



.....

CNS 시뮬레이터를 사용한 운전원과 학생 간의 인적수행도 비교 실험에 관한 연구

.....

Bumjun Park^a, Sungheon Lee^a, Taewon Yang^a, Jeong Hun Choi^b,
Jooyoung Park^c, Awwal M. Arigi^a Ronald L. Boring^c, Jonghyun Kim^{a*}

^aChosun University

^bKorea Hydro & Nuclear Power Co. LTD

^cIdaho National Laboratory

Contents



1. Introduction

2. 실험 설계

3. 실험 결과

4. 결론



1. Introduction



1.1 배경

▶ 인간 신뢰도 분석 (Human Reliability Analysis, HRA)

- 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)에서 고려되는 Human error에 대한 실패 확률을 정량화 방법
- 일반적으로, HRA 방법은 데이터를 기반으로 인적 오류 확률을 추정

▶ HRA 현안: 실제 운전원 오류 데이터 부족

- 원자력발전소에서 수행되는 운전원 직무에 대한 실제 오류 데이터가 부족함.
- 데이터 부족으로 인해 적절한 인적오류확률(Human Error Probability, HEP)의 예측이 어려움.
- 이러한 문제를 해결하기 위해 훈련용 시뮬레이터, 타 산업에서의 데이터 및 전문가 판단을 활용하고 있으나 근본적인 해결책이 되지는 못함.

1. Introduction

1.1 배경

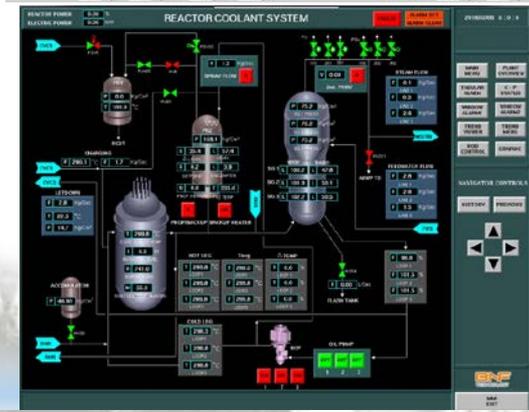
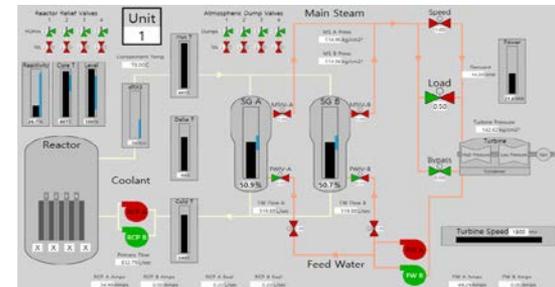
▶ 데이터 부족 문제를 해결하기 위한 Idaho National Lab(INL)의 접근 방식

- Simplified simulator 사용
 - 실제 운전원 및 Full Scope 시뮬레이터를 통한 데이터 수집은 높은 비용과 운전원 섭외의 어려움 등으로 인한 제한이 있음
 - 이를 보완하기 위해 단순화된 시뮬레이터와 학생 실험 데이터를 통해 실제 운전원 데이터를 추론하고자하는 연구를 진행 중

< Full-scope simulator :
Human System Simulation Laboratory >



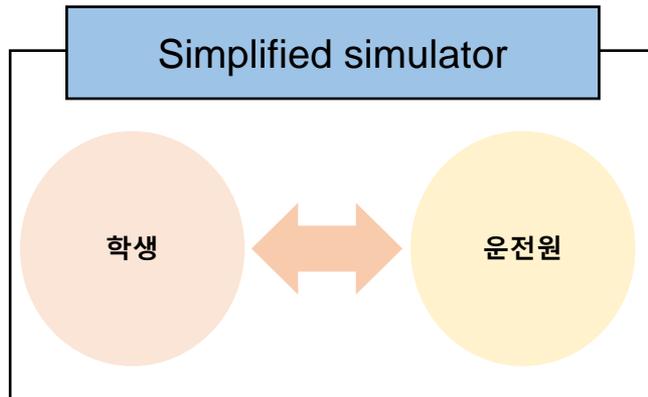
< Rancor microworld & CNS simulator >



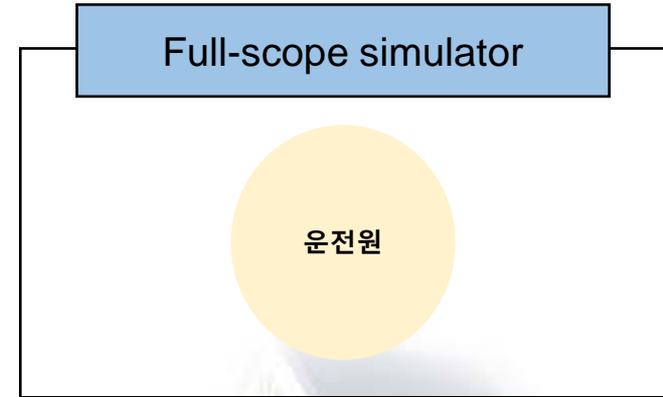
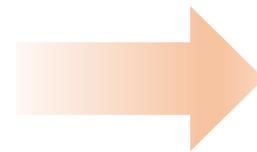
1.1 배경

▶ 데이터 부족 문제를 해결하기 위한 Idaho National Lab(INL)의 접근 방식

- 학생 기반 데이터 수집
 - 간소화된 시뮬레이터를 토대로 합리적인 비용으로 다양한 HRA 데이터 수집
 - 그러나, 학생과 실제 운전원 간의 수행도가 얼마나 차이가 나는지에 대한 연구는 거의 진행된 바 없음
 - 이를 위해 INL과 조선 대학교의 협력 과제 수행 중에 있음



