

# DEA를 활용한 중앙집중식 온실가스 감축 할당 모형

조나래 · 민대기<sup>†</sup>

이화여자대학교 경영학과

## Centralized Allocation of GHG Emissions based on DEA

Narea Cho · Daiki Min

School of Business, Ewha Womans University

Emissions Trading System (ETS) is utilized in many countries, including South Korea, as an efficient policy to abate GHG (Greenhouse Gas) emissions. Grandfathering on the basis of historic emissions is used as the way to allocate permits in South Korea. It, however, has caused an increase in the emission permits and lack of equity. To overcome these drawbacks, we propose an alternative DEA model for centralized allocation of emission abatement to evaluate the amount of emissions abatement by company based on the energy efficiency. In addition, an empirical analysis of 36 assigned companies for ETS in Korean metal industry is conducted to validate the feasibility of the proposed model. The result of the analysis shows that energy-efficient companies achieve reduced target of the emissions abatement and companies with low energy efficiency score are turned out to have contrary outcome, against the result of applying Grandfathering.

**Keywords:** DEA(Data Envelopment Analysis), ETS(Emissions Trading System), Centralized Allocation of Emission Permits, Energy Efficiency

### 1. 서론

국가 성장의 부산물로 여겨지는 환경오염으로 인해 전 세계적으로 지구 온난화가 가속화되고 있다. 지구 온난화는 인간의 성장과 발전을 위협하기 때문에 지구 온난화의 주범인 온실가스를 감축하고자 1997년 교토의정서 제정과 2015년 기후변화협약 등을 통한 전 세계적인 온실가스 감축 노력이 증가하고 있다. 현재 선진국뿐만 아니라 개발도상국의 국가들까지 국가 성장으로 인한 환경오염에 통감하며 의무 혹은 자발적으로 온실가스 감축에 참여하고 있다. 이와 같은 전 세계적 변화에 따라 각국 정부와 기업에서는 온실가스 저감 기술을 개발하는 한편 온실가스 감축을 효과적으로 달성하기 위한 다양한 정책적, 제도적 연구를 진행하고 있다.

온실가스 감축의 효과적인 정책적 수단으로 시장 중심의 경제적 접근법으로 온실가스 배출권거래제도가 고려되고 있다. 우리나라 또한 지난 2012년 제정된 ‘온실가스 배출권의 할당 및

거래에 관한 법률 시행령’에 따라서 2015년부터 온실가스 배출권거래제도를 시행하고 있다. 온실가스 배출권거래제도에서는 개별 조직이 할당받은 온실가스 배출권보다 많은 양의 온실가스를 배출하는 경우 초과 배출량을 시장에서 구매하고, 적은 양을 배출하는 경우 잉여 배출량만큼의 온실가스 배출권을 판매할 수 있다. 초기 배출권 할당량과 실제 온실가스 배출량 사이의 차이에 의하여 기업의 이익과 비용이 결정되는 제도의 특성에 따라서 온실가스 배출권의 배분 · 할당은 기업 입장에서 매우 중요한 문제가 된다. 하지만 배출권 할당과 감축 목표의 적정성에 대한 선행 연구는 국가/산업 수준의 법적, 경제적 측면에서 제도 도입의 효과를 위주로 고려하고 있다. 이는 거시정책 수립의 목적에는 적합하지만 배출권거래제도의 직접적 대상이 되는 개별 기업의 배출권과 감축 목표 설정의 적절성 평가와 개선 방향성 제시에는 적절한 정보를 제공하지 못하고 있다.

온실가스 배출권의 초기 배분 · 할당 방식으로는 두 가지 방법을 일반적으로 많이 사용하고 있다. 첫째, 과거 온실가스 배

이 논문 또는 저서는 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015S1A5A8012415).

<sup>†</sup> 연락저자 : 민대기 교수, 03760, 서울특별시 서대문구 이화여대길 52 이화여자대학교 경영학과, Tel : 02-3277-3923, Fax : 02-3277-3915,

E-mail : dmin@ewha.ac.kr

2016년 11월 16일 접수; 2017년 2월 8일 수정본 접수; 2017년 3월 6일 게재 확정.

출량 실적만을 고려하는 그랜드파더링(Grandfathering) 방식은 다양한 제품 생산의 적정 배출수준에 대한 정보가 부족한 초기 배출권 도입 시기에 적절하다. 하지만 과거 산출 이력만을 고려하는 경우 과거 배출량이 많을수록 더 많은 배출권을 할당 받을 수 있으므로 업체별 배출량(또는 생산량)을 증가시키는 결과를 가져오는 문제가 발생한다(Fischer and Fox, 2004). 두 번째 방법으로 과거 활동자료를 기반으로 하는 벤치마킹(Benchmarking) 방식이 있는데, 그랜드파더링 방식에 비해 공평한 할당은 가능하지만 많은 정보가 필요하기 때문에 도입 초기에는 적용이 어려운 단점이 있다(Groenenberg and Blok, 2001). 현재 많이 사용하고 있는 두 가지 방법론은 적용의 편리성도 불구하고 배출량 할당과 감축 목표가 주로 과거 배출실적을 기준으로 결정되어 기업 간 형평성이나 기업의 기술적 특성을 제대로 반영하지 못하는 문제가 존재한다.

과거 실적 기준의 배출권 할당 방식의 단점을 극복하고자 효율성을 이용한 DEA(Data Envelopment Analysis; 자료포락분석) 모형과 같이 생산에 소요된 투입요소와 온실가스 배출과 같은 산출요소를 함께 고려하는 모형을 대안으로 검토할 수 있다(Amirteimoori and Kordostami, 2005). 본 연구에서는 과거 산출 실적기준이 아닌 투입과 산출을 포괄하는 기업의 에너지 효율성을 고려한 기법을 이용하여 기업별 온실가스 배출 감축 목표량을 효과적으로 배분·할당하기 위한 모형을 제시하도록 한다. 이와 같은 DEA 모형을 이용한 할당 방식에서는 효율성이 높은 기업에게는 온실가스 감축 목표를 적게 할당하고 효율성이 낮은 기업의 경우에는 온실가스 감축량을 많이 할당하게 된다. 특히 본 연구에서는 Common Set of Weights DEA(CSW-DEA) 모형을 활용함으로써 단일 기업의 효율성 극대화를 목적으로 하는 표준 DEA 모형의 단점을 극복하고 중앙집중식 할당 방안을 구현하도록 한다. 또한 본 연구에서 제안하는 모형을 이용하여 국내기업을 대상으로 실증분석을 수행함으로써 그랜드파더링 방법을 이용한 우리나라의 배출권 할당 방식의 적정성을 검토하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 문헌연구를 통해 DEA 모형을 활용한 에너지 효율성 측정과 온실가스 배출권 및 자원 할당 연구를 제시하였다. 제 3장에서는 온실가스 감축 목표의 기업별 배분·할당을 위한 DEA 모형을 제시한다. 또한 DEA 모형의 기준이 되는 에너지 효율성과 투입·산출요소를 정의한다. 제 4장에서는 본 논문에서 제안한 모형의 타당성을 검토하기 위하여 우리나라 탄소배출권거래제도의 대상이 되는 국내 철강 산업의 기업들을 대상으로 실증분석을 수행하였다. 마지막 제 5장에서는 결론과 함께 본 연구의 의의 및 한계점을 제시한다.

