

중국 화력발전산업의 CO₂ 암묵가격 및 잠재감축량, 연료에 대한 대체가능성 분석[†]

김영미*·이명현**

요약 : 본 논문에서는 향후 포스트 교토협약에서 온실가스 감축의무국으로 분류될 가능성이 높은 세계 최대의 CO₂ 배출국 중국의 화력발전산업을 대상으로 Shephard 투입물거리함수를 추정하여 CO₂ 암묵가격과 기술효율성, 그리고 투입요소 간 간접 모리시마 대체탄력성을 측정한다. 1981-2009년 기간 동안 CO₂ 1톤을 감축하는 데 연간 평균 약 3.2달러의 비용이 드는 것으로 나타났다. 이는 한국, 일본의 발전 산업에 대한 CO₂ 암묵가격 추정치보다 낮은 수준으로서 향후 이들 나라와 배출권 거래가 이루어질 경우 배출권 판매를 통한 경제적 이익이 예상된다. 기술효율성의 향상으로 달성할 수 있는 최대 CO₂ 잠재 감축량은 연간 평균 약 2천 5백만 톤에 이르는 것으로 산정되었다. 석탄과 석유 등의 연료와 자본은 상호 대체가능하며 자본이 연료를 더 용이하게 대체하는 것으로 나타났다.

주제어 : 중국화력발전산업, 기술효율성, CO₂ 암묵가격, 배출권거래제도, 간접 모리시마 대체탄력성

JEL 분류 : C61, L94, Q54

접수일(2012년 10월 22일), 수정일(2013년 2월 12일), 게재확정일(2013년 2월 15일)

[†] 이 논문은 인하대학교의 지원과 2010년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2010-330-B00087).

* 인하대학교 국제통상학부 박사과정, 인천시 남구 인화로 100, 제1저자(e-mail: ymkim9989@gmail.com)

** 인하대학교 국제통상학부 교수, 인천시 남구 인화로 100, 교신저자(e-mail: leemh@inha.ac.kr)

Estimation of the Shadow Price of Carbon Dioxide Emissions, the Potential Reduction, and Substitution Possibility for fuels in the Chinese Fossil-fueled Power Generation Sector

Yingmei Jin* and Myunghun Lee**

ABSTRACT : China, the world's largest CO₂ producer, is likely to be obligated to reduce greenhouse gas emissions under the post-Kyoto protocol. This paper estimates a Shephard input distance function for the Chinese fossil-fueled power generation sector to measure the shadow price of CO₂ emissions, technical efficiency, and indirect Morishima elasticities of substitution between inputs. Empirical results show that, on average, it costs approximately 3.2 US dollars per year to reduce CO₂ emissions by one ton over the period 1981-2009. This finding indicates that Chinese power sector is expected to benefit from selling emission permits to other countries such as Korea and Japan, given that our estimate for China is lower than the ones previous literatures estimated for the power sector in these countries. The maximum attainable average CO₂ reduction potential amounts to approximately 25 million tons per year by improving technical efficiency. Capital is substitutable with both coal and oil and capital is relatively more readily substituted for these fuels.

Keywords : Chinese fossil-fueled power generation industry, technical efficiency, CO₂ shadow price, emissions trading system, indirect Morishima elasticity of substitution

Received: October 22, 2012, Revised: February 12, 2013, Accepted: February 15, 2013.

* Department of International Trade, Inha University(e-mail: ymkim9989@gmail.com)

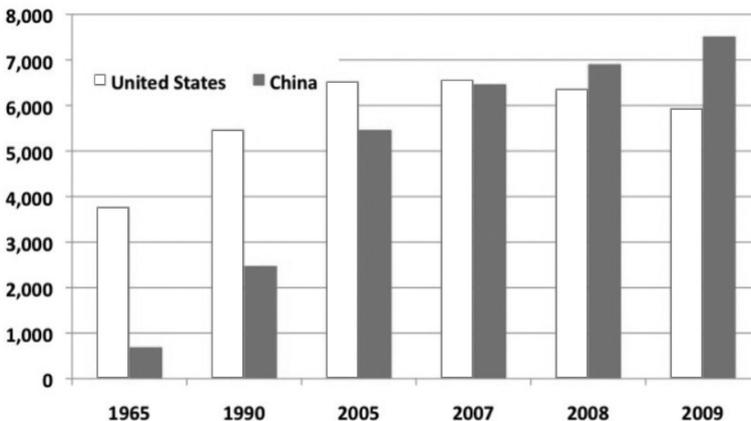
** Department of International Trade, Inha University(e-mail: leemh@inha.ac.kr)

I. 서론

중국은 개혁, 개방정책으로 1979년 이후 괄목한 경제성장 및 사회발전을 이룩하여 지난 30년간 중국의 GDP는 80배 이상 증가하며 미국 다음의 세계 제2 경제대국으로 부상하기에 이르렀다. 이처럼 높은 경제성장을 달성하는 과정에서 막대한 에너지 및 광물자원의 투입 및 소비가 이루어졌는데 이는 연계산업 파급효과 및 경제성장의 기여도가 상대적으로 높은 철강, 조선, 석유화학 등 에너지집약도가 큰 중화학분야를 전략적 육성산업으로 선택한 결과이다. 이로 인하여 불과 10년전 만 해도 중국의 에너지소비량은 미국의 절반수준에 그쳤으나 2010년에는 미국을 추월하여 현재는 중국이 세계에서 가장 에너지를 많이 소비하는 국가가 되었다.

에너지사용에 비례하여 <그림 1>에서 보듯이 중국은 2008년부터 주요 온실가스인 CO₂ 배출량에서도 미국을 능가하기 시작하여 2009년에는 약 77억 톤으로 세계 최대 규모를 기록하였으며 에너지사용의 증가 추세가 지속적으로 이어진다면 두 나라 간 격차는 점점 커지게 될 것이다. 온실가스 규제와 관련하여 1997년 일본 교토에서 개최된 기후변화협약 제3차 당사국 총회에서는 38개국을 대상으로 1990년 대비 2012년까지 평균 5.2%의 온실가스 감축의무 등을 주요 내용으로 하는 교토의정

<그림 1> 중국과 미국의 CO₂ 배출량 규모 비교



자료출처: Reuters (2010), 단위: 백만톤

서가 채택되었고 2005년에 공식 발효되었다. 중국은 1998년에 교토의정서에 서명하고 2002년에 비준하였으나 개발도상국이라는 이유로 감축의무의 유예를 받았다. 하지만 현재 세계 최대 CO₂ 배출국이면서 지속적인 경제성장을 추구하고 있는 중국의 온실가스 배출량은 증가할 전망이다. 2012년 이후의 온실가스 규제를 다루는 포스트 교토협약에서는 온실가스 감축의무국가로 편입될 가능성이 매우 높으며 이에 중국정부는 CO₂를 효과적으로 감축하기 위한 다양한 규제와 대책 수립 및 시행이 시급한 상황이다.¹⁾ 특히 발전부문의 경우 단일 부문으로는 최대 규모로서 2011년 현재 총 CO₂ 배출량의 37.2%를 차지하고 있어서 우선적 규제대상이다.

