



비선형지지구조 저장탱크의 지진거동 특성과 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계

장정민 · 선창호* · †김익현* · 최정인**

울산대학교 건설환경공학부 석사과정, *울산대학교 건설환경공학부 교수, **한국가스안전공사
(2023년 10월 24일 접수, 2023년 11월 22일 수정, 2023년 12월 15일 채택)

Seismic Behavior Characteristics of Spherical Storage Tanks Supported by Inelastic Members and Performance-Based Seismic Design Based on Reliability

Jang jeong min · Sun chang ho · †Kim ick hyun · Choi jeong in*

Civil & environment engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610 Korea

*Korea Gas Safety Corporation, Umsung 22738, Korea

(Received October 24, 2023; Revised November 22, 2023; Accepted December 15, 2023)

요약

석유화학 플랜트에는 여러 설비 및 구조물이 서로 연계되어 운전성을 확보한다. 석유화학 플랜트의 생산활동은 국가 경제에 큰 영향을 미치므로, 구조적인 안전성뿐만 아니라 시설의 운전성을 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현행 내진설계 기준은 주로 붕괴방지를 목표로 시설의 설계요건을 제시하고 있으며, 시설의 운전성을 확보하는 요건을 제시하지 못하고 있다. 시설의 거동특성에 따라, 붕괴방지수준 이외의 내진성능수준에 의해서도 시설의 운전성이 확보될 수 있으므로, 다양한 내진성능수준을 적용할 수 있는 내진설계 방법의 제시가 필요하다. 구형(볼) 저장탱크는 여러 개의 기둥과 브레이스로 지지되어 브레이스와 기둥의 좌굴 및 항복 등으로 지진 시 복잡한 비선형거동을 보인다. 이 연구에서는 비선형거동 특성을 통계적으로 분석하여 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계 방법을 새롭게 제시하였다.

Abstract - In a petrochemical plant, various mechanical equipments and structures are interconnected to ensure operability. Since the production activities of petrochemical plants have a great impact on the national economy, it is very important to maintain not only structural safety but also the operability of the facilities. However, the current seismic design standards present the design requirements of facilities mainly aimed at preventing collapse, and do not provide the requirements for securing operability of facilities. Depending on the behavioral characteristics of the facility, operability of the facility can be secured by seismic performance levels other than the collapse prevention level, so it is necessary to present seismic design methods that can apply various seismic performance levels. Spherical (ball) storage tanks are supported by columns and braces and exhibit complex nonlinear behavior because of buckling and yielding of support members. In this study, nonlinear seismic behavior characteristics were statistically analyzed and a new performance-based seismic design method was proposed based on them.

Key words : spherical tank, seismic behavior, performance-based design, reliability

†Corresponding author: ickhyun@ulsan.ac.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

우리나라는 지진에 의한 산업시설의 피해가 발생한 예는 없지만 해외에서는 많은 피해사례가 보고되고 있다(튀르키예 이즈미지진(1999, M=7.6), 인도 구자라트지진(2001, M=6.9), 일본 동일본대지진(2011, M=9.0~9.1)). 산업시설은 국가의 경제에 상당한 기여를 하는 중요한 시설일뿐만 아니라 피해 시 화재 및 폭발, 유해물질의 누출로 인한 토양, 수질 및 대기 오염 등 상당한 2차피해도 유발한다. 석유화학 플랜트의 생산활동 중단은 국가 경제뿐만 아니라 사회적으로 큰 영향을 미치므로, 구조적인 안전성뿐만 아니라 시설의 운전성을 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현행 내진설계기준[1]은 주로 붕괴방지를 목표로 시설의 설계요건을 제시하고 있으며, 시설의 운전성을 확보하는 요건을 제시하지 못하고 있다. 시설의 거동 특성에 따라, 붕괴방지수준 이외의 내진성능수준에 의해서도 시설의 운전성이 확보될 수 있으므로, 다양한 내진성능수준을 적용할 수 있는 내진설계 방법의 제시가 필요하다[2].

