

월성 원자력 발전소에서의 피동열침원이 노심손상에 미치는 영향

김 동하, 송 용만, 최 영, 진 영호, 박 수용

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

월성 발전소에서의 중대사고 진행을 예측하고 분석하기 위하여 CANDU 발전소의 중대 사고 해석코드인 ISAAC을 이용하여 능동 안전 장치들이 동작하지 않는 발전소 정전사고에 대한 분석을 수행하였다. ISAAC은 사고 관리용 전산코드로 개발된 MAAP4/PWR를 근간으로 월성 발전소의 고유 특성에 관한 모델들을 추가하여 개발되었다. 월성 발전소의 경우 칼렌드리아 안의 감속재와 칼렌드리아 볼트 안의 냉각수는 피동 열침원으로, 능동 안전 장치들이 동작하지 않는 중대사고시 노심으로부터의 붕괴열을 제거하여 노심 손상을 지연시킬 수 있다. 발전소 정전사고에 대한 ISAAC 계산 결과, 노심 손상후 칼렌드리아 파손까지 약 40 시간이 예상되며, 이 동안에 운전자는 사고를 완화시킬 수 있는 방안을 모색할 수 있다. 따라서, 월성발전소의 피동안전장치는 사고 관리 전략 수립에 중요한 기능을 담당한다.

1. 서론

월성 1호기는 우리나라 최초의 CANDU 발전소로 1983년부터 상업 운전이 시작된 이래, 1997년 6월 2호기가 상업운전에 들어갔으며, 3호기와 4호기가 '98년과 '99년 운전을 목표로 건설 중에 있다. 다른 CANDU 발전소와 마찬가지로 월성 발전소도 천연 우라늄을 연료로 사용하며, 중수를 이용하여 중성자 감속 및 연료봉으로부터의 열을 제거하고, 증기발생기에서는 경수를 사용하여 증기를 터빈에 공급한다.

가압 경수로는 증기발생기를 통한 2차계통으로의 열전달이 실패하고 안전계통도 실패하여 1차 계통 안의 냉각수가 감소하게 되는 중대사고의 경우 노심 손상을 지연시킬 수 있는 방법이 없다. 그러나, 월성발전소는 200여 톤의 감속재로 채워진 칼렌드리아 안에 380 개의 수평 연료관 (칼렌드리아 튜브)이 잠겨있으므로, 연료관으로부터 생성되는 붕괴열은

연료관과 인접한 감속재를 통하여 전달되며, 또한 감속재 냉각계통이 가용한 경우에는 정상 운전시 100MW를 제거할 수 있다. 또다른 피동 안전 계통으로는 칼렌드리아를 감싸고 있는 칼렌드리아 볼트 안의 500여 톤의 냉각수로, 연료봉이 손상되어 노심 파편물이 칼렌드리아로 재배치된 후에도 칼렌드리아 벽을 통해 전달되는 붕괴열을 흡수할 수 있다. 이번 논문에서는 이와 같이 PWR에는 없는 월성 고유의 피동 안전 장치가 노심 손상 진행에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 중대사고 해석 코드

월성 발전소는 보통의 가압 경수로와는 달리 수평으로 놓여져있는 연료봉과 연료봉이 잠겨있는 칼렌드리아, 칼렌드리아 볼트 등 CANDU 고유의 특성 때문에 기존의 PWR에 사용하던 중대사고 해석 코드로는 월성발전소에서의 노심 손상 사고를 모사할 수 없다. 따라서 CANDU에서의 중대사고를 모사하기 위한 전산 코드인 ISAAC (Integrated Severe Accident Analysis code for CANDU plants)이 개발되었고[1], 1994년부터 1997년까지 수행되었던 월성 발전소의 2단계 PSA에 사용되었다[2].

