



부유식 해상 모듈러 원전(SMR)

글 : (주)보성 권효재 상무 / kwon7775@bosunggroup.com

윤석열 정부 출범 이후 원전에 대한 적극적인 정부 지원책이 발표되면서 관심이 고조되고 있습니다. 특히 소형 모듈러 원전 (이하 'SMR')은 기존 대형 원전의 단점을 보완할 수 있다는 기대를 한 몸에 받고 있습니다. 이 시간에는 SMR의 일반적인 특성과 종류를, 다음 시간에는 SMR을 탑재한 부유식 해상 모듈러 원전의 특성과 기술적인 과제에 대해 살펴보겠습니다.

SMR은 규모가 작고, 설계가 표준화되어 공장에서 대량 생산할 수 있는 소위 모듈러 공법을 채택한 원전을 의미합니다. 동해안에서 흔히 볼 수 있는 원전은 대형원전으로 발전 출력이 1000~1400 MW급이며, 출력이 300 MW 이하인 원전을 국제 원자력 기구(IAEA)는 소형 원전으로 구분합니다. SMR 보다 더 작은 원전을 MMR (Micro Modular Reactor)로 분류하며 통상 30 MW 이하 규모입니다. SMR은 기존 대형 원전 대비 강화된 안전성, 양산시 개선된 경제성, 다양한 용도로 활용될 수 있는 확장성이 장점이며 현재 세계적으로 50개 이상의 모델('노형')들이 개발되고 있습니다.

SMR로 가는 이유 4가지

<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px;">안전성</div> <ul style="list-style-type: none"> 최신 기술 적용에 따른 향상된 안전성으로 사고 발생 위험 감소 및 제한 구역 최소화 <p>“사고 시 별도의 전력/냉각수 공급과 인력 투입이 없어도 자연 순환 냉각만으로 안정한 상태 유지 가능”</p>	<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px;">경제성</div> <ul style="list-style-type: none"> 건설/유지비 및 해체/폐기물처분비용까지 고려한 균등화 발전비용 계산 시 SMR이 경제적 우위 확보 가능 <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>\$/MWh</td> <td>55</td> <td>68.2</td> <td>77.5</td> <td>128.9</td> </tr> <tr> <td></td> <td>NuScale 초도호기 (일본후쿠시마)</td> <td>가스 (탄소세 \$21.9 포함)</td> <td>대형원전</td> <td>석탄화력 (탄소세 \$24.6 포함)</td> </tr> </table> <p><small>출처: 미 에너지 정보청(2019), 한국형 원전은 54분 전후</small></p>	\$/MWh	55	68.2	77.5	128.9		NuScale 초도호기 (일본후쿠시마)	가스 (탄소세 \$21.9 포함)	대형원전	석탄화력 (탄소세 \$24.6 포함)					
\$/MWh	55	68.2	77.5	128.9												
	NuScale 초도호기 (일본후쿠시마)	가스 (탄소세 \$21.9 포함)	대형원전	석탄화력 (탄소세 \$24.6 포함)												
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px;">다양성</div> <ul style="list-style-type: none"> 시장 환경에 최적화된 다양한 Solution 존재 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>“수소생산에 최적화된 고온가스로”</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>“탄광, 사막도시 등 격오지 전원/난방 공급용 마이크로 원자로”</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>“선박, 해상플랜트 등의 동력을 제공하는 해양원전”</p> </div> </div>	<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px;">탄소중립</div> <ul style="list-style-type: none"> 발전부분 탄소중립 (Net-Zero) 달성을 위해서 신재생과 원자력 발전과의 Mix 필요 <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>원자력</td> <td>10</td> <td>(g/kWh)</td> </tr> <tr> <td>태양광</td> <td>154</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LNG(가스)</td> <td>549</td> <td></td> </tr> <tr> <td>석유</td> <td>782</td> <td></td> </tr> <tr> <td>석탄</td> <td>992</td> <td></td> </tr> </table> <p><small>[발전원별 이산화탄소 배출계수]</small></p> <p>[미국] '35년 발전부분 무탄소를 위한 Clean Energy Standards에 원자력 포함 [유럽] '50년 탄소배출 총량 제로를 위한 원자력 발전 금융지원 포함 예정</p>	원자력	10	(g/kWh)	태양광	154		LNG(가스)	549		석유	782		석탄	992	
원자력	10	(g/kWh)														
태양광	154															
LNG(가스)	549															
석유	782															
석탄	992															

