



LNG저장탱크 지진력 산정을 위한 내부탱크 지진해석 모델에 관한 연구

†김미승 · 이강원 · 김준휘 · 윤인수

한국가스공사 연구개발원

(2013년 9월 9일 접수, 2013년 10월 11일 수정, 2013년 10월 11일 채택)

A Study on the Inner tank Seismic Analysis Model for Calculation of Seismic Forces of LNG Storage Tank

†Miseung Kim · Kangwon Lee · Junhwi Kim · Ihnsoo Yoon

Korea Gas Corporation, R&D Division, 973, Dongchun -dong, Yoonsu-gu, Incheon, 406-130, Korea

(Received September 9, 2013; Revised October 11, 2013; Accepted October 11, 2013)

요 약

환경 친화적 에너지로 고려되는 LNG(Liquefied Natural Gas)는 그 수요량이 계속 증가하고 있으며, 이에 따라 LNG를 저장하는 LNG저장탱크에 관한 다양한 연구도 활발히 진행되고 있다. 실제 LNG저장탱크의 지진력 산정 시 구조물과 지반의 상호작용을 구현하기 위해서는 내부탱크, 외부탱크, 파일 그리고 지반을 함께 모델링하여 유한요소해석을 수행하여야 한다. 따라서 본 연구는 EN 1998-4(European Standard)에 채택되어 있는 Malhotra 방법을 적용하여 세 가지의 내부탱크 모델에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 수계산 결과와 비교·분석함으로써 EN 코드에 가장 적합한 내부탱크 모델을 구축하였다.

Abstract - LNG(Liquefied Natural Gas) has been considered as the green energy. Thus, the demand of natural gas is keep increasing around the world, and various studies are actively under progress about the LNG storage tank. To calculate the seismic forces of actual LNG storage tank, FEM model has to include inner tank, outer tank, pile and soil to implement the interaction between structure and ground. So, this paper is represent the study about inner tank model of three cases using Malhotra method in EN 1998-4(European Standard). The results of calculation were compared, and the most suitable to inner tank model was suggested.

Key words : EN code, LNG storage tank, Inner tank model, Convective component, Impulsive component, Base shear, Overturning moment

1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas)는 타 화석연료에 비해 상대적으로 탄소배출량이 적은 환경 친화적 에너지로서, 전세계적으로 그 수요량이 계속 증가하고 있다. 이로부터 LNG를 저장하는 구조물인 LNG저장탱크에 대한 관심이 높아짐에 따라, LNG저장탱크에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

국내의 경우 API 및 BS코드 등을 적용하여 LNG 저장탱크를 설계해왔으나, 최근 해외에서는 EN코드(European Standard) 또는 ACI코드를 적용하는 추세이며, 그중에서도 EN코드가 주류를 형성하고 있다. 따라서 해외 기술 흐름에 뒤쳐지지 않기 위해서라도 EN코드를 적용한 LNG저장탱크 설계가 불가피하게 되었다. 이에 본 논문은 EN코드를 적용하여 LNG저장탱크의 지진력을 산정하고자 한다.

EN 1998-4[1]와 Malhotra[2]의 논문에 따르면, 유체를 담은 일차 구조물(내부탱크)의 지진력 산출은 수계산만으로 손쉽게 산정가능하여 그 과정과 소요

†Corresponding author:mslove@kogas.or.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 외부 탱크와 파일의 상호작용을 구현하기 위해서는 EN코드에 적합한 내부탱크 해석모델을 선정하고 이를 외부탱크와 파일 그리고 지반과 함께 모델링하여 유한요소해석을 수행하여야 한다.

따라서 본 논문은 EN코드를 적용하여 LNG저장탱크의 지진력을 산정하기 위하여, 내부탱크의 지진해석 모델에 대하여 연구하였다.

