

액체저장탱크의 내진설계 프로그램 개발

박종률* (현대엔지니어링(주) 화공플랜트부 기계부), 오택열 (경희대 기계산업시스템부)

Seismic Design Program for Oil Storage Tank

J. R. Park(Mech. Dept., Chemical Plant, HEC), T. Y. Oh(Mech. & Ind. System Dept., KHU)

ABSTRACT

Under earthquake excitations, the hydrodynamic pressure exerted on the flat bottom vertical-cylindrical oil storage tank walls produces overturning moment which may cause either a failure of the anchors or a buckling of the tank shell near its base. The basis for establishing design loads due to hydrodynamic pressure is described including seismic zone risk map in Korea, zone coefficients and the essential facilities factor. This procedure for calculating applied compressive stress on the shell base subjecting to seismic load and for estimating the allowable buckling stress is described. And seismic design program for the tanks is presented.

Key Words : Impulsive Pressure (충격압), Convective Pressure (이류압), Sloshing Frequency (요동진동수), Seismic Overturning Moment (지진전도모멘트), Buckling (좌굴)

1. 서론

액체를 저장하는 여러 다른 구조물 중에서 지반에 지지되어 있고 밑판이 평평한 얇은 두께로 된 직립 원통 탱크는 저장액체에 의해 생기는 유체 정압을 지지하는데 매우 효과적이기 때문에 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다.

화학플랜트에 설치되는 강제 석유 저장용 탱크에 대한 각국의 설계규격으로는 미국의 API Std. 620, API Std. 650, 일본의 JIS B 8501, 한국 산업규격 KS B 6225(강제 석유 저장탱크의 구조) 등이 있다. 선진국 혹은 지진이 많이 발생하고 있는 국가들은 대체로 자국의 지진 상황에 적합한 내진설계 기준 및 절차를 명기하고 있다. 그러나 한국 산업규격 KS B 6225(강제 석유 저장탱크의 구조)에서는 탱크 몸통의 강도 설계 시, 지진시의 액면 요동과 동압을 고려하여야 한다고 명시하고 있으나 구체적인 절차나 수식을 제안하고 있지 않고 있다.

최근 박종률^(1, 2)은 "강제 석유 저장 탱크(KS B 6225)의 내진 설계 기준 개선 안"을 발표하여 국내 실정에 적합한 탱크의 내진설계절차를 제안하였다.

액체저장탱크의 설계는 탱크의 용도와 구조적 다양성으로 인하여 어떤 정형화된 계산순서에 의하여

동일 내용을 반복적으로 실시되는 예는 매우 적어 상용화수준의 설계프로그램의 개발에 장애요인이 되고 때문에 세계적으로 상용화된 프로그램은 수는 매우 적다. 국내에서는 박종률에 의해 1989년 API Std. 650, App. E의 모체가 된 Housner⁽³⁾, Wozniak과 Mitchel⁽⁴⁾의 이론에 근거하여 DOS용으로 "TANK650"이라는 프로그램으로 상용화수준의 프로그램이 개발되었고, 그 동안 계속 수정, 보완되어 현재 Window용으로 국내에서 유일하게 상용화되어 10여 개 회사에서 국내외 프로젝트에 사용하고 있다.

본고에서는 이미 상용화되어 검증이 된 "TANK650" 프로그램의 로직을 응용하여 박종률이 제안한 내진 설계의 이론 수식 및 절차를 기초로 하여 탱크의 내진설계 프로그램을 개발하였다.

2. 내진설계 범위 및 설계하중

2.1 내진설계 범위

구조물의 내진설계방법⁽⁵⁾은 보수적인 방법인 등가정적해석(equivalent static analysis)과 동적해석으로 대별된다. 액체저장탱크에 대해서는 일반적으로 선진국 혹은 국제원자력기구에서도 보수적인 방법인 등가정적해석을 채용하고 있다. 따라서 본고에서도

보수적인 설계방법을 채용했다.

