

원자력 발전소 인적오류의 거시적 분석

Macroscopic Analysis of Human Errors at Nuclear Power Plant

정연섭, 지문구, 김주택
한국수력원자력(주)

요 약

인적 오류를 분류하는 그래프를 고안하였다. 그래프의 노드와 간선으로 인적 오류의 유형을 파악할 수 있으며 간선의 두께로 발생 빈도를 알 수 있다. 각종 노드에 할당되는 자원의 배분에 따라 인적 오류가 저감되도록 경영자원과 연관시켰다. 이 그래프는 개별 인적 오류의 미시적 분석을 축적하여 얻어진다. 미시적 분석도 이 노드와 간선을 선택하여 추가 정보를 입력함으로 수행된다. 또 잎 노드를 통하여 인적 오류의 방지벽을 알 수 있도록 하였다. 자체적으로 이해될 수 있는 그래프이고 발전소간, 혹은 년도별 오류의 경향을 서로 비교할 수 있다.

Abstract

A decision tree for analysis of human errors is developed. The nodes and edges show human error patterns and their occurrence. Since the nodes are related to manageable resources, human errors could be reduced by allocation of their resources and by controlling human error barriers. Microscopic analysis of human errors is also performed by adding the additional information from the graph.

1. 서 론

원자력 발전소의 인적 오류는 우주 왕복선의 인적 오류에 비하면 해석과 분석이 쉽다. 왜냐하면 오류의 흔적이 남아 있기 때문이다. 2003년 컬럼비아호의 지구궤도 진입시 폭발 사고 분석을 보면 발사 때 충돌로 손상된 타일을 직접 원인으로 꼽았고 그 배후에 안전 문화를 지적하고 있다. 손상 타일이 원인임을 입증하기 위해 유사한 충돌 실험을 수차례 수행하였다. 이런 실험의 반복 이유는 결국 사고의 잔해가 없기 때문이다. 그러나 원자력 발전소의 오류 분석은 이런 점에서 다소 유리하다.

비록 왕복선 사고보다는 유리하나 원자력 발전소의 인적 오류도 계통의 이해, 인적 행위의 이해 없이는 불가능하다. 현재 발전소의 인적 오류들이 경험 많은 운전자들에 의해 분석되고 있음은 다행스런 일이다. 고리3,4호기 PSR를 수행하면서 1996년 2002년까지 약 43건의 인적 오류 사례를 재검토 한 결과에 의하면 각각의 사건에 대하여 사건의 전개, 원인 분석, 시정 조치, 시정 조치의 이행이 체계적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다 이 논문에서는 개별 인적 오류를 상세 분석하여 교훈을 얻는 과정을 미시적 인적 오류 분석이라 명명하기로 한다.

각각의 인적 오류에서 귀중한 교훈을 얻었지만 43건의 분석 후에 전체적으로 종합된 결론을 작성하기 쉽지 않았다. 뿐만 아니라 인적행위 개선 시스템 적용 이후에 수집된 오류의 경향을 분석하여 경영 전략을 수립하려는 노력이 IAEA 학회에서 발표되었고 또 규제기관의 권고에 의해 사업소 내부적으로도 수행되었다[1]. 타 산업체에서도 데이터마이닝을 통하여 과거 운용 데이터에서 경영 현안을 찾으려고 활발히 시도되고 있다. 즉 인적 오류를 종합하고, 비교하여 경영관리적 현안으로 승화시키는 자세가 요구된다. 이 논문에서는 개별의 오류를 종합하여 일반적 경향을 도출하는 과정을 거시적 인적 오류 분석으로 명명한다.

2. 본론

미시적 인적 오류분석이 계통 지식 및 인적 행위를 기반으로 구성되는 반면에 거시적 인적 오류는 계통 지식, 인적행위가 직접 나타나지 않는다. 즉 추상화의 과정을 거치게 된다. 그러므로 계통을 잘 모르는 비전문가도 거시 분석의 결과를 이해할 수 있다는 장점이 있지만 추상화로 인하여 인적 오류의 본질이 왜곡될 수도 있다. 그러므로 지나친 추상화를 경계하여야 한다. 가령 사람의 추상화된 모습을 물고기 심벌로 나타내어 그 값을 채워 갔다면 나중에 그 그래프는 아무런 의미를 전달하지 못한다.

