

Network Data Envelopment Analysis를 적용한 생산 및 폐수처리 효율 추정*

김광욱¹⁾ · 황석준^{2)**}

Efficiency Measurement for Production and Wastewater Abatement
Activity Using Network Data Envelopment Analysis: The Case of
Korean Industrial Complex

Kwang-Uk Kim¹⁾ · Seok-Joon Hwang^{2)**}

1) 경북대학교 경제경영연구소(Research Institute for Economics & Business Administration, Kyungpook National University)

2) 경북대학교 경제통상학부(School of Economics & Trade, Kyungpook National University)

제출: 2015년 2월 6일 수정: 2015년 5월 27일 승인: 2015년 6월 18일

국문 요약

투입·산출변수의 외생적 흐름에 기초한 전통적인 자료포락분석은 생산활동의 모든 내부과정을 'black box'로 간주하며 각 생산단계의 상호작용에 대한 정보를 고려하지 못한 한계를 지닌다. 이에 생산과정을 세분화하고 각 생산단계의 효율성을 연계하여 추정하는 Network DEA 방식이 최근 활발히 적용되고 있으며 특히 환경효율성의 추정과정을 생산 및 저감활동으로 구분한 연구가 대표적이다. 본고는 한국의 51개 산업단지를 대상으로 Network DEA에 기초한 환경효율성 추정을 시도하였으며, 분석결과 추정치의 변별력, 비효율의 발생단계, 기타 외생변수와의 통계적 관련성 등의 관점에서 전통적 DEA 추정결과에 비해 우수한 점을 확인할 수 있었다.

■ 주제어 ■ Network DEA, 산업단지, 폐수종말처리장, 환경효율성

Abstract

In this paper, we present a new empirical method to estimate the environmental efficiency of decision making units. We propose a model with a new approach that describes a network process consisting of two stages, production and wastewater abatement based on the data extracted from 51 Korean industrial complexes.

Taking into account the inter-dependency of two stages, we show a process how to decompose the environmental efficiency into production efficiency and abatement efficiency. Moreover, our new proposed method can be used to explain the information on network relationship between economic growth and environmental protection.

■ Keywords ■ Network DEA, Industrial Complex, Water Waste Decontamination Facility, Environmental Efficiency

* 이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013S1A3A2055150)

** 교신저자 : sxh219@knu.ac.kr

I. 서론

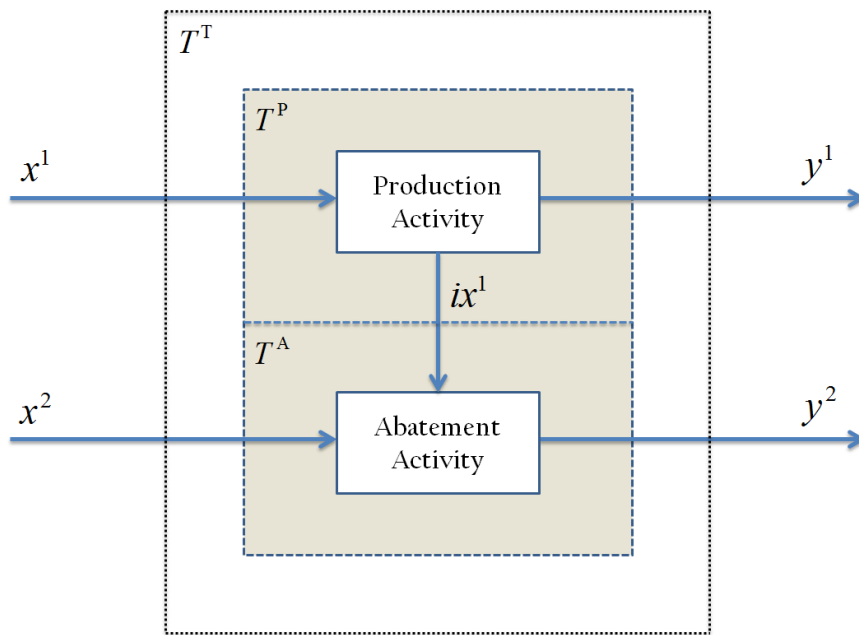
무분별한 산업화로 인한 환경파괴가 인류의 지속가능성에 대한 의문을 야기하면서 '성장과 환경'의 양립가능성을 제고하기 위한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다. 그 중에서도 환경요소를 고려한 생산효율의 추정연구는 지속가능성장(sustainable development)을 위한 미래 경쟁력을 평가하고 효과적인 환경정책설정의 필수적인 과정이라는 점에서 그 중요성이 더해지고 있다. 대표적으로 자료포락분석(data envelopment analysis, DEA)은 각 의사결정단위(decision making units)의 상대적 성과에 기초한 효율산정방식으로서, 이른바 환경과 경제를 연계한 환경효율성지수(environmental efficiency index)를 계측하는데 자주 활용되었으며 환경요소의 비시장적 가치(non-market value)를 적용한 연구로 확대·발전되고 있다(Färe *et al.*, 1989; Seiford, Zhu, 2002; Färe, Grosskopf, 2004; Hu, Wang, 2006; Zhou *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008; Coli, Nissi, RappoSelli, 2011; Choi *et al.*, 2012; Picazo-Tadeo, Beltran-Esteve, Gomez-Limon, 2012; Doganay, Sayek, Taskin, 2014; 강상목, 윤영득, 이명현, 2005; 김광욱, 강상목, 2007).

자료포락분석에 기초한 환경효율의 추정연구는 분석대상과 시계열의 범위, 투입-산출 변수의 설정, 효율성 파라미터의 정의, slack의 처리, 처분성(disposability) 가정 등에서 각각의 독창성을 보이지만 생산활동 상의 모든 내부 과정을 'black box'로 간주한다는 공통점이 있다. 즉 외생적으로 주어지는 변수의 투입 및 산출흐름만을 기준으로 효율성 산정이 이루어지며 생산과정 내부의 상호작용에 대한 정보를 고려하지 못하는 단점이 존재한다. 이에 Färe and Grosskopf(2000)는 중간재(intermediate goods)의 흐름을 고려한 Network DEA모형을 최초로 제안하였으며, 전체 생산과정을 실제 바람직한 산출물을 생산하는 생산활동(production activity)과 그 과정에서 배출된 오염물을 처리하는 저감활동(abatement activity)으로 구분한 효율성 추정연구의 이론적 기초를 제공하고 있다.

<그림 1>은 환경효율의 추정에 있어 전통적인 DEA와 Network DEA의 개념적 차이를 표현한 것이다. 먼저 전통적 DEA에 기초한 환경효율의 추정은 생산 및 저감과정을 모두 포함한 기술수준(T^T)하에서 이루어지며 생산요소(x^1, x^2)와 산출물(y^1) 및 최종오염물(y^2)의 외생적 관계만을 고려한다. 반면 Network DEA는 전체 생산과정을 생산활동의 기술수준(T^P)과 저감활동의 기술수준(T^A)으로 각각 세분화하며, 투입·산출

변수 역시 단계별로 구분한다. 특히 생산활동에서 배출되는 오염물(ix^1) 변수를 저감활동에 투입되는 중간투입물(intermediate input)로 정의함으로써 생산 및 저감활동의 내생적 상호작용을 고려한 특징이 있으며 환경적 비효율의 발생이 실제 어떠한 세부과정에서 이루어졌는지를 판단하는 데 중요한 정보를 제공한다.

