

CO₂ 배출량을 감안한 화력발전소의 생산성 변화분석*

권 오 상** · 박 호 정***

논문초록

생산성 변화에 관한 표준적인 분석법들은 특히 전력산업처럼 많은 양의 오염물질을 배출하는 산업의 경우 오염물질 배출량 변화를 무시하기 때문에 큰 한계를 가질 수가 있다. 따라서 본 연구는 화력발전소의 오염물질, 그 중에서도 CO₂의 배출량 변화까지도 반영하여 생산성 변화율을 계측하고자 한다. 본 연구는 오염물질 배출량까지 포함하여 생산성을 분석할 수 있는 기법들을 개관하고 변형하여, 몇 가지 장점을 가지면서도 기존의 Törnqvist 생산성 변화지수와 직접 비교될 수 있는 형태를 가지는 지수를 제안한다. 본고는 오염물질이 생산성 변화에 미치는 영향을 감안하여 이 지수를 측정하되, 계측방식에 있어 크게 두 가지 점에 주목하였다. 하나는 오염물질 관리에 있어 일종의 원단위를 규제하는 것을 정책목표로 삼느냐 아니면 최근의 전지구적 기후변화와 관련하여 문제가 되는 배출량 자체를 규제대상으로 삼느냐 하는 것과, 두 번째는 오염물질의 잠재가격으로 무엇을 반영하느냐 하는 점이다. 본고는 거리함수 추정법을 이용해 발전소별 CO₂ 잠재가격을 실제로 추정한 결과와, EU-ETS에서의 배출권 실제 거래가격을 잠재가격으로 활용하는 방법을 모두 사용하였고, 그 결과 잠재가격으로 무엇을 선택하느냐와 오염물질관리 정책목표로 무엇을 설정하느냐 하는 것이 모두 생산성 변화율 계측 결과에 상당한 영향을 미침을 보여준다.

핵심 주제어: 화력발전부문, 생산성변화, CO₂

경제학문헌목록 주제분류: Q3, Q4

투고 일자: 2010. 2. 17. 심사 및 수정 일자: 2010. 3. 10. 게재 확정 일자: 2010. 5. 24.

* 이 논문은 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-321-B00041).

** 제1저자, 서울대학교 농경제사회학부 교수 겸 농업생명과학연구원 겸무연구원, e-mail: kohsang@snu.ac.kr

*** 고려대학교 식품자원경제학과 부교수, e-mail: hjeongpark@korea.ac.kr

I. 서 론

화력발전부문은 국가 기간산업으로서 그 효율성이 향상되고 경쟁력이 유지되는 것은 국가적으로 매우 중요한 문제이다. 따라서 이러한 기간산업부문에 있어 생산성이 어떻게 변해왔는지에 관한 많은 선행연구들이 있어왔다. 한국의 경우에도 권오상·유원철(1999), 권오상(1999), 이명현(2007) 등의 분석이 산업전체 혹은 개별 발전소별로 행해졌고, 생산성 변화가 직접적인 분석대상은 아니었지만 손양훈·정태용(1993)은 생산기술의 특성이 동태적으로 변화되어 오는 형태를 규모의 경제성에 초점을 맞추어 분석하는 등, 전력산업의 생산성 관련 연구는 국내에도 다수 존재한다.

이들 선행연구들이 따르고 있는 표준적인 분석법은 Jorgenson and Griliches (1967)가 제안한 Törnqvist 생산성 변화지수를 활용하는 분석법이다. 이 기법은 그 특성상 완전경쟁시장을 가정하고, 또한 생산기술도 규모수익불변이라 가정한 상태에서 생산량의 증가율에서 비용에서 각 투입요소가 차지하는 비중을 가중치로 하여 계산된 투입요소의 가중합의 증가율을 빼주어서 생산성 변화를 계측한다. 이러한 생산성 변화율 계측방식에 대해서는 여러 측면에서 비판이 제기되어 왔지만 (Hulten, 2001), 특히 전력산업처럼 많은 양의 오염물질을 배출하는 산업의 경우 이러한 통상적인 생산성 변화율 계측방법은 오염물질 배출량 변화를 무시하기 때문에 큰 한계를 가질 수가 있다.

한 예를 들자면, 1980년대 이래 한국의 화력발전부문에 대해서는 저황유 의무사용비율을 높이는 등의 정책이 시행되어 오염물질 배출이 꾸준히 규제되어 왔고, 시간이 지날수록 규제수준은 강화되어 왔다. 저황유는 기존의 연료에 비해 고가이기 때문에 이를 도입하도록 규제할 경우 생산비 인상요인이 발생한다. 따라서 이 정책으로 인해 줄어든 오염물질 배출감소효과를 감안하지 않을 경우 정책이 강화될수록 발전부문의 생산성 증가율은 하락하는 것으로 계측될 것이다. 그러나 주요 대기오염원인 발전부문이 규제로 인해 오염물질 배출량을 줄이게 되면 이는 사회적 편익을 가져다주는 환경개선이라는 또 다른 산출물을 가져다주게 되며, 따라서 이러한 오염개선효과를 감안하지 않는 생산성 변화율 계측은 오류를 범하게 되는 것이다.

기존의 생산성 변화율 계측방법이 이상과 같은 문제를 가지기 때문에 본 연구는 화력발전소의 오염물질 배출량 변화까지도 반영하여 생산성 변화율을 계측하고자

한다. 대기오염물질과 같은 오염물질의 배출량을 감안하여 생산성 변화를 분석하는 방법은 크게 두 가지로 분류해볼 수 있다.

첫 번째 방법은 소위 원기술(primal technology)을 분석하는 방법이다. 이 방법은 생산자의 최적화행위는 감안하지 않고 오염물질을 포함하는 산출물과 투입물의 기술적인 관계를 활용하여 생산성 변화를 분석하는 방법이다. 이 방법은 흔히 생산함수나 거리함수(distance function)를 추정하는데, 특히 후자를 추정할 경우 Caves et al. (1982a, b)이 제안한 Malmquist지수나, 아니면 Chambers(2002)가 제안한 Luenberger지수를 생산성 변화지수로 도출한다. 원기술을 분석하는 방법은 특히 Färe et al. (1994a, b) 등이 제안한 비모수적 생산기술분석법(DEA)과 결합되면서 매우 유용하게 사용될 수 있게 되었지만, 오염물질 관리에 있어 정책의 주안점을 배출량 자체와 원단위(=배출량과 정상적인 산출물 생산량의 비율) 중 어디에 둘 것인지 등을 반영하고자 할 때 모호한 점이 있으며, 아울러 오염물질의 객관적인 거래 가격이나 한계저감비용이 존재할 경우 이를 적절히 반영하지도 못하는 단점도 가지고 있다. 또한 Färe et al. (1994a, b) 등이 제시하는 비모수적 기법을 사용할 경우 오염물질을 포함하게 되면 기법의 특성상 모든 생산단위에서 생산성 변화 측정치를 얻을 수는 없다는 문제도 발생한다(Briec and Kerstens, 2009).

생산성변화를 계측하는 두 번째 방법은 쌍대적(dual) 기법이라 할 수 있다. Törnqvist 생산성 변화지수가 오염물질을 감안하지 않고 사용되는 쌍대기법의 대표적인 예인데, 이 기법은 생산기술에 대해서 앞에서 이미 밝힌 바와 같은 가정 등을 도입하지만, 생산함수나 거리함수 등을 직접 구하는 분석은 하지 않는다. 대신 생산자의 최적화행위를 반영할 때 생산성 변화지수가 어떠해야 하는지를 도출하고, 여기에 투입-산출 및 가격자료를 반영하여 생산성 변화지수를 계산해낸다. 이 방법은 생산자의 (혹은 사회적) 최적화행위를 명시적으로 반영할 수 있고, 생산함수나 거리함수에 대한 구체적인 함수형태를 가정하지 않는다는 점에 있어 비모수적이라는 장점도 가지고 있다. 다만 이 방법은 이미 앞에서도 밝힌 바와 같이 오염물질 배출량을 어떻게 반영하여 생산성 변화지수를 도출하느냐 하는 숙제를 가지고 있는데, 무엇보다도 오염물질의 가격, 즉 잠재가격을 필요로 한다. 쌍대분석법을 이용한 생산성 분석사례로 오염규제가 생산성 변화에 미친 영향을 분석한 Gollop and Roberts(1983)의 저명한 연구가 있으나, 오염물질 배출량 자체를 반영하여 쌍대적 접근을 한 연구는 발견하기 어렵다.

