Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 28, No. 1 pp.37-51, February 2009

국내 원자력발전소 인적오류 저감을 위한 Crew Resource Management 교육훈련체계 개발

김사길[1] · 변승남[1] · 이동훈[2] · 정충희[3]

[1]경희대학교 테크노공학대학 산업공학과 / [2]한국원자력안전기술원 계측제어실 /
[3]한국원자력안전기술원 규제기술연구부

Development of a Crew Resource Management Training Program for Reduction of Human Errors in APR-1400 Nuclear Power Plant

Sa Kil Kim[1], Seong Nam Byun[1], Dhong Hoon Lee[2], Choong Heui Jeong[3]

[1]Department of Industrial Engineering, College of Advanced Technology, Kyunghee University, Yongin, 446-701
[2]Department of Instrument & Control, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 305-338
[3]Safety Technology Division of Nuclear Safety Headquarters, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 305-338

ABSTRACT

The nuclear power industry in the world has recognized the importance of integrating non-technical and team skills training with the technical training given to its control room operators to reduce human errors since the Three Mile Island and Chernobyl accidents. The Nuclear power plant (NPP) industry in Korea has been also making efforts to reduce the human errors which largely have contributed to 120 nuclear reactor trips from the year 2001 to 2006. The Crew Resource Management (CRM) training was one of the efforts to reduce the human errors in the nuclear power industry. The CRM was developed as a response to new insights into the causes of aircraft accidents which followed from the introduction of flight recorders and cockpit voice recorders into modern jet aircraft. The CRM first became widely used in the commercial airline industry, but military aviation, shipboard crews, medical and surgical teams, offshore oil crews, and other high-consequence, high-risk, time-critical industry teams soon followed. This study aims to develop a CRM training program that helps to improve plant performance by reducing the number of reactor trips caused by the operators' errors in Korean NPP. The program is; firstly, based on the work we conducted to develop a human factors training from the applications to the Nuclear Power Plant; secondly, based on a number of guidelines from the current practicable literature; thirdly, focused on team skills, such as leadership, situational awareness, teamwork, and communication, which have been widely known to be critical for improving the operational performance and reducing human errors in Korean NPPs; lastly, similar to the event-based training approach that many researchers have applied in other domains: aircraft, medical operations, railroads, and offshore oilrigs. We conducted an experiment to test effectiveness of the CRM training program in a condition of

*본 연구는 교육과학기술부가 출연하고 한국원자력안전기술원이 시행한 원자력기술개발사업의 일환으로 수행됨.
교신저자: 변승남
주 소: 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지, 전화: 010-6339-7081, E-mail: snbyun@khu.ac.kr

simulated control room also. We found that the program made the operators' attitudes and behaviors be improved positively from the experimental results. The more implications of the finding were discussed further in detail.

Keyword: Crew Resource Management (CRM), CRM Training, Team Skills, Team performance, Human Errors

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내의 가동 원자력발전소(이하 원전) 주제어실(Main Control Room; MCR)에서는 발전부장, 안전과장, 원자로과장, 터빈과장, 그리고 전력설비운전원로 구성된 운전조(Operating Crew)가 운전업무를 수행하고 있으나, 운전조는 항상 동일 직원으로 구성할 수 없는 것이 현실이다. 신고리 3 · 4호기 원전부터 적용되는 첨단 주제어실 또한 동일한 상황이다. 휴가, 연가, 직무변경, 그리고 병리 등의 개인적인 상황에 따라 운전원의 구성이 수시로 변경될 수 있기 때문이다. 이러한 상황은 국내뿐만 아니라 국외 원전에서도 빈번한 일이며, 이로 인해 팀 기술(Team Skills)의 문제가 야기될 수 있다(Gaddy and Wachtel, 1992). 일반적으로 팀 기술이란 팀이 목적을 달성하는데 필요한 리더십(Leadership), 의사소통(Communication), 팀워크(Teamwork), 그리고 팀 의사결정(Decision Making) 등을 말한다.

국내 원자력법 제91조에서는 면허를 받은 자만이 운전업무를 수행할 수 있도록 규제하고 있으며, 일정 교육을 이수하고 면허자의 지시나 감독 하에 원자로의 운전이 부분적으로 허용되고 있다. 그리고 발전용 원자로나 10MW 열출력 이상의 연구용 원자로 면허자는 매 3년마다 보수교육을 받도록 되어 있다. 또한 주제어실 운전업무를 안전하고 효율적으로 수행하는데 필요한 지식, 기술, 그리고 실무능력을 제고하고 설비, 절차서, 그리고 규제 등의 변경사항을 습득하도록 재교육을 실시하고 있다. 재교육은 연 3회, 회당 3주간(114시간) 실시되고 있으며, 강의, 토의, 실습, 그리고 기타 교육방법으로 원자력교육원과 각 원전 본부 교육훈련센터에서 시뮬레이터를 활용하여 실시되고 있다.

시뮬레이터를 활용한 교육훈련은 주제어실의 상황별 대처능력을 향상시키기 위한 목적으로 수행되고 있다. 주제어실의 상황은 정상(Normal), 비정상(Abnormal), 그리고 비상(Emergent) 상황으로 구분되며, 상황별 진단, 조치방법, 그리고 조치절차 등에 대한 실무교육이 주가 된다. 이러한 시뮬레이터를 활용한 교육훈련은 지식, 기술, 그리고 능력(Knowledge, Skill, Abilities; KSAs) 위주의 교육으로 특정 훈련상황에 대한 대처능력은 향상되나, 예상치 못한 인적오류(Human Errors)를 예방하지 못하는 한계가 있다.

국내 원전 운영사는 미국 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)에서 개발한 HPES(Human Performance Enhancement System)를 한국형 인적 오류 사례 분석시스템(K-HPES)으로 개발하였다. K-HPES는 사고 개연성이 있는 사고근접사례(Near Miss)도 분석 대상에 포함시키고 있으며, 웹(Web) 기반 시스템의 구축을 통해 사건 제보자의 익명성을 보장하고 사건의 원인 추적성을 높이고 있다. 또한 국내 원전 운영사는 인적 오류 예방도구(예, 인적 행위 관련 신규절차서)의 활용을 증대시키고 있으며, 인적 오류 예방교육을 정규 교육과정에 개설하여 실시하고 있다.

그러나 현재 운영사에서 실시하고 있는 운전원 교육훈련은 각 해당 업무에 대한 체계적 절차에 의해 이행되는 것이 아니라 일방적인 주입식 교육으로 수행되고 있다(이동훈 외, 2007). 이에 따라 한국원자력안전기술원(KINS)은 SAT(Systematic Approaches to Training) 기법을 적용하여 운전원의 직무에 따른 교육훈련의 필요성, 요구사항, 계획, 이행, 그리고 평가 등의 일련의 과정을 체계적으로 적용하는 교육훈련의 필요성을 제기하고 있다(KINS, 2007). 또한 주제어실 운전업무는 개인이 아닌 팀 단위로 수행되고 있으나 현재의 교육훈련체계는 개인 수행도(Individual Performance)의 향상측면에 집중되어 있는 문제점이 지적되고 있다(김사길, 2008). 따라서 개인 수행도 뿐만 아니라 팀 수행도(Team Performance)를 향상시키기 위한 새로운 교육훈련체계의 도입이 시급하다.

본 연구의 목적은 국내 원전 주제어실 운전원의 팀 수행도를 향상시키기 위한 새로운 교육훈련으로서 CRM(Crew Resource Management) 교육훈련체계를 개발하는 데 있다. 개발된 CRM 교육훈련체계는 운전원의 인적 요소에 대한 팀 단위 교육훈련으로서 인적 오류로 인한 사건/사고를 저감시키는 도구로 사용될 것이다. 사건/사고란 원자로 불시정지(Reactor Trips), 사고근접사례(Near Miss), 혹은 원전 사고(Nuclear Accidents) 등을 의미한다. 원전산업에서 CRM을 도입하여 교육훈련에 반영한 사례는 많지 않다. INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 권고 내용(INPO, 1993)과 영국 British Energy의 CRM 교육훈련(Belton, 2001)이 현재까지 알려진 사례이다. 본 연구에서 제안하는 CRM 교육훈련체계는 국내 원전산업에서 최초로 시도되었으며, 국제적인 추세에 뒤지지 않는다. 또한 교육훈련 결과에 대한 평가를 통해 훈련 효과를 측정하고 그 결과를 피드백(Feedback)하는 과정을 본 CRM 교육훈련체계

에 최초로 반영하고 있다.

본 논문 1.2절에서는 CRM에 대한 이해를 돕기 위해 항공산업에서 CRM이 도입된 배경을 간단히 설명하고 있다. 2절에서는 CRM 교육훈련체계의 구축 과정 및 내용을 설명하고 있다. 3절에서는 구축된 CRM 교육훈련체계에 대해 자세히 설명하고 있다. 마지막으로 4절의 결론에서는 제안된 교육훈련체계의 의의와 한계점에 대해 논하고 있다.

1.2 CRM의 도입 배경

1970년대 인적오류로 인한 대형 항공사고가 세 건 보고되었다. 첫 번째 사고는 적절치 못한 연료 주입량으로 인해 발생하였고, 두 번째 사고는 항공기의 고도를 정확히 인지하지 못해서 발생하였다. 마지막 세 번째 사고는 항공 관제 신호를 잘못 이해해서 발생하였다(Salas and Prince, 1999). 이 사고들의 공통점은 인적 오류를 범한 당사자들이 모두 10만 시간 이상의 비행 경험이 있는 베테랑 조종사들이었고 초보 조종사들의 대부분은 이러한 오류를 피해갔었다는 점이다.

