

국내 원자로설비 국산화 역사와 정책 제언

김 선 진 에너지경제연구원 부연구위원(sunjin@keei.re.kr)

박 석 빈 서울대학교 원자력정책센터 연구원(h107626@snu.ac.kr)



1. 서론

원자로설비라는 원자력기술은 국제적으로 민감한 부분을 내포하고 있어 국가간 기술이전이 제한적인 면이 있다. 따라서 1987년 한빛 3/4호기 건설사업 착수 시점에, 고리 1/2, 3/4호기, 월성1호기, 한빛 1/2호기 등 7기의 원전이 이미 운영 중에 있었고, 한울 1/2호기가 건설 중에 있었음에도 원자로설비 부분은 기술자립을 이룬 상태는 아니었다.

사실상 원자로설비는 개발도상국 기술 수준에서 독자적으로 개발하는 것은 거의 불가능하였다. 그 이유는 상용시설과 동급의 대규모 원전 시험시설을 실제로 건설하여 상당 기간 직접 시험 운전해 보아야 경제성과 안전성 확인이 가능한데 그 비용이 원전 도입을 외국에 의존하는 것보다 훨씬 더 크며 자칫 잘못해서 사고가 날 경우, 대규모 원전사고로 이어지는 위험을 감당할 수 없기 때문이다. 그러기에 세계 수준의 핵무기 제조 능력을 보유한 중국도 최근까지 원자로설비의 설계자료와 그 작성기술을 선진 원자로설비 공급자로부터 직접 이전받을 수밖에 없었다.

다행히도 우리나라는 원자로설비 분야의 가치사슬 확보에 성공하였고, 나아가 전세계로의 원전수출에 앞장서고 있다. 두산에너지는 1997년 해외원전인 중국 진산 III 단계 1, 2호기 증기발생기(SG, Steam Generator) 공급계약을 시작으로 미국 세코야 교체용 SG, 중국 및 미국 AP1000 노형의 원자로 용기(RV, Reactor Vessel) 및 SG를 공급하여 기술과 품질을 세계적으로 인정받았다. 2009년에는 Team Korea가 UAE에 APR1400노형 4기를 수출하는 계약을 체결하였다.

본고에서는 우리나라 원자로 설비 국산화 역사에 대해 되짚어보고, 원전수출의 핵심이 되는 원자로 설비 기술개발과 수출활성화를 위해 우리나라가 나아가야 할 길을 제시하고자 한다. 본고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 원자로 설비의 국산화 역사를 되돌아보고, 3절에서는 원자로설비 국산화 현황을 살펴본다. 나아가 4절에서는 국내 원자로설비 경쟁력을 강화할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 원자로설비 국산화 역사

가. 한빛 3/4호기 사업을 통한 가치사슬 국산화

한빛 3/4호기 사업계획은 정부의 지원으로 계획연도인 1995년까지 95%의 기술자립 목표를 완성한다는 목표를 가지고 추진되었다. 따라서 한빛 3/4호기 건설은 곧 한국 원전건설 기술자립의 역사라고 할 수 있으며, 해당 사업추진을 통해 한국 원전 기술자립의 기틀을 마련한 것으로 볼 수 있다. 기술자립의 구체적인 역할 분담을 살펴보면 한국전력이 종합사업관리를, 한국전력기술이 플랜트 종합설계를, 두산 에너빌리티가 주기기인 원자로설비 및 터빈발전기 제작 공급을, 한국원자력연구원이 원자로계통과 핵연료 설계를 담당했으며, 핵연료 제작은 한전연료(주)가 맡아 분야별로 자립을 추진했다.

한빛 3/4호기의 완공으로 국내 원전기술의 자립률은 95%에 이르렀다. 한빛 3/4호기의 첫 국내 계약주도 방식은 많은 긍정적 효과를 가져왔다. 관련 기술도입계약에는 현재의 보유 기술뿐만 아니라 앞으로 10년간 개발되는 기술까지 받도록 했으며, 연구개발에도 국내의 연구진이 공동으로 참여하도록 했다. 그러나 한빛 3/4호기를 통해서도 기술자립을 하지 못한 원자로설비 분야는 존재하였다. 설계분야에서는 신기술 도입 및 인허가 추가 사항 적용을 위한 설계 변경 기술과 안전해석 분야에서 기술국산화를 달성하지 못하였고, 제작분야에서는 RCP¹⁾, MMIS²⁾, RVI³⁾ 및 CEDM⁴⁾, FHE⁵⁾, P/P&V/V⁶⁾ 분야에서 국산화를 달성하지 못했다.

