



원전 강국의 역정과 에너지 변환 시대 원전의 역할

이종훈

前 한국전력공사 사장



- 서울대 전기공학과 졸업
- 한전 입사(61)
- 한전 원자력건설처장, 고리원자력본부장
- 한국전력기술 사장
- 한국전력공사 사장(93~98)
- 한국원자력연구소 이사장
- 원자력위원 역임

보도에 의하면 한국전력이 영국 무어사이드 원전 사업 인수전에서 중국을 꺾고 우선협상대상자로 선정됐다고 한다. 향후 영국 의회 승인 등 내부 절차가 마무리돼 사업이 확정되면 2009년 수주한 아랍에미리트(UAE) 바라카 원전 이후 한국의 두 번째 원전 수출이 될 것으로 보인다. 영국 '무어사이드 프로젝트'는 21조원 규모로 잉글랜드 북서부 무어사이드 지역에 차세대 원자로 3기를 건설하는 내용이다.

영국의 방대한 원전 시장

영국의 「2007년 에너지 백서」에 의하면 영국은 1960년대의 원자력발전소들이 2030년경이면 모두 폐지될 것이며, 화력발전소는 기후 온난화 때문에 차츰 폐쇄하고 신재생에너지와 원전을 주축으로 에너지 전환 정책을 펴기로 하였다.

이에 따라 2035년 신재생에너지 46%, 원전 36%로 전망하면서 원전 건설을 위해 민간자본을 대대적으로 유치하려고 있다. 20년 내에 30~40GW(한국 APR1400 20~30기 해당)의 원전이 건설될 전망이다.

이 큰 시장을 겨냥하여 한전은 원전 사업의 영국 교두보 확보를 위해 도시바의 뉴젠 지분 인수에 적극 관심을 보이면서 지분 인수의 조건으로 한국형 APR1400 원전을 건설하자고 제안하였고 영국 정부가 이를 수용한 것이다.



한빛 원전 우리나라는 1983년 한빛 원전 3,4호기 건설을 계기로 원자로 핵심 설계 기술 도입과 자립을 추진하였다.

또한 한국수력원자력주식회사(한수원)도 영국에서 원전 사업을 추진 중인 바 호라이즌 뉴클리어 파워로부터 지분 인수 제안을 받고 관련 내용을 검토하고 있다.

호라이즌은 2012년 일본 히타치가 인수한 회사로 영국에 5.4GW 규모의 원전을 건설하겠다고 밝힌 바 있다. 그중 2030년까지 약 3GW 규모로 원전 건설 개발을 완료하는 것이 목표다. 완공 후에는 영국 정부와 협상해 35년간 전력을 판매하게 된다.

영국 원전 기술의 쇠퇴

영국은 세계 최초로 Magnox형 흑연감속 가스냉각 방식의 상업용 원전을 개발하여 Calder Hall 원자력발전소를 건설, 1956년 상업 발전을 시작한 원전 건설의 최선진국이였다.

1965년에는 개량된 AGR(Advanced Gas cooled Reactor)을 개발하여 자국 내에 건설하면서 해외 수출도 착수하였다. 즉 프랑스 최초의 원전 Bugey 1호기와 일본 토카이amura(東海村) 1호기를 영국이 건설 및 가동하였다.

1970년 우리나라 최초의 원전 고리 1호기 국제 입찰에도 참여하여 적극적인 마케팅을 했다.

그러나 1972년 AGR 설계에 결함이 발견되어 영국 정부는 수출 금지 조치를 내림으로써 영국은 세계 원전 시장에서 물러나고 자국에서만 운영 중이다.

그 후 북해에서 유전과 가스전이 발견되어 부존 에너지의 풍부함이 확인되자 영국은 1995년 모든 예정 중이던 원전을 중단하고 신재생에너지에 주력하면서 원자력 기술은 사라지게 된 것이다.

중동 원전 진출 전망

탈원전의 악조건에서 영국으로부터 낭보가 날아 들면서 중동의 원전 시장도 전망이 매우 밝아졌다. 지난 7월 24일 사우디아라비아 국왕은 「National project for atomic energy」란 칙령으로, ① 대형 원전(1200MW~1600MW) 2기를 건설할 준비에 곧 착수하고, ② 중국의 신형 가스로나 한국이 개발한 SMART 원전 기술을 전수 받아 2기를 건설하고 3국에 공동 진출할 것이며, ③ 자국 내의 우라늄 개발에 적극 나서라는 3개 정책을 발표하였다.

