

## 일체형 원자로의 소형 냉각재 상실사고 특성

### Small Break LOCA Characteristics of the System Integrated Modular Advanced Reactor

정영중, 배규환, 심석구

한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

개념설계 단계에 있는 SMART의 대표적 설계기준사고인 소형 냉각재 상실사고를 RELAP5/SMR 코드를 이용하여 수행하였다. SMART는 소형 냉각재상실사고시 계통의 압력, 온도 및 재고량 거동측면에서 원자로의 안전성을 확보할 수 있었다. 그리고 SMART는 ECCS의 작동없이 일차 계통 재고량만으로 약 3.7시간은 노심 노출없이 자연순환을 유지할 수 있었으며, 가압기 junction에 수평 성층유동에서 액체건인모델을 적용하는 것이 보다 보수적인 결과를 나타내었다.

#### Abstract

Small break loss of coolant accident analysis for the SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) which is under conceptual design was performed using RELAP5/SMR code. The result showed that the SMART remained at the safe condition with respect to transient of the system pressure, temperature and coolant inventory during the small break LOCA. It is also confirmed that SMART can be cooled through the natural circulation of the primary inventory without core uncover up to 3.7 hours after the initiation of SBLOCA with no ECCS supply. Adaption of liquid entrainment model at the pressurizer junctions in the horizontal stratification flow gave the more conservative results.

#### 1. 서 론

최대 열출력이 330MWt로 설계되는 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)는 일차계통의 주요 부품 및 방사능을 함유하고 있는 냉각재를 하나의 밀봉된 원자로 압력용기 내에 설치함으로써 대형 냉각재 상실사고의 가능성을 근본적으로 제거하는 설계 개념을 채택하고 있다 [1]. 원자로 압력은 원자로 내부에 있는 N<sub>2</sub> 비응축성 가스에 의하여 일정한 압력을 유지하도록 설계되어 있다. 이차계통에는 피동비상냉각계통이 설치되어 열제거원 상실시 자연순환에 의해 최소한 72시간은 노심 붕괴열을 제거할 수 있다.

이와 같이 단순성 및 고유 안전성 등의 새로운 설계 개념에 의한 원자로 설계시 체계적인 안전성 분석을 통하여 그 신뢰성과 안전성을 확인하고 이를 위한 기술의 확보가 필수적이다. 즉, SMART에 특이하게 나타나는 고유 특성을 파악하고, 이와 관련하여 체계적인 안전해석 방법론의 선정 및 코드 개발이 요구된다. 본 연구에서는 개념설계 단계에 있는 SMART의 소형 냉각재 상실사고에 대한 안전해석을 RELAP5/SMR 코드[2]를 이용하여 수행하고 해석결과를 분석함으로써 소형 냉각재 상실사고시 SMART 열수력 특성을 파악하고, 설계의 안전성을 확인하고자 한다.

## 2. RELAP5/SMR 입력모델 및 초기/경계조건

그림 1은 SMART의 안전해석을 위한 RELAP5/SMR의 Nodalization을 보여 준다. 주요 계통으로 주 기기를 포함하는 원자로 압력용기인 일차계통, 이차계통, 피동형 비상냉각계통, 보충수 및 비상노심냉각계통 등이 있다. 노심은 57 개의 핵연료 집합체로 구성되어, 열을 생성하는 부분과 생성하지 않는 부분으로 구분되는데 P200과 P210이 열을 생성하는 핵 연료봉 영역이고 B180와 B220은 열을 생성하지 않는 영역이다. 노심은 56개의 핵연료 집합체를 묶은 평균채널 (P200)과 한 개의 고온채널 (P210)로 모델하였고, 노심의 축방향으로는 12개의 세부 노드를 가지도록 하여 핵 연료봉에서의 축방향 출력분포를 고려하였다. 4 대의 냉각재 순환펌프는 부분 펌프 고장을 해석하기 위해 각각 280, 281, 290과 291로 모델하였다. P270은 펌프 흡입구이며 B110은 펌프 방출구가 된다. 펌프를 통과한 고온의 냉각재는 균일하게 분포되어 12개의 증기발생기 카세트 내부로 흐른다. 12개의 증기발생기는 사고시 4 개의 비상냉각계통 트레인에서 발생할 수 있는 비대칭 특성을 고려하기 위하여 4개의 그룹으로 묶어 모델하였다. B121과 B141은 증기 및 급수 모듈헤더가 위치한 영역이고, P131은 열전달이 일어나는 나선형 튜브의 셀측에 해당된다. 증기발생기를 통과한 저온의 냉각재는 합해져 하향유로 (P160)를 거쳐 노심하부로 유입된다. 가압기는 기존 상용로의 모델링 경험을 바탕으로 모델하였는데,

