

Evaluation for Accident Mitigation Effect of External Injection at WH600 using MELCOR

Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting

December 16 - 18, 2020

Hanyang University (HYU)

원자력안전해석연구실

박예림



1. Introduction

1. Introduction

- 2011년 후쿠시마 사고로 인해, 설계기준초과외부사건 대비의 필요성 인지
- 미국에서 FLEX 전략을 도입, 국내에서도 MACST(Multi-barrier accident coping strategy) 도입
 - 극한재해가 중대사고로 발전하는 것을 원천에 방지하기 위함
- MACST 전용 설비 및 체계 구축, MOG(MACST Operating Guideline) 개발
 - MACST 전용 설비의 사고완화 효과에 대한 분석이 필요함

→ 본 연구에서는 MACST 설비 중 이동형 저압 펌프를 이용한 1, 2차 측으로의 외부주입에 따른 사고진행과 완화 효과를 분석

Table. 1. MACST 전용 설비¹⁾

| 단계 | 설비 | 수량 | 단계 | 설비 | 수량 |
|-----|------------------|---------------|--------------|-------------------|--------|
| 1단계 | 5.5kW 휴대용 소형 발전기 | 호기별 2대 | 3단계 | 3.2MW 대용량 이동형 발전차 | 본부별 1대 |
| | 350kW 중형 선배치 발전기 | 호기별 1대 | | 이동형 정수 차량 | 전사 1대 |
| | 다목적 통신중계 차량 | 본부별 2대 | 최종열제거 원상실 | 이동형 다목적 고유량 펌프 | 호기별 1대 |
| | 비상조명 기기 | 호기별 1Set | | 이동형 열교환기 | 본부별 2대 |
| | 이동형 공기압축기 | 호기별 1대/본부별 1대 | 인위적재해 | 이동형 고압 살수차 | 본부별 2대 |
| 2단계 | 이동형 고압 펌프 | 호기별 1대 | 공통 | 견인 차량 | 본부별 2대 |
| | 이동형 팬 및 덕트 | 호기별 1세트 | 기 확보 | 1.0MW 대용량 이동형 박저차 | 호기별 1대 |
| | 연료유 이송/저장 설비 | 본부별 2대 | | 이동형 저압 펌프 | 호기별 2대 |

