



송진호 | 한국원자력연구원 중대사고·중수로안전연구부장 | e-mail : dosa@kaeri.re.kr

후쿠시마 원전사고로 인해, 중대사고(Severe Accident)에 대해 신문에 연일 대서특필되어 국민들이 이미 중대사고 전문가가 된 듯하다. 이 글을 통해 후쿠시마 원전사고에 대한 소개, 또 이런 중대사고에 대비하여 국민의 안전을 지키기 위해 어떤 연구들이 수행되고 있는지에 대해 소개하고자 한다.

후쿠시마 원전사고?

1979년 미국의 Three Mile Island 사고, 1986년 러시아 체르노빌 사고와 같이 후쿠시마 원전의 사고는 중대사고(Severe Accident)로 분류된다. 원자로 안에 있는 핵연료가 녹고, 많은 양의 방사성 물질이 원자로 격납용기 바깥으로 방출되었기 때문이다.

후쿠시마 원전사고가 나면서 TV를 통해 수소 폭발에 의해 원자로 건물이 파손되는 과정이 생생하게 중계되고, 또 연일 신문에서 사고 진행 과정을 생생하게 기

사화 되서 일반 시민들이 모두 원자력 전문가, 특히 중대사고 전문가가 되었다. 그런데, 한 부지에 있던 3기의 원전에서 원자로 내부의 핵연료가 용융되는 사고가 한꺼번에 발생해서, 그 사고의 심각성이 이미 러시아의 체르노빌 수준 혹은 그 이상까지 접근했다는 사실이 다소 충격적이다. 인간들의 공학 지식의 결정체라 할 수 있는 원자력 발전소가 자연의 힘에 무력하게 무너지는 모습을 보여주고 있어서, 공학자들인 우리가 스스로 돌아보아야 계기로 삼아야 할 것이라고 생각한다. 사고가 난 후 후쿠시마 원전의 모습이 그림 1에 나타나 있다.



그림 1 사고 후 후쿠시마 원전의 모습(왼쪽부터 오른쪽으로 1·2·3·4호기)

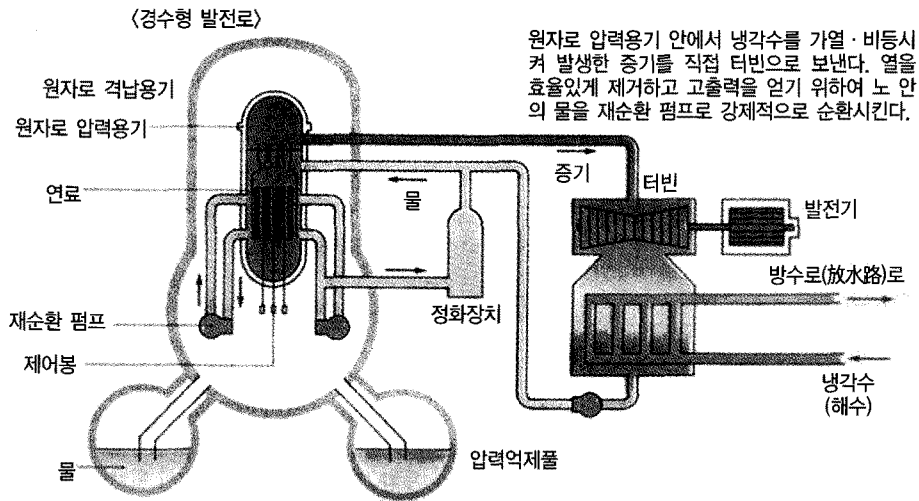


그림 2 비등 경수로(BWR) 원전의 기본 구조

후쿠시마 원전사고의 성격을 살펴보자. 2011년 3월 11일 오전 진도 9.0의 지진이 후쿠시마 원전 부근에서 발생했다. 지진의 영향으로 원자로가 정지되고, 발전소 부지의 전원 공급이 단절되었다. 따라서 전기로 구동되는 계통들이 모두 작동 불능하게 되었다. 물론 원자력 발전소에서는 이에 대비하기 위해 디젤 발전기가 설치되어 있다. 그런데, 지진 후에 따라온 대형 해일로 인하여 디젤 발전기가 침수되어 그 기능도 상실하게 된 것이다. 상상하지 못했던 사고가 발생한 것이다.

