'2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

제어되지 않은 붕산희석 사고의 최적해석

Realistic Analysis of Uncontrolled Boron Dilution Accident

이원재
한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150

박홍준
삼성 SDS
서울시 송파구 신천동 7-25

요 약

울진 1,2 호기의 제어되지 않은 붕산희석 사고 시 원자로계통의 최적 과도거동을 MARS 코드를 사용하여 분석하였다. 붕산희석 사고의 초기사상으로 전출력 운전중 원자로 냉각재펌프 밀봉수 열교환기와 밀봉부의 동시 파손사고와, 부분충수 운전중 잔열제거계통 열교환기 1 대의 파손사고를 선정하여 정량적인 분석을 수행하였다. 제한 시나리오 해석을 통하여, 운전원의 비상대응 조치가 취하여 지지 않았을 경우 제한적인 계통의 안전성 및 운전원 조치시간의 여유도를 정량화 하였다. 또한, 최적 시나리오 해석을 통하여 비상운전절차서에 제시된 운전원 조치의 유효성을 검증하였다.

Abstract

Realistic Response of Ulchin 1,2 reactor system during uncontrolled boron dilution accident has been analyzed using the MARS code. As an initiating event from full power operating conditions, a coincident breach of a reactor coolant pump seal and a seal water heat exchanger is selected. And, as an initiating event from mid-loop operating conditions, a breach of a residual heat removal system heat exchanger is chosen. From the analyses of limiting scenarios where no operator action is credited, the sustainable margins for the system safety and the operator action time have been quantified. And, through the realistic scenario analysis, the effectiveness of operator actions provided in the emergency operating procedure has been validated.

1. 서론

붕산희석사고는 내적 혹은 외적인 요인에 의하여 원자로계통에 순수수가 주입되어, 노심 내 붕산농도가 희석됨에 따라 노심 반응도가 증가하여 노심출력이 비정상적으로 증가되는 사고이다. 비정상적인 노심출력의 증가는 출력-냉각 불일치에 의한 원자로냉각재계통의 압력 및 온도 과도거동을 초래한다. 붕산희석사고는 전 운전모드에서 발생 가능하며, 출력운전 중 붕산희석 사고에 의한 계통의 과압은 가압기 압력방출밸브의 개방을 초래하고 이를 통한 지속적인 냉각재의 상실은 심각한 노심의 손상을 유발할 수 있다. 정지운전 중, 특히, 정비 저온정지 운전 중 붕산희석 사고의 발생은 노심 과출력에 의한 노심 비등, 계통 압력 증가 및 계통 개방부를 통한 냉각재 유출량의 증가를 초래 할 수 있으며, 이에따른 고온관 수위의 감소는 잔열제거계통의 상실에 의한 노심의 손상을 유발 할 수 있다. 따라서, 제어되지 않는 붕산희석 사고 시 운전원의 비상대응조치가 적기에 이루어져야만 노심의 손상 및 다른 계통의 손상에 의한 사고의 확대를 방지할 수 있다.

이러한 붕산희석사고의 중요도를 반영하여, 울진 1,2 호기 비상운전절차서의 비상-5 절차서에는 제어되지 않은 붕산희석 사고에 대응하기 위한 운전원 비상대응 절차가 제공되어 있다. 주요 운전원 조치는 1) 붕산희석사고의 진단을 위한 원자로계통 붕산농도 시료 분석조치, 2) 붕산희석사고 판단 시 긴급 붕산주입에 의한 노심 부반응도 삽입조치 및 3) 붕산희석 원인의 확인 및 격리조치로 구분될 수 있다.

본 연구에서는 울진 1,2 호기의 전출력 운전 중 및 부분충수 운전 중 붕산희석 사고 시 계통의 최적 과도거동을 MARS 코드를 사용하여 분석한다. 제한 시나리오, 즉, 운전원 조치가 없을 경우 계통의 제한적인 과도거동 분석을 통하여 계통 안전성 및 운전원 조치시간의 여유도를 정량화 하며, 비상운전절차서 최적 시나리오 분석, 즉 절차서에 제시된 주요 운전원 조치에 따른 최적 거동분석을 통하여 비상운전절차서의 유효성을 검증한다.