국가별로 온실가스 규제가 가해질 경우 CO₂를 감축하기 위해서는 일반적으로 기존 석탄, 석유 등의 화석에너지 의존도를 줄이고 태양광, 풍력 등 신재생에너지 비중을 높이거나, 배출단계의 CO₂를 포집하여 저장, 활용하는 기술 등을 도입할 수 있다. 하지만 이들 방식은 본격적인 상용화 이전 단계의 발전 및 기술 유형으로서 산업시설에 적용하는 데 상당한 생산비용의 부담이 요구된다. 이밖에 에너지 사용량을 자체를 줄이는 방법을 고려할 수 있는데 당장 산업 현장에서 실행 가능하다는 이점은 있지만 에너지가격의 현실화, 에너지사용의 효율성 제고 등 장기적으로 제반 수요관리정책이 일정한 성과를 거두기 전까지는 단기적으로 에너지 투입의 감소로 인한 산업의 생산성체감이 불가피하다. 따라서 정책기조로서 지속적인 경제성장을 지향하는 중국정부 입장에서는 CO₂ 배출 규제로 인한 산업생산성 하락 폭을 가능한 한 최소화시키는 정책과 제도 마련이 강구되어야 할 것이다.

이에 대한 방안의 하나로서 온실가스 배출량 감축의무를 유연하게 대처하기 위한 이행수단인 교토메커니즘 가운데 국가 간에 온실가스 배출권을 서로 거래할 수 있도록 하는 ‘배출권거래제도(emissions trading mechanism)’의 도입을 들 수 있는데 기업 간 혹은 산업 간에도 확대, 실행함으로써 CO₂ 저감의 사회적비용을 최소화시킬 수 있다. 명령과 통제에 의존하는 전통적 규제방식이 관료적이고 비효율적인 반면에 배출권거래제도는 시장기능을 적극적으로 활용하여 자발적인 환경 친화적인

1) 2011년 남아프리카공화국 더반에서 개최된 17차 유엔기후변화협약 당사국총회에서 교토의정서를 대체하는 합의안 도출에는 실패하였으나 교토의정서를 추가로 5년 연장하여 2020년까지 미국, 중국, 인도 등 교토의정서 체제에 동참하지 않았던 대규모 온실가스 배출국이 모두 참여하는 법적 구속력 있는 조약을 발효할 수 있도록 2015년까지 협상을 마무리하기로 합의하였다.

행위를 유도하는 경제적 유인수단 중 하나이다. 정부는 설정목표에 부합한 지역 총 CO₂ 배출허용량을 정한 후 이를 분배하여 각 기업에게 배출권을 할당하며 수급변화에 따른 기업 간 거래가 가능하다. 기업 간 CO₂ 저감비용에서 차이가 나고 배출권 시장가격이 그 사이에서 형성될 경우 상대적으로 낮은 저감비용의 기업은 배출권을 시장가격으로 판매하는 것이, 높은 저감비용의 기업은 배출권을 구입하는 것이 경제적으로 이득이 된다. 경제적 실익이 소진될 때까지 기업 간 배출권거래는 계속되며 궁극적으로 배출저감의 사회적 비용이 최소화되는 곳에서 균형이 이루어진다. 이때 배출권거래의 경제적 이득은 거래 당사자 간 한계저감비용 즉, CO₂ 한 단위 줄이기 위하여 소요되는 비용의 차이와 거래량에 따라 결정되기 때문에 배출권 거래를 통한 사회적 비용의 절감효과를 측정하는 데 기업의 한계저감비용의 추정이 선행되어야 한다.

Färe et al.(1993)은 1976년 현재 미시간, 위스콘신 주에 소재한 펄프 제지공장에서 부산물로서 발생하는 네 종류의 공해물질들에 대한 한계저감비용을 측정하기 위하여 Shepherd(1970)의 산출물거리함수(output distance function)를 이용하여 이들 공해물질 한 단위 감축하기 위하여 포기해야하는 산출량으로 측정한 일종의 기회비용 개념의 암묵가격 (shadow price)을 도출하였다. 각 공해물질별 암묵가격은 BOD, 부유물질(TSS), 분진(particulate), SO_x 1톤당 평균 1,043달러, 0달러, 25,270달러, 3,696달러로 각각 조사되었다. Coggins and Swinton(1996)과 Färe et al.(2005)은 같은 방법으로 단일 업종 가운데 상대적으로 SO₂가 많이 발생하는 발전산업을 대상으로 SO₂의 암묵가격을 추정하였다. Coggins and Swinton(1996)의 연구에서는 위스콘신 주내의 14개 석탄발전소에 대한 1990-1992 기간 동안의 SO₂ 1톤당 암묵가격은 평균 293달러로 나타났다. Färe et al.(2005)의 경우 209개 미국 발전회사에 대한 1993년과 1997년의 SO₂ 암묵가격은 1,117달러/톤과 1,974달러/톤의 결과를 각각 얻었다. Hailu and Veeman(2000)은 투입물거리함수를 이용하여 1959-1994년 기간을 대상으로 캐나다 펄프 및 제지공장에서 배출되는 연도별 BOD와 TSS의 한계저감비용을 산출한 결과 평균 각각 123달러/톤, 286달러/톤으로 집계되었다.

국내의 경우 발전산업을 대상으로 SO₂, CO₂의 암묵가격을 추정하는 연구가 주를 이루었다. Kwon and Yun(1999)은 산출물거리함수접근법으로 국내 화력발전산업의

SO_x, NO_x, TSP, CO₂별 한계저감비용을 계산하였다. 1990-95년 기간 동안 SO₂ 1톤에 대한 평균 한계저감비용을 약 31만원으로 추정하였다. NO_x, TSP, CO₂ 1톤에 대한 한계저감비용은 각각 약 15만원, 1500만원, 3,800원으로 측정되었다. 이명현·강상목(2002)은 국내 12개 화력발전소 40대 발전기를 대상으로 SO₂ 암묵가격을 계산할 결과 1970-98년 기간 동안 1995년 불변가격으로 1톤 저감하는 데 연평균 15만원이 소요되는 것으로 나타났다. Park and Lim(2009)은 2001-2004년의 화력발전소 자료를 사용하여 평균 14유로의 CO₂ 암묵가격을 산출하였다. Matsushita and Yamane(2012)는 일본 전력산업을 분석한 결과 CO₂의 암묵가격이 1톤당 평균 약 39달러에 이르는 것으로 나타났다.

