

## 원자로 정지 및 가압기안전밸브가 SMART ATWS에 미치는 영향에 대한 연구

### Investigation of the Effect of Reactor Shutdown and Pressurizer Safety Valve on SMART ATWS

양수형, 정영종, 김희철, 김궁구  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

#### 요약

SMART 원전에서 ATWS 사건 발생시 다양성보호계통에 의한 원자로 정지 여부 및 가압기 안전밸브 개방 여부와 같은 Top Event들이 계통에 미치는 영향을 파악하기 위한 분석을 수행하였다. 분석에 사용된 코드는 TASS/SMR 코드이며, 급수유량상실사건, 단일제어봉집합체인출사건 및 제어봉집합체군인출사건과 같이 일차계통의 가압을 일으키는 사건을 대상 사건으로 선정하였다. 분석 결과에 의하면 초기사건이 급수유량상실사건인 ATWS에서는 다양성보호계통에 의한 원자로 정지가 이루어지거나, 3개의 가압기안전밸브중 2개만 작동하더라도 일차계통의 압력은 허용기준 이내에서 유지될 수 있는 것으로 나타났으며, 초기사건이 단일제어봉집합체사건인 ATWS에서는 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 개방 여부 및 반응도 인출율에 상관없이 일차계통의 압력은 허용기준 이내에서 유지될 수 있는 것으로 분석되었다. 초기사건이 제어봉집합체군인출사건인 경우에는 언급된 두 가지 사건과는 달리 허용기준의 만족 여부가 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 개방 여부 및 반응도 인출율에 영향을 상당히 받는 것으로 분석되었다.

#### Abstract

In the SMART ATWS condition, the effects of the reactor shutdown by a diverse protection system and pressurizer safety valves (PSVs) on the system have been analyzed with the TASS/SMR code. The loss of feedwater (LOFW), single control rod assembly withdrawal and control rod assembly bank withdrawal, which induce the increase in the primary system pressure, have been considered as the initiating event in the analyses. According to the analysis result related to the LOFW as the initiating event of the ATWS, the primary pressure has been maintained within the acceptance criteria if the reactor can be established or 2 of 3 PSVs can be operable. In the single control rod assembly withdrawal event, the primary pressure can be maintained within the acceptance criteria regardless of the establishment of the reactor trip, the operability of the PSVs and reactivity withdrawal rate. However, in the control rod assembly bank withdrawal event, whether the acceptance criteria is satisfied or not is considerably affected by the establishment of the reactor trip, the operability of the PSVs and reactivity withdrawal rate.

## 1. 서론

해수 담수화(40000 톤/일) 및 소규모 전력 생산(90 MWe)을 위하여 한국원자력연구소에서는 SMART 원자로를 개발하였다. SMART 원자로에서는 원자로용기 내부에 주요 일차계통 부품이 배치되어 대형냉각재상실사고의 발생 가능성이 제거되었고, 안전성 향상을 위하여 피동잔열제거계통, 비상노심냉각계통, 안전보호용기 및 원자로/격납용기 보호계통 등과 같은 안전 계통이 도입되었다. 기 수행된 안전 해석 결과에 의하면 SMART 원자로는 발생 가능한 설계기준사건시 허용기준을 만족하며, 안정된 상태로 천이되는 것으로 분석되었다[1]. 이와 더불어 특히 SMART 기본 설계안에 대해 수행된 전출력 운전중 내부 사건에 대한 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 결과에 의하면 10개의 초기사건에 대한 노심 손상 빈도는 약  $8.56 \times 10^{-7}/RY$ 로서, 표준 원전의 노심 손상 빈도에 비해 약 10 배 정도 낮게 평가되어 PSA 측면에서도 SMART는 안전성이 매우 높은 것으로 나타났다[2]. SMART 기본 설계안에 대하여 수행된 PSA는 일부 계통에 대해서는 설계를 가정하여 분석을 수행하였기 때문에 안정성을 정량적으로 정확하게 평가하기보다는 SMART 원전 설계의 안전성 수준을 평가하고 설계 취약점을 찾아 개선하는데 목적을 두고 수행되었다. SMART 원자로에 대한 PSA에서 초기 사건 발생후 원자로보호계통(Reactor Protection System; RPS)에 의한 원자로 정지가 이루어지지 않는 경우 원전손상상태(PDS: Plant Damage State)를 ATWS로 처리하고, ATWS 사건 수목에서는 원자로 정지, 가압기 안전밸브 개방 및 수동 원자로 정지 등과 같은 Top Event를 이용하여 원전손상상태를 결정하도록 구성하였다. 따라서, ATWS 사건 수목에서 원전손상상태를 명확하게 파악하기 위해서는 초기 사건 발생시 Top Event에 따른 사건 해석이 수행되어야 한다.

본 논문에서는 ATWS 관련 초기 사건 발생시 원자로 정지 및 가압기 안전 밸브의 개방과 같은 Top Event가 계통에 미치는 영향을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 해석에서 사용된 코드는 TASS/SMR 코드이며, 해석 대상 사건으로 일차계통의 가압을 일으키는 급수유량상실사건, 단일제어봉집합체인출사건 및 제어봉집합체균인출사건을 고려하였다.

## 2. 해석 방법

### 가. 사고 개요 및 원인

ATWS 사고시에는 초기 사건 발생시 계통 주요 변수가 원자로보호계통의 정지 설정치에 도달하여도 원자로 정지 신호의 오류로 인하여 원자로 비상 정지가 이루어지지 않게 된다. 원자로 정지가 이루어지지 않게 되면 일차계통과 이차계통 사이의 열평형이 이루어지지 않아 일차계통의 압력이 계속 증가하게 되며, 일차계통의 압력이 다양성보호계통(Diverse Protection System: DPS)의 가압기 고압력 정지 설정치에 도달하게 되면 자동으로 원자로 정지 신호가 발생하게 되어 원자로는 정지된다. 원자로 정지 신호에 의해 주급수관/주증기관 격리밸브는 폐쇄되고, 피동잔열제거계통 격리밸브는 개방된다. 격리밸브의 폐쇄/개방이 완전히 이루어진 이후 원자로 냉각은 피동잔열제거계통을 통한 자연 대류에 의해 이루어지

면서 계통은 안정한 상태로 전환된다.

