

국내 원자력발전소 인적오류사례의 추이 분석

이정운, 박근옥

한국원자력연구소, 인간공학연구팀

Abstract

국내 원자력발전소의 발전정지사례에 대해 원전 종사원이 분석한 자료를 수록하여 발간하는 원자력발전소 발전정지사례집을 이용하여 인적오류가 개입된 것으로 판단된 총 77건의 불시정지 사례를 추출하여, 인적오류 저감의 우선순위가 높은 원자력발전소 작업분야를 도출하기 위한 분석을 수행하였다. 이를 위하여, 먼저, 인적오류가 개입된 발전소 계통, 인적오류 발생시의 작업상황 및 작업유형, 그리고 인적오류의 유형에 대한 분류체계를 작성하였다. 발전소 근무 경험을 바탕으로 사례별로 발전정지에 가장 직접적인 영향을 미친 작업행위를 구분하고, 이 행위에 대해 작성된 분류체계의 해당항목을 판정하였다. 이 사례별 분석결과를 이용하여 발전소 계통, 작업상황, 작업유형, 오류유형 등, 4가지 항목에 대하여 오류발생의 추이를 분석하였으며, 또한 발전소 계통과 작업상황, 계통과 작업유형, 작업상황과 작업유형, 작업유형과 오류유형 등, 항목간 오류발생 연관성을 조사하였다. 이 결과로 인적오류의 발생률이 높은 발전소 계통, 작업상황, 작업유형 및 오류유형이 구분되었다.

1. 서론

인적오류는 원자력발전소의 안전성과 가동성에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 미국 TMI-2 원전과 구소련의 체르노빌 원전에서 발생한 사고가 인적오류가 개입되어 발생하였다는 사실이 밝혀지고 나서, 원자력발전 선진국에서는 1980년대 초반부터 인간공학연구가 매우 활발해졌다. 일반적으로 30~50%에 달하는 원자력발전소 사건이 인적오류가 개입되어 발생한 것으로 알려져 있다[1, 2]. 원자력발전소에서의 인적오류를 줄이기 위한 노력은 제어실 설계 개선, 신형제어실 설계, 작업지원시스템의 개발, 인간공학적 규제요건의 강화, 인적오류의 인지공학적 연구 등, 다방면으로 이루어져 왔다. 이러한 인적오류를 줄이기 위한 노력에서 중요한 점은 원자력발전소에서 이루어지는 작업의 특성을 충분히 고려해야만 효과적이라는 점이다. 그러나, 원자력발전소가 대규모의 시스템이고, 또한 다양한 작업이 이루어지고 있다는 점을 감안하면, 작업의 특성을 충분히 고려하여 인적오류 저감의 실효성있는 연구를 선정하고 수행하는 것은 매우 힘들다고 하겠다.

본 연구는, 국내 원자력발전소에서 발생하는 인적오류를 줄이기 위한 연구를 효과적으로 도출하기 앞서, 우선순위가 높은 대상 작업 및 분야를 모색하기 위해 수행되었다. 국내 원자력발전소에서 발생한 발전정지사례에 대한 보고자료인 원자력발전소 발전정지사례집[3]을 이용하여 인적오류가 개입된 불시정지사례를 추출하고 이들에 대한 분석을 수행하였다.

2. 인적오류사례의 추이분석

1984년부터 1993년까지 발간된 원자력발전소 발전정지사례집에 수록된 1978년부터 1992년까지의 사례중 불시정지에 해당하는 255건을 추출하였다. 일반적으로 발전정지에는 연차보수와 같이 계획에 따라 발전정지를 시킨 계획정지와, 그외 기기고장 등에 의해 계획치 않은 발전정지가 발

생한 불시정지가 포함된다. 그리고, 일부 초기에 발간된 발전정지사례집에는 발전정지에는 이르지 않고 기기의 비정상상태에 따른 사례들도 수록되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 일단 분석대상을 불시정지사례로 국한하였다. 원자력발전년보[4]에 따르면 불시정지사례중 과실에 의한 사례는 34건으로 전체 불시정지사례수의 13% 정도이다. 여기에서는 오조작 등 명백한 과실로 간주되는 경우에만 인적오류로 구분한 것으로 간주된다. 그러나, 본 연구에서는 부적합한 인적행위에 의해 발전소의 정상운영에 저해가 초래된 경우를 인적오류로 정의하고, 이를 기준으로 77건의 불시정지사례가 인적오류가 개입되어 발생한 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구에서의 총 불시정지사례에 대한 인적오류 개입사례 발생률은 30% 정도인 것으로 산출되었다. 그림 1은 본 연구에서 추출한 불시정지사례와 인적오류가 개입된 사례의 연도별 발생건수를 보여주며, 그림 2는 총 불시정지사례중 인적오류가 개입되어 발생한 불시정지사례의 비율을 연도별로 보여준다. 그리고, 그림 3은 원자로 1기당 연도별 불시정지건수와 인적오류 개입건수를 연도별로 나타낸 것이다.

