

《기술보고》

개량형 중수로 비상노심냉각시스템의 단순화 및 피동화 방안

한기남 · 한상구

한국원자력연구소

(1995. 1. 20 접수)

요 약

원자력 발전소 안전성 향상을 위한 노력으로 현재 안전시스템의 단순화 및 피동화에 대한 연구가 활발히 지속적으로 수행되고 있다. 개량형 중수로에서는 특수 안전시스템의 하나인 비상노심냉각시스템의 피동화 및 단순화 방안을 다각적으로 검토한 결과, 비상노심냉각시스템의 압력이 열수송계통(Heat Transport System) 압력보다 일정 크기 이상일 때만 파열되는 일방향파열판(One-way Rupture Disc)을 개발하여, 계통에 도입함으로써 전기적인 신호와 힘에 의해 작동되는 밸브 개수를 크게 줄일 수 있게 되었고 이로 인해 계통의 피동성이 향상되었으며, 계통구성 측면이나 운전 측면에서도 단순화를 이루었다. 또한 물보다 비중이 작고 가스주입 차단 기능이 뛰어난 볼(Floating Ball)을 고압용 비상노심냉각 물탱크 내부에 설치하여 종래의 차단밸브 기능을 수행하게 함으로써 전동식 차단밸브를 제거할 수 있게 되었다.

1. 서 론

중수로 발전소에는 4개의 독립된 특수 안전시스템이 있으며, 이들은 냉각재상실사고(LOCA) 시 원자로의 안전정지 및 정지상태 유지, 사고 초기 핵연료 냉각과 사고 후 장기간 잔열제거, 그리고 방사능물질을 격납건물 내부에 수용하는 등의 주요 기능을 담당하고 있다. 네 개의 특수 안전시스템이란 제 1 정지계통(Shutdown System #1; SDS #1), 제 2 정지계통(Shutdown System #2; SDS #2), 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System; ECCS), 그리고 격납계통(Containment System)을 말한다. SDS #1과 SDS #2는 원자로의 안전정지와 정지상태 유지 기능을 담당하며, ECCS는 냉각재상실사고 시 경수로써 재고량 상실을 보충하며 사고 후 장기간 동안 붕괴열과 잔열의 제거기능을 한다. 격납계통은 사고 후 손상된 핵연료로부터 격납건물 내부로 누출된 방사능물질을 대부분 격납건물 내부에 수용함으로써 격납건물 외부로의 방사능물질 누출량을 허용치 이하로 제한한다.

본 보고서에서는 위에서 설명한 중수로 발전소의 특수 안전시스템 중 하나인 비상노심냉각시스템의 개량현황에

대해서 중점 설명하고자 한다. 비상노심냉각시스템의 개량은 피동(Passive) 작동개념을 적극 도입함으로써 계통구조와 운전측면에서 단순화를 꾀하였고, 높은 계통 신뢰도 확보와 건설 및 운전비용을 절감하는 방향으로 연구가 진행되어 왔다.

현재 중수로 발전소에서 채택하고 있는 구조의 핵연료 채널을 대상으로 전기나 공기의 힘, 또는 운전원의 도움 없이 계통 내에 흐르는 유체의 위치에 따른 열에너지 차이로 인한 자연순환 냉각만으로 사고 후 필요한 노심냉각능력을 확보함으로써 원자력 발전소의 고유 안정성을 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이 개념은 비상노심냉각시스템을 필요로 하지 않으나 이러한 개념은 아직 해석적 연구를 통한 개념정립 단계에 있어 실용화하기에는 이르고, 보다 많은 해석적, 실험적 연구가 요구되고 있다. 따라서, 중수로 안전성 향상을 위해 당장 실현 가능한 방법은 비상노심냉각시스템 개량이나 Baek과 Spinks의 연구내용[2]과 같이 비상노심냉각계통 상실 시 감속재계통이 피동냉각을 할 수 있도록 하는, 즉 비상노심냉각계통 상실 시 대체 냉각수단의 성능개선을 통해 높은 신뢰도를 갖는 심층방어(Defense-in-Depth)벽을 형성하는 것이다.

개량형 중수로에서는 냉각재상실사고 발생과 비상노심냉각제 상실(이중 고장: Dual Failure) 시 대체 핵연료 냉각수단은 감속재계통에 의한 펌프 순환냉각이 담당하게 되고 감속재계통도 상실되었을 경우는 차폐냉각계통(Shield Cooling System)이 핵연료 냉각을 담당하게 되는데(그림 1참조) 이들 계통의 신뢰도를 높이기 위해서 이들 계통들의 재고량상실 시 중력을 이용한 재고량보충이나 자연순환냉각에 의한 열 제거기능을 새롭게 추가하였다. 감속재계통은 예비저장수탱크(Reserve Water Tank)와 연결되어 감속재 재고량상실 시 중력에 의한 재고량보충이 가능하도록 하였다. 예비저장수탱크란 기존의 살수탱크(Dousing Tank)가 설치되었던 위치의 원자로건물 최상부에 설치된 환형의 탱크로 탈염수를 저장한다. 차폐냉각계통은 기존의 종단차폐냉각계통(End Shield Cooling System)을 개량한 것으로 이전 설계와는 다르게 칼란드리아(Calandria) 전체를 감싸는 원통을 새로 설치하여 감속재를 둘러싸고 있는 칼란드리아 외벽과 새롭게 설치된 원통 사이에 물(경수)을 채워 넣었고, 예비저장수탱크와 연결시켜 펌프 순환냉각이 불가능할 경우 자연순환냉각이 가능하도록 하였다. 자연순환냉각에 필요한 수두는 예비저장수탱크가 제공하게 된다.

