



강재 액체저장탱크의 내진설계를 위한 설계기준 분석

배두병¹ · 박장호^{2*} · 오창국³

¹교수, 국민대학교, 건설시스템공학부, ²교수, 아주대학교, 건설시스템공학과, ³부교수, 국민대학교, 건설시스템공학부

Comparison of Design Standards for Seismic Design of Steel Liquid Storage Tanks

Bae, Doobyong¹, Park, Jang Ho^{2*}, Oh, Chang Kook³

¹Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

²Professor, Dept. of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

³Associate Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

Abstract - In this study, it is carried out to analyze the international design standards such as Eurocode 8, API 650, NZSEE and etc for the seismic design of steel liquid storage tanks. From the comparison and analysis, the data for the required parameters and factors are provided for the establishment of Korean seismic design standard for steel liquid storage tanks. The simplified mechanical models have been presented for the seismic design of steel liquid storage tanks in all design standards and the parameters of mechanical models in design standards have similar values. Although the models for the seismic design of steel liquid storage tanks are similar in design standards, design approaches are given differently in accordance with the design methods, allowable stress design or limit state design. Therefore it is not easy to compare seismic forces presented in design standards directly. After comparison of design standards, it is concluded that establishment of Korean design standard for the seismic design of steel liquid storage tanks is necessary.

Keywords - Steel, Liquid storage tank, Seismic design, Design standard, Mechanical model

1. 서론

에너지 저장시설 및 공급시설을 포함한 플랜트 시설의 수요가 국내외적으로 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 플랜트 시설의 주요 구조물인 강재 액체저장탱크에 대한 수요가 지속적으로 유지되고 있다. 또한 국내의 경우 전력수요의 증가와 전력 정책의 변화에 따라 민간 발전사업에 대한 투자가 지속되고, 석유화학제품의 수출이 증가함으로써 국내 플랜트 시설에 대한 수요는 향후에도 지속될 것으로 예상되

고 있다.

국내의 플랜트 산업은 외형적으로 크게 성장하였으나, 플랜트 시설의 설계에 대한 완전한 기술력의 확보가 이루어져 있지 않으며 아직 플랜트 시설에 대한 국내 설계기준이 마련되어 있지 않은 실정이다. 국내에서의 탱크 구조물의 설계는 국제적으로 사용되고 있는 설계기준인 Eurocode 8, API 650, NZSEE 등을 준용하여 이루어지고 있으며^{[1],[2],[3]}, 이에 따라 설계기준에 대한 연구도 일반구조물에 비하여 절대적으로 부족한 실정이다^{[4],[5]}. 이에 따라 적절한 설계지침 없이 설계, 시공된 탱크 구조물에서 지속적으로 안전사고가 발생하고 있다. 또한 최근 지진의 발생빈도가 증가함에 따라 인명 및 경제, 사회, 환경 측면에서 상대적으로 위험성이 높은 플랜트 시설에 대한 적절한 내진설계가 요구되고 있다.

본 연구에서는 강재 액체저장탱크의 내진설계를 위하여 국제적으로 사용되고 있는 설계기준인 Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 설계기준을 비교함으로써^{[1],[2],[3]}, 강재

Note.-Discussion open until December 31, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 11, 2016; revised May 25, 2016; approved on June 14, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-219-2506 Fax. +82-31-219-2501

E-mail. jangho@ajou.ac.kr

액체저장탱크의 내진설계를 위한 국내 설계기준의 수립에 필요한 주요 사항을 제공하고자 한다. 모든 설계기준들은 강재 액체저장탱크의 동적 특성을 반영하고 있으며, 대부분 유사한 역학적 모델을 사용하여 강재 액체저장탱크를 모델링하고 있다. 그러나 각각의 설계기준은 서로 다른 구현 방법을 사용함에 따라서 설계하중은 다르게 나타나고 있다.

2. 강재 액체저장탱크의 동적 거동 특성

액체저장탱크에 지진 등으로 인하여 동하중이 작용하게 되면 구조물 내부의 유체는 유동을 하게 되고 이로 인하여 구조물에는 유체동압력이 발생하고 유체의 자유수면 또한 요동을 하게 된다. 강재 액체저장탱크와 같이 유연성이 있는 벽체로 구성된 탱크 구조물에서는 유체와 유연한 구조물의 상호작용으로 인하여 내부의 유체와 구조물의 응답은 더 큰 영향을 받게 된다^[6].

