

자원재활용센터의 재활용 공정에 대한 생태효율성 평가

김태석 · 김동규 · 정용현*
(부경대학교)

Eco-Efficiency Assessment of the Recycling Process in Resources Recycling Center

Tae-Seok KIM · Dong-Gyue KIM · Yong-Hyun CHUNG†
(Pukyong National University)

Abstract

In this study, we evaluate the eco-efficiency for recycling processes of Busan Resources Recycling Center for each year from 2010-2012. It analyze the impact of global warming on the power consumption by Life Cycle Assessment. Also calculate the economic value by net profit components those are sales amount and electric charge in accordance with the process operation. On the basis of these results, each of the eco-efficiency Factor analysis and dynamics analysis of 2011 and 2012 as the base year to 2010 are performed.

As a result, the impact of global warming in all the recycling processes is increased by increasing power consumption 2010-2012. But net profit is decreased. In addition, the eco-efficiency of all the recycling processes is decreased and analysis result of the eco-efficiency trends is located on the Fully non Eco-efficiency (-) level.

Therefore, all the recycling processes are necessary improvement for power consumption reducing and net profit increasing to further the environmental and economically sustainable direction.

Key words : LCA, Eco-Efficiency, Factor, GWP, Recycling

I. 서론

경제성장과 더불어 소비가 증가하면서 폐기물 발생량 또한 늘어나고 있다. 이와 함께 기후변화 문제에 대한 심각성이 대두되고 있는 시점에서, 폐기물을 재활용하여 자원화하려는 다양한 방안들이 연구되고 있으며, 실제 산업계에 적용되고 있다.

이러한 움직임은 유엔 지속가능발전 정상회의인 Rio+20에서 논의한 녹색경제 활동의 일환이

며, 지속가능한 발전을 위한 노력이라고 할 수 있다(Kang Sang-In et al. 2012).

이에 발맞춰 국내에서는 저탄소 녹색성장 기본법과 함께 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률을 제정하여 온실가스 감축과 재활용을 통한 자원순환에 노력하고 있다(Ministry of Environment, 2013, & 2014). 특히 정부에서는 재활용 산업을 육성하기 위해 폐기물부담금제도, 재활용부과금제도, 재활용제품 품질인증제도 등을 시행하고 있으며(Kim Kwang-Yim et al., 2006), 지방자치단

† Corresponding author: 051-629-6543, chungyh@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의해 연구되었음.

체별로 재활용품 선별시설들을 설치하여 운영하고 있다(Ministry of Environment, 2013).

이러한 정책의 시행과 지자체에서의 노력은 환경문제 해결에 있어서 중요한 역할을 한다. 그중 지자체별 재활용품 선별시설의 운영은 폐기물을 재활용함으로써 최종적으로 폐기되는 폐기물의 양을 줄이고, 자원의 선순환을 촉진시킨다. 또한 이를 통해 직접적인 온실가스배출량을 줄임으로써 기후변화문제에도 대응할 수 있다(Joo Hyeon-Su et al., 2010).

하지만 재활용품 선별시설의 운영에는 상당량의 전력이 소모되며, 이는 간접적인 온실가스의 배출과 경제적 손실을 야기한다. 실제로 지자체별 배출원에 따른 온실가스배출량의 자료를 살펴보면 지역 특성별로 그 경향은 다르나 전력 사용으로 인한 온실가스배출량은 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있다(Yoon Wan-Woo, 2012). 또한 자원재활용센터에서는 전력 사용량의 증가로 매년 에너지 비용이 증가하는 추세에 있음을 나타내고 있다(Kim Yeong-Min et al., 2013).

현재 이러한 산업 활동의 환경적인 문제와 경제적인 측면을 함께 고려하여 그 지속가능성을 평가하는 방법으로 생태효율성 평가가 활용되고 있다. 최근 국내에서는 열병합발전소(Shin Choon-Hwan and Park Do-Hyun, 2013), 기업(Kang In-Kyu et al., 2014), 철도산업(Choi Yong-Sin et al., 2011), 산업단지(Kim Jung-In et al., 2010) 등 다양한 분야를 대상으로 활발히 연구되고 있으나 재활용 산업과 관련된 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 자원재활용센터의 재활용 공정을 대상으로 전기 에너지 사용에 따른 생태효율성을 평가하였다.

