

산출물거리함수를 이용한 환경오염규제의 한계비용 추정

권 오 상*

1. 서론
 2. 오염물질을 포함하는 생산모형
 3. 생산기술상의 제특성과 산출물거리함수
 4. 요약 및 결론
- 부록: 규모수익불변과 동일한 투입물 분포하의 투입물 집계

1. 서론

오염물질의 감소는 사회적 편익과 비용을 유발한다. 대부분의 천연자원과 환경은 편익을 발생시키므로 환경오염규제를 통한 환경질의 향상은 사회적 편익을 유발한다. 하지만 한편으로는 오염물질을 배출하는 것은 대개의 생산활동에 있어 필요불가결하다고 할 수 있다. 따라서 환경오염규제에 의한 오염물질의 감소는 정규 산출물의 생산을 줄이고 사회적 비용을 수반할 수 있다. 사회적으로 바람직한 수준의 오염규제는 이러한 오염규제의 한계편익과 한계비용이 일치되는 수준

에서 결정된다 (Baumol과 Oates, 1988). 현실의 환경규제 수준이 사회적으로 최적인 수준과 같지 않는 한 오염규제의 한계편익은 그 한계비용과 다를 수 있고 따라서 적절한 오염규제수준을 결정하기 위해서는 한계편익과 비용을 추정하는 것에 관한 연구가 모두 필요하다고 할 수 있다.

환경오염규제의 편익을 추정하기 위해서는 가상적 시장을 구축하여 설문조사를 통해 향상된 환경수준에 대해 소비자가 지불할 용의가 있는 액수를 추정하거나, 여행비용접근 같은 가계생산모형 (household production model) 을 이용하는 방법, 그리고 환경편익의 증가가 시장재의 가치에 미치는 영향을 추정하여 그 편익의 가치를 측정하는 방법 등이 있으며, 이들 방법에 관한 연구는 상당히 체계적으로 되어 왔다¹. 하지만 환경오염규제의 한계비용의 추정에 관한 연구는 상대적으로 덜 체계적이며 그 양 역시 적다고

*책임연구원

¹ 이들 방법은 예를 들어 Freeman (1993) 및 Braden 과 Kolstad (1991)에 의해 정리된 바 있다.

할 수 있다.

오염규제의 비용을 추정하는 방법 중 가장 많이 쓰이고 있는 것은 주로 정부에 의해 결정된 오염수준을 달성하는데 따르는 개별 기업 단위의 공학적 비용을 계산하는 것으로서 이 방법은 목표수준의 환경의 질을 달성하는데 있어 가장 비용이 적게 드는 정책을 찾기 위해 주로 이용되었다 (Seskin et al. 1983; Krupnick 1986; Oates et al. 1989). 국가 경제 전체 수준의 연구로서는 일반균형 분석들이 주로 이용되어 오염규제의 직·간접 효과를 추정하였다 (Jorgenson과 Wilcoxon 1990; Hazilla 와 Kopp 1990). 이상의 모형들은 정부에 의해 미리 설정된 오염수준을 달성하는데 따른 총비용을 추정하는 것들로서 현 수준에서의 오염물질을 한 단위 줄이는데 드는 한계비용을 추정하는데는 이용되지 않았다.

또다른 방법으로 우리는 오염물질이 하나의 부산물로서 직접 포함되는 생산모형을 설정하고 이 생산모형의 쌍대(dual) 모형들을 추정함으로써 오염규제의 한계비용을 추정할 수 있다. 대개의 경우 오염물질은 정규 생산물의 생산 수준에 영향을 주지 않으면서 자유로이 감소될 수 없으므로 오염물질의 감소는 정규 산출물의 생산 수준에 부의 영향을 주게 되고 오염규제의 한계비용은 오염물질을 한 단위 줄임에 따라 야기되는 정규 생산물의 감소분으로 추정될 수 있는 것이다. 예를 들어 Pittman(1981)은 Wisconsin과 Michigan의 펄프 산업의 자료를 이용하여 특정 수준의 수질오염물질 배출하의 제약이윤함수를 추정하고 수질오염물질의 배출을 규제함으로써 야기되는 이윤의 감소를 추정

하고자 하였다. 나아가 Färe et al. (1993)은 오염물질을 일종의 원치 않는 산출물로 보고 이 부산물을 하나의 산출물로 고려한 생산 모형을 구축하였는데 특히 산출물거리 함수(output distance function)를 이용하여 오염물질이 정상재의 생산에 미치는 영향을 추정하였다. 이 방법은 또한 Hetermäki (1994)에 의해 핀란드의 펄프산업에 적용된 바 있고 Coggins와 Swinton(1996)에 의해 Wisconsin 주의 석탄소비시설들에 적용된 바 있다.

Färe et al.의 접근 방법의 장점은 오염물질 배출량에 대한 규제 수준을 반드시 알 필요가 없다는 것이다. 다시 말해 위에서 살펴본 모든 여타 방법은 정부에 의해 결정된 목표 오염 수준이 결정되어 있다고 보고 이를 달성하는데 따르는 비용을 추정하고자 한다. 하지만 목표 수준의 배출량이 있는 경우에 있어서 통상적으로 오염규제는 조세나 수량제한과 같은 여러 가지 정책 수단을 통해 이루어지는데 현실적으로 정부가 의도하는 오염물질 배출 수준이 반드시 개별 경제주체에 의해 지켜진다고 볼 수 없으며 따라서 실제 오염물질 배출량은 정부의 목표 수준 보다도 높거나 낮을 수 있다. 따라서 여타의 방법들은 목표 수준의 배출량이 존재하지 않거나 개별 경제주체에 의해 이 목표 수준이 잘 지켜지지 않는 경우 사용되기 어렵다는 단점이 있다. 하지만 Färe et al.의 모형은 실제로 사용된 투입량과 산출물 수준, 그리고 오염물질 배출량을 가지고 모형을 추정하므로 환경규제가 존재하는지 혹은 그 규제 수준이 실제로 지켜지는지의 여부에 상관없이 이용될 수 있다.

나아가 산출물거리함수는 생산기술의 제 특성을 완전히 나타내어 줄 수 있고 생산경제학의 기타 제 함수, 특히 그 중에서도 수입함수 (revenue function)와는 잘 정립된 쌍대관계(duality)를 가지고 있다. 따라서 이를 이용하면 추정된 산출물거리함수에 기초하여 생산기술상의 제 특성을 파악할 수 있고 이 또한 산출물거리함수를 통한 분석이 가지는 장점이라고 할 수 있다.

