

## 구조물의 지진취약도분석을 위한 비탄성에너지흡수능력의 평가 기법에 관한 비교 연구

### Comparative Study on Evaluation of Inelastic Energy Absorption Capacity for Seismic Fragility Analysis of Structures

조양희\*  
Joe, Yang Hee

조성국\*\*  
Cho, Sung Gook

박형기\*  
Park, Hyung Ghee

---

#### ABSTRACT

This paper introduces the technologies related to seismic resistance assessment of nuclear power plant structures by seismic fragility analysis(SFA). The inelastic energy absorption factor is considered in SFA to represent the effects due to the nonlinear behavior of structures and has a significant effect on the seismic fragility that is a probability of failure of structures by earthquake. Several practical methods to evaluate the inelastic energy absorption capacity of structures are investigated. The capacities determined by those methods are compared with each other. And an improved method that uses the inelastic demand capacity diagram is presented. Conclusively, some comments on each method for practical application are made.

---

#### 1. 서 론

현재까지, 원자력발전소를 비롯한 대부분의 사회 핵심 구조물의 지진에 대한 안전성은 탄성설계법에 기초하여 확보되고 있다. 또한, 이와 관련된 실무에서는 보다 확실한 시설물의 내진능력을 보장하기 위하여 설계단계에서 의도적으로 충분한 보수성(conservatism)을 도입하는 것이 사실이다. 그러나, 그 이후에 실시되는 구조물의 내진성능 평가(seismic performance evaluation)는 설계와는 또 다른 관점에서 실제 구조물의 내진능력을 조사하게 된다. 즉, 평가 시에는 설계단계에서 고려되지 않은 구조물의 비탄성에너지흡수능력을 비롯하여 설계결과에 포함된 여러 가지 보수성이 어느 정

---

\* 정 회 원·인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수

\*\* 학생회원·(주)제이스코리아 기술연구소, 박사과정수료

도인지를 정량적으로 파악한다.

원자력 발전소에 속한 각종 구조물 및 설비들의 내진성 평가는 지진취약도분석(seismic fragility analysis: SFA) 또는 CDFM(conservative deterministic failure margin) 방법을 이용하여 수행된다[1]. 이 SFA와 CDFM에서 대상 구조물의 비선형 거동으로 인한 내진성의 증가는 비탄성에너지흡수능력 (inelastic energy absorption capacity)[2],[3]으로 정의된다. 이와 관련하여, Gergeley[4]는 미국의 Zion 원전 구조물에 적용된 SFA 기법을 면밀히 검토하고, 구조물의 비탄성거동에 의한 영향의 평가방법을 보다 합리적이고, 실용적으로 개선할 필요성이 있음을 지적한 바 있다.

이 연구는 현재까지 원전 분야의 실무에 적용하고 있는 몇 가지 비탄성에너지흡수능력의 결정 기술을 서로 비교하고, 이의 개선방향에 대하여 논의하고 있다. 또, 최근에 건축구조물의 분야에서 주로 이용하고 있는 능력스펙트럼법(capacity spectrum method) 혹은 요구력과 능력의 상관관계를 이용한 방법의 적용 가능성에 대한 의견을 제시한다.

## 2. 비탄성에너지흡수능력의 평가 방법

SFA와 CDFM에서는 구조물의 내진성능에 영향을 미치는 요인들을 안전계수(safety factor)의 형태로 나타낸 후, 이들의 곱을 구함으로써 설계에 포함된 보수성의 정도를 평가한다. 이때, 고려하는 여러 요인가운데 비탄성에너지흡수능력은 구조물의 거동이 탄성범위를 넘어서 극한변형에 도달될 때까지 발휘할 수 있는 시스템의 총 에너지 흡수능력을 의미한다.

