

<공학저널 취재 기획>

SMR, 에너지 전환 이끈다

에너지는 인류 문명의 지속 가능성과 직결되는 가장 중요한 기술 기반 중 하나로, 산업 발전과 국가 안보, 나아가 기후위기 대응까지 포괄하는 핵심 요소로 부상하고 있다. 특히 전 세계적인 탄소중립 흐름 속에서, 에너지 전환은 단순한 기술의 진보를 넘어 정책과 시장, 기술이 맞물리는 전략의 중심에 있다.

지금까지는 태양광, 풍력 등 신재생에너지가 주도권을 잡으며 탄소중립의 미래를 그려왔지만, 날씨와 환경의 제약에서 자유롭지 못하다는 한계 또한 분명히 존재한다. 이에 따라 새로운 대안으로 원자력에너지가 다시 조명받고 있다. 그 중에서도 소형모듈원자로(SMR)는 기존 원전에 비해 안전성과 경제성을 높인 차세대 원자로 기술로, 세계 각국이 연구개발 및 실증에 적극 나서는 추세다.

SMR은 기존 대형 원전에 비해 상대적으로 낮은 초기 투자비와 짧은 건설 기간, 다양한 입지 가능성 등을 통해 원전의 접근성을 크게 높이는 동시에, 탄소배출이 없는 안정적인 전력 공급원이 될 수 있어 ‘에너지 안보’와 ‘지속가능성’이라는 두 과제를 동시에 해결할 수 있는 해법으로 주목받고 있다.

더불어 SMR 기술은 최근 디지털트윈, 인공지능(AI), 고신뢰 설계기술 등 다양한 디지털 요소기술과 융합되며, 고도화된 에너지 시스템 구축을 위한 중심축으로 성장 중이다. 나아가 수소 생산, 지역 열공급, 산업용 에너지 공급 등 다목적 활용 가능성도 열려 있어, 탈탄소 시대의 전력 인프라 혁신을 이끌 핵심 기술로 자리잡고 있다.

에너지 기술 패러다임의 전환기를 맞이한 지금, 미래 전력시장의 게임체인저로 부상하고 있는 SMR에 대한 폭넓은 이해와 논의가 필요한 시점이다. 이에 <공학저널>은 이번 5월호 기획기사 시리즈를 통해 SMR 기술의 국내외 개발 현황과 정책 동향, 산업계의 대응 전략을 다각도로 조명하고자 한다. 기술 개발의 현장과 전문가의 목소리를 중심으로, SMR이 우리 사회에 어떤 의미를 갖는지 구체적으로 들여다볼 예정이다.

<편집자 주>

■ [한국원자력학회 인터뷰 질문안]

－ 차세대 청정에너지 패러다임 전환의 중심, SMR의 미래를 묻다 －

1. 최근 글로벌 SMR 시장의 주요 동향과 흐름은 어떻게 생각하시는지 궁금합니다. 특히 미국, 유럽, 아시아 등 주요국과 비교했을 때 한국의 위치는 어떻다고 보시는지요?

에너지안보, 기후위기 대응, 전력 수요 급증과 고품질 전력에 대한 요구로 원자력의 역할이 강조되고 있어 전 세계가 원전을 확대하거나 새로 도입하고, 탈탈원전으로 회귀하고 있다. 원자력을 확대하는 방안에는 대형원전을 신규 건설하거나, 가동중인 원전의 계속운전을 추진하거나, 다수의 SMR을 건설하는 것이다. SMR은 분산 전원으로 고립된 지역에 전력 공급 뿐 아니라 산업용 열공급과 지역 난방, 선박 추진동력, 해수담수화, 수소생산 등 다양한 수요처에 활용성이 뛰어나 전 세계적으로 약 90여종의 SMR이 개발중이다.

2024년 기준 전 세계 SMR 프로젝트 파이프라인은 22GW로, 2021년 대비 65% 증가한 것이고, SMR 시장 규모도 2025년 약 65억 7천만 달러로 평가되며, 2037년까지 112억 달러를 초과할 것으로 예상되는데 이는 연평균 4.5% 이상의 성장률로 에너지시장의 게임체인저가 될 전망이다. 미국은 NuScale, X-energy, Kairos Power 등 기업들이 SMR 개발을 주도하고 있으며, 미정부는 9억 달러 규모의 지원 프로그램을 통해 SMR 배치를 촉진하고 있는데 최근 트럼프 대통령의 4개 행정명령으로 더욱 가속화될 것이다. 미국 원자력규제위원회(NRC)는 2025년 5월 NuScale의 77MW SMR 설계를 승인하였다. 영국, 프랑스, 스웨덴, 덴마크, 이탈리아 등 유럽 국가들도 SMR 도입을 계획하고 있다. 영국 정부는 Holtec, Rolls-Royce, GE Hitachi 등과 협력하여 SMR 도입을 추진하고 있으며, 2035년까지 상용화하여 전력 생산을 목표로 하고 있다. 러시아는 세계 최초의 부유식 원자력 발전소 '아카데미 로모노소프'호를 운용 중이다. 베트남, 필리핀, 인도네시아 등 동남아 국가들도 SMR 도입을 계획하고 있다. 중국은 2023년 세계 최초의 상업용 210MW SMR Linglong One을 가동하였다.