산출물거리함수를 통한 분석 모형이 이상의 장점을 가지고 있기 때문에 한국 경제에 있어서의 오염규제가 유발하는 한계비용을 추정하는데도 광범위하게 이용될 수 있을 것이다. 이상의 목적을 가진 연구를 수행하기 위해서는 무엇보다도 개별 생산자 혹은 경제 전체의 정규 산출물, 오염물질 배출량, 그리고 투입재의 사용량에 대한 정확한 통계가 필요하다. 하지만 지금 당장에는 이 방법이 적용될 수 있을 정도로 엄밀하게 작성된 자료를 구하기가 어렵다고 할 수 있다². 따라서 본고는 한국 경제의 자료를 이용하여 오염물질의 암묵적 가격을 직접 추정하기 보다는 산출물거리함수를 이용한 생산 모형이 오염규제의 한계비용을 추정하는데 있어 어떻게 이용될 수 있는지를 이론적으로 보이고 이를 이용하는데 있어서 야기되는 논점들을 정리하는 것을 그 목적으로 한다. 본 연구는 기존의 Färe et al.이나 Coggins와 Swinton의 모형들과 몇 가지 점에서 차이를 가

지는데 우선 이들 모형이 가지고 있는 두가지 오류들을 지적·수정한다. 구체적으로 말하여 이들 모형은 오염물질의 약처분가능성(weak disposability)을 부과하기 위해 산출물거리함수가 오염물질에 대해 비증가한다고 가정하며 또한 오염물질의 암묵적 가격을 도출하기 위하여 적어도 한 정규 산출물의 암묵적 가격이 시장가격과 동일하다고 가정하는데 본고는 이 두 가지 가정이 모형의 이론적 근거와 일치하지 않음을 보인다. 둘째로 본고는 기존 연구에서 나아가 산출물거리함수를 추정하는 과정에서 생산기술상의 여러 특성들을 어떻게 부과할 수 있는가 하는 점을 초월대수함수(translog function)를 예로 들어 검토한다. 특별히 규모에 대한 수익불변이나 투입물의 분리가능성을 부과하는 문제, 그리고 개별 기업의 투입물을 집계하여 경제 전체의 투입물 수준을 일관성 있게 구축하는 문제 등을 검토한다.

본고는 다음과 같은 체계를 가지고 있다. 우선 2절은 오염물질을 포함하는 생산모형을 구축하고, 수입함수와 산출물거리함수 사이의 쌍대성을 이용하여 오염물질의 암묵적 가격(shadow price) 혹은 오염규제의 한계비용을 도출한다. 나아가 3절은 위에서 언급한 생산기술상의 제 특성을 산출물거리함수에 부과하는 문제를 검토하고 산출물거리함수를 추정하는데 따른 계량경제학적 제 문제를 논의한다.

2. 오염물질을 포함하는 생산모형

각 생산자의 생산 기술은 투입물 벡터

² 이러한 자료를 얻는데 있어 특히 문제가 되는 것은 오염물질 배출 수준에 관한 직접적인 자료를 얻기가 어렵다는 점이다. Kwon (1996)은 에너지 사용량에 기초하여 간접적으로 계산된 SO₂ 배출량을 이용하여 SO₂ 배출량 규제의 한계비용을 계측하고자 한 바 있다.

$x \in R_+^N$ 를 다음과 같은 산출물 벡터 $y \in R_+^M$ 의 부분집합으로 연결하는 산출물상응 (output correspondence)

$P: R_+^N \rightarrow R_+^M$ 에 의해 나타내어질 수 있다.

$$(1) P(x) = \{y \in R_+^M: y \text{는 } x \text{로 생산 가능}\}.$$

여기서 $P(x)$ 는 주어진 투입물 벡터 x 로 생산가능한 산출물집합이며, y 는 정규산출물과 오염물질(을 모두 포함하는 산출물 벡터)이고, R_+^M 는 M 차원의 모든 비음 (nonnegative)의 실수의 집합이다. 따라서 오염물질은 하나의 원하지 않는 산출물로 가정된다.

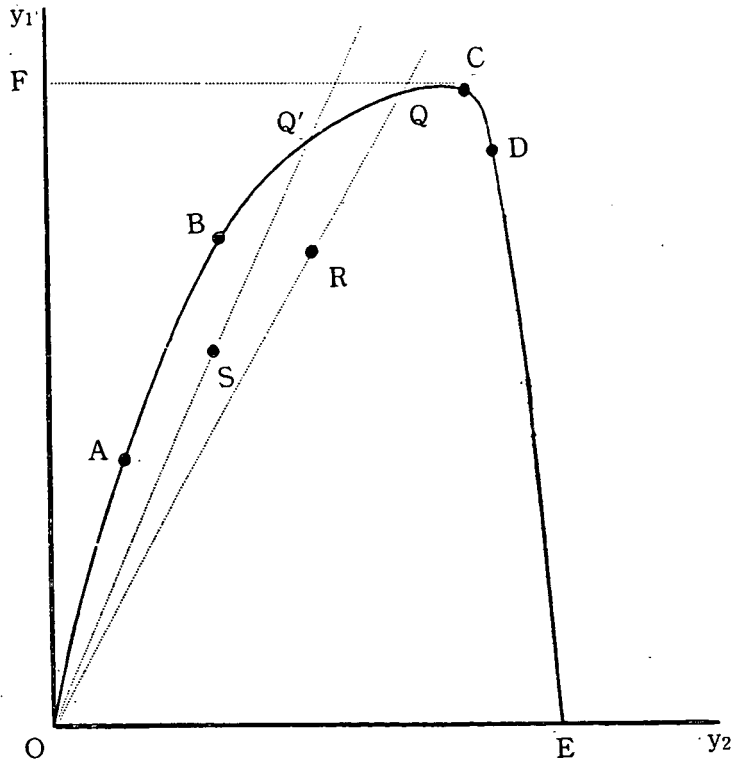
$P(x)$ 는 모든 $x \in R_+^N$ 에 대해 0의 벡터를 포함하며, 유계(bounded)이며, 폐집합(closed set)이라 가정된다. 나아가 다음

의 약처분가능성 (weak disposability) 을 가정한다.

P.1 모든 $(x, y) \in R_+^{N+M}$ 에 대해 만약 $y \in P(x)$ 이고 $0 < \tau \leq 1$ 이면, $\tau y \in P(x)$ 이다.

약처분가능성 공리는 만약 어떤 투입물 벡터 x 가 산출물 벡터 y 를 생산할 수 있으면 y 의 어떤 비례적 감소도 x 에 의해 생산될 수 있다는 것을 의미한다. 다시 말해 만약 y 가 x 에 의해 생산이 되면 원점과 y 를 잇는 직선상의 모든 산출물 조합들은 x 에 의해 생산되어질 수 있다. 하지만 이는 주어진 투입물 수준에서 각 산출물을 어떤 방향으로도 자유롭게 감소하는 것이 항상 가능하다는 것을 의미하지는 않는다. 후자의 특성을 강처

그림 1 산출물집합



분가능성 (strong disposability) 공리라 부르고 다음과 같이 정의한다.

P.1.s 모든 $(x, y) \in R_+^{N+M}$ 에 대해 만약 $y \in P(x)$ 이고 $y' \leq y$ 이면,

$y' \in P(x)$ 이다.

