

## 중국 제조업 부문별 CO<sub>2</sub> 잠재감축량 및 한계저감비용 지역 간 비교 분석<sup>†</sup>

김영미\* · 이명헌\*\*

**요약** : 본 논문에서는 중국 정부가 추진하고 있는 '저탄소 지속가능한 성장'의 실현가능성을 개선하는 데 있어서 탄소배출권 거래 시범지역으로 지정된 7개 지역 가운데 북경시, 중경시 제조업 24개 부문을 대상으로 각 지역별로 투입물거리함수를 추정하여 기술효율성, CO<sub>2</sub> 암묵가격, 투입요소 간 간접 모리시마 대체탄력성 등을 측정하여 이를 토대로 업종 간, 지역 간 최대 CO<sub>2</sub> 잠재감축량, 탄소배출권 거래의 비용절감효과, 자본 투자로 인한 CO<sub>2</sub> 감축의 잠재적 성과 등을 비교, 분석하였다. 2010년 현재 북경시, 중경시 제조업은 100% 기술효율성 달성을 통하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 각각 최대 516만 톤, 1,704만 톤까지 감축가능한 것으로 추산되었다. 평균적으로 탄소배출권 거래의 한계저감비용 절감효과는 중경시에서, 자본 투자의 CO<sub>2</sub> 감축효과 가능성은 북경시에서 더 높게 나타났다.

**주제어** : 중국 지역별 제조업, CO<sub>2</sub> 잠재 감축량, 탄소배출권 거래, 비용절감효과, 투입물거리함수, 기술효율성, CO<sub>2</sub> 암묵가격, 모리시마 대체탄력성

**JEL 분류** : C61, L60, Q52

접수일(2013년 8월 19일), 게재확정일(2013년 9월 2일)

<sup>†</sup> 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-330-B00087).

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

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

# Comparison of Potential CO<sub>2</sub> Reduction and Marginal Abatement Costs across Sectors and Provinces in the Chinese Manufacturing Industries

Yingmei Jin\* and Myunghun Lee\*\*

**ABSTRACT:** To assess the feasibility of ‘low carbon, sustainable growth’ policy pursued of the Chinese government, this paper first measures technical efficiency, CO<sub>2</sub> shadow prices, and indirect Morishima elasticity of substitution between capital and energy for 24 of manufacturing sectors in Beijing and Chongqing, in which China launched pilot carbon emissions trading scheme, by estimating the input distance function. Based on these results, then the potential for CO<sub>2</sub> reduction, cost savings from emissions trading, and the effectiveness of capital investment in reducing CO<sub>2</sub> are compared across industries and provinces. In 2010, manufacturing industries in Beijing and Chongqing could potentially reduce the largest CO<sub>2</sub> emissions, amounting 5.2 and 17 million tons, respectively, by achieving 100% technical efficiency. While, on average, Chongqing has a comparative advantage in the cost savings from carbon trading over Beijing, Beijing is more likely to reduce CO<sub>2</sub> by expanding capital investment.

**Keywords :** Manufacturing industries by provinces in China, CO<sub>2</sub> reduction potential, Carbon emissions trading, Cost savings effect, Input distance function, Technical efficiency, CO<sub>2</sub> shadow price, Morishima elasticity of substitution

---

Received: August 19, 2013. Accepted: September 2, 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

개혁개방 노선이 채택된 1978년 이후로 중국의 산업발전은 양적, 질적 면에서 하나의 전기를 맞이하게 되었다. 개방 이전에 실시한 ‘중공업우선발전정책’으로 인하여 경공업에서 중공업 위주의 산업구조로 전환되었을 뿐만 아니라<sup>1)</sup>, 성장 중시의 정부 산업정책과 중국산 제품의 가격경쟁력 비교우위, 외국 자본의 유입과 산업 특히 제조업 부문에 대한 투자 확대 등에 힘입어 GDP 규모는 지난 30년 기간 동안 (1979~2009) 80배 이상 늘어났다. 현재 세계 2위의 경제대국으로 부상한 중국은 미국 발 글로벌 금융위기로 촉발된 2008년 이후 침체된 세계경제를 견인하는 데 일조하였으나 그 이면에는 자원 개발의 블랙홀로서 자원가격이 급등하고 지구온난화의 주요 원인인 화석연료의 사용이 지속적으로 늘어나는 등 범지구적 차원의 자원 및 기후변화 문제 등에 대해서는 미온적으로 대처하여 국제적 질타를 받고 있다.

산업부문 가운데 상대적으로 에너지집약도가 높은 중화학공업의 압축 성장으로 에너지사용량은 지속적인 증가 추세를 이어갔다. 제11기 전국인대상무위원회(全國人大常務委員會) 18차 회의에서 보고한 에너지절약법 이행상황에 따르면 2009년에 1차 에너지소비량에서 산업 부문이 차지하는 비중이 71.3%에 달하고, 그 중 80%가 철강, 석유화학 등의 에너지다소비업종이었다. 2000년 미국의 절반 수준에 불과하였던 중국의 총에너지 소비량은 2010년에 24억 TOE를 기록함으로써 23억 TOE의 미국을 능가하여 중국은 세계 최대 에너지 소비국이 되었다. 중국의 에너지소비가 화석연료 특히 석탄에 대한 의존도가 큰 만큼 CO<sub>2</sub> 배출량 역시 큰 폭으로 증가하여 2007년부터 미국을 추월한 이후 줄곧 1위를 차지하였다.

2011년 더반에서 개최된 제17차 기후변화협약 당사국 총회에서 각 나라는 2012년 종료되는 교토의정서에 대하여 의무이행 기간을 5년 연장하고 2020년까지 중국, 미국, 인도 등 교토의정서 체제에 동참하지 않았던 대규모 온실가스 배출국이 참여

1) ‘중공업우선발전정책’이란 구소련이 먼저 시행했던 정책으로서, 중국에서 이를 도입하여 1953년부터 시작된 경제발전 1차 5개년 계획기간에 시행하였다. 동 정책에 따라 중국 정부는 전력, 철강, 화학, 기계, 항공 산업 등을 육성하였고, 이로 인해 전체 산업구조에서 중공업의 비중이 크게 높아졌다(주숙련(周叔蓮) 외2인, 1990, p. 55). 중공업 생산총액이 산업 생산총액에서 차지하는 비중은 2000년의 60.2%에서 2009년에는 70.5%로 높아졌다. 이는 일본, 독일, 미국 등과 같은 선진국이 공업화 추진과정에서 달성한 최고치보다 현저히 높은 수준이다.

