

원통형 액체저장 강탱크의 내진설계기준

Earthquake Resistant Design Criteria for Cylindrical Liquid-Storage Steel Tanks

국 승 규* 이 진 호**
Kook, Seung Kyu Lee, Jin Ho

국문요약

건물과 교량의 내진설계기준 제정작업이 활발하게 진행되고 있는 반면 탱크구조물에 대한 내진설계기준 제정작업은 아직 초기단계에 머무르고 있는 실정이다. 탱크구조물이 지진에 의해 붕괴되는 경우 탱크 자체의 파손 및 저장물의 손실에 의한 직접피해보다 저장물의 유출에 의한 피해파급이 더욱 심각한 상황을 초래할 수 있다. 따라서 탱크구조물의 내진설계기준에는 탱크구조물의 동적 거동에 대한 해석 및 검토방법은 물론 이러한 피해파급을 최소화할 수 있는 조치가 포함되어야 한다. 이 논문에서는 원통형 액체저장 강탱크에 대한 내진설계기준의 제정에 필수적으로 고려해야 하는 설계개념과 원칙, 해석방법, 검토사항 및 피해파급 차단조치를 제시하였다.

주요어 : 내진설계기준, 탱크구조물, 원통형 액체저장 강탱크, 설계개념과 원칙, 피해파급 차단조치

ABSTRACT

While the codifying works of the earthquake resistant design codes for buildings and bridges have been carried out progressively, such works for tank structures are still at the beginning steps. In case of the collapse of tank structures under seismic actions, substantially severe damages are expected due to the spillage of tank contents in addition to the direct economic losses of tanks and contents. Therefore not only the analysis and verification methods for the dynamic behavior of tank structures but also the measures of minimizing the damage propagation should be included in the codes for tank structures. In this paper the design concepts and principles, the analysis and verification methods as well as the measures against the damage propagation are set forth, which are mandatory for the preparation of the earthquake resistant design codes for cylindrical liquid-storage steel tanks.

Key words : earthquake resistant design codes, tank structures, cylindrical liquid-storage steel tanks, design concepts principles, measures against the damage propagation

1. 서 론

내진설계가 일반설계와 근본적으로 다른 점은 설계하중이 불특정한 값이라는 것이다. 그러므로 설계지진에 대한 구조물의 응답은 물론 설계지진과는 강도가 다른 강진과 약진에 대한 구조물의 거동을 고려한 설계를 수행해야 한다. 탱크구조물의 동적거동은 지반-유체-

구조물 상호작용(soil-fluid-structure interaction)에 의해 크게 좌우되므로 정확한 설계조건과 해석방법이 요구되나 내진설계기준에 특정한 조건과 해석방법을 모두 제시할 수는 없으므로 일반적으로 적용할 수 있는 단순한 해석 및 검토방법이 요구된다. 또한 지진에 의해 탱크가 파손 또는 붕괴되어 저장물이 유출되는 경우 저장물의 특성에 따라 심각한 환경파괴 또는 연쇄적인 폭발 등 피해파급이 치명적이므로 이에 대한 조치가 제시되어야 한다.

탱크구조물의 동적거동에 대한 연구로는

* 정회원 · 부경대학교 토목공학과 조교수

** 서울대학교 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

Housner⁽¹⁾, Veletsos⁽²⁾, Rammerstorfer⁽³⁾, Malhotra^{(4),(5)} 등의 원통형(cylindrical) 액체저장 탱크를 대상으로 한 연구가 있고 구형(rectangular) 액체저장 탱크에 대한 연구로는 Koh 등^{(6),(7),(8)}, Kim 등^{(9),(10)}의 연구가 활발하게 진행되고 있으며 Huh 등, Park 등의 실험적 연구^{(11),(12)}가 수행되고 있다. 탱크구조물에 대한 내진설계지침으로는 뉴질랜드지침⁽¹³⁾, 오스트리아지침⁽¹⁴⁾을 들 수 있으나 내진설계기준의 비교연구⁽¹⁵⁾결과 오스트리아지침은 일반성이 결여되어 있으며 뉴질랜드지침은 설계기준으로 적용하기에 너무 세분화된 해석방법을 제시하고 있으므로 보완이 필요하다는 것이 제기되었다.

이 논문에서는 가장 보편적인 탱크구조물인 원통형 액체저장 강탱크의 내진설계기준을 마련하기 위해 설계개념과 원칙을 설정하고 현재의 기술수준에서 현장 적용이 가능한 해석방법과 검토사항 및 피해파급 차단조치를 제시하였다.