본 해석에서는 ATWS 사고의 초기 사건으로 일차계통의 압력 증가를 일으키는 사건들 중 급수유량상실사건, 단일제어봉집합체인출사건 및 제어봉집합체군인출사건을 선정하였으며, 각 초기 사건들의 원인을 표 1에 나타내었다. 초기 사건이 급수유량상실사건시에는 사건 원인이 과도 초기에 즉각적으로 발생하는 것으로 가정하였고, 반응도 관련 사건에서는 반응도 인출율을 몇 가지로 세분해 초기 사건을 설정하여 다양한 사건 해석을 수행할 수 있도록 구성하였다. 최대 반응도 인출량은 단일제어봉집합체인출사건 및 제어봉집합체군인출사건에 대해 각각 1018 pcm 및 3758 pcm을 사용하였다. 1018 pcm은 단일제어봉집합체인출사건시 최대 반응도 인출량이며[3], 3758 pcm은 주기초, 고온 전출력 상태하에서 최적 추정 제어봉집합체군 반응도 인출량이다[4].

#### 나. 허용기준

ATWS 사고시 적용되는 일반적인 허용기준은 과도 기간중 계통의 압력이 ASME Service Level C 압력인 22.06 MPa(3200 psia)를 초과하지 않아야 한다는 것이다[5].

#### 다. 해석 방법 및 해석 모델

ATWS 관련 초기사건 발생시 SMART 원자로의 열수력학적인 거동을 분석하기 위하여 TASS/SMR 코드를 사용하였으며, 분석을 위하여 사용된 Nodalization은 그림 1에 나타내었다. ATWS 사고는 설계기준초과사고로서 최적 해석을 수행하기 때문에, 본 해석에서는 100% 주기말의 전출력 조건을 이용하였다. 사건 해석에서 고려된 초기 조건들을 표 2에 나타내었다. 단, 제어봉집합체군인출사건시 최대 반응도 인출량은 보수적인 해석을 위하여 언급된 바와 같이 주기초 조건인 3758 pcm을 이용하였는데, 주기말 최대 반응도 인출량은 2620 pcm이다.

ATWS 관련 초기사건 발생시 Top Event가 계통에 미치는 영향을 파악하기 위하여 초기사건별로 원자로 정지 여부, 가압기 안전밸브 작동성과 작동되는 밸브 수의 조합 및 여러 가지 반응도 인출율 등을 이용하여 다양한 Case를 구성하였다. DPS에 의한 원자로 정지 신호는 가압기 압력이 DPS 가압기 고압력 정지 설정치(17.7 MPa)[6]에 도달하면 발생하게 되고, 0.975초의 신호지연시간 및 0.5초의 CEDM (Control Element Drive Mechanism) 지지코 일감쇠시간 이후 정지 제어봉집합체군이 삽입되기 시작한다. 삽입되는 정지 반응도로는 5% $\Delta\rho$ 를 가정하였는데, 이는 모든 정지제어봉집합체군이 삽입되는 경우(15% $\Delta\rho$ ) 및 가장 큰 반응도가를 가지는 제어봉집합체가 고착되어 작동하지 않는 경우(10% $\Delta\rho$ )에 비하여 비교적 작은 값이다. 신호지연시간 이후 급수 및 증기계통격리밸브와 피동잔열제거계통 격리 밸브들은 10초의 Stroking Time을 가지면서 폐쇄 및 개방되고, 주냉각재펌프는 그림 2에 보이는 바와 같이 Cooldown을 시작하는 것으로 가정하였다. 그리고 가압기 안전밸브는 1.7초의 Stroking Time을 가지면서, 17.51 MPa에 개방되고, 13.85 MPa에서 닫히는 것으로 가

정하였다.

급수유량상실사건시에는 이차측 열제거 감소로 인해 일차측 냉각재 온도는 증가하고, 부(-)의 냉각재 반응도로 인해 노심 출력은 감소하게 되어 핵연료 온도는 감소하게 된다. 따라서 일차측 가압을 증가시키기 위하여 냉각재온도계수 및 핵연료온도계수로서 Least Negative 값 및 Most Negative 값을 이용하였다. 반응도 관련 사건시에는 반응도 인출로 인해 노심 출력이 증가하고, 노심 출력의 증가로 인해 냉각재 온도도 증가하게 된다. 따라서, 반응도 관련 사건시에는 보수적인 해석을 위하여 두 가지 온도 계수로서 Least Negative 값을 기본적으로 이용하였다.

### 3. 사건 분석

#### 가. 급수유량상실사건

표 3은 초기 사건이 급수유량상실사건인 ATWS 사고시 해석에서 고려된 Case들을 보여주고 있다. 기본 경우로 고려된 Case 1은 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지고, 3개의 가압기 안전밸브들이 정상적으로 작동되는 경우이다. Case 2에서는 DPS에 의한 원자로 정지는 이루어지는 반면에, 3개의 가압기 안전밸브들이 고착되어 작동되지 않는 경우이다. 이에 반하여 Case 3에서 Case 5까지는 가압기 안전밸브 전체 또는 일부가 작동되지만, 원자로 정지가 이루어지지 않는 경우이다. 마지막으로 Case 6은 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지지 않을뿐더러 모든 가압기안전밸브가 고착되어 작동되지 않는 가장 심각한 경우이다.

