

KALIMER MMIS 설계를 위한 발전소기능분석 및 기능할당 전략

이현철, 김장열, 김창희, 정철환, 이정운

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기능분석은 발전소의 안전성에 관련된 중요한 기능들을 계층적으로 규명하고 기능의 목적, 관련되는 발전소변수, 기능간의 연관관계 등을 파악하고자 수행하며 그 결과는 기능할당시 운전원과 자동화시스템간의 역할분담을 결정하기 위해서 활용된다. 기존의 발전소에 비하여 자동화시스템의 적극적인 활용이 기대되는 KALIMER MMIS는 운전원과 자동화시스템의 역할에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 KALIMER MMIS 설계시 수행하는 발전소기능분석 및 기능할당에 대한 수행전략을 제시하고, 기능분석을 지원할 수 있는 지원시스템인 FAI(Function Analysis Interface)를 개발하였다.

I. 서론

미국 NRC에서는 인간공학 규제요건을 NUREG-0711[1], NUREG-0700 Rev.1[2], Standard Review Plan Chapter 18 (개정판)[3]로 재정립하였다. NUREG-0711은 "Element 3. Functional Requirement Analysis and Function Allocation"에 사업자의 기능분석 업무에 대한 검토요건을 제시하였으며, NUREG-0700 Rev.1은 "3.2 Function and Task Analysis"에서 발전소 안전기능의 규명, 운전중 발생한 사건의 규명 및 선정, 기능에 대한 기술(Function Description), 기능할당 기준 등 기능분석 및 기능할당에 대한 요건과 이와 연계한 직무분석 요건을 기술하고 있다. 한국원자력안전기술원(KINS)에서 현재 개발 중에 있는 차세대원자로 안전규제요건 개발의 인간공학 관련 요건은 이러한 미국의 규제요건을 대부분 수용할 것으로 보이며, 앞으로의 국내 원전에 적용할 것으로 예상된다[4]. 따라서, 이러한 규제요건을 염두에 두고 KALIMER(Korean Advanced Liquid Metal Reactor) MMIS (Man-Machine Interface System) 설계의 기능분석 업무가 수행되어야 한다고 판단된다.

KALIMER는 기존 국내의 경수로 및 중수로와는 많은 차이가 있고, 또한 기능분석에 필요한 문건, 즉 설계문건, 안전성분석보고서, 절차서, P&ID, 구조도, 등이 부족한 현실이므로, KALIMER의 기능분석은 국내 설계 전례가 있고 문건이 가용한 원자로의 경우와는 다른 방법이 적용되어야 할 것이다. 따라서, NUREG-0711, NUREG-0700 Rev.1으로부터 기능분석요건을 도출하고, KALIMER의 설계특성을 고려한 기능분석 및 할당 방법론을 설정하였다.

