

## SMR 분야 기술현황과 향후 산업 발전방안 원자력미래포럼 연구용역을 통한 정책제언



오승종

국제원자력대학원대학교 교수

- 서울대 원자력공학 학사
- 미국 U.C. Berkeley대 원자력공학 석사, 박사
- 미국 JAYCOR Inc. 수석연구원
- 미국 EPRI 프로젝트 매니저
- 한전 전력연구원 KNGR 종합분석 그룹장, 설계개발그룹장
- 한수원 원자력발전기술원 운영기술실장, NRC설계인증 TF장
- KINGS 정교수, 학생처장 교무처장
- KINGS 명예교수
- 연세대 건설환경공학과 객원교수

### 서론

최근 기후 변화에 따른 저탄소 에너지원의 필요성, 그리고 서구 시장에서 대형원자로 건설의 어려움으로 중소형로에 대한 관심이 고조되고 있다. 중소형로의 장점으로는 안전성 향상, 초기 투자 비용 저감, 발전 체계의 유연성, 화력발전소 대체, 신재생에너지와의 조화, 지역난방 등 비전력 분야 활용을 들 수 있다. 한국은 1997년부터 SMART를 개발하였으며, 미국 에너지부(DOE)는 원자력생태계 유지 차원에서 지속적으로 중소형 원자로 개발을 지원하여왔다.

중소형로는 상용원전의 경수로 기술에 기반을 두어 빠른 시장 진입을 목표로 하고 있는 경수로형 Small Modular Reactor(SMR)와 소듐냉각고속로, 납냉각고속로, 초고온가스냉각로 등 非 경수로형 Advanced Modular Reactor(AMR)로 구분된다. AMR은 GEN IV 기

술에 기반하고 기술 개발이 진행 중이나, SMR 경우 NuScale을 필두로 시장 진입 단계에 도달하고 있다고 판단된다.

국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)는 World Energy Outlook 2020에서 2050년 탄소중립 단계에 도달하기 위하여, 원자력, 특히 SMR의 역할을 강조하고 있으며, 여러 국가가 이에 관심을 표명하고 있다. 미국, 영국은 자국의 원자력산업 육성 차원에서 SMR 프로젝트를 지원하고 있으며, 핀란드는 지역난방, 에스토니아, 폴란드 등은 초기 투자 및 그리드에 대한 고려로 SMR 도입을 검토하고 있다. 남아공의 NuScale에 대한 검토 등, 중동과 아프리카 국가도 관심을 표명하고 있다. 프랑스 EdF 회장 Jean-Bernard Levy는 프랑스 SMR 프로그램에 대해 '앞으로 대형원전 대비 경제성과 시장 규모는 예측하기 어렵지만, 현재 시장 요구에 부응하는 SMR이 필요하다'고 피력하였다[IEA

Webinar, November 25, 2020]. 우리나라도 수출 차원에서 SMR Option이 필요하며, 그동안 개발된 SMART를 기반으로 건설, 운영/정비, 경제성이 한 단계 upgrade된 시장 경쟁력 있는 SMR 개발이 필요하다. 원자력미래포럼 SMR 분과는 SMR 기술현황을 살펴보고 경쟁력 있는 혁신형 SMR 개발을 위한 추진 로드맵을 개발하였다.

### 시장 진입 단계를 고려한 혁신형 SMR 경쟁력 확보 전략

현재 시장 진입에 제일 근접한 SMR은 NuScale이다. NuScale사는 2007년에 설립되어 2011년부터 Fluor(엔지니어링, 건설회사)가 주 투자자로 참여하고 있다. 기본 노형은 피동형 안전 계통을 채택한 60MWe모듈로 구성, 12개 모듈을 커다란 수조에 장착하는 개념이다. 현재 미국 NRC로부터 표준설계 설계승인(2020년 9월 11일)을 획득하였으며, 설계인증 절차가 진행되고 있다. 최초 호기로 Utah Associated Municipal Power System(UAMPS)를 고객으로 미국 아이다호 국립 연구소 내 부지에 건설을 추진 중이다. 시장 진입에 제일 큰 어려움은 경제성으로 최근 출력을 77MW로 증강하는 설계 개선을 하였으나, UAMPS 고객들의 탈퇴로 12개 모듈에서 6개 모듈로 프로젝트를 축소하여 진행 중이다. 또한 First-of-Kind engineering(FOAKE) 항목(나선형 증기발생

기, 진공형 격납용기)들은 시장 진입 단계에서 도전 항목으로 도출될 가능성을 내재하고 있다.

