

위험도 정보이용 설계방법론 개발 및 시범적용
Development of Risk-Informed Assessment (RIA) Design Methodology

지성구, 박석정, 박범락, 김명로, 최철진

한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기존의 KNGR/System 80+와 같은 개량형 경수로의 경우에도 예상되는 건설비의 35~40% 정도의 감소가 필요한 것으로 평가되고 있다. 이와 같은 획기적인 건설비용의 감소를 위해서는 원전이 설계되고 인허가를 받기 위한 산업표준 및 규제요건의 근간에 대한 기본적인 재평가가 요구된다.

본 연구에서는 미래형 원전을 위한 위험도 정보를 이용한 규제 및 설계요건을 검토하고 이와 관련된 설계방법론을 개발하는 것이다. 이를 위해 설계단순화 기술을 개발하고 실제계통에 시범 적용하여 위험도 정보이용 설계방법론을 개발하였다. 개발된 설계방법론을 검증하기 위하여 단순화된 개념적인 비상노심냉각계통 및 급수계통 개발하여 LOCA 민감도 분석 및 급속이차냉각을 해석하고 LOCA 관련 확률론적 안전성평가 모델개발을 개발하였다. 이를 통하여, 위험도 정보이용 설계방법론의 적합성을 평가하였다.

Abstract

It has been assessed that the capital cost for future nuclear power plants needs to be reduced on the order of 35% to 40% for Advanced Light Water Reactors such as KNGR and System 80+. Such reductions in the capital cost will require a fundamental re-evaluation of the industry standards and regulatory basis under which nuclear plants are designed and licensed.

The objective of this study is to develop the risk-informed assessment (RIA) design methodology for future nuclear power plants. In order to meet this objective, the design simplification method is developed and RIA design methodology exercised for conceptual system. For the methodology verification, simplified conceptual ECCS and feedwater system are developed, then LOCA sensitivity analyses and aggressive secondary cooldown analyses for these systems are performed. In addition, the probability safety assessment (PSA) model for LOCA is developed and the validation of RIA design methodology is demonstrated.

1. 서 론

기존의 규제요건 및 산업표준들은 과거 40년 동안의 원전설계에 기반을 둔 공학적인 판단과 정성적인 위험도 평가에 기반을 둔 결정론적인 기준에 근거를 두고 있다. 이러한 수많은 기존의 규제기준 및 산업표준은 원전의 안전성 및 신뢰도에 큰 기여를 하지 못하고 불필요하게 새로운 원전의 건설비용을 상승시키고 다른 에너지원에 비해 경제적인 경쟁력을 하락시키는 주요 원인이 되어 왔다. 원전이 다른 에너지원에 비해 경쟁력을 갖추기 위해서는

기존의 KNGR/System 80+와 같은 개량형 경수로의 경우에도 예상되는 건설비의 35~40% 정도의 감소가 필요한 것으로 평가되고 있다. 이와 같은 획기적인 건설비용의 감소를 위해서는 원전이 설계되고 인허가를 받기 위한 산업표준 및 규제요건의 근원에 대한 기본적인 재평가가 요구된다.

미국에서는 DOE 주관 하에 미국내 원전이용에 대한 장기계획의 일환으로 NERI (Nuclear Energy Research Initiative) 연구를 수행 중에 있으며 미국의 Westinghouse 사는 SNL (Sandia National Laboratories), Duke Engineering & Service 사와 공동으로 건설비와 건설기간을 획기적으로 감소시키는 미래형 원전설계를 위한 혁신적인 연구과제를 제안하였다[1]. 이들 연구개발의 목적은 설계 및 인허가에 있어서 새로운 기술을 접목하고 혁신적인 접근방식으로 원전의 건설비 요구조건을 만족하는 새로운 미래형 원전을 개발하는 것이다. 이 중에 “미래형 원전을 위한 위험도 정보이용 규제 및 설계 요구사항 개발”의 목적은 전체적인 발전소의 안전성을 저해하지 않고 기존의 과도한 규제요건 및 설계요건을 개정하는 것이다.

본 연구에서는 설계단순화 기술을 개발하고 실제계통에 시범 적용하여 설계방법론을 개발하는 것으로 1) 단순화된 개념적인 비상노심냉각계통 및 급수계통 개발, 2) 개발된 계통에 대한 LOCA 민감도 분석 및 급속이차냉각 해석, 3) 확률론적 안전성평가 모델개발 및 LOCA 관련 확률론적 안전성평가, 4) 위험도 정보를 이용한 설계방법론 평가가 수행되었다.

2. 위험도 정보이용 설계방법론 개발

기존의 설계방법론은 중요한 설계변수와 계통의 설계 요구사항을 설정하는데 있어서 과거의 설계 경험에 상당히 의존하고 있다. 또한, 결정론적인 심층방어 요구사항과 설계 여유도가 묵시적으로 규제, 법령, 및 산업기준에 이미 수용되고 있다. 설계자는 계통의 배치 및 계통, 구조물 및 부품의 선택과 관련되어 어느 정도의 유연성을 가지고 있으나 설계공정의 대부분은 매우 제한된 설계 변경사항을 제외하고는 과거의 설계를 바탕으로 수행되고 있다. 설계에 대한 분석도 이미 설정되어 있는 절차에 따라 수행되는 경향이 있다. 일반적으로 이러한 기존의 설계절차에서는 설계의 중요한 근본적인 설계배경에 대한 타당성을 이해하기 위한 재평가는 수행되지 않는다.

그림 1에서는 위험도 정보이용 설계절차에 대한 개념을 도식적으로 보여주고 있다. 먼저, 출력생산의 관점과 안전관점에서 정량적으로 전체적인 원전설계의 목표가 설정된다. 목표는 정량적 보건목표로 표현되며 격납건물 조기파손빈도와 노심손상빈도와 같은 낮은 순위의 정량적 대체목표로 정량화된다. 설정한 목표를 만족하기 위해서 출력생산 기능과 안전기능을 파악하고 정의된 기능을 수행하기 위해 필요한 계통이 파악된다. 다음 단계에서는 출력생산 기능에 위협요소를 파악하고 위협요소를 방지하고 제거하는데 요구되는 계통, 구조물 및 부품을 정의하는 것이다. 그 이후에 모든 계통, 구조물 및 부품에 대한 초기의 성능 요구사항을 설정한다.

일단 계통, 구조물 및 부품에 대한 기본적인 요구사항이 설정된 후에는 성능 요구사항과 안전 및 신뢰도 목표를 만족하기 위해서 계통 설계방법을 개발하고 평가한다. 위험도 정보이용 설계과정에서는 설계자는 발전소가 가능성이 있는 위협요소에 대해 특정한 안전목표를 만족할 수 있는지를 입증해야 한다. 즉, 각 위협요소에 대하여 안전목표를 만족하기 위하여 위협요소의 특성, 심각성 및 발생빈도를 고려하여 각 위협요소에 위험도를 할당하는 것이다. 실제적인 위험도 할당은 안전목표를 고려하여 초기에는 다소 임의적으로 결정되지만 다음과 같은 일반적인 고려사항이 포함된다. 즉, 1) 발생빈도가 10^{-7} /년보다 적은 심각한 위협요소는 방지 또는 제거될 필요는 없다. 2) 단일의 위협요소에 위험도가 집중되어서는 안되며 각 위협요소는 거의 동일한 위험도에 대한 공헌도를 가지고 있어야 한다. 3) 몇 가지의 특정한 초기사건을 포괄하는 위협요소는 초기에 다소 높은 위험도 할당값을 가져야 한다. 4) 1회/년 정도의 발생빈도를 갖는 높은 발생빈도의 위협요소에 대한 초기 위험도 할당은 대응계통에

대한 높은 신뢰도를 반영해야 한다.

또한, 최종적인 안전목표를 만족하기 위한 계통설계 방법론을 개발할 때 1) 미리 설정된 이용불능도를 만족하는 대응계통을 설계하거나, 2) 발생빈도를 감소시키기 위해서 정상적으로 출력생산에 사용되는 계통을 개선하거나, 또는 3) 위험도 할당을 쉽게 제거하고 방지할 수 있는 다른 위협요소의 위험도 할당값과 교환할 수 있다. 이러한 모든 과정은 최종적인 설계목표가 만족될 때까지 반복적으로 수행된다.

