creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2022년 2월

석사학위 논문

CNS 시뮬레이터를 이용한 운전원과 학생 간의 인적수행도 비교

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

박 범 준

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CNS 시뮬레이터를 이용한 운전원과 학생 간의 인적수행도 비교

Comparison of Human Performance between Operators and Students Using the CNS Simulator

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

박 범 준

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CNS 시뮬레이터를 이용한 운전원과 학생 간의 인적수행도 비교

지도교수 김 종 현

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

박 범 준

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

박범준의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 종 현 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

표 목차 ····· ii
그림 목차 ····· iii
ABSTRACT ····· iv

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 연구 목적 ····· 3

제 3 장 실험 설계 ····· 6
제 1 절 시뮬레이터 ····· 7
제 2 절 피실험자 유형 ····· 8
제 3 절 시나리오 유형 ····· 11
제 4 절 시나리오 ····· 11
제 5 절 인적수행도 측정 ····· 13
제 6 절 시설 및 장치 ····· 23
제 7 절 교육 및 훈련 ····· 25
제 8 절 자료 수집 ····· 25

제 4 장 인적수행도 차이에 대한 실험 결과 ····· 26
제 1 절 분산분석 결과 ····· 26
제 2 절 상관분석 결과 ····· 34
제 3 절 AOI에 대한 Heatmap 분석 결과 ····· 38

제 5 장 결론 ····· 40

제 6 장 사사 ····· 41

참고문헌 ····· 42

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

표. 1. 무작위 요인 실험 설계 ····· 6
표. 2. 운전원 일반 정보 ····· 9
표. 3. 학생 일반 정보 ····· 10
표. 4. 시나리오 성공 기준 및 절차서 ····· 12
표. 5. 아이트래커 주요 측정 데이터 ····· 21
표. 6. 인적수행도 데이터 수집 방법 및 항목 ····· 25
표. 7. 독립변수의 인적수행도 평균값 ····· 27
표. 8. 분산분석 결과 ····· 28
표. 9. 전체 피실험자 32명에 대한 상관분석 결과 ····· 35
표. 10. 운전원 16명에 대한 상관분석 결과 ····· 36
표. 11. 학생 16명에 대한 상관분석 결과 ····· 37
표. 12. 정상 시나리오에서의 Fixation count 분산분석 결과 ····· 39

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림. 1. SHEEP 모형 ····· 4
그림. 2. 단순화된 시뮬레이터 연구를 기반으로 Full-scope 데이터를 추론하기 위한 실험 과정 ····· 5
그림. 3. CNS 인터페이스 ····· 7
그림. 4. 일반 정보 설문지 ····· 8
그림. 5. SART 설문지 ····· 14
그림. 6. MCH 설문지 ····· 16
그림. 7. HuREX 프레임워크에 기반하여 분류된 오류 ····· 18
그림. 8. 절차서 구성의 예시 ····· 19
그림. 9. 추출된 동공 데이터 ····· 22
그림. 10. AOI(왼쪽) 및 Heatmap(오른쪽) ····· 22
그림. 11. 실험에 사용된 장치 및 장비 ····· 23
그림. 12. SART에 대한 결과 도표 ····· 29
그림. 13. MCH에 대한 결과 도표 ····· 30
그림. 14. 오류율에 대한 결과 도표 ····· 31
그림. 15. 시간에 대한 결과 도표 ····· 32
그림. 16. 깜빡임 률에 대한 결과 도표 ····· 33
그림. 17. 정상 시나리오에서의 Heat Map ····· 38
그림. 18. 비상 시나리오에서의 Heat Map ····· 39

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Comparison of Human Performance between Operators and Students Using the CNS Simulator

BumJun Park
Advisor : Prof. Jonghyun Kim, PhD.
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

Nuclear power plants (NPPs) are operated or managed by operators capable of taking appropriate measures in the event of an accident. However, any human action carries the potential for error, which is why human reliability analysis (HRA) researchers systematically analyze and predict the potential risks due to human factors in order to eliminate or reduce such errors. In this area, much research is still needed to improve the safety of NPPs. Typically, human error probabilities (HEPs) are estimated by collecting HRA data inferred from other industries, expert judgment, or training simulator research. However, the lack of adequate data has been highlighted as a major challenge in the field of HRA.

Currently, to accumulate HEP data, the U.S. Nuclear Regulatory Commission and the Korea Atomic Energy Research Institute focus on collecting data via full-scope simulators. These studies are conducted using the Scenario Authoring, Characterization, and Debriefing Application (SACADA) database and the Human Reliability Data Extraction (HuREX) framework, respectively, to collect data from full-scope digital main control room (MCR) simulations of actual NPP environments.

HRA data collection using a full-scope simulator is beneficial in terms of

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

more accurate results, but there are problems with using the data collected from such simulators to support the data required for the HRA quantification process. Full-scope simulator studies conducted to collect HRA data are expensive, due to the need for a full-scope simulator facility and numerous operators, experts, and researchers. For this reason, researchers at Idaho National Laboratory (INL) developed the Simplified Human Error Experimental Program (SHEEP) as a method of overcoming the drawbacks of full-scope research. The purpose of the SHEEP study is to infer the HEPs from full-scope simulator data by comparing student and operator performance using a simplified simulator.

Similar to a previous study conducted in the SHEEP project, the current study aims to perform experiments conducted on operators and students to identify differences in human performance data using the Compact Nuclear Simulator (CNS). To achieve this goal, the study analyzes correlations between the measured human performance of students and operators, via a randomized factorial experiment design. Investigate five human performances: 1) workload, 2) situation awareness, 3) error, 4) time and 5) eye movement measurements. In addition, several scenarios and related procedures have been developed for CNS experiments. The data collected in the experiment were compared with human performance using several statistical analysis techniques such as the ANOVA test and Pearson correlation analysis.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서론

원자력발전소는 만일의 사고에 대해 적절한 조치를 수행할 수 있는 운전원들에 의해 운영 또는 관리되고 있다. 하지만, 인간의 행위는 불완전하여 항상 인적오류를 유발할 수 있는 잠재력을 가지고 있다 [1]. 이에, 운전원의 인적오류 저감 또는 예방을 위해 인적요소로 인해 발생 가능한 리스크를 체계적으로 분석하고 예측하는 인간 신뢰도 분석(Human Reliability Analysis; HRA) 분야의 연구자들이 원자력발전소 안전성 향상을 위해 많은 연구와 노력을 기울이고 있다. 현재, 타 산업에서의 데이터나 전문가의 판단 또는 훈련용 시뮬레이터 연구 등으로 인간신뢰도 데이터를 수집하여 인적오류 확률을 추정하고 있지만, 인간신뢰도 데이터 부족은 아직까지 HRA 분야의 주요 현안으로 남아있는 상태이다 [2].

이러한, 문제를 해결하기 위한 방법으로 미국 U.S. NRC (미국 원자력 규제 위원회), 한국 원자력 연구원에서는 실제 원자력발전소 주제어실과 흡사한 Full-scope 시뮬레이터를 이용하여 인적오류 확률을 추정하기 위해 실제 운전원의 인간신뢰도 데이터 수집에 대한 연구를 하고 있다. Full-scope 시뮬레이터를 사용한 인간신뢰도 데이터 수집은 실제 환경과 거의 같은 상황을 연출하여 보다 정확한 결과를 얻어 낼 수 있는 장점이 있지만, Full-scope 시뮬레이터를 사용한 데이터 수집은 HRA 정량화 과정에 필요한 데이터를 지원하는데 몇 가지 문제점을 안고 있다. 기본적으로, Full-scope 연구는 HRA 데이터를 수집하기 위해 높은 비용이 요구된다. 이것은, Full-scope 시뮬레이터 시설과 수많은 운전원을 확보하는데 많은 비용이 수반되며, 많은 전문가와 연구원들이 이 연구에 참여하기 때문이다 [3]. 이러한, 이유로 미국 아이다호 국립 연구소(Idaho National Laboratory; INL)에서는 Full-scope 연구가 가지고 있는 문제를 극복할 수 있는 방법으로 SHEEP(Simplified Human Error Experimental Program)을 개발하였다. SHEEP는 단순화된 시뮬레이터를 사용하여 학생과 운전원의 인적수행도 비교를 통해 Full-scope 시뮬레이터를 사용한 운전원의 인적오류 확률을 추론하기 위해 제안되었다 [4-6].

본 연구는 Full-scope 데이터의 인적오류 확률을 추론하는 SHEEP 프로젝트의 선행 연구로서, CNS(Compact Nuclear Simulator)를 이용한 실험을 통해 지식과 경험을 제외한 동일한 조건에서 학생과 실제 운전원을 대상으로 인적수행도

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

데이터를 수집하여 비교 분석하고 어떠한 차이가 있는지 식별하는 것을 목표로 한다. 2장에서는 Full-scope 데이터의 인적오류 확률을 추론하기 위한 방법인 SHEEP에 대하여 소개한다. 3장에서는 두 개의 독립 변수(즉, 피실험자 유형 및 시나리오 유형)를 포함한 무작위 요인 실험 설계가 제시되었으며, 실험을 위해 정상/비정상 상황의 시나리오 및 Westinghouse 기반의 절차서를 개발했다. 실험에서는 5가지의 인적수행도 즉, 1) 상황인식, 2) 작업부하, 3) 오류, 4) 시간, 5) 동공 운동을 측정했다. 또한, 5개의 인적수행도 중에서 동공 운동을 측정하기 위해 피실험자에게 특정한 신체적 접촉을 피하고, 접근성을 높이는 방법으로 시선 추적(Eye tracking) 기술이 제안되었다 [7-9]. 본 실험은 원자력 공학을 전공으로 한 대학생 16명과 실제 원자력발전소에서 근무하고 있는 16명의 전문 운전원을 대상으로 수행하였다. 마지막으로, 4장에서는 실험으로 수집된 5가지의 인적수행도 데이터를 통계 분석 기법(즉, 분산분석 및 상관분석)을 통해 도출된 결과에 대하여 소개하며, 마지막으로, AOI에 대한 Heat Map을 통해 운전원과 학생의 시선 패턴 분석에 대해 논의하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 연구 목적

앞서 언급하였듯이, INL에서 개발한 SHEEP(그림. 1 참조)는 Full-scope 운전원 인적오류 확률을 추론하기 위한 방법이다. 이러한, 인적오류 확률을 추론하기 위한 과정으로 SHEEP 모형은 다음과 같은 단계로 구성된다. 1) 단순화된 시뮬레이터에서 수집 가능한 HRA 데이터 항목 식별, 2) 실험에 기반한 HRA 데이터 항목 분석, 마지막으로, 3) 실험으로 얻어진 HRA 데이터 항목을 Full-scope 데이터베이스에 통합시키는 공정을 가진다.

첫 번째 단계에서는 각 시뮬레이터에서 수집할 수 있는 HRA 데이터 항목을 두 개의 집단으로 분류한다. 1) Full-scope 시뮬레이터와 단순화된 시뮬레이터에서 공통적으로 수집할 수 있는 HRA 데이터 항목, 2) 단순화된 시뮬레이터에서만 수집할 수 있는 HRA 데이터 항목으로 구분한다.

두 번째 단계는 이전 단계에서 분류된 HRA 데이터 항목을 실험에서 어떻게 측정할 수 있는지를 제시한다. Full-scope 시뮬레이터와 단순화된 시뮬레이터에서 공통적으로 수집할 수 있는 HRA 데이터 항목의 경우에는 피실험자 유형(즉, 학생과 운전원), 시뮬레이터 복잡성(즉, Full-scope 시뮬레이터와 단순화된 시뮬레이터)으로 구분하였다. 이러한 접근법은 피실험자 유형과 시뮬레이터 복잡성으로부터 분명한 차이가 발생하기 때문에, 향후 Full-scope 시뮬레이터 연구의 보완을 위해 사용한다. 단순화된 시뮬레이터에서만 수집할 수 있는 HRA 데이터 항목의 경우, 기존 Full-scope 시뮬레이터에서 고려 및 수집되지 않은 새로운 HRA 데이터 항목을 수집할 수 있는 방법을 제공한다. 다시 말해서, 이 단계는 Full-scope 데이터의 인적오류 확률을 추론하기 위해 필요한 HRA 데이터 항목을 분류하는 것을 목적으로 한다.

