원자력전략·정책연구, 제1권 제1호(2023년 창간호), 17~32
Review on Nuclear Energy Strategy and Policy

소형원자로 개발동향과 성공요소

The Current Status and Success Factors of Small Reactor Development

김윤호*
Yunho Kim

전 세계는 기후위기를 막기 위해 온실가스 감축을 위한 파리협약을 체결하였고, 우리나라도 감축목표를 설정하고 세부 이행계획을 수립 중에 있다. 온실가스 배출량이 많은 화력발전소와 공장의 화석연료를 저탄소 연료로 대체하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 대형원전 건설사업의 비용 증가와 공기 지연, 신재생에너지의 간헐성문제를 해결할 수 있는 소형원자로 개발 현황과 성공 필요 요소를 살펴본다. 시장 경쟁력을 위해 설계의 단순화, 표준화 및 주요 기기의 공장 제작을 통한 공기단축 등으로 건설비용을 낮추고 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 유연한 분산전원으로 개발되어야 한다. 그리고, 전 세계적으로 일관된 규제기준이 수립되어야 소형원자로가 추구하는 대량생산 경제성이 실현될 것이다.

주제어 소형원자로, 탄소중립, 분산전원

Keywords Small Reactor, Net Zero Emission, Distributed Power Generation

투고일 2023.4.21. 수정일 2023.5.26. 게재확정일 2023.5.26.

* 한국수력원자력 수석연구원(yunho.kim@khnp.co.kr)

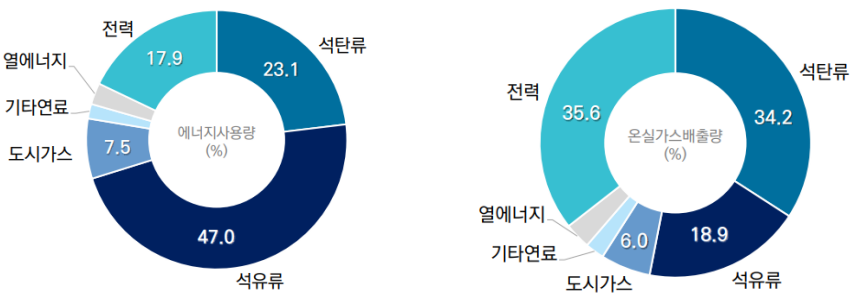
I. 기후위기와 에너지 시장의 환경변화

산업혁명 이후 에너지의 폭발적인 이용으로 인류는 의식주에서 많은 발전을 이루었다. 그러나 전 세계인구의 절반이 깨끗한 마실 물이 부족하고 대도시는 공장과 자동차에서 배출하는 미세먼지로 오염된 공기 속에서 신음하고 있다. 산업 발전이 삶의 여건 개선으로 이어지는 지속 가능한 발전(sustained development)을 이루지 못했다. 오히려 산업화로 인한 열악한 대기는 홍수와 혹서 등의 자연 재앙을 일으켜 인류의 생존을 위협하고 있다. 이러한 기후위기가 돌이킬 수 없는 상태에 도달하는 것을 막기 위해 유럽 선진국을 중심으로 지구 온도가 산업혁명 이전 대비 1.5℃ 이상으로 상승하는 것을 막기 위한 노력이 이루어지고 있고 구체적인 결과물로 파리협약이 체결(2016)되었다.

우리나라도 파리협약에 따라 '2030 국가온실가스감축목표'(NDC)를 설정한 바 있다. 산업통상자원부, 한국에너지공단 통계(2021)에 의하면 [그림 1]과 같이 산업부문 에너지원별 사용량은 석유, 석탄, 전력 순으로 많으며, 온실가스 배출량은 전력, 석탄, 석유 순이다.

석탄과 LNG 등의 화력발전소의 비중이 설비기준 59%, 발전량 기준으로 63%로 가장 높다. 제철, 화학 및 정유 공장에서 필요한 공정열과 난방열 생산에도 석탄, 석유의 화석연료가 많이 사용되는 것을 감안하면(한국에너지공단, 2022) 화력발전소와 산업부문에서 사용되는 화석연료를 대체하는 것이 온실가스 감축을 위한 가장 효과적인 방법이다.

[그림 1] 산업부문 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 비중



출처: 산업통상자원부, 한국에너지공단(2021)

이러한 대체 에너지원으로 최근 전 세계적으로 각광받고 있는 소형원자로의 개발 현황을 돌아보고, 상업적 성공을 위해서 극복해야 할 사항들을 검토하여 우리나라의 소형원자로 개발방향 설정에 도움이 되고자 한다.

