

국가 연구개발 투자시스템의 레버리지 전략: 시스템 다이내믹스 접근

Leverage Strategy to National R&D Investment in Korea: A System Dynamics Approach

박헌준* · 오세홍** · 김상준***

Park, Hun-Joon* · Oh, Se-Hong** · Kim, Sang-Jun***

Abstract

This study is an exploratory investigation on how national R&D investments decisions are made in Korea. For developing system dynamic model, we are interested in locating three structural dilemma, occurring with the Korean NIS. In so doing, we intend to devise the ways of ameliorating problems within the NIS investment decision-making process by providing policy implications. We identify delays and side effects during transition periods between different stages of technology innovation by perceiving the switching pattern dynamically, in which form of technologies shifts from one to another stage like paradigm shift, when the R&D investment reaches a certain stock. It is also suggested that the development of strategies is necessary in order to enhance efficiency of technological development process.

Keywords: 국가연구개발투자, 시스템다이내믹스, 흡수역량, 대리인 문제
(national R&D investment, system dynamics, absorptive capacity,
agency problem)

* 연세대학교 경영대학 교수 (제1저자, hjpark@yonsei.ac.kr)

** KISTEP 연구위원 (공동저자, oshok@kistep.re.kr)

***연세대학교 경영대학 석사과정 (공동저자, sjkim@yonsei.ac.kr)

I. 서론

Pavitt(1988)은 설비투자, 연구인력의 질적 수준, 그리고 연구개발 지출에서의 국가간 차이는 선두에 설 수 있거나 현재의 모범사례를 추격할 수 있는 기회를 결정하는 요인으로 작용한다고 한다. 연구개발은 혁신과정의 기본적 투입자원이고, 혁신은 생산성, 생산성 향상, 그리고 경쟁력에 영향을 미치는 중요한 요소이다(Bozeman and Melkers, 1993). 지난 수십 년 동안 기술 및 연구개발 관리는 극적으로 변해왔고(Edler, Meyer-Krahmer and Rogers, 2002), 기술개발 또는 연구개발이 국가경쟁력의 중요 요인으로 인식되고 있다. 이와 관련하여 국가 전체차원의 기술 및 지식 스톡의 증가와 플로우 혁신을 반복적으로 선순환 시킬 수 있는 혁신역량이 중요하게 다루어지고 있다(이언호 외, 2001). 대체적으로 경제학자들은 생산성증가와 관련된 변수들 중 새로운 기술개발을 포함하는 기술진보를 매우 중요하게 다루고 있으며, 연구개발(R&D)이 기술진보의 핵심적인 바탕이 된다는 생각에 동의하고 있다(Borras and Stowsky, 1999).

오늘날과 같이 연구개발활동이 조직화된 상황에서는 연구개발투자가 기술혁신의 상당부분을 설명한다(신태영, 2002). 지난 10년간 OECD 국가의 과학기술에 대한 지출의 증가는 자금이 사용되는 방식의 변화를 동반해 왔다. 기술혁신의 필요와 기회에 대처하여 연구개발의 방향을 '선택'하는 경우가 많아지고 있고, 공공 부문의 자금은 관련된 산업의 지출과 연결되는 사례가 점점 늘고 있다(김환석·송성수, 1998). 연구개발투자규모가 가장 큰 미국조차도 중대한 갈림길에 서 있는(Bonvillian, 2002; Korn et al., 2002)상황이며, 대부분의 국가들은 공공부문의 연구개발투자규모의 증가와 더불어 이해관계자들의 관심과 사회적 요구를 충족시키는 동시에 기존의 리더십을 어떻게 유지하거나 새로운 리더십을 창출해야 하는 부담을 가지고 있다.

지난 수십 년 동안의 경험에 비추어 보아 기술변화를 증진하거나 촉진하는데 있어서 중심적 역할은 기업임에는 틀림없으나(Pavitt, 1998), 한국의 경우 정부가 연구개발투자를 늘리고 촉진하는데 중요한 역할을 해 왔으며 앞으로도 그럴 것이라는 기대를 가지고 있다. 한국은 지난 30여 년간 정부와 민간의 기술개발노력에 힘입어, 2002년 현재 연구개발투자가 144억불 수준, GDP대비 연구개발투자 2.91%를 실현하여 주요 선진국 수준(2.5%~3% 수준)에 도달했다(과학기술부, 2003). 특히, '99년부터는 국가연구개발사업의 투입자원의 중복성을 줄이고, '선택과 집중' 방식에 의해 국가 전략분야에 자원을 결집하여 국가혁신역량을 높이기 위한 국가연구개발사업 종합조정을 실시함으로써, 정책결정 개선의 모범사례가 되고 있다(OECD, 1999).

그럼에도 불구하고, 한국은 투입에 비해 산출이 대체적으로 낮은 비효율적인 구조를 띄

고 있는 것으로 지적되고 있다. 이와 같은 연구개발투자의 ‘고비용 저효율’ 구조가 왜 나타나는 것일까? 투자주도 전략에 의한 단기간의 투자규모 확대가 연구개발역량의 향상속도를 지나치게 추월하면서 나타나는 일시적 현상인가 아니면 혁신주도 전략으로 전환하는 과정에서 나타나는 장기적이고 구조적인 부작용에 의한 것인가? 기존의 연구개발투자의 경로의 존성에서 벗어나지 못하고, 부작용을 확대 재생산하기 때문인가? 그것도 아니면 보이지 않은 시간지연이 작용하기 때문인가?

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 시스템 다이내믹스 사고를 통해 연구개발투자의 동태성을 효과적으로 관리할 수 있는가이다. 구체적으로 본 연구는 시스템다이내믹스 방법을 활용하여 한국의 국가연구개발 투자시스템의 전반에 작용하고 있는 여러 가지 요소들의 관계성을 파악하여 ‘눈에 보이지 않는 동태적 구조’를 이해하고, 연구개발투자의 실효성을 높이기 위한 정책레버를 발견하는 것이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 한국의 R&D 투자시스템과 투자패러독스에 대해 살펴본 다음, 시스템적 사고에 따라 정책레버발굴을 위한 분석의 기본적 틀(시뮬레이션 모델)을 작성하고, 구성요소에 대한 개략적인 설명을 한다. 그리고 시뮬레이션 결과에 대한 분석과 해석을 통해 연구개발시스템에 작용하고 있는 부작용과 지연현상 그리고 레버리지 영역을 확인하고, 마지막으로 결론 및 정책적 함의를 제시한다.

II. 연구개발투자의 불확실성과 연구개발투자 패러독스

1. 연구개발투자규모와 패러독스 상황

연구개발투자규모 결정은 두 가지 이유에서 매우 중요하다. 만약 너무 많이 지출될 때, 단기적인 재정적 안정성이 위협에 직면할 수 있다. 반면에 너무 과소 지출될 때, 장기적 경쟁력이 위협받게 된다(Heidenberger et al., 2003). 경제성장 정도에 따라 공공부문의 연구개발투자규모가 적정하게 결정되었다고 가정하더라도, 그것이 민간부문의 연구개발투자자와 어느 정도 합일을 이루어내어 단기적인 재정적 안정성과 장기적 경쟁력을 확보할 지는 불확실하다. NISTEP(1999)은 연구개발투자수준 또는 규모가 Arrow의 말처럼 사회적으로 봐서 과소가 될 경향이 있는지 또는 Dasgupta and Stiglitz의 말처럼 과대가 될 경향이 있는지는 선형적으로 밝혀지지 않았으며 실증연구에 의해서 밝혀질 필요가 있다고 한다.

Stewart는 우선순위설정과 관련된 문헌들이 구조적 우선순위 뿐 만 아니라 주제적 우선순위에 대해 논의해온 반면, 공공부문 연구에 대한 국가 우선순위에 관한 정책지향적인 사

고는 선호되는 과학기술분야를 정하는데 집중되고 있다고 말하고 있다. 공공부문의 연구개발투자의 규모가 적정하게 설정되었다 하더라도 정부연구개발사업의 투자우선순위설정과정에서 주제적 우선순위, 구조적 우선순위, 선호 영역에 대한 우선순위에 대한 적정규모 결정과정에서 패러독스 상황이 발생할 수 있다. Heidenberger(2003) 등은 연구개발 투자시기 및 최저수준의 결정은 수많은 조직의 핵심이 된다고 하고, 이것도 문헌연구나 실무차원에서 예산배분 원칙들(rules)을 제시하고 있다. 그러나, 당초 기대했던 것과 달리 실행과정에서 여러 가지 예기치 않은 상황이 발생하게 되고, 또한 그 실효성도 보장할 수 없다.

‘과학기술기본계획’에 따르면, 한국의 국가연구개발사업은 크게 ‘전략기술개발’과 ‘연구개발역량강화’와 관련된 연구개발프로그램으로 구분된다. 이들 두가지 유형의 국가연구개발사업 모두 대체적으로 3년 정도의 장기 연구개발과제와 1년 정도의 단기 연구개발과제로 구성되어 있다. 전략기술개발 프로그램들은 6T(IT, BT, NT 등)와 같은 핵심·전략기술을 선택적으로 집중 개발하는 연구개발 프로그램들로 구성되어 있고, 연구개발역량강화 프로그램들은 혁신주도 전략으로의 전환에 필요한 장기적이고 지속적인 연구개발 프로그램들로 구성되어 있다. 전략기술개발 프로그램들과 연구개발역량강화 프로그램들간에 적절한 투자 균형이 설정되지 않을 경우 ‘개선 패러독스’와 같이 연구개발투자 효과가 상대적으로 줄어드는 ‘연구개발투자 패러독스’가 발생할 개연성이 있다.

연구문제 1 : 연구개발투자 패러독스가 발생되지 않도록 하면서 연구개발투자에 따른 연구개발자원 플로우와 연구개발지식 저량이 늘어나도록 우선순위분야를 설정하는 것이 중요하다. 그렇다면 연구개발단계간 또는 전략기술개발 프로그램들과 연구개발역량강화 프로그램들간 연구개발투자의 적절한 균형점 발견 또는 정책적 제안이 가능한 것인가?

2. 근시안적 투자와 패러독스 상황

연구개발투자규모와 관련된 패러독스는 연구개발투자 우선순위설정과정의 동태성, 참여자들의 긴장 정도 및 인식(mental model), 플로우의 흐름에 영향을 미치게 된다. 하위시스템간의 구조적 긴장은 지속적인 그리고 불연속적인 변화의 기폭제로서 작용된다(Leoncini, 1998). 현재의 연구개발투자가 미래에 어떤 국가 이익을 가져다 줄 것인지에 대한 불확실성으로 인해 연구개발투자 우선순위설정과정은 저항에 직면하게 되며(Bloom, 1988), 경우에 따라서는 선택의 기로에 서게 된다. 이 과정에서 최적의 투자정책을 추구하기 보다는 기존 투자보다 다소 늘려 잡는 정도의 선택, 그래서 연구개발지출에서의 가장 완만한 증가

가 이루어진다(Lundstrum, 2002). Lundstrum(2002)은 미국의 기업들은 최적투자정책을 추구하는 것이 아니라 오히려 기업가치를 극대화하는 프로젝트들 중에서 빠르게 이익이 생기는 (pay off) 프로젝트를 선택하는 근시안적 투자를 한다고 밝혔는데, 이것은 부의 창출과 공공 정책에 매우 중요한 함의를 가진다. Lundstrum(2002)이 말한 바와 같이 모든 조건이 동등하다면 근시안적 투자정책은 낮은 연구개발을 초래할 수 있다. 근시안적 투자는 자금흐름이 원활한 프로젝트를 선호하고, 원활하지 않는 프로젝트를 멀리함으로써 투자정책에서의 왜곡을 초래하며, 패러독스 상황에 빠질 수 있다. 국가연구개발사업의 등급과 우선순위를 최종 확정하게 되는 국가과학기술위원회(NSC)의 위원들과 사업별 예산편성을 하게 되는 담당공무원들은 장차의 연구개발투자 방향 및 투자효과에 대한 불확실성 때문에 현재의 우선순위설정과정에서 더 많은 스트레스에 틀림없이 직면하게 된다. 연구개발투자규모 확대, 시간적 제약, 그리고 근시안적 사고로 국가전략기술개발(예를 들면, 6T 또는 차세대성장동력 기술개발)에 대한 투자를 선호할 때, 주제적 우선순위와 관련된 국가연구개발사업(예를 들면, 신진연구자지원사업, 지방과학기술진흥 관련 사업)에 대한 투자가 줄어들어 기대하지 않은 부작용을 초래할 수 있다.

