



지진 하중을 받는 원통형 플랜트 탱크 구조물의 축방향 허용압축응력 설계기준 비교 연구

오창국¹ · 이소리² · 박장호³ · 배두병^{4*}

¹부교수, 국민대학교, 건설시스템공학부, ²석사과정, 국민대학교, 건설시스템공학부, ³교수, 아주대학교, 건설시스템공학과,
⁴교수, 국민대학교, 건설시스템공학부

Comparison of Allowable Axial Stress Provisions of Cylindrical Liquid Storage Tanks under Seismic Excitation

Oh, Chang Kook¹, Lee, So Ri², Park, Jang Ho³, Bae, Doobyeong^{4*}

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

²Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

³Professor, Dept. of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

⁴Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

Abstract - Stability of cylindrical liquid storage tanks under seismic excitation could prevent catastrophic disaster of human life and economic loss. Domestic provisions on allowable compressive stress in tank walls to prohibit buckling failure are either incomplete or inconsistent, so foreign specifications such as API 650, BS EN 1998-4:2006 or New Zealand Standards are employed in stability design. In this study, response spectrum analyses are performed for plant tanks having different ratios of height to diameter or diameter to thickness to calculate hydrodynamic pressure on tank walls. Then nonlinear buckling analyses are conducted to estimate magnitude of buckling stress. By comparing analysis results with those from foreign design specifications, appropriate domestic design provisions are suggested.

Keywords - Allowable axial compressive stress, Cylindrical liquid storage tanks, Nonlinear buckling analysis, Hydrodynamic pressure, Response spectrum analysis

1. 서 론

원통형 액체저장탱크(Cylindrical liquid storage tanks)는 물, 화학제품, 액화가스, 석유 등과 같은 다양한 종류의 액체를 저장하는 플랜트 내부의 주요 시설물 중의 하나이다. 이러한 플랜트 내 탱크 구조물이 지진 등과 같은 외력에 의해 내부 유체의 유출이 발생하는 경우에는 인명 손실뿐 아니라

Note-Discussion open until February 28, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 25, 2016; revised July 13, 2016; approved on July 18, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-910-4697 Fax. +82-2-910-4939

E-mail. dbbae@kookmin.ac.kr

경제적 손실을 초래하게 된다^{[1], [2]}. 이에 따라 탱크 구조물의 경우에는 일반 구조물에 비해 더 높은 안전성이 확보되어야 한다.

과거에 발생한 실제 지진에 의한 탱크의 피해 형태는 대부분 좌굴로 보고되고 있다^[3]. 좌굴은 다이아몬드 형태의 좌굴(diamond buckling)과 코끼리발형 좌굴(elephant foot buckling)로 나뉘어진다. 다이아몬드 형태의 좌굴은 분기형 좌굴(bifurcation buckling)로 탱크의 벽체에 다이아몬드 형상과 유사한 찌그러짐이 발생하는데, 주로 높이 대 직경비가 큰 높은 탱크에서 발생하였다. 코끼리발형 좌굴은 비선형 좌굴로 탱크의 바닥 부분의 벽체가 코끼리 발과 유사하게 불룩하게 부풀어 오르며 원주 방향으로 띠가 발생되어 파괴에 이르는 현상으로, 높이 대 직경비가 작은 넓은 탱크에서 주로 발생하였다. 두 가지 좌굴 중 코끼리발형 좌굴이 더 심각

한 피해를 초래하는 것으로 알려져 있다^[3]. 실제 발생한 지진에 의해 이러한 파괴가 발생하는 것은 현재 원통형 액체저장탱크 설계에 사용되는 설계기준이 지진에 의한 벽체의 좌굴거동을 정확하게 반영하지 못하고 있다는 반증이 된다.

지진 하중에 의한 원통형 액체저장탱크의 동적거동에 대한 연구는 1960년대 초부터 시작되었다. Housner는 원통형 액체저장탱크를 강체(rigid body)로 가정하고, 유체 동수압을 유체 자체의 진동성분인 대류성분(convective component)과 구조물 변형과 연계된 충격성분(impulsive component)으로 나누어 고려하였다^[4]. 그 이후 Veletos, Yang, Haroun, Housner, Malhotra, Natchigall, Maekawa 등에 의해 액체저장탱크의 동적거동에 대한 연구가 이뤄졌고, 실제 액체저장탱크에서 발생하는 유체동수압은 구조물 벽체의 유연성에 크게 의존한다는 것을 발견하였다^{[5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]}.

실제 플랜트 탱크 구조물은 직경 또는 높이에 비해 무척 얇은 판 또는 쉘로 설계/시공되기 때문에, 지진 등의 동적 하중에 대해 교량, 빌딩과 같은 일반적인 구조물과는 다른 거동 양상을 보인다. 뿐만 아니라, 지진에 의한 동적 해석시 내부 유체의 거동으로 인해 구조물-유체의 상호작용을 고려한 연성해석을 수행해야 하고, 이로 인해 발생하는 유체 동수압을 함께 고려해야 한다.

