핵심 구조물의 확률론적 지진취약도 분석 : 기술현황
A State-of-the-Art of Probabilistic Seismic Fragility Analysis of Critical Structure

조 양 희* 박 형 기** 조 성 국***
Joe, Yang Hee Park, Hyung Ghee Cho, Sung Gook

ABSTRACT

Seismic probabilistic risk assessment(PRA) rather than deterministic assessment provides more valuable information and insight for resolving seismic safety issues in nuclear power plant design. In the course of seismic PRA, seismic fragility analysis is the most significant and essential phase especially for structural or mechanical engineers. Lately, the seismic fragility analysis is taken as a useful tool in general structural engineering as well. A systemized and synthesized procedure or technology related to seismic fragility analysis of critical industrial facilities reflecting the unique experiences and database in Korea is urgently required. This paper gives a state-of-the-art reviews of PRA and briefly summarizes the technologies related to PRA and seismic fragility analysis before developing an unique technology considering characteristics of Korean database. Some key items to be resolved theoretically or technically are extracted and presented for the future research.

1. 개요

그동안 원전을 비롯한 핵심산업시설(critical industrial facilities)의 내진안전성 평가에서는 지진하중을 단일 매개변수로 취급하는 결정론적 방법(deterministic approach)을 이용하여 수행되어 왔다. 그러나, 구조물 및 기기의 각종 설계자료와 사용재료의 특성은 본질적으로 많은 확률적인 변동요인을 내포하고 있으며, 특히 지진하중은 그 고유의 무작위(randomness) 특성에 따라 많은 불확실성을 보유하고 있는 것이 사실이다. 이에 따라 최근에는 주요 산업시설의 내진안전성을 효과적으로 평가하기 위하여 확률론적 위험도 평가(probabilistic risk assessment : PRA)를 활용하는 방안이 점차 증대되고 있다. 특히, 미국, 일본을 비롯한 대부분의 원전 보유국에서는 원자력발전소의 건설 및 가동을 위한 인허가 요건에 PRA를 의무조항으로 채택하고 있다. 지진취약도분석은 이 PRA 수행과정에 포함된 업무 범위로서 구조물의 지진안전성 분석과 관련되어 구조 및 역학적 측면에서 그 중요성이 더욱 부각되는 분야라 할 수 있다.

미국 원자력규제위원회(USNRC)에서는 1979년 발생한 TMI 원전사고에 자극을 받아 중대사고

* 인천대학교 토목공학과 부교수, 정회원
** 인천대학교 토목공학과 교수, 정회원
*** 인천대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원

(sever accident)에 대한 안전 확보 정책의 일환으로 Generic Letter 88-20[1]을 발표하고, 모든 가동중인 원자력발전소에 대하여 외부사상분석(individual plant examination of external events : IPEEE)을 수행할 것을 요구함으로써 원자력발전소의 확률론적 내진안전성 평가를 의무화하게 되었다. 이에 따라 원자력발전소를 비롯한 주요 산업핵심시설에 대한 건설 경험이 상대적으로 많은 미국의 경우에는 1992년부터 모든 가동중인 원자력발전소에 대하여 IPEEE를 수행하고 있다[2]. 또한, 미국 전력연구소(EPRI)에서는 확률론적 지진 위험도 평가를 위해 수행되는 구조물 및 기기의 지진취약도분석 방법을 새롭게 정비하고[3], 이를 미국내 가동중인 원자력발전소에 적용하고 있다. 더우기, 최근에는 원전을 제외한 일반 산업시설 분야로서 교량의 지진손상도(seismic vulnerability)를 평가하기 위하여 취약도곡선을 활용하는 방안에 대한 연구가 진행중이다[4].

그러나, 현재까지 국내의 경우에 원전을 제외한 대부분의 핵심산업시설에 대한 내진안전성 평가는 주로 결정론적 방법 혹은 해석적방법에 의하여 수행되었으며, 확률론적 위험도 평가에 근거한 내진성능평가는 상대적으로 수행실적이 미진하였다. 또한, 그동안 원전분야에서 수행된 지진취약도 분석 절차 및 확률변수들은 과거 외국의 설계자료 및 기술 지침을 준용하여 결정된 것으로 국내의 자료특성을 적절히 반영하지 못한 것이 사실이다. 특히, 지진취약도분석은 그 방법의 특성상 확률변수 및 파괴모드의 결정과 선별기법 등에 따라 평가결과에 상당한 차이가 발생하게 된다. 따라서, 보다 현실적이고, 신뢰성 있는 지진취약도 분석결과를 얻기 위해서는 먼저 국내의 설계 및 시공 자료 특성을 감안한 보다 합리적인 확률변수의 결정 및 지진취약도분석절차의 개선이 요구된다. 또한, 여러 가지 비선형 요인들을 적절히 고려할 수 있는 합리적인 지진응답해석 및 파괴모드의 결정방법이 개발되어야 한다고 할 수 있다.

