

여수산업단지의 생태효율성지표 개발에 관한 연구

김정인*, 윤창한[†], 유형선[‡]

중앙대학교 산업경제학과
456-756 경기도 안성시 대덕면 내리 산 40-1

[†](사)광양만권 환경연구소
555-280 전라남도 여주시 화치동 10번지

[‡]한국 산업단지공단 전남EIP사업단
555-805 전라남도 여주시 중흥동 138-12

(2010년 4월 14일 접수; 2010년 6월 19일 1차 수정본 접수; 2010년 8월 9일 2차 수정본 접수; 2010년 9월 17일 3차 수정본 접수; 2010년 9월 20일 채택)

Development of Eco-Efficiency Indicators for Yeosu Industrial Park

Jung-In Kim*, Chang-Han Yun[†], Hyung-Sun Yoon[‡]

ChungAng University, Department of Industrial Economics
San 40-1 Nae-ri, Daeduk-myun, Ansong city, Kyunggi-do, Korea 456-756

[†]Gwangyang Bay Zone Environmental Institute(Incorporated Association)
10 Whachi-dong, Yeosu City, Jeollanam-do, Korea 555-280

[‡]Jeonnam Eco-Industrial Park Development Division, Korea Industrial Complex Corp.
138-12 Joonghung-dong, Yeosu City, Jeollanam-do, Korea 555-805

(Received for review April 14, 2010; 1st Revision received June 19, 2010; 2nd Revision received August 9, 2010; 3rd Revision received September 17, 2010; Accepted September 20, 2010)

요 약

본 논문은 생태효율성 지표 작성을 통하여 여수산업단지(여수산단) 지표를 개발하였다. 여수산단 매출의 경우 원화의 가치와 원부원료의 수출입 원가 변동 폭이 큰 관계로 제품의 가치(기능)에서 제외하고 대신 총 생산액, 에틸렌 생산량, 경질유 생산량으로 제품의 기능 부분을 구성하고, 환경부하로서는 현재 공식적으로 입수 가능한 자료인 전력 소모량, 용수 사용량 및 폐수 배출량을 사용하였다. 2004년을 기준으로 할 때 2006년의 환경경제효율 지수를 계산한 결과 0.954로 지수가 나빠졌으나, 여수산단의 생태산업단지사업이 성공할 경우 2015년에는 지수가 1.153으로 약 15% 정도 개선될 것으로 예측되었다.

주제어 : 생태효율성 지표, 여수산업단지, 환경부하, 생태산업단지, 산업생태, 전과정평가, 녹색 생산성

Abstract : The industrial ecology indicators(IEI) for Yeosu Industrial Park were developed using eco-efficiency indicator(EEI). The key factors for the creation of IEI were two parts. One part is the value of the products which is selected as the total production value, the amount of ethylene production, the amount of light oil production instead of the total sales volume for Yeosu Industrial Park, since the currency exchange and the price of raw materials varied every year. The other part is the environmental burden. The electric consumption, the industrial water consumption, and the amount of discharged waste water are all officially opened to the public, were used in the calculation. Based on the value for the year of 2004, the IEI value for 2006 became worse to 0.954, but, was expected to be 1.153, a 15% improvement, for 2015 if the current EIP project is successfully performed.

Keywords : Eco-efficiency indicator, Yeosu Industrial Park, Industrial ecology indicator, Eco-industrial park

* To whom correspondence should be addressed
E-mail : jeongin@cau.ac.kr

1. 서 론

전 세계는 지금 자국의 사회를 녹색사회로 만들기 위하여 다양한 법을 만들어 가고 있다. 미국은 2009년에 하원에서 “미국 청정에너지와 보호에 관한 법률”을 통과시켰다. 일본은 2050년까지 저탄소 사회로 가기 위한 온난화 종합대책을 발표하였다. 영국은 에너지·기후변화부의 신설과 함께 「기후변화법」을 제정하였으며 기후변화세도 걷고 있다. 독일은 「온실가스 배출권 거래법」, 「신재생에너지법」, 「신재생 열 법」, 「바이오연료 할당법」 등 기후변화와 관련된 포괄적 법률을 가지고 있다. 호주도 「탄소오염 감축 계획법안」을 2009년 3월에 발표하여 의회에 계류 중이다. 중국은 향후 10년간 에너지 절약과 효율 개선을 위해서 4천억 달러를 투자하겠다는 계획이다. 한국도 2010년 4월에 ‘저탄소 녹색성장 기본법’을 만들었다[1].

이러한 법의 제정 목적은 사회를 녹색사회로 만들어 가면서 경제성장의 패러다임을 기존의 생산 중심에서 환경 보존이나 개발의 극소화를 도모하려는 것이다. 즉, 환경 보호와 경제성장이라는 두 개의 목적을 달성하려는 것이다. 그러나 문제는 이러한 목적이 달성되었거나 얼마나 개선되고 있는지를 알아보는 방법이라고 할 수 있다. 과거의 생산 중심 사회에서는 국민 총생산이나 국내 총생산이라는 지표로 판단을 했지만 이제는 환경까지도 고려해야 하므로 새로운 지표의 개발이 필요하다고 지적되어 왔다. 물론 Green GDP, 녹색생산성, 한계 생산비용, 전과정 분석과 같은 지표도 개발되고 있으나 Green GDP, 녹색 생산성은 대부분 거시적인 자료로서 지표를 작성하는 데에 많은 노력과 시간, 그리고 자료가 필요하다. 한계 생산비용은 기업 내부의 자료가 필요하여 실제 작성하는 데 어려움이 있다. 전과정 분석은 어떤 범주와 범위를 가지고 접근하느냐에 따라서 결과가 다르게 나올 수 있으므로 최초의 디자인이 매우 중요하다.

