

혁신형 소형모듈원자로(SMR) 개발현황과 발전방향

• 최 광 식

한국수력원자력(주) 부장

SMALL
MODULAR
REACTOR

1. 서론

우리나라는 해외에서 에너지의 대부분을 수입하고 있는 자원빈국이다. 생활수준의 향상으로 인해 전력 소비가 증가하고 있는 상황에서 적은 비용으로 많은 전력을 생산하는데 있어 그간 원자력발전은 중요한 역할을 수행해왔다. 하지만 원자력발전은 높은 경제성과 온실가스를 배출하지 않는다는 장점에도 불구하고 안전에 대한 우려가 큰 것이 사실이다. 또한 전 지구적 위기인 기후변화를 해결할 방법으로 다양한 과제를 추진하고 있다. 재생에너지의 한계를 보완할 현실적인 대안으로 원전, 수소 등 다양한 친환경 에너지원에 대한 관심이 커지고 있다. 이에 따라, 세계 여러 국가에서는 기존의 원자력발전의 장점을 그대로 유지하되 안전성을 획기적으로 향상시키고 전력 생산 뿐만 아니라 여러 용도로 사용이 가능한 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, 이하 SMR) 개발을 추진하고 있으며, 우리나라도 수년 전부터 혁신형 SMR을 개발하고 있다.

이에, 본고는 우리나라가 개발하고 있는 혁신형 SMR에 대한 개발현황과 성공을 위한 발전 방향을 제언하는 데에 목적이 있다. 본고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 SMR에 대한 일반적인 사항을 살펴보고, 3절에서는 우리나라가 개발하고 있는 혁신형 SMR의 추진경위, 기술개발계획 및 설계특성, 향후 산업생태계 변화 등을 살펴보고, 4절에서는 혁신형 SMR이 성공적으로 개발되어 사업화까지 성공하기 위한 발전 방향을 제시하고자 한다.

2. 소형모듈원자로(SMR) 개요

우선 소형모듈원자로, SMR의 일반적인 특성에 대해 살펴보도록 하겠다. SMR은 전 기출력 300MWe급 소형원자로를 말하며, 크기가 작아 주요 구조물, 계통, 기기의 모듈 단위 공장제작이 가능해야 한다. SMR은 기존의 대형원전에 비해 전기 출력이 작기 때문에 경제성이 문제가 될 수 있다. 이러한 약점을 극복하기 위해서는 원자로를 모듈화하여 공장에서 제작하고 건설 현장에서의 작업을 최소화함으로써 건설 공기를 획기적으로 단축시켜야 하고 운전 유지보수 분야에 투입되는 인력을 최소화해야만 경제성을 높일 수 있다.

SMR은 기존 대형원전과 비교하여 다양한 장점을 가지고 있다. 우선 지진이나 해일 등으로 인해 전력계통이 상실되더라도 중력 및 밀도차 등 자연력에 의한 냉각수 순환이 완전 피동안전계통에 의한 장기간 냉각으로 일본 후쿠시마 원전과 같은 사고를 원

천적으로 차단하여 중대사고 발생 가능성을 획기적으로 줄일 수 있다. 사실상 중대사고 가능성은 제로에 가깝다. 만약에 사고가 발생한다 하더라도 사고의 영향을 매우 제한적인 범위에 국한시킬 수 있어 주민 대피가 필요 없는 수준의 안전성을 확보할 수 있다. 획기적 안전성 향상과 이를 기반으로 비교적 높은 사회적 수용성이 기대되어 SMR은 대형원전과 다르게 산업단지, 데이터센터 등 수요지에 가까운 곳에 건설이 가능하여 열이용 등 다목적 활용성을 높여 분산형 전원으로서의 가치가 높아지게 된다. 그리고 대형원전에 비해 단위 프로젝트당 투자비와 공사기간이 줄어들기 때문에 상대적으로 투자가 용이하고 자본 회수도 빨라질 수 있다. 안전성 등 우수한 기술력 이외에도 이와같은 우수한 투자용이성으로 인해 해외에서는 상대적으로 규모가 작은 민간 사업자들도 SMR 개발에 뛰어들고 있는 상황이다. 물론 우리나라도 여러 민간사업자들이 SMR에 관심을 가지고 투자에 적극적으로 임하고 있다.