2. 원통형 액체저장 강탱크 내진설계의 개념 및 원칙

2.1 설계개념

2.1.1 내진성능수준

액체저장 탱크구조물의 지진발생 후 거동상태는 일체성유지(full integrity), 최소가동수준 유지(minimum operating level) 및 붕괴(local/global collapse)로 인한 기능상실(ultimate limit state)로 구분할 수 있다. 일반적으로 설계지진은 구조물 사용수명 내 발생확률이 10% 정도 이므로 경제성확보의 측면에서 설계지진 발생 시 탱크는 제한적인 기능을 유지하여 저장물의 통제가능성과 보수가능성이 최대한 확보되도록 설계하여야 하며 안전도확보의 측면에서 활동, 전도에 의한 탱크의 붕괴는 물론 국부적인 파괴에 의해 기능을 상실, 통제 불가능한 저장물의 유출이 초래되지 않도록 설계하여야 한다.

미국, 이태리와 같은 강진지역에서 적용하고 있는 내진설계개념은 붕괴방지수준에 대한 설계라 할 수 있으며 기능수행수준(탄성거동한계)은 구조물이 발휘할 수 있는 연성(ductility)과 여유력(redundancy)을 정량화한 응답수정계수(R; response modification factor)의 적용과 사용성 검토를 통하여 확인한다. 강진지역의 경우 이러한 방식으로 결정되는 기능수행수준은 지진을 고려하지 않은 타하중조합에 의해 요구되는 기능수행수준보다 통상적으로 높게 되므로 합리적이다. 이 설계방식에 적용하는 응답수정계수는 구조물의 탄소성거동을 고려하여 다음 식으로 결정된다(그림 1).

$$R = \frac{E_{pl}}{E_{el}} = \frac{d_{pl}}{d_{el}} \quad (1)$$

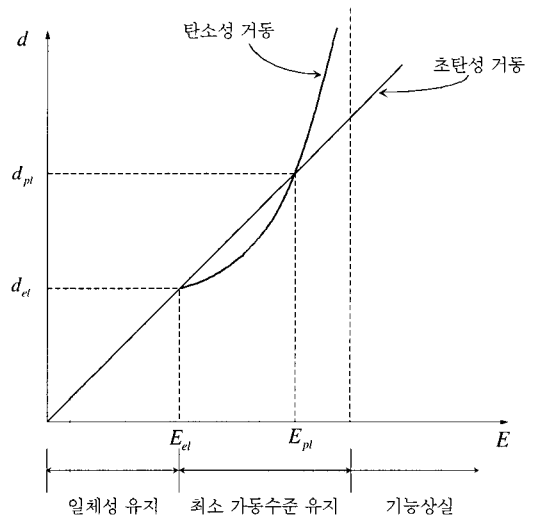


그림 1 지진발생 시 구조물의 동적거동

여기서 E_{el} 과 E_{pl} 은 각각 탄성거동한계와 소성거동한계에 해당하는 지진하중, d_{el} 과 d_{pl} 은 이에 대응하는 변위를 의미한다.

그러나 한반도와 같이 중약진지역으로 분류되는 지역에 이러한 설계방식을 적용하는 경우 내진설계에서 결정되는 기능수행수준이 지진을 고려하지 않은 타하중조합에 의해 요구되는 기능수행수준보다 보통 낮게 설정되므로

불합리하다. 그러므로 중앙진지역의 내진설계 기준에는 붕괴방지구준과 기능수행수준을 제시하고 두 수준 모두에 대해 설계를 수행하여야 하며 두 수준에 의해 구조물에 요구되는 소성거동을 결정하여 이를 만족하는 연성 및 여유력에 대한 세부사항을 제시하는 것이 합리적인 설계방식이다.

2.1.2 피해파급 차단조치와 파괴메카니즘

원통형 액체저장 강탱크는 특수한 경우(하부지지 구조물을 가지는 탱크)를 제외하고 일반적으로 지반에 바로 설치되는 평저원통형으로 여러 개의 동일한 탱크가 파이핑으로 연결되어 하나의 시스템(사업소)을 구성하고 있다. 또한 개개의 탱크에 저장되어 있는 저장물의 양과 특성이 서로 다른 경우 지진발생시의 동적거동이 다르다. 따라서 탱크구조물의 내진설계기준에 최우선적으로 고려해야 하는 피해파급의 최소화를 위해 시스템 구성단위 간의 내부격리가 요구되는 동시에 시스템과 외부(사업소 경계 외부)와의 격리가 요구된다:

- 시스템 구성단위 간의 격리; 저장물의 유출이 인접한 구성단위로 확산하는 것을 방지하기 위해 시스템 구성단위의 용량에 대해 제방(embankment) 또는 고랑(ditch)을 설계
- 시스템과 외부와의 격리; 저장물의 유출이 시스템 외부로 확산하는 것을 방지하기 위해 시스템 전체의 용량에 대해 제방(embankment) 또는 고랑(ditch)을 설계

