 지반과 다름없는 쇠석링기초를 제외한 모든 기초를 대상으로 하였다. 즉 콘크리트링월기초, 링월 콘크리트슬래브기초, 매트 콘크리트슬래브기초, 말뚝기초를 해석 대상(그림 3)으로 하였다. 해석프로그램으로는 FEM(Finite Element Method)을 활용한 Pentagon 3D 프로그램을 사용하였으며, 해석시에는 실제와 동일하게 탱크시공 전의 원지반

상태, 기초설치 단계, 탱크시공단계, 운영단계로 나누어 탱크설치 과정을 모델링(그림 4)하였다. 각 단면을 3차원으로 모델링하였으며 단면형상 및 하중조건 등이 대칭인점을 감안하여 반단면을 모델링하였다.

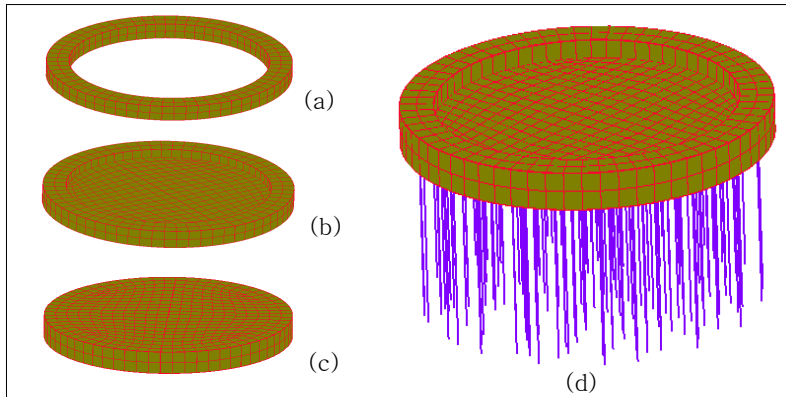


그림 3. 기초유형 분류 및 해석대상  
(a)콘크리트링월 (b)링월슬래브 (c)매트슬래브 (d)말뚝기초

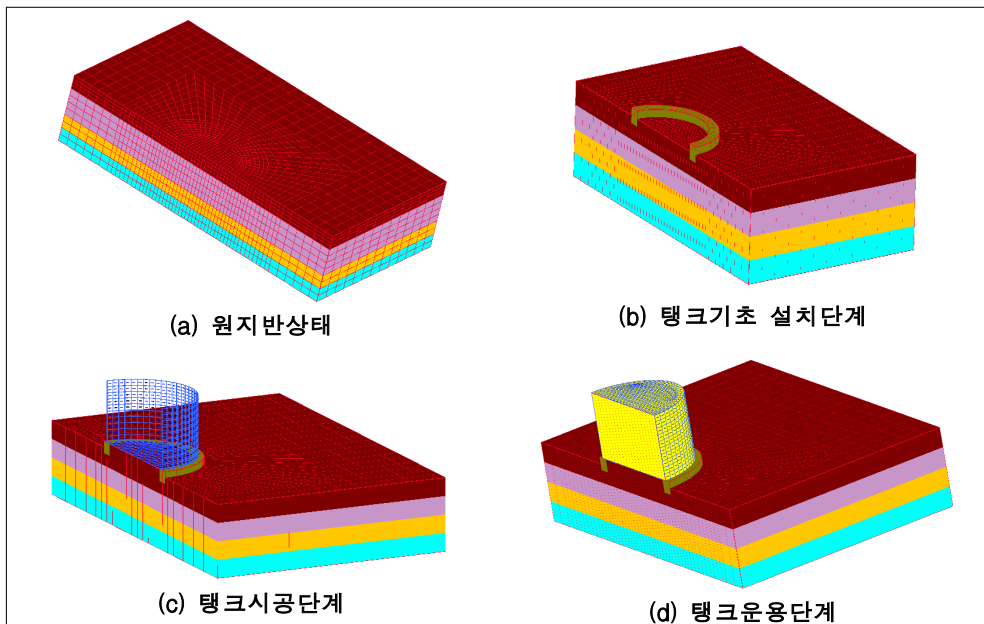


그림 4. 탱크설치 과정 모델링

## 2.2 해석조건 및 가정

위험물 저장탱크는 직경 20m, 높이 10m의 원형중형탱크를 대상으로 하였으며, 대상 탱크의 자중은 지주, 사다리 등의 부대설비를 포함하여 100ton으로 하였다. 위험물 저장용량은 3,000m<sup>3</sup>(충수시를 가정하여 비중1)로 하였으며, 탱크 옆판은 6mm~12mm의 10단, 바닥판 10mm, 애눌러판 12mm, 지붕판 6mm의 Steel 재질로 모델링(표 1)하였다. 탱크 운용시 풍하중은 위험물안전관리법 세부기준과 ASCE(American Society of Civil Engineering)에서 제안한 식을 사용하였으며, 설계풍속은 50m/s(2003년 태풍 매미를 기준)로 하였다. 또한 탱크의 바닥판의 애눌러 부분은 탱크 기초에 앵커로 고정하여 기초와 동일하게 거동하는 것으로 가정하였다.

표 1. 해석대상 위험물저장탱크 정보

탱크형상	탱크재질	탱크판 두께	탱크자중	설계풍속