그림 3은 각 경우에서의 노심 출력 변화를 보여주고 있는데, 원자로 정지가 이루어지는 Case 1과 2에서 노심 출력은 과도 초기에는 핵연료온도계수 및 냉각재온도계수의 영향으로 인해 서서히 감소하다가 DPS에 의해 원자로 정지가 이루어진 이후부터 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 원자로 정지가 이루어지지 않는 Case 3, 5 및 6에서는 핵연료온도계수 및 냉각재온도계수로 인해 노심 출력은 감소하게 되나, 시간이 지남에 따라서 원자로 정지가 이루어지는 Case 1 및 2에 비해서 노심 출력은 높은 상태에서 유지되는 것으로 나타났다. Case 4의 경우에는 원자로 정지가 이루어지지 않더라도 최대 부(-)의 냉각재온도계수를 이용하기 때문에 과도 초기 노심 출력은 급격하게 감소하고, 시간이 지남에 따라서 원자로 정지가 이루어지는 Case 1 및 2와 비슷한 노심 출력 수준을 보이는 것으로 나타났다.

그림 4는 각 경우에 있어서 일차계통의 압력 변화를 보여주고 있다. 과도 초기 이차계통의 열제거 감소로 인해 일차계통의 압력은 증가하게 되는데, DPS에 의한 원자로 정지 또는 가압기안전밸브의 작동이 가능한 경우(Case 1에서 5)에는 일차계통의 압력이 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. 특히, DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지더라도 3개의 가압기안전밸브가 작동하지 않는 Case 2에서의 일차계통의 압력이 다른 Case에 비하여 높은 것으로 분석되었으나, 허용기준인 22 MPa에 비하여 낮은 것으로 나타났다. 이에 반하여 원자로

정지가 이루어지지 않고 가압기안전밸브가 작동하지 않는 Case 6에서는 약 40 초 이내에 일차계통의 압력이 22 MPa를 초과하여 허용기준을 만족할 수 없는 것으로 분석되었다.

초기사건이 급수유량상실사건인 ATWS에서는 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지거나, DPS에 의해 원자로가 정지되지 않더라도 3개의 가압기안전밸브중 2개만 작동하면 일차계통의 압력은 허용기준인 22 MPa 이내에서 유지될 수 있는 것으로 분석되었다.

#### 나. 단일제어봉집합체인출사건

초기 사건이 단일제어봉집합체인출사건인 ATWS 사고시 해석에서 고려된 Case들을 표 4에 나타내었는데, 각 경우에서는 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 작동성 여부 및 반응도 인출율의 조합이 다르다. DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지는 경우에는 5% $\Delta\rho$ 의 정지 반응도를 이용하였으며, 가압기안전밸브의 작동성 여부에서는 3개 정상 작동 또는 3개 고착으로 분류하였다. 반응도 인출율에서는 단일제어봉집합체인출사건시 최대 반응도 인출량(1018 pcm)이 2초, 10초 및 20초 이내에 인출되도록 구성하였다. Case 8에서는 가장 큰 반응도 인출율 상황에서 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지지 않을뿐더러 모든 가압기안전밸브가 고착되어 작동되지 않는 가장 심각한 경우이다.

그림 5 및 6은 ATWS 초기 사건이 단일제어봉집합체인출사건인 경우 노심 출력을 보여주고 있는데, 그림 5는 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지는 경우인데 반해 그림 6은 원자로 정지가 이루어지지 않는 경우이다. 그림 5에서 Case 1 및 3은 509 pcm/sec의 인출율로서, Case 2 및 4는 50.9 pcm/sec의 인출율로서 반응도가 인출되는 경우이다. 과도 초기 반응도 인출로 인해 노심 출력은 급격하게 증가하게 되며, 일차계통에서의 열생성과 이차계통으로의 열제거량 사이 불균형으로 인해 일차계통 압력은 증가하게 된다. 가압기 압력이 DPS 가압기 고압력 원자로 정지 설정치에 도달하게 되면 정지제어봉집합체군의 삽입으로 노심 출력은 급격하게 감소한다. 이에 반하여 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지지 않는 경우에는 노심 출력이 과도 초기에 급격하게 증가한 이후 약 111% 출력 수준에서 안정화되는 것으로 분석되었다(그림 6).

그림 7은 8가지 Case에서 일차계통의 압력 변화를 보여주고 있는데, 고려된 모든 경우에 대하여 일차계통의 압력은 허용기준인 22 MPa 이내에서 유지되는 것으로 나타났다. 특히, DPS에 의한 원자로 정지 여부에 상관없이 3개의 가압기안전밸브가 개방되는 경우인 Case 1, 2, 5, 6 및 7에서는 일차계통의 압력은 최대 18 MPa 근방인 것으로 나타났으며, 이후 일차계통의 압력은 안정된 상태에서 유지되는 것으로 분석되었다. 이에 비하여 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지더라도 가압기안전밸브가 작동되지 않는 경우에는 언급된 Case에 비하여 일차계통의 최대 압력이 다소 증가하지만, 전반적으로 허용기준인 22 MPa에 여유도를 가지는 것으로 나타났다. 일차계통의 압력이 허용기준에 대한 여유도를 가질 수 있는 원인은 SMART 일체형원자로의 핵연료온도계수 및 냉각제온도계수가 크기 때문이다 (그림 8).

초기사건이 단일제어봉집합체사건인 ATWS에서는 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 개방 여부 및 반응도 인출율에 상관없이 일차계통의 압력은 허용기준인 22 MPa 이내에서 유지될 수 있는 것으로 분석되었다.

#### 다. 제어봉집합체군인출사건

표 5는 초기 사건이 제어봉집합체군인출사건인 ATWS 사고시 해석에서 고려된 9가지 Case 들을 보여주고 있다. Case 1에서 4까지는 DPS에 의한 원자로 정지가 가능하고 3개의 가압기안전밸브가 정상 작동하는 조건하에서 반응도 인출율을 달리한 경우이며, Case 5에서 9까지는 147 pcm/sec 인출율 조건하에서 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 작동성 여부 및 냉각재 온도 계수의 조합이 다르다. DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지는 경우에는 5% $\Delta\rho$ 의 정지 반응도를 이용하였으며, 가압기안전밸브의 작동성 여부에서는 3개 정상 작동 또는 3개 고착으로 분류하였다.