현재까지 개발된 여러 가지 비선형모델가운데, 이선형강성모델(bilinear stiffness system)을 갖는 구조시스템을 등가선형시스템으로 환산하면, 이 등가시스템이 최대변형에 도달할 때의 할선진동수(secant frequency)는 식(1)로 계산된다.

$$f_s = f \cdot \sqrt{\frac{1+s(\mu-1)}{\mu}} \quad (1)$$

여기서,  $s$  : 이선형모델의 1차선형 구간과 2차선형 구간의 강성비(stiffness ratio)

$\mu$  : 변위연성도(displacement ductility)

$f_s, f$  : 각각 할선진동수(secant frequency) 및 탄성진동수(elastic frequency)

이 등가선형구조시스템의 최대변형,  $\delta_m$ 은 비탄성에너지흡수계수,  $F_\mu$ 를 이용하여 다음 식으로 표현할 수 있다[5].

$$\delta_m = \frac{F_\mu S_A(f_e, \beta_e)}{(2\pi f_e)^2} \quad (2)$$

여기서,  $S_A(f_e, \beta_e)$ 는 등가탄성응답스펙트럼 가속도이고,  $f_e$ 와  $\beta_e$ 는 등가선형시스템의 고유진동수와 등가감쇠비이다.

이 비탄성에너지흡수계수의 평가는 구조물이 극한변형에 도달될 때의 시스템연성도(system ductility)를 구하는 것으로 시작됨을 알 수 있다. 그러나, 이 연구는 비탄성에너지흡수능력의 계산 방법에 관한 연구로서 시스템연성도의 결정방법에 대해서는 별도의 기술을 생략하였다. 한편, 최근에 최인길과 서정문[6]에 의해 수행된 연구에 의하면, 국내 표준원자력발전소의 시스템 연성도는 약 4.8에서 6.8의 범위에 있는 것으로 평가되었다.

### (1) 비탄성응답스펙트럼감소법

Riddell-Newmark법 (R-N법)으로 불리는 이 방법은 잘 알려진 Newmark 비탄성응답스펙트럼의 감소계수(deamplification factor),  $\phi_\mu$ 의 역수[5]를 비탄성에너지흡수계수로 정의한다. 이 방법은 평활화된 탄성설계스펙트럼의 각 증폭구간별로 제시된 상수 값을 이용하여  $F_\mu$ 를 다음 식으로 표현한다.

$$F_\mu = \frac{1}{\phi_\mu} = (p \cdot \mu - q)^r \quad (3)$$

여기서,  $\mu$ 는 구조물의 시스템연성도이고,  $p, q, r$ 는 구조요소의 특성과 응답스펙트럼의 형태에 따라 결정되는 상수이다.

초기의 확률론적 지진위험도평가(seismic probabilistic risk assessment)에서 주로 사용된 R-N법은 사용하기 편리한 간편 법이지만, 결과를 비보수적으로 예측할 수 있다. 즉, 이 방법은 구조물이 비탄성영역에 진입한 후 나타나는 강성의 저하나 감쇠의 증가와 같은 특성을 고려하지 않을 뿐만 아니라, 비선형 이력특성(hysteresis)에 의한 영향도 반영되지 않는다.

### (2) 평균스펙트럼법

평균스펙트럼법(spectral averaging method)은 R-N법의 약점을 개선하기 위하여 Kennedy[5] 등이 제시한 방법이다. 이 방법은 구조물이 최대변형에 도달되기 전에 비선형응답사이클이 반복되는 동안에 감소되는 시스템의 강성과 증가되는 감쇠의 영향을 평균감소강성(average reduced stiffness)과 평균증가감쇠(average increased damping)로 표현한 등가의 선형모델을 이용한다.

이 등가시스템의 유효진동수,  $f_e$ 와 유효감쇠비,  $\beta_e$ 는 비선형응답사이클의 평균진동수와 평균감쇠를 의미하는 것으로 다음과 같이 계산된다.

$$f_e = \left\{ (1 - A) + A \left( \frac{f_s}{f} \right) \right\} \cdot f \quad (4a)$$

$$\beta_e = \left( \frac{f_s}{f_e} \right)^2 \cdot (\beta + \beta_H) \quad (4b)$$

$$A = C_F \cdot \left(1 - \frac{f_s}{f}\right) \leq 0.85 \quad (4c)$$

$$\beta_H = C_N \cdot \left(1 - \frac{f_s}{f}\right) \quad (4c)$$

여기서,  $f$ 와  $\beta$ 는 각각 탄성시스템의 고유진동수와 감쇠비이며,  $\beta_H$ 는 핀칭이력감쇠(pinched hysteretic damping)이다. 또한,  $C_F$ 와  $C_N$ 은 각각 진동수의 이동과 이력감쇠에 의한 영향을 조정하기 위한 계수로서 핀칭의 정도에 따라 실험적으로 결정된다.