2.1 액체저장탱크에 대한 기술현황

초기의 액체저장탱크의 설계에는 구조물이 강체로 거동한다고 가정하여 유체동압력 및 유체 자유수면의 변화인 슬러싱(sloshing)을 산출하는 근사해법이 사용되었다. 이러한 근사해법 중에서 대표적인 방법으로 Housner 방법을 들 수 있다^[7]. 이 방법에서 Housner는 유체동압력을 벽체와 함께 움직이는 유체에 의한 압력성분, 즉, 충격성분(impulsive component)과 유체 자유수면의 슬러싱에 관련된 압력성분, 즉, 대류성분(convective component)으로 분리하여 응답을 산출하였다(Fig. 1(a)). 이 근사해법은 1963년 US Atomic Energy Commission의 TID-7024 규정집의 일부가 되어 액체저장탱크의 지진에 대한 구조적 안정성 해석에 사용되었다^{[6],[8]}.

1964년 Niigata 지진, 1964년 Alaska 대지진, 1966년 Park field 지진에서 액체저장탱크들에 심한 피해가 발생하였고, 이러한 피해의 원인규명과정에서 유체와 유연한 구조물의 상호작용으로 유체동압력이 강체 구조물 모델에서보다 수배 이상 증폭될 수 있음이 밝혀져 액체저장탱크를 강체로 가정하는 것은 안전하지 못함이 밝혀졌다. 또한 지반에 고정되지 않은 액체저장탱크에 더 많은 피해가 발생하여 지반에 고정되지 않은 액체저장탱크의 들림(Uplifting)이 액체저장탱크의 안전성에 큰 영향을 준다는 사실이 확인되었다. 그 이후 액체저장탱크에서의 유체-구조물 상호작용에 대한 많은 연구

가 집중적으로 시작되었으며, 이후 설계기준 등에서 큰 변화가 발생하였다. 또한 1983 Coalinga 지진, 1994년 Northridge 지진 등을 통하여 설계기준 등의 문제점 및 결함이 확인되고 개선이 진행되어 오고 있다^{[6],[9],[10],[11]}.

2.2 설계기준에 따른 액체저장탱크의 모델링 방법

Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 모든 설계기준에서는 Fig. 1과 같이 액체저장탱크 내부 유체의 모델링에 유체를 벽체와 함께 움직이는 충격성분(impulsive component)과 자유수면의 슬러싱에 관련된 대류성분(convective component)으로 분리한 전통적인 방식의 스프링-질량 시스템 형태의 역학적 모델을 사용하고 있다^{[1],[2],[3]}.

Fig. 1(a)의 역학적 모델은 Housner에 의해 제시된 모델로서 아래쪽 부분의 유체는 주로 충격성분에 기여하고, 위쪽 부분의 유체는 대류성분인 슬러싱에 기여한다^[7]. Eurocode 8, API 650 등의 설계기준에서는 모든 탱크 구조물에 대하여 강체 모델을 사용하고 있다. 반면에 NZSEE에서는 RC 탱크 구조물에 대해서는 강체 모델을, 강재 탱크 구조물에 대해서는 유연 모델을 사용하도록 하고 있다. 이는 Veletsos에 의해 제시된 세개의 질량을 가지는 역학적 모델로서 Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 슬러싱에 관련된 대류성분, 탱크의 강체 모드 충격성분, 탱크 유연 모드 충격성분을 가지며 탱크 벽체의 유연성에 의한 효과를 고려한 모델이다^[12].

