

국가혁신체계 동태모형 연구: 과학기술부 과학기술혁신본부를 사례로

원동규*, 윤진효**

한국과학기술정보연구원*, 한국과학기술기획평가원**

dkwon @kisti.re.kr, jhyun@kistep.re.kr

A Study on System Dynamics Model for National Innovation System : In Case of Head Quarters of science and Technology Innovation of MOST

Won Dong Kyu*, Yun Jin Hyo**

KISTI*, KISTEP**

1. 서론

1.1 국가혁신체제의 개편 필요성과 변화

국가차원에서 IMF 외환위기 극복이후 새로운 성장엔진(산업, 기술) 창출이라는 시대적 요청과 이공계 기피라는 현실의 모순된 상황에서 새로운 변화를 모색하고 있으며, 그 대표적인 예가 국가 혁신체제¹⁾ 구축이다. 일반적으로 국가혁신체제란 “국가 전체의 생산성 제고를 위해 지식의 창출, 확산, 활용을 촉진하는 민간 및 공공조직과 제도들의 네트워크”를 의미한다. 그동안 이와 같은 국가 혁신체제 정립을 위해 한국의 과학기술행정체계의 개편 필요성에 대해서는 많은 논의가 이루어져 왔다.

첫째, 국가연구개발체제에 대한 총괄기획·조정시스템의 개선 필요성이다. 이는 크게 두 가지 관점에서 살펴볼 수 있는데, 먼저 과학기술 자체의 내용과 범위의 문제이다. 즉 기술 영역의 분절화와 새로운 융합기술분야의 확대로 기초-응용-개발연구의 경계가 불분명해져 기존의 분류영역에 의한 선형적인 연구개발관리의 무용론이 등장하고 있다는 것이다. 또한 이러한 변화는 민간부문의 경쟁력획득에 동기로 작용하여 민간영역에서의 R&D투자의 획기적인 증가로 이어지고 있어, 연구개발투자에서 정부가 차지하는 역할과 위상이 점차 축소되고 있다. 특히 국가차원의 종합조정체계 미약으로 과학기술부, 산업자원부, 교육인적자원부, 정보통신부 및 기타 관련 부처간 연구개발투자가 상당부분 상호 중복되고 있어, 관련 정부 부처간, 정부와 민간기업간 과학기술 관련 연구개발 투자 및 국가적 과학기술 마스터플랜에 대한 전략적 조정 및 기획·관리의 필요성이 급증하고 있는 상황이다.

둘째, 저조한 연구개발투자 효율성의 개선 필요성이다. 현재 우리나라의 GDP 대비 연구개발비가 2.91%(2002년 기준)로 스웨덴, 핀란드, 일본에 이어 세계4위의 높은 수준을 차지하고 있으나 세계1등 제품이 1위인 미국의 753개, 5위인 일본의 316개의 수십분의 일에 해당하는 69개로 세계 14위에 불과한 실정이다. 따라서 막대한 과학기술투자가 새로운 첨단기술제품의 생산으로 연결될 수 있도록 연구개발투자 효과성 제고가 절실한 실정이다.

셋째, 과학기술 고급인력양성 종합시스템의 개선 필요성이다. 현재 우리나라의 연구개발 인력은 총량면에서는 138.1천명(상근 기준)으로 9위, 민간기업 총 연구개발인력 87.11천명으로 7위를 차지하는 등 높은 수준임에도 (IMD, 2003년 인구2천만이상국 기준) 불구하고 노벨상 수상자 부재, SCI 논문 인용빈도 순위 13위 등에서 나타나는 바와 같이 초일류 전문 인력이 절대적으로 부족한 실정이다. 이는 국가전체적인 기술분야에 대한 전망과 인력 양성시스템에 대한 조정체제 부재에

1) 국가혁신체제(NIS)개념은 '87년 Freeman 교수가 일본의 고도성장은 한정된 자원에도 불구하고 혁신체제가 효과적으로 작동한 결과라고 주장하면서 학술적으로 사용되기에 이르렀다.

의한 것으로 이에 대한 새로운 체제개선이 요구된다고 할 수 있다.

넷째, 미래신기술 육성체계에 대한 개선 필요성이다. 전세계적으로 심화되고 있는 기술경쟁과 자국 기술보호정책에 근본적으로 대처하기 위해서는 독창적인 미래기술 자체개발체계 구축이 필요한 실정임에도 불구하고, 과학기술 기반의 순수기초연구, 대규모 초기 인프라 투자가 필요한 거대 공공기술, 장차 산업계가 필요로 할 기술 등에 대한 체계적인 연구개발과 육성체계가 미흡한 실정이다.

따라서 이러한 필요성에 대응하여 2004년 10월 과학기술혁신본부의 신설등을 골자로 한 과학기술부의 위상변화는 그 의미하는 바가 크다. 가장 큰 기능변화는 부총리로 승격된 과학기술부가 과학기술혁신본부를 통하여 범부처 국가연구개발사업의 종합조정, 기획, 평가 및 성과 확산을 국가차원에서 총괄하도록 하고, 실질적인 국가 R&D 예산배분권을 행사토록 한 점이다.

1.2. 혁신 모형과 행정체제에 대한 이론적 논의

기존 연구개발을 중심으로 한 혁신에 대한 논의는 선형모형으로부터 출발하였으며, 이 모형에서는 혁신정보가 연구개발단계를 순차적으로 거쳐 흐르며, 그 반대의 방향 혹은 피드백은 간과되는 것으로 보았다. 따라서 최초투입단계인 기초과학이야말로 새로운 혁신을 위한 지식의 유일한 생산영역으로서 국가의 기초과학 R&D투자의 이론적인 근거가 되었다. 따라서 이러한 이론 기반에서의 국가혁신체제는 전적으로 기술시스템 구성의 문제로 보았다.

반면에 다음 세대에 속하는 상호작용모형(혹은 피드백 모형)은 혁신과정을 순차적인 단계로 보는 것이 아니라 과학, 기술, 설계, 엔지니어링 등 경영활동의 집합으로 보고, 복잡한 피드백 경로를 통해 서로 연결되어 있다고 보았다. 따라서 성공한 혁신은 상이한 활동에서의 상호작용에 달려 있는 것으로 보았으며, 이러한 개념에서의 국가혁신체제구축은 기술과 사회 연계시스템이라고 할 수 있다.

한편 1980년대 들어와 혁신모형은 제도라는 보다 거시적인 분석수준을 본격적으로 다루기 시작하였고, 가장 거시적인 개념으로서 기술경제 패러다임은 생산, 혁신, 거버넌스 등 사회적 관계 시스템을 종합한 개념으로 볼 수 있다(Dosi et al., 2002). 이러한 혁신과정에서는 공식적인 조직(기업, 연구소, 대학, 정부 등)뿐 만 아니라, 시스템을 구성하는 요소간의 관계에 집중하였고, 기술시스템접근, 산업군집이론 및 국가혁신체제에 대한 본격적인 논의는 이러한 사회적 패러다임의 변화에 근거한 혁신시스템 모형에 근거한다. 이러한 혁신시스템 모형의 관점으로서, 혁신체제는 요소간의 관계, 전체로서의 시스템, 시스템의 경계 등으로 이루어져 있으며, 이때의 경계는 공간적 경계, 부문적 경계, 기능적 경계 등 다양한 차원에서 접근할 수 있다고 보았다.

