

일체형 원자로의 안전용기 냉각이 설계에 미치는 영향

서재광, 김주평, 윤주현, 이두정, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로는 노심, 증기발생기, 가압기, 펌프 등 1차측 주기기들을 하나의 압력용기안에 모두 포함하고 있고, 또 1차측 냉각재가 원자로 안에서만 순환하므로 기존의 분리형원자로에 비해 구조특성상 대용량 원자로 냉각재 상실사고(LBLOCA)의 발생 가능성을 원천적으로 제거할수 있다. 반면 원자로 냉각재의 보충 등을 위한 소형 배관의 파단 가능성은 역시 존재하므로 소용량 원자로 냉각재 상실 사고(SBLOCA)는 여전히 존재한다. 따라서 현재 한국원자력연구소에서 연구 개발중인 중소규모 전력생산 및 열 활용 목적의 일체형 원자로에는, 원자로 압력용기 외부에 별도의 압력용기(안전용기)를 설치하여 SBLOCA시 원자로 압력용기로부터 방출되는 냉각수를 안전용기내에 보관하도록 함으로써 사고시 외부로의 방사성 물질 유출 가능성을 획기적으로 줄일수 있는 설계 개념을 도입하고 있다. 본 논문에서는 안전용기의 설계시 효율적인 냉각방식에 대한 열유체 해석적 접근을 시도하였고, 예비개념설계된 일체형 열병합원자로의 설계상의 특징들 및 안전용기 설계시 앞으로의 연구방향 등도 간략히 소개하였다.

1. 서 론

일체형원자로는 일반적으로 하나의 원자로용기안에 노심, 증기발생기, 가압기, 펌프 등이 모두 들어가 있는 원자로를 의미하며, 분리형원자로라고 불리는 기존 상용발전소에서 볼 수 있는 주냉각재배관(Reactor Coolant Pipe) 및 밀림관(Surge Line)등 직경이 큰 배관계통이 없으므로 대형 LOCA 의 발생 가능성을 원천적으로 제거할수 있다. 일체형원자로의 안전성은 분리형원자로에 비하여 뛰어난 것으로 알려져있으며, 다양한 목적에 사용이 가능하기 때문에 세계 여러나라에서 다양한 설계 개념을 발표하는등 매우 활발한 연구가 진행중이다. 현재 세계적으로 일체형 원자로의 설계가 가장 활발한 나라는 러시아로서 이미 자연대류를 이용한 일체형 원자로의 시험 운전을 수행하고 있는 실정이다. 하지만 일체형원자로는 주요부품들이 모두 하나의 원자로용기 안에 포함되기 때문에 동급의 분리형에 비하여 원자로용기의 크기가 매우 커지게 되므로 설계시 원자로용기의 제작상의 한계, 그리고 수송조건 등을 고려하여야 한다. 참고로 분리형인 1000 MWe급 울진3,4호기용 원자로용기의 헤드를 제외한 쉘부분의 내경이 4.2 m, 높이가 11.7 m, 그리고 무게가 약 350톤인데 비하여 일본에서 개발중에 있는 일체형 원자로인 600 MWe급 SPWR[1] 원자로용기의 내경 및 높이는 각각 6.6 m, 25.0 m 이며 무게는 1256톤으로서 울진3,4호기 원자로의 3.5배

를 상회한다. 또한 330 MWt인 열병합원자로의 무게는 약 600톤 정도로 예상되며, 이는 울진3,4호기 원자로의 약 2배가 된다.