표 1. RELAP5/SMR의 초기상태 계산결과

계통 변수	설계값	100% 출력 계산값	103% 출력 계산값
노심 열출력, MWt	330	330.	339.9
가압기 압력, MPa	15	15.0	15.0
노심 총 유량, kg/s	1556	1554	1554
일차측 SG 입구 온도, K	583	584	586
일차측 SG 출구 온도, K	543	544	545
급수 유량, kg/s	152.5	152.5	157.1
급수 온도, K	453	456	456
이차측 SG 출구 압력, MPa	3.4	3.4	3.4
이차측 SG 출구 온도, K	547 이상	558	563

의 모델링 경험을 바탕으로 모델하였는데, V300은 외곽공동, B310은 연결배관, P320과 B330은 중 앙공동을 모델한 것이다. 비응축성가스가 있는 중앙공동 (end cavity)은 5개의 세부 노드로 나뉘어져 수직 성층류를 고려할 수 있도록 하였다. 그리고 각 공동간의 연결배관은 B310으로 모델하였다. 이차계통 및 비상냉각계통은 대칭을 이루는 4 개의 그룹으로 모델되어 비상냉각계통중 각 트레인이 작동불능인 경우 및 비대칭 열제거 현상을 고려할 수 있게 하였다. 열전달이 일어나는 증기발생기 튜브는 25개의 세부 노드로 하여 긴 나선형 튜브에 형성되는 과냉영역, 비등영역 및 과열영역에서의 열수력 과도현상을 예측할 수 있게 하였고, 비상냉각계통 열교환기 튜브는 10개의 세부 노드로 하여 과열증기가 과냉액체로 응축하는 현상을

예측할 수 있게 모델하였다.

본 해석시 원자로의 초기 출력은 측정 오차 등을 고려한 103%로 가정하고 원자로 정지 후에는 보수적인 ANS73 잔열곡선을 사용하였다. 원자로가 정지된 후 피동비상냉각계통에 의한 NSSS의 냉각은 보수적으로 4 트레인 중 2 트레인에 의해서만 수행되는 것으로 하고 안전주입계통의 고장은 고려하지 않았다. 증기발생기의 나선형 튜브 (helical tube)에서 열전달 상관식을 열 구조물 입력 경계조건 “135”로 정의하여 사용하였으며, 셀측은 RELAP5/MOD3 [3]에 내장된 기본옵션인 “114”의 대류경계조건을 사용하였다. 또한, 피동비상냉각계통 열교환기의 튜브는 수직관다발 형태이므로 수직관에 대한 열전달 모델을 사용하였다. 이와 같은 모델링과 초기/경계조건을 사용하여 구한 값들을 표 1에서 설계값과 비교하여 요약하였다.

### 3. 해석결과 분석

정격 출력의 103%로 운전중 가압기의 중앙공동에서 가스실린더로 연결되는 내부 직경이 20 mm인 배관이 파단되어 질소 가스 및 증기 혼합체가 안전보호용기로 방출되는 경우를 초기사건으로 가정하였으며, 이때 가스실린더는 밸브에 의하여 격리되어 가스실린더로부터의 방출은 없는 것으로 가정하였다. 파단을 통한 방출유량으로 인하여 계통의 압력이 급격히 감소하면 가압기 저압에 의한 원자로 비상보호 신호가 발생한다. 이 신호에 의하여 제어봉이 삽입되어 원자로가 정지되고, 원자로 정지와 동시에 냉각재 순환펌프는 정지되는 것으로 가정한다. 또한, 원자로정지 신호 발생 시 급수유량은 10%/s의 비율로 감소하는 것으로 하여 신호 발생 10초 후에 주 급수유량은 완전히 정지된다. 그 후 증기 및 급수 격리 밸브가 닫히고 피동비상냉각계통의 증기 및 급수 차단 밸브가 열리므로써 증기발생기는 터빈과 격리되어 피동비상냉각계통에 연결된다. NSSS의 냉각은 4 트레인의 피동비상냉각계통 중 2 트레인에 의해서만 수행되는 것으로 하고 안전주입계통은 정상적으로 작동한다. 또한, 원자로의 일차측 냉각재 수위가 일정 수준 이하로 떨어지면 보충수계통 및 비상노심냉각계통이 작동한다.

