

Case Study for Event Scenario Uncertainty Analysis Using DICE™

Kyung Hee University
Department of Nuclear Engineering

Yuntae Gwak(Presenter)

Sejin Baek

Dohun Kwon

Gyunyoung Heo*



곽윤태

경희대학교 원자력공학과 4학년

허균영 교수님 연구실 학부연구생

00 Contents

1. Introduction
2. Background
3. Case Study
4. Conclusions

01 Introduction

- 과제 소개

- 동적신뢰도분석 DICE™에 기반한 L1/L2 PSA 분기확률 모형 개발

- 동적신뢰도분석도구 DICE™을 이용하여 L1/L2 PSA 모델의 분기확률 모형의 정량적 타당성을 향상시킬 수 있는 방법론 및 전산코드 개발에 대한 연구 진행

- 영출력 원자로를 이용한 선진 미래기반 연구

- 영출력 연구로를 이용한 PSA 방법을 개발하고자 하는 목적을 가지고 경희대학교의 AGN-201K에 대한 연구를 진행

01 Introduction

• 연구 목적

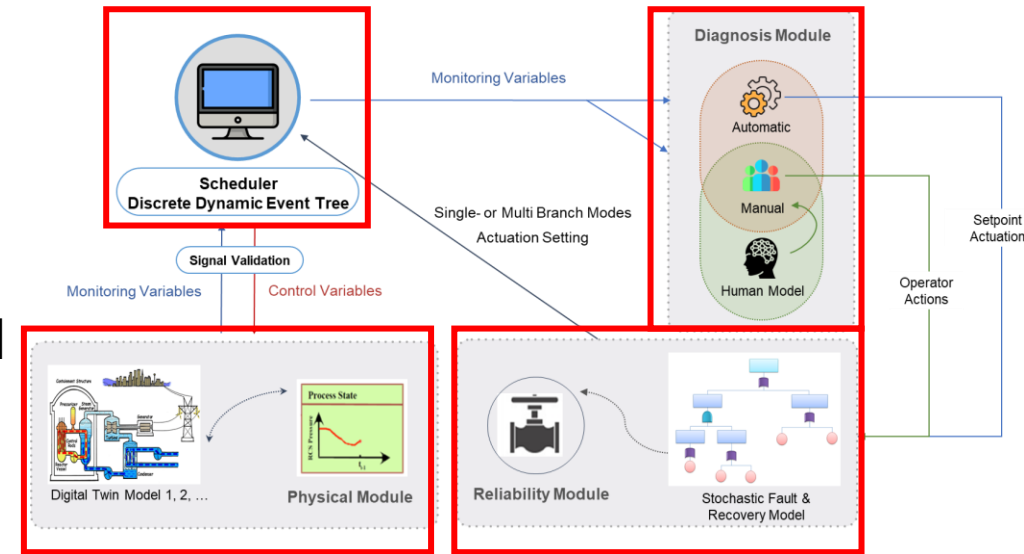
- DICE™은 IDPSA(Integrated Deterministic / Probabilistic Safety Assessment)를 위한 분석도구
 - IDPSA: 결정론적 시뮬레이션 과정에 확률론적 상황 변화를 반영한 방법으로 실시간으로 계산되는 원자로의 열수력적 계산 결과에 의해 사고 시나리오를 생성하며 원자로의 기기 고장 여부와 운전원에 의해 발생할 수 있는 동적 특성 반영 가능
- DICE™의 시나리오 분석 과정은 불확실성 분석 (기기의 제어 변동성) 개념에 기반

