

LNG 저장탱크의 기초 지반 동결시 안정성에 대한 평가 Stability Analysis of LNG Storage Tank with Ground Freezing.

신은철¹⁾, Eunchul-Shin, 김수완²⁾, Soowan-Kim, 박정준³⁾, Jungjun-Park

¹⁾ 인천대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Incheon

²⁾ 인천대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, University of Incheon

³⁾ 인천대학교 토목공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Incheon

SYNOPSIS : Recently the energy dependence of LNG resource is being increased. So the enlargement of LNG storage is constructed in the coastal area. Most of LNG tanks are constructed below the ground level, and thus the hydraulic uplift pressure could be a problem against the weight of tank structure. Specifically, the settlement of foundation soil in the LNG tank is also important in the aspect of safety. The low temperature around LNG tank is induced the ground freezing and hence increasing the soil volume and earth pressure. The additional lateral earth pressure due to ground freezing could be applied to the LNG tank. In this study, the stability of LNG storage tank was evaluated with consideration of freezing earth pressure by using computer program TEMP-W.

Key words : LNG storage site, hydraulic uplift pressure, ground freezing, TEMP-W

1. 서 론

현재 에너지원으로 LNG자원의 에너지 의존도는 급속도로 커지고 있다. 그로 인해 LNG 생산기지의 증축은 계속적으로 이루어지고 있다. 지반 상에 축조되는 모든 LNG 탱크는 건물의 자중에 의한 침하의 영향을 받게 된다. 그래서 이로 인한 LNG탱크의 침하문제나 안정성 평가에 대한 연구가 필요로 되어지고 있다. 이에 본 연구에서는 컴퓨터 모델링 TEMP-W를 활용한 동결시 지반의 동결 범위와 계측자료 비교를 통해 탱크의 안전성에 미치는 영향을 평가 할 것이다. 또한, 저장탱크 온도의 영향성에 대해 계측된 실측 데이터와 수치 해석 데이터의 상호 비교 분석을 수행하여 지반침하에 대한 안정성을 검토하고자 한다.

2. LNG 탱크의 개요 및 연구

LNG(Liquified Natural Gas)는 메탄을 주성분으로 하는 천연가스를 수송과 저장의 편리를 목적으로 체적 1/600의 액체로 냉각한 것이며, -162°C 라는 초저온의 무색, 무취, 투명한 액체이다. 천연가스는 일반적으로 메탄(CH_4)이 대부분이며 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8), 부탄(C_4H_{10})등의 중질분을 많이 포함하고 있으나, 질소, 탄산가스, 유황화합물을 다량 포함한 것도 있다.

LNG 저장탱크의 기본적 역할은 대형 LNG선을 이용해서 정기적으로 입항하는 LNG를 받아 이것을 재기화해서 보낼 때까지에 필요한 LNG의 저장기능을 달성하는 것이다. LNG 저장탱크의 종류는 설치위치에 따라 크게 지상식과 지하식으로 구분할 수 있다. 연구대상의 LNG 인수기지에서 운영중인 저장탱크 총 18기중 지상식은 10기, 지하식은 8기가 운영중에 있다.

2.1 LNG 탱크 단면도

2.1.1 LNG 탱크의 기본설계 개념

LNG 생산기지 내 저장탱크는 기초형식에 대한 강관과일을 적용하였다. 저수위→중수위→고수위의 지하수위 전환운전을 하며, 차수위 및 동결관리로 탱크 본체 및 지반동결선 형성전까지는 지수관 및 배수시설에 의해 본체 내부로의 지하수 유입을 차단(저수위 운전)하고, 탱크 내 LNG 저장 후 일정기간(3년~4년)이 지나면 탱크 본체 및 지반에 동결선이 형성되어 본체 내부로의 지하수 유입이 차단(중수위&고수위)된다. 차수 및 배수시설로는 지수관(Water Stop 0~3), Drain Board(연벽 내측), Buffer Layer & Drainage Pit, Pit A & B가 설치되었다.

