



박원석 한국원자력연구원 소듐냉각고속로개발사업단 단장

## “한국 원자력계를 대표하는 명품원전 개발할 것”

글\_박방주 가천대학교 전자공학과 교수/본지 편집위원 sooyong1320@naver.com

안 전성과 성능이 뛰어나고 핵비확산성까지 갖춘 소듐냉각고속로의 개발에 가속도가 붙고 있다. 제4세대 원전인 이 냉각로의 개발을 진두지휘하고 있는 박원석 한국원자력연구원 소듐냉각고속로개발사업단 단장은 세계 원자력계를 선도하기 위해 밤낮을 가리지 않고 뛰고 있다. 이미 우리나라는 1997년부터 소듐냉각고속로 기술 개발에 착수해 벌써 15년여 동안 지속적으로 기술을 축적해 왔다. 정부는 이를 실증하기 위한 기술을 개발하기 위해 이 사업단을 지난해 출범시켰으며, 총사업비는 2020년까지 9년간 4천178억 원을 배정했다.

Q. 사업단이 하는 일과 목표를 소개해 달라.

A. 2008년 12월 제255차 원자력위원회에서 확정되고 2011년 11월 정책환경 변화를 반영해서 수정된 ‘미래 원자력 시스템 개발 장기 추진계획’의 주요 목표는 현재 원자력 발전소(대부분 경수로)에서 발생하는 사용후핵연료 처리를 위한 기술적 옵션인 친환경 고속로 재순환주기 시스템(파이로프로세싱과 연계된 소듐냉각고속로) 개발이다. 소듐냉각고속로개발사업단은 이 중

소듐냉각고속로 개발의 미션을 부여받고, 명확한 사업 목표 달성을 위해 성과 중심의 개방형 사업 수행방식을 채택해서 2012년 5월 출범했다.

2028년 150MWe 소듐냉각고속로 원형로를 건설하기 위해 2015년 원형로 사전안전성분석보고서 제출, 2017년 특정설계 승인 신청, 2020년까지 소듐냉각고속로 원형로의 특정설계의 승인을 획득하는 것이 사업단의 목표다. 이 목표를 달성하기 위해 연구기획, 선정·평가, 진도 관리, 개발, 정산, 연구개발 성과 보급과 확산, 홍보에 관한 사항을 수행할 뿐 아니라, 사업 수행과 관련한 국내·외 기술 및 산업동향 분석과 대응방안 마련, 그리고 소듐냉각고속로 관련 대학의 기초기술 개발과 인력 양성을 지원하는 것 또한 주요한 미션 중 하나다. 사업단의 미션 달성을 통해 현재 우리나라의 큰 근심거리인 사용후 핵연료를 좀 더 효율적으로 관리하는데 도움이 됐으면 하는 바람이다.

Q. 3세대인 지금의 원전도 아주 좋다는데 4세대 원전인 소듐냉각고속로를 왜 개발하려 하나?

A. 현재 3세대 경수로 위주의 원자력 발전은 경제성 그리고 안전성 측면에서는 문제가 없지만 향후 미래 에너지의 핵심 자격 요건인 사용후 핵연료 처리 문제 및 지속성 문제에 있어서는 한계를 가지고 있다. 더군다나 후쿠시마 사고 이후 지진, 해일에도 안전하도록 설계되어야 하고 정전 등 돌발상황의 경우에도 핵연료가 녹지 않아야 되는 등 원전의 안전성이 크게 강화되고 있는 실정이다.

현행 경수로가 가지는 사용후 핵연료 및 지속성 문제를 해결하기 위해 세계는 제4세대 원전을 개발하고 있으며, 그 핵심에 경·중수로와 같이 전력을 생산하면서도 높은 에너지의 중성자를 사용해서 연료의 증식과 방사성 독성물질의 연소에 보다 효율적인 소듐냉각고속로가 있다.