실제 운전원과 학생 간의 인적 수행도 비교를 위한 실험 연구



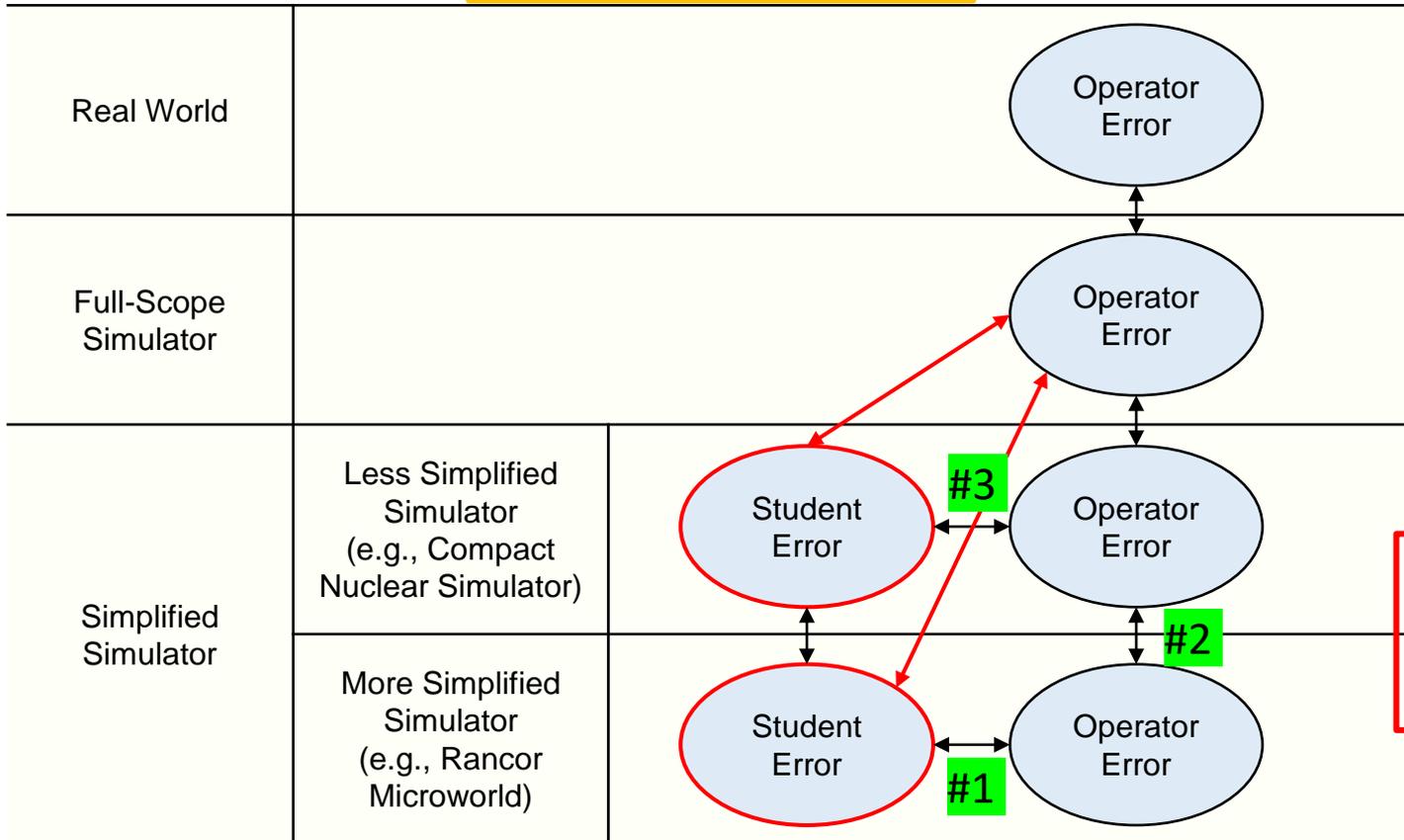
학생 대상을 Full-Scope 시뮬레이터에 적용할 수 있을지 식별

1. Introduction

1.1 배경

#3: CNS를 이용한 운전원과 학생 간의 인적수행도 차이 조사 (2021, 진행중)

- 32 subjects the experiment (Operator: 16, Student: 16)



#2: 운전원이 복잡성이 다른 시뮬레이터를 사용했을 때의 인적수행도 차이 조사 (2021, 완료)

#1: Rancor Microworld를 이용한 운전원과 학생 간의 인적 수행도 차이 조사 (2020, 완료)

- 40 subjects completed the experiment (Operator: 20, Student: 20)
- Analysis of collected data

1.2 연구 목적

- ▶ **CNS 시뮬레이터를 이용한 운전원과 학생 간의 인적 수행도 비교**
- ▶ **주요 내용**
 - 무작위 요인 설계를 적용한 실험
 - 시나리오 및 절차서 개발 (정상 운전 2개, 비상 운전 2개)
 - 실험 수행
 - 5개의 인적 수행도 측정
 - Situation awareness, Workload, Time, Error, Eye-movement
 - 데이터 정리 및 결과 분석



