

정수장의 휴먼에러(조작실수)를 줄이기 위한 연구

다케시 구니히코 _ 효고현기업청 히메지 물이용사무소 정수과장 및 공학석사
호소이 요시히코 _ 돗토리(鳥取)대학 공학부 사회개발시스템공학과 교수 및 공학박사

※ 본 원고는 일본수도협회(JWWA)誌 2006년 4월호에서 발췌·번역한 글입니다.

머리말

필자들은 안정적인 급수를 위한 정수장의 높은 신뢰성 설계와 최적의 보전을 목표로, 지금까지 주로 정수장의 플랜트기기를 대상으로 신뢰성과 보전성에 대한 객관적인 평가를 연구해 왔다. 그러나 정수장의 운용은 사람이 관여하는 부분이 많기 때문에 정수장의 신뢰성이나 보전성을 향상시키기 위해서는 플랜트기기만을 대상으로 하는 것이 아니라, 이를 운용하는 사람의 행동을 추가하여 종합적으로 검토할 필요가 있다. 정수장이 있는 현장에서는 여러 종류의 휴먼에러가 발생하고 있으나, 지금까지 스포트라이트를 받아본 적이 없었다.

최근 2005년 4월에 JR니시니혼에서 쾌속전차가 탈선하여 전복된 사고가 발생하여 많은 사상자가 나왔다. 사고의 재발방지를 위해 현재 신중하게 조사가 진행되고 있으나, 조사를 할 때 철도의 시설면에서만 아니라 운전사의 행동·교육환경·직장환경·근무상태 등 사람의 행동면에 대해서도 조사되고 있다. 향후 조사에서 얻은 데이터로 분석이 이루어져 종합적인 재발방지대책에 도움이 될 것이다.

하인리히 법칙에 의하면 1건의 대형사고발생의 뒷면에는 29건의 사고가 있으며, 또한 그 뒤에는 300건의 경미한 실수가 있었다고 한다. 대형사고가 발생하는 배경에는 그 몇 배인 작은 실수나 고장이 존재한다는 것이다. 이 점에서 기록에 남지 않는 경미한 실수나 고장을 조사분석하여 이들의 방지를 도모하는 것이 대형사고를 방지하는 효과적인 수단이라 말할 수 있다.

또 현장에서는 어떠한 실수가 발생하고 있는지에 대한 현상보고는 경영진 등의 방침결정자에게 안전성과 트레이드 오프(Trade off : 두개의 정책목표 가운데 하나를 달성하려고 하면 다른 목표의 달성이 늦어지거나 희생되는 경우의 양자간의 관계)관계에

있는 경제성을 판단할 때 가장 중요한 정보가 된다. 여러 수도사업체에서 비용절감이 검토되는 가운데 민간위탁화의 도입이나 인원감축이 추진되고 있다. 그러나 사람이 관여하는 부분은 많은 정수장에서는 휴먼에러 관점에서 감안할 필요가 있다.

수도분야에서는 지금까지 큰 사고는 발생하지 않았으나, 대형사고를 미연에 방지하기 위해서는 작은 사고나 고장 등에 관한 조사연구가 중요하다.

연구를 하기 위해서는 데이터가 필요한데, 정수장에서 일하는 사람의 행동에 대한 기록은 일본에는 적고10), 특히 신뢰성과 보전성에 밀접하게 관련된 정수장의 휴먼에러에 대해서는 인위적인 실수는 창피하다고 하여 은폐하려고 하는 경향에 있어 수집이 곤란하였다. 그래서 이 곤란한 데이터수집에 대처하여 정수장의 휴먼에러 실태를 조사하였다.

여기서 얻은 데이터를 기초로 정수장의 휴먼에러 발생에 어떠한 특성이 있는지 고찰함과 동시에, 휴먼에러의 저감방법에 대해 검토하였다.

현장데이터의 개요

1. 조사대상

데이터는 3개 수도사업체의 7개 정수장에서 발생한 휴먼에러에 관한 것이다. 정수장은 모두 횡류침전(橫流沈殿), 급속여과방식이며, 시설능력은 아래에 표시한 1,000~100,000m³/일급의 정수장이다. 정수장에는 컴퓨터가 도입되어 감시제어, 일보, 월보 등의 기록에 이용되었다. 정수장의 운전감시나 기기의 점검정비는 직원 외에 하청직원에게 의해 실시되고 있다.

(1) A수도사업체

A1정수장(능력 : 110,880m³/일, 수원 : 하천표류수 · 댐물)
A2정수장(능력 : 98,496m³/일, 수원 : 댐물 직접채수)
A3정수장(능력 : 102,000m³/일, 수원 : 하천표류수 · 댐물)
A4정수장(능력 : 80,350m³/일, 수원 : 하천표류수 · 댐물 직접
병용/선택취수)

(2) B수도사업체

B1정수장(능력 : 1,900m³/일, 수원 : 댐물 직접채수)
B2정수장(능력 : 5,200m³/일, 수원 : 댐물 직접채수)

(3) C수도사업체

C1정수장(능력 : 12,351m³/일, 수원 : 지하수)

2. 조사방법과 데이터의 특징

데이터는 사고에 이르지 않아도 인위적인 실수가 있다면 1건으로 계산하였으며, 내용의 경중(輕重)은 묻지 않았다. 휴먼에러에 관한 기록부는 모든 사업체에 없었으며, 수집은 주로 직원에게서 한 청취조사가 중심이었다. 청취조사를 할 때 자신의 실패를 기록하는 것에 대해 저항이 있어 데이터를 수집하는데 매우 곤란하였다. 이를 위해 사고방지를 도모하는 연구목적이라는 점을 설명하고 또한 각각의 데이터에 대해 개인이름을 내지 않는 등의 연구를 하여 가능한 한 정확하고 많은 데이터를 얻을 수 있도록 노력하였다.

이와 같이 기록이 없고 청취조사가 중심이라는 점과 기록이 있어도 청취 시에 저항이 있는 등의 문제점이 다른 데이터와의 차이점으로, 휴먼에러에 관한 데이터의 큰 특징이라 할 수 있다. 또 데이터는 사업체에 근무하는 직원 외에 하청 및 위탁업무 등으로 보수나 운전조작에 종사한 사원의 휴먼에러도 포함하였다.

3. 휴먼에러의 개요

데이터수집의 대상기간은 대략 10년간으로 73건의 데이터를 얻었다. 이 중 직원에 의한 것이 44건, 업자에 의한 것이 29건이었다. 그 중에서 일례를 열거하겠다.

(1) 밸브여는 것을 잊어버림

슬러지 배수지에서 슬러지를 천일건조 바닥으로 보내기 위해 수송펌프를 기동시킬 때, 천일건조 바닥의 유입밸브를 여는 것을 잊어버렸기 때문에 펌프를 무송수(無送水) 경보로 정지시켰다.

