Journal of Korea TAPPI
Vol.36.No.1, 2004
Printed in Korea

LCA기법을 이용한 천연펄프의 환경영향 평가

김형진[1†], 조병묵[2], 황용우[3], 박광호[3]

(2003년 11월 3일 접수: 2004년 1월 19일 채택)

Environmental Impact Evaluation of Virgin Pulp Using Life Cycle Assessment Methodology

Hyoung Jin Kim1[†], Byoung Muk Jo[2], Yong Woo Hwang[3] and Kwang Ho Park[3]

(Received on November 3, 2003: Accepted on Januatttry 19, 2004)

ABSTRACT

Life Cycle Assessment for the pulp, which is mainly used as the raw material of fine paper, base paper for food packaging and paper cup, has been carried out in this study to consider environmental aspects by quantifying the environmental emission and to evaluate its environmental impact potential. The system boundary was selected from cradle to gate stage(raw material acquisition, transportation of raw material and product manufacturing) of the product. Environmental impact was divided into 8 categories considering Korean situation: abiotic resource depletion, global warming, ozone depletion, acidification, eutrophication, photochemical oxidant creation, ecotoxicity and human toxicity. In Life Cycle Impact Assessment(LCIA) methodology phase, Ecopoint, Eco-indicator 95 and Korean eco-indicator were used and the results carried out by each methodology were compared. The results from this study were also compared with those of foreign study to verify the reliability of the results. The results of the study could be utilized as the basic data for Environmental Management System(EMS), Design for Environment(DfE) and Type III eco-labeling in the paper and paper-related industry.

Keywords : life cycle assessment, pulp, environmental impact potential, impact category, environmental management system, design for environment, type III eco-labeling

1 국민대학교 임산공학과(Department of Forest Products, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea)
2 강원대학교 제지공학과(Department of Paper Science and Engineering, Kangwon National University, Chunchon 200- 701, Korea)
3 인하대학교 환경공학과(Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheun 402-751, Korea)
† 주저자 (Corresponding author): e-mail: hyjikim@kookmin.ac.kr

1. 서론

최근 지구환경문제에 대한 중요성이 점차 증가되면서, 환경보전과 지속가능한 개발은 시대적 화두가 되고 있을 뿐만 아니라, 국가 간 기업의 생존전략으로서도 절실한 과제가 되고 있다. 이러한 시대의 흐름 속에서 기업체는 21세기 환경·무역시대에 발맞추어 생산되는 제품의 환경영향을 정량적이고 종합적으로 평가하여 제시할 필요성을 느끼게 되었다.

이를 위한 새로운 기법으로서, 산업계에서는 LCA(Life Cycle Assessment)의 도입이 주목을 받고 있으며, 기업의 환경관리시스템과 더불어 환경부하를 삭감하려는 측면에서 많은 연구가 진행되고 있다[1-3]. 또한, 유엔환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development; UNCED)를 비롯한 세계 환경기구들은 자연과 인간이 공생할 수 있는 친환경적 사회를 지향하고 있고, 그 구체적인 수단으로써 국제표준화기구(International Organization for Standardization; ISO)에서는 LCA에 대하여 이미 국제규격으로서 규격화를 완료한 상황이다. 한편 기업에서 생산가공한 제품에 대한 LCA는 제품의 제조에서 폐기까지의 모든 과정에 걸쳐서 환경에 대한 부하(에너지 소비, 자원소비, 고형폐기물의 발생, 대기오염물질배출량, 수질오염물질배출량 등)를 정량화하여 환경에 대한 영향을 평가하는 기법으로 이용하고 있다[4-7].

제지 및 지류관련 산업은 우리나라의 산업발전과 함께 꾸준히 발달되어 온 대표적인 산업 중의 하나로서, 지류의 사용 증가와 함께 제품의 생산 및 폐기 시 발생하는 각종 환경오염 부하물질 또한 다량, 다종으로 증가되고 있다.[8,9] 모든 지류관련 제품을 생산하기 위해 기본적인 원료물질로서 사용되고 있는 펄프는 제지 및 지류관련 산업에 대한 환경영향을 평가하기 위해 선행되어 고려하여야 한다. 이에 본 연구에서는 천연펄프에 대한 환경부하를 LCA기법을 이용하여 평가함으로써, 펄프의 life cycle에서 발생하는 환경오염물질을 목록화하여 제시하고, 이들이 환경에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이는 지류관련 제품에 대한 LCA 수행 시 필수적인 환경 정보를 제공하는데 그 의의가 있으며, 향후 관련 기업의 환경친화적 제품설계(DfE: Design for Environment), EMS(Environmental Management System) 그리고 기타 제품의 환경개선에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 현재 환경부에서 시행중인 환경성적표지제도(Type III)[10]에 대응할 수 있는 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구방법 및 결과

본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 ISO 1404011)의 「LCA Principle and Framework」에서 제시하고 있는 목적 및 범위설정(Goal and Scope Definition), 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 결과해석(Interpretation) 등의 4단계를 통하여 LCA를 수행하였다.

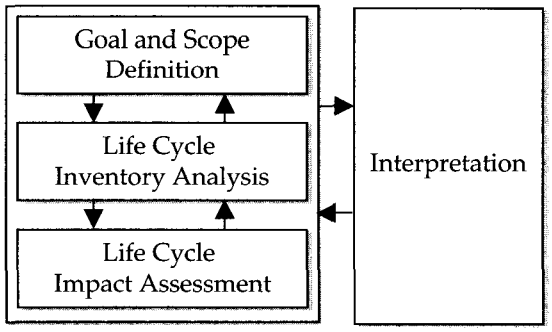

Fig. 1. Framework of LCA.