II. 소형원자로 개발 현황

1. 소형원자로 개념 대두

가. 원자력 발전시장의 환경변화

체르노빌과 후쿠시마 원전사고는 원자력의 안전성에 대한 대중의 염려를 불러일으켜 독일을 비롯한 많은 나라들이 원자력 발전을 포기하였다. 이후 미국 및 유럽에서 일부 대형원전 건설사업이 재개되었지만 22년 말 현재 [그림 2]와 같이 건설사업의 공기 지연과 대규모 자금의 금융비용으로 건설비용이 크게 증가하였다(IEA, 2022). 대형원전 건설 리스크가 현실화되었고 투자자들도 대형원전에 대한 투자 의욕을 상실하였다.

그러나 최근의 세계 에너지 시장은 기후 위기와 에너지 안보라는 큰 화두를 제시하

[그림 2] 주요 원전 건설기간 계획 대비 실적

원전명	구분	건설기간 5년	10년	15년	20년
오킬루토 3호기 (핀란드)	계획				
	실적				
플라망빌 3호기 (프랑스)	계획				
	실적				
보글 3, 4호기 (미국)	계획				
	실적				
신고리 3호기 (한국)	계획				
	실적				

며 변하고 있다. 글로벌 기후 위기로 인해 전 세계 많은 나라들은 탄소중립 정책을 국가 아젠다로 내세우며 청정에너지 수요를 폭발적으로 증가시키고 있다. 그리고 러시아의 우크라이나 침공으로 발생한 전 세계 에너지 공급 불안정은 안정적인 에너지의 확보가 국가 안보에 중요함을 확인하게 되었고, 안정적 공급이 가능한 에너지원의 필요성을 부각시켰다.

이러한 여건에서 최근에 미국의 Nuscale사가 혁신적인 개념으로 원자로를 소형화, 모듈화하여 안전성을 대폭 향상시킨 소형원자로를 시장에 내놓았다. 주요 기기를 공장에서 미리 제작함으로써 건설 공기와 비용을 줄여 건설사업의 리스크를 줄이고 투자도 용이한 개념의 원자로를 개발하였다. 미국 규제기관(NRC) 표준설계 인허가를 획득(2020)하면서 소형원자로 사업성을 가시화하였다.

나. 신재생에너지의 확대

파리협약 이후 전 세계 탄소 발생량의 76%을 차지하는 70개국 이상이 탄소중립을 국가적인 아젠더로 삼아 탄소 발생을 줄이기 위한 노력을 하고 있다. 저탄소 발전원으로 태양광과 풍력을 이용한 발전이 가장 적합한 청정에너지원이라는 점에는 이견이 없다. 하지만 태양광과 풍력은 하루 24시간 일주일 내내 안정적으로 전력을 생산할 수 없는 간헐성의 문제가 있다. 태양광과 풍력의 설비 비중이 높아질수록 전력망의 안정성은 급격히 낮아지는 것이다.

전력망의 요구에 신속하게 대응할 수 있는 저탄소 에너지원으로 원자력 외에 수력 및 바이오에너지, CCUS(Carbon Capture Use and Storage: 탄소포집저장기술) 기능을 갖춘 화력발전, 수소터빈발전 등이 있다. 수력과 바이오에너지는 각각 적합한 부지, 지속성 측면에서 한계가 있고, 화력발전은 CCUS 비용이 비싼 한계가 있으며, 수소터빈발전은 수소전소터빈 개발 및 수소 비용이 비싼 한계가 있다. 결국 원자력이 전력망 요구에 대응할 수 있는 현실적인 저탄소 에너지이며, 신재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 유연한 원자로 개발이 필요하다.

다. 온실가스 감축 목표 달성

파리협약에 따라 많은 나라들이 온실가스 감축 목표량을 설정하고 이를 이행하기 위해 노력하고 있다. 현재 원전을 운전 중인 나라들은 수명연장을 이미 시작했거나 앞으로 할 예정이며, 신규 원전 건설은 더욱더 확대될 것으로 예상한다. 지금까지 신규 대형원

전 건설이 공급망 부실과 공기 지연으로 어려움을 겪고 있지만, 공급망이 회복되고 실패 경험을 발판 삼아 향후 건설은 비교적 무난할 것으로 예상된다. 따라서 앞으로 원전 시장은 대형과 소형원전이 공존할 것으로 예상되며 소형원전은 분산 전원으로서 수요가 많을 것으로 판단된다. 영국 롤스로이스(Rolls-Royce)사는 2035년까지 620조의 소형원전 시장을 예측하고 있으며, 미국 아이다호 국립연구소(INL)는 분산전원 시스템의 수요로 소형원전이 2050년까지 전체 원전시장 수요의 50% 정도까지 늘어날 것으로 예상하고 있다.

