

## 월성 2호기 대형냉각재상실사고 평가를 통한 가압중수형 원자로 안전해석방법론 개선에 관한 연구

### A Study on Improvement of PHWR Safety Analysis Methodology through LBLOCA Assessment for Wolsong Unit 2

김용수\*, 박군철\*, 이재영\*\*, 이상규\*\*\*, 김만웅\*\*\*, 김효정\*\*\*

\* 서울대학교, 서울 관악구 신림9동 산56-1

\*\* 한동대학교, 경북 포항시 북구 흥해읍 남송리 3번지

\*\*\* 한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

#### 요 약

가압 중수형 원자로의 안전규제 요건 수립을 위한 연구의 일환으로서 월성 2호기 노심 입구 급수모관 35% 파단 대형 냉각재상실사고시 비상노심냉각계통에 대한 성능평가를 수행하였다. 해석결과, 대형 냉각재상실사고시 비상노심냉각계통은 충분한 냉각능력이 있는 것으로 평가되었다. 한편 안전규제요건 수립을 위해서는 노심 3차원 출력분포, 사고시 임계채널 (Critical Pass)의 위치 및 이에 대한 핵적, 열수력학적 상태를 결정하여 안전해석에 반영될 필요성이 제기되었다.

#### ABSTRACT

The assessment of the cooling capability of the emergency core cooling system (ECCS) in Wolsong Unit 2 for large loss of coolant accident (LLOCA), 35% break at the feeder pipe near the core entry, was performed to establish the safety regulation criteria for pressurized heavy water reactors (PHWRs). According to the results, the ECCS was estimated to be sufficient capability for LLOCA. However, the three dimensional power distribution in core should be considered in the safety analysis. Besides, it is also concluded that the determination of critical pass location and study of nuclear physics and thermal hydraulic characteristics in the critical pass during the accident should be also included in the safety analysis.

## I. 서론

우리 나라는 가압 경수로를 주종으로 하고 가압 중수로를 보완형으로 하는 노형 체제를 채택하고 있으며, 안전규제요건 및 안전해석 방법론은 미국의 규제기관인 NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 규제기준, 지침 및 절차 등에 근거하고 있다. 그러나 다중 안전 보장등의 특성으로 상이한 안전 철학을 갖고 있어, 노형의 차이와 안전 규제의 방법론의 차이가 있다. 이로인해 따라서 가압경수로에 비해 상대적으로 가압중수로에 대한 규제요건 및 안전해석방법론 등에 대한 기술적 이해 및 기술적 배경에 대한 확립이 미진한 실정에 있다.

이에 본 연구는 가압 중수로 안전규제 요건 수립을 위한 연구의 일환으로 비상 노심 냉각계통에 대한 성능평가를 수행하기 위해 수행되었다. 안전 해석 방법론의 검증의 일환으로 ECCS의 건전성을 검토하기 위한 작업으로 현재 개발중인 RELAP-CANDU[1.2] 코드를 이용한 분석을 하고, 코드 결과에 대한 검토와 코드자체에 적용된 가정이나 모델의 미비에 대하여 파악하여, 해석의 타당성을 증대 시키는데 그 목적이 있다.

이를 위해 비상 노심 냉각계통 성능 평가를 위해 '97년 6월부터 상업운전을 개시한 월성 2호기를 기준 발전소로 선정하였으며 사고 시 계통에 극심한 과도상태를 유발하여 연료 피복관 온도를 증가시켜 핵연료 건전성에 위협을 초래할 수 있는 대형 냉각재 상실 사고를 해석 대상 사고로 선정하였다. 대형 냉각재 상실사고의 파단 면적은 월성 2호기에 대한 지금까지의 안전해석 결과를 참조하여 가장 제한적인 것으로 평가된 입구모관 35% 파단 사고를 선정하였다 [1]. RELAP5/MOD3-CANDU 안전해석코드는 가압 중수로의 수평관 내 성층 유동 모사가 가능하고 내부에서 대류에 의한 열 및 물질전달, 상층부에서 증기 냉각 현상 모사 및 기포율 분포 모사가 가능한 상태이다.

