

# 비모수적 방법을 이용한 OECD 국가별 R&D 효율성과 생산성 분석

박수동\* · 홍순기\*\*

## 〈 목 차 〉

1. 서론
2. 연구의 방법
3. 실증분석
4. 결론

**Summary** : This paper analyses the efficiency and productivity of R&D system across time (1991~2000) and 16 OECD countries using multi-output and multi-input non-parametric frontier methods such as DEA (data envelopment analysis) and Malmquist productivity indexes. Malmquist productivity indexes are decomposed into two components measures, namely technical change and efficiency change. To calculate R&D efficiency and productivity, we used R&D stock and the number of researchers as R&D input proxies and the number of adjusted SCI papers and U.S. patent applications as R&D output proxies. Empirical result shows that Switzerland, Canada, U.S., Australia's R&D efficiencies are the highest and Korea's R&D productivity growth is the highest in the sample for the period. Technical efficiency growth was a more important source of productivity growth than technological innovation.

키워드 : 효율, 생산성, 기술변화, DEA(Data Envelopment Analysis), MDI(Malmquist Productivity Index)

\* 한국과학기술기획평가원 연구기획실, 공학박사 (e-mail: triznik@kistep.re.kr)

\*\* 성균관대학교 시스템경영공학부 교수

## 1. 서론

Financial Times (2001)가 OECD 회원국을 대상으로 지식산업의 수준을 평가한 결과, 우리나라는 투자면에서는 세계 최고의 수준이지만, 지식의 산출과 활용면에서는 수준이 매우 낮은 것으로 나타났다. 이러한 현상의 원인으로 정부와 언론에서는 투자를 산출로 직결시킬 수 있는 시스템, 즉 국가혁신시스템의 비효율성 (inefficiency)을 들었다. 이러한 해석은 한 국가의 혁신시스템이 다른 국가에 비해 보다 효율적으로 또는 생산적으로 운영될 수 있다는 것을 말한다.

전통적으로 경제학자들은 생산함수를 이용하여 생산성을 분석해왔다. 생산함수란 일정기간 동안 사용한 여러 가지 생산요소의 투입량과 이를 사용하여 동 기간 동안 생산할 수 있는 최대산출량과의 관계를 나타내는 함수를 의미한다. 즉, 생산함수는 기술적으로 가능한 모든 투입과 산출의 관계를 의미하는 것이 아니라, 효율적인 투입과 산출의 관계를 의미한다. 이와 같이 생산함수는 생산시스템이 최적 상태에서 운영된다는 것을 가정하기 때문에 생산시스템의 비효율성을 무시한다. 전통적인 성장회계모형 (growth accounting model)에서는 투입의 증가분으로 설명할 수 없는 산출의 증가분을 기술변화로 간주한다. 그러나 생산시스템에 비효율성이 존재하고, 그것이 시간이 지남에 따라 변한다면, 그러한 기술변화의 추정치는 편의될 (biased) 가능성이 있다 (Grosskopf, 1993).

연구개발(research and development, 이하 R&D)은 “인간, 문화, 사회에 관한 지식의 축적을 증대하기 위해 체계적으로 행하는 창조적 활동과 그것을 활용하여 새로운 응용분야를 고안하는 활동”이다 (OECD, 1994). Freeman et al. (1997)은 R&D의 증가가 20세기 산업에 있어 가장 중요한 경제적, 사회적 변화라고 주장하면서, 어느 국가를 막론하고 R&D 정책은 그것이 자유방임주의 (laissez-faire, laissez-innovate)의 관점에서 암묵적이든 또는 국가의 목표나 전략의 관점에서 명시적이든 간에, 과학기술정책의 핵심이라고 하였다.

R&D는 투입 (input), 과정 (process), 산출 (output)로 구성된 하나의 시스템으로 간주할 수 있다 (Brown et al., 1998). R&D의 투입요소로는 인력, 아이디어, 장비, 정보, 자금 등이 있으며, 산출요소로는 특허, 논문, 신제품, 신공정, 출판물, 원리 등 매우 다양하다.<sup>1)</sup> 따라서 R&D 시스템의 효율성 또는 생산성을 측정하는 것은 매우 복잡한 일이다.

---

1) R&D 시스템의 투입과 산출에 대한 자세한 사항은 Freeman et al. (1997)의 *The Economics of Industrial Innovation*의 pp. 7-8을 참조하길 바란다.

본 논문의 목적은 R&D의 산출요소 중에서 과학기술부문을 대표하는 논문과 특허자료를 사용하여 국가별 R&D 효율성과 생산성을 분석하는 것이다. 기존의 생산함수를 이용한 모수적 (parametric) 방법과는 달리, 본 논문에서는 생산시스템의 비효율성을 고려한 비모수적 (non-parametric) 방법을 이용하여 국가별 R&D 효율성과 생산성을 분석하고, 생산성의 변화요인을 효율변화와 기술변화로 분리하여 분석하고자 한다. 분석에 사용할 투입자료는 R&D 스톡과 R&D 인력수이고, 산출자료는 과학기술부문을 대표하는 수정된 SCI 논문수와 미국특허출원수이다. 특히, SCI 논문의 경우 그것의 질적 요인을 반영하기 위하여 피인용도를 이용하여 재구성한 자료를 이용할 것이다. 제2절에서는 효율성과 생산성의 개념을 알아본 후, 분석에 사용할 DEA (data envelopment analysis, 이하 DEA) 모형과 Malmquist 생산성지수에 대해서 알아본다. 제3절에서는 분석에 필요한 기본가정과 자료, 방법을 소개한 후, 분석결과를 제시하고, 제4절에서는 결론과 연구의 한계를 제시한다.

## 2. 연구의 방법

### 2.1 개념정립

#### 가. 효율성

생산단위조직 (production unit)의 성과 (performance)를 논할 때, 그것이 효율적인지 또는 생산적인지를 검토하는 것은 일상적인 일이다. 생산단위조직의 효율성 (efficiency)이란 그것의 최적 산출에 대한 실제 산출의 비율을 의미한다. 이러한 비율은 주어진 투입으로 달성할 수 있는 최대잠재산출 (maximum potential output)에 대한 실제 산출의 비율 또는 주어진 산출을 생산하는데 필요한 실제 투입에 대한 최소잠재투입 (minimum potential input)의 비율로 측정된다 (Lovell, 1993).

오늘날의 효율성 개념은 Debreu (1951)과 Koopmans (1951)가 복수의 투입요소를 갖는 기업의 효율성에 대한 간단한 측정치를 정의하기 위해서 수행한 연구를 바탕으로, Farrell (1957)이 수행한 기술효율성 (technical efficiency)에 관한 연구에 기인한다 (Coelli, 1996). Debreu (1951)와 Farrell (1957)은 주어진 산출 수준을 유지할 수 있는 가능한 범위 내에서 모든 투입의 최대비례감소 (maximum equiproportionate reduction)를 1에서 뺀 값을 기술 효율성으로 정의하였다. 그 값이 1이면 투입의 감소가 불가능하기 때문에 기술적으로 효율적이라는 것을 의미하고, 그 값이 1보다 작으면 기술적으로 비효율적이라는 것을 의미한다.

Debreu-Farrell의 효율성 개념은 또한 산출의 최대비례증가의 관점에서 나타낼 수 있다.

Farrell (1957)은 기업의 효율성이란, 주어진 투입으로 산출을 최대로 할 수 있는 능력을 나타내는 기술효율성과 투입요소를 각각의 가격하에서 최적의 비율로 이용할 수 있는 능력을 나타내는 배분효율성 (allocative or price efficiency)으로 구성된다고 제안하였고, 이 두 가지 효율성을 곱한 것을 전체기술효율성 (overall technical efficiency)이라고 하였다. 그리고 기술효율성은 그것을 바라보는 관점에 따라 투입지향 (input-oriented) 효율성과 산출지향 (output-oriented) 효율성으로 정의할 수 있다고 하였다.