이러한 국내의 여건을 감안하여 이 논문에서는 지진취약도 분석 기법과 관련된 국내외의 자료를 수집하고, 최신 기술현황을 파악하였다. 이로부터 원전시설물을 비롯한 핵심산업시설의 확률론적 지진취약도 분석 기법과 관련된 기술항목중 향후 개선 또는 공학적인 보완이 요구되는 항목을 도출하고, 향후 연구방향을 제시하였다.

2. 확률론적 지진위험도 평가

원자력발전소의 IPEEE가운데 특히 지진사건에 대한 분석은 중대사고의 취약성 평가를 위한 필수적인 분야로서 이를 위하여 NUREG-1407[5]에 두가지 방법 즉, 확률론적 지진위험도 평가(seismic probabilistic risk assessment : SPRA) 및 지진여유도분석(seismic margin assessment : SMA)이 개발되어 지침으로 제공되고 있다. 원자력발전소의 지진에 대한 IPEEE를 수행하고 있는 국가는 캐나다, 체코, 핀란드, 스페인, 스웨덴, 슬로바키아, 헝가리, 슬로베니아, 한국 및 일본 등이며, 이들 중 일부 국가에서는 IPEEE의 방법으로 SPRA를 선택하고 있으며, 일부는 SMA방법을 채택하고 있다[2]. 일부 국가에서 채택하고 있는 SMA방법은 상대적으로 간편하고, 수행비용이 저렴한 방법이지만, 정상적인 확률론적 내진성 평가와는 다소 상이한 결정론적 방법이라 할 수 있다.

원자력발전소의 확률론적 지진위험도 평가의 핵심 업무는 다음의 4단계로 구분되어 수행되며, 전반적인 수행 흐름도는 그림 1에 보인 바와 같다[2].

1) 지진재해도분석(seismic hazard analysis) 단계 : 부지에서 발생 가능한 지반진동 가속도의 수준별 발생 빈도 평가
2) 지진취약도분석(seismic fragility evaluation) 단계 : 선정된 지반가속도에 대한 기기 혹은 구조물의 조건부확률(conditional probabilisties) 평가
3) 시스템 및 사고 추이 분석(system/accident sequence analysis) 단계 : 구조물 및 기기의 파손 형

태의 조합 및 모델링

4) 노심손상빈도평가(evaluation of core damage frequency) 단계 : 노심손상빈도 및 발전소 손상빈도를 평가하기 위한 지진재해도, 지진취약도 및 시스템 분석 결과의 조합

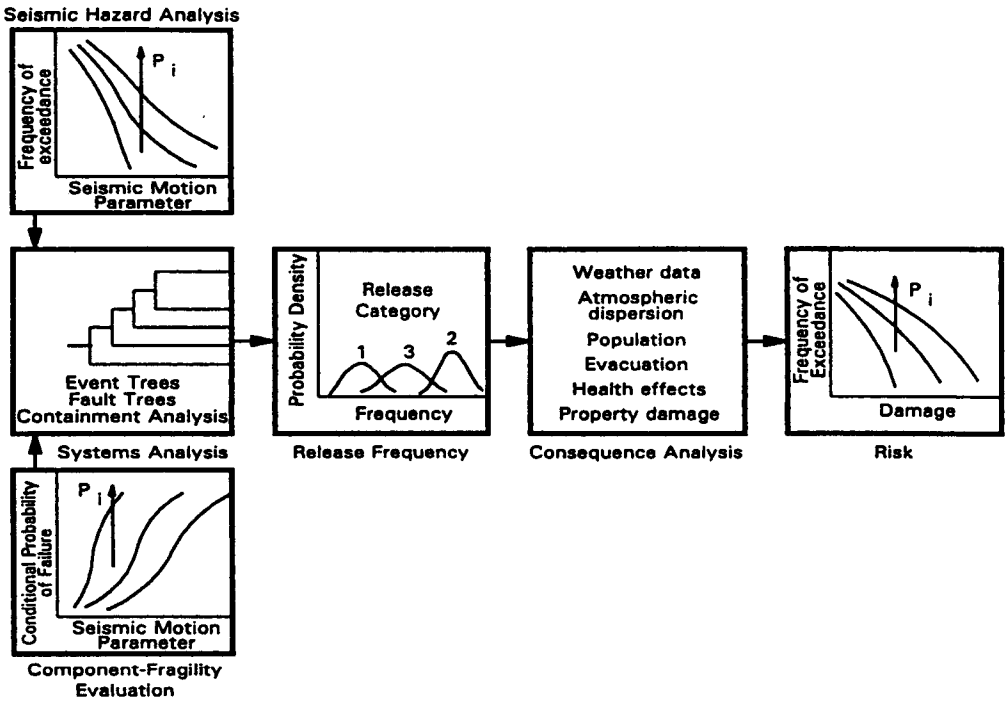

그림 1 확률론적 지진재해도 분석 흐름도[2]