모든 기술 개발 프로젝트는 시장 진입 단계가 제일 중요한 관문이다. 원자력 발전의 경우 제일 큰 어려움은 경제성과 건설 공기의 불확실성이다. 핀란드 및 프랑스 EPR 프로젝트, 미국의 Vogtle과 Summer AP1000 프로젝트가 그 단적인 예이다. 우리나라의 경우, 아랍에미리트연합(UAE) Barakah 원전의 성공적인 건설 경험과 미국 NRC 설계인증이라는 두 가지 중요한 실적을 이루었다. 따라서 APR1400의 시장 진입이 성공적으로 이루어졌다고 판단할 수 있다. 이러한 기술력 및 개발 경험은 혁신형 SMR 개발에 접목하여 시장 진입 단계에서 건설성, 경제성과 안전성이 조화를 이룬 경쟁력을 갖춘 노형을 개발 하는데 핵심 요소가 될 수 있을 것으로 판단된다.

성공적인 건설/운명을 위해서는, 미국 MIT EI 보고서(MIT Energy Initiative, 'The Future of Nuclear Energy in a Carbon Constrained World' 2018)가 제시하였듯이, 개발 시 제작사와 건설사의 설계 참여, FOAKE 항목에 대한 특별한 관심이 요구된다. APR1400 경우, 개발 3단계에 설계 최적화 과정을 통해 건설성, 경제성, 안전성, 운전 보수성이 고려되었으며, 특히 FOAKE 항목에 대해서는 그 필요성 및 시현성에 대한 상세한 검토가 이루어졌다. 또한 제작사는 설계 초기단계부터 참여하였으며, 건설사는 건설성 평가에 참여한 바 있다. 따라서 혁신형

〈표 1〉 혁신형 SMR 설계 최상위 개념

순서	요건명	요건 내용
1	노형 및 출력	- 육상용 가압경수로 - 단일 원자로 모듈 출력은 300 MWe 이내에서 안전성 요건 만족하는 한 최대화
2	설계 수명	- 발전소 설계수명은 최소 60년
3	안전 설계	- 대형 냉각재상실사고 배제 및 노심손상의 실질적 배제 - 완전 피동 잔열제거 (운전원 조치시간 3일 이상)
4	비상 계획	- 비상계획구역(EPZ)은 부지 경계 이내로 축소
5	탄력 운전	- 재생에너지 duck curve 대응 성능 강화 - 에너지저장시스템(ESS) 연계 능력 확보
6	격지 기동 (Black-Start) 능력	- 외부 전원없이 기동 능력 확보
7	경제성	- 건설비 및 운영비가 타에너지원 또는 경쟁노형 대비 동등하거나 우수한 수준 확보
8	운영 인력	- 원전을 다수 원자로 모듈로 구성하는 경우, 주제어실에서 전체 원자로 모듈 제어 가능
9	항공기 충돌 대비	- 항공기 충돌 방지 또는 대비 설계
10	사이버 보안 및 사보타주 대비	- 사이버 위협으로부터 방호 시스템 구축 - 원전 부지 내 물리적 방호 시스템 구축

SMR 경쟁력 확보를 위해서는 개발 단계부터 건설성, 경제성, 제작성, 운영 측면에서 종합적인 평가를 수행하여 지속적인 최적화를 추진하여야 한다. 이는 그동안 쌓아온 원전 생태계의 장점을 십분 활용하는 것이다.

