

개발도상국에 있어서 원자력산업의 기술발전과정 분석 : 한국의 경험과 시사점*

Development Process of Nuclear Power Industry in a Developing Country : Korean Experience and Implications

홍 사 균**

Abstract

Korea has exerted her efforts to assimilate nuclear power technology, and reportedly localized 95 percent of nuclear power technology by 1995. This paper investigates the evolution of nuclear power program in Korea to exploit the development process of the nuclear power industry and key factors for the technological localization of nuclear power plant. In developing countries, an imitative catching-up process can be shown as a course for developing the absorptive capacity of foreign technology, which depends on prior knowledge base and the intensity of effort. The process of technological learning consists of five stages including preparation, implementation of foreign technology, acquisition of peripheral technology, acquisition of core technology, and improvement of foreign technology. Moreover, this paper discusses six essential factors that have influenced the successful achievement of technological localization of nuclear power plants in Korea. They include the role and strategies of the government, the leading role of utility firm, the development and cooperation of the related organizations, the development of human resources and their efforts, market conditions and the assistance of foreign donors, and social conditions. Finally, this paper

* 본 논문은 Technovation지 19(1999)에 게재된 "Development process of nuclear power industry in a developing country : Korean experience and implications" 논문을 번역 정리한 것이다.

** 과학기술정책연구원(STEPI) 책임연구원.

discusses about implications offered by the Korean experience for other developing countries.

I. 序 論

개발도상국 특히 한국과 같이 국내 에너지 자원이 부족한 나라에 있어서 중요한 현안문제들 가운데 하나는 지속적인 경제발전을 위해 어떻게 에너지를 안정적으로 공급하느냐에 관한 것이다(Cook & Surrey, 1989). 원자력 에너지는 많은 산업화된 국가들에서 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 '60년대부터 인정되어 왔다. 그러나 개도국들에 있어서 상업적인 원자력프로그램은 막대한 자금 투자에 따른 재정적인 어려움, 복잡한 첨단기술에 대한 흡수능력의 부족 등으로 그리 활발하지는 않았다. 원자력프로그램을 추진하고 있는 대부분의 개도국들은 단지 텀키형태의 원자로를 단순히 운영하는데 관심을 보이고 있으며, 적은 수의 국가들만이 원자력기술에서의 기술자립을 추구하여 왔다(Chaturvedi, 1990). 한국은 이들 가운데 하나이며, '96년 현재 원자력기술의 95%를 국산화한 것으로 보도되고 있다(원자력산업회의, 1997).

한국에 있어서 무엇이 짧은 기간동안 원자력기술에 대한 국산화를 가능하게 하였는가? 구체적으로 원자력기술을 발전시키기 위해 어떻게 외국기술을 소화하고 기술능력을 축적시켰는가? 언제 그리고 어떻게 정부프로그램과 다른 외부 요인들이 원자력기술의 자립에 영향을 미쳤는가? 그리고 한국의 경험으로부터 개발도상국에 주는 시사점은 무엇인가? 이러한 질문에 답하기 위하여 이 논문은 모방적인 따라잡기 과정에 있어서 조직학습 모형에 대한 개발을 시도하고, 한국이 선진국에서 도입된 기술을 어떻게 따라잡았는가를 설명하기 위해 한국의 원자력산업을 대상으로 사례 분석한다.

II. 外部知識의 吸收

기술은 투입을 산출로 효율적으로 변환하는데 있어서 지식과 기능의 실제적인 적용을 가리키며, 기술능력이란 기술지식을 효율적으로 활용하는 능력을 가리킨다(Westphal et al., 1985). 기술능력에는 기존의 지식을 소화·흡수하는 능력뿐만 아니라 새로운 지식을 창출하는 능력도 포함된다(Linsu Kim, 1997b). 더욱이 개발도상국에 있어서 기술변화는

거의 대부분을 기존 지식의 획득, 소화, 그리고 개선으로부터 발생된다(Linsu Kim 1980). 개도국에 있어서 기술능력을 축적하는 것은 선진국 수준의 기술을 모방하여 따라잡는 동태적인 과정으로 그 과정에는 외부 지식의 획득과 흡수 단계에서 자체 연구개발을 통해 획득한 지식을 개량하고 개선하는 단계에 이르기까지 매우 다양한 활동들이 포함되어 있다.

개인 수준에서 외부의 지식은 사전 관련 지식이라는 토대 위에서 소화·흡수되고 활용된다. 이 과정에서 새로운 정보는 공유된 언어 혹은 '수용기(receptor)'를 통해 인식된다. 인식된 정보는 기억 속에 저장된 관련 지식의 활용을 통해 소화·흡수되며, 새로운 지식의 형태로 다시 기억 속에 저장된다. 이러한 획득된 외부지식을 '빌려온 지식'이라고 부르고 있다(Bolton, 1993). 외부로부터 빌려온 지식을 흡수하기 위해서는 전문적인 능력이 필요하다. Cohen(1990)에 의하면, 외부의 지식을 이용·개발하는 능력을 '흡수능력(absorptive capacity)'이라고 부르면서 흡수능력을 새로운 정보의 가치를 인식하고 소화하며 그리고 그것을 상업적인 제품에 활용하는 능력이라고 정의하고 있으며, 이러한 능력의 집합체가 한 기업의 흡수능력을 가리킨다고 주장하고 있다. 이러한 맥락에서 조직의 흡수능력은 조직 구성원의 흡수능력의 합수로 표현될 수 있다. Linsu Kim(1997a)은 조직의 흡수능력은 사전 관련지식의 축적량과 노력의 강도에 의해 결정된다고 주장하고 있다. 여기서 사전 관련지식의 축적량은 조직 안에서 이용 가능한 개개인 지식의 집합체를 가리키며, 노력의 강도는 문제를 해결하기 위해 조직 구성원이 소비하는 에너지의 양을 나타낸다.

축적된 사전 관련지식은 새로운 지식을 기억 속에 저장하는 능력과 유사한 상황에서 관련지식을 회상하고 이를 활용하는 능력을 증진시킨다(Cohen, 1990). 조직 수준에서 사전 관련지식의 축적량은 2개의 중요한 요소로-조직기억과 조직의 인지구조-구성되어 있다. 조직기억은 현재의 의사결정에 영향을 미칠 수 있는 조직의 역사로부터 저장된 정보이다(Walsh & Ungson, 1991). 이러한 정보는 표준운영절차, 일상적인 업무 등의 형태로 조직에 저장된다(Gioia & Pool, 1984; Nelson & Winter, 1982). 경험으로부터 얻어진 모든 지식과 노하우는 그것이 암묵적인 형태든지 공식적인 규칙이든지 조직기억 속에 저장하는 것이 매우 중요하다. 그 이유는 조직기억의 풍부함이 조직학습의 성과에 영향을 미치기 때문이다. 조직의 인지구조는 조직의 '세계관(weltanschauung)'이라고도 표현되며(Kim, 1993), 이것은 환경변화 혹은 환경의 영향에 대한 조직의 반응을 어떻게 해석하는가를 결정하는 것으로 설명되고 있다. 이는 기술적인 혹은 경영상의 문제를 해결하는 것을 돕는 일종의

지능시스템으로 간주할 수 있다. 더욱이 이것은 공유된 규범과 목표와 같은 조직문화에 반영될 수도 있다(Dodgson, 1993). 그러므로 조직의 인지구조는 조직학습을 용이하게 할 수 있으며, 개인학습과 집단학습을 연결 혹은 통합시키는 역할을 한다.

기업이 빌려온 지식을 내재화하는 노력 없이 대개 그대로 사용하는 경우는 극히 드물다. 빌려온 지식을 내재화하기 위해 기업은 학습과 노력을 하는데 대체로 다양한 형태의 시행착오를 통해 이루어진다. 만약 빌려온 지식을 충분히 흡수하기 전에 그 지식을 적용하기 위한 현장경험의 기회가 적거나 불규칙적으로 발생하면 후속 단계로 이행하는 과정에서 많은 애로를 겪는다. 자체 연구개발 노력은 빌려온 지식을 내재화하는데 매우 중요한 역할을 한다. 이와 같이 보다 복잡한 후속 단계로 넘어가기 전에 초기단계의 비교적 단순한 문제에 충분한 시간과 노력을 투입하는 것은 매우 중요하다(Harlow, 1959; Linsu Kim, 1997a).

Ⅲ. 韓國에서의 原電프로그램의 進化

한국은 세계에서 가장 빠르게 산업화한 국가 중에 하나이다. 실제로 한국의 GDP는 1964년부터 1994년까지 30년 동안 불변가격으로 연평균 8.6% 이상을 성장해 왔다. 경제가 성장함에 따라 1차 에너지소비도 동기간동안 비슷한 증가를 해왔다. '78년 최초의 원자력 발전소인 고리1호기가 상업운전을 시작한 이래 '97년 말까지 11기의 원자력발전소가 한국에서 상업적인 운전을 하고 있으며, 가동중인 원자력발전소의 발전용량은 약 9.6GWe 이다. '97년 말 현재 원자력발전량은 전체 발전량의 34%를 공급하고 있다. 또한 7기가 건설 중에 있고, 중장기전력수급계획에 따라 2006년까지 5기가 추가로 건설될 계획이다.

<표 1>은 한국의 원자력발전소에 대한 개요를 나타낸 것이다. 한국에서의 원전프로그램 진화과정은 원전 건설에 있어서 국내기술의 기여도 혹은 원전 건설기간 중에 습득한 기술 지식의 내용에 따라 5단계-준비, 외국기술의 단순 운영, 주변기술의 획득, 핵심기술의 획득, 그리고 외국기술의 개선-로 구분할 수 있다.

