Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol.21, No.3, pp.13-24, October 2002

원자력발전소 비상직무에 대한 인적수행도 분석

Human Performance Analysis of Emergency Tasks in Nuclear Power Plant

정원대*, 박진균*, 김재환*

ABSTRACT

Reduction and prevention of human error is one of the major interests for the enhancement of system safety and availability in Nuclear Power Plants (NPPs). As human beings have become the weak point in the system safety, a systematic evaluation on human performance during emergency situation should be performed in advance to identify the potential vulnerability of human tasks. Though the data gathering and analysis from real field is an important precondition, there were no available data in nuclear field of Korea. This paper presents the result of human performance analysis on emergency tasks in NPPs. Firstly, a task analysis was performed to identify the characteristics of operator tasks during emergency condition and to classify them into a set of generic emergency tasks. Secondly, simulation data were collected and analyzed for the emergency tasks using the full scope simulator of Younggwang NPPs. The analyzed human performance information covers the event diagnosis time, the execution time of each procedural step, observation parameters, types of irrelevant response, pattern of communication among staffs, and so on. These performance data would be used for human reliability analysis and the research of human error as technical bases.

Keyword: human performance, human reliability analysis, simulation data

* 한국원자력연구소 종합안전평가팀
주 소 : 305-600 대전 유성우체국 사서함 105, 한국원자력연구소
전 화 : 042-868-8296
E-mail:wdjung@kaeri.re.kr

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

1. 서 론

대형 사고나 산업재해를 통해서 원자력발전소(원전), 석유화학, 항공우주, 철도 및 선박 등 산업 전반에 걸쳐 시스템 안전의 중요성이 널리 인식되었다. 이런 대형 사고 및 재해의 발생과 전개에 있어서 가장 중요한 원인 요인 중 하나가 운전원이나 작업자의 부적절한 상황 인식이나 대응 조치로 밝혀졌다(CCPS, 1994). 따라서 사고를 예방하고 시스템 안전성을 높이기 위해서는 인간 작업자가 유발하는 오류를 방지하거나 감소시켜야 하며, 이를 위해서는 우선 시스템 사용자인 인간의 관점에서 다양한 직무에 대한 인적수행도 평가가 선행되어야 한다.

인적수행도를 평가하는 방법으로서 인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis : HRA)이 원자력의 안전성 평가 분야에서 널리 사용되어 왔다(Kirwan, 1994). HRA는 주어진 작업 또는 사고 상황에서 요구되는 직무를 작업자가 제대로 수행하지 못할 확률을 추정하는 것이다. 그러나 관련 데이터가 절대적으로 부족하기 때문에 HRA 수행에는 분석자의 주관적 판단이 주요 입력 자료로 많이 사용되고 있다. 보다 객관적인 HRA 분석 결과를 얻기 위해서 또한 인적오류의 원인 분석 및 방지 대책을 연구하기 위해서는 필수적으로 실제 사례에 근거한 데이터가 있어야 하나 인적오류의 특성상 자료의 취득이 어렵고 결과적으로 관련 자료가 매우 부족한 현실이다. 특히 국내 운전원의 특성이 반영된 인적수행도 자료는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 이런 근본적인 문제점을 해결하기 위해 영광 훈련센터의 시뮬레이터를 활용하여 국내 원전의 인적수행도 자료를 수집하고 분석하였다. 원전의 특성 상 다양한 운전 조건이나 사고 상황에서 실제 실험을 수행하기 어려운데, 주제어실과 동일한 환경의 훈련용 시뮬레이터를 활용(Prokopovich, 1997; Beare et al. 1984)하여 실제로는 경험하기 어려운 비상 상황에서 작업 수행에 걸린 시간 등 직무수행도 정보를 수집하고 분석하였다. 또한 비상직무 수행 중 발생할 수 있는 다양한 오류 정보를 함께 수집하였다.

자료 수집은 영광 훈련센터의 시뮬레이터에서 수행된 모의실험 상황을 녹화하여 분석하였으며 이제까지 총 110여 회에 달하는 모의실험 자료를 수집하고 분석하였다. 수집된 자료의 분석을 통해 얻어진 주요 정보로는 사고 진단시간, 직무의 종류 및 수행 형태, 절차별 수행시간, 부적절한 조치 형태 및 빈도, 운전원 의사소통 형태, 운전원의 상황대처 및 평가 능력 등이 있다. 이렇게 수집된 인적수행도 및 오류 자료들은 향후 원전 HRA의 입력 자료로 사용되며, 오류의 방지와 감소 및 운전원 수행도 향상을 위한 연구 자료로 활용될 것이다.

2. 분석 방법

원전에서 수행되는 인적직무는 크게 일상적으로 수행되는 시험 및 보수 관련 직무와 비상 시 사고 대처에 관련된 비상직무로 구분할 수 있다. 안전성 평가 결과에 의하면 비상직

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

무가 원전의 안전 관점에서는 상대적으로 중요하며, 수행도 관점에서도 비상직무가 일상직무에 비하여 상대적으로 높은 스트레스와 부하로 인하여 오류 가능성이 높은 취약한 직무로 알려졌다. 따라서 본 연구에서는 비상직무의 인적수행도 분석에 초점을 맞추었다.

