

‘98 추계 학술발표회 논문집
한국 원자력 학회

원자력발전소 시뮬레이터 실시간 중대사고 모델
Real Time Severe Accident Model for Nuclear Power
Plant Simulator

이명수, 이용관

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 발전소 설비 및 운영상의 문제점을 보완토록 하는 TMI 후속조치(NUREG-0660) 이후, 가동중 원전의 중대사고에 대한 안전성 평가 수행 요구에 따라 모든 가동 중 원전은 발전소별 안전성 검사(IPE) 결과에 근거한 사고관리 및 개선 계획 수립 등을 요구받고 있다. 중대사고는 그 복잡한 현상 때문에 모델이 복잡하고 불확실성이 매우 커서 일반적인 발전소 시뮬레이터에서는 모의범위 밖으로 되어있어 대부분의 시뮬레이터에서 노심이 용융되기 직전까지만 모의할 수 있는 모델로 되어 있다. 한전 전력 연구원에서는 원자로 용기 내 노심 용융 사고를 실시간으로 모의할 수 있는 ARTSAS 코드를 이용하여 영광 3,4호기 모델을 개발하고 있다. 본 논문에서는 중대사고 현상을 모의하기 위해 기존까지 사용되던 코드와 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터에서 시도되고 있는 중대사고 실시간 모의 현황 및 ARTSAS코드를 이용하여 개발중인 영광 3,4호기 중대사고 모델 개발 내용을 기술하였다.

Abstract

After the NUREG-0660, all in-service NPPs shall be evaluated by Individual Plant Examination for severe accident vulnerabilities(Generic Letter 88-20). Since the mechanism of severe accidents in nuclear power plants is too complicated and uncertain to clearly explain its phenomena, it is not been in the scope of training simulators. However, operating personnel have key roles in the early recognition of conditions or events that might lead to core damage. This paper describes some of the result of an effort was made by KEPCO to simulate severe accident in real time for the YGN-3,4 nuclear power plant simulators using ARTSAS.

1. 서론

TMI 사고이후 원자력 발전소의 안전성 확보를 위해 설계기준 사고(DBA: Design Basis Accident)보다 더 심각한 경우(노심용융, 원자로 압력 용기, 격납용기 파손 등)를 가상하는 중대사고(Severe Accident)에 대한 관심이 고조되고 1988년 그동안 나온 가동중 원전 규제 사항을 종결하는 중대사고 종합 종결 계획[1]이 발표되었다. 중대사고에 대한 안전성 평가를 비롯하여 격납용기 성능개선, 중대사고 관리 계획 등 원자력 산업체가 시행하여야 할 6가지의 주요사항이 지적되었다. 이 같은 추세에 따라 국내에서도 중대사고 대책 수립을 위해 가동중인 원전에 대해서는 발전소별 안전성 검사(IPE: Individual Plant Examination)를 수행하고, 중대사고 안전성 평가 결과에 근거한 사고관리 및 격납용기 개선 계획을 제시 수행하여야 하며, 신규 원전에 대하여서는 이런 계획을 포함한 2단계 확률론적 안전성 평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment)를 요구하고 있다. 이에 따라 한전은 올진 3,4호기 2단계 확률론적 평가를 수행 중에 있다.

발전소별 안전성 검사(IPE)를 수행하는 주 목적 중의 하나는 각 발전소별로 중대사고의 진행형태를 식별하여 노심 손상 및 핵분열 생성물 방출을 완화 할 수 있도록 하는데 있으며 IPE 요구사항에서 “중대사고 예방과 완화를 위해서 중요한 것 중 하나는 총체적이고 조직적인 대응이며 노심 손상까지 야기 할 수 있는 사고의 조기 발견에 있어서 운전요원들이 그 열쇠를 쥐고 있다”고 기술하고 있다[2]. 이와같이 운전원이 사고를 경감시키는 방향이나 악화시키는 방향으로 조작하지 않도록 하기 위해 중대사고의 진행과정과 그 증상 등에 대해 발전소 운전원들과 지원요원들의 훈련이 필요하다.

대부분의 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 그 모의 범위 한계(Simulation Limit)를 설계기준사고(Design Base Accidents)로 한정하고 있으며 원자력 발전소 시뮬레이터 기술 기준인 ANSI/ANS3.5에서도 중대사고를 모의하는 것을 요구하고 있지 않으나 사용하는 것을 막지는 않고 있다[3].