## II. 비상노심냉각계통 성능평가

### 1. 성능평가 해석모형

가압 중수로 열수송 계통은 냉각재 상실 사고 시 냉각재 누설량을 감소시키기 위해 2개의 폐유로로 구성되어 있으며, 각 유로 내 인접 채널의 유동은 서로 반대 방향으로 형성되어 있다. 이를 모사하기 위해 그림 1과 같이 채널 당 95개의 원자로관을 갖는 4개의 평균 채널 (Pipe-100, 200, 300, 400)로 노심을 모델링하였다. 노심과 4대의 열수송 펌프 (Pump-105, 205, 305, 405) 및 증기발생기를 연결하는 열수송 계통 배관은 노심 입, 출구 급수관(Pipe-120/130, 220/230, 320/330, 420/430), 급수모관(Vol-125/135, 225/235, 325/335, 425/435) 및 열수송 펌프 입구 배관(Vol-264, 164, 464, 364)으로 모델링하였다.

증기발생기 튜브는 일, 이차측 간의 열전달을 모사하기 위해 Heat Structure(Vol-248~258, 148~158, 448~458, 348~358)로 모델링하였으며 증기발생기 이차측은 강수부(Vol-265, 165, 465, 365), Riser(Vol-269/271, 169/171, 469/471, 369/371), 습분분리기(Vol-276, 176, 476, 376), 재순환 유로(Vol-274/266, 174/166, 474/466, 374/366) 및 Dome(Vol-278, 178, 478, 378) 영역으로 모델링하였다.

냉각재상실사고 시 일차 계통 압력 감소로 인하여 열수송 계통 저압력(<5.25MPa) 신호와 격납용기 고압력(>0.223MPa) 신호가 동시에 발생하면 냉각재 상실 신호가 발생한다. 이 신호에 의해 개방되어 증기발생기를 급속 냉각 (Crash Cooldown)시키는 안전밸브(V604, 614, 624, 634)를 증기발생기와 터빈을 연결하는 각각의 주증기 배관에 모델링하였다. 원자로 정지 신호에 의해 터빈 Runback이 이루어지도록 터빈 밸브(V645)를 모델링하였으며 주증기관 내 잉여 증기를 대기 및 복수기로 방출하도록 주증기 배관에 대기덤프 밸브, 복수기 덤프 밸브를 모델링하였다. 증기발생기 이차측으로 냉각재 공급을 위해 정상운전 및 원자로 정지 후 5분 동안 탈기 저장탱크를 수원으로 주급수 펌프가 급수 배관(Vol-184, 186, 188, 190)을 통해 정상유량이 공급되도록 하였고 이 후 순수저장탱크로부터 보조급수펌프에 의해 정상유량의 4%가 공급되도록 하였다.

열수송 계통 채널 1 입구 급수모관 35% 대형 파단은 트립 밸브(V960) 및 격납용기(Vol-965)로 모델링하였다. 냉각재 상실 사고 시 열수송 계통 유로 간 격리를 위해 열수송 계통에 연결되는 압력제어계통과 냉각재 공급 및 배출유로에 트립 밸브(V502, V512, V755, V765)를 설치하여 열수송 계통 저압력(<5.25MPa) 신호에 의해 차단되도록 하였다.

가압 중수로의 비상 노심 냉각계통은 크게 고압, 중압 및 저압 주입계통으로 구성된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 축압기(Vol-800)를 설치하여 고압주입을 모델링하였고 살수탱크(Vol-900) 및 비상 노심 냉각펌프를 설치하여 중압주입을 모델링하였다. 안전주입계통이 정상 동작하는 경우에는 고압안전주입은 냉각재 상실 신호[열수송 계통 저압력(<5.25MPa) + 격납용기 고압력(>0.223MPa)]가 발생하고 열수송 계통 압력이 4.0MPa이하로 감소되면 주입되고 축압기 수위가 0.5m이하로 감소되면 주입이 중단되도록 하였다. 중압주입은 축압기 수위가 1.0m이하로 감소되면 주입 개시되어 계산 종료 시까지 안전주입수를 열수송 계통으로 공급하도록 하였다.

원자로 정지계통은 대형 냉각재 상실사고 발생 0.43초 후 원자로 정지 신호가 발생하고 1.2초의 지연시간 후 원자로 정지가 발생하도록 하였으며 터빈 정지는 원자로 정지 신호 발생하고 지연시간 5초 후 Runback이 발생하도록 하였다. 원자로 제어계통은 사고 시 동작하지 않는 것으로 가정하였다.

한편, 비상 노심 냉각계통 성능 평가를 위해 지금까지의 월성 2호기 대형 냉각재 상실 사고 해석 결과, 가장 제한적인 것으로 평가된 열수송 계통 입구 급수모관 35% 파단 사

고에 대해서 안전주입계통이 정상적으로 작동되는 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 사고 진행 과정의 주요 초기조건은 표 1과 같다.

