

원자력발전소 인적행위 분석 지원 전산시스템(CAS-HPES) 개발

김왕배, 정백순, 양승욱
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

본 논문에서는 현재 국내 전 원자력발전소에서 운영중인 원자력발전소 인적행위 개선시스템(K-HPES)의 분석 과정을 전산화 함으로써 분석자에 따른 분석의 정확성과 분석 수준의 일관성을 유지하고 그 결과의 활용도를 극대화하기 위해 개발된 전산시스템을 소개하였다.

1. 서론

원자력발전소와 같은 대형 시설에서 안전을 결정하는 요소는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 그 첫째는 기계 및 설비 자체의 신뢰도이며 둘째는 그 기계/설비들을 다루는 사람의 신뢰도이다. 이 인적신뢰도를 다루는 인간공학의 관심 분야는 인간의 신체적, 정신적 능력과 한계, 그리고 이들과 기계, 설비, 작업 및 환경 등이 갖는 상호관계이다. 1970년대와 80년대에 이룩된 기계, 전자, 제어분야 등에서의 기술발전에 힘입어 원자력발전소 설비 자체의 신뢰도가 향상됨에 따라 설비 및 기기 결함에 의한 사고는 감소되고 있는 반면, 원전 운전원 및 보수요원 등 종사자들의 인적요인에 의한 사고빈도수에는 큰 변화가 없는 실정인바, 이로 인해 상대적으로 인적요인에 의한 사고비율은 점차 증가하고 있는 추세이다.

1979년 미국 TMI 원전에서 발생한 사고와 1986년 소련에서 발생한 Chernobyl 원전 사고는 원전안전에 대한 국제적인 우려를 낳게 하였다. 특히, 이 사고들의 주요 원인이 운전원의 불필요한 행동 즉, 인적오류(human error)라는 것이 밝혀짐에 따라 인적오류가 원전의 안전성을 좌우하는 중요한 요소로 부각되었다. 통계마다 차이가 있기는 하지만, 일반적으로 모든 원전 사고원인의 50% 이상이 인적오류라는 것이 전문가들의 공통된 견해여서 전세계적으로 원전에서의 인적오류 저감을 위한 많은 노력이 계속되어 왔다.

2. 연구 목적 및 개요

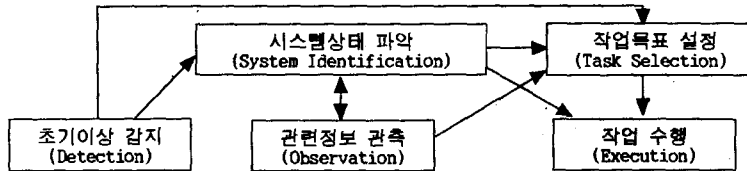
K-HPES 업무는 크게 사건 및 사고의 분석 업무와 분석결과의 보고 및 전파 업무로 나눌 수 있다.[1] 본 연구의 목적은 이러한 K-HPES 관련 업무를 지원하는 전산시스템의 개발에 있다. 현재 국내 원전에서 운용중에 있는 K-HPES는 사고 분석 및 보고서 작성시 한글편집기를 사용한다는 것 이외에는 기본적으로 서류 작성 시스템이다. 이러한 비전산 시스템이 갖는 비효율성 및 한계를 개선하기 위하여 K-HPES의 전산화 필요성이 제기됨에 따라 1995년 K-HPES 전산시스템 개발을 위해 본 연구를 착수하였다.

본 연구를 통하여 개발된 K-HPES 전산시스템은 분석에 대한 전산지원시스템이라는 의미에서 CAS-HPES(Computer Aiding System for HPES)라고 명명되었으며, 그 주요 기능은 다음과 같다.

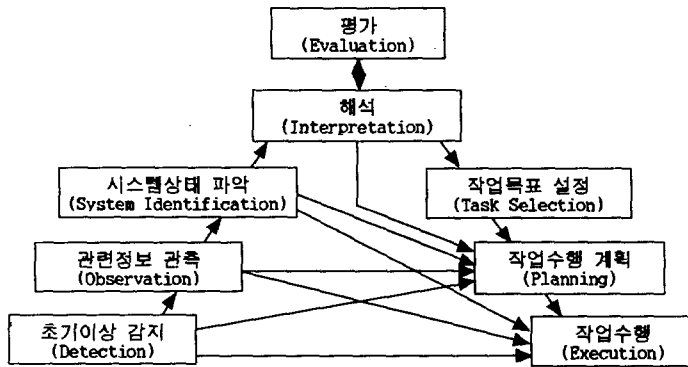
- 가. K-HPES 분석업무 지원 기능
- 나. K-HPES 보고서 작성업무 지원 기능
- 다. K-HPES 분석 결과 통계 검색 기능