2009년 12월 UAE에 수출해 건설하고 있는 한국의 APR1400 원전 모델로 처음 건설된 신고리 3호기가 2016년 12월 상업 운전에 성공하였고, UAE 프로젝트도 큰 차질 없이 성공적으로 추진되고 있어 사우디아라비아를 포함하여 원전을 건설하려는 여러 국가들이 한국의 원전 능력에 관심을 가지게 된 것이다.

한국 원전의 국제적 위상

1978년 우리나라가 오늘날 원전을 가동 중인 31개의 국가 중에서 21번째 나라로 비교적 늦게 원자력발전소를 갖게 되었음에도, 우리나라는 원자력 발전 기술을 자립하고, 원자로와 증기발생기, 터빈 발전기 등 핵심 주요 기자재를 대부분 생산할 능력을 갖춘 세계 5대 강국의 반열에 들었다.

Project를 추진하는 핵심 기술인 Project Management (PA) 능력도 갖추어 건설공사비도 가장 높은 경쟁력을 갖고 있다. 정해진 공기 내에 저렴한 공사비로 품질 좋은 원전을 완성시키는 실적을 갖추고, 운전 능력은 세계 최고 수준에서 운영되고 있다. 지난 12월 9일 IAEA 발표에 의하면 한국의 원전 기술과 운영 수준이

단연 세계 최고임이 수치로 잘 표시되고 있다.

- 계획되지 않은 발전 손실 (UCL: Unplanned Capacity Loss factor)
- 한국: 1.0%(24unit), 프랑스:5.7%(58unit), 캐나다: 4.6%(19unit), 미국: 1.5%(99unit), 중국: 1.4%(28unit) – 세계 평균: 3.4%(44unit)
- 건설공사비 (경수로 기준 kW당 USD)
- 한국: \$2,021, 프랑스: \$5,067, 영국: \$6,070, 일본: \$3,883, 중국: \$1,807~2,615.
- 건설 공기 (건설 허가 첫 콘크리트 작업부터 상업 운전까지)
- 한국은 세계 기록상 가장 단기간에 준공하여 54개월, 프랑스와 미국의 원전은 공기가 계속 늦어지고 있다.

한국 PWR 노형 선정

1969년부터 1970년 사이에 우리나라가 첫 원전을 도입할 무렵 영국은 미국과 함께 상용 원전의 최선진국이였다. 1960년대 우리 원자력 기술자들이 원전 기술을 배우기 위해 영국에서 훈련을 받았다.

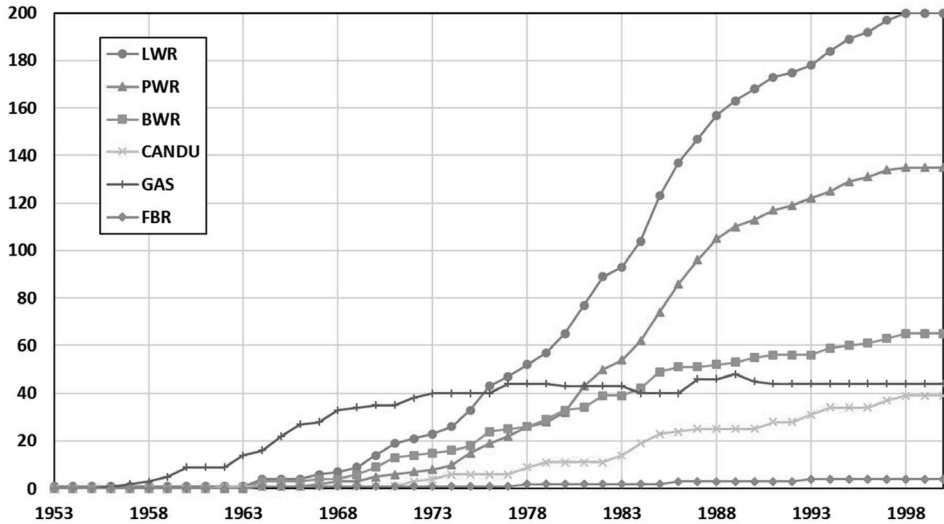
당시 프랑스와 일본이 첫 원자로로 영국의 신형가스 냉각발전소(AGR)를 도입하였으니 정치권으로부터도 AGR 채택을 적극적으로 중용받았으나 한국전력의 원전추진단 기술진은 미국의 PWR의 장점을 일찍이 간파하고 PWR 노형 도입을 관철하였다.

