

Crew Resource Management 교육훈련 투자수익률 모델 : 원자로 불시정지 측면

김사길¹ · 변승남^{1*} · 이덕주¹ · 이동훈² · 정충희³

¹경희대학교 공과대학 산업경영공학과 / ²한국원자력안전기술원 계측제어실/

³한국원자력안전기술원 규제기술연구부

Return on Investment(ROI) Model of Crew Resource Management Training : Reactor Trips' Aspects

Sa Kil Kim¹ · Seong Nam Byun¹ · Deok Joo Lee¹ · Dhong Hoon Lee² · Choong Heui Jeong³

¹Dept. of Industrial Engineering, College of Engineering in Kyung Hee University, 1 Sochen-dong, Kihung-Gu,
Yongin-shi Kyongki-do, 449-701, Korea

²Department of Instrument & Control, Korea Institute of Nuclear Safety, 34 Gwahak-ro, Yusong-ku, Teajon, 305-338, Korea

³Safety Technology Division, Nuclear Safety Headquarters in Korea Institute of Nuclear Safety, 34 Gwahak-ro,
Yusong-ku, Teajon, 305-338, Korea

The Nuclear Power Plant(NPP) industry in Korea has been making efforts to reduce the human errors which have largely contributed to about 150 nuclear reactor trips since 2001. Recently, the Crew Resource Management(CRM) training has risen as an alternative countermeasure against the nuclear reactor trips caused by human errors. The effectiveness of CRM training in NPP industry, however, has not been proven to be significant yet.

In this study a return on investment(ROI) model is developed to measure the effectiveness of CRM training for the operators in Korean NPP. The model consists of mathematical expressions including multiple variables affecting the CRM training impacts and nuclear reactor trips. Implication of the model is discussed further in detail.

Keywords: Crew Resource Management(CRM), Reactor Trips, Return on Investment(ROI), Effectiveness of Training

1. 연구의 배경 및 목적

국제적으로 원자력산업에서는 Crew Resource Management (CRM) 교육훈련의 필요성을 1990년대 초반부터 제기하고 있다. Roth and O'Hara(1994)는 NASA(National Aeronautics and Space Administration)와 FAA(Federal Aviation Administration)를 중심으로 발전되어 인적오류(human errors) 저감효과가 입증된

CRM(Crew Resource Management) 개념을 원전 운전원 팀 교육 훈련에 일부 도입하여, 팀 교육훈련의 요소와 방법에 관한 연구를 수행하였다. 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. 미국 Nuclear Regulatory Commission(NRC)은 운전원(operators)

본 연구는 교육과학기술부가 출연하고 한국원자력안전기술원이 시행한 원자력기술개발사업의 일환으로 수행됨.

* 연락저자 : 변승남 교수, 449-701 경기도 용인시 기흥구 서전동 1번지 경희대학교 국제캠퍼스 공과대학 산업경영공학과, Tel : 031-201-2581,

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

200□년 □월 □일 접수; 200□년 □월 □일 수정본 접수; 2009년 □월 □일 게재 확정.

면허시험이 개인 수행도 위주로 치러지는 문제점을 지적하고, 면허시험에 팀 의존적 행위(team dependent behavior)에 대한 평가 항목을 추가할 것을 NRC 핸드북을 통해 권고하고 있다(USNRC, 1989). 영국의 British Energy는 British Airways의 CRM 교육훈련 체계를 바탕으로 원전 운전원의 팀 교육훈련 체계를 구축하여, 주제어실 운전원뿐만 아니라 현장 종사자들에게도 확대 적용하고 있다(Belton, 2001). Institute of Nuclear Power Operations(INPO)은 28시간의 CRM 교육훈련 프로그램을 개발하여 팀워크 향상을 위한 교육훈련 방법을 권고하고 있다(INPO, 1993).

운전원에 대한 CRM 교육훈련은 운전원의 인적오류로 인한 사건이나 사고를 저감하고 원자력발전소(이하 원전) 조직의 안전문화를 향상시킬 것으로 예상된다. 그러나 현실은 원전에 CRM 교육훈련을 적극 적용하지 못하고 있다(Salas 외, 2006). 원인으로서는 첫째, CRM 교육으로 인해 발생하는 추가 비용으로 인해 전력 생산성이 저하된다고 판단하고 있다. 둘째, CRM 교육훈련의 실효성이 밝혀지지 않았다고 판단하고 있다. 원자력 산업에서 CRM 교육훈련의 효과를 구체적으로 검증한 사례는 거의 없다. CRM 교육훈련을 적용한 현장 사례가 부족하며, 교육훈련의 효과를 정량적으로 분석하기 위한 방법론이 부재하기 때문이다. 다만 최근에 국내에서 첨단 주제어실 운전원에 대한 CRM 교육훈련이 운전원의 직무태도를 긍정적으로 변화시키고 팀 수행도를 향상시킨다는 보고가 있을 뿐이다(Kim, 2008).