여기에서 원자력 발전소의 설계 개념이 구별된다. 원자로의 수명 기간 중 발생할 수 있는 “설계 기준 사고 (Design Basis Event)에 대해 원자로 계통이 설계되어 원자로의 안전을 보장하게 된다. 그런데, 미국의 TMI, 구 소련의 Chernobyl 사고 이후, 원자로 안에 있는 핵연료가 녹아 다량의 방사성 물질이 방출되는” 중대사고(Severe Accident)가 발생할 수도 있다는 것이 원자

이전의 중대사고들이 운전원의 오류, 기기의 오작동에 의해 발생한 사고인데 반해 이번의 후쿠시마 원전사고의 경우에는 진도 9.0의 강진 연이은 쓰나미라는 사상 초유의 자연 재해로 인해 원자로의 안전 계통이 무력하게 된 사고로 그 성격이 조금 다르다.

로 설계에 고려되기 시작했다. 예를 들면, 후쿠시마 원전에서와 같이 모든 전기 계통이 상실되는 Station Black Out(SBO) 사고에 대해서도, 주요 안전 계통이 배터리로 8시간 동안 구동되도록 대비되어 있었다. 하지만, 후쿠시마 원전의 경우 8시간이 지나도, 지진, 쓰나미 등으로 전원이 회복될 수 없어서 사고가 심각하게 진행 된 것이다.

이렇게 상상할 수 없는 사고에 대해서 어느 정도까지 대비할 것인가가 앞으로

원자력 발전소의 설계에서 가장 중요한 쟁점이 될 것이다. 모든 가상의 사고를 다 고려해서 원자로를 설계한다는 것이 경제성, 기술성 측면에서 결코 쉬운 과제가 아닐 것이기 때문이다. 하지만, 공학자들이 부단한 노력을 한다면 해결할 수 있는 과제가 아닐까 하는 기대가 있다.

원자로 안에 배치되어 있는 핵연료에서 핵분열 반응이 일어나고, 그 반응으로 발생된 열을 증기 발생기로 보내서 그곳에서 증기를 발생시켜 그 에너지를 활용하는 것이 원자력 발전의 기본 원리이다. 그런데, 이 핵분