ISAAC 코드는 미국 EPRI와 FAI에서 사고 관리 목적으로 개발된 가압경수로 해석용 코드인 MAAP4/PWR를 근간으로 CANDU 형태인 월성 발전소의 계통 특성에 관한 모델들이 새로이 추가되었다. 즉 수평으로 놓여있는 연료관의 거동과 노심 파편들의 칼렌드리아로의 이송을 모의할 수 있는 노심 가열 모델, 2개의 8자 모양으로 구성된 1차 계통을 모의할 수 있는 1차계통 열 수송 모델, 칼렌드리아 안에서의 열 전달 및 이송된 노심 파편들의 거동을 모의할 수 있는 칼렌드리아 모델, 냉각수로 채워져 있는 칼렌드리아 볼트와 2개의 앤드 쉘드, 그리고 월성 발전소의 3단계 비상 노심 주입계통, 격납건물 살수 계통, 감속재 및 쉘드 냉각장치, 격납건물 공기 냉각기, 그리고 1차계통 고압 방지 계통 등의 고유 안전 장치 등이 ISAAC의 주요 계통 모델들이다.

중대사고 현상과 관련하여서는 다음과 같은 월성 고유 모델 들을 포함하고 있다: 1차 계통 열수력, 수평 연료봉 가열, 산화, 처짐 및 압력관 파손, 노심 파편의 칼렌드리아 바닥으로의 이송, 칼렌드리아 바닥에서의 노심파편물 냉각 및 칼렌드리아 파손, 칼렌드리아 볼트 콘크리트와 노심 용융물과의 반응 및 콘크리트 관통, 수소 연소, 그리고 핵분열 생성물 이송. 여기에 언급되지 않은 일반적인 중대사고 현상들은 MAAP4의 기존 모델들이 ISAAC에 포함되어 있다.

3. 발전소 정전사고 분석

3.1 발전소 모델링 및 사고 초기 조건

ISAAC에서의 월성발전소의 1차 계통은 그림 1과 같이 두 개의 독립적인 냉각수 순환 회로와 각 폐회로에 공통으로 연결된 가압기, 그리고 degasser condenser tank로 모의되어 있다. 각 폐회로에는 2개의 증기 발생기, 2개의 펌프, 두 개씩의 Inlet Header와 Outlet Header, 그리고 수평연료관이 연결되어 있으며, 모두 390개의 수평 연료관은 12개의 대표 연료관으로 모의하였고, 각 폐회로당 6개씩 (즉, Broken Loop에 3개, Unbroken Loop에 3개씩) 배정하되 모두 다른 높이에 위치토록 하였다. 격납건물은 그림 2에서처럼 모두 12개의 격실과 17개의 junction으로 구분하였고 표 1에 각 격실의 이름을 정리하였다.

발전소 정전사고는 class-IV 외부 전원이 상실된 후 비상 디젤 발전기까지 고장난 교류전원 완전상실 사고로, 월성의 경우 비상 전원 공급계통 (emergency power supply system)의 디젤 발전기 2대까지 고장을 가정하였다. 따라서 증기 발생기 급수 계통, 칼랜드리아 및 볼트를 포함한 모든 계통의 냉각장치, 그리고 능동적 공학 안전 장치 등은 작동 불능이고, 1차 계통의 과압을 막기 위한 liquid relief valve는 정전과 더불어 fail-open 되었다고 가정하였다. 격납건물 살수계통은 다우징 탱크에 저장되어 있는 냉각수가 격납건물 대기 압력과 차이에 따라 수두에 의해 피동적으로 작동하므로, 정전이 되더라도 작동하도록 하였다. 2차계통의 주증기 차단 밸브 (main steam isolation valve)는 사고 시작 시점에서 닫히고, 2차 계통의 압력이 높아지면, 주증기 안전밸브 (main steam safety valve)가 설정 압력에서 여닫히도록 하였다.

3.2 사고 진행 특성

발전소에 정전사고가 나면 원자로는 즉시 정지되고, 붕괴열은 ANSI 관계식에 따라 계산된다. 1차 계통의 압력과 증기 발생기에서의 압력은 그림 3에 나타나 있다. 사고 직후 1차 계통의 압력은 노심 출력의 감소와 2차 계통으로의 열전달 때문에 감소하며, 약 2시간 20분 후 2차 계통의 수위가 낮아져 1차계통이 다시 가압되면 탈기 응축기 (degasser condenser tank) 배기 밸브 개폐 압력에 따라 진동한다. 사고 시작 후 5시간 30분 경에는 압력관 파손에 따라 압력은 급격히 감소하여 칼랜드리아 압력과 균형을 이룬다. 증기발생기 압력은 그림에서처럼 1차계통으로부터의 열전달 때문에 증기 발생기 안전밸브의 개폐압력에서 진동하다가 압력관 파손이후에는 거꾸로 1차 계통으로 열을 뺏겨 압력이 감소한다.