마지막 단계에서는 실험으로 얻어진 데이터를 Full-scope 데이터베이스 (예를 들어, Human reliability data extraction; HuREX 데이터)와 HRA 데이터를 통합하는 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

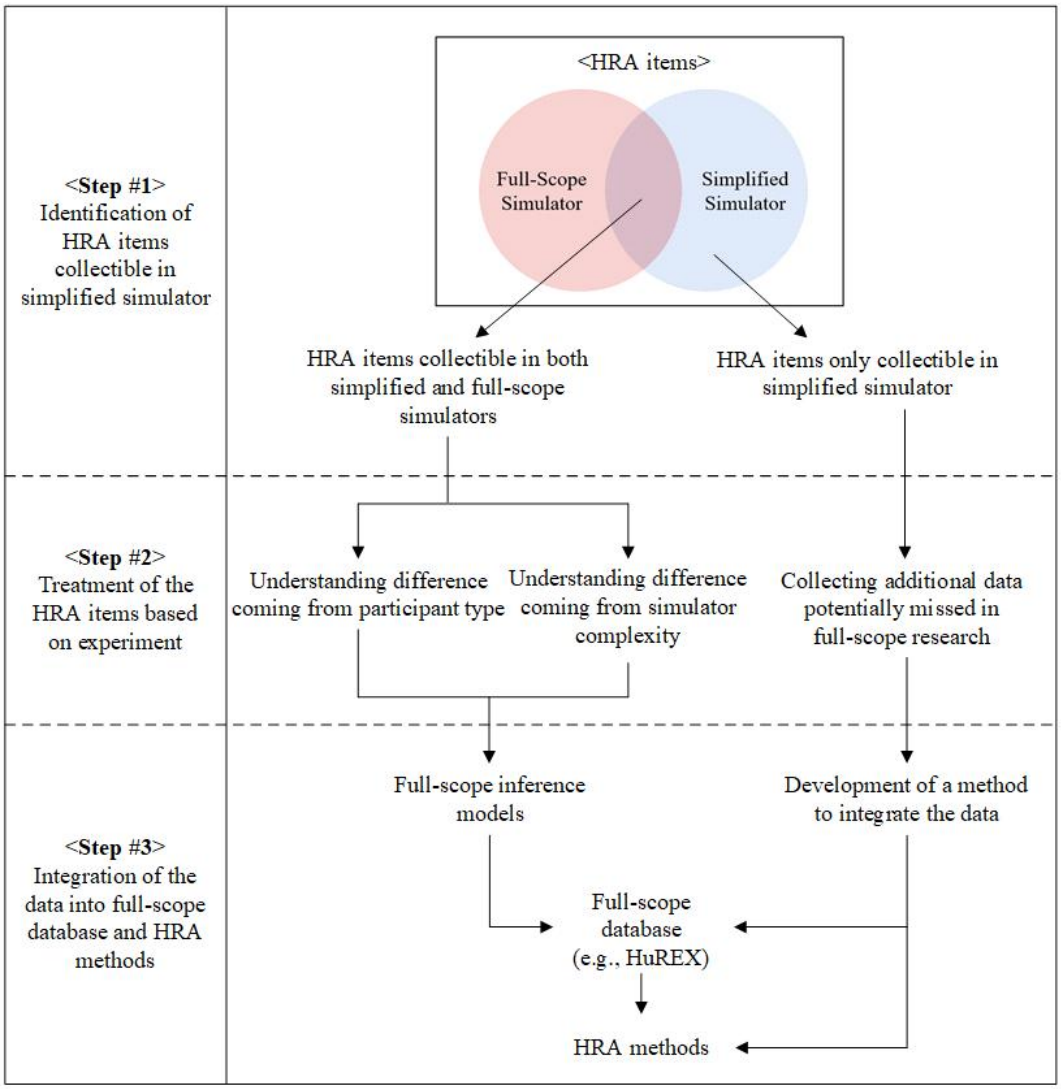


그림. 1. SHEEP 모형

그림. 2는 SHEEP 모형의 두 번째 단계인 Full-scope 시뮬레이터에서 확인할 수 없는 HRA 데이터 항목들을 단순화된 시뮬레이터를 통해 식별하기 위한 세부적인 과정에 대하여 도식화하였다. 이전 연구[3]에서는 Rancor Microworld 시뮬레이터를 사용하여 학생과 운전원의 인적수행도 비교 실험을 통해 단순화된 시뮬레이터에서 수집할 수 있는 HRA 데이터 항목에 대하여 식별하였다. 또한, 운전원을 대상으로 Rancor Microworld 시뮬레이터와 CNS 시뮬레이터 간에

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

복잡도에 따라 얼마만큼의 수행도 차이를 보이는지에 대해서 연구가 수행되었다[4]. 본 연구에서는 Rancor Microworld 시뮬레이터를 사용한 실험 결과의 신뢰성을 높이기 위해 Rancor Microworld 시뮬레이터보다 덜 단순화된 시뮬레이터인 CNS를 사용하여 운전원과 학생 간의 인적수행도를 식별하기 위한 연구를 수행했다.

따라서, 본 연구는 SHEEP의 선행 연구로서 단순화된 시뮬레이터(즉, CNS 와 Rancor Microworld 시뮬레이터) 데이터를 기반으로, Full-scope 데이터의 인적오류 확률을 추론하기 위해 필요한 데이터를 수집하는 것을 목표로 한다.

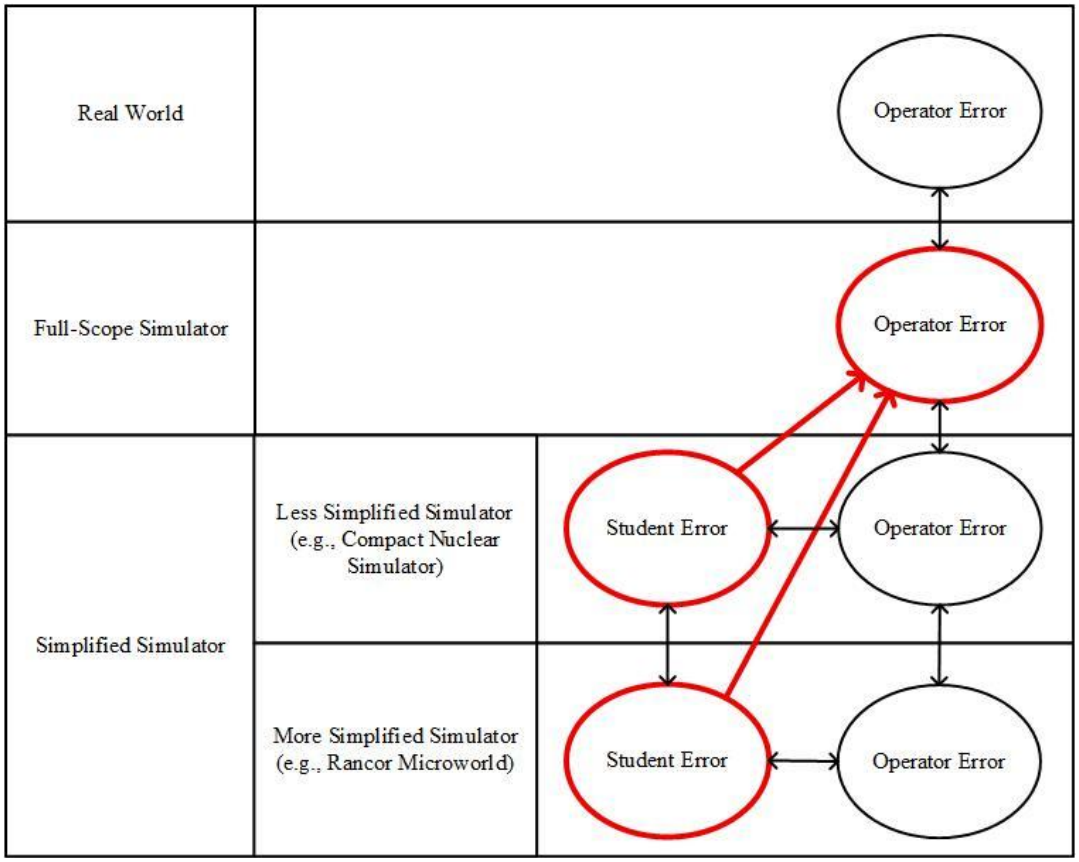


그림. 2. 단순화된 시뮬레이터 연구를 기반으로 Full-scope 데이터를 추론하기 위한 실험 과정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실험 설계

본 실험에서는 무작위 요인 실험 설계를 기반으로 CNS 시뮬레이터를 사용하여 실제 운전원과 학생 사이의 인적 수행도 측정치를 비교했다. 표. 1과 같이 기본 실험 설계는 두 개의 독립 변수 '피실험자 유형' (즉, 운전원 vs 학생), '시나리오 유형'(즉, 정상 시나리오/비상 시나리오)으로 구성되며 피실험자는 2개의 정상 시나리오와 2개의 비상 시나리오를 수행한다.

표. 1. 무작위 요인 실험 설계

시나리오 유형	피실험자 유형		시나리오
	운전원	학생	
정상			- 고온대기에서 출력 50% 까지 출력 증발 - 출력 100%에서 고온대기까지 출력 감발
비상			- 증기발생기 전열관 파단 사고(SGTR) - 주급수 상실 사고(LOFW)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 시뮬레이터

실험에서 사용된 CNS 시뮬레이터(그림. 3 참조)는 한국원자력연구원(KAERI)이 개발한 소형 원자력 발전소 시뮬레이터로 한울 1,2 호기와 동일한 Westinghouse 930Mwe, 3-Loop의 발전소 모델에 기반을 두고 있어 원자력 발전소의 실제 운전에 중요한 특성이 구현되도록 설계되었다.

이 시뮬레이터는 1차측 및 2차측 모델링이 되어있을 뿐만 아니라, 잔열 제거 계통, 전력 계통, 경보 등이 모델링 되어있어 간단한 비정상/비상 사고 모사 및 출력 증/감발 운전이 가능하다.