2.1 목적 및 범위 설정

2.1.1 연구목적 설정

LCA는 사용하는 목적에 따라 수집하는 자료, 분석방법, 결과 등이 달라지기 때문에 먼저 LCA를 어떤 목적으로 사용할 것인지를 명확히 할 필요가 있다. 즉, LCA는 원료의 취득단계부터 제품의 폐기단계까지의 전과정에서 발생하는 환경영향을 평가하는 것으로, 연구수행 목적에 따라 전과정에서 고려해야 할 영역과 제외시킬 영역이 결정된다. 흔히 사용되는 LCA의 목적으로는 Table 1에 나타낸 바

Table 1. Goals of LCA

Goals	Details
Comparative valuation of products	Product A vs Product B
Valuation of product improvement effect	Product A → Product B
Product inspect for reach the standard value and the goal value	Product A → the standard value and the goal value
Impact analysis of product for improvement goal sampling	Product A → improvement goal
Environmental publicity promotion	

와 같이 복수제품의 비교선택, 제품 및 공정개선 효과의 파악, 목표치를 달성하기 위한 제품의 점검, 개선점의 도출 및 우선순위의 결정, 환경홍보에 관계되는 주체간의 의사전달 촉진 등이 있다[12].

본 연구에서는 천연펄프 제조를 위한 원료 취득, 원료 수송, 제품의 생산단계에서 발생하는 환경부하 및 영향을 조사하여, 지류관련 제품에 대한 LCA 수행을 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

2.2.2 연구범위의 설정

(1) 대상 제품 및 기능단위

기능단위(Functional Unit; f.u.)는 LCA를 수행하는 기본적인 단위 즉, 시스템이 나타내는 성능 지수를 의미하는데 이는 목적을 서술할 때 발생할 수 있는 모호성을 피하고 범위 선정의 근거를 확실히 하기 위해 반드시 필요하다. 본 연구에서 대상제품은 펄프 1 ton을 기준으로 하여 기능단위를 설정하였다.

(2) 시스템 경계(System Boundary)

시스템이란 몇 가지 정의된 기능을 수행하는 물질 또는 에너지에 연관된 일련의 활동의 집합체로 정의되어지며, 시스템 경계설정은 Life Cycle의 각 단계, 즉 제품의 원료획득, 제조과정, 유통 및 수송, 사용, 폐기단계 중 LCA 수행 시에 어느 정도의 범위를 포함시킬 것인가 라는 것을 결정하는 것이다.

천연펄프 제조와 관련된 시스템을 분석한다면 조목공정으로서 목재의 절단에서 박피에 이르는 단계, 목재를 일정한 크기의 칩으로 제조하는 단계, 생산된 칩을 펄프화 하는 단계, 펄프섬유를 이용하여 각종 종이 및 지류제품을 제조하는 단계, 사용하는 단계, 폐지를 회수하여 재활용하는 단계 및 소각 또는 매립하는 폐기단계 등으로 나눌 수 있다.

그러나, 본 연구에서는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이, 순수하게 국내산 목재를 이용하여 천연펄프로 만들어지는 흐름과, 해외에서 생산된 목재를 이용하여 천연펄프로 제조 후 수입되어 국내에서 종이 및 지류제품이 만들어지는 흐름에서의 경우는 연구 대상으로 포함하지 않았으며, 국내에서 펄프를 제조하는 경우인 흐름, 즉 해외에서의 조림→해외에서의 목재생산→해외에서의 칩제조→국내에서의 천연펄프로의 제조 등으로 진행되는 과정을 본 연구의 시스템 경계로 설정하였다. 포장→운송→사용→재활용 및 소각 및 매립의 단계는 고려해

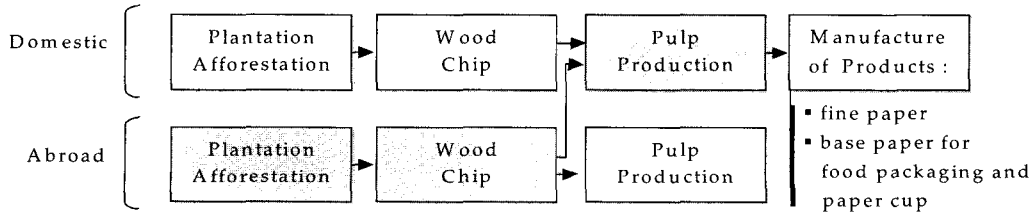

Fig. 2. System boundary.

야 할 경우의 수가 많을 뿐만 아니라, 자료의 한계로 인해 고려하지 않았다.

(3) 자료 조건

동종 제품을 생산하는 경우라 할지라도 생산량, 제조설비의 연식, 가동시간 및 가동률에 따라 같은 항목에서도 자료의 차이가 발생할 수 있다. 따라서 동종 제품의 모든 업체를 대상으로 자료를 수집하여 평균을 구한다는 것은 대단히 어려우며, 또한 그 평균값이 관련 제품을 대표한다고도 볼 수 없다. 본 연구에서는 천연펄프를 생산하고 있는 국내의 한 업체를 대상으로 자료를 수집하였다. 단, 해외에서 조목공정을 거친 후 칩화 되어 국내에 들어오는 경우에 대해서는 해외에서 분석한 자료를 인용하였다. 원칙적으로 국내의 실정을 반영한 자료를 현장에서 직접 수집하고자 하였으며, 국내에 관련 자료가 없거나 수집이 불가능한 경우에는 기 평가된 관련 문헌과 전문가들의 검증을 통해 가장 객관적이고 보편화된 자료를 활용하고자 하였다.