II. 기능분석 방법론

1. KAERI/TR-494/95[5]에 기술된 Level 3까지 구조화된 기능분석 결과를 활용한다.
2. KALIMER의 도출된 기능을 이 경수로의 기능분석 결과와 비교하여 다음과 같이 구분하여 표시하고 그 근거를 기술한다.
 - 1) 신규 기능- 기존 기능의 명칭 및 성격이 다른 새로 추가되어야 할 기능,
 - 2) 변경된 기능 - 기존 기능의 명칭은 그대로 유지할 수 있거나 약간의 변경이 필요한 정도이나 그 성격은 많이 바뀌어야 할 기능,
 - 3) 삭제될 기능 - 구조적인 차이로 인해 KALIMER에서 전혀 필요 없는 기능,
 - 4) 변경되지 않은 기능 - 기존 기능의 명칭 및 성격이 바뀔 필요가 없이 유지되어야 할 기능
3. 앞의 1) 신규 기능, 2) 변경된 기능, 4) 변경되지 않은 기능에 대해, 다음 사항을 포함하여 기능을 기술한다. 기능정의가 상세화함에 따라 기술될 사항을 구체화한다.
 - 1) 기능의 목적
 - 3) 기능간의 상하 관계 및 횡적 관계
 - 4) 운전모드와의 관계
 - 5) 기능을 담당하는 수단으로서의 공정(plant process)
 - 6) 기동 조건 - 기능 또는 공정이 요구됨을 나타내는 조건들
 - 7) 기동 전제 조건 - 기능 또는 공정이 작동하기 위해 만족되어야 할 전제 조건들
 - 8) 가용표시 변수 - 기능 또는 공정이 가용함을 표시하는 변수들
 - 9) 작동표시 변수 - 기능 또는 공정이 작동중임을 표시하는 변수들
 - 10) 목적달성표시 변수 - 기능 또는 공정이 그 목적을 달성하고 있음을 표시하는 변수들
 - 11) 중지표시 변수 - 기능 또는 공정의 작동이 중지될 수 있거나 중지되어야 함을 표시하는 변수들
 - 12) 하위기능일 경우, 제어기능(즉, I&C 또는 운전원이 담당하는)인지의 여부
 - 13) 하위의 제어기능일 경우, 이에 대한 감시, 판단, 조작, 등을 포함한 운전원의 역할
4. 기능정의시, 적절한 계층을 부여한다. Level 3 이후의 기능들에 대해서는 관련 기능의 상하관계를 고려하여 계층화한다.

계층 설정 기준

1) Level 0; Global Function

- 체계의 목적을 달성하기 위하여 제공되는 기능중 모든 하위 기능을 포함하는 최상위의 기능.
- 규제요건에서 제시하고 있는 발전소 안전을 위한 제반 기능을 포괄하여야 함.

2) Level 1: Operational Goals

- 체계의 목적을 달성하기 위하여 제공되는 기능중 임의의 energy boundary 내에서의 에

너지의 흐름 또는 에너지 안정화를 위해 필요한 level 0의 부기능.

- 규제요건에서 제시하고 있는 필수 안전기능을 에너지 형태 또는 흐름에 따라 몇개의 덩어리로 묶은 기능을 나타냄.

3) Level 2: Critical Function

- Level 1의 기능을 달성하기 위하여 물리적, 화학적 또는 기계적 등으로 독립된 Boundary를 형성함.
- Level 1에서 제시한 에너지 흐름 과정을 보다 세분화하여 물리적, 화학적 상태를 결정 짓는 기능중 최상위의 기능임.

4) Level 3: System-Level Function

- 중간단계의 level로서 개념적 기능과 하드웨어 기능을 연결해 줌.
- Level 2의 필수기능을 만족시킬 수 있는 기존 계통들에 대한 기능을 포함함.

5) Level 4: Subsystem-Level Function

- 독립적으로 존재할 수 있는 System-level의 기능중 최소 단위임.
- System에 속하는 목적이 다른 소수의 Equipment로 만족되며, Equipment 기능의 집합임.

6) Level 5: Equipment-Level Function

- Level 4의 기능을 만족시키는 Equipment의 고유 기능들을 의미함.
- Equipment에 속하는 목적이 다른 소수의 Component로 만족되며, Component 기능들의 집합임.

7) Level 6: Component-Level Function

- 체계의 목적을 달성하기 위하여 제공되는 기능중 분할 가능한 최소단위의 기능.
- 목적이 다르지 않은 소수의 부품(5종 내외)으로 만족되거나, 동일한 목적을 만족시키는 소수의 부품으로 정의 가능한 기능.

5. 기타 기능정의시 고려사항

- 1) 안전기능을 타 운전성능요건 만족 기능보다 우선하여 도출한다.
- 2) 기능간의 상관관계를 이용하여 기능도를 작성하고, 또한 이를 통해 상관관계를 확인한다.
- 3) 계통과 운전모드를 고려하여 제어기능 위주로 기능을 도출하며 가능한 한 하위 수준으로 구체화하나 KALIMER 설계의 진행에 따라 수정 및 상세화한다.