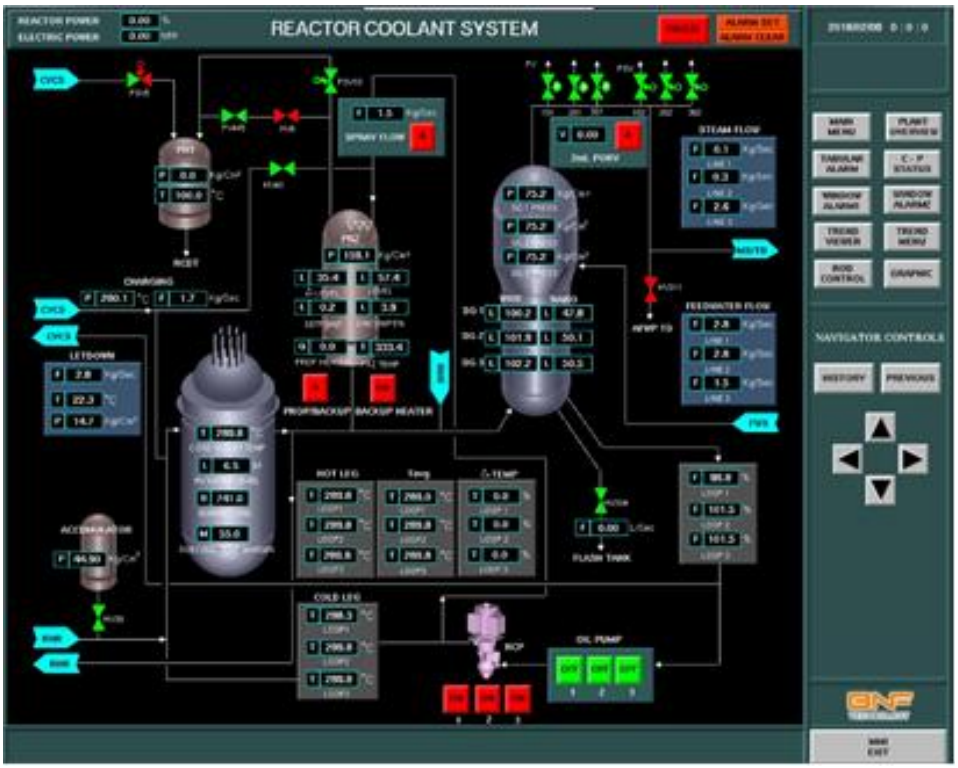


그림. 3. CNS 인터페이스

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 피실험자 유형

이 독립변수는 실험 참가자를 “운전원”과 “학생” 두 그룹으로 나누었다. 운전원의 경우 현재 한국 원자력발전소에서 근무하는 원자로 운전 면허 취득자 16명으로 구성되어 있으며, 학생의 경우 조선대학교 원자력공학과 학부 또는 석사 과정의 학생 16명이 실험에 참여하였다. 또한, 학생들은 원자력발전소 계통 및 운전에 대한 기본적인 지식을 갖추고 있다.

아래의 표. 2와 표. 3은 일반 정보 설문지(그림. 4 참조)를 통해 조사한 성별, 나이, 직책 등을 나타내는 운전원과 학생의 일반 정보이다.

일반 정보 설문지 (운전원)

본 설문의 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			
년 개월			
년 개월			
년 개월			
년 개월			

4. 면허소지여부를 모두 기술해 주세요 (예, WEC RO 면허, APR1400 SRO).
① ② ③

일반 정보 설문지 (학생)

본 설문의 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?

그림. 4. 일반 정보 설문지

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2. 운전원 일반 정보

번호	성별 (남/여)	직책	경력 (연도)	면허	나이
1	남	RO	4	RO	26-30
2	남	SRO	9	SRO, TO	41-45
3	남	TO	10	SRO, RO	36-40
4	남	TO	10	RO	41-45
5	남	Instructor	16	SRO, RO	46-50
6	남	TO	5	RO	36-40
7	남	SRO	16	SRO, RO	41-45
8	남	EO	6	RO	26-30
9	남	RO	11	SRO	41-45
10	남	TO	6	RO	41-45
11	남	TO	13	SRO	41-45
12	남	RO	13	N/A	41-45
13	남	Instructor	14	SRO, RO	41-45
14	남	EO	10	N/A	41-45
15	남	TO	17	SRO, RO	41-45
16	남	EO	9	N/A	41-45

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 3. 학생 일반 정보

번호	성별 (남/여)	학위 과정	학년	수강 과목	나이
1	남	학사	3	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학 / 원자력입문	20-25
2	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학 / 원자력입문	20-25
3	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자력입문	20-25
4	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자력입문	20-25
5	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자력입문	20-25
6	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학 / 원자력입문	20-25
7	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학 / 원자력입문	20-25
8	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학	20-25
9	남	학사	4	원자로이론 1 / 원자력입문 / 원자로안전공학	20-25
10	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학	20-25
11	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로안전공학	26-30
12	여	석사	1	원자로이론 1,2 / 원자로실험실습	20-25
13	여	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자력입문	20-25
14	남	학사	4	원자로이론 1 / 원자로실험실습	20-25
15	남	학사	4	원자로이론 1,2 / 원자로실험실습	20-25
16	남	학사	4	원자로실험실습	26-30

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 시나리오 유형

시나리오 유형은 정상 및 비상 시나리오로 세분화된다. 정상 시나리오는 일반적으로, 출력 증발 또는 출력 감발과 같은 정상 상태에서 수행되는 일반적인 작업과 유사하다. 이러한 정상 시나리오 직무를 수행할 때 실험 참가자들은 비상 시나리오에서보다 비교적 높은 책임감이나 시간적인 부담을 느끼지 않을 수 있다. 반면에, 비상 시나리오의 경우 발전소가 어떠한 사고(즉, 증기발생기 전열관 파단사고 또는 급수 상실 사고)에 의해 정지가 된 후 조치를 수행한다. 이러한, 조치는 향후 발전소에 긍정적 혹은 부정적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 직무로 구성되어 있다. 또한, 비상 시나리오의 경우 실험자들은 한정된 시간 내에 직무를 완료해야 되기 때문에 심리적 부담감을 느낄 수 있다.

제 4 절 시나리오

CNS를 이용한 실험을 진행하기 위해 시나리오 및 관련 절차서를 개발하였다. 이러한, 시나리오는 Full-scope 연구에서 고려된 시나리오와 비교하여 비교적 간단하게 구현하였다. 표. 4은 실험에 사용된 정상/비상 시나리오, 성공 기준 및 관련된 절차서에 대해 설명하였다. 각 시나리오는 사전에 정해진 절차를 완료하거나 특정 목표치에 도달하면 종료하였다. 정상 시나리오의 경우 원자로 출력이 50% 도달 또는 2%에 도달하면 종료된다. 비상 시나리오는 실험 참가자가 모든 절차 또는 조치 사항을 성공적으로 수행하거나 노심 온도 및 증기발생기 수위 같은 매개 변수가 안정적인 상태 값으로 유지될 수 있을 때 종료된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 4. 시나리오 성공 기준 및 절차서

시나리오 유형	시나리오	설명	절차서	성공 기중
정상	출력 증발 운전 (2% ~ 50%)	원자로 출력 2%에서 50%까지 출력 증발 운전	종합-01 (출력증발)	· 원자로 출력 50% 도달 · 운전 중 원자로 트립이 발생되지 않아야함
	출력 감발 운전 (100% ~ 고온 대기)	원자로 출력 100%에서 고온대기까지 출력 감발 운전	종합-02 (출력감발)	· 원자로 출력 2% 도달 · 감발 운전 중 의도하지 않은 원자로 트립이 발생되지 않아야함
비상	증기발생기 전열관 파열 사고 (SGTR)	방사성 물질 누출 방지를 위해 손상된 증기발생기를 격리하고 안전 기능을 유지하며 원자로 냉각재 온도를 냉각시키는 조치를 수행	비상-00 (원자로 트립시 조치) 비상-03 (증기발생기 관 파열)	· 올바른 사고 진단 및 절차서 전이 · 손상된 증기 발생기 격리 · 원자로 냉각재 온도 < 200°C
	주급수 상실 사고 (LOFW)	주급수 펌프 고장으로 인한 트립이 발생하여 발전소를 신속하게 안정시키기 위한 조치를 수행	비상-00 (원자로 트립시 조치) 보조-1.1 (안전주입 종료)	· 올바른 사고 진단 및 절차서 전이 · 원자로 냉각재 온도 < 200°C

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 절 인적수행도 측정

본 실험에서는 1) 상황인식, 2) 작업부하, 3) 오류, 4) 시간, 5) 동공 운동 총 5가지의 인적수행도에 대하여 수집하였다. 표. 4는 실험에서 고려한 인적수행도 및 측정 방법에 대해 간략하게 제시하였으며 이 절에서는 5가지의 인적수행도에 대해 자세하게 설명한다.

1. 상황인식 (Situation awareness)

상황인식은 단순히 상황자료를 아는 것을 포함하여 상황 이해와 운전원의 목표와 비교하여 시스템 상태가 향후 어떻게 변할 것인가를 아는 것으로 정의된다. 또한, 동적인 의사 결정에서 상황인식은 세 가지 단계로 이루어진다 [10-11]. 1 단계 상황인식에서는 일정 시간과 공간의 범주 안에서 주변 환경의 요소들을 인지 및 감지하는 것을 의미하며, 2 단계 상황인식에서는 인지 및 감지된 요소들의 의미를 이해하는 것으로 이루어진다. 마지막, 3 단계 상황인식에서는 향후 상태가 어떻게 변할 것인가에 대한 예측으로 이루어진다 [12].

상황인식 측정 기법들은 다양하지만 크게 주관적 평가 기법, 설문지 기법, 성능 척도 기법, 생리적 기법으로 구분된다 [13]. 본 실험에서는 주관적 평가 기법 중 실험자가 주관적으로 자신의 상황인식에 대해 평가하는 SART (Situation Awareness Rating Technique) [14]을 사용하였다. SART는 그림. 5와 같이 10가지 항목으로 구성되어 있으며, 이 항목들은 Demand (1번 ~ 3번), Supply (4번 ~ 7번), Understanding (8번 ~ 10번)의 세 가지 영역으로 분류된다. SART 점수는 다음의 식을 통해 계산된다.

- SART score = Understanding - (Demand - Supply)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실험자

날짜: 구분 (운전원 / 학생) 시나리오 1 2 3 4

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. 감시해야 할 변수의 수량이 적었는가?(Low) 아니면 많았는가?(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. 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)

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]

처음 겪는 상황 (Low)	1	2	3	4	5	6	7	많이 경험한 상황 (High)

그림. 5. SART 설문지

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 작업부하 (Workload)

작업부하는 운전원의 한정된 처리 능력 안에서 특정한 작업을 수행할 때 사용된 자원의 양으로 정의된다 [15]. 작업부하의 정도가 높을수록 더욱 많은 자원이 소요되며 만약 작업부하가 운전원의 한계를 넘어서면 인적 오류가 유발되어 인적수행도가 저하될 수 있다 [16].

작업부하의 측정 목적은 운전원의 직무 수행에 사용된 자원의 양을 측정함에 있다 [17]. 이러한, 작업부하를 측정하는 방법은 크게 세 종류로 분류되며 설문조사와 면담을 통해 운전원이 느끼는 작업부하를 평가하는 주관적 평가 기법, 운전원의 생리적 변화를 평가하는 생리적 평가 기법, 마지막으로 운전원의 수행도를 평가하는 수행도 평가 기법이 있다.