2. 사고해석 초기 및 경계조건

붕산희석 사고는 전 운전모드에서 발생가능 하나, 과출력 측면에서는 전출력 운전조건에서, 그리고 노심냉각 상실 측면에서는 부분충수 운전 조건에서의 사고 발생이 가장 제한적이다. 따라서, 사고해석 초기조건으로 상기 2 가지의 운전조건을 선정하였다. 전출력 운전조건에서의 노심연소도는 붕산희석에 의한 노심 반응도 삽입율 및 반응도 궤환효과가 가장 제한적인 150 MWD/MTU 에서의 운전조건을 초기조건으로 선정하였으며, 초기 원자로냉각재 붕산농도로 1675 ppm 을 가정하였다. 부분충수 운전조건으로 잔열제거계통 연결 시, 루프-1 의 증기발생기 man-way 가 개방된 형태를 초기조건으로 선정하였으며, 초기 냉각재 붕산농도는 2300 ppm 으로 모든 정지군 및 제어봉은 완전 삽입된 것으로 가정하였다. 부분충수 운전 중 잔열제거계통은 루프-2 로부터 냉각재를 흡입하며 사고 시 냉각재 유출유로

는 개방부로 형성될 것으로 판단되므로, 루프-1 증기발생기 man-way 개방 형태는 잔열제거계통 흡입구 고온관의 수위 감소 측면에서 보수적인 형태이다.

전출력 운전 중 붕산희석 사고의 초기사상은 붕산순수보충계통의 비정상적 주입, 1 차측 기기냉각수계통 열교환기 손상에 의한 순수수 주입, 화학 및 체적제어계통 및 붕산회수계통 탈기기로 부터의 순수수 유입에 의하여 발생할 수 있다. 부분충수 중 붕산희석사고의 원인은 1 차측 기기냉각수 계통 열교환기 손상에 의한 순수수의 계통 주입, 정상적인 행정적 자물쇠 잠금(채움)된 밸브의 열림과 증기발생기 관의 보수작업 중 손상 증기발생기을 통한 순수수 주입으로 들 수 있다. 이중, 운전모드에 무관하게 1 차측 기기냉각수계통 열교환기 손상에 의한 순수수 주입량이 가장 크므로, 본 분석에서는 보수적으로 1 차측 기기냉각수계통 열교환기 손상에 의한 순수수 주입을 사고의 경계조건으로 선정하였다.

전출력 운전 중 열교환기 튜브 측 압력 (원자로냉각재 압력)이 1 차측 기기냉각수계통 압력보다 낮게 운전되는 열교환기는 원자로냉각재펌프 밀봉수 열교환기 뿐이므로, 전출력 운전 중 붕산희석사고의 경계조건으로 원자로냉각재펌프 밀봉수 열교환기의 파손을 가정하였다. 이 경우, 원자로냉각재계통으로의 순수수 주입 유량은 원자로냉각재펌프 밀봉부의 파손을 가정하여 87.6 m^3/hr 로 가정하였다 (참고: NUREG/CR-3226). 부분충수 운전 중 붕산희석사고의 경계조건으로 잔열제거계통 열교환기 1 대의 파손을 가정하였으며, 잔열제거계통 열교환기는 잔열제거 펌프 후단에 위치하므로 총 500 m^3/hr 의 순수수가 추가적으로 원자로냉각재계통에 주입되는 것으로 가정하였다.

3. 사고해석 시나리오

제어되지 않은 붕산희석사고에 대한 사고해석 시나리오는 그림 1 에 제시되어 있다. 그림 1 (a)는 정비 부분충수 운전모드에서의 잔열제거계통 열교환기 파손에 의한 사고 시나리오를 보여주며, 그림 1 (b)는 전출력 정상운전중 원자로냉각재펌프 밀봉수 열교환기 파손에 의한 사고 시나리오를 보여준다. 붕산희석사고 시 비상운전절차서의 주요 운전원 조치는 사고의 진단, 7000 ppm 의 긴급붕산수 주입, 희석원인의 확인 및 격리로서, 절차서의 타당성을 검토하기 위하여 다음의 4 가지 사고해석 시나리오를 선정하였다. 본 분석에 적용된 운전원 조치시간은 사고의 진단을 위한 붕산농도 분석시간 및 관련 절차서 수행시간 등을 반영하여 설정하였다.

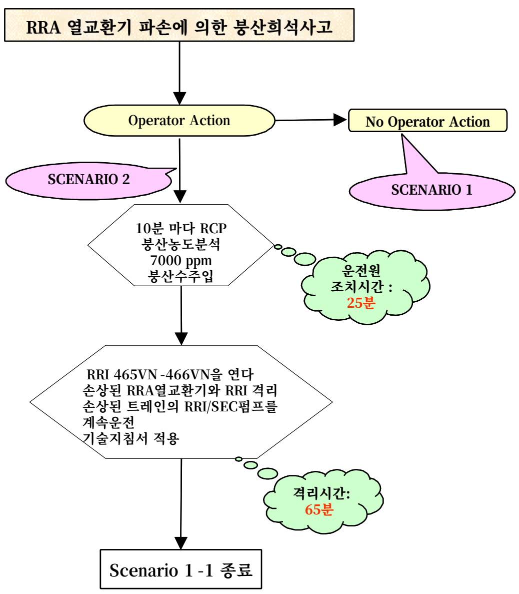
사고 시나리오 1 및 3: 제한 시나리오

사고해석 시나리오 1 및 3 은 제한 시나리오로서 부분충수 운전모드에서의 잔열제거계통 열교환기 파손 및 전출력 운전중 원자로냉각재펌프 밀봉수 열교환기 및 밀봉계통 파손 사고시 운전원의 비상대응 조치가 없을 경우 계통의 제한적인 거동을 분석한다. 제한 시나리