원전 도입국들은 미국전력연구소 발간 사업자설계요건서(EPRI Utility Requirement Document)를 입찰 규격서에 포함하여 최신 기술 및 코드 적용, 기술 신뢰성 충족 요건 등을 달성하고 있다. 한국수력원자력 중앙연구원은 EPRI 사업자 설계 요건서를 바탕으로 경쟁 노형 특성을 고려하여 43개의 설계원칙을 도출하였다.

개발 예정인 혁신형 SMR 시장 경쟁력 확보를 위하여 안전성, 경제성을 경쟁 노형 이상으

로 확보하여야 하며, 이를 위한 설계 최상위 요건을 정립하여야 한다. 미래포럼 SMR 분과위원회는 43개 설계 원칙을 검토, 10개 최상위 설계 개념을 〈표 1〉과 같이 정하였다. 주요 최상위 설계 개념으로는 대형 냉각재상실사고 배제, 비상 계획구역의 부지 경계이내 축소를 들 수 있다. 또한 건설비 및 운영비가 경쟁노형 대비 동등하거나 우수한 수준을 확보하도록 정했다. 2018년 EPRI 조사에 의하면, 미국 시장에서 원전 건설을 추진하는 데는 건설 단가가 3000\$/kW 이하, 가스발전소와 경쟁하기 위해서는 2000\$/kW 이하가 되어야 한다(EPRI, Exploring the Role of Advanced Nuclear in Future Energy Markets, 2018).

### 혁신형 SMR 개발 과제 도출 및 추진 로드맵

성공적인 SMR 프로젝트의 두 가지 핵심요소는 타 경쟁 노형과 같은 시기에 시장에 진입하여야 한다는 점과 경쟁노형 대비 경쟁력을 확보하고 극대화하여야 한다는 점이다. 타 노형의 시장 진입 시점을 감안할 때, 제6차 원자력진흥종합계획(2022-2026년)이 종료되는 시점까지 6년, 기본, 상세 설계를 모두 완성하여, 시장 진출의 기틀을 마련하여야 할 것으로 평가된다. 또한 SMART 개발 경험에 대한 심층 검토와 세계 최고 수준의 원전 건설 및 운영 경험과 능력을 설계에 반영하는 것이 경쟁 우위에 설 수 있는 방안이다.

SMART의 원자로 계통은 경쟁 노형과 동등한 수준으로 경제성 확보 차원에서 출력 증강이 바람직한 것으로 평가되었다. 안전 계통은 SMR 규제요건 합리화, 설계 개선이 필요한 것으로 보이며, GA(General Arrangement), BOP(Balance of Plant), 운영 제작 분야는 개선되어야 할 점이 상당수 도출되었다(참고: 미래포럼 최종보고서 'SMART 원전 개발 경험' 부분). 특히 GA, BOP, 운영 분야는 우리의 장점인 원전 건설 및 운영 경험을 반영 최적화가 필요하며, 이는 시장 진입 단계에서 우위 확보에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 점을 고려하여 추진 로드맵 개발 방향을 아래와 같이 설정하였다.

