

국가 에너지 R&D의 중장기 효과평가를 위한 인과지도 분석*

The Long-Term Effect of Energy R&D Investment Based on Causal Loop Diagramming Analysis

오영민**

Oh, Youngmin

Abstract

This article aims at revealing the dynamic relationships between the energy R&D investment and economic growth in Korea. To achieve this goal, we reviewed the effects of energy R&D investments and tried to make the holistic interconnections for describing the feedback loops between energy R&D and economic system. Energy R&D investments develop the renewable energy, energy efficiency and CO₂ emission reductions technologies for accomplishing the national strategic targets. The rapid obsolescence of technologies makes the inefficiency and negative effects in governmental energy R&D investments.

Keywords: 에너지 R&D 투자, 경제성장, 인과지도, 에너지 효율, CO₂ 저감
(Energy R&D Investment, Economic Growth, Causal Loop Diagram, Energy Efficiency, CO₂ Reduction)

* 본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20131510101690).

** 한국뉴욕주립대학교 기술경영학과 연구교수(unaion@daum.net)

I. 서론

1. 연구의 필요성 및 연구의 주요 내용

우리가 살고 있는 현대사회는 물질 기반인 에너지를 지속적으로 생산해내야만 존립할 수 있다. 또한 화석연료의 고갈과 기후변화 같은 인류 공동의 문제에 현명하게 대처하기 위해선 에너지에 대한 지혜로운 전략을 구축해야 한다. 이러한 맥락에서 전통적인 에너지 원뿐만 아니라 신재생 에너지의 개발과 에너지 효율의 향상 그리고 온실가스 감축기술 개발과 같은 R&D 주제들이 국가적 과제로 등장하고 있으며, 세계 각국은 에너지기술 및 산업의 자국 경쟁력 확보를 위해 체계적인 전략하에 혁신적인 원천기술의 개발과 실증 및 보급에 역량을 집중하고 있다.¹⁾

우리나라는 「제2차 에너지기술개발계획(2011~2020년)」을 수립하면서 에너지기술혁신을 통한 5대 그린에너지 산업 강국으로의 도약을 비전으로 내세웠다. 세계시장에서 그린에너지 산업 분야의 10%를 점유하고, 에너지효율을 12% 향상시키며, 온실가스를 BAU대비 15%를 감축하는 등의 구체적인 목표도 갖고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 ①에너지기술의 신성장동력화 가속화, ②공생발전 R&D 생태계 조성, ③에너지 R&D 시스템 선진화, ④에너지기술 산업화 인프라 구축 등과 같은 추진전략을 마련하였으며, 에너지 R&D 4대 집중 투자분야(신재생에너지, 전력·원자력, 효율향상·온실가스 감축, 에너지·자원개발)를 선정하여 현재의 에너지 R&D 투자를 2배 이상 증대시킬 것임을 천명하였다.

정부차원의 에너지 R&D에 대한 비전과 목표 그리고 추진전략이 수립되었으므로, 재원을 어떻게 마련하고 조성된 재원을 어떻게 효율적으로 배분할지에 대한 구체적인 솔루션을 준비해야 한다. 즉, 세워진 비전과 목표를 달성하기 위해서 에너지 R&D의 전체적인 규모는 얼마여야 하는지 그리고 연차별로 얼마의 재원이 소요되는지, 에너지 R&D 부문별로는 재원을 어떻게 나누어야 할지에 대해서 고민하고, 효과적으로 사용할 수 있도록 효율적인 배분체계를 구성해야 한다.

본 연구에서는 에너지 R&D 투자재원의 규모를 산정하고, 자원 배분 방식에 대한 효율적인 대안을 제시하기 위한 기초적인 연구로서 인과지도(causal loop diagram)의 작성과 분석을 시행하고자 한다. 이를 위해서 우리나라의 에너지 R&D 투자 현황을 살펴보고 에너지 R&D와 경제성장의 관계에 관한 포괄적인 이론적 검토를 수행한다. 이를 바탕으로 에너지 R&D 투자와 국가경제 성장 그리고 에너지 효율과 CO₂ 저감의 관계에 대한 피드백 구조

1) 미국(에너지부)은 Strategic Plan('11), 일본(경산성)은 에너지전략 계획('10)과 Cool Earth('08), EU는 SET-Plan('08), Recovery Plan('08)을 수립하고 추진하고 있다(제2차 에너지기술개발계획('11~'20).

를 규명하고자 한다. 피드백 구조의 규명은 에너지 R&D 투자와 관련된 구체적인 정책문제를 다룸에 있어서 밑거름이 된다.

II. 정부 에너지 R&D의 현황분석 및 투자효과에 관한 이론적 연구

1. 정부 에너지 R&D의 현황분석

1) 에너지 소비현황

우리나라의 경제규모는 급격한 속도로 성장하였다. <표 1>에서 보듯이, 경제성장에 따른 에너지의 소비 역시 동반 증가되어, 이제는 에너지의 효율적인 관리가 절실한 실정이다. OECD자료에 따르면 우리나라는 GDP 1달러 늘리는데 소비되는 전력량이 0.58kwh로서 OECD 평균 0.33kwh 보다 1.7배 많은 전력을 사용하고 있다. 이는 우리나라의 산업구조가 제조업 특히, 화학·철강 등 전력 다소비 업종으로 구성되어 있다는 일차적인 이유와 더불어, 우리와 비슷한 산업구조를 갖고 있는 독일이나 일본과 비교했을 때 에너지 소비가 비효율적이라는데 기인한다.

<표 1> 국내 에너지 소비 추이(단위: 백만 Toe)

구분	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1차에너지 소비	198.4	208.6	215.1	220.2	228.6	233.4	236.5	240.8	243.3	262,6	271,4
최종에너지 소비	153	160.5	164	166	170.9	173.6	181.5	182.6	182.1	193,8	200,1

자료: 에너지경제연구원 「에너지통계연보」 각년도.

아래 <표 2>에서 1차 에너지의 소비현황은 대체적으로 석유의 비중이 가장 높으며, 전 력수요 증가에 따라 발전용 에너지인 LNG 및 석탄의 비중이 점차 증가하고 있다. 그러나, 대체 에너지의 생산과 소비는 늘어나고는 있으나 아직은 미미한 수준임을 알 수 있다.

〈표 2〉 1차 에너지 품목별 소비현황(단위:백만 Toe)

구분	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
1차 에너지	계	198.4	208.6	215.1	220.2	228.6	233.4	236.5	240.8	242.2	262.6	271.4
	석탄	45.7	49.1	51.1	53.1	54.8	56.7	59.7	66.1	68.6	75.9	79.4
	석유	100.4	102.4	102.4	100.6	101.5	101.8	105.5	100.2	102.3	104.3	105.1
	LNG	20.8	23.1	24.2	28.4	30.4	32	34.7	35.7	32.3	43	46.6
	원자력	28	29.8	32.4	32.7	36.7	37.2	30.7	32.4	31.8	31.9	32.3
	기타	3.5	4.3	5	5.4	5.3	5.7	5.9	6.4	7.2	7.5	8

자료: 에너지경제연구원 「에너지통계연보」 각년도.

에너지 소비 부문별로는 경제성장에 따른 산업활동 증가로 산업부문의 비중이 계속해서 늘어나고 있다. 이는 철강, 석유화학 등 에너지 소비가 많은 산업부문이 지속적으로 성장하면서, 동시에 에너지 소비가 늘어났기 때문이다. 한편, 가정·상업부문은 효율이 비교적 높은 고급 가전제품의 보급의 영향으로 에너지 소비량의 변화가 완만하고 전체 소비에서 차지하는 비율도 감소하고 있다. 수송부문의 경우 자동차 보유대수는 상당히 빠른 속도로 증가하였으나, 효율증대는 에너지소비 증가세를 둔화시키고 있다.