위험도 정보이용 설계과정에서는 설계자는 정상 출력운전에 사용되는 계통, 독립적인 대응계통, 또는 이들을 결합하여 사용할 수 있다. 정상 출력운전에 사용된 계통이 전 범위에 걸쳐 요구되는 대응을 수행할 수 있는 충분한 물리적 능력을 만족하고 위협요소에 합리적으로 반응하는데 이용 가능하다면 대응기능으로도 사용할 수 있다. 독립적인 대응계통의 설계는 위협요소를 제거하는데 필요한 물리적인 능력과 대응계통의 이용불능도 목표를 만족하는데 필요한 계통의 신뢰도에 따라 좌우된다. 비교적 낮은 목표에 대해서는 단일계통으로도 충분히 목표를 만족할 수 있으나 좀더 높은 이용불능도 목표에 대해서는 다중성 또는 다양성을 갖는 계통설계를 고려할 필요가 있다. 위험도 정보이용 설계과정의 최종목표는 비용을 가장 효과적인 방법으로 사용하여 안전목표를 만족하는 것이다. 설계자는 이러한 설계의 유연성을 고려하여 안전목표를 만족하는 한 정의된 위협요소에 대한 대응능력을 설정할 때 다음 사항들을 고려해야 한다. 1) 가능한 한 위협요소를 제거하는데 이용 가능하고 능력이 있는 정상적인 출력생산에 이용되는 계통을 이용한다. 2) 정상적인 출력생산에 이용되는 계통이 위협요소에 대응할 수 있는 능력을 갖도록 확장한다. 3) N-Stamp 부품을 Non N-Stamp 부품으로 대체한다. 4) 능동부품을 수동부품으로 대체한다. 5) 자가감시, 자가진단의 특성을 갖는 Smart 부품과 같은 신뢰도가 높은 부품을 사용하여 다중성을 감소시킨다. 6) 다중성과 결합하여 다양한 부품을 사용한다. 7) 동일한 기능을 달성하는데 더 적은 부품을 사용한다. 8) 고도의 신뢰도가 요구되지 않을 때는 단일계통으로 구성한다. 9) 비현실적인 설계 요구사항을 제거한다.

설계자 입장에서 이용도 정보이용 설계방법의 절차를 간단히 정리하면 다음과 같다. 1) 설계자는 출력생산 기능에 필요한 새로운 개념의 설계를 수행한다. 2) 결정론적인 해석방법(예, 최적 안전해석방법)으로 허용기준을 초과할 것으로 예상되는 모든 고장모드를 파악한다. 3) PSA를 이용하여 가장 큰 영향을 주는 고장모드를 파악한다. 4) 가장 큰 영향을 주는 고장모드를 방지 또는 제거하기 위한 계통(또는 부품)을 추가해서 재분석을 수행하고 PSA를 재수행한다. 5) 계산된 노심손상빈도가 허용기준을 만족할 때까지 설계변경, 안전해석, 및 PSA 분석을 반복 수행하여 기본적인 설계를 완료한다. 사고해석에서는 모든 초기사건을 파악해서 사고를 각 그룹으로 분류한 후에 각 설계기준사고를 제거하거나 방지하거나 회피할 수 있는 안전계통을 파악해서 최적 계산방법을 이용하여 완전한 신뢰도를 갖는다고 가정하고 계통의 능력을 검증한다. PSA 분석에서는 PSA에 사용된 고장수목, 사건수목, 사용된 자료의 출처를 포함해서 상세하게 요구되는 노심손상빈도를 계산하고 할당된 노심손상빈도와 비교한다. 설계자는 허용 가능한 불확실도 정량화 방법에 따라 정량화된 모든 불확실도를 파악하고 PSA의 최종결과가 허용기준을 만족함을 입증해야 한다.

규제기관에서는 PSA의 사건수목의 정확성 및 완전성을 검토하여 설계자가 모든 가능한 사고 시나리오를 파악해서 각 시나리오에 필요한 모든 조건을 기술했음을 확인하고 파악된 각 사고 시나리오에 대해서 설계에 포함된 안전계통의 능력 및 충분성을 검토한다. 평가단계에서는 계통의 능력만을 평가하고 계통의 신뢰도 및 불확실도는 고려되지 않는다. 규제기관은 새로운 코드 및 기준에 승인된 코드를 이용하여 계산된 최적계산 결과를 검토하여 설계자가 제출한 안전능력을 확인한다. 계통(또는, 부품)의 신뢰도 또는 불확실도를 의심하는 경우에는 추가적인 안전계통을 요구하거나 안전계통의 능력을 의심하는 대신에 먼저 PSA를 검토해서 이러한 신뢰도 및 불확실도가 정확히 PSA에서 정량화되어 있음을 확인하다. 즉, 안전계통의 능력은 계통이 완전히 신뢰할 만하고 불확실도가 없다는 가정 하에서 최적계산 결과를 바탕으로 평가되어야 하고 계통의 능력과는 별도로 신뢰도 및 불확실도는

PSA에서 취급하여 평가되어야 한다.

또한, 규제기관에서는 PSA가 정확히 결정론적인 해석결과를 반영했음을 확인해야 하고 설계자가 제공한 계통의 능력을 검토하여 사건수목, 고장수목을 포함하여 PSA 논리가 정확한지를 확인한다. 이러한 과정을 통하여 규제기관에서는 불확실도를 언급하기 위해서 설계자에게 사고해석에 보수적인 가정을 요구하거나 추가적인 계통을 요구하는 대신에 사고발생 빈도, 노심손상빈도 또는 예상치의 범위와 같은 확률과 관련된 값의 증가를 요구할 수 있다.

2. 위험도 정보이용 설계방법론 시범적용

개발된 설계방법론의 유용성을 검증하기 위하여 KNGR/System 80+을 기초로 하여 1) 단순화된 개념적인 계통을 개발하고, 2) 개발된 계통을 바탕으로 LOCA와 관련된 열수력 분석을 수행하고, 3) 개발된 계통 및 열수력 결과를 이용하여 PSA 모델을 개발하며, 4) 개발된 새로운 계통이 노심손상빈도 변경에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저, 개선된 개념적인 비상노심냉각계통 및 급수계통이 개발하였으며 위험도 정보이용 설계방법의 유용성을 검증하고 문제점을 파악하기 위해 새로이 개발된 계통에 시범 적용하였다.

가. 단순화된 개념적인 설계개발

KNGR/System 80+에 대한 위험도에 미치는 중요도 분석 결과에 따르면 안전주입계통과 비상급수계통이 발전소 전체 노심손상빈도에 미치는 기여도가 가장 큰 계통인 것으로 파악되었다. LOCA 사고에 대해서는 안전주입계통의 기여도가 가장 중요하고, 일반 과도사건들에서는 비상급수계통의 위험도 기여도가 가장 중요한 것으로 파악되었다. 여기에서는 위험도 정보이용 설계방법론 개발을 위한 시범계통으로 선택된 단순화된 개념적 비상노심냉각계통과 급수계통의 특징을 설명하였다. KNGR/System 80+와의 주요 차이점에 대한 요약은 표 1에 주어져 있다.

단순화된 비상노심냉각계통의 기본적인 기능은 “원자로냉각재 수위제어 기능”을 수행하는 것으로 정상 운전시 충전기능을 수행하며, 사고시 안전주입 기능을 수행하도록 설계되었다. 이러한 설계개발은 정상적인 충전운전 조건에서부터 LOCA에 의해 유발된 원자로 정지 조건까지 광범위한 운전영역에 걸쳐서 원자로냉각재 수위를 유지할 것을 요구하는 개념에 부합된다. 단순화된 개념적인 비상노심냉각계통은 기존의 화학 및 체적제어계통 및 안전주입계통을 결합하여 통합하고 계통을 단순화한 것으로서 그림 2에서는 개발된 계통도를 보여주고 있다. 단순화된 개념적인 비상노심냉각계통은 2대의 안전주입탱크 및 2개의 충전펌프 계열로 구성되어 있다. 각 계열은 1대의 고용량의 안전주입이 가능한 다중구동(Multi-Drive) 펌프가 설치되어 있다. 또한, 각 계열의 안전주입배관은 격납건물 내부에서 4개의 다중 주입배관으로 분기된 후에 각 분기 배관의 유량을 25%로 제한하는 유량제한기 역할을 수행하는 정상시 개방되어 있는 모터구동밸브 및 체크밸브를 거쳐 다시 4개의 공통 주입 배관으로 합쳐진 후 직접용기주입 배관으로 연결된다. 안전주입탱크의 주입배관은 4개의 공통배관 중에 2개로 연결되어 있다. 이때, 직접용기주입 배관들은 안전주입탱크와 연결된 배관은 직경 10 인치의 배관으로 설계되며 안전주입탱크와 연결되지 않는 배관들은 4 인치 배관으로 설계되었다.