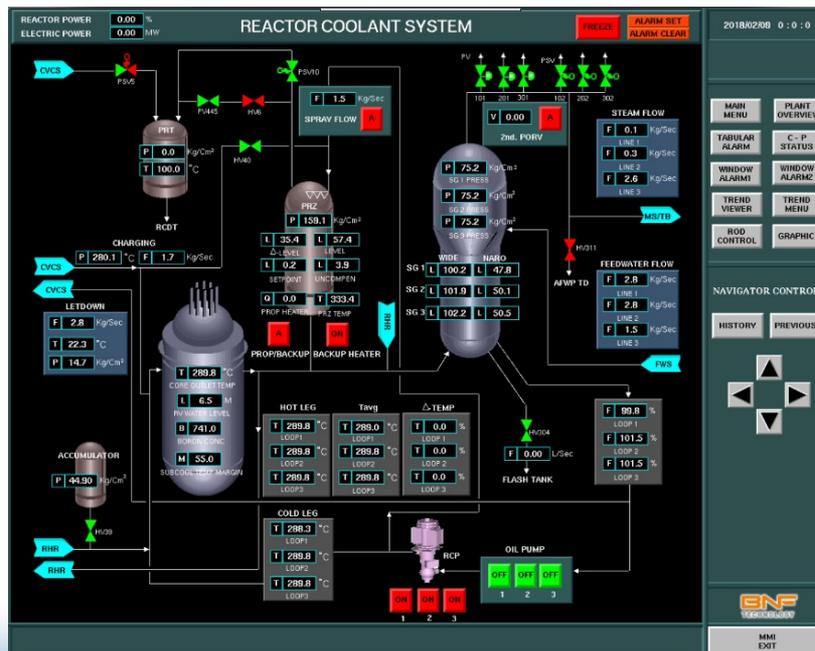
2. 실험 설계



2.1 시뮬레이터 소개

▶ Compact Nuclear Simulator

- 한국원자력연구원(KAERI)에서 개발한 소형 원자력 시뮬레이터
- Westinghouse 3-Loop PWR 930MWe의 발전소 모델에 기반
- 발전소 1, 2차측과 격납용기까지 단순하게 모델링한 시뮬레이터
 - 1차 측의 Reactor Coolant System(RCS) 뿐만 아니라 전력계통까지 모델링 됨
 - 간단한 비상 사고 모사 및 출력 증/감발 운전이 가능



2.2 실험 설계 구성

▶ Randomized factorial experiment design

- 상호작용을 보기 위한 교차 설계
- 두 개의 독립 변수(시나리오 유형, 실험자 유형)가 사용

시나리오 유형	실험자 유형	
	Operator (16명)	Student (16명)
Non-event	Situation awareness Workload Time Error Eye-movements	Situation awareness Workload Time Error Eye-movements
Event	Situation awareness Workload Time Error Eye-movements	Situation awareness Workload Time Error Eye-movements

2.2 실험 설계 구성

▶ CNS 시나리오

- 시나리오는 Non-event 및 Event 상황의 시나리오로 분류
 - Non-event 시나리오
 - ▶ 출력 증발, 출력 감발과 같은 정상 운전 상황
 - Event 시나리오
 - ▶ 비상 운전 상황

Type of scenario	Specific scenario	Procedure
Non-event	Start-up operation (2% to 50%)	종합-01 (Start-up)
	Shut-down operation (100% to Hot Standby)	종합-02 (Shut-down)
Event	A steam generator tube rupture with an indicator failure for the steam generator level (SGTR)	비상-00 (원자로 트립시 조치) 비상-03 (증기발생기 관 파열)
	Loss of Feedwater (LOFW)	비상-00(원자로 트립시 조치) 보조-1.1 (안전주입 종료)

2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

▶ 절차서

- Westinghouse 기반의 절차서로 수정

Compact Nuclear Simulator Procedure	
절차서 번호	
개정 번호	
OP-01	01
2% ~ 50% 출력 증발	
절차서 총 페이지 : 13	

CNS 비상 운전 절차서	
절차서번호	개정번호
비상-00	-
원자로 트립 또는 SI	
승인	-
일자	2020. 02. 24
승인 기관	CSU HERA (73.05.18)
PNSC서면결의번호	01 - 09차
절차서 총 페이지수 : 15	

2.2 실험 설계 구성

▶ 인적 수행도 수집 방법

- 대부분의 인적수행도 데이터는 설문지와 아이트래커를 기반으로 수집 됨

Method	All the items collected	Human performance
Questionnaire	<ul style="list-style-type: none">• General information for each subject• Situation awareness scores from SART• Workload from MCH	<ul style="list-style-type: none">• Situation awareness• Workload
Eye-tracker	<ul style="list-style-type: none">• Video record• Area of interest (AOI)• Gaze point• A picture indicating frequency of subject focus• Excel output• Workload from blinking data	<ul style="list-style-type: none">• Time to completion• Error rate• Eye movements• Workload
Laptop & camcorder	<ul style="list-style-type: none">• Screen recording• Procedure video recording	<ul style="list-style-type: none">• Error rate• Time to completion

2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

일반 정보 설문지 (운전원)

본 설문지의 결과는 연구 이외의 다른 목적으로는 사용하지 않으며, 설문과 관련된 개인 정보는 외부로 누출되지 않을 것을 약속드립니다.

1. 성별: 남 / 여

20-25세	26-30세	31-35세	36-40세	41-45세	46-50세	50세이상

2. 현 부서 및 직책 :

3. 발전소 경력 :

기간	발전소	부서	보직
년 개월			

4. 면허소지여부를 모두 기술해 주세요 (예, WEC RO 면허, APR1400 SRO).

- ①
- ②
- ③

일반 정보 설문지 (학생)

본 설문지의 결과는 연구 이외의 다른 목적으로는 사용하지 않으며, 설문과 관련된 개인 정보는 외부로 누출되지 않을 것을 약속드립니다.

1. 성별: 남 / 여

20-25세	26-30세	31-35세	36-40세	41-45세	46-50세	50세이상

2. 학과 / 학위과정 / 학년 : _____ / _____ / _____

3. 시뮬레이터 조작 또는 발전소 시스템 & 운전 관련 수업 경험 (경험이 없을 경우 없다고 작성해도 무관)

기간	수업명 또는 시뮬레이터	설명
년 개월		
년 개월		
년 개월		

4. 가장 최근에 시뮬레이터를 조작해보거나 발전소 시스템 또는 운전관련 수업을 받은 때는 언제입니까?