III. 기능할당전략

운전원과 자동화시스템간의 기능할당은 운전원의 입장에서 결정되어야 한다[6][7]. 운전원의 신체적인 그리고 정신적인 능력을 고려하지 않은 기능할당의 결과는 운전원오류(operator error)와 연결되고 이는 발전소 안전성이나 생산성에 부정적인 영향을 낳는다[8]. KALIMER MMIS는 운전원에게 과부하를 지우지 않도록 기능을 할당한다. 이러한 목표를 달성하기 위해서 다음과 같은 기능할당전략을 수립하였다.

1. 인간성능에 대한 데이터(Human Performance Data)를 우선적으로 고려한다.

인간과 시스템에 대한 이점 및 단점을 제시하고 있는 MADA-MADA(Fitt's List)를 기준으로 다음과 같은 4가지 범주로 구분한다.

- 자동화되어야만 하는 기능

많은 양의 정보를 신속하게 혹은 장기적으로 처리하여야 하는 기능, 유발될 수 있는 오류가 심각하고 복구될 수 없는 기능, 혹은 악조건하에서 수행되어야 하는 기능 등은 자동화시스템이 담당하도록 한다. 이러한 범주에 속하는 전형적인 기능은 일부 방어시스템(Protection System)이다.

- 자동화할 수 있는 기능

운전원의 성능한계내에 있어서 운전원의 수행할 수 있는 기능이지만, 자동화시스템에 의해 더 나은 수행도(performance)를 얻을 수 있는 기능이 이 범주에 속한다. 기술발전의 영향으로 운전원이 수행할 수 있지만 장시간에 걸친(혹은 주기적인) 단순하고 지루한 유지보수, 시험작업등은 자동화를 고려해 볼 수 있다. 자동화시스템에 의해 운전원은 결과만을 확인하도록 설계될 수 있을 것이다.

- 운전원이 수행하여야만 하는 기능

경험적인 지식, 추론 혹은 판단의 유연성이 요구되는 기능 혹은 현재의 기술로는 자동화할 수 없는 기능은 운전원에게 할당되어야 한다. 비정상이나 비상상태에서 운전조작은 이러한 기능을 포함할 것이다. 할당의 결과는 추후 운전요원계획(staffing)과 관련하여 평가하여야 할 것이다.

- 시스템과 운전원이 공동으로 협력하여 수행하여야 하는 기능

진단, 의사결정 등의 작업에 대하여 운전원은 지원시스템(Operator Support System)에 의하여 보조(aiding)받음으로써 수행도를 향상시킬 수 있다. 지원시스템의 역할이 운전원을 대신하거나 혹은 운전원에게 특정업무를 지시해서는 안된다.

2. 운전원의 수행도 기준에 입각하여 적절한 작업부하를 결정한다.

적절한 작업부하의 수준은 시스템의 성능요건, 운전원오류, 운전원의 주관적외견 등의 수행도 기준(performance criteria)에 의해 결정한다. 수행도 분석의 결과는 기능할당이 이루어진 다음에 직무분석에 따라 얻어질 수 있다. 따라서 이 전략은 기능정의부터 직무분석간의 반복적인 수행을 포함하기도 한다.

3. 자동화시스템으로부터 운전상황을 강제적으로 운전원에게 이관시키지 않도록 한다.

운전원이 담당할 수 없는 기능을 자동화된 시스템의 고장이나 사용불능에 의해 운전원에게 수행토록 한다면 이는 운전원이 감당해 낼 수 없어 운전원오류를 유발할 것이다.

4. 운전원 훈련에 대한 의견을 제시하도록 한다.

운전원의 장기기억(long-term memory)의 특성에 따르면, 자동화된 운전환경에서의 운전원의 수동운전기술은 점차 퇴화되는데, 이는 훈련시뮬레이터에 의한 교육훈련에 의해 주기적으로 보강되어야 한다. 기능할당시 필요한 수동운전기술을 동시에 규명하도록 한다.