본 실험에서는 작업부하를 측정하기 위해 주관적 평가 기법을 사용하였으며 대표적인 방법인 MCH(Modified Cooper-Harper Scale) 설문 조사를 채택하였다 [18]. MCH는 그림. 6와 같이 단일 요인을 평가하기 위한 구조화된 척도를 사용하고 있으며, 설문 문항이 비교적 간단하여 작업부하를 측정하기 위한 시간이 짧게 소요된다는 장점이 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

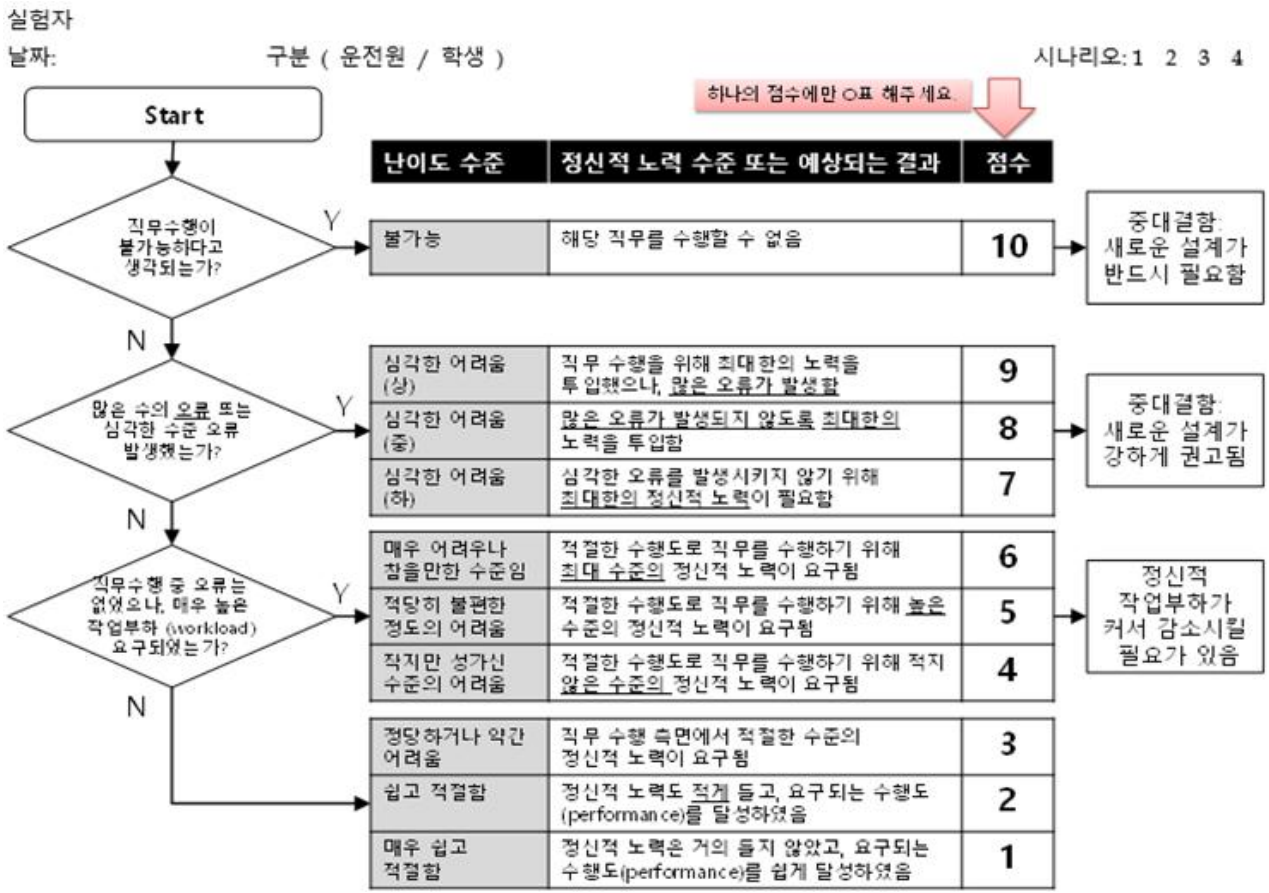


그림. 6. MCH 설문지

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 오류 (Error)

오류는 실험자의 직무 수행이 예상되는 범주에서 벗어날 경우 발생하는 것으로 정의된다. 발생된 오류는 직무 유형과 오류 모드로 분류되며 직무 유형의 경우 정보 확인, 절차서 진행, 발전소 평가, 조작으로 나뉘어 있고 오류 모드는 부적절한 수행 오류(Errors of commission; EOC)와 누락 오류(Errors of omission; EOO)로 분류된다. EOC는 선택 오류, 순서 오류, 시간 오류 또는 정성적 오류에 해당되며 EOO는 직무가 누락되어 발생하는 것을 의미한다[19].

이러한, 오류를 결정하기 위해 본 연구에서는 HuREX 프로젝트에 제시된 것과 동일한 규칙과 분석 방법을 적용했다 [20]. 실험자가 오류를 범하고 나중에 복구하는 경우는 오류로 판단하였지만 해당 직무 단계에서 복구를 수행하였으면 오류로 판단하지 않았다. HuREX 분석 방법과 관련하여, 각 시나리오에서 계수된 오류는 위에서 언급한 오류 유형에 따라 분류된다. 오류 유형에 따라 분류된 오류(그림. 7 참조)들은 각 시나리오의 총 직무 수로 나누어져 오류율로 계산된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Subject Number	Scenario	RP-entry		RP-step		RP-procedure		IG-Graph		IG-comparison		IG-alarm	
		EOC	EOO	EOC	EOO	EOC	EOO	EOC	EOO	EOC	EOO	EOC	EOO
1	Startup(#1)												
1	Shutdown(#2)												
1	LOFW(#3)												
1	SGTR(#4)												
2	Shutdown(#2)												
2	LOFW(#3)												
2	SGTR(#4)												
2	Startup(#1)												
3	LOFW(#3)												
3	SGTR(#4)			1									
3	Startup(#1)												
3	Shutdown(#2)												
4	SGTR(#4)												
4	Startup(#1)												1
4	Shutdown(#2)												
4	LOFW(#3)												
5	Startup(#1)												
5	Shutdown(#2)												
5	LOFW(#3)												
5	SGTR(#4)												
6	Shutdown(#2)												
6	LOFW(#3)												
6	SGTR(#4)				1				1				

그림. 7. HuREX 프레임워크에 기반하여 분류된 오류

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 시간 (Time)

시간은 실험자가 시나리오를 수행하면서 단계(Step), 지시 사항(Instruction) 및 직무(Task)를 완료하는데 걸리는 평균 시간을 나타낸다. 정상 및 비상 절차서는 단계로 구성되어 있으며 단계는 지시 사항과 하나 이상의 직무들이 포함되어 있다. 그림. 8은 단계, 지시 사항, 직무를 설명하기 위한 본 실험에서 사용한 절차서 구성 방식의 예시이다.

터빈을 기동하기 위한 단계 5.1'터빈을 운전하기 위해 다음을 수행한다.' 및 단계 5.2'TBN Speed가 700 RPM에 도달하였으면 Speed Setpoint RPM을 1800 RPM까지 증가시키기 위해 다음을 수행한다.'는 지시 사항을 의미하며 'Setpoint' 및 'Acceleration' 설정은 실험자가 수행해야 할 직무를 나타낸다.

CNS Procedure		개정번호 : 01
OP-01	2% ~ 50% 출력 증발	쪽번호 : 5/13
[단계]	5. 터빈 기동	

5.1 터빈을 운전하기 위해 다음을 수행한다.
- TBN-Speed Setpoint에 700 RPM 설정
- TBN-Acceleration에 150 RPM/MIN 설정

5.2 TBN Speed가 700 RPM에 도달하였으면 Speed Setpoint RPM을 1800 RPM까지 증가시키기 위해 다음을 수행한다.
- TBN-Speed Setpoint에 1800 RPM 설정
- TBN-Acceleration에 130 RPM/MIN 설정

그림. 8. 절차서 구성의 예시

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 동공 운동(Eye-movements)

시선 추적(Eye-tracking) 기술은 아이트래커를 사용하여 동공의 움직임을 기록하고 실험자가 어떠한 직무를 수행하면서 무엇을 보고 있는지를 확인하는 과정을 의미한다. Eye-mind 가설에 따르면, 이러한 동공의 움직임을 통해 실험자의 주의력(Attention), 정신적 처리(Mental processing), 그리고 인지 상태(Cognitive states)의 역동적인 상태를 측정할 수 있다고 제안되었으며 [21], 의료, 항공 그리고 제조 등 다양한 분야에서 연구된 사례가 있다 [22-26].

표. 5는 아이트래커를 이용한 연구에서 주로 사용되는 측정 데이터들에 대한 정의를 나타낸다. 본 실험에서는 측정 데이터의 정확성을 높이기 위해 70% Gaze sample 이상의 데이터를 사용하였으며 1) 깜빡임 률(Blinking rate), 2) AOI(Area of interest)에 대한 Heat Map 총 두 가지의 아이트래커에서 추출한 데이터를 사용하였다.

깜빡임 률은 그림. 9와 같이 아이트래커를 통해 추출된 동공 데이터를 기반으로 데이터가 표기되어 있지 않은 빈칸을 이용하여 추정되었으며 계산된 식은 다음과 같다.

- $Blinking\ counts = 3\ counts + \frac{(4\ counts - 3\ counts)}{2}$
- $Blinking\ rate = \frac{Blinking\ counts}{Scenario\ completion\ time\ (\mathrm{sec})}$

여기서, Count는 데이터가 기록되어 있지 않은 빈 칸을 의미하고 하나의 칸당 20 msec를 지시한다. 깜빡임 수(Blinking counts)는 Jupyter 프로그램의 코드를 사용하여 빈 칸을 3칸(60 msec) 이상일 경우와 4칸(80 msec) 이상일 경우로 구분하여 추출되었다. 깜빡임 률은 추출된 깜빡임 수에 실험자의 시나리오 완료 시간을 나누어 계산되었다. AOI에 대한 Heat Map은 CNS 각 각의 인터페이스 응시한 실험자의 전체 고정 밀도를 나타내며 그림. 10과 같이 계층형 색채 방식을 통해 실험자가 시나리오를 수행하면서 주로 관심을 가지고 응시한 부분을 식별할 수 있는 측정 도구로 사용된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 5. 아이트래커 주요 측정 데이터

추출 데이터	설명
Fixation	· 1° 미만의 특정 영역에서 60 ~ 150msec 이상의 안정적인 이동을 의미함 (실험 목적에 따라 최소 Fixation의 msec 변경이 가능함)
Dwell	· 하나 이상의 Fixation이 연속적으로 특정 영역내에 체류됨을 의미함
Pupil	· 동공 변화를 통한 운전자의 정신 작업 부하의 급변함을 감지 · 심리적 불안감이 높아짐에 따라 Pupil size가 증가함을 보임
Blink	· 실험자의 직무량을 측정하는 대표적인 방법 · Blinking counts가 증가할수록 직무량과 음(-)의 상관 관계를 보임
Visit	· 첫 번째 시선이 특정 영역에 머무는 시점부터 다른 영역으로 이동할 때까지의 시선 이동을 의미함
Saccade	· 특정 Fixation에서 다음 Fixation으로 빠르게 이동하는 시선 이동을 의미함
Entropy	· Level 3 상황인식을 추론할 수 있는 새로운 정보 수집 활동의 지표로 사용됨 · 시스템의 질서와 무질서의 정도를 수량화함
AOI	· 특정 영역에 기초한 수치 및 통계 분석을 가능하게 하는 측정 도구 · Snapshot에 AOI를 설정하여 시선 추적 메트릭스를 추출할 수 있으며 Heat Map을 통해 실험자의 주요 관심 영역을 확인할 수 있음
Fixation to importance ratio (FIR)	· 중요도 비율에 대한 Fixation을 의미함 · 실험자가 각 각의 AOI에 소비한 시간을 중요도와 연관시켜 직무를 완료하기 위해 시간과 주의력을 얼마나 효율적으로 활용했는지를 확인할 수 있음
Selective attention effect (SAE)	· 모든 FIR을 단일 값으로 사용하여 직무를 완료하기 위해 불필요한 요소를 무시하면서 필요한 시각적 요소에 집중하는 전반적인 능력을 나타냄 · SAE 값이 '0'에 가까울수록 전체적인 주의력 자원 효율성이 높다는 것을 나타냄

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Gaze point X [MCS px]	Gaze point Y [MCS px]	Gaze point 3D X [HUCS mm]	Gaze point 3D Y [HUCS mm]	Gaze point 3D Z [HUCS mm]
777	385	89.0669	79.8013	520.608
778	385	88.7437	79.6095	519.787
780	387	89.9693	81.0521	533.8104
784	388	92.5997	84.4607	559.7273
783	389	91.1585	82.3979	550.1984
784	391	87.5167	78.34	529.489
788	396	82.1691	73.1236	508.4529
795	403	80.5492	71.5263	517.5977
800	415	75.8129	63.7737	500.8126
804	430	72.7641	56.2507	494.0103
810	444	70.9753	50.9273	499.4639
767	510	59.4019	14.4771	330.3434
838	754	56.8372	-83.0075	488.9279
843	766	89.2569	-142.8624	795.0004
852	745	82.3164	-127.4213	789.4676
859	705	66.112	-85.4709	672.9033
865	675	53.406	-57.2133	569.454
869	641	45.5492	-35.6644	504.9986
869	614	43.5169	-23.0037	483.6071
866	595	46.0843	-15.072	496.8556
860	579	50.191	-8.5622	513.1886
856	566	55.4648	-2.6641	544.079
835	551	65.4693	4.2322	544.7704

