

# 원통형 액체저장탱크 내진설계기준의 비교연구

## A Comparative Study on the Earthquake Resistant Design Criteria for Cylindrical, Liquid-Storage Tanks

국 승 규\*  
Kook, Seung Kyu

### 국문요약

액체저장탱크 구조물은 지진에 의해 붕괴되는 경우 구조물의 파손 및 저장물의 손실에 의한 직접피해보다 파급효과(유독물질이나 오염물질의 유출로 지속적인 재산피해 및 환경파괴를 초래함)가 더욱 심각하므로 이러한 직,간접적 피해를 최소화하기 위한 내진설계기준의 제정이 시급한 과제이다. 본 논문에서는 원통형 액체저장탱크의 내진설계기준을 마련하기 위한 기초작업으로 뉴질랜드지침과 오스트리아지침의 해석방법을 고찰하고, 수치해석 예의 결과를 비교하여 두 지침의 적용타당성 및 문제점을 제시하였다.

**주요어** : 내진설계기준, 원통형 액체저장탱크, 뉴질랜드지침, 오스트리아지침

### ABSTRACT

Because the collapse of liquid-storage tank structures under earthquakes brings out substantially more damages by indirect effects(continuous losses of economy and environmental disruption due to the spillage of toxic contents or pollutants) than direct economic losses of tanks and contents, it is an urgent matter to provide earthquake resistant design criteria in order to minimize such direct/indirect damages. In this paper, as fundamental works to prepare earthquake resistant design criteria for cylindrical liquid-storage tanks, analysis methods given in the Recommendations of New Zealand and Austria are reviewed and the applicabilities and problems of the two methods are set forth by comparison of the analysis results with a numerical example.

**Key words** : earthquake resistant design criteria, cylindrical liquid-storage tanks, recommendations of New Zealand and Austria

## 1. 서 론

원자력 발전소와 같은 특수구조물이 아닌 일반적인 구조물에 대한 내진설계는 1988년 건축구조물을 시작으로 1991년 고속철도 사업에서 교량의 내진설계기준을 도입하게 된 것이 국내의 상황이다. 건물과 교량 이외에 내진설계가 요구되는 구조물로서 탱크구조물은 지진에 의해 붕괴되는 경우 구조물의 파손 및 저장물의 손실에 의한 직접피해보다 파급효과

(유독물질이나 오염물질의 유출로 지속적인 재산피해 및 환경파괴를 초래함)가 더욱 심각하므로 이러한 직,간접적 피해<sup>(1)</sup>를 최소화하기 위한 내진설계기준의 제정이 시급한 과제이다. 액체저장탱크의 동적거동에 대한 외국의 연구로는 견고한 지반상의 강체구조물로서의 동적거동<sup>(2)</sup>, 구조물-지반 상호작용에 의한 동적거동<sup>(3)</sup>, 탱크의 유연성을 고려한 좌굴거동<sup>(4)</sup>, 유연한 지반상의 들림거동<sup>(5)</sup>에 대한 연구 등이 있고 국내의 연구로는 구형 수조구조물의 동적거동 특성해석<sup>(6)</sup>, 유체-구조물 상호작용을 고려한 구형 탱크의 동적거동<sup>(7,8,9,10)</sup>, 지진계측데이

\* 정회원 · 부경대학교 토목공학과 조교수

타에 의한 동적응답<sup>(11)</sup>, 지반-구조물 상호작용 시스템의 지진응답<sup>(12)</sup>에 대한 연구 등이 있으며 현장적용이 가능한 내진설계지침으로는 뉴질랜드지침<sup>(13)</sup>, 오스트리아지침<sup>(14)</sup>이 있으나 아직까지 일반적으로 적용하기 위한 검증작업이 진행 중인 실정이다. 본 논문에서는 원통형 액체저장탱크의 내진설계기준을 마련하기 위한 기초작업으로 뉴질랜드지침과 오스트리아지침의 해석방법을 고찰하고, 1/2 축소모델을 설정하여 두 지침의 해석방법을 적용, 그 결과를 비교하여 적용타당성 및 문제점을 제시하고자 한다.

