



오늘날의 원자로를 뛰어넘는 기술의 실현은 가능한 것인가?

Moving beyond today's reactors - a viable route?

Steve Kidd

Nuclear Consultant & Economist



현재 3세대 원자로의 엄청난 건설 비용과 사용후핵연료를 재처리 하지 못하고 폐기물로 보관 처리함에 따라 장기간의 지속적 가동이 불가능한 일회성 연료 사이클 때문에 원자력 발전 업계는 4세대 고속로 시대로 진입할 수밖에 없을 것인데 현재 개발중인 SMR과 HTGR타입의 두 원자로가 그 대안이 될 것이다.

지난 기고(〈원자력산업〉 2013-11, 12월호)에서 필자는 영국의 Hinkley Point C (HPC) 프로젝트가 나름대로 해볼 만한 시도이긴 하지만 3세대 가압수형 원자로인 EPR 2기의 건설에 160억 파운드나 소요되는 현재의 대형 원자로 자본 비용이 적어도 서방 세계에서는 대형 원자로 건설의 확산에 분명한 걸림돌이 될 것이라는 언급으로 끝맺은 바 있다.

2기의 AP1000 프로젝트가 진행되는 등 원전 사업의 활성화가 확고한 미국 같은 나라(HPC 프로젝트가 최종 확정되기를 바라는 영국도 포함해서)에서는 당분간 대형 원자로 건설이 계속될 것이다. 그러나 저렴한 셰일가스 등 천연가스의 생산 지역과 재생 에너지 사용 비중이 높은 여타 지역에서는 발전 설비의 채택 경쟁이 심하기 때문

에 건설 비용의 절감은 반드시 이루어져야 한다. 중국이나 한국의 원전 건설 프로젝트 방식의 이점을 교훈 삼아 국제적 규제 협조의 틀 안에서 더 큰 원자로의 건설로 방향을 잡는 것이 대안이 될 수도 있지만, 현재 건설중인 원자로에 대한 정부 보조금 제한의 가혹한 규제에 따른 근본적인 경제성 문제는 앞으로 풀어야 할 숙제이다.

새로운 방식의 원자로 설계 필요

따라서 나는 오늘날의 대형 경수로 방식을 뛰어넘는 다음 단계로의 진입을 주장하고 싶다. 냉각 시스템과 가압 원자로 용기를 확보하고 매우 복잡한 고가의 예비 냉각 장치와 기타 안전 시스템 뿐만 아니라 거대한 돔형 콘크리트 격납 시설을

갖추어야 하는 현재의 원전 설비는 그 크기와 건설 비용이 너무 과하다. 그런 거대하고 복잡한 시설과 막대한 비용 때문에 시간당 수십억 킬로와트를 생산하는 대형 발전소 건설 시장에만 적합할 뿐인데, 발전 설비는 원래 국가의 기본적 시설이므로 비교적 다양한 방식에 의해 어렵지 않게 확보되어야 하는 것이다.

뿐만 아니라 새로운 방식의 원자로 설계로 전환해야 하는 또 다른 중요한 요인이 있는데, 장기적으로 지속 가능한 연료 주기가 바로 그것이다. 핵연료를 재사용하게 되면 천연 우라늄의 사용량을 감소시켜 핵폐기물의 발생량도 따라서 감소되므로 이미 발생된 핵폐기물의 양도 줄일 수 있는 것이다.

최근 Breakthrough Institute에서 인용한 보고서에는 이러한 요인이 기본적으로 무시되어 있다. 현재 가동 중인 사용후핵연료의 심지층 저장소가 머지않아 실제적인 현실 문제로 대두되는 것에 반해 우라늄은 계속해서 값싸고 쉽게 구할 수 있는 것으로 간주하기 때문인 것 같은데, 그 보고서의 앞부분에서는 중국과 인도의 현상황을 간과하였다. 국제 시장에서 우라늄을 값싸게 확보하기 쉬운 것은 사실이지만 이들 두 나라는 막대한 양의 우라늄 수입에 근본적인 부담을 느끼고 있는데 그것은 수입한 우라늄에서 제한적인 양의 에너지만을 추출할 능력밖에 없음이 거의 확실하기 때문이다. 그래서 인도와 중국도 재활용 연료를 사용하는 차세대 원자로를 개발하여 부담을 덜어내고 싶은 강한 동기를 갖고 있는 것이다. 따라서 새로운 원자로들은 궁극적으로 좀 더 나은 경제성을 갖게 될 것으로 보인다.