시스템 구성단위의 요소는 탱크, 연결 파이핑, 기초 및 저장물이며 각 요소의 동적거동은 상호작용에 의한 영향을 받는다. 이러한 지반-유체-구조물 상호작용에 의한 동적거동이 위에서 언급한 피해파급 차단조치에 부합하도록 시스템 구성단위의 파괴메카니즘은 파이핑-탱크-기초의 순서로 구성되어야 한다. 기초의 파괴로 인하여 탱크가 손상 또는 붕괴되지 않아야 하며 파이핑의 거동으로 탱크가 손상되지

않아야 한다. 이러한 파괴메카니즘은 초과강도(overstrength)의 부여 또는 중요도계수의 차등 적용으로 설정할 수 있으며 탱크와 파이핑의 상호작용을 최소화하기 위한 기초의 분리 및 파이핑의 파손 시 저장물의 유출을 방지하기 위한 차단장치의 설치로 저장물의 통제가능성을 확보하여야 한다.

2.2 설계원칙

2.2.1 중요도

탱크구조물을 포함하는 시스템은 시설물의 중요성 즉, 지진발생후의 기능수행여부 및 주변여건에 따라 다음과 같이 내진등급을 결정한다.

- 내진 II등급; 그 설비의 손상이나 기능상실이 시스템(사업소) 외부에 있는 공공의 생명과 재산에 경미한 피해를 초래할 수 있다.
- 내진 I등급; 그 설비의 손상이나 기능상실이 시스템(사업소) 외부에 있는 공공의 생명과 재산에 상당한 피해를 초래할 수 있다.
- 내진 특등급; 그 설비의 손상이나 기능상실이 시스템(사업소) 외부에 있는 공공의 생명과 재산에 막대한 피해를 초래할 수 있을 뿐 아니라 사회의 정상적인 기능유지에 심각한 지장을 초래할 수 있다.

또한 액체저장 탱크에 저장되는 저장물의 특성을 고려하여 표 1⁽⁶⁾과 같이 보정계수를

표 1 저장물의 특성에 따른 중요도의 보정계수

저장물	내진 특등급	내진 I등급	내진 II등급
식수 무독성, 비가연성 화학물	1.2	1.0	0.8
소방수 비확산성, 독성 화학물 저가연성 석유화학물	1.4	1.2	1.0
확산성, 독성 화학물 폭발성 및 고가연성 액화물	1.6	1.4	1.2

설정, 중요도(또는 위험도)에 반영하여야 하며 구조물별로 특별시방서에 명시할 수 있다.⁽¹⁷⁾

2.2.2 기능수행수준

기능수행수준은 다음과 같이 두 경우를 고려하여 결정한다. 첫째는 설계기준이 요구하는 기능수행수준이고 둘째는 붕괴방지수준에 응답수정계수를 적용한 기능수행수준이다. 중앙진지역의 경우 연성과 여유력이 큰 구조물은 설계기준이 요구하는 기능수행수준이 설계를 좌우한다. 원통형 강탱크의 경우 탱크 바닥판의 연성, 초과강도 및 정착볼트의 비탄성거동을 고려하여 최대 2 정도의 응답수정계수를 적용할 수 있다. 따라서 연성과 여유력이 그리 크지 않은 원통형 강탱크의 기능수행수준은 두 경우를 모두 고려하여야 하며 어떠한 경우에도 지진을 고려하지 않은 타하중조합에서 요구하는 기능수행수준보다 낮게 결정할 수 없다.

2.2.3 붕괴방지수준

설계기준이 요구하는 붕괴방지수준에 대해 구조물의 소성거동을 검토하며 원통형 액체저장 강탱크의 경우 붕괴방지수준에 도달하기까지의 탱크구조물의 소성거동, 즉 바닥판의 소성변형으로 인하여 통제가 불가능한 저장물의 유출이 초래되지 않도록 허용변형치 이내에 거동을 제한하여야 한다. 물론 탄성좌굴과 탄소성좌굴은 허용되지 않는다.

3. 원통형 액체저장용 강탱크의 지진해석

3.1 단순해석법

원통형 액체저장용 강탱크의 내진설계기준에 제시할 수 있는 단순해석법⁽¹⁸⁾은 현재 견고한 지반에 설치되는 정착탱크를 대상으로 벽체저면의 전단력, 전도모멘트 및 저장물의 수위증가를 결정할 수 있는 표와 식을 제시하고

있다. 단순해석법은 응답스펙트럼해석법으로 해석모델은 그림 2와 같은 스프링-질량 모델(Spring-Mass analogy)이며 수평방향모드로 1차 대류모드(convective mode)와 1차 충격모드(impulsive mode)를 고려한다. 여기서 고차모드의 영향은 기본모드를 보정하여 결과에 감안한다.