원형중형탱크 (H×D:10m×20m)	steel	옆판:6~12mm 바닥판:10mm 애눌러판:12mm 지붕판:6mm	100 ton	50 m/s

탱크재질 및 파일은 steel 재질을 고려하여 elastic 모델을 적용하였으며, 지반 및 콘크리트의 구성모델은 실제거동을 구현할수 있는 tension cut-off Mohr-Coulomb 소성모델을 적용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 매질의 항복이후 매질거동은 완전소성(perfectly plasticity)으로 모델링 하였다. 지반의 물성은 현장시험과 실내시험을 통해 얻어진 값을 이용하였으며 매립층(깊이 0m~4m), 퇴적층(깊이 4m~16m), 풍화토층(깊이 16m~26m), 풍화암층(깊이 26m~30m)의 순으로 수평지층 지반을 구성하였다. 또한 기초의 링월은 폭 2m, 높이 2m로 하였으며, 션은 링월의 중앙에 위치하는 것으로 하였다. 해석범위는 경계조건에 영향을 최소화 하기위해 지반면상으로는 탱크직경(20m)의 3배 이상(60m)으로 하였으며, 사실상 지반의 경계면이라고 할 수 있는 암반층이 30m이하에서 나타나므로 깊이방향 해석경계면 길이를 30m로 하였다.

## 2.3 해석결과 분석

앞서 기술한 바와 같이 위험물탱크 기초를 형태에 따라 콘크리트링월, 링월슬래브, 매트 슬래브, 말뚝기초로 구분하였으며, 각각 기초 및 기초하부 지반의 변위와 응력분포를 파악하였다.

해석결과 그림 5에 나타난바와 같이 콘크리트링월의 경우 지반침하의 수평방향 영향범위는 기초의 외곽선에서 탱크의 반경만큼 벗어난 지역까지 나타났으며, 지중방향으로는 탱크 직경만큼 침하영향범위가 나타났다. 본 해석은 수평지층일 때를 가정하였으므로 실제 수평지층이 아닌 경우가 대부분이므로 탱크의 직경을 따라 지반의 강성이 틀려 부등침하의 우려가 있다. 따라서 수평지층이 아닌 지반에 콘크리트링월 기초를 설치할 경우, 적어도 지중방향으로 탱크직경 깊이까지 지반을 치환 다짐하면서 평판재하시험 등을 통해 지반의 견고성

