

# 국내 원자력발전소 첨단 주제어실의 Crew Resource Management 교육훈련 효과 분석

김사길<sup>1</sup> · 변승남<sup>1\*</sup> · 이동훈<sup>2</sup> · 정충희<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 공과대학 산업경영공학과 / <sup>2</sup>한국원자력안전기술원 계측제어실 /

<sup>3</sup>한국원자력안전기술원 규제기술연구부

## Effectiveness of Crew Resource Management Training Program for Operators in the APR-1400 Main Control Room Simulator

Sa Kil Kim<sup>1</sup> · Seong Nam Byun<sup>1</sup> · Dhong Hoon Lee<sup>2</sup> · Choong Heui Jeong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial & Management Engineering, College of Engineering in Kyung Hee University

<sup>2</sup>Department of Instrument and Control, Korea Institute of Nuclear Safety

<sup>3</sup>Safety Technology Division, Nuclear Safety Headquarters in Korea Institute of Nuclear Safety

The objective of the study is to evaluate the effectiveness of Crew Resource Management (CRM) training program for operators in the Main Control Room (MCR) simulator of APR-1400 Nuclear Power Plant. The experiments were conducted for two different crews of operators performing six different emergency operating scenarios during four-week period. Each crew consisted of the five operators: senior reactor operator, safety technical advisor, reactor operator, turbine operator, and electric operator.

All crews (Crew A and B) participated in the training program for the technical knowledge and skills which were required to operate the simulator of the MCR during the first week. To verify the effectiveness of the CRM training program; however, only Crew A was selected to attend the CRM training after the technical knowledge and skills training.

The results of the experiments showed that the CRM training program improved the individual attitudes of Crew A significantly. Team skills of Crew A were found to be significantly better than those of Crew B. The CRM training did not have positive effects on enhancing the individual performance of Crew A; however, as compared to that of Crew B. Implication of these findings was discussed further in detail.

**Keyword:** main control room(MCR) simulator, APR-1400 nuclear power plant, effectiveness of crew resource management(CRM) training program, team performance, individual performance

### 1. 서론

원자력발전소(이하 원전) 주제어실(Main Control Room; MCR) 환

경이 첨단화 되어가면서 국내외 원자력산업에서는 주제어실 운전원의 수행도(Human Performance)와 인적 신뢰도(Human Reliability)에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다(Coblentz

본 연구는 교육과학기술부가 출연하고 한국원자력안전기술원이 시행한 원자력기술개발사업의 일환으로 수행됨.

\*연락처 : 변승남 교수, 449-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지 경희대학교 국제캠퍼스 공과대학 산업경영공학과,

Fax : 031-203-4004, E-mail : snbyun@khu.ac.kr

투고일(2008년 12월 01일), 심사일(1차 : 2008년 12월 29일, 2차 : 2009년 01월 31일), 게재확정일(2009년 02월 06일).

and Mollard, 1989; Rasmussen, 1986; O'Hara and Hall, 1990; Guo and Uhrig, 1992; Byun and Lee, 2001). 예를 들어, Guo and Uhrig (1992)는 뉴럴 네트워크(Neural Network)를 활용하여 원전 주 제어실 운전원의 수행도에 영향을 주는 인자들의 관계를 연구하였다. O'Hara and Hall(1990)은 첨단 주 제어실(Advanced Control Room) 운전원의 수행도 연구를 통해 인적 신뢰도의 측정 및 규제 방안을 제시하였다. Byun and Lee(2001)는 컴퓨터 기반의 첨단 주 제어실과 전통적 아날로그 주 제어실 운전원의 인적 수행도를 정신적 직무부하(Mental Workload), 인지적 직무부하(Cognitive Workload), 그리고 상황인식(Situational Awareness) 측면에서 비교·분석하였다.

그러나 Sebok *et al.*(2000)은 원전 주 제어실의 인적 수행도와 인적 신뢰도 연구에 비해 팀 수행도나 팀 신뢰도와 같은 팀 단위의 연구가 부족한 실정임을 지적하였다. 또한 첨단 주 제어실 운전특성이 전통적인 운전방식과는 달라 팀 단위의 협업 수준에 따른 운전 수행도의 차이가 크게 달라질 수 있음을 지적하였다.

미국 원자력산업은 1979년 발생한 Three Mile Island(TMI) 사고 원인 중의 하나인 인적 오류(Human Error), 즉 비기술(Non-technical) 요소에 대한 집중적인 관심을 갖기 시작하였다(Rogovin *et al.*, 1980; Gaddy and Wachtel, 1992). TMI 사고 발생 7년 이후, 1986년 4월 25일 Chernobyl 4호기에 대한 연간 유지보수 작업을 위한 검사가 발전 정지(Shut Down) 이전의 상태에서 실시되었다. 그리고 12시간 이후에 상업용 발전소로서는 최악의 참사인 체르노빌(Chernobyl) 사고가 발생하였다(Reason, 1987). 이 사고는 기계적 결함이 전혀 개입되지 않은 완벽한 인간의 잘못에 의한 사고로 분석되었다. 또한 당시 유지보수 작업팀을 포함하여 유지보수를 승인한 관리자 팀, 그리고 주 제어실 운전원 팀 등의 팀 기술에 대한 총체적인 부실이 사고의 원인으로 지적되었다(INSAG, 1986).

국내 원전산업의 경우, 첨단 주 제어실 운전조의 팀 수행도 연구에 있어 발전부장(Senior Reactor Operator; SRO)의 팀 운영 방식(Leadership의 형태)에 따라 운전조의 수행도 차이가 있는 것으로 분석되었다(KOPEC, 2007). 예를 들어 적극적으로 지시하는 유형과 원자로 운전원(Reactor Operator; RO)과 터빈 운전원(Turbine Operator; TO)의 의견을 수용하는 소극적인 유형에 따라 운전조별 수행도 및 운전원별 직무부하의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 SRO와 RO, TO, 그리고 전력설비 운전원(Electric Operator; EO) 간의 대화 방식, 그리고 벨브나 펌프의 기동시 조작 절차가 운전조마다 다른 것으로 분석되었다. KOPEC (2007)은 운전조 간의 인적 수행도를 적정 수준 이상으로 유지하기 위해서 SRO의 경력과 지식을 포함한 리더십의 표준화, 운전원간의 운전 방식의 표준화 그리고 RO, TO, EO의 직무부하 재조정 등이 필요하다고 지적하였다. 또한 거시적으로 의사소통, 리더십, 운전방식, 상황인식, 그리고 직무부하 등의 팀워크 요소를 체계적으로 접근하여 팀 수행도를 향상시켜야 한다고 지적하였다.

전술한 바와 같은 팀 수행도에 대한 문제 인식에 기반을 두어 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)는 원자력발전으로부터 국민의 건강과 안전을 도모하기 위해 원전 주 제어실 운전원에 대한 최소 요구사항을 규정하였다(Code of Federal Regulations, Title 10, Part 76.91, 1989). 또한 'TMI Action Plan(NUREG-0660, 1980)'을 통해 인적 오류 예방 훈련을 권고하였고 운전원 훈련 및 면허에 관한 새로운 규제방향을 제시하였다(United States Congress, 1982). 특히 NRC는 운전원 면허시험이 개인 수행도(Individual Performance) 위주로 치러지는 문제점을 지적하고, 면허시험에 팀 의존적 행위(Team Dependent Behavior)에 대한 평가 항목을 추가할 것을 NRC Handbook을 통해 권고하였다(NUREG-1021, 1989). 또한 NRC는 팀 수행도 향상을 위한 운전원 교육요소로 의사소통(Communication), 직무협조(Task Coordination), 교대 간 직무 집중도 유지(Maintaining Task Focus in Transitions), 융통성(Adaptability), 개방성 및 참여도(Openness and Participation), 그리고 팀 정신(Team Spirit)을 규정하였다(Montgomery *et al.*, 1991; Mumaw *et al.*, 1994; NUREG/CR, 6637).