액체저장탱크에 지진 등의 동하중이 작용하면 대류 성분

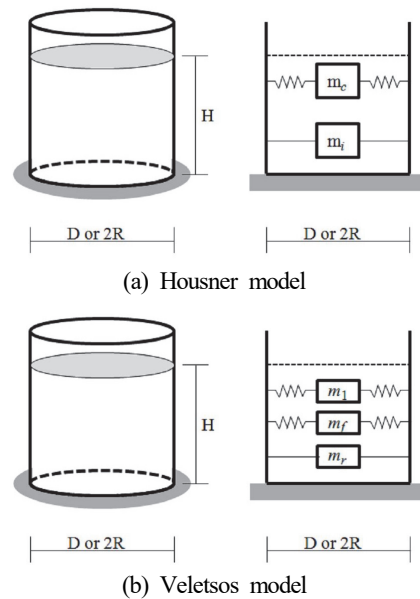


Fig. 1. Mechanical model for a liquid storage tank

과 충격 성분의 유체동압력에 의해서 탱크 구조물에 작용하는 하중은 일반 구조물에 작용하는 하중에 비하여 커지게 되며, 세장비가 큰 액체저장탱크나 두께가 얇은 액체저장탱크에서는 탱크 구조물에 작용하는 하중이 훨씬 커지게 된다. 따라서 Eurocode 8, API 650 등의 설계기준에서는 액체저장탱크의 역학적 모델에서 충격성분의 질량을 산출할 때에는 벽체의 유연성을 고려하지 않는 강체 모델을 사용하지만, 충격성분의 고유주기를 산출할 때에는 강제 탱크 벽체의 유연성을 반영하고 있다.

3. 설계기준 분석

강제 액체저장탱크의 내진설계를 위하여 국제적으로 사용되고 있는 설계기준인 Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 설계기준을 비교, 분석하였다. Eurocode 8, NZSEE은 강도설계법을 사용하고 있으며, API 650은 허용응력설계법을 사용하고 있어 하중 등에 대한 직접적인 비교는 적절하지 않아 해석을 위한 주요 인자들 위주로 비교 검토하였다.

3.1 대류성분의 고유주기

Eurocode 8, API 650, NZSEE 각각의 설계기준에 제시된 원통형 액체저장탱크에서의 대류성분 1차 모드 고유주기는 다음과 같다.

- Eurocode 8^[1]

$$T_{con} = C_c \sqrt{R} \tag{1}$$

여기서, R 은 탱크의 반경이고, H 는 유체의 자유수면의 높이이며, 계수 C_c 는 Table 1과 같다.

- API 650^[2]

$$T_c = 1.8K_s \sqrt{D} \tag{2}$$

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}} \tag{3}$$

Table 1. Coefficient of C_c in Eurocode 8

H/R	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
C_c	2.09	1.74	1.60	1.52	1.48	1.48	1.48	1.48

여기서, D 는 탱크의 직경이고, H 는 유체의 자유수면의 높이이다.

- NZSEE^[3]

$$T_i = \frac{2\pi\sqrt{R/g}}{\sqrt{1.841\tanh\left(1.841\frac{H}{R}\right)}} \tag{4}$$

여기서, R 은 탱크의 반경이고, H 는 유체의 자유수면의 높이이다. NZSEE에 제시된 대류성분 1차 모드의 고유주기에 대한 식은 원통형 구조물 내부에 저장된 유체 자유수면에 대한 이론해와 동일하다.

각 설계기준에 제시된 식에 의하여 계산된 대류성분의 고유주기와 관련된 값을 H/R 의 비에 따라 정리하여 Table 2에 나타내었다. 계산된 고유주기 관련된 값은 이론해와 동일한 NZSEE의 결과와 비교하여 모두 0.5%이내의 아주 작은 차이를 보이고 있다.

전체 액체 질량에 대한 대류성분 질량의 비(m_c/m_t)는 각 설계기준에 따라 Fig. 2와 같이 구하여진다. Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 H/R 의 비가 커짐에 따라서 전체 액체 질량에 대한 대류성분의 질량은 감소한다. 대류성분 질량의 설계기준에 따른 차이는 H/R 의 비가 0.3인 경우 최대값과 최소값의 차이가 13.3%로 나타났으나, 다른 구간에서는 최대값과 최소값의 차이가 5% 내외로 상대적으로 작게 나타나고 있다.

Fig. 3은 각 설계기준에 따른 대류성분의 질량이 작용하는 높이(h_c/H)를 나타낸 것이다. 대류성분 질량의 비와는 달리 H/R 의 비가 커짐에 따라서 대류성분의 질량이 작용하는 높이가 올라간다. H/R 의 비에 따른 각 설계기준에 의한 최대값과 최소값의 차이는 2.5%로 작게 나타났으며, 전체적으로 유사한 값을 보이고 있다.

