

## 모의 비상운전 시나리오 수행에 따른 운전원들의 인지적 직무특성 분석\*

(Analysis of the Cognitive Task Characteristics of Operators  
in Following Simulated Emergency Operating Scenarios)

천세우, 서상문, 이용희, 이정운

한국원자력연구소

이덕현

한국전력공사

### 요약

본 논문에서는 비상운전 상황에서 표출되는 운전원들의 직무전략 및 인지적인 특성을 도출하기 위해 운전원 교육 프로그램을 대상으로 운전원들의 직무특성을 분석하였다. 운전원들의 직무특성을 인지과정의 개입 정도에 따라 크게 Macro와 Micro로 구분하여 이들 직무특성을 잘 대변해 줄 수 있는 비상운전 시나리오를 개발하였다. 시뮬레이터를 통해 개발 시나리오에 따른 운전원들의 비상운전절차 수행과정을 비디오로 기록, 운전원들의 행동과 대화내용을 전산 분석하여 직무특성을 도출하였다.

### 1. 서론

비상운전시 운전원들의 직무특성 및 수행도에 대한 인간공학적인 분석을 위해서는 일반적으로 운전작업에 대한 비디오 실사를 하여 운전원들의 Verbal Protocol을 분석하는 방법이 많이 사용되고 있다 [1-4].

본 연구에서도 운전원들의 직무특성을 분석하기 위해 운전원들의 비상운전 작업에 대한 비디오 실사 및 분석을 하였다. 실사는 고려연수원 모의제어반 2호기에서 운전원 교육 프로그램을 대상으로 수행하였다.

직무특성 도출의 주 목적은 현재 개발중인 운전작업 시뮬레이션 분석기인 SACOM [5,6]내 운전원 모형 구축에 필요로 하는 운전원들의 직무전략 및 인지적인 특성 등을 도출하기 위해서이다.

직무특성 분석을 위해 Macro와 Micro 직무로 구분하여 접근하였다. 운전원들이 직무 수행시 인지과정의 개입이 상대적으로 적은 직무를 Macro 직무, 많은 직무를 Micro 직무라고 가정하였다. Macro 직무에서는 주로 Skill 및 규칙기반 (Rule-based) 행동들이 자주 나타나는 반면, Micro 직무에서는 지식기반 (Knowledge-based) 인지적 행위가 두드러지게 나타난다 [7].

Macro 직무특성 분석을 위한 실사 대상 시나리오는 일반적으로 자주 다루는 사고인 소형 냉각재상실사고 (SB-LOCA: Small Break Loss of Coolant Accident)와 증기발생기관 파열 사고 (SGTR: Steam Generator Tube Rupture)를 대상으로 하였다 [8,9]. 아울러 Micro 직무 대상 시나리오는 주로 운전원들의 인지적인 진단행위와 대처방안 수립을 잘 나타내 줄 수 있도록 연계계통 냉각재상실사고 (ISLOCA: Interfacing System

Loss of Coolant Accident)와 열제거원 상실사고 (LHS: Loss of Heat Sink)를 대상으로 하였다 [10,11]. 시뮬레이터에서 각 시나리오 전개시 사고 초기조건과 비상운전절차서 분기조건들을 따르도록 시나리오 논리를 개발하였다.

본 논문에서는 실사 대상 시나리오 개발, 비상운전 작업 실사방법 및 분석과정, 그리고 직무특성 분석 결과를 기술하였다.

### 2. 실사 대상 시나리오 개발

#### 2.1 Macro 직무분석 대상 시나리오

##### A. SB-LOCA

100% 출력 운전중 냉각재계통 저온관에 냉각재 상실사고가 발생, 상실유량이 충전유량 보다 많아 원자로는 트립되고 안전주입이 발생된다. 따라서 냉각재계통의 냉각이 필요하게 되며, "원자로냉각재 상실사고후 계통냉각 및 감압 절차"를 수행한 후 안전주입 유량을 감소시킬 수 있고 잔열제거 펌프가 운전될 때 시나리오는 종료된다.

이 시나리오는 비상운전절차 수행시 총 71단계 중 71단계까지 운전절차 흐름은 다음과 같다.

- E-0: 원자로 정지 또는 안전주입
  - 26단계에서 분기 (격납용기 방사능, 압력, 배수조 수위 비정상).
- E-1: 1차 또는 2차 냉각재 상실사고
  - 13단계에서 분기 (냉각재 압력이 16.5 kg/cm<sup>2</sup> 이상).
- ES-1.2: 냉각재 상실사고후 계통냉각 및 감압
  - 32단계에서 종료.

##### B. SGTR

100% 출력운전중 냉각재계통의 방사능 준위가 서서히 증가중인 상태에서 발전소 상태를 감시중이며 시료분석 등의 조치를 취하고 있는 상

\* 본 연구는 과기처에서 시행한 원자력연구개발사업 중장기과제 "인간공학기술개발" 과제의 일환으로 수행하였음.

태에서 증기발생기 관 파열사고가 발생되어 원자로가 트립된다. 파열유량은 총전유량 이상이 되고 다음과 같은 운전절차를 거치면서 총 77단계를 수행한다.