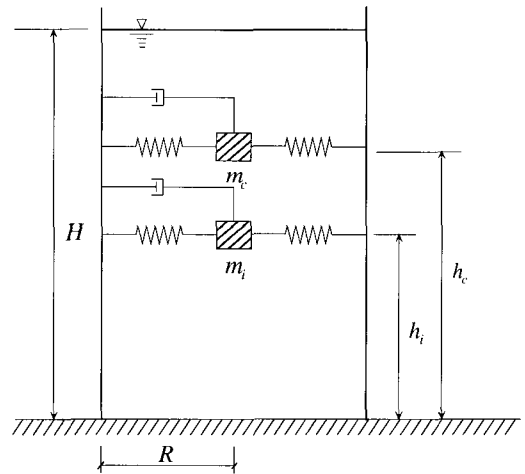


그림 2 스프링-질량 모델

그림 2에서 m_c , m_i 는 각 모드의 질량성분으로 대류성분(convective mass), 충격성분(impulsive mass)을 나타내며 h_c , h_i 는 질량의 작용위치이다. 각 모드의 질량성분과 작용위치(표 2)는 저장물의 형상비(H/R =수위/반경)에 의해 결정되며 1차 대류모드와 1차 충격모드의 주기 T_c , T_i 는 다음 식으로 구한다.

$$T_c = C_c \times \sqrt{R} \quad (2a)$$

$$T_i = C_i \times \frac{\sqrt{\rho \times H}}{\sqrt{h/R \times \sqrt{E}}} \quad (2b)$$

여기서 C_c , C_i 는 계수, ρ 는 저장물의 밀도, h 는 벽체두께가 변하는 경우 등가의 균일 두께, E 는 탄성계수이며 표 2의 m_i 은 저장물의 총질량이다.

표 2 저장물의 형상비에 따른 1차 충격모드와 1차 대류모드의 설계값

H/R (-)	C_i (-)	C_c ($s/m^{1/2}$)	m_i/m_l (-)	m_c/m_l (-)	h_i/H (-)	h_c/H (-)
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825

설계지진에 대한 각 모드의 탄성지진응답계수 (C_{sm}) 산정시 적용되는 감쇄율(ξ)은 대류모드의 경우 0.5%, 충격모드의 경우 2%를 적용한다. 벽체저면의 전단력(Q : base shear), 전도모멘트(M : overturning moment) 및 수위 증가(d : free-surface wave height)는 다음 식으로 결정한다.

$$Q = (m_i + m_w + m_r) \times C_{si} + m_c \times C_{sc} \quad (3a)$$

$$M = (m_i \times h_i + m_w \times h_w + m_r \times h_r) \times C_{si} + m_c \times h_c \times C_{sc} \quad (3b)$$

$$d = R \times \frac{C_{sc}}{g} \quad (3c)$$

여기서 m_w , m_r , h_w , h_r 은 각각 벽체와 지붕의 질량 및 중심의 위치, C_{sc} , C_{si} 는 대류모드와 충격모드에 대한 탄성지진응답계수, g 는 중력가속도이다. 전단력과 전도모멘트는 충격모드와 대류모드, 즉 수평모드에 의한 성분을 절대합으로 조합, 산출한다.

3.2 단순해석법의 적용성

단순해석법의 적용성을 검토하기 위해 그림 2와 같은 해석모델에 뉴질랜드지침을 동일한 해석조건, 즉 견고한 지반, 정착탱크 및 감쇄

율로 적용한 결과와 비교하였다. 탱크는 저장물의 높이(H) 7.0m, 반경(R) 3.5m, 벽체두께(t) 3.5mm, 강재는 탄성계수(E) 200 MPa, 밀도(ρ) 7850kg/m³, 저장물은 밀도(ρ) 800kg/m³로 가정하였다.^{(11),(15)} 설계조건은 도로교표준시방서⁽¹⁹⁾에 의거하여 내진 1등급, 가속도계수(A) 0.14, 지반계수(S) 1.2를 가정하였고 응답수정계수는 적용하지 않았다.

m 번째 진동모드의 탄성지진응답계수 (C_{sm})는 다음 식으로 산정하였다.

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \eta \leq 2.5A \quad (4a)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{5}{\xi}} \quad (4b)$$

여기서 T_m 는 m 번째 진동모드의 주기, η 는 감쇄보정계수, ξ 는 감쇄율이다.

단순해석법과 뉴질랜드지침을 적용하여 지진해석을 수행한 결과를 표 3, 표 4 및 표 5에 비교하였다. 단순해석법에 의한 벽체저면에서의 전단력과 전도모멘트가 뉴질랜드지침에 의한 값보다 증가한 것은 각 모드성분을 조합하는 방법으로 단순해석법은 절대합, 뉴질랜드지침은 제곱합평균근법을 적용하였기 때문이다. 따라서 견고한 지반위에 설치한 정착탱크의 경우 단순해석법은 보수적인 결과를 제공한다.