표2.1 LNG 저장탱크 시공현황

기초형식	규모 및 수량	근입지반(지지층)
강관과일	ø 711.2(14t)× 1,152본	풍화암

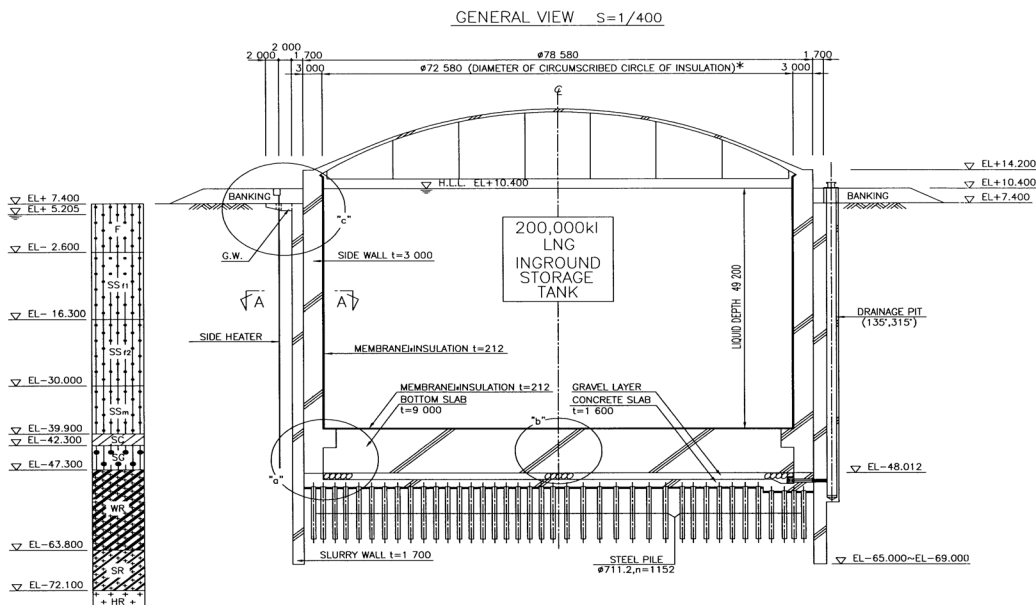


그림 2.1 LNG 탱크 측면도

2.2 LNG 저장탱크의 기초지반에 대한 안정성

2.2.1 LNG 저장탱크의 기초지반 조건

저장탱크 A의 전반적인 지층의 현황은 해성퇴적층이 상부 준설 매립토의 하부에 위치하며, 분포 토층은 준설매립토를 포함하여 모래층이 지표로부터 약 50m 이상 분포하고, 이들 중간에는 점성토층이 불규칙하게 협재되어 있으며, 모래층 하부에는 자갈층이 약 3~4m의 층두께로 분포하고 있다. 풍화대층은 퇴적층의 하부에 약 12.0m 이상의 층두께로 분포하며, 그 하부로는 기반암인 편마암 또는 화강암질 편마암의 연암층 및 경암층이 수직적으로 분포하고 있다. 기반암의 풍화도는 상부에서는 심한 풍화의 상태

를 나타내나 하부로 갈수록 비교적 신선한 상태를 나타낸다. 한편, 공내 지하수위는 지표하 심도 GL(-) 1.96m ~ 4.61m의 범위에 분포하는 것으로 조사되었다. 표 2.2에는 저장탱크 A의 슬러리월 안쪽부분의 파일이 위치해 있는 지반상태를 심도에 따라 나타내었다.

표 2.2 저장탱크의 지반 특성(슬러리월의 안쪽)

흙종류	레벨 (E.L.m)	층두께 (m)	변형계수 $E(kgf/cm^2)$	포아송비 ν	점착력 $c(tf/m^2)$	관성마찰각 $\phi(^{\circ})$	단위중량 $\gamma(tf/m^3)$
WRS	-51.0	4	400	0.33	9	31	2.35
WR1	-55.0	5	1,100	0.33	14	34	2.55
WR2	-60.0	3.8	1,500	0.33	16	35	2.35

표 2.2의 흙종류에서 RS는 풍화토층을, WR1은 풍화암층1을 나타내며, WR2는 풍화암층2를 나타낸다. 표 2.3에는 저장탱크 A의 슬러리월 바깥부분의 지반의 상태를 심도에 따라 나타내었다.

표 2.3 저장탱크 A의 지반 특성(슬러리 월의 외곽)

흙종류	레벨 (E.L.m)	층두께 (m)	변형계수 $E(kgf/cm^2)$	포아송비 ν	점착력 $c(tf/m^2)$	관성마찰각 $\phi(^{\circ})$	단위중량 $\gamma(tf/m^3)$
B	10.4	3.0	-	0.33	-	30	1.80
F	7.4	10	450	0.33	-	30	1.85
SS _{f1}	-2.6	14.9	730	0.33	-	35	1.85
SS _{f2}	-17.5	1.7	1,200	0.33	-	40	1.90
SS _m	-19.2	20	2,160	0.33	-	45	2.05
SC	-39.2	7.3	2,210	0.33	8	-	1.90
SG	-46.5	7.3	2,800	0.33	-	45	2.10
WR	-48.9	2.4	5000	0.33	40	35	2.35
SR	-65	16.1	20,000	0.33	90	40	2.55
HR	-71.3	-	20,000	0.33	90	40	2.55

표 2.3의 흙종류에서 B는 복토를, F는 매립층을, S1은 모래층1을 나타내며, C1은 점토층1을, S2는 모래층2를, C2는 점토층2를, SG는 모래질자갈을 나타낸다. 그리고, RS는 풍화토층을, WR은 풍화암층을, SR은 연암층을 나타내며, HR은 경암층을 나타낸다. 저장탱크의 시설부지에 대한 하부지반 조건 및 물 성치는 그림 2.2에 나타낸 바와 같다.

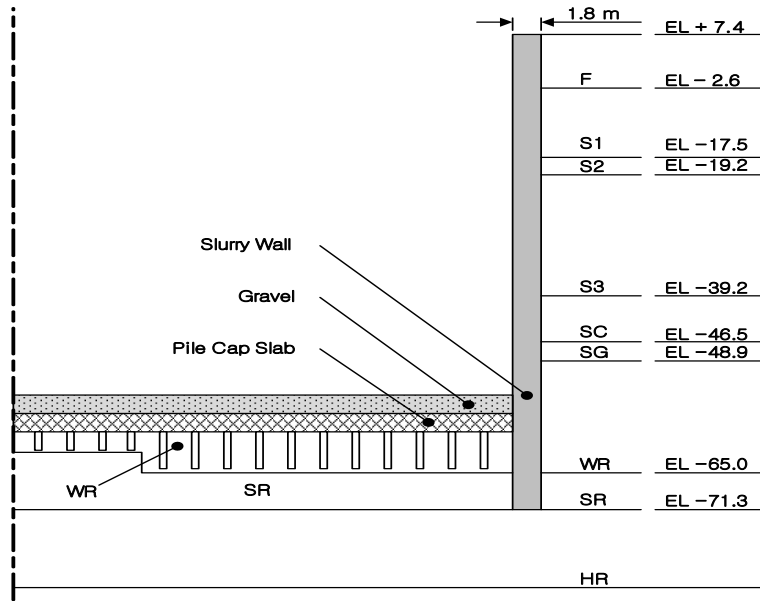


그림 2.2 LNG 탱크의 지질구조

3. 동결실험을 통한 지반안정성 평가

본 연구에서는 LNG 저장탱크가 위치하고 있는 해안매립지반에서 동상에 민감한 반응을 보이는 상부 실트질 흙과 동상에 큰 영향을 받지 않는 하부 모래질 흙, 그리고 건설공사시 상부 화강풍화토에 대하여 동상팽창압 실험과 함수비 특성에 대한 실험을 실시하였다.

