

원자력발전소의 교대근무체계하에서 발생한 인적오류 시간분포

박근옥, 이정운
한국원자력연구소, 인간공학연구팀

Abstract

This paper describes the rotating shift system managed in Korean nuclear power plants and the retrospective analysis procedure of incidents induced by erroneous actions of plant personnel. It also describes the analysis results which include time distribution of erroneous actions occurred under the rotating shift system.

1. 서론

총 10기(가압경수로 9기, 가압중수로 1기)의 원자력발전소가 국내에서 상업운전되고 있으며, 8기(가압경수로 5기, 가압중수로 3기)가 건설중에 있다. 현재 상업운전중인 모든 원자력발전소는 6조 3교대라는 교대근무체계에 따라 전력생산 업무를 수행한다. 발전소를 운전하는 과정에서 발생하는 기기의 고장 또는 발전소 종사원의 잘못(인적오류)으로 인한 발전정지 사건은 발전소 현장 운전원들에 의하여 분석되며, 그 결과는 발전정지 사례문서로써 보고된다. 1978년, 최초의 원자력발전소가 고리부지에서 상업운전을 개시한 이래, 원자로 또는 터빈정지를 초래한 불시 발전정지사건은 1992년말 현재 총 255건에 이른다. 본 연구에서는, 과거에 발생하였던 불시 발전정지사건 자료를 사용하여, 사건에 내포된 인적오류의 유형과 원인을 분석하는 발전정지사건 분석절차(Retrospective Analysis Procedure)에 따라 255건의 발전정지사건을 분석하였고, 발전정지에 직접적으로 기여한 인적오류의 발생시간분포를 교대근무 시간대별로 분석하였다.

2. 원자력발전소의 교대근무체계

원자로와 터빈발전기를 정지시키지 않고 전력을 지속적으로 생산할 목적으로 순환 교대근무체계가 국내의 모든 원자력발전소에 적용되고 있다. 각각의 순환교대근무조는 12-15명의 운전원들로 구성되어 있다. 1989년 전반까지는 5조 3교대 체계가 적용되었다. 이 교대근무체계는 1989년 후반부터 6조 3교대 형태로 변경되었다. 교대근무체계의 변경에는 고리 원자력연수원에서 수행된 연구결과가 영향을 미쳤다[1]. 즉, 교대근무에 따른 불규칙한 생활 패턴, 정신적 및 육체적 피로, 교대근무 운전원의 교육훈련 시간 부족 등과 같은 문제점을 개선시킬 필요가 있다는 연구결과를 반영한 것이다.

1989년 후반부터 국내의 모든 원자력발전소는

6조 3교대 순환 교대근무체계에 따라 운영되고 있다. 표 1은 6조 3교대의 순환 교대근무체계를 보인 것이다. 각 운전조의 순환교대근무는 9주간의 3교대 근무, 소속된 발전소에서의 4주간 OJT, 7주간의 3교대 근무, 고리 원자력연수원에서의 4주간 훈련을 순환반복하며 이루어진다. 어떤 시점에서 6개 교대근무조중 4개조가 Day (08:00 - 16:00, 8시간), Evening (16:00 - 23:00, 7시간), Night (23:00 - 08:00, 9시간) 순서로 구성된 교대근무 운전작업에 참여한다. 4일간의 Day와 Evening 교대근무후에는 1일간, Night 교대근무후에는 2일간의 휴식시간이 주어진다. Day, Evening, Night의 교대근무에 참여하지 않는 나머지 2개 운전조는 고리 원자력연수원에서 훈련(강의 및 시뮬레이터 실습교육)을 받거나, 자신이 소속된 발전소에서 OJT(일근작업으로 발전소 운전작업 지원)를 수행한다.