을 확인하여야 한다. 콘크리트링월기초를 설치한 경우, 최대압축응력은 그림 6에 나타난 바와 같이 옆판의 직하부 콘크리트링월부 응력( $37t/m^2 \sim 40t/m^2$ )이 탱크 중심부 응력( $1t/m^2 \sim 5t/m^2$ )에 비해 40배 이상 집중되어 있다. 따라서 콘크리트링월 기초가 하중을 지지하는 주된 역할을 하므로 콘크리트링월의 구조적 안정성에 각별한 주의를 기울여야하며, 이를 위해 설계시에는 전단응력, 압축응력, 편칭에 대한 안전성을 필히 검토하여야 하고 시공시에는 콘크리트 품질관리와 철근량 및 전단철근 등의 배근을 설계된 바대로 정확하게 시공해야한다. 또한 콘크리트링월기초 하부지반의 응력은 콘크리트링월쪽에 집중되어 있는 것으로 나타나 설계시 총하중에 가중치를 두어 콘크리트링월이 지지하는 것으로 설계해야할 것으로 사료된다. 콘크리트링월에 작용하는 하중을 결정하는 가중치는 탱크의 직경 및 지반의 강성에 따라 변동성이 있으므로 세부적인 연구결과를 토대로 가중치를 정하여야 할 것이다.

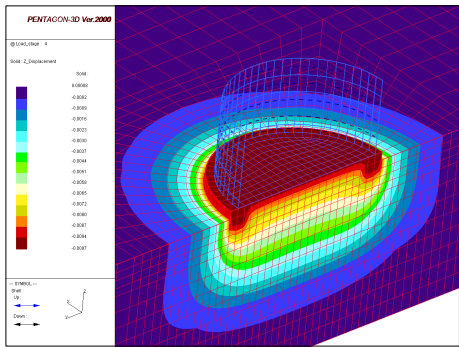


그림 5. 콘크리트링월 기초지반의  
연직침하 분포도

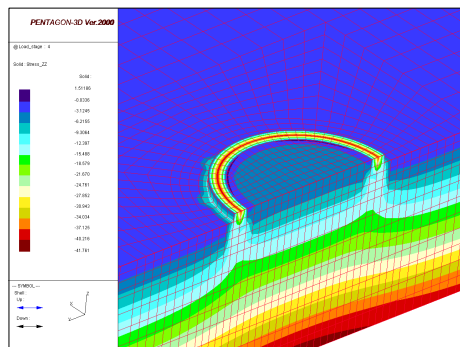


그림 6. 콘크리트링월 기초지반의  
최대응력 분포도

링월슬래브의 경우 지반침하의 영향 범위는 그림 7과 같이 콘크리트링월과 비슷한 양상으로 나타났다. 따라서 링월슬래브의 경우에도 수평지층이 아닌 지반에 콘크리트링월 기초를 설치할 경우, 지중방향으로 탱크직경 깊이까지 지반을 치환 다짐하면서 평판재하시험 등을 통해 지반의 견고성을 확인하여야 한다. 또한 그림 8의 링월슬래브의 응력분포를 살펴보면, 링월부분이 슬래브부분에 비해 침하가 더 일어나게 되어 슬래브부분은 응력이 중심부에 더 크게 나타는 양상이지만 최대압축응력은 옆판의 직하부의 링월부분의 응력( $19t/m^2 \sim 10t/m^2$ )이 슬래브부분( $5t/m^2 \sim 10t/m^2$ )에 비해 약 2배 정도 집중되어 나타났다. 이는 슬래브부분에서 응력을 분산시켰기 때문으로 추정된다. 하지만 이는 링월부분과 슬래브 부분의 접합부가 일체화된 구조라는 가정하에 해석한 것이므로 시공시에 링월부와 슬래브 부분의 접합부에 배근이 연결구조로 되게 하여야 링월슬래브의 기능을 다 할수 있을 것이다. 링월슬래브 직하부 지반은 콘크리트링월 기초와는 달리 응력이 슬래브와 링월부에 분산되어 나타나므로 링월슬래브의 경우에는 슬래브와 링월부분이 탱크하중을 동등하게 분담하는 것으로 설계가 가능하다. 단, 이 경우는 기초 내부의 성토재료가 강성을 발휘 할수 있도록 다짐되어 탱크의 하중을 기초의 전 면적에 걸쳐 균등하게 전달할 수 있는 구조일 때 가능할 것이다. 따라서 링월슬래브의 경우는 링월슬래브 안의 다짐에 관한 품질관리에 주의를 기울여야 한다.

