



An Experimental Investigation of Human Performance Differences Depending on Simulator Complexity

(시뮬레이터 복잡도에 따른 운전원의 인적 수행도 차이에 관한 실험적 연구)

Jeong Hun Choi^{a,b}, Sungheon Lee^b, Bumjun Park^b, Changsang Park^b, Jonghyun Kim^b,
Ronald L. Boring^c, Jooyoung Park^c

^aKorea Hydro & Nuclear Power Co. LTD

^bChosun University

^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

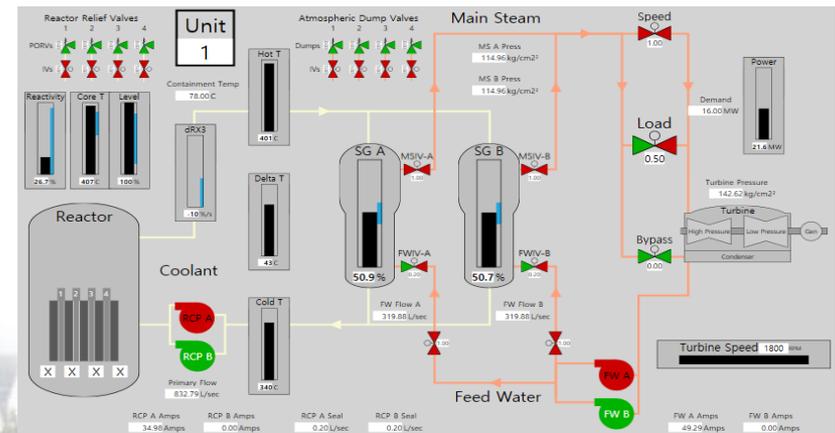
▶ 데이터 부족 문제를 해결하기 위한 Idaho National Lab(INL)의 접근 방식

- Simplified simulator 사용
 - 실제 운전원 및 Full Scope 시뮬레이터를 통한 데이터 수집은 높은 비용, 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 >



<Simplified simulator: Rancor Microworld>

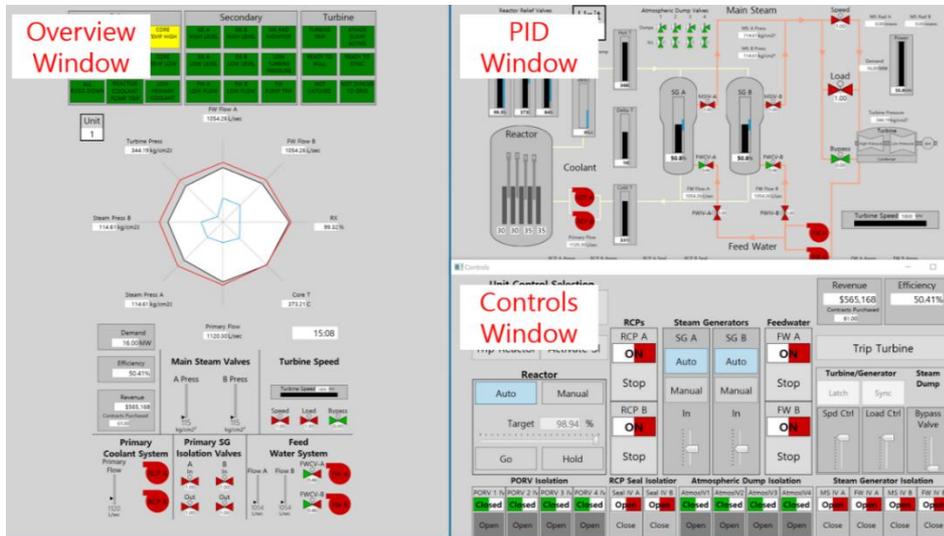


1. Introduction

1.1 배경

▶ Rancor Microworld 시뮬레이터

- 실제 원자력 발전소 운전의 중요 특징이 재현되도록 설계된 **간소화된 시뮬레이터**
 - 공정 제어와 관련된 이론적이고 실용적인 설계
 - HRA 지원을 위한 **인간 신뢰도 데이터 수집을 목적으로 개발**
 - 연구원들이 공정 제어 시스템을 조작 할 수 있는 그래픽 인터페이스 제공
- 시뮬레이터는 SMR 설계와 유사한 Gamified Rankin Cycle 사용
- 노트북에 설치 할 수 있는 **휴대용 시뮬레이터**