II. 본 론

Housner와 Haroun은 지진 시 유체 저장탱크내 유체의 거동에 관하여 연구하였다[3]. Housner는 수평 지진 하중에 의한 유체성분을 자유표면의 거동에 포함되어 진동하는 유체(대류 : convective) 성분과 지진 시 움직이는 저장탱크 벽면의 수평운동과 함께 거동하는 유체(충격 : impulsive) 성분으로 구분하여, 이를 등가의 질량과 등가의 스프링으로 모형화하는 간단한 방법을 제시하였다. 그러나 이 모델은 저장탱크 벽체의 유연성을 고려하지 못하여 유체의 동수압을 과소평가하는 경향이 있었다. 이에 Haroun은 Housner 모델의 문제점을 보완하고자 충격성분의 질량을 다시 지반의 가진에 직접 영향을 받는 부분(rigid impulsive part)과 지반에 의한 탱크 벽체의 변형에 의해 영향을 받는 부분(flexible impulsive part)으로 구분하여 수정 모델을 제시하였다. 이후, Malhotra는 유체 모델을 제시한 기존의 방법들을 기반으로 하여 새로운 모델을 제시하였다. Malhotra가 제시한 방법은 지진 발생 시 구조물의 유연성을 배제하여 동수압을 과소평가하게 되는 Housner 방법의 단점과 도해법을 이용하여 여러 가지 계수들을 정의해야 하는 Haroun 방법의 단점을 보완하여 결과의 정확도는 높이고, 계산 과정을 단순화하였다. 이 방법은 현재 EN코드에 채택되어 있으며, 본 연구에서는 이 방법을 적용하였다.

2.1. 해석 모델 및 제반 사항

LNG의 수요증가로 LNG저장용량이 증가함에 따라 LNG저장탱크의 초대형화에 많은 관심이 쏠리고 있다. 이에 한국가스공사는 세계 최초, 세계 최대 용량인 27만 m³급 저장탱크를 개발하여 현재 삼척 LNG기지 #10~12호기를 시공 중에 있다. 본 연구는 개발된 27만 m³ 용량을 대상으로 진행하였다.

본 연구의 해석 모델은 Fig. 1과 같이 외부탱크와 내부탱크로 구성되어 있는 실제 LNG저장탱크를 Fig. 2와 같이 H 높이의 LNG를 담고 있는 반경 r의 원통형 구조물로 모델화하였으며 이때 구조물은 강재(steel)로 가정하고 지반은 생략하여, 실제 LNG저장탱크의

내부탱크만을 구조체로 묘사하였다. 이는 앞서 설명한바와 같이 EN코드에서는 유체를 담은 일차 구조물의 지진력만을 산출하기 때문이다.

EN코드에 의한 계산과 해석에 사용된 물성은 Table 1과 같으며, 하부경계는 고정으로 가정해야 한다.

스펙트럼은 Fig. 3과 같이 UBC 스펙트럼을 차용하여 적용하였으며, 이때 유체의 대류성분 감쇠비는 0.5%, 충격성분 및 내부탱크의 감쇠비는 2%로 가정하였다.

Table 1. Material property

Classification	Value
Mass density of LNG	480 kg/m ³
Mass density of inner tank	7850 kg/m ³
Young's modulus of inner tank	2.03E+5 MPa
Poisson's ratio	0.3

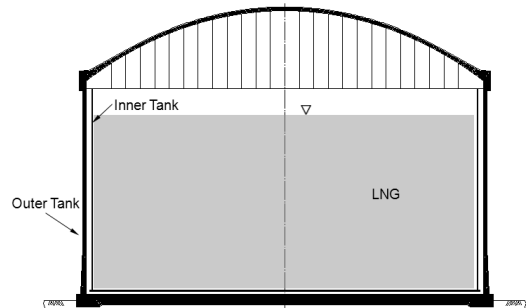


Fig. 1. The actual LNG storage tank.

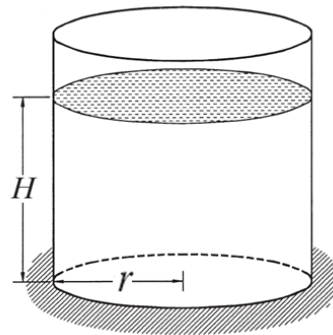


Fig. 2. Analysis model.

