

다목적 초소형 원자력 추진기술 개발과 극지 활용 가능성

세종대학교 양자원자력공학과 교수 박창제(parkcj@sejong.ac.kr)

‘필자의 말,’

극지 항로 운항 시 필수적인 쇄빙과 자원 탐사, 전력공급 등을 위하여 대형 쇄빙선과 함께 소형 다목적 특수선박 기술 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 특히 최근 이슈가 되고 있는 탄소제로를 이루기 위해 친환경 선박과 함께 인공지능과 빅데이터, 무인 자율운항 등의 미래 첨단 기술의 융복합적 접목이 활발히 이뤄지고 있는 실정이다. 이러한 시점에서 초소형 원자력 추진기술을 도입으로 다목적 미래 선박기술 분야의 우위를 선점하고 추후 극지 운항선박의 수출로 이어질 수 있을 것으로 예상된다.

최근 정부는 '2050 탄소제로'를 위한 K-텍소노미(한국형 녹색분류체계)에 미국, 중국, 유럽 등과 같이 원자력기술을 포함시켰고, 새로운 탄소중립 로드맵을 추진하고 있다. 세계적인 탈탄소 정책을 완성하기 위해 소형원자로 기술이 거론되고 있으며 기존 대형원전에 비해 향상된 안전성과 경제성을 모두 갖추기 위해 새로운 개념들이 다양하게 연구되고 있다. 이러한 국내외 실정과 발맞춰 극지 진출을 위해 기존 쇄빙기술에만 한정된 원자력 기술의 적용을 확장하여 소형원자로 기술 기반 다목적 초소형 원자력 추진기술 개발을 본격적으로 논의할 필요가 있다. 물론 원자력에 대한 안전성 문제, 사고 시 방사성폐기물 오염과 핵무기로 전환 가능성 등 초소형 원자력 추진기술 도입 시 해결해야 할 문제가 많지만 국내외 다자간 협력을 통해 원활히 해결 가능할 것으로 예상되며 국내 우수한 원자력 기술과 첨단 해양 기술의 융복합으로 미래 극지 진출에 기여할 것으로 판단된다.



- I. 초소형 원자력 추진기술 개발 동향
- II. 원자력 추진기술 극지활용 필요성
- III. 극지활용 다목적 초소형 원자력추진기술 미래 전망
- IV. 마치는 말

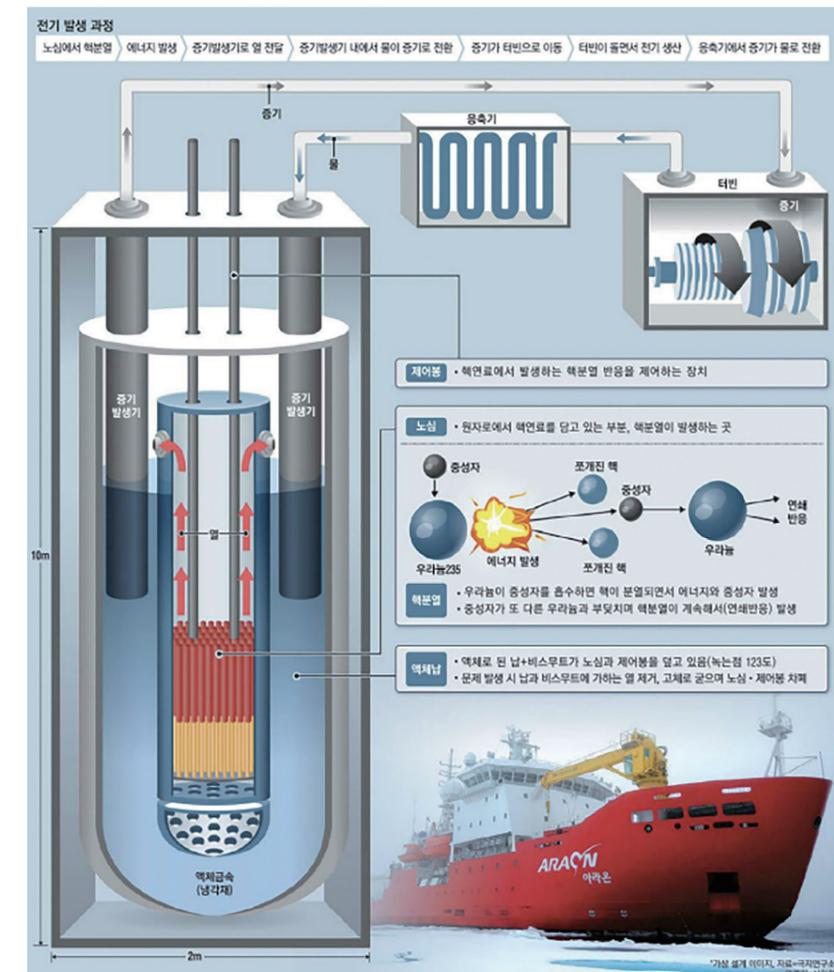
I 초소형 원자력 추진 기술 개발 동향

원자력은 핵분열에서 발생하는 대용량의 열을 이용하여 전기를 생산한다. 모든 원자는 양성자와 중성자로 이뤄진 원자핵과 그 주위에 구름처럼 위치한 전자로 구성돼 있다. 우라늄과 같은 무거운 원자핵이 중성자를 흡수하면 원자핵이 2개로 쪼개져 분열되면서 엄청난 열이 발생한다. 핵이 분열될 때 또다시 중성자가 2~3개 방출되고, 이 중성자가 또 다른 우라늄 원자핵과 만나면 다시 핵분열이 일어난다. 핵분열은 연쇄적으로 계속해서 일어나고 여기서 발생한 열로 물을 끓여 증기를 만든다. 이 증기가 터빈을 돌리면 전기가 생산되고 직접 추진 동력원으로 이용될 수 있다. 우라늄(U^{235}) 1g이 핵분열을 통해 만드는 에너지의 양은 석탄 3톤, 석유 9드럼에 해당한다. 원자력발전소에서 이 같은 핵

분열이 일어나는 중심부가 '원자로'다. 선박 추진용으로 이용되는 초소형원자로 역시 원전의 원자로와 같은 원리를 이용하여 핵분열 반응을 통해 얻어지는 고온의 열에너지로 수증기를 발생시키고, 이 수증기로 터빈을 회전시켜 추진모터를 작동한다. 원자로로는 우라늄과 같은 연료와 연쇄반응 속도를 조절하는 제어봉, 열을 전달하는 냉각재로 구성되어 있다.

