한국원자력학회 2021 온라인 춘계학술발표회

Investigation of Existing Studies for Fuel Assemblies to Develop the Methodology for Fragility Analysis

2021년 5월 12 ~ 14 일

김 나 현

한 국 원 자 력 연 구 원
Korea Atomic Energy Research Institute

CONTENTS

- Introduction
- Review of existing researches
- Conclusions

Introduction

▪ 연구배경 및 연구목적

2011년
일본 후쿠시마 원전사고 발생

→

2016년
경주에서 지진관측 이후 최대규모 지진 발생

출처: "High-resolution photos of Fukushima Daiichi" (Press release). Air Photo Service Co. Ltd., Japan

- 지진에 대한 확률론적 평가를 위하여 다양한 기기에 대한 지진취약도 분석이 수행됨
- 핵연료집합체 취약도 분석은 아직 수행되지 않음
- 핵연료집합체는 핵연료를 포함하고있어 안전과 직결되어 있음

“ 핵연료집합체에 최적화된
지진취약도 평가 방법론 개발 필요 “

Review of existing researches

- **핵연료집합체 최적 지진취약도평가 방법론 개발을 위한 기존연구 조사**
  - 핵연료집합체 관련 파손모드 도출
    - 원자로 트립 시 제어봉 삽입성을 평가한 연구
    - 핵연료집합체의 구조적 건전성과 관련된 기기에 관한 연구
  - 파손모드 관련 기기의 응답 도출
    - 핵연료집합체 및 원자로 내부 구조물의 동적해석 관한 연구
  - 지진취약도평가
    - 핵연료집합체의 지진취약도 평가를 수행한 연구 조사

Review of existing researches

핵연료집합체 관련 파괴모드

- 제어봉 삽입성
  - 원자로 트립 시, 제어봉 삽입경로 구성기기의 손상으로 제어봉 삽입시간 지연 또는 제어봉 삽입이 불가한 경우 발생
  - 원자로 트립 시의 제어봉 삽입성에 초점을 맞추어 파괴모드 분류(Manuel et al. [1])
    - 제어봉구동장치의 변형 (Fig 1-①)
    - 원자로내부구조물의 상대변위 (Fig 1-②③)
    - 핵연료집합체의 변형 (Fig 1-④)
- 핵연료집합체 지지격자
  - 충격하중에 의한 지지격자의 손상
    - 지지격자의 손상이 핵연료집합체 및 제어봉 삽입에 영향을 줄 수 있음

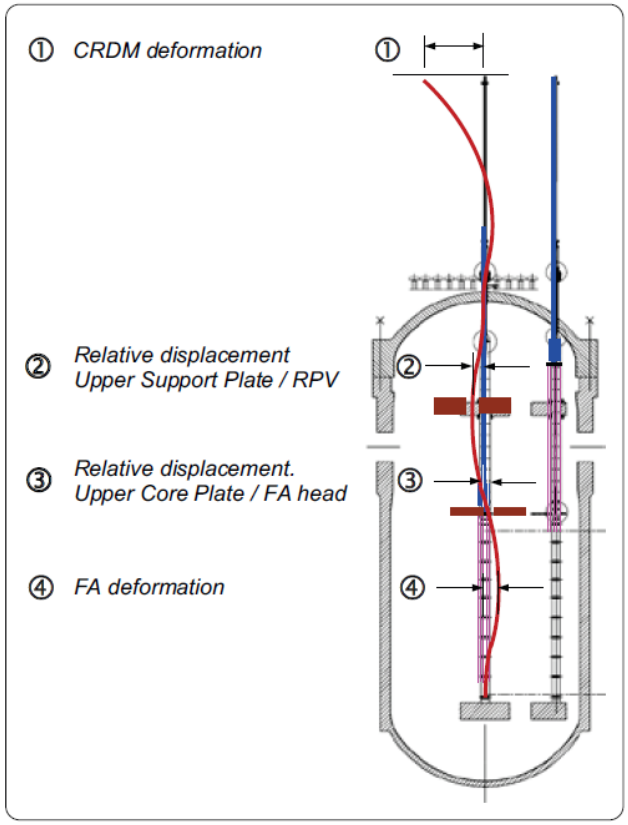

Fig. 1 핵연료집합체 관련 파괴모드 [1]