그림. 9. 추출된 동공 데이터

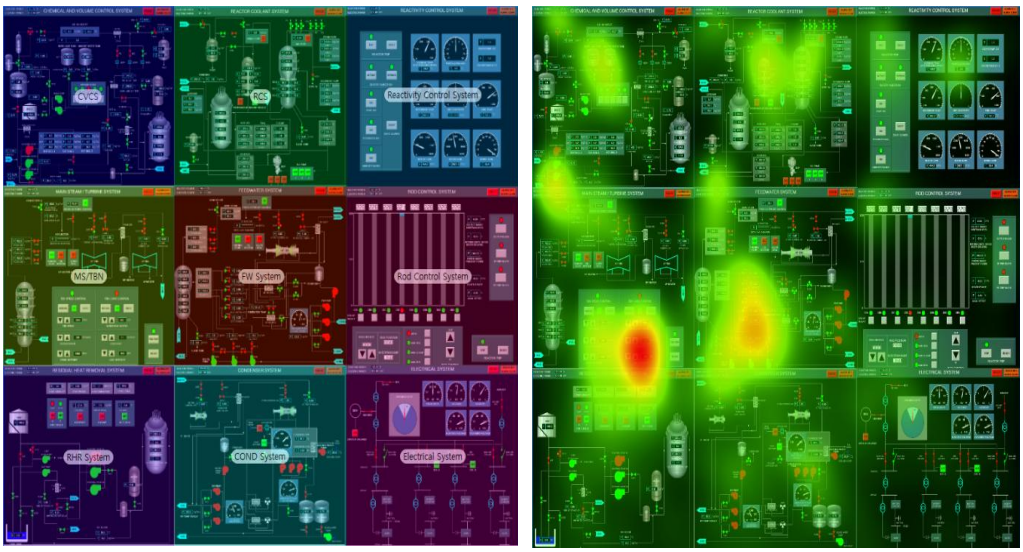


그림. 10. AOI(왼쪽) 및 Heat Map(오른쪽)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 절 시설 및 장치

본 실험에서는 그림. 11과 같이 CNS가 탑재된 노트북 2대와 실험자가 절차서를 수행하는 과정을 녹화하는 캠코더, 실험자의 동공 및 시선을 추적하는 모바일 아이트래커 그리고, 실험을 위해 개발된 Westinghouse 기반의 정상 및 비상 절차서가 사용되었으며 실험은 책상, 의자 및 와이파이와 전기를 사용할 수 있는 장소에서 진행되었다.

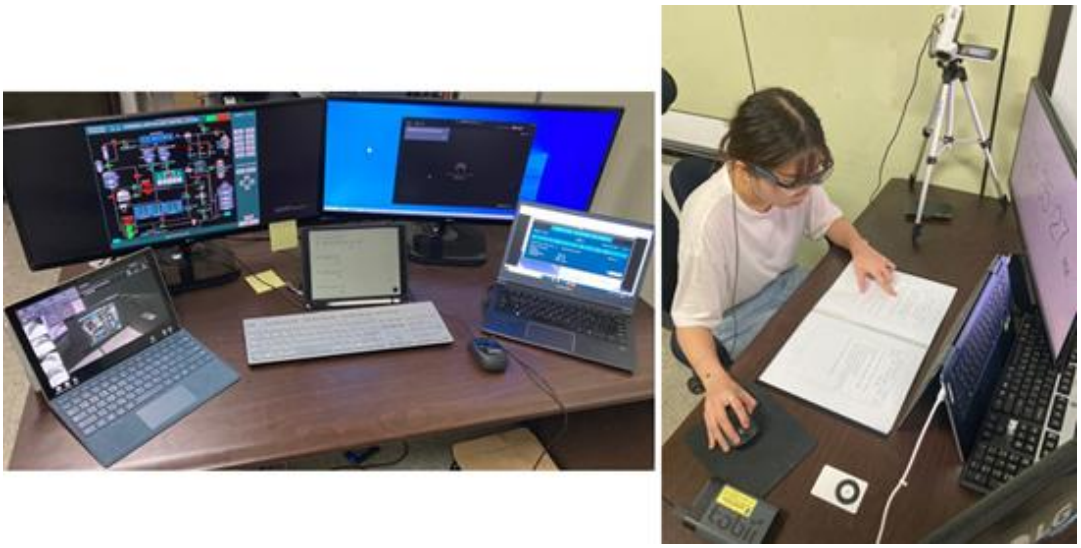


그림. 11. 실험에 사용된 장치 및 장비

가. 실험 녹화 장치

각 실험자의 시나리오 수행 중 직무 수행 및 행동들을 관찰하기 위해 녹화 시스템을 사용하였다. 해당 상황에 맞는 절차를 수행하는지 확인하기 위해 실험자 주변에 캠코더를 설치하였으며 기기 조작 및 변수 확인을 위해 CNS 시뮬레이터를 조작할 수 있는 노트북의 화면을 녹화하였으며, 실험자가 직무 수행 중 어느 기기 및 변수를 모니터링하는지 확인할 수 있는 아이트래커 녹화 파일을 저장하였다. 이러한, 기록들은 주로 오류 분석 및 수행된 직무 수를 계산하고 각 단계의 완료 시간을 추정하는 데 사용되었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 아이트래커

아이트래커는 근적외선 기술과 고해상도 카메라를 사용하여 각막 반사와 시선 방향을 추적한다. 이를 통해 연구자는 2D 화면이나 3D 환경에서 실험자의 시선 지점을 지속적으로 모니터링 할 수 있다. 아이트래커 유형으로는 1) 아이트래커 기기를 정방향에 위치시켜 실험자의 동공을 추적하는 원격 아이트래커, 그리고 2) 실험자가 아이트래커를 착용하고 자유롭게 움직이면서 실험을 수행할 수 있는 모바일 아이트래커 두 가지 유형이 있다.

본 실험에서는 모바일 아이트래커인 Tobii Pro Glasses 2 eye-tracking system [27]을 사용하였다. 이 안경형 모바일 아이트래커는 실험자의 활동을 방해하지 않고 동공의 움직임을 포착할 수 있으며 활동 전체에 걸쳐 연속적, 객관적으로 측정이 가능한 장점을 갖고 있다.

다. 절차서

본 실험에서는 종이 기반의 절차서가 사용되었다. 정상 및 비상 시나리오 절차서 모두 Westinghouse 모델 기반의 양식으로 작성되었지만, 정상 시나리오 절차서의 경우 CNS 시뮬레이터에 맞게 수정되고 단순화되었다 (그림. 8 참조).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 7 절 교육 및 훈련

본 실험을 수행하기 앞서 지식과 경험을 제외한 동일한 조건에서 실험을 진행하기 위해 실험자들은 실험 목적, CNS 시뮬레이터 및 관련 계통에 대한 설명, 조작 방법, 설문지 작성법 등에 대한 교육을 받은 후 CNS 시뮬레이터 친숙화 시간을 갖는다. 학생들의 경우 계통 및 조작 방법에 대한 숙련도를 확인하고 자신감을 높이기 위해 연습 시나리오를 수행하였다. 학생들에 대한 교육 시간은 대략 3시간 정도 소요되었으며, 운전원들은 약 2시간 정도 소요되었다.

제 8 절 자료 수집

본 연구에서 대부분의 데이터는 앞서 언급한 설문지와 아이트래커를 이용하여 수집되었다. 표. 6은 인적수행도 데이터 수집에 사용된 방법 및 항목에 대하여 요약한 내용이며 각 수집 방법 및 항목들을 통해 수집된 데이터는 인적수행도와 직접적으로 연결되어있다.

표. 6. 인적수행도 데이터 수집 방법 및 항목

수집 방법	수집 항목	인적수행도
설문지	· 일반 정보 설문지 · SART 설문지 (그림. 4 참조) · MCH 설문지 (그림. 5 참조)	· 상황인식 · 작업부하
아이트래커	· 비디오 녹화본 · Excel output (그림. 7 참조) · AOI에 대한 Heat Map (그림. 8 참조)	· 시간 · 오류 · 동공 운동 · 작업부하
노트북 및 캠코더	· 화면 녹화 · 캠코더 녹화본 (절차서)	· 시간 · 오류

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 인적수행도 차이에 대한 실험 결과

이 장에서는 두 개의 독립 변수(즉, 피실험자 유형 및 시나리오 유형)에서의 인적 수행도 측정 차이와 운전원 또는 학생에 해당하는 인적 수행도에 관한 분석 결과를 소개한다. 이러한, 인적수행도 차이를 조사하기 위해 분산분석(Analysis of variance; ANOVA)과 상관분석이라는 두 가지의 통계 분석 방법이 적용되었다.

제 1 절 분산분석 결과

표. 7은 피실험자 유형 및 사고 유형에 따라 달라지는 인적수행도 측정의 평균 값이 요약되어 있다. 분산 분석은 통계적으로 그룹(즉, 피실험자 유형 및 시나리오 유형) 간의 평균 차이가 통계적으로 유의한지에 대한 여부를 조사하기 위해 사용되었으며, 각 인적수행도 측정치의 변동량을 통하여 평가되었다. 표. 8는 분산분석에 대한 결과가 요약되어 있다.

분산분석 결과 피실험자 유형 및 사고 유형에서 여러 인적 수행도가 통계적으로 유의한 차이가 나타났다. 피실험자 유형의 경우 단계를 완료하는 데 걸리는 평균 시간 및 오류율에서 통계적 차이가 확인되었으며, 사고 유형의 경우 MCH 점수, SART 점수, 단계/지시사항/직무를 완료하는데 걸리는 평균 시간에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 7. 독립변수의 인적수행도 평균값

인적수행도	측정방법	평균(M)	독립 변수			
			피실험자 유형		사고 유형	
			운전원	학생	정상	비상
상황인식	SART	26.34	25.86	26.83	30.64	22.05
작업부하	MCH	3.29	3.13	3.45	2.36	4.22
오류	Number of error [#]	0.891	0.438	1.344	0.672	1.109
	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	Blinking counts [#]	476.30	526.73	425.88	511.77	440.84
	Blinking rate [#/sec]	0.31	0.32	0.30	0.30	0.33

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 8. 분산분석 결과

인적 수행도	측정 방법	독립 변수					
		피실험자 유형		사고 유형		피실험자 유형 * 사고 유형	
		F	P-Value	F	P-Value	F	P-Value
상황인식	SART	0.570	0.452	44.833	**0.000****	0.059	0.808
작업부하	MCH	1.319	0.253	42.361	**0.000****	0.147	0.702
오류	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
시간	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
동공 운동	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

*: 독립변수와 관련된 통계적 차이(95% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.05$).

**: 독립변수와 관련된 통계적 차이(99% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.01$).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 상황인식

상황인식에 대한 인적수행도 측정에서는 피실험자 유형에 대한 통계적인 차이가 없었지만, 사고 유형에 대해 통계적으로 유의한 차이가 나타났다 (표. 8 참조). 피실험자의 SART 점수에 대해 비교하면 정상 시나리에서 SART 점수(30.64)가 비상 시나리오에서의 SART 점수(22.05)보다 높은 것이 확인되었다 (표. 7 참조). 그림. 12는 정상 및 비상 시나리오 모두에서 운전원과 학생 집단에 대한 SART 점수를 도식화하였으며, 정상 시나리오에서 피실험자 유형에 관계없이 비상 시나리오보다 높은 상황인식을 나타낸 것을 알 수 있다.