(2) 설정값을 잘못 입력

차아염소산 나트륨의 주입율을 설정할 때 0.1mg/L로 입력하려고 한 것이 1.0mg/L로 잘못 입력하여 정수장의 잔류염소 값이 상승하였다.

(3) 불안정한 조작

전동취수 게이트를 수동으로 조작한 후, 전동조작 위치까지 핸들을 밀어넣는 조작이 불안정하였기 때문에 전동조작이 가능하게 되었다.

(4) 연락체제의 미비

연수기가 고장이라는 것을 운전원에게 연락하지 않아, 운전원이 소다회 주입기를 운전하였기 때문에 주입한 배관이 막혔다.

(5) 계기의 지시값을 잘못 읽음

매일 점검할 때 탁도계의 지시값을 잘못 읽어 기록하였다.

(6) 밸브의 회전나사가 끊어짐

송수관의 드레인 밸브 전폐(全閉)작업 중에 힘을 너무 가해 밸브의 회전나사가 끊어져 버렸다.

(7) 기기를 정지시키는 것을 잊어버림

슬러지 배수지에서 천일건조 바닥에 슬러지를 수송하는 중에 수송펌프를 멈추게 하는 것을 잊어버려 천일건조 바닥을 넘치게 하였다.

이상과 같이 내용은 다양하며, 데이터만을 보면 규칙성을 찾아내기 곤란하다. 그래서 본 연구에서는 각 사례를 발생시의 배경, 원인, 에러모드의 3가지 시점에서 계통적으로 분류 및 특징지어 검토하였다.

휴먼에러의 발생특성

1. 발생시의 배경

보수작업이나 공사 중, 사고시의 발생이 37%로 가장 많았으며, 점검이나 정비작업의 실시중이 33%로 이어졌다. 보통 운전조작을 할 때에는 30%로 가장 적었다. 점검정비나 보수공사와 사고를 비통산적으로 하면, 전체의 70%가 이와 같은 보통이 아닌 작업빈도가 적은 작업 중에 휴먼에러가 발생하고 있다.

2. 발생의 원인

휴먼에러의 발생원인은 반드시 하나의 원인에 의해 발생하는 것

은 아니며, 우선 전체의 경향을 알아보기 위해 2-3에 표시한 데이터에 대해 발생시의 상황을 토대로 휴면에러의 발생원인을 「확인부족」 「지식부족」 「기능부족」 「연락부족」의 4가지 원인으로 분류하여 고찰하였다. 그 결과 그림2에 나타난 바와 같이 확인부족에 의한 것이 63%로 과반수를 차지하여 가장 많았으며, 이어서 지식부족이 23%, 기능부족이 11%로 이어졌다. 연락부족은 3%로 매우 적었다.

3. 에러모드

휴면에러의 저감을 검토할 때 자세한 발생특성을 아는 것이 필요하다. 하드웨어의 고장에 대해서는 고장모드에 의한 분류를 기초로 고장대책을 취하는 방법이 있다. 하드웨어의 고장은 사람의 에러에 해당하기 때문에 사람의 경우, 고장모드에 대응하는 것을 에러모드라 부른다. 본 연구에서는 에러모드에 의한 분석을 시도하였다.

(1) 정수장의 에러모드 정의

에러의 항목은 목적이나 입장에 따라 다양하게 분류된다. 정수장의 휴면에러를 저감하기 위해서는 휴면에러에 관한 데이터를 몇 가지 형태로 분류 및 정리하는 방법이 필요하다. 그러나 지금까지 일본에는 정수장에서 발생한 휴면에러에 관한 에러모드의 연구는 없었다. 그래서 높은 안전성을 요구하는 항공분야의 에러모드를 참고로 정수장의 에러모드에 대해 검토하였다. 우선 조종사와 정수장의 운전원과의 차이에 주목해 보면 조종사를 양성하기 위해서는 항공기의 조종에 관한 교육훈련을 받고 지식을 습득함과 동시에, 규정한 비행시간을 실기로 조종하는 경험도 필요하다. 그러나 정수장의 운전원에게는 자격이 필요하지 않기 때문에 조작방법의 지식레벨에도 개인차가 있다. 또 항공기는 컴퓨터 제어로 고도를 자동으로 할 수 있으나, 정수장에는 일부 자동화도 볼 수 있지만 사람이 조작하는 부분이 많다. 특히 자동화하는 것이 불가능한 정수장의 점검정비 등의 업무는 조종사에게는 없다. 이와 같은 차이점에서 조종사의 에러모드 중 「역운전」 「조정」 등의 에러는 정수장에서는 조작방법의 지식부족에 의해 발생되거나, 또 수동으로 정해진 순서에 따라 조작할 기회가 많은 현실을 감안하여 이들을 포함한 「순서」라는 하나의 에러모드로 정의하였다. 한편 「컨트롤부에 닿지 못하다」는 머리 위를 비롯하여 조종석의 주위에 배치된 기기나 조작부를 조작할 때에 발생하는 조종사의 독자적인 에러로 정수장에서는 삭제하였다. 또 실제 데이터에서 「빠트림」으로 인한 에러가 관측되어

정수장의 에러모드로 새로 정의하였다. 이상의 결과 이번에 정의한 정수장의 에러모드를 표 1에 표시하였다.

(2) 휴면에러의 예

아래에 휴면모드별 현장데이터의 일례를 표시하겠다.

「착각」 차아염소산 주입기의 상용기와 예비기를 전환작업을 할 때 중염소(中鹽素)와 후염소(後鹽素)의 주입배관 밸브를 잘못 조작하여, 정수장의 잔류염소값이 이상 상승하였다.

「무의식」 약품주입기실의 배수피트 수위가 올라갔기 때문에 평상시와 같이 수중펌프의 스위치를 넣고 배수하였다. 배수 피트에는 차아염소산의 소다페액이 고여 있었기 때문에 배수지의 세정배수지 반송펌프를 경유하여 착수정의 ph가 이상 상승하였다.

「순서」 송수펌프를 점검 정비할 때 꺼내는 위치로 하였던 차단기를 점검 종료 후에 원래의 위치로 재세트하였으나, 삽입이 충분하지 않아 기동 시에 제대로 기동하지 못하였다.

「망각」 배수슬러지 인발펌프의 점검 종료 후에 펌프의 운전모드를 수동에서 자동으로 하는 것을 잊어버려, 배수슬러지 수위가 상승하여도 펌프가 기동되지 못하여 수위가 이상 상승하였다.

「빠트림」 정수 피쉬모니터(fish monitor)용의 하이포(티오황산나트륨)주입 튜브가 악화되어 하이포가 새는 것을 점검에서 빠트려, 잔류염소가 있는 시료수가 피쉬모니터에 공급되어 물고기가 모두 죽어버렸다.