II. 연구 방법

1. 환경영향 분석

가. 연구 목적

본 연구에서는 전과정평가 기법을 활용하였으며, Kim Tas-suk et al.(2015)의 사전연구에서 수집된 자료를 바탕으로 2010년부터 2012년도까지 부산광역시 자원재활용센터의 재활용 공정이 지구온난화에 미치는 영향을 분석하였다(Kim Tae-Suk and Chung Yong-Hyun, 2015).

나. 시스템 경계

시스템 경계는 전기 에너지를 사용하는 플라스틱, 필름, 캔, 유리병, 스티로폼, 종이 재활용 공정으로 [Fig. 1]과 같다.

다. 기능, 기능단위, 기준흐름

연구 목적에 따른 기능은 에너지 사용에 따른 재활용 제품 생산, 기능단위는 각각의 재활용 제품 1kg, 기준흐름은 전기 에너지 사용으로 생산되는 각각의 재활용 제품 1kg으로 선정하였다.

라. 데이터 수집 및 계산

데이터는 각각의 재활용 공정에 사용되는 전기 에너지 소모량으로 2010년부터 2012년까지 1년 단위로 수집하였다.

이때 전기 에너지 소모량은 각각의 재활용 공정에 따른 세부적인 설비별 동력과 운전시간을 고려하여 산정하였으며, 연구에 적용된 데이터는 설비의 노후와 현장 여건에 따른 가동 시간 변화 등의 이유로 실제 사용한 전력량과 이론적 전력 소모량의 상대적 비율을 적용하여 산출하였다.

마. 영향의 종류 및 영향평가 방법

본 연구에서는 산자부에서 제시하고 있는 방법을 적용하여 대상이 지구온난화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 영향평가는 분류화를 거쳐 특성화까지 진행하였다.

바. 가정 및 제한사항

본 연구에서는 폐기물을 재활용하는 시스템으로써 제품 생산에 따른 원자재의 환경영향은 제외하였으며, 전기 에너지 사용에 따른 환경영향만을 평가하였다. 또한 연구 목적 상 수송에 따른 영향은 제외하였다.