본 연구는 이상 소개된 두 가지 분석법 가운데 두 번째 방법, 즉 쌍대기법을 이용하여 오염물질까지 포함하는 발전소의 생산성 변화를 분석하고자 한다. 본고가 두 번째 방법에 주목하는 이유는, 일단 오염물질 배출량 자체를 생산성 분석에 반응하는 쌍대적 분석법은 Gollop and Swinand (2001)에 의해 개념적으로 제안되었을뿐 실증분석은 아직 실행되지 않아 실제자료를 이용한 분석이 가치를 가지며, 아울러 이 기법이 오염물질의 정책목표 등을 반영하는 데 상당한 장점을 가지고 있고, 또한 기법이 필요로 하는 오염물질의 잠재가격을 실제로 구하여 적용하는 것이 가능하기 때문이다.

본고는 쌍대기법의 장점을 살려, 분석의 주안점으로서 크게 오염물질 관리정책의 목표를 어디에 두느냐에 따라서 생산성 변화율이 어떻게 달라지는지, 그리고 오염물질의 잠재가격으로 무엇을 인정하느냐에 따라서 생산성 변화율이 어떻게 달라지는지를 분석하고자 한다.

보다 구체적으로, 배출권거래시장이나 탄소세제도처럼 오염물질의 가격이 외생적으로 결정되는 메커니즘이 있느냐 그렇지 않느냐에 따라 배출권가격이나 탄소세율을 오염물질의 잠재가격으로 볼 수도 있고 대신 생산자 입장에서 한계저감비용을 잠재가격으로 볼 수도 있다. 본고는 이 두 가지 지표를 모두 사용하였을 때 생산성 변화율에 어떤 차이가 나타나는지를 밝히고자 한다.

아울러 오염물질관리의 목표치는 흔히 배출량 자체로 설정되기도 하지만, 생산의 효율성과 관련하여서는 배출량보다는 원단위, 즉 배출량과 산출량의 비율을 통해 설정되기도 한다. 본고는 이렇게 관리대상을 달리 설정함으로 인해 생산성 변화가 어떻게 달라지는지도 보여주고자 한다.

본고의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장은 오염물질을 반영하여 생산성변화율을 정의하는 방법에 대해 설명한다. 제Ⅲ장은 CO₂, 즉 대기오염물질의 잠재가격을 실제로 구하는 방법과 그 결과를 보여준다. 제Ⅳ장은 생산성 변화율을 실제로 계측하여 제시하며, 마지막 제Ⅴ장은 결과를 요약하고 결론을 내린다.

Ⅱ. 오염물질 배출과 생산성 변화

오염물질을 하나의 산출물로 간주하는 생산기술 표현방식으로 Gollop and Swinand (2001)가 제시한 바와 같이 다음과 같은 일종의 음함수(implicit function)

표현방식을 이용할 수 있다.

$$\Phi = H(Y_t, C_t/Y_t, L_t, K_t, E_t, t) \quad (1)$$

단, Y =전력생산량, L =노동투입량, K =자본투입량,
 E =에너지사용량, C =CO₂ 배출량

식 (1)의 Φ 는 일종의 총산출(aggregate output)을 나타내는 지표인데, 예를 들면 오염수준인 C/Y 를 특정 수준으로 유지할 때 생산해낼 수 있는 통상적인 산출물 Y 의 양으로 간주할 수가 있다. 함수 $H(\cdot)$ 에는 C_t/Y_t 대신 C_t 자체가 들어갈 수도 있지만, 일단 정부규제가 원단위 형태의 규제를 띄기 때문에 전자를 변수로 활용하는 것이 더 효과적이라 가정한다. 특히 오염물질 배출산업의 효율성 측면에서는 원단위규제가 보다 전통적으로 사용되고 있는 방법이기도 하다.

함수 $H(\cdot)$ 는 C/Y , L , K , E 에 대해서는 증가함수이고, 통상적인 산출물 Y 의 감소함수라고 가정한다. 예를 들어 만약 다른 조건은 불변인 채 오염물질 배출량이 늘어나 C/Y 가 증가한다면, 이는 자원을 Y 생산쪽으로 더 배정할 수 있음을 의미하고, 이로 인해 Y , 즉 Φ 의 값을 늘릴 수가 있다. 반면 C/Y 를 포함하는 다른 조건은 불변인 채 $H(\cdot)$ 안의 Y 의 값이 커지려면 이를 위해 더 많은 투입요소가 필요해지기 때문에 Φ 의 값이 하락한다. 따라서 Y 와 C/Y 사이에는 음(-)의 변환관계가 있다.

아울러 X 를 투입요소의 벡터라 할 때 X 와 시간변수 t 가 불변인 상태에서 C 와 Y 를 동시에 θ 배하면 $H(\theta Y, C/Y, X, t)$ 가 되는데, 여기에 동차성을 가정하면 Φ 의 값은 θ 배가 감소하게 된다. 즉 $H(\cdot)$ 는 C 와 Y 에 대해 -1차 동차이다. 아울러 $H(\cdot)$ 는 X 에 대해 1차 동차임을 가정하며, 따라서 $H(\cdot)$ 는 C , Y , X 에 대해 0차 동차임을 가정할 수가 있다. 이 경우 생산기술은 최종적으로 규모수익불변을 띄게 되는데, 이는 생산성 변화 분석에서 흔히 적용하는 가정이다.

이제, 이상의 가정 하에서 다음과 같은 생산자의 최적행위를 검토해보자.

$$\max PY - qC - \sum_{i=1}^N p_i x_i + \lambda [H(Y, C/Y, X, t) - \Phi] \quad (2)$$

P = Y 의 가격, q = C 의 잠재가격, p_i = i 번째 투입요소의 가격,

$$i=L, K, E$$

최적화행위의 1계 필요조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \ln H}{\partial \ln Y} = \frac{\partial H}{\partial Y} \frac{Y}{H} = -\frac{P}{\lambda} \frac{Y}{H} = -\frac{PY}{\lambda \Phi} = -1 \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \ln H}{\partial \ln (C/Y)} = \frac{\partial H}{\partial (C/Y)} \frac{C/Y}{H} = \frac{q}{\lambda} Y \frac{C/Y}{H} = \frac{qC}{PY} \quad (3b)$$

$$\frac{\partial \ln H}{\partial \ln x_i} = \frac{\partial H}{\partial x_i} \frac{x_i}{H} = \frac{p_i}{\lambda} \frac{x_i}{H} = \frac{p_i x_i}{PY}, \quad i = 1, \dots, N \quad (3c)$$

식 (3a)의 최적화 조건식은 C/Y 는 고정시킨 채 Y 만을 변형시킬 때의 최적화조건이다. λ 는 총산출 Φ 의 가격인데, 앞에서 정의한대로 Φ 는 C/Y 를 고정시켰을 때 생산될 수 있는 Y 를 의미한다고 해석하여 $\lambda\Phi = PY$ 를 가정할 수가 있다.

이제, 식 (1)과 같이 표현된 생산기술에 있어 총요소생산성의 변화율을 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} TFP = \frac{\partial \ln H}{\partial t} = & -\frac{\partial \ln H}{\partial \ln Y} \frac{d \ln Y}{dt} - \frac{\partial \ln H}{\partial \ln (C/Y)} \left[\frac{d \ln C}{dt} - \frac{d \ln Y}{dt} \right] \\ & - \sum_{i=1}^N \frac{\partial \ln H}{\partial \ln x_i} \frac{d \ln x_i}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

실제 자료는 이산시점(discrete time)에 대해 얻어지므로, 식 (4)에 식 (3a) - (3c)의 최적화조건을 대입하고, 각 투입요소가 생산액가치에서 차지하는 비중을 θ_i 들로 나타내면, 본 연구가 분석하는 경우에 있어서의 총요소생산성 변화율을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$TFP_t = \frac{\dot{Y}_t}{Y_t} + \frac{q_t C_t}{P_t Y_t} \left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right] - \theta_{Kt} \frac{\dot{K}_t}{K_t} - \theta_{Lt} \frac{\dot{L}_t}{L_t} - \theta_{Et} \frac{\dot{E}_t}{E_t} \quad (5)$$

단, 비중 θ_{it} 는 i 번째 투입요소가 생산액 $P_t Y_t$ 에서 차지하는 비중

아울러 실제 추정에서는 각 가격과 비중자료는 두 인접한 연도의 평균치를 취하도록 하여 오염물질 배출량 변화를 반영하는 Törnqvist지수 형태를 적용할 수도 있다.