그러나 최근에 기업을 중심으로 적용하여 온 제품에 대한 생태효율성 지표(eco-efficiency indicator: EEI)는 기업의 제품 성능 향상 및 환경부하 저감을 위한 의사 결정에 도움을 주고, 환경과 경제의 기능을 종합적으로 평가할 수 있어 많은 기업들이 기업의 경영 지표로 사용하고 있다. 또한, 각 제품에 있어서 환경영향과 경제적 성과를 상대적인 척도로 나타낸 쉬운 정보를 소비자에게 제공함으로써 소비자가 각자의 효용에 따라 최적의 구매의사 결정을 할 수 있도록 환경정보를 지원할 수 있다는 장점이 있다. 생태효율성은 세계지속가능발전기업 협의회(World Business Council for Sustainable Development: WBCSD)에 의해 제안되었으며, 1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 지구정상회의에서 공식적으로 채택된 용어이다. 이것은 ecology와 economic에서의 “eco-”와 효율을 나타내는 “efficiency”의 합성어로, 국내에서는 환경효율, 환경적 효율성, 생태적 효율성, 에코효율, 환경경제효율 및 생태경제 효율성 등 다양한 용어로 번역되어 사용되고 있다.

즉, 소비자는 환경을 배려하면서 제품의 기능이나 품질이 좋고 가격이 싼 것을 추구하고 있다. 이러한 것을 반영하는 지표가 생태효율성 지표가 될 수 있다. 이러한 지표의 개발은 기업

에게는 환경적 효율성에 대한 추이 분석을 가능하도록 하며, 주주들이나 이해관계자들에게는 환경보고서 또는 지속가능보고서를 통하여 기업의 환경성을 홍보할 수도 있다. 소비자의 경우에는 생태효율을 분석함으로써 소비의 행동패턴을 바꿀 수 있도록 하여 지속가능한 소비자가 되게 할 수도 있다. 그러나 소비자에 대한 생태효율성 지표는 아직 개발단계에 머물고 있으며, 주로 기업의 제품을 대상으로 한 생태효율성 지표의 개발이 활발하다[2].

한편, 소비자들에게는 환경마크나 환경성적 표시제도, 에너지효율 등급 등과 같은 마크 제도를 통하여 환경성과 경제성을 알려주고 있다. 기업경영자 및 관리자도 생태효율성 정보를 기업경영의 전략적인 중요한 수단으로 활용함으로써 경제성과 환경성을 동시에 충족시키는 제품의 생산 및 개발방법을 찾아내도록 지원할 수 있으며, 이를 통하여 환경경영의 효과를 효율적으로 측정할 수 있다. 이외에도 해외 선진국으로부터 강화되는 환경규제 및 기후변화협약과 같은 국제환경협약에 적극적으로 대응할 수 있도록 기업들의 제품개발과 생산과정에서 환경영향 감소와 자원생산성 향상에 관한 전략수립에 도움을 줄 수 있는 도구로도 활용이 가능하다.

최근에 한국에서도 생태산업단지나 환경경영 기업체를 대상으로 생태효율성 지표의 중요성이 대두되고 있으며 일부 국내 대기업들은 자체적으로 생태효율성 지표를 만들어 환경보고서에 공표하기도 한다. 본 논문의 목적은 국내에서는 아직 초기단계에 있는 다양한 환경과 경제의 지표를 소개하고, 특히 생태효율성 지표의 정의와 추정 방법론을 심도 있게 고찰하고자 한다. 동시에 생태효율성 지표의 작성을 위하여 여수산업단지를 대상으로 생태효율성 지표를 2006년부터 2015년까지 작성함으로써 실제 2006년도의 생태효율성이 2015년도에는 어떻게 변화하는지를 예측해보자 하는데 목적이 있다.

2. 여수산업단지의 생태효율성 지표 개발

위에서 언급한 한계감축비용(또는 한계저감비용; marginal abatement cost: MAC)은 온실가스 한 단위 감축에 추가적으로 들어가는 비용으로 정의할 수 있다. 예컨대 이산화탄소 1톤을 감축하는데 필요한 온실가스의 한계감축비용은 설비투자비용과 연간 유지관리비용에서 선택된 기술에 의한 탄소 톤 당 에너지비용 경감분을 삭제하여 계산할 수 있다. 아래의 식에서

$$A = C - EP \quad (1)$$

여기서, A: Additional cost required to reduce 1 ton of CO₂
 C: Additional investment cost and annual maintenance cost required to reduce a ton of CO₂
 EP: Reduced energy cost per ton of carbon by properly selecting technology

한계감축비용은 단위 온실가스 감축에 투입되는 추가 비용이 얼마인가를 나타내는 절대적인 판단기준이 된다. 한계감축비용이 마이너스 값을 갖게 되면 에너지절약이나 환경 개선에

의한 비용 감소분이 기술 채택에 따른 초기투자비나 운영비 등을 충분히 보상해 주는 'NO regret' 방안으로 분류되어 환경에 대한 개선과 동시에 경제성장에 긍정적인 효과가 있다고 해석할 수 있다.

전과정평가(life cycle assessment: LCA)란 제품시스템의 전 과정에 걸친 투입물과 산출물에 의해 발생할 수 있는 잠재적인 환경영향을 정성적, 정량적으로 평가하는 기법이다. 즉, 제품의 전 과정(원료채취, 제조, 수송, 사용, 재활용, 폐기) 동안에 제품에서 야기된 환경부하를 계산하고, 환경에 미치는 영향을 평가하는 도구이다. 전과정평가는 목적 및 범위 정의, 목록분석(life cycle inventory, LCI), 전과정 영향평가, 전과정 결과해석(life cycle interpretation) 등 네 단계로 구분되어 실행된다. 전과정평가 방법론은 국제표준화기구(ISO)에 의해 ISO 14040 시리즈로 규격화되어 연구방법과 결과에 대한 객관성을 확보하고 있다.