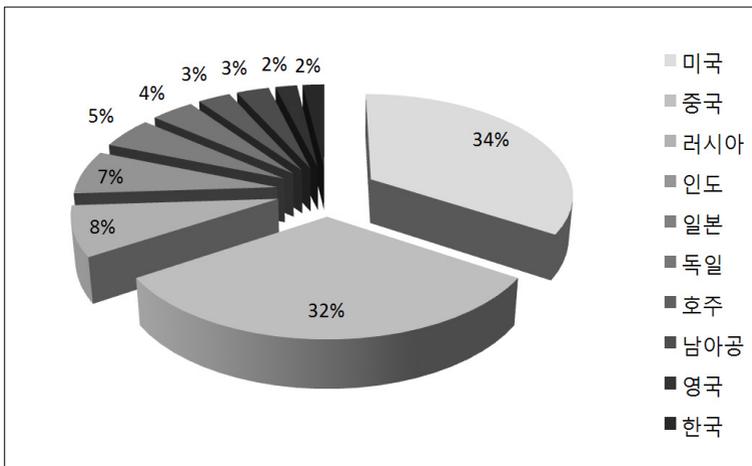
중국을 대상으로 CO₂에 대한 암묵가격 즉 한계저감비용을 추정된 선행연구로서 Wang et al.(2011)은 중국 28개성을 대상으로 방향성 거리함수(directional distance function)를 이용하여 CO₂의 한계저감비용을 추정된 결과 CO₂ 1톤을 감축하는 데 평균 약 73.1달러를 지불한 것으로 나타났다. Wei et al.(2011) 역시 중국 29개성별 자료를 사용하여 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA) 기법으로 1톤당 평균 약 17.6달러의 CO₂ 감축비용을 산출하였다. 하지만 실제 환경규제 및 제도 변화에 직면하고 이에 대응하는 주체는 기업 또는 산업인데 환경규제의 이행여부를 감시, 감독하고 집행하는 주체인 중국 성별 자료를 사용할 경우 현실적 상황과 부합되지 않은 결과를 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 중국에 대한 선행연구의 한계를 극복하기 위하여 2011년 현재 중국 전체 CO₂ 배출량 가운데 약 37%를 차지하고 있는 전력산업을 대상으로 CO₂의 암묵가격을 추정한다. 이와 함께 기술적으로 효율적인 발전을 전제로 CO₂ 잠재적 감축량을 추산하고, 성별 자료를 사용한 기존 연구에서 시도하지 않았던 화석연료와 자본 또는 노동간 대체가능성을 타진해 본다. 이때 자본이 화석연료를 대체하는 정도가 상대적으로 높게 나타날 경우 이는 CO₂ 저감에 따른 전력 생산성 파급효과를 줄일 수 있음을 의미한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II절에서 중국 화력발전산업을 둘러싼 제반 환경에 대하여 서술한 후 제III절에서 분석모형의 토대가 되는 투입물거리함수를 정의하였다. 제IV절에서 실증분석결과를 제시하였으며 제V절에서 요약과 결론을 담았다.

II. 중국 화력발전산업의 제반 환경

지속적인 높은 경제성장으로 세계 제2 경제대국으로 부상한 중국은 국내 거대시장 이면에 그동안 환경 보존의 중요성에 대한 인식 부족과 느슨한 환경규제로 심각한 대기, 수질오염 문제에 직면하고 있다. 대외적으로도 지구환경관련 국제협약에서 문제해결에 소극적인 자세를 견지함에 따라 경제대국으로서의 지위와 역할이 기대에 못 미치는 모습을 보여 왔다. 하지만 지구온난화 문제에 있어서는 주요 온실가스인 이산화탄소 배출량에서 2007년 중국은 미국을 제치고 세계 1위 자리를 차지함에 따라 이에 대한 중국 정부의 인식변화와 온실가스의 자발적인 감축 없이는 지구환경문제를 개선시키는 데는 한계가 있다. 그중에서 화력발전소에 대한 효과적인 관리가 시급한 실정이다. 미국 ‘Center for Global Development’에서 운영하는 ‘CARMA (Carbon Monitoring for Action)’ 데이터베이스에 따르면 2008년 석탄을 화석연료로 사용하는 전 세계 5만여 곳 발전소에서 100억 톤 가까운 CO₂를 배출하는 것으로 나타났다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 각 나라별로 분포되어 있는 화력발전소 중에서 미국의 화력발전소에서 배출하는 CO₂ 양은 매년 25억 톤에 이르며 그 다음은 24억

<그림 2> 화력발전소 보유 국가 현황



자료출처: Center for Global Development (2008)

톤의 CO₂를 배출하는 중국 화력발전소가 차지하였다.

2010년 환경의 중요성을 인식한 중국 ‘국가발전개혁위원회(国家发展和改革委员会)’는 ‘12차 5개년 계획(2011-2015)’ 기간 동안 시행할 ‘에너지 절약 및 오염물 배출 저감에 관한 종합 사업방안’ (이하 ‘사업방안’)을 발표하였다. 이 ‘사업방안’에 따르면 중국 각 성(자치구, 시 포함)을 대상으로 화학적 산소요구량, 이산화황과 암모니아 질소, 질소산화물에 대한 배출 총량 감축목표를 설정한 후 각 지역별 할당량을 지정하였다.²⁾ 2015년까지 화학적 산소요구량과 이산화황 배출량을 2010년 대비 각각 8%씩, 암모니아 질소와 질소 산화물 배출량은 각각 10%씩 낮춘다는 계획이며, 오염물 총량 감축성과를 각 지역의 환경평가 지표로 활용할 예정이다. 이처럼 환경 규제의 강화 움직임은 부수효과로서 환경기술 관련 산업의 발전으로 이어져 탈질(脱硝), 탈황(脱硫), 공기청정(除尘) 등과 같은 설비제조업 시장이 약 2억 위엔의 규모로 성장하였다.

2012년 1월에는 12차 5개년 계획기간 동안 ‘온실가스 배출 규제 업무방안’을 통해 북경시(北京市), 천진시(天津市), 상해시(上海市), 중경시(重庆市), 호북성(湖北省), 광둥성(广东省), 심천시(深圳市) 등 7개 지역을 탄소배출권거래제 도입 시범지역으로 지정하였다.³⁾ ‘국가발전개혁위원회’에서는 해당 지방정부에 탄소집약도나 에너지 지원단위가 아닌 배출총량에 대한 규제를 요구하면서 당초 예정대로 2013년부터 배출권 거래제를 시범적으로 시행하기 위하여 가능한 한 빠른 시일 내로 탄소배출권 할당 계획을 발표할 것을 촉구하였다. 이들 7개 시범지역에서 탄소배출권 거래시장을 운영한 성과가 양호한 경우 도입 지역을 점차 전국으로 확대할 계획이다.