한국은 꾸준한 기술개발과 독자적 SMR 개발로 기술은 세계 최고 수준이라 생각하는데, 아직 실증 부지 확보와 SMR 규제 체제 확립 등 제도적 기반이 부족한 상황이다.

2. 한국형 SMR(i-SMR)을 포함한 국내 SMR 개발 현황과 전망에 대해 학회에서는 어떻게 진단하고 계신가요?

한국은 2012년 SMART(100MWe) 원자로 표준설계 인가를 받았고, 2024년 110MWe 출력의 SMART100 표준설계 인가를 다시 받아 기술은 세계 최고 수준이다. 현재 혁신형소형모듈원자로 기술개발사업단이 과기부와 산업부의 공동 지원 아래 한수원, 한국원자력연구원, 한국전력기술, 두산에너지빌리티, 삼성물산, 대우건설, 포스코에너지 등 공공기관과 민간 기업이 참여해 i-SMR (모듈당 170MWe, 기본 4모듈) 개발을 추진 중이다. 약 4천억원의 예산으로 2025년까지 표준설계를 완료하고 상세설계를 거쳐 2028년 표준설계인가를 획득하고 2031년 첫 번째 원자로모듈을 완성하고 2033년에 상용화하는 것을 목표로 사업을 추진하고 있다. 혁신설계, 혁신기술, 혁신제조 사업으로 나누어 세계 최고 수준의 안전성, 경제성, 유연성을 갖추도록 개발 중이다.

또한 소듐냉각고속로, 용융염원자로, 고온가스로 등 비경수형 SMR도 개발 중인데, 이 SMR들은 실증로 건설을 위한 부지가 없고 민간 참여가 부족해 세계시장 진출이 다소 늦어질 것으로 예상된다. 따라서 정부의 대폭적인 지원과 민간 참여 확대와 함께 실증로 건설을 추진하고 수출 전략을 확보해야 한다. 우리나라는 대형 원전 건설 경험과 설비 공급망을 잘 갖추고 있고, 개발 중인 SMR의 성능도 세계 최고 수준이라 실증로 건설이 완료되면 세계시장 진출에 유리할 것으로 생각한다.

3. SMR이 기존 대형 원전에 비해 갖는 기술적·경제적·사회적 장점과 리스크는 무엇이라고 보시는지 궁금합니다.

SMR은 기술적으로 주요 기기들이 일체형으로 되어 있어 중대사고 가능성을 배제하고, 중력이나 자연대류로 작동하는 피동형안전계통(Passive Safety System)을 장착하고 있어 전원 공급이 중단되거나 사고가 발생하더라도 운전원이 행위를 하지 않아도 스스로 안전장치가 작동되게 되어

있어 매우 뛰어난 안전성을 보유하고 있다. 또한 모듈형으로 설계되어 공장에서 표준 제작하고 현장에서 조립하므로 공사기간을 단축할 수 있고, 유지 보수가 쉽다. SMR은 크기가 작고 출력이 크지 않아 대형 원전처럼 바닷물을 이용한 대량의 냉각수가 필요하지 않아 내륙, 산업단지, 오지나 도서 지역에도 설치가 가능하다. 다만 아직 상용화를 위한 실증 검증이 충분히 되지 않아 계통의 신뢰성과 운전 효율, 유지관리 비용 등에 대한 검증이 아직 부족한 상태이다. 또한 자동화와 디지털 제어 시스템에 기반한 SMR은 사이버보안 위험성도 지니고 있어, 핵심 운영 시스템에 대한 보안 강화가 필요하다.

경제적으로 SMR은 초기 투자 부담이 상대적으로 낮고, 단계적 투자·확장이 가능하다는 장점이 있어 투자 유연성이 크다. 활용성이 다양하고 모듈화 생산과 병렬 건설 방식으로 건설 기간과 인건비를 줄일 수 있고, 시공 위험도 크게 줄일 수 있다고 본다. 다만 아직 규모의 경제를 확보하지 못해 대형 원전보다 발전 단가가 높고, 한꺼번에 많은 수의 SMR을 건설하지 못하면 경제성을 확보하기 어려울 수 있다.

