

중소형 일체형원자로 SMART 안전해석

Small and Medium Integral Reactor, SMART-Safety Analysis



정영종*

* 한국원자력연구원 중소형원자로기술개발부 책임연구원

1. 서론

최근 들어 개발도상국들의 눈부신 경제 성장과 함께 지속적으로 증가하는 유가로 인하여 세계적으로 원자력에 대한 관심이 다시 집중되고 있다. 특히, 원자력을 포기하였던 서부 유럽의 많은 나라들이 다시 원자력을 채택하였거나 채택하려고 법령을 개정 중에 있으며, 세계에서 가장 많은 에너지를 소비하는 미국에서도 다시 원자력발전소의 건설을 준비하고 있다.

1980년대에 많은 국가들이 원자력 에너지 정책을 포기하게 한 결정적인 사건은 1976년에 미국에서 발생한 TMI-2 원자력발전소 사고와 1986년 러시아에서 발생한 체르노빌 원자력발전소의 사고로써 이들 사고는 원자력발전소의 안전성을 국제적인 문제로 조명시킨 사건이다. TMI-2 원자력발전소 사고는 설계기준사고로 분류된 원자로냉각계통의 과압방출밸브의 고장으로 인한 소형냉각재상실사고로 핵연료의 용융이 발생한 사고였으나 주위 환경으로 방사능 누출이 일어나지 않았으며, 인근 주민들에게 어떠한 피해도 없었다. 하지만, 체르노빌 원자력발전소의 사고는 터빈건물의 화재로 인하여 전원이 상실되면서 핵연료 압력관이 파손되면서 냉각재상실사고 일어나고 격납용기가 파손되어 다량의 방사능이 주변 환경으로 누출된 사고였다. 이들 두 발전소의 사고는 세계적으로 원자력발전의 감축을 초래하였으나 한편으로는 안전성의 중요성을 일깨워

주는 계기가 되어 원자력발전소의 안전성관련 연구가 더욱 활발하게 이루어지도록 하였다.

근래에 들어 지역적 및 사회적 특성에 따라 중소형 규모의 원자력 기술이 전기 생산 이외의 다양한 산업기술에 활용되고 있는 추세이다. 해수를 담수화하여 공업 및 생활용수를 생산하는 원자력 담수화발전소(Nuclear Desalination Plant), 심해 탐사를 위한 원자력 잠수정(Nuclear-powered Submarine), 지역난방(District Heating) 등에 원자력 기술이 활용되고 있으며, 국제원자력기구(IAEA)에서도 이러한 최근의 국제적 동향을 반영하여 원자력을 이용한 해수 담수화 설비의 실증로 건설 프로그램을 추진 중에 있다. 이와 같은 세계 추세에 발 맞추어 국내에서도 대용량의 원전개발 정책과 병행하여 중소형 규모의 다목적용 원자로 개발을 한국원자력연구원 주관 하에 열출력 330 MWt 규모의 일체형원자로(System Integrated Modular Advanced Reactor, SMART)의 개발을 수행하고 있다. SMART는 주요 기기를 원자로압력 용기안에 설치한 일체형의 가압 경수로로서 기존 담수화 설비와 연결되어 약 90MWe의 전기와 40,000m³/day의 용수(Fresh water) 생산을 목표로 하고 있다.

일반적으로 해수담수화 플랜트는 최종 생산물은 전기와 용수인데 용수는 수송상의 어려움 때문에 최종 사용자가 위치한 주민 거주지역 가까이에서 설치되어 운전될 것으로 예상된다. 이러한 활용 특성 때문에 플랜트 주변의 거주 주민

및 환경에 대한 잠재적 방사능 위협으로부터 공공의 보호를 강화할 필요가 있으며, 추가적으로 생산된 용수의 방사능 오염방지 수단이 필수적이다. 따라서, 해수담수화 플랜트의 건설 및 운영과 관련하여 일차적으로 발전소 설계의 향상된 안전성과 신뢰성이 보장되어 지역 주민의 수용성을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이를 위하여 SMART를 활용한 해수담수화 플랜트 설계기술 개발과 병행하여 설계단계에서부터 안전성 향상을 위한 연구를 통하여 플랜트의 안전에 중요한 현안들을 도출하여 해결함으로써 일체형원자로의 보다 향상된 안전성을 확보하였다.