이 연구에서는 석유화학 또는 가스 플랜트에 많이 설치된 구형 저장탱크의 지진거동 특성을 분석하고 이를 활용하여 손상을 제어할 수 있는 성능기반내진설계를 신뢰도에 기반하여 설계할 수 있는 방법을 새롭게 제시하였다.

II. 성능기반 내진설계

2.1 기본개념

성능기반 설계는 현행의 사양기반 설계와 대비되는 설계개념이다. 사양기반 설계는 규정된 설계법 이외의 다른 설계법을 허용하지 않는 데 반해 성능기반 설계는 요구되는 성능을 만족한다는 것이 검증된다면 어떠한 설계법도 허용한다. 성능기반 설계의 기본체계는 시설물의 설계목적에 맞게 성능수준을 설정하고 이를 만족하기 위한 설계요건(거동한계)를 설정하고 이의 만족여부를 검증한다. 검증은 비선형해석(실험 포함)을 기반으로 하는 검증법이 기본이지만 설계자의 설계편의를 고려한 대안적 설계법도 제시한다[3]~[5].

이 연구에서는 비선형지지구조를 갖는 구형 저장탱크의 비선형 동적해석을 통해 지진거동 특성을 분석하였다. 비선형 해석기법은 해석적 검증방법 시 적용 가능하고, 분석된 지진거동 특성은 성능기반설계의 대안적 설계방법의 기초자료로 활용된다.

2.2 응답수정계수(R)-변위연성도(μ)-주기(T) 관계

내진설계에서 설계지진력은 탄성지진력을 적정한 R_{design} 값으로 나눈다. 따라서, 식(1)과 같이 R_{design} 은 설계항복강도에 대한 탄성지진력의 비율이며 R_{design} 이 클수록 탄성지진력에 대한 시설물의 설계항복강도는 작아진다. 시설물의 실제항복강도가 설계항복강도 보다 크도록 설계하고, 기준에서 제시하는 내진상세를 따르면 항복 이후에도 파괴되지 않고 충분한 보유변위연성도(μ_c , 식(2a))을 확보할 수 있다. 큰 보유변위연성도(μ_c)가 확보된다면 큰 R_{design} 값을 적용하여 설계항복강도를 작게 설계할 수 있으며, 역으로 설계 시 큰 R_{design} 값을 적용하여 설계강도를 작게 하면 지진 시 응답변위(Δ_d)가 커지므로 소요변위연성도(μ_d , 식(2b))는 커진다. R 과 μ 는 특정한 관계식을 가지며 이는 시설물의 진동주기(T)에 따라 다르다[6]. 식(1), (2)에서 F_{el} 은 탄성지진해석, F_y , Δ_y , Δ_u 는 푸쉬오버해석, Δ_d 는 비선형 응답이력해석으로 구할 수 있다.

$$R_{design} = \frac{F_{el}(\text{탄성지진력})}{F_y(\text{설계항복강도})} \quad (1)$$

$$\mu_c = \frac{\Delta_u(\text{극한변위})}{\Delta_y(\text{항복변위})} \quad (2a)$$

$$\mu_d = \frac{\Delta_d(\text{응답변위})}{\Delta_y(\text{항복변위})} \quad (2b)$$

2.3 내진성능수준별 거동 한계

시설물 내진설계의 공통기준에 해당하는 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반[7]’에는 기능수행, 즉시복구, 장기복구 및 붕괴방지의 4단계의 내진성능수준을 규정하고 있다. 이들 내진성능수준은 시설물의 손상크기에 대응되며 붕괴방지수준으로 갈수록 큰 손상을 허용한다. 지진 시 시설물의 손상크기는 시설물이 보유한 변형성능(보유변위연성도, μ_c)에 대한 응답변위(소요변위연성도, μ_d) 크기의 비(μ_d/μ_c)로 나타낼 수 있다[8]. 설계지진에 대한 시설물의 비선형응답변위는 분산도가 크기 때문에 충분한 연성도가 확보되어야 4단계의 성능수준(기능수행, 즉시복구, 장기복구 및 붕괴방지 수준)이 정의될 수 있다. 이를 위해 이 연구에서는 최소 보유변위연성도를 5.0으로 제시하였다.

