KIGAS Vol. 27, No. 4, pp 34~42, 2023
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.4.42

평저형 원형 저장탱크의 지진거동 특성 및 성능기반 내진설계법 제안

한동윤 · 선창호* · †김익현* · 남형모**
울산대학교 건설환경공학부 석사과정, *울산대학교 건설환경공학부 교수, **한국가스안전공사
(2023년 10월 5일 접수, 2023년 11월 22일 수정, 2023년 12월 8일 채택)

Seismic Behavior Characteristics of Ground Storage Circular Tanks and Proposal of Performance-based Seismic Design Method

Han dong yun · Sun chang ho · †Kim ick hyun · Nam, hyung mo*
Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610 Kore
**Korea gas Safety Corporation, Umsung 22738, Korea*
(Received October 5, 2023; Revised November 22, 2023; Accepted December 8, 2023)

요 약

산업시설이 국가 경제에 기여하는 바를 고려할 때 지진에 대한 운전성 확보는 매우 중요하다. 그러나, 현행 내진설계의 기본 개념은 대규모 지진에 대해 주로 시설물의 연성거동을 허용하며 붕괴방지를 목적으로 구조적인 안전성만을 고려한다. 산업시설의 운전성 확보를 위해, 산업시설물의 구조거동 특성에 따라 운전성을 유지하기 위한 내진성능수준이 다양할 수 있으며, 이를 만족하기 위한 내진설계방법이 필요하다.본 연구에서는 평저형 저장탱크에 대한 비선형 응답이력 해석으로 비선형 지진거동 특성($R-\mu-T$)을 분석하고 이를 바탕으로 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계 방법을 새롭게 제안하였다.

Abstract - Considering the contribution of industrial facilities to the national economy, securing operability against earthquakes is very important. However, the basic concept of current seismic design mainly allows ductile behavior of facilities against large-scale earthquakes and only considers structural safety for the purpose of preventing collapse. In order to secure the operability of industrial facilities, the level of seismic performance to maintain operability may vary depending on the structural behavior characteristics of the industrial facility, and a seismic design method is needed to satisfy this. In this study, a ground storage tanks Nonlinear seismic behavior characteristics($R-\mu-T$) were analyzed through nonlinear response history analysis, and based on this, a new reliability-based, performance-based seismic design method was proposed.

Key words : ground storage tank, seismic behavior, $R-\mu-T$, performance based design

I. 서 론

1.1 연구배경

석유화학 및 가스플랜트와 같은 주요 산업시설이 지진 시 피해를 입어 운전(운영)이 중지되면 국가경제에 직·간접적으로 큰 피해를 유발하게 되므로 운전성 확보(유지)가 매우 중요하다. 주요 시설물의 경우 지진·화산재해대책법에 의해 내진설계가 의무화되어 있어 내진설계가 되고 있다. 현행 내진설계의 기본개념은 재현주기가 짧은(지진강도가 작은) 지진에 대해서는 시설물이 탄성거동하고, 재현주기가 긴(지진강도가 큰) 지진에 대해서는 붕괴가 일어나지 않도록 설계하며 독립된 개별 시설물의 중요도를 반영하여 설계지진의 재현주기를 달리 적용하고 있다. 반면, 산업시설은 설비, 저장탱크, 배관 등 다양한 시설물이 기능

†Corresponding author:ickhyun@ulsan.ac.kr
Copyright ⓒ 2023 by The Korean Institute of Gas

적으로 상호 연계되어 있어, 상호 연계된 전체시스템의 운전성을 유지할 수 있도록 이들 구성요소(시설물)를 설계할 필요가 있다. 따라서 운전성을 확보할 수 있다면 각 구성요소의 지진거동 특성에 따라 허용 가능한 손상수준을 붕괴방지수준 이외에도 다양하게 선택할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 '성능기반' 내진설계를 적용할 필요가 있다. '성능기반' 내진설계는 특정 설계법에 구속되지 않고 유연한 방법으로 설계된 시설물에 대해 비선형 지진해석(또는 실험)을 수행하여 내진성능 확보 여부를 확인하는 것이 기본이다. 한편, 설계자의 편의를 위해 요구성능을 만족시키는 하나의 대안적 설계법을 제시하기도 한다.