나. 표준화 사업과 OPR1000 사업을 통한 추가 국산화

원전 기술자립과 함께, 후속 호기에 대한 안전성과 경제성을 향상하기 위해 국내 실정에 맞는 표준형 원전 설계기술을 확보하는 원전 표준화 사업도 추진하였다. 표준형 원전이란 한빛 3/4호기를 참조 모델로 국내 원전 건설 운영 경험과 해외 최신 기술 개발 사례를 반영한 설계요건과 설계기술을 표준화한 원전을 말한다. 한빛 3/4호기를 참조발전소로 하여 건설된 한울 3/4호기가 1998년 8월과 1999년 12월에 각각 상업운전을 개시함으로써 마침내 한국표준원전(KSNP: Korean Standard Nuclear Power Plant)이라는

-
- 1) Reactor Coolant Pump – 원자로 냉각재 펌프
 - 2) Man Machine Interface System – 원자로설비용 계측제어 설비
 - 3) Reactor Vessel Internal – 원자로 내부 구조물
 - 4) Control Element Drive Mechanism – 제어봉 제어 설비
 - 5) Fuel Handling Equipment – 핵연료 취급 기기
 - 6) Pumps and Valves – 원자로 설비용 펌프와 밸브

고유의 원전 브랜드가 그 빛을 보게 되었다.

KSNP는 한울 5/6호기, 한빛 5/6호기 등 총 6기의 반복 설계를 통해 선행 호기의 제반 문제점을 지속적으로 개선하여 반영함으로써 최적의 경제성과 안전성을 갖추었다. KSNP의 효시였던 한울 3/4호기는 북한경수로사업(KEDO원전사업)의 참조발전소로 채택됨으로써 우리나라 원전의 첫 국제무대 진출이라는 기록을 갖게 되었다. 한국 표준형 원전은 개발 당시 KSNP라 명명되었으나, 2005년 원전수출을 위해 범국제 시장용 브랜드가 필요하다는 인식하에 [최적의 경수로]라는 의미를 담은 OPR1000 - Optimized Power Reactor로 명칭이 변경되었다.

이 OPR1000은 종합적인 설계개선을 통해 기술성과 경제성을 한층 향상시키고, 국제 경쟁력을 확보하였으며, 신고리 1/2호기, 신월성 1/2호기에 적용되었는데, 미국 TMI⁷⁾ 사고에 따른 후속 조치요건을 모두 반영하였고, 중대사고 예방 및 사고 완화 개념과 심층방어 개념에 입각한 안전성 관련 설비의 다중성, 다양성, 독립성 및 Fail-Safe 개념 등이 적용되었다. 이때 원자로설비에서 추가로 개선되고 국산화된 내용은 ① 원자로 냉각재의 화학 처리 및 양을 조절하는 기능을 수행하는 CVCS⁸⁾의 개선 - 한빛 3/4호기의 대형 탱크(1,300 MWe 원전(미국의 Palo Verde 원전)과 동일 용량)에서, 1,000 MWe KSNP에 적합한 용량으로의 변경과 동 계통의 기능과 안전상의 중요도를 고려하여 안전 및 품질 등급의 상향, ② PMS⁹⁾와 PAS¹⁰⁾의 PMAS¹¹⁾로의 통합 및 국산화 - PMS의 국산화 실현, ③ CPC¹²⁾의 최신 기기화 실현 - 구형 컴퓨터의 신형으로의 교체 및 추가 이중화를 통한 안전성 향상, ④ IHA¹³⁾ 도입 및 국산화 - 연료 장전 시간 단축 및 작업 피폭선량 저감, ⑤ ENFMS¹⁴⁾ 개선 및 국산화 - 작업자 피폭선량 감축, ⑥ Pool Seal의 영구설비화 및 국산화 - 재장전 시간 단축 및 작업자 피폭선량 감축 등이다.

다. APR1400 사업을 통한 가치사슬 확보 이력

1980년대 말에 접어들면서 원전 선진국들은 미국 TMI 및 소련 Chernobyl 원전 사고의 영향으로 강화된 규제요건을 충족시키고, 안전성과 경제성을 보다 향상하기 위해 각국은 차세대 노형 개발을 추진하였다. 이에 우리나라도 1992년 6월에 열린 정부 종합과학심의회에서 국가 원자력 기술 수준을 선진 7개국 수준으로 진입시킨다는 목표를 설정하고 「차세대 원자로 기술 개발」을 국가선도기술개발사업(G-7 프로젝트)으로 선정하였다. 당시 원전 설계기술 자립이 완전히 이루어지지 않은 상태에서 새로운 노형 개발을 시작하는 것은 시기상조라는 의견도 있었으나, 새로운 노형 개발에 통상 10년이 걸리고, 이를 건설하는 데 10년이

