

차세대 원전, 소형모듈원자로(SMR)

KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터
윤 정 길 (jayun2014@kdb.co.kr)

- ◆ 최근 에너지 안보 및 탄소중립이 전세계 공통 관심사로 떠오른 가운데, 안정성이 향상되고 타 산업으로 활용이 용이한 '소형모듈원자로(SMR)'에 대한 개발 필요성이 대두
- ◆ 국내에서도 기존 소형원자로 SMART기술을 토대로 '30년대 세계시장 선점을 위한 혁신형 SMR 기술개발을 추진 중

□ 최근 러시아-우크라이나 전쟁으로 에너지 안보에 대한 관심이 증가하며 원전의 가치가 재조명되는 가운데, 안전성과 유연성이 강화된 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor)가 부상하고 있음

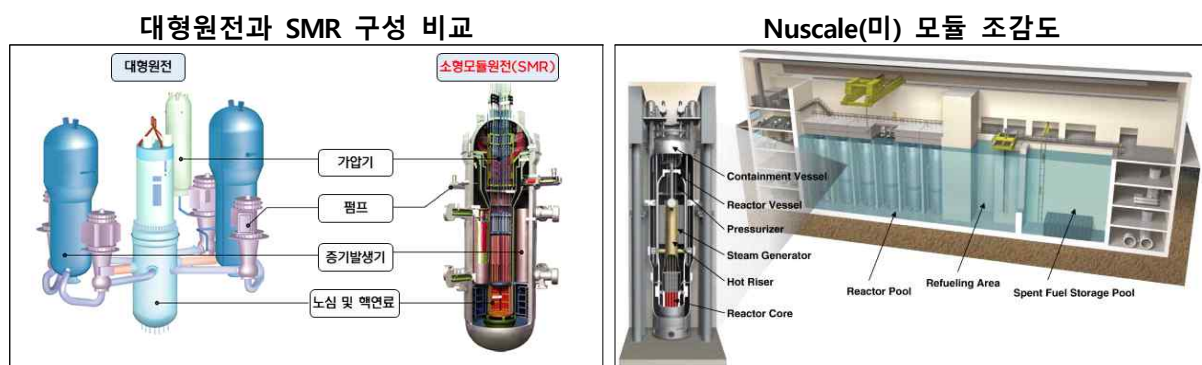
- SMR은 원자로 계통을 모듈화, 단순화*하고 대형원전 대비 낮은 출력으로 피동형 안전계통** 채택이 가능하여 안전성이 더욱 향상

* 노심(핵분열을 통해 열을 생산하는 부분)이 작고, 일체형 설계로 냉각재 배관 파손으로 인한 방사능 유출 가능성 저하

** 대형원전의 강제 순환 냉각방식 대비 자연순환 방식으로 사고시 전원차단에도 원자로를 냉각 유지하여 안전성과 운전신뢰도 향상에 기여할 수 있는 시스템

- 소규모 전력망을 위한 분산 발전원 활용과 더불어 산업 공정열, 해수담수화, 수소생산 등 다양한 산업적 활용이 가능

- 또한, 부하 추종 운전을 통한 출력 조절이 가능하여 신재생에너지(태양광, 풍력)의 간헐성 문제 보완 가능



자료 : 한국원자력연구원 자료 재구성

자료 : 에너지경제연구원(2020.07)

- 미국, 영국 등 원전 선진국을 중심으로 노후원전 대체, 탄소 저감, 소규모 분산 전원 목적 등을 위해 SMR 개발에 적극적

- SMR 확대로 원자력 산업계의 공급망 변화와 더불어 대규모 자본투입*이 예상

* (미국)SMR개발에 7년간 \$32억 투자, (중국) SMR개발 및 20기 설치를 목표로 \$90억 투자 계획 등

SMR 개발 추진현황

모 델	총 설비 용량	노형 ^{주)}	설계자	(국가)추진 현황
NuScale SMR	600MW (50MW×12모듈)	PWR	Nuscale Power	(미국)Idaho국립연구소와 실증사업 및 인허가 진행중
Sodium	345MW	SFR	TerraPower/ GE-Hitachi	(미국)Wyoming주에서 실증화 추진
NUWARD	340MW (170MW×2모듈)	PWR	EDF컨소시움	(프랑스)'30년 실증화 추진 계획
UK SMR	470MW	PWR	Rolls-Royce	(영국)Whyfa등에서 인허가 진행중
BWRX-300	300MW	BWR	GE-Hitach	(캐나다)Ontario社 상용화 추진

주 : PWR(Pressurized Water Reactor):가압경수로, SFR(Sodium Fast Reactor):고속원자로, BWR(Boiling Water Reactor):비등경수로
 자료 : 한전 경영연구원

□ 국내는 '12년 세계 최초로 표준설계인가를 취득한 소형원자로 SMART 기술을 토대로 '30년대 세계시장 선점을 위한 '혁신형 SMR(i-SMR)'을 개발 중

- 현재 한국수력원자력과 한국원자력연구원 주도로 '혁신형 소형모듈원자로 (i-SMR) 기술개발 사업'을 진행 중이며, '28년까지 설계 완료 목표