그림 1 Network DEA의 효율성 추정



전체 생산과정을 생산 및 저감활동으로 세분화시킨 Network DEA 연구는 Färe, Grosskopf, Pasurka(2011)에서 최초로 제시되었으며, 이후 Benjamin(2014), Bian, Yan, Xu(2014), Song, Wang, Cen(2014), Bian, Liang, Ku(2015) 등에서 응용·발전되었다. 먼저 Färe, Grosskopf, Pasurka(2011)은 2001~2005년 미국 화력발전소를 대상으로 배연탈황시스템(Flue Gas De-sulfurization, FGD) 설치를 통한 황산화물의 저감효율성을 전력생산효율과 함께 2-stage의 형태로 추정하였으며, Benjamin(2014)은 위 연구를 확장하여 전통적인 DEA 추정결과와 비교하였다. 이후 Bian, Yan, Xu(2014)은 2009년 중국 26개 지역을 대상으로 수자원의 이용효율과 생산과정에서 발생한 폐수의 처리효율을 각각 추정하였으며 정화작업을 통한 중수(reused water)를 중간투입물로 적용한 점

이 특징적이다. 다음으로 Song, Wang, Cen(2014), Bian, Liang, Xu(2015) 등은 생산경계(production frontier)상에서 발생 가능한 slack변수를 제어한 Network DEA방법을 제시하였으며 중국의 각 지역과 석탄채굴기업을 분석대상으로 활용하였다. 이와 같이 Network DEA를 통한 생산 및 저감효율의 추정연구는 각 의사결정단위의 환경성과(environmental performance)를 생산단계별로 평가하고 그에 맞는 환경정책을 설정하는 데 매우 효과적인 분석방법이지만 전체 생산과정상의 network 관계를 명확히 정의해야 하고 중간재에 대한 구체적인 통계 데이터를 얻기 어렵다는 점에서 최근까지 소수의 연구에만 제한적으로 적용되어 왔다.

본 연구는 한국의 산업단지(industrial complex)와 산업단지 폐수종말처리장을 대상으로 생산 및 폐수처리과정에 관한 단계별 효율성을 Network DEA를 통해 추정하고자 한다. 산업단지는 한국 제조업 성장의 요람이면서 ‘성장과 환경’의 양면성을 극명하게 보여주는 상징적인 공간이다. 즉 상대적으로 환경적 부담이 큰 제조업의 집적으로 형성된 산업단지는 급격한 산업화에 따라 생산량이 급증하였으며, 그 결과 생산과정상에서 발생하는 오염물질 역시 크게 증가했고 다양화되었다. 특히 산업폐수는 일반 생활하수에 비해 유해물질 독성이 높고 수계에 미치는 환경영향이 매우 크기 때문에 폐수특성에 따른 효과적인 관리체계가 필수적이다. 이에 따라 정부는 오염원이 밀집된 산업단지를 대상으로 산업폐수를 공동으로 처리할 수 있는 폐수종말처리시설의 설치를 지속적으로 추진하는 한편 방류수질 기준 강화, 통합적 폐수관리체계 구축, 환경처리 기술개발 등과 같은 다양한 산업폐수 관리정책을 시행하고 있다. 즉 한국의 산업단지는 일반 제조기업의 생산활동과 환경당국의 폐수처리활동이 서로 결합되어 운영되고 있으며, Network DEA를 적용하여 두 개체 간의 상호작용까지 고려할 수 있는 새로운 효율운영지표를 제시하는 것이 본 연구의 주목적이다. 지금까지 산업단지 운영효율에 관한 선행연구는 대부분 생산과정상의 효율성 추정으로 제한된 경향이 있으며, 생산과정의 환경적 부담을 실증분석에 적용한 연구는 김광욱, 황석준(2014)이 유일하다. 즉 정책당국의 폐수처리효율을 각 산업단지와 연계하여 적용한 연구는 현재까지 없으며, 실제 환경적 비효율이 발생하는 생산과정을 식별하고 그에 맞는 환경정책방향을 제안할 수 있다는 점에서 선행연구와의 차별성을 가진다.

이하 제2장에서는 Network DEA에 기초한 효율성 추정의 이론모형을 설명하고, 제3장에서는 통계데이터 및 실증분석결과를 제시한다. 마지막으로 제4장에서는 실증분석결

과에 기초한 결론 및 정책적 시사점을 제시한다.

II. 이론모형

본 연구는 한국 산업단지의 생산 및 폐수처리효율을 추정하기 위해 Färe, Grosskopf, Pasurka(2011), Chen(2012)에서 적용된 multi-activity Network DEA 방식을 응용한다. $k=1, 2, 3, \dots, K$ 의 산업단지를 분석대상으로 각 산업단지는 연계된 폐수종말처리시설을 갖고 있으며, 생산(P) 및 폐수처리활동(A)에 각각 $X_k^P = (x_{1k}^P, x_{2k}^P, \dots, x_{Fk}^P)$, $X_k^A = (x_{1k}^A, x_{2k}^A, \dots, x_{Dk}^A)$ 의 생산요소를 투입한다고 가정한다. 먼저 각 산업단지는 생산 활동을 통해 산출물 $Y_k^P = (y_{1k}^P, y_{2k}^P, \dots, y_{Rk}^P)$ 와 오염물 $B_k^P = (b_{1k}^P, b_{2k}^P, \dots, b_{Ck}^P)$ 를 각각 생산 및 배출하며, 이를 기초로 규모수익불변(constant returns to scale)하에서의 생산가능 집합(production possibility set) T^P 를 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$T^P = \left\{ (X, Y, B) : \begin{array}{l} \sum_{k=1}^K z_k^P x_{fk}^P \leq x_f^P, \quad f = 1, \dots, F \\ \sum_{k=1}^K z_k^P y_{rk}^P \geq y_r^P, \quad r = 1, \dots, R \\ \sum_{k=1}^K z_k^P b_{ck}^P = b_c^P, \quad c = 1, \dots, C \\ z_k^P \geq 0, \quad k = 1, \dots, K \end{array} \right\} \quad (1)$$

한편 생산과정에서 배출되는 산업폐수를 처리하는 폐수종말처리시설의 저감활동은 식(2)와 같은 생산가능집합 T^A 로 표현할 수 있으며 식(1)에서의 b_{ck}^P 가 중간투입물로 고려된 점이 특징적이다.

$$T^A = \left\{ (X, Y, B) : \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k^A x_{dk}^A \leq x_d^A, & d = 1, \dots, D \\ \sum_{k=1}^K z_k^A b_{ck}^P = b_c^P, & c = 1, \dots, C \\ \sum_{k=1}^K z_k^A y_{mk}^A \geq y_m^A, & m = 1, \dots, M \\ z_k^A \geq 0, & k = 1, \dots, K \end{cases} \right\} \quad (2)$$