2.2 전과정 목록 분석

2.2.1 원료취득단계

펄프제조에 대한 원료취득단계에서의 목록분석은 국내에서의 펄프생산을 기초로 한 자료조사를 토대로 분석하였다. 현재, 국내 제지산업에서는 펄프생산을 위해 원료 칩 조달의 80%를 수입에 의존하고 있으며, 단 20%만을 국내에서 조달하고 있다. 이에 본 연구에서는 연구범위에서 설명한 바와 같이 해외로부터의 칩 수입에 대해서만 고려하였다. 원료취득단계에서는 Table 2에서 나타낸 바와 같이, 국내에 수입되는 칩 제조용 목재에 대하여 조림과 벌목 시 소비되는 에너지량[13, 14]을 고려하여 분석하였다.

Table 2에서 나타낸 바와 같이 나무 1 kg을 조림하기 위해 1.4 g의 디젤이 소비되며 벌목 시에는 나무 1 kg 생산 시 1.7 g의 디젤과 0.4 g의 가솔린이 소비되고 있으며, 원료 취득을 위한 조림과 벌목에서의 디젤과 가솔린 소비량을 가지고 목록분석을 수행하였다.

2.2.2 수송단계

수송부문에 대한 목록분석으로서 수입된 칩의 항만도착에서 펄프제조 회사까지를 분석하였다. 이때 원료 수송거리는 평균 20 km이며, 수송 시 사용되는 트럭은 순적재 중량이 29.5톤인 25톤 트럭이다. 연간 원료수송량은 약 80만 톤이며, 연료로는 경유를 사용하고 있다. 이를 바탕으로 펄프 원료 1 ton 수송하기 위해 소비되는 에너지 소비량을 산정하였으며, 이를 Table 3에 정리하였다.

2.2.3 제조단계

종이 및 지류관련 제품 제조의 주원료로 사용되는 화학펄프 제조공정을 Fig. 3에 간략하게 나타내었다. 펄프를 제조하기 위해서는 우선 주원료인 목

Table 2. Energy consumption in afforestation and felling

Section	Energy consumption	Used equipment
Afforestation	1.4 g diesel/kg wood	Tractor, Building machine
Logging	1.7 g diesel/kg wood 0.4 g gasoline/kg wood	Tractor, Building machine, Chain saw

(Data : Life Cycle Inventories for Packagings, The Swiss Agency for the Environment, 1998)

Table 3. Energy Consumption in transportation stage

	Distance (Round trip)	Fuel Consumption	Utilized truck	Total Fuel Consumption	Energy Consumption by Transportation of raw material 1 ton	
Unit	km	km/L	EA/yr	L/yr	L	kg
	40	2.5	27118.64	433898.31	0.54	0.45

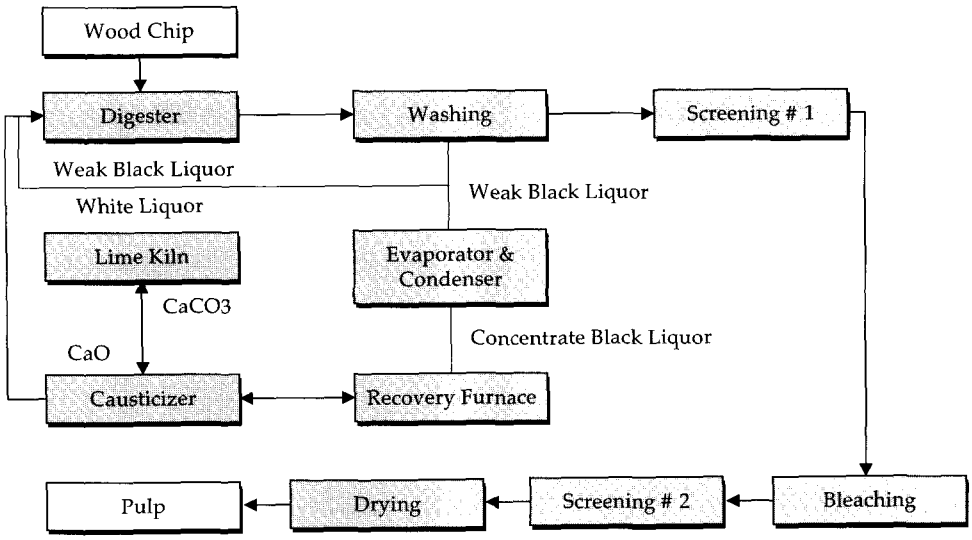

Fig. 3. Flow diagram of pulp manufacture.

Table 4. Input and output materials in manufacturing stage of pulp

(f.u. : pulp 1 ton)

Section	Components	Quantity	Unit
Raw material	Wood (chip)	1,985	kg
Subsidiary material	Sodium hydroxide	29	kg
	Liquid chlorine	15	kg
	Sodium chlorate	13	kg
	Oxygen	12	kg
	Sulfuric acid	11	kg
	Alum	3	kg
	Limestone	39	kg
Utility	Water	47	m^3
	Bunker-C	38	L
	Electricity	10	kwh
Air Emissions	NO_x	110.38	kg
	SO_x	91.98	kg
Water Emissions	pH	7.1	
	BOD	0.15	kg
	COD	2.12	kg
	SS	0.60	kg
	n-Hexane	0.10	kg
Wastes	Sludges	50	kg
	Ash (Combustion)	0.01	kg
	Waste oil	0.10	kg
	Waste metal	0.58	kg
	Waste wood	0.05	kg
	Waste paper	0.02	kg

재를 일정 크기의 칩으로 가공한 후 제조공장에 야적된다. 이후 다이제스터에 목재칩과 증해액을 투입하여 고온·고압하에서 펄프 섬유를 분리하는 증해공정을 거쳐 펄프 섬유를 세척한다. 이때 증해 폐액 및 세척수는 약품회수 및 재이용을 위해 증발공정으로 이송하게 된다. 세척된 펄프 중 리젝트를 정선, 분리하는 정선공정을 거치고, 정선된 펄프는 몇 단계의 표백과정을 거친 후 건조시켜 판상시트 형태로 만들어 펄프를 생산하게 된다.