미국 NRC를 중심으로 원전 주 제어실 운전원의 팀 교육훈련에 대한 관심은 높아졌다. Roth and O'Hara(1994)는 팀 교육훈련의 요소와 방법에 관한 연구를 수행하였고, NASA(National Aeronautics and Space Administration)와 FAA(Federal Aviation Administration)를 중심으로 발전된 CRM(Crew Resource Management) 개념을 원전 운전원 팀 교육훈련에 일부 도입하였다. CRM이란 가용한 모든 인적 자원을 활용하여 인적 요소(Human Factors)와 관련된 문제 혹은 사고를 해결하기 위한 관리체계로서 처음에는 항공기 조정실(Cockpit) 조종사의 체계적 인적 행위 관리를 위한 접근으로 시작하였다.

영국의 British Energy는 British Airways CRM 교육훈련 체계를 바탕으로 원전 운전원의 팀 교육훈련 체계를 구축하였다. 교육훈련체계는 운전행위(Operational Conduct), 직장 건강(Health at Work), 의사결정(Decision Making), 상황인식(Situational Awareness), 행위선택(Choosing Behavior), 피드백(Feedback), 의사소통(Communication), 그리고 팀 기술(Team Skills) 이상 8가지 훈련요소를 포함한다. British Energy의 CRM 교육훈련은 종사자들에게 긍정적인 반응을 얻어 주 제어실 운전원뿐만 아니라 현장 종사자들에게도 확대 적용되었다(Belton, 2001).

또한 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)는 운전조의 팀워크 향상을 위해 28시간의 CRM 교육훈련 프로그램을 개발하여 원자력발전산업에 활용할 것을 권고하였다. INPO가 개발한 프로그램은 의사소통(Communication), 탐구(Inquiry), 지지 및 지원(Advocacy), 리더십(Leadership), 분쟁해결(Conflict Management), 그리고 비평적 업무수행(Critique Performance)으로 구성되어 있다(INPO, 1993).

이처럼 해외 원전은 CRM 교육훈련을 기반으로 운전원의 팀 수행도 향상 및 인적 오류 저감을 위해 노력하고 있어 국내 원전 산업에서도 CRM 교육훈련에 대한 관심이 높아지고 있다.

한국원자력안전기술원은 인적 오류로 인한 원자로 불시정지 사건의 감소와 새롭게 건설되는 첨단 주제어실의 안전한 운전을 위한 새로운 방식의 교육훈련체계의 필요성을 제기하고 있다(Lee 외, 2007). 신고리 3·4 주제어실의 인간공학 설계적합성 검증 과정에서도 팀 수행도 향상을 위한 CRM 교육훈련 도입의 필요성을 제기하고 있다. 이에 따라 팀 수행도와 관련된 문헌 연구와 사례연구를 통해 국내 첨단 원전에 적합한 CRM 교육훈련체계를 개발하였다(Kim, 2008). CRM 교육훈련체계는 <Figure 1>과 같이 ‘조사단계’, ‘계획단계’, ‘실행단계’, 그리고 ‘평가단계’로 구성된다.

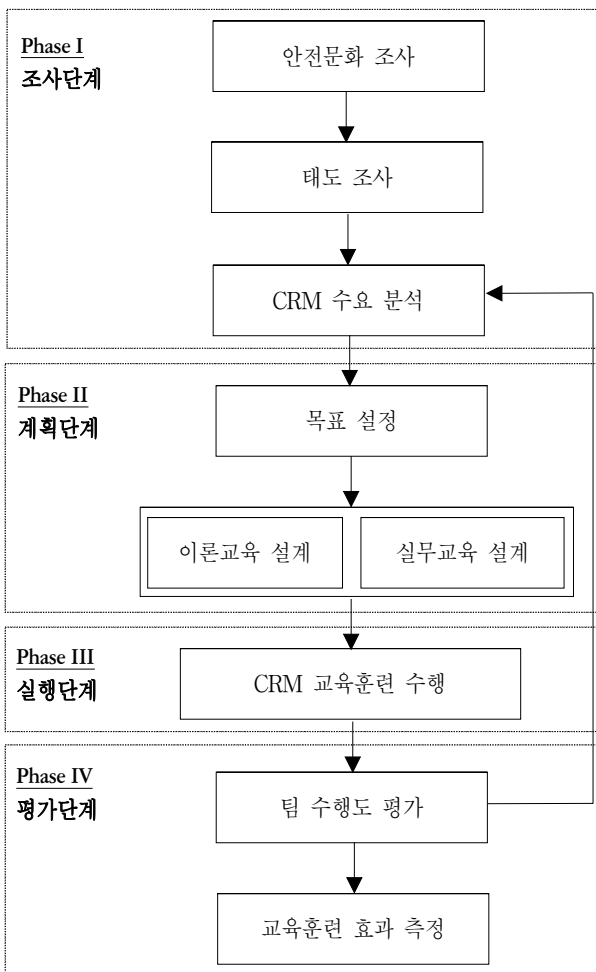


Figure 1. 국내 첨단 주제어실 CRM 교육훈련체계

본 연구에서는 첨단 주제어실 CRM 교육훈련의 국내 도입 방안을 검토하기 위해 효과분석을 수행하였다. 효과분석의 대상이 되는 교육훈련체계는 문헌연구와 사례연구를 바탕으로 Kim(2008)에 의해 개발된 교육훈련체계를 활용하였다. 교육훈련의 효과분석은 첫째, CRM 교육훈련을 받은 운전조에 대한 교육 전과 후의 태도(Attitudes)분석과 둘째, CRM 교육훈련을 받은 운전조와 받지 않은 운전조에 대한 개인 수행도와 팀 수행도의 비교분석을 통해 수행되었다.

## 2. 연구 방법 및 절차

CRM 교육훈련의 효과 검증을 위해 두 운전조를 선정하고 상호 대립적인 실험설계(Between-Subjects Design)를 하였다. 본 연구에서는 한 운전조에 대해 CRM 교육훈련체계에 준하여 교육훈련을 실시하고 다른 운전조는 CRM 교육훈련을 실시하지 않았다. 두 운전조에 대한 수행도 평가를 실시하고 비교·분석하여 CRM 교육훈련에 대한 효과분석을 실시하였다. 이상의 개괄적인 실험 방법 및 절차를 도식화하면 <Figure 2>와 같다.

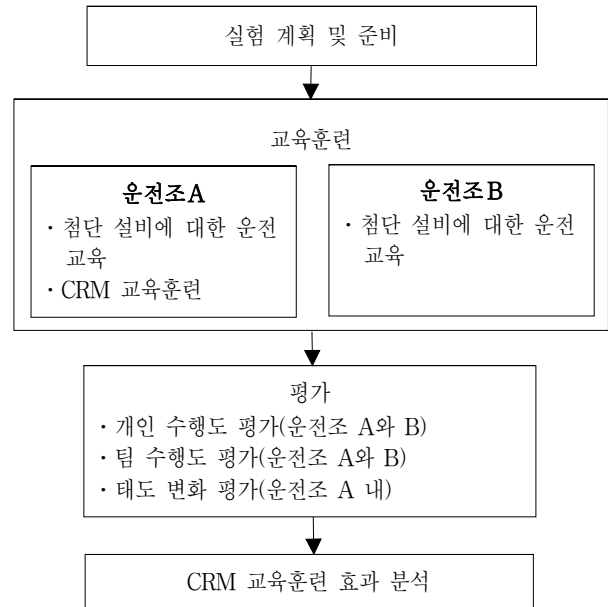


Figure 2. 실험 방법 및 절차

### 2.1 실험 계획 및 준비

#### (1) 실험 참여자(Participants)

##### 1) 피험자(Subjects)

본 실험에는 원전 운전자격증을 소지하고 있고 현재 주제어실에 근무하고 있는 2개 운전조(Operating Crew)가 피험자로 참여하였다. 각 운전조는 첨단 주제어실 운전조 구성에 따라 SRO, STA(Safety Technical Advisor), RO, TO, 그리고 EO 이상 5명으로 구성되었다.

