

## 목재 펠릿 생산에 따른 온실 가스 배출량 분석\*

김태훈\*\*·윤성이\*\*\*

### Analysis of Greenhouse Gas Emissions Associated with the Production of Wood Pellets

Kim, Tae Hoon·Yoon, Sung-Yee

In this study, it is intended that utilize the LCA (Life Cycle Assessment) method, to evaluate the environmental impact of wood pellet manufacturing facility. As mentioned above, wood pellet manufacturing facility of 20 has produced wood pellets as a raw material sawdust and wood in our country. In this study, in order to feature manufacturing process of wood pellets that resemble almost necessary to analyze evenly size and characteristics of various equipment whether these reasonable, the characteristics of the equipment may be different, the production of 20 places I surveyed the facility one central timber distribution center one large scale most of the equipment.

Key words : *wood pellet, greenhouse gas, life cycle assessment*

## I . 서 론

펠릿의 탄생은 1970년 1차 오일쇼크 후 스칸디나비아반도에서 시작하여, 1980년대 초에 북미와 유럽으로 확산되었으며, 2012년 1월 현재 전 세계 목재펠릿공장이 652개소, 생산능력이 32,852,050톤일 정도로 공장 수와 생산능력이 빠르게 증가되어 가고 있다(The Bio-energy International, 2012).

우리나라에서는 2008년 정부가 ‘저탄소 녹색성장’을 기치로 내걸며 기후변화 대응을 위

---

\* 이 논문은 농림부 “농·임, 축산 바이오매스 순환 실증단지(Biopia)모델 구축 및 사업지침서 개발”에 의하여 이루어졌음.

\*\* 동국대학교 식품산업관리학과 식품클러스터연구소

\*\*\* Corresponding author, 동국대학교 식품산업관리학과 식품클러스터연구소(E-mail : syyoon@dongguk.edu)

한 신재생에너지 개발과 보급 사업 확대에 나서게 되었다. 이에 따라 정부지원 사업에 의해 2008년 산림조합중앙회 목재유통센터(경기 여주)에 우리나라 최초의 목재 펠릿의 상업적 제조시설이 가동을 시작하였고, 이어서 SK임업(전남 화순)이 순수 민간투자자로 펠릿을 생산하기 시작하였다. 이어서 2009년 김해, 청원, 양평, 단양 등에 4개소, 2010년 8개소(포항, 거창, 괴산, 연기, 산청, 태백, 화천, 무주), 2011년 3개소(광양, 포천, 서귀포) 등 정부지원으로 16개소가 펠릿생산설비를 갖추었다. 한편 민간자본에 의한 투자도 이루어져 동해(일도), 정선(우주그린), 평택(그린에코) 등 3개소가 조업 중에 있다. 따라서 우리나라에는 2012년 6월 현재 총 20개소의 제조시설이 설치·운영 중에 있다.

본 연구에서는 LCA(Life Cycle Assessment)방법론을 활용하여 친환경에너지로서 최근 농업부분에서 사용빈도가 증가하고 있는 겨울철 난방에너지원중 하나인 목재펠릿에 대한 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 한다. 앞서 언급했듯이 우리나라에는 20개의 목재펠릿 제조설비들이 톱밥을 원료로 목재펠릿을 생산하고 있으며, 아직은 우리나라에 보편화 되어 있지는 않지만 농업부분에서도 목재칩과 목재펠릿은 지속적으로 사용되고 있다. 또한 목재펠릿의 생산과 관련하여 설비들의 다양한 규모와 특성들이 고르게 분석되어야 좀 더 신뢰도가 높은 결과가 나올 수 있으나, 설비들의 특성이 다르더라도 목재펠릿 생산공정이 대부분 비슷하다는 특성 때문에, 20개의 제조설비들 중 가장 규모가 큰 중부목재유통센터 1개 시설을 대상으로 목재펠릿 생산할 때에 발생하는 온실가스배출량에 관한 연구를 진행하였다.