한편, 본고는 앞에서 예를 들었던 Gollop and Swinand (2001)의 가정과는 달리 대기 오염물질의 관리를 일종의 원단위인 C/Y 가 아니라 배출량 자체에 초점을 맞출 수도 있다고 가정한다. 특히 이산화탄소와 같은 전지구적 오염물질의 경우 배출량 자체가 중요한 정책적 의미를 지니게 된다. 이 경우 생산기술은 다음과 같은 음함수 표현방식으로 변형된다.

$$\Phi = H(Y_t, C_t, L_t, K_t, E_t, t) \quad (6)$$

이어서 앞에서 사용하였던 최적화조건을 변형하여 적용하면, 총요소생산성 증가율은 다음과 같아야 함을 보여줄 수 있다.

$$TFP_t = \frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{q_t C_t}{P_t Y_t} \frac{\dot{C}_t}{C_t} - \theta_{Kt} \frac{\dot{K}_t}{K_t} - \theta_{Lt} \frac{\dot{L}_t}{L_t} - \theta_{Et} \frac{\dot{E}_t}{E_t} \quad (7)$$

식 (7)의 경우 오염물질 배출량 자체에 초점을 맞추기 때문에 그 두 번째 항은 전력생산량과 오염물질 배출량 증가율의 상대적 크기가 아니라 오염물질 배출량의 절대적 크기에 의해 그 값이 결정된다. 즉 정책목표를 무엇으로 보느냐에 따라 총요소생산성 변화율이 달리 계측될 수가 있다.

Ⅲ. 오염물질의 잠재가격 추정

식 (5) 혹은 식 (7)과 같이 생산성 변화율을 계측하려면 오염물질의 잠재가격 즉 q_t 를 알아야 한다. 이 잠재가격 역시 크게 두 가지 방법을 사용해 구할 수 있고, 각각의 방법은 오염물질(배출권)이 거래되는 시장이 있느냐의 여부에 의해 선택될 수가 있다. 만약 배출권거래시장이 활성화되어 있다면 이산화탄소의 경우 동질적(uniform) 오염물질이기 때문에 누가 오염물질을 배출하든 동일한 가격에 거래될 것이며, 이 경우 모든 오염원의 오염물질 잠재가격은 동일하고, 시장에서 거래되는

배출권의 가격과 일치하여야 한다. 한국의 경우 현재에도 CDM 등을 통해 저감량을 해외 배출권시장에 판매하는 것이 가능하지만, 국내의 거래시장이 형성되지 않은 상태에서는 유럽 등에서 형성되는 배출권가격을 모든 발전소의 오염물질 잠재가격으로 보기 어려운 점이 있다.

따라서 만약 오염물질이 거래되는 시장이 없거나 불완전하다면, 오염원 입장에서 오염물질 잠재가격은 배출저감의 한계비용, 즉 한계저감비용이 되어야 한다. 각종 직간접적인 규제하에 있거나 아예 규제가 없다고 하더라도 오염물질을 한 단위 더 줄이기 위해서는 생산감소나 비용증가가 발생할 것이기 때문에 그러한 한계비용을 오염원 입장에서의 오염물질의 잠재가격이라 볼 수가 있다.

본고는 먼저 후자의 방법을 이용해 오염물질의 한계저감비용을 추정하고자 한다. 한계저감비용 추정을 위해서도 여러 가지 방법이 사용될 수가 있다. 생산경제학적 기반을 가지는 방법 중 특히 Färe et al. (1993, 2005)이 제시한 방법은 배출규제가 있는지의 여부에 상관없이 오염원이 실제로 배출한 배출량자료를 가지고 분석을 할 수 있으며, 투입물이나 산출물 가격에 대한 정보도 모형의 추정과정에서 필요로 하지 않는다는 측면에서 매우 유용한 방법이다¹⁾. 특히 생산기술의 특성을 나타내는 산출물거리함수(output distance function)와 생산자의 수입함수 사이에는 일종의 쌍대관계(duality)가 정립되어 있고, 이 쌍대관계에 기초하여 이론적인 측면에서도 적절한 한계저감비용을 도출할 수 있다. 이 방법은 Coggins and Swinton (1996), Kwon and Yun (1999), Kwon et al. (2005)에 의해 화력발전소에 대해 이미 적용된 바도 있다.

이 방법은 오염물질은 원하지는 않지만 생산과정에서 ‘생산되는’ 일종의 부산물로 간주하고, 각 생산자가 투입물 벡터 $X \in R_+^N$ 를 사용하여 산출물 벡터 $Y \in R_+^M$ 를 생산해낸다고 가정한다. 이 경우 생산기술은 X 를 이용해 생산해 낼 수 있는 산출물집합(output set), $P(X)$ 를 통해 나타낼 수 있다. 아울러 생산기술은 다음과 같이 정의되는 산출물거리함수를 사용해 나타낼 수도 있다.

1) 오염물질의 잠재가격은 물론 소비자들의 한계피해액으로 규정할 수도 있다. 그러나 전지구적(global) 오염물질인 CO₂의 경우 배출단위당 한계피해액을 추정하기는 어렵기 때문에 본고는 생산자 입장에서 오염물질의 잠재가격을 분석에 활용한다.

$$D_o(X, Y) = \min\{\tau: (Y/\tau) \in P(X)\}, \tau \in R_+ \quad (8)$$

산출물거리함수의 값 τ 는 주어진 투입물 벡터로 생산이 가능한 어떤 산출물 벡터 Y 를 구성하는 모든 산출물들을 최대한 어느 정도까지 비례적으로 증대시켜줄 수 있는지를 나타낸다. 산출물거리함수는 여러 가지 성질을 가지지만(Färe 1988, pp. 29-34; Shephard 1970, pp. 208-212), 특히 본고의 분석을 위해 필요한 성질로서 산출물에 대해 선형동차이며, 볼록인 함수라는 것을 들 수가 있다. 아울러 산출물거리함수는 통상적인 산출물인 전력에 대해서는 증가함수이지만, 오염물질에 대해서는 그렇지 않고 흔히 감소한다고 가정된다.²⁾

정규산출물의 가격과 오염물질의 잠재가격을 P 라는 벡터로 나타내면 $R(X, P)$ 는 주어진 투입요소를 이용해 그와 같은 가격조건에서 얻을 수 있는 최대한의 수입을 나타내는 수입함수이다. 산출물거리함수를 통해 오염물질 배출 감소의 한계비용을 도출하기 위해서는 다음과 같이 Shephard (pp. 266-272)에 의해 정립된 수입함수와 산출물거리함수간의 쌍대성을 이용할 필요가 있다.

$$R(X, P) = \max_Y \{PY : D_o(X, Y) \leq 1\} \quad (9a)$$

$$D_o(X, Y) = \max_P \{PY : R(X, P) \leq 1\} \quad (9b)$$

먼저 식 (9a)를 보면, P 는 생산자 입장에서는 외생적으로 정해져 있는 전력과 오염물질의 가격을 나타내는 일종의 잠재가격 벡터이다. 수입함수 $R(X, P)$ 는 가격 벡터가 P 로 주어지고, 투입물량이 X 로 주어져 있을 경우의 극대화된 수입이라 할 수 있다. 그러나 식 (9a)의 잠재가격은 적어도 오염물질의 경우에 있어서는 그 값이 외생적으로 알려져 있는 값이 아니며 이를 구하는 것이 본 연구의 목적이라 할 수 있다. 다시 말해 식 (9a)의 오염물질의 잠재가격은 생산자 입장에서의 오염물질의 가격이고 그 값은 통상적으로 음의 값을 지니기 때문에 본고가 구하고

2) 이는 정규산출물은 강처분가능한 반면 오염물질은 단지 약처분가능(weakly disposable)하다는 전제에서 도출되는 것이지만, 산출물거리함수가 오염물질의 감소함수라 보는 것은 오염물질의 약처분가능성보다도 좀 더 강한 가정이다(Kwon and Yun, 1999). 아울러 수입함수는 산출물가격에 대해 비감소하고, 선형동차이며, 볼록이라 가정된다.

자 하는 오염물질의 한계저감비용에 음의 값을 취해준 것이라 해석할 수 있다.

식 (9b)는 수입함수를 통해 표현된 산출물거리함수이다. 식 (9b)에 있어서의 선택변수는 식 (9a)와 달리 산출물량이 아니라 가격 벡터인 P 인데, 여기서의 잠재가격 벡터 P 는 극대화된 수입이 1 이하의 값을 가지도록 하는 일종의 정규화된 가격 벡터로서, 주어진 값이 아니라 내생변수이다.

식 (9a)와 (9b)를 각각 제약하의 최적화문제로 전환한 뒤 미분가능성을 가정한 상태에서 그 최적화조건들을 결합하되, y_1 과 y_m 을 각각 전력과 오염물질의 양이라고 하자. 이 경우 식 (9a)와 (9b)를 동시에 이용해 어떤 오염물질 $y_m(m \neq 1)$ 의 잠재가격 p_m , 혹은 오염물질 y_m 의 한계저감비용에 음의 값을 취해준 것은 다음과 같이 도출할 수 있다(Färe et al., 1993).

$$p_m = p_1 \frac{\partial D_o(X, Y) / \partial y_m}{\partial D_o(X, Y) / \partial y_1} \quad (10)$$

따라서 식 (10)로 나타난 오염물질의 잠재가격 혹은 한계저감비용의 마이너스값은 산출물집합의 경계선상에서의 정상재와 오염물질간의 한계변환율에 정상재의 시장가격을 곱해준 것으로서, 기술적으로 효율적인 생산행위를 할 때 한 단위의 오염물질 y_m 을 줄이기 위해 수반되어야 할 정상재 y_1 의 손실가치를 나타낸다.