→ DICE™을 이용한 불확실성 분석의 사례 연구로 AGN-201K의 사고 불확실성 분석 진행

02 Background

DICE™ 구조

- 물리모듈
 - MARS-KS, MELCOR 코드를 사용하여 열수력학적 시뮬레이션 진행
 - 시뮬레이션을 통해 발전소 시스템의 물리적 거동에 대한 정보 제공
- 진단모듈
 - 열수력 코드의 감시변수가 사용자가 정해둔 분기규칙을 만족하는지 판단 (분기 여부 판단)
 - 자동동작(ESF, RPS와 같이 자동으로 작동하는 설비)과 수동동작(운전원 행위)을 나누어 판단
- 신뢰도모듈
 - 기기신뢰도 평가(기기의 고장 여부 판단) 및 고장수목을 이용한 분기확률 계산
- 스케줄러
 - 모듈간의 정보 교환 및 시뮬레이션 제어



<DICE™의 구조>

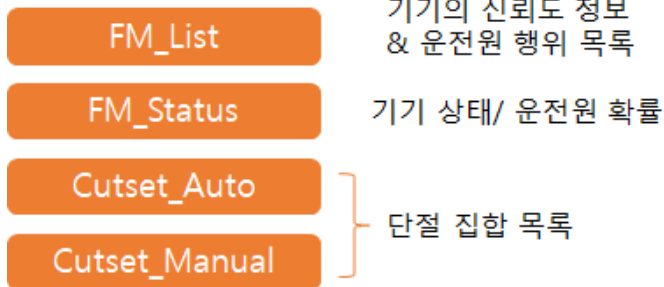
02 Background

DICE™ 입력파일

물리모델



신뢰도모델



진단모델



- 물리모델 (MARS-KS 기반)
 - 열수력 코드 실행을 위한 입력 자료
- 진단모델 & 신뢰도모델
 - DICE™내에서 사용될 엑셀 입력 자료
 - List는 한번 읽어들이면 값이 변하지 않음
 - Status는 값이 변화할 수 있음
 - 자동동작은 ESF, RPS와 같이 자동으로 작동하는 설비의 작동
 - 수동동작은 운전원의 행위에 의한 작동
 - TC는 On/Off 만 제어 가능한 기기에 대한 값
 - CV는 수준(%)로 제어 가능한 기기에 대한 값