- o E-0: 원자로 정지 또는 안전주입
  - 25단계에서 분기 (2차측 방사능 준위 비정상).
- o E-3: 증기발생기관 파열 사고
  - 39단계에서 분기 (냉각방법 선택).
- o ES-3.1: 증기발생기관 파열 사고시 역보충에 의한 냉각
  - 13단계에서 종료.

## 2.2 Micro 직무분석 대상 시나리오

ISLOCA는 냉각재 계통 고온관 루프와 RHR (RHR: Residual Heat Removal) 계통 사이에 있는 두개의 격리밸브에서 냉각재가 RHR 계통으로 내부누설이 발생되어 일어난다. ISLOCA는 표 1과 같이 두가지 유사한 시나리오인 ISLOCA 1과 ISLOCA 2로 구분할 수 있다.

LHS는 이차계통내 주급수 펌프 정지로 인해 급수유량 완전상실과 함께 가압기 압력방출밸브 (PORV: Power Operated Relief Valve)의 누출로 복잡하게 발생된다. 이 시나리오도 역시 표 1과 같이 두가지 유사한 시나리오인 LHS 1과 LHS 2로 구분할 수 있다.

### A. ISLOCA

이 시나리오는 발전소 상황 평가 (Situation Assessment) 측면에서 운전원들의 인지적인 노력을 많이 요구한다. 즉, ISLOCA 시나리오의 목적은 운전원들이 절차서상의 도움이 없이 RHR 계통으로의 누설을 진단하고 차단해야 하는 상황을 만들어 주는 것이다.

ISLOCA 진행으로 그림 1과 같이 크게 격납용기내 LOCA 증상과 보조빌딩내 이상현상이 동시에 발생된다. ISLOCA 1에서는 RCS 누설이 보조빌딩내 RHR 배관 파열을 일으켜 냉각재가 보조빌딩내 바닥으로 흘러 넘치게 된다. ISLOCA 2도 같은 방법으로 사고가 진행되나 RHR내 압력형성으로 인해 RHR 계통과 기기냉각수(CCW: Component Cooling Water) 계통 사이에 위치한 열교환기의 파열을 일으켜 RCS 유량이 CCW 계통으로 흘러 들어가게 된다.

위와 같이 두가지 전개과정의 시나리오에서 운전원들은 누설을 차단하기 위해 RHR 계통내에서 발생하는 ISLOCA를 규명해야 한다. 초기 증상이 격납용기내 LOCA의 증상과 유사하므로 상황 평가를 위한 운전원들의 인지적인 노력의 정도가 커진다. 이때 정확한 상황 평가를 위해서는 서로 다른 계통들간의 다중 증상들을 통합해야 한다.

ISLOCA에 대한 비상운전 절차 진행 흐름은 그림 2와 같다. 여기서 ISLOCA 1의 진행 흐름은 SB-LOCA의 진행 흐름과 동일하다. ISLOCA 1에서는 일단 한번 LOCA 절차인 E-1으로 진입하면 ISLOCA 대응 절차인 ECA-1.2로 빠질 수 있는 명백한 분기점이 없다. 운전원들은 결국 절차서상의 "Try to identify and isolate the leakage."라는 조치사항만 접하게 된다. 반면 ISLOCA 2에서는 E-1 절차에서 ISLOCA 대응 절차인 ECA-1.2로 분기할 수 있도록 하였다.

### B. LHS

LHS는 상황평가 및 대처방안 수립 (Response Planning)의 두가지 측면에서 운전원들의 인지적 노력을 많이 필요로 하는 시나리오다. 이 시나리오는 운전원의 주의 (Awareness)를 우선 순위가 높은 문제, 즉 열제거원 상실에 초점을 맞추는 상황을 구현하는데 목적이 있다. 또, 운전원들이 이차적으로 잠재성이 있는 가압기 PORV 누출을 어떻게 발견하고 대처하는가를 잘 관찰할 수 있는 시나리오다.

급수가 상실되었으므로 절차서에서는 운전원들이 그림 3과 같이 급수회복 조치를 취하도록 요구하여 우선 보조 급수유량을 다시 형성할 수 있도록 한다. 이 시도가 실패했을 때는 주급수 유량을 회복하도록 하고, 이것도 실패하면 응축수 계통을 이용하여 급수유량을 회복시키도록 한다.

이 시나리오에서 운전원은 가압기 압력을 줄이기 위해 PORV를 직접 열고 닫고 한다. PORV가 개방 고착되어 누출이 발생되지만 절차서내에 분명한 대처 방안이 없으므로 운전원이 PORV의 누출에 어떻게 대처하는가를 볼 수 있다.

LHS는 상황평가 측면에서 발전소에서 나타나는 증상들이 운전원의 조치로 인한 발전소의 거동인지를 판단해야 한다는 점이 중요하다. 예를 들면, PORV 누출의 초기 증상인 가압기 압력과 수위의 감소는 이차계통 열제거원을 회복하기 위해 운전원이 취한 냉각 조치에 원인이 있을 수 있고, 또는 PORV의 개방 고착이 원인일 수도 있다.