원전의 비상직무에 대한 인적수행도를 분석하기 위하여 절차화된 대상 직무를 상세히 분석하였으며, 시뮬레이터 모의실습을 통해 수행도 자료를 수집하고 분석하였다. 분석 절차는 크게 세 부분으로, 다음과 같다.

- 직무분석 : 대상 비상직무에 대한 상세 직무분석
- 자료수집 : 시뮬레이터 실습 자료수집
- 자료분석 : 수집된 자료의 분석 및 결과 해석

2.1 직무분석

비상직무란, 운전 중인 시스템의 고장이나 문제 발생으로 예기치 못한 원자로 정지가 발생한 경우, 원자로를 정지시키고 안전한 상태로 유지하기 위하여 필요한 일련의 조치를 말한다. 불시정지나 사고와 같이 급박한 상황에서의 잘못된 상황 판단이나 불필요한 조치를 방지하고 적절한 대응을 신속히 수행하기 위하여, 발전소에서는 여러 상황에서 필요한 일련의 비상직무를 절차서로 개발하여 사용하고 있다. 원자로가 불시에 정지한 경우에 운전원은 반드시 비상운전절차서에 기술된 절차에 따라 필요한 대응 조치를 수행하게 되어 있다.

비상운전절차서에는 원자로를 건전하고 안전한 상태로 유지하기 위해 정의된 안전기능(safety function)을 만족시키기 위하여 필요한 일련의 대응 절차를 기술하고 있다. 그러나 비상운전절차서는 평소에는 거의 사용하지 않은 절차서이고 다양한 지식 수준의 직무가 일련의 수행 절차 단위로 기술되어 있기 때문에, 이를 사용하는 작업자 관점에서는 해당 절차의 직무 목표를 인지하기 어려운 경우가 있으며 이로 인해 결정적인 진단실패나 인지오류를 유발할 수 있다. 따라서 오류분석 관점에서 절차서 직무를 안전기능 수준에서부터 구체적인 기기 조작 수준까지 그 기술 수준을 분석하고 절차화된 직무의 목표와 수단 관계를 분석할 필요가 있다.

여러 직무분석 방법(Kirwan, 1992) 중에서 일련의 세부 절차로 이루어진 절차화된 직무가 작업자에게 어떤 작업 목표로 인지되고 해석되는 지를 파악하기 위하여 목표-수단 직무분석(goal means task analysis) 방법(Hollnagel, 1993; Jung, 2001)을 사용하였다. 비상직무의 수행 절차별로 관련된 직무 목표를 분석하고, 세부 수행 절차간의 논리적 관계를 분석하였으며, 수행 절차 단위별로 운전원이 직무수행을 위해 관찰해야 하는 정보와 발전소 운전 변수를 분석하였다.

또한 Rasmussen(1986)의 정보 추상화 계층(abstraction hierarchy) 이론을 근거로 절차서에 기술된 직무의 추상화 수준(abstraction level)을 분석하였다. 절차서에 기술된 세부 단위 행위 절차는 그 정보의 추상화 수준이 매우 다양하다. 한 수행 절차가, 별도의 다른 절차서를 수행해야 하는 상

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

위 수준의 개념적인 작업 지시에서부터 구체적인 단위 기기의 조작을 지시하는 수준까지, 여러 단계의 기술 수준을 가지고 있다. 직무절차의 기술 수준을 분석하기 위하여 Rassmussen(1986)의 지식 표현 방법을 기반으로 절차서 분석에 필요한 추상화 수준을 다음과 같이 정의하였다.

- Abstraction level : 질량(mass)이나 에너지(energy)의 상태(state)를 묘사하는 직무 기술 수준
- Process function level : 질량이나 에너지의 흐름(flow)을 묘사하는 절차 중 목표를 달성하는 다양한 방법이 있는 직무 기술 수준
- System function level : 특정 시스템의 기능(function)이나 상태(state)를 묘사하는 직무 기술 수준
- Component state/control level : 특정 기기의 상태나 조작을 묘사하는 직무 기술 수준

이와 같은 추상화 수준의 정의를 바탕으로 한국 표준 원전의 비상운전절차서(한국수력원자력, 1997)에 대한 목표-수단 분석을 수행한 결과 다양한 직무유형을 정의할 수 있었다. 비상운전 직무는 모두 8개의 abstraction level의 직무 목표, 26개의 process function level의 직무 목표, 72개의 system/component function level의 직무 단위로 구분되었다. 이를 통하여 절차서에 기술된 비상직무가 추상화 수준이 높은 상위목표 관점에서는 8개의 '안전기능 확보'로 구성되어 있으며, 계통단위의 26개 상위수준 직무목표와 72개의 세부 직무목표로 구성되었음을 알 수 있었다. 또한 세부 직무절차(task step)로서 동일한 문장 형태로 기술된 절차는 모두 86개임을 파악하였다. 따라서 모두 7개의 하부 절차서로 구성된 비상운전 절차서가 500페이지 이상의 분량이 되지만, 그 안에 기술된 모든 수행 절차는 이들 직무유형으로 표현이 가능하다. 즉 이들 86개 직무유형이 표준 원전 비상직무의 일반직무(generic task)라고 말할 수 있다.

