



세계의 건설원전 현황 및 분석



최종호

한국전력기술(주) 수석연구원

- 부산대학교 기계공학과
- 한국과학기술원 원자력공학 석사
- 한국원자력연구원 책임연구원
- 국제원자력기구(IAEA) 원자로 연구개발 책임자
- 한국전력기술 수석연구원

1. 서론

원자력발전소(원전)는 타 발전원에 비하여 상대적으로 건설기간이 길고 초기 비용이 많이 요구되는 특성을 가지고 있다. 현재 전 세계 상용 원전의 건설 현황 및 동향을 파악하고 미래의 변화/수요를 예측하여 해외 수출을 준비하는데 참고하고자 한다.

건설원전이라 함은 육상에 첫 원자로건물 기초 콘크리트 타설 이후부터 그리드 연결 이전까지의 상태에 있는 원전으로 정의한다. 현재 전 세계 19개국에서 총 51기의 원전을 건설중에 있다[1,2,3]. <표 1>에서 건설원전의 현황을 요약해서 보여주는데 최근 10여년간 매년 3~5호기의 신규원전 건설에 착수한 것으로 파악된다. 8개국(중국, 인도, 한국, 러시아, 일본, 미국, 프랑스, 아르헨티나)은 자체개발 원전 30기를, 기타 13개국은 수입 원전 21기를 건설하고 있다

(중국과 인도는 자체개발과 수입 원전을 병행하여 건설하고 있음).

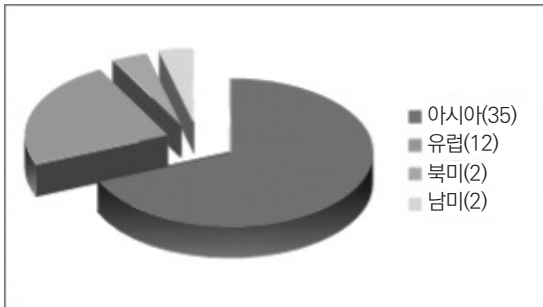
브라질을 제외한 수출원전 20기의 노형은 러시아의 VVER 14기, 한국의 APR1400 2기, 프랑스의 EPR 3기 그리고 중국의 ACP-1000 1기이다. 현재 원전을 수출해서 건설중인 국가는 전 세계에서 4개국에 불과하며 중요한 것은 우리나라가 그 중에 포함된다는 사실이다.

원전을 건설하고 있는 19개국 가운데 원전을 처음으로 도입한 국가는 터키와 방글라데쉬이다. 이들 국가에 건설되는 총 5기의 노형은 러시아에서 도입한 VVER-1200 이다.

건설원전의 노형을 보면 가압경수로(PWR)가 43기로 84%를 차지하며 나머지는 가압중수로(PHWR) 3기, 비등경수로(BWR) 2기, 고속증식로(FBR) 2기 그리고 고온가스로(HTGR) 1기이다.

[그림 1]에 표시한 바와 같이 건설원전의 대륙별 분포를 보면 아시아 35기, 유럽 12기, 북미 2

기, 남미 2기이다. 원전건설 1, 2위의 중국과 인도 그리고 최초 원전도입국인 터키와 방글라데쉬가 포함된 아시아가 전체 건설원전의 69%를 차지하고 있으며 유럽은 동유럽이 차지하는 비중이 상대적으로 높다.



[그림 1] 건설원전의 대륙별 분포

2. 주요 국가별 현황

2.1 중국

중국은 전 세계에서 원전건설에 가장 적극적인 국가로 다양한 종류의 원전을 도입하였으며 현재 14기의 원전을 건설중에 있다. 가압경수로가 12기이고 나머지는 고속증식로 1기와 고온가스로 1기이다.

현재 중국이 자체개발하여 건설중인 가압경수로로는 Framatome 3루프 설계를 기본으로 개발한 1000 MWe급 3루프 설계이며 개발이력은 아래와 같다:

- CNNC(China National Nuclear Corporation): 중국 표준 3루프 PWR CNP-1000를 개발/건설한 이후 ACP-1000으로 개량함

- CGN(China General Nuclear Power Group): CPR-1000 개발/건설한 이후 ACP-1000으로 개량함
- CNNC의 ACP-1000과 CGN의 ACP-1000을 통합/개량하여 HPR1000이 됨. 중국은 2015년 이후부터 자국에서 HPR1000 노형만 건설하고 있음

프랑스 EDF와 중국 CGN의 자회사 GNS(General Nuclear Services)가 영국에서 UK HPR1000 설계에 대한 일반설계평가(GDA) 심사를 진행중에 있다. CGN이 EDF의 영국 Hinkley Point C 프로젝트 지분 33.5% 취득과 Bradwell 부지에 HPR1000 건설을 추진하기로 하였으나 최근 영국정부가 중국기업을 배제하는 방안을 고려하고 있어 향후 전망은 불투명한 상황이다.