자료: 두산중공업, IBK투자증권

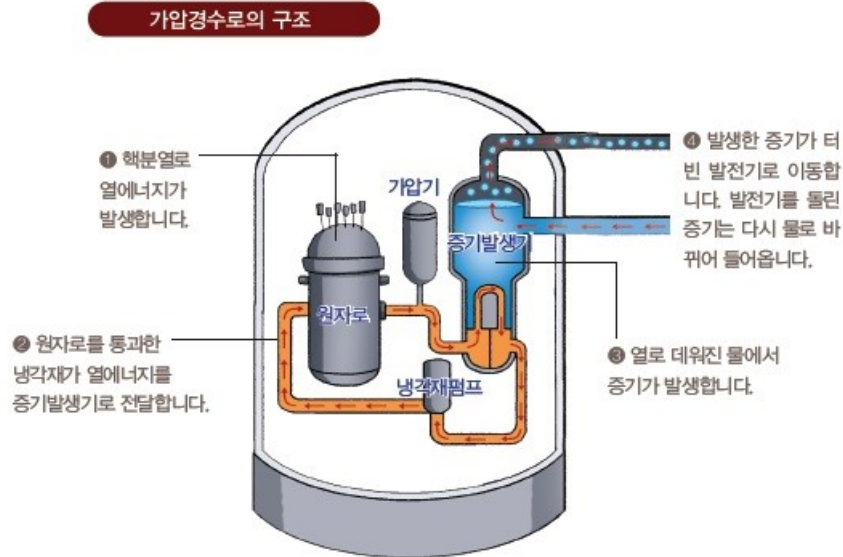
<SMR의 4가지 장점>

출처 : “원전 작아져도 시장은 커진다” IBK투자증권

발전부분 탄소중립을 위해서는 재생에너지 설비 투자도 중요하지만, 전주기 탄소배출량이 매우 적고 대규모/고밀도 에너지 생산을 24시간/365일 기상 상태와 무관하게 할 수 있는 원전 역시 필요합니다. 그런데 기존 대형 원전은 역설적으로 단일 발전기의 출력이 너무 거대하므로 전력망의 규모가 적은 개도국에서는 전력망 접속이 어렵습니다. 대형 원전은 1기 발전소의 투자비도 수 조원 이상이며 10년 이상의 사업개발/건설 기간이 소요되므로 대형 원전을 감당할 수 있는 국가는 제한적입니다. 그래서 보다 작고, 싸고, 전력망에 접속/

이탈 부담이 적은 소형 원전이 상업화된다면 현재 대형 원전보다 폭 넓은 시장을 확보할 수 있을 걸로 기대됩니다.

원자력 발전소는 1950년대 등장 이후 크게 3세대를 걸쳐 발전했으며, 요즘 건설되는 대형 원자력 발전소는 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 강화된 안전 규정이 적용되어 '3세대 플러스' 원전이라고 지칭합니다. 주류 기술은 가압경수로 노심 방식으로 원자로 냉각재로 일반물(경수)을 압력을 높여서 사용하는 방식입니다. 핵분열 반응이 통제된 속도로 진행되는 원자로의 연료봉을 냉각수가 식히면서 가열되고, 그 냉각수가 증기발생기를 통과하면서 증기를 발생시키는 구조입니다. 가압경수로는 원자로를 통과하여 방사능을 띤 물이 증기발생기의 물과 분리되어 있으므로 안전성이 뛰어나습니다. 만약 사고가 발생하더라도 방사능을 띤 물을 격납건물 안에 가둘 수 있도록 조치할 수 있습니다. 단점으로는 원자로-냉각재펌프-증기발생기 순환 계통에 높은 압력이 걸리므로 매우 견고한 구조물로 제작되어야 하며 냉각수의 온도가 320도 이하로 억제되므로 증기발생/발전 효율이 떨어지는 단점이 있습니다. 50년 이상 검증을 거쳐 지속적으로 개량되면서 가압경수로는 전 세계 원전의 70%를 차지할 만큼 보편적인 원전 모델입니다.