7) Three Mile Island 원전

8) Chemical and Volume Control System - 화학체적제어계통

9) Plant Monitoring System - 발전소감시계통

10) Plant Annunciator System - 발전소경보계통

11) Plant Monitoring and Annunciator System - 발전소감시경보계통

12) Core Protection Calculator System - 노심보호연산기계통

13) Integrated Head Assembly - 일체형상부구조물

14) Ex-core Neutron Flux Monitoring System - 노외중성자속감시계통

추가 소요되므로 중장기 원전산업 발전을 위해서는 차세대 원전인 APR1400 기술 개발이 필요하다는 공감대가 이루어졌다. 이에 따라 1992년 12월 APR1400 개발을 본격적으로 착수하게 된 것이다. APR1400 개발은 10년간 연인원 2,300여 명의 정부, 산업계, 연구계, 학계 등 국내 원전 관계기관의 기술인력이 참여한 대형기술개발 사업으로써 우리나라 원전산업의 변화와 역사를 같이 하였다. 각 기관의 이해관계를 떠나 모두가 협력하여 사업적, 기술적 어려움을 함께 넘었기에 성공적으로 APR1400을 개발하여 2008년 신고리 3/4호기의 노형으로 건설에 착수할 수 있었으며, 신고리 3/4호기의 성공적인 건설은 결국 UAE로의 원전수출까지 가능해지도록 했다.

1992년 당시 우리나라 원전건설 기술자립의 바탕이 되었던 Westinghouse Electric Company(WEC, 당시 Combustion Engineering, CE)와의 기술전수(TT)계약이 1997년 6월에 계약이 만료됨에 따라, 계약만료 이후 기술사용(특허, 저작권, 상표권)에 제한이 발생하게 되었고, 국내 원전산업계를 대표한 한전과 미국의 CE사가 TT계약을 대체할 LA¹⁵⁾를 체결할 시기인 1997년에는 국내 원전산업계에는 크게 두 가지 이슈가 대두되고 있었다. 첫째는 1987년 6월 체결된 양 주체간의 TT계약이 1997년 6월에 만료됨에 따라 만료 이후에도 원전사업 수행을 위해 기존의 도입해 활용하고 있던 원전기술의 지속적인 사용권한을 확보하는 문제였는데, 1995년부터 국가적으로 신형원전인 APR1400을 개발하기로 함에 따라 CE로부터 신형원전설계인 System 80+ 기술에 대한 활용권한(실시권)을 확보해야 할 필요성이 있었기 때문이었다. 둘째는 자유로운 원전수출과 협상을 위해서 우리가 확보한 원전기술을 제약 없이 활용하여 세계원전시장에서 우수한 외국 원전공급사들과 경쟁하길 원하고 있었는데, TT에 따르면 협정이 만료된 후에는 국내는 물론 해외사업에 있어서 확보한 기술을 사실상 사용하기가 불가능하도록 되어 있었으며, 이는 TT계약 당시, 도입기술과 관련한 상표권 및 지적재산권(특허권, 저작권)은 계약 만료후 사용할 수 없도록 명시되어 결국 TT의 연장이나 다시 계약을 체결하지 않고는 원전수출이 매우 어려운 상황이었다는 것을 의미하였다. 이에 TT계약 하에 도입한 기술의 실시권을 공히 사용 가능토록 하여 위에서 언급된 두 가지 현안 문제들을 해결할 수 있도록 정부(산업부)와 관련사(한전, 두산 에너빌리티, 한기, 한전연료, 한원연)는 함께 CE와 LA를 체결하였다.

라. 이후 미자립 핵심 분야에서의 국산화 역사

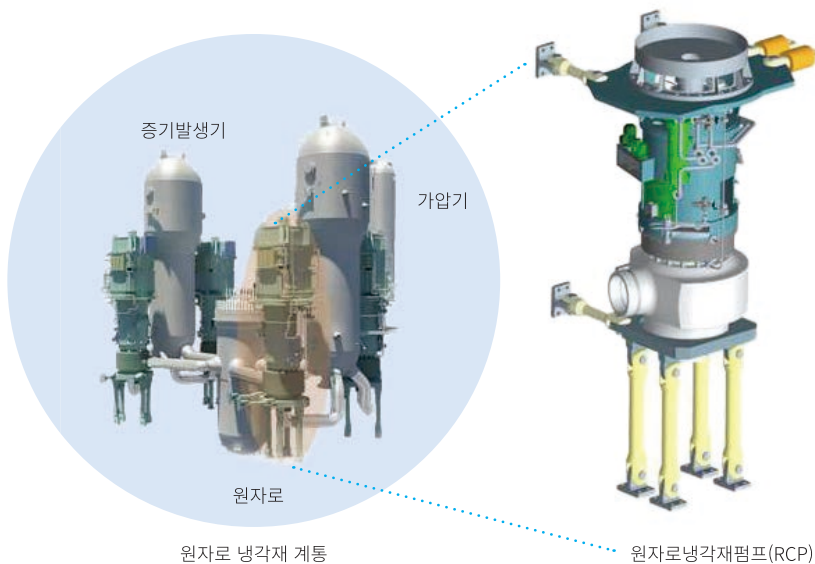
1) RCP / MMIS

국내 기술로 개발한 APR1400이 최초로 적용된 신고리 3/4호기에 이르기까지도 미전수기술인 RCP와 MMIS는 해외 공급사에 의해 독점 공급되고 있어 기술자립의 필요성이 대두되었다. 원자로 냉각재를 순환시키는 원전의 심장으로 일컬어지는 RCP는 약간의 이상만 발생해도 원전 전체를 정지시켜야 하는 핵심 기기다. MMIS는 원전의 두뇌와 신경망으로 원전의 안전 운전을 보장하고 사고 예방에 필수적인 시스템이다. 기술자립의 필요성에도 불구하고 RCP 분야는 이 기술을 가진 나라들의 기술적 장벽으로 기술이전