러시아, 일본, 미국을 비롯한 대부분의 원자력 선진국에서는 발전용 뿐만 아니라 해수담수화용, 지역난방용, 선박의 동력용 등 다양한 목적으로 이용될 수 있으면서 고도의 안전성과 경제성을 가진 일체형원자로에 대한 연구를 활발히 추진하고 있는데[2], 원자로의 용량분포의 예를 살펴보면, 일본에서 상선이나 쇄빙선의 동력원으로 사용할 목적으로 개발중에 있는 100 MWt 용량의 MRX[3]와 같은 소형원자로로부터, 러시아에서 개발중에 있으며, 현재 개념설계가 완료되고 상세설계가 진행중인 1800 MWt/630 MWe 용량의 VPBER-600[4]과같은 중형 원자로에 이르기까지 다양하다. 이들 나라에서 개발중인 설계개념은 원자로 압력용기 자체에 대한 열수력학적 특성은 대부분이 유사하며, 원자로 압력용기 외부에 설치하는 안전용기는 노심 손상확률을 획기적으로 줄이기 위하여 사용하는 경우가 많다. 안전용기는 원자로 냉각재계통에서 냉각수 상실사고시 냉각수 및 방사성 물질이 외부로 유출되는 것을 방지하며, 원자로 압력용기내의 노심이 항상 냉각재에 잠길수 있도록하는 중요한 역할을 담당한다. 따라서 안전용기를 설치할 경우 노심 손상확률을 상당히 낮은 수준으로 유지할수 있을것으로 예상하고 있다. 반면 사고시 안전용기의 최대 내부 압력에 의하여 안전용기의 설계 압력을 결정하게 되며, 설계 압력이 증가할수록 안전용기의 두께가 두꺼워지게 된다. 사고시 안전용기의 최대 내부 압력을 감소시킬수 있는 가장 효과적인 방법은 안전용기내에 축적되는 에너지를 감소시키는 것이며, 이를 위하여 다양한 설계 개념을 사용할수 있다. 즉, 원자로 압력용기로부터 방출되는 냉각재가 가지는 에너지를 안전용기벽을 통하여 직접 냉각시키는 방식(피동 열제거 방식)과, 안전용기 내부에 열교환기를 설치하여 기기 냉각수 등을 통과시켜서 냉각시키는 방식(능동 열제거 방식) 등을 생각할수 있다. 또한 안전용기 외벽에 냉각수를 사용하여 냉각수의 증발열에 의하여 안전용기를 냉각시키는 방식과 단순히 공기의 유동을 이용하는 방식등 다양한 설계 개념을 사용할수 있다. 본 논문에서는 안전용기 외벽에 적절한 용량의 냉각수 저장탱크를 설치하여, 이 냉각수의 증발열을 이용한 냉각방식의 효과를 논하였다.

2. 일체형 원자로의 설계 개념

현재 국내에서 열병합 원자로로 개발중에 있는 일체형 원자로의 용량은 330 MWt로 잠정 결정하였으며 계통의 주요 열수력학적 설계변수는 Table 1과 같다. Figure 1에 이러한 용량을 가진 일체형 원자로를 개략적으로 도시하였다. 안전 용기의 설계와 관련하여 계통의 이해를 돕기 위하여 원자로계통의 주요 부품에 대한 개략적인 설계개념을 설명한다.

2.1 원자로 압력용기(Reactor Pressure Vessel)

원자로 압력용기는 기존의 상용로와 같이 크게 상부헤드와 원통셸로 구성되는데 상부헤드에는 CEDM, 4개의 원자로 냉각재 펌프 및 주급수/주증기 헤더가 설치되는데 사고시 노심이 노출되는 것을 방지하고 냉각재의 자연순환 능력을 높이기 위하여 증기발생기를 가능한 한 높은 위치에 설치되도록 설계하였다. 또한 원자로 압력용기와 연결되는 일체의 배관은 배관 파단 사고의 영향을 최소화하기 위하여 원자로 용기 상부헤드에 설치하였다. 원자로 용기의 설계 수명을 60년으로 하기 위하여 수명에 직접적인 영향을 미치는 고속 중성자조사량을 줄일수 있도록 원자로용기 하부 헤드아래와 증기발생기 지지대 아래의 원통형 공간(Annulus Downcommer)에는 열차폐

체(Thermal Shield)를 설치하였다. 자연순환 능력을 극대화할수 있도록 가능하면 원자로 압력용기 내부에서 일차냉각수로에서의 압력 손실을 최소화할수 있도록 설계하였다. 원자로 압력 용기의 내부에 설치된 가압기 체적을 충분히 확보하여 정지 냉각상태로부터 100% 출력 운전상태로 변화시 냉각수의 열팽창으로 인한 체적 변화를 모두 수용함으로써 모든 과도 운전 상태시 원자로 냉각재의 보충 및 취출을 할 필요가 없다.