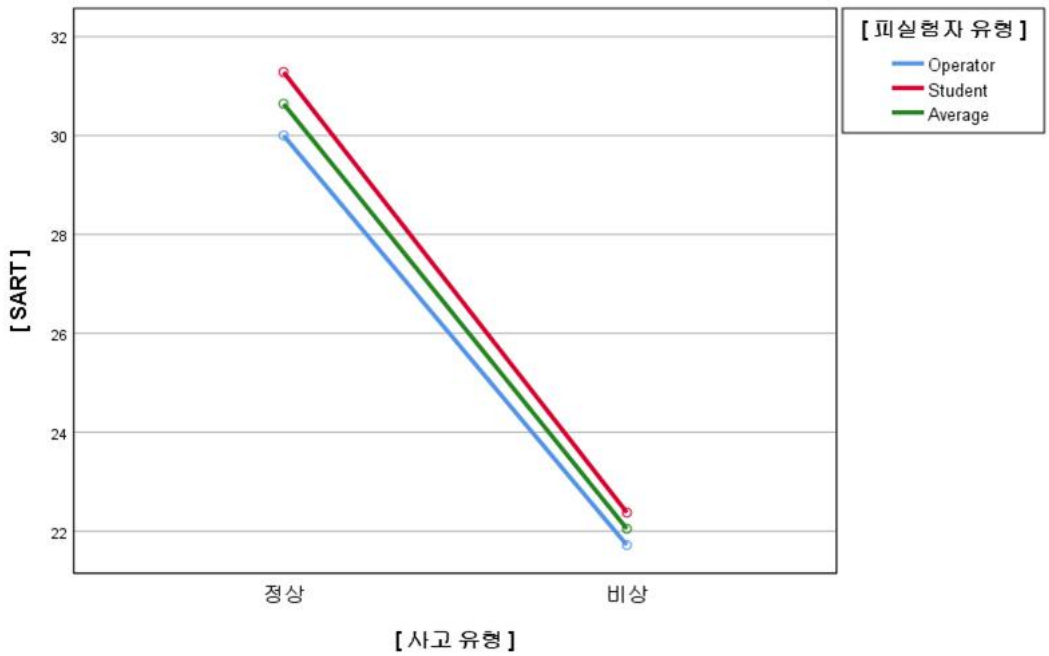


그림. 12. SART에 대한 결과 도표

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 작업부하

작업부하에 대한 인적수행도 측정에서는 피실험자 유형에 대한 통계적인 차이가 없었지만 사고 유형에 대해서는 통계적으로 유의한 차이를 보였다 (표. 8 참조). 표. 7에서 볼 수 있듯이 MCH 점수는 평균적으로 정상 시나리오(2.36)에서 보다 비상 시나리오(4.22)에서 높게 측정된 것이 확인되었다. MCH 평가 척도에 대한 설문지 (그림. 6 참조)에 따르면 정상 시나리오의 평균 작업 부하는 대략적으로 “적절한” 난이도(적절한 정신적 작업 부하)에 해당하는 반면, 비상 시나리오의 평균 작업 부하는 “불편한” 난이도(중간 정도의 정신적 작업 부하)에 가까웠다. 그림. 13은 정상 및 비상 시나리오 모두에서 피실험자 유형에 대한 MCH 결과의 추세를 나타내며, 피실험자 유형과 관계없이 정상 시나리오보다 비상 시나리오에서 비교적 높은 작업부하가 측정된 것이 확인되었다.

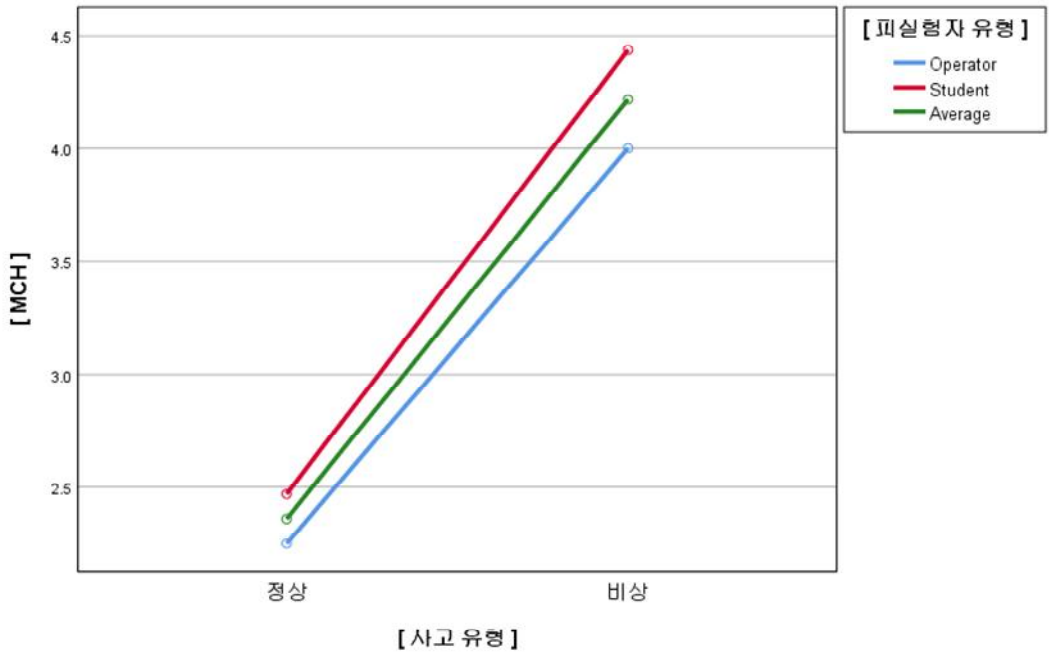


그림. 13. MCH에 대한 결과 도표

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 오류

표. 8에서와 같이 오류는 피실험자 유형에 따라 상당한 차이를 보였다. 표. 7에서 볼 수 있듯이 평균적으로 학생(0.017) 집단이 운전원(0.005) 집단보다 오류율이 더욱 높은 것이 확인되었지만, 사고 유형에서 오류율은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 그림. 14는 정상 시나리오와 비상 시나리오 모두에서 운전원 및 학생 집단에 대한 오류율 결과를 도식화하였으며 학생 집단은 사고 유형과 관계없이 운전원 집단보다 더 높은 오류율이 나타났다.

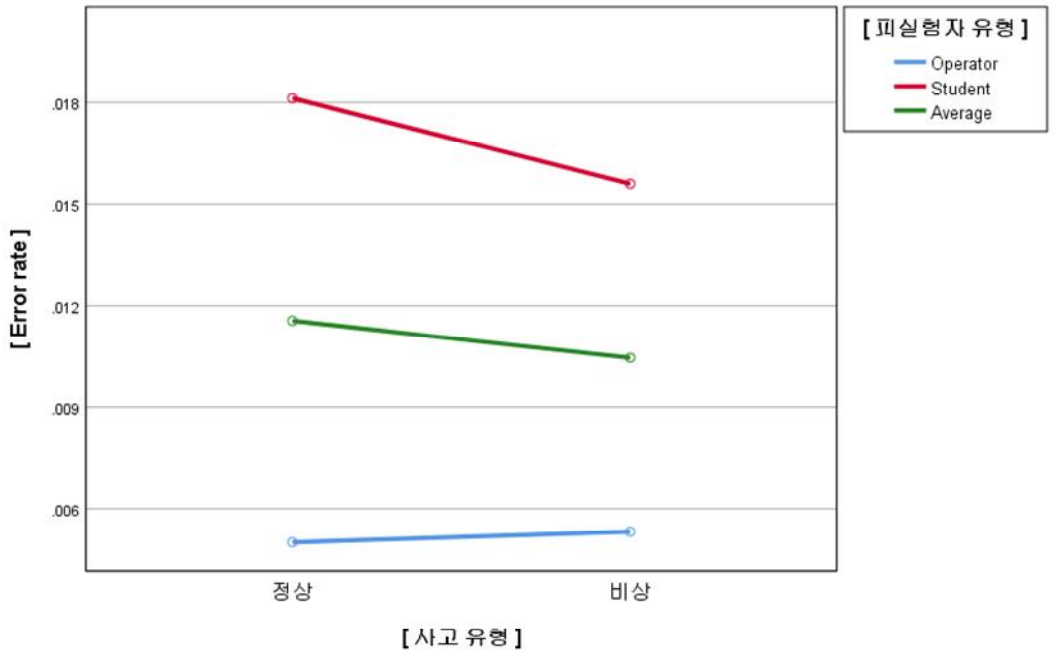


그림. 14. 오류율에 대한 결과 도표

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 시간

시나리오 완료까지의 시간에 대한 모든 인적수행도 측정 결과 사고 유형에서 유의한 차이를 보였지만, 단계를 완료하는데 걸리는 평균 시간을 제외하고 피실험자 유형에 대한 통계적인 차이가 없었다(표. 8 참조). 사고 유형에서 직무를 완료하는 데 걸리는 평균 시간을 살펴보면 비상 시나리오(11.37초)는 정상 시나리오(28.01)보다 평균 완료 시간이 비교적 짧은 것이 확인되었다. 그림. 15는 정상 및 비상 시나리오 모두에서 피실험자 유형에 대한 평균 완료 시간의 추세를 보여준다.

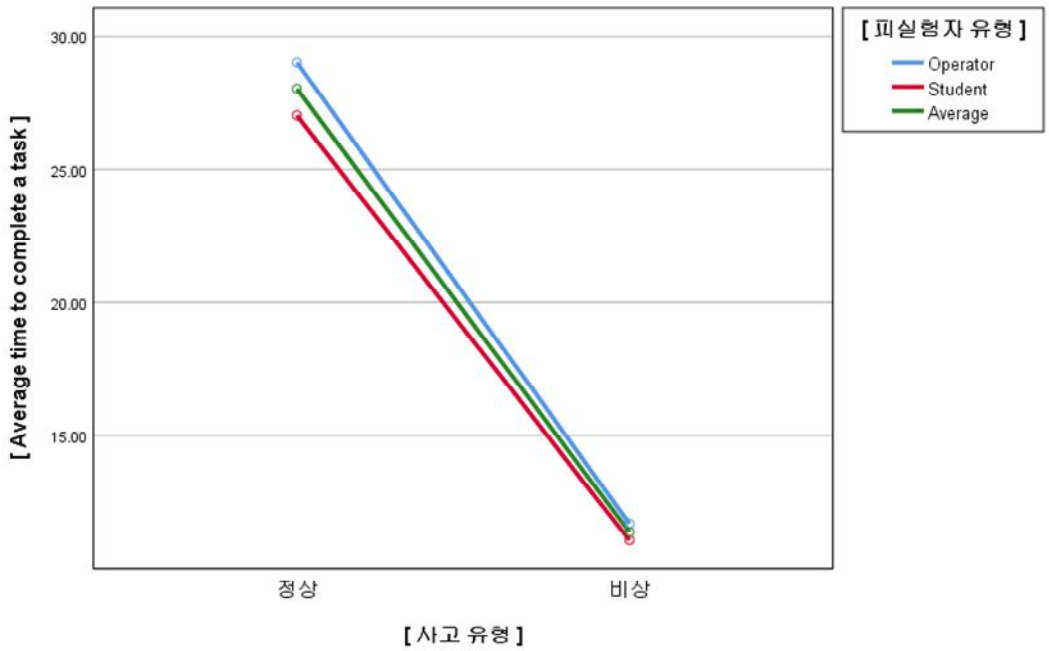


그림. 15. 시간에 대한 결과 도표

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 동공 운동

동공 운동의 경우 표. 8에서와 같이 피실험자 유형 및 사고 유형 모두 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나, 그림. 16과 같이 운전원의 경우 정상 시나리오보다 비상 시나리오에서 깜빡임 률이 높았던 반면에, 학생의 경우 정상 시나리오 및 비상 시나리오 두 상황 모두에서 깜빡임 률이 비교적 흡사한 것이 확인되었다.