표 3 질량성분 및 작용위치의 비

모드	뉴질랜드 지침		단순해석법	
	$\frac{m_i}{m_l}$ 와 $\frac{m_c}{m_l}$	$\frac{h_i}{h_l}$ 와 $\frac{h_c}{h_l}$	$\frac{m_i}{m_l}$ 와 $\frac{m_c}{m_l}$	$\frac{h_i}{h_l}$ 와 $\frac{h_c}{h_l}$
충격모드	0.77	0.49	0.76	0.45
대류모드	0.23	0.75	0.24	0.75

표 4 주기 $T_m(sec)$ 및 탄성지진응답계수 $C_{sm}(-)$

모드	뉴질랜드 지침		단순해석법	
	T_m	C_{sm}	T_m	C_{sm}
충격모드	0.09	0.35	0.09	0.35
대류모드	2.75	0.33	2.72	0.32

표 5 벽체저면에서의 전단력(MN), 전도모멘트(MNm) 및 수위증가(m)

설계력	뉴질랜드 지침	단순해석법
전단력	0.605	0.740
전도모멘트	1.881	2.670
수위증가	0.96	1.14

면 및 바닥면의 변위에 대한 유체의 지배방정식이 구해진다. 그리고 축대칭성(axisymmetry)을 이용하여 유체의 3차원 지배방정식을 변형시킨다.

3.3 유한요소-경계요소법에 의한 해석결과와의 비교

3.3.1 모델링 방법

그림 3-a에서 보인 바와 같이 바닥이 강체 지반에 정착된 직립원통형 탱크를 그림 3-b에서와 같이 환형(ring shape) 요소^{(20),(21)}를 이용하여 이상화하였다. 환형요소내의 변위들은 적당한 형상함수들을 이용하여 요소절점변위에 대한 식으로 표시할 수 있는데 여기서는 형상함수를 축방향과 회전방향의 변위에 대해서는 z 의 2차식으로, 반경방향 변위에 대해서는 1차 미분의 연속성까지 보장하기위해 z 에 대한 5차의 Hermitian 다항식으로 택하였다.

유체는 Laplace 방정식을 만족시키는 potential flow라고 가정을 한 후 그림 4처럼 3차원 quadratic 경계요소를 사용하여 이상화하였다.⁽²²⁾ 탱크의 벽면과 바닥면, 그리고 자유표면에서의 경계 조건을 적용시킨 후 압력을 절점 하중으로 바꿔주면 sloshing과 탱크 벽

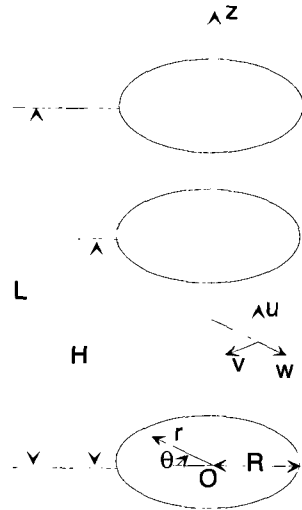


그림 3-a

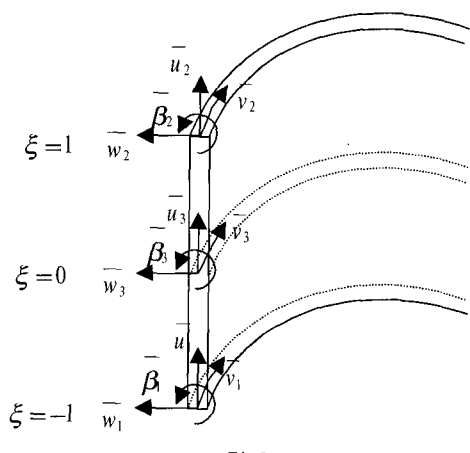


그림 3-b

그림 3 Coordinate of the tank and ring element

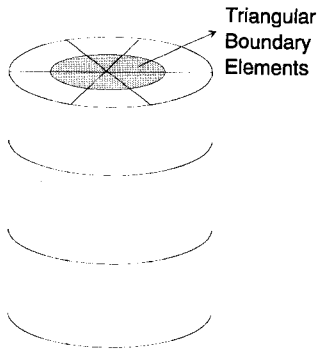


그림 4 유체의 경계요소 이상화

위에서 얻어진 탱크의 지배방정식과 유체의 지배방정식을 적합조건과 가상일의 원리를 이용하여 결합시키면 구하고자하는 셸-유체계의 유한요소-경계요소법에 의한 지배방정식이 구해진다. 이 과정에서 유체의 영향은 부가질량행렬과 자유표면의 거동에 의한 강성행렬의 형태로 나타난다.

3.3.2 Haroun & Housner의 결과^{(21),(22)}와의 비교

Tall tank와 broad tank의 두가지 경우에 대해서 비교하여 보았다. 각 탱크의 제원은 표 6과 같다. 두 탱크 모두 유체로 가득 차 있다.

