

2025.05.21 SMR 운전관련 국내 인간공학/인적수행도 현안

SMR 환경 인적수행도 자료 수집 - 실험

김종현

원자력 및 양자공학과
한국과학기술원(KAIST)

목차

1. 과제 개요

2. 실험 진행 현황

3. 실험 결과

4. 향후 계획

1. 과제 개요

1. 과제 개요

- **용역 과제명**

- 다중모듈환경 인적수행도 자료 수집 및 분석 용역

- **용역기간**

- 2024.07.01. – 2025.12.31.

- **용역목적**

- 시뮬레이터를 활용한 다중모듈 환경에서의 인적수행도 자료 수집 및 분석
 - 인적오류 확률 도출
 - PSF 영향 확인 및 정량화

1. 과제 개요



2. 실험 진행 현황

2.1 인적수행도 영향인자 선정

- 본 연구는 다중모듈환경 내 주요한 인적수행도 영향인자(Performance Shaping Factors, PSF)를 다음과 같이 정의함.

PSF 종류	설명	수준
Accident Module / Operator (AMO)	운전원별 조치 직무를 이행해야 되는 사고 모듈 수	0.5
		1
		2
Surveillance (SS)	운전원 직무 및 발전소 상태를 감시하는 인력	존재
		없음
Accident Homogeneity (AH)	운전원 내 동일하거나 다른 사고나는 경우	동일
		다름
HSI Quality of Passive Safety System (HSI_PSS)	피동안전계통 관련 HSI 에서 표시되는 정보의 수준	Original
		Supportive
HSI Quality of Automated System (HSI_AS)	자동화 시스템 관련 HSI 에서 표시되는 정보의 수준	Original
		Supportive

2.2 실험 환경 구축

- 실험 환경 설비
 - 시뮬레이터 기반 4개 모듈 환경
 - Large Display Panel (LDP)
 - 모듈별 화면 (운전원별 2개 제공)
- 운전조 구성
 - 3인 운전: 2 Reactor Operators / 1 Shift Supervisor

