

원자력발전소 중대사고 관리시스템 개발 및 적용

김고려 · 박선희 · 김동하

한국원자력연구소 열수력안전연구부

1. 서 론

원자력발전소 중대사고는 설계기준 사고와는 달리 많은 불확실성을 내재하고 있어 적절한 사고관리 전략을 수립하기 위해서는 보다 다양한 형태의 정보수집이 필수적이다. 설계기준외 사고인 중대사고가 발생하면 발전소 전체의 안전은 전적으로 운전원의 조치에 의존하게 되며, 운전원이 사고회복에 실패할 경우에는 발전소는 심각한 타격을 입어 손상된 노심으로부터 발생한 다량의 방사능 물질이 원자로 용기를 관통하여 격납 건물에 누출되게 된다. 그럼에도 불구하고 중대사고 현상과 시나리오에 내재된 불확실성으로 인하여 비상운전의 경우와 같은 구체적이고도 자세한 절차서의 작성이 거의 불가능하며, 사고 완화를 위한 지침서 정도가 개발되고 있는 실정이다. 즉, 중대사고시 발전소 거동을 정확하게 예측하기가 매우 어려우며 따라서 최적의 의사결정을 지원하기 위해 지속적인 발전소 감시기능과 함께 다양한 형태의 중대사고 지식베이스가 절실하다.

최근에 들어 국내에서도 한국표준원전에 대한 중대사고관리지침서(KAMG)가 개발되었으며¹⁾, 이를 토대로 중대사고관리를 위한 훈련시스템이 개발되고 있다. 중대사고관리지침서 전체를 하이퍼텍스트 형태로 만든 HyperKAMG, 중대사고시 발전소 거동을 그래픽으로 나타내는 SATS 중대사고 훈련 시뮬레이터가 개발되었으며, 본 논문에서는 이 둘을 연계하여 중대사고에 대한 훈련을 가능하게 하는 시스템도 개발에 대해 기술하고자 한다. 즉, 중대사고 정보표시계통(SPDS)에서 경보가 발생하면 주제어실(MCR)과 기술지원실(TSC)에서는 HyperKAMG의 완화전략을 사용할 수 있게 되어, 중대사고시 전략수립 전체과정을 모의할 수 있도록 한다는 목표를 가지고 있다. HyperKAMG는 KAMG와 마찬가지로 응급지침서, 전략수행제어도, 완화지침서, 종료지침서, 기술배경서, 기기점검표 및 다양한 계산도구를 포함하고 있다.

2. 중대사고지침서 모듈 개발

2.1 한국표준원전 중대사고관리지침서

한국원자력연구소에서는 1988년 한국표준원전의 중대사고관리지침서(KAMG)를 개발하였다. 이 지침서는 원자로 노심이 용융되어 더 이상 응급절차서를 적용할 수 없는 상황에서 사용되어지도록 설계되었으며, 응급지침서, 전략수행제어도, 완화지침서, 종결지

침서, 기술배경서, 기기점검표 및 계산보조도구 들로 이루어져 있다. 지침서는 주제어실에서 사용되는 지침서와 기술지원센터에서 사용되는 지침서로 구분되며, 기술지원실에서 사용되는 7개 완화전략을 핵심으로 하고 있다. 각각의 완화전략은 고유의 계산 보조도구를 가지고 있으며, 7개 전략은 다음과 같다.

- 완화-01: 증기발생기 급수 주입
- 완화-02: 원자로 냉각재계통 감압
- 완화-03: 원자로 냉각재계통 냉각재주입
- 완화-04: 격납건물 급수주입
- 완화-05: 핵분열생성물 방출 제어
- 완화-06: 격납건물 상태 제어
- 완화-07: 격납건물내 수소 제어

전략수행의 우선순위는 KAMG의 전략수행제어도에 의해 결정된다. 전략수행제어도에는 사고기간 동안 감시되어야 할 모든 안전 변수가 설정치와 같이 포함되어 있어, TSC에서는 전략수행제어도를 통해 발전소 상태가 안정되어 MCR에서 통제가 가능해질 때 까지 발전소를 주기적으로 감시하여야 한다.

2.2 중대사고 지침서 모듈(HyperKAMG)

HyperKAMG는 중대사고관리 및 훈련의 기본이 되는 모듈로 한국표준원전 중대사고관리지침서(KAMG)의 모든 내용이 포함되어 있다. KAMG의 경우와 같이 각각의 완화전략은 가용기기 점검, 전략수행여부 결정, 전략수행방법 결정, 전략수행 및 전략종결의 5단계를 거치는 과정이 전산화 되어 있으며, 여기서 이루어진 의사결정 사항은 HyperKAMG에서 다음의 형태로 정리된다.