안전성 증진과 신뢰성 제고를 일차적 설계목표로 하고 있는 SMART 원자로의 안전개념은 기존 발전용 원자로와는 달리 고유 안전특성 및 피동 안전성을 이용한 새로운 계통 및 기기들이 설계에 도입되었다. 궁극적으로 SMART 플랜트의 안전성 확보는 공공에 대한 신뢰성 증진에 크게 기여할 것이다.

2. 안전성이 향상된 SMART 계통설계와 안전계통

SMART 플랜트는 주요 기기들을 원자로용기 내부에 설치함에 따라 원자로용기를 관통하는 대형배관을 제거하여 체르노빌 원자력발전소에서 발생하였던 사고와 같은 대형 사고가 발생할 수 있는 가능성을 원천적으로 배제하는 설계를 도입하여 안전성을 향상시켰다. 또한, 캔드 모터 펌프를 원자로냉각재펌프로 채택하여 펌프밀봉장치를 제거함으로써 밀봉장치와 관련된 사고들을 제거하였으며, 나선형튜브가 외압을 받는 형태의 증기발생기를 채택함으로써 대기로 방사능누출 가능성이 많은 사고 중에 하나인 증기발생기 세관누설사고의 발생 확률을 현저히 감소시켰을 뿐 아니라 가압기의 증기체적을 상대적으로 크게 설계하여 자체적으로 사고에 대응하는 능력을 향상시켰다.

SMART 플랜트는 이와 같이 설계단계에서부터 안전성을 고려하였을 뿐 아니라 플랜트보호계통을 통하여 설계단계에서 고려된 여러 종류의 설계기준 사고들이 발생할 경우 안전관련 플랜트 인자들을 감지하여 이들 인자들이 설정치에 도달하면 플랜트 보호계통이 작동하도록 하였다. 이들 보호계통은 핵연료의 건전성을 확보하고, 고압을 유지하는 원자로압력용기의 건전성을 유지하고, 소외 방사능 누출량이 법에서 정한 허용 기준치를 초과하지 않도록 사고결과를 완화 또는 방지하는 기능을 수행한다. 플랜트의 안전성을 다중으로 확보하기 위하여 출력을 제어할 수 있는 제어봉

삽입이 되지 않는 사고의 위협으로부터 안전을 확보하기 위하여 다중 보호계통을 도입하였다. 이 계통은 플랜트 보호계통에서 발생시키는 원자로 정지신호가 고장에 의해 작동하지 않을 때 별도의 다른 방법으로 원자로 정지신호가 발생하여 제어봉이 삽입하도록 설계되어 있다.

안전성을 강화하기 위하여 SMART 플랜트는 다중 안전방벽설계 개념을 도입하여, 핵연료, 증기발생기 세관, 원자로용기, 격납건물로 이루어진 방사능 누출을 방지하기 위한 다중의 방어벽을 가지고 있다. 사고시 핵연료 손상을 방지하고 가능한 한 방사능 누출로부터 공공과 환경을 보호하도록 설계되어 있다. 대표적인 안전계통으로 피동잔열 제거계통, 비상노심냉각계통, 정지냉각계통, 원자로 과압 보호계통, 격납건물 과압보호계통 등이 있으며, 이들 안전계통은 대부분 피동적으로 작동되고, 다중성 및 독립성을 유지하도록 설계되어 신뢰성 및 안전성을 확보하고 있다. 가장 중요한 안전계통중에 하나인 피동잔열제거계통은 이차계통의 열 제거 능력이 상실될 경우 자연순환에 의해 일차측에서 발생하는 열을 제거하여 노심을 냉각시키는 보호안전 기능과 일차계통에서 이차계통으로 누출되는 방사능 물질을 격리 차단하는 격리안전 기능을 수행한다. 이 계통은 사고 발생시 운전원의 조치없이도 일정 시간 동안 노심에서 발생하는 잔열을 제거할 수 있는 능력을 가지도록 설계되어 있으며, 신뢰성을 높이기 위하여 총 4 개의 트레인 중 최소한 2 개만 사용하여도 사고 후 원자로 정지시에 발생하는 붕괴열을 제거하기에 충분하도록 설계되어 있다.