특히 화력발전소를 대상으로 중국 ‘환경보호부’와 ‘국가품질감독검역관리총국(国家质量监督检验检疫总局)’은 ‘화력발전소 대기오염 배출물 표준’의 수정안을 발표하여 2012년 1월 1일 부터 공식 시행하고 있다. 2010년 말 기준 중국 전력 발전설비 용량은 9억 6,200만KW로서 세계 2위에 해당되며, 그중 화력발전설비 용량은 중국 전체 발전설비 용량에서 73%를 차지하고 있다. 뿐만 아니라 발전량 규모에서도 전

2) 특히 북경에 할당된 오염물 배출 감축폭은 국가 감축목표치를 상회하였다.

3) ‘국가발전개혁위원회’는 7개 시범지역에서 실시될 탄소배출권 거래제의 참고모델을 선정하는 데 있어서 ‘호주 모델’, ‘EU 모델’, ‘일본 모델’ 등이 후보군에 포함되었음을 밝혔다.

체 발전량의 80% 이상의 점유율을 나타내고 있으며, 화력발전에서 사용되는 석탄의 양도 연간 16억 톤에 달하고 있다. 따라서 중국은 화력발전 과정에서 생산되는 대기 오염물질의 배출량을 최소화하기 위하여 청정발전기술을 도입하여 석탄 사용량을 줄이는 한편 효율성이 낮은 소형 화력발전 장비를 교체하는 등 전력생산 구조를 개선하려고 노력하여 왔다. 탈황시스템의 경우 2010년 말 기준 5억 6,500만 KW 누계 규모의 석탄화력발전소에 설치하여 가동함으로써 화력발전 탈황시스템 장착율을 2005년의 12%에서 80%까지 끌어올렸다. 현재 중국의 인구당 전력생산 설비용량은 선진국 평균 수준에 크게 미치지 못하고 있어서 앞으로 상당 기간 동안 전력생산 설비용량을 늘려야 하는 상황으로서 중국 에너지구조 특성상 일정기간 동안 석탄연료 발전시스템의 지속적인 증가는 불가피한 실정이다. 이는 향후 화력발전소의 이산화황, 질소산화물, 먼지 배출의 증가를 수반하게 되며 따라서 화력발전소에서 배출되는 공해물질의 효과적인 규제는 중국 대기환경정책의 주요 현안이 될 전망이다.⁴⁾

III. 분석모형

자본(k), 노동(l)과 화석연료로서 석탄(c)과 석유(o)의 생산요소 벡터 $x \in R_+^4$ 을 투입하여 전력(q)와 연료를 연소시키는 과정에서 발생하는 부산물 CO₂(u)의 산출물 벡터 $y \in R_+^2$ 을 창출하는 발전 산업을 대상으로 Shephard(1970)의 투입물거리함수를 정의하면 다음과 같다.

$$I(y, x) = \sup \{ \eta > 0 : (x/\eta) \in G(y) \} \quad (1)$$

여기서 $I(\cdot)$ 는 y 의 양적 변화를 초래하지 않고 x 을 동일한 비율로 최대한 줄일 수 있는 정도를 측정하며, 이때 $G(y)$ 는 y 을 창출하는 데 요구되는 투입요소 집합을 나

4) 중국 ‘환경보호부’ 陶德田 대변인은 “중국 환경보호 12차5개년 계획(2011-2015년)을 실속 있게 추진하기 위해 ‘환경보호부’는 ‘화력발전소 대기 오염 배출 표준’에 대하여 더욱 강도 높은 수정을 단행했다”며 “수정된 표준은 기존 화력발전소와 새로 건설되는 신규 화력발전소를 구분하여 배출 감축 목표를 설정했고 신규 화력발전소에 대해서는 엄격한 오염물 배출 허용기준을 적용하였으며 기존 화력발전소의 경우에는 목표 기준을 도달하는 데 2년 반의 유예기간을 부여할 것이다”라고 설명했다.

타낸다. $I(\cdot)$ 값의 범위는 1보다 같거나 크며, 1일 경우 기술적으로 가장 효율적인 지점으로서 x 의 최소수준에서 y 의 생산이 가능한, $G(y)$ 의 하한(lower bound) 경계 선 즉 등량곡선(isoquant) 상에서 조업이 이루어지는 상태이며, 1보다 크면 클수록 y 대비 x 가 필요 이상으로 과잉 투입한 상황이므로 그만큼 생산 효율성은 낮아지게 된다. $I(\cdot)$ 는 x 에 대하여 1차 동차함수이고 단조성(monotonicity) 조건으로서 x 와 u 에 대해서는 비체감(non-decreasing), q 에 대해서는 비체증(non-increasing) 함수이다(Shephard, 1970; Färe and Grosskopf, 1990; Hailu and Veeman, 2000).⁵⁾

Farrell(1957)의 기술효율성(TE)은 $I(\cdot)$ 의 역수로 측정하며 최대값 1보다 작을 수록 기술효율성은 떨어지게 된다. 따라서 $(1-TE)$ 는 y 의 감소를 초래하지 않고 생산의 효율성 향상을 통하여 줄일 수 있는 x 의 규모를 나타낸다.

투입물거리함수를 제약조건으로 하는 비용최소화 문제를 해결함으로써 다음과 같은 비용함수를 도출할 수 있다.

$$c(y, w) = \min_x \{w \cdot x : I(y, x) \geq 1\} \quad (2)$$

여기서 $w \in R_+^4$ 는 투입요소의 가격벡터이다.

Hailu and Veeman(2000)을 따라서 식 (2)을 y 로 미분할 경우 다음의 방정식이 성립한다.

$$\nabla_y c(y, w) = -\lambda \nabla_y I(y, x) \quad (3)$$

여기서 ∇ 는 편미분 연산자이고, λ 는 제약 비용최소화 문제의 Lagrangian 승수로서 최적수준에서 비용함수 값과 같게 된다(Shephard, 1970; Jacobsen, 1972). 산출물의 암묵가격은 산출물 한 단위를 추가적으로 생산하는 데 발생하는 비용 증가분으로 정의할 수 있으므로 식 (3)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

5) x 가 늘어나거나 u 가 증가되어 이를 감축하기 위하여 x 의 추가 투입이 이루어지면 조업점은 등량곡선 우상향으로 이동되어 이를 기존 등량곡선 상으로 다시 이전시키기 위해서는 그만큼 x 을 더 많이 줄여야 하며, q 가 증가하면 등량곡선 자체가 우상향으로 이동하기 때문에 그만큼 x 의 감소폭은 줄어들기 때문이다.

$$p^s = -c(y, w) \nabla_y I(y, x) \quad (4)$$

여기서 $p^s \in R_+^2$ 는 산출물의 암묵가격 벡터이다. $I(\cdot)$ 는 q 와 u 에 대하여 각각 비체증과 비체감 단조함수이므로 전력 암묵가격(p_q^s)은 비음수이고 CO₂ 암묵가격(p_u^s)은 비양수이다.