## 2. 문헌연구

본 연구는 에너지 효율성을 기반으로 효과적인 온실가스 배출

감축목표의 배분·할당을 위한 DEA 모형 제안과 실증연구를 목적으로 한다. 최근 DEA 기법을 활용한 고정비용 또는 자원의 배분·할당 문제를 에너지 효율성(energy efficiency) 또는 환경효율성(environmental efficiency)에 적용하여 배출권 할당과 배분의 적정성을 평가한 연구가 제시되고 있다. 이번 장에서는 DEA를 활용한 자원 할당 연구와 이를 이용한 배출권 할당 연구를 제시하고, 온실가스 감축 목표의 배분·할당의 기준이 되는 에너지 효율성의 정의와 구성요소에 대한 선행연구를 살펴보도록 한다.

### 2.1 DEA 활용 자원 할당

비모수효율성분석법 등으로 불리는 DEA는 동질적 경영단위(Decision Making Units, DMU) 즉, 개별 업체의 상대적 효율성을 평가하여 비효율적 기업을 확인하고 효율성 개선을 위한 방향성을 제시하는 이론적 기반을 제공한다(Lee and Oh, 2012). 최근 표준 DEA 모형을 일부 변형하여 한정된 자원이나 고정비용을 다수의 경영단위에 효과적으로 배분·할당하는 모형이 제시되고 있다(Li *et al.*, 2009). 관련 연구결과 비용/자산의 총량을 유지하되 투입과 산출을 동시 고려한 할당방식을 이용하여 중앙집중적으로 적절하게 배분함으로써 총 효율을 개선할 수 있음을 확인하였다(Lozano and Villa, 2004; Asmild *et al.*, 2009).

Lozano and Villa(2004)는 DEA를 활용한 중앙집중식 자원 할당 모형을 제안하였으며, Asmild *et al.*(2009)는 Lozano and Villa(2004)의 연구를 확장하여 비효율적인 DMU의 자원만을 조정하는 방안을 제시하였다. 이후에는 앞선 연구들에 비해 보다 일반적인 중앙집중식 자원 할당 모형을 제시하는 일환으로 투입요소 감축의 기반을 찾아내기 위하여 구조적 효율성을 구체적인 세 가지의 효율성으로 나누어 모델을 구성하였다(Fang, 2013).

표준 DEA 모형에서는 평가 대상 DMU의 효율성을 최대화하는 가중치를 선택하므로 DMU에 따라서 가중치가 변화하는 단점이 있다. DMU에 따른 가중치 변화는 모든 DMU를 함께 고려해야 하는 중앙집중식 자원할당 문제에 적합하지 않다. 이와 같은 표준 DEA 모형의 단점을 극복하고자 Lotfi *et al.*(2013)은 CSW-DEA 모형을 활용하였다. CSW-DEA 모형은 모든 DMU를 동시에 고려하여 효율성을 평가하고 자원할당을 결정한다. 특히, Lotfi *et al.*(2013)의 연구에서는 효율성 평가와 함께 고정자원의 배분·할당을 고려하기 위하여 CSW-DEA 모형과 Goal Programming 방식을 연계한 방법론을 제안하였다. Hatami-Marbini *et al.*(2015) 또한 CSW-DEA 모형과 Goal Programming 방식을 연계하여 모든 DMU의 효율성 개선을 추구하면서 투입·산출 자원의 분배·할당을 결정하는 방안을 제시하였다. 각 DMU의 최대의 효율성과 모든 조직의 효율성을 최적화하기 위하여 bi-level DEA 모형을 single-level DEA 모형으로 전환한 형태의 자원 할당 모형이 Hakim *et al.*(2016)에 의해 제안되었다.

DEA를 활용한 자원 할당 모형은 최근 온실가스 배출과 같은 비소망 산출요소(undesirable output)를 포함하는 모형으로 확장되었다. Wu *et al.*(2013)은 산출요소에 경제적 요소와 환경적 요소를 각각 소망재와 비소망재로 동시에 고려한 효율성 지표를 구성하였다. 하지만 Wu *et al.*(2013)은 소망재와 비소망재를 분리하여 소망 산출요소(desirable output)의 최대화와 비소망 산출요소의 최소화를 위한 DEA 자원할당 모형을 순차적으로 고려한 결과를 제시하였다. Fujii and Managi.(2015)는 제조 산업에서 현재 생산 기술을 바탕으로 온실가스 배출을 최소화하기 위한 최적의 생산 자원 재할당 문제에 DEA 모형을 적용하였다. Li *et al.*(2013)은 비소망 산출요소의 변화량에 대한 투입요소와 소망 산출요소의 감축량을 살펴보는 다목적 선형모형(Multi-Objective Linear Programing; MOLP)을 제안하였는데, 소망 산출요소보다 비소망 산출요소의 감축 비율이 높다는 결과를 통해 제안된 모형이 효과적인 자원 할당 모형임을 증명하였다.

## 2.2 DEA 활용 온실가스 감축량 할당

Guo *et al.*(2011)은 에너지 기술의 발전과 산업 구조조정에 따른 지역 별 잠재적 온실가스 배출 감축량을 DEA 모형을 이용하여 추정하고, 비효율적 지역과 효율적 지역 사이의 협력방안을 연구하였다. Sun *et al.*(2014)은 효율성 기준의 배출권 할당 결과를 분석하여 개별 기업 중심의 온실가스 할당보다는 중앙집중식 할당이 산업 전체의 효율성을 높인다는 것을 제시하였다. Feng *et al.*(2015)은 Sun *et al.*(2014)의 연구모형을 확장하여 중앙집중식 온실가스 감축량 배분 결과와 개별 기업의 이익을 극대화하는 온실가스 감축량 사이의 차이를 평가하고 중앙집중식 배분에 따른 비용을 보상하기 위한 방안을 제시하였다. Wu *et al.*(2016)은 보다 일반화된 모형을 위해 투입요소를 할당 불가 투입요소, 할당 가능 고정 투입요소, 할당 가능 가변 투입요소로 나누어 context-dependent DEA 모형과 MOLP 방식을 함께 사용함으로써 합리적인 자원 할당이 가능하도록 하였다.