3.1 시료의 공학적 특성

3.1.1 화강풍화토

국내에 널리 분포하는 화강풍화토는 신생대 후기에 규산염이 지층의 절리에 침투되어 기존의 퇴적층이나 변성암을 변질시켜 현재의 화강암을 이루었고, 이들이 다시 풍화작용을 받아 풍화 화강암층을 형성하고 있다. 지금까지 화강풍화토는 도로의 노체와 노상부에만 사용되어 왔으나, 앞으로는 입상재의 확보가 점차 어려워짐에 따라서 기층 내지는 보조기층재료로써 대체 사용이 불가피하고, 자원이 빈약한 우리의 현실을 감안할 때 자원 절약 내지는 재활용의 차원에서 본 흙의 활용가치는 다양하다.

그러나, 본 화강암은 풍화가 계속됨에 따라서 단립화, 세립화 단계를 거쳐 점토광물도 생성하여 고유의 액성한계에 영향을 줄 뿐만 아니라, 동상의 발현 및 동결융해 반복 작용을 받아서 흡수팽창에 따른 안정성의 저하, 점착력의 손실 등으로 압축강도와 전단강도가 현저하게 감소된다.

따라서, 본 실험에서 사용된 노상토용 화강풍화토는 No. 4체를 모두 통과한 시료를 노건조시킨 후 수분으로 인해서 뭉쳐진 흙덩이들을 고무망치로 부수고, 표준체(#10,#20,#40,#60,#100,#200)를 사용하여 입자 크기별로 각각 분류하였다. 또한 각각의 물리적 성질을 파악하기 위한 실내실험은 한국공업규격 KS F에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다.

노상토용 재료로 사용한 화강풍화토의 자연함수비는 16.47%이고, 비중은 2.66으로 판명되었다. 사용된 시료의 입도분포 곡선은 그림 3.1과 같으며, 시험 결과, 균등계수는 133, 곡률계수는 4.33으로 입도분포가 불량한 것으로 나타났다. 따라서, 통일분류법(USCS)에 의하여 이 흙은 SM으로 나타났다. 다짐시험결과, 최적함수비가 12.4%, 최대건조단위중량은 1.89t/m³을 나타내었다. 표 3.1은 화강풍화토의 공학적 특성을 종합적으로 나타낸 것이며, 그림 7.2는 다짐시험 결과에 의한 표준다짐곡선을 나타낸 것이다.

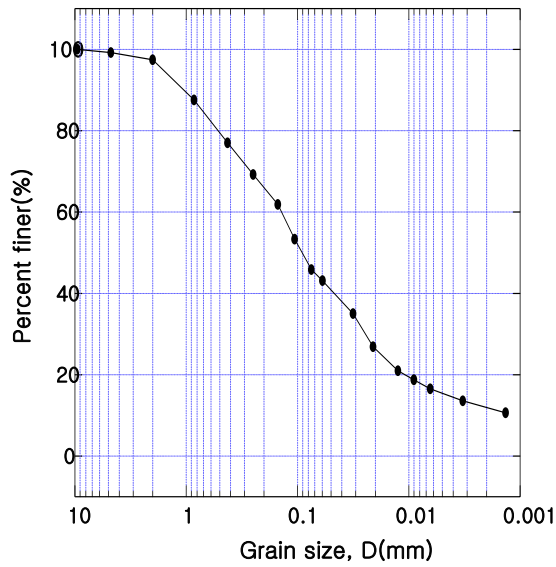


그림 3.1 화강풍화토의 입도분포곡선

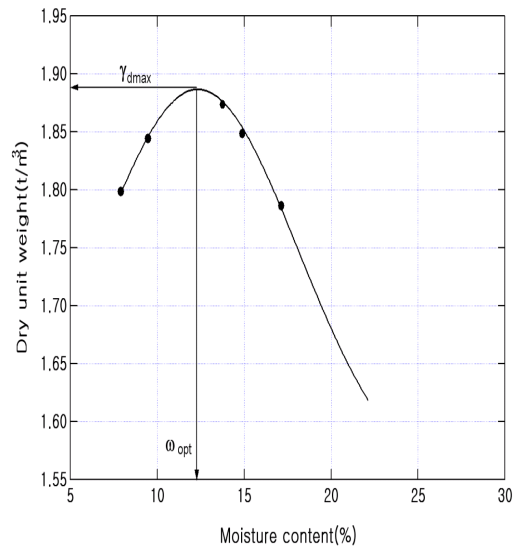


그림 3.2 화강풍화토의 다짐곡선

표 3.1 화강풍화토의 공학적 특성

공학적 특성	시험 결과
자연 함수비, ω_n (%)	16.47
비중, G_s	2.66
자갈(> #4)	0.81
모래(#4~#200)	53.34
실트(#200~0.002)	33.72
점토(< 0.002)	12.13
균등 계수, C_u	133
곡률 계수, C_g	4.33
액성한계, LL(%)	31.9
소성지수, PI	NP
최대건조단위중량, γ_{dmax} (t/m^3)	1.89
최적 함수비, ω_{opt} (%)	12.4
투수계수, k (cm/sec)	2.0×10^{-6}
No. 200체 통과량	38.5
통일분류법에 의한 분류 (USCS)	SM

3.1.2 실트질 흙과 모래질 흙

인천지역의 매립지반에 대부분을 차지하고 있는 실트질 흙은 입도조성이 실트질의 모래에서 거친 모래로서 넓은 범위의 토사들이 호층 상태로 퇴적되어 있다. 본 연구의 실내 동상실험에 사용된 실트질 흙과 모래질 흙은 인천광역시 LNG 인수기지 현장에서 채취한 시료로서, 공학적 특성을 파악하기 위한 기본물성시험으로 자연함수비시험, 다짐시험, 비중시험, 액·소성한계시험, 투수시험 등을 실시하였다. 시험방법은 한국산업규격에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다. 자연함수비시험은 LNG 지하탱크 내부공사를 실시하기 위하여 지반굴착을 하였을 때 채취한 시료에 대하여 측정하였다.