표 1은 계통 수준에서 정의된 직무목표를 정리한 것으로서, 이에 따르면 국내 표준 원전의 모든 비상직무는 이들 26개의 상위수준의 직무목표와 72개의 세부 직무목표로 구성되었다. 표 2는 동일한 절차로 기술된 비상직무의 일반직무 86개 중 일부를 예로 보여주고 있다. 표 2에서 보는 바와 같이 동일한 형태의 비상직무 절차가 LOCA, SGTR, ESDE 절차서 등에서 반복적으로 사용됨을 알 수 있다.

표 1. 계통 단위의 직무 목표와 세부 목표

계통이름	직무 목표	세부 목표
가압기	가압기 압력 제어	가압기 압력 유지
	가압기 수위 제어	가압기 수위 유지
증기 발생기	손상된 증기 발생기 격리 (in case of SGTR)	손상된 증기발생기 물리적 격리
		RCS 감압을 통한 손상된 증기발생기 현상학적 격리
		증기발생기 수위 유지
	급수 공급 및 제어	주/보조 급수 유량 확보
		주/보조 급수 유량 제어
		증기발생기 급수원 확보

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

계통이름	직무 목표	세부 목표
증기 발생기	증기발생기 냉각 및 감압	증기발생기 냉각 및 감압 (in case of SGTR)
		RCS 냉각을 위한 이차측 열제거
RCS 냉각재	CVCS 유량 제어	충전 및 유출 운전
		CVCS를 통한 유출 유량 확보
		충전 펌프를 통한 냉각재 주입
		충전 펌프를 위한 냉각수원 확보
	SI 유량 확보 및 제어	HPSI 유량 확보
		HPSI 유량 조절
		SI 및 CVCS를 통한 냉각재 주입
		SI 유량 조절
		SI 펌프를 이용한 냉각재 주입
		SIAS 작동 후 SI 주입 유량 확인
		RCS 냉각재 주입 유량 확인
	SI 급수원 확보	SI를 위한 냉각재 급수원 확보
	SIAS 수동 작동	수동으로 SIAS 작동
RCS 냉각 및 감압 운전	RCS 냉각 및 감압	RCS 냉각 및 감압
		RCS 냉각의 적합성 확인
	RCS 냉각 운전	SBCS를 통한 RCS 냉각 및 온도 조절
		RCS 과냉각도 유지
		RCS 냉각을 위한 열제거원 확보
		강제순환을 통한 RCS 냉각
		자연순환을 통한 RCS 냉각
	RCS 감압 운전	RCS 감압
		RCS 압력 조절
RCS 완전충수 방지	RCS 완전충수 상태 방지	RCS 완전충수 상태나 반응도 사고 방지
		RCS 완전충수 상태 확인
RCS 비등 방지	RCS에서 기포 제거	RCS 내의 기포 제거
		RCS 내의 기포 존재 확인
격납건물	격납건물 격리 및 배기	격납건물 배기
		격납건물 배기
		격납건물 차단 및 배기 상태 확인
	격납건물내 연소가스제거	격납건물내 연소가스 제거
		격납건물내 수소농도 감시

계통이름	직무 목표	세부 목표
격납건물	격납건물내 연소가스제거	격납건물내 수소가스 배출
	격납건물 살수 제어	격납건물 살수 작동
		격납건물 살수 종료
	저압경계부 LOCA 확인	저압경계부 LOCA 확인
방사능 제어	격납건물 외부로 방사능 방출 방지	격납건물 방사능 준위 확인
		격납건물 외부로 방사능 방출 방지
반응도 제어	붕소석출 방지	RCS내 붕소석출 방지
	정지여유도 유지	RCS 정지여유도 유지
		원자로 수동 정지
		원자로 제어봉 주입
		RCS 온도와 출력 제어 (MTC효과 고려)
		붕소희석 반응도 사고 방지 (in case of SGTR)
전력계통	N/A	배터리와 배터리 충전기를 사용한 필수전원 확보
		AAC를 사용한 비상전력 공급
		안전등급 교류모선의 전원상실 확인
		기동 컨덴서를 사용한 교류모선 전력공급
		비상발전기를 사용한 교류모선 전력공급
공학적안전계통작동신호	N/A	ESFAS 원위치
		자동작동신호 설정치 우회
기기보호	N/A	LPSI 정지 후 RAS 작동신호 확인
		LPSI 펌프 보호
		HPSI 펌프 보호
		LTOP 보호밸브 정렬
		RCP 보호 (in case of SGTR)
냉각재 누설 최소화	N/A	RCP를 통한 냉각재 누설 방지
		RCS 냉각재 누설 방지 (in case of SGTR)
		RCS 냉각재 누설 최소화
기타 보조계통	N/A	응축기로 통하는 증기공급 차단
		압축공기 공급
		필수 보조계통 기동
		격납건물 배수조 수위 감시