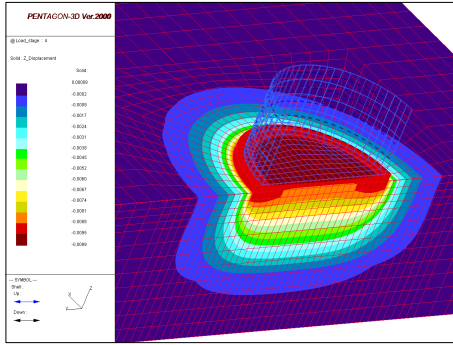


그림 7. 링월슬래브 기초지반의 연직침하 분포도

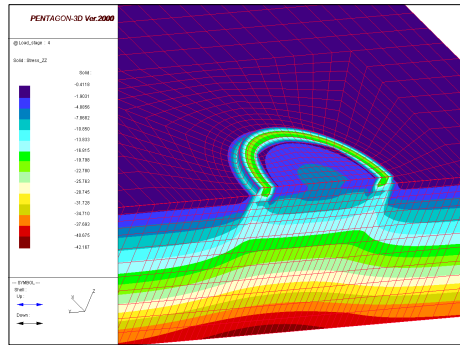


그림 8. 링월슬래브 기초지반의 최대응력 분포도

매트슬래브의 경우에는 그림 9 및 그림 10에 나타나듯이 링월슬래브와 침하 및 응력의 양상이 비슷하게 나타나 동일한 효과에 시공비가 더 적게 드는 매트슬래브가 더 바람직할 것으로 사료된다. 단, 앞서 언급한 바와 같이 매트슬래브가 일체화된 구조로 되어 있어야 하며, 매트슬래브 안쪽의 성토부분의 다짐이 잘 이루어진 경우에 한하여 링월슬래브 기초가 매트슬래브와 동일한 기능을 발휘할 수 있다. 또한 탱크 바닥판에 인위적인 기능 및 형상을 부여하고자 하는 경우에는 매트슬래브가 불가피할 것이다.

