

SATS 훈련시뮬레이터를 위한 중대사고 지침서 모듈 개발

Development of the Severe Accident Management Guidance Module for the SATS Training Simulator

김고려, 박선희, 김동하
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

KAERI에서는 중대사고 관리에 대한 체제 구축에 대한 노력의 일환으로 최근 중대사고 관리지침서를 개발하였다. 또한 MELCOR 코드를 기반으로 하여 중대사고 현상을 그래픽으로 모의하고 중대사고와 관련된 기기들을 조작하여 그 결과를 점검할 수 있는 PC용 훈련 시뮬레이터인 SATS가 개발되어 가상 시나리오에 의한 중대사고 훈련 및 교육에 대한 기대를 갖게 하였다. 본 논문에서는 중대사고 지침서에 따른 조치사항을 SATS 훈련시뮬레이터에 적용하고 그 결과를 평가하는 시스템을 구축하기 위한 노력의 일환으로 개발된 HyperKAMG 지침서모듈에 대해 기술하고자 한다.

Abstract

Recently KAERI has developed severe accident management guidance to establish Korea standard severe accident management system. On the other hand PC-based severe accident training simulator SATS has been developed, which uses MELCOR computing code as the simulation engine. SATS graphically displays and simulates the severe accident progression with interactive user inputs. The control capability of SATS makes a severe accident training course more interesting and effective. In this paper the development and functions of HyperKAMG module are explained. Furthermore easiness and effectiveness of the HyperKAMG-SATS system in severe accident management are described.

1. 서론

중대사고 현상 및 사고 진행에 대한 불확실성으로 인해, 중대사고의 완화전략을 보다 원활하게 수행하기 위해서는 의사결정에 도움이 되는 더 많은 정보와 자료들이 제공되어야 한다. 정상부터 비상운전까지의 경우에는 기존의 많은 연구결과와 운전경험을 토대로 보다 구체적인 조치 및 운전원 행위를 규정지을 수 있지만, 중대사고의 경우에는 내재된 불확실성으로 인하여 구체적인 조치행위의 규정 보다는 사고 완화를 위한 계통이나 주요 기기의 선정 내지는 필요한 발전소 기능이 사고완화 정도를 결정하게 된다. 사고의 진행 방향에 대한 불확실성으로 인하여 발전소 상태에 대해 항상 감시하고 있어야 한다. 즉 중대 사고의 경우 최적의 의사결정을 위해서는 발전소 상태에 대한 정보뿐만이 아니라 중대사고 자체에 대한 가용정보를 제공하는 것이 필요하게 된다.

KAERI에서도 중대사고 관리체제 구축에 대한 노력의 일환으로 중대사고 관리지침서[1]를 개발한 바 있다. 또한 MELCOR 코드를 기반으로 하여 중대사고 현상을 그래픽으로 모의하고 중대사고와 관련된 기기들을 조작하여 그 결과를 점검할 수 있는 PC용 훈련용 시뮬레이터인 SATS[2,3]가 개발되어 가상 시나리오에 의한 중대사고 훈련 및 교육에 대한 기대를 갖게 하였다.

본 논문에서는 KAERI에서 개발한 중대사고 지침서인 KAMG에 따른 조치사항을 SATS 훈련시뮬레이터에 적용하고 그 결과를 평가하는 시스템을 구축하기 위한 노력의 일환으로 KAMG의 온라인 모듈인 HyperKAMG 개발에 대해 기술하고자 한다. 또한 훈련시뮬레이터에 중대사고 지침서와 SATS에 대한 소개와 이를 이용한 중대사고 관리에 대해 기술하고자 한다.