3. 발전정지사건 분석절차

6조 3교대 체계로 운영되는 원자력발전소에서 발전정지 사건이 발생하면 현장 운전원들이 사건발생의 원인을 분석하고 분석결과를 발전정지사건로써 관련 기관에 보고한다. 현장에서 작성하여 보고한 발전정지사건 자료의 내용은 발전소를 구성하는 기기 및 설비들의 이상현상과 고장내용에 대한 상세한 정보를 포함하고 있다. 또한, 원자력발전소에서 실제로 발생한 발전소 종사원의 잘못된 행위에 관한 정보를 포함하고 있으므로 인적오류연구에 유용한 자료로써 활용될 수 있다. 그러나, 발전정지사건자료가 발전소를 구성하는 기기 및 설비의 문제점들에 대해서는 비교적 일관성 있게 기술하고 있는 반면, 발전소 종사원(운전원)들의 작업내용에 대해서는 충실하지 못한 경향을 띄고 있다. 따라서, 발전정지사건 자료의 내용을 최대한 활용하여 인적오류연구에 활용할 목적으로 그림 1과 같은 분석절차가 개발되었다[2]. 분석은 다음과 같은 7단계 과정으로 수행되며, 분석과정에서 표 2와 같은 분석양식이 사용된다.

1단계 : 발전정지사건 자료의 내용을 재구성한다. 즉, 발전정지가 발생하는 과정에서 수행된 작업내용(발전소의 상태변화 및 종사원의 수행작업)을 보다 작은 단위의 작업내용으로 세분화시키고, 작업이 수행된 시간순서에 따라 재배열시킨다. 세분화된 개개의 작업내용들은 특정 시간에 발생되었거나 수행된 단위사건들이다.

2단계 : 원자력발전소를 구성하는 요소(사람, 기기 및 설비, 환경)들중 어떠한 구성요소들간의 상

호작용을 통하여 개개의 단위사건이 발생하였는지 분석양식에 내용을 기술한다.

3단계 : 작업양식을 사용하여 나열한 단위사건들중 정상적인 발전소 운전에 장애를 초래한 단위사건들을 선별한다. 선별된 사건들중 발전소 종사원과 발전소 기기 또는 설비들과의 상호작용 결과로써 발생한 사건은 주요사건(Critical Event)으로 정의한다. 주요사건은 발전정지와 관련된 발전소 종사원의 잘못된 행위(Erroneous Actions)에 관한 실마리 정보를 담고 있다.

4단계 : 선별된 개개의 주요사건들에 대하여 종사원의 잘못된 행위의 개입 가능성을 판별한다. 만약에 어떤 주요사건이 잘못된 종사원의 행위를 내포하고 있다면, 해당되는 주요사건은 인적오류 분석을 필요로 하는 촛점사건(Focal Event)으로 정의한다. 선별된 모든 주요사건들이 종사원의 잘못된 행위와 무관하다면 발전소 기기 또는 설비의 문제점 때문에 발전정지가 발생하였으므로 인적오류 분석을 진행하지 않는다.

5단계 : 고안된 오류유형 분류표[2]를 사용하여 촛점사건이 어떠한 유형의 인적오류 유형에 해당하는지 결정한다.

6단계 : 고안된 인적오류 원인 분류표[2]와 분석 작업양식에 기술된 단위사건들의 작업내용을 사용하여 촛점사건의 인적오류 원인분석을 수행한다.

7단계 : 발전정지와 관련된 인적오류의 분석결과, 발전소 기기 및 설비의 개선 권고사항 등을 종합적으로 정리한다.

4. 인적오류 발생 시간대 분석

1978년부터 1992년까지 보고된 불시 발전정지 사례 자료[3] 255건을 분석한 결과, 모두 78건의 발전정지사례가 발전소 종사원의 인적오류로 인하여 발생된 것으로 드러났다. 78건의 발전정지 사례를 대상으로 인적오류가 발생한 시간을 분석하였다. 그 결과, Day 교대근무 시간대(08:00-16:00)에서 41건, Evening 교대근무 시간대(16:00-23:00)에서 11건, Night 교대근무 시간대(23:00-08:00)에서 10건의 발전정지 사례가 인적오류로 인하여 발생하였다. 나머지 16건의 발생정지 사례는 인적오류가 발생한 시간을 명확하게 결정할 수 없었다. 그림 2는 Day, Evening, Night 교대근무 시간대에서 발생한 인적오류의 발생시점을 보인 것이다.

