

차세대 원자력 발전기술의 특성과 개발전망*

정근모

아주대학교·한국과학재단

요약

금세기 중반에 원자력발전이 개발된 이래로 현재 400여기의 원전이 세계에서 가동되어 총 전력생산의 15% 정도를 담당하고 있다. 그러나 그 무한한 활용가능성에도 불구하고 현재 그 개발의 속도가 전 세계적으로 둔화되고는 있지만 차세기에 원전의 이용이 필요할 것임은 모든 전문가들이 인정하고 있고 특히 최근 지구환경오염에 대한 우려가 고조됨에 따라 원자력이용이 불원간에 급격히 증대될 전망이다. 본고는 이러한 상황에서 개량형원자로와 신형원자로의 개발동향과 향후전망을 간략히 살펴보고 국민적 합의와 국제적인 기술수준에 기반을 둔 차세대 원전의 기술요건과 우리의 개발전략을 제시하고자 한다.

현황

원자력발전은 사회에 크게 기여할 수 있으리라는 큰 열망 속에 금세기 중반에 출현하였다. 그러나 항공, 전자, 자동차, 컴퓨터, 의료기술등 우리 일상생활의 일부가 이미 되어버린 기술들과는 달리 원자력은 현재 에너지부문에서 차지하고 있는 중요성과는 대조적으로 보다 깊은 대중의 이해를 필요로 하고 있으며 우리나라의 경우도 예외가 아닌 것이 현실이다.

그러나 국내외 전문가들은 원자력이 2000년대의 주된 전력원이 되리라고 확신하고 있다. 세계동력회의의 조사결과에 의하면 87년도 세계 총전력생산의 15% 정도를 원자력이 담당했으며 90년도까지는 20%로 원자력발전의 비중이 높아질 전망이다. 프랑스, 벨기에, 일본, 스웨덴, 서독, 스위스, 불가리아, 스페인, 핀란드, 대만, 그리고 우리나라가 30% 이상의 전력을 원자력에 의존하고 있다. 장기적인 관점에서 미래의 에너지원으로 원자력이 선호되는 이유는 다음과 같다.

- 현재로서는 원자력만이 전력생산에 있어서 화석연료를 대체할 수 있는 상업화된 기술이다.
- 범지구적인 산성비와 온실효과문제는 화석연료의 추가이용에 제동을 걸고 있다.
- 석유는 공급안정측면에서 아직 취약하고 발전용으로는 고가이다.
- 기존의 원자력 발전기술을 개선시킬 수 있는 여지가 충분하다.

- 후행 핵연료 주기의 이용가능성이 높아지고 있는 바 원자력발전의 기술경제성을 증진시킬 수 있을 것이다.
 - 원자력발전운영관리를 개선할 경우 원자력 발전의 경제성이 현저히 증진될 수가 있다.
 - 전력망간의 상호의존성이 커짐에 따라 발전설비의 대형화와 벽지전설의 타당성이 있게 되었다.
 - 현재 부상중인 초전도 송전기술이 최소의 손실로 장거리송전을 가능하게 할 수 있을 것이다.
 - 개량형 전력저장장치나 히트펌프를 난방 및 온수공급에 활용하는 새로운 전력소비방식이 전력수요를 증가시킬 것이다.
 - 국제협력의 강화를 통하여 연구개발비용을 절감하고 대중이해를 증진시킬 수 있을 것이다.
- 그러나 이러한 기대와 전망에 따른 원자력의 본격적 이용을 실현하기 위해서는 기술자체, 설계, 시공, 운전, 보수, 품질보증, 관리, 재원조달, 안전규제 측면에서의 현저한 개혁이 이루어져야만 하며 장기전략을 수립하여 도출된 개발경로를 충실히 밟아야 할 것이다.

당면문제점

일반적으로 신기술이 성공적으로 활용되기 위해

*본고는 1989년 10월 28일 서울대학교에서 열린 한국원자력학회 '89추계 학술 발표회에서 행한 특별강연 내용을 보완한 것이다.