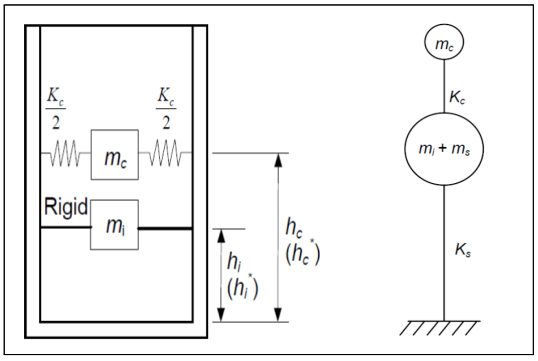
이 연구에서는 유체-구조물의 상호작용을 갖는 평저형 원형저장탱크에 대해 비선형응답이력해석을 수행하여 지진응답특성(비선형 응답의 평균값 및 표준편차)을 분석하였고 이에 기반하여 성능기반 내진설계를 위해 신뢰도 기반의 대안적 설계방법을 새롭게 제안하였다.

Ⅱ. 평저형 탱크의 지진거동 특성 분석

2.1 평저형 저장탱크의 지진해석모델

평저형 저장탱크의 경우 진동하게 되면 정수압뿐만 아니라 충격모드(강체와 같이 거동, impulsive mode) 및 대류모드(출렁거림으로 인해 유연하게 거동, convective mode)의 동수압이 액체로부터 발생하여 탱크 벽면 및 기초에 작용한다. 이러한 동수압의 영향은 Fig 1(a)와 같이 스프링-질량으로 모델링할 수 있으며 이를 (b)와 같이 2질점으로 보다 간략하게 모델화할 수 있다.

Fig 1(a)에서 m_i, m_c는 각각 충격모드 및 대류모드



(a) 스프링-질량 모델 (b) 2-질점 모델

Fig. 1. Spring-mass model of ground storage tanks.

의 액체질량이며, h_i 및 h_c는 각각 탱크바닥면으로부터 이들 질량까지의 높이이다. 충격모드 질량은 탱크 벽면에 강체(Rigid Link)로 연결되고, 대류모드 질량은 탱크 벽면에 스프링계수가 K_c인 스프링 요소(Elastic Link)로 연결된다. 이들 설계정수는 관련기준[1]에 따라 산정할 수 있다.

관련기준[1]에서는 탱크의 형상비(높이/지름)에 따라 두 그룹($h_w/d \le 0.75, h_w/d > 0.75$)으로 구분하여 모델링 방법을 다르게 적용하고 있어 이번 연구에서는 $h_w/D > 0.75$에 속하는 탱크를 대상으로 하여 연구를 수행하였다.

2.2 평저형 탱크의 R-μ-T 관계 분석

성능기반 내진설계의 경우 시설물의 비선형 응답변위의 크기(변위연성도, μ)를 활용하여 설계할 수 있으며 이는 시설물의 진동주기(T)와 응답수정계수(R)에 따라 다르다. 따라서, 시설물의 $R-\mu-T$의 관계 특성을 파악하는 것이 중요하다. 1-질점계 구조물 경우 다양한 $R-\mu-T$ 관계식이 제안되어 있으며 이 중 아래의 Newmark의 제안식이 널리 적용되고 있다[2]. 응답수정계수가 커지면(구조물의 설계항복강도가 작아지면) 응답 변위연성도는 증가하며 장주기(식(2))에 비해 단주기(식(1))일 때 변위연성도는 크게 증가한다.

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (0.12s \le T \le 0.5s) \tag{1}$$

$$R = \mu \quad (T \ge 1s) \tag{2}$$

여기서,

$$R = \frac{F_{el}(\text{탄성지진력})}{F_y(\text{설계항복강도})} \tag{3}$$

$$\mu = \frac{\Delta_d(\text{응답변위})}{\Delta_y(\text{항복변위})} \tag{4}$$

식(3), (4)에서 F_y와 Δ_y는 푸쉬오버(Push-over) 해석, F_{el}은 스펙트럼해석으로 구할 수 있고, Δ_d는 비선형 응답(시간)이력해석을 통해서 구할 수 있다.

Table 1에서와 같이 형상비(h_w/d)가 0.75~1.2인 4개 탱크에 대해 지진거동특성($R-\mu-T$)을 분석하였다.