하는 법적 구속력 있는 조약을 체결하기로 합의하였다. 중국은 2005년 이후로 환경 보호와 에너지사용의 성과를 향상시키기 위하여 노력을 경주해왔는데, ‘국가발전개혁위원회(國家發展和改革委員會, NDRC)’에서는 ‘11차 5개년 계획(2006~2010)’ 기간 에너지효율적이고 환경친화적인 사회구축의 중요성을 제시하였다. ‘12차 5개년 계획(2011~2015)’에서는 ‘에너지절약 및 오염물 배출저감에 관한 종합 사업방안’을 발표하여 31개 성(자치구, 시 포함)에 대한 NH<sub>4</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등 오염물질의 총배출량 감축목표 및 지역별 감축 할당량을 설정하였으며, 오염물 총량규제를 환경평가의 선행 조건으로 지정하는 등 50가지 정책안을 제출하였다.

12차 5개년 계획에서는 ‘녹색, 저탄소 발전’ 개념을 처음으로 확립하였는데 새로운 탄소 저감 및 에너지 목표로서 2010년 수준 대비 2015년까지 에너지소비에서 비화석연료의 비중은 11.4% 늘리고 GDP 한 단위 당 에너지소비량과 CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 16%와 17% 감소하기로 하였다. 또한 ‘온실가스 배출규제 업무방안’을 통하여 CO<sub>2</sub> 배출을 억제하는 데 있어서 시장메커니즘의 정책수단을 점진적으로 도입할 것을 선언하였다. 그 가운데 대표적으로 탄소배출권 거래시장의 단계적 도입을 들 수 있는데 2015년까지 하나의 통일된 전국체제 구축을 목표로 북경, 중경, 상해, 천진, 심천, 호북성, 광둥성 등 7개 시범지역을 대상으로 탄소배출거래 실행 계획에 착수하였다.<sup>2)</sup> 선정 배경으로는 천진시, 중경시, 호북성, 광둥성 등의 경우 다른 지역에 비해 에너지집약 산업이 상대적으로 많이 입지되어 있고, 북경시, 상해시, 심천시 등은 비록 에너지집약 산업의 집중도는 낮으나 상대적으로 발전 속도가 빠르고 건물들의 밀집도가 높아서 에너지 절약과 온실가스 배출저감에 대한 필요성이 제기되었다.

CO<sub>2</sub> 감축목표를 달성하기 위하여 에너지집약도가 높은 산업은 에너지효율성을 높이고 풍력, 태양광 등 신재생에너지 사용을 확대해야 한다. 이 과정에서 에너지고효율의 생산시설과 장비, 친환경적인 공정 등에 대한 투자는 생산비용의 증가로 이어지며 제품가격의 대외경쟁력 저하로 인하여 경제성장 둔화가 불가피하다. 중국이 G2 국가로서 글로벌 기후변화에 적극 대처하고 동시에 정부 목표 연 7-8%대의

2) 중국의 탄소배출권 거래제도는 2008년 처음 도입된 이래로 지역단위의 자발적 참여 형태로 진행되었다. 중국 국가발전개혁위원회는 7개 시범지역에서 실시될 탄소배출권 거래모델로 ‘호주 모델’, ‘EU 모델’, ‘일본 모델’ 등을 제시하였으며, 해당 지방정부에 탄소집약도나 에너지원단위가 아닌 배출총량에 대한 규제와 배출권 할당 계획을 요구하였다.

경제성장률을 유지하느냐 여부는 경제성장 저하, 에너지가격 인상 등 온실가스 저감에 따른 경제적 파급효과를 최소화하고 비용 효과적인(cost-effective) 정책수단의 개발, 운용 성과에 달려 있다고 볼 수 있다.

중국 총에너지의 59%가 제조업에서 소비되고(중국에너지통계연보(中国能源统计年鉴), 2010), <표 1>에서 보는 것처럼 CO<sub>2</sub> 배출규모에서도 전력산업에 이어 제조업 상위 4개 업종이 차지하는 비율이 35.7%에 이르고 있다. 이는 제조업에서의 에너지 효율화와 CO<sub>2</sub> 감축비용 최소화의 성과가 중국 정부의 ‘저탄소 지속가능한 성장’ 여부를 타진하는 데 중요한 판단기준이 됨을 의미한다. 온실가스 배출량 의무감축을 경제적 방법으로 유연하게 대처하기 위한 이행수단으로서 도입된 교토메커니즘 가운데 기업, 산업, 국가 간에 CO<sub>2</sub> 배출 권리를 서로 거래할 수 있는 탄소배출권거래제는 2002년에 영국 런던에서 온실가스 거래시장이 개장된 이후 거래규모 및 참여 기업수가 확대되어 왔으며, 온실가스 저감의 사회적 비용을 낮추는 데 일정 부분 기여했다는 평가이다.

<표 1> 중국 산업 부문별 이산화탄소 배출량 비율(2010)

산업	부문	비율
전력산업	전력생산	40.1%
제조업	코크스, 석유가공, 핵연료 제조	15.7%
	철강	7.3%
	비금속광물	6.7%
	화합물, 화학제품	6.0%

자료출처: 중국통계연감(中國統計年鑑)(2010)

본 논문에서는 중국 정부가 추진하고 있는 ‘저탄소 지속가능한 성장’의 실현가능성을 개선하기 위하여 탄소배출권 거래 시범지역으로 지정된 7개 지역 가운데 북경시, 중경시 각각에 대하여 해당 지역 제조업을 대상으로 투입물거리함수(input distance function)를 추정하여 생산의 기술 효율성(technical efficiency) 100% 달성을 전제로 업종별 감축 가능한 최대 CO<sub>2</sub> 배출량을 추산한다. 각 지역의 제조업 업종별 CO<sub>2</sub> 암묵가격(shadow price), 즉 한계저감비용을 계산하여 각 지역 내 업종 간

거래, 두 지역 사이의 동일 업종 간 탄소 배출권거래 등에 대한 비용절감 효과를 비교, 분석한다. 에너지 고효율 생산시설 및 친환경 생산공정의 투자를 통한 CO<sub>2</sub> 감축의 잠재적 성과를 분석하기 위하여 각 지역 제조업의 자본과 에너지 간 대체가능성을 측정한 후 두 지역을 비교한다.<sup>3)</sup>

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제II절에서는 중국 북경시, 중경시 저탄소 정책 및 배출권거래제 현황을 살펴보고, 제III절에서는 실증분석 모형으로서 투입물 거리함수를 정의하고 이로부터 기술효율성, CO<sub>2</sub> 암묵가격 및 투입요소 간 대체가능성을 측정한다. 제IV절에서는 실증분석 결과를 제시하고 정책적 시사점을 도출하며, 제V절에서는 요약과 결론을 담는다.

