

# 지상식 LNG저장탱크 Brine Heating System의 최적운전온도 설정 및 동결시간에 관한 해석

오병택<sup>\*</sup> · 홍성호<sup>\*</sup> · 양영명<sup>\*</sup>  
한국가스공사 연구개발원

## Optimum Operating Temperature and Freezing Time Estimation of Brine Heating System for Above-ground LNG Storage Tank

B.T. Oh<sup>\*</sup>, S.H. Hong<sup>\*</sup>, Y.M. Yang<sup>\*</sup>  
KOGAS R&D Division

### 1. 서론

우리 나라에서 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 청정 무공해 에너지라는 장점으로 인해 1986년 도입 이래, 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압,  $-162^{\circ}\text{C}$  상태에서 액화시켜 액화천연가스(LNG)로 저장하는 방법을 사용하고 있다. 수요 증가에 따라 국내에서는 저장기지의 건설 및 확충이 이루어지고 있으며 이에 따른 독자적인 LNG저장탱크 설계, 건설 및 시공 기술의 국산화 필요성이 증대되고 있다. LNG저장탱크는 여러 가지 구분방법이 있으나 지반과의 접촉방식에 따라 지상식과 지하식으로 크게 나누며, 지상식의 경우 지표에서 일정한 높이를 띄워 콘크리트 기둥(Pedestal)위에 탱크를 설치하는 방식과 1~2m 지하에 콘크리트 기초를 두고 탱크를 설치하는 방식으로 나뉜다. 전자의 경우 탱크 하부가 대기와 접하게 되므로 지반동결의 우려가 없으나 후자의 경우는 탱크 내부로부터의 냉열이 바닥부분에 미치게 되면 인접해 있는 지반이 동결되어 탱크에 안전상 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 이를 방지하기 위해 하부 콘크리트 구조물에 별도의 가열 시스템을 설치하며, 상용화되어있는 방법으로는 전기 코일을 이용한 가열방식과 가열된 액체를 순환시키는 방식으로 나뉜다. 액체 순환방식은 하부 콘크리트 내부에 배관을 나열하고 적당한 온도로 가열한 열매체를 순환시키는 방식으로서 열매체는 Ethylene Glycol을 부식방지제와 함께 사용한다. 이것을 Brine Heating System(이하 BHS)이라 칭하며, 중요한 설계 변수는 배관 내부온도, 설치 배관간격, 탱크 외부 및 지하의 온도조건 등이 있으나, 상용화된 외국사의 BHS는 설계변수가 우리 현실에 최적화되지 않은 면이 있다. 따라서, 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 BHS의 특성을 파악하고, 설계변수를 최적화하고자 하였다.

### 2. 해석에 사용한 조건

LNG저장탱크에 설치되는 BHS는 실험을 할 수 없는 대상이므로 유한요소해석을 통한 접근을 시도하였다. 이론적 접근인 만큼 조건을 실제상황에 가깝게 설정하는 것이 중요한 요인이 될 것이며, 각 시나리오는 아래에 나열하는 조건들을 조합하여 구성하였다.

## 2.1 탱크 내부

탱크 내부 조건은 정상운전상태와 비상운전상태를 설정하였다. 전자는 탱크에 이상이 발생하지 않은 정상적인 상용 운전상태이다. 후자는 탱크 내조에 결함이 발생하여 내조로부터 LNG가 누출된 경우이고, 이렇게 되면 누출된 LNG는 단열재 층을 거쳐 Corner Protection까지 내려오게 되며, 비상운전상태를 대비해 준비한 여분의 BHS가 작동하게 된다 따라서, 비상운전상태에서는 배관의 간격이 정상운전상태에 비해 1/2로 줄어들게 된다.

## 2.2 탱크 외벽

탱크 외벽은 계절의 영향을 받으며, 공기와 대류가 일어나는 부분으로 여름철과 겨울철 온도를 적용하였다. 각 계절에 대해 평균온도를 적용하여 여름철은 37℃, 겨울철은 -12℃를 각각 적용하였다.

## 2.3 Heater Plane의 평균온도 기준

Heater Plane이란 BHS 배관 중심이 위치한 수평면을 말하며, BHS를 설계하는데 인용되는 BS7777 코드와 각 LNG탱크 설계사의 기준도 Heater Plane에서 평균온도를 사용하고 있다. Heater Plane의 평균온도가 기준으로 사용될 수 있는 것은 열매체의 입구온도와 출구온도차가 1~2℃에 불과하기 때문으로, 이는 탱크의 규모를 생각할 때, 상당히 작은 차이이다. 본 해석에서는 BS7777 코드에 나와 있는 5℃, 10℃ 기준과 일본 K사의 기준인 14.2℃로 해석을 수행하였다.