15) License Agreement - 기술사용협정

논의 자체가 거부되는 상황이었다. MMIS 분야는 원전 기술의 최후 결정판으로 반복, 복제 사용이 가능하고, 지식집약형 고부가가치 기술이다. 따라서 국내의 IT 기반 저력에 대해 우려하고 있는 외국 공급자들은 우리의 기술이전 요청을 차단하였던 것이다.

그림 1 계통내 RCP 설치 위치 및 기기 형상



자료: 두산중공업, APR1400용 원자로냉각재펌프(RCP) 설계, 제작, 적용 및 핵심요소 기술개발 2012. 12. 31.

RCP를 국산화하기 위해서는 설계, 제작단계 이전에 원형 펌프 모델의 성능을 결정짓는 수력 핵심부품의 구조와 형상을 수력학적 상사 법칙에 따라 축소한 모델 펌프를 시험해야 한다. 그리고 원자로 냉각재 계통에서 요구하는 수력학적 특성 및 펌프 성능요건이 만족함을 실증하여야 하며, 펌프 케이싱 및 모터 지지대 등과 같은 대형 압력 기기 및 구조물에 대한 설계, 제작기술도 확보해야 한다. 그리고 마지막으로 원형 RCP에 대한 내구성 시험 및 성능시험을 해 원전에서의 적용 여부를 확인하여야 한다. 이를 위해 두산 에너지는 국책과제로 2007년 8월부터 한국원자력연구원 등 국내 기관들과 APR1400 RCP 개발 및 성능시험 설비 구축을 추진하였다. 2008년 7월 RCP의 축소모델 시험을 성공리에 완료하고 국산화 모델의 성능을 확인하였고, 이로써 두산 에너지는 RCP 국산화 고유모델을 보유하게 되었다. 이렇게 개발된 RCP 모델은 발전회사인 한국수력원자력(주), 계통설계 및 종합설계 회사인 한국전력기술(주) 등 관계기관으로 구성된 평가단으로부터 2007년 6월부터 2008년 12월까지 약 1년 6개월간에 걸쳐 실제 원전에 적용할 수 있는지 운전성, 안전성, 신뢰성 등 모든 부문에서 객관적 평가를 받았으며, 그 결과 모든 요건이 충족됨에 따라 신한울 1/2호기 원전에 이를 적용하게 되었다.

2001년 원전 계측제어 시스템 개발 (KNICS, Korean Nuclear I&C System) 사업에 착수하고 사업 달성목표를 APR1400에 적용할 때까지로 설정하였다. 7년간의 KNICS 개발을 통해, 정부 출연기관 및 우

리기술, 수산 ENG와 같은 국내 기업들과 공동으로 원전용 제어기 및 디지털 원자로 안전계통, 출력제어계통 등을 개발 완료하였다. 이후 2007년에 시작된 통합검증설비 구축 및 통합검증시험을 통해 MMIS의 신뢰성 및 사용자 수용성 확보와 더불어 국산화 디지털 I&C 기술과 제품 전체의 성능에 대한 발전회사인 한국수력원자력(주), 계통설계 및 종합설계 회사인 한국전력기술(주) 등 관계기관으로 구성된 평가단의 2년간 평가 작업을 성공적으로 마무리하여 신한울 1/2호기 원전에 적용할 수 있었다.

이렇게 하여 국내 원전 기술의 자립을 완결하여 원전수출의 기반을 마련하게 됐고 나아가 원전 핵심기기 및 계측제어 기술의 산업 및 관련 응용기술 분야의 산업까지 새로운 일자리를 창출하는 효과를 가져왔다. 국산화된 RCP, MMIS를 통해, 앞으로 국내에 공급되는 모든 신규 원자로설비는 순수 국내 기술로 완성될 수 있게 됐다. 나아가 가동 원전의 원자로설비 업그레이드를 포함한 유지 보수 역시 국내 기술로 수행될 수 있음을 의미하는 것이다. 따라서 자체 기술로 개발된 이 모든 기술은 원전의 안전성과 이용률 향상에 더욱 이바지할 수 있을 것이다.

그림 2 RCP 실물사진



자료: 두산중공업, APR1400용 원자로냉각재펌프(RCP) 설계, 제작, 적용 및 핵심요소 기술개발 2012.12.31.