#### 나. 생산성

생산단위조직의 생산성이란 투입에 대한 산출의 비율로 정의된다. 생산단위가 한 가지의 산출을 생산하기 위해 한 가지의 투입을 이용할 경우에는 계산이 쉽지만, 복수의 투입을 이용할 경우에는 계산이 좀더 복잡해진다. 효율성 분석이 특정 시점의 최적 투입과 산출에 대한 실측치의 비율에 초점을 두는 반면에, 생산성 분석은 특정 구간의 투입과 산출의 관계 변화, 즉 생산성 변화에 초점을 둔다.<sup>2)</sup> 생산성은 생산기술의 차이, 생산과정의 효율성 차이, 생산이 일어나는 환경의 차이 등에 따라 다르다. 따라서 생산성 분석의 주요 관점은 그것의 변화요인이 어떤 것인지를 밝히는 것이다 (Lovell, 1993). 생산성의 변화요인으로는 크게 생산시스템의 효율변화 (efficiency change)와 기술변화 (technical change)를 들 수 있으며, 요인별로 성장의 기여도 또한 다르다. 따라서 생산성을 분석할 때는 그것의 변화요인이 생산시스템의 효율변화에 기인한 것인지, 기술변화에 기인한 것인지를 밝혀야 하고, 그에 따른 적절한 정책을 수립해야 한다.

가장 널리 이용되는 생산성 지표로는 개별요소생산성 (partial factor productivity)과 총요소생산성 (total factor productivity, 이하 TFP)을 들 수 있다. '평균생산 (average production)'이라고도 불리는 개별요소생산성은 특정 투입요소에 대한 산출의 비율로서, 가장 널리 이용되는 지표로 노동생산성 (labor productivity)을 들 수 있다. TFP을 측정하기 위한 방법에는 지수법 (index measurement), 프로그래밍법 (programming method), 계량경제학적 추정 (econometric estimation) 등이 있다 (Sudit, 1995). 본 논문에서는 지수법의 하나인 Malmquist 생산성지수를 이용하여 R&D 생산성을 분석한다.

---

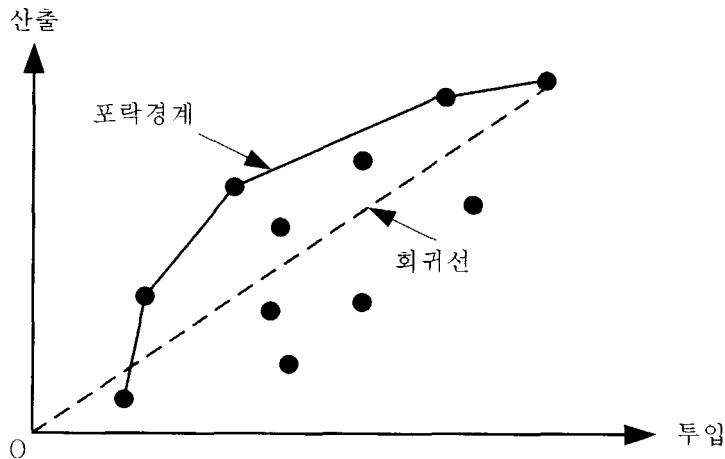
2) 이현정 (1999: 57)은 전자를 '정태적 (static) 생산성 분석,' 후자를 '동태적 (dynamic) 생산성 분석'이라고 하였다. 경제분석은 크게 정태분석과 동태분석으로 나누어지는데, 전자는 하나의 균형점의 상태를 분석하는 것이고, 후자는 하나의 균형점에서 다른 하나의 균형점으로 이동하는 과정과 경로에 대해 분석하는 것을 말한다. 통상적으로 경제분석은 균형점을 서로 비교하여 살펴보기 때문에 정태분석인 경우 비교정태분석 (comparative static analysis)이 일반적이다. 그러나 국가간의 생산성 분석은 반드시 구간의 변화에만 초점을 두지는 않는다.

## 2.2 분석모형

### 가. DEA

DEA는 투입과 산출에 대한 가격정보가 알려져 있지 않을 때, 기업이나 비영리조직과 같은 의사결정단위 (decision making unit, 이하 DMU)<sup>3)</sup>의 상대효율 (relative efficiency)을 평가하기 위해서 개발된 비모수적 방법의 하나로서, 오늘날 경영과학을 포함한 다양한 분야에서 은행, 병원, 기업 등의 효율성을 분석하는데 널리 응용되고 있다.

DEA의 목적은 모든 실측치들이 생산경계 (production frontier)나 그 아래에 놓이도록 하는 비모수적 포락경계 (envelope frontier)를 찾아, 그것으로부터 떨어진 정도를 이용하여 각 DMU의 상대효율을 평가하는 것이다. 모집단에 관한 정보를 추출하기 위해서 <그림 1>과 같이 자료를 관통하는 하나의 회귀선을 찾는 모수적 방법과는 달리, DEA는 파레토 효율적인 (Pareto-efficient)<sup>4)</sup> DMU 집합에 의해서 결정되는 포락경계를 찾기 위해 개별 실측치들을 최적화한다 (Charnes et al., 1994). 만일 자료의 수가  $n$ 개라면, DEA의 초점은 DEA 분석에 필요한  $n$ 번의 최적화에 의한 개별 실측치에 있는 반면에, 모수적 방법의 초점은 하나의 최적 회귀식에 대한 모수의 평균과 그것의 추정에 있다.



<그림 1> DEA와 모수적 방법과의 비교

3) DEA에서는 투입을 산출로 변환하는 주체를 DMU라고 부르는데, 일반적으로 기업, 병원, 은행 등과 같은 조직을 DMU라고 할 수 있다. 또한 동일한 DMU의 연도별 효율성을 분석할 경우에는 각 연도별 자료를 하나의 DMU라고 볼 수 있다. 본 논문에서는 개별 국가의 R&D 시스템과 이들의 시계열자료가 각각의 DMU에 해당된다.

4) 경제학에서 파레토 효율이란 다른 재화의 생산량을 감소시키지 않으면서 특정 재화의 생산량을 증가시키는 것을 의미한다.

모수적 방법은 회귀식이나 생산함수와 같이 독립변수와 종속변수를 관련짓는 특정한 함수 형태를 가정한다. 이러한 함수형태는 오차항의 분포에 대한 특별한 가정을 요구한다. 이와는 대조적으로, DEA에서는 특정한 함수형태를 가정하지 않고, 각각의 DMU가 포락경계나 그 안쪽에 놓일 수 있도록, 모든 다른 DMU들에 대한 각 DMU의 최대 효율을 계산한다.

$m$ 개의 투입요소  $X(x_1, \dots, x_m)$ 를 이용하여  $s$ 개의 산출  $Y(y_1, \dots, y_s)$ 를 생산하는  $n$ 개의 DMU가 있다고 가정하자. DMU<sub>o</sub>의 투입과 산출의 가중치 벡터를 각각  $v$ 와  $u$ 라고 하면, DMU<sub>o</sub>의 가상투입 (virtual input)과 가상산출 (virtual output)은 각각  $\sum_{j=1}^m v_j x_{jo}$ 와  $\sum_{i=1}^s u_i y_{io}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 DMU<sub>o</sub>의 TFP은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$TFP = \frac{\sum_{i=1}^s u_i y_{io}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{jo}} \dots\dots\dots (1)$$

투입과 산출의 가중치 벡터  $v$ 와  $u$ 는 보통 산출의 경우 수익분배율 (revenue share), 투입의 경우 비용분배율 (cost share)로 정해진다. DEA에서는 모든 DMU의 투입과 산출의 가중치를 미리 결정하여 일률적으로 부여하는 것이 아니라, 식 (2)와 같은 분수형 계획문제 (fractional programming problem)를 풀어서 각 DMU의 효율성을 최대화 하는 가중치를 찾는다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \frac{uY_o}{vX_o} \\ \text{s. t.} \quad & \frac{uY}{vX} \leq 1 \dots\dots\dots (2) \\ & u \geq 0, v \geq 0 \end{aligned}$$

식 (2)를 풀면 DMU<sub>o</sub>는 다른 DMU와 비교하여 자신의 효율을 최대화 하는 가중치 벡터  $v$ 와  $u$ 를 결정하게 되며, 이때 목적함수 값을 DMU<sub>o</sub>의 총요소효율성 (total factor efficiency, 이하 효율성)이라고 부른다. DEA의 효율성은 다른 DMU에 대한 상대효율성을 의미하므로, 모든 DMU 효율의 상한값을 정해야 한다. 식 (2)에서 첫 번째 제약조건은 모든 DMU의 효율성이 1을 초과해서는 안된다는 것을 의미한다. 따라서 모든 DMU의 효율은 0과 1사이의 값을 갖게 되고, 상대적으로 가장 효율적인 DMU의 효율은 1의 값을 갖게 된다. 그러나 식 (2)와 같은 분수형 계획문제는 목적함수가 비선형 (nonlinear)이고, 제약조건이 비볼록 (nonconvex)이므로, 무한개의 해가 존재한다.<sup>5)</sup>

