

원자력발전소 운전원 수행 특성 평가

김 석 철

한국원자력안전기술원 안전해석실 선임연구원



미 래학자들은 21세기를 저부가 가치에서 고부가 가치로, 생산 경제에서 지식 경제 또는 고도 정보화 사회로 변화될 사회라고 말한다.

산업의 발달 과정 또한 하드웨어 중심 사회에서 소프트웨어 중심 사회를 거쳐, 인간 중심 사회로 변화될 것이라고 한다.

원자력발전소의 안전성에 대한 관심도 시대의 조류에 따라 변천되어 왔다.

불과 몇년 전만 하더라도 안전성 평가의 주요 관심 사항은 주요 안전계통의 안전 여유도 확보 개념의 설계 안전성 분야였으나, 최근에는 계통 상호 작용이나 인적 실수의 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 확률론적 안전성 평가(PSA)가 관심의 대상이 되고 있다.

특히 인적 요인 또는 사고시 운전원의 사고 대처 능력 평가는 TMI나 체르노빌 사고 이후 주요 안전성 현안으로 다루어지고 있다.

국내의 PSA 결과를 보더라도 전체

노심 손상 빈도의 거의 절반이 인적 실수에 의한 것으로 나타나고 있다.

물론 인적 실수의 영향이 크게 나타나는 이유는, 인간 신뢰도 분석의 불확실성을 고려하여 인적 실수 확률을 보수적으로 평가하기 때문이기도 하지만, 운전원이 제어 루프에서 모티로서 작용하는 현재의 원자력발전소에서는 인적 실수가 발전소의 위험도에 막대한 영향을 미치는 것은 피할 수 없는 사실이다.

그러나 불행하게도 이러한 인적 실수나 운전원 수행도를 정량적으로 평가할 수 있는 보편 타당한 평가 방법이 개발되지 못하고 있다.

기구나 계통의 신뢰도는 외국의 일반적인 자료를 이용하고 통계적 처리를 할 수 있으나, 인간 신뢰도 자료의 경우는 인간 수행도 또는 인적 실수 확률은 문화·조직·개인차 등의 다차원적인 영향 인자로 인해 일반적인 통계 처리나 간단하게 수식화된 모델로 설명하기가 어렵다.

TMI와 체르노빌 사고 이후에 조직인자(organizational factor)가 사고

이 글은 지난 95년부터 2년 동안 영광·고리·울진 원전의 운전원 150명을 대상으로 시뮬레이터를 이용한 조직 구성 및 절차서 특성에 따른 운전원 수행 특성에 대한 실험적 평가 결과를 요약한 것이다. 이 평가 작업은 원자력발전소 사고시 운전원의 사고 대처 능력 평가 방법 개발 및 역할 갈등 등을 포함한 조직 인자를 고려할 수 있는 인간 신뢰도 분석 방법을 개발하기 위한 연구의 예비 연구로 수행되었다.

예방 및 사고 완화 과정에서 매우 중요하다라는 사실이 밝혀졌다.

그리고 현재 이러한 조직 인자를 어떻게 PSA나 안전성 평가에 고려할 것인가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 이렇다 할 만한 연구 성과로 나타난 것은 없다.

원자력발전소 사고시 운전원의 사고 대처 능력 평가 방법 개발 및 역할 갈등 등을 포함한 조직 인자를 고려할 수 있는 인간 신뢰도 분석 방법을 개발하기 위한 연구의 예비 연구로, 한국전력공사 고리 원자력 연수원 한동현·김현장 교수팀과 공동으로 시뮬레이터를 이용한 조직 구성 및 절차서 특성에 따른 운전원 수행 특성에 대한 실험적 평가를 수행하였다.

연구 방법

운전원 수행 특성에 대한 실험적 평가는 크게 두 가지 범주로 수행되었다.

먼저 국내 운전원의 조직 특성 및 스트레스 요인을 파악하기 위하여 고리 원자력연수원에서 웨스팅하우스형 950MW급 발전소 재교육 과정에 있는 150명의 운전원(주제어실 요원 102명, 현장 운전원 48명)의 학력, 연령, 발전부 근무 경력, 보직, 보직 경력 및 스트레스 요인 등에 대한 설문 조사를 실시하였다.