본 논문에서는 원통형 유체저장탱크에 대한 비선형 좌굴해석을 3차원 유한요소 모델을 이용하여 수행하였다. 구조물-유체의 상호작용을 고려하기 위해 응답스펙트럼해석을 통해 얻은 유체 동수압을 탱크 구조물에 자중과 정수압과 함께 가해 주었다. 해석을 통해 얻은 축방향 응력값을 설계기준에서 제안하고 있는 응력값과 비교, 분석하여 탱크의 좌굴거동에 대해 분석한 뒤 탱크 설계를 위해 적절하고 쉽게 적용할 수 있는 기준을 제안하였다.

2. 설계기준에 규정된 탱크벽체의 축방향 좌굴응력식

국내의 경우 탱크 구조물의 내진 설계를 위한 설계 기준으로 소방방재청에서 제정한 ‘위험물 안전관리에 관한 세부기준’^[13]과 한국표준협회에서 제정한 ‘KS B 6283 액체저장탱크의 내풍압 및 내진에 대한 설계 요건’^[14]등의 규정이 있으나, 일관성의 부족, 불명확한 근거 등으로 그 내용이 미비하여 실제 설계시 외국의 기준을 차용하고 있는 실정이다. 국외 기준으로는 미국의 API 650 (2007), 유럽의 BS EN

1998-4:2006와 뉴질랜드의 NZSEE(2009) 등을 주로 사용한다^{[15], [16], [17]}.

2.1 API 650(2007)

허용응력설계법에 의한 API 650(2007)^[15]에서는 탱크 쉘에 발생하는 압축응력에 관한 식을 Appendix E. Seismic design of storage tanks에 제시하고 있다. API 650(2007)에는 두께가 t (mm)인 벽체에서의 최대 축방향 쉘 압축응력값은 식 (1)에 의해 계산되어 지는 허용응력값 F_C (MPa)보다 작아야 한다고 규정하고 있다.

$$F_C = \begin{cases} \frac{83t_s}{D} & (GHD^2/t^2 \geq 44) \\ \frac{83t_s}{2.5D} + 7.5\sqrt{(GH)} < 0.5F_{ty} & (GHD^2/t^2 < 44) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, G 는 내부유체의 비중, H 는 탱크의 최대설계 높이(m), D 는 탱크의 공칭 직경(m), t_s 는 부식허용치를 제외한 탱크벽체 최하단부의 두께(mm)를 의미한다. 본 연구에서와 같이 벽체의 두께가 탱크 높이에 따라 변하지 않고 동일한 경우에는 $t = t_s$ 로 계산한다.

2.2 BS EN 1998-4:2006(NZSEE(2004))

극한한계설계법에 의한 BS EN 1998-4:2006과 NZSEE(2009)에 제시된 식의 형태는 거의 동일하다. BS EN 1998-4:2006의 경우 Annex A.10 탱크의 내진해석 부분에 원통형 탱크 벽체에 발생하는 좌굴응력 σ_m (MPa)을 식 (2)에 의해 계산된 값으로 규정하고 있다.

$$\sigma_m \leq \sigma_d \left[1 - \left(\frac{pR}{tf_y} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1.12 + s^{1.15}} \right) \times \left[\frac{s + \frac{f_y}{250}}{s + 1} \right] \quad (2)$$

여기서, σ_m 는 좌굴응력(MPa), $\sigma_d = 0.6E\frac{t}{R}$ 은 축 방향 압축력이 작용했을 때 두께가 t 인 원통형 실린더에 발생하는 임계 좌굴응력값을 의미한다. p 는 탄-소성 좌굴 응력 값을 구할 때 지진 거동에 의한 내부 유체 압력의 최대값(MPa), R 는 탱크의 반경(m), s 는 탱크 벽체 하단의 두께(m), f_y 는 탱크 벽체에 사용된 재료의 항복응력(MPa), $s = \frac{R/t}{400}$ 로 반경

과 두께의 합수이다. 특별히, p 값을 구할 때에는 아래의 식(3)을 이용한다.

$$p = p_{static} + \sqrt{p_i^2 + p_c^2 + p_v^2} \quad (3)$$

여기서 p_{static} 은 정수압(MPa), p_i 는 충격성분에 의한 수압(MPa), p_c 는 대류성분에 의한 수압(MPa), p_v 는 수직성분의 수압(MPa)을 의미한다.

NZSEE(2009)에서는 5.5절에 강재탱크의 좌굴응력 계산식이 식(4)와 같이 제시되어 있다. 식(2)의 BS EN 1998-4:2006과 비교하면, 우변의 두 번째 항 분모의 승수만 차이가 있고 동일한 형태의 식으로 규정되어 있으며, 탄-소성 좌굴에 관련한 응력 σ_m (MPa) 계산은 다음과 같다.

$$\sigma_m \leq \sigma_d \left[1 - \left(\frac{pR}{tf_y} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1.12 + s^{1.5}} \right) \times \left[\frac{s + \frac{f_y}{250}}{s + 1} \right] \quad (4)$$

BS EN 1998-4:2006과 NZSEE(2009)에 규정된 좌굴응력식은 각각 식(2)과 식(4)처럼 유사해 보이지만, 식(3)의 p 값을 구하는 방법은 서로 상이하다. 예를 들어, BS EN 1998-4:2006을 적용하는 경우에는 Bessel함수를 사용하는 등 그 과정이 무척 복잡하고, NZSEE(2009) 기준을 사용하는 경우에는 좌굴응력값을 계산하기 위해서는 부가적으로 NZS(2004)^[18]를 참고하여 내부 수압을 계산해야 한다. 본 논문에서는 상기한 두 종류의 설계기준 간 비교의 편의를 위해 제시된 식의 기호를 식(2)와 식(4)과 같이 동일하게 변경해 주었다.