〈표 3〉 에너지 소비 부문별 현황(단위: 천 Toe, %)

구분	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
산업	85,158	89,197	90,805	92,992	94,366	97,253	104,327	106,458	106,119	115,155	121,474
	55.70%	55.60%	55.40%	56.00%	55.20%	56.00%	57.50%	58.30%	58.30%	59.40%	60.70%
수송	31,909	33,763	34,632	34,615	35,559	36,527	37,068	35,792	35,930	36,938	36,755
	20.90%	21.00%	21.10%	20.90%	20.80%	21.00%	20.40%	19.60%	19.70%	19.10%	18.30%
가정·상업	32,893	34,299	34,965	34,807	36,861	35,986	35,916	36,225	35,722	37,256	37,410
	21.50%	21.40%	21.30%	21.00%	21.60%	20.70%	19.80%	19.80%	19.6%	19.20%	18.70%
공공·기타	2,989	3,191	3,593	3,595	4,068	3,836	4,144	4,099	4,295	4,483	4,520
	2.00%	2.00%	2.20%	2.20%	2.40%	2.20%	2.30%	2.30%	2.40%	2.30%	2.30%
합계	152,950	160,451	163,995	166,009	170,854	173,584	181,455	182,574	182,066	193,832	200,160
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

자료: 에너지경제연구원 「에너지통계연보」 각년도.

2) 에너지 R&D 투자 현황

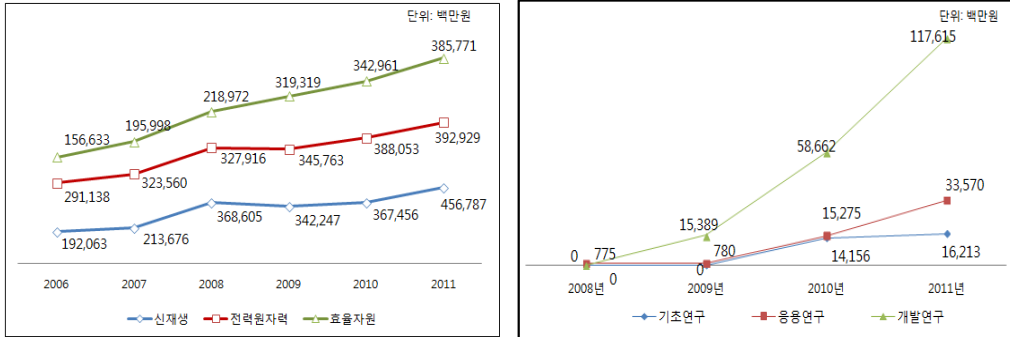
에너지 R&D 사업비 중 정부투자금은 연평균증가율이 14.7%로서 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 이것은 대체에너지의 개발과 효율적인 에너지 관리를 위한 정부의 공격적인 에너지 R&D 투자를 의미한다. 2011년도 정부지원금은 7,473억 원으로 전년대비 11.9% 증가하였으며, 전체 투자부담의 58.4%를 차지하고 있다. 반면에, 민간 부담금은 5,327억 원으로 15.1%의 연평균 증가율을 보이며 전체 투자의 41.6%의 비중을 차지하고 있다. 기업 부문 역시 에너지의 확보와 효율적인 관리가 기업의 새로운 경쟁력을 갖추는 것이라 예상하고 에너지 R&D 투자의 규모를 늘리고 있음을 보여준다.

아래의 [그림 1]에서 왼쪽 그림은 에너지 R&D 사업별 투자 추이를 나타내고 있다. 그림에서 신재생 에너지 분야의 사업금액은 2008년에 3,686억 원으로 급격히 증가하였으나 2009년에 3,422억 원으로 다소 감소하였다. 그리고 2010년부터 다시 증가 추세를 보이며 2011년에는 4,568억 원이 투자된 것으로 나타나고 있다. 전력원자력 분야 역시 계속해서 증가추세를 보이다가 2009년에 3,458억으로 다소 감소하였으나 이후 꾸준히 증가하여 2011년에는 3,929억 원이 투자되었다. 반면에 효율자원 부문은 꾸준한 증가세를 보이며 2011년에 3,858원이 투자되었다. [그림 1]의 오른쪽 그림은 신재생에너지 분야에서 R&D 단계별 투자 추이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 응용연구와 기초연구 분야의 지원 금액은 상대적으로 적었으며 개발연구 위주의 R&D 투자를 하고 있음을 알 수 있다. 개발연구의 2011년도에는 총액은 1,176억 원이었다.

〈표 4〉 에너지 R&D 투자 추이 (단위: 백만 원, %)

구 분		2006	2007	2008	2009	2010	2011	연평균 증가율
사 업 비	정부 지원금	376,658 (58.9)	434,253 (59.2)	535,891 (58.5)	605,534 (60.1)	668,023 (60.8)	747,285 (58.4)	14.7
	민간 부담금	263,176 (41.1)	298,981 (40.8)	379,602 (41.5)	401,795 (39.9)	430,447 (39.2)	532,705 (41.6)	15.1
	현금	136,896	149,229	189,288	169,795	150,574	243,779	12.2
	현물	126,280	149,752	190,314	232,000	279,873	288,926	18.0
	계	639,834	733,234	913,493	1,007,329	1,098,470	1,279,990	14.9
과제	950	1,055	1,056	1,074	1,056	1,032	1.7	

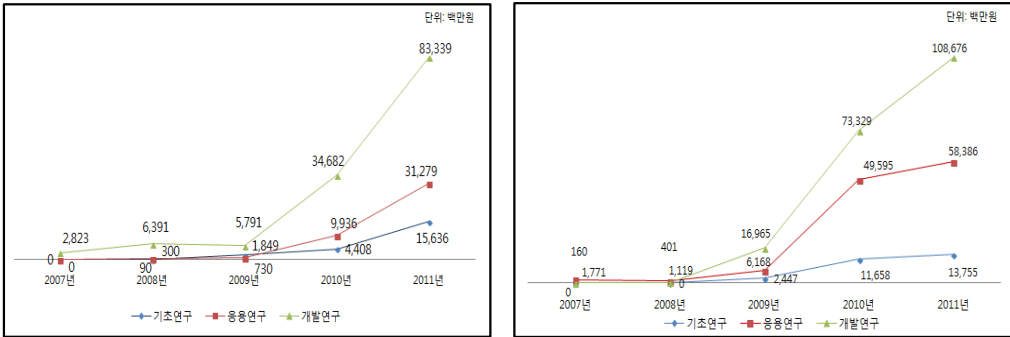
자료: 2011년도 에너지 R&D통계 자료집(2012.9), 지식경제부, 한국에너지기술평가원.



자료: 한국에너지기술평가원 내부자료

[그림 1] 에너지 R&D 투자추이와 신재생에너지 R&D 단계별 투자 추이

아래 [그림 2]에서, 전력원자력 R&D의 단계별 투자 역시 개발연구 중심으로 지원되고 있는바, 2010년에 347억 원에서 2011년에는 833억 원으로 대폭 증가하였다. 반면, 응용연구 분야는 2011년 312억 원으로 증액되어 투자되어 대체적으로 전력원자력 분야에서는 2010년 이후 투자가 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있다. 효율자원 부문에서 R&D 단계별 투자도 앞선 신재생에너지와 전력원자력 부문과 마찬가지로 개발연구 위주로 이루어지고 있다. 2010년에 733억, 2011년에 1087억 원으로 급격히 늘어나고 있었으며, 응용개발 부문 또한 상당한 규모로 증가되어 2010년에 496억 원, 2011년에는 584억 원이 투자되었다.



자료: 한국에너지기술평가원 내부자료

[그림 2] 전력원자력 R&D 단계별 투자 추이와 효율자원 R&D 단계별 투자 추이

이러한 정부 R&D의 투자흐름을 정리해보면, 에너지 R&D에 투자가 최근 급격히 늘어나고 있다는 바람직한 사실과 더불어, 기초연구보다는 응용 및 개발연구에 투자가 집중되는 경향을 보인다는 것이다. 이것은 에너지 R&D 투자가 즉각적으로 산업체에 활용할 수 있는

과제 중심으로 연구가 이루어지고 있음을 보여준다. 사실, 원천기술을 확보하는 것은 대부분 기초연구를 통해 이루어진다고 할 때, 개발 중심의 편향적인 R&D 투자는 이 분야의 국제적 경쟁력을 키우는 토양을 만들지 못한다는 한계를 내포하고 있다.