한편 최근의 연구들은 공통적으로 지식을 창출하고 새로운 지식의 방향을 탐색하는 학습조직으로서 제도를 파악하고 있으며, 이러한 제도에 대한 관심이 증가하면서 제도의 실패를 시스템의 실패라는 차원에서 접근하는 시도가 이루어지고 있다.

즉 지금까지의 혁신연구는 <표 1>에서와 같이 환경과 맥락의 변화에 따라 현실 적합성을 증가시키기 위해서 관계를 확장하고, 변수를 확장(분석수준의 이동, 새로운 현상의 개념화)하고, 시간에 따른 역동성을 고려하는 방향으로 혁신모형을 발전시켜왔다.

<표 1> 혁신모형의 발전단계

발전단계	분석수준 확장	새로운 현상의 개념화	관계의 확장	역동성의 확장
1단계	개인	기술중심	선형 모형	정태모형
2단계	조직		피드백 모형	
3단계	제도	지식중심	시스템모형	동태모형

한편, 각국의 과학기술행정체계는 정치·사회·문화적인 특성에 따라 다양하게 형성·운영되어 왔다. OECD의 “과학기술정책위원회”의 분류에 의하면 각국의 과학기술혁신체제는 크게 분산형, 조정형, 집중형, 조화형의 4가지 유형으로 구분 가능하다. 각국의 현황을 살펴보면 영·미계 국가의 경우는 민간부문의 자율에 의한 창의와 경쟁을 통하여 민간 스스로 과학기술을 발전시킨다는 기본인식 하에 과학기술행정은 각 부처에서 추진토록 하는 분산형을 채택하면서 최고 통치권 차원에서 과학기술정책을 종합조정하는 체제를 구축하고 있다. 한편, 대륙계 국가(독일, 프랑스 등)의

경우는 교육과학연구기술부 등 과학기술 전담의 중앙행정기관을 설치하여 종합적인 조정을 추진하고 있으며, 대부분 대학교육과 과학기술의 연계형태를 채택하고 있다. 예를 들면 독일의 경우는 교육연구부(1998년), 프랑스는 청소년교육연구부에 위임장관으로 연구신기술담당(2002년)을 두고 있으며, 일본의 경우는 과거 문부성과 과학기술청을 문부과학성²⁾으로 통합(2001년)하여 운영하고 있다. 이러한 구분에 의하면 우리나라의 경우는 조화형에서 이번 개편을 통하여 강한 조정형과 약화 조화형을 절충한 형태라고 할 수 있는 국제적으로 매우 드문 형태의 행정형태를 갖추게 되었으며, 시스템실패의 치유라는 측면에서는 혁신시스템모형에 근거한 국가혁신체제구축의 개념을 함유한 조치였다고 할 수 있다.

1.3. 연구 내용 및 방법

과학기술부의 연구개발 종합조정위상 확립과 새로운 변화를 선도하기 위해서는, 과거와 같이 물자관리중심의 물리적 혹은 양적인 변화모색에서 벗어나 지식관리중심의 새로운 틀로 질적 변화가 요구되고 있으며, 그 핵심에는 성과기반의 새로운 국가연구개발체제를 통한 국가혁신체제 구축에 있다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 새로운 국가과학기술행정체계의 변화된 모습인 국가R&D종합조정체계와 성과기반이라는 개념 하에서의 변화를 시스템 동학(system dynamics)의 방법론 관점에서 동태적으로 예측해보고자 한다.

시스템 동학 방법론은 기업의 경영전략, 연구개발 혹은 국가간 무기경쟁 이슈 등 동태적 시스템 연구에 적용되면서 발전하여 왔다. 정부의 연구개발 검증 및 평가기관의 기술적 효과성에 관한 조사연구(Wachold, 1963), 연구개발조직의 동태적 형태 분석(Welles, 1963), 연구개발시스템 분석(Nay, 1965) 등에 사용되었다. 이후 연구개발과 관련한 적용사례인 프로젝트 관리의 동태성에 관한 연구(Ford, 1995), R&D 커뮤니티의 성장과 확산(Rose, 1990), R&D 네트워크의 진화(Zirulia, 2004), R&D 자원할당과 관련한 관리적 통찰력을 제공하기 위해 시스템 다이나믹스 방법론을 적용한 연구(Hansen et al., 1999) 및 국가연구개발투자와 연구개발혁신활동의 정합(오세홍, 2004) 등에 관한 연구가 동 방법론을 활용하여 진행된 바 있다.

동 연구에서는 우선, 새로운 과학기술행정체계의 구체적인 내용을 확인하고, 다음으로 새로운 과학기술행정체계의 핵심인 ‘국가연구개발사업 종합조정’과 다양한 국가연구개발투자로 촉진되는 성과확산의 구조를 분석하고자 한다. 이러한 연구를 위해서 System Dynamics 분석방법을 사용한다.

2. 새로운 국가과학기술행정체계의 내용

2.1 새로운 체제의 목표 및 내용

새로운 국가과학기술행정체계의 목표는 “연구개발 생산성 극대화를 통해 국민소득 2만불 시대 창출”에 있다고 한다. 그리고 이러한 체제개편의 원칙으로는 다음 네 가지로 요약 할 수 있다.

첫째, 부문 최적화(local optimization)에서 시스템 최적화(system optimization)로의 전환이다. 즉 여러 분야별 국가연구개발사업들의 부문별 최적화보다는 국가혁신체제의 최적화를 지향하여, 기존의 개별 집행기능 중시에서 전체 사전기획 및 평가 중시체제로의 전환이 가능하도록 하자는 것이다.

둘째, 사업영역별 역할분담중심에서 기능별 역할분담중심으로의 전환이다. 즉 연구개발영역별 사업수행 부처 편제 중심에서 연구개발사업의 기획, 조정, 부분별 집행, 평가 등 기능별 편제로 전환하자고 하는 것이다.

셋째, 시장실패 대응체제에서 시장실패 및 정부실패 동시 대응체제로의 전환이다. 즉 민간부문과 관련부처 모두 담당하고 있지 않는 분야 중에서 국가적으로 꼭 필요한 과학기술사업에 한해서 태동기 기술개발이나 대형복합기술개발 업무를 과기부가 잠정 수행하고, 다른 부처가 참여하게 되면 즉시 해당 사업을 이관토록 하겠다는 것이다.