Day 교대근무 시간대에서 가장 많은 인적오류가 발생하고 있다. 원자력발전소 현장에서 Day 교대근무 시간대에 각종 점검 및 시험작업과 유지보수작업이 수행되고 있다는 사실을 감안하면 가장 많은 인적오류의 분포를 보이는 것은 당연하다. Day 교대근무 시간대중 10:00 - 11:30과 13:30 - 16:00 시간대 동안에 다수의 인적오류가 발생한다는 사실이 특기할만하다. Evening 교대근무 시간대에서는 교대근무의 시작시점 시간대(16:00-17:00)에서 인적오류가 주로 발생하고 있는 것으로 나타났으며, Evening 교대근무의 나머지 시간대는 어떤 집중적인 분포현상을 보이지는 않고 있다. Night 교대근무에서는 원자력발전소의 운전에 긴급하지

않은한 점검시험 또는 유지보수 작업을 수행하지 않고 있다. 그러나, 인적오류의 발생건수가 Evening 교대근무 시간대와 유사하게 발생하고 있다는 점에서 주목할만하다. Night 교대근무에서 인적오류가 주로 발생하는 시간대는 23:00 - 23:30, 02:00 - 03:00, 05:30 - 07:30의 시간대이다.

5. 결론

1978년부터 1992년까지 보고된 원자력발전소 불시정지 사례들중 약 30%에 해당하는 78건의 발전정지 사건이 발전소 종사원의 인적오류가 원인이 되어 발생한 것으로 나타났다. Day, Evening, Night 교대근무 시간대별로 인적오류의 발생시점을 분석한 결과, Day 교대근무 시간에 인적오류의 절반이상이 발생한 것으로 나타났다. 분석작업을 수행하기 전에는, 점검시험 또는 유지보수 작업이 거의 수행되지 않고 있는 Night 교대근무 시간대에서의 인적오류 발생율이 많지 않을 것으로 예상했으나, Evening 교대근무 시간대와 유사한 발생율을 보였다. 이 사실은 국내 원자력발전소 종사원의 Night 교대근무에 따른 관련 문제점 연구의 필요성을 보여주고 있다.

인적오류의 발생시간 분석을 수행하는 과정에서, 교대근무체계가 5조 3교대에서 6조 3교대로 변화된 이후, 이 변화가 인적오류의 발생율에 어떤 영향을 미쳤는가에 대한 상관관계 분석을 시도하였다. 그러나, 특별한 관계성을 발견하지 못하였다. 이는 1987년 이전에 작성 보고된 발전정지사례 자료의 내용이 상관관계 분석에 활용할 수 있을 정도의 충분한 상세성을 갖고 있지 못하기 때문이다.

본 연구의 인적오류 발생 시간분포 분석결과, 원자력발전소의 안전성과 가동성을 높이기 위하여, 인적오류가 집중적으로 발생하는 시간대에서의 발전소 종사원에 대한 관리감독의 강화가 필요함을 보여주고 있다. 또한, 장기적으로는 인적오류가 집중적으로 발생하는 교대근무 시간대에서의 운전원 작업에 관한 관련 연구를 수행하여, 인적오류를 저감시킬 필요가 있다.

(본 연구는 과학기술처에서 시행하는 원자력연구개발사업으로 수행되었음)

참고문헌

- [1] 윤금옥, "원자력발전소 현장교육 활성화 방안", 한국전력공사, 고리 원자력본부 연수원, 연구발표논문집, 1987년, P111-145.
- [2] KAERI/RR-1490/94, 이정운 외, 인적행위분석 기법개발, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1994년.
- [3] 원자력발전소 발전정지 사례집(1978년-1992년 발간 자료), 한국전력공사.