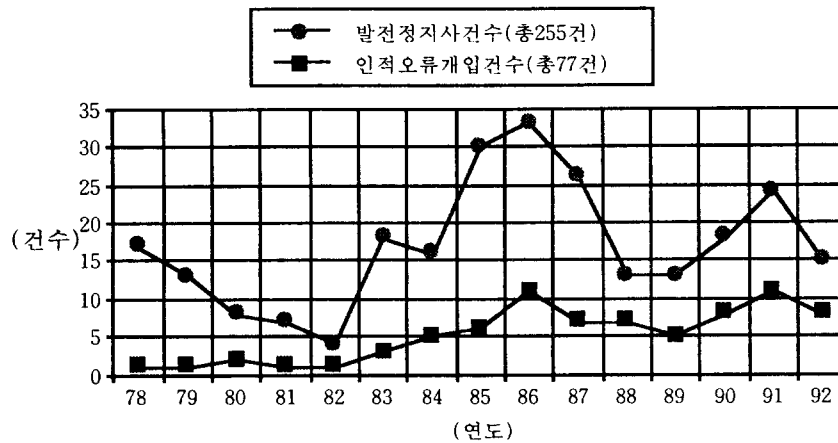


그림 1. 연도별 불시정지건수 및 인적오류가 개입된 불시정지건수

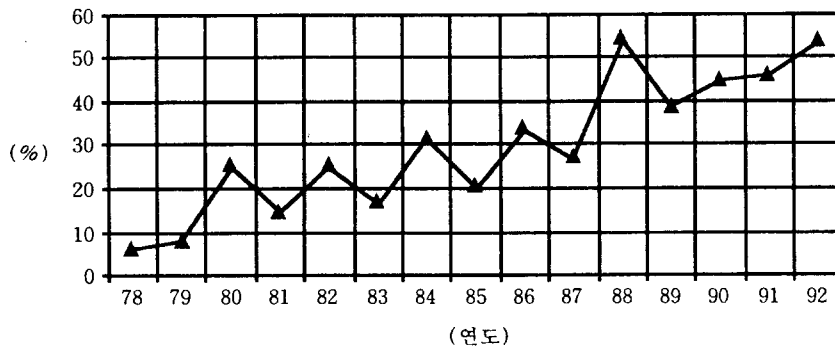


그림 2. 연도별 총 불시정지사례중 인적오류개입 불시정지사례 발생률

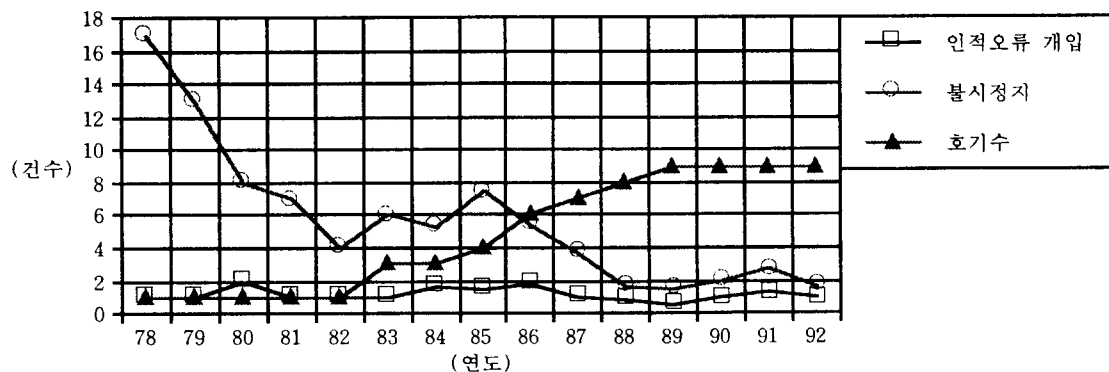


그림 3. 원자로 1기당 연도별 불시정지건수 및 인적오류 개입건수

그림 2에서와 같이, 인적오류가 개입되어 발생하는 불시정지의 발생률이 점차 증가하고 있는 것으로 나타나 있다. 이는 그림 3에서 1기당 불시정지건수는 줄어드는 경향이 있으나 1기당 인적 오류 개입사례의 건수는 줄지 않는 것으로 미루어 볼 때, 기기제작기술의 발달로 기기고장 등에 의한 사례수는 줄어드는 반면, 인적오류에 의한 사례수는 줄어드는 추세가 미미하여 상대적으로 인적오류에 의한 불시정지사례의 발생률이 증가하는 것으로 해석된다. 이러한 현상은 일본 등, 다른 나라의 경우에도 유사하게 나타난다[5].

위와 같이 추출한 77건의 사례에 대해, 발전정지에 주된 영향을 미친 작업행위를 구분하고 이에 대한 작업 관련 발전소 계통, 작업시의 상황, 작업유형, 오류유형의 분석을 아래의 표 1과 같은 분류체계를 사용하여 수행하였다.

표 1. 오류사례분석에 사용된 분류체계

주계통분류	1차계통	원자로 제어 및 보호계통, 원자로 냉각재 계통, 가압기 제어 및 보호계통, 증기발생기 제어 및 보호계통, 잔열제거계통, 화학체적제어계통, 핵계측계통, 격납용기 진공계통, 공학적 안전설비계통, 일차기냉각수계통	
	2차계통	주증기 공급 및 덤프계통, 증기재열 및 추기계통, 보조증기계통, 터빈제어 및 보호계통, 터빈보조계통, 발전기제어 및 보호계통, 발전기 보조계통, 주급수계통, 보조급수계통, 응축 및 복수계통, 순환수계통, 이차냉각수계통, 소내전원공급계통, 전력전송계통	
	기타계통	압축공기계통, 핵연료취급계통, 폐기물처리계통, 공기조화계통, 방사선감시계통, 기타 설비계통	
작업상황분류	정상운전, 정기/주기점검, 긴급유지보수, 계획유지보수, 연차보수		
작업유형분류	제어실 운전, 현장기기운전, 계측제어작업, 기계작업, 전기작업, 기타		
오류유형분류	작업시간상의 잘못	Too Early, Too Late	
	작업수행 방식 잘못	Too Fast, Too slow, Wrong direction	
	작업대상 잘못	train, similar, unrelated	
	잘못된 작업순서	순서바꿈	
	작업누락	일상점검소홀, 상태표시 확인누락, 경보/비정상상태의 원인제거누락, 선행조치누락/다음작업착수, 마무리조치누락, 성능시험누락, 일부대상에 대한 조치누락, 작업전체누락	
	작업수행의 정량적 결함	Too much, Too little	
	작업수행의 질적결함	청결불량, 기준미달작업, 기준미달자재사용	
	잘못된 작업의 수행	영향간과한 잘못된 조치, 의도되지 않은 동작, 불필요한 조치	
	기타 작업미숙	운전미숙	

