

코렉스에서 파이넥스로: 포스코의 경로실현형 기술혁신[†]

From COREX to FINEX: The Case of Path-revealing Innovation in POSCO

송성수(Sungsoo Song)*, 송위진(Wichin Song)**

목 차

- | | |
|------------------|-------------------|
| I. 서론 | IV. 기술혁신과정의 특징 분석 |
| II. 코렉스 공법의 상용화 | V. 결론적 고찰 |
| III. 파이넥스 공법의 개발 | |

국 문 요 약

이 논문에서는 탈(脫)추격형 기술혁신의 사례로 1990~2007년에 포스코가 용융환원법을 개발한 과정과 그 특징에 대해 분석하였다. 포스코는 차세대 혁신철강기술의 일환으로 용융환원법에 주목했으며, 피스트와의 협력을 바탕으로 코렉스 공법을 상용화하는 데 성공하였다. 더 나아가 포스코는 분광석을 원료로 사용할 수 있는 파이넥스 공법을 개발하는 작업을 전개했으며, 그것은 모델 플랜트, 파일럿 플랜트, 데모 플랜트, 상용화 설비의 단계를 거쳤다. 포스코는 파이넥스 공법과 관련된 모든 영역의 기술을 개발 혹은 확보하는 데 성공함으로써 기존의 빠른 추종자를 넘어 기술혁신 선도자로 부상하고 있다. 포스코의 용융환원법 개발과정은 적절한 기술선택, 점진적 규모 확대, 나선형 기술개발방식, 상호보완적 기술협력, 과감한 연구개발투자, 중량급 프로젝트 매니저의 존재, 초기 단계의 정부 지원 등과 같은 특성을 보였다. 이러한 포스코의 용융환원법 사례는 기술패러다임 전환기에 이루어진 경로실현형 기술혁신(path-revealing innovation)에 해당한다.

핵심어 : 탈추격, 포스코, 용융환원법, 코렉스, 파이넥스, 경로실현형 기술혁신

※ 논문접수일: 2010.8.11, 1차수정일: 2010.11.11, 게재확정일: 2010.12.19

+ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

* 부산대학교 기초교육원 교수, triple@pusan.ac.kr, 051-510-3837, 교신저자

** 과학기술정책연구원 연구위원, songwc@stepi.re.kr, 02-3284-1875

ABSTRACT

This paper examines the development of smelting reduction process in POSCO from 1990 to 2007 with the perspective of post catch-up technological innovation. POSCO paid attention to smelting reduction process as a sort of next-generation iron and steel technology, and implemented COREX (coal ore reduction) by the cooperation with Vöest. In addition to this, POSCO started to develop FINEX (fine iron ore reduction) which can use abundant powder ore, and FINEX was developed through model plant, pilot plant, demo plant, and commercial facility. POSCO came up to innovation leader beyond fast follower by securing almost technologies concerning FINEX. The case of smelting reduction process shows various characteristics including appropriate technological choice, successive scale-up, spiral development system, complementary technological cooperation, long-term investment, the existence of top management's leadership, and Korean government's support in early stage. This case can be interpreted as a path-revealing innovation in the middle of technological paradigm change.

Key Words : Post Catch-up, POSCO, Smelting Reduction, COREX, FINEX, Path-revealing Innovation

I. 서 론

우리나라의 기술혁신에 대해서는 상당한 연구가 진행되어 왔으며, 이에 대한 모형이나 단계를 정립하려는 시도도 계속되어 왔다. 김인수는 기술수명주기론을 바탕으로 후발국의 기술혁신은 선진국과는 반대로 경화기, 과도기, 유통기의 순서를 통해 이루어진다고 주장하면서 한국의 기술발전 단계를 획득기(acquisition), 소화기(absorption), 개선기(improvement)로 구분하였다(Kim, 1980). 이진주 등은 기술, 기업, 산업, 국가, 세계 등의 다차원적 시각에서 도입기술의 수준, 기술획득의 방법, 기술습득의 내용, 기술활동의 성격 등을 고려하여 개발도상국의 기술발전 과정을 도입(introduction), 내재화(internalization), 창출(creation)의 세 단계로 규정하였다(Lee, et al., 1988). 이어 김인수는 후발국의 범세계적 기술환경, 제도적 환경, 기업의 동태적 학습과정, 기술이전 등을 감안하여 기존의 획득, 소화, 개선에 이어 창출의 단계를 포함시키기 시작하였고(Kim, 1997), 1999년에는 그 동안의 연구성과를 종합하면서 기술 궤적, 흡수능력, 기술이전, 위기조성, 동태적 학습을 고려하여 한국의 기술발전 단계를 복제적 모방(duplicative imitation), 창조적 모방(creative imitation), 혁신(innovation)으로 재구성하였다(Kim, 1999). 또한, 이근과 임채성은 세계시장 점유율, 기술체제의 성격, 상대적인 추격의 정도 등을 감안하여 우리나라 주요 산업의 기술발전 유형을 경로추종형 추격(path-following catch-up), 단계생략형 추격(stage-skipping catch-up), 경로개척형 추격(path-creating catch-up)으로 범주화하였다(Lee and Lim, 2001).

이상과 같은 연구성과들은 기본적으로 추격형 체제에서 이루어진 기술혁신을 대상으로 삼고 있으며, 시기적으로는 주로 1990년대 전반까지에 국한되어 있다고 볼 수 있다. 그러나 우리나라의 기술능력이 지속적으로 발전함에 따라 몇몇 분야에서는 추격해야 할 대상이 점차 줄어들고 오히려 우리나라가 추격의 대상이 되는 상황에 이르렀다. 이제 선진국이 간 길을 따라가는 추격형 기술혁신을 넘어 독자적인 기술궤적을 개척하는 탈(脫)추격형(post catch-up) 기술혁신이 요구되고 있는 것이다.

사실상 우리나라의 기술혁신은 몇몇 부분에서 추격형에서 탈추격형으로 전환되고 있으며, 이에 대한 본격적인 연구가 필요한 시점을 맞이하고 있다. 이와 관련하여 흠데이 등은 한국 기업의 일부는 이미 기술리더가 되었지만 기술추격자에서 기술리더로의 전환에 대한 연구가 거의 없으며, 이에 대한 논의가 학계보다는 산업계에서 부분적으로 이루어지고 있다고 지적한 바 있다(Hobday, et al., 2004). 이러한 점을 극복하기 위한 출발점은 1990년대 이후에 우리나라에서 이루어진 탈추격형 기술혁신에 대한 사례를 체계적으로 분석하는 데 있을 것이다.