- 선정된 장비
- 선정된 주입경로 또는 감압경로
- 전략수행 제한 사항
- 특별히 감시되어야할 변수
- 기타

이렇게 정리된 결정사항은 SPDS를 통해 SATS에 전달된다.

3. 중대사고 훈련시뮬레이터(SATS)

현재 세계 각국에는 다양한 형태의 중대사고 분석코드가 사용되고 있으며, 이러한 분석코드를 사용하는 다양한 사고관리시스템이 개발되어 있다⁶⁻⁷⁾. SATS 중대사고 훈련시뮬레이터는 국내의 중대사고관리지침서 개발에 맞추어 개발되었다. 한전에서 중대사고지침서를 사용하게 되면, 발전소 운전원들은 중대사고 훈련과정을 이수해야 되고, 효율적인 훈련을 위해서는 중대사고 훈련시뮬레이터가 필수적이다.

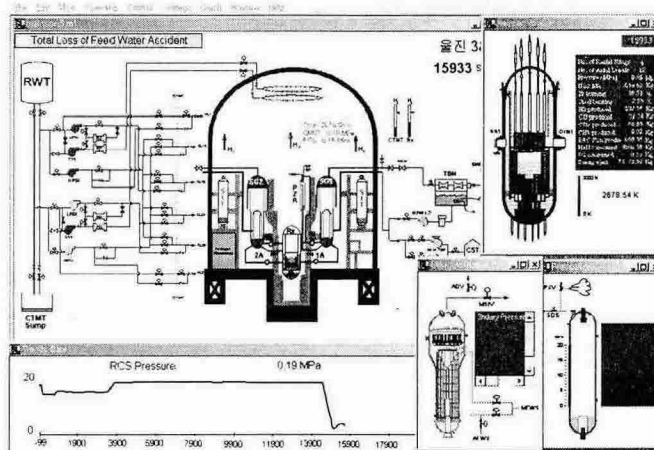


Fig. 3-1 중대사고 훈련시뮬레이터

SATS(Severe Accident Training Simulator)는 중대사고 훈련, 모의 및 분석 등의 다양한 목적을 위해 개발된 PC 기반의 그래픽 시뮬레이터이다. SATS의 기능은 크게 2개의 기능으로 분류되는데 하나는 중대사고시 발전소의 거동 및 주요 중대사고 현상을 그래픽으로 나타내는 것이고, 다른 하나는 사용자 입력을 받아 즉석에서 그 결과를 보여주는 것이다. SATS는 MELCOR 코드를 중대사고 모의엔진으로 하고 있으며, 현재 계산되는 결과를 즉시 반영하여 중대사고시 원전의 거동을 그래픽으로 나타낸다. MELCOR 코드를 사용하면 사고 경과시간에 따른 노심의 거동이나 격납건물내 시스템의 거동을 예측할 수 있다. SATS는 실시간 제어능력을 가지고 있으며 KAMG에 나타나는 주요 밸브나 펌프는 MELCOR 입력의 수정 없이 마우스를 사용하여 실시간으로 제어할 수 있다. SATS의 이러한 실시간 제어능력으로 인하여 SATS는 명실상부한 중대사고 그래픽 시뮬레이터로서의 기능을 가진다.

4. SATS - HyperKAMG 연계

4.1 중대사고 정보표시계통 (SPDS)

한국표준원전에는 발전소의 상태를 감시하기 위해 필수안전기능(Critical Safety Function)이란 개념을 정의하여 사용하고 있다. 이 CSF 개념은 비상시까지 적용되는 개념으로 이에 따라 필수안전감시계통(CFMS)이 설계되어 운영 중에 있다. 그러나 노심이 손상되는 중대사고시에는 비상시와는 사고회복에 근본적인 목표 차이가 있어 CSF 개념이 그대로 적용되어질 수는 없다. 2장에서 언급된 KAMG의 전략수행제어도에는 CSF와 거의 유사한 개념이 도입되어 있는데 전략수행제어도의 7개 핵심 변수를 비롯하여 중대사고의 일반적인 현상에 영향을 미치는 변수가 포함된 중대사고 정보표

시계통(SPDS)이 개발되었다. SPDS는 필수안전기능 측면에서 발전소 정보를 표시하는 CFMS와는 달리 중대사고시 방사능 누출을 최소로 하기 위한 정보를 재구성하여 제공한다.