그림 2는 파단면을 통한 방출유량을 보여 준다. 가압기의 중앙공동에서 가스실린더로 연결되는 배관이 파단되면 초기 약 80초까지는 질소 기체가 방출되고 그 이후는 질소 기체와 증기의 혼합체가 안전보호용기 내로 방출된다. 과도초기 약 9.5 kg/s의 방출유량으로 인하여 그림 3의 일차계통 압력은 급격히 감소하여 사고 후 약 15초만에 비상보호 신호 설정치인 12MPa에 도달하게 된다. 이 신호에 의하여 원자로가 정지되면 출력 감소로 일차계통의 압력은 계속 감소하다가 터빈의 정지로 이차측에 의한 열 제거량이 줄어들게 되면 서서히 감소하게 된다. 원자로 정지와 동시에 냉각재 순환펌프는 정지되고 일차계통은 강제순환 조건에서 자연순환 조건으로 바뀌게 된다. 계속적인 압력 감소로 인한 flashing과 냉각재 유량의 감소로 인하여 노심에서는 잔열에 의한 비등이 일어나 증기가 발생하게 된다. 이로 인하여 일차계통의 감압은 더욱 서서히 진행되고 (그림 3), 가압기로부터 방출되는 기체-증기 혼합체의 유량도 줄어들게 된다 (그림 2). 증기-기체 혼합체가 파단부로 방출되면서 일차측 냉각재는 가압기로 유입되고 가압기의 수위가 파단 부위까지 도달하는 125초경부터 이상 혼합체가 방출되어 방출유량은 급격히 증가하고, 그림 4의 일차측 냉각재 재고량은 감소한다. 사고 후 106초경에 원자로 수위가 보충수계통 작동 설정치에 도달하게 되면 3 대의 보충수 펌프가 물 저장탱크로부터 약 1 kg/s의 보충수를 원자로로 주입한다. 그러나 이량은 파단유량에 비해 상당히 적기 때문에 원자로 수위는 지속적으로 감소하다가 약 163초경에 비상노

심냉각계통이 작동되어 다량의 냉각수가 원자로로 주입됨에 따라 (그림 5), 일차측 압력은 이차측 압력 근방까지 급격히 떨어지면서 (그림 3), 파단유량이 감소하게 된다 (그림 2). 비상노심냉각계통 작동 초기에 많은 량의 냉각수가 계통으로 주입됨에 따라 일차측 냉각재 재고량은 잠시 증가하나 (그림 4), 주입되는 대부분의 유량은 파단부인 가압기쪽으로 유입되어 과냉의 안전주입수가 파단부로 우회 방출되기 때문에 계통의 재고량 회복 및 노심 냉각에 효과적으로 이용되지 못하고 있다. 보충수펌프와 비상노심냉각탱크로부터 주입되는 유량이 파단 유량보다 적어지게 되는 340초경부터는 이상혼합체가 다시 방출되고, 365초경에 계통 압력이 비상노심냉각탱크 압력보다 높게 유지되어 주입이 중단되면 파단면을 통한 방출과 이차측으로의 열교환을 통하여 계통 압력은 감소하게 된다. 계통 압력이 감소하면 다시 보충수펌프와 비상노심냉각탱크로부터 냉각재가 주입되는 현상이 계속된다. 사고 후 560초경에는 비상노심냉각탱크가 고갈되고 탱크 내의 질소 기체가 계통으로 유입되고, 작은 량의 증기-기체 혼합체가 파단부를 통하여 방출되나 방출유량은 보충수펌프에서 주입되는 유량보다 많기 때문에 일차계통의 냉각재 재고량은 지속적으로 감소하고 있다 (그림 4). 그러나 모의된 사고기간 동안 계통의 재고량 및 노심수위는 노심 노출이 일어나지 않을 만큼 충분히 확보되어 자연대류 회로가 잘 유지되고, 피동비상냉각계통이 잔열을 지속적으로 제거함으로써 핵연료 피복재의 온도는 초기치보다 높아지지 않고 일차계통 냉각재의 온도도 163초경부터는 단순 감소하여 안정한 상태로 유지되고 있다 (그림 6).