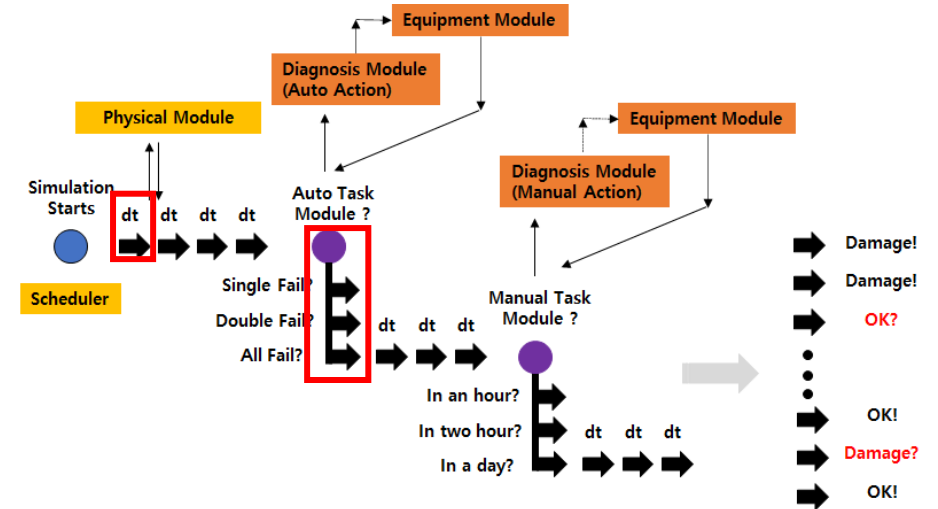
→ 단일/ 다중 분기 전개 시, 입력 파일 변화 없음

<DICE™의 입력파일의 용도>

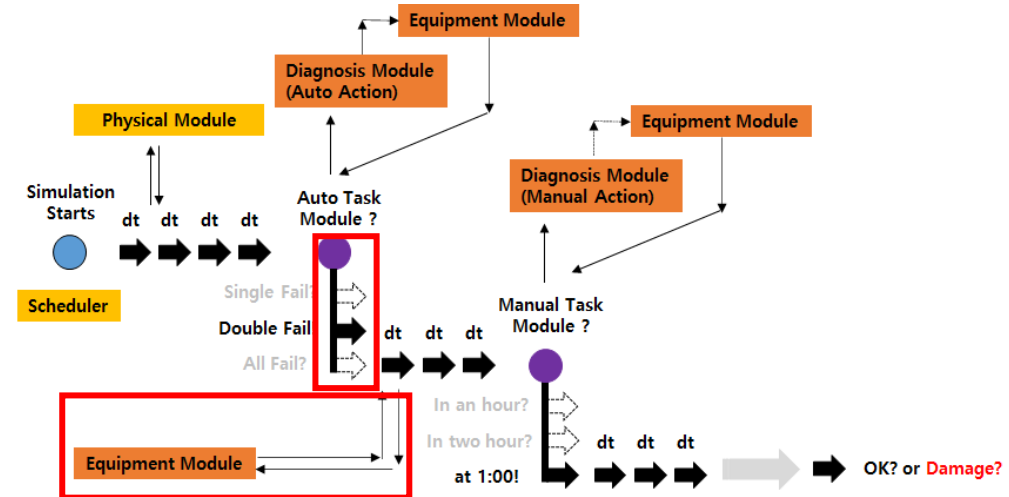
02 Background

DICE™ 시나리오 분석

- DICE™의 시뮬레이션 전개 과정
 - 시뮬레이션을 타임스텝을 나누어 전개
 - 시뮬레이션 전개 방식에 따라 단일/다중분기 모드 존재
- 다중분기 모드
 - 진단을 내리는 시점에서 사용자가 미리 결정해 둔 **모든 분기**를 생성하여 시나리오 전개
- 단일분기 모드
 - 무작위 시점의 기기 상태/운전원 조치를 고려하여 **특정 분기**를 생성하여 시나리오 전개 (실시간으로 신뢰도 모듈과 정보교환)
 - 시나리오 중간에 기기가 고장나거나 운전원에 의해 복구되는 경우도 포함