각 해석모델의 탄성지진력(F_{el})을 스펙트럼해석과 식(5)의 간이식으로 산정하면 Table 2와 같다. Table 2에서와 같이 해석모델의 대류모드 질량(m_c)은 전체 액체질량(m_t)의 19~31%정도이며, 진동주기(T_c)는 3.33~4.34(s)로 장주기이다. 대류모드에 의한 관성력

Table 1. Parameters of analysis model

Description	Model1	Model2	Model3	Model4
d (m)	17	12	12.2	10
h (m)	17.7	10.5	13.2	14.1
h_w (m)	15	8.9	11.2	12
h_c (m) (h_c/h_w)	10.7 (0.71)	6.0 (0.68)	8.1 (0.72)	9.3 (0.78)
h_i (m) (h_i/h_w)	5.96 (0.39)	3.3 (0.375)	4.5 (0.4)	5.1 (0.42)
h_w/d	0.88	0.75	0.92	1.2
m_c (kN/g) (m_c/m)	884.8 (0.25)	309.4 (0.31)	327.3 (0.25)	180.6 (0.19)
m_i (kN/g) (m_i/m_t)	2614.6 (0.77)	702.5 (0.70)	1022.6 (0.78)	807.0 (0.86)
K_c (kN/m)	1850	911	954	643
T_i (s)	0.17	0.14	0.16	0.17
T_c (s)	4.34	3.64	3.62	3.33

d : diameter of tank
h : height of tank
h_w : height to free water surface
h_i : height to impulsive mass
h_c : height to convective mass
m_t : total mass of storage liquid
T_i : impulsive mode period
T_c : convective mode period

Table 2. Elastic forces

Model	Eq(5) ①	Spectral analysis ②	Ratio (①/②)
Model 1	69124 kN	70621 kN	0.98
Model 2	18585 kN	18874 kN	0.99
Model 3	27035 kN	27429 kN	0.98
Model 4	21335 kN	21670 kN	0.98

은 충격모드 관성력에 비해 매우 작아서 무시할 수 있는 수준이기 때문에 간이식(식(5))으로 산정하여도 결과는 유사하다.

$$F_{el} = (m_i g) \times S_a(T_i) \qquad (5)$$

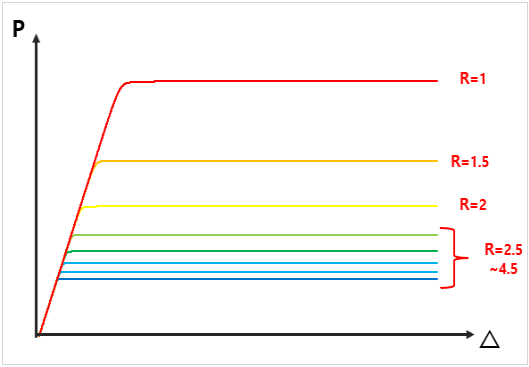


Fig. 2. Force(P)-Disp.(△) relations.

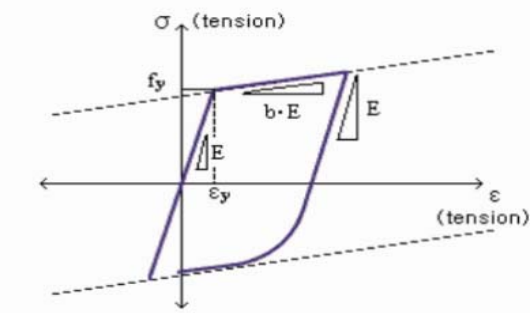


Fig. 3. Inelastic material model (Menegotto-Pinto Model).

여기서, g는 중력가속도, $S_a(T_i)$는 충격모드 진동주기에서의 설계응답가속도이다.

구조물의 설계항복강도(F_y)와 항복변위(Δ_y)는 푸쉬오버해석으로 산정한다. 평저형 저장탱크에서 대부분의 관성력을 생성하는 주요 질량이 충격질량(m_i)인 점을 감안하여 재하점(하중 작용점)은 충격질량의 위치로 하였다. 각 모델에서 탱크의 응답수정계수(R)는 재료의 항복값을 조정하여 0.5 간격으로 1부터 4.5까지 변하도록 하였다. Fig. 2는 R에 따른 하중-변위(P-△) 곡선을 나타낸 것으로 R에 무관하게 초기강성은 동일하며 항복강도와 항복변위는 R에 반비례한다.

각 해석모델에 15개의 입력지진파를 입력하여 비선형응답(시간)이력해석(THA;Time History Analysis)을 수행하였으며, 최대응답변위(Δ_d)를 충격모드 위치에서 얻고 이를 푸쉬오버해석에서 구한 항복변위(Δ_y)로 나누어 변위연성도(μ)를 산정하였다. 저장탱크 재료(강재)의 비선형 역학모델은 Menegotto-Pinto

Model(Fig. 3 참조)을 적용하였으며, 탄성계수(E)는 2×10^5(MPa), 항복 후 2차강성은 무시할 수준으로 하였다(b ≃ 0).