냉각재상실사고 후의 주 냉각능력 상실 시 대체 냉각계통의 피동냉각 기능을 새롭게 추가함으로써, 차폐냉각계통에 의한 자연순환냉각능력이 확고히 입증되면 중수로의 노심손상빈도는 매우 낮아질 것으로 기대된다.

본 보고서에서는 개량형 중수로 비상노심냉각계통(그림 2 참조)의 단순화 및 피동화 방안과 배경을 설명하기 위해 제 2절에서 600 MW급(CANDU 6) 중수로의 비상노심냉각계통의 운전과 단점을 소개하고, 제 3절에서는 CANDU 6 비상노심냉각계통의 요구이용불능도(Demand Unavailability)를 개선한 300 MW급(CANDU 3) 중수로의 비상노심냉각계통에 대해 설명하였으며, 제 4절에서는 CANDU 6와 CANDU 3 비상노심냉각계통의 단점들을 지적하고, 이 단점들을 보완할 수 있는 개량형 중수로 비상노심냉각계통의 피동성 향상 방안에 대해 중점적으로 기술하였다.

2. CANDU 6 중수로의 비상노심냉각계통

CANDU 6 중수로의 비상노심냉각계통은 열수송계통의 냉각재가 상실되는 사고 발생 시 냉각재의 재고량

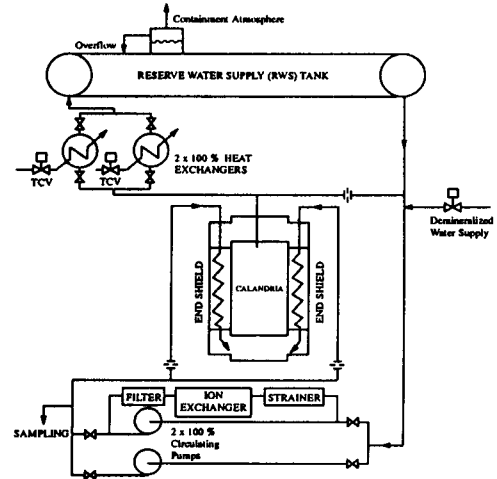


그림 1. 개량형 중수로 차폐냉각계통

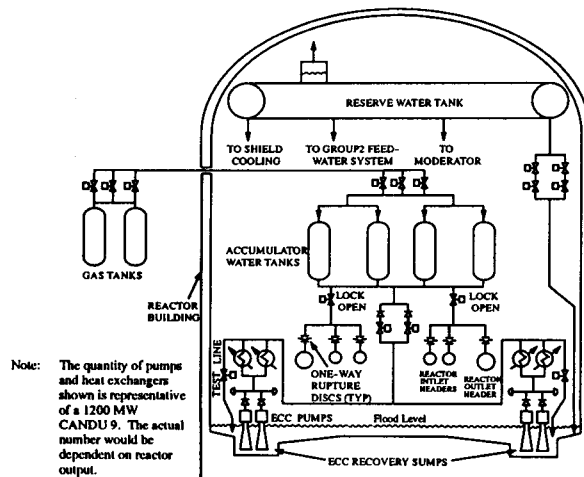


그림 2. 개량형 중수로 비상노심냉각계통

보충 요구에 응답하는 응답신뢰도 향상, 즉 요구이용불능도 감소 노력을 통하여 개량되어 왔다. 최근 강화된 요건 중 가장 까다로운 요건은 요구이용불능도가 1×10^{-3} 을 넘지 않아야 한다는 것이다. 다시 말하면, 비상노심냉각계통을 작동시키는 신호가 1000회 발생했을 때 실패 횟수가 1회 이상을 초과하면 안된다. 이 요건은 경수로에 없는 요건으로서, 현재 월성 2, 3, 4호기 최종안전성분석보고서에 의하면, 여러 가지 운전조건을 개선하거나 기기의 작동 시험빈도를 증가시키고(이것은 시험중 운전원에 의한 실수 가능성을 높이거나 기기의 기

계적 손상 확률을 높이는 역기능을 초래할 수 있지만 이러한 역기능을 최소화하는 방향에서 시험빈도를 결정함) 기기의 중첩에 의해 위 요구이용불능도를 만족시키려고 노력한 결과 1.4×10^{-3} 까지의 결과를 얻었다. 그러나 요구이용불능도 요건 1×10^{-3} 을 정확히 만족시키기 위해서는 이미 운전성과 성능이 입증된 열수송시스템의 배관구조를 변경해야 하는데, 이 경우 열수송시스템의 운전과 성능에 대한 새로운 불확실한 변수를 발생시키고 설계변경에 따른 비용을 증가시키므로 이러한 설계변경은 불필요하다. 이에 대한 구체적인 내용을 이 절의 뒷부분에 기술하였다.

