

# 복합모드감쇠를 고려한 구조물의 지진취약도분석

## Seismic Fragility Analysis of the Structure Considering Composite Modal Damping

조성국\*  
Cho, Sung Gook

조양희\*\*  
Joe, Yang Hee

박형기\*\*  
Park, Hyung Ghee

황규호\*\*\*  
Hwang, Kyu Ho

### ABSTRACT

This paper introduces a methodology of seismic fragility analysis and discusses the basic input variables, focusing on the conservatism and variability of reference response spectrum. The procedures to consider the composite modal damping in the seismic fragility analysis is presented and its effects on the seismic capacity of structure is evaluated through an example analysis of the nuclear power plant structure which has typical composite modal damping characteristics. Two seismic fragility analyses were performed to obtain the seismic capacities which evaluated by considering the composite modal damping and the single damping characteristics. The results showed that the seismic fragility analysis without considering the different values of composite modal damping may considerably overestimate the seismic capacity of coupled structures.

### 1. 서 론

현재 대부분의 원자력발전소 보유국가에서는 원자력발전소에 대한 외부사상분석(individual plant examination of external events : IPEEE)을 발전소의 건설 및 운전에 관한 인허가 요건으로 규정하고, 이 가운데 지진사상(seismic event)에 대한 안전성 평가를 위하여 확률론적 지진위험도평가(seismic probabilistic risk assessment : SPRA) 기법(EPRI, 1994)을 수립하여 시행하고 있다. 이 SPRA를 위해 현재 원자력발전소 분야에서는 결정론적 파손여유도 방법(conservative deterministic margin method : CDFM)과 지진취약도분석 기법(seismic fragility analysis : SFA)을 개발하여 구조물의 내진 성능 평가에 활용하고 있다(Lee & Song, 1999). 이 가운데 지진취약도분석 기법은 확률론적 신뢰성 이론에 입각하여 지진운동 및 설계자료의 보수성과 변동성을 모두 고려한 분석 방법으로서 보다 실제적으로 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 기법이라 할 수 있다.

\* 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정, 학생회원

\*\* 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, 정회원

\*\*\* 한국전력기술주식회사, 전력기술연구소, 선임연구원, 정회원

한편, 결정론적 방법에 비하여 확률론적 구조안전성 평가에서는 입력자료로 제공되는 기본변수들의 표현 방법과 그의 통계특성(statistical parameter)에 따라 분석결과에 많은 차이가 발생할 수 있다. 그 중에서도 특히 지반운동의 정의와 관련된 입력자료는 SPRA의 수행목적과 관련된 중요한 변수라 할 수 있다. 이 지반운동의 정의와 관련하여 지진취약도 분석에서는 설계시 적용된 응답스펙트럼의 형태와 그의 보수성 및 변동성을 고려한다. 이전의 연구(조양희, 2001)에서 밝힌 바와 같이, 현행 지진취약도 분석 실무에서는 구조물의 기본모드 혹은 몇 개의 주요 모드에 대한 응답스펙트럼 형태의 보수성과 변동성만을 고려하고 있다. 그러나, 보다 합리적으로 설계응답스펙트럼의 보수성과 변동성을 고려하기 위해서는 구조물의 모든 유효모드들에 대한 영향을 고려해야 한다. 특히, 두 가지 이상의 복합모드감쇠(composite modal damping)를 갖는 구조물에 대하여 응답스펙트럼의 단일감쇠곡선의 영향만을 고려하는 경우에는 실제의 응답과는 다른 결과를 산출할 수 있다.