전술한 세 건의 사고 중에서 당대 가장 큰 관심과 경악을 심어주었던 사고는 세 번째 사고로 1977년 3월 27일 아조레스제도(Azores)의 Tenerife Island 공항 활주로에서 벌어진 사고이다. Jacob Van Zanten 기장은 B-747 점보 항공기를 조정하여 안개 낀 활주로에서 이륙을 준비하고 있었다. 그는 해당 기종 비행경력이 30년인 교관급 기장으로 부기장으로 탑승한 동료는 그 기장으로부터 비행교육을 6개월 전에 받았다. Jacob 기장은 관제탑으로부터 명확한 이륙 승인 없이 이륙을 시도하였다. 부기장과 동료 엔지니어는 관제탑으로부터 이륙 승인이 없었다는 사실을 알고 있었고 활주로에 다른 항공기가 이륙 중일 수도 있다는 사실을 염려했다. 그들은 기장에게 조심스럽게 현재 이륙이 위험할 수 있다는 사실을 알렸지만 기장은 달갑지 않다는 듯, 오히려 화를 냈다고 한다. 당시 기장은 비행 일정이 늦어지는 것을 부담스러워하고 있었고 자신의 비행 기술과 경험을 지나치게 과신하고 있었다. 점보 항공기가 이륙을 위해 속력을 높였을 때, 안개 사이 활주로에 또 다른 이륙 중인 항공기를 발견하였다. 기장은 당황하였고 속도를 줄일 수도 바로 이륙할 수도 없는 사이에 점보 항공기는 다른 항공기와 엄청난 속도로 충돌하였다. 이 사고로 583명이 사망하였고 항공기 사고 역대 최악의 사고로 기록되었다(Gaffney 외, 2005).

Tenerife Island 항공기 사고는 인적 오류의 전형적인 사고로 항공기의 안전 기술이나 관제소의 관제 기술과 관계없는 순수하게 인적 요소가 근본적인 원인으로 지적된 사고이다. 그러나 이러한 인적 오류로 인한 항공기 사고는 이후에도 계속되었다.

당대 항공사들은 항공기의 이착륙이 조종사들마다 조금씩 다르다는 점에 의문을 품고 있었다. 또한 70~80%의 항공사고가 인적 오류로 인해 발생하고 있다는 문제점을 해결하고자 하였다. 이 시점에 그 해결책으로 대두된 개념이 CRM이다.

CRM은 1979년 미 항공 우주국(NASA)에서 주관한 'Resource Management on Flightdeck' 회의를 통해 최초로 알려지게 되었다(Cooper White and Lauber, 1980). 최초 CRM은 'Cockpit Resource Management'로 조종사들 간의 협업 효율성을 증대시킬 목적으로 시작된 훈련 프로그램이었다. 이후 'Cockpit'의 범위를 'Crew'로 확장하였으며, 20여 년 동안 혁신적인 발전을 통해 오늘날 CRM의 개념이 항공, 해군, 공군, 의료 그리고 에너지 산업 등에 널리 활용되었다.

오늘날 항공산업에서 CRM은 인적 오류를 관리하는 도구로서 활용되고 있다. 그러나 항공산업의 CRM 전문가들은 CRM 교육훈련을 통해 완벽하게 인적 오류를 관리할 수는 없다고 주장한다. 다만 그들은 CRM 교육훈련을 통해 가능한 오류를 피하고 초기에 발견하여 대응하며, 또한 인적 오류로 인한 피해를 최소화하는데 초점을 맞추고 있다(Helmreich 외, 1999).

2. 연구 방법 및 내용

2.1 CRM 교육훈련체계 구축 과정

본 연구에서는 그림 1의 절차에 따라 원전 운전원을 위한 CRM 교육훈련체계를 구축하였다.

2.2 CRM 교육훈련의 원칙 도출

CRM 교육훈련의 원칙은 CRM에 관한 문헌연구(Cannon-Bowers 외, 1991; Cacciabue, 2004; Gaddy and Wachtel, 1992; Salas 외, 2000; Salas and Prince, 1999; Salas and Kendall, 2004; Salas 등, 2005)와 항공 및 철도산업의 CRM 적용 사례분석(CAA, 2006; Dédale Asia Pacific, 2007; FRA, 2007; HCPro, 2005)를 기반으로 도출되었다.

Cannon-Bowers 등(1991)은 팀의 의사결정을 향상시키기 위한 교육훈련 방안으로 팀원들의 정신모형을 공유하는(Shared Mental Models) 방안을 제안하였다. CRM 교육훈련체계에는 Cannon-Bowers가 제안한 교육훈련 방법이 CRM 실무교육에 반영되었다. Cacciabue(2004)는 항공산업에서 활용되고 있는 HERMES(Human Error Risk

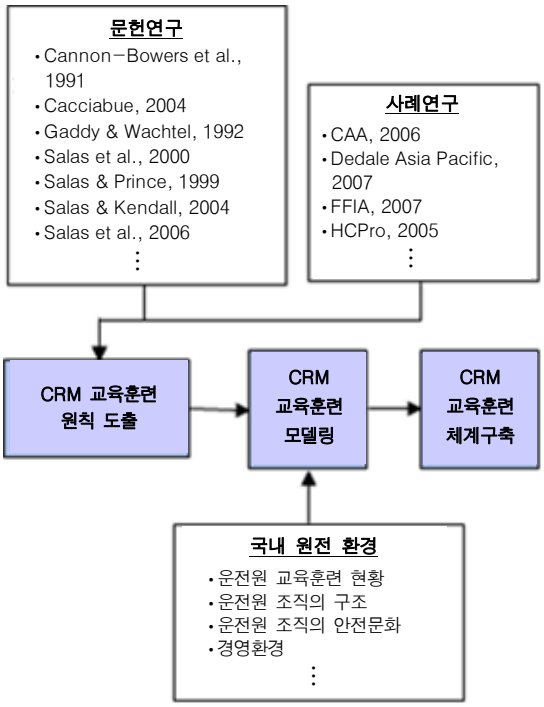

그림 1. CRM 교육훈련체계 구축 과정

Management for Engineering System)를 활용하여 CRM 교육훈련을 제안하였다. 그는 CRM 교육훈련과정 개발을 위해 다음 세 가지의 요건을 강조하였다.

- 요건 1: 직무의 사회 기술적(Socio-technical) 맥락(Context) 분석 및 인간공학적 관련 이론 분석
- 요건 2: 과거의 사고/사건 자료와 관련한 '요건 1'의 분석 자료에 대한 심층적 평가(CRM 교육훈련의 핵심 현안 및 교육 내용을 결정하기 위한 과정)
- 요건 3: 적용 가능한 모든 교육훈련 방법론의 적용(CRM 교육훈련의 효과를 최적화하기 위해 필요한 교육 방법론 결정)

상기의 세 가지 요건을 바탕으로 Cacciabue는 다음 6단계의 CRM 교육훈련개발 과정을 제안하였으며, 본 연구를 통해 제안하고 있는 CRM 교육훈련체계는 그가 제안한 개념적 틀(Conceptual Framework)을 바탕으로 개발되었다.

- 제1단계(교육과정의 정의): 교육과정의 특징과 목표를 확인하는 단계
- 제2단계(이론 정립): 교육과정에 적용되는 각종 인간공학 이론을 정립하고 교육훈련의 내용(Contents)과 효과(Effects)를 개념적으로 정의하는 단계
- 제3단계(조직의 이해): 교육대상 조직에 대한 사회-기술적 이해(Socio-technical Study), 인지적 직무분석(CTA), 그리고 사고분석(Accident Analysis) 등을 통해 조직을 이해하는 단계
- 제4단계(인간공학 교육훈련과정 개발): 해당 조직에 맞는 교육훈련과정을 개발하는 단계
- 제5단계(교육훈련 목표의 감시): 교육훈련 목표의 달성 정도를 확인하고 체크하는 단계
- 제6단계(평가 및 검증): 교육훈련과정을 사전에 평가하고 검증하는 단계

Gaddy와 Wachtel(1992)은 원전 주제어실 운전원의 팀 기술(Team Skills) 훈련 방안을 제안하였다. 또한 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 규제요건을 바탕으로 다음 5가지 팀 기술의 교육훈련을 방안을 제시하였다.

- 의사소통(Communications): 팀원들 간의 정보의 교환을 효과적으로 할 수 있는 기술에 대한 교육훈련
- 피드백(Feedback): 양방향 의사소통을 위해 필요한 팀 기술로 원전 상태에 대한 피드백(Technical Performance Feedback)과 운전원 상호간의 피드백(Personal Feedback) 교육훈련
- 효과적인 영향(Effective Influence): 운전원 상호간의 적절한 지원 및 적극성에 관한 교육훈련
- 분쟁의 해결(Conflict Resolution): 운전원 간의 의견 대립이나 불일치의 문제를 해결하는 능력에 관한 교육
- 리더십(Leadership): 문제의 해결이나 적절한 의사결정 등에 관한 교육훈련

상기의 팀 기술은 원전 운전원의 CRM 교육훈련에 필수적인 요소이므로, 본 연구에서는 CRM의 교육 내용에 전술한 5가지 교육훈련 방안을 기본 요소로 반영하였다.

Salas 외(1999)는 효과적인 CRM 교육훈련 모델을 기존의 팀에 관한 수많은 연구의 결과(예, Baker and Salas, 1992; Bowers 외, 1994; Cannon-Bowers and Salas, 1998; Cannon-Bowers 외, 1995; Salas 외, 1995)를 바탕으로 다음의 교육훈련 설계 요소들을 제안하였다.