2. 경제적 가치 분석

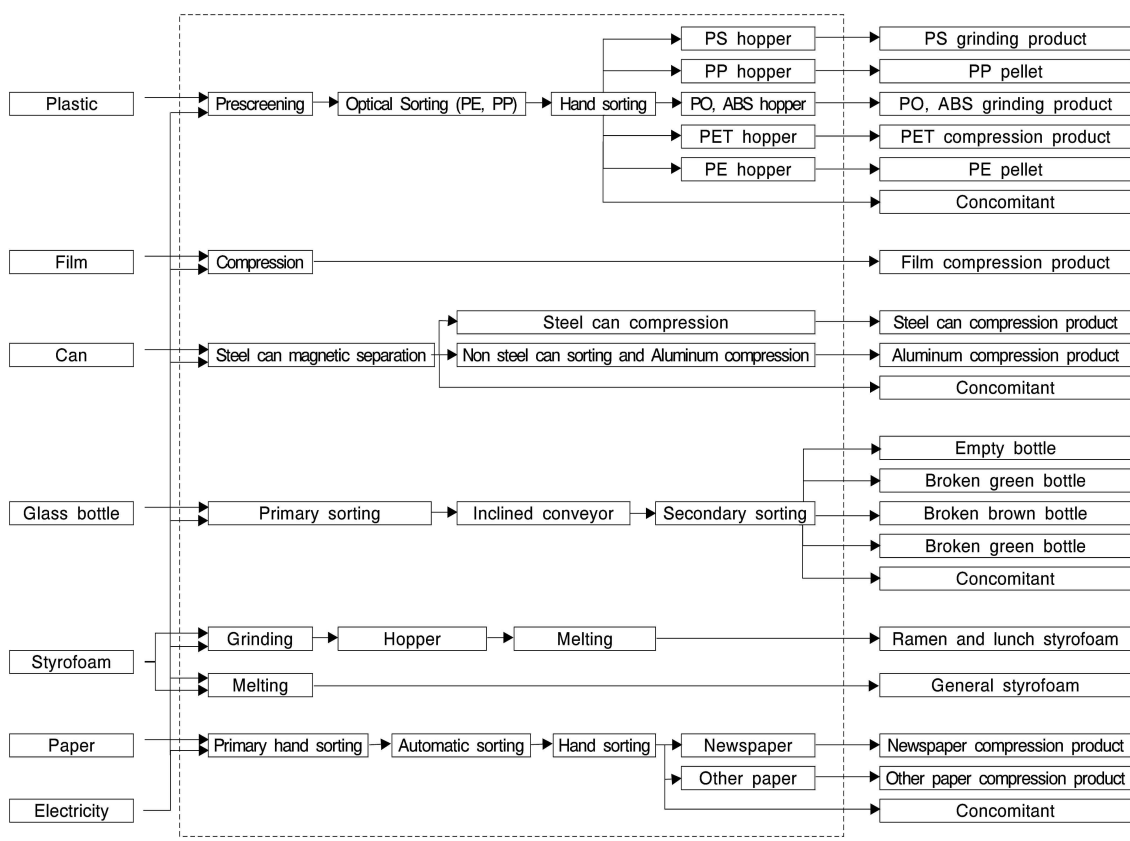
가. 연구 목적

경제적 가치 분석은 전술된 환경영향 분석과 동일한 대상과 범위에 대하여 전기 에너지 사용에 따른 전기요금과 제품 생산에 따른 판매금액을 순이익 산정요소로 선정하여 경제적 가치를 분석하였다.

나. 데이터 수집 및 계산

연구대상에 대한 경제적 가치를 산출하기 위해서는 초기비용, 운영비용, 유지 및 보수비용, 판매 수익 등에 대한 데이터가 필요하나, 각각의 재활용 공정 운영에 따른 전기요금과 제품의 판매금액만을 데이터로 수집하였다.

이에 따른 데이터 계산은 <Table 1>과 같이 3개년도 전기요금의 평균 단가와, 3개년도 제품별 평균 단가를 적용하여 산출하였다.



[Fig. 1] System boundary of recycling facilities

<Table 1> Average unit price of each product and electricity 2010–2012
(Korea Electric Power Corporation 2014; Korea Environment Corporation 2014)

Plastic	Film	Can	Glass bottle	Styrofoam	Paper	Electricity
718 (Won/kg)	10 (Won/kg)	740 (Won/kg)	45 (Won/kg)	601 (Won/kg)	153 (Won/kg)	83.56 (Won/kWh)

3. 생태효율성 평가

가. 생태효율성 분석

생태효율성 분석은 연구 대상에 대한 환경영향과 경제적 가치 분석 결과를 토대로 ESCAP에서 제시한 식을 이용하여 각각의 재활용 공정에 대한 연도별 생태효율성을 산출하였다.

$$\text{Eco-efficiency} = \frac{\text{Value of a product}}{\text{Environmental impact of a product}}$$

나. Factor 분석

Factor 분석은 2010년도의 각각의 공정별 생태효율성 결과를 기준으로 하여 2011년도와 2012년도에 대한 Factor 값을 JEMAI에서 제시한 식을 이용하여 산출하였다. 이를 통해 기준년도대비 대상년도의 생태효율성 개선여부를 살펴보았다.

$$\text{Factor} = \frac{\text{Eco-efficiency of the assessed product}}{\text{Eco-efficiency of the yardstick product}}$$

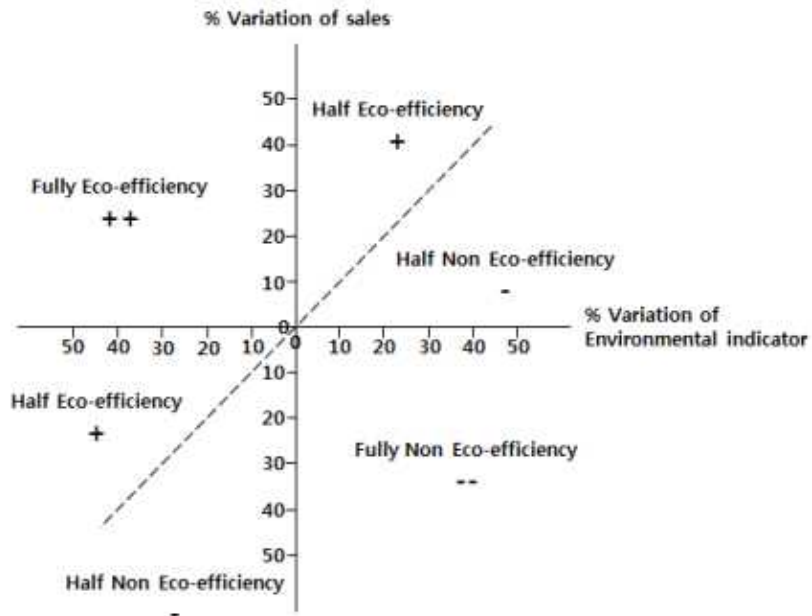
다. 변동분석

연도별 각각의 공정의 생태효율성 결과에 대한 환경적·경제적 변화를 자세히 살펴보기 위해 Charmondusit. K. and Keartpakpraek, K.의 식을 이용하여 2010년도를 기준으로 변동분석을 실시하였으며, 그 결과를 [Fig. 2](Anite systems 1999)의 변동분석 그래프에 적용하여 나타내었다.