Fig. 3의 제조공정에서 펄프 1 ton 생산 시 투입물과 배출물의 실제현장 자료를 조사하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서와 같이, 펄프 1 ton을 생산하기 위하여 약 1,985 kg의 목재칩이 주원료로 사용되며, 수산화나트륨, 염소산나트륨, 알럼, 황산 등이 부원료로 첨가되는 것으로 나타났다. 또한 펄프를 제조하는 과정에서 BC유, 전력 등의 에너지가 소비되며, 이로 인해 SOx, NOx 등의 대기오염물질이 배출되는 것으로 나타났다. 폐수처리장에서의 수질오염물질 데이터와 슬러지, 폐유, 폐목재 등의 폐기물도 각각 정리하여 나타내었다.

Table 5. Results of inventory analysis for pulp

(f.u. ; pulp 1 ton)

	Flow name	Unit	Raw material acquisition	Transportation	Manufacture
I	(r) Oil (in ground)	kg	2.23E+03	4.89E-01	1.75E+01
I	(r) Natural Gas (in ground)	kg	1.67E+02	1.13E-02	2.35E+00
I	(r) Coal (in ground)	kg	2.00E+00	5.33E-05	9.20E+01
I	(r) Limestone ($CaCO_3$, in ground)	kg	6.64E-01	1.08E-04	1.55E+01
I	(r) Sodium Chloride (NaCl)	kg	5.73E-01	6.27E-05	8.47E-02
I	(r) Lignite (in ground)	kg	3.04E+00	2.34E-05	1.04E-03
I	(r) Gravel (unspecified)	kg	1.55E+00	3.54E-04	0.00E+00
I	(r) Potassium Chloride (KCl)	kg	7.54E-01	0.00E+00	0.00E+00
O	(a) Carbon Dioxide (CO_2, fossil)	g	1.23E+06	1.35E+02	3.96E+05
O	(a) Hydrocarbons (except methane)	g	1.44E+04	3.27E+00	1.49E+02
O	(a) Methane (CH_4)	g	1.26E+04	2.35E+00	1.10E+03
O	(a) Sulphur Oxides (SO_x as SO_2)	g	6.84E+03	6.70E-01	1.65E+03
O	(a) Particulates (unspecified)	g	6.17E+02	6.92E-02	1.21E+03
O	(a) Nitrogen Oxides (NO_x as NO_2)	g	2.95E+03	3.28E-01	5.39E+02
O	(a) Hydrocarbons (unspecified)	g	6.51E+02	2.91E-04	9.72E-01
O	(a) Carbon Monoxide (C_O)	g	4.35E+02	8.56E-02	2.14E+02
O	(a) Ethane (C_2H_6)	g	6.23E+02	1.22E-01	2.51E+01
O	(a) Pentane (C_5H_{12})	g	2.08E+02	4.28E-02	1.54E+00
O	(a) Propane (C_3H_8)	g	1.95E+02	3.65E-02	7.32E+00
O	(w) Chlorides (Cl-)	g	1.09E+05	2.48E+01	1.68E+03
O	(w) Sodium (Na+)	g	6.60E+04	1.50E+01	5.82E+02
O	(w) Calcium (Ca++)	g	6.82E+03	1.54E+00	5.42E+01
O	(w) Sulphates (SO_4--)	g	1.87E+03	3.87E-01	2.98E+02
O	(w) TOC (Total Organic Carbon)	g	1.58E+03	3.51E-01	1.11E+01
O	(w) Strontium (Sr II)	g	1.27E+03	2.89E-01	1.04E+01
O	(w) Water: Chemically Polluted	liter	1.12E+03	1.91E+00	7.12E+01
O	(w) Saponifiable Oils and Fats	g	1.03E+03	2.35E-01	8.17E+00
O	(w) Potassium (K+)	g	9.38E+02	2.12E-01	7.40E+00
O	(w) Dissolved Matter (unspecified)	g	4.65E+01	1.67E-03	6.20E+01
O	(w) Barium (Ba++)	g	5.29E+02	1.20E-01	4.20E+00
O	(w) COD	g	3.32E+02	6.98E-02	8.26E-01

I : Input, O : Output, (r) : Resource, (a) : Air emission, (w) : Water emission

2.2.4 목록분석

LCA에서는 평가대상 제품의 생산단계, 즉 본 연구에서의 대상제품인 펄프의 생산단계 자체뿐만 아니라 생산을 위해 투입되는 제반 부원료인 chemicals과 에너지에 대하여 그 상위공정(upstream)까지를 고려한다. 펄프를 생산하기 위해 투입되는 수산화나트륨, 알럼, 석회석 등의 물질들 및 전력, BC유 등의 에너지는 펄프를 생산하는 공장에서 제조되는 것이 아니라 다른 곳에서 생산되어 공급되는 것이다. 즉 이러한 것에 대한 분석을 위해 환경부, 산업자원부에서는 국가기간산업 및 기초소재에 대한 LCI DB(Life Cycle Inventory Database)를 구축하고 있다. 그러나 국내의 국가 LCI DB는 현재 부분적으로는 완료되었지만, 아직 지속적으로 진행 중에 있기 때문에, 일부 화학물질에 대해서는 외국에서 구축된 LCI DB를 이용하였다. 각 단계별로 투입되고 배출되는 목록을 기초로 펄프의 전과정에 대해 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다.