따라서, 서로 다른 감쇠특성을 갖는 구조물의 내진성능평가시에는 복합모드감쇠효과를 고려한 지진취약도분석이 요구된다. 이러한 요구에 따라, 이 연구에서는 현행 지진취약도분석 실무에서 감쇠와 응답스펙트럼의 보수성과 변동성을 고려하는 방법에 대하여 논의하고, 복합모드감쇠효과를 고려한 지진취약도분석 기법을 소개하였다. 또한, 대표적인 원자력발전소 구조물을 대상으로 예제 분석을 수행하고, 복합모드감쇠효과가 지진취약도 분석 결과에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 지진취약도분석

지진취약도는 임의의 지반운동수준,  $a$ 에 대한 대상 구조물의 조건부파괴확률(conditional probability of failure)로 정의(Kennedy, 1984)된다. 현재, 원자력발전소의 지진취약도분석을 위하여 널리 사용되고 있는 확률분포모델은 대수정규분포(log-normal distribution)이며, 지진취약도를 구하기 위하여 입력자료로 제공되는 기본확률변수는 응답변수(response variable)와 내력변수(capacity variable)로 구분된다. 이때, 응답변수는 내진설계시 평가된 지진응답의 보수성과 변동성을 평가하기 위한 것이고, 반면에 내력변수는 지진하중에 대한 구조물의 실제 강도와 비탄성에너지흡수능력의 영향을 고려하기 위한 것이다.

현재까지 개발된 지진취약도 분석 기법 가운데 널리 이용되고 있는 방법은 미국 전력연구소에서 지침으로 제공하고 있는 안전계수법(safety factor method)으로서 이 방법에서는 각 기본변수를 기준이 되는 지진내력에 대한 안전율 또는 안전계수의 식으로 표현한다. 즉, 최대지반가속도(PGA)를 지반운동수준을 표현하는 특성인자로 사용하고, 설계시 적용한 지반운동수준을 기준내력(reference capacity)으로 정할 경우, 실제 지진내력(actual seismic capacity)은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$A = \left( \prod_{i=1}^n F_i \right) \times A_{ref} \quad (1)$$

여기서,  $F_i$ 는 각 기본변수의 안전계수(safety factor)이고,  $A_{ref}$ 는 기준지반운동수준(reference ground motion level)으로서 현행 실무에서는 주로 안전정지지진(safe shutdown earthquake)의 최대지반가속도로써 표현한다.

### 3. 기본입력변수

지진취약도분석에서 고려하는 기본확률변수는 응답변수(response variable)와 내력변수(capacity variable)로 구분된다. 여기서, 응답변수는 내진설계시 계산된 지진응답의 보수성을 평가하기 위한 것이고, 내력변수는 목표지진운동에 대한 구조물의 실제 저항 능력을 평가하기 위한 것이다.

#### 3.1 지진내력변수

구조물의 지진내력변수는 설계지진하중에 대한 구조물이 가지고 있는 실제의 저항능력을 표현하기 위한 것으로 강도계수(strength factor)와 비탄성에너지흡수계수(inelastic energy absorption factor)의 곱으로 표현한다. 강도계수,  $F_S$ 는 설계지진하중이 요구하는 부재력에 대한 설계단면의 실제 저항능력의 안전율로서 다음과 같이 표현된다.

$$F_S = \frac{S - P_N}{P_S} \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 특정한 파손모드에 대한 구조요소의 강도이고,  $P_N$ 은 지진하중을 제외한 설계하중이 요구하는 부재력이며,  $P_S$ 는 목표지반운동 즉, 설계지진하중에 저항하는데 요구되는 구조단면의 부재력이다.

현행, SPRA에서는 강구조물인 경우에는 탄성한도(elastic limit)를, 콘크리트 구조물인 경우에는 설계단면의 극한강도(ultimate strength)를 구조요소의 지진내력강도(seismic capacity strength)로 정의한다. 구조요소의 극한강도 혹은 탄성한도를 초과하여 극한상태에 도달될 때까지 발휘하는 연성거동(ductile behavior)은 구조물이 비탄성범위에서 지진에너지를 흡수하는 능력을 표현하는 비탄성에너지흡수계수로 고려한다. 이전까지 원전 실무에서, 비탄성에너지흡수능력은 Newmark-Riddel이 제시한 감소계수(deamplification factor)를 이용하여 고려하였으나, 현행 지침(EPRI, 1994)에서는 유효진동수/유효감쇠방법과 유효 Riddel-Newmark 법으로 계산된 두 가지 비탄성에너지흡수계수의 평균치를 사용할 것을 추천하고 있다.