먼저, CANDU 6 비상노심냉각시스템의 개략적인 계통 운전에 대해 기술을 하고(그림 3 참조), 요구이용불능도 요건을 만족하기 어려운 이유에 대해 간단히 설명하고자 한다[3, 4].

비상노심냉각시스템은 냉각재상실사고 시 고압, 중압, 저압 재순환의 연속적인 3 단계로 냉각수를 원자로 노심내로 주입시키는데 모든 계통의 운전은 자동, 수동 조작이 가능하다. 고압단계에서는 가스압력을 이용하여 탱크에 저장된 경수를 원자로 노심내로 신속히 주입시킨다. 고압물탱크 내의 물이 모두 주입되어 중압단계 시작을 위한 물탱크 저수위에 도달하면 중압단계가 자동으로 시작된다. 중압단계에서는 살수탱크에 저장된 물이 중력에 의해 펌프 흡입구로 흘러 들어오면 비상노심냉각펌프를 사용하여 물을 원자로 노심내로 공급한다. 살수탱크에 비상노심냉각계통용으로 저장되었던 물이 고갈되면, 저압단계가 자동적으로 시작된다. 저압단계에서는 원자로바닥에 고인 중수와 경수의 혼합물을 회수하여, 중압단계에서 사용되었던 동일한 비상노심냉각펌프를 사용하여 열교환기를 통과시킨 후 원자로 노심내로 되돌려 보내어 노심내 잔열을 제거하는 장기간(3개월) 재순환 노심냉각이 이루어진다. 경수와 중수의 혼합물에 포함되어 있던 열은 열교환기를 거치면서 제거된다. 비상노심냉각계통에 부여된 요건을 만족시키고 동시에 위와 같은 과정을 성공적으로 수행하기 위하여 다음과 같은 밸브의 작동이 필요하다. 밸브작동은 운전원의 개입 없이 냉각재상실사고 신호나 기타 연동신호에 의해 자동으로 이루어진다. 팔호 안은 밸브를 작동시키는 연동신호를 나타낸다.

1) 고압주입 단계에서의 밸브작동

- 고압가스차단밸브(HP Gas Isolation Valves) 개방(냉각재상실사고 신호)
- 고압주입밸브(HP Injection Valves) 개방(냉각재상실사고 신호)
- 중수차단밸브(D₂O Isolation Valves) 개방(냉각재상실사고 신호)

위의 밸브들은 모두 이중(Redundancy)으로 되어 있으며 병렬로 연결된 두개의 밸브 중 한 개는 사고시 반드시 개방되어야 한다.

2) 중압주입 단계에서의 밸브작동

- 살수탱크차단밸브(Dousing Tank Isolation Valves) 개방(냉각재상실사고 신호)
- 중압주입밸브(MP Injection Valves) 개방(고압물탱크 저수위 신호)
- 고압주입밸브와 고압주입밸브시험용밸브(HP Injection Valves Test Valves) 차단(고압 물탱크 저수위 신호)

위의 밸브들은 모두 이중으로 되어 있고 병렬로 연결된 두개의 밸브 중 한 개는 사고시 반드시 개방되어야 한다. 노심내로 가스의 주입을 막기 위해서는 고압주입 각 배관에 직렬로 연결된 고압주입밸브와 시험용밸브가 차단되어 양 배관이 모두 차단될 수 있어야 한다.

3) 저압주입 단계에서의 밸브작동

- 원자로바닥차단밸브(R/B Basement Isolation Valves) 개방(살수탱크 저수위 신호)
- 개방된 살수탱크차단밸브와 정상 원자로 운전 시 개방되어 있던 살수탱크차단보조밸브(Dousing Tank Isolation Aux. Valves) 차단(살수탱크 저수위 신호)

원자로바닥차단밸브는 중압주입 완료 후 이중으로 되어 있는 두개 중 한 개만 개방되면 되고, 중압주입단계에서 개방되었던 두개의 살수탱크차단밸브는 펌프 흡입구로 공기의 흡입을 막기 위하여 다시 모두 차단되어야 한다. 살수탱크차단보조밸브는 월성 2, 3, 4호기 비상노심냉각시스템의 설계변경사항으로 다음절에서 설명되는 CANDU 3 비상노심냉각시스템의 설계개념을 도입한 것이다.