이러한 이유로 소듐냉각고속로는 현재 전 세계적으로 총 6기가 가동 중이고 원형로, 실증로가 각각 1기씩 건설 중에 있으며, 주요 제4세대 소듐냉각고속로 개발국은 2020년대에 기술 상용화를 목표로 연구개발에 박차를 가하고 있다. 특히 최근 발표된 중국의 고속로 도입 계획은 과거 충격적이다. 2011년에 실험로 CEFR(20MWe)를 건설 완료했고, 2023년 실증로 CFR-600(600MWe) 건설, 2030년 상용로 CFR-1000(1,000MWe) 건설을 각각 완료하고, 2050년경 200GWe, 2100년경 1,400GWe의 발전량을 고속로를 통해 제공할 계획이다. 이렇듯 제4세대 원자력 시스템 중에서도 가장 실현 가능성이 높은 것이 바로 소듐냉각고속로이며 시대적 요구사항이라는 것을 강조하고 싶다.

#### Q. 소듐냉각고속로의 장점을 소개해 달라.

A. 소듐냉각고속로는 물 등 다른 냉각재에 비해 열을 전달하는 능력이 탁월한 소듐을 냉각재로 사용하는데, 특히 풀형 소듐냉각고속로는 원자로 용기에 많은 양의 냉각재가 존재해서 만약의 사고시에도 원자로에서 발생하는 붕괴열의 대부분을 냉각재가 흡수하고, 원자로 출력이 상승할 경우 운전원이 기기를 작동하지 않아도 원자로가 스스로 출력을 낮추고 안정을 찾아가는 고유 안전성을 갖고 있다.

또한 자연현상을 이용해 원자로의 잔열을 제거하는 방식을 채택함으로써 후쿠시마 원전사고와 같은 완전 전원상실 사고에서도 안전 정지 및 냉각이 가능하다. 또

한 현재 경수로가 쓰는 산화물 연료보다 열전도 능력이 탁월한 금속 연료를 사용해서 보다 높은 열적 안전성을 확보할 수 있다.

뿐만 아니라 현재 가압 경수로가 150기압의 높은 압력에서 운전되는 것과 달리 대기압과 같은 저압에서 운전 되기 때문에 냉각재 계통의 압력이 낮아 냉각재의 누설 가능성성이 없으며, 경수로에서 주요 현안인 대형배관파단사고(LOCA)의 발생가능성이 고속로에서는 아예 없어 안전성 측면에서 경수로보다 우수하다.

또한 용융점과 밀도가 낮고 열전달 특성이 우수한 소듐(물에 비해 약 130배)을 냉각재로 사용하기 때문에 경수로에 비해 2~3배의 열출력 밀도로 운전해도 냉각에 문제가 없고, 이에 따라 원자로의 소형화 및 고성능이 가능하다.

결정적으로 고속로는 고속증성자를 이용해 반감기가 긴 핵종은 반감기가 짧은 핵종으로 변환시켜 사용후 핵연료의 방사성 독성 감소 기간을 1,000분의 1로 줄이고, 최종처분장 규모도 수십분의 1로 축소시킬 수 있다.

#### Q. 빌 게이츠가 600MWe를 개발한다는데 우리가 개발하려는 150MWe과 성능이나 방법이 다른가?

A. 테라파워(TerraPower)는 2007년 빌 게이츠 등 3인이 설립한 원자력 벤처회사다. 자원 빈국인 모든 나라에서 안전하고 경제적으로 전력을 공급하는 것을 목표로, 현재는 신개념 원자로 및 원자력 시스템 혁신과 개발의 중심축 역할을 담당하기 위해 노력하고 있다. 이와 같은 목표를 위해 테라파워가 개발하고 있는 600MWe는 진행파 원자로로 연료 재장전 없이 장기간 운전하는 초장주기로 전력 생산이 가능하도록 하는 것을 주목적으로 하고 있다.