1) 양승태, 사고관리계획서 사업자 후속조치 현황, 2019년 KNS 추계학술대회 워크숍, 2019

2. Methodology

2.1 Plant Nodalization

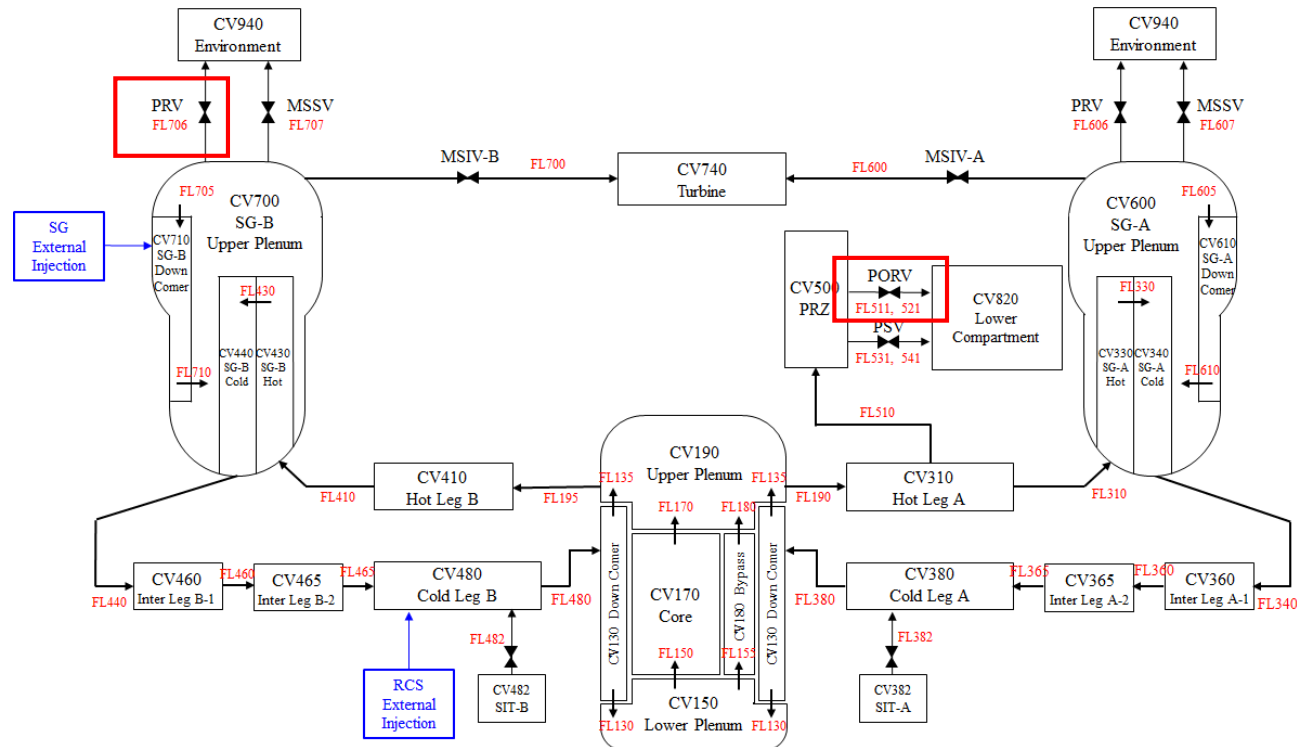


Fig. 1. WH600 MELCOR 모델의 원자로냉각재계통 Nodalization

- MELCOR 2.2를 이용한 사고 분석
- 참조 노형: WH600, 2개의 루프(A, B)로 구성
- B 루프의 저온관과 증기발생기로 이동형 기기 연결 가정
 - 이동형 저압 펌프 (500gpm @20kg/cm²) 가정¹⁾
- 1차측 PORV, 2차측 SG PRV가 운전원에 의해 수동으로 개방

1) 양승태, 사고관리계획서 사업자 후속조치 현황, 2019년 KNS 추계학술대회 워크숍, 2019

2.1 Plant Nodalization

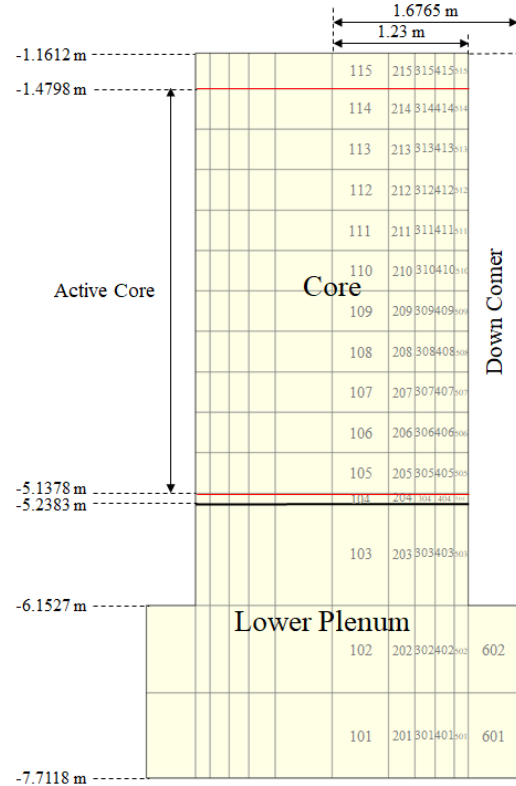


Fig. 2. WH600 MELCOR 모델의 노심 Nodalization

- 15층(Axial Level), 5개의 반경(Ring)으로 구성
- 유효노심(Active Core)은 5 - 14층으로 구성
- 원자로용기 하부(Lower Plenum)은 1 - 3층으로 구성
- 노심 지지 구조물(Supporting Structure)은 1 - 4 층에 모의
 - 1, 2, 4층에 Plate로, 3층에 Column

2.2 Accident Scenario

- 사고 경위: Loss of CCW 초기사건 가정
 - Turbine Driven 보조급수펌프 이용 불가 가정
 - 이동형 저압 펌프는 사고발생 1.5 시간 후 연결
 - SAMG 진입 조건 30분 후, 운전원에 의해 수동으로 밸브 개방

- Base : 이동형 기기 사용되지 않음
- Case 1: 1차측 감압으로, 1차측 외부 주입 수행
- Case 2: 1,2차측 감압으로, 1,2차측 외부 주입 수행

Table. 2. 사고 경위 구분

| | Base | Case 1 | Case 2 |
|-----------------------------|------|------------|---------------------------------|
| Manually Opened Valve | - | 2 PORVs | 2 PORVs 1 PRV |
| External Injection Location | - | Cold Leg B | Cold Leg B Steam Generator B |