일부 연구에서는 비소망 산출요소인 온실가스 배출량을 투입요소로 고려하여 자원 할당 문제에 활용하였다(Wu *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014). 그러나 온실가스 배출권의 할당 문제에서 온실가스 배출을 특별 투입요소(special input)로 가정하는 경우 다른 투입요소(일반 투입요소) 간의 자유가처분성과 같은 DEA 분석의 주요 가정에 결함이 생기거나 소망 산출요소가 변화할 때의 비소망 산출요소를 함께 고려하지 못한다는 점에서 DEA 모형을 적용하는 데 문제가 될 수 있다(Scheel, 2001). Lins *et al.*(2003)과 Gomes and Lins(2007)은 투입요소가 탄소배출량이고 산출요소가 GDP, 인구, 에너지 사용량인 환경효율성에서 총 탄소배출량이 고정된 상황에서 배출량을 국가 사이에 배분하기 위한 모형을 제시하였다. 특히 총 배출량의 배분과정에서 한 국가의 할당량이 증가하면, 다른 국가의 배출권 할당량이 감소하는 zero sum game을 고려하였다. Miao *et al.*(2016)은 Gomes and Lins(2007)에서 제시한 zero sum gains DEA(ZSG-

DEA) 모형을 중국의 지역별 온실가스 배출권을 할당에 적용하였다. Lozano *et al.*(2009)는 표준 CCR 모형을 변형하여 생산량 최대화, 비소망재(온실가스) 최소화, 투입요소(노동력, 에너지 등) 최소화 등의 세 가지 목적을 달성하기 위한 CCR 모형을 제시하고, lexicographic approach를 이용하여 다목적 모형의 최적해를 도출하였다. Wu *et al.*(2013) 또한 총 배출량이 고정된 경우 이를 경영단위에 적절하게 배분하기 위한 DEA 모형을 제시하였다. 세부적인 모형과 목적에 차이는 있으나 DEA 모형을 이용한 효율성 기반의 중앙집중적 배출권 배분을 통하여 시스템의 전반적인 효율성 향상이 가능함을 제시하고 있다.

## 2.3 에너지 효율성의 정의

DEA 모형을 적용함에 있어 효율성 지표를 연구 목적에 맞게 적절하게 구성하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 효율성을 기준으로 온실가스 배출권을 배분·할당함에 있어 온실가스 배출의 원인이 되는 에너지 사용량과 온실가스 배출량을 포함한 에너지 효율성을 사용하였다. 연구의 목적에 따라 효율성의 정의는 다양하지만 일반적으로 효율성은 산출요소와 투입요소 간의 비율로 정의하고 있다. Lovell(1993)은 투입·산출요소의 관측값과 최적값 사이의 차이를 효율성을 정의하였다. 그러나 이와 같은 효율성의 정의는 일반적으로 산출요소와 투입요소 간의 비율로 정의되는 생산성과 큰 차이를 보이지 못한다. 따라서 Daraio and Simar(2007)은 효율성을 한 기업의 투입·산출요소의 값과 그 기업이 속한 산업에서 구현할 수 있는 최상의 효율변경(efficient frontier)을 구성하는 투입·산출요소 값 사이의 거리라고 정의하였다.

Lim *et al.*(2015)은 우리나라 공공기관의 환경효율성을 DEA 방법론을 이용하여 평가하였으나 이를 에너지 사용량 대비 매출액으로 정의하여 에너지 효율성과 유사한 개념으로 적용하였다. Hahn *et al.*(2010)은 에너지 효율성과 유사한 개념으로 온실가스 배출에 중점을 둔 환경효율성을 기업 운영 과정에서 부가된 가치와 환경적 영향 사이의 비율로 정의하였다. 이는 경제적 이득과 환경적 영향에 초점을 맞춘 정의로서 환경적 영향으로 온실가스 배출과 자원 소비 등을 포함한다(Passetti and Tenucci, 2016). 이와 관련하여 Dyckhoff and Allen(2001)은 환경효율성은 적은 자원 소비와 환경적 영향으로 더 많은 상품이나 서비스를 만들어내는 능력이라고 정의했다. Ramli and Munisamy(2015)는 환경적 영향을 고려한 효율성을 정의함에 있어 소망 산출물의 부산물인 비소망 산출물을 무시하거나 소망 산출물에 단순 합산하는 경우 편향된 결과를 얻을 수 있음을 제시하였으며, Watanabe and Tanaka(2007)와 Mandal(2010) 등은 이를 실증적으로 증명하였다.

<Table 1>은 선행연구에서 정의한 에너지 효율성 또는 환경 효율성의 투입·산출요소를 제시한다. 투입요소에는 상시 직원 수(Labor force), 자본금(Capital stock), 에너지 사용량(Energy consumption)을 기본 요소로 하여 연구의 목적과 대상 문제에

따라 일부 다른 요소들을 추가적으로 포함하고 있다. 앞서 제시한 것과 같이 산출요소는 소망 산출요소와 비소망 산출요소를 명시적으로 구분하여 제시하고 있다. 다수의 연구에서는 배출권 할당에 대한 연구가 국가 간 비교를 대상으로 하고 있어 소망 산출요소로 GDP를 활용하고 있다(Guo *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2015; Miao *et al.*, 2016). 일부 기업 또는 산업을 대상으로 온실가스 배출권 할당과 에너지 효율성 측정을 목적으로 하는 경우에는 소망 산출요소로 매출액(Sales)이나 기업의 부가가치(Value added)를 사용하고 있다(Fuji and Managi, 2015; Wu *et al.*, 2016). DEA를 이용한 에너지 효율성 평가에 대한 상세한 내용은 Zhou *et al.*(2008a, 2008b)의 연구를 참고하도록 한다.

**Table 1.** Literatures of Energy Efficiency

Reference	Input	Output	
		Desirable output	Undesirable output
Guo <i>et al.</i> (2011)	Capital stock Labor force Primary energy consumption	GDP	CO <sub>2</sub> emissions
Wei <i>et al.</i> (2012)	Capital Labor Energy	GDP	CO <sub>2</sub> emissions
Feng <i>et al.</i> (2015)	Labor Total capital stock Total energy consumption	GDP	CO <sub>2</sub> emissions
Fuji and Managi (2015)	Energy Material Labor Capital	Sale	CO <sub>2</sub> emissions
Wu <i>et al.</i> (2016)	Investment Energy	Value added	CO <sub>2</sub> emissions
Miao <i>et al.</i> (2016)	Energy consumption Population Capital stock	GDP	CO <sub>2</sub> emissions