연구문제 2 : 바람직한 투자방향 또는 전략이 명확하지 않은 상황에서 연구개발 투자규모가 늘어날 때 비효율적인 국가연구개발프로그램, 종료되어야 할 국가연구개발프로그램의 규모가 줄어들 수 있지만 계속 지원될 수 있다. 경로의 존적 투자, 당기실적위주의 투자, 근시안적 투자가 선택적 집중투자(선택과 집중·원칙)와 결합되었을 때 초래될 수 있는 부작용발견 또는 이에 대한 정책적 제안은 가능한가?

3. 대리인 문제와 패러독스 상황

연구관리와 연구성과 창출에 있어서도 정부의 정책의도와 대리하는 연구자와의 목표갈등이 있을 수 있고, 양자간의 정보 역시 동일하지 않는 정보 비대칭의 문제에서 이른바 대리인 문제가 발생할 여지가 있다. 정부가 연구개발의 지원주체로서 자금을 지원하고 연구기관으로 하여금 연구개발을 하게 한다고 했을 때 정부는 적은 비용으로 성과를 극대화하려 할 것이다. 연구기관은 연구팀을 구성하여 과제를 수행하고 연구자들은 노력을 투입할 것이지만 연구자의 노력은 정부나 연구기관이 객관적으로 측정할 수 없는 변수여서 여기서 도덕적 해이 문제가 발생하게 된다. 더욱 엄밀히 말하면 정부는 사업을 수행하는 연구기관의 성실성을 점검할 수 없고, 아울러 연구기관은 연구자의 노력 정도에 대해서 충분한 정

보를 가지지 못하여 2단계에 걸친 도덕적 해이가 발생하게 된다.

또한, 급격한 기술환경 변화에 대응하기 위해 정부가 신생기술 및 첨단기술개발에 주력하게 될 때, 국가 전략적 차원에서 늘려 잡은 연구개발투자규모는 잉여자원(slack)으로서 변화에 대한 완충재로서 역할을 담당할 수 있다. 그러나, 나노기술, 바이오기술, 정보기술과 같은 불확실성이 크고 연구개발 성공확률이 낮으면서도 성공할 경우 국가 경제에 큰 도움이 되는 연구개발과제 또는 그것들로 이루어진 국가연구개발사업에 대한 투자를 확대할 때, 장기적으로 이들 사업에 연구자들이 집중적으로 몰리게 됨으로써 기존의 축적된 기술 스톡이 해체되거나, 여타분야 사업을 수행하는 연구인력에 수급문제가 발생하는 등의 부작용을 초래하게 되는 패러독스 상황에 빠질 수 있다. 국가적 차원에서 연구개발투자 효과가 높은 경우 연구개발 잉여 투자가 연구개발성과에 긍정적으로 작용할 수 있지만, 아직까지는 ‘고비용 저효율 구조’를 가지고 있는 우리나라의 경우 첨단 신생기술에 대한 적극적인 잉여투자가 반드시 의도한 만큼의 연구개발성과가 창출될 것이라고 기대하는 것은 무리가 있다.

연구문제 3 : 국가연구개발사업 투자우선순위설정의 계층적 인과고리의 전략적 루프로부터 효능감 루프까지의 전체 과정에서 루프간 불합일에 따른 주인-대리인 문제로 인한 도덕적 해이 또는 잉여 연구개발 투자정책의 효율성과 관련된 정책적 함의를 발견할 수 있는가?

Ⅲ. 한국의 국가연구개발사업 종합조정 : 연구개발투자우선순위설정과정

1. 복잡하고 동태적인 상호작용과정

Braun(1998)은 과학시스템의 인지발전은 우선 외부의 관심이 자금지원기관으로 흘러 들어오고, 자금지원기관의 조직과 하부구조, 인지적 전통 및 각본, 과학기술자의 동기, 기술발전과 같은 네 가지 하위시스템의 상호작용에 의해 이루어진다고 한다. 한국의 국가연구개발투자방향설정 및 배분 메카니즘, 소위 국가연구개발사업의 종합조정은 국가과학기술위원회에 의해 진행되는 ‘우선순위설정’ 시스템과 개별 연구개발사업에 대한 기획예산처의 ‘연구개발예산편성’ 시스템으로 구분 된다. 이러한 연구개발투자규모의 결정은 대체로 외생적으로 결정되는데, 최근에는(2004), 국가과학기술위원회(NSIC)에서 기획예산처가 정한 연구개발예산 규모 내에서 투자우선순위설정과 사업별 예산편성 기능까지 수행하는 것으로

로 결론이 나 있는 상태다. 특히 여기서 말하는 한국의 국가연구개발사업에 대한 종합조정
은 구조적 우선순위, 주제적 우선순위, 선호되는 과학기술 분야를 전체적으로 종합하여 연
구개발사업별 투자 우선순위를 정한 다음, 예산편성이라는 과정을 통해 연구개발비를 개별
연구개발사업에 배정하는 복잡하고 동태적인 과정이다.

부처별로 관리되고 있는 국가연구개발사업은 연구개발과제간 또는 연구개발사업간 중복
투자를 줄이고, 국가목표와의 합일을 높여나감으로써 궁극적으로 사업의 실효성을 높인다
는 차원에서 개별 부처가 관리하고 있는 거의 대부분의 국가연구개발사업이 종합조정
대상에는 포함된다. 복잡하고 동태적인 상호작용과정으로서의 국가연구개발사업 종합조정
의 그 기본적 활동의 흐름구조를 살펴보면 다음과 같다. 우선 전년도 국가연구개발사업에 대
한 조사·분석과 평가를 실시하고, 그 다음으로 차년도 국가연구개발사업에 대한 예산사전
조정과정을 통해 분야별 및 개별 사업별 등급설정과 정성적 의견을 종합한 후 대통령이 주
재하는 국가과학기술위원회에 보고한다. 국가과학기술위원회는 최종적으로 사업별 우선순
위를 확정하고, 그 결과를 기획예산처에 통보하면, 기획예산처는 가용예산 범위 내에서 각
부처의 주요 정책, 국가연구개발투자방향 등을 종합하여 개별사업별로 예산을 배정하는 구
조이다. 공공부문의 과학기술 우선순위설정은 본질적으로 연구개발시스템안의 다수의 참여
자들이 서로 상호 작용하는 복잡한 정치적 과정이다(Stewart, 1995). Bloom(1988)은 국가적
그리고 조직수준에서의 과학연구의 우선순위설정과정은 등급 부여 보다는 선택-결정 시스
템의 변화하는 측면에 의해 가장 잘 조정된다고 한다.

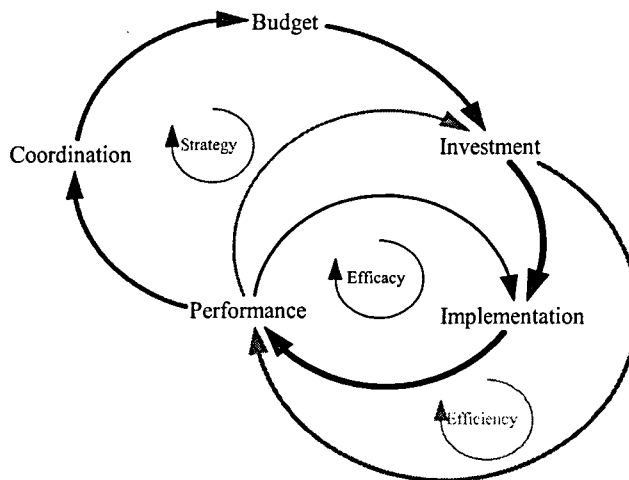
한편, Leoncini(1998)은 기술시스템을 기술 및 과학지식, 기술시스템의 구조, 시장 환경, 그리
고 제도적 상호작용영역으로 구분하였는데, 기술시스템의 동태성을 설명하는데 있어서 제도적
상호작용영역을 특히 중요하게 다루고 있다. 한국의 국가연구개발사업의 종합조정과정에는
총연구개발예산규모, 부처별 연구개발투자정책 및 전략, 기술분야별 전문가를 포함한 다양한
참여자들의 인식, 연구개발투자 성과와 향후 계획과 관련된 각종 자료들, 그리고 우선순위
설정 기준들이 동태적으로 움직이면서 상호 작용영역을 형성한다. 다시 말해 국가연구개발사업
종합조정은 각 분야의 전문가와 이해관계당사자들이 과학기술기본법에 정한대로 다양한 외부
적 관심과 선호되는 과학기술분야를 포함한 연구개발투자방향을 고려하여 국가연구개발사업
들에 대한 투자우선순위를 조정하는 중요한 제도적 상호작용영역이다.

2. 계층제적 의사결정 인과고리

Hansen 등(1999)은 자원배분 의사결정이 세 가지로 차원으로 이루어진 계층제 형태를 띠
고 있다고 한다. 그 첫 번째 차원은 국방부와 같은 공공기관이 현재의 역량을 지탱하는 것

과 미래 역량을 확보하는 것 사이에서 결정을 하는 것을 말하고, 두 번째 차원은 R&D 단계간 자원 배분을 말하며, 세 번째 차원은 구체적인 연구개발단계 내에서의 배분과 관련된 의사결정이다¹⁾. 한국의 국가연구개발사업 종합조정の場合は 국가전략적 차원에서 연구개발투자 우선순위를 설정하는 것 뿐만 아니라 예산배정을 통해 국가연구개발사업의 성과창출 및 연구자의 연구개발활동에 대한 사전적 의사결정까지 포함하는 계층적 인과고리로 연결된 과정이라고 할 수 있다.

구체적으로 <그림 1>과 같이 세 가지 루프로 구분할 수 있다. <그림 1>에서 첫 번째 루프는 전략적 루프로 기획예산처, 전문기관, 연구자들이 프로젝트 또는 프로그램 성과 및 차년도 계획의 타당성에 대한 의견조정과정을 거쳐 사업별 우선순위와 투자규모를 결정하는 루프이다. 여기에는 부처이기주의, 당기업적주의 등의 성과대비 의사결정 경향, 선택과 집중의 함정(Fixes that fail), 이해관계의 복잡성이 작용한다. 둘째는 구조적 루프 또는 효율화 루프로써 연구개발자원이 어떻게 순환되고 있는지, 그래서 전년도의 성과가 전략적 루프에 어떤 영향을 미치는가와 관련된 루프이다. 여기에서는 순환되는 연구개발자원을 화폐의 흐름과 프로젝트의 흐름으로 구분하여 이해관계의 복잡성과 연구진척도 등을 파악할 수 있을 것이다. 셋째는 효능감 루프 또는 연구자루프로써 연구개발투자 우선순위결정이 연구자들의 태도에 어떤 영향을 미치는지에 관련된 루프이다. 구체적으로는 하드웨어적인 연구



[그림 1] 국가연구개발사업 투자우선순위설정의 계층적 인과고리

1) Hansen 등(1999)은 두 번째 차원의 자원배분 의사결정에 대해 시스템 다이내믹스 방법을 적용하여 분석을 실시하였다.

개발 프로세스 하에서 이를 운영하는 소프트웨어의 연구자의 태도가 얼마나 하드웨어의 흐름을 원활히 할 것인가에 대한 것으로 이해된다. 전체적으로 볼 때, 국가연구개발사업과 관련한 과학기술 이슈, 개별 사업별 성과, 연구자의 연구개발활동을 포함한 다양한 외부적 관심이 지속적으로 연구개발투자시스템에 유입되는 구조이다.