최근에 착공한 Xudabu 3호기는 러시아에서 도입한 VVER-1200 원자로이며 파키스탄의 Kanupp 3호기는 ACP-1000 노형으로 현재 중국이 수출하여 건설중인 유일한 원전이다.

HTR-PM은 세계 최초의 Pebble-bed 고온가스로 실증로이며 나선형 일방관류증기발생기(Spiral coil once-through steam generator) 설계이다. 2021년 9월에 첫 임계에 도달하였으며 현재 가동전 시운전시험을 진행하고 있다.

CFR-600은 소듐냉각 고속로이며 Xiapu 1호기는 파일럿 프로젝트로서 노심은 UO2 또는 혼합연료(MOX) 모두 가능한 설계를 채택하고 있다.

현재 중국은 원전 운영 수 및 발전용량에서 미

〈표 1〉 세계의 건설원전 현황 (IAEA, PRIS, 2021.10.01 현재)

국가	건설원전 수	원자로형	발전소	Net 용량 (MWe)	건설 시작일	비고
중국	14	HPR1000	Changjiang-3	1000	2021.03.31	PWR
			Fangchengang-3	1000	2015.12.24	
			Fangchengang-4	1000	2016.12.23	
			Fuqing-6	1000	2015.12.22	
			Sanaocun-1	1000	2020.12.31	
			Taipingling-1	1000	2019.12.26	
			Taipingling-2	1000	2020.10.15	
			Zhangzhou-1	1126	2019.10.16	
		Zhangzhou-2	1126	2020.09.04		
		ACPR-1000	Hongyanhe-5	1061	2015.03.29	PWR
		Hongyanhe-6	1061	2015.07.24		
		VVER-1200	Xudabu-3	1200	2021.07.28	PWR
		HTR-PM	Shidaobay-1	200	2012.12.09	HTGR
CFR600	Xiapu-1	642	2017.12.29	FBR		
인도	6	PHWR-700	Kakrapar-4	630	2010.11.22	PHWR
			Rajasthan-7	630	2011.07.18	
			Rajasthan-8	630	2011.09.30	
		VVER-1000	Kudankulam-3	917	2017.06.29	PWR
			Kudankulam-4	917	2017.10.23	
		PFBR	PFBR	470	2004.10.23	FBR
대한민국	4	APR1400	Shin-Hanul-1	1340	2012.07.10	PWR
			Shin-Hanul-2	1340	2013.06.19	
			Shin-Kori-5	1340	2017.04.01	
			Shin-Kori-6	1340	2018.09.20	
터키	3	VVER-1200	Akkuyu-1	1114	2018.04.03	PWR
			Akkuyu-2	1114	2020.04.08	
			Akkuyu-3	1114	2021.03.10	
러시아	3	VVER-1200	Baltic-1	1109	2012.02.22	1993 중단
		VVER-TOI	Kursk II-1	1175	2018.04.29	PWR
			Kursk II-2	1175	2019.04.15	
UAE	2	APR1400	Barakah-3	1345	2014.09.24	PWR
			Barakah-4	1345	2015.07.30	
일본	2	ABWR	Ohma	1328	2010.05.07	BWR
			Shimane-3	1325	2006.10.24	
영국	2	EPR-1750	Hinkley Point C-1	1630	2018.12.11	PWR
			Hinkley Point C-2	1630	2019.12.12	
방글라데쉬	2	VVER-1200	Rooppur-1	1080	2017.11.30	PWR
			Rooppur-2	1080	2018.07.14	
우크라이나	2	VVER-1100	Khmelnitski-3	1035	1986.03.01	1990 중단
			Khmelnitski-4	1035	1987.02.01	1990 중단
미국	2	AP-1000	Vogtle-3	1117	2013.03.12	PWR
			Vogtle-4	1117	2013.11.19	
슬로바키아	2	VVER-440	Mochovce-3	440	1987.01.27	PWR
			Mochovce-4	440	1987.01.27	
이란	1	VVER-1000	Bushehr-2	974	2019.09.27	PWR
파키스탄	1	ACP-1000	Kanupp-3	1014	2016.05.31	PWR
프랑스	1	EPR	Flamanville-3	1630	2007.12.03	PWR
핀란드	1	EPR	Olkiluoto-3	1600	2005.08.12	PWR
브라질	1	Pre Konvoi	Angra-3	1340	2010.06.01	2016 중단
벨라루스	1	VVER-1200	Ostrovets-2	1110	2014.04.27	PWR
아르헨티나	1	CAREM P	CAREM25	25	2014.02.08	IPWR
합계	51					