### 3. 수리 모형

#### 3.1 에너지 효율성 정의; 투입 및 산출요소 선정

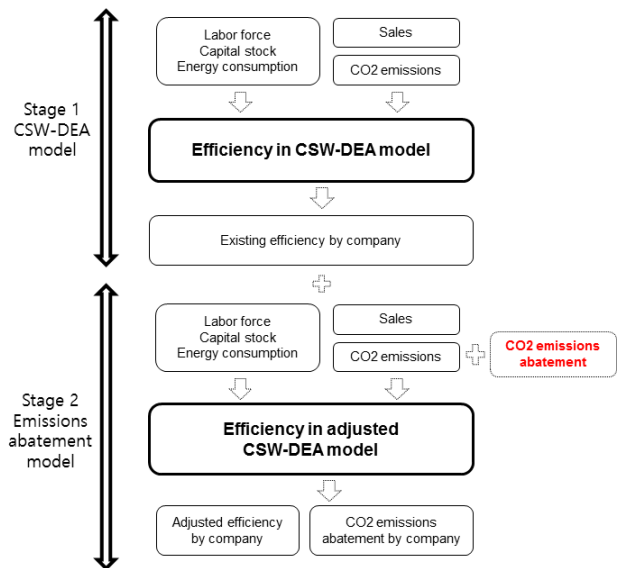
본 연구에서는 선행연구를 참고하여 에너지 효율성을 정의하는 투입요소 및 산출요소를 선정하였다. 우선 선행연구에서 공통적으로 사용하고 있는 상시 직원 수, 자본금, 에너지 사용량 등 세 가지 요소를 투입요소로 선정하였다. 일반적으로 국가 또는 산업 수준에서의 배출권 할당을 고려하는 경우 GDP를 소망 산출요소로 사용하고 있으나 본 논문에서는 동일 산업 안에서 개별 기업을 대상으로 배출권 할당을 고려하므로

소망 산출요소로는 GDP 대신에 매출액을 사용하도록 한다. 마지막으로 비소망 산출요소의 경우 소망 산출요소를 생산할 때 부수적으로 발생하는 온실가스 배출량을 고려하였다.

DEA 모형을 사용하는 경우 DMU의 수와 투입 및 산출요소로 선정되는 변수의 수가 효율성 분별력에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 투입 및 산출요소의 수에 비해 DMU의 수가 지나치게 작을 때는 다수의 DMU가 효율적인 것으로 평가되어 변별력이 낮아지게 된다. 이러한 DEA 모형의 변별력과 관련하여 Banker *et al.*(1984)은 DMU의 수가 투입 및 산출요소 수의 합보다 세 배 이상 커야 변별력이 생긴다는 것을 검증하였다. 또한 Boussofinance *et al.*(1991)은 투입 및 산출요소 수의 곱보다 효율성의 평가 대상이 되는 DMU의 수가 두 배 이상 커야 변별력이 있다고 설명하였으며, Fitzsimmons and Fitzsimmons(1994)는 투입 및 산출요소의 수의 합보다 DMU의 수가 두 배 이상 커야 변별력이 있다는 것을 검증하였다. 본 연구에서 고려한 에너지 효율성은 세 가지 투입요소와 두 가지 산출요소로 구성되며, 효율성 평가 대상인 DMU의 수가 35개이다. 따라서 DEA 모형의 변별력과 관련하여 앞서 제시한 세 가지 기준에 모두 부합하는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2 DEA 기반의 2단계 할당 모형

본 연구에서는 Hatami-Marbini *et al.*(2014)에서 제시한 CSW-DEA 기반의 2단계 연구모형을 확장하여 <Figure 1>과 같이 중앙집중식 온실가스 감축량 할당 모형을 제안하였다. 2단계 모형 중 첫 번째 단계에서는 동일 산업 내 포함된 모든 기업들의 에너지 효율성을 평가한다. 특히, 효율성을 평가함에 있어 CSW-DEA 모형을 활용함으로써 개별 기업의 효율성을 독립적으로 평가하는 대신 공통의 가중치를 적용하는 중앙집중식 방식을 이용하여 효율성을 평가한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계



**Figure 1.** 2-Stages Allocation Model based on DEA

에서 평가한 현재 에너지 효율성을 개선하는 동시에 온실가스 감축량을 의사결정변수로 정의함으로써 온실가스 감축량을 각 업체에 배분하게 된다. <Table 2>에 제시된 기호를 이용하여 본 연구에서 제안하는 모형을 설명하도록 한다.

**Table 2.** Notation

$i$	Index among $m$ inputs
$j$	Index among observed $n$ DMUs
$x_{ij}$	$i^{\text{th}}$ input of the $j^{\text{th}}$ DMU
$y_j$	Desirable output(Sales) of the $j^{\text{th}}$ DMU
$z_j$	Undesirable output(CO <sub>2</sub> emissions) of the $j^{\text{th}}$ DMU
$v_i$	variable weights of the $i^{\text{th}}$ input
$u$	variable weights of the desirable output
$w$	variable weights of the undesirable output
$\bar{b}_j$	the reduction of undesirable output of the $j^{\text{th}}$ DMU

(1) 단계 1. 효율성 평가

개별 DMU의 효율성을 최대화하는 표준 DEA 모형과 다르게 CSW-DEA 모형은 평가 대상에 포함되는 모든 DMU의 효율성을 동시에 최대화하는 가중치를 결정한다. 즉, 모든 DMU의 효율성을 동시에 최대화하는 다목적 최적화 문제를 구성하게 된다. 다음 모형 (1)은 CSW-DEA 모형을 본 연구에서 고려하는 비소망재를 포함하는 환경효율성으로 수정한 결과이다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} \quad \left\{ \frac{uy_1 - wz_1}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i1}}, \frac{uy_2 - wz_2}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i2}}, \dots, \frac{uy_n - wz_n}{\sum_{i=1}^m v_i x_{in}} \right\} \\ & \text{s.t.} \quad \frac{uy_j - wz_j}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (1) \\ & \quad \quad \quad v_i, u, w \geq \epsilon \end{aligned}$$

모형 (1)의 목적함수는 평가 대상 기업의 효율성을 모두 최대화하는 다목적 최적화 모형인 것을 의미하며, 제약식은 각 기업의 효율성이 최대 1을 넘을 수 없음을 나타낸다. 목적함수에서 각 항목은 기업의 효율성이며, 산출요소  $uy_j - wz_j$ 은 소망재와 비소망재의 차이로 정의된다. 즉, 기업의 에너지 효율성은 소망재에 비례하고 비소망재에 반비례함을 명시적으로 제시하였다. 모형 (1)에서 제시한 다목적 최적화 모형을 선형화하기 위하여 효율성의 잉여분(slack)을 의미하는 새로운 변수  $s$ 를 사용하였다. DMU  $j$ 의 잉여분  $s_j$ 는 DMU  $j$ 의 효율성과 최대의 효율성 값(즉, 1) 사이의 차이를 의미하며, 다음과 같이 정의된다.

$$s_j = \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - (uy_j - wz_j)$$

모형 (1)을 선형계획법으로 수정한 모형은 다음 모형 (2)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^n s_j \\ & \text{s.t.} \quad uy_j - wz_j - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + s_j = 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (2) \\ & \quad \quad \quad s_j \leq \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \\ & \quad \quad \quad u, w, v_i \geq \epsilon, i = 1, \dots, m, s_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

모형 (2)의 최적해를  $(u^*, w^*, v_i^*, s_j^*)$ 라 하면 최적의 가중치들로 이루어진 DMU  $j$ 의 효율성 값  $\theta_j^*$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_j^* = \frac{u^* y_j - w^* z_j}{\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ij}} = 1 - \frac{s_j^*}{\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ij}}, j = 1, 2, \dots, n.$$

(2) 단계 2. 감축량 할당

단계 2에서는 총 온실가스 감축 목표량을 개별 기업에 적정하게 배분하는 의사결정을 진행한다. 특히, 온실가스 감축량을 개별 기업에 배분함에 있어 단계 1에서 계산한 기업별 효율성을 개선하도록 한다.