2. 중대사고지침서

1998년 한국표준원전에 대한 중대사고관리지침서가 개발되어졌다. 이 지침서는 노심이 용융되어 기존의 비상운전절차서로는 더 이상 사고를 완화시킬 수 없는 중대사고의 경우에 적용할 수 있도록 개발되었으며, 주제어실에서 사용하는 지침서와 기술지원센터에서 사용하는 지침서로 구분된다. 7개의 중대사고 완화 전략을 핵심 내용으로 하여, 각 전략의 수행에 필요한 계산보조도구가 포함되어 있다. 각각의 전략은 그림1과 같은 전략제어수행도에 의해 우선순위가 결정되며, 가용수단 확인, 전략수행여부 결정, 전략수행 방법결정, 전략수행, 전략종결 등의 총 5부분으로 이루어져 있다.

한국표준원전 중대사고관리지침서는 주제어실 지침서와 비상기술지원실 지침서의

크게 두 부분으로 나뉘어 있다. 비상기술지원지침서는 다시 전략수행제어도와 완화지침서, 종료지침서, 그리고 계산표로 이루어져 있다. 주제어실 지침서는 사고가 계속 진전하여 중대사고로 발전되어진 경우에, 주제어실에서 비상운전절차서 종료 이후에 사용하는 지침서이다. 주제어실지침서는 비상운전절차서와 동일한 형태인 두 줄로 구성되어 있으며, 비상기술지원실이 발족되어지기 전까지 우선적으로 수행되어야 하는 조치들이 포함되어 있다.