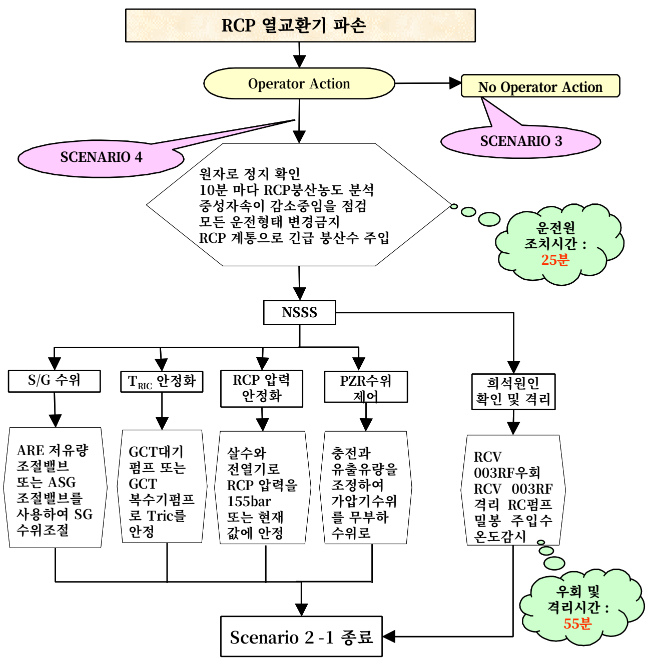
오 해석을 통하여 순수수의 주입이 지속적으로 이루어질 경우, 원자로의 고유 안전성능에 의하여 계통의 안전성 및 건전성이 유지되는 시간을 정량화 하며, 원자로의 안전정지를 위하여 요구되는 주요 운전원 조치의 타당성과 운전원 조치시간의 여유도를 평가한다.

<u>사고 시나리오 2 및 4: 최적 시나리오</u>

사고해석 시나리오 2 및 4 는 비상운전절차서의 최적 시나리오로서, 부분충수 운전모드에서의 잔열제거계통 열교환기 파손 및 전출력 운전 중 원자로냉각재펌프 밀봉수 열교환기 파손 사고시 비상운전절차서의 주요 운전원 조치에 따른 계통의 최적 과도거동을 분석한다. 붕산희석사고 시 운전원은 우선 긴급 붕산주입 계통을 이용하여 7000 ppm 의 붕산수를 원자로계통에 주입하여 요구되는 노심 부반응도를 확보하며, 이후 희석원인을 확인, 격리함으로써 원자로를 안전정지 시킨다. 운전원의 조치시간은 사고의 진단 및 관련 절차서 수행시간 등을 반영하여 설정하였으며, 분석에 사용된 긴급 붕산주입계통의 붕산농도 및 유량은 각각 7000 ppm 및 20 m^3/hr 으로 긴급 붕산주입은 1 시간 30 분 동안 지속되는 것으로 가정하였다. 본 최적 시나리오의 분석을 통하여 비상운전절차서의 유효성을 검증하고, 당 조치 시 원자로냉각재계통의 최적 과도거동을 정량화 한다.



(a) RRA 열교환기 파손 사고



b) RCP 열교환기 파손 사고

그림 1 제어되지 않은 붕산희석 (비상-5) 사고해석 시나리오

4. 사고해석 결과 및 분석

부분충수 운전모드에서 제한 (사고 시나리오 1) 및 최적 (사고 시나리오 2) 시나리오 해석

표 2 에는 제한 및 최적 사고해석 시나리오의 사고전개를 제시하였으며, 그림 2~7 에는 노심반응도, 노심출력, 원자로평균온도, 가압기압력, 고온관 기포율 및 증기발생기 man-way 유량 등 주요 계통변수의 과도거동을 시나리오 별로 비교 제시하였다.

표 2 부분충수 운전모드에서의 붕산희석사고 사고전개 (시나리오 1 및 2)

(단위 (분))

	제한 시나리오	최적 시나리오	비고
잔열제거계통 열교환기 손상	0.0	0.0	500 m^3/hr
긴급 붕산주입	-	25.	7000 ppm
잔열제거계통 열교환기 격리	-	65.	
고온관 수위 > 50%	~ 75.	-	잔열제거계통 운전수위
긴급 붕산주입 종료	-	115.	
계산 종료	150.	150.	