하나의 원전을 건설하기 위해서는 원자로의 설계 및 제작, 핵연료 제조, 플랜트 설계 및 엔지니어링, 시공 및 감독, 시운전, 그리고 프로젝트 관리 등 다방면에 걸친 기술지식이 축적되어 있어야 하며, 특히 최고의 안전성과 신뢰성 조건을 만족시켜야 하기 때문에 높은 수준의 기술적인 능력이 요구된다. 따라서 원전기술을 내재화하는 과정에는 많은 노력과

오랜 기간을 수반하게 된다. 이러한 점에서 원전기술의 내재화 과정에 대한 사례연구는 모방적인 따라잡기 과정을 동태적으로 잘 설명해 줄 것이라고 기대한다. 이후 그 과정에 대해 자세히 살펴본다.

〈표 1〉 원자력발전소 건설 추진현황

호 기	출 력 (MKw)	노 형	발주방식	설계용역	주기기 공급자			건설비 (백만불)	건설기간 (기초굴착~ 상업운전)
					원자로계통	터빈 /발전기			
# 1(고리 1)	587	PWR	일괄발주	GIL	WH	GEC	322	'70~'78	
# 2(고리 2)	650	PWR	일괄발주	GIL	WH	GEC	988	'76~'83	
# 3(월성 1)	679	PHWR	일괄발주	AECL	AECL	HP	1,094	'75~'83	
# 4, 5(고리 3, 4)	950×2	PWR	분할발주	BECH	WH	GEC	2,378	'78~'86	
# 6, 7(영광 1, 2)	950×2	PWR	분할발주	BECH	WH	WH	2,518	'79~'87	
# 8, 9(울진 1, 2)	1000×2	PWR	분할발주	FRA/ALS	FRA	ALS	2,582	'81~'90	
# 10, 11(영광 3, 4)	1000×2	PWR	분할발주	한기/S&L	한중/CE	한중/GE	4,887	'87~'95	
# 12, 13(울진 3, 4)	1000×2	PWR	분할발주	한기	한중	한중	4,399	'91~'99	
# 14, 15, 16(월성 2, 3, 4)	700×3	PHWR	분할발주	AECL	AECL	한중	4,198	'91~'97(2) '95~'99(3,4)	
# 17, 18(영광 5, 6)	1000×2	PWR	분할발주	한기	한중	한중	4,239	'95~2002	

주 : PWR; Pressurized Water Reactor, PHWR; Pressurized Heavy Water Reactor, GIL; Gilbert(미국) WH; Westinghouse(미국), GEC; General Electric Co., Ltd.(영국), AECL; Atomic Energy of Canada Ltd(캐나다), HP; Howden Parsons(캐나다), BECH; Bechtel(미국), FRA; Framatome(프랑스), ALS; Alsthom(프랑스), CE; Combustion Engineering(USA), S&L; Sargent & Lundy(미국), GE; General Electric(미국)
 자료원 : 한국전력공사(1993, 1994, 1995, 1996, 1997), 원자력산업회의(1994-1998)

3. 1 準備 段階

3. 1. 1 下部構造의 構築

'54년 유엔총회 산하에 국제원자력기구(IAEA)가 설치된 이후 한국은 '57년 IAEA의 회원국으로 가입하면서부터 원자력의 이용 및 개발에 대해 관심을 기울이기 시작하였다. 먼저 정부는 '58년에 원자력 관계 법령을 제정하고, 이에 따라 원자력 문제를 전담할 정부조직으로서 원자력원과 국립연구기관인 원자력연구소를 설치하는 등 원자력 관련 하부구조

를 마련해 나갔다. 당시 정부는 핵기술이 미래를 약속할 것이라는 국가적인 비전을 형성해 왔으며, 가장 시급하고 중요하게 취급한 정책은 원자력요원의 양성이었다¹⁾. 실제로 '56년부터 '64년까지 정부는 국비, IAEA, 미국 등의 자금을 활용하여 240명의 훈련생을 해외에 파견하였다(원자력(연), 1990). 이들은 주로 원전의 시찰, 정규 교육프로그램 등 기초적인 교육을 받았다. 그러나 국내에 돌아와서 원자력연구소외에 마땅한 일자리가 없어 대부분의 인력이 타 분야로 전직하거나 다시 미국 유학을 떠났으며²⁾, 훗날 이들은 한국의 과학기술계의 지도그룹으로 핵심적인 역할을 하였다.

한편 원자력연구소를 중심으로 추진되어 온 연구는 주로 농업과 의학분야에서의 방사선과 동위원소의 활용과 관련된 것이며, 원자력발전과 관련된 연구활동이 시작된 것은 미국으로부터 도입한 100Kw급의 연구용원자로 TRIGA Mark-II를 가동하기 시작한 1962년부터이었다.

3. 1. 2 原子爐 導入의 決定

'60년대 후반에 들어 정부는 수출지향적 경제정책을 추진해 나갔으며, 이에 따라 정부의 중요한 정책적 관심사항은 안정적인 전력수급을 확보하는데 초점을 두었다. 빈약한 천연자원의 제약 속에서 '60년대부터 상업적으로 사용되기 시작한 원자력에너지는 하나의 대안으로 신중히 검토되었다. '68년에 정부는 IAEA의 자문, 외국 컨설팅전문업체에 의한 경제성 검토³⁾ 등을 토대로 2개의 원전을 건설한다는 기본계획을 설정하였다. 기본계획에 따라 원자력발전소 건설 및 운영의 주체로 지정된 전력공급업체인 한국전력공사(이하 한전)는 정부와 함께 원자로의 형태와 공급선을 결정하기 위한 검토작업을 하였다(한국전력공사, 1995). 외국에서 훈련받은 전문인력을 중심으로 실무작업반이 구성되었다. 실무작업반은 외국에서 습득한 지식을 토대로 가압경수로(PWR; Pressurized Water Reactor), 비등로

-
- 1) 정부의 원자력정책의 일환으로 '58년과 '59년에 각각 한양대와 서울대에 원자력공학과를 신설하였으며, 실제로 우수한 학생이 많이 몰려들었다.
 - 2) '58년부터 '64년 동안 정부는 핵전문가를 양성하기 위해 IAEA 교육 프로그램 등을 이용하여 240명의 훈련생을 파견하였으나 당시 직업의 기회가 제한되어 교육받은 훈련생의 60%만 귀국하였으며, 더욱이 실험장비와 연구비의 부족으로 이들 중 대부분은 몇 년 후 미국으로 다시 돌아갔다.
 - 3) 원전사업에 대한 타당성 검토는 1) 국내 에너지 자원의 빈약과 해외수입유류에 대한 지나친 의존 탈피, 2) 화력발전소 대비 경제성 우위, 3) 연료 저장·수송의 편의성, 4) 에너지 공급원의 다원화 등을 주요 내용으로 하는 Burn & Roe 의 컨설팅용역 분석보고서를 토대로 이루어 졌다.

(BWR; Boiling Water Reactor), 가스냉각로(AGR; Air Gas Reactor)를 검토하였으며, 그 결과 PWR 또는 BWR이 안전성, 신뢰성, 그리고 대규모 운영면에서 우수하다고 생각하였다. 그러나 한전은 미국 주요 공급자인 WH(PWR), CE(PWR), GE(BWR)끼리의 담합을 방지하기 위해 입찰과정에 영국의 BNEE(AGR)도 포함시켰다⁴⁾. BNEE(AGR)가 영국 정부의 지원을 받아 더 좋은 차관조건을 제시하였지만, 한전은 기술적 측면에 더 우선순위를 두어 WH(BWR)를 선정하였다(김종수, 1990). 결국 미국의 WH가 원전 1호기의 주계약자로 선정되었으며, 주계약자가 공기, 공사비, 품질 등 사업전반에 대한 책임을 지고 건설 및 시운전을 한 후 사업주에게 인계하는 일괄발주방식으로 계약을 맺었다. 결과적으로 재정적인 확보의 어려움으로 인해 2기의 원전을 동시에 건설하지 못하고, 두 번째 원전프로젝트는 6년 후에 추진되었다. 만약 한전이 재정문제에 우선 순위를 두어 AGR로 원전을 건설하기로 결정하였다면 이후에 추진된 원전기술의 자립과정에서 심각한 문제가 야기됐을 것이다.

3. 2 外國技術의 單純運營 段階 : 1~3호기

3. 2. 1 합작회사의 設立

원전 1호기가 외국업체에 의해 건설되는 동안 정부는 향후 원전기술을 내재화하기 위해서 가장 핵심이 되는 것이 원전설계기술을 습득하는 것이라고 판단하였다. 당시 발전소 설계를 전문으로 하는 국내업체도 없었기 때문에 정부는 설계·엔지니어링(A-E; architecture-engineering) 전문회사를 외국업체와 합작투자회사 형태로 설립하고 이를 통해 외국의 원전설계기술을 습득하고자 하였다. 이에 따라 '75년 정부는 미국의 A-E전문회사인 Burns & Roe社와 정부(원자력(연))가 50:50으로 합작투자회사인 KABAR(Korea Atomic and Burns & Roe)를 설립하였다. 그러나 2, 3호기의 원전건설프로젝트에 Burns & Roe社가 설계부문의 하청계약자로 참여하지 못하고 외국의 주계약자가 자기의 설계를 갖다가 그대로 시공하였기 때문에 KABAR는 일부 인허가업무에의 기술지원 및 현장인력을 지원하는 정도에 머물렀으며, 단지 외국업체의 수행을 관찰하는 수준에서 관련지식을 습득할 뿐이었

4) WH는 미국의 Westinghouse를, GEC는 영국의 The General Electric Co., Ltd.를, BNEE는 영국의 British Nuclear Export Executive를 나타낸다.