API 650(2007)의 식(1)을 이용하여 산정한 값은 허용응력값이므로, BS EN 1998-4:2006과 NZSEE(2009)을 이용하여 구한 각각의 좌굴응력값을 안전율 1.5로 나누어 주어야 동등 비교할 수 있음에 유의해야 한다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델

지진 하중이 가해졌을 때 유체 거동에 의한 탱크 벽체의 좌굴응력을 구하기 위해 범용구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 탱크 모델링에는

Fig. 1과 같이 재료 비선형을 고려할 수 있는 4절점 SHELL181 요소를 탱크 벽체, 지붕 및 바닥에 사용하였고, 구조물과 유체의 상호작용을 고려하기 위해서 내부 유체 부분은 FLUID80 요소를 사용하였다^[19]. Fluid80요소는 8개의 절점을 가진 요소로 3차원의 구조 입체 요소(3-D Structural Solid Element)를 변형하여 유체의 정수압 및 동수압, 슬로싱(sloshing) 효과 등 지진에 의한 유체의 거동 효과를 고려할 수 있다^[19].

원통형 탱크는 비선형 재료 특성을 고려하기 위해서 완전 탄소성(perfectly elasto-plastic)으로 정의하였고, 탄성계수 $E=200\text{GPa}$, 항복응력 $\sigma_y=400\text{MPa}$, 포아송비 $\nu=0.3$ 을 사용하였다. 탱크 내부의 유체는 벽체 높이의 85%까지 채우는 것으로 가정하였다. 탱크의 물성치와 재원 등은 Table 1에 정리하였다.

탱크의 좌굴응력에 영향을 미치는 변수로 알려진 높이 대 직경비(H/D)와 직경 대 두께비(D/t)를 고려한 변수해석을

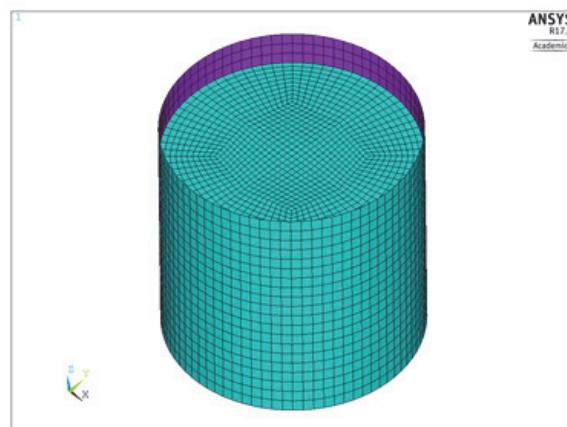


Fig. 1. 3-dimensional finite element tank model

Table 1. Dimension and material properties of the 1st tank model

	Items	Values
Tank	Height, H(m)	10.0
	Diameter, D(m)	10.0
	Thickness t(m)	0.004
	E(GPa)	200
	ν	0.3
	$f_y(\text{MPa})$	400
Internal fluid	Fluid height, h(m)	8.5
	Density, ρ (kg/m^3)	1000

Table 2. Dimension of tanks with different ratios of H/D

No.	H/D	D/t	H(m)	D(m)	t(m)
T1	1	2500	10	10	0.004
T2	0.5	2500	10	20	0.008
T3	0.25	2500	10	40	0.016

Table 3. Dimension of tanks with different ratios of D/t

No.	H/D	D/t	H(m)	D(m)	t(m)
T4	0.5	2000	10	20	0.0100
T5	0.5	2200	10	20	0.0091
T6	0.5	2500	10	20	0.0080
T7	0.5	2700	10	20	0.0074

수행하기 위하여 Table 1의 기본 탱크(T1)를 포함한 6가지 해석 모델(T2와 T6는 동일함)의 재원을 Table 2와 Table 3에 열거하였다. 먼저, H/D의 영향을 알아보기 위해 동일한 D/t값을 갖는 3가지 형상의 탱크 T1, T2, T3에 대한 해석을 수행하고, D/t에 대한 변수해석을 위해 동일한 H/D를 갖는 4가지 형상의 탱크 T4, T5, T6, T7에 대해서도 별도의 해석을 수행하였다.