SMART 계통 특성 및 계산에 사용된 RELAP5/SMR 코드의 특성을 파악하기 위한 민감도 분석이 수행되었다. ECCS 계통이 작동하지 않을 경우 노심이 노출되는 기간을 예측하기 위하여 ECCS가 작동하지 않는 경우를 기본경우와 비교하였다. 그림 7은 ECCS가 작동하지 않는 경우의 노심 상부 압력을 보여준다. ECCS가 작동하는 163초 이전에는 두 경우가 동일한 과도현상을 보여주고 그 이후는 ECCS가 공급되지 않기 때문에 파단유량이 기본경우보다 감소하면서, 일차계통 재고량 감소로 인하여 일차계통 및 이차계통의 압력은 더 높게 나타난다. ECCS가 공급되지 않으면서 파단면을 통하여 냉각재가 계속 방출되므로써 약 13300초 (약 3.7 시간)에는 노심노출이 발생하여 핵연료봉의 피복재 온도가 급격히 증가한다 (그림 8). 이 결과는 SMART 원자로는 일차계통 재고량만으로 약 3.7시간은 노심노출 없이 자연순환을 유지할 수 있음을 보여 준다. 가압기 junction에서 수평으로 성층화된 유동의 액체건인모델 효과를 고려하기 위하여 그림 1의 volume 320과 330 사이의 junction에 수평 성층유동 (horizontal stratification flow)에서 액체건인모델을 사용한 경우의 파단유량을 그림 9에서 비교하였다. 증기가 발생하지 않는 과도초기 (300초 이내)에는 기본 경우와 동일한 결과를 보여주고 과도기가 진행되어 파단면으로 액체방출이 완료되고 기체의 유속에 의하여 액체가 건인되는 유동영역에서는 차이가 나타나는데 액체건인모델의 적용으로 인하여 과도기 후반부는 보다 많은 유량이 파단면으로 방출되었다. 기본경우와 비교 시 과도기 발생 1000초 후에는 약 1100kg 정도 더 많이 방출되는 것으로 예측하였으며 이것은 핵연료 피복재 온도 상승측면이나 안전보호용기의 압력측면에서 볼 때 보다 보수적인 결과를 나타낸다.

#### 4. 결 론

최대 열출력이 330MWt로 설계되는 SMART는 기존의 분리형 원자로와는 상이한 설계 개념을

채택하고 있다. 특히 원자로의 고유안전성 및 피동안전성 등 일체형 원자로에 특이하게 나타나는 안전 현안들은 심도 있게 고려되어 안전규제요건이 개발되고, 이와 관련하여 체계적인 안전 해석 방법론 및 코드 개발을 통하여 안전성 분석이 수행될 필요성이 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는 개념설계 단계에 있는 SMART의 대표적 설계기준사고중 하나인 가압기 가스실린더 배관이 파단된 소형 냉각재 상실사고에 대하여 RELAP5/SMR 코드를 사용하여 안전해석을 수행하였다.

RELAP5/SMR 코드는 소형 냉각재 상실사고시 나타나는 물리적 현상을 적절히 예측하였으며, 계통의 압력, 온도 및 재고량 거동 측면에서 SMART는 소형냉각재 상실사고시 안전성이 확보되고 있었다. 그리고 SMART는 ECCS의 작동없이 일차계통 재고량만으로 약 3.7시간은 노심 노출없이 자연순환을 유지할 수 있었으며, 가압기 junction에 수평 성층유동에서 액체건인모델을 사용하는 것이 보다 보수적인 결과를 나타내었다.