- 운전(미션) 요구사항 확인
- 팀 교육 요구분석
- 팀워크 교육성과 수준 결정
- 팀 교육훈련 목표 설정
- 이론교육 내용 및 방법 결정
- 시나리오 기반의 실무교육 내용 및 방법 결정
- 팀 수행도 측정방법 개발

• 팀 수행도 측정 및 평가
• 팀 교육 효과 측정 및 평가

상기의 팀 교육훈련 설계 요소들은 본 연구의 CRM 교육훈련체계의 구성 요소로 활용되었다.

마지막으로 원전 CRM 교육훈련체계는 기존 항공, 의료, 철도, 그리고 해양 원유 발굴산업 등에서 적용하고 있는 사건 기반의 접근(Event-based Approach) 방법과 유사한 체계로 개발되었다. 사건 기반의 접근 방법은 많은 연구자들에 의해 CRM 교육훈련에 가장 적합한 방법론으로 그 효과가 입증되었다(CAA, 2006; Dédale Asia Pacific, 2007; FRA, 2007; HCPro, 2005). 이 접근 방법은 사건/사고 시나리오를 구성하고 실행하여 발굴되는 인적 요소의 문제점을 해결하는 전통적인 인간공학 방법론 중의 하나로 널리 알려져 있다.

이상의 문헌연구 및 사례분석을 통해 도출된 CRM 교육훈련 원칙은 다음과 같다.

• CRM 교육훈련을 통해 운전원의 정신모형을 공유할 수 있어야 한다(Cannon-Bowers 등, 1991).
• CRM 교육훈련은 HERMES(Human Error Risk Management for Engineering System)의 개념 틀을 유지한다(Cacciabue, 2004).
• 원전 주제어실 운전원의 팀 기술 요건으로서 의사소통, 피드백, 효과적인 영향, 분쟁의 해결, 그리고 리더십 능력을 CRM 교육훈련에 반영한다(Gaddy and Wachtel, 1992).
• CRM 관련 학계에서 제안하는 효과적인 CRM 교육 모델을 CRM 교육훈련체계에 반영한다(Salas 외, 1999; Baker and Salas, 1992; Bowers 외, 1992; Cannon-Bowers 외, 1995; Salas 외, 1995).
• CRM 교육훈련은 사건 기반의 접근 방법으로 수행되어야 한다(CAA, 2006; Dédale Asia Pacific, 2007; FRA, 2007; HCPro, 2005).

2.3 CRM 교육훈련 모델화 및 체계 구축

CRM 교육훈련체계의 모델화는 문헌연구와 사례분석을 통해 도출된 원칙을 바탕으로 수행되었다. 모델화는 (1)개념적 틀을 구축하고, (2)모델화 요소를 찾고, (3) 모델화 요소를 개념적 틀에 맞추어 구조화하고, (4)도출된 원칙에 적합한지 확인하고, 마지막으로 (5)도출된 원칙에 부적합한 측면을 수정 · 보완하는 과정을 통해 수행되었다. 또한 CRM 교육훈련체계가 국내 원전 환경에 최적화될 수 있도록 국내 원전 환경요소를 모델화 요소에 반영하였다. 국내 원전 환경요소는 운전원의 교육훈련 현황, 운전원 조직의 구조 및 조직문화, 운전원의 안전문화, 그리고 경영 환경 등이다.

3. 연구 결과

모델화를 통해 도출된 CRM 교육훈련체계는 그림 2와 같다. CRM 교육훈련체계는 조사단계, 계획단계, 실행단계, 그리고 평가단계, 이상 4개 단계로 구분된다. 먼저 조사단계는 CRM 교육훈련 계획을 수립하는 데 필요한 정보를 수집하는 단계로 조직의 안전문화, 운전원의 태도, 그리고 CRM 교육 수요를 조사하는 단계이다. 계획단계는 조사단계에서 얻어진 자료의 분석 결과를 바탕으로 CRM 교육훈련의 목표를 설정하고 이론교육과 실무교육 계획을 수립하는 단계이다. 계획단계에서는 이론 및 실무교육 내용뿐만 아니라 교육훈련의 시기, 기간, 교육매체, 교육대상, 그리고 교강사/전문가 등도 결정한다. 실행단계는 교육훈련 계획에 의해 CRM 교육훈련을 수행하는 단계이다. 마지막으로 평가단계는 운전원의 팀 수행도를 측정하고 평가하여 그 결과를 CRM 교육 수요에 피드백(Feedback)하며, CRM 교육훈련의 효과(Effectiveness)를 평가하는 단계이다.

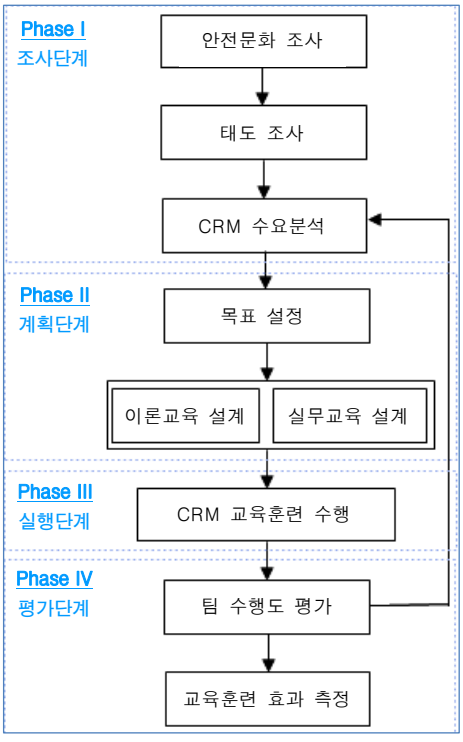

그림 2. CRM 교육훈련체계 모델

3.1 조사단계(Phase I)

3.1.1 안전문화 조사

원전 운전원 조직의 안전문화(Safety Culture) 조사는 Cacciabue(2004)가 제안한 CRM 교육훈련과정 개발요건 중 사회-기술적 맥락분석을 통한 교육훈련 대상 조직의 이해를 위해 필요하다. 또한 조직의 안전문화 수준에 따라 CRM 교육훈련의 기간과 빈도를 교육훈련 계획에 반영한다(Dédale Asia Pacific, 2007).

조직의 안전문화에 관한 연구는 사회과학의 범주인 문화에 대한 연구에 기초하고 있다. 영국의 Health and Safety Commission(HSC)는 안전문화를 다음과 같이 정의하고 있다(Cooper, 1999).

"*Safety culture is the product of individual and group values, attitudes, competencies, and patterns of behaviour that determine the commitment to, and the style and efficiency of, and organizations health and safety programs. Organizations with a positive safety culture are characterized by communications founded on mutual trust, by shared perceptions of the importance of safety, and by confidence in the efficacy measures.*"

HSC의 안전문화에 대한 정의와 같이 건강과 안전에 대한 개인이나 집단의 가치, 태도, 능력, 그리고 행동양식으로 인해 나타나는 결과물을 안전문화로 이해할 수 있다. 또한 Cooper의 안전문화에 대한 연구는 Bandura(1977)와 Cooper(1999)의 상호 결정모델(Model of Reciprocal Determinism)을 근간으로 인간(Person), 상황(Situation), 그리고 행위(Behavior)에 대한 상호 동적인 결정관계를 이해하는 데 있다.

조직의 안전문화를 조사하는 방법은 관찰법(Observation)과 질문지법(Questionnaire)이 있다. 관찰법은 Cooper의 안전문화 모델에 반영된 인간의 행위를 직접 관찰하는 방법과 간접적으로 조직의 안전문화 상태를 조사하는 방법이 있다. 관찰법에 대한 자세한 내용은 영국의 'Health and Safety Executive Safety Climate Measurement User Guide and Tool kit'에 자세히 서술되어 있다(Flannery, 2001). 질문지법은 조직 구성원의 인식을 질문지를 활용하여 조사하는 방법이다. Zohar(1980, 2000)은 산업조직의 안전 분위기(Safety Climate)를 조사하기 위한 종사자 인식 평가지를 제안하였다. 안전 분위기란 전체 조직이 아닌 조직내 그룹이나 팀의 안전문화를 의미한다. Zohar의 질문지법을 기반으로 이후 많은 연구자들(예, Glenon, 1982; Brown and Holmes, 1986; Dedobbeleer and Beland, 1991; Seppala, 1992; Glendon, Stanton and Harrison, 1994; Cooper, 1995; DeJoy, Murphy and Gershon, 1995)에 의해 안전문화 도구들이 개발되었다(Zohar, 2000). 또한 Kdkins(1999)는 항공산업의 안전문화를 평가하는 척도로서 Airline Safety Culture Index(ASCI)를 개발하여 보급하였다(Flannery, 2001).

한편 Reason(2000)은 조직 안전문화의 수준(Nature)과 강점(Strength)을 평가할 목적으로 안전문화 평가지를 개발하였다(Dédale Asia Pacific, 2007). Zohar의 평가지가 주로 제조기업 종사자를 대상으로 만들어진 반면에 Reason의 평가지는 일반적인 모든 산업에 적용할 수 있도록 보다 일반화된 평가지이다.