2.2 증기발생기(Steam Generator)

증기발생기는 72개의 관류식 나선형(Once-through Helical Type) 모듈을 사용하여 원자로심상부의 노심지지원통 외부와 원자로 압력용기 내부의 사이 공간에 배치하였다. 전열관은 일체형 원자로의 설계 특성상 증기발생기가 원자로심 가까이에 위치하는 관계로 중성자 조사에 강한 내성을 지닌 티타늄 합금을 사용하였다. 각 증기발생기 모듈의 열수력학적 특성을 균등하게 하기 위하여 냉각수의 흐름을 균질화시킬수 있도록 각 모듈의 일차측 출구에 적절한 용량의 오리피스를 설치하였다. 증기발생기는 100% 출력 운전시 발생 가능한 모든 과도 운전시 40°C 이상의 과열 증기를 생산할수 있도록 열적 용량을 결정하였으며, 출력이 낮아지면 과열도는 더욱 높아져서 U-tube를 사용하는 증기발생기의 단점인 터빈으로의 수분유입 가능성을 원천적으로 배제하였다.

2.3 가압기(Pressurizer)

가압기는 일차계통의 계통 압력을 유지시 자동적으로 압력을 유지하는 방식인 자가가압방식을 채택하여 분리형 원자로에서 사용되는 전열기 및 살수기와 같은 능동부품이 별도로 설치되어 있지 않고 원자로 내부의 상부에 가압기로 사용할수 있도록 고압 질소 기체공간을 마련하였다. 따라서 정상 운전시 원자로 내부는 정상운전시 완전히 물로 채워지는 것이 아니고 원자로 상부 부분이 포화 수증기와 고압 질소가스로 채워진다. 물에 용해되는 질소의 특성이 온도 및 압력에 따라 바뀌며, 약 80°C전후하여 용해도가 가장 낮으므로 가압기내의 냉각수의 온도를 이 값이 되도록 유지한다. 가압기는 습식단열재를 사용하여 일차계통으로부터의 직접적인 열전달을 제한하고, 이차계통의 주급수를 이용하여 지속적으로 냉각시킨다. 따라서 가압기내에는 이를 위한 열교환기를 설치하고, 열교환기에서 제거된 열은 이차계통으로 방출된다.

2.4 CEDM(Control Element Drive Mechanism)

CEDM은 선형스텝모터(Linear Step Motor)에의해 구동되며 일차 냉각수에 중성자 흡수 물질인 수용성 붕산수를 사용하지 않는 관계로 일반 상용료와 같은 핵연료 연소에 따른 반응도 보상뿐만 아니라 일상적인 부하 추종 운전이 가능하도록 미세 반응도 제어가 가능하도록 설계되어 있다. CEDM의 작동원리상 베어링이 사용되지않으며 마그네틱 코일이 500°C까지 견딜수있도록 설계되었기 때문에 별도의 외부 냉각이 필요없이 일차냉각수에 의한 냉각이 가능하다.

2.5 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump)

원자로 냉각재 펌프는 세계적인 발전 추세에 맞춰, 별도의 밀봉축 장치가 필요하지 않은 Canned Motor Pump를 사용한 펌프를 사용하며 회전축에 Depleted Uranium이나 납을 Can에 채운 형태의 Fly Wheel을 두어 회전관성이 큰 것을 사용하는 방법을 고려하고 있다. 일체형 원자로 는 1차 냉각재 계통내의 전체적인 압력 손실이 분리형에 비하여 상대적으로 작으므로, 냉각재의 자연순환능력이 뛰어나고, 따라서 펌프의 수두가 높을 필요는 없다. 따라서 일체형 원자로에 적

용할수 있는 펌프는 고유량, 저수두인 펌프 특성을 갖춰야 하며, 이런 펌프는 축류 펌프이므로, 적절하게 설계된 축류 펌프를 사용할 계획이다.