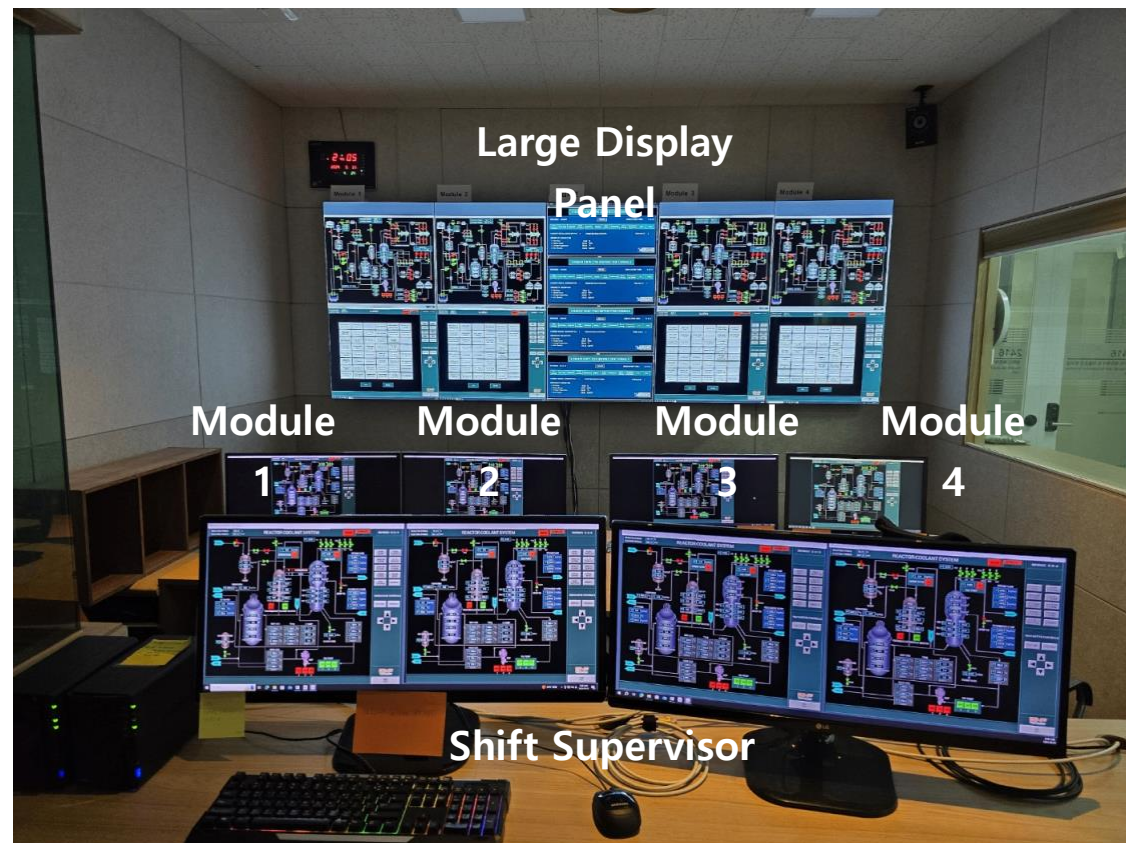


Fig. 다중모듈 운전 환경

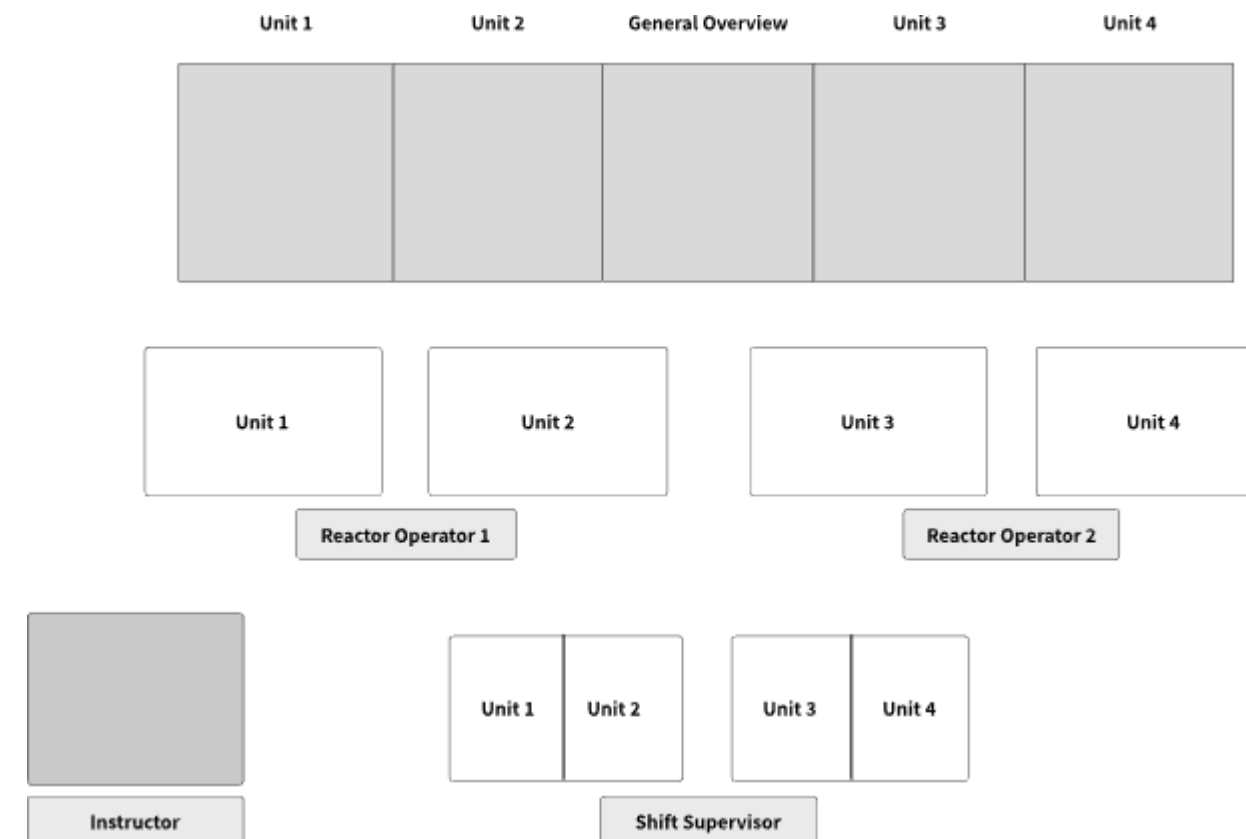
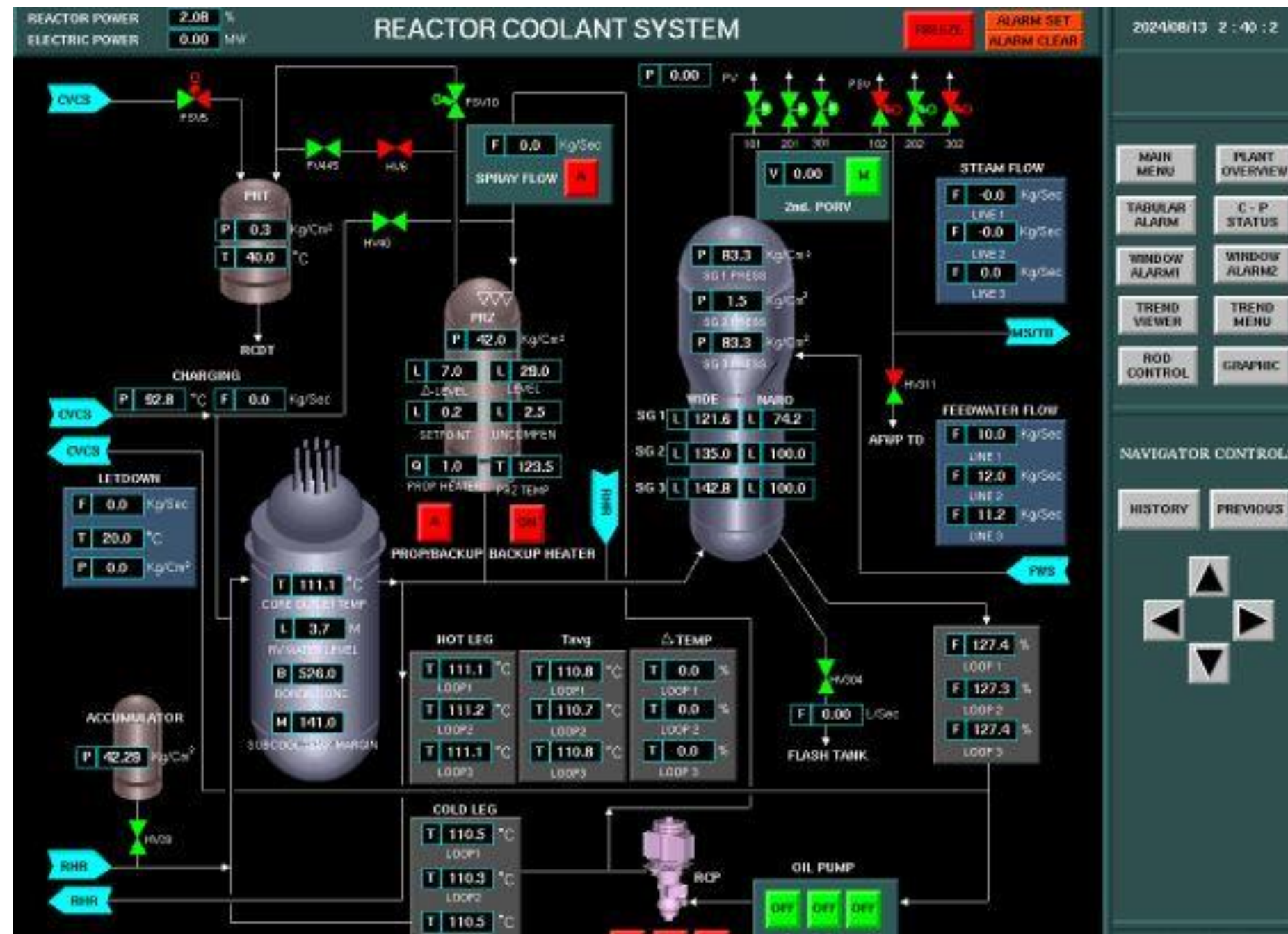


Fig. 다중모듈 운전 환경 Layout

2.2 실험 환경 구축

- Compact Nuclear Simulator (CNS)
 - 3-Loop Westinghouse PWR 993 MWe 노형 (고리 3, 4호기)



2.3 영향인자 수준 분류

1) 운전원별 사고 모듈 수 (Accident Module/Operator : AMO)