응답이력해석에 필요한 입력지진파는 설계응답스펙트럼(지진구역 I, S_2지반, 재현주기 1000년, 5% 감쇠비)에 부합되도록 상용프로그램인 SIMQKE를 사용하여 15개를 생성하여 적용하였다[3,4]. 입력지진파의 포락곡선은 내진설계기준에 따랐다[3]. Fig. 4는 15개의 입력지진파 중 예시로 하나의 파형(가속도시간이력)을 나타낸 것이며 Fig. 5에 보인 바와 같이 설계응답스펙트럼에 잘 부합한다.

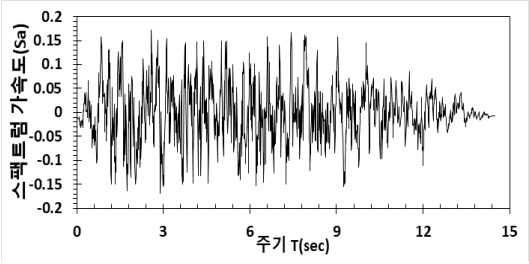


Fig. 4. Input motion.

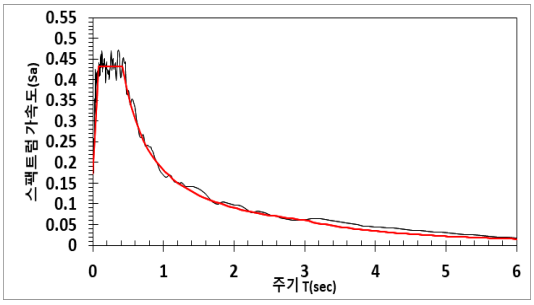


Fig. 5. Design spectrum.

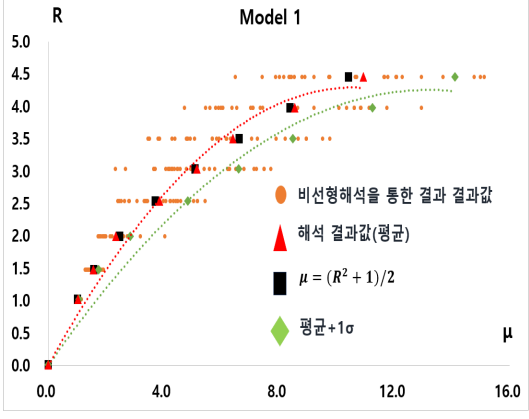


Fig. 6. $R-\mu$ relationship of Model 1

Fig 6은 입력지진파에 대한 Model1의 지진해석으로부터 구한 $R-\mu$ 사이의 관계를 나타낸 것이다. 동일한 R값을 갖는 해석모델에서 탄성지진해석과 달리 비선형해석에서는 입력지진파의 최대가속도(PGA)가 동일하고 진동수성분(contents)이 유사(설계응답스펙트럼과 유사)하여도 구조물의 비선형거동에 따른 진동주기의 변화와 입력지진파의 진동수 배열특성 등에 차이가 있어 응답 변위연성도가 모두 다르게 나타난다. R이 증가할수록(설계항복강도가 작을수록) 변위연성도 값의 평균값(μ_m^{RHA})이 증가하며 응답의 분산정도도 커진다. 이러한 경향은 Model 2, 3, 4에서도 동일하게 나타난다.

Fig 7은 각 모델의 응답 변위연성도 평균값(그림에서 ▲)과 이의 분포를 정규분포로 가정했을 때의 평균값+1 σ (σ: 표준편차)(그림에서 ◆)을 나타낸 것이다. 응답 변위연성도의 평균값을 Newmark의 제안식(Eq. (1): $R=\sqrt{2\mu-1}\rightarrow\mu=(R^2+1)/2$, 그림에서 ■)과 비교하기 위하여 함께 나타내었다.

Table 3에 해석 결과값과 분석값을 상세하게 나타내었다. 해석으로부터 구한 응답 변위연성도의 평균값(μ_m^{THA}) 특성을 분석하기 위하여 Newmark의 제안식에 의한 변위연성도(μ^{NM})와 비교하였다. μ_m^{THA}/μ^{NM}를 산정하면 Model 1, 2, 3, 4에서 각각 0.97~1.05(평균 1.01), 0.81~0.94(평균 0.86), 0.92~1.16(평균 1.05), 0.86~1.04(평균 0.97)이다. Model 2에서 다소 편차가 있지만 모델 전체의 평균값은 0.97이며 상관계수(R^2)는 0.998으로 잘 부합한다. 저장탱크 모델의 지진거동