Table 2. Comparison of natural periods for convective component

H/R	T_{con}/\sqrt{R} (Eurocode)	T_c/\sqrt{R} (API 650)	T_i/\sqrt{R} (NZSEE)
0.5	1.740	1.727	1.735
1.0	1.520	1.509	1.516
1.5	1.480	1.477	1.484
2.0	1.480	1.472	1.479
2.5	1.480	1.471	1.478
3.0	1.480	1.471	1.478

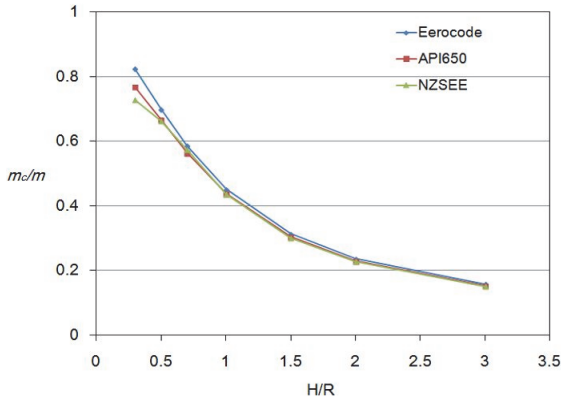


Fig. 2. Comparison of convective mass ratio

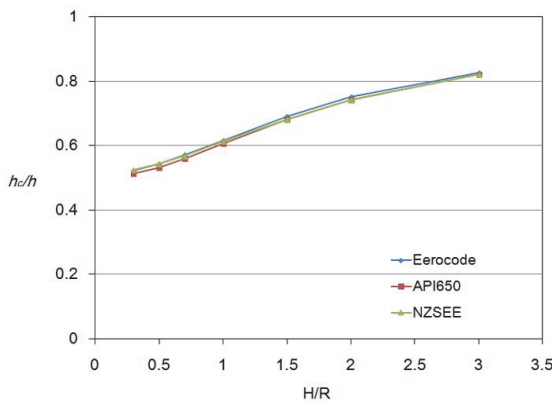


Fig. 3. Comparison of equivalent heights of convective mass

3.2 충격성분의 고유주기

Eurocode 8, API 650, NZSEE 각각의 설계기준에 제시된 원통형 액체저장탱크에서의 충격성분 고유주기는 다음과 같다.

- Eurocode 8^[1]

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho} H}{\sqrt{s/R} \sqrt{E}} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 액체의 질량 밀도이고, s 는 탱크 벽체의 등가 균일 두께이고, E 는 탱크 재료의 탄성계수이며, 계수 C_i 는 Table 3과 같다.

- API 650^[2]

$$T_i = \left(\frac{C_i H}{\sqrt{t_w/D}} \right) \left(\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \right) \quad (6)$$

Table 3. Coefficient of C_i in Eurocode 8^[1]

H/R	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
C_i	9.28	7.74	6.97	6.36	6.06	6.21	6.56	7.03

여기서, ρ 는 액체의 질량 밀도이고, t_w 는 탱크 쉘의 등가 균일 두께이고, E 는 탱크 재료의 탄성계수이며, 계수 C_i 는 Fig. 4와 같다.

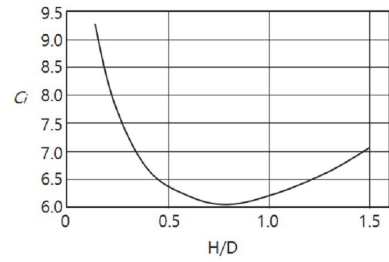


Fig. 4. Coefficient of C_i in API 650^[2]

- NZSEE^[3]

$$T_f = \frac{5.61\pi H}{k_h} \left(\sqrt{\frac{\gamma_l}{Eg}} \right) \quad (7)$$

여기서, γ_l 는 액체의 단위 중량이고, t_w 는 탱크 벽체의 두께이고, E 는 탱크 재료의 탄성계수이며, 계수 k_h 는 Fig. 5와 같다.