#### 가) 건설성, 경제성, 운영 측면의 설계 최적화

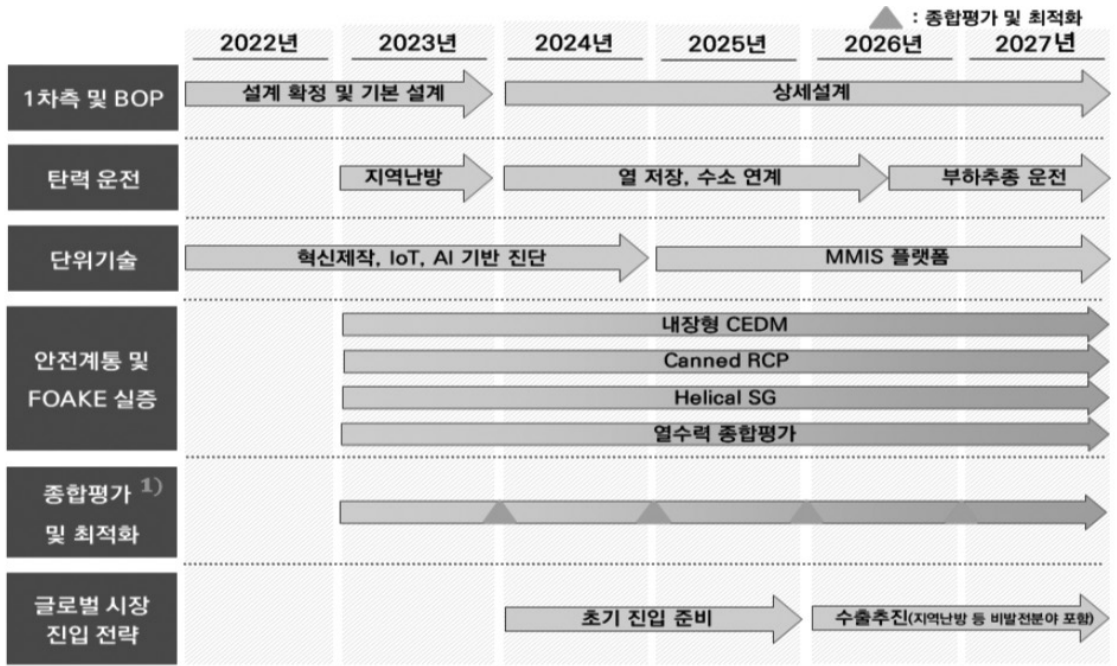
- NuScale, BWRX-300, mPower 등 경쟁 노형의 안전 계통을 비교 최적화를 수행
  - ※ 인허가 요건과 연계, 피동형 안전계통의 최적화가 경제성 확보에 필수적임
- BOP(Balance of Plant), GA 등의 최적화
- 국내 전문 인력의 참여로 기기 제작성 및 시공성, 정비 보수성을 주기적으로 검토 설계에 피드백
- 수출시장 조기 진입을 위해 국내에 기 개발된 기술 통합 및 최적화 수행

#### 나) 도전적이나 파급 효과가 큰 분야에 대한 단위 기술 개발 추진

- Multi-module MMIS, 지역난방, 신재생에너지와 연계된 duck curve 대응 혁신 개념에 대한 기술 개발을 추진
- SMR용 기기에 대한 혁신 제작 기술 개발, 정비 및 자산관리 프로그램을 수립, 사물인터넷(IoT)을 적극 활용
  - ※ 국내 원자력생태계(특히 기기 공급자) 유지에 대한 고려

#### 다) 전략적 수출 방안과 연계

- 글로벌 시장의 적기 진입을 위해 기본설계 완료 시점부터 해외 수출 대상 국가에 대한 적극적 홍보
  - 타겟 국가의 파트너를 발굴하여 해당 국가의 강점이 있는 분야에 대한 기술 협력 파트너십을 구축, 공동 프로젝트 수행
- 상기 기술한 로드맵 개발 방향을 고려, 연차



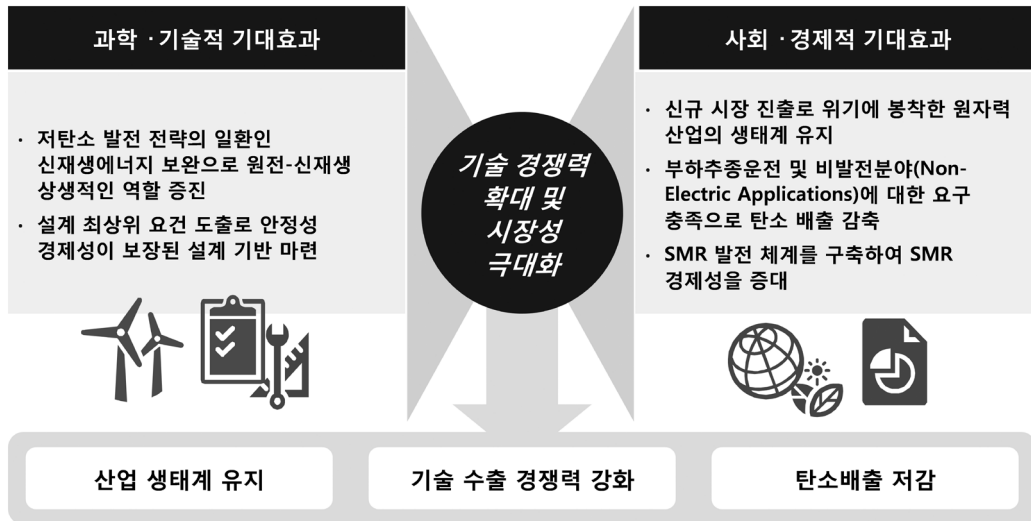
1) 종합평가 및 최적화 : 안전성, 경제성, 시공성, 운송용이성, 운전 및 정비 편의성 평가 및 최적화 수행