[그림 1]의 한국의 국가연구개발사업 종합조정과정에서 플로우의 방향성과 일관성은 연구개발투자 우선순위결정과 관련한 참여자들의 관련성을 나타낸다. 국가연구개발사업별 등급부여와 정성적 의견의 차이 또는 변화가 국가연구개발사업별 투자액 배분의 차이를 가져오고, 그 결과는 인과고리에 의해 계층적으로 연결된 하위시스템에 영향을 끼친 다음, 다시 국가전략적 차원에서 사업별 투자우선순위설정과정에 순환(feedback)됨으로써 특정한 국가연구개발사업의 투자규모 추이 또는 위상변화를 가져온다.

IV. 시스템 다이내믹스 기법을 이용한 시뮬레이션 모형설계

본 연구의 관심 사항중 하나는 연구개발투자 우선순위설정과정에서의 패러독스의 해결인데, 이는 무엇보다도 ‘현재보다 국가경쟁력 또는 과학기술경쟁력을 높이거나 적어도 현 수준 이상을 유지해 나가기 위해 연구개발투자규모를 늘릴 것인가 아니면 줄일 것인가? 늘리거나 줄인다면 그 확대 및 삭감의 정도 및 수준, 그리고 투자 속도 조절하기 위해 조절장치를 어느 지점에 설치하고, 적절한 정책레버는 어디에서 찾아야 하는가와 관련된 것이다.

실제 회귀모형 분석결과 연구개발투자자와 연구개발성과간의 강한 결합관계가 반드시 인과적 관계를 의미하는 것은 아니다. 강한 통계적 관련성이 인과조건을 반영하고 있을 때에도 인과조건은 역방향(Y로부터 X)으로 작용할 수 있다(오세홍 외, 2002). 또한 어떤 과정도 형이 상호의존성을 나타낼 수는 있지만 그것은 단지 일어나는 상황의 정지된 그림만을 나타낼 뿐이다(박광량·손태원, 1996). 연구개발투자시스템에 수많은 참여자들이 있을 것이고, 수많은 과정들이 작동하고 있으며, 모두가 상호 연계되어 있고, 각기 다른 시간대에 흘러가며, 상당부분은 서로 주고받는 그런 과정들일 것이다. 본질적으로 복잡한 시스템을 이해하기 위해서는 환류(feedback), 스톱과 플로우, 시간 지연, 그리고 비선형성과 같은 시스템 다이내믹스의 기본개념의 숙달을 필요로 한다(Sterman, 2002). 연구개발투자시스템은 다양한 사고모형(mental model)을 가진 이해관계당사자들이 참여하고 있고, 하위시스템이 복잡하게 상호 작용하는 매우 동태적인 구조이다. 연구개발 투자의 어떤 변수의 변화는 관련된 순환 고리(feedback loops)의 모든 변수들의 변화를 가져오게 된다. 연구개발투자시스템과 같이 복잡하고 동태적인 시스템을 이해하기 위해서는 시스템적 사고를 통한 접근이 필요하다.

여기에서의 연구개발투자시스템 다이내믹스 모형설계는 우선 연구개발투자시스템 이해에 중심이 되는 핵심변수들을 찾아내는 것이다. 본 연구에서는 이론 및 실무경험을 토대로 연구개발투자시스템의 핵심변수를 찾아낸 다음, 인과루프를 전략적 루프, 효능감 루프, 효율화 루프로 구분하여 그렸다. 그런 다음 '스톡 및 플로우' 모형을 그려서 각각의 루프를 모델링한 다음 종합하는 방식으로 진행하였다. 특히, 연구개발투자의 개별 루프와 루프간 관계에서 의미 있는 정책레버를 발견하기 위해, 연구개발투자 우선순위설정과정에서 투자배분의 기본단위가 되는 국가연구개발사업을 연구개발단계의 축에 따라 기초, 응용, 개발의 3가지 유형으로 구분하고, 이들 3가지 유형이 각각 어떻게 변화해 나가는지를 중심으로 살펴보았다. 모형설계에 사용된 프로그램은 STELLA 5.1.1을 사용하였다.

1. 전략적 루프

전략적 루프는 R&D 투자결정에 대한 의사결정 조정을 위한 루프로써 의사결정의 행동주체는 크게 정부(기획예산처), 전문기관(KISTEP), 연구자로 나누어볼 수 있다. 정부는 예산의 규모와 우선순위를 결정하는 조정자 역할을 하고 있고, 전문기관과 연구자들은 연구성과 및 향후의 성공가능성에 따라 연구개발투자결정에 작용하거나 반응하는 행위자로 간주하였다. 따라서 이들 세 주체의 의사결정 조정에 따라 각각의 우선순위분야와 투자액이 결정되는데 의사결정의 조정은 각 주체의 영향력에 비례하여 배분된다고 가정한다(Lounamaa, March, 1987). 즉, 각 주체의 활동 수준에 따라 의사조정을 위한 일종의 가중치가 결정되고, 이러한 가중치에 의해서 R&D 투자에 대한 의사결정이 조정된다고 보았다.

행동주체의 활동수준은 기술혁신 가능성에 대한 의지나 믿음으로써 이러한 의지나 믿음은 경험적 추론을 통하여 이루어진다. 이는 의지에 따라 행한 행동의 결과를 통해서 학습이 이루어지고, 이러한 학습이 다시 자신의 믿음에 영향을 주는 인지적 사고과정에 기초한다. 결국 과거 성과에 비해서 얼마나 향상되었나, 얼마나 큰 효과가 있었는지 여부가 학습에 의한 인지과정의 출발점이 되기 때문에 경사탐색법(a form of gradient search)을 가정한다. 각 기(time period)에서 의사결정 행동주체들은 자신의 학습에 대한 믿음에 의해서 활동수준을 결정하게 된다.

행동주체들의 학습에 의한 믿음은 연구개발성과에 대한 평가에 의해서 이루어진다. 성과평가는 행동주체들의 제한된 합리성 혹은 의도된 합리성에 의해서 자신이 바라보고자 하는 부분에 대한 평가만을 한다고 가정하였다. 예를 들어 연구자들은 자신의 연구 성과만을 가지고 다음 기의 활동수준을 결정하려고 하고, 기획예산처는 연구활동을 재정적 상황과 결부시켜 투자대비 성과가 얼마나 재정적으로 효율성을 가져왔는가에 따라 활동수준을 결정

하게 된다. 한편, 전문기관의 경우에는 재정적 상황과 더불어 기술의 역량적 측면에 대해서도 고려한 후 활동수준을 결정하게 된다.

각 주체의 활동수준은 R&D 투자 의사결정의 토대가 되는데, 대립되는 세 주체간 투자의 사결정의 조정은 정부의 조정의지에 의해 가중평균 되는 것으로 보았다. 즉 매년 정부가 재정상태 및 연구개발정책 등을 감안하여 정하는 ‘연구개발 투자방향’에 나타나 있는 정부의 정책의지(예를 들면, 총 연구개발투자규모 대비 기초연구에 대한 투자 비율 등)에 의해 조정이 이루어진다고 보았다. 다시 말해, 결국 연구개발 투자결정은 정부가 하는 것이지만 다른 행동 주체의 영향을 고려하는 의사조정 모형으로 구성하였다. 연구개발투자 조정에 대한 연구개발단계별 배분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{kt} = \frac{\sum_{i=1}^3 f_{kt} A_{ikt}}{\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^3 f_{kt} A_{ikt}} \text{-----}(1)$$

f_{kt} 는 t 기간 k 기술에 대한 의사조정 가중치를 의미한다. 1×3 (기초, 응용, 개발) 행렬로 구분했던 기술은 행위주체가 추가되면서 3 (기획예산처, 전문기관, 연구자) $\times 3$ 의 행렬 X 로 나타내어 지고 f_{kt} 는 t 기간 행렬 X 의 $X_i \cdot$ 요인에 대한 가중치가 된다.

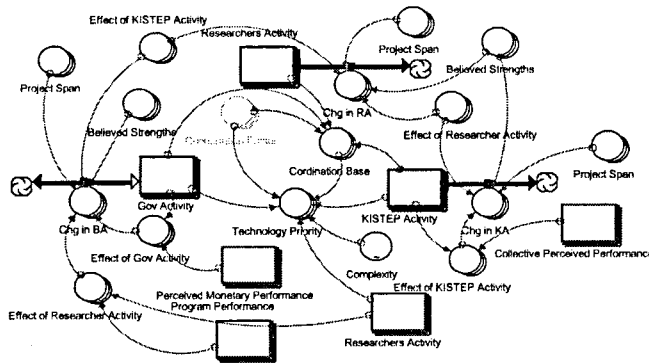
한편, 상대방 활동수준 변화에 대한 인식은 상대방 활동수준의 변화를 완전히 인식한 경우 1 이 되고 그렇지 않은 경우는 0 으로 상대방의 활동수준을 자신의 학습적 인지과정에 포함시키지 않는 상황을 가정하였다. 특히 이러한 상대방의 활동수준에 대한 인식은 상호작용 혹은 배태성에 의거하여 상호작용이 클수록 활동수준에 대한 인식은 크게 나타나고 상호작용이 적은 경우에는 상대방 활동수준에 대한 인식이 그만큼 줄어든다고 간주하였다. 즉, 상대방에 대한 영향력의 인식 정도에 따라 상대방의 활동 수준에 대한 인식이 달라진다고 가정하였다. 본 연구모형에서는 상대방의 활동수준 변화에 대한 인식에 대해 아래와 같이 조작적 정의를 하였다.

[표 1] 활동 수준 변화에 대한 인식의 조작적 정의

행위주체	기획예산처	전문기관	연구자
정의	0.7	0.2	0.1

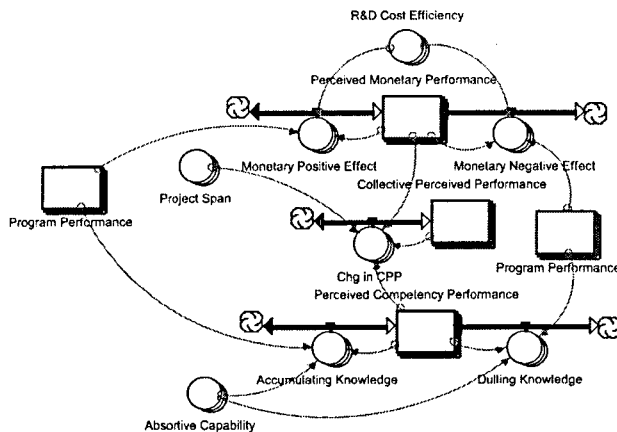
의사결정을 함에 있어서 휴리스틱 의사결정도 간과할 수 없는 의사결정 방법이 된다. 다시 말해, 조정할 문제가 복잡해져서 의사결정에 대한 비효율이 예상되는 경우에 과거의 경험적 수칙에 의해서 할당자체를 균등하게 처리하는 휴리스틱 의사결정을 행하게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 진행 중인 프로그램(또는 프로젝트) 수가 일정 수준을 초과하면, 즉 문제의 복잡성이 어느 수준을 초과하게 되면 균등 배분하도록 의사조정(Tkt)에 논리적 연산을 추가로 설정하였다.

국가연구개발사업의 우선순위를 결정하는 전략적 루프의 저장/유량 구조를 나타내면 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 전략적 루프의 모델링

전략적 루프의 중심구조는 세 가지 주체의 각 활동수준을 조정하는 것으로 자신의 제한된 합리성에 의거하여 연구 성과에 따른 평가를 내리고, 이에 따라 자신의 활동수준 및 연



[그림 3] 연구개발성과에 대한 참여자들(players) 인식 모형

구개발사업에 대한 의지를 다자간에 재조정하는 프로세스를 구성한다. 세 가지 주체의 활동수준을 결정하는 연구 성과는 각자의 인식에 의거하게 되는데 이러한 인식에 대한 저장/유량 구조는 다음과 같다.

[그림 3]에서 보는 바와 같이, 연구 성과의 평가는 실제 연구자가 참여하고 있는 프로그램의 성과에서 출발한다. 프로그램의 성과는 비용 효율적 관점에서 보는가와 흡수역량의 차원에서 보는가로 구분되고, 이러한 평가에 의해서 각 주체가 인식하는 성과가 달라지게 된다. 비용 효율적 관점은 투자대비 성과의 측면으로 재정적 관점을 의미하고, 흡수역량의 차원은 후술하겠지만 기술자체의 축적을 위한 역량적 목적에 의한 평가관점을 의미한다.