$$\%VE = \left\{ \frac{\sum Ei - Eb}{\sum Eb} \right\} \times 100$$

%VE : Percent variation of economic or environmental indicators
 $\sum Eb$: Summation of economic or environmental indicators in the selected base year
 $\sum Ei$: Summation of economic or environmental indicators in the selected time period

여기서 변동분석 그래프에 대한 각각의 영역은 환경적·경제적 지수가 모두 바람직한 방향의 변동성을 가지면 완전 에코효율성(++), 환경적 혹은 경제적 지수가 다른 한쪽을 보상해주면 반 에코효율성(+), 환경적 혹은 경제적 지수가 다른 한쪽을 보상해주지 못하면 반 비 에코효율성(-), 환경



[Fig. 2] The classification of eco-efficiency trend

적·경제적 지수가 모두 바람직하지 못한 변동성을 가지면 완전 비 에코효율성(--))을 뜻한다 (Charmondusit. K., 2009; Charmondusit. K. and Keartpakpraek, K., 2011).

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 환경영향 분석 결과

환경영향 분석을 위해 각각의 공정별 제품 생산량 <Table 2>과 전력 소모량 <Table 3>을 연도별로 계산하였다.

<Table 2> Production (ton) of each recycling facility 2010-2012

	2010	2011	2012
Plastic	9,438	9,474	9,338
Film	16,656	16,719	16,479
Can	1,110	1,115	1,099
Glass bottle	13,880	13,933	13,733
Styrofoam	1,666	1,672	1,648
Paper	12,770	12,818	12,634
Total	55,520	55,730	54,930

<Table 3> Power (MWh) calculation of each recycling facility 2010-2012

	2010	2011	2012
Plastic	2,829.687	2,917.061	2,964.777
Film	240.435	246.910	251.914
Can	178.055	183.553	187.066
Glass bottle	35.829	36.793	37.539
Styrofoam	38.209	39.389	40.143
Paper	349.287	358.692	365.962
Total	3,671.5	3,782.4	3,847.4

그 결과 2012년으로 갈수록 제품 생산량은 줄어들었으며, 전력 소모량은 증가하였다. 여기서 제품 생산량에 대한 결과는 실제로 수거되는 폐기물의 양이 줄었기 때문이며, 전력 소모량의 경

우는 장비의 노후화에 따른 것으로 분석되었다.

이를 토대로 2010년부터 2012년까지 각각의 공정별 전력 사용이 지구온난화에 미치는 영향을 전과정평가 기법을 이용하여 <Table 4>와 같이 계산되었다.

이를 살펴보면 모두 2012년으로 갈수록 지구온난화에 미치는 영향은 증가하는 것으로 나타났으며, 그 중 생산량 대비 전력 사용량이 많은 플라스틱 재활용 공정이 지구온난화에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 공정별로 사용하는 전력량의 크기가 다르고, 모든 공정의 전력 사용량이 2012년으로 갈수록 증가하기 때문으로 판단된다.

<Table 4> GWP (kg CO₂ eq/f.u.) result of each recycling facility 2010-2012

	2010	2011	2012
Plastic	0.25230	0.26010	0.26440
Film	0.02144	0.02202	0.02246
Can	0.01588	0.01637	0.01668
Glass bottle	0.00320	0.00328	0.00335
Styrofoam	0.00341	0.00351	0.00358
Paper	0.03115	0.03199	0.03264

f.u. : functional unit

2. 경제적 가치 분석 결과

경제적 가치 분석에서는 2010년부터 2012년까지 각각의 재활용 공정에 따른 연도별 제품 판매금액 <Table 5>과 전기요금 <Table 6>을 산출요소로 하여 기능단위에 따른 순이익 <Table 7>을 산출하였다.

먼저 연도에 따른 각각의 제품별 판매금액에 대한 결과를 살펴보면 제품 생산량 <Table 2>에 따라 증감하였으며, 생산량이 비교적 적은 제품이지만 단가 <Table 1>가 높은 제품에서 그 판매금액이 많다는 것을 알 수 있다.