식 (4)로부터 p_q^s 과 p_u^s 의 비율을 각각 산출한 다음, p_q^s 과 시장가격(p_q)이 동일하다는 전제하에 다음과 같이 p_u^s 을 계산할 수 있다.

$$p_u^s = p_q \cdot \frac{\partial I(y, x) / \partial u}{\partial I(y, x) / \partial q} \quad (5)$$

식 (5)로부터 도출된 CO₂의 암묵가격은 CO₂ 한 단위를 추가적으로 감축하기 위하여 희생해야 할 전력 생산량으로 측정하며 CO₂의 한계저감(기회)비용과 상응한 개념이다.

등량곡선의 곡률에 따라 투입요소 간 대체 정도가 결정된다. 투입물거리함수 (1)로부터 다음과 같이 도출된 간접 Morishima 대체탄력성을 이용하여 투입요소 x_i 와 x_j 간 대체가능성을 분석한다(Blackorby and Russell, 1988; Grosskopf et al., 1995).

$$M_{ij} = x_i I_{ij}(y, x) / I_j(y, x) - x_i I_{ii}(y, x) / I_i(y, x), i, j = k, l, c, o, \quad (6)$$

여기서 $I(\cdot)$ 아래첨자는 투입요소에 대한 편미분을 나타낸다. M_{ij} 는 x_i 와 x_j 간 대체를 유도하기 위하여 요구되는 두 요소가격의 상대적 변화 정도를 측정한다. 값이 클수록 대체가 이루어지기 위하여 상대적으로 두 요소 간 가격 차이가 더 많이 벌어져야 한다는 의미이기 때문에 그만큼 대체가 어려워지게 된다. 또한 어떤 투입요소를 기준으로 사용하느냐에 따라 두 요소가격 비율이 달라지므로 일반적으로 M_{ij} 와 M_{ji} 는 일치하지 않는다.

식 (5)의 p_u^s 과 식 (6)의 M_{ij} 을 산출하기 위하여 투입물거리함수 (1)를 추정해야

하며 이를 위하여 다음과 같이 초월대수(translog) 함수형태로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \ln I(y, x) = & \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln x_i + \sum_j \alpha_j \ln y_j + \frac{1}{2} \sum_i \sum_{i'} \gamma_{ii'} (\ln x_i)(\ln x_{i'}) \\ & + \frac{1}{2} \sum_j \sum_{j'} \gamma_{jj'} (\ln y_j)(\ln y_{j'}) + \sum_i \sum_j \beta_{ij} (\ln x_i)(\ln y_j), \\ & i, i' = k, l, c, o, \quad j, j' = q, u, \quad \gamma_{ii'} = \gamma_{i'i}, \quad \gamma_{jj'} = \gamma_{j'j}. \end{aligned} \quad (7)$$

Aigner and Chu(1968)을 따라서 다음과 같이 선형계획(linear programming) 기법을 사용하여 (7)의 계수를 추정한다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_j [\ln I(y^h, x^h) - \ln 1] \\ \text{s.t. } & \ln I(y^h, x^h) \geq 0, \\ & \partial \ln I(y^h, x^h) / \partial \ln x^h \geq 0, \\ & \partial \ln I(y^h, x^h) / \partial \ln q^h \leq 0, \\ & \partial \ln I(y^h, x^h) / \partial \ln u^h \geq 0, \\ & \sum_i \alpha_i = 1, \quad \sum_{i'} \beta_{ii'} = \sum_i \beta_{ij} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 h 는 각 관찰치를 나타낸다. 설정된 목적함수는 제반 제약조건 하에서 가장 생산효율성이 높은 $G(y)$ 의 경계선과 현재 조업지점과의 간격을 최소화시키는 것이다. 첫 번째 제약조건은 투입물거리함수 값의 범위이며, 두 번째에서 네 번째 제약조건은 각각 x , q , u 에 대한 단조성 조건에 해당된다. 마지막 제약조건은 x 에 대한 동차성을 충족시키기 위하여 부여한다.

IV. 분석결과

본 논문의 실증분석을 위하여 중국 화력발전산업에 대한 1981-2009년 기간의 연도별 자료를 사용하였다. 전력생산량은(q)과 자본투입량(k)은 『중국전력통계연감(中国电力统计年鉴)』의 연간 화력발전량(TWh)과 화력발전 설비용량(GW) 자료를

각각 사용하였다. 노동투입량(l)은 『중국에너지통계연감(中国能源统计年鉴)』의 전력산업의 화력부문 종사자수로 측정하였으며 석탄(c) 및 석유투입량(o)은 『中国能源统计年鉴』의 전력산업에서의 석탄 및 석유소비량(백만톤)을 사용하였다. 전력가격(p_q)은 『중국공업기업자료집(中国工业企业数据库)』의 연도별 전력 판매가격(위엔/MWh)이다. CO₂ 배출량(u)은 다음과 같이 「기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)」의 연도별 탄소배출계수에 근거하여 산정하였다.

$$CO_2 = \sum_i f_i \times h_i \times d_i \times r_i \times (44/12), i = c, o, \quad (9)$$

여기서 아래첨자 i 는 화석연료로서 석탄(c)과 석유(o)를 나타낸다. f 는 연료 사용량, h 는 평균 발열량, d 는 단위열량 당 탄소함유량, r 은 탄소의 산화율이다. 연료별 탄소배출계수 값들은 <표 1>에 제시하였다. 사용된 자료의 통계치는 <표 2>에서 요약하였다. 모든 변수는 중간연도인 1995년에서 1이 되도록 표준화하였다.⁶⁾

식 (8)의 문제를 선형계획기법으로 해결함으로써 투입물거리함수 (7)의 계수를 추정된 결과 <표 3>에서 보는 바와 같다. 이들 추정계수를 식 (7)에 다시 대입하여 구한 거리함수 값의 역수를 취함으로써 중국 화력발전산업의 연도별 기술효율성(TE)을 측정할 수 있다. <표 4>에서 보듯이 TE 는 1981-2009년 기간 동안 8개 연도에서

<표 1> 중국 주요 화석연료별 탄소배출계수

연료	석탄	석유	등유	경유	연료유	천연가스
h (톤/1조 Joule)	27.28	18.9	19.6	20.17	21.09	15.32
d (1조 Joule/1억kg.m ³)	192.14	448	447.5	433.3	401.9	3839.1
r (%)	92.3	98.0	98.6	98.2	98.5	99.0

자료출처: 국가기후변화 대책 기구 및 국가발전 개혁위원회 에너지연구소(国家气候变化对策协调小组办公室和国家发改委能源研究所) (2007).