(3) 에러모드별 휴면에러의 발생분포

이번에 정의한 정수장의 에러모드에 따라 73건의 모든 데이터에 대해 「어떠한 설비를 어떠한 휴면에러로 어떠한 결과가 되었는지」 1건씩 내용을 잘 조사하여 5종류의 에러모드로 분류하였다. 비율에서는 「순서」가 34%, 「망각」이 33%로 양쪽이 67%로 과반수를 차지하였으며, 이어서 「빠트림」이 16%이다. 「착각」은 12%로 전체의 약 8분의 1을 차지하였다. 「무의식」은 5%로 가장 적었다. 조종사의 에러모드와 비교해 보면 조종사에게는 「착각」이 50%로 절반을 차지하고 있음에 비해, 정수장에서는 12%로 약 8분의 1이다. 「망각」은 조종사의

표 1 정수장의 에러모드

에러모드	예시
착각	다른 것을 조작하고, 다른 수치를 입력한다
무의식	무의식적으로 조작한다
순서	조작방법 및 순서를 잘못하다
망각	해야 할 전달이나 사항을 잊어버린다
빠트림	빠트림이나 지시값을 잘못 읽는다

18%에 비해 정수장에서는 약 2배인 33%였다. 무의식은 양쪽 모두 5%로 같은 비율이었다. 정수장에서는 조종사와 같이 절반을 차지하는 대표적인 모드가 없어 여러 에러모드가 혼재하고 있음을 보여주었다.

(4) 에러모드별 발생시의 배경

에러모드별 발생시의 배경을 그림 1에 표시하였다.

「착각」과 「망각」은 보통일 때 점검, 보수·공사·사고의 어떠한 경우에도 거의 동일한 비율로 발생하였다.

「무의식」은 보통일 때 자주 발생하고, 점검 시에는 거의 없었다. 「빠트림」은 보통 때와 보수·공사·사고시에 발생하는 비율이 높았으며, 점검시에는 적었다. 「순서」는 점검시와 보수·공사·사고시가 대부분을 차지하였다.

(5) 직원과 업자의 에러모드별 비교

그림 2는 에러모드별로 본 직원과 업자의 발생비교이다. 직원과 업자는 발생건수에 차이가 있으며, 에러모드별 발생건수

를 각각의 전체발생건수로 나누어서 계산하였다. 「착각」은 업자의 20.7%에 비해 직원은 6.8%로 업자의 약 3분의 1로 차이가 나는 것을 명확하게 알 수 있었다. 이와 관련하여 업자는 직원에 비해 경험이 부족하여 익숙하지 못하기 때문에 다른 것을 조작하는 등의 에러를 일으키기 쉽다고 생각할 수 있다. 거꾸로 「무의식」은 직원이 업자의 2배이다. 이는 「익숙」하기 때문에 의식하지 않고 조작한다고 생각할 수 있다. 기타 「순서」 「망각」 「빠트림」의 에러모드에 대해서는 현저한 차이를 볼 수 없었다.

(6) 에러모드의 원인별 비율

그림 3은 원인별로 표시한 것이다. 「착각」과 「망각」은 확인부족이 지배적이었으며, 「순서」는 기능부족·지식부족·확인부족과 3가지 원인이 거의 같은 비율로 구성되었다. 또한 기능부족이 원인인 에러는 「순서」만이다. 또 「무의식」과 「빠트림」은 지식부족과 확인부족의 2가지 원인만으로 발생하였으며, 「무의식」에서는 지식부족이 지배적이다.

그림 1 에러모드별 발생시의 배경

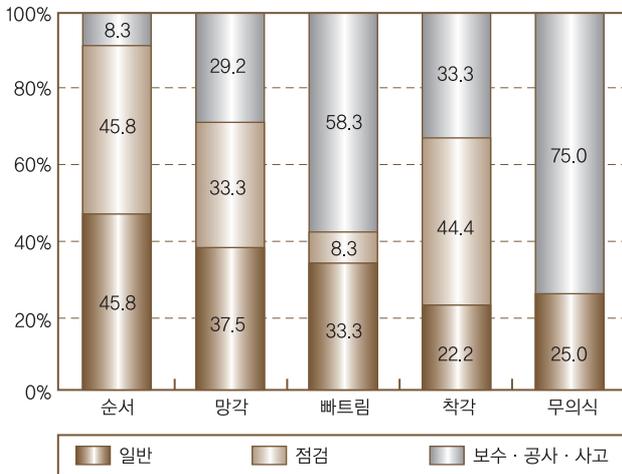
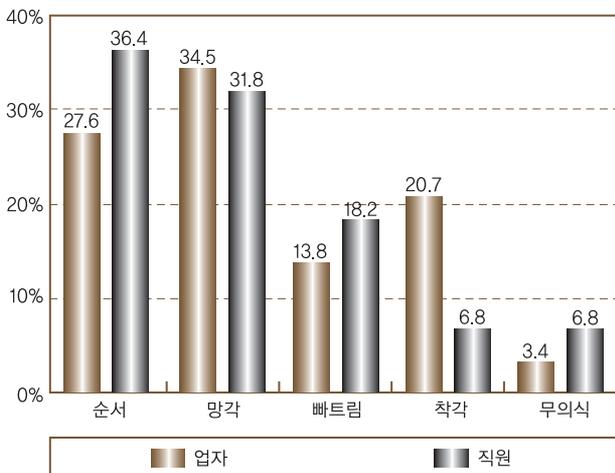


그림 2 직원대 업자의 에러모드별 비교



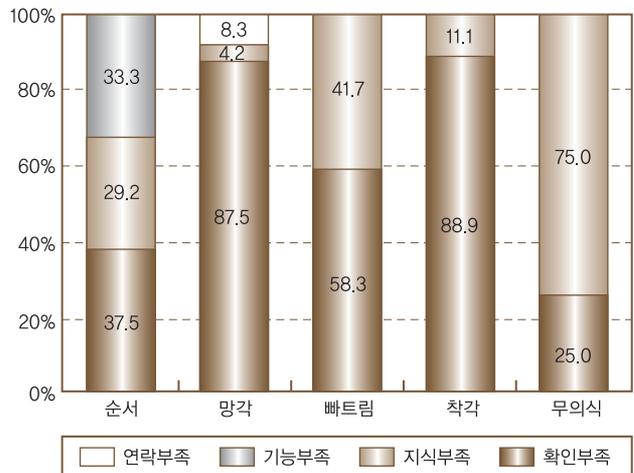
휴면에러의 저감

휴면에러의 발생특성을 기초로 휴면에러의 저감방법에 대해 검토하였다. 검토시 휴면에러의 저감방법을 크게 소프트면과 하드면의 두 가지 측면에서 대책을 검토하였다.