Review of existing researches

- **핵연료집합체와 원자로 내부 구조물의 해석적 평가**
  - 핵연료집합체 및 원자로내부구조물의 동적해석 수행
    - 원자로 노심의 동적해석 방법 개발(Jhung [2])
      - 정확한 구조적 응답을 얻기 위하여 simplified model, lumped model, detailed model을 사용
      - OBE와 SSE를 고려하여 해석 수행
      - 전단력, 굽힘모멘트, 축하중 및 변위에 대한 핵연료집합체의 응답과 충격하중에 대한 지지격자의 응답을 조사하여 구조적 안전성 평가
    - 상세해석모델을 사용한 원자로 내부 구조물의 내진해석(Choi et al. [3])
      - 신뢰할 수 있는 응답을 얻기 위하여 detailed 3D model 사용
      - 계산시간을 줄이기 위하여 model reduction method 사용
      - 원자로 내부 구조물이 냉각수에 잠길 때의 동적응답을 얻기 위하여 FSI(Fluid-Structure Interaction)효과 고려
      - 내진해석을 수행하여 원자로 내부 구조물의 구조적 안전성 평가

Review of existing researches

제어봉삽입성 평가

- 지진 시 제어봉 삽입기능 상실(Japan Nuclear Regulation Authority [4])
  - 지진으로 인한 원자로 트립 시, 제어봉 삽입기능이 상실 또는 저하되는 경우
    - 제어봉 삽입경로 구성기기(제어봉, 제어봉구동장치, 제어봉클러스터안내관, 핵연료집합체)의 변위 또는 가속도에 의해 제어봉에 마찰력이 발생하여 제어봉 삽입시간이 지연됨
    - 지진 시 제어봉 삽입경로 구성기기의 손상으로 인해 삽입경로 확보가 불가함

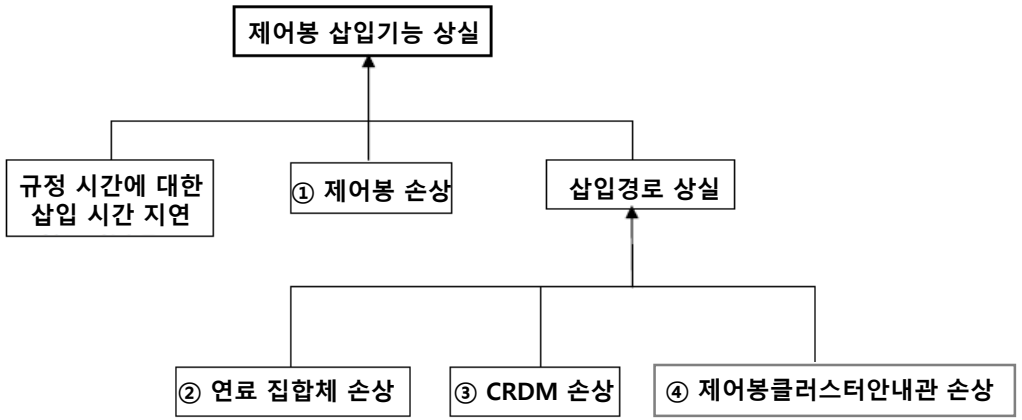

Fig. 2 제어봉 삽입기능 상실 및 저하 요인 [4]