다음으로 전기요금의 경우에는 전력 소모량 <Table 3>에 따라 변화하였으며, 그 중 전력 소모가 많은 플라스틱 재활용 공정에서 가장 많은 전기요금이 발생되는 것으로 나타났다.

자원재활용센터의 재활용 공정에 대한 생태효율성 평가

위의 결과들을 토대로 산출한 각각의 공정별 순이익은 2012년으로 갈수록 줄어드는 것으로 나타났다. 특히 2011년의 제품판매 금액이 가장 많음에도 불구하고, 2012년으로 갈수록 전체적인 순이익이 감소하는 것은 전력 소모량이 매년 증가 때문으로 판단된다.

<Table 5> Sales (million Won) of each recycling facility 2010-2012

	2010	2011	2012
Plastic	6,776.8	6,802.4	6,704.8
Film	166.6	167.2	164.8
Can	821.7	824.8	813.0
Glass bottle	624.6	627.0	618.0
Styrofoam	1,001.0	1,004.8	990.4
Paper	1,953.7	1,961.1	1,933.0
Total	11,344.4	11,387.3	11,224.0

<Table 6> Electric charge (million Won) of each recycling facility 2010-2012

	2010	2011	2012
Plastic	236.5	243.8	247.7
Film	20.1	20.6	21.0
Can	14.9	15.3	15.6
Glass bottle	3.0	3.1	3.1
Styrofoam	3.2	3.3	3.4
Paper	29.2	30.0	30.6
Total	306.9	316.1	321.4

3. 생태효율성 평가 결과

가. 생태효율성 분석 및 Factor 분석 결과

<Table 8> Eco-efficiency and Factor analysis result of each recycling facility 2010-2012

	Eco-efficiency			Factor	
	2010	2011	2012	2011/2010	2012/2010
Plastic	2,746.52092	2,661.55699	2,615.23927	0.9691	0.9522
Film	410.15553	398.08899	388.36027	0.9706	0.9469
Can	45,755.69676	44,364.00503	43,511.45652	0.9696	0.9510
Glass bottle	14,016.99456	13,648.07188	13,372.63228	0.9737	0.9540
Styrofoam	175,838.87299	170,518.44465	167,308.48863	0.9697	0.9515
Paper	4,838.34007	4,709.64641	4,613.34101	0.9734	0.9535

<Table 7> Net profit (Won/f.u.) result of each recycling facility 2010-2012

	2010	2011	2012
Plastic	692.947	692.271	691.469
Film	8.794	8.766	8.723
Can	726.600	726.239	725.771
Glass bottle	44.784	44.779	44.772
Styrofoam	599.083	599.031	598.964
Paper	150.714	150.662	150.579

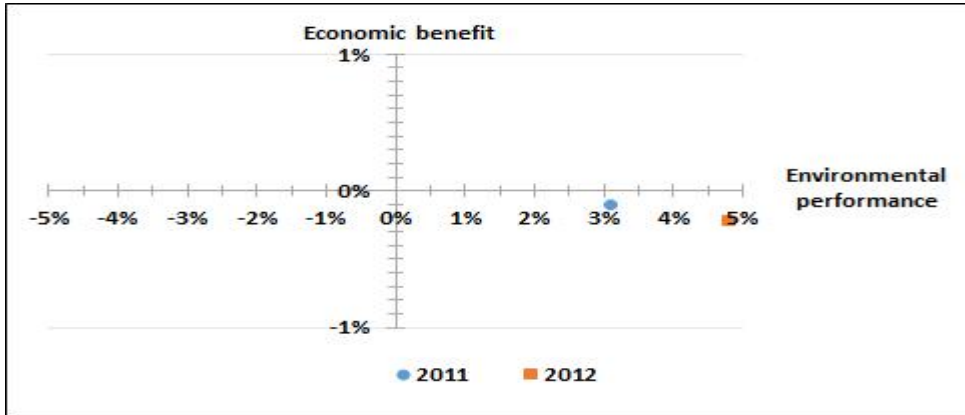
f.u. : functional unit

생태효율성 분석 및 Factor 분석은 각각의 재활용 공정에 대한 환경영향 분석과 경제적 가치 분석 결과를 이용하여 연도별로 산출하였으며, 그 결과는 다음 <Table 8>과 같다.