1. 소프트면의 저감방법

전체 데이터에 대해 1건별로 휴면에러의 발생상황을 기초로 저감하기 위해서는 무엇이 필요한지 검토하였다. 저감에 필요한 것

그림 3 에러모드별 발생원인



은 1건에 1개만이 아니지만 여기에서는 대표적인 것 1개로 압축하여 8종류로 분류하였다. 그 결과 작업 후 확인철저가 27%로 가장 많았으며, 이어서 지식의 습득 21%, 조작 및 작업방법의 습득 16%, 작업 전 확인철저 14%, 감시조작의 철저 12%, 연락철저 4%, 조작의 재확인과 점검의 충실철저가 모두 3%이다. 총괄해 보면 확인작업이나 감시조작, 연락 등의 철저가 전체의 63%를 차지하고, 지식의 습득과 조작 및 작업방법의 습득 등 학습으로 휴먼에러를 줄일 수 있는 것이 37%였다. 이 결과를 감안한 소프트웨어의 구체적인 저감방법을 아래에 나타내도록 하겠다.

(1) 직장환경

건설업에서는 휴먼에러의 51.1%가 직장의 팀워크 부족이라는 데이터가 있다. 팀워크가 양호하면 연락도 원활하게 이루어져 에러를 일으키는 심리상황도 발생하기 힘들다. 또한 직원간의 어드바이스 등 지식의 습득으로도 이어진다. 양호한 직장환경의 구축에는 인적환경에서는 인재를 적재적소에 배치하는 인사면(전근, 승진), 통근시간, 업무량(과도한 야근의 유무), 교대제근무의 로테이션 적정화를 생각할 수 있다.

(2) 관리인원 수

일반적으로 직원수를 산정하기 위해서는 업무량을 기준으로 하여 결정되는 경우가 많다. 그러나 운전조작이나 점검정비와 같은 유지관리업무는 업무량만으로 결정되지 못하는 차이점이 있다. 예를 들면 고장이 동시에 발생한 경우 무엇을 우선하여 작업할 것인지, 한정된 인원 중에서 피해를 최소한으로 하기 위한 판단이 중요하다. 사무처리의 경우에는 담당자에서 계장, 계장에서 과장, 과장에서 부장이라는 결재흐름이 있어 그 과정에서 복수인의 체크기능이 있다. 그러나 운전조작이나 점검정비의 경우에는 1명 많아도 2명 정도가 실시하고 있어 사무처리와 같은 체크기능이 없다. 청취조사에서 점검정비 등의 작업 중에 다른 고장경보가 발생하여 작업을 중단하고 고장복구에 매달린 후 고장복구가 완료된 시점에서, 이전의 점검정비를 잊어버려 중도에 작업한 상태로 방치된 사례가 있었다. 점검이나 정비는 몇 개월분의 업무를 모아 미리 실시할 수 없는 업무의 특수성이 있으며, 사무작업과 달리 나중에 실시하는 것이 곤란하거나, 전문성이 높아 종사할 수 있는 인제가 한정된 경우가 있다. 또 고장 등 업무 도중에 해야 할 일이 많은 곳에서는 업무량만이 아니라 대처방법의 검토를 복수가 할 수 있는 관리인원이 필요하다.

(3) 운전교육

정수장의 운전에는 많은 지식을 필요로 한다. 연수를 통해 지식을 향상시키고, 관련문헌을 참고하는 것도 중요하다. 관리

인원이 복수체제인 경우에는 숙련자와 미숙련자가 함께 교육을 하여 경험을 전승해 줄 수 있는 교육방법도 있다. 또한 자격취득으로 인한 지식향상은 객관적인 지표가 된다. 사고후련을 할 때 사고를 가정한 모의체험으로 문제점을 추출하여 교육하는 것도 효과적인 수단이다.

(4) 메뉴얼

틀에 맞는 업무는 조작메뉴얼이 효과적이다. 메뉴얼은 그 메뉴얼을 사용하는 작업원 전원이 같은 순서로 작업할 수 있도록 작업원의 수준에 맞는 것을 작성해야 한다.

(5) 체크시트

휴먼에러의 발생원인으로서 확인부족이 다수를 차지하였다. 이를 위해 작업전후에는 확인이 필요하다. 사전에 작업 종류별로 확인항목을 기재한 체크시트를 작성하고, 작업전후에 체크시트에 따라 확인작업을 함과 동시에, 체크가 끝난 항목에 체크표시를 한다.

(6) 실무경험

자동차의 운전은 운전지식이 많아도 운전경험이 없으면 운전할 때 발생하는 여러 상황에 대처하기 힘들다. 휴먼에러를 줄이기 위해서는 실무경험이 꼭 필요하기 때문에, 운전원은 실무경험을 반드시 거쳐야 한다.

(7) 작업감시원의 배치

보수공사 등에 종사하는 하청업자는 보수를 하는 기기에 관한 지식은 있으나, 그 기기가 정수장에서 어떠한 역할을 하고 있으며, 기기의 동작이 정수장 전체에 어떠한 영향을 주는가에 대해 숙지하지 못하고 있다. 보수작업 중에는 기기의 정지나 기능이 악화되기도 한다. 위탁업자의 작업 중에는 정수장의 운전에 익숙한 직원에 의한 감시와 조연으로 위탁업자의 휴먼에러를 방지한다.

2. 하드면에 의한 저감방법

(1) 수도시설의 공통화 및 조작방법의 통일화

동일한 사업체에서도 일반적으로 정수장에 따라 설비나 기기의 조작방법이 다르다. 이로 인해 직원은 전근할 때에는 다시 조작방법을 습득해야만 한다. 또 기기에 따라 조작방법이 반대인 경우에는 반대조작을 하여 에러가 발생하는 원인이 된다. 이 배경에는 설비를 납품하는 제조회사가 다르다는 것을 원인으로 들 수 있다. 설비납품은 일반적으로 입찰로 제조회용이 저렴한 제조회사로 결정되는 경우가 많지만, 휴먼에러를 줄이는 관점에서는 보수부품, 조작성(운전원의 전근 등),

조작방법의 공통성 등도 고려해야 한다.

(2) 표시방식

기계 인터페이스의 프로세스 밸류(PV값) 지시계에서, 아날로그 지시계는 디지털 지시계에 비해 3배나 잘못 읽는다고 되어 있다. 그러나 아날로그 지시계는 디지털 지시계에 비해 그 지시값이 전체의 어느 정도 위치에 있는지 파악하기 쉽다는 특징이 있다. 예를 들면 배수지의 수위지시계의 디지털 지시값이 1.8m인 경우, 플랜트에 익숙한 운전원이라면 낮은지 높은지를 알 수 있다. 그러나 미숙련자라면 금방 알 수 없다. 구간이 2m라면 충분한 수위이지만, 15m이라면 수위는 이상 하한이다. 또한 수위를 TP로 표시하고 있는 경우에는 숙련되는데 오랜 시간이 걸린다. 이상에서 정수장의 프로세스 값은 버그 그래프로 전체의 비율을 표시함과 동시에 디지털로 PV값을 표시하는 병용방식이 휴먼에러를 줄이는 대책이다. 바(bar) 표시에는 자세한 눈금이 불필요하기 때문에, 운전원이 전체에서 차지하는 비율을 파악할 수 있는 것으로 한다.