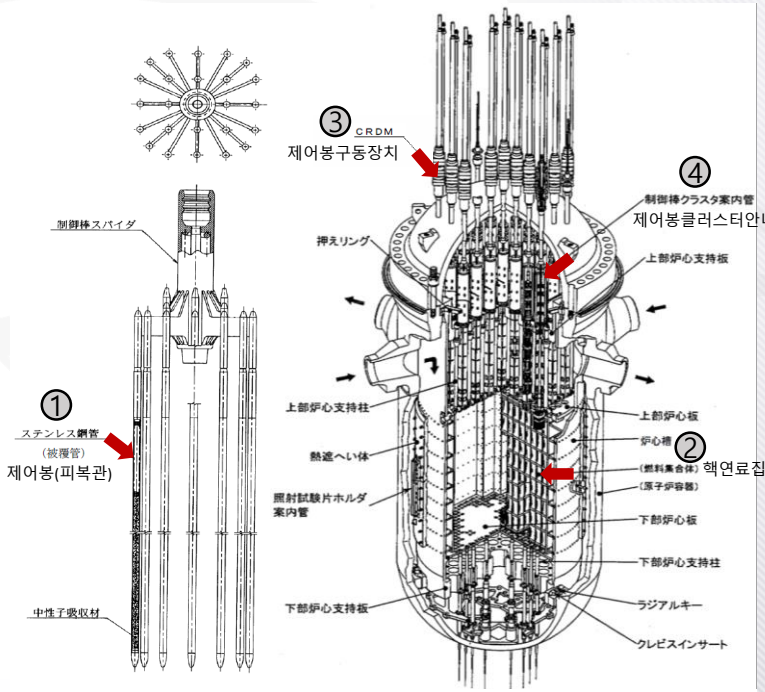

Fig. 3 제어봉클러스터 및 원자로 내부 구조 [4]

Review of existing researches

제어봉삽입성 평가

지진 시 제어봉 삽입시간 평가(Kansai Electric Power Company [5])

- 지진으로 인한 원자로 트립 시, 제어봉이 노심에 85% 삽입되는 시간 평가
  - 응답배율법 : 이전 기준지진과 새로운 기준지진의 응답가속도 비율을 새로운 기준지진에 곱하여 삽입시간 도출
  - 상세해석법 : 제어봉 클러스터의 자중과 낙하 시 발생하는 저항력을 계산하여 삽입시간 도출
- 삽입시간 평가기준에 대한 안전여유도에 대한 논의
  - 현재 삽입시간 평가기준은 안전해석 평가상의 관점에서 설정 → 지진 시 평가기준을 초과할 경우에도 연료봉의 냉각에 문제가 없다면 제어봉의 동적 기능이 유지된 것으로 판단

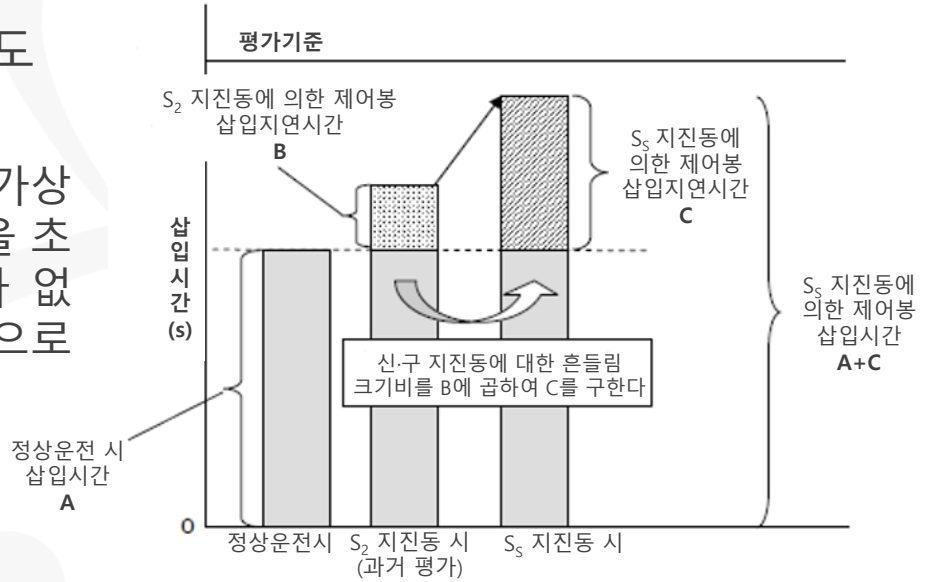

Fig. 4 응답배율법에 의한 평가 [5]

Review of existing researches

- **핵연료집합체와 원자로내부구조물의 지진취약도평가**
  - 원자로 트립 관점에서의 핵연료집합체 지진취약도 평가(Manuel et al. [1])
    - 여러가지 파괴모드로 인해 주어진 시간 내에 제어봉 삽입이 불가할 수 있음(Fig 1)
    - 원자로 트립 관련 파괴모드의 HCLPF 성능을 CDFM(Conservative Deterministic Failure Method)과 SOV(Separation Of Variables) 방법에 의하여 평가
      - CDFM 방법에 대해서는 파손모드 핵연료집합체의 변형(Fig 1-④) 및 제어봉 구동장치의 변형(Fig 1-①)에 대한 HCLPF 성능 추정
      - SOV 방법에 대해서는 모든 파손모드(Fig 1-①②③④)에 대한 HCLPF 성능 추정