1. Introduction

1.1 배경

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

- Simplified simulator 사용
 - 간소화된 시뮬레이터를 토대로 합리적인 비용으로 다양한 HRA 데이터 수집
 - INL과 조선 대학교의 협력 과제 수행 중에 있음



1. Introduction

1.1 배경

▶ 이전연구: Microworld를 활용한 운전원 vs 학생 수행도 비교

인적 수행도	분류	독립 변수								
		실험자 유형			Event			시나리오		
		ANOVA	F-Value	P-Value	ANOVA	F-Value	P-Value	ANOVA	F-Value	P-Value
Workload	MCH	★	5.361	0.022	-	0.708	0.401	-	1.765	0.079
Situation awareness	SART	★	4.334	0.039	-	0.094	0.759	-	1.01	0.434
Time	단계를 완료하는데 걸리는 평균 시간	-	2.567	0.111	★	109.683	0	★	27.14	0
	지시사항을 완료하는데 걸리는 평균 시간	-	0.607	0.437	★	22.665	0	★	7.019	0
	직무를 완료하는데 걸리는 평균 시간	-	0.173	0.678	★	62.408	0	★	13.258	0
	오류 수	★	4.517	0.035	-	2.774	0.098	-	1.765	0.079
Error	오류 율	★	5.908	0.015	-	0.001	0.936	-	0.729	0.688
Attention pattern	응시 횟수	-	0.032	0.858	★	74.371	0	X		
	응시 시간	-	0.189	0.664	★	75.306	0			
Number of Manipulation	시나리오 완료 시간 당 총 조작 수	-	0.549	0.46	★	102.38	0	-	61.433	0
Blinking	깜빡임 횟수	-	0.102	0.75	★	22.371	0	★	5.208	0
	깜빡임 비율	★	4.391	0.038	-	0.004	0.948	-	0.343	0.959

1.2 연구 목적

- ▶ **시뮬레이터 복잡성에 따른 인적 수행도 차이를 실험적으로 조사**
 - Rancor Microworld(단순화된 시뮬레이터)와 Compact Nuclear Simulator; CNS (보다 복잡한 시뮬레이터)를 이용한 원자력 발전소 운전원의 인적 수행도 차이 비교
 1. 실험 설계
 2. CNS 활용하여 운전원 대상으로 실험 수행 (16명)
 3. 이전 Microworld의 운전원 수행도와 비교