액체저장탱크의 내진설계에 대한 기본개념은 지진에 견딜 수 있도록 강도, 강성 및 연성으로 병기할 수 있는 계의 능력을 평가하는 것이다.

앵커가 된 탱크의 경우, 지진에 의한 주요 파손은 탱크 옆판의 바닥 근처에서 발생하는 코끼리 발형 좌굴(elephant foot buckling), 그리고 간혹 앵커 볼트가 늘어나는 것이다. 이러한 파손 형태는 탱크 옆판과 밑판 위에 있는 유체로 인해 일어난 지진의 전도모멘트에 의한 것이다. 따라서 지진에 대한 탱크의 안전도를 평가하는 주 관심은 전도모멘트와 이 모멘트를 견딜 수 있는 옆판의 강도이다.

2.2 설계하중

Fig. 1과 같이 밑판이 평평하고 원통인 액체저장탱크의 지진응답은 일반 구조물의 지진응답과는 매우 다르다. 액체 저장 탱크가 지진하중을 받을 때, 저장 액체의 진동 운동은 탱크 구조물을 통해 액체에 작용되는 지진 가속도에 의해 발달된다. Fig. 2과 같이 이 액운동은 두 가지 형(mode)으로 나눌 수 있다. 첫 번째 것(mode 0)은 충격형(impulsive mode)으로 정의되는데 탱크 구조물의 운동과 조화되게 움직이는 액체 입자들의 운동에 의한 운동이다. 두 번째 것(mode 1, 2,...)은 이류형(convective mode) 혹은 보통 액체요동(sloshing)으로 부르는 것으로 정의되는데 수직으로 요동하는 자유액면 근처에서의 액체 입자들의 운동에 의한 운동이다.

내진설계는 충격형하중과 이류형하중의 산정에서부터 시작된다. 이를 하중을 산정하기 위한 기본 데이터는 탱크의 직경, 내용액체의 높이, 내용액체의 비중, 지진가속도, 지반형태 및 기기의 중요도이다.

3. 전도모멘트 및 옆판 압축응력

3.1 전도모멘트

지진시 충격하중과 이류하중에 의해 발생한 탱크

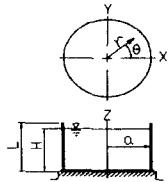


Fig. 1 Cylindrical Tank and Coordinate System

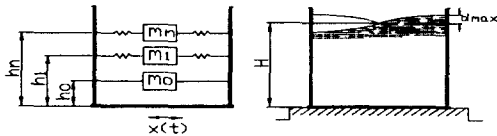


Fig. 2 Equivalent Model and Fluid Motion

의 옆판 최하단 바닥에서의 전단력과 전도모멘트는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$V = ZI(C_0 W_s + C_0 W_r + C_0 W_0 + C_1 W_1) \quad (1)$$

$$M = ZI(C_0 W_s X_s + C_0 W_r H_t + C_0 W_0 h_0 + C_1 W_1 h_1) \quad (2)$$

여기서,

V = 전단력(kg)

M = 전도모멘트(kg · m)

Z = 지진구역계수

I = 중요도계수

C_0, C_1 = 수평력계수

W_s = 탱크옆판무게(kg)

W_r = 탱크지붕무게(kg)

W_0 = 충격력 질량의 등가무게(kg)

W_1 = 이류력 질량의 등가무게(kg)

X_s = 탱크옆판 무게중심높이(m)

H_t = 탱크옆판높이(m)

h_0 = 충격력 작용높이(m)

h_1 = 이류력 작용높이(m)

3.2 한반도 지진구역도 및 지진구역계수(Z)

1987년 건설부에서 발표한 한반도지진구역도 및 지진구역계수는 Fig. 3에 보여주고 있다⁽⁶⁾. 한반도의 지진구역계수(seismic zone factor), Z 는 그 구역에 지진통계치를 이용하여 50년동안 10%이상 발생할 가능성이 있는 유효최대지진가속도를 나타낸다.

구역0은 $Z=0.04$, 구역1은 $Z=0.08$, 구역2는 $Z=0.12$ 이다.