식(1)과 (2)의 z^P, z^A 는 $K \times 1$ 밀도벡터(intensity vector)이며 생산 및 저감활동과 관련된 각각의 생산프론티어(production frontier)를 형성한다. 본 연구는 Färe *et al.*(1989)에서 정의한 바와 같이 두 생산가능집합 T^P, T^A 는 투입물과 산출물에 대한 강제분(strong disposability)과 오염물에 대한 약처분(weak disposability) 기술을 가정한다.¹⁾

이를 기초로 산업단지의 생산 및 폐수처리효율을 정의하기 위한 multi-activity Network DEA는 식(3)과 같이 정의할 수 있으며 생산 및 오염저감활동과 관련된 모든 제약조건이 포함된 형태의 선형계획식이다. 먼저 생산단계(a)와 관련된 제약조건을 확인하면, 파라미터 β^P 는 투입물의 최대저감과 산출물의 최대증가를 동시에 달성할 수 있는 효율지표로 정의된다. 즉 산업단지의 생산효율은 오로지 경제적 관점에서 측정하며 최소의 비용으로 최대의 부가가치를 생산하는 단위에게 높은 효율성을 부여한다. 한편 폐수처리단계(c)와 관련된 제약조건에서도 생산단계와 유사한 형태의 파라미터 β^A 가 적용되며 여기서 바람직한 산출물 y^A 는 환경개선율로 정의한다. 한편 생산 및 오염처리과정의 상호연계에 대한 연결단계는 제약조건(b)로 표현되며 산업폐수의 발생과 처리에 대한 내생적 관계를 정의한 것이다(Bian, Liang, Xu, 2015).²⁾

1) 폐수발생량은 오염저감 생산기술 하의 중간투입물이지만 실제 선형계획식에서는 약처분성을 가정한다. 이는 생산과정상에서 발생한 오염물이 폐수처리로 직접 투입되며 이미 발생된 오염물은 폐수처리과정에서 변화시킬 수 없음을 의미한다.

2) multi-activity Network DEA를 정의하는 효율지표 β 는 일반적인 방향거리함수(directional distance function)에 기초하고 있다. 즉 식(3)은 단계별 효율지표를 추정하기 위한 파라미터를 정의한 것이며 β 가 0이면 효율적이고 $\beta \geq 0$ 이면 비효율적인 생산단위로 구분된다.

$$\vec{D}(x, y, b; g) = MAX \beta^P + \beta^A \quad (3)$$

Subject to

(a) Production State

$$\sum_{k=1}^K z_k^P x_{fk}^P \leq (1 - \beta^P) \cdot x_f^P, \quad f = 1, \dots, F$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^P y_{rk}^P \geq (1 + \beta^P) \cdot y_r^P, \quad r = 1, \dots, R$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^P b_{ck}^P = b_c^P, \quad c = 1, \dots, C$$

$$z_k^P \geq 0, \quad k = 1, \dots, K$$

(b) Stage Link

$$\sum_{k=1}^K z_k^P b_{ck}^P = \sum_{k=1}^K z_k^A b_{ck}^A, \quad c = 1, \dots, C$$

(c) Abatement Stage

$$\sum_{k=1}^K z_k^A x_{dk}^A \leq (1 - \beta^A) \cdot x_d^A, \quad d = 1, \dots, D$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^A b_{ck}^A = b_c^P, \quad c = 1, \dots, C$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^A y_{mk}^A \geq (1 + \beta^A) \cdot y_m^A, \quad m = 1, \dots, M$$

$$z_k^A \geq 0, \quad k = 1, \dots, K$$

마지막으로 Network DEA에 기초한 전체 효율지표 β^T 는 단계별 효율지표 β^P 와 β^A 의 산술평균으로 정의하며 식(4)와 같이 표현할 수 있다.³⁾ Liang *et al.*(2006), Cook, Liang, Zhu(2010), Chen(2012), Bian, Yan, Xu(2014)은 network 형태의 효율성 산정에서 단계별 효율지표의 산술평균에 기초한 추정방식을 제안하고 있으며 본 연구에서도 이를 따른다.

3) 산술평균에 기초한 Network 효율성 산정은 동일한 가중치를 적용했다는 점에서 자의적인 면이 존재한다. 그러나 대부분의 선행연구에서는 Network DEA가 전체 효율성의 추정보다는 생산과 저감활동 단계별 효율성 추정에 주목적이 있다. 점과 두 번째 생산기술(second-stage production technology) 즉 저감활동에만 투입되는 외생변수가 존재한다는 점에서 산술평균을 적용하는 것이 합리적이라고 언급하고 있다.

$$\beta^T = \frac{1}{2} [\beta^P + \beta^A] \quad (4)$$

한편 본 연구는 환경효율성과 관련된 대부분의 선행연구에서 적용하고 있는 전통적인 DEA 추정을 시도하여 Network DEA 추정결과와 비교한다. 식(5)는 전통적인 DEA 추정을 위한 선형계획식이며 산출물의 확장과 오염물의 저감을 동시에 달성하는 β^C 를 계측한다. 즉 생산과정에서 발생하는 오염물질인 폐수에 관한 중간과정은 생략되며 산업 단지의 생산 및 저감활동과 관련된 외생적 변수의 흐름만을 고려한 추정방식이다.⁴⁾⁵⁾

$$\vec{D}(x, y, b; g) = \text{MAX } \beta^C \quad (5)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^K z_k^C x_{fk}^C \leq x_f^C, \quad f = 1, \dots, F$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^C x_{dk}^C \leq x_d^C, \quad d = 1, \dots, D$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^C y_{rk}^C \geq (1 + \beta^C) \cdot y_r^C, \quad r = 1, \dots, R$$

$$\sum_{k=1}^K z_k^C y_{mk}^C \geq (1 + \beta^C) \cdot y_m^C, \quad m = 1, \dots, M$$

$$z_k^C \geq 0, \quad k = 1, \dots, K$$

4) 환경효율성을 추정하기 위한 일반적인 추정에서는 최종 산출물을 바람직한 산출물과 오염물로 구분한다. 그러나 본 연구는 식(5)의 산출물을 모두 바람직한 산출물로 정의하며 이는 폐수처리와 관련된 산출물 변수를 환경개선수준으로 정의하였기 때문이다. 이는 3장에서 보다 구체적으로 설명한다.

5) 식(5)는 환경효율성을 정의하는 가장 일반적 형태의 추정식으로서 바람직한 산출물과 오염물에만 방향벡터를 설정한다.