2. 소형원자로 개발 현황

가. 주요 개발 노형

미국을 비롯한 전 세계 20개국 80개 이상의 기관에서 소형원자로를 개발하고 있고 기술개발 수준도 다양하다(이정익, 2020; OECD/NEA, 2023). EPRI 보고서(2021)에 의하면 소형원자로는 육지뿐만 아니라 1970년대 이후 많은 선례로 보아 해상의 선박 및 바지선 설치도 충분히 가능한 것으로 평가하고 있다. 노형도 경수로 기술부터 새로운 냉각재, 연료 개념의 4세대 노형 기반의 소듐냉각고속로(SFR), 고온가스로, 용융염로까지 다양하게 개발 중이다.

경수로 기술에 기반한 소형원자로는 그동안 축적된 설계 및 운전 경험으로 당장 개발이 가능하지만, 4세대 노형은 기술개발의 성숙도를 고려하면 2030년 이후에 상용화가 가능할 것으로 판단된다.

경수로 기반으로 개발 중인 대표적인 노형을 소개하면 다음과 같다.

(1) Nuscale

소형원자로 중 가장 먼저 NRC 인허가를 통과한 노형이다. 현재 77MWe×4개모듈로 구성된 총 462MWe 출력의 발전소를 아이다호 국립연구소 부지에 건설하는 사업(CFPP, Carbon-Free Power Project)을 준비 중이다. 여러 차례 지연되어 현재 2024년 건설/운영 인허가를 신청하여 2029년에 첫 모듈 운전을 목표로 하고 있다.

POWER(2023.3) 월간기사에 따르면 코로나 유행 이후 최근 원자재 물가 상승으로 건설단가가 58$/MWh에서 89$/MWh로 올라간 점은 투자 부담으로 작용하고 있다. 새롭게 평가한 사업개발/인허가 및 건설비용은 각각 27억 불, 67억 불로 총 94억 불 정도

의 비용을 예상한다. 여기서 정부의 보조금과 인플레이션 감축법(IRA)의 혜택을 받는다면 총 51억 불이 필요할 것으로 예상하고 있다. 국내기업으로 두산에너빌러티, GS에너지, 삼성물산이 투자에 참여하고 있다.

(2) BWRX-300

2014년 미국에서 NRC 표준설계 인허가를 획득하였으나 건설을 하지 못했던 1500MW ESBWR 설계를 바탕으로 소형화한 노형이다. 인허가를 통과한 입증된 기술과 시스템 단순화를 통해 빠른 상업화와 가격경쟁력을 목표로 GE Hitachi Nuclear(GEH)사가 개발하고 있다. 캐나다 OPG사가 달링턴 부지에 건설을 목표로 2022년 건설인허가를 신청하였고, 최근 캐나다 VDR 2단계를 완료한 바 있다. 최근 OPG, TVA, SGE(Synthos Green Energy)사가 기술개발 협력협정을 체결하고 폴란드 건설을 준비하고 있다.

(3) NUWARD

170MWe×2개모듈로 총 340MWe 용량이다. 1차 계통 주요 기기들이 원자로용기내에 들어가는 일체형 원자로설계이다. 기본설계는 2023년에 완료할 계획이며, 2030년 착공을 목표로 하고 있다. 인허가성을 높이기 위하여 프랑스, 체코, 핀란드의 규제기관은 NUWARD을 기준으로 소형원자로 심사기준을 개발 중이다.

(4) Rolls-Royce

영국 Rolls-Royce사는 470MWe 가압경수로형을 설계 중이다. 2020년 영국 내에 16기의 소형원자로 건설을 목표로 2022년에 영국 규제기관에 인허가(Generic Design Assessment) 신청서를 제출하였다.

(5) RITM-200

쇄빙선 및 부유식 원전에서 사용되던 KLT-40 노형을 개량한 가압경수로형으로 최근 50MWe 용량의 소형원자로를 2024년에 사하공화국 육상에 건설 예정이다.