탱크 벽체와 유체가 접촉하는 부분은 Fig. 2의 (a)와 같이 동일한 좌표를 갖는 탱크 벽체 노드와 유체 노드의 자유도를 실린더좌표계에서 방사방향(radial direction)으로 연결(couple)시켜주어, 유체–구조물 상호작용에 의한 각 요소의 움직임이 동일하도록 모델링 하였다. 탱크 바닥부분과 유체가 접촉하는 부분의 노드도 Fig. 2의 (b)와 같이 실린더좌표계에서 수직방향(vertical direction)으로 구속시켜주었으며 이외의 방향에 대한 움직임은 구속하지 않았다. 또한, 탱크 바닥과 기초간의 경계조건은 완전 고정(fixed)으로 가정하였다. 이를 위하여, 탱크의 바닥 노드만을 선택하여 바닥에 완전 고정되어 있는 형태로 경계조건을 입력해 주었다.

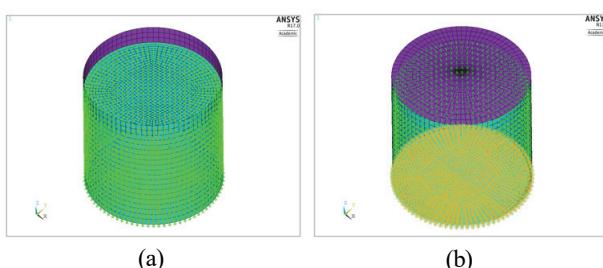


Fig. 2. Coupled degree of freedom at interfaces between (a) the tank wall and internal fluid and (b) the tank bottom and the contained fluid

3.2 응답스펙트럼해석

지진에 의해 발생하는 탱크–유체간의 상호작용을 고려한 동적거동 해석을 수행하기 위해 응답스펙트럼해석을 수행하고 그로 인한 유체 동압력의 분포를 산정하였다. 수평방향의 설계응답스펙트럼으로는 국내 구조물의 내진설계에서 일반적으로 사용되는 미국 원자력구제회의(U.S. Nuclear Regulatory Commission)에서 제공하는 응답스펙트럼을 최대 가속도 0.3g, 감쇠비 5%로 설정하여 사용하였다^[20].

수평방향의 동수압성분과 수직방향의 동수압성분은 개별적인 응답스펙트럼해석을 각 방향별로 수행하여 산정하였다. 수직방향 동수압을 구하기 위해서 수평방향 설계응답스펙트럼의 2/3에 해당하는 값을 입력해 주었다. 이러한 과정을 통해 산정한 T1 탱크에 대한 수평방향 동수압력분포와 수직방향 동수압력분포를 Fig. 3의 (a)와 (b)에 각각 도시하였다.

3.3 비선형 좌굴해석

선형좌굴해석은 이상적으로 거동하는 탄성 구조물에 대한 고유치 문제를 풀어서 이론적 좌굴강도를 구하는 해석 방법이다. 하지만, 실제 구조물은 제작 오차, 판 두께의 불균일한 오차, 경계조건의 불완전성, 하중의 편심, 용접에 의한 잔류응력 발생, 설치 오차 등 직·간접적인 요인에 의해 불가피한 초기 결함(initial imperfection)이 존재하고, 이러한 결함은 선형좌굴해석에서 구한 구조물의 임계좌굴값에 도달하기 전에 좌굴을 유발하는 중요한 요인이 된다.

본 연구에서는 이러한 결함을 보완하기 위해 재료 비선형과 기하 비선형을 고려한 비선형좌굴해석을 수행하였다. 제

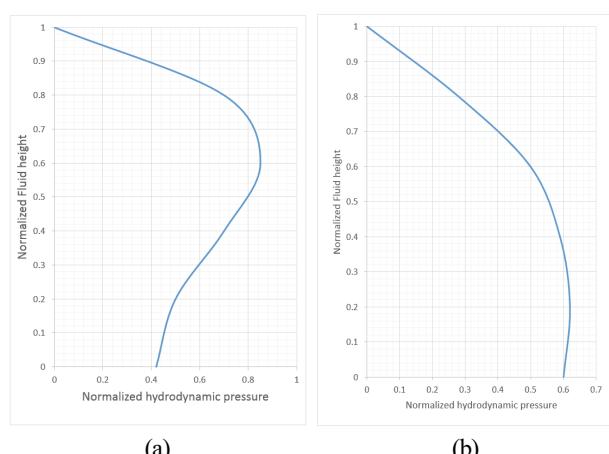


Fig. 3. Hydrodynamic pressure for T1 in (a) horizontal and (b) vertical directions

작 오차 등의 초기 결합은 자중과 정수압이 가해진 실구조물의 변형에 비해 상대적으로 그 크기가 작기 때문에, 지진 하중이 가해지기 전 자중과 정수압만 작용하는 구조물의 변위 형상을 초기 결합 형상으로 사용하였다.