약처분가능성과 강처분가능성이 가지는 개념의 차이는 산출물거리함수를 이용하여 오염물질의 암묵적 가치를 추정하는데 있어 가장 핵심적인 것이라 할 수 있다. 어떤 산출물이 강처분 가능하면 주어진 투입물 수준에서 다른 산출물을 줄이지 않고 이 산출물을 줄이는 것이 항상 가능하다. 하지만 오염물질은 통상적으로 정상재의 생산에 필요불가결한 경우가 많으므로 이 강처분가능성을 충족하지 않을 것이다. 따라서 우리는 모든 산출물이 최소한 약처분 가능하지만 정상재만이 강처분 가능하다고 가정한다. 다시 말해 주어진 투입물 수준에서 오염수준의 감소 없이 정상재의 산출 수준을 줄이는 것은 항상 가능하지만 오염물질은 정상재의 감소 없이 줄여질 수 없다. 예를 들어 주어진 투입물 수준에서 5%의 오염물질의 감소는 모든 정상재들 역시 5% 씩 감소될 때는 가능하지만 그 외의 경우는 반드시 가능한 것이 아니다.

이상의 약처분가능성하의 산출물집합은 <그림 1>에 의해 나타내어질 수 있다. 두 산출물 y_1 과 y_2 가 있다고 가정하고 주어진 투입물 수준에서 A, B, C, D, 그리고 R 과 같은 산출물의 결합이 관측된다고 가정하자. 만약 두 가지 산출물이 다 강처분 가능하면 산출물집합은 면적 OFCDE 로 나타내어진다. 하지만 만약 y_2 는 약처분 가능하고 y_1

만 강처분 가능하면 산출물집합은 면적 OFCBAO를 포함하지 않게 된다. 따라서 A나 B 와 같은 관측치에서는 y_2 를 줄이기 위해서는 y_1 역시 감소되어야만 한다. 이러한 y_1 과 y_2 사이의 한계전환율 (MRT, marginal rate of transformation) 이 y_2 를 줄이는데 따르는 한계비용이라고 해석될 수 있는 것이다. 만약 산출물집합의 경계가 첨점(kink)을 가지면 MRT가 유일하게 정의되지 않기 때문에 이 경계가 첨점을 가지지 않는다고 가정하여야 한다.

이상 산출물집합으로 나타내어진 생산기술은 산출물거리함수를 통해서도 똑같이 나타내어질 수 있는데 이 산출물거리함수야말로 본 연구에서 오염규제의 한계비용을 구하기 위해 이용되어지는 주된 분석 수단이다. 산출물거리함수는 다음과 같이 정의된다³.

$$\begin{aligned} (2) \quad D_0(x, y) &= \inf \{ \theta > 0 : (y/\theta) \in P(x) \} \\ &= \inf \{ \theta > 0 : y \in \theta P(x) \} \end{aligned}$$

이 산출물거리함수는 여러 특성들을 가지는데 특히 모든 $x \in R_+^N$ 에 대해

$$D_0(x, 0) = 0 \text{ 이고 산출물에 대해 선형}$$

³ 산출물거리함수는 주어진 기술 및 투입물 수준에서 산출물들이 확장될 수 있는 최대비율의 역수이다. 이러한 산출물거리함수는 투입물거리함수 (input distance function)와 함께 생산기술의 특성을 나타내는 하나의 쌍대함수로 Shephard (1953, 1970) 에 의해 도입되었으나 최근 경제학의 각 분야에서 사용되고 있다. 예를 들어 Malmquist (1953), Diewert (1993) 등은 거리함수를 이용하여 지수이론 (index number theory) 을 편 바 있으며, Färe와 Grosskopf (1991), Färe 와 Love II (1978) 등은 거리함수를 이용하여 생산의 효율성을 측정하는 것에 관한 연구를 하였고, Deaton (1979) 은 최적 조세를 도출하는데 있어 거리함수를 이용한 바 있다.

동차이며 산출물의 집합

$\{y : D_o(x, y) \leq \alpha\}$ 이 모든 $\alpha > 0$ 에 대해 유계이고 폐집합이다. Färe와 Primont (1995, pp. 17 - 18)에 따르면 약처분가능하에서는 이상의 산출물거리함수가 가지는 특성은 앞에서 언급한 산출물집합의 공리들로부터 도출되며 그 역의 관계도 성립한다. 마지막으로 Shephard (1970, pp. 211)와 Färe (1988, pp.33)에 의하면 산출물집합이 모든 $x \in R_+^N$ 에 대해 볼록 (convex) 집합이라 가정될 경우 산출물거리함수는 산출물의 볼록함수이다.

〈그림 1〉의 산출물집합은 두가지의 산출물이 존재할 경우에 있어서의 산출물거리함수가 어떻게 정의되는지를 보여주고 있다. 먼저 각 산출물이 약처분 가능할 경우 다음과 같은 관계가 존재한다(Färe와 Primont, pp. 16).

$$D_o(x, y) \leq 1 \Leftrightarrow y \in P(x)$$

예를 들어 산출물집합 내부의 한 점 R에서의 산출물거리함수는 OR/OQ 이고 이는 1보다 작다. 하지만 A, B, 그리고 C와 같은 효율적인 점들에 있어서는 산출물거리함수의 값이 1이다. 예를 들어 한 단위의 y_2 를 감소하는 것이 관측치 R에서 S로의 이동을 가져온다면, 이 한 단위의 감소로 인해 산출물거리함수는 OS/OQ'로 변하게 된다.

곡선 OA나 AB와 같이 그에 상응하는 산출물집합의 경계 (frontier)가 양의 기울기를 가지는 영역에서는 산출물거리함수는 y_1 에 대해 증가하고 y_2 에 대해 감소한다. 하지만 곡선 CD와 같이 그에 상응하는 경계가 음의 기울기를 가지는 영역에 있어서는

산출물거리함수는 y_1 과 y_2 모두에 대해 증가한다. 따라서 한 산출물이 단지 약처분 가능하다는 사실은 산출물거리함수가 이 산출물에 대해 반드시 감소한다는 것을 의미하지 않는다. 이러한 점에서 산출물거리함수를 추정할 때 산출물거리함수를 오염물질에 대해 증가하지 않도록 부호를 제약하는 기존의 Färe et al.이나 Coggins와 Swinton의 모형은 약처분가능성의 개념과 부합되지 않는다고 할 수 있다. 곡선 CD와 같은 영역에서는 두 산출물간에 음의 기울기가 존재하므로 오염물질배출에 있어서 일종의 과잉 (congestion) 현상이 존재하며, 이러한 과잉배출영역에서는 정규 산출물을 줄이지 않으면서 오염물질을 감소하는 것이 가능하다⁴. 실제로 Hetemäki는 핀란드 펄프산업의 경우 상당히 많은 수의 기업이 이러한 과잉배출영역에 위치하고 있음을 보여준 바 있으며, 따라서 오염물질이 정상재와는 달리 단지 약처분 가능하다고 가정될 경우에도 산출물거리함수가 오염물질에 대해 비증가하도록 제약조건을 부과하지 말아야 한다.

다음과 같은 수입함수와 산출물거리함수간의 쌍대관계는 Shephard (1970, pp. 266 - 272)에 의해 정립되었으며 오염물질의 암묵적 가격을 추정하는데 있어 핵심적 역할을 한다.