본 실험에서 CRM 교육훈련의 교육효과를 검증하기 위해 운전조 A는 CRM 교육훈련을 받은 조이고 운전조 B는 CRM 교육훈련을 받지 않은 조이다. 운전조 A와 운전조 B의 선정은 발전소 운영상황에 의존하여 제한적으로 결정되었다는 한계가 있다. 본 실험에 참여한 운전원의 연령과 경력은 <Table 1>과 같다. 피험자의 평균 나이는 운전조 A가 42.4세이고 운전조 B가 37.8세로 나타났으며, 평균 발전소 근무경력도 운전조 A가 195개월이고 운전조 B가 139개월로 조사되었다. 발전소 근무경력 측면에서 운전조 A가 운전조 B보다 많았다. 또한 주제어실 운

전경력은 운전조 A가 89.2개월이고 운전조 B가 25.8개월로 조사되었다.

어실의 설계 적합성 검증(Suitability Verification)을 위해 제작된 설비이다(<Figure 3> 참조).

Table 1. 피험자의 연령과 경력

운전조	운전직무	SS	STA	RO	TO	EO	평균
운전조 A	나이 (세)	47	42	45	41	37	42.4
	발전소 근무경력 (개월)	312	168	169	180	146	195.0
	MCR 운전경력 (개월)	144	48	74	38	142	89.2
운전조 B	나이 (세)	43	38	37	40	31	37.8
	발전소 근무경력 (개월)	251	131	132	132	49	139.0
	MCR 운전경력 (개월)	35	15	66	8	5	25.8



Figure 3. 첨단 주제어실 시뮬레이터

<Figure 3>의 첨단 주제어실 시뮬레이터는 국내에서뿐만 아니라 세계적으로도 최초로 시도된 컴퓨터 기반의 첨단 I&C (Instrument and Control) 설비를 갖추고 있으며, 다음과 같은 운전 설비로 구성되어 있다.

- 대형정보표시기(LDP; Large Display Panel)
- 평면정보표시기(Information FPD; Information Flat Panel Display)
- 공학적 안전설비 기기제어기(ESCM; ESF-CCS Module)
- 경보화면(Alarm Display)
- 전산화 절차서(CPS; Computerized Procedure System)
- 안전 제어반(Safety Console)
- 운전원 콘솔(Operation Console)
- 원격정지 콘솔(Remote Shutdown Console)

2) 교관(Instructors) 및 평가자(Raters)

피험자에 대한 첨단 주제어실 시뮬레이터 운전 교육은 첨단 주제어실 운전 전문가(Operation Expert) 2인, 첨단 주제어실 인간공학 설계자 1인, 첨단 주제어실 MMI(Man-Machine Interfaces) 설계자 2인, 그리고 인간공학 전문가(Human Factors Expert) 2인에 의해 수행되었다. 또한 CRM 교육훈련과 수행도 평가에 운전 전문가 2인과 인간공학 전문가 2인이 참여하였다.

운전 전문가는 현재 가동 중인 원전 주제어실에 대한 20~30년의 운전경력을 갖고 있으며, 첨단 주제어실 설계의 모든 과정에 참여하고 있는 계통 전문가(Process Expert)이다. 인간공학 전문가는 원전 인간공학에 대한 폭넓은 지식과 경험을 갖추고 있으며, 각종 원전 설비의 인간공학 설계 및 평가 경험을 갖고 있다. 또한 실험의 원활한 진행을 위해 첨단 주제어실 시뮬레이터의 제작에 참여한 인간공학 설계자가 실험을 총괄·관리하였다.

3) 시뮬레이터 운영자(Simulator Instructors)

시뮬레이터 운영자는 첨단 주제어실 시뮬레이터의 설계에서 유지·보수에 이르기까지 모든 운영(Administration)을 책임지고 있다. 본 실험에는 3인의 시뮬레이터 운영자가 시뮬레이터의 기동 및 정지, 설비의 기능적 결함에 대한 해결, 그리고 설비의 한계를 고려한 실험 진행 협조에 도움을 주기 위해 실험에 참여하였다.

(2) 실험 설비 및 기기(Apparatus)

본 실험에서 사용한 첨단 주제어실 시뮬레이터는 첨단 주제

실험 시나리오 수행의 모든 과정은 CRM 교육훈련의 실무교육용 자료와 수행도 평가용 자료를 위해 비디오와 시뮬레이터 화상정보시스템을 통해 촬영 및 기록 및 보관 되었다. 또한 실험 시나리오의 수행 시간을 측정하기 위해 스톱워치를 활용하였으며, CRM 교육 및 수행도 평가용 각종 평가지(Questionnaires)가 사용되었다. 한편 수집된 평가지 자료의 코딩(Coding)은 Microsoft 사의 MS EXCEL를 이용하였으며, 통계 분석은 SPSS 사의 SPSS 12.0 for Windows를 활용하였다.

(3) 실험 시나리오(Experimental Scenarios)

1) CRM 실무교육용 시나리오

원전분야에서 인간공학 분석대상으로 선정된 사고시나리오로는 Steam Generator Tube Rupture(SGTR), Loss Of Coolant Accident(LOCA), Following Loss of Offsite Power(LOOP), Inadequate Core Cooling 등 비상사건을 포함하여 Reactor Startup 및 Shutdown 등의 유형이 있다(Byun and Lee, 2000). 본 실험에서는 CRM 실무교육 시에 운전조의 팀 기술을 관찰하고 평가하여 피드백(Feed-

back)하기 위해 실무교육용 시나리오를 준비하였다. 실무교육용 시나리오는 운전 전문가 2인에 의해 작성되었으며, 운전조의 팀 기술이 요구되는 비상운전 사고 시나리오 중 LOCA를 실무교육용 시나리오로 선정하였다.

2) 평가용 시나리오

평가용 시나리오는 운전 전문가 2인에 의해 작성되었으며, 다음 두 가지 기본 요건이 만족되도록 작성되었다. 첫째, 발전소의 대표적인 운전직무를 수행해야 한다. 둘째, 운전원들이 현재 발전소의 상황을 서로 공유하고(Shared Situational Awareness) 인지할 수 있도록 핵심 운전 단계(Key Step)를 반영해야 한다.

평가용 시나리오는 운전원 콘솔(Operation Console)에서 수행하는 시나리오 3개, 안전제어 콘솔(Safety Console)에서 수행하는 시나리오 2개, 그리고 원격정지 콘솔(Remote Shutdown Console)에서 수행하는 시나리오 1개로 구성되었다. 운전원 콘솔은 운전원이 평상시에 주로 운전하는 설비로 첨단 주제어실은 운전원 콘솔의 사용 환경을 위주로 설계되어 있다. 안전제어 콘솔은 운전원 콘솔을 사용하는 데 문제가 발생한 경우(예를 들어, 대형 정보 화면의 고장으로 발전소 상황 정보가 손실된 경우)에 발전소를 안전한 상태로 운전하기 위해 설치된 보조설비이다. 마지막으로 원격정지 콘솔은 주제어실에 화재, 방사능, 그리고 화학 오염 등의 비상사태가 발생하여 주제어실 상주가 불가능 한 경우 기본적인 발전소 운전 및 정지가 가능하도록 주제어실에서 격리된 곳에 별도로 설치된 비상 설비이다.