Fig. 1은 보유변위연성도(μ_c)가 5.0 이상인 시설물의 내진성능수준별 구간(범위)를 나타낸 것으로 소성 변위연성도($\mu_{pl} = \mu_c - 1$)를 3등분하여 각각 부여하였다. 반면, ASCE 41[8]에서는 IO(Immediate Occupancy), LS(Life Safety), CP(Collapse Prevention)의 한계

Table 1. Ductility limit of each seismic performance level

μ_c	구간별 한계값(μ_{lim})		
	즉시복구	장기복구	붕괴방지
1.0	×	×	×
2.0	×	×	×
3.0	×	×	3.0
4.0	×	2.50	4.0
5.0	2.33(2.50)	3.67(3.75)	5.0
6.0	2.67(3.00)	4.33(4.50)	6.0
7.0	3.00(3.50)	5.00(5.25)	7.0
8.0	3.33(4.00)	5.67(6.00)	8.0

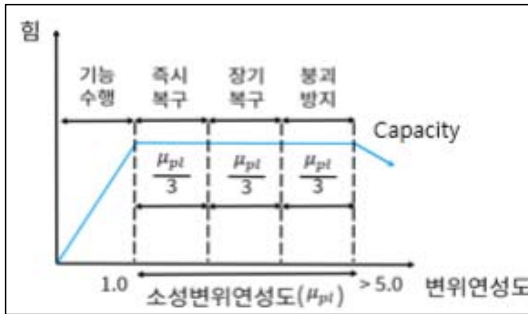


Fig. 1. Ductility ranges of each seismic performance level.

값을 각각 극한변위의 50%, 75%, 100%로 정의하고 있다.

Table 1은 μ_c 에 따른 각 내진성능 구간의 한계값(μ_{lim})이며 비교를 위해 ASCE의 IO와 LS의 한계값을 ()안에 함께 나타내었다. ASCE에 비해 본 연구의 한계값이 조금 보수적으로 설정된 것을 알 수 있다.

만약 설계된 시설물의 설계지진에 대한 응답, 즉 소요변위연성도(μ_d)가 각 구간의 μ_{lim} 를 초과하지 않는다면 요구 내진성능수준을 만족한다고 간주할 수 있으므로 해석법으로 검증하는 경우 이를 확인하면 된다.

III. 구형 저장탱크의 해석방법

3.1 대상 저장탱크 및 모델링

구형 저장탱크의 지진거동 특성을 분석하기 위하여 탱크 예제를 선정하였다. 탱크 예제는 물질을 저장

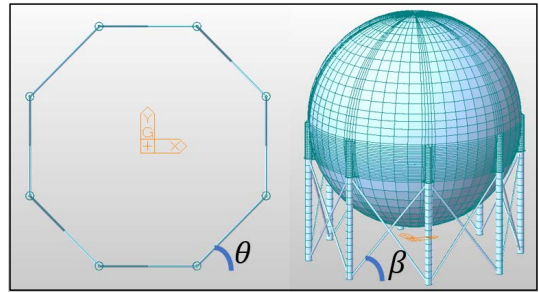


Fig. 2. Analysis model of the tank.

Table 2. Dimension of the tank

구분	제원
직경(m)	11.5
셸 두께(mm)	16.5
기둥 높이(m)	6.05
기둥 단면(mm)	406.4×9.5
브레이스 단면(mm)	114.3×6
기둥간 간격(m)	4.75
$\theta(^{\circ})$	60
$\beta(^{\circ})$	52

하는 구형 저장용기와 이를 지지하는 8개의 기둥과 안정성 제고를 위하여 X형 브레이스가 설치되어 있다(**Fig. 2**). 제원특성은 **Table 2**와 같다. 저장물질은 지지부재에 가장 큰 지진력이 재하되도록 가득 찬 상태로 가정하였다(저장물질의 질량=550kN/g).