3. 이론적 배경

어떤 영역에서의 인지행위 및 인지오류를 분석하기 위해서는 기본적으로 그 영역에서의 인지행위 수행자가 어떠한 의사결정 과정을 거쳐 업무를 수행하게 되는가를 나타내는 인지모형의 설정이 필요하다. K-HPES 분석의 대상이 되는 원전에서의 인지행위 수행자는 원전 운전원 및 보수원들로 <그림 3.1>과 같은 운전원 인지모형이 개발되어 현재 원전에서 운용중인 K-HPES의 중심 이론으로 적용되었다.



<그림 3.1> 원자력발전소 운전원 의사결정모형 (5단계 인지모형)



<그림 3.2> Rasmussen의 8단계 인지모형

이 인지모형은 인간공학자들에게 널리 받아들여지고 있는 Rasmussen의 8단계 인지모형(<그림 3.2>)을 인지공학적 전문지식이 없는 발전소 현장 분석자들이 쉽게 사용할 수 있도록 5단계로 단순화한 것이다.[2] 즉, Rasmussen 모형에서의 평가(Evaluation) 및 해석(Interpretation) 단계는 원전 운전 체계하에서의 의미가 모호하여 생략하였고, 작업수행계획(Planning)단계는 원전 운전 체계 하에서는 독립적인 존재 이유가 미흡하여 그 의미가 가장 가까운 작업목표 설정(Task Selection)단계와 통합하였다.

인지행위의 명확한 분석을 위해서는 앞서 설명한 운전원 인지모형과 함께 인지오류의 분류체계가 필요하게 되는데, 현 K-HPES 시스템에서는 5단계 인지모형을 기반으로 개발된 “동적오류분류체계”라는 인지오류의 동적 분류체계(Dynamic Classification Scheme for Cognitive Errors)를 사용하였다. 이 오류 분류체계는 사건/사고에 관련된 인지오류를 명확히 분석하기 위해 원전 운전 및 보수 작업 중에 발생할 수 있는 모든 종류의 인지오류를 형태(error form) 및 원인(error cause)별로 분류하였다.

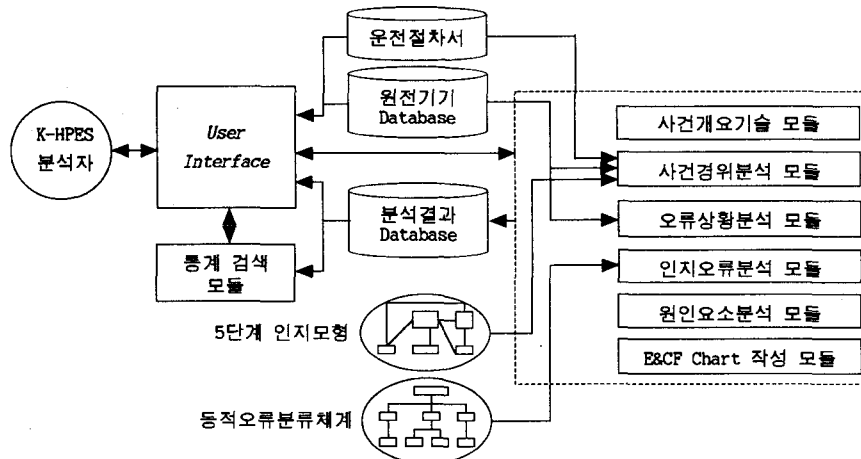
5단계 인지모형과 동적오류분류체계는 K-HPES 운용체계의 핵심 개념이 되는 것으로, CAS-HPES는 모든 인지행위의 분석이 바로 이 5단계 인지모형과 이를 기반으로 원전의 상황에 맞게 개발된 동적오류분류체계를 중심으로 이루어지도록 설계되었다. CAS-HPES에서 제공되는 이 5단계 인지모형과 동적오류분류체계는 K-HPES 분석자로 하여금 보다 명확한 오류분류와 오류분석을 가능하게 하여 줄 뿐만 아니라 사건 전개

상황에 대한 분석자의 이해를 돕고 필요할 경우 사건의 재구성 및 재해석을 용이하게 해 주는 역할을 수행하게 된다.