(6) ACP-100

중국국가원자력공사(CNNC)가 21년에 하이난성 창장에 실증로 건설을 시작하였고 26년에 상업운전을 목표로 하고 있다. 피동안전계통과 일차계통 주요 기기들이 원자로 용

기 내부에 들어가는 125MWe 크기의 일체형 소형원자로로 세계 최초로 실증로를 건설 중이다.

(7) AP300

웨스팅하우스사의 AP1000 피동안전 설계를 기반으로 2027년까지 설계인증 취득을 목표로 개발하고 있다. 미국 조지아주에 현재 건설 중인 AP1000의 기자재 공급망과 설계, 인허가를 활용하여 인허가 및 건설에 소요 되는 시간 및 비용을 최소화하는 전략을 취하고 있다. 전기출력 300MWe 호기당 건설비용은 10억 달러로 예상하고 있다.

4세대 노형 소형원자로는 일반적으로 500℃ 이상의 고온열을 제공할 수 있고 안전성이 높으며 저압에서 운전되므로 운전 여유도가 높은 장점이 있다. 현재 개발 중인 대표적인 노형은 다음과 같다.

(1) 소듐냉각고속로(SFR)

소듐을 냉각재로 사용하는 고속로로써 물에 비해 열전도도가 높아 열성능이 우수해 열효율이 좋다. 금속과의 양립성도 우수해 기기 및 배관의 부식문제도 해결할 수 있는 노형이다. 다만 소듐과 물의 반응을 방지하기 위한 대처설비가 필요하다. 미국의 TerraPower사가 개발 중인 Natrium 원자로가 여기에 해당하며, 미국 Wisconsin주의 화력발전소 대체를 목표로 하고 있다. 국내기업으로는 SK와 현대건설이 투자에 참여하고 있다.

(2) 용융염로(MSR)

핵연료를 불소 또는 염소화합물과 혼합해 만든 용융염을 냉각재로 사용한다. 대기압 운전이 가능하므로 배관과 용기의 두께를 줄일 수 있어 건설비용이 낮은 장점이 있다. 다만 용융염에 대한 기술적 완성도가 아직 낮은 상황이다. 미국의 Terrestrial Energy사와 덴마크 Seaborg사가 개발 중인 노형이 해당된다.

(3) 고온가스로(HTR)

세라믹 핵연료, 흑연감속재, 헬륨 등의 기체를 냉각재로 사용하여 950℃ 고온의 증기로 수소생산 등에 효율적으로 활용할 수 있다. 자연력만으로 원자로 냉각이 가능해 안전성

이 높다. 미국의 X-energy사가 Xe-100을 미국 정부의 지원(Advanced Reactor Demonstration Program)을 받아 개발 중이다. 국내기업으로는 두산에너빌리티가 참여하고 있다.

나. 우리나라의 개발 현황

(1) SMART 개발

1997년 소형원자로 기술개발에 착수하여 2012년 세계 최초로 소형원자로 SMART의 국내 표준설계 인가를 취득하였다. 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등을 압력용기 내부에 설치한 일체형 설계이다. 현재 사우디 및 캐나다 등에 수출을 추진하고 있다. 그러나 현재의 소형원자로 기술개발 추이를 고려하면 향후 2030년대 수출시장에서 경쟁력 확보에 한계가 예상된다.

(2) 혁신형 SMR 개발

우리나라도 그동안 국내에서 축적한 대형원전 개발 기술력을 바탕으로 30년대 수출시장 진출을 목표로 혁신형 SMR 개발에 착수하였다. 2023년부터 개발에 착수하여 2028년 표준설계 인허가를 완료한다는 일정으로 3,992억의 정부 예타사업을 시작하였다. 세계 최고 수준의 안전성과 경제성 확보를 목표로 경수로 기반의 모듈형 원전으로 [표 1]과 같은 주요 설계요건을 만족하는 소형원자로를 개발 중이다.