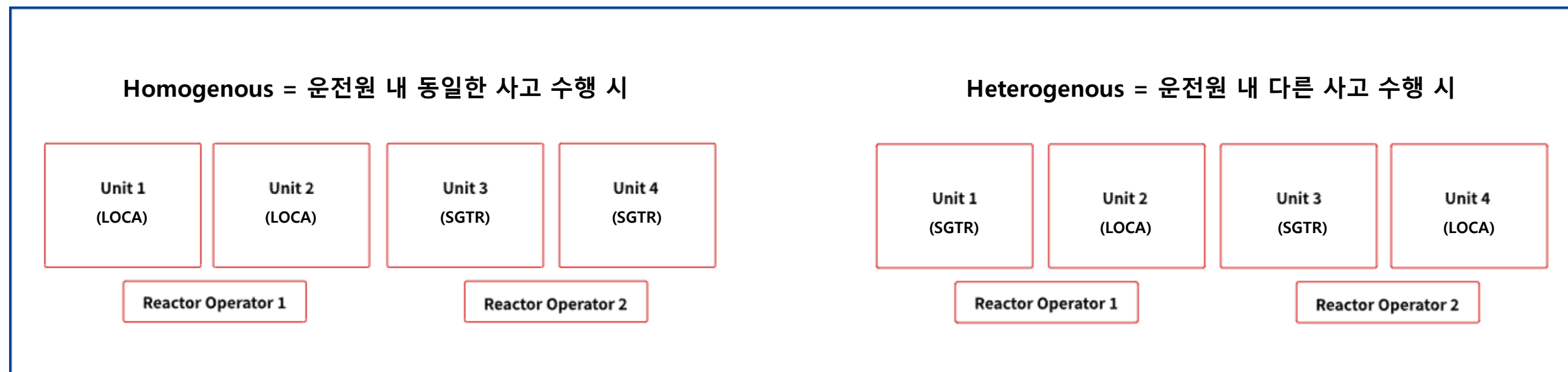
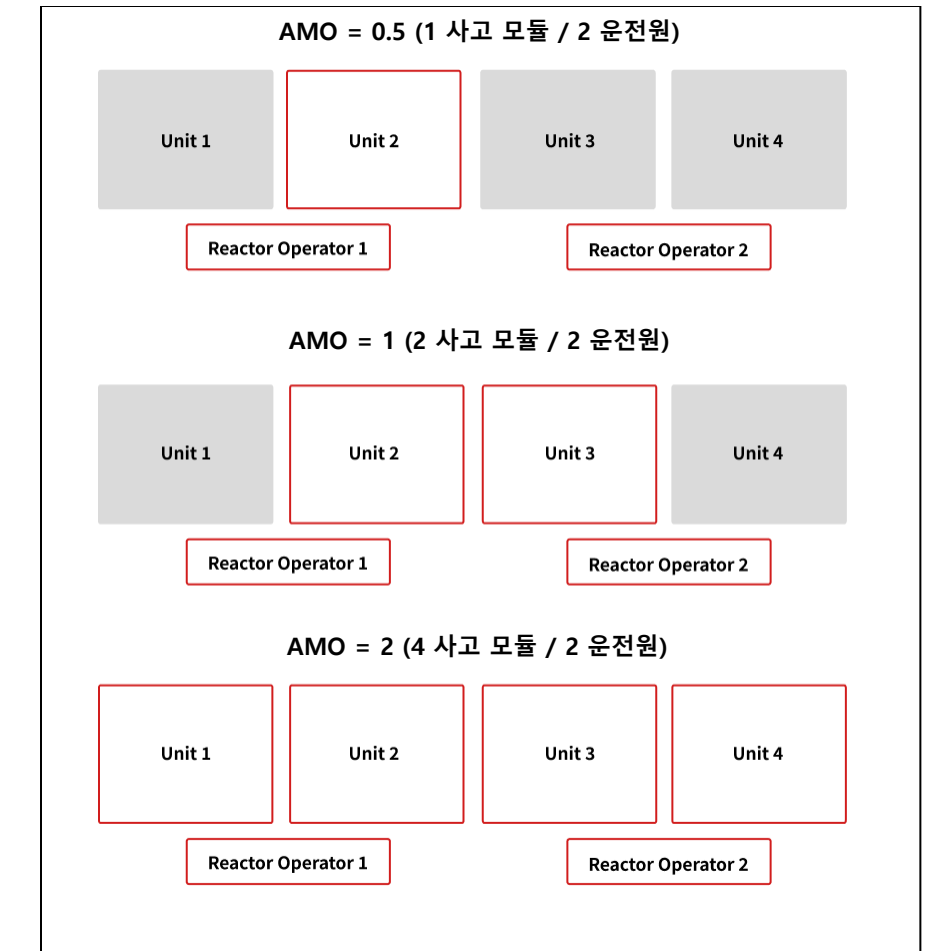
- 운전원별 조치가 필요한 사고 모듈 수
 - **0.5:** 1 사고 모듈 / 2 운전원
 - **1:** 2 사고 모듈 / 2 운전원
 - **2:** 4 사고 모듈 / 2 운전원

2) 감시인력 (Surveillance : SS)

- 운전원의 직무를 감시 및 지시하는 인력

3) 사고 동질성(Accident Homogeneity : AH)

- 운전원이 동일하거나 다른 사고 수행 여부



2.3 영향인자 수준 분류

4) 피동안전계통/자동화 시스템의 HSI 설계 수준 (HSI Quality)

- Human centered automation 기반 화면 정보 설계
 - Supportive Design:
 - 자동화 시스템의 상태 및 추가 정보를 선별하여 기존 HSI에 추가함으로써 운전원 직무 영향도 평가

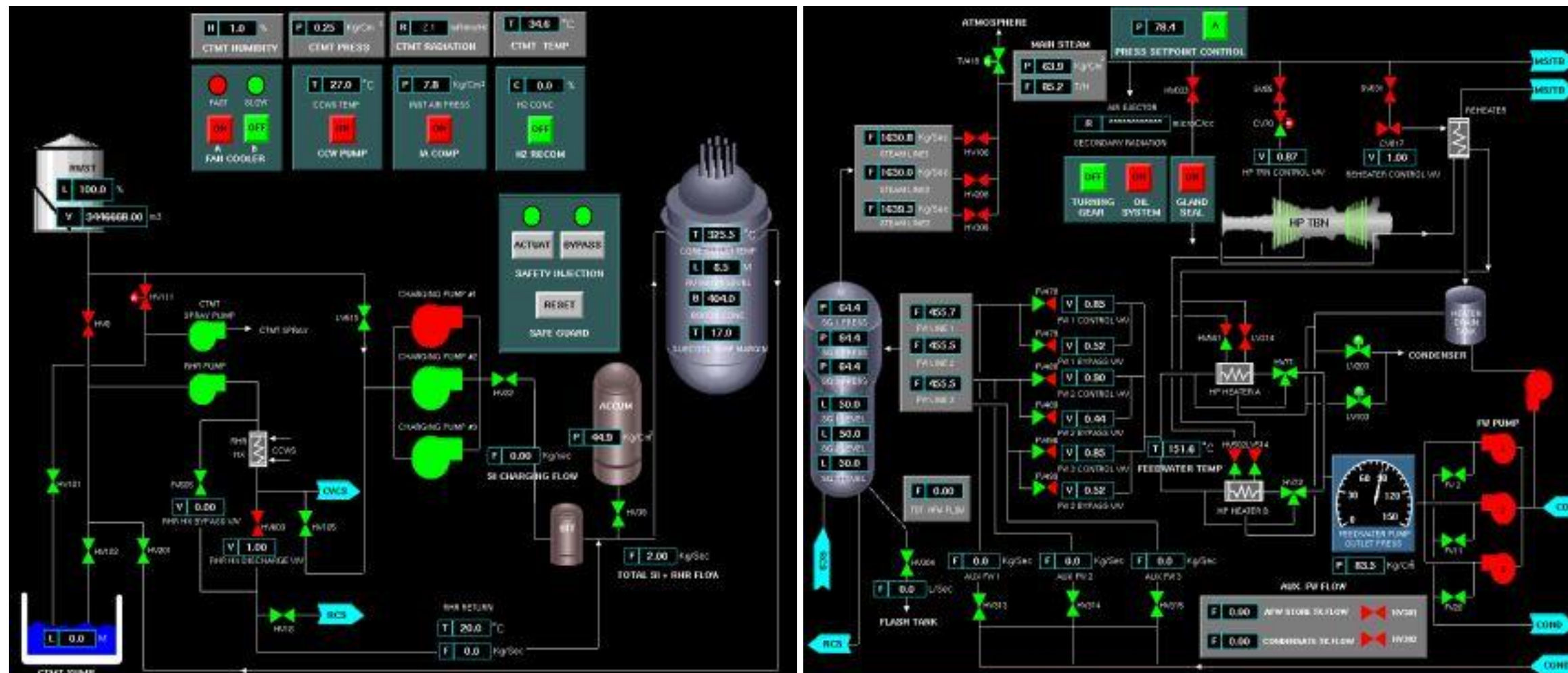


Fig. Supportive Design 자동화 시스템 (Left), 피동안전계통(Right)