그림 3.3은 실트질 흙과 모래질 흙의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 입도분포곡선에 나타난 바와 같이 실트질 흙의 경우 35%정도가 모래이며, 64%이상이 실트 및 점토분을 함유하고 있다. 한편, 모래질 흙은 93%이상이 모래이며, 7.6%가 자갈 및 실트로 구성되어 있다. 실트질 흙과 모래질 흙의 균등계수는 각각 54.42, 5.29이며, 곡률계수는 8.32, 0.968을 나타내었다. 그러므로 이 연구에 사용된 실트질 흙은 세립토분이 대부분 실트질로 구성되어 있어 통일분류법(USCS)의 분류기호로 ML로 저소성 실트이고, 모래질 흙은 입도분포가 좋지 못한 모래로서 SP이다.

No. 200체 통과량 시험결과 역시 실트질 흙은 75.2%로 실트질 성분을 포함하고 있고, 모래질 흙은 7.8%로 나타났다. 일반적으로 No. 200체 통과량시험은 입도분포시험 방법과는 달리 일정량의 시료와 물을 혼합하여 No. 200체 통과량 보다 많은 양이 통과된다. 실트질 흙과 모래질 흙의 비중시험은 2.67, 2.65로 모래의 주성분을 이루는 석영의 비중과 거의 동일한 값을 보여주었다.

실트질 흙과 모래질 흙의 표준다짐시험 결과는 최적함수비가 각각 16.3%, 11.1%이며, 최대건조밀도는 $1.71tf/m^3$, $1.95tf/m^3$ 을 나타내었다. 실트질 흙과 모래질 흙의 다짐곡선은 그림 3.4에 나타낸 바와 같다. 실험결과에서 나타난 바와 같이 입도분포가 좋지 못한 모래질 흙의 최대건조밀도는 $1.95tf/m^3$ 인데 비하여 실트질 흙의 최대건조밀도는 상당히 낮은 값을 보여주고 있으며, 이는 입자가 세립분으로 구성되어 있어 최적함수비의 변화도 상대적으로 큰 변화를 보이고 있다.

실트질 흙과 모래질 흙의 아터버그한계 시험결과, 실트의 액성한계는 24.3%, 소성지수는 NP로 나타났다. 모래질 흙의 경우, 액성한계와 소성한계값을 구할 수 없는 비소성 토사이다. 입도분포시험 결과에서 알 수 있듯이 실트질 흙은 64%의 실트질 및 점토를 포함하고 있는데, 점토보다는 실트질 토사를 다량 함유하고 있는 것으로 판단된다.

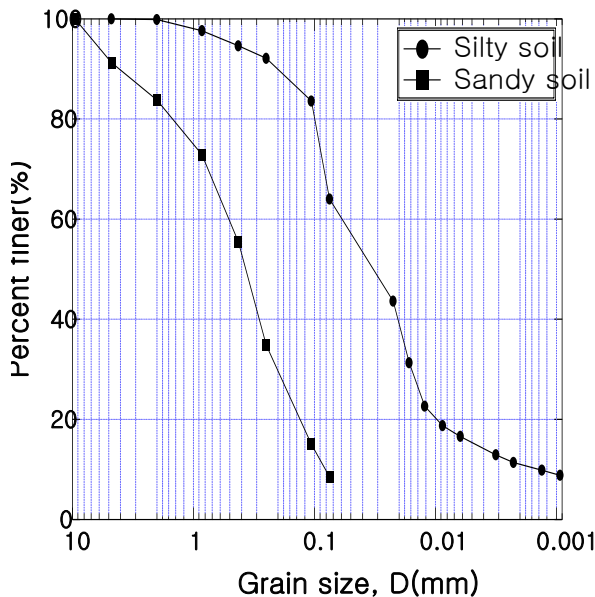


그림 3.3 실트질 흙과 모래질 흙의 입도분포곡선

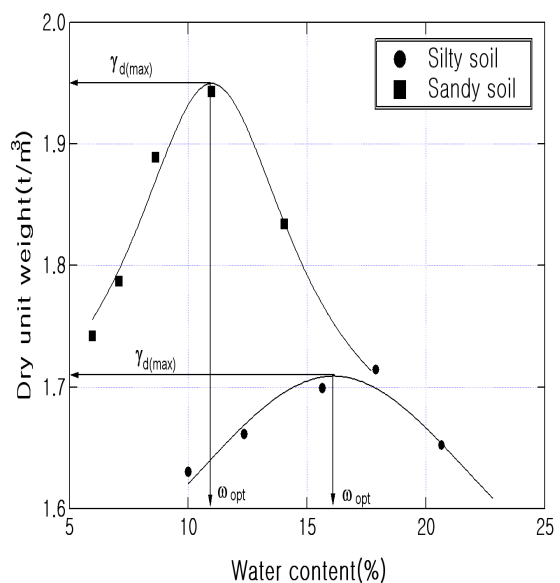


그림 3.4 실트질 흙과 모래질 흙의 다짐곡선

표 3.2 실트질 흙과 모래질 흙의 공학적 특성

공학적 특성	실트질 흙	모래질 흙
자연 함수비, ω_n (%)	26.4%	17.18%
비중, G_s	2.67	2.65
균등 계수, C_u	54.42	5.29
곡률 계수, C_g	8.32	0.968
최대건조단위중량, $\gamma_{d \max}$ (t/m^3)	1.71	1.95
최적 함수비, ω_{opt} (%)	16.3	11.1
액성한계, LL(%)	24.3	-
소성지수, PI	NP	NP
투수계수, k (cm/sec)	1.7×10^{-5}	2.1×10^{-4}
No. 200체 통과량	75.2%	7.8%
통일분류법(USCS)	ML	SP

7.2 실험장치 및 장비

7.2.1 동결 실험 장치

본 연구에서 사용된 동결 시험기는 그림 3.5에 나타낸 바와 같이 실험장치는 직경60cm, 높이 40cm인 원형토조로 된 장치로서 내부에는 Teflon으로 도포하였다. 또한, 몰드의 상부에는 알루미늄 디스크를 제작하여 시료에서 작용되는 압력을 로드셀로 전달할 수 있게 제작하였다. 또한, 알루미늄 디스크 위에 밀착시켜 로드셀을 반력지지대에 대하여 지지됨과 동시에 시료를 구속시킬 수 있도록 설치하였다.