설문 조사 결과로서 평가 대상 운

전원의 학력, 연령 및 발전부 근무 경력은 <그림 1>부터 <그림 3>과 같이 나타났다.

1. 운전원 조직 특성 평가

각 운전조의 학력, 연령, 발전부 근무 경력, 보직, 보직 경과 연수 등에 대한 설문 조사를 통해 운전원 조직의 특성을 평가하여 범주화하였다.

분석 결과 운전원 조직 특성은 발전과장·안전과장의 연령, 지식 수준, 경험 정도에 따라 다음 세 가지 범주로 분류하였다.

가. Category A

발전과장 및 안전과장이 주제어실 운전원(대리, 원자로 운전원, 터빈 운전원, 전기 계통 운전원 및 데이터 베이스 운전원)에 비해 경험 정도 및 지식 정도가 우월적 지위에 있는 조직

나. Category B

발전과장 또는 안전과장이 주제어실 운전원에 비해 경험 정도 및 지식 정도가 대등하거나 약간 우위에 있는 경우. 이러한 경우는 대체적으로 발전과장이나 안전과장이 주제어실 근무 경험이 운전원보다 적은 경우에 해당된다.

다. Category C

조직 구성원 중 1~2명이 현장 운전원에서 주제어실 운전원으로 보직을 부여받은 지 얼마 경과하지 않았거나 순환 보직제에 따라 다른 사이트에서 전입된 경우

2. 스트레스 요인 조사

스트레스는 가장 중요한 인적 실수 유발 요인으로 현재 인간 신뢰도 분석에서도 가장 영향도가 큰 수행 특성 인자이다.

인간 신뢰도 분석시 스트레스 레벨에 따라 기본 오류 확률값에 10배까지 곱해기도 한다.

따라서 조직 인자 평가시 스트레스 원인의 파악은 매우 중요한 과정이다.

스트레스 요인은 일정한 형식을 주지 않고 설문서에 한 가지만 쓰도록 한 후, 결과 분석 과정에서 8가지 범주로 구분하였다.

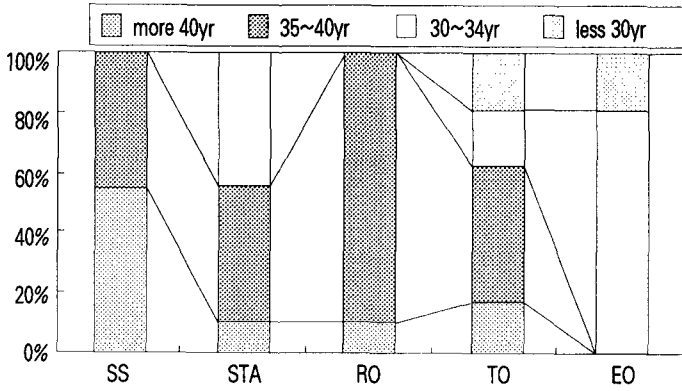
3. 운전원 사고 대처 능력 평가

사고 대처 능력의 평가는 한국전력공사 고리 원자력연수원의 실물 크기의 시뮬레이터(simulator)에서 현재 주제어실에 근무하는 운전원들을 대상으로, 각 운전조들에 대한 증기 발생기 관파열 사고의 시나리오를 가지고 사고 대처 능력을 평가하였다.

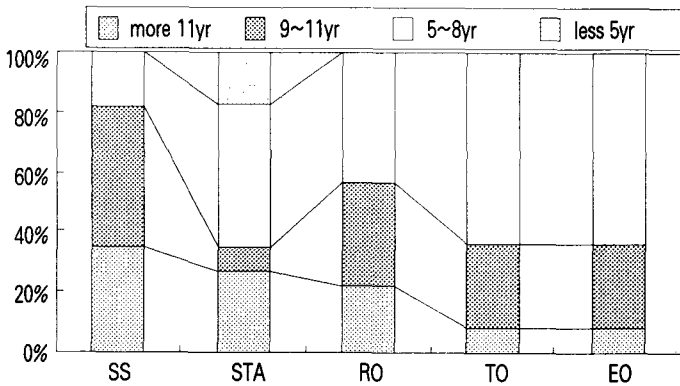
가. 사고 시나리오

운전원 사고 대처 능력 평가를 위한 사고 시나리오로 상황 평가 측면에서 운전원의 인지 부담이 큰 원자로 계통 고온관 루프와 잔열 제거 계통 사이 격리 밸브의 내부 누설인 Interface System LOCA와 증기 발생기 관파열 사고를 선정하였다.