2.4 인적수행도 측정 척도

척도	비고	측정 방법
오류확률	<ul style="list-style-type: none">절차서 내 직무 유형을 HuREX 체계에 기반하여 인적오류확률 도출	<ul style="list-style-type: none">영상분석시뮬레이터 로그 데이터
직무 수행 시간	<ul style="list-style-type: none">사고 시나리오에서 작업 도입부터 완료까지 소요된 시간 측정직무 단계 (Step) 기반 Task Completion Time 측정	<ul style="list-style-type: none">영상분석시뮬레이터 로그 데이터
작업부하	<ul style="list-style-type: none">시나리오별 직무 수행 시 운전원이 주관적으로 경험한 주의집중도 저하 및 스트레스 축적 수준 측정	<ul style="list-style-type: none">MCH (1)아이트래커
상황인식	<ul style="list-style-type: none">발전소 변수 현재 상태 인지 및 미래 상황 예측까지 종합적인 운전 상황에 대한 인지여부	<ul style="list-style-type: none">SACRI (2(3))
통계 분석	<ul style="list-style-type: none">PSF별 영향도 분석을 위한 통계 기반 접근	<ul style="list-style-type: none">ANOVA (4)회귀분석

(1) Modified-Cooper Harper Rating Scale (MCH)
(2) Situational Awareness Control Room Inventory (SACRI)
(3) Situation Awareness Rating Technique (SART)
(4) Analysis of Variance (ANOVA)

2.4 인적수행도 측정 척도

1) 인적오류확률 / 직무 수행시간

- 절차서에서 본래 명시된 직무와 실제 이행한 직무가 다를 경우 (Error of Commission), 혹은 수행을 안 한 경우(Error of Omission) 인적 오류가 발생했다고 판단함.
- 절차서 단계별 직무 수행시간을 측정함
 - (1) 운전원(RO)의 직무 수행 시간, (2) SS의 개입으로 인한 RO의 Unsafe Act 회복 시간
- 측정 방안:
 - HuREX 기반 Information Gathering Table(IGT)를 구축함으로써 절차서와 영상에서의 실제 운전원 행동을 대조하여 인적오류확률, SS에 의한 회복 직무의 성공확률, 그리고 직무 수행 및 회복 시간을 IGT 분류에 적합하게 파악

표. HuREX IGT

Row#	EXP_ID	Scenario_ID	Time	Time for Loop	Procedure	Step	Substep code	Contents	Cognitive Activity	Task Type	Demand(#)	Success(#)	EOO	EOC	UACode	Description
1	04201U	42	14:27:37		E-0	1	0-	원자로 트립을 확인한다	RP	Entry	1					
2	04201U	42			E-0	1	0-bl-1	모든 제어 및 정지봉 (Rod Coontrol System): 모두 삽입됨	RP;IG	Information;Indicator	1;1					
3	04201U	42			E-0	1	0-bl-2	원자로 트립 신호: 켜짐	RP;IG	Information;Indicator	1;1					
4	04201U	42			E-0	1	0-RNO-1	수동으로 원자로를 트립시킨다	RP;EX	Manipulation;Discrete	1;1	1;1				
5	04201U	42			E-0	1	0-RNO-2	회복-S.1 (원자로 정지불능시 조치)의 단계 1.0으로 간다	RP	Procedure	1					
6	04201U	42	14:28:00		E-0	2	0-	터빈 트립을 확인한다	RP	Entry	1					
7	04201U	42			E-0	2	1-	모든 저압터빈 정지밸브 (COND-SV161) 닫힘	RP;IG	Information;Indicator	1;1					
8	04201U	42			E-0	2	1-RNO-1	수동으로 터빈을 트립시킨다	RP;EX	Manipulation;Discrete	1;1					
9	04201U	42	14:28:30		E-0	3	0-	비상교류 모선이 가압되어 있는지 확인한다	RP	Entry	1					

2.4 인적수행도 측정 척도

2) 작업부하

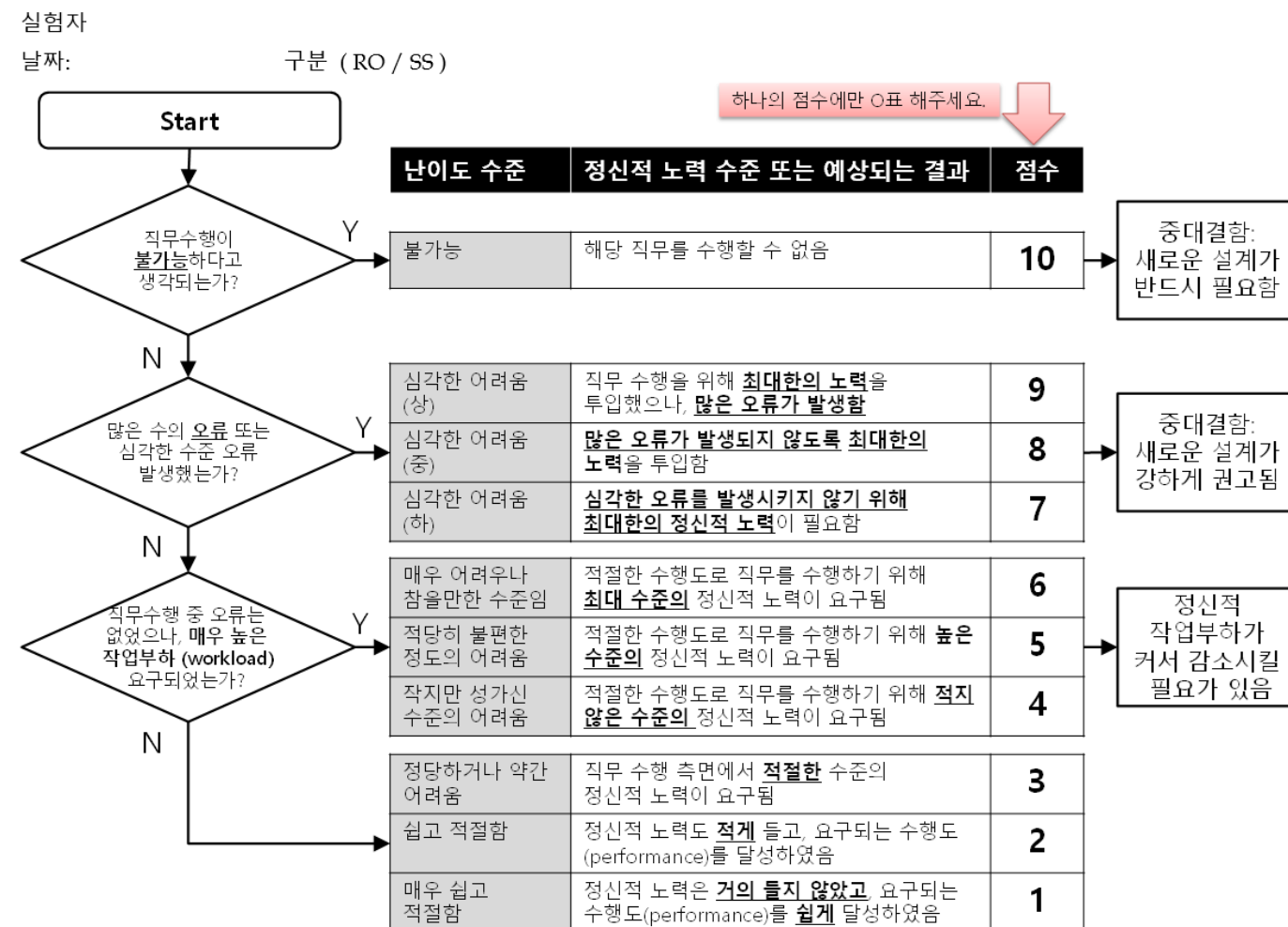
• 측정방법 1: 설문지 기반

- MCH는 항공분야에서 조종사의 **정신적 작업부하**를 평가하기 위해 개발된 설문지 기반의 평가방법
- 실험 중 대한 피실험자가 경험한 직무부하를 **1~10점(1=낮음, 10=높음)**의 척도로 평가함
- 세 개의 이분형 질문을 통해 전반적인 난이도 수준을 결정한 후 세부적인 질문을 통해 본인이 경험한 직무부하를 평가