본 논문에서는 현재 복잡한 중대사고를 모의하는 코드의 현황과 발전소 시뮬레이터에 적용할 수 있는 실시간 시뮬레이션 중대사고 모델 중의 하나인 ARTSAS(Advanced Real Time Severe Accident Simulation)의 간단한 소개 및 전력연구원에서 국산화 개발한 시뮬레이터에 적용하기 위한 전 단계로 개발중인 영광 3,4호기의 모델의 계산 결과를 보였다.

2. 중대사고 해석용 코드

노심 손상 및 격납용기 손상 가능성을 발전소별로 확률론적 평가, 점검하기 위해서는 중대사고 현상을 해석할 수 있는 전산 코드를 이용한 발전소 모델 개발이 선행되어야 하며, 이를 위해 미국 NRC 주관으로 다국적 중대사고 공동연구 프로그램(CSARP : Cooperative Severe Accident Research Program) 진행되고 있으며 국내에서도 KINS, KAERI등이 참여하SCDAP/RELAP5, CONTAIN, MECOR등의 코드를 이용한 해석 보완 실험을 통해 프로그램에 참여하고 있다. 일반적으로 중대사고 진행과정이 복잡하고 모의해야 할 범위가 많기 때문에 모의 현상에 따라 자세히 모의 할 수 있는 코드를 쓰는 것이 좋으나 편의상 원자로 압력용기 내의 사고부터 격납용기 파열까지도 모의 할 수 있는 MAAP, MELCOR등 이 많

이 사용된다. 다음은 일반적으로 중대사고에 사용되는 해석용 코드의 특징을 요약 하였다.

2.1 SCDAP/RELAP5

이 SCDAP/RELAP5 모델은 US NRC 지원 하에 INEL(Idaho National Engineering Laboratory)이 개발한 최적 평가용 전산 코드로서 중대사고 실험 해석에 많이 사용되며 SCDAP/RELAP5/COUPLE 등 3 코드로 이루어져 있다. SCDAP은 대표 노심 부품 (Representative Core Component) 모델, 연료 파편층 모델(debris bed), 용융 Pool 모델의 조합으로 이루어져 있다.

초기에 가열과 노심 용융은 대표 노심부품 모델에서 계산되어 지며, 기하학적인 구조가 상당히 손상되었을 때는 연료 파편층 모델(debris bed), 용융 Pool 모델이 작동되게된다. 용융이 계속되어 용기 하부에 파편층이 쌓이고 가열되면서 근처 구조물이 용융되어 쌓이는 현상은 COUPLE 모델이 담당한다.

2.2 MELCOR

이 MELCOR 모델은 US NRC 지원 하에 SNL(Sandia National Laboratory)이 개발한 최적 평가용 전산 코드로서 원자로 용기 밖에서의 사고도 모의하는 정상운전에서 방사선 선원향(Source Term)까지 계산이 가능하다. 노심 용융물의 jet 분사, 용융물 대 콘크리트의 화학반응 등을 모의할 수 있고 제어기와 공학적 안전설비 모델을 포함하고 있다.

2.3 CONTAIN

이 CONTAIN 모델은 US NRC 지원 하에 SNL(Sandia National Laboratory)이 개발한 격납용기 최적 평가용 전산 코드로서 격납용기가 손상될 때 격납용기 내부의 물리적, 화학적, 방사화학적 조건과 격납용기 손상시 밖으로 유출되는 분열생성물, 격납용기 관련 사고 시험 모델, 격납용기내 수소 연소 및 이동, 비응축성 개스 생성, 격납용기 직접가열 등 격납용기 관련 현상의 모의가 가능하다.

2.4 VICTORYA

VICTORYA 모델은 핵분열 생성물의 유출 분석을 위한 US NRC의 기계적 현상을 해석하기 위한 최적코드로서 US NRC와 SNL(Sandia National Laboratory)이 개발했던 MELPROG 코드의 모듈 중의 일부였다. 핵연료 손상시 연료, 제어봉, 등 각 노드에서 288 개 화학물질에 대한 평형식을 정밀하게 계산이 가능하다. 특히 증기 발생기 관 파열 사고시 MELCOR.보다 10~1000배 더 적은 양도 계산이 가능하다.

2.5 MAAP

MAAP코드는 FAI(Fauske & Associates Inc.) 1980년대 초에 개발되었으며 증기 생성, 연료피복재 산화 및 노심 재분포, 용기 내-외부 냉각, 용기 관통, 용기하부 손상, 연료 파편과 콘크리트의 반응, 격납용기 내부에서 기체 성층화, 핵분열 생성물의 생성, 누출, 축적 및 중요한 안전계통 모의가 가능하므로 미국에서 IPE 수행에 많이 쓰이고 있다.