계열당 1대씩 설치된 충전펌프들은 정상적인 운전압력에서 약 150 gpm의 정상유량을 공급할 능력을 가지고 있다. 즉, 1대의 펌프만으로도 정상운전 동안의 원자로냉각재 수위 제어를 위한 보충수 공급 요구사항을 만족하도록 설계되었다. 충전펌프는 정상 운전시 1대만 운전되고 나머지 1대는 대기상태로 유지된다. 사고조건에서 각 충전펌프는 안전주입펌프의 기능으로 약 1500 gpm의 Run-out 유량을 공급할 수 있으며 한 개의 계열 또는 양 계열 모두를 활용하여 노심으로 봉산수를 공급한다.

개선된 개념적 급수계통의 기본적인 기능은 발전소 정상운전, 기동 및 정지운전, 사고시

증기발생기로 급수를 공급하여 원자로냉각재로부터 전달된 열을 제거하는 것이다. 이러한 기능을 수행하기 위하여 개선된 급수계통은 주급수계통, 기동급수계통 및 비상급수계통의 3개의 부계통으로 구성되어 있다. 발전소 정상출력 운전시에 주급수계통은 증기발생기로 급수를 공급하고 발전소 기동 시에는 기동급수펌프를 이용하여 급수를 공급한다. 또한, 발전소 정지 시에 출력이 5% 이하로 감소하게 되면 기동급수계통을 이용하여 증기발생기로 급수를 공급하게 된다. 기동급수계통은 정상출력 운전시 대기상태로 있으며 운전원에 의한 수동 기동으로 운전이 시작된다. 비상급수계통은 발전소 정전사고 등을 포함하는 모든 사고시에 원자로냉각재로부터 증기발생기로 전달되는 열을 제거하기 위하여 증기발생기에 급수를 공급하는 독립된 안전관련 계통이다.

그림 3은 개선된 개념적인 급수계통을 보여주고 있다. 주급수계통에 대해서는 새로운 Smart 기기로 설정한 주급수펌프를 사용함으로써 주급수승압펌프를 제거하는 새로운 설계 개념을 도입하였고 주급수펌프는 모두 모터구동으로 전환하였다. 또한, 자체 냉각회로를 갖추고 있으며 5% 정도의 출력 수준에서도 지속적인 운전이 가능한 것으로 설정하였다. 따라서, 사고 조건에서도 펌프 및 밸브들에 대한 전원과 급수원이 확보된다면 지속적인 급수공급이 가능하다. 새로운 계통에서는 사고시 주급수계통의 지속적인 급수운전이 가능한 충분한 급수원을 확보하기 위하여 복수저장탱크로부터 주급수펌프로 급수를 공급하는 연결배관을 새로이 추가하였다. 또한, 계통설계의 단순화를 위하여 4개의 주급수 격리밸브와 2개의 체크밸브를 계통 구성에서 제거하였다.

기동급수펌프는 소외전원상실사고의 경우에도 이용이 가능하고 비상급수계통의 모터구동 펌프와 터빈구동펌프와의 다양성을 확보하기 위하여 디젤구동펌프로 설계하였다. 새로운 계통에서는 기동급수계통은 운전원에 의한 수동 기동으로만 이용 가능하도록 설계되었다. 비상급수계통은 100% 용량의 터빈구동펌프 계열과 100% 용량의 모터구동펌프 계열의 2개의 계열로 구성함으로써 계통을 단순화하였다. 각 계열은 100% 용량의 1대의 펌프, 공통으로 이용하는 비상급수저장탱크 및 관련배관, 밸브, 제어기기 등으로 구성되어 있으며 양 계열은 하나의 비상급수저장탱크에 연결되어 급수를 공급받는다. 또한, 신뢰도의 향상을 위하여 양 계열을 연결하는 교차 연결배관을 설치하였다. 운전원은 급수유량 조절밸브, 격리밸브 및 교차 연결배관 상의 수동밸브 등을 이용하여 비상급수계통의 배열을 조정할 수 있다. 새로운 계통에서 고려한 비상급수계통의 터빈구동펌프는 양쪽 증기발생기로부터 증기를 공급받을 수 있도록 설계하였다.

주급수계통과 기동급수계통 설계에 사고완화 기능을 부가하여 사고시에 3개의 부계통 모두가 사고완화에 사용될 수 있도록 설계되었다. 사고 후에 주급수계통이 전출력의 5% 용량의 급수유량을 계속적으로 공급하여 증기발생기 수위제어가 적절하게 수행된다면 비상급수계통 또는 기동급수계통의 운전은 요구되지 않는다. 만약, 주급수계통이 소외전원상실사고 또는 주증기관 파단사고의 영향으로 급수의 공급이 불가능하게 되면 비상급수계통이 자동으로 기동하여 증기발생기로 급수를 공급하게 된다. 또한, 비상급수계통은 LOCA 사고시 장기적인 관점에서 증기발생기 세관의 노출을 방지하기 위하여 운전원에 의해 수동으로 기동이 가능하다. 기동급수계통은 사고 발생후 주급수계통 및 비상급수계통이 이용 불가능한 경우에 운전원에 의해 수동으로 기동하는 것이 가능하다.

나. 열수력학적 해석

열수력학적 분석은 KNGR/System 80+의 입력자료를 기초로 하여 RELAP5/MOD3 코드 [2]를 이용하여 최적 계산으로 수행되었다. 이러한 분석결과는 PSA의 성공기준을 결정하고 판단하는데 사용되며 궁극적으로 LOCA에 의한 노심손상빈도를 계산하는데 사용된다. RELAP5/MOD3의 Nodalization은 LOCA의 전 범위에 적용될 수 있을 만큼 상세한 모델을 포함해야 한다. 기존에 Idaho National Lab.에서 개발된 System 80+의 RELAP5/MOD3 기본 Nodalization[3]에서 개선된 개념적인 계통을 반영하여 변경되었으며 상세한 Nodalization

은 그림 4에 나타나 있다. 기본적으로 위험도 정보이용 설계방법론에서는 최적계산으로 수행된다. 따라서, 붕괴열 발생률은 추가적인 불확실도 없이 1973 ANS 모델을 사용하였으며, 정상적인 노심 압력, 유량 및 온도가 초기조건으로 사용되었고, 정상적인 증기발생기 압력 및 온도를 가정하였다. 또한, 정상적인 안전주입탱크의 온도, 압력 및 수위를 가정했으며 안전주입신호는 가압기 저압력의 정상 값 (1825 psia)에 도달할 때 발생하는 것으로 가정하였다.