거시적 인적 오류의 분석 틀은 결국 인적 오류의 분류로 귀결된다. 즉 인적 오류의 분류가 실제 일어난 인적 오류의 모든 경우를 포함할 수 있도록 완결성(Completeness), 구별성(Independence), 가치(Value)를 가져야 한다. 가령 인적 오류는 사람에 의해 범하여지므로 인적 오류를 남자와 여자에 따라 분류했다며 완결성과 구별성은 만족될지 모르지만 구별의 가치는 미미하다.

거시적 인적 오류 분석의 가치는 인적 오류의 경향을 분석하여 경영 자원을 조절하여 인적 오류를 저감시키는데 있다. 분석 결과는 경영 관리의 입장에서는 예산이나 자원의 배분으로 연결되어야하며 운전 및 정비의 입장에서는 인적 오류의 방지책으로 역할을 하여야 한다. 즉 어떤 경로를 통하여 오류가 많이 발생하기 때문에 그 경로를 차단하는 예산을 증가시키고 운전원이나 점검자에게 그 경로의 방지책을 인식하도록 주문하여야 한다. 거시적 인적오류 평가는 발전소별, 년도별 오류의 비교 용도로 이용되어야 한다. 만일 비교 기능이 없다면 굳이 거시적 분석 없이 미시적 분석으로도 충분하다. 비교를 위해서는

틀이 동일하여야하며 정량화되어야 한다. 이 그래프의 해석은 하나의 그래프 안에서 해석될 수 있고 또 여러 그래프를 상호 비교할 수 있어야 한다.

마지막으로 요건은 거시적 분석 틀이 미시적 분석과 상호 연결되어야 한다. 미시적 분석, 거시적 분석이 따로 독립되어 수행된다면 거시적 분석을 위해 또 다른 노력이 들기 때문이다. 때문에 최적의 방법은 거시적 경로를 먼저 선택한 후에 미시적 분석은 그 선택된 경로에 따라 상세 정보를 채우는 방법으로 진행되게 하여야 한다.

