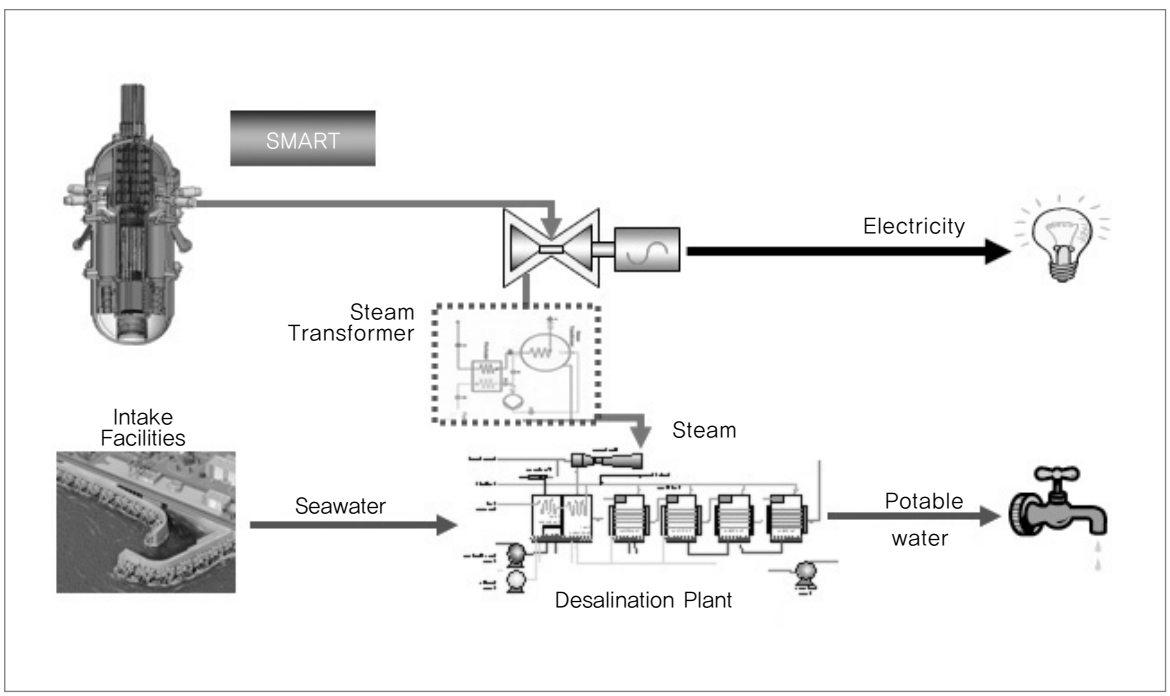
중소형 일체형 원자로
스마트 원자로 개발 현황과 전망

김학노
한국원자력연구원 스마트개발 본부장

안전성 확보를 최우선으로 하고 있는 원자력발전소는 용량과 관계없이 기본적으로 갖추어야 하는 안전설비에 소요되는 비용 때문에 용량이 클수록 상대적인 비용이 감소하는 규모의 경제 원칙이 적용된다. 따라서 전력생산용 원자력발전소는 대용량 원자로가 시장 수요의 주류를 이루고 있고, 개발 및 기술개량도 대용량 원자로 중심으로 이루어져 왔으며, 용량 또한 지속적으로 커지는 추세에 있다. 우리나라의 경우에도 최초로 도입된 고리 1호기는 출력이 600MWe이었으며, 이후 한국표준형원자로의 1,000MWe를 거쳐 UAE에 수출한 것과 동일한 신고리 3,4호기는 1,400MWe로 용량을 증가시켜 왔다. 1980년대 중반 이후 미국을 비롯한 서방세계의 원자력발전소 건설 기피 현상으로 인하여 우리