서는 다음 조건중 최소 한 조건을 충족시켜야만 한다. 즉,

- 전혀 새로운 제품이나 서비스를 창출
- 기존의 제품이나 서비스를 현저히 개선
- 기존의 제품이나 서비스의 비용을 현저히 절감

신기술이 일단 시장에 자리를 잡게되면 경쟁기술과의 격차를 벌리기에 힘을써야 한다. 이렇기 위해서는 기술의 판매로 얻은 수입을 기술혁신을 위한 연구개발에 재투자해야 한다.

원자력발전은 전기를 생산하는데 이 전기라는 제품은 원자력발전기술이 탄생될 당시에 이미 존재하고 있었다. 그러다고 원자력발전을 통해 소비자들이 느낄만큼 전기의질이 좋아진 것도 아니다. 따라서 원자력기술의 활용근거는 안전하게 저렴한 비용으로 전력을 생산한다는 데에만 있다고 할 수가 있다. 그러나 각국의 강력한 지원과 이제까지 5000 Reactor-Year라는 양호한 원전 운전실적에도 불구하고 원자력발전은 대중의 보다 깊은 이해를 필요로 하고 있다. 원자력 발전소에서 발생하는 크고 작은 문제점들이 일반대중에게 원자력의 궁극적 안전성에 대해 심각한 의문점을 지니게 하고 있다.

원자력발전이 국가경제에 아주 중요한 일부국가를 제외하고는 원자력발전의 경제적이점은 그다지 중요하게 여겨지지 아니하고 안전성에 대해서만 비판적 관심이 주어지고 있다. 이러한 대중의 비판적인 시각은 기술적인 관점이 아니라 정치사회적 관점에서 초래된 것이라고 할 수가 있다. 그렇지만 기술혁신을 통해 안전성을 현저히 증가시킬 수 있거나 대중의 태도가 너무 경직되어 있는 경우에는 안전성 증진을 위한 새로운 기술계획이 필요하다.

현재 원자력이 당면하고 있는 정체현상의 직접적인 원인은 몇몇국가가 채택했던 개발과정에서 비롯된다. 즉 개발과정에 있어 전력시장과 수요자의 요구에 둔감했었다. 예를들어 미국의 LWR이나 소련의 RBMK는 그 선택과정에서 전력회사들이 참여하지 않았고 더욱 중요한 사실은 이후 다른 원자로 기술의 선택을 억제하여 효과적인 기술혁신에 애로가 있었다는 점이다. 시장의 요구에 부응하기보다는 선택된 원자로를 개선, 보완하여 발전용으로 적응시키려는데 연구개발투자가 행해졌

으며 경제성증진은 우선순위에서 밀려났었다. 또한 원전의 안전성에 대한 대중의 우려가 증가함에 따라 안전규제활동이 기술혁신을 간접적으로 저해하는 결과를 초래했고 전력회사는 언제 운전정지를 받을지 모르는 불안감에 직면하게 되었다. 즉 기존 원자력발전계통에 미비점이 없다면 이는 완전한 기술이고 더이상의 개선이 필요없다는 논리가 지배적이었다. 즉 기술혁신을 하겠다고 나서는 것은 전력회사가 소유한 원전이 불안전하다는 의미로 이해되어 왔던 것이다.

물론 모든 국가에서 이러한 상황이 벌어졌던 것은 아니다. 프랑스, 캐나다, 일본은 단일조직의 강력한 리더쉽하에 원자력을 개발해왔다. 프랑스에서는 EdF가 원전표준화를 이루었는데 표준화를 통해 전문기술을 축적했고 정부의 강력한 지지를 얻어내었다. 캐나다의 경우 AECL의 리더쉽과 온타리오 하이드로의 강력한 지원에 의해 CANDU를 선택할 수가 있었고 이를 정부가 보호해 주었다. 일본의 경우 미쓰비시, 도시마, 히다찌 중공업이 국내전력회사들에게 턴키공급을 하였고 이러한 기업들은 기술의 종합화가 가능했고 시공에도 참여한 결과 원자력사업에서 이윤을 얻을 수가 있었고 따라서 APWR이나 ABWR사업같은 기술혁신투자가 가능했었다.