• 측정방법 2: 아이트래커

- 눈 깜빡임 수(Blinking Rate), 동공확장(Pupil Dilation) 등 심리생리학적(Psychophysiological) 신호를 활용한 객관적 평가

그림. MCH 설문지(왼쪽), 아이트래커(오른쪽)



2.4 인적수행도 측정 척도

3-1) 상황인식 (SART)

- Taylor가 제안한 주관적 상황인식 평가도구인 **Situation Awareness Rating Technique(SART)**를 활용함
- 측정방법:
 - 시스템 설계에 대한 주의요구정도(Demand), 주의배분정도(Supply), 상황에 대한 이해도(Understanding)의 세 가지 분야에 대해서 10개 항목으로 구성됨
 - 피실험자는 1~7점(1=낮음, 7=높음)의 척도를 가지는 10개의 항목으로 이루어진 설문지를 통해 본인이 경험한 상황인식을 평가

그림. SART 설문지

실험자

날짜: 구분 (RO / SS)

1. 상황이 안정적이고 순조롭게 진행됐는가?(Low) 아니면 불안정하고 갑자기 급변했는가?(High)

[상황의 불안정성]

안정적이고 서서히 변함
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

불안정하고 급변
(High)

2. 감시해야 할 변수의 수량이 적었는가?(Low) 아니면 많았는가?(High) [상황의 변동성]

변수 파악 용이함
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

변수 파악 난해함
(High)

3. 상황이 단순하고 순조로웠는가?(Low) 아니면 서로 연관된 많은 요소들로 복잡했는가?(High)

[상황의 복잡성]

단순함
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

복잡함
(High)

4. 직무를 수행하기 위해 항상 준비하고 있는 상태(각성)를 유지하였는가?(High) 아니면 준비 상태를 유지하지 못했는가?(Low) [각성도]

너무 바쁨
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

미리 대비
(High)

5. 새로운 상황이 나타났을 때, 쉽게 주의를 기울일 수 있을 정도로 여유가 있었는가?(High) 아니면 추가되는 상황을 파악할 여유가 없었는가?(Low) [정신적 여유]

여유 없음
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

여유 많음
(High)

6. 직무를 수행하기 위해 매우 집중하였는가?(High) 아니면 집중하지 못하였는가?(Low)? [집중 정도]

집중하지 못함
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

매우 집중함
(High)

7. 많은 상황/변수에 주의를 분배하였는가?(High) 아니면 한두 가지 상황/변수에만 주의를 집중하였는가?(Low) [주의자원분할]

한두 가지 상황/변수에 주의를 기울임
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

여러 상황/변수에 골고루 주의를 분배함
(High)

8. 발생한 상황을 이해하기 위해 수집한 정보의 양이 많았는가?(High) 아니면 정보의 양이 적었는가?(Low) [정보의 양]

적은 정보
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

많은 정보
(High)

9. 제공된 정보의 품질(정보의 형식, 내용)이 필요한 변수/증상을 파악하기 충분했는가?(High) 아니면 부족했는가?(Low) [정보의 질]

낮은 품질
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

높은 품질
(High)

10. 주어진 시나리오가 많이 경험(훈련, 실습, 실제경험)해 본 상황인가?(High) 아니면 경험해 보지 못한 상황인가?(Low) [상황의 친숙도]

적음 겪는 상황
(Low)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

많이 경험한 상황
(High)

2.4 인적수행도 측정 척도

3-2) 상황인식 (SACRI)(RO용)

- 정의:
 - SACRI는 Hogg et al.이 제안한 상황인식 진단용 설문지로 운전원이 발전소의 전반적인 상태를 나타내는 주요 변수들에 대해 **과거, 현재, 그리고 미래**에 일어날 상황 진단 및 인지 수준을 측정함.
- 측정 수단: 총 9개 문항으로 구성된 설문지
 - 과거/현재/미래 시점을 기준으로 시점별 주요 발전소 변수들의 추이를 묻는 3개 문항으로 구성됨
 - 설문지별 약 2분, E-0 진단 완료 후 설문 수행
- 결과 도출 방법: 설문답안을 토대로 다음 척도를 도출하여 평가
 - A'** : 발전소 변수들 중에서 변화가 없이 안정된 변수들을 구분할 수 있는 운전원의 능력을 나타내는 척도
 - R:S** : 변화하는 발전소 변수들의 범위를 운전원이 과소평가 또는 과대평가하는 정도를 나타내는 척도

표. SACRI 발전소 주요 변수 목록

번호	SACRI 설문변수
1	가압기 압력
2	가압기 수위
3	증기발생기 압력
4	증기발생기 수위
5	격납용기 압력
6	격납용기 방사선
7	RCS 평균온도
8	안전주입(Safety Injection) 유량
9	2차측 방사선

표. SACRI 산출변수

산출변수	의미
pCA	변화가 없는 변수를 운전원이 변화 없음으로 인지한 확률
pFA	변화가 없는 변수를 운전원이 변화가 있는 것으로 오인한 확률
pH	변화가 있는 변수를 운전원이 정확하게 인지한 확률
pM	변화가 있는 변수를 운전원이 변화가 없는 것으로 오인한 확률
pDe	변화가 있는 변수들의 비율
pNDe	변화가 없는 변수들의 비율

그림. SACRI 결과 도출 수식

$$A' = 1 - 0.25 \left[\left(\frac{pFA}{pH} \right) + \left(\frac{pM}{pCA} \right) \right]$$

2.4 인적수행도 측정 척도

3-2) 상황인식 (SACRI)(RO용)

그림. SACRI 설문지 ESDE(왼쪽), LOCA(중간), SGTR(오른쪽)

시나리오 수행 중 상황인식 평가를 위한 SACRI 설문지	
일시: 보직: 모듈:	
아래 질문들에 대해서, 우측의 답변 중 하나를 선택하여 주십시오.	
1. 이전 몇 분 전과 비교하여, RCS 평균온도는 어떻게 변화하고 있습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
2. 이전 몇 분 전과 비교하여, 가압기 수위는 어떻게 변화하고 있습니까?	증가함 /동일함 / 감소함
3. 이전 몇 분 전과 비교하여, 안전주입 유량은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
4. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 가압기 압력은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
5. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 증기발생기 압력은 어떻습니까?	1개 증가 / 2개 증가 / 모두 증가 / 모두 동일 / 1개 감소 / 2개 감소 / 모두 감소 / 동시에 증가와 감소
6. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 2차측 방사선은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
7. 현재 상태와 비교하여, 증기발생기 수위는 어떻게 변화하고 있습니까?	1개 증가 / 2개 증가 / 모두 증가 / 모두 동일 / 1개 감소 / 2개 감소 / 모두 감소 / 동시에 증가와 감소
8. 현재 상태와 비교하여, 격납용기 방사선은 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
9. 현재 상태와 비교하여, 격납용기 압력은 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	증가함 / 동일함 / 감소함

