

環境制約을 고려한 技術效率 및 生産性에 관한 研究*

姜 尚 穆**

논문 초록

본 연구는 한국의 24개 산업의 환경제약을 고려한 기술효율 및 생산성상실율을 추정하고 산업성장의 지속가능성을 살펴보고자 함이다. 기술효율의 척도로는 생산향상과 오염감소의 동시적 성공을 위한 기준으로 쌍곡선 척도를 중심으로 논의한다. 이 척도는 산업의 지속가능한 성장을 위한 판단 기준에 부합한다. 광업 및 제조산업의 환경제약을 고려한 기술효율수준은 산업간 상당한 차이를 보였고 기술의 비효율로 인한 상이한 생산성상실율을 보였다. 산업의 실질 성장율이 국가전체의 실질GDP의 성장율보다 낮고 환경제약을 포함한 기술효율이 낮으며 이로 인한 생산성상실이 큰 산업은 경쟁력이 약하고 성장의 지속가능성이 밝지 못하다. 환경제약은 대다수 산업의 기술효율과 생산성에 영향을 미쳤다. 그러나, 석유정제, 1차 금속, 화학물 및 화학 등의 중공업에 속한 산업들은 경공업에 속한 대부분의 산업들보다 환경제약을 포함한 기술효율의 우위를 유지함으로써, 환경제약이 산업간에 존재하는 기술효율의 격차를 근본적으로 변화시키지는 못하였다. 한국산업이 직면한 환경제약의 대처방안은 생산의 탈물질화 내지 투입물질의 최소화를 통하여 오염을 억제하는 녹색산업화와 지속가능한 성장의 가능성이 매우 낮은 산업에 대해서는 환경친화적이고 동시에 빠르게 성장하는 산업으로의 구조전환을 들 수 있다.

핵심 주제어: 환경제약, 기술효율, 생산성

경제학문헌목록 주제분류: C4, L6, Q2, Q4

* 통계자료에 협조해 준 통계청의 최정수 박사께 감사한다.

** 미 퍼듀대 교환교수. e-mail: kang5@purdue.edu

I. 서 론

생산의 효율과 생산성의 측정은 항상 경제학의 주된 관심사중 하나로서 경쟁력을 결정하는 주된 요소가 되고 경제성장에 주요 기여인자가 된다. 최근 생산의 효율향상에 영향을 미치는 요인 중 환경이 하나의 중요 이슈가 됨에 따라, 환경요소가 고려된 생산효율과 생산성이 필요한 시점에 이르렀고 이것이 산업의 경쟁력을 측정하는 새로운 지표로 등장하고 있다. 이 새로운 지표는 생산업체의 효율과 생산성 향상 및 환경에 대한 의사결정 뿐만 아니라 정부의 산업정책과 환경규제정책의 수행에 주요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구의 목적은 한국의 산업별 환경제약을 포함한 기술효율과 생산성 상실을 추정하고 산업성장의 지속가능성을 살펴보고자 한다.¹⁾ 특히 본 연구는 다음의 의문들에 대한 해답을 찾는데 그 의의를 갖는다.

첫째, 환경을 고려한 한국산업의 기술효율과 생산성은 산업별로 동일한가?

둘째, 어떤 산업이 생산의 기술효율과 생산성에서 환경제약의 영향을 많이 받는가?

셋째, 지속가능한 경제성장의 관점에서 어떤 산업이 과연 지속가능한가?

이를 분석하기 위하여 본 연구는 생산가능곡선을 이용한 생산의 기술효율을 측정하는 척도 중 쌍곡선 효율척도를 위주로 논의할 것이다.²⁾ 기술효율의 쌍곡선 척도는 생산을 증가시키면서 동시에 같은 일정한 비율로 오염물을 동시에 감소시킬 수

1) 여기서 기술효율이란 실제 산업내에 존재하는 생산시설의 양질여부, 노동자의 숙련정도, 생산작업라인의 신속 정확 내지 정밀성 등을 기준으로 측정하는 것이 아니라 생산주체가 산출량을 얻기 위하여 요소투입을 얼마나 효율적으로 사용하였는지를 측정하는 것으로서 자원의 효율적 사용이란 관점에서 평가하는 것이라고 할 수 있다. 즉, 단위당 산출량을 생산하는데 있어서 어떤 생산단위가 보다 적은 생산요소를 투입하여 생산할 수 있는가를 측정하는 것이다. 이러한 기술효율의 측정방법은 개별 기업, 지역, 국가자료 등에 적용가능하므로 Fare, Grosskopf, Norris, and Zhang (1994) 등 기술효율 측정에 관한 수 많은 선행연구에서 기업 혹은 지역, 국가 등에 대하여 이러한 기술효율의 측정방법을 널리 사용하고 있다. 한국의 산업에 대해서는 환경요소를 제외한 제조업에 대한 기술효율의 측정이 신원섭·조광래(1999)와 한광호·김상호(1999)에 의해 시도된 바 있다. 환경제약은 환경당국의 환경규제에 대하여 생산단위가 이를 준수하는 것을 전제한다. 한편, Krugman (1994), Wu (2000) 등은 경제성장의 지속가능성의 여부를 생산성을 기준으로 평가하였다. 본 연구도 이들의 관점을 따른다.

2) 전통적 Solow (1957) 유형의 생산성 접근방법에서는 기술의 비효율의 존재를 고려하지 않는다. 생산에서 기술비효율을 고려하는 접근방법을 여기서는 프론티어 생산접근방법으로 명명한다.

있는 기술효율 척도로서 상대적으로 오염량은 적게 발생시키면서 높은 산출량을 달성하는 생산단위에 대하여 높은 효율수준을 부여한다.³⁾ 그런데 추정할 생산의 기술효율은 포함된 투입물, 산출물, 오염물의 변화가능성에 의하여 상이한 효율수준을 얻을 수 있으므로 본 연구는 투입물 접근방법을 통하여 효율을 측정할 것인 바, 산출물의 변화가능 여부를 기준으로 투입물 효율척도(input efficiency measure)와 생산적 효율의 쌍곡선척도(hyperbolic measure of productive efficiency)로 분리하고, 환경제약의 여부를 측정하기 위하여 강처분(free disposability) 기술과 약처분(weak disposability) 기술로 구분하여 생산의 기술효율을 추정할 것이다.⁴⁾ 이러한 효율의 비교분석은 환경요인이나 산출물의 변화가 생산의 기술효율이나 생산성에 미치는 영향을 각각 보여줄 수 있게 된다.

비모수적(nonparametric) 접근방법에 의한 생산효율 측정은 Farrell(1957)이 최초로 제시한 이래 Shephard(1970), Afriat(1972), Caves, Christensen, and Diewert(1982), Banker, Charnes, and Cooper(1984)에 의해 발전되어 왔다.⁵⁾ 특히 Shephard(1970)의 생산가능곡선을 이용한 효율의 측정방법을 기초로, Fare, Grosskopf, and Lovell(1985)과 Fare, Grosskopf, Norris, and Zhang(1994)는 보다 개선된 효율과 생산성 측정방법을 제시하고 있다. 이러한 비모수적 접근법에 의한 생산의 기술효율 측정은 다른 한편으로 환경요소를 고려한 생산의 기술효율과 생산물의 기회비용의 측정으로 발전되었다. 선행연구들의 주된 흐름은 효율을 측정하는 방법에 따라서 방사선상 척도(radial efficiency measure)와 쌍곡선 척도(hyperbolic efficiency measure)로 대별해 볼 수 있다. 방사선상 척도는 산출물과 오

-
- 3) DEA(data envelopment analysis) 분석에서 바람직한 산출물과 상반되는 오염물을 고려할 경우 쌍곡선 척도는 이를 위한 기술효율 척도의 하나로 사용되어 왔다. 오염물을 포함한 기술효율을 측정하는 대표적 방법으로 수평방향, 수직방향, 방사선, 쌍곡선 등이 제시되고 있다.
 - 4) 기술효율의 측정형태로는 투입물효율과 산출물효율 접근 즉, 주어진 산출량에 대해서 최소의 투입물의 사용으로 측정하는 방법과 주어진 투입물에 대하여 최대의 산출량을 생산하는 측정 방법으로 대별된다. 생산적 효율척도는 이들 두 효율 측정방법에 의존하여 투입물 효율접근에서는 산출물을, 산출물효율접근에서는 투입물을 동시에 조정한다.
 - 5) 비모수 접근은 생산자의 행동가정이나 특정형태의 생산함수를 가정할 필요가 없고 양적인 자료를 보다 효과적으로 처리할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 특히 횡단자료를 분석할 경우 효과적인 비교를 가능하게 한다. 그러나 모수적 접근과 달리, 추정오차는 고려대상으로 하지 않는다. 모수적(parametric) 접근방법과 비모수적 접근방법의 장단점은 Coelli, Rao, and Battese(1998)을 참조바란다.

염분이 동시에 증가하는 경우에 대하여 효율의 개선으로 측정한다는 한계를 가지고 있기 때문에 최근 연구들은 쌍곡선 척도를 많이 사용하고 있다. 쌍곡선 척도가 갖고 있는 의미는 환경을 고려한 효율의 척도라 할찌라도 생산량과 오염물을 동시에 증가시키는 생산활동을 기준으로 효율을 정해서는 안되고 같은 자원과 비용하에서도 보다 많은 생산량과 보다 적은 오염물을 배출하는 생산활동을 기준으로 효율의 측정이 수정되어야 한다는 것이다. 이는 생산과 환경의 동시적인 성공을 기대할 수 있고 환경친화적이고 지속가능한 성장의 개념에 부합하는 효율의 척도기준으로서 생산단위들로 하여금 이런 방향으로 최선의 생산계획을 유도할 수 있고 환경기술의 개선에도 큰 자극을 줄 수 있다는 이점이 있다.

방사선 척도에 기초한 선행연구로서 Fare, Grosskopf and Pasurka(1986), Fare, Grosskopf, and Tyteca(1996), Tyteca(1997), 강상목·김은순(2002)을 들 수 있고 쌍곡선 효율척도(hyperbolic efficiency measurement)를 사용한 선행연구들로서 Fare, Grosskopf, Lovell, and Pasurka(1989), Boyd and McClelland(1999), Zaim and Taskin(2000), Sancho, Tadeo, and Martinez(2000), Zofio and Prieto(2001) 등을 열거할 수 있다. 결국 이러한 선행연구들은 투입물 혹은 산출물 접근방법과 방사선상 척도 내지 쌍곡선 척도를 적절하게 결합하여 오염배출량을 고려한 기술효율 혹은 기술비효율로 인한 생산물 상실 등을 추정하고 있다.

이와 같은 선행연구에서 개별 산업내의 업체간 효율의 측정은 많이 이루어 졌으나 산업간 환경을 고려한 기술효율 및 생산성의 연구가 알려진 바로는 거의 없다. 또한 비모수적 접근방법을 사용하여, 환경제약으로 인한 기술비효율과 생산성을 연계시켜 이들간의 명확한 관계를 제시한 사례가 드물다. 따라서 본 연구는 기존의 생산의 기술효율에 관한 선행연구에서 간과되어 왔던 이러한 미비점을 보완하는 데 그 의의가 있다. 본 연구는 환경제약하의 기술효율 측정을 위한 생산적 효율함수를 Fare, Grosskopf, Lovell, and Pasurka(1989), Boyd and McClelland(1999), Zaim and Taskin(2000)으로부터 원용하였으나 선행연구에서 간과되어온 기술효율과 생산성의 관계를 명확히 유도하고 이를 환경제약하의 기술효율과 생산성의 관계로 발전시키고자 한다. 본 연구에서는 한국의 1997~1998년간 24개 광업과 제조산업의 산출량, SO_x , NO_x , 자본량, 노동량, 원재료비, 연료비, 전력비 등의 자료를 이용하여 한국산업의 환경제약을 고려한 기술효율과 환경제약의 생산성에 미치는 영향을 살펴볼 것이다. 이를 위하여 선행계획모형을 제시하고 기술효율과 생산성 상

실을 등을 추정할 것이다. 실증작업은 다음의 순서로 진행될 것이다.

