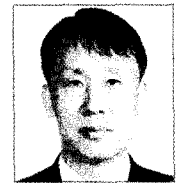




## 한국형 원전개발 현황



강용철

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원 신형로기술팀

부존자원이 부족한 우리나라는 1970년대 2차례 석유파동을 겪으면서 기술 집약적인 에너지원으로 서 원자력발전의 중요성을 인식하고 지속적으로 원전건설 및 기술자립을 추진하여왔다. 1978년 7월 고리 1호기 준공에 따라 세계에서 21번째로 원전 보유국이 되었으며, 이후 30여 년간 끊임없는 원전

기술개발을 추진하여온 결과, 지난해 말 아랍에미리트(UAE)에 APR1400 원전 수출이라는 쾌거를 이룰 수 있었다. 이에 그동안 우리나라 원자력 산업 발전 경과를 살펴보고 앞으로의 기술개발 방향을 조망하고자 한다.

### 원자력 기술의 도입 및 기자재 국산화 시기

우리나라는 1971년 미국 웨스팅하우스사와 건설 공급 계약을 체결하여 우리나라 최초 가압중수로 원전인 고리 1호기를 1978년에 준공함으로써 본격적인 원전 보유국이 되었으며, 1983년 고리 2호기 및 가압중수로 원전인 월성 1호기를 준공하였다. 1970년대부터 1980년대 초반에 건설된 이들 3개의 원전은 국내 건설경험 부족과 산업기반 취약 등으로 외국 계약자에 전적으로 의존하는 계약자일괄도급(Turn-key) 계약방식의 사업이었다.

이후 고리 1,2호기와 월성 1호기 건설사업 및 운영경험을 기반으로 1970년대 후반에 착수한 고리 3,4호기 건설사업부터는 한전(현 한수원)이 사업을 주도하고, 외국 계약자에게 분할 발주하는(Non Turn-key) 계약방식을 채택하여 국내 기기 제작 능력 확보 및 기자재 국산화를 도모하였다.

당시 원자력 설비 제작기술이 전무했던 한국중공업(현 두산중공업)은 원전 기자재 국산화 기술습득을 목적으로 원전 선진업체의 하청형태로 기기를 공급하기 시작했다. 영광 1,2호기 사업에서는 가압기, 증기발생기, 압력용기 및 열교환기 제작에, 울진 1,2호기 사업에서는 원자로 제작에 참여함으로써

주기기의 완제품 조립·제작기술을 축적할 수 있었다. 이러한 과정을 통하여 원전 플랜트 종합설계분야 및 기자재 국산화율은 각각 46%와 40%를 달성하였고, 시공 기술은 100% 국산화를 달성할 수 있었다.

### 원전기술 자립화 시기

1984년 10월 한전(현 한수원)은 원전설계 및 기자재 국산화와 표준형원전을 반복 건설함으로써 원자력발전의 경제성을 제고하기 위한 실천계획을 수립하였다. 이 계획에서는 원전 설계, 기기 제작, 구매, 설치 및 시공, 시운전, 운영 및 폐로까지의 원전 건설과 운영 전반에 소요되는 기술을 자립 범위로 하고, 1995년까지 영광 3,4호기와 동일한 기종의 원전을 독자설계, 제작, 건설할 수 있는 기술 능력 95% 수준 달성을 목표로 설정하였다.

이러한 목표 달성을 위해 각종 사업관리절차서 및 관리기법을 개발하고 이를 활용하여 사업관리, 공사관리, 설계관리, 시공기술관리, 시운전관리 등 사업 제반 업무를 직접 수행하여 종합사업관리분야의 기술을 축적하였다.

[ 표 1 ] 호기별 플랜트 종합설계 및 기자재 국산화율

| 분 야         |         | 고리 3,4호기 | 영광 1,2호기 | 울진 1,2호기 |
|-------------|---------|----------|----------|----------|
| 플랜트종합설계     |         | 37%      | 44%      | 46%      |
| 기<br>자<br>재 | 보 조 기 기 | 33.2%    | 42.1%    | -        |
|             | 원자로공급설비 | 9.8%     | 18.9%    | -        |
|             | 터빈발전기   | 10.5%    | 30.0%    | 40%      |
|             | 총 합     | 29%      | 35%      | 40%      |