## 3. 유한요소 해석 모델

2.절에서 설명한 조건들을 조합하여 시나리오를 설정하면, 총 12가지 경우가 되는데 각 시나리오에 대해 시행착오를 거쳐 평균온도 기준을 만족하는 BHS 배관 내부온도를 찾을 수 있도록 모델링하였다. Fig.1은 해석 모델의 물성(Material Properties)별 구성도인데 단열재를 포함한 모든 구성요소가 존재하는 단면을 보여준다. 해석 프로그램은 MSC/NASTRAN V.70.7이며, 모델링은 MSC/PATRAN을 이용하였다. 직경 86m의 탱크 규모에 비해 5mm 두께의 탄소강판 등이 사용되는 구조이므로 전체적인 요소(Element)수는 상당히 증가하였다.

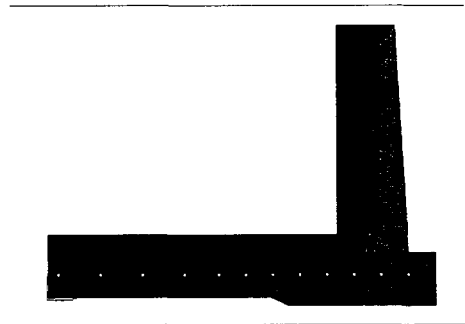
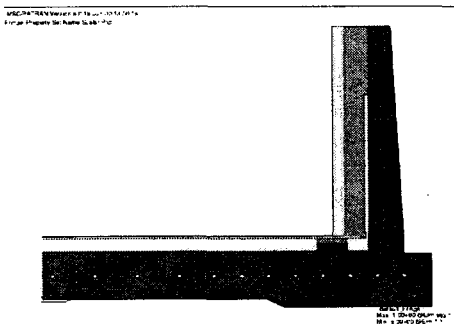


Fig.1 2D Model of normal operation condition Fig.2 Meshing of normal operation condition

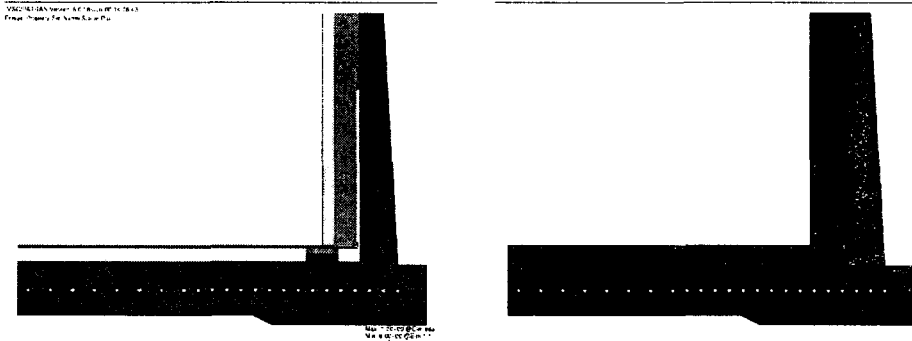


Fig.3 2D Model of emergency operation condition

Fig.4 Meshing of emergency operation condition

Fig.1과2는 정상운전조건에 대한 모델로 BHS 1기를 운행시켜, 배관간격(Pitch)이 1.4m, 0.9m이며, Fig3과 4는 비상운전조건에 대한 모델로 비상시 운행하는 BHS까지 총 2기를 운행시켜 배관간격은 0.7m, 0.45m인 경우에 대한 모델이다.

탱크의 특성을 고려하여 축대칭으로 모델링하였으며, 탱크의 중심부분은 온도 분포가 균일할 것으로 예상하여 30.4m 지점부터 외벽까지 모델링하였고, 높이는 약 10m이다. Fig.5는 코너부위의 확대그림으로 콘크리트, Foamglas, Perlite, 탱크 내조, PUF등의 배열을 잘 보여준다.