첫째, 환경제약의 기술효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 투입물 효율척도와 쌍곡선 척도하에서 기술의 강처분과 약처분에 대한 각각의 기술효율을 측정한다.

둘째, 도출된 각각의 기술효율에 기초하여 환경제약의 영향을 보여주는 24개 산업의 환경효율지수를 유도할 것이다.

셋째, 기술효율 및 환경효율지수를 이용하여 생산성상실을 추정할 것이다.

다만, 본 연구는 자료제약으로 인하여 1998년의 금융위기로 인한 급격한 경제 후퇴시점을 대상으로 포함시키고 있다는 한계를 갖는다.

이하 제2장에서는 기술효율을 측정하기 위한 투입물 효율척도와 생산적 효율의 쌍곡선 척도에 관한 이론적 모델을 제시하고 제3장에서는 실증에 사용될 자료와 실증결과를 제시할 것이다. 제4장에서는 정책적 시사점과 함께 결론을 맺을 것이다.

II. 모형

이론 모형의 가장 핵심적인 요소는 산출물과 오염물을 처분하는데 따르는 기술상 제약의 존재유무이다. 특히 시장가격으로 평가되지 않는 오염물을 생산에 포함할 경우, 오염물과 산출물 간의 차이는 이들의 처분성 여부에 따라 달라진다. Fare, Grosskopf, Lovell, and Pasurka(1989, p.92), Boyd and McClelland(1999, p.127), Zaim and Taskin(2000, p.98), Sancho, Tadeo, and Martinez(2000, p.367), Zofio and Prieto(2001, p.68) 등은 오염물의 처분성을 기준으로 강처분과 약처분의 기술을 사용하고 있다. 본 연구도 이들의 정의를 따른다. 일반적으로 생산자가 산출물의 수준을 결정할 때, 아무런 제약없이 자유롭게 결정할 수 있다면 이런 기술상태를 강처분기술로 정의한다. 즉, 강처분 기술은 규제나 제약으로 인한 추가적 비용없이 산출물에 대한 비용만을 부담하여 생산할 수 있는 경우를 말한다. 반면에 약처분 기술은 생산자가 일정한 환경제약의 기준을 만족시켜야만 하는 경우, 즉, 생산비용이외에 오염처리의 비용에 직면하게 되는 생산기술상태를 의미한다. 이러한 기술상의 추가적 비용이 수반되면, 생산기술은 약처분 기술하에 놓이게 되고 일정한 생산기술상 제약을 감수해야만 한다.

사용할 모델의 이론적 배경을 기술하기 위해, K 개의 생산단위가 있다고 가정하자. 각 생산단위는 바람직한 산출물 $y \in R_+^M$, 오염물 $w \in R_+^L$, 투입물 $x \in R_+^N$ 을

생산한다고 할 때, $Y(Y=y_1, y_2, \dots, y_m)$ 는 산출물 벡터, $W(W=w_1, w_2, \dots, w_l)$ 는 오염물 벡터 그리고 $X(X=x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 투입물벡터라 두자. 생산기술의 산출물집합 혹은 생산가능집합을 $F(x)$ 라고 두면, 생산과정이 산출물, 오염물과 투입물의 강처분성을 만족할 경우, 강처분 산출물 조합은 다음과 같이 표현될 수 있다. 이는 Farrell(1957)의 생산효율을 의미한다.

$$F^S(x) = \{(y, w) : ZY \geq y, ZW \geq w, ZX \leq x, Z \in R_+^K\} \quad (1)$$

$F^S(x)$ 는 강처분성을 만족하는 생산기술의 산출물집합을 말한다. 위 식은 임의의 산출물은 최대생산가능 산출물과 적어도 같거나 작아야 하고 임의의 투입물은 적어도 최소투입물과 같거나 커야한다는 경제효율의 제약조건을 보여주고 있다. Z 벡터는 일종의 가중치로서 생산단위 K 개의 비교대상이 있다고 할 때, $K \times 1$ 밀도 벡터로서 관측된 투입물과 산출물의 볼록 결합을 통하여 강처분생산집합의 최대가능선을 형성하게 된다. 이 조합은 투입물 벡터 혹은 산출물 및 오염물 벡터와 함께, 강처분하의 가능한 산출물의 생산가능곡선이 형성될 수 있게 해준다. 비슷하게 생산제약을 가하는 규제된 처분성에 대하여 약처분 생산조합을 설정할 필요가 있다. 오염물의 약처분성을 만족하는 생산기술은 다음과 같은 생산집합으로 나타낼 수 있다.

$$F^W(x) = \{(y, w) : ZY \geq y, ZW = w, ZX \leq x, Z \in R_+^K\} \quad (2)$$

$F^W(x)$ 는 약처분성을 만족하는 산출물집합을 말한다. $ZW = w$ 는 오염물벡터 W 속에 오염물이 자유롭게 처분될 수 없음을 의미하고 오염물의 일정 수준 감소를 허용한다. 이러한 방정식들은 각 생산단위의 기술효율이 계산될 수 있는 각각의 관측된 투입물과 산출물에 관한 기준 기술을 의미하고 환경을 고려할 경우 환경제약의 효과의 측정에 사용할 수 있다.⁶⁾ 그러므로 강처분과 약처분하의 기술효율은 환경을 최대한 이용하여 비용의 부담없이 오염물을 마음대로 배출하면서 얻을 수 있는 기술효율수준과 각 생산단위의 현재 오염배출량이상으로 배출할 수 없는 상황,

6) (1)식과 (2)식에서 환경제약 뿐만 아니라 노동이나 산업규제로 인한 생산제약도 이들 요소를 계량화할 수 있다면 추가적으로 고려한 모형으로 발전시킬 수 있을 것이다.

즉, 환경제약의 상황에서 얻을 수 있는 생산의 기술효율수준을 의미하는 것이다.

환경요소를 고려한 기술효율함수를 이용하면 바람직한 산출물, 오염물과 투입물을 기준으로 환경제약하의 결합점들의 기술효율수준을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 먼저 투입물 효율함수에 기초하여 논의를 전개하고자 한다. 투입물 효율함수는 생산단위 k , $k=1, \dots, K$ 에 대하여 다음과 같이 정의된다.⁷⁾

$$E_I^W(x^k, y^k, w^k) = \min \{ \alpha^W : (\alpha^W x^k, y^k, \alpha^W w^k) \in F^W(x) \}$$

$$E_I^S(x^k, y^k, w^k) = \min \{ \alpha^S : (\alpha^S x^k, y^k, \alpha^S w^k) \in F^S(x) \} \quad (3)$$

약처분과 강처분의 산출물집합, $F^W(x)$ 와 $F^S(x)$ 에 대하여 E_I^W 와 E_I^S 는 약처분과 강처분하의 투입물 효율함수이다. 여기서 투입물 효율함수는 Farrell (1957)에 따라서 산출물이 일정할 때, 실제 투입물에 대한 최소투입물로 정의된다. 약처분과 강처분하의 각 투입물 효율함수는 0과 1사이의 값을 갖으며 1에 가까울수록 효율적이다.⁸⁾ α^W 와 α^S 는 함수에 대한 실제 값, 즉, 기술효율수준이다. 각각의 투입물 효율함수 E_I^W 와 E_I^S 는 생산가능경계선상에 위치한 점과 실제 생산점을 비교함으로써 최적의 α^W 와 α^S 를 구한다.

투입물 효율함수 E_I^W 와 E_I^S 는 생산단위 k 에 대하여 규모불변(constant return to scale)의 가정하에서 (4)식과 같은 선형계획 프로그램을 통하여 측정할 수 있다. (4)식의 (a)는 오염물의 약처분하에서 생산의 기술효율을 얻기 위한 선형프로그램이고 (b)는 오염물의 강처분하에서 생산의 기술효율을 얻기 위한 선형프로그램이다. (a)와 (b)에서 각각의 우변의 산출물, 오염물, 투입물 벡터는 일종의 가중치인 밀도벡터 Z^k 와 결합하여 생산단위에 대한 투입물과 산출물, 오염물의 관측치들을 이용하여 최대생산가능량 즉, 생산가능곡선을 형성하거나 최소투입량을 형성하게 된다. 이 때 선형프로그램은 제약조건을 만족시키는 오염물과 투입물을 최소화하는 기술효율의 수준, α^W 와 α^S 를 구한다. (a)의 선형계획식에서 오염물에 대한 등호

7) 효율은 생산가능곡선상의 점과 내부의 점간의 거리에 의해 측정되므로 거리함수로 명명되기도 한다. 즉, 효율함수는 투입물 혹은 산출물을 기준으로 측정하느냐에 따라, 투입물 거리함수 혹은 산출물 거리함수로 언급될 수 있다.

8) 투입물 효율함수와 상반되는 산출물 효율함수에서 기술효율의 값의 범위는 1 이상의 값을 갖는다.

계약은 오염물을 개별 생산단위의 현재 배출량, 즉, 환경계약하에 배출한 실제 오염량 이상 자유롭게 처분할 수 없는 상황을 의미한다. 이와 함께 여타 제약조건을 모두 만족시키는 기술효율을 측정하는 것이다. 오염물에 대한 강제분성의 가정은 (b)와 같이 오염물에 대한 등호를 부등호 즉, $\alpha w^k \leq Z^k W^k$ 로 바꾸어 줌으로써 전환할 수 있다. 이는 밀도벡터 Z^k 를 통하여 오염물의 자유처분을 가능하게 함으로써, 즉, 오염물 처리의 제약없이 각 생산단위의 실제 오염배출량 이상으로 오염물을 배출할 수 있는 경우에 직면하는 기술효율수준을 구하게 된다. 투입물 효율척도에서는 최대산출물들로 형성된 생산가능곡선하에서 생산단위의 실제 산출물의 변화는 고려하지 않고 생산단위의 투입물과 오염물만 최소화시키는 최적 기술효율을 측정하게 되므로 쌍곡선 척도가 아닌 일종의 방사선 척도가 작용하고 있다. 반면에 선행연구의 Boyd and McClelland(1999)와 Zaim and Taskin(2000)과 같이 생산단위의 산출물을 투입물과 함께 동시에 조절할 수 있다는 가정을 할 경우 산출물은 최대, 투입물과 오염물은 최소화하는 생산적 효율(productive efficiency)을 측정해 볼 수 있다. 생산적 효율 척도에서는 오염물과 투입물을 최소화하고 산출물을 최대화하는 제약조건하에서 생산단위의 기술효율을 측정한다. 따라서 이러한 생산적 효율척도하에서 투입물, 오염물과 산출물이 상반된 방향으로 이동을 측정하기에 적합한 척도로 쌍곡선 척도가 사용된다. 생산적 효율함수는 강제분과 약처분하에서 (5)식과 같이 정의된다.