발전소 계통의 분류에서는, 상위계통으로 1차, 2차 및 기타계통으로 구분하고, 이들에 대한 상세계통을 분류하였다. 작업시의 상황에 대해서는, 통상적인 원자력발전소 운전(정상운전), 규제에 따른 기기의 점검 및 시험, 또는 기술사양에 규정된 점검 및 시험(정기/주기 점검), 돌발적으로 발생하는 비정상 기기의 보수(긴급유지보수), 발전소 운영계획에 따라 계획된 보수(계획유지보수), 계획유지보수중 연차적으로 핵연료교체시 수행하는 대규모 보수(연차보수)로 구분하였다. 작업유형의 분류에서는, 발전소 시스템에 직접적으로 행해지는 작업을 대상으로 작업자의 직무에 따라 제어실 운전, 현장기기운전, 계측제어작업, 기계작업, 전기작업으로 구분하였으며, 사례집의 내용상 구분이 불분명하거나 발전소 운전과는 관계없는 외부인의 경우를 포함하여 기타로 구분하였다. 오류유형에 대해서는, Swain의 재래식 인간공학적 접근에 의한 분류체계[6], information processing 관점에서의 오류분류체계-GEMS[1] 또는 Rouse의 분류체계[7]- 등이 사용가능하나, 작업내용과는 독립적인 일반적 오류유형을 구분하고 있거나 인지적인 사항에 치중하고 있어, 사례집의 보고자료에 기반한 본 연구의 목적상 작업내용을 반영할 수 있는 오류유형 분석에는 부적합하다고 판단하였다. 따라서, 사용가능한 기존의 분류체계를 기반으로 본 연구에 적합하다고 판단되는 오류유형분류를 작성하였으며 사례분석의 진행에 따라 일부항목을 보완하여 사용하였다.

특히, 작업누락과 잘못된 작업의 수행을 부적합한 행위의 내용을 참조하여 구체화하였으며, 기존 오류유형분류에는 보이지 않지만 오류행위의 구분상 필요하다 판단하여 작업수행의 질적 결함이라는 항목을 추가하고 상세항목을 분류하였다. 그리고, 일부 제어실 운전중의 오류와 같이 작업내용이 구체적이지 못한 경우에 대해서는 작업미숙이라는 용어를 사용하기로 했다. 이와 같은 오류유형분류는 원자력발전소에서 발생가능한 모든 오류유형을 포함하고 있지는 않지만, 추출된 77건의 사례에서 발생한 오류유형을 구분하기에는 충분하도록 구성하였다.

표 1과 같은 분류체계를 사용하여 인적오류가 개입된 각 사례에 대해 분석을 수행한 후, 계통별, 작업상황별, 작업유형별, 오류유형별 등, 분류체계의 개별적인 항목에 대해 인적오류 발생건수를 집계하였으며, 또한 계통과 작업상황, 계통과 작업유형, 작업상황과 작업유형, 작업유형과 오류유형에 대해서는 두가지 분류항목을 공통적으로 고려한 오류발생건수를 조사하여 항목간 연관성을 분석하였다.

먼저, 개별항목별 오류발생률의 조사결과는 다음과 같다. 발전소 상위계통에 대한 발생률은 아래의 그림 4와 같으며, 상세계통에 대해서는 그림 5와 같다. 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이, 1차계통 23%, 2차계통 69%, 기타계통 8%로 2차계통과 관련한 인적오류가 많이 발생하였음을 알 수 있으며, 이는 타국의 상황과 유사하다. 상세계통별 오류발생에 대해서는, 2차계통중 주급수계통이 20%, 터빈제어 및 보호계통과 소내전원공급계통이 9%로 높게 나타났으며, 1차계통의 원자로 제어 및 보호계통이 12%로 높게 나타났다.

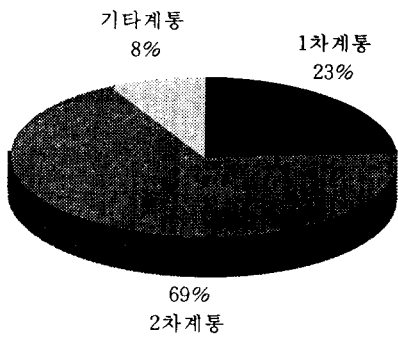


그림 4. 인적오류 관련 상위계통 비교

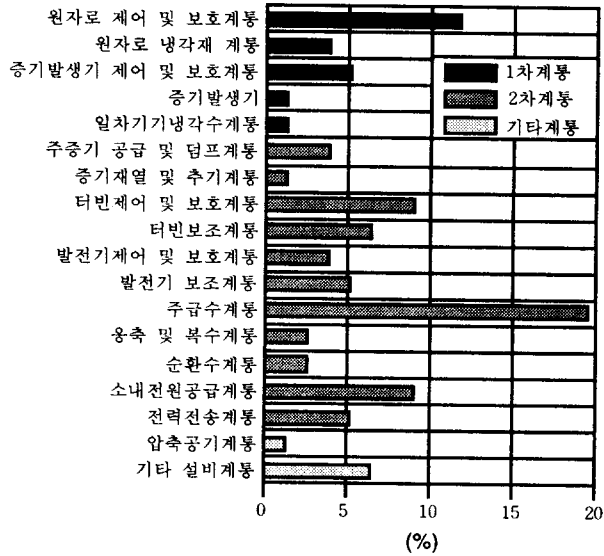


그림 5. 인적오류 관련 상세계통 비교

작업상황 및 작업유형별 오류발생률은 각각 그림 6, 7과 같다. 그림 6에서와 같이, 정상운전, 계획유지보수, 정기점검, 연차보수, 긴급유지보수 순으로 높은 점유율을 가진 것으로 나타났으며, 이는 작업상황의 빈도 또는 행해진 시간과 상관된 결과로 보여진다. 그리고, 작업유형별로는, 그림 7에서와 같이 현장기기운전이 30%로 가장 높았으며, 전기작업(19%), 제어실운전(18%), 기계작업(16%), 계측제어작업(14%), 기타(3%) 순으로 높게 나타났다. 이 결과로부터, 현장에서 이루어지는 현장기기운전, 전기, 기계, 계측제어 작업에서의 오류발생 점유율이 79%에 달함을 알 수 있다. 이는 인적오류의 저감을 위해서는, 그 동안 많은 연구가 수행되어 온 주제어실 뿐만 아니라, 상대적으로 등한시된 현장에서 이루어지는 작업에 대해서도 높은 관심을 가져야 함을 의미한다. 그리고, 오류유형별 발생률은 그림 8에서와 같이 작업누락이 36%로 가장 높게 나타났으며, 잘못된 작업의 수행(16%), 작업대상 잘못(14%), 작업수행의 질적결함(10%), 작업수행의 정량적결함(6%), 작업수행방식 잘못(6%) 등의 순으로 높게 나타났다. 작업누락이 가장 많은 점유율을 가짐은, 200건의 미국 원자력발전소 SER에 대해 Rasmussen이 분석한 결과(34%)와 일치한다[8].