⁴ 과잉배출영역에서의 이러한 현상이 앞에서 정의한 약처분가능성과 상치되는 것은 아니다. 약처분가능성은 단지 어떤 산출물조합이 주어진 투입물로 생산가능할 경우 이 산출물조합의 모든 산출물을 동시에 특정비율로 감소시키는 것은 가능하다고 말할 뿐이지 오염물질을 줄이기 위해서 반드시 정상재의 산출량을 줄여야 한다는 것을 의미하지는 않는 것이다.

$$(3) R(x, p) = \sup_y \{py : D_o(x, y) \leq 1\}$$

$$(4) D_o(x, y) = \sup_p \{py : R(x, p) \leq 1\}$$

여기서 p 는 산출물의 (암묵적) 가격 벡터이며 어떤 부호도 가질 수 있다. x 가 투입물 벡터이므로 $R(x, p)$ 는 정상재와 오염물질을 산출물로 하는 극대화된 수입이라 할 수 있다⁵.

이제 (3)과 (4)의 쌍대관계가 어떻게 시장에서 거래되지 않는 오염물질의 가치를 도출하는데 이용되는지 살펴보자. (3)과 (4)로부터 다음과 같은 라그랑지안을 형성할 수 있다.

$\Lambda(y, \lambda) = py + \lambda(1 - D_o(x, y))$
 $y(x, p)$ 와 $\lambda(x, p)$ 를 위의 라그랑지안 문제의 해라고 하면 포락선 정리 (envelope theorem)를 이용할 때 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$(5) \nabla_x R(x, p) = -\lambda(x, p) \nabla_x D_o(x, y(x, p))$$

$$(6) \nabla_p R(x, p) = y(x, p)$$

여기서 ∇_x 는 각 벡터의 x 에 대한 그래디언트를 취함을 의미하며, $\nabla_x R(x, p)$ 와

$\nabla_x D_o(x, y(x, p))$ 는 N 차원 벡터이고 $\nabla_p R(x, p)$ 는 M 차원 벡터이다. 한편 위의 라그랑지안 문제의 1계 필요조건은 다음과 같다.

$$(7) p = \lambda \nabla_y D_o(x, y)$$

따라서 (7)로부터 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$py(x, p) = \lambda(x, p) \nabla_y D_o(x, y)y = \lambda(x, p) D_o(x, y) (\because \text{선형동차성})$$

우리는 특별히 기술적으로 효율적인 관측치들에 관심이 있으며 따라서 $D_o(x, y) = 1$ 이다. 이 경우 위의 관계는

$R(x, p) = \lambda(x, p)$ 임을 의미하고 이 관계를 (7)에 대입하면 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$(8) p = R(x, p) \nabla_y D_o(x, y)$$

우리는 $\nabla_y D_o(x, y)$ 가 (4)의 극대화문제를 푸는, 수입함수로 나뉘어진 암묵적 가격벡터임을 알 수 있다. 따라서 산출물들의 암묵적 가격 벡터 p 는 극대화된 이윤함수를 산출물거리함수의 산출물에 대한 그래디언트 벡터로 곱해준 값으로 정의된다. (8)의 관계가 정의되기 위해서는 산출물거리함수 $D_o(x, y)$ 가 산출물에 대해 연속 미분가능하다고 가정하여야 한다. 이러한 연속미분가능성에 관한 가정은 산출물집합의 경계가 첨점을 가지지 않도록 보장하며 (McFadden 1978, pp. 35) 따라서 각 점에서의 산출물의 암묵적 가격이 유일하게 정의되도록 한다.

수입함수의 극대값 $R(x, p)$ 가 알려져

⁵ 수입함수는 산출물 가격에 대해 비감소하고, 선형동차이며, 볼록이다.

있지 않기 때문에 (8)의 관계를 이용하여 산출물의 암묵적 가격을 도출하는데는 어려움이 있다. 따라서 기존의 Färe et al. 이나, Coggins 와 Swinton, 그리고 Hetemäki의 연구들은 모두 최소한 한 정상재의 시장가격 p_1^0 이 그 암묵적 가격 p_1 과 일치한다고 가정한다. 이 경우 어떤 정상재 혹은 오염물질 y_m ($m \neq 1$)의 암묵적 가격 p_m 은 다음과 같이 나타내어진다.

$$(9) \quad p_m = R(x, p) \frac{\partial D_o(x, y)}{\partial y_m} \\ = p_1^0 \frac{\partial D_o(x, y) / \partial y_m}{\partial D_o(x, y) / \partial y_1}$$

하지만 이 가정은 매우 비현실적이라 할 수 있는데 이는 우선 (8)의 암묵적 가격은 $D_o(x, y) = 1$ 이라는 제약조건하에서만 그 의미를 가지고 있기 때문이다. 따라서 실제로 추정된 산출물거리함수의 값이 많은 관측치에서 1보다 작은 경우에 있어서는 정상재의 암묵적 가격이 그 시장가격과 일치한다고 가정하는 것은 비현실적이라 할 수 있다.

(9)의 가정을 도입하지 않은 채 암묵적 산출물가격을 정의할 수 있는 방법은 오염물질의 암묵적 가격을 정상재의 시장가격이 아닌 암묵적 가격으로 나타내는 것이다. 이 경우 우리는 (8)에 의해 도출된 오염물질의 암묵적 가격을 특정 정상재의 암묵적 가격으로 나누어 줄 수 있다. 예를 들어 한 오염물질 y_m 의 암묵적 가격은 정상재 y_1 의 암묵적 가격을 통해 다음과 같이 나타내어진다.

$$(10) \quad s_m = \frac{p_m}{p_1} \\ = \frac{R(x, p) \partial D_o(x, y) / \partial y_m}{R(x, p) \partial D_o(x, y) / \partial y_1} \\ = \frac{\partial D_o(x, y) / \partial y_m}{\partial D_o(x, y) / \partial y_1}$$

이 비율은 y_m 과 y_1 사이의 MRT로서 정상재 y_1 의 암묵적 가격이 1로 정규화 되었을 때의 y_m 의 암묵적 가격을 나타낸다.

<그림 1>에서의 산출물집합의 경계의 기울기는 정상재와 오염물질간의 MRT에 음의 부호를 취해 준 것과 동일한 것으로서 어떤 부호든 가질 수 있다. 따라서 이 MRT역시 어떤 부호든 취할 수 있으며 만약 그것이 음(양)이면 그것은 한 단위의 오염물질 y_m 을 줄이기 위해 수반되어야 할 정상재 y_1 의 손실(이득)을 나타낸다.