(3) 휴먼에러의 저감 설계

정수장은 근대화와 함께 컴퓨터를 도입하여 다양한 지시값을 표시할 수 있게 되었다. 그러나 여러 표시나 기능은 복잡화를 초래하여 운전원에게 혼란을 일으키는 원인이 되기도 한다. 옛날의 검은색 전화기는 설명서도 필요없고 고장도 매우 적었으나, 요즘 휴대전화는 설명서가 없으면 사용할 수가 없다. 정수장은 운전조건이 맞지 않으면 스위치 조작이 가능하지 않는 인터록을 설치하거나, 기기 안은 하이테크일지라도 조작스위치를 가장 간단하게 하는 등 사용자 측의 시점에서 설계를 하여 휴먼에러를 줄이는 것이 중요하다.

(4) 식별표시

인지를 잘못하는 것으로, 형태나 색이 비슷하여 조작을 잘못하는 경우가 있다. 이와 같은 착각으로 인한 휴먼에러를 줄이기 위해서는 식별표시가 효과적이다. 특히 밸브류에는 개방형으로 좌우 모두 존재하기 때문에 우측을 열 때는 빨강색, 좌측을 열 때는 녹색으로 통일하는 것이 역회전방지에 효과적이다. 한신아와지(阪神淡路) 대지진 후에 수도사업체간의 상호지원협정을 체결한 사업체도 많아 지원하는 측의 밸브조작 오작동방지를 위해서도 통일된 색으로 하는 전국적인 전개가 필요하다.

(5) 페일 세이프 시스템(고장시 안전작동 시스템)

실수로 조작을 하여도 계통에 치명적인 영향을 주지 않는 시스템을 하드에 구축한다. 구체적인 예로 정수장은 밸브류가 많이 사용되고 있어 밸브조작을 할 기회가 많으나, 밸브류의

대부분은 전개(全開:전체열림)의 비율로 사용하지 않는다. 잘못으로 전개하였을 경우에도 필요 이상의 유량방지를 위해 오토밸브(자동밸브)나 오리피스(orifice) 등을 설치한다.

(6) 컴퓨터에 의한 운전지원

신뢰성 특히 한정된 요구기능이라는 면에서 보면 기계 쪽이 강력하고 안정적이며, 사람과 같은 생리적·육체적, 정신적, 심리적인 제약은 없다. 예를 들면 피로, 권태, 망각, 번덕스러움, 정신적인 공황 등은 없다. 그러나 상황판단에 기록한 바와 같이 제어프로세스값이 역치를 넘은 경우 운전원에게 그 결과를 알려주는 것이 상시 정확하고 또한 빈틈없이 가능해도 처리방법까지 알려주는 것은 불가능하다. 한편 사람은 대처방법에 대해 가정할 수 있는 사고를 모두 종합판단하는 것은 가능하지만, 제어프로세스값의 감시를 빈틈없이 하는 것은 어렵다. 이러한 양자의 특징을 이용하고 플랜트 감시에서 빠트림 방지를 위해, 어느 값을 초과하거나 또는 하회하였을 경우 자리수 틀림 등의 큰 설정값을 입력할 때 알람을 울리게 하는 운전지원을 설정하여, 휴먼에러를 줄인다.

3. 사고조사

본 연구를 통해 휴먼에러에 관한 기록이 없어 조사 및 분석이 충분히 이루어지지 못하였음을 알 수 있었다. 이로 인해 동일한 휴먼에러가 반복하여 발생하고 있다고 하겠다.

재발방지를 위해서는 휴먼에러를 극히 경미한 사고로 취급하고, 사고조사를 확실하게 하는 소프트웨어와 하드웨어의 양측면에서 대책을 검토하여 조직 내의 정보공유화와 주지철저를 도모한다. 실패에서 배운다는 말이 있듯이 동일한 에러가 반복되지 않도록 하는 것이 휴먼에러를 줄이는 가장 효과적인 대책이다.

저감효과

실제 데이터에 기초한 휴먼에러 저감방법을 제안하였으나 그 효과는 어느 정도인지, 또 무엇부터 우선 실시하면 되는지, 실시할 때 객관적인 지표가 필요하다. 휴먼에러는 사람의 심리학적 요소가 강하게 작용하기 때문에 객관적인 평가는 곤란하다. 그래서 본 연구에서는 문헌에서 얻은 정수장 이외의 프로세스에 관한 데이터 중에서 정수장과 관련된 데이터를 이용함과 동시에, 운전원에게 실시한 상황판단에 대한 테스트 결과를 활용하는 등 가능한 객관적인 평가를 하였다.

1. 에러모드에 대한 효과

그림 4, 그림 5는 각각 소프트웨어와 하드웨어의 정수장 에러모드와 본 연구에서 제안한 휴먼에러 저감방법의 상관관계를 표시한 것이다. 그림 4, 그림 5와 같이 저감방법이 하나의 에러모드에 대해서만 효과가 있는 것이 아니라, 상호 관련되어 복수의 에러모드에 대해 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 이는 저감방법을 하나라도 실시하면 복수의 에러모드에 효과가 있고, 복수의 저감방법을 강구하면 상승효과로 보다 많은 에러모드에 몇 배로 영향을 주어 큰 휴먼에러 저감효과를 기대할 수 있음을 보여주고 있다. 소프트웨어, 하드웨어의 휴먼에러 저감방법은 그림 4, 그림 5에 표시한 바와 같이 발생원인 및 에러모드별로 저감효과가 미친다. 이 효과는 그림 3에 표시한 비율로 효과가 있다고 말할 수 있다. 즉 「착각」에서는 확인부족의 개선으로 88.9%가 개선된다. 이하 마찬가지로 「무의식」에 대해서는 지식부족의 개선으로 75.0%, 「순서」는 기능, 지식, 확인부족의 개선으로 각각 33.3%, 29.2%, 37.5% 개선한다. 「망각」에서는 확인부족의 개선으로 인해 87.5%, 「빠트림」은 지식과 확인부족의 개선으로 41.7%, 58.3%가 기대치로 개선된다.