그림 9 및 10은 DPS에 의한 원자로 정지가 가능하고 3개의 가압기안전밸브가 정상 작동하는 조건하에서 반응도 인출율에 따른 노심 출력 및 일차계통의 압력을 보여주고 있다. 반응도 인출율이 증가할수록 노심 출력은 더욱 빠르게 증가하며, 노심에서의 열생성량과 이차측을 통한 열제거량의 불균형으로 인해 일차계통의 가압 또한 더욱 빠른 것으로 나타났다. 반응도 인출율이 209 pcm/sec인 Case 4에서는 DPS에 의한 원자로 정지 및 가압기안전밸브가 정상 작동하더라도 허용기준인 22.0 MPa를 만족할 수 없는 것으로 분석되었으며, 이외의 Case에서는 일차계통의 압력은 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

그림 11과 12는 147 pcm/sec인 반응도 인출율 조건하에서 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 작동 여부 및 냉각재온도계수에 따른 노심 출력 및 일차계통 압력 변화를 보여주고 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 냉각재온도계수로 최대 부(-)의 값을 사용하는 Case 7과 9에서는 다른 경우에 비하여 노심 출력 증가율이 낮는데, 이는 냉각재 온도의 증가로 인해 더욱 큰 부의 냉각재 반응도가 삽입되어 노심 출력 증가를 억제하기 때문이다. 일차계통 압력 변화를 그림 12에 나타내었는데, 가압기안전밸브는 작동하지 않더라도 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지는 Case 5에서는 허용기준인 22.0 MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 허용기준에 대한 여유도는 상당히 작은 것으로 분석되었다. 그리고 최대 부의 냉각재온도계수를 사용하는 Case 7의 경우에는 노심 출력의 증가 폭이 작고, 가압기안전밸브의 작동으로 인해 일차계통의 압력은 허용기준에 비해 꽤 낮은 수준에서 유지되는 것으로 나타났다. Case 5 및 7을 제외한 다른 경우에는 일차계통의 압력이 허용기준을 초과하는 것으로 분석되었다.

초기사건이 제어봉집합체군인출사건인 경우에는 초기사건이 급수유량상실사건이나 단일제어봉집합체인출사건과는 달리 일차계통의 압력이 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 개방 여부 및 반응도 인출율 등에 상당히 영향을 받는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 TASS/SMR 코드를 이용하여 ATWS 관련 초기 사건 발생시 DPS에 의한 원자로 정지 및 가압기 안전 밸브의 개방이 계통에 미치는 영향을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 일차계통의 가압을 일으키는 급수유량상실사건, 단일제어봉집합체인출사건 및 제어봉집합체군인출사건을 ATWS 초기 사건으로 고려하여 수행된 분석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 초기사건이 급수유량상실사건인 ATWS에서는 DPS에 의한 원자로 정지가 이루어지거나, 3개의 가압기안전밸브중 2개만 작동하더라도 일차계통의 압력은 허용기준인 22 MPa 이내에서 유지될 수 있는 것으로 분석되었다.
- 초기사건이 단일제어봉집합체사건인 ATWS에서는 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기 안전밸브의 개방 여부 및 반응도 인출율에 상관없이 일차계통의 압력은 허용기준인 22 MPa 이내에서 유지될 수 있는 것으로 분석되었다.
- 초기사건이 제어봉집합체군인출사건인 경우에는 급수유량상실사건이나 단일제어봉집합체인출사건과는 달리 일차계통의 압력이 DPS에 의한 원자로 정지 여부, 가압기안전밸브의 개방 여부 및 반응도 인출율 등에 상당히 영향을 받는 것으로 분석되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

#### 참고 문헌

1. KAERI/TR-2142/2002, 일체형원자로 기본설계 보고서, 한국원자력연구소, 2002.
2. KAERI/TR-2114/2002, SMART 원전의 기본설계에 대한 PSA 측면에서 안전성 평가, 한국원자력연구소, 2002.
3. SMART-CA-01011, 단일제어봉인출사고 해석용 핵설계 자료, 한국원자력연구소, 2001.
4. SMART-CA-DD190-01, Revision 02, Basic Core Design Data for SMART, 한국원자력연구소, 2001.
5. BNFL New Reactor Study: System 80+™ Standard Design(Key Issue Paper on Reactor Shutdown; ATWT and Return to Power), ABB Combustion Engineering, 1992.
6. 양수형, 김희철, 장문희, SMART 정지불능예상과도상대해석, 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2002.

표 1. 초기 사건의 원인

사건	원인
급수유량상실사건	급수격리밸브 폐쇄(Stroking Time = 0)
단일제어봉집합체인출사건	2초, 10초 및 20초간 1018 pcm 인출 (1018 pcm은 Dead Band가 없는 조건이며, 단일제어봉집합체인출사건시 최대 반응도 인출량임)
제어봉집합체균인출사건	25.6초, 22초, 19초 및 18초간 3758 pcm/sec (3758 pcm은 주기초, 고온 전출력 상태하에서 최적 추정 반응도 인출량임)

표 2. 사건 해석의 초기 조건

계통변수	값
노심 열출력 (MWt)	330.0
증기발생기 통과 유량 (kg/sec)	1550.1
노심 통과 유량 (kg/sec)	1491.3
가압기 End Cavity 압력 (MPa)	14.98
증기발생기 일차측 입구 온도 (K)	582.8
증기발생기 일차측 출구 온도 (K)	542.8
급수 유량 (kg/sec)	152.7
이차계통 증기헤드 압력 (MPa)	3.3
증기발생기 튜브 Plugging (%)	10.0
다양성보호계통 전체지연시간 (sec)	1.475
정지제어봉집합체균 삽입 시간 (sec)	8.0