## II. 중국 지역 저탄소정책 및 배출권거래제 현황

세계 경제 침체와 온실가스 감축 노력에도 불구하고 2011년 세계 CO<sub>2</sub> 배출량은 전년에 비해 3.1% 늘어났으며 이는 중국, 인도 등 고성장 개도국의 배출량 증가가 주원인으로 지목되고 있다. 세계 1위 중국은 2011년에는 전년 대비 9.9% 증가한 100억 톤의 CO<sub>2</sub>를 배출하였는데 이는 세계 배출량의 28%에 해당되는 규모이다.<sup>4)</sup> ‘12차 5개년 계획’기간 탄소배출권 시범 거래를 위한 인프라 구축 대상으로 선정된 7개 지역에 대하여 2015년까지 2010년 대비 평균 18% CO<sub>2</sub> 감축 목표가 설정되었다. 본 논문의 실증분석 대상지역인 북경과 중경의 저탄소 정책과 탄소배출권 제도 도입 현황을 살펴본다.

온실가스 규제의 산업 경쟁력 저하효과를 최소화하는 것이 지방정부의 ‘저탄소 녹색성장’ 달성 여부를 결정하는 데 중요한 과제라고 판단되며, 가장 효과적인 해결 방안으로서 에너지 사용의 효율성 향상을 들 수 있다. 북경시는 현재 인구, 교통, 환경, 에너지 등의 문제가 지속적인 발전을 제약하는 걸림돌로 작용하고 있어서 ‘저탄

3) CO<sub>2</sub> 암묵가격을 측정할 때 대부분 선행연구에서는 생산결정자를 중국 지역(성·시)(Wei et al., 2011; Wang et al., 2011)로 설정하거나 혹은 지역 구분 없이 제조업 전체(Lee and Zhang, 2011)를 대상으로 분석함으로써 본 논문에서 시도하는 지역별, 제조업종 결과를 토대로 지역 간 차이에 대한 분석은 이루어지지 않았다.

4) 인도는 전년에 비해 7% 증가한 25억 톤의 CO<sub>2</sub>를 배출해 3위를 이어갔다. 미국은 59억 톤으로 2위였고, 러시아(18억 톤), 일본(13억 톤), 독일(8억 톤) 등이 그 뒤를 이었다.

소 녹색성장' 도시로 거듭나는 것이 향후 발전방향의 전환 및 생태문명의 건설에 도움이 될 전망이다. 2008년 올림픽 이후 '녹색-올림픽'에서 '녹색도시-북경'으로 전환하여 '저탄소 녹색' 도시로 발전시키는 전략을 추진하고 있다.<sup>5)</sup>

산업구조의 최적화 개선이 가속화되고 에너지 절약 및 이산화탄소 배출량 저감활동이 활발히 이루어지고 있음에 따라 '저탄소 녹색' 도시를 건립하는 데 유리한 환경이 조성되고 있다. 더 나아가 경제성장 방식을 전환하여 청정에너지 산업화를 추진하고 신재생에너지 산업을 육성하며 기존 제조업 업종 외에 자동차 산업에 저탄소 설비 및 장비 설치를 확대, 권장함으로써 이산화탄소 배출량을 감축하는 데 상당한 노력을 기울이고 있다.

북경시는 전국 최초 탄소배출권거래 시범지역으로 지정된 바, 2013년부터 정기적으로 배출권거래를 운영, 가동할 계획이다. 이를 위하여 2012년 탄소배출권 전자플랫폼시스템을 구축하였으며, 전국 단위의 탄소배출권 거래 및 등록 시스템 구축, 교역 플랫폼 및 관리, 감독체계를 마련하기로 하였다. 배출권거래 시범지역의 확대를 위하여 총량 감축 대상인 이산화탄소의 직접배출권과 함께 간접배출권 거래까지 종합하여 실시하고 있으며 여기서 간접배출은 현재 북경시에서 소비되는 전력 2/3은 외부 지역에서 구입한 것으로 이들 지역의 전력 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량이다. 일명 '북경모델'로서 북경이 처음 도입한 간접배출권 거래는 직접배출권만을 취급하는 것보다 운영상의 어려운 점이 있으나 기술적인 부분에서 새로운 획을 그은 것으로 평가하고 있다.

중경시는 과거 전국 6대 산업기지 도시 중 하나로서 철강, 화공, 유색금속, 석화, 건축재료, 전력 등 에너지집약도가 상대적으로 높은 산업부문이 주축을 이루고 있어서 에너지절감에 대한 압력을 지속적으로 받아왔다.<sup>6)</sup> 2010년 1월 시정부는 '저탄

5) 북경시가 발표한 '대기오염 방지조항'에 따르면 대기오염이 심각하고, 인체 건강과 안전에 긴급한 위협 상황이 발생할 경우 시정부는 즉시 대기오염 공고(초안에 따르면 대기오염이 심해져 인체건강 및 안전에 위협하다고 판단되면 즉시 오염상황을 공고하는 한편 오염물질 배출량이 많은 업체의 공장 가동을 중단하고 일부 차량의 운행을 중단하는 등의 강제조치를 시행하는 것을 말함)를 발표한다. 지정된 구역 내 자동차 운행을 제한하고, 대기오염물질 배출 기업은 설비 및 샘플 검사를 해야 하며, 1차 검측 기록을 최소 3년간 보존해야 한다. 오염물질을 초과 배출한 기업은 직장 폐쇄, 기술개선 조치, 설비 개선 등 배출량 감축 조치가 이루어진다. 이때 환경보호 행정주관부서 심사 통과 후 전국적으로 동일 규정의 지역을 대상으로 오염배출권 거래를 할 수 있다.

6) 산업부문의 에너지사용 점유율은 약 70%에 이르고 있으며, 주요 산업의 품목 비율은 기타 지역보다 평균 약 40%이상 높은 것으로 나타났다.

소 경제발전정책을 적극 추진하여 저탄소 산업, 저탄소 시범구역, 저탄소 교통 등을 도입하고, 산림을 조성하여 대기중의 이산화탄소를 대폭 흡수 하는 등 지속적인 성장을 도모하려고 한다. 2011년 중앙정부로부터 탄소배출권 거래 시범지역으로 선정된 중경시는 ‘12.5 온실가스 배출 제한 및 저탄소시범 업무 방안’을 발표하였다. 기업별 탄소배출 총량제를 실시함과 동시에 기업의 에너지 사용을 제한할 계획이며, 이를 위해 먼저 탄소배출권 거래 대상기업을 지정하고, 기업별로 탄소배출 연간 한도를 배분할 예정이다. 주요 대상기업에는 지역내 에너지 기업 및 중공업 기업, 특히 에너지 다소비 업종인 알루미늄, 철강 관련 기업을 집중적으로 포함시켰다.

