

액체저장탱크의 지진하중과 풍하중 설계기준 고찰

이남현*(신성엔지니어링), 오택열(경희대학교 테크노공학대학 교수),
안주옥(경희대학교 토목건축대학 교수), 최선영(경화엔지니어링),
박종률(현대엔지니어링), 김학영(산업자원부 기술표준원)

A Study on the Design Criteria of Seismic and Wind Loads for Cylindrical Liquid Storage Steel Tanks

N. H. Lee(Shinsung Eng.), T. Y. Oh(Tech. Eng. Dept., KHU), Z. O. An(Civil Eng. Dept., KHU)
S. Y. Choi(Kyunghwa Eng.), J. Y. Park(Hyundai Eng.), H. Y. Kim(Korean Tech. & Standards)

ABSTRACT

Special considerations on the design of liquid storage tanks should be taken into account for seismic and wind loads. But Korean industrial standard KS B 6225 does not specify detailed guidelines for a design. It is therefore necessary to improve design guidelines for a seismic and wind-proof design in KS B 6225. The purpose of this study is provide a basis for the development of improved seismic and wind-proof design procedures, especially about seismic and wind loads.

Key Words : liquid storage tank (액체저장탱크), seismic loads (지진하중), wind loads (풍하중)

1. 서론

발전소, 석유화학 시설 등 산업시설에서 원통 직립형 액체저장탱크가 널리 사용되고 있다. 액체저장탱크는 지진의 발생이나 강한 바람에도 탱크의 보존과 지속적인 기능을 유지해야 한다. 기상청 자료에 따르면 최근 한반도 내에서도 1년에 19회 정도의 지진이 발생하고 있으며 사람이 느낄 수 있는 리히터 규모(Richter magnitude) 3 이상의 지진이 연평균 9번 발생하고 있다. 산업시설물이 파손될 수 있는 리히터 규모 4이상의 지진은 1.3회/년, 리히터 규모 5이상은 0.2회/년 발생되고 있어 이제 한반도는 지진에 대하여 안전지대가 아니라는 것이 현실적인 상황이며 지진에 대한 액체 저장 탱크의 안전도도 심각히 고려해야 한다. 또한, 한해 평균 약 20 ~ 30개 정도의 태풍이 상륙하고, 이러한 강풍으로 원통형 액체 저장탱크의 피해가 우려되고 있는 실정이다. 현재 액체저장탱크에 관한 설계기준은 1980년 이후 개정이 없는 KS B 6225 기준을 사용하고 있으며, 풍하중과 지진하중에 대한 보완 및 개정이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 지진하중과 풍하중에 대한 설계기준 작성을 위해 각 하중별 설계 이론의 고찰과 해석을 수행하였다.

2. 액체저장탱크의 설계기준 지진하중

2.1 지진시 액체저장탱크의 거동 및 파괴

액체 저장 탱크가 지진하중을 받을 때, 저장 액체의 진동은 탱크구조물을 통해 액체에 작용되는 지진 가속도에 의해 발생된다. Fig. 1과 같이 이 액체의 운동은 두 가지 형(mode)으로 나눌 수 있다. 첫 번째 것은 충격형(impulsive mode)으로 정의되며, 탱크 구조물의 운동과 조화되게 움직이는 액체의 관성에 의한 운동이다. 두 번째 것은 이류형(convective mode) 혹은 보통 액체요동(stroking)으로 정의된다. 지진시 탱크의 파괴는 옆판의 좌굴, 지붕의 파손, 밑판의 파손, 앵커가 있는 곳의 탱크 옆판의 파단, 앵커의 파손, 전체 붕괴, 기초의 국부 침하에 의한 파손, 흔들림에 의해 기초에서 미끄러지거나 이탈, 배관 연결부위 파손 등이다. 관찰된 손상 중에서, 첫 번째로 일반적인 많은 파손 형태는 전도력에 의해 발생한 수직방향 압축으로 인해 탱크 옆판에서 발생하는 코끼리 발굽 형태의 좌굴에 의한 파손이다. Fig. 2는 탱크의 파괴형상이며 주로 전도 모멘트에 의해 발생하는 파괴이며, 다이아몬드형 좌굴과 코끼리 발굽형 좌굴을 보여준다.