IV. Function Analysis Interface (FAI)

기능분석시 각 시스템에서는 다량의 문서를 생산하여야 하며 이 문서들은 설계의 진행에 따라 수정, 추가, 삭제된다. 또한 문서화된 기능분석자료는 조회가 어려우며 최신의 기능정의에 따라 많은 수의 기능정의가 수정되어야 하는 경우가 발생한다. 이러한 문서화의 단점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 기능분석 데이터베이스를 구축하고 Web Browser상에서 데이터베이스와 연동하여 자유로운 기능의 수정, 조회, 추가, 삭제 등이 가능한 FAI를 개발하였다(그림 1, 2 참조).

FAI는 기능정의의 모든 항목을 하나의 테이블로 저장하고 있는 public domain상의 데이터베이스인 MSOL(Mini-SQL)v2.3과 C언어로 작성된 CGI(common Gateway Interface)로 연결되어 있다. 하드웨어/소프트웨어 구성관련도가 그림 3에 나타나 있다. FAI의 수행하드웨어는 Apache HTTP server가 설치되어 있는 HP9000/755 workstation이고 사용자는 Netscape나 Internet Explorer등의 Web Browser가 수행될 수 있는 PC이다. HP workstation과 PC는 Ethernet에 의하여 연결되어 HTTP로의 연결이 가능한 네트워크 환경에 있어야 한다. FAI는 기능의 계층적인 구조에 입각하여 작동한다. FAI의 사용자인 계통설계자는 앞에서 기술한 계층분류에 의해 기능의 수준을 결정한 후, 그 기능에 고유의 기능번호를 부여한다. 기능번호는 데이터베이스상에서 Key로 정의되어 있다. 입력한 기능번호에 따라 데이터베이스의 각 항목이 HTML문서규약에 정의된 Form형식에 맞추어 표시되고, 입력할 수 있다. CGI의 역할은 이렇게 사용자가 입력한 내용을 데이터베이스에 전달하는 역할 및 데이터베이스가 처리한 내용을 사용자에게 다시 알려주는 역할을 수행한다. CGI가 데이터베이스에 연결하여 작업을 수행할 때에는 데이터베이스가 이해하는 질의어(Query)인 SQL(Sequential Query Language)를 사용한다. FAI에서는 MiniSQL이 제공하는 C언어 API(Application Program Interface)로 이를 구현하였다. 데이터베이스가 요청한 질의에 의해 수행한 결과는 다시 CGI에 의해서 사용자에게 보여주는 데, 이때 HTML문서 양식으로 출력하여 사용자는 그 결과를 Web Browser상에서 확인할 수 있다.

사용자가 데이터베이스를 활용하여 수행할 수 있는 작업은 기능정의의 추가, 삭제, 조회, 수정 등이며, 데이터베이스 관리자는 원하는 탐색어에 의한 기능정의들의 조회 및 출력(reporting)을 수행할 수 있다. 따라서, 특정의 제어방법에 대한 질의를 수행토록 하여 그 결과로 출력되는 기능에 대해서는 단일의 제어전략을 제시할 수 있을 것이며, 표시기의 그룹핑(grouping)이나 배치 등도 이에 의하여 결정될 수 있다.

V. 결론

KALIMER MMIS설계를 위한 기능분석 및 할당의 수행전략을 수립하였다. 수행계획은 최신의 규제요건을 만족시킬 수 있으며, 또한 시스템 설계자들의 입력이 요구되는 기능분석의 경우 FAI에 의하여 보다 용이하게 수행될 수 있을 것이다. 현재 이러한 수행전략에 의하여 KALIMER MMIS의 기능분석 및 할당이 진행되고 있으며, FAI에 대한 사용자의 만족을 얻었다. MMIS의 기능분석 및 할당은 직무분석과 연계되어 반복되어야 하는데, 반복에 소요되는 시간 및 투입자원의 절감이 기대된다.

