신기술 · 공법을 기반으로 한 원전건설 경쟁력 제고

Improvement of Competitive Power for NPPs based on Advanced Construction Technology

방창준* *Chang-Joon Bang*　조대식** *Dae-Shik Cho*　허열*** *Youl Hur*

1. 개요

2009년 12월 27일은 아랍에미리트연합(UAE)에 원전수출을 성사시킨 원자력산업계의 기념비적인 날이다. 업계를 초월하여 범국가적으로 지극한 공을 기울였던 우리나라 최초의 원전수출이 성사된 날이기도 하지만 그 동안 우리에게 원전기술을 전수한 프랑스, 미국 등 원자력 강국을 누르고 전 세계의 주목을 끌었다는 점에서 더욱 그러하다. 그날 이후 원자력은 이제 녹색성장의 새로운 동력으로 떠오르며 자동차, 반도체 등의 뒤를 이어 우리나라의 새로운 효자수출 종목으로도 급부상하고 있다. 특히 전 세계 40개국에서 460여 기에 달하는 원전이 2030년까지 발주될 계획이어서 이에 대한 빈틈없는 대비와 역량강화는 이제 정부와 민간을 초월한 하나된 마음으로 이어져야 한다. 하지만 이 분야의 전통강호인 프랑스, 미국, 일본 등 원전 선진국과의 치열한 경쟁도 불가피 할 것으로 예상된다. 비록 우리나라가 아랍에미리트(UAE) 원전 수주경쟁에서 그들에 앞섰으나 <표 1>에서 보는 바와 같이 세계 원전시장은 미국, 프랑스, 러시아, 일본 등 기존 원자력 강국들에 의해 장악되어온 것이 현실이다.

이에 본 글에서는 세계 원전시장 건설현황과 건설전망을 알아보고 건설경쟁력을 확보하기 위해 우리가 개발중인 신기술 및 신공법을 소개하고자 하며, 향후 원전시장의 전망 및 분석을 통해 원자력 강국과의 수출경쟁에서 우리나라가 우위를 점하기 위해 필요한 기술개발 전략과 나아가야 할 방향에 대해서 논하고자 한다.

표 1. 원전 주요 선진기업 현황

	WEC(美)	AREVA(佛)	GE(美)	AEP(露)	AECL(加)
시장 점유율	28%	24%	20%	10%	5%
원자로형	PWR	PWR	BWR	PWR	PHWR
3세대 원전모델	AP1000 (110만kW)	EPR (160만kW)	ESBWR (156만kW)	VVER 1000 (100만kW)	ACR 1000 (110만kW)
최근동향	도시바가 인수 ('06.10)	미쯔비시와 MOU ('06.10)	히타치와 제휴 ('07.5)	지멘스와 MOU ('09.3)	-

* 정회원, 한국수력원자력(주) 건설기술처 차장
bangcj@khnp.co.kr
** 한국수력원자력(주) 건설기술처 부장
*** 한국수력원자력(주) 건설기술처 처장

2. 세계 원전 건설현황 및 건설전망

2.1 원전 건설현황

현재 원자력발전소의 건설현황을 살펴보면 <그림 1>과 같이 세계 14개국에서 56기의 원전이 건설 중이며, 주요 국가별로 중국이 21기, 러시아 9기, 한국 6기, 인도 5기 등이다. 건설 중인 원전을 좀 더 자세히 살펴보면 중국의 경우 21기 중 자국 노형(CPR-1000, CNP-600) 17기 그리고 미국 노형(AP1000) 1기와 프랑스 노형(EPR) 1기가 건설 중이다. 러시아는 9기 모두 자국 노형으로 건설 중이며, 인도의 5기, 불가리아의 2기를 비롯하여 슬로바키아와 우크라이나에서 모두 러시아 노형을 도입하였다. 프랑스와 핀란드에서 각 1기의 프랑스 노형이 건설 중이며, 미국과 일본에서 각 1기씩 자국 노형으로 원전이 건설되고 있다.