3. Results

3.1 Accident Progression of Base

❖ Base 사고 진행과정

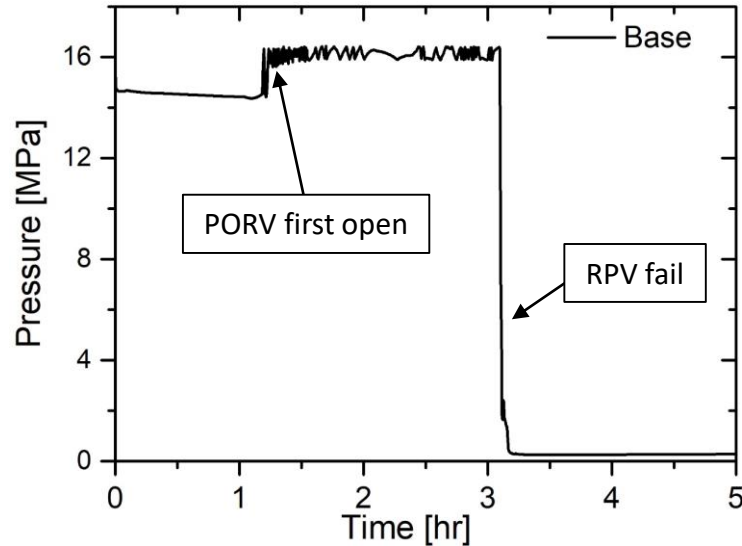


Fig. 4. RCS pressure (Base)

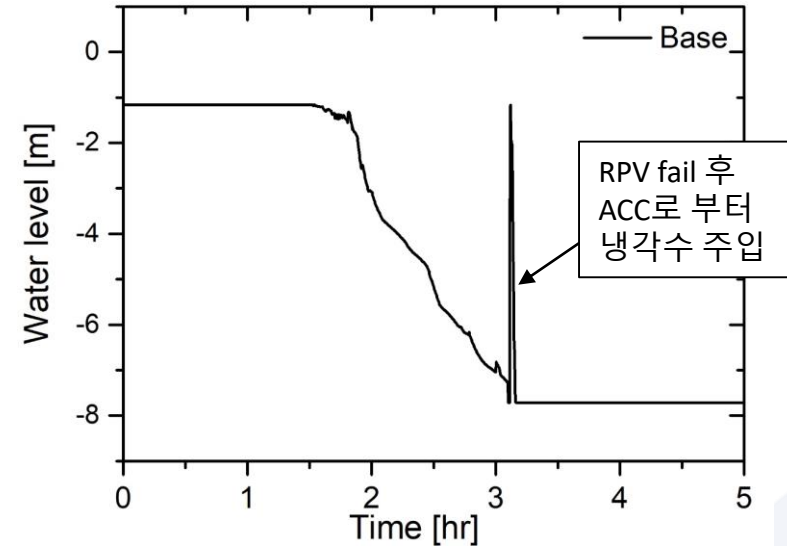


Fig. 5. Core water level (Base)

Table. 3. Accident progression of Base

| Event | Base | |
|------------------------|-------|------|
| | [sec] | [hr] |
| LOCCW | 0.0 | 0.0 |
| PORV First Open | 4312 | 1.20 |
| Active Core Uncover | 6800 | 1.89 |
| SAMG Entry Condition | 7846 | 2.18 |
| Core Damage | 8700 | 2.42 |
| Debris Relocated to SS | 9725 | 2.70 |
| RPV Failure | 11149 | 3.10 |
| ACC Injection Start | 11200 | 3.11 |
| ACC Injection End | 11226 | 3.12 |

- LOCCW 발생으로, 원자로/RCP 정지
- PORV set point 도달 후 개폐를 반복 (1.20 시간)
- 원자로건물로 냉각재가 빠져나가면서 유효노심 노출
- 노심 출구 열전대 SAMG 진입 조건 도달 (2.18 시간)
- 노심용융물에 의해 원자로용기 하부 가열, 파손 (3.10 시간)
- 원자로용기 파손 후, ACC로부터 냉각재 주입 (3.11 시간)

3.1 Accident Progression of Base

❖ Base 노심 손상 과정

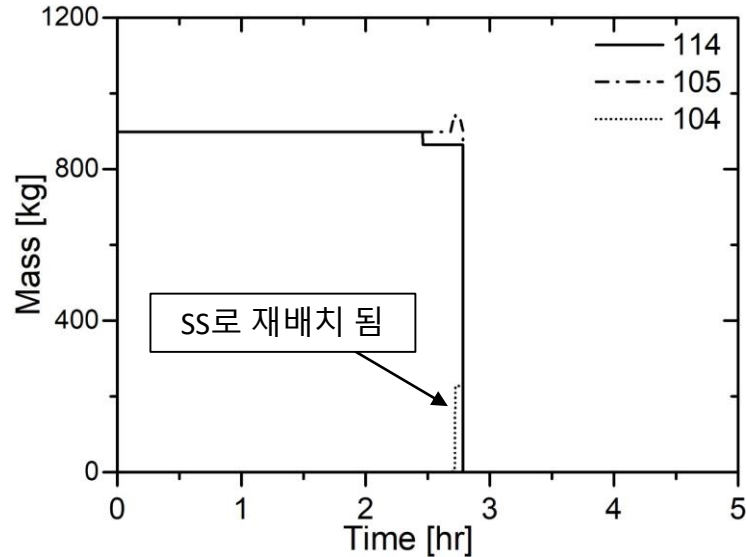


Fig. 6. UO2 mass of each cell (Base)