이러한 배경에서 최근에는 탈추격형 기술혁신에서는 어떤 문제가 새롭게 부각되는지, 탈추

격형 기술혁신이 담아야 할 내용은 무엇인지, 탈추격형 기술혁신의 유형은 어떻게 구분할 수 있는지 등에 대한 연구가 시도되고 있다. 예를 들어, 이공래 등은 탈추격 단계에서는 추격 단계와 달리 혁신경로 운항능력(paths-navigating capability)보다는 혁신경로 창출능력(paths-creating capability)이 더욱 중요하게 작용한다고 전제한 후, 핵심기술역량의 관리, 연계 및 통합, 기술 정책 및 전략 등의 세 가지 차원에서 우리나라 주요 기업의 혁신경로 창출능력을 평가하고 있다(이공래 외, 2008). 또한, 송위진 등은 탈추격형 기술혁신에서 나타나는 기술경제적 불확실성과 기술위험에 대한 불확실성에 주목하면서 최근의 사례에 대한 분석을 바탕으로 탈추격형 기술혁신의 유형을, 기존 기술을 심화해서 새로운 궤적을 개척하는 기술심화형 혁신, 원천 기술은 해외에 의존하지만 새로운 아키텍처나 응용방안을 찾는 기술차별화형 혁신, 선진국과 거의 같은 시기에 원천기술을 개발하여 새로운 산업을 형성하는 신기술기반형 혁신으로 구분한 바 있다(송위진 외, 2007).

이와 같은 선행 연구들은 크게 환영할 만한 것이지만, 다시 생각해 보아야 할 문제가 제법 있는 것으로 판단된다. 이공래 외(2008)는 추격의 단계를 경로운향에, 탈추격의 단계를 경로 창출에 일대일로 대응시키고 있지만, 탈추격의 단계에서도 경로운향이 중요할 수도 있고, 거꾸로 모든 탈추격의 단계가 새로운 경로를 창출하는 것이 아닐 수도 있다. 송위진 외(2007)는 탈추격형 기술혁신의 유형을 세 가지로 구분하고 있지만, 모든 유형화 작업이 그렇듯이, 세부적으로 보완될 여지를 가지고 있다. 가령, 앞서 언급된 세 가지 유형의 경우에도 해당 기술의 환경이 패러다임의 전환기에 있는지, 아니면 기존 패러다임이 지속되는 시기에 속하는지에 따라 세분화될 수 있는 것이다.

이러한 문제의식을 바탕으로 이 논문에서는 탈추격형 기술혁신의 한 유형으로 ‘경로실현형 기술혁신’(path-revealing innovation)이란 개념을 제안하고자 한다.¹⁾ 일반적으로 탈추격형 기술혁신이라고 하면 경로창출형 기술혁신(path-creating innovation)을 떠올리는 경향이 있지만, 탈추격형 기술혁신에는 경로창출형 기술혁신 이외에도 경로실현형 기술혁신이 존재할 수 있다. 경로실현형 기술혁신은 경로추종형 기술혁신(path-following innovation)과 경로창출형 기술혁신의 중간 단계이자 독자적 유형이라 할 수 있다. 경로추종형 기술혁신이 해결해야 될 문제와 그것을 해결하기 위한 대안이 모두 알려져 있는 상황에서의 기술혁신이고, 경로창출형 기술혁신이 해결해야 할 문제도 설정되어 있지 않고 문제해결을 위한 대안도 매우 불확실한 상황에서의 기술혁신이라면, 경로실현형 기술혁신은 무엇을 해결해야 하는지는 알고 있지만 그 대안이 불확실한 상태에서 이루어지는 기술혁신이다(〈표 1〉 참조).

1) ‘경로실현형 기술혁신’이란 개념은 본 저자들이 고려대학교 최영락 교수, 대전발전연구원 황혜란 박사와 탈추격형 기술혁신의 모형에 대해 논의하는 과정에서 도출되었음을 밝혀둔다. 이에 대한 논의와 사례연구는 최영락 외(2008)를 참조.

〈표 1〉 후발기업의 기술혁신 유형

혁신의 유형	경로추종형 기술혁신	경로실현형 기술혁신	경로창출형 기술혁신
혁신의 초점	모방을 위한 문제풀기	혁신을 위한 문제풀기	혁신을 위한 문제설정
문제	확실	확실	불확실
대안	확보 가능	불확실	불확실
원천기술 획득 경로	기술도입	기술도입+공동연구	자체개발+공동연구

자료: 최영락 외(2008: 9)를 일부 수정함.

이 논문에서는 경로실현형 기술혁신의 과정과 의미를 타진하기 위하여 포스코가 개발했던 용융환원법(smelting reduction process)의 사례를 검토하고자 한다. 용융환원법은 우리에게 파이넥스(fine iron ore reduction, FINEX) 공법으로 익숙한 것으로서 용융환원법을 개발하기 위한 작업은 1990년부터 2007년까지 총 17년 동안 추진되었다. 기술개발에는 국가연구개발사업에서 지원된 222억 원과 함께 포스코 자체의 연구개발비용 5,541억 원이 투입되었으며, 상용화 설비투자에는 1조 600억 원이 소요되었다. 이와 같은 초대형 장기 프로젝트가 성공리에 일단락됨으로써 포스코는 세계 철강산업의 역사를 새롭게 쓰고 있다. 지난 150여 년 동안 철강산업의 지배적인 패러다임으로 작용해 왔던 용광로 공법을 대체할 수 있는 새로운 공법이 등장한 것이다.

포스코의 기술혁신에 관한 대표적인 기존 연구로는 송성수(2002)와 정대기(2009)를 들 수 있다. 송성수는 포스코의 기술능력이 1970년대의 기술습득, 1980년대의 기술추격, 1990년대 이후의 기술창출의 단계를 거쳐 발전해 왔다는 점에 주목하면서 자세, 대상, 조직, 성과 등의 측면에서 포스코의 기술활동이 보여준 시기별 특징을 분석하였다. 정대기는 이진주 등이 제안한 모형을 바탕으로 기술창출 단계의 주요 사례로 파이넥스 공법에 주목하면서 파이넥스 공법의 개발과정을 간략히 살펴본 후에 전략 및 운영체계, 원천기술의 확보, 기술개발의 가속화 등에서 나타난 이슈를 검토하였다.