---

5) 즉,  $(v^*, u^*)$ 이 해라면,  $(av^*, au^*)$  또한 해가 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 DEA는 가상투입 또는 가상산출의 합을 1로 고정하는 볼록성 (convexity) 제약조건을 포함시켜 분수형 계획문제를 선형계획문제 (linear programming problem)로 변환한다. 가상투입의 합이 1이라는 볼록성 제약조건( $\nu X_o = 1$ )을 포함시킨 모형을 투입지향모형이라고 하고, 가상산출의 합이 1이라는 볼록성 제약조건( $u Y_o = 1$ )을 포함시킨 모형을 산출지향모형이라고 한다.<sup>6)</sup>

DEA 모형은 또한 규모수익불변 (constant return to scale, 이하 CRS) 가정 하의 CCR 모형과 규모수익가변 (variable return to scale, 이하 VRS) 가정 하의 BCC 모형으로 구분할 수 있다.<sup>7)</sup> CRS 가정은 모든 DMU가 최적규모 (optimal size)에서 운영될 때에만 적합하다. 불완전 경쟁이나 재정적 제한 등으로 인하여 DMU가 최적규모에서 운영되지 못할 수도 있다 (Coelli, 1996). 모든 DMU가 최적규모에서 운영되지 않는 경우에 CRS 가정을 이용하여 구한 효율성 측정치는 규모효율 (scale efficiency, SE)의 영향을 받게 된다. Banker et al. (1984)는 이를 해결하기 위해 CCR 모형을 확장한 BCC 모형을 제안하였다. CCR 모형에서는 규모 효율을 고려하지 않았으므로 동 모형에서 구한 효율성을 전체기술효율 (overall or global technical efficiency, OTE)이라고 하는 반면, BCC 모형에서는 규모수익<sup>8)</sup>을 고려하였으므로 동 모형에서 구한 효율성을 순수기술효율 (local pure technical efficiency, PTE)이라고 한다. 규모효율성 측정치는 전체기술효율을 순수기술효율로 나눈 값이다.

일반적으로 선형계획문제는 제약조건의 수가 많아지면 해를 구하는데 소요되는 시간이 상당히 증가한다. DEA에서 DMU의 수  $n$ 은 투입요소의 수와 산출요소의 수의 합 ( $m + s$ )보다 상당히 크기 때문에, 식 (2)의 제약조건의 수 ( $n + 1$ )은 상당히 크다고 볼 수 있다.<sup>9)</sup> 이러

6) DMU의 목표는 그 조직의 특성에 따라 크게 이윤극대화와 비용최소화라는 관점으로 구분할 수 있다. 사적 이익을 추구하는 기업의 입장에서는 이윤극대화가 목표가 될 수 있고, 공적 이익을 추구하는 공공기관의 입장에서는 비용최소화가 목표가 될 수 있다. 그러므로 DMU의 목표에 따라서 효율성을 측정하는 모형을 투입지향모형과 산출지향모형으로 구분할 수 있다. 그러나 이러한 구분은 문제를 어떻게 바라보느냐에 따라 달라질 수 있고, 어떤 모형을 풀던 간에, 효율성 값은 같게 나타난다. 본 논문에서는 국가 R&D 시스템의 효율성과 생산성을 논하므로, 산출지향모형을 택하기로 한다.

7) Charnes, Cooper & Rhodes (1978)와 Banker, Charnes & Cooper (1984)가 각각 최초로 제시한 모형이므로, 그들의 이름을 따서 CCR 모형과 BCC 모형이라고 부른다.

8) 생산과정에 투입되는 모든 생산요소의 투입량을  $k$ 배로 증가시킬 때, 산출량도 이에 따라서  $k$ 배로 증가한다면 그러한 생산기술은 규모수익불변의 특성을 갖는다고 말한다. 그러나 모든 생산요소의 투입량을  $k$ 배로 증가시킨다고 해서 산출량도  $k$ 배로 증가한다는 보장은 없다. 즉, 산출량의 증가는  $k$ 배보다 더 클 수도 있고, 더 작을 수도 있다. 이러한 생산기술을 규모수익가변의 특성을 갖는다고 말한다. 만일 산출량의 증가가  $k$ 배보다 더 크게 된다면 이러한 생산기술은 규모수익체증의 특성을 갖는다고 말하고, 반대로 산출량의 증가가  $k$ 배보다 작게 나타나면 규모수익체감의 특성을 갖는다고 말한다.

9) DEA에서는 DMU의 수와 투입요소의 수, 산출요소의 수가 효율성의 변별력에 영향을 미친다. DMU의 수가 투입요소와 산출요소의 수에 비해 지나치게 적은 경우에는 모든 DMU의 효율성이 1로 나타날 가능성이 있다.

한 문제는 원문제 (primal problem)를 쌍대문제 (dual problem)로 변환하여 풀면 해결할 수 있다. 식 (3)은 식 (2)의 원문제에 가상산출의 합이 1이라는 제약조건을 포함시킨 후, 이것을 쌍대문제로 변환한 산출지향 CCR 모형을 나타낸 것이다.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Max} & \theta \\
 \theta, \lambda & \\
 \text{s.t.} & -\theta Y_o + Y\lambda \geq 0 \\
 & X_o - X\lambda \geq 0 \dots\dots\dots(3) \\
 & \lambda \geq 0
 \end{array}$$

산출지향 BCC 모형은 식 (3)에 규모수익가변을 허용하기 위해 각 DMU의 참조벡터 (reference vector)  $\lambda$ 의 크기를 1로 제한하는 볼록성 제약조건인  $\sum \lambda = 1$ 을 추가하면 된다. 특정 DMU가 IRS 구간에서 운영되고 있는지 또는 DRS 구간에서 운영되고 있는지를 판단하기 위해서는 BCC 모형의 볼록성 제약조건인  $\sum \lambda = 1$ 을 NIRS (non-increasing return to scale) 조건인  $\sum \lambda \leq 1$ 으로 바꾸어서 풀어야 한다. 특정 DMU의 NIRS 모형과 BCC 모형의 효율성 측정치가 동일하다면 해당 DMU는 DRS 구간에서 운영되는 것이고, 동일하지 않다면 IRS 구간에서 운영되는 것이다.

#### 나. Malmquist 생산성지수

Malmquist 생산성지수는 소비이론의 틀 안에서 거리함수 (distance function)의 비율로 투입지수를 계산하자고 제안한 Malmquist (1953)에 의해서 최초로 개발되었다. 그 후 이러한 거리함수의 개념은 Caves et al. (1982)에 의해 생산이론의 맥락에서 경제학적 해석을 받게 되었고, 동 지수를 Malmquist 생산성지수라고 명명하였다. 그 후 Malmquist 생산성지수의 용도는 생산성 측정 분야로 확대되었다. Arcelus et al. (1999)은 톨퀴비스트지수 (Tornqvist index)와 피셔지수 (Fisher ideal index)와 같이 널리 알려진 생산성지수에 비해 Malmquist 생산성지수가 갖는 장점을 4가지로 요약하였다. 첫째, Malmquist 생산성지수는 생산성 증가의 요인을 기술변화와 효율변화로 분해할 수 있다. 둘째, Malmquist 생산성지수는 가격자료를 요구하지 않으므로, 가격정보의 부재와 왜곡으로 인한 문제를 방지할 수 있다. 셋째, Malmquist 생산성지수는 복수의 투입과 산출을 이용할 수 있으므로, 그것들을 집계할 필요가

---

Banker et al. (1984)는 DMU의 수가 투입요소의 수와 산출요소 수의 합보다 3배 이상 커야 변별력이 있다고 주장하였고, Boussofinanc et al. (1991)은 DMU의 수가 투입요소의 수와 산출요소 수의 곱보다 2배 이상 커야 변별력이 있다고 주장하였으며, Fitzsimmons (1994)는 DMU의 수가 투입요소의 수와 산출요소 수의 합보다 2배 이상 커야 변별력이 있다고 주장하였다. 그러나 이러한 주장은 특정한 상황에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에 절대적인 기준이라고 볼 수는 없다. 일반적으로 DEA를 적용한 많은 연구들은 DMU의 수가 투입요소의 수와 산출요소 수의 합보다 2배 이상 커야 변별력이 있다는 기준을 적용하고 있다 (박만희, 2002).



없다. 넷째, Malmquist 생산성지수는 비용최소화나 이익극대화와 같은 미리 규정된 최적화 기준을 필요로 하지 않는다.