그러나 많은 국가에서 원자력은 엔지니어링 최적화, 설계종합화, 제작과 시공의 연계가 아직 부족하다. 오늘날의 원전은 아직도 엔지니어가 설계했다기 보다는 물리학자가 설계한 것임을 엿볼 수가 있고 이것이 바로 기술혁신이 잘 이루어지지 않는 이유중의 하나이다. 어떤 제품의 생산에 있어서 90%이상의 기술혁신은 엔지니어링, 설계, 제작, 시공의 과정에서 창출된다. 원자력기술은 매우 복잡하기 때문에 이러한 현장경험들의 반영이 요구되는 바 정보망활용과 업무의 종합화를 필요로 한다. 그러나 유감스럽게도 많은 국가들에서 이러한 필요성이 간과되었다. 원전건설이 설계가 15% 정도 종료된 시점에서 개시되었던 바 운전경험을 활용할 기회가 없었던 것이다. 이러한 점들이 차세대 원자력기술개발과정에서 시정되어야만 21세기에 원자력 기술이 결실을 맺을 수가 있을 것이다.

차세대 원전에 요구되는 특성

현재 세계적으로 원자로 개발전략은 기존경수로의 개량(Evolution)과 신형로의 개발(Revolution)으로 구분되고 있다. 기존경수로의 개량이라 함은 기존경수로의 설계개념을 채택하되 안전성과 경제성증진을 위한 설계개선을 이루는 것이며 신

형로의 개발이란 피동안전개념이나 고유안전개념을 도입한 새로운 노형을 개발함을 의미한다. 표 1은 개량로와 신형로의 일반적인 특성을 예시하고 있다. 기존경수로의 개량은 향후 약 20년 사이의 집중적인 활용을 목표로 하고 있으며 신형로의 개발은 2000년대 초의 건설을 목표로 하고 있다.

<표 1> 개량로와 신형로의 일반적 특성

	개량로	신 형 로	
		피동 안전로	고유 안전로
전이현상완화	낮은출력밀도 증가된 열 관성	좌 동	좌 동
원자로정지	기존제어봉의 신뢰도를 개선	좌 동	피동적
잔열제거	기존계통의 신뢰도 개선	피동적	피동적
대표적노형	System 80+ Sizewell B N4	AP 600 SBWR SIR	PIUS MHTGR ISER

자료 : The Feasibility Study on the Advanced Reactors in Korea, 1988.8. KEPCO, KOPEC, KAERI

우선 어떠한 차세대 원전기술도 생명력을 지니기 위해서는 안전성, 경제성, 전력계통 안정성이라는 기본요건을 충족시켜야만 하고 지속적인 기술혁신을 이룰수가 있어야 한다. 차세대 원전은 과학이론적으로 안전할 뿐만 아니라 원형로 건설 또는 이와 상용할 수 있는 과정을 통해 안전성이 실증될 수 있어야 한다(Demonstrably Safe). 즉 과학기술자들이 인류건강에 현저한 위험을 줄 수 있는 어떠한 사고도 일어날 수가 없음을 인정할 수 있어야만 한다. 여기에 전력회사가 경제적으로 손해를 볼 수 있는 어떠한 사고도 발생하지 않아야 한다는 더욱 엄격한 요건이 부가되어야 할 것이다. 기존 원자로의 안전수준 역시 일반 대중이 'Demonstrably Safe'하다고 확신할 수 있게끔 더욱 증진되어야 할 것이다.

둘째로 차세대원전기술은 경제성 면에서 획기적인 개선이 이루어져야만 한다. 경쟁발전원의 단가보다 30-50% 정도가 저렴해야만 폭넓은 지지를 획득할 수가 있을 것으로 보여지고 있다. 약간의 경쟁력 우위로는 전력회사의 관심을 끌기가 어려

울 것이다. 따라서 차세대 원전의 신규개발 투자로 인한 경제적 부담을 설계단순화, 표준화, 모듈화를 통해 만회해야 할 것이다.