이와 같은 밸브의 복잡한 운전은 그 신뢰도를 확보하기 위해 원자로 가동중 시험을 요구하며, 빈번한 시험은

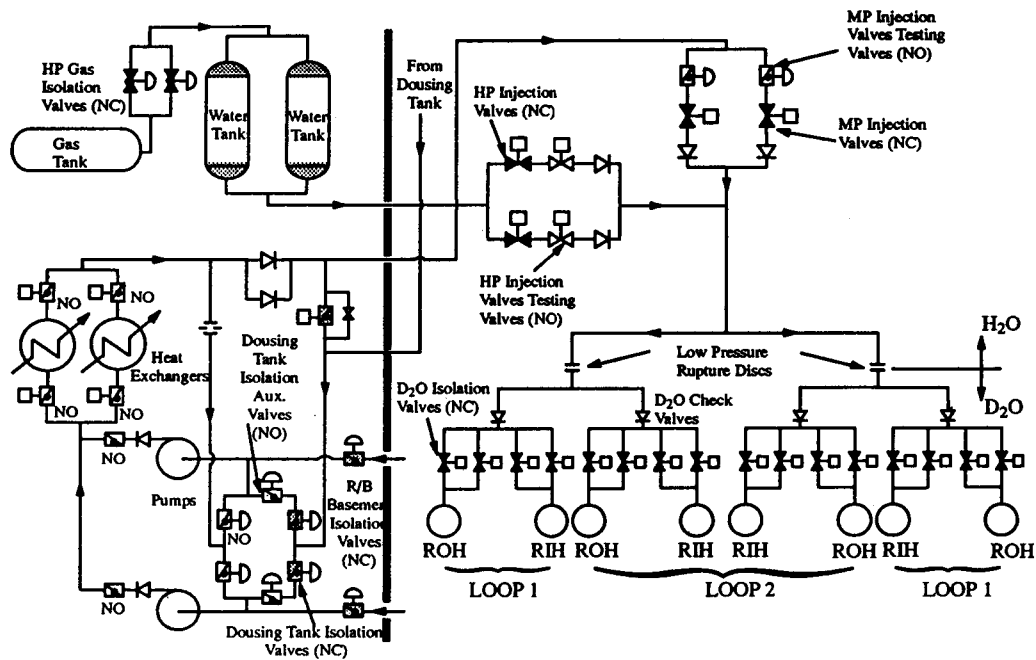


그림 3. CANDU 6 비상노심냉각계통

Legend:

HP High Pressure
 MP Medium Pressure
 NC Normally Closed
 NO Normally Open
 R/B Reactor Building
 RIH Reactor Inlet Header
 ROH Reactor Outlet Header

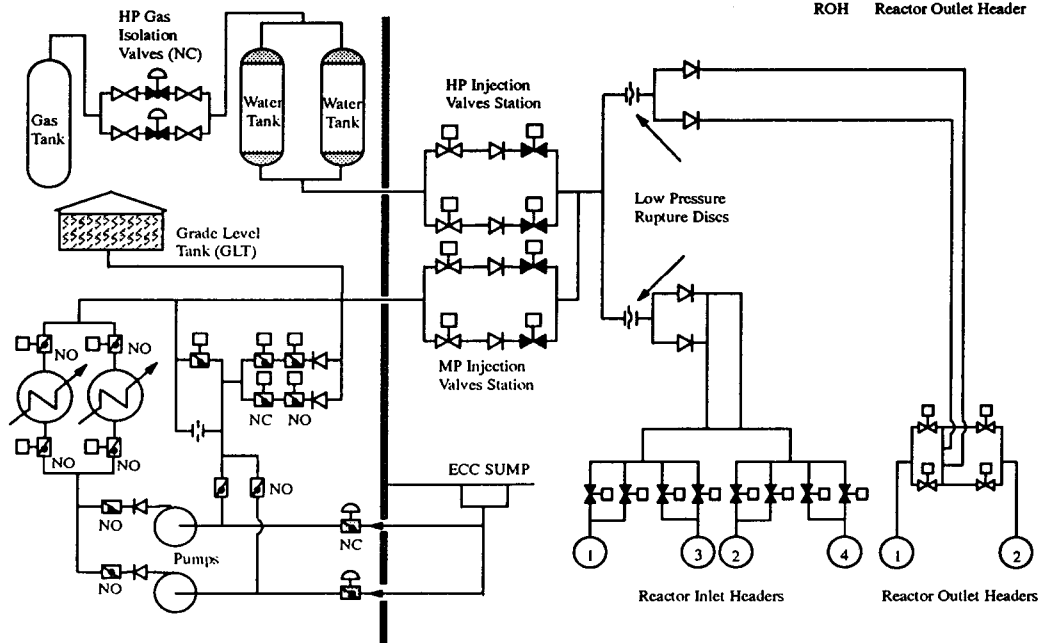


그림 4. CANDU 3 비상노심냉각계통

운전원에게 부담을 주어 계통을 오동작시키거나 밸브들을 정상위치에서 벗어난 상태로 위치시킬 확률을 높인다.