대부분의 해양용 원자로로는 극지연구를 위한 쇄빙선이나 군사용 잠수함의 동력으로 이용되고 있다. 선박을 추진하기 위해서는 기존 대형 원자로 출력의 100분의 1 정도의 수십 MW급 초소형원자로도 충분히 가능하다. 일반적으로 원자력 추진 잠수함에는 가압경수형 원자로를 축소한 형태의 원자로가 탑재된다. 디

그림 1 선박용 원자력 추진 원리



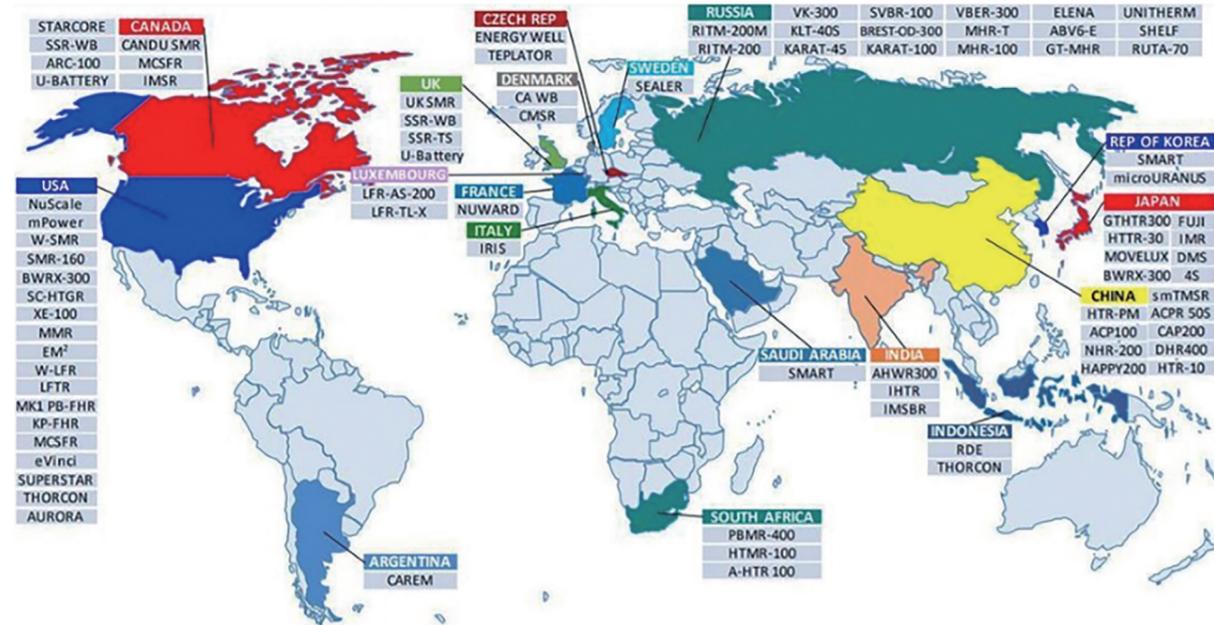
*출처 : "초소형 원자로 품은 선박... 연료 재주입없이 '40년 항해' 거뜬" 황일순 UNIST 석좌교수 연구팀의 도전 『매일경제』 2019. 5. 17.

젤엔진을 사용하는 잠수함은 짧게는 1~2일에 한 번, 길어도 보름 정도에 한 번은 물 위로 올라와서 연료를 태우기 위한 공기를 보충해야만 한다. 연료통 크기를 늘리는 것이 제한된 만큼 오랜 기간 물속에서 작전을 수행할 수 없다. 반면 원자력 추진 잠수함은 수개월 동안 물속에서 생활이 가능한 만큼 작전 범위 또한 넓어진다. 수개월에 한 번씩 물 위로 올라와야 하는데 그 이유는 연료 문제가 아니라 밀폐된 공간에서 선원들이 오래 지낼 경우 정신적·육체적으로 문제가 생기기 때문이다. 원자력 추진 잠수함은 최대 6개월 가까이 식량 등 외부 자원의 공급 없이 물속에서 작전을 수행할 수 있는 장점이 있다. 원자력 핵보유국들의 원자력 잠수함들은 90% 이상 고농축 우라늄 연료를 사용하여 40년의 수명 기간 동안 핵연료 교체가 필요 없다.

최근 원자력 잠수함 기술과 경험을 활용하여 보다 안전하고 경제적인 소형모듈원전(SMR)을 개발하고 있다. 육상의 전력생산용으로는 미국의 NuScale이 대표적 사례다. 반면 러시아는 이러한 조선 해양 원자력 기술을 확장하여 선박에 작은 원자로를 설치해 일부 지역에 전기를 공급하는 해상 부유식 원자력발전소인 아가데믹 로모노소프라를 개발하여 북극 해안 항구인 Pevek에 설치하였고, 2021년부터 운영하고 있다. 중국도 최근 헬륨기체를 냉각재로 이용하는 SMR 기반으로 쉬다오 연안에 위치한 시험공정