마지막으로 SMR은 전력생산 뿐만 아니라 수소생산, 공정열 제공 등 다양한 용도로의 활용이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 대형원전에 비해 원자로당 출력이 작고 최신 기술이 적용되어 우수한 탄력운전 성능을 가지고 있다. 우수한 다목적 활용성과 탄력운전성능은 신재생에너지가 가지는 내재적인 문제점인 간헐성을 보완할 수 있어 신재생에너지와 조화를 통해 신재생에너지의 안정적인 확대에도 기여할 수 있다. SMR은 신재생에너지와 경쟁하는 관계가 아니라 탄소중립이라는 목표를 달성하기 위해서 서로를 보완하는 관계로 발전할 수 있다. 이러한 장점 때문에 우리나라를 비롯해서 미국, 프랑스, 일본 등에서 약 80여 종의 SMR을 개발중이고 다양한 용도로의 활용이 예상되고 있다. 그중에서도 2050 탄소중립 실현이라는 전 지구적인 과제해결을 위해 가장 필요하다고 판단되는 노후 석탄 화력을 대체하려는 수요가 가장 많을 것으로 추정된다.

3. 혁신형 SMR 개발현황

가. 사업추진경위

혁신형 SMR 기술개발사업은 2019년부터 한국수력원자력과 한국원자력연구원을 중심으로 새로운 SMR 개발을 위한 논의를 시작했고, 2020년부터는 산학연 추진위원회 및 산학연 포럼을 통해 혁신형 SMR의 개념 그리고 최상위 요건을 논의하여 우리가 개발할 혁신형 SMR을 경수형의 전력 생산용 노형으로 결정했다.

산학연을 중심으로 이루어진 기술적 논의와 병행하여 범정부적인 컨센서스를 모으고 혁신형 SMR의 기술개발 재원을 확보하기 위한 정부 연구개발사업 추진, 인허가 관련 법·제도 개선방안 논의 및 협의가 혁신형 SMR 국회포럼을 통해 진행되었다. 2021년 4월, SMR의 필요성과 개발 방향에 대한 논의를 시작으로 2차 포럼에서는 기본적인 개발 전략과 수출 환경을 어떻게 조성할 것인가에 대한 방안이 논의되었다. 3차 포럼에서는 SMR이 가지고 있는 여러가지 이슈들이 무엇인지, 그것을 극복하고 성공하기 위한 전략들이 논의되고 보고되었으며, 4차 포럼에서는 ‘i-SMR의 성공적 개발 및 사업화 추진 방안’, 5차 포럼에서는 ‘탄소중립 가속화를 위한 i-SMR의 역할과 국내외 사업화 추진방안’이라는 주제로 개최되었다.

이러한 노력의 결과로 2022년 혁신형 SMR 기술개발사업이 정부 예비타당성 심사를 통과하였고 2023년부터 약 4천억 원의 예산을 투입하여 2028년까지 6년간의 일정으로 기술개발이 진행 중이다. 혁신형 SMR 기술개발 사업을 총괄할 혁신형 SMR 기술개발사업단은 2023년 2월 6일 법인 설립을 완료했으며 2023년 4월 24일 대전시 엑스포타워 사무소에 입주하여 업무를 개시했다. 예타사업 40개 세부과제 중에 16개 과제는 2023년에 착수되어 진행 중이고, 금년 착수 예정과제는 3월 말까지 과제공고를 통해 수행기관을 결정할 예정이다.