SMART 플랜트는 고유 안전성 증진과 더불어 안전계통설계에 피동개념을 도입함으로써 안전성을 향상시켰다. 피동개념은 압력과 중력 및 자연대류 등의 자연적인 현상을 이용하여 기기가 작동하므로써 운전원의 실수 또는 기기의 오작동으로 인한 사고를 가능한 한 최소화할 수 있는 운전개념이다.

3. SMART 안전해석체계 및 해석방법론

일반적으로 원자력발전소에 대한 안전해석은 주민의 건강과 안전 그리고 환경에 미치는 영향을 규정한 법령의 만족여부를 확인하기 위하여 관련 규제요건에 따라 분류된 설계기준사고에 대하여 수행한다. 그러므로 SMART 플랜트의 안전해석은 원자력 규제기관에서 인증한 안전해석 방법론에 따라 설계기준 사고들을 분류하고, 분류된 각각의 사고가 발생하더라도 안전요건을 만족함을 보여 주는 것이다. 안전해석에 사용되는 전산프로그램의 물리적 현

상 예측 능력의 정확성과 보수성은 규기관의 인증을 받아야 한다.

안전해석은 보수적인 해석방법론과 최적 해석방법론으로 구분된다. 보수적 해석방법론은 보수적인 가정, 초기조건 및 경계조건과 보수적인 안전해석코드를 사용하여 해석을 수행하기 때문에 안전해석을 위한 변수 및 모델의 불확실성을 보수적으로 처리한다. 이를 위하여 규제기관에서는 주요 물리적 모델에 대하여 보수성이 충분히 고려된 상관식들을 지정하여 이들을 사용하여 해석을 수행하거나, 새로운 상관식을 사용할 경우 적용된 모델에 대한 보수성의 입증은 필수적이다. 이에 반하여 최적 해석방법론은 사고의 초기조건 및 경계조건, 가정, 계통의 모델과 현상, 해석에 수행되는 전산코드 등을 최적조건으로 가정하여 안전해석을 수행하는 방법론이다. 이 경우 각각의 입력 및 가정, 열수력 모델에 대한 코드 예측능력의 불확실성 해석은 필수적으로 수행하여야 한다.

안전해석을 수행하기 위해서는 플랜트에서 발생 가능한 사건들을 도출하고 사건의 발생 확률에 근거하여 사고들을 분류해야 하고, 상세 해석이 필요한 초기사건 및 제한사건을 선정 후 적절한 해석 방법을 사용하여 해석을 수행한 결과가 허용기준을 만족해야 함을 보여 주어야 한다. 그림 1은 SMART의 안전해석에 적용된 보수적인 안전해석 방법론의 경우 플랜트의 운전제한영역과 안전해석의 개념도를 나타낸다. 가장 외곽 경계를 안전제한 (SL: Safety Limit)으로 설정한다. 안전제한 경계는 플랜트의 안전을 입증할 수 있는 핵연료 건전성이나 계통의 건전성을 확보할 수 있는 경계선을 나타내며, 사고시에는 안전관련 설계기준사고들의 허용기준을 만족하여야 한다. 중간에 위치한 안전계통 작동 설정치 (LSSS: Limiting Safety System