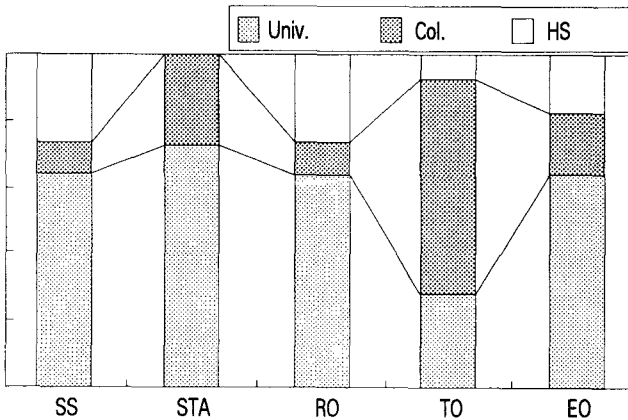
그러나 사고 시나리오를 운전원들이 소형 냉각재 상실 사고로 오인하



〈그림 1〉 보직별 연령 분포



〈그림 2〉 보직별 발전부 근무 경력 분포



〈그림 3〉 보직별 학력 분포

게 한 Interface System LOCA의 경우 미국의 연구 사례에서 모든 운전조가 진단 실패하였으나, 조사 대상 운전원들은 조치 후 발전 변수 및 경보 추이를 지속적으로 관찰하여 적절한 완화 조치를 수행하여 실험 목적을 달성할 수가 없어 증기 발생기 관파열 사고만 평가 대상 사고로 선정하였다.

사고의 규모는 한 개의 증기 발생기 튜브가 완전히 양단 파단되는 사고를 선정하였다.

증기 발생기 관파열 사고는 격납 건물 우회 사고로 사고 완화 과정에서 완화 실패시 환경에 직접적인 영향을 줄 수 있는 사고로서, 느린 사고 진행과 소형 냉각재 상실 사고와 유사한 발전소 거동을 보이기 때문에, 운전원이 소형 냉각재 상실 사고로 오인할 가능성이 있으며, 사고 완화 과정에서 다수의 운전원 조치와 절차서 전이가 요구되며, 의사 결정 부담이 비교적 높기 때문에 평가 대상 사고로 선정하였다.

나. 팀 수행도 평가 척도

팀 수행도 평가 척도로 증기 발생기 관파열 사고의 사고 완화에 요구되는 다음 5개의 주요 운전원 조치 종료 시점과 4개의 발전소 운전 변수의 표준 사고 추이(standard accident trend)로부터의 변위나 변동의 정도 및 사고 완화 과정에서 발전과정의 리더십, 운전원 상호간의 협동 또한 조직 내외부 의사 소통의

질(crew quality of communication)을 선정하였다.

증기 발생기 관파열 사고 완화시 필수적으로 요구되는 주요 운전원 조치는 다음과 같다.

- 증기 발생기 관파열 사고 확인
- 손상된 증기 발생기 확인 및 격리
- 1차측의 누설 종료를 위한 냉각/감압
- 안전 주입 수동 종료

표준 사고 추이는 시뮬레이터 훈련 담당 교수가 직접 수행한 결과와 안전성 분석 보고서나 각종 사고 해석 결과를 토대로 생산하였다.

팀 수행도 평가에 사용된 주요 운전 변수는 다음과 같다.

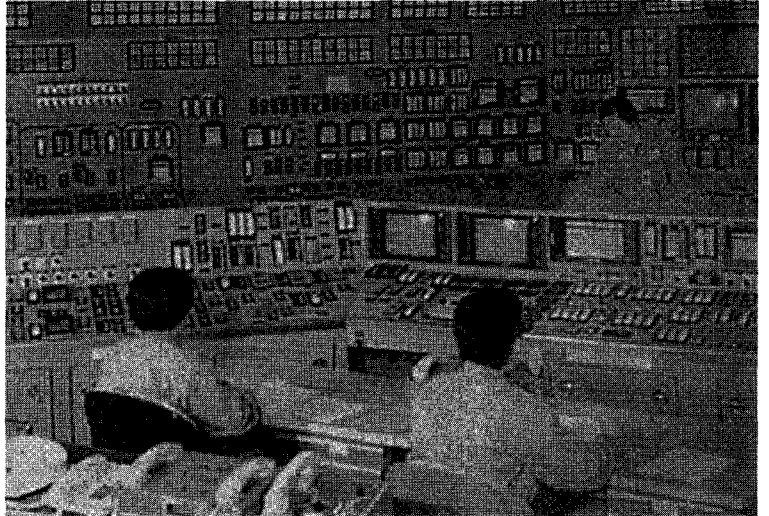
- 손상 및 건전축 증기 발생기 압력
- 손상 및 건전축 증기 발생기 수위
- 가압기 압력
- 가압기 수위