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

표 2. 비상운전절차서의 일반직무(generic task) 유형 예

No	직무목표	절차번호*	예상 반응 및 조치*	관찰 운전정보	불만족시 조치*
59	SIAS/CIAS 동작확인	LOCA 4 SGTR 4 ESDE 4	만약 가압기 압력이 123.9 kg/㎠A 이하 이면, SIAS와 CIAS 동작을 확인한다.(첨부 8, 9).	가압기압력, SIAS/CIAS 작동경보	만약 가압기 압력이 123.9 kg/㎠A 이하에서 SIAS 및 CIAS가 동작되지 않았으면, SIAS 및 CIAS를 수동작동시킨다. ◎ SIAS : EF-HS-102A/102B/102C/102D. ◎ CIAS : EF-HS-104A/104B/104C/ 104D
60	SI 유량 〉 = 최소유량 확인	LOCA 5 SGTR 5 ESDE 5	만약 SIAS가 발생되었으면, 다음을 모두 수행한다: ◎ SI 유량 확인: 최수유량 이상(첨부2,3) ◎ 운전가능한 모든 HPSI와 LPSI 펌프 운전중 확인. ◎ 운전가능한 모든 충전펌프 기동.	SIAS 경보, HPSI/LPSI 유량, SI 펌프 상태, Chg 펌프 상태	◎ 만약 SI 유량이 최소유량 미만이면, SI 유량복구를 위해 다음중 필요한 조치를 수행: - SI 펌프와 밸브에 대한 전원공급. - SI 유로의 밸브배열. - SI 펌프의 보조기기 운전. - SI 유량이 최소유량 이상으로 증가될 때까지, SI 펌프 추가 기동.

* 비상운전절차서에 표현된 부분

이제까지 설명한 바와 같이 원전 비상직무의 인적수행도 평가와 오류분석을 위하여, 대상 비상직무에 대한 직무분석을 수행하였다. 이를 통하여 작업자가 수행해야 하는 직무목표와 수행절차를 파악하였고, 수행 절차간의 논리적 연관 관계, 절차별 담당 작업자, 작업을 위해 관찰하는 정보, 기술된 절차의 정보 추상화 수준 등을 분석하였다.

2.2 자료 수집

비상직무에 대한 시뮬레이터 모의 자료를 수집하고 관찰하였다. 자료 수집에 사용된 시뮬레이터는 영광 훈련센터에 설치된 것으로서, 영광 3,4호기 원전의 주제어실과 완전히 동일한 형태의 full scope 시뮬레이터이다. 자료 수집 방법은 주제어실의 모의실습 상황을 녹화 시설이 있는 상황실에서 비디오로 녹화하고, 한편으로는 주조정실에서 시뮬레이터 내부의 실습 장면을 관찰하고 특기 사항을 기록하는 방법으로 자료를 수집하였다. 또한 주요 운전변수의 추이 및 운전원의 기기조작 정보는 시뮬레이터로부터 입수하였다.

모의실습에는 영광 3,4호기 및 울진 1,2호기 주제어실 운전원들이 참가하였으며, 주제어실 운전원들에 대한 정기적인 교육/훈련의 일부로 수행된 비상직무 모의실습을 대상으로 하였다. 자료수집은 표 3에 정리된 바와 같이 1999년 6월부터 2001년 4월까지 수행되었으며, 모두 24개 운전조(operating shift)에 대한 모의실습 자료를 취득하였다.

표 3. 시뮬레이터 자료 수집 개요

수집기간	대상 사고 시나리오	모의 실험 수
'99.6 ~ '99.12	LOAF SGTR	5 5
'00.1 ~ '00.6	LOCA ESDE	18 18
'00.7 ~ '00.12	LOAF SGTR	18 18
'01.1 ~ '01.4	LOOP SBO LOCA	10 10 10
계		112

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

모의실습은 비상운전절차서에 포함된 6개 사고 시나리오에 대하여 수행하였으며, 총 112회의 실습 자료를 수집하였다. 자료 수집은 원자로 냉각재상실 사고(LOCA), 증기발생기 세관 파단 사고(SGTR), 이차측 급수상실사건(LOAF), 증기과잉방출사건(ESDE), 소외전원상실사건(LOOP) 및 발전소정전사건(SBO) 등 비상운전절차서에 포함된 6개 비상사고 시나리오를 대상으로 하였다.

2.3 자료 분석

비디오 테이프와 운전변수 출력정보, 운전원 경력정보 등 수집된 모든 시뮬레이터 자료를 분석하였다. 특히 비상직무의 인간신뢰도 분석 지원에 초점을 맞추어서, 표 4에 정리된 인간신뢰도분석에 필요한 입력 정보를 분석하였다. 직무분석을 통하여 사고 시나리오별로 운전원들이 수행해야 되는 직무목표와 직무목표별 세부 수행 절차를 분석하였으며, 각 수행 절차별로는 비디오 분석을 통하여 관련 운전원, 수행시간, 판찰정보, 운전원간 의사소통 내용 및 수준, 부적절한 행위 유형 및 관련 영향 인자 등을 분석하였다. 인간신뢰도분석 관점에서는 여러 입력 정보 중에서도 특히 직무 수행시간 정보가 매우 중요하기 때문에 이를 분석하기 위하여 Timeline 분석(Kirwan, 1992)을 수행하였다. 2.1절에서 설명한 직무분석 결과와 모의실습에 대한 비디오 분석을 통하여 비상직무의 수행 절차별 평균 수행시간을 분석하였다.