1호기에서 산동성 송전망에 연결하여 전력을 공급하고 있다. 국제원자력기구(IAEA)가 2020년에 발간한 소형모듈원자로 개발현황 보고서에 의하면 전 세계에서 18개국에서 76개 업체가 다양한 방식으로 소형모듈원자로를 개발 중이며, 이 중에서 조선해양용은 총 10종이다. 조선해양용 소형모듈원전을 기술적으로 분류하며, 핵잠수함 경험에서 도출된 경수로가 5종 그리고 납냉각고속로방식이 3동으로 주류를 이룬다. 나머지 2가지가 용융염 원자로이며, 조선해양용으로 사용된 경험은 없는 신기술이다. 내륙용 소형모듈원전은 조선해양용보다 더욱 실용화에 근접하고 있다. 국내에서는 한국수력원자력과 한국원자력연구원이 2021년 1월부터 500억 원을 들여 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 개념 설계 중에 있는데 향후 상용화를 위해선 산업체와 연계가 필요한 만큼, 관련 기업들과 연계를 추진하고 있다. 캐나다 정부는 2020년 12월 탄소제로 정책 지원을 위해 소형원자로 시행계획을 발표했고, 미국도 같은 시기 우주 원자력개발에 관한 대통령 우주 정책 훈령을 발표했다. 또한 미국에서는 2020년 9월 미 원자력규제위원회로부터 표준설계심사를 완료한 뉴스케일 원전은 6070MWe 또는 70MWe 원자로를 한 모듈로 고려하고 있으며 현재 아이다호국립연구소(INL) 부지에 원자로 모듈 12개를 묶어 700~800MWe급 원전 건설을 추진 중이다.

그림 2 전 세계 소형모듈원자로 개발현황

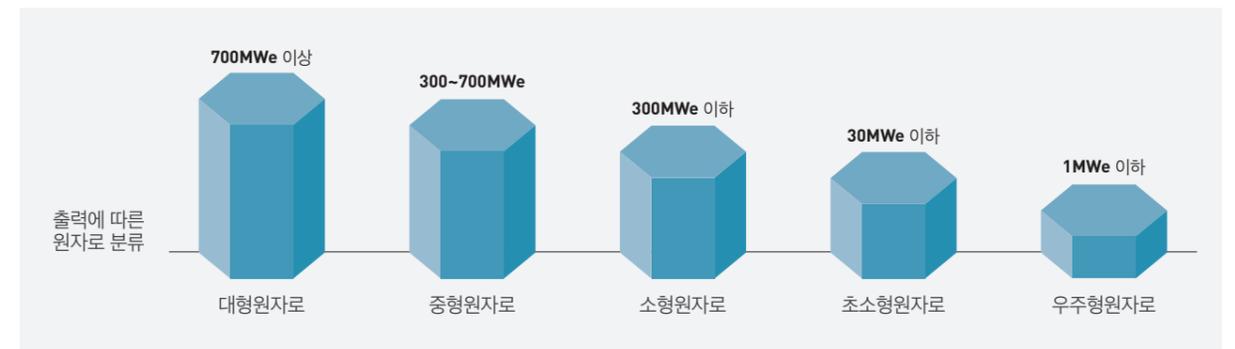


*출처 : IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2020.

일반적으로 초소형원자로는 30MWe 이하의 열출력으로 주로 잠수함이나 우주선 추진 동력원으로 고려되고 있다. 기존 상용 원자력발전소는 대부분 700MWe 이상의 대형인 데 반해 소형 모듈원자로(SMR)는 300MWe 이하 전력을 생산하는 우리나라 플루토늄의 핵분열반응이 지속적으로 일어나는 원자로를 일컫는다. 초소형원자로는 소형모듈원자로와 같이 핵분열반응이

직접 일어나는 원자로와 물을 수증기로 변환시키는 증기발생기, 냉각재를 순환시키는 냉각재 펌프, 일정한 압력을 유지시키는 가압기 등 주요 기기를 하나의 용기에 모두 담아 일체화시킨 것이 가장 큰 특징 중 하나이다. 그리고 기존 원자로처럼 특정 장소에서 직접 건설하는 것이 아니라 미리 생산된 모듈을 운송하여 현장에서 조립하는 방식을 채택하고 있다.

그림 3 출력에 따른 원자로 구분



2021년 6월 국내 삼성중공업은 한국원자력연구원과 협력하여 소형 용융염원자로(MSR) 기반 부유식 원자력발전 플랜트 및 원자력추진선박 시장을 개척하겠다고 발표했다. 용융염원자로 소형모듈원전의 일종으로 핵연료 사용주기가 20년 이상이며 한 번 핵연료 장전 후 상당기간 교체가 필요 없으며, 원자로 크기를 소형화할 수 있어 선박 적용이 용이하다. 그리고 원자로 내부에 이상 신호가 생기면 액체상태의 핵연료인 용융염이 굳어져 더 이상 반응이 일어나지 않도록 설계되어 안전성을 높이고 고효율의 전력과 수소를 동시에 생산할 수 있도록 설계가 진행 중이다. 그러나 선박이 침몰할 경우, 높은 방사능을 지닌 용융염이 해수에 쉽게 용해되어 비상대피구역이 크게 확대될 수 있다. 선박용으로의 소형모듈원전은 SMART 원자로를 한국원자력연구원에서 20년간 꾸준히 개발하여 해상담수화용으로 추진되었다. SMART 원자로 1호기는 1990년대 러시아 핵잠수함 추진 원자로 설계에 기초로 하여 다양한 신개념의 고유 안전성 설계를 추가하였으나 2007년 예비타당성조사에서 부적합 판정을 받고 2008년 사업이 폐기되었다. 이후 수출용 원전으로 이를 재추진했다가 경제성 문제로 국내 컨소시엄이 좌절되었지만 이후 2012년 세계 최초 소형모듈원자로 분야에서 표준설계인가를 받는 쾌거를 달성하였다. 이후 사우디아라비아 수출을 타진하고 기술 교류 및 인력 양성 등 다양한 프로그램을 추진하였다. 이를 확장하여 한국원자력연구원과 한국수력원자력이 전술한 바와 같이 혁신형 소형모듈원전(i-SMR)을 개념설계를 완성하여 향후