항공산업의 경우, 원자력산업 보다 10여 년 전인 1970년대 후반부터 CRM에 대한 관심을 보였으며 Cooper White and Lauber, 1980), CRM 교육훈련의 효과를 검증하기 위한 연구를 병행하고 있다(Cannon-Bowers 외, 1989; Leedom and Simon, 1995; Salas 외, 1999). Salas 등(1999)은 35명의 미 해군 헬리콥터 조종사 35명을 대상으로 교육훈련에 대한 효과를 Kirkpatrick (1976)의 4수준 모델을 바탕으로 검증한 결과를 제시하고 있다. 검증 결과는 교육훈련으로 향상시키고자 했던 팀의 능력(예, 적극성, 의사소통, 상황인식, 미션 분석 능력 등)의 향상을 나타내고 있다. 그러나 Salas 등(2006)은 표준화된 CRM 교육훈련의 지침이 부족하고 그 효과를 측정하기 위한 방법론이 다양하여 교육훈련 효과의 일관성이 확보되지 못함을 개선점으로 지적하고 있다.

일반적으로 교육훈련의 효과를 검증하기 위한 척도로 Kirkpatrick의 기준을 활용한다(Edens and Bell, 2003). Kirkpatrick (1976)의 기준은 반응(reaction), 학습(learning), 행위(behavior), 그리고 결과(results)이다. Edens과 Bell(2003)은 교육훈련의 효과에 대한 메타 분석(meta-analysis)을 통해 Kirkpatrick의 기준에 대한 타당성 연구를 수행한 바 있다. 연구 결과는 교육훈련을 포함한 일반적인 교육훈련 효과의 크기(Cohen's d)가 $d = 0.6$ 이상으로 높게 나타남을 보이고 있다(반응 : $0.60(N = 936)$, 학습 : $0.63(N = 15,014)$, 행위 : $0.62(N = 15,627)$, 결과 : $0.62(N = 1,748)$). 참고로 Cohen(1988, 1992)은 교육훈련 효과의 크기(d)

를 ‘작다(0.20)’, ‘중간이다(0.50)’, 그리고 ‘크다(0.80)’로 해석하고 있다. 또한 일부 연구자들은 Kirkpatrick의 기준을 확장 및 보완하여 새로운 척도를 제안한 바 있다(Kraiger 외, 1993; Salas and Cannon-Bowers, 2001). Kraiger 등(1993)은 학습(learning)의 다차원적 접근을 통해 인지적 학습(cognitive learning), 감성적 학습(affective learning), 그리고 기술 기반의 학습(skill-based learning)에 대한 교육훈련 효과 기준을 제시하고 있다. 인지적 학습은 말로 표현할 수 있는 지식(verbal knowledge)이나 지식의 조직화(knowledge organization), 그리고 인지적 전략(cognitive strategies) 등의 향상 정도를 의미한다. 감성적 학습은 태도(attitude)나 동기(motivation)의 변화를 의미한다. 마지막으로 기술 기반의 학습은 편집 및 수집 능력(compilation)이나 자동성(automaticity)을 의미한다.