본 연구에서는 국내 원전 주제어실에 근무하는 운전원들의 안전문화를 평가하기 위해 Reason의 평가지를 사용하였으며, 일부 용어를 원전직무 환경에 맞도록 수정 · 보완하여 사용하였다. 평가지는 모두 20개 평가항목으로 구성되어 있으며, 긍정적 답변에 1점, 그저 그렇거나 잘 모르는 경우가 0.5점, 그리고 부정적 답변에 0점을 부여하도록 설계되었다. 20개의 평가항목의 내용은 다음과 같다.

- 위험에 대한 염려나 경각심
- 부득이하게 종종 나타나는 안전 문제에 대한 수용
- 안전에 대한 명확한 태도나 정책
- 안전 관련 정기 회의
- 안전 관련 사건/사고에 대한 검토
- 안전 관련 사건/사고에 대한 대비책 강구
- 정기적인 건강 검진
- 구조적이고 조직적인 안전상의 문제에 대한 인식
- 안전 관련 사건/사고 자료의 관리
- 안전 관련 사건/사고의 조짐을 알리는 체계
- 종사자의 안전 회의 참석
- 안전 관련 경력의 인사고과 반영
- 안전 관련 손익계산
- 안전 관련 현안의 보고체계
- 안전관리체계에 대한 신뢰도
- 안전 관련 보고자에 인한 신상보호 및 배상 정책
- 안전 관련 문제의 당사자에 대한 처벌이나 비난 정도
- 비기술적 능력이나 교육 정도
- 안전 관련 문제의 재발 방지를 위한 조직차원의 피드백
- 실수에 대한 인정과 재발 방지차원의 노력과 의지

안전문화 평가 결과의 해석은 다음 표 1의 적용 기준을 참고하여 평가할 수 있다. 표 1의 평가척도는 호주 철도산업에 제안된 적용기준(Dédale Asia Pacific, 2007)을 국내 원전산업특성에 맞도록 수정 · 보완하여 제안되었다. 또한

평가 결과는 CRM 교육훈련의 기간과 빈도의 결정뿐만 아니라 평가 항목별 분석을 통해 안전문화의 문제점을 극복하기 위한 방안을 CRM 이론교육 설계에 반영할 수 있다.

표 1. 안전문화 평가척도

평가 점수	안전문화 상태	CRM 적용
16~20	매우 건전함	CRM 적용에 매우 적합함
11~15	비교적 건전함	비교적 긴 기간 동안 CRM 적용이 필요함
6~10	나쁘지 않음	CRM 적용을 신중히 재검토하여야 함
1~5	좋지 못함	CRM 적용 시에 역효과가 생길 수 있음
0	매우 좋지 못함	현 시점에서는 CRM 적용이 불가능함

3.1.2 태도 조사

태도(Attitudes)나 성격(Personality)은 개인이나 집단의 직무 수행도에 직간접적으로 영향을 주는 요소이다(Chidester 외, 1991). 이 때문에 일반적으로 태도 조사는 조직 구성원이 해당 조직에서 수행하고 있는 직무에 적합한지 여부를 결정하는데 사용된다. 한편, 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 등, 1993). 따라서 조직 구성원의 태도는 CRM 교육훈련을 통해 조직 전체의 수행도를 향상시키는 주요인이 될 수 있다.

Helmreich 등(1993)는 항공산업의 CRM 교육훈련에 적용할 수 있는 태도 조사지인 'Flight Management Attitudes Questionnaire(FMAQ)'을 개발하였다. 그들의 연구 결과는 이후 팀워크 향상이나 안전도 향상을 위한 방법의 일환으로 의료산업, 에너지산업, 그리고 기타 산업에 까지 확대 적용되었으며, 태도 조사지의 신뢰성을 인정받고 있다.

본 연구에서 제안하는 CRM 교육훈련체계에서는 FMAQ를 국내 원전산업의 특성에 맞도록 일부 용어의 수정을 통해 'Crew Resource Management Attitudes Questionnaire (CRMAQ)'를 완성하였으며, 태도 조사지로 활용되었다. CRMAQ은 57개 조사 항목의 리커트(Likert) 5점 척도로 구성되어 있다. CRMAQ을 통한 운전원의 태도 조사 결과는 다음의 CRM 교육훈련 자료로 활용된다.

- 조직의 안전 현안과 관련한 CRM 교육훈련과정의 설계
- 조직 내에 만연해 있는 안전 위협요소들의 확인
- CRM 교육 전후의 조직 구성원의 태도 변화를 통한 교육효과 검증

3.1.3 CRM 수요분석

CRM 수요분석은 교육훈련의 수요 혹은 요구사항을 정의하는 과정으로 일반적인 교육훈련의 경우 'Training Needs Analysis(TNA)'로 불린다. TNA를 수행하기 위해 먼저 분석을 실시하는 이유와 목적을 제시하고 이후 조사해야 할 집단의 규모를 결정해야 한다. 이 과정에서 고려되어야 할 것은 TNA를 실시하는데 필수적인 자료를 확보함과 동시에 다음의 각 자료에 대한 장단점을 파악해야 한다(DiLauro & Thomas, 1979).

- 교육훈련 수요를 정의하는 자료로서 기대되는 안전업무 수행도와 현재의 안전업무의 수행도 간의 불일치를 밝혀내고 불일치의 원인이 무엇인가에 대한 자료
- 불일치의 해결책에 대한 자료로 교육훈련 수요를 충족시키기 위해서 어떤 훈련방법을 선택할 것인가에 대한 자료
- 교육훈련 대상 및 집단의 선정을 위한 자료
- 교육훈련의 계획과 실시를 위한 자료로 누구에게, 어디서, 언제, 그리고 얼마의 비용으로 교육할 것인가에 대한 논리적인 자료

교육훈련 수요를 조사하는 기법은 대표적으로 설문조사법(Written Survey), 개인면담(Individual Interview), 현지관찰(On-site Observation), 그룹토의(Focus Groups)등이 있지만, 교육주체의 상황에 맞게 다른 조사방법을 이용할 수 있다.

본 논문에서 제안된 CRM 수요분석용 평가지는 설문조사법의 일환으로 호주 철도의 CRM 교육훈련체계에서 활용된 TNA 평가지를 국내 원전산업에 맞도록 수정한 것이다(Dédale Asia Pacific, 2007).

CRM 수요는 다음의 CRM 요건을 만족시키기 위해 SMEs(Subjective Matter Experts)를 대상으로 평가된다.

- 팀 수행도와 관련한 위험 요소를 줄이기 위해 개개인의 역할에 대한 교육훈련 우선순위의 결정
- 현재 시점에서 수행되고 있는 교육훈련과 수행되지 못하는 교육훈련의 구분
- CRM 교육훈련과정에 교육훈련 수요의 최적화

SMEs는 운전원의 직무 요구사항에 대한 지식이 풍부하여야 하며, CRM 교육훈련체계에 대한 맥락을 이해하고 있어야 한다. 또한 SMEs는 운전원 조직 내에서 발생할 수 있는 안전 사건/사고와 관련된 인간공학적 요소에 대한 이해

가 가능해야 한다.

CRM 수요분석은 리더십(Leadership), 직무 관리(Task Management), 팀워크(Teamwork), 의사소통(Communication), 위험 관리(Risk Management), 상황인식(Situational Awareness), 의사결정(Decision Making), 비상대응(Emergency Management), 그리고 자기 관리(Self-management) 측면의 세부 운전원 행위에 대한 SMEs의 평가를 기초로 하고 있다. 이상의 9가지 행위 구분은 CRM에 적용되는 팀 기술을 모두 포함하고 있으며, 각각의 정의는 다음과 같다.

- Leadership: 주어진 상황에서 다른 팀원의 생각이나 행동에 영향을 미칠 수 있는 리더의 아이디어나 행위 등
- Adaptability: 변화된 상황에 대처하는 대안선택 과정, 적절한 행동의 변화, 그리고 어떠한 압력 하에서 건설적인 행위를 유지하는 등의 융통성 등
- Cooperation: 팀원들이 필요한 정보를 공유하여 직무를 수행하고 때로는 그 직무를 수행하기 위해 필요한 직무 부하를 공유하여 팀의 목표를 달성하거나 팀원을 돕는 행위 등
- Communication: 아이디어나 정보의 교환 혹은 지시 등의 메시지를 혼란 없이 다른 팀원에게 전달 등
- Risk Management: 위기 상황에 대처하는 능력, 결정에 대한 대응, 질문에 대응하거나 대처하는 적극성, 그리고 위험 요소에 대한 합리적 대응 등
- Team Situational Awareness: 예상되는 위험 요소를 팀원이 공동으로 인지, 잠재된 위험을 유용한 정보로부터 발견, 그리고 일정 시공간에서 팀원들의 이해와 예측을 공유할 수 있는 인지 요소 등
- Decision Making: 행위 과정을 선택, 그 의사결정을 수행, 그리고 예상되는 결과물을 평가하는 과정 등
- Emergency Management: 위험의 평가, 감각적이고 즉각적인 판단력, 그리고 안전 대응 등
- Self-management: 피로, 시간적 압박, 예상치 못한 상황이나 난제 등을 스스로 극복하는 능력, 특정 한계 상황을 인정하고 협조를 요청하는 등의 행위

상기 9가지 팀 기술 측면의 세부 운전원 행위와 행위 기준(Behavior Marker)은 부록 A와 같다. 또한 운전원 행위에 대한 SMEs의 평가는 안전에 미치는 영향(Effects)과 행위의 발생 빈도(Frequency)에 따라 그림 3과 같이 4개의 수준(Level)으로 구분된다.