2.6 원자로 내부구조물(Reactor Internals)

원자로 내부구조물은 핵연료집합체를 지지, 보호하고 적절한 냉각재 흐름경로를 제공하며, 중성자 제어봉집합체 및 계측장비를 보호하고 안내하는 기능을 수행해야 한다. 원자로 내부구조물의 대부분의 기능은 기존의 분리형원자로와 유사하지만 1차측 냉각재가 원자로내에서만 순환되는 것을 고려하여야 하고 또 증기발생기와 가압기의 설치공간을 확보하여야 하므로 설계개념은 많이 다르다. 특히 원자로의 수명을 60년으로 증가시키기 위해서는 고속 중성자의 조사량을 줄여야 하는 것이 필수적이다. 따라서 이러한 목적으로 열차폐체를 사용하며, 열차폐체는 원자로용기 하부 헤드에의 중성자조사량을 줄이기 위한 하부 열차폐체와 증기발생기 아래의 원통형 공간(Annulus Downcomer)에 설치된 반경방향 열차폐체(Radial Thermal Shield), 증기발생기를 포함한 상부구조물의 중성자조사량 감소를 위한 상부 열차폐체로 구성되어 있으며 재질은 300계열의 스테인리스강을 사용할 예정이다.

2.7 안전 용기(Safeguard Vessel)

안전 용기는 격납용기 안에 설치하는 일종의 이중 격납용기 개념을 사용한 것으로 일체형 원자로의 경우에는 모든 원자로계통 주요 기기가 원자로 압력용기내에 설치되는 관계로 안전용기를 사용하는 개념을 자연스럽게 도입할수 있다. 따라서 현재 개발되고 있는 대부분의 일체형 원자로는 안전 용기를 설치하는 방식을 채택하고 있다. 특히 열병합용 원자로의 경우에는 그 사용 목적상 열수요와 가능한 지리적으로 가까운쪽에 건설하는 것이 현실적이므로, 사고시 방사성 물질이 주변 환경을 오염시킬 경우 그 파급효과는 기존의 상용 원자로 사고에 비하여 상당히 심각할수 있으므로 이중 격납용기 개념과 더불어 안전 용기를 사용하는 것은 필수 불가결한 선택일수 있다. 원자로 냉각재 계통에서의 사고시 모든 방사성 물질은 일차적으로 안전 용기에 의하여 차단되며, 더 이상의 방사성 물질은 주변 환경으로 확산되지 않도록 설계되고 있다.

3. 배관파단 사고해석

안전 용기의 최고 압력을 결정하는 요인은 사고시 원자로 냉각재 계통으로부터 방출되어서 안전 용기내에 축적되는 총 에너지량 및 자기 가압기에 사용될 고압 질소 기체량이므로 안전 용기내에 축적되는 총 에너지량을 감소시킬 경우 안전 용기의 최고 압력을 줄일수 있다. 안전 용기로부터 에너지를 제거하는 방법은 안전 용기내에 열교환기를 설치하여 이 열교환기를 이용하는 능동적인 방법과 안전 용기 자체를 외부에서 자연 현상에 의하여 냉각시키는 피동적인 방법이 있다. 당연히 능동적인 방법이 효율적일수 있으나, 원자로 설계에 대한 세계적인 추세가 사고시 피동적으로 사고를 완화하는 방향으로 진행되고 있으므로 본 연구에서는 안전 용기 외벽에 냉각수조를 설치하여 피동적으로 안전 용기를 냉각시키는 방식을 채택할 경우 안전 용기의 최고 압력에 미치는 영향을 분석하였다. 사고시 안전 용기 외벽에 설치된 냉각수조로부터 증발되는 냉각수의 증발열에 의하여 안전 용기내에 축적된 에너지를 발산하는 방식을 채택할 경우, 안전 용기를 냉각시키는 방식은 피동적이 되며, 사고시 별도의 운전원의 동작을 필요로하지 않는다.