[그림 1] 혁신형 SMR 연차별 추진계획(안)

별 추진 계획(안)을 [그림 1]과 같이 구성하였다. 혁신형 SMR 개발은 안전 계통, BOP의 개선을 핵심으로 기본 설계를 2023년 확정, 상세 설계를 진행한다. 혁신형 SMR의 기술적 불확실성을 최소화하기 위해 FOAKE 항목(내장형 CEDM, Canned RCP, Helical SG)에 대한 제작, 실증 실험, In-service test 요건에 대한 연구를 2023년부터 병행하여 추진한다. 또한 국내 원전 건설 및 운영 경험을 최대한 활용, 주기적으로 안전성, 경제성, 시공성, 운송 용이성, 운전 및 정비에 대한 평가 및 최적화를 추진한다. 한편 도전적이나 파급 효과가 큰 단위 기술개발, 탄력운전 연구는 병렬로 수행한다.

### 개선 필요 제도 도출

혁신형 SMR과 같이 신규성이 아주 큰 중소형 원전의 경우 인허가 요건의 영향이 크며 사업자와 규제기관 양측의 합의점 도출이 바람직하다. SMART 원전 표준설계 심사에서 대형 원전을 대상으로 개발된 현행 규제요건이 적용되었으며 이는 향후 개발될 중소형 원전 및 혁신형 SMR 개발에 제약 요소로 판단된다. 따라서 혁신형 SMR 개발과 연계하여 사전설계안전성 검토 제도 수립 또는 행정 조치를 통한 사전 설계 안전성 검토가 바람직하며 이에 대한 정부 부처 차원 합의 및 지원이 필요한 것으로 판단된다.



[그림 2] 혁신형 SMR 향후 기대효과

또한 국제적으로 SMR 심사를 수행 중인 규제기관간의 협력도 바람직한 것으로 보인다.

### 기대효과 및 결언

미래포럼 SMR 분과는 시장도입 단계에 진입하고 있는 경수로형 SMR 시장에서 경쟁력을 갖춘 혁신형 SMR 개발 로드맵을 제안하였다.

혁신형 SMR 개발의 향후 기대효과는 [그림 2]에 요약하였다. 혁신형 SMR은 실질적인 안전성, 경제성, 건설성을 확보한 노형으로 국제시장에서의 경쟁력 확보를 목표로 하고 있다. SMR은 장기 저탄소 발전전략을 목표로 하는 파리 협정에 따라 추진되고 있는 신재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 원전-신재생의 상생적

인 역할을 기대할 수 있다. 전 세계적으로 분산형 전원 수요가 증가하고 있으며, 이는 SMR의 수요를 증가시킬 것으로 예측되며 정부의 적극적인 지원을 통해 혁신형 SMR의 수출 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 혁신형 SMR의 글로벌 시장 진출을 통해 에너지전환 정책과 신규 원전건설 중단으로 정체되어 있는 원자력산업 생태계 유지 기반을 마련할 수 있다.

APR1400 개발 프로젝트처럼 국내 원자력계가 모두 힘을 모아 실질적으로 제작, 건설, 운영에서 경쟁 우위를 가진 혁신형 SMR을 성공적으로 개발할 수 있을 것을 확신하며 미래포럼 SMR 분과위원과 주변에서 이를 지원해 주신 모든 분께 감사드립니다. **KIIF**