최근 생태농업 혹은 유기농업, 자원순환농업 등 친환경농업에서도 지구환경 특히 지구온난화포텐셜과 관련한 온실효과가스의 배출량을 저감하는데 많은 연구가 진행되기 시작했지만 아직 활성화되지 못한 사정이다. 특히 친환경농업에 사용되는 농자재는 물론이고 농법에 따른 차별적 전과정평가가 이루어 지지 못하고 있다. 그래서 본 논문에서는 그러한 연구의 활성화를 위해서 자원순환농업과 관련이 많고 최근 특히 바이오매스 자원활용을 통한 재생에너지의 농업부분에 사용량과 빈도가 증가하고 있는 점에 비추어 본 연구를 수행하였다.

## II. 공정개요 및 LCA 모형 설정

목재펠릿은 원목과 같은 목재원료를 펠릿생산에 적합한 크기로 잘게 파쇄한 후 수분을 건조시켜 이를 적당한 크기 및 모양으로 성형하여 포장하는 것이 기본적인 제조과정이다 (Fig. 1).

목재펠릿 제조설비의 전과정평가를 위해 각 단계별로 고려해야 하는 세부적인 사항들에 대해 정의·규정함으로써 모형을 설정하는데, 본 연구의 목적이 목재펠릿제조시설에 대한 LCI 구축이 주목적이기 때문에, 공정별로 세분화하여 분석하기보다는 단순화시켜 모형을

설정하였다. 본 평가의 기능단위는 목재펠릿 1kg을 기준으로 산정하였다.

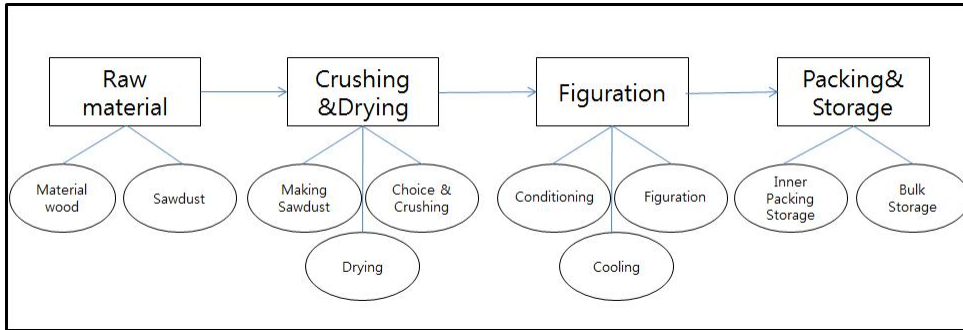


Fig. 1. Manufacturing process basic wood pellets

## 1. 목적 및 범위 정의

### 1) 목적 정의

본 목재펠릿에 대한 전과정평가의 목적은 목재펠릿 제조설비의 환경성을 분석하고, 나아가 앞으로 우리나라에서 바이오피아(Biopia)<sup>1)</sup> 단지를 구축 할 시에 목재펠릿 제조시설의 도입에 따른 환경영향이 어떻게 변화하는지 예측이 가능하도록 하나의 데이터베이스화하는 것이 주목적이다.

### 2) 기능, 기능단위 및 기준흐름

본 연구의 대상 공정 및 제품은 목재펠릿 제조까지의 전 과정에 걸친 공정이며, 6가지 범주의 환경영향(자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학적산화물 생성) 중 지구온난화 범주를 정량적으로 평가하는데 주목적을 두고 있다. 따라서 공정 또는 제품이 지니고 있는 모든 기능을 대상으로 정의할 수 있으며, 기능단위로는 기능을 구현하여 판매되는 용도에 따라 1kg, 1kWh 등으로 설정이 가능하다. 목재펠릿의 기능은 에너지원으로서의 기능을 하며, 기능단위는 목재펠릿 1kg 제조이다.