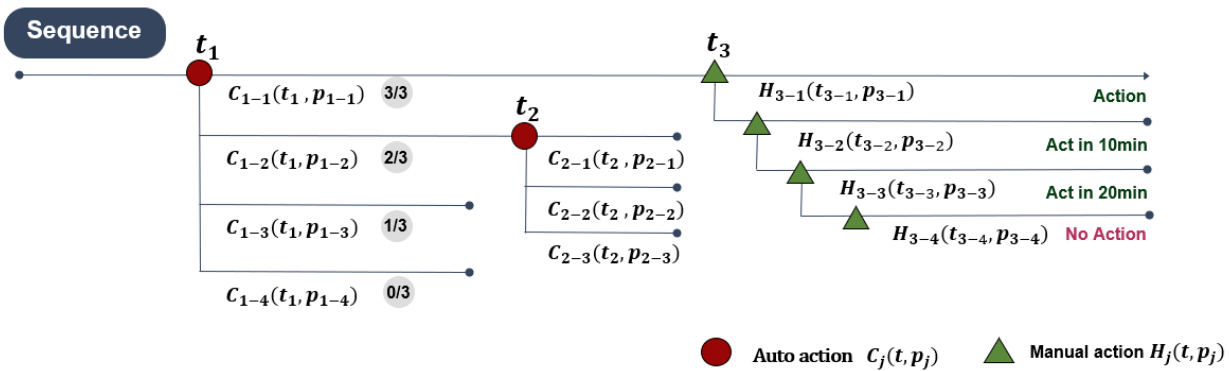
<다중분기 모드의 시나리오 분석 과정>



<단일분기 모드의 시나리오 분석 과정>

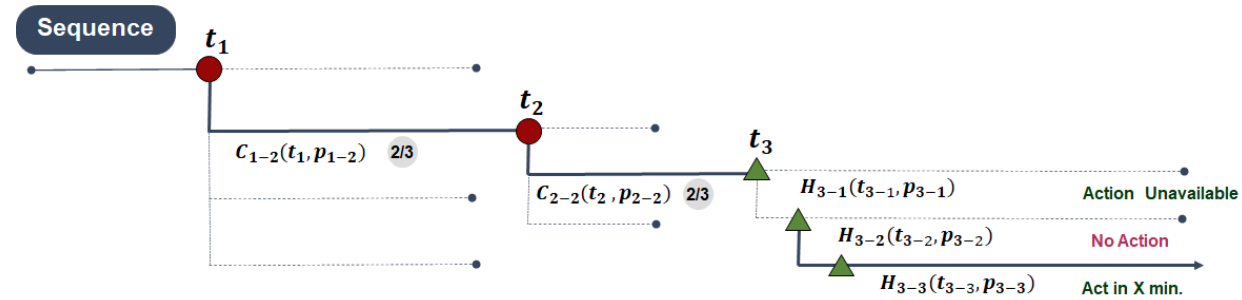
02 Background

다중분기 모드



분기점에서 여러 개의 분기를 전개
PSA 결과와 동일하게 정량화 수행 가능

단일분기 모드



분기점에서 한 개의 분기를 전개
여러 번의 시뮬레이션을 진행하여 정량화 수행 가능

02 Background

DICE™ 실행모습

The screenshot displays the DICE software interface. On the left is a dark sidebar with a menu containing: Menu, Pre Process, Project (selected), Run, Status Tree View, and Post. The main area is titled 'Project' and features a table with columns 'IP', 'STATUS', and 'USE NO. OF CORE'. Below the table, there are two main configuration panels. The top panel, 'Initialize Protocol', shows a text input field containing '163.180.126.31' and buttons for 'Add', 'Delete', and 'Connect'. The bottom panel, 'Initialize Project', is split into two sections: 'Select DICE INPUT' and 'SET PSA Property'. The 'Select DICE INPUT' section lists several models: AGN, Kori18&2, LLOCA, LLOCArev1, RCS Model(1 Auto 1 Manual)_Rev2, RCS Model(1 Auto 1 Manual)_Rev3, RCS Model(1 Auto 1 Manual)_Rev4, and Simple_Model. The 'SET PSA Property' section includes radio buttons for 'Multi Branch' (selected) and 'Single Branch'. Below these are input fields for '- Engine' (set to 'FTREX'), '- Iteration' (set to '10'), '- Prob' (set to '1E-10'), and '- MissionTime' (set to '0'). A 'SEND' button is located at the bottom of this section.

02 Background

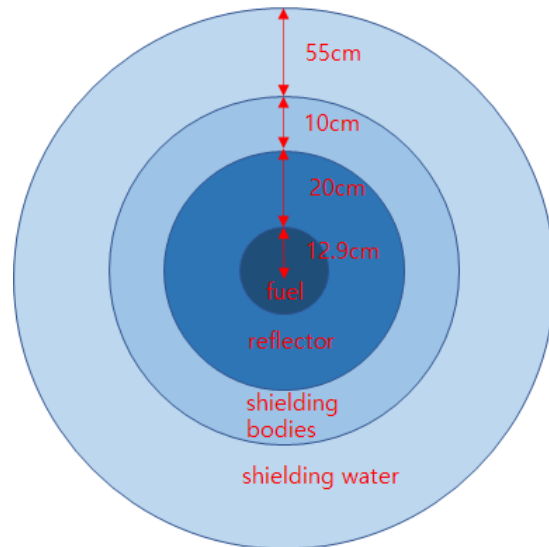
• Uncertainty Analysis

- 불확실성 분석은 시스템의 열수력 변수의 물성치에 대해 변동성을 부여하여 계산
- 변수의 물성치가 가지는 변동성의 범위에 대해 열수력학적 계산을 진행함으로써 시스템의 물리적 변화를 확인
- DICE™의 경우 시나리오 분석 과정에서 Trip card를 이용하여 시스템의 기기에 변동성을 부여하여 계산
- DICE™의 경우 기기의 변동성에 의한 시나리오의 변화(시스템의 물리적 변화)에 초점을 맞추어 분석을 진행
- 시나리오의 변화 속에서 미인지 시나리오를 찾는 것이 DICE™의 목적