III. 통계 데이터 및 실증분석 결과

본 연구는 산업단지의 생산활동과 관련된 투입변수로 산업단지별 고용(E)과 산업시설구역(L)을 활용하며, 산출물로는 국내생산(DY), 수출(EX), 폐수발생량(B)으로 정의한다. DEA에 기초한 생산성 추정에서는 노동 및 자본스톡을 투입변수로 활용하는 것이 일반적이다. 그러나 실증분석의 대상이 되는 산업단지의 자본스톡을 정의할 수 있는 통계데이터가 현재 제공되지 않으며 본 연구에서는 산업단지별 산업시설구역(면적)을 자본변수의 대리변수(proxy)로 활용한다.⁶⁾ 또한, 본 연구는 산업단지 생산활동의 산출물로 국내생산과 수출생산을 구분하여 효율성을 추정한다. 한국 산업단지의 급격한 규모성장은 수출무역의 확장과 함께 이루어진 특징이 있으며 수출생산은 국제기준에 부합하는 추가적인 생산공정을 필요로 하는 경우가 존재한다. 즉 수출을 위한 새로운 설비확충이나 강한 규제하에서의 생산과정은 산출물의 환경성과에 상이한 영향을 미칠 가능성이 있으며 본 연구는 각 산업공정을 고려한 효율성 산정을 시도한다.

한편 각 산업단지와 연계된 폐수종말처리시설은 운영비(OC)와 시설용량(CF)를 투입변수로 하며 폐수처리량(VOL)과 BOD, COD, SS, T-N의 수질개선율을 산출물로 정의한다.⁷⁾ 언급한 바와 같이 환경효율성을 추정하는 선행연구는 오염배출량을 산출변수로 활용하는 것이 일반적이다. 그러나 현행법상 폐수종말처리시설은 특정 유기물질에 대한 수질기준에 맞추어 운영되고 있으며, 기준치 이하이면 환경적으로 동일하다고 간주한다. 즉 유입수질의 오염도가 심한 경우 기준치에 부합되는 수질개선을 위해서는 더 많은 자원이 소모되므로 주어진 투입요소 수준에서 수질개선율이 가장 높은 단위에 높은 효율성을 부여하는 것이 더 적합할 것으로 판단된다. <표 1>은 실증분석에 사용된 변수의 정의 및 출처를 정리한 것이다.

6) 자본스톡과 가장 유사한 성격을 가지는 유형자산 연말잔액 데이터는 2006년이 최신 자료이다. 언급된 데이터는 2006년 산업시설구역면적과 강한 통계적 유의성을 보이며 상관계수 $\sigma = 0.555$ 로 계측되었다.

7) 수질개선율은 $|1 - (\text{방류수질} / \text{유입수질})|$ 으로 정의한다(이상철, 2010).

표 1 통계자료의 출처 및 단위

변수		정의	단위	데이터 출처
산업단지 생산기술 <i>Production Activity</i>	<i>E</i>	연평균 고용	명	한국 산업단지공단
	<i>L</i>	산업입지면적	m ²	한국 산업단지공단
	<i>DY</i>	국내 생산	백만 원	한국 산업단지공단
	<i>EX</i>	수출	천\$	한국 산업단지공단
	<i>B</i>	폐수발생량	톤/일	환경부
폐수종말처리장 폐수저감기술 <i>Abatement Activity</i>	<i>OC</i>	운영비	백만 원	환경부
	<i>CF</i>	시설용량	톤/일	환경부
	<i>VOL</i>	폐수처리량	톤/일	환경부
	<i>BOD</i>	화학적 산소요구량	mg/L	환경부
	<i>COD</i>	생물학적 산소요구량	mg/L	환경부
	<i>SS</i>	부유물질	mg/L	환경부
	<i>T-N</i>	총질소	mg/L	환경부

본 연구는 2011년, 2012년 전국 51개 일반산업단지를 대상으로 Network DEA를 적용한 생산 및 폐수처리효율을 추정한다.⁸⁾ 현재 환경부에서 발간하는 ‘공장폐수의 발생과 처리’는 2014년이 최신 자료이며 이는 2012년의 산업단지 폐수발생량에 관한 통계 데이터를 제공하고 있다. 따라서 2012년 환경부 ‘산업단지 폐수종말처리시설 운영현황’을 기준으로 실증분석이 가능한 51개의 일반산업단지를 선택하였으며 시계열적 일관성을 최대한 유지하는 수준에서 2011년까지 데이터를 확장하였다. <표 2>는 실증분석에 활용된 통계 데이터의 기초통계량을 제시한 것이다.

8) 대규모 국가산업단지나 환경부담이 큰 특정산업의 입지비용이 높은 일반산업단지의 경우 자체적인 폐수처리시설을 갖추고 있으며 1차 여과 이후 지역 하수종말처리장으로 유입되는 특징이 있다. 따라서 본 연구는 특정 산업단지의 직접 연계되어 운영되는 폐수종말처리장만을 대상으로 분석한다.

표 2 기초통계량

변수	평균	표준편차	최대	최소
연평균 고용	1,236	1,301	6,662	50
산업입지면적	5,647	9,196	55,424	140
국내생산	2,716,005	4,995,462	26,338,936	17,863
수출	1,485,619	4,378,078	28,848,605	548
폐수발생량	12,787	30,611	148,942	3
운영비	2,570	9,501	67,441	45
시설용량	17,678	38,391	205,000	190
폐수처리량	11,413	29,814	162,059	53
BOD 개선율	0.9752	0.0277	0.9992	0.8533
COD 개선율	0.9057	0.0593	0.9929	0.7491
SS 개선율	0.8305	0.1089	0.9761	0.4326
T-N 개선율	0.8317	0.1201	0.9801	0.3679

<표 3>은 이론모형에서 정의된 두 가지 효율지표에 대한 추정결과를 산업단지별로 제시한 것이다⁹⁾. β^C , β^T 는 각각 전통적인 DEA와 Network DEA를 적용한 추정결과이며, 여기서 β^T 는 생산 및 저감효율을 의미하는 β^P 와 β^A 로 다시 구분된다. 먼저 전통적 DEA 추정결과를 기준으로 평균 환경비효율은 0.1794로 추정되었으며 이는 산업단지의 환경성과가 17.94% 개선될 수 있음을 의미한다. 인천검단(0.4955), 화성마도(0.6676), 화성발안(0.7142), 음성맹동(0.4182), 아산 테크노밸리(0.5052), 양산어곡(0.5223), 김포양촌(0.5807) 등의 산업단지에서 환경비효율이 크게 계측되었으며, 폐수발생량이 많은 산업구조적 특성이 가지고 있거나 생산 부가가치가 낮은 소규모 산업단지라는 특징을 보인다. 한편 Network DEA 추정결과에서는 평균 0.2282의 환경비효율이 추정되었으며 생산과정과 폐수처리과정에서 각각 0.2755와 0.1810의 비효율이 계측되었다. 화성마도(0.6390), 화성발안(0.7084), 음성맹동(0.6036), 양산어곡(0.6606) 등의 산업단지에서 가장 큰 비효율을 보였으며 전통적인 DEA의 추정결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다¹⁰⁾.

9) <표 3>은 2011년과 2012년 추정결과의 평균값을 제시한 것이다.

10) 실제 두 효율지표의 상관계수는 0.6381이며 유의수준 1%에서 통계적 유의성을 보인다.