이 시스템의 최대변형은 변위연성도와 항복변형( $\delta_y$ )을 이용하여 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\delta_m = \mu \cdot \delta_y = \mu \cdot \frac{S_A(f, \beta)}{(2\pi f)^2} \quad (5)$$

따라서, 식(2)와 식(5)를 등치 시키면, 비탄성에너지흡수계수는 다음 식(6)으로 표현된다.

$$F_\mu = \mu \left(\frac{f_e}{f}\right)^2 \left\{ \frac{S_A(f, \beta)}{S_A(f_e, \beta_e)} \right\} \quad (6)$$

이 방법은 진동수의 이동(shift)과 이력감쇠(hysteretic damping)의 영향을 고려하므로 R-N법에 비하여 개선된 방법이라 할 수 있다.

### (3) 유효R-N법

유효R-N법은 항복후 힘-변형 곡선의 기울기와 지반운동의 지속시간에 대한 영향을 반영할 수 있도록 R-N법을 개선한 방법이다[7]. 이 방법은 이선형시스템을 등가의 탄소성시스템으로 변환한 후, 이 때의 등가항복변형과 등가극한변형으로부터 비탄성에너지흡수계수를 결정한다. 이 방법은 그림 1과 같이, 각 민감구간별로 계산되는 계수를 구한 후, 이들을 서로 비교하는 과정(그림 1 참조)을 거쳐 최종 비탄성에너지흡수계수를 결정한다. 이 과정에 필요한 중간 계수는 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$F_{\mu 2} = C_F [(q_v + 1)\mu' - q_v]^{r_v} \quad (7a)$$

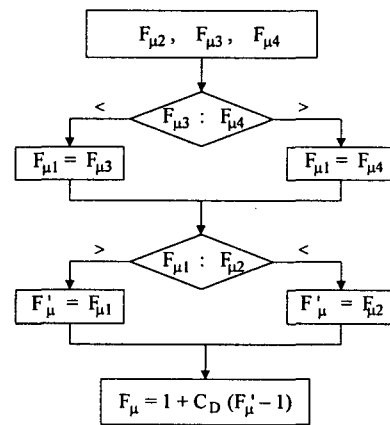


그림 1 유효R-N법의 절차

$$F_{\mu\beta} = [(q_a + 1)\mu' - q_a]^{r_a} \quad (7b)$$

$$F_{\mu\alpha} = \frac{S_A(f, \beta)}{p g a} \mu'^a \quad (7c)$$

이때,  $F_{\mu\alpha}$ ,  $F_{\mu\beta}$  및  $F_{\mu}$ 는 각각 속도증폭구간, 가속도증폭구간, 강체구간에 대한 에너지흡수계수이고,  $q_a$ ,  $q_v$  및  $r_a$ ,  $r_v$ 는 스펙트럼의 증폭구간별로 감쇠값에 따라 결정되는 상수이다.  $C_F$ 는 가속도민감구간과 속도민감구간의 경계진동수(knuckle frequency)에 따라 결정되는 보정계수이다. 또,  $\mu'$ 는 이선형모델의 항복후 강성비(post-yield slope)에 따른 영향을 반영한 수정연성도로서 다음 식으로 구한다.

$$\mu' = 0.5 + \frac{(\mu - 1)(1 + R) + 1}{2R^2} \quad (8a)$$

$$R = 1 + s(\mu - 1) \quad (8b)$$

#### (4) EPRI법

미국의 현행 지침[7]에서 제시하고 있는 방법은 평균스펙트럼법과 유효R-N법의 두 가지이다. 이 지침은 이들 두 가지 방법으로 구한 결과의 평균을 비탄성에너지흡수계수로 사용할 것을 추천하고 있다. 이때, 유효R-N법은 앞서 논의된 방법과 동일하나, 평균스펙트럼법은 식(1)로 표현되는 이선형모델을 탄소성모델로 근사하여, 이에 대한 비탄성에너지흡수계수의 계산식을 제시하고 있다.

