

인적오류 방지 및 운전편이성 증대를 위한 차세대원자로 전산화절차서 MMI 설계

MMI Design of K-CPS for Preventing Human Errors and Enhancing Convenient Operation

성찬호, 정연섭, 오웅세, 신영철, 이용관

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

종이절차서의 단점을 보완하여 인적오류를 줄이고 운전 편이성 증대를 위해 컴퓨터를 기반으로 하는 절차서 개발이 진행되고 있다. 차세대원자로에 적용될 전산화절차서 역시 이러한 목적에 부합하기 위해 인간공학적 설계 개념을 도입하여 설계되고 있다. 차세대원자로 전산화절차서(K-CPS)는 종이절차서보다 고수준의 자동화 기능을 가지고 있으며, 제어 및 감시시스템과 통합되어 있다. 또한, 발전소 상태에 따라 동적으로 변하는 기기와 절차서 문구를 연결함으로써, 절차서의 readability를 강화한다. 본 논문은 전산화절차서의 일반적인 설계기준을 제시하고, 현재 개발된 K-CPS의 MMI 설계 특성과 Mockup 에 구현된 K-CPS 절차서에 대해 운전원 적합성 평가 결과를 보여주고자 한다.

Abstract

In order to supplement defects of paper procedure, reduce human errors and enhance convenient operation, computer-based procedure system is being developed. CPS (Computerized Procedure System) including human-factor engineering design concept for KNGR (Korean Next Generation Reactor) has been also developed with the same object. K-CPS(KNGR CPS) has higher level of automation than paper procedure. It is fully integrated with control and monitoring systems. Combining statements and relevant components, which changes dynamically according to plant status enhances readability of procedure. This paper shows general design criteria on computer-based procedure system, the MMI design characteristics of K-CPS and the results of suitability evaluation for K-CPS by operator.

1. 서 론

TMI 사고 이후, 운전원의 인적오류 사항은 원자력발전소 운전의 중요 이슈가 되어, 새로이 설계되는 발전소의 거의 모든 부분에 인적오류를 줄이기 위한 노력이 시도되고 있다. 그 노력의 일

환으로 인간공학적 설계의 적용이 필수적인 기본요소로 요구되고 있다. 디지털화의 시대적 흐름에 따라 원자력 발전소도 역시 디지털화로 설계되는 추세이다. 특히 디지털의 적용을 가장 많이 받는 주체어실 디지털화 설계는 차세대 발전소의 주요한 이슈가 되어있다.

차세대발전소에는 기존의 발전소에서 사용중인 운전을 위한 절차서를 디지털화, 즉 전산화하기 위한 노력이 진행중이다. 전산화절차서는 기존의 종이 절차서 운전에서 가지고 있는 인적오류 발생가능성을 줄이며, 운전원 부담을 적게 하여 운전 편이성을 도모하는데 그 목적이 있다. 원자력 발전소 운전에서는 작은 오류도 큰 사고를 일으킬 수 있는 가능성을 배제할 수 없기 때문에, 인적 오류를 줄일 수 있는 전산화절차서의 설계는 반드시 요구된다.

2. 종이절차서 운전으로 인한 예상오류

종이절차서 운전에는 기본적으로 많은 제약이 따른다. 과도한 양의 절차서, 부적절한 분류, 기술적인 부정확성, 절차서 수행에 있어 명확한 목표나 구분의 부족, 운전 행위에 대한 모호한 표현 등등 이러한 제약은 운전원에게 큰 부담을 갖게 하고 있으며, 운전 성과와 관련하여 많은 문제점을 지니고 있다. 또한 아래와 같은 운전원의 오류로 인하여 안전과 관련된 중요한 오류를 야기할 수도 있다.[1]

- 절차서 수행 중에 스텝(Step)을 빼먹고 수행하는 경우
- 순차적 수행을 벗어나는 경우
- 잘못된 step을 사용하는 경우
- 오류가 있고, 부정확한 절차서를 사용하는 경우
- 불완전한 참고자료로 인해 잘못된 절차서를 따르는 경우
- 변경된 절차서를 사용치 않고 현재 절차서를 고수하는 경우

3. 전산화절차서 설계시 고려 되어 할 기본 사항

전산화절차서 설계시 일반적으로 고려되어야 할 사항들은 크게 다음과 같은 기준으로 적용되어진다.[1]

3.1 설계과정과 운영지원

전산화절차서 개발 시에 종이절차서 설계 및 운영상 도출된 문제점들을 보완할 수 있어야 한다.