6) 식 (8)의 선형계획기법으로 추정된 식 (7)의 초월대수 투입물거리함수의 계수들을 사용하여 식 (6)으로부터 중간연도에서의 Morishima 대체탄력성을 계산하는 데 있어서 관찰치 x, y 을 중간연도에서 1로 표준화할 경우 그 대수값들이 모두 0이 되어 식 (6)은 추정계수만으로 구성된다(Grosskopf et al., 1995, p. 293).

〈표 2〉 자료 통계치

변수	단 위	평 균	표준편차	최소값	최대값
발전량(q)	TWh	1057.4	825.16	243.72	3011.7
CO ₂ 배출량(u)	백만톤	994.77	704.26	215.08	2572.20
자본투입량(k)	GW	214.99	172.81	47.20	651.08
노동투입량(l)	만명	141.35	47.21	62.54	229.19
석탄투입량(c)	백만톤	536.58	399.76	89.62	1439.70
석유투입량(o)	백만톤	13.64	3.13	5.01	18.64
전력가격(p_q) ^a	달러/MWh	4.37	1.57	2.66	8.40

주: ^a 위엔화 표시의 가격을 각 연도별 환율(RMB/USD)을 이용하여 달러로 환산하였음.
 자료출처: 『中国能源统计年鉴』(2010), 『中国电力统计年鉴』(2010), 『中国工业企业数据库』(2010).

〈표 3〉 투입물거리함수 추정계수

계수	추정치	계수	추정치
α_0	0.0513	γ_{ll}	-0.4938
α_q	-0.9642	γ_{lc}	-0.1388
α_u	0.1000	γ_{lo}	-0.0012
α_k	0.2662	$\gamma_{\alpha\alpha}$	2.1239
α_l	0.0030	$\gamma_{\omega\omega}$	-0.6657
α_c	0.6111	γ_{oo}	0.0225
α_o	0.1196	β_{qk}	0.8958
γ_{qq}	0.4066	β_{ql}	-0.5751
γ_{qu}	-0.8787	β_{qc}	-0.2452
γ_{uu}	1.1200	β_{qo}	0.0754
γ_{kk}	0.0411	β_{uk}	0.3765
γ_{kl}	0.6338	β_{ul}	0.3182
γ_{kc}	-1.3193	β_{uc}	-0.6923
γ_{ko}	0.6444	β_{uo}	-0.0024

가장 높은 1을 기록하였는데 1980년대에서 3번, 나머지는 2000년 이후에 달성하였다. 가장 낮은 TE 을 나타낸 연도는 0.9로서 1992년과 1996년이였다. TE 의 변화추이를 연대별로 개관하면 1980년대와 비교하여 1990년대 들어 상대적으로 떨어진

〈표 4〉 연도별 기술효율성 및 CO₂에 대한 한계저감비용, 잠재감축량 추정

연도	기술효율성 (<i>TE</i>)	잠재감축량 (만톤)	한계저감비용(p_u^s) (달러/톤)
1981	1.000	0	- ^a
1982	0.998	49.045	1.46
1983	0.974	715.964	1.97
1984	0.975	763.794	- ^a
1985	0.970	1006.992	0.92
1986	1.000	0	0.11
1987	1.000	0	- ^a
1988	0.966	1536.400	1.63
1989	0.951	2405.766	2.72
1990	0.961	2031.784	3.29
1991	0.963	2123.220	3.45
1992	0.905	6393.860	3.64
1993	0.943	4008.153	2.77
1994	0.991	672.704	2.06
1995	0.950	4154.412	3.28
1996	0.906	8989.177	4.19
1997	0.932	6261.422	4.70
1998	0.947	4870.218	6.39
1999	0.963	3586.417	5.91
2000	0.997	308.192	4.18
2001	1.000	0	3.19
2002	1.000	0	1.41
2003	0.997	450.482	0.95
2004	1.000	0	- ^a
2005	0.971	5460.831	3.72
2006	0.938	13332.591	4.02
2007	0.983	3987.575	- ^a
2008	1.000	0	3.08
2009	1.000	0	8.36
평균	0.971	2521.000	3.23

^a 식 (5)에서 $\partial I/\partial u$ 의 값이 0에 근접함에 따라 p_u^s 을 산출할 수 없음.

생산의 효율성이 2000년대부터 다시 개선되는 양상이다.⁷⁾ 전체기간을 대상으로 TE 는 연간 평균 0.971로서 이는 생산 효율성의 극대화를 통하여 등량곡선 상에서 생산이 이루어질 경우 생산량 감소 없이 모든 생산요소의 투입량을 동시에 평균적으로 2.9%까지 줄일 수 있음을 의미한다.

이러한 상황을 연료 투입요소인 석탄과 석유에 적용하여 CO_2 배출량 산정식 (9)에 $(1 - TE)$ 를 곱함으로써 연도별 감축 가능한 최대 CO_2 배출량을 계산할 수 있다. 따라서 기술효율성이 낮을수록 CO_2 잠재 감축량은 많아지게 된다. <표 4>에서 제시한 연도별 CO_2 잠재 감축량을 비교하면 가장 많은 해는 2006년으로서 최대 1억 3천만 톤의 CO_2 배출량을 줄일 수 있으며 1996년이 그 뒤를 이어 9천만 톤 가까이 CO_2 저감이 가능한 것으로 나타났다. 1992년과 1997년에도 6천만 톤 대의 비교적 큰 규모의 잠재 감축량을 기록하였다. 2006년에는 TE 가 가장 낮은 수준이 아님에도 불구하고 CO_2 잠재 감축량이 가장 많은 이유는 중국의 경제성장에 비례하여 전력수요가 늘어나는 추세이므로 석탄, 석유 사용량이 1992년과 1996년보다 상대적으로 많았기 때문이다. 이러한 규명은 0.99대의 비슷한 수준의 TE 를 각각 기록한 1982년보다 2003년의 CO_2 잠재 감축량이 약 9배 크게 나타난 사실로부터 확인할 수 있다. 1981-2009년 기간에 걸쳐 기술효율성 제고로 연간 평균 최대 약 2천 5백 만 톤가량의 CO_2 감축이 가능한 것으로 추산되었다.