발전과장의 리더십, 운전원 상호간의 협동 또한 조직 내외부와의 의사소통의 질은 시뮬레이터 훈련 담당 교수가 5개 수준(매우 높다, 높다, 보통이다, 낮다, 매우 낮다)으로 평가하였다.

연구 결과

1. 조직 특성 평가

설문서 분석 결과로서 조사 대상 운전원 조직 특성은 <그림 1>부터 <그림 3>까지와 같다.



최근에는 계통 상호 작용이나 인적 실수의 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 PSA가 원전의 안전성 평가의 주요 관심 대상이 되고 있다. 원전의 중앙제어실 모습

전체 대상 운전원의 평균 연령은 34.5세이며, 보직별로는 발전과장의 경우 평균 39세, 안전과장은 평균 35.5세, 운전원은 평균 32세로 나타났다.

학력은 85% 이상이 전문대 이상의 학력을 보유하고 있으며, 발전부 근무 연수는 평균 8.5년이고, 발전과장을 제외한 운전원의 보직 경력은 대부분이 3년 미만으로 나타났다.

각 운전조별 조직 구성은 전체 운전조의 45%가 Category A, 35%가 Category B, 나머지가 Category C로 나타났다.

운전원들은 교대 근무(시차, 가족 관계, 자녀 교육 등)로 가장 스트레스를 많이 받는 것으로 나타났으며, 긴장된 근무 분위기, 과중한 업무 부담,

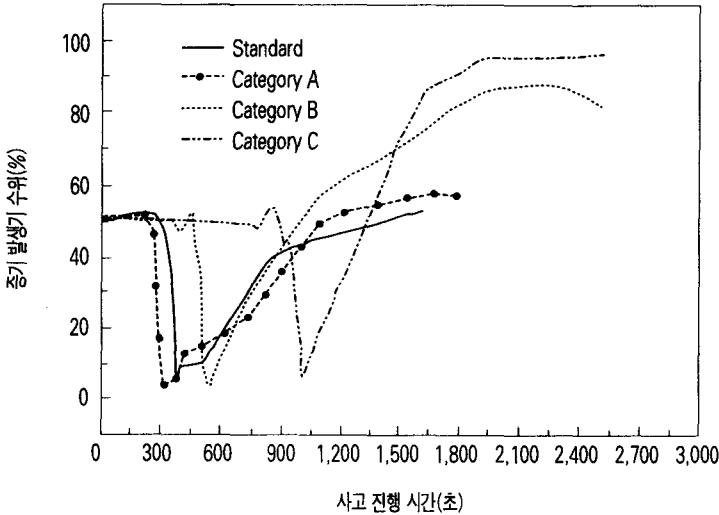
성(性) 문제도 스트레스의 주요인으로 조사되었다.

기타 오지 근무, 원자력에 대한 사회적 반감도 운전원들에게 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

조사 결과 국내 운전원의 스트레스 원인들을 정리하면 <표>와 같다.

<표> 국내 운전원의 스트레스 원인

구분	%
인원 감축에 따른 업무 과중	20
교대 근무(시차, 가족 관계, 자녀 교육)	38
긴장된 근무 분위기	10
회사 경영 방식	9
의사 소통	8
복리 후생	6
형식적 교육	7
기타	6
계	100



(그림 4) 운전원 수행 특성 평가 방법 개발

2. 운전원 대처 능력 평가

조사 대상의 모든 운전조는 방사능의 환경 누출 방지 측면에서의 사고 대처에는 성공하였지만, 조직 구성에 따라 경제성·효율성 측면을 고려한 사고 대처 능력에는 조직 인자 특성에 따라 현격한 대처 능력의 차이를 보였다.