LHS 시나리오에서는 그림 4와 같이 E-0 절차를 거쳐 Step 4에서 ES-0.1 (Reactor Trip Response) 절차로 분기한다. ES-0.1 진입 초반에 열제거원 안전기능이 위반되어 운전원은 기능회복절차인 FR-H.1 (Response to Loss of Secondary Heat Sink) 절차를 수행한다. LHS 1에서는 운전원들이 급수유량을 회복시키지 못하므로 ES-0.1 절차로 다시 돌아 갈 수 없다. LHS 2 시나리오에서는 LHS 1과 달리 운전원이 급수유량을 회복시킨다. 따라서 운전원은 FR-H.1 절차에서 본래 절차인 ES-0.1 절차로 다시 되돌아가도록 되어 있다.

## 3. 비상운전작업 실시방법 및 분석과정

비상상태하에서 운전원들이 수행하는 직무 특성을 분석하기 위해 시나리오 실사를 고리연수원 모의제어반 2호기에서 수행하였다. 운전원 재교육 프로그램에 참가하는 운전원들을 대상으로 하였으며 이들은 보통 3 ~ 5년의 경험을 가진 숙련된 운전원들로 구성되어 있다.

주제어실내에서 운전원들의 행동을 분석하기 위해 그림 5와 같이 세대의 비디오카메라를 모의제어반에 설치하여 운전원들의 행동과 음성을 기록하였다. 각각 원자로 운전원(RO), 발전과장(SRO)과 안전과장(STA), 그리고 터빈 운전원(TO)과 배전반 운전원(DB)들을 전담하여 비디오 촬영을 하였다.

실사 후, 참가 운전원들과 녹화된 비디오테이프를 재생하면서 인터뷰와 Questionnaires 작성으로 운전원들의 상황평가 및 인지적 대처 전략 등을 도출하였다.

표 1. Micro 직무분석 대상 시나리오 요약 및 특징

시나리오	시나리오 요약 및 특징
연계계통 냉각재 상실사고 (ISLOCA)	<p>ISLOCA 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 사고원인: RCS 고온관 루프와 RHR 계통 사이 격리밸브의 RHR 계통으로의 내부 누설</li> <li>• 초기증상: RHR Discharge Pressure High, Pressurizer Pressure Low, Pressurizer Level Low</li> <li>• 후속증상: 보조압입내 방사능 준위 비정상, 보조압입내 Sump Level High</li> <li>• ISLOCA 대응 절차서인 ECA-1.2로 분기할 수 없음</li> <li>• 특징: 상황평가 측면에서 운전원들의 인지의 노력이 많이 필요함</li> </ul>
	<p>ISLOCA 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ISLOCA 1과의 차이점:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>① RHR 계통내 압력 형성으로 CCW 계통으로 통하는 RHR 압력판기 파열, CCW 계통에 방사능 준위가 높아짐</li> <li>② RHR 계통의 압차적인 누설증상인 RHR Discharge Pressure High 경보 발생이 없게됨</li> <li>③ ISLOCA 절차서 ECA-1.2로 분기가 가능</li> </ol> </li> <li>• 특징: ISLOCA 1과 달리 전단을 위해 운전원들의 능동적인 탐색과 여러 계통내 증상들의 조합에 대한 노력이 필요함</li> </ul>
열제거원 상실사고 (LHS)	<p>LHS 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 사고원인: 완전 급수유량 상실과 더불어 가압기 PORV 누출이 동시에 일어남</li> <li>• 보조급수계통, 주급수 계통, 응축수 계통 및 Feed &amp; Bleed를 사용하여 급수유량 회복 시도</li> <li>• 급수유량을 원래대로 회복시키지 못함 (FR-H.1에서 계속해서 급수유량 회복 시도)</li> <li>• 특징: 다중 목표에 대해 대처방안들이 서로 상충될 때 운전원의 판단에 대한 어려움을 보여줌.</li> </ul>
	<p>LHS 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• LHS 1과의 차이점:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>① 운전원이 가압기 PORV 차단밸브를 닫으면 방출이 중단됨</li> <li>② 운전원이 급수유량을 회복시키고 나서 ES-0.1 절차를 다시 계속 수행</li> </ol> </li> <li>• 특징: ES-0.1 절차를 다시 수행시 발전소 현재 상태에서 부적절한 절차서 Step들이 존재함</li> </ul>