식 (5)로부터 추정된 중국 화력발전의 연도별 CO_2 암묵가격(p_u^s)은 <표 4>에서 알 수 있듯이 1986년에 1톤당 최저 0.1달러에서 2009년에 최고 8.4달러의 범위를 보였으며, CO_2 1톤을 저감하는 데 표본기간 동안 연간 평균 약 3.2달러의 비용이 발생하는 것으로 나타났다. 1981-2009년 기간에 걸쳐 p_u^s 의 추정치에 변화추이를 살펴보면 1988년까지 톤당 1달러 이하에서 등락이 이루어진 후, 1989년과 1990년에 2.7달러, 3.3달러를 각각 기록하며 비록 1993년과 1994년에 2달러 대로 다시 낮아지긴 했어도 6.4달러로 측정된 1998년까지 상승하는 추세를 나타냈다. 1999년부터 2003년까지는 급격한 감소세를 보이며 1달러 미만까지 떨어졌으나 그 이후 다시 상승 반전

7) 시계열 자료로 측정된 TE 의 연도별 차이가 크지 않은 상황에서, 기후, 기기의 오작동, 노동자의 실수 등 임의오차가 발생되어 이들 요인이 기술비효율로 간주됨으로써 연도별 TE 차이에 결정적으로 작용할 수 있는 개연성이 있다. 이 경우 기술비효율과 임의오차를 분리할 수 있는 확률적 변경함수 접근법이 유효하다.

하는 양상을 보이며 2009년에는 8.4달러로 최대치를 기록하였다. p_u^s 을 종속변수로 놓고 시간(연도) 지표($t = 1, 2 \dots$)로 1차 선형 OLS 회귀분석을 실시한 결과 표본기간 전체적으로 CO₂ 암묵가격은 매년 평균 약 5%씩 증가하는 것으로 나타났다.⁸⁾

본 논문의 p_u^s 에 대한 추정결과는 Wang et al.(2011)과 Wei et al.(2011) 등이 중국 지역(성)별 자료를 사용하여 일종의 방향(directional) 거리함수 접근법으로 도출한 CO₂ 암묵가격 추정치보다 낮은 수준인데, Shephard 거리함수에 근거한 암묵가격이 산출물 벡터를 산출물 집합의 상대적으로 덜 가파른 영역으로 이동시킴으로써 방향 거리함수를 측정할 경우보다 일반적으로 낮게 추정되기 때문이다(Färe et al., 2005). 현재 중국 화력발전산업의 청정기술 수준을 평가한다면 CO₂ 배출을 저감하기 위해서는 일정량의 전력생산 감소가 수반된다고 볼 때 Shephard 거리함수의 사용이 더 적합하다고 볼 수 있다.

한국 화력발전소과 일본 전력산업을 대상으로 각각 추정한 Park and Lim(2009)과 Matsushita and Yamane(2012)의 CO₂ 암묵가격보다 낮았다.⁹⁾ 중국은 일본과 달리 교토협약의 온실가스 감축의무국이 아니므로 CO₂ 배출 규제를 받지 않아서 상대적으로 많은 양의 CO₂ 배출이 이루어지는 상황에서 일본 전력산업에 비해 적은 비용으로 1톤을 줄일 수 있다. 즉 CO₂ 배출량이 증가하면 한계저감비용은 감소하기 때문이다. 한국의 경우 온실가스 감축의무국은 아니지만 두 나라 발전량 규모를 비교하면 중국의 화석연료의 사용량이 한국을 능가함에 따라 발전 산업에서 배출하는 CO₂의 양은 절대적으로 많다. 따라서 향후 동북아지역을 대상으로 온실가스 배출권 거래가 이루어질 경우 중국의 화력발전산업은 공급자 입장에서 일본과 한국에 배출권을 판매함으로써 상당한 경제적 수입을 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

<표 5>는 식 (6)으로부터 도출된 중간연도 1995년에서 평가한 투입요소 간 간접 Morishima 대체탄력성의 추정결과이다. 자본과 노동은 양 방향 모두 간접 탄력성이 비교적 큰 값을 보임에 따라 서로 대체하기가 어려운 것으로 나타났는데 이는 중국

8) 회귀방정식 추정결과는 다음과 같다.

$$\ln(p_u^s)_t = 0.1007 + 0.0535 \cdot t + \epsilon_t$$

(0.2786) (2.5630) 괄호안은 t 값, $R^2 = 0.23$.

9) 여기서 자료체계가 각기 상이한 세 나라를 한 모형에서 동시에 분석한 것이 아니기 때문에 간접 비교에 국한한다.

〈표 5〉 Morishima 대체탄력성 추정결과 (중간연도에서 측정)

대체탄력성	추정치
M_{kl}	209.382
M_{lk}	165.840
M_{kc}	-1.313
M_{ck}	-7.431
M_{ko}	6.234
M_{ok}	3.233
M_{lc}	163.232
M_{cl}	-48.156
M_{lo}	163.449
M_{ol}	0.415
M_{co}	-8.042
M_{oc}	-0.277

화력발전산업의 생산과정에서 자본과 노동 간 역할의 경계가 분명하다는 점을 의미한다. 자본과 석탄은 대체적 관계를 나타냈는데 양 방향 모두 음수로 추정되었기 때문이다(이명현, 2012). 특히 절대값에서 M_{ck} 가 M_{kc} 을 능가함으로써 석탄에 대한 자본의 대체성이 자본에 대한 석탄의 대체성보다 더 큰 것으로 측정되었다. 이는 연료 가운데 석탄에 대한 의존도가 매우 높은 화력발전산업이 석탄사용을 줄이고 대신 자본의 투입을 늘림으로써 효과적으로 CO₂ 배출량을 억제하면서 자본투자에 기술 혁신이 체화될 경우 생산성 향상까지 도모할 수 있다는 점에서 고무적인 결과라고 할 수 있다. 자본과 석유는 상호 대체가능성이 있는 것으로 나타났으나 그 강도는 자본과 석탄의 대체관계보다 상대적으로 약했으며, 방향에서는 자본이 석유를 더 수월하게 대체하는 것으로 조사되었다.

노동과 석탄은 어느 요소를 기준으로 대체여부를 판단하느냐에 두 요소 간 관계는 서로 상반된 결과가 도출되었다. 즉 석탄은 노동을 대체하기가 어려운 반면 노동은 석탄을 비교적 용이하게 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 노동과 석탄 간 투입비율에서 석탄이 상대적으로 과다 투입되어 석탄이 노동을 추가로 대

체하기가 어렵지만 노동을 늘리고 석탄의 사용을 줄임으로써 생산요소 간 효율적 배분으로 생산성 향상이 가능한 현실을 반영한 것으로 판단된다. 노동과 석유의 관계에서도 노동이 석유를 대체하는 정도가 석탄에 대한 대체 정도보다 못 미치지만 노동-석탄 간 관계와 비슷한 결과를 보였다. 전반적으로 석탄, 석유 등 화석연료가 노동에 비해 과다 투입되고 있는 양상이다. 석탄과 석유의 화석연료 간 대체는 양방향 모두 음수로서 상대적으로 자유로운 것으로 나타났으며 세부적으로는 석유가 석탄을 대체하는 정도가 더 강했다.