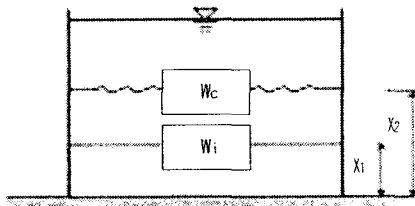


Fig. 1 Housner's simplified tank model

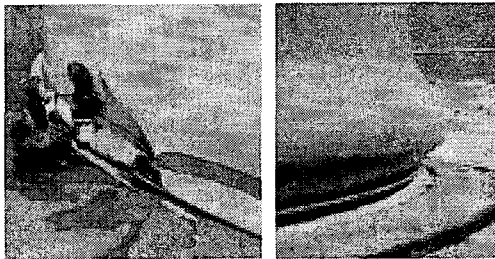


Fig. 2 Tank's buckling shape

2.2 모멘트 산정식의 유도 및 비교검토

탱크의 거동특성을 고려한 모멘트 산정식을 구하고, 이를 단순화하여 설계자가 실무에 쉽게 적용하도록 하는 일은 중요하다.

$$M = ZI(C_1 W_s X_s + C_1 W_t H_t + C_1 W_i X_i + C_2 W_2 X_2) \quad (1)$$

$T \leq 4.5$ sec;

$$M = ZI(W_s X_s + W_t H_t + W_i X_i) + \frac{1.88 C_2 I}{RT} W_2 X_2 \quad (2)$$

$T > 4.5$ sec;

$$M = ZI(W_s X_s + W_t H_t + W_i X_i) + \frac{8.46 C_2 I}{RT^2} W_2 X_2 \quad (3)$$

식(1)은 API650의 모멘트 산정식이며, 여기서 S는 지반계수이고, T는 탱크의 고유주기이다. C_1 과 Z의 곱에 의해 충격력의 수평가속도가 결정되게 된다. ZC_1 값은 지진가속도의 값 0.24, 0.045를 그대로 사용하고 있음을 알 수 있다. 기준이 되는 가속도 0.24 값에 구역별 계수인 Z를 곱해줌으로써 각 지역마다의 지진크기를 고려한 값이 된다. 여기서, Z값에 C_1 의 특성을 포함시키게 되면 결국 구역계수 Z값 하나만으로 각 지역별 지진가속도를 산정할 수 있게 됨을 알 수 있다. 식(2), (3)은 API650을 기본으로 하여, 우리나라의 표준응답스펙트럼 및 지반 특성을 고려한 식으로 해석을 통하여 그 값을 다음과 같이 비교하였다. Fig. 3, Fig. 4는 각각 등가부게 및 등가 작용 높이이며, Fig. 5는 모멘트 산정식 값의 비교이

다. Fig. 6은 지진하중시 첫 번째 슬로싱에 의한 탱크의 좌굴형상이다.