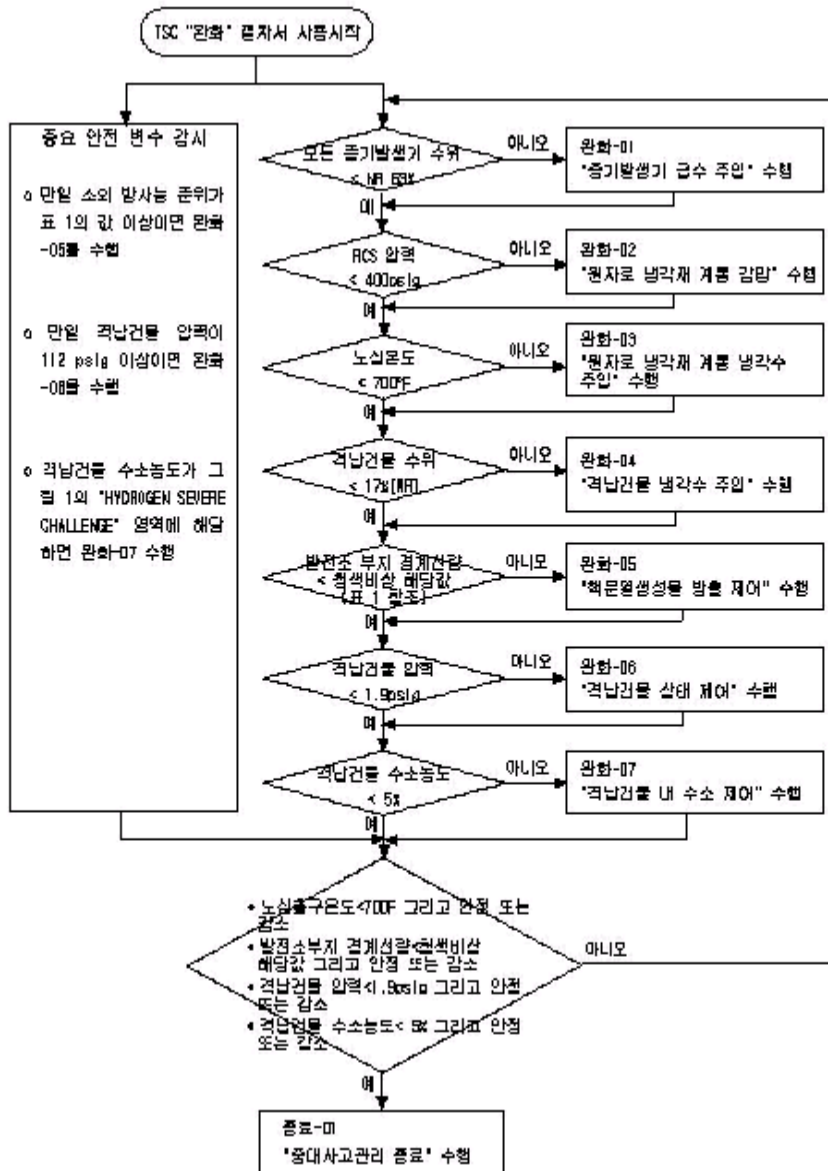


그림 1. 한국 표준원전의 중대사고지침서의 전략수행제어도

전략수행제어도에는 중대사고가 진행되는 동안 계속하여 감시하고 제어되어야 하는 주요 변수들이 기술되어 있다. 비상기술지원실은 전략수행제어도를 통하여 발전소가 안정되고 제어 가능한 상태에 도달할 때까지 발전소를 계속하여 주기적으로 감시하여야 한다. 이 전략수행제어도를 사용하여 발전소 상태를 진단하게 되고, 우선적으로 수행되어야 하는 전략을 결정하게 된다.

중대사고지침서에는 완화-01(핵분열생성물 방출 제어), 완화-02(격납건물 상태 제어), 완화-03(격납건물 내 수소 제어), 완화-04(RCS 냉각수 주입), 완화-05(RCS 감압), 완화-06(증기발생기 급수 주입), 완화-07(격납건물 냉각수 주입) 등 모두 7개의 완화지침서가 있으며, 각각의 지침서는 해당 변수들을 제어할 수 있는 전략들의 수행과 관련된 사항들을 포함하고 있다. 그리고 전체적으로 가용수단확인, 전략수행여부결정, 전략수행방법결정, 전략수행, 전략종결의 5단계로 구성되어 있다.

종료지침서는 전략수행제어도에 의해서 발전소가 안정적이며 제어 가능하다고 판정이 난 경우에 수행한다. 중대사고 상황이 종료된 후에 발전소 계통과 구조물들이 방사능에 오염되었기 때문에 회복조치를 취할 때 매우 주의 깊게 조치를 취해야 한다. 종료지침서에는 중대사고 상황이 종결된 후 회복조치들을 수행하는 데 중요한 정보들을 비상기술지원실에 제공하기 위한 조치들이 기술되어 있다.

계산표는 비상기술지원실에서 전략수행제어도를 사용하여 발전소 상태를 진단하거나, 각 완화지침서를 수행하는 도중 필요한 정보를 제공하기 위해 개발되었다. 이들은 계측기로부터 정보를 얻을 수 없거나 또는 부정확한 값을 나타낼 때 매우 유용하다.

발전소의 사고가 조기에 완화되지 못하고 계속 진행하여 비상운전지침서의 범주를 벗어난 중대사고로까지 발전하게 되면, 기술지원센터의 결성이 요청되어지며 동시에 주제어실에서는 우선적으로 “응급지침서”를 수행하기 시작한다. 기술지원센터가 결성되어지면, 그 이후의 사고 완화에 관한 모든 권한은 기술지원센터로 위임되어지며, 주제어실에서의 모든 조작은 기술지원센터의 지시에 의해서만 이루어지게 된다. 기술지원센터에서는 완화지침서를 기준으로 사고의 완화를 위한 최적의 전략 선정에서부터 관련된 모든 조치를 해당자에게 지시하여 수행하게 한다.

3. SATS 훈련시뮬레이터

중대사고 훈련 시뮬레이터에 대한 연구는 최근 국내에서 중대사고지침서의 개발과 시기

가 맞추어 시작되었다 즉 지침서가 현장에 적용되어지면, 비상운전절차서와 마찬가지로 중대사고 관리에 대한 훈련이 필요하게 되며, 이를 위한 시뮬레이터의 개발은 필수적인 요소가 된다.