4. CAS-HPES 개요

4.1 CAS-HPES 구조

CAS-HPES에서는 사건개요기술, 사건경위분석, 오류상황분석, 인지오류분석, 원인요소분석의 5단계 분석절차를 거쳐 사건/사고에 대한 인적행위 분석을 수행한다. 전산시스템인 CAS-HPES에서는 각 분석 단계에서 필요한 분석 지원 기능들을 일종의 프로그램 그룹인 소프트웨어 모듈(Software Module)로 구현하여 효율적인 프로그램 관리를 가능하게 하였으며, 모든 분석 결과는 Database에 저장되어 추후 분석자가 필요할 경우 조회 할 수 있도록 하였다 (<그림 4.1> 참조). 또한, 운전절차서, 기기 Database, 원전 운전원 의사결정 모형인 5단계 인지모형, 동적오류분류체계는 해당 분석 모듈과 연계되어 필요한 분석 지원 기능을 제공하며, 통계 검색 모듈은 분석된 사건들에 대한 통계 및 분석 내용을 조회할 수 있는 기능을 제공한다.



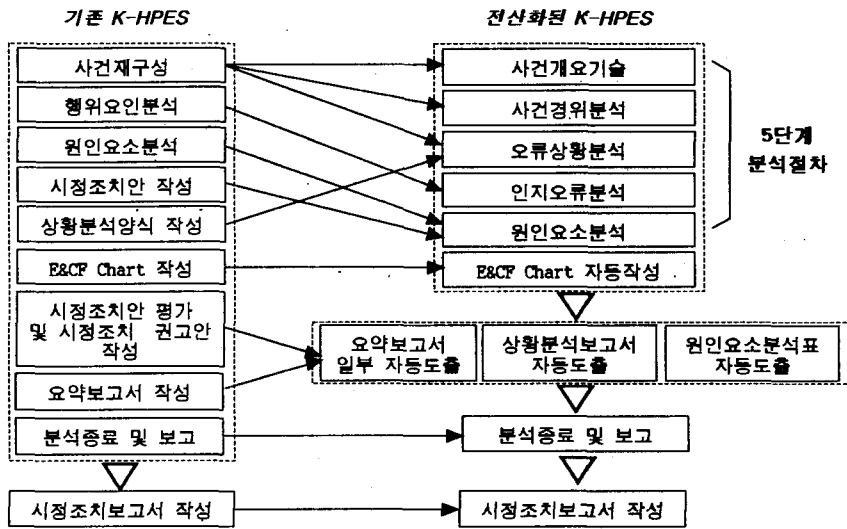
<그림 4.1> CAS-HPES 구조 개요

4.2 CAS-HPES 기능

CAS-HPES의 기능은 분석 지원기능, 보고서작성 지원기능, 통계 검색 기능 등 세 가지로 나눌 수 있으며, 이들 기능 중 핵심이 되는 것은 분석 지원 기능으로 앞에서 설명된 5단계 인지모형을 기본으로 설계되었다. 분석 지원 기능은 CAS-HPES 사용자를 분석 체계에 따라 순차적으로 인적행위 분석으로 유도하고 필요한 세부 기능을 지원해 줌으로써 분석 경험이 부족한 분석자들도 큰 어려움 없이 분석 업무를 수행할 수 있도록 설계되었다. 이 밖에도 각 분석 단계마다 온라인(On-Line) 도움말 기능을 제공함으로써, 필요하면 분석 도중 언제라도 분석 방법에 대한 상세 설명을 제공받을 수 있다. CAS-HPES 사용자는 이런 기능들을 이용하여 보다 편리하게 K-HPES 분석업무를 수행할 수 있을 것이며 분석결과 또한 쉽게 검색, 조회할 수 있어, 이로 인하여 보다 정확하고 일관성 있는 원전 인적행위 분석 및 효율적인 분석결과 활용을 기대할 수 있게 되었다.

5. CAS-HPES를 활용한 분석 절차

본 연구에서는 보다 효율적인 전산시스템의 활용을 위해 기존의 K-HPES 분석체계를 <그림 5.1>에서와 같이 수정, 개선하였다. 전산시스템에서는 서류양식에서와는 달리 순차적으로 분석업무를 수행토록 유도하는 것이 필요하므로 사건개요기술, 사건경위분석, 오류상황분석, 인지오류분석, 원인요소분석 등 5단계의 분석 절차를 개발하여 CAS-HPES 사용자가 이 절차를 따라 사건 분석을 수행할 수 있도록 하였다. CAS-HPES에서는 이 5단계 분석절차를 완료하면 E&CF Chart와 각종 K-HPES 보고서들의 내용이 대부분 자동으로 작성된다.