수출을 추진하기 위해 예비타당성 평가를 신청하여 통과하였으며 그 결과로 2028년까지 3,992억 원을 투자를 받아 활발하게 연구가 진행 중이다. 한편 국내 학계에서도 새로운 개념의 다양한 소형원자로 기술을 개발하고 있다. 기존 원자로와 달리 액체 납을 냉각재로 사용하는 선박용 원자로 MicroURANUS도 UNIST에서 연구가 진행되고 있다. 만약 사고 발생 시에는 액체 냉각재인 납이 굳어 원자로를 감싸게 되어 배만 격리시키면 되어 추가적인 사고의 전개를 막아 안전성을 향상시켰고 40년 동안 추가적인 핵연료의 공급 없이 운전이 가능하여 핵안보성과 경제성을 높였고, 또한 핵무기로 전환될 가능성을 현저히 낮추게 되었고, 이후 소형원자로만 분리하여 캐스케에 넣어 처리시설로 옮겨 방사성폐기물 관리가 용이한 장점들이 있다. 특히 MicroURANUS는 구소련의 Alfa 핵잠수함의 총 8기(총 80년간 가동)의 실용화 경험을 토대로 조기 상용화를 추진하고 있다. 해외(스웨덴, 이태리 등)에서도 납냉각 원자로 기술을 접목하여 해양, 해저 탐사선이나 부유식 발전용 동력원으로 개발되고 있다. 또한 KAIST연구팀은 안전성이 확보된 초임계 CO₂ 가스냉각 방식의 자율운전 소형원자로 핵심기술을 개발하고 있다. 원자로 출력을 제어하는 제어봉을 사용하지 않고도 부하추종운전이 자율적으로 수행되며, 인공지능 시스템을 도입하여 사고 진단, 예측, 대응 등을 효율적으로 수행하며 궁극적으로 운전원 실수를 원천적으로 배제하여 안전성과 경제성을 극대화할 수 있도록 연

구를 진행 중이다.

해외의 경우 원자력 추진을 위한 초소형원자로로는 주로 우주선 추진을 위해 연구되고 있다. 특히 미국의 웨스팅하우스사(Westinghouse)는 5MWe급 eVinci 초소형 원자로에 대한 개념 설계 및 개발계획 수립을 완료하였다. eVinci는 삼중코팅 입자형 핵연료(TRISO, TRIsstructural-ISOtropic)를 사용하며, 설계수명은 40년이며 핵연료 재장전주기는 6년 또는 9년으로 개발 진행 중이다. 특히 열전달 계통으로 첨단기술인 히트파이프 방식을 채택하여 효율성을 향상시켰다. 원자로 용기 내부에 모듈형으로 제작된 기기를 장착하여 건설비용을 최소화하고 30일 이내 현장 설치가 가능하며 eVinci 초도호기의 상업운전을 2027년 개시할 것으로 계획하였다. 현재 미국 및 캐나다 인허가 기관이 eVinci 설계 검토 중이다.

2011년 설립된 USNC는 2015년부터 5MWe급 Micro Module Reactor(MMR)를 기반으로 한 초소용 원자로를 개발 진행 중

이다. TRISO 핵연료 입자를 사용하여 실리콘 카바이드(탄화규소, SiC)로 핵연료 펠렛을 제작하는 특허를 보유하고 있으며 냉각재로 헬륨, 감속재로는 흑연이 사용되며, 건설기간은 36개월로 계획하고 있다. USNC는 캐나다 유틸리티인 OPG(Ontario Power Generation)과 GFP(Global First Power)라는 합작회사를 설립하였다. 규제기관인 CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)는 USNC에 대한 VDR(Vendor Design Review) 1 단계를 종료했으며, 건설부지에 대한 평가도 완료하였다. 2021년 3월에 발행된 Canada SMR Feasibility Study에 따르면, USNC MMR은 2026년 상업운전을 목표로 하고 있으며, 2020년 7월에는 우리나라의 한국원자력연구원, 현대엔지니어링 및 USNC는 차세대 원자로 기술개발을 위한 MOU를 체결했으며, 탄소제로 전력생산, 지역난방, 수소생산 등을 목표로 USNC SMR의 기술을 강화하는 데 협력하고 있다.

이러한 소형모듈원자로의 장점은 여러 가지가 있는데 우선 안전성이 우수하여 비상대피구역반경이 크게 작아지고 나아가 부하추종능력이 우수하여 전력수요에 탄력적으로 대응할 수 있다는 것이다. 이는 도시 인근에 건설이 가능하고 신재생에너지의 간헐성을 보완하여 에너지 믹스로 구성할 경우 적정 수준으로 원활한 전력을 탄력적으로 공급할 수 있다는 의미이다. 두 번째로 원자로를 비롯한 기기의 규모가 상대적으로 작아 공장에서 제작 후 건설 현장에서 설치까지 모듈화 공법으로 건설 공기를 상당히 단축시킬 수 있다. 또한 총 투자비 측면에서도 예산 규모와 전력공급 수요에 맞춰 모듈 개수를 유리하게 선택할 수 있다. 세 번째로 안전성 측면에서는 대형 원자력발전소에 비해 낮은 원자로 출력을 제공하여 안전 여유도를 높일 수 있으며, 자연 순환이나 공기를 이용한 냉각 방식도 쉽게 적용이 가능할 수 있다. 미국의 소형모듈원자로인 뉴스케일의 경우 어떤 사고가 발생하든 30일 동안은 보유하고 있는 냉각수로 안전한 상태를 유지할 수 있고, 그 이후로는 공기를 이용한 냉각이 가능하도록 설계되었다. 이는 기존 대형 원자력발전소의 취약점이라고 할 수 있는 지속적인 냉각수 공급이 소형모듈원자로에서는 필요 없게 된다. 네 번째로 일체형 조립 방식을 채택하여 각 기기 사이의 연결 배관을 대폭 줄여서 배관 파손에 따른 냉각재 상실사고의 가능성을 현저히 줄였다. 배관 파손사고는 실제로 1979년 미국 스리마일(TMI) 원자로에서 발생하였으며 외부로 방사능 유출은 없었지만 심각한 원자로 손상을 초래하였다. 이에 일반적으로 원자로 설계 시 배관 파손에 의한 냉각재 상실사고에 대한 영향과 대책에 대해 반드시 고려하고 있다.