테라파워는 '진행파 원자로를 10년 가동하면 생산되는 폐기물의 양은 기존 원자로에서 생산되는 폐기물보다 훨씬 적을 것'이라고 하는데, 진행파 원자로는 전력 효율성이 높고 기존의 경수로와 달리 핵연료 교체 없이 최장 100년간 초장기적으로 운영될 수 있다는 점에서 주목을 받고 있다. 또한 농축 과정에서 생성된 감순우라늄을 원료로 사용해 우라늄 농축 시설이 필요하지 않는다는 장점도 가지고 있다.

반면에 우리가 개발하고 있는 150MWe 소듐냉각고속로 원형로는 현재 가동 중인 가압경수로(PWR)형 원전에

서 발생한 사용후 핵연료를 재활용하는 기술인 파이로프로세싱(건식처리공정) 기술과 연계해서, 독성이 높은 장반감기 핵종을 반감기가 짧거나 안정된 핵종으로 변환시켜 기존 경수로에서 발생하는 사용후 핵연료를 효과적으로 처리할 수 있는 최적의 기술로 주목 받고 있다.

두 원자로는 소듐을 냉각재로 사용하고 고속 중성자를 이용해 핵분열 연쇄반응을 일으키는 기본 원리는 같고, 원자로 노심에 금속 핵연료를 장전하고 원자로가 폴(pool) 형이라는 점에서 기술적 유사성이 매우 크다.

Q. 빌 게이츠와 한국이 공동으로 개발하면 돈도 적게 들고, 전문가 풀도 많은 등 좋을 텐데 그럴 수는 없나?

A. 우리는 빌 게이츠가 투자한 테라파워의 계획과 관계 없이 국가의 미래 에너지를 위해서 소듐냉각고속로를 개발하고 있으며, 2008년 국가 정책으로 확정된 '미래 원자력 시스템 개발 장기 추진계획'에 따라 2028년까지 원형로를 건설할 계획으로 개발을 추진하고 있다. 풀형 원자로에 금속 핵연료를 사용한다는 기술적 유사성이 매우 크기 때문에, 금속 핵연료 및 피복관 등 재료 개발과 실험 데이터 공유, 공동 기기 검증 분야 협력, 전산코드 벤치마킹, 개발 과정에서의 경험과 지식 공유 등의 협력을 추진 중에 있으며, 장기적으로는 전산코드 검증 및 인허가를 위한 시험자료의 공유 등 접진적 화대를 추진해서 비용 절감과 개발 일정 단축을 도모할 예정이다.

이러한 측면에서 지난 4월 빌 게이츠가 방한해서 상호 협력 프로그램 개발 타당성 평가를 추진하기로 하고, 오는 9월에 '기술적 협력 타당성' 평가를, 11월에 '사업적 협력 타당성' 평가를 목표로 현재 활발한 논의를 진행 중에 있다. 그 결과에 따라서 비용을 줄이고 개발 일정을 단축시킬 수 있는 협력 프로그램을 수립할 계획이다.

Q. 소듐냉각로 개발 작업이 한·미원자력협정 결과에 영향을 받을 수 있나?

A. 현재 발효 중인 한·미원자력협정에서는 국내에서 우라늄을 농축할 수 없으며, 사용후 핵연료를 취급할 수 없도록 돼있다. 우리나라에서 현재 설계 개발 중인 소듐냉각고속로 원형로는 초기 노심에 우라늄을 연료로 사용하도록 하고 있기 때문에 단기적으로는 한·미 협정의 결과에 영향을 받지 않는다. 그러나 협정 개정

이 이루어지지 않는다면 장기적으로는 경수로에서 발생되는 사용후 핵연료 처리라는 소듐냉각고속로 개발의 주요 목적을 달성하기는 어려울 것으로 봐야 한다. 소듐냉각고속로는 지속가능성과 안전성, 경제성, 핵비화산성을 획기적으로 향상시킨 제4세대 원자력 시스템 중에서도 기술적으로 가장 실현 가능성이 높은 것으로 평가되고 있을 뿐 아니라, 사용후 핵연료 처리를 위한 가장 확실한 기술적 방안으로, 자연이 인류에게 제공하는 이러한 훌륭한 혜택을 기술적으로 안전하게 활용하는 것은 우리 엔지니어들이 수행해야 할 의무라고 생각한다.