다. 결국 KABAR가 A-E 관련 업무를 확보하지 못해 Burns & Roe는 1년후 철수하였으며⁵⁾, KABAR는 설계기술을 습득할 기회가 제한됨에 따라 Burns & Roe의 기술지식을 전수받지 못하였다.

3. 2. 2 施工分野의 制限的 參與

원전 1호기가 Bechtel에 의해 一括發注(turn-key)로 건설됨에 따라 국내기업의 참여 폭은 극히 제한되었다. 설계, 기자재 공급은 물론 시공감독, 공정관리 등 거의 모든 분야에 걸쳐 외국기술자에게 의존하였다. 단지 토건공사 및 토건자재 공급, 간단한 장치의 조립 등에 대해 외국 하청업자의 감독을 받아 국내건설업체인 현대건설이 단순노동 업무만을 수행하였으며, 매 공정마다 외국기술자의 확인을 받았다. 그러나 2호기와 3호기부터는 1호기의 현장경험을 통해서 습득한 지식을 토대로 외국기술자의 협조를 받아 많은 양의 현장도면이나 시공절차서를 작성하여 업무를 수행하는 단계까지 도달하였다. 2, 3호기사업에서 현대의 계약액은 총건설비의 5%에도 미치지 못하는 정도로 국내업체의 참여 정도는 매우 저조했다(현대건설, 1982).

3. 2. 3 터키 원전의 運營

이 시기에 가장 시급한 당면과제는 터키의 원전을 어떻게 잘 운영할 것인지에 관한 것이었다. 실제로 원전 운영요원에 대한 해외훈련, 그리고 운영, 품질관리, 가동전 조사 등과 관련된 기술 및 엔지니어링서비스를 집중적으로 도입하는 등 운영기술을 습득하기 위한 노력이 활발히 이루어졌다. 당시 원자력연구소의 주된 역할은 원전 관련 요원을 훈련시키는 것이었다. 실제로 원자력연구소는 '68년부터 매년 150~200명씩 원자력 요원에 대한 기본교육을 시켰으며, 이 훈련과정은 현장작업자, 운영요원, 해외 파견자를 위한 기본과정으로 운영되었다(원자력(연), 1990).

5) KABAR(Korea Atomic and Burns & Roe)는 Burns & Roe가 영업실적이 저조하여 철수함에 따라 '76년 원자력(연)이 Burns & Roe 지분 주식을 인수하여 단독투자회사 KNE로 개편되었으며, 후에 한전의 자회사인 현재의 KOPEC으로 다시 개편되었다.

3. 3 周邊技術의 獲得 단계 : 4~9호기

3. 3. 1 分離發注方式의 採擇: 外國業體 主導, 國內業體 下請

'70년대 중반에 접어들면서 한국의 경제는 중동건설의 호황에 힘입어 조선을 포함한 중화학공업에 막대한 설비투자가 이루어지는 등 중화학공업이 급속히 성장되었다. 이에 따라 외국 엔지니어링업체에 의한 플랜트 건설이 증가하자 '76년 정부는 플랜트의 국산화, 일괄 수주방식에 의한 공장건설의 지양 등을 주요 내용으로 하는 '기계류 국산화전략'을 추진하였다. 그 일환으로 '70년대 후반 정부는 외국업체가 원전사업을 주관하는 경우 일정한 한도 내에서 기술전수의 목적으로 국내업체를 참여시키도록 하는 것을 방침으로 세웠다. 이에 따라 발주자인 한전은 기술전수의 목적을 극대화시키기 위해서 원전 4, 5호기 사업부터 분할발주방식으로 추진하였다. 이러한 조치로 국내업체는 하청의 형태로 참여하면서 원전 관련 기술지식을 공식적으로 습득할 수 있는 학습의 기회를 가질 수 있었다.

3. 3. 2 상세설계기술의 習得

A-E업무의 설계부문의 기술습득을 위한 학습의 기회는 발주자인 한전과 원전 4, 5호기 및 원전 6, 7호기 사업의 A-E업무에 대한 주계약자인 Bechtel과의 계약과정에서 기술전수 조항을 추가시킴으로써 생성되었다. 이에 의해 '78년 국내 A-E 전문업체(KNE)는 국내에서 기본교육 과정을 거친 28명의 기술인력을 Bechtel에 파견하였다. Bechtel에서 3개월간의 훈련과정을 거친 전문인력들은 Bechtel의 기술자와 함께 해외에서 3년동안 A-E 업무를 수행하면서 관련 지식을 습득하였다. 이들은 국내에 돌아와서 '81년부터 원전 4, 5호기 준공시점인 '85년까지 현장노동자와 함께 상세설계 도면 작성, 설계계산, 설계수정 등 제반 부수설계업무를 수행하면서 지식과 경험을 현지 노동자에게 이전하였다. 국내 기술진이 실무와 접하면서 습득하게 된 중요한 것은 다음 단계에 습득해야할 지식의 내용, 전체 시스템 속에서의 습득한 지식의 위상 등 습득한 지식에 대한 활용도를 높이기 위한 나름대로의 지식처리 능력을 축적하기 시작하였다는 것이다. 그리고 원전 계획단계부터 건설완료시까지 참여함으로써 언젠가는 우리 힘으로 원전설계를 할 수 있다는 자신감도 가지게 되었다.

원전 6, 7호기에서는 A-E 관련 기술자를 보다 많이 양성하고 보다 많은 기술지식을 습득하기 위해 Bechtel에의 파견에 앞서 '79년에 벨기에의 Belgatom사에 1년동안 42명을 파견하여 A-E업무에 대한 기초과정을 교육시켰다. 여기서 교육받은 인력을 포함하여 58명의 국내기술자가 Bechtel에서 '80년부터 5년 동안 체계적인 학습방법을 통해 기술지식을 전수 받았으며, 특히 기술책임자(Project engineer)의 기술관리능력을 배양하기 위한 노력도 병행하였다. 원전 6, 7호기 사업에서는 원전 4, 5호기 사업과 달리 일부 상세설계업무가 Bechtel에서 한기로 이관되었으며, 국내기술자들은 Bechtel이 수행한 기본설계에 의거하여 상세설계업무를 수행하였다. 이 결과물은 다시 Bechtel로 보내져 외국기술자에 의해 기본설계와의 중첩사항 등이 검토되었다. 이와 같이 상세설계에 대한 기술지식은 강의실에서의 훈련(CRT), 외국기술자 지도하의 실무훈련(OJT), 그리고 상세설계 업무의 수행과 설계결과물에 대한 외국기술자의 검증 등의 과정을 거쳐 한국기술자에 내재화되었다. 그리고 향후 후속사업에 대비하기 위해 4, 5호기사업 이후부터는 사업의 수행과정에 발생한 문제점과 이에 대한 처리경위 등 현장경험을 자료화하는 작업도 병행하여 추진해 나갔다. 이러한 노력으로 A-E업무의 국내 인력 참여율은 투입인력 기준으로 원전 3호기의 16%에서 원전 4, 5호기와 원전 6, 7호기에서 각각 37%와 44%로 증가되었다(<표 2> 참조).

〈표 2〉 원자력발전소 호기별 국산화율

(단위 : %)

원 전 명	1호기	2호기	3호기	4, 5호기	6, 7호기	8, 9호기	10, 11호기
건설기간	'70-'78	'76-'83	'75-'83	'78-'86	'79-'87	'81-'90	'87-'96
설계·엔지니어링 ¹⁾	-	-	16%	37%	44%	46%	75%
기자재 ²⁾	8%	13%	14%	29%	35%	40%	74%
- 원자로설비	0	0	0	(10%)	(18%)	(26%)	(64%)
- 터빈/발전기	0	0	0	(11%)	(28%)	(45%)	(72%)
- 보조기기	N.A	N.A	N.A	(33%)	(42%)	NA	(75%)

주 : 1) 설계·엔지니어링 부문의 수치는 man-hour 기준으로 국내 인력의 참여율을 타냄.

2) 기자재 부문의 수치는 금액기준으로 국내 공급의 비율을 나타냄.

자료원 : 한국중공업(1995), 한국전력기술(주)(1995)

3. 3. 3 發電設備의 單純組立

'70년대 말 한전은 정부의 '기계류 국산화'정책에 따라 원전 4, 5호기 사업이후부터는 원전 기자재의 국산화율을 제고시켜 나가기로 했다. 원전 기자재를 국산화가 가능한 품목(주로 비발전용 보조기기)과 불가능한 품목(주로 발전설비)으로 구분하고, 국산화 가능품목을 대상으로 고시한 후 국내업체가 제작한 기자재를 정부가 구매하는 제도를 통해 국내 기자재 제작업체의 기술능력과 원전 기자재의 국산화율을 제고시켜 나갔다. 그리고 '80년에 정부는 발전설비에 대한 외국의 선진기술을 집중적으로 습득하여 발전설비를 조기에 국산화시키기 위해 한국중공업(이하 한중)을 발전설비 제조업체로 일원화하여 원전설비의 공급에 대한 독점권을 부여하고 한전의 자회사 형태로 공기업화 하였다. 그후 한전은 원전 6, 7호기 사업부터 한국중공업을 외국공급업체의 하청업체로 참여시킴으로써 공식적인 창구를 통해 관련 기술지식을 습득해 나갈 수 있었다. 원전 6, 7호기 사업에서 한중은 가압기, 증기발생기에 대한 용접과 조립제작에 참여하였으며, 원전 8, 9호기에서는 원자로, 증기발생기, 가압기 등의 핵심기기를 반제품 형태로 들여와 완제품으로 조립 제작하였다. 이와 같은 노력에 힘입어 표 2에서 보는 바와 같이 원전 기자재의 국산화율은 금액기준으로 원전 2, 3호기의 13%에서 원전 8, 9호기에서는 40%로 크게 신장하였다.