(1) LOCA 열수력 분석

먼저, 단일고장기준을 적용하지 않는다고 가정하고 대형 LOCA에 대해서 단순화된 개념적인 안전주입계통의 기본적인 능력을 평가하기 위해서 RCP 토출관 및 고온관에서의 양단 순시파단에 대한 분석을 수행하였다. 즉, 대형 LOCA에 대해서는 기본적으로 다음과 같이 4가지 경우가 분석되었다. 1) 2대의 고압안전주입펌프와 2대의 안전주입탱크를 가진 RCP 토출관의 양단순시파단, 2) 2대의 고압안전주입펌프와 2대의 안전주입탱크를 가진 고온관의 양단순시파단, 3) 2대의 고압안전주입펌프와 1대의 안전주입탱크를 가진 RCP 토출관의 양단순시파단 및 4) 2대의 고압안전주입펌프와 1대의 안전주입탱크를 가진 고온관의 양단순시파단. 분석결과는 표 2에 나타나 있으며 위에서 언급된 모든 경우에 대하여 침투피복관온도 제한치인 2200°F을 초과하지 않은 것으로 나타났다. 비록 단순화된 개념적인 안전주입계통의 총 용량이 KSNP/System 80+보다 적지만 최적계산 결과는 2대의 고압안전주입펌프와 1대의 안전주입탱크 만으로도 노심의 침투피복관온도는 안전 제한치를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 1대의 고압안전주입펌프와 1대의 안전주입탱크를 가진 RCP 토출관의 양단순시파단을 분석한 결과 2200°F을 초과하고, 붕괴열 발생률에 20%의 불확실도를 추가하여 2대의 고압안전주입펌프와 2대의 안전주입탱크를 가진 RCP 토출관의 양단순시파단을 분석한 결과도 안전 제한치를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서, 대형 LOCA 분석을 통하여 단일고장기준을 적용하거나 최적입력을 이용한 최적계산을 수행하지 않는 경우에 개념적인 안전주입계통은 안전 제한치를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나, PSA에서는 이러한 결과에 근거하여 사건수목 및 고장수목을 설정하고 노심손상빈도를 계산하여 대형 LOCA에 할당된 노심손상빈도와 비교하여 허용기준을 만족하는지를 평가한다. 대형 LOCA는 발생빈도가 매우 적고 대형 LOCA에 의한 노심손상빈도는 전체 노심손상빈도에서 차지하는 비율이 적기 때문에 대형 LOCA를 설계기준사고에서 배제할 예정이다.

단일고장기준을 적용하여 계통의 기본적인 설계기준 능력을 확인하기 위하여 10 인치 (0.55 ft²) 고온관 및 토출관 파단에 대한 중형 LOCA 분석을 수행하였다. 이 분석에서는 4개의 직접용기주입 관을 가진 1대의 고압안전주입펌프를 가정하고 안전주입탱크에서는 주입되지 않는 것으로 가정하였다. 또한, 추가적으로 다음과 같은 가정을 사용하여 8.5 인치 직접용기주입관 파단 분석이 수행되었다. (1) 3개의 건전한 직접용기주입 관으로 고압안전주입 (경우 1 : 고압안전주입펌프 용량의 3/4 주입, 경우 2 : 고압안전주입펌프 용량의 2/3 주입), (2) 파단된 관으로는 안전주입 불가능 (즉, 주입유량 완전손실), (3) 안전주입탱크에 의한 주입은 없음, (4) 이차측 열제거는 없음. 분석결과는 표 3에 나타나 있으며 고온관 및 토출관 파단의 경우에는 충분한 여유를 가지고 피복관 온도에 대한 안전 제한치를 초과하지 않음을 보여주고 있다. 직접용기주입관 파단의 경우에 3/4 (75%) 고압안전주입 용량을 가정했을 때 노심 노출이 발생했으나 2200°F를 초과하지는 않았다. 또한, 2/3 (66%) 고압안전주입 용량의 경우에는 온도에 대한 안전 제한치를 초과하는 것으로 나타났다.

소형 LOCA와 중형 LOCA의 경계를 설정하기 위하여 고온관 및 토출관에서 0.03 ft²의 소형 LOCA 분석이 수행되었다. 즉, 0.03 ft²의 소형파단은 노심 노출없이 노심의 잠열 및 붕괴열을 제거할 수 있음을 보여줌으로써 0.03 ft² 이하의 소형 LOCA는 노심 노출이 발생하지 않으며 그 이상 크기의 LOCA는 압력강하로 인하여 안전주입탱크의 보충수가 주입되어 중형 LOCA로 분류할 수 있다. 소형 LOCA 분석은 2시간 동안 이차측의 열제거 없이 1

대의 안전주입펌프로 보충수가 주입되는 경우 노심 노출이 발생하지 않음을 검증하는 것이다. 분석결과는 표 5에 나타나 있으며 고온관 및 토출관 파단의 모두 2시간 동안 충분한 여유를 가지고 노심 노출이 발생하지 않음을 보여주고 있다.

(2) 급속감압냉각 해석

소형 LOCA가 발생하고 고압안전주입이 실패하는 경우에 만일 노심손상이 발생하기 전에 일차측 압력이 정지냉각펌프의 정지수두 이하로 감압될 수 있다면 노심의 재고량 제어를 위해 정지냉각계통 (또는, 저압안전주입계통)이 사용될 수 있다. 이차측 열 제거계통 이용하여 급속하게 일차계통을 냉각시켜 일차계통의 압력을 급속히 감압시키거나 안전감압계통을 이용하여 급속히 일차계통을 감압할 수 있다.

이 분석에서는 단순화된 개념적인 계통에 대하여 이차계통 또는 안전감압계통을 이용하여 급속냉각 또는 급속감압 능력을 확인하였다. 각 사고 분석에서 0.03 ft²의 소형 LOCA가 발생하고 고압안전주입펌프가 작동되지 않는다고 가정하였다. 이차계통을 이용한 급속냉각은 사고발생 15분 후에 운전원이 각 증기발생기당 2대의 대기방출밸브 중에 1개를 개방하고 증기발생기 각각에 1대씩의 비상급수펌프를 작동시켜 비상급수를 공급한다. 이와 같이 이차계통을 이용하여 노심을 100°F/시간 (또는, 75°F/시간)으로 냉각시켜 압력이 감소되고 압력이 615.7 psia에 도달하면 2대 (또는, 1대)의 안전주입탱크에서 안전주입이 시작된다. 운전원은 정지냉각펌프를 수동으로 재장전수저장탱크로 연결하여 압력이 260 psi로 감소되면 안전주입이 시작되고 원자로냉각재 재고량제어를 수행한다. 안전감압계통을 이용한 급속감압은 사고 발생 15분 후에 운전원이 안전감압밸브 2개 (또는, 1개)를 개방하여 일차측 압력을 급속하게 감압하여 압력이 615.7 psia에 도달하면 2대 (또는, 1대)의 안전주입탱크에서 안전주입이 시작된다. 운전원은 정지냉각펌프를 수동으로 재장전수저장탱크로 연결하여 압력이 260 psi로 감소되면 안전주입이 시작되어 원자로냉각재 재고량 제어를 수행한다.

분석결과는 표 5와 표 6에 나타나 있다. 이차계통에 의한 급속감압은 100°F/시간의 냉각률과 1대 이상의 안전주입탱크를 이용하는 경우에 노심의 온도가 허용기준인 2200°F을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 안전주입탱크를 가정하지 않거나 75°F/시간의 냉각률로 감압하는 경우에는 온도 제한치를 초과하여 노심손상이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 안전감압계통에 의한 급속감압은 주입되는 안전주입탱크의 수에 관계없이 1개의 감압밸브 개방으로도 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

다. 확률론적 안전성 평가

확률론적 안전성평가는 위험도 정보를 기반으로 설계를 개발하고 개발된 설계를 바탕으로 신뢰도 평가와 전체 발전소의 안전성평가를 수행하는 것이다. 위험도 정보이용 설계는 열수력 분석을 통한 성공기준의 분석을 바탕으로 하고 있다. 발전소 안전성평가는 일반적인 PSA의 수행방법을 이용하여 수행하지만 위험도 정보이용 설계방법론에서는 미리 노심손상 빈도의 목표를 설정하고 각 초기사건별로 할당된 노심손상빈도를 만족시키는 방향으로 수행되었다. 이를 위해 시범적용 계통에 대한 고장수목 작성과 이용불능도 평가를 수행하였으며 발전소 전체의 안전성평가를 위한 사건수목 작성, 초기사건빈도 개정 및 사고경위 정량화 등을 수행하였다. PSA 수행은 CAFTA 코드를 이용하여 수행되었으며 기본 정량화 모델은 System 80+의 정량화 모델을 사용하였다. PSA 분석은 내부사건에 대해서만 수행하였고 수행 방법은 PSA 수행 기본방법론인 PSA 절차지침서의 절차 및 방법[4,5]에 따라 수행되었다.