2. 정부 에너지 R&D에 관한 이론적 검토

연구개발은 새로운 지식을 탐구함으로써 그 결과나 지식을 새로운 상품이나 공정으로 전환시키는 활동을 총칭한다. 연구개발을 통한 기술진보와 혁신은 현 수준의 기술과 산업을 질적으로 변화시켜 경제성장에 기여한다. 경제학적으로 연구개발투자는 한 경제의 지식 수준을 결정하는 핵심요인으로서, 지식수준의 향상은 한 국가체제의 균형성장경로를 상향 이동시킨다. 이것은 연구개발투자가 장기적으로 경제성장률을 결정하는 중요한 요소임을 말해준다(신태영, 2004). 에너지 R&D 투자 역시 제반 관련 산업을 포함한 우리나라의 모든 영역에 심대한 영향을 미치고 있다. 산업·수송·가계·공공부문 등 사회의 각 부문에서 에너지 R&D에 대한 경제사회적인 효과가 발생하고 있으며, 유의미한 선순환 구조 위에서 효율적인 투자가 이루어져야 한다.

본 장에서는 R&D투자에 대한 이론적·실증적 연구결과들을 살펴보고, 에너지 R&D의 정책적 위치를 파악하여 향후 작성하게 될 에너지 R&D 인과지도 작성을 위한 기초적인 자료로 활용할 수 있도록 한다. 논의순서는 R&D 투자와 경제성장에 대한 이론적·실증적 연구를 정리한 후, 에너지 R&D 투자 및 기술에 관한 시스템 다이내믹스의 연구결과와 더불어 에너지정책과 경제성장 등의 이슈를 살펴본다.

1) R&D 투자와 경제성장에 대한 이론적 논의

(1) R&D 투자와 경제성장의 이론적 흐름과 파급효과 경로

기술진보(technology progress)가 경제 성장의 큰 축으로 작동하고 있음은 주지의 사실이다. 1950년대에 제시된 솔로우(Solow)의 신고전학파의 논의(외생적 성장론)와 1980년대에 롬머(Romer)와 루카스(Lucas)에 의해 제시된 신성장이론(내생적 성장론)은 경제성장의 원천으로서 기술진보의 중요성을 말해주고 있는 대표적인 이론이다(하정훈, 이동욱, 2009).

기술에 의한 경제성장의 초기 주장인 외생적 성장론은 ‘기술충격(technological shock)’에 의해 경제가 더 높은 수준의 성장을 달성할 수 있다는 주장이다. 그러나 기술진보는 인간의 의도적이고 계획적인 활동이라기보다는 외부에서 주어진 혁신의 결과물이라는 인식을 공유하고 있었다. 반면, 내생적 성장론은 생산요소 투입량의 증가에 따른 수확체감 현상이

발생하지 않게 된 이유를 인적자본과 내생적 기술진보로서 제시하고 있다(황태연, 2010). 이는 과학기술연구가 인적자본과 기존의 누적된 지식의 기반하에 새로운 지식을 창출함으로써 경제성장이 이루어진다고 보는 것이다. 이러한 내생적 성장론은 1990년대에 들어서서 준내생적 성장모형(semi-endogenous growth theory)과 제2세대 내생적 성장모형으로 진화된다.

R&D 투자의 경제적 파급효과를 추정하는데 중요한 것은 경로(pathway)를 고려하는 것이다. 여기에는 크게 세 가지의 경로를 제시할 수 있는데 첫째, R&D 투자가 생산성 향상을 통해 GDP증가에 영향을 미치는 경로를 들 수 있다. 이 경로는 표준적인 경제성장 모형에서 기술발전이 생산성 향상을 가져오며, 이것이 경제체제의 산출량 증가로 이어짐을 의미한다. 둘째, R&D 투자가 생산성 향상을 통해 수출을 증가시키며, 수출증가가 총생산의 증가를 유발하는 경로이다. 이 경로는 표준적인 국제무역이론에서 기술발전을 통한 생산성 향상이 해당 산업의 비교우위를 실현시키며, 이것이 수출의 증대와 산출량의 증대로 연결됨을 의미한다. 셋째, 각 산업에서의 R&D 투자가 R&D 자본스톡의 증가를 가져오며 이는 총자본의 증가를 통하여 생산의 증가를 가져오는 경로이다. 이것은 R&D 자본이 총자본스톡에 포함되어 투입물로서 부가가치에 영향을 미치는 효과를 의미한다(김정언, 정현준, 이경남, 임순옥, 강성진, 2011). 이외에도 R&D 투자를 정부직접지출로 인식하여 수요 측면에서 GDP의 증대를 가져온다는 일각의 주장도 있다(일본과학기술청, 2002). 이렇듯 연구개발과 경제성장이 여러 경로를 통해 상호영향을 주고받는 것은 에너지 R&D 투자의 경제적 효과에 관한 인과지도를 작성하는데 유효한 이정표를 제시해준다.

(2) 연구개발과 경제성장 관계에 관한 실증연구

연구개발²⁾과 경제성장 이론의 실증은 우리나라를 포함하여 전 세계적으로 수많은 연구가 축적되어 있다. 대부분의 실증적인 연구들은 국민경제 차원의 생산함수를 이용하는데, 그 이유는 연구개발투자의 직·간접적인 경제효과를 최대한 포함시키기 위해서이다. 연구개발투자와 생산함수를 연결하는 방법은 크게 두 가지가 제시되고 있다. 첫째, 생산함수를 추정하지 않고 성장회계(growth accounting) 분석을 활용하는 것인데, 성장회계방식으로 총요소생산성(total factor productivity: TFP³⁾)을 구한 다음 총요소생산성을 연구개발스톡에 회귀

2) 연구개발이 경제성장을 유인하였다는 결과를 도출하기 위해서는 기술진보를 추정해야 한다. 그러나 기술진보는 실제 측정하기가 불가능한 개념으로서 측정과 평가가 용이한 연구개발투자(R&D flow), R&D 집약도, 연구개발스톡(R&D stock) 등을 주로 사용하고 있다. 먼저, 연구개발투자는 측정이 단순하다는 장점이 있지만, 시장의 규모에 따른 변화와 기술의 누적성을 반영하기 힘들다는 단점이 크다. R&D 집약도는 GDP대비 R&D투자, 총 인구대비 연구원 수 등과 같이 시장의 규모를 반영한 변수이지만, 기술의 누적성을 반영하기는 어렵다. 연구개발스톡은 자본과 같은 스톡의 개념을 도입하여 기술의 누적성을 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 스톡 추정을 위해서는 기술의 반영시차와 진부화를 같은 불확실한 변수를 추정해야하는 단점이 있다(하정훈, 이동욱, 2009: 5).

하여 추정하는 방식이다. 이 경우 총요소생산성에 대한 연구개발투자의 탄력성(elasticity)을 추정할 수 있는데, 연구개발투자가 1% 증가할 때 총요소생산성이 몇 % 증가하는지를 보여주는 지표를 측정하는 것이다. 이러한 방식으로 연구개발투자의 효율성을 측정한 국내연구로서는 하준경(2005), 황태연(2010), 신태영(2012)의 연구가 있다. 이들 연구에서 도출한 총요소생산성에 대한 연구개발투자의 탄력성 추정치는 0.133~0.199, 0.205~0.252, 0.126, 0.264이었다.

둘째, 생산함수에 연구개발 스톡을 생산요소 또는 결정요인으로 직접 포함시키는 방법으로서 연구개발투자의 산출탄력성(output elasticity)을 추정하는 것이다. 즉, 연구개발투자가 1% 증가할 때 GDP가 몇 % 증가하는지를 보여주는 것으로서 그릴리치스와 마이어스(Griliches & Maires, 1984)는 1966년부터 1977년까지 133개 미국 제조업체를 대상으로 R&D의 제조업 노동생산성에 대한 기여도를 분석하였다. 분석 결과 연구개발스톡 1%의 증가는 약 0.07%의 노동생산성 향상을 가져온다고 한다. 국내에서도 연구개발투자와 경제성장간의 관계에 대해서 많은 연구를 진행하였다. 종속변수를 중심으로 정리한 연구결과물들이 <표 5>에 자세히 정리되어 있다. 주요 연구 몇 가지를 살펴보자.