표 1 혁신형 SMR 국회포럼 개최 이력

구분	일시	주제
제1회	2021. 4. 14.	SMR 개발 왜 해야 하는가?
제2회	2021. 9. 25.	i-SMR 수출·사업화를 위한 환경 조성
제3회	2022. 4. 18.	i-SMR 경쟁력 제고 및 성공 전략
제4회	2023. 2. 1.	i-SMR 성공적 개발 및 사업화 방안
제5회	2024. 1. 5.	탄소중립 가속화를 위한 i-SMR 역할 및 사업화 추진방안

나. 기술개발 계획

다음으로 혁신형 SMR 기술개발 계획이다. 혁신형 SMR은 안전성, 경제성, 유연성 등의 3가지 측면을 고려하여 개발할 예정이다. 안전성 측면은 비정상 상황에서 전기 및 조작이 필요 없는 피동 안전계통 도입, 중대사고 발생 가능성 실질적 배제, 중대사고에 대한

저항성을 획기적으로 증대시켜 대형원전보다 10,000배 높은 안전성 향상, 주민 대피가 필요 없는 수준의 안전성을 확보할 예정이다. 경제성 측면에서는 일체형 원자로 모듈의 공장 제작을 통해 건설비를 절감하고, 계통 공유 및 단순화, 4차 산업혁명 기술 등 첨단 기술을 적용한 운전 및 유지보수를 통해 대형원전 수준의 경제성을 확보하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 재생에너지의 간헐성을 보완하기 위해 탄력운전 능력을 극대화하고, 수소 생산 등 다목적으로 활용이 가능하도록 설계 및 검증을 할 계획이다.

혁신형 SMR은 [그림 1]에서와 같이 한국수력원자력(주) 자체 연구개발비를 활용하여 2021년부터 3년간에 걸쳐 기본설계를 진행했는데, 여기에는 한국수력원자력 뿐만 아니라 한국원자력연구원, 한국전력기술, 한전원자력연료 등이 모두 참여했다. 연구개발 재원이 충분하지는 않지만, 정부 예타과제가 착수되기 전에 혁신형 SMR의 기본적인 설계를 완성하기 위해 노력했다. 2022년 예비타당성 심사 통과로 본 사업은 산업부/과기부 주관의 정부연구개발사업으로 전환되었고 2023년부터 약 4천억원의 예산으로 6년간의 일정으로 추진되며, 2025년 말이면 원자력안전위원회에 표준설계인가를 신청하기 위한 표준설계를 완료하고, 3년간의 검증 및 인허가 과정을 거쳐서 2028년에는 혁신형 SMR에 대한 표준설계인가를 획득하는 것을 목표로 하고 있다. 혁신형 소형모듈원자로 예타과제는 설계, 혁신기술, 제조기술의 3개 내역사업으로 구성되어 있다. 내역사업별 중점분야로는 설계 분야는 노심, 계통, 종합설계 등 3개 분야, 혁신기술 분야는 검증, 경제성, 안전성 등 3개 분야, 제조기술 분야는 부품/소재, 혁신제작 등 2개 분야로 구성되어 있다.