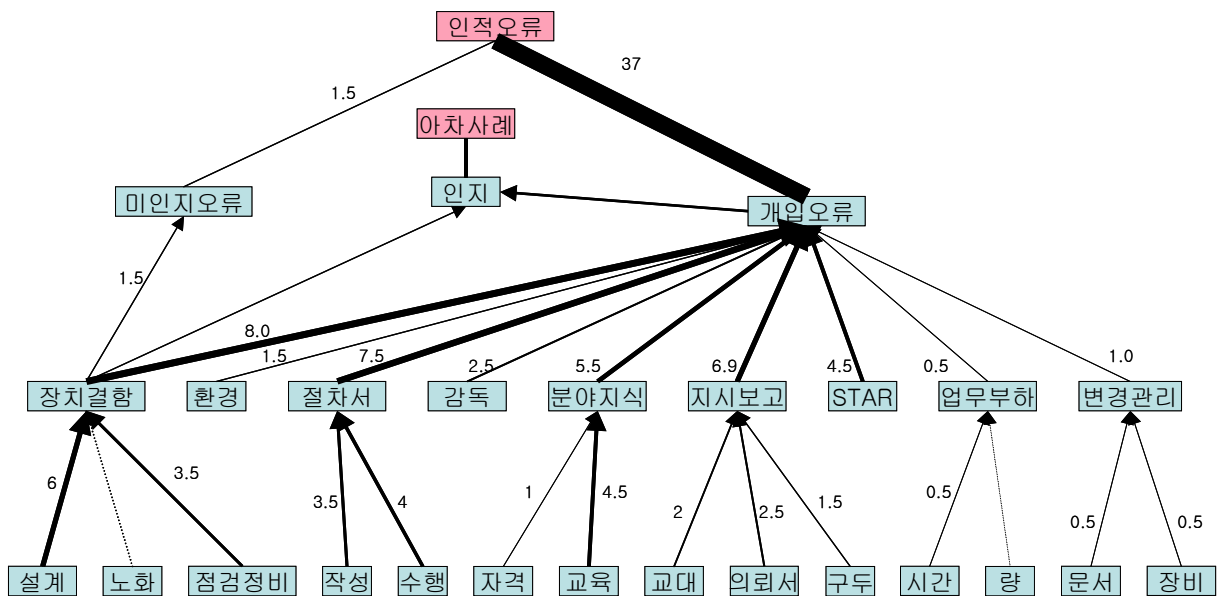


그림 1 거시적 인적오류 분석 그래프

그림1은 거시적 인적 오류 분석을 위한 구조이다. 이 그래프는 고리3,4호기 43건의 인적 오류를 분류하면서 완성시켰다. 사례를 중심으로 그래프가 개발되었기 때문에 이론적인 완결성은 논쟁거리가 되지만, 경험에 근거하였기 때문에 적용 가능성은 높다. 만일 이 그래프가 원자력 분야가 아닌 타 분야에서 유도되었다면 또 다른 형태를 가질 것이다.

인적 오류는 사람의 개입 여부에 따라 개입 오류와 미인지 오류로 나누었다. 개입오류는 오류의 발생에 사람의 행위가 부분적이나 전적으로 개입된 경우이다. 미인지 오류는 사람이 사고가 나기 이전에 어떠한 인적 행위도 하지 않은 경우이다. 미인지 오류를 인적 오류로 분류하는데 논쟁이 있을 수도 있지만 사람의 역할은 장비의 결함을 감시하고 점검하는 책임도 있으므로 오류에 포함 시켰다. 그러나 개입 오류와 미인지 오류를 엄밀히 구분하기는 쉽지 않다. 개입을 정확히 정의하기 어렵기 때문이다. 위의 그래프에서는 사람이 결함 장비를 조작하고 한 시간이 되기 전에 문제가 발생했다면 개입오류로 분류하였고 그 외에는 미인지 오류로 분류하였다.

미인지 오류는 저절로 발생되기 때문에 자발적 기능이 있는 장비와 관련된다. 즉 장비의

결함이 결국 감지되지 못하고 사고로 표출되기 때문이다. 본 그래프에서는 장비의 결함을 설계 결함, 노화, 정비/점검 결함으로 구분하였다. 세분하는 이유는 분류를 통하여 관리를 하기 위함이다.

개입오류는 사람이 발전소의 상태를 보다 안전한 방향으로 운전하려다 실수한 오류이다. 이 오류는 선의의 의도를 가지고 있지만 인적 행위에 영향을 미친 다양한 주변시설, 심적 상태에 따라 발생하게 된다. 본 논문에서는 장치결함, 환경, 절차서, 감독, 분야지식, 지시보고, STAR, 업무부하, 변경관리로 분류하였다. 원자력 발전소의 특수성으로 인하여 절차서, 지시보고들도 중요한 분류인자로 처리하였다.

이 분류가 서로 독립적이고 완결성을 가지는지 논리적으로 증명하기는 쉽지 않다. 용어의 불명확성이 있기 때문이다. 원자력 발전소의 대표적 작업을 열거함으로써 타당성을 보이겠다. 만일 어떤 밸브가 제기능을 못한다면(장비결함) 정비원은 밸브의 작업의뢰서를 작성하고, 그 밸브의 작업으로 영향을 받는 부서에 통보한다(지시보고). 검토가 완료되면 정비원은 정비 절차서에 따라서 정비를 한다.(절차서) 정비의 모든 정보가 절차서에 기록되지 않기 때문에 교육으로 취득한 분야 지식을 동원한다(분야지식), 정비 장소의 조명이 나 방사능 노출 우려로(환경), 타 공정을 맞추기 위해 서두르다가(업무부하) 실수를 할 수도 있으며 STAR(Stop, Think, Action, Review)하는 신중성 결여, 정비자의 감독 소홀로 사고가 발생할 수 있다(감독). 밸브를 분해하였더니 설치된 밸브가 도면에 기입된 모델과 달라 실수를 할 수도 있다.(변경관리).