<그림 1>에서 명확히 세계 선두를 달리던 가스냉각로를 거부하고 지금 세계의 주류 노형인 PWR을 선택한 당시 우리 기술진의 선견지명이 얼마나 탁월하였는지 실감할 수 있다.

그 뒤 영국의 AGR 원전은 몇 가지 운영상 문제점이 발견되어 영국 정부가 수출을 금지하는 조치를 취하였



Cumulative World Nuclear Power Plant Installations (1953-2000)



〈그림 1〉 세계 원전 노형 통계

고, 그 뒤 영국의 원전 사업은 세계 주도권을 상실하게 되었다.

바로 그 영국에 우리 원자력 발전 기술이 최고의 평가를 받고 진출을 기다리고 있으니 감회가 남다른 수 밖에 없다.

원자로 설계 핵심 기술의 도입

우리나라는 ‘원자력 강국’이 되기까지 많은 우여곡절을 겪었고 정책이 올바른 방향으로 추진되기도 했지만 우리가 기술 자립을 적극 추진하는 기간 동안 행운도 따랐다.

원전 핵심 기술은 항공우주 기술과 함께 국가 간의 이전이 극히 제한된 기술이다. 1979년 3월 미국 TMI 사고와 1986년 4월 소련 체르노빌 원전 사고로 세계

원전산업계는 전망이 암담하였다. 이런 환경에서 한국만이 이 국제 환경을 이용하여 원자력발전소 핵심 원전 기술 도입에 성공하게 된 것이다.

1977년 시작한 고리 3,4호기를 난턴키(non turnkey)로 추진하면서 사업관리 PM 기술과 종합설계 AE 기술을 도입하여 자립하였다.

원전 건설의 PM(Project Management) 기술을 도입하여 발전소 건설을 적시(on time)에 예산 내(in budget)에 건설할 능력을 키웠고, 이어서 종합 설계 기술(AE: Architect Engineering)을 도입해 주요 기자재의 사양(Spec.)을 자체적으로 결정해 국산화를 극대화함으로써 궁극적으로 기술 자립의 기반을 닦은 것이다.

1983년 영광 원전 3,4호기 건설을 계기로 원자로 핵심 설계기술 도입과 자립을 추진하였다. 한전이 기

술 전수 조건을 전제로 국제 입찰에 붙여 미국의 컴버스천 엔지니어링(CE)을 선정하였다. 한국에 이미 6기의 원전을 공급한 미국 웨스팅하우스(WH)는 이에 반발하였고, 1988년 당시 정치적으로 여소야대 정국에서 '5공 비리'로 낙인 찍혀 계약이 해지될 위기에 봉착하기도 하였다.

이 계약이 해지되면 우리는 영영 원자력 핵심 기술 자립의 꿈을 이룰 수 없게 될 위기에 봉착하기도 하였으므로 한국전력은 전사적으로 국민 지지를 얻기 위한 노력을 기울였다.

국정 조사, 감사원 감사까지 받았으나 혐의 사실이 드러나지 않자 정치권이 검찰 수사까지 의뢰하였다. 3개월간 기술 평가와 계약에 참여하였던 기술진 연인원 150명이 검찰 수사를 받았으나 무혐의 처리되었다.

이 계약의 기술 전수 내용에 대한 협상이 한창일 때 소련의 체르노빌 원전 사고가 발생하여 전 세계가 원전 사업을 폐기하게 될 위협에 처하자 미국 CE는 미련 없이 모든 기술을 한국에 전수하였다.

