

# MELCOR 코드를 이용한 중대사고 훈련용 그래픽 시뮬레이터(MEL-GRS) 개발

김고려\*·정광섭\*\*·하재주\*\*\*

## Development of a Graphic Simulator(MEL-GRS) for Severe Accident Training using a MELCOR Code

Ko Ryu Kim, Kwang Sub Jeong, Jae Joo Ha

**Key Words:** 시뮬레이터, 훈련도구, 중대사고, MELCOR

### Abstract

본 논문에서는 중대사고 해석코드인 MELCOR를 이용하여 개발중인 중대사고 훈련용 그래픽 시뮬레이터 MEL-GRS에 대하여 기술하였다. MEL-GRS는 SL-GMS 그래픽 툴과 MELCOR 계산 결과를 적절히 사용하여 중대사고 현상을 실시간으로 디스플레이하는 목적으로 개발되었는데, 기존의 MELCOR 코드에서 불가능했던 다이내믹 시뮬레이션 기능을 가지고 있어 실시간 밸브 및 펌프 조작이 가능하다. 개발된 시스템은 IBM PC Windows 환경에서 작동하며, 울진 3,4호기를 대상으로 한 TLOFW, LOCA등의 중대사고 시나리오를 사용하여 그 성능을 검증하였다. 개발된 시스템은 차후 발전소 현장의 설치 및 검증을 거쳐 운전원 및 TSC 요원의 중대사고 훈련도구로 활용할 계획이다.

책 요원들에 의해 행해지는 조직행위를 말한다.

### 1. 서 론

원자력발전소의 중대사고(Severe Accident)는 설계기준사고를 벗어난 사고 중 노심의 손상이나 용융을 야기시키는 사고를 뜻하며, 발생확률은 적지만 결과의 심각성은 매우 큰 사고이다. 중대사고관리는 미 NRC의 NUREC/CR-477에 정의되어 있으며, 중대사고시 원자로용기의 보호와 격납건물의 건전성을 유지시켜 핵분열 생성물의 소외방출을 최소화하기 위해 발전소 운전원을 비롯한 비상대

한편, 중대사고의 예방과 완화를 목적으로 하는 중대사고관리는 중대사고 현상에 대한 이해가 필수적이며, 이를 위하여 RELAP, MELCOR, MAAP 등의 해석코드를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션이 많이 사용되고 있는데, 컴퓨터 시뮬레이션 결과인 방대한 자료에 대한 분석은 전문가에게 있어서도 매우 힘들고 많은 노력이 요구되는 작업이다. 그래픽 시뮬레이터는 방대한 중대사고 데이터를 그래픽을 사용하여 중대사고현상을 모의하는 시스템으로 ATALAS, MAPP-GRAAP, SIPA, NPA[3,4] 등 국내외에서 활발하게 개발되고 있으며, 일부는 상용화 단계에 있다.

\* 한국원자력연구소 종합안전평가팀

MEL-GRS는 MELCOR 1.8.4 PC Version을 사용하여 중대사고를 시각적으로 모의하는 중대사고 훈련용 그래픽 시뮬레이터로 가압경수형 원자로인 울진 3,4호기를 모형으로 제작되었다. 주요 기능은 MELCOR 코드의 수행결과를 충실히 반영하여 운전원 및 TSC 요원에게 운전에 필요한 정보를 시각적으로 제공하고, 밸브 및 펌프 등을 조작하여 그 결과를 모의하는 시스템으로 TLOFW, LOCA 등의 중대사고 시나리오를 통해 검증되었다. MEL-GRS는 아직 개발 중에 있으며, 차후 현장설치 및 보완을 거쳐 발전소 운전원 및 TSC요원의 훈련도구로 사용될 예정이다.

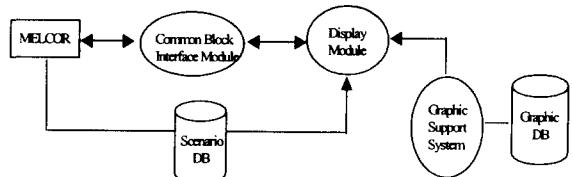
## 2. MEL-GRS 구조 및 특성

### 2.1 MEL-GRS 전체구조

MEL-GRS는 MELCOR 코드의 수행 결과를 토대로 하고 있다. MELCOR 코드는 Sandia National Lab.에서 개발한 2세대 risk 코드로 중대사고시 원자로 냉각재 계통, 캐비티, 격납건물 등에서의 열수력 거동을 모의하고 노심손상, 핵분열 생성물 방출과 이송, 수소생성과 연소 등을 모의한다.