녹색생산성은 생산성 향상과 환경보호를 종합한 개념으로 생산성을 환경요소로 나누어 도출한다(APO[3]). 산업연관표 상의 경제와 환경을 동시에 구성하는 하이브리드 산업연관표를 이용하면 녹색 총요소생산성(Green TFP)을 도출할 수 있다.

$$GP = \frac{SP/LCC}{EI} = \frac{\text{Productivity}}{\text{Eco-efficiency indicator}} \quad (2)$$

여기서, GP : Green productivity
 SP : Selling price
 LCC : Life cycle cost
 EI : Eco-efficiency indicator

녹색생산성은 생산성 향상과 환경보호를 종합한 개념이다. 총요소생산성(total factor productivity: TFP)은 'Solow의 잔차모형'에서 도출한 계산식으로 측정된 값을 지수화하여 산출하였다. 이산화탄소 배출량을 기초로 측정된 환경기여도를 성장회계의 한 투입요소로 고려해 총생산에서 환경이 차지하는 비중의 계량화가 녹색성장모형이다[4].

녹색성장모형은 일반 성장모형에 CO₂ 배출량으로 측정되는 환경적 요소인 X가 추가 된다.

$$Y = F(K, H, E, X) \quad (3)$$

where K = capital, E = effective labor, H = manpower를 의미하는데 CO₂ 배출량으로 측정되는 유효 환경 요소투입 X는 물리적 배출량인 Z와 CO₂ 배출 저감기술변화인 B의 곱인 X = BZ으로 표현 된다.

$$\dot{Y} = \epsilon_K \dot{K} + \epsilon_H \dot{H} + \epsilon_A \dot{A} + \epsilon_L \dot{L} + \epsilon_Z \dot{B} + \epsilon_Z \dot{Z} \quad (4)$$

$$TFP = \epsilon_A \dot{A} + \epsilon_Z \dot{B} = \dot{Y} - (\epsilon_K \dot{K} + \epsilon_H \dot{H} + \epsilon_L \dot{L} + \epsilon_Z \dot{Z}) \quad (5)$$

$$TFP = \dot{y} - (\epsilon_k \dot{k} + \epsilon_z \dot{z}) \quad (6)$$

Table 1. Evaluation Factors in EE [5]

	Product index (y)	Input index (x)
Elements type	<ul style="list-style-type: none"> • Selling price • Output • Productivity • yearly output 	<ul style="list-style-type: none"> • Unit element (Energy, resources, water, land, waste, etc.) • General elements (Comprehensive Environmental Impact)
Evaluation categories	Production process (gate to gate) Parent process (cradle to gate) Life cycle (cradle to grave)	

여기서, TFP: Increasing rate of total productivity factor
 y: Real GDP per a worker
 z: Amount of CO₂ emission per a worker
 k: Capital stock per a worker
 ek: Distribution ratio of capital gain
 ez: Distribution ratio of energy gain

생태효율성은 ecology와 economy에서 eco와 efficiency를 합성한 용어(eco-efficiency: EE)로 WBCSD(2000)에 의해 제안되어 1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 지구정상회의에서 공식적으로 채택되었다. 자원효율성과 자원집약도가 연계된 생태효율성은 자원의 효율적 사용을 통해 환경에 미치는 영향을 최소화하면서 경제개발도 동시에 이루는 녹색성장 평가 지표로 활용될 수 있다. 생태효율성은 산업부문의 가치(경제적 생산성)를 환경영향(환경부하)으로 나눈 값으로 정의한다.

$$EE_r = \frac{y_r}{x_r} \quad (7)$$

여기서, EE : Eco-efficiency
 x : Input variables (Environmental Impacts)
 y : Output variables (Economic value)

만약 제품을 만드는 과정에서 다투입·다산출의 경우에 생태효율성을 계측하려면 다수의 투입요소에 가중치를 적용한 총괄투입(aggregate input)과 다수의 산출물에 가중치를 적용한 총괄산출(aggregate output)을 계산하는 과정이 필요하다. 생태효율성 분석을 할 때 환경에 긍정적인 산출물과 부정적인 산출물을 동시에 산출하는 경우에는 다수의 산출물과 투입요소를 사용한다. 이러한 경우에 생산조직의 생태효율성을 평가하기 위한 모형으로 자료포락분석(data envelopment analysis, DEA)이 널리 활용되고 있다.

생태효율성 지표의 장단점은 세부적으로 기업단위, 제품단위로 구분되어 적용되는 지표에 따라 다르게 나타난다. 세계지속가능협의회(WBCSD)가 주장하였듯이 기업들의 경우 기업단위의 친환경성 이미지를 제고하고 소비자가 쉽게 이해할 수 있도록 정의하여 전 세계적으로 공통적으로 사용하도록 노력하고 있다[6]. 단점으로는 제품의 환경친화성 분석이 제도화되어 있지

않아 분석에 어려움이 있고, 지표가 기업의 지속가능성 평가에서 전체적으로 포괄하지 못하고 있는 부분도 있어서 공정성의 문제가 지적되고 있다[5].

EU에서는 좀 더 개선된 프로젝트(Advanced Project)를 2004 ~ 2005년 동안 추진하여 65개 기업을 대상으로 기업단위의 EEI (EU에서는 Sustainable value(Eco-efficiency)로 표현)를 계산·비교하는 방법론을 개발하였으며, 이를 기업의 평가기관에서 활용하는 방안을 마련 중이다. 국내의 경우, 삼성전자, LG전자, 현대자동차 등에서 이러한 지표를 기업 경영목표의 전략수단으로 사용하는 방안을 모색하고 있다.