(4) 평가 계획

1) 실험 설계

CRM 교육훈련 효과 검증을 위한 실험설계(design of experiments)는 임의화의 원리(principle of randomization), 블록화의 원리(principle of blocking), 그리고 직교화의 원리(principle of orthogonality)를 적용한 ‘Randomized Block Factorial Design’으로 운전조별로 평가순서를 결정하였다.

운전원 콘솔에서 총 6회(시나리오 3개 × 참여 운전조 2팀), 안전제어 콘솔에서 총 4회(시나리오 2개 × 참여 운전조 2팀), 그리고 원격정지 콘솔에서 총 2회(시나리오 1개 × 참여 운전조 2팀)로 모두 12회의 실험을 수행하였다. 평가 순서와 시나리오 수행 순서는 <Table 2>와 같다.

2) 수행도 평가 계획

교육훈련의 효율성은 일반적으로 이익(benefits)의 형태로 해석되며, CRM 교육훈련의 효율성은 팀 수행도 향상을 통해 인적오류로 인한 사고의 저감이 원전 운영에 어떠한 이익을 주는가와 직결된다. 따라서 본 연구에서는 CRM 교육훈련의 효과 측정을 ‘Kirkpatrick의 4수준 모델’을 활용하였다. 제 4수준 모델은 다음 네 개의 수준(levels)으로 수행된다(Kirkpatrick, 1994).

- 제 1수준(Reaction) : 교육대상자의 교육훈련에 대한 반응
- 제 2수준(Learning) : 교육훈련을 받은 정도

Table 2. 운전조 및 시나리오별 평가 순서

평가 순서	운전조 A						운전조 B					
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
1		○					○					
2	○								○			
3			○					○				
4					○					○		
5				○							○	
6						○						○

- S<sub>1</sub> : 운전원 콘솔 시나리오 #1 (증기 과잉 요구사고 : ESDE)
- S<sub>2</sub> : 운전원 콘솔 시나리오 #2 (증기발생기 기관과열사고 : SGTR)
- S<sub>3</sub> : 운전원 콘솔 시나리오 #3 (원자로냉각재 상실사고 : LOCA)
- S<sub>4</sub> : 안전 제어반 시나리오 #1 (원자로 정지불능사고 : ATWT)
- S<sub>5</sub> : 안전 제어반 시나리오 #2 (원자로냉각재 상실사고 : LOCA)
- S<sub>6</sub> : 원격정지 콘솔 시나리오 #1 (주제어실 상주불능 : 상온정지 냉각운전)

- 제 3수준(Transfer) : 교육훈련을 운전직무에 응용하는 정도
- 제 4수준(Results) : 유형의 조직적 이익

먼저 제 1수준 평가는 원전 운전원이 CRM 교육훈련을 수료한 이후에 느끼는 교육훈련에 대한 주관적인 만족도를 측정하는 방법으로 수행된다. 제 2수준 평가는 교육훈련과정을 거친 이후에 교육훈련 내용에 대한 KSAs(Knowledge, Skill, Attitudes)의 습득 정도를 교육훈련 전후로 측정하는 방법으로 수행된다. 일반적으로 지식(Knowledge)에 대한 측정은 이론 시험(Examination)을, 기술(Skills)에 대한 측정은 실기 시험으로 측정되었다. 그리고 태도(Attitudes)에 대한 측정은 별도의 태도 측정지를 활용한다. 제 3수준 평가는 CRM 교육훈련 이후에 현장 운전직무에 CRM KSAs가 얼마나 활용되는 지를 측정하는 방법으로 수행된다. 제 3수준 평가는 현장 직무활동을 관찰하여 주관적으로 평가하거나 팀 수행도의 정량적 기준을 적용하여 평가하기도 한다. 마지막으로 제4수준 평가는 CRM 교육훈련을 통해 얻어진 조직의 이익을 측정하는 방법을 사용한다. 조직의 이익은 안전도의 향상, 생산성이나 품질의 향상, 운전비용의 절감, 그리고 투자수익률(ROI; Return On Investment)의 향상 정도 등으로 계산된다.

본 연구에서는 제 1수준 평가로서 CRM 교육훈련과정의 만족도 조사를 생략하였다. 왜냐하면, CRM 교육훈련을 받은 운전조 A는 5명의 운전원으로 구성되어 있어 5명에 대한 만족도 결과가 통계적으로 유의할 수 없기 때문이다.

또한 본 연구에서는 CRM 교육훈련으로 인한 조직의 기대 이익을 직접적으로 측정할 수 있는 자료가 없어 제 4수준 평가를 수행하지 않았다. CRM 교육훈련체계는 운전원의 팀 수행도를 향상시켜 운전원의 인적 오류로 인한 사건/사고를 절감하는데 그 목적이 있다. 따라서 제 4수준 평가는 실제 원전 산업에 CRM 교육훈련체계를 적용하여 사건/사고 데이터의 수집하고, 사건/사고의 절감에 따른 조직의 기대 이익(Expected Benefits)을

측정하여 가능하다. 조직의 기대이익은 안전도의 향상, 생산성이나 품질의 향상, 운전비용의 절감, 그리고 투자수익률(ROI; Return On Investment)의 향상 정도 등으로 계산된다.

따라서 본 연구에서는 Kirkpatrick(1994)의 제2수준과 제3수준 평가를 기반으로 CRM 교육훈련에 대한 효과를 분석하였다. 먼저 제2수준 평가는 운전조 A의 태도(Attitudes)를 CRM 교육훈련 전후로 평가하여 태도변화를 분석하였다. 다음으로 제3수준 평가는 운전조 A와 B의 개인 수행도(Individual Performance) 및 팀 수행도(Team Performance)를 측정하여 각각의 수행도 차이를 분석하였다. 개인 수행도는 상황인식과 정신적 직무부하를 측정하여 평가하였다. 팀 수행도는 운전원 간의 상호작용(Team Interaction)을 측정하여 평가하였다.

### ① 태도 평가

CRM 교육훈련의 교육효과 분석 방법의 일환으로 CRM 교육훈련을 실시하기 전과 실시한 후의 운전원의 태도(Attitudes)를 평가하여 태도의 변화분석을 실시하였다. 태도나 성격(Personality)은 개인이나 집단의 직무 수행도에 직간접적으로 영향을 주는 요소이다(Chidester, 1987; Helmreich, 1999 cited by Chidester *et al.*, 1991). 이 때문에 일반적으로 태도 조사는 조직의 구성원이 해당 조직에서 수행하고 있는 직무에 적합한지 여부를 결정하는데 사용된다. 리더십(Leadership), 스트레스(Stress), 팀워크(Teamwork), 직업에 대한 가치부여(Work Values), 직무 실수(Errors), 그리고 조직의 분위기(Organizational Climate) 등에 대한 조직 구성원의 태도는 CRM 교육훈련을 통해 향상될 수 있는 중요한 요소이다(Helmreich *et al.*, 1993). 따라서 조직 구성원의 태도는 CRM 교육훈련을 통해 조직 전체의 수행도를 향상시키는 방향으로 개선될 수 있다.

본 연구에서는 국내 원전산업의 특성에 맞는 ‘Crew Resource Management Attitudes Questionnaire(CRMAQ)’을 태도 조사지로 활용하였다. CRMAQ는 57개 조사 항목으로 구성되어 있으며, 리커트(Likert) 5점 척도로 구성되어 있다(Kim, 2008).

### ② 개인 상황인식 평가

상황인식이란 “유동적(Dynamic)이고 복잡한 시스템 하에서 작업자가 연속적 의사결정을 요구하는 직무 상황을 이해하고, 이를 바탕으로 앞으로 일어날 상황을 예측하는 것”으로 정의된다(Endsley, 1995b). 따라서 원전 주제어실 운전원의 상황인식은 “각종 표시 및 제어설비에서 발생하는 다양한 상황정보를 감지하고, 미리 설정된 운전목표와 비교하여 제시된 상황정보의 의미를 정확히 이해한 다음, 최종적으로 발전소 상태가 향후 어떻게 변할 것인가를 예측하는 것”으로 정의할 수 있다.