## 2. 원통형 액체저장탱크의 지진해석

### 2.1 해석절차

액체저장탱크의 동적거동은 응답스펙트럼해석법을 적용하여 기술하며 탱크의 동적거동에 따라 탱크의 지반정착여부를 결정한다. 탱크를 지반에 정착하는 것은 경제적인 부담이 크며 정착에 의해 불특정 지진하중에 대한 안정성을 확보하는 데에도 한계가 있으므로 설계지진에 대한 안정성이 입증된다면 정착하지 않는다. 따라서 탱크구조물의 동적거동해석은 지반에 정착하지 않음으로 인하여 발생하는 들림거동에 의한 영향을 검토하는 방식을 취하게 되며 다음과 같은 절차에 의하여 수행된다:

- 1) 응답스펙트럼해석
- 2) 설계단면력 산정
- 3) 응력/좌굴검토 및 들림거동에 의한 영향 검토

### 2.2 응답스펙트럼해석

원통형, 액체저장탱크의 지진해석에 응답스펙트럼해석법을 적용하는 경우, 그림 1과 같은 스프링-질량 모델을 설정하여 수평모드와 수직모드를 고려한다(Spring-Mass Analogy). 수평방향 1차원 동적거동에는 대류모드(convective mode)와 충격모드(impulsive mode)가 고려되

며 충격모드는 탱크벽체의 유연성에 따라 강체모드(rigid mode)와 유연체모드(flexible mode)로 구분한다. 그림 1에서  $M_{SL}$ ,  $M_B$ ,  $M_D$ 는 각 모드의 질량성분으로 대류성분(convective mass), 강체성분(impulsive rigid mass), 유연체성분(impulsive flexible mass)을 나타내며  $H_{SL}$ ,  $H_B$ ,  $H_D$ 는 질량의 작용위치이다.

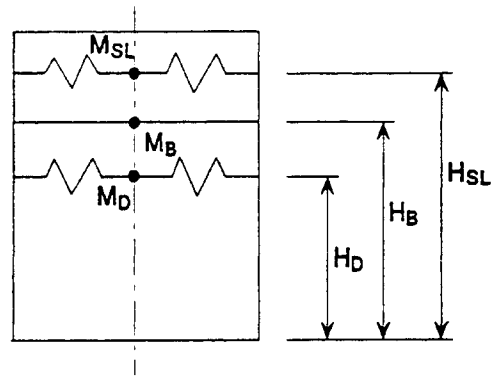


그림 1 스프링-질량 모델

각 모드의 질량성분(그림 2)과 작용위치(그림 3)는 저장액체의 형상비( $\frac{H}{R} = \frac{\text{수위}}{\text{반경}} = \alpha$ )에 의해 결정한다. 그림 2의  $M_T$ 는 저장액체의 총질량,  $\frac{M_X}{M_T}$ 는 각 모드의 질량성분비이며 그림 3의  $v$ 는 작용위치와 수위의 비를 나타낸다.