표 1 원자력발전소의 순환교대근무체계

주	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
운전조 A	교대근무 (9 주)									OJT			교대근무 (7주)						훈련					
운전조 B	훈련			교대근무 (9주)									OJT			교대근무 (7주)								
운전조 C	교대근무(7주)			훈련			교대근무 (9주)									OJT			교대근무					
운전조 D	교대근무 (7주)			훈련			교대근무 (9주)									OJT								
운전조 E	OJT			교대근무 (7주)						훈련			교대근무 (9주)											
운전조 F	교대근무(9주)			OJT			교대근무 (7주)						훈련			교대근무(9주)								

일	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
운전조																											
A 조	D	D	D	D	x	E	E	E	E	x	N	N	N	N	x	x	D	D	D	D	x	E	E	E	E	x	N
C 조	E	x	N	N	N	N	x	x	D	D	D	D	x	E	E	E	E	x	N	N	N	N	x	x	D	D	D
E 조	N	N	x	x	D	D	D	D	x	E	E	E	E	x	N	N	N	N	x	x	D	D	D	D	x	x	E
F 조	x	E	E	E	E	x	N	N	N	N	x	x	D	D	D	D	x	E	E	E	E	x	N	N	N	N	x
B 조	고리 원자력연수에서 4주간의 훈련																										
D 조	자신이 소속된 발전소에서 OJT (발전 운전작업 지원)																										

(주) D : Day(08:00-16:00), E : Evening(16:00-23:00), N : Night(23:00-08:00), x : 휴일

표 2 발전정지사례 분석을 위한 작업양식

Retrospective Analysis 작업양식 (1 / #)						
사건제목 : 급수펌프 Coupling Crash에 의한 발전정지						
순서	일자	시간	단위사건 발생내용	상호작용 경로 (상호작용 내용)	운전 문제점	비고
1	..	..	.....	.....	.....	.....
2	..	..	.....	.....	.....	.....
3	1992 10/22	07:18	"Radial Bearing Vibration High of Main Feed Water A Pump" 경보가 중앙 제어실 판넬상에 계속 발생함	주급수계통-경보시스템 (고진동 상태의 경고)		
4	1992 10/22	07:18	중앙제어실 운전원이 주급수 펌프 A를 정지시키지 않고 계속 운전함	주급수 펌프- 제어실 운전원 (계속적인 운전)	주급수 펌프 A를 즉시 정지시키지 않음	focal event
5	1992 10/22	09:11	주급수 펌프 A의 Radial Bearing이 파손되어 주급수 펌프 A가 자동정지됨.	주급수계통-주급수펌프 (self protection)	.....	.....
6	..	..	.....	.....	.....	.....
7						
8						