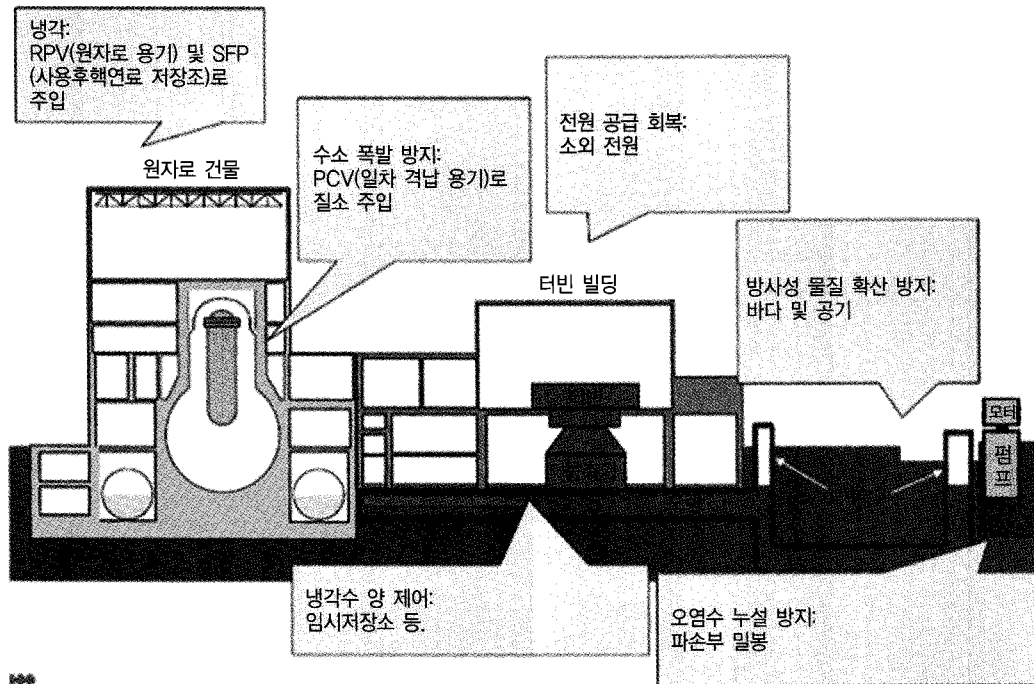


그림 3 후쿠시마 원전 복구 과정

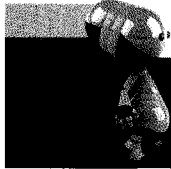
열 반응은 그 반응이 정지되어도 핵연료에서 지속적으로 잔열(Decay Heat)이라 불리는 상당한 양의 열을 발생시킨다. 따라서 이 열을 원자로 정지 후에도 지속적으로 제거해 주어야 한다는 것이 다른 에너지원과 분명히 다른 점이고, 이 열을 어떻게 제거할 것인가가 공학적인 숙제이다. 후쿠시마 원전의 경우에도, 핵연료로부터 계속 발생하는 열을 적절히 제거할 수단이 없어서 모든 문제가 발생한 것이다. 이하 후쿠시마 원전의 사고 진행 경위를 살펴보기로 하자.

후쿠시마 원전의 경우는 우리나라 원전과 다소 다른 비등형 경수로(Boiling Water Reactor)이다.

그림 2에서 보는 것처럼, 냉각수가 원자로에 공급되면 핵연료에서 발생한 열에 의해 증기가 발생하고, 그 증기를 터빈에 보내 전기를 생산하게 된다. 원자로가 정지되고 모든 안전 계통의 작동이 정지되면 핵연료에서 발생한 잔열에 의해 원자로 안의 냉각재가 비등하게 된다. 증기 발생을 그대로 방치하면 원자로의 압력이

증가해서 원자로가 파손되게 되므로, 일정한 압력이 되면 증기는 압력 제어 폴로 방출되게 된다. 이 때 원자로에 적당한 양의 냉각수가 공급되어야 원자로 내부의 냉각재가 유지되어 안정된 냉각을 할 수 있다. 하지만 후쿠시마 원전의 경우 원자로로 냉각재가 공급되지 않고 핵연료에서 발생하는 열에 의해 지속적으로 증기가 발생하고, 그 증기가 압력 제어 수조로 방출되었다. 따라서 원자로 내부의 냉각재가 점점 고갈되게 된 것이다. 이렇게 되면 고온의 핵연료를 냉각할 수 있는 물이 없어서, 핵연료의 온도가 증가하게 된다.

핵연료는 UO_2 펠렛이 지르칼로이 피복관 안에 있는 구조이다. 미국의 Three Mile Island 사고 후 밝혀진 물리적인 현상으로 가장 중요한 것이 두 가지이다. 첫 번째는 핵연료의 온도가 높아지면 지르칼로이 피복관과 수증기가 반응하여 급속하게 수소를 생성한다는 것, 또 UO_2 의 용융온도는 $2,800^{\circ}C$ 가까이 되지만 지르칼로이 피복관과 UO_2 가 서로 합금을 형성하여 훨씬 낮은 온도



인 1,700°C 부근에서부터 녹기 시작한다는 것이다. 원자로에서 다량의 수소가 발생하면서, 후쿠시마 원전에서 수소 폭발이 일어나고 그 광경이 TV로 생생하게 중계된 것이다. 그림 1에서 원자로 격납 건물이 수소 폭발에 의해 파손된 것을 볼 수 있다.