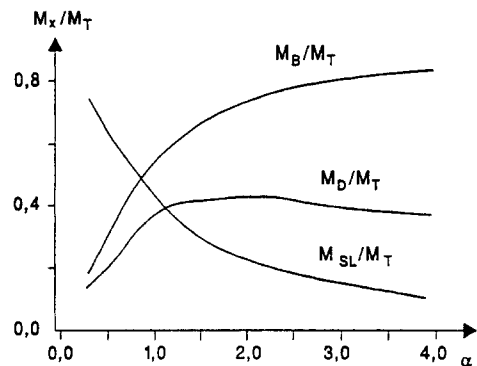


그림 2 강체-, 유연체-, 대류모드의 질량성분

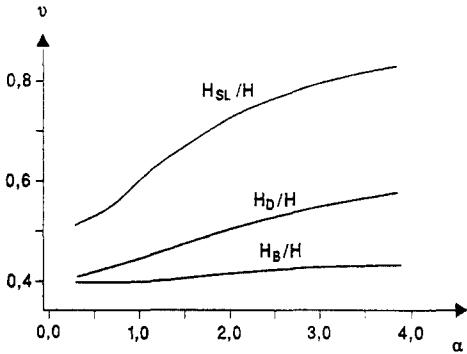


그림 3 대류-, 유연체-, 강체모드의 작용위치

각 모드에 대한 고유주기의 산정시 뉴질랜드지침은 저장액체의 형상비, 탱크의 유연성 ( $\frac{t}{R} = \frac{\text{벽체두께}}{\text{반경}}$ ) 및 지반조건을 고려한다 (유체-구조물-지반 상호작용). 지반-구조물 상호작용을 고려하기 위해 지반의 스프링상수와 감쇠상수를 결정하며 지반-구조물 상호작용에 의해 고유주기는 길어지고 감쇠상수는 증가한다. 뉴질랜드지침에서 적용한 지반-구조물 상호작용 해석법은 ATC-3-06<sup>(15)</sup>의 절차를 원용한 것이다. 반면에 오스트리아지침은 유체-구조물 상호작용만을 고려하며 수직모드를 다시 강체모드와 유연체모드로 구분한다. 설계지진에 대한 각 모드의 탄성지진응답계수 ( $C_{sm}$ ) 산정시 적용되는 감쇠율( $\zeta$ )은 대류모드의 경우 두 지침 모두 0.5%를 적용하나 충격모드와 수직모드의 경우 들림거동을 고려하여 각각 다른 값을 적용한다(수치해석 예 참조).

### 2.3 설계단면적 산정

설계단면력으로는 벽체저면에서의 전도모멘트( $MM$ ; overturning moment)와 수압( $P$ ; hydraulic pressure)을 산출한다. 전도모멘트는 충격모드와 대류모드, 즉 수평모드에 의한 성분을 조합하여 산출하며 뉴질랜드지침은 충격 모드성분(강체모드, 유연체모드)을 절대합으로

조합하고 대류모드성분과 제곱합평방근법(SRSS)에 의해 수행하는 반면 오스트리아지침은 세 모드성분의 조합을 제곱합평방근법(SRSS)에 의해 수행한다.

$$MM = \sqrt{MM_{SL}^2 + (MM_B + MM_D)^2} \quad ; \text{New Zealand}$$

$$MM = \sqrt{MM_{SL}^2 + MM_B^2 + MM_D^2} \quad ; \text{Austria} \quad (1)$$

수압은 수평모드에 의한 수압( $P_K$ ,  $K = SL, B, D$ ; 그림 4), 수직모드에 의한 수압 및 정수압을 고려하여 산출한다. 설계단면력은 저장액체는 물론 탱크벽체와 지붕의 질량을 같이 고려하여 산출하는 것이 원칙이나 두 지침 모두 저장액체 만을 고려하고 있다(뉴질랜드지침은 벽체저면의 압축응력 산정시 벽체자중을 고려한다.)

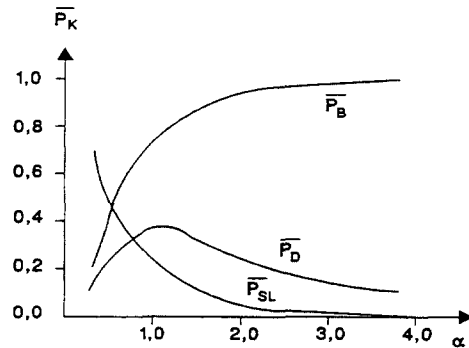


그림 4 강체-, 유연체-, 대류모드의 벽체저면 수압비

### 2.4 응력/좌굴검토 및 들림거동에 의한 영향 검토

뉴질랜드지침은 원주방향력(hoop tension)과 휨모멘트(bending moment)에 대한 응력검토와 탄성좌굴(그림 5; elastic buckling) 및 탄소성좌굴(그림 6; elastic-plastic buckling)에 대한 검토를 수행한 후 들림거동(그림 7)에 의한 탄

소성좌굴응력의 증가, 바닥판의 응력 및 소성 변형을 검토한다.  $n_{x,max}$ 는 들림거동에 의한 벽체저면의 최대압축응력이다.