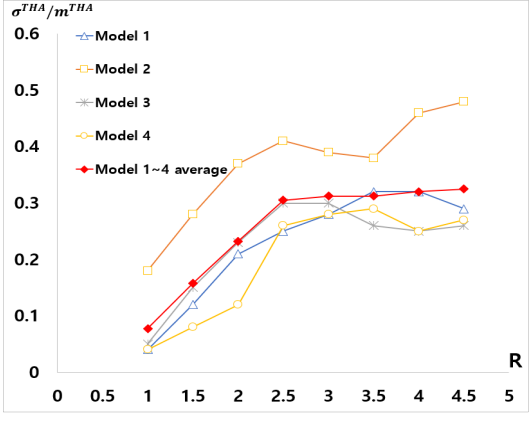


Fig. 8. $R-(\sigma^{THA}/m^{THA})$ relations.

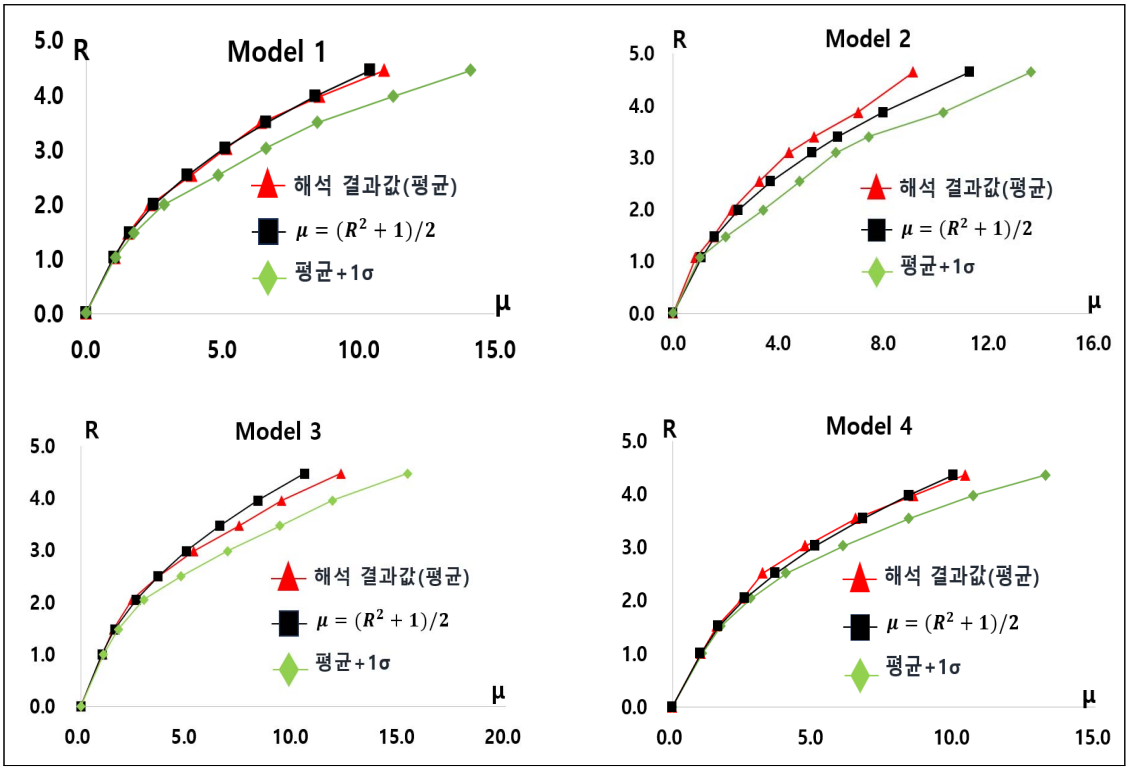


Fig. 7. R-μ relations of models.

은 충격모드에 의해서 지배되고 이들 진동주기(T_i)는 0.14~0.17(s)로 단주기여서 Equal energy 관계식을 적용하여 산정된 Newmark 값에 잘 부합하는 것으로 판단된다. 따라서 평저형 저장탱크의 R값에 따른 응답변위연성도는 Newmark의 제안식(식(1))으로 산정하여도 무방함을 알 수 있다.