2.2 원전 건설전망

1950년대 세계 최초로 원자력발전소의 상업운전이 개시된 이래로 현재 세계 30개국에서 436기의 원전이 운영 중이며 발전

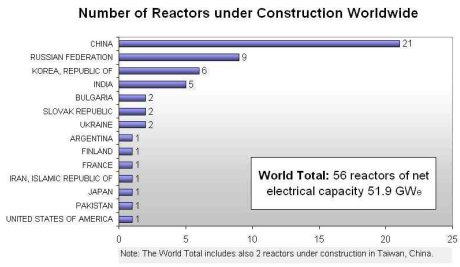


그림 1. 국가별 원전 건설 현황
* Nuclear Power Plants Information, International Atomic Energy Agency (Mar 2010)

비중은 전세계 전력생산의 15%를 점유하고 있다. 최근에는 원자력 에너지가 온실가스 감축 등 기후변화 문제에 대처할 수 있는 청정 대체에너지로 각광 받으면서 기존 원전 우호국은 물론, 원전 기피국도 원전 도입을 추진하고 있어 2030년까지 약 460기의 원전이 추가로 도입될 것으로 전망된다.

세계원자력협회에 따르면, 미국에서는 20기 이상의 새로운 원전이 제안되었는데 이중 17기가 COL[주]을 신청하였다. 캐나다는 Ontario주에 3,500 MWe 규모의 원전을 건설할 계획이며 Alberta주와 New Brunswick주에도 유사한 용량으로 원전이 제안되어 있다. 프랑스는 Flamanville에 1,600 MWe급 원전을 건설 중에 있으며 Penly에 후속호기를 건설할 예정이다. 영국에서는 2019년 운영을 목표로 1,600 MWe급 원전이 계획되어 있으며, 추가적으로 6,000 MWe 규모의 원전이 제안되어 있다. 러시아의 경우 9기의 원전이 건설되고 있으며 이중 1기는 대형 고속중성자로(fast neutron reactor)이다. 그리고 추가적으로 7기의 원전이 기존 원전을 대체할 계획이며 2016년까지 새로운 원전 10기(9.8 GWe)가 운영에 들어갈 예정이다. 또한 2012년까지 1기의 부양식 원전이 완성될 예정이며 2020년까지 부양식 원전 1기가 추가로 제작될 계획이다. 중국에서는 현재 21기의 원전이 건설되고 있으며 건설 중인 원전에는 AP1000과 고온기체냉각원자로(high-temperature gas-cooled reactor plant)가 포함되어 있다. AP1000의 경우 웨스팅하우스가 개발한 신형 3세대 원전으로 중국에서 최초로 건설되는 것이다. 향후 중국에서 3년 내에 건설이 예정되어 있는 원전은 27기인데 대부분이 자국 노형인 CPR-1000으로 건설될 전망이다.

이와 같이 세계 각국은 대규모의 원전을 건설할 계획을 가지고 있으며, <표 2>에서도 알 수 있듯이 앞으로 지어질 원전의 수는 460여기가 넘으며 이는 현재 운영중인 원전 수와 비슷한 수준이다. 이는 지난 50여 년간 지어진 원전이 향후 20년간 모두 지어지게 된다는 의미로 시장규모는 1,000조원에 이른다. 이에 우리나라 정부는 2030년까지 세계 신규원전 건설 점유율의 20% 달성이라는 국가적인 목표를 설정하여 약 80기의 원전을 수주한다는 계획을 발표하였다. 이를 위해서는 건설공기가 획기적으로 단축될 수 있는 경쟁력우위의 원전건설기술을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠다.

3. 우리나라의 원전건설기술

우리나라는 지난 30년간 지속적으로 원전을 건설해 왔으며, 주로 반복적인 건설 경험(lessons learned)을 통해 건설공기를 단축해왔다. 최근에는 새로운 건설기술 개발을 통해 획기적으로 건설공기를 단축하기 위한 방안을 모색하고 일부 개발된 기술은 이미 현장 적용을 앞두고 있는 실정이다.

주) COL(Construction and operating license)-기존의 건설허가(C.P : Construction Permit)와 운영(O.L : Operating License)의 2단계로 되어있던 인허가 절차를 발전소 운영이 행정적인 절차로 지연되는 것을 예방하기 위해 건설과 운영을 동시에 처리하기 위해 간소화된 인허가 절차.