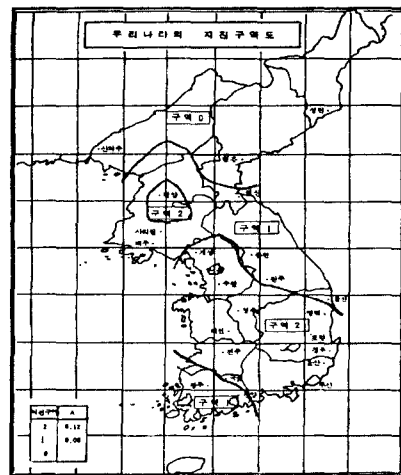


Fig. 3 Seismic Zone Map

3.3 시설의 중요도 계수(I)

중요도계수(importance factor), I 는 지진시 이 구조물이 지탱하는 것이 얼마나 중요한가를 계수로 나타낸 것이다. 지진의 재현주기 500년을 기준으로 해서 매우 중요한 시설이 아닌 경우 보통 탱크에 대해서는 $I=1.0$ 을 취한다. 그리고 I 값은 시설의 위험도 및 중요도에 따라 증가시킬 수 있는데 최대 $I=1.25$ 를 취하는 것이 적합하며 이는 재현주기 750년에서의 I 값에 해당한다(Table 1).

3.4 수평력 계수(C_0, C_1)

수평력계수 C_0, C_1 는 최대확대지반운동을 나타내는 계수이다.

C_0 는 탱크-액체계의 강제 구조에 대해 충격효과 시 최대확대지반운동의 정도를 나타내는 계수로 지진계수(seismic factor)와 응답확대계수(response amplified factor) 및 감쇄비 2%의 감쇄보정계수의 곱으로 표시되는데 0.6을 채용했다.

C_1 의 계산은 이류 전단력과 관련이 있으며 특정 지반에서의 가속도를 표준지반가속도로 산정하기 위해서는 제1차 요동모우드의 고유진동수의 결정과 구역확대계수 S 를 요구한다. 제1차 요동 모우드의 진동은 비교적 길고 상응하는 스펙트럼 가속도 값은 특정구역의 최대 스펙트럼가속도 혹은 변위 범위 안에 있다. 제1차요동주기는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{1.8412 \frac{g}{a} \tanh\left(1.8412 \frac{H}{a}\right)}} \quad (\text{sec.}) \quad (3)$$

$T \leq 4.5$ 인 경우

$$C_1 = \frac{0.75S}{T} \quad (4)$$

Table 1 Importance factor (I)

Return Period (year)	50	100	200	500	1,000	2,400
I	0.4	0.57	0.73	1	1.4	2

Table 2 Site Coefficients (S)

Type	Description	S
S_1	A soil profile with either a) a rock-like material characterized by a shear wave velocity greater than 762 m/s or by other suitable means of classification or b) stiff or dense soil conditions where the soil depth is less than 60.96 m	1.0
S_2	A soil profile with stiff or dense soil conditions where the soil depth exceeds 60.96 m	1.2
S_3	A soil profile 12.192 m or more in depth containing more than 6.96 m of soft to medium stiff clay but more than 12.96 m of soft clay	1.5
S_4	A soil profile containing more than 12.192 m of soft clay	2.0

$T > 4.5$ 인 경우

$$C_1 = \frac{3.375S}{T^2} \quad (5)$$

여기서, S 는 UBC code에서 원용했으며, Table 2에 있다.

3.5 등가질량비와 등가무게

Fig. 2에서 보는바와 같이 탱크 내용 액체 전체 질량 m_l 에 대한 충격효과 질량 m_0 와 이류효과질량 m_1 의 비를 등가질량비라고 한다. 이 등가질량비로서 충격무게와 이류무게를 구할 수 있다. 이류 효과에서 이론적으로는 n 차 모우드까지 고려할 수 있으나 단순화를 위해 제1차 모우드만 고려하였다.