3. 지진취약도분석

3.1 분석 절차

지진취약도는 주어진 지진입력운동에 대한 분석 대상 구조물 또는 기기의 조건부파손빈도수(conditional failure frequency)로서 정의되며, 지진취약도분석의 목적은 최대지반가속도(PGA)의 크기별 구조요소의 내진성능과 그 불확실성을 평가하기 위한 것이다. 따라서, 지진취약도는 분석대상 설비의 파손(failure) 또는 붕괴(collapse)를 유발하는 지반가속도의 중앙값(median ground acceleration)과 그 값의 불확실성과 무작위성에 관련된 분산도를 나타내는 로그표준편차의 항으로 표현된다.

원자력발전소의 PRA를 위한 지진취약도분석 절차를 요약하면 다음과 같으며, 이로부터 작성된 취약도곡선은 발전소 부지에서의 지진재해도분석 결과와 조합되어 지진으로 인한 노심손상빈도(core damage frequency) 계산을 위한 기본자료로 이용된다.

1) 대상 발전소의 계통 및 내진설계와 관련된 자료들을 검토하고, 방사능 누출사고에 민감한 구조물 및 기기의 선정
2) 분석대상 구조물 및 기기의 현장 보존상태 확인을 위한 발전소 답사(walk down)
3) 충분히 높은 내진성능(seismic capacity)을 보유한 요소의 선별제거(screening out) 또는, 지진에 취약할 것으로 판단되는 새로운 요소의 선별채택(screening in)
4) 선정된 구조요소 또는 기기의 파손형태 즉, 파손모드(failure mode)의 결정
5) 발생 가능성이 가장 높은 파손모드에 대한 대상 요소의 개략적인 지진취약도분석
6) 과거 경험 또는 설계자료를 토대로 충분히 높은 내진성능을 보유한 요소의 추가 선별제거
7) 상세 취약도분석을 통한 최종적인 지진취약도곡선의 작성

3.2 지진취약도곡선

임의의 파손모드에 대한 지진취약도곡선은 지반가속도내력의 중앙값(median ground acceleration capacity), A_m에 그 무작위성 및 불확실성을 감안하기 위한 두 확률변수의 곱으로 표현된다. 그러므로 발전소 설비가 파손되는 지반가속도 A는 다음의 식 (1)로 표현된다.

$$A = A_m \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_U \tag{1}$$

여기서, ε_R : 무작위성을 고려하는 확률변수
ε_U : 불확실성을 고려하는 확률변수

식(1)에서 무작위성과 불확실성을 결합한 복합확률변수를 ε_C라 하고 ε_C의 로그표준편차를 β_C라고 하면, β_C는 다음 식(2)로 표현된다.

$$\beta_C = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \tag{2}$$

최종 취약도곡선은 메디안 지반가속도, A_m 및 복합확률변수의 로그표준편차 β_C를 구하여 로그정규분포의 누적분포함수로 나타낸 식(3)을 이용하여 작성된다.

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{\beta_C \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{1}{\beta_C} \cdot \ln\left(\frac{a}{A}\right)\right\}^2\right] da \tag{3}$$

그림 2는 이와 같이 계산된 대표적인 취약도곡선의 형태를 나타낸 것이다. 그림 2에서 HCLPF는 고신뢰도저파손확률(high confidence low probability of failure)로서 신뢰도 95%인 5%의 파괴확률값을 의미한다[12]. 이 값은 취약도곡선과 더불어 분석대상 구조물 또는 기기의 내진성능을 평가하는 기준치로 활용되며, 다음 식으로 계산된다[2].