반면에 소형모듈원자로 개발을 위해 여러 가지 문제점을 극복해야 한다. 첫 번째로 출력 대비 경제성이 낮다는 것이다. 일반적으로 원자력발전소는 안전성 향상에 소요되는 추가 비용을 보상하기 위해 출력 및 용량 증가를 제시하고 있다. 소형모듈원자로의 경우 지나치게 안전성을 높이다 보면 추가 기기 제작 등 건설비가 비례적으로 높아질 것은 자명한 사실이다. 이를 보완하기 위해 모듈화된 공법과 설계 단순화 등 혁신적인 개념의 도입이 필요하다. 또한 극지탐험 및 분산전원 등 특수목적으로 이용하는 경우 충분히 경제성이 있을 것으로 판단되며, 특히 해양 선박용 소형원자로를 적용할 경우, 그린 암모니아 또는 그린 수소기술 등 거론되고 있는 친환경 선박과 비교하여 경제성이 확실하게 우위에 있다는 점이 원자력 추진 기술을 돋보이게 하고 있다.

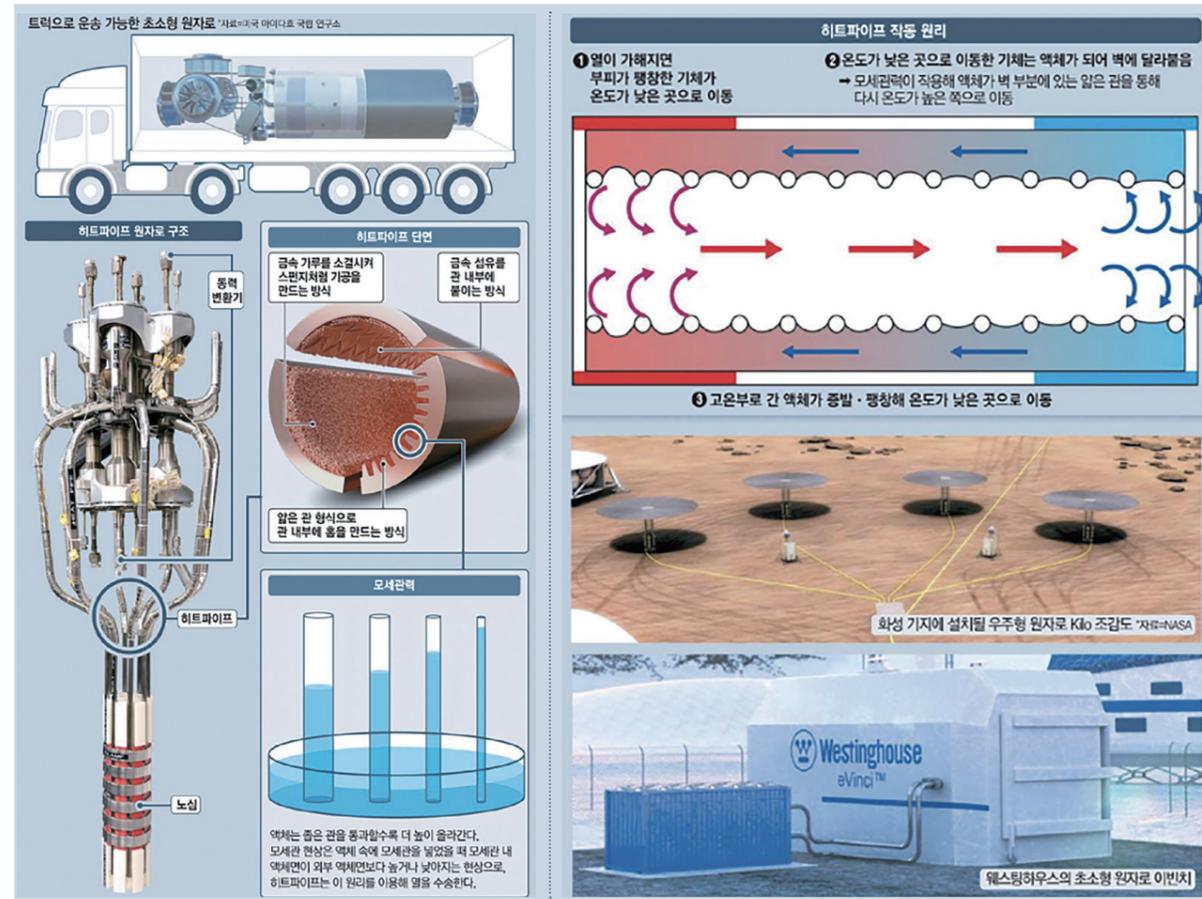
두 번째로 소형화로 인한 플루토늄을 포함한 핵무기로 전환 가능성이 높다는 것이다. 이러한 특성을 핵비확산성이라 하며 소형모듈원자로로는 원자로에 직접 접근성이 상대적으로 쉬워 핵물질 분리가 용이할 수 있다. 이를 보완하기 위해 핵무기로 전환이 상대적으로 힘든 입자형 핵연료를 이용하는 등 혁신적인 설계개

념이 요구되고 있다. 특히 선박과 같이 핵사찰의 사각지대에 들어갈 수 있고, 해적들의 공격 대상이 될 수 있는 경우, 설계에서부터 이 문제를 근원적으로 해결해야 할 것이다. 용융염 원자로로는 특히 핵연료가 액체이므로 사각지대에서 인출이 가능하므로 우려의 대상이 된다. 그러나 소형원자로의 핵연료의 농축도와 연소도는 유형별로 상이하고 핵비확산성 개념의 적용을 동일하게 적용하기가 힘들다. 이에 소형원자로에 대한 보다 상세한 핵비확산성 평가가 요구된다.