이때 미국 CE가 소재한 코네티컷주 원저시에 100여명의 한국원자력연구소 고급 기술진을 파견하여 CE 기술진과 머리를 맞대고 영광 원전 3호기 원자로를 설계하면서 원전 기술과 모든 프로그램을 완벽하게 전수 받은 것이다.

북한 경수로 공급에 한국형 원전 채택

1993년 북한은 NPT에 가입한 후 필수적으로 받게 되는 IAEA의 안전 검사를 받던 중 검사관들이 신고된 내용과 불일치한 점이 발견되어 이를 추궁하려하자 NPT 탈퇴를 선언하면서 핵무기 개발을 공언하였다.

1995년 제네바 합의에 따라 북한의 모든 핵개발 설비를 동결하고, 북한의 에너지 개발 중지 보상 차원에

서 한반도에너지기구(KEDO)를 설립하고 북한에 100만kW급 원자력발전소 2기를 공급하기로 합의되었다. 미국, 독일 등은 북한에 자국의 원전을 공급하려고 노력하였다.

이때 한국은 이미 한국표준형원전 KSNP-1000, 100만kW 원전을 개발하여 울진에 건설 중에 있었다. 그러나 우리 정부에서도 한국의 원전 건설 능력을 과소평가하고 있었고, 미국은 자국의 원전 수출을 위해 의도적으로 한국 원전을 폄하하고 있었다.

이런 국제 환경을 설득 극복하고 한국표준형원전을 북한에 공급하기로 합의되었다. KEDO는 미국의 유능한 전문가들로 하여금 철저히 한국 원전의 설계 내용을 검증하였고, 한국 원전이 국제 기준을 모두 충족한다는 사실을 검증받는 계기가 되었다. 그 후 북한 경수로 건설이 진행되던 중 북한이 비밀리에 핵개발을 하고 있음이 확인되자 경수로 공급 건설 사업은 2004년에 종결되었다.

제3세대 원전 APR1400 개발과 성공

1990년대 초 과학기술부는 미래 먹거리산업으로 중요 과제를 찾던 중 안전도가 획기적으로 제고된 신형 원자로 개발을 G-7 프로젝트의 하나로 채택하였다.

개발비가 2,300억 원이나 소요되는 대형 연구 과제여서 투자에 시비가 있었으나, 적극 추진한 결과 1998년 기본 설계를 완성하였는데 이 신형 원자로가 APR1400 원전 모델이다.

이에 앞서 미국과 프랑스도 안전성이 획기적으로 제고된 제3세대 원전을 개발하였다. 미국 WH가 개발한 AP1000을 중국에 4기, 미국 V.C. Summer 2기, 조지아 Vogtle에 2기 공급하여 건설 중이나 10년 넘게 완성을 보지 못하고 있던 중 V.C. Summer 원전은 지난



KEDO의 북한 경수로 건설 현장. KEDO는 당시 미국의 유능한 전문가들로 하여금 철저히 한국 원전의 설계 내용을 검증하였고, 이는 한국 원전이 국제 기준을 모두 충족한다는 사실을 검증받는 계기가 되었다.

7월 말 사업 폐지를 선언하기에 이르렀다. 이 사업으로 WH가 고전하자 2006년 WH를 52억불에 인수하였던 일본 도시바도 경영 위기에 처하게 되었다.

또 프랑스 아레바도 EPR1600을 개발하여 프랑스와 핀란드에 건설 중이나 공기 지연과 공사비 과다 초과로 아레바가 경영상 어려움을 겪게 된 나머지 프랑스 국영 전력회사인 EDF가 인수하여 명맥을 유지하고 있다.