Table 2는 코드와 해석에 적용한 LNG 및 LNG저장 탱크의 제원이며, 이는 EN코드를 적용한 LNG저장 탱크(27만 m³ 용량)의 유체 지진력에 관한 연구 결과를 토대로 H/r가 1이 되도록 결정한 것이다.

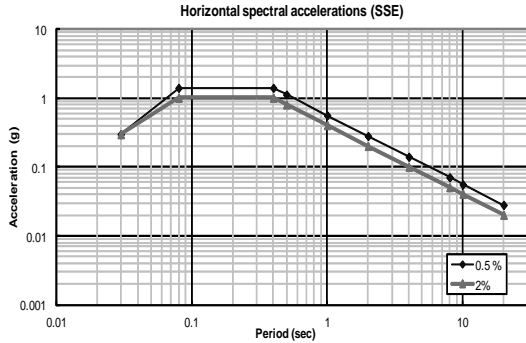


Fig. 3. Spectra for 0.5% and 2% damping.

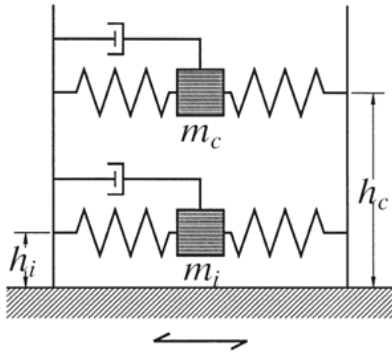


Fig. 4. Suggested fluid Model by Malhotra.

Table 3. Suggested coefficient by Malhotra

H/r	C _i	C _c [s√m]	m _i /m _i	m _c /m _i	h _i /H	h _c /H	h' _i /H	h' _c /H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521	2.640	3.414
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543	1.460	1.517
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571	1.009	1.011
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616	0.721	0.785
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690	0.555	0.734
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751	0.500	0.764
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794	0.480	0.796
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825	0.472	0.825

2.2. EN코드의 적용

EN코드에 반영된 Malhotra의 방법은 유체모델을 Fig. 4와 같이 제시하고, 각종계수를 Table 3과 같이 제시하였다.

EN코드에서는 충격성분의 고유주기(T_{imp})와 대류성분의 고유주기(T_{con})를 각각 식 (1)과 (2)에 따라 구하고, Table 3의 계수를 이용하여 Fig. 4의 충격성분 질량(m_i)과 대류성분의 질량(m_c), 그리고 각 성분의 작용 위치를 구한다.

$$T_{imp} = C_i \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{h/r} \times \sqrt{E}} \quad (1)$$

$$T_{con} = C_c \sqrt{r} \quad (2)$$

식 (1)에서 C_i와 C_c는 각각 충격성분과 대류성분계수, H[m]는 LNG의 높이, r[m]은 내부탱크 반지름, ρ [kg/m³]는 LNG밀도, E[MPa]는 내부탱크 탄성계수, 그리고 h[m]는 내부탱크 벽체의 두께를 의미한다. 본 연구는 변화하는 내부탱크 벽체 두께를 증가로 환산 적용하였다.

Table 3에서 i와 c는 각각 충격과 대류성분을 의

Table 2 . Specification of LNG storage tank

Classification	Value
Height of LNG (H)	44.1 m
Radius of inner tank (r)	44.1 m
Height of inner tank (H _{inner})	45.2 m
Thickness of inner tank wall (t)	0.037~0.01 m

미하며, l 은 LNG, m [kg]은 질량, h [m]는 해당성분의 작용위치, H [m]는 LNG의 높이, p 는 동수압 포함 작용 위치를 의미한다.