식 (10)을 이용해 대기오염물질의 잠재가격을 도출하기 위해서는 먼저 산출물거리함수를 추정하여야 한다. 본 연구는 산출물거리함수의 추정을 위하여 다음과 같은 초월대수(translog) 함수 형태를 설정하기로 한다.

$$\begin{aligned} \ln D_o(X, Y) = & \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_n + \sum_{m=1}^M \alpha_m \ln y_m \\ & + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \beta_{nn'} (\ln x_n) (\ln x_{n'}) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \alpha_{mm'} (\ln y_m) (\ln y_{m'}) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \gamma_{nm} (\ln x_n) (\ln y_m) + \sum_{m=1}^M \gamma_{tm} t (\ln y_m) + \gamma_{it} t + \frac{1}{2} \gamma_{tt} t^2 \\ n = & L, K, E, \quad m = 1, C \end{aligned} \quad (11)$$

위의 초월대수 산출물거리함수에서 x_n 은 투입물이고, y_m 은 정규 산출물인 전력의 생산량과 부산물인 CO₂의 배출량으로 구성되는 산출물들을 나타낸다. 이용하는 자료가 시계열자료와 횡단면자료를 모두 포함하므로 기술변화를 반영하기 위해 시간을 나타내는 변수 t 를 포함하였다.

앞서 밝힌대로 산출물거리함수는 산출물에 대해 1차 동차의 성질을 가진다. 따라서 다음과 같은 동차성조건이 부과되어야 한다.

$$\sum_m^M \alpha_m = 1, \sum_{m=1}^M \gamma_{nm} = 0, \sum_{m'=1}^M \alpha_{mm'} = 0, \forall m \quad (12)$$

아울러 추정작업을 위해서는 다음과 같은 대칭성조건도 부과된다.

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

한편, 앞에서 밝힌 바와 같이 거리함수는 정규 산출물 y_1 의 증가함수이고 오염물질 y_m 의 감소함수이므로, 다음의 두 가지 제약도 부과한다.

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

$$\alpha_C + \sum_{m=1}^M \alpha_{Cm'} \ln y_{m'} + \sum_{n=1}^N \gamma_{nC} \ln x_n \leq 0 \quad (15)$$

본 연구의 결과를 도출하기 위해서는 식 (11)의 산출물거리함수를 추정하되, (12) 및 (13)의 등호 제약식과 (14) 및 (15)의 부등호 제약식이 모두 충족되도록 추정하여야 한다.

이상의 제약조건을 부과하면서 (11)의 산출물거리함수를 추정하는 데에는 몇 가지 방법이 사용될 수 있다. 본고는 그 중에서도 Aigner and Chu (1968)가 사용한 확정적 목표계획법(deterministic goal programming)을 사용한다. 이 방법은 발전소간의 효율성 격차가 있을 수 있어 거리함수의 값이 반드시 1이 아니라는 점과, 또한 식 (14) 및 (15)와 같은 부등식 제약을 반영하여 추정할 수 있다는 장점을 가

진다. 다만 이 방법에서는 추정 파라메터의 통계적 추론은 불가능하다(Schmidt, 1976).

식 (11)의 초월대수 산출물거리함수의 우변을 $f(X, Y; \beta)$ 라 나타내보자. 단 여기서 β 는 추정될 모수들의 벡터이다. 위에서 설명한대로 자연적인 요인이나 자료 집계상의 오차와 같은 확률적인 요인을 고려하지 않을 경우 산출물 거리함수는 1보다 클 수가 없다. 따라서 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = f(X, Y; \beta) + \epsilon, \epsilon \geq 0$$

각 관측치를 나타내는 지수로 i 를 사용할 경우 Aigner and Chu는 다음과 같은 선형계획법을 사용할 것을 제시하였다.

$$\min_{\beta} \sum_i \epsilon_i, \text{ s.t. } \epsilon_i = -f(X_i, Y_i; \beta) \geq 0, \forall i, (12) \sim (15) \quad (16)$$

본고가 분석에 사용하는 자료는 전력산업 구조개편이 이루어진 후의 시기인 2001년-2007년 사이의 26개 화력발전소의 연간 자료이다. 자료는 한전과 전력거래소를 통해 얻었으며, 여기에는 발전소별로 송전된 전력량(Gwh), 전력판매가격, 고용인원 수와 노동력 비용, 사용된 에너지량(TOE)과 에너지 비용 등이 포함된다. 자본의 경우 발전소별 자본비용 자료는 없고, 대신 설비용량 자료가 이용가능하다. 이들 자료의 기초통계량은 <표 1>과 같다.

<표 1>과 같은 자료를 가지고, 7년간 각 발전소별 연평균 증가율을 보면, 전력생산량의 경우 8.2%, 노동투입의 경우 4.9%, 에너지사용의 경우 4.7%가 각각 늘어났고, 마지막으로 설비용량의 경우 4.5% 증가하였다. 따라서 이 기간 동안 어느 정도의 생산성 증가는 발생했을 것이라 추측할 수 있다.

발전소별 오염물질의 잠재가격을 파악하고 생산성 변화를 계측하기 위해서는 자본의 투입량 K 와 자본비용이 전체 전력판매수입에서 차지하는 비중인 θ_K 를 자료로 가지고 있어야 한다. 또한 CO_2 의 배출량 C 도 발전소별로 파악할 수 있어야 한다.

먼저 자본스톡의 경우 5대 화력발전사별로는 계측이 되고 있지만, 각 발전소별로

는 자본스톡이 계속되지 않는 문제가 발생하는데, 하나의 대안으로서, 본 연구는 각 발전사별로 계속되는 자본스톡을 각 발전소가 각 발전사의 전체 설비규모에서 차지하는 비중과 일치하도록 각 발전소별로 할당하였다. 이 방법은 각 발전소별로 발전유형도 다르고 내구연수나 노후화 정도 다를 것이기 때문에 문제를 가지고 있지만, 현재로서는 사용할 수 있는 거의 유일한 방법이라 할 수가 있다³⁾.

본 연구는 이상의 절차를 거쳐 구해진 각 발전소별 자본스톡을 GDP 디플레이터를 이용해 2005년 가격으로 환산한 것을 자본량 즉 K 라 간주한다. 아울러 자본의 가격 r 혹은 p_K 는 자본의 사용자가격(user price) 즉, 전기장비가격지수 \times (실질 이자율+감가상각률)과 같이 정해주었는데, 이와 같은 자본가격 추정방식은 Denny et al. (1981), Nadiri and Schankerman(1981) 등의 선행연구에서도 많이 사용된 방법이다.

한편, CO₂ 배출량은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)가 공인한 배출계수를 발전사의 투입연료 소비량에 적용하는 Tier 1 방법을 이용해 계측한다.⁴⁾

〈표 1〉 기초통계량

변수	단위	평균	표준편차	표본최소	표본최대
전력판매량	Gwh	7107.19	8402.58	30	29,354
전력가격	원/kwh	95.65	79.33	14.95	479.92
노동력	명	304.85	209.93	49	1,110
노동비용	원	5.03e+07	5,368,676	4.35e+07	6.12e+07
에너지사용량	TOE	4.38e+08	5.77e+08	2,063,669	2.29e+09
에너지비용	원	2.93e+11	2.94e+11	2.19e+08	1.20e+12
설비규모	Mw	1256.15	1021.63	20	4,000
자본량	백만원	3.85e+5	3.18e+05	5.67e+03	1.20e+06
자본비중	비율	0.123	0.077	0.029	0.850
CO ₂ 배출량	톤	1.48e+06	3.61e+06	811	3.76e+07

3) 물론 생산단위를 발전소가 아닌 발전사로 한정하여 분석할 경우 이와 같은 문제가 발생하지 않지만, 이 경우 연간 이용가능한 관측치가 5개에 불과하여 의미 있는 통계분석을 할 수 없다는 문제가 발생한다.

4) Tier 1 방법은 각 연료별로 배출계수를 곱해주기 때문에 상대적으로 사용하기가 수월한 방법이다. 반면 또 다른 방법인 Tier 2 방법은 발전유형별로 연료별 배출계수를 달리하기 때문에 보다 정교하기는 하지만 계산하기가 상대적으로 더 복잡한 방법이다.