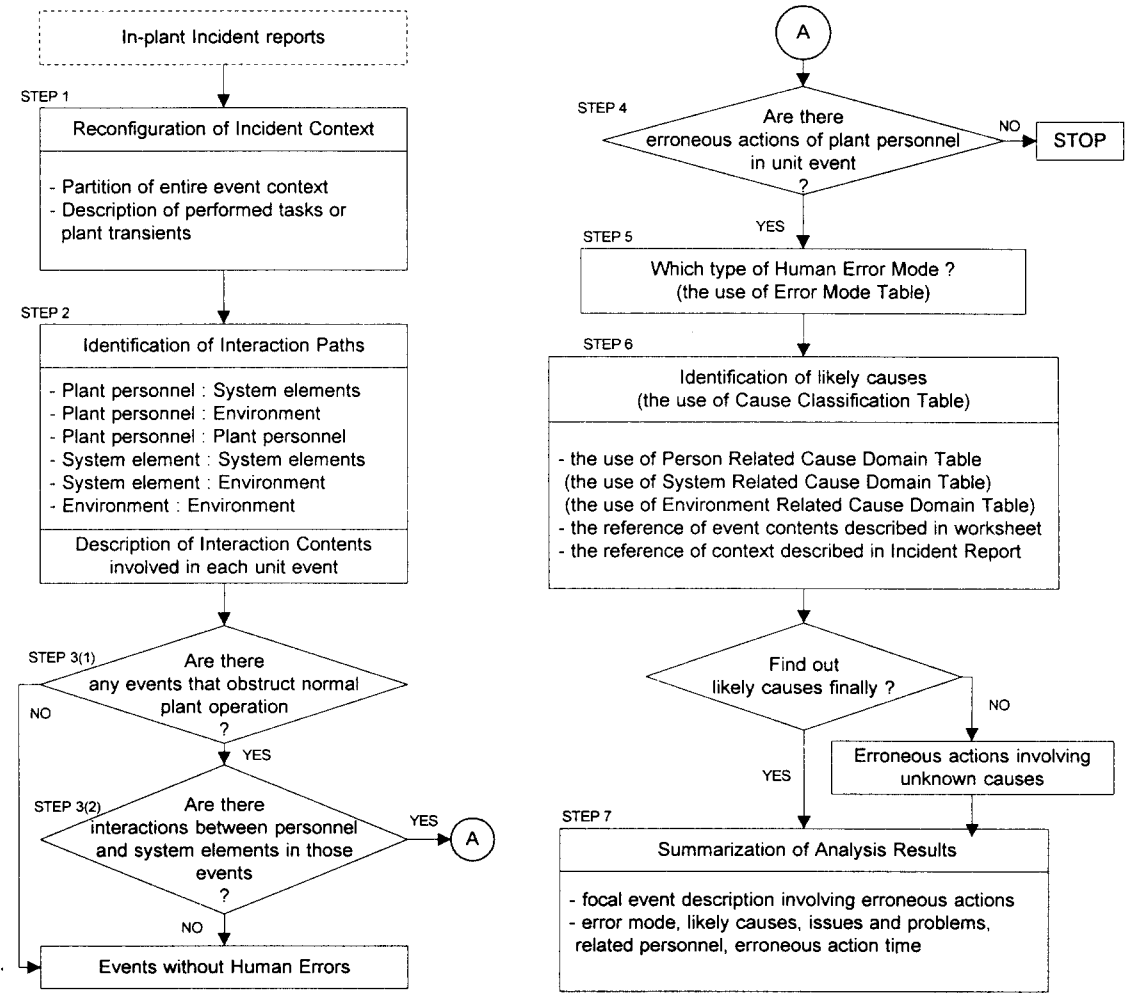


그림 1 발전정지사례 자료 분석절차

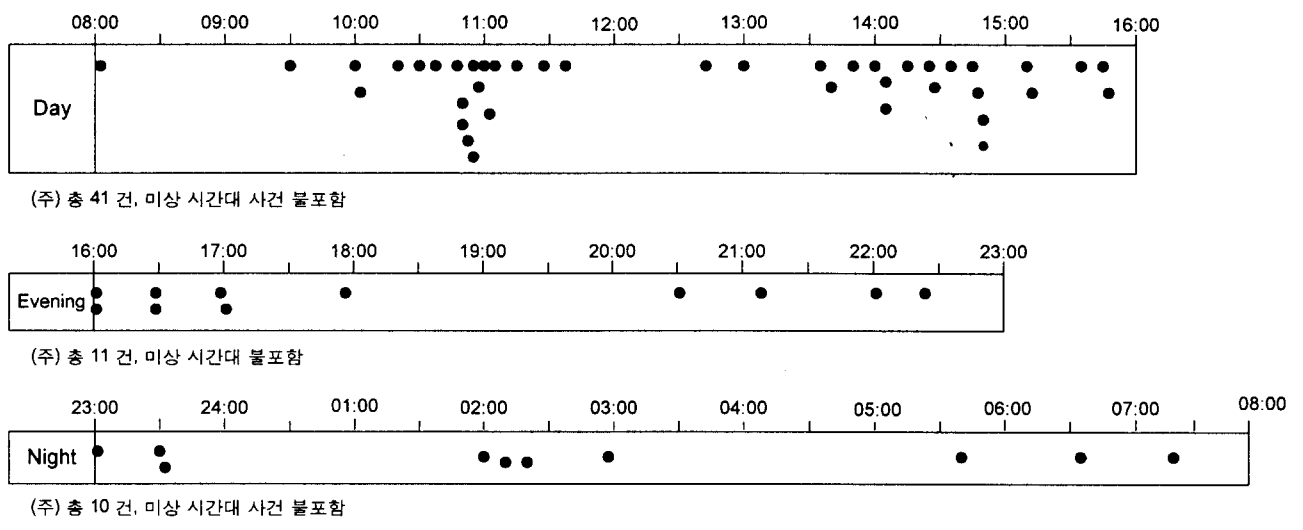


그림 2 교대근무 시간대별 인적오류 발생 시간분포