이 논문에서는 이러한 연구성과와 함께 포스코의 내부 자료, 잡지 및 신문의 기사, 포스코 관계자와의 인터뷰 등을 바탕으로 용융환원법이 개발된 과정을 체계적으로 분석하고,²⁾ 이를 바탕으로 탈추격형 기술혁신의 한 유형으로서 경로실현형 기술혁신의 특징과 의미에 대해 논의하고자 한다. 이 글의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 파이넥스 공법의 모체로 작용했던 코렉스(coal ore reduction, COREX) 공법이 상용화된 과정을 다루고, 3절에서는 파이넥스 공

2) 인터뷰 대상자의 명단과 인터뷰 시기는 다음과 같다. 이일옥(1999년 6월 30일, 포항산업과학연구원 연구위원), 민동준(2007년 10월 17일, 연세대학교 금속시스템공학과 교수), 이태주(2008년 5월 15일, 포스코 기술개발실 기술기획 그룹 리더).

법의 개발과정을 모델 플랜트, 파일럿 플랜트, 데모 플랜트, 상용화 설비의 네 단계로 구분하여 검토한다. 이어 4절에서는 용융환원법을 개발하는 과정에서 나타난 특징을 혁신활동, 기술협력, 기업경영, 정부정책의 측면에서 살펴보고, 5절에서는 이상의 논의를 바탕으로 경로실현형 기술혁신이라는 개념의 의미와 확장가능성에 대해 논의할 것이다.

II. 코렉스 공법의 상용화

코렉스 공법과 파이넥스 공법을 포함한 용융환원법은 세계 철강업계에서 1990년대부터 본격적으로 탐색되기 시작한 차세대 혁신철강기술의 주요 사례에 해당한다. 차세대 혁신철강기술은 신(新)제선기술과 신(新)주조기술로 구분되며, 전자에는 직접환원법(direct reduction)과 용융환원법이, 후자에는 박슬래브주조법(thin slab casting)과 박판주조법(strip casting)이 포함된다. 직접환원법은 고철의 공급 부족이 심화됨에 따라 고철대체재를 생산하기 위한 기술이고, 용융환원법은 용융 상태의 철광석을 환원하여 직접 선철이나 용선을 제조하는 방법이며, 박슬래브주조법은 연주공정과 열연공정의 일부를, 박판주조법은 연주공정과 열연공정의 전체를 통합한 것이다(그림 1) 참조.

구 분	제선			제강	연주	열연			냉연
	코크스	소결	고로			가열로	조압연	사상압연	
용융환원법	■	■	■						
박슬래브주조법					■	■	■		
박판주조법					■	■	■	■	

주: 음영부분은 생략되거나 통합될 수 있는 공정임.

자료: 송성수(2002: 191).

(그림 1) 차세대 혁신철강기술의 개요

1980년대까지 철강산업의 기술혁신이 주로 설비의 대형화와 단위 공정의 자동화에 초점을 두었던 반면, 차세대 혁신철강기술은 이전에 분리되어 있었던 공정을 생략하거나 직결화함으로써 에너지비용을 비롯한 제조원가를 대폭적으로 절감할 수 있는 이점을 가지고 있다. 이러한 차세대 혁신철강기술이 모두 상용화될 경우에는 냉연강판을 제조하는 데 사용되는 공정의 수자가 기존의 10여 개에서 용융환원, 연속제강, 박판주조, 연속냉간압연의 4개로 현격히 감소하게 될 전망이다. 이처럼 철강산업은 1990년대 이후에 기술패러다임의 전환을 맞이하면서

차세대 혁신철강기술의 개발과 상업화가 모색되고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 더욱 가속화 될 전망이다.³⁾

포스코는 1990년을 전후하여 차세대 혁신철강기술에 도전하는 과정에서 용융환원법의 일종인 코렉스 공법에 주목하였다. 당시에 포스코의 입장에서는 차세대 혁신철강기술에 도전하는 것이 그리 시급한 상황은 아니었다. 왜냐하면, 포스코가 보유한 설비는 다른 선진업체에 비해 매우 최신의 것이었으며, 별다른 문제없이 잘 가동되고 있었기 때문이었다. 그러나 포스코는 2020년대를 대비하여 독자적인 신기술을 확보한다는 의미에서 용융환원 프로젝트와 스트립캐스팅 프로젝트를 출범시키기로 결정하였다. 여기에는 포스코의 위상이 높아지면서 기술적 측면에서도 세계 철강산업의 발전에 기여하라는 요구가 높아졌다는 점도 중요한 배경으로 작용했던 것으로 판단된다.

차세대 혁신철강기술을 개발하는 작업은 1987년부터 산업과학기술연구소(Research Institute of Industrial Science and Technology, RIST)를 중심으로 추진되었던 기초연구의 일환으로 기술정보를 수집하는 것에서 시작되었다.⁴⁾ RIST의 연구진은 차세대 혁신철강기술에 대한 연구개발활동을 전개하고 있었던 선진국 업체의 관계자들과 개별적으로 접촉하여 기술개발의 현황 및 문제점에 대한 정보를 수집하였다. 당시에 선진국에서 입수할 수 있는 정보는 부분적이었을 뿐만 아니라 충분한 신빙성을 가지고 있지 않았고 실험실 수준의 테스트를 통해 그것을 수정하고 보완하는 작업이 지속적으로 전개되었다. 과거의 기술혁신활동과는 달리 외국의 기술업적도 분명하지 않았고 이에 따라 기술개발의 구체적인 목표를 설정하는 데에도 별도의 작업이 필요했던 것이다.

특히, 차세대 혁신철강기술의 경우에는 ‘철강기술의 르네상스 시대’라고 부를 수 있을 정도로 과거와는 달리 매우 다양한 공법이 출현하는 경향이 나타나고 있었다. 예를 들어, 용융환원법에는 코렉스 공법 이외에도 DIOS(direct iron ore smelting reduction), HISMELT(high intensity smelting), CCF(cyclone converter furnace) 등의 공법이 있었다. 이처럼 지배적 기술이 없는 유동기의 기술혁신에서는 과거와는 달리 어떤 기술을 선택하는가 하는 것이 매우 중요한 문제로 부상하였다. 이와 같은 다양한 공법 중에서 포스코는 기술적·경제적 타당성이

3) 철강산업의 기술패러다임 변화와 대응과제에 대해서는 송성수(2000)를 참조할 수 있다.

4) 포스코의 연구개발체제는 1990년대 이후에 세 차례의 변화를 경험해 왔다. 1994년 7월에는 포스코기술연구소(POSCO Technical Research Laboratories, POSLAB)가 설립되면서 RIST의 철강 부문 중 제철소 현장과 밀착된 과제에 대한 연구개발기능이 이관되었다. 1996년 8월에는 산업과학기술연구소가 포항산업과학연구원으로 개칭되면서 철강 부문 중에서 단위공정 및 제품에 관한 연구개발기능은 RIST에서 POSLAB으로 이관되었고, POSLAB과 포스코 계열사에서 수행해 왔던 다른 부문에 대한 연구개발기능은 RIST로 집중되었다. 이어 2003년 7월에는 POSLAB은 철강 분야에 대한 연구역량을 결집하고 RIST는 포스코의 장기발전에 필요한 연구기능을 특성화하는 방향으로 연구개발체제가 다시 개편되었다(포스코, 2004: 716-718).