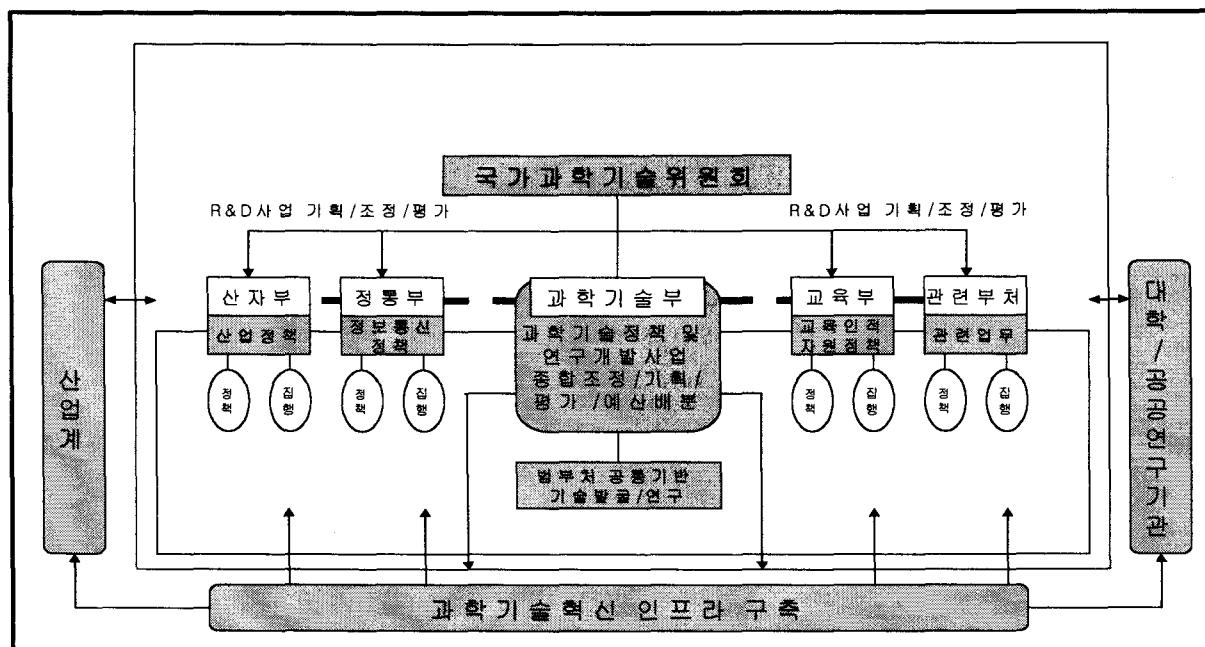
넷째, 사안별 부분 대응체제에서 유기적 종합 대응체제로의 전환이다. 즉 기술기반 산업, 인력 및 지역혁신 정책에 대한 사안별 개별 대응에서 관련 부처들이 다함께 참여하는 유기적 종합 대응으로 전환하고자 하는 것이다.

한편 이러한 목표를 근간으로 새로운 체제개편의 내용으로는 다음과 같다.

2) 수상에 대한 자문기구인 과학기술회의(의장 : 수상) 사무국을 현재의 과기청에서 수상직속(내각부)로 이관

첫째, 국가 R&D 총괄 기획·조정·평가 체제를 새롭게 편성한다는 것이다. 전술한 바와 같이 지금까지 과학기술부가 핵심기능으로 수행하고 있는 국가연구개발사업의 경우, 산업자원부와 관련부처가 유사한 사업을 수행하고 있고, 그리고 기초과학과 이공계인력 양성정책의 경우에도 교육인적자원부가 함께 수행하고 있는 실정이었다. 또한, 국가연구개발사업에 대한 조정 및 기획과 평가 기능을 원만하게 수행하기 위한 예산배분 권한이 없었기 때문에 과기부의 국가연구개발사업에 대한 조정 역할이 유명무실했을 뿐 아니라, 국가차원의 범부처적 연구개발 프로그램 평가 및 실시간 모니터링체계 미비로 국가차원의 총체적 연구개발성과 확산과 국가기술혁신체제구축에 걸림돌로 작용하여 왔다. 따라서 과학기술부는 집행기능³⁾을 관련 부처로 이관하고 국가연구개발사업의 총괄, 기획, 조정, 평가 체제 구축에 집중하고자 한다.

둘째, 과학기술 인력·지역혁신·산업정책의 유기적 조정체제를 새롭게 구성한다는 것이다. 지금까지 과학기술부는 연구개발 집행부서의 하나로서의 틀 내에서 벗어나지 못하고 있어 왔다. 하지만 국가혁신체제구축의 중심기관으로서의 위상정립과 함께 부처별 인력양성사업의 중복성 및 종합조정기능을 강화하여 수요지향적 인력양성 및 신기술분야 인력양성의 효율성을 제고하는 기능을 가져야 한다는 것이다. 뿐 만 아니라, 기술을 핵심요소로 하는 차세대 성장동력 산업 및 부품소재, 공정혁신(제품의 IT화, 공정의 IT화)산업 뿐 만 아니라 기술콘텐츠가 새롭게 핵심요소로 대두되고 있는 문화·관광산업의 종합조정 기능도 추가적으로 구성하여야 한다는 것이다. 따라서 과학기술 관련 인력양성, 지역혁신, 산업정책 분야의 상호유기적으로 연계되고 체계적인 종합조정체계구축이 필요하다. 한편, 이러한 체제개편의 내용에 따라 새롭게 구성된 국가과학기술행정체제를 가시화하면 다음 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 새로운 국가과학기술행정체제의 개념도

2.2 국가혁신체제의 지식기반

우리나라의 지속적인 연구개발 지출규모의 증가는 크게 두 가지 의미를 갖는다고 할 수 있다. 첫째는 무형자산인 연구개발 기술과 지식기반의 증강을 의미하고 둘째는 그것이 유형이든 무형이든 간에 네트워크를 통하여 이러한 무형자산들이 국가혁신시스템에 연동되어 경제적인 부를 창출하는 기능을 발휘한다는 것이다. 예컨대, 사회의 지식창출기능과 생산기능 및 서비스기능이 상호 연동되어 연계체계(linkage mechanism)를 형성하여 1, 2, 3차 산업 전반에 걸친 '지식기반 경제화(knowledge based economy)'가 실현됨을 의미한다고 할 수 있다. 즉 우리나라의 연구개발 부문이

3) 대형·복합 연구, 시장·정부 실패 사업영역(원자력, 우주개발 및 순수기초연구개발사업)은 예외적으로 과학기술부가 그대로 담당한다.

투입에 비해 성과가 미흡하다거나 국가연구개발사업의 산업화 실적이 저조한 근본적 이유는 이러한 ‘지식기반경제’ 관점에서 재해석되어야 할 것이다.

그동안 각 부처는 정부출연(연) 및 국공립 연구소를 통해 기술개발에 장기간을 요하거나 실패 위험이 높은 연구과제를 중심으로 국가연구개발을 수행함으로써 민간기업의 ‘시장실패(market failure)’를 보완하는 기능을 담당하였다. 하지만 ‘지식기반경제’에서는 혁신체계론적인 정부의 역할과 기능이 필요하다고 할 수 있다. 이러한 관점에서는 시장에 대응하는 시스템적인 시각이 필요하며, 이때의 시스템은 혁신능력(innovating capability), 동학(dynamic), 보편성(ubiquity) 등을 특징으로 하고 있다.

즉 기존 고전적 경제학에서 논의되고 있는 균형이란 애초부터 없다고 전제하고 있으며, 경제활동에 있어서 재생산되는 것은 항상 새로운 요소를 내포하면서 진화한 것으로 파악하고 있는 것이다. 따라서 직접적으로 지식창출을 하는 R&D 활동 뿐 아니라 일상적인 생산, 마케팅 활동을 통해 새로운 지식이 창출되는 혁신이 이루어진다고 보는 것이다.

하지만 현재 우리나라의 국가연구개발사업은 그동안 부처별로 기획 수행 추진되고, 개별사업 단위로 관리되는 실정이어서 지식기반 관련기술과 같이 이종 기술 간의 시너지 효과를 유발하는 기술을 개발하는데는 매우 부적합한 체제였다. 따라서 향후 국가경제 발전에 필수적인 지식기반산업을 육성하기 위해서는 범정부처 차원의 기술기획 및 추진체제를 우선적으로 정비해야 할 것이다. 아울러, 국가혁신체계상의 지식의 흐름도 지식창출 주체들에 의한 스팬오프형(spin off: 특정 주체간에 정보유통) 기술확산보다는 지식을 효율적으로 생산, 이용, 배분할 수 있는 효율적인 사회인프라를 창출하는 스필오버형(spill over: 불특정 다수에 대한 정보유통) 기술혁신을 추구해야 하며, 이러한 기술적 성과를 경제적 생산과 연계하는 적극적인 노력이 요구된다.