3. 중대사고의 실시간 시뮬레이션

현재 세계각국에서 중대사고를 실시간으로 모의하고자 하는 노력이 슈퍼 시뮬레이터 계획

(IMPACTS 등)의 일환이나 혹은 중대사고 모델의 단독 개발(ARTSAS 등)로 이루어지고 있다[6].

발전소 운전원 훈련에 사용하기 위해서는 기존의 설계 기준사고 시나리오에 근거한 비상 운전 절차서(EOP: Emergency Operating Procedure) 수행으로부터 중대사고 관리 계획(Severe Accidents Management Plan)에 의해 수립된 시나리오 수행으로 바로 이어질 수 있도록 하여 운전원이 그 모델의 변화를 잘 인지 못하도록 해야한다. 이를 위해 기존의 모델과 중대사고 잘 연결(Coupling) 되어져야 하며 모델이 큰 변화 없이 모델이 바뀌어 수행 되어져야 하며, 일단 중대사고 모델로 이행되면 실시간으로 모의하여 줄 수 있어야 하는 것은 물론이다. 중대사고를 실시간으로 모의하기 위해서는 모의 범위를 한정시켜 계산량을 줄이거나 병렬처리(Parallel Processing) 등을 이용하여 계산 속도를 높이는 방향으로 이루어지고 있다.

3.1 IMPACTS

일본의 NUPEC(Nuclear Power Engineering Corp.)는 이른바 슈퍼시뮬레이터 계획(IMPACT; Integrated Modular Plant Analysis Computing Technology)을 통해 수소폭발, 2상류를 4상류(물, 증기, 용융 파편 입자, 및 연속 유동)로 확장하려는 노력이 시도되고 있다. 이를 위해 CPU 32개까지 병렬처리 하는 것을 시험 중에 있다[6].

3.2 SCDAPSIM

SCDP(SCDAP Development and Training Program)계획의 일환으로 미국의 ISS(Innovative System Software)사에 의해 개발되고 있으며 SCDAP의 계산 알고리즘을 간략히 하여 설계 기준 사고 및 중대사고시에 원자로 압력용기 내부의 연료 열화 거동을 잘 모사 할 수 있도록 하고 여기에 격납용기 모델과 방사선 선원항(Source Term) 모델을 결합시키고 있다[7]

3.3 ARTSAS

ARTSAS(Advanced Real Time Severe Accident Simulation)는 NSSS 열수력코드와 결합하여 노심이 노출되어 원자로 용기 내에서(In-vessel) 연료손상이 일어나는 다음의 현상들을 모의하고자 시뮬레이터 전문 제작 회사인 GSE사에 의해 개발되었다.

- 노심 노출 및 열전달(Boiling Heat Transfer),
- 피복재 산화, 방사성 물질 및 비응축성 개스의 방출(release) 및 이동(transportation),
- 피복재 부풀음 현상(ballooning),
- 냉각재 유동 막힘(blockage),
- 손상된 노심의 열전달 및 증기 생성, 휘발성 분열 생성물의 방출,
- 제어봉 및 노심 용융 및 재분포(relocation),
- 수소 및 증기 생성,
- 노심 급속냉각(quenching) 및 재충전(refill).

3.3.1 연료 거동 모델

각 노심 노드는 연료재질(UO₂, Zr, 및 ZrO₂), 제어봉 재질, 노심 구조물과 냉각재가 유동할 수 있는 자유체적(free volume)으로 구성되어 있으며 연료봉의 부풀음 현상이나 용융으로 기하학적인 형상이 변화되면 그에 따른 수력반경(Hydraulic Diameter)을 재계산하여 냉

각재 유량 및 열전달 상관식을 변화 시키게 된다. 용융이 시작된 구조물이 있는 노드의 자유체적은

$$V_{free} = V_{total} - \sum_{k=1}^3 \frac{m_k}{\rho_k} - \frac{m_{Rod}}{\rho_{Rod}} - \frac{m_{str}}{\rho_{str}} \text{ 이 된다.}$$

3.3.2 Strain 계산

연료봉 응력은

$$\sigma_h = \frac{(P_m - P_{rcs})}{2\delta} D_j \text{ 이 되며}$$

연료봉 내부 압력(P_{pin})은 시간에 따른 함수로 계산되어진다

연료가 용융될 때는 초가 녹아 아래로 떨어지는 것을 가정(Candle down)하여 용융물은 바로 아래 노드로 용융되어 쌓이는 것을 가정한다. 봉 내부 압력(P_{pin})은 시간에 따른 함수로 계산되어진다