세째는 차세대 원전이 기존의 원전과는 전혀 다른 환경에서 운전되리라는 점이다. 즉 21세기의 전력회사와 수요자의 요구에 부응할 수 있도록 다음 사항들이 고려되어야 한다.

- LOLP 요건 하향조절에 부응하는 고신뢰도
- 예비율 하향조정에 부응하는 고 이용률
- 고 부하율
- 보수 간편성
- 더욱 엄격한 품질보증

마지막으로 차세대 원전기술은 급격히 발전되는 과학기술환경에 적응할 수가 있어야 한다. 즉 안전성, 신뢰성, 기타 모든 측면을 보장하면서 지속적인 기술혁신이 가능해야만 한다. 이상적인 차세대 원전기술은 타분야 신기술의 잇점을 이용할 수 있게끔 충분한 신축성을 지녀야 한다.

<표 2> 차세대원전의 개발현황

근원기술	개량로	피동안전로	고유안전로	전기출력	개발기관
경수로	DWR 1300			1300	KWU
	N4			1500	EDF, Framatome
	VVER 88			1000	USSR
	APWR			1350	Westinghouse Mitsubishi
	ABWR			1350	GE Toshiba, Hitachi
	BWR 900			1050	ABB
	B 600			1300	B&W
	System 80+			1270	CE
	Sizewell B			1250	CEGB, Bechtel
		AP 600		600	Westinghouse B&R, Avondale
		SIR 300		320	CE, UKAEA R&R, S&W
		SBWR		600	GE
			PIUS	500	ABB
			MARS	600	Rome Univ.
		ISER	200	Tokyo Univ.	
개스냉각로	HTR 500			550	AHR, HRB
			MHTGR	540	GA
중수로	ARGOS			380	CNEA
	CANDU3			300	AECL
고속로			PRISM	138×3	GE
			SAFR	330×4	Rockwell

<표 3> 원전안전목표치와 실적치

단위 : 노심손상빈도/Reactor Year

노 형	목 표 치	실 적 치	비 고
기존원전	10^{-4}		미 국
EPRI ALWR	10^{-5}		미 국
Sizewell B	10^{-6}	1.1×10^{-6}	영 국
Konvoi	10^{-6}	3.5×10^{-7}	서 독
N4	$10^{-4} - 10^{-5}$		프 랑 스
APWR	$10^{-5} - 10^{-6}$	2×10^{-7}	일 본
PUN	$10^{-5} - 10^{-6}$	8.1×10^{-6}	이 태 리
표준원전(한국)		5×10^{-5}	연구시산결과

차세대원전 개발현황

현재 차세대 원전개발은 경수로, 개스냉각로, 중수로, 고속로 분야에서 이루어지고 있다. 표 2 는 차세대 원전의 개발현황을 보여주고 있다.

차세대원전은 그 설계에 있어서 사고의 완화보다는 방지에 큰 역점을 두고 있다. 이를 위하여 피동적 안전개념의 적용, 인간실수의 허용증대, 운전원 조치요건 경감, 설계여유도증대, 지진을 포함한 외부요인(External Events)의 고려, 인간-기계요건(Man-Machine Interface) 고려, PSA 이용, 설계단순화, 피폭절감, 폐기물발생량 축소를 시도하고 있다.

이러한 새로운 시도에 전반적으로 적용되는 설계개념은 복잡성의 지양과 안전성의 증진이다. 현재 개량형경수로로는 $10^{-5}/\text{yr}$ 이하의 노심손상빈도와 0.5마일 거리에서의 일반개인 방사능 피폭 25rem 초과 가능성 $10^{-6}/\text{yr}$ 이하를 설계목표로 하고 있다. 표 3은 각국이 추구하는 안전목표치와 실적치를 조사한 것이다.

고유안전로나 피동안전로같은 신형로들은 개념적으로는 사고의 발생가능성을 인정하지 아니하고 있다. 그러나 이러한 완전한 안전성확보는 용량축소, 개발투자등으로 인한 경제성 감소가 없이는 불가능 할 것으로 보여지고 있는데 피동적 개념의 확대 적용과 설계단순화로 이를 보완하고 있다. 현재의 추세로 개량형경수로들은 90년대 초반, 신형경수로들은 90년대 중반, 신형가스냉각로는 90

년대 후반, 신형고속로는 21세기 초반의 설계완료 가 기대되고 있다.