한편 원전 기자재의 국산화를 위한 노력은 원자력연구소에서도 추진되었다. 원자력(연)은 원자력 선진기술을 배우기 위한 첫 단계로 '78년 원전 기자재 시제품 개발사업을 추진하였다. 대상은 발전설비 가운데 국내기술능력으로 제작이 가능한 품목⁶⁾ 중에서 비교적 기술자료의 입수가 용이한 품목으로 선정되었다. 연구소는 이와 관련된 기술자료를 비공식 경로를 통해 입수하여 이를 분석/소화하고, 국내 제작업체와의 긴밀한 협조 하에 시제품을 제작하는데 성공하였다. 이것은 국내에서 처음으로 핵수준급의 부품을 국산화하였다는 점에서 그 의의가 크다.

3. 3. 4 원전건설기술의 定着

원전 4, 5호기에서는 대부분의 건설시공을 국내업체인 현대의 책임 하에 수행하였다. 토

6) 대상 품목은 핵연료 장진관집합체, 안전봉 구동장치, 저항온도 측정계 등 비교적 기술자료의 입수가 용이한 품목으로 선정하였다.

건공사의 경우 대부분의 기본설계를 제외한 전 부문을 국내 기술진에 의해 업무를 수행하였으며, 기전공사의 경우도 대부분의 기본설계를 외국업체에 의존하였으나 시공도면과 절차서의 작성, 공법 및 건설장비의 선정, 품질보증 업무 등을 국내업체가 자체적으로 수행하여 건설기술을 정착시켜 나갔다. 한편, 원전 8, 9호기부터는 현대건설이 건설 및 시공업무에 대한 주계약자가 되어 국내업체의 책임 하에 모든 업무를 수행하는 수준에 도달하였다.

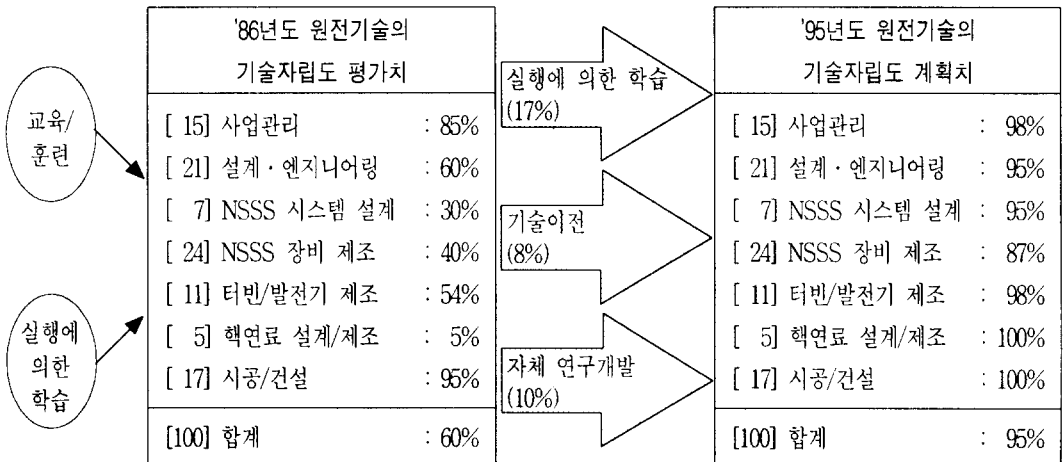
3. 4 核心技术의 獲得 단계 : 10~16호기

3. 4. 1 技術自立計劃의 樹立

'70년대 후반 산업설비에 대한 급속한 투자가 이루어지면서 엔지니어링서비스의 도입이 증가하자 정부는 '81년 국내 엔지니어링산업을 육성하기 위해 현행의 기술용역육성법을 개정하였다. 그 내용은 국내에서 발주하는 용역의 경우 국내용역업자를 주계약자 또는 사업관리 대행자로 하여 업무를 수행하도록 규정하였으며, 용역발주자가 외국용역업자에게 용역을 수행하고자 할 때에는 정부의 승인을 받도록 하였다.

이러한 배경아래 '82년 한전은 후속 원전건설프로젝트의 주계약자를 국내업체로 지정한다는 원칙 하에 원전기술의 기술자립을 위해 원자력정책의 이정표가 되는 '원자력발전 기술자립 기본계획'을 수립하였다. 그것은 원전 10, 11호기사업의 수행과 기술도입을 병행으로 추진하여 원자력 핵심기술을 획득하고, 사업이 완료되는 '96년에 동일한 기종의 원전에 대한 자주적인 건설능력을 95% 수준까지 끌어올린다는 기본목표를 설정한 것이다. 이를 달성하기 위한 구체적인 추진전략으로는 그림 1에서 보는 바와 같이 지금까지 축적된 지식의 토대 위에서 한편으로는 기술이전의 협약을 통해 기술적인 자료의 확보와 기술인력의 양성을 추진하고, 다른 한편으로는 모의설계 및 모의제작 등의 노력을 통해 도입된 기술지식을 소화·흡수한 후, 이들 두 가지 방법을 통해 흡수한 지식을 토대로 공동설계, 자체 설계 및 기자재 제작에 대한 검증 등 실행에 의한 학습을 통해 흡수된 기술지식을 내재화시킨다는 것이다. 구체적인 실천계획을 수립하기 위해 한전 주도로 국내 관련업체 및 연구기관으로 구성된 '전력그룹협력회'를 운영하였다. 이 '전력그룹협력회'는 자원의 효율적인 활용을 촉진시키고 노력의 중복을 피하기 위해 각 주체별로 사업의 수행범위 및 기술

자립계획에 대한 역할분담 등의 기본원칙을 결정하였다. 이 위원회는 충분한 협의와 상호 조정을 통해 원자력기술개발의 국가정책을 수행하는데 커다란 공헌을 하였으며, 지금까지도 중요한 임무를 계속 수행하고 있다.



주 : [] 안의 수치는 원전 10, 11호기 사업의 총건설비용 중 해당 부문이 차지하는 비중을 나타냄.
 자료원 : 한국전력공사(1992)

(그림 1) 원자력발전기술 기술자립 기본계획

3.4.2 核心技术의 移轉

원전 10, 11호기 사업에 대한 각 사업별-원자로 등 기자재 공급, A-E 업무, 건설 및 시공 등-주계약자가 국내업체로 결정됨에 따라 국내 주계약자들은 국내에서 공급될 수 없는 핵심기술과 관련 업무를 제공하고 동시에 해당 기술지식을 전수해 줄 각각의 외국업체들과 하청계약을 맺었다. 기술도입선인 외국공급사와의 계약내용에는 핵심기술을 포함하여 외국에 의존하고 있는 모든 기술에 대한 이전이 포함되어 있으며, 기술자료 및 전산코드의 제공내역, 기술인력에 대한 교육 등 구체적인 방법과 절차가 명기되었다. 외국공급자들은 자기들이 보유한 기술을 그대로 넘겨주는 파격적인 기술이전 조건을 수락한 것이었다. 실제로 입찰안내서를 발행한 1985년의 세계 원전시장은 신규 발주가 거의 없던 때여서 문자 그대로 구매자 시장(buyer's market)이었으며, 외국의 파트너들은 새로운 일거리가 얻기 위해서 고객의 요구를 수용했던 것이다.

한편 한전은 과거 외국업체와의 직접 계약하는 형태에서 각 사업별로 국내업체와의 계약하는 형태로 바뀌면서 사업 전체에 대한 책임감과 기술자립을 총괄해야하는 이중부담을 가지게 되었다. 이에 따라 한전은 원전사업에 대한 총괄적인 사업관리 업무를 수행함과 동시에 원전건설 기술자립 실천계획의 차질 없는 추진을 위해서 주기적으로 기술도입 계약의 이행상태, 외국기술을 흡수하기 위한 추진실적, 그리고 원전사업의 수행실적 등에 대한 계획 대비 실적을 점검하였다. 그리고 미흡분야 및 잘못된 사항에 대해서 보완 및 개선을 유도하였다. 뿐만 아니라 관련업체들의 열악한 재정상태를 감안하여 기술도입비용 등 기술자립에 소요되는 모든 비용을 지원하였다.

3. 4. 3 基本設計 및 設計管理技術의 習得

한국전력기술(주)은 원전 10, 11호기 사업에서 A-E업무를 주도적으로 수행하기 위해 선행호기에서 부분적으로 축적된 사전 관련 지식을 토대로 후속 원전에 대한 설계기준 작성, 기자재 국산화 대상품목에 대한 검토, 그리고 원전의 운영과정에서 파생된 문제를 해결하기 위한 자체 R&D의 수행 등 사전 준비를 갖추어 나갔다. 그러나 A-E업무를 독자적으로 수행하기에는 전체의 설계업무를 일관성 있게 엮고 앞뒤를 짜 맞추는 시스템기술과 이를 관리하는 설계관리의 노하우가 절대적으로 부족했다. 이에 따라 '87년 한국전력기술(주)(이하 한기)은 이러한 시스템기술을 전수해주고 A-E업무를 같이 수행할 외국 파트너로 Sargent & Lundy(이하 S&L)를 선정하여 A-E업무 지원 및 기술전수 계약을 체결하였다.