위에서 설명한 복잡한 밸브의 운전 외에 병렬로 연결되어 있는 원자로바닥차단밸브는 중압주입단계에서 오동작이나 각 밸브에 연결된 구동기로 공급되는 구동용 공기공급배관 상실로 인하여 두개 중 한개 혹은 모두 개방되었을 경우 살수탱크로부터의 물이 원자로바닥으로 불필요하게 배수되므로 계통의 이용불능상태를 초래한다. 또한, 8개의 원자로 모관(Header)에 연결된 4개의 공용 주입배관(1개의 공용 주입배관이 2개의 입구, 출구 모관에 연결됨)에는 각각 1개씩의 체크밸브(DxO Check Valves)가 설치되어 있는데 이 들 체크밸브의 신뢰도가 주 관심대상이 된다. 이들 단일 체크밸브들이 설치되어 있는 배관들이 원자로 모관을 중심으로 밀집되어 있어 체크밸브를 중첩시키기 위해서는 열수송계통 배관구조 변경이 불가피하다. 이러한 배관구조 변경은 또 다른 비용증가와 불확실성을 발생시키므로 체크밸브의 중첩은 고려되지 않는다. 따라서 단일 체크밸브의 손상으로 인하여 손상된 체크밸브가 설치된 공용 주입배관을 통하여 노심 냉각수 공급이 불가능하게 되면 칼란드리아를 중심으로 한쪽 면에 위치한 어느 한 루프(중수로로는 냉각재 유로가 2개의 루프로 구성되어 있음)의 입, 출구 모관에 냉각수 주입이 충분하지 못하게 된다. 만일 칼란드리아를 중심으로 이 부분과 반대쪽에 위치한 열수송 배관에 대형파단이 발생하면 냉각수는 노심을 통과하지 못하고 원자로바닥으로 그대로 배출되므로 이는 비상노심냉각시스템의 상실을 의미한다.

이상을 요약하면, 1) 살수탱크차단밸브, 2) 원자로바닥차단밸브, 3) 공용 주입배관의 단일 체크밸브(DxO Check Valves)의 오동작 혹은 손상이 비상노심냉각계통 요구이용불능도를 높이는 가장 두드러진 요인이 되어 왔다. 그러나, 1)은 월성 2, 3, 4호기 비상노심냉각계통 설계 시 차단보조밸브를 추가하여 차단기능을 중첩시킴으로서 계통의 이용도를 높였다.

3. CANDU 3 중수로의 비상노심냉각계통

CANDU 3 비상노심냉각계통은 CANDU 6 비상노심냉각계통에서 부각되었던 단점을 배경으로 설계개선을 시도하여 2 절에서 요약한 1), 3)의 단점을 보완하였다 [5].

그림 4에 나타난 CANDU 3 비상노심냉각계통의 개략도를 참조로 상기 단점 보완방안을 설명하면 다음과 같다.

1) 살수탱크차단밸브 : CANDU 6 와 달리 CANDU 3 의 격납건물은 Steel Liner를 격납건물 안쪽에 설치함으로써 사고 후의 높은 격납건물 압력에도 방사능 물질 허용 누설율을 만족할 수 있도록 설계하였다. 살수계통이 필요하지 않게 됨으로서 살수탱크 대신 대기와 개방된 Grade Level Tank(GLT)를 격납건물 밖에 설치하여 저압 단기주입(Low Pressure Short-Term Injection)을 위한 냉각수를 제공한다. GLT 저장수 공급배관은 비상노심냉각펌프와 연결되는데, 이 배관에는 차단밸브와 이들 밸브와 각각 직렬로 연결되어 정상운전 시 개방되어 있는 두개의 보조 밸브가 있다. 사고 시 차단밸브는 저압 단기주입을 위해 개방되고 저압 단기주입 완료 후 GLT로부터 펌프로의 공기 주입을 방지하기 위하여 개방되었던 차단밸브와 차단보조밸브는 닫힌다. 저압 단기주입 완료 후 펌프로의 공기주입 방지목적의 차단밸브를 중첩시킴으로써 계통전체의 이용도(Availability)는 증가 한다. 이것은 월성 2호기 이전 CANDU 6 비상노심냉각계통의 단점을 보완한 설계변경사항이다.

2) 공용 주입배관의 체크밸브 : CANDU 3 비상노심냉각계통은 공용 주입배관의 체크밸브를 중첩하여 설계함으로써 계통의 이용도를 증가시켰다.

위와 같은 설계개선을 통하여 CANDU 3 비상노심냉각계통의 전체 요구이용불능도는 감소될 것으로 기대되거나 원자로바닥차단밸브의 이용도 개선에 대한 문제는 여전히 남아 있으며, 개선 방향도 피동성의 향상이나 단순화보다는 단일능동기기의 중첩에 의해 이용불능도를 감소시켰다. 능동기기의 중첩은 건설비를 증가시키고 운전원에게는 시험에 대한 부담을 가중시키는 역기능을 발생시킨다.

4. 개량형 중수로의 비상노심냉각계통

CANDU 6와 CANDU 3 비상노심냉각계통의 이용도 요건과 성능요건을 만족시키기 위하여 개선사항을 연구하는 과정에서 현재의 비상노심냉각계통은 다음과 같은 단점이 있음을 파악하였다.