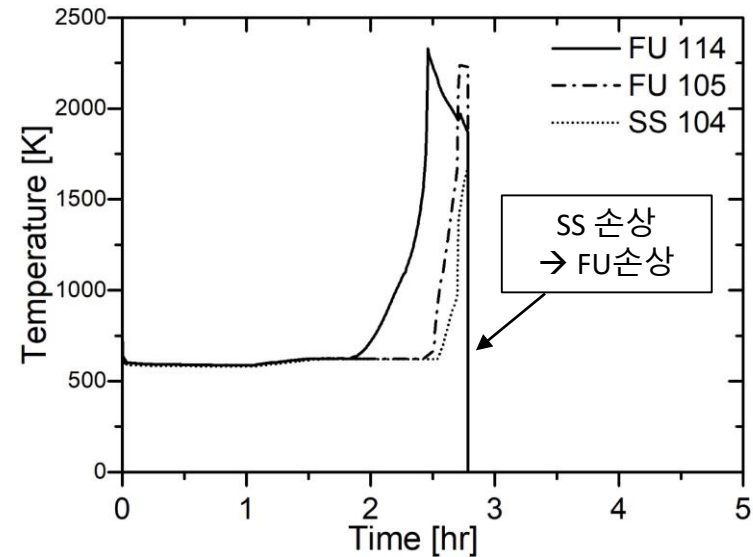


Fig. 7. Core component temperature (Base)

Table. 3. Accident progression of base

| Event | Base | |
|------------------------|-------|------|
| | [sec] | [hr] |
| LOCCW | 0.0 | 0.0 |
| PORV First Open | 4312 | 1.20 |
| Active Core Uncover | 6800 | 1.89 |
| SAMG Entry Condition | 7846 | 2.18 |
| Core Damage | 8700 | 2.42 |
| Debris Relocated to SS | 9725 | 2.70 |
| RPV Failure | 11149 | 3.10 |
| ACC Injection Start | 11200 | 3.11 |
| ACC Injection End | 11226 | 3.12 |

- 상단의 노심부터 손상되기 시작 (2.42 시간)
- 약 200 kg UO2가 4층 SS에 재배치 (2.70 시간)
→ SS 손상 → 동일 반경 FU 손상

* FU: Intact fuel component

* SS: Supporting structure

3.2 Accident Progression of Cases

❖ 사고 진행과정

Table. 4. Accident progression of cases [hr]

| Event | Base | Case 1 | Case 2 |
|---------------------------|------|--------|--------|
| Manually Valves Open | - | 2.68 | 2.68 |
| External Injection to SG | - | - | 2.70 |
| Debris Relocated to SS | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| ACC Injection Start | 3.11 | 2.90 | 2.80 |
| ACC Injection End | 3.12 | 2.91 | 3.11 |
| External Injection to RCS | - | 2.91 | 3.10 |
| RPV Failure | 3.10 | 3.93 | - |