높고 자신의 능력으로 기술학습이 가능한 코렉스 공법을 선택하였다.

코렉스 공법은 1985년 초에 오스트리아의 뢰스트(Vöest-Alpine Industrienanlagenbau, VAI)가 개발했으며, 1987년 11월에 남아프리카공화국 이스코르(Iscor)의 프레토리아(Pretoria) 제철소가 코렉스 공법에 입각한 연산 30만 톤 규모의 공장을 완공한 후 1989년 11월부터 정상적인 조업을 실시하고 있었다. 포스코는 세계에서 두 번째로 코렉스 공법을 선택하면서 규모의 경제 효과를 누릴 수 있는 60만 톤으로 확대하기로 하였다.

1990년경부터 포스코는 시험설비(pilot plant)를 구축하여 상업화에 필요한 기술을 확보하기 위한 활동을 추진하였다. 시험설비의 설계와 제작은 외국의 기술진과 국내 기술진이 공동으로 수행했으며 설비설계는 뢰스트가, 설비제작은 국내 기술진이 주도하였다. 시험설비가 제작된 후에는 수십 차례의 시험조업을 통해 생산규모 확대, 품질향상, 설비개선 등이 도모되면서 실제 공장에 적용할 수 있는 설비사양과 조업조건을 도출하는 작업이 전개되었다. 이러한 과정을 거쳐 공장건설사업이 착수되기 전에 상업적 활용가능성이 높은 기술체계가 정립되었다.

이상의 준비작업을 바탕으로 포스코는 1992년 12월에 뉴 프로젝트 추진본부(신제선기술팀)를 구성하여 실제 공장을 건설하고 가동하는 작업을 추진하였다.⁵⁾ 코렉스 공법을 적용한 연산 60만 톤 규모의 신제선공장은 포항제철소에서 1993년 11월에 착공되어 1995년 11월에 완공되었다. 신제선공장이 가동된 이후에는 환원로 안에 철광석이 굳어지는 바람에 용융로 작업을 중단해야 하는 문제점이 발생하였다. 이에 추진본부의 현장 기술진들은 방열복을 입고 환원로 안에 들어가 구멍에 막힌 찌꺼기를 긁어내는 작업을 전개하였다. 환원로가 막히는 일은 3개월 동안에 여섯 번이나 계속되었는데, 그러한 문제점을 해결하는 데 걸리는 시간은 96시간에서 72시간, 48시간 등으로 점차 축소되었다. 환원로가 막히는 일이 반복되면서 포스코 내부에서는 회의론이 대두되기도 했지만, 문제점이 점차 완화되면서 포스코 경영진은 용융환원 프로젝트를 계속 추진하기로 하였다(정대기, 2009: 249).

결국 포스코는 1996년 12월부터 신제선공장을 정상적으로 가동시키는 데 성공했으며, 1998년 초에는 코렉스 설비에 대한 운용기술을 남아프리카공화국의 살다나(Saldanha)와 인도의 JVSL(Jindal Vijayanagar Steel Limited)에 수출하기도 했다. 뢰스트가 보유한 설비제작기술과 포스코가 확보한 조업기술이 결합되어 코렉스 공법에 대한 기술이 집합적 형태로 다른 외국 업체들에 수출된 것이었다. 과거에는 포스코가 선진국으로부터 직접적 혹은 간접적으로 기술을 이전받았던 반면 최근에는 보완적 자산(complementary assets)을 가지고 선진국의 일류

5) 당시에 뉴 프로젝트 추진본부의 담당 임원은 유상부 부사장이었으며, 신영만 부장, 이후근 과장, 김득채 과장 등이 실무팀을 이끌었다. 뉴 프로젝트 추진본부는 2007년 5월에 파이넥스 상용화 설비가 완공되면서 파이넥스 연구개발 추진반으로 변경되었다. 파이넥스 연구개발추진반은 기술그룹, 조업그룹, 엔지니어링그룹 등을 포괄하고 있으며, 400여 명의 인원으로 구성되어 있다.

업체와 동등한 자격으로 기술협력을 추진하고 있는 셈이다.

III. 파이넥스 공법의 개발

포스코는 코렉스 공법을 개발하는 과정에서 새로운 개념을 제안하기도 했다. 코렉스 공법은 용기 내부에 반응가스가 잘 통과할 수 있도록 입경이 8~35mm인 펠릿(pellet)을 별도로 만들어 원료로 사용해야 한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 입경 8mm 이하의 분광석을 원료로 사용할 수 있는 새로운 공법이 모색되었고 그것은 파이넥스 공법으로 명명되었다. 포스코는 코렉스 공법에서 사용되었던 수직환원로를 여러 단계로 구성된 유동환원로로 대체함으로써 이상적인 용융환원법을 현실화시키고자 하였다. 이처럼 코렉스 공법은 파이넥스 공법의 기본 개념을 잡는 데 많은 도움을 주었으며, 코렉스 공법의 개발 과정은 파이넥스 공법을 개념화하는 단계에 해당한다고 볼 수 있다.⁶⁾

파이넥스 공법은 분광석을 환원시킨 후 성형철(hot compacted iron, HCI)을 만드는 공정, 일반탄을 성형탄(briquette coal, BC)으로 가공하는 공정, 그리고 성형탄과 성형철을 용융하여 쇳물을 생산하는 공정으로 구성되어 있다. 포스코는 점차적으로 규모를 증가시키는 과정을 통해 파이넥스 공법을 개발했으며, 그것은 모델 플랜트, 파일럿 플랜트, 데모 플랜트, 상용화 설비의 네 단계로 구분할 수 있다(〈표 2〉 참조).

〈표 2〉 파이넥스 공법의 개발 단계

단계	모델 플랜트	파일럿 플랜트	데모 플랜트	상용화 설비
규모	일일 15톤	일일 150톤 (연산 3만톤)	연산 60만톤	연산 150만톤
전단계 대비 배율	-	10배	20배	2.5배
건설 시기	1996. 5	1998. 2 ~ 1999. 8	2001. 1 ~ 2003. 5	2004. 8 ~ 2007. 5
주요 활동	실험실 수준의 테스트	기술적 실현가능성 검증	주요 기술의 완성과 경제성 검증	파이넥스 공법의 상업적 적용

6) 파이넥스 공법을 개발하는 과정에서도 포스코 내부에서는 상당한 회의론이 제기되었다. 1998년까지 700억원 이상이 투자되었지만 획기적인 결과가 나타나지 않았고 외환위기의 상황에서 추가적으로 연구비를 투입하는 것이 쉽지 않았던 것이다. 사내의 이러한 갈등 속에서 유상부 회장은 당시에 도쿄사무소장으로 있었던 강창오를 포항제철소장으로 불러 들였다. 강창오는 다양한 정보 수집을 바탕으로 “저에게 1,000억원만 주십시오. 신기술 시스템에서 완전히 철수하는 것은 시간과 자원 낭비니 이 시스템을 죽이지 말고 살리면서 분기루 공법을 연구해보겠습니다”고 하면서 유상부 회장을 설득했다고 한다(박미숙, 2007: 16-17).

