

면진 유체 저장 탱크의 지진취약도 분석

Seismic Fragility Analysis of Base Isolated Liquid Storage Tank

안성문^{*} 최인길^{**} 전영선^{***}
Ahn, Sung Moon Choi, In Kil Choun, Young Sun

ABSTRACT

In this study, the seismic fragility analysis of a base isolated condensate storage tank installed in the nuclear power plant. The condensate storage tank is safety related structure in a nuclear power plant. The failure of this tank affect significantly to the core damage frequency of the nuclear power plants. The seismic analysis of the liquid storage tank was performed by the simple calculation method and the dynamic time storage analysis method. The convective and impulsive fluid mass is modeled as added masses proposed by several researchers. To evaluate the effectiveness of the isolation system, the comparison of HCLPF and core damage frequencies in non-isolated and isolated cases are carried out. It can be found from the results that the seismic isolation system increases the seismic capacity of a condensate storage tank and decreases the core damage frequency significantly.

Key words : condensate storage tank, seismic fragility analysis, seismic isolation system

1. 서 론

원전 내의 안전관련 기기는 원전 격납건물과 마찬가지로 그 중요도나 안전요구도에 있어서 매우 중요한 위치를 차지한다. 원전 내의 안전관련 기기가 지진 시 손상을 입어 그 기능을 상실하였을 경우 그로 인하여 원전의 노심이 손상되고 그 결과 원전 전체시스템에 치명적인 피해가 발생할 수 있으며, 이러한 피해는 주변 환경에 막대한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 원전에 설치되어 있는 각종 기기들은 설계허용치내의 지진 발생 시는 충분한 내진 여유도를 가질 수 있도록 설계 제작되어 있다. 설계한도를 넘는 지진이 발생하여 기기들이 손상을 입을 경우에는 원전의 안전성에 치명적인 손상이 발생할 수 있는데 이에 대한 대비책중의 하나로 면진장치를 적용하여 원전의 내진 안전성을 향상시키는 방법을 들 수 있겠다. 이때 구조물이나 일부 층 전체를 면진시키는 방법이 있으나 이는 큰 경제적인 부담을 초래하게 되므로 안전에 관련된 주요 취약기

* 한국원자력연구소 학연과정

** 정회원, 한국원자력연구소 책임연구원

*** 정회원, 한국원자력연구소 책임기술원

기에 대하여 각각의 기기를 면진하여 지진력을 저감시키는 방법이 효율적인 방법이라 할 수 있다.

본 논문에서는 원전의 노심손상빈도(Core Damage Frequency; CDF)에 큰 영향을 미치는 유체 저장 탱크의 하나인 CST(Codensate Storage Tank)를 대상으로 하였다. CST의 동적거동 평가를 위해 Housner[1]와 Haroun[2]에 의해 제시된 부가질량법을 이용하여 모델링 하였다. 기기의 내진 성능을 평가하기 위해 면진 및 비면진 탱크에 대한 취약도 분석을 수행하였으며 산정된 취약도 결과를 이용하여 노심손상빈도를 비교, 평가하여 면진장치의 효율성을 검토하였다. 이때의 면진장치로는 개략적인 효율성 평가를 위한 LRB(Lead Rubber Bearing) 장치를 선정했으며 입력지진동으로는 우리나라 원전의 설계지진으로 사용되고 있는 US NRC에서 제시한 Regulatory Guide 1.60의 표준응답 스펙트럼[3]을 사용하여 작성된 지진파를 이용하였다.

2. 지진취약도 분석

지진취약도 분석[4]은 구조물 및 기기의 개별적인 내진성능을 평가하고 이를 이용하여 취약도 곡선을 작성하는 것이다. 취약도 분석은 확률론적 특성을 가지고 있으며 지진의 크기에 따른 파괴 확률로 나타내며, 주어진 지반운동특성인자(PGA, Sv, Sa)에 대한 구조물 및 기기의 조건부 파괴 확률로 정의한다. 먼저 파괴모드를 정의하고 이에 대한 취약도를 평가하는 두 단계로 구분할 수 있다. 취약도 계산에서는 안전계수로 불리는 일련의 랜덤변수를 이용하여 취약도를 산정한다. 안전계수 F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[5,6].

$$F = \frac{\text{Actual seismic capacity of component}}{\text{Actual response due to SSE}} \quad (1)$$

성능 및 응답관련 랜덤변수를 이용하면 안전계수 F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_C \times F_{RS} \quad (2)$$

여기서 F_C 는 구조물 성능계수이며, F_{RS} 는 구조물의 응답에 관련된 계수들로 구조물의 응답에 영향을 미치는 각종 랜덤변수들에 대한 계수의 곱으로 나타낼 수 있으며 다음 식으로 표현된다.

$$F_{RS} = F_{SA} \cdot F_\delta \cdot F_M \cdot F_{MC} \cdot F_{EC} \cdot F_{HD} \cdot F_{SS} \quad (3)$$

이때, F_{SA} 는 스펙트럼 형상계수, F_δ 는 감쇄계수, F_M 는 모델링계수, F_{MC} 는 모드응답조합계수, F_{EC} 는 지진성분조합계수, F_{HD} 는 수평지진방향계수, F_{SS} 는 지반-구조물 상호작용계수를 나타낸다.