2. 효능감 루프

연구자의 효능감 루프는 연구개발 투자에 대한 태도와 자신의 연구 성과에 대한 태도라는 두가지 차원으로 설계하였다.

우선, R&D 투자에 대한 태도는 가용자원(slack)에 대한 태도라 할 수 있다. 가용자원이 발생하였을 경우 연구자는 두 가지 양상을 띠게 된다.

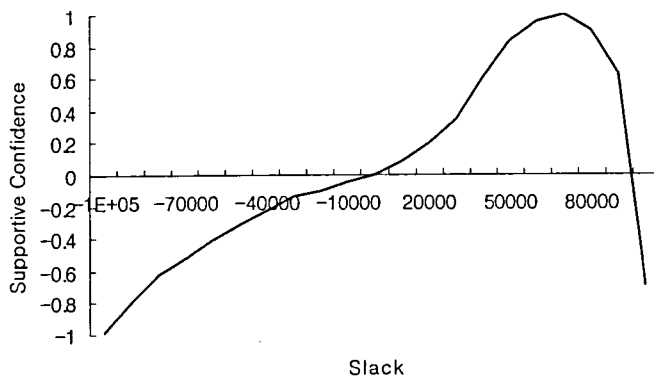
첫째, 강한 동기부여가 형성되어 혁신의 밑거름이 되는 경우이다(Cyert & March, 1963). 가용자원이 많은 조직은 상대적으로 더 많은 연구개발 활동을 하게 되고, 결과적으로 더 많은 혁신을 할 수 있는 심리적 토대를 형성하게 된다. 가용자원이 없는 경우에는 새로운 것보다는 루틴화된 것을 중심으로 의사결정을 하게 되어 탐색(exploration)보다는 활용(exploitation)에 중점을 두게 된다(March, 1991). Perrow(1984)는 고도의 기술을 가진 복잡한 조직에서는 대형 참사가 오히려 통상적 사고(normal accidents)라고 불릴 만큼, 가용자원 없이 잘 짜여진 체계 내에서는 어떠한 형태로든 혁신에 대한 자유로움이나 여지를 얻어내기가 힘들다고 설명하고 있다. 이러한 측면에서 가용자원은 혁신을 위한 밑거름이 될 수 있다.

둘째, 가용자원이 연구자의 위험 선호동기를 자극하는 경우이다. 이는 가용자원이 많은 만큼 변동이 크고 장기간의 프로젝트에 대하여 기다릴 수 있는 여유가 있다는 뜻이 되고, 실패에 대한 보전능력이 상대적으로 크게 된다는 의미와 상통한다. 반면에 가용자원은 낭비에 불과하며 변화하는 환경에 적절하게 대응할 수 있는 기회를 줄이기도 한다(Thompson, 1967). 가용자원이 생기는 경우, 주인-대리인 관계에서 대리인의 사적 이해를 위해 가용자원을 활용할 가능성이 커지기 때문에 조직 전체를 위한 호의성이라기 보다는 자신만을 위한 호의성으로 변질되어 모럴헤저드와 같은 폐해를 만들어 내기도 한다(Jensen & Meckling, 1976; Holmstrom, 1979).

이러한 맥락에서 가용자원은 크게 동기부여의 관점과 사적이익추구에 대한 관점에 영향

을 미치고 있음을 알 수 있다. 먼저 동기부여의 관점에서 가용자원이 많아질수록 동기부여 정도는 증가하여 연구자의 연구에 대한 자신감은 물론이고 속해있는 조직에 대해서 호의적인 태도를 가지게 된다(Greve, 2003). 그러나, 가용자원이 일정 수준 이상이 되면 동기부여의 영향력보다는 모럴헤저드의 영향력이 더 강하게 작용하여, 가용자원에 대한 호의성은 증가하지만 그 방향성이 자신이 속해있는 조직이 아니라 연구자 자신을 위한 호의성으로 전환되어 오히려 조직 전체적으로는 낭비를 가져오게 될 것이다. 한편, 가용자원이 없는 경우, 즉 예산요구액 보다 예산이 적게 배정된 경우에 연구자의 태도는 동기부여를 받지 못하고 위험회피 경향이 커져서 주어진 예산 내에서 준최적화(sub-optimization)를 하던지 일종의 태업을 하게 됨으로써 지연 현상이 일어나게 된다.

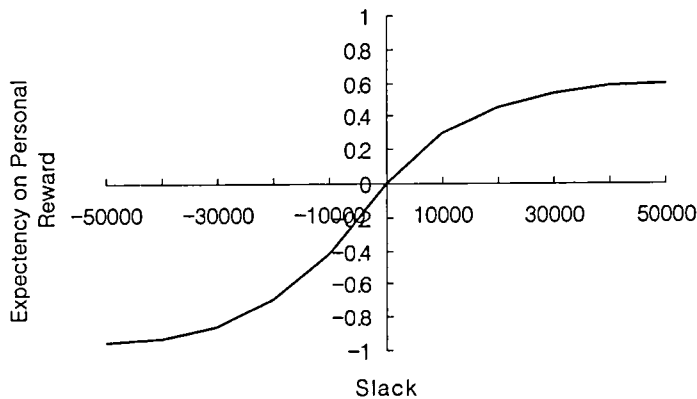
본 연구모형에서는 연구개발투자와 관련하여 가용자원을 ‘역량적 가용자원’과 ‘금전적 가용자원’으로 구분하였다. 여기서 역량적 가용자원은 투자된 국가연구개발 예산이 연구자의 능력에 비해서 많을 경우에 발생한다고 가정하였다. 다시 말해, 연구자가 자신의 연구개발 활동수준 또는 men/hour보다 더 많은 지원을 받았을 경우에 발생하는 가용자원이다. 이러한 역량적 가용자원은 연구자의 동기부여와 모럴헤저드의 성향을 둘 다 가지고 있다. 본 연구모형에서는 가용자원과 연구자의 투자지원에 대한 자신감과의 관계를 [그림 4]와 같은 비선형관계로 가정하였다.



[그림 4] 가용자원과 연구자의 투자지원에 대한 자신감과의 관계

다음으로 기획예산처가 편성하는 국가연구개발 예산과 연구개발사업을 관리하는 정부부처 또는 연구개발 프로젝트를 수행하는 연구자의 기대간 차이가 잉여로 결과지어질 때에 우리는 이것을 ‘금전적 가용자원’으로 정의하고, 개인의 보상과 관련한 기대로 연결된다고

보았다. 불확실한 상황에서의 의사결정에 있어서 개인의 효용함수는 행동결과의 영역이 양인 경우에는 위험회피적 성향을 띠나, 음인 경우에는 오히려 위험선호적 성향을 띠게 된다. 이러한 관계는 연구자의 가용자원에 대한 태도에서도 나타날 수 있다. 가용자원은 연구자의 사적인 부에 대한 인식에도 영향을 미치게 되는데, 여기서 가용자원의 사적인 부에 대한 기대감은 프로스펙트 이론에 의거하였다(Kahneman & Tversky, 1979). 다시 말해, 만약 가용자원이 발생하게 되면 자신에게도 사적 이득이 발생할 것이라는 기대를 가지게 되어 연구에 대한 위험 감수 비용을 가능한 줄이려고 한다. 반대로 가용자원이 음의 영역에서 발생할 경우, 즉 부족한 예산을 배정받은 경우에는 자신의 사적 손실을 감수해야 하는 부담감이 발생하기 때문에 오히려 위험선호적인 경향을 띠게 된다(Sitkin & Pablo, 1992; Wiseman & Gomez-Mejia, 1998). 이러한 관계에 의거해서 가용자원과 사적 보상에 대한 기대에 대한 관계는 [그림 5]와 같은 관계로 보았다.



[그림 5] 가용자원과 사적 보상에 대한 기대와의 관계

정리하면, 결국 가용자원은 연구자의 위험선호성향에 영향을 미치게 되고, 이러한 위험선호성향은 다시 연구자의 연구에 대한 태도에 영향을 미치게 된다. 위험선호성향에 대한 효용함수는 위험회피성향인 경우에는 체감적 증가함수 형태를, 위험선호성향인 경우에는 체증적 증가함수 형태를 나타내기 때문에 다음과 같이 효용함수 식을 생각할 수 있다.

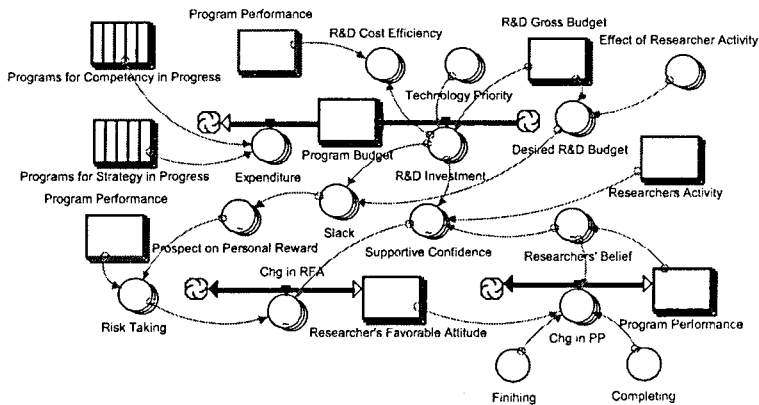
$$\begin{aligned}
 U(P) &= 1 - \exp(-rP), r \geq 0 \\
 U(P) &= \exp(-rP), r < 0 \quad \text{-----(2)}
 \end{aligned}$$

r은 위험에 대한 회피성향을 나타내는 모수로써 양의 범위일 때는 위험회피성향을, 음의 범위일 때는 위험선호성향을 의미한다. x는 금전적 성과로써 여기서는 프로젝트 성과라 정의한다. 따라서 연구자의 태도는 가용자원에 대한 연구자의 능력적 자신감과 위험회피성향에 의해서 결정된다. 이는 다음과 같이 정리된다.

$$FA(t+1) = FA(t) + U(P)CL \text{-----}(3)$$

다음으로 R&D 투자에 대한 태도중 연구성과에 대한 태도를 살펴보면 다음과 같다. 연구 성과는 정량적 평가와 정성적 평가를 모두 고려해야 할 필요가 있는데, 정량적 평가는 우선 모든 프로그램(또는 프로젝트)은 주어진 기간에 완성된다고 가정하고, 해당기간에 완료한 프로그램(또는 프로젝트)의 수를 양적 성과로 측정하였다.2) 그러나 프로그램(또는 프로젝트)의 정성적 평가는 정량적 평가에 비해 측정하기가 곤란하기 때문에 연구자의 태도에 비례하는 것으로 가정하였다. 즉, 연구성과는 완료한 '프로젝트 수*연구자의 실질적 태도'로 측정하였다. 연구자의 실질적 태도는 연구자의 의지와 실질 활동수준을 모두 포함하는 개념으로 연구자의 성과에 대한 믿음과 연구자의 활동의 곱으로 나타낸다. 여기서 연구자의 성과에 대한 믿음은 연구자의 호의적 태도에 비례한다고 가정하였다.

결과적으로, R&D 투자배분에서 성과로 이어지는 연구자의 효능감 프로세스에 대한 저장/유량 구조는 [그림 6]과 같다.



[그림 6] 효능감 루프의 모델링

2) 프로그램은 크게 역량적 목적에 의한 프로그램과 전략적 목적에 의한 프로그램으로 나누었다. 역량적 목적에 의한 프로그램은 기초연구에 대한 프로그램으로써 기술 자체의 역량강화를 위한 단기간의 프로그램을 의미하고 전략적 목적에 의한 프로그램은 장기적인 국가사업으로 어떤 특수한 목적에 의해서 이루어지는 프로그램이다.