Setting)는 플랜트에 사고가 발생하여 계통이 비 정상적인 상태로 전환되면 자동적으로 작동하는 안전계통의 작동 설정치를 나타낸다. 이 설정치를 초과하게 되면 원자로는 보호계통에 의하여 정지하게 되고, 안전계통이 작동하여 플랜트는 안전한 상태를 유지할 수 있게 된다. 가장 내부의 경계는 원자로가 정상운전 상태시 운전제한범위 (LCO: Limiting Condition for Operation)를 나타내며, 이는 원자로의 정상운전 상태의 경계를 보여준다. 즉, 원자로의 정상운전은 운전제한범위 내에서 이루어져야 한다. 정상운전시에는 성능관련 설계기준사고들의 허용기준을 만족하여야 한다. 안전해석의 초기조건은 ROPM (Required Over-Power Margin)을 고려하여 운전제한범위의 경계에서 시작한다고 가정한다. 이를 위해서는 ROPM의 적용치와 안전제한이 우선 결정되어야 하는데 안전제한의 결정은 먼저 핵연료의 건전성을 위하여 결정되어야 하며, SMART에 적절한 ROPM을 결정하기 위해서는 안전해석을 통한 반복적인 계산을 수행해야 한다. 본 해석을 위하여 계통해석용으로 TASS/SMR 전산코드를 사용하고, 핵연료의 건전성은 별도의 전산코드를 사용한다. SMART의 ROPM은 18%로 선정하였으며 이 값은 안전경계로부터 운전제한범위까지 요구되는 안전 여유도를 출력으로 표현한 것이다. 그리고 원자로의 주요 상태변수인 압력, 온도, 유량, 노심 출력, Peaking factor 등을 LCO 내에서 선정하며, 변수의 선정은 보수적 관점에서 안전여유도를 가장 악화시키는 값으로 선정한다. 사고가 발생하여 안전변수가 설정된 안전제한치를 초과하게 되면 원자로 보호계통에 의하여 원자로가 정지되어 사고를 완화시켜 플랜트는 안전요건을 만족하게 되며, 이를 수치적 계산을 통하여 보여주는 것이 안전해석이다.

사고들은 안전규제지침에 따라 분류해야 하는데, 발생 가능한 잠재적 사고는 사고의 발생확률과 그 사고결과와 심각성에 따라 분류되는데 기본적으로 사고 발생빈도가 높으면 높을수록 공공에 미치는 방사학적 영향을 낮게 제한하고, 공공에게 미치는 방사학적 영향이 심각한 사고일수록 낮은 발생빈도를 유지하도록 분류한다. 이는 플랜트의 가상적인 과도 및 사고로부터 공공의 안전과 건강을 보호하고, 플랜트의 안전성을 확보하기 위한 기본 안전원칙으로서 플랜트의 잠재적인 사건을 선정하고 허용기준을 적용하는데 사용되는 일반적인 원칙이다. 이에 따라 분류된 설계기준사고의 유형은 아래와 같다.

- 이차계통에 의한 열제거 증가 사고
- 이차계통에 의한 열제거 감소 사고

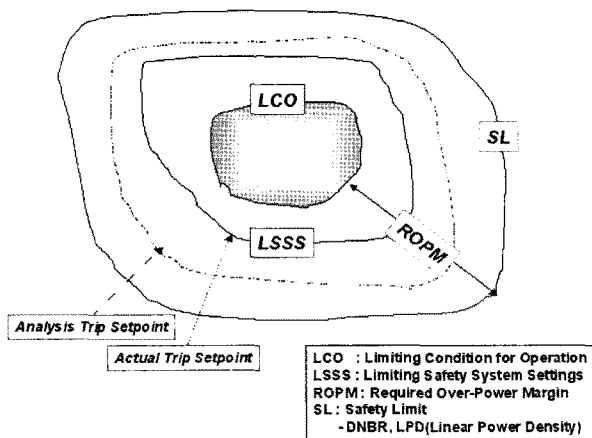


그림 1 운전제한범위 및 안전해석 개념도

- 원자로 냉각재유량 감소 사고
- 반응도 및 출력이상 변화 사고
- 원자로 냉각재 재고량 증가 사고
- 원자로 냉각재 재고량 감소 사고
- 부속계통이나 기기로부터의 방사능 유출 사고
- 정지불능 예상과도상태 (ATWS)