Fig. 2에 저장용기는 셸요소, 기둥은 보조소로 모델링한 탱크를 보여준다. 브레이스는 역학적 특성을 고려하여 축력만 받는 트러스 요소로 모델링하여 양단 기둥에 힌지로 연결하였다. 기둥의 하단의 지지조건은 완전고정으로 하였다.

3.2 탄성지진해석

탄성지진해석에는 기본적으로 스펙트럼해석을 적용한다. 탱크의 진동주기는 0.4(sec)이며, 설계응답스펙트럼(지진구역 I, 재현주기 1000년, S_2 지반, 2% 감쇠비)을 이용하여 탄성지진력($F_{el}=16,280kN$)을 산정하였다. 한편, 탱크 저장물질의 질량이 전체 구조물 질량의 88%이며, 저장용기와 저장물질은 지진 시 일체로 거동하므로 질량이 저장용기의 중심에 집중된 1-질점계로 간략하게 모델화할 수 있다.

이 때 지지부재의 전체강성(K_s)은 기둥(c)의 강성과 브레이스(b)의 설치각도(β 와 θ , Fig. 2)를 고려한 강성의 합으로 식(3)과 같이 계산할 수 있다[9].

$$K_s = \sum_{j=1}^n \left(\frac{12EI_c}{h_c^3} \right)_j + \sum_{k=1}^n \left(\frac{EA_b}{L_b} \cos^2\theta \cdot \cos^2\beta \right)_k \quad (3)$$

여기서, h_c 는 기둥의 높이, I_c 는 단면2차모멘트, A_b 는 브레이스의 단면적, L_b 는 브레이스의 길이이다.

3.3 푸쉬오버 해석

탱크의 항복강도(F_y)와 항복변위(Δ_y)를 산정하

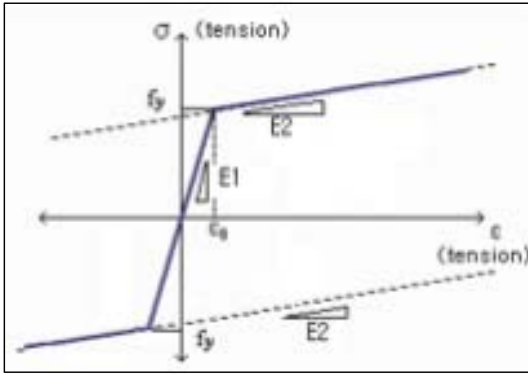


Fig. 3. inelastic model of column.

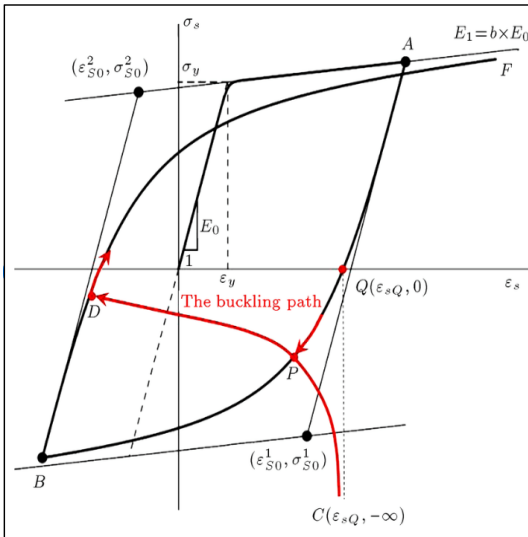


Fig. 4. inelastic model of brace.