이상의 자료를 이용해 추정한 결과는 <표 2>와 같다. 에너지 소비구조상 LNG발전소와 석탄 및 중유발전소 사이에는 한계저감비용면에서 상당한 차이가 있을 수 있으므로 두 가지 유형의 발전소를 구분하여 모형을 추정하였다. LNG발전소의 경우 $\gamma_t = \gamma_{tt} = 0$ 의 제약을 가하지 않으면 한계저감비용 혹은 잠재가격 추정에 필요한 파라미터들 중 상당수가 0으로 추정되는 문제가 있어 그러한 제약을 가하였다. 이 제약은 LNG발전소의 경우 시간변수는 산출물 생산량의 변화를 통해 거리함수값에 영향을 미치지만 직접 함수에 영향을 미치지 않는다고 가정하는 것이다. 먼저 추정된 결과를 가지고 산출물거리함수의 평균값을 구해보면, 비LNG 발전소의 경우 0.81인데 반해 LNG발전소의 경우 0.91이었다. 따라서 LNG발전소간의 효율성 측면에서의 동질성이 비LNG발전소에 비해 상대적으로 더 높다고 할 수가 있다.

<표 2> 산출물 거리함수 추정결과

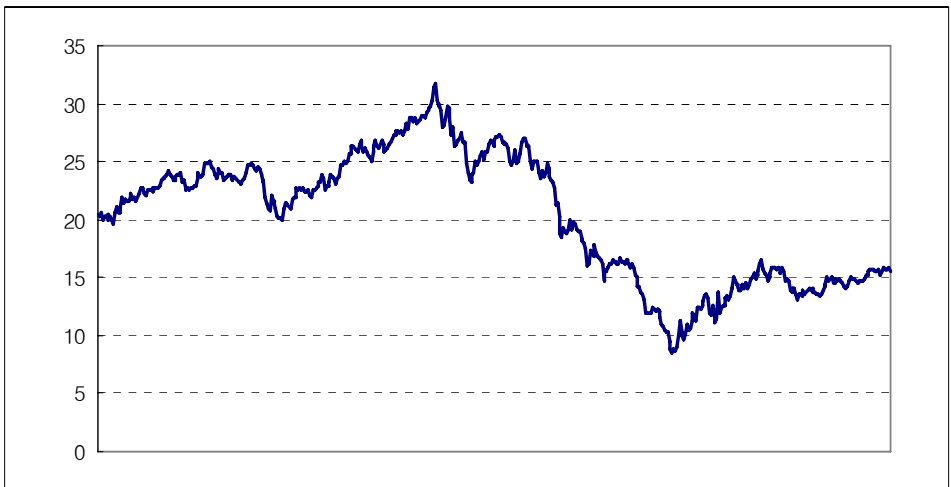
추정파라미터	추정치 (비LNG 발전소)	추정치 (LNG 발전소)
α_0	50.786	67.149
β_L	-8.048	8.525
β_K	-0.598	-5.249
β_E	-1.859	-1.589
α_1	1.019	0.954
α_C	-0.019	0.045
β_{LL}	0.699	0.0013
β_{LK}	0.137	-0.341
β_{LE}	0.005	0.032
β_{KK}	-0.105	0.283
β_{KE}	0.094	-0.029
β_{EE}	-0.030	0.056
α_{11}	-0.0007	-0.0008
α_{1C}	0.0007	0.0008
α_{CC}	-0.0007	-0.0008
γ_{L1}	0.003	0.0026
γ_{LC}	-0.003	-0.0026
γ_{K1}	-0.0007	0.0036
γ_{KC}	0.0007	-0.0036
γ_{E1}	-0.0009	-0.0034
γ_{EC}	0.0009	0.0034
γ_{t1}	-0.00069	0.00085
γ_{tC}	0.00069	-0.00085
γ_t	0.054	0
γ_{tt}	-0.013	0

〈표 3〉 CO₂의 잠재가격 추정치 단위: 원/톤

발전유형	관측치수	평균	표준편차	최대	최소
비LNG	113	46,052	64,600	257,000	0
LNG	66	8,682	38,518	284,000	0
전체	179	32,278	59,132	284,000	0

전력의 시장가격을 p_1^0 으로 사용하여 거리함수 추정결과 및 식 (10)을 반영하여 도출한 발전유형별 CO₂의 잠재가격 혹은 한계저감비용 추정치는 〈표 3〉과 같이 정리된다. 2005년도 가격으로 평가된 톤당 잠재가격이 석탄 및 중유발전소의 경우 평균 46,000원 정도이고, LNG발전소는 그 보다 낮은 8,700원 정도이다. 따라서 발전유형별로 상당한 정도의 잠재가격 차이가 있음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 동일 발전유형 내에서도 잠재가격의 표준편차는 상당히 큰 편이고, 따라서 발전소별 잠재가격의 차이는 전체적으로 상당하다는 것을 알 수가 있다. 국가 전체의 발전부문 CO₂ 배출저감을 가장 적은 비용으로 달성하기 위해서는 각 오염원별 한계저감비용이 동일하도록 저감량 할당이 이루어져야 하는데, 〈표 3〉에서처럼 발전소별 잠재가격 혹은 한계저감비용의 차이가 크다는 것은 그와 같은 비용효과성(cost effectiveness)이 현재 달성되고 있지 못할 가능성이 크다는 것을 시사한다.

〈그림 1〉 EU-ETS의 EUA 배출권 가격동향 (2007.8.13~2009.9.9)



자료: Point Carbon.

한편, 2005년 이후 실제로 CO₂ 배출권이 거래되는 유럽시장에 있어 배출권의 가격을 살펴보면, 최근 기간에 있어 <그림 1>과 같이 약 20유로를 대체로 유지하다가 유가가 상승하면 그보다 올라가는 행태를 보여주었다. 1유로당 약 1,700원의 환율을 가정하면, 따라서, <표 3>의 추정결과는 한국의 석탄 및 중유발전소의 경우 한계저감비용이 유럽에서의 거래가격과 거의 유사하거나 조금 높은 수준이고, LNG 발전소의 경우에는 그 한계저감비용이 유럽에서의 거래가격보다는 꽤 낮은 편이라고 할 수가 있다. 본고는 유럽에서 실제로 거래된 가격의 거의 평균치라 할 수 있는 20유로, 즉 톤당 34,000원을 이산화탄소의 또 다른 잠재가격으로 인정한다. 이 가격은 모든 발전소에 있어 동일하게 적용된다. 흥미롭게도 이 가격은 <표 3>의 전체 발전소의 저감비용과 매우 유사하다.

IV. 생산성 변화율 분석결과

먼저 앞에서 도출된 두 가지 잠재가격을 이용하되, 식 (5)와 같이 원단위 규제를 가정했을 때의 생산성 변화율 계측치는 <표 4>와 같이 정리된다.

<표 4> 발전소별/분석모형별 연평균 생산성 증가율(%): CO₂ 원단위 규제

모형		LNG 미사용 발전소	LNG 발전소	전체 평균
CO ₂ 고려안함		6.89 (97)	0.41 (56)	4.51 (153)
CO ₂ 배출고려	거리함수 잠재가격	6.90 (97)	0.44 (56)	4.54 (153)
	EU-ETS 가격	7.19 (97)	2.08 (56)	5.32 (153)

주: ()안은 생산성이 계측된 발전소의 연숫자임.

<표 4>의 분석결과에서 첫 번째 경우는 CO₂ 배출량을 전혀 고려하지 않는 경우이다. 즉 식 (5)의 두 번째 항 $\frac{q_t C_t}{P_t^* Y_t} \left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right]$ 을 아예 무시하고 추정한 결과로서, 이는 통상적인 생산성 변화율 계측치와 같다고 할 수 있다.

이어서 <표 4>의 세 번째 행은 식 (5)와 같이 CO₂ 배출량 변화를 고려하되, 산

출물거리함수를 이용해 추정한 한계저감비용을 CO₂의 잠재가격 q 로 간주하여 도출한 결과이다. 이 결과를 보면, CO₂ 배출을 전혀 고려하지 않을 때와 매우 유사한 생산성 증가율이 도출됨을 확인할 수 있다. 즉 한계저감비용을 잠재가격으로 사용하여 CO₂ 배출량 변화를 반영하여도 CO₂ 배출량을 감안하지 않을 때에 비해 평균 생산성 증가율은 0.01-0.03%의 차이만을 나타낸다. 분석기간 동안 석탄 및 중유 발전소의 경우 연평균 3.5%씩 CO₂ 배출량이 감소했고, 반대로 LNG 발전소의 경우 연평균 8.71%씩 배출량이 증가했다는 점을 감안하면 이는 의외의 결과라 할 수 있다. 이러한 결과는 세 가지 이유 때문에 발생하였다.