#### 3.2 지진응답변수

지진응답변수는 내진설계시 적용된 지진입력운동의 정의, 구조해석 모델링, 지반-구조물 상호작용해석, 지진해석방법 등에 포함된 보수성으로 인한 구조물의 지진응답의 차이를 평가하기 위한 것이다. 보다 실제에 가까운 구조물의 지진응답을 구하기 위해서는 내진설계에 관련된 인자들의 보수성을 제거하고, 이들을 확률변수로 취급하여 해석을 수행하는 확률론적 지진응답해석(probabilistic seismic response analysis)을 수행하는 것이 보다 합리적이라 할 수 있다. 그러나, 현행 실무에서는 이 방법 대신에 보다 간편한 방법으로, 내진설계시 계산된 지진응답을 구하기 위하여 입력된 기본 자료들과 이들의 변동성을 포함한 확률변수에 대한 비로 표현되는 안전계수법(safety factor method)을 주로 이용한다.

지진취약도분석에서 고려되는 지진응답변수는 지반운동의 정의와 관련된 스펙트럼형태계수를 포함하여 감쇠계수, 모델링계수, 모드조합계수, 지진방향성분계수, 지반구조물 상호작용계수 등이다. 이 가운데 스펙트럼형태계수(spectrum shape factor)는 설계응답스펙트럼의 형태에 포함된 보수성 및 변동성을 고려하기 위한 것으로, 이는 기준응답스펙트럼과 부지에서 발생 가능한 실제 지진 응답스펙트럼의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$F_{SS} = \frac{S_A(\omega, \xi)_{ref}}{S_A(\omega, \xi)_{act}} \quad (3)$$

여기서,  $S_A(\omega, \xi)_{ref}$  : 기준응답스펙트럼(통상, 설계응답스펙트럼)

$S_A(\omega, \xi)_{act}$  : 발생 가능한 실제 지진의 응답스펙트럼

$\omega, \xi$  : 구조물의 고유진동수 및 감쇠값

지진하중을 받는 구조물의 실제 응답은 각 모드별 응답을 전체 모드에 대하여 선형중첩(linear superposition) 함으로써 얻어질 수 있다. 따라서, 고차모드효과를 고려한 응답스펙트럼 형태계수는 모드별 모드참여질량비(modal participating mass ratio)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$F_{SS} = \sum_{n=1}^N \bar{r}_n \cdot \frac{S_A(\omega_n, \xi_n)_{ref}}{S_A(\omega_n, \xi_n)_{act}} \quad (4)$$

여기서,  $\bar{r}_n$ 는  $n$ -번째 모드의 유효모드질량비이고,  $S_A$ 는 스펙트럼 가속도를 의미하며,  $\omega_n, \xi_n$ 은  $n$ -번째 모드의 고유진동수와 감쇠비이다.

감쇠계수는 내진설계시 사용된 감쇠값과 실제 감쇠값의 차이를 고려하기 위한 것으로 부지고유 스펙트럼(site-specific spectrum)의 곡선 가운데 파괴시의 구조감쇠에 해당하는 감쇠곡선상의 스펙트럼 가속도에 대한 설계시 적용된 감쇠값에 대한 스펙트럼 가속도 값의 비로써 표현한다. 이때, 서로 다른 감쇠특성을 갖는 복합모드감쇠시스템이나, 지반-구조물 상호작용과 같은 문제에서는 전체 구조응답에 미치는 모드별 감쇠값의 영향을 무시할 수 없으므로, 스펙트럼 형태계수 및 감쇠계수의 결정시에 각 모드감쇠의 영향을 고려할 필요가 있다.