<표 5> 연구개발투자의 파급효과 분석

연구자	발표 년도	분석대상	분석기간	종속 변수	연구결과
김재원	1984	중소기업과 대기업 (제조업)	1971~1979년	TFP	분석기간동안의 TFP 증가율을 약 2.2%
송중기	1994	제조업 10개 사업별 150개 기업	1985~1990년	TFP	R&D 자본의 성장기여도는 산업별로 0.37%에서 2.16% 사이에 분포
양현태	1996	중소기업(제조업)	1976~1991년	TFP	우리나라 주조기업의 TFP 증가는 노동생산성 및 산출이 증가함에 따라 증가.(질적성장이 아닌 양적성장)
성낙일	1997	한국통신	1966~1995년	TFP	기간 중 한국통신의 생산성 증가율은 연평균 2.84%
김의제	1999	제조업11개 세부분류	1980~1996년	TFP	TFP의 연평균 증가율은 2.2%
한광호 김상호	1999	한국제조업 상장기업	1980~1994년	TFP	총 요소 생산성의 증가율은 전체 산업7.3%이었으며, 주로 기술진보와 기술적 효율성의 개선에 기인
윤충한 장화탁	2000	정보통신산업 21개 기업	1980~1999년	TFP	정보통신산업에 있어서 R&D 집약도가 1% 증가하면 TFP가 7.134% 증가

3) 총요소생산성은 솔로우 잔차(Solow residuals)라고 불린다.

(계속)

연구자	발표 년도	분석대상	분석기간	종속 변수	연구결과
김태기 주경원	2001	선진국 2개국, 개도국 47개국	1970~1992년	TFP	하이테크 수출입, 해외직접투자와 기술도입 등은 총요소생산성과 양의 상관관계
윤충한	2002	한국 정보통신기업(총 41개)들의 패널자료	1980~1999년	TFP	1년 시차 고려시 기업의 연구개발투자가 TFP에 미치는 파급효과 1.519
홍동표 외	2003	제조업/ IT산업과 non-IT산업/ 중소기업과 대기업	1991~2000년	TFP	제조업 총요소생산성 증가율 2.3%/IT산업 10.0%/ non-IT산업 0.2% 한국 IT산업 총요소생산성 성장률 10%, 미 국은 17.2%
조윤애	2004	제조업 연구개발	1979~2002년	TFP	외부연구개발자본의 산출탄력도가 높음 200인 이상의 기업규모에서 외부연구개발 자본의 산출 탄력도가 높음
감상호 임현준	2005	한국경제	1980~2003년	TFP	수입변화에 따른 TFP 변화계수(0.08), R&D 변화에 따른 TFP 변화계수(0.04)
신태영	2005	한국경제	1970~2004년	TFP	GDP 대비 연구개발 비율이 1% 증가하면 TFP 1.7% 증가
양현봉	2005	중소기업, 대기업(제조업)	1991년~2002 년	TFP	분석기간 동안의 TFP변동은 중소기업은 1.30%증가,대기업은 0.53% 외환위기 후 중소기업의 TFP 감소, 대기업 의 TFP 증가
정기호	2005	한국원자력산업	2000년 산업연관 분석표	TFP	연구개발 1단위 투자에 따라 부가가치의 총파급효과 27.2191
신태영	2004	한국경제	1981~2002년	GDP	GDP에 대한 연구개발탄력성 13.9%
하준경	2005	한국경제	1970~2000년	GDP	GDP 대비 R&D 투자비중 1%높일 경우 성 장률은 0.16%p 증가
서중패	2002	제조업 26개 산업별 4017개 기업	1995~2000년	노동 생산성	연구개발의 노동생산성 기여도는 약 23%
이원기 김봉기	2003	제조업중을 8개 업 종으로 구분한 패널 자료	1980~2001년	노동 생산성	연구개발스톡 증가율이 1%p 증가하면 제 조업 전체의 노동생산성 증가율은 0.13%p 상승,주요업종 0.22%p 상승

자료: 신태영, 이우성, 송치웅, 손수정(2007), 『연구개발투자의 경제성장 및 분배에 미치는 영향』, 과학기술부.

김인철 · 김원규 · 김학수(2003)는 우리나라의 산업별 총요소생산성과 R&D 스톡의 관계
를 분석하여, 2기 전의 연구개발 스톡 비중이 현재의 총요소생산성에 양(+)의 관계를 보이
고 있음을 밝혔으며, 과학기술정책연구원(2007)은 우리나라의 R&D 투자효율성이 0.182로

서 OECD 평균 수준이며, 연구개발투자의 경제성장에 대한 기여도는 30.6%라고 분석하였다. 신태영·이우성·송치웅·손수정(2007)은 연구개발투자가 총요소생산성에 미치는 영향과 탄력성에 대하여 OECD 22개 국가를 대상으로 분석하였다. 분석 결과, 우리나라의 투자탄력성은 0.133-0.199인데 비해, OECD 국가의 평균은 0.185-0.195이었고, 미국은 0.167-0.263, 일본은 0.278-0.293, 캐나다는 0.072-0.157, 이탈리아는 0.127-0.160로 분석되었다. 대체적으로 미국과 일본의 R&D 투자탄력성이 우리보다 높게 나타나는 반면에, 이탈리아와 캐나다 등은 R&D 탄력성이 뒤떨어지는 것으로 나타났다. 김정언·오동훈·이중하(2012)는 1980년부터 2009년까지 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)의 시계열 자료와 구조적 벡터자기회귀(structural vector auto regression) 모형을 활용하여, 연구개발투자의 경제적 파급효과를 측정하는 연구를 진행하였다. 실증분석 결과, 연구개발투자 1% 증가가 가져오는 GDP의 증가는 0.3%로 예상외로 상당히 큰 것으로 나타났는데, 그것은 연구개발투자의 승수효과가 누적적으로 나타나기 때문이다.

〈표 6〉 연구개발투자의 승수효과 추정결과

구분	시점별 누적치		
	3년 후	6년 후	10년 후
총연구개발투자	6.716	10.302	13.988
정부연구개발투자	2.407	2.626	3.225
민간연구개발투자	9.575	14.802	20.265

자료: 김정언, 오동훈, 이중하(2012), 『연구개발투자의 경제적 파급효과 분석』, p. 25.

〈표 6〉에서 보듯이, 총연구개발투자의 승수는 충격발생 3년 이후에는 6.716으로 상당히 크게 나타나고 있으며, 시간이 지남에 따라 충격이 점차 감소하고 있다. 10년 후 최종적으로 나타난 승수는 13.988로서 총연구개발투자액 1원이 증가하면, 그 증가로 인한 10년간 누적 GDP가 13.988원임을 말해준다. 이 결과에 따르면 2009년도 총연구개발투자 금액 37조 9,285억 원을 기준으로 총연구개발투자가 1% 증가(3,793억 원)하였을 경우, 10년 누적 GDP 증가효과는 4조 9,307억 원으로 추산되는 것이다. 마찬가지로, 정부연구개발투자의 승수효과는 10년 후 3.225로서 정부연구개발투자 1원 증가는 누적적으로 GDP가 3.225원이 된다는 것을 뜻한다. 그러나 민간연구개발투자는 10년 후 GDP 승수효과가 20.265로서 정부연구개발투자에 비해 매우 높음을 보여준다. 이 연구가 시사점을 갖는 이유는 시간을 고려한 동태적 국가 R&D 투자의 효과를 누적적으로 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

지금까지 검토한 연구결과들은 공통적으로 R&D 집약도나 연구개발스톡으로 전환된 연

구개발투자가 중요소생산성이나 경제성장과 유의미한 정(+)의 상관관계를 가지고 있음을 보여주고 있다. 더불어, 정부의 연구개발투자보다는 기업과 민간의 R&D 투자가 경제성장에 기여하는 정도가 높은 것을 보여주고 있다. 한편, 국가별 연구개발투자는 경제성장에 상이하게 기여하고 있었는데, 그것은 국가별 기술혁신체제, 연구개발 투자체제, 투자의 산업별 배분과 기술발전 및 주력산업의 구성 등에 따라 연구개발투자의 효과성이 다를 수 있음을 보여주는 것이다. 이는 국가의 산업 및 체제에 맞는 연구개발 투자배분의 전략과 실천의 최적화가 중요함을 시사한다(하정훈, 이동욱, 2009).