1) 비상노심냉각계통은 열수송계통과의 차단과 안전요

건 만족을 위하여 많은 밸브를 필요로 한다. 이 중 중요한 기능을 하는 밸브들은 이용도 요건을 만족시키고 단일 능동 기기고장에 의한 계통전체 손상방지 요건을 만족시키기 위하여 네 개의 군으로 설치되어야 한다. 즉, 비상노심냉각계통은 열수송계통과 직접 연결되기 때문에 열수송계통과의 차단을 위해서 차단밸브들이 직렬로 이중, 삼중으로 요구되고, 비상노심냉각계통 이용도 측면에서는 병렬로 중첩되어야 하고 정기적으로 시험되어야 하므로 밸브들이 많이 필요하다.

- 2) 밸브는 구입, 수리, 시험하는데 비용이 많이 든다.
- 3) 밸브는 동작이 요구될 때 피동적으로 작동할 수 없고 운전원이나 제어 계통에 의해 작동된다.
- 4) 차단밸브들은 사고시 반드시 열릴 수 있도록 효율적으로 유지, 보수되어야 하고 정기적인 시험을 거쳐야 한다. 이 요건을 준수하지 않고는 발전소 운전이 허용되지 않는다.

결국 밸브 갯수를 감소시키고 동시에 기존의 밸브가 수행하여 왔던 기능을 새로운 피동기기가 수행할 수 있다면, 계통은 단순화되고 피동화될 수 있으며 자본절감과 운전의 용이, 계통전체의 신뢰도 증가라는 여러 가지 이익을 얻을 수 있다.

이러한 목적을 위하여 캐나다원자력공사(Atomic Energy of Canada Limited ; AECL)는 일방향파열판(One-way Rupture Disc)과 가스주입차단볼(Float-ing Ball Shut-off)을 개량형 중수로 비상노심냉각계통에 적용하였다[6, 7].

개량형 중수로는 CANDU 6와 달리 격납건물에 Steel Liner를 사용함으로써 살수계통이 불필요하므로 비상노심냉각계통의 중압주입단계가 제거되었다. 그리고, 격납건물 체적이 증가하여 4개의 물탱크를 격납건물 내부에 설치 가능하므로 물탱크로부터 원자로 모관과의 거리가 단축되었다. 또한 비상노심냉각펌프를 격납건물 내부에 설치하였다. 따라서 개량형 중수로의 비상노심냉각계통은 전체적인 계통구조가 CANDU 6나 CANDU 3의 비상노심냉각계통 구조와는 상이한 구조로 되어 있는데 본 보고서에서는 기기위치에 따른 장단점에 관한 내용은 생략하고 세 가지의 단순화 및 피동화 방안과 그중 가장 비중이 높은 일방향파열판에 대한 AECL의 실험적 연구결과를 아래에 소개하였다.

4.1. 일방향파열판

CANDU 6와 CANDU 3의 비상노심냉각계통에서는 발전소 정상운전 시 열수송계통과 비상노심냉각계통의 차단을 전동식 게이트형 밸브(이하 중수차단밸브)가 담당하고 있다. 중수차단밸브(DxO Isolation Valves)는 고압의 열수송계통 압력을 차단함으로써 비상노심냉각계통으로의 냉각재상실을 막는데 주 목적이 있다. 중수차단밸브는 냉각재상실사고 신호에 의해 개방되어 비상노심냉각계통의 물탱크로부터 공급되는 냉각수가 노심으로 주입될 수 있도록 한다.

개량형 중수로의 비상노심냉각계통에서는 위에서 설명한 중수차단밸브를 제거하기 위해 일방향파열판을 계통에 도입하였다. 일방향이란 의미는 한쪽 방향으로만 파열이 가능하게 설계된 것으로부터 붙여진 이름이다. 즉, 일방향파열판의 기본개념은 첫째 냉각재상실사고 시 작은 압력차(약 0.52 ± 0.17 MPa(d))에 의해서도 비상노심냉각계통으로부터 열수송계통 방향으로 파열이 일어나며, 둘째 발전소 정상운전 시 열수송계통으로부터 비상노심냉각계통으로의 냉각재상실사고를 방지하기 위해 열수송계통 압력(약 11.72 MPa(d))을 지탱하도록 하는 것이다. 직경 4.5"인 실제 크기의 1/4 크기 모형을 대상으로 한 Chalk River에서의 실험결과에 의하면 0.62 MPa(d)에서 파열판이 파열되었고, 열수송계통 압력은 48.27 MPa(d) 까지 지탱할 수 있었다. 이는 비록 1/4 크기 모형을 대상으로 실시한 실험결과이나 실제 크기의 파열판도 요건을 충분히 만족할 수 있을 것으로 예상된다.