잔열제거계통 열교환기 손상에 따른 순수수의 원자로계통 주입은 노심 내의 붕산농도의 희석을 유발하여 노심의 반응도를 증가시킨다. 운전원 조치가 없는 제한 시나리오의 경우, 노심의 붕산농도는 초기 2300 ppm 으로부터 사고 후 35 분 후에는 약 180 ppm 수준으로 빠르게 감소하며, 이후의 노심 붕산농도는 붕산농도 균형에 의하여 서서히 감소하게 된다. 이에 따라, 노심의 반응도는 초기값 약 –20,150 pcm 으로부터 사고 후 약 35 분에는 약 –4,500 pcm 수준으로 증가하며(그림 2), 노심의 출력도 초기 14 MWth 로부터 사고 후 약 36 분에는 약 62 MWth 까지 증가하여 이후 서서히 증가한다(그림 3). 노심의 출력증가는 계통온도(그림 4) 및 계통 압력(그림 5)의 증가를 야기한다. 고온관 수위는 사고 초기 다량의 순수수 주입에 의하여 증가하였다가, 계통 온도가 증가하면서 다시 감소하기 시작한다(그림 6). 계통 압력의 증가에 따라, 원자로냉각재는 루프-1 증기발생기 개방부를 통하여 격납용기로 유출되며, 원자로냉각재의 유로는 루프-1 의 개방부로 형성된다(그림 7). 지속적인 계통압력의 증가 및 이에따른 개방부를 통한 냉각재 유출량 증가는 냉각재의 재고량 감소를 초래한다. 특히, 냉각재 재고량 감소와 루프-1 으로의 유로형성은 잔열제거계통 펌프 흡입구인 루프-2 고온관 수위의 감소를 초래하여, 루프-2 의 고온관 수위는 사고 후 약 75 분에는 흡입조건인 50% 수위 이하로 감소하게 되어 잔열제거계통의 상실을 유발할 수 있다(그림 6). 당 사고 시 저온의 순수수 유입에 의하여 노심 출구의 과냉각도는 충분한 여유도를 갖고 유지되므로, 잔열제거계통이 작동하는 한 노심의 안전성은 유지될 수 있다. 그러나, 부분충수 운전 중 잔열제거계통의 상실은 심각한 노심 손상을 초래하므로, 당 사고 시 운전원은 사고 후 75 분 이내에 긴급 붕산주입에 의한 노심 부반응도 삽입에 의한 노심 안전정지 등 조치를 취하여야 한다.

비상운전절차서 최적 사고해석 시나리오의 경우, 운전원의 긴급 붕산주입 조치(사고 후 25 분)에 의한 노심 부반응도의 삽입(그림 2)에 따라 노심의 출력은 서서히 감소하기 시작한다. 사고 후 65 분에는 운전원의 붕산희석 원인의 격리조치에 따라 다량의 순수수 주입이 차단되면서 노심출력은 급격히 감소하여, 사고 후 115 분 후에는 약 18 MWth 의 출력으로 감소하여 안전정지 상태로 유지된다(그림 3). 계통 온도는 긴급 붕산주입에 의한 노심출력의 감소에 따라 일정 값을 유지하다가, 손상 열교환기 격리에 의하여 저온의 순수수 주입이 차단되면서 상승하나 지속적인 노심출력 감소에 의하여 감소한다(그림 4). 손상 열교환기 격리 후, 고온관 수위는 계통의 온도와 연동하여 감소하나 잔열제거계통의 운전에 충분한 수위 여유도를 유지하며(그림 6), 증기발생기 개방부를 통한 냉각재 유출도 손상 격리 후 중단된다(그림 7).

결론적으로, 부분충수 운전 중 제한적인 붕산희석사고 시 노심의 안전성은 운전원 조치 없이도 사고 후 75 분 간은 유지되므로, 운전원의 비상대응 조치에 충분한 시간적 여유를 제공함을 알 수 있다. 또한, 비상운전절차서에 제시된 긴급 붕산주입 조치 및 붕산희석 원인 격리 조치는 원자로의 안전정지를 가능하게 하므로, 기존의 비상운전절차서에 제공된 운전원 조치는 유효함을 알 수 있다.