2.1. 선진국의 생태효율성지표 연구 사례

Ottar et al.[7]은 확장된 공급사슬(extended supply chains: ESCs)에서 생태효율성이 어떻게 이해되고 측정될 수 있는지에 대한 방법론을 제시하였다. ESCs는 상품의 수명주기(life cycle)의 전과정을 포함하며 생태효율성은 한 ESCs의 다른 ESCs에 대한 상대적인 환경·가치성과(enviromental and value performance)로서 측정된다. Ottar et al.[7]은 이러한 연구를 수행하기 위해 노르웨이의 가구 상품을 대상으로 사례 연구를 수행하였다. 먼저 9개의 서로 다른 환경성과지표(enviromental performance indicators)가 정해졌는데, 이러한 지표들은 세계 지속가능협의회(World Business Council for Sustainable Development)의 제안서와 상품의 생애주기에 중요한 영향을 줄 것으로 생각되는 추가적인 지표들에 근거하고 있다. 다음으로 가치성과(value performance)는 역(逆) 생애주기비용(inverse life cycle costs)으로 측정된다. Ottar et al.[7]은 6개의 서로 다른 의자 모델의 생태효율성을 계산하고 이들의 상대적 가치를 X-Y 다이어그램을 통해 나타내어 상품의 상대적 성과에 대한 정보를 파악할 수 있다고 주장하였다.

Ottar et al.[7]은 또한 같은 방법을 이용하여 확장된 공급 사슬의 가능한 변화가 일어났을 때 생태효율성이 어떻게 변화하는가를 분석하였다. 분석 결과 상품수명 종료처리(end-of-life treatment)의 작은 실제 변화에도 상품의 생태효율성은 크게 변화하는 것으로 나타났다. Ottar et al.[7]은 민감도분석(sensitivity analysis)에 의해 새롭게 제안된 방법론은 기존 방법론보다 우월하다는 것을 보였는데 이는 주로 두 가지 측면에서 나타난다. 하나는 새로운 방법론은 시장에서 같은 기능을 가진 모든 제품들을 검토할 때 선택된 제품의 품질 수준을 파악하는 것을 가능하게 한다. 다른 하나는 새로운 제품이 추가될 때조차도 새롭게 제안된 방법론 하에서 계산된 품질 가치는 변하지 않는다는 것이다.

Taeko[4]는 생태효율성(Factor X) 지표를 제안하고 2001년 이후 기업들에 이러한 지표들을 실제로 적용하였다. 이러한 지표들을 구체적으로 이용하여 생태효율성과 Factor X에 관한 많은 사례 연구를 수행하였다. 그러나 잊지 말아야 할 것으로서 '생태효율성(Factor X)의 향상은 기능의 향상에 기인할 수 있으며, 환경적 충격(enviromental impacts)이 증가할 가능성은 여전히 존재한다는 것이다. Taeko[4]는 기존에 제안된 생태효율성(Factor X) 지표와 사례 연구에 대해 간단히 설명하고 생태

Table 2. Comparison of Various Indicator Methodologies for Creation of EE

	Marginal abatement costs	Cost of the entire process	Green Productivity	Eco-Efficiency
Data accessibility	■	■	■	■
Ease of creation	■	■	■	■
Environment-economic representation	■	□	□	□
Readability stakeholders	□	■	□	■

■ Very high, □ High, ■ Low

※ Authors take advantages and disadvantages of each methodology based on the criteria.

효율성과 생태디자인(eco-design)에 대해 논의하였다. 계량적 평가방법을 이용하여 기능과 환경적 충격 간의 관계를 분석하고 계량적으로 그러한 주장을 검증하였다. Taeko[4]의 연구의 주된 분석결과를 보면 대부분의 상품에서 제품 기능이 향상되었고, 이와 더불어 환경 충격이 감소하였음을 발견하였다.

Park et al.[8]은 생태효율성의 계량화 방법을 제안하였다. 구체적으로 상품의 품질과 상품수명기간, 그리고 이들의 곱과 전과정평가인 LCA에 근거한 전체적인 환경영향의 비율로부터 도출된다. 상품의 품질은 상품의 가치로서 이용되는데 이것은 다음의 3가지 단계에 의해 계량화된다. 1단계는 가치함수(value function)에 근거한 정규화(normalization), 2단계는 특성에 대한 주관적 가중치(subjective weighting factors) 결정, 3단계는 선택된 상품의 질 계산이다. Park et al.[8]은 디지털 카메라를 이용하여 실제 상품에 대해 제안한 방법론의 적용 가능성을 평가하였다. 결과를 보면 충전배터리가 장착된 제품의 생태효율성 가치는 알칼리전지를 장착한 제품보다 더 높은 것으로 나타났는데, 이는 더 높은 제품의 품질과 더 낮은 환경 충격에 기인하는 것으로 판단되었다.

Kim[9]은 제품단위의 지표에는 생태효율성의 국내·외 동향 조사 및 기업에의 보급·확산 촉진을 위한 연구, 정보교환 및 정보제공 등의 목적으로 설립된 일본 생태효율포럼(Japan Eco-Efficiency Forum)을 운영하고 있는 JEMAL(일본산업환경관리협회, Japan Environmental Management Association for Industry)과 BASF 및 WBCSD 지표에 대해 장단점을 상호 비교하였다.

JEMAL은 기업 내부용으로 사용하여 경쟁 제품과의 차별 전략 수립에 기여하고 있으며, 다양한 생산제품의 특성을 반영하여 계산이 가능하고 복잡한 전과정 분석을 사용하지 않아도 계산이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 기본이 되는 제품을 선정하는 객관성이 결여되고 타 경쟁제품과 특성 비교에 어려움이 있다는 단점이 있다.

BASF는 제 3자의 검증을 통한 객관적인 결과의 제시가 가능한 지표를 만들어 기술에 대한 비교가 가능한 지표로 인정을 받고 있다. 하지만 이 지표는 개발이 아직 확산이 되지 않은 상태이며, 제품의 기능에 대한 내용은 포함되어 있지 않은 단점이 있다.