일방향파열판은 파열판 자체는 종래의 파열판과 같으나 파열판 표면에 딴플을 만든 것과 파열판에 지지체를 두고 있는 것이 종래의 파열판과 다르다. 파열판 형상은 열수송계통 방향으로 볼록한 형상을 하고 있고, 표면에 골프공 표면에 있는 것과 같은 딴플이 120개 있는데 그 이유는 계통의 작동 시 파열판의 파열 신뢰도를 높이고 원자로 정지와 재기동을 반복할 때 파열판이 꺾는 피로를 줄일 수 있도록 강성(Stiffness)을 증가시키기 위한 것이다. 실제 4.5" 크기의 모형을 대상으로 한 피로실험 결과에 의하면 비상노심냉각계통과 열수송계통 압력차(비상노심냉각계통 압력-열수송계통 압력)를 0 MPa(d)에서 -11.72 MPa(d)로 1000회 반복하고, +0.21 MPa(d)에서 -11.72 MPa(d)로 500회 반복한 후 파열판을 정방향으로 가압하여 파열시켰을 때의 압력을 측정하였는데 0.59 MPa(d)이었다. 또 다른 세 개의 파열판에 대해 같은 조건의 시험을 수행한 결과 각

각 0.61, 0.63, 0.65 MPa(d)에서 파열되었다. 따라서, 파열판은 파열판을 경계로 압력변동에 따른 피로에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

파열판의 지지체로서 원통형 몸체를 비상노심냉각계통 쪽에 설치하고 있는데 원통형의 몸체에는 냉각수 주입배관과 같은 크기의 흐름단면적을 갖도록 축방향 구멍을 뚫어 놓아 필요한 유량을 공급할 수 있게 하였고, 파열판 표면의 뒤편은 이 구멍에 일치시켰다. 또한, 파열판 바로 하류의 관 형상을 파열판 곡률과 같은 곡률을 갖는 곡관으로 설계함으로써 파열판이 파열된 후 네 개의 조각이 이 곡관에 완전히 밀착되도록 설계하여 유량변동에 따라 조각이 심하게 움직여 조각 뿌리가 피로에 의해 파열되어, 몸체로부터 분리되는 가능성을 줄였다. 네 개로 등분된 파열판 표면의 파열조각 뿌리에는 일자형의 홈을 만들어 파열된 후 파열 조각이 작은 유량에도 최대로 개방되어 유체의 유동저항을 줄일 수 있도록 하였다. 모형 파열판에 대한 유량실험결과 0에서 70 kg/s까지 유량을 증가시켰을 때 파열된 조각은 몸체로부터 분리되지 않았으며 70 kg/s의 최대유량에서 수두손실계수는 2.5 이었다. 유량 70 kg/s는 실제 크기에서 유량설계조건 1000 kg/s에 해당한다. 파열판의 파열 후 수두손실계수에 대한 연구는 비상노심냉각계통 성능해석과 병행하여 앞으로도 계속 수행될 것이다.

일방향파열판은 단지 한 방향의 압력차에 의해서만 파열되는 피동기기이므로 계통의 신뢰도가 향상된다. 일방향파열판의 도입으로 중수차단밸브를 제거할 수 있게 되어, 건설비, 자본, 수리비용 절감효과가 기대되며, 냉각재로 사용되지 않는 중수의 양이 감소되므로 부대경비절감 효과가 발생된다. 그 이유는 일방향파열판 구조는 밸브와 비교할 때 매우 단순하여 제작이 용이하므로 제작비용이 적게 든다. 그리고, 일방향파열판은 높은 파열신뢰도를 갖고 있기 때문에 중첩이 요구되지 않을 것으로 예상되어 개수를 반으로 줄일 수 있다. 일방향파열판은 원자로 정지기간 중 파열판 자체만 몸체로부터 분리하여 정기검사를 수행하면 된다. 종래에는 저압 파열판과 중수차단밸브 사이에 많은 양의 중수가 채워져 있었으나 일방향파열판의 도입으로 이러한 중수의 양을 감소시킬 수 있는 설계가 가능하다.

4.2. 가스주입차단볼

CANDU 6 비상노심냉각시스템의 고압주입밸브는 고

압가스차단밸브의 원자로 가동중 개방시험 중 계통 하류에 설치된 저압 파열판의 파열을 방지하기 위해 발전소 정상운전 중에는 항상 차단되어 있다. 기존의 비상노심냉각계통에서 사용되어 온 저압에서 파열되는 파열판은 중수차단밸브를 경계로 비상노심냉각계통 쪽에 위치하여 중수와 경수의 혼합을 방지하는 단지 경제적인 이유로 설치되었다. 이 밸브들은 냉각재상실사고 시 냉각수를 노심에 공급하기 위하여 냉각재상실사고 신호에 의해 반드시 개방되어야 하고, 고압주입계통의 작동 완료 후에는 열수송계통으로의 가스 주입을 방지하기 위하여 반드시 차단되어야 한다.