3. 생산기술상의 제특성과 산출물거리함수

(10)에 나타난 것과 같은 관계를 이용하여 오염물질의 암묵적 가격이나 배출규제의 한계비용을 추정하기 위해서는 우선 산출물거리함수가 추정되어야 한다. 우리가 산출물거리함수를 추정하는데는 크게 두 가지 방법이 있는데 모수적(parametric) 방법과 비모수적(nonparametric) 방법이 그 방법들이다. 하지만 비모수적 방법에서는 산출물거리함수의 값을 특정한 함수형태를 부과하지 않고 추정할 수 있다는 장점이 있긴 하지만 선형계획법을 통해 구축된 기술집합(technology set)이 점점을 가지기 때문에 산출

물들의 암묵적 가격이 유일하게 정의되지 않는다. 따라서 단순히 산출물거리함수의 값을 추정하는 것이 목적이 아니라 산출물들의 암묵적 가격을 추정하는 것이 연구 목적일 경우 모수적 방법을 사용하여야 한다. 다시 말해 특정한 함수형태를 산출물거리함수에 부과하여야 한다. 본 절은 y_1 과 y_2 두 가지 산출물이 x_1 과 x_2 두 가지 투입물을 이용해 생산되며 이 중 y_2 가 오염물질이라 가정한다. 예를 들어 다음과 같은 초월대수 산출물거리함수를 설정해 보자.

$$\begin{aligned}
 (11) \quad \ln D_o(x, y) &= f(x, y) \\
 &= \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_n \\
 &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \beta_{nn'} (\ln x_n)(\ln x_{n'}) \\
 &+ \sum_{m=1}^M \alpha_m \ln y_m \\
 &+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \alpha_{mm'} (\ln y_m)(\ln y_{m'}) \\
 &+ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \gamma_{nm} (\ln x_n)(\ln y_m) \\
 M &= N = 2.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (12) \quad \sum_{m=1}^M \alpha_m &= 1, \quad \sum_{m=1}^M \gamma_{nm} = 0, \\
 \sum_{m'=1}^M \alpha_{mm'} &= 0 \quad \forall m.
 \end{aligned}$$

$$(13) \quad \alpha_{mm'} = \alpha_{m'm}, \quad \beta_{nn'} = \beta_{n'n}, \\
 \forall m, m', n, n'.$$

제약식 (12)는 산출물거리함수가 산출물에 대해 선형동차라는 성질을 전역적(global)으로 부과하고 (13)은 추정과정에서 필요한 대칭성을 부과한다.

앞 절에서 살펴본대로 산출물거리함수는 강처분가능성을 가지는 정상재 y_1 에 대해

비감소하지만 오염물질 y_2 에 대해서는 어떤 부호도 가질 수 있다. 모형이 현실에 맞게 설정되었다면 (11)의 추정결과가 산출물거리함수가 y_1 에 대해 비감소하도록 나타나야겠지만 그렇지 못할 경우는 다음과 같은 부호제약이 부과되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 (14) \quad \alpha_1 + \sum_{m'=1}^M \alpha_{1m'} \ln y_{m'} \\
 + \sum_{n=1}^N \gamma_{n1} \ln x_n \geq 0
 \end{aligned}$$

이 단조성(monotonicity) 조건은 위의 제약식 (12)-(13)과는 달리 전역적으로 부과될 수 없고 각 관측치에서의 투입물 및 산출물의 값에 의존함을 알 수 있다.

한편, 두 산출물 y_1 과 y_2 는 공히 약처분가능하다고 가정되는데 이 약처분가능성은 다음의 조건과 동일하다.

$$\ln D_o(x, y) \geq \ln D_o(x, \tau y), \quad 0 < \tau \leq 1.$$

하지만 선형동차성 조건 (12) 와 대칭성 조건 (13)을 부과할 경우 이 약처분가능성은 초월대수함수로 표시된 산출물거리함수에 의해 항상 충족됨을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 제약조건 (12)-(13)이 부과되는 한 약처분가능성은 더 이상의 제약을 요구하지 않는다.

(11)의 초월대수함수로 표시된 산출물거리함수는 생산기술에 대한 어떠한 가정도 부과하지 않은 것이다. 이용되는 자료의 성격이나 연구의 목적에 따라 생산기술에 관한 특정한 가정을 부과하여야 하는 경우가 있는데 이제 그 첫번째 경우로서 추정에 이용되는 자료가 규모에 대한 수익불변하에서 만들어졌다고 가정해 보자. 이 경우 산출물거리

함수는 투입물에 대해 -1계 동차함수라야만 한다는 것이 증명될 수 있다 (Färe와 Primont pp. 24). 다음의 제약조건은 이 규모에 대한 수익불변조건을 초월대수 산출물 거리함수에 전역적으로 부과한다.

$$(15) \quad \sum_n^N \beta_n = -1, \quad \sum_{n=1}^N \gamma_{nm} = 0, \\ \sum_{n=1}^N \beta_{nm} = 0 \quad \forall n.$$

두 번째로 투입물의 분리가능성(separability)에 대해 검토해 보자. 생산물에 따라서는 그 생산과정이 일종의 두 단계의 의사 결정 과정을 거치는 경우가 있을 수 있다. 다시 말해 생산자는 먼저 모든 투입물들을 결합하여 하나의 총체적 투입물을 구축하고 이어서 이 총체적 투입물을 이용하여 생산될 각각의 산출물들의 양을 결정한다. 이 분리가능성이 가정되어야만 하는 한 예로서 우리는 실질부가가치를 이용하여 대기오염 배출 규제의 한계비용을 분석을 하는 경우를 들 수 있다. 특히 우리가 경제 전체의 집계변수들을 가지고 분석을 할 경우 기업의 조산출물(gross output)은 관측이 불가능하고 대신 조산출물에서 중간투입물을 빼준 실질부가가치를 생산물로 정의할 경우가 있다 (표학길·권호영, 1991). 이 경우 조산출물을 대신하여 사용되는 실질부가가치가 조산출물 생산의 기술적인 관계, 예를 들어 투입물의 대체관계 등을 왜곡하지 않고 잘 반영하는 것이 중요한데 Arrow (1974)나 Bruno (1978)에 의하면 자본이나 노동과 같은 원 투입물(primary input)들이 에너지와 같은 중간투입물로부터 조산출물 생산에 있어 분리 가능하면 실질부가가치가 조산출물의 대리변수로 이용될 수 있다. 이 경우 오염물

질 배출량은 에너지 사용량과 직접 연계되어 있으므로 결국 자본이나 노동과 같은 원 투입물이 에너지와 분리 가능하다는 것은 이들 투입물이 모형에 산출물로 포함될 실질부가가치나 대기오염물질과 분리 가능하다는 것을 의미한다. 이상과 같이 투입물들이 산출물들로부터 분리 가능할 경우 산출물거리함수는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$D_o(x, y) = \overline{D}_o(g(x), y)$$

여기서 $g(x)$ 는 투입물 벡터 x 로부터 구해지는 총체적 투입물로서 스칼라이다. 위의 조건은 다음의 조건과 동일하다 (Goldman과 Uzawa 1964).

$$\frac{\partial}{\partial y_m} \left(\frac{\partial D_o / \partial x_1}{\partial D_o / \partial x_2} \right) = 0, \quad \forall m.$$

따라서 이상의 분리가능성 조건을 위의 초월대수함수에 적용하면 다음과 같은 비선형 제약식을 얻는다.

$$(16) \quad \beta_1 \gamma_{2m} - \beta_2 \gamma_{1m} \\ = \beta_{11} \gamma_{2m} - \beta_{12} \gamma_{1m} \\ = \beta_{21} \gamma_{2m} - \beta_{22} \gamma_{1m} \\ = \gamma_{1m'} \gamma_{2m} - \gamma_{2m'} \gamma_{1m} \\ = 0, \quad m, m' = 1, 2.$$

한편 규모에 대한 수익불변과 투입물 분리가능성이 동시에 부과될 경우, 다시 말해 (15)와 (16)이 동시에 부과될 경우에는 그 제약조건이 다음과 같이 된다.

$$(17) \quad \gamma_{nm} = 0, \quad \forall n, m.$$

이 경우 초월대수 산출물거리함수의 투입물과 산출물의 교차항의 계수는 모두 0이 되고 산출물거리함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$D_o(x, y) = \frac{D_o(y)}{h(x)}$$

여기서 $h(x)$ 는 투입물에만 의존하는 함수로서 이러한 산출물거리함수는 생산기술이 다음과 같이 동조적 (homothetic) 일 경우와 부합된다 (Shephard 1970, pp.220 - 222).

$$P(x) = h(x)P(1)$$

여기서 $P(1) \subset R_+^M$ 는 하나의 준거 (reference) 산출물집합으로 투입물 벡터에 의존하지 않는다.