        (평가 시 Latin-Hypercube Sampling으로 생성된 예비데이터 사용)

Table 1. 원자로 트립 관련 파손모드의 HCLPF 성능 [1]

	Stage 1 (CDFM)	Stage 2 (Fragility analysis)
Fuel assembly spacer grids (“Fr_FA_spacer”)	0.63 g	0.72 g
Deformation CRDM tubes (“Fr_CRDM_disp”)	0.54 g	0.66 g
Core barrel upper flange (“Fr_CB_flange”)	N/A	0.64 g
CRDM pressure housing (“Fr_CRDM_str”)	N/A	0.63 g

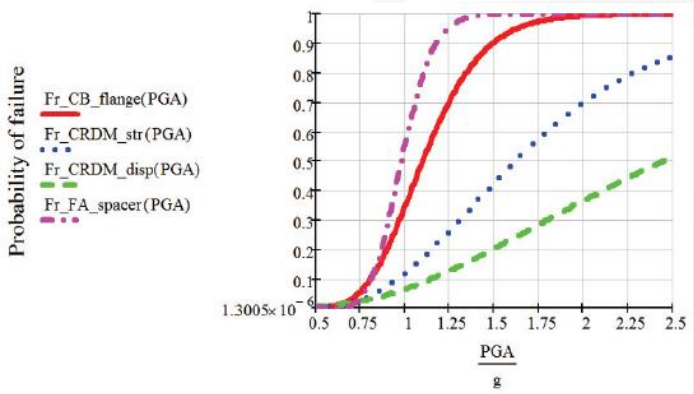

Fig. 5 분석된 파괴모드의 복합 취약도 곡선 [1]

Conclusions

- 조사한 기존 연구들을 참고하여 국내 원전 핵연료집합체 최적 지진취약도 평가 방법론의 개발이 가능할 것으로 예상됨

1. 지진취약도 평가를 위한 파괴모드 정의
   - 제어봉삽입성 평가 결과와 원자로 내부 구조물 및 핵연료집합체의 동적해석 결과 등을 참고하여 파괴모드 정의
   - 제어봉 삽입경로 구성기기 및 핵연료집합체 지지격자의 손상과 관련한 파괴모드를 정의할 수 있을 것으로 예상됨
2. 관련기기의 응답을 얻기 위한 동적해석 수행
   - 핵연료집합체 또는 원자로 내부 구조물의 해석을 수행하여 파괴모드와 관련된 기기에서의 응답을 얻을 수 있음
3. 핵연료집합체 지진취약도 평가
   - 정의한 파괴모드와 파괴모드와 관련된 기기의 응답으로 지진취약도 평가 수행

Reference

[1] M. Pellissetti, A. Nykyforchyn, P. Rangelow, K. Schramm, H. Keßler, J. Klügel and U. Klapp, Seismic Robustness of Reactor Trip via Control Rod Insertion at Increased Seismic Hazard Estimates, 23th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-23), Aug.10-14, 2015, Manchester, UK.

[2] M. J. Jhung, Intefrity Evaluation of Fuel Assembly for Earthquake, Nuclear Engineering and Design, Vol.185, p.97-108, 1998

[3] Y. I. Choi, J. B. Park, S. J. Lee, N. C. Park, Y. P. Park, J. S. Kim and W. J. Roh, Seismic Analysis of the APR 1400 Reactor Vessel Internals Using the Model Reduction Method, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 53, p.1701-1714, 2016.

[4] 獨立行政法人 原子力安全基盤奇構, 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 機器耐力その２（制御棒挿入性）, 平成１７年８月.

[5] Fukui Prefecture Safety and Environment Department Nuclear Safety Measures Division [internet] Fukui prefecture nuclear safety committee; 2021 March 10 [cited 2021 March 10]. Available from http://www.atom.pref.fukui.jp/senmon/report2012siryou/no6-5.pdf

THANK YOU