Table 3. Examples of Environmental Indicators [10]

Notebook		Refrigerator		Washing Machine	
Electricity consumption	7.99	Electricity consumption	8.69	Electricity consumption	8.41
Weight	7.97	Weight	7.72	Weight	8.21
Toxic chemicals	7.43	Toxic chemicals	7.69	Toxic chemicals	7.40
Life Cycle CO ₂	-	Life Cycle CO ₂	-	Life Cycle CO ₂	-

Table 4. Examples of Key Functional Indicators[10]

Notebook		Refrigerator		Washing Machine	
RAM capacity	8.68	Noise	8.74	Noise	8.59
HDD capacity	8.41	Cooling speed	7.96	Washing capacity	8.35
Battery duration time	8.37	Freezing speed	7.87	Time for washing	7.78

제품 수준에서 국내 기업을 대상으로 생태효율성을 시험적으로 측정하기 위해서는 원래 소비자 설문조사를 기초로 하여 효율 계산에 적용할 기능 및 환경성 요인과 그 비중을 선정하여야 한다. Kim et. al.[10]은 유럽을 중심으로 제품 환경규제(EuP, RoHS, WEEE 등)의 집중적인 규제대상이 되고 있고 우리나라 수출주력산업인 전기·전자업종의 대표적인 제품들에 대해서 이러한 지표를 시험 적용함으로써 전기·전자산업의 생태효율성을 측정하였으며, 국내의 대표적인 전기·전자업종 두 개 기업, 세 가지 가전제품(노트북, 세탁기, 냉장고)을 선정하여 지표를 작성하였다.(Table 2 참조)

Kim et. al.[10]은 생태효율성을 측정하기 위한 환경성으로는 여러 가지가 있으나 생태효율성 표시제도의 목적에 비추어 “전자제품의 기능과 환경성에 대한 소비자 수요 조사” 결과를 바탕으로 소비자가 중요하다고 생각하는 요인 3개를 Table 3과 같이 선택하였다. 그는 환경성 요인 선정에 있어서는 다음과 같은 복합적인 기준을 적용하였는데 소비자 설문조사 결과 가장 중요도가 높은 항목, 자원소비량, 에너지소비량, 유해물질사용을 각각 대표할 수 있는 항목을 사용하였다.

환경성과 기능성의 항목을 결정한 후, 생태효율성 계산은 WBCSD에서 제시한 전형적인 산식인 Eq 8에 따라서 산출하였다[2].

$$EEI = \frac{\text{Functioning of goods}}{\text{Environmental impact of goods}} \quad (8)$$

분자와 분모의 항목을 결정함에 있어서의 유의점은 다음과 같다. 분자에 들어갈 제품기능과 분모에 들어갈 환경성은 소비자 설문조사 또는 전문가의 판단에 근거할 수 있지만 중요한 요인 3가지를 통상 선정한다. 분자에 제품의 부가가치 또는 가격을 적용하지 않은 것이 바람직하다. 가격 또는 부가가치는

Table 5. Examples of weight factors [10]

Goods	Notebook	Refrigerator	Washing Machine
Functioning	8.75	8.65	8.80
Environmental	7.18	7.65	7.72
Design	8.10	8.15	7.85
Brand Image	8.04	7.96	7.80
Price	8.89	8.92	8.93

종합적인 제품의 가치를 표시한다는 장점이 있는 반면에 화폐단위로 표시되므로 기업이 통제할 수 없는 가격변동이 생태효율 값에 영향을 미치므로 적절하지 않을 수 있기 때문이다.

실제로 BASF에서는 기술이나 제품의 원가를 고려한 생태효율성을 적용하여 내부적으로 기술개발이나 제품설계에 활용할 수 있을 것으로 판단하고 있지만 기업의 내부의사결정 목적을 위한 정보를 제공하는 측면을 지표를 통해서 보고자 하는데 목적이 있으므로 제외하였다[6].

계산식의 분자에 포함될 3가지 기능과 분모에 들어갈 3가지 환경성은 각 요인의 vector 값의 합계로 구하되 각 요인의 중요도를 가중치로 계산하며 분자와 분모의 각 복수의 요인들을 합하여 하나의 수치로 계산해야 하는데 각 요인의 단순 합계는 의미가 없다. 따라서 복수의 요인 값을 더하여 하나의 의미 있는 합계를 구하기 위해서 각 요인 값의 제곱을 합한 값의 제곱근을 구하는 것이 일반적이다. 이 때 중요도를 생태효율 계산에 반영하기 위하여 그것을 각 요인 값의 제곱에 곱함으로써 가중평균에 가까운 값이 되게 하고 각 요인(기능 및 환경성)의 중요도에 기능과 환경성에 대한 중요도를 동시에 고려하고 있다. 즉 회사의 경우 에너지 가격, 기능(성능), 환경성에 대해서 각각 중요하게 생각하는 정도를 조사한 결과를 가중치 계산에 반영해야 한다. Table 5는 앞서 언급한 사례에 적용되었던 중요도의 한 예이다.

따라서 구매의사결정 전반적인 요인 중 각 기능과 환경성의 세부 요인에 대해서 소비자가 생각하는 중요도를 곱함으로써 최종적인 중요도(가중치)가 계산될 수 있으며 일단 각 제품에 대한 생태효율이 계산되고 나면 Eq 9와 같이 기준시점과 비교시점의 생태효율의 비율로써 factor를 계산한다.

$$\text{Factor} = \frac{EEI \text{ at the point of comparison}}{EEI \text{ at the point of basis}} \quad (9)$$

생태효율을 구하기 위해 비교제품과 기준제품에 대해서 기능비율과 환경 부하비율을 계산한 후 다음 Eq 10과 같이 factor를 산출한다.

$$\text{Factor} = \frac{\text{Functioning rate of goods}}{\text{Environmental impact rate}} \quad (10)$$