이상에서 살펴본 바 대로 초월대수함수를 이용하여 산출물거리함수를 추정하고 그 결과에 기초하여 오염물질의 암묵적 가격을 추정할 경우 규모에 대한 수익 불변이나 분리 가능성, 그리고 동조성 같은 생산기술상의 제 특성을 잘 부과할 수 있다. 본고가 마지막으로 검토하는 생산기술상의 특성은 경제 전체의 투입물의 집계 (aggregation)가 가능하도록 하는 조건에 관한 것이다. 경우에 따라서는 개별 기업의 생산물이나 투입물에 관한 정보를 얻는 것이 불가능하고 단지 경제 전체의 집계변수들만을 사용하여 모형을 추정하여야 하는 경우가 있다. 이 경우 우리는 경제 전체의 집계 수입함수는 단지 경제 전체의 집계 투입물과 산출물가격의 함수일 뿐 투입물이 개별 기업별로 어떻게 분포되어 있느냐 하는 것은 고려하지 않는다. 하지만 이미 Gorman (1968) 에 의해 보여진 바와 같이 이러한 집계는 항상 가능한 것이 아니며 생산기술에 관한 특정한 가정하에서만 가능하다.

경제 전체에 I 개의 기업이 있다고 하자.

오염물질의 암묵적 가격은 수입함수와 산출물거리함수 사이의 쌍대관계에 의해 도출되므로 집계 투입물 및 산출물자료를 사용하여 산출물거리함수를 추정하는 것은 경제전체를 대표하는 집계 수입함수가 존재함을 전제로 한다. 만약 $R(x, p)$ 를 경제 전체의 수입함수라 할 경우 이 함수는 개별 수입함수의 합이어야만 한다.

$$(18) R(x, p) = \sum_i R^i(x^i, p)$$

여기서 $R^i(x^i, p)$ 는 투입물 벡터 x^i 를 가지고 있는 i 번째 기업의 수입함수이다. 이어서 각 집계 투입물은 다음과 같이 각 개별 기업이 가지고 있는 투입물 양에 기초하여 집계된다.

$$(19) x_n = X_n(x_n^1, \dots, x_n^I), \quad \forall n.$$

여기서 x_n 은 n 번째 집계 투입물이며 x_n^i 는 i 번째 기업이 가지고 있는 n 번째 투입물의 양이다. 따라서 경제 전체의 집계 수입함수는 (18)과 (19)의 집계규칙과 부합되어야 한다.

생산기술이 규모에 대한 수익 불변을 따르고 있고 또한 각 기업이 모두 같은 수준의 투입물량을 가지고 있을 경우는 (18)과 (19)가 동시에 성립되고 수입함수와 투입물의 집계가 항상 가능하다 (부록). 하지만 이 두 전제조건은 항상 충족되는 것이 아니므로 이 두 조건이 충족되지 않는 경우에 있어서도 수입함수와 투입물의 집계가 가능하도록 하는 생산기술상의 조건들이 필요할 때 Gorman 에 따르면 수입함수가 다음과 같은 형태를 가질 경우 집계가 가능하다.

$$(20) \quad R(x, p) = a_0(p) + \sum_{n=1}^N a_n(p)b_n(x_n), \quad N = 2.$$

이에 상응하는 i 번째 기업의 수입함수는 다음과 같아야 한다.

$$R^i(x^i, p) = a_0^i(p) + \sum_{n=1}^N a_n(p)b_n^i(x_n^i)$$

따라서 i 번째 기업은 세 개의 공장을 가지고 있고 각각의 공장은 각기

$a_0^i(p)$, $a_1(p)b_1^i(x_1^i)$, 그리고 $a_2(p)b_2^i(x_2^i)$ 의 수입을 올린다. 따라서 이 생산 기술하에서는 아무런 투입재를 투입하지 않고도 어느 정도의 생산이 가능하며 예를 들어 노동만 투입하거나 자본만 투입하여도 생산이 가능하다. 여기서 우리는 이러한 생산기술이 산출물거리함수를 추정하여 오염물질의 암묵적 가격을 추정하는데 어떤 의미를 가지는지를 검토하고자 한다.

(20)에서 보여지는 수입함수는 다음과 같은 산출물집합으로부터 도출됨을 쉽게 확인할 수 있다.

$$P(x) = P^0(1) + b_1(x_1)P^1(1) + b_2(x_2)P^2(1)$$

여기서 $P^0(1)$, $P^1(1)$ 그리고 $P^2(1)$ 는 일종의 준거 (reference) 집합들로서 투입물 수준에 의존하지 않는다. 이 산출물집합으로부터 다음과 같은 산출물거리함수가 도출될 수 있다.

$$(21) \quad \widehat{D}_o(x, y) = \inf\{\theta : y \in \theta P^0(1) + \theta b_1(x_1)P^1(1) + \theta b_2(x_2)P^2(1)\} = \inf\{\theta : y^0 \in \theta P^0(1), y^1 \in \theta b_1(x_1)P^1(1), y^2 \in \theta b_2(x_2)P^2(1): y^0 + y^1 + y^2 = y\} = \inf\left\{ \max\left[D_o^0(y^0), \frac{D_o^1(y^1)}{b_1(x_1)}, \frac{D_o^2(y^2)}{b_2(x_2)} \right] : y^0 + y^1 + y^2 = y \right\}$$

다시 말해 (20)의 수입함수와 부합되는 산출물거리함수를 찾기 위해 산출물 벡터 y 를 벡터합 $y^0 + y^1 + y^2$ 로 나눈 뒤

$P^0(1)$, $b_1(x_1)P^1(1)$, 그리고 $b_2(x_2)P^2(1)$ 로부터의 거리들을 구한다. 산출물거리함수는 위 세개의 거리 중 가장 큰 것을 최소화하는 벡터합을 구함으로써 결정된다.