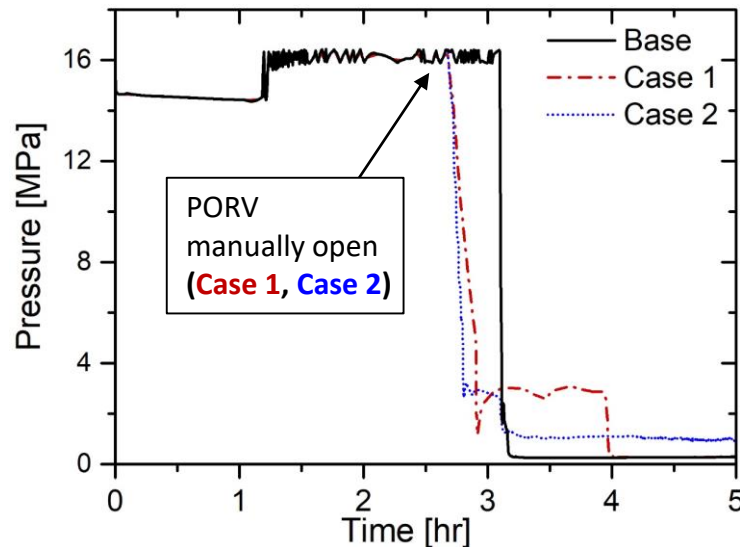


Fig. 8. RCS pressure

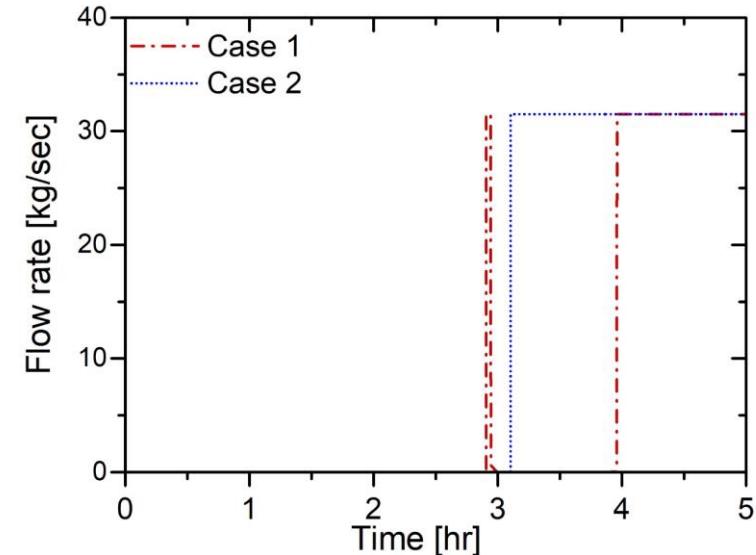


Fig. 9. Flow rate of external injection to RCS

- Case 1, Case 2에서 PORV 2개 개방으로 인해 1차측 압력 급감 (2.68 시간)
- Case 2에서 2차측으로 열 제거가 지속적으로 이루어짐 → Case 1 보다 더 빠르게 1차측 감압
- Case 2 는 충분히 감압 되어 저압 이동형 펌프로 부터 꾸준히 냉각수 주입, Case 1은 순간적으로만 주입

3.2 Accident Progression of Cases

❖ 사고 진행과정

Table 4. Accident progression of cases [hr]

| Event | Base | Case 1 | Case 2 |
|---------------------------|------|--------|--------|
| Manually Valves Open | - | 2.68 | 2.68 |
| External Injection to SG | - | - | 2.70 |
| Debris Relocated to SS | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| ACC Injection Start | 3.11 | 2.90 | 2.80 |
| ACC Injection End | 3.12 | 2.91 | 3.11 |
| External Injection to RCS | - | 2.91 | 3.10 |
| RPV Failure | 3.10 | 3.93 | - |