표 2. 국가별 상용 원전 현황 및 전망

국가	운전중		확정 단계		계획 중	
	기수	용량(MW)	기수	용량(MW)	기수	용량(MW)
캐나다	18	12,652	4	4,400	3	3,800
중국	11	8,587	37	41,590	120	120,000
프랑스	58	63,236	1	1,630	1	1,630
인도	17	3,779	23	21,500	15	20,000
일본	54	47,102	13	17,915	1	1,300
대한민국	20	17,716	6	8,190	0	0
루마니아	2	1,310	2	1,310	1	655
러시아	31	21,743	8	8,000	37	36,680
남아공	2	1,842	3	3,565	24	4,000
터키	0	0	2	2,400	1	1,200
우크라이나	15	13,168	2	1,900	20	27,000
UAE	0	0	4	5,600	10	14,400
영국	19	11,035	4	6,600	6	9,600
미국	104	101,119	11	13,800	19	25,000
베트남	0	0	2	20,00	8	8,000
기타	85	69,404	20	18,042	61	69,735
합계	436	372,693	142	156,442	327	343,000

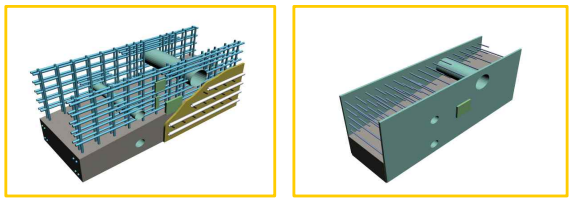
* World Nuclear Power Reactor, World Nuclear Association (Feb. 2010)

3.1 강판콘크리트 구조(SC구조)

SC(steel plate concrete)구조는 원전구조물에 적용하기 위해 2005년부터 2008년까지 3년에 걸쳐 국내 기술진에 의해서 개발된 기술로써 RC(reinforced concrete)구조의 철근과 거푸집 대신 강판(steel plate)을 설치하고 양면 강판 내부에 콘크리트를 채워 넣은 합성구조체로 전단 스터드(shear stud) 및 타이바(tie-bar)를 이용한 강판과 콘크리트의 합성작용으로 구조적 기능을 수행하는 새로운 개념의 합성구조이다<그림 2>.

이는 RC(철근콘크리트)구조의 공정잠식 요소인 철근조립, 거푸집 설치 및 해체와 같은 공정을 생략할 수 있고, 콘크리트 타설 후 양생으로 인한 후속공정 지연을 크게 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 SC모듈을 공장에서 제작한 후 현장에서 각 모듈을 조립하고 설치함으로써 병행시공(parallel construction)이 가능하여 원전건설에 대해 근본적인 공기단축을 통한 원전의 경제성 향상을 추구할 수 있는 기술이다.

SC구조는 벽체에 사용되는 SC구조와 층 슬래브에 적용되는 SC 슬래브로 분류될 수 있다. 벽체에 사용되는 SC구조는



(a) RC 구조 (b) SC 구조

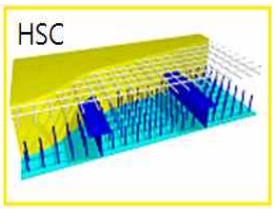
그림 2. RC구조와 SC구조 비교

<그림 3>의 USC(unstiffened steel plate concrete)와 SSC(stiffened steel plate concrete)로 나누어진다. 슬래브에 적용되는 HSC(half steel plate concrete)는 슬래브 바닥에 철판을 사용한 구조이다.

SC구조는 경제성뿐만 아니라 구조성능 또한 뛰어나다. <그림 4>를 통해 알 수 있듯이 SC구조의 전단응력은 동일 강재량을 갖는 RC구조에 비해 약 1.5배 높을 뿐만 아니라 연성도 뛰어남을 알 수 있다. 이러한 구조성능은 내진성능 향상으로 이어진다.

RC 전단벽을 주요 지진저항시스템으로 사용하고 있는 원자력발전소 구조물에 SC구조를 적용할 경우에는 SC 전단벽의 뛰어난 내진성능으로 인해 지진에 의한 발전소의 안전성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

(a) USC구조 (b) SSC구조



(c) HSC 슬래브

그림 3. SC 구조 분류

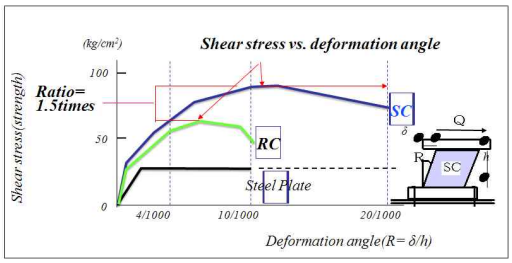


그림 4. RC구조와 SC구조 성능비교

3.2 복합모듈화 공법

복합모듈화 공법은 2008년 SC구조 기술개발과 함께 2단계로 계획된 '복합모듈화 기술개발'과제로 착수하여 현재 개발 중에 있으며, 구조물과 기기/계통을 일체화하여 공장에서 제작한 후 현장에서 각 모듈을 연결·조립하여 설치하는 공법이다. 즉, <그림 5>와 같이 SC구조체에 파이프, 덕트, 지주 등의 계통설비를 부착하는 블럭 단위의 모듈화 공법이라 할 수 있다.