먼저 투입물의 집계를 가능하게 하는 (21)의 산출물거리함수가 초월대수 거리함수로 나타내어질 수 있는지를 보기 위해 초월대수함수로 표시된 (11)의 산출물거리함수에 반(anti) 로그를 취하면 다음과 같은 산출물거리함수를 얻는다.

$$D_o(x, y) = d_1(y)d_2(x, y)$$

여기서 $d_1(y)$ 와 $d_2(x, y)$ 는 서로 다른 두 개의 함수이다. 따라서 (21)의 집계를 가능하게 하는 산출물거리함수는 초월대수함수로 표현될 수 없다. 뿐만 아니라 (21)의 산출물거리함수는 산출물에 대해서 항상 연속적으로 미분가능한 것이 아니다. 따라서 각 관측치에서 유일한 암묵적 가격을 얻기 위한 전제 조건이 충족되지 않게 되는 것이

다. 결론적으로 말하여 개별 기업의 산출물 및 투입물에 관한 자료가 아닌 경제 전체의 집계변수를 이용하여 산출물거리함수를 추정하고 오염물질의 암묵적 가격을 추정하고자 할 경우 이러한 집계 가능하도록 하는 생산기술상의 조건과 암묵적 가격이 존재하기 위한 조건이 서로 상충된다. 따라서 생산기술이 규모에 대한 수익불변을 보이고 있고 모든 기업이 동일한 수준의 투입물을 가지고 있다는 비교적 강한 가정이 없이는 집계변수를 가지고 배출규제의 한계비용을 추정하는 것은 이론적으로 문제가 있다고 할 수 있다. 본고의 분석방법을 통해 보다 의미있는 추정 결과를 갖기 위해서는 개별 기업 단위의 미시자료를 이용할 필요가 있다.

마지막으로 위에서 살펴본 산출물거리함수를 추정하는데 있어 이용 가능한 방법들에 관해 간략히 언급하고자 한다⁶. (11)의 산출물거리함수를 추정하기 위해 다음과 같은 잔차항을 설정할 수 있다.

$$\ln D_o(x_t, y_t) = f(x_t, y_t) + \varepsilon_t, \quad t = 1, \dots, T.$$

위에서 밝힌 바대로 산출물집합의 경계에서는 산출물거리함수가 1의 값을 갖고 산출물집합의 내부의 점들에서는 그 값이 1보다 작다. 따라서 위의 추정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(22) \quad 0 = f(x_t, y_t) + \varepsilon_t$$

이상의 관계에 기초하여 Färe et al. 이

나 Coggins 와 Swinton 같은 기존의 연구는 위의 ε_t 가 비음이라고 가정하며 다음과 같은 목적계획법 (goal programming) 을 풀어 산출물거리함수를 추정한다.

$$\min \sum_{t=1}^T \varepsilon_t \quad s.t. \quad \varepsilon_t = -f(x_t, y_t) \geq 0.$$

이러한 목적계획법을 이용한 경계 (frontier) 함수의 추정법은 Aigner와 Chu(1968)에 의해 제시된 것으로 산출물거리함수가 일종의 경계함수인 특성을 잘 반영하지만 그 추정량의 통계적 특성이 알려져 있지 않고 또한 산출물거리함수에 미치는 확률변수의 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

이러한 단점들은 Aigner et al. (1977), Meeusen 과 van den Broeck (1977), 그리고 Stevenson (1980) 등에 의해 제시된 경계최우추정법 (frontier maximum likelihood estimation)을 통해 해결될 수 있다. 이 경우 ε_t 는 통상적인 정규분포를 가지는 확률변수와 반 (half) 정규분포나 혹은 지수분포와 같은 단방향분포 (one-sided distribution) 를 가지는 또다른 확률변수의 합으로 가정되고 이 가정에 따라 우도함수를 구성할 수 있다. 이 방법은 완전한 최우추정법을 보장한다는 장점은 있지만 동시에 몇가지 문제점을 가진다. 우선 (22)의 종속변수가 항상 0 이어서 변이를 가지지 않는다는 문제점이 있는데 이 문제점은 선형동차성 조건 중 하나인 $\sum_m^M a_m = 1$ 를 대입하여 한 산출물을 좌변으로 넘겨주어 추정함으로써 해결이 가능하다. 경계최우추정법은 일반적으로 많은 수의 관측치를 필요로 하며

⁶ 이 문제에 대한 보다 자세한 검토는 Kwon (1996)이나 Greene (1993)에 의해 행해진 바 있다.

특히 (14)와 같은 강처분가능성이나 불록성 처럼 부등호제약식으로 표현되는 제약식들을 모든 관측치에 대해 부과할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 목적계획법을 이용한 추정방법이나 경계최우추정법 모두 장점과 단점을 동시에 가지며 연구의 특성이나 이용가능한 관측치의 수에 따라 이들 추정방법 중 하나가 선택되어야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

본고는 산출물거리함수를 이용하여 오염물질 배출규제의 한계비용을 추정하는 방법에 관해 논의하였다. 수입함수와 산출물거리함수간의 쌍대관계와 오염물질은 정상재와는 달리 자유로이 처분 가능하지 않다는 가정이 이 한계비용을 도출하는데 핵심적 역할을 한다. 본고는 우선 Färe et al.이나 Coggins와 Swinton과 같은 기존의 연구들이 오염물질의 암묵적 가격이 항상 비양(nonpositive)이 되도록 부과하는 것은 오염물질의 약처분가능성 조건과 부합되지 않음을 보인다. 또한 이들 연구들이 도입하고 있는 것처럼 한 정상재의 암묵적 가격이 실제 시장가격과 동일하다는 가정 역시 제한된 경우에만 현실적일 수 있음을 보인다.

본고는 생산기술상의 여러 특성들이 산출물거리함수 추정시 어떻게 반영될 수 있는가를 보여준다. 규모에 대한 수익 불변이나 투입물의 분리가능성, 그리고 동조적 생산기술 등의 조건은 초월대수 산출물거리함수에 전역적으로 부과될 수 있으나 경제 전체의 집계 수입함수의 존재를 가능하게 하는 기술

조건은 산출물거리함수가 연속적으로 미분 가능하여야 한다는 조건과 상치된다. 따라서 보다 의미있는 결과를 얻기 위해서는 개별 기업 단위의 자료를 이용한 분석이 필요함을 보여준다.

이러한 산출물거리함수를 이용한 오염물질 배출규제의 한계비용 분석은 한국 경제에 있어서도 여러 각도로 사용될 수 있을 것이라 생각된다. 예를 들어 대기 오염 물질을 많이 배출하는 산업이 특정 오염물질을 저감하기 위해 지불해야하는 한계비용을 추정하는데 이용될 수 있고, 또한 농약이나 축산폐수의 단위당 감소가 가져다 줄 농업 및 축산생산물의 저감효과도 이 방법을 통해 추정될 수 있을 것이다. 이렇게 추정된 결과는 환경정책에 대한 몇 가지 함의를 제공할 수 있는데, 예를 들어 별도로 추정된 오염규제의 한계편익과 비교하여 현 수준의 오염물질배출규제가 적절한 수준인지를 확인할 수 있다. 또한 효율적인 오염규제하에서는 각 산업에서의 동일 오염물질을 감소하는데 드는 한계비용이 모두 동일하여야 한다. 따라서 추정된 특정 오염물질 배출규제의 한계비용이 각 산업별로 동일한지의 여부를 확인하여 현재의 오염규제의 효율성을 검정하고, 나아가 향후 오염규제의 방향을 설정할 수 있다. 이러한 분석이 가능하기 위해서는 통상적인 투입물, 산출물, 그리고 가격자료외에 각 경영체의 생산행위로 인해 발생하는 오염물질량에 대한 자료를 집계하는 노력이 필요할 것이다.