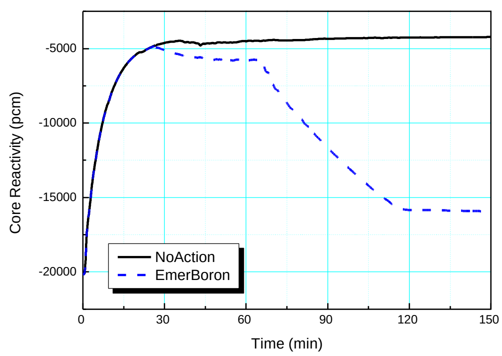


그림 2 노심 총 반응도

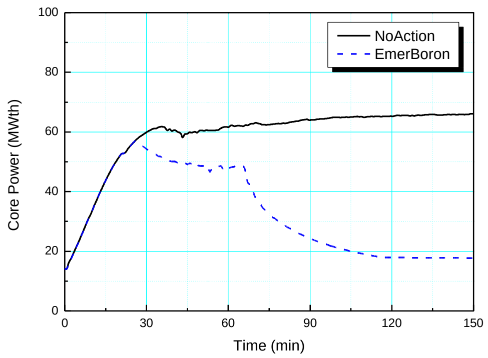


그림 3 노심 출력

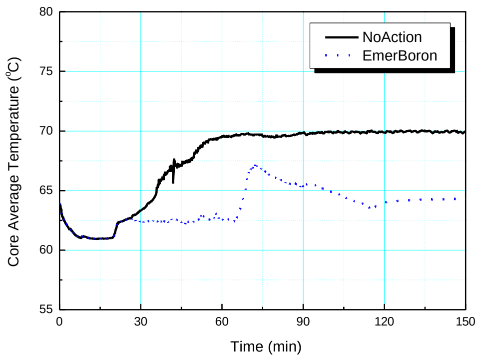


그림 4 루프-3 평균온도

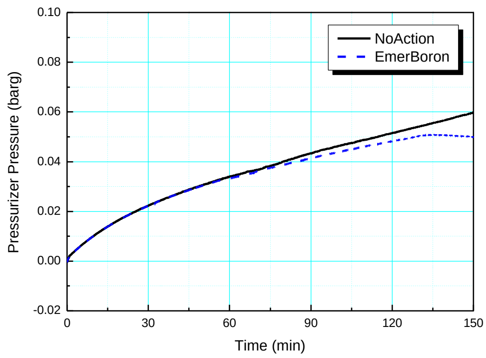


그림 5 원자로계통 압력

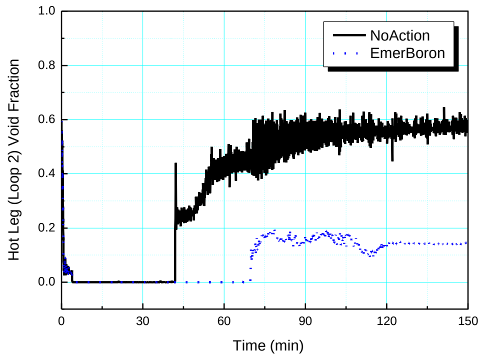


그림 6 루프-2 고온관 기포율

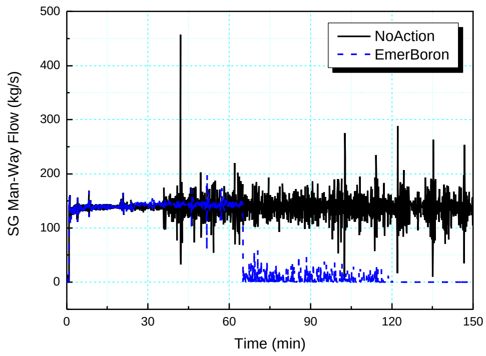


그림 7 루프-1 증기발생기 개방부 유출 유량

<u>전출력 운전 중 제한 (사고 시나리오 3) 및 최적 (사고 시나리오 4) 시나리오 해석</u>

표 3 에는 제한 및 최적 시나리오 해석의 사고전개를 제시하였으며, 그림 8~18 에는 가압기 수위, 가압기 압력, 노심반응도, 노심출력, 원자로평균온도, 증기발생기 압력, 증기덤프 유량, 증기발생기 수위, 노심 과냉각도, 원자로냉각재계통 유량, 노심 수위 등 계통 과도거동을 각 시나리오 별로 비교 제시하였다.

표 3 전출력 운전 중 붕산희석사고 사고전개 (시나리오 3 및 4)

(단위 (분))

	제한사고	EOP 최적해석	비고
원자로냉각재펌프 열교환시 파손/ 원자로냉각재펌프 밀봉부 파손	0.0	0.0	87.6 m^3/hr
가압기 고수위 원자로 정지	2.46	2.46	88% NR 수위
주급수 격리/보조급수 기동	3.44	3.44	Low Tavg + Rx Trip
가압기 안전밸브 주기적 개방	11.	11.	160.5 bar
증기발생기 고갈	50.8	-	WR 수위 < -9.8 m
재임계 최대출력	50.8	-	1636 MWth
원자로냉각재펌프 정지	55.5	-	ΔT_{sat} < 10 °C
가압기 안전밸브 닫음	-	108.3	
계산 종료	330.	150.	
최종 노심출력	~ 253 MWth	32.9 MWth	
최종 가압기 압력	~ 160. bar.g	~ 132. bar.g	
최종 증기발생기 압력	70.2 bar.g	69.4 bar.g	증기덤프 압력 = 69.3 bar.g
최종 노심수위	2.33 m	4.08 m	만수위 = 4.08 m

RCP 펌프 열교환기 손상 및 RCP 펌프 밀봉부 파손에 의한 순수수의 원자로계통 주입은 가압기의 수위를 증가시켜, 원자로는 가압기 고수위 신호에 의하여 비상정지된다. 원자로 정지에 따른 계통온도 감소로 가압기 수위는 감소하였다가, 지속적인 순수수 주입으로

사고 후 11 분에는 만수위에 도달하여 가압기 안전밸브의 개방을 초래한다(그림 8). 이후, 계통의 압력은 주기적인 가압기 안전밸브의 개폐를 통하여 약 160.5 bar 로 유지된다(그림 9). 주급수계통은 원자로정지와 계통 저온 신호에 의하여 격리되며, 이후 증기발생기의 2 차측 냉각은 보조급수계통에 의하여 이루어진다.