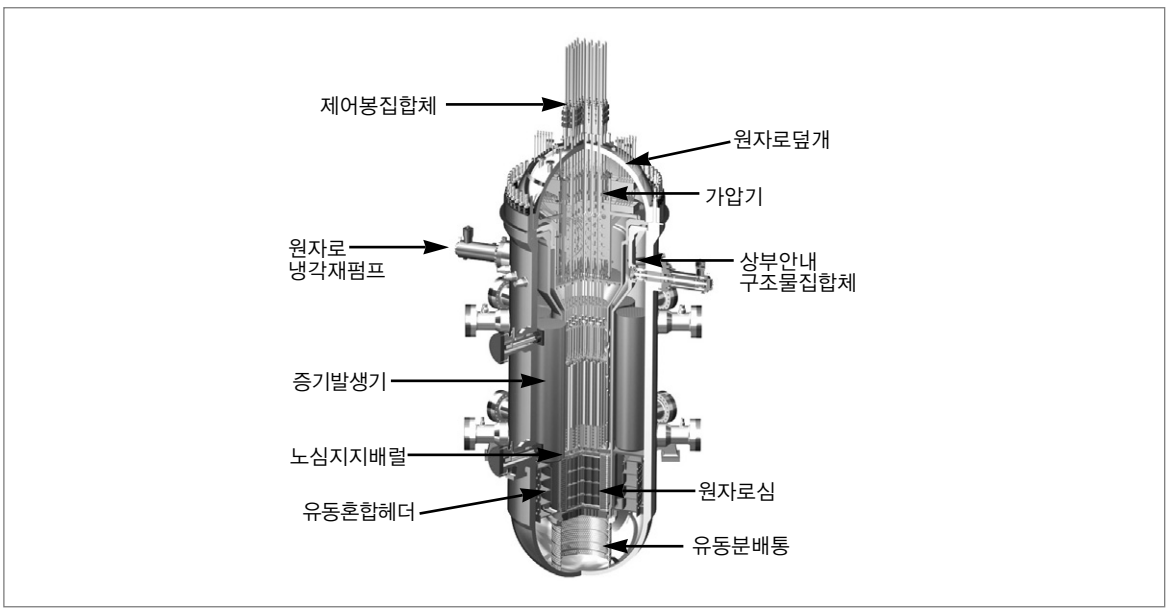
나라를 포함한 몇몇 국가들을 제외하면 원자력 산업은 침체기에 있었다. 원자력발전소를 활발히 건설하는 국가들도 전력생산 관점에서 대용량 원전에 비해 경제성이 떨어지는 소형원자로에 대하여 관심을 보이지 않고 있었다. 그러나 전력망이 하나로 묶여있는 지역이나 국가에 안정적인 전력을 공급하기 위해서는 발전소 하나의 용량이 그 지역 총 전력망 용량의 10%를 넘지 않도록 계획하는 것이 일반적이다. 단일 발전소의 용량이 지나치게 크면 해당 발전소의 불시정지로 전체 전력 공급이 불안정해지는 상황이 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 넓은 지역에 인구가 분산되어 살고 있는 국가나 광역 전력망이 갖추어지지 않은 지역에서는 규모의 경제 원칙에도 불구하고 단일 발전소의 용량을 무제한 크게 할 수 없는 환경이 된다. 또한, 기후변화 대응, 화석연료 가격폭등 등 화석연료의 문제를 극복하기 위하여 원자력 에너지 활용의 다변화에 대한 관심이 증가하면서 열병합발전, 해수담수화 열원공급, 지역난방 등에 사용할 수 있는 소형원자로 개발 노력이 증가하고 있으며, 향후 중소형 규모의 원자로 시장형성에 대한 긍정적 전망에 따라 국제적인 개발 경쟁도 점차 치열해지고 있는 추세이다.

총 전기출력이 100MWe 급인 SMART는 이러한 틈새시장 진입을 위하여 개발되고 있는 원자로이다. SMART는 원자로에서 발생하는 열을 이용하여 소규모 전력을 생산하고 일부 열을 해수담수플랜트의 에너지원으로 활용하여 효율을 극대화하는 개념을 채택한 원자로이다. SMART로부터 에너지를 공급받는 담수계통은 하루 40,000톤의 담수를 생산하도록 설계되었으며, 동시에 전력계통은 90MWe의 전력을 생산할 수 있다. 이 생산량은 인구 10만의 도시에 필요한 물과 전력을 동시에 공급할 수 있는 규모이다.