2.3 전과정 영향평가

LCA를 수행함에 있어서 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment; LCIA)는 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 전과정 목록분석만으로는 비교대상이 되는 제품들의 상대적인 환경성 우위만을 판별할 수 있을 뿐이고, 대상 제품 자체의 환경성을 파악하기는 곤란하다. 전과정 영향평가는 전과정 목록분석 결과를 이용하여 잠재적인 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 한다. 즉, 환경에 미치는 영향정도를 정량적으로 계산하여 주어진 시스템이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 것이다. 이러한 영향평가는 현재 다양한 평가방법이 계속 개발 중에 있지만, ISO 14040s에서 영향평가 단계는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 목록항목을 영향범주에 배정하는 분류화 단계(Classification), 영향범주 내에서 목록항목의 환경영향을 나타내는 특성화 단계(Characterization), 지역적, 시간적인 기준을 설정하는 정규화(Normalization) 및 영향범주별 상대적 중요도를 결정하는 가중치 부여 단계

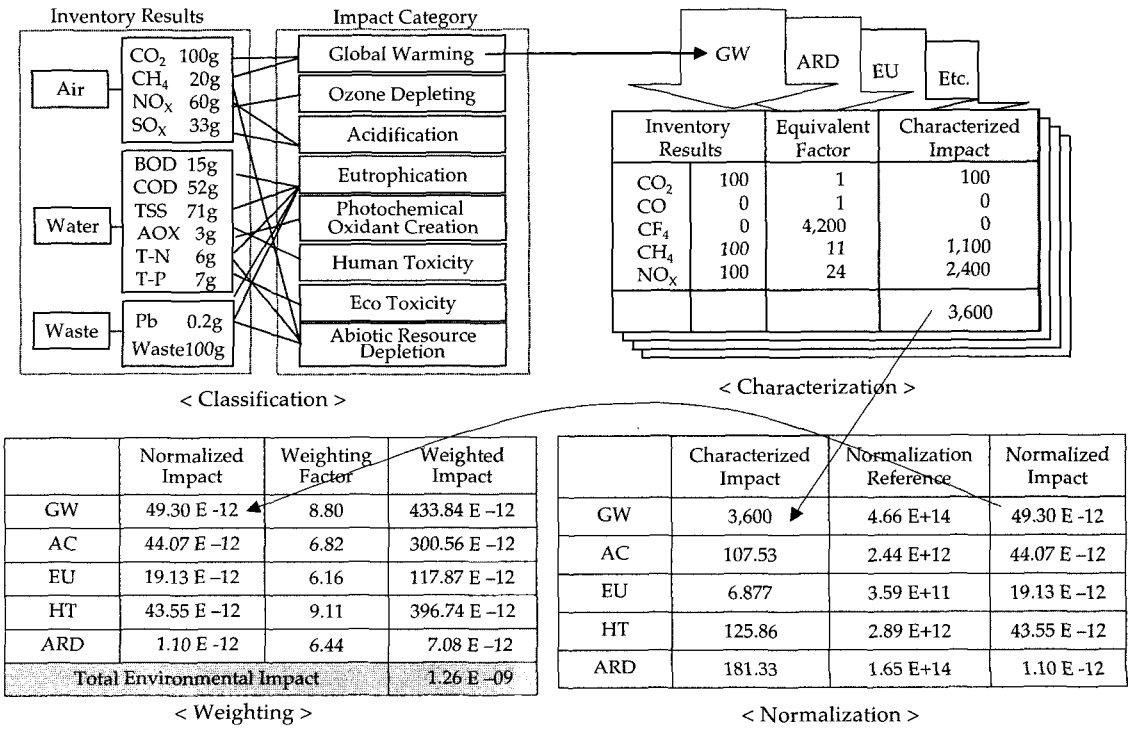

Fig. 4. The procedure of LCIA.

(Weighting)로 구분하여 명시하고 있다[11].

영향평가는 동일한 목록분석의 결과를 가지고 수행하더라도 환경오염물질에 대한 가중정도나 환경영향 범주 등에 따라 상이한 차이를 보인다. 본 연구에서는 세계적으로 가장 많이 사용되는 영향평가 방법인 Eco-indicator 95[6], Ecopoint[6], 그리고 국내에서 연구된 Korean Eco-indicator[15]를 사용하여 영향평가를 수행하였으며, 이들 결과를 상호 비교하였다. 그러나, 상기의 각 방법론들은 환경영향범주를 각각 달리 설정하고 있기 때문에, 본 연구에서는 각 방법론에서 비교적 공통적으로 사용되고 있는 자원고갈(Abiotic Resources Depletion; ARD), 지구온난화(Global Warming; GW), 오존층(Ozone Layer Depletion; OD), 광화학 산화물 생성(Photochemical Oxidant Creation; POC), 산성비(Acidification; AC), 부영양화(Eutro phication; EU), 생태독성(Eco-toxicity; ET), 인간독성(Human Toxicity; HT)의 8가지를 환경영향범주로 설정하였다.

전술한 목록분석 결과를 바탕으로 수행한 전과정 영향평가의 결과를 Table 6에 각각 나타내었다. 각 영향평가 방법론별 결과를 보면, Eco-indicator에서는 자원고갈에 대한 영향을, Ecopoint에서는 자원고갈, 오존층파괴, 생태독성에 대한 영향을 고려하지 않고 있다. 이는 방법론 별로 중요시 하는 영향범주만을 평가항목으로 선정하고 있기 때문이다. 또한, 동일한 목록분석 결과 값을 가지고 영향평가를 하였지만, 각 방법론별 환경영향이 상당한 차

Table 6. Environmental impact of pulp by each LCIA methodology

Impact category \ LCIA	Eco-indicator 95 (Person · year/f.u.)	Ecopoint (Ecopoint/f.u.)	Korean Eco-indicator (Person · year/f.u.)
Abiotic Resource Depletion	-	-	4.90E+00
Global Warming	1.18E+03	2.69E+05	8.34E-02
Ozone Layer Depletion	7.62E+02	-	1.33E-02
Photochemical Oxidant Creation	1.32E+02	2.09E+05	5.60E-02
Acidification	1.62E+03	3.77E+05	2.50E-02
Eutrophication	3.12E+02	1.63E+05	3.60E-03
Eco-toxicity	1.07E+02	-	4.33E-01
Human Toxicity	6.16E+03	5.86E+05	3.88E-02