혁신형 SMR(i-SMR) 주요 기술

기술	기술 설명	효 과
무한냉각	운전원 조치 및 전력이 필요없는 피동안전기술	안전성 향상
내장형 제어봉구동장치	내장형 제어봉구동장치 설계로 제어봉 이탈사고 차단	
혁신 핵연료	혁신형 SMR을 위한 핵연료 및 가연성흡수봉	
모듈화	건설공기 단축을 위한 모듈화 기술	경제성 확보
통합형 제어실	다수모듈 통합제어 기술	
무봉산운전	무봉산 노심 핵연료 관리 및 최적 장전모형 설계	유연성 향상
재생에너지연계	재생에너지 연계 탄력운전 기술	

자료 : 한국에너지기술평가원

- 안전계통 설계를 단순화*하여 각종 고장요소를 제거하고, 고내압 철제 격납용기** 활용으로 방사능 누출을 방지

* 원자로 주요기인 증기발생기, 펌프, 가압기, 원자로 노심을 하나의 압력용기 내에 최적화 및 밀집화

- ** 대형원전의 콘크리트 대비 상대적으로 높은 내압을 견딜 수 있어 원자로 사고시 구조물 손상위험 감소
- 외부 전력 공급 및 운전원의 개입 없이도 안전한 냉각이 가능*하여, 사고시 주민 대피 및 소개 필요성이 현재의 대형원전보다 매우 낮음

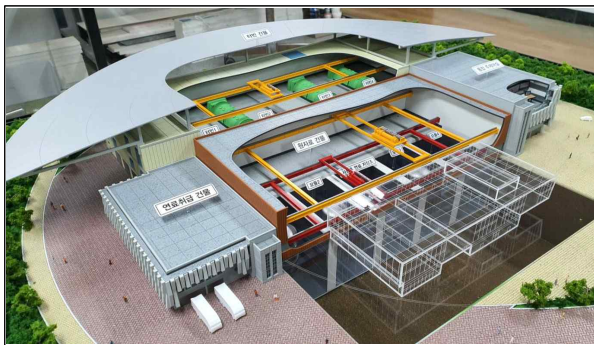
* 사고 발생시 자연력을 이용하여 원자로 및 사용후핵연료 저장수조를 무한기간 동안 냉각 가능

- 설계 단순화, 모듈화, 공장제작 및 내륙운송으로 건설 물량 및 공기 축소* 가능

* 대형원전(1,400MW)의 경우 약 48개월이 소요되나 i-SMR(179MW×4기 기준)의 경우 24개월 예상

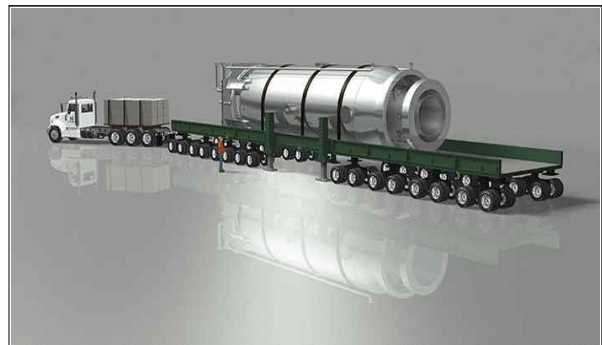
- 가스복합발전 수준의 부하추종* 및 모듈별 탄력운전 설계로 재생에너지 간헐성 보완 가능
 - * 전력계통의 부하 변동에 대응해 발전기의 출력량을 조정하는 운전방식으로 주파수를 제어하는 방식과 수요가 없는 시간대에 출력을 낮춰 운전하는 일일 부하추종운전 방식이 있음. 국내 첫 수출형 원전인 APR1400의 경우 부하추종운전이 가능하도록 설계
- 다수 원자로 모듈을 한 공간의 제어실에서 통합 감시 및 제어 가능*
 - * 예를 들어 4개 모듈의 경우 3인의 운전원만으로도 원자력 발전소 운영이 가능

혁신형 SMR(i-SMR) 플랜트 개념



자료 : 한국원자력연구원

SMR 내륙운송



자료 : Nuscalepower.com

□ 향후 경쟁력있는 SMR의 개발과 상용화를 위해서는 경제성 확보와 사용후핵연료 처리가 관건

- 설비 소형화에 따라 대형원전 대비 규모의 경제 측면에서 불리하나 복수의 모듈러 건설로 극복할 필요
 - 대형원전 대비 작은 크기로 핵분열로 발생하는 출력밀도* 및 에너지밀도**가 낮음
 - * 출력밀도의 경우 대형원전은 약 100W/cc인 반면 SMR은 50W/cc 이하 수준
 - ** 에너지밀도(연소도)의 경우 대형원전은 약 60MWd/kgU인 반면 SMR은 30~40MWd/kgU 수준
 - 소형화 및 모듈화를 통해 공장 제작 후 현장까지 육로 수송함으로써 현장 작업과 건설 공기를 최소화하여 비용을 절감하며, 복수모듈 배치, 통합 주제어실 등을 통해 규모의 경제 실현
- 고준위 방사성 물질인 사용후핵폐기물 처리 등 종합적인 관리 방안 수립 필요
 - 정부는 고준위 방폐물 안전관리*를 위한 10개 요소기술 개발 등을 위해 1.4조원 예산 투자 예정('22.7.20자 '고준위 방사성폐기물 R&D 로드맵' 중)
 - * 한국은 미국, 스웨덴, 핀란드 등 선도국 대비 운반 84%, 저장 80%, 부지 63%, 처분 57% 수준 기술 보유
 - 현재 사용후핵연료의 재활용 기술은 연구개발 단계이며 고준위 폐기물 처분장은 관련법 제정 등이 필요