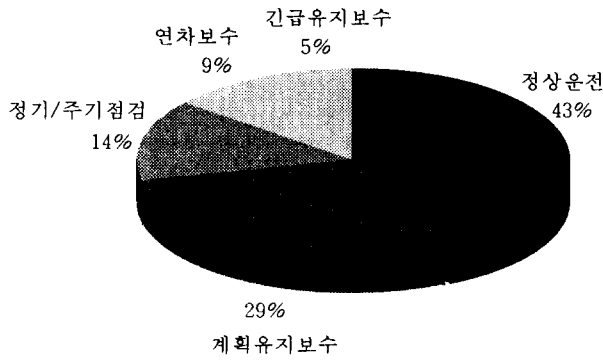


그림 6. 작업상황별 오류발생 비교

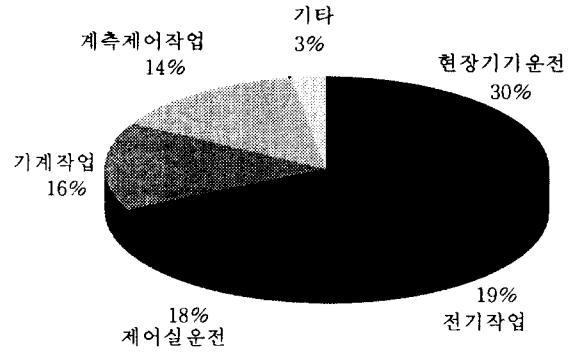


그림 7. 작업유형별 오류발생 비교

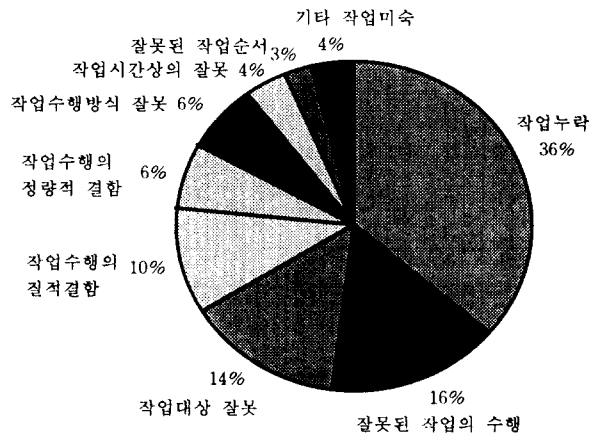


그림 8 오류유형별 발생률

지금까지의 개별분석 항목에 대한 오류발생건수의 분석과 더불어, 분석항목간의 연관성을 고려한 오류발생률의 검토결과는 다음과 같다. 먼저, 작업상황 및 작업유형과 작업관련 계통의 검토 결과는 아래의 표 2와 같다. 표 2에서 작업상황에 따른 계통별 오류발생건수중 3건 이상을 차지한 계통을 보면, 정상운전시에는 주급수계통이 11건으로 압도적으로 많았으며, 원자로 제어 및 보호계통, 증기발생기 제어 및 보호계통, 소내전원공급계통이 각 3건씩으로 많이 발생하였다. 정기점검시에는 원자로 제어 및 보호계통이 4건, 터빈 제어 및 보호계통이 3건으로 다른 계통에 비해 많았으며, 계획유지보수시에는 소내전원공급계통이 4건, 주급수계통이 3건으로 많았고, 연차보수시에는 발전기 보조계통이 3건으로 많이 나타났다. 정상운전시와 계획유지보수시에는 많은 수의 계통에서 오류가 발생하였으나 정기점검, 긴급유지보수, 연차보수에서는 상대적으로 오류발생 계통의 수가 적었다. 마찬가지로, 작업유형에 따른 계통별 오류발생건수가 3건 이상인 경우는, 현장기기운전에 대해 원자로 제어 및 보호계통(5건), 주증기 공급 및 덤프계통(3건), 기타설비계통(3건)이었으며, 전기작업에 대해서는 소내전원공급계통(5건), 발전기 제어 및 보호계통(3건), 발전기 보조계통(3건), 제어실 운전의 경우 주급수계통(6건), 증기발생기 제어 및 보호계통(3건), 기계작업의 경우, 주급수계통(6건), 터빈보조계통(3건)으로 나타났다.

그다음으로 작업상황에 따른 작업유형별 오류발생 검토결과는 그림 9와 같다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이, 정상운전시에는 현장기기운전과 제어실 운전에서의 오류발생 비율이 높게 나타났다. 정기점검시에는 현장기기운전에서, 연차보수시에는 전기작업에서, 계획유지보수시에는 전기작업, 기계작업, 계측제어작업이에서, 긴급유지보수시에는 계측제어 작업에서 오류발생률이 높은 것으로 나타났다.

표 2. 작업상황 및 작업유형에 따른 계통별 오류발생건수

	작업상황					작업유형					
	정상 운전	정기/ 주기 점검	계획 유지 보수	긴급 유지 보수	연차 보수	현장 운전	전기 작업	제어실 운전	기계 작업	계측 제어 작업	기타
원자로 제어 및 보호계통	3	4	1	1		5	1	1		2	
원자로 냉각재 계통	1		2			1				2	
증기발생기 제어 및 보호계통	3		1					3		1	
증기발생기					1				1		
일차기기냉각수계통	1					1					
주증기 공급 및 덤프계통	1	2				3					
증기재열 및 추기계통			1						1		
터빈제어 및 보호계통	1	3	2	1		1	1	2	1	2	
터빈보조계통		1	2	1	1	1			3	1	
발전기제어 및 보호계통	2				1		3				
발전기 보조계통			1		3		3			1	
주급수계통	11		3		1	2		6	6	1	
응축 및 복수계통	2					2					
순환수계통	1		1			2					
소내전원공급계통	3		4				5	2			
전력전송계통	2		2			1	2				1
압축공기계통	1					1					
기타 설비계통	1	1	2	1		3				1	1
계	33	11	22	4	7	23	15	14	12	11	2