[SMART 개념도]

SMART 원자로의 특징은 단일 원자로 용기 내에 원자로심, 증기발생기, 원자로냉각재 펌프, 가압기 등 증기를 생산하기 위한 주요 기기를 모두 배치하는 일체형이라는 점이다. 일체형 원자로에서는 주요기기를 연결하는 대형 배관이 불필요하기 때문에 기존의 가압경수로에서 우려하는 중요 사고의 하나인 대형 배관의 파단에 의한 냉각재상실사고의 가능성이 원천적으로 배제되어 안전성이 획기적으로 증대될 수 있다. 또한, 비상시 전원의 공급이나 운전원의 조작이 없이도 작동되는 안전장치인 피동잔열제거계통이 설치되어 원자로의 정지 후 핵분열 생성물에 의하여 발생하는 잔열을 제거할 수 있도록 설계되어 있다. SMART는 이 두가지 특징 외에는 인허가 시현성의 극대화를 위하여 기존의 상용 원자로에서 적용되어 입증된 기술을 채택하고 있다. 즉, 저농축 이산화우라늄 핵연료를 사용하며 반응도의 제어에는 산화가돌리니움 가연성 중성자흡수봉, 제어봉, 붕소 등 상용 가압경수로와 동일한 개념을 채택하고 있다. 원자로냉각재펌프의 전동기는 고정자와 회전자에 냉각재가 스며드는 현상을 방지하기 위하여 밀봉 캔을 고정자와 회전자에 용접하여 냉각재와 격리한 캔드 모터를 사용함으로써 축 밀봉을 통한 원자로냉각재의 누설을 제거하고 있다. 증기발생기는 열전달면적 대비 체적을 최소화 할 수 있는 관류식 나선형 형태인데, 원자로냉각재는 상용가압경수로와는 달리 전열관 외부로 흐르고 증기가 생성되는 2차측 급수가 전열관 내부로 흐른다. 노심보다 높게 배치된 증기발생기는 원자로냉각재펌프가 동작하지 않는 상황에서도 노심의 잔열을 제거하는 자연 순환 유동을 형성한다. 원자로용기 원통의 하단에는 유동혼합헤더가 설치된다. 이는 노심지지배럴의 하단부를 둘러싸고 있는 동심원 형태의 원통형 구조물로서 증기발생기를 통과한 냉각재가 노심으로 다시 유입되기 전에 혼합되도록 하며, 노심 유량 및 온도의 비대칭 현상을 방지하며 증기발생기의 하단부를 지지한다. 또한, 원자로용기의 하부에는 유동분배통이 설치되어 유동혼합헤더를 통과한 원자로냉각재가 균일한 유동분포를 유