앞에서 구한 안전계수를 이용하여 메디안 성능(Median Ground Acceleration Capacity) A_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$A_m = F \cdot A_{SEE} \quad (4)$$

여기서 A_{SEE} 는 안전정지지진의 최대지반가속도값을 나타내며 각각의 응답관련 랜덤변수들의 랜덤성 및 불확실성에 대한 대수표준편차를 SRSS 방법에 의해 다음과 같이 산정한다.

$$\beta_R = [\sum(\beta_r)_i^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$\beta_U = [\sum(\beta_u)_i^2]^{1/2} \quad (6)$$

메디안 성능(A_m)과 랜덤성 및 불확실성에 대한 대수표준편차(β_R, β_U)를 이용하여 일련의 취약도 곡선을 작성할 수 있다. 또한 지진취약도 곡선에서는 고신뢰도저과괴확률로 정의되는 HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure)값을 구할 수 있는데 이는 95% 신뢰수준에서 5% 파괴확률 값을 나타내며 취약도 곡선과 더불어 분석대상 구조물 및 기기의 내진성능을 평가하는 기준치로 활용된다.

$$HCLPF = A_m \cdot e^{-1.65(\beta_R + \beta_U)} \quad (7)$$

3. 해석대상 구조물

3.1 해석대상 유체저장 탱크

본 연구에서는 울진 3,4 호기에 설치되어 있는 복수저장 탱크(CST)를 해석모델로 선정하였다. 그림 1에 보인 바와 같이 CST는 직경과 높이가 각각 15.24m와 12.68m이며 돔형태의 지붕을 가지고 있는 탱크이며, 물은 바닥에서부터 9.906m까지 채워져 있다.