표 3. 급수유량상실사건시 고려된 Cases

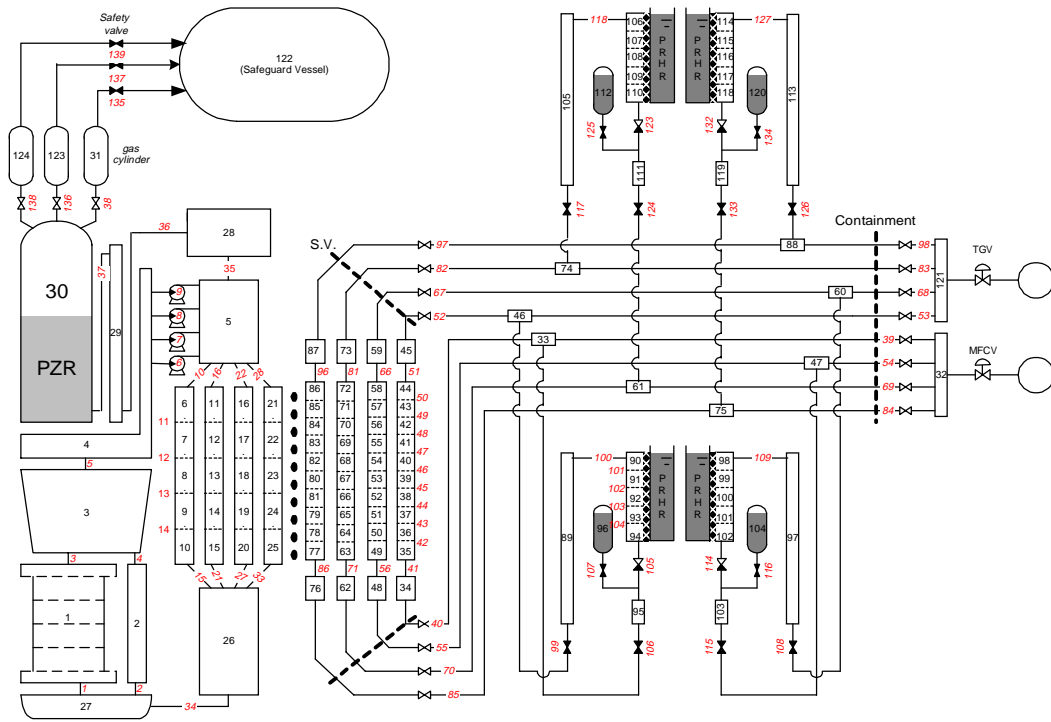
Case #	Reactor Trip	PSV	반응도	허용기준
Case 1	O	3	Most FTC & Least MDC	만족
Case 2	O	0	Most FTC & Least MDC	만족
Case 3	×	3	Most FTC & Least MDC	만족
Case 4	×	3	Most FTC & Most MDC	만족
Case 5	×	2	Most FTC & Least MDC	만족
Case 6	×	×	Most FTC & Least MDC	불만족

표 4. 단일제어봉집합체인출사건시 고려된 Cases

Case	Reactor Trip	PSV	반응도 인출율	반응도	허용기준
Case 1	O	O	1018 pcm in 2 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 2	O	O	1018 pcm in 20 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 3	O	×	1018 pcm in 2 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 4	O	×	1018 pcm in 20 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 5	×	O	1018 pcm in 2 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 6	×	O	1018 pcm in 10 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 7	×	O	1018 pcm in 20 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 8	×	×	1018 pcm in 2 sec	Least FTC & Least MDC	만족

표 5. 제어봉집합체균인출사건시 고려된 Cases

Case	Reactor Trip	PSV	반응도 인출율	반응도	허용기준
Case 1	O	O	3758 pcm in 25.6 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 2	O	O	3758 pcm in 22.0 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 3	O	O	3758 pcm in 19.0 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 4	O	O	3758 pcm in 18.0 sec	Least FTC & Least MDC	불만족
Case 5	O	×	3758 pcm in 25.6 sec	Least FTC & Least MDC	만족
Case 6	×	O	3758 pcm in 25.6 sec	Least FTC & Least MDC	불만족
Case 7	×	O	3758 pcm in 25.6 sec	Least FTC & Most MDC	만족
Case 8	×	×	3758 pcm in 25.6 sec	Least FTC & Least MDC	불만족
Case 9	×	×	3758 pcm in 25.6 sec	Least FTC & Most MDC	불만족