DMU  $j$ 의 온실가스 감축량이  $\bar{b}_j$ 이면, 총 온실가스 감축량이  $B = \sum_{j=1}^n \bar{b}_j$  이 된다. 또한 온실가스 감축량을 반영한 기업의 에너지 효율성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{uy_j - w(z_j - \bar{b}_j)}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}}$$

온실가스 감축량을 반영한 새로운 효율성을 활용하여 단계 1과 같이 모든 기업의 효율성을 최대화하는 다목적 최적화 모형을 다음 모형 (3)과 같이 제시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} \quad \left\{ \frac{uy_1 - w(z_1 - \bar{b}_1)}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i1}}, \frac{uy_2 - w(z_2 - \bar{b}_2)}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i2}}, \dots, \frac{uy_n - w(z_n - \bar{b}_n)}{\sum_{i=1}^m v_i x_{in}} \right\} \\ & \text{s.t.} \quad \frac{uy_j - w(z_j - \bar{b}_j)}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \geq \theta_j^*, j = 1, 2, \dots, n \\ & \quad \quad \quad \frac{uy_j - w(z_j - \bar{b}_j)}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (3) \\ & \quad \quad \quad \sum_{j=1}^n \bar{b}_j = B \\ & \quad \quad \quad \bar{b}_j \leq z_j, j = 1, 2, \dots, n, u, w, v_i \geq \epsilon, \bar{b}_j \geq 0 \end{aligned}$$

모형 (3)의 첫 번째 제약식은 온실가스 감축량을 반영한 효율성이 단계 1에서 계산한 현재 기업의 효율성 보다 개선되어야 함을 의미한다. 세 번째 제약식은 온실가스 감축량의 총량을 나타내며, 네 번째 제약식은 온실가스 감축량이 현재 온실가스 배출량보다 적어야 함을 의미한다.

모형 (3)은 두 변수  $w$ 와  $\bar{b}_j$ 로 구성된  $w\bar{b}_j$ 를 포함하는 비선형 계획 모형이며, 새로운 변수  $b_j = w\bar{b}_j$ 를 사용하여 이를 선형화하였다. 또한 단계 1에서와 같이 다목적 최적화 형태의 모형을 선형 모형으로 변환하기 위하여 효율성 잉여  $t_j = \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \{u y_j - (w z_j - b_j)\}$ 를 이용하여 모형 (3)을 수정하였다. 최종적으로 수정된 결과는 다음 모형 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \sum_{j=1}^n t_j \\
 \text{s.t.} &&& u y_j - (w z_j - b_j) \geq \theta_j^* \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 &&& u y_j - (w z_j - b_j) + t_j - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 &&& t_j \leq \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 &&& b_j \leq w z_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 &&& \sum_{j=1}^n b_j = w B \\
 &&& u, w, v_i \geq \epsilon, b_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{4}$$

모형 (4)의 최적해를  $(u^{**}, w^{**}, v_i^{**}, t_j^*, b_j^*)$ 라 하면 기업별 온실가스 감축량은  $\bar{b}_j^* = b_j^*/w^{**}$ 에 의하여 결정되며, 최적의 가중치들로 이루어진 DMU  $j$ 의 효율성 값  $\theta_j^{**}$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_j^{**} = \frac{u^{**} y_j - (w^{**} z_j - b_j^*)}{\sum_{i=1}^m v_i^{**} x_{ij}} = 1 - \frac{t_j^*}{\sum_{i=1}^m v_i^{**} x_{ij}}$$

**Table 3.** Summary Statistics of Inputs and Outputs

	Input			Output	
	Energy consumption (TJ)	Labor force (person)	Capition stock (million won)	Desirable output (Sales (million won))	Undesirable output (CO <sub>2</sub> emissions (tCO <sub>2</sub> e))
Mean	27,226	1,285	82,940	3,067,476	2,832,580
Standard deviation	96,820	3,227	159,856	10,861,207	12,360,182
Max.	527,148	17,045	667,200	65,098,400	73,820,100
Min.	492	115	100	60,500	26,240

## 4. 실증 연구

### 4.1 데이터

우리나라의 온실가스 배출권거래제 제1차 계획기간 동안 산업별로 할당된 온실가스 배출권을 살펴보면 발전·에너지 산업과 철강 산업이 타 산업과 비교하여 많은 배출권을 할당 받고 있다. 현재 우리나라에서는 철강 산업에서 온실가스 배출권 할당을 위하여 과거 실적에 기반한 그랜드파더링 방식을 사용하고 있다. 또한 철강 산업은 발전·에너지 산업과 비교하여 자료의 확보가 용이한 장점이 있어 본 연구에서는 철강 산업을 대상으로 실증 분석을 수행하였다.

온실가스 배출권 거래제 제1차 계획기간의 대상 업체는 총 525개이며, 이중 37개 기업이 철강 산업에 포함되고 있다. 37개의 기업 중에서 투입 및 산출요소 자료가 공개되지 않은 기업을 제외한 36개 기업을 대상으로 실증분석을 진행하였다. 분석에서 제외된 한 기업체는 2015년에 타 업체에 합병되어 2015년 이후의 자료가 없으며, 온실가스 배출권 거래제가 2015년부터 시작되었기 때문에 온실가스 감축량 할당에 영향이 없을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 앞서 제시한 바와 같이 투입요소로 에너지 사용량, 상시 직원 수, 자본금을 선정하였으며, 소망 산출요소에는 매출액, 비소망 산출요소로 온실가스 배출량을 사용하였다. 상시 직원 수, 자본금, 매출액은 전자공시시스템에 공시된 자료를 이용하였다. 또한 에너지 사용량과 온실가스 배출량은 온실가스 종합정보센터에 공시된 자료를 활용하였다. 실증연구 대상인 36개 기업들의 투입 및 산출요소 자료를 요약하여 <Table 3>에 제시하였다. 철강 산업에 속한 36개의 기업들은 기업의 규모가 매우 상이하기 때문에 표준편차가 높은 것을 확인할 수 있다.