3.3.3 연료의 열역학적 현상 계산

노심 노드의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dU_{i,j}}{dt} = Q_{decay,i,j} - Q_{rcsi,j} - Q_{radi,j} + Q_{oxi,j} + \sum_{k=1}^3 W_{i-1,j,k} h_{liq,i-1,j,j,k} - \sum_{k=1}^3 W_{i,j,k} h_{liq,i,j,-j}$$

여기서 Q_{ox} 는 Zr의 산화 반응에 의한 발열량으로

$Q_{ox} = \Delta H_R \frac{dm_{ox}}{dt}$ 이며 피복재 산화율은 산화 반응식(kinetics)과 접촉 가능성에 의해 제한된다. 결국 산화 반응식은 노드 온도(Local Temp) 및 이미 산화된 산화물의 양에 따라 변하게 된다.

4. 영광 3,4호기 시뮬레이터용 모델 개발

한전 전력연구원에서는 원자로 압력용기 내에서의 중대사고를 제한적으로 모의 할 수 있는 ARTSAS를 이용하여 이미 국산화 개발된 영광 3,4호기 시뮬레이터에 적용하기 위해 영광 3,4호기 중대 사고 모델을 개발하고 있다. 다음은 냉각재 상실 사고 후 안전주입 유량이 주입되지 않을 때 노심손상 진행 계산 결과이다.

4.1 노심 Nodalization

각 노드에서의 유량을 계산하기 위해서 노심의 기하학적인 자료들이 시간의 함수로 계산된다. 이 계산은 각 노드에 있어서 연료, 제어봉, 노심 구조물 영역을 제외한 유동 체적을 통해 이루어진다. 그림 1은 중대사고 계산을 위한 노심 nodalization을 보여주고 있다. 반경 방향으로 6개 축방향으로 12개 총 72개의 노드로 이루어져 있으며 중심 축을 중심으로 대칭(Symmetric)이 된다고 가정하여 2D로 풀게된다.

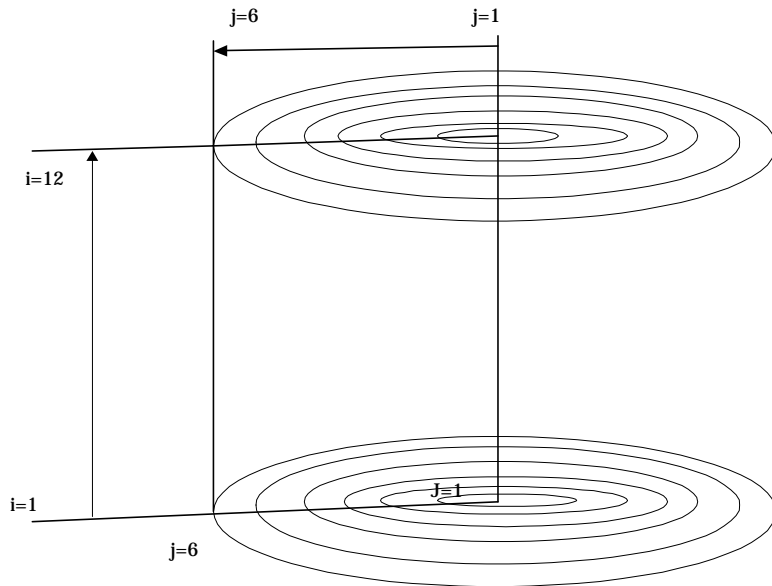


그림 1 노심 Nodalization

4.2 사고진행

사고 발생으로 인해 노심 상부에서 비등이 시작되면서 압력 용기 수위는 감소하기 시작한다.(그림 2).