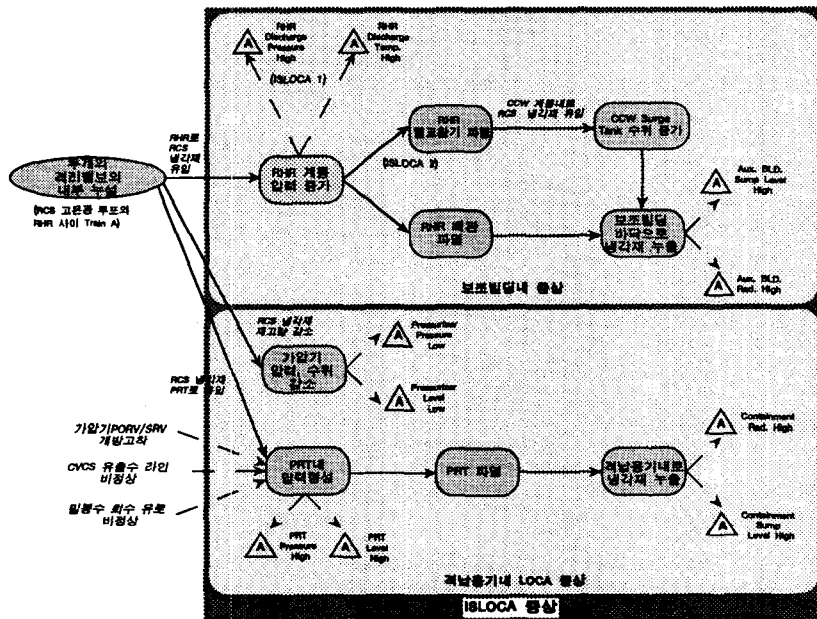


그림 1. ISLOCA 시나리오와 관련된 발전소 증상 흐름도

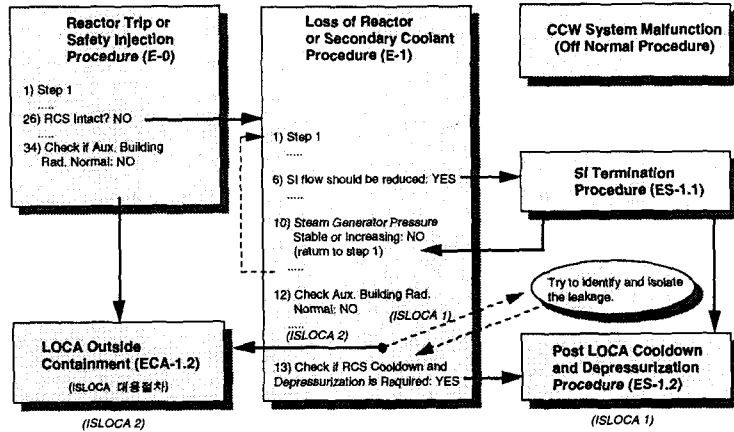


그림 2. ISLOCA와 관련된 비상운전절차 흐름도

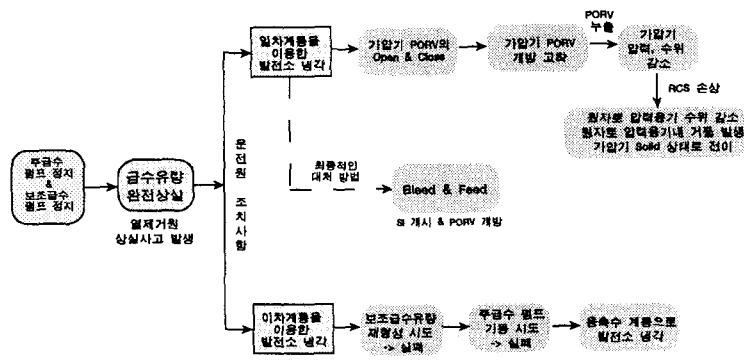


그림 3. LHS 시나리오 전개상황 및 운전원 조치사항

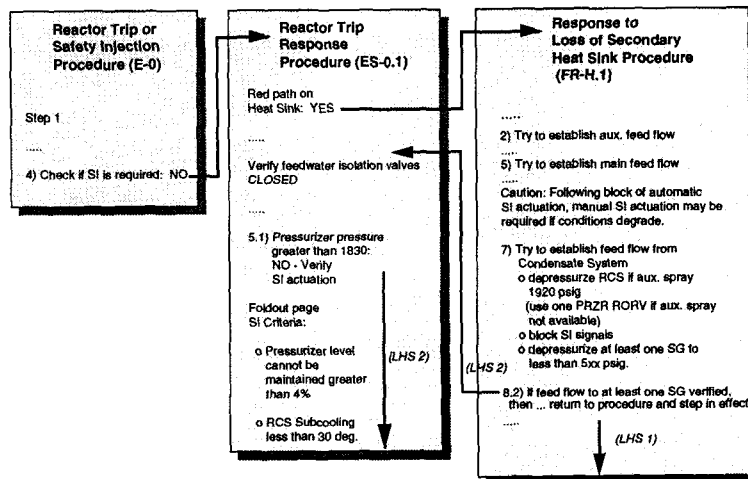


그림 4. LHS 시나리오와 관련된 비상운전절차 흐름도

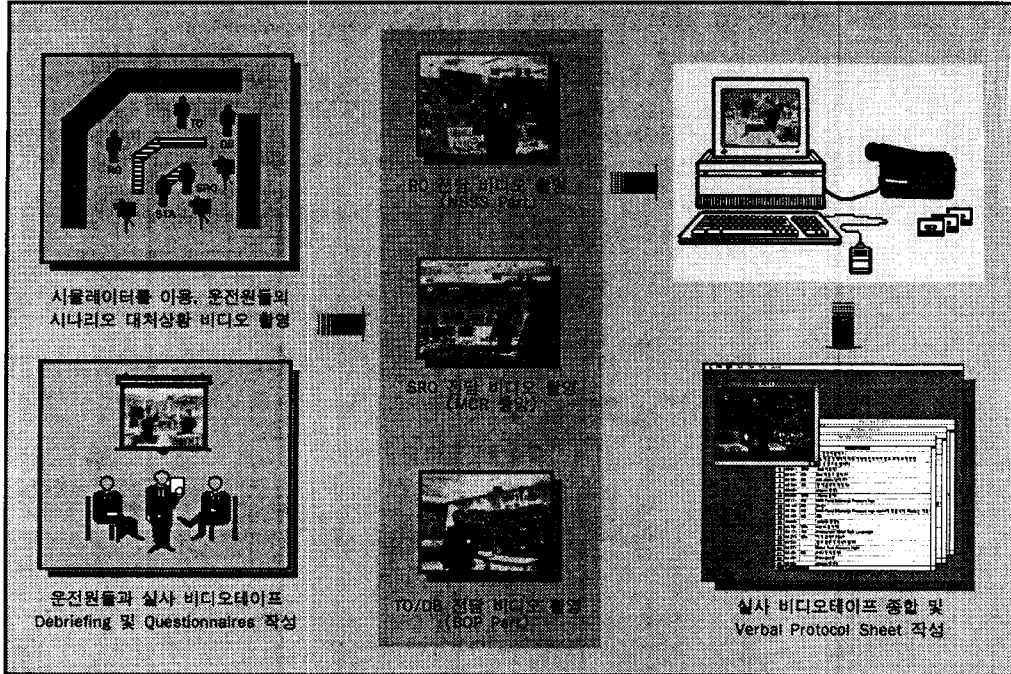


그림 5. 비상운전작업 비디오 실사 및 분석과정

효율적인 비디오 분석을 위해 비디오카메라를 Macintosh 컴퓨터와 직접 연결해서 운전원들의 대화내용을 분석, 최종적인 Verbal Protocol Sheet를 작성했다. 비디오 분석시 Audio 데이터는 발전과장의 지시사항과 각 운전원들의 보고 등 대화내용을 분석할 때 필요하고, Video 데이터는 운전원들의 행동을 분석하는데 필요하다.

운전원들의 Verbal Protocol 분석을 위해 다음과 같은 내용들을 분석하였다.

- 경보, 발전소 운전변수 및 자동동작 내역,
- 주요 절차서 Steps,
  - 분기점
  - 이전 Step으로 역행
  - 의사결정이 필요한 Step
  - 진단과 대처방안 수립이 필요한 Step
- 수립된 진단 가설,
- 이상상태 대처와 관련하여 운전원이 고려하거나 취한 조치사항,
- 절차서내에 기술되어 있지 않은 운전원 조치사항,
- 상황 평가나 적절한 조치를 취하기 위해 운전팀간의 대화내용.