제품기능비율과 환경영향비율을 산출함에 있어 기능과 환경

Table 6. Example of raw data to calculate environmental effects and indicators for Refrigerator

Items	Goods	Refrigerator at 10 years ago	Refrigerator at present
Capacity (L)		150	300
Electricity Consumption (kWh/yr)		1000	200

※ 10 years ago, the environmental efficiency of the refrigerator: the capacity (numerator) / power consumption (the denominator) = (150L) / (1000 kWh / year) = eco-efficiency 0.15
 ※ Current environmental efficiency of the refrigerator: the capacity (numerator) / power consumption (the denominator) = (300L) / (200 kWh / year) = eco-efficiency 1.15
 ※ Factor Calculation: [Assessment Product (current) of the eco-efficiency] / [based products (10 years), the eco-efficiency] = 1.5/0.15 = 10
 ⇒ factor-10 became 10 times increase in efficiency

Table 7. Example of value of goods (numerator)

Items	Goods	Examples of Numerator
Physical properties	Share	Number of sales, Production rate (Number, kg, ton etc)
Economic value	Share	Sales volume, Economic benefit, Income
Function and performance	Refrigerator	Capacity, Cooling speed, Freezing speed
	Computer	CPU Speed, Capacity of hard drive
	Scanner	Resolution, Speed, Communication
	Washing machine	Capacity, Life time

Table 8. Example to calculate value of goods for scanner ([5])

Functions	Items	Unit	New		Comparison	
			Old (a) fi-4110C	(b) fi-4120 C	b/a	EEI
Resolution	Basic resolution	dpi	300	600	2.00	3.808
	Color analysis	ipm	5	25	5.00	3.000
Speed	Feeding rate (max)	Mn	210×297	210×297	1.00	1.240
	Thickness of feed	Kg/bundle	45~90	45~110	1.44	1.240
Communication	Display speed compression (standard)	No. of programs	4	6	1.52	1.500

영향을 복수의 항목으로 측정하기 때문에 아래의 Eq 11와 Eq 13을 이용하여 벡터(vector)값을 산출하되 앞에서 설명한 대로 가중치를 적용한다.

$$\text{Functioning vector of goods} = (\sum(\text{Functioning rate})^2 \times \text{Weight factor})^{0.5} \quad (11)$$

Table 9. Example of environmental burden (denominator)

Items		Examples	Unit
Input	Energy	Energy Consumption (Electricity, Fossil fuel, etc)	W, kg
	Resources	Materials(Raw, Solvent, Goods under processing, etc), Water, etc.	kg, m ³ , CO
	Chemicals	Lead, Toluene, Mercury, etc.	kg, g
Output	Discharge	Ozone depletion materials	CFC Eq. kg
		Greenhouse Gases	CO ₂ Eq. kg
		Acidification Gases	SO ₂ Eq. kg
		Total weight of waste	kg

Table 10. Example to calculate value of goods for cellular phone[6]

Items	Natural Resources Consumption(MRC)	Energy Consumption	Toxic Chemicals
1991	1	1	1
2002	0.42	0.24	0.82
Improvement	MRC saving: 58% Non-recyclable : 60% down	66% saving during talking 96% saving at stand-by	18% saving of Pb

$$\text{Environmental impact vector} = (\sum(\text{Environmental impact rate})^2 \times \text{Weight factor})^{0.5} \quad (12)$$

2.2 해외 환경경제효율 계산 사례 (냉장고, 프린터)

2005년 일본 산업환경관리협회는 제품의 생태효율 지표를 계산하기 위한 다양한 사례를 보고서의 형태로 만들어 보급하고 있는데 많은 회사도 이를 잘 이용하고 있다. 냉장고에 대한 생태효율 측정사례 Table 6을 보면 10년 전 냉장고과 현재의 냉장고를 용량과 소비전력에서 생태효율성을 비교하여 제시하는데 목적이 있다.

위의 방법과 마찬가지로 상태효율 및 factor를 만드는 방법은 대동소이 한데 환경 효율의 분자인 제품의 가치는 Table 7에서 보는 바와 같이 물리량, 경제적 가치, 기능 및 성능으로 구성하고 있다. 다음으로는 Table 7의 제품 중 스캐너를 대상으로 Table 8에서 제품의 가치(분자: 기능) 산출을 위한 데이터를 구성하여 자료를 모은다. 생태효율의 분모는 투입 산출 등으로 구분하여 구성하고 있는데 석유화학의 경우에도 거의 유사한 구조를 가질 것이다. 즉, Table 9에서 보듯이 에너지 소비, 자원 소비, 화학 물질소비량, 배출량 중에서 오존층 파괴 물 배출량, 온난화 가스 배출량, 산산화 계수, 총 폐기 물량 등이 투입물이다.

휴대전화의 경우는 Table 10에서 보는 바와 같이 자원 유효 활용, 에너지 유효활용, 환경 유해물질 함유 등으로 구분하여 작성

Table 11. Value of goods and environmental burden of Yeosu industrial park at 2004 and 2006 [2]

Items			2004	2006	Ratio	Rate
Value of Goods	Function	Production volume (billion Won/yr)	32,016	40,737	1.27	1.176
		Ethylene production (1000 MT/yr)	2,945	3,432	1.17	
		Light oil production (1000 MT/yr)	819	881	1.08	
Environmental Burden	Energy	Electricity (Gwh/yr)	7,199	7,819	1.09	1.235
	Resources	Water (1000 MT/yr)	82,517	123,266	1.49	
	Discharge	Waste water (1000 MT/yr)	20,429	33,139	1.62	

할 수 있다. 1991년 대비 2002년 에너지 소비는 거의 80% 증가한 0.24가 되었으며, 유해 화학물질의 발생은 약 20% 감소하고 천연 자원의 소비는 60%정도 개선 된 것으로 나왔다. 생태효율은 이렇듯이 에너지, 천연 자원 소비 등의 개선 효과를 간단하게 보여주는 지표의 역할을 한다.