국과 프랑스에 이어 세계 3위 수준이나 조만간 프랑스를 제치고 세계 2위로 올라설 것으로 예측된다.

2.2 인도

인도는 자체개발한 가압중수로를 주력 원자로 형태로 하고 가압경수로와 비등경수로를 보조 노형으로 채택하고 있으며 고속증식로도 추진하고 있다. 현재 3가지 노형의 원전 6기를 건설중에 있는데 가압중수로 3기, 가압경수로 2기 및 고속증식로 1기이다.

PHWR-700은 자체개발한 220 MWe 및 540 MWe 원전의 후속노형으로서 700 MWe (630 MWe Net) 가압중수로이며 Kudankulam 3,4호기는 러시아에서 도입한 VVER-1000 원자로이다.

Kalpakkam에 건설중인 PFBR(Prototype FBR)은 IGCAR(Indira Gandhi Center for Atomic Research)가 설계한 500 MWe급 소듐냉각 고속로이다. 2004년 10월에 건설에 착수하였으며 원래 2010년에 운전개시 계획이었지만 완공이 계속 지연되고 있다. 토륨 연료주기 완성을 위한 인도의 PHWR-FBR-AHWR(Advanced HWR) 3단계 국가 원자력프로그램의 일환으로 진행되고 있다.

2.3 대한민국

우리나라는 현재 APR1400 노형을 국내에 4기(신한울 1,2호기 및 신고리 5,6호기) 그리고

UAE에 2기를 수출하여 건설중이다. 신한울 1호기는 2021년 7월에 운영허가를 취득하여 시운전시험을 진행중이며 2022년에 상업운전을 시작할 예정이다. UAE에 수출한 Barakah 1호기는 2020년 8월에 그리고 Barakah 2호기는 2021년 9월에 그리드에 연결되었으며 Barakah 3,4호기도 순조롭게 건설되고 있다.

APR1400은 2019년에 USNRC 설계인증을 받았다. 설계인증을 받은 7개 원자로(ABWR, System 80+, AP-600, AP-1000, ESBWR, APR1400, NuScale) 가운데 APR1400은 유일하게 미국 외부에서 개발된 원자로이다. Areva의 US-EPR과 미쯔비시의 US-APWR은 2007년에 USNRC 설계인증을 신청하였으나 현재 심사가 중단된 상태이다.

2.4 러시아

러시아는 자국에 건설중인 원전은 3기이나 가장 많은 원전을 수출하여 현재 8개국에 14기의 VVER 원자로를 국외에서 건설중이다. VVER 원자로는 별집모양의 노심구조 및 수평증기발생기의 설계특성을 가지고 있다.

우크라이나에 수출한 Khemelnitski 3,4호기는 1990년 75% 및 28% 공정에서 중단된 상태이다. 2015년도부터 러시아의 재정지원과 함께 건설재개 예정이었으나 2014년 3월 러시아의 우크라이나 자치공화국 크림반도 합병으로 인해 우크라이나는 서방국가와 협력하여 건설을 종결하는 것으로 방향을 바꾸었다. 이후 우

크라이나 정부의 Khemelnitski 3,4호기 건설 재개를 위한 여러 가지 시도에도 불구하고 성공하지 못하였으나 2021년 8월 Energoatom과 Westinghouse간의 MOU 체결로 AP-1000 노형으로의 대체 계획을 추진하고 있다.

슬로바키아에 수출한 Mochovce 3,4호기는 VVER-440 원자로로 1993년에 건설이 중단되었다가 2009년도에 건설이 재개되었다. 러시아 자국내 Baltic 1호기는 2013년부터 건설이 중단된 상태이다.