기술전수 계약의 체결로 S&L社로부터 A-E 업무의 수행에 필요한 engineering standards, computer codes, 그리고 reference plant의 설계 자료와 함께 이를 구체적으로 활용하기 위한 절차서, 매뉴얼, computer programs 등이 제공되었다. 사업시작과 함께 약 100여명에 달하는 한기의 기술진이 S&L사로 파견되었다. 국내 기술진은 해외에서 S&L사의 주도 아래 수행된 업무체계의 정립과 원전의 개념설계 업무를 지켜보면서 관련 지식을 습득하였다. 2단계로 업무장소를 서울로 이전한 후 S&L사 직원과 한기의 직원으로 구성된 통합사업팀을 한시적으로 운영하여 기본설계 및 상세설계의 모든 업무를 수행하였다. 그후 '91년에는 한기 주도로 상세설계업무를 수행하였으며, '93년에는 통합사업팀을 현장으로 이관하여 시운전 업무에 대한 실무경험을 쌓아 나갔다. 이와 같이 한기는 선행호기에서의 부분적인 참여와는 달리 원전 10, 11호기에서는 처음부터 끝까지 전 범위에 걸쳐 S&L社와

동등한 책임을 가지고 공동으로 수행하였다.

한편 한기는 A-E업무와 병행하여 기술자립을 위한 다각적인 노력도 기울였다. 구체적으로 S&L社로부터 도입한 engineering standards, computer codes, reference plant의 설계자료 그리고 computer program 등을 체계화하고 내재화시키는 작업도 병행하였다. 그리고 설계업무 수행을 통하여 취득한 기술과 경험을 축적코자 각종 설계경험자료도 정리해 나갔다. 이와 같이 공동작업을 통한 설계능력의 축적, 설계에 필요한 기술자료의 체계적인 정리, 구매·시공관리 및 시운전 등 전 단계에 걸쳐 도출된 문제점에 대한 개선사항 및 경험사례 정리, 전산시스템의 구축 등을 통해 A-E 업무를 일괄 수행할 수 있는 능력을 갖추어 나갔다.

3. 4. 4 핵증기공급계통(NSSS)의 시스템설계기술 획득

핵증기공급계통(NSSS)은 원전의 핵심기술로 이전까지는 외국업체에 의해 전적으로 공급되어 왔다. NSSS의 시스템설계의 결과물은 NSSS의 기기에 대한 설계와 기자재 구매를 위한 구매시방서로 활용되고, A-E업무의 연계자료로 활용되기 때문에 NSSS의 시스템설계에 대한 기술지식의 획득은 원전 기술자립에 있어서 매우 중요한 비중을 차지한다. 그러므로 NSSS의 시스템설계와 NSSS의 기기에 대한 공급을 가능한 한 기자재제작업체인 한중으로 일원화하는 것이 바람직했다. 그러나 전력그룹협력회는 핵증기공급계통의 시스템설계에 대한 기술획득 및 사업수행의 주체로 원자력(연)을, 원자로 등 NSSS의 주요 기기에 대한 공급주체로 한국중공업을 각각 분리시켜 결정하였다. 그 이유는 NSSS의 계통설계기술을 소화·흡수하기 위해서는 고도의 기술적 기반을 가진 기술인력이 필요하나 한중은 이에 대한 흡수능력이 상대적으로 뒤떨어지며, 향후 습득한 기술을 개량하기 위해서 자체 R&D를 병행하여 수행하는 것이 바람직하다고 판단하였기 때문이다.

NSSS 시스템설계기술의 효율적인 기술이전을 위한 접근방법으로 공동설계의 방법을 택하였다. 이 접근방법은 가압경수로 핵연료의 국산화사업에 대해 지멘스와 선행적인 공동설계의 경험의 성공으로부터 얻어진 자신감에 토대를 두고 선택한 것이다. 계약이 원자력(연)과 CE⁷⁾사이에 이루어졌다. NSSS시스템설계와 엔지니어링 작업은 양쪽이 50:50의 비

7) CE는 그후 ABB와 통합되어 ABB-CE로 개칭됨.

율로 인력이 참여했다. 설계에 참여한 기술인력에는 박사학위를 가진 다수의 고급두뇌가 포함되어 외국기술을 소화·흡수하는데 매우 빠르게 동화시켰다(이병령, 1996). 반면에 CE는 최종 결과물의 보증과 성능에 대한 책임을 맡았다. 이것은 연구소에게 품질에 대한 보증, 일정에 대한 책임, 비용통제수단에 대한 경험을 얻는데 최대의 기회를 제공하였다. 이와 함께 연구소는 기술이전 협약을 통해 CE로부터 NSSS의 시스템설계와 엔지니어링에 대한 모든 기술자료뿐만 아니라 이미 개발된 상업용 가압경수로에 대한 사업관리 기술도 전수 받았다. 뿐만 아니라 계약조건에 따라 CE에서 진행중인 새로운 모형에 대한 R&D 프로젝트에 공동연구의 형태로 참여할 수 있어 원자로개발에 대한 새로운 연구테마에 대한 수요도 확인해 나갈 수가 있었다. 이와 같이 공동설계 작업 착수 전에 국내 설계인력에 대한 기본교육, 해외에서의 공동 설계작업, 작업현장을 국내로 이동하여 국내주도의 작업 수행, 작업결과에 대한 외국기술진의 검증 등의 과정은 한국이 외국업체로부터 기술지식을 흡수해나가는 전형적인 방법이다.

3. 4. 5 원자로 및 터빈/발전기의 製作

원전의 핵심설비인 원자로설비와 터빈/발전기에 대한 공급은 전적으로 외국에 의존하여 왔으며, 단지 일부 기자재에 대한 제작에 있어서 원전 6, 7호기부터 부분적인 기술지식을 습득하여 왔다. 이 분야의 주계약자인 한중은 원전 10, 11호기 사업에서 설계기술 등 핵심 기술을 전수해줄 외국 파트너로 원자로설비 부문에 CE를, 터빈/발전기 부문에 GE를 하청 계약자로 선정하였다. 한중의 기술자는 원전 10, 11호기사업 착수 전에 외국에서 공급사로부터 기술연수를 받았으며, 훈련받은 국내기술자들은 외국 공급사의 기술자와 함께 원전의 주요 설비에 대한 설계업무를 공동으로 수행하면서 설계 관련지식을 축적해 나갔다. 이렇게 훈련된 기술자는 귀국 후 신규인력을 교육시켜 흡수한 지식을 전파시켜 나갔으며, 모의 설계를 통해 자신이 흡수한 지식을 체계화시켜 나갔다. 다른 한편으로는 하청계약을 맺은 CE, GE 뿐만 아니라 BISCO 등 외국의 주요 기자재 제작업체와 기술협력을 맺어 주요 기자재에 대한 기술자료, 전산코드 등 각종 설계자료와 전산프로그램 및 전산설비를 도입하여 설계기술 자립을 위한 기반을 구축하고, 기기 제작에 대한 실시권도 확보해 두었다. 한편 원자로 설비 및 터빈/발전기에 대한 제작은 지금까지 축적된 경험과 주·단조기술을 토대로 제공받은 기술문서, 훈련받은 기술인력 그리고 외국에서 구입한 설비 등을 활용하

여 '88년에 NSSS의 주기에 대한 실물크기의 모형을 제작에 성공하였으며, 품질보증을 위한 각종 시험, 외국파트너의 기술자문 과정을 거쳐 국내 기술자에 의해 완제품을 생산할 수 있었다. 이들 제품은 '91년말부터 공급되었다.

3. 5 外國技術의 改善 단계 : 17~18호기

3. 5. 1 韓國型 標準模型의 開發

원전 10, 11호기는 NSSS의 기준모델인 CE社의 'System 80'(1300 MWe급) 모형을 1000 MWe급으로 축소시킨 것으로, 외국 공급업체의 도움을 받아 건설한 것이다. 따라서 다음 단계는 이와 동일한 기종(동일노형, 동일용량)의 원전을 국내의 힘으로 반복 건설할 수 있는 능력을 확보하는 것이다. 이에 따라 후속원전인 12, 13호기는 외국기술자의 지원 비용을 최대한 줄이는 수준에서 국내 기술진의 힘으로 건설할 수 있는 원전의 표준모형으로 설정되어 건설되고 있다. 이 표준설계모형에 의해 후속 원전인 원전 17, 18호기가 반복 건설되고 있으며, 안전성, 경제성, 운전 및 예방장비의 편의성 등을 높이기 위해 설계기술을 지속적으로 개량시켜 나가고 있다.

원자로 등 일부 주요 핵심기자재는 원전 10, 11호기에서 축적된 경험을 토대로 원전 12, 13호기 사업에서는 한중이 자체적으로 기기 설계를 수행한 후 기술제휴선의 검토를 받는 방법으로 주요 기자재에 대한 국산화율을 지속적으로 높여나가고 있으며, 제작설비의 도입, 설계요원의 해외훈련 등 국산화를 위한 노력을 지속적으로 추진해 나가고 있다.

한편 최근 진행되고 있는 북한 경수로 지원사업에도 한국형 표준모형으로 건설되고 있으며, 향후 중국 등 해외에도 이 모형의 기술과 설비가 수출될 것으로 기대된다. 또한 최근에는 21세기초에 기술선진국 수준에의 진입을 목표로 추진하고 있는 국가연구개발사업인 선도기술개발사업의 하나로 운전중의 경험과 안전성을 보강시킨 개량형 경수로 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 원자력기술을 발전시키기 위해 장기계획을 수립하여 연구개발사업을 본격적으로 추진하고 있다. 원자력연구개발 중장기계획사업은 '92년부터 '96년까지 1단계 연구를 추진하였으며, '97년부터는 원자력연구개발기금이 설치·확보됨에 따라 원자력 기초연구 등 원자력기술을 종합적으로 개발하기 위한 연구개발사업이 체계적으로 추진되고 있다. 표 3은 원전사업에 대해 각 단계별 기술발전과정에 대한 특징 등 주요

특성을 요약 정리한 것이다.