2. 평가의 지표

저감방법 각각에 대해 휴먼에러의 저감효과를 평가하기 위해서는 정수장의 휴먼에러에 관한 지표가 필요하다. 그러나 지금까지 정수장의 휴먼에러에 대한 지표는 없다. 그래서 정수장의 운전원

에게 실시한 테스트결과나 수도분야 이외의 문헌에서 얻은 휴먼에러에 관한 데이터 중에서 정수장의 보전활동의 지표가 될 수 있는 것을 사용하여 휴먼에러의 저감효과를 평가하였다.

(1) 실무경험

정수장의 운전원에게는 아래의 사항이 요구된다.

- ① 시스템의 정상동작시에 항목을 요구한 후 실시한다.
- ② 시스템에 이상이 발생하였을 때에 시스템의 상태를 진단하고 상황에 맞는 결정을 하여, 적절한 책임대책을 취해 회복시킨다.

이상에서 전자(前者)의 기계의 일부로서 한 Doing 보다도 후자(後者)의 결단 및 결정을 하는 Thinking and Deciding이 중요시된다. 그래서 ②의 상황판단력을 판정하는 지표로 하기 위해 운전원에게 테스트를 실시하였다. 테스트는 「정수장에서 침전지 탁도계의 지시값이 상승하였을 경우, 무엇이 원인인지 가정할 수 있는 것을 적어 주십시오」라는 설문으로 가정건수와 경험년수를 조사하였다. 가정할 수 있는 원인으로 응집제의 배관 막힘, 탁도계고장, 샘플링 펌프고장, 다른 지시값과의 착각 등 다수 있다. 조사결과 적게는 2건, 많게는 29건의 원인을 가정하였다.

그림 6은 조사결과를 그림으로 나타낸 것이다. 경험년수가 10년 이하인 왼쪽 아래쪽의 집합과 오른쪽 위쪽인 15년 이상의 집합으로 크게 나눌 수 있다. 경험년수가 10년 이상에서는 많게는 9건, 적게는 2건을 가정하였다. 그러나 경험년수가 15년 이상에서 적게는 10건, 많게는 29건이나 원인을 가정하였다. 이와 같이 운전경험이 오래된 자일 수록 이상시에 가정할 수

그림 4 에러모드 · 원인 · 소프트웨어 저감방법의 관계

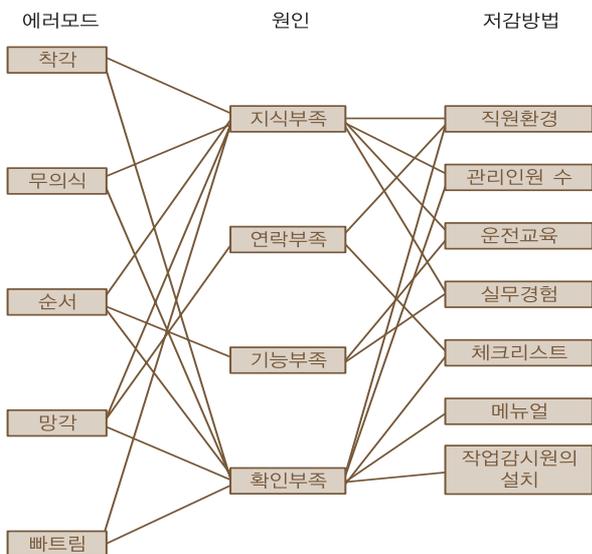
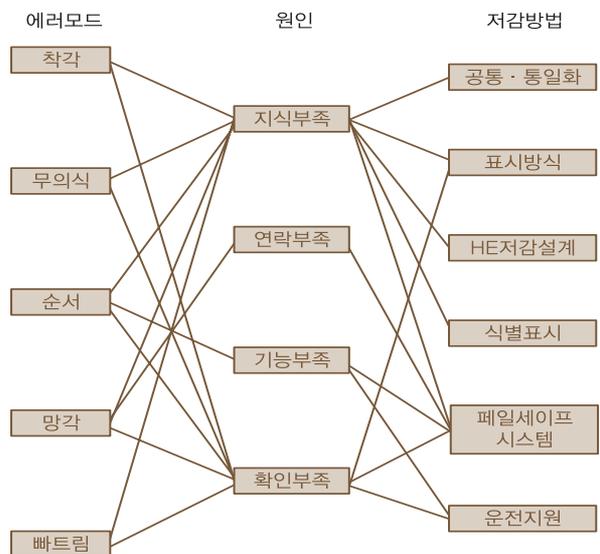


그림 5 에러모드 · 원인 · 하드웨어 저감방법의 관계



있는 원인의 건수가 많다. 경험년수가 긴 집단에는 개인차나 사고경험회수의 차이로 인한 오차를 볼 수 있으나, 정수장의 정보발생시 대응에 대한 경험년수에서는 확실한 차이를 볼 수 있었다. 실무경험을 거듭하면서 여러 경험을 통해 판단하고 행동할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 실무경험이 풍부하면 정확한 원인규명이 가능하고, 원인 외에 조작실수 등의 휴면 에러가 쉽게 발생하지 않는다는 것을 말해주고 있다.

(2) 표시방식

개별적인 업무 또는 독립된 업무가 계속해서 실행될 경우에, 가장 전형적인 인간신뢰성의 척도에는 HEP(Human Error Probability)가 있다. 이는 n회의 독립업무 중의 에러회수r을 통해 식(1)으로 추정할 수 있다.

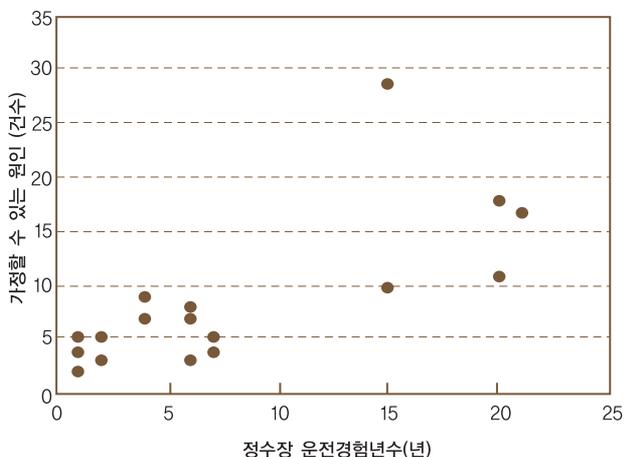
$$\text{에러 회수/전체시행 회수} = r/n \quad (1)$$

표 2 표시기의 HEP

표시기	HEP
아날로그 미터기	0.003
디지털 표시기	0.001

표 2는 음성이 나오지 않는 디스플레이의 수량을 읽거나 또는 기술할 경우의 Commission에러(Swain, Guttman 1983)이다. 이 데이터에 의하면 표시기의 수치를 읽는 HEP에서, 아날로그 데이터는 디지털 표시기(4자리수 이내)의 3배이다. 아날로그 미터기에는 수치를 읽을 때 자리수를 잘못 읽을 우려가 있는 수치에 승을 곱한 것과 3배 연장눈금 등 등간격눈금이 아닌 것이 있다. 표시방식을 선정할 때는 정수장이 요구하는 읽어내는 수치의 정밀도와 중요도를 감안하여 선정하는

그림 6 경험년수대 원인가정 건수



것이 휴면에러를 줄이는데 도움이 된다. 정수장의 보전활동 중에는 표시기를 읽는 확인작업이 많고 그림 5에서 표시방식의 개선으로, 지식부족과 확인부족이 줄어들었으며 또한 모든 에러모드의 휴면에러가 개선되는 것을 알 수 있었다.