또한 변위연성도의 분산정도를 파악하기 위하여 응답변위의 분포를 정규분포로 가정하여 표준편차(σ^{THA})를 산정하고 이를 평균값(m^{THA})으로 정규화(σ^{THA}/m^{THA})하였다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다. R이 2.5 이하에서는 선형으로 증가하고 2.5 이상에서는 더 이상 증가하지 않고 일정해지는 경향을 보인다. 다른 모델에 비해 Model 2의 분산정도가 좀 크지만 R에 대한 4개 모델의 σ^{THA}/m^{THA}의 평균값은 다음과 같이 2선형(bi-linear)으로 나타낼 수 있다.

$$(\sigma/m)^{prop} = 0.13R \; (1 \leqq R < 2.5) \tag{6a}$$

$$(\sigma/m)^{prop} = 0.3 \; (R \geqq 2.5) \tag{6b}$$

Ⅲ. 성능기반 내진설계방법 제안

성능기반 내진설계에서는 시설관리자(발주자)가 요구하는 임의의 내진성능수준을 만족하도록 설계하여야 하며 성능수준 확보 여부를 입증하여야 한다.[6]~[8]. 다만 지나치게 다양한 내진성능수준을 정의하는 경우 적용에 어려움이 있어 일반적으로 4단계의 성능수준(기능수행, 즉시복구, 장기복구, 붕괴방지)을 정의한다[3].

Fig. 9는 충분하게 연성거동($\mu_{cap} \geqq 5.0$)을 하는 시설물의 성능수준을 정의한 예시이다. 이 연구에서는 비선형거동 구간인 소성변위연성도(μ_{pl})를 3등분하여 각 내진성능수준의 구간을 정의하였다. 한편 ASCE 41에서는 극한변위점까지의 구간을 4등분하여, 각 성능수준의 한계점을 IO(Immediate Occupancy)는 50%, LS(Life Safety)는 75%, CP(Collapse Prevention)는 100%점에 위치시킨다[5]. Table 4는 각 성능수준의 거동한계값를 비교한 것으로 이 연구의 제안값이 ASCE 41에 비하여 약간 보수적임을 알 수 있다.

Table 3. Statistical characteristics of responses

R	응답의 평균(m) 및 표준편차(σ)			변위연성도(μ) 비교			$m+1\sigma$	
	m^{THA}	σ^{THA}	$\frac{\sigma^{THA}}{m^{THA}}$	μ_m^{THA}	μ^{NM}	$\frac{\mu_m^{THA}}{\mu^{NM}}$	$m^{THA}+\sigma^{THA}$	$\frac{m^{THA}+\sigma^{THA}}{m^{THA}}$
Model 1								
4.5	0.051	0.014	0.27	10.9	10.4	1.05	0.065	1.27
4.0	0.045	0.014	0.31	8.5	8.4	1.01	0.059	1.31
3.5	0.038	0.012	0.32	6.4	6.6	0.97	0.050	1.32
3.0	0.035	0.009	0.26	5.2	5.1	1.02	0.044	1.26
2.5	0.031	0.007	0.23	3.9	3.7	1.05	0.038	1.23
2.0	0.024	0.005	0.21	2.4	2.5	0.96	0.029	1.21
1.5	0.022	0.002	0.09	1.6	1.6	1.00	0.024	1.09
1.0	0.021	0.0008	0.04	1.0	1.0	1.00	0.022	1.04
	평균		0.22	평균		1.01	평균	1.22
Model 2								
4.7	0.028	0.013	0.46	9.1	11.3	0.81	0.041	1.46
3.9	0.026	0.012	0.46	7.0	8.0	0.88	0.038	1.46
3.4	0.023	0.009	0.39	5.4	6.3	0.86	0.032	1.39
3.1	0.020	0.008	0.40	4.4	5.3	0.83	0.028	1.40
2.5	0.017	0.007	0.41	3.2	3.7	0.86	0.024	1.41
2.0	0.015	0.005	0.33	2.2	2.5	0.88	0.020	1.33
1.5	0.014	0.004	0.29	1.5	1.6	0.94	0.018	1.29
1.1	0.011	0.002	0.18	0.9	1.1	0.82	0.013	1.18
	평균		0.37	평균		0.86	평균	1.37
Model 3								
4.5	0.047	0.012	0.26	12.2	10.5	1.16	0.059	1.26
4.0	0.041	0.01	0.24	9.5	8.3	1.14	0.051	1.24
3.5	0.037	0.009	0.24	7.4	6.5	1.14	0.046	1.24
3.0	0.031	0.009	0.29	5.3	5.0	1.06	0.040	1.29
2.5	0.025	0.007	0.28	3.6	3.6	1.00	0.032	1.28
2.1	0.021	0.004	0.19	2.4	2.6	0.92	0.025	1.19
1.5	0.018	0.002	0.11	1.5	1.6	0.94	0.020	1.11
1.0	0.018	0.0008	0.04	1.0	1.0	1.00	0.019	1.04
	평균		0.21	평균		1.05	평균	1.21
Model 4								
4.4	0.047	0.013	0.28	10.4	10.0	1.04	0.060	1.28
4.0	0.043	0.01	0.23	8.6	8.4	1.02	0.053	1.23
3.5	0.036	0.01	0.28	6.5	6.8	0.96	0.046	1.28
3.0	0.031	0.008	0.26	4.7	5.1	0.92	0.039	1.26
2.5	0.025	0.006	0.24	3.2	3.7	0.86	0.031	1.24
2.0	0.024	0.003	0.13	2.5	2.6	0.96	0.027	1.13
1.5	0.021	0.001	0.05	1.6	1.6	1.00	0.022	1.05
1.0	0.020	0.0008	0.04	1.0	1.0	1.00	0.021	1.04
	평균		0.19	평균		0.97	평균	1.19