세 번째로 원자로 운전을 위한 인허가를 받기가 상대적으로 힘들다는 것이다. 새로운 개념으로 다양한 소형모듈원자로로는 전세계적으로 개념설계 단계에서 2025년부터 상용운전을 목표로 경쟁하고 있는 실정이다. 규제기관으로부터 운전을 위한 인허가를 받기 위해서는 원자로 설계의 안전성을 입증하여야 하므로 상당한 시일이 소요될 것이다. 또한 규제를 위한 요건도 새로이 만들어야 하므로 가동원자로에 비해 보다 많은 규제 심사 인력도 필요한 실정이다. 반면 미국과 캐나다의 경우 소형원자로의 인허가가 활발히 진행되고 있으며 기존 상용원자로 규제 기준을 확대하여 적용하고 있다. 이는 추후 규제기관과 유기적 협력을 통해 규제절차 단순화 등을 통해 해결해야 할 것이며 국가의 개발 의지와 함께 현재 적용 법규의 제한성을 극복하고 소형원자로에 대한 인허가 시현성을 확대해 나가야 할 것이다.

나아가 '사용후핵연료'에 대한 대책이 불분명하다는 데 있다. 경수로나 용융염 원자로의 경우, 선박의 수명 기간에 핵연료를 수차례 교체하여야 하므로, 이의 처리 대책이 수립되어야 한다. 이러한 문제는 기존 상용원자로와 동일하게 적용되고 있으며 사용후핵연료 및 방사성폐기물 처리에 대한 근본적인 문제가 해결되지 않을 경우, EU의 Green Taxonomy 기준조차 만족하지 못하게 된다. 범국가적 국제협력을 통해 원자력 이용에 대한 슬기로운 해결방안을 모색하고 후손에게 안전한 원자력 에너지를 물려 주어야 할 책임이 우리 모두에게 있다.

그림 4 초소형원자로 개념 예시



*출처 : "원전은 위험?... 이젠 트럭에도 싣고 다니다, 초소형 원자로 혁명" 매일경제, 2021. 7. 16.

II 원자력 추진 기술 극지활용 필요성

지구 온난화로 북극항로는 향후 자연자원 탐사 및 채취, 교역 물류의 중요한 수송 경로가 될 것으로 예상되며 이를 선점하기 위해 북극씨클(Arctic Circle)을 중심으로 러시아, 중국, 미국, 일본, 캐나다 등에서 활발하게 개발을 진행하고 있다. 북극해 영역에 미개발 석유 및 천연가스가 다량 매장된 것으로 추정되고 있으며 특히 미국 DOE(Department of Energy)에서는 가스 하이드레이트가 상당량 매장된 것으로 예상하고 있다. 이러한 시점에서 북극항로는 연료 공급이 힘들고 다량의 연료가 필요하여 기존 디젤 엔진을 이용한 쇄빙선을 이용하기에는 한계가 있으며 원활한 북극해 항로 운항을 위해 흡수선이 낮으며, 경제적이고 장주기 운전이 가능한 원자력추진 쇄빙선 기술의 독자적 개발이 필요하다. 러시아는 북극해 항로 운영을 위해 6척의 원자력추진 쇄빙선을 보유하고 있으며 중국은 러시아의 도움으로 소형원자로 기술 기반 쇄빙선을 2018년에 진수하였다. 3m 두께의 다년빙을 극복할 수 있는 쇄빙기술과 장주기 운전이 가능한 성능을 확보하기 위해 원자력추진 기술 개발이 필수적이다. 우리나라는 2013년부터 북극이사회 상임 옵서버 국가로 가입하여 활발한 활동을 하고 있다. 이와 함께 50년간 원자력 기술을 개발해 온 경험을 기반으로 소형원자로 추진선 확장이 용이하며 원자력 산업의 수출에도 기여할 수 있다. 특히 특수 목적의 초소형 선박의 추진 및 장기간 운전을 위해 혁신적인 개념을 도입한 초소형 원자로 기술개발이 선행되어야 한다. 초소형원자로 기술은 세계적으로 소형화 및 장주기로 개발이 진행되고 있으며 특히 핵비확산성이 우수한 고연소도 핵연료 기술개발 연구에 대한 관심이 높아지고 있다. 액체 용융염 연료, 입자형 연료와 함께 토륨을 포함한 새로운 개념의 핵연료 개발이 진행되고 있으며 열전달 계통도 효율성을 높이기 위해 히트파이프 등 혁신적인 개념들이 연구되고 있다.

우리나라는 반도국가로 해양진출을 꾸준히 노력하여 세계 최고의 해양조선기술을 보유하고 있다. 최근 아라온 쇄빙연구선에 이어 북극 연구 능력을 강화한 차세대 쇄빙연구선의 건조사업이 정부의 예비타당성 조사 심의 및 의결되어 총 2,774억 원 규모로 2027년에 본격 운항할 계획이다. 이러한 차세대 쇄빙연구선의 도입으로 북극해에서의 기후, 해양, 바이오, 자원, 지질, 대기, 우주 등 다양한 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 한편 15,000톤급 대형 쇄빙연구선에서 특수 탐사 목적의 소형 선박이 필요할 것으로 판단된다.