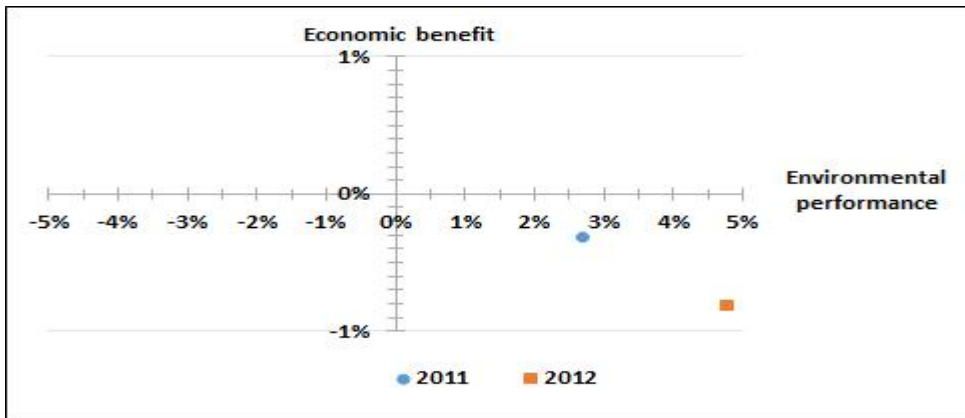
이를 살펴보면 모든 재활용 공정의 생태효율성이 2012년으로 갈수록 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 Factor 분석 결과는 2010년과 비교하여 모두 1보다 작고 점차 감소하여 모두 개선되지 못함을 알 수 있었다. 이는 2012년으로 갈수록 각각의 재활용 공정에서 사용하는 전력량은 증가하고, 순이익은 감소하기 때문으로 판단된다.

나. 변동분석 결과

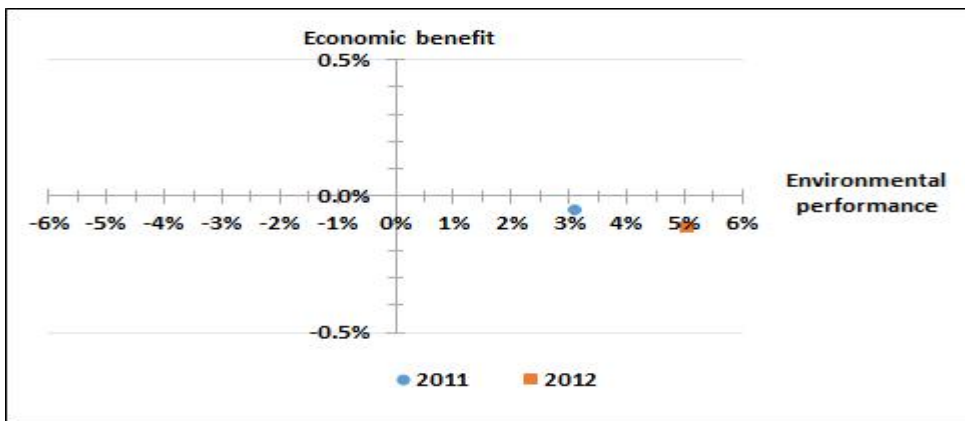
이러한 각각의 재활용 공정의 생태효율성 분석 및 Factor 분석 결과에 대한 환경적·경제적 영향의 원인을 분석하기 위해 2010년을 기준으로 변동분석을 수행하였으며, 이는 [Fig 3]부터 [Fig 8]과 같다.