그림 1 혁신형 SMR 기술개발 추진 일정



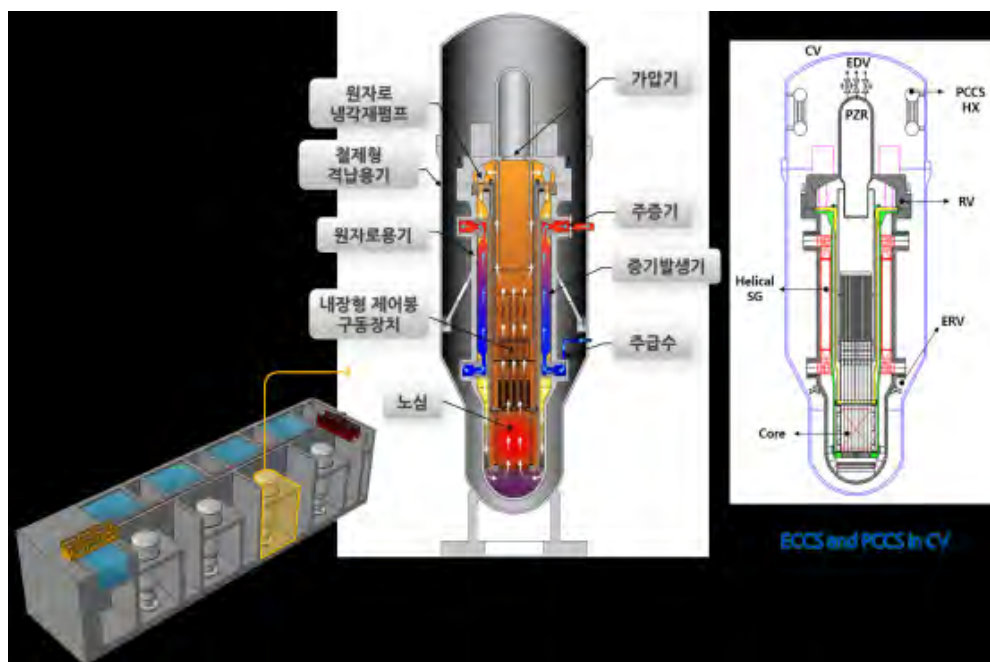
다. 설계특성

현재까지 개발된 혁신형 SMR의 주요한 설계특성은 크게 일체형 원자로, 피동형 안전계통, 무봉산 운전, 복수모듈 배치 등 4가지로 요약할 수 있다. [그림 2]와 같이 원자로 모듈은 기본설계가 완성되어 가는 중에 있는 고유한 기술로 개발한 혁신형 SMR 원자로 모듈이다. 열을 생산하는 노심 그리고 열을 이송하는 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 가압기 그리고 방사성 물질의 외부 누출을 방지하는 격납용기까지, 하나의 모듈로 구성되어 있는 혁신형 SMR 모듈은 지금까지 SMART 원자로 기술과 산업계에서 개발한 피동안전계통에 관련된 기술의 결정체로 안전성 및 경제성이 최적화된 일체형 원자로이다. 일체형 원자로로는 위협적인 냉각재 유출 사고를 원천적으로 배제하여 사고 대응에 효과적이며 공장 생산 및 현장 조립에 최적화된 설계이다.

전력 및 운전원 조작이 필요 없는 피동형 안전계통으로는 피동 비상노심냉각계통, 피동 격납용기냉각계통, 피동 보조급수계통 등이 채택되어 있으며, 현재 대비 사고 가능성을 10,000분의 1 이하로 줄일 수 있고, 계통도 단순화할 수 있어 고장 요소 및 정비 수요를 줄여 안전성, 경제성 제고에 효과적이다. 무봉산 운전으로 계통이 단순화되었고 방사성폐기물의 양을 최소화 시키면서 배관 파단의 가능성 자체를 원천적으로 배제한 설계이다. 또한, 장기적인 피동냉각이 가능하고 내장형 제어봉 구동장치를 채택하여 이 탈사고를 원천적으로 제거한 획기적인 설계를 적용했다. 마지막으로 경제성 향상에 크게 기여할 복수모듈 배치는 통합 주제어실과 대형 기기 및 계통 공유 등을 통해 운전 및 정비 인력을 줄일 수 있는 설계이다.



그림 2 혁신형 SMR 원자로 및 격납용기 설계



라. 산업생태계 변화

아직까지 혁신형 SMR에 대한 구체적인 설계가 완성되지 않았고 건설도 준비되지 않은 상황이다. 다만, 기존의 대형원전과 같은 원전산업 생태계와는 많은 변화가 있을 것으로 예상하고 있다. 여기에서 제시한 것들은 현재의 시점에서 예상해 볼 수 있는 혁신형 SMR 도입과 관련한 산업생태계 변화에 대한 이야기이다.