3.2 일반적인 인지 (Cognitive) 부하

전산화절차서는 운전원들로 하여금 주요한 요소나 작업 기억에 대한 과도한 요구사항을 줄일 수 있어야 하며, 보다 높은 수준의 절차서 수행 목표에 초점을 맞추도록 설계되어야 한다. 또한, 변수 값을 구하고 감시하고, 실제값과 참고값을 비교하고, 계속적 수행을 요하는 스텝(Step)을 감시하는 등의 인지적인 기능에 대해 지원 가능해야 한다.

3.3 상세화 수준

전산화절차서는 수행작업이나 제어기기, 발전소 계통에 대한 숙지도가 다양한 운전원들을 위해 절차서 상세화에 대한 수준을 조정 가능할 수 있도록 해야 하며, 운전원들이 절차서에 정의된 처리 과정을 수행하는데 있어 절차서 사용 안내(Guidance)를 효과적으로 이용할 수 있도록 해야 한다.

3.4 상황 민감도

현재 상황과 관련된 절차서 스텝(Step)들만 표시하도록 하여 운전원들이 불필요한 정보로 인해 산만하게 되지 않도록 해야 한다.

3.5 순차적 제어와 네비게이션(Navigation)

컴퓨터 네비게이션과 관련된 정보의 접근은 언제라도 가능해야 하며, 계속 수행 스텝이나 time-dependent 스텝은 그 스텝의 수행이 필요되어질 때, 자동적으로 탐지되어 제어 한다. 또한, cross-referencing 기능이나 place keeping 기능이 수행 가능해야 한다.

3.6 다수의 절차서 운용

전산화절차서는 다수의 절차서를 동시에 운용가능 하도록 되어야 하며, 필요한 수행작업에 대한 우선순위 또는 순차 설정이 가능해야 한다.

3.7 절차서의 기술적인 정확성 유지

절차서 데이터베이스를 사용하는 절차서 생성 시스템은 정확도를 강화시켜야 한다.

3.8 절차서와 다른 작업과의 통합

절차서 수행을 위한 제어행위는 같은 workstation 내에서 수행되어 질 수 있어야 하며, 종이 절차서 사용시 나타날 수 있는 오류와 지연을 줄일 수 있어야 한다.

이상과 같이 열거한 개념들은 완전히 검증된 사항은 아니지만, 전산화절차서 설계시에 요구되는 기본사항으로 통용되고 있다. 이 밖에도 운전원들의 팀워크나 의사소통 역시 운전 성능에 있어서 중요한 요소로 지적되고 있다. 차세대 전산화절차서 설계는 위의 사항을 기본으로 하여, 운전원 오류를 줄이고 운전 편이성 증대를 목표로 설계되었다.

4. KNGR CPS(K-CPS)의 인적오류 방지 및 운전 편이성 증대 설계

고정된 Menu 표시

절차서 Open, Close, 화면 이동, 화면 저장, 타 시스템 연계 등 고정된 위치에 표시되어 있어 자유로운 접근을 통해 언제라도 필요한 작업으로 이동이 가능하다.

다중절차서 표시 및 수행

최근 Open한 3개의 절차서 제목이 화면에 표시되며, 3개를 초과할 경우 Pull-Down 메뉴로 제공된다. 절차서 간의 이동이 용이하고, 다중 절차서 수행시 운전원의 편이성을 증대시킨다.

자유로운 Navigation 및 순차적 스텝 실행

절차서 수행시 스텝간의 이동이 자유롭도록 설계되어있다. 하지만 순차적 진행도 가능하여 스텝을 빼먹고 진행하는 오류를 방지한다.

계속수행스텝 감시 및 간편 접근

종이절차서 운전에서 운전원들의 가장 큰 작업부하 중 하나가 계속수행스텝 감시이다. CPS는 계속수행 스텝일 경우, 스텝 만족조건을 벗어나면 자동으로 별개의 창에 트리거 되어 Blinking 함으로써 운전원에게 스텝 수행을 요청한다. 따라서 운전원의 작업 기억에 대한 부담을 줄여줄 수 있

다. 또한 트리거 되어진 스텝을 선택함으로써 수행모드로 진입가능 하다.

6개의 분리된 창사용

CPS 메인 화면은 메뉴창, 계속수행스텝 감시창, 보류스텝 관리창, 다중절차서 표시창, 절차서 Overview 표시창, 상세스텝 표시창 등의 6개 화면으로 각각 분리되어 있어, 절차서 수행 및 진행 사항을 쉽게 파악할 수 있고, 정보 취득을 위한 화면 이동(Navigation)을 줄임으로써 작업부하를 감소시키는 역할도 한다.