- 플랜트종합설계(주어진 공정, 자원을 가지고 품질기준에 적합한 원전건설을 위한 설계를 수행하는 기술) : 국내 참여 인력 M/H 기준으로 산출

- 기자재 제작 : 호기별 계약금액 기준의 실적위주로 산출

[ 표 2 ] 분야별 기술자립 목표

| 분 야    |         | 가중치 | 목 표 ( ' 95년도) |
|--------|---------|-----|---------------|
| 종합사업관리 |         | 15  | 98%           |
| 설계     | 플랜트종합설계 | 21  | 95%           |
|        | 원자로계통설계 | 7   | 95%           |
|        | 원전연료설계  | 2   | 100%          |
|        | 소계      | 30  | 95%           |
| 기자재제작  | NSSS    | 24  | 87%           |
|        | T/G     | 11  | 98%           |
|        | 소계      | 35  | 90%           |
| 원전연료제조 |         | 3   | 100%          |
| 시 공    |         | 17  | 100%          |
| 총 합    |         | 100 | 95%           |

주) 가중치 산정 : 영광 3,4호기 계약금액 기준 (단, 종합사업관리분야는 "2000년대를 향한 장기 인력개발계획" 자료 근거)

플랜트종합설계분야에서는 주어진 공기내에 최적의 예산으로 요구된 품질의 발전소를 독자 설계할 수 있는 능력을 확보하기 위하여 전산코드 운용 기술 및 기술자료 확보를 진행하였으며, 핵설계, 유체계통설계, 기계설계, 제어계통설계 및 안전해석 업무를 통하여 설계기준의 설정, 기자재 및 계통규격서 작성, 안전성분석보고서 작성 등을 통해 원자로계통에 대한 설계 능력을 습득하였다.

또한 이러한 계통설계 결과에 따라 응력해석보고서, 제품/재료시방서, 도면을 생산하고, 이에 따라 필요 자재를 구매하고 생산설비를 가동하여 증기발생기, 원자로용기, 가압기 등의 주요기기를 제작, 시험, 검사할 수 있는 수준의 주기기(NSSS, T/G) 제작 기술을 확보하였다.

원전연료 설계 및 제조 분야는 기존의 기술로 영광 3,4호기 연료를 제조하여 공급함으로써, 동일 원전에 발전소 연료를 공급할 수 있는 기술자립 목표를 달성하였고, 시공분야에서도 관련 도면, 자재 및 시방서와 자체 인력을 운영하여 기술 요건에 맞

게 시공할 수 있는 능력을 확보하였다.

이러한 과정을 거쳐 기술자립도 95%의 수준으로 1995년 3월 영광 3호기 상업 운전을 달성할 수 있었으며, 설계분야 연계사항 조정, 인허가 요건 변동에 따른 설계변경, 원자로냉각재 펌프, 계측제어장비, 터빈발전기 제어계통 제작 등 기술 자립이 일부 미흡한 분야에 대해서는 올진 3,4,5,6호기 한국표준형원전(OPR1000) 건설사업을 통하여 지속적인 기술 확보를 추진하였다.

### 원전기술 고도화(APR1400 개발) 시기

1980년대 말부터 원자력 선진국들은 미국 TMI 및 소련 Chernobyl 원전 사고의 영향으로 강화된 인허가 요건을 충족시키고, 경제성을 향상시키는 차세대원자로 개발을 추진하기 시작했다. 미국은 ALWR(Advanced Light Water Reactor) Program을 국가 주도로 추진하여 Sys 80+, ABWR, AP600 등의 노형을 개발하였으며, 유럽도

[ 표 3 ] OPR1000 및 APR1400 주요 설계 특성

| 항 목                         | OPR1000<br>(한국표준형원전) | APR1400<br>(신형경수로)    |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 설비용량                        | 100만kW급              | 140만kW급               |
| 설계수명                        | 40년                  | 60년                   |
| 가동률                         | 87%                  | 90%                   |
| 설계기준                        | 설계기준사고               | 설계기준사고 + 중대사고         |
| 안전계통<br>신뢰도                 | 기계적(2계열) + 전기적(2계열)  | 기계적(4계열) + 전기적(2계열)   |
| 노심손상빈도<br>(100%출력, 내부사건 기준) | 10만년에<br>1회 미만       | 100만년에<br>1회 미만       |
| 주제어실                        | 인간공학개념 미적용           | 인간공학개념 적용             |
| 내진설계                        | 0.2g<br>(암반부지)       | 0.3g<br>(암반 및 비암반 부지) |

프랑스의 주도하에 유럽의 안전규제 제도와 산업 환경에 적합한 차세대가압경수로인 EPR 등을 개발했다.