SATS는 중대사고 현상을 모의할 수 있는 중대사고 전산코드 MELCOR를 기반으로 개발된 시뮬레이터이다. MELCOR는 중대사고 분석용 전산코드인데, 이를 활용하여 수행 중간에 사용자의 입력을 반영하는 기능을 추가함으로써 시뮬레이터의 기본기능을 갖게 되었다. MELCOR를 활용하면 노심의 시간에 따른 변화 및 격납건물의 거동에 대한 분석이 가능해진다. 그림 2에 SATS의 수행모습을 나타내었다.

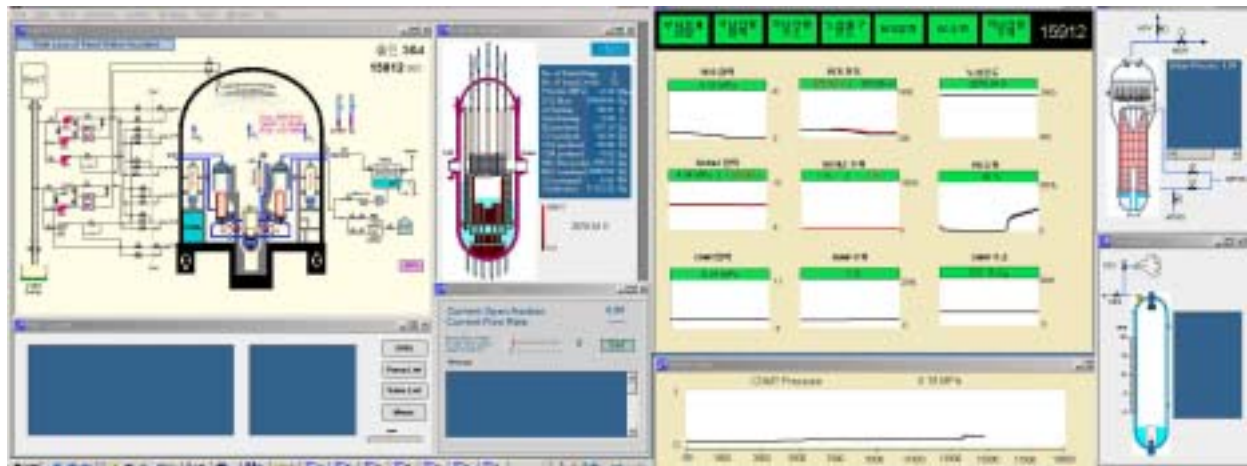


그림 2. SATS 실행 화면

SATS 제어기능은 다음과 같이 이루어진다. 사용자가 직접 화면상에서 기기조작을 하면, 조작결과 MELCOR 내부변수의 값이 변경되며 MELCOR는 이 변경된 값으로 남은 계산을 수행하게 되어 결과적으로 입력의 변경 없이 기기 제어가 이루어진다. 그림 3은 완전급수상실 사고시에 원자로냉각재계통 감압에 대한 전략 중 하나인 안전감압밸브의 개방에 대한 발전소의 변화를 사전에 모의하여 그 결과를 나타낸 것이며, 밸브에 대한 현재의 제어 화면이 그림 4에 나타나 있다. 그림 4의 위쪽 그래프들이 아무런 조치를 취하지 않았을 때의 RCS 압력과 원자로 수위를 나타내고 있으며, 아래쪽 그래프가 안전감압밸브를 90% 개방하였을 때의 결과이다. 그래프를 보면 RCS 감압을 위한 전략으로 안전감압밸브를 선택하였을 때의 발전소의 변화를 알 수 있게 된다.

이 시뮬레이터의 또 하나의 특징은 원자로 및 주요 기기들의 상태 변화를 그래픽으로 제공한다는 점이다. 그림 2에 보면 원자로의 상태 및 증기발생기의 상태가 그래픽으로 표

현되어져 한 눈에 주요 기기들의 상태를 파악할 수 있도록 하였다. 원자로심의 상태를 그래픽으로 표현함으로써 노심 용융을 시각적으로 표현하여 이에 대한 보다 깊은 이해가 가능하도록 하였으며, 또한 증기발생기, 가압기 등 주요 기기들의 상태도 한 눈에 파악할 수 있도록 그래픽으로 설계하였다.