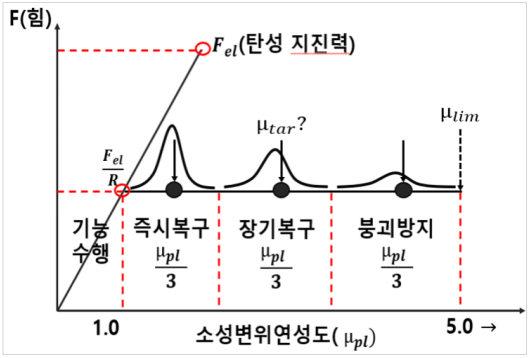


Fig. 9. Dispersion of response ductility ateach performance level.

Table 4. Ductility limit (μ_{lim}) for each performance level

보유 연성도	This study			ASCE 41		
	즉시 복구	장기 복구	붕괴 방지	I.O	L.S	C.P
5.0	2.33	3.67	5.0	2.50	3.75	5.0
6.0	2.67	4.33	6.0	3.00	4.50	6.0
7.0	3.00	5.00	7.0	3.50	5.25	7.0
8.0	3.33	5.67	8.0	4.00	6.00	8.0

Table 5. μ_{tar} **&** R_{design} **according to each performance level**

구분			보유 변위연성도(μ_{cap})			
			5	6	7	8
k_{tar}= 1.5	즉시복구	①μ_{lim}	2.33	2.67	3	3.33
		②μ_{tar}	1.77	2.00	2.2	2.41
		②/①	0.76	0.75	0.73	0.72
		R_{design}	1.59	1.73	1.84	1.95
	장기복구	①μ_{lim}	3.67	4.33	5.00	5.67
		②μ_{tar}	2.61	3.01	3.40	3.78
		②/①	0.71	0.69	0.68	0.67
		R_{design}	2.05	2.24	2.41	2.56
	붕괴방지	①μ_{lim}	5.00	6.00	7.00	8.00
		②μ_{tar}	3.40	3.75	4.38	5.00
		②/①	0.68	0.63	0.63	0.63
		R_{design}	2.41	2.55	2.78	3.00
k_{tar}= 2.0	즉시복구	①μ_{lim}	2.33	2.67	3	3.33
		②μ_{tar}	1.67	1.86	2.05	2.24
		②/①	0.71	0.70	0.68	0.67
		R_{design}	1.53	1.65	1.76	1.87
	장기복구	①μ_{lim}	3.67	4.33	5.00	5.67
		②μ_{tar}	2.42	2.78	3.12	3.47
		②/①	0.66	0.64	0.62	0.61
		R_{design}	1.96	2.14	2.29	2.44
	붕괴방지	①μ_{lim}	5.00	6.00	7.00	8.00
		②μ_{tar}	3.12	3.63	4.38	5.00
		②/①	0.62	0.61	0.63	0.63
		R_{design}	2.29	2.50	2.78	3.00

설계지진에 대한 시설물의 응답(소요) 변위연성도가 Table 4에 정의된 성능구간의 한계값(μ_{lim})을 초과하지 않는다면 소요내진성능수준을 만족하게 된다. 강도에 비하여 변위가 제어하기 힘든 점을 고려한다면 보유변위연성도(μ_{cap})는 5.0 이상이 되어야 각 성능구간의 변위연성도의 크기가 최소 1.33(=(5-1)/3) 이상이 되어 현실적으로 설계에 적용(구현) 가능하리라 판단된다.