구조물에 가해지는 하중은 식(5)와 같이 자중과 정수압에 응답스펙트럼해석으로 구한 수평, 수직 방향의 동수압을 추가하였다. 이 때, λ 를 증가시킴으로써 탱크 모델에 작용하는 지진에 의한 유체 동수압의 크기를 점진적으로 증가시켰다. 수평방향의 동수압의 경우 Fig. 4에 보이는 것처럼 높이별 변화와 더불어 탱크의 원주방향별 변화도 고려하여 식(5)와 같이 입력하였다.

$$p = p_{static} + \lambda(p_{H\ dynamic} \cdot \cos\theta + p_{V\ dynamic}) \quad (5)$$

여기서, p_{static} , $p_{H\ dynamic}$, $p_{V\ dynamic}$ 은 각각 정수압과 수평, 수직방향 유체 동수압을 나타내고, λ 는 동수압의 영향을 점진적으로 증가시키기 위한 계수이다. 특별히 수평방향의 동수압은 가진방향과 해석에 사용된 벽체요소가 이루는 각 θ

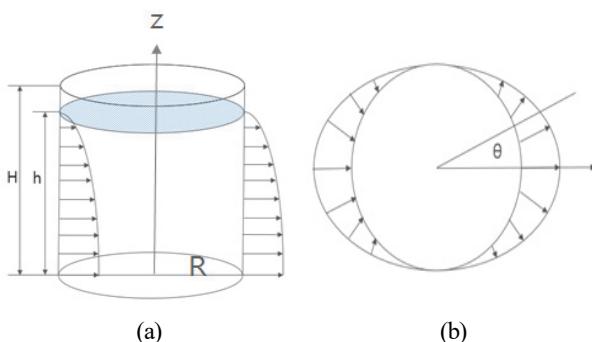


Fig. 4. Applied pressure distribution in (a) vertical and (b) radial directions

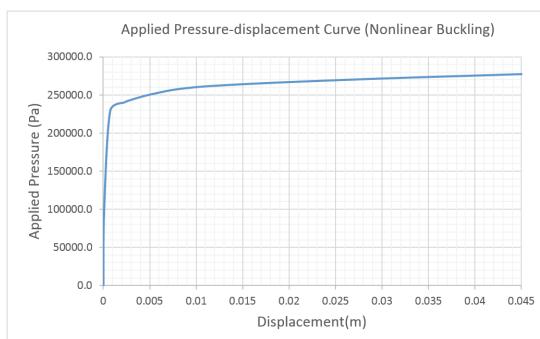


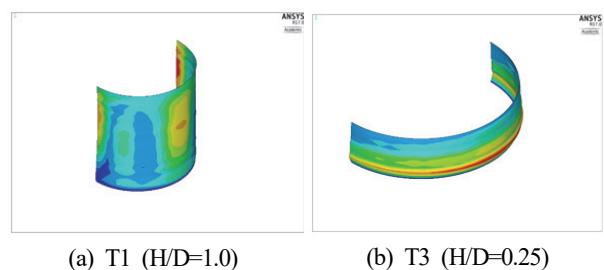
Fig. 5. Applied pressure-displacement curve for nonlinear buckling

의 영향을 고려하여 압력이 요소에 법선방향으로 작용하도록 하였다. 반면 수직방향 동수압의 경우 θ 의 영향이 없이 방사방향으로 동일한 값을 갖기 때문에, 높이 변화만을 고려한 값을 사용하였다.

자중과 정수압에 점진적으로 증가하는 동수압을 가해준 후, 축방향 응력이 가장 크게 발생되는 위치(즉, 탱크 벽체의 하단부)에서 가한 힘과 수평방향 변위와의 관계를 Fig. 5과 같이 도시하였다. 비선형좌굴해석에서 좌굴하중(본 연구에서는 좌굴을 유발하는 유체 동수압)은 Fig. 5에서 하중-변위 곡선의 수평한(또는 거의 수평한) 하중값에 해당한다^[21].

3.4 해석결과분석

Fig. 6과 Fig. 7에는 좌굴 하중에 도달했을 때 탱크에 발생한 최대변형을 나타냈다. Fig. 6의 결과는 D/t의 값은 2500으로 동일하고 H/D의 값이 1.0인 T1 모델(a)과 0.25인



(a) T1 (H/D=1.0) (b) T3 (H/D=0.25)

Fig. 6. Parametric study results for different H/D ratios: deformation in the radial direction

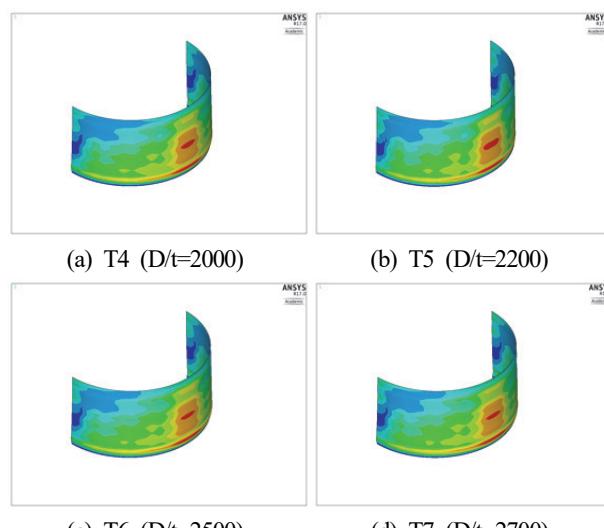


Fig. 7. Parametric study results for different D/t ratios: deformation in the radial direction