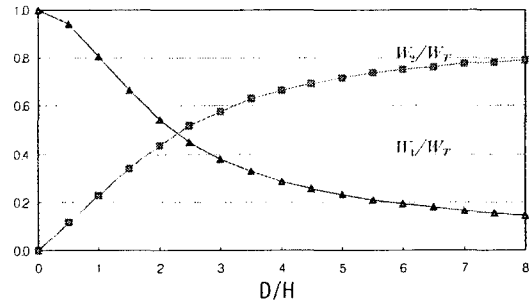


Fig. 3 Equivalent weights

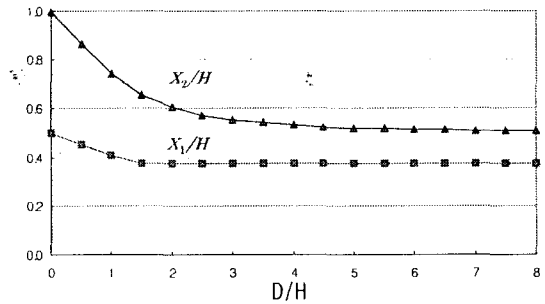


Fig. 4 Equivalent heights

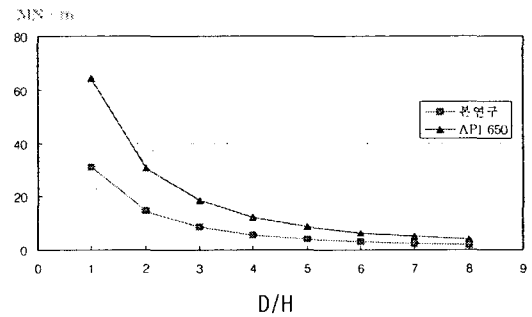


Fig. 5 Comparison of moment values

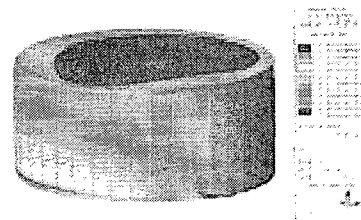


Fig. 6 Deformed shape of tank which subjected to seismic loads

3. 액체저장탱크의 설계기준 풍하중

3.1 기준별 설계풍하중 산정 방법

건설교통부에서는 2000년도에 건축물의 풍하중 설계 기준을 새롭게 규정하였다. 건설교통부는 구조물의 형태와 대한민국 실정에 맞게 풍하중에 영향을 끼치는 여러 인자들을 고려하여 설계 풍하중 산정 방법을 제시하고 있으며, 일본 건축학회에서 제정한 '건축물 하중 지침'과 유사하다. ASCE-7의 풍하중에 대한 설계 기준은 93년과 95년 2002년도에 걸쳐 개정되어 계속 보완되고 있다. 건설교통부 기준과 일본 건축학회의 기준은 풍하중 영향인자들을 구하는 방법이 매우 흡사하다. 영국, 오스트레일리아 등도 각국의 실정에 맞게 풍하중에 대한 설계 기준들을 규정하고 있으며, 이 두 규정의 특징은 단면의 위치별로 다른 압력계수를 적용한다는 특징이 있다. 현행 KS 기준을 제외하고 설계 속도압에서 계수들은 $(1/2)\rho$ 를 의미하는 것이며 각 기준 별로 거의 유사한 값을 쓰고 있으며, ASCE-7을 제외하고는 속도 항은 지역 별 기본풍속이 아닌 설계풍속의 제곱으로 적용하고 있다. 원형 단면을 가지는 구조물에 대하여는 설계 풍하중 산정 시 건설교통부, 일본건축학회 그리고 ASCE-7은 지붕과 벽체에 대한 식을 따로 정의하여 사용하며, BS6399와 SAA는 동일한 식을 사용한다.

3.2 설계풍하중에 영향을 주는 인자들

첫째, 기본풍속으로 설계 풍속을 구하고자 할 때 기본이 되는 풍속으로 지형을 고려하여 정한 풍속이다. 모든 기준에서 측정 높이는 10m이고, 노풍도는 개활지 (건설교통부 기준 노풍도 C에 해당)로 동일하다. 대기 경계층 내의 풍속은 기상 관측소 주변의 지형조건, 지표면에 따라 크게 영향을 받는다. 둘째, 노풍도 구분으로 일정 지역의 지표면 조도에 해당하는 장애물이 바람에 노출된 정도를 구분한 것이다. 셋째로 Fig. 7에 있는 고도분포계수를 들 수 있다. 고도분포계수란 지표면의 고도에 따라 기준경도풍 높이까지의 풍속의 증가분포를 지수법칙에 따른 수직방향 분포계수를 말한다. 일반적인 탱크 높이를 고려하여 그래프에서는 30m까지만을 나타냈다. 각 기준 별로 고도분포 계수 값의 차이가 나는 것은 기본 풍속의 평가시간이 길어짐에 따라 난류성분을 많이 포함하기 때문이다. ASCE-7기준은 지수값이 커서 약 17m 이하에서는 건설교통부와 일본건축학회(AIU) 기준보다 작은 값을 보이지만 17m보다 높아질수록 고도분포계수는 더 큰 값을 보인다. 또한 SAA 기준에서 고도분포계수는 전체적으로 적은 값을 가진다. 다음으로, 풍속할증계수는 언덕 및 산 경사, 지의 정점 부근에서 풍속이 증가하므로, 이에 따른정점 부