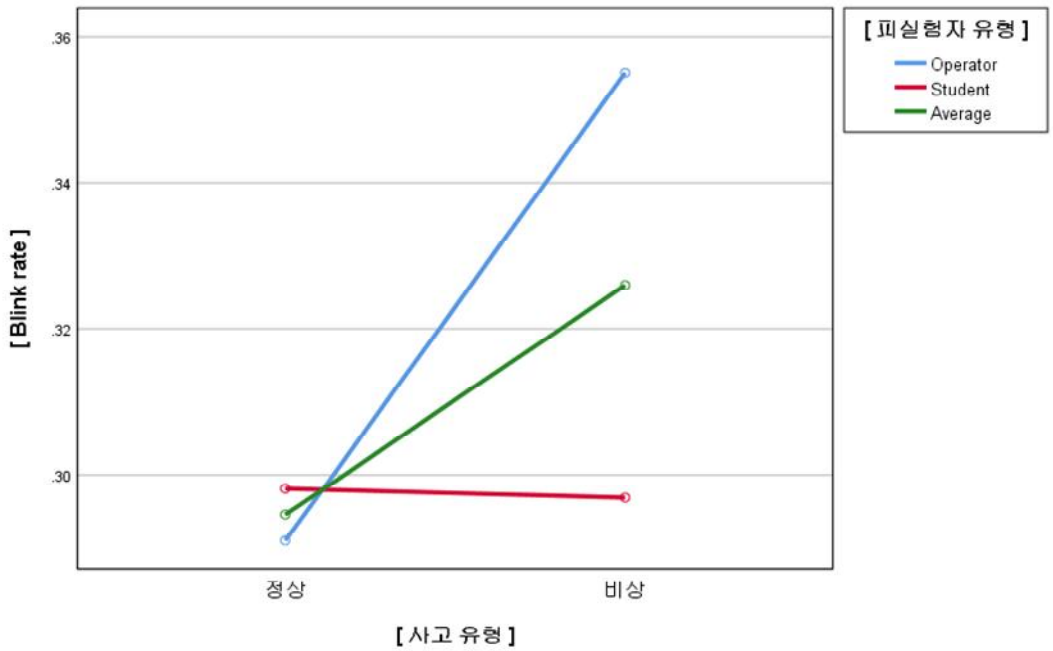


그림. 16. 깜빡임 률에 대한 결과 도표

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 상관분석 결과

이 절에서는 상관관계 분석을 통해 5가지 인적수행도 변수들이 서로 어떠한 상관관계가 있는지를 확인하고 다음의 상관관계를 별도로 조사했다. - 1) 전체 피실험자, 2) 운전원, 3) 학생.

상관분석 방법은 앞서 언급한 대로 변수 간의 관계를 밝히는 데 사용되는 통계 기법이다. 이 방법에서 상관관계(즉, 선형 관계)의 방향과 강도를 확인하기 위해 상관 계수 'r'을 측정한다. 일반적으로, 상관 계수 r = - 1 일 경우 하나의 변수가 커질수록 다른 변수는 오히려 작아지는 음의 상관관계를 가지며 이와 반대로, 상관계수 r = 1일 경우 하나의 변수가 커질수록 다른 변수도 함께 커지는 양의 상관관계를 의미한다. 또한, 상관도에 대해 ±0.40 ~ ±1.0 사이의 계수 값은 일반적으로 강한 상관관계를 나타내며 ±0.20 ~ ± 0.40 사이 및 ±0.20 미만의 계수 값은 각각 중간 및 약한 상관관계를 의미한다.

표. 9는 전체 피실험자의 5 가지 인적수행도 측정치에 대한 상관관계 행렬이다. 상관분석 결과 다음과 같은 상관관계가 확인되었다. (1) MCH - SART, (2) MCH - Error rate, (3) MCH - Average time to complete a task, (4) SART - Error rate 및 (5) SART - Blink rate. 또한, '*'이 붙어있는 계수 값은 통계적으로 유의한 수준을 의미하고 중간에서 강한 정도의 상관관계를 나타낸다.

표. 10은 운전원에 대한 상관분석 결과이다. 상관분석 결과 운전원 집단에서 다음과 같은 유의한 상관관계가 확인되었다. (1) MCH - SART, (2) MCH - Error rate, (3) SART - Error rate 및 (4) SART - Blink rate.

표. 11은 학생에 대한 상관분석 결과이며 다음과 같은 유의한 상관관계가 학생 집단에서 확인되었다. (1) MCH - SART, (2) MCH - Error rate 및 (3) SART - Error rate.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 9. 전체 피실험자 32명에 대한 상관분석 결과

< 전체 실험자 >	N	상관 계수 (r)				
		MCH	SART	Error rate	Average time to complete a task	Blinking rate
MCH	128	1				
SART	128	**- 0.639****	1			
Error rate	128	**- 0.440****	**0.392****	1		
Average time to complete a task	128	**0.224****	- 0.107	- 0.041	1	
Blinking rate	128	0.047	**- 0.203***	0.014	- 0.071	1

*: 독립변수와 관련된 통계적 차이(95% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.05$).

**: 독립변수와 관련된 통계적 차이(99% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.01$).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 10. 운전원 16명에 대한 상관분석 결과

< 운전원 >	N	상관 계수 (r)				
		MCH	SART	Error rate	Average time to complete a task	Blinking rate
MCH	64	1				
SART	64	**- 0.569****	1			
Error rate	64	**- 0.498****	**0.377****	1		
Average time to complete a task	64	0.139	0.027	0.033	1	
Blinking rate	64	0.155	**- 0.304***	- 0.037	0.013	1

*: 독립변수와 관련된 통계적 차이(95% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.05$).

**: 독립변수와 관련된 통계적 차이(99% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.01$).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 11. 학생 16명에 대한 상관분석 결과

< 학생 >	N	상관 계수 (r)				
		MCH	SART	Error rate	Average time to complete a task	Blinking rate
MCH	64	1				
SART	64	**- 0.705****	1			
Error rate	64	**- 0.412****	**0.423****	1		
Average time to complete a task	64	0.234	- 0.195	- 0.051	1	
Blinking rate	64	- 0.077	- 0.057	0.027	- 0.162	1

*: 독립변수와 관련된 통계적 차이(95% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.05$).

**: 독립변수와 관련된 통계적 차이(99% 신뢰수준 이내)를 표시했다 ($p<0.01$).

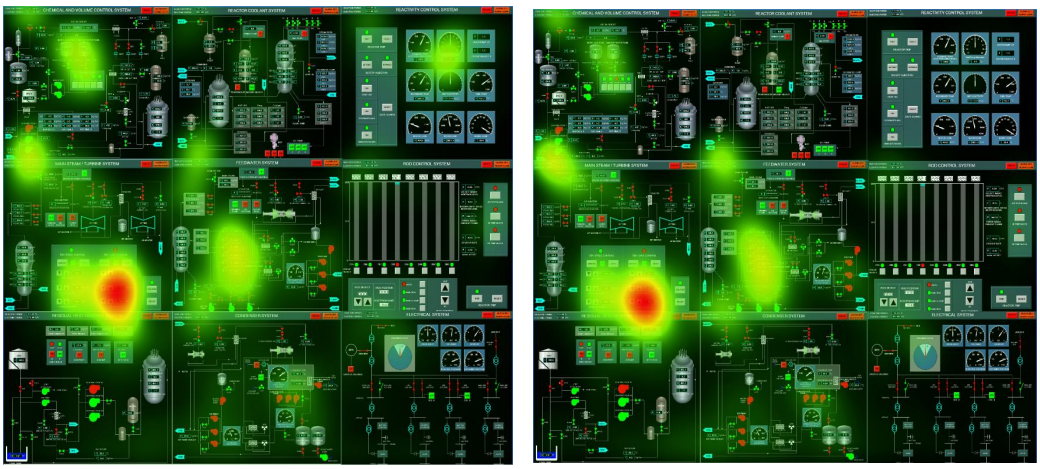
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 AOI에 대한 Heatmap 분석 결과

본 연구에서는 아이트래커를 이용하여 AOI에 대한 Heat Map 데이터를 수집했다. Heat Map은 앞서 언급한 것과 같이 계층형 색채 방식을 통해 실험자가 시나리오를 수행하면서 주로 관심을 가지고 응시한 부분을 식별할 수 있는 측정 도구로 사용된다. 이 절에서는 수집된 Heat Map을 통해 사고 유형에 따른 운전원과 학생의 시선 패턴에 대해 비교 분석한 결과에 대하여 다음과 같이 소개한다. - 1) 정상 시나리오에서의 운전원과 학생 간의 Heat Map 비교, 2) 비상 시나리오에서의 운전원과 학생 간의 Heat Map 비교.

그림. 17은 운전원과 학생이 정상 시나리오를 수행했을 때의 Heat Map이다. 그리고, 표. 12는 정상 시나리오에서의 AOI에 대한 Fixation count 분산분석 결과이며, 명시된 값들은 통계적으로 유의한 차이를 보이는 인터페이스에 대해 요약하였다.

분석 결과 운전원의 경우 정상 시나리오를 수행하면서 발전소를 상태를 안정적으로 유지하기 위해 주요 변수(즉, Plant parameter)들을 확인하며 직무를 수행한 것이 확인되었다. 반면에, 학생의 경우 발전소의 주요 변수들에 대해 감시 및 모니터링에 주의하지 않으며 직무를 수행한 것이 확인되었다.



< 운전원 > < 학생 >

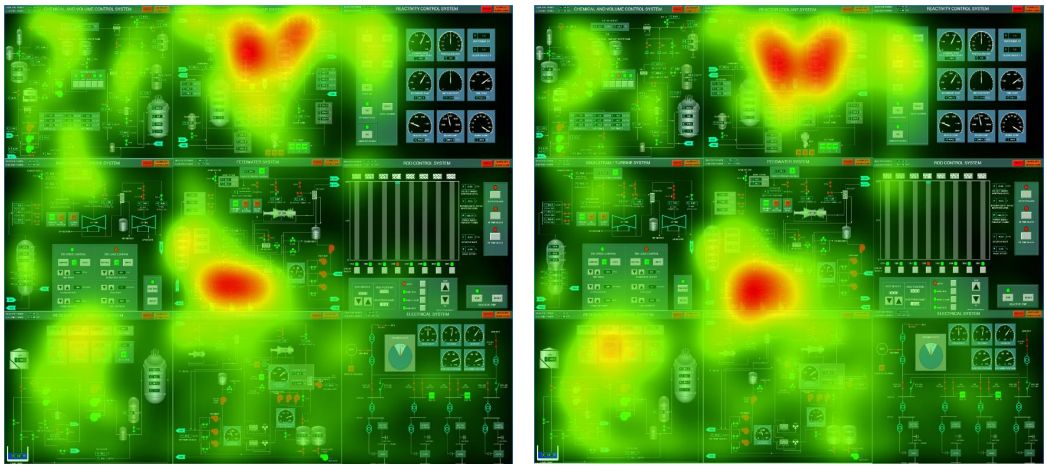
그림. 17 정상 시나리오에서의 Heat Map

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 12. 정상 시나리오에서의 Fixation count 분산분석 결과

시나리오	인터페이스	p-value	평균값 (Fixation count)	
			운전원	학생
출력 증발 운전 (2% ~ 50%)	PRZ indicator in RCS	0.011	18.35	7.88
	Reactivity control system	0.018	199.41	40.88
	BOR/DIL	0.023	150.24	99.75
	Plant parameter	0.025	138.71	22.44
출력 감발 운전 (100% ~ 고온대기)	Reactivity control system	0.010	107.06	19.12
	BOR/DIL	0.011	36.81	16.94
	CVCS	0.013	134.56	82.76
	Power indicator in reactivity control system	0.013	1.94	0.18
	Plant parameter	0.017	67.31	7.12

그림. 18은 비상 시나리오에 대한 운전원과 학생의 Heat Map이다. 비상 시나리오를 수행했을 때 운전원과 학생들의 Heat Map은 전반적으로 유사한 시선 패턴을 보였다.