## 2. 성능평가 결과

급수모관 35% 파단 대형 냉각재 상실 사고시 비상 노심 냉각계통 성능 평가를 위해 대형 냉각재 상실사고 발생 시 열수송 계통 압력, 축압기 수위 및 기타 계통 조건에 따라 안전 주입 유량이 형성되는 안전주입계통 정상 동작 상태에 대해 그림 2와 같이 모형화하여 수행하였다.

### 가. 정상상태

급수모관 35% 파단 대형 냉각재 상실 사고 과도상태 계산 수행 전 정상상태 계산을 수행하였으며, 이를 월성 2호기 전출력 정상상태 운전 변수 설계치와 표 2와 같이 비교하였다. 비교 결과 전산계산 모사결과와 운전변수에 대한 초기 조건이 잘 일치함을 확인하였다.

### 나. 과도상태

#### 1) 유량분포

사고 시작으로 채널 1 입구 급수모관에서 배관 단면적 35%에 해당하는 대형 파단이 발생하면 그림 3과 같이 파단 부위를 통하여 일차계통 냉각재가 급격히 방출하게 된다.

파단 부위를 통한 냉각재의 지속적인 방출로 열수송 계통 압력이 5.25MPa이하로 감소되며, 파단 유로와 건전 유로 간 격리가 이루어지고, 파단유로의 열수송 펌프 1, 2가 18.2초 및 18.4초에 각각 열수송 계통 저압력 신호(<2.5MPa)에 의해 정지된다.

열수송 계통 압력이 5.25MPa 이하인 상태에서 격납용기 압력이 0.223MPa 이상으로 상승함에 따라 열수송 계통 저압력(<5.25MPa) 및 격납용기 고압력(>0.223MPa) 신호 동시 발생으로 냉각재 상실사고 신호가 발생된다. 이에 따라, 37.3초에 고압안전주입이 시작되어 그림 4에서 보는 바와 같이 초기 대략 1,750kg/sec의 안전주입 유량이 공급되고 축압기 수위 감소에 따라 주입량이 서서히 감소되어 153.9초에 축압기 저수위 신호로 주입이 종료된다.

파단 유로의 입구 급수모관 1(Vol-126)과 출구 모관 1(Vol-238)로 주입되는 안전주입수는 노심을 통과하지 않고 모두 격납용기로 방출되게 되며, 출구 모관 1(Vol-139)로 공급되는 안전주입수는 채널 1 노심을 역류하여 파단부로 방출되고 입구 급수모관 2(Vol-226)로 공급되는 안전주입수는 채널 2 노심을 통과하여 격납용기로 방출됨에 따라 그림 5에서 보는 바와 같이 파단 유로에서는 안전주입수 공급에 의해 열수송 계통

순환 유량이 형성된다. 건전 유로에서는 유로 격리로 파단 부위로 방출이 중단된 후 계통 압력이 열수송 펌프 정지 압력 설정치보다 높게 유지되어 열수송 펌프에 의한 강제 순환유량이 형성되고 계통에 존재하는 기포의 영향으로 펌프 운전성능이 저하되면서 유량이 진동하는 상태에서 순환유량이 서서히 감소한다. 증기발생기를 통한 열제거가 이루어지면서 계산시간 75.0초에 건전 유로 계통 압력이 2.5MPa이하로 감소되어 열수송 펌프 3, 4가 정지되고 대략 120.0초까지 열수송 펌프가 Coast-down되면서 유량이 감소되어 120.0초 이후에는 주증기 방출밸브를 통한 열제거에 의한 자연순환 유량이 형성된다.

주증기 안전밸브 방출유량은 그림 6에서 보는 바와 같이 주증기 안전밸브가 42.3초에 개방되어 증기발생기를 통한 급속 냉각(Crash Cooldown)이 이루어진다.

사고 발생 310초 후 그림 7에서 보는 바와 같이 증기발생기 이차측으로 냉각재를 공급하는 탈기 저장탱크가 고갈되어 보조급수로 전환되면서 이차측 급수유량이 감소하지만 증기발생기는 충분한 재고량을 확보하고 있어 주증기 안전밸브를 통한 열제거가 지속적으로 이루어져 열수송 계통 냉각재 및 연료 피복재가 충분히 냉각된 상태에서 사고가 종료된다.

## 2) 압력분포

사고 시작으로 채널 1 입구 급수모관에서 배관 단면적 35%에 해당하는 대형 파단이 발생하면 파단 부위를 통하여 일차계통 냉각재가 급격히 방출하게 되며, 이로 인하여 그림 8과 같이 열수송 계통 압력이 급격히 감소하게 된다.