[표 1] 혁신형 SMR 주요 설계요건

주요 설계요건
ㅇ 모듈형 가압경수로
ㅇ 80년 설계수명
ㅇ 완전 피동형 노심/격납용기 냉각
ㅇ 발전소 부지내 비상계획구역(EPZ)
ㅇ 운전원 조치여유 시간 및 정전대처 시간 72시간 이상
ㅇ 건설공기: 첫 모듈 24개월/ 전 모듈 42개월 이하
ㅇ 모듈 공장 제작 및 육상 운송 가능 설계
ㅇ 무붕산 운전 및 유연한 부하추종운전
ㅇ 재장전 주기: 24개월 이상
ㅇ 핵비확산 및 해체 고려 설계
ㅇ 항공기 충돌 및 사이버보안 설계

출처: 과학기술정보통신부, 산업통상자원부(2021)

III. 소형원자로 성공을 위한 요소

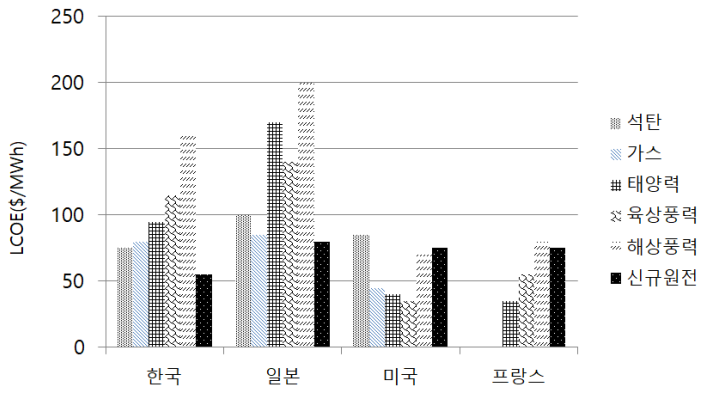
1. 시장 경쟁력 확보

가. 발전원별 건설단가

원전의 경제성은 세계 각국의 전력시장 환경에 따라 다르다. IEA and OECD-NEA (2020) 보고서의 세계 주요국의 전원별 LCOE(Levelised Cost Of Electricity: 평균발전단가) [그림 3]을 보면 우리나라와 일본에서는 원자력이 가장 경제성이 있는 전원으로 평가되지만, 미국, 프랑스 등에서는 태양광, 육상풍력의 신재생에너지뿐만 아니라 천연가스에 비해서도 경제성이 떨어진다. 태양광, 풍력 등은 기술이 발전할수록 가격도 낮아져 점유율이 확대되겠지만, 안정적인 전력공급에는 한계가 있다. 신재생에너지의 비중이 커질수록 전력 계통의 안정성 유지에 많은 비용이 들 것이며, 결국 안정적인 보조전원이 제공되어야지만 신재생에너지도 경제적 효과를 발휘할 것이다.

안정적인 전력공급을 위한 신재생에너지 보조전원 역할을 할 수 있는 저탄소 전원은 현재의 기술로 수력, 원자력 및 CCUS을 확보한 화력발전, 수소터빈발전이 될 것이다. 수력은 지리적인 제약이 있어 확대에 한계가 있고 결국 원자력과 CCUS 화력발전, 수소터빈발전이 가장 현실적인 대안이다.

[그림 3] 세계 주요국의 전원별 예측 발전단가(2025)



출처: IEA and OECD/NEA(2020)

그러면 앞으로 신규 원전 건설은 성공할 것인가? 미국 및 프랑스는 그동안의 대형 원전 건설에서 실패 경험을 바탕으로 신규 원전을 훨씬 경제적으로 건설할 수 있을 것으로 예상한다. 설계완성도를 높여 인허가 불확실도를 줄이고, 설계를 표준화하여 기자재 공급망을 잘 구성할 수 있을 것이다.

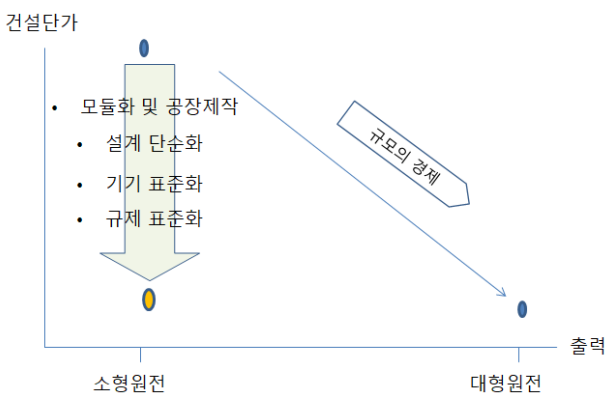
IEA(2022) 보고서에서는 향후 2025~2030년대 신규원전 건설단가를 5,000$/kWe로 예측하고 있다. 그리고 현재 CCUS 기술이 성숙되진 않았지만 향후 CCUS을 장착한 화력발전소와 경쟁하기 위해서는 2,000~3,000$/kWe의 건설단가와 40~80$/MWh의 발전단가를 유지해야 한다고 한다.