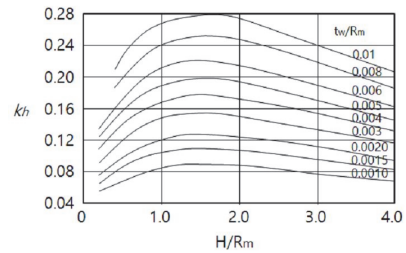


Fig. 5. Coefficient of k_h in NZSEE^[3]

각 설계기준에 제시된 식에 의하여 계산된 충격성분의 고유주기와 관련된 값을 H/R 과 t/R 에 따라 정리하여 Fig. 6에 나타내었다. Eurocode 8와 API 650에 의한 값은 동일하였으며, NZSEE에 의한 값은 Eurocode 8 및 API 650에 의한 값과 비교하면 다소 크게 나타나고 있다. 설계기준에 따른 차이는 최대 5.9%로 나타났으나, 전반적으로 유사하게 나타나고 있다.

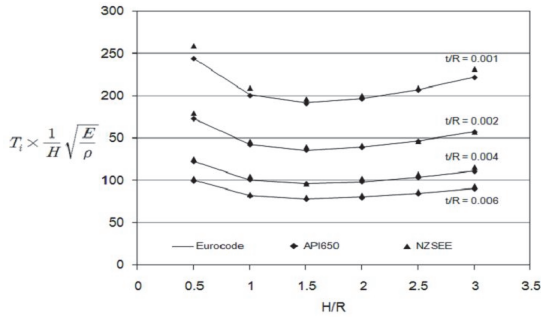


Fig. 6. Comparison of natural periods for impulsive component

전체 액체 질량에 대한 충격성분 질량의 비(m_i/m_t)는 각 설계기준에 따라 Fig. 7과 같이 구하여진다. Fig. 7에서 볼 수 있는 것과 같이 H/R 의 비가 1.5에서 각 설계기준에 의한 충격성분 질량의 최대값과 최소값의 차이가 6% 정도로 가장 크게 나타났으며, 전체적으로 유사한 경향을 보이고 있다. 전체 액체 질량에 대한 충격성분 질량은 H/R 의 비가 커짐에 따라서 증가하고 있다.

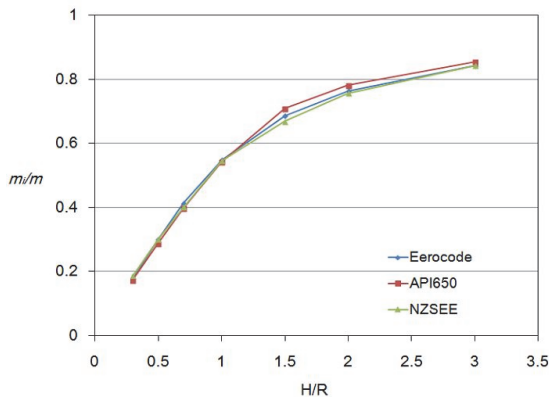


Fig. 7. Comparison of impulsive mass ratio

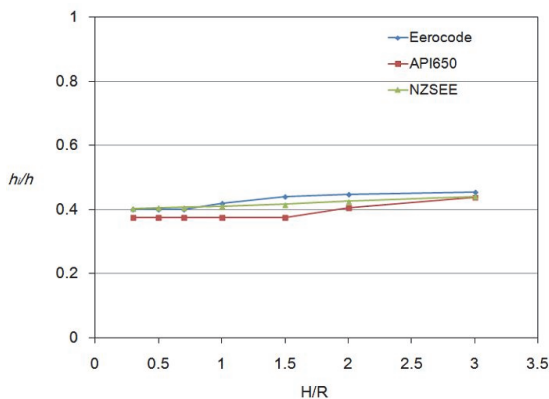


Fig. 8. Comparison of equivalent heights of impulsive mass

Fig. 8은 각 설계기준에 따른 충격성분의 질량이 작용하는 높이(h_i/H)를 나타낸 것이다. 충격성분의 질량이 작용하는 높이는 H/R 의 비가 증가함에 따라 증가하기는 하지만 변화는 크지 않게 나타나고 있다. H/R 의 비가 1.5에서 각 설계기준에 의한 충격성분 작용위치의 최대값과 최소값의 차이가 17.1%로 가장 크게 나타나고 있다. 전체적으로 충격성분의 질량이 작용하는 높이는 Eurocode 8에서 가장 크게 나타나고 있고, API 650에서 가장 작게 나타나고 있다.

