

한국원자력학회 2021 온라인 추계학술발표회

Preliminary Seismic Fragility Analysis of Fuel Assembly in NPPs Using SOV Approach



2021년 10월 21 ~ 22 일

김 나 현



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

CONTENTS

- » Introduction
- » Defined failure mode
- » Preliminary seismic fragility analysis
- » Conclusions

Introduction

■ 연구배경 및 연구목적

- 경주(2016) 및 포항(2017)에서 비교적 큰 지진이 연달아 발생함에 따라 지진안전성 확보에 대한 요구수준 상향
- 지진취약도 평가 시 EPRI방법론^[1, 2]에 따른 일상적 평가가 수행되고 있으며, 핵연료집합체의 지진취약도는 평가되지 않음
- 핵연료집합체에 최적화된 지진취약도 평가방법론의 개발 필요

■ 연구내용

- 원전 핵연료 최적 지진취약도 평가방법론 개발에 앞서 지진취약도 평가를 위한 잠재 파괴모드 도출 및 기존 EPRI 방법론에 따른 예비 지진취약도 평가 수행

[1] EPRI, Seismic Fragility and Seismic Margin Guidance for Seismic Probabilistic Risk Assessments, EPRI TR-3002012994, Palo Alto, CA, 2018.

[2] J. W. Reed, and R. P. Kennedy, Methodology for Developing Seismic Fragilities, EPRI TR-103959, Palo Alto, CA, 1994.

Defined failure mode

■ 지진취약도 평가를 위한 잠재 파괴모드 도출

- 핵연료집합체의 구조적 손상 및 제어봉 삽입성에 대한 잠재 파괴모드 도출
 - 핵연료집합체 구성 기기 - 지지격자, 핵연료봉, 핵연료집합체 안내관(guide thimble tube)
 - 제어봉 삽입성 관련 기기 - CRDM, 제어봉 클러스터 안내관, 핵연료집합체 안내관

핵연료집합체 잠재 파괴모드

Component	Failure mode
Control rod	Damage to upper end plug
	Damage to cladding
CRDM	Bending of CRDM housing
	Damage to CRDM housing support
	Deformation of / Damage to CRDM tubes
Control rod guide tube	Deformation of / Damage to guide tube
RPVIs	Damage to core support
	Damage to core shroud
	Damage to lower support
Spacer grid	Damage to spacer grid
Fuel Assembly	Bending of fuel rod
	Detachment of fuel rod
	Deformation of / Damage to guide thimble tube

- ✓ 핵연료집합체 안내관의 손상은, 제어봉 삽입성을 한계에 이르게 하는 가장 큰 원인
따라서, 핵연료집합체 안내관의 소성변형으로 인한 제어봉 삽입기능 상실을 취약 파괴모드로 선정

Preliminary fragility assessment

■ 지진취약도 평가의 기본사항

■ 예비 지진취약도 평가에서의 가정사항

- 지진취약도 평가 참조지진은 국내 원전 부지의 등재해도 스펙트럼을 부지고유 응답스펙트럼으로 가정하여 scaling approach 방법 적용
- 핵연료집합체 고유진동수를 3 Hz로 가정

■ 취약도 모델

- 대수정규분포 취약도모델은 지반가속도성능 중앙값 A_m 과 두 종류의 변동성 β_R 및 β_U 사용하여 정의
- 취약도 평가 시 사용한 변수분리(SOV, separation of variables)방법은 지진에 대한 SSC의 성능과 응답에 영향을 미치는 각 변수에 대하여 안전계수의 중앙값 및 그에 대한 대수표준편차의 평가 수행
- $A_m = F_{EC} * F_{ER} * F_{RS} * PGA_{RE}$
(F_{EC} , F_{ER} , F_{RS} 는 각각 기기의 성능계수, 기기의 응답계수, 구조물의 응답계수이며, PGA_{RE} 는 참조지진의 첨두지반가속도)
- β 는 각 안전계수에 대한 대수표준편차들의 SRSS