3. 국가혁신체제의 동태론적 분석틀

3.1 국가혁신체제의 동태성(System Dynamics)

전술한 바와 같이 지식기반사회에서의 혁신연구는 혁신과정에 대한 암흑상자(black box)내부의 역동성에 관심의 중대로 특징지을 수 있다. 즉, 기존의 선형모형에서 피드백모형, 정태적 시스템 모형, 동태적 시스템 모형으로 혁신에 대한 강조점이 변하게 되었다. 물론 이는 사회과학 패러다임이 기계론적인 사고에서 시스템적인 패러다임으로의 변화양상과 무관하지 않다. 이는 기본적으로 지식의 창출·이전·흡수라는 개념들을 사용하여 혁신과정의 복잡성과 불확실성을 축소하고자 하는 노력에 근거한 것으로, 국가혁신체제는 국가라는 경계 안에서의 지식의 커뮤니케이션 과정이 이루어지는 시스템으로 볼 수 있으며, 따라서 커뮤니케이션 과정의 변화는 곧 국가혁신체제의 특성이 변화함을 의미한다고 할 수 있다.

혁신이론에서 시스템적 접근의 확장은 조직과 제도라는 단순히 혁신체제의 구성요소로의 확장뿐만 아니라 구성요소간의 관계로의 확장에 대한 분석이 이루어졌다. 학습과정에서의 핵심은 구성요소간의 상호작용이기 때문에 혁신체제에서 관계는 주로 경제학에서 다룬 시장뿐만 아니라 비시장관계, 조직과 제도, 제도와 제도간의 관계까지 확장되고 있다. 특히 혁신의 성과는 단순히 투입 자원의 양으로는 설명이 안되는 오히려 혁신과정에 참여한 다양한 행위자의 네트워크의 특성이 혁신의 성과를 더 잘 설명할 수 있다는 연구결과가 잇따라 나오고 있다.

따라서 국가혁신체제를 시스템적인 시각에서 접근한다고 할 때, 혁신능력(innovating capability), 동학(dynamic), 보편성(ubiquity)의 요소를 중심으로 접근해야 한다. 여기서 혁신능력이란 비선형적인(파괴적인) 변화능력을 의미하며, 이에 따른 행태변화를 동태적인 변화(dynamics)라고 할 수 있다. 한편 이러한 변화는 (정책적) 조정가능한 인과적 연계성을 갖는다는 차원에서 보편적 존재(ubiquity)양상을 갖어야 한다. 그리고 이를 방법론적인 측면에서 분석한 것이 시스템 동학(system dynamics)으로 이는 시스템의 동태성(dynamics) 즉, 변화하는 행태를 설명하고자 하는 것을 목적으로 한다. 그리고 이러한 방법론은 시스템의 동태성을 가져오는 원천으로써 시스템의 피드백 구조(feedback loop)를 상정한다⁴⁾.

일반적으로 시스템 다이내믹스는 무엇보다도 동태적으로 변화하는 시스템의 행태(behavior)를 시스템의 구조(structure)에 의해 설명해야 한다는 관점을 견지한다. 여기에서 시스템의 행태란 시

4) 시스템 다이내믹스는 1960년대에 MIT의 Jay Forrester 교수에 의해 거의 독자적으로 개발되었다. 그는 Industrial Dynamics(1961), Urban Dynamics(1969), World Dynamics(1971)를 연속하여 출판하면서, 시스템 다이내믹스의 기본 논리와 방법론을 구축하였다.

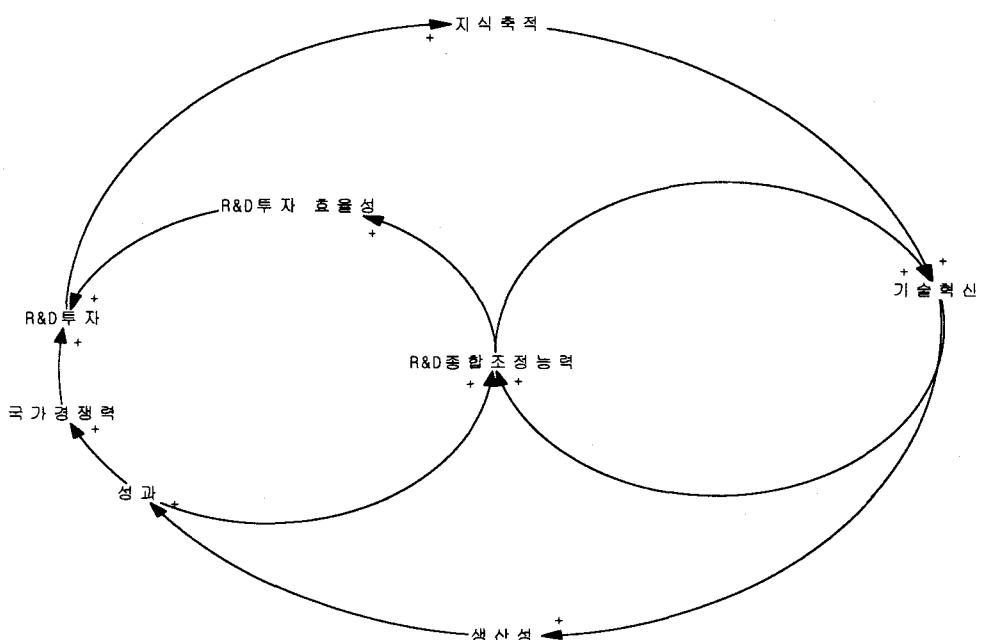
스템을 구성하는 변수의 값이 시간이 지남에 따라서 혹은 다른 변수의 변화에 따라서 어떻게 변화하는가를 의미하며, 궁극적으로 시스템의 구조는 시스템 다이내믹스의 시뮬레이션 모델에 있어서 피드백 구조로 표현되며, 시스템의 행태는 시뮬레이션이 진행됨에 따라 모델을 구성하는 변수들이 지니는 값의 변화로 표현된다.

따라서 시스템 다이내믹스 학자들은 수치적인 정확성을 추구하는 대신 상식적인 피드백 구조가 산출해 내는 시스템의 구조적인 변화에 초점을 둔다. 즉 시스템 다이내믹스는 비록 계량적인 시뮬레이션을 수행하지만, 수치의 정확성을 추구하지 않는다⁵⁾. 이러한 점에서 시스템 다이내믹스는 계량적인 접근이라기 보다는 질적인 접근에 더 가깝다고도 할 수 있다(Coyle 1998).

3.2 가설설정: R&D투자와 성장에 관한 인과지도 작성

일반적으로 혁신은 교육과 R&D를 꼽는다. 그러나 대부분의 경우 혁신은 일상적인 경제활동내에 배태된 다양한 학습과정의 결과이다. 그러므로 생산자의 효율성을 증가시키는 수행by using), 사용자와 생산자의 상호작용 효율성을 증진시키는 상호작용을 통한 학습(learning by interaction)이 혁신의 핵심을 이룬다.