〈표 3〉 원전 프로그램에 대한 단계별 주요 특성

특성 \ 단계	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	5 단계
해당 원전	-	1~3호기	4~9호기	10~16호기	17~18호기
시기	1958~69	1970~83	1978~90	1987~99	1995~2002
핵심 인력	- 정책결정자 - 외국 컨설턴트	- 외국 전문가	- 외국 전문가	- 국내·외 통합팀	- 국내 전문가
중요 정부 정책	- 교육/훈련 - 하부구조의 구축	- 기계류국산화 정책	- 엔지니어링 기술진흥촉진법	- 기술자립 기본계획	- 원자력 연구개발사업의 추진
계약 형태	-	- 일괄발주	- 분할발주 (외국업체주도)	- 분할발주 (국내업체주도)	- 분할발주 (국내업체수행)
국내 연구기관의 역할	- 원전 형태의 선택 자문	- 기본 교육	- 일부 품목의 국산화	- 핵증기공급계통 의 시스템설계	- 연구개발
기술획득의 주 원천	- 교육, 입찰서류	- 현장경험 - 교육/훈련	- 해외 훈련 및 업무 수행	- 기술도입 계약 - 자체 연구개발	- 공동연구 - 자체 연구개발
기자재/부품의 주 원천	-	- 전부 외국	- 대부분 외국	- 대부분 국내	- 거의 국내
획득된 기술					
- 설계· 엔지니어링	-	없음	- 상세설계	- 기본설계	- 사업관리 전산프로그램
- 핵증기공급 계통설계	-	없음	없음	- 시스템설계 기술의 획득	- 시스템설계 기술의 소화/ 흡수
- 기자재 제작	-	없음	- 조립	- 증기발생기, 원자로 제작	- 제어장치 등

IV. 原子力技術의 內在化 影響要因: 技術自立 成功要因

원자력발전산업에 있어서 기술자립을 성공적으로 달성할 수 있었던 요인은 크게 내적인 요인과 외적인 요인으로 구분할 수 있다. 내적인 요인에는 공격적이고 계획적인 정부의 개

발전전략과 정책, 전력공급업체인 한국전력의 의지와 노력, 유관 관련조직의 협력 및 지원, 우수한 인재의 양성 및 과학기술자의 끊임없는 노력 등이 포함된다. 외적인 요인에는 시장의 조건과 외국공급자의 협력, 그리고 사회적인 조건 등이 포함된다. 다음에는 이들 요인들에 대해 자세히 살펴본다.

4. 1 政府의 政策 및 役割

정부의 역할은 특히 개도국의 경제발전과 기술개발에 있어서 중요한 영향을 미치는 요인으로 오랫동안 인정되어 왔다. 정부의 역할은 그 나라가 처한 상황에 따라 다양함에도 불구하고 에너지분야가 공공적인 성격을 가지기 때문에 다른 분야보다 언제나 정부의 역할이 더 강했다. 일반적으로 에너지분야에 있어서 개도국의 정부는 에너지시스템을 효율적으로 운용하기 위해 기술적인 성과를 개선시킬 수 있는 정책을 개발하는데 중점을 두어야 한다. 이러한 에너지 기술정책은 에너지 기술능력의 획득을 강요하고 국내의 기술축적을 제고시키기 위해 성공적인 에너지프로젝트와 결합시킨 장기적인 전략으로써 인식되어야 한다(Oliverira, 1991). 정부는 안정적인 전력을 공급하고 기술능력에 대한 축적을 촉진시키기 위해 엄격한 규제정책을 실시한다. 이러한 정책수단에는 기본적인 개발계획, 인력을 포함한 자원의 개발, 공기업, 독점권의 규제와 민간기업의 독점권 부여, 대규모 외국기업과 조력자와의 협상에 대한 관여, 라이선싱에 대한 탐색 등에 대한 통제가 포함된다(Cook & Surrey, 1989). 그러나 정부의 역할은 경쟁력 향상에 있어서 항상 긍정적으로 작용하지 않는다는 것을 알아야 할 것이다.

원자력발전산업에 있어서 정부의 정책 및 역할에 대한 특징은 크게 2가지로 요약될 수 있다. 첫째, 정부정책이 장기적인 전략 속에서 지속적이고 일괄되게 추진되어 왔으며, 특히 시간이 흐름에 따라 동태적으로 그 시기에 적합한 정책을 적절하게 추진해 왔다는 것이다. '70년대에는 원자로 형태의 선정을 포함하여 원자력프로그램의 계획과 수행단계에 직접적으로 관여하여 왔으나, '80년대에 들어서면서 정부의 역할은 유도와 지원의 역할로 변해갔다. 정부가 원자력 기술자립계획을 수행하는데 있어서 주도권을 가질 수 있는데도 불구하고 사용자 기업인 한전에게 주도권을 위임한 것은 매우 효율적이고 현명한 조치였다.

둘째로 정부가 원자력 정책을 추진하는데 있어서 오직 전력의 수급과 경제적인 측면에서 추구하지 않고 기술능력을 제고시키고 나아가 기술자립을 달성하는데 궁극적인 목표를

두고 추진하였다는 것이다. 즉 에너지정책을 산업정책 및 기술정책과 시의 적절하게 성공적으로 통합시켰다는 것이다. 일반적으로 에너지 분야에 있어서 효율성의 요소(시간과 비용)와 학습의 요소(기술지식의 획득과 기술이전) 간에는 상쇄관계가 존재한다(Cook and Surrey, 1989). 한국은 '70년대에 전력을 안정적으로 확보하는 것이 급선무이었기 때문에 학습의 요소보다 효율성의 요소를 추구했다. 일괄발주의 계약방식은 전력을 공급하는데 위험부담을 최소화하는 반면에 효율성을 최대화하는 접근방법이었다. 그후 '80년대 후반에 추진된 10~11호기 원전사업은 원전기술의 내재화와 연계하여 추진된 사업으로 효율성의 요소보다는 학습 요소 측면을 강조한 사업이었다.

4. 2 電力供給業體의 求心體 役割

일반적으로 전력공급업체는 에너지 분야의 기술발전에 있어서 선도적인 역할을 하게 된다. 즉, 전력공급업체는 에너지의 생산자로서 적은 비용으로 안정적인 전력을 공급하기 위해 전력생산설비의 효율적인 운영을 실질적으로 도모하며, 발전시설 건설프로젝트에 대한 발주자로서 설비의 기자재에 대한 구매정책 혹은 설계 등 관련기술의 획득 및 축적을 고려한 프로젝트의 발주를 통해 기자재 제작 능력 혹은 A/E 및 프로젝트 관리 능력을 제고 시키는데 커다란 기여를 한다.

대부분의 개도국들에 있어서 에너지분야, 특히 전력은 정부소유의 기업에 의해 대부분이 통제되고 있다(Oliveira, 1991). 따라서 개도국에 있어서 전력공급업체는 선진국의 전력공급업체보다 에너지분야에서의 기술능력을 축적하는데 더 커다란 역할을 할 가능성이 크다.

국내 전력공급업체인 한전의 역할은 크게 2가지로 정리될 수 있다. 첫째, 한전은 원자력발전의 수요자임에도 불구하고 원자력발전산업의 발전 및 원자력기술자립에 있어서 구심체 역할을 하였다는 것이다. 원전건설프로젝트를 추진하는데 있어서 전력수급계획에 따른 원전의 건설 등 프로젝트의 경제적인 측면보다는 기술능력의 축적에 더 커다란 우선순위를 두었다. 기술도입 비용이 포함된 프로젝트 비용 혹은 별도의 기술전수 비용을 기꺼이 지불하였고, 더욱이 많은 부분의 기술개발 비용까지도 지원하였다. 뿐만 아니라 한전의 최고경영자는 원전건설 기술자립프로그램에 지대한 관심을 보였으며, 목표 대비 달성도를 점검하여 필요한 경우에 신속하게 적절한 조치를 취하였다. 이와 같이 기술능력을 축적시키기 위한 배려는 정부 소유의 공기업이라 가능한 것이라고 생각된다.

둘째, 선진국에서는 보기 드문 경우로 원전의 수요자로서 공급자의 기능을 가지고 있어 선진 외국기술을 습득하는데 매우 효율적으로 작용했다는 것이다. 즉, 원전사업을 안정적으로 확보하기 위해 수직적 통합의 필요성을 인식하고, 원전설비의 유지 및 정비(한전기공(주)), 설계 및 엔지니어링(한국전력기술(주)), 원전설비의 제작(한국중공업), 그리고 원전연료의 공급(원전연료(주))까지 사업의 범위를 확대시켜 나갔다. 이와 같이 각 사업별로 자회사를 두어 업무의 수행 등을 독점권을 부여한 것은 선진기술의 습득 및 축적과정에 매우 효율적으로 작용하였다.