3.1 가정

LOCA시 원자로 냉각재 계통은 피동 잔열제거 계통에 의하여 지속적으로 냉각되며, 안전 용기로 방출되는 물질 및 에너지는 안전 용기내의 압력과 원자로 냉각재 계통의 압력이 일치하는 시점까지 계속되는 것으로 가정하였다. 또한 원자로 냉각재 계통으로부터 방출되는 고압 질소는 자기 가압기에 사용하는 관계로 가압기로부터 냉각수가 완전히 유출되기 전까지는 안전 용기내로 방출되지 않는다고 가정하였다. 안전 용기외벽에 설치된 냉각수조에서는 수조 비등에 의한 열전달을, 안전 용기내벽에서는 공기가 존재하는 응축 열전달을 고려하였다. 공기가 존재하기 때문에 발생하는 열전달 계수의 감소분은 순수 응축 열전달 계수의 10%라고 가정하였다. 원자로 정지후 가능하면 많은 잔열이 발생하도록 하기 위하여 원자로가 사고 전까지 365일(1년)간 계속하여 100% 출력으로 운전되다가 사고후 원자로 냉각재 계통의 압력이 12MPa가 되었을 때 원자로가 정지하고, 피동 잔열 제거 계통에 의하여 원자로 냉각재 계통의 냉각이 이루어진다고 가정하였다. 지금까지 개념 설계된 결과에 의하면 일체형 열병합원자로의 원자로 압력용기를 관통하는 배관중 일차 냉각수가 통과하는 배관은 가장 큰 직경은 냉각수 충수 배관으로 내부 직경이 15mm인 배관으로서, 이 배관의 파단 사고시 안전 용기내의 압력이 최대치가 될것으로 예상되므로 이 배관의 파단 사고를 가정하였다. 특히 파단 부위를 통해서 방출되는 냉각수 및 고압 질소 기체는 choking 조건을 채택하여 무제한의 방출 유량 증가를 허용하지 않았다.

3.2 초기 조건

사고시 계통의 초기 압력은 15MPa, 출력은 100%를 유지하였다. 또한 가압기내의 냉각수 높이는 정상운전 범위내에 있으며, 가압기내의 냉각수 온도는 정상 운전 온도인 93oC를 유지하고 있다.

3.3 계산 결과

안전 용기의 벽 두께를 계산하는 방식은 정적 압력에 의한 해석인 최고 압력에 대한 thin walled cylinder를 사용하였고, 초기에 임의의 값을 가정하여 iteration에 의하여 벽 두께를 계산하였다. 계산 결과 안전 용기를 냉각하지 않는 경우는 원자로 냉각재의 유출량에 비례하여 최고 압력이 증가하였으며, 냉각재의 유출이 정지되는 상태인 원자로 압력 용기내의 일차계통 압력과 안전 용기내의 압력이 같아지는 시점까지 계속하여 압력이 증기하여, 안전 용기 최대 내부 압력은 사고후 1594초에 57기압까지 상승하였으며, 이 압력에 대한 정적 하중을 견디기 위하여 필요한 안전 용기의 벽 두께는 104.8mm가 되었다. 특히 안전 용기를 냉각시키지 않는 경우는 최고 압력에 영향을 준 인자는 순수하게 일차계통으로부터 방출된 냉각재량 및 관련 에너지인 것으로 밝혀졌으며, 장시간 원자로 냉각재 계통을 피동잔열제거계통에 의하여 냉각시킬 경우 냉각재의 온도 저하에 따른 체적 수축에 의하여 가압기내의 냉각재가 일차 계통으로 방출되며, 가압기에서 냉각수가 완전히 방출되면 가압기내의 고압 질소 기체가 안전 용기내로 방출되며, 이 경우 안전 용기내의 최대 압력은 상승할 가능성은 있으나, 본 논문에서는 그 시점까지 계산하지 못하여 확인하지는 못하였다. 반면, 안전 용기 외벽에 냉각수 저장수조를 설치하여 안전 용기를 피동적으로 냉각시킬 경우는 일차 냉각재 계통으로부터 유입되는 에너지의 양과 안전 용기 외벽에 설치된 냉각수 저장수조를 통하여 유출되는 에너지의 양이 같아지는 시점까지 계속하여 압력이 증가하여, 안전 용기 최대 내부 압력은 사고후 1020초에 32기압까지 상승하였다. 이 경우 가압기내에 냉각수가 있으므로 가압기내에 있는 고압 질소 기체는 안전 용기내로 방출되지 않았으므로 안전