우리나라는 1992년 6월에 열린 정부 종합과학심의회에서 국가 원자력 기술수준을 선진 7개국 수준으로 진입시킨다는 목표를 설정하고, 「차세대원자로(APR1400)기술개발」을 국가선도기술개발사업(G-7 Project)으로 선정했으며, 그해 12월부터 APR1400 기술개발 사업에 본격 착수했다.

APR1400 기술개발 사업은 국내 전 유관기관이 참여하는 대형 프로젝트로서 1992년부터 2001년까지 10년간 개발을 추진하였다. 1단계('92.12~'94.12) 사업에서는 개발 대상 노형으로 140만kW급 개량형 경수로로 선정하고, 해외 신형원전과의 차별성을 확보하면서 실질적인 한국형 고유모델 개발을 위해 필요한 설계기본요건 및 주요계통에 대한 개념설계를 완료하였다. 2단계('95.1~'99.2) 사업에서는 설계기본요건을 만족하도록 발전소 배치 및 기본 설계를 완료하고, 주요 기기에 대한 설계규

격(Design Specification) 작성과 더불어 설계 인허가 심사를 위한 표준안전성분석보고서(SSAR : Standard Safety Analysis Report)를 발행하여 규제기관의 사전 안전성검토가 진행될 수 있도록 하였다. 1999년 3월부터 2001년 12월까지 수행한 3단계 사업에서는 APR1400 원전의 경제성 및 시공성 향상을 위해 설계최적화 업무와 함께 원전 주기 사양서 작성 및 표준설계 인허가 심사업무를 중점적으로 수행하였다. APR1400 표준설계 인허가 심사과정에서 신기술 적용, 중대사고 대처능력, 안전성 기술기준 등에 대한 철저한 안전성 심사를 통하여 2002년 5월 7일 표준설계인가(DC : Design Certification)를 획득했다.

APR1400은 비상사고시나 이상상태 발생시에도 원자로가 건전성을 유지할 수 있도록 노심의 열적 여유도 증대와 더불어 가압기 및 증기발생기의 용량증대와 격납건물내 핵연료재장전수조 설치 등을 통해 충분한 설계여유, 즉 안전여유를 확보할 수 있도록 설계했다.

사고방지 측면뿐만 아니라 사고 발생시에도 사고 완화 및 사고관리를 개선시키기 위해 방출되는 방사선의 양을 최소화 할 수 있는 근본적인 설계 개념을 채택하였으며, 주제어실은 한국인의 체형과 습성 등 인간공학 요소를 충분히 반영하여 설계하였다.

이밖에도 APR1400은 설계수명을 60년으로 확장하여 안전성과 경제성을 제고하였으며, 암반부지에 원자로를 설치하는 것을 조건으로 적용한 0.2g의 기존 원전 내진설계 기준을 강화하여 비 암반부지에도 설치할 수 있도록 0.3g 기준으로 설계함으로써 원전 부지 선정에 대한 유연성을 확보하였다.

### 원전기술 선진화(APR+ 기술개발) 시기

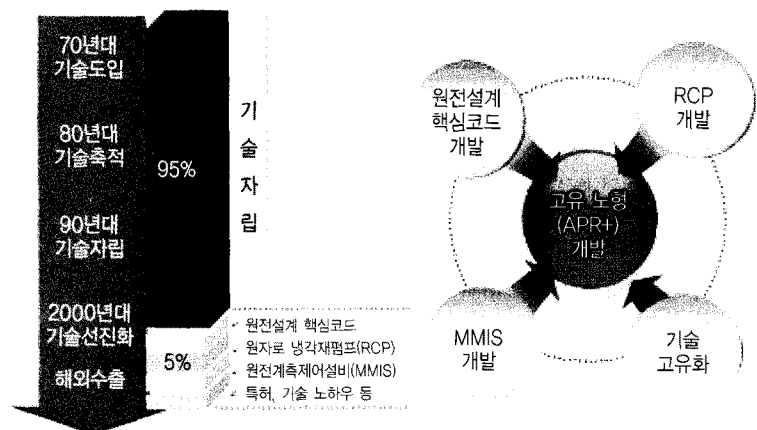
2000년대 들어서면서 개도국의 전력 수요가 지속적으로 증가하고 전력시장 개방화 추세에 따라 세계 전력시장이 국가, 지역별 독점체제에서 경쟁체제로 전환되었다. 이에 원전 선진국들은 제2의 원자력 르네상스를 대비하기 위해 신기술 개발, 경제성 제고 등을 통해 세계시장을 선점하기 위한 노력을 경주하고 있다. 웨스팅하우스는 기존의 AP600을 용량 격상한 AP1000을 개발하여 중국에 진출하였으며, GE는 ABWR과 SBWR의 장점을 복합시킨 ESBWR을 개발하여 표준설계 인가를 추진중에 있다. 일본의 미쓰비시는 기존의 APWR의 용량을 격상시킨 US-APWR을 개발하여 미국시장에 진출하기 위해 노력하고 있으며, 프랑스는 EPR에 대한 지속적인 설계 개선 및 용량 격상으로 핀란드와 프랑스에 건설 및 미국시장 진출을 추진중에 있다.