사건수목은 System 80+ PSA에서 사용한 사건수목에 기초하였으며 시범적용 계통의 열수력 분석을 통해 일부 사건수목의 성공기준을 재설정하였다. 열수력 분석결과를 바탕으로 설정한 초기사건별 성공기준은 표 7에 요약 정리하여 나타내었다. 대형 냉각재상실사고에서

는 비상노심냉각계통의 2대의 펌프 모두가 운전되어야 하며 4개의 DVI 중 3개 이상의 주입 유로가 개방되어야 하고 안전주입탱크는 2대 중에 최소한 1대 이상이 주입되어야 한다. 중형 냉각재상실사고에서는 비상노심냉각계통의 2대 중에 1대의 펌프가 운전되어 DVI로 냉각재를 보충한다면 노심 손상을 방지할 수 있다. 중형 냉각재상실사고에서 8.5인치 직경의 DVI 파단의 경우에는 비상노심냉각계통의 2대 중에 1대의 펌프가 4개의 DVI 유로중 3개의 유로로 공급될 경우 노심 손상을 방지할 수 있는 것으로 파악되었다. 소형 LOCA에서 일차측 냉각재 보충을 위해 비상노심냉각계통을 사용할 수 없을 경우에 안전감압계통을 이용한 급속감압 및 이차측에 의한 급속감압 운전으로 원자로냉각재계통의 압력을 정지냉각펌프의 정지수두 이하로 감압시켜 정지냉각펌프를 통한 안전주입을 시작한다. 그림 5, 6 및 7은 대형, 중형, 소형 냉각재상실사고의 사건수목을 나타내고 있다.

일반적으로 PSA에서 수행하는 계통분석은 계통구성, 운전 및 계통간의 종속성 파악 등으로 구성된다. 비상노심냉각계통과 급수계통을 위험도 정보이용 설계방법론 개발을 위한 시범적용 계통으로 설정하였고 이들 계통에 대한 고장수목을 개발하였다. 정량화 시에 1) 초기사건빈도, 2) 기기고장 확률, 3) 공통원인고장 확률, 4) 시험 및 보수에 의한 이용불능도 및 5) 인간오류 확률이 신뢰도 데이터로 사용되었다. INEEL에서 개발한 초기사건빈도[6]를 이용하고, 기기고장 확률, 공통원인고장 확률, 시험 및 보수에 의한 이용불능도 그리고 인간 오류 확률 데이터베이스는 System 80+ PSA에서 사용한 데이터베이스를 활용하였다.

사고경위는 사건수목 분석을 통하여 파악되며 정량화 분석에는 CAFTA 코드를 사용하였다. 노심손상빈도 평가는 일반적으로 각 초기사건별 사건수목의 표제식을 정량화하고, 각 사건수목의 사고 경위에 대한 표제식의 성공 및 실패를 정량화 코드인 PRAQUANT에 입력하여 결과를 도출하게 된다. 그리고 도출된 결과에 대해 QRECOVER 코드를 이용한 회복조치 분석 등을 수행하여 최종 노심손상빈도를 계산하였다. 최종적으로 계산된 노심손상빈도는 표 8에 나타나 있다. 이 결과에 따르면 총 노심손상빈도 $3.64E-07$ /년으로 상당히 낮은 노심손상빈도를 가지는 것으로 나타났으며 대형 냉각재상실사고는 $1.3E-07$ /년으로 가장 높게 나타났다.

위험도 정보이용 설계방법론 개발을 위해 노심손상빈도의 할당 방법을 통해 사고완화에 필요한 계통설계를 고려하였다. 발전소 전체의 노심손상빈도를 $1.0E-5$ /년으로 설정하고 각 초기사건별 노심손상빈도는 비슷한 수준을 유지할 수 있도록 할당하였다. 할당된 초기사건별로 노심손상빈도는 PSA 분석에 사용되는 초기사건빈도 설정에 따라서 각 초기사건별 요구되는 사고 완화계통의 계통 이용불능도가 결정된다. 초기사건빈도는 LOCA를 제외하고는 모두 System80+ PSA에서 사용한 값들을 그대로 활용하였고 LOCA 빈도는 INEEL 데이터를 이용하였다. 각 초기사건별 노심손상빈도 할당과 사건발생 빈도 설정이 끝나면 해당 사고시의 사고 완화계통 이용불능도 계산이 가능하며 표 8에 각 초기사건별 사고 완화계통의 이용불능도 목표가 나타나 있다. 본 연구에서 개발된 비상노심냉각계통과 급수계통의 사고완화기능에 대한 이용불능도 평가 결과와 사고 완화계통의 이용불능도 목표치와의 비교를 통해 다음과 같은 내용을 파악하였다. 1) 대형 LOCA의 사고 완화 기능을 수행하는 비상노심냉각계통의 이용불능도는 목표 이용불능도인 $2.0E-2$ 를 초과하는 $2.6E-2$ 의 이용불능도를 가진다. 따라서 대형 LOCA에 대해서는 할당된 노심손상빈도를 초과하는 노심손상빈도를 가지게 된다. 2) 중형 LOCA 및 소형 LOCA에서는 사고 완화계통의 목표 이용불능도보다 낮은 이용불능도를 비상노심냉각계통이 가진다. 3) 증기발생기 세관파단사고시 사고 완화계통의 목표 이용불능도를 만족시키기 위해서는 일차측 급속감압운전 등이 요구된다. 4) 나머지 과도사건들에 대해서는 이차측 열제거 기능과 이의 실패시 대체 운전수단으로 주입 및 방출 운전을 고려한 계통 이용불능도는 각 초기사건별로 할당된 사고 완화계통의 목표 이용불능도보다 낮은 값을 나타낸다.

이와 같은 결과를 통해 대형 LOCA는 현재의 사고 완화계통으로는 노심손상빈도의 목표치를 만족시키지 못하므로, 추가적인 계통 설계 변경이 필요할 것으로 파악되었다. 나머지 초기사건들은 사고완화계통의 목표 이용불능도를 모두 만족시키는 것으로 파악되었다. 노심

손상빈도 할당 방법을 통해 특정 초기사건에서 계통 이용불능도가 사고 완화를 위한 목표치를 만족시키지 못할 경우에는 설계개선, 노심손상빈도의 할당치 조정 또는 노심손상빈도 여유분 조정을 고려할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 위험도 정보이용 설계방법론 개발을 위해 PSA 수행을 통한 설계 최적화를 시도하였다. 이를 위해 계통설계에서 신뢰도 관점의 설계기법이 도입되었고 이를 비상노심냉각계통과 급수계통에 적용하였다. 설계를 뒷받침하기 위한 열수력 분석이 수행되었으며 사건수목의 계통 성공기준의 도출은 열수력 분석을 기초로 하여 수행되었다. 현재까지 수행된 계통 이용불능도와 사건수목 표제식의 정량화 결과를 이용하여 노심손상빈도를 평가하였으며 그 결과 $3.64E-7$ /년의 노심손상빈도가 도출되었다.

이러한 위험도 정보이용 설계방법론은 1) 국내 안전해석 및 설계기준사고의 선정, 2) 설계방법론의 개선, 3) 기존 원전의 보수성 파악을 통한 가동원전의 운전성 향상 등의 기술수준을 향상시키는데 기여를 할 것으로 예상된다. 또한, 향후 국.내외적으로 규제 환경이 변화될 때 이에 적극적으로 대처하여 원전의 안전성의 훼손 없이 경제성이 크게 향상된 원전의 설계능력을 확보하는 계기를 마련할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Westinghouse, "NERI Risk-Informed Assessment of Regulatory and Design Requirements for Future Power Plants," RISK-G-007-2000, August 2000.
2. NUREG/CR-5535, "RELAP5/MOD3 Code Manual (Draft)," June 1990.
3. L.W. Ward, "System 80+ RELAP5/MOD3 Input Deck," INEL-94/0247, December 1994.
4. NUREG/CR-2300, "PRA Procedures Guide," ANS and IEEE, 1982.
5. NUREG/CR-2815, "Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide," BNL, 1984.
- 6 NUREG/CR-5750, "Rates of Initiating Events at U.S. Nuclear Power Plants : 1987 - 1995," USNRC, February, 1999.