표 6 탱크의 제원

	Tall tank	Broad tank
반지름 R	7.32 m	18.3 m
높이 L	21.96 m	12.2 m
두께 h	2.54 cm	
셸 밀도 ρ_s	7840 kg/m ³	
유체 밀도 ρ_l	1000 kg/m ³	
포아송비 ν	0.3	
탄성계수 E	206.7 GPa	

표 7 기존 해석결과와의 비교

	Tall tank		Broad tank	
	This study	Haroun & Housner	This study	Haroun & Housner
Maximum radial component of shell displacement	1.14 cm	1.13 cm	0.563 cm	0.620 cm
Maximum axial force resultant	1436.5 N/mm	1467 N/mm	146.15 N/mm	190 N/mm
Maximum base shear	23.0 MN	22.7 MN	36.6 MN	39.7 MN

감쇄 행렬은 ω_{min} 은 sloshing과 주로 관련된 모드의 최소 frequency로, ω_{max} 는 shell 진동과 주로 관련된 모드의 최소 frequency로 설정하고 감쇄비는 1.5%로 하여 Rayleigh damping으로 구성하였다.

위의 두가지 경우를 해석한 결과가 표 7에 나타나 있고 Haroun & Housner의 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3.3 예제 구조물의 해석과 결과 비교

3.3.3.1 셸과 유체의 모델링

셸은 6개의 환형 요소를 사용하여 모델링하였는데 그 중 유체와 접하는 부분의 요소의 수는 5개이다. 절점의 수는 13개, 총자유도는 52개이다.

유체는 축방향으로 5개, 반경방향으로 5개, 접선방향으로 8개의 quadratic 요소를 사용하여 모델링하였다. 특히 중심축을 포함하고 있는 부분은 삼각형 요소로 모델링을 하였고 나머지는 사각형 요소를 사용하여 모델링하였다.

질량 행렬과 강성 행렬을 구한 후 감쇄 행렬을 구성하였는데 ω_{min} 은 1 Hz로, ω_{max} 은 25 Hz로 설정하고 감쇄비는 1.5%로 하여 Rayleigh damping으로 구성하였다. 단, 유체의 감쇄비는 매우 적으므로 sloshing의 높이를 구할 때는 ω_{min} 을 0.1 Hz로 하고 감쇄비는 0.5%로 하였다.

3.3.3.2 입력지진의 생성

그림 5와 같은 지속시간이 15초인 포괄함수를 사용하여 P.G.A.가 0.17g가 되도록 SIMQKE를 사용하여 인공지진을 생성하였다. 인공지진의 time history는 그림 6와 같고 이 인공지진에 의한 response spectrum은 그림 7과 같다.

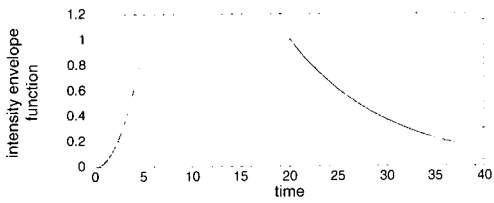


그림 5 Intensity envelope function

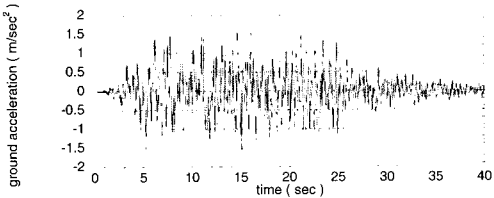


그림 6 입력인공지진의 시간이력

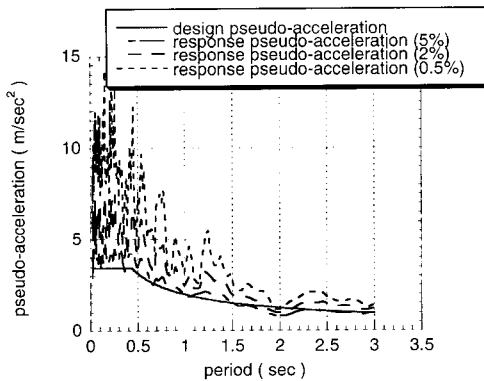


그림 7 응답 스펙트럼

랜드 지침이나 단순해석법은 실제 해석보다 더 안전측의 결과를 제시함을 알 수 있다. 그리고 수치해석에 의한 최대수위증가량이 지침과 단순해석법에 의한 것과 큰 차이를 보이는 데 이는 인공지진의 특성에 기인한다. 즉 설계스펙트럼을 만족하도록 인공지진을 시뮬레이션하더라도 개개의 인공지진은 그 주파수특성에 큰 차이를 보이며 이것은 실지진이 가지는 임의성을 재현하는 것으로 간주할 수 있다. 충분한 갯수의 인공지진을 예제구조물에 적용한 결과로부터 평균극한값(mean extreme value)을 산정하면 이러한 큰 차이는 없어진다.