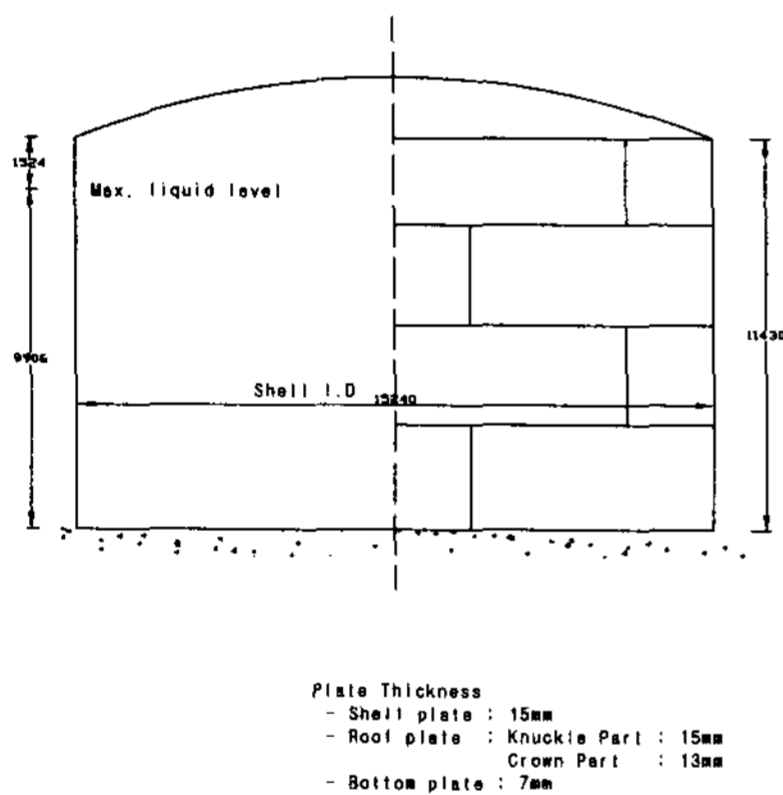


그림 1. CST의 제원

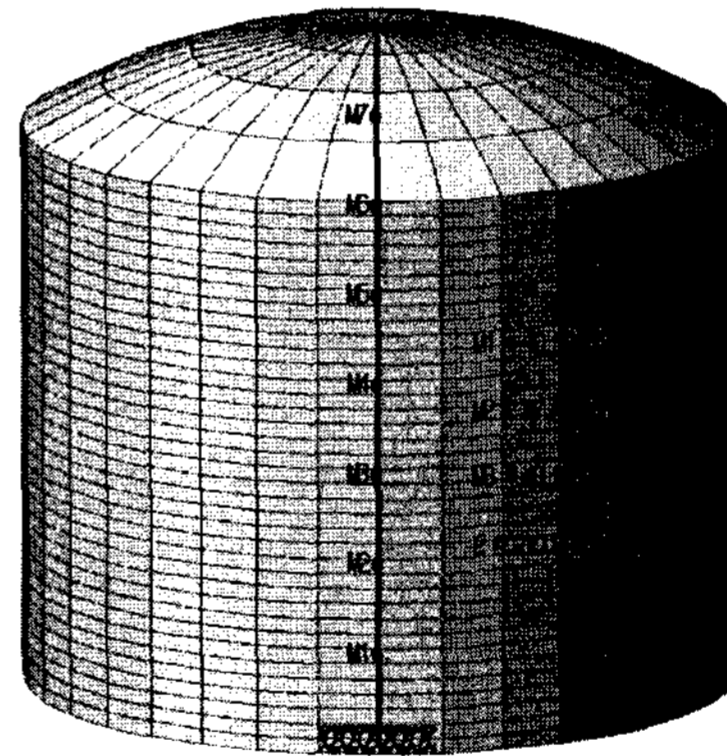


그림 2. 유한요소 모델과 집중질량 모델

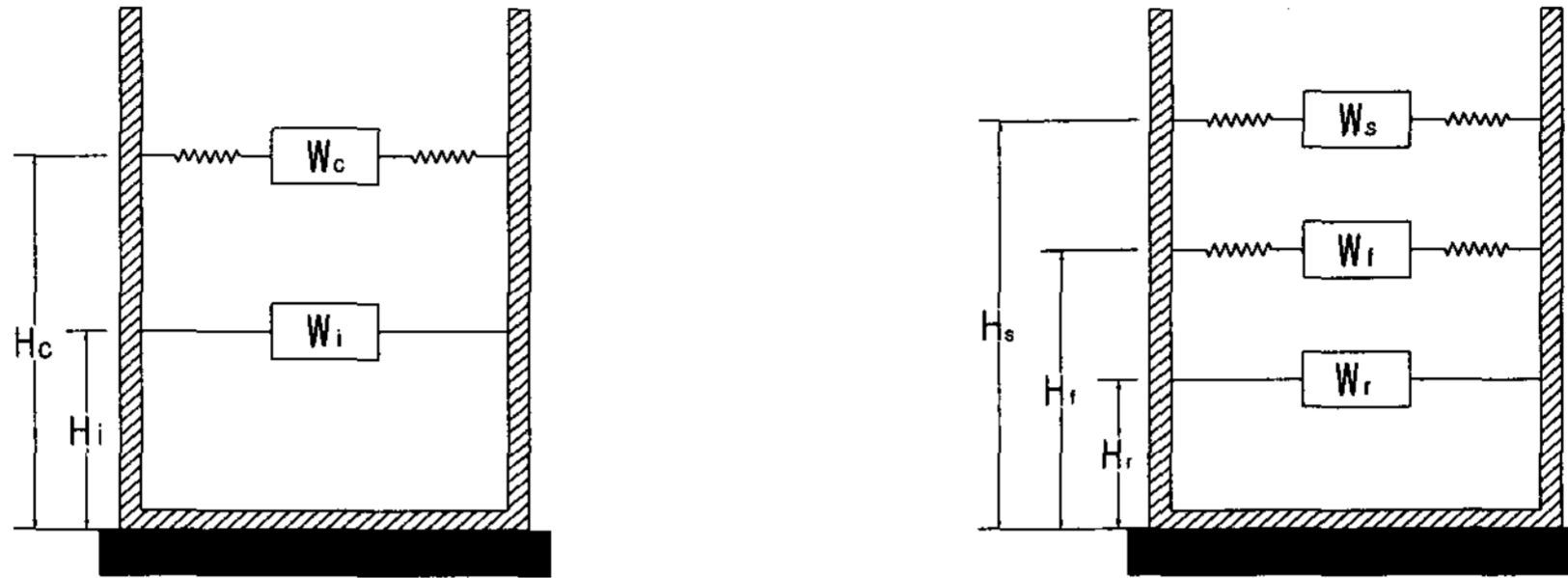
3.2 탱크의 모델링

내부가 비어있는 탱크를 그림 2와 같이 3차원 유한요소 모델과 집중질량 모델로 모델링하여 고유치해석을 수행한 결과 두 모델의 첫 번째 고유진동수는 각각 30.12Hz와 29.33Hz로 나타났으며 1차 모드의 기여도는 약 83%로 나타났는데 이는 작성된 집중질량 모델이 지진응답 평가 시 유체저장 탱크를 대신하여 사용될 수 있음을 보여준다.