2.3 여수산단의 생태효율성 계산

2.3.1 2004년 기준 2006년의 생태효율성

전 세계는 산업단지의 녹색화를 위하여 1970년대 후반부터 산업단지를 변화시키고 있다. 기존의 산업단지를 생태산업단지로 만드는 프로젝트를 시작하고 있는데 이를 전문용어로 Brown-field라고 한다. 한편 새로운 산업단지를 생태산업단지로 하는 것은 Green-field라고 한다. 한국의 경우 Brown-field는 여수, 순천, 포항, 울산, 안산-시화 등과 같은 몇 십 년된 산업단지를 생태산업단지로 바꾸는 것이다. Green-field의 경우 오송산업단지 또는 군장산업단지 등 초기 단계부터 생태산업단지로 단지자체를 만드는 것이다.

한국 정부도 기존의 산업단지를 생태산업단지로 하기 위하여 1단계(2006-2010)사업을 추진하여 왔다. 2단계사업도 5년 단위로 부산, 전북 등의 산업단지를 대상으로 추진하고 있다. 기존의 산업단지를 생태산업단지로 하는 것은 오랜 기간의 투자와 많은 단지 내 기업들의 자료를 필요로 한다. 예컨대 기업 내의 폐기물, 에너지사용량, 용수사용량, 폐열사용량 등의 지속적인 자료의 구축이 절대적으로 필요하다. 한국의 경우 1단계에 속하는 단지는 여수, 순천, 포항, 울산, 안산-시화 단지였다. 이러한 단지를 생태산업단지로 함으로써 산출되는 효과를 측정하여 2단계에도 지속적으로 사용한다면 환경 및 경제적 효과의 추정이 가능할 것이다.

본 논문에서는 화학산업단지인 여수의 기본적인 환경 및 경제 자료를 가지고 생태효율지표를 측정하기 위해서는 앞 절에서 살펴본 바와 같이 제품의 가치와 환경 부하에 대한 것을 추정하고자 노력하였다.

본 연구에서는 Table 11에서 보는 바와 같이 먼저 2004년 대비 2006년의 환경효율성을 측정하기 위해 제품의 가치를 기능으로 구성하고, (배출의 경우 원화의 가치와 원부원료의 수출입 원가 변동폭이 큰 관계로 제외) 환경부하로서는 현재 공식적으로 입수 가능한 자료인 전력소모량, 용수 사용량 및 폐수 배출량을 지표로 삼았다.

앞 절의 예에서 보인 바와 같은 방법으로 여수산단의 2004년 대비 2006년의 생태효율성을 계산하여 보면,

$$\textcircled{1} \text{ 제품 가치 비율} : 1.177 = \sqrt{\frac{1}{3}(1.27^2 + 1.17^2 + 1.08^2)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 환경 부하 비율} : 1.235 = \sqrt{\frac{1}{3}(1.09^2 + 1.49^2 + 1.62^2)}$$

이 되어 환경효율성은 0.953($\leftarrow 1.177/1.235$)이 된다. 즉, 2004년 대비 2006년의 환경효율성은 나빠졌음을 의미하게 된다.

2.3.2 여수 EIP 사업 전개에 따른 2015년까지의 생태효율성 예측

여수 EIP 사업 전개에 따른 2006년 기준 2015년까지의 생태효율성 변화를 타 요인과 별도로 독립적으로 예측하기 위해 EIP 사업 외에도 원부원료 및 제품과 오염처리비용 단가에 의해 변화되는 생산액 단가, 청정생산에 등의 공장 내부의 개선활동에 의한 생산효율 및 오염물 배출 저감, 사고에 의한 공장 가동 중지 등 여러 가지 요인들을 배제시키는 것이 타당 하다고 본다.

즉, 본 연구에서는 순수 EIP 사업에 의한 여수산단의 연차별 생태효율성 변화 예측과 생태효율 지표의 달성 목표 설정을 위하여 본 연구에 사용된 지표를 생태효율 지표로 사용하였다. 따라서 본 연구에서는 앞 절에서 2004년 대비 2006년에서 생태효율성 지표 선정과는 달리 순수 EIP 사업 전개에 따른 예측을 위해 앞장에서 평가되어져 목표로서 사용되는 지표를 사용하였다. 즉, 제품가치로서의 지표는 생산액과 부가가치를 사용하고 환경부하로서의 지표는 폐기물 발생량과 CO₂발생량을 지표로 삼았다.

Table 12는 Yun et. al.[11]이 제안한 여수산단을 생태산업화 하기 위한 11개의 개선안의 기대효과를 정리한 것이고, Table 13은 제시된 Network이 연차별로 성공하여 목표에 도달할 경우 폐기물과 CO₂ 발생량 저감 효과에 의해 2006년 대비 2015년까지의 여수 EIP 연차별 생태효율지수의 변화를 예상한 결과이다. 단, 입수하기 어려운 2006년 부가가치는 2006년 생산액의 10%로 가정하였고, 지역적 특성이자 지표 자체의 특성인 지표 간의 가중치는 설문조사 등의 통계가 이루어 지지 않아 전부 1.0으로 동일한 것으로 가정하였다.

Table 13에 따르면 2006년 대비 2015년까지 순수 EIP 사업에 의한 생태효율 지표는 약 15%가 개선될 것으로 예상된다.