2. 실험 설계



2.1 개요

▶ 목적

- CNS 를 활용한 실제 운전원의 인적 수행도 차이 비교

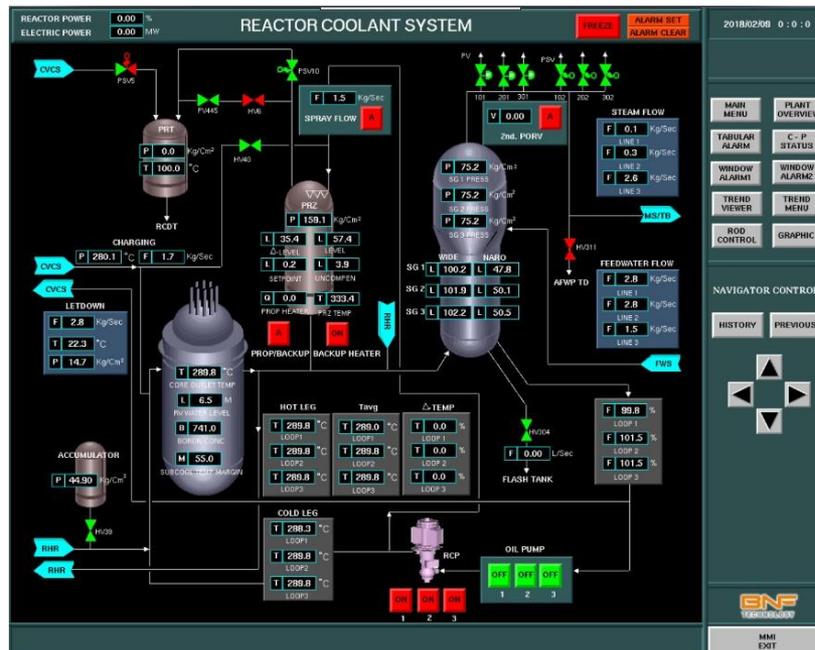
▶ 주요 내용

- 무작위 요인 설계를 적용한 실험
- 시나리오 및 절차서 개발 (정상운전 2개, 비상운전 2개)
- 실험 수행
- 인적 수행도 측정
 - Time, error, workload, situation awareness

2.2 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
 - 1차측의 Reactor Coolant System(RCS) 뿐만 아니라 전력계통까지 모델링 됨
 - 간단한 비상 사고 모사 및 출력 증/감발 운전이 가능



2.3 실험 설계 구성

▶ Randomized factorial experiment design

- 상호작용을 보기 위한 교차설계
- 두 개의 독립 변수(시나리오, 시뮬레이터)가 사용

시나리오 유형	시뮬레이터 유형	
	Rancor Microworld	CNS
Non-event	Time Error Workload Situation awareness	Time Error Workload Situation awareness
Event	Time Error Workload Situation awareness	Time Error Workload Situation awareness

2.3 실험 설계 구성

▶ CNS 시나리오

- 시나리오는 Non-event 및 Event 시나리오로 분류
 - Non-event 시나리오
 - Start-up, Shut-down과 같은 정상 운전 상황
 - Event 시나리오
 - 비상 운전 상황

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

2. 실험 설계

2.3 실험 설계 구성

▶ 절차서

- Westing house 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	
승 인	-
일 자	2020. 02. 24
승인 기관	CSU HERA (73.05.18)
PNSC서면결의번호	01 - 09차
절차서 총 페이지수 : 15	

2. 실험 설계

2.3 실험 설계 구성

▶ 인적 수행도 측정

Performance	Measure
Workload	Modified Cooper-Harper (MCH)
Situation Awareness	Situation Awareness Rating Technique (SART)
Error rate	Number of errors per task in a scenario
Time to completion	Time to complete a task

2.3 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)해 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

2.3 실험 설계 구성

▶ 오류율(Error rate) 및 직무당 완료 시간 분석

- 지시되는 절차에서 벗어나는 수행을 했을 경우 오류로 판단
- Procedure – Step – Instruction – Task 구조
- 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 삽입한계 (CONT BANK LO-LO LIMIT)" 경보가 발생하면 즉시 봉산을 비상 주입하여야 한다.	확인					
2.2	출력을 증발하는 동안 "봉산주입(BOR)"이나 "희석(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	주중기관 차단 밸브 (FWS-HV108/208/308) 개방	확인	IG	Indicator		95	
3.1.3	중기압력모드(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

2.3 실험 설계 구성

▶ 피실험자

피실험자 유형	시뮬레이터 유형	피실험자 수	설명
실제 운전원	CNS	16	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 운전 면허가 있으며 한빛 원자력 발전소에서 근무하는 운전원(3명 제외)