표 4. HRA 입력정보과 직무분석 및 시뮬레이터 자료 분석을 통해 얻은 정보

HRA 입력 정보	데이터 분석 방법	직무분석 및 시뮬레이터 분석을 통해 얻은 정보
- 절차서 유무 및 기술 수준	1. EOP 분석 (목표-수단 직무분석) 2. 훈련센터 교수 및 운전원과의 면담	- 절차서 종류 (i.e., LOCA, SGTR 절차서 등) 및 직무 기술 수준
- 직무 수행 절차 - 직무간, 수행 절차간 연관성 - 직무별 MMI 수준		- 절차서별 구성 직무 - 직무 목표 및 세부 수행 절차 - 비상 일반직무(generic task) 및 판찰 정보 - 관련 MMI 유무 및 유효성 - 직무목표 및 수행 절차간 동일 유형 파악 - 직무의 추상화 기술 수준 - 직무별, 수행 절차별 판찰 정보량, 논리적 복잡도
- 운전조 구성 및 역할 분담 - 직무 절차별 수행 담당자 - 운전원 경력 및 숙련도	1. 운전조 구성, 보직 및 담당자별 경력 분석	- 운전조 조직 및 보직별 역할 분담 - 직무 절차별 수행 담당자 - 운전원 경력 및 숙련도 - 절차서 준수 형태 - 운전원간 의사소통 형태 및 수준
- 직무 수행시간 - 시나리오별 발전소 거동	1. 운전변수 추이 분석 2. 훈련 시나리오별 비디오 timeline 분석	- 비상절차별 수행시간 - 사고 진단 수행시간 - 세부 수행절차 단위별 수행 시간 - 일반직무(generic task) 수행 시간 - 시나리오별 운전변수 추이(trend) 분석
- 시나리오별 발전소 거동 - 직무 여유시간 - 직무 긴급성	1. 시뮬레이터 거동 분석 2. 열수력 사고해석	- 발전소 운전변수 추이(trend) 분석 - 사고해석(별도 사고해석)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

3. 분석 결과 및 해석

본 연구에서는 비상직무의 인간신뢰도분석을 위한 입력 정보의 생산에 초점을 맞추어 인적수행도를 분석하였다. 원전이 불시에 정지하면 운전원들은 초기 발전소 상태를 점검하고, 어떤 사건이 발생하였는지 진단하며, 진단된 결과에 따라 후속 조치를 수행하게 되는데, 이 모든 일련의 조치는 비상운전절차서에 기술된 절차에 따라 수행한다. 이에 따라 원전의 비상직무는 발전소 초기 상태 점검, 사고 진단, 진단된 사고에 대응하는 절차서 수행 등으로 크게 구분할 수 있으며, 사고 대응의 결과는 초기 상황 판단과 사고 진단에 크게 영향을 받는다. 따라서 비상직무의 인적수행도를 평가하기 위해서는 세부적인 직무절차의 수행도는 물론 사고 진단에 걸린 시간이나 정확성을 평가해야 한다. 특히 진단수행시간은 인간신뢰도분석 결과에 가장 큰 영향을 미치는 입력 정보로 알려져 있다.

2장에서 설명한 직무분석, 시뮬레이터 자료 수집 및 분석을 통하여 한국 표준 원전의 비상직무에 대한 국내 운전원의 인적수행도를 분석하였다. 분석 결과 각 사고 시나리오에 대하여 필요한 운전원 직무목표 및 수행 절차, 86개의 일반직무 유형, 절차별 수행시간, 관찰 정보, 부적절한 대응 유형 및 영향 인자 등을 파악할 수 있었다. 또한 시나리오별로 발전소 초기 상태 점검과 사고 진단에 걸린 시간을 분석하였으며, 사고 진단의 정확도도 평가하였다. Timeline 분석을 통하여 총 1340개 비상직무 절차에 대한 수행시간을 추출하였으며, 모두 80여 개의 상이한 비상직무 절차에 대한 평균 수행시간을 분석하였다.

본 논문에서는 6개 사고 시나리오에 대한 자료 분석 결과 중 완전 급수상실사고(LOAF) 시 안전감압밸브를 통한 일방관류냉각운전의 직무에 대한 시간분석 결과와 원자로 냉각재상실사고(LOCA) 시 비상직무 수행시간만을 간단히 요약하였다. 완전 급수상실사고(LOAF)가 발생하면 주 제어실 운전원은 초기 상황 판단과 사고 진단을 위하여 우선-01, 02 절차서를 수행한다. 사고 진단이 성공적으로 끝나면 비상-05(LOAF) 절차서를 단계별로 수행하다가 이차측 급수가 복구되지 않으면 회복절차서로 전이하여 비상 조치를 수행한다. 원자로 냉각재상실사고(LOCA) 경우에는 우선-01, 02를 수행 후, 사고 진단 완료되면 비상-02(LOCA) 절차서를 단계별로 수행한다.