운전원의 사고완화 조치가 없는 제한 시나리오의 경우, 지속적인 순수수 주입에 의한 노심 붕산농도의 희석은 노심 반응도를 증가시켜(그림 10) 사고 후 약 45 분에는 재임계 조건에 도달하여, 노심출력은 급격히 증가하게 된다(그림 11). 급격한 노심출력 증가에 의한 핵연료 온도 및 원자로계통 온도(그림 12)의 증가는 노심에 부반응도를 삽입하게 되어 노심출력은 사고 후 약 51 분 최대치인 1636 MWth 에 도달한 후 급격히 감소한다(그림 11). 노심출력의 증가에 따른 원자로계통 온도의 증가는 2 차측 압력(그림 13)을 증가시켜 증기우회계통 및 압력방출밸브 급속한 개방(그림 14)을 초래한다. 이때, 보조급수에 의한 2 차측 재고량의 보충(약 89 kg/s)은 증기우회계통을 통한 증기유량 (최대 약 630 kg/s)에 비하여 매우 작으므로, 증기발생기 수위는 급속히 감소하여 사고후 51 분에 모든 증기발생기는 고갈된다(그림 15). 이후, 증기발생기로 공급된 모든 보조급수는 증기우회계통을 통하여 유출되며, 증기발생기는 고갈된 상태로 유지된다. 증기발생기의 고갈은 원자로냉각재 계통 온도를 포화온도까지 증가시켜, 노심출구 과냉각도(그림 16)는 사고후 56 분에는 원자로냉각재펌프의 정지 조건에 도달한다(본 분석에서는 운전원에 의한 원자로냉각재펌프의 정지는 없는 것으로 가정). 계통포화에 따른 펌프 수두 저하로 원자로냉각재 유량은 감소하기 시작하며(그림 17), 이에 따른 계통 온도 증가 및 가압기 압력방출 밸브를 통한 냉각재 재고량의 지속적인 유출에 따라 가압기와 노심 수위는 감소하기 시작한다(그림 18). 이후, 노심출력은 순수수 주입에 의한 정반응도 삽입과 노심 비등에 의한 부반응도 궤환효과가 균형을 이루게 되어 약 253 MWth 의 출력으로 지속적으로 유지된다(그림 11). 이때, 2 차측에 의한 열제거는 노심출력을 제거하기에 충분하지 않으므로, 가압기 압력방출밸브를 통한 냉각재의 지속적인 유출에 의하여 노심 수위는 지속적으로 감소하여 궁극적인 노심 손상을 초래할 수 있다. 따라서, 운전원은 노심 출력 감소를 위한 긴급 붕산주입 조치 및 붕산희석원인 격리 조치를 통하여 노심을 안전정지 시켜야 한다. 본 분석에서 노심 수위 감소에 의한 노심 손상은 사고후 약 5.5 시간 동안은 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 따라서, 운전원의 비상대응 조치에는 충분한 시간여유가 있음을 알 수 있다.

비상운전절차서 최적 시나리오 해석의 경우, 운전원의 긴급 붕산주입 조치(사고 후 25 분)는 노심 총 반응도(그림 10)를 부 방향으로 서서히 감소시킨다. 사고 후 55 분, 운전원의 원자로냉각재펌프 순수수 주입 격리에 따라 다량의 순수수 주입이 차단되면서 노심 총 반응도는 감소하여(그림 10), 노심의 재임계를 방지한다(그림 11). 노심 재임계의 방지는 제한 사고에서 관찰된 원자로냉각재 온도 증가, 계통 과냉각도의 상실에 의한 원자로냉각재펌프 정지, 증기발생기 고갈 등을 방지하며, 보조급수 유량은 노심 붕괴열을 제거하기에 충분하므로 당 운전원 조치에 의하여 노심의 안전성은 유지됨을 알 수 있다(그림 12 ~ 17). 또한,

고압의 순수수 주입 격리 조치는 계통의 압력을 감소시켜 가압기 압력방출밸브를 통한 지속적인 냉각재 유출을 방지하므로, 노심의 노출은 발생하지 않는다(그림 18). 상기 운전원 비상조치 이후, 원자로계통은 관련 최적복구절차서에 따라 안정될 수 있으므로 비상운전절차서에 제시된 운전원 조치는 원자로의 안전정지에 유효함을 알 수 있다.