그림 1. FAI의 초기화면

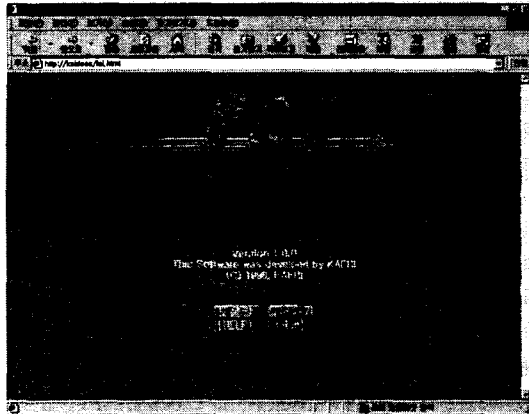


그림 2. FAI의 기능목록

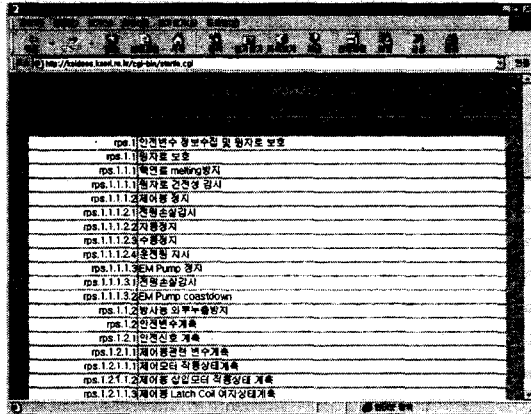
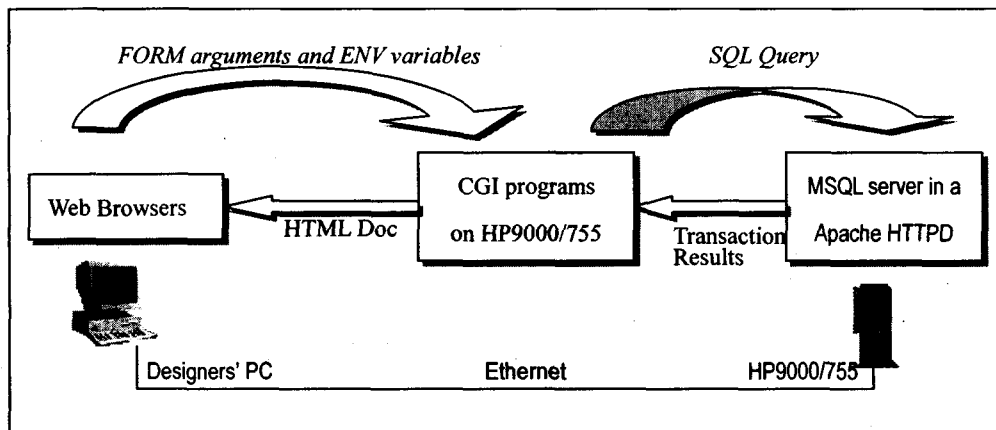


그림 3. FAI의 구성



참고문헌

[1] NUREG-0711, *Human Factors Engineering Program Review Model*, USNRC, Washington, DC, 1994.

[2] NUREG-0700 Rev. 1, *Human-System Interface Design Review Guideline*, USNRC, Washington, DC, 1996.

[3] NUREG-0800 Draft Rev. 0, *Standard Review Plan Chap. 18*, USNRC, Washington, DC, 1996.

[4] KINS/GR-112, 차세대원자로 안전규제요건 개발, 한국원자력안전기술원, 1996.

[5] KAERI/TR-494/95, 차세대 인간기계연계계통 설계개발을 위한 기능분석, 한국원자력연구소, 1995.

[6] IAEA-TECDOC-668, *The Role of Automation and Humans in Nuclear Power Plants*, International Atomic Energy Agency - International Working Group on NPP Control and Instrumentation, 1992.

[7] IEC 964, *Design for Control Rooms of Nuclear Power Plants*, 1989 [International Electrochemical Commission (Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale)].

[8] NUREG/CR-3331, *A Methodology for Allocation of Nuclear Power Plant Control Functions to Human and Automated Control*, USNRC, Washington, DC, 1983.