$$HCLPF = A_m \cdot \exp[-1.65(\beta_R + \beta_U)] \tag{4}$$

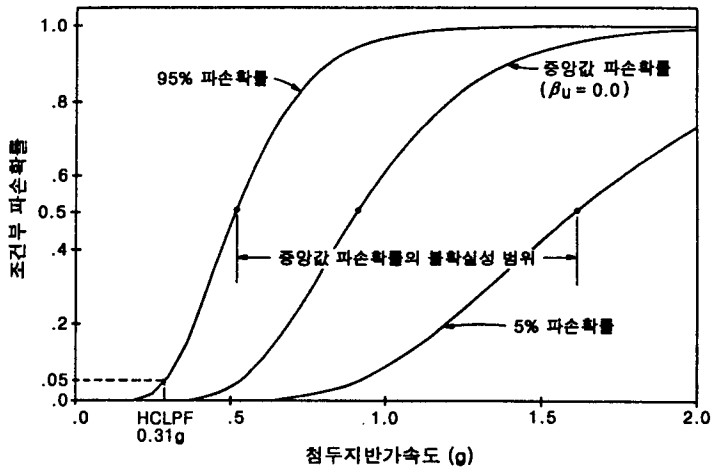

그림 2 지진취약도 곡선의 예

현재까지 원자력발전소의 지진취약도곡선의 작성을 위해서 개발되어 사용중인 분석방법(basic analytical approach)은 다음과 같이 구별된다[3].

- Approximate second moment procedure
- Second moment procedures
- Monte Carlo simulation

이 외에도 전문가의 견해를 이용한 방법 또는 Bayesian 분석방법 등이 구조계의 지진취약도분석을 위한 방법으로 개발되어 이용되고 있다.

3.3 최근 연구 동향

미국의 경우에 원자력발전소의 지진취약도분석 방법 및 세부절차는 Kennedy와 Ravindra[6]에 의해 수립되었으며, 미국전력연구소에서 최근의 기술현황을 반영하여 개정된 기술보고서, EPRI TR-103959[3]를 발간하였다. 그러나, Kiureghian[7]은 현재까지 개발된 지진취약도 모델 작성 및 평가 방법들은 공통적으로, 단지 전체 구조시스템에 대하여 취약도를 평가하는 방법으로서 이식성(transportable)이 결여되어 있음을 지적하였다. 즉, 기존의 방법에서는 두 구조시스템이 아주 유사한 경우를 제외하고는 어떤 특정 구조를 위해 수행되었던 취약도 모델을 다른 구조에 다시 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 뿐만 아니라, 이 방법들은 각 구조요소별로 얻어진 과거의 실험자료를 전체 구조시스템의 취약도 평가를 위하여 효과적으로 이용할 수 없다고 설명하였다. 이를 개선하기 위하여 그는 합성기법(synthesis approach)에 근거한 취약도 평가방법을 제시하였다. 이 방법은 먼저 각 구조요소 즉, 보, 기둥, 슬래브, 벽체에 대하여 독립적인 취약도 모델을 작성한 후, 시스템의 취약성 평가를 위하여 이들을 시스템 전체의 신뢰성 수식화(system reliability formulation) 과정에서 조합하는 방법이라 할 수 있다.

또한, Ozaki등[8]은 원자로건물의 지진취약도분석을 위해 일본에서 사용되고 있는 기존의 방법은 구조물의 선형응답 특성에 근거한 방법임을 지적하고, 비선형응답 특성을 고려할 수 있도록 개선된 두가지 '응답계수방법(response factor method)'을 제안하였다. 제안된 방법중 하나는 선형응답에 근거한 방법이고, 다른 하나는 비선형응답에 근거한 방법이다.

국내의 경우에는 1990년 조양희등[9]이 원자력발전소의 인허가 신청을 위한 확률론적 안전성 평가에 이용될 수 있는 실용적인 절차를 최초로 개발하였다. 그러나, 이 방법은 당시 외국의 기술 및 자료를 토대로 개발되었기 때문에 각종 확률변수 및 입력자료에 국내의 고유 특성을 반영하기 위한 개선이 요구된다. 그후, 이성노[10]는 지진취약도 곡선을 이용한 철근콘크리트 구조물의 안전성평가와 확률론적 설계에 대한 연구를 수행하였다. 그는 이 연구에서 구조 응답의 확률론적 지진손상의 누적방법을 제안하고, 구조응답의 비선형 이력거동과 지진손상특성을 고려한 콘크리트 구조물의 지진취약도분석 방법을 제시하였다. 그러나, 이성노에 의해 제안된 방법은 구조응답의 회전자유도를 고려할 수 없는 전단보(shear beam) 형태의 해석모델에 국한되어 적용될 수 있으므로 이를 고려할 수 있도록 개선하는 연구가 윤철호[11]에 의해 수행되었다. 그는 개선된 해석모델을 이용하여 대표적인 원자력발전소 격납건물의 지진취약도분석을 수행하고, 외국의 취약도분석 방법에 의한 결과와 비교한 후, 제안된 방법이 원전구조물의 지진안전성 평가에 실용적으로 이용될 수 있음을 발표하였다.