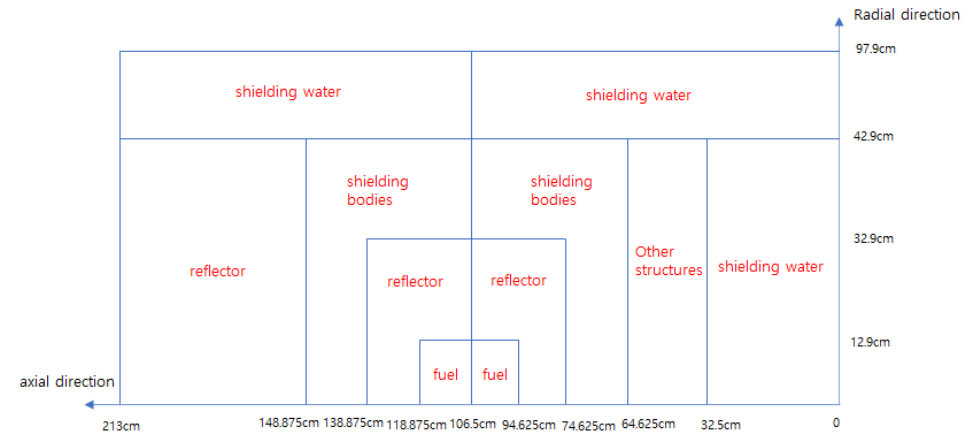
02 Background

• AGN-201K

- 경희대학교에 위치한 영출력 연구용 원자로
- 냉각수가 없어 Boron에 의한 영향이 없고 영출력 원자로이기 때문에 온도변화 및 Xenon에 영향이 없어 제어봉에 의해서만 출력 조절
- 보호계통으로 핵연료의 온도가 393.15K를 넘어서면 자동으로 원자로를 정지시키는 열퓨즈 존재
- 핵연료의 온도가 473.15K를 넘어서면 핵연료의 용융 시작
- 핵연료(UO₂+폴리에틸렌), 반사체(흑연), 차폐체(납), 차폐수(물)로 구성



<AGN-201K의 반경방향 단면도>



<AGN-201K의 축방향 단면도>

03 Case Study

- 사고 상황
 - AGN-201K의 제어봉(핵연료)이 모두 삽입된 상태에서 열퓨즈의 고장 발생
 - 제어봉이 자동으로 인출되지 않는 상태에서 핵연료의 온도가 350K에 도달
 - 사고 상황을 인지한 운전원이 수동으로 제어봉 인출을 시도

- 분석 상황 (다중분기 모드)
 - 1) 기기 고장으로 인해 제어봉 인출이 불가능한 경우
 - 2) 운전원이 수동으로 제어봉 인출을 하지 않는 상황
 - 3) 핵연료의 온도가 350K에 도달 후 90초 이후 운전원에 의한 제어봉 인출
 - 4) 핵연료의 온도가 350K에 도달 후 180초 이후 운전원에 의한 제어봉 인출

03 Case Study

- 분석 상황 (단일분기 모드)

- 단일분기 모드에서는 시점에 대한 값을 정해줄 필요가 없음
- 단일분기 모드에서는 운전원 행위에 대한 확률 분포에서 난수를 발생시켜 운전원 행위 시점을 정함

→ 다중분기 모드에서는 운전원의 행위 시점을 선택하여 분석을 진행해야 하지만 단일분기 모드에서는 운전원 행위 시점을 사용자가 선택해줄 필요가 없음