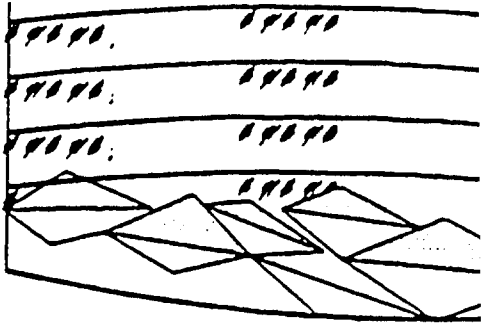


그림 5 탄성좌굴(elastic buckling)

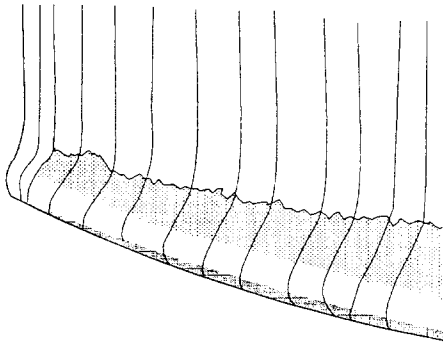


그림 6 탄소성좌굴(el.-pl. buckling)

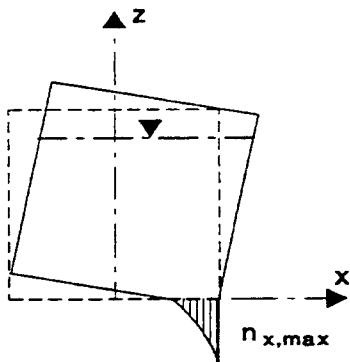


그림 7 들림거동

오스트리아지침은 탄성좌굴검토와 탄소성 좌굴검토를 수행하기 위해 전도모멘트와 수평모드에 의한 수압이 들림거동과 직교지진력에 의해 증가하는 것을 고려한다. 들림거동에 의한 증가율  $N_{unanch} / N_{anch}$ 은 그림 8에 의해 결정되며 직교지진력에 의한 2차원 동적거동  $E_H^{2D}$ 는 다음과 같이 산정한다.

$$E_H^{2D} = E_H^{NS} \left\{ 1 + \left( \frac{E_H^{EW}}{E_H^{NS}} \right)^{-0.5} \right\} + E_H^{EW} \left\{ 1 + \left( \frac{E_H^{NS}}{E_H^{EW}} \right)^{-0.5} \right\} \quad (2)$$

여기서  $E_H^{EW} = 0.3 \times E_H^{NS}$ , 즉 E-W성분을 NS성분의 30%로 가정하는 경우 1차원 동적거동에 대한 증가율은 4.4%이다. 탄성좌굴은 수직모드에 의해 내압(internal pressure)이 최소가 되는 경우, 탄소성좌굴은 수직모드에 의해 내압이 최대가 되는 경우의 좌굴응력(buckling stress)으로 검토한다.

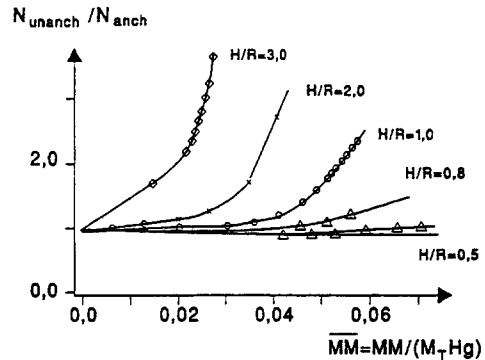


그림 8 들림거동에 의한 증가율

### 3. 수치해석 예

#### 3.1. 해석모델

수치해석 예로 선정된 탱크모델<sup>(11)</sup>은 그림 9와 같고 탱크와 지반의 재료특성은 표 1과 같다.