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

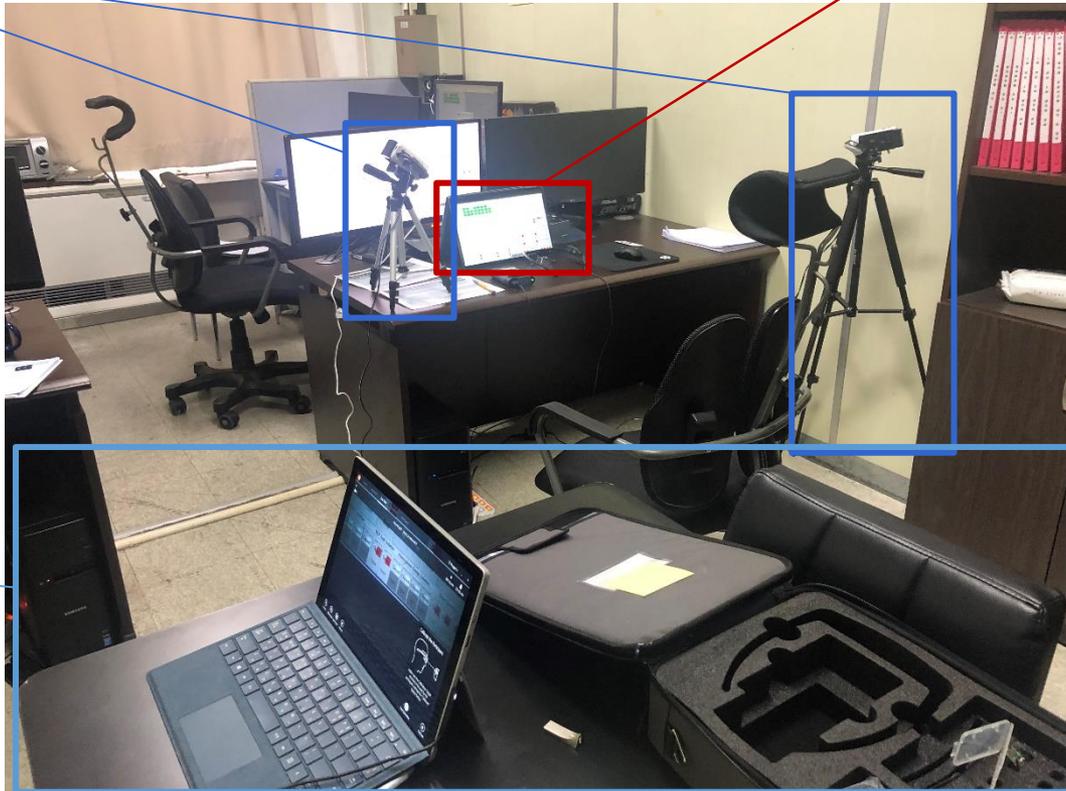
2. 실험 설계

2.3 실험 설계 구성

▶ 장비

Two cameras

CNS on the tablet



Tobii Pro Glasses 2:
Eye tracking system

2. 실험 설계

2.3 실험 설계 구성

▶ 교육 및 훈련

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



3. 실험 결과



3. 실험 결과

3.1 분산 분석 (ANOVA Test)