### 4.2 감축량 할당 결과

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 모형을 이용한 온실가스 감축량 할당 결과와 현재 광범위하게 사용되고 있는 그랜드파더링 기법에 의한 감축량 할당 결과를 비교하였다(<Table 4>, <Table 5>). 우리나라의 경우 산업과 기업에 할당한 온실가스 배출권 규모를 공시하지 않고 있다. 본 연구에서 제시한 그랜드파더링 기법을 이용한 기업별 온실가스 감축량은 온실가스 종합정보센터에 공시한 온실가스·에너지 목표관리 명세서로부터 2013년부터 2015년 사이의 온실가스 배출량을 이용하여 추정하였다.

**Table 4.** Summary Statistics of Efficiency and Emissions Abatement

	Efficiency in the 1 <sup>st</sup> stage $\theta^*$	Efficiency in the 2 <sup>nd</sup> stage $\theta^{**}$	Emissions abatement (tCO <sub>2</sub> e)	
			Proposed model	Grand-fathering
Mean	0.432228	0.432228	56.623	56.623
Standard deviation	0.223009	0.223009	234.6135	247.0789
The number of company with full efficiency	3			

**Table 5.** Result of Efficiency and Emissions Abatement

id	Efficiency in the 1 <sup>st</sup> stage $\theta^*$	Efficiency in the 2 <sup>nd</sup> stage $\theta^{**}$	Emissions abatement (tCO <sub>2</sub> e)	
			Proposed model	Grand-fathering
1	0.494653	0.494653	0.623284	0.658647
2	0.414722	0.414722	5.348	5.285818
3	0.161361	0.161361	3.52609	1.919444
4	0.562242	0.562242	1.15155	0.680423
5	0.509309	0.509309	3.36159	2.606044
6	0.40332	0.40332	9.81478	7.325854
7	0.405783	0.405783	1.11031	0.742032
8	0.469378	0.469378	3.06205	2.706213
9	0.550417	0.550417	6.7965	10.28072
10	0.514622	0.514622	2.17653	0.753546
11	0.570313	0.570313	37.6849	34.83851
12	1	1	0	16.53474
13	0.440455	0.440455	3.22197	1.650806
14	0.367973	0.367973	33.0806	25.5543
15	0.25093	0.25093	7.40975	4.589143
16	0.416878	0.416878	7.00796	6.902041
17	0.185334	0.185334	42.4471	24.57762
18	0.364066	0.364066	2.02064	1.278301
19	1	1	1385.24	1475.657
20	0.687073	0.687073	1.36911	2.027843
21	0.720719	0.720719	2.06052	0.551815
22	0.440553	0.440553	2.26061	1.53214
23	0.362822	0.362822	12.7261	10.72664
24	0.360666	0.360666	5.80618	5.249669
25	0.171908	0.171908	0.982147	0.60756
26	0.375024	0.375024	415.701	363.6295
27	0.14822	0.14822	3.11373	1.929659
28	0.324441	0.324441	7.39693	6.296474
29	0.32137	0.32137	1.79438	0.737834
30	1	1	0	2.495666
31	0.255945	0.255945	1.52139	0.949041
32	0.171635	0.171635	0.867626	0.524542
33	0.43931	0.43931	1.28315	0.752014
34	0.136106	0.136106	3.85659	2.287278
35	0.206542	0.206542	18.1209	11.0189
36	0.356127	0.356127	4.47933	2.570349

<Table 4>는 본 연구의 제안 모형과 그랜드파더링을 이용한 온실가스 감축량 할당 결과의 요약 통계를 제시한다. 온실가스 감축 총량이 동일하므로 평균 온실가스 감축량에 차이가 없지만, 제안 모형을 통한 업체별 온실가스 감축량의 표준편차가 그랜드파더링 방식을 통한 온실가스 감축량의 표준편차보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 제안 모형을 활용함으로써 개별 기업의 효율성 감소 없이 보다 형평성이 높은 감축량 배분이 가능함을 나타낸다. 형평성 개선의 예는 <Table 5>에서 제시된 id 19 기업을 통하여 확인할 수 있다. 해당 기업은 단순히 과거 온실가스 배출량이 많아서 그랜드파더링 방식을 적용하는 경우 다른 기업들보다 많은 양의 온실가스 감축량을 할당 받았지만, 제안 모형을 활용한 경우 상대적으로 효율성이 높아 온실가스 감축량이 작아지게 된다.

<Table 5>는 36개 기업의 효율성과 온실가스 감축량을 제시한다. 분석 결과를 살펴보면 효율적인 기업일수록 그랜드파더링 방식을 기준으로 온실가스 감축량을 할당할 결과보다 제안 모형을 기준으로 온실가스 감축량을 할당했을 때 적은 온실가스 감축량을 할당 받았음을 알 수 있다. 또한 총 온실가스 감축량은 동일하므로, 제안 모형의 경우 효율성이 낮은 기업들에 더 많은 온실가스 감축량을 할당하고 있다.

예를 들어, 효율성이 1인 id 12와 30인 기업은 그랜드파더링 방식을 통해 산출된 온실가스 감축량은 각각 16.5tCO<sub>2</sub>e와 2.5tCO<sub>2</sub>e이었으나, 제안 모형을 이용한 경우 온실가스 감축량이 0tCO<sub>2</sub>e이었다. 또한, id 19인 기업은 과거 온실가스 배출량이 많았던 기업으로 그랜드파더링을 적용하는 경우 온실가스 감축 규모가 큰 것을 확인할 수 있으나, 제안 모형을 이용한 경우 효율성이 높은 이유로 온실가스 감축량이 90tCO<sub>2</sub>e 가량 감소하였다. 이와 반대로 효율성이 0.38로 낮은 id 26인 기업은 48tCO<sub>2</sub>e 가량의 온실가스 감축량이 추가로 부과되었다.

### 4.3 온실가스 감축과 에너지 사용량 감소

이번 장에서는 회귀분석을 통하여 온실가스 배출의 변화가 투입 및 산출요소에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 온실가스 배출량을 종속변수로 하고 투입 및 소망 산출요소를 독립변수로 회귀모형을 구성하였다. 우선 회귀식을 구성하는 독립변수 선정을 위하여 종속변수인 온실가스 배출량과 투입 및 산출 요소 사이의 상관관계 분석을 수행하였다. 일반적으로 최소제곱법(Ordinary Least Square; OLS)을 통한 회귀분석은 이상치(outlier)에 매우 민감하기 때문에 안정된 모형을 제공하지 못하므로 이상치로 의심 가는 자료를 식별하는 것이 필요하다(박대인 외, 2013). 본 연구에서 실증대상 연구로 고려한 36개 기업 중에서 온실가스 배출량과 에너지 사용량, 매출액 기준으로 id 11와 id 19, id 26 기업이 공통으로 이상치로 확인되었다. 안정적인 회귀분석 모형 구축을 위하여 id 11, 19, 26의 세 기업을 제외한 33개 기업을 대상으로 투입요소와 산출요소의 상관관계 분석을 다시 한 번 진행하였다.