## 5. 참고 문헌

- [1] 김환열, 1998, “핵증기공급계통 설명서”, SMART-FS-SD210
- [2] B. D. Chung, 1998, “RELAP5/SMR User problem/code deficiency and resolution report” RELAP5/SMR-003/98
- [3] NRC, 1997, “RELAP5/MOD3 code manual, user’s guide and input requirements”, NUREG/CR-5534, Vol. 2.

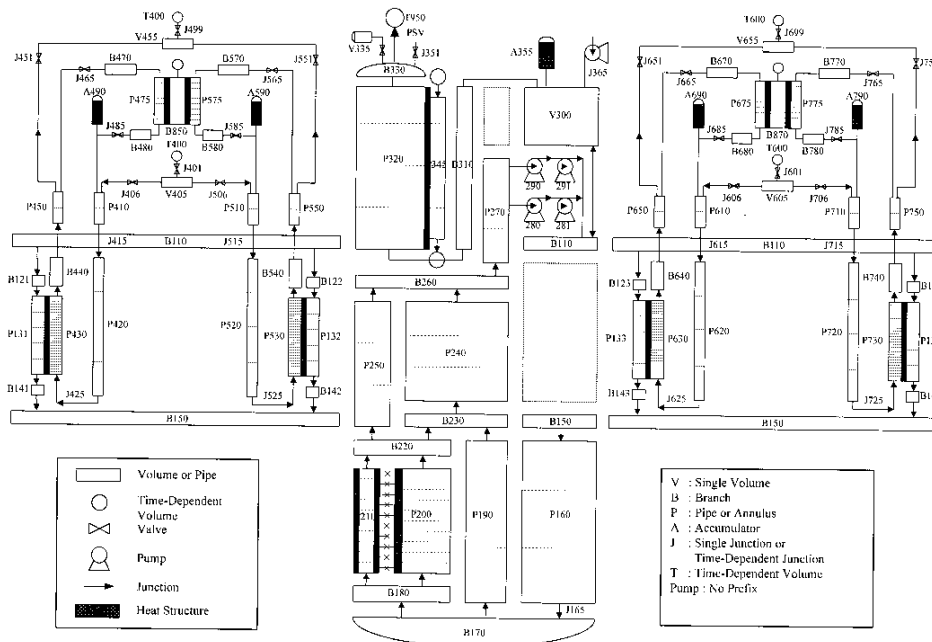


그림 1. SMART 안전해석을 위한 RELAP5/SMR nodalization

표 1. RELAP5/SMR의 초기상태 계산결과

- 그림 1. SMART 안전해석을 위한 RELAP5/SMR nodalization
- 그림 2. 파단유량
- 그림 3. 노심상부 압력
- 그림 4. 일차계통 냉각재 재고량
- 그림 5. 비상노심냉각수 유량
- 그림 6. 노심출구 유체 및 핵연료 피복재 온도
- 그림 7. ECCS 계통이 작동하지 않을 경우의 노심상부 압력
- 그림 8. ECCS 계통이 작동하지 않을 경우의 핵연료 피복재 온도
- 그림 9. 가압기에 수평건인 모델을 적용할 경우의 파단유량