충격등가질량비, $\frac{m_0}{m_l}$ 는

$$\frac{m_0}{m_l} = \frac{H}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{[(2n-1)\pi]^3} \times \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]}{I_1'\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]} \quad (6)$$

이류등가질량비, $\frac{m_1}{m_l}$ 는

$$\frac{m_1}{m_l} = \frac{a}{H} \frac{2}{1.8412(1.8412^2-1)} \tanh\left(1.8412 \frac{H}{a}\right) \quad (7)$$

식(6)와 식(7)의 결과는 Fig. 4와 같다.

따라서, 충격무게와 이류무게는

$$W_0 = W_l \times \frac{m_0}{m_l}, \quad W_1 = W_l \times \frac{m_1}{m_l} \quad (8)$$

여기서, W_l 는 탱크내용액의 전체무게이다.

3.6 등가작용높이비와 등가높이

Fig. 2에서 보는바와 같이 탱크 내용 액체 전체 높이 H 에 대한 충격효과 질량작용높이 h_0 와 이류효과질량 작용높이 h_1 의 비를 등가작용높이비라고 한다. 이류효과에서는 제1차요동모우드만 고려하였다.

충격질량 등가작용높이비 $\frac{h_0}{H}$ 는

$$\frac{h_0}{H} = 1 + \frac{m_l}{m_0} \left[-\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{64(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^4} \frac{H}{a} \times \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]}{I_1'\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]} \right] \quad (9)$$

이류질량 등가작용높이비 $\frac{h_1}{H}$ 는

$$\frac{h_1}{H} = 1 - \frac{1}{1.8412} \frac{a}{H} \tanh\left(\frac{1.8412}{2} \frac{H}{a}\right) \quad (10)$$

따라서, 상기 식에서 충격중심높이와 이류중심높이

이를 구할 수 있다. 식(9)와 식(10)의 결과는 Fig. 5와 같다.

3.7 앵커가 된 탱크의 옆판 압축응력

앵커가 된 탱크의 옆판에 작용하는 수직방향 최대 압축응력은 보의 굽힘식($\sigma = My/I$)을 사용하여 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$b = w_t + \frac{4M}{\pi D^2}, \quad \sigma = b/t_s \quad (11)$$

여기서,

b = 옆판의 수직방향 압축력 (kg/mm)

σ = 옆판의 압축응력 (kg/mm²)

w_t = 옆판의 단위길이당 수직방향 무게(kg/mm)

M = 전도모멘트 (kg · mm)

D = 탱크의 직경 (mm)

t_s = 최하단 옆판의 두께 (mm)

3.8 앵커가 안 된 탱크의 옆판 압축

앵커가 안된 탱크의 경우, 지진시 탱크 옆판과 밀판이 만나는 위치에서 밀판이 초승달 형태의 어느 영역이 부상된다. 이 부상으로 생기는 반력 R_A 은 옆판에 압축하중으로 작용된다.

따라서 앵커가 안되어서 밀판이 부상되는 경우 옆판에 작용하는 압축력 및 압축응력은

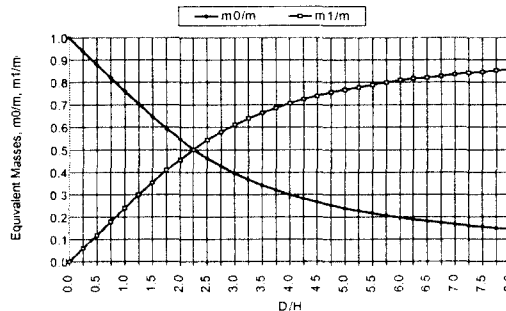


Fig. 4 Equivalent Masses

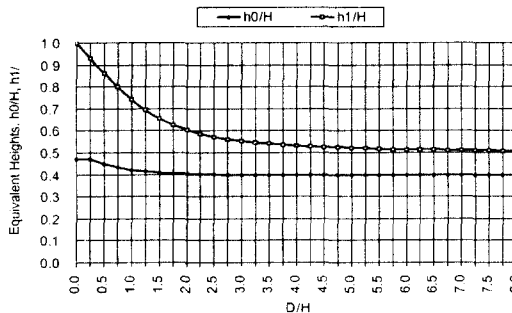


Fig. 5 Equivalent Heights

$$b = w_t + \frac{4M}{\pi D^2} + R_A, \quad \sigma = b/t_s \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (12)$$