표 1 KNGR/System 80+과 단순화된 개념적인 계통의 비교

	KNGR/System 80+ 계통	단순화된 개념적인 계통
화학 및 체적제어 계통	<ul style="list-style-type: none"> 직접적인 사고완화의 기능 없음 2대의 충전펌프로 구성 	<ul style="list-style-type: none"> 화학 및 체적제어계통과 안전주입계통을 결합한 하나의 비상노심냉각계통으로 구성 사고시 계열당 1대씩의 안전주입펌프를 사용하여 노심으로 안전주입기능 수행
안전주입계통	<ul style="list-style-type: none"> 총 4대의 모터구동 안전주입펌프로 구성 각 펌프는 각각 총 4개의 주입배관에서 각각의 DVI 배관으로 연결 각 DVI 배관에 안전주입탱크가 연결되어 총 4대의 안전주입탱크로 구성 	<ul style="list-style-type: none"> 총 2대의 다중구동 (Multi-Drive) 안전주입펌프로 구성 각 펌프는 1개의 주입배관에 연결되어 있으며 각 주입배관은 4개의 DVI 배관으로 연결 4개의 DVI 배관 중 2개에만 안전주입탱크 연결 각 DVI 배관에 유량제한기를 설치하여 주입배관 파단시에도 일정량 이상의 냉각수를 주입할 수 있고 노심으로부터 역누출을 방지하는 기능을 수행
주급수계통	<ul style="list-style-type: none"> 사고시 완화계통으로 고려하지 않음 모터구동 주급수펌프 3대와 주급수승압펌프 3대로 구성 	<ul style="list-style-type: none"> 사고시 완화계통으로 고려함 기존의 주급수펌프 및 주급수승압펌프를 하나의 펌프로 구성
비상급수계통	<ul style="list-style-type: none"> 2개 계열로 구성되며 각 계열은 터빈구동펌프와 모터구동펌프로 구성 총 4대의 비상급수펌프로 구성 (터빈구동펌프 2대, 모터구동펌프 2대) 2대의 비상급수저장탱크로부터 각 계열로 급수 터 증기를 공급받음 	<ul style="list-style-type: none"> 2개 계열로 구성되며 한 계열은 터빈구동펌프로 나머지 한 계열은 모터구동펌프만으로 구성 총 2대의 비상급수펌프로 구성 (터빈구동펌프 1대, 모터구동펌프 1대) 1대의 비상급수저장탱크로부터 양 계열로 급수 1대의 터빈구동펌프는 양쪽의 증기발생기로부터 증기를 공급받음
보조급수계통	<ul style="list-style-type: none"> 모터구동펌프 1대 구성 필요시, 자동기동 	<ul style="list-style-type: none"> 디젤구동펌프 1대로 구성 필요시, 운전원에 의한 수동기동
기타	<ul style="list-style-type: none"> 각 계열 간 교차 연결배관이 설치되어 있으나 정상 시에는 단혀있으며 필요시 수동으로 개방 증기발생기 주급수격리밸브 2개, 하향유로공통 배관측 체크밸브 3개로 구성 	<ul style="list-style-type: none"> 각 계열 간 교차 연결배관이 설치되어 있으며 정상시에 상기 배관을 통해 양쪽 증기발생기로 급수 가능 증기발생기 주급수격리밸브 1개, 하향유로 공통배관측 체크밸브 2개로 구성

표 2 대형 LOCA 최적계산 결과

경우	파단부위	고압안전주입펌프 수	안전주입탱크 수	최대 피복관온도	허용기준만족 여부
1	로입구관	2	2	1907°F	만족
2	로출구관	2	2	1334°F	만족
3	로입구관	2	1	1907°F	만족
4	로출구관	2	1	1584°F	만족

- 주1) 1대의 고압안전주입펌프와 1대의 안전주입탱크를 가진 RCP 토출관의 양단순시파단을 분석한 결과 2200°F를 초과
- 주2) 붕괴열 발생률에 20%의 불확실도를 추가하여 2대의 고압안전주입펌프와 2대의 안전주입탱크를 가진 RCP 토출관의 양단순시파단을 분석한 결과 안전 한계치를 초과

표 3 중형 LOCA 최적계산 결과

경우	파단부위	파단크기	고압안전주입펌프 수	최대 피복관온도	허용기준만족 여부
1	로입구관	10" (0.55 ft)	1	1316°F	만족
2	로출구관	10" (0.55 ft)	1	1180°F	만족
3	직접용기주입	8.5"	1*	1521°F	만족
4	직접용기주입	8.5"	1**	-	불만족

주1) 안전주입탱크 주입 및 이차측에 열제거는 가정하지 않음

* 75% 고압안전주입펌프 용량, 3개의 직접용기주입관으로 주입

** 66% 고압안전주입펌프 용량, 3개의 직접용기주입관으로 주입

표 4 중형 LOCA 최적계산 결과

경우	파단부위	파단크기	고압안전주입펌프 수	허용기준만족 여부
1	로입구관	~2" (0.03 ft)	1	만족
2	로출구관	~2" (0.03 ft)	1	만족

주1) 이차측 열제거는 가정하지 않음

표 5 급속이차냉각 계산결과

경우	안전감압밸브 수	안전주입탱크 수	허용기준만족 여부
1	1	0	만족
2	1	1	만족
3	1	2	만족
4	2	0	만족
5	2	1	만족
6	2	2	만족

주1) 가정사항

- 1) 로입구관에서의 소형 LOCA, 2) 고압안전주입 불능,
- 3) 증기발생기 당 1대의 비상급수 및 1개의 대기덤프밸브 작동, 4) 285.1 psi에서 정지냉각펌프 작동

표 6 안전감압계통을 이용한 급속감압 계산결과

경우	운전원 조치시간	냉각율 (°F/시간)	안전주입탱크 수	허용기준만족 여부
1	15	75	0	불만족
2	15	100	0	불만족
3	15	75	1	불만족
4	15	100	1	만족
5	15	75	2	불만족
6	15	100	2	만족

주1) 가정사항

- 1) 로입구관에서의 소형 LOCA, 2) 고압안전주입 불능, 3) 운전원 조치시간 : 15분,
- 4) 285.1 psi에서 정지냉각펌프 작동

표 7 열수력 분석결과를 이용한 초기사건별 성공기준

초기사건	파단부위 정의	안전주입기능 (비상노심냉각펌프)	안전주입탱크	이차측 열제거 (급수계통)
대형 LOCA	로입구관 양단순시파단	2/2 펌프, 3/4 DVI	1/2 탱크	필요 없음
	로출수관 양단순시파단	2/2 펌프, 3/4 DVI	1/2 탱크	필요 없음
중형 LOCA	로입구관 10인치파단	1/2 펌프, 3/4 DVI	필요 없음	필요 없음
	로출수관 10인치 파단	1/2 펌프, 3/4 DVI	필요 없음	필요 없음
	직접용기주입 8.5인치 파단	1/2 펌프, 3/4 DVI	필요 없음	필요 없음
소형 LOCA	0.03ft ² 이하	1/2 펌프, 1/4 DVI	필요 없음	1/2 펌프, 1/2 SG
	일차측 급속감압 (안전감압계통 밸브 개방)	실패 상황	필요 없음	필요 없음
	이차측 급속감압 (비상급수계통) 냉각율 100°F/hr	실패 상황	1/2 탱크	2/2 펌프, 2/2 SG

표 8 노심손상빈도 계산결과 및 할당과정

초기 사건	초기사건빈도	할당된 노심손상빈도 (/년)	사고완화계통 이용불능도 목표치	계산된 노심손상빈도
Large LOCA	5.0E-6	1.0E-7	2.0E-2	1.30E-07
Medium LOCA	4.0E-5	1.0E-7	2.5E-3	3.76E-08
Small LOCA	5.0E-4	5.0E-7	1.0E-3	3.04E-09
Steam Generator Tube Rupture	4.5E-3	5.0E-7	1.1E-4	2.75E-08
Large Secondary Side Break	1.5E-3	5.0E-7	3.3E-4	9.09E-09
Loss of Feedwater	4.1E-1	1.0E-6	2.4E-6	9.09E-08
Loss of Offsite Power	5.0E-3	5.0E-7	1.0E-4	3.18E-08
Loss of A Class 1E 4.16KV Bus	1.5E-3	2.0E-7	1.3E-4	9.47E-10
Loss of A Class 1E 125V DC Bus	1.5E-3	2.0E-7	1.3E-4	3.38E-09
Loss of Component Cooling Water	2.4E-3	2.0E-7	8.3E-5	1.43E-09
Loss of One Division HVAC	4.1E-2	2.0E-7	4.9E-6	2.58E-08
General Transients	5.9E-1	1.0E-6	1.7E-6	2.29E-09
Total Internal Event		0.5E-5		3.64E-07
External Events		3.0E-6		
Margin		2.0E-6		
Total		1.0E-5		