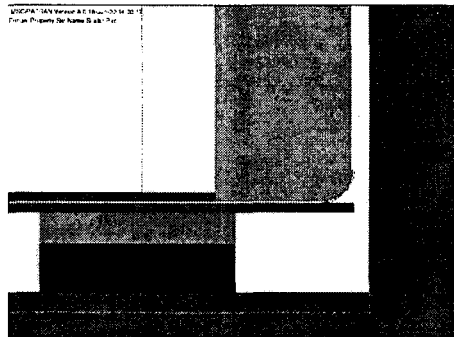


Fig.5 Detail of annular and peripheral part

#### 4. BHS 배관의 최적 온도

유한요소해석을 통해 BHS의 각 조건에 대한 최적 배관온도를 구했다. Fig.6은 해석의 일례로 정상운전조건, 겨울, 평균온도 기준 10℃, 내부배관온도 15℃ 조건으로 해석한 결과 온도 분포이다.

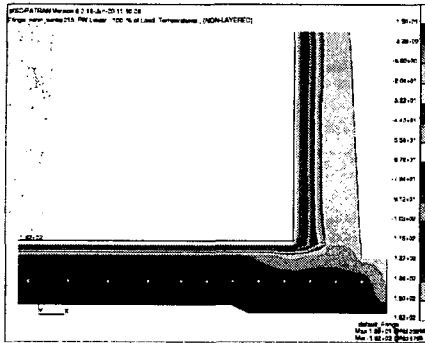


Fig.6 Temperature contour of normal operation, winter and 10°C condition

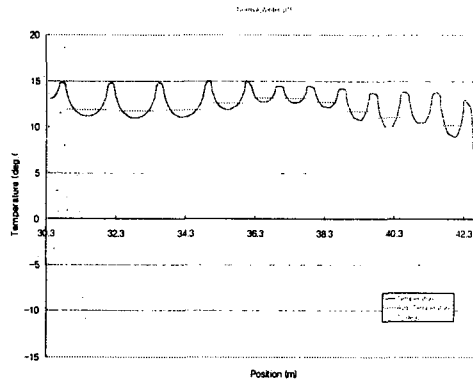


Fig.7 Path plot of normal operation, winter and 10°C condition at heater plane

Fig.7은 Heater plane을 따라가며, 경로에 대한 온도분포를 그래프로 나타낸 것인데 겨울철 외벽온도가 영하라는 사실을 고려할 때, 바깥쪽 한 구간을 제외하고 나머지 배관 구간에서 10°C기준을 만족하는 온도는 15°C인 것으로 나타났으며 탱크의 중심부로 갈수록 온도 분포가 균일해 진다는 초기 가정이 적당하다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 방법으로 각 조건에 대해 결과를 종합하면 Table.1과 같다.

Table.1은 BHS에서 순환하는 열매체의 평균온도를 결과값과 같이 유지하면 Heater plane에서 각 기준을 만족한다는 것을 의미한다.

Heater Plane 기준온도(°C)	운전조건	외벽온도(°C)	Heating Pipe 내부온도(°C)
5	정상운전	37(여름)	8.0
		-12(겨울)	9.0
	비상운전	37(여름)	6.5
		-12(겨울)	6.5
10	정상운전	37(여름)	14
		-12(겨울)	15
	비상운전	37(여름)	11
		-12(겨울)	12
14.2	정상운전	37(여름)	17.5
		-12(겨울)	19.5
	비상운전	37(여름)	15.5
		-12(겨울)	16.5

Table.1 Optimized temperature of heating pipe

### 5. 고장시 보수시간에 대한 과도해석

LNG저장탱크와 같이 한 번 건설하면 개축이 용이하지 않은 고정 구조물의 경우 만일 발생할 수 있는 사고에도 대비책을 준비해야 한다. 앞서 언급한 여분의 BHS도 같은 맥락으로 이해할 수 있는데, 운전용과 비상용 BHS 모두 작동하지 않아 지반이 동결된다면 그 시점까지의 시간적 여유를 알 필요가 있다. 이것은 저장탱크에서 LNG를 비우는 등의 후속조치를 위한 것이며, 지반이 동결될 때까지의 시간을 구하는 과도해석을 수행하였다. 해석 시간은 1,000,000초, 약 11일 동안이며, 과도해석의 특성상, 유한요소모델은 축소된 것을 사용하였다.