사회적으로 SMR은 대형 원전에 비해 안전하고 작은 면적으로 주민수용성이 높다고 본다. 또한 SMR은 무탄소 에너지원으로 기후위기 대응의 핵심 수단이면서 재생에너지의 간헐성을 보완하는 운전 유연성도 있어 원자력-재생에너지 융합 시스템에서 중요한 역할을 할 것이다. SMR은 단순한 발전 외에도 지역난방, 산업 열 공급, 수소 생산, 해수담수화 등과 연계해 활용할 수 있어, 에너지 복지나 다목적 활용성 측면에서도 사회적 가치가 높다. 다만 아직 신기술에 대한 불확실성, 새로운 형태의 고준위방사성폐기물, 법 제도와 규제 체제의 미비 등 위험 요인이 남아 있다.

4. 탄소중립, 분산형 전원 확대, 에너지 안보 등 국가적 전략 과제 속에서 SMR은 어떤 역할을 할 수 있을까요?

SMR은 기존 대형 원전 및 재생에너지의 한계를 보완하며 탄소중립, 분산형 전원, 에너지 안보를 위해 전략적으로 중요한 역할을 수행할 수 있다. 2024년 6월부터 시행된 분산에너지 활성화 특별법에 따르면 SMR은 중소형원자력발전사업에 포함된다. SMR은 무탄소 전력원으로 퇴출되는 석탄발전을 대체하고, 지역난방, 산업용 열 공급, 해수담수화, 수소생산 등 지역맞춤형 분산 전원으로 활용될 수 있어 송전망 설치 불필요에 따른 비용 절감, 지역 산업 활성화, 사회적 갈등 회피 및 전력공급의 안정화에 기여할 것으로 예상된다. 또한 수입연료인 LNG나 석탄 발전을 대체하여 에너지 안보에도 기여하고 저렴한 전기요금으로 경제적 이익과 산업경쟁력 확보에도 유리할 것이다. 우리가 개발하고 있는 SMR은 상용화되어 뛰어난 경쟁력을 가진 수출 상품이 되어 국가경제 발전에 크게 이바지할 것으로 생각한다. 우리는 대형원전뿐 아니라 SMR의 제작과 시공 건설의 경쟁력이 우수하다. 전략적으로 세계시장을 향해 비즈니스와 마케팅을 강화하여 시장 진출을 도모하여야 할 것이다.

5. 학회 차원에서 SMR 관련 기술 표준화, 인력 양성, 학술 지원 등 어떤 활동들을 중점적으로 추진하고 계신지요?

우리 학회의 회원들이 원자력 각 분야의 전문가들로 구성되어 SMR 개발에 직접 참여하고 있고 학회차원에서는 정부에 SMR 개발에 따른 정책 제언과 건의, 지원을 하고 있고 매년 춘계와 추

계 학술대회에서 특별히 SMR 워크숍을 따로 개최하고 있다. 또한 국내뿐 아니라 IAEA와 OECD-NEA 등 국제기구와 비정기적인 학술 세미나와 토론회를 통해 SMR 개발의 표준화와 안전성 평가와 검증 방법론의 가이드라인을 마련하고 있다.

원자력 인력 수급 문제는 SMR뿐만 아니라 원자력 산업 전반에 위기로 다가오고 있다. 인구 감소로 학령인구가 크게 줄고 있고, 원자력 분야는 국가 정책의 불안과 변동으로 전공 회피 현상이 벌어지고 있다. 더군다나 한전은 나주, 한수원과 원자력환경공단은 경주, 원자력연구원은 대전, 두산에너지빌리티는 창원에 있는 등 원자력 기관이 대부분 지방에 자리를 잡고 있어, 인력이 지방 근무를 기피하는 경향이 있어 인력공급에 위기를 느끼고 있다. 향후 이런 현상이 더 심화될 것으로 예상되어 학회는 인력양성에 대한 현황과 수급 대책, 원자력 분야 유인 방안 등을 강구하고 있다.

또한 산업계 세션을 학술대회기간에 개최하여 SMR 개발에 참여하는 기업들의 애로사항과 산업 맞춤형 정보 교류와 교육을 도모하고 있다. 대한전기학회, 한국신재생에너지학회와 한국원자력학회가 공동으로 워크숍을 매 분기 개최하여 SMR과 신재생에너지의 조화와 융합을 도모하고 전력망 문제점 해소를 위해 노력하고 있다.