SPDS는 중대사고 감시를 위하여 7개의 경보과 12개의 그래프를 사용하도록 설계되어 있다. 7개의 경보는 SPDS의 상단의 좌측에서부터 전략수행제어도에 나타난 변수 순서에 따라 차례로 위치하며, 변수의 상태에 따라 적색, 황색 및 청색으로 표시된다. SPDS의 12개 그래프는 최근 1시간동안의 경향을 표시하며, 이 그래프들은 중대사고에 영향을 미치는 주요변수에 대한 현재값 및 경향을 알 수 있게 하여, 중대사고시 의사결정에 도움을 줄 수 있도록 설계된 것이다. 또한 각 그래프 아래에 있는 단위변경 버튼을 사용하여 압력이나 수위의 단위를 변경할 수 있도록 하였으며, 모든 변수에 대한 사고 이후 현재까지의 변화추이도 선택하여 볼 수 있도록 하였다.

4.2 SPDS를 통한 SATS-HyperKAMG 연계

SATS 훈련시뮬레이터와 HyperKAMG 모듈간의 연계에 있어 SPDS가 핵심적인 역할을 수행한다. 그림4-1은 SATS-HyperKAMG 연계시스템의 개념도이다. 그림4-1에서 SATS, MELCOR, SPDS, HyperKAMG는 공유메모리에 의해 결합되어 있으며, 각각은 독립적으로 실행된다. MELCOR에서 이루어지는 모든 계산결과는 공유메모리에 저장되며, SATS와 SPDS에서 사용된다. SATS와 SPDS는 같은 데이터를 각각 다른 목적으로 사용한다. 즉, SATS의 경우 발전소 거동의 그래픽 표현과 밸브나 펌프를 사용한 실시간 제어기능 구현에 사용하고, SPDS의 경우에는 주요 안전변수의 표시 및 KAMG논리에 따른 경보발생에 사용하고 있다. 일단 경보가 발생하면, SPDS는 HyperKAMG 모듈을 기동하며, HyperKAMG상에서 이루어지는 의사결정 과정을 기다리게 된다. 발생한 경보는 HyperKAMG모듈로 전달되며, 전달된 일련의 경보들은 전략수행제어도의 논리에 따라 SATS에서 수행할 적절한 명령을 생성하게 된다. 생성된 명령은 다시 SPDS를 통하여 SATS에 전달되게 되어, 해당되는 밸브, 펌프 등의 제어기가 작동하게 된다.

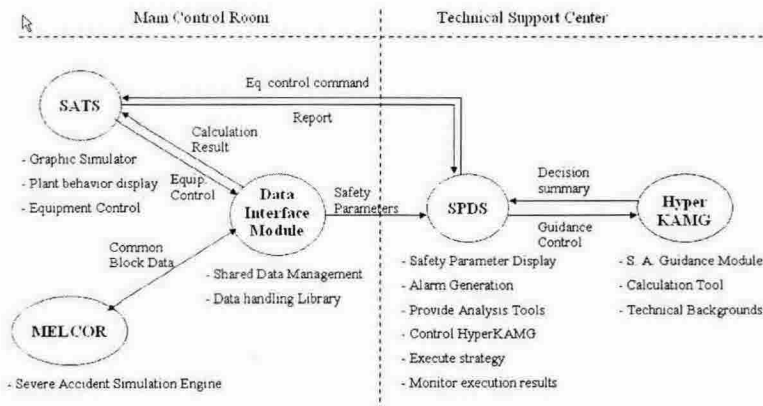


Fig. 4-1 Overall structure of SATS-HyperKAMG system

4.3 적용사례: 완전급수상실사고 시나리오

원자력발전소는 방사능의 외부 누출문제 때문에 터빈을 구동하는 증기 생성이 원자로에서 직접 이루어지지 않고 증기발생기에서 간접적으로 이루어진다. 완전급수상실(TLOFW) 사고란 증기발생기 냉각을 위해 공급될 수 있는 2개의 급수계통인 주급수계통과 보조급수계통 모두가 상실되는 사고를 말한다. 이들 급수계통이 고장나면 노심손상이 발생하는 중대사고로 발전할 수 있다.

Table 4-1 TLOFW 주요현상

경과시각(초)	주요 내용
0	원자로 정지
3,546	증기발생기 고갈
6,190	노심노출 시작
9,540	노심 dryout
12,875	노심 용융 및 재배치
13,259	lower head 관통
13,597	SIT 동작

Table 4-2 전략적용 결과

경과시각(초)	주요 내용	기기조작
0	원자로 정지	
3,000	증기발생기 고갈 RCS 압력증가 격납건물 압력증가	
10,400	노심출구온도>644.1° K	
11,600	완화-01 수행 AFW 재기동시도	AFW 기동
11,900	이차측 재고량 회복 완화-02 수행	SDS 개방