그림 3 MMIS 개발품 중 Main Control Room Console/ Large Display Panel



자료: 지식경제부, 원전 제어 핵심기술, MMIS 개발성공 -원전 3대 미자립 기술중 원전 계측제어 시스템 국산화 성공 - 2010.9.17.

2) 원전핵심설계코드

원전기술의 척도로 불리는 원전핵심설계코드는 지금까지 전적으로 외국 기술에 의존해왔다. 따라서 원

전수출에 큰 제약요인으로 작용했었다. 설계코드는 원전설계에 사용되는 일종의 소프트웨어로, 안전해석 코드와 노심설계 코드로 구성된다. 안전해석 코드는 원전에서 발생할 수 있는 모든 사고를 예측, 원전의 안전성을 확인하는 소프트웨어다. 노심설계 코드는 한 주기(18개월)의 핵연료 상태를 예측, 핵연료 장전량을 결정하는 소프트웨어로 미국 정부 코드이거나 공급자 코드로, 판매를 목적으로 개발되는 상용 코드와는 달리 개발에 많은 비용과 시간이 소요된다. 이 중 노심설계 코드는 2010년 3월 개발을 완료하였고, 2015년에는 안전해석 코드를 개발 완료 및 인허가를 획득하여, 완전한 국산 소유권을 확보하였다. 설계코드 개발이 완료됨에 따라, 원전수출시 원전도입국에 제공할 독자적인 설계 소프트웨어를 확보하게 돼 원전수출에 크게 기여하게 되었다. 특히 원전설계 소프트웨어 분야의 기술자립 달성으로 미국, 프랑스 등 원전 선진국과 대등한 수준의 기술력을 확보하게 된 것이다. 현재 노심코드는 UAE 사업에 적용하였고, 안전해석코드 및 안전해석 방법론은 신고리3, 4호기 신연료사업부터 가동중 원전에 순차적으로 적용하고 있다.

3) 일체형 주단소재

그림 4 원전 주기기용 일체형 경판



자료: 두산중공업, 두산중공업 원자력사업 소개, 2015. 11

국내의 원자로설비 가치사슬에서 원전 안전성 향상 및 가동중검사 기간 단축을 위해 용접 이음부가 없는 일체형 주단소재 사용이 요구되었다. RV 및 SG 헤드의 일체형은 용접 이음부가 없어져 원전기기의 안전성이 향상되고, 가동중검사 영역이 줄어들어 원전 종사자의 방사선피폭이 감소하게 됨에 따라 해당 일체형 주단소재의 사용이 요건화되었다. 개발 전까지 RV 및 SG 제작에 필요한 일체형 헤드의 경우 JSW(일본)나 CF(프랑스)에서 구매했지만, 안정적인 일체형 주단 소재의 구매가 어려워 독자적인 일체형 단조품 개발이 필요한 실정 이었고, 현재는 두산 에너지빌리티에서 일체형 헤드의 개발 성공으로 원자로설비 가치사슬 유지에 문제가 없다.

3. 원자로설비 국산화 현황

이와 같이 우리나라 정부와 기업들은 여러 가지 난점에도 불구하고 끊임없는 원전분야 국산화를 추구하였으며 일부 분야를 제외한 대부분의 분야에서 국산화를 달성하였다. 다만 일부분야에서는 경제성 부족 등의 이유로 국산화 능력이 있음에도 불구하고 국산화가 완성되지 못한 부분이 존재한다.

가. 설계 분야

우리나라는 APR+ 기술개발을 통해 원자로설비 독자 설계기술을 완전히 확보하였고, 이후 진행되는 EU-APR 및 US-APR1400 기술개발 사업을 통해 완전히 입증하였다.

나. 기자재 분야

기자재 분야는 해당 기자재의 국산화 및 독자 설계기술은 확보하였으나 일부 기자재의 부품의 경우 아직도 해외에서 공급받고 있다. 해외에서 공급받고 있는 기자재 부품들은 다음과 같다.

1) SG Tube

현재 SG Tube를 생산하는 회사는 스웨덴의 Sandvik, 프랑스의 Valinox, 일본의 Sumitomo 그리고 중국의 BaoSteel 4개 회사이다. 이들 중 중국을 제외한 3개 사의 연간 최대 생산량은 3,900km/년 (APR1400 약 15대의 SG Tube 소요량)으로서 현재의 세계 원전시장 여건상 공급부족 사태는 없는 것으로 평가된다. 현재 두산 에너빌리티에서 제작하는 SG에 사용되는 SG Tube는 전량 수입에 의존하고 있다. SG Tube 제작기술은 이미 한전연료(주)에서 기술개발을 완료하였으나 시장의 상황을 고려하여 상용화는 연기한 상황이다. 따라서 세계 원전 시장 여건이 개선된다면 상용화 추진이 가능할 것으로 추정된다.