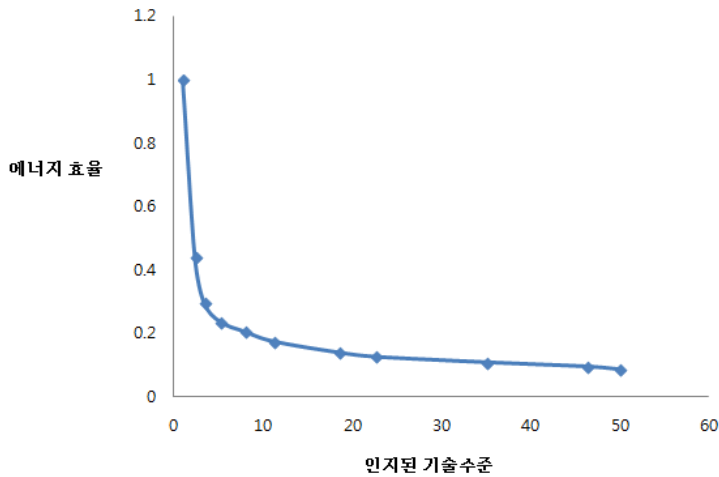
(3) 연구개발의 경제적 효과 예측 시뮬레이션 연구

앞서 살펴보았듯이 연구개발의 경제적 효과에 대한 이론적·실증적 연구는 상당히 축적되어 있으며, 국가별·산업별·시기별로 다양한 이론적 설명과 실증데이터를 제시하고 있다. 그러나 이를 토대로 향후 연구개발의 경제적 효과를 예측하거나 연구개발 투자규모 혹은 자원배분방식에 대해서 설명하는 연구는 찾기가 드물다. 그럼에도 불구하고 소수의 연구자들이 경제성장 예측에 관심을 기울이며, 정책적 지렛대(leverage)를 찾는 노력을 기울이고 있다.

모이저와 토올러(Moizer & Towler, 2007: 434)는 R&D 투자시스템은 복잡한 구조와 동태적인 특성을 갖고 있으며, 그것을 관리하는 시스템 내에 존재하는 지연(delay)과 비선형성(non-linearities) 그리고 다수의 인과적 환류(causal feedbacks)로 인해 의사결정의 결과를 예측하고 추적하는 것이 어려움에 봉착한다고 말한다. 잘 설계되고 의도된 전략적 R&D 결정이 예측한 것과는 전혀 다른 모습으로 나타나 바람직하지 않은 결과를 야기하는 것 역시, R&D 투자시스템의 특성에 기인한 것이다. 이러한 맥락에서 시스템 다이내믹스 모델링은 R&D 시스템 내부의 정책과 외부의 변화를 탐색할 수 있는 구조를 만들어줌으로써 의사결정자들에게 도움을 준다고 주장한다.

에너지 R&D와 경제성장과 관련된 시스템다이내믹스 연구는 비교적 드문데, 칹(Zheng, 2007)의 연구가 몇 가지 점에서 시사점을 주고 있다. 그에 따르면 에너지 효율에 관한 기술의 효과는 아래 [그림 3]과 같은 모습을 갖고 있다고 한다. 그림에서 X축은 투입요소로서 인지된 기술수준(perceived technology level)을 나타내며, 산출인 Y축은 그 효과를 나타내고 있다. 만일, 기술이 시작 수준에서 머물러 있다면, 에너지 효율(산출단위: 에너지 소비량)에 아무런 효과도 나타나지 않을 것이다. 이것은 산업화 초기처럼 기술개발 초기 단계에서는 사람들이 에너지 절약에 많은 중요성을 두지 않는 것을 의미한다. 시간이 지남에 따라 점차 에너지 기술의 중요성을 알게 되고, 다른 발전된 나라들로부터 기술을 수입하거나 R&D에 투자하는 등의 행동을 시작한다. 사실, 비교적 낮은 수준으로부터 관련 기술을

향상시키는 일은 어려운 일은 아니다. 그러나 시간이 지남에 따라 요구되는 기술 수준이 높아지게 되면서, 에너지 효율을 초기처럼 향상시키는 잠재력은 점점 작아진다. 왜냐하면 기술의 발전은 개발에 소요되는 막대한 비용 때문에 그 효과에 제약이 있기 때문이다. 최종적으로는 에너지를 소비하지 않고 무언가를 생산할 것을 기대할 수 없기 때문에 에너지 절감에 대한 기술개발은 에너지소비에 있어서 명백한 한계를 가질 수밖에 없을 것이다.



[그림 3] 기술개발과 에너지효율에 관한 함수

황병용(2011)은 미래 에너지 전망은 국가적 차원의 중요한 과제이며 화두임에도 불구하고, 빨라진 기술변화 주기와 불확실한 기술개발 환경 등과 같은 요소를 적극적으로 고려하기 위한 연구가 필요하다고 주장하였다. 이를 위해서 에너지 분야의 정책적 의사결정을 위한 시스템 다이내믹스 모델을 구축하였는데, 그 모델에서는 정치·경제·사회·환경·기술 등 다차원적인 관점에서 여러 변수를 선정하여 2030년의 한국의 미래 에너지 사회를 그리고 있다. 여기에는 에너지 자급률과 대체에너지 생산, 경제활동과 에너지 수요, 친환경 시스템으로의 변화와 신성장 동력 창출과 같은 이슈를 인과지도로 작성하여 실제 시뮬레이션을 시행하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 2030년까지의 총 사용 전력의 부하는 약 85,000MW가 될 것이며, 이 수요를 맞추기 위하여 녹색 에너지 기술의 시장 진입은 가속화 될 것으로 예측되었다. 더불어, 녹색 에너지 기술에 관한 학습능력이 높은 경우에는 사회적 수용성이나 정부의 지원 없이도 더 높은 비율로 시장 진입이 증가할 수 있을 것으로 전망하는 장밋빛 미래를 그리고 있다.

(4) 에너지 정책과 경제성장에 관한 연구

교역 부문과 비교역 부문으로 구성된 동태적 최적화 일반균형모델(Intertemporal Dynamics General Equilibrium, DGE)을 적용한 박기현(2011)의 연구는 정부의 에너지 정책이 경제에 전혀 영향을 미치지 않고 실행하기는 불가능하며, 에너지 절약 및 효율정책이 경제성장을 둔화시킬 수도 있는 딜레마에 빠질 수 있음을 강조하고 있다. 예를 들어, 에너지가격이 3% 오를 경우 교역부문의 자본스톡을 0.41% 감소시키고 전체 자본스톡을 0.1% 감소시키는 결과를 나타냈다. 이는 에너지가격 상승이 경제 내 자본스톡을 감소시키고 국제채권의 보유를 늘리는 포트폴리오의 변화를 유도하기 때문이라고 분석하였다. 한편, 에너지 가격상승 폭이 크면 클수록 에너지 집약도의 하락이 커지게 되는데, 이는 에너지가격이 오르면 기업이 생산에 있어서 에너지 사용량을 줄이기 때문이다. 즉, 에너지가격의 상승은 비교역재의 상대가격을 변화시킴으로써 교역부문과 비교역부문의 생산량에 변화를 가져온다. 더불어, 에너지가격의 상승은 에너지사용량을 줄이게 만드는 대체효과를 가져오고, 에너지 집약도를 감소시키는 결과를 초래한다.