첫째, 잠재가격으로 평가된 CO₂ 배출량의 가치가 생산된 전력의 가치에서 차지하는 비중, 즉 $\frac{qC}{PY}$ 의 값이 별로 크지가 않다. 그 값은 많은 발전소에 있어 1%미만에 불과하고, 따라서 $\frac{q_t C_t}{P_t^* Y_t} \left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right]$ 의 값이 별로 크지가 않다.

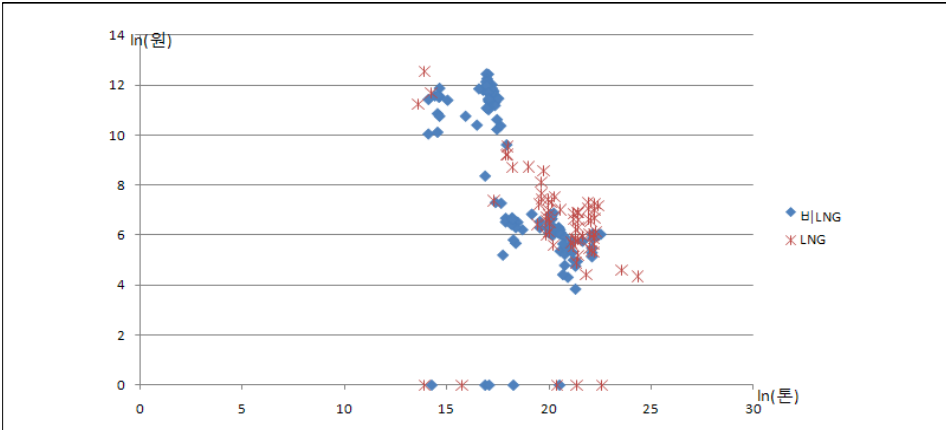
둘째, 이것은 잠재가격으로 한계저감비용을 사용할 때 나타나는 매우 중요한 현상 때문에 발생하는 것인데, 발전소에 따라서는 배출량이 매우 많고, 따라서 C_t 의 값이 매우 클 수가 있지만, 이 경우 한계저감비용은 배출량 자체의 감소함수이기 때문에 q_t 자체가 하락하고, 따라서 $\frac{qC}{PY}$ 는 배출량이 매우 많은 발전소의 경우도 크지 않은 값을 가지게 된다. 배출량이 많을수록 한계저감비용이 낮은 것은 배출량이 많을 때에는 연료전환 등 비교적 비용이 적은 방식을 통해 배출감소가 가능하지만 배출량을 줄여갈수록 점점 더 비용이 많이 드는 저감방식을 선택하여야 하기 때문이다. 이는 최적수준의 배출량이 존재하기 위해 필요한 조건이다. 이 조건이 실제로 충족된다는 것은 <그림 2>에 의해 보여 진다⁵⁾. 대체로 LNG발전소의 한계저감비용이 더 낮지만 한계저감비용의 분포는 비LNG발전소의 경우가 더 넓다는 것을 확인할 수 있다.

셋째, 석탄, 중유, 석탄-중유 혼합발전소와 LNG 발전소의 분석기간 동안의 CO₂ 배출량 증가율은 서로 크게 달랐지만, 생산량 증가율도 서로 달랐기 때문에 CO₂ 배출량을 반영하더라도 두 유형의 발전소의 평균 생산성 증가율은 둘 다 크게 달라지

5) 이 그림은 변수들의 크기 차이를 줄여 시각적으로 나타내기 위해 배출량과 한계저감비용을 모두 로그를 취해 그린 것이다. 소수의 경우이지만 한계저감비용이 (거의) 0일 경우 그 로그값도 0이 되도록 표현하였다.

지 않는다. 즉 두 유형의 발전소에 있어 $\frac{\dot{C}_t}{C_t}$ 는 석탄/중유발전소의 경우 마이너스 이고 LNG발전소의 경우 0보다 컸지만, 동기간 동안 생산량 증가율, 즉 $\frac{\dot{Y}_t}{Y_t}$ 이 각각 4.7%와 15.1%로 차이가 났고, 결과적으로 $\left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right]$ 의 값 자체가 0보다 크면서 두 유형의 발전소간에 별 차이가 없었다. 따라서 탄소배출을 반영하느냐 하지 않느냐 하는 것이 두 유형의 발전소간의 생산성 증가율 격차에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

〈그림 2〉 한계저감비용과 CO₂ 배출량의 관계



한편, 〈표 4〉에서 CO₂ 배출량의 변화를 생산성 변화율 측정에 반영하되, CO₂의 잠재가격을 EU-ETS의 실제 배출권거래가격으로 고정시키면 이제는 CO₂배출을 고려하지 않을 때에 비해 상당한 정도의 생산성 증가율 차이가 발생한다. CO₂배출을 추가로 고려함으로 인해 전체적으로 생산성 증가율이 0.81% 높아졌고, 특히 LNG 발전소의 생산성 증가율이 1.64%나 높아진다. CO₂ 잠재가격 선택이 가져오는 이와 같은 차이는 두 가지 이유로 설명이 된다.

첫째, 한계저감비용을 잠재가격으로 사용할 때와 달리 EU-ETS 가격을 사용하게 되면 배출량과 상관없이 동일한 잠재가격을 적용하게 된다. 따라서 배출량이 많은 발전소의 경우 $\frac{q_t C_t}{P_t^* Y_t} \left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right]$ 의 값이 상당히 클 수 있고, 이 때문에 배출량을 반영할 때와 하지 않을 때 생산성 증가율이 상당한 정도 차이를 보일 수 있다.

둘째, LNG발전소의 경우 추정된 CO₂의 한계저감비용은 평균 8,700원이었음에 반해 배출권거래가격 20유로는 약 34,000원 정도로 더 높고, 따라서 후자의 방법을 사용하면 $\frac{q_t C_t}{P_t^* Y_t} \left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right]$ 의 값이 상대적으로 많이 크고, 이로 인해 EU-ETS 거래가격을 활용하면서 CO₂배출을 감안할 경우 생산성 증가율이 크게 높아지게 된다.

이상의 발견은 상당한 함의를 가진 결과로서, 오염물질 배출량 변화를 반영하여 생산성 증가율을 계측할 때, EU-EST와 같이 동일한 가격을 받고 감축량을 판매할 수 있는 시장이 있느냐 없느냐에 따라 발전유형별 생산성 증가율에 대한 평가가 상당히 달라질 수 있음을 의미한다.

〈표 5〉 발전소별/분석모형별 연평균 생산성 증가율(%): CO₂ 총량 규제

모형		LNG 미사용 발전소	LNG 발전소	전체 평균
CO ₂ 고려안함		6.89 (97)	0.41 (56)	4.51 (153)
CO ₂ 배출고려	거리함수 잠재가격	6.89 (97)	0.35 (56)	4.50 (153)
	EU-ETS 가격	6.60 (97)	-0.78 (56)	3.89 (153)

주: ()안은 생산성이 계측된 발전소의 연숫자임.

이제 식 (7)과 같이 오염물질 배출량 자체가 정책적 관심이고, 따라서 그 절대적 배출량 변화를 생산성 변화율 계측에 반영하는 경우를 생각해보자. 분석결과는 〈표 5〉와 같이 정리된다. 이 방식으로 생산성 변화율을 계측하면, LNG발전소의 경우 분석기간 동안 전력생산량이 늘었지만 CO₂ 배출량 자체가 크게 늘었고, 반면 석탄이나 중유발전소의 경우 CO₂ 배출량 자체가 상당한 정도 감소했기 때문에 두 유형의 발전소간에는 상대적으로 더 큰 생산성 증가율 격차가 나타나게 된다. 그와 같은 결과는 〈표 5〉가 보여주고 있는데, 특히 EU-ETS가격을 잠재가격으로 활용하면 LNG발전소의 경우 생산성 변화율이 음(-)의 값을 보일 정도로 크게 하락한다. 이러한 결과는 EU-ETS가격을 사용할 경우 배출량에 관계없이 동일한 잠재가격을 적용하기 때문에 $\frac{qC}{PY}$ 의 값이 일단 크고, 아울러 원단위의 경우와 달리

$\left[\frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{C}_t}{C_t} \right]$ 가 아닌 $\frac{\dot{C}_t}{C_t}$ 가 생산성 변화를 계측에 반영되는데, 분석기간 동안 LNG 발전소와 비LNG발전소 사이에 CO₂ 배출량 변화율 차이가 컸기 때문에 발생하였다.

이처럼 배출감소의 정책적 초점을 원단위 관리와 배출총량 관리 중 어디에 두느냐에 따라 생산성 증가율 추정치가 크게 달라진다는 점 역시 흥미롭다 하겠다.