먼저 기자재 물량 측면에서 기존 대형원전 1기 건설시 대형 능동기기, 대용량 밸브가 소량 필요한 반면, 혁신형 SMR 시장에서는 기기가 소형화되면서 운전성, 안전성 확보에 필요한 밸브 등 핵심 기자재의 수량이 증가하게 될 것이다. 대형원전에는 호기당 4개가 필요한 가압기 안전밸브를 예로 들면 혁신형 SMR에는 모듈당 2개, 4개 모듈 건설시 8대가 필요하다. 현재 설계에서 예상해 볼 때 혁신형 SMR 4개 모듈 건설시 48,000개 이상의 밸브, 1,200개 이상의 기계부품 등 제조물량이 필요하다. 따라서 소재 및 기자재 산업 역량을 활용한 혁신형 SMR 기자재 공급망 구축이 필요하다.

제조기술 측면을 살펴보면 대형 콘크리트 격납건물에서 저합금강 철제형 격납용기로

변경되기 때문에 격납용기 제작기간 및 비용이 혁신형 SMR 경제성에 큰 영향을 줄 수 있다. 또한 기존에는 현장에서 많은 용접이 이루어지기 때문에 많은 작업시간이 소요되고 제작공정도 주조, 단조, 가공, 용접 등 다수의 공정이 필요하지만 혁신형 SMR에서는 전자빔, 클래딩 자동용접 등을 통해 제작시간을 획기적으로 단축시킬 필요가 있다. 따라서 혁신형 SMR의 경제성 확보를 위해서는 혁신 제조기술 적용이 필수적임으로 소재가공, 제작기술 분야에서도 신규 제조기술 도입, 자체기술 확보를 위한 다각적인 투자와 지원이 필요하다.

또한 혁신형 SMR에는 새로운 계측기 개발도 필요하다. 혁신형 SMR의 운전 환경조건은 정상운전 조건에서도 고온의 환경(~200℃)에 노출되고 사고 조건 시에는 기존 원전보다 더 높은 고압 환경이며, 설치 및 유지보수 공간도 매우 협소할 것으로 예상된다. 현재 예상할 수 있는 필요 계측기로는 Radar 방식의 수위 측정 계측기, 격납용기 외부에서 노외중성자속을 계측할 수 있는 계측기, 초음파 등 비차압식 원자로냉각재펌프 유량 계측기 등이며 또한 전송기 등 고온 환경에 민감한 부품은 대부분 격납용기 외부에 배치할 필요가 있다. 따라서 고온-고압 조건에서의 계측기기 건전성 및 생존성 확인을 위한 기기검증 수요가 대폭 증가할 것으로 예상됨으로 혁신형 SMR용 기기 검증 시스템도 조기에 확충할 필요가 있다.

마. 혁신형 SMR 활용 사례

에너지 소모가 많은 최첨단 솔루션 적용을 통해 경쟁력 확보가 필요한 스마트 시티와 안정적, 경제적, 친환경 에너지원인 SMR이 결합하면 상당한 시너지가 예상된다. 한국 수력원자력은 이 시너지를 구체화하고 시각화 시뮬레이션 할 수 있는 SMR Smart Net-Zero City(SSNC) 플랫폼을 개발하고 있다. 후보지역의 산업, 기후환경, 정책 등 실제 데이터를 조사하고 반영하여 i-SMR 및 신재생에너지로 구성된 CF100 (Carbon Free 100) 기반의 탄소중립 도시 모델을 만들고 있다. 이 플랫폼을 통해 스마트 시티를 구성하고 있는 각 산업단지, 주거지역에 전력, 담수, 수소, 공정열 등 도시가 필요로 하는 모든 형태의 에너지를 경제적으로 생산하고 효율적인 소비 및 순환을 위한 관제 방법을 시뮬레이션을 통해 구체적으로 확인할 수 있다. 현재까지 국내외 실제지역을 기반으로 해당지역이 향후 SSNC로 개발되면 어떤식으로 운영될지를 보여주는 가상 SSNC 모델

을 개발하였고 COP28 등 국내외 각종 행사에서 시연을 통한 홍보를 하고 있다. 이 모델을 본 많은 관계자들로부터 미래 탄소중립 실현을 위해 이 모델의 실현이 필요하다는 많은 공감을 얻고 있다. 한국수력원자력은 혁신형 SMR 개발과 병행하여 SMR 스마트 넷제로시티 모델을 지속적으로 개선하여 향후 혁신형 SMR사업화 모델로 활용할 계획이다.