기 위하여 푸쉬오버(push-over)해석을 하였다. 푸쉬오버 해석은 비선형 정적해석으로 시설물의 질점 위치에 정적하중을 점진적으로 증가시켜 보유성능(힘-변위 관계식)을 구하는 해석이다. 이 때 시설물의 구성요소는 항복 및 좌굴 등 비선형 거동특성을 모사할 수 있는 역학적 모델을 적용하여야 한다. 대상 탱크의 강제기둥은 좌굴은 발생하지 않고 항복만 발생하여 Fig. 3과 같이 2선형(bi-linear) 역학 모델($b \geq 0$)을 적용하였고, 브레이스는 인장에는 항복을 고려하고 압축에는 좌굴(buckling)을 모사할 수 있는 역학모델을 적용하였다(Fig. 4). 탱크 브레이스의 좌굴강도는 항복강도의 18% 수준이다. 탱크에서 브레이스가 탱크의 강도에 기여하는 정도를 확인하기 위하여 브레이스가 없는 경우(Br_0), 브레이스의 좌굴없이 항복만 고려하는 경우(Br_y), 인장브레이스의 항복과 압축브레이스의 좌굴을 고려한 경우(Br_yb)에 대해 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 5 및 Table 3과 같다. 브레이스가 없는 모델(Br_0)의 강도에 대해 실제 모델(Br_yb)의 강도는 2.6배 증가하여 브레이스가 탱크의 강도 확보에 크게 기여함을 알 수 있다. 한편, 브레이스의 좌굴을 고려하지 않고 항복만 고려하면(Br_y) 실제 강도를 1.55배 과대평가($3770/2440=1.55$)하게 된다.

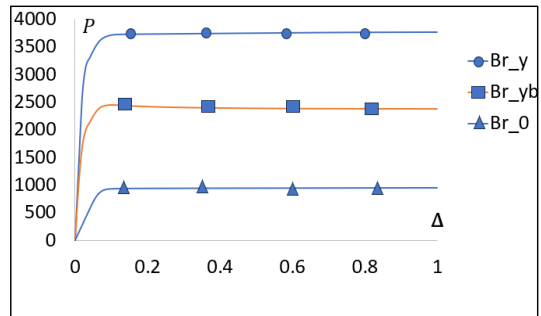


Fig. 5. P (kN)- Δ (m) relations of each model

Table 3. P - Δ characteristics of each model

구분	Br_0	Br_y	Br_yb
T (sec)	1.3	0.4	0.4
F_{el} (kN)	6280	16280	16280
F_y (kN) (Br_0 대비)	-	3770 (3.9)	2440 (2.6)
Δ_y (mm) (Br_0 대비)	0.09	0.03 (0.3)	0.02 (0.2)

3.4 비선형 응답이력해석

입력지반운동(가속도시간이력)에 대해 탱크의 응답변위(Δ_d)를 산정하였다. 비선형해석에서는 입력지반운동에 따라 응답변위가 달라지므로 응답의 통계적 특성(평균 및 변동계수)을 분석하기 위하여 SIMQKE[10]를 사용하여 50개의 가속도시간이력을 생성하여 해석하였다. 탄성지진해석과의 일관성 유지를 위해 동일한 설계스펙트럼에 부합되게 생성하였으며, 가속도시간이력의 포락함수 형상은 ‘KDS 17 10 00[7]’의 지진규모 5.5~6.0을 적용하였다.

IV. 지진거동 특성과 신뢰도기반 설계법

4.1 지진거동 특성 분석

$R-\mu$ 의 관계 특성을 분석하기 위하여 지지부재의 항복강도를 조정하여 R 이 1~5가 되는 5개의 해석모델을 작성하였다. 해석모델의 강성은 같기 때문에 진동주기와 탄성지진력은 동일하다. 입력지반운동에 대하여 응답이력해석(RHA; Response History Analysis)을 수행하여 응답변위의 최댓값(Δ_d)을 구하고 이를 항복변위(Δ_y)로 나누어 소요변위연성도(μ_d)를 구하였다.

Fig. 6에 R 에 따른 μ_d 의 관계를 나타내었다. R 이 증가하면 μ_d 도 증가하며, μ_d 의 분산도도 함께 커진다. R 에 따른 μ_d 의 평균값(μ_m^{RHA})의 관계를 기존의 제안식과 비교하였다(Table 4).