개량형 중수로의 비상노심냉각계통에서 고압주입계통의 작동 후 가스주입 차단은 각각의 물탱크 내부에 설치된 가스주입차단볼에 의해 이루어진다. 이 차단볼들은 발전소 정상운전 시 물탱크 상부에 떠 있고, 일방향파열판에 누설이 발생하여 열수송계통 압력이 비상노심냉각계통으로 작용하였을 때의 충격을 견디고 물탱크 입구를 효과적으로 밀폐하도록 설계된다. 물탱크 내부의 물이 열수송계통으로 모두 주입된 후에는 탱크 출구를 밀폐함으로써 열수송계통으로의 가스 주입을 방지한다. 가스주입차단볼의 도입으로 제 2절의 2항에서 설명한 가스주입 차단을 위한 밸브조작이 필요없게 되고, 일방향파열판의 도입으로 발전소 정상운전 시 비상노심냉각계통이 가압되어도 일방향파열판은 파열되지 않으므로 기존의 고압주입밸브와 시험용밸브를 제거할 수 있게 되었다. 중수로에서는 크기는 다르나 이와 유사한 기기가 제 2 정지계통(SDS #2)의 독물질(가돌리늄) 저장탱크가 사용되고 있어 실증성(Proveness)에 대한 문제는 크지 않을 것으로 예상된다.

차단볼은 양단의 압력차에 의해서만 움직이므로 매우 피동적이고, 또한 차단볼의 사용으로 계통이 매우 단순해진다. 고압주입밸브와 시험용밸브의 제거는 보수와 운전중 시험으로 인한 비용을 감소시켰고, 또한 자본절감효과를 가져왔다.

4.3. 증기구동 가압탱크

현재 개량형 중수로 비상노심냉각시스템의 추가적인 개선안으로서 비상노심냉각시스템의 고압가스를 고압증기로 대체하는 방안이 검토되고 있다. 그 이유는 열수송계통으로의 가스주입 가능성을 더욱 낮추고 비상노심냉각시스템의 고압주입 성능개선과 비용을 절감할 수 있기 때

문이다.

고압 주입 후 노심으로의 가스주입을 방지하기 위하여 4.2 절에서 설명하였듯이 가스주입 차단볼을 도입하고 있는데 노심 냉각용 물의 가압수단인 가스 자체를 증기로 대체하면 가스주입 가능성은 더욱 줄어들게 된다. 또한, 개량형 중수로의 비상노심냉각계통은 두개의 고압가스탱크를 사용하는데 증기구동 가압탱크를 사용하면 한 개의 탱크로 충분하므로 캐나다화로 Cd\$ 0.6 Million에서 0.7 Million까지 경비를 절감할 수 있으며 고압가스탱크보다 성능이 뛰어나다[8].

증기구동 가압탱크란 열수송계통의 가압기와 같은 설계개념을 응용한 것으로 발전소 정상운전 시 적절한 크기의 물탱크에 가압된 50%의 물과 50%의 증기를 저장하고 있다가 사고 시 차단밸브가 개방되면 저장되었던 고압증기가 노심 냉각용 물을 가압하게 되는 방법을 이용하는 것이다. 전기 가열기에 의해 50% 정도 저장되었던 물은 계속 증기로 바뀌어 압력감소율이 가스에 비하여 낮으므로 계속 높은 압력을 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이 방법은 아직 해결해야 되는 문제점들이 남아 있다. 그것은 증기와 물이 접촉하였을 때 발생하는 고압, 고온 증기의 와해로 인한 탱크와 배관에 미치는 충격을 예측하여 설계에 반영하여야 하고, 계통이 대기상태로 있을 때 노심 냉각용 물로 열전달이 일어나지 않게 하는 수단 등이 강구되어야 한다.

5. 결 론

이상에서 소개한 바와 같이 일방향파열판과 가스주입 차단볼을 도입하면 비상노심냉각계통은 단순화되고 피동성이 향상되어 계통의 신뢰성 향상과 운전의 단순화, 그리고 경비절감 효과를 얻을 수 있다. 일방향파열판과

가스주입차단볼에 대한 실험적 성능평가가 완료되어 충분한 성능이 입증되고 규제기관의 규제요건을 만족하게 되면, 이들 기기는 개량형 중수로뿐만 아니라 현재 가동 중인 CANDU 6와 CANDU 3에도 적용할 수 있다. 증기구동 가압탱크는 아직 해결해야 될 문제점이 많으므로 앞으로 보다 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 장순홍 외, "비상노심냉각계통을 제거한 압력관형 피동 수냉자로", 원자력학회지, Volume 26, Number 2 (1994).
2. W.P. Baek and N.J. Spinks, "CANDU Passive Heat Rejection Using the Moderator", Int'l Conf. on New Trends in Nuclear System T/H, Pisa, Italy (1994).
3. AECL, Emergency Core Cooling System Process Design Manual for Wolsong 2, 3 & 4.
4. AECL, Emergency Core Cooling System Part 1-General Requirements and Overview.
5. AECL, CANDU 3 Emergency Core Cooling System Design Description.
6. AECL, Technical Description for CANDU 9 480/SEU.
7. 한국원자력연구소, "중수로 개량 국제 공동연구 및 기반기술 개발", 제 2 차년도 최종 보고서, KAERI-I/RR-1377/93 (1993).
8. Large CANDU Development KAERI/AECL Joint Study, "CANDU 9 ECC Steam-Driven Pressurizer", 69-34320-ASD-001 (1994)