그림 3. 밸브 제어 화면

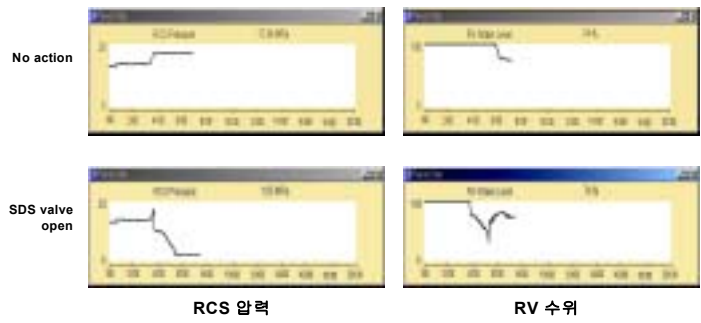


그림 4. 안전감압밸브 개방에 따른 발전소의 변화

전술한 바와 같이 비상운전과 중대사고의 기본 차이로 인해 기존의 CFMS를 중대사고 상황에서 그대로 사용하게 되면 몇 가지 문제점이 발생하게 되는데, 그 중 제일 큰 문제점은 안전 목표의 차이로 인해 상황 판단 및 조치에 필요한 변수들의 종류에 차이가 있다는 점이다. 즉, 비상인 경우에는 노심용융방지 개념에서 비롯된 필수안전기능을 기준으로 하여 정보를 제공하지만, 중대사고의 경우에는 방사선물질의 누출 방지 차원에서 발전소 전체를 한눈에 파악할 수 있도록 정보를 재구성하여 제공해야 한다는 점이다.



그림 5. 중대사고 SPDS 모듈

그림 5에는 중대사고 SPDS 모듈이 나타나 있는데, 윗부분의 7개 변수들은 중대사고관리지침서의 전략수행제어도의 변수들, 즉 전략의 우선 순위 결정에 필요한 변수들을 나타내고 있다. 각 변수들의 상태를 표현함에 있어 비상운전절차서와 마찬가지로 색깔 개념을 도입하여 쉽게 파악할 수 있게 하였다. 즉 설정치를 초과하는 변수들에 대해선 비상운전지침서와 동일한 적색으로 표현함으로써 쉽게 구별되도록 하였다. 그리고 중대사고 전반에 걸쳐 발전소 상황 판단에 중요한 변수들을 선정하여 이들에 대해서는 현재의 값은 물론, 시간에 따른 변화를 그래프로 표현함으로써 사고 이후 이들 변수들의 변화 과정을 한 눈에 알아볼 수 있도록 설계하였다.

4. HyperKAMG 지침서 모듈

중대사고 훈련 지원시스템의 근간이 되는 모듈로써, 중대사고관리지침서의 모든 전략이 모두 전산화되어 입력되어 있다. 응급지침서, 전략수행제어도, 완화지침서, 계산보조도구, 그리고 기기점검표에 이르기까지 지침서의 모든 부분이 전산화되어 서로 연계되어 있다. 지침서의 각 완화 전략들은 가용수단에서부터 시작하여 전략수행여부결정, 전략수행방법결정, 전략수행, 그리고 전략종결에 이르는 과정으로 진행되어지며, 현재 수행하고 있는 단계가 이들 중에서 어느 과정에 속하는지를 자동으로 보여줌으로서 전략 수행에 대한 이해를 증진시킬 수 있게 하였다.