3.3 유체의 모델링

본 연구에서는 탱크 내부에 채워져 있는 유체의 동적거동을 고려하기 위해 그림 3과 같은 Housner[1]와 Haroun[2]에 의해 제안된 유체모델링 방법을 이용하였다. Housner는 탱크내부 유체를 크게 충격성분(Impulsive)과 대류성분(Convective)으로 나누어 유체의 동적특성을 평가했으며 Haroun은 Housner 방법에 더하여 탱크벽체의 유연성을 고려하였다. 그림에서의 아래첨자 i 와 r

은 충격성분을, 아래첨자 c 와 s 는 대류성분을 나타내며, 아래첨자 f 는 벽체의 유동성을 고려한 성분을 나타낸다. 표 1은 Housner 방법과 Haroun 방법으로 구한 유체모델에서의 각 성분들의 값을 나타내고 있다[2,7]. 표에서 유체 성분별 무게를 보면 그 전체 무게가 상당히 다르다는 것을 알 수 있는데 이는 Housner와 Haroun 방법의 차이점으로 벽체의 유동성 고려 유무에 따른 결과이다.



(a) Housner에 의한 방법

(b) Haroun에 의한 방법

그림 3. 유체 모델링

표 1. 유체모델의 성분 및 고유진동수

	성분별 무게	성분별 높이	성분별 고유진동수
Housner	$W_c = 628.48 \text{ ton}$	$H_c = 6.459 \text{ m}$	$f_c = 0.243 \text{ Hz}$
	$W_i = 1179.11 \text{ ton}$	$H_i = 3.764 \text{ m}$	$f_i = 9.794 \text{ Hz}$
Haroun	$W_s = 621.64 \text{ ton}$	$H_s = 6.635 \text{ m}$	$f_s = 0.243 \text{ Hz}$
	$W_f = 1164.94 \text{ ton}$	$H_f = 4.428 \text{ m}$	$f_f = 10.287 \text{ Hz}$
	$W_r = 1213.70 \text{ ton}$	$H_r = 4.101 \text{ m}$	

4. 면진장치

4.1 면진장치의 선정 및 모델링

면진장치는 지진하중 발생 시 기초에서 상부로 전달되는 에너지를 감소시키기 위한 장치로 지반과 기초사이에 유연한 재료로 설치되어 구조물 및 기기의 고유진동수를 지진에너지가 작은 영역으로 이동시키는 역할을 한다. 면진장치 중 실제 가장 널리 사용되는 LRB는 고무-강판의 복합 구조형상, 고무재료의 비선형성, 수직하중변화, 그리고 수평대변형에서의 기하학적 비선형성 등에 따라서 매우 복잡한 역학특성을 나타낸다[8]. 하지만 본 연구에서는 유체저장 탱크의 면진장치에 대한 개략적인 효율성 평가만을 목적으로 하므로 LRB를 대상 면진장치로 선정하였다. 이때 유체 저장 탱크의 목표 진동수를 0.5Hz로 하였으며 선형탄성거동을 하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

5. 지진취약도 분석

5.1 복수저장탱크의 파괴모드

우리나라에서 지금까지 수행된 각 원전의 취약도 분석 자료와 과거 미국에서의 지진취약도 분석결과를 보면 CST의 주요 파괴모드는 크게 탱크 벽체의 좌굴과 앵커볼트파괴를 들 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 유체저장 탱크의 취약도 평가 시 이와 같은 두 가지 파괴모드에 대하여 취약도를 평가하였다. 또한 면진장치에서 나타날 수 있는 파괴모드는 면진장치가 충분한 강성 및 변형능력을 가진 것으로 가정하여 본 연구에서는 고려대상에서 제외하였다.

벽체의 좌굴은 Elephant's foot 이라고도 하는 이 현상에 의한 것으로 벽체 바닥부근에서의 수평 인장력과 수직 압축력에 의해 나타나며 발생하는 응력은 탄소성붕괴이론에 의해 추정할 수 있다[9,10]. 초기 좌굴이 발생한 후에도 대부분의 경우는 기능 수행을 계속할 수 있으나 더 이상 탱크의 성능을 예상할 수 없다. 이러한 이유로 취약도 평가 시 파괴이전의 제한된 좌굴 성능을 사용한다.