V. 요약 및 결론

국제에너지기구(IEA)에서 집계된 통계에 따르면 2007년부터 지구 온난화를 야기하는 주된 물질인 이산화탄소 배출량에서 중국은 미국을 제치고 세계 1위 자리를 차지하였다. 고공진행의 경제성장률과 비례한 에너지사용의 급속한 증가와 함께 주로 화석연료에 의존하는 수급구조로 인하여 중국이 향후 포스트 교토협약에서 온실가스 감축의무국으로 분류될 경우 산업 및 생활경제 전반에 미치는 파급효과는 지대할 것이다. 온실가스 규제의 국제 동향에 중국이 효과적으로 대처하기 위해서는 장기적으로는 에너지 효율성을 제고하고 에너지 다소비 산업구조를 개선하며 신재생에너지 개발에 투자하여 화석연료의 의존도를 낮추고, 중·단기적으로는 CO₂ 배출규제의 도입으로 기업 및 산업의 생산성을 증가시키는 데 미치는 충격을 최소화하는 등 전략적인 정책 수립이 요구된다. 이때 규제수단 가운데 배출량 저감을 위한 유연한 의무이행수단인 교토메커니즘으로 도입되어 이미 국가, 지역, 기업 간에 광범위하게 실행되고 있는 배출권거래제도의 도입이 현실적 대안이 될 수 있다.

본 논문에서는 중국에서 단일 업종으로 CO₂를 가장 많이 배출하는 화력발전산업을 대상으로 CO₂ 암묵가격, 즉 한계저감비용을 측정한 후 다른 나라와의 비교를 통하여 배출권거래제의 도입효과를 분석하고, 생산의 효율성 개선을 통하여 최대로 감축할 수 있는 CO₂의 배출량 규모와 투입요소 간 특히 자본과 화석연료의 대체가능성을 측정하였다. 1981-2009년 기간의 중국 화력발전산업의 연도별 자료를 사용하여 Shephard 투입물거리함수를 추정된 결과 CO₂ 암묵가격은 1986년에 1톤당 최

저 0.1달러에서 2009년에 최고 8.4달러까지 매년 평균 약 5%씩 증가하였으며 평균적으로 CO₂ 1톤 저감하는 데 약 3.2달러를 지불하는 것으로 나타났다. 이는 한국과 일본의 발전 산업에 대한 CO₂ 암묵가격 추정치보다 낮은 수준으로서 향후 동북아 지역을 대상으로 CO₂ 배출권거래제도가 도입된다면 중국 발전 산업의 경우 배출권을 시장에 판매함으로써 경제적 이득을 올릴 수 있음을 의미한다.

전력생산과정에서 100%의 기술효율성 도달을 전제로 산정한 CO₂ 잠재 감축량 규모는 1981-2009년 기간 동안 연간 평균 약 2천 5백만 톤가량으로 집계되었다. 투입요소 간 Morishima 대체탄력성을 측정한 결과 자본과 석탄은 서로 대체관계로서 방향에서 자본이 석탄을 더 용이하게 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 자본-석탄 간 대체정도보다는 상대적으로 약했지만 자본과 석유 간에도 상호 대체가능한 것으로 조사되었다. 이러한 결과로부터 중국 당국이 CO₂ 배출규제를 실시할 경우 화력 발전산업은 생산 설비 및 시설에 대한 투자를 늘리는 대신 성공적으로 석탄, 석유 등 화석연료의 사용을 줄임으로써 규제의 생산성 감소효과를 어느 정도 제어할 수 있음을 판단할 수 있다.

[참고문헌]

1. 이명현, “국내 발전산업의 원자력-화력 자본스톡에 대한 암묵가격 추정 및 대체가능성 분석”, 「환경정책」, 제20권 2호, 2012, 1~18.
2. 이명현·강상목, “SO₂에 대한 배출권거래의 경제적 실익 분석-한국 화력발전소를 대상으로”, 「국제경제연구」, 제8권 제2호, 2002, 171~190.
3. Aigner, D. and S. Chu, “On Estimating the Industry Production Function,” *American Economic Review*, Vol. 58, 1968, pp. 826~839.
4. Blackorby, C. and R. R. Russell, “Will the Real Elasticity of Substitution Please Stand Up? (A Comparison of the Allen/Uzawa and Morishima Elasticities),” *American Economic Review*, Vol. 79, 1989, pp. 882~888.
5. Coggins, J. S. and J. R. Swinton, “The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO₂ Allowance,” *Journal of Environmental Economics and Management*,

- Vol. 30, 1996, pp. 58~72.
6. Färe, R., C. A. K. Lovell, and S. Yaisawarng, "Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach," *Review of Economics and Statistics*, Vol. 75, 1993, pp. 374~380.
 7. Färe, R. and S. Grosskopf, "A Distance Function Approach to Price Efficiency," *Journal of Public Economics*, Vol. 43, 1990, pp. 123~126.
 8. Färe, R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell, D. Noh, and W. Weber, "Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice," *Journal of Econometrics*, Vol. 126, 2005, pp. 469~492.
 9. Farrell, M. J., "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of Royal Statistical Society*, Vol. 120, 1957, pp. 253~290.
 10. Grosskopf, S., K. Hayes, and J. Hirschberg, "Fiscal Stress and Production of Public Safety: A Distance Function Approach," *Journal of Public Economics*, Vol. 57, 1995, pp. 277~296.
 11. Hailu, A. and T. S. Veeman, "Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1959-1994: An Input Distance Function Approach," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 40, 2000, pp. 189~210.
 12. Halvorsen, R. and T.R. Smith, "Substitution Possibilities for Unpriced Natural Resources: Restricted Cost Function for the Canadian Metal Mining Industry," *Review of Economics and Statistics*, Vol. 68, 1986, pp. 398~405.
 13. Jacobsen, S. E., "On Shephard's Duality Theorem," *Journal of Economic Theory*, Vol. 4, 1972, pp. 458~464.
 14. Kwon, OS and Won-Cheol Yun, "Estimation of the Marginal Abatement Costs of Airborne Pollutants in Korea' Power Generation Sector," *Energy Economics*, Vol. 21, 1999, pp. 547~560.
 15. Matsushita, K. and F. Yamane, "Pollution from the Electric Power Sector in Japan and Efficient Pollution Reduction," *Energy Economics*, Vol. 34, 2012, pp. 1124~1130.
 16. Park, H. and J. Lim, "Valuation of Marginal CO₂ Abatement Options for Electric Power Plants," *Energy policy*, Vol. 37, 2009, pp. 1834~1841.
 17. Shephard, R. W., *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press, 1970.

18. Wang, Q., Q. Cui, D. Zhou, and S. Wang, "Marginal Abatement Costs of Carbon Dioxide in China: A Nonparametric Analysis," *Energy Procedia*, Vol. 5, 2011, pp. 2316~2320.
19. Wei, C., J. Ni, and L. Du, Regional Allocation of Carbon Dioxide Abatement in China. *China Economic Review*, Vol. 23, 2012, pp. 552~565.