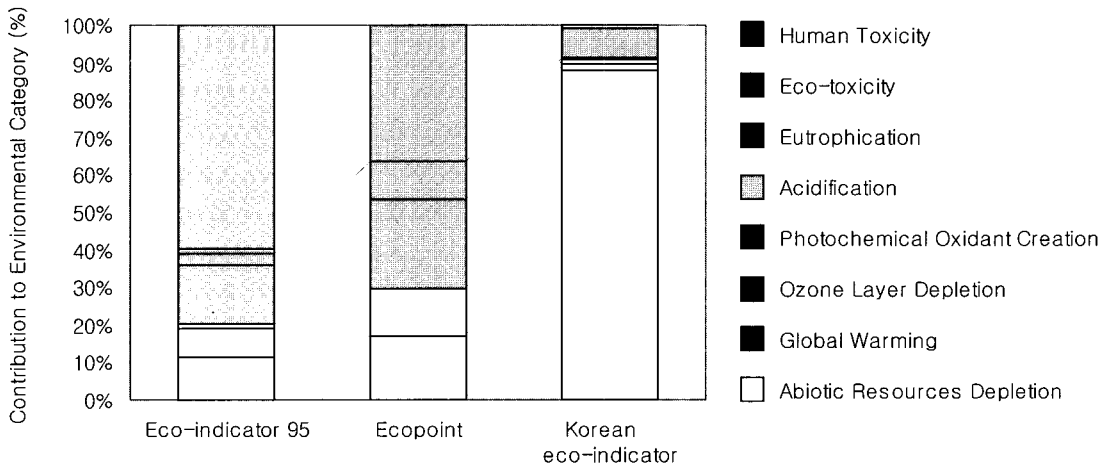

Fig. 5. Contribution of environmental impact to environmental categories.

이를 나타내고 있는데, 이는 각 방법마다 환경영향 범주에 대한 가중 정도가 다르기 때문이다. 세계적으로 이러한 영향평가 방법론의 차이점을 해결하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있는 것도 이러한 이유에 기인한다고 할 수 있다. 한편, 전체적인 영향평가 결과에서는 자원고갈, 인간독성, 생태독성, 지구온난화 등에 대한 환경영향이 가장 많이 차지하고 있음을 알 수 있다.

각 영향평가 방법론별, 환경영향 범주별 환경영향의 기여도를 Fig. 5에 나타내었다. Eco-indicator 95를 이용한 영향평가 결과, 인간독성에 대한 환경영향이 6.16E+03(Person·year/f.u)로 약 60%를 차지했으며, 다음으로는 산성비가 16%, 지구온난화가 12%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한, Ecopoint의 경우, 인간독성에 대한 환경영향이 5.86E+05 (Ecopoint/f.u)로 약 36%를 차지했으며, 다음으로는 산성비가 24%, 지구온난화가 17%를 차지하는 것으로 나타났으며, Korean eco-indicator의 경우, 자원고갈에 대한 환경영향이 4.90E+00 (Person·year/f.u)로 약 88%를 차지했으며, 다음으로는 생태독성이 8%, 지구온난화가 2%를 차지하는 것으로 나타났다.

2.4 전과정 결과해석

전과정 결과해석의 단계는 LCA의 최종 단계로서 목록분석과 영향평가 단계로부터 얻은 정보를 바탕으로 평가대상 제품의 환경성에 미치는 요인들을 규명하고 검토하는 단계이다. 본 연구에서는 환경영향 범주별로 영향이 큰 물질들을 선정하여 key factor로 구성하였는데, 여기서 구성된 key factor들은 개선계획을 세울 때 우선적으로 개선 대상에 포함시키게 된다. Table 7에는 각 영향평가 방법론별 key factor를 영향범주별로 정리하여 나타내었다.

자원고갈을 고려하고 있는 방법인 Korean eco-indicator에서는 Oil(94.67%), Natural gas (4.88%)가 key factor로 나타났으며, 지구온난화의 key factor는 모든 방법에서 CO_2, CH_4 물질이 공통적으로 나타났다. 생태독성은 Korean eco-indicator와 Eco-indicator 95에서만 고려하고 있는데, 전자의 경우 PAH's(86.70%)와 Toluene

Table 7. Key factor of pulp in each LCIA method

Impact category	Eco-indicator 95	Ecopoint	Korean eco-indicator
Abiotic Resource Depletion*	-	-	Oil(94.67%), Natural gas(4.88%)
Global Warming	Halon-1301 (64.60%) CO_2(27.23%)	CH_4(73.22%) CO_2(22.48%)	CO_2(80.82%) CH_4(16.57%)
Ozone layer Depletion	Halon-1301 (100%)	-	Halon-1301 (100%)
Photochemical Oxidant Creation	HC(40.30%) CH_4(32.17%)	CH_4(94.46%) HC(5.54%)	HC(98.39%) CH_4(1.55%)
Acidification	SOx(80.23%), NOx(18.48%) HCl(0.60%)	SO_x(55.83%), NO_x(42.26%) HCl(1.39%)	SO_x(74.50%) NO_x(21.46%) NH_3(2.91%)
Eutrophication	NO_x(96.05%) NH_3(3.37%)	NO_x(84.45%) COD(0.78%)	NO_x(66.59%) TOC(18.27%)
Eco-toxicity	Cd(37.96%) Ni(23.38%) Pb(16.36%)	-	PAH's (86.70%) Toluene(4.20%)
Human Toxicity	Ni(31.04%) SO_x(21.12%) Cd(19.26%)	SO_x(35.95%) CH_4(33.63%) NO_x(27.21%)	SO_x(64.19%) NO_x(17.17%)

* : ARD is not considered in Eco-indicator 95 method,
- : ARD, OD and ET are not considered in Ecopoint method.