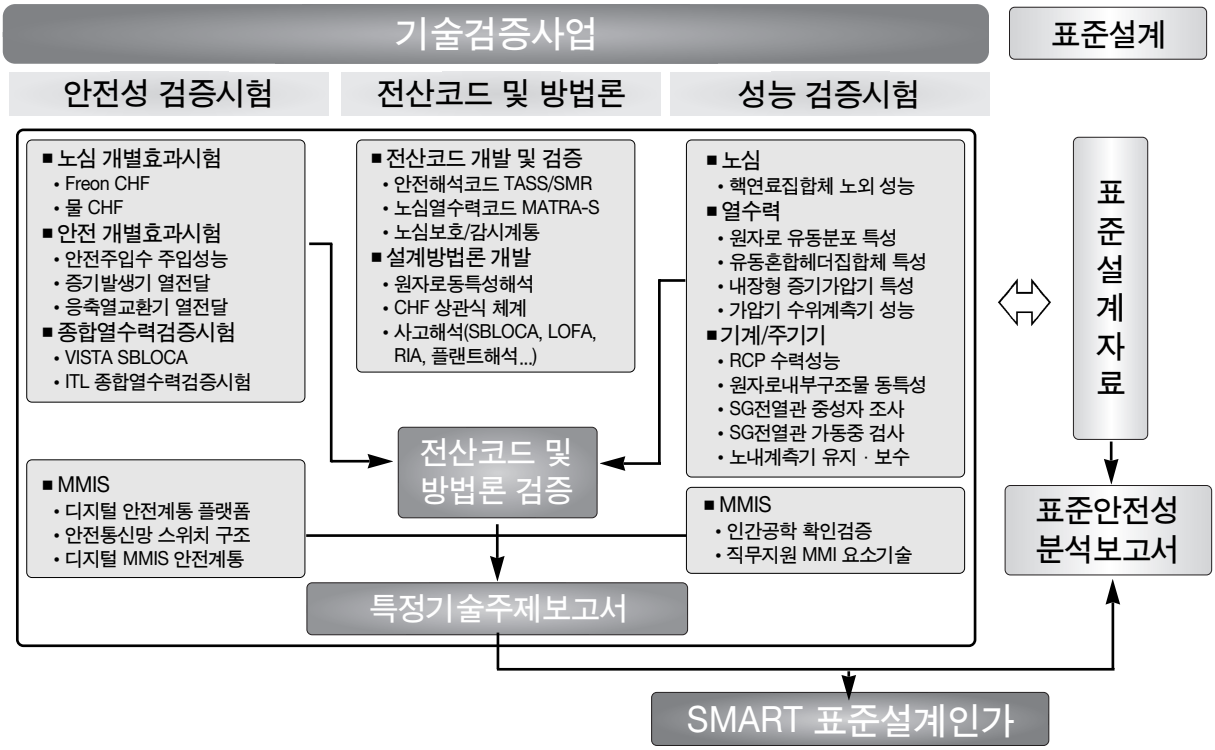
[SMART 원자로집합체]

지하도록 하고 있다. 원자로덮개와 상부안내구조물 집합체 사이의 공간은 가압기 기능을 수행하여 원자로냉각재계통의 압력을 제어한다. 원자로냉각재계통은 15MPa의 압력으로 운전되며 설계압력 17MPa에서는 계통의 과압을 방지하기 위하여 2개의 안전밸브가 설치된다.

SMART 원자로의 안전성을 확인하는 첫 단계는 우리나라의 원자력 규제기관인 교육과학기술부로부터 표준설계인가를 획득하는 것이다. 표준설계인가란 원자력법 제12조 2항에 따라 동일한 설계의 발전용 원자로 및 관계시설을 반복적으로 건설하고자 하는 경우 그 설계에 관하여 사전에 교육과학기술부장관의 인가를 받는 것을 말한다. 표준설계인가를 획득하기 위해서는 SMART 원자로의 설계 자체는 물론 설계에 사용되는 컴퓨터 프로그램, 해석방법론 및 설계자료 등에 대한 검증이 모두 완료되어야 한다. SMART 원자로 설계의 대부분은 상용 가압경수로의 입증기술을 적용하기 때문에 별도의 검증이 필요하지 않지만 상용 원자로와 상이한 부분의 검증을 위하여 기술검증사업이 정부의 지원으로 수행되고 있다. 기술검증사업에서는 총 22건의 성능 및 안전성 개별효과 및 종합효과 검증시험을 수행하고, 3건의 핵심 설계코드와 5건의 설계방법론을 개발하고 있다. 또한, 인허가에 대비하여 선정된 시험, 코드 및 설계방법론에 대하여 총 11건의 특정기술보고서를 별도로 생산하고 있다. 기술검증사업에서는 2010년까지 주요 검증시험과 설계코드 및 방법론 개발을 완료하고, 2011년에는 표준설계인가 획득을 위한 인허가 지원 및 보완시험 등을 수행할 계획이다.