비체화된 (disembodied) Hicks (Hicks)형 중립적 기술변화 (neutral technical change)를 가정한다면,  $t$ 기의 생산함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.  $A(t)$ 는 시간의 경과와 더불어 나타나는 생산함수의 이동(shift), 즉 기술변화를 나타낸다.

$$y^t = A(t)f(x^t) \dots\dots\dots(4)$$

생산이 생산경계에서 이루어지지 않을 경우, 즉 생산시스템에 비효율성이 존재하는 경우에는 식 (4)가 성립하지 않는다. 즉, 실측치와 최대잠재산출 간에는 식 (5)과 같은 차이가 발생한다.

$$y^t < A(t)f(x^t) \dots\dots\dots(5)$$

식 (5)와 같은 차이를 설명하기 위해서는 실측치를 생산경계까지 이동시키기 위해 그것을 수정할 필요가 있다. 여기에 적절한 방법이 Shepherd (1970)의 거리함수이다.  $t$ 기의 산출거리 함수 (output distance function)  $D_o^t(x^t, y^t)$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)에서  $S^t$ 는  $t$ 기의 모든 투입-산출의 쌍으로서 생산가능집합 (production possibility set)이라고 한다.

$$D_o^t(x^t, y^t) = \text{Min} \{ \theta : (x^t, y^t/\theta) \in S^t \} \dots\dots\dots(6)$$

$$= \frac{y_t}{A(t)f(x^t)}$$

Caves et al. (1982)는  $t$ 기의 산출지향 Malmquist 생산성지수 ( $M_o^t$ )와  $t+1$ 기의 산출지향 Malmquist 생산성지수 ( $M_o^{t+1}$ )를 식 (7-1)과 식 (7-2)로 정의하였는데, 이들은 각각  $t$ 기와  $t+1$ 기의 생산기술하에서 효율변화에 기인한 생산성의 변화를 측정한다.

$$M_o^t = \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \dots\dots\dots(7-1)$$

$$M_o^{t+1} = \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \dots\dots\dots(7-2)$$

Fare et al. (1994)는 Caves et al. (1982)가 정의한  $t$ 기와  $t+1$ 기의 산출지향 Malmquist 생산성지수의 기하평균을 이용하여 식 (8)과 같이 산출지향 Malmquist 생산성지수 ( $M_o^{t,t+1}$ )를 정의하였다.

$$M_o^{t,t+1} = [M_o^t \cdot M_o^{t+1}]^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

$$= \left[ \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2}$$

Fare et al. (1992, 1994)은 식 (9)와 같이 Malmquist 생산성지수를 생산시스템의 효율변화와 시간에 따른 생산기술의 이동 (shift), 즉 기술변화로 분리하였다. 식 (9)에서 [ ]밖의 비율은 효율변화를 의미하고, [ ]안의 2가지 비율의 기하평균은 기술변화를 의미한다.

$$M_o^{t,t+1} = \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \left[ \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \frac{D_o^t(x^t, y^t)}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

Malmquist 생산성지수가 분리된다는 것의 중요성은 효율변화가 추격잠재력 (catch-up potential)을 반영하고, 기술변화가 혁신잠재력 (innovation potential)을 반영한다는 사실에 있다 (Fare et al., 1994). 시간이 지남에 따라 기술이 발전하게 되면 Malmquist 생산성지수는 1보다 큰 값을 갖고, 기술이 퇴보하게 되면 1보다 작은 값을 갖는다. 효율변화와 기술변화 또한 동일하게 해석할 수 있다. 생산성이 증가했다고 하더라도 효율감소나 기술퇴보 (technical regress)가 발생할 수 있다. 마찬가지로 생산성이 감소했다고 하더라도 기술진보 (technical progress)나 효율증가가 발생할 수 있다 (Grosskopf, 1993).

Malmquist 생산성지수를 계산하기 위해서는 식(9)에 포함된 4개의 거리함수를 계산해야 한다. Caves et al. (1982)은 시스템에 비효율성이 존재하지 않고, 규모수익불변과 기업의 최적행태 (optimal behavior)를 가정한다면, Malmquist 생산성지수는 톤퀴비스트 (Tornqvist) 산출지수와 투입지수의 비율로 근사된다고 하였다. 이러한 지수는 표준 피셔 (Fisher) 지수공식을 이용하여 계산할 수 있다 (Diewart, 1992). 비효율성이 없다고 가정하는 것은 톤퀴비스트 지수를 기술변화와 효율변화로 분해할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 시스템에 비효율성이 존재하고, 그것이 시간이 지남에 따라 변한다면, 그러한 지수는 편의될 것이다 (Grosskopf, 1993). Fare et al.(1994)은 생산시스템에 존재하는 비효율성을 고려하기 위해서 DEA를 이용하여 거리함수를 계산하였다. 본 논문에서는 Fare et al. (1994)의 연구와 마찬가지로, R&D 시스템의 비효율성을 고려하기 위해 비모수적 방법인 DEA를 이용하여 Malmquist 생산성지수의 거리함수를 계산한다. DEA의 산출지향 기술효율성 측정치  $\theta$  는 실 측정치가 생산가능집합  $S^t$ 로부터 떨어진 정도를 의미하는데, 이것은 투입  $x$ 가 산출  $y$ 에 대한 등량곡선상에 위치할 수 있도록 하는 승수 (multiplier)로서,  $Max \{ \theta : (x^t, \theta y^t) \in S^t \}$ 와 같이 표현할 수 있다. DEA의 산출지향 기술효율성 측정치  $\theta$  는 산출거리함수의 역수와 동일함을 알 수 있다. 따라서 식 (9)에 포함된 4개의 산출거리함수는 식 (3)과 같은 CRS 가정 하의 4개의 산출지향 CCR 모형을 이용하여 계산할 수 있다.

## 2.3 선행연구의 검토와 본 논문의 차별성

지금까지 DEA와 Malmquist 생산성지수를 이용하여 효율성과 생산성을 분석한 연구는 많  
이 있다. 그 중에서 최근의 연구를 몇 가지 살펴보자. Lien et al. (2001)은 DEA를 이용하여  
OECD 24개국을 대상으로 통신부문의 효율성을 분석하였다. 산출자료로 총수입, 투입자료로  
회선수, 고용인원, 투자를 이용하여 1980~1995년까지의 효율성을 분석한 결과, 경쟁을 허락  
한 국가들이 평균적으로 보다 효율적이라는 발견하였다. 그들은 통신분야의 경쟁이 생산효율  
성의 증대와 관련이 있다는 결론을 내렸다. 고민수 등 (2001)은 DEA를 이용하여 1998년도  
OECD 26개국의 R&D 활동 관련 자료를 대상으로 R&D 효율성을 측정하였는데, 투입자료로  
GDP 대비 R&D 지출액과 총인구 대비 연구인력 비율을 이용하였고, 산출자료로 SCI 논문수  
와 미국특허등록수를 이용하였다. 그들은 R&D 시차를 반영하기 위해 투입과 산출간의 시차  
를 5년으로 가정하고, 투입의 경우 1993년 자료, 산출의 경우 1998년 자료를 이용하였다.

Fare et al. (1994)은 Malmquist 생산성지수를 이용하여 1979~1988년의 기간 동안  
OECD 17개국의 생산성 변화요인을 효율변화와 기술변화로 분리하였다. 그들은 투입자료로  
자본스톡과 고용인력을 이용하였고, 산출자료로 GDP를 이용하였다. 분석 결과 미국의 생산  
성 증가는 대부분이 기술변화에 기인한 것이었고, 일본의 생산성 증가의 절반은 효율변화에  
기인한 것이었다. 김진한 등 (2001)은 Malmquist 생산성지수를 이용하여 전세계 53개의 주요  
철강업체들을 대상으로 1986~1998년 동안의 기술변화를 분석하였다. 그들은 투입자료로 인  
건비, 자본비, 재료 및 기타비용을 사용하였고, 산출자료로 매출, 생산량, 선적량을 사용하였  
다. 분석 결과 한국, 일본, 프랑스의 기업들은 기술이 진보한 것으로 나타난 반면, 대만, 미국,  
독일 캐나다는 기술이 퇴보한 것으로 나타났다.