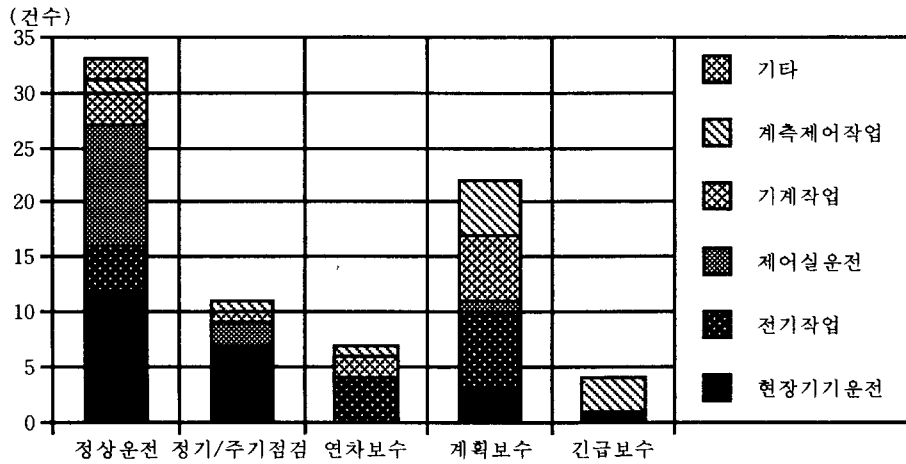


그림 9 작업상황에 따른 작업유형별 오류발생

작업유형에 따른 오류유형의 검토결과는 그림 10과 같다. 현장기기운전에 대해서는 작업누락이 16건으로 타유형의 오류에 비해 압도적으로 높게 나타났으며, 잘못된 작업의 수행이 2건 정도로 나머지 유형의 오류 보다는 많이 발생하였다. 전기작업에 대해서는 작업누락, 잘못된작업의 수행, 작업수행의 질적결함(각 3건 이상 발생한 것으로 나타났으며, 작업대상 잘못이 2건 발생하였다. 제어실 운전의 경우에는, 운전미숙과 작업누락이 다른 유형에 비해서 많이 발생하였으나, 제어실 운전에 대해 발생한 나머지 유형들인 잘못된 작업의 수행, 작업대상 잘못, 작업수행방식 잘못, 작업시간상의 잘못 등과는 큰 차이를 두고 있지 않았다. 기계작업에 대해서는 작업누락과 작업수행의 질적결함(각 4건)이 다른 유형에 비해 높게 나타났으며, 잘못된 작업의 수행이 2건 발생하였다. 계측제어작업에 대해서는, 작업대상 잘못이 다른 유형의 오류에 비해 압도적으로 많이 발생하였으며, 그다음으로 작업수행방식 잘못이 2건 발생한 것으로 나타났다. 표 3은 상세오류유형별 오류발생건수를 작업유형별로 구분한 결과이다.

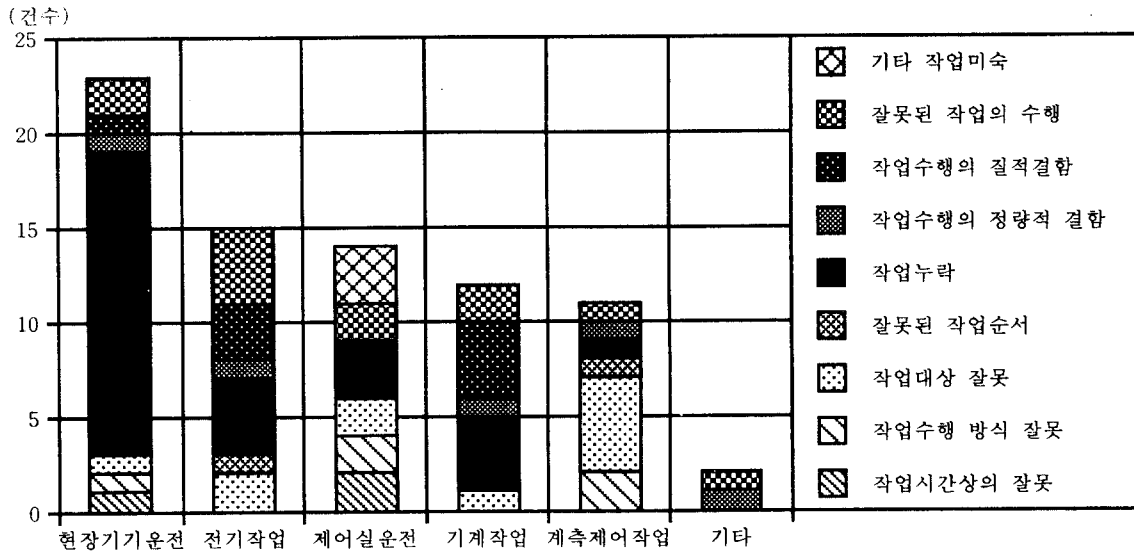


그림 10. 작업유형별 오류유형

표 3. 상세오류유형에 따른 작업유형별 오류발생건수

오류유형		작업유형	현장기기 운전	전기작업	제어실 운전	기계작업	제측제어 작업	기타
작업시간상의 잘못	Too Early		1		2			
	Too Late							
작업수행 방식 잘못	Too Fast				2		2	
	Too slow							
	Wrong direction		1					
작업대상 잘못	train		1		1		1	
	similar			2	1		3	
	unrelated					1	1	
잘못된 작업순서	순서바꿈		1			1		
작업누락	일상점검소홀		2	2			1	
	상태표시 확인누락		4					
	경보/비정상상태의 원인제거누락		3	1	1	1		
	선행조치누락/다음작업착수		1		1	1		
	마무리조치누락		3					
	성능시험누락, 일부대상에 대한 조치누락		2			2		
	작업전체누락		1	1	1			
작업수행의 정량적 결함	Too much		1					
	Too little			1		1	1	1
작업수행의 질적결함	청결불량			2				
	기준미달작업		1			1		
	기준미달자재사용			1		3		
잘못된 작업의 수행	영향간과한 잘못된 조치			1			1	
	의도되지 않은 동작			3		1		1
	불필요한 조치		2		2	1		
기타 작업미숙	운전미숙			3				