모델 플랜트는 일일 15톤의 규모로서 1996년 5월에 만들어졌다. 파이넥스 공법의 경우에는 코렉스 공법과 달리 포스코가 세계 최초로 도전하는 것이어서 참조할 만한 대상이 존재하지 않았기 때문에 모델 플랜트의 단계가 별도로 필요했던 것이다. 모델 플랜트의 단계에서는 이론적 연구와 함께 실험실 수준의 테스트가 병행되었다. 이를 통해 파이넥스 공법에 대한 기본적인 개념이 확정되었고 주요 설비에 대한 최적의 설계안이 도출되었다.

파일럿 플랜트는 일일 150톤(연산 3만톤) 규모로서 1998년 2월에 착공된 후 1999년 8월에 완공되었다. 파일럿 플랜트를 건설하면서 포스코는 쇠스트와 함께 유동환원기술에 대한 공동 개발을 추진하였다. 쇠스트가 설비설계를 하고, 포스코가 설비제작을 담당하는 식이었다. 그러한 과정에서 포스코가 직면했던 가장 어려운 문제는 분광석의 환원 온도와 압력을 찾는 데 있었다. 화학 교과서에는 철광석에 강한 온도와 압력으로 열풍을 쐬면 환원이 가능하다고 나와 있었지만 어느 정도의 세기와 온도가 필요한지는 알려져 있지 않았다. 유동환원로의 온도가 너무 높으면 분광석이 눌러 붙었고, 너무 낮으면 환원이 제대로 이루어지지 않았다. 이러한 상황에서 포스코의 기술진은 수백 번의 시행착오 끝에 분광석의 환원이 이루어지는 적정한 온도와 압력을 찾을 수 있었다. 파일럿 플랜트가 완공된 이후에는 파이넥스 공법의 기술적 실현 가능성을 검증하기 위한 작업이 지속적으로 전개되었다.

데모 플랜트는 연산 60만톤 규모로서 쇠스트와의 공동개발을 통해 2001년 1월에 착공된 후 2003년 5월에 완공되었다. 데모 플랜트를 통해서도 설비를 최적화시키고 파이넥스 공법의 기술성과 경제성을 검증하는 작업이 이루어졌다. 이 시기에는 경제성 있는 생산을 위해 필요한 핵심적 문제들이 해결되었는데, 그 대표적인 예로는 성형탄 제조 방법과 성형철 롤러 장비의 개발을 들 수 있다(박미숙, 2008: 17-18). 포스코는 1998년부터 성형탄 개발에 착수했으나 수차례에 걸쳐 실패를 거듭하였다. 성형탄을 만들어 테스트를 하면 깨지는 일이 반복적으로 발생했던 것이다. 포스코의 기술진은 하루에 600톤에 달하는 일반탄을 가공하고 테스트하면서 결국 2003년 4월에 성형탄 개발에 성공하였다. 한편, 성형철 설비의 경우에는 프랑스와 독일에서 도입한 것이 제대로 작동하지 않자 2003년 6월부터 40여 명의 전문가로 특별팀을 구성하여 자체적 개발로 방향을 바꾸었다. 포스코의 기술진은 롤러에 사용되는 쇠의 강도를 높여 롤러가 깨지는 것을 막으려 했지만 그 역시 문제를 해결하지 못했다. 이를 해결한 것은 역발상의 접근으로서 현장 기술진의 감각과 직관을 바탕으로 쇠의 강도를 낮추었더니 롤러가 더 이상 깨지지 않았다. 결국 포스코는 2003년 12월에 파이넥스 공법에 적합한 성형철 설비를 자체적으로 개발할 수 있었다. 이와 같은 성형탄 제조법과 성형철 설비의 개발을 통해 포스코는 연산 150만톤에 달하는 상용화 설비를 완성할 수 있는 결정적인 계기를 마련하였다.

상용화 설비는 연산 150만톤 규모로서 2004년 8월에 착공된 후 2007년 5월에 완공되었다.

상용화 설비의 기본설계는 피스트가, 상세설계 및 시공은 포스코건설이 수행하였다. 포스코는 2007년 9월에 파이넥스 상용화 설비에서 일일 4,300톤의 용선을 생산하여 정상조업도를 달성하였다. 바야흐로 기존의 용광로 공법을 대체할 수 있는 경쟁력을 갖춘 파이넥스 공법의 상용화가 이루어진 것이다.

이상에서 논의한 코렉스 공법과 파이넥스 공법의 개발과정을 시기별로 정리하면 다음의 <표 3>과 같다.

<표 3> 용융환원법 개발에 관한 주요 일지

1990년	11	석탄계 용융환원제철기술 개발 과제 착수
1992년	12. 9	피스트(VAI)와 코렉스 설비 도입 계약 체결
1993년	11. 1	코렉스 공장 착공
1995년	11. 28	코렉스 공장 준공(연산 60만톤)
1996년	5	파이넥스 모델 설비 준공(일일 15톤)
1998년	1. 3	남아프리카공화국 살다나(Saldanha)와 코렉스 기술 판매계약 체결
	1. 26	인도 JVSL과 코렉스 기술 판매계약 체결
	2. 3	파이넥스 파일럿 설비 착공
1999년	8. 27	파이넥스 파일럿 설비 준공(일일 150톤)
	11. 11	VAI와 파이넥스 공법 공동개발 협정 체결
2001년	1. 30	파이넥스 데모 플랜트 착공
2003년	5. 29	파이넥스 데모 플랜트 준공(연산 60만톤)
	7. 28	BHP와 파이넥스 원료개발 기술협약 체결
2004년	8. 17	파이넥스 상용화 설비 착공(연산 150만톤)
	12. 16	이사회에서 인도제철소 파이넥스공법 적용 결정
2005년	1. 20	산업자원부, 파이넥스를 '10대 신기술'로 인증
2006년	3. 25	100만 톤 조업 생산능력 확인(일일 최대 생산 신기록 수립)
2007년	4. 10	파이넥스 상용화 설비 화입(연산 150만톤)
	5. 30	세계 최초로 파이넥스 상용화 설비 준공