Category A에 속하는 운전조들의 경우는 대체로 top-down 방식의 신속한 의사 결정과 신속한 조치를 통해 우수한 팀 수행도를 보였으나, 발전과장의 성격과 EOP를 읽는 속도에 따라 약간의 수행도 차이를 보였다.

예를 들어 완벽주의 성향을 가진 발전과장의 경우는 절차서의 모든 단계를 순차적으로 확인하기 때문에, 주요 운전원 종료 시점이나 의사 결정이 지연되는 경향이 있었다.

그러나 Category A의 정보 전달 특성은 top-down 방식으로 운전원들의 상황 판단에 대한 information 피드백(feedback)이 상대적으로 약한 것으로 나타났다.

Category B와 같이 발전과장이 리더십 측면에 우월적 지위에 있지 못할 경우, 발전과장과 운전원들의 수평적인 정보 교환과 기술적 사항에 대하여 토의를 통한 의사 결정이 이루어지나, 대부분 운전원의 상황 판단이 의사 결정에 크게 영향을 미치거나 의견 대립으로 의사 결정이 지연되는 경우가 많았다.

특히 국내 운전원들의 직무 태도 특성인 조치 후 자기 조치에 대한 독자적 평가 및 주요 운전 변수의 추적 등은 외국 운전원들의 수행 특성에 비해 바람직한 직무 태도이나, 의사

결정 단계에서 운전원들의 상황 판단에 대한 information 피드백 영향이 아주 크게 나타나 의사 결정 지연이나 운전원간의 정보 전달 체계가 양호하지 못한 특성을 보였다.

Category B의 팀 수행도는 Category A에 비하여 상대적으로 낮은 팀 수행도와 사고 대처 능력을 보였다.

이것은 down-top information 피드백 영향으로 인한 의사 결정 지연과 조치 지연 때문으로 판단된다.

Category C의 경우는 운전원 중 현장에서 주재어실로 전입된 지 얼마 안되는 운전원이나 순환 보직제로 인하여 타 발전소에서 전입된 운전원이 있는 경우이다.

이 경우 top-down 방식의 정보 전달이나 의사 결정이 신속하게 이루어졌으나 팀 수행도는 가장 낮게 나타났다.

팀 수행도가 가장 낮은 이유는 신입 또는 전입 운전원이 발전과장의 구두 지시를 정확히 파악하지 못하는 경우가 있었다.

예를 들어 Category A나 B와 같은 장기간 같이 근무를 한 경우는 발전과장의 은어·약어(jargon)와 같은 구체적이지 못한 지시라도 발전과장의 의도를 비교적 정확히 이해하고 조치를 취하지만, 조직의 분위기 및 이들에 익숙하지 못한 신입 또는 전입 직원은 발전과장의 지시를 명확히 이해하지 못해 조치가 지연되는 현상

을 보였다.

〈그림 4〉의 경우는 각 category별로 사고 완화 과정에 대한 대표적인 팀 수행도 평가 척도 중 하나인 증기 발생기 수위 조절 능력을 보여준다.

〈그림 4〉에서 보듯이 Category A의 경우 표준 사고 추이와 거의 비슷한 우수한 대처 능력을 보였으나, Category B의 경우는 의사 결정 지연 및 조치 지연으로 인해 Category A보다 낮은 대처 능력을 보였다.

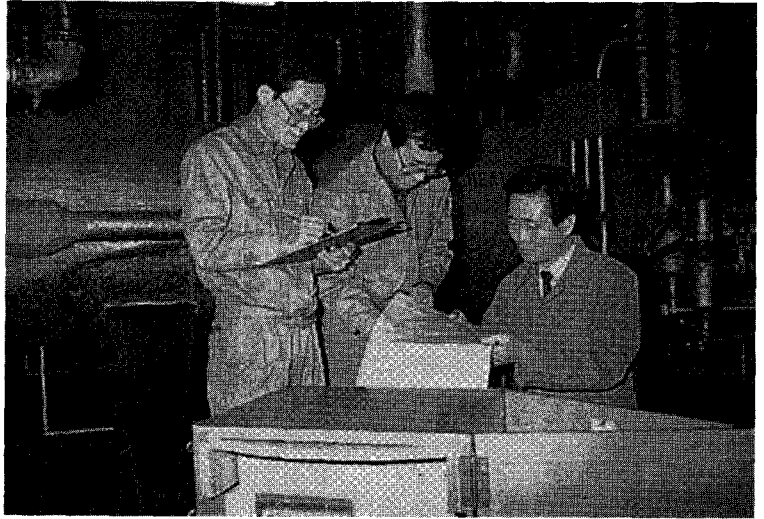
또한 Category C의 경우는 운전원간 또는 발전과장과의 의사 소통의 문제로 인하여 조치 지연 및 조절 실패에 따른 매우 낮은 대처 능력을 보이는 것을 알 수 있다.