그림 4에는 노심의 평균 및 최고 연료봉 온도를 보여준다. 최고 온도는 위치에 관계 없이 노심 내의 제일 높은 값을 나타내므로 6시간부터 14시간 까지의 2000K이상의 온도분포는 노심 용융이 계속 진행되고 있음을 나타낸다. 사고 시작 5시간 후부터 연료봉이 급격히 가열되는 이유는 감속재의 수위가 낮아져 칼랜드리아 상부에 위치한 수평 연료관들이 노출되기 때문이며, 그림 5에 표시된 감속재와 칼랜드리아 볼트의 냉각수 재고량과 관련된다. 약 12시간이 경과하면 칼랜드리아 안의 감속재는 고갈되고, 곧 이어 재배치된 노심 파편들

로 부터의 붕괴열은 칼렌드리아 볼트의 냉각수를 증발시키기 시작하여 약 46시간이 지나면 칼렌드리아 볼트 물도 고갈된다. 칼렌드리아는 노심 파편물이 칼렌드리아로 이송된 후에도 계속 건전성을 유지하다가 칼렌드리아 볼트 안의 수위가 칼렌드리아 바닥보다 낮아지는 43 시간 쯤 칼렌드리아는 파손된다.

4. 결론

가압 중수로에서의 노심 손상은 노심으로의 추가적인 냉각수 공급이 더 이상 없는 상태에서 연료봉이 노출되면서부터 시작된다. 즉 원자로 외부로부터의 냉각만으로 노심 손상을 늦출 수 있는 방법은 없다. 그러나, 월성발전소는 원천적으로 수평 연료봉이 200여톤의 감속재에 잠겨 있고, 칼렌드리아는 500여 톤의 냉각수에 잠겨있으므로, 1차계통으로 냉각수가 공급되지 않는 상황에서도 연료봉 손상을 늦출 수 있는 피동 열 침원이 존재한다.

유사한 사고 경위에 대한 울진 3,4호기에서의 노심 손상 시간을 표 2에 비교하였다. MAAP4의 계산 결과에 따르면, 울진의 경우 노심이 노출되기 시작한 후 약 44분이 지나면 연료봉이 녹기 시작하며, 그후 약 2시간이 지나면 원자로는 파손된다. 월성의 경우에는, 제일 상부에 위치한 수평 압력관 안의 냉각수가 고갈되고나서 연료봉이 손상되는데 걸리는 시간은 약 2시간 40분이고, 칼렌드리아가 파손되는 것은 그후 약 38시간이 지나서이다. 이와 같이 울진에 비하여 사고 진행이 더딘 것은 칼렌드리아 안의 감속재와 칼렌드리아를 감싸고 있는 칼렌드리아 볼트 안의 냉각수가 붕괴열을 상당기간 효과적으로 제거하기 때문이다. 특히 감속재가 고갈되고서도 (사고 시작 후 12.8 시간) 약 30시간이 지나 칼렌드리아가 파손되는데 이는 칼렌드리아 벽을 통하여 볼트 안의 냉각수가 계속 열을 제거하기 때문이다.

이와같이 월성발전소의 원천적인 피동 안전 장치는 노심 손상을 지연시켜 운전자로 하여금 여러 가지 안전 장치들을 구동하여 사고를 완화시킬 수 있는 시간을 제공함으로써, 사고 관리 수립에 중요한 요소로 자리잡고 있다.