여기서,

$$R_A = t_b \sqrt{\frac{2}{3} q f_{by}} \quad (\text{kg/mm}) \quad (13)$$

q = 단위면적당 유체의 무게 (kg/mm²)

f_{by} = 밀판의 항복응력 (kg/mm²)

t_b = 밀판의 두께 (mm)

4. 옆판의 허용좌굴응력

4.1 코끼리 발형 좌굴 현상

지진과 중력하중하에서 탱크의 바닥 근처 옆판에는 높은 유체 압력이 옆판의 원주방향 변형을 일으키는데 이는 비대칭적이고 축방향 면에서 굽힘응력을 일으킨다. 이것은 탱크 바닥 근처에서 매우 가까운 높이, $\Delta H = 0.04L$ 에서 탱크 옆판의 360° 전부를 부풀어오르게 한다⁽⁷⁾. 이런 현상을 코끼리 발형 좌굴이라 한다. 직립형 탱크의 이 좌굴수용력은 이런형의 좌굴에 의해 지배받는 것이 대부분이다. 좌굴 수용력에 관해서 강성의 효과는 보수적으로 무시된다.

4.2 코끼리 발형 좌굴응력

코끼리발형 좌굴형에서의 좌굴응력, σ_e 은 다음 식으로 주어진다⁽⁸⁾.

$$\sigma_e = \frac{0.6 E_s t_s}{R} \left\{ 1 - \left(\frac{P_{\max} R}{\sigma_y t_s} \right)^2 \right\} \left(1 - \frac{1}{1.12 + S_1^{1.5}} \right) \times \left(\frac{S_1 + f_{sy}/25.308}{S_1 + 1} \right) \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (14)$$

여기서, 탱크 바닥에서의 유체정압과 지진의 수평항과 수직항을 포함하는 탱크바닥에서의 전체 횡압력은

$$P_{\max} = \rho_l g H + P_0 + ZI(C_0 W_0 + C_1 W_1) + ZI C_0 \frac{(\rho_l g H + P_0)}{5} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (15)$$

R = 탱크의 내경 (mm)

P_0 = 탱크의 설계내압 (kg/mm²)

f_{sy} = 옆판의 항복응력 (kg/mm²)

E_s = 옆판의 탄성계수 (kg/mm²)

t_s = 옆판의 최하단의 두께 (mm)

$S_1 = (R/400t_s)$

4.3 설계허용좌굴응력

어떠한 경우도 좌굴에 대한 안전도를 확보하기 위해서는 우선 $\sigma_e \leq \sigma_y$ 인 조건이 만족되어야 한다.

설계에 적용할 수 있는 설계허용좌굴응력은 코끼리 발형 좌굴응력값의 72%를 적용하는 것이 적당하

다. 즉, 설계허용좌굴응력, σ_b 는

$$\sigma_b = 0.72 \times \sigma_e \quad (16)$$

5. 내진설계 프로그램 개발

액체저장탱크의 내진설계프로그램은 Windows를 기반으로 하여 MS C++를 사용하여 객체지향형 프로그램으로 개발되었다. Fig. 6에서 개략적인 설계절차순서도를 보여주고 있다. 프로그램 구성을 대별하면 입력 모듈, 계산모듈, 출력모듈로 나눌 수 있고, 별도로 재료 물성치 데이터 모듈이 있다. 계산모듈의 실행에 앞서서 지붕과 옆판의 무게를 계산하는 모듈은 외부에서 실행된다. 이들 무게는 옆판에 작용하는 압축응력을 산정하는데 필수적인 인자이다. 앵커의 유무에 따라서 옆판에 작용하는 압축응력의 산정이 다르다는 것에 주의하여야 한다. 중요한 사항은 비록 앵커가 되었지만 작용압축응력이 허용압축응력을 초과했을 경우는 옆판의 최하단 두께를 증가시켜 좌굴에 대해 안정화시키는 방법 외는 없다. 코끼리 발형 좌굴은 옆판에 부분적으로 보강링을 설치해도 전혀 효과가 없기 때문이다.