본 실험 평가에서 나타난 공통적인 문제는, 사고 대처 과정중에서 안전과장의 역할은 매우 중요하나, 대부분의 운전조에서 단순히 발전과장을 보조하고 필수 임계 기능의 감시 역할만 수행하고 직접적인 운전원의 통솔에 한계가 있다는 것으로 판단되었다.

따라서 발전과장과 안전과장의 권한과 책임 한계가 명확히 설정되어야 하고, 안전과장의 보직 부여시 주체어실 근무 경력이나 사고 관리 능력을 고려해야 할 것으로 판단된다.

또한 현재 비상 운전 절차서에서는 '증기 발생기 관파열 사고시 후속 냉각 방법 선택'과 같이 우선 순위를 고려하지 않고 발전과장의 판단에 따라 조치 방법을 선택하는 경우가 있다.

이것은 사고시 의사 결정 부담을



이번 실험 평가에서 조사 대상의 모든 운전조는 사고 대처 능력에 있어서 조직 인자 특성에 따라 현격한 대처 능력의 차이를 보였다. 발전소 성능 진단 자료를 분석하고 있는 모습

가중시켜 의사 결정 지연 및 조치의 지연을 유발시킬 수 있다.

따라서 현재 각 발전소별로 수행되고 있는 비상 운전 절차서 개선 과정에서 운전원들의 의사 결정 부담을 경감시킬 수 있는 지원 도구 또는 조치 우선 순위 등이 고려되는 것이 바람직하다고 판단된다.

결론 및 토의

본 실험적 평가는 모의된 사고 상황에서 수행된 것이고 국내 운전원 전체를 대상으로 수행한 것이 아니기 때문에, 실제 운전원들의 사고 대처 능력을 일반적으로 평가하는 데 한계가 있음은 분명한 사실이다.

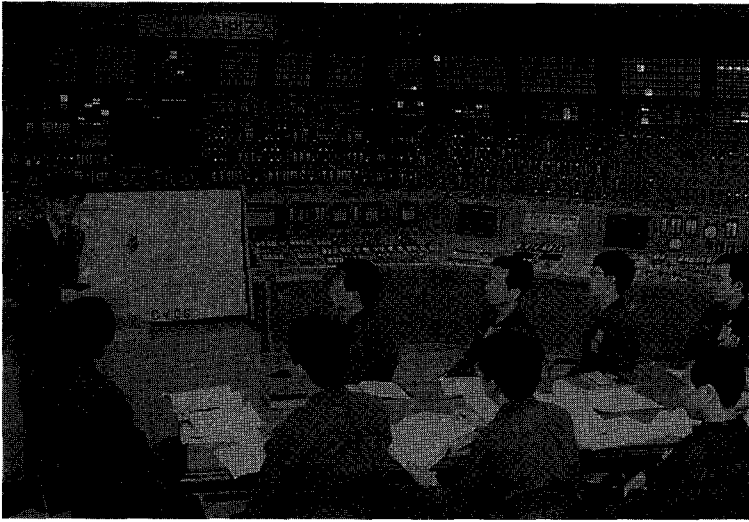
그러나 본 실험 평가가 갖는 의미는 동적인 사고 완화 과정에서 직무 배정, 의사 결정 또는 비상 운전 절차서의 수행 효율성 등을 고려한 팀 수

행도를 정량적으로 평가할 수 있고, 이를 토대로 사고시 운전원의 대처 능력 향상 방안을 제시하는 데 사용될 수 있다는 것이다.

다음은 본 실험 평가 결과 및 운전원 대처 능력 향상을 위한 개선 필요 사항에 대한 요약이다.