4. 3 關聯 組織의 支援

개도국에 있어서 에너지분야의 자본재와 기술적인 서비스를 외국의 공급에 의존할 것인가 아니면 국내공급으로 충당해 나갈 것인가의 문제는 경제적인 측면과 기술적인 측면에서 상쇄관계가 발생한다(Oliveira, 1991). 즉, 외국의 공급에 의존할 경우에는 신뢰성, 즉 품질과 납기일이 보장되며, 비용은 저렴해지기 쉽다. 그러나 국내 기술능력이 부족한 경우 단기적인 경제적 혜택이 미래의 기술적인 혜택의 장기적인 제고를 방해하는 경향이 있기 때문에 기술변화과정은 완결되지 않는다. 국내 공급으로 충당시키기 위해 국내 공급을 늘려 가는 것은 낮은 품질과 장기적인 납기일의 위험을 제공하지만 그것은 기술발전과정을 유지하는데 필수적인 기술능력을 개선시킨다. 특히 원자력발전과 같이 복잡하고 고도의 기술로 구성된 경우 국내 기술능력을 제고시키기 위해 취약한 산업적 기반을 토대로 국내공급을 늘려나가는 것은 더욱 어렵다.

한국의 경험은 국내 공급의 폭을 조금씩 늘려나가면서 관련 조직을 점차적으로 발전시켜 나간 것이 기술능력의 축적 및 기술자립에 커다란 도움을 주었다는 것을 보여준 것이다. 이것은 관련 조직의 역할과 원전기술자립프로그램의 성공적인 완결과의 관계가 나선형이라는 것을 보여준 것이다. 즉, 원자력프로그램의 수행은 관련조직의 발전에 기여하였으며, 관련조직은 다음 단계의 원자력프로그램의 성공적인 수행에 기여하였고, 그리고 관련 조직을 강화시키는데 기여하였다.

한국에 있어서 원자력 관련 산업의 발전에 대한 특징은 다음 2가지로 정리할 수 있다. 첫째, 관련 조직의 형성 및 발전이 시장메커니즘보다는 정부의 개입과 통제에 의해 이루어졌다는 것이다. 초창기에 국내업체의 참여는 단지 시공분야에 간단한 시공업무와 토건자재

의 공급만을 담당하였으나, 시간이 경과함에 따라 정부의 개입으로 설계엔지니어링 전문업체의 발족, 기자재공급업체의 지정 및 독점권 부여, 원전연료 공급업체의 발족 등 관련 지원조직을 정비하여 나갔다. 두 번째 특징은 관련 지원조직 가운데 정부출연(연)이 기술자립 과정에서 중요한 역할을 수행하였다는 것이다. 초창기에는 원자로의 형태 등 원전도입의 타당성 검토를 위한 기술현황조사 및 컨설팅, 원자력요원에 대한 기본교육, 그 이후에는 기자재의 국산화사업에 대한 지원, 원전연료 성형가공의 국산화 그리고 NSSS 시스템 설계 등 원전 관련기술의 국내도착화를 위한 업무를 지원하였다. 이와 같이 원전사업의 수행과정과 연계시켜 기술능력에 따라 단계적으로 추진한 것이 기술자립 및 기술능력 확보에 커다란 기여를 하였다.

4. 4 人力의 開發과 그들의 努力

숙련도가 높은 기능인력의 부족과 사람에 체화된 지식의 취약함은 개도국에서의 기술발전에 매우 커다란 장애물이 된다. 원자력발전분야에 대한 인력자원의 개발은 '50년대 후반부터 한국 정부가 가장 관심을 기울인 정책이며, 그 결과 상대적으로 타 분야보다 많은 과학기술인력이 원자력분야에 종사하고 있다. 실제로 '96년말 현재 원자력 관련 연구개발인력은 약 7,000명이며, 이는 전체 연구개발 인력의 약 6.5%를 차지하는 수치이며, 관련 종사자는 약 20,000명에 달하고 있다. 다양한 첨단기술산업에의 진입가능성이라는 관점에서 원자력발전 분야에 많은 고급인력을 할당하는 것은 자원의 낭비라는 의견이 제기될 수 있다. 그러나 대부분의 다른 개도국들과는 달리 한국은 원자력발전기술과 산업기술 양쪽 모두 성공을 달성한 국가이다(Surrey, 1988).

한편 설계기술 등 사람에 체화되어 있는 지식을 습득하기 위해 질 높은 교육을 받은 고급인력이 실무 현장에 투입되었다. 이들은 고급인력이 현장에 투입되는 것을 기피하는 당시의 사회적인 풍토를 깨뜨리면서 원자력기술 자립에 대한 강한 의지를 표명하였다. 실제로 '80년대에 외국의 지식노동자와 함께 설계·엔지니어링 업무를 공동으로 수행함으로써 숙련된 기예를 가진 지식 노동자로 다시 태어났으며, 빠르게 외국기술을 동화시켜 나갔다.

또한 한국인의 자기 희생적인 노력은 교육, 정통적인 유교사상, 빈곤에 대한 경험, 그리고 애국심 등을 포함한 여러 가지 문화적인 요소로부터 유래되었다. 이러한 문화적인 요소는 다른 국가에서는 쉽게 모방할 수 없으며, 이러한 요소는 기술능력을 축적하기 위한 학

습을 촉진하는데 주요 원동력으로 작용하였다(Linsu Kim, 1997a).

4. 5 市場 條件 및 外國供給者의 協力

일반적으로 국제적인 기술이전의 성과는 외국공급자의 자발적인 의지와 수용국가의 흡수능력에 의해 결정된다. 비공식적인 채널을 통해 기술획득이 어려운 경우 공식적인 국제 기술이전은 필요한 기술지식을 확보할 수 있는 유일한 접근방법이다. 이 때 그 실효성을 얻기 위해서는 기술제공자의 내실 있는 도움과 기술을 전수 받는 자의 소화시킬 수 있는 기술적인 능력이 구비되어 있어야 한다. 기술제공자의 내실 있는 도움을 얻기 위해서는 기술이전의 협약과정에서 필요한 기술을 얻어낼 수 있는 조건을 명시할 수 있는 협상능력을 확보하는 것이 중요하다. 이러한 협상능력을 갖추기 위해서는 기술에 대한 존재와 사용하는 방법을 알고있어 어떠한 방법으로 전수해 주기를 제시할 수 있을 뿐만 아니라 이에 대한 어느 정도의 기술이 축적되어 있어야 한다. 또한 이를 실행으로 옮기기 위해서는 기술 전수자의 재정능력이 뒤따라야 하며, 특히 시장조건은 기술이전의 협상단계에서 매우 중요한 역할을 한다.

Three Mile Island 원전과 Chernobyl 원전의 사고로 세계적으로 확산된 반핵운동에 기인하여 선진국들의 대부분이 많은 핵프로그램과 원전의 새로운 건설을 취소하였다. 그 결과 '80년대 중반 세계원전시장은 수요자가 유리한 교섭력을 가지게 되는 수요자시장으로 형성되었다. 즉, 협상단계에서 기술이전에 유리하도록 계약조건을 써넣을 수 있는 수요자의 강한 위치를 창출했다. 사실, '80년대 중반 국내기업은 외국공급자가 국내파트너에게 기술과 노하우를 전체규모로 이전하고 협력베이스로 프로젝트를 수행하는 조건하에서 국내 기자재공급자의 하청업체로서 외국공급자를 끌어들이는데 성공하였다.

4. 6 社會的 條件

사회적인 조건은 상황에 따라 긍정적으로 혹은 부정적으로 기술개발에 영향을 줄 수 있다. 원자력분야에 있어서 반핵운동은 원자력프로그램의 수행을 제한하는 전형적인 예이다. Three Mile Island 원전과 Chernobyl 원전에서의 사고는 전세계적인 반핵운동이 확산되는 계기를 제공했으며, 결과적으로 선진 각국들은 원자력프로그램을 취소하거나 원전의 건설

을 중지하게 만들었다. 예를 들면 대만은 '70년대에 기술자립전략을 수행함으로써 원자력 기술에 대한 자립의 높은 단계를 달성하였다. 그러나 대만은 '80년대 원자력프로그램을 중지하였고 이는 경험의 손실과 축적된 사전 관련 지식의 쇠퇴로 연결되었다. 최근에 대만은 세계적으로 원자력발전에 대한 긍정적인 분위기가 형성되면서 원자력프로그램을 다시 진척시켰다. 그러나 원자력분야에서의 축적된 기술지식의 부족이 발견되었다.

한국에서 에너지의 원천을 원자력에 의지하지 않고 전력공급을 확보하는 다른 방법이 없다는 의견은 오일위기로 인해 발생한 어려움에 기인하여 '80년대에 널리 확산되었다. 그래서 반핵 사회적 압력집단은 강하지 않았고, 한국정부는 원자력프로그램을 계속할 수 있었다. 반핵 압력단체의 등장은 원자력프로그램의 수행과정에서 정부에게 안전측면을 강조하게 하였다. 이 과정에서 정부는 원자력 안전 문제를 담당할 원자력안전기술원을 '91년에 설치하였다. 또한 원자력 프로그램은 지역개발 프로그램과 연계하여 추진되었다. 그러나 한국에서의 반핵 압력단체의 활동은 최근에 더욱 강화되기 시작하였으며, 이것은 원자력프로그램을 계속하는데 어려움을 주고있다.