핵연료가 녹게 되면 다량의 방사성 물질이 방출되게 된다. 그 방사성 물질을 다양한 경로를 따라서 외부로 방출되게 된다. 후쿠시마 원전에서는 에어로졸 형태로, 또 오염수의 형태로 방사성 물질이 방출되었다. 대기 오염을 대비해 원전 부근의 주민을 소개시켰고, 후쿠시마 원전 부근의 바다로 오염수가 방출되면서 그에 대한 관심이 고조되었다. 현재 외부로 방출된 방사성 물질의 양에 체르노빌 원전 사고 때의 10분의 1을 넘어서, 체르노빌 원전 사고와 동일하게 국제 원자력 안전 등급 7로 공식 발표되었다. 현재 원자로 복구 작업이 진행되고 있는데 그 과정이 그림 3에 나타나 있다. 공기 및 바다로 방출되는 방사성 물질의 최소화, 전력 복구, 원자로 및 격납 용기로의 냉각수 주입, 수소 폭발 방지를 위한 질소 주입, 터빈 빌딩에 모인 오염수의 처리 등이 주요 내용이다.

후쿠시마 원자로에서는 1, 2, 3호기 모두 원자로 내부의 핵연료가 많이 녹고 손상된 것으로 발표되었다. 즉 다량의 핵연료가 녹았다는 것이다. 그런데 핵연료가 녹으면 녹은 물질들이 원자로의 아래쪽으로 흘러내리고 만약 원자로 하반구에 물이 없다면, 핵연료 물질의 녹는 온도가 원자로 용기의 재질인 탄소강의 온도보다 높으므로 원자로 용기가 파손될 수 있다. 현재 후쿠시마 원전 1호기의 경우, 원자로 안에 다량의 물을 주입하였지만 원자로 내부의 수위가 회복되지 않고 있어서 원자로 용기의 파손이 추정되고 있다.

후쿠시마 원전사고는 아직도 진행 중이다. 미국

중대사고가 발생하더라도 노심 용융물을 적절히 냉각하여 원자로 용기 및 격납건물의 건전성을 확보하여 핵분열 생성물로 인한 피해가 일반 대중에서 최소화 되도록 하는 것이 중대사고 연구의 목표이다

Three Mile Island 사고의 경우, 원자로 용기 덮개를 열어서 그 안에서 핵연료가 녹은 것을 발견하기까지 3년이 걸리고, 또 그 핵연료를 안전하게 저장하는 데까지 10년이 넘는 시간이 걸렸다. 후쿠시마 원전의 경우 사고의 규모나 심각도로 볼 때, 우리가 이 사고에 대해서 새롭게 발견될 것이 많이 있고, 이 원자로를 복구하는 데까지 10년 이상 걸릴 것은 분명하다. 원자

력 발전을 하는 중심 국가의 하나인 우리나라에서도 많은 공학자들이 이 과정에 적극적인 관심을 갖고 진지하게 이 사고로부터 교훈을 얻어야 할 것이다. 우리나라처럼 부존자원이 없는 나라는 원자력 발전을 멈출 수 없다. 우리에게 주어진 숙제는 후쿠시마 원전에서와 같은 극심한 자연 재해에 대해서도 일반 대중의 안전을 확보할 수 있도록 그 방안을 마련하는 것일 것이다.

중대사고 연구

중대사고란 원자력 발전소 설계 시 고려되는 “설계 기준사고”를 벗어나 원자로 노심이 용융되는 사고를 말한다. 물론 원전에 설치되어 있는 많은 다중 안전설비들로 인해 이러한 중대사고는 극단적 자연재해나 의도적 테러에 의한 것을 제외하면 그 발생 가능성은 거의 없다. 그러나 후쿠시마 원전과 같이 극단적 자연재해, 혹은 테러, 운전원의 연속적인 실수 등에 의해 중대사고가 발생하면 노심이 회복할 수 없을 정도로 손상될 수 있으며, 격납건물의 밀폐 기능이 손상되는 경우에는 핵분열 생성물이 대기로 방출되어 인근 지역을 오염 및 인명 손상을 초래하여 국가 경제에 막대한 피해를 줄 수 있다.