2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

< MCH 설문지 (작업부하) >



< SART 설문지 (상황인식) >

- 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)
- 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)
- 감시해야 할 변수의 수량이 적었는가?(Low) 아니면 많았는가?(High) [상황의 복잡성]
 단순함 (Low) [1 2 3 4 5 6 7] 복잡함 (High)
- 직무를 수행하기 위해 항상 준비하고 있는 상태(각성)를 유지하였는가?(High) 아니면 준비 상태를 유지하지 못했는가?(Low) [각성도]
 너무 배회 (Low) [1 2 3 4 5 6 7] 미리 대비 (High)
- 새로운 상황이 나타났을 때, 쉽게 주의를 기울일 수 있을 정도로 여유가 있었는가?(High) 아니면 추가되는 상황을 파악할 여유가 없었는가?(Low) [정신적 여유]
 여유 있음 (Low) [1 2 3 4 5 6 7] 여유 없음 (High)
- 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)
- 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)
- 발생된 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)
- 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)
- 주어진 시나리오가 많이 경험(훈련, 실습, 실제경험)에 본 상황인가?(High) 아니면 경험해 보지 못한 상황인가?(Low) [상황의 진속도]
 처음 겪는 상황 (Low) [1 2 3 4 5 6 7] 많이 경험한 상황 (High)

2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

▶ 오류율(Error rate) 및 직무당 완료 시간 분석

- 지시되는 절차에서 벗어나는 수행을 했을 경우 오류로 판단
- Procedure – Step – Instruction – Task 구조
- $Error\ rate = \frac{Number\ of\ error}{Number\ of\ task}$
- 비디오(화면 녹화, 절차서, 아이트래커) 기록 영상을 사용함.

< 2%~50%까지 출력 증발 >

단계	Contents	직무 동사	Task Type	Error Mode	Time	직무 수행 시간	Description
1	목적		RP	Entry			
1.1	이 절차서는 원자로의 출력을 2%에서 50%까지 증발하는데 필요한 운전 절차를 제공한다.	확인				20	
2	주의사항		RP	Entry			
2.1	"제어봉 저-저 삼입한계 (CONT BANK LO-LO LIMIT)" 경보가 발생하면 즉시 봉산을 비상 주입하여야 한다.	확인					
2.2	출력을 증발하는 동안 "봉산주입(BOR)"이나 "회석(DIL&ALT DIL)"으로 Reactivity Control System의 Tref/Tavg Mismatch ΔT를 ±1°C 이내로 유지해야 한다.	확인					
2.3	급격한 반응도 상승을 방지하기 위해 "Makeup Mode"의 "Makeup Water"를 과도하게 주입하지 않아야 한다.	확인					
2.4	위의 사항을 확인하였으면 단계 3으로 이동한다.	확인/이동	RP	Step		26	
3	초기 조건 확인		RP	Entry			
3.1	출력 증발 수행을 위해 다음이 모두 만족하는지 확인한다.						
3.1.1	제어봉(CBA, CBB, CBC)이 모두 인출	확인	IG	Indicator		35	1. 시간: 17:19 2. 현재상황: CBD 제어봉 218 Step 3. 수행: CBD 제어봉 수동으로 228 Step까지 인출함. 4. 결과: 조건 확인 단계에서 제어봉 수동 인출 수행하여 추후, 발전소 출력 거동이 빠르게 변화함. 5. 비교: CBD 제어봉 수동으로 228 Step까지 인출하여 절차서에 없는 직무 수행을 수행함. (OT-Manipulation)
3.1.2	주증기관 차단 밸브 (FWS-HV108/208/308) 개방	확인	IG	Indicator		95	
3.1.3	증기압력모드(TBN-Press Setpoint Control) "Manual (M)"	확인	IG	Indicator		102	
3.1.4	원자로냉각재펌프(RCS-RCP) 3대가 운전 중	확인	IG	Indicator		112	
3.1.5	복수 펌프 (CS-Condensate Pump 1) 1대 운전 중	확인	IG	Indicator		125	
3.1.6	주 급수 펌프 (FWS-FW Pump 1) 1대 운전 중	확인	IG	Indicator		130	
3.1.7	저출력 급수 조절 밸브(FWS-FV479/489/499)가 "Auto"	확인	IG	Indicator		175	
3.2	위의 조건이 모두 만족하면 단계 4로 이동한다.	확인/이동	RP	Step		180	

2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

▶ 실험자

실험자 유형	실험자 수	설명
운전원	16	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 운전 면허가 있으며 한빛 원자력 발전소에서 근무하는 운전원(3명 제외)
학생	16	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 발전소 계통에 대한 지식을 갖추고 학부 수업 '원자로 운전 및 시뮬레이터 실습' 을 수강한 원자력 공학과 학생

No	Current position	Working Experiences (yr)	License	Age (yr)
1	RO	4	OPR-1000 RO	26~30
2	SRO	9	OPR-1000 TO / OPR-1000 SRO	41~45
3	TO	10	Hanbit NPP Unit 3 RO 01, RO 02, AO 1, EO, TO / OPR-1000 RO, SRO	36~40
4	TO	10	Hanbit NPP Unit 4 RO 01, RO 02, AO 1, EO, TO / OPR-1000 RO	41~45
5	Instructor	16	WH-1000 SRO / RO	46~50
6	TO	5	OPR-1000 RO	36~40
7	SRO	16	WH-1000 SRO / RO	41~45
8	EO	6	OPR-1000 RO	26~30
9	RO	11	OPR-1000 SRO	41~45
10	TO	6	WH-1000 RO	41~45
11	TO	13	OPR-1000 SRO	41~45
12	RO	13	N/A	41~45
13	Instructor	14	OPR-1000 SRO / RO	41~45
14	EO	10	MCR Experience (10 years)	41~45
15	TO	17	WH-1000 SRO / RO	41~45
16	EO	9	MCR Experience (9 years)	41~45