시나리오 수행 중 상황인식 평가를 위한 SACRI 설문지	
일시: 보직: 모듈:	
아래 질문들에 대해서, 우측의 답변 중 하나를 선택하여 주십시오.	
1. 이전 몇 분 전과 비교하여, 격납용기 압력은 어떻게 변화하고 있습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
2. 이전 몇 분 전과 비교하여, 증기발생기 수위는 어떻게 변화하고 있습니까?	1개 증가 / 2개 증가 / 모두 증가 / 모두 동일 / 1개 감소 / 2개 감소 / 모두 감소 / 동시에 증가와 감소
3. 이전 몇 분 전과 비교하여, 가압기 압력은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
4. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 가압기 수위는 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
5. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 격납용기 방사선은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
6. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 2차측 방사선은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
7. 현재 상태와 비교하여, 안전주입 유량은 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
8. 현재 상태와 비교하여, 증기발생기 압력은 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	1개 증가 / 2개 증가 / 모두 증가 / 모두 동일 / 1개 감소 / 2개 감소 / 모두 감소 / 동시에 증가와 감소
9. 현재 상태와 비교하여, RCS 평균온도는 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	증가함 / 동일함 / 감소함

시나리오 수행 중 상황인식 평가를 위한 SACRI 설문지	
일시: 보직: 모듈:	
아래 질문들에 대해서, 우측의 답변 중 하나를 선택하여 주십시오.	
1. 이전 몇 분 전과 비교하여, 격납용기 압력은 어떻게 변화하고 있습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
2. 이전 몇 분 전과 비교하여, 격납용기 방사선은 어떻게 변화하고 있습니까?	증가함 /동일함 / 감소함
3. 이전 몇 분 전과 비교하여, 가압기 압력은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
4. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 안전주입 유량은 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
5. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, RCS 평균온도는 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
6. 정상운전(100% 출력) 상태와 비교하여, 가압기 수위는 어떻습니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
7. 현재 상태와 비교하여, 2차측 방사선은 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	증가함 / 동일함 / 감소함
8. 현재 상태와 비교하여, 증기발생기 수위는 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	1개 증가 / 2개 증가 / 모두 증가 / 모두 동일 / 1개 감소 / 2개 감소 / 모두 감소 / 동시에 증가와 감소
9. 현재 상태와 비교하여, 증기발생기 압력은 향후 몇 분간 어떨 것으로 예상될니까?	1개 증가 / 2개 증가 / 모두 증가 / 모두 동일 / 1개 감소 / 2개 감소 / 모두 감소 / 동시에 증가와 감소

2.4 인적수행도 측정 척도

3-2) 상황인식 (SACRI)(SS용)

- 정의:
 - SS의 역할을 모든 모듈에 대한 Surveillance가 가능하도록 **감시 및 회복역할**에 초점을 맞추어 재정의함
 - 따라서, **과거 및 현재** 발전소 변수 상태 평가만 설문 문항을 새로 개발함
- 측정 수단:
 - 총 9개 문항으로 구성된 설문지
 - 설문지별 약 2분, E-0 진단 완료 후 설문 수행

표. SS용 SACRI 발전소 주요 변수 목록

번호	SACRI 설문변수
1	2차측 총 급수유량
2	2차측 방사선
3	증기발생기 압력
4	RCS 평균 온도
5	격납용기 압력
6	격납용기 방사선
7	격납용기 배수조
8	가압기 압력
9	가압기 수위

그림. SS용 SACRI 설문지

시나리오 수행 중 상황인식 평가를 위한 SACRI 설문지 (SS용)

일 시:

아래 질문들에 대해서, 해당 모듈 모두 확인해 주십시오.

	M1	M2	M3	M4	해당 없음
1. 증기발생기로의 총급수 유량이 33 kg/sec 미만인 모듈은 어떤겁니까?					
2. 2차측 방사선이 1.0 E ⁻⁶ microC/cc를 초과하는 모듈은 어떤겁니까?					
3. 증기발생기 압력이 86kg/cm ² 이상인 모듈은 어떤겁니까?					
4. RCS 평균온도가 135℃ 미만인 모듈은 어떤겁니까?					
5. 격납용기 배수조가 0m를 초과하는 모듈은 어떤겁니까?					
6. 가압기 압력이 121 kg/cm ² 이하인 모듈은 어떤겁니까?					
7. 가압기 수위가 17~92%를 만족하지 않는 모듈은 어떤겁니까?					
8. 격납용기 압력이 1.55 kg/cm ² 이상인 모듈은 어떤겁니까?					
9. 격납용기 방사선 준위가 10 ⁸ mRem/hr 이상인 모듈은 어떤겁니까?					

2.4 인적수행도 측정 척도

• 인적수행도 측정 장비

- 영상 촬영 장비: 운전원의 화면 및 LDP 녹화
- 마이크: 운전원 간 소통 및 보고 녹음
- 시선추적(아이트래커): 동공 움직임 및 주의(attention) 녹화