표 3 전통적 DEA와 Network DEA 실증분석 결과

산업단지	β^C	β^P	β^A	β^I
기장장안	0.0325	0.2566	0.0000	0.1283
대구성서공단	0.1629	0.1304	0.0000	0.0652
달성	0.1759	0.3949	0.0000	0.1974
인천검단	0.4955	0.5106	0.4686	0.4896
연기월산	0.0000	0.0000	0.0246	0.0123
연기전의	0.2395	0.2943	0.0979	0.1961
조치원	0.0215	0.3768	0.0000	0.1884
안성제1	0.1968	0.1829	0.5287	0.3558
안성제2	0.1537	0.1862	0.0000	0.0931
양주검준	0.0000	0.0000	0.5863	0.2932
파주LCD	0.0000	0.0000	0.0072	0.0036
파주금파	0.0000	0.5575	0.0000	0.2788
평택어현한산	0.2493	0.0925	0.2027	0.1476
평택진위	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
평택송탄	0.2980	0.1684	0.0000	0.0843
평택현곡	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
포천양문	0.0000	0.1414	0.0000	0.0707
화성마도	0.6676	0.8200	0.4579	0.6390
화성발안	0.7142	0.8582	0.5587	0.7084
화성장안첨단	0.3203	0.0213	0.3473	0.1843
청주산단	0.1117	0.0047	0.0000	0.0024
충주중원	0.2007	0.6035	0.2664	0.4350
음성금왕	0.0000	0.2443	0.4387	0.3415
음성대풍	0.1518	0.1499	0.0686	0.1093
음성맹동	0.4182	0.7039	0.5032	0.6036
음성하이테크	0.1629	0.4698	0.1627	0.3163
증평일반	0.1043	0.3504	0.1933	0.2719
청원오창	0.1736	0.0408	0.1024	0.0716
청원현도	0.0000	0.0000	0.3228	0.1614
논산산단	0.2250	0.2293	0.1066	0.1680
보령관창	0.0000	0.0097	0.2987	0.1542
서산대죽	0.0436	0.0000	0.3279	0.1640
아산 테크노밸리	0.5052	0.1122	0.0000	0.0561
인주산단	0.0000	0.0000	0.3241	0.1620
아산탕정(1~3)	0.0000	0.0000	0.0337	0.0168

산업단지	β^C	β^P	β^A	β^I
천안제3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
천안제4	0.2274	0.3396	0.0000	0.1699
천안천흥	0.3009	0.5941	0.3396	0.4669
완주산단	0.2104	0.0856	0.3689	0.2273
여수울촌	0.2960	0.3082	0.2753	0.2918
고령개진	0.1193	0.6017	0.0931	0.3474
고령다산	0.0000	0.2068	0.0000	0.1034
김해덕암	0.0000	0.2496	0.0000	0.1248
양산일반	0.3379	0.5410	0.0000	0.2705
양산어곡	0.5223	0.6985	0.6228	0.6606
진주상평	0.3803	0.7249	0.4077	0.5664
함안칠서	0.1835	0.1313	0.0706	0.1010
사천일반	0.0000	0.0000	0.4650	0.2325
김포양촌	0.5807	0.5791	0.0000	0.2895
세종부강	0.0701	0.4414	0.0000	0.2207
충주첨단	0.0968	0.6373	0.1588	0.3980
평균	0.1794	0.2755	0.1810	0.2282

두 가지 효율지표를 비교할 때 가장 특징적인 부분은 β^C 의 경우 16개의 산업단지가 환경효율적인 생산단위로 구분된 반면 β^I 에서는 단지 3개의 산업단지만이 환경효율적인 산업단지로 계측되었다는 점이다. 언급한 바와 같이 Network DEA를 통한 추정방식은 전체 생산과정을 세분화하고 단계별 생산기술에 대한 보다 구체적인 정보를 바탕으로 추정이 이루어진다. 그 결과 비효율성의 과소평가경향이 크게 개선되며 효율성 비교를 위한 변별력 차원에서도 큰 장점을 가진다. 더욱 엄밀한 분석을 위해 두 방식에 따라 계측된 비효율의 분포와 누적함수를 <그림 2>와 같은 그래프로 표현할 수 있다. <그림 2>의 위쪽 그래프는 전통적인 DEA 방식을 통한 효율성 추정결과이며 $0 \leq \beta^C < 0.1$ 에 위치하는 산업단지의 비율이 31.37%를 차지한다. 다음으로 $0 \leq \beta^C < 0.2$ 의 비율은 41.18%, $0 \leq \beta^C < 0.3$ 의 비율은 62.75%로 누적되며, 이후 그 증가폭이 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 반면, <그림 2>의 아래쪽 그래프에 표현된 Network DEA 방식의 추정결과에서는 $0 \leq \beta^I < 0.1$ 를 만족하는 산업단지 비율이 불과 5.88%이며, 이후 $0 \leq \beta^I < 0.02$ 는 25.49%, $0 \leq \beta^I < 0.3$ 는 56.86%로 크게 증가한다. 즉 β^C 를 기준으로 할 때 0~0.1 사이의 비효율을 보인 산업단지가 β^I 에서는 0.1~0.3으로 크게 변화한 경향을 확

인할 수 있으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 환경효율적인 생산단위로 분류되는 산업단위의 수가 크게 하락한 점이 주원인으로 판단된다. 구체적으로 연기월산, 양주검준, 파주LCD, 파주금과, 포천양문, 음성금왕, 청원현도, 보령관창, 인주산단, 아산탕정(1~3), 고령다산, 김해덕암, 사천일반 등의 산업단지에서 이러한 경향을 확인된다. 반면 평택진위, 평택현곡, 천안제3 등은 두 가지 효율지표 모두에서 환경효율적인 산업단지로서 일관된 추정결과를 보이며 생산프론티어를 형성하는 산업단지로 분류된다.

<그림 3>은 생산과정을 세분화시킨 효율성 지표 β^P 와 β^A 의 분포 및 누적함수를 표현한 것이다. 먼저 산업단지의 생산활동과 관련된 효율지표 β^P 를 기준으로 $0 \leq \beta^P < 0.1$ 에 속하는 산업단지 비율은 21.57%이며, $0 \leq \beta^P < 0.2$ 는 33.33%, $0 \leq \beta^P < 0.3$ 은 49.02%로 완만한 형태의 누적경향을 보인다. 반면 폐수처리활동과 관련된 β^A 지표에서는 $0 \leq \beta^A < 0.1$ 에 속하는 비율이 35.54%로 매우 큰 수치를 보이며 이후의 누적 폭이 크게 감소하는 형태이다. 즉 실증분석에 포함된 산업단지는 전반적으로 폐수처리활동에 비해 생산활동에서 산업단지 간 효율성 격차가 크게 계측된 점을 확인할 수 있다. 폐수종말처리 시설의 경우 환경당국의 시설투자 지원규정에 따라 적절한 지원규모 및 형태를 결정하며, 그 결과로 폐수처리에 관한 산업단지별 효율지표가 유사하게 표출된 것으로 예상할 수 있다.