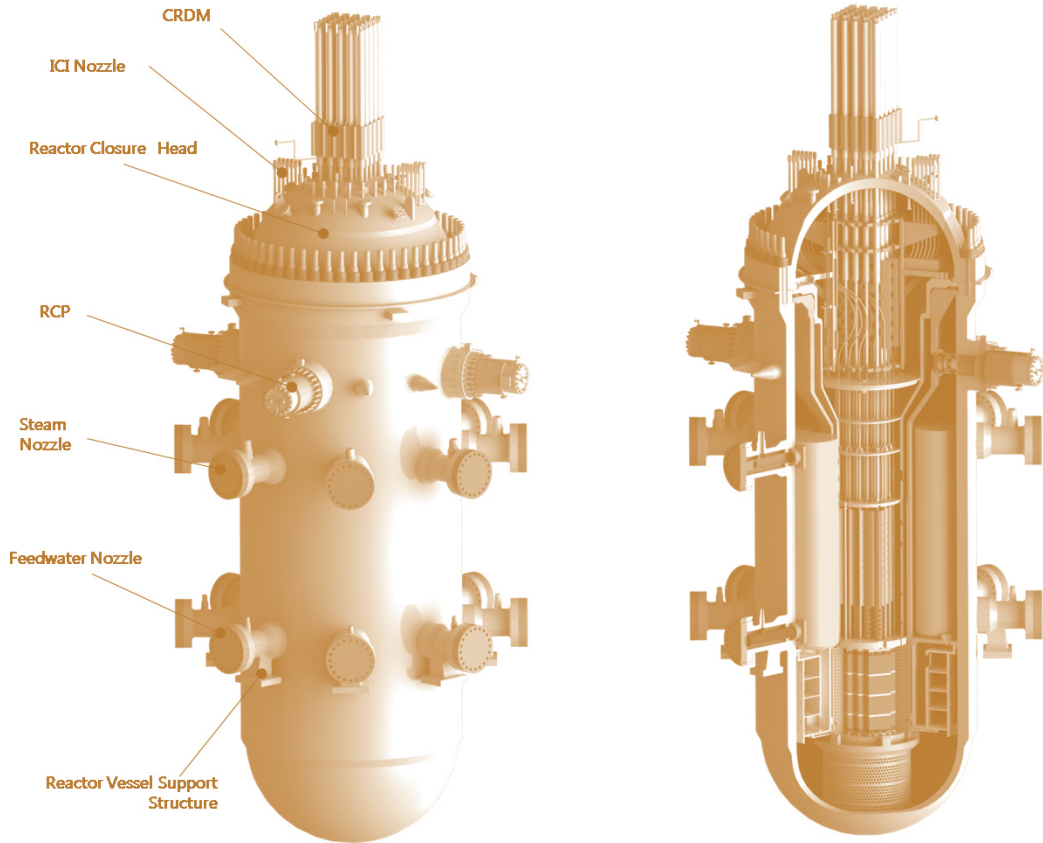
미국 WH와 프랑스 아레바의 몰락이 새로운 노형의 원전을 개발하여 성공한다는 것이 얼마나 어려운가를 보여주었다. 그 어려운 신형 원전을 한전이 개발하여 신고리 3호기가 2016년 12월 20일 상업 운전에서 성공한 것을 선두로 신고리 4호기도 완성하였고, UAE에서도 첫 호기 준공을 눈앞에 두고 있다.

매거진 <Forbes>는 2017년 4월 29일자에서 '대한민국, 세계 원자력산업 강국으로 군림하고자 할 것'이라는 제하에 "미국의 원자력산업계는 한국이 꾸준히 발전시켜온 세계적 수준의 원자로 제조와 원전 건설 능력에 대해 은근한 질시의 눈초리와 더불어 상당한 찬사와 존경심을 보이고 있다."고 전했다.

미래 에너지 해결을 위한 원자력의 역할

1. 화력발전소 대체와 신재생과 공생할 원전 노형 개발의 필요

세계적으로 전력시장의 패턴에 급격한 변화가 예상



한국원자력연구원이 개발한 SMART 구조도. 지금까지 우리나라는 선견지명으로 세계 원자력계의 선두 주자가 되어 왔다. 앞으로 SMR에 대해서도 이와 같은 현명한 선택을 함으로써 세계 원전 일등국으로서의 동력을 지속하여야 할 것이다.

되고 있다. 발전소 건설용 신규 입지의 확보는 극히 제한되어 있다. 현재의 화력발전소가 10년 내지 30년 후 폐쇄될 때 이 부지에 어떤 발전 설비를 건설할지에 대한 검토가 있어야 한다.

지구 온난화의 주범으로 주목받고 있는 석탄 발전 설비를 대체할 전원으로서는 획기적으로 안전이 향상된 차세대 원자로 SMR(Small Modular Reactor) 개발 활용이 그 해답일 수 있다.