<그림 5.1> 기존 K-HPES 분석체계와 개선된 분석체계

5.1 사건개요기술 모듈

이 모듈은 해당 사건/사고의 보고서번호, 사건발생일시, 제목, 개요, 결과 등 사건과 관련된 개괄적인 정보를 기술하는 모듈이다. 이 중 보고서번호, 사건발생일시, 보고서제목은 사건 등록 시 입력된 내용이 자동적으로 표시되므로, 분석자는 사건개요 및 결과의 내용만을 입력하면 된다.

5.2 사건경위분석 모듈

사건경위분석 단계에서는 분석자가 사건/사고 당시 계통 시스템의 상태나 운전원의 행동을 개조식으로 기술하도록 설계하였다. 사건경위 구성 과정에서 분석자의 업무를 방해하지 않는 한도 내에서 미리 구성된 양식과 컴퓨터 지원 기능을 통하여 최대한 현장의 객관적인 상황 정보가 기술될 수 있도록 하였다.

이 모듈에서는 분석자의 필요에 따라 운전원 의사결정단계 모형인 5단계 인지모형을 보여준다거나, 기 Database를 조회하여 관련 기기명이나 기기번호 등을 입력하거나, 절차를 조회하는 등의 분석 지원 기능을 사용할 수 있도록 하였다. 또한, 이 모듈은 후속 단계인 오류상황분석, 인지오류분석, 원인요소분석 모듈 및 E&CF Chart의 자동 작성 기능과 논리적인 연관관계를 갖도록 설계됨으로써 일관성 있는 분석결과가 도출될 수 있도록 하였다.

5.3 오류상황분석 모듈

오류상황분석은 사건경위분석 단계에서 파악된 인적오류를 대상으로 해당 오류가 발생하게 된 배경 상황을 분석하는 단계이다. CAS-HPES에서는 상황발생일시, 장소, 상황감지 장소, 감지 당시의 직무 등 19개에 해당하는 상황 요소를 메뉴 형식을 통하여 사용자에게 제공함으로써 분석자가 손쉽게 정보를 입력할 수 있도록 설계하였다. 화면 상단에는 이전 단계인 사건경위분석 단계에서 파악된 인적오류들의 목록이 표시되고 이 목록 중 하나를 선택하면 해당 오류의 배경 상황이 하단에 표시되도록 설계되었으며, 사용자의 편의를 위해 오류상황 복사 기능 및 기기 Database 조회 기능을 제공한다.

5.4 인지오류분석 모듈

인지오류분석은 사건경위분석 단계에서 파악된 인적오류와 인적오류경로를 바탕으로 각 의사결정단계에서의 오류 형태 및 원인을 CAS-HPES에서 제공되는 동적오류분류체계를 이용해 파악하는 단계이다. 이러한 인지오류분석 체계는 파악된 오류 발생 및 전과 경로를 바탕으로 단계별 오류 원인과 형태에 대한 분류가 이루어짐으로써 입체적인 오류 구성이 가능하게 되는 장점을 가지고 있다.

이 분석 단계에서는 분석대상 오류와 오류경로 목록은 사건경위분석 단계에서 파악된 내용에 의해 자동적으로 표시되며, 인지적 오류 형태 및 원인들을 메뉴 형식을 통하여 입력할 수 있도록 하는 한편 추가 설명이 필요할 경우 자유롭게 기술할 수 있도록 하였다.

5.5 원인요소분석 모듈

사건경위분석을 통해서 인적오류의 윤곽이 드러나고 인지오류분석을 통해서 오류의 인지적 형태 및 원인이 분석된 후에는 오류의 인지적 원인 이외에 작업수행에 영향을 미친 주변환경, 조직 및 관리상의 문제점 등 보다 광범위한 오류 원인에 대한 파악을 위해 원인요소분석을 수행하게 된다. 단, 원인요소분석의 대상이 되는 것은 사건경위분석 단계에서 인적오류라고 판정된 사건경위 뿐이며, 그 이후의 전과 과정에서 발생한 오류는 분석 대상에서 제외되도록 설계하였다.

5.6 E&CF Chart 및 보고서 작성 모듈

E&CF Chart는 전반적인 사건 내용을 도형 기호를 이용하여 입체적으로 표현하여 주는 그림이다. E&CF Chart는 사건 흐름에 대한 정보를 함축성있게 전달하여 줌으로써 복잡한 상황의 사건을 분석자가 한 눈에 파악하고 이해할 수 있도록 하여 준다. CAS-HPES는 앞서 설명한 5단계 분석절차를 통하여 입력된 내용 및 시정조치안을 바탕으로 자동적으로 E&CF Chart를 그려줌으로써 K-HPES 분석자의 업무를 경감시켜 주었다.