참고 문헌

부록: 규모수익불변과 동일한 투입물
분포하의 투입물 집계

본 부록은 생산기술이 규모에 대한 수익불변을 보이고 또한 경제 내의 각 기업이 모두 동일한 양의 투입재를 가지고 있을 경우는 수입함수와 투입물의 동시적 집계가 항상 가능하다는 것을 보인다. 각 기업이 x_1^o 과 x_2^o 의 동일한 투입물 수준을 가지고 있다고 가정하자. 따라서 $x_1 = Ix_1^o$ 이고 $x_2 = Ix_2^o$ 이다. 생산기술이 규모에 대한 수익불변을 따를 경우 수입함수는 투입물에 대해 선형동차임이 잘 알려져 있다. 따라서 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} R(x, p) &= \sum_i^I R^i(x^i, p) = \sum_i^I R^i(x^o, p) \\ &= \sum_i^I \frac{R^i(x, p)}{I} \\ &\quad (\because \text{규모에 대한 수익불변}) \\ &= \frac{\sum_i^I R^i(x, p)}{I} \end{aligned}$$

경제 전체의 집계 수입함수 $R(x, p)$ 가 잘 정의되는 각 개별기업의 수입함수의 합에 상수 $1/I$ 를 곱해준 것이므로 이 경우 집계 수입함수 역시 개별 기업의 수입함수가 보유한 모든 성질들을 보유한다. 따라서 집계 수입함수 역시 잘 정의되는 수입함수가 된다.

표학길·권호영. 1991. "우리나라 민간부문의 실질요소투입 및 요소 생산성 추계 (1960 -89년)," 경제논집 30, 147 - 194.

Aigner, D. and S.-G. Chu. 1968. "On Estimating the Industry Production Function," *American Economic Review* 58, 826 - 839.

Aigner, D., C.A. K. Lovell and P. Schmidt. 1977. "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models," *Journal of Econometrics* 6, 21 - 37.

Arrow, K. J. 1974. "The Measurement of Real Value Added," in P. David and M. Reder, eds, *Nations and Households in Economic Growth: Essays in Honor of Moses Abramovitz*, New York: Academic Press.

Baumol W. J., and W. Oates 1988. *The Theory of Environmental Policy*, 2nd ed., Cambridge, Cambridge University Press.

Braden J. B., and C. D. Kolstad 1991. *Measuring the Demand for Environmental Quality*, Amsterdam, North-Holland.

Bruno, M. 1978. "Duality, Intermediate Inputs and Value-Added," in M. Fuss and D. McFadden, eds., *Production Economics: A Dual Approach to Theory and Applications*, Vol 2, Amsterdam, North-Holland.

Coggins, J. S. and J. R. Swinton

1996. "The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO₂ Allowances," *Journal of Environmental Economics and Management* 30, 58 - 72.
- Deaton, A. S. 1979. "The Distance Function in Consumer Behaviour with Application to Index Numbers and Optimal Taxation", *Review of Economic Studies* 46, 391-405.
- Diewert, W. E. 1993. *Essays in Index Number Theory*, Amsterdam, North-Holland.
- Färe, R. 1988. *Fundamentals of Production Theory*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Berlin, Springer-Verlag.
- Färe, R. and S. Grosskopf 1991. "A Distance Function Approach to Price Efficiency", *Journal of Public Economics* 43, 123-126.
- Färe, R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell and S. Yaisawarng 1993. "Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach," *The Review of Economics and Statistics* 75, 374 - 380.
- Färe, R. and C. A. K. Lovell 1978. "Measuring the Technical Efficiency of Production", *Journal of Economic Theory* 19, 150-162.
- Färe, R., S. and D. Primont 1995. *Multi-Output Production and Duality: Theory and Applications*, Boston, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers.
- Freeman III A. M. 1993. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*, Washington D. C., Resources for the Future.
- Goldman, S. M., and H. Uzawa 1964. "A Note on Separability in Demand Analysis," *Econometrica* 32, 387 - 399.
- Gorman, W. M. 1968. "Measuring the Quantities of Fixed Factors," in J. N. Wolfe ed., *Value, Capital, and Growth: Papers in Honour of Sir John Hicks*, Chicago, Edinburgh University Press.
- Greene, W. H. 1993. "The Econometric Approach to Efficiency Analysis," in *The Measurement of Productive Efficiency: Technique and Applications*, edited by Fried, H. O., C. A. K. Lovell and S. S. Schmidt, Oxford, Oxford University Press.
- Hazilla, M. and R. J. Kopp 1990. "Social Cost of Environmental Quality Regulations: A General Equilibrium Analysis," *Journal of Political Economy* 98, 853 - 873.
- Hetemäki, L. 1994. "Do Environmental Regulations Lead Firms into Trouble? Evidence from a Two-Stage Distance Function Model with Panel Data," The Finnish Forest Research Institute.
- Jorgenson, D. W., and P. Wilcoxon 1990. "Environmental Regulation

- and U.S. Economic Growth," *Rand Journal of Economics* 21, 314-340.
- Krupnick, A. J. 1986. "Costs of Alternative Policies for the Control of Nitrogen Dioxide in Baltimore," *Journal of Environmental Economics and Management* 13, 189 - 197.
- Kwon, O. S. 1996. "Measuring the Marginal Cost of SO₂ Control of the Republic of Korea," Unpublished Working Paper.
- McFadden, D. 1978. "Cost, Revenue, and Profit Functions," in M. Fuss and D. McFadden, eds., *Production Economics: A Dual Approach to Theory and Applications*, Vol 1, Amsterdam, North-Holland.
- Malmquist, S. 1953. "Index Numbers and Indifference Surfaces", *Trabajos de Estadística* 4, 209-242.
- Meeusen, W. and J. van den Broeck 1977. "Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error," *International Economic Review* 18, 435 - 444.
- Oates, W. E., P. R. Portney, and A. M. McGartland 1989. "The Net Benefits of Incentive-Based Regulation: A Case Study of Environmental Standard Setting," *American Economic Review* 79, 1233 - 1242.
- Pittman, R. W. 1981. "Issues in Pollution Control: Interplant Cost Differences and Economies of Scale," *Land Economics* 57, 1 - 17.
- Seskin, E. P., R. J. Anderson, Jr., and R. O. Reid 1983. "An Empirical Analysis of Economic Strategies for Controlling Air Pollution," *Journal of Environmental Economics and Management* 10, 112 - 124.
- Shephard, R. W. 1953. *Cost and Production Functions*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Shephard, R. W. 1970. *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Stevenson, R. 1980. "Likelihood Functions for Generalized Stochastic Frontier Estimation," *Journal of Econometrics* 13, 58 -66.