비록 완벽하지 않지만 원자력 산업의 대표적인 업무 패턴에서 중요한 요소만 뽑아 분류인자로 만들었다. 만일 낱말 잇기처럼 공통 의미를 찾아 나아간다면 절차서에서 분야지식으로 이어지는 경로가 있을 수 있다. 이 경로가 존재한다면 초기에 요건으로 제시한 독립성이 훼손되었다고 이의를 제기할 수 있다. 다음 예를 보자. 절차서 작성이 잘못되어 수행 중에 오류가 발생하였다. 그런데 그 작성의 원인을 조사하여 보니 컴퓨터 소프트웨어의 불량이었고, 소프트웨어 잘못 구입은 해당 업무 지식이 없는 자의 구매로 인함이었다. 이런 경우에 수평적인 분류가 아니라 절차서->장비결함->분야지식의 직렬적, 순환적 구조를 가지는 그래프가 만들어진다. 그러나 이 세 개의 오류를 각각 독립시켜 병렬적으로 처리하여도 오류의 통계적 가치는 동일하다. 즉 순환적 그래프를 도입하여 그래프를 복잡하기보다는 병렬적 그래프로 단순화시켜도 가치가 훼손되지 않는다. 직렬적 그래프에서 나타난 인과 관계는 나중에 설명될 미시적 인적 오류인 사건의 시간 전개에서 표시되므로 정보의 누락은 없다.

아홉 개의 일차 분류의 각 항목에 대해 세부 항목을 제시하였다. 예를 들어 절차서는 작성 오류와 수행 오류로, 분야지식에서는 자격과 교육 등으로 세분하였다. 위 그래프에서 환경은 더 이상 분해되어 있지 않지만 온도, 조도, 방사능 등으로 충분히 세분할 수도 있다.

그래프의 앞노드는 인적 오류의 원인임과 동시에 발전소 운영의 관리 인자이다. 인적 오류 저감이 가능한 이유는 이 앞노드가 관리인자이기 때문이다. 경영 측면에서는 이 노드

에 예산과 인원을 많이 할당하면 그에 반비례하여 오류 발생 빈도도 줄게 된다. 이것은 경영자가 이 그래프를 활용하는 방법이다.

운전원, 정비원도 이 잎노드에서 이익을 얻을 수가 있다. 이 잎노드의 오류 발생을 최소화시키기 위한 방지벽이 구축되어 일대일로 대응되기 때문이다. 예를 들어 절차서 작성의 오류를 방지하기 위하여 절차서 작성을 안내하는 기행절차서가 수립되어 있다. 만일 그 절차서를 참조하지 않고 작성되었다면 수많은 오류 발생 가능성이 있다. 분야지식/자격에서도 발전소의 축적된 경험으로 필수 자격과 인원등이 문서화되어 있고 이것과 비교하여 부족한 부분이 있다면 그 차이를 메울 수 있다. 만일 방지벽이 아직 구축되어 있다면 개발할 수도 있다.

미시적 인적오류 분석에서는 오류 분석 후에 개선 항목을 도출하여 시행한다. 만일 이렇게 방지벽이 이미 구축되어 있다면 방지벽이 제 역할을 하도록 교육을 강화하면 대부분 문제는 해결된다. 만일 방지벽이 부실하다면 그 방지벽을 보강하는 선에서 마무리된다. 사건 때마다 새로운 시행 조치를 발견하기 위해 고심하지 않아도 된다.

아래 표는 분야지식/교육, 장비결함 등에 포함될 방지벽을, 43건의 인적 오류를 미시 분석하여 모아놓았다. 현재는 한 표로 통합되어 있지만 잎 노드의 특성에 따라 앞으로 세분할 필요가 있고 교육을 통해 주지시키거나, 해당 계기등에는 교통안전심벌처럼 주의심벌을 부착할 수도 있다.