복합모듈화 연구는 원자력발전소 파워 블록(power block)의 보조건물 및 복합건물의 구조물과 계통설비에 집중하고 있다. 기존 원전 건설의 주공정(critical path)을 구성하던 원자로건물의 시공기간이 SC구조 기술개발과 공법개선을 통해 단축됨에 따라 보조공정이던 보조 및 복합건물이 주공정에 편입된다. 보조 및 복합건물의 주공정을 단축하기 위해 선행연구를 통해 확보된 SC구조 기술을 계통설비와 함께 복합모듈로 구성하여 전체적인 시공기간을 단축하기 위한 기술개발이다.

향후 SC구조와 함께 복합모듈화가 원전구조물에 전면적으로 적용될 경우 건설공기가 36개월(F.C : 최초 콘크리트 타설 ~ F.L, 핵연료 장전)로 단축될 것으로 기대되어 모듈화 기술의 체계적이고 차원 높은 개발이 더욱 절실하다.

3.3 수직반입(open top) 공법

주기기 수직반입 공법은 대용량 크레인을 이용하여 원자로건물 상부로 주기기를 인양하여 설치하는 공법이다.

<그림 6>에서 볼 수 있듯이 기존 측면반입 공법의 경우 원자로건물 외벽 및 돔 콘크리트 타설 후 천정크레인 설치 및 시험을 실시하고 원자로건물 내벽공사를 완료하여야 NSSS(nuclear steam supply system : 핵증기공급시스템) 주기기를 설치 할 수 있었던 반면, 수직반입 공법은 원자로건물 내부의 천정크레인이 아닌 원자로건물 외부에서 대용량 크레인을 사용하므로 외

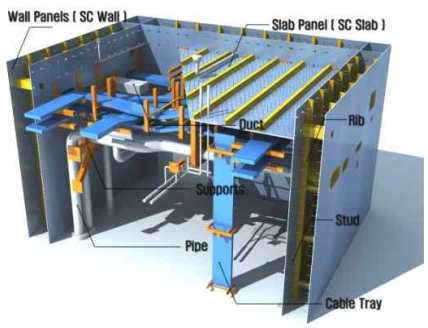


그림 5. 복합모듈화 개념도

벽과 내벽 공사가 완료되면 천정크레인 설치 및 시험에 상관없이 NSSS주기기를 설치 할 수 있다. 즉, 천정크레인 설치 및 시험과 NSSS주기기 설치의 병행시공(parallel construction)이 가능한 공법이라고 할 수 있다.

4. 향후 시장분석 및 전략

향후 20년간 발생할 대규모 해외 원전시장 진출의 서막이라고 할 수 있는 아랍에미리트(UAE) 원전 건설프로젝트를 수주하면서 우리나라는 원자력 강국과의 수주경쟁에서 한발 앞서게 되었다. 이는 지속적인 원전건설로 경쟁국들에 비해 건설기간 및 가격 경쟁력 등에서 비교우위에 있을 뿐만 아니라 지난 30여 년간 단 한차례의 사고도 없이 원전을 운영해온 뛰어난 운영능력이 있었기에 가능한 일이었다. 우리나라의 원전 기술 경쟁력이 아랍에미리트(UAE) 원전 건설프로젝트 수주를 통해 세계 원자력 산업계에 알려지면서 원전 도입을 계획하고 있는 국가들의 관심이 집중되고 있고 일부 국가와는 MOU를 체결 하는 등 제 2, 제 3의 원전수출 가능성이 높아지고 있다. 그러나 우리에게 장미빛 미래만이 기다리고 있는 것은 아니다. 앞서 언급한 세계 원전시장 건설현황 및 전망을 분석해 볼 때 미국, 프랑스, 러시아, 일본 등 원자력 강국들은 모두 자국 노형으로 원전을 건설하고 있으며, 최대 원전 시장이 될 중국도 건설 중인 원전과 계획된 원전의 대부분이 자체 개발한 노형이다. 세계 각국에서 약 460여 기의 원전이 추진되고 있지만 이중 250여 기가 중국, 러시아, 미국, 일본, 프랑스에서 추진 중이며, 이 국가들은 모두 자국 노형을 보유한 국가들로 향후에도 자국 노형으로 원전을 건설할 가능성이 크다. 즉, 실제로 우리나라가 진출할 수 있는 원전시장의 규모는 우리가 기대하는 원전시장 규모의 절반에 불과하다는 결론에 도달하게 된다. 최근 경쟁국들의 움직임을 보면 남은 절반의 시장에서도 우리나라 원전의 수출 전망은 그리 밝지만은 않다.