$$\begin{array}{ll}
 (a) & (b) \\
 E_I^W(x^k, y^k, w^k) = \min \alpha^W & E_I^S(x^k, y^k, w^k) = \min \alpha^S \\
 y^k \leq \sum_{k=1}^K Z^k Y^k & y^k \leq \sum_{k=1}^K Z^k Y^k \\
 \alpha^W w^k = \sum_{k=1}^K Z^k W^k & \alpha^S w^k \leq \sum_{k=1}^K Z^k W^k \\
 \alpha^W x^k \geq \sum_{k=1}^K Z^k X^k & \alpha^S x^k \geq \sum_{k=1}^K Z^k X^k \\
 Z^k \geq 0 & Z^k \geq 0
 \end{array} \quad (4)$$

$$\begin{array}{l}
 E_P^W(x^k, y^k, w^k) = \min \{ \beta^W : (\beta^W x^k, (\beta^W)^{-1} y^k, \beta^W w^k) \in F^W(x) \} \\
 E_P^S(x^k, y^k, w^k) = \min \{ \beta^S : (\beta^S x^k, (\beta^S)^{-1} y^k, \beta^S w^k) \in F^S(x) \} \quad (5)
 \end{array}$$

생산적 효율함수 E_P^W 와 E_P^S 는 약처분과 강처분에 대한 효율함수이고 그 기술효율수준은 각각 β^W 와 β^S 이다. 오염물의 약처분과 강처분의 가정하에 선형계획을 통하여 얻게 되는 최적해 β^W 와 β^S 는 투입물 효율함수의 기술수준과 동일하게 $0 \leq \beta^W, \beta^S \leq 1$ 의 값을 갖는다. 기술효율이 1에 가까울수록 효율적이며 1일 경우 최대생산효율이 달성된다. 각 생산단위에 대한 생산적 기술효율수준은 다음의 비선형프로그램을 통하여 그 최적해를 얻게 된다.

$$\begin{array}{ll}
 (a) & (b) \\
 E_P^W(x^k, y^k, w^k) = \min \beta^W & E_P^S(x^k, y^k, w^k) = \min \beta^S \\
 (\beta^W)^{-1} y^k \leq \sum_{k=1}^K Z^k Y^k & (\beta^S)^{-1} y^k \leq \sum_{k=1}^K Z^k Y^k \\
 \beta^W w^k = \sum_{k=1}^K Z^k W^k & \beta^S w^k \leq \sum_{k=1}^K Z^k W^k \\
 \beta^W x^k \geq \sum_{k=1}^K Z^k X^k & \beta^S x^k \geq \sum_{k=1}^K Z^k X^k \\
 Z^k \geq 0 & Z^k \geq 0
 \end{array} \quad (6)$$

그런데 위의 비선형 쌍곡선 척도를 계산하기 위해서는 실제 비선형의 계획문제를 선형프로그램 문제로 전환하는 것이 필요하다. 이는 식(6)의 (a)와 (b)에서 양변에 모두 β 를 곱해줌으로써 전환할 수 있다. 그러므로 $\phi^W = (\beta^W)^2$, $\phi^S = (\beta^S)^2$, $Z' = Z\beta$ 로 두면 (7)식과 같은 새로운 선형계획식을 각각 얻을 수 있다.

$$\begin{array}{ll}
 (a) & (b) \\
 (E_P^W(x^k, y^k, w^k))^2 = \min \phi^W & (E_P^S(x^k, y^k, w^k))^2 = \min \phi^S \\
 y^k \leq \sum_{k=1}^K Z'^k Y^k & y^k \leq \sum_{k=1}^K Z'^k Y^k \\
 \phi^W w^k = \sum_{k=1}^K Z'^k W^k & \phi^S w^k \leq \sum_{k=1}^K Z'^k W^k \\
 \phi^W x^k \geq \sum_{k=1}^K Z'^k X^k & \phi^S x^k \geq \sum_{k=1}^K Z'^k X^k \\
 Z'^k \geq 0 & Z'^k \geq 0
 \end{array} \quad (7)$$

위의 각각의 선형 계획식을 풀어주면 제약조건하의 최적 기술효율 $(\phi^W)^{1/2} = \beta^W$, $(\phi^S)^{1/2} = \beta^S$ 을 얻게 된다. $F^W(x)$ 와 $F^S(x)$ 를 이용한 강처분과 약처분하의 효율형태의 측정은 환경제약이 오염물의 처분성을 제약하는 정도를 보여줄 것이다.

투입물 효율척도와 생산적 효율척도에서 강처분 효율함수, E_I^S 와 E_P^S 는 오염물에 관한 제약조건에서만 약처분의 효율함수, E_I^W 와 E_P^W 와 다르다. 일반적으로 환경제약은 생산자원의 오염처리로의 이전을 초래하므로 산출물이 감소할 것이고 생산량과 오염감소는 대체관계에 놓이게 된다. 환경제약으로 인한 상대적 효율상실은 투입물 효율 혹은 생산적 효율척도하에서 각각 환경제약에 대한 영향을 보여줄 수 있다. 그들은 일반적으로 $E_I^S \leq E_I^W$ 와 $E_P^S \leq E_P^W$ 로 그 크기가 달리 나타날 것이다.

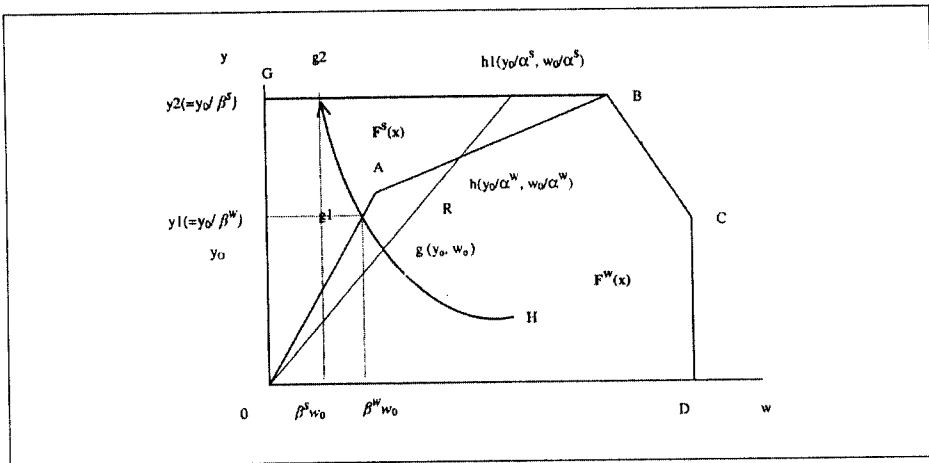
〈그림1〉은 위에서 논의한 환경제약과 기술효율의 쌍곡선척도에 관한 내용을 보다 명확하게 보여준다. 설명의 편의상 산출물 (y)과 오염물 (w)이 각각 한 종류만 있다고 가정할 때, 산출물과 오염물에 대한 생산가능곡선을 보여 준다. OGBCD영역으로 표시되는 강처분의 산출물집합, $F^S(x)$ 는 산출물의 처분에 제약이 없을 때 달성가능한 생산가능집합을 의미하고 OABCD영역으로 표시되는 약처분의 산출물집합, $F^W(x)$ 는 오염물의 처분성에 제약이 있을 때 달성가능한 생산가능집합을 표현하고 있다. $F^W(x) \leq F^S(x)$ 가 성립할 경우, 산출물은 오염물의 처분성결여로 상실될 수 있다. 만약 오염물 처분에 비용이 들지 않는다면, 산출물을 포기함이 없이 오염물을 줄일 수 있어야 하므로 이는 생산가능곡선상의 GB구간이 해당할 것이다. 그러나 오염물 처분에 비용이 수반될 경우 자원을 산출물 생산에서 오염물 처리로 이전해야 하고 더 이상 기존의 생산량을 유지할 수가 없게 된다. 이 때, 오염물 감소하의 생산은 OA와 AB선을 따라서 일정비용하에서 달성가능하다. 즉, 오염물감소를 위해서 동시에 일정 생산량을 감소시키거나, 생산량 증가를 위해서 동시에 일정 오염배출량을 증가시키게 된다.

그런데 쌍곡선 척도 H 는 생산가능곡선을 향하여 좌상방으로 보다 근접된 생산단위에 높은 효율 값을 부여하는 반면, 방사선상 척도 R 는 생산가능곡선을 향하여 우상방으로 보다 가까이 위치한 생산단위에 높은 효율을 준다. 따라서 쌍곡선 척도는 투입물과 오염물을 줄임과 동시에 동일한 율로 산출물을 증가시킬 수 있는 엄격한 기준에 기초하여 효율을 측정하므로 방사선 척도의 산출물과 오염물의 동시적

증가 내지 동시적 감소에 의존한 효율 척도보다 매우 보수적인 기준을 사용한다고 볼 수 있다.

〈그림1〉에서 실제 생산점을 $g(y_0, w_0)$ 라 두자. 이 점이 쌍곡선 척도 H에 따라서 약처분과 강처분하의 효율점인 점, $g1(y_0/\beta^W, \beta^W w_0)$, $g2(y_0/\beta^S, \beta^S w_0)$ 으로 이동할 경우 최대효율을 달성할 수 있을 것이다. 그러므로 $g(y_0, w_0)$ 점의 생산이 약처분과 강처분하의 효율적인 점이 되기 위해서는 오염물을 w_0 에서 각각 $\beta^W w_0$, $\beta^S w_0$ 로 축소하는 동시에 산출물은 y_0 에서 y_0/β^W , y_0/β^S 로 확장해야만 한다. 따라서 점 $g(y_0, w_0)$ 가 강처분 기술과 약처분 기술하의 최대효율점에 도달할 경우 각 기술하의 생산가능곡선상의 최대효율수준에서의 산출량 수준은 y_0/β^S , y_0/β^W 로 표시된다. 물론 점 $g2$ 와 같이 β^S 와 β^W 가 모두 1이 된다면, 강처분과 약처분 기술하에서 모두 효율적인 점이 되므로 $g2$ 는 환경제약을 받지 않는 최대효율적인 점이 될 것이다. $g1$ 점은 약처분하의 최대효율적인 점이지만, 강처분하의 비효율적인 점이다. 즉, $\beta^W=1$ 이지만, $\beta^S<1$ 이다.

〈그림1〉 환경제약과 기술효율의 쌍곡선 척도



그러므로 생산이 생산가능곡선상의 점을 제외한 그 내부에서 이루어 진다면, 쌍곡선 척도상의 상대적인 거리를 통하여 환경제약의 수준을 측정할 수 있다. 가령 OAB의 약처분 산출물과GB의 강처분 산출물의 최대지점인 $g1$ 과 $g2$ 을 기준으로

약처분과 강처분 간의 쌍곡선거리 $g1g2$ 를 측정함으로써, 상대적 효율의 차이를 얻는다. 이는 환경제약의 정도를 보여주는 환경효율지수를 의미하는 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$EI = (y_0/\beta^W)/(y_0/\beta^S) = \beta^S/\beta^W \quad (8)$$

여기서 β^S 와 β^W 가 동일하면 EI 는 1이 되고 환경규제로 인한 효율상실은 일어나지 않으며 생산단위의 비용부담을 초래하지 않는다. 그러나 환경제약이 생산자의 비용부담을 초래할 경우, 일반적으로 β^S 는 β^W 보다 작게 되고 EI 의 값도 1보다 작게 되어, 환경제약으로 인한 생산의 상실이 발생한다. 그러므로 생산가능곡선의 내부에 위치한 점들의 대부분은 EI 가 1보다 적은 값을 갖게 되므로 생산수준의 조정과 오염처리 간의 생산의 전환에 따른 기회비용이 수반된다. 마찬가지로 <그림 1>에서 방사선척도 R 에서 약처분과 강처분하의 효율적인 점 h 와 $h1$ 을 기준으로 동일하게 방사선 척도하의 환경효율지수를 측정할 수 있다.⁹⁾ 강처분과 약처분의 기술효율, α^W 와 α^S 에 기초하여, 약처분과 강처분간의 차이인 방사선거리, $hh1$ 을 이용하면 방사선 척도하의 환경효율지수 $EI = (y_0/\alpha^W)/(y_0/\alpha^S) = \alpha^S/\alpha^W$ 가 성립한다.¹⁰⁾ 그러므로 쌍곡선과 방사선 두 척도에서 환경제약으로 인한 효율상실의 크기는 두 척도하의 환경효율지수, EI 의 상대적 크기에 따라 결정된다.