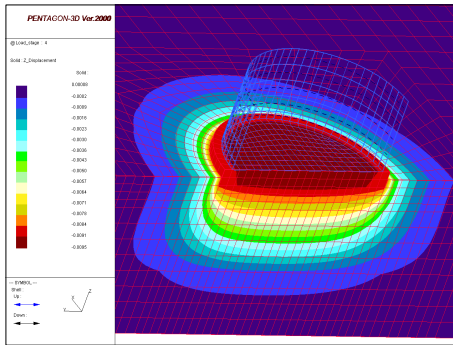


그림 9. 매트슬래브 기초지반의 연직침하 분포도

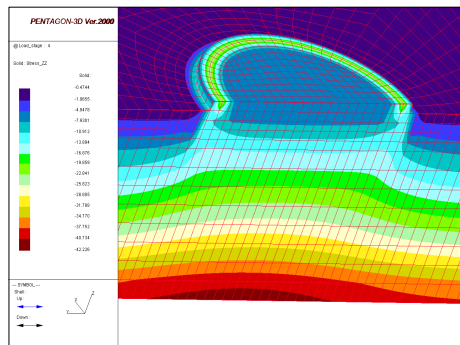


그림 10. 매트슬래브 기초지반의 최대응력 분포도

그림 11과 그림 12에 파일기초의 연직침하분포와 최대응력분포를 나타내었다. 파일기초의 경우에는 침하의 양상이 파일부분까지 하나의 구조물처럼 거동하는 양상을 보인다. 위험물 저장탱크에서 침하를 결정하는 부분은 옆판의 직하부이므로 파일기초와 다른 기초와의 옆판 직하부의 침하량을 비교해보면 파일기초의 경우에는 3mm로 나타났으며 다른 기초의 경우에는 모두 동일하게 9~10mm로 나타났다. 따라서 파일기초의 경우에는 다른 기초의 유형에 비해 침하를 약 1/3정도 경감시키는 효과를 나타내었다. 또한 침하는 파일기초의 끝부분이 안착되는 지중부분에서 침하가 수평으로 일어나고 있으며 탱크의 가장자리 즉 옆판의 아래

쪽에 위치한 파일의 연직침하가 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 파일기초의 경우에는 옆판 하부 혹은 기초의 외곽에 위치한 파일기초의 침하관리에 주의하여 시공하여야 한다. 철근콘크리트 구조물의 응력분포를 살펴보면 파일기초의 경우에도 옆판의 직하부분인 링월부분에 응력이 집중되는 양상을 보이거나 링월슬래브기초와 동일한 응력분포 형태를 보이고 있다. 하지만 철근콘크리트구조물 하부지반에서는 링월부분 직하부와 슬래브부분 직하부에서 모두 동일한 응력을 나타내어 응력분포가 수평한 분포를 보이고 있다. 이는 파일이 링월슬래브기초를 지지하는 형태의 기초유형이므로, 하중을 파일이 지지하기 때문으로 파악된다. 따라서 파일기초의 경우에는 링월슬래브의 철근콘크리트 구조물이 완벽하게 시공되었다고 가정했을 때, 파일의 완벽한 시공만 확보되면 가장 안전한 기초유형으로 나타났다.

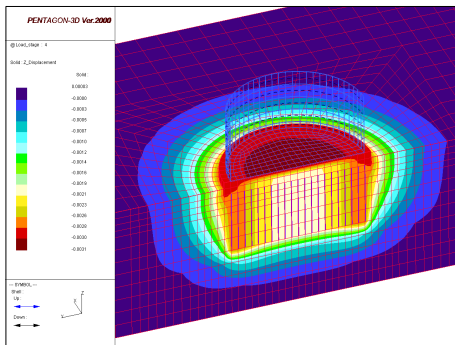


그림 11. 파일 기초지반의 연직침하 분포도

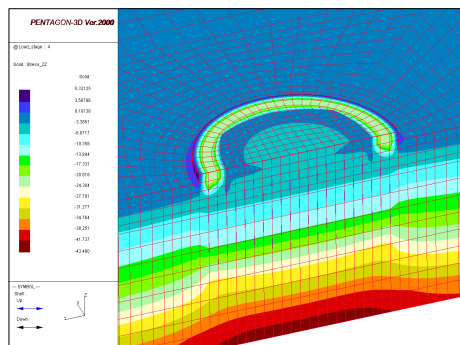


그림 12. 파일 기초지반의 최대응력 분포도

또한 본 연구에서는 풍하중(설계풍속 50m/s)에 의한 영향도 아울러 검토하였으나 본 연구의 대상(직경 20m, 높이 10m의 원형중형탱크, 탱크 자중 100ton, 저장용량 3,000m<sup>3</sup>)의 탱크에는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 실제로 위험물저장탱크가 태풍으로 인해 부분적인 결함이 발생하는 것으로 보고되고 있으나 탱크의 안정성에 위험한 정도는 아니며 또한 극히 이례적인 현상이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 위험물저장탱크의 안전성 확보를 통한 산업단지의 대규모 화재를 예방하고자 위험물저장탱크단지의 안전을 위해 필히 선행되어야 할 탱크기초의 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 대표적인 기초 유형을 콘크리트링월, 링월슬래브, 매트슬래브, 파일기초로 분류하였으며, 각 기초유형별로 3D FEM을 이용하여 대표단면을 모델링 한 후 수치해석을 수행한 결과를 이용해 설계 및 시공시 가이드라인을 다음과 같이 제시하였다.