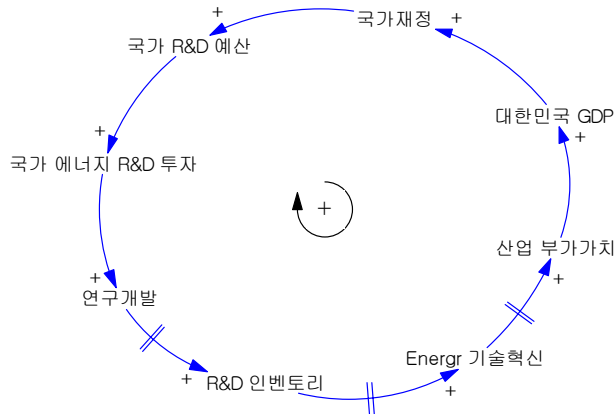
이처럼 에너지가격은 산업구조에 영향을 직간접적으로 미치는데, 에너지가격이 인상되면 직접적으로 수요가 감소하며, 생산비 상승으로 인해 단기적으로는 GDP의 감소를 가져온다. 그러나 장기적으로는 절약노력 및 절약투자 확대 등의 이용효율 향상으로 에너지가격이 떨어질 수 있을 것으로 내다보고 있다. 즉, 에너지가격의 상승이 부가가치의 상승 및 GDP 상승을 유도할 수 있고, 산업구조를 저에너지형으로 전환시켜 청정연료로의 소비대체를 촉진시킬 수도 있는 것이다. 이처럼 에너지 정책과 가격과 그리고 에너지소비는 중장기적으로 산업구조의 변화를 야기하는 요인임이 분명하다.

III. 정부 에너지 R&D에 관한 인과지도 작성 및 분석

1. 국가 R&D 투자와 기술혁신 그리고 경제성장의 구조

R&D 투자와 경제성장에 관한 수많은 연구결과들은 R&D 투자가 국가의 경제성장에 긍정적인 역할을 수행한다고 주장하는데 결코 주저하지 않는다. 비록, 국가별·산업별로 R&D가 미치는 효과의 차이는 있을 수 있지만, 전체적인 방향에서 R&D는 국가 경제발전에 필요한 요소임은 분명하다. 다만, 몇몇 연구에서 정부 R&D의 효과성이 민간 R&D보다 낮다고 평가하고 있는데, 그것은 정부 R&D 투자의 영역이 민간 부문이 투자하기 어려운 기초

연구·원천연구에 치중하기 때문이라는 것이 정확한 판단이다.



[그림 4] 국가재정과 에너지 R&D투자 그리고 Energy 기술혁신

[그림 4]는 에너지 R&D 투자와 경제성장 즉, GDP 증가와의 피드백 관계를 보여주고 있는 인과지도이다. 9시 방향에 있는 국가 에너지 R&D 투자를 통해서 연구개발이 진행되는 데, 에너지 R&D 투자는 국가 R&D 예산의 범위에서 일정 부분이 할당된다. 물론, 국가 R&D 예산 역시 국가재정 내에서 투입되는 것이며, 국가재정은 우리나라에서 생산한 부가가치에서 일정 부분이 떨어져 나오는 것으로 구성된다. 이러한 거시경제체제에서 R&D 투자는 기술혁신을 통해서 산업의 효율성을 높이고, 혁신적인 제품의 시장출시와 국제경쟁력의 확보를 통해 더 많은 부가가치를 창출해낸다(하준경, 2005; 황태연, 2010; 신태영, 2012). 에너지 부분의 R&D 역시 상당기간의 연구개발을 통해서 기술혁신을 이뤄내고 산업의 부가가치를 창출할 뿐만 아니라, 새로운 에너지 원천을 개발하고, 에너지효율을 높이며, 전 지구적인 과제인 CO2 감축을 위한 혁신을 만들어낸다(박기현, 2011).

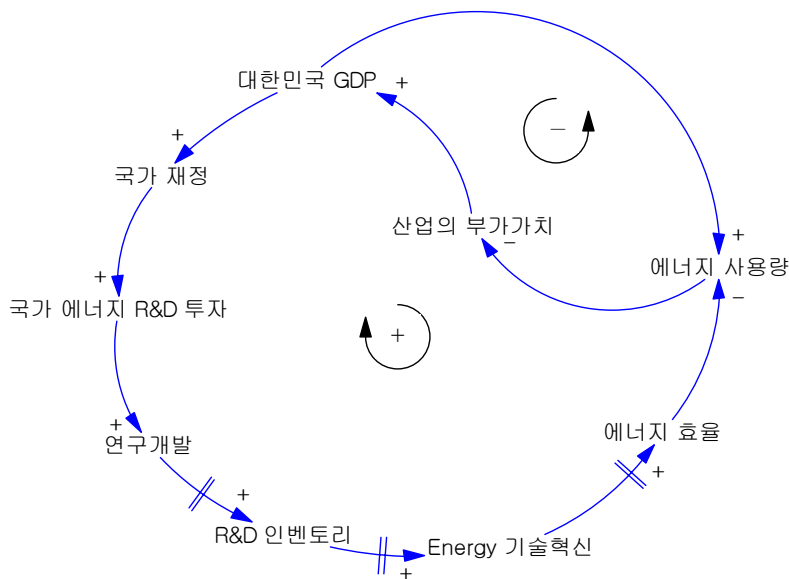
이러한 피드백 구조에서 여러 저장(stock) 변수들이 존재하지만, 한 가지 중요하게 고려해야 할 점은 연구개발에서 R&D 인벤토리(energy R&D inventory)라는 개념이 들어가 있다는 것이다. R&D 인벤토리는 대표적인 저장변수인데, 왜냐하면 특정 시점의 연구개발이 자금으로 투자(flow)된다고 해서, 기술혁신으로 바로 이어지지 않는 속성을 갖기 때문이다. 즉, 기존에 진행되었던 연구개발 과제들과 기술들이 종합적으로 결합하여 새로운 기술개발을 창출하는 시너지를 내고, 이러한 기반 하에 혁신이 이루어지는 것이 올바른 판단이다. 이 개념을 통해 R&D 투자가 투입-반응(또는 산출)의 단순과정을 벗어나, 동태적인 변화와 추이를 살펴봐야 한다는 것이 에너지 R&D 인벤토리가 말해주고 있으며, 실제 R&D 투자

의 중장기적인 효과를 예측하기 위해서 반드시 고려되어야 하는 변수이다.

2. R&D 기술혁신과 에너지 효율증가 그리고 경제성장의 구조

정부가 에너지 R&D를 추진하는 이유는 산업의 물적 기반이 되는 에너지 사용기술의 효율을 높이기 위해서이다. 에너지 효율을 높이면 에너지사용이 줄어들게 되고, 같은 제품을 생산하는데 필요한 에너지 비용을 절약할 수 있다. 물론, 에너지가격을 결정하는 주요한 변인들은 국제유가와 환율, 정부의 에너지 정책과 세금과 같은 요인에 의해서 좌우될 것이다. 하지만 이러한 요인들이 일정하다고 가정하면(Ceteris Paribus), 에너지효율의 증가는 분명 에너지사용량의 감소를 가져올 것이다.

줄어든 에너지비용은 산업의 부가가치를 늘릴 것이고, GDP 역시 늘어날 것으로 예상할 수 있다. 다만, GDP의 증가는 에너지 사용량의 증가를 가져올 것인데, 이는 국가경제의 크기가 커질수록 전반적으로 에너지 사용량이 늘어나기 때문이다. 다만, GDP의 증가비율과 에너지사용량의 증가비율은 비례 혹은 지수적으로 커질 것이라고 생각할 수는 없다. 그것은 일반적으로 소득의 증가비율보다 에너지사용 증가비율이 낮기 때문이다. 소득이 증가하여 1인당 GDP가 커질수록 에너지증가율은 점진적으로 하락하여 일정 지점에서 수렴할 가능성이 높을 것이다. 물론, 이에 대한 반론으로 소득이 증가할수록 사치성 제품(예를 들어

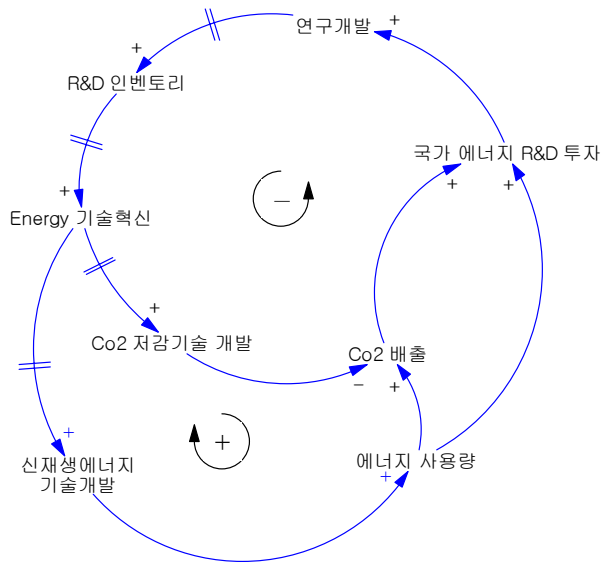


[그림 5] 에너지 R&D투자와 에너지사용

자동차와 가전제품)의 구입이 많아져 에너지사용이 늘어날 것이라는 주장도 있다. 그럼에도 불구하고, 평균적으로 가격이 비싼 제품의 에너지효율이 높은 경우가 많아지는 추세는 이러한 주장에 대한 적극적인 반론이 될 가능성이 높다. 그 결과, 인과지도에서 에너지사용량과 GDP의 피드백 관계는 균형루프(balancing loop)가 될 것이다.