2.5 미국

미국은 TMI 사고 이후로 신규원전 건설이 없었으나 가동원전의 이용률 향상, 출력 증강 및 수명연장으로 원전에 의한 총 발전량은 오히려 증가하였다. 2013년 웨스팅하우스 AP-1000 노형으로 Summer 2,3호기 및 Vogtle 3,4호기 건설에 착수하였다. 하지만 Summer 2,3호기는 공기 지연 및 건설비용 급증으로 2017년 미완성 상태에서 프로젝트가 종결처리 되었고 Vogtle 3,4호기는 건설이 지연되고 있다.

GEH(GE-Hitachi)사의 ESBWR은 2014년 USNRC로부터 설계인증을 받았으나 단 한건의 실제 건설프로젝트도 수주하지 못한 상태이다.

최근에 USNRC로부터 설계인증을 받은 NuScale사의 소형모듈원자로(SMR) NuScale이 주목을 받고 있다. NuScale은 자연순환냉각의 일체형원자로이며 1999년 시행된 미국 정부 NERI(Nuclear Energy Research Initiative)

프로그램의 MASLWR(Multi-Application Small Light Water Reactor) 프로젝트 결과물에서 출발하였으며 2013년부터 미국 정부 SMR 인허가기술지원 프로그램의 수혜를 받아 설계 인증까지 성공하였다.

2.6 일본

3개의 원자로공급사 (도시바, 미쯔비시, 히타치)를 가진 일본은 원자로 개발에 막대한 투자 및 자국내 다수의 원전 건설에도 불구하고 해외 수출에는 성공하지 못하였다. 2011년 후쿠시마 사고 이후 기존 원전은 영구폐쇄, 재가동 완료 및 재가동 준비상태로 분류된다. 2기의 ABWR을 자국내 건설중이며 Ohma 원전은 플루토늄-우라늄 혼합연료 100%로 운전가능한 노심을 추구하고 있다.

2.7 프랑스

프랑스의 Areva/EDF사는 EPR 원자로 4기를 국내외에서 건설중에 있다. 핀란드의 Olkiluoto 3호기 및 자국의 Flamenville 3호기는 2005년과 2007년에 각각 건설에 착수하였으나 아직도 완공하지 못한 상태이며 영국의 Hinkley Point C 1,2호기 프로젝트를 비교적 최근에 수주하였다.

Areva/EDF사는 Olkiluoto 3호기 및 Flamenville 3호기의 건설지연으로 인해 막대한 재정적 타격을 입었으며 생존을 위해 여러번의 구조조정 과정을 겪었다.



프랑스는 현재 원전 운영 수 및 발전량에서 미국에 이어 세계 2위이나 Flamenville 3호기가 완공되기까지는 추가적인 국내 원전건설을 보류하고 있다.

2.8 영국

현재 운영중인 노후화된 가스냉각로의 대체가 필요한 영국은 서방국가 중에서 원전건설에 가장 의욕적으로 보인다. 2009년 2월 British Energy사를 프랑스의 EDF사가 인수한 이후로 영국의 모든 원전을 EDF사가 운영하고 있으며 영국내 신규원전 건설도 EDF사가 주도적으로 진행하고 있다. Hinkley Point C 1,2호기를 EPR 설계로 확정하고 2018년과 2019년에 건설을 시작하였다.

2.9 캐나다

캐나다는 가압중수로를 개발하여 자국에 19기의 가압중수로만 운영하고 있으며 한국, 아르헨티나, 루마니아, 중국에 수출도 하였다. 1993년 Darlington 4호기 완공 이후 캐나다 국내의 추가건설이 없으며 해외수출도 2003년 중국의 Qinshan 3-2호기 완공 이후 실적이 없는 상태이다.

2.10 아르헨티나

아르헨티나는 3기의 가압중수로를 운영중이고 자체개발한 CAREM25 원전을 건설중이다. CAREM25는 Prototype 소형원자로이며 자연

순환냉각의 일체형원자로 설계로 2014년 착공 이후 여러번의 공사 중단/재개를 반복하여 완공 일정이 계속 지연되고 있다. CAREM25는 건설 중인 최초의 일체형원자로 설계의 SMR 프로젝트이나 공사지연과 미국의 NuScale 원자로에 가려져 큰 주목을 받지 못하고 있다.