국내 특수형 소형 선박은 주로 연안 연구선인 이어도호와 장목 1,2호가 대표적이다. 특히 이어도호는 357톤급으로 1992년

에 취항하여 연구해 해양 순환기후 탐사, 해양 방위 작전해역 환경조사, 수중 초음파 통신 등 다양하게 활용되고 있다. 최근 선박 자율운항선박 개발이 자율주행자동차의 개발에 힘입어 활발하게 연구가 진행되고 있으며, 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터 등 다양한 융합기술로 시스템이 자율적으로 적절한 판단을 하여 항해하는 기술이 핵심이다. 국내 정보보안 전문기업 펜타시큐리티는 2019년 국제 선박검사기관 한국선급과 '선박 보안 솔루션 공동연구를 위한 업무협약'을 체결하여 자율운항선박에 대한 보안 문제를 심도 있게 연구하여 상용화에 대비하고 있다.

전 세계적으로 소형모듈원자로 개발이 이슈가 되고 있으며 이를 활용하여 심해 잠수정 추진, 우주선 추진 등의 목적으로 추가적인 연료 공급 없이 장기간 운전이 가능하여 경쟁적으로 연구가 진행되고 있다. 실제로 선박 운용비 중 대부분이 인건비와 연료비로 약 80%를 넘게 차지하고 있다. 초소형 원자력추진과 자율주행 선박기술이 융합하여 완성된다면 선박 운영에 필수 선원의 수를 줄일 수 있다. 대부분 대형 선박의 경우 최소 20명의 선원이 필수적이다. 이는 단순히 인력 비용이 줄어드는 효과뿐 아니라 공간의 효율성을 높일 수도 있다. 특히, 선원이 사용하는 편의시설을 최소화하고 이 공간에 화물이나 연료를 추가로 실을 수 있게 되어 자원 탐사나 해빙 정보 등 다양한 극지 생태 및 환경 정보를 실시간적으로 분석하는 특수 선박을 설계할 수 있다. 또한 핵연료 교체를 최소화하는 원자력 기술로 안정적인 운항을 기대할 수 있다.

아라온호가 2034년 퇴역을 예정하고 있다. 북극항로의 기대 가치를 고려하여 제3의 쇄빙연구선을 원자력 추진으로 검토한다면, 이를 토대로 원자력 조선해양 산업 대국의 미래를 겨냥할 수 있다.

극지활용을 위해 원자력추진기술의 도입은 장기적으로 정부 주도의 산학연 연계 심화연구가 필요하다. 이와 관련하여 북극항로개발이 선행되어야 할 것이며 미래 자원개발을 위해 세계적 내내 북극 전역에서 쇄빙 포함하는 고성능 선박이 필요할 것으로 예상된다. 앞으로 북극 운항 및 체류 기간이 늘어날 것으로 예상되며 이와 비례하여 고가의 디젤연료비용을 절감할 필요가 있다. 이러한 예상 문제들은 혁신적인 초소형 원자력추진기술의 도입으로 해결될 것으로 기대된다. 나아가 초소형 원자력추진기술을 기반으로 북극항로 진출을 위한 대형 원자력 상선의 상용화 확장도 기대해 볼 만하다.

III 극지활용 다목적 초소형 원자력추진기술 미래 전망

극지 연구는 대부분 혹독한 환경에서 진행되며 안정적인 전원 공급이 필수적이다. 초소형원자력추진기술을 활용하며 추가적으로 전력공급, 해수담수화, 수소생산 등 다양한 부가적인 이득을 가져올 수 있다. 기존 쇄빙선에만 한정된 원자력 기술을 확장하여 미래 극지연구에 활용하면 효율적인 결과와 안정적인 성과를 기대할 수 있을 것이다.

그러나 방사능 오염과 함께 원자력 안전에 대한 우려에 대해 지속적인 사고예방 대비와 안전 신뢰성 강화 연구 등이 진행되고 있다. 이러한 시점에서 자율운항선박과 소형모듈형 원자로 기술을 융합하여 각각의 장점을 최대화한 극지연구를 위한 초소형 원자력추진 기술 개발이 기대된다.

미래 극지활용 다목적 초소형 원자력추진 기술을 완성하기 위해 여러 가지 고려해야 할 사항들이 있다. 우선 이러한 초소형 원자력추진 기술개발은 우리나라에서 단독으로 완성하기는 현실적으로 힘든 상황이며, 국제 공동연구와 기술 교류를 통한 국제협력이 필수적이다. 산업계, 연구계, 학계 모두 참여하는 범정부 중심으로 미국, 캐나다, 일본 등과 국제협력을 추진하여야 하

며 이러한 협력관계로 원활한 핵연료 공급, 공동 프로젝트 수행, 수출 컨소시엄 구축 등을 기대할 수 있다.

두 번째로 미래 초소형 원자력추진 기술은 극지연구에 활용하기 위해 공동 기구의 신설이 필수적이며 원자력과 해양기술의 융복합으로 극지진출 초소형 원자로기술 개발을 포함하여 산학연 집중 투자유치 그리고 향후 수출 기회를 높일 수 있을 것으로 예상된다. 현재 국내 여러 기업에서 다양한 개념의 소형원자로 기술을 개발하고자 언론에 홍보하고 있다. 이러한 시점에서 산업체의 기술 경쟁력을 높이고 범국가적 공동 기구 창설을 통한 원자력 추진기술 개발정책의 일관성을 유지하는 데도 도움이 될 것이다. 또한, 안전규제와 통제관리 측면에서 국내 고유기술의 해외 유출을 방지하며 기득권 확보를 통한 수출에 기여할 수 있다. 국내외 우수 인력, 시설, 장비에 대한 DB 확보를 통한 효과적인 해외투자기관의 참여 유도도 가능할 것이다.