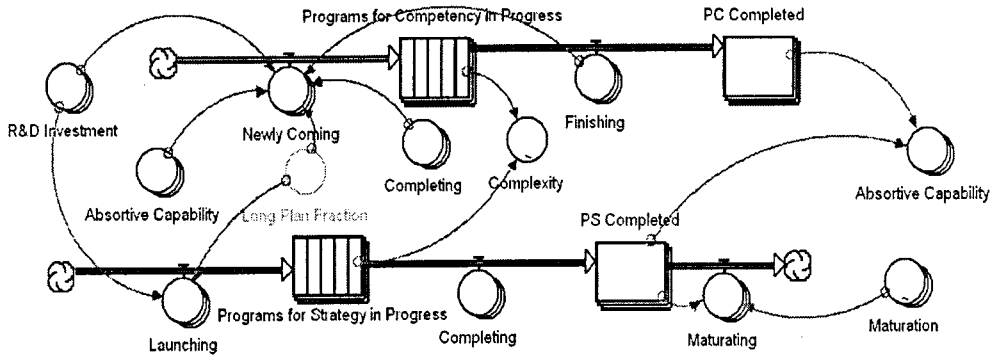
3. 효율화 투프

전체 R&D 투자의 하드웨어적인 관점인 효율화 프로세스에 대한 모델링은 크게 두 가지 측면에서 이루어졌다. 하나는 프로그램(또는 프로젝트)에 의해서 이루어지는 흐름이고, 다른 하나는 화폐에 의해 R&D 예산에서 집행 그리고 다음 기의 예산결정으로 이어지는 흐름이다. 앞서 기술한 바와 같이, 국가연구개발사업 프로그램은 목적에 따라 연구개발역량 강화(역량적 목적) 프로그램들과 전략기술개발(전략적 목적) 프로그램들로 구분할 수 있는데, 그 프로세스나 행태(behavior)도 각기 다르게 나타난다.

역량적 목적 프로그램들은 기초과학, 인력양성 등과 관련한 프로그램들이 다수 포함되어 있어, 단기간 사업이 많으며 지속적으로 이루어지는 모습을 보인다. 따라서 기술의 축적은 가시적이지는 않지만 티핑포인트를 지나는 순간부터 기하급수적인 증가의 모습을 보일 것이라 가정했다. 반면, 전략적 목적 프로그램들은 주로 유망신기술들을 선택적으로 집중개발하기 위한 프로그램들로 10년 정도의 장기간 사업이지만 외부 환경변화에 따라 기술개발내용이 빠르게 변화되는 모습을 보인다. 따라서 완성된 기술의 경우 그 성과는 가시적이지 않지만 시장이 포화되는 경우 시장과 함께 기술도 사장되는 양상을 보이는 것으로 가정했다. 즉, 상당한 시간이 지나면 전략적 목적에 의해 개발된 기술은 사라지게 된다.

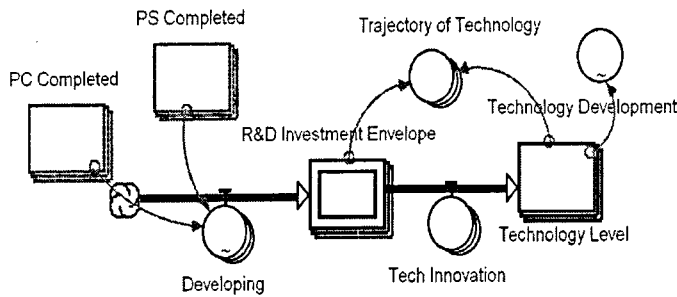
한편, 전략적 목적 프로그램들의 경우 특히 기술간 연속성이 존재한다. 연구개발단계간 선형관계를 가정하면, 기초기술은 응용기술과 개발기술을 위한 밑바탕이 된다. 완료된 기초기술은 일부 응용기술과 개발기술을 위한 준비단계가 된다. 기초기술, 응용기술, 그리고 개발기술간의 연계는 ‘흡수역량’을 통해서 결정된다. 여기서 흡수역량은 외부에서 유입된 기술을 얼마나 잘 활용할 수 있는가에 대한 학습관점에서의 역량이다(Cohen & Levinthal, 1989; 1990). Cohen과 Levinthal(1989)는 흡수역량을 조직 외부에 존재하는(spillover) 기술에 대한 학습 정도로 정의를 내리고 있는데, 기초기술은 응용기술의 외부에 존재한다고 볼 수 있어 동일한 논리를 적용할 수 있다. 아울러, 역량적 목적 프로그램들의 경우 프로그램별 특성상 연구개발단계간 선형관계를 가정하기 어렵지만, 연구개발단계간 선형 관계를 띄고 있다고 판단되는 전략적 목적 프로그램들의 연구개발단계간 학습 또는 흡수역량에 어떤 형태로든 영향을 미친다고 가정하였다.

이러한 관점에서 저장/유량 구조는 [그림 7]과 같다. 역량적 목적 프로그램들은 매기 프로젝트와 연구자가 유입되고 매기 완료되는 반면, 전략적 목적 프로그램들은 내용에 따라 불규칙적이나 3기에 한번씩 유입되고 3기 후에 완료되는 것으로 가정하였다.



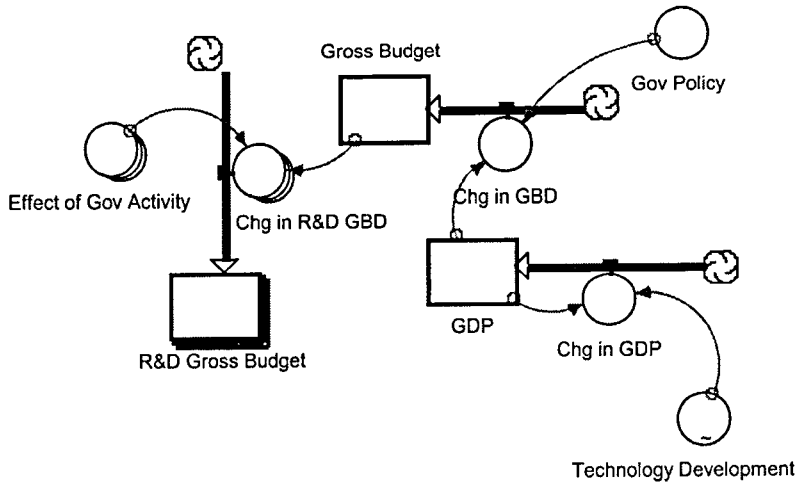
[그림 7] 효율화 루프의 모델링

이렇게 완성된 연구 성과는 축적되어 기술개발을 위한 토대가 되는데 완료한 프로젝트 수가 많을수록 기술개발 정도는 증가하게 되고 일정수준이 지나면 R&D 투자에 대한 패러다임이 바뀌면서 기술혁신이 일어나게 된다. 기술혁신으로 인해서 새로운 기술적 패러다임 단계를 맞이하게 되고 또 다른 패러다임의 혁신을 위해서 다시 기술을 축적하는 과정을 되풀이하게 된다. [그림 8]은 이러한 기술혁신의 과정에 대한 저장/유량 구조이다.



[그림 8] 효율화 루프의 프로그램(프로젝트) 흐름

화폐의 흐름은 효능감 루프와 중복되는 부분이 많지만 성과가 어떻게 다시 R&D 예산배분에 영향을 주고 있는가에 대한 이슈를 다룬다. 즉 연구자에 의해서 이루어진 연구성과는 투자대비 지출액의 크기를 통해서 재무적 성과를 측정하고 이 측정치에 따라 다음 기의 예산배분에 대한 의사결정을 실시하게 된다. 특히 기술 발전이 경제성장에 정(+)의 영향을 미친다는 연구결과와 같이 기술발전은 국민경제에 영향을 주게 되고 성장한 경제에 따라 예산의 크기 자체가 커지는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 재무적 성과에 의한 의사결정은 주로 전략적 기술에 대한 투자에서 주로 이루어진다([그림 9] 참조).

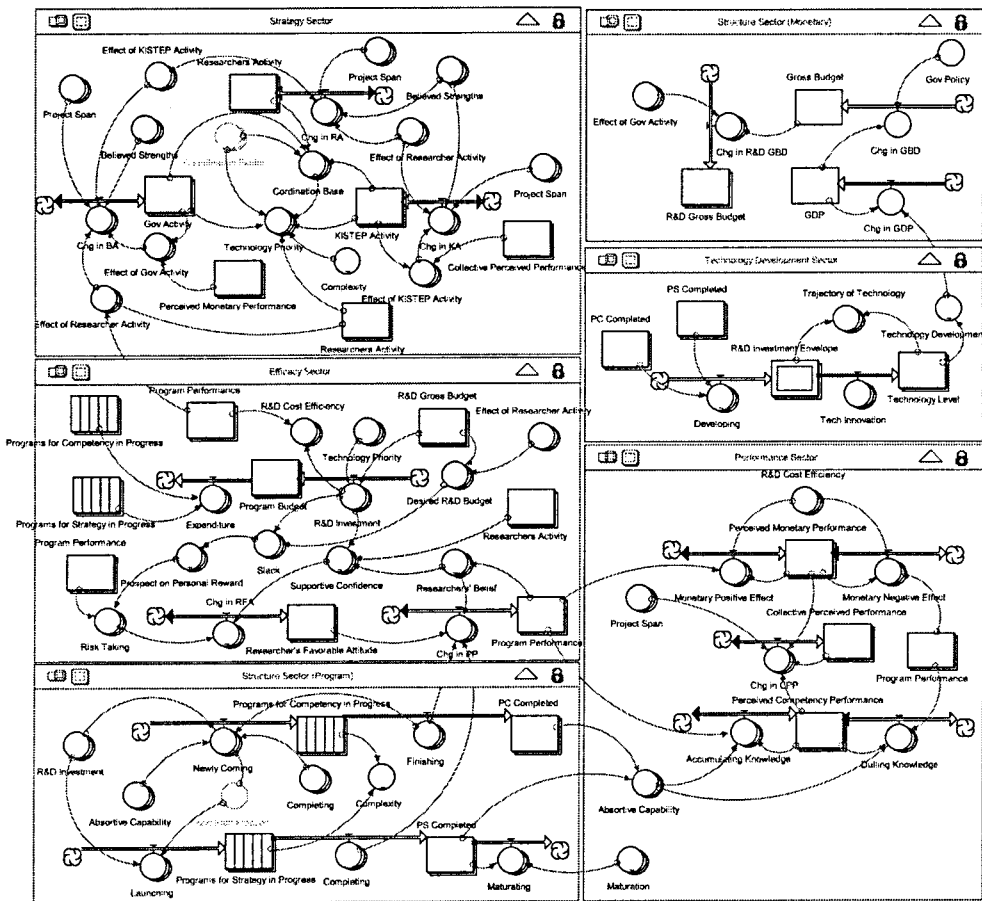


[그림 9] 효율화 루프의 화폐 흐름

국가연구개발사업의 우선순위설정을 위한 종합조정과정에서 KISTEP과 같은 전문기관은 프로그램(프로젝트)의 성과와 재무적 성과에 대한 측정의 어려움을 겪는다. 여기서 여러 가지 어려움에도 불구하고 KISTEP은 전문성이 받쳐주는 범위 내에서 성과평가 및 차년도 계획에 대한 분석을 통해 현재 진행 중인 국가연구개발 프로그램(또는 프로젝트)을 계속 진행시킬 것인지, 중단할 것인지, 프로그램 목적과 내용을 수정해서 진행할 것인지에 대한 의견을 제시함으로써 연구개발투자에 대한 정부의 조정의지에 작용한다.

4. 모형 종합

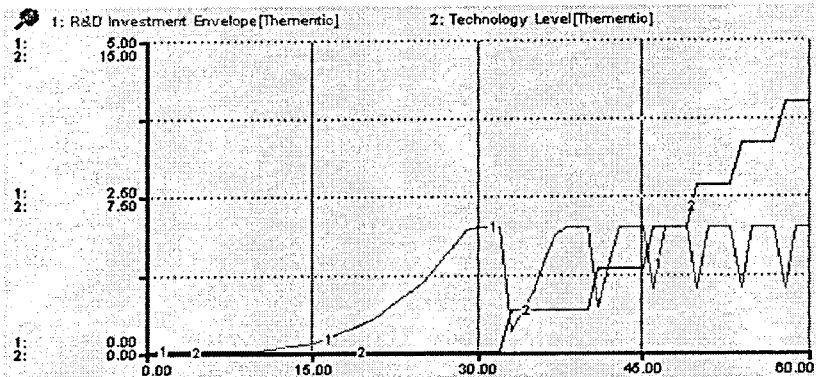
R&D 투자에 대한 세 가지 루프를 인과지도에 따라 저장/유량 구조로 설계하여 종합한 모델이 [그림 10]이다. [그림 10]은 크게 세 가지의 관점으로 구성되어 있고, 세부적으로 5개의 관점으로 나뉘어져 있다. 연구개발투자시스템을 조작하는 주체를 정부라고 할 때 조작변수는 R&D 투자에 대한 행위주체의 의견을 조정하는 조정요인(coordination factor)과 프로그램 비중을 결정을 하는 장기 구성 요인(Long Plan Fraction)이 된다.