그림 3 혁신형 SMR을 활용한 Smart Net-Zero City(예시)



4. 혁신형 SMR 성공을 위한 제언

이상으로 혁신형 SMR 사업추진 경과, 기술개발 계획 및 설계특성, 그리고 예상되는 산업생태계 변화에 대해 살펴보았다. 혁신형 SMR은 현재 개발이 진행 중이다. 혁신형 SMR이 적기에 개발되어 해외시장을 선점하기 위해서는 여러 가지 풀어야 할 숙제가 있다. 혁신형 SMR에는 기존 대형원전에는 없는 혁신적인 기술들이 많이 채택되어 있다. 이러한 혁신적인 기술과 현재의 인허가 제도는 상충되는 부분이 많이 발생할 수 있다. 따라서 2030년대에 혁신형 SMR이 시장에 정착하기 위해서는 혁신형 SMR에 맞는 새로운 규제체계가 마련되어야 할 것이다.

2030년대에 본격화될 국내외 SMR 시장에서 혁신형 SMR이 시장을 선점하고 주도적인 역할을 하기 위해서는 최초호기의 신속한 국내 건설이 필요하다. 우리나라가 아랍에미리트(UAE)에 APR1400 원전을 수출할 수 있었던 것은 다른 여러 가지 이유도 있

겠지만 국내에 신고리 3,4호기를 건설하고 있었기 때문이다. 원자력발전소를 도입하려는 국가는 건설, 운영이 입증된 발전소를 선호한다. SMR 또한 마찬가지다. 따라서 혁신형 SMR의 해외수출을 위해서는 국내 실증 건설이 필수적이므로 국내 건설을 위한 준비를 지금부터 해 나갈 필요가 있다.

앞서 설명한 바와 같이 SMR의 이용 분야와 운영방식은 기존의 대형원전과 비교할 때 매우 다양할 것으로 예상된다. 국내외에서 다수의 프로젝트가 동시에 진행될 것을 가정할 때, 기존과 같은 소수의 공기업 중심으로는 모든 수요에 대응하기 힘들 수 있다. 에너지 다소비 기업, 데이터센터, 산업단지 등에서 요구되는 열, 전기 등 다양한 수요에 대해서는 민간기업이 주도적으로 SMR을 건설, 운영하면서 필요한 에너지를 공급하는 것이 효율적이다. 예컨대 신규 원전 기술 개발 및 도입 지원을 목적으로 규제비용 감축, 인센티브 부여 등 지원방향을 제시하는 미국의 ADVANCE ACT와 같이 사업단계별로 민간 사업자의 진입을 활성화하고 지원하기 위한 법, 분산에너지로서의 SMR 활성화를 위한 제도 정비, 민간사업자의 수익성 강화를 위한 전력 직거래 제도, SMR 전용 전력요금제 등 법제도 마련도 병행되어야 하겠다.

마지막으로 혁신형 SMR 개발은 국가적인 사업으로 진행되고 있다. 이 원자료가 적기에 기술개발이 완료되고 건설되어 탄소중립에 기여할 수 있도록 관계기관의 모든 이들의 헌신적인 노력과 국민 여러분의 혁신형 SMR에 대해 많은 관심과 지지가 필요하다고 생각한다. 끝.

참고문헌

국내 문헌

- 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 2021년도 예비타당성조사 기획보고서, 혁신형 소형 모듈원자로 기술개발사업, 2021.9
- 한국과학기술기획평가원, 2021년도 예비타당성조사 보고서, 혁신형 소형모듈원자로 기술 개발사업, 2022.8

웹사이트

- 한국수력원자력(주) 홈페이지, www.khnp.co.kr
- 혁신형 SMR 기술개발사업단 홈페이지, www.ismr.or.kr