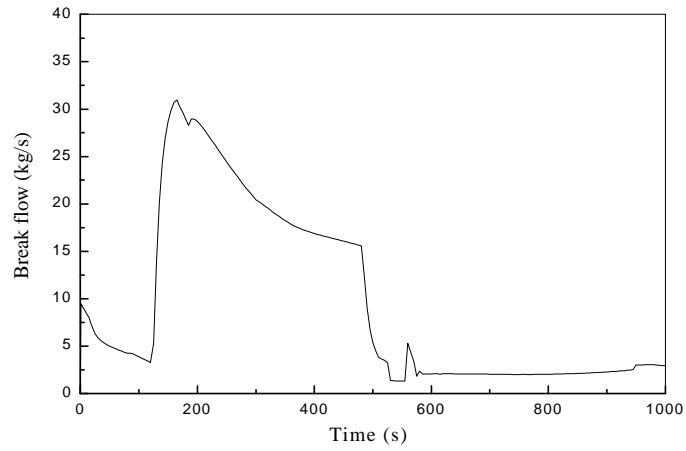


그림 2. 파단유량

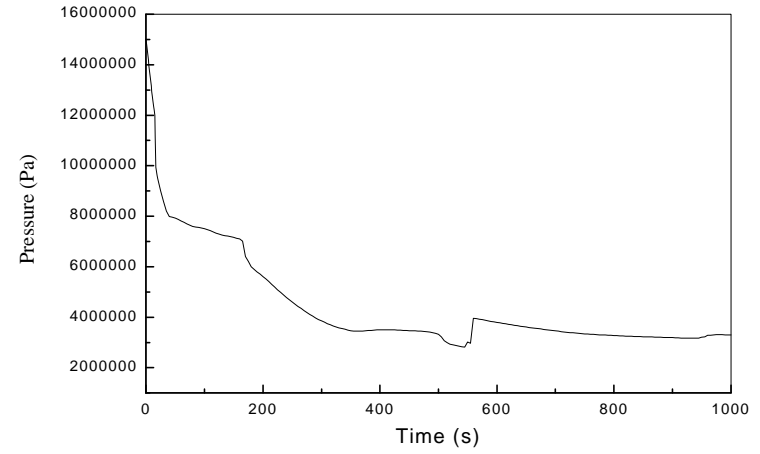


그림 3. 노심상부 압력

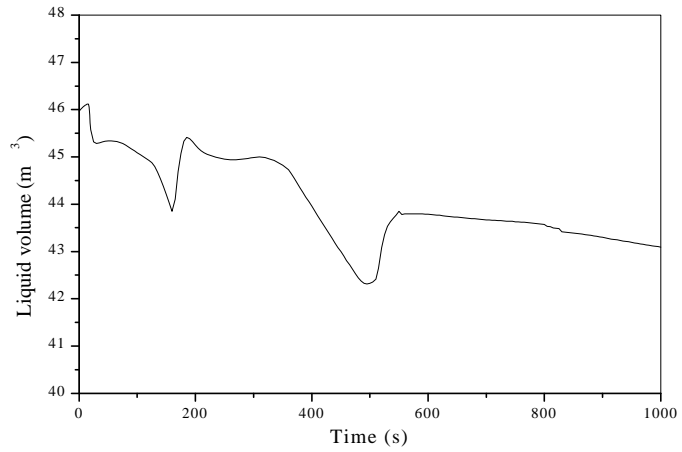


그림 4. 일차계통 냉각재 재고량

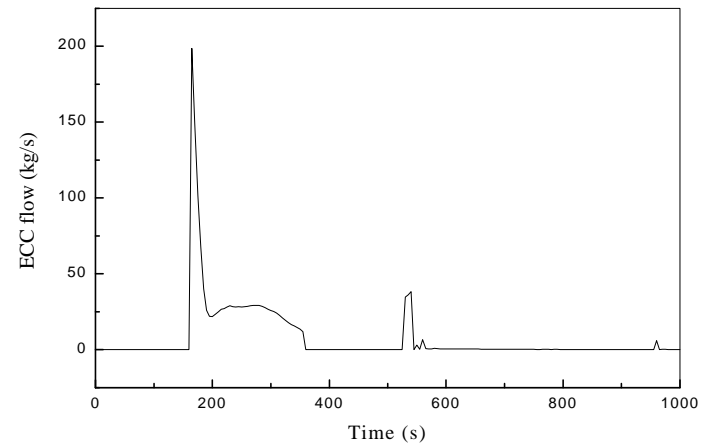


그림 5. 비상노심냉각수 유량

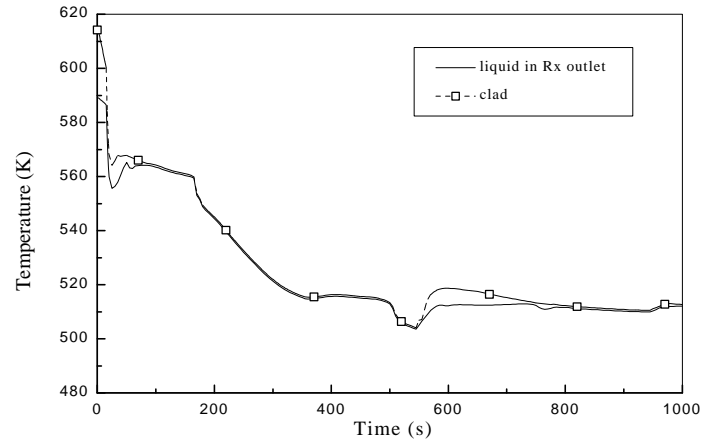