앵커볼트는 탱크 기초와 탱크를 연결하는 장치로서 지진하중 발생 시 접합부에서 전단하중과 전도모멘트에 저항하도록 설계되었다. 그러므로 볼트의 인장성능, 기초와 볼트의 정착, 탱크와 볼트의 정착 등의 상태를 평가해 앵커볼트의 취약성능을 결정한다. 본 연구에서는 앵커볼트의 인장성능을 취약성능으로 결정하여 사용하였다.

바닥이 앵커로 고정된 유체저장 탱크의 취약도 계산에서는 전도모멘트에 대한 안전계수, 즉 성능에 대한 응답비를 평가하는 것이 일반적이다. 여기서 전도모멘트에 대한 성능값은 탱크벽체의 좌굴 성능과 앵커볼트의 인장성능에 의존하는 값으로 해석대상 유체저장 탱크의 전도모멘트 성능값은 $2.108 \times 10^4 \text{ tonf} \cdot m$ 로 평가되었다. 또한 용접부와 앵커볼트의 인장에 의존하는 슬라이딩에 대한 성능값도 평가하여 취약도 계산을 수행하였다. 이때의 슬라이딩에 대한 성능값은 2524.803 tonf 로 평가되었다.

5.2 취약도 파라메타

본 절에서 CST의 응답계수와 응답계수의 불확실성 및 랜덤성에 대한 대수표준편차는 과거 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment)에서 취약도 분석 시 사용된 자료 등[4,11]에서 제시된 값을 사용하였으며 그 값은 표 2와 같다. 성능에 관련된 안전계수는 지진응답 해석결과로부터 산출된 값을 사용하였으며 이때, 전도모멘트에 대한 성능감소계수(F)와 슬라이딩성능의 불확실성에 대한 변동성(β_u)을 각각 0.9와 0.224로 적용하여 계산하였다.

표 2. 응답계수 및 그에 대한 대수표준편차

랜덤변수		스펙트럼 형상계수	수평지진 방향계수	감쇄계수	모델링 계수	모드응답 조합계수	지진성분 조합계수	지반구조물 상호작용계수
F		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
대수표준 편차	불확실성(β_u)	0.05	0.0	0.076	0.0	0.0	0.0	0.0
	랜덤성(β_r)	0.1	0.15	0.076	0.13	0.05	0.05	0.05

5.3 취약도 곡선

지진취약도 분석에 고려하는 기본확률변수로는 지진응답의 보수성을 평가하기 위한 응답변수와 구조물의 실제 지진저항능력을 평가하기 위한 성능변수가 있다. 본 연구에서는 확률변수로 전도모

멘트와 밀면전단력에 대하여 취약도 분석을 수행하였다. 유체저장 탱크의 성능변수는 파괴모드 설정 시 구하였으며 응답변수는 앞에서의 모델을 사용하여 Housner, Haroun, 시간이력해석 방법으로 각각 구하였다. 표 3은 성능계수와 표 2의 값을 이용하여 취약도 분석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 Housner 방법이 Haroun이나 시간이력해석 방법에 비해 보수적이며, 면진장치가 설치된 경우 비면진에 비해 응답이 1/3로 감소됨을 알 수 있다. 메디안성능과 대수표준편차를 이용한 보통의 취약도 곡선은 불확실성의 정도에 따라 평균곡선, 메디안곡선, 95% 신뢰도곡선, 5% 신뢰도곡선의 4개의 곡선으로 표현되며 그림 4는 유체저장 탱크에 대한 각각의 취약도 곡선을 보여주고 있다. 그림 5는 평균값에 대한 취약도 곡선을 비교한 것으로 면진장치를 사용한 경우 CST의 파괴빈도가 현격히 줄어드는 것을 알 수 있다.

면진장치가 CDF에 미치는 영향을 평가하기 위해 과거 수행된 지진 PSA[12,13]를 참고하여 유체저장 탱크의 내진성능 증가에 따른 CDF의 감소율을 평가하여 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 지진응답이 줄어들수록 CDF는 저하되며 지진응답이 50% 정도 감소되면 더 이상의 CDF는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 또한 그림 7은 메디안성능에 대한 HCLPF와 CDF의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 메디안성능이 1.0g를 넘는 경우 HCLPF는 계속해서 증가하나 CDF는 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 이는 유체저장 탱크의 HCLPF 값이 계속해서 증가하더라도 원전 내의 CDF를 유발하는 다른 기기들의 손상에 따라 CDF의 감소는 더 이상 없다는 것을 보여준다. 따라서 면진장치를 CST에 도입할 경우 메디안 지반가속도 성능이 1.0g 정도를 확보하면 가장 효율적으로 CDF를 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이러한 결과를 이용함으로써 최적 면진시스템의 설계가 가능하게 된다.