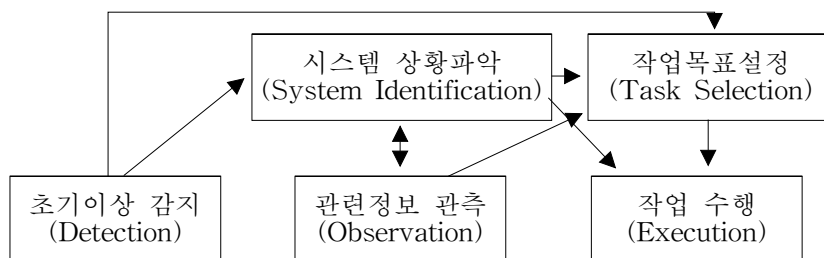
계기	고장모드 혹은 인적 오류
Relay	Relay의 가압 상태 확인 생략 Relay신호 제거에 따른 과급 효과 무시 기능에 따른 Relay의 균집 배열 필요 Relay에 자성체 물질 부착으로 오작동 가능성
Valve	외부압력에 의한 자력식 밸브 분해시 외부 압력 배관의 막음 미확인(이로 인한 Tank의 압력 증감 발생) Boric Acid 석출로 인한 Valve의 개폐 어려움. 밸브 개폐에 따른 토크 구분 및 유체 흐름 감지에 무관심(청진기 사용) 밸브 개폐시 계통 변화 미미하면 밸브 고장으로 오진할 가능성(Vent) Reach Rod 이용시 토크로 Rod 건전성 확인 누락 밸브 배열 오류 유체의 상(액체/기체)에 따른 밸브의 차단(누설) 능력 간과 유체 이동 공간 증감에 따라 가압된 유체 압력 변화 이해부족 정비후 불완전한 원상복귀 수압 상승으로 밸브 자동 개방 고려 미흡 밸브를 제어하는 계전기의 오작동에 의한 밸브 개방 고려 미흡

	<p>밸브 취외후 재설치 때 방향 혼동(관련 배관에 흐름 방향 표시)</p> <p>밸브 과잉 잠금으로 인한 누설(버터플라이 밸브)</p> <p>CLOSE Setting 잘못으로 Crack OPEN 상태 유지</p> <p>압력보호밸브의 설정치 조절 오류</p>
Pipe	<p>방사능 구역에서 작업시 부담발생(ex 임시배관 연결시 오류)</p> <p>장기간 미사용시 유체의 변질 미 확인</p> <p>플라스틱 배관의 꺾임</p> <p>이형질(물과 수지) 이송시 수지 존재 여부 파악 어려움</p> <p>진동 혹은 노화에 의한 배관의 파손 및 누설 동파</p> <p>Flange 체결 불량</p> <p>배관의 유체 공급원 변경 시에 압력/온도 신중한 조절</p>
Card	<p>점퍼 설정 착오</p> <p>카드 제거시 영향 평가 미흡</p> <p>접촉시 정전기로 인한 오동작</p> <p>고장난 제어카드의 제어신호 사용</p>
Select Switch	Select Switch로 영향 받는 계기, 받지 않는 계기의 구별성 나쁨(예 가압기 수위 선택 스위치)
Pump	<p>정비시 차단스위치 개방 누락</p> <p>밀봉 가스켓의 잘못 조립으로 유체 누설</p> <p>인접한 Pump를 잘못 조작 및 정비</p> <p>유로 확보 안됨(자동 밸브 배열인 경우에 확인 단계 누락)</p>
Tank	넘침
Fan	윤활유 공급 밸브 개방 안함.
Pressurizer	기포 미형성 상태에서 부피 변화에 따른 급격한 압력.
DVM(Digital Volt Meter)	저항, 전압, 전류 측정 선택 착오
Motor	<p>전선 연결부에 피복 벗어짐 점검 오류</p> <p>전선 연결 오류</p>
Breaker	인입선을 따라 물 유입
Gen Stator Winding	수소 누설
Fuse	다른 용량의 회로에 동일 퓨즈 삽입
SG	<p>증기 발생기 세관에 Labeling(Probing) 제거시 불량 세관 확인 어려움.</p> <p>댐 설치시 수실의 미끄러움</p>
애자	활성 전선이 가까이 있는 애자의 금구류에 유도전압 발생 가능
베어링	조립시 윤활유 입구 배열 잘못
수위 지시계	RCS 배수시 압력 차이에 의한 수위 지시계 오차 발생