파단 부위를 통한 냉각재의 지속적인 방출로 열수송 계통 압력이 5.25MPa이하로 감소되어 14.5초에 파단 유로와 건전 유로 간 격리가 이루어진다. 유로 격리로 더 이상의 냉각재 방출이 이루어지지 않는 건전유로는 압력 감소가 둔화되고 냉각재 방출이 지속되는 파단유로에서는 급격한 감소가 지속되어 열수송 펌프 1, 2가 18.2초 및 18.4초에 각각 열수송 계통 저압력 신호(<2.5MPa)에 의해 정지된다.

증기발생기 압력은 주증기 안전밸브가 개방됨에 따라 그림 9에서 보는 바와 같이 증기발생기를 통한 급속 냉각(Crash Cooldown)이 이루어져 압력이 급격히 감소한다.

사고 발생 310초 후 주증기 안전밸브를 통한 열제거가 지속적으로 이루어져 열수송 계통의 압력이 안정되면서 사고가 종료된다.

## 3) 온도분포

열수송 계통 냉각재 재고량 감소로 그림 10에서 보는 바와 같이 파단 급수모관에

연결된 채널 1의 원전연료 피복재 온도가 급격하게 증가한다. 반면, 다른 채널 (2, 3, 4)에 위치한 피복재의 온도 상승량 그림 11-13에서와 같이 상대적으로 작게 나타난다. 이는 파단 급수모관에 연결된 채널 1의 노심 내 냉각재가 고갈되면서 기포 분율 (그림 10)이 급격히 증가되어 연료 냉각 능력이 저하된 데 기인한다. 파단 유로 채널 2에 위치한 연료의 피복재 온도 증가량은 냉각재가 연료 채널을 통과하여 파단 부위로 방출됨에 따라 채널 1보다 작다. 건전 유로의 경우에는 파단 부위로 방출되는 냉각재량이 상대적으로 작아서 노심 내 냉각재가 고갈되지 않으므로 기포분율은 그림 14와 같이 낮고 피복재 온도 상승량이 상대적으로 작다.

14.5초 경에 파단 유로와 건전 유로가 격리된 상태이므로 건전 유로의 압력은 고압 안전주입 압력보다 높게 유지되어 저온(60°C)의 안전주입수는 파단 유로에만 공급된다. 이에 따라, 파단 유로의 온도가 그림 15와 같이 급격하게 감소되는 반면 건전 유로는 주증기 안전밸브를 통한 증기 방출로 열제거가 이루어짐에 따라 상대적으로 천천히 온도가 감소되어 그림 16과 같이 파단 유로와 건전 유로 간 온도 차이가 크게 나타난다.

축압기 수위가 감소함에 따라 사고 발생 후 153.9초에 축압기 저수위에 의한 고압 안전주입이 종료되기 전까지 안전주입수 주입 유량이 감소된다. 축압기 저수위 신호에 의해 비상 노심 냉각펌프에 의한 중압주입(750kg/sec)으로 전환되는 과정에서 안전주입 유량이 감소되어 파단 유로 채널 2의 피복재 온도 및 냉각재 온도가 210초까지 30°C 정도 상승하여 안정상태를 유지한다.

사고 발생 310초 후 그림 16에서 보는 바와 같이 증기발생기 이차측으로 냉각재를 공급하는 탈기 저장탱크가 고갈되어 보조급수로 전환되면서 이차측 급수유량이 감소하지만 증기발생기는 충분한 재고량을 확보하고 있어 주증기 안전밸브를 통한 열제거가 지속적으로 이루어져 열수송 계통 냉각재 및 연료 피복재가 충분히 냉각된 상태에서 사고가 종료된다.

원자로 정지 신호가 0.43초에 발생하여 1.2초 지연 후 원자로가 정지됨에 따라 노심 열출력이 감소되어 채널 1의 연료 피복재 온도 상승이 중지되어 냉각재 상실사고 발생 9.0초 후 채널 중심 (Node 7)에 위치한 연료의 피복재 온도가 본 해석에서의 최고 온도인 1211.1K에 도달한다.