(3) 메뉴얼

표 3은 메뉴얼(순서서)을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 HEP이다. 메뉴얼은 10항목 이하의 짧은 리스트로 된 HEP이나, 사용한 경우의 데이터는 순서서를 이용해서 사용해야 하는데도 사용하지 않은 경우의 HEP와 비교하여 50분의 1의 값이다. 즉 메뉴얼을 사용함으로써 확인부족으로 인한 에러를 50분의 1로 줄일 수 있다.

(4) 체크리스트

표 4는 업무순서를 체크하는 문서(체크리스트)를 사용하여 체크한 경우와 체크하는 문서를 사용하지 않은 경우의 HEP이다. 그림 4에 표시한 바와 같이 체크리스트를 사용함으로써 연락부족이나 확인부족에 의한 에러를 2분의 1로 줄일 수 있다.

(5) 관리인원 수

정수장의 보전활동에는 정수기기의 분해, 점검, 정비작업이

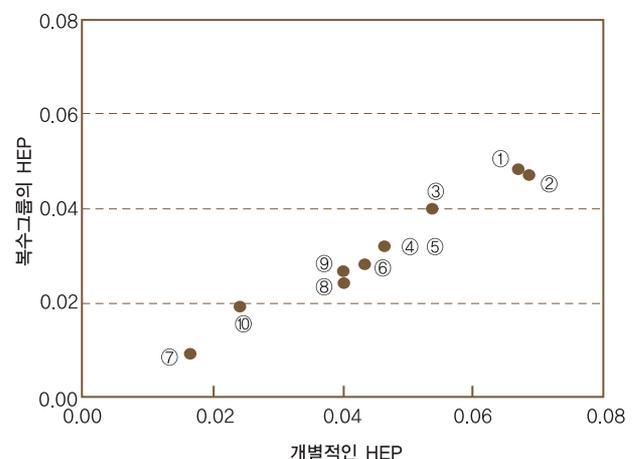
표 3 순서서의 HEP

메뉴얼	HEP
사용	0.001
비사용	0.05

표 4 체크리스트의 체크 에러율

항목	HEP
체크리스트를 사용하여 체크	0.1
체크리스트를 사용하지 않을 경우	0.2

그림 7 보전활동의 에러율



있다. 표 5는 정수의 정수기기 분해, 점검, 정비작업과 유사한 보전활동에 따르는 기계의 에러율이다. 그림 7에 표시한 바와 같이 개별적인 HEP와 비교하여 복수그룹의 HEP는 전체 업무에서 약20~30% 하회하고 있다. 이와 관련하여 복수의 인원에 의한 보전활동은 휴면에러를 줄일 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 또 표-3의 아날로그로 표시한 HEP는 0.003이다. 이를 독립한 2명의 관리인원으로 확인할 경우 HEP2를 고려하면 $HEP2=HEP \times HEP = 0.00009$ 가 되고, 디지털 표시를 1명에서 읽을 경우 HEP 0.001의 약 10분의 1이다.

표시방식을 아날로그에서 디지털로 변경하고 읽는 에러를 줄이는 하드면의 대책은 앞에서 말한바와 같다. 또한 소프트웨어의 대책으로서 관리인원을 늘려서 복수가 확인하여 읽는 에러를 줄이고, 하드면과 동일한 지식부족과 확인부족으로 인한 에러의 저감효과가 있다는 것을 알 수 있었다.

(6) 기타 에러율의 예

상기에 열거한 것 이외에 정수장의 운전조작과 관련된 에러율의 예를 표 6에 표시하였다.

3. 저감방법과 그 효과의 검토방법

여기에 제시한 휴면에러의 구조를 정리한 결과와 저감방법 효과의 정량적인 데이터를 사용하여, 계통적인 휴면에러 대책을 검토

표 6 기타 사람의 에러율

활동	HEP
감시업무	0.15
펌프의 기동	0.001
밸브의 닫는 조작	0.0018
수동밸브 조정	0.00015
원격밸브 조작	0.004

표 5 보전활동을 하는 기계학의 에러율(Irwin et al. 1964)

No	항목	개별HEP	복수그룹의 HEP
①	터보펌프의 기어박스 압력저하 체크	0.068	0.047
②	전기적인 체크 준비	0.067	0.048
③	육안에 의한 테스트 후의 작업구역 검사, 전체가 정비되어 있는지, 도구는 깨끗하게 되어 있는지	0.053	0.040
④	터보기어박스의 기름받이에 주유	0.046	0.032
⑤	기어박스의 기름받이 서비스	0.046	0.032
⑥	터보펌프의 토크테스트 준비	0.043	0.028
⑦	서브어셈블리의 터보펌프 토크체크에 대한 준비	0.017	0.009
⑧	서브어셈블리의 터보펌프 토크체크에 대한 실행	0.040	0.025
⑨	기어박스 가압키트 부착준비	0.040	0.026
⑩	터보펌프의 연료펌프 도구의 누수체크 실행	0.024	0.019

하였다. 「착각」의 사례인 「차아염소산 주입기의 밸브착각 조작」으로 인한 잔류 염소값의 상승과 관련된 사고의 방지대책 효과에 대해 정량적으로 검토해 본다.

그림 3에서 「착각」의 원인은 「확인부족」이 88.9%, 「지식부족」은 11.1%로 볼 수 있다. 즉 가령 「지식부족」을 완전히 없앨 수 있다면 「착각」은 88.9%까지 줄일 수 있다.

그리고 「착각」의 발생에 대해 아래식과 같이 정식화해 본다.

$$\text{「착각」} = 0.889 \times \text{「확인부족」} + 0.111 \times \text{「지식부족」} \quad (2)$$

그림 4에 표시한 정리에 의하면 「지식부족」에 대해서는 관리인원의 증가나 운전교육의 실시, 실무경험의 증가로 작게 할 수 있다. 또 「확인부족」은 직장환경의 개선, 관리인원증가, 체크리스트나 메뉴얼의 정비, 작업감시원의 배치 등으로 작게 할 수 있다고 하겠다.