T3 모델(b)에서 발생하는 최대 변형을 나타낸 것이다. T2의 결과는 Fig. 7의 T6의 결과와 동일하다. 결과를 통해 볼 수 있는 바와 같이 H/D 값이 작아지면, 즉, 더 넓은 탱크의 경우, 탱크 벽체 하단에 최대 변형이 생기고, 이로 인한 코끼리발형 좌굴이 발생하게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7의 결과는 H/D 의 값은 0.5로 동일하고, D/t 의 값이 각각 2000, 2200, 2500, 2700인 T4(a), T5(b), T6(c), T7(d) 모델에 대한 해석 결과이다. D/t 값의 변화와 관계없이 모든 탱크에서 코끼리발형 좌굴로 인한 변형을 확인할 수 있다. Fig. 8에 T6 모델에서 발생하는 코끼리발형 좌굴 형상을 추가하였다. Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 종합해 볼 때 코끼리발형 좌굴을 유발하는 액체저장탱크의 주된 설계 변수는 H/D 값임을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에 비선형좌굴해석을 통해 좌굴하중이 가해졌을 때 탱크 요소에서 발생되는 축방향 응력의 최대값을 각각의 탱크에 대해 계산한 후 그 값을 API 650(2007), BS EN 1998-4:2006과 NZSEE(2004)에 규정된 값과 비교하였다. 유체저장탱크의 좌굴에 의한 파괴를 방지하기 위해서는 비선형좌굴해석에 의한 결과값이 설계기준에서 규정한 허용응력값보다 커야 하므로, Fig. 9에 의하면 H/D 가 0.25 와 0.5인 경우에는 API 650(2007)만 안전측의 결과를 제시하고 있다고 판단할 수 있다. 하지만, H/D 가 1인 경우에는 API 650(2007)의 경우에도 다른 기준과 마찬가지로 비안전측의 결과가 도출된다. 이러한 현상은 API 650(2007)이 코끼리발형 좌굴과 밀접한 관련이 있는 형상 변수인 H/D 에 대한 영향을 고려하지 못하기 때문으로 판단되며(식 (1) 참조), 새롭게 제안할 설계기준식에서는 H/D 를 변수로 하는 허용

응력값 산정식이 필요하다는 사실을 뒷받침한다. 실제 지진 발생시 코끼리발형 좌굴이 넓은 탱크에서 주로 발생하고 있음에도 불구하고, API 650(2007)을 포함한 국외 설계기준 모두 H/D 에 따라 허용응력값이 거의 변하지 않는 식을 제안하고 있는 점은 개선해야 할 사항이라고 판단된다.

Fig. 10에는 D/t 의 변화에 대한 허용좌굴응력값을 해석에 의해 산정한 값과 국외 설계기준에서 제시하고 있는 값들과 함께 도시하였다. Fig. 9의 결과와 마찬가지로 BS EN 1998-4:2006과 NZSEE(2004)은 비안전측의 결과를 도출하고 있으며, API 650(2007)의 경우에도 D/t 가 2700인 경

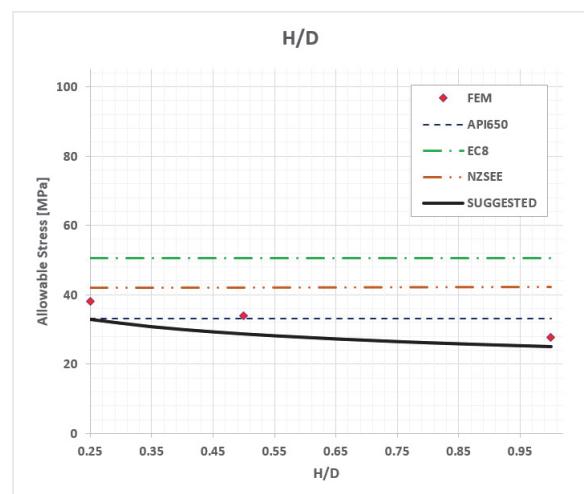


Fig. 9. Allowable axial stress w.r.t. different H/D values obtained from finite element analysis, API650, Eurocode8 and NZSEE with a suggestion

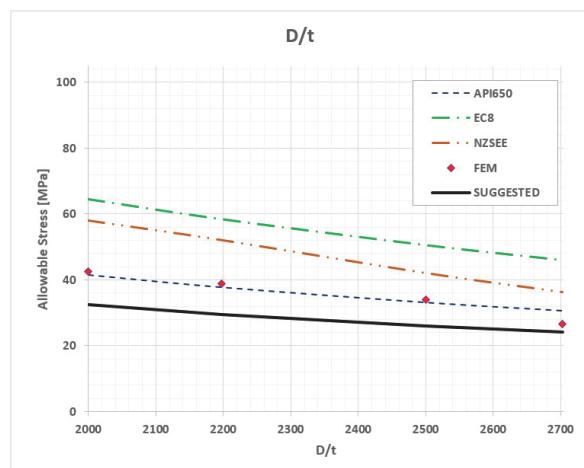


Fig. 10. Allowable axial stress w.r.t. different D/t values obtained from finite element analysis, API650, Eurocode8 and NZSEE with a suggestion