또한 핵폐기물 처리 문제를 스웨덴이나 핀란드의 경우처럼 심지층 저장소 건설로 해결하기도 하겠지만 여타 지역에서의 일반적인 핵폐기물 저장소의 지하 배치 문제는 적극적으로 신속하게 처리되지 못하고 지연되거나 다른 대안을 모색하도록 거센 압력을 받게 될 것이다. 현재 미국이나 다른 여러 나라에서 교착 상태에 빠져있는 핵폐기물 정책들이 이를 증명한다.

이러한 경제성 그리고 지속 가능성과 관련된 문제 해결의 필요성을 놓고 볼 때 미래의 원자로 개발을 향한 합리적인 로드맵의 윤곽을 이제는 제시할 수 있게 되었다. 결국 우리는 Generation IV International Forum(4세대원자로 국제포럼)에서 제안되었던 몇 가지 유형의 원자로를 지향하여야만 하는데 가스냉각과

속원자로(gas-cooled fast reactor), 납냉각고속원자로(lead-cooled fast reactor), 용융염원자로(molten salt reactor), 나트륨냉각고속원자로(sodium-cooled fast reactor), 초임계압수냉각원자로(supercritical-water-cooled reactor), 그리고 초고온가스원자로(very-high-temperature reactor) 등이 그것이다.

그러나 2020년대 후반까지는 이러한 새로운 원자로들의 실용화가 불가능 할 것이므로 그때까지 약 15년간 서방 국가들은 상당한 규모의 기존 원전 건설을 계속 진행하겠지만, 중간 단계 기술을 활용한 다음 두 가지 유형의 과도기적 원자로(generation III+ reactor)가 확실한 주목을 받을 것이다.

소형 모듈형 원자로(SMRs)

첫 번째는 최근 관심을 모으고 있는 소형 모듈형 원자로(SMR : Small Modular Reactor)이다. 300MW 이하의 소형 원자로 모델은 수없이 많지만 그 중에서 철도나 도로를 사용해 운반할 수 있을 정도의 소형 부품으로 완전히 모듈화하여 건설하는 기본적인 소형 가압수형 원자로(PWRs : pressurized water reactor) 기술이 가장 상업화의 가능성이 높을 것 같다.

소형 모듈형 원자로(SMR)는 두 가지 방법으로 비용 절감 방안을 제시하고 있는데, 첫째, 중앙 집중 설비 방식으로 여러 개의 소형 원자로를 건설함으로써 다량 생산의 학습 곡선(learning curve)법칙에 따른 종사자들의 조속한 숙련도에 의한 생산 경비 절감 원칙으로 설명될 수 있으며, 둘째, 한 발전소 내에서 원전업체로 하여금 점차적으로 소형 모듈 원자로 수를 늘려 나가게 함으로써 초기 투자 비용을 절감시키는 것이다. 그러므로 소형 모듈형 원자로는 대형 원전 설비 건설에 따르는 막대한 초기 투자 비용의 리스크 없이 사회 기반 사업으로서 원전의 확보를 가능하게 해주는 방법이다.

원전의 안전성과 경제성은 언제나 함께 확보되어야 한다. 최근에 제안되는 경수 소형 모듈형 원자로(light water SMRs)설계 기술은 비상 상황을 대비한 예비 냉각 시스템을 인위적으로 조작되는 펌프 구동 방식의 냉각이 아닌 중력 낙하식 혹은 자연 대류식 냉각 시스템이라는 수동적 안전 장치의 특성을 채택하고 있다.

이런 수동적 시스템은 정상적 상황은 물론 모든 문제



발생 상황에서 시스템상 인위적인 일차적 펌프 가동을 배제하고 자연적 공기 순환으로 냉각 시킴으로써 원자로 운영 인력의 즉각적 일차 조치를 최소화해주는 설계를 말한다.

뿐만 아니라 소형 모듈형 원자로(SMRs)는 중요한 기본적 부품 모두가 한 개의 고강도 압력용기 안에 위치하는 일체형 설계를 채택하므로 기본적으로 외부에 노출된 대형 파이프가 없는 등 이 설계상 특성은 냉각수 유출 같은 잠재적 사고의 가능성을 상당히 낮추어 준다.

또한 SMRs는 대형 원자로보다 붕괴열의 레벨이 상당히 낮으므로 가동 중지 후 냉각 설비의 가동량이 월등히 감소되며, 설계상 최소화된 안전 장치의 작동 및 유지를 강력한 배터리에 의존하는 방식이므로 예비 전력이나 비상 전력의 확보 수요를 대폭 저감시켜 주는 데, 결국은 필요 없는 단계까지 발전할 것이다.