[그림 10] 연구개발투자시스템의 시뮬레이션 모형

[그림 10]의 ‘기술발전 섹터’에서, 투자우선순위에 의한 국가연구개발사업별 투자규모의 등락이 연구개발프로젝트 또는 연구개발자금의 흐름으로 이어지고, 이것이 연구개발투자시스템의 참여자인 연구자의 효능감 등의 태도와 결합해서 기술혁신에 영향을 미치게 됨으로써 궁극적으로 향상된 기술발전(기술수준향상) 의해 경제성장 및 연구개발투자수준 결정에 작용하는 폐쇄회로임을 알 수 있다. 이상의 모형에서 연구개발투자로 인한 장기적인 기술발전의 동태적 변화를 살펴보면 [그림 11]과 같다. 기술혁신과 관련하여 많은 기술자와 경제학자들은 “S-곡선”을 사용한다. 처음에는 매우 느린 속도로 확산되다가 임계질량(Critical Mass)에 도달하면 매우 빠른 속도로 확산된다는 것이다. 본 연구모형에서 연구개발사업을 통한 R&D 투자가 기술발전 또는 기술수준에 어떻게 작용하고 있는지, 다시 말해, 연구개발투자시스템의 동태성이 어떻게 나타나고 있는지를 살펴보면 [그림 11]과 같이 나타났다.

[그림 11]에서 1번 그래프는 R&D 투자에 대한 기술의 변화를 나타내고, 2번 그래프는 기술 수준 혹은 기술발전의 변화를 나타낸 그래프다. 여기서 R&D 투자는 연구개발을 통한 기술지식의 축적이 일정수준에 도달할 때까지 점점 투자속도를 올려나가다가 갑자기 기술 혁신이 일어나고, 그 결과 해당분야 및 연구개발사업 그 자체의 의도하고 기대한 목표달성이 달성됨으로써, 해당기술에 대한 연구개발투자가 이루어지지 않다가, 다시 파생기술 또는 유관기술의 발전에 따라 연구개발투자가 반복적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 새롭게 이전된 기술 패러다임에서 다시 기술발전이 이루어지게 되면 또 다른 패러다임으로 이전하는 모습을 가지게 된다. 이렇게 기술축적과 이에 따른 패러다임의 변화의 반복으로 기술은 시간의 흐름과 R&D 투자에 의해서 발전하게 된다.



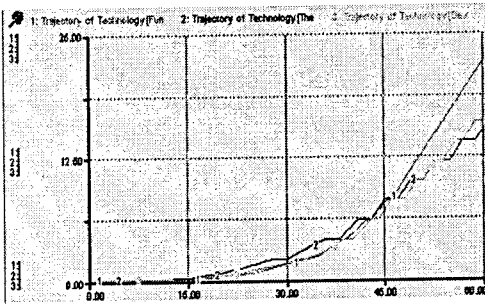
[그림 11] 연구개발투자와 기술발전의 동태성

V. 결과분석 및 정책적 함의

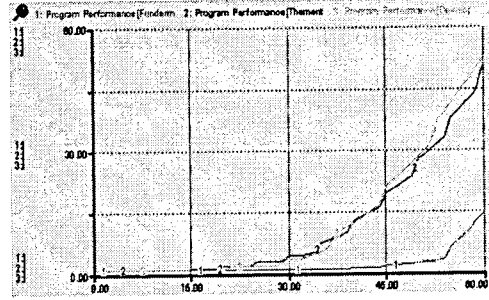
1. 연구개발단계별 R&D 투자결과

우선, 전략적 루프와 관련하여 연구개발단계간 의사결정이 어떻게 이루어지는 것이 좋을 것인가에 대하여 알아보았다. 이를 위해서 연구개발단계별 조정비중(coordination factor)을 어떻게 하는가에 따라 투자성과 및 혁신과 기술개발은 어떻게 변화하는지 알아보려고 하였다. 먼저 또 다른 조절변수인 장기 구성요인을 역량적 목적, 전략적 목적 모두 동일하게 고정시킨 후 연구개발단계의 조정비중을 변화하였다.

먼저 기초기술에 많은 비중을 두었을 때의 결과이다. 즉 기술조정비중을 (기초, 응용, 개발)=(0.8,0.1,0.1)로 두었다.

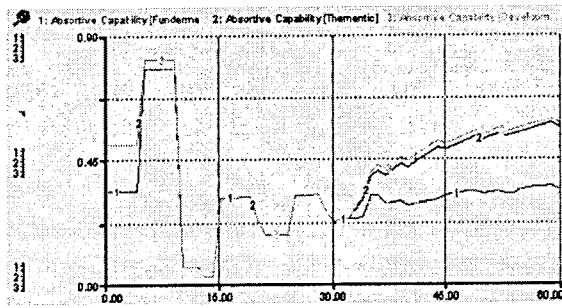


[그림 12-(1)] 기술발전 추이(0.8,0.1,0.1)



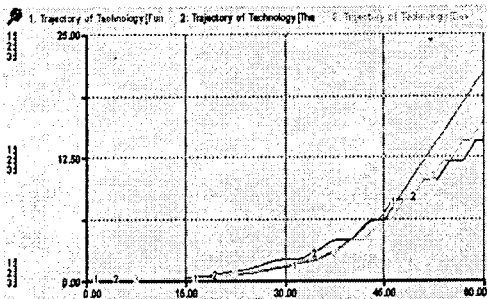
[그림 12-(2)] 프로그램 성과(0.8,0.1,0.1)

[그림 12]에서 1번 그래프는 기초기술, 2번 그래프는 응용기술, 3번 그래프는 개발기술에 대한 그래프이다. 왼쪽의 [그림 12-(1)]은 기술발전 추이에 대한 그래프이고 오른쪽의 [그림 12-(2)]는 매기 연구자의 성과에 대한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 기초기술은 단기적인 성과는 오른쪽 그림에서 보는 바와 같이 다른 기술에 비해 그렇게 뚜렷한 증가를 보이고 있지는 않지만 기술혁신은 꾸준히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히 왼쪽의 기술수준 그림에서 보듯이, 기술 수준 증가 속도에서 기초기술이 다른 기술에 비해서 늦음에도 더 빠른 증가추세를 보이고 있다. 반면 응용기술이나 개발기술의 경우에는 단기적인 성과가 매우 크지만 기술혁신에 있어서 지연이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 흡수역량의 행태변화를 통해서 그 원인을 알 수 있는데, 아래 [그림 12-(3)]에서 보는 바와 같이 기술혁신이 일어나기 시작하는 30기부터 응용기술과 개발기술의 흡수역량이 급격히 증가하고 있는 모습을 나타내고 있다. 흡수역량이 기초기술에 의해서 결정된다는 가정에 의거, 응용 및 개발 기술의 개발이 기초기술의 혁신을 통하여 이루어진 기술발전임을 추론할 수 있다.

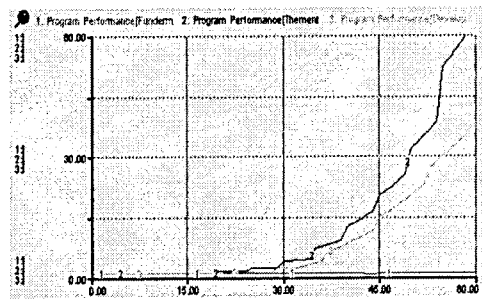


[그림 12-(3)] 흡수역량

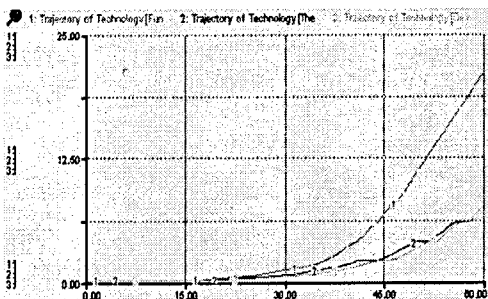
한편, 응용기술 또는 개발기술에 비중을 많이 두었을 때의 결과는 다음과 같다.



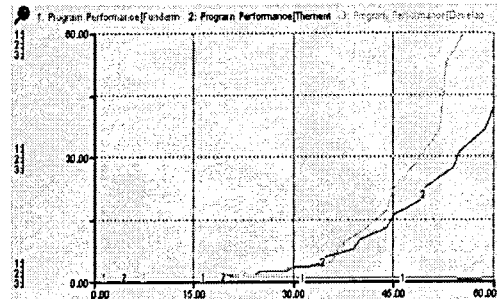
[그림 13-(1)] 기술발전 추이(0.1,0.8,0.1)



[그림 13-(2)] 프로그램 성과(0.1,0.8,0.1)



[그림 13-(3)] 기술발전 추이(0.1,0.1,0.8)



[그림 13-(4)] 프로그램 성과(0.1,0.1,0.8)

[그림 13]에서 보는 바와 같이 오른쪽의 응용기술 또는 개발기술의 단기적 성과는 기하급수적으로 증가하는 모습을 보이지만 반면에 기술혁신의 모습은 더딘 성장을 보여주고 있다. 반면, 상대적으로 적은 비중의 기초기술은 투자가 적게 이루어지고 있음에도 꾸준한 기

술발전이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이는 응용기술에 더 많은 비중을 두고 있는 현 투자에 대한 패러독스를 제시하고 있는 단면이라 할 수 있다. 즉 응용기술에 대한 막대한 투자는 이루어지고 있고 그것이 단기적으로 성과들의 누계가 긍정적인 모습을 보여주고는 있지만 그 성과가 실제 기술발전에는 그렇게 큰 도움이 되지 않는 비효율적 투자가 이루어지고 있는 것이다.

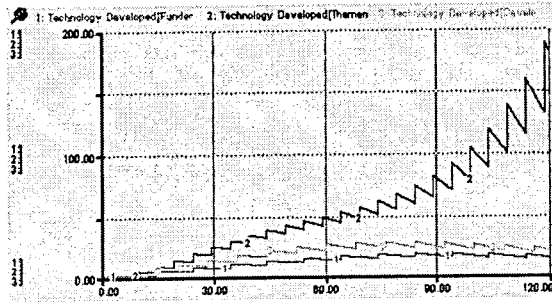
따라서 이러한 연구개발투자 패러독스가 발생하지 않고 연구개발투자에 따른 연구개발 자원 플로우와 지식저량이 늘어나도록 하기 위해서는 우선적으로 기술간 우선순위를 정함에 있어서 기초기술에 대한 비중으로 의도적으로 늘릴 필요가 있을 것이다.

2. 프로그램 목적별 R&D 투자결과

연구개발투자의 패러독스가 나타나는 또 다른 이유는 바람직한 투자방향 또는 전략이 설정되지 않은 상황에서 연구개발 투자규모가 늘어날 때, 비효율적인 국가연구개발프로그램, 종료되어야 할 국가연구개발프로그램에 대해 지원하는 경로의존적 투자에 의해 나타날 수 있는 부작용, 단기실적위주의 투자 또는 근시안적 투자를 했을 때에 따르는 부작용에 기인한다. 그렇다면 이러한 근시안적 투자는 어떤 결과를 가져올 것인가?