3. 결 론

본 연구는 원자력발전소 안전성 및 가동성의 향상에 중요한 인적오류를 저감하기 위해서 우선 순위가 높게 다루어야 할 분야를 모색하기 위해 수행되었다. 우선, 1978년부터 1992년까지 국내에서 발생한 255건의 불시정지사례중 인적오류에 의해 발생된 것으로 판단되는 77건의 사례를 추출하였다. 이 사례들에 대해 인적오류가 관련된 발전소 계통, 작업상황, 작업유형, 오류유형을 구분하고 오류발생에 대한 추이 분석을 수행하였다. 본 연구의 분석 결과, 작업상황과 작업유형을 고려하여 인적오류가 많이 발생한 계통으로는, 1차계통에서 원자로 제어 및 보호계통, 증기발생기 제어 및 보호계통이, 2차계통으로는 주증기 공급 및 덤프계통, 터빈 제어 및 보호계통, 터빈보조계통, 발전기 제어 및 보호계통, 발전기보조계통, 주급수계통, 소내전원공급계통, 전력전송계통 등이 판정되었다. 작업유형별 오류발생률은 현장기기운전이 가장 높았으며, 현장에서 이루어지는 작업이 제어실 운전보다는 높다는 사실이 밝혀졌다. 그리고, 작업상황에 따라 불시정지에 영향을 미친 오류가 많이 발생하는 작업유형이 구분되었으며, 또한 많이 발생한 오류의 유형이 작업유형에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다. 인적오류의 분석이 분석자에 따라 매우 주관적이고, 본 연구에서는 불시정지사례만을 취급하였으나, 본 연구의 결과는, 작업 확인 및 감독, 교육훈련 등, 원전 현장에서 많이 활용되고 있는 인적오류 대응방안을 작업상황과 작업유형에 따라 구체화하는데 도움을 줄 것이며, 또한 앞으로의 인적오류 저감을 위해 집중해야 할 연구대상과 방향의 설정에 많은 도움이 될 것이다. 그리고, 이와 같은 분석을 발생수가 많은 near miss 사례에 대해 수행한다면 인적오류의 저감을 위해 보다 의미있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J. T. Reason, Human Error, Cambridge, Cambridge Press, 1990
- [2] 조병록, 이영철, 원자력발전소 인위적 과실(Human Error)에 대한 고찰, 연구논문집(원자력 기술보수 분야), pp. 319-373, 한국전력공사 고리 원자력연수원, 1988
- [3] 원자력발전소 발전정지사례집, 한국전력공사 원자력발전처, 1984~1995
- [4] 원자력발전년보, 한국전력공사, 1993
- [5] J-HPES 전문가초청 세미나 - 일본의 인적행위 개선 제도, 한국전력공사, 1992
- [6] A. D. Swain, Modelling Response to Nuclear Power Plant Transients for Probabilistic Risk Assessment, *Proc. of the 8th Congress of the Int'l. Ergonomics Association*, Tokyo, August, 1982
- [7] W. B. Rouse and S. H. Rouse, Analysis and Classification of Human Error, *IEEE-SMC*, Voi. 13, 1983
- [8] J. Rasmussen, What can be learned from human error reports?, in K. Duncan, M. Gruneberg & D. Wallis (Eds.), *Changes in Working Life*, London, Wiley, 1980