마지막으로, 발전유형별로 그리고 모든 발전소에 있어 노동, 에너지, 자본 각 투입요소 사용량 변화가 생산성 변화에 미친 영향을 살펴보고, 그 결과는 <표 6>과 같이 정리된다. 전체 발전소의 경우 분석기간 동안 노동투입량은 거의 변화가 없었지만 에너지와 자본은 투입량이 늘어나 생산성 변화에 영향을 미쳤다. 예를 들면 에너지의 경우 그 사용량이 늘어남으로 인해 전력 산출량이나 CO₂ 배출량이 달라지지 않았다면 생산성을 연평균 1.78% 하락시켰을 것이다. 발전유형별로 보면 비LNG발전의 경우 에너지 사용량은 오히려 줄어들었고, 자본은 소폭 늘어났음에 반해 LNG발전소의 경우 에너지 사용량과 자본 투입량이 크게 늘어나 상대적으로 높은 생산성 감소요인으로 작용하였다. 이러한 발전 유형별 투입요소 사용량 차이가 발전량 및 CO₂ 배출량의 차이와 더불어 앞에서 확인하였던 발전유형별 생산성 변화율 차이를 유발하였다.

<표 6> 투입요소별 생산성 변화 기여도 단위: %(연평균)

발전유형	관측치수	노동	에너지	자본
비LNG	113	-0.40	3.15	-0.60
LNG	66	-0.28	-10.32	-4.05
전체	179	-0.36	-1.78	-1.86

V. 요약 및 결론

화력발전부문은 국가 기간산업으로서 그 효율성이 향상되고 경쟁력이 유지되는 것은 국가적으로 매우 중요한 문제이다. 따라서 이러한 기간산업부문에 있어 생산성이 어떻게 변해왔는지에 관한 많은 선행연구들이 국내외에서 진행되어 왔다. 이들 선행연구들이 따르고 있는 표준적인 분석법은 소위 Törnqvist 생산성 변화지수

를 활용하는 분석법으로서, 그 특성상 완전경쟁시장을 가정하고, 또한 생산기술도 규모수익불변이라 가정한 상태에서 생산량의 증가율에서 투입요소의 가중합의 증가율을 빼주어서 생산성을 계측한다. 이러한 생산성 변화율 계측방식에 대해서는 여러 측면에서 비판이 제기되어 왔지만, 특히 전력산업처럼 많은 양의 오염물질을 배출하는 산업의 경우 이러한 통상적인 생산성 변화율 계측방법은 오염물질 배출량 변화를 무시하기 때문에 큰 한계를 가질 수가 있다. 기존의 생산성 변화율 계측방법이 이상과 같은 문제를 가지기 때문에 본 연구는 화력발전소의 오염물질 즉 이산화탄소의 배출량 변화까지도 반영하여 생산성 변화율을 계측하고자 하였다.

먼저 본 연구는 오염물질 배출량을 포함하여 생산성을 분석할 수 있는 기법들을 개관하고, 그 가운데에서 몇 가지 장점을 가지면서도 기존의 Törnqvist 생산성 변화지수와 직접 비교될 수 있는 형태를 가지는 지수를 도출할 수 있는 생산기술의 쌍대성을 이용하는 기법을 제안하였다. 이를 위해 본고는 Gollop and Swinand (2001)이 최근에 제안한 오염물질을 반영하는 쌍대분석기법을 확장하여 이론적 근거로 삼았다.

본고는 오염물질이 생산성 변화에 미치는 영향을 감안하되, 계측방식에 있어 크게 두 가지 점에 주목하였다. 하나는 흔히 논의하는 바와 같이 일종의 원단위를 규제하는 것을 정책목표로 삼느냐 아니면 최근의 전지구적 기후변화와 관련하여 문제가 되는 배출량 자체를 규제대상으로 삼느냐에 따라 생산성 변화율 계측치가 달라질 수 있다는 점이다. 두 번째는 오염물질의 잠재가격으로 무엇을 반영하느냐 하는 점이다. 배출권거래제처럼 오염물질을 실제로 시장에서 거래할 수 있는 장치가 마련되고 오염원 입장에서는 객관적인 시장가격이 형성될 경우 그 가격이 잠재가격이 될 수가 있지만, 그렇지 못한 상황에서는 각 오염원별로 달라지는 한계저감비용을 잠재가격으로 반영하여야 한다. 이러한 잠재가격의 선택에 의해서도 생산성 변화율 계측치는 달라질 수가 있다.

각 오염원별로 다를 수 있는 한계저감비용 추정을 위해 오염물질을 산출물의 하나로 포함하는 산출물거리함수를 함수형태를 부여하여 추정하고, 그 결과와 산출물 거리함수와 생산자의 수입함수 사이에 존재하는 쌍대관계를 이용하여 오염물질의 잠재가격을 도출하였다. 그 결과, 평균적으로는 석유 및 중유발전소의 경우 CO₂ 톤당 46,000원 정도의 잠재가격이, 그리고 LNG발전소의 경우 톤당 8,700원 정도의 잠재가격이 추정되었다. 아울러 두 가지 발전유형 모두에 있어 CO₂ 배출량이 많

을수록 그 잠재가격, 즉 한계저감비용이 감소하여 경제학에서 일반적으로 전제하는 바 또한 잘 충족되었다.

오염물질의 잠재가격을 추정하는 두 번째 방법으로 CO₂의 배출권거래가격, 특히 EU-ETS에서의 실제 거래가격을 조사하고 이를 잠재가격으로 인정하는 방법을 사용하였다. 본 연구는 EU의 시장거래동향과 가격동향을 조사한 결과 거래가격이 등락을 거듭하지만 톤당 약 20유로 혹은 34,000원 수준이라 가정하는 것이 적합하다고 보았다.

이렇게 추정 혹은 조사된 두 가지 잠재가격을 이용해 CO₂ 배출량 변화까지 감안하는 생산성 변화를 분석해보면, 첫 번째 방법 즉 발전소의 생산자료를 이용하고 산출물거리함수를 추정해 도출한 잠재가격을 사용할 경우 CO₂ 배출량을 반영해도 생산성 증가를 추정치가 거의 달라지지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 무엇보다도 CO₂ 배출량이 많은 발전소의 경우 그 잠재가격도 크게 낮아지기 때문에 실제로 CO₂의 배출가치가 전체 생산액에서 차지하는 비중이 크지 않기 때문에 발생하였다. 반면, EU-ETS의 거래가격을 모든 발전소에 공통으로 적용되는 잠재가격으로 사용하면 CO₂의 배출을 감안할 경우 발전소의 생산성 증가율은 상당한 정도 달라질 수 있는 것으로 나타났다.

아울러 본고가 세운 또 다른 가설처럼 오염물질의 관리대상으로 무엇을 보느냐에 의해서도 생산성 변화를 계측치는 많이 달라지는 것으로 나타났다. 만약 오염물질 관리구조를 원단위, 즉 전력생산량당 오염물질 배출량을 줄이는 것으로 정한다면 CO₂의 배출이 늘어나는 속도보다도 전력생산량이 늘어나는 속도가 더 빠른 구조로 인해 CO₂ 배출을 감안하게 되면 각 발전소의 생산성 증가율은 오염물질 배출을 무시할 경우에 비해 오히려 더 높아지게 추정된다. 반면 온실효과가스의 배출량 자체를 정책대상으로 삼고자 한다면 CO₂ 배출량을 감안하고 EU-ETS 가격을 적용할 경우 특히 LNG발전소의 생산성 증가율이 크게 하락하여 음(-)의 값을 보이기도 하는 것으로 나타났다.

본 연구가 분석한 기간은 발전소의 연료사용형태에 대한 규제는 있었지만 명시적으로 CO₂ 배출량에 대한 규제는 없던 시기였다. 그럼에도 불구하고 본 연구가 시행한 이상의 분석결과는 향후 전력부문의 생산성 관리 및 대기오염 감소정책에 대해 유용한 시사점을 제공할 수 있을 것이다. 향후 CO₂에 대한 명시적인 배출규제가 도입되더라도 발전소 입장에서는 결국 직접 배출량을 줄일 때의 한계저감비용이거

나 혹은 배출권을 판매하거나 구매할 수 있을 때의 배출권거래가격이나 외생적으로 결정되는 탄소세가 오염물질의 잠재가격이 될 것이다. 본고는 이를 감안하여 명시적인 배출량 규제가 없을 경우에도 적용될 수 있는 잠재가격 도출방식을 적용하였고, 또한 가장 활발한 거래가 이루어지는 조직화된 CO₂ 배출권거래시장의 가격을 잠재가격으로 활용하였다. 향후의 오염물질 잠재가격도 따라서 본 연구가 적용하는 가격의 수준을 크게 벗어나지 않으리라 생각된다. 다만 원단위규제가 적절하나 아니면 총량규제가 적절하냐가 문제가 될 수 있지만, 이는 정책선택의 문제라 할 수 있고, 전지구적 오염물질이라는 CO₂의 성격을 감안하면 향후에는 총량규제를 정책 목표로 보는 모형이 보다 적절할 것으로 예견된다.