따라서 앞으로 개발할 소형원자로가 성공하기 위해서는 적어도 대형원전 건설단가 수준으로 개발을 해야 하며, 일부 시장에서는 CCUS 화력발전소와도 시장경쟁을 해야 할 것으로 생각된다.

나. 비용 저감 방안

규모의 경제 측면에서 소형원자로가 대형에 비해 경제성을 확보하기가 어렵다. 하지만 NEA는 [그림 4]와 같이 소형원자로 경제성 확보방안을 제시하고 있다. 혁신적인 설계를 통하여 각종 밸브, 배관 및 계측기의 수를 줄여 설계를 단순화하고, 주요 기기를 표준화하여 공장에서 반복, 생산할 수 있게 한다. 설계를 모듈화하여 현장 부지작업 동안에

[그림 4] 대형원전 대비 소형원전의 경제성 확보방안



출처: IEA and OECD/NEA(2020)

주요 기기 및 시스템을 공장에서 사전 제작을 할 수 있을 것이다. 단기간에 주요 기기의 대량 제작을 통해서 비용을 대형원전 건설단가 수준으로 낮출 수 있을 것이다. 즉 규모의 경제(economy of scale) 방식이 아니라 대량 제작의 경제(economy of series production) 방식으로 비용을 낮추는 것이다.

그리고 제작기술 혁신을 통한 공기단축이다. 먼저 원전 주 기기 중 하나인 원자로의 공장 제작이다. 기존은 쇳물을 식혀서 망치로 두들기는 단조 방법으로 원자로를 제작하였으나 제작 기간이 1년 이상 걸렸다. 하지만 소형원자로는 철판을 구부려 EBW (Electron Beam Welding)라는 용접과 다이오드 레이저 용접(diode laser cladding) 방법을 통하여 2개월 내에 공장 제작이 가능하다. 또한 복잡한 형태의 용기는 철가루에 고온 고압의 압력을 가하여 제작하는 열간등압성형(hot isostatic pressing) 기술도 적용할 수 있다.

그리고 주요 기기와 구조물을 모듈화 설계를 하고 공장에서 제작하여 건설 현장에 바로 설치하는 기술도 있다. GEH사는 모듈화 스틸 콘크리트 구조물을 개발하여 건설 공기를 단축하는 기술을 개발하고 있다.

2. 안정적인 규제체계

가. 규제기준 수립

대형원전은 수십 년의 운전 경험으로 규제체계가 비교적 잘 정립되어있다. 하지만 소형원자로는 대형원전과는 전혀 다른 설계개념으로 기존의 대형원전 규제체계를 적용할 수 없다. 소형원자로 개발에 가장 앞서있는 미국에서는 최근에 새로운 규제기준을 만들어 Nuscale사에 인허가를 발행한 바 있다.

소형원자로 규제기준이 정립되지 않는 국내의 상황은 기술개발 사업의 불확실성을 높이고 사업에 필요한 투자를 어렵게 만들고 있다. 규제기관이 선제적으로 소형원전 규제기준을 수립하여 개발사업의 불확실성을 제거해야 한다.

나. 규제 표준화

대형원전시장에서도 원자로 개발사업자의 해외시장 진출시 국가 간에 서로 다른 규제체계로 인하여 설계변경 발생등 사업의 원활한 수행에 지장이 많다. 특히 원전운영 경험이 없는 국가는 규제체계를 정립하는 데에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 전 세계 규제기관이 동일하게 통용되는 규제기준을 만들자는 취지로

MDEP(Multinational Design Evaluation Program) 회의를 운영하고 있다. SMR 분야는 최근에 IAEA 주도로 SMR Regulator's Forum(2018, 2019, 2021)을 운영하여 주요 설계개념 및 규제기관의 역할에 대해 논의하였다.

특히 미국과 캐나다의 규제기관인 NRC와 CNSC사가 BWRX-300 노형에 대해서 규제 및 안전현안에 대해서 협력하기로 합의한 것은 그 의미가 크다고 할 것이다.

한편 유럽에서는 각국의 규제요건에 따른 설계변경을 최소화하고 설계를 표준화하기 위하여 프랑스의 ASN, 체코의 SUJB, 핀란드의 STUK 규제기관들이 프랑스의 Nuward 설계를 대상으로 합동 규제검토를 하기로 합의하였다.