이와 더불어 격납 설비와 지하 저수조 안의 원자로 용기의 내진 능력을 향상시켜 어떠한 지각 운동의 영향도 완화시켜주는 내진 시스템의 능력도 강화하여 설계하고 있으며, 지하에 견고한 대형 사용후핵연료 저장고를 설치하여 누출 위험을 확실하게 차단하였다.

이처럼 모든 면이 다 좋아 보이는 소형 모듈형 원자로의 경제성은 과연 어떨까? 원자로의 대형화를 지향해온 지난 40년 동안은 항상 규모의 경제를 추구해 왔으나 이제 그 규모의 경제는 환상이었음이 증명되었다. 그렇다면 작지만 안전하고 경제성도 있어 보이는 스마트한 소형 원자로의 선택이 바람직한 대안이 될 수 있을까? 그 대답은 '아직은 확실히 알 수 없다'이다.

지금까지의 대형 원자로 설비에 들어간 킬로와트 생산당 건설 비용 수준의 자본 비용으로 소형 모듈형 원자로를 지을 수 있음은 확실하다. 그러나 건설 비용을 대폭 낮추기 위해서는 발전 설비의 대량 주문과 생산이 이루어져야 한다. 모듈 방식의 원자로 건설은 대형 경수로(LWR)분야에서도 시작되었고 소규모로 짓는다고 해서 무조건 경비가 적게 드는 것이 아님도 밝혀지고 있다. 그러므로 소형 원자로 프로젝트에서 경제성 확보의 요체는 다른 시장 원리에서도 그렇겠지만 원전 건설의 후기 단계에서 다량의 소형 모듈형 원자로 규모를 확장하는 것이다.

더 큰 문젯거리가 될 소지는 가동 및 유지 보수 경비

부분에 있다. 소형 모듈형 원자로 개발자들이 성공하기 위해서는 원전 건설과 운영 전반에 관련된 모든 분야에서 규제를 간소화시킬 수 있는 방안을 모색해내야 한다.

대형 원전의 제어실 운영 같은 운영 차원의 경우에서 보면 분명히 규모의 경제 원리가 적용되므로 소형 모듈형 원자로 개발자는 상대적으로 불리하게 작용할 수도 있는 이런 요소들을 극복해야 하는데, 건설 경비 분야에서 복수의 원자로 설비 배치 등에 의해 확보한 경제성에도 불구하고 높은 운영경비로 그 이점을 상실한다면 애석한 일이 아닐 수 없다.

이전에 미국에서 가스연료발전소와 원자력발전소의 가동 경비(연료+운영 경비)에는 큰 격차가 있었으나 이제는 그 차이가 대폭 줄어들어 2012년에 kWh당 생산비가 원전은 2.4센트 가스발전소는 3.4센트로 단 1센트 차이로 줄었다. 가스발전소의 건설 경비 역시 원전보다는 현저히 적게 소요되므로 향후에도 가스 가격이 계속 저렴하게 유지된다면 소형 모듈형 원전이 높은 운영 경비를 줄이지 못하게 될 경우 현실적으로 가스발전소와 경쟁하기는 어려울 것이다.

고온 가스 냉각 원자로(HTGRs)

또 하나의 과도기형 원자로로는 고온가스냉각원자로(HTGRs : high temperature gas cooled reactors)이다. 이 원자로로는 현재의 원자로와 근본적으로 다른 것은 사실이나 4세대원자로로 잘못 알려져 있으며, 가압수형 원자로가 기반인(Pressurized water reactor-based) 소형 모듈형 원자로보다 4세대에 가깝기는 하지만 사실은 장기적 관점에서 볼 때 그 가능성을 가늠해 볼만한 단계에 불과하다.

고온가스냉각원자로(HTGRs)는 감속 냉각재로 흑연(graphite)을 사용하고 기본 냉각재로는 helium 가스나 이산화탄소(carbon dioxide) 혹은 질소(nitrogen)를 사용한다. 연료는 직경이 1mm 이하인 삼중구조 등방성 소립자(TRISO : tristructural-isotropic particles) 형태인데 농축 우라늄인 U-235 20%알루미늄(산화탄화물(oxy carbide)나 우라늄이산화물(uranium dioxide))을 함유하고 있다.

이 원자로로는 여러 겹의 탄소와 탄화규소(silicon

carbide)로 둘러싸여 있고 핵분열 생성물을 격납용기로 보존하여 섭씨 1600도 이상까지 안정화시킬 수 있다. 이 소립자들은 육각형 프리즘 형태의 블록이나 탄화규소(silicon carbide)로 둘러싼 당구공 크기의 흑연 덩어리 등 두 가지 방식으로 처리되는데 아쉽게도 지금은 없어진 남아프리카공화국의 페블베드 모듈 원자로(PBMR)가 당구공 크기의 흑연 덩어리 방식이었다.