프랑스, 미국, 일본 등 원자력발전소 건설 시장의 기존 강자들은 아랍에미리트(UAE) 원전 수주경쟁에서 우리나라에 고배를 마신 뒤 절치부심하고 있다. 이들은 특히 주요 패인으로 분석된 가격경쟁력을 확보하기 위해 단가 낮추기에 총력을 기울이고 있으며 우리나라를 견제하기 위해 합종연횡의 전략적 제휴도 진행하고 있다. 미국과 일본은 원전 건설을 공동으로 수주하기 위해 국가 차원에서 협력하는 방안을 추진 중에 있으며, 프랑스는 토목공사 비용을 현재의 4분의 1로 낮출 수 있도록 또 다른 방안을 모색 중이다. 이는 향후 우리나라가 해외 원전을 수주하는데 상당한 장애 요인이 될 수 있다. 그러나 공사비가 수 조원에 달하는 원전사업은 정치적 논리와 함께 경제적 논리에도 많이 좌우된다. 우리나라가 원전건설 수주경쟁에서 원자력 강국에 앞서기 위해서는 무엇보다 중요한 것이 가격 경쟁력이며 원자력발전소 건설에 있어서 가격 경쟁력을 높일 수 있는 방법은 원전 건설공기 단축이 가장 효과적이라 하겠다. 우리나라가 지난 30년간 지속적인 건설을 통해 얻은 학습효과에 의한 공기단축은 이제 한계에 도달했다고 판단할 때, 앞서 소개한 SC구조, 복합모듈화 등의 새로운 건설기술의 개발과 이의 적용을 통해서만 추가적인 공기단축이 가능하다. 나아가 공기단축을 통한 가격 경쟁력 확보를 위해서는 현재 개발된 기술 이외에도 원전구조물의 부피를 줄이는 동시에 내진성능을 향상시키는 면진 기술, 구조물의 철근 및 철골량을 대폭 줄일 수 있는 고강도 철근 및 철골의 원전 적용기술, 다양한 기후조건에서 전천후의 기량을 발휘할 수 있는 고성능 콘크리트 원전적용기술 그리고 3D CAD 및 CAE를 기반으로 한 해석과 설계가 통합된 구조설계통합시스템과 같은 핵심기술들을 국가적인 차원에서 고민하고 또 개발하여야 한다.

(a) 측면반입공법 (b) 수직반입공법

그림 6. 측면반입공법과 수직반입공법

5. 맺음말

아랍에미리트(UAE) 원전 수주 이후로 원자력 수출산업은 이제 우리의 새로운 먹거리로 주목 받고 있다. 정부 차원에서도 2030년까지 80기의 원전을 수주하기 위해 원자력 산업에 적극적인 지원을 아끼지 않고 있다. 원자력 관계자들은 이러한 변화의 흐름에 따라 머릿속에 있던 아이디어를 구체화하여 새로운 기술로 발전시킴은 물론 일반 건설 산업계에 적용되고 있는 신기술도 과감히 원전에 도입하는 개방적이고 유연한 사고를 가져야 한다. 규제기관의 협조 또한 매우 중요하다. 애써 개발한 기술이 단순히 기술개발에 그치지 않고 원전에 신속히 적용될 수 있도록 합심하여 노력하고 이제 세계 속에서의 원전규제기술을 주도하는 자세전환이 필요하다고 본다. 그리고 무엇보다 중요한 것은 올바른 시장전망 분석이라 하겠다. 국가별 건설전망과 정책 등을 철저히 분석하여 수출가능성을 타진한 후 가능성이 높은 국가별로 맞춤 전략을 수립해야 한다. 그렇게 정부 주도하에 기업과 관련 기관이 유기적으로 협력하여 새로운 기술개발을 모색하고 시장 다변화에 대응하기 위한 전략을 수립한다면 원자력 강국들과의 수주경쟁에서 승리함은 물론 세계 원자력산업계를 주도할 날이 멀지 않았음을 확신하는 바이다.

담당 편집위원 :
권기주(한국전력공사) *kyeunkjoo@kepco.co.kr*