그림 6. 노심출구 유체 및 핵연료 피복재 온도

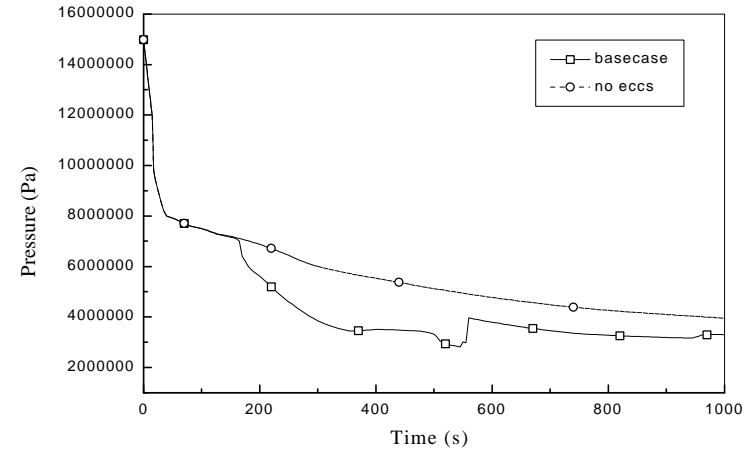


그림 7. ECCS 계통이 작동하지 않을 경우의 노심상부 압력

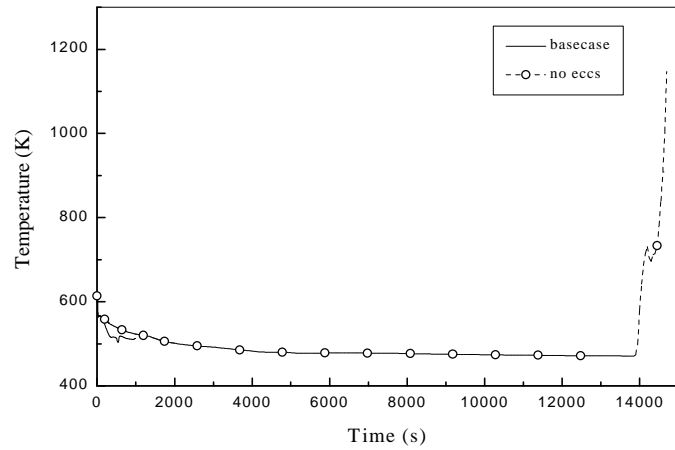


그림 8. ECCS 계통이 작동하지 않을 경우의 핵연료 피복재 온도

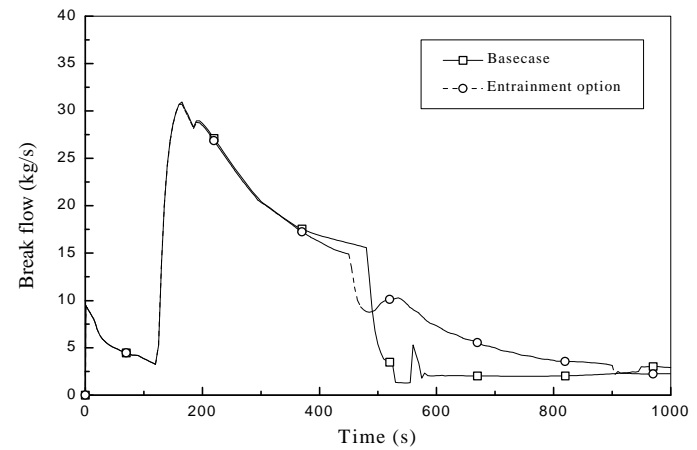


그림 9. 가압기에 수평건인 모델을 적용할 경우의 파단유량