표 1 탱크 및 지반의 재료특성

구분	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$H$ ( $m$ )	$R$ ( $m$ )	$t$ ( $mm$ )	$E$ ( $MPa$ )	$G$ ( $MPa$ )	$\nu$ (-)	$v_s$ ( $m/s$ )
탱크	7850	7.0	3.5	3.5	200	-	-	-
지반	1800	-	-	-	50	19.2	0.3	103

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $E$ 는 탄성계수,  $G$ 는 전단 탄성계수,  $\nu$ 는 포아슨비,  $v_s$ 는 전단파속도이다. 저장액체의 밀도  $\rho_L$ 은  $800 kg/m^3$ 으로 가정하였다. 도로교표준시방서<sup>(16)</sup>에 의거하여 해석에 적용하는 기준값은 가속도계수(A) 0.14, 지반계수(S) 1.2를 가정하였고 탄성지진응답계수는 다음과 같이 산출하였다:

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \leq 2.5A$$

( $T_m$ ;  $m$ -번째 진동모드의 주기)

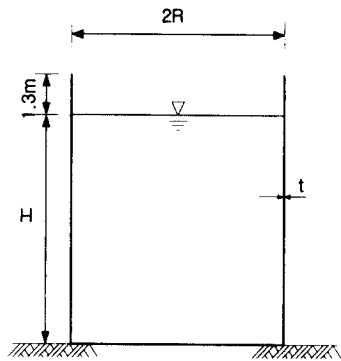


그림 9 수치해석 모델

응답수정계수( $R$ )는 연성(ductility), 초과강도(overstrength) 및 정착탱크의 경우 정착볼트의 비탄성거동을 고려하여 결정하며 붕괴방지수준의 설계에서 2 정도의 값을 설정할 수 있다. 본 수치해석 예에는 응답수정계수 1.0을 가정하였다.

### 3.2 해석결과

뉴질랜드지침과 오스트리아지침을 적용하여

지진해석을 수행한 결과를 표2 - 표5에 비교하여 제시하였다.

표 2  $\frac{M_X}{M_T}$  (-) 및  $\nu$ (-)

모드	뉴질랜드 지침		오스트리아 지침		
	$\frac{M_X}{M_T}$	$\nu$	$\frac{M_X}{M_T}$	$\nu$	
충격모드	유연체	0.70	0.49	0.42	0.51
	강체	0.77	0.42	0.76	0.42
대류모드	0.23	0.75	0.23	0.74	

표 3 주기  $T_m$ (sec), 감쇠율  $\zeta$ (%) 및 탄성 지진응답계수  $C_{sm}$ (-)

모드	뉴질랜드 지침			오스트리아 지침		
	$T_m$	$\zeta$	$C_{sm}$	$T_m$	$\zeta$	$C_{sm}$
충격모드	유연체	10.0	0.35	0.08	2.0	0.53
	강체			0.07	0.35	0.00
대류모드	2.75	0.5	0.33	2.76	0.5	0.32
수직모드	유연체	5.0	0.35	0.08	6.0	0.35
	강체			0.18	0.35	0.00

표 4 벽체지면에서의 수압  $P_K$ ( $kPa$ ) 및 전도 모멘트  $MM$ ( $MNm$ )(\*; 들림거동에 의한 증가치)

모드	뉴질랜드 지침		오스트리아 지침	
	수압	전도모멘트	수압	전도모멘트
충격모드	9.13	1.881 (1.892)*	4.47	1.875 (3.299)*
대류모드	0.36		0.44	
수직모드	19.23		20.59	

표 5 들림거동을 고려한 좌굴검토와 안전율  $\gamma(-)$

검 토	뉴질랜드 지침			오스트리아 지침		
	응력 (MPa)	좌굴응력 (MPa)	$\gamma$	응력 (MPa)	좌굴응력 (MPa)	$\gamma$
탄성좌굴	14.47	63.12	4.4	958.5	63.65	0.07
탄소성좌굴	30.89	85.31	2.8	958.5	69.76	0.07