위에서 분류된 사고 유형에 의하여 원자로의 특성 및 설계를 고려하고 사고의 발생률 및 계통과 기기 고장 및 사고와 동시에 발생 가능한 고장 등을 고려하여 사고의 심각성에 따라 설계기준사고 및 설계기준 초과사고가 분류되었다. 분류된 사고는 각각의 안전해석을 통하여 안전규제에 정한 안전요건을 만족함을 보여주어야 한다. 현재까지 수행된 SMART 설계에서 고려한 안전요건은 다음과 같다.

- 원자로냉각재계통 및 이차계통 압력은 설계압력의 110%를 초과하지 않아야 한다.
- 핵연료 봉의 손상을 막기 위하여 핵비등이탈률이 최소 핵비등이탈률 보다 커야 한다.
- 핵연료봉 축적 에너지가 핵연료 용융값을 초과하지 않아야 한다.
- 핵연료봉 표면 온도가 1,204℃를 초과하지 않아야 한다.
- 핵연료는 냉각가능한 형태를 유지해야 한다.

”로, SMART 안전해석은 위에서 제시된 안전요건을 만족함을 보수적 안전해석 방법론에 의하여 보임으로써 SMART 플랜트의 안전성을 평가하고 안전성 확보를 확인하는 것이다.

4. 대표적 가상사고의 수치해석 결과

SMART 플랜트의 안전성을 평가하고 설계에 안전해석의 결과를 반영하여 설계개선을 하기 위한 각 사고 유형에 따른 설계기준사고에 대한 안전해석을 수행한다. 먼저 각 사고들에 대하여 보수적인 초기조건을 선정하고, 해석에 필요한 가장 보수적인 동시사건과 단일고장을 민감도 분석을 통하여 선정하여 사고해석을 수행한다. 사고해석의 결과를 통하여 각 사고에 대한 안전성을 평가함과 더불어 설계개선이 필요할 경우 개선 방안을 도출한다.

여기서는 안전해석 방법론과 안전성 평가 과정을 개략적으로 보여 주기 위하여 원자로냉각재계통의 냉각재 방출이 없는 비냉각재 상실사고 중에 하나인 냉각재유량 상실사고와 대기로 방사능 누출이 발생하는 가상적인 사고인 소형냉각재 상실사고의 해석 결과에 대하여 개략적으로 기술하고자 한다.

원자로냉각재 유량 완전 상실사고는 모든 원자로냉각재 펌프에 전원이 동시에 상실될 때 발생한다. 모든 원자로냉각재펌프에 전원을 동시에 상실시킬 수 있는 가장 확실한 원인은 완전한 소의전원상실이다. 소의 전원상실이 발생하게 되면 급수유량이 중단되고 급수유량 상실 신호로 주급수/주증기 격리밸브가 닫히고, 피동잔열제거계통의 격리밸브가 개방되어 노심에서 발생하는 잔열은 피동잔열제거계통에 의하여 제거된다. 원자로 정지신호는 원자로냉각재펌프 저속도로 발생하며 제어봉이 낙하하여 노심출력을 붕괴열 수준으로 낮추어 사고를 완화시킨다. 가장 제한적인 초기 조건을 선정하기 위하여 노심출력, 원자로냉각재계통 압력, 노심입구 유량과 증기발생기 일차측 입구온도에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 핵연료 건전성관점에서 가장 제한적인 결과를 초래하는 초기조건은 노심 고출력, 냉각재계통 저압력, 노심입구 저유량과 일차측 증기발생기 고온도이다. 이 경우를 초기조건으로 선정하여 해석을 수행한 결과로 그림 2는 사고발생으로 인한 노심에서의 냉각재 유량 감소를 보여 준다. 원자로냉각재펌프가 정지로 인하여 노심 통과 유량이 급격히 감소하고, 급수 중단에 의한 증기발생기 이차측으로 열전달 감소로 인하여 노심 내 냉각재 온도는 상승하게 된다. 이는 그림 3과 같이 핵연료의 건전성을 나타내는 핵비등이탈률의 감소를 유발한다. 핵비등이탈률은 유량감소와 냉각재 온도상승으로 감소하여 최저값에 도달한 후 원자로정지로 인한 노심출력이 붕괴열 수준으로 감소함으로써 증가하여 건전성을 확보하게 된다. 해석결과에 의하면 원자로냉각재 유량 완전 상실 사고시, 원자로냉각재계통과 이차계통의 최대 압력은 각각 설계압력의 110%이하로 계통의 건전성이 유지되었으며, 과도상태 동안 최소 핵비등이탈률이 허용기준 이상으로 유지되고, 핵연료봉의 온도는 용융온도 이하를