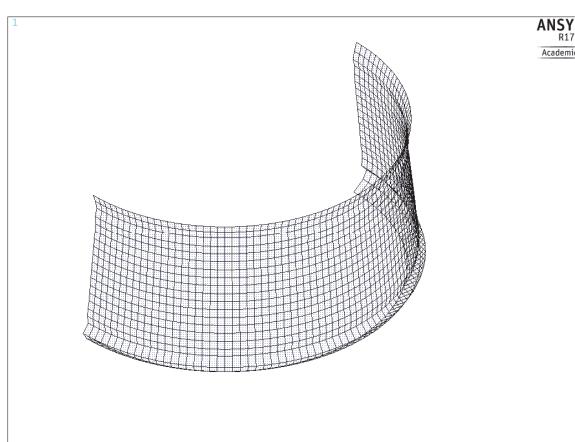


Fig. 8. Elephant foot buckling for the T6 model

우에는 비안전측의 결과가 확인되기 때문에 API 650(2007)의 설계식에 기반하여 모든 경우의 해석 결과가 안전측에 속 할 수 있도록 식 (6), 식 (7), 식 (8)과 같이 축방향 허용좌굴 응력식을 제안하였다.

$$F_a = \min (F_a^1, F_a^2) \quad (6)$$

$$F_a^1 = 25 \left(\frac{D}{H} \right)^{0.2} \quad (7)$$

$$F_a^2 = \begin{cases} \frac{65t_s}{D} & (GHD^2/t^2 \geq 44) \\ \frac{65t_s}{2.5D} + 6.0\sqrt{(GH)} < 0.5F_{ty} & (GHD^2/t^2 < 44) \end{cases} \quad (8)$$

제안한 식은 API 650(2007)에 규정된 식과 유사한 형태로 표현해서 일관성을 유지하도록 하였고, 코끼리발형 좌굴에 대한 주된 변수로 판단되는 H/D에 대한 식을 추가하였다.

Fig. 9와 Fig. 10에 새롭게 제안한 식을 해석결과 및 기준 설계기준식과 함께 도시하여 비교하였다. 제안한 식을 사용하는 경우에는 본 연구에서 사용된 H/D, D/t가 다른 모든 탱크에 대해 적절한 좌굴안정성이 확보되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 H/D와 D/t를 갖는 원통형 유체 저장탱크에 지진하중이 가해졌을 때 발생하는 허용좌굴응력에 대한 국내 기준을 제안하기 위해 (1) 구조물-유체 상호작용을 고려한 응답스펙트럼해석을 수행하여 내부 유체가 탱크 벽체에 가하는 동수압 분포를 산정하고, (2) 재료 비선형과 기하 비선형을 고려한 비선형좌굴해석을 수행한 뒤, (3) 유한요소해석에서 산정된 축방향 허용응력값을 설계기준에서 제안된 값들과 비교·분석하여 주된 설계 변수를 도출하고, (4) 이에 따라 설계자들이 사용하기 편리한 국내 기준을 제안하였다.

유한요소해석 결과 및 기준의 API 650(2007), BS EN 1998-4:2006과 NZSEE(2004)에 제시된 축방향 좌굴응력 설계기준식에 기반하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) H/D에 대한 유한요소 변수해석 결과를 통해 H/D값이 상대적으로 작은 낮은 탱크의 경우, 코끼리발형 좌굴이 탱크 벽체 하단부에 생기고, 상대적으로 H/D값이 큰 높은 탱크의 경우에는 코끼리발형 좌굴보다는 탱크 벽체 상단부분에 분기형 좌굴 형태가 발생하는 것을 확인하였다.
- (2) D/t에 대한 변수해석 결과 D/t 값의 변화와는 무관하게 모두 코끼리발형 좌굴형태가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, H/D와 D/t에 대한 변수해석 결과를 비교해 볼 때 코끼리발형 좌굴을 유발하는 액체 저장탱크의 주된 설계 변수는 H/D값인 것을 확인하였다.
- (3) 유한요소해석 결과와 기존의 국외 설계 기준들을 비교해 본 결과, BS EN 1998-4:2006과 NZSEE (2004)을 이용하는 경우와 API 650(2007)을 이용하여 설계한 일부 경우에는 비안전측 좌굴응력값이 산정될 수 있으며, 실제로 과거에 발생한 지진에 의해 코끼리발형 좌굴 파괴가 발생한 사실에 비추어볼 때 기존의 설계기준이 지진에 의한 벽체의 좌굴 거동을 정확하게 반영하지 못하고 있을 수 있음을 확인했다.
- (4) 해석 결과에 기반하여 코끼리발형 좌굴에 대한 주된 설계변수인 H/D의 영향을 포함하고, 기존의 설계기준식과 일관성이 유지되며, 설계자의 편의를 고려한 축방향 허용좌굴응력식을 제안하였다.