또, 모델링계수는 내진설계시 사용된 해석모델을 구성하는 질량과 강성의 불확실성을 고려하기 위해 사용되며, 모드조합계수는 내진설계시 응답스펙트럼해석법을 적용하는 경우에 모드조합방법상의 보수성을 고려하기 위한 것이다. 지진하중의 방향별 지진분력의 크기 비의 차이와 이들 분력의 조합방법상의 보수성은 수평방향첨두응답계수와 지진성분조합계수로서 각각 고려한다.

#### 4. 예제분석

이 연구에서는 앞서 논의된 응답스펙트럼형태계수 및 감쇠계수의 유용성 및 실용성을 확보하고, 복합모드감쇠효과가 지진취약도 분석결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 고리 원

자력 발전소 4호기에 건설된 기기냉각수건물(component cooling water building)을 대상으로 예제분석을 수행하였다. 이를 위하여 대상 모델의 단일 감쇠특성만을 고려한 경우와 복합모드감쇠를 고려한 경우에 대한 지진취약도분석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

#### 4.1 대상 모델

선정된 대상 건물(Bechtel, 1991)은 내진 1등급의 2층 구조물로서 콘크리트-강 합성 구조이다. 즉, 이 건물의 하부층은 철근콘크리트 상자형 전단벽 구조이고, 상부층은 브레이싱이 설치된 강재 프레임 구조 형식을 채택하고 있다. 따라서, 구조물을 구성하는 구조요소별로 서로 다른 감쇠특성을 보유한 구조물이다. 이 건물의 하부층 평면의 크기는 124ft×54ft이고, 구조물의 총높이는 48ft이다.

그림 1은 이 건물의 구조형상이며, 그림 2는 지진해석을 위해 작성된 집중질량-보 모델이다. 고유치해석결과 대상 모델의 NS-방향 응답을 지배하는 진동모드는 1번째와 4번째 모드로서 1번째 모드는 주로 상부층의 철골구조에 대한 모드이며, 4번째 모드는 하부층의 콘크리트 전단벽의 진동모드이다. 이때, 이 모드들의 유효모드질량비는 각각 22%와 78%이다.

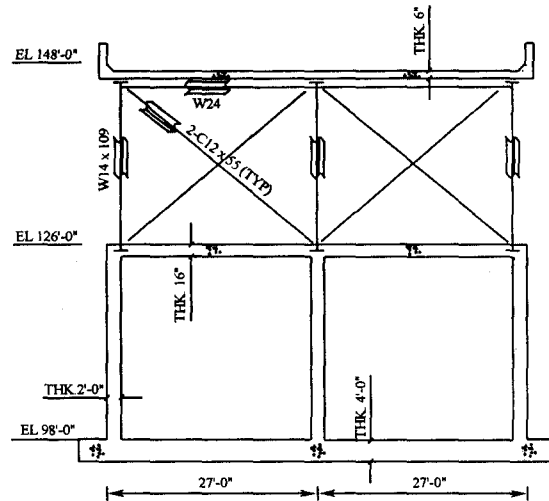


그림 1 기기냉각수건물의 구조형상

#### 4.2 기본변수 및 지진취약도분석

이 건물의 지배적인 파손모드는 개구부를 포함하는 동쪽 콘크리트 전단벽 하단의 휨에 의한 N-S 방향 전단파괴이다. 이 구조물의 연성계수는 Gergely(1984)의 연구 결과를 바탕으로 4로 예상하였으며, 비탄성에너지흡수계수는 Riddell-Newmark 방법에 의해 계산하였다.

대상 모델은 철골과 콘크리트가 복합된 구조물로서 이를 고려하여, 구조물의 모드 감쇠값은 상부층에 대하여 4%와 하부층에 대하여 7%를 각각 고려하였다. 또한, 파괴시