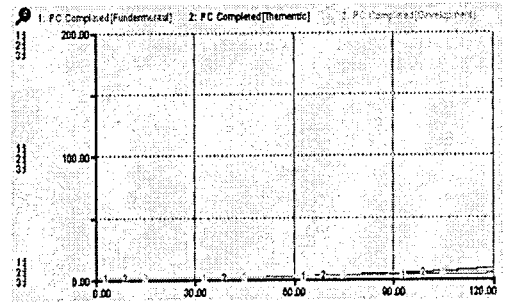
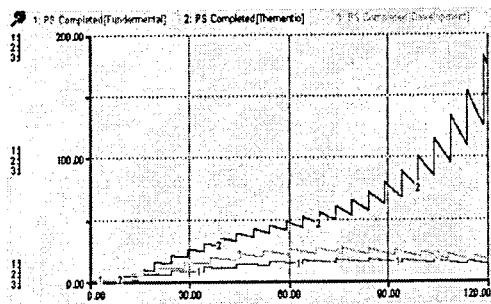
이를 알아보기 위해서 연구개발 프로그램 목적에 따라 기술성과의 양상이 어떻게 달라지는가 살펴보았다. 모델 구축에 있어서 가정하기를, 기술개발을 위한 프로그램은 크게 역량강화를 위한 역량적 목적의 프로그램과 선택적 집중에 의한 특정 기술개발을 목적(즉, 전략적 목적)으로 하는 프로그램으로 나뉘어 진다. 그리고 각 기술은 이러한 목적에 대한 비중에 따라 프로그램을 나누어 연구를 시행하게 된다. 따라서 이러한 프로그램의 목적을 나누는 비중의 정도에 따라 기술수준은 달라지게 될 것이고, 전략적 목적에 초점을 맞출수록 단기 실적위주의 근시안적 투자라 할 수 있을 것이고, 역량적 목적에 초점을 맞출수록 근시안적 투자에서 벗어나는 것이라 할 수 있을 것이다. 여기서 프로그램의 비중에 따라 기술수준은 어떻게 달라지는지 알아보았다.

먼저 근시안적 투자를 시행하였다고 판단할 경우 총체적인 기술 수준의 모습이다.



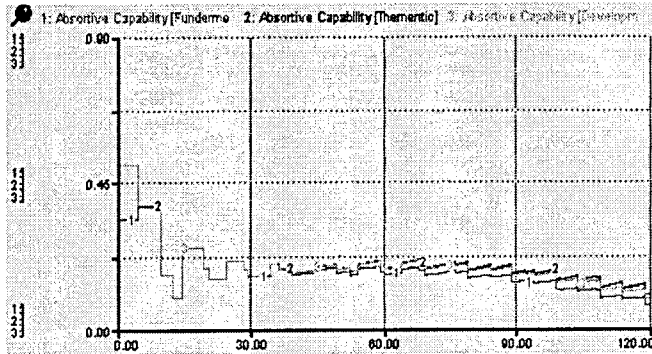
[그림 14-(1)] 프로그램 성과에 따른 기술수준 변화 양상

분석을 위해서 총체적 기술수준의 모습을 전략적 목적의 프로그램과 역량적 목적의 프로그램으로 나누어보면 다음과 같다.



[그림 14-(2)] 전략적 목적 프로그램 성과 추이 [그림 14-(3)] 역량적 목적 프로그램 성과 추이

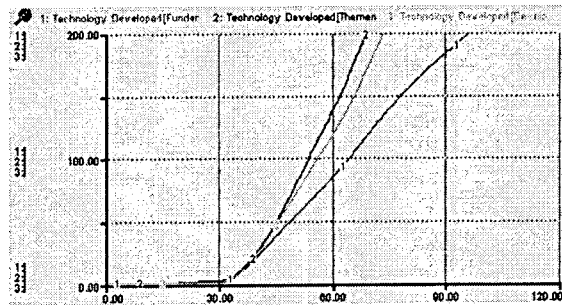
왼쪽그림은 전략적 목적 프로그램이 완성된 모습이고 오른쪽 그림은 역량적 목적 프로그램이 완성된 모습이다. 그림에서 보는 바와 같이 역량적 기술은 거의 이루어지지 않고 전략적 기술만 이루어지고 있음을 알 수 있다. 전략적 목적 프로그램은 출현과 사장을 반복하면서 대체적으로 증가하는 모습을 보여주고 있으나 그 변화율이 감소하는 증감 모습을 보여주고 있다. 즉, 성장의 한계를 가지고 있기 때문에 시간이 흐를수록 더 급진적인 발전을 이루어낼 수 없게 된다. 이는 흡수역량의 행태를 통해서도 알 수 있는데 아래 [그림 14-(4)]에서 보는 바와 같이 흡수역량의 모습이 시간이 지남에 따라 점차 감소하고 있는 모습을 보여주고 있다.



[그림 14-(4)] 흡수역량

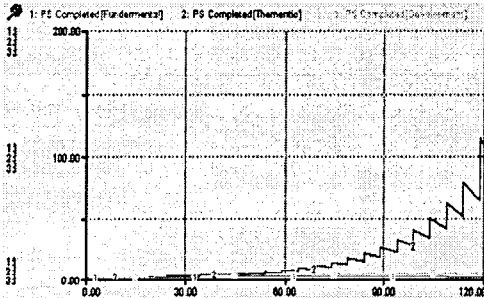
결국 전략적 목적에 비중을 둔 투자는 흡수역량을 증가시키지 못하기 때문에 성장의 한계를 가지고 있는 기술만을 양산하는 결과를 낳게 된다.

반면에 역량적 목적 프로그램의 비중을 더 크게 했을 경우의 기술의 변화추이를 살펴보면 다음과 같다.

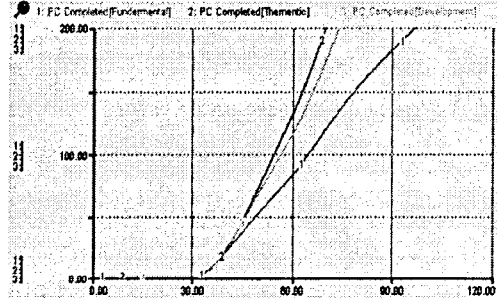


[그림 15-(1)] 프로그램 성과에 따른 기술수준 변화 양상

앞의 모습과는 달리 비록 시간적인 지연이 존재하고 있지만 어느 일정한 수준이 지나면 기술수준이 기하급수적으로 증가하고 있는 모습이다. 면밀한 분석을 위해서 위의 [그림 15-(1)]을 전략적 목적의 프로그램과 역량적 목적의 프로그램으로 나누면 다음과 같다.

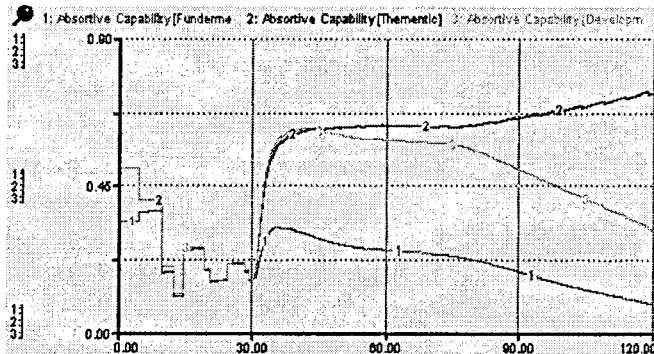


[그림 15-(2)] 전략적 목적 프로그램 성과 추이



[그림 15-(3)] 역량적 목적 프로그램 성과 추이

그림에서 보는 바와 같이 전략적 목적의 프로그램의 수준은 높은 수준이 아니지만 역량적 목적의 프로그램 수준이 굉장히 높다. 즉 역량적 목적의 프로그램이 기술수준을 보다 효과적으로 개발할 수 있는 토대가 됨을 알 수 있다. 이는 흡수역량의 추이를 통해서도 알 수 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 역량적 목적의 프로그램이 기하급수적으로 증가하게 되는 30기부터 흡수역량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 응용기술에 대한 흡수역량이 커지게 되면서 응용기술이 더욱 급격하게 발전하고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 15-(4)] 흡수역량

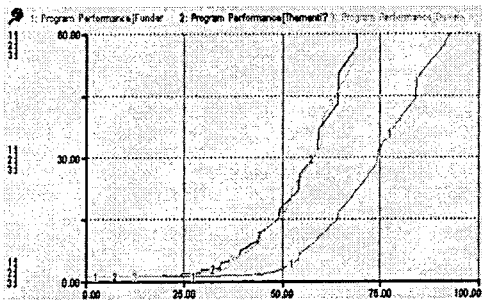
결국 근시안적 투자행태는 기술의 발전의 토대가 되는 흡수역량을 간과한 채 단기적인 성과에만 치중하는 오류를 범하고 있음을 알 수 있다. 따라서 기술개발 투자를 위해서는 흡수역량에 대한 고려가 반드시 필요하다고 하겠다.

3. 연구자의 태도행태

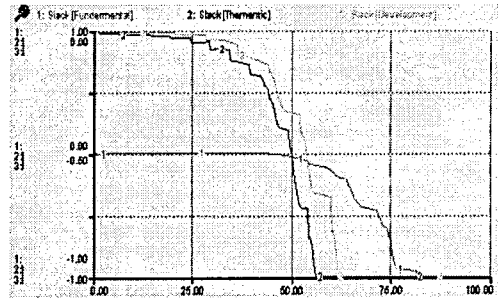
지금까지 하드웨어측면에서의 비효율성을 살펴보았다면, 이러한 시스템을 운영하는 소프트웨어

웨어적인 측면에서 연구개발투자의 생산성에 장애가 되는 시간지연이 어디에서 발생하고 있고 도덕적 해이와 같은 부작용이 존재하고 있는지 살펴보고자 한다. 소프트웨어적인 측면에서의 비효율성은 연구자의 효능감 루프에서 비롯된다. 연구자의 태도에 따라 성과의 질은 달라지게 될 것이고 이것이 전체적인 연구개발투자 시스템에 비효율성을 야기할 수 있기 때문이다. R&D 투자와 관련된 연구자의 태도는 연구자의 내생적인 특성보다는 그 주위를 둘러싸고 있는 여러 가지 요인들에 의해서 결정되게 된다. 본 연구모형에서 연구자가 바라는 프로그램 연구개발 투자액과 실제 투자액과의 차이에 의해서 태도가 결정된다고 가정하고 있으므로, 우선 R&D 투자액의 변화를 통해서 연구자의 효능감에 대해서 알아보았다.

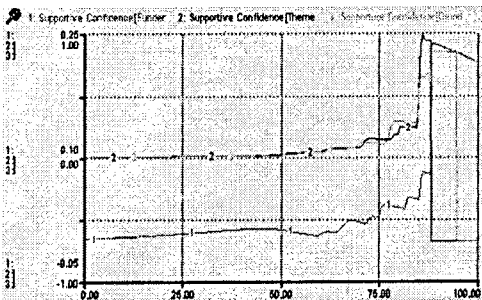
R&D 예산의 초기값을 변화시키면서 연구자의 태도 및 이에 대한 성과가 어떻게 달라지는가 알아보면 아래 [그림 16]과 같다. 먼저 R&D 예산의 초기값을 1로 두었을 때의 결과이다.