한편, 이러한 생산의 기술효율은 생산성과 밀접한 관계를 갖는다.¹¹⁾ 여기서 투

-
- 9) 규모불변하의 투입물 효율함수와 산출물 효율함수는 정확히 역의 관계에 있어서 기술효율은 역수이고, 약처분과 강처분에 대한 상대적인 비율은 동일하다.
- 10) 오염배출량을 통해서도 역시 동일한 상대적 효율수준을 얻을 수 있다. 쌍곡선 척도에 의하면, $\beta^S w_0 \leq \beta^W w_0$ 이고 상대적 효율수준은 $\beta^S/\beta^W \leq 1$ 이 된다. 방사선척도하에서도 오염물 변화를 이용하면 상대적 효율수준 $(w_0/\alpha^W)/(w_0/\alpha^S) = \alpha^S/\alpha^W$ 를 얻는다.
- 11) Solow(1957) 유형의 전통적 생산함수 접근방법에서는 모든 생산자가 일정한 투입물을 사용할 경우 항상 최대 산출량에 도달하는 것으로 간주하여 기술의 비효율의 존재를 고려하지 않았다. 반면, 프론티어 생산함수 접근방법은 생산자에 따라서 최대 생산량에 이르지 못하는 현실적인 경우를 감안하여 기술의 비효율의 존재를 고려한다. 따라서 전통적 접근은 총요소생산성을 기술발전과 동일하게 간주하였으나 프론티어 접근에서는 기술발전과 함께 기술효율을 포함한다. 여기서 기술효율의 향상은 기존의 앞선 기술을 따라잡는 것 즉, 생산가능곡선내에서 생산가능곡선상으로 이동을 의미하고 기술발전은 신기술의 개발 내지 혁신, 즉, 생산가능곡선 자체의 상향이동을 말한다.

입물 (x^k)에 대한 산출물 (y^k)의 상대적 비로 정의 되는 생산성에 기술효율을 연
계시키고자 한다. 이를 통하여 기술비효율로 인한 생산성변화를 살펴볼 수 있다.
우선, 환경제약을 고려하지 않는 일반적 프론티어 접근방법에 의한 생산가능함수가
다음과 같이 표시된다고 가정하자.

$$y^f = A \times F(x_i) \quad (9)$$

x_i 는 각 투입물, y^f 는 생산가능곡선상의 산출물 수준으로 위의 생산가능함수는
전통적 Solow(1957) 형태의 생산함수와 동일하다. 이를 이용하면, 프론티어 접근
방법에 의한 투입물 기술효율함수는 실제 산출량 y 와 함께 다음과 같이 정의될 수
있다.¹²⁾

$$\begin{aligned} E_I(x^k, y^k) &= \min \{ \lambda : y \leq A \times F(\lambda x_i) \} \\ &= \min \{ \lambda : y \leq A \times \lambda F(x_i) \} \\ &= \min \{ \lambda : y / (A \times F(x_i)) \leq \lambda \} \\ &= y / (A \times F(x_i)) \end{aligned} \quad (10)$$

그러므로 생산함수에 기술효율을 고려할 경우 총요소생산성은 (10)식에서 다음
과 같이 유도된다.

$$TFP = y / (E_I \times F(x_i)) \quad (11)$$

이는 생산가능곡선상에 위치한 점의 총요소생산성이 된다. E_I 는 투입물접근하
의 효율함수로서 투입물 기술효율수준 λ 에 의하여 $0 \leq E_I \leq 1$ 의 값을 갖는다. 그
런데 생산자가 생산가능곡선상의 최대효율을 달성할 경우 문제가 없으나 생산이 최
대효율에 이르지 못할 경우, 생산의 비효율로 인하여 생산성은 전통적 생산성 수준
에 비하여 축소된다.¹³⁾ 이 때 기술비효율로 인한 생산성상실을 구한다면, 생산성

12) 기술이 규모불변상태에서는 생산함수가 1차동차성을 만족한다. 투입물과 산출물 효율함수는
상호 대칭적으로 이중성을 갖기 때문에 상호간에 유도될 수 있다. 즉, 산출물 효율함수,
 $E_0(x^k, y^k)$ 는 다음과 같이 정의되고 투입물 효율함수와 역의 관계에 있다. $E_0(x^k, y^k) =$
 $\max \{ \theta : \theta y \leq A F(x_i) \} = \max \{ \theta : \theta \leq A F(x_i) / y \} = A * F(x_i) / y = 1 / E_I(x^k, y^k)$. 자세
한 것은 Fare et al. (1985)를 참조바란다.

상실 (PL)은 임의의 생산단위가 생산가능곡선상의 산출물 (y/E_I)에서 얻는 생산성과 실제 산출물 (y)에서 얻는 생산성간의 차이로 측정가능하다. 즉, 기술비효율로 인한 생산성 상실은

$$PL = y/(E_I \times F(x_i)) - y/F(x_i) = ((1/E_I) - 1) \times y/F(x_i) \quad (12)$$

이 된다. 그러므로 기술비효율로 인한 생산성상실율은 생산가능곡선상 산출물의 생산성에 대한 생산성상실의 비율로 표시할 수 있다. 즉, 생산성상실율은 $PL/(y/E_I \times F(x_i)) = 1 - E_I$ 이다.

따라서 이러한 기술효율과 생산성의 관계에서 환경제약의 요소를 고려해 볼 수 있다. 이 때, (10)식의 투입물 효율함수는 제 II장의 이론모형이 보여준 바와 같이 환경제약을 고려한 강처분과 약처분의 기술효율 함수로 대체되고 생산성 또한 강처분과 약처분의 기술효율을 도입한 각각의 생산성을 얻을 수 있다. 환경제약을 감안한 생산성의 척도는 자원이 바람직한 산출물을 생산하기 보다 오염물을 줄이도록 전환될 때, 산출/투입의 비율은 더 작아지므로 생산성은 기존의 생산성에 비하여 감소하게 된다. 환경제약으로 인한 생산성상실은 강처분하의 생산성과 약처분하의 생산성간의 차이로 측정되므로 먼저 투입물 효율척도하의 생산성상실 PL_I 은 다음과 같이 표시된다

$$\begin{aligned} PL_I &= (y/(E_I^S \times F(x_i)) - (y/(E_I^W \times F(x_i))) \\ &= (1/E_I^S - 1/E_I^W) \times y/F(x_i) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $E_I^S = E_I^W$ 경우 생산성 상실 (PL_I)은 0이다. 반면 $E_I^S < E_I^W$ 이면 생산성 상실이 발생한다. 따라서 생산성상실율은 환경제약이 없는 강처분하의 생산성 수준에 대한 생산성 상실의 비율로 측정할 수 있다. 즉, 생산성상실율은 $(1 - E_I^S/E_I^W) = (1 - EI)$ 이다.¹⁴⁾

13) 프론티어 총요소생산성 ($TFP^f = E \times TFP$)은 전통적 총요소생산성 (TFP)에 기술효율을 포함시킨다. 그러나 여기서는 기술효율의 도입으로 인한 투입물과 산출물의 상대적 변화에 초점을 두고 있으므로 편의상 전통적 Solow(1957)의 총요소생산성, TFP 를 기준으로 논의를 전개한다.

한편, (9) 식을 이용하여 쌍곡선 척도하의 생산적 효율함수를 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_p(x^k, y^k) &= \min \{ \delta : y/\delta \leq A \times F(\delta x_i) \} \\ &= \min \{ \delta : y/\delta \leq A \times \delta F(x_i) \} \\ &= \min \{ \delta : y/(A \times F(x_i)) \leq \delta^2 \} \\ &= \{ y/(A \times F(x_i)) \}^{1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

생산적 효율의 쌍곡선 척도하에서 기술효율을 고려할 경우 투입물 감소와 산출물 증가가 동시에 일어나는 것을 위의 효율함수는 반영하고 있다. 따라서 총요소생산성 TFP 는 (14) 식에서 양변을 제곱하면 다음과 같이 유도된다.

$$TFP = y/(E_p^2 \times F(x_i)) \quad (15)$$

이 총요소생산성도 y/E_p^2 이 생산가능곡선상의 산출물 수준이므로 최대달성가능한 생산성 수준이다. 쌍곡선 척도하의 생산성상실도 생산가능곡선상에서 얻을 수 있는 생산성과 실제 산출물에 의한 생산성과의 차이로 표시할 수 있다. 즉, 생산성 상실은 $PL = y/(E_p^2 \times F(x_i)) - y/F(x_i)$ 가 되고 생산성 상실율은 $PL/(y/(E_p^2 \times F(x_i))) = 1 - E_p^2$ 이다.

이러한 쌍곡선척도하의 기술효율과 생산성간의 관계를 이용하여, 환경제약을 감안한 생산성의 차이를 측정할 수 있고 이 또한 강처분과 약처분 하의 두 생산성수준의 차이로 표시된다. 즉, 생산성 상실은

$$\begin{aligned} PL_p &= (y/E_p^S)/(E_p^S \times F(x_i)) - (y/E_p^W)/(E_p^W \times F(x_i)) \\ &= \{ (1/(E_p^S)^2 - 1/(E_p^W)^2) \} \times y/F(x_i) \end{aligned} \quad (16)$$

이다. 약처분과 강처분의 기술효율함수간에 $E_p^S \leq E_p^W$ 가 성립하므로 환경제약하의

14) 오염물의 강처분하의 생산성, $TFP_S = y/(E^S \times F(x_i))$ 는 환경제약이 없는 경우의 달성가능한 생산성 수준이고 약처분하의 생산성, $TFP_W = y/(E^W \times F(x_i))$ 는 환경제약이 있는 경우의 달성가능한 생산성 수준이다. 따라서 환경제약으로 인한 생산성 상실율은 $PL_I/TFP_S = (TFP_S - TFP_W)/TFP_S$ 이다.

생산성상실은 이들 간의 차이에 의해서 결정된다. 생산성 상실율은 투입물 효율척도와 같은 방식으로 쌍곡선 척도하에서 $1 - (E_P^S/E_P^W)^2 = 1 - (EI)^2$ 으로 측정된다. 이 처럼 생산성 상실은 투입물 효율척도와 생산적 효율척도에 따라서 각각의 상이한 값을 얻을 수 있으며 강처분과 약처분하의 기술효율수준의 차이가 생산성상실에 주는 상이한 영향을 살펴볼 수 있게 된다.