< 운전원 > < 학생 >

그림. 18 비상 시나리오에서의 Heat Map

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결론

본 연구는 HRA 데이터 수집과 관련하여 Full-scope 시뮬레이터 연구에 직면한 문제를 극복하기 위한 연구의 일환으로 CNS 시뮬레이터를 이용하여 운전원과 학생 간의 인적수행도 차이를 식별하기 위해 시도했다. 본 실험에서는 무작위 요인 실험 설계를 채택하여 피실험자 유형 및 사고 유형의 두 가지 독립변수를 사용했다. 1) 상황인식, 2) 작업부하, 3) 오류, 4) 시간 및 5) 동공 운동의 5가지 인적수행도에 대해 측정하였으며 실험을 위해 정상/비상 시나리오와 관련된 절차서를 개발했다. 실험에서 수집된 인적수행도 측정 데이터는 분산분석과 상관분석 총 2 가지 통계 분석 방법을 사용하여 분석되었다.

운전원과 학생 간의 인적수행도 비교 결과 상황인식, 작업부하 및 직무를 완료하는데 걸리는 평균 시간에서는 유의한 차이가 없었다. 그러나, 오류의 경우 정상 및 비상 시나리오 모두에서 학생 집단이 운전원 집단보다 더욱 많은 오류가 발생한 것으로 확인되었다. 운전원의 인적수행도 데이터에 대한 상관분석 결과, 작업부하와 상황인식, 작업부하와 오류율, 상황인식과 오류율 및 상황인식과 깜빡임에서 유의한 결과가 도출되었으며 학생 집단 상관분석 결과 작업부하와 상황인식, 작업부하와 오류율 및 상황인식과 오류율에서 유의함이 확인되었다. 또한, Heat Map 분석 결과 운전원 집단에서는 직무 수행 중 발전소 주요 변수에 대하여 지속적으로 감시 및 조작을 수행한 것이 확인되었으나, 학생의 경우 직무 수행 중 발전소 주요 변수에 대한 모니터링을 수행하지 않은 것으로 확인되었다.

CNS 시뮬레이터를 사용하여 운전원과 학생 간의 인적수행도 차이를 보여준 본 연구 결과는 Full-scope 시뮬레이터 환경에서 운전원의 인적수행도를 추론하는 연구에 도움이 될 것으로 예상된다. 다시 말해, 이 연구 결과는 피실험자 유형(즉, 운전원 vs 학생)과 시나리오 유형(정상 시나리오 vs 비상 시나리오)으로 인한 차이를 식별할 뿐만 아니라 나아가, 선행 연구[3-5] 결과를 기반으로 시뮬레이터 복잡성(즉, 단순화된 시뮬레이터 vs Full-scope 시뮬레이터)의 차이를 식별하여 본 연구의 최종 목적인 Full-scope에서의 운전원의 수행도에 대하여 추론 할 수 있는 방법의 지표가 될 것으로 기대된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 사사

This work of authorship was prepared as an account of work sponsored by Idaho National Laboratory (under Contract DE-AC07-05ID14517), an agency of the U.S. Government. Neither the U.S. Government, nor any agency thereof, nor any of their employees makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed or represents that its use would not infringe privately owned rights.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] Byeon, S. N., et al. An Human Reliability Analysis to Identify Human Error Mechanisms for Reducing the Risks Associated with Human Errors in a Main Control Room of the SMART. No. KAERI/CM--1427/2010. Korea Atomic Energy Research Institute, 2011.

[2] Park, Jooyoung, Awwal Mohammed Arigi, and Jonghyun Kim. "A comparison of the quantification aspects of human reliability analysis methods in nuclear power plants." Annals of Nuclear Energy 133 (2019): 297-312.

[3] Choi, Jeong Hun, et al "An Experimental Investigation of Human Performance Differences Depending on Simulator Complexity" Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Jeju, Korea. 2021.

[4] Kim, Jeongtaeg, et al. "An experimental design on the use of rancor microworld simulator: a comparison of human performances between actual operators and students." Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Goyang, Korea. 2019.

[5] Park, Jooyoung, et al. "Identification of Collectible Items in the Rancor Microworld Simulator Compared to Full-Scope Studies." International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, Cham, 2020.

[6] Ulrich, Thomas A. The Development and Evaluation of Attention and Situation Awareness Measures in Nuclear Process Control Using the Rancor Microworld Environment. University of Idaho, 2017.

[7] Lim, Sung-Man, et al. "An analysis of eye movement in observation according to university students' cognitive style." Journal of The Korean Association For Science Education 33.4 (2013): 778-793.

[8] Choi, Hyun-Dong, and Dong-Hoon Shin. "Eye-tracking on inservice elementary teachers' interpreting of science textbook tables." Journal of Korean Elementary Science Education 31.3 (2012): 358-371.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[9] Ha, Jun-Su, and Poong-Hyun Seong. "A review of studies on operator's information searching behavior for human factors studies in NPP MCRs." Nuclear Engineering and Technology 41.3 (2009): 247-270.

[10] Endsley, Mica R., and Daniel J. Garland, eds. Situation awareness analysis and measurement. CRC Press, 2000.

[11] 이동하, and 이현철. "상황인식에 대한 측정 및 차세대 원자로 운전원 성능 평가에서의 활용방법에 관한 이론 연구." 산업공학 (IE interfaces) 13.4 (2000): 751-758.

[12] 하준수, and 성풍현. "신형원전 주제어실 인적요소 검증을 위한 인적수행도 평가척도 개발." 대한인간공학회지 25.3 (2006): 85-96.

[13] Endsley, Mica R. "Measurement of situation awareness in dynamic systems." Human factors 37.1 (1995): 65-84.

[14] Taylor, Richard M. "Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design." Situational awareness. Routledge, 2017. 111-128.

[15] O'DONNELL, Robert D. "Workload assessment methodology." Cognitive processes and performance (1986).

[16] Norman, Donald A., and Daniel G. Bobrow. "On data-limited and resource-limited processes." Cognitive psychology 7.1 (1975): 44-64.

[17] 김사길, 변승남, and 이동훈. "국내 원자력발전소 첨단 주제어실 운전원의 팀 효율성 측정 방법에 관한 연구." 대한인간공학회지 27.1 (2008): 21-27.

[18] Cummings, M. L., Kevin Myers, and Stacey D. Scott. "Modified Cooper Harper evaluation tool for unmanned vehicle displays." Proceedings of UVS Canada: conference on unmanned vehicle systems Canada. 2006.

[19] Swain, Alan D., and Henry E. Guttmann. Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final report. No. NUREG/CR--1278. Sandia National Labs., 1983.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[20] Jung, Wondea, et al. "HuREX-A framework of HRA data collection from simulators in nuclear power plants." Reliability Engineering & System Safety 194 (2020): 106235.

[21] Bhavsar, Punitkumar, Babji Srinivasan, and Rajagopalan Srinivasan. "Quantifying situation awareness of control room operators using eye-gaze behavior." Computers & chemical engineering 106 (2017): 191-201.

[22] van de Merwe, Koen, Henk van Dijk, and Rolf Zon. "Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment." The International Journal of Aviation Psychology 22.1 (2012): 78-95.

[23] Williams, Brett, Andrew Quested, and Simon Cooper. "Can eye-tracking technology improve situational awareness in paramedic clinical education?." Open access emergency medicine: OAEM 5 (2013): 23.

[24] Kim, Ji Tae, et al. "An experimental approach to estimate operator's information processing capacity for diagnosing tasks in NPPs." Annals of Nuclear Energy 59 (2013): 100-110.

[25] Kovesdi, Casey Robert, et al. Measuring human performance in simulated nuclear power plant control rooms using eye tracking. No. INL/EXT-15-37311. Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States), 2015.

[26] Moore, Kristin, and Leo Gugerty. "Development of a novel measure of situation awareness: The case for eye movement analysis." Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. Vol. 54. No. 19. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2010.

[27] Niehorster, Diederick C., Roy S. Hessels, and Jeroen S. Benjamins. "GlassesViewer: Open-source software for viewing and analyzing data from the Tobii Pro Glasses 2 eye tracker." Behavior Research Methods 52.3 (2020): 1244-1253.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감사의 글

안전이라는 단어에 이끌려 시작한 석사학위 과정이 2년의 시간을 걸쳐 결실을 맺으려 합니다. 이 논문이 완성되기까지의 과정은 생각처럼 쉽지만은 않았지만 수많은 사람들의 도움을 받아 완성할 수 있었습니다. 그분들의 도움이 없었다면 논문이 완성될 수 없기에 이 자리를 빌려 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저, 항상 아낌없는 조언과 지도를 해주신 존경하는 김종현 교수님께 감사의 뜻을 전합니다. 실험이나 연구에 대해 아무것도 모르던 저를 교수님께서는 연구자로서의 태도와 학습 방법뿐만 아니라 앞으로의 인생에 필요한 지혜 등 많은 것들을 가르쳐주셨습니다. 실수 투성이인 저에게 해주신 세심하며 명철한 제안과 배려를 통해 보다 넓은 식견을 배울 수 있었고 성장할 수 있는 큰 동력이었습니다. 정말 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

또한, 바쁘신 와중에 석사학위 졸업 논문 심사에 참여해 주시고 세심한 제안과 깊은 관심을 가져주신 나만균 교수님, 송종순 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고, 학부 과정부터 석사 과정까지 열정적인 강의로 많은 가르침을 주신 정운관 교수님, 이경진 교수님, 김진원 교수님께 감사드립니다.

실험실 분들에게서도 많은 도움을 받았습니다. 석사 과정 초기부터 함께한 이승헌 형으로부터 많은 것을 배울 수 있었습니다. 연구를 진행함에 있어 이해가 안되거나 막히는 부분에 있어 해결하는데 많은 도움을 받았으며 스스로 정답을 찾아가는 방법을 배울 수 있었습니다. 동네 형같은 Awwal 박사님에게는 연구뿐만 아니라 발표 등 여러 면에서 제 부족함을 고칠 수 있도록 조언을 해주었습니다. 그의 도움이 있었기에 연구 결과는 더욱 세련되어 질 수 있었습니다. 실험 진행과 밤낮으로 분석을 같이해준 김성헌, 양태원에게 감사의 말을 전합니다. 덕분에 많은 자극을 받을 수 있었고 즐거운 연구를 할 수 있었습니다. 그리고, 눈 깜빡임을 계산하기 위해 도움을 준 이대일 형과 동기인 박지훈에게 감사합니다. 석사 과정 동기이자 믿고 의지할 수 있는 김효진, 항상 긍정적인 마인드로 즐거운 석사 생활을 할 수 있도록 도움을 준 김재현에게 감사의 인사를 드립니다. 석사 과정 동안 많은 추억을 선물해준 HERA 실험실 모두에게 다시 한번 감사드립니다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

더하여 업무를 병행하면서 실험에 도움을 주신 최정훈 차장님, 실험에 참여해주신 한빛원자력발전소 운전원분들과 조선대학교 선·후배와 동기들 모두에게 감사드립니다.

마지막으로 가정의 평화를 지키는 동생과 항상 믿고 응원해주시는 아버지, 어머니께 감사의 인사를 드립니다.

이제 졸업을 앞두고 사회로 나서는 문턱에 서니 설렘보다 불안한 감정이 앞섭니다. 아직 갈피를 잡지 못하고 있지만 이런 저를 위해 도움과 격려의 말씀을 해주신 많은 분들에게 진심으로 감사드리며 도움을 주신 모든 분들에게 실망시켜 드리지 않도록 항상 처음과 같은 마음으로 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.