본 논문의 목적은 비모수적 방법인 DEA와 Malmquist 생산성지수를 이용하여 OECD 16  
개국을 대상으로 R&D 효율성과 생산성을 분석하는 것이다. 대부분의 연구에서 산출자료로  
GDP를 이용한 것과 달리, 본 논문에서는 R&D의 1차 성과라고 할 수 있는 과학기술부문의  
논문과 특허를 이용한다. 고민수 등 (2001)의 연구에서 이러한 시도를 하였으나, 투입자료로  
R&D 스톡이 아닌 R&D 지출자료를 이용하였고, SCI 논문수와 피인용횟수를 별도의 변수로  
취급하여 분석하였다. 이와는 달리 본 논문에서는 국가별 R&D 지출과 기술도입액을 이용하  
여 구한 R&D 스톡<sup>10)</sup>을 이용하였고, 평균 피인용횟수를 고려한 수정된 SCI 논문수를 이용하  
였다.

---

10) 국가의 기술개발 능력 및 잠재력을 나타내는 것은 당해연도의 R&D 지출의 흐름 (flow)이 아니라 국가가 보유  
하고 있는 지식과 경험의 스톡 (stock)이다 (홍순기 등, 1991). 따라서 투입자료로 당해연도의 R&D 지출이  
아닌 R&D 스톡을 이용하는 것이 바람직하다.

일반적으로 DEA를 이용한 효율성 분석은 횡단 (cross-section) 분석이 대부분이다. 즉, 각 DMU의 특정 시점의 통계자료를 이용하여 효율을 분석한다. 그러나 식 (9)에서 보는 바와 같이 Fare et al. (1992, 1994)이 정의한 효율변화지수는  $t$ 기에서 바라본  $t$ 기의 거리함수  $D'_0(x', y')$ 와  $t+1$ 기에서 바라본  $t+1$ 기의 거리함수  $D'^{+1}(x'^{+1}, y'^{+1})$ 의 비율이다. 그러나 패널자료를 이용할 경우 이러한 효율변화지수는 해석상의 문제가 발생한다. 즉  $t$ 기의 횡단자료를 이용하여 구한 효율과  $t+1$ 기의 횡단자료를 이용하여 구한 효율을 비교하는 것 자체가 의미가 없다. DEA에서 구한 효율은 상대효율을 의미하므로, DMU가 동일할 지라도 비교시점에 따라 생산경계가 바뀌게 되어, 결국 서로 다른 집단의 상대효율을 비교하는 것은 의미가 없다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 16개국 10년간의 자료를 통합한 (pooling) 총 160개의 DMU를 이용하여, 가장 효율적인 DMU로 구성된 글로벌경계 (global frontier)를 도출하여 이것으로부터 각 DMU의 상대효율을 구한다. 이것은 특정 국가의 10년간의 자료를 횡단분석에서처럼 별도의 자료로 간주하는 것과 동일하다. 이렇게 하면 하나의 글로벌경계로부터 떨어진 정도를 이용하여 각 DMU의 상대효율 뿐만 아니라 특정 DMU의 시간에 따른 효율변화를 비교할 수 있다. 기술변화지수의 경우 기존의 방법을 그대로 이용한다.

### 3. 실증분석

#### 3.1 자료, 방법, 가정

본 논문에서는 과학기술부문의 국가별 R&D 효율성과 생산성을 분석하기 위해 비모수적 방법인 DEA와 Malmquist 생산성지수를 이용한다. 분석에 이용한 투입자료는 R&D 스톡과 R&D 인력수이고, 산출자료는 수정된 SCI 논문수와 미국특허출원수이다. OECD 회원국을 대상으로 1991년부터 2001년까지 투입과 산출의 시계열자료 확보가 가능한 16개국을 대상으로 분석하였다. R&D 효율성의 경우 DEA를 이용하여 전체기술효율과 순수기술효율, 규모효율을 분석하였고, 각국의 연도별 규모수익과 최적생산규모 (most productive scale size)를 분석하였다. R&D 생산성의 경우 각국의 기간별 Malmquist 생산성지수와 효율변화지수, 기술변화지수를 분석하였다.

분석에서 가장 중요한 부분은 R&D 스톡을 측정하는 것이다.<sup>11)</sup> R&D 스톡을 측정하는 방법 중에서 가장 널리 알려진 방법은 Griliches (1979)와 같이 R&D 지출의 흐름(flow) 자료를

11) R&D 스톡을 측정하는 모형은 정태운 등 (1991)과 홍순기 등 (1991)을 참조하여 재구성하였다.

이용하여, 이들의 누적합 형태로 나타내는 방법이다. 구체적으로 Griliches (1979)는 R&D 스톡 추정치  $K$ 를 식 (10)과 같이 표현하였다.

$$K_t = G[\mathbb{W}(B)R_t, v] \dots \dots \dots (10)$$

여기서  $\mathbb{W}(B)R_t$ 는 현재와 과거에 대한 R&D 지출의 수준을 나타내는 지표이며,  $\mathbb{W}(B)$ 는 R&D 스톡  $K$ 에 대한 과거와 현재의 R&D 지출의 상대적인 기여도를 나타내고,  $B$ 는 시차를 반영해주는 연산자이다. 그리고  $v$ 는 R&D 스톡의 축적에 영향을 미치는 기타요인이며,  $\mathbb{W}(B)$ 는 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbb{W}(B)R_t &= (W_0 + W_1B + W_2B^2 + \dots)R_t \\ &= W_0R_t + W_1R_{t-1} + W_2R_{t-2} + \dots = \sum W_i R_{t-i} \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

R&D 스톡은 자체 R&D 지출에 의해서 형성된 것과 기술도입에 의해서 형성된 것으로 구분할 수 있다. 따라서 각각의 스톡을 구한 후, 이를 합하여 전체 R&D 스톡을 구해야 한다. R&D 스톡을 구하기 위해서는 R&D 시차 (time lag), 진부화율 (obsolescence rate), 디플레이터 (deflator)를 고려해야 한다. 본 논문에서는 식 (12)를 이용하여 R&D 스톡을 측정한다. R&D 흐름은 당해 년도의 R&D 투자액이 아니라 과거에 지출된 R&D 투자액 중에서 여러 형태의 R&D 시차를 경과하여 당해 연도에 성과로 나타나는 부분이다. 그러나 현실적으로 R&D의 시차분포를 정확히 알 수 없으므로, 실제의 측정에서는 R&D의 평균시차( $\mu$ )를 사용한다. 즉,  $RD_t = RDE_{t-\mu}$ 이 된다. 마찬가지로 기술도입의 경우, 그것의 평균시차( $v$ )를 사용하면,  $RD_t = RDF_{t-v}$ 가 된다.

$$RDS_t = (1 - \delta)RDS_{t-1} + RD_t \dots \dots \dots (12)$$

여기서,  $RD_t = \sum_{i=1}^n \mu_i RDE_{t-i} + \sum_{j=1}^m v_j RDF_{t-j}$

- |                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| $RDS_t$ : $t$ 년의 R&D 스톡        | $RD_t$ : $t$ 년의 R&D 지출(흐름)   |
| $RDE_{t-i}$ : $t-i$ 년의 R&D 투자액 | $RDF_{t-j}$ : $t-j$ 년의 기술도입액 |
| $\mu_i$ : R&D의 시차분포            | $v_j$ : 기술도입의 시차분포           |
| $\delta$ : R&D 스톡의 진부화율        | $t$ : 년도                     |

식 (12)를 이용해서 R&D 스톡을 측정하기 위해서는 기준년도 (base year, tb)의 R&D 스톡을 계산해야 한다. 기준년도의 R&D 스톡을 이미 오래 전부터 매년 새롭게 형성된 R&D 투자가 누적되어 온 결과로 정의하면, 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$RDS_{tb} = \sum_{i=0}^{\infty} RD_{tb-i} (1-\delta)^i \dots\dots\dots(13)$$

$$= RD_{tb} + (1-\delta)RD_{tb-1} + (1-\delta)^2 RD_{tb-2} + \dots$$

R&D 투자액의 연평균 증가율을  $g$ 라고 하면,  $RD_{tb-1} = \left(\frac{1}{1+g}\right)RD_{tb}$ 로 나타낼 수 있으므로, 식 (13)은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$RDS_{tb} = RD_{tb} + \left(\frac{1-\delta}{1+g}\right)RD_{tb} + \left(\frac{1-\delta}{1+g}\right)^2 RD_{tb} + \dots\dots\dots(14)$$

$$\doteq \left(\frac{1+g}{g+\delta}\right)RD_{tb} = \frac{RD_{tb+1}}{g+\delta}$$

즉, 기준년도의 R&D 흐름( $RD_{tb}$ )에  $\left(\frac{1+g}{g+\delta}\right)$ 을 곱한 것을 기준년도의 R&D 스톡( $RDS_{tb}$ )으로 볼 수 있다. 또한 기준년도의 R&D 스톡( $RDS_{tb}$ )은 기준년도 다음해의 R&D 흐름( $RD_{tb+1}$ )을  $(g+\delta)$ 로 나눈 것으로 볼 수 있다. 식 (14)을 이용하여 기준년도의 R&D 스톡을 구하여 식 (12)에 대입하면, 국가별 R&D 스톡의 시계열 자료를 구할 수 있다.