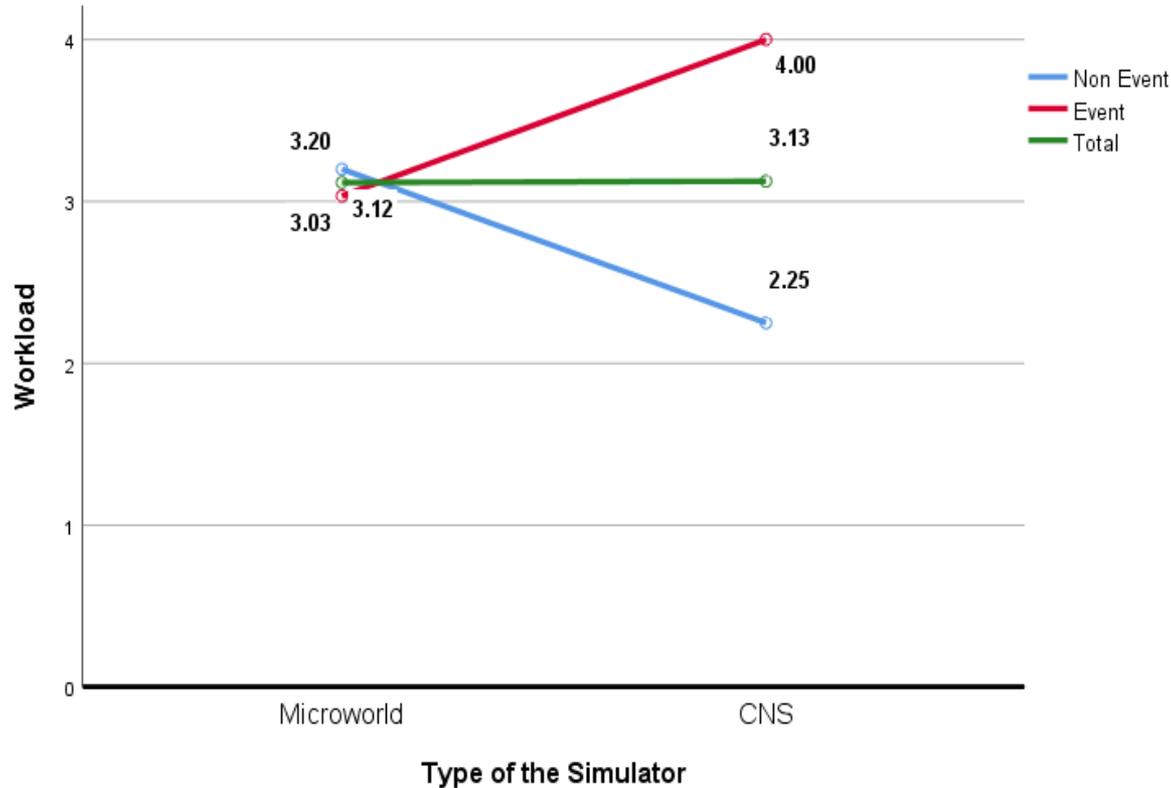
▶ Microworld vs CNS 비교

Human Performance	Categorization	Independent Variable					
		Total		Non-event		Event	
		F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
Workload	MCH	0.001	0.970	10.894	0.001	10.208	0.002
Situation awareness	SART	26.932	0	44.397	0	1.588	0.211
Time	Average time to complete a task	239.223	0	469.847	0	322.487	0
Error	Error rate	25.400	0	14.491	0	16.844	0

3. 실험 결과

3.1 분산 분석 (ANOVA Test)