CRM 교육훈련의 효과 연구는 Kirkpatrick의 기준을 근간으로 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 CRM 교육훈련이 구체적이고 실질적인 효과를 나타내고 있는가에 대한 의문은 여전히 남아있다. CRM 교육훈련은 경영자에게 여전히 많은 비용을 유발시키는 비이윤적(non-beneficial) 요소이기 때문이다. Salas 등(2006)의 연구는 이러한 의문을 CRM 교육훈련의 효과 연구와 관련한 28개의 기존 문헌 연구를 통해 해결하고 있다. 그들은 항공, 의료, 정유, 선박, 그리고 원자력 산업 등을 대상으로 수행된 교육훈련 효과 연구를 Kirkpatrick의 기준을 근간으로 분석하였다. 연구 결과, 첫째, 반응(reaction) 측면의 CRM 교육훈련 효과는 모두 긍정적으로 나타났다. 둘째, 학습(learning) 측면의 효과는 주로 태도의 변화 측면에서 긍정적으로 나타났다. 셋째, 행위(behavior) 측면의 효과는 일부는 긍정적 효과로, 그리고 일부는 부정적으로 나타났다. 넷째, 결과(results) 측면의 효과는 연구 자료의 부족으로 판단할 수가 없었다. 또한 O'Connor 등(2008)은 최근에 수행된 16개의 CRM 교육훈련 실증연구 결과를 바탕으로 메타분석(meta-analysis)을 실시한 바 있다. 그들은 Kirkpatrick의 평가 기준을 근간으로 태도(attitude), 지식(knowledge), 그리고 행위(behavior) 측면에 대한 분석 결과를 제시하고 있으나(태도 : $0.94(N = 1,166)$, 지식 : $0.59(N = 185)$, 행위 : $1.18(N = 3,245)$), 제 4수준 평가로서 결과(results)에 대한 분석은 데이터의 부족으로 제외되었다.

이처럼 Kirkpatrick의 제 4수준(results)에 대한 평가는 CRM 교육훈련의 효과를 검증하는데 한계가 있다. 조직의 이익을 CRM 교육훈련의 효과로 계량화 하는데 어려움이 있기 때문이다. Taylor(2000)는 제 4수준 평가의 방법으로 투자수익률(Return On Investment; ROI) 모델을 제시한 바 있다(CAA, 2003). 그는 CRM 교육훈련의 투자로 인한 수익률을 ‘순수 CRM 교육훈련의 이익’에 대한 ‘CRM 교육훈련 비용’의 비율에 ‘CRM 교육훈련으로 인한 결과들의 상관계수’의 곱으로 정의하였다. 그러나 그의 ROI 모델은 이익과 비용 변수가 구체적이지 못하고 상관계수를 산출하기 위한 CRM 기준 변수의 결정이 어렵다는 한계가 있다. 따라서 CRM 교육훈련으로 인해 해당 조직이 얻을 수 있는 이익 측면의 효과 검증 방법에 대한 구체적인

연구가 필요하다. 특히, 원자력산업의 경우, CRM 교육훈련의 필요성을 조직의 이익 측면의 실증적 근거에 기반을 두어 제안할 필요가 있다. 원자력산업은 항공산업에 비해 사건 및 사고의 빈도가 낮아 상대적으로 CRM 교육훈련의 필요성이 축소될 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 국내 원전 운전원에 대한 CRM 교육훈련의 효과 검증 방법을 ROI 측면에서 제안하고자 한다. 또한 본 연구의 ROI 모델은 CRM 교육훈련의 효과를 인적오류로 인해 발생하는 원자로 불시정지(reactor trips)의 저감 건수로 가정한다. 따라서 본 연구의 목적은 국내 원전에 CRM 교육훈련을 도입하여 해당 원전 조직이 얻을 수 있는 이익을 평가하는 수리 모델을 개발하여, 추후 실제 경영변수를 활용한 의사결정을 지원하는 도구를 제공하는 데 있다.

2. 국내 원자로 불시정지 현황

한국원자력안전기술원(KINS)의 불시정지 이력관리시스템(OPIS) 통계에서 인적오류는 ‘종사자의 기기조작 실수에 의한 즉발오류(active error)’로 구분되며, 지난 7년간의 자료는 <Table 1>과 같다.

Table 1. Reactor trips caused by human errors

Event	Year							Means
	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	
Number of Reactor Trip	21	23	18	21	19	20	14	19.43
Number of Event caused by Human Errors	5	3	7	6	2	2	4	4.14

<Table 1>에서 보는 바와 같이 국내 원전의 불시정지 건수 중 인적 오류로 인한 경우가 매년 평균 4건 이상 발생하고 있다. 일반적으로 인적오류로 인한 사건의 발생은 대수정규분포(log-normal distribution)와 유사하게 발생되므로 일정 기간 동안의 평균 발생건수를 줄이기 위한 노력이 필요하다. 이에 따라 국내 원전산업은 인적오류로 인한 원자로 불시정지를 감소하기 위한 대책 마련의 필요성을 인지하고 있다. 또한 교육과학기술부는 인적오류로 인한 원자로 불시정지 건수를 저감하기 위해 지난 2006년부터 ‘인적오류 저감을 위한 중장기 대책팀’을 구성하여 활발한 R&D 활동을 지원하고 있다(Lee 외, 2007). Kim 등(2009)은 인적오류로 인한 원자로 불시정지를 줄이기 위한 대책 방안의 하나로 CRM 교육훈련체계를 개발하고 예비연구(pilot study)를 통해 그 효과를 검증한 결과를 제시하고 있다. 그러나 CRM교육훈련으로 인한 조직의 이익 평가를 구체적으로 제시하지 못한 한계가 있다.