[Fig. 3] Eco-efficiency trend result of Plastic recycling facility 2011-2012

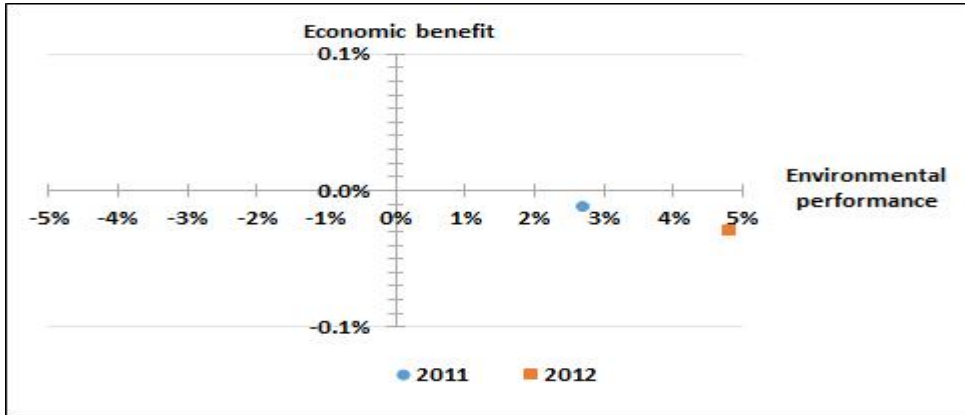


[Fig. 4] Eco-efficiency trend result of Film recycling facility 2011-2012

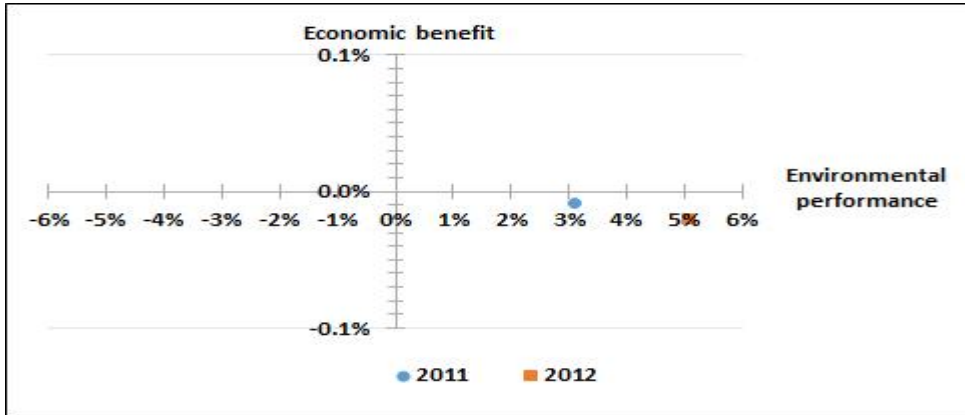


[Fig. 5] Eco-efficiency trend result of Can recycling facility 2011-2012

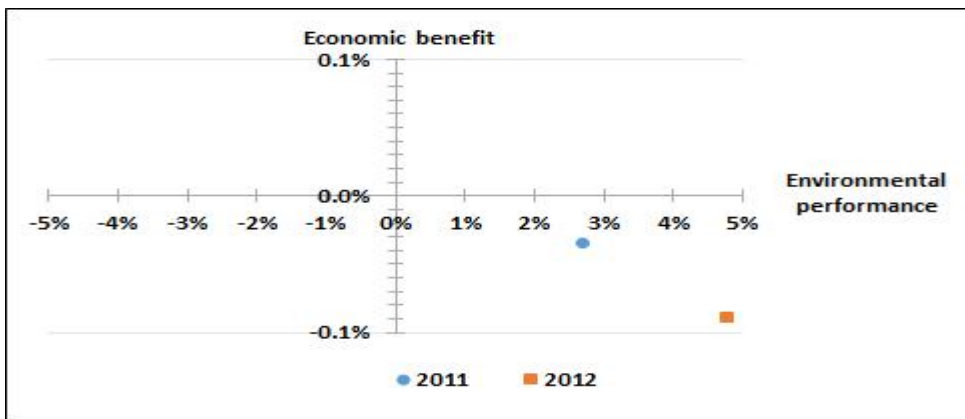
자원재활용센터의 재활용 공정에 대한 생태효율성 평가



[Fig. 6] Eco-efficiency trend result of Glass bottle recycling facility 2011-2012



[Fig. 7] Eco-efficiency trend result of Styrofoam recycling facility 2011-2012



[Fig. 8] Eco-efficiency trend result of Paper recycling facility 2011-2012

이를 살펴보면 모든 재활용 공정에 대한 2011년과 2012년의 환경적·경제적 지수가 바람직하지 못한 변동성을 가지며, 완전 비 에코효율성(-)영역에 위치하는 것으로 나타났다. 또한 2011년보다 2012년의 환경적·경제적 지수의 변동이 크게 나타났다. 이는 2012년으로 갈수록 각각의 재활용 공정에서 사용하는 전력량은 증가하고, 순이익은 감소하기 때문으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 2010년부터 2012년 동안 부산광역시 자원재활용센터의 재활용 공정을 대상으로 생태효율성을 평가하였으며, 이에 따른 결론은 다음과 같다.

먼저 연도별로 각각의 공정이 지구온난화에 미치는 영향은 2012년으로 갈수록 모두 커졌으며, 순이익은 감소하였다.

다음으로 생태효율성 분석 결과에서는 2012년으로 갈수록 모든 공정의 생태효율성이 감소되는 것으로 나타났다. 또한 2010년의 생태효율성을 기준으로 분석한 Factor 값에서는 모든 공정이 1보다 작았으며, 2012년으로 갈수록 점차 감소하여 개선되지 못함을 나타냈다.