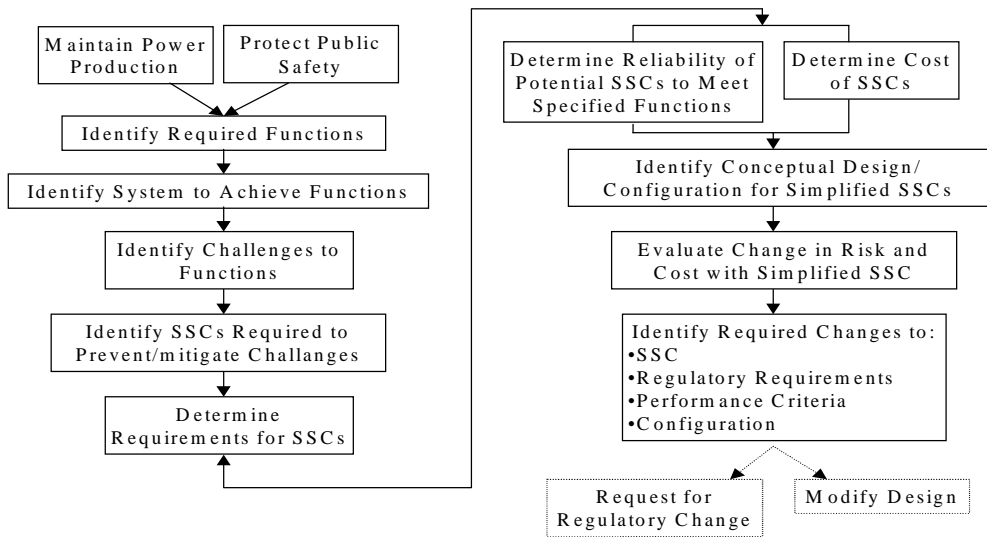


그림 1 위험도 정보이용 설계절차

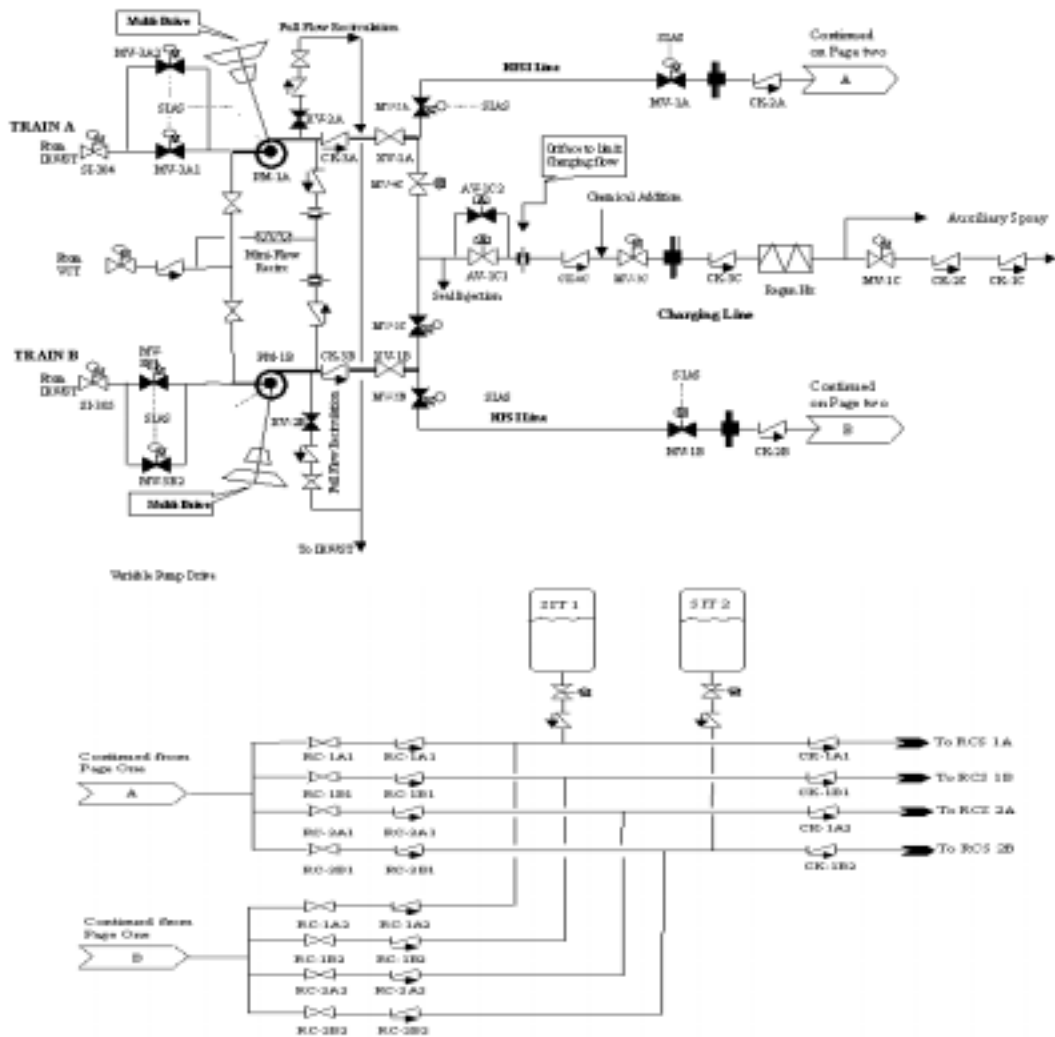


그림 2 단순화된 개념적인 비상노심냉각계통

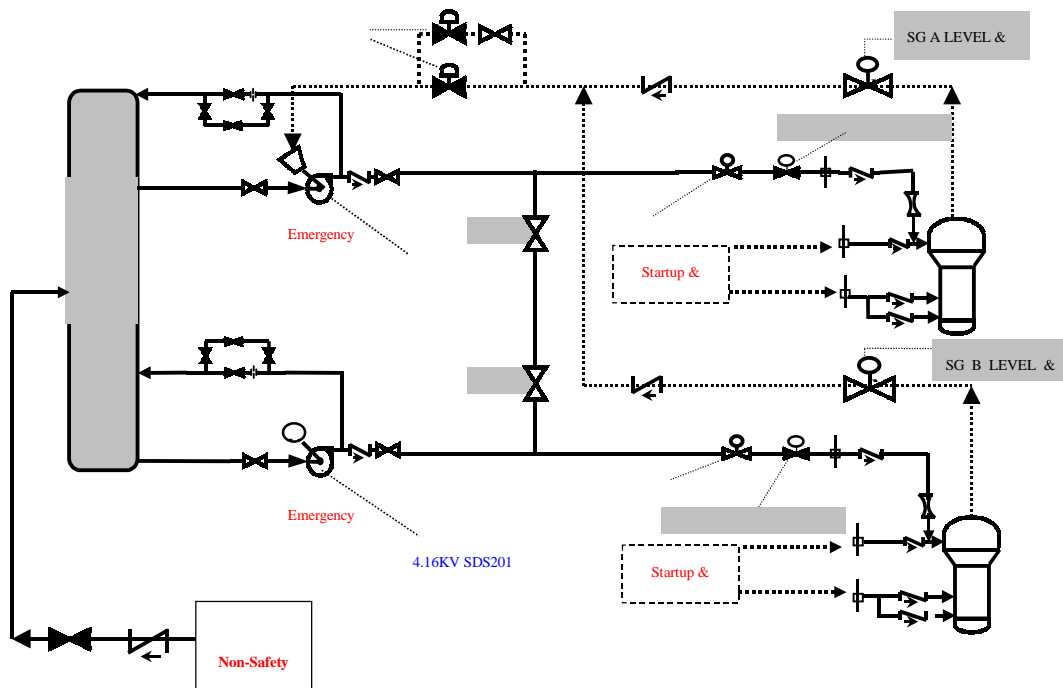
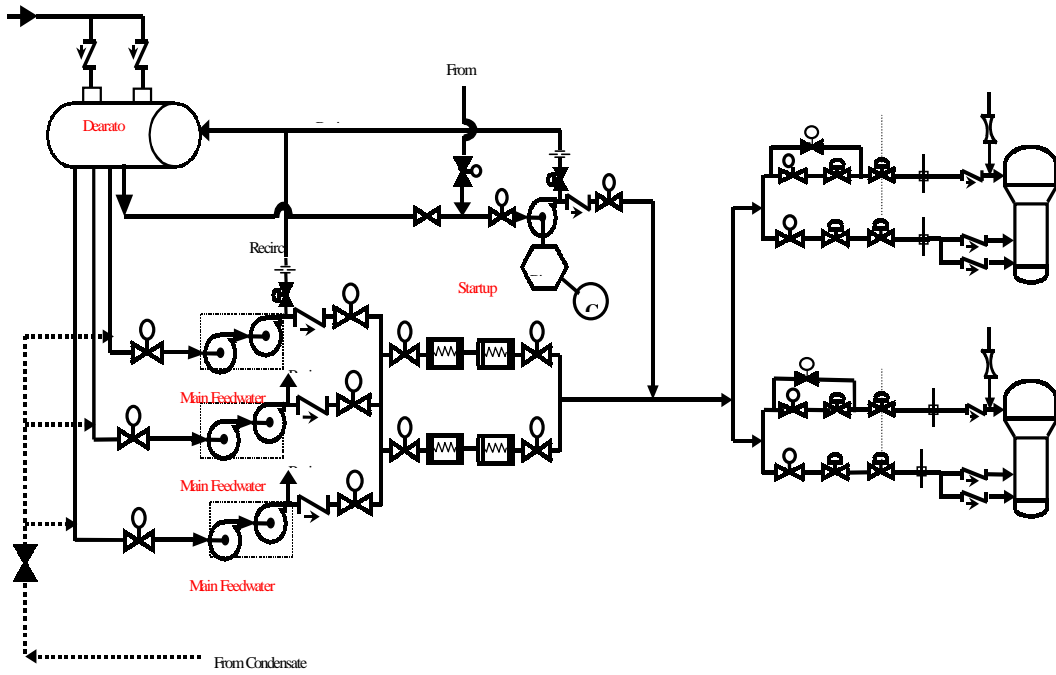