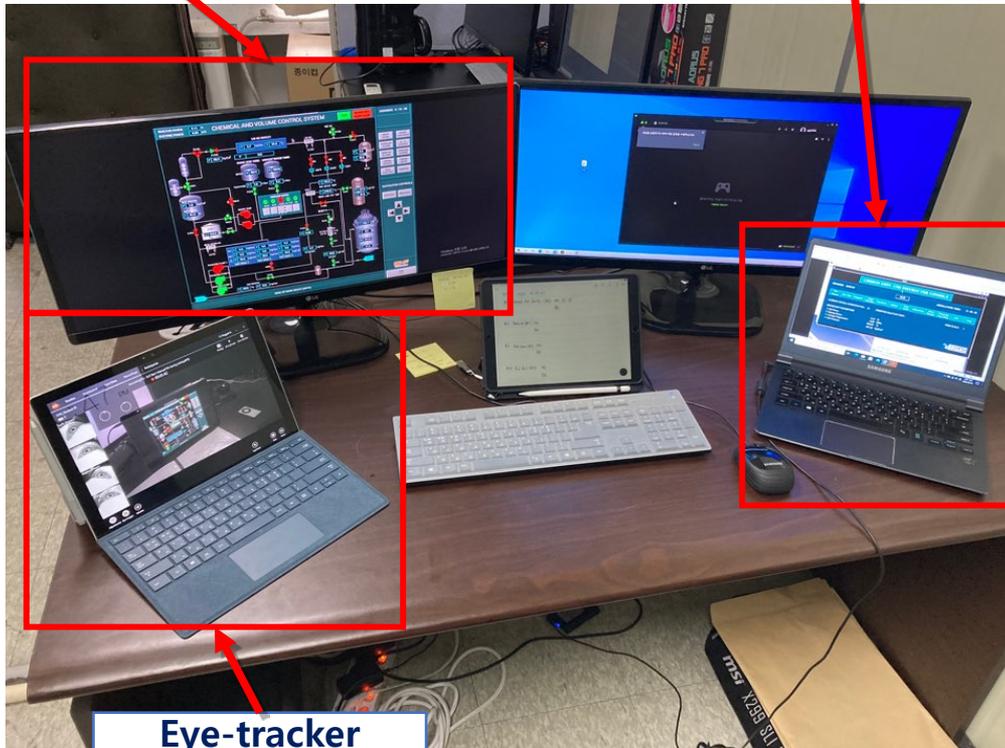
2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

▶ 장비

Screen recording

CNS main laptop

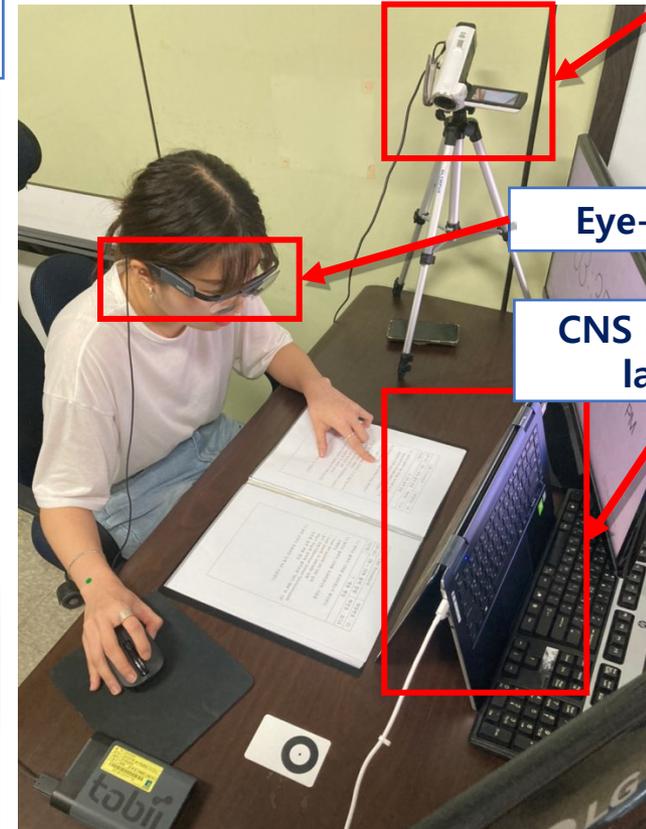


Eye-tracker laptop

Camcorder

Eye-tracker

CNS interface laptop



2. 실험 설계

2.2 실험 설계 구성

▶ 교육 및 훈련

- CNS 친숙화
 - 실험을 수행하기 앞서, 실험자에게 프레젠테이션을 통해 실험의 개요를 설명
 - 실험자는 CNS를 조작해보며 친숙화 시간을 갖음
 - 시뮬레이터 교육 및 훈련은 약 90분 가량 소요



3. 실험 결과



3. 실험 결과

3.1 통계 분석

▶ 개요

- 두 개의 독립 변수: Type of subject & Type of event
 - Type of subject: 운전원과 학생
 - Type of event: Non-event and Event
- 32명의 실험자가 참여함(운전원: 16명, 학생: 16명)
- 5개의 인적 수행도 분석: 작업부하, 상황인식, Time, Error rate, Blink rate
- Statistical analysis software: IBM SPSS Statistics
- 통계 분석 방법: ANOVA test, Pearson correlation analysis
 - ANOVA test: 신뢰도 구간 95% 에서 수행
 - ▶ 유의확률(p)이 5% 이내이면 집단 간에 유의한 차이가 있는 것으로 판단함



3. 실험 결과

3.2 분산 분석

▶ ANOVA test

Human Performance	Categorization	Independent Variable					
		Type of subject (operator vs student)		Type of event (non-event vs event)		Type of subject * Type of event	
		F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
Workload	MCH	1.319	0.253	42.361	0.000**	0.147	0.702
Situation awareness	SART	0.570	0.452	44.833	0.000**	0.059	0.808
Time	Average time to complete a step	4.658	0.033*	897.032	0.000**	3.308	0.071
	Average time to complete an instruction	1.114	0.293	351.892	0.000**	0.218	0.641
	Average time to complete a task	2.198	0.141	355.746	0.000**	0.594	0.442
Error	The number of errors	14.360	0.000**	3.347	0.070	0.615	0.435
	Error rate	10.754	0.001**	0.094	0.760	0.155	0.695
Blink rate	Blinking Counts	0.822	0.366	0.407	0.525	0.376	0.541
	Blinking Rate	0.163	0.687	0.248	0.619	0.268	0.605