6. 결 론

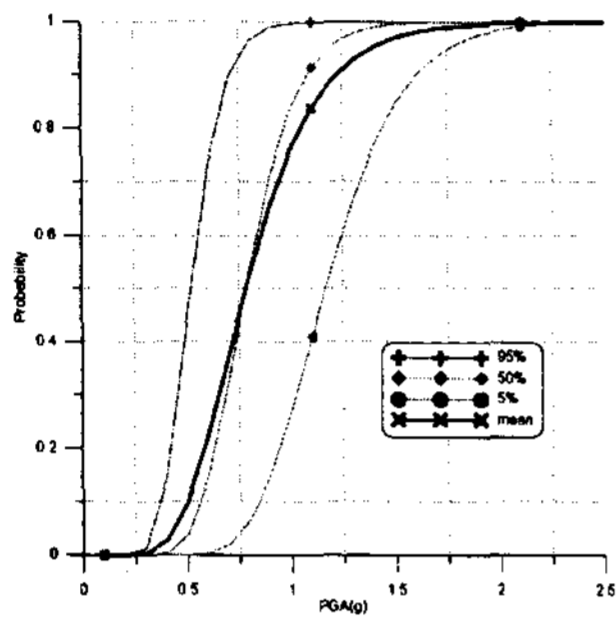
본 연구는 지진의 최대 지반가속도에 따른 유체저장 탱크의 파괴 가능성을 확률적으로 나타내는 지진취약도 분석을 수행하였다. 유체 동압력에 의해 탱크에 가해지는 부가질량과 유체유동은 Housner와 Haroun의 유체모델링 방법에 따라 고려했으며 확률기본변수로는 지배적인 파괴모드에 따른 전도모멘트와 밀면전단력을 선정하였다. 또한 개략적인 LRB를 설치하여 내진보강을 한 경우의 취약도 분석을 수행하여 그 효과를 정량적으로 살펴보았다. 또한 취약도 분석 결과를 이용하여 노심손상빈도를 평가하여 내진안전성에 미치는 영향을 살펴보았다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 취약도 분석 결과 Housner 방법은 Haroun이나 시간이력해석 방법에 비하여 보수적인 결과를 보여준다. 또한 Haroun에 의한 방법은 시간이력해석을 수행한 결과에 비해 저평가하고 있음을 알 수 있다.
- CST에 면진장치 설치하면 비면진 CST에 비해 지진응답을 약 1/3로 저감시킬 수 있으며 그에 따라 메디안 성능이나 HCLPF가 약 3배 증가하여 노심손상 빈도에 미치는 영향이 크게 줄어드는 것을 알 수 있다.
- CST에 면진장치를 설치할 경우 메디안 성능을 1.0g 이상으로 확보할 수 있다면 효과적으로 CDF를 저감시킬 수 있으며 이러한 방법을 사용하면 최적 면진시스템의 설계가 가능하다.

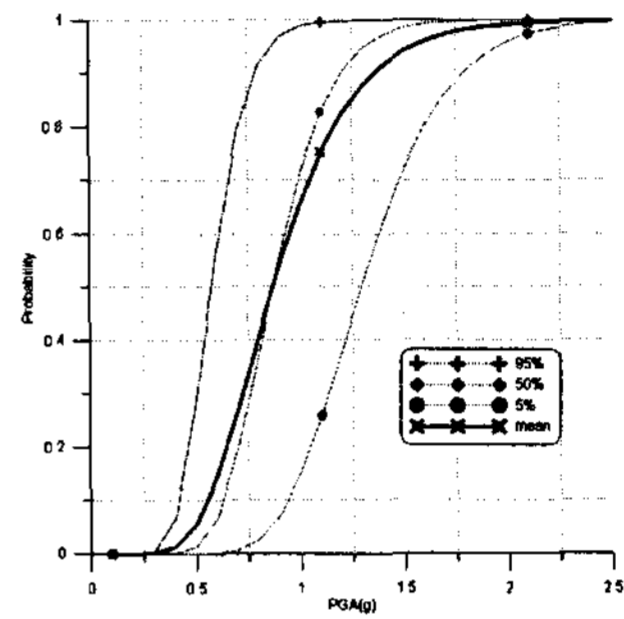
면진장치는 유체저장 탱크의 파괴확률을 줄이는데 큰 효과가 있으며 이러한 내진성능의 향상은 원전의 내진 안전성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 유체저장 탱크와 입력지진파에 대한 적절한 설계가 이루어진다면 면진장치를 이용하여 상당한 면진효과를 기대할 수 있다는 것을 보여준다.