3. R&D 기술혁신과 신재생에너지 개발, 온실가스의 배출량과의 구조

에너지 R&D 투자의 목표는 GDP향상과 산업경쟁력 강화를 위한 에너지효율을 높이는 것 이외에도, 신재생에너지의 개발과 더불어, CO2와 같은 온실가스를 저감하는 기술을 개발하는 것도 포함된다. 신재생에너지를 개발하는 것은 화석연료의 고갈에 대처하는 것과 동시에 새로운 에너지원에 대한 탐구와 친환경적인 에너지체제로의 전환을 추진하고자 시도하는 것이다. 제2차 에너지기술개발계획(2011-2020년)에 따르면 국가 에너지 R&D를 통해 방출되는 온실가스를 BAU 대비 15% 감축하는 것을 목표로 하고 있다. BAU 상의 2020년 온실가스 방출량이 8억 1,300만 TCO2이므로, 2020년 실제 방출 목표량은 6억 9,105만 TCO2가 될 것이다. 에너지 사용량과 정(+)의 관계를 가지고 있는 온실가스 방출량이 이 정도 규모로 줄어들기 위해서는 혁신적인 CO2 감축기술이 필요하며, 혁신적인 신재생에너지 기술의 개발과 적용을 통해 탄소중심의 에너지 시스템을 전환해야 한다. 또한,



[그림 6] 에너지 R&D 인벤토리와 Co2배출

에너지 효율을 높임으로써 에너지 사용총량을 줄여야만 한다. 이러한 맥락에서 국가 에너지 R&D 투자는 정부 재원의 규모 그 자체에 의해서도 좌우되지만, 에너지 사용량과 온실가스 배출량에 의해서도 좌우된다고 할 수 있다.

4. 에너지 R&D 투자와 기술혁신 그리고 경제성장의 피드백 구조

앞서 세 개의 주요한 피드백 루프를 결합시키고 보조변수(auxiliary variables)를 포함시키면, 전체적인 인과지도를 그려볼 수 있다. 아래의 인과지도에서 알 수 있듯이, 정부의 에너지 R&D 투자가 시행되면 연구개발 스톡인 R&D 인벤토리에 그 결과들이 쌓이게 된다. 물론, R&D 인벤토리는 연구프로젝트가 성공하면서 축적되는 시스템이며, 시간이 흐르면서 감가상각 즉, 진부화되어 사용하지 못하는 것들 역시 생겨나 인벤토리에서 제거된다. 이처럼, R&D 투자의 효율성은 R&D의 성공과 시간의 함수라고 할 수 있는 바, 시장에서 실제로 활용될 수 있는 기술이라는 관점에서 실제 에너지 R&D의 성공률은 비교적 낮을 수 있고, R&D의 진부화율은 상당히 높아 연간 30%에 달하고 있다고 평가되기도 한다(서중해, 2005).

〈표 8〉 국내 산업의 R&D 진부화율

식품, 섬유, 목재	화학	제약	금속, 철강	기계	자동차	전기, 전자	서비스	전체
0.2495	0.4302	0.4478	0.1160	0.3135	0.3115	0.2674	0.4949	0.3289 (0.3051)

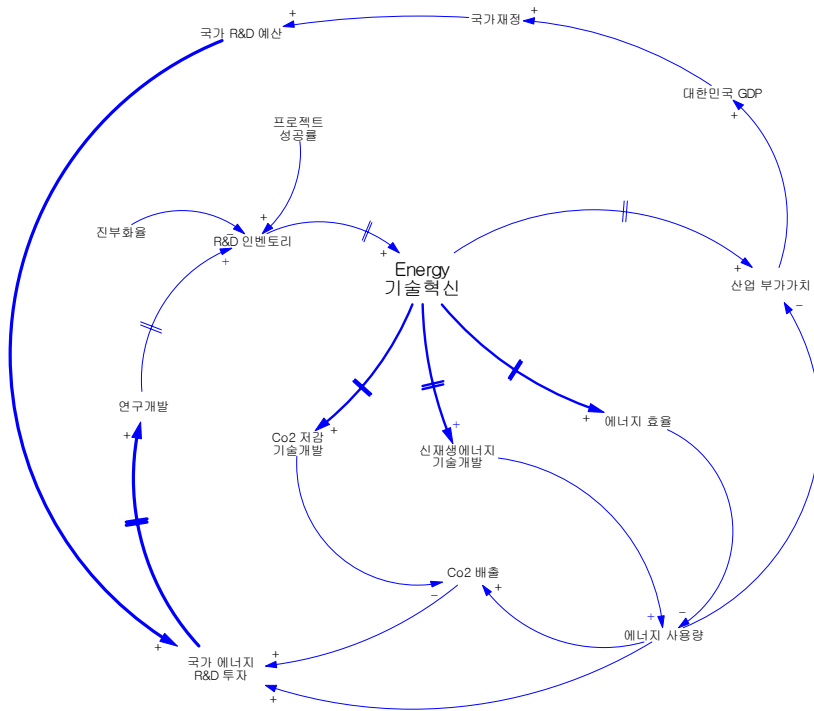
주: ()안은 서비스를 제외한 제조업만을 대상으로 한 경우임

서중해(2005), '우리나라 민간기업 연구개발투자의 특성 및 경제적 효과', 한국개발연구 제27권 제1호.

이처럼 에너지 R&D의 기술개발이 성공하기도 쉽지 않고, 그 진부화도 빠를 경우 자본이라는 관점에서의 R&D 인벤토리는 예상 밖으로 적을 수 있다. 이러한 문제가 심각할 경우 비록 공공적 속성이 강한 에너지 R&D 투자라 할지라도 대외적인 지지를 얻지 못할 수 있다.

한편, 연구개발 프로젝트를 진행하면 특허와 논문과 지적재산에 해당하는 결과물이 나오게 되고 시제품이 개발되며, 연구원들의 일자리가 생긴다. 장기적이고 동태적인 유입과 유출의 과정을 거쳐 연구개발은 에너지 기술혁신을 창출하고, 이를 통해 산업의 발전과 에너지 효율 증대 및 신재생에너지 개발, 그리고 CO2 저감기술 개발 등을 이룬다. 또한 효율적이고 환경 친화적인 에너지 R&D는 관련 산업을 발전시켜 국부를 창출하고, 기업체의 수를 증가시키면서 일자리를 늘리게 된다. 늘어난 GDP는 국가재정을 건실하게 함으로써 보

다 산업 촉진적이며 환경 친화적인 R&D를 도모하게 한다. 에너지 R&D와 경제체제의 선순환 구조는 이러한 동태적이고 복합적인 관계 속에서 우리가 설정한 국가적 과제와 목표를 달성하게끔 만드는 주요한 도구(drivers)임이 분명하다.



