

## 월간리포트

작성자

강 기식

작성일

2023.04.01

##

### 1. 배 경

신규 대용량 상업원자력발전소 (이하 원전)의 건설에 대한 불확실성으로 인해 대용량 상업 원전에 대한 매력은 점차 떨어지고 있는 것은 분명하다. 유가가 70 달러 이상으로 고 유가가 계속된다면 대용량 상업 원전이 매력적이지만, 지금처럼 유가의 혼돈의 시대가 계속된다면 건설준비, 재원조달 등에서 비교적 용이한 소형모듈형원자로(Small and Module Reactor: SMR)이 향후 원자력산업의 비전이라는 것은 의심할 여지가 없다.

그러나 현재 연구 개발 단계에 있는 SMR이 상용화 로 확대되기 위해서는 지속적인 기술 개발과 모듈화를 통하여 건설비용을 현저하게 낮추지 않고는 적용되기 어려울 것이며, 건설 단가를 낮추기 위해 개선된 건설공법이 적용되어야 할 것이다.

2010년대 이전에는 Small (300MWe 이하) and Medium (700MWe 이하) 원자로를 SMR이라고 불렀다. 해당 원자로는 CAREM, KLT-40S, PBMR-400, IRIS, HTR-PM, VHTR, AHWR, SMART 등이며 용량이 작은 원자로의 활용 가능성에 특히 원자력 개도국 중심에 초점을 맞추었다. 2020년대는 하나의 원자로가 300MWe 이하로써 모듈화가 가능한 원자력시스템을 SMR로 이룸하고, 미래에 상용화될 가능성이 있는 SMR로 통칭하는 경향도 있다.

원전 수요는 대형으로 갈수록 경제성이 좋은 것으로 평가되어 왔고, 복잡한 인허가 절차, 규모의 경제로 인하여 대용량 원전이 시장의 환영을 받아왔다. 그러나 수년 전부터 대형 원전 건설의 공기 지연에 따른 건설원가의 상승과 송전망의 안전성을 고려하여 대규모 발전소보다는 중소형 원전의 대한 수요 증가로 소형모듈형원자로에 관심이 급상승하고 있다. SMR은 규모의 소형화뿐만 아니라, 기존 원전에서 격납건물 내부에 설치된 증기발생기 등의 계통 일부가 원자로용기 내부에 설치되어 있어서 냉각재 상실 사고를 원천적으로 방지하는등 안전성을 더 높일 수 있는 것으로 알려져 있다. 비용을 현저하게 낮추지 않고는 적용되기 어려울 것이며, 건설 단가를 낮추기 위해 모듈화 방법을 이용할 것이다.

본고에서는 SMR의 안전성 및 경제성 제고를 위한 미국, 러시아 등을 중심으로 이루어지는 세계적 SMR 개발 현황과 SMR에서 추진하는 모듈화 건설이 현실적으로 가능한지, 해결되어야 할 기술적 사항 등 모듈화 건설에 대한 문제점 및 해결방안을 소개한다.

신규 원전 도입국들은 후쿠시마 원전 사고가 발생하기 전에는 대용량 상용원전의 도입을

추진하였다. 그러나 최근에는 많은 국가들이 전력 소비량의 완만한 증가, 그리고 원전 건설을 위한 막대한 자원 조달, 그리고 송전망의 용량 제한으로 대용량 상용 원전의 도입이 현실적으로 최적으로 방법이 아님을 깨닫고 비교적 적은 공사비로 단기간 건설이 가능한 SMR로의 방향 전환을 시도하고 있다. 예를 들면 요르단과 케냐는 상업용 대형 원전에서 SMR 도입으로 국가의 원자력 도입 정책을 변경하였다.

## 2. 소형모듈형원자로의 특성

SMR은 3가지 특성, 즉 안전성 관점, 경제성 관점, 시장성 관점에서 뚜렷한 특징들을 가지고 있어야 한다. SMR은 획기적인 안전성이 확보되고, 경쟁력을 가지고 있어야 시장성을 확보할 수 있을 것이다. SMR은 기존의 고유 안전성과 피동 안전성 등을 필수로 확보하고, 기존 대용량 상용 원전의 부지 제한성 등을 과감히 벗어날 수 있는 특성을 갖고 있다. 그래서 접근이 어려운 내륙지방이나 도시 인근의 아주 소규모로 독립 전원을 공급할 수 있는 요소를 갖추고 있고 또 한 소규모 전력망에 적합하다.

일반적으로 규모의 경제에 따라 전기 출력이 클수록 건설 및 발전 단가가 낮아져 경제성을 가질 수 있다. 그러나 SMR은 용량이 적음에 따라 건설 단가 및 발전 단가가 높아짐으로 경제성 측면에서 취약점을 가지고 있다.

이러한 경제성을 보완하는 방법으로

- 1) 설계를 표준화하고 모듈을 확대하여 건설하여 경제성을 향상
- 2) 계통 설비가 단순화되어야 하고 소형화, 모듈화 설계,
- 3) 모듈화 제작을 확대하여 건설 공기를 단축되어서 건설 기간을 대폭 단축시킬 수 있어야 한다.

모듈화, 설계 표준화는 SMR의 건설 호기 수와 밀접하게 관련되어 있다. 모듈화, 표준화는 SMR의 건설호기 수가 증가할 수록 전체 공사비가 저감되는 효과가 큰 것을 알 수 있다.

그러나 모듈화 방법을 채택하는 경우 두 개의 큰 비용 요인이 있다.

첫째는 모듈화를 위한 제조 공장 설비 개선 및 기반 비용,

둘째는 모듈화 설계 및 제조비용 이다.