Nodalization of TASS/SMART for SMART

그림 1. SMART ATWS 분석을 위하여 사용된 Nodalization

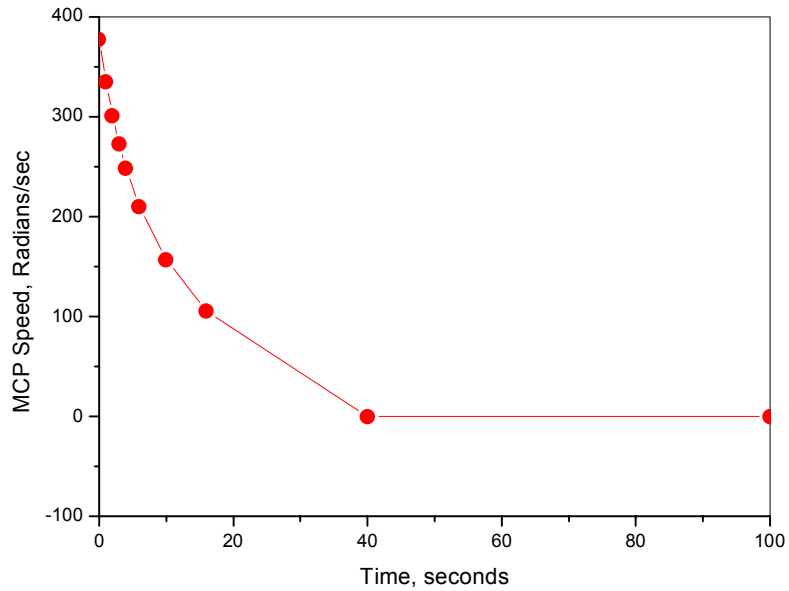


그림 2. 주냉각재펌프 Coastdown Curve

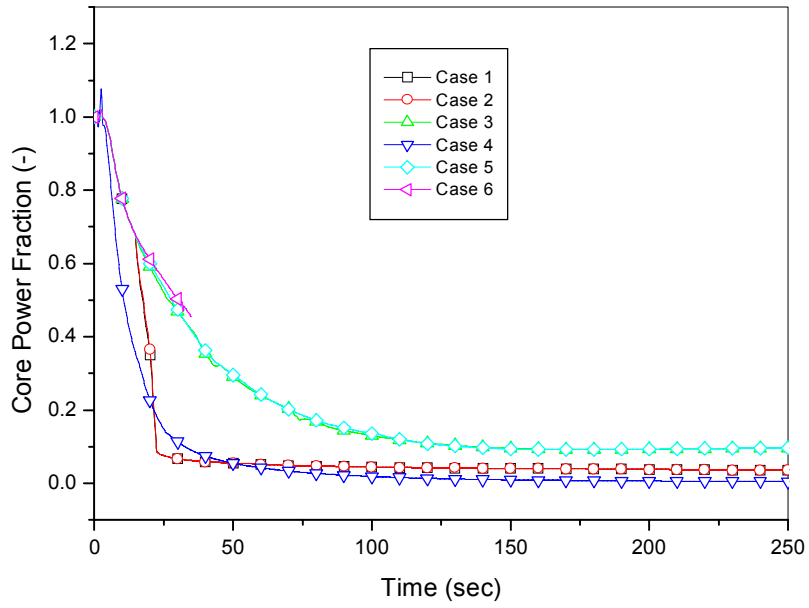


그림 3. 초기 사건이 급수유량상실사건인 경우 노심 출력의 변화

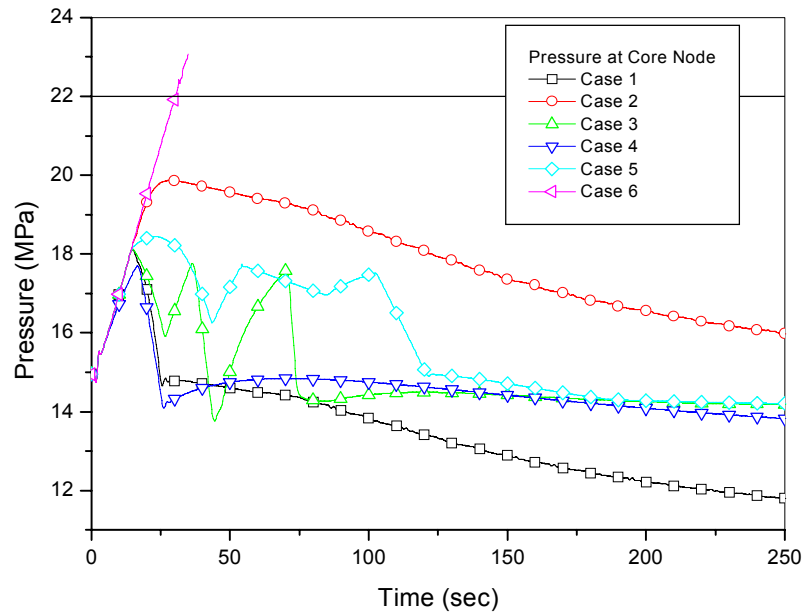


그림 4. 초기 사건이 급수유량상실사건인 경우 일차계통 압력의 변화

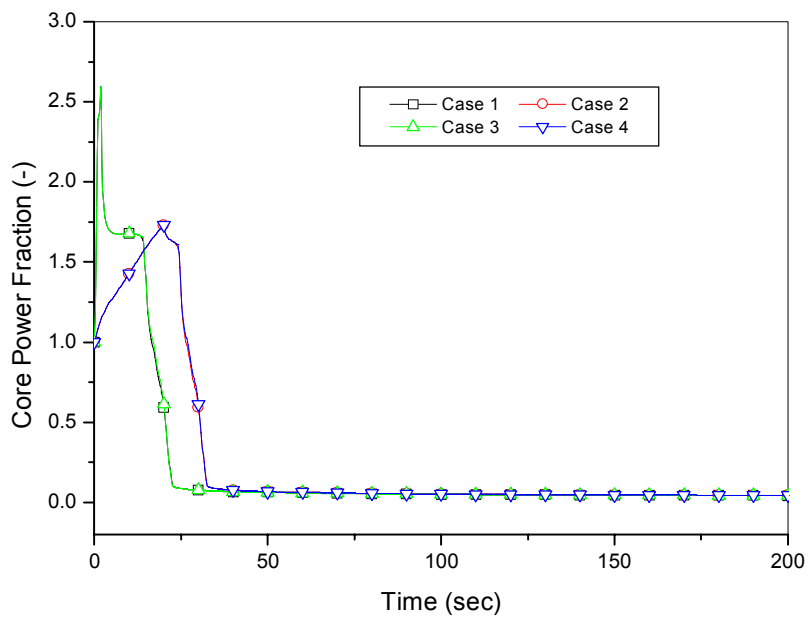


그림 5. 초기 사건이 단일제어봉집합체인출사건인 경우 노심 출력의 변화 (Case 1-4)