보류스텝 관리

절차서 수행중 보류된 스텝들을 별개의 창에 따로 관리함으로써, 필요에 따라 언제든지 접근 가능하도록 설계되어 있다. 다중 절차서 사용시 별도의 이동 행위 없이 보류된 스텝을 관리할 수 있는 장점이 있다.

Dynamic values, 정보 및 계산값 제공

K-CPS에는 변수의 값이 실시간으로 표시되며, 스텝수행과 관련된 일부 정보도 표시된다. 또한 기존의 운전원들에 의해 행해지던 계산된 값도 제공되어 작업 부하를 줄여준다.

Cross-referencing 지원(trend, 계통화면, 전용화면, caution, note)

K-CPS는 3개의 CRT 화면을 기본으로 사용한다. 메인화면을 중심으로 우측에 계통화면 연계, 좌측에 AID화면을 사용하며, AID화면에는 Trend를 비롯한 중요 변수, 만족조건 등등 절차서 수행에 도움이 되는 정보를 모아 놓고 있다. 그리고 “Caution”, “Note”를 확인할 수 있는 별도의 버튼을 제공하여 필요에 따라 언제든지 접근이 가능하다.

Soft-Control 연계

절차서 수행중 기기제어행위를 지원하기 위해 Soft-Control이 연계되어 있다. 절차서 내에서 펌프나 밸브 등의 제어기기 심벌을 선택하면, 우측 CRT에 관련 계통도 및 제어기 위치가 나타나며, 제어전용 CRT에 제어기 구동화면을 불러온다. Soft-Control 사용 처리 결과는 실시간으로 절차서에도 나타난다.

절차서내 수행스텝 위치

운전원들은 동료 운전원들의 절차서내 위치파악이 가능하다. 절차서 Overview창에 표시되는 각 스텝에는 스텝오너 및 상대스텝 진행상태 파악을 위해 작은 관리창이 표시되어 있다.

스텝 수행 및 진행 상태

스텝의 진행상태표시는 3가지 색의 칼라코드를 사용한다. 흰색은 미수행 스텝, 노란색은 현재 진행중인 스텝, 그리고 회색은 수행 완료된 스텝을 나타낸다. 이 기능은 절차서 수행과정을 체크할 수 있으며, 운전원 서로간의 진행 사항도 파악할 수 있다.

Tree Logic 적용

체계적인 절차서 수행과 절차서 수행의 용이성을 위해 각 스텝에 해당되는 정보의 기본 구조는 Tree구조로 되어 있어, 한눈에 판단이 가능하도록 되어 있다. 즉, 서브스텝의 구조가 CHECK->ACTION->SUB_ACTION으로 되어 있어, 조건에 따라 하단으로 내려오면서 처리하도록 되어있고, 최하단의 조건 만족으로부터 상단으로 만족상태가 이동되어 진다.

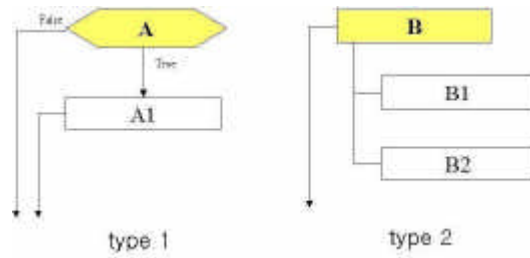


그림 1 Instruction의 기본 형태

그림 1의 type 1에서 A가 참이면 A1을 수행하도록 되어진다. 반면에, type 2에서는 B1, B2가 수행되어야만 B는 수행 완료가 된다. 이 경우에 B1,B2는 and 조건이거나 또는 or 조건 일 수 있다. type 1,2는 종이 절차서에서 흔히 볼 수 있는 기본적인 조건을 정형화 한 것이다. 또한 그림 2와 같이 두 가지 형태를 혼합한 형태도 나타난다. 즉, A가 참일 경우 B가 수행 가능하며, B1, B2가 완료되어야 B는 완료되는 경우이다.

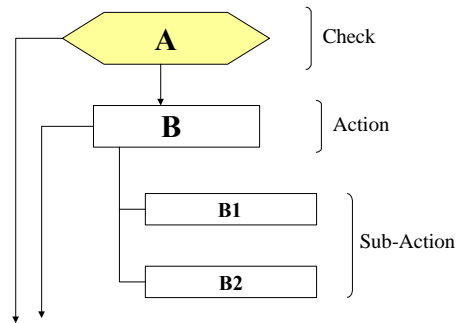


그림 2 Instruction의 조합된 형태

Step Owner 표시

절차서내 각 스텝에는 스텝의 오너(Owner)를 나타내는 작은 창이 있다. 스텝오너는 영문자로 표시되는데, 즉 R은 원자로 운전원(RO), T는 터빈 운전원(TO), C는 발전과정(CRS), E는 안전과장(EO), R/T는 RO와 TO 공동 수행스텝 등을 의미한다.