그림 6은 Verbal Protocol Sheet를 기반으로 작성된 직무분석 Worksheet의 예이다. 이 Worksheet를 이용하여 동사로 대변되는 각 행위에 대한 담당 운전원, 운전원 목적어, 직무의 시작 및 종료 시점에서의 운전원 위치와 반응 시간, 그리고 대화내용 등을 분석할 수 있다.

#### 4. 직무특성 분석 결과

##### 4.1 Macro 직무특성 분석

주제어실내에서의 운전원들의 작업은 크게 인지작업 (상황평가 및 대처방안 수립), 기역작업, 의사소통작업, 계기판단작업, 조작작업 및 이동작업으로 구분될 수 있다.

SRO는 운전을 총괄 지휘하고 책임진다. 즉, SRO는 운전절차서의 각 Step들을 순차적으로 진행하며, 다음과 같은 직무를 각 운전원에게 할당하여 수행하게 한다.

- 특정 운전변수 또는 기기상태에 대한 확인 요구,
- 몇가지 관련된 운전변수 값을 참조한 후 판단할 수 있는 시스템의 상태 등을 요구,
- 특정 제어기의 조작을 요구,
- 증기발생기 수위제어 및 계통냉각과 같이 연속된 직무나 목표달성을 각 운전원들에게 요구.

의사결정과 같은 인지적인 직무수행 측면에서 SRO는 중요한 역할을 수행하므로 인지적 작업부하의 정도가 다른 운전원들에 비해 상대적으로 높다. Macro 행위 측면에서 SRO는 직접적인 조작 행위 등을 수행하지 않고, 신체적 작업부하의 주요 영향인자인 이동거리도 발생하지 않는다고 가정하는 것이 타당하다.

다른 운전원들은, 위에서 언급한 직무들을 수행하면서, 감시작업을 통해 얻은 중요한 시스템 상태 및 경보 등을 SRO에게 통보한다. 이들 운전원들이 수행하는 직무의 형태는 특정 운전변수 및 제어기를 이용한 단위 행위 (Unit Action), 시작과 끝이 명확한 단속 직무 (Discrete Task) 및 운전 전반에 걸쳐 수행해야 하는 연속 직무 (Continuous Task) 형태가 존재한다.