중대사고에 대한 연구는 현상 이해 차원에서 실험이나 모델 개발 등으로 다양하게 이루어지지만 정량적인 접근은 규제기관의 규제요건에 따라 이행된다. 우리나라

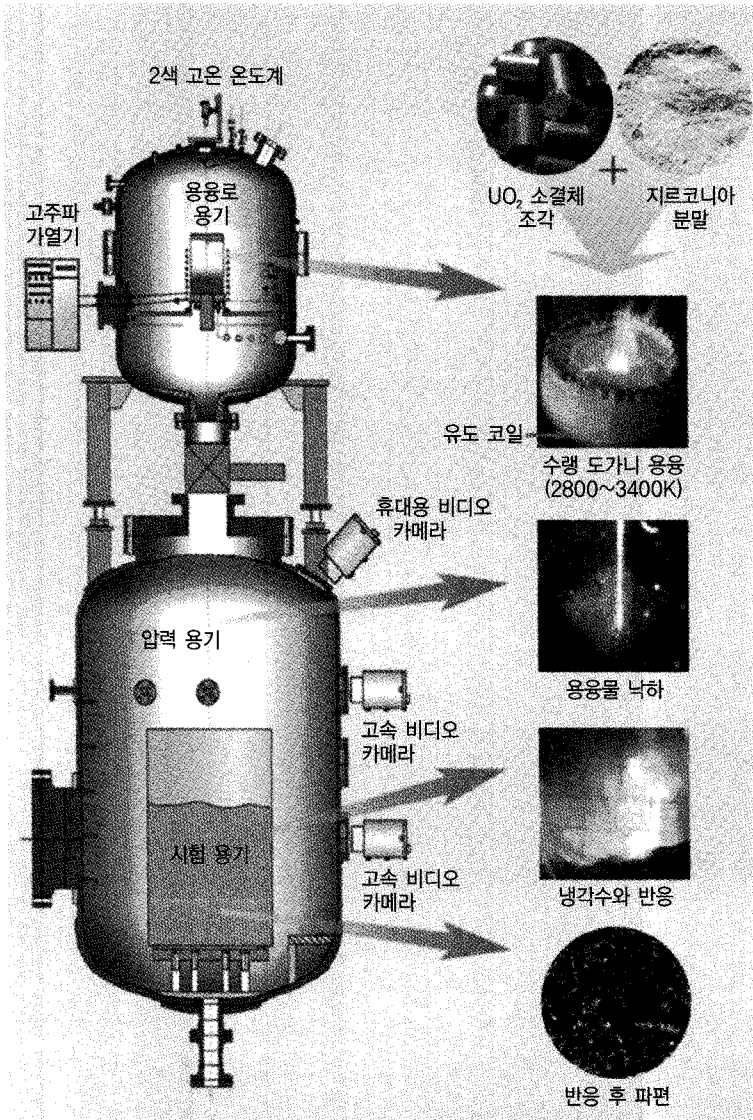


그림 4 TROI 실험 장치 및 그 원리

라의 규제 요건은 미국과 유사하며, 일반적으로 확률론적 안전성 평가(PSA)를 통해 노심손상빈도(CDF)와 핵분열생성물 대량조기방출빈도(LERF)를 평가하여 허용기준 이하로 유지되도록 하는 것과 주요 중대사고 현상에 대해 결정론적인 해석을 수행하여 24시간 이내에 격납건물이 파손되지 않아야 된다는 것이다. 하지만, 후쿠시마 원전사고 이후로 확률론적인 접근, 즉 사고 확

률이 아주 낮으면 무시할 수 있다는 접근 방법의 취약점, 또 격납 건물의 건전성 확보를 24시간 이내에만 관심을 가졌던 부분에 대해 새로운 접근이 필요할 것으로 예상된다.

후쿠시마 사고 전까지는 다소 간과되었던 중대사고 대처 기술, 사고관리 전략을 실효성 있게 할 수 있도록, 노심 용융물 노내 억류 및 냉각 불확실성 정량화, 격납 건물 장기 건전성 확보, 사고 방사선원항 저감화 기술 개발 등의 연구가 앞으로 추진될 예정이다.

중대사고 연구의 핵심은 사고 상황을 예측하고 용융된 원자로 물질을 안전하게 냉각하는 방안을 마련하는 것이다. 중대사고 시 노심 용융이 발생하게 되면 노심 용융물에서 발생한 열로 인해 원자로 용기가 파손될 수 있다. 이를 막기 위해 원자로 용기를 침수시키는 방안이 제시되어왔다. 이를 위해 HERMES(Hydraulic Evaluation of Reactor vessel cooling Mechanism by Self induced flow) 실험 및 해석연구를 수행하였다. HERMES 연구는 원자로 용기 외벽 형상을 실규모의 절반 크기로 모의하여 중대사고 시 원자로 주변에 흐르는 냉각수의 유동을 관찰

하는 실험과 그에 따른 현상을 규명하는 해석연구이다.