### III. 결론

본 연구에서는 가압중수로 비상노심냉각계통 성능 평가를 위해 열수송 계통 입구 급수모관 35% 파단 대형냉각재상실사고 시 안전주입계통 정상 작동 상태에 대해서 계통

해석을 수행하였다. 해석 결과, 대형냉각재상실사고 시 계통 압력이 급격히 감소하므로 축압기와 비상노심냉각펌프로 부터의 안전주입수는 계통 압력 등의 외부 요건에 의해 영향을 받지 않고 비교적 일정한 유량으로 주입된다. 또한, 비상노심냉각계통이 대형냉각재 상실사고에 대한 충분한 냉각 능력이 있음을 보여준다. 그러나, 가압중수로 비상노심냉각 계통 성능에 관한 규제요건 수립을 위해서는 아래의 사항이 향후 고려될 필요성이 제기되었다.

1. 기존 계통해석 입력에는 3차원 출력 분포 등의 노심 핵설계 자료가 포함되어 있지 않아서 초기 열수송 계통 온도변화 및 연료온도 변화에 따른 반응도 궤환에 의한 원자로 출력 변화 및 노심 내 출력분포에 따른 열수력 거동 변화에 대한 계산이 수행되고 있지 않으므로 이에 대한 보완이 필요하다.
2. 원자로관을 4개의 평균채널로 모델링하고 있어, 안전해석에 중요한 임계채널 (Critical Pass)에 대한 계산이 수행되고 있지 않다. 따라서, 사고 시 임계채널의 위치와 핵적 및 열수력학적 상태를 결정하여 안전해석에 포함할 필요가 있다.
3. 정상운전 중 열수송 펌프에 의한 강제유량 형성 시 각 채널의 출력을 고려하여 유량이 일정하게 유지되도록 급수관 내 오리피스를 설치하였다. 하지만, 열수송 계통 대형 냉각재 상실사고와 같은 사고 시 급수모관에 존재하는 증기가 안전주입수와 동반되어 노심으로 공급될 수 있다. 이로 인해, 파단 유로의 입, 출구 모관에서 급수관(Feeder Pipe)으로의 유량 분포가 정상운전 상태와 달라진다. 따라서, 사고 조건에서 각 채널, 특히 임계채널에 대한 안전주입수 공급량, 주입 조건 등과 같은 열수력 인자들을 결정하여 안전해석에 반영해야 할 필요가 있다.

#### 참고문헌

1. CANDU형 원자로 열수력 사고해석 코드체계 평가, 한국원자력안전기술원, 1996, KINS/GR-111
2. RELAP5/MOD3 Code Manual, NRC, 1999, NUREG/CR-5535
3. 월성 가압 중수로 계통실무, 한국원자력안전기술원, 1993
4. 중수로 계통 및 구조, 한국전력공사, 주제어실(월)-1

표 1 열수송 계통 입구모관 35% 파단 사고 추이

동작 내용	경과 시간	비 고
입구 급수모관 35% 파단	0.0sec	파단 위치 : 채널 1
원자로 정지	1.63sec	지연시간 : 1.2sec
터빈 Runback	5.43sec	원자로 정지 신호
피복재 최고온도 도달	9.0sec	PCT : 1185.2K(CH. 1, Node 7)
열수송 계통 유로 격리	14.5sec	열수송계통 저압력(<5.25MPa)
열수송펌프 1 정지	18.2sec	급수모관 1 저압력(<2.5MPa)
열수송펌프 2 정지	18.4sec	급수모관 2 저압력(<2.5MPa)
고압안전주입 개시	37.3sec	냉각재 상실사고 신호
주증기 안전 밸브 열림	42.3sec	· 냉각재 상실사고 신호+5.0sec · 정격 터빈 유량 124.85%
열수송펌프 3,4 정지	75.8sec	급수모관 3,4 저압력(<2.5MPa)
중압주입 개시	153.7sec	축압기 저수위(<1.0m)
고압안전주입 종료	153.9sec	축압기 저수위(<0.5m)
주급수 펌프 정지 보조급수 펌프 기동	310sec	주급수 : 1,032kg/sec (135℃) 보조급수 : 35.9kg/sec (20℃)
계산 종료	500sec	

표 2 월성 2호기 전출력 정상상태 운전 변수 설계치 및 계산치

변 수 명	설계치[3,4]	계산치	비 고
입구 모관 온도(K)	539.0	541.11	
출구 모관 온도(K)	583.0	584.17	
입구 모관 압력(MPa)	11.35	11.41	
출구 모관 압력(MPa)	10.0	10.1	
평균 유량(kg/sec)	-	7,344.9	
증기발생기 압력(MPa)	4.82	5.33	
증기 유량(kg/sec)	1,047.0	1,047.73	
급수유량(kg/sec)	1,047.0	1,031.82	
급수온도(K)	459.0	459.0	
노심출력(MWth)	2056.0	2052.0	513MW/Ch.