(4.20%)가 그리고, 후자의 경우 Cd(37.96%) Ni (23.38%), Pb(16.36%) 등의 물질이 key factor가 되는 물질로 나타났다. 이러한 key factor들은 환경영향을 저감하기 위한 방침이나 대책을 강구할 때 중요한 자료가 된다. 즉, 환경에 가장 많은 영향을 미치는 원인물질을 추적하고, 이러한 물질들에 대한 저감 및 대체물질 사용 등을 강구하여, 장기적인 대책으로는 친환경적인 제조 공정으로의 개선, 폐지의 재활용율 증대 및 재활용 기술 개발, 에너지 사용의 효율화 방안 등을 제공하게 된다.

3. 결과 고찰

본 연구의 목록분석 결과를 외국의 연구 결과[13,14]와 비교하여 신뢰도를 검증하고, 어떤 부분에서 환경영향의 차이가 발생하는지를 고찰하였다. 외국의 예로서 본 연구에서 분석한 제품과 동일한 제품을 선정하였으며, 분석 범위도 본 연구에서와 같이 원료취득, 원료수송, 제조까지의 동일한 시스템 범위 내에서 평가한 결과를 이용하였다. 영향평가는 전 절에서 고려한 3가지 영향평가 방법론을 이용하였으며, 수행결과를 본 연구의 결과 값과 비교하였다. 비교를 위한 외국자료는 캐나다에서 분석된 것으로, 크라프트 표백펄프를 1 ton 생산 시 투입되고 배출되는 목록분석 자료이며, Table 8에 캐나다에서 분석한 목록분석의 결과 값과 국내의 결과 값을 비교하여 나타내었다. 한 예로 펄프 1 ton 을 생산 시 목재 칩의 투입량이 캐나다의 경우가 국내보다 450 kg정도가 많았으며, 배출량을 비교하면 지구온난화에 가장 크게 기여하는 물질인 CO2의 경우, 캐나다에서 1.02E+06 g정도 더 많이 배출되었고 산성비에 크게 기여하는 물질인 NOx는 6.70E+02 g정도 더 많이 배출되었다. 이와 반대로 SOx의 경우에는 국내의 자료가 5.19E+03 g정도로 더 많이 배출되는 것으로 나타났다. 이외 다른 물질들도 어느 정도 차이가 있었는데, 이는 펄프의 원료취득의 방법, 수송거리의 차이, 제조공정상의 차이 등에 의해서 투입 및 배출물질이 다르게 나타나는 것으로

Table 8. Comparison of inventory analysis results

(f.u. ; pulp 1 ton)

	flow name	Unit	Canada	Korea
I	Wood	kg	2.44E+03	1.99E+03
I	(r) Coal (in ground)	kg	1.67E+02	1.01E+02
I	(r) Sodium Chloride (NaCl,)	kg	6.44E+01	4.93E+01
I	(r) Limestone ($CaCO_3$, in ground)	kg	4.20E+01	5.59E+01
I	(r) Oil (in ground)	kg	4.14E+01	2.25E+03
I	(r) Natural Gas (in ground)	kg	1.22E+01	1.74E+02
I	(r) Lignite (in ground)	kg	8.13E+00	3.05E+00
O	(a) Carbon Dioxide (CO_2)	g	2.70E+06	1.68E+06
O	(a) Particulates (unspecified)	g	5.87E+03	5.49E+03
O	(a) Nitrogen Oxides (NO_x as NO_2)	g	4.44E+03	3.77E+03
O	(a) Sulphur Oxides (SO_x as SO_2)	g	3.97E+03	9.16E+03
O	(a) Aldehyde (unspecified)	g	3.40E+03	1.28E-01
O	(a) Methane (CH_4)	g	1.26E+03	1.38E+04
O	(a) Hydrocarbons (except methane)	g	8.76E+02	1.46E+04
O	(w) COD (Chemical Oxygen Demand)	g	5.50E+04	3.33E+02
O	(w) Suspended Matter (unspecified)	g	8.23E+03	2.78E+02
O	(w) Chlorides (Cl-)	g	5.03E+03	1.14E+05
O	(w) Salts (unspecified)	g	3.22E+03	2.17E+00
O	(w) BOD5 (Biochemical Oxygen Demand)	g	3.00E+03	1.62E+01
O	(w) Sulphates (SO_4--)	g	2.03E+03	2.42E+03

Table 9. Comparison of LCIA results

	Eco-indicator 95 (Person · year/f.u)		Ecopoint (Ecopoint/f.u)		Korean eco-indicator (Person · year/f.u)	
	Korea	Canada	Korea	Canada	Korea	Canada
Abiotic Resource Depletion	-	-	-	-	4.90E+00	1.37E-04
Global Warming	1.18E+03	4.50E+02	2.69E+05	3.43E+04	8.34E-02	1.96E-02
Ozone layer Depletion	7.62E+02	1.57E+01	-	-	1.33E-02	2.75E-04
Photochemical Oxidant Creation	1.32E+02	1.03E+01	2.09E+05	1.80E+04	5.60E-02	1.68E-02
Acidification	1.62E+03	9.24E+02	3.77E+05	2.83E+05	2.50E-02	1.46E-02
Eutrophication	3.12E+02	5.15E+02	1.63E+05	3.99E+05	3.60E-03	9.16E-03
Eco-toxicity	1.07E+02	2.36E+02	-	-	4.33E-01	1.16E-01
Human Toxicity	6.16E+03	1.31E+03	5.86E+05	3.01E+05	3.88E-02	1.91E-02
Total Environmenta impact	1.03E+04	3.46E+03	1.60E+06	1.03E+06	5.55E+00	3.32E-01

판단된다.