차세대원전의 기술요소

이러한 차세대원전에 요구되는 특성들을 만족시키기 위해서는 새로운 기술들을 개발하고 이의 타당성을 입증해야만 한다. 어떤 경우는 많은 연구개발을 필요로하고 어떤 경우는 제도와 규제의 개선만을 필요로 할 것이다. 현재 타당성이 있는 것으로 판단되는 기술요소로는 다음과 같은 것들을 들 수가 있다.

• 엔지니어링 및 행정의 완전전산화

개인 워크 스테이션, 슈퍼컴퓨터, 국제전산망등 컴퓨터보급과 컴퓨터용량과 처리속도의 획기적증진으로 인해 차세대 원전 엔지니어링과 행정의 완전전산화가 가능할 것이다. 공정, 제작, 자재, 인력에 관한 모든 정보가 데이터베이스화되어 착공 이전에 인허가기관 및 일반대중이 이에 접근할 수가 있어야 한다. 건설을 개시하기전에 사업자는 규제당국, 이해당사자, 투자자, 일반대중에게 전산화될 정보패키지를 제시할 수가 있어야 한다. 이를 통해 원전표준화의 여건이 조성될 것이며 전반적인 사업관리와 품질보증의 개선을 이룰 수가 있고 건설공기의 단축이 가능할 것이다.

• 컴퓨터 시뮬레이션

모든 잠재적인 인간실수나 사고 시나리오를 시뮬레이션을 통해 도출해낼 수가 있다. 시뮬레이션 프로그램은 원전설계 패키지를 활용하여 자세히 작성되는데 원전안전성을 입증할 수 있는 올바른 방법으로서 과학기술계의 인정을 받을 수가 있어야 한다.

• 모듈화

기존의 대부분의 원전은 발주자의 요구에 맞도록 설계되어 현장에서 시공이 이루어졌다. 그러나 차세대 원전은 품질이 엄격히 관리될 수 있는 공장에서의 제작이 용이하게끔 고도로 모듈화되어야 한다. Barge에 설치된 해상원전은 궁극적인 원전 모듈화라고 할 수가 있다. 해상원전은 특수장비가 갖추어진 제작소에서 모듈들을 제작하여 대형 독크에서 모듈을 조립하고 이를 이미 완성된 장소까지 견인하여 정치함으로써 건설이 완료된다. 이러한 과정을 통해 건설공기를 3년 이하로 단축할 수가 있으며 보수 및 해체도 정해진 작업장에서 수행이 가능하고 전면 보수에 대비한 대체발전소의 투입이 용이하다.

• 후행 핵연료 주기의 이용

현재의 원전에서는 핵연료가 연소된후 저농축연료와 다양한 방사성원소들이 남게된다. 사용후 핵연료는 주기적으로 원자로로부터 제거하고 신연료를 장전해야 한다. 차세대원전은 완전핵연료주기를 겨냥하여 설계될 수가 있을 것이다. 예를 들어 IFR과 같은 동일부지내의 후행핵연료주기 이용은 타당성이 있다. 개량형 경수로와 CANDU가 연결되는 탄담핵연료주기 이용은 타당성이 있다. 원전 부지내에서 후행핵연료주기를 완결시킬 수 있다면 방사성 물질의 수송, 핵연료자원 이용, 방사능폐기물관리 측면에서 매우 유리할 것이다.

• 발전이외의 분야 이용

차세대 원자력 기술은 전력 뿐만이 아니라 다른 용도에 쓰일 수가 있을 것이다. 예를 들자면 열, 방사선, 전기의 복합응용으로 수송과 공정열원에 쓰일 수소를 생산할 수가 있다. 원전으로부터 발생하는 폐열은 지역난방과 산업용으로 쓰일 수가 있다.