Table 4. Comparison of analysis results and evaluation values

R	RHA		$\mu^{Prop} (\mu^{Prop}/\mu_m^{RHA})$		
	μ_m^{RHA}	$\sigma^{RHA} (CV)$	식(3)	식(4)	식(5)
1.3	1.6	0.013 (0.09)	1.35 (0.84)	1.30 (0.81)	1.39 (0.87)
2.3	2.2	0.015 (0.10)	3.15 (1.43)	2.30 (1.05)	2.68 (1.22)
3.2	2.7	0.023 (0.14)	5.62 (2.08)	3.20 (1.19)	3.85 (1.42)
3.8	3.5	0.030 (0.17)	7.72 (2.21)	3.80 (1.09)	4.62 (1.32)
4.5	4.7	0.035 (0.19)	10.63 (2.26)	4.50 (0.96)	5.53 (1.18)
μ^{Prop}/μ_m^{RHA} 평균			1.76	1.02	1.20

식(3), (4)는 Newmark의 제안식[11]이며, 식(5)는 교량기준의 제안식[12]이다. 식(5)에서 $T \geq 1.25 T_s$ 이면 식(4)와 식(5)는 같아진다. 탱크의 진동주기가 0.4(s)로 단주기영역에 가깝지만 식(4)가 해석결과와 가장 잘 부합한다(Table 4의 μ^{Prop}/μ_m^{RHA} 의 평균값은 1.02).

$$\mu = (R^2 + 1)/2 \quad (0.12s \leq T \leq 0.5s) \quad (3)$$

$$\mu = R \quad (T \geq 1s) \quad (4)$$

$$\mu = \lambda_{DR} R \quad (5)$$

여기서,

$$\lambda_{DR} = \left(1 - \frac{1}{R}\right) \frac{1.25 T_s}{T} + \frac{1}{R} \quad (T < 1.25 T_s)$$

$$\lambda_{DR} = 1 \quad (T \geq 1.25 T_s)$$

T_s 는 설계응답스펙트럼의 상한통제주기로 S_2 지반은 0.414(s)이다.

한편, μ_d 의 분포를 정규분포로 가정하여 표준편차(σ^{RHA})와 변동계수($CV = \sigma^{RHA}/\mu_m^{RHA}$)를 산정하여

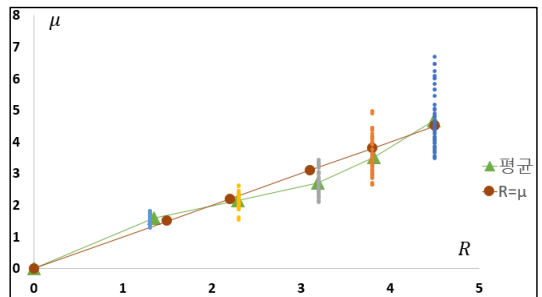


Fig. 6. $R-\mu$ of model tank.

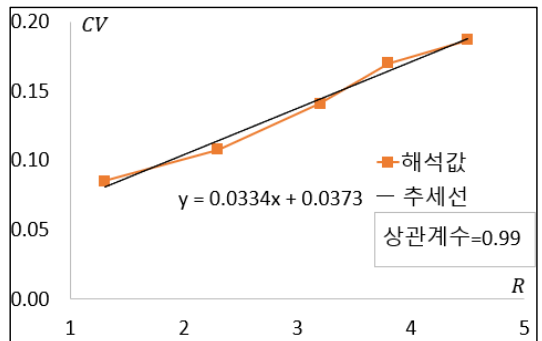


Fig. 7. $R-CV$ relation.

Table 4에 함께 나타내었다. R 에 대한 CV 의 관계특성을 그림으로 나타내면 Fig. 7과 같다. R 이 증가하면 CV 가 선형적으로 증가한다. 이를 정식화하면 식(6)과 같다.