설계기준에 따른 대류성분과 충격성분의 질량 및 각 성분이 작용하는 높이는 벽체의 높이에 따라 벽체에 작용하는 유체 동압력의 분포에 의하여 결정된다. 벽체의 높이에 따른 유체 동압력의 분포는 포물선 형태로 Housner의 연구에 기초하고 있으나^[8], 각 기준에서 유체 동압력 분포에 차이가 있고 이에 따른 영향으로 스프링-질량 형태의 역학적 모델에서의 값에도 차이를 보이고 있다.

3.3 감쇠비

Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 설계기준에서는 모두 대류 모드에 대하여 0.5%의 감쇠비가 지정되어 있다.

반면에 충격 모드에 대해서는 감쇠비가 탱크 구조물의 유형, 탱크 구조물의 재료 등에 따라서 다른 값으로 지정되어 있다. Eurocode 8에서는 RC 구조의 탱크 및 PSC 구조의 탱크에 대해서는 충격 모드에 대한 감쇠비로 5%를 사용하고, 강재 구조의 탱크에 대해서는 감쇠비로 2%를 사용하고 있다. ASCE 7에서는 모든 종류의 탱크에 대해서 충격 모드에 대한 감쇠비로 5%를 사용하도록 하고 있으며, 이에 따라 강재 탱크 구조물을 다루는 API 650도 충격 모드에 대한 감쇠비로 5%를 사용하고 있다. NZSEE에서 지상 탱크의 충격 모드에 대한 감쇠비를 탱크 구조물의 재료, 탱크 형상, 기초 지반의 특성에 따라 결정하여 사용하도록 하고 있고, 강재 구조의 탱크에 대해서는 감쇠비 2%를 사용하고 있다.

3.4 설계하중

Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 설계기준에 제시된 하중의 산출 방법은 다음과 같다.

- Eurocode 8^[1]

바닥 전단력 :

$$Q = (m_i + m_w + m_r)S_c(T_{imp}) + m_e S_c(T_{con}) \quad (8)$$

전도 모멘트 :

$$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) S_c(T_{imp}) + m_c h_c S_c(T_{con}) \quad (9)$$

여기서 m_i, m_c, m_w, m_r 는 각각 충격 모드의 질량, 대류 모드의 질량, 탱크 벽체의 질량, 탱크 지붕의 질량이며, h_i, h_c, h_w, h_r 는 각 질량과 관련된 무게 중심의 높이이고, $S_c(T_{imp}), S_c(T_{con})$ 는 충격 모드와 대류 모드에 대한 스펙트럼 가속도를 나타낸다.

위의 식에서 보는 바와 같이 Eurocode 8는 충격성분과 대류성분의 응답을 절대합산(absolute summation)하여 총 응답을 산출한다.

- API 650^[2]

바닥 전단력 :

$$V = \sqrt{[A_i(W_s + W_r + W_f + W_i)]^2 + [A_c(W_c)]^2} \quad (10)$$

전도 모멘트 :

$$M = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \quad (11)$$

여기서 W_c, W_f, W_i, W_r, W_s 는 각각 액체 무게의 유효 대류 부분, 탱크 바닥의 무게, 액체 무게의 유효 충격 부분, 고정 탱크 지붕 총 무게, 탱크 셸 및 부속물의 총 무게이고, X_c, X_f, X_i, X_s 는 각 하중과 관련된 횡방향 지진력의 작용 중심까지의 높이이다. A_i, A_c 는 충격 모드와 대류 모드에 대한 지반 가속도이다.

위의 식에서 보는 바와 같이 API 650은 충격성분과 대류성분의 응답을 SRSS(Square Root of Square sum) 규칙을 사용하여 총 응답을 산출한다. 참고로 ASCE 7은 총 응답은 계산에 절대합산(absolute summation)의 사용을 제시하고 있으나, SRSS(Square Root of Square sum)에 대한 언급도 되어 있다.

- NZSEE^[3]

바닥 전단력 : $V = \sqrt{[V_r + V_f]^2 + [V_1]^2} \quad (12)$

전도 모멘트 : $M = \sqrt{[M_r + M_f]^2 + [M_1]^2} \quad (13)$

여기서 V_r, V_f, V_1 는 각각 강체 충격 모드로 인한 전단력, 유연 벽체 충격 모드로 인한 전단력, 1차 대류 모드로 인한 전단력을 의미하고, M_r, M_f, M_1 는 각각 강체 충격 모드로 인한 전도 모멘트, 유연 벽체 충격 모드로 인한 전도 모멘트,

1차 대류 모드로 인한 전도 모멘트를 나타낸다.