실무경험과 지식부족과의 관계를 그림 6을 참고하여 아래와 같이 생각해 본다. 그림 6에 의하면 정수장의 운전경험 연수와 이 상시에 가정할 수 있는 원인의 건수와는 거의 비례관계에 있다고 가정한다. 이 이상시에 가정할 수 있는 원인건수가 실무경험으로 배양된 지식량을 보여주는 것으로, 지식부족의 지표를 경험년수의 역수(逆數)로 표시한다. 즉 1년째의 운전원 지식부족은 1이며, 연수가 증가함에 따라 0을 향해 감소한다고 가정한다. 현재 실무경험이 2년인 운전원에 의해 운전되고 있는 것을 경험이가 5배인 10년의 운전원으로 바꿀 경우 「확인부족」의 지표는 1의 상태로 변화하지 않는다고 가정하면 식(2)에서 「착각」은 현재 $0.889 + 0.111 \times 1/2 = 0.945$ 이다. 그러나 변경 후에는 $0.889 + 0.111 \times 1/10 = 0.900$ 이 되어 지금보다 약 5% 줄어들 수 있다고 예상된다.

만약 신입 운전원이 배치되면 「지식부족」=1이 된다. 그리고 밸

브조작을 잘못하지 않도록 체크리스트를 사용케 하면 표 5에서 확인부족을 1/2로 줄일 수 있다고 생각할 수 있다. 따라서 식(2)에서 $0.889 \times 1/2 + 0.111 \times 1 = 0.556$ 이 되어 체크리스트가 없는 경우보다 약 44% 「착각」을 감소시킬 수 있다고 생각된다.

이는 운전교육을 잘 실시하고, 원인의 11.1%를 차지하는 「확인부족」을 적게하는 것 보다 효과가 크다고 예상된다.

또 「빠트림」의 사례인 「정수 피쉬모니터의 하이포주입 튜브에서 한 누액 빠트림」에 대해 검증해 보도록 하겠다. 그림 3에서 「빠트림」의 원인은 「확인부족」 58.3%, 「지식부족」이 41.7%이다. 따라서 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{「빠트림」} = 0.583 \times \text{「확인부족」} + 0.417 \times \text{「지식부족」} \quad (3)$$

앞의 예와 마찬가지로 체크리스트를 사용한 경우는, 사용하지 않은 경우에 비해 확인부족을 1/2로 할 수 있으며, 식(3)에서 「빠트림」= $0.583 \times 1/2 + 0.417 = 0.709$ 가 되어 빠트림을 70.9%로 줄일 수 있다고 생각된다. 이상과 같이 이와 같은 데이터를 정비해 감으로써 휴먼에러를 방지하기 위한 효과적인 대책이나 비용과의 비교 등을 정량적으로 검토하는 것이 가능하다고 생각된다.

4. 운전업무의 민간위탁과 관련된 문제의 검토

2002년 4월 시행된 개정수도법에 따라 기술상의 업무를 민간위탁할 수 있게 되었다. 향후 민간위탁의 도입은 정수장의 운전업무를 검토하는 사업체가 많아질 것으로 생각되기 때문에, 예상되는 휴먼에러와 효과적인 저감방법을 검토하였다. 민간위탁의 도입시 운전원의 능력에 대한 문제점을 들 수 있으나, 지금까지 주관적으로 논하여 왔다. 본 연구에서는 이 문제를 보다 객관적으로 검토하여 효과적인 휴먼에러 저감방법에 대해 의견을 말하고자 한다.

(1) 민간위탁 도입시에 예상되는 휴먼에러

정수장의 운전관리를 민간위탁하고 있는 사업체는 적기 때문에 민간위탁 도입시에 운전경험이 풍부한 인재를 필요한 인원수만큼 확보하는 것이 곤란하다. 따라서 민간위탁 도입시에는 도입 전에 비해 경험년수가 짧은 자가 운전관리에 종사하게 된다.

운전원에게 실시한 테스트의 결과인 그림 6에서 5-3에 가정한 바와 같이 경험년수와 「지식부족」은 반비례한다고 생각할 수 있다. 「지식부족」은 그림 4, 그림 5에서 모든 에러모드의 원인이 되며, 그 중에서도 그림 3에서 에러모드 「무의식」 「빠

트림」 「순서」의 휴먼에러가 많이 발생한다고 예상된다.

(2) 효과적인 저감방법

「지식부족」이 원인인 휴먼에러의 저감방법으로서, 소프트웨어에서는 그림 4에서 「관리인원」 「운전교육」 「실무경험」, 하드면에서는 「공통 및 통일화」 「표시방식」 「HE저감설계」 「식별표시」 「페일세이프 시스템」이 효과적이라는 것을 알 수 있다. 「실무경험」은 민간위탁을 장기계약으로 하여 운전원을 육성한다.

따라서 민간위탁 도입시에는 지금까지 1명이 실시하였던 업무를 필요한 지식습득까지의 기간에 2명으로 하고, 민간위탁으로의 이행기간을 설정하여 경험이 풍부한 운전원에 의한 운전교육을 실시하고, 시설은 전문적인 지식을 필요로 하지 않는지, 표시는 보기 쉽게 되어 있는지, 조작은 쉬운지 등 시설을 총점검한 후 필요한 개선을 하는 것이 휴먼에러를 줄이는 방법으로 효과적이다.

마무리

정수장의 휴먼에러 연구는 인적행동의 분석으로, 지금까지 과학적인 시점에서 연구된 적이 없었다. 본 연구는 이를 가능한 한 객관적으로 평가하고, 그 결과로서 발생한 특성과 경향을 파악할 수 있었다. 또한 그 특성을 토대로 저감방법을 제안함과 동시에 제안한 저감방법의 효과를 정량적으로 계산하였다.

일반적으로 실수를 기록하는 경우는 적다. 이로 인해 에러를 발생시키는 원인을 특정할 수 없어 에러가 반복될 우려가 있다. 최근 여러 정수장에서는 컴퓨터를 이용한 운전관리시스템이 도입되고 있어, 사람과 기계의 인터페이스를 최적화하기 위한 휴먼에러의 방지는 중요한 접근방법의 하나라고 생각할 수 있다.

에러를 분석하여 휴먼에러의 실체와 그 특성을 파악함으로써, 효과적인 페일세이프 시스템이나 적절한 운전지원시스템의 구축이 가능하다. 또한 운전관리의 민간위탁 도입시에도 경험이 짧은 오퍼레이터가 안전하게 운전업무를 하는데 귀중한 정보가 될 수 있다. 또 정수장의 휴먼에러가 원인인 사고는 때로 인사사고를 야기시킬 위험성도 있다. 이러한 의미에서 휴먼에러의 연구는 안정적인 급수에만 머무르지 않고, 직장이기도 한 정수장의 노동재해 방지를 위한 안전관리에도 효과적이다.

향후에도 본 연구의 성과를 활용하여 정수장이 있는 현장의 휴먼에러 저감에 노력하고자 한다. ☺