IAEA도 NHSI(Nuclear Harmonization and Standardisation Initiative)를 통해서 소형원자로에 대한 전 세계 각국의 규제체계를 일관되게 만들려고 노력하고 있다.

소형원자로는 대량의 반복생산으로 경제성을 확보하는 사업모델이므로 표준화된 설계와 일관된 기자재 공급망, 그리고 글로벌 수요가 존재해야 한다. 국내뿐만 아니라 해외의 여러 국가에 공통적으로 적용 가능한 규제체계가 존재해야 표준화된 대량생산의 경제적 효과를 볼 수 있을 것이다.

3. 안전성 및 주민 수용성 확보

가. 화력발전소 대체 기술개발

소형원자로의 성공적 상용화를 위해서는 안전한 원자로를 개발하여 주민의 수용성을 확보해야 한다. 소형원자로가 주민의 수용성을 확보하여 현재의 노후 화력발전소를 대체하게 되면 대량의 온실가스 감축효과 뿐만 아니라 추가적인 송전망 건설없이 전력제공이 가능하다. 미국 아이다호 국립연구소(INL, 2022) 보고서에 따르면 화력발전소 부지에 1,200MWe급 원전을 지을 경우 신규부지 건설비용보다 15~35% 저렴한 경제적 효과도 얻을 수 있다. 그리고 주변 지역 공장과 주민들에게 저렴하게 공정열과 난방열도 공급이 가능하다.

현재 상업용 대형원전은 반경 20~30km 이내에 인구 밀집지역이 없도록 방사선비상계획구역(EPZ)을 설정하여 운영하고 있다. IAEA(2021)는 소형원자로의 작은 출력과 그에 따른 적은 방사선원항, 소형원자로에 내재된 안전설계와 지난 수십 년간 개발된 PSA기술을 활용한다면 최소화된 방사선비상계획구역을 적용할 수 있을 것으로 평가하고 있다.

또한 화력발전소 부지를 원전부지로 사용하기 위한 부지 사용지침 등도 준비가 필요하다. 미국 DOE는 포츠마스(Portmouth) 부지를 대상으로 부지 특성화 데이터 등의 수집을 통해서 원전부지 사용지침 개정작업을 하고 있다.

나. 주민 수용성 확보

화력발전소를 대체하여 소형원자로를 건설하기 위해서는 방사선비상계획구역을 최소화하는 기술개발 뿐만 아니라 주민 수용성을 확보해야 한다. 소형원자로에 대한 주민의 이해와 동의를 구하는 것이 중요하다. 안전한 원전이라는 기술적 설명뿐만 아니라 소형원전의 건설과 운영으로 현지 고용창출 등 지역경제가 활성화될 수 있도록 관련 정책을 선제적으로 개발해야 할 것이다.

4. 신재생에너지와의 공존

가. 신재생에너지의 확대와 간헐성

온실가스를 줄이기 위한 각국 정부의 노력으로 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 확대는 빠른 속도로 진행될 것이며, 결국 간헐성 문제가 기술적으로 해결되면 가장 적합한 탈탄소 전원이라고 할 수 있다. 그러나 간헐성 문제가 단기간에 기술적으로 해결되기가 어려우므로 신재생에너지를 보완할 수 있는 전원으로 소형원자로가 개발되어야 할 것이다.

나. 유연성을 보유한 분산전원

신재생에너지 확대와 그로 인한 간헐성 문제 해결을 위해 소형원자로는 유연성을 보유해야 한다. NEA(2022)와 NREL(2020)에서 정의한 유연성이라고 함은 전력 수요에 따라 출력 증감발을 제어하는 전통적인 부하추종 운전능력뿐만 아니라 전출력을 유지하면서 시장 상황에 따라 전기 대신 열을 생산하여 난방, 에너지 저장 및 수소 생산 등에 활용할 수 있는 능력을 말한다. 기술혁신을 통해서 전기 혹은 열을 유연하게 생산할 수 있는 능력을 보유한 소형원전은 재생에너지와 완벽하게 공존할 수 있는 전원이 될 것이다. 또한 이러한 유연성에 대한 보상을 받을 수 있는 전력가격 정책이 개발되어야 할 것이다.