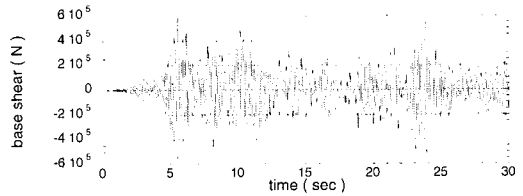


그림 8 바닥전단력의 시간이력

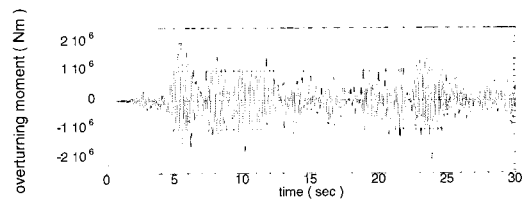


그림 9 전도모멘트의 시간이력

3.3.3.3 해석 결과 비교

위의 인공지진에 의한 주어진 탱크의 바닥 전단력, 전도 모멘트, sloshing 높이의 시간 이력은 각각 그림 8, 9, 10과 같다. 기존의 뉴질랜드 지침과 단순해석법에 의한 해석결과와의 비교한 것은 표 8에 수록되어 있다. 표 8에서 알 수 있듯이 기존의 뉴질

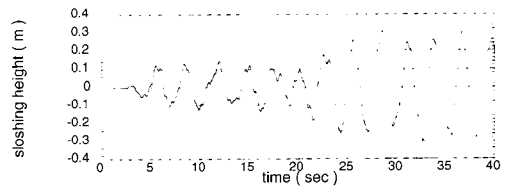


그림 10 Sloshing height의 시간이력

표 8 예제 구조물의 해석결과 비교

	This study	뉴질랜드 지침	단순해석법
interaction, 주기	0.0882 sec	0.09 sec	0.09 sec
sloshing 주기	2.767 sec	2.75 sec	2.72 sec
최대 바닥전단력	0.592 MN	0.605 MN	0.740 MN
최대 전도모멘트	2.067 MNm	1.881 MNm	2.670 MNm
최대 수위증가	0.311 m	0.96 m	1.14 m

4. 원통형 액체저장용 강탱크의 내진설계절차

원통형 액체저장용 강탱크의 내진설계절차는 그림 11과 같이 요약할 수 있다. 설계조건 즉, 내진등급, 가속도계수, 중요도계수, 지반계수가 설정되면 기능수행수준과 붕괴방지수준이 결정된다. 모드해석 시 기능수행수준 해석에는 유체-구조물 상호작용(fluid-structure interaction)만을 고려하며 붕괴방지수준 해석에는 지반-유체-구조물 상호작용을 고려한다. 붕괴방지수준의 해석에는 정착여부에 관계없이 탄성지진 응답계수의 산정, 탄소성좌굴에 대한 응력검토 및 바닥판의 응력/소성변형에 들림거동(uptilting)의 영향을 고려해야 한다. 탄성지진 응답계수의 산정에 적용하는 감쇄율은 강탱크의 경우 기능수행수준에서 2%, 붕괴방지수준에서 4%를 적용할 수 있다.

물론 탱크에 저장되어 있는 저장물의 양이 다른 경우 지진발생시의 동적거동이 다르므로 저장물이 최고수위인 경우와 저장물이 없는 경우 모두에 대한 해석이 요구되며 탱크의 지진해석결과를 바탕으로 시스템 구성단위의 파괴메카니즘 검토 및 피해파급에 대한 차단조치가 수행되어야 한다.

5. 결 론

원통형 액체저장 강탱크의 내진설계기준을 마련하기 위한 기초작업으로 설계개념과 원칙, 지진해석, 검토방법 및 피해파급 차단조치를 제시하였다.

설계기준으로 제시할 수 있는 단순해석법과 보다 상세한 해석법인 뉴질랜드지침을 동일한 모델에 적용, 그 결과를 비교하여 단순해석법의 보수성을 입증하였다. 원통형 액체저장 강탱크의 완전한 지진해석을 위해서는 수직모드에 대한 해석, 각 동적모드와 정수압에 대한 설계응력을 산출하는 방법 및 소성거동에 대한 검토방법이 요구된다. 이러한 사항을 단순해석법과 같이 표와 간편식으로 결정할 수 있는 지속적인 내진설계기준 마련작업을 수행하여야 한다.

감사의 글

이 연구는 한국학술진흥재단의 연구지원금과 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발 사업으로 수행된 것이다.