**Table 6.** Correlation Analysis between Inputs and Outputs(after eliminating outliers)

		Labor force (person)	Capital stock (million won)	Energy consumption (TJ)	Sales (million won)	CO <sub>2</sub> emissions (tCO <sub>2</sub> e)
Labor force (person)	Pearson coefficient	1	0.732**	0.668**	0.698**	0.543**
	p-value		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	33	33	33	33	33
Capital stock (million won)	Pearson coefficient	0.732**	1	0.705**	0.698**	0.584**
	p-value	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	33	33	33	33	33
Energy consumption (TJ)	Pearson coefficient	0.668**	0.705**	1	0.615**	0.968**
	p-value	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	33	33	33	33	33
Sales (million won)	Pearson coefficient	0.698**	0.698**	0.615**	1	0.509**
	p-value	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	33	33	33	33	33
CO <sub>2</sub> emissions (tCO <sub>2</sub> e)	Pearson coefficient	0.543**	0.584**	0.968**	0.509**	1
	p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	33	33	33	33	33

\*\* p &lt; 0.01.

**Table 7.** Simple Regression Analysis Result

Dependent variable	Independent variable	B	beta	t	p-value
CO <sub>2</sub> emissions (tCO <sub>2</sub> e)	Constant	-13824.117			
	Energy consumption (TJ)	65.327	0.968	21.527	0.000***

\*\*\* p &lt; 0.01.

**Table 8.** Summary Statistic of Energy Reductions

	Total	Mean	Max.	Min.
Energy reductions(TJ)	31.20338	0.866761	21.20471	0

이상치 제거 이후에 종속변수와 투입 및 산출요소 사이의 상관관계를 분석한 결과를 <Table 6>에서 제시하였다. 에너지 사용량의 경우 온실가스 배출량과 높은 상관관계를 보였으나, 이상치 제거 이전에 높은 상관관계를 보였던 매출액의 경우 온실가스 배출량과의 상관계수가 0.5 가량으로 낮은 상관관계를 보였다. 이와 같은 분석결과는 대부분의 온실가스 배출이 에너지 사용과정에서 발생함을 보여주는 반면에 기업의 규모가 두드러지게 컸던 기업들을 제외하면 온실가스 배출량과 기업의 규모(즉, 매출액) 간의 관계가 약해짐을 보여준다. <Table 6>에 제시된 상관관계 분석결과를 기반으로 에너지 사용량을 독립변수로 선정하였다.

<Table 7>에 제시된 단순회귀분석 결과를 살펴보면, 독립변

수인 에너지 사용량의 계수는 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 일반적인 회귀식의 분석 방식을 통해 온실가스 배출이 기업에서 에너지를 사용함에 따라 발생하기 때문에 온실가스 배출량을 감축시킬 경우 기업의 에너지 사용량 역시 얼마나 감소하게 될 지를 추정할 수 있다.

<Table 7>에 제시한 회귀식을 적용하여 36개 기업의 에너지 사용량의 변화를 추정하였다(<Table 8> 참조). 에너지 감축량 역시 기업의 효율성이 1인 경우 온실가스 감축량이 0이거나 그 랜드파더링 방식을 적용시킬 때에 비해 감소하였기 때문에 에너지 감축량 역시 0이거나 감소된 값을 가졌다. 반면에 기업의 효율성 값이 낮은 기업은 그랜드파더링 방식에 비해 온실가스 감축량이 늘어났기 때문에 에너지 감축량 역시 증가하였다.



## 5. 결 론

본 연구에서는 DEA 방식을 활용하여 기업의 효율성에 따라 온실가스 감축량의 할당에 변화가 있는지를 살펴보고자 하였다. 따라서 기업의 효율성에 따라 온실가스 감축량을 할당하기 위한 CSW-DEA 기반의 모형을 제시하였으며, 온실가스 배출권의 할당량이 많은 철강 산업에 속한 36개의 기업을 대상으로 실증연구를 진행하였다.

실증연구를 통해서 기업들의 효율성을 감소시키지 않는 범위 내에서 효율성이 매우 높은 기업의 경우 현재 우리나라에서 사용하고 있는 할당 방식인 그랜드파더링 방식에 비해 온실가스 감축량을 적게 할당 받는다는 결과를 보여주었다. 반대로 효율성이 낮은 기업들에게는 효율성이 매우 높은 기업들에서 발생한 잔여의 온실가스 감축량을 나누어 할당하여 기존의 그랜드파더링 방식에 비해 더 많은 양의 온실가스 감축량을 할당하게 되었다. 또한 회귀분석을 통하여 기업의 온실가스 배출량 감소가 에너지 사용량에 미치는 영향력을 분석하였다.

본 논문에서는 온실가스 배출량과 상관관계가 높은 에너지 사용량의 변화를 회귀분석을 이용한 사후분석을 통하여 분석하였다. 따라서 향후 온실가스 배출량과 상관성이 높은 요소를 함께 고려하는 모형으로 확장하는 것이 요구된다. 또한 철강산업에 더하여 타 산업으로 실증분석의 대상을 확장하여 적용함으로써 산업별 특성과 온실가스 감축량 조정효과를 분석하는 것이 필요하다.