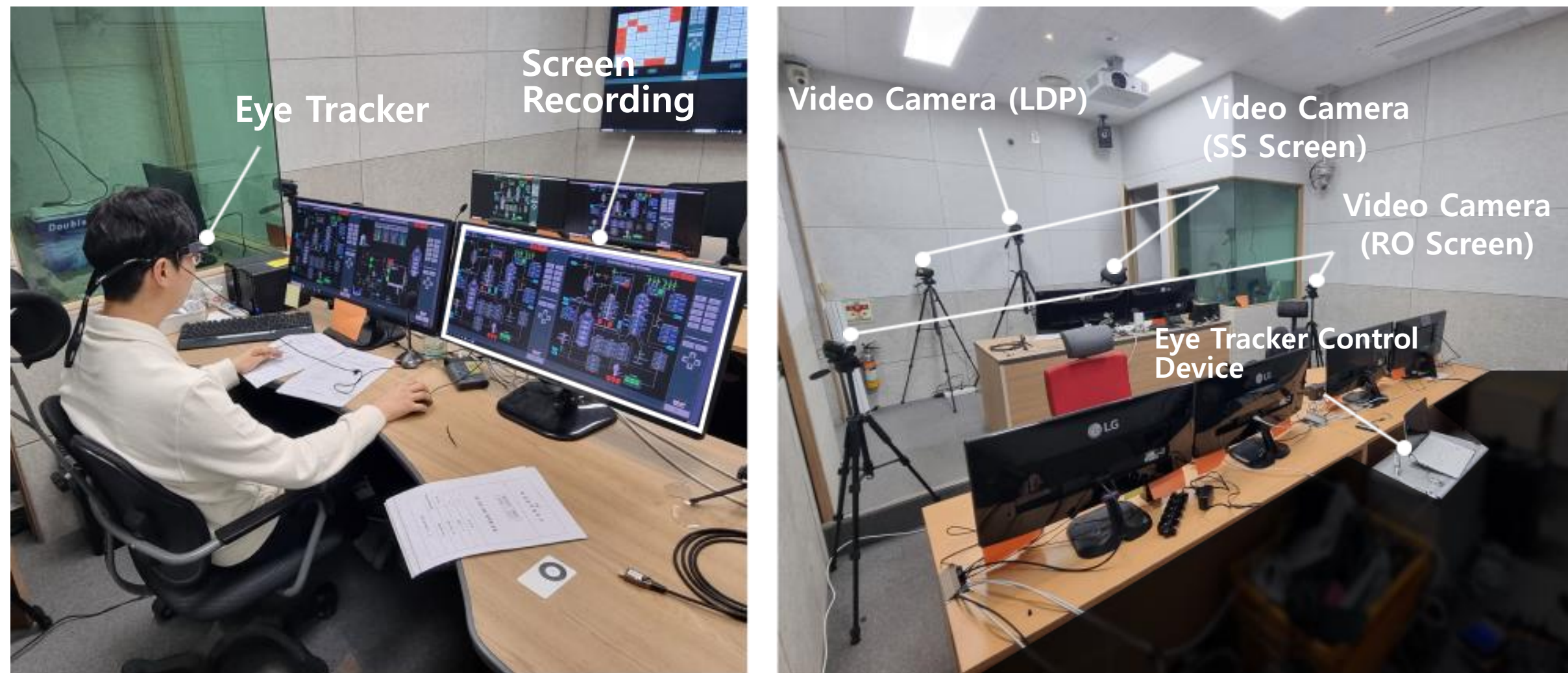


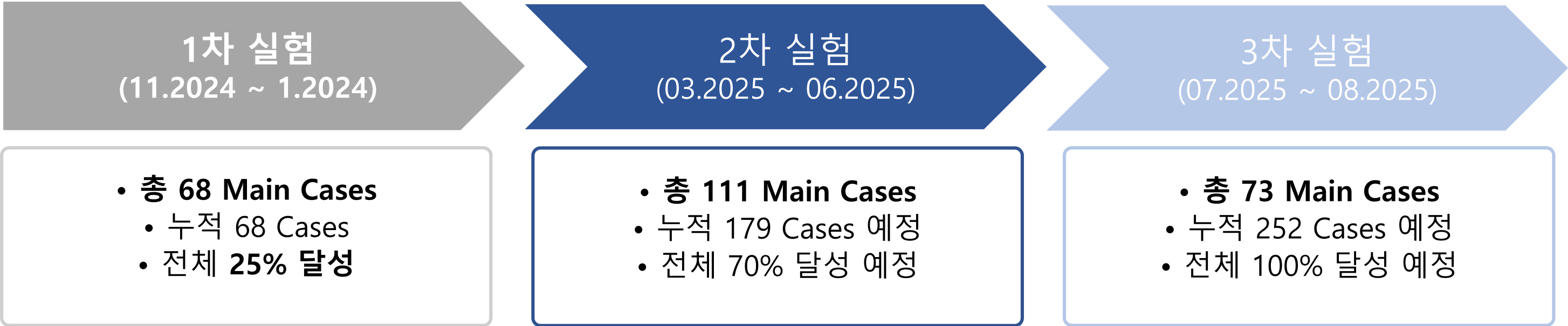
그림. 인적수행도 측정 환경 레이아웃

2.5 실험 전체 시나리오

- PSF, 비상사고, 그리고 안전계통 고장을 포함한 총 252가지 시나리오 구축
 - 기관별 126가지 시나리오 수행

Scenario	Details	Conditions	Total
Original Off-normal Conditions	Select based on the feasible experiment scenarios operable in the simulator	Loss of Coolant Accident (LOCA)	84
		Excess Steam Demand Event (ESDE)	
		Steam Generator Tube Rupture (SGTR)	
Off-normal Conditions + Passive Safety System Failure	Failure of PSS occurs simultaneously with off-normal scenarios	LOCA + PSS Fail	84
		ESDE + PSS Fail	
		SGTR + PSS Fail	
Off-normal Conditions + Automatic System Failure	Failure of AS occurs simultaneously with off-normal scenarios	LOCA + AS Fail	84
		ESDE + AS Fail	
		SGTR + AS Fail	

- 전체 시나리오를 3차에 걸쳐 실험 수행



2.6 실험 참가자 및 시나리오 수행 현황

- 1차 실험 수행 완료 (총 122회 완료)

	KAIST	UNIST																																
실험 참여인원	<ul style="list-style-type: none">• (25년 5월 기준) 총 36명• 소속 학과: 원자력 30 / 기계 4 / 생화공 2	<ul style="list-style-type: none">• (25년 5월 기준) 총 21명• 소속 학과: 원자력 11 / 기계 7 / 지구환경 1 / 화학 2																																
실험 시나리오	<table><tr><th colspan="2">Train Case (총 29회)</th><th colspan="2">Main Case (총 60회)</th></tr><tr><td>LOCA</td><td>8</td><td>AMO 0.5</td><td>15</td></tr><tr><td>SGTR</td><td>12</td><td>AMO 1</td><td>15</td></tr><tr><td>ESDE</td><td>9</td><td>AMO 2</td><td>30</td></tr></table>	Train Case (총 29회)		Main Case (총 60회)		LOCA	8	AMO 0.5	15	SGTR	12	AMO 1	15	ESDE	9	AMO 2	30	<table><tr><th colspan="2">Train Case (총 26회)</th><th colspan="2">Main Case (총 62회)</th></tr><tr><td>LOCA</td><td>15</td><td>AMO 0.5</td><td>12</td></tr><tr><td>SGTR</td><td>15</td><td>AMO 1</td><td>28</td></tr><tr><td>ESDE</td><td>9</td><td>AMO 2</td><td>22</td></tr></table>	Train Case (총 26회)		Main Case (총 62회)		LOCA	15	AMO 0.5	12	SGTR	15	AMO 1	28	ESDE	9	AMO 2	22
Train Case (총 29회)		Main Case (총 60회)																																
LOCA	8	AMO 0.5	15																															
SGTR	12	AMO 1	15																															
ESDE	9	AMO 2	30																															
Train Case (총 26회)		Main Case (총 62회)																																
LOCA	15	AMO 0.5	12																															
SGTR	15	AMO 1	28																															
ESDE	9	AMO 2	22																															

3. 실험 결과

3.1 1,2차 실험 결과 (KAIST)

설문지 기반 인적수행도 통계 분석 (ANOVA)

- 운전원별 사고 모듈 수 (AMO) (전체)
 - 모든 인적수행도(상황인식, 작업부하)에 모든 AMO 수준 간 $p\text{-value} < 0.05$ 로 통계적으로 유의미한 차이가 존재
 - 사후분석(Tukey HSD) 결과 작업부하와 상황인식 모두 (0.5, 1), (1, 2), (2, 0.5) 변수간 유의미한 차이가 존재

독립변수	Levels	MCH (작업부하)			SART (상황인식)		
		평균	표준편차	P-value	평균	표준편차	P-value
AMO	0.5	2.92	1.265	< 0.001	27.10	7.387	< 0.001
	1	3.88	1.847		22.68	9.065	
	2	5.20	1.895		17.63	8.071	

< AMO별 Tukey-HSD >

AMO	SART		MCH	
	평균차	P-value	평균차	P-value
(0.5, 1)	4.42	0.044*	-0.95	0.042*
(1, 2)	5.05	0.004*	-1.32	< 0.001*
(2, , 0.5)	-5.05	< 0.001*	2.27	< 0.001*

3.1 1,2차 실험 결과 (KAIST)

설문지 기반 인적수행도 통계 분석 (ANOVA)

• 운전원별 사고 모듈 수 (AMO)

- RO와 SS 모두 모든 인적수행도(상황인식, 작업부하)에 $p\text{-value} < 0.05$ 로 통계적으로 유의미한 차이가 존재
- 사후분석(Tukey HSD) 결과 작업부하는 0.5 vs 2와 1 vs 2에서, 상황인식은 0.5 vs 2에서 유의미한 차이가 존재
 - AMO가 0.5인 경우, 모듈 책임 운전원만 직접 직무 수행하며 나머지 운전원은 직무 감시 및 회복 역할만 수행함
 - 따라서, AMO=0.5와 1은 RO 입장에서 직무유형이 동일하므로, 동일한 직무로 인지하며 수행도가 유사하게 도출