		안전에 미치는 영향	
		간접적 영향	직접적 영향
빈도	낮음	Level 1 해당 직무는 가끔 발생하며, 직접적으로나 즉각적으로 안전에 영향을 미치지는 않는다.	Level 3 해당 직무는 자주 발생하지 않으나 안전에 직접적인 영향을 미친다.
	높음	Level 2 해당 직무는 규칙적으로 발생하며, 사람이나 시스템의 안전에 간접적인 영향을 미친다.	Level 4 해당 직무는 규칙적으로 발생하며, 사람이나 시스템의 안전에 직접적인 영향을 미친다.

그림 3. CRM 수요분석을 위한 SMEs의 평가 매트릭스

3.2 계획단계(Phase II)

3.2.1 목표 설정

안전문화 조사, 태도 조사, 그리고 교육훈련 수요분석은 CRM 교육훈련을 준비하는 단계이고 CRM 교육훈련의 계획단계에서 교육훈련 목표의 설정은 가장 먼저 수행해야 하는 과정이다. 목표의 설정은 교육훈련 내용에서부터 평가에 이르기까지 완성도(Competencies)의 기준을 제공한다. 목표의 설정은 다음의 요건을 갖추어야 한다.

- 운전원과 원전 경영자의 안전에 영향을 미치는 운전행위에 대한 인간공학적 인식이 CRM 교육훈련을 통해 향상
- CRM 교육훈련을 통해 인간공학적 지식을 습득하고 팀 기술의 습득 및 태도의 변화를 통해 기술적 혹은 인적 실패로 인한 초기의 사건/사고를 예방
- CRM KSAs(Knowledge, Skills, and Attitudes)를 원전 운전에 활용하여 안전문화를 향상시키고 잠재된 사건/사고를 예방
- CRM KSAs를 원전의 상업적 운영에도 효과적으로 활용
- 원전 운전과 관련된 모든 작업 환경을 향상
- 원전 운전조에 의해 발생할 수 있는 팀 에러(Team Errors)를 적절히 관리 및 예방

3.2.2 이론교육 설계

CRM 교육훈련에서 이론교육의 목적은 지식이나 기법의 습득, 태도의 변화, 행동의 변화, 그리고 문제해결 능력의 향상 등을 강의식 교육을 통해 달성하는 데 있다. 이론교육의 내용은 CRM 이론, 인간의 정보처리과정, 의사소통, 리더십, 의사결정과 문제해결, 그리고 상황인식 등이다.

또한 CRM 이론교육의 설계에 있어 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다(Salas 등, 2006).

- 교육자료와 학습행위는 원전 운전원의 운전행위와 직접적으로 관련
- 사건/사고에 대한 사례학습은 원전 운전직무와 직간접적으로 관련
- 교육자료는 읽기 쉽고 이해가 쉽게 작성

3.2.3 실무교육 설계

CRM 실무교육은 시나리오 기반의 직무 연습을 통해 팀 기술을 향상시키는 데 그 목적이 있다. 따라서 실무교육은 반드시 목적에 부합하도록 설계되어야 하며, 다음의 세 가지 기본요건에 맞도록 설계해야 한다.

- 팀 기술을 평가할 수 있는 실무교육용 시나리오의 작성
- 시나리오를 수행하는 운전원의 행위를 관찰
- 시나리오를 수행하는 운전원의 행위를 평가하고 피드백(Feedback)

먼저 원전 운전 전문가에 의해 팀 기술을 필요로 하는 시나리오를 작성하도록 하여야 한다. 일반적으로 원전의 운전직무는 정상직무, 비정상직무, 그리고 비상직무로 구분되는 데, 팀 기술을 주로 필요로 하는 직무는 비상직무이다. 따라서 실무교육용 시나리오는 비상직무를 기반으로 작성되어야 한다.

운전원의 행위를 관찰하기 위해서는 팀 직무와 관련한 운전원의 세부 운전행위를 정의하고 각 운전행위별로 행위기준(Behavior Marker)을 결정하여야 한다. 팀 직무와 관련한 운전원의 세부 운전행위와 행위기준은 CRM 수요분석에 활용된 9가지의 세부 운전행위(리더십, 직무 관리, 팀워크, 의사소통, 위험 관리, 상황인식, 의사결정, 비상대응, 그리고 자기 관리)를 따른다. 또한 각 세부행위를 자세히 관찰하기 위해 관찰자는 운전원의 시나리오 수행과정을 촬영하여 반복적으로 관찰할 수 있어야 한다.

마지막으로 운전행위의 평가는 개인 직무(Individual Task or Task Work)와 팀 직무(Team Task or Team Work)로 구분하여 팀 직무에 해당하는 운전원 행위에 대해 9가지의 팀 기술 능력(Competencies)을 평가하는 방식으로 설계돼야 한다. 이러한 평가 방법은 Salmon 등(2005)이 제안한 CDA(Co-ordination Demands Analysis)을 활용한 것이다. 또한 운전행위의 평가 결과는 팀 기술 측면에서 운전원에게 피드백 되어야 한다. 피드백은 운전원과 평가자가 녹화된 시나리오 수행 화면을 모니터링(Monitoring)하면서 디브리핑(Debriefing)하는 방법으로 진행돼야 한다.

3.3 실행단계(Phase III)

CRM 교육훈련의 실행주체(이하 교관)는 운전 경험이 많은 동료 중의 지원자(Volunteer Peer Facilitators)가 이상적이다. 왜냐하면 운전 경험이 많은 동료는 조직의 안전문화(Safety Culture)와 안전 분위기(Safety Climate)를 잘 알고 있으며, 운전 현장의 현안에 대한 통찰력(Thoroughness)이 풍부하기 때문이다. 교관은 CRM 교육훈련의 실효를 거두기 위해 인간공학적 지식과 팀 수행도에 대한 폭넓은 이해가 필수적이다. 또한 보다 전문적인 교육훈련을 위해 필요한 경우, 해당 분야의 전문가(Specialist)를 활용한다.

CRM 교육훈련은 이론교육과 실무교육으로 실시되며, 교육훈련 기간 동안 연속성 있는 주제를 유지할 수 있도록 교육훈련 계획에 대한 지속적인 확인(Check) 및 검토(Review)가 병행돼야 한다.

3.4 평가 단계(Phase IV)

3.4.1 팀 수행도 평가

CRM 교육훈련의 궁극적인 목적은 팀 수행도를 향상시켜 인적오류로 인한 사건/사고를 예방하는 데 있다. 따라서 CRM 교육훈련을 실시하고 팀 수행도를 평가하여 운전조의 인적오류 행위를 개선하는 과정은 반복적으로 수행되어야 한다(그림 4 참조).

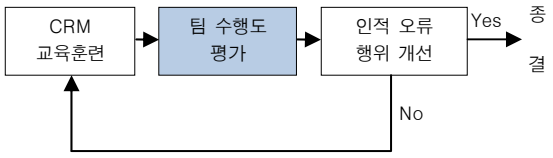

그림 4. 팀 수행도 평가의 메커니즘

CRM 교육훈련체계에서 팀 수행도 평가는 리더십(Leadership), 팀 직무부하(Team Workload), 팀 상황인식(Shared situational Awareness), 의사소통(Communication), 그리고 협업(Cooperation or Coordination) 등의 팀 기술을 측정하는 방법으로 수행된다.

초창기 팀 수행도의 측정은 동시에 여러 직무를 수행하는 상황을 측정하는 방법론인 MTMM(Multi-Trait Multi-Method; Campbell and Fiske, 1959)이나 MTPB(Multiple Task Performance Battery; Alluisi, 1967; Morgan 외, 1986)를 응용하는 방식으로 수행되었다. Brannick과 Prince (1992)은 MTMM을 활용하여 항공업무 종사자의 팀 직무 과정을 분석하였고 Bowers, Urban, 그리고 Morgan 등

(1995)은 미 공군 조종사를 대상으로 MTPB를 응용한 TPAB(Team Performance Assessment Battery)을 활용한 팀 수행도 분석을 수행하였다.

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. BOS는 복잡한 시스템에서 팀 수행도 측면을 전문가(SMEs)가 관찰하여 평가하는 기법으로 Baker(2005)에 의해 제안되었다. BARS는 Smith와 Kendall(1963)에 의해 개발된 행위기반의 평가척도로서 도표척도법(Graphic Rating Scale)과 중요사건기록법(Critical Incident Method of Rating)을 결합한 방법이다. CUD는 Watts와 Monk(2000)가 의학 통신의 문제를 해결하기 위해 제안한 방법으로 공간적으로 떨어진 곳에서 팀 간의 협력적 행위를 그림으로 묘사하는 방법론이다. CDA는 Salmon 등(2005)이 제안한 방법으로 팀워크나 협업행위 등에 관한 팀원들의 협조관계를 평가자가 관찰하는 기법이다. TTA는 복잡하고 동적인 시스템을 운영하는 팀의 수행 직무와 수행도를 분석하는데 유용한 방법으로 팀의 KSAs 요구사항을 찾고 평가하기 위해 주로 사용된다. Baker와 Salas(1992)는 팀워크 요구사항을 평가하고 팀 자원의 효율적 운용을 위해 TTA가 효율적인 방법론임을 주장하고 있다. TCTA는 Klein(2000)에 의해 제안된 팀의 인지적 직무 분석 방법론으로 팀이 직무를 수행하는 동안 팀의 인지적 기술(cognitive skills)이나 공정(processes) 등을 분석하는 데 활용된다. 마지막으로 Bowers와 Jentsch (2004)는 개인의 정신적 작업부하를 측정하는 도구로 널리 알려진 NASA-TLX를 수정 보완하여 팀의 정신적 작업부하를 측정하는 도구로 제안하였다(Stanton 외, 2005).