전통적인 혁신연구에서는 R&D시스템 내로 투입되는 자원에 관심을 갖는 반면, 혁신 시스템은 전체적인 접근방식을 취한다. 혁신시스템에는 혁신에 영향을 미치는 경제적 요소와 더불어 제도적, 조직적, 사회적, 정책적 요소가 포함된다. 이러한 측면에서 혁신시스템의 접근방식은 요소들을 밝힘과 동시에 요소들간의 관계가 먼저 분석되어야 하며, 이러한 분석방법이 시스템 다이나믹스에서의 인과지도의 구성이다. 즉, 인과지도(causal map)는 여러 변수들간의 인과관계들을 피드백 구조에 초점을 두어 종합화 하는 도식으로, 시스템 다이내믹스 모델링을 수행하기 전 단계의 분석 도구로 활용되어 왔으며, 피드백 루프를 발견하는데 효과적인 도구로 활용되었다.



<그림 2> 국가혁신체제의 인과지도

5) 따라서 시스템 다이내믹스 학자들은 경험적 데이터에 대해서 그다지 중요하게 생각하지 않는다. 숫자로 표현되어 있는 경험적 데이터들에 못지 않게, 숫자로 표현되기는 어렵지만 상식이나 직관 또는 전문적 지식에 근거하여 짐작할 수 있는 변수들간의 인과관계와 피드백 구조가 더 중요하다고 생각한다. 비록 경험적인 데이터에 의한 증거가 없다고 하더라도, 시스템 다이내믹스 학자들은 자신의 상식이나 직관에 근거하여 두 변수간의 인과관계를 수식으로 설정하곤 한다(김동환, 2000).

먼저 국가혁신시스템에 있어서의 이러한 피드백 구성을 위한 기본 전개를 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 국가 R&D투자를 포함하는 연구개발 활동은 국가 R&D사업을 통해 지식축적에 영향을 주게 된다는 것이다. 그리고 이는 지식축적을 통해 기술혁신을 초래하거나 혹은 점진적인 생산성 향상을 가져오게 된다고 할 수 있다. 둘째, 일반적으로 지식축적은 기술진보를 가져와 노동, 자본과 함께 성장에 직접적인 효과를 가져다주는데, 이 과정에서 기술진보는 노동과 자본의 투입에 따른 수확체감 현상을 상쇄시키는 역할을 하게 된다. 그리고 지식축적과 기술진보는 인적·물적 자본의 투자 수익률 증가를 가져오므로, 노동이나 자본 등 다른 생산요소의 효율성 증대를 통해 성장에 간접적인 효과를 줄 수 있다. 셋째, 지식축적에 의한 성장확대는 R&D투자 확대의 인센티브로 작용하는 한편, GDP 일정 부분만큼 기업과 정부의 R&D투자 자금을 확보할 수 있도록 하여, 또 다른 기술혁신을 이룰 수 있는 원동력으로 작용한다. 즉 R&D 투자에 의해 이룩된 높은 경제 성장은 기업들의 이윤증가, 정부의 예산 증가 등을 통해 다시 민간 및 공공부문의 R&D투자를 증가 시킨다(김정홍,2003:206-207). 이러한 현상을 Lundvall은 기술과 성장간의 ‘누적적 인과관계’(cumulative causation)라 하였다⁶⁾.

한편, 기술진보는 제도적인 요인, 특히 규제개혁의 피드백과정을 통해 더욱 촉진될 수도 있다. 기술진보를 이룬 기업은 기존의 독점기업의 시장 점유율을 잠식할 것이고, 이것은 독과점규제의 완화를 가져올 것이다. 또한 규제완화는 기술혁신을 자극, 생산성의 급속한 향상을 통해 제품 가격 인하와 핵심기술의 확산을 가져올 것이다.

이처럼 정부도 기술과 관련된 각종 제도와 정책변경을 통해 지식축적에 영향을 줄 수 있다. 과학기술행정체계 개편을 통해 새롭게 구축된 국가혁신시스템에서는 국가가 실질적인 R&D종합조정 제도의 확립을 통해서 R&D투자-> 지식축적-> 기술혁신-> 총 요소생산성 향상-> 경제성장->새로운 R&D투자 등으로 이어지는 선순환 메커니즘을 더욱 빠르게 가동시킬 수 있게 하고 있다. 즉, ‘R&D종합조정제도’가 R&D투자의 효율성 제고와 기술혁신 촉진을 이라는 중간체인역할을 수행할 수 있다.

사실 과학기술부가 2001년 과학기술기본법 제정을 통해 국가연구개발사업에 대한 조사·분석·평가와 예산사전조정을 통한 국가연구개발사업에 대한 형식적인 종합조정제도를 마련한 바 있다. 하지만, 과기부가 동 제도를 거의 모든 국가연구개발사업으로 확대함에도 불구하고, 실효성 있는 정책수단의 미비로 국가 연구개발사업의 생산성 제고나 국가목표와의 정합성 등이 충분히 확보되지 못했다는 지적이 계속되어 왔다. 따라서, 과학기술행정체계 개편으로 과학기술부 장관이 부총리로 승격되고, 과학기술혁신본부에 모든 국가연구개발사업에 대한 예산배분권이 부여됨을 두고 국가연구개발사업에 대한 실질적인 종합조정제도의 확립으로 표현하는 것이 무리가 아닌 것으로 판단된다.

3.3 동태분석을 위한 시뮬레이션 모델 설정

본 연구에서는 연구자의 사고를 가능한 한 배제하면서 정책결정자의 인과지도(인지지도)를 시스템 다이내믹스 모델로 전환시킬 수 있는 방법중의 하나인 “기초관계 균등단위 모델링(Normalized Unit Modelling By Elementary Relationship, NUMBER)”을 이용하여 인과지도의 내용을 시스템 다이내믹스 모델로 전환하고자 한다. 여기서 “기초관계 균등단위 모델링”이란 저량(수준변수)과 유량(변화율 변수)간의 관계를 모두 기초적인 관계로 설정하고, 이를 변수들의 측정 단위를 0에서 1까지의 값으로 균등화시키는 것이다⁷⁾(김동환,1999). 즉, 주관적인 개념으로서의 낮은 값(예를 들면 국가경쟁력 저조)을 0에 가깝게 설정하고 높은 값(국가경쟁력 최고)을 1에 가깝게 설정한다. 0과 1은 변수의 최소값과 최대값으로써 그 이하나 그 이상의 값은 존재하지 않는 것으로 간주한다. 하지만 함수에 의한 계산시 1을 넘어갈 수 있기 때문에, 계산항의 수 (+, -로 구분)로 나누어 주어 이를 보정하여야 한다.

시뮬레이션 모델에서는 지식축적, R&D 사업화, 성과, 국가 R&D 성과 인지도, 국가 R&D잠재수요, 국가 R&D총수요를 저량(stock)으로 간주하고, 나머지 변수들을 유량 혹은 보조변수로 간주하였다. 그 외에도 R&D관리의 프로세스 R&D선정, 수행, 관리, 평가 등의 일련의 프로세스를 R&D수행이라는 변수로 축약하였으며, 기타 성과 및 투자에 이르는 혁신 프로세스 중에서 본 연구 목적에 맞지 않는 변수의 분리를 대부분 통일 시켰다. 이는 저량과 유량을 시스템구성의 근본