차세대원전 개발 전략

앞에서 살펴본 바와 같이 차세대 원전 개발 전략은 개량로와 신형로로 구분되고 있다. 여기서 유의해 볼 만한 사실은 일본이나 프랑스가 현재 원자력에 크게 의존하고 있으면서도 개량로 개발위주의 정책을 펴고 있다는 점이다. 즉 투자효과를 중요시한 결과 신형로 개발에 소극적인 양상을 보이고 있다. 반면에 미국을 위시한 기타 선진국들은 개량로의 개발과 더불어 신형로 개발에도 많은 자원을 투입하고 있다.

최근에 제안된 우리나라의 장기 원자력개발전략은 노형전략과 원전표준화를 연계시키며 제1세대의 개량경수로 표준화를 거친 후 제2세대 표준화(2007-2017)에서는 현재 세계적으로 개발중인 신형로중 하나를 선택해야 하는 것으로 결론짓고 있다. 이는 현재의 신형로의 개발전망과 2000년대의 원전에 대한 대중이해, 그리고 원전안전성확보에 관한 국제동향을 감안한 것이다. 일본이나 프랑스 처럼 기존기술에 안주할 경우 장래 예측되는 대중의 거부감을 극복하기가 곤란하며 국제적인 추세에 역행하는 결과를 낳을 수도 있음을 주지해야 한다.

현재의 상황에서 한국이 신형로개발에 적극적으로 나설 경우 21세기 초반에 기술적 우위를 선점하여 원전기술의 수출도 가능할 것이다. 특히 신형로개발 주도국들이 현재 그들의 국내여건상 공동개발을 모색하고 있다는 점이 우리에게 유리하게 작용될 수가 있다. 이러한 국제공동개발에 조속히 참여하여 90년대의 실증로 건설참여를 통해 기술획득을 할 경우 2000년대초의 신형로 건설 착수가 가능할 것으로 전망된다.

정부의 역할과 국제협력

원자력발전기술이 21세기에 융성하기 위해서는 몇가지 과정을 거쳐야만 한다. 이를 위해 산업계와 정부는 각자의 역할분담을 명확히 해야한다. 전력사업은 일반시장의 시계를 넘어서는 장기적인 차원에서 수행된다. 따라서 정부는 장기전력개발 계획에 개입해야 한다. 특히 신형로의 연구개발은 원형로 건설까지 정부의 적극적인 지원이 필요하다. 이에 있어서 정부의 역할은 다음과 같다.

- 원전기술과 같은 첨단고급기술은 많은 두뇌를 필요로하는 막대한 투자를 필요로하는 바 정부는 차세대 과학기술인력의 교육, 훈련을 적극 지원해야 한다.
- 정부의 적절한 연구개발기금 활용은 새로운 아이디어 창출의 촉매가 될 수 있다.
- 미래의 원자력기술은 현재보다 광범위한 다분야 기술참여를 요구하기 때문에 정부가 다분야 협동연구를 지원해야 한다.
- 정부는 기술혁신이 차세대 원전을 위해 활용될 수 있는 신속성 있는 규제체제를 운영해야 한다.

차세대 원전이 국제협력의 결과일 것임을 주목해야 한다. 전체적인 일괄공급보다는 부분적인 공급에 주력하며 각국은 서로 협력하여 에너지 시장에의 안착을 시도할 것이다.

또한 원전은 국제적인 안전기준의 적용을 받게 될 것이다. 원전발전단가는 세계시장기능에 맡겨질 것이다. 따라서 국제협력은 초기 연구개발투자를 절감하고 아이디어와 두뇌의 공급에 기여할 것이다.

이러한 차세대 국제협력에 있어서 IAEA의 역할은 중요하다. IAEA는 이미 ITER사업을 주관하고 있고 고속로, 개스냉각로, 경수로분야의 실무그룹을 운영하고 있는데 우리나라의 적극적인 참여가 필요하다. 변혁에 대한 당위성은 명확한 바 미래를 위한 전향적인 비전을 가진 자가 차세대 원전기술을 향유할 수 있을 것이다.