또한 기업의 탄소 저감기술에 대한 R&D 유도를 위하여 정책지원을 실시할 계획이다. 중경시 에너지집단(重庆能源集团)은 현재 자체 R&D를 통해 설치한 기술설비를 활용하여 연간 1만 3,000톤의 탄소배출량을 감축하고 향후 탄소 저감기술에 대한 연구를 지속적으로 추진할 예정이다. 이러한 제반 정책시행을 통하여 중경시는 2015년까지 단위지구 생산총액 대비 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 17%이상, 에너지 사용량은 16%까지 감소시킬 계획이다.

### III. 분석모형

제조업 업종별 개별기업이 자본( $k$ ), 노동( $l$ ), 에너지( $e$ )의 세 가지 생산요소로 구성된 투입물벡터  $x \in R_+^3$  을 사용하여 최종제품 생산량( $q$ )와 원하지 않은 부산물  $CO_2(u)$ 로 구성된 산출물벡터  $y \in R_+^2$  을 창출하는 생산기술을 고려한다.  $y$ 의 감소 없이  $x$ 를 동일한 비율로 줄일 수 있는 최대 폭을 측정하는 Shephard(1970)의 투입물거리함수(input distance function)를 다음과 같이 정의한다.

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

여기서  $I(y)$ 는  $y$ 의 생산을 가능하게 하는 투입물 소요집합(input requirement set)이다.  $D(y, x) \geq 1$ 은  $x \in I(y)$ 의 필요충분조건이다. 투입물거리함수의 성질로서 첫째,



$x$ 에 대하여 단조적으로(monotonically) 비체감하고(non-decreasing) 오목하며(concave), 1차 동차함수이며 둘째,  $q(u)$ 에 대해서는 단조적으로 비체증(비체감) 하고, 준오목하다(quasi-concave)(Shephard, 1970; Hailu and Veeman, 2000).

Farrell(1957)의 기술효율성(TE)은  $1/D(y, x)$ 을 계산함으로써 측정할 수 있다. 기업이 기술적으로 가장 효율적인 영역으로서  $I(y)$ 의 경계선(즉, 등량곡선) 상에서 조업을 하고 있다면  $D(y, x)$  값은 1이 된다.  $D(y, x)$  값이 1보다 클 경우 적정 등량곡선을 벗어나 생산요소들이 과잉 투입되는 상황이며 1과의 차이가 많이 벌어질수록 생산의 비효율성은 증가하게 된다. 따라서  $(1 - TE)$ 는 생산효율성 개선을 통하여  $y$  감소 없이  $x$ 을 줄일 수 있는 정도를 나타낸다.

투입물거리함수 값을 제약조건으로 하는 비용최소화 문제의 최적조건으로부터 다음과 같은 비용함수를 도출할 수 있다.

$$C(w, y) = \min_x \{wx : D(y, x) \geq 1\}, \quad (2)$$

여기서  $w \in R_+^3$  은 투입물의 가격벡터이다.

Hailu and Veeman(2000)을 따라서 식 (2)를  $y$ 로 편미분하면 다음과 같은 등식이 성립한다.

$$\nabla_y C(w, y) = -\lambda \nabla_y D(y, x), \quad (3)$$

여기서  $\nabla$ 는 편미분 연산자이며,  $\lambda$ 는 제약 비용최소화 문제의 Lagrangian 승수로서 비용함수의 최적 값과 일치한다(Jacobsen, 1972; Shephard, 1970). 산출물의 암묵가격은 산출물 한 단위를 추가 생산할 때 발생하는 비용 증가분으로 정의할 수 있으므로 식 (3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

여기서  $p^s \in R_+^2$  는 산출물의 암묵가격 벡터로서 투입물거리함수의 성질로부터  $p_q^s \geq 0$ ,  $p_u^s \leq 0$ 이다.

식 (4)로부터  $p_q^s$ 와  $p_u^s$ 을 각각 구한 후,  $p_q^s$ 가 최종제품의 시장가격( $p_q$ )과 같다면 이들 두 산출물(암묵)가격의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (5)에서 도출된 CO<sub>2</sub> 암묵가격은 한계저감(기회)비용 개념으로서 CO<sub>2</sub> 한 단위 저감하기 위하여  $q$  몇 단위까지 포기하는지를 측정한다.

등량곡선의 굴곡은 투입요소 간 대체가능성 정도를 반영하므로 다음과 같이 투입물거리함수로부터 도출되는 간접 Morishima 대체탄력성을 산출함으로써 투입요소  $x_i$ 와  $x_j$ 간 대체정도를 파악할 수 있다(Blackorby and Russell, 1988; Grosskopf et al., 1995).

$$M_{ij} = x_i D_{ij}(y,x)/D_j(y,x) - x_i D_{ii}(y,x)/D_i(y,x), \quad i, j = k, l, e, \quad i \neq j, \quad (6)$$

여기서  $D_i = \partial D/\partial x_i$ ,  $D_{ij} = \partial^2 D/\partial x_i \partial x_j$ . 이 탄력성은 투입요소 간 대체가 이루어지기 위하여 요구되는 상대 요소가격의 변화 정도를 측정하며, 따라서 탄력성 값이 클수록 대체가능성은 낮아지게 된다. 어떤 투입요소를 기준으로 하느냐에 따라 두 요소가격의 비율은 달라지므로  $M_{ij} \neq M_{ji}$ 이다.

식 (5)와 (6)을 이용하여 CO<sub>2</sub> 암묵가격과 Morishima 대체탄력성을 산출하는 데 있어서 투입물거리함수를 추정해야 하는 바, 식 (1)에 다음과 같이 초월대수(translog) 함수형태를 취한다.

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

$i, i' = k, l, e, \quad j, j' = q, u,$

여기서  $\gamma_{ii'} = \gamma_{i'i}, \gamma_{jj'} = \gamma_{j'j}$ .