위의 식에서 보는 바와 같이 NZSEE는 충격성분과 대류성분의 응답을 SRSS(Square Root of Square sum) 규칙을 사용하여 총 응답을 산출하고 있다.

각각의 설계기준은 강도설계법 및 허용응력설계법처럼 서로 다른 접근 방법을 사용함에 따라서 설계하중이 다르게 나타나고 있어 설계기준에 따른 설계하중의 직접적 비교는 쉽지 않다.

3.5 설계를 위한 계수

지진 발생시 유연한 액체저장탱크에는 일반적인 구조물보다 큰 하중이 작용하게 되고 손상 발생시 피해 규모가 크므로 설계기준 등에서는 높은 중요도 계수를 사용하고 있다.

Eurocode 8에서는 액체 저장 탱크를 액체의 종류에 따라 등급을 할당하고 있으며, 손상 발생시 예상되는 인명 및 경제적, 사회적, 환경적 위험에 따라 할당하여 0.8에서 1.6까지 범위의 아홉 가지 중요도 계수 값이 사용될 수 있다.

ASCE 7에서는 탱크를 기능 요구 사항과 그 내용물의 누출로 인한 위험에 따라 중요도를 세 가지로 분류 (I=1.5, 1.25 및 1.0)하고 있으며, API 650에서도 이와 동일하게 중요도 계수를 세 가지로 분류하여 제시하고 있다.

NZSEE에서는 0.5부터 1.6까지의 범위를 가지는 위험도 계수를 제시하고 있다. 이때 중요도 계수는 탱크 구조물의 파괴에 따른 결과가 무시될 수 있는가, 경미한가, 보통인가, 극심한가 등에 따라 결정되도록 되어있다.

4. 결론

강재 액체저장탱크의 내진설계에 관한 해외 주요 설계기준들을 분석한 결과 모두 유사한 모델링 방법을 제시하고 있으나, 설계법으로 허용응력설계법 또는 강도설계법이 사용되고 있어 각 설계기준에서의 설계절차 및 계수가 설계법에 따라 서로 다르게 제시되어 있다.

Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 모든 설계기준에서는 액체저장탱크 내부 유체의 모델링에 충격성분과 대류성분으로 분리된 스프링-질량 시스템 형태의 역학적 모델을 사용하고 있다. 설계기준에 따라서 충격성분의 질량의 산출에 강체 탱크 모델 또는 유연 탱크 모델이 사용되고 있으나, 충격 모드의 고유주기를 산출할 때에는 모두 벽체의 유연성

을 반영하고 있었다. 이에 따라서 액체저장탱크의 대류 모드 및 충격 모드의 고유 주기에는 큰 차이를 보이지 않는다. 대류성분과 충격성분의 질량 및 각 성분의 질량이 작용하는 위치는 각 설계기준에서 사용하는 유체 동압력 분포의 차이에 따라 일부 형상비에서 차이를 보이지만 전체적으로 유사한 값을 가진다. 그러나 설계법에 따른 영향으로 각 설계기준에서 사용되는 중요도 계수, 응답의 합산 등에서는 차이를 보이고 있다. 이러한 차이에 따라 설계하중 등의 직접적 비교는 어려웠으나, 강도설계법으로 되어 있는 ACSE 7와 허용응력설계법으로 되어 있는 API 650를 일부 비교하여 보면 유사한 수준의 안전율을 가지고 있는 것으로 판단되었다.