III. 자료 및 결과

실증의 목적은 한국 산업의 지속가능한 성장을 분석해 보는 것이다.¹⁵⁾ 오염배출량과 투입물 및 산출량의 자료가 광업과 제조업의 1997-1998년간 이용가능하였기에 이를 대상으로 하였다.¹⁶⁾ 생산량, 노동량, 자본량 원재료비, 연료비, 전력비 등의 자료는 통계청의 광공업통계조사보고서를 이용하였고 24개 산업의 SO_X 와 NO_X 배출량에 관한 오염배출통계는 최근 환경부가 표준산업에 맞춘 산업별 오염통계자료를 이용하였다. 특히 산업간의 비교는 산업간의 상이한 환경제약의 효과를 보다 명확하게 보여줄 수 있다. 실증분석을 위하여 생산량과 자본량, 원재료비, 연료비, 전력비 등은 1995년 GDP deflator(1995=100)로 환산하였다. 이론 모형을 이용하면 1997년과 1998년의 산업별 환경요인을 고려한 생산의 기술효율을 측정할 수 있다. 여기서 기술효율은 생산단위간에 형성된 생산가능곡선을 기준으로 상대적인 거리를 비교하는 것이므로 효율의 수준은 측정대상 단위간에 산출물을 얻기 위한 투입물의 효율적인 사용 정도를 측정하고자 하는 것이다.¹⁷⁾ 실증분석에 사용된 컴퓨터 프로그램은 제약조건하의 최적 해를 얻는데 적합한 What's Best와 DEAP 프로그램을 이용하였다. 산업별 기술효율수준을 얻기 위하여 선형계획 프로그램이 24개 산업에 대하여 반복적으로 추정되었다.

15) 강상목·김은순 (2002)은 한국의 제조업을 지역별로 구분하여 환경규제하의 기술효율을 측정 한 바 있으나 이를 산업별로 분석하지 못했다는 한계를 가지고 있다.

16) DEA 분석은 시계열 자료보다는 횡단자료를 분석하는데 보다 적합하게 사용된다.

17) Fare, Grosskopf, Norris, and Zhang (1994), Zaim and Taskin (2000), Zofio and Prieto (2001)은 이러한 개념에 기초하여 OECD국가의 GDP, 자본스톡, 노동을 이용한 국가별 기술효율 혹은 이에 CO_2 자료를 추가하여 환경요소를 고려한 국가별 기술효율을 측정한 바 있다.

24개 광업 및 제조산업의 요약통계는 <표1>과 같다. 주요변수들의 분포에 있어서 1997년의 경우, 산출물의 평균은 1,697.4백억원이고 최대값 4,215.7백억원에서 최소 62.7백억원의 분포를 보였다. SO_x 의 평균은 27,399톤이고 최대값은 344,533톤, 최소값 109톤이며, NO_x 의 평균은 이보다 조금 적은 21,751톤이며 최대 283,170톤에서 최소 184톤의 분포를 보였다. 한편, 투입물 중 자본은 평균 826.5백억톤이고 최대 2,665.8백억톤에서 최소 25.8백억톤의 수치를 보였다. 원재료비의 분포도 자본과 비슷한 수준으로 평균 868.0백억원, 최대 2,290.1백억원에서 최소 24.1백억원의 분포를 보여 자본과 유사한 수준의 투입이 이루어졌다. 연료비와 전력비는 원재료비에 비하면 많은 자원이 투입되지는 않은 것으로 나타나고 있음을 볼 때, 자본, 노동, 원재료비 등이 주요 투입물로 사용되었음을 알 수 있다.

1998년의 주요변수는 외환위기로 인한 경기침체의 영향으로 산출물 평균은 1,578.5백억원으로 1997년에 비하여 120백억원 정도 감소하였고 이에 비례하여 SO_x , NO_x 의 오염배출량도 평균적으로 각각 약 3,500톤과 3,000톤씩 감소하였다.¹⁸⁾ 노동도 평균 26,000명 가량 감소하였고 원재료비 역시 감소하였다. 그러나 자본은 산업별로 평균 약 3,000억원씩 증가하였다. 사용된 통계자료가 짧은 2년간이지만 만약 산출량은 증가 혹은 일정하고 오염배출량이 감소하였다면, 전반적인 산업의 평균 환경효율은 개선된 것으로 쉽게 알 수 있으나, 위의 통계로는 두 년도 간의 환경효율의 개선여부를 알 수 없다. 이는 이하의 실증결과를 통하여 살펴볼 수가 있다.

이론 모형의 (4)와 (7)식의 선형프로그램을 이용하여 강처분과 약처분하의 24개 광업 및 제조산업의 기술효율 수준을 각각 측정해 볼 수 있다. 물론 측정된 기술효율은 24개 산업의 실제 산출물, 오염배출량, 투입물의 자료를 가지고 생산가능곡선의 경계영역을 결정하게 되고 이들 중 최대효율을 보이는 산업은 생산가능곡선상에 위치하고 기술효율이 1을 보이게 된다. 따라서 개별 산업의 기술효율은 최대효율을 보인 산업과 측정대상 단위간의 상대적인 효율수준으로 나타난다.

18) IMF로 인한 외생적 요인이 경제적인 것이라면 이는 환경을 고려치 않는 기술효율에 반영된다. 환경규제의 효과측정은 동일한 산출량과 투입량의 조건에서 오염물의 강처분성과 약처분성을 이용하여 측정되고 IMF의 경제적 충격이 강처분과 약처분하에서 각각 동일한 전제조건이 되기에 외생적 요인이 환경규제를 포함한 기술효율에 반영되지는 않는다.

〈표 1〉 24개 산업의 산출물, 오염물, 투입물의 요약통계

	변수	평균	표준편차	최대	최소
1997	산출물(10억)	16974	13202	42157	627
	SO _x (톤)	27399	71558	344533	109
	NO _x (톤)	21751	57494	283170	184
	자본(10억)	8265	7628	26658	258
	노동(명)	113411	81354	286311	3546
	원재료(10억)	8680	7263	22901	241
	연료비(10억)	172	243	815	1
	전력비(10억)	203	237	874	5
1998	산출물(10억)	15785	13178	46620	651
	SO _x (톤)	23958	59448	284745	92
	NO _x (톤)	18696	48681	229941	136
	자본(10억)	8986	9071	31157	256
	노동(명)	97655	70379	234768	3752
	원재료(10억)	8152	7243	21875	214
	연료비(10억)	183	272	1065	2
	전력비(10억)	205	239	883	5

자료 : 광공업통계조사보고서(1998~1999).

1997년에 대한 투입물 효율 척도하에서 시도한 실증결과는 〈표2〉와 같다. 1997년의 경우, 강처분 즉, 환경에 대한 비용부담 없이 환경을 자유롭게 이용 가능한 기술조건하에서 생산기술효율을 추정하였을 때, 산업별 효율수준에 있어서 광업, 담배, 코크스 및 석유정제, 제1차 금속 등 4개 산업은 최대효율을 보인 반면, 여타 산업들은 상대적으로 매우 저조한 기술효율수준을 보였다. 그 중, 음식료품, 목재 및 나무, 자동차 및 트레일러 등은 최대효율의 50%에도 미치지 못하였다.¹⁹⁾ 그러므로 산업간 기술효율의 격차로 인하여 상당한 생산요소의 낭비와 비효율적 생산이 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 강처분하의 산업의 평균 기술효율수준은 0.659로서 비효율적 산업들이 최대효율산업과 동일한 효율 수준을 유지할 수 있다면 상당한 투입자원의 절약을 가져올 수 있다. 즉, 산업별로 평균 기존의 효율수준에서 34%정도의 효율개선의 여지가 남아있다.²⁰⁾

19) 가령, 최대효율을 보인 코크스 및 석유정제 산업은 음식료품 산업에 비하여 생산요소의 절반만 투입해도 동일한 산출물을 생산할 수 있음을 의미한다.

〈표2〉 투입물 효율척도하의 기술효율과 생산성 상실율 (1997)

(단위: $0 \leq E_I^S, E_I^W, EI \leq 1$, %)

		강처분 (E_I^S)	약처분 (E_I^W)	환경효율 지수 (EI)	생산성 상실율
	광업	1.000	1.000	1.000	0.0
경공업	음·식료품	0.469	0.520	0.901	9.9
	담배	1.000	1.000	1.000	0.0
	섬유	0.604	0.919	0.657	34.4
	봉제의복 및 모피	0.801	1.000	0.801	19.9
	가죽, 가방 및 신발	0.533	0.548	0.973	2.7
	목재 및 나무	0.485	1.000	0.485	51.5
	출판, 인쇄 및 기록매체	0.902	0.922	0.978	2.2
	고무 및 플라스틱	0.563	1.000	0.563	43.7
	가구 및 기타	0.604	0.771	0.783	21.7
	재생자료 가공처리업	0.430	1.000	0.430	57.0
중공업	펄프 및 종이	0.542	1.000	0.542	45.8
	코크스, 석유정제 및 핵연료	1.000	1.000	1.000	0.0
	화학물 및 화학	0.556	0.639	0.870	13.0
	비금속광물	0.898	1.000	0.898	10.2
	제1차 금속산업	1.000	1.000	1.000	0.0
	조립금속	0.648	0.691	0.937	6.3
	기타 기계 및 장비	0.529	0.771	0.686	31.4
	컴퓨터 및 사무용 기기	0.525	1.000	0.525	47.5
	기타 전기기계 및 전기변환장치	0.519	0.639	0.812	18.8
	전자부품, 영상, 음향 및 통신	0.633	0.641	0.987	1.3
	의료, 정밀, 광학기기 및 시계	0.502	0.996	0.504	49.6
	자동차 및 트레일러	0.498	0.622	0.800	20.0
	기타 운송장비	0.567	1.000	0.567	43.3
평균	경공업	0.639	0.868	0.757	24.3
	중공업	0.647	0.846	0.779	22.1
	산업전체	0.659	0.862	0.779	22.1

- 20) 두 오염배출량을 아예 제외한 산출물과 5종류의 투입물 만을 사용하여 즉, 오염물의 생산에 대한 효과를 무시하고 산업별 기술효율을 추정했을 때, 평균 기술효율은 1997년에 0.616, 1998년에 0.655였다. 즉, 모든 산업이 생산가능곡선상에서 생산이 이루어졌을 경우에 비하여 평균 약 38.4%와 34.5%의 비효율적 생산을 의미한다. 이는 환경변수를 포함했을 때 보다 기술효율수준이 낮아진 것으로서, 환경변수를 사용할 경우 생산단위의 선택변수가 증가하고 효율향상의 여지가 커질 수 있음을 의미한다. 참고로 모수적(parametric) 접근방법을 사용한 한광호·김상호(1999)의 1990~1994년간 제조산업의 평균기술효율은 0.640로서, 연도는 차이가 있으나 본 연구와 비슷한 추정치를 보여 주었다. Fare et al. (1989, p. 95)는 환경요소를 배제한 효율측정의 상대적 저하는 생산단위의 오염감소의 노력을 인정하지 않고 측정한 것으로 생산단위의 기술효율과 생산단위간 효율의 상대적 성과의 왜곡을 초래하므로 이는 현실 설명력이 보다 낮다고 주장한다.