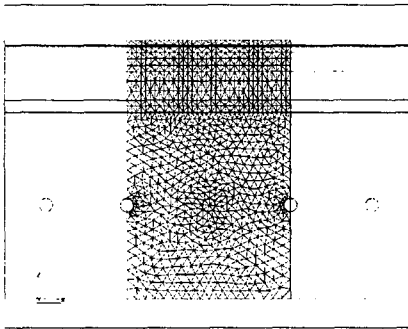


Fig.8 FE model of transient analysis at center part

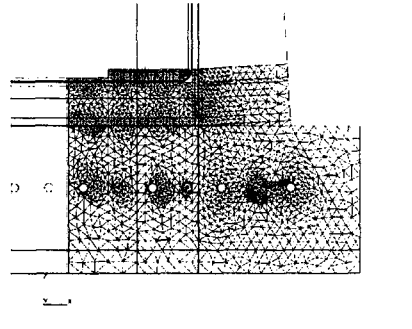


Fig.9 FE model of transient analysis at annular & peripheral part

Fig.8과 9는 각각 Center part와 Annular & Peripheral part의 정상상태, 유한요소 모델을 나타낸 것인데, 선행된 해석에서 증명되었듯이 Center part에서는 대칭성이 존재하므로 정상운전상태와 비상운전상태에 대한 배관 간격을 고려한 국부 모델이 사용되었고, Annular 및 Peripheral part는 탱크의 외벽 때문에 비대칭성이므로 함께 모델링하였다. 해석은 두 단계로 이루어졌다. BHS 미작동 시점을 묘사하기 위해 먼저 정적해석을 통해 얻은 결과를 다음 과도해석의 초기온도(Initial temperature)조건으로 부여하는 방법을 사용하였다.

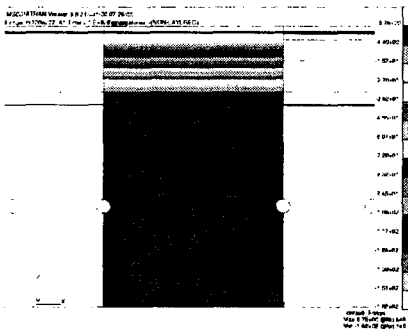


Fig.10 Temperature contour of transient thermal analysis at center part

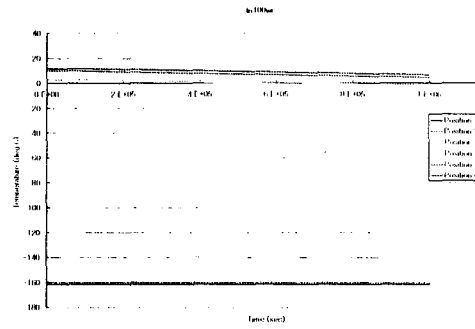


Fig.11 Result of transient thermal analysis at center

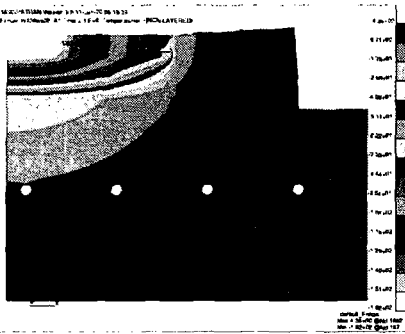


Fig.12 Temperature contour of transient thermal analysis at annular & peripheral part

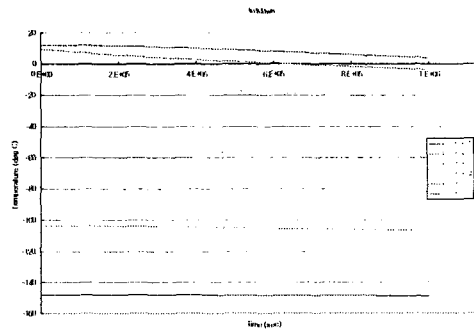


Fig.13 Result of transient thermal analysis at annular & peripheral part

Fig.10~13은 해석의 일례로 Heater plane 10°C기준에 대해 여름, 정상운전조건에서 두 개의 BHS가 모두 작동을 멈췄을 때를 가상하여 Center part 및 Annular, peripheral part에서 과도해석을 수행한 결과이다. Fig.10과 12는 약 11일이 지난 후, 각 부분에 대한 최종 온도 분포이고, Fig.12와 14는 시간의 진행에 대한 탱크 단면 깊이별로 나타낸 온도 변화 그래프이다. 가장 상부의 곡선이 탱크의 하부 콘크리트 바닥에서의 온도 변화인데 결과에서 알 수 있듯이 정해진 시간이 지난 후에도 콘크리트 하부의 온도가 영하로 떨어지지 않는다. 외벽의 조건이 겨울철이고, 단열재 사이에 존재하는 공기층(Air gap)의 단열효과를 무시한 가혹한 조건에서 해석한 결과가 이와 같다면 실제로는 더 오랜 시간이 걸릴 것으로 예상되며, Table.2는 해석결과를 정리한 것이다.