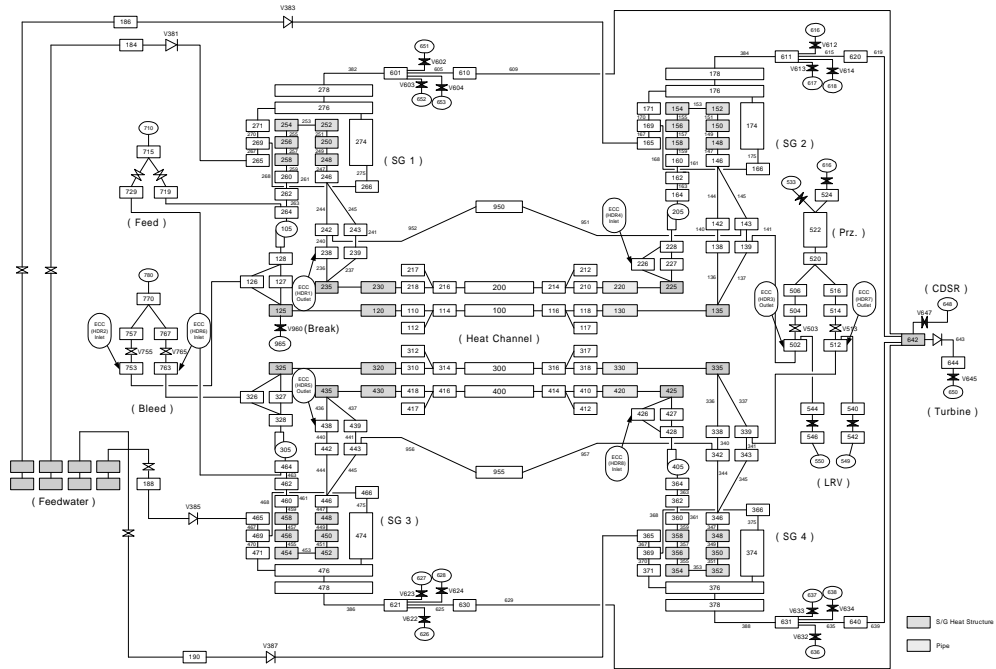


그림 1 가압 중수로 계통 해석 모델링

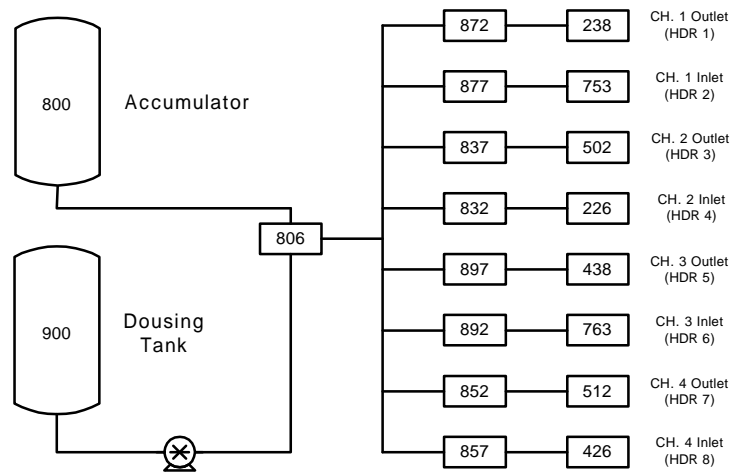


그림 2 가압 중수로 안전주입계통 모델링

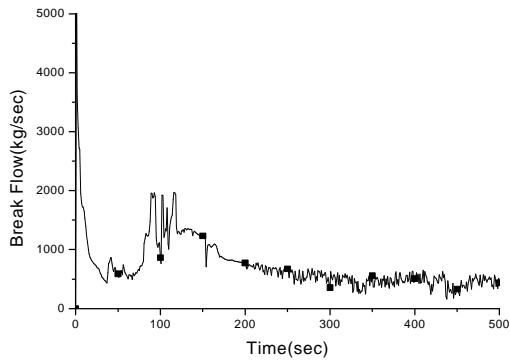


그림 3 파단 부위 방출량

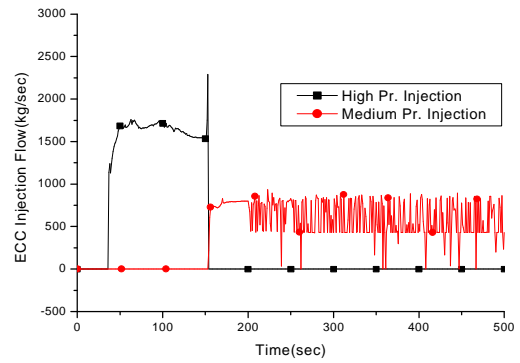


그림 4 안전주입 유량

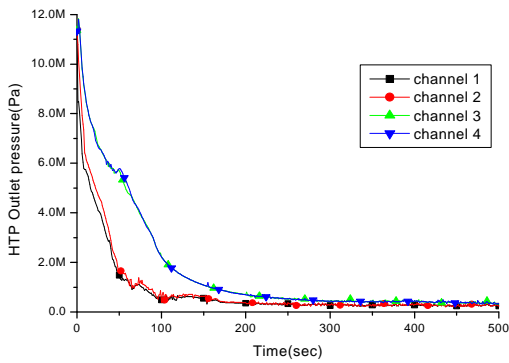


그림 5 채널 출구 압력

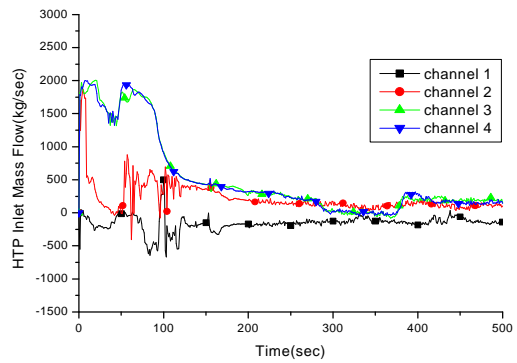