현재까지 개발된 상황인식 측정기법들은 다양하지만 생리적 기법(Physiological Technique), 성능측정(Performance-based Measure), 주관적 평가기법(Subjective Rating Technique), 설문지(Questionnaire) 등 네 가지 유형으로 분류할 수 있다(Endsley, 1995b; U.S. NRC, 1997).

본 실험에서는 SART를 기반으로 국내 원전 산업에 최적화된 KSAX(Korean Situational Awareness index)를 이용하여 개인 상황인식을 측정하였다. KSAX는 감지(Perception), 파악(Comprehension), 그리고 예측(Projection), 이상 세 가지 분야에 대한 총 6개의 측정 항목이 7점 척도로 구성되어 있으며, 운전원이 시나리오 종료 후에 주관적으로 평가하도록 계획하였다. 개인의 상황인식 정도는 6개의 측정 항목의 합으로 평가되며, 가중치는 없다.

### ③ 개인의 정신적 직무부하 평가

원전 주제어실 운전원의 정신적 작업부하는 새로운 인간-기계 시스템(Human-Machine System)을 설계하거나 또는 기존의 시스템을 개선하는 데 있어 고려해야 할 중요한 요소이다. 지나치게 높은 정신적 작업부하는 인적 실수와 사고를 유발할 수 있으며 너무 낮은 정신적 작업부하 또한 운전원을 방심시켜 인적 실수의 원인이 된다(Braby *et al.*, 1993). 정신적 작업부하란 운전원의 한정된 처리 능력 중 특정한 작업 수행에 사용된 자원의 양을 말한다. 따라서 정신적 작업부하가 클수록 더 많은 자원이 소모되며 만약 정신적 작업부하가 작업자의 한계를 넘어서면 인적 실수가 유발되어 수행도가 저하된다(Norman and Bobrow, 1975).

인간-기계 체계에서 작업자의 정신적 작업부하를 측정하는 방법은 다양하다. Williges and Wierwille(1979)은 28가지의 정신적 작업부하 측정 방법을 고찰하였다. 수많은 측정 방법에도 불구하고 일반적으로 정신적 작업부하 측정 방법은 세 종류로 분류된다. 측정방법은 작업자의 부하 평가에 따른 주관적 평가법(Subjective Ratings), 작업 수행에 따른 작업자의 생리적 변화를 측정하는 생리적 측정법(Physiological Measures), 그리고 작업자의 수행도를 평가하는 수행도 평가법(Performance-based Measures)이다(O'Donnell and Eggemeier, 1986; Wickens, 1992; Wickens *et al.*, 1998).

본 실험에서는 주관적 평가법 중 원자력 인간공학에서 널리 사용하는 NASA TLX를 활용하여 개인의 정신적 직무부하를 측정하였다. NASA TLX는 정신적 부하(Mental Demand), 신체적 부하(Physical Demand), 시간적 요구(Temporal Demand), 수행도(Performance), 노력(Effort), 좌절 수준(Frustration Level) 등 6개 요인을 정신적 작업 부하에 영향을 미치는 요인으로 분류하여 정신적 직무부하를 측정하는 도구이다.

### ④ 운전원 간의 상호작용 평가

팀 수행도를 측정하는 방법은 다양하다. 대표적인 팀 수행도 평가 방법론으로 Behavioral Observation Scales(BOS), Behaviorally Anchored Rating Scale(BARS), Communications Usage Diagram(CUD), Co-ordination Demands Analysis(CDA), Team Task Analysis(TTA), Team Cognitive Task Analysis(TCTA), 그리고 Team Workload Assessment 등이 있다.

본 실험에서는 팀 수행도를 측정하는 방법 중에서 운전원

간의 상호작용을 측정하기 위해 원자력 인간공학에서 주로 사용하는 BARS 평가지를 사용하였다. BARS는 Smith and Kendall (1963)에 의해 개발된 행위 기반의 평가척도로서 도표척도법(Graphic Rating Scale)과 중요사건기록법(Critical Incident Method of Rating)을 결합한 방법이다. BARS는 팀의 수행도를 평가하는 전문가(SMEs)가 팀의 직무 행위를 관찰하여 미리 정해진 성과 기준에 맞추어 평가하는 방식으로 수행된다. 전문가의 평가는 긍정적인 행위와 부정적인 행위를 모두 평가하며, 평가 요소별로 5점 혹은 7점의 정량적 점수를 부여한다. 평가요소는 팀의 임무 집중도 및 단체의사 결정 효율(Task Focus/decision Making), 의견에 대한 조율(Coordination as a Crew), 의사소통의 효율(Communication), 개방성(Openness), 그리고 팀 융화(Team Spirit)로 구성된다.

2.2 교육훈련 및 평가

본 연구에서는 운전조 A와 운전조 B의 교육훈련을 실시하였다. 운전조 A에게는 첨단 주제어실 운전 교육훈련과 CRM 교육을 병행하여 실시하였고, 운전조 B에게는 첨단 주제어실 운전 교육훈련만을 실시하였다. 운전조 A의 교육훈련은 2008년 2월 3일부터 7일까지 5일간 이론교육과 실무교육을 병행하여 실시되었다. 또한 운전조 B의 교육훈련은 2008년 3월 7일부터 11일까지 5일간 실시되었다. 운전조 A와 운전조 B의 교육훈련 과정을 정리하면 <Table 3>과 같다.

운전조 A에 대한 CRM 이론교육은 강의, 시범, 토의, 그리고 사례연구를 통해 진행되었다. 또한 CRM 실무교육은 CDA(Co-ordination Demands Analysis)를 활용하여 실무교육용 시나리오 수행에 따른 팀 수행도 평가와 디브리핑(Debriefing)을 반복

수행하였다. 팀 수행도 평가는 운전 전문가 2인과 인간공학 전문가 2인이 시나리오 수행과정을 촬영한 비디오 화면 분석을 통해 수행되었다.

3. CRM 교육훈련 효과 분석 및 결과

3.1 제 2수준(Learning) 평가

본 연구에서는 CRM 교육훈련으로 인한 운전조 A의 태도 변화를 CRMAQ를 활용하여 측정하였으며, 제 2수준 평가를 위해 다음과 같은 연구가설(Research Hypothesis)을 세웠다.

$H_1$  : 운전조 A의 직무태도(work attitudes) 점수는 CRM 교육훈련 전(before)보다 후(after)가 높다.

CRMAQ의 직무태도는 57개 평가 항목과 5점 리커트 척도로 구성되어 있어 강한 부정(Strong Negative)에 1점을 강한 긍정(Strong Positive)에 5점을 부여하도록 설계되었다. 운전조 A의 CRM 교육훈련 전후의 태도를 대응표본 검정(Paired Samples T-test)을 통해 비교 분석한 결과는 <Table 4>와 같다. <Table 4>에서 나타난 바와 같이 57개의 운전조 A의 직무태도(Work Attitudes) 점수는 CRM 교육훈련 전(3.344)보다 교육훈련 후(3.688)가 높게 나타났다( $p = 0.005 < 0.05$ ). 따라서 CRM 교육훈련으로 운전조 A의 직무태도가 긍정적으로 향상되었다고 할 수 있으며( $H_1$ 의 채택), CRM 교육훈련의 효과(Effectiveness)가 있음을 알 수 있었다.