근의 풍속을 증가시키는 지형, 지물 등에 의한 영향을 고려하기 위한 풍속의 할증계수를 말한다.

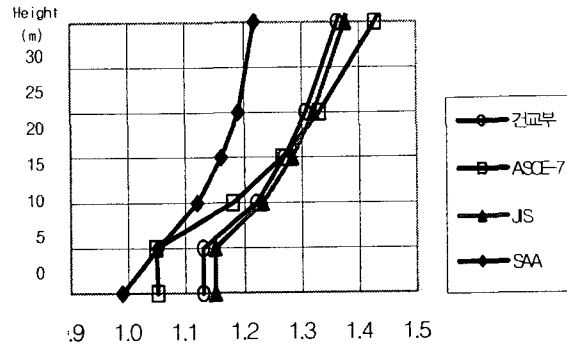


Fig. 7 Velocity exposure coefficient

네 번째로 가스트 영향계수는 강풍 시에 발생하는 구조물의 풍방향 진동의 동적 하중 효과를 최대 변위와 평균변위의 비로 정의하여 반영한 것으로 강풍이 분 경우 구조물의 최대 변위와 평균변위의 비로 정의된다. ASCE-7 기준에서도 강체 구조물일 경우에는 약산표를 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 강체 구조물의 약산표를 비교해보면 ASCE-7과 건설교통부 기준의 가스트 영향계수는 약 2배 정도의 차이가 난다. 마지막으로 풍압계수를 들 수 있다. 풍압계수는 구조물의 형상, 규모, 표면의 거칠기 및 자연풍의 성질에 의해 달라진다.

3.3 풍하중이 작용하는 액체저장탱크의 해석

실제액체 저장탱크 구조물을 일반적인 가정조건에 의하여 쉘 구조로 모델링 하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 앞서 동일 조건하에서 기준 별 설계 풍하중을 구한다. 수치해석에 필요한 조건은 다음과 같이 가정하였다. 탱크형식은 Cone-roof 형식(지붕경사율 : 1/16)으로 포항해안 10km 떨어진 곳의 장애물이 없는 평지이며, 재질은 SS400을 사용한다. 일반적으로 액체 저장탱크의 높이는 2m ~ 20m, 직경은 3m ~ 110m, 그리고 직경/ 높이의 비가 0.2 ~ 8 정도로 설계되고 있다. 본 수치해석을 위하여 탱크의 직경을 20m, 60m 그리고 100m에 대하여 각각 수치해석을 수행하였으며, 탱크 높이에 따른 비교를 하기 위하여 직경이 20m로 동일할 때 16m와 25m의 높이를 갖는 탱크에 대하여 각각 수치해석을 수행하였다.

또한 석유압의 영향을 파악하기 위해 탱크 안에 석유가 들어있지 않은 경우와 함께, 석유로 차있는 경우를 고려하여 구조해석을 하였다. 16m 높이의 탱크 안은 비어있는 경우와 석유가 각각 1/4(4m),

1/2(8m) 그리고 가득 찼을 경우(16m)에 대해서 고려하였다.