LOP 단계	담당 운전원	운전원 번호	운전원 직책	시작 시간	종료 시간	시작 위치	종료 위치	내 용
E-0 진 입 전	RO	WLK		0:00:52	0:00:55	1R	4L	RO는 이동한다. (JP004과속으로)
	RO	OSV	CTMT iso signal	0:00:55	0:00:56	4L	4L	RO는 확인한다. (CTMT isolation signal)
	RO	OSV	Radiation IE 정보	0:00:56	0:00:58	4L	4L	RO는 확인한다. (Radiation IE 정보)
	RO	INF		0:00:58	0:00:59	4L	4L	RO는 SRO에게 'CIS와 Radiation IE Alarm 낮습니다.'라고 알린다.
	RO	WLK		0:01:00	0:01:02	4L	2L	RO는 이동한다. (Control Desk로)
	RO	OSV	PRZR lvi & pressure	0:01:02	0:01:04	2L	2L	RO는 확인한다. (JP002 과속에서 가압기 압력과 수위 *PRZR pr. and level indicator)
	RO	INF		0:01:05	0:01:06	2L	2L	RO는 SRO에게 '가압기 압력 떨어지고 있습니다.'라고 알린다.
	RO	MON	PRZR lvi & pressure	0:01:07	0:01:10	2L	2L	RO는 감시한다. (JP002 과속에서 가압기 압력과 수위)
	TO	PSH	A-button	0:01:07	0:01:07	3L	2M	TO는 누른다. (JP002 중앙에 있는 A-Button(Silence)) *JP002에는 silence와 reset 두개의 버튼이 있음.
	TO	MON	Alarm Panel	0:01:08	0:01:12	2M	2M	TO는 감시한다. (경보패널을 전방적으로)
	SRO	QUE		0:01:09	0:01:10	SRO	SRO	SRO는 'RO! RCS 들어왔는지 확인해봐?'라고 요청한다.
	RO	MOV		0:01:10	0:01:11	2L	1R	RO는 이동한다. (JP001우측으로)
	RO	CHK	RCS flow	0:01:11	0:01:18	1R	1R	RO는 확인한다. (RCS flow를 나타내는 계기- *Charging flow controller와 flow indicator)
	TO	PSH	A-button	0:01:12	0:01:12	2M	2M	TO는 누른다. (JP002 중앙에 있는 A-Button(Silence))
	TO	MON	SGTR lvi & pressure	0:01:12	0:01:14	2R	2R	TO는 감시한다. (JP002 우측에서 증기발생기 수위, 압력, 유량 recorder를 확인함으로써 증기발생기 상태를 감시)
	TO	INF		0:01:14	0:01:15	2R	2R	TO는 SRO에게 'Pressurizer Level Deviation 낮습니다.'라고 알린다.
	TO	PSH	A-button	0:01:17	0:01:17	2M	2M	TO는 누른다. (JP002 중앙에 있는 A-Button(Silence))
EO	INF		0:01:17	0:01:18	14	14	DB는 'GT20 alarm났습니다.'라고 알린다.	
RO	ASW		0:01:19	0:01:21	2L	2L	RO는 SRO에게 'Flow 계속 증가 추세네요... 3분...'라고 대답한다.	
SRO	DRT		0:01:26	0:01:32	SRO	SRO	SRO는 각 운전원에게 'DB! 급전에 연락하고, TO는 출력감발... 그... 시간당... 10%씩가치고 출력감발운전 준비...'라고 지시한다.	
EO	LST		0:01:26	0:01:32	14	14	DB는 듣는다. (SRO의지시)	
E-0:1	SRO	QUE	Ctrl rod	0:02:23	0:02:24	SRO	SRO	SRO는 '재어봉 bottom 떨어져 있지?'라고 묻는다.
	RO	ASW		0:02:25	0:02:25	2L	2L	RO는 '예'라고 대답한다.
	RO	MON		0:02:25	0:02:26			RO는 계속 감시한다.

그림 6. Verbal Protocol Sheet를 기초로 작성된 직무분석 Worksheet의 예

감시작업의 경우 운전원은 상담 수준에서 이미 절차서에 대한 지식을 숙지하고 있는 상태이므로 다음에 수행하게 될 직무와 관련된 운전원 수 및 계통 상태를 확인하여 기억하거나, 지속적으로 감시해야 할 주요 운전변수를 읽고 계통의 상태를 파악한 후 특별한 변화가 발생하였을 때 즉시 SRO에게 통보한다.

비디오 분석을 통해 운전원들은 다음과 같은 Macro 측면의 직무특성이 있음을 알 수 있었다.

- 운전작업 수행시 운전팀간에 의사소통이 불명확하여 재확인 요청이 있는 경우가 종종 있다.
- 절차서 수행시 가끔 운전목표에 대한 의문점 제기가 하위 운전원들에 의해 이루어졌다.
- 운전원들은 가끔 절차서 내용을 애매하게 기억하여 SRO에게 확인 (예를 들면, '모든 증기발생기' 또는 '한대의 증기발생기')을 요청하기도 한다.
- 절차서내 조치사항 수행을 가끔 연기하는 경우 (예를 들면, 보조빌딩내 방사능 준위가 높아져 현장 운전원의 접근이 불가능한 경우)도 있었다.

#### 4.2 Micro 직무특성 분석

인터뷰 및 실사 비디오 분석을 통해 운전원들은 비상운전 수행시 크게 발전소 상황평가와 대처방안 수립 측면에서 다음과 같은 인지적인 직무특성이 있음을 알 수 있다.

##### A. 발전소 상황평가 측면

###### (1) 능동적인 발전소 상황 평가

운전원들은 시나리오 진행에 따라 발생되는 발전소 증상들로 사고원인에 대한 유추가 가능하도록 상황평가를 능동적으로 수행한다. ISLOCA의 경우 운전원들은 사고 초기에 발생 증상들을 기반으로 격납용기내 LOCA임을 추측하면서 절차서를 수행하였다. 그리고 동적인 증상변화에 따라 대처하는 조치사항이 바뀌기도 한다.