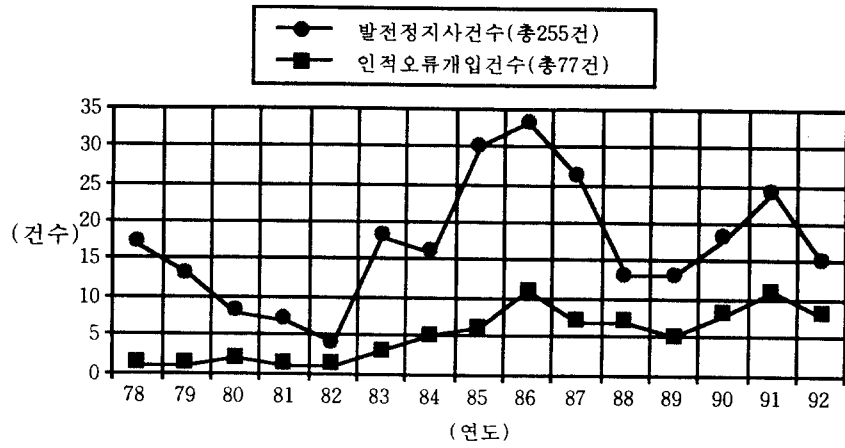


그림 1. 연도별 불법정지건수 및 인적오류가 개입된 불법정지건수

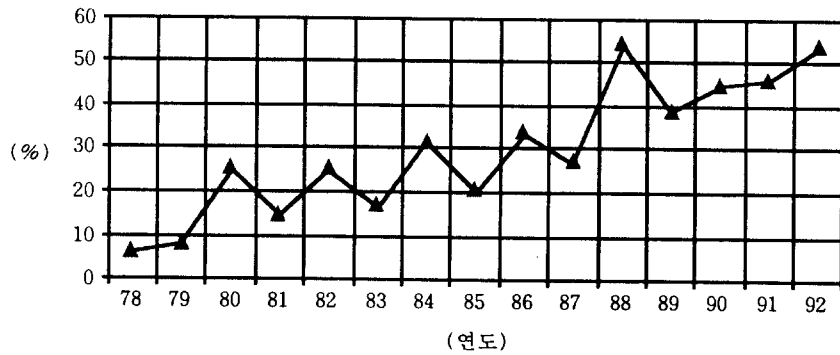


그림 2. 연도별 총 불법정지사례중 인적오류개입 불법정지사례 발생율

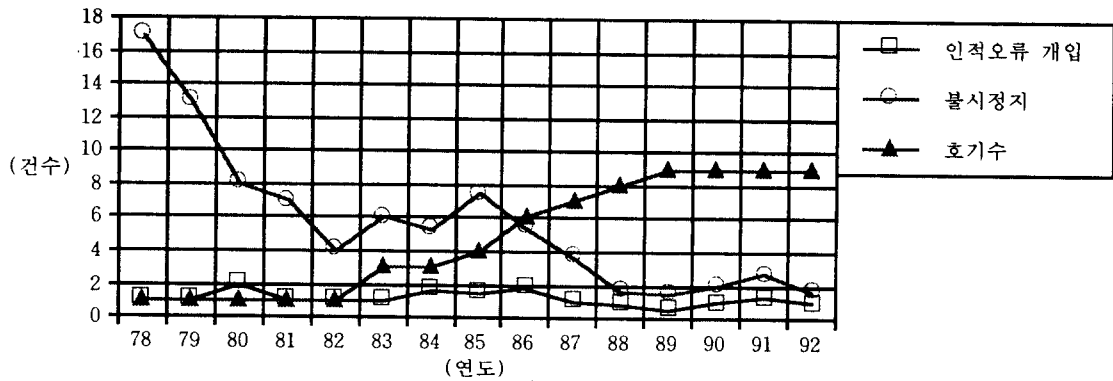


그림 3. 원자로 1기당 연도별 불법정지건수 및 인적오류 개입건수

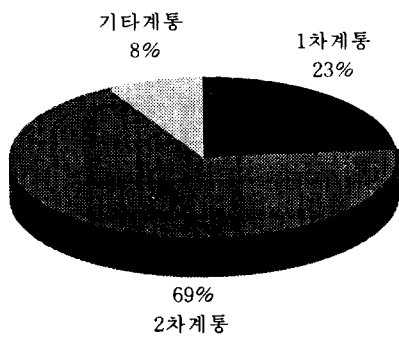


그림 4. 인적오류 관련 상위계통 비교



그림 5. 인적오류 관련 상세계통 비교

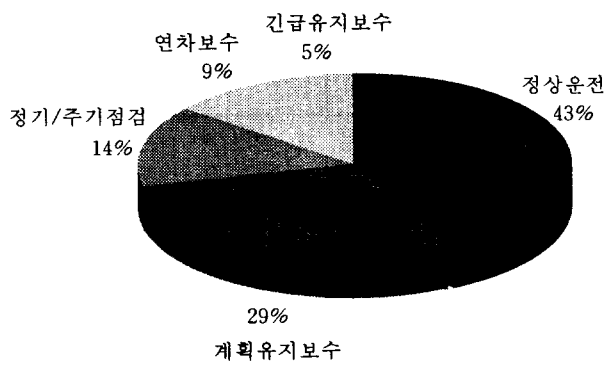


그림 6. 작업상황별 비교

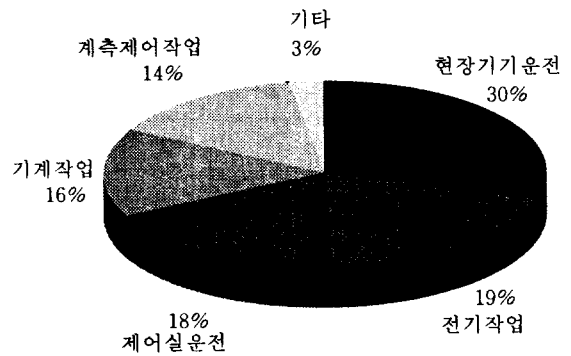


그림 7. 작업유형별 비교

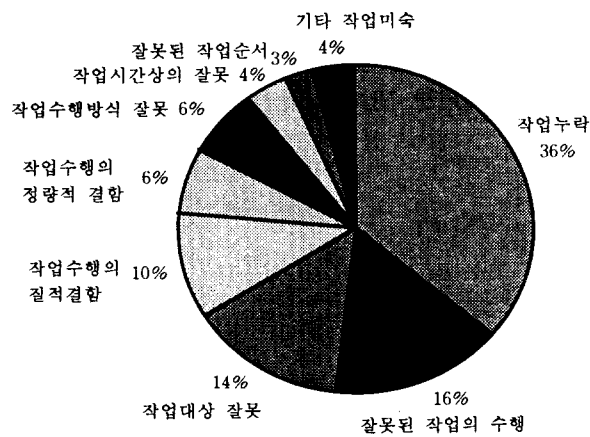


그림 8 오류유형별 발생률

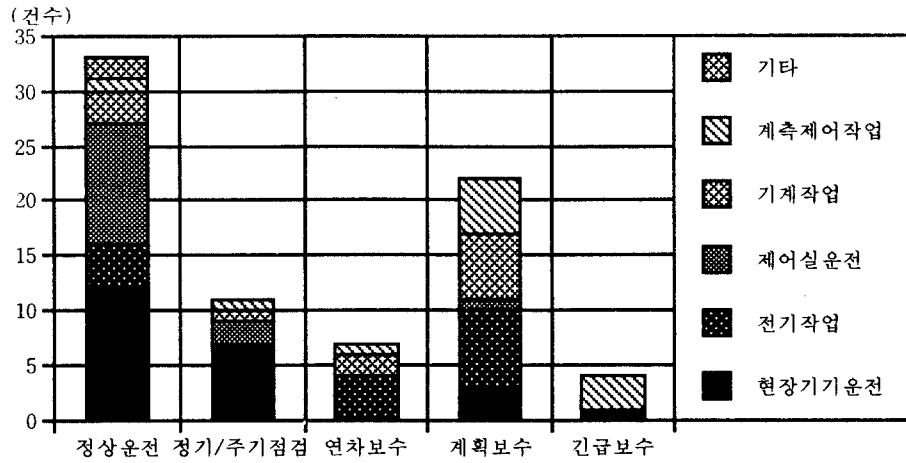


그림 9 작업상황에 따른 작업유형별 오류발생

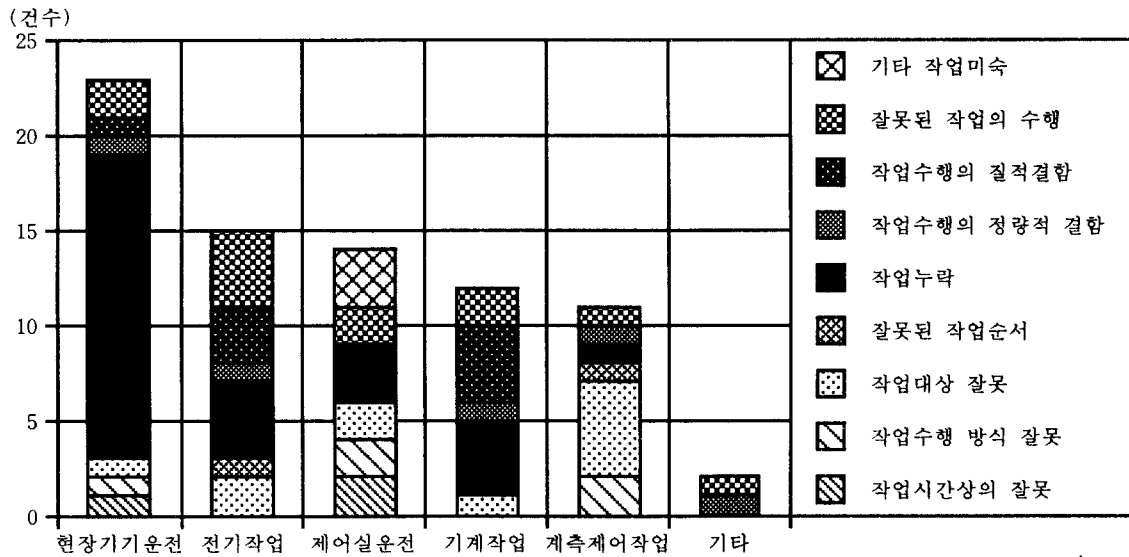


그림 10. 작업유형별 오류유형

표 1. 오류사례분석에 사용된 분류체계

주계통분류	1차계통	원자로 제어 및 보호계통, 원자로 냉각재 계통, 가압기 제어 및 보호계통, 증기발생기 제어 및 보호계통, 잔열제거계통, 화학체적제어계통, 핵계측계통, 격납용기 진공계통, 공학적 안전설비계통, 일차기냉각수계통
	2차계통	주증기 공급 및 덤프계통, 증기재열 및 추기계통, 보조증기계통, 터빈제어 및 보호계통, 터빈보조계통, 발전기제어 및 보호계통, 발전기 보조계통, 주급수계통, 보조급수계통, 응축 및 복수계통, 순환수계통, 이차냉각수계통, 소내전원공급계통, 전력전송계통
	기타계통	압축공기계통, 핵연료취급계통, 폐기물처리계통, 공기조화계통, 방사선감시계통, 기타 설비계통
작업상황분류	정상운전, 정기/주기점검, 긴급유지보수, 계획유지보수, 연차보수	
작업유형분류	제어실 운전, 현장기기운전, 계측제어작업, 기계작업, 전기작업, 기타	
오류유형분류	작업시간상의 잘못	Too Early, Too Late
	작업수행 방식 잘못	Too Fast, Too slow, Wrong direction
	작업대상 잘못	train, similar, unrelated
	잘못된 작업순서	순서바꿈
	작업누락	일상점검소홀, 상태표시 확인누락, 경보/비정상상태의 원인제거누락, 선행조치누락/다음작업착수, 마무리조치누락, 성능시험누락, 일부대상에 대한 조치누락, 작업전체누락
	작업수행의 정량적 결함	Too much, Too little