6. SMR은 기존 원전과 달리 다양한 응용 분야(수소 생산, 해수담수화, 지역난방 등)에도 활용될 수 있다고 하는데, 이 부분에 대한 학회 또는 연구자들의 논의는 어떻게 진행되고 있는지 궁금합니다.

SMR은 경수형과 비경수형으로 다양한 종류가 개발되고 있는데, 소형이면서 안전성이 뛰어나 기존 대형 원전과는 달리, 전력 생산 외에도 다양한 분야에 응용될 수 있는 특성이 있다. 고온가스로를 이용한 고온 수전해(HTSE) 기반 청정수소 생산 실현을 목표로 경제성 향상, 수소 공급망과의 연계 전략, 제도 개선 방향 등에 대한 발표와 토론을 학술대회 및 워크숍을 통해 진행하고 있다. 해수담수화는 국내 수요뿐 아니라 중동, 아프리카, 동남아 등 물 부족 국가를 중심으로 SMR을 활용한 담수화 연계 통합 설계 기술에 관한 연구와 관련 기업·기관과의 협업을 진행하고 있다. 원전 인근 지역과 산업단지 내에 소규모 SMR을 설치하여 난방용 증기와 공정열을 공급하는 모델도 연구자들 사이에서 활발히 검토되고 있다. 학회는 SMR을 미래 에너지시스템의 큰 축으로 인식하고 기술개발, 산업연계, 수출전략, 사회적 수용성을 종합적으로 고려한 학술·정책 허브 역할을 더욱 강화하려 한다.

7. SMR 개발과 관련하여 국내 인허가 체계 및 규제 환경의 변화가 필요하다는 지적도 있습니다. 이에 대해 학회에서는 어떤 의견을 가지고 계신가요?

현재 원자력발전소 인허가 체계와 규제 환경은 대형원전 위주로 되어 있어 SMR의 특성과 기술적 차이를 반영한 새로운 인허가 체계와 규제 환경이 필요한 것이 사실이다. 미국도 원전 4배 확대와 활성화를 위해 트럼프대통령이 4개의 행정명령에 서명하였는데 그중 하나가 규제 혁신이다. 원자력규제위원회(NRC)를 개혁하고 규제 절차를 간소화해 산업 현장의 수요에 부응하고 공공 안전 기준을 합리화하겠다는 것이다. 우리나라도 현행 제도의 경직성을 완화하고, 유연하고 기술 친화적인 규제 환경을 조성함으로써, 한국이 SMR 분야의 글로벌 선도국가로 도약하는 데

필수적인 제도 기반을 마련해야 한다. 이를 위해 원자력안전위원회는 2023년말에 경수형 SMR에 대한 SMR규제연구추진단을 출범하여 건설 · 운영 · 해체 · 방재 · 방호를 포함하는 SMR 전주기 안전규제를 위한 규제요건 및 검증기술을 마련하고 있다. 2028년까지 경수형 SMR인허가 규제기술을 개발하여 i-SMR 표준설계인가 심사에 적용하는 것을 목표로 설계 인허가, 규제 검증, 핵비확산/핵안보의 규제 체계를 구축하고 있다.

한국원자력학회는 특히 국내의 획일적이고 일괄적인 심사 절차를 개선하기 위해, 미국과 캐나다가 채택하고 있는 리스크 기반 규제(Risk-informed Regulation) 및 단계적 허가(Phased Licensing) 체계를 도입하여 초기 설계와 개념 검토부터 심사하는 유연한 구조를 갖추도록, 기술 전문가와 규제자 간 소통의 플랫폼을 마련하고, SMR 규제 개선을 위한 학술적·기술적 논의와 제언을 계속 추진하고 있다.

8. 해외 진출을 위해 국제 설계인증, 해외 파트너십, 기술수출 등이 필요하다는 분석도 있는데, 이를 위한 학회의 지원 혹은 제언이 있다면 소개 부탁드립니다.

우리나라 대형원전은 미국 원자력규제위원회(NRC)와 유럽사업자협회의 설계인증을 받았다. SMR도 해외수출의 기술 신뢰성 확보와 입찰 자격 확보를 위해 국제 설계인증 획득이 필수적이다. 한국원자력학회는 SMR 개발 기업들이 각국 규제기관의 요구사항을 이해하고, 인증 전략을 수립할 수 있도록 국가별 인증체계 및 심사기준 비교 연구를 학술적으로 지원하고 있다. 또한 설계인증 준비에 필요한 규제 전문가 및 기술자, 시스템 엔지니어 등 전문 인력의 양성을 위한 정책 연구와 교육 프로그램 운영을 제안하고 있다.