실내 동상측정 시험은 일차원의 시험으로서 측면이 강성 몰드로 구속되므로 열류방향과 팽창방향이 일치함으로서 실제의 동결현상과 다르나 동결팽창은 열류방향이 주체가 되므로 팽창압은 열류방향만으로 발생한다고 가정한 것이다.

따라서, 토조 내부에는 그리스를 발라서 마찰력을 최소화시켰고, 냉각기를 통해 단일 방향으로의 동결을 진행시켜서 동결 조절을 적절하게 진행시켰다.

시료가 동결되면서 발휘되는 압력은 로드셀로 측정되어진다. 이 측정된 값은 자동수집장치로 나타내어진다. 동결 온도는 상부, 중부, 하부로 나누어 설치한 Thermocouple로 측정할 수 있다. 시료에 일정 수 두상태에서 물을 공급하는데, 이 때의 압력은 시료의 높이와 같다. 동결되는 동안 물은 시험시료의 안으로 혹은 밖으로 자유로이 이동된다.



그림 3.5 동결실험장치

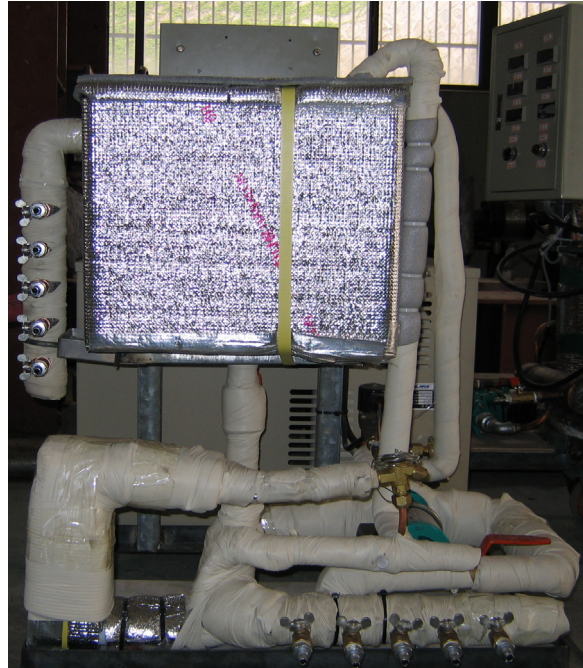


그림 3.6 동결 실험 장치 측면도

본 시험기는 ASTM에서 제작한 동상시험기와 동일한 원리에 의하여 제작하였다. 즉, 동결시험용 원형토 조와 동상팽창압 및 동상량 측정계기를 설치한 측정부, 물을 공급하는 수조부의 3부분으로 나눌 수 있다. 수조의 물은 시험기 외부에 설치된 물탱크로부터 계속 공급되며, 수조내에는 가열선이 설치되어 있어 물의 온도를 항상 일정하게 유지할 수 있다. 또한, 수조의 수면과 공시체 바닥면과의 높이를 임의로 조절할 수 있다. 측정부에는 동상량을 측정할 수 있는 LVDT와 동상팽창압을 측정할 수 있는 로드셀이 설치된다.

그림 3.6은 동결용해 실험 장치의 전체 전경을 나타낸 것으로서 최저 -45°C 에서 최고 40°C 까지 임의로 온도의 크기, 지속시간 등을 조절할 수 있으며, 센서는 0.1°C 까지 읽을 수 있는 정밀도를 지니고 있으며, 자동기록장치에 연결하였다.

3.3 동결 실험 결과 및 분석

토립자 사이의 간극에 포함된 수분이 팽창하면서 흙의 구조적인 변화를 일으켜 동상압력이 발생된다. 이러한 팽창압력(expansion pressure)은 가장 작게 저항하는 방향으로 그 힘을 발휘하게 된다. 이 과정 동안에 동결전선에서 얼음 형태로 상변화된 힘이 입자의 구조적인 변화를 발생시키는 것이다.

초저온의 LNG 지하저장탱크나 인공동결공법을 이용한 터널, 연약지반 보강 등에서도 이 점에 착안하여 열의 흐름을 적절하게 조절하여야한다. LNG 지하저장탱크나 인공동결공법 적용 시 저온가스나 brine의 냉열에 의해 지하저장탱크나 동결관 주변의 지반이 동결하면, 지반 동결팽창에 의해 탱크 본체나 동결관의 주변에 동상 팽창압이 작용하게 된다. 지반 동결에 의한 동상팽창압에 대하여, 안정성이나 시공시의 안정성을 확보하기 위해 동상팽창압의 크기를 미리 예측하여 두지 않으면 안 된다.

동상팽창압은 주로 동결토와 미동결토 사이의 경계인 동결면 부근에서 물의 상변화에 의해 발생하는 압력을 의미하며, 동상팽창압의 크기는 지반의 동결팽창특성에 크게 영향을 미친다. 그러나, 비교적 동결팽창량이 큰 연약지반에서는 미동결토층의 지반반력이 작기 때문에 동결 팽창량은 미동결토층을 변형시킬 뿐이며, 동결팽창압은 발생하지 않는다. 이러한 사실로부터 지반반력 즉, 지반의 강성과 동결팽창량의 조합에 의해 동상팽창압은 크게 영향을 받는다. 또한, 지반은 응력 수준에 대응하여 크리프 변형이나 파괴가 발생하므로 동상팽창압을 장기간에 걸쳐 정확히 추정하기 위해서는 이러한 지반의 특성을 고려

할 필요가 있다.

실내 동상실험은 측면이 강성으로 구속된 투수시험용 몰드를 사용하여 일차원 시험으로 실시하였다. 일차원 동상실험은 열류방향과 팽창방향이 일치시켜 팽창은 열류방향으로만 발생한다는 가정하에 실험을 수행하였다.