그림 3 단순화된 개념적인 급수계통

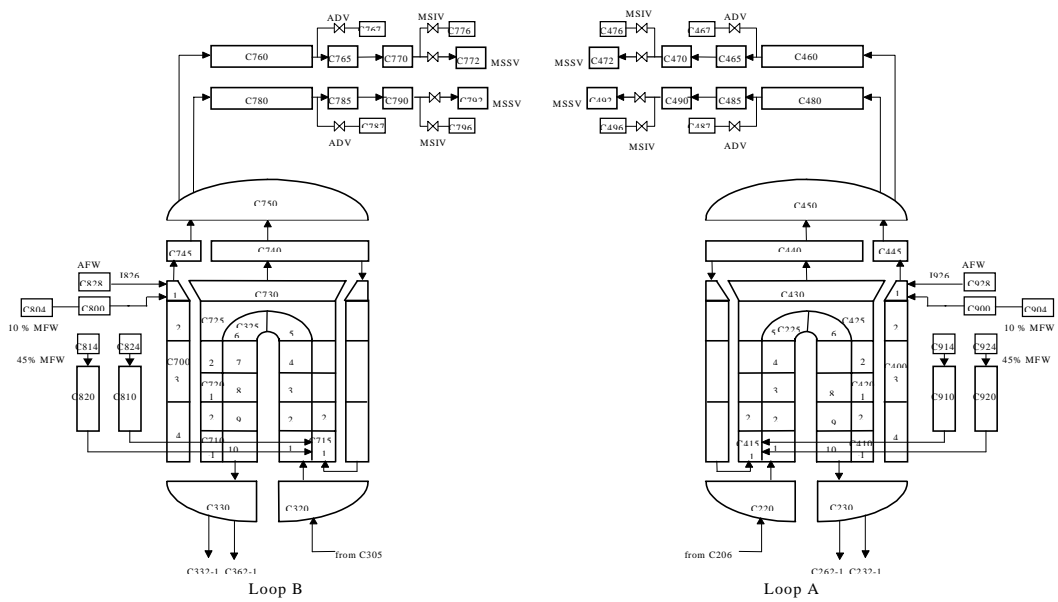
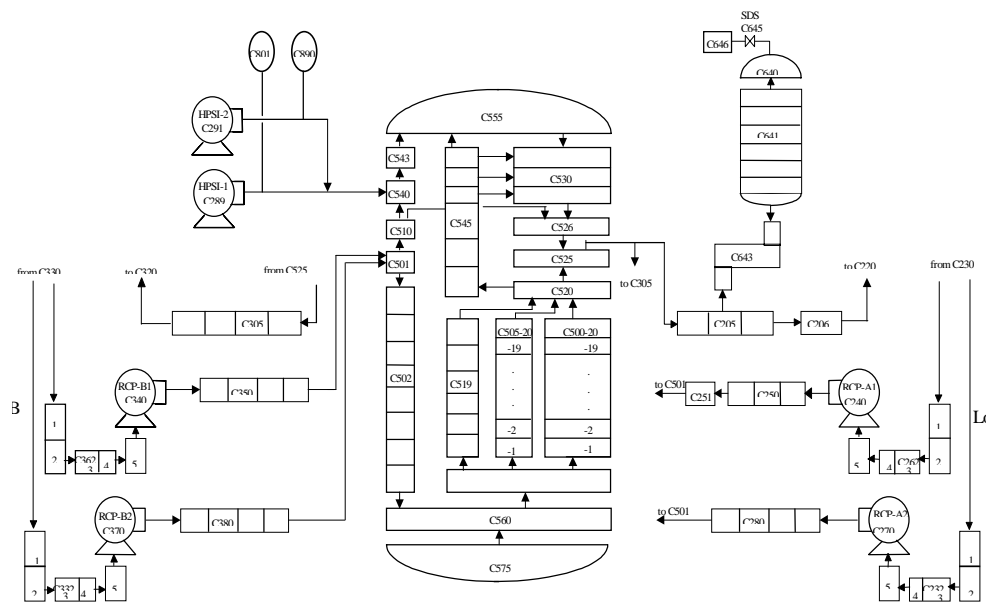


그림 4 단순화된 개념적인 계통에 대한 LOCA 분석을 위한 Nodalization

LLOCA	SIS	SSS	CHR	CLASS	CORE DAMAGE
LARGE LOCA	SIT INJECTION (1 OF 2)	SAFETY INJECTION (3 OF 4)	CONTAINMENT HEAT REMOVAL (CNTMT SPRAY)		
LLOCA	FLAIR1BK	PHAIR1BK	LLCHR	L-1	OK
				L-2	CD
				L-3	CD
				L-4	CD

그림 5 대형 LOCA 사건수목

MLOCA1	SIS	CHR	CLASS	CORE DAMAGE
MEDIUM LOCA 1	SIT INJECTION (3 OF 4)	CONTAINMENT HEAT REMOVAL (CNTMT SPRAY)		
MLOCA1	PHM001BK	LLCHR	ML1-1	OK
			ML1-2	CD
			ML1-3	CD

MLOCA2	SIS	CHR	CLASS	CORE DAMAGE
MEDIUM LOCA 2	SIT INJECTION (3 OF 4)	CONTAINMENT HEAT REMOVAL (CNTMT SPRAY)		
MLOCA2	PHM001BK	LLCHR	ML2-1	OK
			ML2-2	CD
			ML2-3	CD

그림 6 중형 LOCA 사건수목

SLOCA	SIS	SIS	SIS	SIS	SIS	SIS	SIS	SIS	SIS	CHR	CORE DAMAGE	
SMALL LOCA	SIT INJECTION (1 OF 4)	SIT INJECTION (2 OF 4)	SIT INJECTION (3 OF 4)	SIT INJECTION (4 OF 4)	SAFETY INJECTION (1 OF 4)	SAFETY INJECTION (2 OF 4)	SAFETY INJECTION (3 OF 4)	SAFETY INJECTION (4 OF 4)	CONTAINMENT HEAT REMOVAL (CNTMT SPRAY)			
SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA	SLOCA-1	OK
											SLOCA-2	OK
											SLOCA-3	OK
											SLOCA-4	CD
											SLOCA-5	CD
											SLOCA-6	OK
											SLOCA-7	CD
											SLOCA-8	CD
											SLOCA-9	OK
											SLOCA-10	CD
											SLOCA-11	CD
											SLOCA-12	CD

그림 7 소형 LOCA 사건수목