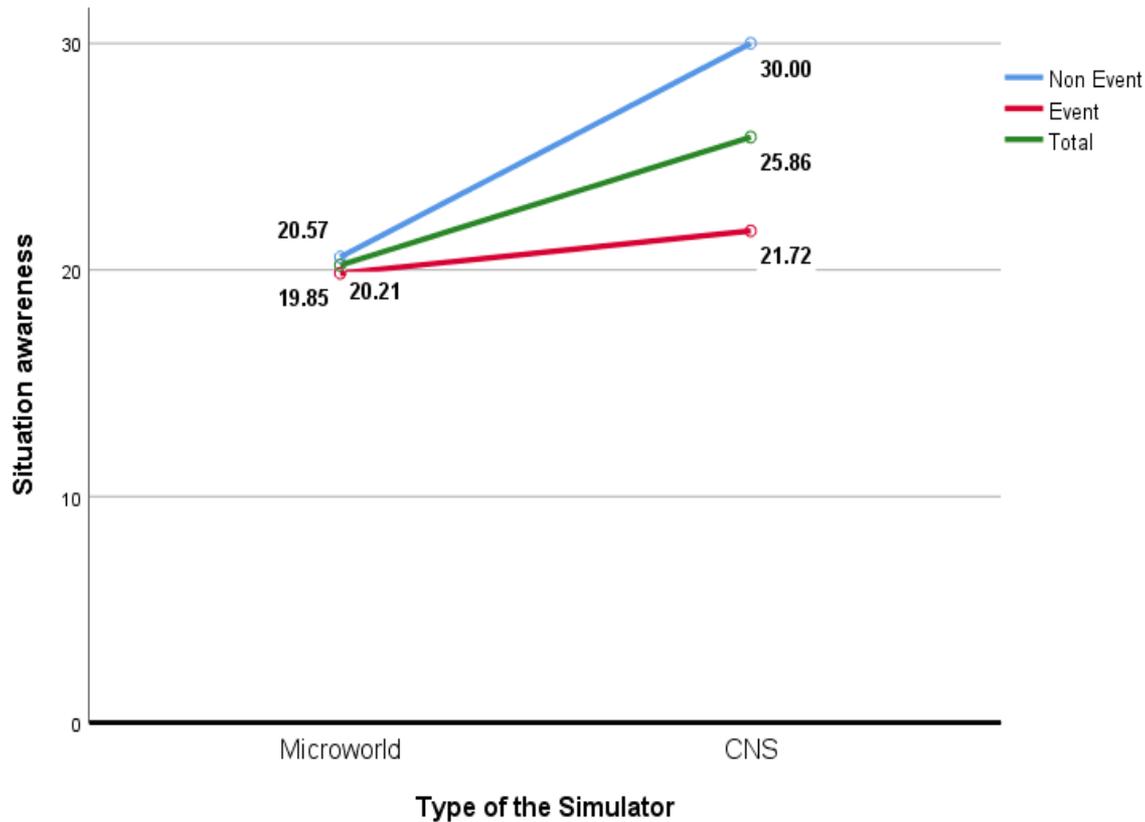
▶ Workload



3. 실험 결과

3.1 분산 분석 (ANOVA Test)

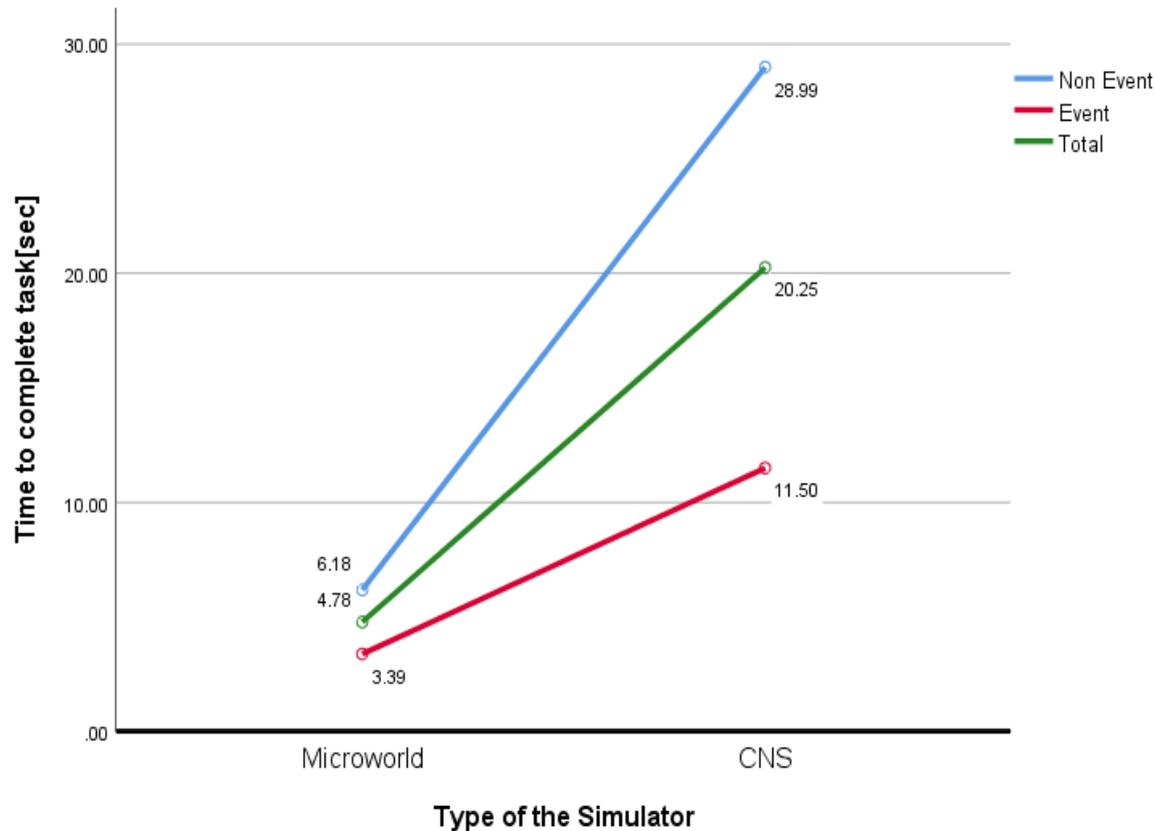
▶ Situation awareness



3. 실험 결과

3.1 분산 분석 (ANOVA Test)