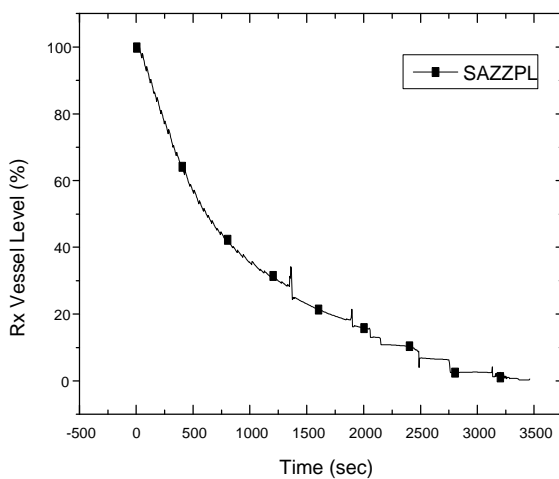


그림 2 원자로 압력용기 수위(%)

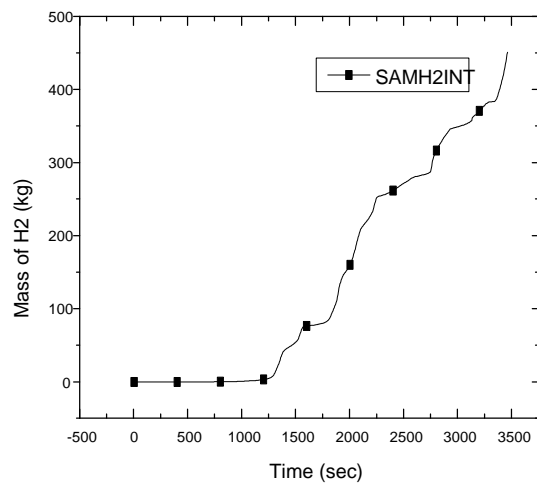


그림 3 노심내 수소발생 누적총량 (kg)

이에 따라 노출된 부분의 열전달은 기체 대류와 복사로 인해 이루어지며 일반적으로 생성되는 잔열(Decay Heat)보다 적기 때문에 연료봉의 온도는 상승하기 시작한다(그림 5)

노심 중심부의 경우 연료봉의 온도가 1000 K 정도를 넘으면 증기와의 산화반응에 의해 수소가 생성되기 시작하여 1700 - 1800 K 정도가 되면 활발하게 생성되면서 잔열보다 더 양이 많게 된다. 그림3은 사고 진행동안 발생한 수소의 총량이다.

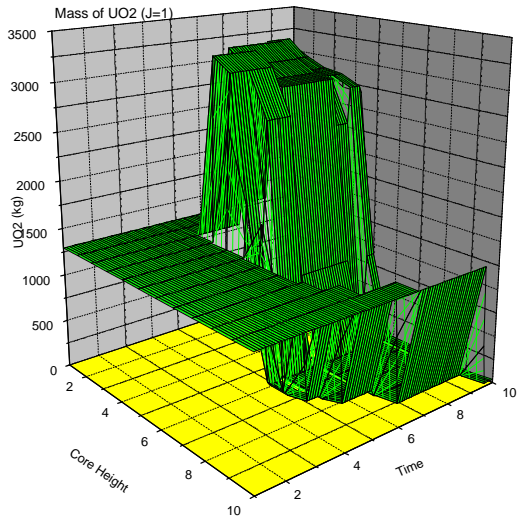


그림 4 노심 중심부(J=1)에서의 UO2량 변화(kg)

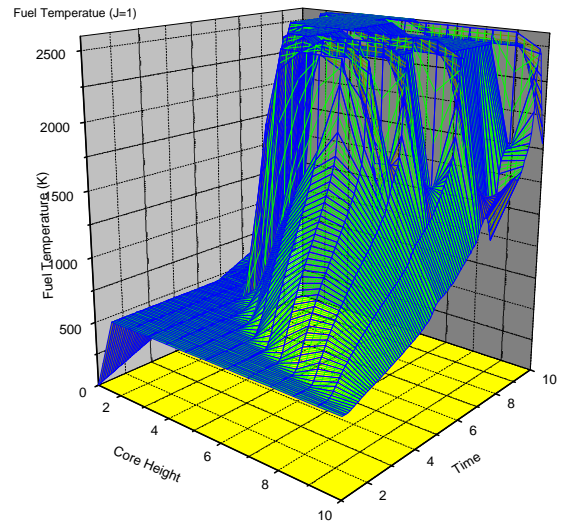


그림 5 노심 중심부(J=1)의 연료봉 온도변화 (K)