일반적으로 탱크는 그 자체 중량만으로 지지되어 있거나 Anchor를 설치한다. 본 논문에서는 탱크 바닥 부분의 바깥 둘레 부분을 따라서 Anchor를 설치하는 것으로 보고, 나머지는 z축 변위를 제어하기 위하여 Roller로 가정하였다. Anchor가 설치된 부분은 고정단으로 취급하여서 x, y, z 방향이 모두 구속된 것으로 하였고, Roller 부분은 z방향으로만 구속하였다. 탱크의 바닥면을 10cm 연장하여 그 주위를 따라서 Anchor를 설치하였다. 해석결과는 Fig. 8에 유압 작용 높이에 따른 응력은 Fig. 9에 각각 있다.

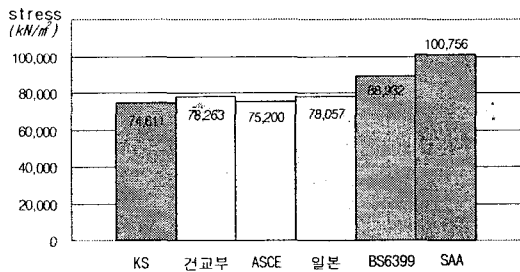


Fig. 8 Comparison of maximum stress values

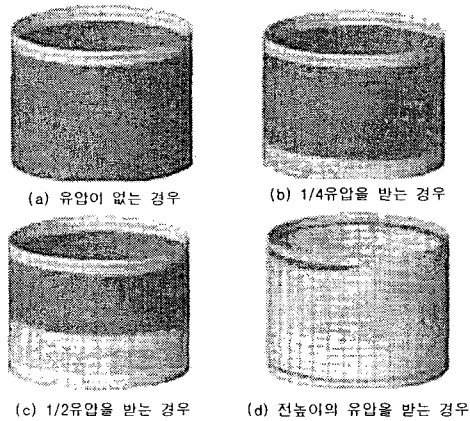


Fig. 9 Stresses according to fluid pressure

4. 결론

액체저장탱크에 작용하는 지진하중과 풍하중에 대하여, 현행 설계기준 및 외국의 설계기준내용을 중심으로 연구 및 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 충격력과 이류력을 고려한 탱크의 바닥 위 측판에서 작용하는 전도 모멘트(M)는 API650의 식(1)을 기본으로 우리나라 구역계수 및 지반의 특성을 포함한 식(2)와 식(3)로 제시된다.
2. 형상(D/H) 대비 모멘트 값의 경우 API650기준과 비교했을 경우 최대지반가속도로 미국0.24, 우리나라 0.11을 사용하였는데, 가속도의 차이만큼 Fig. 5와 같이 D/H에 따라 모멘트 값이 일정한 감소율(2.1-2.2배)을 보임을 알 수 있었다. 따라서 제시된 식(2)와 식(3)의 타당성을 확인할 수 있었다.
3. 건설교통부와 일본건축학회의 기준에서 설계 풍하중은 매우 유사하다. 그 중 가스트 영향계수, 중요도 계수가 같고, 그 외에 고도분포계수와 풍력계수는 거의 유사한 값을 보인다.
4. 본 수치해석 예에서 풍하중에 대한 구조 해석을 수행한 결과 건설교통부, ASCE-7 및 일본건축학회 기준과 비교하여 응력 및 변위 결과에는 큰 차이가 없음을 보였다.
5. 액체 저장탱크 설계 시에는 특수한 경우를 제외하고는 풍하중의 영향이 지배적이지 않음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국산업기술평가원 연구과제의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. KS B 6225, 강제석유저장탱크의 구조
2. API Standard 650, 1998, Welded Steel Tanks for Oil Storage, 9th edition
3. Housner, G. W., 1955, "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers," Bulletin of The Seismological Society of America, pp. 15 ~ 5.
4. 대한 건축학회, 2000년 건설교통부제정 건축물 하중기준에 따른 풍하중 해설 및 설계, 2001
5. American Society of Civil Engineers, ASCE 7-02, 2002
6. 日本建築學會, 建築物 荷重 指針-同解説 6章. 風荷重, 1993
7. British Standard, Loading for Buildings Part 2. Code of practice for Wind Loads, 1997
8. Australian Standard, SAA Loading Code Part2. Wind Loads, 1989