Q. 소듐냉각로 개발에 참여하는 연구자들은 모두 원자력 연구원 소속으로 꾸려져 있나?

A. 국내 소듐냉각고속로 기술 개발의 경우, 1997년부터 원자력연구개발 중장기사업을 통해 본격 수행된 관계로 그간의 기술 개발 참여자는 대부분 주 사업 수행자였던 한국원자력연구원의 연구진이었다.

그러나 2012년 5월 '2028년 소듐냉각고속로 원형로 건설을 위한 2020년 특정설계승인 획득'이라는 명확한 사업목표 달성과 책임성 강화를 위해 기존의 한국원자력연구원 중심의 과제 수행 방식에서 벗어나 한국전력 기술, 두산중공업, KAIST, 경희대, 중앙대 등 산·학·연이 모두 참여할 수 있는 성과중심의 개방형 사업단체제로 개편했다.

현재 사업단 주도로 '한국 원자력계를 대표하는 명품원전 개발'이라는 비전을 가지고 국내 산·학·연이 기술 개발에 참여하고 있을 뿐만 아니라, 소듐냉각고속로 개발 경험이 풍부한 해외 산·학·연과도 실질적인 설계 기술 교류를 병행해서 강력한 사업추진 동력도 확보하고 있다.

Q. 4세대 원전의 종류는 어떤 것이 있고, 그 중 소듐냉각 고속로를 집중적으로 개발하고 있는 이유가 있나?

A. 2001년 미국을 중심으로 원자력 이용·발전이 활발한 주요 9개국이 모여 제4세대 원자력시스템(Gen IV)의 2030년 이후 상용화를 위한 공동개발협정에 서명하고, 이를 추진하기 위해 제4세대 원자력시스템 국제 포럼(GIF)을 결성한 바 있다.

GIF는 기존의 원자로보다 '지속가능성, 경제성, 안전성과 신뢰성, 핵비화산성 및 물리적방호'가 강화된 원자

로 개념 및 설계를 공모한 결과 전 세계 산·학·연으로부터 약 130개의 개념들이 제안됐으며, 국제 전문가 그룹은 검토를 통해 최종적으로 가스냉각고속로(GFR), 납냉각고속로(LFR), 용융염로(MSR), 소듐냉각고속로(SFR), 초임계압수냉각로(SCWR), 초고온가스로(VHTR) 등 총 6개 노형을 Gen IV 원자력시스템으로 선정하고, 개발을 위한 기술 로드맵을 작성했다.

우리나라는 원전에서 발생하는 사용후 핵연료 부피 감축, 방사성독성 완화, 사용후 핵연료 재활용을 위한 핵심기술 확보와 향후 전개될 수소경제시대에 대비해서 원자력 수소생산 시스템 개발을 위해 소듐냉각고속로와 초고온가스로 개발 참여를 결정하였다.

3개의 Gen IV 고속로 시스템 중 소듐냉각고속로는 전 세계적으로 400원자로 1년의 운전경험이 있으며, 해결해야 할 기술장벽이 가장 낮아 가장 빠른 시기에 상용화가 기대되는 원자력 시스템으로서, 미래 고속로 시장의 주력 노형으로 자리매김할 것으로 기대되는 원자로다. 특히 인도와 러시아의 경우 2020년대 소듐냉각고속로 상용화를 실현해 미래 고속로 시장을 선점하고자 공격적인 개발을 추진 중에 있다.