EN코드에는 저장탱크의 밀면 전단력(Q)과 전도 모멘트(M)를 구하는 식이 제시되어 있으며, 이는 식 (3), (4)와 같다.

$$Q = (m_i + m_w + m_r) \times S_e(T_{imp}) + m_c S_e(T_{con}) \quad (3)$$

$$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) \times S_e(T_{imp}) + m_c h_c S_e(T_{con}) \quad (4)$$

위의 식 (3)과 (4)에서 m_i 는 충격성분 질량, m_c 는 대류성분 질량, m_w 는 내부탱크의 벽체 질량, m_r 은 지붕의 질량을 의미하며, $S_e(T_{imp})$ 는 충격성분 고유주기의 해당 가속도, $S_e(T_{con})$ 는 대류성분 고유주기의 해당 가속도를 의미한다. 또, h_i 는 충격성분의 작용위치를 의미하며, h_c 는 대류성분의 작용위치, h_w 는 내부탱크 벽체의 작용위치, h_r 은 지붕의 작용위치를 의미한다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구의 적용 모델은 지붕을 생략하였으므로, m_r 과 h_r 은 무시할 수 있다.

2.3. 유한요소해석 모델

EN코드에 부합하는 내부탱크 모델을 선정하기 위하여, 다음의 세 가지 모델에 대하여 분석하고자 한다.

먼저 case 1은 EN코드에 가장 부합하도록 내부탱크와 유체를 모델링하였고, 이 해석 모델 개략도는 Fig. 5와 같다.

이 모델은 충격성분과 대류성분 질량, 내부탱크 질량을 각각 하나의 절점에 집중시켜 스프링을 달고 이를 하나의 뼈대로 이상화한 2D beam-stick 모델이며

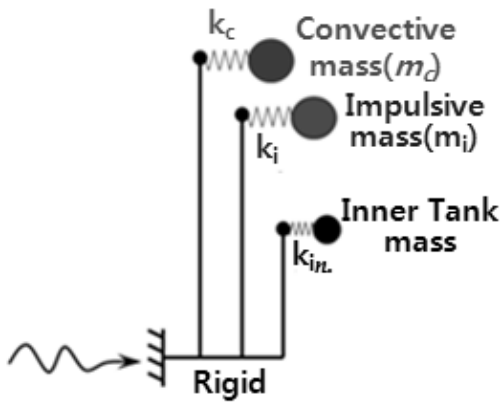


Fig. 5. Concept for case 1 analysis.

이때, 뼈대는 rigid하다고 가정한다. Fig. 6은 Fig. 5를 midas civil로 모델링한 것이다.

case 2의 경우, 충격성분은 하나의 절점에 집중시키고 내부탱크 질량은 뼈대 절점에 lumped mass로 분포시켰으며, 대류성분은 하나의 절점에 집중시켜 스프링을 달아 이를 강성이 있는 하나의 뼈대로 이상화하였다. Fig. 7은 case 2의 해석 모델 개략도이며, Fig. 8은 이를 midas civil로 모델링한 것이다.

case 3은 충격성분과 내부탱크 질량을 뼈대 절점에 lumped mass로 분포시키고, 대류성분은 스프링을 달아 이를 강성이 있는 하나의 뼈대로 이상화한 2D beam-stick 모델이다. Fig. 9는 case 3의 해석 모델 개략도이며, Fig. 10은 이를 midas civil로 모델링한 것이다.

해석 모델의 충격성분과 대류성분의 질량, 내부탱

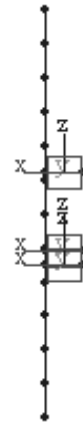


Fig. 6. Midas civil model of case 1.

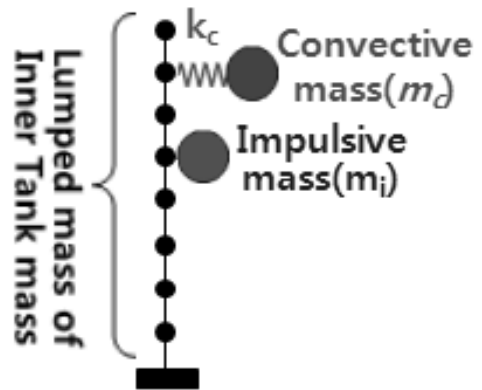


Fig. 7. Concept for case 2 analysis.



Fig. 8. Midas civil model of case 2.