그림 6 열수송 계통 유량

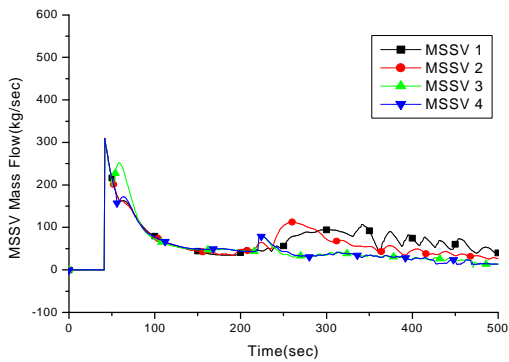


그림 7 안전밸브 방출 유량

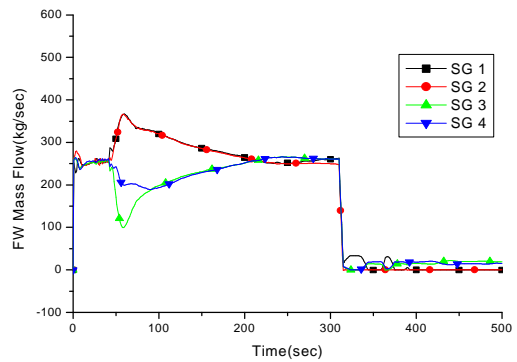


그림 8 증기발생기 이차측 급수유량

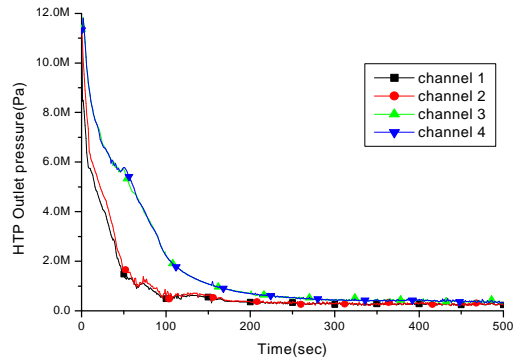


그림 9 채널 출구 압력

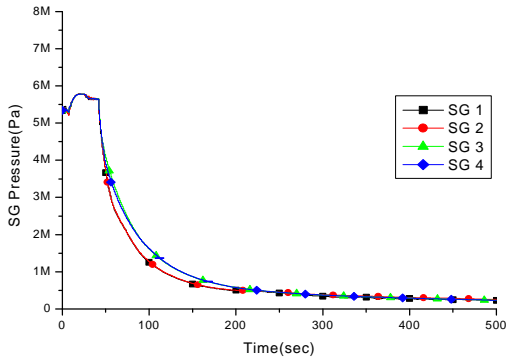


그림 10 증기발생기 압력

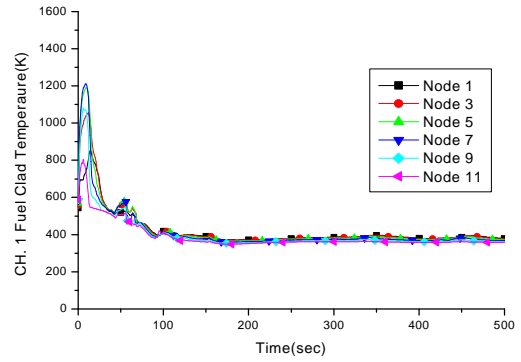


그림 11 채널 1 연료 피복재 온도

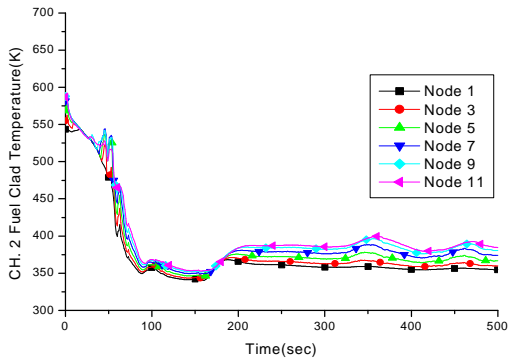