Table 12. Expected effects of networks proposed for Yeosu EIP Project [11]

Fields	Networks	Economic Effects				Environmental Effects	
		Investment (Mil ₩)	Sales (Mil ₩/yr)	Profit (Mil ₩/yr)	ROI (yrs)	S. Waste (tons/yr)	CO ₂ (tons/yr)
Water	Cooperative Treatment of Industrial Water	2,340	49	49	47.76	-	-
	Cooperative Treatment of Toxic Wastewater	3,243	298	298	10.88	-	-
Energy	Reuse of Low Density calory Source	16,400	1,790	1,790	9.16	-	6,000
Gas	Syngas Extraction from Carbon Black Tail Gas	60,185	28,800	19,695	3.06	-	126,000
	By product Gas of Steel Work to Resource	84,400	164,000	72,480	1.16	-	131,000
Soild wastes	Aromatic Organic Waste to Resource	500	7,400	5,250	0.10	20,000	50,000
	Extend of Low Price Steam Consumption	100,000	282,900	282,900	0.4	-	-
	Reuse of Waste Catalyst by Regeneration	-	-	-	-	1,000	-
	Waste Salt to Resource	400	245	140	1.75	4,000	0
	Reuse of Plastic Waste to Fuel by RPF	5,000	3,000	1,500	3.33	100,000	-
	Phosphoric Gypsum Reuse	-	2,150	2,150	-	650,000	-
Total		272,468	490,632	386,252		775,000	313,000

Table 13. Expected variations in IEI according to the development of Yeosu EIP project [11]

Items		Year										
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Value	Sales	Billion ₩/yr	40,737	40,738	40,739	40,742	40,743	40,775	40,892	41,056	41,115	41,130
		Ratio ¹⁾		1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.004	1.008	1.009	1.010
	Profit	Billion ₩/yr	4,074 ²⁾	4,074	4,075	4,077	4,078	4,100	4,182	4,318	4,369	4,383
		Ratio ¹⁾		1.000	1.000	1.001	1.001	1.007	1.027	1.060	1.072	1.076
	Average Ratio ¹⁾			1.000	1.000	1.000	1.001	1.004	1.015	1.034	1.041	1.043
Burden	Waste Generation	Thousand MT/yr	4,037	4,036	4,033	4,025	3,977	3,848	3,558	3,450	3,417	3,417
		Ratio ¹⁾		1.000	0.999	0.997	0.985	0.953	0.881	0.855	0.846	0.846
	CO ₂ Generation	Thousand MT/yr	6,127	6,125	6,117	6,097	6,090	6,074	5,933	5,891	5,877	5,877
		Ratio ¹⁾		1.000	0.998	0.995	0.994	0.991	0.968	0.961	0.959	0.959
	Average Ratio ¹⁾			1.000	0.999	0.996	0.989	0.972	0.926	0.910	0.905	0.905
IEI			1.000	1.000	1.001	1.004	1.011	1.032	1.097	1.137	1.151	1.153

1) Ratio is the current value versus the value of 2006.
 2) Profit in 2006 is estimated to be 10% of sales.
 ※ The weighted index was assumed to be the same for all.

3. 결 론

본 연구에서는 순수 여수EIP 사업 전개에 의해 개선되는 여수산단의 생태효율성 개선 평가에 필요한 생태효율 지표를 정하고, WBCSD가 제시한 가이드라인에 기준을 두어 이를 지수화 하였다. 2004년 대비 2006년의 생태효율성을 평가한 결과 1.0 이하인 0.953로서 오히려 후퇴한 반면, 2006년 대비 2015년의 여수EIP 사업에 의한 생태효율지수는 1.153으로 약 15% 정도로 개선될 것으로 예측된다.

그러나 지수의 산정에는 두 가지 가정, 즉, 생산액 대비 부가 가치 비율과 지표 간 가중치를 가정하여 구한 결과인 것이므로

추후에는 설문조사 등을 통해서 이에 대한 보정이 필요하다. 동시에 순수 EIP사업에 의한 생태효율성 향상뿐만 아니라 여수산단의 전체적인 생태효율성 평가를 위한 별도의 연구를 진행하면서 2015년의 결과에 대한 좀 더 객관적이고 타당한 연구를 할 필요가 있다.

감 사

본 연구는 지식경제부와 한국 산업단지공단 2007-2009년도 생태산업단지구축사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim J-I, Oh, K-H, and Park H-S, "Korea Initiative of Public Insurance Program Against the Climate Disasters," *Environ. Policy*, **17**(1), 45-53 (2009).
2. UN ESCAP, "Eco-efficiency Indicators; Measuring Resource-use Efficiency and the Impact of Economic Activities on the Environment," Greening of Economic Growth Series, UN Publication, (2009).
3. Green Productivity Manual, Asian Productivity Organization (2002).
4. Taeko, A., "Eco-efficiency and Eco-design in Electrical and Electronics Products," *J. Cleaner Prod.*, **15**, 1406-1414 (2007).
5. Hyundai Environment Research Institute "Environment VIP Report," 45th Report, (2000).
6. Park, P.-J., "Eco-efficiency to Producer and Consumer's Communication tool - Focusing on Product and Company's Level," Trade and Environment Information Network Expert Report (2006).
7. Ottar, M., Fet, A. M., and Dahlsrud, A., "Eco-efficiency in Extended Supply Chain: A Case Study of Furniture Production," *J. Environ. Manage.*, **79**, 290-297 (2006).
8. Park, P.-J., Tahara, K., and Inaba, A., "Product Quality-based Eco-Efficiency Applied to Digital Cameras," *J. Environ. Manage.*, **83**, 158-170 (2007).
9. Kim, J.-I., and Nam, S.-M., "Eco-Efficiency Indicators (EEIs) and Implication for the Green Growth," UNESCAP Workshop, Bangkok, March, 2007.
10. Kim, J.-D., Cho, M.-G., and Kim, Y.-B., "Eco-Efficiency Measurement Examples in Korean Companies," Environment Management Institute (2007).
11. Yun, C.-H., Hong, W.-H., Kim, J.-I., Shim, J.-H., Lee, M.-S., Hwang, J.-J., June, S.-J., and Choi, J.-W., "Yeosu Eco-Industry Park Construction Project's Vision and Strategy Final Report," KICOX (2008).