MELCOR 코드는 MELGEN pre-processor, MELCOR, MELPLT post-processor 등 3개 부분으로 구분되며, 기본적인 계산결과 파일 이외에도, 재실행을 위한 Restart File과 그래프를 그리기 위한 Plot File 등의 결과물을 생성한다. MEL-GRS는 SL-GMS로 작성된 원자력발전소 안전관련계통의 주요기기에 대한 그래픽 DB와 MELCOR 수행 결과로 얻어지는 시나리오 DB, Common Block

Interface Module, SL-GMS Graphic Interface Module 그리고 Main Module로 구성된다. Plot File 또는 별도로 수행중인 MELCOR 데이터를 입력으로 사용하며, 다중 프로세싱을 개념으로 설계되었다.



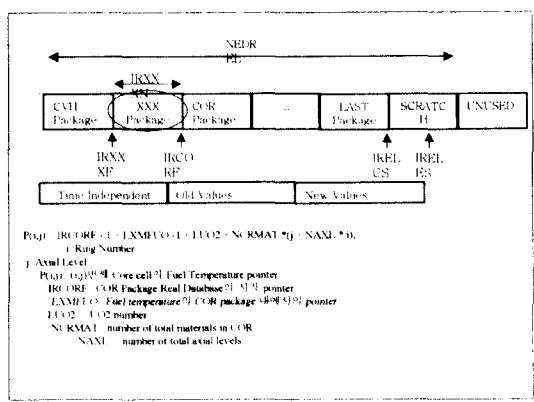
- . Scenario DB: MELCOR PLOT File
- . Graphic DB: SL-GMS Rx Model
- . Display Module: 2D/3D dynamic behavior display of Rx, Cavity, RCS, Containment
- . Graphic Support System: SL-GMS
- . Common Block Interface Module: interface to MELCOR Common Block via shared memory

그림1 Overall Structure of MEL-GRS

### 2.2 MELCOR Data 처리

여기서는 편의상 입력 데이터가 MELCOR 플롯파일(Plot File)인 경우를 오프라인 데이터처리, Common Block 데이터인 경우를 온라인 데이터처리로 분류하기로 한다. 플롯파일은 이전 파일로 MELCOR 유트리티인 Hisplt를 사용하여 변수의 트렌드에 대한 그래프를 그릴 수 있도록 생성된 것이다. 오프라인 데이터처리의 경우 모의 초기에 플롯파일을 읽는데 따른 지연 및 시스템의 부하를 피하기 위해 별도의 작업자 스레드를 만들어 병렬로 수행시키는 방법을 사용하였는데, 이 경우 메인 프로그램과 작업자의 2개의 스레드가 병렬로 수행되며 메인 스레드는 작업자 스레드에서 받은 해당 변수 값을 SL-GMS 그래픽 제어 시스템에 보내 화면을 갱신하게 된다.

한편, 온라인 데이터처리는 별도로 수행중인 MELCOR의 데이터를 읽는 방식으로 오프라인 방식에 비해 진행이 느린 반면 실시간 모의가 가능하다. MELCOR 코드는 각 패키지에 사용되는 데



Block에 두어 관리하다가 지정된 시간마다 재실행 파일에 저장한다. 그림2는 MELCOR 데이터의 구조와 노심의 반경 방향 i번째 Ring, 축방향 j번째 셀의 핵연료 온도를 구하는 예이다. MELCOR는 매 Cycle마다 데이터를 갱신하는데, 이를 수정하여 밸브 또는 펌프의 조작을 모의할 수 있다. 즉, MELCOR에서 밸브나 펌프의 제어는 CF 패키지에서 제어입력을 기억하여 일정한 조건에 도달하면 관련 프로그램에서 제어하게 되는데, 궁극적으로 Flow Line Open Fraction 변수인 FLOPO의 값을 변경하는 것이며, MEL-GRS에서 이 값을 강제적으로 변경함으로써 같은 효과를 얻을 수 있다. 단지, MELCOR에서는 이러한 사실을 모르므로 CF 패키지에서 계속 입력값으로 환원시키게 되는데, 이를 방지하기 위하여 CF Function Table을 변경시키거나 입력을 조정하는 방법이 있으며, 펌프나 밸브의 특성을 고려하여 사용한다.

그림2. MELCOR 데이터 구조

온라인 방식에서는 프로그램의 진행이 MELCOR 진행에 의존하게 되어 시간이 많이 걸리는 문제가 필연적으로 발생하는데, MEL-GRS에서는 Replay 기능과 MELCOR 재실행 기능을 이용하여 이와 같은 단점을 보완한다.

### 2.3 그래픽 디스플레이

MEL-GRS의 그래픽화면은 SL-GMS 모델로 구성되며, MELCOR의 구역화(Nodalization)를 바탕으로 하고 있다. 구역화 정보는 MELCOR의 20여 개의 패키지에 나뉘어 입력되며, 주로 CVH, COR, HS, FL 패키지의 입력의 정보가 사용된다. 구역화 단위는 CVH 패키지의 Control Volume이 기본적으로 사용되며, COR 패키지에서 특별히 노심을 nRad x nAxis 셀로 나누어 관리한다. 그림3은 울진3,4호기 원자로 구역화 정보이다.