R&D 시차는 국가나 기업은 물론 기술 분야별로 다르게 나타나며, 같은 분야라고 하더라도 R&D 단계와 연구과제마다 다르게 나타난다. 또한 기술수준과 기업전략의 차이에 따라서도 다양한 영향을 받게 된다. 이와 같이 R&D 시차의 분포에 대한 정확한 정보를 구하기가 어렵기 때문에, 실제 R&D 시차를 추정할 때에는 평균시차를 많이 이용한다 (홍순기 등, 1991). 본 논문에서는 R&D 시차를 자체 R&D 지출의 경우 2년 (30%), 3년 (40%), 4년 (30%)으로 하였고, 기술도입의 경우 시차가 없는 것으로 가정하였다. 진부화율은 R&D 스톡이 감가상각되는 기간을 7년으로 가정하고, 이것의 역수 (0.143)를 진부화율로 가정하였다. R&D 디플레이터는 OECD (2001)에 있는 국가별 경상 (current) R&D 지출을 불변 (constant) R&D 지출로 나누어서 구하였고, 이것으로 경상 기술도입액을 나누어서 불변 기술도입액을 구하였다. <표 1>은 1990년을 기준년도로 하여 1991~2000년의 국가별 R&D 스톡을 측정된 결과이다. R&D 스톡의 연평균 증가율은 오스트리아와 한국이 각각 8.90%와 8.89%로 높게 나타났고, 이탈리아는 0.13%로 가장 낮게 나타났다.

R&D 인력의 경우 상근상당인력 (full time equivalent, FTE)을 기준으로 하였다. SCI 논문의 경우 그것의 질을 반영하기 위해 연도별 SCI 논문수를 2001년까지의 피인용횟수로 나눈 평균 피인용횟수를 구한 후, 그 값이 가장 높은 스위스를 기준으로 표준화한 후에, 이 값을 연도별 SCI 논문수에 곱하여 수정된 SCI 논문수를 구하였다.<sup>12)</sup> 특허의 경우 미국특허 출원건

---

12) 예를 들어, 2000년 한국의 SCI 논문수는 12,245편이고, 2001년까지의 피인용횟수는 15,567회이므로, 평균

수를 이용하였다.<sup>13)</sup> 그리고 투입과 산출간의 시차를 반영하기 위해서 특허출원의 경우 1년, 특허등록의 경우 2년, 논문의 경우 1년의 시차를 적용하였다.

<표 1> 국가별 R&D 스투크

(단위: 1995년 기준 백만 PPP 달러, %)

연도 국가	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	연평균 증가율
네덜란드	63,193	66,934	70,778	74,598	78,068	81,949	85,851	90,256	95,135	100,403	5.28
노르웨이	12,673	13,280	13,820	14,293	14,881	15,149	15,494	16,208	16,855	17,487	3.64
독 일	297,692	305,030	312,713	319,660	328,123	335,170	340,611	346,571	352,898	359,339	2.11
미 국	1,045,906	1,070,159	1,094,925	1,120,113	1,142,818	1,161,679	1,181,067	1,206,844	1,240,538	1,283,019	2.30
벨기에	44,587	44,427	44,271	44,414	44,643	45,065	45,668	47,004	48,535	49,947	1.27
스위스	35,816	36,644	37,244	37,915	38,570	39,330	39,704	40,223	41,250	41,977	1.78
스페인	32,899	35,563	37,051	37,535	38,220	38,706	39,023	39,274	39,658	40,321	2.29
영 국	158,787	160,447	161,519	162,448	163,303	168,333	173,208	177,922	182,140	186,060	1.78
오스트리아	13,414	15,149	16,691	18,232	20,163	22,282	24,038	26,108	27,630	28,905	8.90
이탈리아	109,781	111,759	113,115	114,028	114,154	114,000	113,055	111,861	111,554	111,069	0.13
일 본	535,150	537,096	543,487	551,649	558,794	563,771	568,179	573,268	580,137	588,092	1.05
캐나다	59,547	61,053	62,737	64,537	66,496	68,796	71,448	74,043	76,636	79,586	3.28
프랑스	198,515	198,504	199,426	200,906	202,796	204,734	206,167	207,471	208,526	209,362	0.59
핀란드	11,927	12,322	12,780	13,207	13,632	14,140	14,702	15,289	16,067	17,089	4.08
한 국	37,580	39,649	42,114	45,027	49,098	54,226	60,225	66,832	74,082	80,896	8.89
호 주	26,841	27,566	28,452	29,566	30,919	32,449	34,051	35,738	37,470	39,084	4.26

### 3.2 분석결과

<표 2>는 CRS 가정하의 DEA-CCR 모형과 VRS 가정하의 DEA-BCC 모형을 이용하여 국가별 R&D 효율성을 분석한 결과로서, 전체기술효율 (TE), 순수기술효율 (PTE), 규모효율

피인용횟수는 1.27회이다. 2000년 스위스의 평균 피인용횟수는 3.15회이므로, 1.27을 3.15로 나눈 0.40을 12.245에 곱하면 논문의 질을 반영한 2000년 한국의 SCI 논문수는 4,946편이 된다.

13) 특허의 경우 SCI 논문과 달리 그것의 질을 평가할 수 있는 객관적인 자료가 없기 때문에, 어느 정도 질이 국제적으로 입증되었다고 볼 수 있는 미국특허 출원건수를 그대로 이용하였다. 미국특허 등록건수를 이용하여 동일한 분석을 수행한 결과 비슷한 결과가 나왔다.

(SE)의 연평균을 나타낸 것이다. 분석결과, 네덜란드, 미국, 스위스, 영국, 캐나다, 핀란드, 호주는 연평균 R&D 효율 (TE와 PTE)이 평균 이상으로 나타난 반면에, 노르웨이, 독일, 벨기에, 스페인, 오스트리아, 이탈리아, 일본, 프랑스, 한국은 연평균 R&D 효율이 평균 이하로 나타났다. 특히, 스위스, 캐나다, 미국, 호주의 R&D 효율이 매우 높게 나타났다. 규모효율의 경우 미국, 벨기에, 스위스, 스페인, 일본, 캐나다, 핀란드, 한국, 호주는 평균보다 높게 나타났고, 네덜란드, 노르웨이, 독일, 영국, 오스트리아, 이탈리아, 프랑스는 평균보다 낮게 나타났다. 규모효율이 평균보다 높게 나타난 국가들의 R&D 비효율의 원인은 R&D 시스템의 비효율적인 운영 또는 경영에 기인했다고 볼 수 있다. 반면에 규모효율이 평균보다 낮게 나타난 국가들의 R&D 비효율의 원인은 그들의 R&D 규모가 다른 국가에 비해서 작기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 후자의 경우 R&D 규모를 늘림으로써 R&D 효율을 개선할 수 있다.