그러나 파이넥스 공법은 용광로 공법에 비해 대용량 생산능력이 충분히 검증되지 않은 상태이다. 연산 150만톤 규모의 파이넥스 공장을 2개 가동시킬 경우에는 300만톤 규모의 용광로에 비해 투자비용이 80%, 제조원가가 85%로 줄어드는 것으로 예상되고 있지만,⁷⁾ 현재로서는 연산 150만톤 규모의 파이넥스 공장 1개가 가동 중인 상태이기 때문에 아직까지 완전하게

7) 경제성 이외에 환경친화성도 파이넥스 공법의 장점으로 꼽힌다. 파이넥스 공법을 활용하면 기존의 용광로 공법에 비해 이산화탄소(CO₂) 배출량은 9% 정도 줄일 수 있고, 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x)은 각각 94%, 96%로 크게 감소시킬 수 있다(전희동, 2007: 107).

용광로 공법에서 파이넥스 공법으로 이행되었다고 보기는 어려운 것이다. 실제로 파이넥스 공장을 가동하면서 예상 이외의 문제점이 발생할 수도 있고, 그러한 문제점이 용이하게 해결될 수 있을 것인지에 대해서는 확답할 수 없는 것이다. 게다가 기존의 용광로 공법도 계속해서 개선되고 있기 때문에 파이넥스 공법이 어느 시점에서 지배적 설계로 부상할 지를 확실하게 예측하기는 쉽지 않다. 이에 따라 파이넥스 공법은 새롭게 건설되는 제철소에서 채택될 가능성이 높으며, 포스코는 인도의 일관제철소를 건설할 때 파이넥스 공법을 적용하기로 결정한 바 있다.

IV. 기술혁신과정의 특징 분석

포스코가 용융환원법을 개발하는 과정에서 나타난 특징을 혁신활동, 기술협력, 기업경영, 정부정책의 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

용융환원법의 경우와 같이 지배적 기술이 없는 유동기의 기술혁신에서는 과거와는 달리 어떤 기술을 선택하는가 하는 것이 매우 중요한 문제로 부상하였다. 이를 위하여 포스코는 선진국 업체의 관계자들과 접촉하여 기술정보를 수집하고 그러한 정보를 보완하는 작업을 지속적으로 전개하였다. 그 결과 포스코는 용융환원법의 다양한 선택지 중에서 당시 자신의 능력으로 기술습득이 가능할 것으로 판단되는 코렉스 공법을 선택하였다. 새로운 아이디어를 창출하지는 못했지만 다양하게 시도되는 외부의 아이디어를 탐색해서 적절한 방법을 선택한 것이다. 이러한 선택은 코렉스 공법을 상용화하는 데 성공하는 것은 물론 파이넥스 공법이라는 더욱 혁신적인 공법을 모색할 수 있는 계기로 작용하였다.

포스코가 파이넥스 공법을 개발하는 과정에서 보여준 가장 중요한 특징은 점차적인 규모 확대(scale-up)를 통해 기술적·경제적 위험을 감소시켰다는 점을 들 수 있다. 파이넥스 공법은 모델 플랜트, 파일럿 플랜트, 데모 플랜트, 상용화 설비의 단계를 거치면서 기술적 실현가능성과 경제적 타당성이 더욱 높아졌던 것이다. 포스코는 이러한 규모 확대를 추진하면서 매우 빠빠한 스케줄을 제시함으로써 내부적 위기를 조성하고 기술학습의 강도를 높였다(정대기, 2009: 257).

파이넥스 공법의 경우에는 과거의 기술과 달리 공정설계, 설비제작, 공장조업의 세 단계에 필요한 요소기술을 국내에서 모두 정립해야 했기 때문에 한 부분에서 오류가 있는 것으로 판명될 경우에는 연구개발의 방향 자체가 수정되어야 했다. 과거의 기술혁신활동이 대체로 각 단계에 따라 순차적으로 전개되었던 반면, 파이넥스 공법의 개발을 추진하는 방식은 각 단계

를 반복하면서 점차적으로 발전해 가는 나선형 구조를 가지고 있었던 것이다.

또한, 파이넥스 공법과 같이 아직 검증되지 않은 기술을 개발하는 활동에서는 과거에는 접해본 적이 없었던 새로운 문제를 해결해야만 했다. 유동환원로에서 분광석의 환원 온도와 압력을 시행착오의 방식으로 찾는 과정, 성형철 설비를 외국에서 도입하여 사용하다 문제가 해결되지 않아 자체적으로 개발하는 과정, 경쟁력 있는 성형탄을 제조하는 기술을 개발하는 과정 등은 포스코는 물론 누구도 해결해본 적이 없는 문제들이었다.

기술협력과 관련하여 포스코는 처음부터 모든 기술을 개발하는 것이 아니라 이미 코렉스 공법을 개발한 피스트와의 협력을 바탕으로 그 기술을 확보하고 개선했으며, 더 나아가 파이넥스 공법이라는 새로운 기술을 개발하는 전략을 취했다. 그것이 가능했던 것은 포스코가 조업기술 분야에서 뛰어난 능력을 가지고 있어서 용융환원법의 개발에서도 보완적 자산으로 활용할 수 있었기 때문이었다. 이러한 과정에서 포스코는 외국 기업을 통해 공급된 기술, 자사가 보유하고 있었던 기술, 그리고 실험을 통해 창출된 다양한 유형의 기술과 같은 세 가지 차원의 기술을 효과적으로 통합하는 가운데 상업성을 담보할 수 있는 수준으로 구현하는 능력을 보여주었다.

결과적으로 포스코는 파이넥스 공법과 관련된 모든 영역의 기술을 개발 혹은 확보하는 데 성공하였다. 그것은 핵심설비 관련 기술, 조업기술, 엔지니어링 기술 등으로 구분할 수 있다. 핵심설비와 관련된 기술로는 유동환원기술, 성형철 설비 기술, 성형탄 제조기술 등이 개발되었고, 조업기술이 파이넥스 상용화 설비의 가동을 통해 축적되고 있으며, 다양한 형태의 설비와 공장을 건설하면서 엔지니어링 기술도 확보했던 것이다.

특히, 코렉스 공법의 개발자는 피스트였던 반면, 파이넥스 공법은 피스트와 포스코가 공동으로 개발했다는 점에 주목할 필요가 있다. 코렉스 공법의 경우에는 설비기술은 피스트로부터 제공받았고, 포스코가 이에 대한 조업기술을 개발하는 식으로 추진되었다. 그러나 파이넥스 공법의 경우에는 개념의 제안에서 설비의 제작에 이르는 모든 과정이 포스코와 피스트의 공동 작업을 통해 이루어졌다. 이와 함께 포스코는 파이넥스 상용화 설비를 통해 조업기술을 축적함으로써 파이넥스 공법에 관해서는 모든 측면에서 기술혁신 선도자(innovation leader)의 자격을 갖추게 되었다.