한편 β^P 와 β^A 에 관한 추정결과를 구체적으로 살펴보면 단계별 효율성과 관련된 산업단지별 특성을 파악할 수 있다. 먼저 기장장안, 대구성서공단, 달성, 조치원, 안성제2, 평택송탄, 아산 테크로밸리, 천안제4, 양산일반, 김포양촌, 세종부강 등과 같은 산업단지는 Network DEA를 통한 비효율이 모두 생산과정에서 표출되는 것을 확인할 수 있다. 즉 언급된 산업단지의 경우 폐수처리과정이 상대적으로 효율적인 생산단위로 구분되며 생산과정에서의 부가가치 생산을 위한 경제적 노력이 더 필요하다는 것을 의미한다. 반면 양주검준, 청원현도, 서산대죽, 인주산단, 사천일반 등의 산업단지는 생산과정의 비효율이 모두 오염저감과정에서 나타나며 산업폐수처리와 관련된 자원의 재분배가 필요한 것으로 계측된다.

그림 2 전통적 DEA(β^C)와 Network DEA(β^T) 실증결과의 분포 및 누적곡선

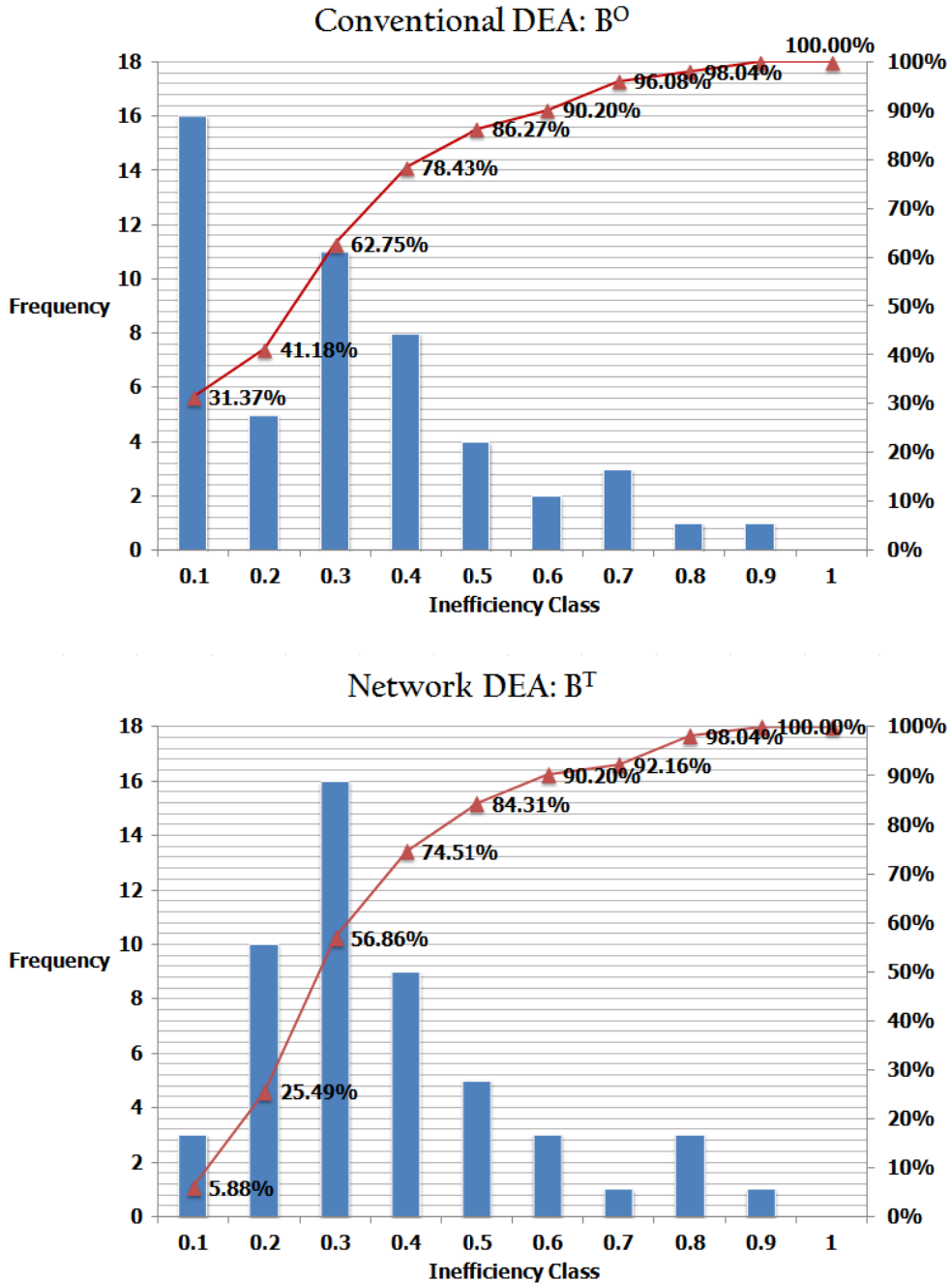


그림 3 생산(β^P) 및 폐수처리(β^A)과정의 비효율과 누적곡선

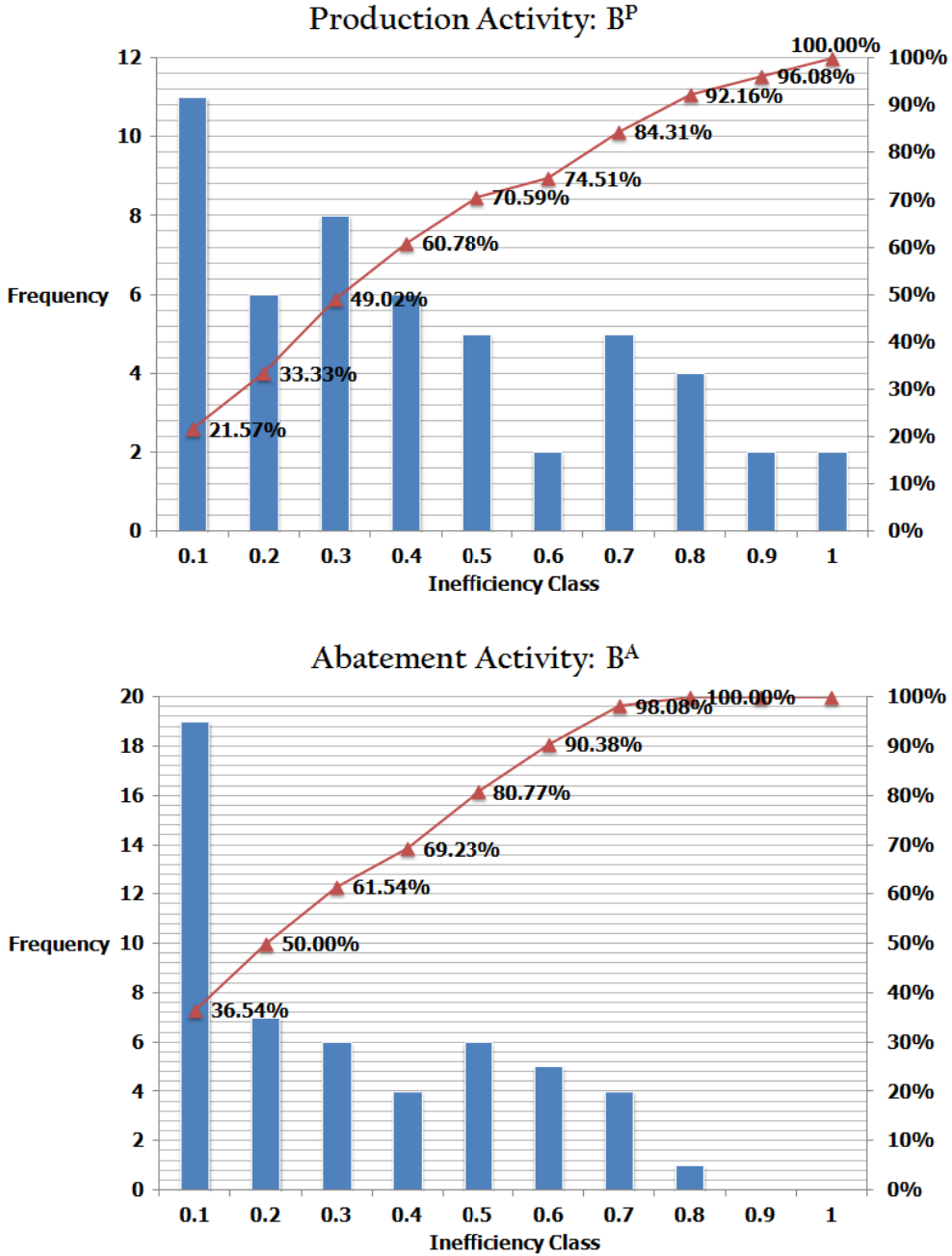


표 4 Pearson 상관계수와 통계적 유의성

	국내생산	수출	수출비중	시설투자	시설용량	폐수유입률
β^C	-0.2395*	-0.2312	-0.3944***	-0.1844	-0.2153	-0.2466*
	(0.0939)	(0.1063)	(0.0046)	(0.2000)	(0.1331)	(0.0842)
β^D	-0.4183***	-0.3173**	-0.4962***	-0.2187	-0.3176**	-0.1527
	(0.0025)	(0.0248)	(0.0002)	(0.1270)	(0.0246)	(0.2898)
β^A	-0.2558*	-0.1986	-0.2215	-0.1284	-0.2019	-0.4465***
	(0.0730)	(0.1667)	(0.1222)	(0.3740)	(0.1597)	(0.0012)
β^T	-0.4342***	-0.3319**	-0.4701***	-0.2242	-0.3339**	-0.3520**
	(0.0016)	(0.0185)	(0.0006)	(0.1176)	(0.0178)	(0.0122)

주: ***, **, *는 각각 유의수준 1%, 5%, 10%에서 통계적으로 유의함.

마지막으로 본 연구는 산업단지의 각 효율지표와 생산 및 폐수처리에 관한 관련변수 사이의 통계적 관계를 검증하며, <표 4>는 이를 정리한 것이다. 먼저 국내생산변수는 4가지 효율지표와 모두 통계적으로 유의하며 음(-)의 상관관계를 보인다. 즉 국내생산 규모가 큰 산업단지에서 비효율이 상대적으로 낮게 계측되며 전반적으로 산업단지 효율성 수준을 정의하는 중요한 변수임을 확인할 수 있다. 상관계수의 절대값 및 통계적 유의수준을 기준으로 보면 β^C 에서 비해 β^T 에서 그 영향력이 크게 나타나고, 또한 폐수저감효율을 의미하는 β^A 에 비해 생산활동과 직접적으로 연계된 β^D 에서 더 강한 통계적 유의성을 보인다. 