만약 SMR을 8기 이상 건설한다고 하면 비용의 절감을 통하여 대형 상용 원전과 건설 비용에 있어 경쟁력이 있을 것이다. 또한 모듈화와 표준화가 동시에 이루어진다면 SMR도 충분한 시장 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

미국은 최근 신규원전의 정책에 있어 대형원전 시장에서 실질적으로 주도권을 러시아에게 상실하고 원자력의 평화적 이용 (NPT) 체제의 주도권 위협을 받고 있다. 예전 미국의 영광을 되찾기 위해서 SMR 및 차세대 원전으로 주도권 회복 추진하고 있으며 모듈원전인

Nuscale을 NRC에서 규제예외 사항을 인정한 설계인증을 받았다.

### 3. 소형모듈형원자로의 특성

모듈화는 상업용 원전에서 설비나 시설물 건설에 적용된 기간이 상당히 오래되었다. 과거에는 주로 화학 분야의 공장 건설에 많이 사용되어 왔으나 특수 구조물 등으로 사용처가 확대되고 있다. 모듈화는 물적 및 인적 자원이 제한되어 있고 현장 작업이 어려운 환경에서 구조물을 건설할 때 경제적인 해결책으로 불리고 있다.

모듈화는 위험 부담을 줄이면서 비용 절감과 공기 단축을 이룩하게 해주는 효과적인 수단이지만 복잡성을 높이고 혼돈을 초래하기도 한다. 그러므로 특정 프로젝트의 모듈화는 현장 건설의 경우와 비교해서 분명한 경제적 이점 여부에 의하여 결정되어야 하며, 최종 의사 결정전에 모듈화가 실용적이고 실행 가능한 방법인지 신중하게 검토되어야 한다.

대용량 상업용 원전은 에너지의 효율화, 고객 주문형등의 특성을 갖고 있어 용량이 클수록 경제성이 높아지나, SMR은 반복 건설의 강점이 있어 모듈화에 유리할 것이다. 그러나 적용시 설계의 복잡성 및 조기에 상세 설계를 완료하고, 기기 구매 및 건설 현장의 모듈 운송 및 관리조건, 노무비용 등이 고려되어야 한다. 현장 건설과 모듈화 경우의 작업량, 노무비, 비용 등을 다각적으로 분석한 결과를 잘 보여주고 있다.

대용량 상업용 원전의 리스크 요인을 회피하고 SMR 건설 사업의 타당성을 확보하려면 모듈화 건설 방식 도입을 통한 원격지 사전 제작 및 급속 시공법의 도입이 불가피하다. 그러나 이러한 경제성은 건설 호기 수와 절대적인 관계가 있으므로, 8기 이상의 SMR을 건설하는 경우에는 표준화 및 모듈화를 통한 제작의 경제성과 함께 대형 크레인 및 운송 수단 관련 비용의 절감이 가능하여, SMR 건설 전반에 모듈화 전략을 적용하는 것이 최선의 선택이다.

### 4. 소형모듈형원자로 적용의 문제점

SMR을 도입하고자 하는 많은 국가는 아래와 같은 사항에 대해 SMR을 수출하고자 하는 나라, 기업에 대해 아래와 같이 요구하고 있다.

1) 기술을 개발한 나라가 먼저 SMR을 건설, 설치하여 건설, 운영 경험을 입증하기를 요구하고 있다. 건설되지 않은, 입증되지 않은 기술을 도입하기 위해 무모함을 받아드릴 나라가 없을 것이다. 따라서 SMR을 수출하기 위해서 먼저 한국에서 건설하여 건설, 운영에 대한 실적으로 입증하여야 할 것이다.

2) SMR을 도입하는 경우, 수입하는 나라의 기술이전, 국내기업의 참여율에 대해 우려하고 있다. 수출하는 나라의 공장에서 모듈로 제작하여 공급됨으로 수입하는 국가로 기술이전, 기업의 참여에 대한 우려를 표명하고 있다. 기술의 이전을 통해 SMR을 지속적으로 안전

하게 운영하기 위해 해당국의 기술이전, 국내기업의 참여를 높일 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다.

3) 핵물질이 SMR을 통해 확산되는 경우 핵비확산에 대한 대책이 필요할 것이다. SMR혹은 Micor reactor를 통해 핵물질이 아프리카, 남미등의 여러나라에서 SMR의 운용된다면 이에 대한 핵비확산을 조치가 어떠한 방법으로 핵물질에 대한 물리적 방호, 핵물질 비확산 대책이 선결되지 아니하면 SMR의 수출은 어려울 것이다.

4) 현재의 SMR은 Kw당 건설비용이 10000\$에 이상 소요될 것도 모른다. SMR의 Kw당 건설비용은 3000- 4000\$이라고 하는 각 설계자의 발표는 믿을 수 없을 것이다. SMR의 건설 후 운영, 유지 보수 비용에 대해서도 다시 한번 생각을 해 보아야 될 것이다.

위에서 언급된 SMR이 가지는 여러 가지 문제가 해결되지 아니하면, 2050년까지는 현재의 입증된 기술인 가압경수로 (PWR) 기술이 대형원전이 원전사업을 주도할 것이다. SMR은 많은 나라, 많은 기관에서 관심을 가지고 내일 당장 현실화 될 것 같이 보이지만, 아직 현실적으로 SMR의 건설은 러시아, 중국, 아르헨티나에서 건설, 혹은 운용이고 한국을 비롯한 많은 나라는 기술개발 혹은 설계중에 있다. 미국의 NRC의 설계인증을 받은 Nuscale도 말만 무성하지 아직 어떤 나라도 Nuscale를 건설하고 있지 않다. 우리는 너무 과도하게 SMR에 집중하여 한국의 원자력 수출에 대한 시간과 자원을 낭비하지 않기를 바란다.