기업경영상의 특징으로는 과감한 기술투자와 최고경영진의 기술 리더십을 들 수 있다. 파이넥스 공법과 같은 대규모 공정기술은 불확실성이 매우 크며 장기적 관점에서의 투자를 요구한다. 파이넥스 공법을 개발하기 위해 추진된 용융환원 프로젝트는 1990년부터 2007년까지 총 17년 동안 진행되었으며, 포스코는 연구개발비로 5,541억 원, 설비투자비로 1조 600억 원을 투입하였다. 포스코는 매출액과 순이익의 지속적인 증가를 바탕으로 용융환원 프로젝트를 지

원할 수 있는 재정적 자원을 보유하고 있었기 때문에 적절한 시점을 놓치지 않고 투자할 수 있었다.

이와 함께 새로운 혁신경로는 모색하는 단계에서는 중량급 프로젝트 매니저의 역할이 부각되는데, 파이넥스 기술을 개발하는 과정에서는 강창오가 그러한 역할을 담당하였다. 그는 파이넥스 기술의 필요성에 대한 강한 신념을 바탕으로 경영진들을 설득해 데모 플랜트와 상용화 설비에 대한 투자를 이끌어내었고, 전체 기술체제에 대한 이해를 바탕으로 핵심 요소기술을 이해하고 지원하는 역할을 담당했으며, 2003년에 포스코 사장이 된 이후에는 중간 단계를 없애고 직접 프로젝트팀을 관장하고 지원하기도 했다. 선진국과 달리 인적·물적 자원이 부족한 상태에서는 이와 같은 중량급의 프로젝트 매니저가 존재하지 않았더라면 파이넥스 공법을 개발하는 과정에서 발생하는 수많은 문제들을 해결하기 어려웠을 것이다.

정부의 역할과 관련하여 포스코는 용융환원법에 관한 과제를 1990~2000년에 산업자원부의 국가연구개발사업인 중기거점 기술개발사업의 일환으로 추진할 수 있었다. 국가연구개발사업은 차세대 기술개발과 관련된 불확실성을 축소시켜 기업들로 하여금 새로운 기술개발에 뛰어 들 수 있는 중요한 계기를 마련해주었다고 할 수 있다. 이와 함께 어떤 기술개발이 국가연구개발사업으로 추진되고 그것에 참여하게 되었을 때에는 조직 내에서 그와 관련된 기술에 대한 정당성을 확보하고 자원을 배분받는 데에도 유리한 위치를 차지하게 된다. 이처럼 새로운 혁신경로에 도전하는 단계에서 정부의 초기 지원은 기술적 불확실성에 대한 대응은 물론 사회적 정당성을 확보하는 데에도 상당한 기여를 할 수 있다.

V. 결론적 고찰

이 논문에서는 탈추격형 기술혁신의 사례로 1990~2007년에 포스코가 용융환원법을 개발한 과정과 그 특징에 대해 분석하였다. 포스코는 여러 개의 차세대 혁신철강기술이 제적이 논의되는 상황에서 용융환원법에 주목했으며, 피스트와의 협력을 바탕으로 코렉스 공법을 상용화하는 데 성공하였다. 더 나아가 포스코는 분광석을 원료로 사용할 수 있는 파이넥스 공법을 개발하는 작업을 전개하였다. 파이넥스 공법은 모델 플랜트, 파일럿 플랜트, 데모 플랜트, 상용화 설비의 단계를 거치면서 기술적 실현가능성과 경제적 타당성이 더욱 높아졌다. 포스코는 파이넥스 공법과 관련된 모든 영역의 기술을 개발 혹은 확보하는 데 성공함으로써 기존의 빠른 추종자를 넘어 기술혁신 선도자로 부상하고 있다. 포스코의 용융환원법 개발과정은 적절한 기술선택, 점진적 규모 확대, 나선형 기술개발방식, 상호보완적 기술협력, 과감한 연구개발투

자, 중량급 프로젝트 매니저의 존재, 초기 단계의 정부 지원 등과 같은 특성을 보였다.

서론에서 언급했듯이, 탈추격형 기술혁신의 모형과 관련하여 용융환원법의 사례는 경로실현형 기술혁신으로 개념화할 수 있다. 용융환원법의 사례는 그것의 필요성에 대해서는 세계 유수의 철강업체들이 인지하고 있었고 여러 개의 후보적인 대안들이 존재하고 있었지만, 어느 것이 타당한 대안인지를 알 수 없었던 상황에서 포스코가 코렉스 공법과 파이넥스 공법을 통해 가능성으로만 존재했던 기술혁신의 경로를 실현한 것에 해당한다. 즉, 후보 기술들은 존재하지만 어떤 기술이 가장 효율적인 기술인지 알 수 없는 상황에서 자신들에게 적합하다고 판단되는 기술을 탐색하여 선택하고, 그 기술을 효율적으로 만드는 기술학습활동을 수행하여 새로운 궤적을 실현했던 것이다.

한편, 후발국 기업이 이렇게 경로실현형 혁신활동을 수행하는 과정에서는 선진국과는 다른 독특한 특성들이 나타난다. 후발국 기업은 선진국 기업과 비교해볼 때, 자원동원 능력과 기술 능력이 상대적으로 떨어지기 때문에 자원과 노력의 집중적인 투입을 바탕으로 기술적 불확실성을 낮추기 위한 다양한 활동을 필요로 한다. 후발국 기업들은 실패했을 경우 다른 대안들을 시도할 수 있는 여력이 충분하지 않기 때문에 선택한 기술의 실현에 모든 것을 걸게 된다. 이런 이유로 해서 경로실현형 기술혁신을 수행하는 후발국 기업은 해외로부터 초창기 단계의 원천기술을 도입하는 전략을 취하는 경우가 많다. 또 최고경영진도 그 기술의 실현에 모든 것을 걸고 장기적이고 전폭적인 지원과 투자를 수행하게 되고 기술개발팀들은 고강도의 기술학습을 감내하게 된다. 그리고 정부도 국가연구개발사업이나 정부구매 등을 통해 불확실성을 감소시켜 주는 활동을 하게 된다.