$$CV = 0.03R + 0.04 \quad (1 \leq R < 5.0) \quad (6)$$

4.2 신뢰도에 기반한 성능기반설계 방법

성능기반으로 설계된 시설물이 설계지진에 대한 소요변위연성도(μ_d)가 Table 1에 정의된 성능구간의

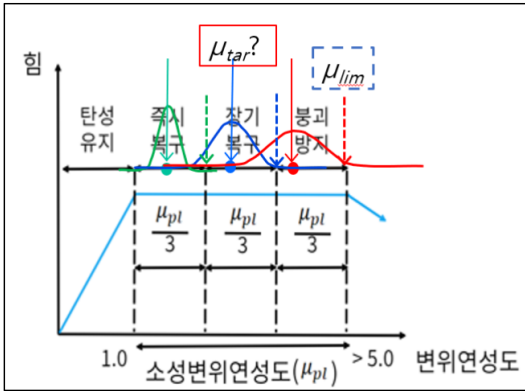


Fig. 8. μ_{tar} for required performance.

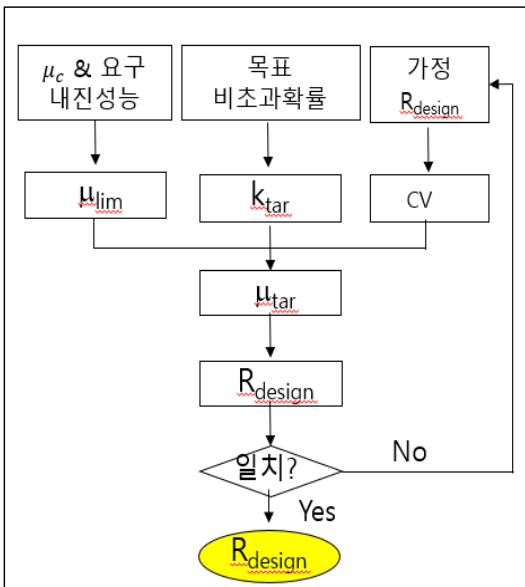


Fig. 9. Procedure to determine R_{design} .

한계값(μ_{lim})을 초과하지 않는다면 소요내진성능수준을 만족하게 된다. 이를 위해서는 비선형동적해석을 통한 검증이 필요하다. 다만 설계지진에 대한 지진거동 특성의 통계적 특성을 안다면 이를 활용하여 시설물을 설계(대안적 설계)할 수 있다. 응답변위가 상당한 분산도를 지니고 있으므로 요구되는 내진성능구간 내에 신뢰성 있게 들어올 수 있도록 ‘목표변위연성도(μ_{tar})’를 잘 설정할 필요가 있다(Fig. 8). μ_{tar} 이 적정하게 설정되었다면 이를 만족하는 ‘설계응답수정계수(R_{design})’를 결정할 수 있다. R_{design} 을 결정하는 구체적인 절차는 Fig. 9와 같다.

‘ μ_c ’와 ‘요구내진성능’이 결정되면 Table 1에 따라 ‘ μ_{lim} ’를 결정한다. 요구내진성능수준의 ‘목표비초과확률’을 설정하면 이를 만족하는 ‘ k_{tar} ’ 값이 결정된다(Fig. 10). ‘ R_{design} ’를 가정하면 식(6)으로 ‘CV’가 결정된다. μ_d 의 분포를 정규분포로 가정하면 식(7a), 식(7b)로부터 ‘ μ_{tar} ’를 결정할 수 있다. μ_{tar} 이 결정되면 식(8)로부터 설계 시 필요한 ‘설계응답수정계수(R_{design})’를 산정할 수 있다. 이와 같이 산정된 R_{design} 이 처음에 가정한 R_{design} 과 같다면 최종적인 R_{design} 이 된다. 따라서 탱크의 탄성지진력을 이 설계응답수정계수(R_{design})로 나눈 값을 설계지진력으로 하여 설계하면 요구하는 내진성능을 설정한 신뢰도(목표 비초과확률)로 만족하게 된다.