반면 환경요소가 생산단위에 비용을 초래하는 가정에 기초한 약처분하의 기술효율을 측정하면 오염배출량이 각 산업들의 생산을 제약하는 정도를 파악할 수 있다. 즉, 오염물에 대한 비용을 부담하는 경우의 약처분 하의 제약조건은 <그림1> 이 보여주듯이 생산량과 투입량의 확대와 축소를 오염물과 결부시킴으로써 강처분하에서 가능하던 최대생산량 수준을 축소시키게 되고 생산가능곡선이 강처분기술하의 생산가능곡선에 비하여 축소되는 결과를 초래한다. 이로 인하여 약처분하의 대부분 산업들은 상대적으로 강처분하의 기술효율에 비하여 최대생산가능량의 축소로 상당히 개선된 효율수준을 보이게 된다. 12개 산업이 약처분의 생산가능 경계상에 위치할 정도로 기술효율의 변화가 뚜렷하다. 특히, 강처분하의 기술효율과의 격차가 클수록 환경제약이 초래하는 생산의 기술효율에 대한 영향이 보다 높음을 의미한다. 환경제약의 영향을 크게 받는 산업으로는 섬유제품, 목재제품, 펄프 및 종이제품, 고무 및 플라스틱, 사무계산기계, 의료정밀, 기타운송장비, 재생자료가공처리업 등이 속한다. 약처분하의 24개 산업의 평균 기술효율수준은 0.862로서, 강처분하의 평균효율 0.659과 상당한 격차를 보여주었다. 그러므로 이들 산업에 대한 환경제약은 상응하는 비용부담과 생산의 제약을 초래할 것임을 알 수 있다. 실제 두 기술효율을 이용한 환경효율지수를 산정하였을 때, 광업, 담배, 코크스 및 석유정제, 제1차 금속을 제외한 20개 산업이 매우 낮은 환경효율지수를 보였다. 그 중, 가죽가방, 출판인쇄기록, 조립금속제품, 영상음향 등의 환경효율지수는 최대효율지수, 1에 근접한 0.900이상을 보였다. 반면 목재나무제품, 펄프종이, 고무 및 플라스틱, 사무계산 및 기계, 의료 및 정밀기계, 기타운송장비, 재생자료가공처리업 등은 효율지수가 0.5 안팎으로 매우 저조하다. 물론 환경효율지수가 낮은 산업들은 오염처리에 상당한 비용부담을 안고있는 산업으로서 환경제약의 영향을 민감하게 받게 된다. 24개 산업의 평균환경효율지수는 0.779로서 산업전반적으로 환경효율수준은 매우 낮았다.

생산성 상실수준 역시 산업간에 큰 격차를 보였다. 최대효율을 보인 4개 산업은 생산성상실이 없고 가죽가방, 출판인쇄, 조립금속, 영상음향 등의 산업은 상대적으로 생산성상실이 작았다. 그러나 재생자료가공업, 목재나무, 의료정밀, 사무기계, 펄프종이, 고무플라스틱, 기타운송장비 등의 제조산업은 40-50%의 매우 높은 생산성상실율을 보였다. 이들 산업으로 인하여 24개 산업의 전체 평균생산성 상실은 22.1%로 나타나, 투입물 효율척도하에서 환경제약은 상당히 크게 생산성에

영향을 줄 수 있는 것으로 추정되었다.²¹⁾

특히 산업을 경공업과 중공업으로 구분하여 기술효율과 생산성에 미치는 영향을 살펴 볼 필요가 있다. 오염물을 자유롭게 제약없이 처분할 수 있는 강처분하의 기술효율은 중공업이 다소 높은 반면, 오염물 처분에 비용이 수반될 경우의 약처분하의 기술효율은 오히려 경공업이 높게 나타난다. 이는 대부분 중공업이 경공업보다 오염물 처분성에 보다 크게 의존하는 산업 즉, 오염물배출에 보다 크게 의존하는 산업임을 보여주고 있다. 그러나 두 기술의 상대적인 격차는 오히려 경공업이 보다 높게 나타남으로써 환경제약의 영향을 흡수할 능력이 중공업이 보다 높은 것으로 예견된다. 결과적으로 환경효율의 정도를 보여주는 환경효율지수는 중공업이 경공업보다 높았다. 즉, 중공업이 환경제약의 비용부담을 흡수할 생산상의 능력에서 경공업보다 우월한 위치에 있음을 의미한다.²²⁾ 실제 환경제약의 기술비효율로 인한 생산성상실에서 중공업이 보다 적은 상실율을 보였다.

1998년 투입물 효율척도하의 기술효율과 생산성상실율에 대한 결과는 <표3>과 같다. 기술효율 면에서 1997년에 비하여 1998년의 결과는 24개 산업이 전반적으로 큰 효율향상을 보였다. 강처분하의 최대효율성과를 보인 산업은 기존의 4개 산업이 외에 출판인쇄, 비금속광물을 포함한 6개 산업으로 증가하였고 전반적인 기술효율 수준도 상당한 향상을 보였다. 기술효율에 큰 변화를 보인 산업은 의복모피, 펄프종이, 가죽가방, 사무계산기계, 재생자료가공처리업 등이었다. 1998년의 두 기술 효율에 의존한 환경효율지수는 전반적으로 상승하였다. 산업의 평균환경효율지수는 1997년의 0.779보다 상당히 높은 0.870으로 향상되었다. 뚜렷한 환경효율지수의 개선을 보인 산업으로는 섬유제품, 의복모피, 펄프종이, 화합물화학, 비금속광물, 기타기계장비, 사무계산기계, 기타전기기기, 가구기타, 재생자료가공처리업 등이었다. 환경제약으로 인한 생산성 상실에 있어서도 지난해의 산업전체 평균생산성 상실율이 22.1%에서 13.0%로 큰 개선을 보였다. 경공업과 중공업으로 구분해

21) 일반적으로 산업간 기술효율의 격차는 개별 산업내 기술효율의 격차보다 크게 나타난다. 따라서 산업간 생산성상실수준도 보다 크게 추정되었다.

22) 중공업이 경공업보다 강처분하의 기술효율이 높다는 것은 오염물 배출이 상대적으로 높다는 것을 의미하지만 환경효율지수에서 중공업이 높은 수준을 보인 것은 생산상 환경제약의 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다. 즉, 이미 환경을 제외한 기술효율의 수준에서 중공업이 경공업에 비하여 훨씬 높기 때문에 환경요소를 추가할 경우 생산상 부담은 중공업이 높지만 중공업과 경공업의 기술효율 자체를 뒤바꿀 정도로 영향을 미치지 않는다는 것이다.

불 경우, 경공업이 중화학공업보다 강처분과 약처분하의 기술효율이 모두 높게 계측되었으나, 환경제약의 흡수능력을 보여주는 환경효율지수에서는 오히려 낮게 나타났다. 따라서 환경제약으로 인한 생산성 상실율도 15.0%로 중공업의 12.6%보다 높은 영향을 보여주었다.

〈표3〉 투입물 효율척도하의 기술효율과 생산성 상실율 (1998)

(단위: $0 \leq E_I^S, E_I^W, EI \leq 1$, %)

		강처분 (E_I^S)	약처분 (E_I^W)	환경효율 지수 (EI)	생산성 상실율
	광업	1.000	1.000	1.000	0.0
경공업	음·식료품	0.469	0.496	0.946	5.4
	담배	1.000	1.000	1.000	0.0
	섬유	0.615	0.804	0.764	23.6
	봉제의복 및 모피	0.812	0.832	0.976	2.4
	가죽, 가방 및 신발	0.823	0.839	0.981	1.9
	목재 및 나무	0.517	1.000	0.517	48.3
	출판, 인쇄 및 기록매체	1.000	1.000	1.000	0.0
	고무 및 플라스틱	0.653	1.000	0.653	34.7
	가구 및 기타	0.624	0.632	0.987	1.3
	재생자료 가공처리업	0.678	1.000	0.678	32.2
중공업	펄프 및 종이	0.571	0.879	0.650	35.0
	코크, 석유정제 및 핵연료	1.000	1.000	1.000	0.0
	화합물 및 화학	0.574	0.598	0.961	3.9
	비금속광물	1.000	1.000	1.000	0.0
	제1차 금속산업	1.000	1.000	1.000	0.0
	조립금속	0.667	0.684	0.976	2.4
	기타 기계 및 장비	0.595	0.680	0.875	12.5
	컴퓨터 및 사무용 기기	0.877	1.000	0.877	12.3
	기타 전기기계 및 전기변환장치	0.527	0.562	0.938	6.2
	전자부품, 영상, 음향 및 통신	0.596	0.601	0.992	0.8
	의료, 정밀, 광학기기 및 시계	0.591	0.887	0.666	33.4
	자동차 및 트레일러	0.475	0.540	0.881	11.9
	기타 운송장비	0.553	1.000	0.553	44.7
평균	경공업	0.719	0.860	0.850	15.0
	중공업	0.694	0.802	0.874	12.6
	산업전체	0.717	0.835	0.870	13.0

〈표4〉는 생산적 효율척도하에서 1997년에 대하여 환경제약이 기술효율과 생산성 상실율에 미치는 영향을 추정한 것이다. 강처분과 약처분하의 기술효율은 투입물 척도하의 기술효율에 비하여 크게 개선되었다. 투입물 효율척도하에서 50%가량의 산업이 0.5정도의 저조한 기술효율을 보였으나 생산적 효율척도에서는 거의 모든

산업이 강처분하에서 0.7이상의 기술효율을 보여 산업의 평균기술효율이 0.816으로 크게 개선되었다. 기술효율이 높은 산업은 투입물 효율척도하에서와 동일하게 최대성과를 보이는 4개 산업을 포함한 출판인쇄, 비금속광물 등이며 음식료품, 목재나무, 가죽가방 등 경공업에 속한 대부분은 상대적으로 낮은 효율을 보여준다. 그런데 약처분을 가정한 상태하의 기술효율은 오염물의 자유처분하에서 낮은 효율을 보였던 산업들의 상당 부분이 최대효율 혹은 최대효율에 근접한 기술효율을 보임으로써, 환경제약으로 인한 생산가능영역의 축소가 일어났음을 반영하고 있다.

〈표4〉 생산적 효율척도하의 기술효율과 생산성 상실율 (1997)

(단위: $0 \leq E_P^S, E_P^W, EI \leq 1, \%$)

		강처분 (E_P^S)	약처분 (E_P^W)	환경효율 지수 (EI)	생산성 상실율	성장율* (91-97)
	광업	1.000	1.000	1.000	0.0	-8.8
경공업	음·식료품	0.699	0.743	0.940	11.7	4.2
	담배	1.000	1.000	1.000	0.0	-0.2
	섬유	0.786	0.976	0.806	35.1	0.6
	봉제의복 및 모피	0.896	1.000	0.896	19.7	3.6
	가죽, 가방 및 신발	0.730	0.740	0.986	2.7	-9.8
	목재 및 나무	0.704	1.000	0.704	50.4	1.3
	출판, 인쇄 및 기록매체	0.950	0.960	0.989	2.2	9.6
	고무 및 플라스틱	0.750	1.000	0.750	43.7	5.6
	가구 및 기타	0.777	0.878	0.885	21.7	-0.5
	재생자료 가공처리업	0.749	1.000	0.749	43.8	56.1
	펄프 및 종이	0.736	1.000	0.736	45.8	5.6
	코크스, 석유정제 및 핵연료	1.000	1.000	1.000	0.0	12.8
	화합물 및 화학	0.799	0.799	1.000	0.0	8.4
	비금속광물	0.948	1.000	0.948	10.1	2.9
	제1차 금속산업	1.000	1.000	1.000	0.0	5.3
	조립금속	0.810	0.846	0.957	8.5	9.3
	기타 기계 및 장비	0.744	0.890	0.835	30.2	5.8
	컴퓨터 및 사무용 기기	0.724	1.000	0.724	47.5	35.8
	기타 전기기계 및 전기변환장치	0.733	0.804	0.912	16.9	8.7
	전자부품, 영상, 음향 및 통신	0.801	0.801	1.000	0.0	8.5
	의료, 정밀, 광학기기 및 시계	0.710	1.000	0.710	49.6	6.6
	자동차 및 트레일러	0.777	0.823	0.944	10.8	9.8
	기타 운송장비	0.753	1.000	0.753	43.3	13.2
	경공업	0.804	0.930	0.871	23.1	7.1
평균	중공업	0.810	0.920	0.886	20.2	10.2
	산업전체	0.816	0.928	0.884	20.6	8.1

주: * 1991-1997년간 24개 산업의 실질산출물의 연간성장율임. 연간 성장율= $\{ \exp(\ln(y_{97}/y_{91})/6) - 1 \} * 100$.