세 번째로 학계, 연구계, 산업계의 독자적인 다양한 기술을 융합하여 미래 초소형 원자력 추진기술 분야와 연관된 첨단 ICT 융복합 기술 분야에 대한 발굴이 선행되어야 한다. 아울러 초소형

그림 5 해양원자력산업 기술개발 로드맵 예시



*자료 출처: 원전정책미래포럼, p.436

원자로 기술개발, 원자력 소재, 부품, 장비 개발 등 핵심 기술개발이 필요하며 극지활용에 필요한 해양선박기술과 함께 첨단 인공지능 기반 설계 최적화, 메타버스 플랫폼 개발 및 성능평가, 빅데이터 처리 등 미래 기술 선점을 위한 협력체계를 구축하여야 할 것이다. 원자력추진 기술의 극지진출을 위해 원자력과 비원자력 분야와 협력방안을 마련해야 하며, 국제특허 등 기밀 자료의 보안 시스템 구축, 국제협력 시 공동 기술 개발 및 관련 협약 지원 및 대형연구과제 기획 등이 수반되어야 한다.

이러한 원자력추진기술을 통한 극지 활용분야 개발을 통해 국제적으로 해양 선진국으로서 위상을 높이고 첨단 원자력 기술

수출에 기여할 것이다. 그리고 해양과 원자력 분야와 연계를 통한 다양한 융복합 분야의 진출 활로를 제시하고 국제 교류의 기회를 통해 첨단 융복합 기술의 국산화와 기술 자립을 이룰 수 있다. 또한 국내외 우수 기관의 협력 체계를 구성하여 우수한 연구인력 확보에 기여하고 직면한 문제점을 보완하여 기술의 완성도를 높여 극지 진출에 기여할 수 있다. 이를 위해 지속적인 인력양성과 함께 다양한 프로그램을 개발하고 제시하여야 하며 원자력추진기술의 극지 활용을 위한 융복합 기술의 고도화를 통해 국내 해양 기술의 선진화를 이루어야 할 것이다.

표 1 국내에서 개발 중인 소형원자로

국내 업체, 연구계, 학계	관심 소형모듈원자로 유형	조선해양 적용성
현대엔지니어링/미국 USNC	4세대 초소형모듈원자로(MMR)/초고온가스로(VHTR)	부피 과다
두산에너지빌리티, 삼성물산, GS건설/미국 NuScale Power	소형모듈원자로(NuScale)/경수형원자로(PWR)	핵연료 교체 빈번
한국원자력연구원/선박해양플랜트연구소	선박해양플랜트 적용을 위한 소형모듈원자로(SMR)/융용원자로(MSR)	침몰 시 안전성 우려
대우건설/한국전력	소형모듈원자로(SMART)/가압경수형(PWR)	핵연료 교체 빈번
한전기술(주)	해양부유식 소형모듈원자로(BANDI-60S)/가압경수형(PWR)	핵연료 교체 빈번
UNIST	해양선박추진 소형모듈원자로(SMR)/납냉각고속로(LBR)	핵연료 교체 없이 장기 운전

IV 마치는 말

국내외적으로 다목적 초소형 원자력추진 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이를 구현하기 위해 다양한 개념의 소형모듈원전이 고려되고 있으며 이에 대한 안전성과 경제성을 동시에 향상시키는 노력이 필요하다. 원자력추진 기술의 극지활용을 위해 우선적으로 사고 발생 시 방사성폐기물에 의한 해양 오염의 영향을 최소화해야 하며 핵무기로 전환되는 경우를 원천적으로 무효화하기 위해 혁신적인 핵연료와 계통설계를 고려하여야 한다. 그 외에도 원자력에 대한 사회적 수용성과 인허가 규제요건 충족을 위한 해결해야 할 많은 문제점이 남아 있다.

이러한 초소형 원자력추진 기술개발에 따른 부가적인 문제 해결을 위해 산업계, 학계, 연구계의 단일화된 공동 창구를 통한 범국가적인 국제협력이 필요할 것이다. 이러한 정부적인 통합으로 분산된 기술개발의 집중력을 높일 수 있으며 해외로의 기술

수출 등의 폐해를 최소화할 수 있을 것이다. 그리고 국내 초소형 원자력추진 설계, 운전 및 제어, 안전 규제 기술, 건설 및 운영 기술 등 첨단 원자력과 선박 기술에 대한 산업체의 해외 진출 지원 및 제반 국제 협약 등 기술적인 부분에 대한 적극적인 지원이 필요할 것이다. 원자력과 조선 기술의 융합으로 초소형 원자력추진 다목적 선박기술 개발로 세계 시장의 우위를 차지하여 극지 진출의 기반을 마련하고 해외 수출 기회의 가능성을 높일 수 있을 것이다.

미래형 첨단 선박기술과 원자력추진기술을 융합하여 다목적 초소형 원자력추진기술 개발은 무인 자율운전을 통한 극한 조건 운영 및 운전원 오류 저감의 장점이 있으며 공간 확보 및 효율적 선박구조 운용으로 경제성 향상 및 인공지능 및 빅데이터 처리 등 첨단 5G 기술을 접목하여 미래 해양과 원자력 선진국으로 발돋움할 수 있는 중요한 계기가 되리라 기대한다.

참고문헌

1. 국내문헌
 - 원전정책 미래포럼, 한국원자력산업회의, 2021.
2. 외국 문헌
 - IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2020.
3. 기타 자료
 - <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1045256.html>
 - https://www.sciencetimes.co.kr/news/바다에_떠있는_원자력_발전소가_있다/
 - <https://www.joongang.co.kr/article/25066649#home>
 - <https://m.dongascience.com/news.php?id=53904>
 - <https://www.kepco-enc.com/portal/contents.do?key=1248>
 - <https://www.impacton.net/news/articleView.html?idxno=3130>
4. 저작권자료
 - <그림 1> 원자력추진 원리: <https://www.mk.co.kr/news/it/view/2019/05/325553/>
 - <그림 2> 전 세계 소형모듈원자로 개발현황: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
 - <그림 4> 초소형원자로 개념 예시: <https://www.mk.co.kr/news/it/view/2021/07/687563/>