3.4 동상팽창압의 변화

본 실험을 수행한 결과 시간에 따른 최대 동상팽창압 실험결과는 화강풍화토가 3.549kg/cm^2 , 실트질 흙은 4.237kg/cm^2 , 모래질 흙은 0.397kg/cm^2 으로서 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다. 또한, 인공동결공법 적용시 동결시간과 온도의 관계를 나타낼 수 있었다.

각각의 토사에 대하여 포화도에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 포화도 60%, 80%, 90%, 100%에 대하여 화강풍화토의 최대 동상팽창압은 0.121, 0.839, 1.744, 3.576kg/cm^2 으로 나타났다. 실트질 흙의 최대 동상팽창압은 0.359, 1.163, 2.267, 4.199kg/cm^2 으로 도출되었다.

표 3.3 토사종류와 시간변화에 따른 동상팽창압의 변화

토사종류	설정온도(°C)	동상팽창압 발현시점 까지의 시간(min)	동상지속시간 (min)	최대동상팽창압 (kg/cm^2)
화강 풍화토	-5	400	780	3.574
	-10	180	540	3.526
	-15	130	320	3.471
	-25	70	230	3.624
실트질 흙	-5	530	1220	4.197
	-10	340	760	4.228
	-15	270	420	4.173
	-19	200	360	4.349
모래질 흙	-5	70	320	0.363
	-10	50	200	0.408
	-15	45	140	0.403
	-19	40	110	0.412

표 3.4 초기 설정온도에 따른 최대 동상팽창압

실험 조건		지속시간(min)			최대 동상팽창압(kg/cm^2)		
		화강 풍화토	실트질 흙	모래질 흙	화강 풍화토	실트질 흙	모래질 흙
초기 설정 온도 (°C)	-5	540	960	180	1.325	1.627	0.121
	-10	300	540	110	2.185	3.131	0.225
	-15	240	360	80	2.893	3.801	0.301
	-19	210	300	60	3.603	4.346	0.405

4. 지반 동결 범위 산정을 위한 수치해석

4.1 동결범위 및 팽창압 검토

차수목적으로 실시되는 LNG 지하저장탱크 주변지반의 급결시 예상되는 동결범위와 이와 같은 주변지반의 동결로 인해 LNG 지하저장탱크 콘크리트 구조물에 작용이 예상되는 팽창압을 분석 검토 하였다. 사용된 Temp/W(Ver. 5.14)는 캐나다의 GEO-SLOPE International Ltd.에서 개발하였으며, 2차원 유한요소법에 근거한 지반 열 해석 프로그램이다.

4.1.1 TEMP/W 해석에 사용된 온도상수

표 4.1 해석에 사용된 지반 온도상수

구 분 지 층		열전도율 kcal/mhr℃	비열 kcal/kg℃	밀도 kg/m ³	열용량 kcal/℃m ³	동결잠재열kcal/kg
제방	비동결	1.00*1	0.38	1,800	683	16.6
	동결	2.00*1	0.27	1,756	477	
매립(1)	비동결	1.00*1	0.38	1,811	683	16.4
	동결	2.00*1	0.27	1,768	479	
매립(2)	비동결	1.50	0.41	1,902	775	19.6
	동결	2.46	0.28	1,848	519	
실트질 모래 1	비동결	1.50	0.40	1,913	775	19.4
	동결	2.46	0.28	1,859	521	
실트질 모래 2	비동결	1.65	0.37	2,018	746	15.6
	동결	2.54	0.27	1,973	529	
점토	비동결	1.70	0.36	2,082	744	14.3
	동결	2.56	0.26	2,039	539	
실트질 모래 2	비동결	1.65	0.37	2,018	746	15.6
	동결	2.54	0.27	1,973	529	
자갈	비동결	1.65	0.37	2,018	746	15.6
	동결	2.54	0.27	1,973	529	
잔류토	비동결	1.49	0.41	1,903	779	19.9
	동결	2.45	0.28	1,848	521	
쇄석 (공극에 공기)	비동결	1.00*1	0.15	2,092	313	9.9
	동결	2.00*1	0.15	2,062	308	
쇄석 (공극에 물)	비동결	1.82	0.34	2,156	754	12.0
	동결	2.61	0.26	2,118	545	

표 4.2 해석에 사용된 콘크리트의 온도상수

	열전도율 kcal/mh ^o C	비열 kcal/kg ^o C	밀도 kg/m ³	열용량 kcal/ ^o C m ³
콘크리트	2.00	0.25	2,400	600

4.1.2 TEMP/W 해석에 사용된 온도조건

- 본 해석모델의 경계조건은 다음과 같다.
- 공기-측벽, 공기-지반
: 공기 온도 +11.9^oC(연평균), 열전도율 $\alpha=14\text{kcal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$
- 지반 경계의 외측-경계의 바닥과 쇄석층의 바닥
: 고정온도 +16^oC
- 공기-membrane
: LNG 탱크내의 온도 : +16^oC(고정 온도)
- 2m LNG-membrane
: LNG 탱크 내의 온도 : -162^oC(고정 온도)
- 초기 온도
: +17.5^oC (측벽, 바닥 슬래브, 슬러리월과 R=39.512m 내에 있는 측벽 외곽 지반)
: +16^oC (앞에서 언급한 것을 제외한 나머지)