## 참고문헌

- Amirteimoori, A. and Kordrostami, S. (2005), Allocating fixed costs and target setting : a DEA-based approach, *European Journal of Operational Research*, **171**(1), 136-151.
- Asmild, M., Paradi, J. C., and Pastor, J. T. (2009), Centralized resource allocation BCC models, *Omega*, **37**(1), 40-49.
- Banker, R. D., Charnes, A., and Cooper, W. W. (1984), Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science*, **30**(9), 1078-1092.
- Boussofinance, A., Dyson, R. G., and Thanassoulis, E. (1991), Applied data envelopment analysis, *European Journal of Operations Research*, **52**(1), 1-15.
- Charnes, A., Cooper, W. W., and Rhodes, E. (1978), Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, **2**(6), 429-444.
- Daraio, C. and Simar, L. (2007), *Advanced robust and nonparametric methods in efficiency analysis : methodology and applications*, Springer Science & Business Media, 13-42.
- Du, J., Cook, W. D., Liang, L., and Zhu, J. (2014), Fixed cost and resource allocation based on DEA cross-efficiency, *European Journal of Operational Research*, **235**(1), 206-214.
- Dyckhoff, H. and Allen, K. (2001), Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis( DEA), *European Journal of Operations Research*, **132**(2), 312-325.
- Fang, L. (2013), A generalized DEA model for centralized resource allocation, *European Journal of Operational Research*, **228**(2), 405-412.
- Feng, C., Chu, F., Ding, J., Bi, G., and Liang, L. (2015), Carbon Emissions Abatement(CBA) allocation and compensation schemes based on DEA, *Omega*, **53**, 78-89.
- Fischer, C. and Fox, A. (2004), *Output-based allocation of emissions permits : Efficiency and distributional effects in a general equilibrium setting with taxes and trade*, Resources for the future, Discussion paper, 4-37.
- Fitzsimmons, J. A. and Fitzsimmons, M. J. (1994), *Service management for competitive advantage*, McGraw Hill, Inc
- Fujii, H. and Managi, S. (2015), Optimal production resource reallocation for CO<sub>2</sub> emissions reduction in manufacturing sectors, *Global Environmental Change*, **35**, 505-513.
- Gomes, E. G. and Lins, M. P. E., Modelling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis model, *Journal of the Operational Research Society*, **59**(5), 616-623.
- Groenenberg, H. and Blok, K. (2002), Benchmark-based emission allocation in a cap-and-trade system, *Climate Policy*, **2**(1), 105-109.
- Guo, X. D., Zhu, L., Fan, Y., and Xie, B. C. (2011), Evaluation of potential reductions in carbon emissions in Chinese provinces based on environmental DEA, *Energy Policy*, **39**(5), 2352-2360.
- Hahn, T., Figge, F., Liesen, A., and Barkemeyer, R. (2010), Opportunity cost based analysis of corporate eco-efficiency : a methodology and its application to the CO<sub>2</sub>-efficiency of German companies, *Journal of Environment Manage*, **91**(10), 1997-2007.
- Hakim, S., Seifi, A., and Ghaemi, A. (2016), A bi-level formulation for DEA-based centralized resource allocation under efficiency constraints, *Computers and Industrial Engineering*, **93**, 28-35.
- Hatami-Marbini, A., Tavana, M., Agrell, P. M., Lotfi, F. H., and Beigi, Z. G. (2015), A common-weights DEA model for centralized reduction and target setting, *Computers and Industrial Engineering*, **79**, 195-203.
- Lee, J.-D. and Oh, D.-H. (2012), *Theory of efficiency analysis : Data Envelopment Analysis*, Jiphil Media, Seoul, Korea.
- Li, H., Yang, W., Zhou, Z., and Huang, C. (2013), Resource allocation models' construction for the reduction of undesirable outputs based on DEA methods, *Mathematical and Computer Modelling*, **58**(5-6), 913-926.
- Li, Y. J., Yang, L., Liang, L., and Hua, Z. S. (2009), Allocating the fixed cost as a complement of other cost inputs : a DEA approach, *European Journal of Operational Research*, **197**(1), 389-401.
- Lim, M. S., Kim, J., and Choi, S. J. (2015), A study on eco-efficiency in public sector using decision tree and DEA analysis, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **40**(1), 91-116.
- Lins, M. P. E., Gomes, E. G., Soares de Mello, J. C. B., and Soares de Mello, A. J. R. (2003), Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model, *European Journal of Operational Research*, **148**(2), 312-322.
- Lotfi, F. H., Hatami-Marbini, A., Agrell, P. J., Aghayi, N., and Gholami, K. (2013), Allocating fixed resources and setting targets using a common-weights DEA approach, *Computers and Industrial Engineering*, **64**(2), 631-640.
- Lovell, C. A. K. (1993), Production frontiers and productive efficiency, *The measurement of productive efficiency : techniques and applications*, 3-67.
- Lozano, S. and Villa, G. (2004), Centralized resource allocation using data envelopment analysis, *Journal of Productivity Analysis*, **22**, 143-161.
- Lozano, S., Villa, G., and Brännlund, R. (2009), Centralised reallocation

- of emission permits using DEA, *European Journal of Operational Research*, **193**(3), 752-760.
- Mandal, S. K. (2010), Do undesirable output and environmental regulation matter in energy efficiency analysis? Evidence from Indian Cement Industry, *Energy Policy*, **38**(10), 6076-6083.
- Miao, Z., Geng, Y., and Sheng, J. (2016), Efficient allocation of CO<sub>2</sub> emissions in China : a zero sum gains data envelopment model, *Journal of Cleaner Production*, **112**(5), 4144-4150.
- Park, D.-I., Kang, H.-C., Han, S.-T., and Choi, H.-S. (2013), Comparison study of outlier detection methods in a regression model, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, **15**(1), 177-186.
- Passetti, E. and Tenucci, A. (2016), Eco-efficiency measurement and the influence of organisational factors : evidence from large Italian companies, *Journal of Cleaner Production*, **122**, 228-239.
- Ramli, N. A. and Munisamy, S. (2015), Eco-efficiency in greenhouse emissions among manufacturing industries : A range adjusted measure, *Economic Modelling*, **47**, 219-227.
- Scheel, H. (2001), Undesirable outputs in efficiency valuations, *European Journal of Operational Research*, **132**(2), 400-410.
- Sun, J., Wu, J., Liang, L., Zhong, R. Y., and Huang, G. Q. (2014), Allocation of emission permits using DEA: centralised and individual points of view, *International Journal of Production Research*, **52**(2), 419-435.
- Watanabe, M. and Tanaka, K. (2007), Efficiency analysis of Chinese industry : a directional distance function approach, *Energy Policy*, **35**(12), 6323-6331.
- Wei, C., Ni, J., and Du, L. (2012), Regional allocation of carbon dioxide abatement in China, *China Economic Review*, **23**, 552-565.
- Wu, H., Du, S., Liang, L., and Zhou, Y. (2013), A DEA-based approach for fair reduction and reallocation of emission permits, *Mathematical and Computer Modelling*, **58**(5), 1095-1101.
- Wu, J., An, Q., Ali, S., and Liang, L. (2013), DEA based resource allocation considering environmental factors, *Mathematical and Computer Modelling*, **58**, 1128-1137.
- Wu, J., Zhu, Q., and Liang, L. (2016), CO<sub>2</sub> emissions and energy intensity reduction allocation over provincial industrial sectors in China, *Applied Energy*, **166**, 282-291.
- Wu, J., Zhu, Q., An, Q., Chu, J., and Ji, X. (2016), Resource allocation based on context-dependent data envelopment analysis and a multi-objective linear programming approach, *Computers and Industrial Engineering*, **101**, 81-90.
- Wu, J., Zhu, Q., Chu, J., An, Q., and Liang, L. (2016), A DEA-based approach for allocation of emission reduction tasks, *International Journal of Production Research*, **54**(18), 5618-5633.
- Zetterberg, L. (2014), Benchmarking in the European Union Emissions Trading System : Abatement Incentives, *Energy Economics*, **43**, 218-224.
- Zhou, P. and Wang, M. (2016), Carbon dioxide emissions allocation: A review, *Ecological Economics*, **125**, 47-59.
- Zhou, P., Ang, B. W., and Poh, K. L. (2008b), Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies, *Energy Economics*, **30**, 1-14.
- Zhou, P., Ang, B. W., and Poh, K. L. (2008a), A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies, *European Journal of Operational Research*, **189**, 1-8.