본 연구는 강제 액체저장탱크에 대한 국내 내진설계기준을 마련하기 위한 기초적인 주요 사항을 검토하고 차이점을 제시하였다는데 의의가 있다. 향후 마련될 강제 액체저장탱크에 대한 국내 내진설계기준은 허용응력설계법보다는 하중저항계수설계법을 사용함으로써 하중 및 저항 특성을 고려하여 강제 액체저장탱크의 신뢰도 수준을 일정하게 유지할 수 있도록 하는 것이 합리적일 것이라고 사료된다. 그러나 아직까지 국내에서는 구조물의 설계에 허용응력설계법이 일부 사용되고 있는 실정이므로 관련 전문가 및 기관의 지속적인 연구와 협의를 통하여 국내 실정에 맞는 실질적이고 합리적인 강제 액체저장탱크의 내진설계기준이 마련되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C077504-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 8 - Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines* (EN 1998-4), Belgium.
- [2] American Petroleum Institute (2007) *Welded Storage Tanks for Oil Storage* (API 650), USA.
- [3] New Zealand Society for Earthquake Engineering (2009) *Seismic Design of Storage Tanks*, NZSEE, New Zealand.
- [4] Oh, C.K., and Bae, D. (2014) Proposed Revisions to Fatigue Provisions of Orthotropic Steel Deck Systems for Long Span Cable Bridges, *International Journal of Steel Structures*, Vol.14, No.4, pp.811-819.
- [5] 이철호, 강기용, 김성용, 구철회(2013) 각형 콘크리트충전 강관기둥 부재의 구조설계기준 비교연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.389-398.
- Lee, C.H., Kang, K.Y., Kim, S.Y., and Koo, C.H. (2013) Review of Structural Design Provisions of Rectangular Concrete Filled Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.389-398 (in Korean).
- [6] 박장호(1997) 면진 및 비면진 직사각형 수조구조물의 동적 거동 해석, 박사학위논문, 서울대학교.
Park, J.H. (1997) *Analysis of the Dynamic Behavior of Isolated and Non-Isolated Rectangular Liquid Storage Structures*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea (in Korean).
- [7] Housner, G.W. (1957) Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, SSA, Vol.47, No.1, pp.15-35.
- [8] Housner, G.W. (1963) *Nuclear Reactors and Earthquakes*, Technical Information Document No. 7024, Appendix F: Dynamic Analysis of Fluids in Containers Subjected to Acceleration, U.S. Atomic Energy Commission, USA, pp. 367-390.
- [9] Rammerstorfer, F.G., Sharf, K., and Fisher, F.D. (1990) Storage Tanks Under Earthquake Loading, *Applied Mechanics Reviews*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.43, No.11, pp.261-282.
- [10] Malhotra, P.K., Wenk, T., and Weiland, M. (2000) Simple Procedure of Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks, *Structural Engineering International*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.10, No. 3, pp.197-201.
- [11] Manos, G.C., and Clough, R.W. (1985) Tank Damage During May 1983 Coalinga Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, International Association for Earthquake Engineering, Vol.13, No.4, pp.449-466.
- [12] Veletsos, A.S. (1984) *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, Chapter 7: Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks, American Society of Civil Engineers, USA, pp.255-370.

요 약 : 본 논문은 강제 액체저장탱크의 내진설계를 위하여 이용되고 있는 Eurocode 8, API 650, NZSEE 등의 해외 설계기준들의 설계방법들을 비교, 분석함으로써, 강제 액체저장탱크의 내진설계를 위한 국내 설계기준을 수립하기 위하여 필요한 주요 사항들에 대한 자료를 제공하고자 하였다. 각 설계기준에서는 강제 액체저장탱크의 내진설계를 위하여 충격성분과 대류성분을 이용한 단순화된 형태의 역학적 모델을 제시하고 있다. Eurocode 8, API 650 등의 설계기준에서는 두 개의 질량을 가지는 역학적 모델을, NZSEE에서는 세 개의 질량을 가지는 역학적 모델을 사용하고 있다. 또한 Eurocode 8, NZSEE은 강도설계법을 사용하고 있으며, API 650은 허용응력설계법을 사용하고 있어 하중 등에 대한 직접적인 비교는 적절하지 않아 역학적 모델에 대한 주요 인자들을 위주로 비교, 검토하였다. 역학적 모델은 설계기준에 따라 차이는 있으나 충격성분 및 대류성분의 질량 및 진동수 등은 유사하게 나타났다. 강제 액체저장탱크에 대한 국내 내진설계기준은 허용응력설계법보다는 하중저항계수설계법을 사용하고, 국내의 실정에 맞는 하중 및 저항 특성을 고려하여 강제 액체저장탱크의 신뢰도 수준을 일정하게 유지하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강제, 액체저장탱크, 내진설계, 설계기준, 역학적 모델