표 5. 완전급수상실 사고 시 직무목표 및 절차

직무번호	직무목표	관련 절차서
TASK_1	트립 후 우선조치	우선01 절차서
TASK_2	사고진단	우선02 진단절차서
TASK_3	초기점검, RCP정지	비상05, 절차 4
TASK_4	SG 급수공급 기능 확인	비상05, 절차 8
TASK_5	일방관류냉각운전 조건 확인	회복06, HR-04, 절차 2
TASK_6	SDS 밸브 개방 준비	회복06, HR-04, 절차 3
TASK_7	PSV 개방 확인	회복06, HR-04, 절차 4
TASK_8	SDS 밸브 개방	회복06, HR-04, 절차 5-6

표 5와 그림 1은 LOAF 사고시 운전원의 수행 직무와 시간 분석 결과를 보여주고 있다. 또한 그림 2는 LOCA 사고시 운전원 수행시간을 보여주고 있다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

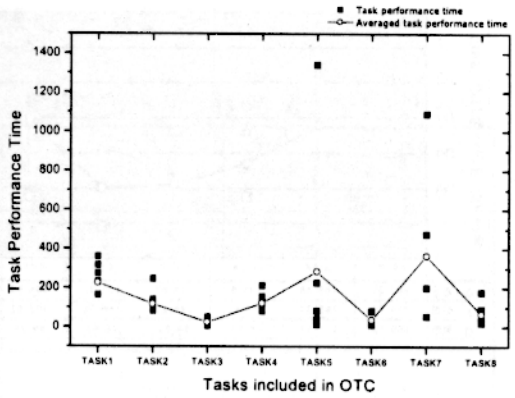


그림 1. 완전급수상실 사고 시 직무별 수행시간

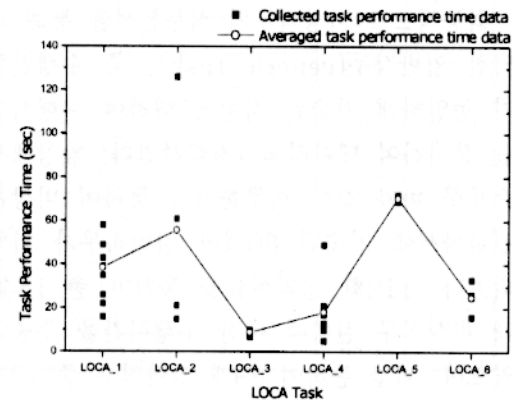


그림 2. 냉각재상실 사고 시 직무별 수행시간

표준 원전 비상직무에 대한 인적수행도 분석을 통하여 해당 직무의 수행도는 물론 직무 특성을 파악할 수 있었다. 직무별 수행시간의 평균과 편차를 분석함으로써 비상직무의 특성을 파악하고 취약점을 분석하였다. 그림 1의 TASK7 직무처럼 평균 수행시간이 상대적으로 긴 직무가 있는가 하면, TASK3 직무처럼 수행시간이 짧은 직무가 있다. 평균 수행시간이 길다는 것은 상대적으로 조작해야 하는 기기가 많다거나 상태 파악에 시간이 많이 걸리는 작업으로서 직무 복잡도나 난이도가 높다고 해석할 수 있다. 따라서 상대적으로 평균 수행시간이 긴 직무를 파악함으로써 수행도를 높이기 위한 후속 연구의 필요성과 그 대상을 선별할 기술 근거를 확보하게 되었다. 또한 수행도 분석을 통하여 그림 2의 LOCA_5 직무처럼 대부분의 운전조에서 유사한 시간대에 작업을 마친 직무가 있었는가 하면, LOCA_2 직무처럼 운전조마다 작업에 걸린 시간이 매우 다양한 직무가 있음을 확인할 수 있었다. LOCA_5 직무처럼 개인별 수행도 편차가 크지 않은 직무는 개개인의 능력이나 특성에 관계없이 운전원에게 잘 인지되도록 설계되고 훈련되고 있음을 알 수 있다. 반면 LOCA_2 직무처럼 개인별 수행도 편차가 큰 직무는 직무의 인적수행도가 작업자의 개인적 능력이나 경험에 많이 좌우되는 것으로서, 직무의 이해도를 높이고 작업자의 인지과정을 지원하기 위해 직무 절차가 개선되고 훈련 및 교육이 강화되어야 할 대상임을 알 수 있다.