	외판부회회수기별							선전부회 (2기별)		후방기대기			
	RG-1001	RG-1002	RG-1003	RG-1004	RG-1005	RG-1006	RG-1007	RG-1008	RG-1100	RG-1101	RG-1102	RG-1103	RG-1104
발전소전기부회 (1기부회 운영전) (정상)	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상
발전소발전부회	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상
핵심기 대동정	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5

	외판부회회수기별		선전부회 (2기별)	
	RG-1001, 1002	RG-1003, 1004	RG-1005, 1006	RG-1007, 1008
발전소전기부회 (1기부회 운영전) (정상)	정상	정상	정상	정상
발전소발전부회	정상	정상	정상	정상

그림 6 HyperKAMG 지침서모듈

그림 6에 HyperKAMG 모듈의 수행모습을 나타내었다. HyperKAMG 지침서 모듈은 SATS와 연계되어 작동하게 설계 되었으며 기본적으로 중대사고관리지침서의 모든 내용을 하이퍼텍스트 형태로 제공한다. HyperKAMG 모듈은 중대사고관리지침서와 마찬가지로 응급지침서, 전략제어수행도, 완화지침서, 종결지침서, 기술배경서, 기기점검표 및 보조계산도구로 구성되어 있다. 완화지침서는 선택된 전략에 대한 일반적인 기술로부터 시작되며, 기기점검, 수행전략 결정, 전략수행방법 결정, 전략수행, 전략종결의 과정을 차례로 거치게 된다.

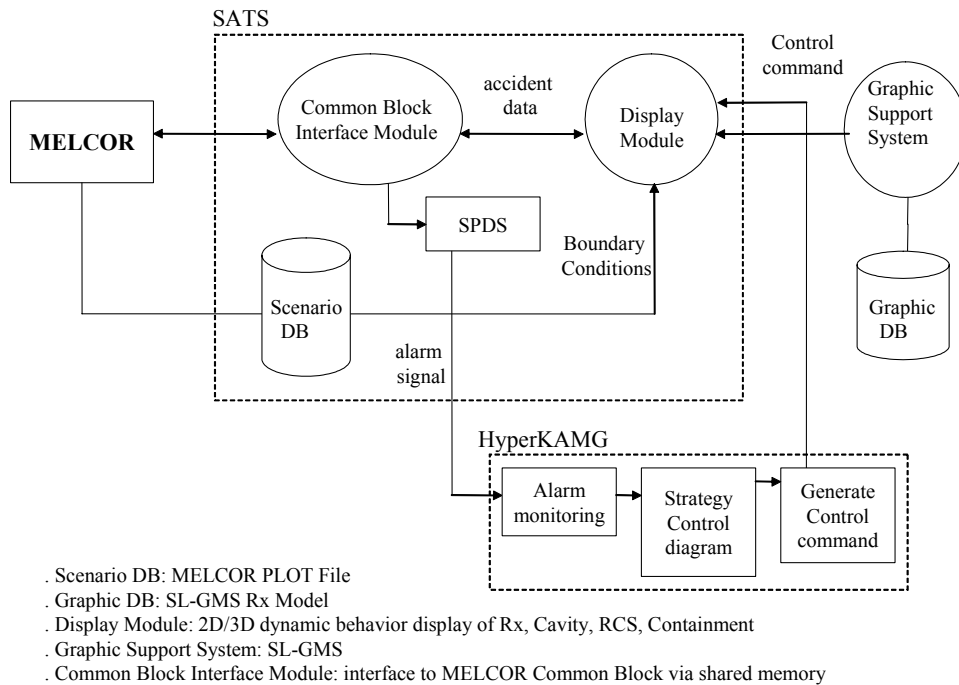


그림 7. SATS - HyperKAMG 연계 시스템의 구조도

그림 7은 HyperKAMG와 SATS와의 관계를 도식적으로 표현한 것이다. 그림에서 보듯이 SATS는 common block 인터페이스 모듈을 통하여 MELCOR의 데이터 블록에 접근하고, SL-GMS 모델로 이루어진 그래픽 디스플레이에 발전소 현재 상태를 나타낸다. 주요 중대사고 변수를 감시하기 위해 작성된 SATS의 SPDS 모듈은 사고 진행상황에 따른 주요 변수에 대한 현재 값과 추이 그래프를 그리며, 중대사고관리지침서에서 정의된 주요 변수 설정치에 따라 황색 또는 적색의 경보를 발생시킨다. 발생된 경보신호는 HyperKAMG 모듈에 전송되며, 전송된 일련의 경보들로 부터 HyperKAMG는 전략제어