참고 문헌

1. Housner, G. W., "The dynamic behaviour of water tanks," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, 1963, pp. 381-387.
2. Veletsos, A. S. and Tang, Y., "Soil-structure interaction effects for vertically excited tanks," *Proc. 9th WCEE, Tokyo/Kyoto, Japan*, WCEE, Vol. VI, 1988, pp. 631-636.
3. Rammstorfer, F. G., Sharf, K., and Fisher, F. D., "Storage tanks under earthquake loadings," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 43, 1990, pp.

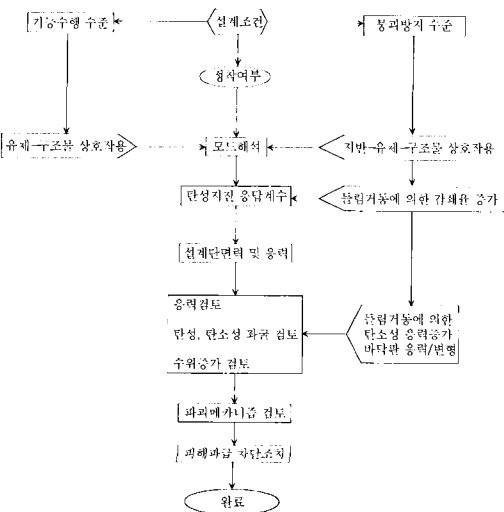


그림 11 원통형 액체저장 강탱크의 내진설계절차

- 261-282
4. Malhotra, P. K., "Base uplifting analysis of flexibly supported liquid-storage tanks," *EESD*, Vol. 24, 1995, pp. 1591-1607.
 5. Malhotra, P. K., "Seismic response of soil supported unanchored liquid-storage tanks," *Journal of Structural Engineering*, 1997, pp. 440-450.
 6. 고현무, 박장호, 김재관, "경계요소-유한요소 연계법에 의한 구형 수조구조물의 동적거동 특성해석", 대한토목학회 논문집, 제14권 제5호, 1994, pp. 1033-1042.
 7. 고현무, 김재관, 박관순, 하동호, "유체-구조물 상호작용을 고려한 면진구조물의 추계학적 응답해석", 대한토목학회 논문집, 제14권 제3호, 1994, pp. 463-472.
 8. 고현무, 김재관, 박정준, "구형 유체저장구조물의 유체-구조물 상호작용에 관한 해석적 연구", 대한토목학회 논문집, 제15권 제4호, 1995, pp. 765-775.
 9. Kim, J. K., Koh, H. M., and Kwak, I. J., "Dynamic response of rectangular flexible fluid containers," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 122, No. 9, 1996, pp. 807-817.
 10. Koh, H. M., Kim, J. K., and Park, J. H., "Fluid-structure interaction analysis of 3D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 109-124.
 11. 허택영, 이종립, 연관희, 조의경, "지진계측 데이터에 근거한 유체저장탱크의 동적응답 평가", 한국지진공학회 1997년도 춘계학술대회 논문집, 1권 1호, 1997, pp. 115-128.
 12. 박형기, 조양희, "부분구조법에 의한 지반-구조물 상호작용시스템의 지진응답 매개변수 연구", 한국지진공학회논문집, 제2권 제1호, 1998, pp. 1-10.
 13. Priestley, M. J. N. and et. al., "Seismic design of storage tanks", *New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1986.
 14. Rammerstorfer, F. G. and Sharf, K., "Empfehlungen zur ermittlung von belastungen aus erdbeben-beanspruchungen bei zylindrischen flüssigkeitsgefüllten tank-bau-werken," *Heft ILFB-1/94*, TU Wien, 1994.
 15. 국승규, "원통형 액체저장탱크 내진설계기준의 비교 연구", 한국지진공학회 논문집, 2권 2호, 1998, pp. 69-75.
 16. CEN, "Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, Part 4: tanks, silos and pipelines," Brussels, 1997.
 17. 한국지진공학회, "가스시설의 내진 설계 기준 연구", 1997.
 18. Malhotra, P. K., Wenk, T., and Wieland, M., "Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks," *prepared for Journal of Structural Engineering (IABSE)*, 1997.
 19. 건설교통부, "도로교표준시방서, 설계편", 서울, 1996.
 20. 윤정방, 이창근, "벽면의 유연성을 고려한 액체 저장탱크의 동적해석", 대한토목학회 논문집, 제7권 제4호, 1987, pp. 21-29.
 21. Haroun, M. A. and Housner, G. W., "Earthquake response of deformable liquid storage tanks," *J. applied mech.*, ASME, Vol. 48, 1981, pp. 411-418.
 22. 박장호, "면진 및 비면진 직사각형 수조구조물의 동적 거동 해석", 박사학위논문, 서울대학교, 1997.
 23. Haroun, M. A., "Vibration studies and tests of liquid storage tanks," *Earthquake Engineering and Sturctural Dynamics*, Vol. 11, 1983, pp. 179-206.