V. 綜合檢討 및 示唆點

지난 20여 년간 한국의 원자력발전산업은 외국업체에 의해 일괄수주 방식으로 건설된 원전을 단지 운영하는 수준에서 자체적으로 원전을 설계하는 수준으로 발전하여 왔다. 다른 개도국들과는 달리 한국은 원자력발전산업을 발전시키는 과정에서 기술자립 전략을 추구해 왔다. 기술능력을 축적하는 과정은 준비, 외국기술의 단순 운영, 주변기술의 획득·소화, 핵심기술의 획득·소화, 그리고 외국기술의 개선 등의 과정을 거쳐 발전해 왔다. 한국의 원자력발전산업의 진화 과정은 외국기술을 소화·흡수해 나가는 동태적인 학습과정과 그 과정에서 학습의 성과에 영향을 주는 요인, 기술자립의 성공요인에 대한 것을 보여주고 주고 있다. 원자력발전산업에서 기술능력을 축적하기 위한 학습의 성과는 정부의 역할 및 정책, 사용자 기업, 지원조직 및 관련기업, 과학기술 인력의 개발과 그들의 의지 등 내적인 요인과 기술공급자 및 시장조건, 그리고 사회적인 조건 등 외적인 요인 등에 의해 영향을 받는다. 외적인 요인은 기술발전에 대한 기회와 위협을 야기시키고 기술발전에 대한 정책 및 전략에 영향을 주는 환경적인 요인을 나타낸다. 따라서 원자력산업에서의 기술발전은 이러한 환경적인 요인을 어떻게 극복 또는 활용할 것인가에 대한 각 주체의 역할과 상호

연계성에 달려있다.

원전건설에 대한 기술자립을 달성하는데 있어서의 한국의 성공적인 경험은 개도국에게 여러 가지 유용한 시사점을 준다. 첫째, 개도국에 있어서 원자력산업의 기술발전과정 혹은 따라잡는 과정은 준비, 외국기술의 단순운영, 주변기술의 획득·소화, 핵심기술의 획득·소화, 그리고 외국기술의 개선 등 5단계를 거쳐 발전하게 된다. 한국의 전자(Linsu Kim, 1980), 기계(Amsden and Kim, 1986), 자동차(Linsu Kim, 1997), 그리고 반도체(Linsu Kim, 1997) 산업에서의 기술발전 과정도 이와 유사한 패턴을 보이고 있다. 원자력발전산업에 대한 사례연구를 통해 엔지니어링산업에서도 이와 유사한 패턴을 보일 것이라고 기대한다.

둘째로, 다음 단계로 이행하기 전에 외부에서 빌려온 지식을 소화시키는데 충분한 노력과 시간을 보내야 한다. 즉 빌려온 지식은 관찰, 모방, 그리고 현장실습 등과 같은 경험을 통해 자신의 지식으로 체계화시켜야 한다. 따라서 이에 대한 학습의 기회를 많이 가지는 것은 매우 중요하다. 그러나 원자력발전기술의 경우 장기간에 걸친 건설기간과 많은 건설비용이 소요되기 때문에 학습의 기회가 제한된다. 따라서 경험에 의해 관련 지식을 축적하는 기회를 가지는 것이 어렵다. 더욱이 사회적인 조건과 재정 능력은 원전 프로그램에 대한 추진을 어렵게 만드는 요인으로 작용할 수 있다. 만약 이러한 이유로 반복적인 학습에 대한 기회가 제한된다면 사람에게 체화된 노하우와 축적된 지식은 곧 진부화될 것이다. 한국의 경우 관련 지식이 축적된 후에 기술을 일괄적으로 도입한 것은 매우 성공적이었다고 말할 수 있다. 정부정책에 있어서 어떤 기업에게 독점권을 부여하는 것은 학습의 기회를 안정적으로 제공하였다는 점에서 효율적인 기술획득 전략으로 바람직한 대안이라고 생각할 수 있다. 또한 자체적인 기술개발 노력은 빌려온 지식을 내재화시키는데 매우 효율적으로 작용하였다.

셋째로, 복합산업, 특히 원자력발전과 통신위성과 같은 대규모 프로젝트 형태인 경우 기술자립 전략은 오랜 기간동안 인내와 자신감을 가지고 지속적으로 추진되어야 한다. 이러한 측면에서 정부는 중재자 및 지휘자 역할을 하여야 한다. 실제로 정부의 원자력발전 정책은 에너지 정책과 통합되어 장기적인 계획 속에서 내재적인 기술능력의 축적과 기술인력의 개발에 초점을 두어왔다. 그리고 초창기에 기술발전을 위한 직접적인 개입 혹은 기술발전을 위한 체계의 정비에서 후반기에는 간접적인 지원 혹은 기술개발 활동을 유도하거나 기술개발의 체계를 발전시키는 방향으로 변화되었다.

넷째로, 사전 관련지식을 확장시키는 가장 효율적인 방법은 다양한 외부의 원천으로부터

외부의 지식을 획득하는 것이다. 원자력발전과 같은 복합산업에 있어서 역행적 엔지니어링과 같은 비공식적인 메커니즘을 통해 기술지식을 습득하는 것은 매우 한계가 있다. 이것은 기술지식의 관리능력이 외부지식의 흡수에 대한 효율성에 많은 영향을 줄 것이라는 것을 시사하고 있다.

마지막으로 다섯 번째는 기술자립에 대한 자신감을 가지는 것이 중요하다는 것이다. 이러한 자신감은 기술자립에 대한 의지와 성공에 대한 경험으로부터 파생된다. 기술능력이 더 많이 축적되고 경험이 많은 인력이 증가될수록 이러한 자신감은 더욱더 증진된다. 또한 기술자립에 대한 목표를 공유하는 것은 조직구성원에게 관련 조직의 동질성을 형성하게 하며, 같은 조직내의 지식이전과 의사소통 그리고 관련 조직간의 협력을 촉진시키기 위한 기술자립 프로그램에 몰입하는 것을 도와준다.

참 고 문 헌

－ 국내 문헌 －

1. 김종수(1990), “고리 1, 2호기와 관련된 숨은 이야기들”, 원자력산업, 1990. 8., pp.10-17.
2. 이병령(1996), 한국형 경수로, 미국승인 필요없다. 세계철출판사
3. 한국원자력산업회의(1995-1998), 원자력연감
4. 한국원자력연구소(1990), 한국원자력연구소 30년사
5. 한국전력공사(1992), 원자력발전소 건설기술자립실천계획.
6. 한국전력공사(1992-1998), 원자력산업백서, 각 연호
7. 한국전력기술주식회사(1995), 세계 속의 미래를 설계하며-한국전력기술(주) 20년사-
8. 한국전력기술주식회사(1990), 발전소 건설에서의 A-E 역할.
9. 한국전력기술주식회사(1995), 발전소 설계기술의 현황과 전망, 제35회 전력그룹협력회 워크샵.
10. 한국중공업주식회사(1995), 한중발전사.
11. 현대건설주식회사(1982), 현대건설 25년사 I, II.

－ 국외 문헌 －

1. Amsden, A. H. and Linsu Kim(1989), “A Comparative Analysis of Local and Transnational Corporations in the Korean Automobile Industry”, in Don-Ki Kim and Linsu Kim(eds.), *Management behind Industrialization : Reading in Korean Business*, Seoul : Korea University Press.
2. Bolton, M. K.,(1993), “Imitation Versus Innovation : Lessons to Be Learned From the Japanese”, *Organizational Dynamics*, Einter, pp.30-45.
3. Chaturvedi, R.P.(1990), “Issues Related to Nuclear Energy Transfer to Developing Countries”, in Chatterji, M.(eds). *Technology Transfer in the Developing Countries*, pp.249-261, Macmillan Press.
4. Cohen, W. M., and D. A. Levinthal(1990), “Absorptive Capacity : A New Perspective on Learning and Innovation”, *Administrative Science Quarterly*, 35, pp.128-152.
5. Cook, P. L. and J. Surrey.(1989), “Energy Technology in Developing Countries :

- The Scope for Government Policy”, *Technovation*, 9, pp.431-451.
6. Dodgson, M.(1991), “Technology Learning, Technology Strategy and Competitive Pressures”, *British Journal of Management*, 2, pp.133-149.
 7. Dodgson, M.(1993), “Organizational Learning : A Review of Some Literatures”, *Organization Studies*, 14, 3, pp.375-394.
 8. Gioia, D. A. and Poole, P. P.(1984), Scripts in Organizational Behavior, *Academy of Management Review*, 9, pp.449-459.
 9. Harlow, H. F.(1959), Learning set and error factor theory. in S. Koch(ed.), *Psychology : A Study of Science*, 2 : pp.492-537, New York : McGraw-Hill.
 10. Kim, D. H.(1993), “The Link between Individual and Organizational Learning”, *Sloan Management Review*, Fall, pp.37-50.
 11. Linsu Kim(1980), “Stages of Development of Industrial Technology in a Developing Country : a Model”, *Research Policy*, 9, pp.254-277.
 12. Linsu Kim(1997a), *Imitation to Innovation : The Dynamics of Koreas Technological Learning*, Harvard Business School Press.
 13. Linsu Kim(1997b), “The Dynamics of Samsung’s Technological Learning in Semiconductor”, *California Management Review*, 39(3), Spring, pp.86-100.
 14. Nelson, R. R. and S. G. Winter(1982), *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, MA : Harvard University Press.
 15. Oliveira, A.(1991), “Energy Technology Policy in Developing Countries”, *Science and Public Policy*, 18(9), June, pp.156-164.
 16. Surrey, J.(1988), “Nuclear Power : An Option for the Third World, Energy Policy”, *Energy Policy*, October, pp.461-479.
 17. Walsh, J. P., and Ungson, G. R.(1991), Organizational Memory, *Academy of Management Review*, 16(1), pp.57-91.
 18. Westphal, L. E., L. Kim and C. J. Dahlman(1985), “Reflections on the Republic of Korea’s Acquisition of Technological Capability”, N. Rosenberg and C. Frischtak(eds.), *International Technology Transfer : Concepts, Measures, and Comparisons*, Praeger, New York, pp.167-221.