$$\mu_{lim} = \mu_{tar} + k_{tar}\sigma \quad (7a)$$

$$\frac{\mu_{lim}}{\mu_{tar}} = 1 + k_{tar} \frac{\sigma}{\mu_{tar}} = 1 + k_{tar} \cdot CV \quad (7b)$$

$$\mu_{tar} = R_{design} \quad (8)$$

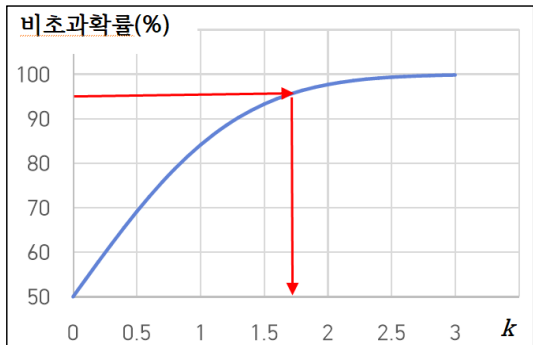


Fig. 10. relation of k and non-exceedance probability.

V. 결론

산업시설은 지진 시 운전성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 현행 내진설계는 시설물의 구조적인 안전을 확보하기 위해 붕괴방지수준 또는 기능수행(탄성유지)수준을 만족하도록 제시되어 있다. 시설물의 거동 특성에 따라, 시설물의 운전성 확보를 위해 그 외 다른 내진성능수준을 목표로 설계할 필요가 있다. 즉, 다단계의 내진성능 수준을 설정하고 이의 만족 여부를 검증하는 성능기반 내진설계가 필요하다.

이 연구에서는 비선형 지지부재를 갖는 구형 저장탱크를 대상으로 지진거동특성을 분석하고 이를 기반으로 하여 신뢰성 기반 성능기반 내진설계법을 제시하였다.

이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기둥과 브레이스로 지지되는 구형저장탱크는 지지부재의 항복 및 좌굴로 복잡한 거동 특성을 보이며, 브레이스의 좌굴을 고려하지 않는다면 탱크의 강도를 과대평가하게 되어 적합한 $R-\mu$ 관계를 도출할 수 없다.

2. 예제 탱크의 진동주기는 0.4(s)이며, 이 경우의 $R-\mu$ 관계는 동일변위(Equal Displacement) 관계식($R=\mu$)과 잘 부합한다.

3. 설계지진에 대한 소요변위연성도의 변동계수(CV)는 R 이 증가할수록 거의 선형적으로 증가한다($CV=0.03R+0.04$).

4. 특정 보유변위연성도(μ_c)를 확보한 저장탱크의 소요변위연성도(μ_d)가 요구내진성능수준(μ_{lim})을 특정 비초과확률로 초과하지 않도록 설계하는데 필요한 설계응답수정계수(R_{design})을 구하는 절차를 제시하였다.

5. 이 연구에서는 진동주기 0.4(s)인 구형 탱크에 대해 분석하였으며 향후 다양한 진동주기를 갖는 탱크의 거동특성 분석이 필요하다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준
- [2] Kim, I., Hong, K.J., Kim, J.H., Lee, J.H., Cho, S., "Improvement in Design Load and Seismic Performance Objective for Industrial and Environmental Facilities", *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 42(6), 763-773, (2022)
- [3] Performance based building : conceptual framework, Final Report, PeBBu, (2005)
- [4] Final report of CIB task group 11 : Performance based building codes, National Research Council Canada, (1997)
- [5] Vision 2000-Performance based Seismic Engineering of Buildings, SEAOC, (1995)
- [6] Whittaker, A., Hart, G., Rojahn, C., "SEISMIC RESPONSE MODIFICATION FACTORS", *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 125(4), 438-444, (1999)
- [7] KDS 17 10 00 내진설계 일반, 국토교통부
- [8] ASCE 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings
- [9] Karamanos, S.A., Patkas, L.A. and Platyrrachos, M., "Sloshing effects on the seismic design of horizontal-cylindrical and spherical industrial vessels", *Journal of Pressure Vessel Technology*, 128(3), 328-340, (2006)
- [10] Athol, J.C., "SIMQKE-1", (2002)
- [11] Newmark, N. "1982 Newmark Hall EERI Earthquake Spectra and Design 1982", 6, 42-47, (1982)
- [12] KDS 24 17 11 교량내진설계기준(한계상태설계법), 국토교통부