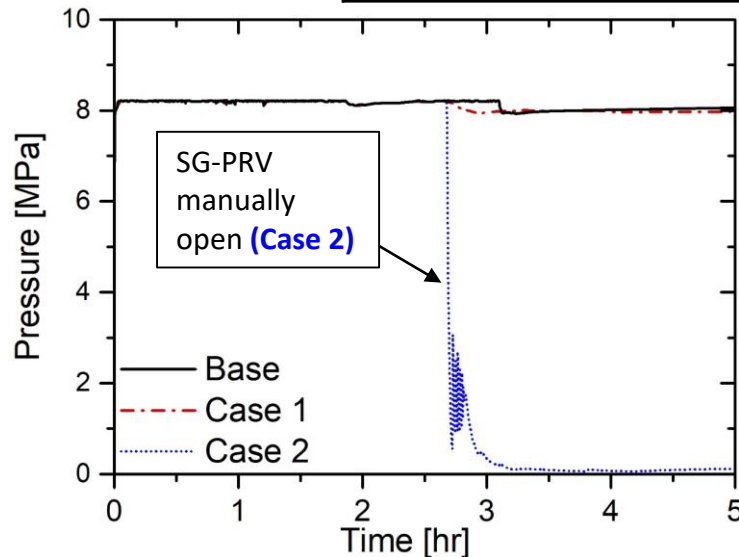


Fig. 10. 2nd system pressure

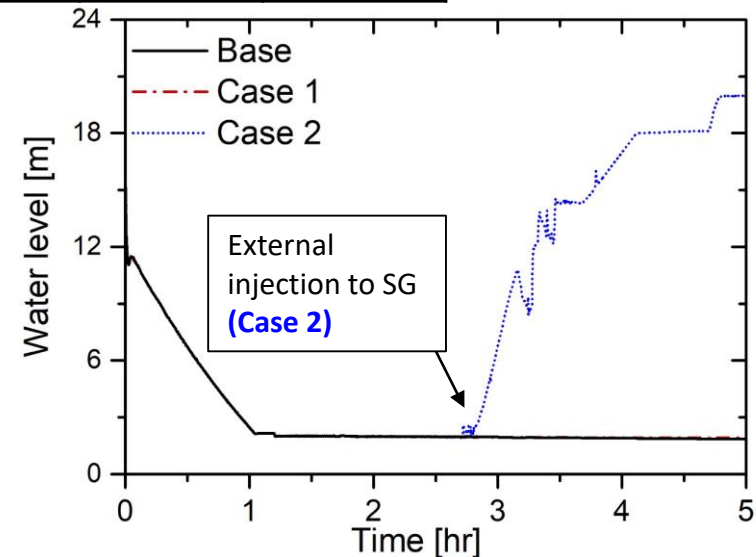


Fig. 11. 2nd system water level

- Case 2 에서 PRV 의 수동 개방으로 인해 2차측 압력 급감
- 이동형 저압 펌프로 부터 Case 2의 증기발생기 2차측으로 냉각수가 주입
→ Case 2, 2차측으로 열제거

3.2 Accident Progression of Cases

❖ 사고 진행과정

Table 4. Accident progression of cases [hr]

| Event | Base | Case 1 | Case 2 |
|---------------------------|------|--------|--------|
| Manually Valves Open | - | 2.68 | 2.68 |
| External Injection to SG | - | - | 2.70 |
| Debris Relocated to SS | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| ACC Injection Start | 3.11 | 2.90 | 2.80 |
| External Injection to RCS | - | 2.91 | 3.10 |
| RPV Failure | 3.10 | 3.93 | - |

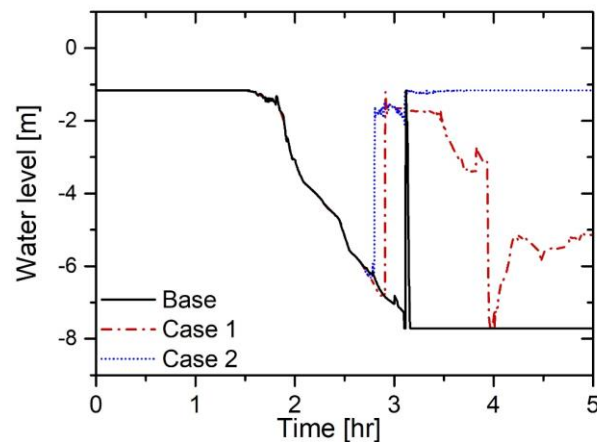


Fig. 12. Core water level

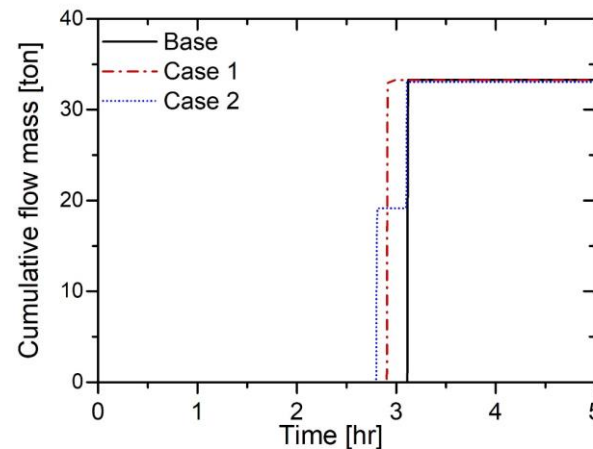


Fig. 13. Cumulative flow mass from ACC

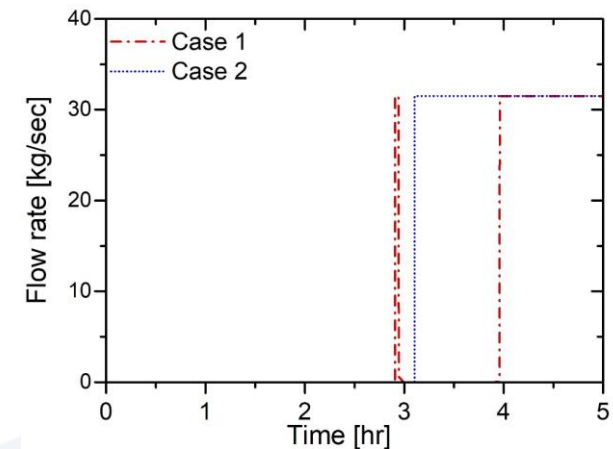


Fig. 11. Flow rate of external injection to RCS

- Case 1에서는, 순간적인 외부주입과 ACC로 인해 유효노심 상단까지 일시적으로 수위 회복
- Case 2에서는, 외부주입과 ACC로 인해 유효노심 최상단까지 지속적으로 수위 유지