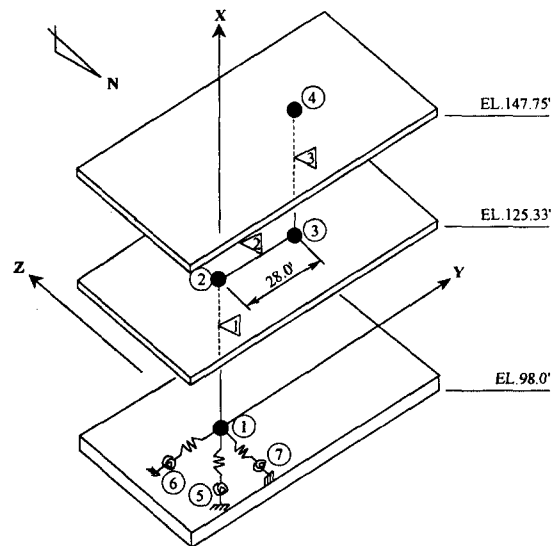


그림 2 지진해석 모델

의 감쇠를 기준으로 할 경우에는 현행 지침의 추천에 따라 철골과 콘크리트 구조 모두에 대하여 10%로 가정하였다. 한편, 원 설계시에는 보수성 확보를 위하여 응답스펙트럼의 4% 감쇠곡선을 설계응답스펙트럼으로 적용하였다.

현재까지 국내의 경우에는 이용 가능한 부지고유 응답스펙트럼이 제시되어 있지 않은 상황이므로 이 연구에서는 NUREG/CR-0098(Newmark, 1979)에 제시된 중앙값 곡선과 중앙값+1표준편차의 곡선을 실제 지진응답스펙트럼으로 가정하고, 원 설계시 적용된 미국 원자력규제위원회(USNRC, 1973)에서 제시한 표준응답스펙트럼을 기준응답스펙트럼으로 가정하였다.

이 연구의 목적을 위하여 대상 건물의 감쇠값을 철골구조물을 기준으로 4%로 가정한 경우와 콘크리트를 기준으로 7%로 가정한 경우 및 두 감쇠의 복합모드효과를 고려한 경우에 대한 지진취약도분석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 이때, 각 경우에 대한 파괴확률은 근사2계모멘트법(approximate second moment approach)을 이용하여 계산하였다.

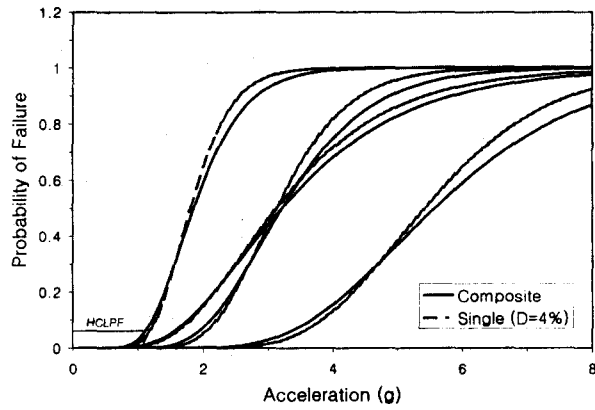
### 4.3 분석결과 및 고찰

표 1은 이 세가지 경우에 대한 지진취약도 분석결과이다. 표에서 HCLPF 값은 구조물의 지진 내력의 지표라 할 수 있는 95% 신뢰도 곡선상의 5% 파괴확률 값을 의미한다. 또,  $A_m$ 은 중앙값 가속도 내력이고,  $\beta_r$ 과  $\beta_u$ 는 가속도 내력의 무작위성과 불확실성에 대한 대수표준편차이다.

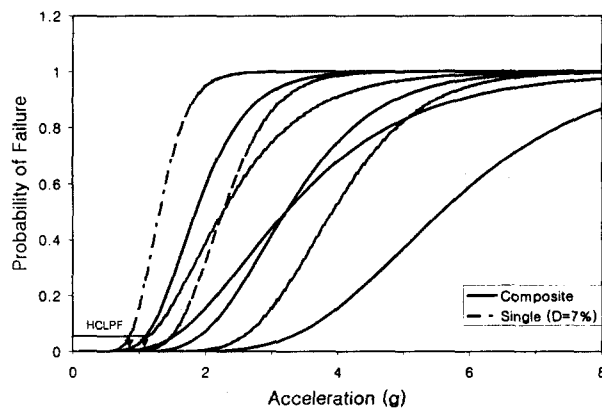
표 1. 지진취약도 분석결과 비교

		$A_m$	$\beta_r$	$\beta_u$	HCLPF	비 고
단일 모드	4% 감쇠	3.13 g	0.272	0.334	1.155 g	기준가속도 = 0.2 g
	7% 감쇠	2.26 g	0.263	0.334	0.848 g	
복합 모드		3.22 g	0.326	0.334	1.086 g	