SMR은 대형 원전보다 비즈니스와 마케팅이 중요하고 다자간 협력이 필수적이다. 학회는 SMR 해외 진출을 위한 기술 기반 정책 자문과 국제 네트워크 구축의 중추적 플랫폼 역할을 확대하고 있고, 기술수출과 산업 생태계 정립을 위한 제도적 기반 구축을 지원하고 있다. SMR 국제컨퍼런스를 기획하고 SMR 기업을 지원하는 등 학회는 단순한 학술기관을 넘어, SMR의 글로벌 확산을 주도하는 전략적 두뇌 역할을 하고 있다.

9. 학회 내에서 SMR과 관련한 융합연구(예: AI, 디지털트윈, 방재기술 등)나 차세대 기술 트렌드에 대한 논의가 있다면 소개해 주실 수 있을까요?

SMR은 자동화 운전과 자동 비상대응 체계를 전제로 개발되고 있다. 인공지능(AI)과 빅데이터를 기반으로 비정상 상태 감지 및 자동 진단, 방사선 감시, 환경모니터링 데이터 분석, 기기 결함 조기 감지 등을 통해 운영 인력 축소, 저비용 유지 보수 등 SMR의 경제성을 한층 높일 수 있을 것이다. 디지털트윈 기술은 실제 원자로의 운영 상태를 실시간으로 모사하는 가상 모델을 통해 예측 정비, 사고 대응 시뮬레이션, 설계 개선 등에 활용된다. 현재 KAERI(한국원자력연구원), 한국전력기술, 두산에너지빌리티 등에서 AI 기반 진단 시스템, 디지털 설계 시스템을 SMR에 도입 중이다. AI의 자동 진단 기술과 지리정보시스템(GIS)을 이용한 방재기술도 개발 중인데 AI 기반 비상대응 시뮬레이션 및 훈련 플랫폼 구축과 실시간 위기 대응 시나리오를 개발 중이다. 학회는 AI와 빅데이터를 활용한 이러한 첨단 기술 개발을 위해 이번 2025 춘계학술대회에서 신진연구자를 위한 AI 강좌를 마련하여 성황리에 개최하였는데, 앞으로 첨단기술 강좌를 계속 이어나갈

계획이다.

10 마지막으로, SMR 기술의 대중 인식과 수용성 확대를 위해 학회 또는 전문가들이 앞으로 어떤 노력을 해야 한다고 생각하시는지요?

원자력 확대를 위해 주민 수용성 확대는 필수이다. 더군다나 대형 원전과 달리 SMR은 지역 분산형 설치, 다양한 응용 분야 활용, 민간 투자 참여 등을 전제로 하고 있어, 일반 국민과 지역사회, 지방정부의 직접적 수용과 협력이 필수적이다.

한국원자력학회는 후쿠시마 사고이후로 널리 퍼진 원자력과 방사선에 대한 잘못된 정보와 오해를 바로 잡고자, ‘후쿠시마 원전사고의 논란과 진실’, ‘원자력바로알기’, ‘원자력상식’ 책자를 발간하였다. 그리고 대중 강연, 시민토론회, 기자 브리핑 등을 확대 개최하고 있고, 매년 방학때마다 초중고 교사 연수 프로그램을 서울, 대전, 부산 등 여러 지역에서 운영하고 있다. 또한 시민단체와 연대를 통한 원자력 홍보도 열심히 하고 있고, ‘원자력바로알리기’, ‘엘로우케익’이라는 유튜브와 팟캐스트 등 미디어와 SNS, 디지털 플랫폼도 적극 활용하고 있다. 다행히 학회와 한국에너지정보문화재단에서 여론조사 전문기관에 의뢰하여 매년 시행하고 있는 ‘에너지 국민 인식조사’에 따르면 국민의 87%가 원자력이 필요하다고 인식하고 있고 76%가 원자력이 안전하다고 생각하고 60%는 원자력 비중을 늘려야 한다고 생각하고 있다. 앞으로도 학회와 원자력 전문가들은 단순한 기술 전달을 넘어서 국민과 눈높이를 맞추는 쉽고 정확한 소통 전략, 지역 맞춤형 접근, 대중의 위험 인식을 공감하고 원전사고에 대한 불안 해소와 안심을 위한 노력, 문화·사회 융합적 접근을 통해 SMR에 대한 대중적 신뢰와 공감을 만들어가는 역할을 더욱더 적극적으로 추진할 것이다.

공학저널