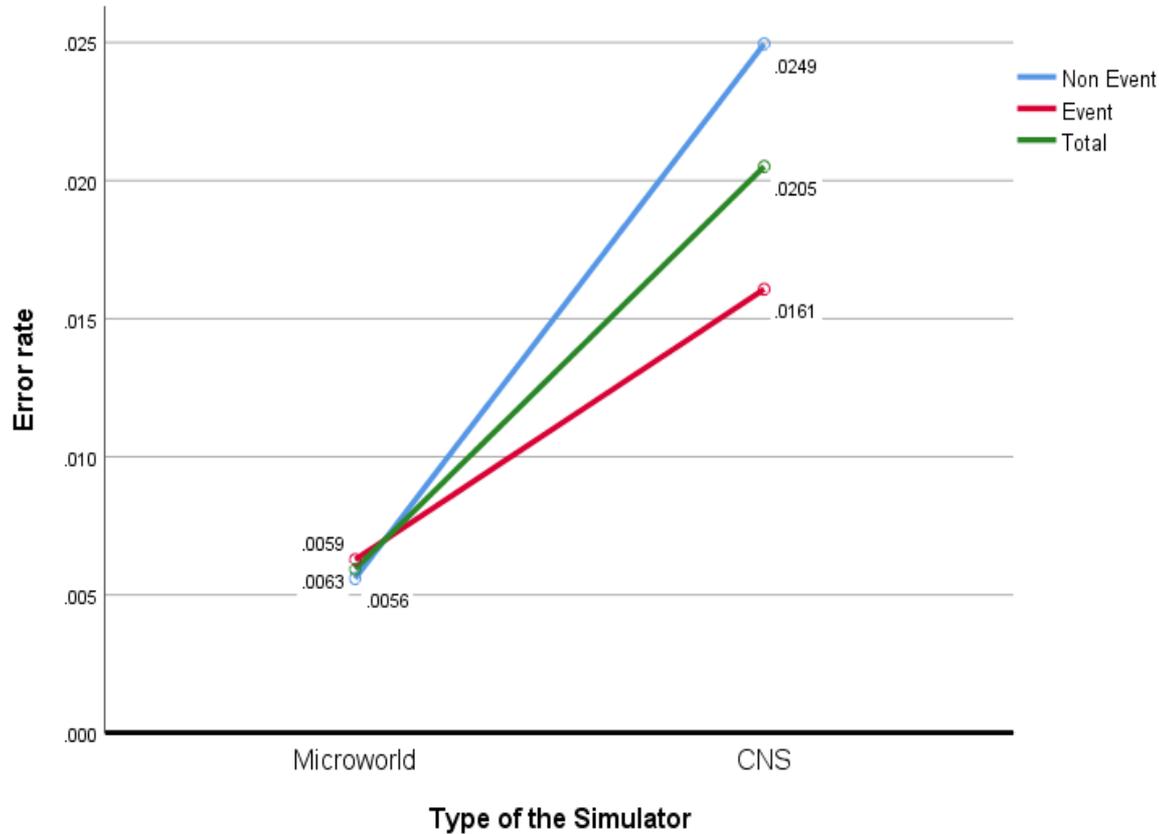
▶ Average time to complete a task



3. 실험 결과

3.1 분산 분석 (ANOVA Test)

▶ Error rate



3. 실험 결과

3.2 상관 분석 (Pearson Correlation Analysis)

▶ 총 피실험자 36명에 대한 수행도간 상관분석 결과

전체 36명	평균	표준화 편차	상관 계수			
			1.MCH	2.SART	3.Error	4.Time
1. MCH	3.12	1.44				
2. SART	22.17	7.52	-.421**			
3. Error	0.01	0.02	.048	.184*		
4. Time	10.16	9.80	-.186*	.421**	.496**	

3. 실험 결과

3.2 상관 분석 (Pearson Correlation Analysis)

▶ Microworld 운전원 20명에 대한 수행도간 상관 분석 결과

MW 20명	평균	표준화 편차	상관 계수			
			1.MCH	2.SART	3.Error	4.Time
1. MCH	3.12	1.42				
2. SART	20.21	6.51	-0.375**			
3. Error	0.006	0.009	.168	.028		
4. Time	4.78	2.65	.004	.025	-0.07	