3.2 Accident Progression of Cases

❖ 노심 손상 과정

Table. 4. Accident progression of cases [hr]

| Event | Base | Case 1 | Case 2 |
|---------------------------|------|--------|--------|
| Manually Valves Open | - | 2.68 | 2.68 |
| External Injection to SG | - | - | 2.70 |
| Debris Relocated to SS | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| ACC Injection Start | 3.11 | 2.90 | 2.80 |
| External Injection to RCS | - | 2.91 | 3.10 |
| RPV Failure | 3.10 | 3.93 | - |

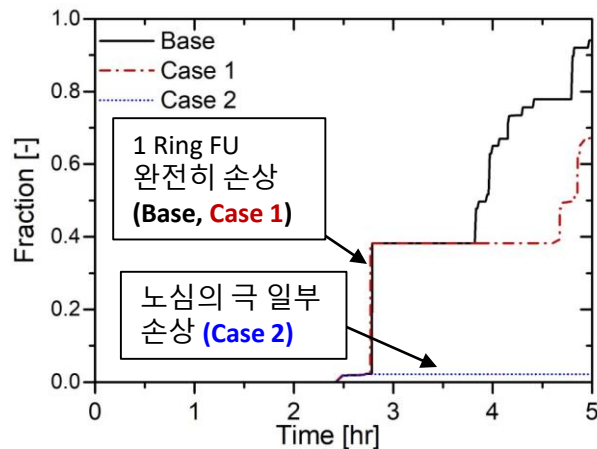


Fig. 14. Core damaged fraction

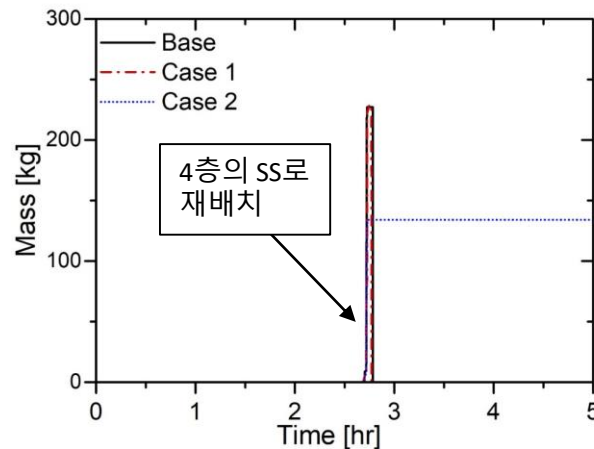


Fig. 15. UO2 mass relocated to cell 104

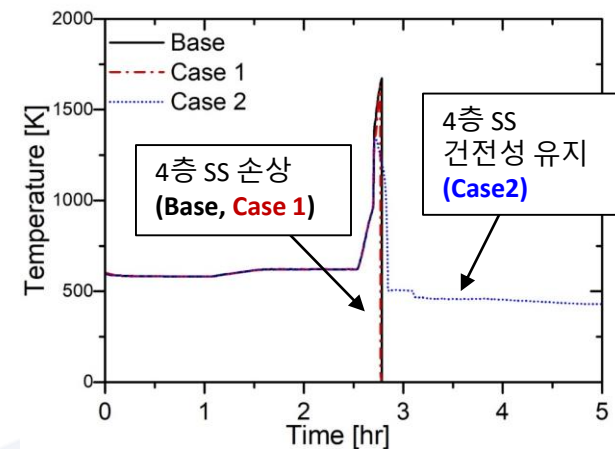


Fig. 16. Supporting structure temperature of cell 104

- Base, Case 1, Case 2 최상단의 FU 부터 손상 시작 (2.42 시간) → 손상된 노심 구조물이 4층의 SS로 재배치
- Base, Case 1에서는 4층 SS 손상으로 인해 동일 반경의 FU 완전히 손상
- Case 2 에서는 ACC로 인해 4층의 SS 건전성 유지 (2.80 시간)
→ 밑에 층으로 손상된 노심구조물이 재배치 되지 않음

3.2 Accident Progression of Cases

❖ 노심 손상 과정

Table. 4. Accident progression of cases [hr]

| Event | Base | Case 1 | Case 2 |
|---------------------------|------|--------|--------|
| Manually Valves Open | - | 2.68 | 2.68 |
| External Injection to SG | - | - | 2.70 |
| Debris Relocated to SS | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| ACC Injection Start | 3.11 | 2.90 | 2.80 |
| External Injection to RCS | - | 2.91 | 3.10 |
| RPV Failure | 3.10 | 3.93 | - |