설계 대상 탱크에 요구되는 내진성능수준이 부여된다면 그 성능수준을 만족하는데 필요한 '목표변위연성도(μ_{tar})'를 설정하여야 한다. 소요 변위연성도가 확률분포를 가지므로 μ_{lim}와 μ_{tar}의 관계는 식(7)로 나타낼 수 있다(Fig. 9).

$$\mu_{\lim} = \mu_{tar} + k\sigma \tag{7a}$$

$$\frac{\mu_{\lim}}{\mu_{tar}} = 1 + k\frac{\sigma}{\mu_{tar}} \tag{7b}$$

여기서, k의 값에 따라 응답 변위연성도가 임계값(μ_{lim})을 초과하는 확률이 결정된다. 푸쉬오버 해석으로 구한 탱크의 보유성능(capacity)도 확률분포를 갖고, 지진해석에 의한 응답변위도 확률분포를 가지므로 응답변위가 임계값을 초과할 확률은 이 둘의 확률분포 특성을 모두 알아야 산정할 수 있다. 그러나, 보유성능의 분산도가 소요변위의 분산도에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 이 연구에서는 보유성능의 확률적 분포 특성을 고려하지 않는다. 설계에서 임계값을 초과하지 않는 '목표 비초과확률'이 설정되면 이를 만족하는 k값(k_{tar})이 결정되고, 식(6)과 식(7)로부터 μ_{tar}을 산정할 수 있다. μ_{tar}이 결정되면 식(8)로부터 설계 시 필요한 강도비(R_{design})를 산정할 수 있다. 따라서 탱크의 설계항복강도는 탄성지진력을 설계응답수정계수(R_{design})로 나누어 구할 수 있다.

$$R_{design} = \sqrt{2\mu_{tar} - 1} \tag{8}$$

k_{tar}이 1.5, 2인 경우, 비초과확률은 각각 93%, 98%이며, 이 때 μ_{tar}와 R_{design}을 Table 5에 나타내었다. 보유 변위연성도(μ_{cap})가 클수록 μ_{lim}에 대한 μ_{tar}의 비(②/①)는 조금 작아지고, R_{design}는 조금 커지는 추세를 보인다. $\mu_{cap} = 5$일 때 $k_{tar} = 1.5$인 경우를 보면 즉시복구, 장기복구, 붕괴방지의 R_{design}은 각각 1.59, 2.05, 2.41이며 $k_{tar} = 2.0$이면 각각 1.53, 1.96, 2.29가 된다.

Ⅳ. 결 론

산업시설은 지진 시 운전성 확보가 매우 중요하지만 현행 내진설계의 개념은 붕괴방지를 주로 목표로 하여 구조적 안전성만을 고려하고 있다. 운전성 확보를 위해서는 더 다양한 내진성능수준을 목표로 한 성능기반 내진설계가 필요하다. 이 연구에서는 평저형 원형저장탱크를 대상으로 하여 지진거동특성을 분석하였고 이를 기반으로 성능기반 내진설계방법을 신뢰도 기반으로 새롭게 제시하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 탱크의 지름 대비 자유수면 높이의 비가 0.75~1.2인 4 종류의 탱크에 대해 비선형응답해석을 수행하였으며, 응답변위연성도의 분산도는 R이 커질수록 증가한다.

(2) 해석에 의한 응답변위연성도의 평균값(μ_m^{THA})은 Newmark의 Equal energy식($\mu^{NM} = (R^2+1)/2$)에 잘 부합하므로 소요변위연성도의 평균은 Newmark 식으로 산정할 수 있다.

(3) 보유변위연성도가 5.0 이상인 경우 소성변위연성도 크기를 3등분(=$\mu_{pl}/3$)하여 즉시복구, 장기복구 및 붕괴방지 성능의 한계값(μ_{lim})으로 정의하였으며, 이의 목표 비초과확률에 따라 목표변위연성도(μ_{tar}), 설계강도비(R_{design})를 산정하는 성능기반 내진설계 방법을 제안하였다.

(4) 보유변위연성도(μ_{cap})가 클수록 μ_{tar}/μ_{lim}은 작아지고, R_{design}는 커지는 추세를 보인다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 연구(과제번호 RS-2021-KA163132)의 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

[1] Indian Institute of Technology Kanpur "IITK-GSDMA GUIDELINES for SEISMIC DESIGM OF LIQUID STORAGE TANKS" (2007)
[2] Newmark, N. "1982 Newmark Hall EERI Earthquake Spectra and Design 1982", 6, 42-47, (1982)
[3] KDS 17 10 00 내진설계 일반, 국토교통부
[4] Athol, J.C., "SIMQKE-1", (2002)
[5] ASCE 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings

[6] Performance based building : conceptual framework, Final Report, PeBBu, (2005)
[7] Final report of CIB task group 11 : Performance based building codes, National Research Council Canada, (1997)
[8] Vision 2000-Performance based Seismic Engineering of Buildings, SEAOC, (1995)