결론적으로, 출력운전 중 제한적인 붕산희석사고 시 노심의 안전성은 운전원 조치 없이도 사고 후 330 분 이상 유지되므로, 운전원의 비상대응 조치에 충분한 시간적 여유를 제공함을 알 수 있다. 또한, 비상운전절차서에 제시된 긴급 붕산주입 조치 및 붕산희석 원인 격리 조치는 원자로의 안전정지를 가능하게 하므로, 기존의 비상운전절차서에 제공된 운전원 조치는 유효함을 알 수 있다.

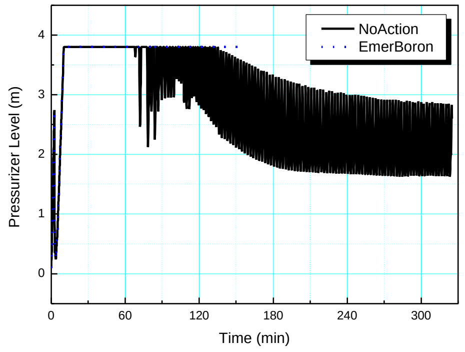


그림 8 가압기 수위

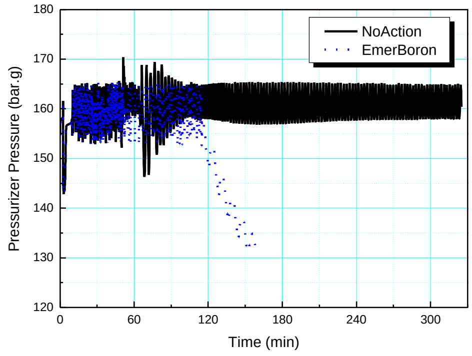


그림 9 가압기 압력

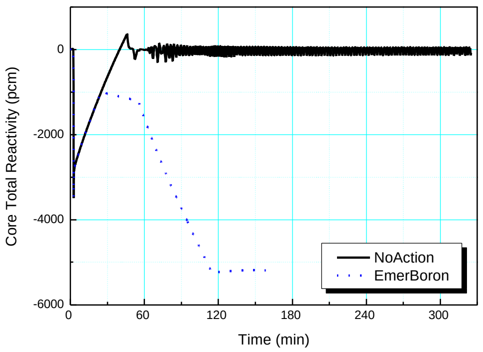


그림 10 노심 총 반응도

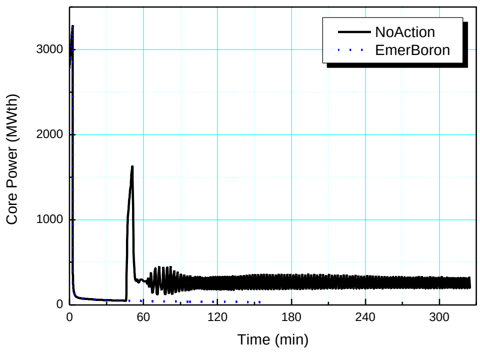


그림 11 노심 출력

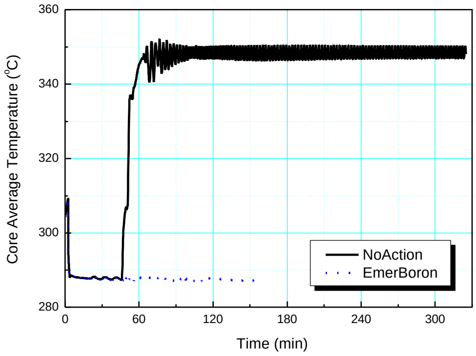


그림 12 루프 평균온도

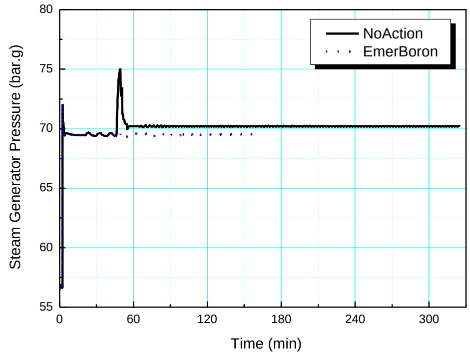


그림 13 증기발생기 압력

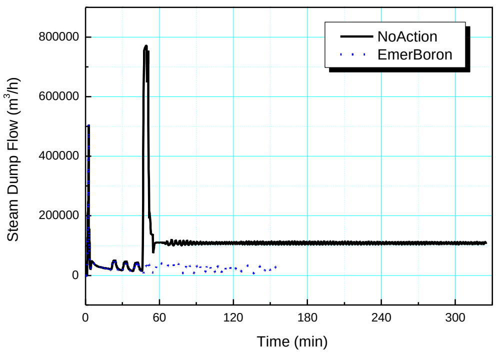


그림 14 총 증기덤프 유량

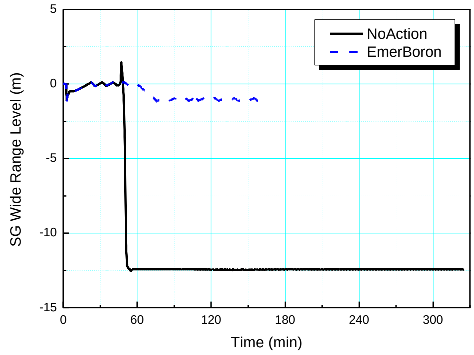


그림 15 증기발생기 수위

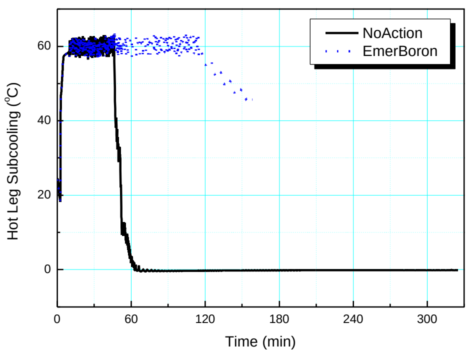


그림 16 노심출구 과냉각도

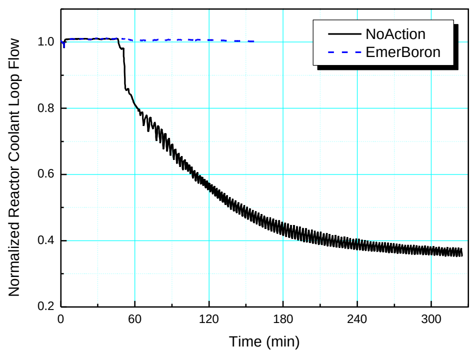


그림 17 원자로냉각재 루프 유량

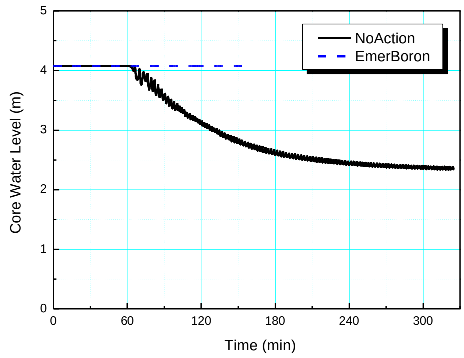


그림 18 노심 수위

5. 결론