3. CRM 교육훈련의 ROI 모델

본 연구에서는 CRM 교육훈련의 ROI 모델 적용을 위해 Kirkpatrick의 교육훈련 평가모델에서 정의한 제 4수준 평가 개념을 적용하였다. 제 4수준 평가는 교육훈련을 통해 얻은 조직의 이익을 측정하는 것이다. 조직의 기대이익은 안전도의 향상, 생산성이나 품질의 향상, 운전비용의 절감, 그리고 ROI의 향상 정도 등으로 계산된다.

ROI 측면에서 제 4수준 평가를 수행하기 위해서는 먼저 안전도 향상 측면에서 CRM 교육훈련에 대한 평가가 필요하다. CRM 교육훈련으로 인한 사건 및 사고 절감 이익을 안전도 향상 측면에서 접근해야 하기 때문이다.

3.1 안전도 향상 평가

안전도 향상 측면의 평가는 사건 및 사고의 절감에 따른 조직의 기대이익을 측정하는 것이다. 그러나 국내 원전의 경우, 원전사고로 기록된 데이터는 없으며, 원자로 불시정지 건수가 안전도 향상 측면에서 가장 위협적인 사건으로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 원자로 불시정지 사건을 바탕으로 조직의 기대이익을 측정하는 방안을 제안한다. 본 연구에서는 CRM 교육훈련으로 원자로 불시정지 건수를 저감할 수 있다는 전제 하에 제 4수준 평가 모델을 제시하고자 한다.

1회의 원자로 불시정지로 인한 비용(costs)은 재가동에 소요되는 비용과 정지 기간 동안 생산하지 못한 전력으로 인한 기회비용(opportunity cost)으로 구분된다. 먼저 재가동 비용으로는 재료비, 설비비, 그리고 인건비로 구분된다. 재료비는 원자로를 최초 가동할 때 필요한 재료의 비용으로 원자로가 가동 중에 필요한 재료는 제외되며, 재료별 단가에 의해 결정된다. 설비비는 재가동에 필요한 설비의 비용으로 원자로 불시정지 사유에 따라 고장 설비의 교체나 수리 등 다양한 설비비용으로

Table 2. Criteria for estimating costs of reactor trips

Costs	Criteria	Variables
Materials	$\sum_{j=1}^l (M_j \times MC_j)$	M_j : amount of j^{th} material MC_j : unit cost of j^{th} material
Facilities	$\sum_{k=1}^m (F_k \times FC_k)$	F_k : number of k^{th} facility FC_k : unit cost of k^{th} facility
Labors	$MP \times L \times H$	MP : manpower per hour L : labor per hour H : time period of reactor trips
Opportunity	$W \times P \times H$	W : mean power production per hour(kW) P : unit cost of 1 kW H : time period of reactor trips

설비별 단가(수리비 포함)에 의해 결정된다. 마지막으로 인건비는 재가동에 필요한 인력 투입에 따른 비용으로 원자로 시간당 필요 인원수에 원자로 불시정지 시간을 곱하여 계상한다.

전력생산손실비용은 원자로 불시정지로 인해 원자로가 정지되어 있는 기간 동안 전력을 생산하지 못하여 발생하는 가치(values)의 손실로 시간당 평균 전력 생산량에 해당 전력의 단가를 곱하여 원자로 불시정지 시간의 곱으로 산정된다. 1회의 원자로 불시정지로 인해 발생하는 비용의 산정기준은 <Table 2>와 같다.

t 년째에 N_t 건의 원자로 불시정지 사건이 발생한다면, 이로 인해 발생하는 연간 사건비용(C_t)은 <Equation 1>과 같다.

$$C_t = \sum_{i=1}^{N_t} (MP \times L + W \times P) H_{i,t} + N_t \left[\sum_{j=1}^l (M_j \times MC_j) + \sum_{k=1}^m (F_k \times FC_k) \right] \quad (1)$$

<Equation 1>에서 인건비($MP \times L$)와 기회비용($W \times P$)은 t 년째의 원자로 불시정지 시간($H_{i,t}$)에 따라 달라지는 변동비용이며, 재료비($\sum_{j=1}^l (M_j \times MC_j)$)와 설비비($\sum_{k=1}^m (F_k \times FC_k)$)는 원자로 불시정지 건수마다 발생하는 고정비용이다.