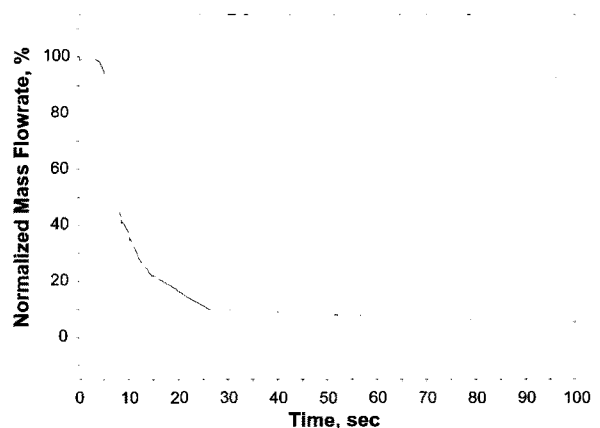


그림 2 냉각재유량상실사고의 경우 원자로냉각재계통 유량

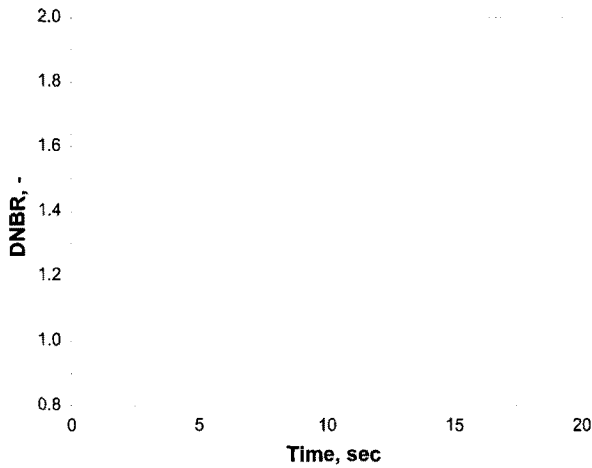


그림 3 냉각재유량상실사고의 경우 핵비등이탈률

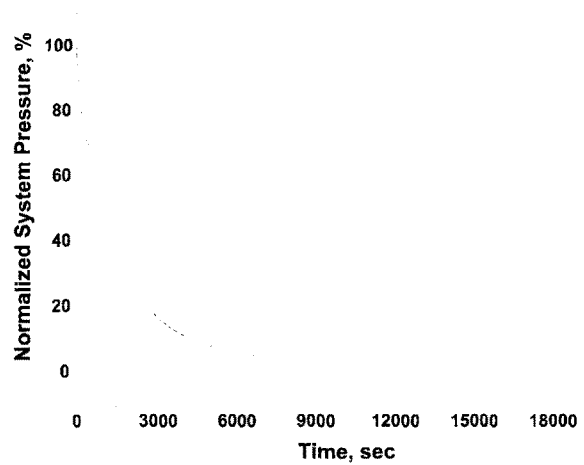


그림 4 소형냉각재상실사고의 경우 계통압력

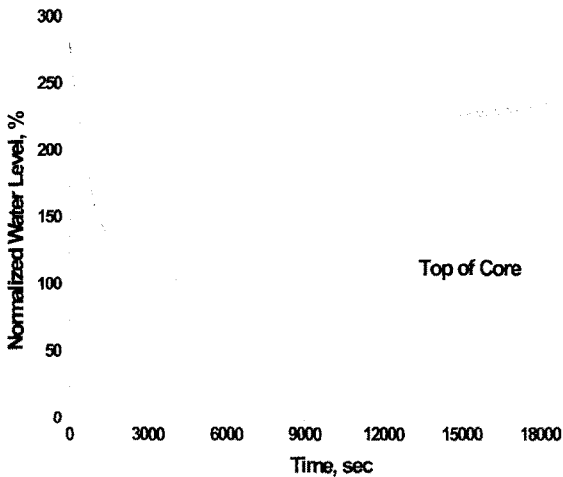


그림 5 소형냉각재상실사고의 경우 노심수위

되어 원자로냉각재계통을 충수시킨다. 이로 인하여 냉각재 방출로 인하여 감소되었던 노심 수위는 다시 회복되어 그림 5와 같이 노심 노출을 유발하지 않는다. 해석 결과에 의하면 파단 발생 후 사고 전 기간 동안 노심은 항상 물로 채워져 있으며, 피동잔열제거계통 및 저온의 안전주입수에 의해 노심에서 발생하는 잔열은 지속적으로 제거되어 노심은 냉각 가능한 형태를 유지하게 된다.

위와 같은 안전해석 방법론에 따라 SMART 플랜트의 모든 설계기준사고에 대하여 안전해석과 민감도 분석을 수행한 결과 SMART 플랜트는 발생 가능한 모든 설계기준사고에 대하여 규제기관에서 요구하는 안전요건을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

유지하여 핵연료의 건전성이 확보되었다.