참고문헌

1. "가압 중수로형 원자력 발전소의 2단계 PSA를 위한 전산코드 개발," KAERI/RR-1573/95, 한국원자력연구소, 1995.12
2. "가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가," 최종보고서, TR.93NJ10.97.67-2, 전력연구원, 1997.8

표 1 월성 발전소 격납건물 구역 이름

구역 번호	구역 이름
1	지하실 (basement)
2	칼랜드리아 볼트 (calandria vault)
3	연료실 1 (fuelling machine room 1)
4	연료실 2 (fuelling machine room 2)
5	감속재실 (moderator room)
6	계단 및 접근 지역 (access area)
7	증기발생기실 (boiler room)
8	격납건물 상부 (upper dome)
9	다우징 탱크 (dousing tank)
10	탈기 응축기 (degasser condenser tank)
11	end shield 1
12	end shield 2

표 2 원자로 파손 시간 비교표

UCN 3&4 (CE)		Wolsong 2/3/4 (CANDU6)	
Events	Time (sec/hr)	Events	Time (sec/hr)
Core Uncovery Time	2956/0.82	Top-most Fuel Channel	10026/2.8
		Inside Dryout Time	
		Bottom-most Fuel Channel	13913/3.9
		Inside Dryout Time	
Fuel Melting Time	5581/1.6	Fuel Bundle Failure Time	19834/5.5
Vessel Failure Time	13112/3.6	Calandria Dryout Time	45951/12.8
		Calandria Failure Time	155338/43.1

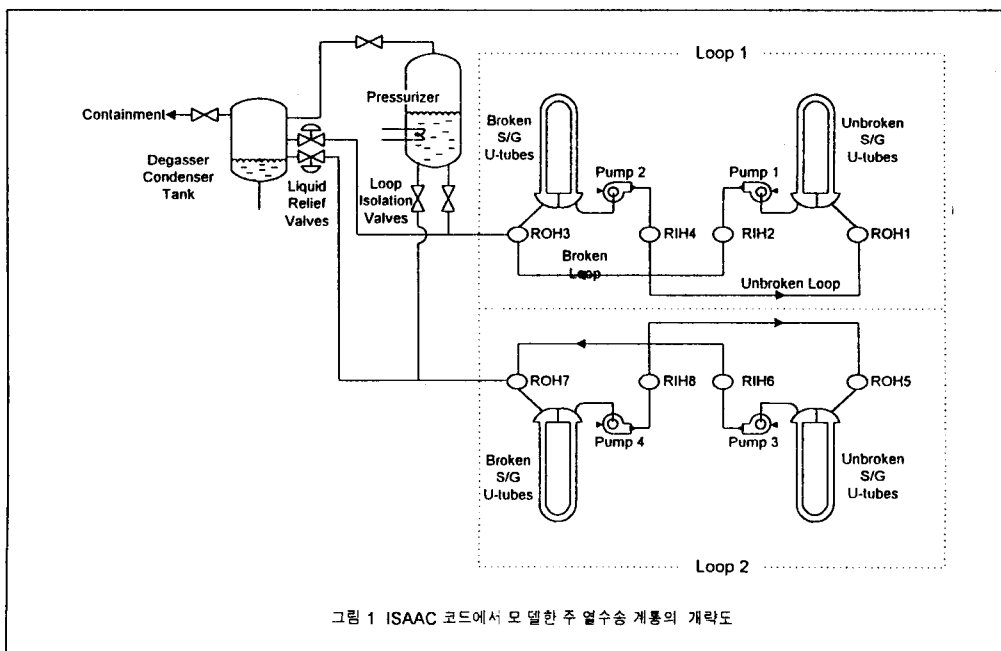
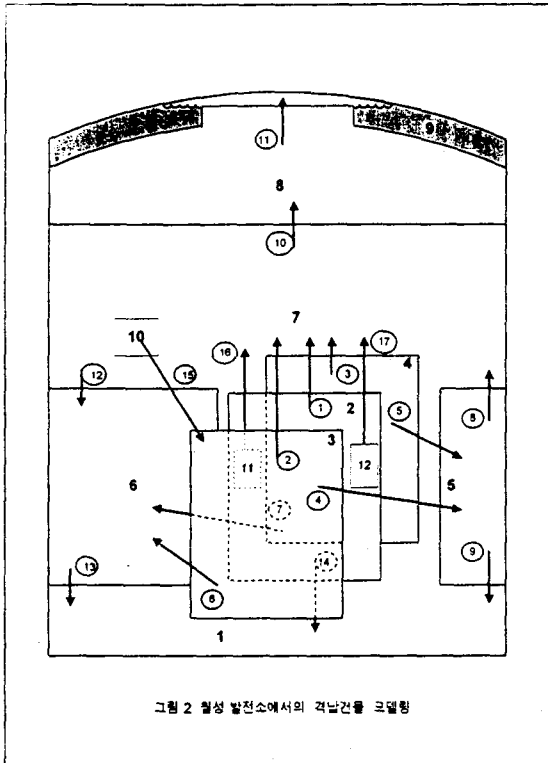