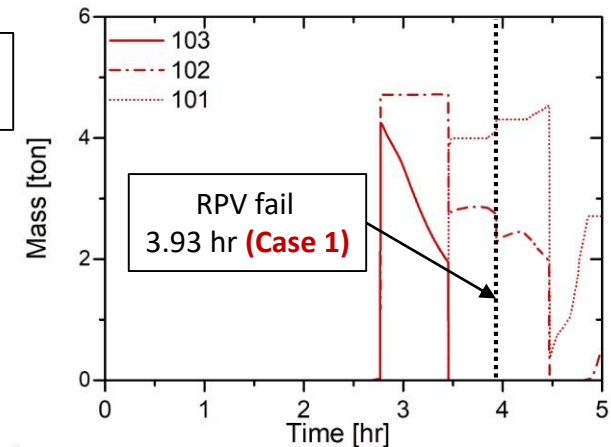
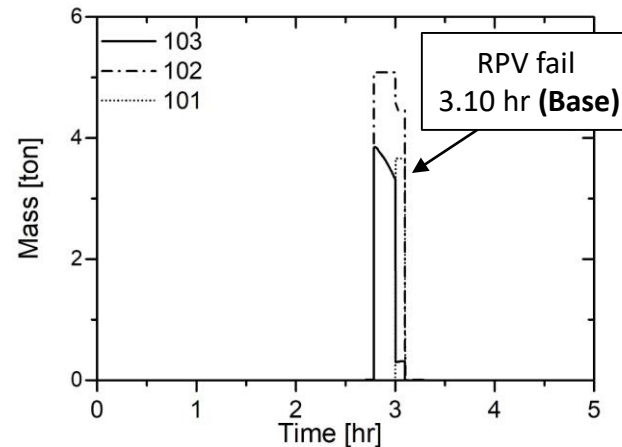
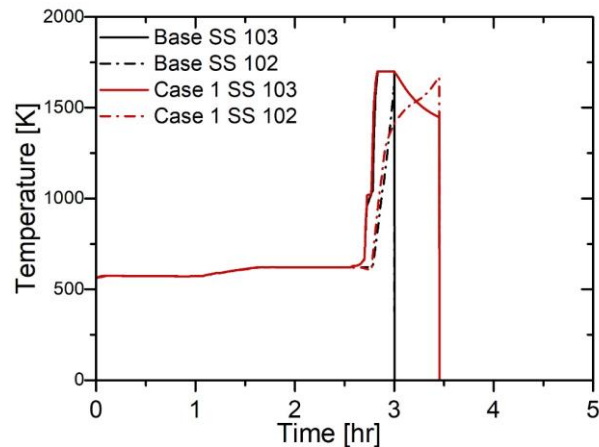


Fig. 17. Supporting structure temperature of cell 103, 102 (Base, Case 1)

Fig. 18. UO₂ mass relocated to lower plenum (Base)

Fig. 19. UO₂ mass relocated to lower plenum (Case 1)

- Base, Case 1에서는 원자로용기 하부(1 - 3층)로 노심용융물이 재배치
- Base에서 2층의 SS 손상 (3.00 시간), 이후 원자로용기 손상 (3.10 시간)
- Case 1에서는 ACC로 인해 2층의 SS 손상 시점이 약 0.46시간 (약 30분) 지연됨
→ 원자로용기 파손 시점은 0.83 시간 (약 50분) 지연

4. Conclusion

4. Conclusion

- 본 연구에서는 이동형 저압 펌프를 이용한 외부주입의 사고완화 효과를 평가하였음
 - WH600 노형
 - LOCCW, AFW-TDP 실패 사고경위 가정
- 외부로부터 냉각수 주입이 없을 경우, 초기사건 발생 3.10 시간 후에 원자로용기가 파손됨
- 1차측으로 외부주입이 될 경우, 원자로용기 손상을 0.83 시간(약 50분) 지연시킬 수 있음
- 원자로용기의 건전성을 확보하려면, 1차측 외부주입과 동시에 2차측으로도 외부주입이 이루어져야함
- 일반적인 MACST 설비의 이용 단계가 아닌, 사고초반부터 이동형기기만을 사용하는 매우 보수적인 사고 경위에 대한 분석 결과임
- 사고 해석 모델에 대해, 추가적인 불확실성 분석이 이루어진다면 신뢰성 높은 해석 결과를 얻을 것이라 기대됨

Q & A

yerim@hanyang.ac.kr