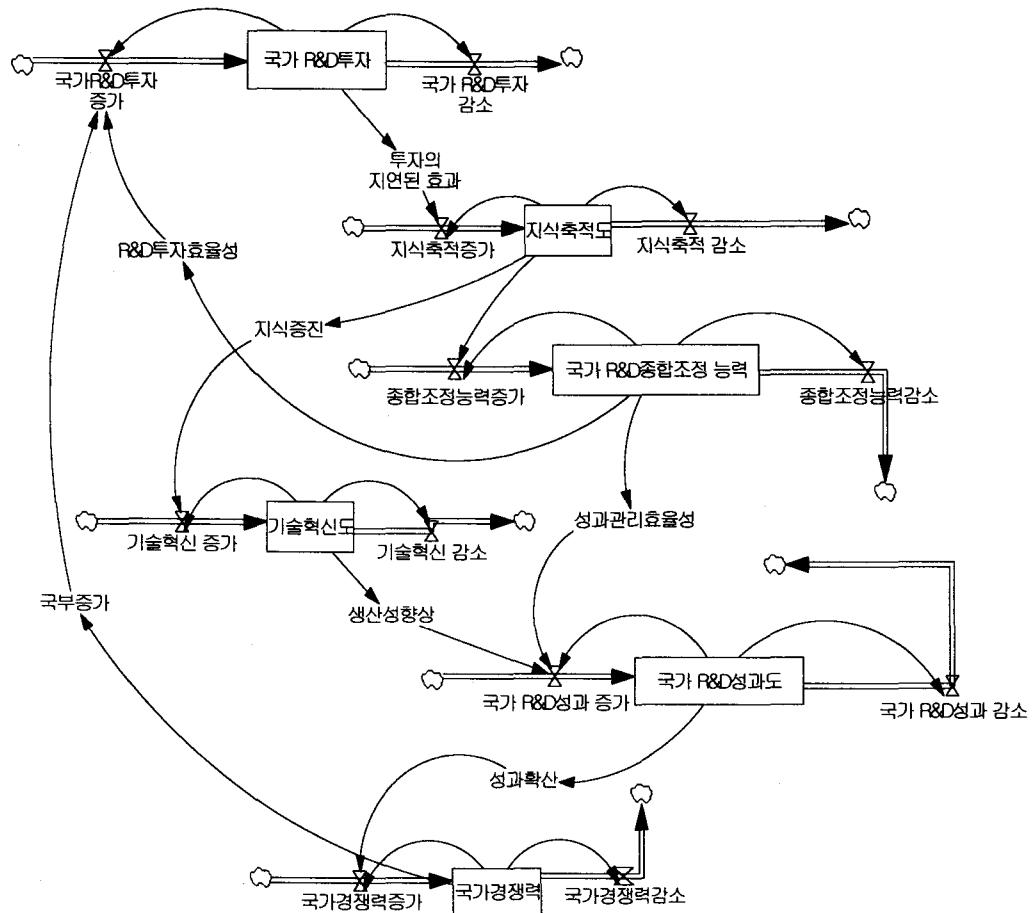
6) 그는 R&D와 기술혁신이 일국의 기술능력을 제고시켜 자본축적을 통해 경제성장을 가져오며, 성장은 다시 선진기술에 대한 투자 자원이 되는 동시에 인센티브가 된다고 하였다 (Pianta,1995:177).

7) 이 방법론은 역으로 0에서 -1까지로 변환하여 활용가능하다.

가정을 하고 있는 시스템 동태론에 의한 모델구성의 불필요한 복잡화를 방지하기 위함이다.

<그림 3>의 국가혁신체제의 저량/유량 모델에 관하여 간략하게 개관해 보면, 먼저 R&D수행이라는 변수는 유량으로 표현되어 있다. 이러한 국가 R&D수행에 영향을 미치는 변수는 R&D투자와 기존의 지식축적률이라는 보정계수에 영향을 받는다고 가정하였다. 여기서 이러한 지식축적률은 국가 연구개발정보 체제구축정도에 대한 개념을 반영한 것으로 보았으며, 이는 국가기술혁신의 지식학습과정에 중요한 요인이라고 가정하였다. 그리고 R&D수행을 통해 이루어진 지식축적(연구결과물 등 성과포함) 변수는 다시 지식증진(기초연구)과 기술혁신(응용, 개발연구)의 변수로 이전한다고 가정하였다.

국가 R&D의 관리적인 노하우는 R&D종합조정 능력을 구성하는 변수에 투입되어 영향을 끼친다고 가정하였는데, 이는 결국 국가 R&D 성과효과 등을 국가경쟁력을 통한 국가 R&D 투자에 영향을 주기 때문이다. 그리고 여기서 국가경쟁력이나, R&D종합조정 능력 등으로의 영향은 곧 바로 이루어지기보다는 그 효과가 서서히 나타난다고 보아 자연된 효과를 나타내는 함수들을 삽입하였다⁸⁾.



<그림 3> 국가혁신체제의 시뮬레이션 모델

8) 물질적인 시간지연과 정보적인 시간지연을 나타내는 함수(Delay 함수와 Smooth 함수)를 사용하였으며, 이는 특정변수값이 갑자기 변화하더라도 이를 서서히 인식하도록 하는 것으로 혼히 말하는 이동평균과 같은 개념이다.