Table 3. 교육훈련 과정

구분	교육훈련 내용	교관	운전 교육	CRM 교육	운전조A	운전조B
이론	첨단 주제어실 운전 철학	운전전문가	√		○	○
	LDP/Soft Control/Alarm/CPS	MMI 설계자	√		○	○
	기존 주제어실과의 계통 차이	계통 전문가	√		○	○
	시뮬레이터의 한계	시뮬레이터운영자	√		○	○
	CRM 소개	인간공학전문가		√	○	
	인간의 정보처리과정	인간공학전문가		√	○	
	의사소통 기술	인간공학전문가		√	○	
	리더십과 적극성(assertiveness)	인간공학전문가		√	○	
	의사결정과 문제해결	인간공학전문가		√	○	
	상황인식의 공유	인간공학전문가		√	○	
	CRM의 주요 원칙	인간공학전문가		√	○	
실무	시나리오 기반 연습	운전전문가	√		○	○
	팀 수행도 평가 및 Debriefing	운전전문가/인간공학전문가		√	○	
	팀 직무 모니터링 및 Debriefing	운전전문가/인간공학전문가		√	○	

Table 4. 운전조 A의 교육훈련 전후의 태도 변화 검증

	대응차				t	df	P-value	
	평균	표준 편차	평균의 표준오차	차이의 95% 신뢰구간				
				하한				상한
(교육훈련 전) - (교육훈련 후)	-0.344	0.141	0.063	-0.519	-0.169	-5.466	4	0.005

교육훈련 전 운전조 A의 태도점수 평균(표준편차) : 3.344(0.042)  
 교육훈련 후 운전조 A의 태도점수 평균(표준편차) : 3.688(0.138)

3.2 제 3수준(Transfer) 평가

본 연구에서는 운전조 A와 운전조 B의 수행도 평가에 대한 비교분석을 통해 CRM 교육훈련이 수행도에 미치는 영향을 분석하였다. 제 3수준 평가를 위해 다음과 같은 연구가설(Research Hypothesis)을 세웠다.

- $H_2$  : CRM교육훈련을 받은 운전조 A의 개인 수행도가 CRM 교육훈련을 받지 않은 운전조 B보다 높다.
- $H_3$  : CRM교육훈련을 받은 운전조 A의 팀 수행도가 CRM 교육훈련을 받지 않은 운전조 B보다 높다.

수행도 평가는 개인 수행도로서 상황인식과 정신적 직무부하를 평가하였으며, 팀 수행도로서 팀 상호작용을 평가하였다. 상황인식의 경우, 일반적으로 상황인식이 높게 평가되면, 개인 수행도가 높은 것으로 판단한다. 정신적 직무부하의 경우, 직무부하가 낮게 평가되면, 개인 수행도가 높은 것으로 판단한다. 팀 상호작용의 경우, 긍정적인 팀 상호작용에 대한 평가는 높은 팀 수행도와 직결된다고 할 수 있다. 본 연구에서 활용된 평가 방법론을 정리하면 <Table 5>와 같다.

Table 5. 수행도 평가 방법론

평가항목		평가도구	평가방식	평가자
개인적 수행도	상황 인식	KSAX	평가척도	운전원
	정신적 직무부하	NASA TLX	평가척도	운전원
팀 수행도	팀 상호작용	BARS	평가척도	운전 전문가

운전조 A와 운전조 B의 개인 수행도를 비교 분석하였다. 상황인식은 5점 척도로 구성된 KSAX로 평가하였으며, 정신적 직무부하는 5점 척도로 구성된 NASA-TLX로 평가하였다. 운전조 A와 운전조 B가 각각 평가용 시나리오(총 6개)를 수행한 이후에 두 개의 평가지를 약 15분간 작성하도록 하였다. 상황인식과 정신적 직무부하 평가지는 6개의 평가 항목으로 구성되어 있으며, 각각의 평가는 각 항목에 대한 점수의 총합으로 하였다. 두 운전조의 개인 수행도의 차이를 대응표본 검정을 통해 비교 분석하였다.

대응표본 검정 결과, 운전조 A조의 상황인식 점수(28.23) 및 정신적 직무부하 점수(21.00)와 운전조 B의 상황인식 점수(28.68) 및 정신적 직무부하 점수(20.53)의 차이가 유의하게 나타나지 않았다( $p = 0.535 > 0.05$ ,  $p = 0.623 > 0.05$ ). 따라서 운전조 A의 개인 수행도가 운전조 B보다 높다고 할 수 없으며( $H_2$ 의 기각), CRM 교육훈련이 개인 수행도에 영향을 미친다고 할 수 없다.

$H_2$  가설이 기각된 것은 CRM 교육훈련이 개인 수행도에 영향을 미치는 요인이라고 할 수 없다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 CRM 교육훈련이 비 기술적(Non-technical) 측면의 교육에 초점을 맞추고 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 상황인식이나 정신적 직무부하와 같은 개인 수행도는 주로 기술적(Technical) 측면의 숙련도나 시스템의 사용성(Usability)과 관계가 있기 때문이다.

<Figure 4>는 운전조 A와 운전조 B의 개인 수행도의 추세(Trend)를 평가 일정 별로 나타내고 있다. 두 운전조 모두 정신적 직무부하(WL)는 낮아지는 경향이 있고 상황인식(SA)은 높아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 첨단 주제어실의 운전 경험이 부족한 피험자들이 평가 기간 동안 운전기술(Operation Skills)에 점점 익숙해지면서 발생한 학습효과(Learning Effects)라고 판단된다.

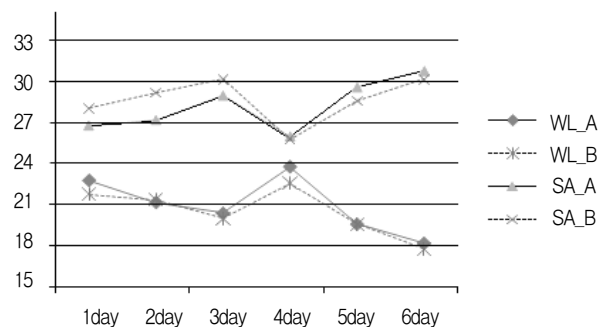


Figure 4. 개인 수행도 추세

다음으로 운전조 A와 운전조 B의 팀 수행도를 비교·분석하였다. 팀 수행도 평가는 7점 척도로 구성된 BARS 평가지를 활용하였으며, 운전 전문가 2명이 팀 수행도를 평가하였다. 운전 전문가 2명의 평가에 대한 타당성을 확인하기 위해 Pearson의 상관관계분석을 실시하였다. 상관관계분석 결과, Pearson's



alpha 값이 0.749( $p = 0.005 < 0.01$ )로 나타나 운전 전문가 2명의 평가 간에 일관성이 존재하는 것으로 분석된다.

5 가지의 팀 상호작용에 영향을 미치는 팀 기술에 대한 평가 값의 평균으로 두 운전조의 팀 수행도 차이를 분석하였다. 5 가지 팀 기술은 팀의 임무 집중도 및 단체의사 결정 효율(Task focus/Decision Making), 의견에 대한 조율(Coordination as a Crew), 의사소통의 효율(Communication), 개방성(Openness), 그리고 팀 정신(Team Spirit)이다. 두 운전조의 팀 수행도의 차이를 대응표본 검정을 통해 비교 분석한 결과는 <Table 6>과 같다.

<Table 6>에 나타난 바와 같이 운전조 A의 팀 수행도 점수(6.558)가 운전조 B의 팀 수행도 점수(5.967)보다 높게 나타났다( $p = 0.012 < 0.05$ ). 따라서 운전조 A의 팀 수행도가 운전조 B보다 높다고 할 수 있으며( $H_3$ 의 채택), CRM 교육훈련이 팀 수행도에 긍정적인 영향을 미친다고 할 수 있다.

팀 상호작용에 영향을 미치는 5개의 팀 기술 별로 운전조 A와 운전조 B의 평가 결과를 비교 분석하여 CRM 교육훈련이 팀 기술에 미치는 영향을 분석하였다. 두 운전조의 팀 기술 별 수행도의 차이를 대응표본 검정을 통해 비교·분석한 결과는 <Table 7>과 같다.