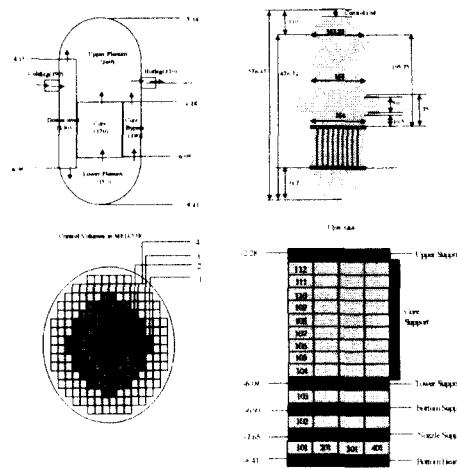


그림3 울진3,4호기 원자로 및 노심 구역화

그래픽 디스플레이는 시스템 부담을 최소화하기 위하여 제3업체의 SL-GMS Graphic Library를 사용하여 이루어진다. SL-GMS는 C로 작성된 Graphic Library로 C++의 Object에 해당되는 State를 정의하는데, 최상위의 StandardTopState, 윈도우를 정의하는 WinModState, 데이터를 처리하는 DsModState를 기본으로, 사용자의 필요에 따라 State를 정의하여 사용하도록 되어 있다.

### 2.4 사용자 인터페이스

편리한 사용자 인터페이스를 위해 Windows 사용자에 익숙한 MFC 기반의 프로그래밍이 이루어졌으며, 특별히 MELCOR 전문가를 위하여 코드

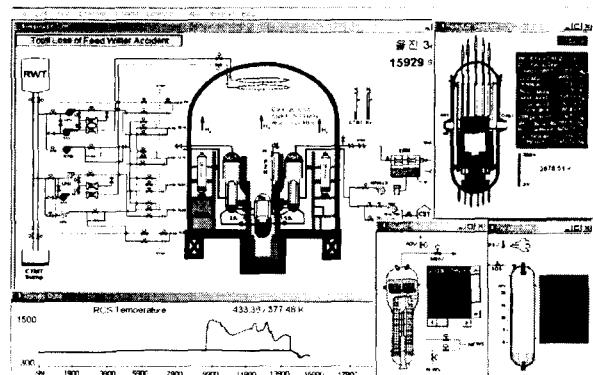
입출력을 위한 화면도 제공한다. 또한 모의된 사고 시나리오를 빠른 시간 내에 반복 재생하는 Replay 기능, 주요 사고 변수의 추이를 한눈에 알 수 있게 디자인된 SPDS (Safety Parameter Display System)와 SPDS Alarm, 강력한 기능의 그래프가 제공되며, 시나리오 저장, 온라인과 오프라인 상호 전환 등의 기능이 갖추어져 있다.

### 3. Simulation 및 결과

#### 3.1 사고시나리오 모의

TLOFW는 원자력발전소에 공급되는 급수가 완전히 차단되는 중요한 사고 시나리오 중의 하나이다. 원자력발전소는 방사능의 외부 누출 문제 때문에 화력발전소와는 다르게 터빈을 구동하는 증기 생성이 원자로에서 직접 이루어지지 않고 증기발생기에서 간접적으로 이루어진다. 원전이 정지한 후에도 원자로에서 잔열(decay heat)이 계속 생성되기 때문에 증기발생기를 통해 원자로를 냉각시켜야 하여야 한다. TLOFW란 증기발생기 냉각을 위해 공급될 수 있는 2개의 급수계통인 주급수계통과 보조급수계통 모두가 상실되는 사고를 말한다. 이들 급수계통이 고장나면 노심손상이 발생하는 중대사고로 발전할 수 있다.

시뮬레이션 대상인 울진 3,4호기는 대표적인 가압형 경수로로 2개의 루프로 된 냉각재계통과 대형 건식 격납건물을 가지고 있는데, 각 폐회로 당 하나의 고온관과 하나의 증기발생기, 2개의 저온관 및 2개의 냉각재 펌프로 구성되고, 전 계통은 하나의 가압기에 의해 압력이 유지되며, 1차계통과 2차계통의 과압을 방지하기 위하여 가압기와 주증기 관에 안전방출밸브(Safety Relief Valve:SRV)가 달-



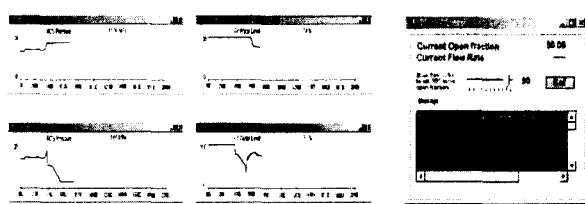
려 있다. TLOFW 시나리오에서는 사고 완화에 사용될 수 있는 HPSI와 LPSI는 작동하지 않으며, 원자로 냉각재 펌프는 사고 후 약 10분 경과 후 정지하는 것으로 가정하였고, SDS에 의한 중대사고 방지나 완화에 의한 모의는 수행하지 않았다. 그림4는 TLOFW 사고시나리오를 그래픽으로 모의하는 화면이다.