용융환원법의 사례에서도 이러한 모습들이 나타났다. 외국 기업이 개발한 코렉스 공법을 바탕으로 새로운 공정혁신을 이룩해서 파이넥스 공법을 개발하였고, 용융환원법에 도전하는 초기 단계에서 국가연구개발사업이 추진되었다. 또한 새로운 기술을 실현하면서 발생하는 수많은 새로운 문제점을 해결하는 과정에서 최고경영진의 흔들리지 않는 지원이 있었고 기술개발을 담당할 프로젝트팀은 빡빡한 스케줄 속에서 높은 강도의 노력을 기울였다.⁸⁾

이 논문의 확장과 관련하여 경로실현형 기술혁신에도 다양한 유형이 존재할 수 있다는 점을 지적하고자 한다. 그것은 기술패러다임 전환기에 이루어지는 혁신과 기존의 패러다임 내에서 이루어지는 혁신으로 구분할 수 있다. 첫 번째 유형은 아직 지배적 설계가 등장하지 않아

8) CDMA의 경우에도 비슷한 이야기를 할 수 있다. 무선통신의 디지털 전환기에 여러 방식들이 서로 경쟁하던 상황에서, 국내 기업들은 벤처기업이었던 켈컴의 원천기술을 도입하여 재빠르게 CDMA 방식의 통신시스템과 단말기를 개발해서 세계 최초로 CDMA 기술을 상용화하는 혁신에 성공하였다. 이 과정에서 국가연구개발사업을 통해 산학연 공동연구가 진행되었고, CDMA에 대한 표준화가 이루어졌다. 이와 함께 기술개발을 담당했던 기업과 연구소의 연구팀들은 수많은 일화와 신화를 남길 정도로 고강도의 기술학습활동을 수행하였다. CDMA에 관한 사례연구로는 송위진(2007)을 참조할 수 있다.

기술이 유동기의 상태에 있을 때, 가능성이 있다고 알려진 후보들 중에서 특정 대안을 선택해서 상업적 성공으로 연결시킨 혁신활동이다. 이 논문에서 살펴본 용융환원법의 사례가 여기에 해당한다. 두 번째 유형은 기존 기술패러다임 내에서 축적된 능력을 최대한 확장 혹은 심화시키는 과정에서 가능성의 차원에 머물고 있었던 새로운 기술을 상업적 성공으로 연결시키는 혁신활동이다. 이와 관련하여 삼성전자의 플래시 메모리는 D램 개발과정에서 축적한 공정기술과 경제성 있는 생산방식을 최대한 활용할 수 있는 기술전략을 바탕으로 새로운 경로를 실현한 사례라 할 수 있다(신장섭·장성원, 2006: 66-88).

이 논문은 경로실현형 기술혁신이라는 새로운 개념을 제안하고 있지만, 한 가지 사례연구에 의존하고 있다는 점에서 한계를 가지고 있다. 그러나 CDMA, 플래시 메모리 등을 매개로 경로실현형 기술혁신에 대한 사례는 지속적으로 보완될 수 있을 것이며, 이에 대한 후속연구를 통해 경로실현형 기술혁신의 개념과 그 의미가 더욱 세련화될 수 있을 것으로 판단된다. 사실상 현재 우리나라에서 이루어지고 있는 탈추격형 기술혁신의 적지 않은 부분은 경로실현형 기술혁신에 해당한다고 할 수 있다. 이처럼 경로실현형 기술혁신에 주목하게 되면, 우리나라에서 탈추격형 기술혁신이 이루어지는 양상을 더욱 역동적으로 포착할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 박미숙 (2007), “여기 사람들 다 미친 것 같다: 파이넥스 개발 다큐멘터리”, 『이코노미스트』 (2007. 7. 17), pp. 14-19.
- 송성수 (2000), “철강산업의 기술혁신패턴과 발전과제”, 『기술혁신학회지』 제3권 2호, pp. 94-110.
- 송성수 (2002), “기술능력 발전의 시기별 특성: 포항제철 사례연구”, 『기술혁신연구』 제10권 1호, pp. 174-200.
- 송위진 (2007), 「기술정치와 기술혁신: CDMA 이동통신 기술개발 사례 분석」, 한국학술정보.
- 송위진·박동오·강윤재 (2007), 「탈(脫)추격형 기술혁신의 불확실성 대응 전략」, 과학기술정책연구원.
- 신장섭·장성원 (2006), 「삼성 반도체 세계 일등 비결의 해부」, 삼성경제연구소.
- 이공래 외 (2008), 「한국 선도산업의 기술혁신경로 창출능력」, 과학기술정책연구원.
- 전희동 (2007), “검은 연기 대신 푸른 돈 쏟아낸다: 일석삼조 신제철공법 파이넥스”, 『과학동아』 7월호, pp. 106-109.

- 정대기 (2009), “개발도상국 기업의 기술창출단계 기술혁신: 프로세스 기술개발 사례연구”, 「기술혁신학회지」 제12권 1호, pp. 237-264.
- 최영락·송위진·황혜란·송성수 (2008), 「차세대 기술혁신 시스템 구축을 위한 정부의 지원시책」, 한국공학한림원.
- 포스코 (2004), 「포스코 35년사」.
- Hobday M., H. Rush, and J. Bessant (2004), “Approaching the Innovation Frontier in Korea: The Transition Phase to Leadership”, *Research Policy*, Vol. 33, No. 10, pp. 1433-1457.
- Kim, L. (1980), “Stages of Development of Industrial Technology in a Developing Country: A Model”, *Research Policy*, Vol. 9, No. 3, pp. 254-277.
- Kim, L. (1997), *Imitation to Innovation: The Dynamics of Korea's Technological Learning*, Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Kim, L. (1999), “Building Technological Capability for Industrialization: Analytical Frameworks and Korea's Experience”, *Industrial and Corporate Change*, Vol. 8, No. 1, pp. 111-136.
- Lee, J., Z. Bae and D. Choi (1988), “Technology Development Process: A Model for a Developing Countries with a Global Perspective”, *R&D Management*, Vol. 18, No. 3, pp. 235-250.
- Lee, K. and C. Lim (2001), “Technological Regimes, Catching-up and Leapfrogging: Findings from the Korean Industries”, *Research Policy*, Vol. 30, No. 3, pp. 459-483.

송성수

서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정에서 “한국 철강산업의 기술능력 발전과정”으로 박사학위를 받았고, 현재 부산대학교 기초연구원 교수로 재직 중이다. 관심분야는 산업별 기술혁신패턴, 과학기술과 사회문화, 과학기술정책의 역사 등이다.

송위진

고려대학교 행정학과에서 과학기술정책으로 박사학위를 받았고, 현재 과학기술정책연구원에서 연구위원으로 재직 중이다. 관심분야는 국가혁신체제, 혁신거버넌스, 사회적 혁신정책 등이다.