1. TLOFW 발생 2시간후 AFW 응급복구
2. 일차측 감압수단 중 SDS 밸브만 사용가능함

표4-1은 TLOFW 사고에 대해 어떠한 조치도 취하지 않았을 경우의 주요 전개과정이고, 이를 토대로 중대사고 완화를 위해 개발한 시나리오가 표 2에 요약하였다. 그림 4-2는 중대사고관리가 시작되어 완화-02 지침서를 시작하는 시점인 11,000초에서의 발전소 상황으로 노심온도가 계속적으로 증가하며 증기발생기는 고갈되어 중대사고로 진행되고 있음을 보여 주고 있다. 그림 4-3은 표4-2에서 보는 바와 같이 TSC의 지시에 의해 보조급수가 재가동되어 이차측 급수가 회복되고 있으며 일차측은 SDS 밸브의 개방으로 압력이 낮아져 저압안전주입이 재개되고, 노심수위, 노심온도가 안정적 상태로 돌아오고 있음을 보여주고 있다.

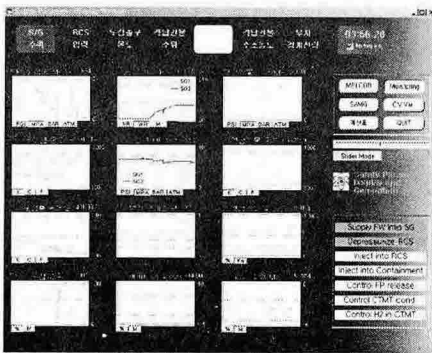


Fig. 4-2 TLOFW (11000초)

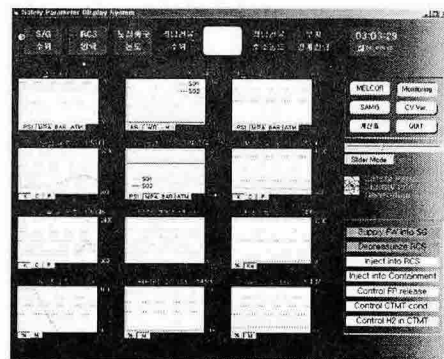


Fig. 4-3 TLOFW (14100초)

4. 결 론

원자력발전소 중대사고는 극히 발생하기 힘든 사고로 그 결과의 엄중함에도 불구하고 주제어실의 운전원이나 TSC요원들이 중대사고 현상과 그 완화전략에 익숙하지 않은 실정이다. 또한 실제 중대사고 시 긴급 상황에서의 심리적인 압박감을 상상해 보면 평소 중대사고에 대한 교육과 훈련의 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 이번에 개발한 SATS와 HyperKAMG의 경우 발전소 운전원에게 제품소개와 교육을 통하여 보다 쉽고 간단한 GUI, SATS와 HyperKAMG간의 연결문제, 모의 속도, 정상 비정상 및 중대사고 통합 환경, 다양한 사고 시나리오 확보 등 여러 가지 개선항목이 도출되어 개발에 반영되었다.

본 논문에서는 hyperKAMG와 SATS에 대한 간략한 소개와 KAMG 논리에 대해 기술하였으며, 사고관리에 훈련시뮬레이터와 절차서의 자동 구현을 위해 SATS-HyperKAMG 연계시스템 개발과 응용사례에 대해 기술하였다. 중대사고관리의 궁극적 목표는 환경에 대한 방사능 누출을 막는 것으로, 개발된 SATS-HyperKAMG 연계 시스템은 중대사고 관리 및 훈련의 훌륭한 도구가 될 수 있을 것으로 기대한다

참고문헌

- [1] 한국원자력연구소I, "한국표준원전 중대사고지침서 개발", KAERI/RR-1939/98 (1998).
- [2] 김고려 외, "PC를 이용한 중대사고현상의 그래픽 시뮬레이션," 2000 춘계원자력학회
- [3] 한국원자력연구소, "MELCOR 코드를 이용한 중대사고 훈련시뮬레이터 개발," KAERI/TR-2078/02
- [4] K. R. Kim et. al, "Development of a Severe Accident Training Simulator: SATS," 2002 ANS Annual Meeting, Hollywood, FL , June (2002).
- [5] K. S. Jeong et. al, "Development of Severe Accident Management Advisory and Training Simulator (SAMAT)," Annals of Nuclear Energy, v29, pp2055-2069 (2002).
- [6] M. Sonnenkalb, "Phenomenolgy and Course of Severe Accidents in PWR Plants Training by Teaching and Demonstration," 2ndOECD Special Meeting on Operator Aids for Severe Accident Management, Lyon, France, Sept. 9-10 (1997).
- [7] P.J.T. Bakker, "Use of MAAP-GRAAP for Training of Borssel NPP Plant Operators", SAMOA-2 Meeting, Lyon, France, Sept. 9-10 (1997)