본 연구가 발견한 내용이 향후의 전력부문 생산성 관리에 대해 제공하는 시사점과 관련하여, 무엇보다도 오염물질 배출량을 적절히 반영하지 않을 경우 생산성 변화율 측정치와 생산성 변화율의 특성이 상당한 정도로 왜곡되어 계측될 수 있음이 보여 졌다. 즉 생산량이나 통상적인 투입요소만 반영하여 생산성 변화를 분석하면 생산성 증가율의 절대적인 수준은 물론이고, 발전유형별로 생산성 증가율이 어떻게 다른지, 그리고 발전소간 생산성이나 효율성이 서로 수렴하는지 아니면 그 격차가 확대되는지 등에 대해 잘못된 결론을 가질 수 있으며, 따라서 향후의 생산성관련 논의는 본 연구가 시도한 바와 같은 방법들을 활용하여 오염물질 배출량의 변화까지도 감안하여 이루어져야 할 것이다.

본고는 또한 LNG발전소와 LNG를 사용하지 않는 여타 화력발전소 사이에는 상당한 정도의 생산성 변화율 격차가 있으며, 특히 오염물질 배출량 자체를 관리 목표로 할 경우 오염물질을 감안하게 되면 유형간 이산화탄소 배출저감성과의 차이로 인해 발전유형별 생산성 변화율 격차가 더 크게 벌어진다는 것도 보여주었다. 이 또한 향후 화력발전부문 관련 정책을 입안하는 데 참조할만하다.

■ 참 고 문 헌

1. 권오상, “한국 화력발전소의 생산성변화 분석-기술변화와 효율성변화의 분리,” 『한국자원경제학 회지』, 제8권 제2호, 1999, pp. 147-174.
(Translated in English) Kwon, O.S., “An Analysis of Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Korean Fossil-fueled Electric Generation,” *Korea Journal of Resource Economics*, Vol. 8, No. 2, 1999, pp. 147-174.
2. 권오상 · 윤원철, “저황유 공급정책이 한국 화력발전부문의 생산성 변화에 미친 영향,” 『환경경제 연구』, 제8권 제1호, 1999, pp. 49-75.
(Translated in English) Kwon, O.S. and W.C. Yun, “Environmental Regulations and Productivity: The Case of the Low-sulfur Fuel Standards in the Korean Fossil-fueled Power Generation Sector,” *Environmental Economics Review*, Vol. 8, No. 1, 1999, pp. 49-75.
3. 손양훈 · 정태용, “전력산업의 규모의 경제성에 관한 연구,” 『경제학연구』, 제41권 제2호, 1993, pp. 29-47.
(Translated in English) Sonn, Y. H. and T. Y. Jung, “Scale Economies in Electric Industry in Korea,” *Kyong Je Hak Yon Gu*, Vol. 41, No. 2, 1993, pp. 29-47.
4. 이명현, “거리함수접근법을 이용한 Porter 가설에 대한 연구,” 『자원 · 환경경제연구』, 제16권 제1호, 2007, pp. 171-197.
(Translated in English) Lee, M., “A Study on Porter Hypothesis: A Distance Function Approach,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 16, No. 1, 2007, pp. 171-197.
5. Aigner, D., and S. -G. Chu, “On Estimating the Industry Production Function,” *American Economic Review*, Vol. 58, No. 4, 1968, pp. 826-839.
6. Briec, W. and K. Kerstens, “Infeasibility and Directional Distance Functions with Application to the Determinateness of the Luenberger Productivity Indicator,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 141, No. 1, 2009, pp. 55-73.
7. Caves, D.W., L.R. Christensen, and W.E. Diewert, “The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity,” *Econometrica*, Vol. 50, No. 6, 1982a, pp. 1393-1414.
8. _____, “Multilateral Comparisons of Output, Input and Productivity Using Superlative Index Numbers,” *Economic Journal*, Vol. 92, No. 365, 1982b, pp. 73-86.
9. Chambers, R.G., “Exact Nonradial Input, Output, and Productivity Measurement,” *Economic Theory*, Vol. 20, No. 4, 2002, pp. 751-765.
10. Coggins, J.S. and J.R. Swinton, “The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO₂ Allowances,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 30, No. 1, 1996, pp. 58-72.
11. Denny, M., M. Fuss, and L. Waverman, “The Measurement and Interpretation of Total Factor Productivity in Regulated Industries, with an Application to Canadian Telecommunications,” in T.G. Cowing and R.F. Stevenson eds., *Productivity*

Measurement in Regulated Industries, New York, Academic Press, 1981.

12. Färe, R., *Fundamentals of Production Theory, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Berlin, Springer-Verlag, 1988.
13. Färe, R., S. Grosskopf, and C.A.K. Lovell, *Production Frontiers*, Cambridge, Cambridge University Press, 1994a.
14. Färe R., S. Grosskopf, M. Norris, and Z. Zhang, "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries," *American Economic Review*, Vol. 84, No. 1, 1994b, pp.66-83.
15. Färe, R., S. Grosskopf, C.A.K. Lovell, and S. Yaisawarng, "Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach," *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 75, No. 2, 1993, pp.374-380.
16. Färe, R., S. Grosskopf, D.-W. Noh and W. Weber, "Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice," *Journal of Econometrics*, Vol. 126, No. 2, 2005, pp.469-492.
17. Gollop, F.M. and G.P. Swinand, "Total Resource Productivity: Accounting for Changing Environmental Quality," in C.R. Hulten, E.R. Dean, and M.J. Haper, eds., *New Developments in Productivity Analysis*, Chicago, The University of Chicago Press, 2001.
18. Gollop, F.M., and M. J. Roberts, "Environmental Regulations and Productivity Growth: The Case of Fossil-fueled Electric Generation," *Journal of Political Economy*, Vol. 91, No. 4, 1983, pp.654-674.
19. Hulten, C.R., "Total Factor Productivity: A Short Biography," in C.R. Hulten, E.R. Dean, and M.J. Haper, eds., *New Developments in Productivity Analysis*, Chicago, The University of Chicago Press, 2001.
20. Jorgenson, D.W. and Z. Griliches, "The Explanation of Productivity Change," *Review of Economic Studies*, Vol. 34, No. 3, 1967, pp.349-383.
21. Kwon, O.S. and W.C. Yun, "Estimation of the Marginal Abatement Costs of Airborne Pollutants in Korea's Power Generation Sector," *Energy Economics*, Vol. 21, No. 6, 1999, pp.545-588.
22. Kwon, O.S., W.-C. Yun and D.H. An, "Market Value for Thermal Energy of Cogeneration: Using Shadow Price Estimation Applied to Cogeneration Systems in Korea," *Energy Policy*, Vol. 33, No. 14, 2005, pp.1789-1795.
23. Nadiri, M.I. and M.A. Schankerman, "The Structure of Production, Technological Change, and the Rate of Growth of Total Factor Productivity in the U.S. Bell System," in T.G. Cowing and R.F. Stevenson, eds., *Productivity Measurement in Regulated Industries*, New York, Academic Press, 1981.
24. Schmidt, P., "On the Statistical Estimation of Parametric Frontier Production Functions," *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 58, No. 2, 1976, pp.238-239.
25. Shephard, R.W., *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton, Princeton University Press, 1970.

CO₂ Emission and Productivity of Fossil-fueled Power Plants

Oh-Sang Kwon* · Hojeong Park**

Abstract

This study estimates productivity changes of Korean fossil-fueled power plants incorporating changes in CO₂ emissions. The study derives a Törnqvist-type productivity index where the pollutant is incorporated as an undesirable output. The shadow price of pollutant, which is required for calculating the index, is estimated based on the duality between a revenue function and an output distance function. Productivity changes are measured with both the estimated shadow prices and the actual trading prices of CO₂ in the EU-ETS. The results show that productivity change measurement is highly dependent on the choice of shadow prices. The study also investigates the impacts of policy focus on the productivity measurement. The policy target is either to reduce emission itself or to reduce pollution intensity. Our study shows that productivity measurement is dependent on the choice of policy targets as well.

Key Words: fossil-fuel power generation sector, productivity change, CO₂

Received: Feb. 17, 2010. Revised: March 10, 2010. Accepted: May 24, 2010.

* First author, Professor & Program Head of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics and Rural Development, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, San 56-1 Sillim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, South Korea, Phone: +82-2-880-4728, e-mail: kohsang@snu.ac.kr

** Associate Professor, Department of Food and Resource Economics, Korea University, Anam-dong, Seoungbuk-gu, Seoul 136-701, Korea, Phone: +82-2-3290-3039, e-mail: hjeongpark@korea.ac.kr