미국 DOE는 SMR 개발에 \$5억 이상 투자하고 있으

며, 유럽연합, 중국, 그리고 캐나다도 그 대열에 끼어들었다. 미 오바마 대통령은 2015년 SMR을 대체 에너지로 규정하는 행정명령에 서명하고 미국 연방정부 시설에 우선적으로 건설을 지원했다.

우리나라는 전력망이 고립되어 신재생 발전 증가 시에 LNG 발전을 증설할 수밖에 없어서 기후 변화와 미세먼지 대책에 역행할 수 있다. 전력요금에서 적립되는 전력산업기반기금에서 R&D 기금을 지원하고 있으므로 대체 에너지 요건을 설정하고 이를

모두 만족하는 SMR 개발에 R&D 기금을 집중 투자해야 한다.

2. 자연 순환 방식으로 가동되는 완전 피동 방식의 SMR 노형이 해답이다.

도시 인근에도 건설할 수 있는 획기적으로 안전하고 규모가 작은 소형 모듈형 원자로(SMR)는 최악의 사고에도 탱크같이 견디는 특성을 갖고 있다.

전력 공급 없이 자연 현상만으로 냉각이 가능한 완전 피동 안전성을 갖추고, 냉각재가 자연 순환될 수 있어 정전이나 단수, 지진, 테러 등으로부터 안전성이 보장되고, 지역 난방까지도 겸용될 수 있는 새로운 노형이라면 도시 인근에도 수용할 수 있다.

WNA의 통계 자료에 의한 SMR의 1kW당 건설비는 미국 mPower 형식이 약 6,000달러이지만, 한국에서 개발 검토 중인 URANUS형 원자로는 2,500달러(NOAK)로 추정되어 SMR도 대형 원자로와 경쟁할 수 있는 경제성이 있는 것으로 보고되고 있다.

3. 고준위 폐기물도 안전하게 처리할 SMR

최근 입수한 정보에 의하면, 국내 자체 기술로 연구 개발이 검토되고 있는 SMR 노형 중에는 외부 전원 상실 시에도 수 일 간 견딜 수 있어 중대사고 방지를 위한 안전성이 획기적으로 향상된 노형을 연구 개발하고 있다고 한다.

이 원자로는 장수명 고준위 폐기물을 단수명 핵종으로 변환(Transmutation)시키는 기능까지 갖출 수 있다고 한다. 이 SMR은 자연 순환 방식으로 가동되며 114MWt(40MWe) 출력을 가진 신형 원자로로서 납-비스무스(Pb-Bi, 녹는 점 섭씨 123.5도)를 액체 냉각재로 사용하는 원자로이다.

이 SMR은 안전성이 극히 높을 뿐 아니라, 연료를 한번 장전하면 20년간 쓰고 교체하므로 사용후핵연료 방출량 및 방사성폐기물량을 최소화할 수 있어 핵비확산성(核非擴散性)이 탁월하다고 보도되고 있다.

이렇게 되면 원자력발전소에서 배출되는 고준위 방사성폐기물의 처리 처분이 매우 어려운 이 때, 사용후 핵연료 및 고준위 폐기물들을 핵종 변환하게 되면 원자력의 모든 숙제를 한꺼번에 해결할 수 있을 것으로 전망된다.

최근 OECD-NEA가 발표한 SMR의 수요 전망에 따르면 2040년에 최대 2,200만kW, 영국국립원자력연구원(NNL)이 발표한 SMR의 수요 전망을 보면 2035년까지 최대 8,500만kW로 각각 전망하였다.

이같이 큰 시장을 두고 있는 SMR은 국가적인 차원에서, 그리고 대기업들의 미래의 이윤을 보장할 비즈니스 대상으로도 매우 매력적인 연구 개발이 아닐 수 없어 이 기회에 소개하는 바이다.

지금까지 우리나라는 선견지명으로써 세계 원자력계의 선두 주자가 되어 왔다. 앞으로 SMR에 대해서도 이와 같은 현명한 선택을 함으로써 세계 원전 일등국으로서의 동력을 지속하여야 할 것이다. 