	유량의 흐름에 따른 수위 부정확
회로 결선	설계와 다르게 결선하는 오류
열교환기	구두요청시 복수/급수/취기 계통 열교환기의 구별성 나쁨
Shift Operation	사용 빈도가 낮은 계기 조작 후 교대시 통보 누락
Cooling Coil	동파
Room	침수로 전기 불통
자동 제어기	우회배관 흐름을 고려하지 않은 제어논리
단자대 (Trminator)	신호선 오결선 연결부분 접촉 불량
전송기 (Transmitter)	고장난 전송기의 Hunting 발생 파악 미흡 신호 연결부 방수처리 불량으로 침수시 기능 상실
전류계	미소 전류 측정시 접지 누락
볼트	볼트 조임 및 취수 시 이탈 혹은 분실
명판	노후화 및 도색 작업으로 관독성 감소
작업 의뢰	구두 지시로 인한 내용 전달 오류 비정상 상태 발생시 통보 누락 방사능 환경에서 작업시 사전검토 미흡
공정표	지연 공정 만회를 위한 운전 범위를 벗어난 배수/급수 운전

표 1 계기 유형별 인적오류 형태

현재 인적행위 개선시스템[2,3,4]에서 채용한 분류와 위 그래프를 비교할 필요가 있다. 그 시스템은 그림2의 인지 사이클 개념을 기반으로 개발되어 있다. 이 사이클이 보편적인 개념임에는 틀림없으나 인적 오류 분류에 응용하기는 쉽지 않다. 첫째 이유는 이 사이클이 크고 작은 인적행위에 프랙탈처럼 반복적으로 나타나기 때문에 최소 단위를 정할 수 없기 때문이다. 둘째 이유는 이 사이클이 너무 빠르게 작용하기 때문에 한 원소만을 뽑을 수가 없기 때문이다. 셋째는 설령 한 원소를 뽑은 경우에도 그 원소를 조절하기 위한 관리 인자를 발견하기 어렵다는 점이다. 비슷한 예로 사람은 왼발, 오른발 교대로 걸어가지만 왼발, 오른발이 인간 동작의 분류 인자가 되지 못함과 유사하다. 그럼에도 불구하고 본 그래프에서 인지 사이클과 유사한 STAR를 한 분류인자로 포함시킨 이유는 다른 요인으로 닦할 수없는 운전원의 부주의 때문에 사고가 발생하는 경우가 있기 때문이다.



[그림.2 원전 운전원 의사결정모형(5단계 인지모형)]

본 그래프는 미시분석의 업무 흐름도, 의사결정 수목도로 사용될 수 있다. 다음과 같은 가상의 사고를 예를 들어 미시 분석에 어떻게 사용되는지 설명한다. 아래의 별표(*)는 인적 오류가 개입된 사건을 표시한다.

- 9시 00분“ 주급수 격리 밸브 수리(*)
- 9시 30분 밸브 배열 완료 후 가압
- 9시 40분 격리 밸브를 통한 누수
- 9시 50분 SG 저수위로 원자로 트립(*)

대부분 인적 오류가 그렇듯이 사건은 두개의 오류가 공교롭게 결합되어 일어났다. 밸브를 정상적으로 수리했다면 사고가 발생되지 않았거나 SG 저수위에서 적절한 조치를 취하였다면 원자로 정지로 귀결되지 않았다. 이 사고는 하나이기 때문에 두개의 오류 비중의 합이 1이 되도록 가중치를 부여한다. 그림1에서 나타난 숫자가 이런 가중치를 의미한다.