소형냉각재상실사고는 일차측 냉각재의 압력경계를 이루고 있는 원자로냉각재계통의 모든 구성품 및 배관에서 가장적인 파단으로 인하여 일차측 냉각재가 격납건물로 누설되어 계통의 압력과 냉각재 재고량이 감소하는 사고이다. 보수적인 소형냉각재상실사고 해석을 위하여 냉각재유량완전상실사고와 동일한 방법으로 가장 보수적인 초기조건과 경계조건을 선정하였으며, 이를 바탕으로 사고 해석을 수행하였다. 원자로냉각재계통을 관통하는 배관의 파단이 발생하면 냉각재가 방출되면서 그림 4와 같이 계통 압력이 급속히 감소한다. 사고는 가압기 저압력에 의하여 원자로정지 신호가 발생하고 제어봉이 낙하하기 시작한다. 원자로정지와 동시에 터빈 정지 및 소외전원상실이 발생한다고 가정하기 때문에 원자로냉각재펌프와 급수펌프는 관성서행(coastdown)하게 되고, 피동잔열제거계통이 이차계통에 연결되어 노심 잔열을 제거한다. 압력이 계속 감소되면 노심을 보호하기 위하여 안전주입수가 주입

5. 맺음말

해수담수화 및 소규모 전력생산용으로 개발 중인 중소형 일체형원자로 SMART 플랜트의 안전성을 확보하기 위한 안전계통과 원자로보호계통에 대하여 기술하였다. 또한, 이를 수치해석적으로 계산하기 위한 해석방법론을 설명하고 보수적 방법론에 따라 수행된 대표적인 사고에 대한 안전해석 결과를 보여 주었다. 민감도 분석을 통한 가장 보수적인 초기조건과 경계조건 및 가정을 사용하여 모든 설계기준사고들에 대한 안전해석을 통한 안전성 평가에 의하면 국내 원자력 법령에서 요구하는 안전요건을 만족하였다. 향후 SMART의 설계가 최적화됨에 따라 보다 상세한 안전해석이 수행될 예정이며, 최적화된 계통에 대한 설계기준초과사고와 중대사고 대처설비에 대한 평가와 더불어 내부사건과 외부사건에 대한 확률론적 안전성 평가를 수행하여 SMART 플랜트의 모든 계통에 대한 안전성 진단이 평가될 예정이다. [2]