독립변수c	Levels	MCH (작업부하)			SART (상황인식)		
		평균	표준편차	P-value	평균	표준편차	P-value
AMO (RO)	0.5	3.03	1.326	< 0.001	27.10	7.867	< 0.001
	1	3.86	1.903		22.90	8.989	
	2	4.92	1.797		19.02	7.2370	
AMO (SS)	0.5	2.56	1.014	< 0.001*	27.11	5.904	< 0.001*
	1	3.92	1.782		22.17	9.628	
	2	5.95	1.988		13.86	8.850	

< AMO별 Tukey-HSD RO(위), SS(아래) >

	SART		MCH	
AMO	평균차	P-value	평균차	P-value
(0.5 , 1)	4.2	0.107	-0.83	0.158
(1 , 2)	3.88	0.081	-1.05	0.021*
(2, , 0.5)	-8.08	< 0.001*	1.88	< 0.001*

	SART		MCH	
AMO	평균차	P-value	평균차	P-value
(0.5 , 1)	4.94	0.4	-1.36	0.204
(1 , 2)	8.30	0.027*	-2.05	0.007*
(2, , 0.5)	-13.3	0.001*	3.4	< 0.001*

3.1 1,2차 실험 결과 (KAIST)

설문지 기반 인적수행도 통계 분석 (ANOVA)

- 사고 동질성 (AH)

- 모든 인적수행도(상황인식, 작업부하)에 $p\text{-value} < 0.05$ 으로 통계적으로 유의미한 차이가 존재
 - RO와 SS 모두 두 모듈 간 사고 유형이 다를 시 작업부하가 높아지고, 상황인식이 낮아짐
- RO의 AH 수준 간 상황인식 및 작업부하 차이는 SS 보다 적음
 - => 이는 SS의 감시 및 회복지시에 의해 작업부하가 낮아지고 상황인식을 높아짐을 시사함

독립변수	Levels	MCH (작업부하)			SART (상황인식)		
		평균	표준편차	P-value	평균	표준편차	P-value
AH (RO, AMO = 2)	동일	4.30	1.489	0.007*	21.77	6.976	0.003*
	다름	5.53	1.889		16.27	6.797	
AH (SS, AMO = 2)	동일	4.75	1.215	0.001*	18.00	6.755	0.012*
	다름	7.40	1.776		8.90	8.762	

3.2 1,2차 실험 결과 (UNIST)

설문지 기반 인적수행도 통계 분석 (ANOVA)

- 운전원별 사고 모듈 수 (AMO)
 - 상황인식 정확도(SACRI A')에 $p\text{-value} < 0.05$ 로 통계적으로 큰 유의미한 차이가 존재
- 사고 동질성 (AH)
 - 자신감 대비 정확도(SACRI R:S)에 통계적으로 큰 유의미한 차이가 존재

독립변수	Levels	작업부하(MCH)		상황인식 (SART)		직무 소요시간(min)		상황인식 정확도 (SACRI A')		자신감 대비 정확도 (SACRI R:S)	
		F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Accident Module / Operator	0.5	0.946542	0.390104	0.175488	0.839199	70.33218	<0.001	3.175072	0.046123	1.873027	0.157911
	1										
	2										
Operator Role	Reactor Operator	0.21885	0.64051	1.119729	0.291461	-	-	-	-	-	-
	Shift Supervisor										
운전원 소속	원자력 전공	16.58365	<0.001	22.98717	<0.001	0.894307	0.345639	2.792336	0.097874	16.87587	<0.001
	그외										
Mental Model (AMO 2)	같음	1.47617	0.229298	0.581142	0.448954	2.672047	0.107541	0.467948	0.498569	4.917395	0.032053
	다름										

3.3 1,2차 실험 결과 (UNIST)

HuREX 분석결과 (Response IGT)

- 총 분석 완료 시나리오 수: 14건
- 총 UA 수: 71개 / 총 Recovery 수: 15개 / 총 Error 수: 56개
 - AMO별 UA Recovery율은 AMO = 0.5가 AMO = 1보다 높다.
 - 현재 시나리오 변수 간 분석된 시나리오 수가 부족하므로, 분석 데이터 확보 후 변수별 인적오류 및 회복 추이 도출 가능

		시나리오(모듈) 수	UA	Recovery	Error	Recovery Rate	UA/모듈(시나리오) 수
AMO	0.5	4(4)	10	8	2	0.8	2.5
	1	9(18)	59	7	52	0.119	3.28
	2	1(4)	2	0	2	0	0.5
시나리오별	LOCA	4	10	4	6	0.4	2.5
	ESDE	13	38	6	32	0.158	2.92
	SGTR	9	23	15	18	0.651	2.56

3.3 1,2차 실험 결과 (UNIST)

HuREX 분석결과 (Response IGT)

- 직무유형(Task Type) 비교 분석:
 - 가장 많이 발견된 UA 직무유형은 **Information Gathering**으로, 총 49개로 전체 UA 중 **69.01% (49/71)**
 - Recovery의 Initiator는 **SS = 7**으로 지시에 의해 직무회복 수행에 제일 많이 기여함 (Self = 4, 동료 RO = 4)

직무유형	오류모드	UA	Recovery	Initiator	Error	총 UA
IG-Indicator	EOO	3	0	-	3	21
	EOC	18	6	Self(2) / RO(2) / SS(2)	12	
IG-Comparison	EOO	3	0	-	3	16
	EOC	13	2	RO(1) / SS(1)	11	
IG-Synthesis	EOC	3	2	RO(1) / SS(1)	1	3
IG-Abnormality	EOO	2	0	-	2	5
	EOC	3	0	-	3	
IG-Value	EOO	3	1	SS	2	4
	EOC	1	0	-	1	
IG-Trend	EOO	1	0	-	1	1

직무유형	오류모드	UA	Recovery	Initiator	Error	총 UA
EX-Continuous	EOC	7	-		7	7
EX-Discrete	EOC	6	2	Self(1) / SS(1)	4	6
EX-Manipulation	EOO	1	0	-	1	3
	EOC	2	1	Self(1)	1	
EX-Dynamic	EOC	2	1	SS(1)	1	2
RP-Step	EOO	3	0	-	3	3

4. 향후 계획



Korea Advanced Institute of
Science and Technology



NICA Nuclear I&C and Autonomous
Operation Lab

4.1 실험 계획

- 2차 실험 진행 중



	KAIST			UNIST		
실험 참여인원	<ul style="list-style-type: none">• (25년 5월 기준) 총 36명• 소속 학과: 원자력(21) / 기계(4) / 생화공(2)			<ul style="list-style-type: none">• (25년 5월 기준) 총 21명• 소속 학과: 원자력(9) / 기계(9) / 지구환경(1) / 그 외(2)		
실험 시나리오		수행 완료	수행 예정		수행 완료	수행 예정
	1차	24		1차	46	
	2차	36	28	2차	16	31
	3차		38	3차		33

4.2 자료 분석 계획

- 1차 분석 수행 중

인적수행도		완료	수행 예정			
작업부하/ 상황인식	척도	총	1차 분석 (~ 07.2025)	2차 분석 (08.2025 ~ 10.2025)	3차 분석 (10.2025 ~ 11.2025)	총
	MCH	122	59	71	0	130
	SART	122	59	71	0	130
	SACRI	122	59	71	0	130
오류모드/ 직무 수행시간	HuREX	14	89	89	60	238

감사합니다



Korea Advanced Institute of
Science and Technology



NICA Nuclear I&C and Autonomous
Operation Lab