표에서 보는 바와 같이 단일 모드 감쇠만을 고려하는 경우에는 복합모드를 고려하는 경우에 비하여 대상 구조물의 내진성능을 약 6% 적게 또는 약 20% 크게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 단일 모드만을 고려하는 경우에는 복합 모드를 고려하는 경우에 비하여 지진취약도의 변동성(variability)을 훨씬 적게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그림 3은 분석결과 작성된 지진취약도 곡선으로서 4% 감쇠값의 단일 모드를 고려하는 경우에 비하여 7% 감쇠값의 단일 모드를 고려하는 경우가 복합 모드를 고려하는 경우에 비하여 더 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 대상 건물의 파손모드가 하부층 전단벽의 전단파괴에 지배됨에도 불구하고, 콘크리트의 단일 감쇠값만을 고려하는 경우에는 실제와 다른 결과를 예측할 수 있음을 의미한다. 또, 대상 모델은 비교적 단순한 모델임에도 불구하고, 복합모드감쇠의 고려 여부에 따라 지진취약도분석 결과에 큰 차이가 발생되었으며, 보다 복잡한 구조물의 경우에는 복수모드 및 복합감쇠의 효과가 더 클 것으로 예상된다.



(a) 4% 감쇠를 고려한 경우



(b) 7% 감쇠를 고려한 경우

그림 3. 대상 구조물의 지진취약도 곡선 비교

## 5. 결 론

이 연구에서는 지진취약도분석시 복합모드감쇠를 고려한 지진취약도분석기법을 소개하고, 예제 분석을 통하여 이의 필요성을 검토하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지진취약도분석시 두 가지 이상의 재료감쇠를 갖는 구조물의 경우, 단일모드감쇠에 대한 영향만을 고려하게 되면, 구조물의 내진성능을 약 20% 정도 크게 예측할 수 있다. 따라서, 이와 같은 구조시스템의 경우에는 복합모드의 영향을 고려한 지진취약도분석이 요구된다.
- 2) 현행 실무에서와 같이 업무의 효율성 또는 간편성을 위하여 단일 모드감쇠만을 고려하여 지진취약도분석을 수행하는 경우에도, 선정된 모드감쇠값에 따라 분석결과에 많은 차이가 예상

되므로, 감쇠값의 선정에 주의할 필요가 있다.

#### 참고문헌

1. EPRI(1994), "Methodology for Developing Seismic Fragilities", EPRI TR-103959, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
2. R.P. Kennedy and M.K. Ravindra(1984), "Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies", J. Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, No. 1, pp.47-68.
3. USNRC(1973), "Design Response Spectra for Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.60, Rev. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
4. Newmark, N.M. and Hall, W.J.(1978), "Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants", NUREG/CR-0098.
5. Nam-Ho Lee and Ki-Bum Song(1999), "Seismic Capability Evaluation of the Prestressed/Reinforced Concrete Containment, Younggwang Nuclear Power Plant Units 5 & 6", J. Nuclear Engineering and Design, Vol. 192, pp. 189-203.
6. Bechtel Power Corporation(1991), KNU 5&6 (KRN 3&4) Design Report, Section STR 12, Component Cooling Water Building.
7. P. Gergeley(1984), Seismic Fragility of Reinforced Concrete Structures and Components for Application to Nuclear Facilities, USNRC, NUREG/CR-4123.
8. 조양희, 조성국, 박형기(2001), "고차 모드 효과를 고려한 구조물의 지진취약도 분석", 2001년도 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회.