수출생산의 경우에도 전반적인 음(-)의 상관관계가 확인되며, β^T 에서 더 강한 통계적 유의성이 나타난다. 이를 종합하면 생산활동과 직접적으로 관련되는 국내생산과 수출변수는 각 효율지표와 음(-)의 상관관계가 일관되게 나타나며 이러한 경향은 Network DEA에 기초한 효율지표에서 더욱 뚜렷하게 표출되는 것을 확인할 수 있다. 또한 환경당국에 의해 주도적으로 운영되는 저감 효율성과는 상대적으로 낮은 통계적 유의성을 보이며 이는 폐수처리활동이 가지는 공공적 성격에 의한 것으로 예상된다.¹¹⁾ 즉 폐수종말처리장은 산업단지의 생산 및 수출량과는 달리 생산과정에서 배출되는 오염물질수준을 기준으로 설립·운영되고 있으며, 그 결과 β^A 의 통계적 유의성이 상대적으로 낮게 계측되는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 수출비중변수와 상관관계에서 보다 뚜렷하게 표출되며 총 생산액에서 수출비중이 높은 산업단

11) 언급한 바와 같이 폐수종말처리장은 환경당국에 의해 주도적으로 운영되고 있으며 산업단지의 생산 및 수출의 크기와 달리 생산과정에서 배출되는 오염물질수준을 기준으로 운영된다.

지일수록 더 효율적인 산업단지로 분류되는 것을 확인할 수 있다. 이는 수출생산이 국제기준에 부합되는 다양한 요구사항을 만족시키기 위해 생산기술, 자원할당 등과 같은 경제적 활동에서 더 효율적인 수준을 유지해야 한다는 점이 그 원인으로 예상된다.

다음으로 <표 4>의 우측 3개 변수는 폐수처리와 관련된 변수이며 각 효율지표는 시설투자, 시설용량, 폐수유입률과 일관된 음(-)의 상관관계를 보이지만 앞선 국내생산, 수출, 수출비중변수에 비해 상대적으로 낮은 통계적 유의성을 보인다. 먼저 폐수종말처리장의 시설용량변수는 폐수처리 가능용량을 의미하며 β^T 와 β^P 에서 통계적 유의성을 보인다. 이는 상대적으로 생산규모가 큰 산업단지에 시설용량이 큰 폐수종말처리시설이 설치된다는 것을 의미하지만 실제 저감효율성과는 상대적으로 낮은 통계적 유의성을 보인다는 점이 특징적이다. 다음으로 폐수유입률 변수는 실제 설비용량 대비 폐수처리량을 의미하는 변수이며 β^C 와 β^T 에서 모두 통계적으로 유의한 음(-)의 상관관계를 보인다. 그러나 β^P 와 β^A 와 관계를 살펴보면 폐수처리활동과 관련된 β^A 에서만 강한 통계적 유의성이 표출된다. 즉 폐수유입률이 높다는 것은 주어진 저감설비를 최대한 활용한다는 것을 의미하며 그에 따라 폐수처리과정의 비효율을 의미하는 β^A 의 감소와 밀접한 관련이 있다고 판단된다. 이를 종합하면 폐수처리시설은 산업단지의 경제적 성과보다는 환경보호와 같은 공공적 성격이 더욱 강하며 이는 Network DEA에 기초한 추정결과에서만 확인 가능하다.