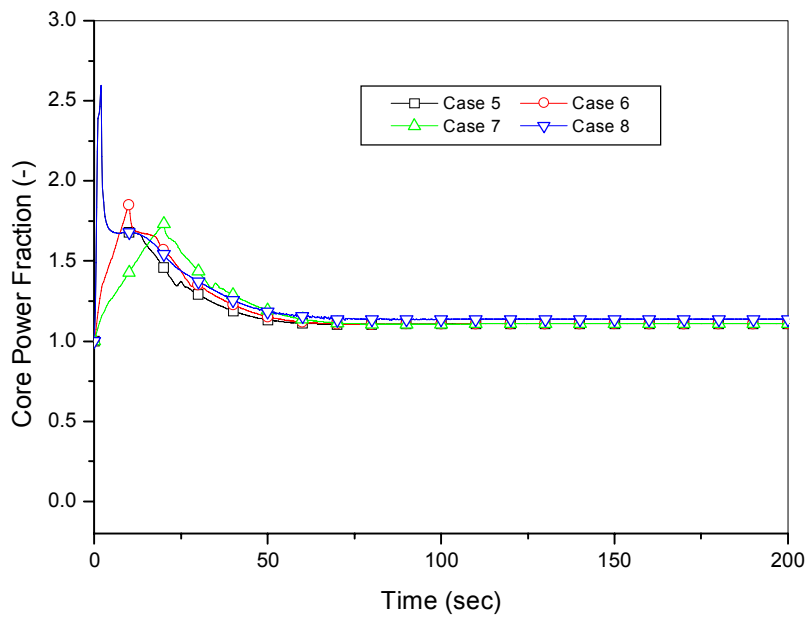


그림 6. 초기 사건이 단일제어봉집합체인출사건인 경우 노심 출력의 변화 (Case 5-8)

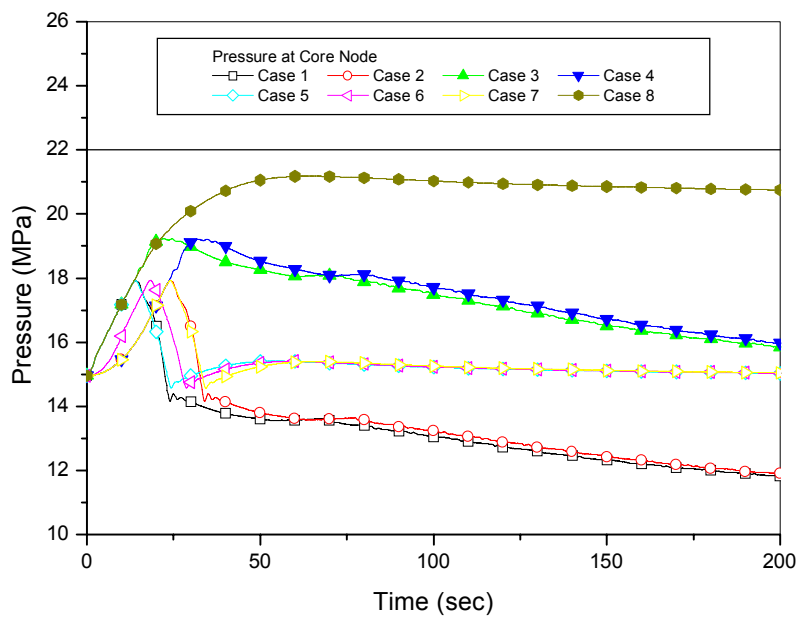


그림 7. 초기 사건이 단일제어봉집합체인출사건인 경우 일차계통 압력의 변화

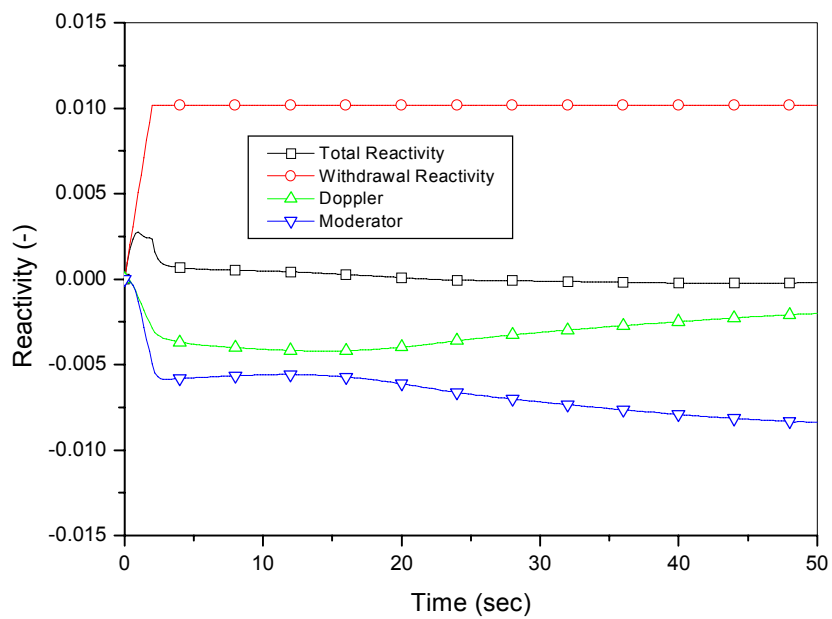


그림 8. Case 8에서 반응도의 변화

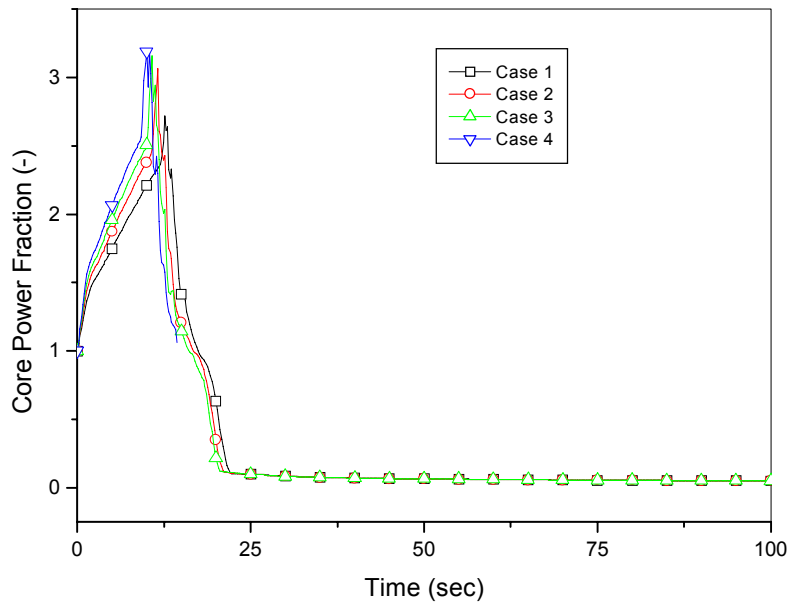


그림 9. 초기 사건이 제어봉집합체균인출사건인 경우 노심 출력의 변화 (Case 1-4)