질량성분비를 비교한 결과(표 2) 유연체모드의 경우 현저한 차이가 난다. 그러나 오스트리아 지침은 모드기여도  $\Gamma$ 를 고려하여 전도모멘트와 수압을 결정하므로 유연체모드의  $\Gamma_D=1.53$ 를 감안하면  $M_D\Gamma_D=0.42 \times 1.53=0.64$ 가 되어 해석결과에 큰 차이를 주지 않았다. 오스트리아지침은 고유주기의 산정시 구조물-지반 상호작용을 고려치 않음으로 충격모드와 수직모드의 고유주기가 뉴질랜드지침보다 작은 값이 구해지며(표 3) 따라서 충격모드에 의한 벽체 저면에서의 수압에 차이가 발생한다(표 4). 또한 뉴질랜드지침의 경우 충격모드에 적용한 감쇠율 10%는 지나치게 큰 값이며 강탱크의 경우 기능수행수준(탄성거동)에서 2%, 붕괴방지수준(비탄성거동)에서 4% 정도가 적절하다. 그러나 이러한 응답스펙트럼해석방법의 차이는 전도모멘트(표 4) 및 좌굴응력(표 5)의 산정에 큰 영향을 주지 않았으며 결정적인 차이는 들림거동의 영향을 산정하는 과정(그림 8)에서 발생하였다. 모델로 선정된 탱크는 설계지진 발생시 뉴질랜드지침에 의하면 안전하나 오스트리아지침에 의하면 안전치 못한 것으로 상반된 결과가 나타났으며(표 5) 오스트리아지침에 제시된 설계도표는 계산과정에서 도표의 범주를 벗어나는 값을 외삽법(extrapolation)에 의해 구해야 하는 문제점이 발생하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 원통형 액체저장탱크의 내진

설계기준을 마련하기 위한 기초작업으로 뉴질랜드지침과 오스트리아지침의 해석방법을 고찰하였으며, 1/2 축소모델에 두 지침을 적용하여 타당성 및 문제점을 제시하였다.

오스트리아지침은 설계도표의 적용시 외삽법을 사용할 수 없다고 명시하고 있으며 설계도표를 적용할 수 있는 가속도계수  $A$ 의 상한값은 0.065로 확인된 바 이는 특정상황(0.065g이하의 약진지역)에만 국한되므로 오스트리아지침은 탱크의 내진설계에 일반적으로 적용할 수 없다.

뉴질랜드지침은 일반성을 갖춘 해석방법을 제시하고 있으므로 적용타당성은 입증되었다고 할 수 있다. 그러나 아직 미해결과제라 할 수 있는 들림거동의 영향(감쇠율, 응답수정계수)에 대한 연구가 보다 더 수행되어야 하며 또한 해석방법이 너무 세분화되어 있으므로 실무자들의 현장적용이 가능한 시방기준으로 제시하기 위해서는 해석방법의 단순화가 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 부경대학교 기성희의 연구지원금에 의한 것이며 연구비지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Jennings, P.E., "Engineering features of the San Fernando earthquake," *EERI-71-02*, California Institute of Technology, Pasadena, 1971, pp. 434-470.
2. Housner, G.W., "The dynamic behaviour of water tanks," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, 1963, pp. 381-387.
3. Veletsos, A.S. and Tang, Y., "Soil-structure interaction effects for vertically excited tanks," *Proc. 9th WCEE*, Tokyo/Kyoto, Japan, Vol. VI, 1988, pp. 631-636.

4. Rammstorfer, F.G., Sharf, K., Fisher, F.D., "Storage tanks under earthquake loadings," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 43, 1990, pp. 261-282.
5. Malhotra, P.K., "Base uplifting analysis of flexibly supported liquid-storage tanks," *EESD*, Vol. 24, 1995, pp. 1591-1607.
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. 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 erdbebenbeanspruchungen bei zylindrischen flüssigkeitsgefüllten tankbauwerken," *Heft ILFB-1/94*, TU Wien, 1994.
15. *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings*, ATC-3-06, 1984.
16. 건설교통부, "도로교표준시방서, 설계편", 서울, 1996.