Aigner and Chu(1968)을 따라서 선형계획(linear programming)기법을 사용하여 (7)의 계수들을 추정한다. 목적함수를  $\Sigma_n [\ln D(y^n, x^n) - \ln 1]$ 로 설정하고 단조성, 동차성 등 제반 제약조건들을 충족시키면서 최소화를 추구한다. 여기서  $n$ 은 관찰치를 나타낸다. 해당 제약조건들을 나열하면, i) 거리함수의 정의로부터  $D(y, x) \geq 1$ 이므로  $\ln D(y^n, x^n) \geq 0$ , 거리함수의  $x, q, u$ 에 대한 단조성 성질로서 ii)  $\partial \ln D(y^n, x^n) / \partial \ln x^n \geq 0$ , iii)  $\partial \ln D(y^n, x^n) / \partial \ln q^n \leq 0$ , iv)  $\partial \ln D(y^n, x^n) / \partial \ln u^n \geq 0$ , v)  $x$ 에 대한 1차 동차성으로부터  $\sum_i \alpha_i = 1, \sum_i \beta_{ij} = \sum_{i'} \gamma_{ii'} = 0$ .

#### IV. 자료 및 분석결과

본 논문에서는 북경시, 중경시의 제조업을 대상으로 지역별 투입물거리함수를 추정하는 데 있어서 제조업 24개 부문으로 구성되어 있는 2010년도 횡단면자료를 사용하였다. CO<sub>2</sub> 배출량( $u$ )을 제외한 모든 변수에 대한 통계자료의 출처는 「북경시통계연감」과 「중경시통계연감」이다. 최종 생산량( $q$ )은 산업총생산액(억 위안)으로, 자본투입량( $k$ )은 고정자산액(억 위안)으로 측정하였다. 노동투입량( $l$ )과 에너지투입량( $e$ )은 각각 평균 종업원 수(천 명)와 에너지 총사용량(만 톤)을 사용하였다. CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하는 데 있어서 다음과 같이 「기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)」의 연료별 탄소배출계수에 기초한 산정방식을 이용하였다.

$$CO_2 = \sum_i f_i \times h_i \times v_i \times o_i \times (44/12),$$

여기서 밑첨자  $i$ 는 투입된 연료로서 석탄, 석유류, 가스를 나타낸다.  $f$ 는 연료 사용량,  $h$ 는 평균 발열량,  $v$ 는 단위열량당 탄소함유량,  $o$ 는 탄소의 산화율이며, 이들 연료별 탄소배출계수 값들은 <표 2>에서 제시하였다. <표 3>에서 사용한 자료의 변수별 통계량을 요약하였으며, 모든 변수는 평균값에서 1이 되도록 표준화시켰다.

<표 2> 중국 주요 화석연료별 탄소배출계수

연료	석탄	석유	등유	경유	연료유	천연 가스
$v$ (톤/1조 Joule)	27.28	18.9	19.6	20.17	21.09	15.32
$h$ (1조 Joule/1억kg, m <sup>3</sup> )	192.14	448	447.5	433.3	401.9	3839.1
$o$ (%)	92.3	98.0	98.6	98.2	98.5	99.0

표 인용: 김영미·이명현(2013)

<표 3> 변수별 자료통계 요약

변수	단위	평균		표준편차		최대값		최소값	
		북경	중경	북경	중경	북경	중경	북경	중경
$q$	억 위안	428.54	327.05	587.64	574.27	2229.1	2903.8	16.99	17.35
$u$	만 톤	52.36	133.11	88.11	311.39	379.88	1191.3	1.85	0.75
$k$	억 위안	89.30	126.08	93.52	186.11	397.31	861.23	8.30	7.15
$l$	천 명	44.97	49.02	33.53	77.30	129.48	390.60	4.44	5.30
$e$	만 톤	65.90	93.02	126.97	194.21	584.98	707.67	0.72	0.97

자료출처:「북경시통계연감」, 2010;「중경시통계연감」, 2010.

북경시, 중경시 각 지역의 제조업을 대상으로 식 (7)의 투입물거리함수를 선형계 획기법으로 추정한 결과는 <표 4>에서 보는 바와 같다.<sup>7)</sup> 이들 추정계수를 다시 식 (7)에 대입하여 각 지역별로 거리함수 값을 도출한 후 그 역수를 취함으로써 제조업

7) 제조업종 간 이질성의 존재를 고려한다면 업종 간 잠재 생산기술의 차이를 포착하기 위하여 식 (7)에 각 업종 고유의 더미 변수를 포함시켜 이들에 대한 통계적 유의성 유무를 검증하는 것이 바람직하나, 비통계적 거리함수를 사용하고 있는 본 논문에서는 추정계수에 대한 확률적 통계량이 제공되지 않기 때문에 이러한 일련의 과정을 실행하는 데 한계가 있다. 중국 전체 제조업을 대상으로 업종별 CO<sub>2</sub> 암묵가격을 추정한 Lee and Zhang(2011) 역시 업종별 더미를 사용하지 않았다.

산업별로  $TE$ 를 산출할 수 있다. 먼저 북경시의 경우 <표 5>에서 보는 것처럼 제조업 24개 산업을 대상으로  $TE$ 를 계산한 결과 목재 및 나무제품, 코르크 및 석유가공, 철강, 비철금속, 전기기계 및 장비, 영상 및 통신장비, 사무 및 회계용 기계 등 7개 산업에서 최대값 1을 기록하였다. 비금속광물 산업의  $TE$ 가 0.35로서 가장 낮았으며 화합물 및 화학제품, 고무제품, 출판 및 인쇄 산업 등이 그 다음을 이었다. 0.5미만의  $TE$ 를 나타낸 음료품, 식료품, 방직 및 신발 산업 등도 상대적으로 생산 효율성이 저조하였다. 24개 제조업 부문 전체의 평균  $TE$ 는 0.69이었는데, 이는 북경시 제조업 기업들이 생산 효율성의 극대화를 통하여 기술적으로 가장 효율적인 영역(즉, 등량곡선 상)에서 조업을 한다면 산출물 감소 없이 모든 생산요소의 투입량을 평균적으로 동시에 최대 31%까지 줄일 수 있음을 의미한다.