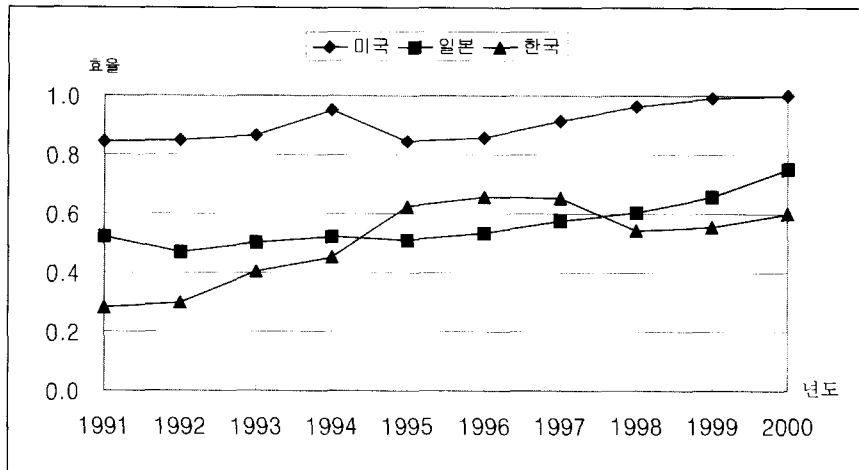
<표 2> R&D 효율성 분석결과

국가	구분	TE	PTE	SE
네덜란드		0.666	0.820	0.812
노르웨이		0.467	0.567	0.828
독 일		0.465	0.590	0.790
미 국		0.908	0.977	0.929
벨 기 에		0.445	0.460	0.969
스 위 스		0.987	0.989	0.998
스 페 인		0.630	0.640	0.983
영 국		0.770	0.970	0.794
오스트리아		0.537	0.664	0.828
이탈리아		0.451	0.618	0.734
일 본		0.565	0.567	0.996
캐 나 다		0.957	0.963	0.994
프 랑 스		0.412	0.563	0.732
핀 란 드		0.886	0.995	0.891
한 국		0.507	0.544	0.928
호 주		0.913	0.925	0.987
평 균		0.660	0.741	0.887

주: TE: 전체기술효율, PTE: 순수기술효율, SE: 규모효율, TE = PTE × SE



<그림 2>는 한국, 미국, 일본의 R&D 효율의 변화추세를 나타낸 것이다. 한국의 경우 R&D 효율이 계속해서 증가하다가 1998년에 갑자기 하락하다가 차츰 회복하는 추세에 있다. 이 시기에 한국은 외환위기사태로 기업의 R&D 활동이 위축되어, 연구성과를 미국특허로 출원하는 활동이 위축되었기 때문이다. 실제로 한국의 미국특허출원수는 1998년 5,452건에서 1999년 5,033건으로 약 7.8% 감소하였다.



<그림 2> 한국, 미국, 일본의 R&D 효율 (TE)의 추세

규모수익을 분석한 결과, 노르웨이, 스페인, 오스트리아, 일본, 핀란드, 한국, 호주는 규모수익체중의 특성을 보인 반면에, 네덜란드, 독일, 미국, 벨기에, 영국, 이탈리아, 프랑스는 규모수익체감의 특성을 보였다. 규모수익체중의 특성을 보인 국가들의 경우에는 그들의 R&D 규모를 늘임으로써 그들의 R&D 효율을 개선할 여지가 있는 반면에, 규모수익체감의 특성을 보인 국가의 경우 그들의 R&D 규모를 줄임으로써 그들의 R&D 효율을 개선할 여지가 있다. 그러나 현실적으로 R&D 효율을 개선하기 위해 R&D 규모를 줄인다는 것은 의미가 없으므로, R&D 산출의 부족율이나 투입의 초과분을 구해 적정 산출 또는 투입 규모를 목표로 선정하고, 이를 달성하도록 노력할 필요가 있다.

<표 3>은 각국의 실제 산출량과 최적산출규모의 비율, 즉 R&D 효율이 1이 되기 위해 필요한 평균 산출부족율 나타낸 것이다. R&D 효율이 높은 미국, 스위스, 영국, 캐나다, 핀란드의 평균 산출부족율은 매우 낮은 반면에 R&D 효율이 낮은 노르웨이, 독일, 벨기에, 스페인, 일본, 프랑스, 한국 등은 평균 산출부족율이 매우 높게 나타났다. 대부분의 국가에서 미국특허출원수의 평균 부족율이 SCI 논문수의 평균 부족율보다 높게 나타난 반면에, 한국과 일본은 SCI

논문수의 평균 부족율이 미국특허출원수의 평균 부족율보다 높게 나타났다. 이는 한국과 일본이 논문보다는 특허에 보다 많은 비중을 둔다는 것을 간접적으로 보여준다.

<표 3> 평균 산출부족율

(단위: %)

국가	구분	SCI 논문	미국특허출원
네덜란드		18.0	29.7
노르웨이		43.3	62.1
독 일		41.0	41.0
미 국		2.3	3.6
벨 기 에		54.0	56.6
스 위 스		1.1	5.9
스 페 인		36.1	80.6
영 국		3.0	7.4
오스트리아		33.6	35.3
이탈리아		38.2	38.7
일 본		63.1	43.3
캐 나 다		3.7	3.7
프 랑 스		43.7	43.7
핀 란 드		0.5	0.5
한 국		76.1	45.6
호 주		7.5	10.0

<표 4>는 각국의 효율변화지수 (EC), 기술변화지수 (TC), Malmquist 생산성지수 (MPI)의 연평균 (기하평균)을 나타낸 것이다. 세 가지 지수 모두 그 값이 1보다 크면 증가를 의미하고, 그 값이 1보다 작으면 감소를 의미한다. 예를 들어 효율변화지수가 1.100이라면 효율이 10% 증가했다는 것을 의미하고, 그 값이 0.900이라면 효율이 10% 감소했다는 것을 의미한다. 분석결과, 전반적으로 R&D 생산성이 증가 (2.3%)한 것으로 나타났고, 그것의 원동력은 기술혁신 (0.5%)보다는 효율개선 (1.7%)인 것으로 나타났다. 한국은 R&D 생산성이 연평균 14.2%로 가장 많이 증가한 것으로 나타났으며, 그것의 원동력은 기술혁신 (5.1%)보다는 효율개선 (8.7%)에 있는 것으로 나타났다. 효율변화의 경우 한국이 연평균 8.7%로 효율이 가장

많이 개선된 것으로 나타났으며, 오스트리아는 연평균 -2.9%로 효율이 가장 많이 하락한 것으로 나타났다. 기술변화의 경우 한국과 일본이 연평균 5.1%로 기술혁신이 가장 많이 일어난 것으로 나타났으며, 핀란드는 연평균 -1.6%로 기술퇴보가 가장 많이 일어난 것으로 나타났다.

<표 4> R&D 생산성 분석결과

국가	구분	EC	TC	MPI
네덜란드		0.978	0.989	0.967
노르웨이		0.989	0.986	0.975
독 일		1.037	1.020	1.058
미 국		1.019	1.040	1.059
벨 기 에		0.989	0.997	0.987
스 위 스		0.996	0.987	0.984
스 페 인		1.049	0.985	1.033
영 국		0.997	0.997	0.994
오스트리아		0.971	1.002	0.973
이탈리아		1.046	0.997	1.044
일 본		1.042	1.051	1.095
캐 나 다		0.992	0.991	0.984
프 랑 스		1.019	1.003	1.023
핀 란 드		1.032	0.984	1.016
한 국		1.087	1.051	1.142
호 주		1.002	0.992	0.994
평 균		1.017	1.005	1.023

주 : EC : 효율변화지수, TC : 기술변화지수, MPI : Malmquist 생산성지수, MPI = EC × TC

R&D 생산성을 1990년대 전반기와 후반기, 그리고 1990년대로 구분하여 분석한 결과, 1990년대 전반기에 R&D 생산성이 가장 높게 증가한 국가는 한국 (133.7%)으로 나타났으며, 그것의 원동력은 주로 효율개선 (120.7%)인 것으로 나타났다. 이것은 1990년대 전반기에 한국의 SCI 논문수와 미국특허출원수가 각각 177%, 113%나 증가했기 때문이다. 1990년대 후반기에 R&D 생산성이 가장 높게 증가한 국가는 일본 (99.9%)으로 나타났으며, 그것의 원동력은 효율개선 (40.7%)과 기술혁신 (42.0%)인 것으로 나타났다. 1990년대 전체로는 한국과 일본의

R&D 생산성이 각각 218.7%와 116.8% 증가한 것으로 나타났으며, 그것의 원동력은 한국의 경우 효율개선, 일본의 경우 기술혁신인 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 과학기술부문의 국가별 R&D 효율성과 생산성을 분석하기 위해 기존의 생산함수와 같은 모수적 방법이 아닌 DEA와 Malmquist 생산성지수와 같은 비모수적 방법을 이용하였다. DEA는 투입과 산출의 함수관계와 오차항의 분포에 대한 가정을 필요로 하지 않을 뿐만 아니라, 복수의 투입과 산출이 있는 경우에도 이들을 집계하지 않고 원시자료를 그대로 이용할 수 있다는 장점이 있다. Malmquist 생산성지수는 시스템에 비효율성이 있다고 가정하고, 생산성의 변화요인을 효율변화와 기술변화로 분리할 수 있는 장점이 있다.