3. 실험 결과

3.2 분산 분석

▶ ANOVA test 결과 요약

- 작업부하, 상황 인식, 직무 당 평균 수행 시간, Blink rate에서는 통계적으로 운전원과 학생 간의 유의한 차이는 나타나지 않음
- Error rate의 경우 통계적으로 유의한 차이를 보임
 - 학생(평균:0.017)의 오류율이 운전원(평균:0.005)의 오류율보다 높은 것이 확인됨

인적수행도	측정 방법	평균 값	독립 변수			
			Type of subject		Type of event	
			운전원	학생	정상	비상
작업부하	MCH	3.29	3.13	3.45	2.36	4.22
상황인식	SART	26.34	25.86	26.83	30.64	22.05
오류	Error rate [#/task]	0.011	0.005	0.017	0.012	0.010
시간	Average time to complete a step (sec)	116.49	122.34	110.59	198.43	34.56
	Average time to complete an instruction (sec)	22.72	23.34	22.09	33.80	11.64
	Average time to complete a task (sec)	19.69	20.34	19.03	28.01	11.37
동공 운동	Blink counts [#]	476.30	526.73	425.88	511.77	440.84
	Blink rate [#sec]	0.31	0.32	0.30	0.30	0.33

3. 실험 결과

3.3 상관 분석

** : 상관관계가 0.01 수준에서 유의함

* : 상관관계가 0.05 수준에서 유의함

All subjects	N	Correlation coefficient				
		1. MCH	2. SART	3. Time	4. Error rate	5. Blink rate
1. MCH	128	1				
2. SART	128	-0.639**	1			
3. Time	128	-0.440**	0.392**	1		
4. Error	128	0.224**	-0.107	-0.041	1	
5. Blink	128	0.047	-0.203*	0.014	-0.071	1

Operator	N	Correlation coefficient				
		1. MCH	2. SART	3. Time	4. Error rate	5. Blink rate
1. MCH	64	1				
2. SART	64	-0.569**	1			
3. Time	64	-0.498**	0.377**	1		
4. Error	64	0.139	0.027	0.033	1	
5. Blink	64	0.155	-0.304*	-0.037	0.013	1

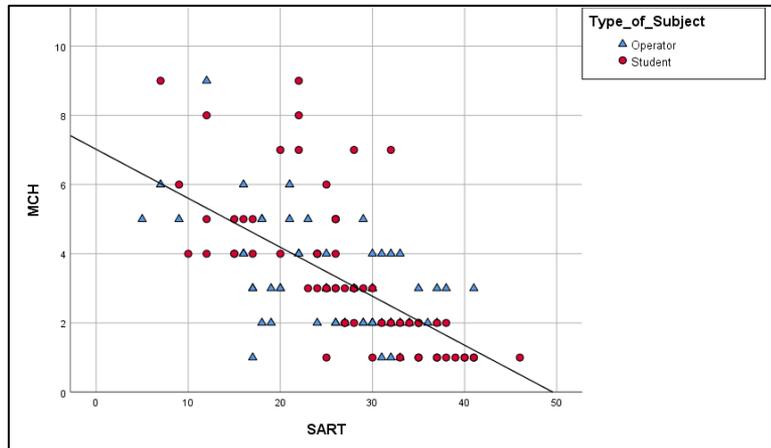
Student	N	Correlation coefficient				
		1. MCH	2. SART	3. Time	4. Error rate	5. Blink rate
1. MCH	64	1				
2. SART	64	-0.705**	1			
3. Time	64	-0.412**	0.423**	1		
4. Error	64	0.234	-0.195	-0.051	1	
5. Blink	64	-0.077	-0.057	0.027	-0.162	1

3. 실험 결과

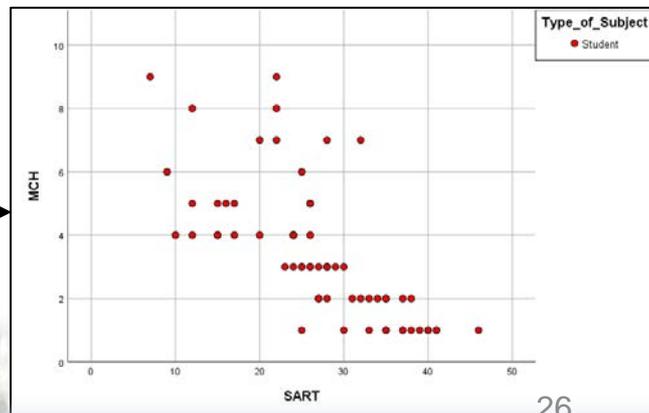
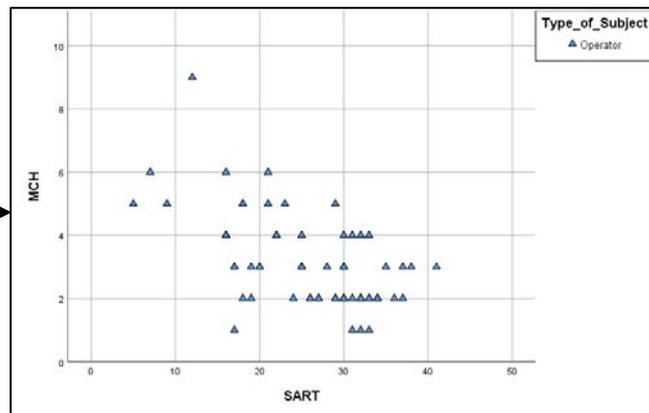
3.3 상관 분석

▶ MCH-SART

- MCH – SART의 경우 운전원과 학생 모두 음(-)의 강한 양의 상관 관계를 보임
 - 작업량이 증가함에 따라 상황인식이 감소함이 나타남 < Operator ($r = -0.569^{**}$) >