SMART 표준설계는 한국원자력연구원이 원자로 부분인 핵증기공급계통(NSSS: Nuclear Steam Supply System) 설계를 담당하고, 한국전력기술(주)가 플랜트종합설계(BOP: Balance of Plant)를 한전원자력연료(주)가 핵연료설계를 담당하며 국내 원자력 기기공급업체인 두산중공업이 기기의 제작성 검토 등을 수행하고 있다. SMART 표준설계는 2009년 1월부터 2010년 12월까지 완료하여 표준설계인가를 신청한 후 2011년 12월까지 인허가 심사를 받을 예정으로 있다. 통상 원자력발전소의 인허가 검토에 소요되는 기간이 24개월인 점을 감안하면 인허가 기간이 충분하지 않지만, 이를 보완하기 위하여 2010년 2월 이미 상당한 부분의 설계결과와 검증계획이 규제기관에 제출되어 사전 인허가 심사가 진행되고 있다. 표준설계인가 사업은 한국원자력연구원이 주관하여 수행하고 있는데 정부의 연구비투자와 함께 한국전력공사, 포스코, STX중공업, 대우조선해양, 대우건설, 삼창기업, 일진에너지 등 민간기업 컨소시엄의 공동 투자로 사업이 진행되고 있다. 민간기업 컨소시엄은 표준설계인가 사업이 성공한 후 기술실시권을 확보하여 해외수출 사업을 수행하게 된다.

최근 미국을 중심으로 한 원자력 선진국에서는 중소형원자로 개발에 대하여 공격적인 시장진입 계획을 잇달아 발표하고 있다. 상용 원자력발전이 본격적으로 시작된 1960년대부터 원자력발전 시장을 석권하였던 Westinghouse 사는 SMART와 유사한 개념의 일체형 원자로인 IRIS를 꾸준히 개발하고 있다. 이 원자로는 열출력이 SMART의 3배 정도로 실제 공학적 설계검토가 충분히 이루어지지 않았다는 비판을 받아 왔으나 최근 SMART와 유사한 출력의 원자로 개발계획을 발표한 바 있다. 미국의 B&W 사는 출력 125MWe 일체형원자로인 mPower 개발계획을 발표하였다. 이 원자로는 기차로 운반할 수 있을 정도로 원자로집합체의 크기를 줄여서 미국 내 노후화된 화력발전소를 대체하



[SMART 기술검증사업]

는 것이 목표로 2018년에 첫호기 건설 완공을 목표로 하고 있다. 아르헨티나의 INVAP은 출력 27MWe의 일체형원자로인 CAREM 시범원자로의 자국내 건설계획을 발표하였다. 이 외에도 출력이 45MWe로 SMART의 절반 수준이나 원자로냉각재펌프가 필요 없는 개념의 일체형원자로인 NuScale 등 중소형 원자로 개발 경쟁이 점점 심화되고 있다. 이들 원자로는 나름대로 혁신적인 개념을 채택하여 경쟁력 강화를 꾀하고 있는데, 미국의 현행 규제기준에 적합하지 않은 부분에 대해서는 규제기준 변경 및 개선을 유도하는 등 인허가와 관련된 사전 작업을 치밀하게 전개하고 있다. 이에 반하여 SMART는 현행 국내 가압경수로 규제기준을 만족시키는 개념을 채택하여 인허가 시현성을 강화하는 전략을 채택하고 있다. 따라서 개발 초기에 제시된 여러 가지 혁신 개념을 포기하여 경쟁력이 저하되고 있다는 비판에도 불구하고 가장 먼저 실제 건설에 착수하여 시장에 진입할 수 있는 일체형원자로이라는 점이 SMART의 가장 큰 장점으로 부각되고 있다.

현재 중동 및 중앙아시아, 북아프리카, 동남아시아, 남미의 개발도상국 등 물 부족 국가나 소형 전원 개발을 계획 중인 국가들은 우리 고유의 기술로 개발된 SMART에 큰 관심을 보이고 있다. 이러한 국제적인 여건을 바탕으로 SMART는 연구용원자로, 대형 원자력발전소와 더불어 수출산업화를 이룩하여 세계 중소형 원자로 시장을 주도할 수 있을 것이며, 고유원전을 수출하는 원자력 5대강국으로의 진입은 물론 에너지분야의 신성장동력 창출에도 큰 역할을 담당하게 될 것이다. KEA