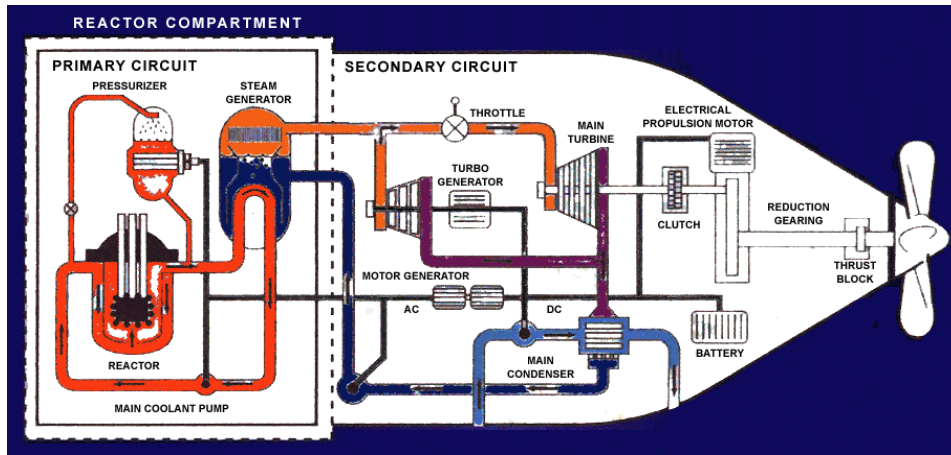


<가압경수로 구조>

출처 : 원자력안전위원회 블로그, <https://m.blog.naver.com/PostView.naver?isHttpsRedirect=true&blogId=prnssc&logNo=220304537120>

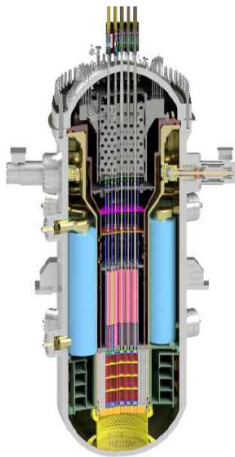
개발 중인 SMR은 다양한 냉각재와 연료를 사용하며, 경수로 기술을 적용/개량/소형화하는 디자인을 채택한 계열과 완전히 새로운 개념의 원자로 노심 기술 (소위 '4세대' 원자로)을 적용한 계열로 분류됩니다. 경수로 기술을 적용할 때 가압 상태로 운전하느냐 대기압 상태로 운전하느냐의 차이도 있으며, 하나의 단일 유닛으로 원전을 구성하는 경우와 복수의 유닛으로 발전 수요에 따라 확장하는 다중 모듈형으로도 구분됩니다. 기존 경수로 기술을 소형화한 SMR은 엄밀히 따지면 새로운 기술은 아닙니다. 원자로를 탑재한 핵항공모함과 핵잠수함은 소형화된 가압식 경수로를 이용하기 때문이며 현재도 지속적으로 신모델이 개발되고 있습니다. 그럼 군에서 개발한 SMR을 민간용도로 쓰면 될텐데 왜 별도로 기술개발이 필요한 것일까요? 여기에는 원자력 발전소만의 중요한 특성인 연료의 농축 이슈가 있습니다.

모든 원자로는 핵분열 과정에서 발생하는 막대한 열에너지를 활용하는데, 핵분열이 가능한 핵물질 (우라늄, 플루토늄)이 연료에 고도로 농축되어 있을 경우 한 번 연료를 주입하면 오랜 기간 핵분열을 지속시킬 수 있습니다. 핵항공모함이나 핵잠수함에 탑재된 원자로는 1회 핵연료 장입 (핵물질을 가는 봉 형태로 가공하여 설치하므로 '장입'이라고 표현합니다) 하면 20년을 계속 사용할 수 있습니다. 그런데 이렇게 고농도로 농축된 핵연료는 기술적으로 큰 어려움 없이 핵폭탄의 원료로 전용할 수 있습니다. 그러므로 핵무기 확산 방지와 테러 위험을 감안하면 고농도로 농축된 군용 핵연료를 민간이 자유롭게 사용할 수 있게 둘 수는 없습니다. 그래서 대부분의 민간 원자력 발전소는 핵무기로 전용이 어려운, 5% 이하의 저농도로 농축된 핵연료를 이용합니다. 이 경우 짧게는 6개월, 길게는 2년에 한 번씩 연료봉을 교체해야 하고, 사용한 연료봉은 고농도 방사능을 띤 사용후 핵연료로서 고도의 관리 체계를 통해 처리/운송/보관되어야 하는 불편함이 있습니다.



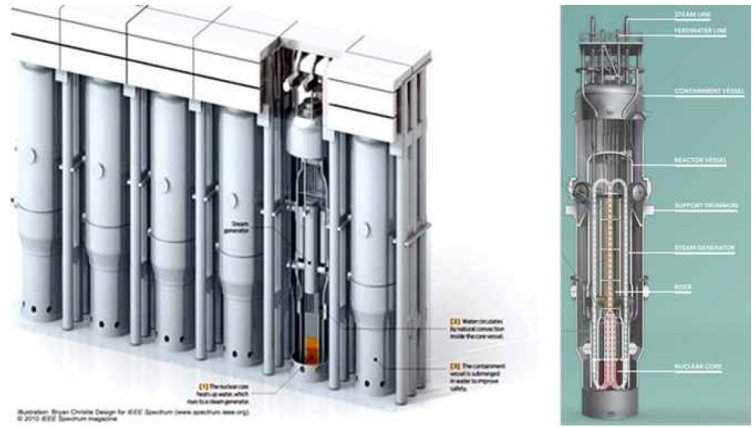
〈핵잠수함에 설치된 원자로와 추진 계통 계통도〉
출처 : “Nuclear Marine Propulsion” by M.Ragheb