운전원 오동작 메시지 표시

운전원의 판단오류 또는 오동작에 대해 CPS가 자동으로 오류 checking을 하여 운전지원을 하는 기능이다. 즉, 운전원이 절차서를 수행할 때, 발전소 상황과 달리 판단하여 행해진 절차서 수행 오류에 대해 CPS는 항상 체크하고 있으며, 오류 메시지를 운전원에게 보여준다. 하지만, CPS는 단지 발전소 데이터와 절차서의 운전원 판단을 체크하고 있을 뿐, 운전 방법을 조언하지는 않는다. 발전소 운전의 최종 판단 및 결정을 운전원에게 달려 있다.

연계된 절차서 쉬운 이동 및 복귀

절차서 스텝 수행중에 관련된 타 절차서로의 이동버튼을 상세스텝 표시창에 두어 원하는 절차서로 쉽게 이동 가능하다. 또한 이동된 절차서에는 복귀버튼이 있어 현 절차서로 복귀도 용이하다.

타시스템과의 연계(IPS, LDP)

- 정보처리계통(IPS)과 연계 : CPS는 IPS에 연결된 하나의 응용프로그램으로 모든 Dynamic 데이터를 IPS로부터 받는다. 변수 데이터 및 계통화면, Trend 정보 등등을 제공받는다.
- 대형정보표시판(LDP) 연계 : CPS의 화면을 LDP에서 볼 수 있는 기능을 제공한다.

원자로 Trip시 절차서 자동 동작

발전소 운전중에 원자로가 Trip되면, 절차서가 자동으로 CRT에 나타나는 기능이다. 사고시에 빠른 대응 조치를 위해 절차서로의 직접 이동기능을 제공하여, 운전 성능을 향상시킬 수 있다. 이때 CRT에 나타나는 절차서는 '원자로 트립후 우선조치(SPTA)'가 제공된다.

Data log 관리

절차서 수행과 관련된 모든 정보, 예를 들면, 변수값, 발전소 현재 상황, 운전원 동작 상태 등등을 시간별로 별도 저장하여, 운전평가, 사고분석에 이용된다.

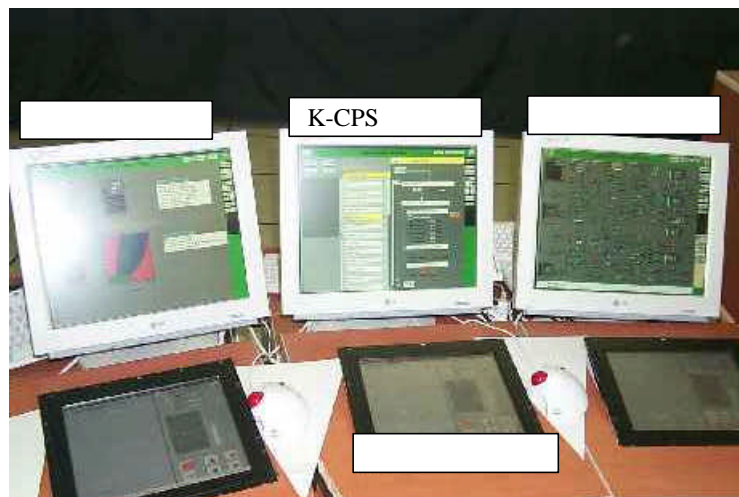


그림 3 KNGR Mockup에 구현된 K-CPS

5. K-CPS 적합성 평가 실험

실제 원자력 발전소 운전원 12명을 4개의 조로 나누고, 각 조는 원자로 운전원 1명, 터빈 운전원 1명, 발전과장 1명 등 3명으로 구성하여 KNGR Mockup에 구현된 K-CPS를 이용하여 운전 시나리오를 수행하게 하였다. 시나리오 수행후 각 운전원들은 종이절차서 수행과 비교하여 속도, 정확도, 성능, 작업부하, 훈련부하 등의 5개 영역으로 구분된 평가항목에 대해 평가업무를 수행하였다. 표1은 K-CPS 운전원 평가 결과이다.