Table.2에서 알 수 있듯이 Heater plane에서 평균온도를 10°C, 14.2°C로 유지하도록 배관온도를 설정, 운전하던 중 BHS가 작동을 멈추어도 콘크리트 하부의 온도는 주어진 시간 안에 영하로 떨어지지 않는다.

(단위 : Day)

운전조건		Center		Annular-Peripheral	
		정상운전	비상운전	정상운전	비상운전
5°C	여름	11.5	-	-	-
	겨울	-	-	9.8	8.5
10°C	여름	-	-	-	-
	겨울	-	-	-	-
14.2°C	여름	-	-	-	-
	겨울	-	-	-	-

Table.2 Result of transient thermal analysis

Heater plane 평균온도를 5℃로 유지하는 경우, 몇 가지 조건에서 11일 이내에 영하로 떨어지나, 현재 건설중인 BHS의 기준은 10℃를 사용하고 있어 만일 발생할 수도 있는 BHS의 고장으로 인한 탱크 하부 지반의 동결은 없을 것으로 판단된다. Fig.11과 13의 그래프로부터, 각 부위의 온도강하의 선형에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서, 온도강하의 정도를 선형으로 가정하고 최종적으로 Heater Plane에서의 온도가 영하로 되는 시점까지의 시간을 추적해 보았다.

(단위 : Day)

운전조건		Center		Annular-Peripheral	
		정상운전	비상운전	정상운전	비상운전
5℃	여름	11.5	13.3	20.2	13.5
	겨울	13.6	13.3	9.8	8.5
10℃	여름	23.6	22.4	30.6	20.2
	겨울	25.6	24.4	15.8	13.5
14.2℃	여름	30.5	31.3	35.3	25.9
	겨울	34.3	33.2	19.9	17.3

Table.3 The interval for repair derived by calculation

그 결과, 기준에 미달하는 3가지 경우를 제외하고 Heater plane에서의 기준온도를 10℃ 이상으로만 유지한다면, 정상 혹은 비정상운전시 BHS가 작동을 멈추어도 충분한 보수시간을 가질 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

LNG저장탱크에 적용되는 지반 동결 방지용 Brine heating system에 대한 최적화를 수행하여 시스템의 특성을 파악하고 실제 우리 여건에 맞는 설계인자를 도출하고자 하였다. 열매체로서 Ethylene Glycol(53wt% Ethylene Glycol Solution including corrosion inhibitor)을 사용하는데, 해석결과 배관 내부온도를 1℃ 조정해도 Heater plane에서 평균온도가 2~4℃ 정도 변하는 민감한 배관온도가 존재하는 것으로 보아, 각 조건 및 기준을 만족하는 최적 배관온도는 존재하며, 이를 구하여 실제로 적용하였다. 그 최적온도는 Heater plane에서 10℃ 이상으로 유지되도록 Heating pipe 내부온도를 운전하는 것이다. 이렇게 얻어진 최적온도를 적용하고 Brine heating system의 미작동을 고려한 과도해석을 수행하여, 지반동결까지 걸리는 시간을 구해, 혹시 발생할 수도 있는 Brine heating system의 고장에 대한 후속조치에 적용하고자 하였다. 해석 결과, Heater plane에서의 기준온도 10℃를 유지하도록 운전되면, BHS가 작동을 멈추더라도 설계 자료에서 요구되는 보수시간 10일을 초과하는, 13일 정도 경과 후에 지반동결의 징후가 나타날 수

있다고 판단된다. 이는 BHS가 작동을 멈추어도 고장 수리를 위한 시간적 여유는 충분한 설정이라 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage".
- (2) 위용호 외, 1995, "공정위생 설비실무 핸드북", 한미, pp.61~66, 79~98
- (3) Phil Evans, 2000, "Physical Properties of Materials", Kvaerner Whessoe Technical Transfer
- (4) 건설부, 1987, "구조물 기초 설계 기준 해설", pp.542~545
- (5) Tokyo Gas Engineering Co., LTD., 2000, "Outline of Mechanical Design of LNG Inground Storage Tank"