<Table 7>에 나타난 바와 같이 의견조율, 의사소통, 그리고 팀 융화 측면의 팀 기술은 운전조 A(6.542, 6.583, 6.500)가 운전조 B(5.792, 5.958, 5.833)보다 높다고 평가되었다( $p = 0.005, 0.021, 0.013 < 0.05$ ). 따라서 운전조 A는 CRM 교육훈련을 통해 의견조율, 의사소통, 그리고 팀 융화 측면의 팀 기술이 임무집중과 개방성 측면의 팀 기술보다 더욱 향상되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 CRM 교육훈련이 의견조율, 의사소통, 그리고 팀 융화 측면의 팀 기술에 임무집중과 개방성 측면의 팀 기술보다 더 많은 영향을 미치는 것으로 해석된다.

Table 6. 운전조 A와 운전조 B의 팀 수행도 차이 검정

	대응차					t	df	P-value
	평균	표준 편차	평균의 표준오차	차이의 95% 신뢰구간				
				하한	상한			
(운전조 A) - (운전조 B)	0.592	0.684	0.198	0.157	1.026	2.996	11	0.012

운전조 A의 팀 수행도 평균(표준편차) : 6.558(0.476)

운전조 B의 팀 수행도 평균(표준편차) : 5.967(0.566)

Table 7. 운전조 A와 운전조 B의 팀 기술별 수행도 차이 검정

		대응차					t	df	P-value
		평균	표준 편차	평균의 표준오차	차이의 95% 신뢰구간				
					하한	상한			
임무집중 의사결정	(운전조 A) - (운전조 B)	0.500	0.826	0.238	-0.026	1.025	2.098	11	0.060
의견조율	(운전조 A) - (운전조 B)	0.750	0.754	0.218	0.271	1.229	3.447	11	0.005*
의사소통	(운전조 A) - (운전조 B)	0.625	0.801	0.231	0.116	1.134	2.702	11	0.021*
개방성	(운전조 A) - (운전조 B)	0.417	0.702	0.203	-0.029	0.863	2.057	11	0.064
팀 정신	(운전조 A) - (운전조 B)	0.667	0.779	0.225	0.172	1.161	2.966	11	0.013*

	운전조 A		운전조 B	
	평균	표준편차	평균	표준편차
임무집중/의사결정	6.500	0.603	6.000	0.769
의견조율	6.542	0.498	5.792	0.656
의사소통	6.583	0.469	5.958	0.689
개방성	6.667	0.444	6.250	0.584
팀 정신	6.500	0.522	5.833	0.577

주)\* :  $p < 0.05$ .

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 CRM 교육훈련의 효과 검증을 위해 가동 중 원전의 두 운전조를 피험자로 선발하여 실험을 수행하였다. 운전조 A는 운전교육훈련 및 CRM 교육훈련을 받았고 운전조 B는 운전교육훈련만을 받았다. 교육훈련 효과 검증은 운전조 A와 운전조 B의 수행도 평가를 바탕으로 Kirkpatrick (1994)의 4수준 모델이 적용되었다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- CRM 교육훈련으로 운전조 A의 직무태도가 향상되었으며, 이는 CRM 교육훈련의 효과가 있다는 것을 증명한다.
- 운전조 A의 개인 수행도가 운전조 B보다 높다고 할 수 없다. 따라서 CRM 교육훈련이 개인 수행도에 영향을 미친다고 볼 수 없다.
- 개인 수행도는 주로 기술적(Technical) 능력(숙련도나 사용성 등)에 영향을 받고, 팀 수행도는 비기술적(Non-technical) 능력에 영향을 받는다.
- 운전조 A의 팀 수행도가 운전조 B보다 높게 나타났으며, 이는 CRM 교육훈련이 팀 수행도에 긍정적인 영향을 미친다는 사실을 증명한다. 또한 팀 수행도를 향상시키기 위한 CRM 교육훈련의 효과가 있음을 증명하기도 한다.
- CRM 교육훈련은 임무집중(Task Focus or Decision Making)이나 개방성(Openness) 측면보다는 의견조율(Coordination as a Crew), 의사소통(Communication), 그리고 팀 정신(Team Spirit) 측면의 팀 기술(Team Skills)에 더 많은 영향을 미친다.

본 연구의 결과는 CRM 교육훈련이 국내 원전 운전원의 팀 수행도를 향상시키는 방안임을 증명하고 있다. 그러나 본 연구는 다음 네 가지의 연구한계를 갖고 있으며, 추후 연구 과정을 통해 연구한계를 극복할 필요가 있다.

첫째, 본 연구의 피험자 선정에 있어 운전조 A가 운전조 B보다 주제어실 근무 경력이 많아 운전능력의 차이가 있을 수 있는 것이 우려된다. 두 운전조의 모든 운전원이 운전면허를 소지하고 있으며, 일반적으로 운전면허를 득한 자가 주제어실에서 6개월 이상 근무하면 운전능력에는 큰 차이가 없다는 것이 전문가들의 판단이다. 또한 두 운전조의 첨단 주제어실 시뮬레이터 운전 경험을 조사한 결과, 운전조 A는 1주일 정도의 경험이 있었고, 운전조 B는 2주일 정도의 경험이 있었다. 본 연구에서는 가동 중인 주제어실의 운전 경험보다는 첨단 주제어실의 운전 경험이 더 큰 변수로 작용할 가능성이 있다고 판단된다.

둘째, 본 연구에서는 CRM 교육훈련과 개인 수행도 및 팀 수행도의 관계를 실험을 통해 규명하였다. 그러나 개인 수행도와 팀 수행도의 측정에 있어 CRM 교육훈련 이외의 변수를 모두 통제하지 못한 한계가 있다. 즉, 개인수행도 측정을 위해 KSAX와 NASA-TLX를, 팀 수행도를 측정하기 위해 BARS 평가지를 활용하였으나, 이들 평가지는 CRM 교육훈련의 효과를 측정하기 위한 전용 평가체계가 아니다. 따라서 개인 및 팀 수

행도 평가과정에서 CRM 교육훈련 이외의 다른 변수가 충분히 작용하였을 가능성이 있다. 이러한 한계점은 CRM 교육훈련의 효과를 측정하기 위한 전용 수행도 평가체계의 개발 및 타당성 검토를 통해 해결할 수 있다고 판단된다.

셋째, 본 연구에서는 인적 오류로 인한 사건/사고의 원인을 개인 수행도가 아닌 팀 수행도의 문제로 가정하였다. 그러나 인적 오류로 인한 사건/사고는 개인 수행도에 영향을 미치는 변수들과 팀 수행도에 영향을 미치는 변수들의 상호 복합적인 관계에 의해 발생할 수 있다. 따라서 인적 오류에 대한 접근을 개인의 인적 오류와 팀의 인적 오류로 구분하여 접근할 필요가 있다.

넷째, 본 연구에서는 CRM 교육훈련 효과를 검증하기 위해 Kirkpatrick의 4수준 모델을 활용하였다. 그러나 제 1수준과 제 4수준 평가를 수행하지 못하였다. 제 1수준 평가는 통계적 유의성이 확보되지 못하여 수행하지 못하였다. 그리고 제 4수준, 즉, CRM 교육훈련을 통해 해당 조직이 산출하는 결과에 대한 평가를 사건이나 사고 자료가 없어서 수행할 수 없었다. 사건/사고 자료는 원자로 불시정지(Reactor Trips), 아차 사례(Near Misses), 혹은 원전 사고(Nuclear Accidents) 등의 자료를 의미한다. CRM 교육훈련으로 이러한 사건/사고의 저감을 가져온다면, 조직이 산출하는 결과가 이익으로 나타날 수 있다. 따라서 원전 불시정지 사례와 같이 비용을 야기하는 사건에 대해 투자수익률 분석이 가능한 분석 모델을 제시할 필요가 있다.