탄소성모델에 대하여 항복 전후의 강성비는 0이 되므로, 식(1)에  $s=0$ 을 대입하여 활선진동수,  $f_s$ 를 결정하고, 이를 다시 식(6)에 대입하면, 비탄성에너지흡수계수는 다음과 얻어진다.

$$F_{\mu} = \left(\frac{f_e}{f_s}\right)^2 \left\{ \frac{S_A(f, \beta)}{S_A(f_e, \beta_e)} \right\} \quad (9)$$

이 지침에서 두 방법의 평균값을 비탄성에너지흡수계수로 사용할 것을 추천하고 있다는 사실로 미루어, 두 가지 방법으로 구한 결과 값에 큰 차이가 없으며, 방법간의 우열을 가리기 힘들다는 전제가 내포되어 있음을 짐작할 수 있다. 그러므로, EPRI법은 평균스펙트럼법과 비교하여 크게 개선된 방법이라고 예측할 수 없다.

#### (5) 비탄성요구능력법

유효R-N법을 제외하고, 이상의 방법들은 비탄성시스템을 등가의 탄성시스템으로 변환한 후, 탄성응답스펙트럼의 가속도를 이용하여 구조물의 최대변형을 예측하고 있다. 그러나, Chopra와

Goel[8]이 밝힌 바와 같이, 비탄성시스템의 최대변형(peak deformation)을 탄성스펙트럼을 이용하여 구할 경우, 여러 차례의 반복해석을 수행하고도, 구조물의 최대변형능력을 실제보다 훨씬 과소평가 할 수 있다. 이에 대하여 그들은 외력과 시스템의 응답 특성을 가속도와 변형의 관계로 표현한 요구력도(demand diagram)와 능력도(capacity diagram)를 이용하여 비탄성시스템의 최대변형을 쉽게 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

현행 EPRI 지침에서 이용하고 있는 비탄성에너지흡수능력계수의 결정방법도 식(5)에서와 같이 구조물의 최대변형을 탄성스펙트럼에 근거하여 계산하므로 실제와는 다른 결과를 산출 할 수 있다. 이에 대하여 이 연구에서는 구조물의 최대변형을 예측하기 위하여 비탄성응답스펙트럼과 요구능력도(demand-capacity diagram)를 이용하는 방안을 모색하였다.

Chopra와 Goel의 연구에서와 같이, 비탄성응답스펙트럼에 부합하는 구조물의 최대변형은 항복강도감소계수(yield strength reduction factor)를 이용하여 다음 식으로 계산된다[8].

$$\delta_m = \mu \cdot \frac{1}{R_y} \cdot \left( \frac{1}{2\pi f} \right)^2 \cdot S_A(f, \zeta) \quad (10)$$

여기서,  $R_y$ 는 항복강도감소계수이고,  $\mu$ 는 시스템의 연성도이다. 만약, 탄성응답스펙트럼에 부합하는 비탄성응답스펙트럼이 정의된다면, 설정된 연성도에 도달할 때의 구조물의 최대변형은 식(10)을 이용하여 정확하게 예측할 수 있다.

지진취약도는 구조물이 파괴에 도달될 때의 지반운동수준을 구하는 문제를 다루므로, 통상 극한 변형에 도달할 때의 연성도에 대해서 평가된다. 따라서, 식(5)을 대신하여 식(10)을 식(2)에 대입하여 정리하면, 비탄성에너지흡수계수는 다음과 같이 표현된다.

$$F_\mu = \mu \left( \frac{f_e}{f} \right)^2 \left\{ \frac{S_A(f, \beta)}{S_A(f_e, \beta_e)} \right\} \cdot R_y \quad (11)$$

### 3. 비교 평가

이상에서 논의된 원전구조물의 비탄성에너지흡수능력을 예측하는 방법들의 연관성을 검토하고, 새로이 시도되는 비탄성요구능력법의 적용 가능성을 확인하기 위하여 각 방법들을 이용하여 계산된 비탄성에너지흡수계수를 비교하였다. 이 비교를 위하여 선정된 탄성스펙트럼은 Newmark-Hall의 5%감쇠에 대한 중앙값(50% 신뢰도) 곡선이다.