중대사고 시 원자로 용기를 보호하기 위한 전략이 실패하여 원자로 용기가 파손되면, 방출된 고온의 원자로 물질이 주변의 물과 반응하여 증기폭발(steam explosion)이 일어날 가능성이 있다. 증기폭발 현상은 고온의 용융물이 물과 반응하여 폭발적인 반응을 일으키는 현상으로 만약 원전에서 증기폭발이 발생하면 격



그림 5 VESTA 실험 장치

납건물의 손상으로 인해 다량의 핵분열 생성물이 대기로 방출될 가능성이 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 원자로 물질과 물과의 증기폭발 현상에 대한 이해가 전 세계적으로 부족한 실정이었다. 한국원자력연구원에서는 실제 원자로 물질을 이용한 증기 폭발 실험 장치인 TROI(Test for Real cOrium Interaction with water)를 자체 기술력으로 제작하고 실험함으로써 실제 핵연료 물질에서도 증기 폭발이 발생할 수 있음을 세계 최초로 확인하는 성과를 거뒀다. 이 연구 결과가 국제적으로 인정을 받음에 따라 현재 프랑스의 CEA 국립 연구소와 공동으로 OECD/SERENA 국제 공동 연구를 수행하고 있다. 2007년 10월부터 2011년 9월까지 4년 간 진행되는 이 연구에는 미국, 프랑스, 독일, 캐나다, 일본을 포

함하여 11개국 16개 기관이 참여하고 있다.

후쿠시마 원전에서 나타난 바와 같이 중대사고 시 핵연료의 산화과정에서 다량의 수소가 방출하여 폭발을 일으킬 수 있으며, 이는 격납건물의 손상으로 이어진다. 우리나라 원전의 경우 격납건물 내 수소 농도가 폭발에 이르지 않도록 제어할 수 있는 수소연소기(ignitor) 및 피동 수소 재결합기(PAR)를 설치하고 있다. 중대사고 시 발생한 수소의 격납건물 내 분포를 계산하여 최적의 위치에 적절한 수소연소기 및 수소 재결합기를 설치하기 위한 연구를 수행하고 있다.

한편, 피동 개념의 중대사고 대처설비는 운전원의 부적절한 판단 및 오류로 인한 사고 진행의 악화를 막고, 중대사고 현상이 예측 가능한 형태로 진행되도록 유도하여 최종적으로 원자로 물질을 안전하게 생각할 수 있어서 중대사고에 대한 근본적인 해결책이 될 수 있다. 이러한 피동개념 중대사고 대처설비의 하나인 Core Catcher 개발을 위해, 실제 핵연료 물질과 코어 캐처에 채택될 보호 물질과 희생 재료의 반응 실험을 수행할 수 있도록 VESTA(Verification of Ex-vessel corium STabilization) 실험장치를 구축하여 연구를 수행 중이다. 약 400kg의 노심 용융물의 생산하고 처리할 수 있는 세계 수준의 실험장치이다.

중대사고는 재료-화학-열전달-유체역학 등 다양한 분야의 기술이 필요하고, 또 초고온 방사성 물질을 다루어야 하기 때문에 원자력 선진국을 중심으로 그 연구가 진행되어 왔다. 그래서 우리나라 경우 원천 기술 확보가 제한적일 수밖에 없었다. 특히 중대사고 현상을 평가하는 전산 코드 분야가 그렇다. 그래서 현재까지 외국 전산코드들을 도입하여 활용하고 있었다. 이제 국내 원자력 기술이 세계 수준에 근접하게 되고 또 이번 후쿠시마 원전 사고로 인해 중대사고 해석기술의 중요성이 부각되면서 국내에 독자적으로 중대사고 해석 코드 체계를 구축하기 위한 연구 개발이 시도되고 있다.