3.4.2 교육훈련 효과 측정

교육훈련체계를 개발하는 데 있어 일반적으로 다음 세 가지 사항을 고려한다. 첫째, 교육훈련체계는 최소의 시간에 최적의 교육효과를 나타낼 수 있는가? 둘째, 그 교육 효과는 최대한 오랫동안 지속되는가? 셋째, 비용 대비 경제성이 있는가? 이상의 세 가지 고려사항을 한 마디로 정리하면 교육훈련의 효율성(training efficiency)이다(Wickens and Hollands, 2000).

교육훈련의 효율성을 증가시키기 위해 교육훈련을 통해 얻어진 기술이 실제 환경에서 얼마나 정확하게 적용될 것인가를 고민하게 되었으며, 이를 교육의 전이(Transfer of Training)이라 한다. Fabinani 외(1989)는 이러한 교육의 전이를 측정하여 교육훈련 전략 개발에 활용하였다. 일반적으로 교육의 전이율(% transfer)은 식(1)에 의해 계산된다.

$$\text{전이율} = \frac{T_c - T_t}{T_c} \times 100 \quad (1)$$

식(1)에서 T_c는 현재(기존) 교육체계를 활용한 교육을 통해 해당 직무를 수행하는 데 소요되는 시간을 의미하며, T_t는 새롭게 제안된 교육체계를 활용한 교육을 통해 해당 직무를 수행하는 데 소요되는 시간을 의미한다.

또한 학습 효율성(Transfer Effectiveness Ratio; TER)은 다음 식(2)에 의해 계산된다.

$$\text{TER} = \frac{T_c - T_t}{T} \quad (2)$$

식(2)에서 T는 새롭게 제안된 교육훈련체계를 통해 교육훈련을 실시한 시간을 의미한다. 비용 효율성(Training Cost Ratio; TCR)은 다음 식(3)에 의해 계산된다.

$$\text{TCR} = \frac{C_o}{C_n} \quad (3)$$

식(3)에서 C_o는 현재(기존) 교육체계나 장비를 통해 교육훈련 시키는데 소요되는 단위시간당 비용을 의미하며, C_n는 새롭게 제안된 교육체계나 장비를 통해 교육훈련 시키는데 소요되는 단위시간당 비용을 의미한다.

마지막으로 교육훈련 비용 효율성(Training Cost Effectiveness; TCE)은 다음 식(4)와 같다.

$$\text{TCE} = \text{TER} \times \text{TCR} \quad (4)$$

식(4)에서 TCE > 1 이면, 새롭게 제안된 교육체계나 장비가 비용대비 교육의 효율성이 있다고 할 수 있으며, TCE < 1 이면, 비용대비 교육의 효율성이 없다. 그러나 교육훈련을 통해 안전성을 보장해야 하는 중대한 교육인 경우, 비용 효율성 보다는 안전을 우선시 하여야 할 것이다 (Wickens and Hollands, 2000).

교육훈련의 효율성은 일반적으로 이익의 형태로 해석되며, CRM 교육훈련의 효율성은 팀 수행도 향상을 통해 인적 오류로 인한 사건/사고의 저감이 원전 운영에 어떠한 이익을 주는 가와 직결된다. 따라서 CRM 교육훈련의 효과 측정은 Kirkpatrick(1994)의 4수준 모델을 활용하여 수행된다. 4수준 모델은 다음과 같다.

- 제1수준(Reaction): 교육대상자의 교육훈련에 대한 반응
- 제2수준(Learning): 교육훈련을 받은 정도

- 제3수준(Transfer): 교육훈련을 운전직무에 응용하는 정도
- 제4수준(Results) : 유형의 조직적 이익

먼저 제1수준 평가는 원전 운전원이 CRM 교육훈련을 수료한 이후에 느끼는 교육훈련에 대한 주관적인 만족도를 측정하는 방법으로 수행된다.

제2수준 평가는 교육훈련과정을 거친 이후에 교육훈련 내용에 대한 KSAs의 습득 정도를 교육훈련 전후로 측정하는 방법으로 수행된다. 일반적으로 지식(Knowledge)에 대한 측정은 이론 시험을, 기술(Skills)에 대한 측정은 실기 시험으로 측정된다. 그리고 태도(Attitudes)에 대한 측정은 별도의 태도 측정지를 활용한다.

제3수준 평가는 CRM 교육훈련 이후에 현장 운전직무에 CRM KSAs가 얼마나 활용되는 지를 측정하는 방법으로 수행된다. 제3수준 평가는 현장 직무활동을 관찰하여 주관적으로 평가하거나 팀 수행도의 정량적 기준을 적용하여 평가하기도 한다.

마지막으로 제4수준 평가는 CRM 교육훈련을 통해 얻어진 조직의 이익을 측정하는 방법으로 수행된다. 조직의 이익은 안전도의 향상, 생산성이나 품질의 향상, 운전비용의 절감, 그리고 투자수익률(ROI; Return On Investment) 등으로 계산된다.

3.5 사례연구: CRM 교육훈련의 효과

본 연구에서는 개발된 CRM 교육훈련체계의 타당성을 검증하기 위해 국내 첨단 원전 주제어실(Main Control Room; MCR) 시뮬레이터를 활용하여 CRM 교육훈련체계를 적용하였다. 교육훈련의 효과 검증을 위해 두 운전조를 상호 대립적으로 설정하여 운전조 A에게는 CRM 교육훈련을 실시하였고, 운전조 B에게는 실시하지 않았다.

먼저 운전조 A의 CRM 교육훈련을 실시하기 위해 안전문화를 조사하였다. 안전문화의 조사는 정형화된 평가지를 통해 수행되었으며, 안전문화 점수(최고 20점)는 평균 18점으로 매우 높게 평가되었다. 따라서 운전조 A는 매우 건전한 운전문화를 가지고 있어 CRM 교육훈련의 적용이 적합한 상태로 평가되었다.

다음으로 운전조 A에 대한 직무태도(Attitudes) 조사를 실시하였다. 직무태도 조사는 정형화된 태도 조사지를 활용하여 측정되었으며, 총 57개 조사 항목 중 5개의 항목에 대한 점수가 낮게 조사되어 해당 항목을 CRM 교육훈련의 내용에 반영하였다.

조사단계의 마지막으로 교육훈련의 수요분석을 위해 9가지의 팀 기술에 대한 교육훈련 중요도 평가를 전문가 4인을 대상으로 수행하였다. 수행 결과, Emergent Management, Communication, 그리고 Situational Awareness가 중요한 교육훈련 요구사항으로 분석되어 교육훈련 설계시 반영하였다.

이상의 조사단계를 거쳐 계획단계에서 교육훈련 목표를 첫째, 운전조 A의 직무태도를 향상시키고, 둘째, 운전조 A의 팀 수행도를 운전조 B보다 통계적으로 유의하게 높이는 것으로 세웠다. 두 가지의 교육훈련 목표를 달성하기 위해 이론교육과 실무교육과정을 조사단계에서 분석된 결과를 바탕으로 설계하였다. 이론교육은 강의, 시범, 토의, 그리고 사례연구 방식으로 CRM의 이론, 필요성, 그리고 팀 기술의 향상 원칙 등의 내용을 구성되었다. 실무교육은 시나리오 기반으로 직무를 수행하고 촬영된 자료를 모니터링 하여 피드백 하는 방식으로 구성되었다.

실행단계에서 이론 및 실무교육을 운전조 A를 대상으로 4일 동안 실시하였다. 이론 교육은 2일간 강의실에서 실시되었고, 실무교육은 첨단 주제어실 시뮬레이터에서 고장 및 비상 시나리오의 반복 수행 및 전문가 피드백을 2일간 실시하였다.

마지막으로 평가단계에서 평가용 시나리오 수행 및 전문가 평가를 통해 교육목표의 달성 여부를 평가하였다. 먼저 운전조 A에 대해 CRM 교육훈련 전후의 태도(Attitudes) 변화를 정형화된 태도 조사지를 활용하여 측정하였다. 태도 조사지는 항공산업에서 활용되고 있는 태도 조사지(Helmreich 외, 1993)를 바탕으로 국내 원전 특성에 적합하도록 수정 및 보완되었으며, 총 57개 항목, 리커트 5점 척도로 구성되었다. 다음으로 두 운전조에 대한 팀 수행도 평가를 BARS(Behaviorally Anchored Rating Scale)를 통해 수행하여 수행도의 차이를 분석하였다. BARS는 전문가가 팀의 직무를 관찰하여 미리 정해진 성과기준에 맞추어 평가하는 척도이다(Smith and Kendall, 1963).

운전조 A에 대한 교육훈련 전후의 태도 변화를 분석한 결과, 교육훈련 전(3.344)보다 교육훈련 후(3.688)의 태도점수가 높게 나타났다(p=0.005<0.05). 다음으로 두 운전조에 대한 팀 수행도 점수의 차이분석 결과, 운전조 A의 팀 수행도 점수(6.558)가 운전조 B의 팀 수행도 점수(5.967)보다 높게 나타났다(p=0.012<0.05). 따라서 CRM 교육훈련의 목표를 모두 달성하였다고 할 수 있으며, CRM 교육훈련의 효과가 입증되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 문헌연구와 사례분석을 통해 국내 원전 환

경에 적합한 CRM 교육훈련체계를 구축하였다. CRM 교육훈련체계는 국내 원전 주제어실 운전원의 팀 수행도 향상을 통해 인적오류를 저감하기 위한 교육훈련체계다.