시스템의 비효율성 증가로 인한 생산성 증가의 둔화는 기술변화의 부족으로 인한 생산성 증가의 둔화와는 다른 정책을 제안할 수 있다. 예를 들어, 비효율성으로 인한 생산성 감소는 혁신의 확산에 대한 제도적 장벽에 기인할 수 있다. 따라서 생산성을 개선하는 데에는 이러한 제도적 장벽을 제거하는 정책이 기술혁신을 유도하는 정책보다 효과적일 수 있다 (Grosskopf, 1993: 169). 한국의 경우 1990년대 전반기에는 생산성 증가요인이 효율변화인 것으로 나타났고, 1990년대 후반기에는 기술변화인 것으로 나타났는데, 이를 통해 한국은 1990년대 전반기에는 기술혁신을 위한 노력이 부족했다고 판단할 수 있다. 그러나 이러한 해석은 오류를 범할 수도 있다. 왜냐하면 본 논문에서 R&D의 산출로 가정한 논문과 특허는 전체 R&D 산출의 일부이기 때문이다. 즉, 기술혁신의 결과인 신제품이나 신공정 등을 산출로 반영하지 못했기 때문이다.

본 논문의 한계와 추후 연구과제를 제시하면 다음과 같다. 첫째, DEA는 기본적으로 병원이나 은행, 전력회사 등과 같이 동일한 속성을 지닌 DMU 간에 상대효율성을 비교하기 위한 방법이다. 국가마다 정치, 경제, 사회, 문화가 다르듯이 R&D 시스템 또한 다르다. 따라서 국가간 R&D 시스템의 차이를 반영하기 위한 조치가 필요하다.

둘째, R&D의 산출로 가정한 SCI 논문과 미국특허가 해당 국가의 과학기술부문의 산출을 정확히 대변한다고 볼 수는 없다. SCI 논문의 경우 대부분이 영어로 작성되기 때문에 미국이나 영국과 같은 국가가 논문을 발표하는 데에 유리할 수 있다. 특허의 경우도 마찬가지이다. 특정 국가에 특허를 출원하는 이유는 해당 국가를 중요한 시장이라고 판단했기 때문이다. 현재 가장 큰 시장은 미국이므로, 많은 국가들은 미국에 특허를 출원하는 것을 중요한 전략적 목표로 삼고 있다. 따라서 R&D 산출자료로 미국특허만을 이용하게 되면 미국이 다른 나라에

비해서 유리할 수 있다. 이러한 현실적인 문제가 있으나, SCI 논문과 미국특허는 질적인 면에서 어느 정도 검증되었기 때문에, 현재 대부분의 국가에서 과학기술력을 비교하는데 이용하고 있다. 그러나 보다 정확한 분석을 위해서는 국가의 차이를 반영한 수정된 과학기술 산출지표를 이용할 필요가 있다.

셋째, R&D의 투입요소 중에서 가장 중요한 것은 R&D 지출이다. 그러나 R&D 지출은 유량(flow) 개념이기 때문에, 대신에 저장(stock) 개념인 R&D 스톡을 이용한다. R&D 스톡을 계산하기 위해서는 시차, 진부화율, 디플레이터를 고려해야 하는데, 이 과정에서 많은 계산과 가정을 하게 된다. 따라서 신뢰할 만한 추정치를 구하는 것이 쉽지 않다. 그러나 분석의 신뢰성을 높이기 위해서는 여러 가지 상황을 조합하여 R&D 스톡을 구한 후에, 결과에 어떤 영향을 미치는지를 알아보아야 할 것이다.

## 〈참 고 문 헌〉

- 고민수·이덕주 (2001), “DEA를 이용한 OECD 국가별 연구개발 효율성 비교 분석”, 대한 산업공학회 추계학술대회 발표논문.
- 김진한·정기대, “Malmquist 지수에 의한 세계 철강산업의 기술변화”, 「기술혁신학회지」, 제4권 제3호, pp. 369-382, 한국기술혁신학회.
- 박만희 (2002), 「품질경쟁력 강화를 위한 단계적 의사결정지원시스템」, 박사학위논문, 성균관대학교.
- 이현정 (1999), 「효율성 및 생산성 측정의 비모수적 DEA 방법론에 관한 연구 - 전력 산업에 대한 응용을 중심으로」, 석사학위논문, 서울대학교.
- 정태윤·박병무 (1991), “생산요소로서의 기술지식스톡”, 「과학기술정책」, 제3권 제1-2호, 과학기술정책관리연구소.
- 홍순기·홍사균·안두현 (1991), 「연구개발투자의 산업부문간 흐름과 직·간접 생산성 증대효과 분석에 관한 연구」, 과학기술정책관리연구소.
- Arcelus, F. J. and P. Arozena (1999), “Measuring Sectoral Productivity Across Time and Across Countries”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 119, pp. 254-266.
- Banker, R. D., A. Charnes and W. W. Cooper (1984), “Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis”, *Management*

- Science*, Vol. 30, No. 9, pp. 1078-1092.
- Boussofinane, A., R. G. Dyson and E. Thanassoulis (1991), "Applied Data Envelopment Analysis", *European Journal of Operations Research*, Vol. 52, pp. 1-15.
- Brown, M.G. and R. A. Svenson (1998), "Measuring R&D Productivity", *Research Technology Management*, Vol. 42, No. 6, pp. 30-35.
- Caves, D., L. Christensen and E. Diewart (1982), "Multilateral Comparisons of Output, Input, and Productivity using Superlative Index Numbers", *Economic Journal*, Vol. 92, No. 365, pp. 73-86.
- Charnes, A., W. W. Cooper and E. Rhodes. (1978), "Measuring the Efficiency of Decision Making Unit", *European Journal of Operations Research* 2, pp. 429-444.
- Charnes, A., W. W. Cooper, A. Y. Lewin and L. M. Seiford (1994), *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application*, Kluwer Academic Publishers.
- Coelli, T. J. (1996), "A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program", CEPA Working Paper, Centre for Efficiency and Productivity Analysis (CEPA).
- Debreu, G. (1951), "The Coefficient of Resource Utilization", *Econometrica*, Vol. 19, pp. 273-292.
- Diewart, W. E. (1992), "Fisher Ideal Output, Input and Productivity Indexes Revisited", *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 3, No. 3, pp. 211-248.
- Fare, R., S. Grosskopf, M. Morris. and Z. Zhang (1994), "Productivity Growth, Technical Progress in Industrialized Countries", *American Economic Review*, Vol. 84, No. 1, pp. 66-83.
- Farrell, M. J. (1957), "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of the Royal Statistical Society*, A CXX, Part 3, pp. 253-290.
- Financial Times (2001), "New Millennium's Winners and Losers", Financial Times 2001. 10. 29.
- Fitzsimmons, J. A. and M. J. Fitzsimmons (1994), *Service Management for Competitive Advantage*, McGraw-Hill, Inc.
- Freeman, C. and L. Soete (1997), *The Economics of Industrial Innovation*, MA: The MIT Press.
- Griliches, Z. (1979), "Issues in Assessing the Contribution of Research and Develop-

- ment to Productivity Growth”, *Bell Journal of Economics*, Vol. 10, pp. 92-116.
- Grosskopf, S. (1993), “Efficiency and Productivity”, in Fried, H. O., C. A. K. Lovell and S. S. Schmidt (eds), *The Measurement of Productive Efficiency*, Oxford: Oxford University Press, pp. 160-194.
- Koopmans, T. C. (1951), “An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities”, in Koopmans T. C. (eds), *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Commission for Research in Economics, Monograph No. 13, New York: Wiley.
- Lien, D. and Y. Peng (2001), “Competition and Production Efficiency Telecommunications in OECD countries”, *Information Economics and Policy*, Vol. 13, pp. 51-76.
- Lovell, C. A. K. (1993), “Production Frontiers and Productive Efficiency”, in Fried, H. O., C. A. K. Lovell and S. S. Schmidt (eds), *The Measurement of Productive Efficiency*, Oxford: Oxford University Press, pp. 3-67.
- Malmquist, S. (1953), “Index Numbers and Indifference Surfaces”, *Trabajos de Estadística*, Vol. 4, pp. 209-242.
- OECD (1994), *Frascati Manual 1993 : The Measurement of Scientific and Technological Activities : Proposed Standard Practice for Surveys of Research and Experimental Development*, Organization for Economic Co-operation and Development.
- OECD (2001), *Main Science and Technology Indicators*, Organization for Economic Co-operation and Development.
- Shepherd, L. M. (1970), *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press.
- Sudit, E. F. (1995), “Productivity Measurement in Industrial Operations”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 85, pp. 435-453.