1991-1997년간의 실질 GDP의 연간 성장율은 6.6%임. GDP deflator는 1995=100.

약처분하의 13개 산업이 최대효율을 보인 결과, 산업의 전체평균효율은 0.928로 추정되었다.

환경제약의 영향을 가늠할 수 있는 환경효율지수는 산업전체의 평균을 기준으로 투입물 척도하의 0.779보다 상당히 향상된 0.884를 보였고 환경효율지수 1을 보인 산업이 4개 산업에서 6개 산업으로 늘어났다. 투입물 효율척도의 결과에 비하여 산업전체의 평균생산성 상실이 20.6%로 약간 개선되었다. 이는 생산적 척도하의 생산성 상실이 투입물과 산출물이 동시에 최소 및 최대화로 조정되므로 작은 산출물의 변화가 생산성에 큰 영향을 줄 수 있기 때문이다.

경공업과 중공업을 비교할 때, 강처분과 약처분하의 기술효율은 상대적으로 높아졌으나 투입물 척도하의 결과와 비슷한 현상을 보였다. 즉, 중공업의 경우, 강처분 기술효율은 경공업보다 높으나 약처분 기술은 낮게 나타남으로써, 환경효율지수는 상대적으로 높고 생산성상실도 보다 낮게 추정되었다.

〈표5〉는 생산적 효율척도하의 1998년에 대한 기술효율과 생산성 상실을 보여 준다. 1998년의 경우, 1997년에 비하여 강처분하에서 기술효율 수준은 전반적으로 높다. 약처분하의 산업의 평균 기술효율은 0.916으로 상대적으로 1997년의 0.928 보다 낮은 수치를 보임으로써 강처분과 약처분의 기술효율의 격차가 보다 축소되었다. 이는 결국 1998년의 환경제약이 1997년 환경제약에 비하여 산업에 주는 압력이 상대적으로 약화되었음을 시사하는 것이다. 강처분하의 기술효율을 근거로 두 년도간에 비교할 때, 상당한 기술효율의 향상을 보여준 산업은 가죽가방, 고무프라스틱, 사무계산기계, 기타운송장비, 재생자료가공처리업 등으로 나타났다. 이들 산업은 1997년에 오염처리가 상당히 생산의 장애요소가 될 수 있는 산업들이었음을 고려할 때, 1998년 경기후퇴시에 상대적으로 높은 효율개선을 보인 것이 특이하다.

1998년의 강처분과 약처분하의 산업별 기술효율의 수준이 보다 좁혀짐에 따라서 결과적으로 환경효율지수는 높은 수준을 보였다. 환경효율지수가 1을 보인 산업이 9개 산업으로 늘어났으며 산업의 전체평균 환경효율지수도 0.933이었다. 여전히 코크스석유정제, 제1차 금속, 화합물 및 화학 등 중화학산업의 높은 환경효율지수에 반하여 경공업에 속한 섬유, 목재나무, 고무프라스틱 등과 의료정밀, 재생자료가공처리업 등은 가장 낮은 환경효율지수를 보였다. 산업전체의 평균생산성 상실수준은 12.2%이고 생산성상실의 감소에 대한 주된 기여 산업들은 경공업의 봉제

의복 및 모피, 음식료품, 목재나무, 고무프라스틱, 재생자료가공처리업과 중공업의 펄프종이, 의료정밀, 기타운송장비 등이다. 경공업과 중공업의 비교에서는 전반적으로 효율수준은 높아졌으나 1998년의 투입물 척도와 비슷한 패턴을 보였다. 중공업의 환경효율지수가 크게 개선되었고 생산성상실도 10.5%로 경공업의 15.8%보다 크게 개선된 것으로 나타났다. 따라서 향후 기술효율과 생산성에 보다 큰 영향을 받는 대부분의 경공업과 펄프 및 종이, 컴퓨터 및 사무용기기, 의료정밀 및 광학기기, 기타운송장비등에 있어서 환경요소의 극복이 한국경제의 지속가능한 성장과 생산성향상을 통한 경쟁력 강화를 위하여, 한국산업의 중요한 선결과제의 하나가 될 것으로 보인다.

한편, 개별 산업별로 실질 산출물의 성장율을 실질 GDP의 성장율과 비교하는 것은 기술효율 및 생산성과 함께, 추가적인 시사점을 줄 수 있다. 경제가 발전함에 따라, 오염산업이 감소하는 것은 일반적인 현상은 아니지만, OECD선진국의 경우, 지난 30년동안 어떤 오염산업도 GDP의 성장율보다 빠르게 성장하지는 않았다.²³⁾ <표4>와 <표5>에서 1998년의 경기후퇴는 1998년의 포함여부에 따라서 1990년대 24개 산업에 대한 실질 GDP의 연간성장율이 약 3%의 차이를 보인다. 1991~1997년간 연간 성장율을 기준으로 볼 때, 산업전체의 연간성장율은 8.1%이고 그 중 중공업의 연간 성장율은 10.2%, 경공업은 7.1%이다. 동 기간동안 실질 GDP의 연간성장율이 6.6%임을 고려한다면, 24개 산업의 성장율은 GDP의 연간성장율보다 높다. 그러나 산업별 비교는 상당한 차이를 보인다. 경공업에 속한 10개 산업중 출판인쇄 및 기록매체와 재생가공처리업을 제외한 8개 산업은 실질 GDP의 연간성장율 보다 낮은 성장을 보인 반면, 중공업에 속한 13개 산업중 비금속광물 등 4개 산업을 제외하고 연간성장율이 실질 GDP성장율 보다 높다. 이러한 추이는 <표5>에서도 확인할 수 있다.

1991~1998기간의 산업별 연간 성장율은 경기후퇴의 영향으로 전자부품, 영상음향 및 통신산업을 제외하고 23개 산업이 모두 감소하였지만, 경공업에 속한 출판, 인쇄 및 기록매체와 재생가공처리업이 실질 GDP의 성장율보다 빠른 성장을 보였다. 그러나 중공업에서는 이 기간동안 4.6%의 실질 GDP성장율 보다 낮은 산업이 6개 산업으로 증가하였다. 산업의 성장을 비교와 환경요인을 포함한 기술효율과 생산성

23) 세계경제의 오염산업에 대한 추이는 Mani and Wheeler(1997)를 참조바란다.

〈표5〉 생산적 효율척도하의 기술효율과 생산성 상실율 (1998)

(단위: $0 \leq E_P^S, E_P^W, EI \leq 1$, %)

		강처분 (E_P^S)	약처분 (E_P^W)	환경효율 지수 (EI)	생산성 상실율	성장율* (91-98)
	광업	1.000	1.000	1.000	0.0	-10.2
경공업	음·식료품	0.708	0.708	1.000	0.0	4.0
	담배	1.000	1.000	1.000	0.0	-2.5
	섬유	0.798	1.000	0.798	36.3	1.0
	봉제의복 및 모피	0.904	0.914	0.990	2.0	-2.8
	가죽, 가방 및 신발	0.907	0.941	0.964	7.3	-9.1
	목재 및 나무	0.733	1.000	0.733	46.3	-3.2
	출판, 인쇄 및 기록매체	1.000	1.000	1.000	0.0	5.4
	고무 및 플라스틱	0.822	1.000	0.822	32.5	4.4
	가구 및 기타	0.790	0.795	0.994	1.3	-2.9
	재생자료 가공처리업	0.823	1.000	0.823	32.2	47.2
중공업	펄프 및 종이	0.766	0.938	0.817	33.3	4.2
	코크스, 석유정제 및 핵연료	1.000	1.000	1.000	0.0	11.2
	화학물 및 화학	0.773	0.773	1.000	0.0	8.2
	비금속광물	1.000	1.000	1.000	0.0	-0.5
	제1차 금속산업	1.000	1.000	1.000	0.0	5.2
	조립금속	0.838	0.838	1.000	0.0	3.8
	기타 기계 및 장비	0.800	0.824	0.971	5.8	0.7
	컴퓨터 및 사무용 기기	0.936	1.000	0.936	12.3	27.8
	기타 전기기계 및 전기변환장치	0.726	0.777	0.935	12.6	5.3
	전자부품, 영상, 음향 및 통신	0.772	0.775	0.996	0.8	8.8
	의료, 정밀, 광학기기 및 시계	0.769	0.942	0.817	33.3	3.6
	자동차 및 트레일러	0.696	0.749	0.929	13.8	2.8
	기타 운송장비	0.871	1.000	0.871	24.1	11.9
평균	경공업	0.849	0.936	0.912	15.8	4.2
	중공업	0.842	0.894	0.944	10.5	7.2
	산업전체	0.851	0.916	0.933	12.2	5.2

주 : *1991-1998년간 24개 산업의 실질산출물의 연간성장율임. 연간 성장율= $[\text{EXP}(\text{LN}(y_{98}/y_{91})/7)-1] * 100$.
1991-1998년간의 실질 GDP의 연간 성장율은 4.6%임. GDP deflator는 1995=100.

영향을 함께 고려함으로써 얻을 수 있는 시사점은 산업의 연간성장율이 국가의 실질GDP의 연간성장율보다 낮고 환경을 포함한 기술효율이 낮으며 생산성상실이 큰 산업, 가령, 섬유, 목재 및 나무, 플라스틱 산업 등은 산업의 경쟁력이 약하고 성장의 지속가능성이 높지 못하다. 이러한 산업의 경우, 대부분 낮은 기술효율로 인하여 생산성 또한 낮아서 생산성이 산업의 성장율을 충분히 지지해 주지 못한다. 따라서 이들 산업에 대한 환경제약의 추가는 산업의 지속가능한 성장을 더욱 어렵

게 만들 것이다. 반면 실질성장율이 높고 환경제약하의 기술효율이 높으며 생산성 상실이 적은 산업, 예를 들어, 코크스, 석유정제, 화합물 및 화학산업은 상당한 오염배출을 억제해야 하는 비용부담하에서도 이를 흡수하고도 상대적으로 높은 기술효율과 생산성을 유지함으로써 향후 산업의 지속가능성은 높은 것으로 기대된다.

나아가 1997년과 1998년간 GDP성장율이 5% 에서 -6.7%로 추락하는 경제전환기의 경기후퇴상황에서 24개 산업이 보여준 환경제약에 대한 영향은 경기후퇴시에 보다 감소하였다. 실증결과는 24개 산업의 대부분이 오염배출과 밀접히 연계된 경제성장을 추구하고 있음을 보여 주었다. 그런데 특이한 점은 경기후퇴 시에 오염이 감소하였고 생산에 대한 영향이 크게 감소함에 따라서 기술효율과 생산성에 미치는 영향에 있어서도 향상을 보였다는 점이다. 향후 이러한 산업들이 실질적인 환경친화성과 지속가능한 성장을 위해서는 경기상승기에 근본적으로 환경제약의 영향을 줄일 수 있는 예방적이고, 근본적인 대비가 있어야 하고, 오염처리의 비용부담문제를 경제상승기에 축소해 나갈 수 있는 지혜가 요구된다.