표 3. 지진취약도 분석결과

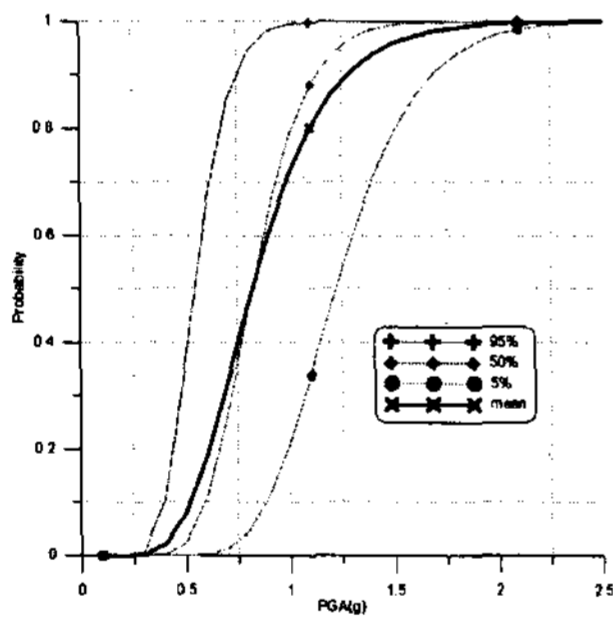
		Housner	Haroun	Time History	면진장치설치
메디안성능	밀면전단력(tonf)	2524.80			
	전도모멘트(tonf·m)	21080.00			
응답	밀면전단력(tonf)	646.35	581.77	616.26	198.04
	전도모멘트(tonf·m)	2690.286	2603.53	2700.55	915.90
성능계수	F (밀면전단력)	3.906	4.340	4.097	12.749
	F (전도모멘트)	7.836	8.097	7.806	23.016
메디안성능	A_m (g)	0.781	0.868	0.819	2.550
HCLPF	A_{HCLPF} (g)	0.347	0.385	0.364	1.132