3. 분석 및 결론

현재 주력 노형인 경수로를 공급할 수 있는 국가는 6개국(미국, 프랑스, 일본, 한국, 러시아, 중국)이나 미국, 프랑스, 일본은 자국내 건설과 수출 모두 부진한 상황이 지속되고 있다. 러시아는 수출에 강하며 중국은 수출은 부진하나 자국내 건설을 가장 활발하게 추진하고 있다.

건설원전 51기 중에서 수입원전의 건설은 13개국의 21기인데 원전공급국을 보면 러시아(8개국 14기), 한국(1개국 2기), 프랑스(2개국 3기), 중국(1개국 1기)이다. 프랑스 EDF사의 영국 원전사업 주도권 보유 그리고 중국과 파키스탄의 특별한 관계를 고려하면 정상적인 입찰과정을 통해서 해외수출을 성사시킨 국가는 러시아와 한국뿐이다. 한국이 수출한 UAE 바라카 1,2호기는 완공이 되었고 3,4호기도 순조롭게 진행되고 있어 공기 지연 및 건설비용 급증을 초래한 타 수출원전 프로젝트와 대비되어 APR1400 설계와 한국 시공사의 우수성을 증명하고 있다. 따라서 우리의 노력에 따라 또 다른 수출 프로젝트를 성공시킬 가능성은 높다.

원전과 같은 초대형 프로젝트 수주의 성공여부는 입찰가격과 함께 공개되지 않는 여러 가지의 요소가 포함되기 때문에 논리적인 분석에 제한이 있다. 그럼에도 불구하고 원전 수출에 독보적인 주도권을 보여주고 있는 러시아의 수출성공요인은 아래와 같이 분석된다:

- 경제성(VVER 원전의 경제성이 상대적으로 우수한 것으로 판단됨)
- 안전성(VVER 원전의 안전성이 탁월하다고 판단되지는 않으나 도입국의 인허가요건을 만족시키는 안전성을 확보함)
- 핵연료 선행 및 후행주기 기술 일괄 제공(원전 건설 및 운영기술뿐만 아니라 핵연료 선행 및 후행 주기 기술을 토탈서비스 형태로 제공함)
- 재정지원(일부 국가를 제외한 대부분의 원전수입국은 초기 막대한 건설자금 조달에 어려움이 있어 원전공급국이 건설비용을 융자해 주고 완공후 일정기간에 걸쳐 융자금을 회수하는 방안을 채택함)
- 정치/외교 관계(정부와 민간에서의 지속적인 교류와 우호관계 유지로 신뢰관계 구축함)
- 국가적인 공조 지원체계(경제성 이외의 요인 만족에 필요함)

- 지정학적 위치 및 선점효과(구 소련연방에 속했던 동유럽 국가)

위에 분석한 러시아의 성공요인은 대부분 우리나라의 추가적인 원전수출 성공을 위해서도 동일하게 적용될 것으로 판단된다. 원전 공급사가 민간회사인 경우 모든 요인을 만족시키기에 불리한 측면이 있지만 미국과 일본을 제외하고는 모든 원전공급사가 해당국가의 공기업이기 때문에 수출에 유리한 기본체계를 갖추고 있다고 평가된다.

최근 SMR 원자로에 대한 관심이 확산되고 있다. 미국의 NuScale 원자로가 USNRC로부터 설계인증을 받음으로 인해서 SMR 프로젝트의 현실화 가능성이 한층 높아진 것은 사실이나 안전성과 경제성을 확인하기 위해서는 실증로 단계를 거쳐야 할 것으로 판단된다.

태양광이나 풍력 같은 재생에너지의 발전단가 하락 및 원전의 발전단가 상승으로 인해 발전원간의 발전단가 비교에서 원전의 상대적 순위가 약화되고 있다[4]. EPR(프랑스와 핀란드) 및 AP-1000(미국) 원전의 공기지연 및 건설비용 급증으로 인해 원전건설의 리스크가 부각되는 점을 극복하기 위해서는 안전성과 함께 경제성 향상에도 주목해야 할 것으로 판단된다. **KIIF**

참고문헌

- (1) IAEA, Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org>.
- (2) World Nuclear Association, Country Profiles, <https://world-nuclear.org>.
- (3) World Nuclear News, <https://www.world-nuclear-news.org>.
- (4) Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition, OECD/International Energy Agency.