본 연구에서는 CRM 교육훈련으로 인한 조직의 기대이익을 원자로 불시정지 사건으로 인해 발생하는 연간 사건비용(C_t)의 절감이익으로 대체하여 제 4수준 평가 방법을 제안하고 있다. 따라서 T년 동안 CRM 교육훈련을 통해 인적오류로 인한 원자로 불시정지 사건을 매년 R_t 의 저감율로 감소시킨다면, CRM 교육훈련으로 인한 조직의 기대이익(Expected Training Returns; ETR)은 <Equation 2>와 같다.

$$ETR = \sum_{t=0}^{T-1} (P_t \times PE_t \times R_t \times C_t) \quad (2)$$

<Equation 2>에서 P_t 는 t 년째의 원자로 불시정지 사건이 발생할 확률을, PE_t 는 t 년째의 원자로 불시정지 사건 중 인적요인이 원인일 확률을, R_t 는 원자로 불시정지 저감율을, 그리고 C_t 는 t 년째 N_t 건의 원자로 불시정지로 인해 발생하는 비용을 의미한다.

3.2 ROI 평가

투자 수익에 대한 조직의 기대이익은 특정 기간 동안 발생하는 투자 수익률(ROI)을 통해 평가된다. Kirkpatrick의 제4수준 평가 중 ROI 평가는 CRM 교육훈련에 들어간 비용과 CRM 교육훈련으로 인해 얻어진 조직의 이익을 비교한다. ROI를 여러 가지 방법으로 표현할 수 있지만 주로 퍼센트나 이익·비용 비율로 표현한다. 본 연구에서는 T년 동안 매년 1회의 CRM 교육훈련을 실시하여 인적오류로 인한 원자로 불시정지 사건

을 매년 R_t 의 저감율로 감소시킨다고 가정하여 ROI를 평가하였다. CRM 교육훈련의 횟수는 CRM 교육훈련 대상에 따라 차등 적용하여야 하지만 국내 원전산업 실정에 비추어 년 1회의 CRM 교육훈련이 적합한 것으로 판단된다.

T년 동안 매년 1회의 CRM 교육훈련을 통해 인적오류로 인한 원자로 불시정지 사건을 매년 R_t 의 저감율로 감소시킨다면, CRM 교육훈련으로 인한 조직의 기대이익(ETR)은 전술한 바와 같다(<Equation 2>). 한편 CRM 교육훈련을 1회 실시하는데 필요한 비용(Training Costs; TC)은 <Equation 3>과 같다.

$$TC = TD + TM + TP + TB + TL + TA + TO \quad (3)$$

TD: CRM 교육훈련 설계 및 개발비(단위: 원)

TM: 운전원에게 제공된 교육용 자료비(단위: 원)

TP: 강사 및 시설 이용비(단위: 원)

TB: 운영관련 숙식 및 출장비 등의 CRM 교육훈련: 진행비(단위: 원)

TL: CRM 교육훈련 기간 중의 운전원 임금 및 수당(단위: 원)

TA: 교육관련 행정비 및 간접비(단위: 원)

TO: 기타 비용(단위: 원)

따라서 T년 동안 매년 1회의 CRM 교육훈련을 실시하여 원자로 불시정지 건수를 저감시킬 것에 대한 ROI(%)를 현재가치 비교분석 방법으로 산출하였다. CRM 교육훈련의 할인율을 r 이라고 하고 TC_t 를 t 년째의 CRM 교육훈련 투자액이라고 하면 투자의 현재가치(Present Investments; PI)는 <Equation 4>와 같다.

$$PI = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{TC_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

그러나 CRM 교육훈련의 경우, 투자비용은 현재 시점의 투자비용(TC_0)이 T년 동안 매년 동일하게 적용된다고 가정할 수 있으므로 PI는 다음 <Equation 5>와 같다.

$$PI = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{TC_t(1+r)^t}{(1+r)^t} = TC_0 + TC_0(T-1) = T \times TC_0 \quad (5)$$

<Equation 5>에서 CRM 교육훈련의 할인율(r)은 CRM 교육훈련의 투자비용과 CRM 교육훈련으로 인한 예상수익(원자로 불시정지 건수 절감으로 인한 조직의 이익)을 현재가치로 환산하여 양자를 동일하게 만드는 투자수익률로 현재 시장의 이자율보다 높다고 가정한다.