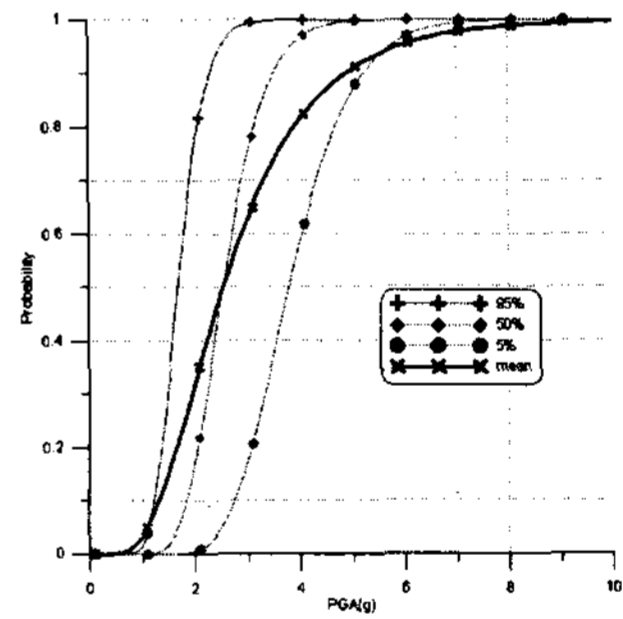
(a) Housner



(b) Haroun



(c) TH Analysis



(d) Isolated

그림 4. 유체저장 탱크의 취약도 곡선

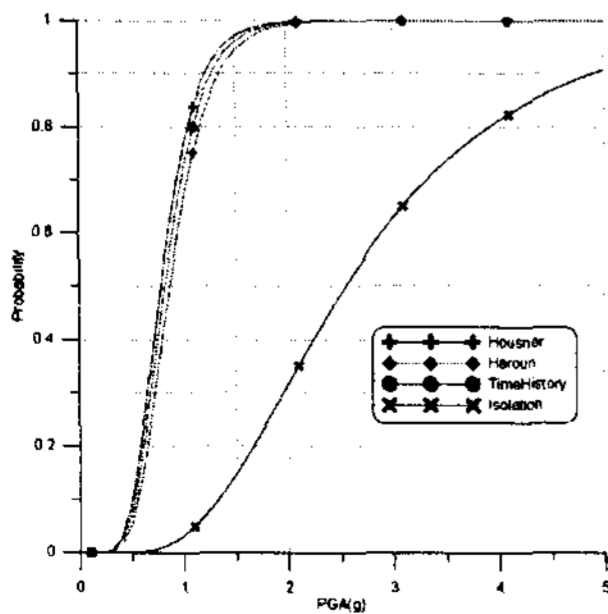


그림 5. 평균 취약도곡선 비교

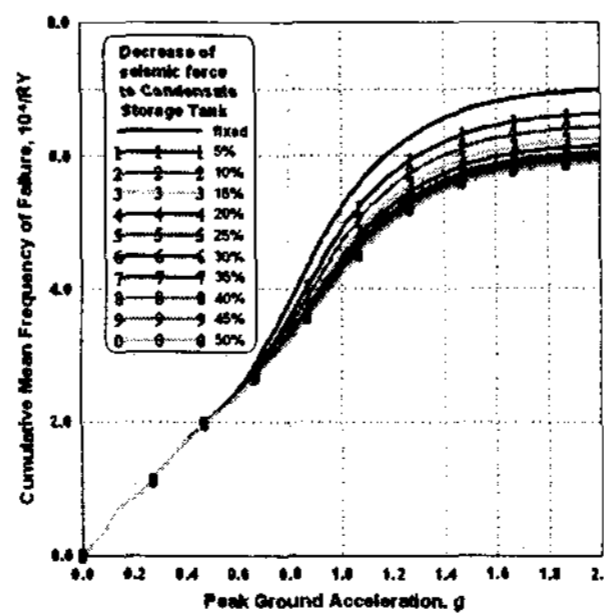


그림 6. CST성능에 따른 CDF

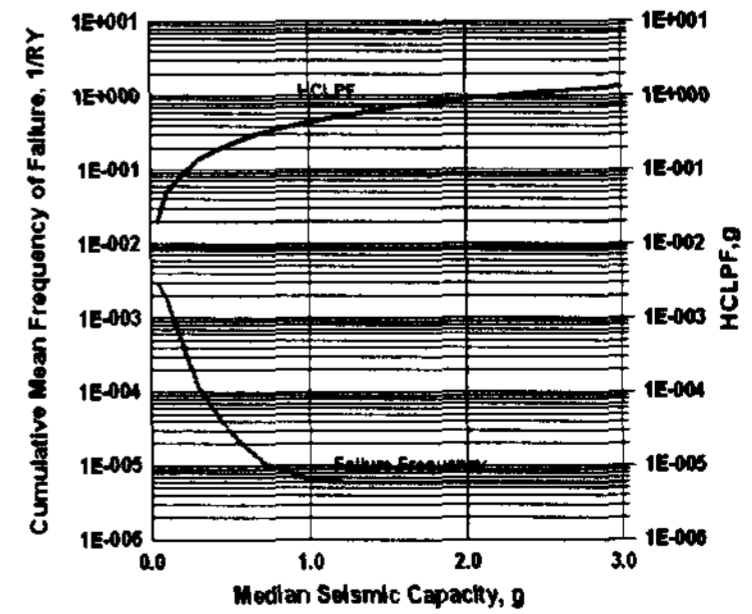


그림 7. HCLPF와 CDF의 변화

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. W. Housner, The Dynamic Behavior of Water Tanks. Bull. Seismolog Soc. Am. 53, 381-387. (1963)
2. M. A. Haroun and G. W. Housner, 'Seismic Design of Liquid Storage Tanks', J. Tech. Councils ASCE, 107, 191-207. (1981)
3. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. (1973)
4. Choi, In Kil, Choun, Young Sun, Seo, Jeong Moon, 'Technical Guide for Seismic Fragility Analysis of NPP Structures and Equipments', KAERI. TR-2071. (2002)
5. R. P. Kennedy, C. A. Cornell, R. D. Campbell, S. Kaplan, and H. F. Perla, 'Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear Power Plant', Nuclear Engineering and Design, 59, 315-338. (1980)
6. R. P. Kennedy, M. K. Ravindra, 'Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies', Nuclear Engineering and Design, 79, 47-68. (1984)
7. A. S. Veletos. 'Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks', Chapter 7, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE. (1984)
8. J. A. Haringx, 'On Highly Compressive Helical Springs and Rubber Rods and Their Applications to Free Mountings-Part 1, 2 and 3', Philips Research Reports. (1948-1949)
9. M. J. N. Priestly, Seismic Design of Storage Tanks, Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, December. (1986)
10. J. M. Rotter, Local Inelastic Collapse of Pressurized Thin Cylindrical Steel Shells Under Axial Compression, Research Report, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, Australia. (1985)
11. J. W. Reed and R. P. Kennedy, Methodology for Developing Seismic Fragilities, EPRI, TR-103959. (1994)
12. M. P. Bohn and J. A. Lambright, Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150, NUREG/CR-4840, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC. (1990)
13. 전영선, 최인길, 기기의 면진을 통한 원전의 내진안전성 향상, 한국지진공학회, 춘계학술대회 논문집. (2003)