고온가스냉각원자로 (HTGRs)는 온도가 상승하면 핵분열 반응이 늦어지는 부온도계수(negative temperature coefficient)와 붕괴열의 수동적 제거로 안전을 확보하는 피동형 안전 원자로(inherently safe reactor)방식으로서 안전을 위한 격납용 건물이 필요하지 않다. 이 원자로를 공장에서 제조하여 지하에 설치하면 될 만큼 작고 전기와 마찬가지로 고온에서도 가열 처리 과정에 적합한 속성을 가지고 있으므로 이런 점은 경제성의 관점에서 높이 평가할만 하다.

1960년대와 1970년대에 이미 여러 기의 혁신적 고온 가스냉각원자로가 만들어진 바 있지만 현재 가장 선도적 위치는 단연 중국이 차지한다. 칭화대에 있는 원자력 및 신에너지기술연구소(INET : Institute of Nuclear & New Energy Technology)의 10MW 실험용 고온원자로인 HTR-10은 2000년 이래 계속 가동중인데 섭씨 700도에서 가동되는 이 원자로의 페블베드(27,000 elements) 연료는 평균 연소 80GWd/tU의 산화물 핵연료이다. 각각의 핵연료 페블은 수천개의 삼중구조 등방성 소립자(TRISO)로 이루어져 있고 17%농축 우라늄을 함유하고 있다.

그러나 현재 중국에서 건설중인 30개의 원자로 가운데 하나로 Shindaowan 에 건설중인 페블베드모듈고온원자로(HTR-PM)는 210MW 급인데 페블베드연료(52,000 element)는 9%농축우라늄이고 방출 연소도는 80GWd/tU이다. 이 시범 가동용 원자로는 같은 부지 안에 건설될 3×6×210MW 원자로 18기를 갖춘 실제 원전을 위한 토대를 놓기 위해 설계된 것이다.

또 한 가지 중요한 점은 중국의 메이저 전력 공급 회사 가운데 하나인 China Huaneng Group 이 지분 47.5%를 보유하고 이 프로젝트를 주도하고 있다는 것인데, 이는 페블베드모듈고온원자로(HTR-PM)가 단지 연구용이 아니라 상업화를 목적으로 한 프로젝트가

확실하다는 것이다.

중국의 현 상황에서 HTR-PM 원자로 프로젝트가 아직은 실험적인 단계임이 분명하지만 향후 이 실험 원자로에서 얻어지는 기술적 성과물이 머지않아 기존의 원자로를 대체하는 기술로 자리잡을 것으로 짐작하기는 어렵지 않다. 또한 이 새로운 고온원자로에서 발생하는 고온을 상업적으로 활용할 가능성도 다분한데 수소 생성에 기반한 창출물의 경제성이 현실화되는 것과 더불어 새로운 상업적 가능성을 제시해 줄 것이다.

고온가스냉각원자로 (HTGR)의 경제성과 비교적 작은 규모인 페블베드모듈원자로(HTR-PM)가 역시 작은 규모인 소형모듈원자로(SMRs)와 유사한 문제거리를 갖게 될 것인지는 아직 확실치 않다. 이에 따라 중국은 3세대 원자로 이후 시대를 감안한 대형 원자로와 4세대 원자로에 최적화된 몇 종의 고속중성자원자로(fast neutron reactor)를 적극적으로 연구하고 있다. 물론 다른 나라에서도 이에 대한 활발한 연구가 진행중이긴 하지만 중국처럼 실제적 대형 원전 건설 프로젝트와 밀접하게 관련되어 진행되는 곳은 없다.

2020년대 초에는 이런 몇 가지 선도적 원자로 기술 중에서 어떤 것이 2020년대 후반부까지 실제로 상업화될 것인지 명백히 드러나게 되겠지만 그때까지 원전 업계는 계속 원자로를 건설하게 될 것이다.

2020년대 말까지 건설될 대부분의 원자로들은 과도기적인 Generation III+설계로서 계속 축적되는 기술에 힘입어 개선된 안전성과 나은 경제성을 제공해 주겠지만 그 건설 비용은 상당히 높을 것 같다. 수년 전에 예상했던 원전의 황금기는 아직 도래하지 않았지만 Generation III+ 원자로들은 조만간 확실한 원전의 틈새 시장으로 등장하게 될 것이다.

소형모듈원자로 (SMRs)와 고온가스냉각원자로 (HTGRs)는 아직 그 수량은 짐작하기 어려우나 새로 건설될 원자로의 상당 부분을 차지하게 될 것인데 뭔가 다르고 새로운 기술을 선보인다는 점에서 매우 중요하다. 🌟