이러한 목록분석 결과 값을 이용하여 영향평가를 수행하였으며, 이를 본 연구에서 분석한 환경영향평가 결과와 비교하여 Table 9에 나타내었다. 캐나다 자료에 대한 영향평가 결과와 본 연구의 영향평가를 비교해 본 결과, 전체적인 경향은 비슷하게 나타나 연구결과의 신뢰성을 검증할 수 있지만, 환경영향의 크기는 다소 차이를 나타내었다. 예를 들어, Korean eco-indicator에서는 국내의 영향평가 결과가 캐나다의 영향평가 결과보다 5.22E+00 (Person·year/f.u) 정도 높게 나타났으며, Ecopoint와 Eco-indicator 95 방법에 의한 영향평가 결과에서도 각각 5.70E+05 (Ecopoint/f.u), 6.84E+03 (Person·year/f.u)정도로 국내에서의 영향평가 결과 값이 비교적 높게 나타났다. 이러한 이유는 각 영향평가 방법별 영향범주, 즉 자원고갈, 지구온난화, 오존층, 광화학 산화물 생성, 산성비, 부영양화, 생태독성, 인간독성에 있어서 크게 비중을 차지하고 있는 물질들의 양이 전반적으로 국내의 경우가 크기 때문이다. 또한 캐나다 및 국내의 목록분석 결과를 이용하여 각 영향방법별로 평가를 하였지만, 각 영향평가의 결과가 상이한 것은 전 절에서 서술한 가치평가, 즉 영향범주별 중요도를 달리 산정하고 있기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 백상지, 식품포장용 원지, 종이컵 원지 등과 같이 제지 및 지류관련제품의 주원료로 사용되고 있는 펄프에 대한 환경영향을 LCA를 수행함으로써 분석해보았으며, 펄프의 각 단계별 목록분석 결과를 이용하여 영향평가 방법론별 평가결과를 비교 분석하였다. 동일한 목록분석 결과 값을 가지고 영향평가를 하였지만, 각 방법론별 환경영향이 상당한 차이를 나타내었는데, 이는 각 방법마다 환경영향범주에 대한 가중정도가 다르기 때문이다. LCA수행결과를 가지고 영향범주별 주요 영향물질을 추적해 본 결과, 자원고갈, 지구온난화, 생태독성, 인간독성 등에 대한 환경영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 본 연구의 결과 값과 외국 관련산업의 연구사례를 비교하여 연구 결과의 신뢰성을 검증하였다.

연구를 수행함에 있어서, 제지 및 지류관련 산업에 대하여 국내에서는 처음으로 시도되는 연구이기 때문에 원료물질, 공정, 운송방법, 사용에너지 등에 대한 데이터베이스의 부재로 인하여 자료의 수집과 신뢰성 판단에 많은 어려움이 있었다. 향후, 보다 신뢰성 있는 LCA를 수행하기 위해서는 표준화된 공정과 범위설정, 기능단위 등에 관한 표준 가이드라인, 그리고 국가 차원의 공용 데이터베이스가 구

축되어 각 제품의 LCA수행에 활용되어져야 할 것이다.

한편, 본 연구에서 수행된 LCA결과는 종이와 관련된 기업의 환경친화적인 제품 설계(DfE)에 활용될 수 있을 것이며, 환경친화적 대안을 선택하는데 활용될 수 있을 것이다. 또한, 평가결과에 따라 필요한 경우 EMS(환경경영시스템)방침, 목표 등의 변경을 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것이다. 또한, 2002년부터 제품의 환경성적표지제도(Type Ⅲ)가 본격적으로 시행되고 있는 현 시점에서, 이에 탄력적으로 대응할 수 있는 근거를 마련하였다고 할 수 있을 것이다.

인용문헌

1. 황용우, "LCA의 국내외 동향 및 향후 추세", 대한환경공학회 전과정평가 전문위원회 정기세미나 논문집 (2000).
2. EPA, "The Use of Life Cycle Assessment in Environmental Labelling" (1993).
3. 산업자원부 (사)한국포장개발연구원, "지류포장의 제조공정 및 지류포장재의 청정화를 위한 환경평가 기준 표준설정 연구개발" (2000).
4. 산업자원부 (사)한국포장개발연구원, 포장기술선진화 개발전략 (2000).
5. 유영준, "환경경영시스템-LCA평가", 첨단환경기술 (1996).
6. 社団法人 産業環境管理協會, "LCA日本フォーラム報告書" (1997).
7. 한국품질환경인증협회(KAB), "환경전과정평가(LCA) 이론과 지침" (1999).
8. 박광호, 황용우, 조병묵, 이학래, 김형진, "LCA기법을 이용한 지류제품의 잠재적 환경부하 평가" 한국공업화학회, 응용화학, 제5권, 제1호, pp. 287～290 (2001).
9. U.S. EPA, "Profile of the Pulp and Paper Industry" (1995).
10. 환경부, "환경성적표지작성지침 및 인증기준" (2002).
11. ISO, 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (1997).
12. 황용우 외, "환경전과정평가(Environmental Life-Cycle Assessment)", 시그마프레스 (1998).
13. SAFEL, "Life Cycle Inventories for Packagings Volume Ⅰ" (1998).
14. SAFEL, "Life Cycle Inventories for Packagings Volume Ⅱ" (1998).
15. Kun M. Lee, "A weighting Method for the Korean Eco-Indicator." The International Journal of LCA, 4(3), pp.161～166 (1999).