IV. 결론

본 연구는 한국의 24개 광업 및 제조산업의 환경을 고려한 기술효율 및 기술비효율로 인한 생산성상실율을 측정하고 이를 산업간에 비교해 보았다. 24개 산업의 환경제약을 고려한 기술효율 수준은 오염물의 처분성 제약으로 인하여 상당한 차이를 보였고 두 년도와 산업간에 있어서도 큰 격차를 보여 주었으며 이것이 생산성의 상당한 상실을 초래한 것으로 추정된다. 특히 지금까지 오염산업으로 인식되어 온 중화학 공업에 속한 석유정제, 1차 금속, 화합물 및 화학 비금속광물 등의 산업에서 환경을 포함한 기술효율은 음식료품, 가죽가방, 섬유제품 등 경공업에 속한 산업들 보다 높았고 환경제약으로 인한 생산성 상실수준도 오히려 낮았다. 이는 중화학공업에 속한 이들 산업이 오염처리란 환경제약에 직면하더라도 환경제약이란 요소가 산업간에 존재하는 기술효율의 격차에는 근본적으로 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 함축하고 있다. 즉, 실증결과는 오염산업으로 인식된 이들 산업이 환경제약을 흡수하고도 충분히 생산상의 기술효율의 우위를 유지할 수 있음을 보여준 것이다.

산업의 성장율과 환경요인을 포함한 기술효율과 생산성 영향을 함께 고려함으로써

써, 얻을 수 있는 시사점은 산업의 실질 산출물의 연간성장율이 국가의 실질GDP의 연간성장율보다 낮고 환경을 포함한 기술효율이 낮으며 생산성상실이 큰 산업은 산업의 경쟁력이 약하고 성장의 지속가능성이 높지 못하다. 이러한 산업의 경우, 대부분 낮은 기술효율로 인하여 생산성 또한 낮아서 생산성이 산업의 성장율을 충분히 지지해 주지 못한다. 따라서 이들 산업에 대한 환경제약의 추가는 산업의 지속가능한 성장을 더욱 어렵게 만들 것이다. 반면 실질성장율이 높고 기술효율이 높으며 생산성 상실이 적은 산업은 환경제약하에서도 상대적으로 높은 기술효율과 생산성을 유지함으로써, 향후 산업의 지속가능성은 높은 것으로 기대된다.

그러나 전체적으로 24개 산업중 환경제약으로부터 자유로울 수 있는 산업은 거의 없고 크고 작게 생산상의 영향을 받는 것으로 나타난 것으로 볼 때, 환경제약이 우리 산업들이 생산상에 직면한 문제중의 하나임은 분명하다. 환경요소가 극복해야 할 경쟁적 요소의 하나가 됨에 따라서 향후 우리 산업의 과제는 생산상의 부담을 최소화하고 높은 환경성과를 달성함으로써 경쟁력있는 산업으로 거듭날 수 있는 가하는 점이다.

한 때 국가적으로 이러한 산업들이 국가 경제성장의 견인역할과 부의 원천이 된다고 생각했기 때문에 제조산업을 보호하고 정책적으로 지원을 아끼지 않았다. 그러나 경제발전과 함께, 국가의 경제구조도 변화하고 국가의 주된 기간산업도 변화를 필요로 한다. Mani and Wheeler(1997)의 결과에 의하면, 선진국의 사례는 인당 소득이 증가함에 따라 GDP성장에서 제조산업이 차지하는 비중이 감소하였고, 오염산업의 오염원단위가 감소하는 추이를 보여주었다. 물론 경제발전과정에서 산업의 구조변화가 있었으며, 모든 선진국에서 일률적으로 일어난 것은 아니지만, 미국, 캐나다, 일본, 독일, 영국 등 대표적인 선진국의 경우, 구조조정과정에서 오염산업이 감소하였고, 물질에 의존한 성장패턴이 감소하는 뚜렷한 추세를 보였다. 즉, 보다 선진화될수록, 물질에 의존한 산업의존도가 줄어들었다는 것이다. 또한 산업의 성장율의 차이는 산업의 환경적 효과를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. OECD에 포함된 대다수의 선진국들의 경우 오염산업은 GDP의 성장속도보다 빠른 성장을 보여주지 못하였다.

이러한 오염산업에 있어서 선진국들의 대처방안은 한국의 오염산업에 대한 중요한 정책적 시사점을 줄 수 있다. 그 대표적인 방안의 하나로 녹색산업화를 들 수 있다. 녹색산업화는 기술발전을 통하여 물질과 에너지 등 투입물의 사용원단위를

근원적으로 줄임으로서 오염을 억제하거나, 리사이클링을 통하여 오염발생을 줄이는 것이다. 이러한 녹색산업화는 산업의 특성에 따라 다양한 형태의 물질 투입효율 개선의 수단이 마련될 수 있을 것이다. 그 궁극적인 목표는 탈물질화 내지 물질투입의 최소화가 되어야 할 것이다.

다른 방안으로, 기술효율이 낮고 생산성상실에 주는 영향이 큰 산업이나 그 성장이 점차 둔화되거나 정체되는 산업의 경우 경제발전의 과정상 산업의 구조조정이 불가피할 것이고 환경의 치명적 부담과 위기가 예견된다면 구조조정의 적절한 시기를 찾아야 할 것이다. 국민경제가 얼마동안 그리고 언제까지 환경을 심하게 오염시키는 산업에 국가의 경제성장을 계속 의존해야 하는가? 에 대한 의문에 결단을 내리기는 쉽지 않을 것이다. 그러나 산업구조조정의 실패로 경제성장의 정체와 함께 계속 오염산업에 의존하고 있는 국가의 예를 찾기는 어렵지 않다. 결국 산업이 직면한 새로운 도전을 어떻게 슬기롭게 극복하는가에 따라서 지속가능한 경제성장의 여부는 결정될 것이다.

■ 참 고 문 헌

1. 강상목·김운순, "환경규제와 기술제약-한국 지역 제조업을 중심으로-", 한국 자원환경 경제학회, 『자원환경경제연구』, 제11권 제3호, 2002.
2. 신원섭·조광래, "한국 제조업 주요업종의 효율성 분석," 한국은행, 『경제분석』, 제5권 제1호, 1999.
3. 한광호·김상호, "한국제조업의 총요소생산성과 기술적 효율성," 한국경제학회, 『경제학연구』, 제47집 제4호, 1999, pp. 5~28.
4. Afriat, S.N., "Efficiency Estimation of Production Function," *International Economic Review*, Vol. 13, 1970, pp. 568~598.
5. Banker, R.D., A. Charnes and W. Cooper, "Models for Estimation of Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis," *Management Science*, Vol. 30, pp. 1078~1092.
6. Boyd, G.A. and J.D. McClelland, "The Impact of Environmental Constraints on Productivity Improvement in Integrated Paper Plants," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 38, 1999, pp. 121~142.
7. Caves, D.W., L.R. Christensen and E. Diewert, "The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity," *Econometrica*, Vol. 50, No. 6, 1982, pp. 1393~1413.

8. Chung Y.H., R. Fare and S. Grosskopf, "Productivity and Undesirable Output : A Directional Distance Function Approach," *Journal of Environmental Management*, Vol. 51, 1997, pp. 229~240.
9. Coelli, Tim, D.S. Prasada Rao and George E. Battese, *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, 1998.
10. Färe, R., S. Grosskopf, and C.A.K. Lovell, *The Measurement of Efficiency of Production*, edited by A. Dogramaci, "Studies in Productivity Analysis," Kluwer Nijhoff, Boston, Mass, 1985.
11. _____, and Carl Pasurka, "Effects on Relative Efficiency in Electric Power Generation Due to Environmental Controls," *Resources and Energy*, Vol. 8, 1986, pp. 167~184.
12. _____, C.A.K. Lovell, and Carl Pasurka, "Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach," *Review of Economics and Statistics*, Vol. 71, 1989, pp. 90~98.
13. _____, M. Norris, and Z. Zhang, "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries," *The American Economic Review*, Vol. 84, Issue 1, 1994, pp. 66~83.
14. _____, and Daniel Tyteca, "An Activity Analysis Model of the Environmental Performance of Firms-Application to Fossil Fuel Fired Electric Utilities," *Ecological Economics*, Vol. 18, 1996, pp. 161~175.
15. Farrell, M.J., "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of Royal Statistical Society*, Vol. 120, 1957, pp. 253~281.
16. Mani M., and D. Wheeler, "In Search of Pollution Havens? Dirty Industry in The World Economy, 1960-1995," Worldbank, Working Paper, 1997, pp. 1~30.
17. Krugman, Paul., "The Mith of Asias Miracle," *Foreign Affairs* 73, 1994, pp. 62-78.
18. Sancho, Francesc Hernadez, Tadeo, Andres Picazo and Ernest Reig Martinez, "Efficiency and Environmental Regulation," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 15, 2000, pp. 365~378.
19. Shephard, Ronald W., *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press, 1970.
20. Solow, R.M., Technical Change and the Aggregate Production Function, *Review of Economics and Statistics*, Vol. 39, No. 3, 1957, pp. 312~320.
21. Tyteca, D., "Linear Programming Models for the Measurement of Environmental Performance of Firms-Concepts and Empirical Results," *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 8, 1997, pp. 183~198.
22. Wu, Yanrui, "Is China's Economic Growth Sustainable? A Productivity Analysis," *China Economic Review*, Vol. 11, 2000, pp. 278-296.
23. Zaim, O. and F. Taskin, "Environmental Efficiency in Carbon Dioxide Emissions in the OECD: A Nonparametric Approach," *Journal of Environmental Management*, Vol. 58, 2000, pp. 95~107.
24. Zofio, Jose L. and Angel M. Prieto, "Environmental Efficiency and Regulatory Standards: the Case of CO2 Emissions from OECD Industries," *Resource and Energy*, Vol. 23, 2001, pp. 63~83.

On Technical Efficiency and Productivity under Environmental Constraint

Sang Mok Kang*

Abstract

The purpose of this paper is to estimate technical efficiency and the loss of productivity under environmental constraints, and to examine the sustainability of industrial growth for 24 Korean industries. A hyperbolic measure based on the simultaneous success of production improvement and pollution reduction is mainly used as the measure of the sustainable growth. Technical efficiency and loss of productivity under environmental constraints were very different among the 24 Korean industries. The industries that showed a lower growth rate of real output than that of the national real GDP, a low technical efficiency, and the loss of productivity under environmental constraints are difficult to expect industrial competitiveness and sustainable growth. The environmental constraints had a significant effect on the technical efficiency and productivity in most industries. Of those, coke-refined and petroleum, basic metals, and chemicals and chemical products that belong to the heavy industry showed a higher level of technical efficiency than light industry, implying that environmental constraints did not change the fundamental gaps of the technical efficiencies among industries. The counter-measures to overcome the environmental constraints that the Korean industries have confronted might include 1) greening industry minimizing material use and 2) structural change substituting unsustainable industries with low technical efficiency into fast, highly sustainable industries with environmental friendliness.

Key Words: environmental constraint, technical efficiency, productivity

* Visiting Scholar · Researcher, Purdue University