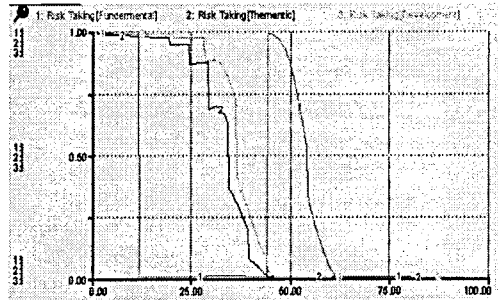
[그림 16-(1)] 프로그램 성과



[그림 16-(2)] 가용자원



[그림 16-(3)] 지원에 대한 자신감(능력)

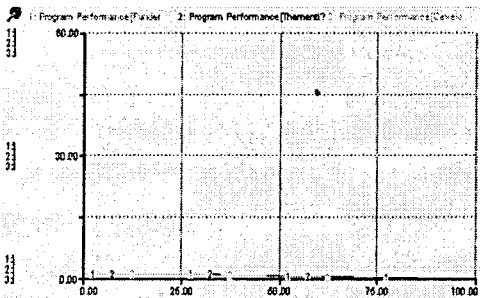


[그림 16-(4)] 위험선호경향

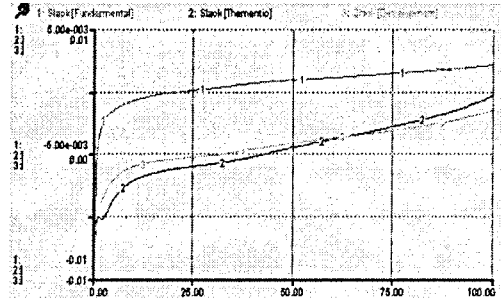
결과적으로 프로그램 성과가 증가하고 있는 모습인데, 이 때의 연구자의 효능감을 살펴 보면, 먼저 요구하는 투자금액보다 실제 투자금액이 많아 가용자원을 초기에 형성하고 있으나 시간이 지나면서 가용자원이 줄어들고 있는 양상을 보이고 있다. 그림에도 불구하고

시간이 지날수록 프로그램 성과는 증가하고 있는데, 그 이유는 가용자원이 줄어들면서 따라 위험선호경향 역시 위험회피성향으로 변화하게 되지만 반면에 초기의 가용자원으로 인해 연구자의 자신감 혹은 능력이 향상되어 가용자원의 부재로 인한 위험회피성향에도 불구하고 프로그램 성과가 증가하는 모습을 보이게 된다.

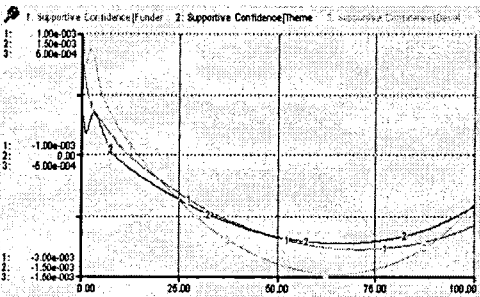
그러나, R&D 투자예산 초기값을 10으로 두었을 때의 모습을 보면 다음 [그림 17]과 같이 가용자원이 존재함에도 불구하고 프로그램 성과가 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 이는 가용자원이 증가하면서 위험회피성향이 지연되어 나타나기는 하지만 연구자의 자신감 혹은 능력이 급격히 감소하여 성과를 이루어낼 동기부여를 일으키지 못했기 때문이라 판단할 수 있다.



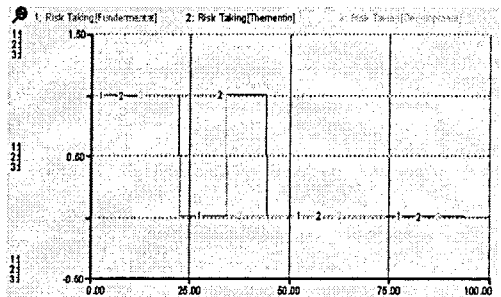
[그림 17-(1)] 프로그램 성과



[그림 17-(2)] 가용자원



[그림 17-(3)] 지원에 대한 자신감(능력)



[그림 17-(4)] 위험선호경향

결국 투자의 규모 자체가 연구자의 효능감을 증가시켜주지는 않는다. 연구자의 태도를 호의적으로 만들어 성과로 연결시키기 위해서 투자만 늘리려는 것은 또 다른 비효율성을 낳을 가능성을 만들게 되는 것이다.

4. 정책적 함의

OECD 국가에서는 대체적으로 혁신이 경제성장에 핵심적인 역할을 하는 것으로 받아들여지고 있다. 이들 국가들은 기술개발을 제고하기 위한 적절한 정책 설계, 기술 관련 연구를 촉진하고 새로운 지식이 창출되는 영역의 급격하고 효과적인 분화를 보장하기 위해 정부 역할을 제고하고 있다(Marceau, 2002). 한국의 경우 '99년부터 부처별로 관리되고 있던 대부분의 국가연구개발사업에 대해 투자우선순위를 설정하는 종합조정을 매년 실시하고 있다.

과학 기술은 종종 예산과정과 연결된다(Makeig, 2002). 과학기술의 본질은 아마도 사회가 어떻게 우선순위를 설정해야 하는가에 대한 단서를 가지고 있다는 것일 것이다. 연구개발자금은 종종 연구에서 개발까지 전체적으로 정당하게 배분되지 않고 있다. 다시 말해 대학은 기초 연구에 지나치게 몰려있고, 기업은 기술개발에 전념하고 있는 것이 현실이다. 우리는 해결 필요성이 인지되는 문제들에 대해, 그리고 미래의 성장 동력을 창출하는 연구개발 영역에 대해 어떻게 투자하는 것이 좋은가?

한국의 국가연구개발사업에 대한 투자에서 정부(기획예산처)는 예산규모와 우선순위를 결정하는 조정자 역할을 한다. 국가연구개발투자 우선순위를 설정하는데 있어서 여러 가지 패러독스 상황에 직면하게 되는데 이를 효과적으로 극복하여야 한다. 특히, 투자우선순위와 예산규모를 결정하는 정부는 연구자를 포함한 이해관계당사자의 투자영역 및 투자규모에 대한 수용성을 높여 가장 활발하게 연구개발활동을 하도록 하는 동시에 장차 국가경쟁력을 끌어올리기 위한 전략과 정책 레버를 찾아야 한다.

본 연구에서는 연구개발투자시스템을 국가전략적 차원에서 연구개발투자 우선순위를 설정하는 것 뿐만 아니라 연구성과창출과 연구자의 연구개발활동에 대한 사전적 의사결정을 포함하는 계층적 인과고리로 인식하고, 연구개발 패러독스 상황을 고려한 시뮬레이션 모형을 개발하였다.

주요 연구문제에 대한 시뮬레이션을 실행한 결과, 응용 및 개발기술에 대한 투자 확대가 단기적으로는 긍정적이나 장기적인 과학기술경쟁력 확보 및 기술혁신을 촉진하기 위해서는 기초연구에 대한 투자 비중을 높여나가는 것이 더 바람직하다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 기술흡수역량이 따라주지 않을 경우 개발된 기술들이 성장의 한계에 직면하게 되므로, 흡수역량을 간과한 전략적 목적의 연구개발프로그램에 대한 단기간의 선택적 집중투자가 장기적으로는 여러 가지 부작용을 낳고, 종국적으로 투자효과가 반복적으로 줄어드는 악순환 고리가 형성될 수 있다는 것을 발견할 수 있었다. 마지막으로 연구개발투자 규모의 확대 그 자체가 연구자의 효능감을 높여주는 것이 아니므로 새로운 정책레버의 발굴, 특히

동태적 시스템을 고려한 다양한 제도나 시책의 개발이 곧 바로 투자 효율성을 높이는 결정적인 단서가 될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그러나, 연구개발투자시스템을 구성하고 있는 각각의 루프에서 어떤 형태의 부작용과 지연현상이 나타나고 있는지, 각각의 루프간 불일치가 어떤 영향을 미치고 있는지, 그리고 우선순위영역 또는 분야간 적정한 투자균형점을 발견과 같은 패러독스를 극복하기 위한 실질적인 정책레버를 발견하는 데는 한계가 있었다. 국가연구개발사업 투자우선순위설정과정으로서의 종합조정에 직접적으로 활용하기 위해서는 보다 깊은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

[참고문헌]

- 과학기술부. (2003). 「과학기술연구활동조사보고」. 서울 : 과학기술부.
- 이연호 · 김상영 · 김선빈. (2001). 한국의 국가경쟁력 : 현실과 방향, 제1부 <총론>. 「국가경쟁력의 현실과 정책방안」. 15. 삼성경제연구소.
- 오세홍 · 임수진 · 손소영 (2002). 국내 연구개발투자와 경제성장간의 인과관계. 「기술혁신연구」, Vol.10, No.1 : 66-67.
- 신태영. (2002). 연구개발투자와 지식축적량의 국제비교. 「정책자료 2002-10」. 과학기술정책연구원.
- Bloom, F. E. (1998). Priority Setting : Quixotic or Essential?. *Science*, Vol.282 : 27.
- Bozeman, B., & Melkers, J. (1988). *Evaluating R&D Impacts : Methods and Practice*. London : Kluwer Academic Publishers.
- Bonvillian, W. B. (2002). Science at a crossroads. *Technology in Society*, Vol.24 : 27-39.
- Borrus, M., & Stowsky J. (1999). *Technology Policy and Economic Growth, Investing in Innovation : Creating a Research and Innovation Policy That Works*. 40-63. Cambridge : The MIT Press.
- Braun, D. (1998). The role of funding agencies in the cognitive development of science. *Research Policy*, Vol.27 : 807-821.
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1989). Innovation and Learning: The Two Faces of R & D. *The Economic Journal*, Vol.99 : 569-596.
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, Vol.35 : 128-152.
- Cyert, R. M. & March, J. G. (1963). *A Behavioral Theory of the Firm*. Englewood Cliff, NJ : Prentice Hall.
- Edler, J., Meyer-Krahmer, F., & Rogers, G. (2002). Changes in the strategic management of technology : results of global benchmarking study. *R&D management*, Vol.32 : 149-164.
- Greve, H. R. (2003). A Behavioral Theory of R&D Expenditures and Innovations: Evidence from Shipbuilding. *Academy of Management Journal*, Vol.46 : 685-702.
- Hansen, K. F., Weiss, M. A. & Kwak, S. M. (1999). Allocating R&D Resources: A Quantitative Aid to Management Insight. *Research Technology Management*, Vol.42 : 44-50.
- Holmstrom, B. (1979). Moral Hazard and Observability. *The Bell Journal of Economics*, Vol.10 : 74-91.

- Jensen, M. C., & Meckling, W. H. (1976). Theory of the Firm: Managerial Behavior, Agency Costs and Ownership Structure. *Journal of Financial Economics*, Vol.3 : 305-360.
- Kahneman D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, Vol.47 : 263-292.
- Korn, D., R. R. Rich, H. H. Garrison, S. H. Gloub, M. J. C. Hendrix, S. J. Heinig, B. S. Masters and R. J. Turman. (2002). The NIH Budget in the "Postdoubling" Era. *Science*, Vol.296 : 1401-1402.
- Leoncini, R. (1998). The nature of long-run technological change : innovation, evolution and technological systems. *Research Policy*, Vol.27 : 75-93.
- Lounamaa, P. H., & March, J. G. (1987). Adaptive Coordination of a Learning Team. *Management Science*, Vol.33 : 107-123.
- Makeig, K. (2002). Funding the future : setting our S&T priorities. *Technology in society*, Vol.24 : 41-47.
- March, J. G. (1991). Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science*, Vol.2 : 71-87.
- Marceau, J. (2002). Divining directions for development: a cooperative industry-government-public sector research approach to establishing R&D priorities. *R&D Management*, Vol.32 : 209-221.
- OECD. (1999). *Managing National Innovation System*.
- Pavitt, K. (1988). The inevitable limits of EU R&D funding. *Research policy*, Vol.27 : 559-568.
- Perrow, C. (1984). *Normal Accidents: Living with High Risk Systems*. New York : Basic Books.
- Senge, P. (1994). *The Fifth Discipline Fieldbook*. Bantam Doubleday Dell Publishing Group, Inc.
- Sitkin, S. B., & Pablo, A. L. (1992). Reconceptualizing the Determinants of Risk Behavior. *The Academy of Management Review*, Vol.17 : 9-38.
- Sterman, J. D. (2002). All models are wrong : reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, Vol.18 : 501-531.
- Stewart, J. (1995). Models of priority-setting for public sector research. *Research Policy*, Vol.24 : 115-126.
- Thompson, J. (1967). *Organizations in Action*. New York: McGraw-Hill.
- Webster, A. (1991). 「과학기술과 사회」, 김환석 · 송성수(역). 서울 : 한울아카데미; *Science, Technology and Society : New Direction*: Basingstoke and London : Macmillan Education Ltd..

66 「한국 시스템다이내믹스 연구」 제5권 제2호 2004. 11

Wiseman, R. M., & Gomez-Mejia, L. R. (1998). A Behavioral Agency Model of Managerial Risk Taking. *The Academy of Management Review*, Vol.23 : 133-153.

논문접수일: 2004. 7. 26 / 심사완료일: 2004. 9. 6