1. 콘크리트링월 및 링월슬래브 안쪽에 형성되는 성토지반의 경우에도 응력을 분담하므로 적절한 강성을 확인하기 위해 시공시 평판재하시험 등을 통해 품질관리를 하여야 한다.
2. 콘크리트링월 기초의 경우 콘크리트링월에 하중이 탱크중심부에 비해 40배 이상 집중

되므로 설계시에는 안전율을 고려하여 탱크의 하중을 링월부분의 지반에 작용하는 하중에 가중치를 두어 설계하여야 한다.

3. 링월슬래브 기초의 경우 슬래브 부분이 응력을 분산시키는 것으로 나타나 설계시에도 기초하부지반이 균일하게 하중을 지지하는 것으로 설계가 가능하나, 이를 위해서는 링월과 슬래브가 일체화 구조로 될수 있도록 설계 및 시공시에 확인이 필요하며 링월슬래브 안의 성토재의 다짐에 관한 품질관리가 요구된다.

4. 매트슬래브의 경우 탱크바닥판의 인위적인 형상 및 기능을 부여하고자 하는 등의 특별한 경우를 제외하면 링월슬래브와 동등한 기능을 하는 것으로 나타났다.

5. 파일기초의 경우 탱크와 파일기초 부분까지 하나의 구조물처럼 거동하는 양상을 보여 다른 기초의 유형에 비해 침하량이 매우 적은 것으로 파악되었으며, 따라서 가장 안전한 구조물로 나타났다.

6. 파일기초의 경우, 기초의 최외곽 혹은 밀판의 하부에 설치된 파일에서 가장 큰 침하 및 응력분포가 나타나므로 시공시에 기초의 최외곽 혹은 밀판의 하부에 설치된 파일의 품질관리에 주의를 기울여야 한다.

7. 파일기초를 제외한 나머지 3가지 기초의 유형에서는 지중방향의 침하영향범위가 탱크의 직경만큼 나타났으며, 실제 국내 지반의 경우 대부분 수평지층이 아니므로 적어도 지중방향으로 탱크직경만큼 지반의 견고성을 확인하여야 한다.

8. 본 연구의 대상인 4가지 유형의 기초 모두 연직침하의 영향범위가 수평방향으로 탱크 기초외곽에서 탱크 반경만큼 벗어나게 나타나므로 이 범위 안에서 기존탱크가 위치한 경우 및 추후 시공하여야할 시설물이 존재한 경우에는 침하에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

9. 본 연구의 대상인 4가지 유형의 기초는 모두 철근콘크리트 구조물로 이루어졌으며, 철근콘크리트구조물이 견고하다는 가정하에 연구가 이루어진 것이므로, 실제 시공시에도 설계대로 철근의 배근 및 콘크리트의 품질관리가 정확하게 이루어져야 한다.

10. 앞서 언급한 기초의 침하영향 범위 및 지반의 하중분담율 등의 결정을 위해서는 추후에 다양한 탱크이 직경 및 기초지반에 관한 Parametric Study와 현장검증을 통한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

1. API(2003), "API Standard 650 - Welded Steel Tanks for Oil Storage", American Petroleum Institute.
2. Earthquake Engineering Research Center(1995), "Geotechnical Reconnaissance of the Effects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan", University of California at Berkeley
3. Philip E. Myers(1997), "Aboveground Storage Tanks", McGraw-Hill.
4. Wu TY Liu GR(2000), "Comparison of design methods for a tank-bottom annular plate and concrete ring wall", Int. Jour. pressure vessel&pipng vol.9