용기의 최대 내부 압력은 순수한 증기압에 의하여 발생하며, 그 후 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 최종적으로는 수증기의 분압은 1기압 이하가 되고, 가압기로부터 방출된 고압 질소에 의한 분압이 주종을 이루었으며, 정적 하중인 최고 압력 32기압을 견디기 위하여 필요한 안전용기의 벽 두께는 58.8mm가 되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재 개발중에 있는 330MWt 용량의 일체형 중소형 원자로의 주요 기기의 예비개념설계의 특징들을 요약하였다. 또한 소형 냉각재 상실사고와 관련하여 원자로의 안전성 확보에 대한 개념을 정립하기 위해 여러종류의 배관파단 사고를 해석하여 안전용기가 원전설계에 미치는 영향을 파악하였다. 배관파단 사고해석결과 안전용기를 냉각하지 않는 경우 안전 용기 최대 내부 압력은 사고후 57기압까지 상승하였으며, 안전용기 외벽에 냉각수 저장수조를 설치하여 안전용기를 피동적으로 냉각시킬 경우 안전용기 최대 내부압력은 사고후 32기압까지 상승하는 것으로 나타났다. 더욱이 벽 두께에서는 104.8mm와 58.8mm로 안전용기 외부 벽에 냉각수 저장수조를 설치하는 경우 안전용기의 무게를 거의 50% 가까이 줄일 수 있는 것을 알수 있었다. 따라서 안전용기의 외부 벽에 냉각수 저장수조를 설치하는 방안은 안전용기의 최대 압력을 줄이고, 또한 결과적으로 안전용기의 무게를 줄이는데, 대단히 효율적인 방법임을 있다. 앞으로는 위의 설계 개념을 좀더 보완, 발전시키는 한편, 더 효율적인 방안의 마련 및 관련 성능 시험도 수행할 계획이다.

5. 참고문헌

- [1] K.Sako, T. Oikawa, and J. Oda, "SPWR (System-integrated PWR)," IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
- [2] 김용완외, "신형원자로로서의 일체형 가압경수로 설계특성 분석", 한국원자력학회 논문집 제 27 권, 제 2 호, pp269-279, 1995.4.
- [3] K. Sako, et al., "Advanced Marine Reactor MRX," International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants Proceedings, October 25-25, Tokyo, Japan, Vol.I, pp.6.5-1~6.5-7, 1992.
- [4] Small and Medium Reactors, OECD Nuclear Energy Agency, 1991.

Table 1. 주요 열수력학적 설계변수

일차계통		증기발생기	
노심열출력, MWt	330	주증기온도, °C	274
핵연료집합체 개수	57	주증기압력, MPa	3.0
설계압력, MPa	17	과열도, °C	40
운전압력, MPa	15	주급수온도, °C	180
노심입구온도, °C	270	튜브재질	Ti Alloy
노심출구온도, °C	310	튜브외경, mm	12

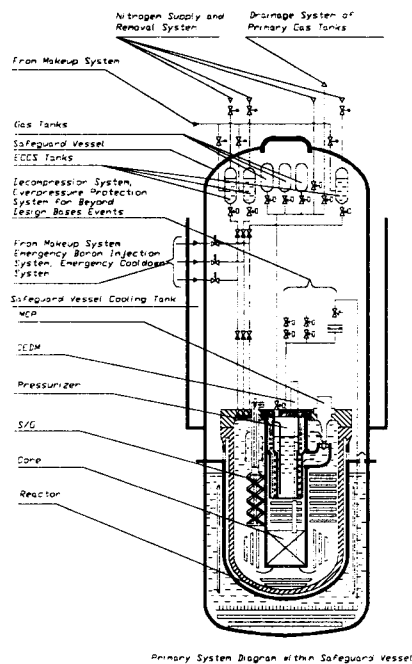


그림 1. 일체형원자로 개략도