	작업수행의 질적결함	청결불량, 기준미달작업, 기준미달자재사용
	잘못된 작업의 수행	영향간과한 잘못된 조치, 의도되지 않은 동작, 불필요한 조치
	기타 작업미숙	운전미숙

표 2. 작업상황 및 작업유형에 따른 계통별 오류발생건수

	작업상황					작업유형					
	정상 운전	정기/ 주기 점검	계획 유지 보수	긴급 유지 보수	연차 보수	현장 운전	전기 작업	제어실 운전	기계 작업	계측 제어 작업	기타
원자로 제어 및 보호계통	3	4	1	1		5	1	1		2	
원자로 냉각재 계통	1		2			1				2	
증기발생기 제어 및 보호계통	3		1					3		1	
증기발생기 일차기냉각수계통	1				1				1		
주증기 공급 및 덤프계통	1	2				3					
증기재열 및 추기계통			1						1		
터빈제어 및 보호계통	1	3	2	1		1	1	2	1	2	
터빈보조계통		1	2	1	1	1			3	1	
발전기제어 및 보호계통	2				1		3				
발전기 보조계통			1		3		3			1	
주급수계통	11		3		1	2		6	6	1	
응축 및 복수계통	2					2					
순환수계통	1		1			2					
소내전원공급계통	3		4				5	2			
전력전송계통	2		2			1	2				1
압축공기계통	1					1					
기타 설비계통	1	1	2	1		3				1	1
계	33	11	22	4	7	23	15	14	12	11	2

표 3. 상세오류유형에 따른 작업유형별 오류발생건수

오류유형		작업유형	현장기기 운전	전기작업	제어실 운전	기계작업	계측제어 작업	기타
작업시간상의 잘못	Too Early		1		2			
	Too Late							
작업수행 방식 잘못	Too Fast				2		2	
	Too slow							
	Wrong direction		1					
작업대상 잘못	train		1		1		1	
	similar			2	1		3	
	unrelated					1	1	
잘못된 작업순서	순서바꿈			1			1	
작업누락	일상점검소홀		2	2			1	
	상태표시 확인누락		4					
	경보/비정상상태의 원인제거누락		3	1	1	1		
	선행조치누락/다음작업착수		1		1	1		
	마무리조치누락		3					
	성능시험누락, 일부대상에 대한 조치누락		2			2		
	작업전체누락		1	1	1			
작업수행의 정량적 결함	Too much		1					
	Too little			1		1	1	1
작업수행의 질적결함	청결불량			2				
	기준미달작업		1			1		
	기준미달자재사용			1		3		
잘못된 작업의 수행	영향간과한 잘못된 조치			1			1	
	의도되지 않은 동작			3		1		1
	불필요한 조치		2		2	1		
기타 작업미숙	운전미숙				3			