###### (2) 발전소 상황 예측

절차서를 진행하면서 운전원들은 주요 운전변수 추이 및 자동동작 내역 (예를 들면, 원자로 트립 및 안전주입 발생)들을 미리 예견하면서 발전소가 심각한 상태에 도달되지 않도록 노력한다.

###### (3) 발전소 물리적 상관관계 활용

운전원들은 복잡한 증상들의 발생으로 사고원인을 쉽게 파악하기 힘들때 발생 증상들로 사고 원인이나 유추가 가능하도록 하기 위해 발전소 계통들의 물리적인 상관관계에 대한 계통 지식(System Knowledge)을 활용한다. 예를 들면, ISLOCA 시나리오의 경우 운전원이 가압기내 PRT 증상을 인식하고 나서 발전소 물리적 상관관계에 대한 지식을 활용해서 이상상태의 영역을 RHR 계통내로 좁힐 수 있었다. 운전원들은 초기 증상에 따라 일차적인 사고 원인을 추정하고 절차서를 진행하면서 세부 증상들의 조합으로 계통 지식을 활용하여 사고원인을 파악하고 대처방안 수립을 한다.

운전원들은 특히 상황평가와 대처방안 수립시 발전소 일차계통과 이차계통 사이의 물리적인 열평형 관계에 대한 지식을 자주 활용한다. 예를 들

면 이차계통내 급수유량이 감소되면 불충분한 냉각에 의해 일차계통내 온도와 압력이 증가한다는 추론을 한다.

(4) 다양한 증상들에 대한 일관성있는 가설 수립

운전원들은 다양한 증상들에 대해 일관성 있는 근거 원인(Root Cause)을 찾기 위해 발전소 계통들에 대한 능동적인 원인 탐색을 한다. ISLOCA 시나리오에서 살펴보면, RHR 계통내 압력 형성으로 RHR과 CCW 계통 사이에 있는 열교환기의 누설을 초래, CCW 계통내에 고수위와 방사능 증상을 야기시킨다. CCW 증상들은 RCS에서 CCW 계통으로 직접적인 누설로 생긴 가설과 연관시킬 수 있지만 RHR이나 PRT내에서 나타나는 증상들과는 연관시키기 어렵다. 따라서 운전원들은 서로 연관성이 없는 고장 가설들의 수를 줄이고 증상들에 대해 일관성 있는 가설인 "RHR로 부터 CCW 열교환기로의 누설"로 좁힌다. 따라서 운전원들은 이 가설 수립으로 다양한 증상들을 모두 대변해 줄 수 있는 일관성있는 인과관계(Cause-consequence Relationship)를 설정할 수 있다. ISLOCA의 경우, 운전팀간의 사고 가설을 수립하여 검증하는 진단 전략 (즉, Hypothesize and Test)이 두드러 졌다.

B. 대처방안 수립 측면

(1) 증상 완화를 위한 우선적인 대처방안 수립

운전원들은 발생하는 증상 완화를 위해 최우선적인 대처방안을 수립, 적절한 조치를 취한다. 대처방안 수립시 여러가지 가능한 조치사항들에 대해 우선순위에 따라 선별을 하여 조치를 취한다. 또, 절차서내에 기술된 조치사항들로 원하는 발전소 상태로 유도할 수 없을 때는 발전소 계통 지식을 활용해서 적절한 조치사항을 도출하여 취하기도 한다.

(2) 절차서내 조치사항의 의도 고려

운전원들은 어떤 조치를 취할 것인가 결정을 할 때 절차서내 기술된 조치사항들의 의도(Intention)를 고려한다. 이렇게 함으로써 운전원들은 절차서 수행을 시간적으로 보다 더 효율적으로 할 수 있다. 예를 들면, 증기발생기 압력이 안정 또는 증가 상태인가를 묻는 절차서 Step들이 있다. 이 Step들은 진단 성격이 강하며 주증기관 파열과 같은 이차계통의 잠재성이 있는 비정상 상태에 대한 감시를 위해 있는 것이다. 만약 증기 발생기 압력이 감소하면 절차서는 운전원들로 하여금 절차서 시작 단계로 다시 돌아가도록 기술하고 있다. 운전원이 이 단계를 거칠 때는 증기발생기 압력이 감소하는 냉각단계에 있는 경우가 종종 있다. 이때는 증기발생기내 압력 감소가 이차계통내의 비정상에 의한 것이 아니므로 다른 운전변수들을 감시해서 증기발생기 압력이 단지 냉각단계에서 발생하는 증상임을 확인한다. 따라서 운전원은 제어 불능의 증기발생기 압력 감소가 아님을 확신하고 절차서를 계속 진행한다.

(3) 절차서 경로의 적합성 고려

운전원들은 수행하고 있는 절차서 경로의 적

합성을 고려한다. 발전소의 동적인 특성상 특정 분기 Step에 도달하여도 분기 조건을 만족하는 증상들이 나타나지 않는 경우가 종종 있다. 이 분기 조건들은 발전소의 동적인 특성을 충분히 고려한 것이 아니다. 따라서 절차서를 현재 나타나는 증상들로만 수행하다 보면 전혀 관련없는 절차서로 분기할 가능성도 있다. 따라서 운전원들은 다음 분기되는 절차서의 적합성을 고려하면서 수행한다.