<표 4> 지역별 투입물거리함수 추정결과

계수	추정치		계수	추정치	
	북경	중경		북경	중경
$\alpha_0$	0.3308	0.4027	$\gamma_{ke}$	0.1547	0.00002
$\alpha_q$	-0.8978	-0.5853	$\gamma_{ll}$	0.2186	0.0759
$\alpha_u$	0.0730	0.0183	$\gamma_{le}$	-0.1221	0.00001
$\alpha_k$	0.4571	0.2975	$\gamma_{ee}$	-0.0326	0.00001
$\alpha_l$	0.4269	0.7025	$\beta_{kq}$	-0.0837	0.0774
$\alpha_e$	0.1160	0.00001	$\beta_{lq}$	0.2104	-0.0774
$\gamma_{qq}$	0.0989	0.2218	$\beta_{eq}$	-0.1267	-0.00001
$\gamma_{qu}$	-0.0002	-0.0054	$\beta_{ku}$	0.0368	0.0063
$\gamma_{uu}$	0.0236	0.0045	$\beta_{lu}$	-0.0289	-0.0063
$\gamma_{kk}$	-0.0582	0.0759	$\beta_{eu}$	-0.0079	0.00001
$\gamma_{kl}$	-0.0965	-0.0759			

100% 생산 효율성을 달성함으로써 연료 사용량을 다른 투입요소와 함께  $(1 - TE)$ 만큼 감축할 수 있다는 가정 하에 제조업 각 산업별로 CO<sub>2</sub> 최대 잠재 감축량을 추산할 수 있다.  $TE$ 가 낮을수록 CO<sub>2</sub> 잠재 감축량은 많아지게 된다. 북경시

<표 5> 지역 제조업 부문별 기술효율성, CO<sub>2</sub> 잠재감축량, 한계저감비용 추정결과

제조업	TE		CO <sub>2</sub> 잠재감축량(만 톤)		$p_u^*$ (달러/톤) <sup>a</sup>	
	북경시	중경시	북경시	중경시	북경시	중경시
농산물식품	0.878	0.831	4.223	4.253	2.30	1.57
식료품	0.462	0.709	17.368	7.652	2.74	3.49
음료품	0.435	0.771	35.796	5.040	5.86	2.34
방직업	0.510	0.709	8.173	14.801	7.16	5.93
방직 복장, 신발, 모자	0.484	0.413	10.996	0.682	12.37	0.93
목재 및 나무제품	1.000	0.474	0	2.421	2.15	4.09
가구	0.658	1.000	1.795	0	2.80	0.43
종이제품	0.685	0.873	6.234	23.937	4.45	11.97
출판, 인쇄, 기록매체업	0.402	0.839	9.384	0.320	1.61	0.52
코크스, 석유가공, 핵연료	1.000	1.000	0	0	4.08	28.69
화합물, 화학제품	0.377	0.387	111.621	651.865	7.15	14.75
의료	0.673	0.706	9.646	15.830	1.08	3.76
고무제품	0.401	0.649	5.013	10.755	14.51	5.67
플라스틱제품	0.513	0.722	5.512	1.709	3.31	1.12
비금속광물	0.352	0.319	246.193	811.314	14.42	24.09
철강	1.000	0.750	0	43.178	0.58	2.86
비철금속	1.000	1.000	0	0	2.05	1.54
금속	0.569	0.734	8.622	4.898	1.56	1.96
통용설비	0.686	0.568	6.879	12.665	0.59	1.27
전용설비	0.623	0.533	10.866	2.674	0.78	0.41
교통운송설비	0.793	0.191	17.928	89.377	0.38	0.97
전기기계 및 장비	1.000	1.000	0	0	0.41	0.39
영상, 음향 및 통신장비	1.000	1.000	0	0	0.05	0.21
사무, 계산, 회계용기계	1.000	0.666	0	1.073	0.35	0.51
평균	0.687	0.702	21.51	71.03	3.86	4.97

<sup>a</sup>2010년 평균 환율(RMB/USD) = 6.65를 이용하여 위안을 달러로 환산하였음.

제조업 전체로는 총 516만 톤의 CO<sub>2</sub> 감축이 가능한 것으로 집계되었다. <표 5>에 서 알 수 있듯이 생산효율성 향상을 통한 CO<sub>2</sub> 잠재 감축효과가 가장 큰 산업은 비 금속광물과 화합물 및 화학제품 산업이며 각각 246만 톤과 112만 톤을 기록하였

다.8) 이 두 산업의 CO<sub>2</sub> 잠재 감축량은 북경시 제조업 총 집계량(516만 톤)의 70%에 이른다.

중경시 제조업에서는  $TE=1$ 인 산업의 수가 북경시보다 적은 5개로 나타났다. 특히 코크스 및 석유가공, 비철금속, 전기기계 및 장비, 영상 및 통신장비 산업 등은 두 지역 모두 생산효율성 100%를 보였다.  $TE$ 가 가장 낮은 산업은 교통운송설비 부문이며 비금속광물, 화합물 및 화학제품이 그 뒤를 이었다. 제조업 전체 평균  $TE$ 는 0.7로서 북경시와 비교하여 미세하게 우위를 보였다. 생산효율성 제고를 통한 제조업 총 CO<sub>2</sub> 잠재 감축량은 북경시보다 3배 이상 많은 1,704만 톤에 달하였으며 이 가운데 비금속광물과 화합물 및 화학제품 두 산업이 86%를 차지하였다. 이는 이들 두 산업에서의 연료 사용량이 북경시보다 월등히 많기 때문이다.

식 (5)로부터 산출한 북경시 제조업의 산업별 CO<sub>2</sub> 한계저감비용은 <표 5>에서 제시한 것처럼 최저 0.05(영상 및 통신장비)에서 최고 14.51달러/톤(고무제품)의 범위를 보였으며 평균 3.86달러/톤으로 추산되었다. 비금속광물, 방직 및 신발 산업도 CO<sub>2</sub> 1톤 저감하는 데 10달러 이상의 상대적으로 높은 비용이 드는 것으로 나타났다. 이에 반해 영상 및 통신장비를 비롯하여 사무 및 회계용 기계, 교통운송설비, 전기기계 및 장비 산업 등 7개 산업의  $\hat{p}_i^s$ 는 1달러/톤에도 못 미치는 양상이다. 북경시에서 탄소배출권 시장이 운영되어 제조업 업종 간 CO<sub>2</sub> 거래가 이루어진다면 한계저감비용이 가장 높은 두 산업 고무제품, 비금속광물(14.42달러/톤) 제조업 기업들은 이들 7개 산업의 기업과 배출권 거래를 통하여 CO<sub>2</sub> 한계저감비용의 절감효과를 극대화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 두 기업 간 배출권거래가 성립하려면 거래가격이 두 기업의 한계저감비용 사이에서 결정되어야 하며 한계비용의 차이가 클수록 배출저감의 사회적비용은 감소한다. 거래를 통한 배출권 한 단위 당 순경제적 이득은 두 한계비용의 차이가 되기 때문이다(Lee, 2005).

중경시의 경우 24개 제조업 부문 가운데 CO<sub>2</sub> 한계저감비용이 가장 높은 산업은 29달러/톤을 기록한 코크스 및 석유가공이며 그 다음이 비금속광물(24달러/톤), 종이제품(12달러/톤)산업 순이었다. 영상 및 통신장비 산업이 북경시와 마찬가지로

8) 여기서 제시한 잠재 CO<sub>2</sub> 감축량은 적정 수준 대비 연료의 과다 투입 정도를 근거로 추산한 것이 아니라 기술효율성 100% 달성을 전제로 연료를 포함하여 모든 투입요소를 같은 비율로 축소할 경우 도출된 결과이다.