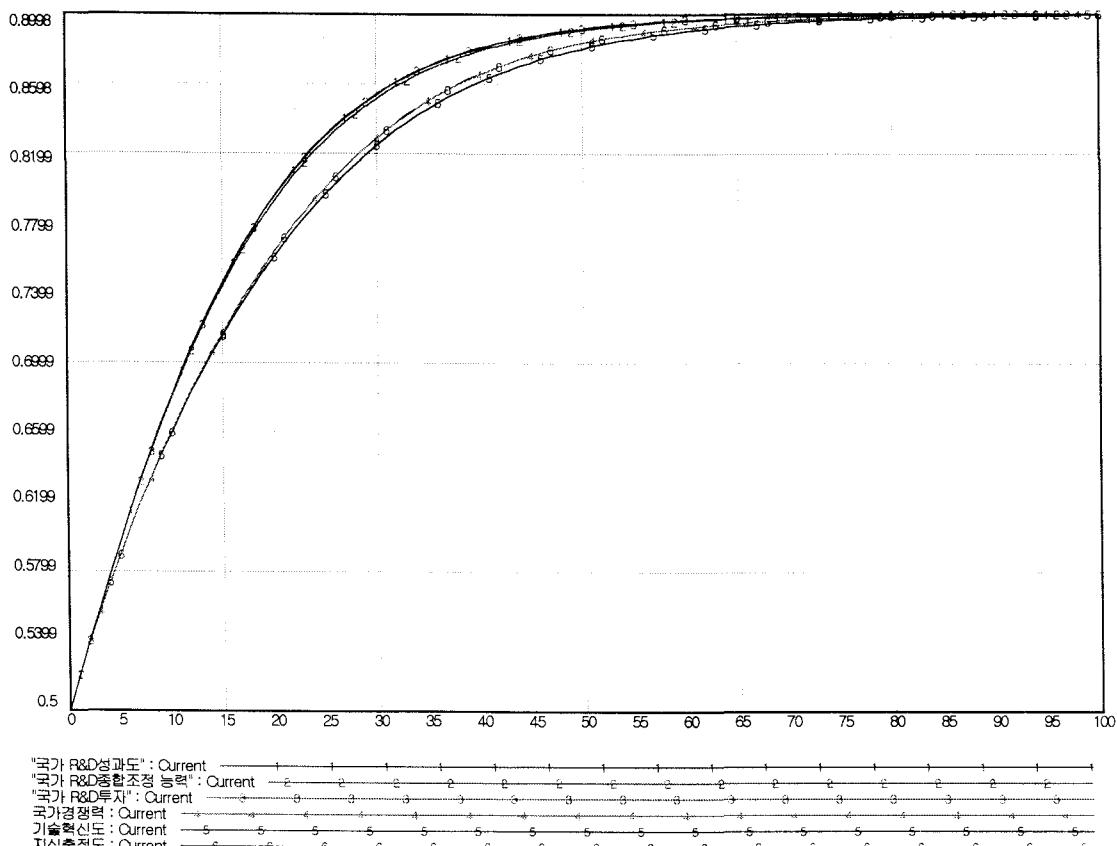
4. 결과 분석

<표 2>는 <그림 3>의 모델을 컴퓨터상에서 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 결과에는 저량(수준변수)인 국가 R&D투자, 지식축적도, 국가 R&D종합조정능력, 기술혁신도, 국가 R&D성과, 국가경쟁력 등이 표현되어 있다. 이는 저량(수준변수)이 시스템의 상태를 나타내 주는 지표이기 때문이다. <그림 4>는 현실세계에서의 값을 의미하지는 않는다. 단지 균등화된 단위의 세계에서 각각의 변수들이 일반적인 관점에서의 0에서 1사이의 절적 척도로 기초관계 균등단위 모델링 방식으로 전환하였을 때, 컴퓨터상에서 시뮬레이션 하여 산출된 값을 의미한다.

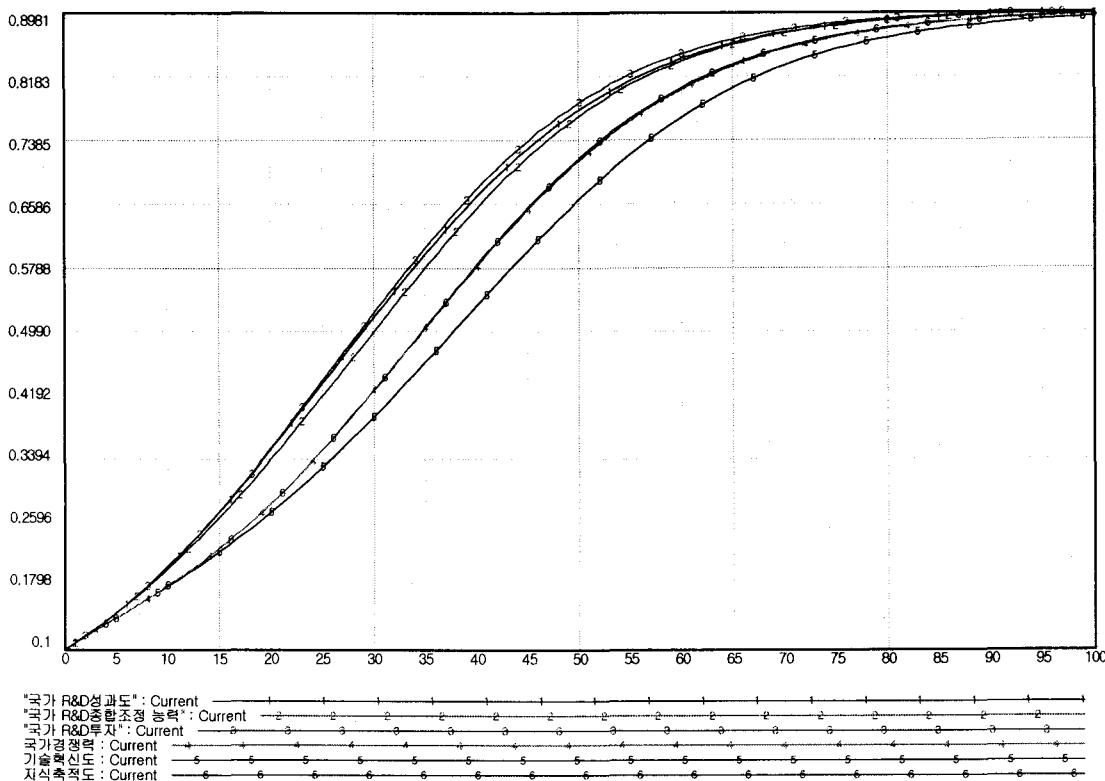
본 연구에서는 초기치값을 0.5(중간수준)로 가정하고 시뮬레이션을 하여 보았다. 결과는 본 연구의 예상을 크게 벗어나지 않았다. 전체적으로 시스템의 수준변수들은 거의 일치된 모습을 보이고 있으며, 65-70개월 후에는 완전히 일치된 모습을 보이고 있다. 특히 지식축적도, 기술혁신도, 국가경쟁력은 한쌍의 일치된 경향성을 보여주고 있으며, 국가 R&D성과도, 국가 R&D종합조정능력, 국가 R&D투자의 저량변수들을 견인하고 있다. 이를 통해서 변수들이 평균적인 평가를 받고 있는 상태에서, 국가 R&D투자가 선순환적으로 국가경쟁력에 좋은 평가(0.8이상의 평가)를 받게 되기까지는 약 30개월 이후인 것임을 알 수 있으며, 종합조정능력은 약 24개월(2년)정도의 시간이 필요한 것으로 나타났다.

또한 모든 수준변수들을 최하수준(0.1)의 평가를 받는다고 가정하고 시뮬레이션 한 경우에는 종합조정능력이 우수하다는(0.8) 평가를 받을 때까지 약 60 개월 이상이 소요되는 것으로 분석되고 있다 <표 3>. 따라서 새롭게 행정적으로 조직되어 내년부터 본격적으로 구체화될 과학기술혁신본부 및 연구개발인프라 등과 같은 국가기술혁신체제가 어느 정도의 성과를 가시화하기 위해서는 적어도 5년(60개월)정도의 충분한 기간이 소요될 것으로 예상된다.

<표 2> 모든 수준변수의 초기값을 중간으로 가정한 경우의 결과



<표 3> 모든 수준변수의 초기치 값을 최하수준으로 가정한 경우



5. 결론 및 정책적 대안

지금까지 많은 혁신에 대한 모형이 개발되었고, 관련된 개념의 세련화에도 불구하고 아직까지 혁신정책의 요소가 무엇인지, 그러한 정책이 어떻게 집행되는지에 대한 체계적인 논의 및 합의가 없는 상황이다. 이와 같이 과학기술혁신과 관련된 정책의 설계가 어려운 이유는 비록 확인된 시장 실패를 완화하기 위해 설계되어도 시스템 실패가 여전히 남아 있을 가능성성이 있으며, 오히려 시장 실패는 치유하더라도 시스템실패⁹⁾가 발생할 가능성이 여전히 남아 있기 때문이다. 혁신은 다양한 정책의 결합을 통해 영향을 받으나 개별정책은 개별 목적에 의해 추진되기 때문에, 실제 정책의 효과가 어떻게 나는지는 아직 그 과정이 명쾌하게 설명되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 그동안 추상적인 개념 수준에서 논의되어왔던 우리나라 국가혁신체제에 대한 시뮬레이션이 가능한 모델화의 가능성을 제시하였다고 생각된다. 이러한 노력은 무엇보다도 국가의 정책시스템설계에 직접적인 도움이 될 것이며, 변화의 노력이 성과없이 몇 개의 구호와 조직 몇 개 생기는 것으로 끝나왔던 그동안의 실수를 사전에 예방할 수 있는 계기를 만들어 줄 것으로 기대 한다. 본 연구에서 제시하였던 수준변수들은 정책적인 투입이 요구되는 결절지점이 될 것으로 판단되며, 무엇보다도 지식축적도를 제고할 수 있는 국가혁신체제내에서의 지식기반화 문제와 국가 연구개발 종합조정체제의 조기 정착화가 실현되어야 할 것이다. 이를 위해서는 먼저 현재 부처별·기관별로 중복·상이하게 운영되고 있는 각각의 국가연구개발사업 관리시스템을 "국가표준의 연구관리정보시스템"을 활용하여 연계·통합하고, 이를 지속적으로 지원·관리하는 체제가 구축되어야 할 것이다. 이를 통해서 국가연구개발사업의 중복 연구 및 중복 투자를 사전에 예방토록 하고, 관련 수집된 정보를 가공·분석하여 실시간으로 국가 연구개발 종합조정을 지원하는 기획·통계 및 정책지원 정보들이 자동적으로 생성되게 해야 할 것이다. 즉 연구개발 관리기능과 지식정