수행도에 따라 처리 적절한 조치사항을 생성시킨다. 생성된 조치사항은 다시 SATS의 디스플레이 모듈로 전송되어 해당 밸브나 펌프 등의 제어기기를 자동으로 조작하게 된다. 이로 전략수립 과정이 실행되어 특정 밸브를 제어하는 등의 구체적인 완화전략 조치사항이 생성되고, 생성된 조치사항은 다시 SATS에 전송되어 해당 조치가 SATS에서 실행되어진다.

HyperKAMG-SATS 연계 시스템은 현재 개발 중인 시스템이지만 대체적으로 SATS 개발과정에서 이미 검증되었던 부분에 대한 자동화 시스템 구축이다.[4] 다만 SATS의 SPDS 모듈과 HyperKAMG 모듈간의 데이터통신 문제, 전략수행제어도를 사용한 제어명령 생성 문제, SPDS 정보신호 조합에 의한 발전소 상태 판정과 이에 따른 지침서 자동진입 문제 등 구체적으로 해결되어야 할 문제들이 아직 남아 있다.

5. 결론

현재까지 개발된 많은 의사결정지원시스템 및 훈련시스템들이 대부분 비상운전 영역까지만 대상으로 개발되었는데, 이는 중대사고의 불확실성으로 기인한 것이다. 그러나 외국과 마찬가지로 최근 국내에서도 중대사고관리지침서가 개발되어져 국내 중대사고관리에 대한 근거가 마련되어졌다. 이에 따라 중대사고관리지침서를 논리흐름의 근간으로 채택한 중대사고 훈련 지원시스템을 개발하였다.

중대사고의 복잡한 현상을 그래픽으로 디스플레이 하고 원하는 기기를 조작할 수 있는 중대사고 시뮬레이터 SATS의 개발은 가상 시나리오에 의한 중대사고 훈련 및 교육에 대한 기대를 갖게 하였다. 또한 기왕에 개발된 중대사고관리지침서를 하이퍼텍스트 형식으로 전산화한 HyperKAMG 모듈이 개발되었으며, SATS와 연계하여 중대사고 시나리오 모의 및 중대사고 전략수립에 중대사고 전략 수립에 적절히 활용될 수 있어 전체적으로 하나의 훈련지원 시스템 역할을 수행하였다.

본 논문에서는 그동안 지적되어져 온 SATS와 HyperKAMG 사이의 자동화 문제를 해결하기 위하여 Tightly coupled HyperKAMG-SATS 시스템의 설계와 구축방안, 예상되는 문제점 및 해결 방안에 대하여 논의하였다. 본 시스템은 운전원과 기술지원센터 요원 등 중대사고 관련자들의 교육과 훈련을 기본으로 하여 설계되어졌지만, SATS의 SPDS 모듈 발전소 변수 입력 부분만 발전소 계측 데이터로 변경하면 실제 중대사고시에 발전소 상태의 감시가 가능하며, 다른 부분의 기능들도 그대로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 한국원자력연구소, "한국표준원전 중대사고지침서 개발", KAERI/RR-1939/98, 1999년 11월.
- [2] "MELCOR 코드를 이용한 중대사고 훈련 시뮬레이터 개발," 김고려외, KAERI/TR-2078/02.
- [3] "Development of a Severe Accident Training Simulator : SATS," 김고려외, 2002 ANS Annual Meeting
- [4] "Development of Severe Accident Management and Training Support System," 정광섭외, Annals of Nuclear Energy 29(2002) pp. 2055-2069