그림4. MEL-GRS의 TLOFW 그래픽 모의

MEL-GRS의 성능은 대표적 중대사고 시나리오인 TLOFW와 LOCA시나리오를 수행하여 검토되었는데, MEL-GRS의 Sub Module로서의 MELCOR와 워크스테이션 MELCOR와의 수행결과 비교검토, 계산결과를 그래픽에 정확하게 반영하는가 여부, 모의 수행시간 튜닝 등이 주로 검토되었다.

#### 3.2 실시간 기기조작 모의

가압기 상단의 SDS 밸브는 중대사고시 유용한 1차계통 감압 수단으로 TLOFW 입력에 정의되어 있으나 이를 이용한 중대사고 방지나 완화는 모의되지 않고 SRV 밸브로 압력이 제어되고 있으며, 압력용기 파손이 일어나면 압력이 급강하되도록 되어있다. 또한, 압력용기 손상 등으로 인하여 충분히 압력이 떨어지게 되면 SIT에서 급수가 이루어지게 되어 있는데, MEL-GRS의 제어성능을 검증



하기 위하여 강제로 SDS밸브를 개방시키는 모의를 수행하였다. SDS 밸브 제어의 목적은 밸브를 완전히 개방하여, 중형 LOCA의 상태로 만들고, 이 때의 압력감소 정도와 SIT 급수 작동여부를 점검하는 것이었으며, 모의결과 급격한 압력과 수위의 감소가 발생했지만 SIT급수가 시작될 정도의 압력감소는 일어나지 않음이 확인되었다. 또한, SDS밸브 개폐 여부에 관계없이 사고의 큰 경향은 바뀌지 않고 노심손상, 용융 및 재배치에 의해 압력용기가 파손되는 것을 확인할 수 있었다. 그림5는 TLOFW 사고시나리오를 모사하던 도중, 사고 후 3753초 시점에서 가압기 상단의 SDS밸브를 90% 개방시킨 후 얻어진 압력용기의 압력과 수위를 원래의 그래프와 비교한 것으로, SDS밸브 개방 후 1차축 압력과 압력용기수위의 급격한 감소를 보여주고 있다.

그림5 SDS밸브 개방 결과 비교

이외에도 중형 LOCA 시나리오에서 핵연료재장전탱크(RWT)와 Sump 사이의 밸브를 조작하여 냉각수 재순환에 의한 중대사고를 방지 가능성을 모의하였는데, 밸브의 개방 시간대에 따라 중대사고 방지효과가 상이하여 RWT 수위 고갈 후 1000초 이내에는 중대사고를 방지효과가 있음이 확인되었고, 노심의 반응이 진전된 1000초 후에는 중대사고 방지효과가 없음이 확인되었다.

MELCOR를 이용하여 중대사고를 그래픽으로 모의하는 MEL-GRS 개발에 있어, MELCOR 데이터 처리와 SL-GMS 그래픽 툴을 이용한 중대사고 현상을 모의하고, 사고모의 중 밸브 및 펌프를 조작하는 기능 등에 대해 검토하고 결과를 제시하였다. MEL-GRS는 IBM PC WinNT/2K 환경 더블 CPU 환경에서 잘 작동하였으며 발전소 현장에 1차 설치 후 요구사항을 수용하여 보다 많은 기능을 보강, 중대사고 훈련도구로 활용할 예정이다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 중장기개발 과제의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- (1) "MELCOR 코드의 입력작성 지침서", KAERI/TR-810/97, 한국원자력연구소, 조성원 외, 1997
- (2) "원전 사고관리계획 방향 정립 최종보고서", 전력연구원, 1997
- (3) "Phenomenology and Course of Severe Accidents in PWR Plants-Training by Teaching and Demonstration", MSonnenkalb 외, 2nd OECD Specialist Meeting on Operator Aids for Severe Accident Management, Lyon, France, Sept. 9-10, 1997
- (4) "Use of MAAP-GRAAP for training of Borssele NPP Plant Operators", P.J.T. Bakker, KEMA, SAMOA-2 meeting Lyon, France, Sept. 9-10, 1997
- (5) "한국표준원전 중대사고지침서 개발", KAERI /RR-1999/98, 하재주외, 한국원자력연구소

#### 4. 결론