또한 CRM 교육훈련의 할인율을 r 이라고 하고 ETR_t 를 CRM 교육훈련의 효과로서 T년 동안 매년 R_t 의 저감율로 인적오류로 인한 원자로 불시정지를 저감시켜 얻어지는 CRM 교육훈련 기대이익이라 하면, 기대이익의 현재가치(Present Returns; PR)는 <Equation 6>과 같다.

$$PR = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{ETR_t}{(1+r)^t} \quad (6)$$

따라서 T년 동안 매년 1회의 CRM 교육훈련을 실시하여 원자로 불시정지 건수를 저감시킬 것에 대한 ROI(%)는 <Equation 7>과 같다.

$$ROI(\%) = \frac{PR}{PI} \times CoF_{IR} \times 100 \quad (7)$$

$$= \frac{\sum_{t=0}^{T-1} \frac{ETR_t}{(1+r)^t}}{T \times TC_0} \times CoF_{IR} \times 100$$

CoF_{IR}은 CRM 교육훈련 투자와 조직의 기대 수익과의 상관 계수로 해당 산업계에서 검증되어 통용되는 계수 값을 사용한다. ROI 수식(Equation 7)은 금전적인 측면만을 고려하며, 추상적 가치는 포함하지 않는다.

3.3 사례 연구

국내 원전에 원자로 불시정지에 관한 자료를 활용하는 데 한계가 있어 원자로 불시정지 비용과 저감율을 현실적 측면을 고려하여 가정한다. K사 원자력 발전소에서는 향후 5년 동안 매년 1회의 CRM 교육훈련을 실시하여 <Table 3>과 같은 원자로 불시정지 저감 효과가 있을 것으로 예측되었다고 가정한다.

Table 3. K's reactor trip descriptions

T(Year)	N _t	PE _t	R _t
T ₀	20	0.21	0.1
T ₁	23	0.20	0.2
T ₂	18	0.17	0.3
T ₃	19	0.15	0.4
T ₄	21	0.13	0.5

Note) N_t: number of reactor trip in tth year.

PE_t: rate of reactor trip caused by human errors in tth year.

R_t: rate of reactor trip reduction in tth year.

또한 K사의 원자로 불시정지에 따른 비용은 과거의 건당 총 비용을 기반으로 예측한 결과, <Table 4>의 건당 평균비용이 발생한다고 가정하자.

CRM 교육훈련은 매년 1회 실시할 예정이며, 1회 실시하는데 소요될 비용은 훈련 설계 및 개발비, 교육용 자료비, 강사 및 시설비, 교육훈련 진행비, 피훈련원 임금, 그리고 기타 및 간접비를 모두 포함하여 100,000천원으로 추산된다고 가정하자.

K사의 CRM 교육훈련으로 인한 ROI 분석을 위해 먼저 5년

동안 CRM 교육훈련 투자액의 현재가치(PI)는 5×100,000천원으로 500,000천원이다(Equation 5 참조).

Table 4. K's mean costs per a reactor trip

Costs	Mean Costs (thousand won/event)
Materials	100,000
Facilities	150,000
Labors	50,000
Opportunity	750,000
Total	1,050,000

다음으로 5년 동안 매년 발생되는(P_t = 1) 원자로 불시정지에 대해 인적오류로 인해 발생하는(PE_t) 건수를 R_t의 저감율로 감소시킴에 따른 K사의 기대이익은 매년 아래와 같다(<Equation 2> 참조).