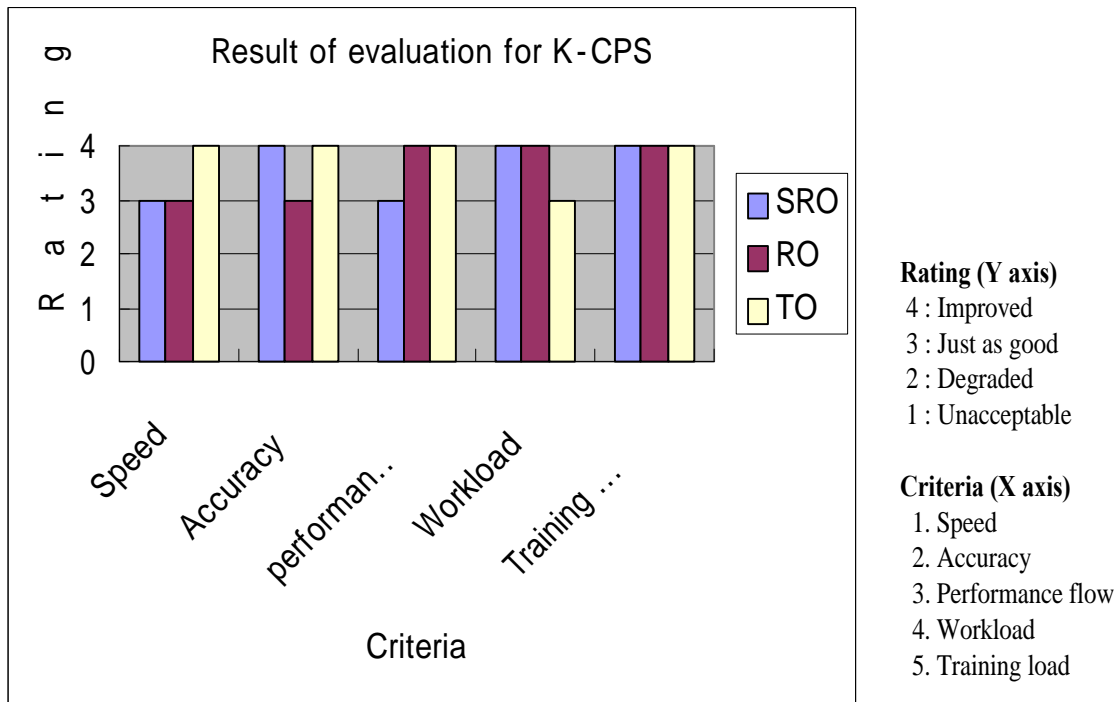


표 1. K-CPS 적합성 평가 결과

6. 결 론

발전소 운용에 있어 절차서 운전은 매우 중요한 사항이며, 사고와 직결될 수 있는 많은 잠재적 요인이 산재해 있다. 기존의 발전소에서 운용하는 종이 절차서는 사용자에게 적지 않은 운전 부담을 가중시켜 왔으며, 잠재된 인적 오류의 가능성을 지니고 있다. 컴퓨터 기반의 전산화절차서는 이러한 종이절차서의 단점을 보완하고 인적오류를 줄이며, 운전 편의성 증대라는 목적으로 개발되어 왔다. K-CPS는 차세대 원자로 발전소에 적용을 목적으로 인간공학적 개념을 도입하여 사용자를 위한 운전지원시스템으로 개발되고 있다. K-CPS의 1차 적합성 평가는 대체로 만족스런 결과를 얻었다. 그러나 시스템 안정성, 데이터의 정확도, 판단논리의 명확성 등의 몇 가지 보완되어야 할 부분도 나타났다. 설계보완과 검증실험의 반복적인 작업을 통해 이러한 단점을 보완 가능할 것으로 보인다.

컴퓨터 기반의 전산화절차서는 다양한 형태의 운전을 지원하고, 인간공학적 설계가 적용된 고수준의 자동화 시스템이어야 하지만, 그 못지 않게 상세하고 복잡한 정보의 제공보다는 단순하면서도 적응하기 쉽고, 원하는 정보에 쉽게 접근할 수 있도록 설계되어야 하는 것도 간과되어서는 안될 것이다.

참고문헌

- [1] Brookhaven National Laboratory, Computer-Based Procedure System, 2000.3
- [2] KEPRI, KNGR Computerized Procedure System Functional Requirement, 2000
- [3] KEPRI, KNGR Computerized Procedure System Design Report, 2000
- [4] Halden Reactor Project, The Picasso-3 User Interface Management System (Reference Manual), 1995.3