경수형 SMR은 가압경수로 기술에 기반하므로 설계 완성도가 높고 인허가 단계 통과 기간이 상대적으로 단축되는 장점이 있습니다. 하지만, 가압경수로 기술 자체가 가지는 근원적인 특징으로 인해 소형화에 한계가 있습니다. 경수형 SMR 중 국내에서 개발하여 2012년에 표준설계인가를 취득한 SMART-100은 SMR의 특징과 장점, 그리고 기존 원전을 소형화 하는데의 어려움을 보여주는 사례입니다. SMART-100은 노심, 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등 주요 기기가 원자로압력용기에 내장되어 있는 일체형 소형 가압경수로입니다. 대형 원전이 주요 기기가 배관으로 연결되어 있어 배관 파열이나 연결부 파손으로 안전사고가 발생하는 단점을 보완하였습니다. 하지만, 연료봉과 보조 기기는 기존 대형 원전과 차이가 없으므로 결과적으로 발전 출력은 1/10 수준이나 발전소의 전체 규모는 비슷하게 되는 문제가 있습니다. 그래서 정부에서는 SMART-100이 있음에도 최신의 기술을 적용하여 발전소 전체 규모를 대폭 줄일 수 있는 iSMR (innovative-SMR, 혁신형 SMR)을 새로 개발하여 2028년까지는 표준설계인가를 획득하는 것을 목표로 사업을 추진하고 있습니다.



〈SMART-100 개념도〉
출처 : “소형 혁신원자로 기술조사보고서” 한국원자력 학회

SMART-100이 표준설계인가를 최초로 획득한 SMR이라면 미국의 NuScale Power사가 개발하는 NuScale SMR은 상업화에 가장 근접한 SMR입니다. 일체형 자연순환 가압경수로 방식으로 단위 모듈의 발전용량은 60 MW이며 최대 12개까지 모듈을 연결하여 최대 720 MW까지 출력을 낼 수 있는 확장성이 장점입니다. 미국과 영국에서 첫 데모 호기 건설이 추진되고 있으며 빠르면 2024년 운전이 가능할 것으로 예상됩니다. NuScale SMR은 펌프 없이도 대류 현상을 통해 냉각재가 순환하는 자연순환 방식입니다. 치명적인 원전 사고 대부분이 발전소 내 전기 공급이 끊겨, 냉각재 펌프를 가동하지 못해 노심이 과열되어 발생하는 점을 감안하면 자연순환 방식은 원전의 안전성을 한 차원 높인 기술이라고 하겠습니다.