- ETR₀ = 1×0.21×0.1×20×1,050,000 = 441,000천원
- ETR₁ = 1×0.20×0.2×23×1,050,000 = 966,000천원
- ETR₂ = 1×0.17×0.3×18×1,050,000 = 963,900천원
- ETR₃ = 1×0.15×0.4×19×1,050,000 = 1,197,000천원
- ETR₄ = 1×0.13×0.5×21×1,050,000 = 1,433,250천원

또한 CRM 교육훈련의 할인율(r)을 0.1이라고 가정하고 기대 수익의 현재가치(PR)를 구하면, 아래와 같다(Equation 6 참조).

$$PR = \sum_{t=0}^4 \frac{ETR_t}{(1+0.1)^t} = 441,000 + 878,182 + 796,612 + 899,324 + 978,929 = 3,994,047 \text{ (천원)}$$

따라서 K사의 CRM 교육훈련으로 인한 ROI(%)는 약 479%로 계산과정은 다음과 같다. 단, CoF_{IR}는 원자력 산업계에서 통용되는 계수 값이 부재하므로 항공 산업계에서 일반적으로 통용되는 계수 값(CoF_{IR} = 0.6)으로 사용하였다.

$$ROI(\%) = \frac{PR}{PI} \times CoF_{IR} \times 100$$

$$= \frac{3,994,047}{500,000} \times 0.6 \times 100 \approx 479(\%)$$

결과적으로 K사의 CRM 교육훈련에 따른 투자수익률은 5년간 CRM 교육훈련에 소요되는 비용의 4.79배 만큼의 원자로 불시정지 저감으로 인한 비용절감 효과가 있다고 해석된다. 그러나 이상의 결과해석에 있어, 교육훈련 비용과 불시정지 저감 비용이 실제 데이터에 근거하지 못하였으므로 수치적 해석 과정 이상의 의미를 부여할 수는 없다.

4. 결 론

본 연구에서는 CRM 교육훈련의 효과(effectiveness) 분석 방법을 조직의 기대이익 측면의 ROI 모델로 제안하였다. 본 연구를 통해 제안된 모델은 국내 원전에 CRM 교육훈련 도입 여부를 결정하기 위한 의사결정 지원 도구로 활용될 것을 기대한다. 또한 일반적인 교육훈련의 효과를 측정하는 데 있어서도 투자수익률 측면의 구체적이고 정량적인 방법론을 제공할 것으로 기대한다. 그러나 본 연구를 통해 해결하지 못한 한계점이 있으며, 이를 다음 세 가지의 연구 논제로 제안하고자 한다.

첫째, 본 연구에서 제안한 ROI 모델은 CRM 교육훈련의 투자로 운전원의 팀 수행도를 향상시키고, 이로 인해 인적오류로 인한 사건/사고를 저감시킬 것이라는 전제를 두고 있다. 국내의 원전산업에서 아직 CRM 교육훈련으로 인한 구체적인 효과검증(특히, 조직의 이익 측면에서)이 부재한 상태이다. 또한 CRM 교육훈련은 반드시 인적오류로 인한 사건/사고를 저감시킬 수 있는 것은 아니다. 즉, CRM 교육훈련은 인적오류의 발생 메커니즘을 기술적으로 차단하였다 하더라도 인간의 한계로 인해 불가피하게 발생할 수 있는 인적오류를 개인이 아닌 팀의 협조체계를 통해 극복하고자 하는 대체방안인 것이다. 따라서 기술적 불안정 상태로 인해 인적오류의 발생 메커니즘이 노출되어 있는 상황에서 단순히 CRM 교육훈련만을 통해 인적오류로 인한 사건/사고를 피할 수는 없다. 그러나 국내의 항공산업에서 CRM 교육훈련으로 인적오류로 인한 사건/사고의 절감 효과를 실증적으로 검증하였다. 원자력산업은 항공산업과 안전성 측면의 유사성이 매우 높은 산업이므로 추후 지속적인 예비연구(pilot study)와 현장 적용을 통해 원자력산업의 CRM 교육훈련 효과를 검증할 필요가 있다.

둘째, 본 연구에서 제안한 ROI 모델에서는 원자로 불시정지 사건에 대한 통계학적 예측을 허용하고 있다. 본 모델에서 사용되는 변수들은 연간 불시정지 추정건수, 불시정지 사건이 인적오류 원인일 확률, 그리고 CRM 교육훈련으로 인적오류로 인한 불시정지 사건이 저감될 확률 등으로 과거의 사건 이력 데이터를 활용하여 통계학적으로 도출 가능한 예측변수들이다. 그러나 본 논문에서는 이상의 입력변수들의 예측방법에 대한 설명을 연구범주에서 제외하였다. 따라서 입력변수들의 예측방법에 대한 추가 연구가 필요하다. 특히 인적오류 사건 변수에 대한 예측은 인간 신뢰도 분석(human reliability analysis)을 바탕으로 가능할 것으로 판단된다.