본 연구의 결과와 한계점을 통해 오늘날 국내 원전 산업에서는 개인 수행도와 팀 수행도를 이분법적으로 접근할 필요가 있다고 판단된다. 즉, 개인 수행도를 향상시키는 방안과 팀 수행도를 향상시키는 방안을 동시에 고려해야 한다. 특히 컴퓨터 기반의 첨단 주제어실의 경우, 운전원들의 팀 수행도가 더욱 중요하므로(Gaddy and Wachtel, 1992; Sebok, 2000), 개인 수행도와 더불어 팀 수행도의 향상방안을 고려하여야 한다. 본 연구 결과는 국내 첨단 주제어실 팀 수행도를 향상시키는 방안으로서 운전원 교육훈련을 설계하는데 CRM 교육훈련체계가 유용함을 보여준다.

#### 참고문헌

- Belton, S. (2001), CRM training in the nuclear industry, paper presented at the Third CRM Users Group Workshop, University of Aberdeen, October.
- Braby, C. D., Harris, D., and Muir, H. C. (1993). A psychophysiological approach to the assessment of work underload, *Ergonomics*, 36, 1035-1042.
- Byun, S. N. and Lee, D. H. (2001), Preliminary Safety Review on the Design of Korea Next Generation Reactor : A Human Factors Evaluation of Advanced Control Facilities in Korea Next Generation Reactor, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-404.
- Chidester, T. R., Helmreich, R. L., Gregorich, S. E., and Geis, C. E. (1991), Pilot personality and crew coordination : Implications for training and selection, *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 25-44.

- Coblentz, A. and Mollard, R. (1989), Human efficiency variability in monotonous conditions effects on safety, *Human decision making and manual control*, 76-86.
- Endsley, M. R. (1995b), Measurement of situational awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37, 65-84.
- Gaddy, C. and Wachtel, J. (1992), Team skills training in nuclear power plant operations, in Swezey, R. and Salas, E.(Eds.), *Teams : Their Training and Performance*, Ablex, Norwood, NJ.
- Guo, Z. and Uhrig, R. E. (1992), Nuclear power plant performance study by using neural networks, *IEEE transaction on nuclear science*, 39(4), 915-918.
- Helmreich, R. L. (1993), Fifteen years of the CRM wars : A report form the trenches, IN B. J. Hayward and A.R. Lowe(Eds.), *Proceedings of the Australian Aviation Psychology Symposium*, 73-87, Melbourne : The Australian Aviation Psychology Association.
- Helmreich, R. L. *et al.* (1999), The evolution of crew resource management training in commercial aviation, *The international journal of aviation psychology*, 9(1), 19-32.
- INPO (1993), *Control Room Teamwork Development Training : Course Administration and Facilitation Guide*, National Academy for Nuclear Training, Atlanta, GA.
- INSAG; International Nuclear Safety Advisory Group (1986), *Summary report on the Post-Accident Review Meeting on Chernobyl Accident*. Vienna, Austria : International Atomic Energy Agency.
- Kim, S. K. (2008), *Development and Evaluation of Crew Resource Management Training for Improving Team Performance of Operators in the APR-1400 Nuclear Power Plant*, Graduate School of Kyung Hee University, Dissertation of Industrial Engineering.
- Kirkpatrick, D. L. (1994), *Evaluation training programs : The four levels*, San Francisco, CA : Berrett-Koehler.
- KOPEC (2007), *Engineering Report : 2th HFE V and V Report, SNK 3 and 4*, Korea Power Engineering Company.
- Lee, D. H., Byun, S. N., and Lee, Y. H. (2007), Short-Term Human Factors Engineering Measures for Minimizing Human Error in Nuclear Power Facilities, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 26(4), 121-125.
- Montgomery, J. Gaddy C., and Toquam, J. (1991), Team interaction skills evaluation criteria for nuclear power plant control room operators, *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting*, 2-6 September, 918-22, Santa Monica, CA : HFS.
- Mumaw, R., Swatzler, D., Roth, E., and Thomas, W. (1994), *Cognitive skill training for nuclear power plant operational decision making (NUREG/CR-6126)*, Washington, DC : U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Norman, D. A. and Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- O'Donnell, R. D. and Eggemeier, F. T. (1986), *Workload assessment methodology*. In K. R. Boff, L. Kaufman, and J. Thomas, Eds., *Handbook of Perception and Human Performance; volume II, cognitive Processes and Performance*. New York, NY : J. Wiley and Sons.
- O'Hara, J. M. and Hall, R. E. (1990), *Advanced control rooms and crew performance issues : implications for human reliability*, Brookhaven National Laboratory, New York 11973, 1405-1409.
- Rasmussen, J. (1986), *Information processing and human-machine interaction*, Amsterdam : North Holland.
- Reason, J. (1987), The Chernobyl errors, *Bulletin of the British Psychological Society*, 40, 201-206.
- Rogovin, M., Grampton, G. T., and the Nuclear Regulatory Commission (NRC) Special Inquiry Group (1980), *Three Mile Island : A report to the Commission and the public (NUREG/CR-1250, 1)*. Washington, DC : U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Roth, E. M. *et al.* (1994), *An empirical investigation of operator performance in cognitively demanding simulated emergencies*, NUREG/CR-6208. Washington, DC : USNRC.
- Sebok, A. (2000), Team performance in process control : influences of interface design and staffing levels, *Ergonomics*, 43(8), 1210-1236.
- Smith, P. C. and Kendall, L. M. (1963), Retranslation of expectations : An approach to the construction on unambiguous anchors for rating scales, *Journal of Applied Psychology*, 47, 149-155.
- United States Congress (1982), *Section 306 of the Nuclear Waste Policy Act of 1982(Public Law 97-425)*.
- USNRC (1980), *NRC action plan developed as a result of the TMI-2 Accident (NUREG-0660)*, Washington DC : US Nuclear Regulatory Commission.
- USNRC (1989), *Operator licensing examiner standards(NUREG-1021)*, Washington DC : US Nuclear Regulatory Commission.
- USNRC, *Human-System Interface and Plant Modernization Process : Technical Basis and Human Factors Review Guidance (NUREG/ CR-6637; BNL-NUREG-52567)*, Washington DC : US Nuclear Regulatory Commission.
- Wickens, C. D. (1992), *Engineering Psychology and Human Performance*, New York, NY; Harper Collins.
- Wickens, C. D., Gordon, S. E., and Liu, Y. (1998), *An Introduction to Human Factors Engineering*, New York, NY : Longman.
- Williges, R. and Wierwille, W. W. (1979), Behavioural measures of aircrew mental workload, *Human Factors*, 21, 549-574.



**김사길**

경희대학교 산업공학 학사  
경희대학교 산업공학 석사  
경희대학교 산업공학 박사  
현재: 경희대학교 산업공학 연구박사  
관심분야: 인간공학, 안전공학,  
팀 교육훈련 및 팀 수행도



**변승남**

서울대학교 산업공학 학사  
서울대학교 산업공학 석사  
미시간대학교(미국) 산업공학 박사  
현재: 경희대학교 산업공학과 정교수  
관심분야: 인간공학, 안전공학,  
원자력 인간공학



**이동훈**

경희대학교 산업공학 학사  
경희대학교 산업공학 석사  
경희대학교 산업공학 박사  
현재: 한국원자력안전기술원  
계측제어실 선임연구원  
관심분야: 원자력인간공학, 안전공학



**정충희**

아주대학교 전자공학 학사  
충남대학교 컴퓨터공학 석사  
현재: 한국원자력안전기술원  
규제기술연구부 책임연구원  
관심분야: 전자공학, 컴퓨터공학  
원자력인간공학