비상직무의 인적수행도 분석은 세부 직무절차 단위에 대한 분석뿐만 아니라 절차서 단위의 수행시간 분석도 수행하였다. 사고 초기에 발전소 상태를 점검하고 사고를 진단하는데 사용되는 우선-02 및 우선-02 절차서의 수행시간을 분석하고 비교하였다. 우선-02 절차서는 불시에 원자로가 정지되면, 관련 주요 운전변수를 확인하면서 현재의 발전소 상태를 파악하는 절차서이고, 우선-02 절차서는 우선-01 절차서 수행 후 어떤 사건이 발생하였는지를 진단하는 진단절차서이다. 특히 사고

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

초기에 주요 안전변수를 점검하고 사고를 진단하는 직무는 원전의 안전 및 사고 대응 관점에서 매우 중요하기 때문에, 6개 사고 시나리오별로 이들 두 절차서에 대한 수행 시간을 분석하였다. 그림 3에는 우선-01 절차서의 세부 절차별 수행시간이, 그림 4에는 사고 시나리오별로 사고 진단에 걸린 평균 시간이 정리되어 있다. SGTR 사고가 진단에 가장 오랜 시간이 걸린 반면, LOOP나 SBO가 상대적으로 진단에 짧은 시간이 소요된 것으로 분석되었다. 이것은 SGTR 사고는 LOCA 징후를 가지면서 추가적으로 방사능 정보를 확인하는 사고의 특성 때문에 진단에 많은 시간이 소요되는 반면, LOOP와 SBO 사건은 상대적으로 진단 절차서의 앞 부분에서 진단이 완료되기 때문인 것으로 밝혀졌다. 이와 같은 진단 수행시간은 원전의 안전성 평가에 중요한 입력으로서, 이제까지 전문가 판단에 의존하던 것을 대신하여 보다 신뢰성 있는 입력자료로 사용될 것이다.

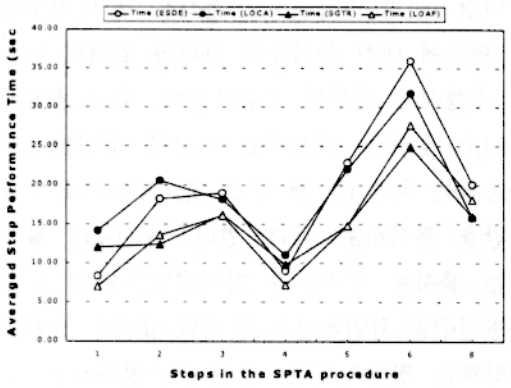
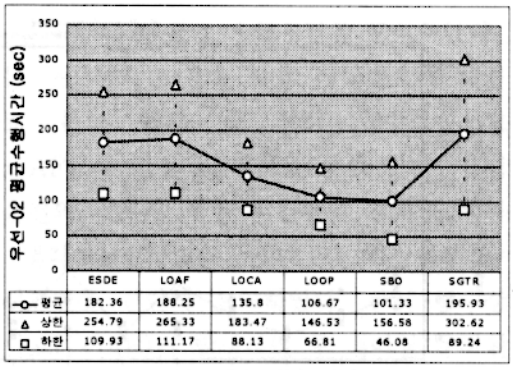


그림 3. 우선-01 절차별 수행시간



	ESDE	LOAF	LOCA	LOOP	SBO	SGTR
평균	182.36	188.25	135.8	106.67	101.33	195.93
상한	254.79	265.33	183.47	146.53	156.58	302.62
하한	109.93	111.17	88.13	66.81	46.08	89.24

그림 4. 우선-02(진단) 초기사건별 수행시간

최종적으로 비상직무의 직무분석을 통해 파악한 일반직무(generic task), 즉 수행절차가 동일하게 기술된 직무에 대하여 수행시간을 분석하여 데이터베이스화하였다. 앞장에서 소개한 바와 같이 직무분석을 통하여 비상운전절차서에 기술된 86개의 일반직무가 파악되었다. 112회 모의실습을 통하여 총 1340개 비상직무 절차에 대한 수행시간을 추출하였으며, 이를 통하여 89개 일반직무 중 79개의 일반직무에 대한 수행시간을 얻을 수 있었다. 표 6은 일반직무에 대한 시간분석 결과 중 일부를 예시하고 있다. 일부 일반직무의 경우는 수집된 자료의 수가 충분치 못한 것도 있어 보다 신뢰성 있는 통계치를 얻기 위해서는 지속적인 자료 수집과 분석이 필요하다.

원전의 인간신뢰도 분석에는 대상 직무의 수행시간 정보가 중요한 입력으로 사용되며, 이제까지는 이를 운전원을 통해 얻은 주관적인 추정치를 사용해 왔다. 따라서 본 연구를 통해 얻은 79개 일반직무에 대한 수행시간은 향후 원전의 인간신뢰도 분석에서 국내 운전

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

원의 행위 특성을 반영한 고유 입력 자료로 활용될 수 있을 것이다.