[그림 8] 에너지 R&D 투자와 효과분석을 위한 전체 인과지도

IV. 결론 및 향후 연구방향

필요하고, 잘 알려져 있다고 생각되지만 실제로는 잘 다루어지지 않는 현상들이 있다. 대표적인 것이 본 연구에서 다루고 있는 에너지 R&D 투자와 경제성장의 동태적 관계이다. 경제학자들이 수행한 이론적, 실증적 연구들이 상당하지만, 변수들간의 상호관계를 포괄적으로 접근한 연구들은 드물다. 더 나아가 정책적인 변수들을 고려하고, 각 변수들의 시간적 특성들을 감안한 모델을 제시한 연구들은 더욱 적다. 이러한 필요성을 메우고, 향후 시행할 에너지 R&D 투자의 경제성장과의 정량적 연구를 뒷받침하기 위해 본 연구는 시행되었다.

연구의 결과, 에너지 R&D의 투자는 경제성장과 이론적·실증적으로 유의미한 관계를

나타내고 있었다. 먼저, 에너지 R&D 투자는 저장변수로서 R&D 인벤토리라는 개념으로 설정되었는데, 이 변수는 자본적 속성을 지닌 것으로서 R&D의 성공과 진부화를 수반하고 있다. 그 결과 모든 R&D가 그러하듯이, 에너지 분야의 R&D 투자 역시, 동태적인 특성을 지니게 된다. 또한 에너지 R&D 투자는 경제성장의 선순환 관계를 내재하고 있는데, 그것은 생산성의 향상을 통해 상품의 부가가치를 높이고 에너지의 효율을 높임으로써 GDP를 향상시키는 구조를 갖고 있다. 더불어, 에너지 R&D 투자는 CO₂와 같은 온실가스의 절감을 이뤄내기도 한다. CO₂의 감축이 우리나라에서 경제적으로 GDP에 영향을 미치고 있는지는 현재로서 규정하기는 어렵지만 유럽 등 선진국의 기준에 입각할 때 분명 긍정적인 효과를 나타낸다고 할 수 있다.

에너지 R&D 투자와 경제성장 그리고 온실가스 저감이라는 거시적 관계는 이론적으로 상정하기는 비교적 어렵지 않다. 본 연구에서는 빈약하나마, 포괄적으로 에너지 R&D 투자와 국가경제의 발전의 관계를 구축해 보았다. 그러나, 필요한 것은 이러한 관계를 정책적 판단에 어떠한 도움을 줄 수 있을 것인지를 명확히 하는 것이다. 실제, 어떠한 정책적 방향을 가지고, 어느 정도로, 어떤 시점에 적용할지에 대한 구체적인 해답을 토대로 R&D 투자를 해야 한다. 본 연구는 이를 위한 밑그림을 그리는 작업을 한 것이다. 이러한 기초하에 향후의 연구는 정량적인 시뮬레이션 모형을 개발하고, 여러 정책적 시나리오를 적용함으로써 에너지 R&D와 국가경제의 관계를 동태적으로 분석해야 할 것이다.

【참고문헌】

- 과학기술정책연구원. (2007). “연구개발투자의 경제성장기여도 국제비교”. 과학기술정책연구원.
- 김도훈 · 문태훈 · 김동환. (1999). 『시스템 다이내믹스』. 대영문화사.
- 김인철 · 김원규 · 김학수. (2003). “연구개발투자의 효율성 분석”. 산업연구원 제485호.
- 김정언 · 정현준 · 이경남 · 임순옥 · 강성진. (2011), “방송통신 R&D 투자의 파급효과 분석과 정책 방향”. 방송통신위원회.
- 김정언 · 오동훈 · 이종하. (2012), “연구개발투자의 경제적 파급효과 분석”. 『재정정책논집』 제14권 제2호: 3-31.
- 박기현. (2011). 『한국의 에너지 정책과 경제성』. 에너지경제연구원.
- 신태영. (2004). 『연구개발투자의 경제성장에 대한 기여도』. STEPI.
- 신태영. (2012). “생산구조와 연구개발투자 효율성의 동태적 변화”. 『Issues & Policy』 제56호, STEPI.
- 신태영 · 이우성 · 송치웅 · 손수정. (2007). “연구개발투자의 경제성장 및 분배에 미치는 영향”. 과학기술부.
- 오세홍 · 임수진 · 손소영. (2002). “국내 연구개발투자와 경제성장간의 인과관계”. 『기술혁신 연구』 제10권, 제1호: 65-82.
- 에너지경제연구원. 『에너지통계연보』. 각년도.
- 일본과학기술청, 삼화종합연구소 저, 박구선 외 역(2002), 『연구개발정책의 경제효과에 관한 정량적 평가방법 조사연구』. 한국과학기술기획평가원.
- 지식경제부. (2012). 『2011년도 에너지 총조사 보고서』. 에너지경제연구원.
- 최승일 · 김진호 · 조문재 · 황인극. (2007). “R&D 사업의 경제적 파급효과 측정: 산업측정 신뢰도 제고사업을 중심으로”. 『한국산학기술학회논문지』 제8권, 제5호: 946-951.
- 하정훈 · 이동욱. (2009). “우리나라 연구개발투자와 경제성장의 관계 분석”. KISTEP R&D FOCUS, KISTEP.
- 하준경. (2005). “연구개발의 경제성장 효과 분석”. 경제분석, 금융경제연구원, 제11권 제2호.
- 한국경제연구원, 경제인문사회연구회(2012), 『경제사회 지표변화로 본 대한민국』. 21세기북스.
- 한국에너지기술평가원(2011), 『2010년도 에너지R&D 통계자료집』.
- 지식경제부, 한국에너지기술평가원(2012), 『2011년도 에너지R&D 통계자료집』.
- 황병용(2011), 『동적모형 구축을 통한 미래 에너지사회 전망에 관한 연구』. 한국과학기술 기획평가원.

- 황석원 외. (2009). 『국가연구개발사업 R&D 효율성 분석 및 제고방안』. 과학기술정책연구원.
- 황태연. (2010). 『공공부문의 연구개발투자가 경제성장에 미치는 영향에 관한 연구』. 전북대학교 박사학위논문.
- Coyle, R. G. (1996), *System Dynamics Modelling*, Florida: Chapman & Hall/CRC.
- Ford, Andrew. (1999), *Modeling the Environment*, Washington D.C.: Island Press.
- Forrester, Jay W. (1990). *Principles of System*, MA: Pegasus Communication, Inc.
- Forrester, Jay W. (1973). *World Dynamics*, MA: Wright-Allen Press, Inc.
- Griliches, Zvi. and J. Mairesse. (1984), “Productivity and R&D at the firm level”, in Z. Griliches(ed.), *R&D, Patents and Productivity*, University of Chicago Press, PP.339~374.
- Moizer, J.D. and Towler, M.J. (2007). Research and Development Resourcing when Faced with Fundamental Market Dynamics. *International Journal of Business Performance Management*, 9(4): 434-452.
- Mansfield, Edwin. (1991), Academic Research and Industrial Innovation, *Research Policy*, 20 (1, Feb): 1-12.
- Meister, Christoph and Bart Verspagen. (2004~2005), European Productivity Gaps: Is R&D the Solution?, *MERIT-Infonomics Memorandum Series*.
- Pardue, J.H., Clark T.D. and Winch G.W. (1999), Modelling short- and long-term dynamics in the commercialization of technical advances in IT producing industries, *System Dynamics Review* , 15(1): 97-105
- Ruth, Matthias, Hannon Bruce. (1997). *Modeling Dynamics Economic System*, New York: Springer.
- Salter, Ammon J and Ben R Martin, The Economic Benefits of Publicly Funded Basic Research: A Critical Review, *Research Policy*, March 2001, 30(3), pp.509~532.
- Sterman, John D. (2004). *Business Dynamics*, Singapore: McGraw Hill.
- Verspagen, Batt(1995), R&D and Productivity: A Broad Cross-Section Cross-Country Look, *Journal of Productivity Analysis*, vol. 6, pp.117-135.
- Warren, Kim. (2002). *Competitive Strategy Dynamics*, New York: John Wiley & Sons, LTD.
- Zheng, Longbin. (2007), A System Dynamics Based Study of Policies on Reducing Energy Use and Energy Expense for Chinese Steel Industry. Degree of Master Thesis in University of Bergen.