03 Case Study

- 불확실성 분석에 이용된 입력 파일
- KooN Manual
 - TC_Index_On/Off
 - 분기 시 기기 상태 제어에 대한 기능 제공
 - TC_Index_Delay
 - 기기 제어에 대한 조치시간 부여 기능 제공 (조치시간에 대한 값을 초 단위로 부여, 즉시 조치하는 경우 -1)

ID	Heading	TC_Index_On	TC_Index_Off	TC_Index_Delay
1	CR failure			-1
2	N/A			-1
3	90 sec		401	90
4	180 sec		401	180

<KooN_Manual 입력 예시>

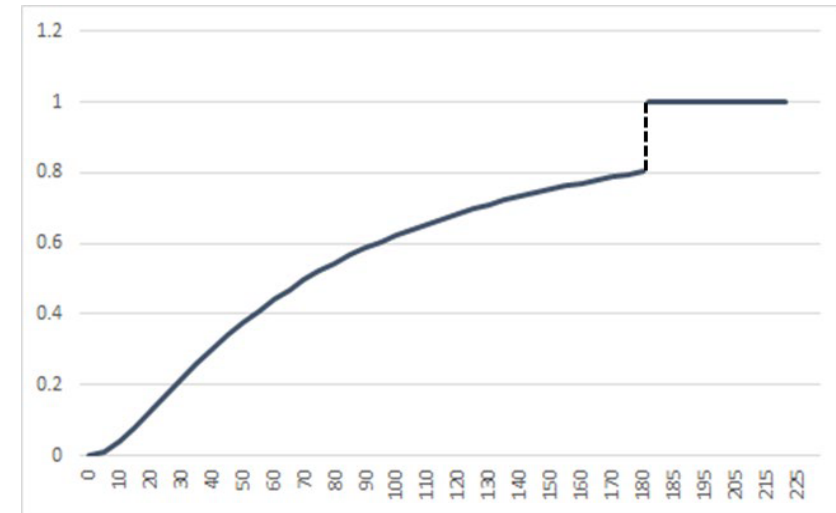
03 Case Study

- FM_List

- 고장수목을 통해 계산된 각 기기의 고장확률 제공
- 이 연구에서는 운전원의 조치시간에 대한 확률 제공
- 다중분기 모드에서는 사용자가 변수 값을 선택하여 입력 파일에 미리 확률 값 입력
- 단일분기 모드에서는 운전원 행위에 대한 분포에서 난수를 이용하여 확률 값을 선택

ID	Name	Description	Lamda
1	#OP1-1	Control Rod Failure	0
2	#OP1-2	Control Rod No action	0.2
3	#OP1-3	Control Rod in 90 sec	0.6
4	#OP1-4	Control Rod in 180 sec	0.2

<FM_List 입력 예시 >



$$Pr(x) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{(\ln x) - 4.26}{1.1}\right) & (0 \leq x \leq 180) \\ 1 & (180 < x) \end{cases}$$