4. 현안 연구과제 도출

원전을 비롯한 핵심산업시설에 대한 실용적이고 합리적인 지진취약도 분석절차를 수립하기 위해서는 먼저 국내의 특성이 반영된 확률변수 및 확률분포를 결정하는 것이 선행 과제라 할 수 있다. 이를 위하여 그동안 국내에 축적된 건설 관련 자료를 수집하고, 시설물별, 특성별로 분류하여 지진취약도분석을 위한 자료구조(data base)를 구축할 필요성이 요구된다. 이를 근거로 지진취약도분석 단계별로 요구되는 세부 기술 및 절차, 즉 관련자료의 선별채택과 선별제거, 시설물별 임계파괴모드(critical failure mode)의 결정, 지진응답계수 및 지진내력계수의 결정 등과 관련된 세부 기술 및 절차를 개선하고 향상 시키는 연구가 수행되어야 한다.

특히, 구조물의 지진손상 특성을 고려한 개선된 기법의 개발을 위해서는 각 시설물의 특성에 부합하는 지진손상지수(seismic damage indices)의 선정 및 개발이 요구된다. 그러나 Williams[13]등이 지적한 바와 같이 현재까지 개발된 모든 지진손상지수는 구조물의 파괴모드로서 주로 휨파괴모드만을 고려하고 있으므로 전단손상(shear damage)을 고려할 수 있는 새로운 손상지수의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

이와 관련된 향후 구체적인 연구가 필요한 기술 항목을 요약하면 다음과 같다.

- 국내 주요 시설물의 설계, 시공 및 유지관리 자료에 부합하는 확률변수의 특성 도출
- 핵심 대상 구조물 및 기기의 선별(screening) 기술의 개선 및 향상
- 시설물별 파손모드의 결정을 위한 합리적인 파손 상태의 정의
- 확률론적 비선형 특성을 고려한 지진응답계수의 산정
- 개선된 내진성능평가를 이용한 지진내력계수의 산정
  - 강도계수, 비탄성에너지흡수계수
  - 손상지수등을 이용한 내진성능평가

5. 결론

이 논문에서는 확률론적 지진안전성 분석 수행 과정중 핵심업무가 되는 지진취약도분석을 대상으로 국내 실정에 부합되는 절차 및 방법을 정립하기 위한 선행업무로서, 현재까지 연구, 축적되어온 국내외의 기술현황을 분석하였다. 이를 통하여 현재의 기술수준에서 해결되어야 할 현안 과제를 도출하고, 이를 근거로 관련 기술의 발전 방향을 제시하였다. 도출된 현안 과제 및 기술적 미해결 항목은 향후 국내의 지진취약도분석 기술의 개선 및 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. USNRC(1991), "Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities", Generic Letter No. 88-20, Supplement 4, US Nuclear Regulatory Commission.
2. M.K. Ravindra(1997), "Seismic Individual Plant Examination of External Events of US Nuclear Power Plants: Insights and Implications", J. Nuclear Engineering and Design, Vol. 175, pp.227-236.
3. EPRI(1994), "Methodology for Developing Seismic Fragilities", EPRI TR-103959, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
4. John B. Mander(1999), "Fragility Curve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges", Research Acomplishments: 1997-1999, MCEER-SP01, MCEER.
5. IPEEE(1991), "Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities", NUREG-1407, US Nuclear Regulatory Commission.
6. 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.
7. A. Der Kiureghian(1999), "Seismic Fragility Assessment of Structural Systems: Towards a Synthesis Approach", Transaction of the 15th International Conference on SMIRT, Seoul, Korea, A04/1.
8. M. Ozaki, et al.(1998), "Improved Response Factor Method for Seismic Fagility of Reactor Building", J. Nuclear Engineering and Design, Vol. 185, pp.277-291.
9. KOPEC(1990), "원자력발전소의 지진안전성평가를 위한 지진취약도분석", 기술개발최종보고서, KOPEC/90-T-004, 한국전력기술주식회사.
10. Lee, S.L.(1991), "Seismic Damage Assessment and Fragility Analysis of Reinforced Concrete Structures", Ph. D Thesis, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University.
11. 윤철호(1994), "지진손상특성을 고려한 원전구조물의 취약도해석", 공학박사학위논문, 서울대학교, 토목공학과.
12. M.K. Ravindra(1988), "Seismic Probabilistic Risk Assessment and Its Impaction on Margin Studies", J. Nuclear Engineering and Design, Vol. 107, pp.51-59.
13. Martin S. Williams and Robert G. Sexsmith(1995), "Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review", J. of Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 2, pp.319-349.