표 6. Generic task의 평균 수행시간 예시

일반 직무 ID	절차서 및 단계번호	수집 자료 수	수행 시간 (초)	
			부분 평균	전체 평균
1	SGTR 21.0	3	7.3	7.0
	LOCA 26.0	4	6.8	
2	ESDE 17.0	5	11.4	9.4
	LOCA 16.0	7	8.0	
3	SGTR 4.0	13	11.8	11.5
	ESDE 4.0	7	10.0	
	LOCA 4.0	10	12.0	
4	SGTR 15.0	7	41.6	43.5
	ESDE 13.0	8	45.3	
5	ESDE 15.0	5	27.6	33.2
	LOCA 23.0	6	37.8	
6	SGTR 5.0	13	33.1	32.1
	ESDE 5.0	8	40.4	
	LOCA 5.0	10	24.2	
7	ESDE 20.0	7	38.3	39.7
	LOCA 12.0	11	40.5	
8	ESDE 8.0	7	63.4	65.4
	SGTR 7.0	5	68.2	

4. 결 론

인적수행도 분석은 인적직무의 특성상 자료의 취득에 많은 노력과 시간을 필요로 한다. 그러나 HRA 수행이나 인적오류의 방지 및 수행도 향상 연구를 위해서는 운전원의 특성을 반영한 국내 고유 자료의 수집이 필수적이다. 본 연구에서는 HRA 분석에 필요한 입력 정보를 생산하기 위하여 영광 훈련센터의 시뮬레이터를 활용하여 국내 원전의 인적수행도 자료를 수집하고 분석하였다. 이 자료 수집에는 모두 24개 운전조가 참여하였으며, 비상운전절차서에 포함된 6개 사고 시나리오를 대상으로 총 112회의 실습 자료를 수집하였다. 녹화된 모의실습 자료를 분석하여 사고진단시간, 직무의 종류 및 절차별 관찰 정보, 절차별 수행 시간, 부적절한 조치 유형 및 빈도, 운전원 의사전달 형태, 운전원의 상황대처 유형 등을 분석하였다. 또한 비상운전절차서에 대한 직무분석을 수행하여 직무목표와 총 86개에 달하는 일반직무(generic task) 유형을 도출하였으며, 직무별 작업자, 관찰정보 등을 분석하였다.

본 연구에서는 원전에서 수행되는 여러 유형의 직무 중 비상운전 직무에 대한 인적수행도를 분석하였다. 국내에서는 처음으로 대규모 시뮬레이터 자료를 수집하고 분석하여 국내 인적수행도 데이터베이스의 구축의 기반을 마련하였다. 비상직무에 대한 직무분석을 통해 도출된 86개의 일반직무 중 79개 일반직무에 대한 수행시간 정보를 분석하고 데이터베이스화하였으며, 이중 일부에 대한 수행시간 정보를 표 6에 예시로 정리하였다. 분석결과의 신뢰성을 보다 높이기 위해서는 지속적인 자료 수집과 분석이 필요하다.

본 연구를 통해 수집된 수행시간 정보는 영광 5,6호기 안전성평가를 위한 HRA 수행에 기 사용되었으며, 향후 국내 원전 HRA의 입력 자료로 활용될 예정이다. 또한 오류의 방지와 감소 및 운전원 수행도 향상을 위한 연구의 기술적 근거 자료로 사용될 것이다. 향후 연구계획으로는 보다 다양한 직무 및 사고시나리오를 대상으로 한 자료 수집과 분석을 지속할 예정이며, 한편으로는 수집된 자료에

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

대한 추가 분석을 통하여 운전경력과 수행도와 연관성 분석, 운전원 상호간 의사소통 유형 분석, 취약한 직무의 수행도 향상 방안에 대한 연구 등을 수행할 계획이다.

참고 문헌

한국수력원자력(주) (1997). 영광 2 발전소 비상운전절차서.

Beare, A.N., et. al. (1984). *A Simulator-Based Study of Human Errors in Nuclear Power Plant Control Room Tasks.* NUREG/CR-3309, USNRC.

Center for Chemical Process Safety (CCPS) (1994). *Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety.* American Institute of Chemical Engineers.

Hollnagel, E. (1993). *Human Reliability Analysis : Context and Control.* Academic Press.

Jung, W.D., Kim, J.H., Yoon W.C. (2001). Structured Information Analysis for Human Reliability Assessment of Emegency Tasks in Nuclear Power Plants. *Journal of Reliability Engineering and System Safety, 71(1).* p21-32. Elsevier.

Kirwan B., Ainsworth, L. (1992). *A Guide to Task Analysis.* Taylor&Francis,

Kirwan, B. (1994). *A Guide to Practical Human Reliability Assessment.* Taylor & Francis.

Prokopovich. S.R. (1997). *ERG Operator Response Time Assessment Program.* WCAP-14996, Westinghouse.

Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction : An Approach to Cognitive Engineering.* Elsevier.

저자 소개

◈ 정원대

고려대학교 산업공학과(학사). 한국과학기술원 산업공학과(석사, 박사). 현재 한국원자력연구소 책임연구원. 주 관심분야는 시스템 안전에서의 인적수행도 및 인간신뢰도 분석.

◈ 박진균

한양대학교 원자력공학과(학사). 한국과학기술원 원자력공학과(석사, 박사). 현재 한국원자력연구소 선임연구원. 주 관심분야는 직무복잡도 및 인적수행도 평가.

◈ 김재환

서울대학교 원자력공학과(학사). 한국과학기술원 원자력공학과(석사). 현재 한국원자력연구소 선임연구원. 주 관심분야는 인적오류 및 조직요인 평가.

논문접수일 (Date Received): 2002/1/8
논문게재승인일(Date Accepted): 2002/10/10

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.