셋째, 본 연구에서는 CRM 교육훈련의 효과를 CRM 교육훈련에 대한 투자수익률 측면에서 접근하고 있으며, 투자수익률에 영향을 주는 사건/사고를 원자로 불시정지로 인한 금전적 손실만을 분석하고 있다. 그러나 기업의 이익이나 손실은 금전적인 이익이나 손실뿐만 아니라 조직의 분위기(climate), 동기(motivation)나 사기(morale), 안전문화(safety culture)의 성숙, 업무만족도(job satisfaction)의 증가, 조직 갈등(organizational complications)의 감소, 그리고 대국민 홍보효과 등에 의한 비금전적(non-monetary) 측면을 무시할 수 없다. 따라서 CRM 교

육훈련을 통한 비금전적 조직의 이익을 ROI 모형에 추가할 필요가 있다.

결론적으로 국내 원전 운전원에 대한 CRM 교육훈련의 도입은 인적오류로 인한 원자로 불시정지 사건을 얼마나 저감할 것인지 조직의 이익 측면에서 정량적으로 접근할 필요가 있다. 이러한 정량적 접근은 본 연구를 통해 제안한 ROI 모형의 적용으로 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

- Belton, S. (2001), CRM training in the nuclear industry, paper presented at the Third CRM Users Group Workshop, University of Aberdeen, October.
- CAA(2003), Methods used to evaluate the effectiveness of flightcrew CRM training in the UK aviation industry, Safety Regulation Group, CAA Paper 2002/05, Civil Aviation Authority.
- Cannon-Bowers, J. A., Prince, C., Salas, E., Owens, J., Morgan, B., Jr., and Gonos, G. (1989), Determining aircrew coordination training effectiveness, Paper presented at the 11th Interservice/Industry Training Systems Conference, Fort Worth, TX.
- Cooper, G. E., White, M. D., Lauber, J. K. (1980), Resource management on the flightdeck, NASA/Industry Workshop, NASA CP-2120, NASA : USA.
- Edens, P. S. and Bell, S. T. (2003), Effectiveness of training in organizations : A meta-analysis of design and evaluation features, *Journal of Applied Psychology*, **88**(2), 234-245.
- INPO(1993), Control room teamwork development training : Course administration and facilitation guide, National Academy for Nuclear Training, Atlanta, GA.
- 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.
- Kim, S. K., Byun, S. N., Lee, D. H., and Jeong, C. H. (2009), Effectiveness of Crew Resource Management training program for operators in the APR-1400 main control room simulator, *IE Interfaces*, **22**(1) (in press).
- Kirkpatrick, D. L. (1976), Evaluation of training, In R. L. Craig(Ed.), *Training and development handbook : A guide to human resource development*(2nd ed., 331-319), New York : McGraw-Hill.
- Kraiger, K., Ford, J. K., and Salas, E. (1993), Application of cognitive, skill-based, and affective theories of learning outcomes to new methods of training evaluation, *Journal of Applied Psychology*, **78**, 311-328.
- 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), 1-5.
- Leedom, D. K., and Simon, R. (1995), Improvement team coordination : A case for behavioral-based training, *Military Psychology*, **7**, 109-122.
- O'Connor, P., Campbell, J., Newon, J., Melton, J., Salas, E., and Wilson, K. A. (2008), Crew Resource Management training effectiveness : A meta-analysis and some critical needs, *The International Journal of Aviation Psychology*, **18**(4), 353-368.

- Salas, E. and Cannon-Bowers, J. A. (2001), The science of training : A decade of progress, *Annual Review of Psychology*, **52**, 471-499.
- Salas, E., Fowlkes, J. E., Stout, R. J., Milanovich, D., and Prince, C. (1999), Does CRM training improve teamwork skills in the cockpit? : Two evaluation studies, *Human Factors*, **41**(2), 326-343.
- Salas, E., Wilson, K. A., Burke, C. S., and Wightman, D. C. (2006), Does Crew Resource Management training work? : An update, and extension, and some critical needs, *Human Factors*, **48**(2), 392-412.
- Taylor, J. C. (2000), A new model for measuring return on investment(ROI) for safety programs in aviation : An example from air-line maintenance resource management(MRM), In proceedings of the Advances in Aviation Safety Conference, Paper number 2000-01-2090, Daytona Beach, Florida.
- USNRC(1989), Operator licensing examiner standards(NUREG-1021), Washington DC : US Nuclear Regulatory Commission.