연구 결과를 종합해 볼 때, 코끼리발형 좌굴을 방지하기 위해서는 새롭게 제안한 식에 의해 축방향 허용좌굴응력을 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 추후에는 본 연구에 대한 실험 검증을 거쳐 제안된 식에 대하여 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출할 뿐 아니라, 본 연구에서 주로 고려하지 않았던 높은 탱크에 대한 해석을 통해 분기형 좌굴이 지배적인 경우에 대한 축방향 허용좌굴응력에 대한 연구가 추가로 수행 될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] 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.
- [2] Manos, G.C., Shibata, H., and Shigeta, T. (1989) Correlation of Cylindrical Tank Wall Buckling with an Earthquake Motion Recorded at a Small Distance from the Tank, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, International Association for Earthquake Engineering, Vol.18, No.2 pp.169-184.
- [3] 김승억, 최동호, 이동원(2000) 지진 하중을 받는 유체저장탱크 거동 연구에 대한 고찰, 대한토목학회논문집 A, 대한토목학회, 제20권, 제4A호, pp.607-619.
Kim, S.E., Choi, D.H., and Lee, D.W. (2000) State of the Art Review on Behavior of Liquid Storage Tanks Subjected to Earthquake Load, *Journal of Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.20, No.4A, pp.607-619 (in Korean).
- [4] Housner, G.W. (1963) The Dynamic Behavior of Water Tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, SSA, Vol.53, No.2, pp.381-387.
- [5] Veletsos, A.S., and Yang, J.Y. (1977) Earthquake Response of Liquid Storage Tanks, *Advances in Civil Engineering Through Mechanics (Proceedings of the 2nd Engineering Mechanics Specialty Conference)*, American Society of Civil Engineers, USA, pp.1-24.
- [6] Haroun, M.A., and Housner, G.W. (1981) Earthquake Response of Deformable Liquid Storage Tanks, *Journal of Applied Mechanics*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.48, No.2, pp.411-418.
- [7] 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.
- [8] Malhotra, P., and Veletsos, A.S. (1994) Uplifting Response of Unanchored Liquid-Storage Tanks, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.120, No.12, pp.3525-3546.
- [9] Natchigall, I., Gebbeken, N., and Urrutia-Galicia, J.L. (2003) On the Analysis of Vertical Circular Cylindrical Tanks Under Earthquake Excitation at its Base, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.25, No.2, pp.201-213.
- [10] Housner, G.W., and Haroun, M.A. (1978) Vibration Tests of Full-Scale Liquid Storage Tanks, *Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, USA, pp. 137-145.
- [11] Morita, H., Ito, T., Hamada, K., Sugiyama, A., Kawamoto, Y., Ogo, H., and Shirai, E. (2003) Investigation on Buckling Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks Under Seismic Excitation, 2nd Report: Investigation on the Nonlinear Ovaling Vibration at the Upper Wall, *Proceedings of 2003 Pressure Vessels and Piping Conference*, American Society of Mechanical Engineers, pp.227-234.
- [12] Maekawa, A., Suzuki, M., and Fujita, K. (2006) Nonlinear Vibration Response of a Cylindrical Water Storage Tank Caused by Coupling Effect Between Beam-Type Vibration and Oval-Type Vibration, Part 1: Vibration Experiment, *Proceedings of 2006 Pressure Vessels and Piping Conference*, American Society of Mechanical Engineers, pp.329-338.
- [13] 위험물안전관리에 관한 세부기준(2013).
Detailed Guideline for Safety Control of Hazardous Substances (2013, Republic of Korea, in Korean).
- [14] 국가기술표준원(2006) 액체저장탱크의 내풍압 및 내진에 대한 설계요건(KS B 6283: 2006).
Korean Agency for Technology and Standards (2006) *Design Requirements for Windpressure-Proof and Earthquake-Proof of Liquid Storage Tanks* (KS B 6283: 2006), Korea (in Korean).
- [15] American Petroleum Institute (2007) *Welded Storage Tanks for Oil Storage* (API 650), USA.
- [16] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 8 - Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines* (EN 1998-4), Belgium.
- [17] New Zealand Society for Earthquake Engineering (2009) *Seismic Design of Storage Tanks*, NZSEE, New Zealand.
- [18] Standards New Zealand (2004) *Structures Design Actions, Part 5: Earthquake Actions* (NZS 1170.5: 2004), New Zealand.
- [19] ANSYS (2013) *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*, ANSYS Inc., USA.
- [20] U.S. Nuclear Regulatory Commission (2014) *Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, US NRC, USA.
- [21] Galambos, T.V. (1988) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* (5th Ed.), John Wiley & Sons, USA.

요 약 : 전플랜트 내부의 주요 시설물인 원통형 액체저장탱크에 지진 하중이 작용하면 탱크 벽체에 좌굴이 발생하여 큰 손실을 초래할 수 있다. 탱크 구조물 설계시 좌굴에 대한 허용응력을 규정한 국내 기준은 일관성이 부족하고 근거가 미약하여 주로 국외의 API 650, BS EN 1998-4:2006, 뉴질랜드 기준 등을 차용하고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 형상 비를 갖는 탱크 구조물에 대해 응답스펙트럼해석을 수행하여 유체 동압력을 산정한 후 재료 및 기하비선형을 고려한 비선형 좌굴해석을 수행하여 축방향 허용좌굴응력을 산정하고 국외 기준과의 비교를 통해 적절한 국내 기준을 제안하였다.

핵심용어 : 인축방향 허용압축응력, 원통형 액체저장탱크, 비선형 좌굴해석, 유체 동압력, 응답스펙트럼해석