▶ CNS 운전원 16명에 대한 수행도간 상관 분석 결과

CNS 16명	평균	표준화 편차	상관 계수			
			1.MCH	2.SART	3.Error	4.Time
1. MCH	3.13	1.49				
2. SART	25.86	7.94	-0.569**			
3. Error	0.02	0.03	-.004	.095		
4. Time	20.25	10.36	-.501**	.383**	.445**	

4. 결론



4.1 실험 결과

▶ 결과 요약

- Microworld 와 CNS 에 대한 운전원 수행도 비교 결과 다음의 수행도에서 차이가 있었음.
 - 작업부하(Workload): 차이 없음
 - 상황인식(Situation awareness): Microworld < CNS
 - 직무당 수행시간(Average time to complete a task): Microworld < CNS
 - 오류율(Error rate): Microworld < CNS
- 수행도 사이의 상관관계 분석결과 다음의 수행도 사이의 상관관계가 통계적으로 유의하게 나왔음.
 - 작업부하 \Leftrightarrow 상황인식
 - 오류율 \Leftrightarrow 상황인식
 - 직무당 수행시간 \Leftrightarrow 작업부하, 상황인식, 오류율

4.2 향후 계획

Plant Simulator

Differences

CNS
(Small-world)

Differences

Microworld

??? per task

추후연구

0.0205 per task

추후연구

Differences

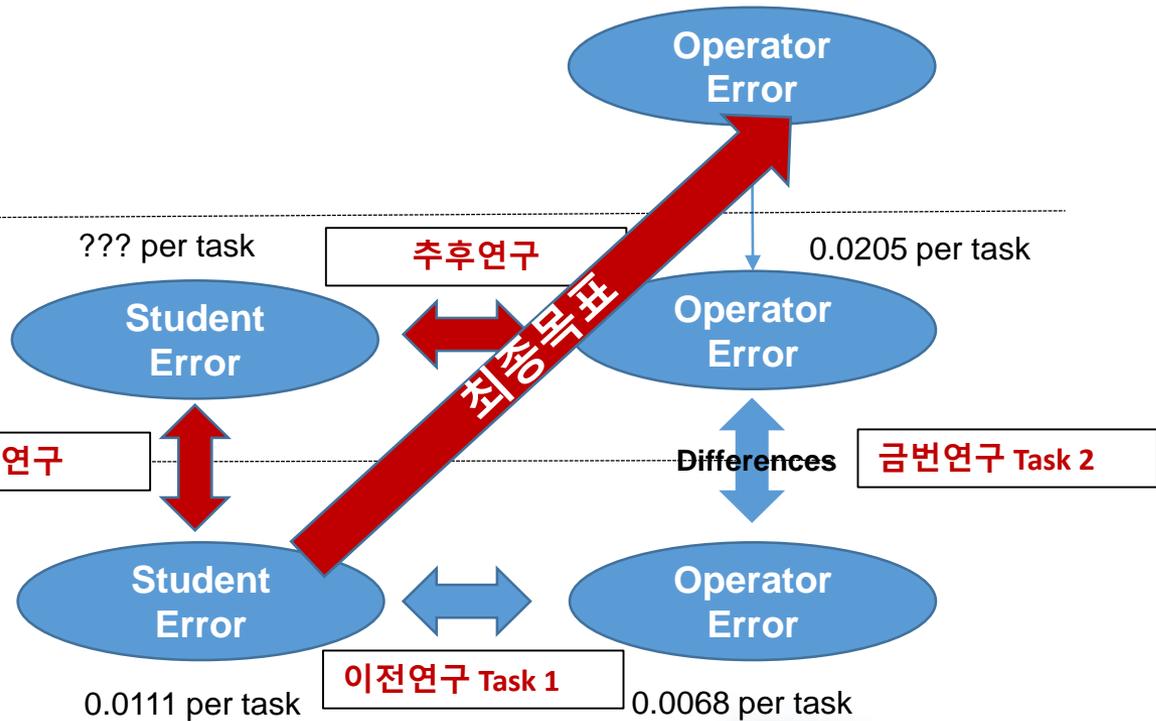
금번연구 Task 2

0.0111 per task

이전연구 Task 1

0.0068 per task

최종목표



Thank you !