그림 1 ISAAC 코드에서 모델한 주 열수송 계통의 개략도



WSR0328 VSD 97-33-24

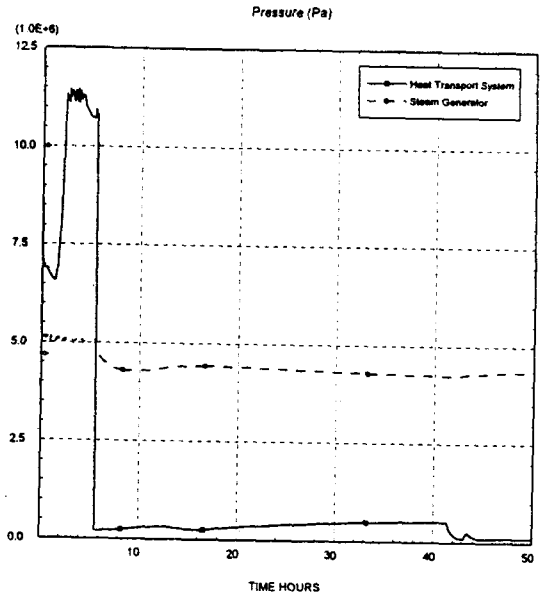


그림 3 시간에 따른 1차계통과 증기 발생기에서의 압력의 변화

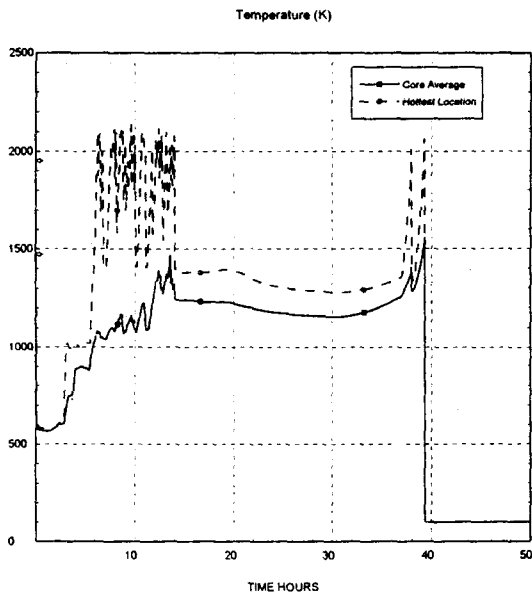


그림 4 시간에 따른 노심에서의 평균 및 최고 온도

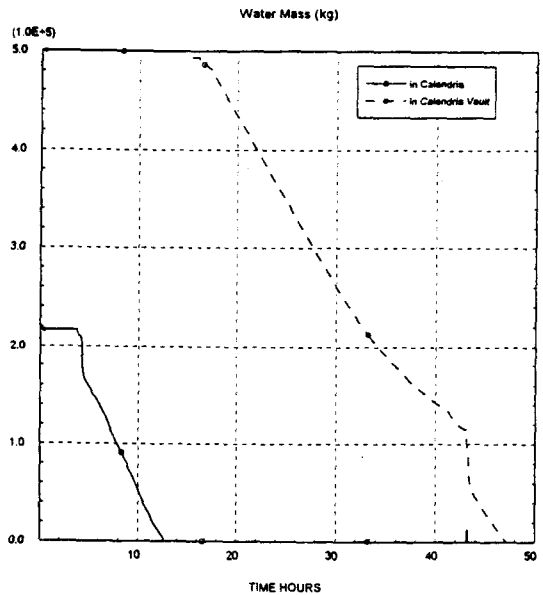


그림 5 시간에 따른 감속재와 칼렌드리아 볼트 냉각재 변화