< All subject ($r = -0.639^{**}$) >



< Student ($r = -0.705^{**}$) >

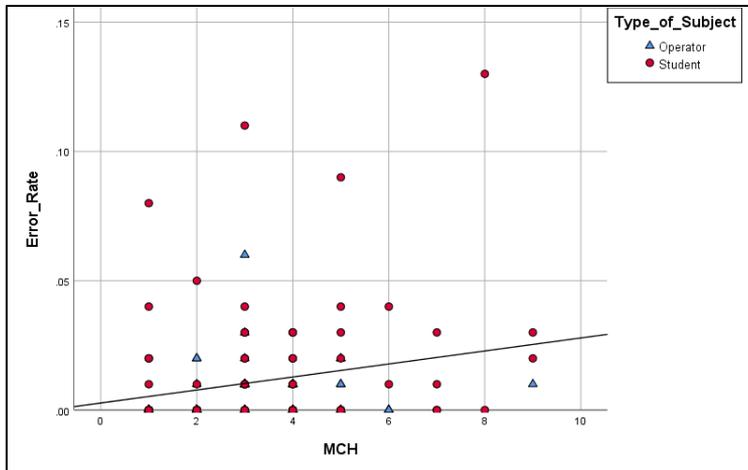
3. 실험 결과

3.3 상관 분석

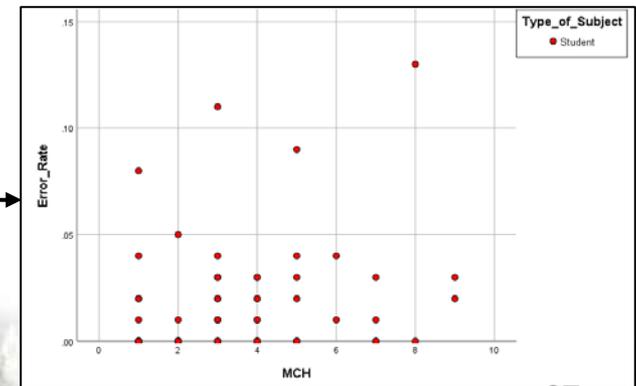
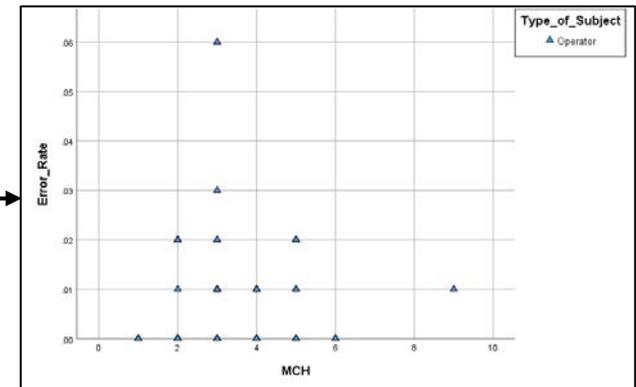
▶ MCH-Error rate

- 전체 실험자에서 작업 부하와 오류율은 중간 정도의 양(+)의 상관 관계를 보임
- 그러나, 분리했을 때 운전원과 학생 모두 유의한 상관 관계가 나타나지 않음

< Operator ($r = 0.139$, not sig.) >



< All subject ($r = 0.224^{**}$) >



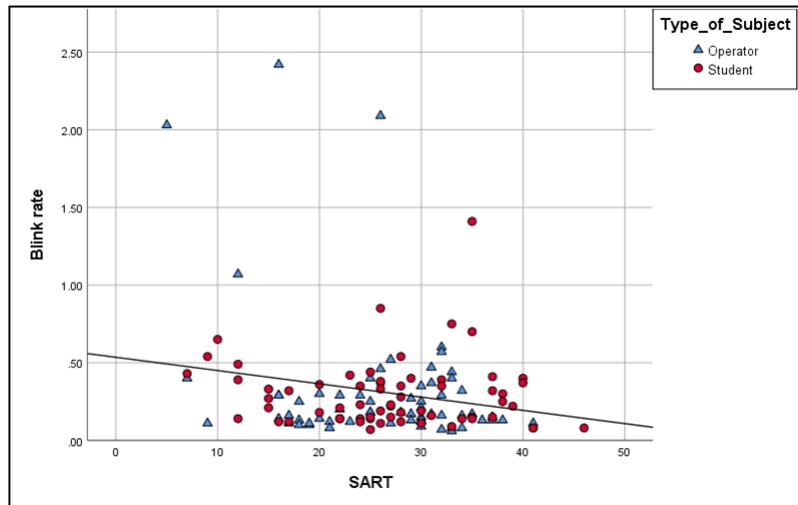
< Student ($r = 0.234$, not sig.) >

3. 실험 결과

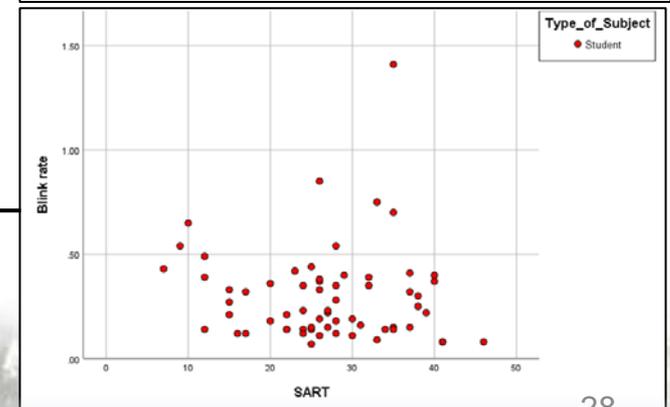
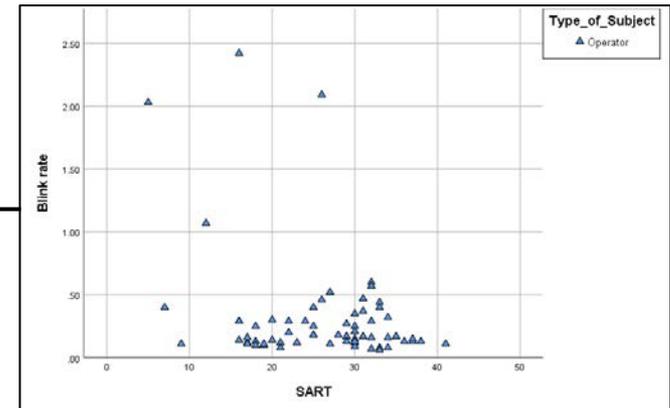
3.3 상관 분석

▶ SART – Blink rate

- 전체 실험자에서 상황 인식과 Blink rate는 중간 정도의 음(-)의 상관 관계가 나타남
- 그러나, 분리했을 때 오직 운전원만이 음(-)의 상관관계를 보인 반면, 학생은 SART – Blink rate에서 통계적으로 유의한 상관 관계가 확인되지 않았다.