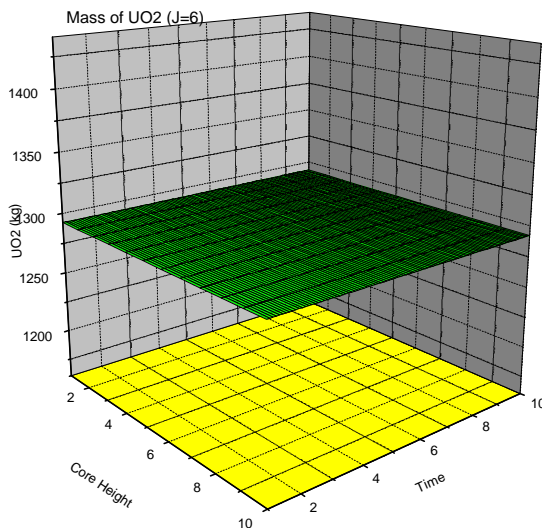


그림 6 노심 최외곽(J=6)에서의 UO2량 변화(kg)

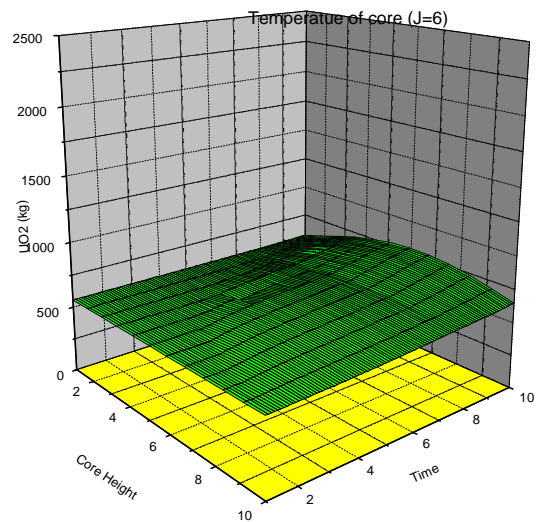


그림 7 노심 최외곽(J=6)에서의 연료봉 온도변화 (K)

연료봉 온도가 1000 K 정도가 되면 온도상승으로 인한 연료봉의 응력 증가로 소성변형이 일어나게 되며 결국 2500 K 이상 되면서 산화 Zr이 용융되어 연료 온도는 더 이상 증가하지 않지만 용융분율이 높아지면서 평균온도는 계속 증가하게 된다.

결국 붕괴열과 Zr의 산화반응에 의한 용융이 계속되면서 Core Slump가 발생하게 되고 원자로 압력용기 하부에 모이게 된다. 그림4에 노심 중심부(J=1)에서 연료가 용융되어 노심 상부에서 하부로 질량이 이동되는 것을 표시하였고, 연료봉 온도 변화를 그림 5에 표시하였다.

그러나 노심 최 외곽(J=6)의 경우에는 연료봉 온도가 서서히 상승하나 750 K이하를 유지하면서 노심 용융이 발생하지 않음을 볼 수 있다(그림 6,7)

5. 결론

중대사고는 그 복잡한 현상 때문에 모델이 복잡하고 불확실성이 매우 커서 일반적인 발전소 시뮬레이터에서는 모의범위 안에 있지 않다. 그러나 중대사고로 갈 수 있는 과도 사고 초기에 운전원의 적절한 대응은 중대사고를 미연에 방지할 수도 있으므로 그 증상 파악 및 적절한 대응 훈련이 필요하다. 현재 노심이 노출되기 직전까지만 모의할 수 있는 모델로 되어 있는 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터의 사고모의 범위를 확장하기 위해 실시간 중대사고 모의가 가능한 ARTSAS코드를 이용하여 영광 3,4호기의 실시간 중대사고를 모의하였다. 모의 결과 중대사고의 일반적인 증상이 잘 나타났으며 이의 검증 작업을 계속 수행 예정이다.

참고문헌

1. US NRC, "Integration Plan for Closure of Severe Accident Issues", SECY-88-147, May 25, 1988.
2. US NRC, "Individual Plant Examination For Severe Accident Vulnerabilities", Generic Letter 88-20, Nov 23, 1988
3. ANSI/ANS 3.5, "Nuclear Power Plant Simulators for use in Operator Training", 1993
4. 박창규 외, "발전용 원자로의 중대사고에 관한 연구", KAERI, pp23~30, Sep , 1991.
5. M.R. Fakory and A. Oneyemaechi, "Real Time Simulation of Severe Accident In Nuclear Reactor", SCS proceeding, Vol 24, No 4, pp318~321, 1992.
6. T. Kasuya etc. ,"Super Simulator IMPACT - Its concept and Developmental Plan", proceeding of 3rd Super Simulators for NPPs, pp114~118, 1996
7. C.M Aallison, "SCDAP/RELAP5-Based SCDAPSIM Nuclear Plant Analyzer for Severe Accident Conditions", NUTHOS-5, April 14-18, 1997.