2) RCP Motor

현재 RCP의 구동장치인 RCP Motor를 생산하는 회사는 독일의 Siemens, 미국의 GE 그리고 일본의 Mitsubishi Electric 3개 사이다. 해당 제품은 원전 건설 시 공급되어 원전과 수명을 같이하는 RCP 부품이다. 두산 에너빌리티에서 국산화 추진을 고려했으나 경제성이 없다고 평가되어 상용화 추진을 포기한 상황이며, 현재 전량 Siemens로부터 구매하고 있다.

그림 5 Siemens-Allis RCP motor



자료: Westinghouse, Reactor Coolant Pump Motor Shop Services, 2014

3) POSRV

가압기의 과압보호에 사용되는 POSRV¹⁶⁾는 기존 스프링식 안전밸브보다 설정치 변동이나 고착 가능성이 적고 기밀성이 우수하여 APR1400에서 가압기 안전밸브로 채택되었으며 대부분의 유럽 원전에서 적용되어 신뢰성을 인정받아 왔다. POSRV는 Sulzer사, SEBIM사, Sempell사 등 3개 업체에서 개발되었으나 Sulzer사는 미국의 CCI사로 SEBIM사는 영국의 Weir Group PLC로, Sempell사는 미국의 Tyco Group으로 인수 합병되었다. 합병 사유로 고려된 내용이 현재 매출 실적은 부족하나 미래 가치가 인정받았기 때문이라고 한다. 이들 업체에서 개발된 POSRV는 주로 유럽 원전에 공급되고 있다. 우리나라에서 POSRV의 국산화 추진 기술개발 기획이 있었으나 경제성 사유로 기술개발이 취소된 이력이 있으며, 최근 한국수력원자력은 POSRV 국산화 사업을 진행하고 있다.¹⁷⁾ 현재 두산 에너빌리티는 전량 Sempell사로부터 수입하여 원자로설비에 공급하고 있다.

4) Neutron Source Assembly

Neutron Source Assembly(NSA)는 한전연료에서 이미 국산화가 되었으나 NSA의 핵심부품 Californium-252 방사선원은 전세계에서 미국과 러시아의 국립연구소에서만 생산할 수 있다. 따라서 대체 설계를 통해 NSA를 대체하는 방법을 고안하지 못하는 한, 이는 의존할 수밖에 없는 품목이다. 다만 원전의 초기 가동 시에만 필요하고 가격이 저렴한 사유로 대체 설계하지 않는 것으로 알려져 있다.

다. 서비스(운영 및 보수) 분야

일상적인 운영 및 보수 분야의 기술은 이미 확보된 상황이다. 다만, 원자로설비의 경험하지 못한 운영 및 보수 문제가 발생 시엔 타국의 경험 인력의 수급을 통해 해결하고 있는 상황에 있다. 이는 기술이 확보되어 있지 않기 때문이 아니라 신속하고 정확하게 해당 문제점을 해결하려는 조치이며, 원전 운영국 모두가 함께 공조하고 있다.

4. 정책 제언

가. 추가 국산화 고려시의 장단점 검토

안전한 원전은 신뢰할 수 있는 원전을 말하며, 이는 유경험의 품질 인증 체제를 갖춘 적기 공급이 가능한 원전 가치사슬을 통해 이루어 질 수 있다. 원전 가치사슬은 최고 수준의 인력¹⁸⁾, 기술, 그리고 약 100만 개 이상의 많은 기기들이 필요한 거대 산업이다. 특히 원전의 안전한 운영을 위해서는, 숙련된 기술자와 엄

16) Pilot operated safety relief valve

17) 한국수력원자력(주), 한국수력원자력, POSRV 국산화 나선다, 2022.7.27.

18) OECD/NEA와 IAEA의 공동연구(Measuring Employment Generated by the Nuclear Power Sector): 1000 MWe 원자력발전소 1기의 건설과 유지 그리고 해체에 이르기까지 약 200,000 인년의 고용효과가 있음. 건설과 준비에 약 12,000인년, 50년 운전 30,000인년, 해체와 방사선 관리 등의 업무에 약 50,000인년이 필요함. 그리고 직접인력 외에 간접인력이 약 100,000인년이 필요하여 전체 약 200,000인년의 고용효과가 발생함.



격한 품질 관리 요건에 부합하도록 신뢰성을 갖춘 원전의 기자재를 지속적으로 공급할 수 있는 인적·물적 공급망을 확보해야 한다. 원전의 설계에는 경험 많은 전문 인력을 체계적으로 유지하고 있는 기술선이 필요하고, 핵심기기인 원자로설비 제작에는 상당히 복잡하고 정교하며 매우 큰 중량의 대규모 단조품을 제작할 수 있는 전문 인력과 설비가 필요하다.