이러한 원인을 분석하기 위하여 변동분석을 실시한 결과 2011년과 2012년에 대한 모든 재활용 공정의 환경적·경제적 지수가 바람직하지 못한 변동성을 가지기 때문으로 나타났다.

따라서 전기 에너지 소모의 증가와 제품 판매 이익이 감소되고 있는 시점에서 환경적·경제적 수준을 향상시키기 위해 앞으로 공정 개선, 에너지 절약 등의 노력이 필요할 것으로 판단된다.

References

Anite systems(1999). A first set of eco-efficiency indicators for industry:pilot study, Luxembourg, 21~22.

Charmondusit. K.(2009). Development of eco-efficiency indicators for assessment of industrial estate, International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009 December 2-4 2009 Chiang Rai

Charmondusit. K. · Keartpakpraek, K.(2011). Eco-efficiency evaluation of the petroleum and petrochemical group in the map Ta Phut Industrial Estate, Thailand, Journal of Cleaner Production 19 (2011) 241~252

Choi, Yong-Sin · Chun, Yoon-Young · Lee, Kun-Mo · Kim, Yong-Ki(2011). A Study on the Environmental Evaluation in Use Stage of KTX and Samaul Train ; the Development of Eco-efficiency Indicator, The Korean Society for Railway, 2011(5), 1313~1320.

ESCAP(2009). Eco-efficiency indicators : Measuring Resource-use Efficiency and the Impact of Economic Activities on the Environment, United Nations publication, 4.

Japan Environmental Management Association for Industry(JEMAI)(2004). Eco-efficiency and Factor Handbook for Products, 4~5.

Joo, Hyeon-Su · Lee, Hui-Seon · Ko, Eun-Yeong(2010). A Study on Waste Management for Reducing Greenhouse Gas Emissions-Life Cycle Assessment (LCA) of Greenhouse Gas Emissions from Waste Management Practices, Korea Environment Institute, 144~149.

Kang, In-Kyu · Sim, Gwang-Sic · Kim, Jae-yun (2014). Eco-Efficiency Analysis of Target Management Enterprises for Green House Gases and Energy Using DEA, Korean Corporation Management Associator, Vol.53, 1~25

Kang, Sang-In · Oh, Il-Chan · Park, Jeong-Hyeon (2012). Green economy in the context of Rio+20 : issues and implications for national strategies, Korea Environment Institute, 26~50

Kim, Jung-In · Yun, Chang-Han · Yoon, Hyung-Sun (2010). Development of Eco-Efficiency Indicators for Yeosu Industrial Park, The Korean Society Of Clean Technology, 16(3), 229~37

Kim, Kwang-Yim · Choi, Jin-Seok · Lim, Hyun-Gun (2006). Reforming Resource Circulation Policy for Sustainable Material Management, Korea Environment Institute, 37~47

Kim, Tae-Suk · Chung, Yong-Hyun(2015). Eco-efficiency

- assessment of the waste recycling process, 2015 Spring conference of the The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education, 156.
- Kim, Tae-Suk, Kim, Dong-Gyue, Chung, Yong-Hyun (2015). Environmental impact evaluation of the waste cooking oil recycling products, The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education, 27(2). 516~520.
- Kim, Yeong-Min · Seo, Gyeong-Ui · Kim, Nam-Hun, · Chung, Han-Byeol · Lee, U-Cheol(2013). Busan Metropolitan City recycling center reports, Dr. Green, 3~59.
- Korea Electric Power Corporation(2014). Vol.83 (20013) Statistics of electric power in korea, 144.
- Korea Environment Corporation(2014). Market survey on recyclable materials, 16~34.
- Ministry of Environment(2013). 4th(2011~2012) waste statistics survey in korea, 96.
- Ministry of Environment(2013). Framework Act on Low Carbon, Green Growth.
- Ministry of Environment(2014). Law of saving of resources and recycling promotion.
- Shin, Choon-Hwan, Park, Do-Hyun(2013). Life Cycle Assessment for the Business Activities of Green Company -1. Analysis of Process Flow and Basic Unit, Journal of Environmental Science International 22(3); 269~279; March 2013.
- Yoon, Wan-Woo(2012). A study on Greenhouse Gas Emissions Characteristics of Local Government for establishing the effective mitigation policy, Ph. D. Interdisciplinary Program of Earth Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan.
-
- Received : 02 November, 2015
 - Revised : 04 December, 2015
 - Accepted : 04 December, 2015