첫째, 본 연구의 실패 사례에서 보는 바와 같이 조치 후 독자적인 평가 및 사고 전개 과정의 추적 등 국내 운전원의 개인적 직무 태도 및 기술 능력은 외국의 운전원 수행 특성에 비하여 매우 바람직하고 사고 대처 능력 또한 우수하게 나타났으나, 조직의 구성에 따라 팀 수행도는 현격한 차이를 보였다.

따라서 신규 원전의 주체어실 요원의 구성이나 기존 원전의 주체어실 요원의 인사는 나이·지식 또는 경험 수준의 상대적 차이에 따른 역할 갈등을 최소화할 수 있도록 해야 한다.



이번 실험 평가를 통해 팀 수행도를 고려한 최적의 운전 조직 모델 개발 및 사고 대처 능력의 계량적 평가가 가능하게 되었다. 모의 조종 훈련 모습

둘째, 발전과장의 리더십, 비상 운전 절차서에 따른 직무 배정, 비상 운전 절차서 낭독 속도, 의사 결정 스타일, 정보 전달 체계 특성 및 역할 갈등이 사고시 팀 수행도에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

울진 1·2호기 비상 운전 절차서(EOP Emergency Operating Procedure)를 제외한 나머지 EOP들은 구체적인 직무 배정이 명시되지 않고 발전과장이 상황에 따라 직무를 배정하고 있기 때문에, 발전과장이 신입하는 운전원들의 직무 부담이 상대적으로 커질 수 있다.

따라서 운전원의 직무 부하, 조치 시간 등을 고려하여 절차서의 단계 조정 및 명확한 직무 배정 등의 절차서 보완이 필요할 것으로 판단된다.

또한 발전과장의 EOP 낭독에 대한 표준 시간 및 낭독 방법(발전과장에 따라 계통명만 불러주거나, 조치 사항만 불러주고 확인 사항을 추후에

확인하는 경우도 있다)에 대한 교육이 필요할 것으로 생각된다.

셋째, 안전과장은 필수 안전 기능의 감시 및 사고 완화 과정에서의 기술 지원자의 역할을 담당함으로써, 사고 완화 과정에서 제2의 확인자(second checker)로서 매우 중요한 위치임에도 불구하고 단순히 발전과장의 보조자 역할을 하며 운전원의 직접 통솔 및 정보 전달 체계에도 한계가 있음을 확인하였다.

따라서 발전과장과 안전과장의 권한과 책임 한계를 명확히 설정해야 하고 안전과장의 보직 부여시 주제어실 근무 경력이나 사고 관리 능력을 고려하여야 할 것으로 판단되며, restructuring의 일환으로 시행되고 있는 발전부장의 안전과장 대행은 사고시 역할 갈등 및 의사 결정 체계에 혼란을 야기시킬 우려가 있기 때문에 안전과장의 책임 및 권한의 재설정 및 안전과장의 축소는 재고할 필요가

있다.

실제 안전과장 유무에 대한 PSA 민감도 분석 결과 안전과장의 존재 유무가 노심 손상 빈도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

활용 전망

사람에 의한 사고 영향을 줄이려는 인간 신뢰도(human reliability) 연구 초점이 기존에는 운전원 개인과 발전 기기 및 계통의 건전성에 있었으나, 이번 실험을 통해 역할 갈등과 같은 운전원간 상호 관계의 중요성이 밝혀짐으로써 앞으로 팀 수행도(team performance)를 고려한 최적의 운전 조직 모델 개발 및 사고 대처 능력의 계량적 평가가 가능하게 되었으며, 연구 결과는 운전원의 사고 대처 능력 평가 및 사고 관리 전략 평가 중 운전원 수행도 평가 방법으로 사용될 수 있다.

또한 본 팀 수행도에 대한 실험 평가 방법은 원자력발전소뿐만 아니라 사고의 사회적 영향이 큰 화학 공장, 대형 항공기, 선박, 잠수함의 운전 요원들의 사고 대처 능력 평가에도 적용될 수 있을 것이다.

그러나 본 실험 평가는 일부 노형 및 사고 시나리오에 국한되어 수행되었기 때문에 명실 상부한 수행도 향상 방안을 구축하기 위해서는 다양한 사고 시나리오 및 다양한 노형에 대한 실험 평가가 계속되어야 할 것이다. ☞