첫 번째 오류를 분석하면 정비원이 개입되었고 절차서를 잘못 적용하여 발생하였으므로 “인적오류->개입오류->절차서->수행”의 경로로 미시 분석(의사 결정)되고 그 가중치는 0.4 를 줄 수 있다. 두 번째 오류를 분석하면 운전원이 개입 되었고 “인적오류->개입오류”의 가중치는 그 나머지 0.6 를 줄 수가 있다. 개입 오류의 하위 단계에서는 장비 결함과 분야지식으로 양분 할 수 있고 각각 동일한 가중치를 줄 수 있다. 0.3 가중치가 부여된 장비 결함의 하위 단계인 정비 결함은 0.3 를 물려받는다. 분야 지식은 자격과 교육의 미미 정도를 고려하여 0.3의 값을 나눌 수가 있다.

이것을 일반화시키면 하나의 사건에 대해서 근 노드에서 인적 오류의 가중치 합은 항상 1이 된다. 그러나 하나의 사건에 여러 개의 인적 오류가 섞여 있기 때문에 그 가중치를 분배시켜야 한다. 사건 개요에서 발생 시간대가 틀린 사건마다 근노드에서 앞노드까지 따로 분석하고 가중치를 준다. 어떤 노드를 중심으로 상위쪽 간선과 하위쪽 간선의 빈도 합은 같도록 분배되어야 한다. 이런 규칙에 따르도록 그래프가 작성되면 오직 오류의 횟수, 인적 오류에 취약한 경로를 쉽게 파악할 수 있다. 또 간선의 빈도에 따라 선의 두께가 그려진다면 직관적으로 문제점을 파악할 수가 있다.

미시 분석이 이런 경로와 가중치를 결정할 아니라 상세 정보를 추가하여야 한다. 만일 개입 오류였다면 인적 행위자의 경력, 부서, 근무조 등이 있고 절차서이라면 절차서명, 단계명 등이 추가 입력 항목이 된다. 그래 1의 그래프에서는 이런 속성을 입력할 수 있는 부분이 없지만 모니터 화면에 나타나는 그림에서는 각 노드와 각 간선을 호출하여 추가 속성을 입력하게 할 수가 있다. 즉 미시적 인적 오류분석은 거시적 인적 오류의 틀을 이용하여 수행될 수가 있다.

통계값은 보통 파이 그래프로 많이 표현된다. 그림 1의 그래프도 파이 그래프로 변환될 수가 있다. 다만 계층적인 구조를 가지기 때문에 파이 그래프로 변환했을 때 여러 개의

파이 그래프가 생성될 것이다. 표현의 차이일 뿐 전달하는 정보의 질은 유사하다. 이 그래프를 통하여 발전소 간에 비교가 가능하고 동일 발전소에서는 년도별 비교도 가능하다. 통계의 의미가 사라지는 하나의 인적 오류에 대해서도 이 그래프에 표시 하면 그 오류의 발생 경로를 알 수 있다. 즉 인적 오류 전체의 통계적 가치와 각각의 오류에 대한 패턴을 보여줄 수 있다.

3. 결론

인적 오류의 경향을 알 수 있도록 그래프의 요건을 기술하였고 그 요건에 적당한 그래프를 도입하였다. 약 40건의 인적 오류를 이 그래프에 따라 분류하였고 이 그래프의 가치를 경영 관리적 측면, 방지벽 측면, 통계적 비교 측면, 미시적 분석과 관련하여 설명하였다.

참조

1. (주)한국수력원자력 발전운영실, “인적 오류의 경향 분석”, 2003년
2. 채경식, 국내 원자력 발전소에서 K-HPES 사례를 통한 인적실수 분석에 관한 연구, 석사 학위 논문, 2002년
3. 오태석, “K-HPES 적용시 문제점 분석”, 한전 원자력연수원 교수연구발표논문집, 2000년
4. 한국전력공사, “원전인적행위 개선 관리 절차”