Preliminary fragility assessment

■ 기기 지진취약도평가 기본 변수

- 기기의 지진취약도 분석 수행 시 구조물의 응답, 기기의 응답 및 기기의 성능에 의한 영향 고려
- 일반적으로 기기의 취약도 분석에는 해석적 또는 시험적 평가방법 사용, 본 연구에서는 해석적 평가방법으로 기기의 예비 취약도 분석 수행
- 가정사항을 기반으로 한 기기응답 및 강도의 변동성을 EPRI 보고서^[1]를 참고하여 보수적으로 산정

해석에 의한 기기 취약도평가 기본 변수

기기 성능	기기 응답	구조물 응답
강도계수	검증방법	지반운동
비탄성에너지흡수계수	감쇠	감쇠
	모델링	모델링
	주파수	모드조합
	모드형상	시간이력해석
	모드조합	SSI 해석
	지진성분조합	비탄성에너지흡수계수

[1] EPRI, Seismic Fragility and Seismic Margin Guidance for Seismic Probabilistic Risk Assessments, EPRI TR-3002012994, Palo Alto, CA, 2018.

Preliminary fragility assessment

■ 기기 응답 계수

$$\begin{aligned} F_{ER} &= F_{QM} * F_{dmp} * F_{mod} * F_{mc} * F_{ECC} \\ &= 1.0 * 1.0 * 1.0 * 1.0 * 1.0 = 1.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_{R_{ER}} &= \sqrt{\beta_{R_{mc}}^2 + \beta_{R_{ECC}}^2} \\ &= \sqrt{0.15^2 + 0.18^2} = 0.234 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_{U_{ER}} &= \sqrt{\beta_{U_{QM}}^2 + \beta_{U_{dmp}}^2 + \beta_{U_{mod}}^2} \\ &= \sqrt{0.0^2 + 0.0^2 + 0.335^2} = 0.335 \end{aligned}$$

- 검증방법 : 현실적인 응답해석 및 재료특성을 이용한 것으로 가정하여 $F_{QM} = 1.0$, $\beta_{U_{QM}} = 0.0$ 으로 설정
- 감쇠 : 확보가능한 정보의 부재로 $F_{dmp} = 1.0$, $\beta_{U_{dmp}} = 0.0$ 으로 설정
- 기기 모델링 : $F_{mod} = 1.0$, 진동수 및 모드형상의 불확실성은 보수적으로 복잡한 기기에 적용되는 값인 $\beta_{U_{freq}} = 0.3$, $\beta_{U_{ms}} = 0.15$ 으로 각각 설정 $\rightarrow \beta_{U_{mod}} = \sqrt{\beta_{U_{freq}}^2 + \beta_{U_{ms}}^2} = 0.335$
- 모드조합계수 : $F_{mc} = 1.0$, 모드 조합계수의 변동성은 보수적으로 $\beta_{R_{mc}} = 0.15$ 로 설정
- 지진성분 조합 : $F_{ECC} = 1.0$, 지진성분 조합방법의 변동성은 보수적으로 $\beta_{R_{ECC}} = 0.18$ 으로 설정

Preliminary fragility assessment

■ 기기 성능 계수

- $F_{EC} = F_S * F_\mu = 6.087 * 1.0$
 $= 6.087$

- $\beta_{R_{EC}} = \beta_{R_\mu} = 0.0$

- $\beta_{U_{EC}} = \sqrt{\beta_{U_\mu}^2 + \beta_{U_S}^2}$
 $= \sqrt{0.0^2 + 0.2^2} = 0.2$

- 강도계수 : SSE(RG 1.60^[1], PGA 0.3g)에 의한 핵연료집합체 안내관의 응력을 31.7 ksi, 한계응력을 62.7 ksi로 가정하고, SSE에 의한 응답을 UHS(PGA 0.273g)에 의한 응답으로 scaling하여 강도계수 $F_S = 1.0$ 산정, 확보가능한 정보의 부재로 불확실성 $\beta_{U_S} = 0.2$ 로 설정
- 비탄성에너지 흡수계수 : 핵연료집합체 안내관의 한계상태에서 비탄성구간을 포함하는 것으로 가정하여 $F_\mu = 1.0$, $\beta_{U_\mu} = 0.0$ 및 $\beta_{R_\mu} = 0.0$ 으로 설정