주제어실의 안전한 운전은 기술적 지식이나 운전 기술뿐만 아니라 CRM에 기초한 인지적 기술(Cognitive Skills)과 운전원 상호간의 팀 기술(Interpersonal Skills)의 숙련 또한 필요로 한다. 인지적 기술은 상황인식(Situational Awareness)을 향상시켜줄 뿐만 아니라 문제해결 능력과 의사결정 능력의 향상을 돕는다. 운전원 상호간의 팀 기술은 효과적인 의사소통 능력에 기초하며, 시너지 효과(Synergy Effects)와 성공적인 팀워크를 창출한다. 이러한 인지적 기술과 운전원 상호간의 팀 기술은 운전원 집단 내의 고무적 분위기(Climate)와 조직의 안전문화(Safety Culture)에 의해 더욱 향상된다. 그러나 개인적인 스트레스(Stress)의 표출로 인해 쉽게 감쇄될 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 제안하고 있는 CRM 교육훈련체계는 이러한 인지적 기술과 운전원 상호간의 팀 기술을 향상시키기 위한 교육 내용뿐만 아니라 조직의 안전문화와 팀 내의 분위기 향상을 위한 교육을 포함하고 있다.

국내 원전산업은 운전원 직무교육 시 운전 지식과 기술에 치중하고 있다. 최근 들어 국내 원전산업은 운전원의 인적오류 저감을 위한 안전교육에 관심을 갖고 있으나, CRM 교육훈련에 대한 관심은 전무한 상태이다. 일찍이 국내외 항공산업은 조종사뿐만 아니라 항공 직원 모두를 대상으로 직무 지식 및 기술교육과 병행하여 CRM 교육을 실시하고 있다. 더구나 최근에 항공산업에서는 지식이나 기술교육에 CRM 교육을 통합하여 교육훈련의 효과를 더욱 향상시키고 있다(CAA, 2006). 따라서 국내 원전산업에서도 CRM 개념을 도입하여 인적오류 저감을 위한 효율적인 대응이 필요한 시점이며, 본 연구의 결과는 그 효율적인 대응을 위한 초석이 될 것으로 판단된다.

그러나 본 연구를 통해 제안하고 있는 CRM 교육훈련체계는 다음 세 가지의 보완이 필요하다.

첫째, CRM 교육훈련체계는 국내 원전 운전원 개개인의 한계를 팀 단위로 극복할 수 있다는 기본 가정(Basic Assumption)을 전제로 한다. 즉, '1+1=2'가 아닌 '1+1>2'라는 전제를 두고 있다. 여기서 '1+1'은 두 명의 개인이 모인 팀을 의미하며, '2'는 두 명의 개인을 의미한다. 따라서 운전원 개개인의 운전 능력은 기준 이상의 표준성을 갖고 있어야만 CRM 교육훈련의 효과를 얻을 수 있다. 또한 인간의 육체적/인지적 한계로 인해 불가피하게 발생되는 인적오류는 CRM 교육훈련을 통해 근본적으로 저감하는 데 어려움이 있다.

둘째, 본 연구를 통해 제안된 CRM 교육훈련체계에서 마지막 평가단계에 대한 구체적인 방법론을 제시하지 못하고 있다. 특히, Kirkpatrick의 제4수준 평가인 '조직의 이익' 평가는 교육훈련 효과에 대한 가장 중요한 척도이다. 그러나 국내 원전산업은 제4수준 평가를 하기 위해 필요한 사건/사고 자료가 부족한 실정이다. 예를 들어 "CRM 교육훈련으로 원자로 불시정지(Reactor Trips) 건수가 저감되었다면, 이로 인해 조직의 이익은 얼마인가?"라는 질문의 답을 하기 위해 필요한 불시정지에 대한 사건 및 비용 정보가 필요하다. 그러나 이러한 사건/사고 정보의 수집체계가 체계적이지 못하며, 아직은 전문기관의 원인 및 대책 보고서 수준에 그치고 있다.

셋째, 본 연구는 CRM 교육훈련체계에 대한 이론 및 사례적 접근에 그치고 있다. 따라서 실제 국내 원전산업에 적용하여 교육훈련의 효과를 실증적으로 검증할 필요가 있다. 특히 CRM 교육훈련의 효과검증은 시계열 연구(Time Series Study)를 통한 추세 분석이 중요한 검증 요건이라고 판단된다.

결론적으로 CRM 교육훈련체계는 교육훈련 평가 방법에 대한 추가 연구와 국내 원전산업 대상의 실증연구가 필요하다. 그러나 본 체계는 폭넓은 문헌과 사례를 근간으로 개발되었으므로 현존하는 국내 원전 CRM 교육훈련체계로서는 가장 실용적 체계라고 판단된다.

참고 문헌

Baker, D. P., Behavioral Observation Scales(BOS), in N.A. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas and H. Hendrick(Eds.), *Handbook of Human Factors Methods*, London: Taylor and Francis. 2005.

Baker, D. P. & Salas, E., Principles for measuring teamwork skills, *Human Factors*, 34, 469-475, 1992.

Belton, S., CRM training in the nuclear industry, paper presented at the Third CRM Users Group Workshop, University of Aberdeen, October, 2001.

Bowers, C. A., Urban, J. M. and Morgan, B. B. Jr., The study of crew coordination and performance in hierarchical team decision making, Team Performance Laboratory Tech. Rep. No. 92-1, Orlando, FL: University of Central Florida, 1992.

Brannick, M. T. &, Prince, A., The measurement of team process, *Human Factors*, 37(3), 641-651, 1995.

CAA, Crew resource management training: Guidance for flight crew, CRM instructors and CRM instructor-examiners, Safety Regulation Group, Civil Aviation Authority, West Sussex, 2006.

Cacciabue, P. C., Application of HERMES in training: A human factors course in the aviation domain, in P.C. Cacciabue(Eds.), *Guide to applying human factors methods*, 190-229, Springer-Verlag London

Limited, 2004.

Cannon-Bowers, J., Salas, E. & Grossman, J., Improving tactical decision making under stress: Research directions an applied implications, Paper presented at the *International Applied Military Psychology Symposium*, Stockholm, Sweden, 1991.

Cannon-Bowers, J. A., Tannenbaum, S. I., Salas, E. & Volpe, C. E., Defining competencies and establishing team training requirements, In Buzzo, R.A. and Salas, E.(Eds.), *Team Effectiveness and Decision Making in Organizations*, San Francisco, CA: Jossey-Bass, 333-380, 1995.

Chidester, T. R., Helmreich, R. L., Gregorich, S. E. & Geis, C. E., Pilot personality and crew coordination: Implications for training and selection, *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 25-44, 1991.

Cooper, M. D., Towards a model of a safety culture, An abridged version published in *Safety Science*(2000), 36, 111-136, 1999.

Cooper, G. E., White, M. D. & Lauber, J. K., Resource Management on the Flightdeck, NASA/Industry Workshop, NASA CP-2120, NASA: USA, 1980.

Dédale Asia Pacific, Final report, National Rail Resource Management Project: Guidelines for rail resource management, Melbourne/Sydney: PTSV/ITSRR, 2007.

DiLauro, Thomas J., Training Need Assessment: Current Practices and New Directions, *Public Personnel Management*(Novermber/ December), 350-359, 1979.

Fabiani, M., Buckley, J., Gratton, G., Goles, M. G., Donchin, E. & Logie, R., The training of complex task performance. *Acta Psychologia*, 71, 259-299, 1989.

Flannery, J. A., Safety culture and its measurement in aviation, University of Newcastle, Australia, 2001.

Gaddy, C. and Wachtel, J., Team skills training in nuclear power plant operations, in Swezey, R. and Salas, E.(Eds), *Teams: Their Training and Performance*, Ablex, Norwood, NJ, 1992.

Gaffney MD, F. A. et al., *Crew Resource Management: The flight plan for lasting change in patient safety*, HCPro, Inc., Marblehead, 2005.

HCPro, *Crew Resource Management: The flight plan for lasting change in patient safety*, written by F. Andrew Gaffney, MD, FACC, Captain Stephen W. Harden, Rhea Seddon, MD, 2005.

Helmreich, R. L., Fifteen years of the CRM wars: A report from the trenches, IN B.J. Hayward & A.R. Lowe(Eds.), *Proceedings of the Australian Aviation Psychology Symposium*, 73-87, Melbourne: The Australian Aviation Psychology Association, 1993.

Helmreich, R. L., et al., The evolution of crew resource management training in commercial aviation, *The international journal of aviation psychology*, 9(1), 19-32, 1999.

INPO, Control Room Teamwork Development Training: Course Administration and Facilitation Guide, National Academy for Nuclear Training, Atlanta, GA, 1993.

Klein, G. A., Cognitive task analysis of teams, in J.M. Schraagen, S.F. Chipman, V.L. Shalin(Eds.), *Cognitive Task Analysis*, 417-431, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000.

Kirkpatrick, D. L., *Evaluation training programs: The four levels*, San Francisco, CA: Berrett-Koehler, 1994.

Morgan, B. B., Jr., Clickman, A. S., Woodard, E. A., Blaiwer, A. S. & Salas, E., Measurement of team behaviors in a Navy environment(Tech. Rep. No. NTSC TR-86-014), Orlando, FL: Naval Training Systems Center, 1986.

Salas, E., Burke, C. S. & Cannon-Bowers, J. A., Teamwork: emerging principles, *International Journal of Management Review*, 2(4), 339 -356, 2000.

Salas, E. & Kendall, D. L., Measuring team performance: a review of current methods and consideration of future research, 5, 307-326, 2004.