이러한 안전한 원전을 설계, 제작, 공급할 수 있는 공급선은 우리나라를 포함하여 전 세계적으로도 매우 한정적이다. 뿐만 아니라, 원전건설사업의 성공을 담보하기 위해서는 원자로설비 외에도 수많은 기기들의 원활한 적기 조달 및 공정 내 건설이 필수적 요건이다. 신뢰성 있는 원전 공급망을 육성하고, 유지하기 위해서는 상당히 오랜 기간 동안 기술의 축적과 지속적인 설비투자, 수요선 확보 등 관련 산업 육성을 위한 장기적인 계획과 인적, 물적 투자가 수반되어야 한다. 이러한 이유로 현재는 우리나라를 포함하여 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 중국 등 다수의 원전을 건설하고 운영경험이 있는 한정된 국가들만이 원전 가치사슬을 확보하고 있다. 우리나라의 원전 가치사슬 확보 역량은 숙련된 기술자의 부족, 제조기반의 축소, 부품 수명주기의 단축, 신 부품재료의 출현, 정보기술의 발달, 기술기준의 강화 및 시장 경쟁 심화와 같은 역동적인 변화를 지난 수십 년에 걸쳐 경험하면서 현재는 UAE에 수출하고 적기 준공을 하는 등의 성과를 거두었다.

앞서 기술한 바와 같이, 아래에서 언급하는 원전 가치사슬의 특성상 추가 국산화 시의 경제성은 현격하게 떨어질 수밖에 없다.

- 프로젝트 특성상 소량 다품종으로 거의 일회성 공급 성격
- 국가계약법 규정 준수라는 까다로운 계약 규정 의무
- 엄격한 품질 절차 및 사전 검증 필수
- 고품질 요구에 따른 비용 및 제작 기간 증가로 인한 고비용 구조
- 프로젝트마다 특성 상이로 표준화에 애로

원자로설비 가치사슬 추가 확보 시의 장점은 모든 결정을 우리나라 단독으로 결정할 수 있다는 점이고, 단점은 현저하게 경제성이 없다는 점이다. 원자로설비 가치사슬 완전 확보에서 고려해야 할 사항은 원자로설비의 완전 가치사슬 확보로 원전 가치사슬이 100% 확보되느냐 하는 것이며, 우리나라의 원전 핵연료 가치사슬의 완전 자립이 어려운 현실¹⁹⁾을 고려할 때, 경제성 없는 분야에 대한 원자로설비 가치사슬을 완전 확보하기보다 가치사슬 체제의 자체 역량에 의존하는 것이 바람직하다고 고려된다.

경제성이 떨어지는 방식의 정책을 택한 예시와 그 결과는 해외사례에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 중국은 HPR100이라는 독자노형을 확보하는 과정에서, HPR100 뿐만 아니라 CAP1000 두 가지 노형의 기술 가치사슬 유지를 결정했다. 이를 통해 각 노형의 경쟁력 확보에 이종의 노력을 기울일 수밖에 없는 상황에 처하게 되었다. 프랑스는 노형을 추가로 개발할수록 원가가 상승하는 추이를 보여주고 있는데, 이는 중국과 유사하게 경제성을 무시한 완전 원전 가치사슬 확보를 목표로 하는 것 때문인 것으로 추정된다. 1985년부터 일본에서는 고속증식로를 건설하였는데, 이를 건설하기 위해 당시에 없었던 원자로제작설비를 새로 도입할 필요가 제기되었다. 결국 일본 당국은 미츠비시 중공업에 새로이 Super Milling Machine이라는 설비 제작 및 설치비용을 지불하여 고속증식로 원자로설비를 제작케 하였으나, 이후 해당 설비는 가동률이 현저히 낮은 설비로 전락하게 되어 대표적인 과잉투자의 예시가 되었다.

나. 원자로설비 가치사슬의 경쟁력 강화 방안

그렇다면 충분한 성과를 달성한 국산화 사업 대신, 원자로설비 경쟁력을 강화하기 위해 한국 원전업계가 추구해야 할 길은 무엇일까?

한국은 이미 UAE로의 원전수출을 통해 한국 원전의 경쟁력을 보여주었다. 사실 우리나라의 원전은 국내 발전원 중 가장 낮은 발전단가를 보여 왔으며, 앞으로도 최저 수준을 유지할 것으로 전망된다. 2020년 IEA/NEA의 국가별 전원별 평준화 발전비용 보고서²⁰⁾에서도 따르면 우리나라 원전은 러시아를 제외하면 세계에서 가장 높은 경제성을 보여주고 있다. (<표 1>, <표 2> 참조)

표 1 원자력 발전 초기 건설비 (Overnight Cost)

(단위: USD/MWh)

프랑스	일본	한국	러시아	슬로바키아	미국	중국	인도
4,013	3,963	2,157	2,271	6,920	4,250	2,500	2,778

자료: Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition

19) 우리나라는 농축 및 재처리를 하지 않겠다고 선언한 국가

20) Projected Costs of Generating Electricity, IEA/NEA, 2020

표 2 국가별 원자력 발전 균등화 발전비용 추정 결과 (할인율 7% 적용시)