정부는 국가 에너지·자원기술개발 기본계획에 따라 국내 원자력산업의 지속 성장과 환경변화를 고려한 원전기술발전방안(Nu-Tech 2015)을 2006년 6월에 수립하여 해외 신형 원전 기술 대비 경쟁력을 갖춘 한국 고유의 수출 주도 노형인 APR+ 기술개발을 추진하여 왔다. 그 과정 중 2008년 제1차 국가에너지 기본계획에 기초하여 원전 수출을 국가 신성장 동력원으로 육성하는 방안이 수립됨에 따라, 2012년 사업목표 조기 달성을 목표로 원전기술발전방안을 수정·보완하여 Nu-Tech 2012를 수립했다.

APR+ 기술개발은 그동안 축적된 기술을 바탕으로 원전 선진국과 대등하게 경쟁할 수 있는 안전성과 경제성이 대폭 향상된 APR1400 후속 원전을 독자 개발하고, 해외 원전 수출에 제약 요소를 완전히 제거한 고유노형개발을 목표로 하고 있다.

APR+ 기술개발은 APR1400 설계를 근간으로 핵연료집합체 16개를 추가 장전함으로써 경제성이 향상된 전기출력 150만kWe급 노형을 개발하고, 피동안전 개념을 채택하여 안전성 향상을 도모할 뿐

[ 그림 1 ] APR+ 기술개발 추진 기본방향



만 아니라 미자립 설계기술(방법론, 도면, 기술서류 등)의 고유화를 추진하고 있다. 또한 APR+, APR 1400, OPR1000 등에 설계변경 없이 적용 가능한 공통핵심기술(안전계통의 단순화, 중대사고 대처설비 강화, 원전 기기/구조물 복합모듈화, 일일 자동 부하추종 운전 등)을 개발하고 현재 추진중인 Nu-Tech 2012 핵심사업(원전설계핵심코드개발, RCP 및 MMIS 개발 등) 결과를 APR+ 설계에 반영할 예정으로 있다. APR+ 기술개발은 2012년까지 구매 가능한 수준의 설계개발을 완료하고, 국내 표준설계 인가(DC)를 획득함으로써 2013년 이후 해외 수출 주력 노형을 개발할 예정이다.

### 향후 전망

우리나라는 1978년 고리 1호기 준공 이후, 1995년 영광 3·4호기 준공을 통하여 한국표준형원전의 기술자립을 도모했으며, APR1400 기술개발 과정을 통해 국내 원전 운영경험 및 해외 최신기술을 지속적으로 반영하여 안전성, 경제성 및 운전 편의

성을 향상시켜왔다. 그 결과 2009년 12월 27일 프랑스, 일본 등 우리나라보다 원전 수출경력이 많은 국가들을 제치고 아랍에미리트(UAE)에 APR1400 원전 수출 계약 체결이라는 쾌거를 이룩함으로써 원전 수출국 반열에 당당히 올라서게 되었다.

우리나라의 지속적인 원전 건설 및 운전 경험, 상대적으로 유리할 것으로 예상되는 가격 경쟁력 등을 감안할 때, APR1400에 비하여 안전성과 경제성이 보다 향상된 새로운 노형인 APR+ 설계개발이 완성될 경우 OPR1000, APR1400 뿐만 아니라 150만kWe급 노형을 추가로 확보함으로써 해외 원전 시장의 다변화를 도모함은 물론 원전 수출의 모든 걸림돌을 일거에 제거할 수 있을 것이다.

아울러 APR+ 기술개발을 통해 축적된 전기출력 증대, 주요 핵심 원전기기 설계 변경 및 고유화 기술은 향후 제4세대 원전 기술 개발을 우리나라가 주도적으로 추진할 수 있는 귀중한 밑거름이 될 것이며, 이를 통하여 21세기에는 명실 공히 세계 일류의 원전 기술 보유 강국으로 발돋움할 수 있을 것으로 기대한다. KEA