그림 12 채널 2 연료 피복재 온도

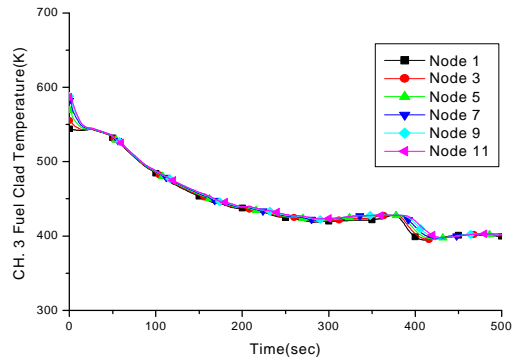


그림 13 채널 3 연료 피복재 온도

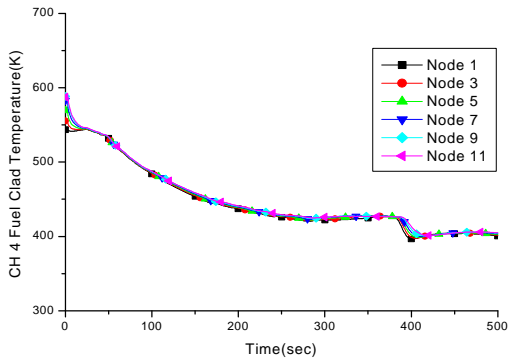


그림 14 채널 4 연료 피복재 온도

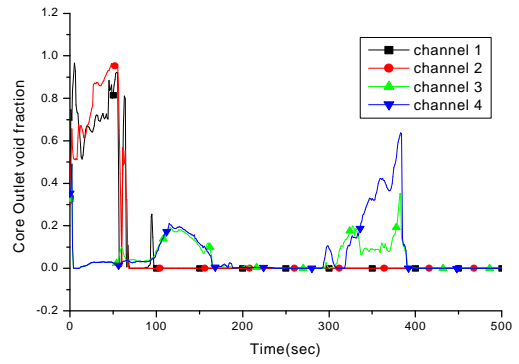


그림 15 채널 출구 기포 분율

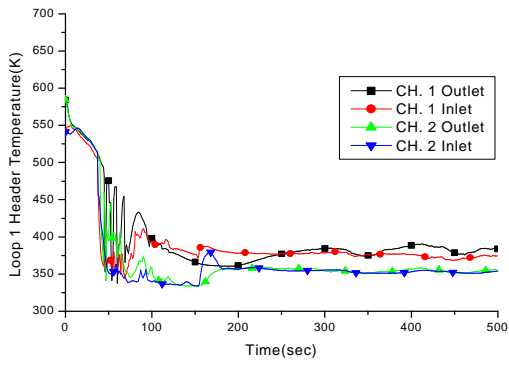


그림 16 파단유로 채널 입, 출구온도

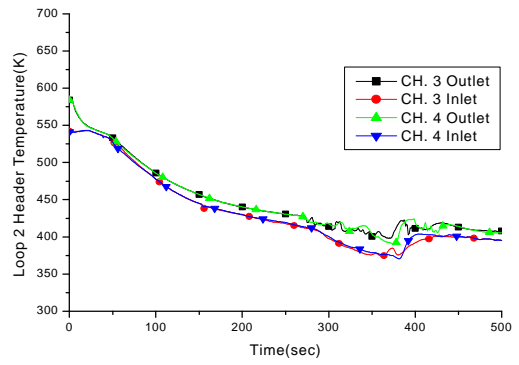


그림 17 건전유로 채널 입, 출구온도