(단위: USD/MWh)

국가	투자비용	해체 및 방폐물 관리비용	연료비용	운전유지비	LCOE
프랑스	47.46	0.05	9.33	14.26	71.10
일본	46.87	0.05	13.92	25.84	86.67
한국	25.51	0.03	9.33	18.44	53.30
러시아	26.86	0.03	4.99	10.15	42.02
슬로바키아	81.84	0.96	9.33	9.72	101.84
미국	50.26	0.05	9.33	11.60	71.25
중국	29.57	0.03	10.00	26.42	66.01
인도	32.85	0.03	9.33	23.84	66.06

자료: Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition

그렇다면 이러한 세계 최고 수준의 경제성을 유지하기 위해 한국 원전산업계가 나아가야 할 길은 무엇일까? MIT 연구진은 보고서 The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World (2018)에서 낮은 원전산업 경제성으로 인해 고민하는 국가들을 위해 몇가지 제안을 하였다.²¹⁾

첫째, 검증된 프로젝트 및 건설 관리 사례를 통해 신규 원전건설의 성공 확률을 높일 수 있다. 최근 미국과 유럽의 원전건설 프로젝트에서는 예정 공사 기간 및 예산 범위 내에서 제품을 조달하는 데 있어 반복적으로 실패한 건설 관리 사례가 발생하였고, 이는 원전건설비용 증가로 이어졌다. 이를 방지하기 위해서는 1) 건설 착수 전, 세부 설계 상당 부분 완료해야 하고 2) 입증된 공급망 및 숙련된 노동력 사용해야 한다. 3) 초기 설계 단계부터 제작사/건설사의 설계 참여로, 제작/건설의 효율화 도모하고 4) 다수의 독립적 협력업체 관리에 자격과 경험을 갖춘 계약 관리자 임명해야 한다. 5) 프로젝트의 성공 시, 각 계약자들이 얻을 수 있는 권리를 보장해 건설성공유인을 높여야 하고 6) 마지막으로 설계 및 건설 중 변경 사항을 적기 수용 가능하도록 유연한 규제 환경 조성해야한다.

둘째, 복잡하고 부지 종속적인 기존의 건설방식에서 표준화된 원전건설로 프로젝트 방식을 전환해야 한다. 이를 통해 신규 원전 자본비용을 감소시키고 건설 일정 역시 단축시킬 수 있다. 이를 달성하기 위해 1) 표준화된 원전의 다수 호기 건설로 건설 경험을 확보해야 하고, 2) 높은 생산성을 갖는 공장 생산방식을 확대해야 한다. 최근 SMR 건설에서 논의되고 있는 공장 제작 권장(모듈화) 제작 및 최신 생산/건설기술 활용이 좋은 예가 될 수 있다.

21) The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, MIT, 2018

마지막으로, 고유 및 피동 안전성을 갖는 원전으로의 전환이 요구된다. 구체적으로 우수한 원전 재료와 외부 개입이 최소화된 고유 및 피동 안전 시스템 계통을 도입할 수 있다. 이를 통해 원전운전을 단순화하여 인적 오류의 위험성을 감소시킬 수 있다. 이러한 설계는 신규 원전의 인허가를 용이하게 만들 수 있다. 원전 운영회사들은 인허가 불확실성을 감소시켜 전체적인 원전건설 프로젝트 리스크를 줄일 수 있다.

MIT 연구진의 제안을 살펴보면 이미 우리나라 원전산업이 달성한 부분도 있지만 부분적으로 원전산업계가 추가 수용할 부분이 존재한다. 예를 들어 프로젝트 성공사례를 축적시키거나 표준화된 발전소 제작을 추구하는 것은 기존 APR-1400 반복건설을 통해 달성했다고 자평할 수 있지만 이를 달성하기 위한 세부적인 제안들을 살펴보면 국내 원전산업계가 수용할 항목 역시 존재한다. 이와 같은 자료 및 분석을 살펴볼 때, 현재 높은 수준의 경쟁력을 보유하고 있는 원자로설비 가치사슬의 지속 유지가 가장 중요한 것으로 고려되며, 그 다음으로 지속적인 기술개발을 통한 최신 기술의 접목 확대가 원자로설비 가치사슬 경쟁력 확보에 핵심으로 고려된다.

참고문헌

국내 문헌

- 두산중공업, 두산중공업 원자력사업 소개, 2015. 11
- _____, APRI400용 원자로냉각재펌프(RCP) 설계, 제작, 적용 및 핵심요소 기술개발, 2012.12.31.
- 지식경제부, 원전 제어 핵심기술, MMIS 개발성공 -원전 3대 미자립 기술중 원전 계측제어 시스템 국산화 성공-, 2010.9.17.

외국 문헌

- IEA, Projected Costs of Generating Electricity, 2020
- MIT Energy Initiative, The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, 2018
- Westinghouse, Reactor Coolant Pump Motor Shop Services, 2014