(4) 절차서 후반 Step들의 앞선 수행

운전원들은 절차서 수행중 순서와 관련이 없고 우선적으로 취할 필요가 있는 후반 Step의 조치사항들을 가끔 미리 취한다. 이러한 조치사항들의 수행은 발전소 상태와 절차서의 내용과 순서를 미리 이해하면서 취해진다. 예를 들면 ISLOCA 시나리오에서 운전원들이 발전소 이상상태를 ISLOCA임을 추정하고 나서 격납용기 외부의 가능한 누설 증거를 찾으려고 보조빌딩 근무자에게 확인 요청을 미리 한다. 절차서에는 이 조치사항이 절차서 후반 Step에 기술되어 있다.

(5) 운전팀간의 의견조정 행동

운전팀에 따라 상황평가나 대처방안 수립시 운전팀간의 의견조정 행동이 관찰되었다. RO/NO가 경력이 많을수록 SRO와의 의견조정 빈도가 높았다. 의견조정 빈도가 높을때는 다음과 같은 경우들이 해당된다.

- 운전원들이 다중 운전목표에 직면했을때,
- 발전소 상황평가를 위해 각 운전원들이 담당하고 있는 증상들을 모두 필요로 할 때,
- 절차서 수행중 경로의 적합성을 고려하거나 다음 경로에 대한 명백한 기술이 안되어 있을때.

5. 결론

운전원들의 Macro 직무 특성을 파악하기 위해 SB-LOCA와 SGTR 시나리오를 대상으로 하여 운전원들의 비상운전 상황을 기록한 Audio/Video 데이터를 분석하였다. 분석 결과, 이 두가지 시나리오에는 운전원들에게 상당히 익숙한 것으로 주로 숙련된 작업 및 규칙기반 행동을 보였다. 즉, 인지부담의 가능성이 적어 운전 직무 특성중 주로 행위적인 측면이 파악되었다.

운전원들의 Micro 직무특성 파악을 위해 인지적인 행위가 두드러지는 ISLOCA와 LHS 시나리오를 선정해서 실사를 수행하였다. 상황평가 측면에서 보면, 운전원들은 발전소 상태 파악을 위해 능동적인 상황 평가를 한다. 또, 발생하는 증상들에 대해 일관성있는 가설을 수립하기 위해 발전소 물리적인 상관 관계 등을 이용한 지식기반 추론을 한다. 대처방안 수립 측면에서 보면, 운전원들은 절차서 후반 Step들을 우선적으로 조치하거나 각 Step의 기술사항들을 충분히 고려하기도 한다. 또, 발전소의 동적인 특성을 감안, 운전원들은 절차서 경로의 적합성을 고려한다.

참고문헌

1. E. M. Roth, R. J. Mumaw and P. M. Lewis, "Enhancing Crew Performance in Complex

- Emergencies: What We Can Learn From Simulator Data," Proc. of the ANS Topical Meeting on Computer-based Human Support Systems: Technology, Methods, and Future, Philadelphia, Pennsylvania, June 25-29, 1995.
2. H. Ujita, R. Kawano and S. Yoshimura, "An Approach for Evaluating Expert Performance in Emergency Situations," Reliability Eng. and System Safety, Vol. 47, pp. 163-173, 1995.
  3. Y. Yamaguchi *et al.*, "Human Performance Experiment Using A CRT-based Simulator in JAERI," Proc. of the Post ANP'92 Conference Seminar on Human Cognitive and Cooperative Activities in Advanced Technological Systems, Kyoto, Japan, Nov. 4-5, 1992.
  4. T. Ohtsuka *et al.*, "Nuclear Power Plant Operator Performance Analysis Using Training Simulators," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 31, No. 11, pp. 1184-1193, Nov. 1994.
  5. S. W. Cheon *et al.*, "An Approach to Modeling Operator's Cognitive Behavior Using Artificial Intelligence Techniques in Emergency Operating Event Sequences," Proc. of the '94 KNS Spring Meeting, Pohang, May 28, 1994.
  6. Y. H. Lee *et al.*, "Development of an Operator's Cognitive Task Model Using Artificial Intelligence Techniques in Emergency Operating Event Sequences," Proc. of the ANS Topical Meeting on Computer-based Human Support Systems: Technology, Methods and Future, Philadelphia, June 25-29, 1995.
  7. J. Rasmussen, Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering, Amsterdam: Elsevier, 1986.
  8. 서상문, 천세우, 이용희, "운전원 직무수행 오류 유형 사례분석을 통한 비상운전절차서의 적합성 분석," 한국원자력학회 '95 춘계학술발표회, 울산, 1995. 5. 26-27.
  9. 이용희, 서상문, 천세우, "훈련용 시뮬레이터를 이용한 원전 비상운전작업특성에 대한 검토," 대한인간공학회 '95 춘계학술발표회, 대구대, 1995. 4.14-15.
  10. E. M. Roth *et al.*, NUREG/CR-6208: An Empirical Investigation of Operator Performance in Cognitively Demanding Simulated Emergencies, Washington D.C., July 1994.
  11. 이정운 외, 인간공학기술개발: 인적행위분석 기법 개발, KAERI/RR-1490/94, 제3차년도 연차보고서, 한국원자력연구소, 1995. 7. 20.