6. 결론

본고는 KS B 6225(강제석유저장탱크의 구조)에서 미진한 내진설계에 대한 설계기준안 및 절차서에 대한 선행연구에 근거하여 전산프로그램을 개발한 것이다. 제시한 Figs, 수식들 및 프로그램 로직은 기존의 설계규격보다 좀더 진보된 연구결과를 반영하고 있다. 적용사례에 대한 결과 및 고찰은 제시하지 않았으나 매우 보수적인 결과를 얻었다.

참고문헌

1. 박종률, "수학적 해석 방법에 의한 액체저장탱크의 액동압 거동 해석", 대한기계학회 2001년 춘계 학술대회논문집 A, pp. 628-635, 2001. <대한기계학회논문집원고 심사 중, 접수번호: A200107209, 접수일 : 2001. 7. 6>
2. 박종률, "강제 석유 저장 탱크(KS B 6225)의 내진 설계 기준 개선 안", 대한기계학회 2001년 추계 학술대회논문집 A <대한기계학회논문집원고 심사 중, 접수번호: A200108266, 접수일 : 2001. 8. 30>
3. G. W. Housner, Nuclear reactors and Earthquakes, TID-7024, U.S. Atomic Energy Commission, pp. 183-209, 367-390, Aug.1963.
4. R. S. Wozniak and W. W. Mitchell, "Basis of Seismic Design Provision for Welded Steel Oil

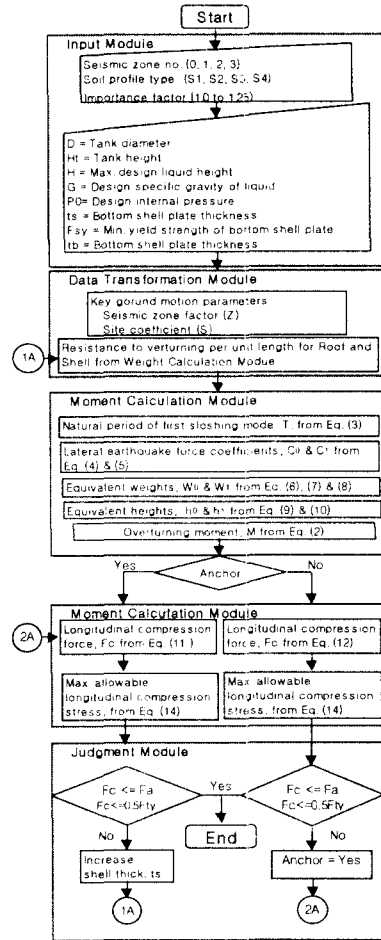


Fig. 5 Flow Chart for Seismic Design

Storage Tanks", Proceedings-Refining Department, Vol. 57, American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 485-501, 1978.

5. ASCE, "Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities", pp. 4-5~4-23, 1997.
6. 지진과 내진설계 - LNG 인수기지 시설물을 중심으로-, 한국가스공사, 현대엔지니어링(주), 1997.
7. A. B. Poole, "Simplified Design and Evaluation of Liquid-Storage Tanks Relative to Earthquake Loading", PVP-Vol. 275-2, Seismic Engineering - Vol. 2, ASME, pp. 111-116, 1994.
8. M. A. Haroun, Ali A. El-Zeiny, and H. Bhatia, "Seismic Design Guidelines for Liquefied Natural Gas Tanks", PVP-Vol. 272, Sloshing, Fluid-Structure Interaction and Structural Response Due to shock and Impact Loads, ASME, pp. 43-49, 1994.