0.21달러/톤으로서 한계저감비용이 가장 낮았으며, 북경시에서  $\hat{p}_u^s$ 가 가장 낮은 4개 산업은 중경시에서도 저감비용이 1달러/톤보다 적었다. 제조업 평균은 1톤의 CO<sub>2</sub>를 저감하는 데 북경시보다 1.1달러 많은 5달러 가까이 소요되는 것으로 계산되었다.<sup>9)</sup> 본 논문의 북경시, 중경시 제조업에 대한 평균 CO<sub>2</sub> 한계저감비용 추정치와 선행 연구 결과와 비교하면 <표 6>에서 알 수 있듯이 분석 국가, 대상에 따라 차이가 나는 데 중국 제조업, 발전산업 자료를 사용한 경우 CO<sub>2</sub> 암묵가격은 3.1, 3.23달러/톤으로서 본 논문 결과와 유사하나, 지역(성)을 분석 대상으로 한 경우에는 17.6-73.1달러/톤의 범위를 보였다. 한국이나 일본, EU를 연구한 경우 14달러/톤 이상으로 추정되었다. 중경시 제조업 내 산업 간 탄소배출권 거래가 실시되면 CO<sub>2</sub> 한계저감비용이 상대적으로 높은 코크스 및 석유가공과 비금속광물 산업 등은 1달러/톤 미만의 7개 산업과 거래를 통하여 북경시에서보다 한계저감비용을 더 많이 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 두 지역 간 산업별  $\hat{p}_u^s$ 의 표준편차를 비교한 결과 각 지역 내 제조

<표 6> CO<sub>2</sub> 암묵가격 추정 선행연구 결과

선행 연구	국가/대상(연도)	분석모형	평균 CO <sub>2</sub> 암묵가격 추정치
Wei et al.(2011)	중국/29개 성(1995-2007)	DEA	17.6달러/톤
Wang et al.(2011)	중국/28개 성(2007)	방향성거리함수접근법	73.1달러/톤
Lee and Zhang(2011)	중국/제조업(2009)	투입물거리함수접근법	3.1달러/톤
김영미·이명현(2013)	중국/화력발전산업 (1981-2009)	투입물거리함수접근법	3.23달러/톤
Kwon and Yun(1999)	한국/화력발전산업 (1990-1995)	산출물거리함수접근법	3,800원/톤
Park and Lim(2009)	한국/화력발전산업 (2001-2004)	투입물거리함수접근법	14달러/톤
Lee(2011)	한국/화력발전산업(2007)	산출물거리함수접근법	14.63달러/톤
Matsushita and Yamane (2012)	일본/전력산업(2000-2009)	방향성거리함수접근법	39달러/톤
De Cara and Jayet (2011)	EU/농업(2005-2020)	BSA기법	32-42유로/톤

9) 각 산업별 CO<sub>2</sub> 배출량으로 가중 평균한  $\hat{p}_u^s$ 로 비교할 경우 북경시, 중경시 각각 7.2달러/톤, 16.1달러/톤으로서 두 지역 제조업 평균은 2배 이상의 차이가 났다.



업 업종 간 탄소배출권거래의 한계저감비용 절감효과는 평균적으로 중경시가 더 클 것으로 예상된다.<sup>10)</sup> 만약 두 지역 간 동일 업종끼리 CO<sub>2</sub> 배출권을 거래할 경우  $\hat{p}_u^s$ 의 지역 간 격차가 큰 코크스 및 석유가공, 방직 및 신발, 비금속광물 산업 등에서 CO<sub>2</sub> 단위 감축의 사회적 비용 최소화효과는 상대적으로 높을 것이다.

<표 7>은 식 (6)으로부터 계산한 지역별 제조업에 대한 투입요소 간 간접 Morishima 대체탄력성의 평균 추정값을 보여주고 있다. 먼저 북경시의 경우 자본과 노동 간 대체탄력성 양 방향 모두 상대적으로 낮게 추정됨에 따라 두 투입요소 간 대체가능성이 비교적 높은 가운데, 자본이 노동을 상대적으로 더 쉽게 대체할 수 있는 것으로 나타났다.<sup>11)</sup> 이에 반해 자본과 에너지는 다른 요소 간 관계와 비교하여 대체가능성이 상대적으로 떨어지지만 두 요소 간 상호 관계에 있어서는 자본이 에너지를 대체하는 가능성이 그 반대 방향보다 상대적으로 더 높았다. 자본과 에너지의 대체가능성 특히 에너지에 대한 자본의 대체가능성이 높을 경우 에너지 집약도가 높은 산업이(에너지 효율화) 자본 시설에 투자를 확대하고 에너지 사용을 줄임으로써 CO<sub>2</sub> 발생량을 효과적으로 억제할 수 있을 뿐만 아니라 자본투자로 인한 체화된 기술혁신

<표 7> 지역별 제조업의 간접 Morishima 대체탄력성 추정결과(평균값에서 측정)

대체탄력성	추정값	
	북경시	중경시
$M_{kl}$	0.9012	0.6367
$M_{lk}$	0.2769	0.6366
$M_{ke}$	2.4611	3.2547
$M_{ek}$	1.6194	2.6223
$M_{le}$	-0.5648	0.0042
$M_{el}$	0.9951	2.6222

10) 북경시와 중경시 제조업 24개 업종의  $\hat{p}_u^s$ 에 대한 표준편차는 각각 4.35와 7.54로 계산되었다.

11) Grosskopf et al.(1995)이 Morishima 대체탄력성을 자기, 교차 가격탄력성으로 분해하여 두 요소 간 관계를 분석한 것처럼 두 요소가 상호 보완적이면  $M_{ij}$ 는 양수가 되며 대체관계인 경우에는 자기 및 교차 가격탄력성의 절대값 크기에 따라 부호가 결정된다.  $M_{ij}$ 가 음수이면 대체관계로서 절대값이 클수록 강한 대체관계이며,  $M_{ij}$ 가 양수이고 값이 작으면 대체가능성이 높으며 클수록 대체가능성은 제한된다.

이 이루어지게 되면 생산성 향상을 도모할 수 있을 것이다. 노동과 에너지의 관계를 살펴보면  $M_{le}$ 가 음수로서 이는 에너지가 노동을 대체할 수 있음을 의미하며,  $M_{el}$  역시 비교적 낮게 추정되어 에너지에 대한 노동의 대체가능성 또한 높았다.