■ 구조물 응답 계수

- 구조물 응답계수는 기존 취약도 평가결과를 참조하여, $F_{RS} = 0.86$, $\beta_{R_{RS}} = 0.221$, $\beta_{U_{RS}} = 0.218$ 으로 설정

Preliminary fragility assessment

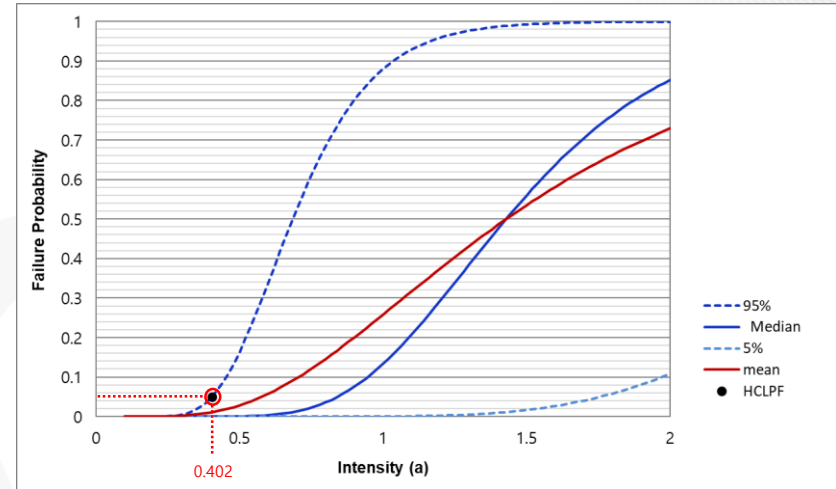
■ 핵연료집합체의 예비취약도

■ 취약도 파라미터 도출

- $A_m = 6.087 * 1.0 * 0.86 * 0.273 = 1.429$

- $$\beta_R = \sqrt{\beta_{R_{EC}}^2 + \beta_{R_{ER}}^2 + \beta_{R_{RS}}^2}$$
$$= \sqrt{0.0^2 + 0.234^2 + 0.221^2} = 0.322$$

- $$\beta_U = \sqrt{\beta_{U_{EC}}^2 + \beta_{U_{ER}}^2 + \beta_{U_{RS}}^2}$$
$$= \sqrt{0.2^2 + 0.335^2 + 0.218^2} = 0.447$$



핵연료집합체 예비 취약도곡선

■ HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure) 도출

- HCLPF는 95% 신뢰도 수준 취약도곡선에서 5%의 파괴확률

- $HCLPF = A_m * \exp[-1.65(\beta_R + \beta_U)]$

$$= 1.429 * \exp[-1.65(0.322 + 0.447)] = 0.402$$

Conclusions

- 기존 EPRI 방법론에 따른 핵연료집합체 예비 지진취약도 평가 수행
 1. 지진취약도 평가를 위한 잠재 파괴모드 정의
 - 핵연료집합체 구성기기 및 제어봉 삽입성 관련기기에 대한 잠재 파괴모드 정의
 - 핵연료집합체 안내관의 소성변형으로 인한 제어봉 삽입기능 상실을 취약 파괴모드로 선정
 2. 핵연료집합체 예비 지진취약도 평가
 - 기존 EPRI 방법론에 따라 취약 파괴모드에 대한 지진취약도 평가 수행

- 연계된 시험 및 해석으로 얻은 값에 대하여 지진취약도 매개변수를 업데이트 하여 EPRI 방법론에 따른 핵연료집합체 지진취약도의 실제 평가가 가능할 것으로 예상

THANK YOU