9) Edquist(1997)는 최소한 4개의 시스템 실패영역이 존재한다고 주장하였다. 첫 번째는 혁신체제의 기능이 부적절하거나 부재한 경우, 두 번째는 조직, 세 번째는 제도가 부적절하거나 상실된 경우, 네 번째는 이러한 요소간의 연계 혹은 상호작용이 부적절하거나 부재한 경우 시스템 실패가 발생할 수 있다고 한다.

보지원 기능의 밀접한 연계 및 상승효과가 창출될 수 있도록 하여야 할 것이다.

특히 『변화의 리더쉽』의 저자인 코터(J.P.Kotter)가 변화관리의 마지막 단계라고 일컫는 일하는 방식의 변화가 이루어져야 할 것이다. 즉 조직과 구조가 물자관리중심에서 자식관리중심으로 바뀌고 있는데, 일하는 방식이 기준과 같다면 변화의 피로만 누적될 뿐 어떤 것도 이를 수 없기 때문이다. 따라서 새로운 국가연구개발체제 및 연구개발 종합조정체제구축이 조직 및 구조의 변화의 변화를 통해서 새로운 일하는 방식으로 정착되도록 2년에서 5년 동안의 지속적인 변화관리가 요구된다고 할 수 있다. 한편, 본 연구에서는 시뮬레이션 모델 상에서 종합조정변수와 다른 투입 및 산출 변수들 간의 관계, 혁신본부의 활동을 구체적으로 보여 줄 수 있는 종합조정변수의 구체화 등이 빠져 있다. 활발한 후속 연구가 본 연구의 부족한 부분을 채워주기를 기대한다.

< 참고문헌>

- 김동환 외, 1999, 『시스템 다이내믹스』, 서울: 대영문화사.
김동환, 2004, 『시스템 사고: 시스템으로 생각하기』, 서울: 선학사.
김정홍, 2003, 『기술혁신의 경제학(2판)』, 서울: 시그마 프레스
오세홍, 2004, 「국가연구개발투자시스템과 레버리지 전략: 연구개발투자와 연구개발혁신활동의 정합」. 연세대학교 기술경영학협동과정 박사학위논문.
윤진호, 2002, 「한국의 기술능력과 외국인 직접투자의 변화 연구」. 고려대학교 과학기술학협동과정 박사학위논문.
Ahn. N., 1999. *A System Dynamics Model of Large R&D Program*, Ph. D., MIT, pp. 21-22.
Coyle, R.G., 1998, "The Practice of system dynamics: milestones, lessons and ideas from 30 years experience", *System Dynamics Review*, Vol. 14, No. 4, pp.343-365.
Dong-Hwan Kim, 2000, "A Method for Direct Conversion of Causal Maps into SD Models: Abstract Simulation with NUMBER", International conference of System Dynamics Society.
Dosi, G., Orgensio, L. and Labini, M. S., 2002, "Technology and the Economy", LEM Working Paper Series, prepared for the 2nd Edition of the Handbook of Economic Sociology, Neil J. Smelser and Richard Swedberg.
Edquist, C., 1997, "Systems of Innovation Approach: Their Emergence and Characteristics", in Charles Edquist (ed.), *Systems of Innovation- Technologies, Institutions and Organizations*, London: Cassell Academic.
Ford, D. N., 1995. *The Dynamics of Project Management: An Investigation of the Impact of Project Process and Coordination on Performance*, Ph. D., MIT.
Forrester, Joy, 1969, *Urban Dynamics*, Boston: MIT Press.
Forrester, Joy, 1971, *World Dynamics*, Boston: MIT Press.
Forrester, Joy. 1961, *Industrial Dynamics*. Boston: MIT Press.
Hansen, K. F. Wess, M. A., Kwak, S., 1999. " Allocating R&D Resources: A Quantitative Aid to Management Insight", *Research and Technology Management*(July-August), pp. 44-50.
Kotter, J. P.(신태균 역), 2003, 『변화의 리더쉽, 21세기 북스
Nay, J. N., 1965, *Choice and Allocation in Multiple Markets: A Research and Development System Analysis*, Ph D., MIT.
Piata, M., 1995, " Technology and growth in OECD countries, 1970-1990", *Cambridge Journal of Economics*, Vol.19.
Ross, B. N., 1990, *A System Dynamics Model of the Growth and Diffusion of R&D Communities*, Ph. D., MIT.
wachold, G. R., 1963, *An Investigation of The Technical Effectiveness of A Government Research, Development, Test and Evaluation Organization*, Ph. D., MIT
Welles III, G.k 1963. *An Analysis of The Dynamic Behavior of A Research and Development Organization*, Ph. D., MIT.
<http://www.public.asu.edu/~kirkwood/sysdyn/SDRes.htm> Arizona State University. System Dynamics Resource Page.

<부록: 모델방정식 >

"국가 R&D투자"= INTEG ("국가R&D투자 증가"- "국가 R&D투자 감소", 0.5)
지식축적도= INTEG (+지식축적증가-지식축적 감소, 0.5)
"국가 R&D종합조정 능력"= INTEG (+종합조정능력증가-종합조정능력감소,0.5)
기술혁신도= INTEG (+기술혁신 증가-기술혁신 감소,0.5)
"국가 R&D성과도"= INTEG (+"국가 R&D성과 증가"- "국가 R&D성과 감소",0.5)
국가경쟁력= INTEG (+국가경쟁력증가-국가경쟁력감소,0.5)
"국가R&D투자 증가"=(국부증가+"R&D투자 효율성")*0.1*(1-"국가 R&D투자")/2
"국가 R&D투자 감소"="국가 R&D투자" *0.01
투자의 지연된 효과= DELAY1("국가 R&D투자", 12)
지식축적증가= 투자의 지연된 효과*0.1*(1-지식축적도)
지식축적감소=지식축적도*0.01
지식증진 = SMOOTH(지식축적도 , 12)
종합조정능력증가= 지식축적도*0.1*(1- "국가 R&D종합조정 능력")
종합조정능력감소="국가 R&D종합조정 능력" *0.01
기술혁신증가=지식증진*0.1*(1-기술혁신도)
기술혁신 감소=기술혁신도*0.01
성과관리효율성="국가 R&D종합조정 능력"
"국가 R&D성과 증가"=(기술혁신도+성과관리효율성)*0.1*(1- "국가 R&D성과도")/2
"국가 R&D성과 감소"="국가 R&D성과도" *0.01
성과확산=DELAY1("국가 R&D성과도", 12)
국가경쟁력증가= 성과확산*0.1*(1-국가경쟁력)
국가경쟁력감소=국가경쟁력*0.01
국부증가=국가경쟁력
"R&D투자효율성"="국가 R&D종합조정 능력"