K-HPES 분석 후 최종적으로 작성되어야 하는 보고서는 요약보고서, 상황분석보고서, 원인요소분석표, 시정조치보고서 있다. CAS-HPES는 요약보고서의 일부 항목과 시정조치보고서를 제외한 모든 보고서를 사건 분석시 입력된 내용을 바탕으로 자동으로 작성하여 준다. 요약보고서에는 사건의 개요, 인적오류의 내용, 대책안 등이 작성되며 문제점의 분석 결과를 관리자에게 보고하기 위한 것이다. 상황분석보고서는 인적오류 발생상황에 대한 조사분석의 내용이 포함된다. 원인요소분석표는 인적오류의 직접/간접/잠재적 원인 항목에 대해서 분석자가 파악한 내용이 포함되어 진다. 시정조치보고서는 분석이 끝나고 시정조치가 지시된 후 지시된 사항의 수행 내용에 대한 상세 기록 및 확인을 위한 보고서이다.

5.7 분석결과 통계 검색 모듈

CAS-HPES는 기존의 분석된 사건들을 대상으로 사건의 검색을 지원하고 시기별, 상황요소별 등의 여러 가지 의미있는 범주로 사건의 원인을 통계 처리하여 인적오류의 경향을 파악할 수 있도록 함으로써 효율적인 인적행위 연구 및 대책안 수립을 지원해준다.

6. CAS-HPES의 분석 지원 기능

6.1 기기 Database 지원

CAS-HPES를 이용한 사건 분석 절차 중 '사건경위 분석' 및 '오류상황 분석' 단계에서는 경우에 따라 기기 종류나 기기 번호 등 사건과 관련된 기기에 대한 정보가 필요하게 된다. 본 연구에서는 이러한 분석 지원 기능 및 분석 결과의 효과적인 활용을 위해 한국 표준형 원전을 대상으로 기기 Database를 구축하였으며, 기기 Database 편집기 및 계통분류 편집기 등 Database 관리를 위한 관련 전산기능도 함께 구현하였다.

6.2 절차서 조회 지원

K-HPES 분석자가 CAS-HPES를 이용하여 사건에 대한 분석 업무를 수행하는 분석 절차 중 '사건경위 분석' 단계에서 경우에 따라 관련절차서를 조회할 필요가 있게 된다. 절차서 조회기능은 이러한 경우 효과적인 분석 지원을 위해 구축되었다. 원자력발전소에서 사용되어지는 다양한 종류의 절차서 가운데 본 과제의 대상 원전인 한국 표준형 원전(울진 3, 4호기)의 운영절차서 파일이 CAS-HPES와 연계되어 K-HPES 분석시 절차서 조회기능을 사용하게 되면 바로 해당 절차서가 조회되도록 하였다.

7. 결론

본 연구에서는 문서작성체계(pencil-and-paper)로 운용되고 있는 현 K-HPES 운용 체계의 전산시스템인 CAS-HPES(Computer Aiding System for HPES)를 개발하였다. CAS-HPES는 원전 인적행위 및 인적오류의 체계적인 분석과 분석 결과의 효율적인 활용을 가능하게 하여 주는 종합적인 인적행위 개선시스템으로 사건 분석 절차를 자연스럽게 유도해 줌으로써 일관성 있는 분석을 가능하게 하고, 분석에 필요한 다양한 지원 기능을 제공하여 줌으로써 K-HPES 분석자가 쉽게 사건 분석을 수행할 수 있도록 하며, 각종 보고서들을 자동으로 작성하여 줌으로써 업무 부담을 경감시켰다. CAS-HPES 기본 기능들의 적정성 및 사용 편의성은 현장 K-HPES 담당자를 대상으로 실시한 검증을 통해 그 우수성을 인정받았으며 가까운 장래에 국내 모든 원전에서 사용될 예정이다. CAS-HPES가 현장에 적용되어 K-HPES 분석 업무에 이용될 경우 원전 인적행위 분석 업무에 혁신적인 개선을 가져올 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] 한국전력공사 기술연구원 (1993), 원자력발전소 인적행위개선시스템(K-HPES) 개발(1), KRC-92-J09, 과제 최종보고서.
- [2] Rasmussen, Jens (1986), Information Processing and Human-Machine Interaction: an Approach to Cognitive Engineering, New York: Elsevier Science Publishing Co., Inc.