제어되지 않는 붕산희석사고 시 울진 1,2 호기 비상운전절차서(비상-5)의 유효성 검증을 위하여 전출력 운전 중 원자로냉각재펌프 밀봉수 열교환기와 밀봉부의 동시 파손사고와 부분충수 운전 중 잔열제거계통 열교환기 1 대 파손에 의한 붕산희석사고를 분석하였다. 각 각의 초기사상에 대하여 붕산희석사고 시 요구되는 운전원 조치의 필요성을 확인하고, 운전원 조치시간의 여유도 정량화를 위하여 운전원 조치가 이루어지지 않는 제한 시나리오 분석을 수행 하였다. 또한, 비상운전절차서에 제시된 주요 운전원 조치의 유효성 검증 및 최적 계통 과도거동의 정량화를 위하여 최적 시나리오 분석을 수행하였다.

분석결과, 부분충수 운전 중 제한적인 붕산희석사고 시 노심의 안전성은 운전원 조치 없이도 사고 후 75 분 간은 유지되며, 전출력 운전 중의 사고 시에는 330 분 이상 유지되므로, 운전원의 비상대응 조치에 충분한 시간적 여유를 제공함을 알 수 있다. 또한, 비상운전절차서에 제시된 긴급 붕산주입 조치 및 붕산희석 원인 격리 조치는 원자로의 안전정지를 가능하게 하므로, 기존의 비상운전절차서에 제공된 운전원 조치는 유효함을 알 수 있다.

결론적으로, 제어되지 않는 붕산희석 사고의 제한 및 최적 시나리오 해석을 통하여 원자로계통 및 노심출력의 최적 과도거동을 정량화 하였으며, 비상운전절차서에 제시된 운전원 조치의 타당성과 유효성을 입증하였다.

참고문헌

1. 울진 원자력발전소 (1,2 호기) 운영절차서 (비상운전절차서), 울진원자력본부
2. 울진 원자력발전소(1,2 호기) 비상운전 기술배경서, 한국전력공사, ‘95
3. W.J. Lee, et. al, “MARS 2.1 Code Description”, KAERI/TR, to be published, ‘02
4. Special Issues and Sequence Analyses, NUREG/CR-4550, Appendix A, USNRC
5. 울진 1 호기 10 주기 핵설계보고서, 한국원전연료㈜, ’99