<운전원 조치시간에 대한 확률 값 (CDF)>

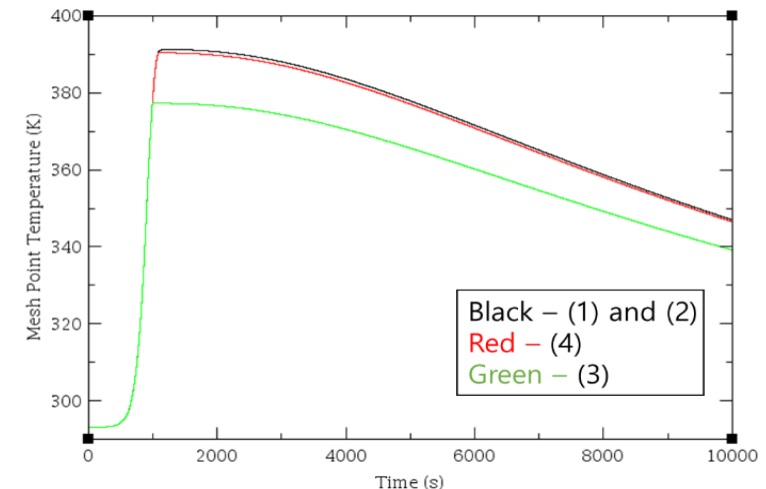
03 Case Study

• Result

• 다중분기 모드

- (1)과 (2)의 경우 핵연료의 최고 온도가 391.30K까지 증가
- (3)의 경우 핵연료의 최고온도가 376.33K까지 증가
- (4)의 경우 핵연료의 최고온도가 390.37K까지 증가
- 모든 경우에서 핵연료의 온도가 용융이 발생하는 473.15K까지 증가하지 않음
- Negative feedback에 의해 일정 시간이 지난 후 온도 감소

- (1) 기기 고장으로 인해 제어봉 인출이 불가능한 상황
- (2) 운전원이 수동으로 제어봉 인출을 하지 않는 상황
- (3) 핵연료의 온도가 350K에 도달 후 90초 이후 운전원에 의한 제어봉 인출 상황
- (4) 핵연료의 온도가 350K에 도달 후 180초 이후 운전원에 의한 제어봉 인출 상황



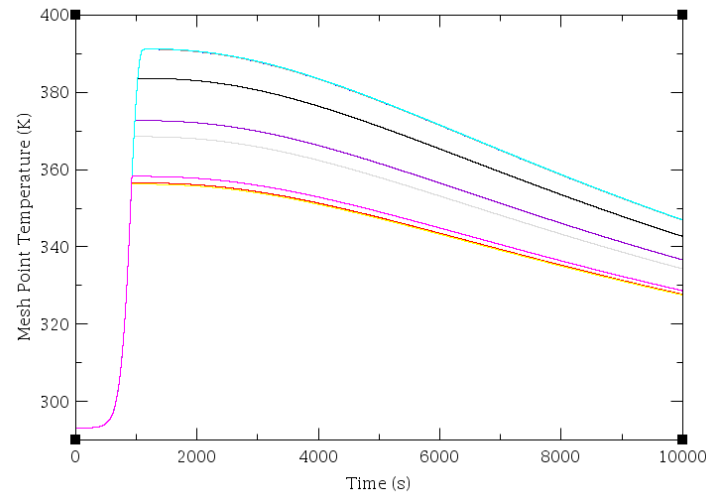
<운전원 조치시간에 따른 핵연료 온도변화 (다중분기)>

03 Case Study

• Result

• 단일분기 모드 (10번 실행)

- 운전원의 조치시간이 운전원 행위에 대한 분포를 따르는 난수로 발생
- 운전원 조치시간이 20~30초 사이에 가장 많이 발생
- 모든 경우에서 핵연료의 온도가 용융이 발생하는 473.15K까지 증가하지 않음
- Negative feedback에 의해 일정 시간이 지난 후 온도 감소



<운전원 조치시간에 따른 핵연료 온도변화 (단일분기)>

04 Conclusions

• Conclusions

- 사례 연구를 통해 미인지 시나리오 탐색을 위한 IDPSA 분석도구인 DICE™를 이용한 시나리오 분석 과정을 통한 불확실성 분석을 진행
- DICE™의 경우 열수력 변수의 변동성에 대한 분석이 아닌 시스템 기기의 변동성에 대한 분석을 진행
- 기기의 변동성에 대한 분석은 다중/단일분기 모드를 통해 가능
- 열수력 코드를 여러 번 실행하여 불확실성을 분석하는 것과 DICE™을 이용하여 불확실성을 분석하는 것의 차이점은 운전원 모델과 같은 외부 모듈의 연결 가능성임

Q&A

Yuntae Gwak
(Presenter)

gwakyuntae@gmail.com

Sejin Baek

whiten.sejin@gmail.com

Dohun Kwon

skdmlclsrn11@gmail.com

Gyunyoung Heo*
(Corresponding Author)

gheo@khu.ac.kr