5. 설계 실증

가. 설계 실증

현재까지 전 세계 많은 소형원자로 개발이 진행 중이지만 아직 실제로 건설되어 안정적으로 운영됨을 실증한 원자로가 없다. 표준설계 인허가를 취득한 Nuscale사의 원자로도 미국 아이다호 국립연구소 부지에 건설계획이 있지만, 현재까지는 문서 상의 원자로인 것이다. 첫 원자로를 건설하게 되면 설계과정에서 검토하지 못한 다양한 문제가 예상되므로 적어도 안정적으로 운영됨을 실증해야 한다. 이러한 실증결과가 있어야 전 세계 시장에서 경쟁력을 갖출 수 있을 것이다.

나. 실증로 건설

국내에서 개발 중인 혁신형 SMR도 아직 구체적인 설계가 정립되지 않은 개념설계 단계이다. 적용되는 다양한 혁신설계의 운전성을 입증해야 시장에서 경쟁력이 있을 것이다. '28년 표준설계 인허가 취득계획과 30년대 수출시장 진출을 고려하면 국내 실증로 건설을 위한 준비도 서둘러야 할 것이다. 가장 먼저 건설부지를 확보해야 하고 주민들의 동의도 구해야 할 것이다. 이 모두 상당한 준비기간이 필요한 작업이어서 지금부터라도 실증로 건설을 위한 준비가 필요한 것이다.

IV. 맺음말

소형원자로는 설계 개념상 안전성의 획기적 향상 등 많은 잇점을 제공하지만, 사업적 성공을 확신하기에는 아직 이르다. 전 세계 대부분의 소형원자로가 아직 개념개발 단계이며, 표준설계 인허가를 통과한 Nuscale사도 아직 실증로 건설을 시작하지 못했다. 하지만 저탄소 청정에너지원으로 다양한 용도로 활용이 가능한 소형원자로의 잠재성을 고려하면 대형원전시장의 단점을 극복한 새로운 소형원전 시장이 2030년대에 형성될 수 있을 것으로 판단된다.

우리나라도 SMART 개발경험을 바탕으로 2023년부터 본격적으로 소형모듈 원자로 개발사업에 뛰어들고 있다. 개념설계 기술개발을 하는 현재의 시점에서 소형원자로 개발사업이 성공하기 위해 필요한 요소가 무엇인지를 본 논문에서 검토해보았다. 성공

적인 기술개발 뿐만 아니라 법적, 행정적 제도도 차근차근 준비해서 우리나라의 해외수출 주력상품으로 발전하기를 기대한다.

참고문헌

과학기술정보통신부, 산업통상자원부, "기획보고서: 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업," 과학기술정보통신부, 2021.

산업통상자원부, 한국에너지공단, "2021 산업부문(대상년도: 2020) 에너지 사용 및 온실가스 배출량 통계," 한국에너지공단, 2021.

이정익, "국내 및 해외의 소형원자로 개발동향," 『세계원전시장인사이트』, 에너지경제연구원, 2020.

한국에너지공단, 국가온실가스 배출량 종합정보 시스템, 2021년 산업부문 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 통계 〈https://netis.kemco.or.kr/〉, 2022(검색일: 2023.4.10).

EPRI, "Rethinking Deployment Scenarios for Advanced Reactors," EPRI, 2021.

IAEA, "Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment," Nuclear Energy Series No. NR-T-1.18, IAEA, 2021.

IEA, "Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From Today'S Challenges to Tomorrow'S Clean Energy Systems," IEA Publications, 2022.

IEA and OECD/NEA, "Projected Costs of Generating Electricity," OECD Publishing, 2020.

INL, "Investigating Benefits and Challenges of Converting Retiring Coal Plants into Nuclear Plants," INL/RPT-22-67964 Revision 1, INL, 2022.

NEA, "Meeting Climate Change Targets: The Role of Nuclear Energy," NEA, 2022.

NREL, "Flexible Nuclear Energy for Clean Energy Systems," NREL/TP-6A50-77088, NREL, 2020.

OECD/NEA, "Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear," NEA, 2020.

OECD/NEA, "The NEA Small Modular Reactor Dashboard," NEA Publishing, 2023.

POWER, "Novel UAMPS-Nuscale SMR Nuclear Project Gains Participant Approval to Proceed to Next Phase," POWER, 2023.

SMR Regulators'Forum, "Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors," IAEA, 2018.

SMR Regulators'Forum, "Report on Key Regulatory Interventions during a Small Modular Reactor Lifecycle: INTERIM REPORT," IAEA, 2019.

SMR Regulators'Forum, "Small Modular Reactors Regulators'Forum Working Group on Lisensing Issues: Phase 2 REPORT," IAEA, 2021.