현재까지, 과거의 지진기록을 분석하여 제시된,  $R_y$ 의 예측식은 여러 종류가 있으나, 이 연구에서는 앞서 기술한 타 방법과의 비교를 위하여 Newmark-Hall의 탄소성시스템에 대한  $R_y$ 의 계산식[8]을 이용하였다.

또한, 상기한 각 방법들의 수행과정에 요구되는 시스템의 유효감쇠에 대한 탄성스펙트럼의 값은 대수보간법(logarithmic interpolation)을 이용하여 계산하였다. 즉, 미리 정의된 두 가지 감쇠값의 스펙트럼 곡선 사이에 있는 감쇠곡선의 스펙트럼가속도는 다음 식으로 계산된다.

$$S(f, \bar{\beta}) = S(f, \beta_1) + [S(f, \beta_2) - S(f, \beta_1)] \frac{\ln\left(\frac{\beta}{\beta_1}\right)}{\ln\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right)} \quad \text{여기서, } \beta_1 < \bar{\beta} \leq \beta_2 \quad (12)$$

여기서,  $S(f, \bar{\beta})$ 는 구하고자 하는 스펙트럼 감쇠곡선이고,  $S(f, \beta_1)$ 과  $S(f, \beta_2)$ 는 미리 정의된 두 감쇠값,  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 에 대한 스펙트럼곡선을 의미한다.

#### 4. 토의 및 결론

이 연구의 주요 관심 사안은 원자력발전소의 내진성능 평가를 위하여 적용되는 비탄성에너지흡수능력 예측 식의 개선이라 할 수 있다. 이번 발표에서는 이와 관련된 연구의 진행과정과 향후의 연구방향에 대하여 소개하였으며, 주요 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 원전 구조물의 비탄성에너지흡수능력의 예측을 위하여 기존에 주로 이용되는 방법에서는 비탄성시스템의 최대변형을 구하는 과정에 탄성스펙트럼을 이용하므로, 실제보다 변형능력을 과소평가 할 수 있다. 따라서, 보다 합리적으로 구조물의 비탄성에너지흡수능력을 예측하기 위해서는 구조물의 비탄성 변형능력을 정확하게 예측하는 것이 선행되어야 한다.
- 이 연구에서는 새롭게 시도되는 비탄성요구능력법을 소개하고, 이의 적용 가능성에 대해서 검토하였다. 이 방법은 보다 정확한 비탄성변형을 예측할 수 있으므로 보다 합리적으로 구조물의 비탄성에너지흡수능력을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.
- 이 연구에서는 원전구조물의 비탄성에너지흡수능력의 평가를 위하여 요구력과 능력의 상관관계를 적용하는 방법에 대하여 개념적으로 소개하고 있으며, 향후 실제 지진기록 등을 적용한 예제분석을 통하여 이 방법의 신뢰성을 확인하고자 한다.
- 현재까지 이용하는 방법들은 주로 구조물의 변형과 지진가속도의 관계를 이용한 방법이라 할 수 있으며, 지진에 의한 입력에너지와 구조물이 흡수한 에너지의 관계를 직접적으로 고려할 수 있는 개선된 방법의 개발이 요구된다.

#### 감사의 글

저자 일행은 이 연구의 진행 과정에 많은 기술적 의견을 교환하여 주신 한국전력기술주식회사 전력기술연구소의 황규호 과장님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. USNRC, Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407, US Nuclear Regulatory Commission,

- 1991.
2. 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, Vol. 59, 1980, pp.315-338.
  3. EPRI, A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin, NP-6041, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by NTS Engineering, et al., October 1988.
  4. P. Gergeley, Seismic Fragility of Reinforced Concrete Structures and Components for Application to Nuclear Facilities, NUREG/CR-4123, 1985.
  5. R.P. Kennedy, et al., Engineering Characterization of Ground Motion - Task 1. Effects of Characteristics of Free-Field Motion on Structural Response, Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3805, May 1984.
  6. 최인길, 서정문, "확률론적 지진위험도 분석을 위한 원전 격납건물의 비탄성에너지 흡수계수 평가", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제5호, 2001, pp.47-56.
  7. EPRI(1994), Methodology for Developing Seismic Fragilities, EPRI/TR-103959, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
  8. A.K. Chopra and R.K. Goel, Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDF Systems, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, April 1999.