중경시 제조업 역시 자본과 노동은 비교적 수월하게 대체가능한 것으로 추정되었으며 북경시와는 달리 양 방향 대체가능성에서 거의 차이가 나지 않았다. 자본과 에너지의 관계는 북경시와 마찬가지로 다른 투입요소에 비해 대체가능성이 상대적으로 떨어지며, 에너지에 대한 자본의 대체가능성이 그 반대 방향보다 더 용이하였다. 두 지역 간  $M_{ek}$ 을 비교하면 북경시에서의 에너지에 대한 자본의 대체가능성이 상대적으로 높음에 따라 자본 투자확대로 인한 CO<sub>2</sub> 감축의 기대효과는 그 가능성에서 북경시가 더 높을 것으로 예측된다. 에너지는 노동을 비교적 쉽게 대체할 수 있으나 노동이 에너지를 대체하는 정도는 그보다 못 미치는 것으로 나타났다.

## V. 요약 및 결론

2011년 개최된 제17차 기후변화협약 당사국 총회에서 교토의정서의 의무이행 기간을 5년 연장하면서 2020년까지 세계 최대 온실가스 배출국인 중국, 미국 등이 참여하는 법적 구속력 있는 조약을 체결하기로 합의하였다. 중국 정부는 12차 5개년 계획(2011~2015)에서 ‘녹색, 저탄소 발전’ 개념을 도입하여 비화석연료의 비중 확대, 에너지집약도 및 탄소집약도 저감 목표를 제시하였다. 이 과정에서 산업계의 생산비용 부담을 완화시키기 위하여 경제적 유인수단으로서 탄소배출권거래제의 단계적 도입을 추진하기로 하였으며, 우선 북경, 중경 등 7개 시범지역을 선정하여 탄소배출거래 실행 계획에 착수하였다.

중국 정부의 ‘저탄소 지속가능한 성장’을 추진하는 데 있어서 비용효과적인 CO<sub>2</sub> 감축 여부가 관건인 만큼 본 논문에서는 탄소배출권거래 시범지역인 북경시와 중경시에 소재한 각 제조업 24개 부문을 대상으로 투입물거리함수를 추정하여 지역별, 업종별 생산효율성 제고를 통한 CO<sub>2</sub> 잠재 감축량을 추산하고, CO<sub>2</sub> 암묵가격을 도출하여 각 지역 내 업종 간, 두 지역의 동일 업종 간 CO<sub>2</sub> 배출권거래 등에 대한 비용절감 효과를 비교, 분석하였다. 또한 지역별 자본과 에너지의 대체가능성을 측정

하여 자본투자에 대한 CO<sub>2</sub> 감축의 잠재적 성과정도를 타진하였다.

2010년 현재 100% 생산효율성 달성을 전제로 북경시와 중경시 제조업에서 최대 감축가능한 CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 516만 톤과 1,704만 톤에 달하는 것으로 추산되었다. 이 가운데 비금속광물, 화합물 및 화학제품 두 산업이 차지하는 비중은 북경시와 중경시에서 70%와 86%를 각각 기록하였다. 북경시, 중경시 제조업 업종별 CO<sub>2</sub> 한계저감비용을 추정된 결과 각각 평균 3.86달러/톤, 4.97달러/톤으로 추정되었다. 지역별로 CO<sub>2</sub> 암묵가격이 상대적으로 높은 고무제품(북경시), 코크스 및 석유가공(중경시), 비금속광물(북경시, 중경시) 산업 등이 탄소배출권 거래를 통한 CO<sub>2</sub> 한계저감비용의 절감효과를 극대화시킬 수 있는 것으로 조사되었다. 지역 제조업 간 비교에서는 산업별 CO<sub>2</sub> 암묵가격의 표준편차가 상대적으로 더 큰 중경시가 탄소배출권 도입의 비용효과성에서 북경시보다 비교 우위를 점할 것으로 나타났다. 만약 두 지역 간 동일 업종끼리 탄소배출권 거래가 이루어진다면 코크스 및 석유가공, 방직 및 신발, 비금속광물 산업 등에서 CO<sub>2</sub> 단위 감축비용을 상대적으로 더 크게 낮출 수 있을 것이다. 북경시 제조업에서의 에너지에 대한 자본의 대체가능성이 중경시보다 상대적으로 더 높게 측정됨에 따라 자본 투자확대로 인한 CO<sub>2</sub> 감축의 기대효과 가능성은 북경시가 더 높게 나타났다.

#### [참고문헌]

1. 김영미, 이명현, “중국 화력발전산업의 CO<sub>2</sub> 암묵가격 및 잠재감축량, 연료에 대한 대체가능성 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제22권 제1호, 2013, pp. 77~98.
2. 周叔莲, 裴叔平, 陈树勋, 『中国产业政策研究』, 经济管理出版社, 1990.
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 SO<sub>2</sub> Allowance," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 30, 1996, pp. 58~72.
6. De Cara, S. and P. Jayet, "Marginal Abatement Costs of Greenhouse Gas Emissions from European Agriculture, Cost Effectiveness, and the EU Non-ETS Burden Sharing Agreement," *Ecological Economics*, Vol. 70, 2011, pp. 1680~1690.
7. Farrell, M. J., "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of Royal Statistical Society*, Vol. 120, 1957, pp. 253~290.
8. Färe, R. and S. Grosskopf, "A Distance Function Approach to Price Efficiency," *Journal of Public Economics*, Vol. 43, 1990, pp. 123~126.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Jacobsen, S. E., "On Shephard's Duality Theorem," *Journal of Economic Theory*, Vol. 4, 1972, pp. 458~464.
14. 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, 1999, pp. 547~560.
15. Lee, M., "Potential Cost Savings from Internal/External CO<sub>2</sub> Emissions Trading in the Korean Electric Power Industry," *Energy Policy*, Vol. 39, 2011, pp. 6162~6167.
16. Lee, M. and N. Zhang, "Technical Efficiency, Shadow Price of Carbon Dioxide Emissions, and Substitutability for Energy in the Chinese Manufacturing Industries,"

- Energy Economics*, Vol. 34, 2012, pp. 1492~1497.
17. 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.
  18. Park, H. and J. Lim, "Valuation of Marginal CO<sub>2</sub> Abatement Options for Electric Power Plants," *Energy policy*, Vol. 37, 2009, pp. 1834~1841.
  19. Shephard, R. W., *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press, 1970.
  20. 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.
  21. Wei, C., J. Ni, and L. Du, "Regional Allocation of Carbon Dioxide Abatement in China," *China Economic Review*, Vol. 23, 2012, pp. 552~565.