Fig. 10. Midas civil model of case 3.

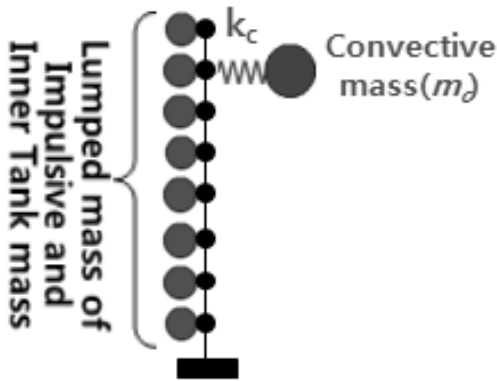


Fig. 9. Concept for case 3 analysis.

크 질량, 그리고 각 성분의 해당 작용위치는 Table 4와 같다. 여기서 해당 작용위치는 내부탱크 바닥에서부터의 높이를 의미한다.

2.4. 결과 비교 및 분석

EN코드에 의한 수계산 결과와 2.3절에서 제시한 세 가지 case의 해석 결과를 Table 5에 나타내었다.

EN코드에 의한 수계산 결과를 기준으로 세 가지 해석 case의 오차를 괄호 안에 표기하였다. Table 5로부터 EN코드의 수계산 결과와 가장 근접한 해석 모델은 case 1로 밀면 전단력은 약 2.1%, 전도모멘트는 약 4.5% 정도의 오차를 보였다. 또한 case 2와 case 3과 같이 강성이 있는 뼈대로 이상화 한 경우, rigid한 뼈대로 가정한 경우보다 작은 지진력을 얻었다. 이는 내부탱

Table 4. Summary of total mass and height of each component

Classification	EN code	case 1	case 2	case 3
Total mass of convective component (m_c)		58,458,183 kg		
Total mass of impulsive component (m_i)		70,874,080 kg		
Total mass of inner tank (m_{inner})		2.213E+6 kg		
Height of convective component (h_c)		27.17 m		
Height of impulsive component (h_i)		18.48 m		-
Height of inner tank (H_{inner})		16.95 m	-	-

Table 5. Results of EN code and analysis

Classification	EN code	case 1	case 2	case 3
Base shear (Q) [MN]	569 (-)	557 (2.1%)	507 (10.9%)	434 (23.7%)
Overturning moment (M) [MN·m]	10776 (-)	10289 (4.5%)	9430 (12.5%)	10121 (6.1%)

크 벽체가 유연성을 가지게 됨으로써, 내부탱크 하단의 전단력과 모멘트가 실제보다 작게 발생한 것으로 보인다. 또, 유체의 충격성분을 여러 개의 절점에 lumped mass로 분포 시킨 경우의 전단력은 분포된 층

격성분 질량에 해당하는 고유주기들의 응답 중 일부가 하나의 절점에 집중시키는 경우의 고유주기 응답보다 작아져 탱크에 작용하는 지진력이 과소평가된 것으로 판단된다. 그러나 내부탱크의 질량분포 여부는 내부탱크의 질량이 유체성분 질량들에 비하여 작기 때문에 해석 결과에 크게 영향을 미치지 않는다.

III. 결 론

EN코드에 가장 부합하는 내부탱크 모델은 충격성분과 대류성분 질량, 내부탱크 질량을 각각 하나의 절점에 집중시켜 스프링을 달고, 이를 rigid한 하나의 뼈대로 이상화한 것이다. 추후, 본 연구에서 제시한 내부탱크 모델을 외부탱크 및 파일 모델과 함께 반영하여, 지진에 따른 LNG저장탱크의 전체적인 거동 파악에 관한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업 LNG플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance- Part 4: Silos, tanks and pipelines, British Standards, (2006)
- [2] Praveen K. Malhotra, Thomas Wenk, Martin Wieland, "Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks", *Structural Engineering International*, (2010)
- [3] 유체-구조물-지반 상호작용 시설물의 내진설계 (제7회 기술강습회), 한국지진공학회, 131- 155