Q. 9년 간의 연구 개발 과정이 잡혀 있는데 혹시 정부의 정책 여하에 따라 연구가 중단될 가능성도 있나?

A. 자원빈국인 우리나라에서 생산되는 준국산자원이라 말할 수 있는 것이 원자력이다. 원자력의 연료인 우라늄은 에너지 밀도가 높아 적은 양으로 많은 에너지를 생산할 수 있을 뿐만 아니라, 전 세계적으로 고르게 분포돼 있어 자원 수급도 용이하고, 저렴한 가격에 전력 생산도 가능해 기저전력 역할을 충실히 수행함으로써 국가 에너지 안보 확보에도 큰 역할을 하고 있다.

뿐만 아니라, 에너지 안보 확보 차원에서 원자력의 이용·발전은 당분간 필연적이고, 사용후 핵연료 저감과 지속성을 보장하는 소듐냉각고속로가 미래 원자력 시스템으로 주목받고 있는 것이다. 그러므로 향후 급변하는 국내외 환경 및 정책 변화에 따라 현재 수립되어 있는 '미래원자력시스템 개발 장기 추진계획'의 수정·보완이 있을 수는 있겠지만, 큰 틀에서의 소듐냉각고속로 개발 사업은 지속될 것으로 생각한다.

Q. 한국으로서는 원전의 중요성이 에너지 독립성과 아주

밀접하다. 원전을 중단하거나 축소하라는 요구가 많은데 세계 에너지 환경을 봤을 때 그렇게 하는 것이 좋은가?

A. 현대사회에서 에너지 공급의 부족은 전쟁만큼이나 국가 존립에 커다란 영향을 미친다. 세계 에너지 수요는 폭발적 증가로 이어질 것이다. 그런데 지구 상의 에너지 자원은 한계에 이르고 있다. 에너지 자원의 절대 빈국인 우리가 선택해야 할 에너지원은 기술이 주를 이루는 기술주도형 에너지원이다. 석탄과 석유 그리고 천연가스가 자원주도형 에너지를 대표한다면 원자력과 태양열, 풍력 등이 대표적인 기술주도형 에너지원이다. 예를 들어 현재 우리 땅에서 버려지는 태양열과 풍력을 100% 재활용할 수만 있다면 아마 에너지 100% 자립이 가능할 것이다.

그런데 기술의 현주소는 그러하지 못하다. 너무나도 많은 비용을 지불해야 한다. 그렇다면 원자력은 어떤가? 가능하다가 답이다. 현재 우리 사업단에서 개발하고 있는 고속로를 이용해서 국내에 쌓여있는 사용후 핵연료를 재활용한다면 향후 수 백년 동안 우리나라가 사용할 수 있는 전기에너지를 여러분의 비용 부담 증가 없이 생산할 수 있다.

Q. 그동안 한국이 축적한 소듐냉각고속로 관련 성과를 소개해 달라.

A. 소듐냉각고속로 개발은 1997년 원자력연구개발기금으로 착수돼 2001년에 국내 최초로 소형 소듐냉각고속로인 KALIMER-150의 개념설계를 완성했고, 2006년에는 중형 소듐냉각고속로인 KALIMER-600의 개념설계를 완성했다. KALIMER-600은 우리 기술력을 바탕으로 한 독창적 개념의 원자로로, 앞서 소개한 GIF(제4세대 국제포럼)에서 제4세대 소듐냉각고속로 참조 노형으로 선정돼 우수성을 인정받았다.

그 이후로는 기술고도화 단계로 TRU(초우라늄) 연소로 개념설계를 수행하였고, 설계 및 인허가 취득을 위해 필요한 주요전산코드를 국산화했다.

또한, 전기가 끊겨도 자연 현상만으로 원자로를 안전하게 냉각시킬 수 있는 고유 개념의 피동잔열제거계통의 성능 입증을 위한 실험장치(STELLA-1)를 구축해서 설계 중심의 기술개발 능력을 실험을 통한 검증단계까지 확대시켰으며, 소듐 내부 원자로 내부 손상 검사시스템을 구축해서 안전성 및 경제성 향상에 기여했다. ☺