Salas, E., Priest, H. A. & Burke, C. S., *Teamwork and team performance measurement*, *Evaluation of Human Work(3rd ed.)*, Wilson, J.R., Corlett, N.(Eds.), Taylor & Francis, CRC Press, 793-808, 2005.

Salas, E. & Prince, C., A Methodology for Enhancing Crew Resource Management Training, *Human Factors*, 41(1), 161-172, 1999.

Salmon, P. M., Stanton, N. A. Walker, G. and Green, D., Situation awareness measurement: A review of applicability for C4i environments, *Journal of Applied Ergonomics*, 2005.

Smith, P. C. & Kendall, L. M., Retranslation of expectations: An approach to the construction on unambiguous anchors for rating scales, *Journal of Applied Psychology*, 47, 149-155, 1963.

Stanton, N. A., Salmon, P. M., Walker, G. H., Baber, C. & Jenkins, D. P., *Human factors methods: a practical guide for engineering and design*, Ashgate Publishing Limited, 2005.

Wickens, C. D. & Hollands, J. G., *Engineering Psychology and Human Performance(3th)*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey., p241-292, 2000.

Watts, L. A. and Monk, A. F., Reasoning about tasks, activities and technology to support collaboration, in J. Annett and N. Stanton (Eds.), *Task Analysis*, 55-78, UK, Taylor and Francis, 2000.

Zohar, D., Safety climate in industrial organizations, Theoretical and applied implications, *Journal of Applied Psychology*, 65(1), 96-102, 1980.

Zohar, D., A group-level model of safety climate: Testing the effect of group climate on micro accidents in manufacturing jobs, *Journal of Applied Psychology*, 85(4), 587-596, 2000.

김사길, APR-1400 주제어실 운전원의 팀 수행도 향상을 위한 Crew Resource Management 교육훈련체계 구축 및 평가, 경희대학교 일반대학원, 박사학위논문, 2008.

이동훈, 변승남, 이용희, 원자력시설에서의 인적오류 발생 최소화를 위한 인간공학적 단기대책수립에 관한 연구, 대한인간공학회지, 26(4), 121-125, 2007.

부록 A.

CRM 수요분석을 위한 운전원 세부 행위

구 분	세부 행위	행위 기준
Leadership	Accountability	정상상황과 비정상상황에 대한 명확한 역할과 책임을 가진다.
	Decisiveness	안전에 영향을 주는 상황을 알리는 중요한 행동을 수행한다.
	Maintaining standards	팀원들이 적절한 규칙이나 절차들을 적용하지 못하였을 때 중재한다.
	Monitoring performance	다른 표준 절차서를 검증하거나 안전과 관련된 직무를 정확히 수행한다.
	Promoting participation	직무 계획과 성취에 기여할 수 있도록 팀원들을 격려한다.
	Situational leadership	상황에 따라 리더십 역할을 수행한다.
	Authority Gradient	팀 내에서 최적의 권위 구배를 육성한다.
Adaptability	Concentration	방심을 관리하고 주의 할 수 있도록 한다. 특히 높은 수준의 작업량을 필요로 하는 상황일 때
	Cross-checking	다른 팀원들의 행동을 감시하거나 cross-check한다.
	Delegation	위임된 중대한 안전과 일상적인 직무에 대한 작업량을 관리한다.
	Flexibility	현재 계획을 검토하고 필요 시 계획을 수정한다.
	Managing automation	자동화된 시스템을 관리하고 효율적으로 통제한다.
	Prioritizing action	복잡한 직무나 높은 작업량을 관리하기 위한 최우선의 행동
	Time management	작업량을 관리할 때 다른 팀원들과의 시간 제약을 관리한다.
Cooperation	Assisting others	도움을 제공하거나 다른 팀원들에게 충고한다.
	Considering others	팀원들과 상호작용 전에 다른 팀원들의 작업량을 고려한다.
	Developing others	경험의 공유를 통해 안전에 대한 인식을 증가시킨다(사건이나 실수 등).
	Positive atmosphere	의사소통을 활성화 하고 팀원들과 효율적인 직무환경을 조성한다.
	Preventing conflict	협력을 증대하기 위해 직업상 또는 개인적인 선입견들을 제거한다.
	Resolving conflict	논쟁을 제거하고 상호 대립을 해결하기 위해 대인관계 기술을 이용한다.
	Using available resource	다른 팀원들이나 자원들로부터 조언을 얻는다.
Communication	Assertiveness	안전에 관한 중대한 사항에 대해 관심을 표현한다.
	Briefing	교대/직무 이전에 다른 사람과 운영상의 계획과 정보를 공유한다.
	Debriefing	나중에 더 나은 조치를 위해 중대한 사건에 대해 Debriefs 한다.
	Ensuring understanding	Briefing이나 debriefing이 끝난 다음 이해 정도를 확인한다.
	Inquiry	만약 명확히 이해되지 않으면 질문을 요청한다.
	Keeping others informed	다른 팀원들이 최신의 정보를 가질 수 있도록 한다.
	Providing clear information	명확한 지시, 정보와 설명을 제공한다.
	Radio procedure	정확한 통신 프로토콜을 이용한다.
	Shift hand over	중대한 운영상의 직무에 대해 다른 사람과 팀에게 적합한 권한 등의 이양을 수행한다.
Risk management	Exercising caution	일반적이지 않고 많은 노력이 필요한 작업 하에서 특별히 주의해야 할 사항을 훈련한다.
	Handling competing goals	안전고려사항을 생각하여 기한을 준수한다.
	Judgment	안전하지 않은 예외적인 상황을 제외하고 절차서에 따라서 일을 수행한다.
	Managing Pressure	중압감하에 있을 지라도 규칙과 절차서들을 따른다.
	Planning for threats	어떻게 잠재적인 위험들 또는 비정상상황을 관리 하는지에 대한 다른 팀원들과의 정보를 교환한다.
	Risk assessments	일반적이지 않거나 어려운 직무를 수행하기 전에 리스크와 계획을 평가한다.
	Safe operation	규칙과 제한에 맞게 장비를 안전하게 운용한다.
	Safety focus	운영상의 준비와 계획에서 안전에 대한 관심을 보여준다.

CRM 수요분석을 위한 운전원 세부 행위(계속)

구 분	세부 행위	행위 기준
Team situation awareness	Alertness	위험원이 발생할 것으로 예상될 때 시선을 집중한다.
	Anticipation	가용한 정보로부터 잠재적인 문제들을 정의한다.
	Awareness of systems	운영이나 통제 시스템 내의 변화를 감시, 보고한다.
	Field knowledge	행동의 기초로서 운영 환경의 Mental model을 이용한다.
	Removing uncertainty	추가적인 정보 탐색으로 불확실성을 해결한다.
	Verification	행위이전에 가정이나 기대에 대한 검증을 실시한다.
Decision making	Define the problem	문제에 대한 이해를 돕는데 관계된 모든 정보를 수집하고 분석한다.
	Consult others	무엇을 해야 할지 결정하기 이전에 다른 사람의 제안이나 의견을 문의한다.
	Consider options	모든 option을 고려한 가용한 시간, 가장 확실한 대안을 선택한다.
	Weigh up risks	고려중인 각 대안에 대한 잠재적인 위험에 대해 토론한다.
	Review consequences	해결을 위한 의사결정 결과물이 효과적인지 검토한다.
Emergency management	Evaluating risk	비상상황을 관리할 때 정기적으로 위험을 재평가 한다.
	Intuitive decision making	비상상황에서 즉각적으로 훈련 경험에서 나오는 가장 중요한 행동을 수행한다.
	Providing support	비상사항에서 다른 사람을 재확인하고 안정되도록 돕는 행동을 취한다.
	Safety action	비상상황에서 다른 종사자들과 주민을 보호하기 위한 행동을 취한다.
Self-management	Composure under pressure	관리중인 응급상황이나 다른 많은 노력이 필요한 상황에서 평정심을 보여준다.
	Fitness for work	직무를 수행하기에 적합한 상황인지를 보고한다.
	Managing fatigue	자신이 피로하여 다른 사람에게 발생하는 영향을 인지하고 이를 적절하게 관리한다.
	Self control	스트레스나 높은 작업부하에서도 효율성을 유지한다.
	Recognizing limitations	어렵거나 비정상적인 상황 하에서 일을 수행할 때에는 주저하지 않고 도움을 요청한다.

◐ 저자 소개 ◑

❖ 김 사 길 ❖ sakilkim@khu.ac.kr
경희대학교 산업공학 박사
현 재: 경희대학교 산업공학과 박사후 연수과정
관심분야: 원자력 인간공학, 팀 수행도 및 교육훈련, 인간신뢰도, 철도 인간공학

❖ 변 승 남 ❖ snbyun@khu.ac.kr
미국 미시간대학교 산업공학 박사
현 재: 경희대학교 테크노공학대학 정교수
관심분야: 인간공학, 안전공학, 인지공학, 인간신뢰도

❖ 이 동 훈 ❖ dhlee@kins.re.kr
경희대학교 산업공학 박사
현 재: 한국원자력안전기술원 계측제어실 선임연구원
관심분야: 원자력 인간공학, 산업안전, 제품안전

❖ 정 충 희 ❖ chjeong@kins.re.kr
충남대학교 컴퓨터공학 석사
현 재: 한국원자력안전기술원 규제기술연구부 책임연구원
관심분야: 전자공학, 원자력 인간공학, 컴퓨터공학

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2008년 12월 11일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2009년 02월 23일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2009년 02월 23일