4.1.3 TEMP/W 해석 결과 모델

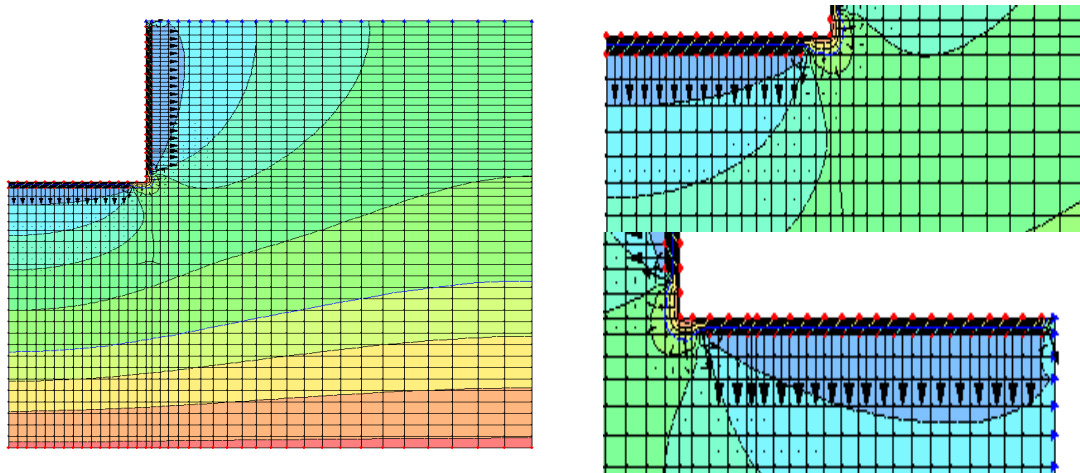


그림 4.1 LNG 탱크 열해석 세부 단면도 1

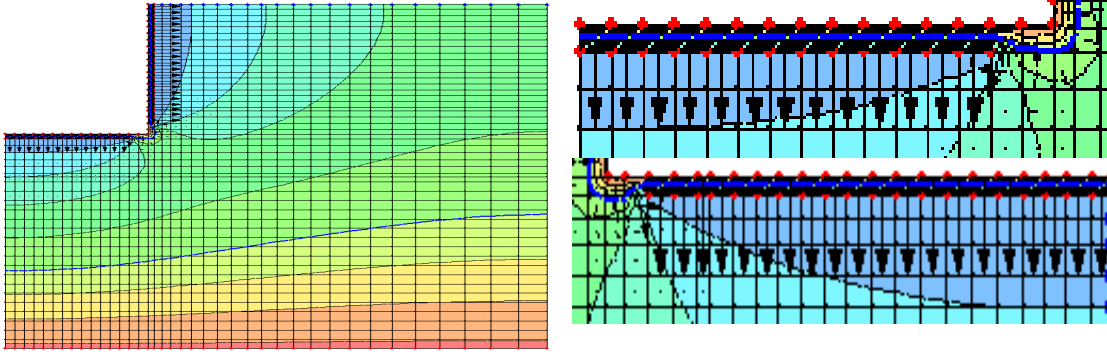


그림 4.2 LNG 탱크 열해석 세부 단면도 2

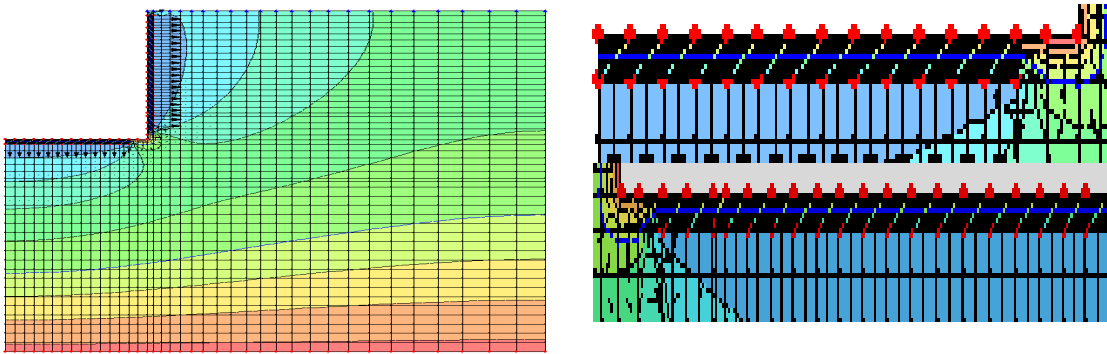


그림 4.3 LNG 탱크 열해석 세부 단면도 3

본 온도해석 검토는 LNG탱크의 지반조건 및 시공조건을 바탕으로 LNG 저장탱크 측벽부와 저관하부에서의 동결범위를 산정하기 위해 실시하였으며, LNG 지하저장탱크 측벽부와 저관하부의 동결범위에 대한 TEMP/W에 의한 해석 결과를 탱크별로 산정하여 본 결과 측벽부 지반의 동결범위는 슬러리월의 외벽으로부터 2m~2.2m, 저관 바닥으로부터는 0.85m~1m 정도로 평가할 수 있었다. 각각의 LNG 지하저장탱크 해석모델을 근거로 하여 보면 측벽부 지반의 동결범위는 슬러리월의 외벽으로부터 A의 경우 2m, B의 경우 2.1m, C의 경우 2.2m, D의 경우 2.1m로 나타났고, 저관 바닥으로부터의 동결범위는 A의 경우 0.85m, B의 경우 0.9m, C의 경우 0.95m, D의 경우 1m로 나타났다.