IV. 결론 및 정책적 제언

한국의 산업단지는 과거 제조업 성장의 핵심적인 역할을 담당하였으며 최근 환경 친화적 생산단지로의 변화를 요구받고 있다. 특히 생산량 급증에 따른 산업폐수의 증가는 미래 지속가능한 성장의 걸림돌로 작용할 가능성이 높으며 환경보호를 위한 정책적 대안이 필수적인 상황이다. 이에 본 연구는 산업단지의 생산 및 폐수처리과정을 세분화시킨 Network DEA 방식을 활용하여 전국 51개 일반산업단지의 환경효율성을 추정하였다. 과거 전통적인 DEA를 통한 환경효율성 추정은 생산과정상의 상호작용을 고려하지 못한 한계가 있으며, 특히 폐수종말처리장과 같이 산업단지의 오염저감활동이 환경당국과 연계되어 이루어지는 경우 환경효율성이 왜곡되어 추정되는 문제점이 존재할 수 있다. 반면 본 연구에서 적용한 Network DEA는 각 생산단계상의 network

관계를 미리 정의하고 중간재의 흐름을 모두 고려할 수 있는 분석방법으로 생산 및 저감활동을 연계한 환경효율성 추정에 더욱 적합하다.

2011년, 2012년 전국 51개 일반산업단지를 대상으로 환경효율성을 추정된 결과 Network DEA는 산업단지별 효율성 비교의 변별력 향상과 실제 비효율이 발생하는 생산단계를 구체적으로 정의한다는 점에서 더 효과적인 추정방식임을 확인할 수 있었다. 또한 전통적인 DEA를 통한 추정방식에서 발생할 수 있는 효율성의 과대평가문제가 크게 감소하였으며 특히 관련변수와의 상관관계분석에서 주요 관련변수가 각 생산단계와 가지는 통계적 유의성을 파악하는 데 더욱 효과적이었다.

본 연구는 산업단지의 생산 및 저감활동과 관련된 변수를 활용한 추가적인 통계분석을 시도하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다. 첫째, 일반적으로 생산규모가 큰 대규모 산업단지에서 환경적 비효율이 낮게 계측되었으며 이러한 경향은 수출생산비중이 큰 경우 더욱 뚜렷하게 표출되었다. 둘째, 폐수종말처리시설의 시설용량은 일반적으로 산업단지의 생산규모와 비례하지만 실제 폐수처리효율과는 통계적 유의성이 확인되지 않았다. 오히려 폐수유입률이 높은 처리시설에서 높은 저감효율이 나타났으며 이는 적정용량에 대한 시설투자방향의 재검토를 요구한다.

한편 본 연구는 생산 및 저감활동에 관한 Network DEA를 한국 산업단지에 적용했다는 점에서 차별화된 연구이지만 통계 데이터의 미비로 인한 시계열 및 산업단지 표본의 확장이 불가능했다는 점에서 한계를 가지며 향후 이를 보완하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 강상목, 윤영득, 이명현. 2005. "산업의 생산성 성장, 기술효율, 환경성과". 「경제학연구」 53(2): 5-39.
- 김광욱, 강상목. 2007. "환경효율과 국제무역: 환경쿠즈네츠 곡선과 오염피난처 가설 연구". 「자원·환경경제연구」 16(3): 511-544.
- 김광욱, 황석준, 2014, "수출이 환경성과에 미치는 영향에 관한 연구: 한국의 주요 산업단지를 중심으로". 「경제연구」 32(4): 1-27.
- 이상철. 2010. "상업화된 지방행정조직의 패러독스에 관한 연구," 「한국행정논집」, 22, 1109-1131.
- Benjamin, H. 2014. "Separating environmental efficiency into production and abatement efficiency: a nonparametric model with application to US power plants". *Journal of Productivity Analysis*, 41: 457-473.
- Bian, Y., Liang, N., and Xu, H. 2015. "Efficiency evaluation of Chinese regional industrial systems with undesirable factors using a two-stage slacks-based measure approach". *Journal of Cleaner Production*, 87: 349-356.
- Bian, Y., Yan, S., and Xu, H. 2014. "Efficiency evaluation for regional urban water use and wastewater decontamination systems in China: A DEA approach". *Resources, Conservation and Recycling*, 83: 15-23.
- Chen, P. 2012. "Measurement of technical efficiency in farrow-to-finish swine production using multi-activity network data envelopment analysis: evidence from Taiwan". *Journal of Productivity Analysis*, 38: 319-331.
- Choi, Y., Zhang, N., and Zhou, P. 2012. "Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: a slack-based efficiency measure". *Applied Energy*, 98: 198-208.
- Coli, M., Nissi, E., and Rapposelli, A. 2011. "Monitoring environmental efficiency: an application to Italian provinces". *Environmental Modelling & Software*, 26: 38-43.
- Cook, W. D., Liang, L., and Zhu, J. "Measuring performance of two-stage network structures by DEA: a review and future perspective". *Omega*, 38: 423-430.
- Doganay, S. M., Sayek, S., and Taskin, F. 2014. "Is environmental efficiency trade inducing

- or trade hindering?". *Energy Economics*, 44: 340–349.
- Färe, R., Grosskopf, S. 2000. "Network DEA". *Socio-Economic Planning Sciences*, 34:35–49.
- Färe, R., Grosskopf, S., and Lovell, C.A.K. 1989. "Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach". *The Review of Economics and Statistics*, 71(1): 90–98.
- Färe, R., Grosskopf, S., and Pasurka, C. 2011. *Joint production of good and bad outputs with a network application*. In Shogren, J.(Ed.), *Encyclopedia of Energy, Natural Resources and Environmental Economics*, Elsevier.
- Hu, J. L., Wang, S.C. 2006. "Total-factor energy efficiency of regions in China". *Energy Policy*, 34: 3206–3217.
- Linag, L., Yang, F., Cook, W. D., and Zhu, J. 2006. "DEA models for supply chain efficiency evaluation". *Annals of Operations Research*, 145: 35–49.
- Picazo-Tadeo, A. J., Beltran-Esteve, M., and Gomez-Limon, J. A. 2012. "Assessing eco-efficiency with directional distance functions". *European Journal of Operational Research*, 220: 798–809.
- Seiford, L.M., and Zhu, J., 2002, "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation," *European Journal of Operational Research*, 142: 16–20.
- Song, M., Wang, S., and Cen, L. 2014. "Comprehensive efficiency evaluation of coal enterprises from production and pollution treatment process". *Journal of Cleaner Production*, forthcoming, 1–6.
- Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z., and Ge, J. 2008. "Eco-efficiency analysis of industrial system in China: a data envelopment analysis approach". *Ecological Economics*, 68: 306–316.
- Zhou, P., Ang, B. W., and Poh, K. L. 2006. "Slack-based efficiency measures for modeling environmental performance". *Ecological Economics*, 60: 111–118.
- ors using a two-stage slacks-based measure approach". *Journal of Cleaner Production*, 87: 349–356.