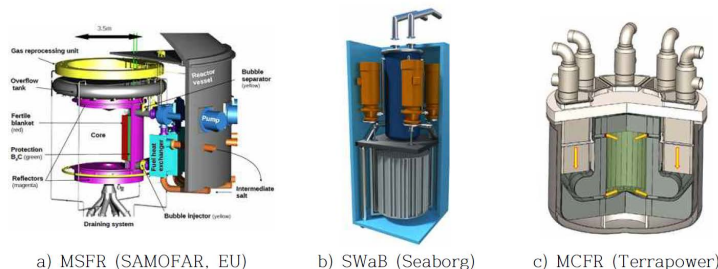
<NuScale SMR 개념도>

출처 : “소형 혁신원자로 기술조사보고서” 한국원자력 학회

그러나, SMART-100에 비해 NuScale SMR이 발전소 전체 크기 기준으로 절반 이하이지만 여전히 상당한 크기의 대형 격납 건물을 필요로 합니다. 그 이유는 냉각재인 경수에 혼합하는 붕소 투입 장치와 붕소 저장 설비가 발전소에 반드시 필요하기 때문입니다. 붕소는 중성자를 흡수하는 능력이 뛰어나므로 냉각수에 붕소를 얼마나 투입해 주느냐에 따라 원자로의 출력을 세밀하게 조절할 수 있습니다. 기존 대형 원전들은 일단 가동을 시작하면 최대한 정격 출력을 유지하는 ‘출력조절 불가’ 발전원입니다. 그러므로 대형 원전만으로는 수요가 실시간으로 변화하는 전력계통에 대응할 수 없으며, 대형 원전은 기저부하에 대응하는 기저전원으로 기능합니다. 하지만, SMR은 단독으로 전력계통의 부하를 감당해 주어야 하는 경우가 많을 것으로 예상되어 기존 대형 원전과는 다른 빠른 출력 증가/감소 기능이 필요합니다. NuScale SMR은 붕소 투입 장치를 통해 이 기능을 수행하는데, 개념도에는 나와 있지 않지만, 붕소 관련 설비의 규모가 상당히 크다는 단점이 있습니다. 그래서 최근에 개발 중인 가압경수로형 SMR은 붕소 투입 조절이 아닌 다른 방식으로 출력을 조절하는 기술을 연구하고 있으며, 성공할 경우 발전소 전체의 규모를 대폭 축소시킬 수 있을 것으로 기대됩니다.

4세대 원자로로는 가압경수로와 방식이 전혀 다르며 다양한 종류가 있습니다. 초고온가스냉각로(VHTR)는 냉각재로 헬륨가스를 사용하여 냉각재의 출구 온도를 최대 1000도까지 높일 수 있는게 특징입니다. 이 경우 냉각재의 고열을 활용하면 물의 열분해 조건을 손쉽게 달성할 수 있어, 초고온가스냉각로는 대규모 수소 제조에 최적화된 원자로로 평가됩니다. 소듐냉각고속로(SFR)는 핵분열 반응을 기존 경수로와 달리 고속중성자를 활용하는 것으로 고속중성자 냉각재로 액체 소듐을 쓰는 것이 특징입니다. 고속중성자를 통한 핵분열은 핵분열 후 잔존 핵물질 (소위 핵폐기물)이 기존 원자로 대비 1/20 이하로 줄어들어 원자력 발전으로 인한 고준위 폐기물의 배출량이 획기적으로 감소합니다. 또한 기존 사용후 핵연료를 소듐냉각고속로에 투입하여 ‘태울’ 수 있기 때문에 고준위 핵폐기물 영구처리장의 소요를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대됩니다. 초고온가스냉각로와 소듐냉각고속로 모두 50 MW 이하 규모의 실험로 차원의 실증 플랜트가 건설 중에 있으며 2025년까지는 운전실적을 확보할 수 있을 것으로 예상됩니다.

용융염원자로(MSR)는 고체 핵물질을 농축한 연료봉이나 연료 펠릿을 사용하지 않고, 고온에서 염(Salt)을 녹인 형태의 용융 불화물 혹은 염화물에 핵연료를 녹여, 원자로의 연료 및 냉각재로 활용하는 형태의 원자로입니다. 이렇게 하면 용융염 자체의 순환을 통해 원자로의 온도가 유지되어 냉각재 계통이 불필요하며, 용융염이 누출될 경우 냉각과 동시 경화되어 핵물질의 유출을 원천적으로 차단하는 장점이 있습니다. 원자로 계통을 소형화 시키고 구조물을 줄일 수 있어 계통이 간단해지며 출력 밀도도 높은 장점이 있습니다. 용융염은 대량의 열에너지를 저장하는 장치로도 사용할 수 있으므로 용융염냉각로와 용융염 저장장치를 결합하면 원자로에서 발생한 에너지를 대규모로 장기간 손쉽게 보관할 수 있으며, 이런 특징을 이용하여 대규모 풍력/태양광 발전단지의 간헐성을 보완하는 용도로 사용될 것으로 기대됩니다.



<개발 중인 여러 형태의 용융염원자로>

출처 : “소형 혁신원자로 기술조사보고서” 한국원자력 학회

4세대 원자로들은 장기적으로 기존 가압식 경수로에서는 기대할 수 없는 혁신적인 성능과 안정성을 목표로 개발 중에 있지만, 극한의 안전성이 요구되는 상용 원자로 개발 특성상 인허가 검증 과정에서 무수한 도전을 받을 것으로 예상됩니다. 방사능 물질을 다루야 하는 원자로 개발 특성 때문에 4세대 원자로의 개념 설계에서 상용화까지는 20년 이상 소요되는 것이 일반적입니다. 그러므로 4세대 원자로 기술을 적용한 SMR이 보급되기 전에 가압경수로 타입의 SMR이 우선 시장에 등장하여 SMR 자체의 시장성을 입증하는 것이 필요하다고 여겨집니다.

다음 시간에는 SMR을 부유체에 접목한 해상원전의 개발 현황과 사례, 기술적 과제 등에 대해 다뤄보도록 하겠습니다.