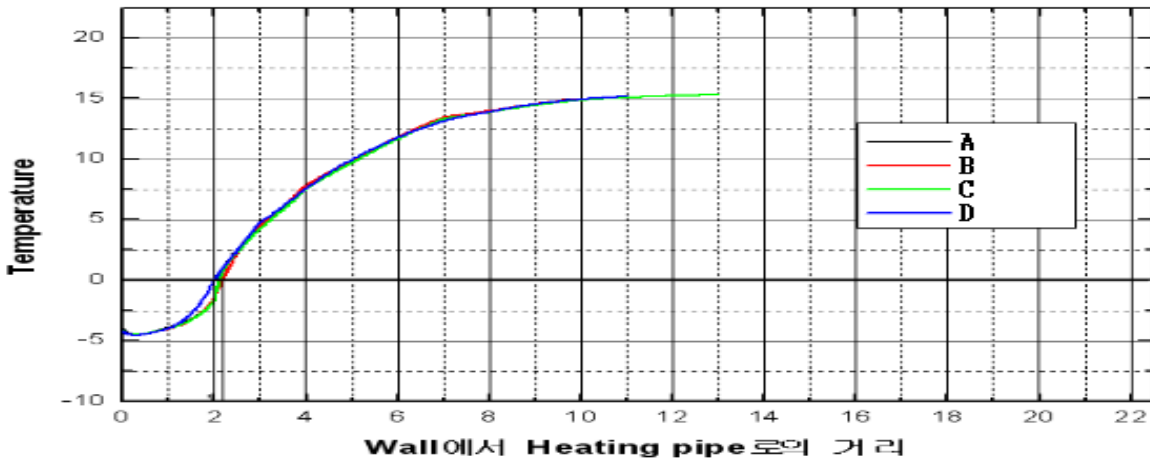


그림 4.4 해석영역에 따른 LNG 지하저장탱크 측벽부의 동결범위 산정

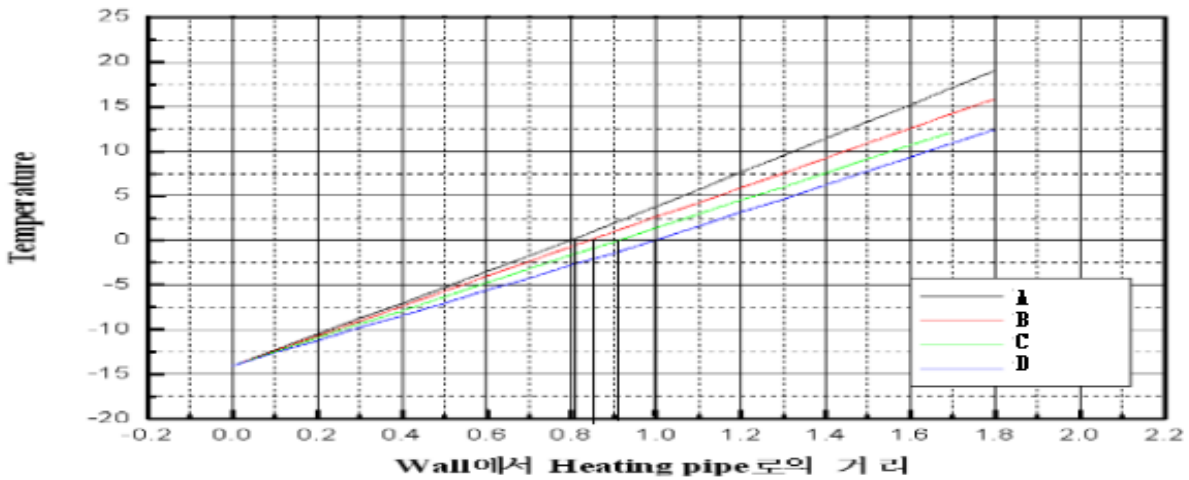


그림 4.5 해석영역에 따른 LNG 지하저장탱크 저판 하부의 동결범위 산정

5. 종합결론

본 연구는 LNG 생산 지하저장 탱크의 지반침하 원인 중 지반동결에 따른 지반공학적 특성을 고려하여 LNG탱크의 특성 원인분석을 수행하였다. 이에 도출된 종합적인 의견은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 LNG 저장탱크의 주변지반 시료를 사용하여 동결실험을 수행한 결과 최대 동상팽창압을 살펴보면, 화강풍화토는 3.549kg/cm^2 , 실트질 흙은 4.237kg/cm^2 , 모래질 흙은 0.397kg/cm^2 으로서 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다.

2. 이에 침투해석 프로그램인 SEEP/W와 열해석 프로그램인 TEMP/W를 연동하여 수치해석 한 결과, LNG 지하저장탱크 측벽부 지반의 동결범위는 슬러리월의 외벽으로부터 2m~2.2m, 저판 바닥으로부터는 0.85m~1m 정도로 산정되었다. 즉, 상기 도출된 동결실험 결과와 연계하여 분석시, 비교적 동결팽창량이 큰 연약지반에서는 미동결토층(슬러리월 외벽)의 지반반력이 작기 때문에 동결 팽창량은 미동결토층을 변형시킬 뿐이며, 도출된 온도 범위에 따른 동결팽창압은 미소하게 발생할 것으로 판단된다. 또한, 지반은 응력 수준에 대응하여 크립 변형이나 파괴가 발생하므로 동상팽창압을 장기간에 걸쳐 정확히 추정하기 위해서는 이러한 지반의 특성을 고려할 필요가 있다.

3. 상기 결론 1.2에 나타난 바와 같이 동결실험과 해석프로그램을 통한 동결 범위 평가시, 관련자료 대

책공법의 검토 과정에서 고려된 최대 동상팽창압인 10t/m^2 이하로 도출되어 구조물 손상에는 영향이 없는 것으로 사료된다. 그러나, LNG를 다시 만액시 추가로 시공된 동결파이프를 포함하여 히팅 파이프로 전환할 때, 전환시기와 온도 충격차이 때문에 급속한 동결로 인한 구조물의 변형 등으로 인해 더 큰 팽창압이 발생할 수는 가능성이 있다. 따라서, 이에 따른 점진적인 히팅 절차 수립이 필요하며, 추가적으로 온도계측이나 침하를 측정할 수 있도록 계측기를 설치하여 체계적이고 지속적인 유지관리를 통해 앞으로 발생 가능한 침하량에 대한 대비책을 강구해야 할 것이다.

참고문헌

신은철, 이재동, 김종대, (1996), “서천 화력발전소 Dolphin Fender 안전진단에 관한 연구”, 연구보고서, 인천대학교

이지원, 이재형, 이대수, 강금석, 이해균 (1995), “화력 원자력 발전소 토목구조물의 설계”, 신기술, 개정 증보판

황정규, 신은철, 김홍택, 김기웅, 구민세, 전찬기 (2000), “인천 LNG생산기지 #11, #12 탱크 지반침하 관련 구조물 안전 및 안정성평가와 대책공법의 타당성”, 대한토목학회

Brown, S. F., Lashine, Aj. K. F. and Hyde, A. F. L. (1975), "Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay, "Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 95-114.