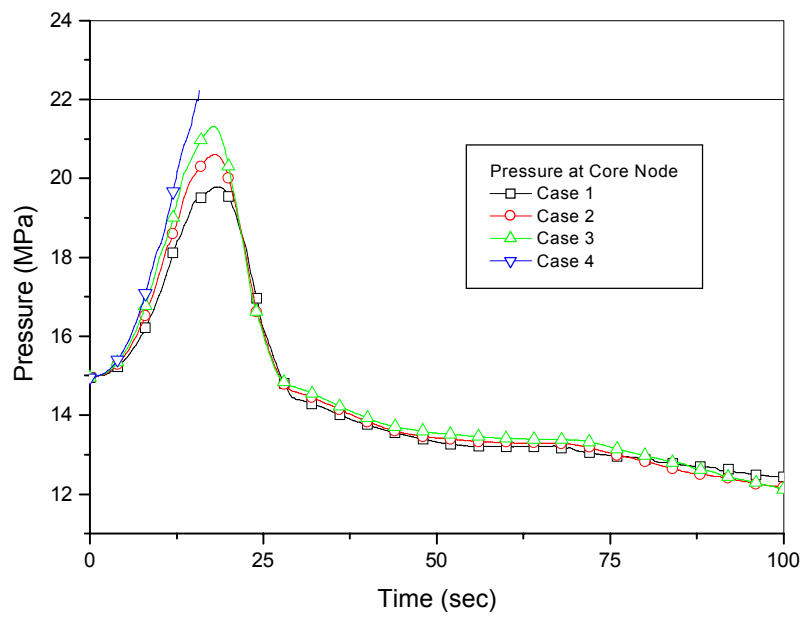


그림 10. 초기 사건이 제어봉집합체균인출사건인 경우 일차계통 압력의 변화 (Case 1-4)

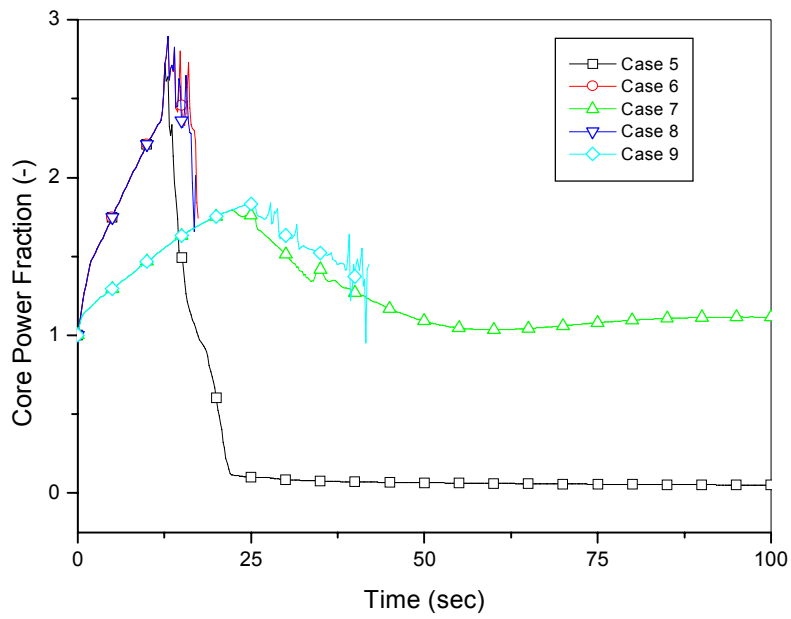


그림 11. 초기 사건이 제어봉집합체균인출사건인 경우 노심 출력의 변화 (Case 6-9)

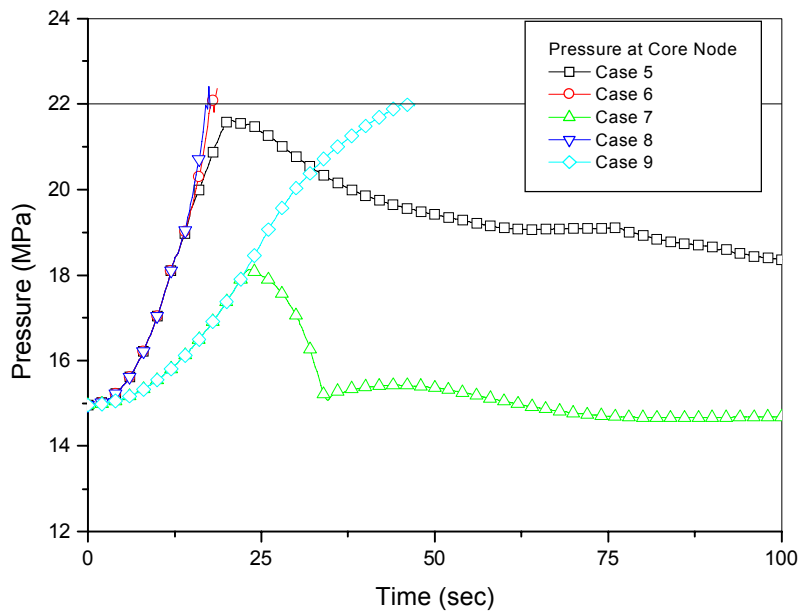


그림 12. 초기 사건이 제어봉집합체균인출사건인 경우 일차계통 압력의 변화 (Case 6-9)