< All subject ($r = -0.203^*$) >



< Student ($r = -0.057$, not sig.) >

3. 실험 결과

3.3 상관 분석

▶ 상관 분석 결과 요약

- 전체 32명 실험자의 상관 분석 결과
 - MCH-SART
 - Time-MCH, Time-SART
 - Error-MCH
 - Blink-SART
- 16명 운전원의 상관 분석 결과
 - MCH-SART
 - Time-MCH, Time-SART
 - Blink-SART
- 16명 학생의 상관 분석 결과
 - MCH-SART
 - Time-MCH, Time-SART
- 운전원과 학생의 상관 분석 결과 MCH- SART, Time-MCH 및 Time-SART에서 동일한 상관관계가 확인되었다.
- Blink-SART의 경우 운전원에게서만 음(-)의 상관 관계가 확인되었다.

4. 결론



4. 결론

4.1 실험 결과

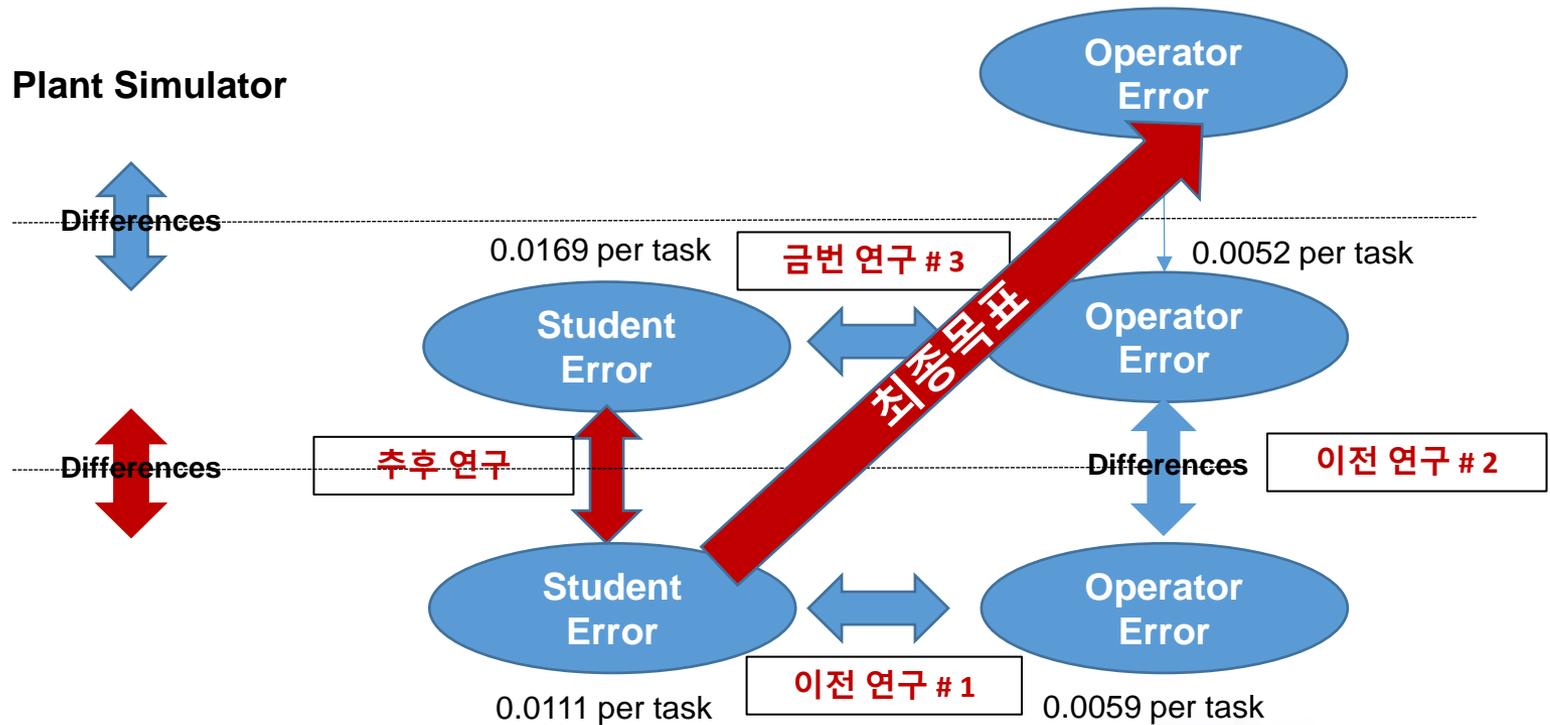
▶ 결과 요약

- 운전원과 학생에 대한 인적수행도 비교 결과 다음의 수행도에서 차이가 있었음.
 - 작업부하(Workload), 상황인식, 직무당 평균 수행 시간, Eye-movements: 차이 없음
 - 오류율(Error rate): 운전원 < 학생
- 인적수행도 간의 상관관계 분석결과 다음의 수행도에서 상관관계가 통계적으로 유의하게 나왔음.
 - 상황인식 \Leftrightarrow 작업부하
 - 직무당 평균 수행시간 \Leftrightarrow 작업부하, 상황인식
 - 오류율 \Leftrightarrow 작업부하
 - 동공 운동 \Leftrightarrow 상황인식



4. 결론

4.2 향후 계획



Thank you !