1) Biopia : 녹색성장의 관점에서 바이오매스를 이용하는 에너지 자립 마을(또는 단지)의 한 유형으로서 “친환경 청정에너지 농업기술 확보와 활력 있는 농촌개발을 위해 농·산촌에서 유래하는 바이오매스의 발생단계부터 이용단계까지의 관리체계를 확보하고, 바이오매스의 물질 및 에너지 자원화를 통해 지역단위 유기자원 및 에너지 순환체계를 구축하여 청정 에너지생산, 온실가스 감축, 친환경 농·축산 정착, 관광자원 연계 등을 통해 경제적 수익을 창출하는 마을(단지)”로 사업기획자는 정의하고 있음.

3) 시스템 경계

본 연구에서 LCA의 시스템경계는 Fig. 2에 주어진 바와 같이, 목재펠릿 원료물질의 투입, 목재펠릿 제조, 포장 및 저장공정을 포함하며, 공정상 발생하는 스크랩은 전량 재활용되고 폐기물은 발생하지 않기 때문에 폐기물 처리는 제외하였다. 원료물질의 투입에서 운송은 전국 각지에서 벌채되어 수집되는 것으로 목재펠릿 제조시설까지의 운송으로 한정하였으며, 조사업체에서는 운송거리가 기록되어있지 않아 산림청통계에 따라 우리나라 원목 벌채 및 수집량에 따라 각 지역별로 가중평균하여 운송거리에 적용하였다.

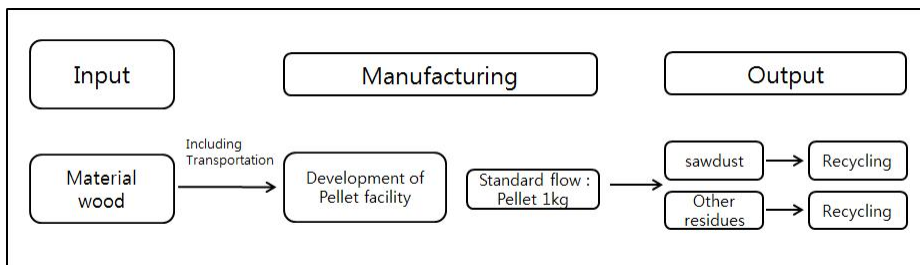


Fig. 2. Products and systems for wood pellets

3) 데이터 범주

목재펠릿 제조시설에 투입되는 물질은 원료물질, 에너지 및 유틸리티가 포함된다. 원료물질은 숯가꾸기 부산물인 원목, 목재가공소에서 원목가공후 발생하는 톱밥이 된다. 산출물로는 제품인 목재펠릿이며, 대기 및 수계로의 배출물, 그리고 고형폐기물은 발생되지 않는 것으로 파악되어 고려하지 않았다.

4) 데이터 품질 요건

데이터 품질에 대한 기술은 연구결과의 신뢰성을 판단하는 것과 적절한 결과해석을 위해서 매우 중요하기 때문에 데이터 품질의 요구사항이 연구목표와 범위에 부합하도록 규정되어야 한다. 데이터 품질은 데이터를 수집하는 방법 또는 통합하여 가공하는 방법뿐만 아니라 데이터의 정량적, 정성적 특성에 의해서 정해진다. 본 연구에서 사용된 데이터의 품질 요건 및 데이터 출처는 아래의 Table 1과 같다.

본 연구에서 사용한 데이터 출처의 각 항목에 대한 정의는 다음과 같다. 측정치는 제품 생산량, 투입된 전기 소비량 등과 같이 현장에서 숫자로 관리하는 데이터들을 일컫는다. 전기 소비량, 건조용 연료 등과 같이 공장 전체 사용량밖에 없고 공정별로 관리가 되지 않는 데이터들인 경우에는 제품 생산량 등을 기준으로 각 단위공정별로 할당을 통해 계산하여야 하고, 이렇게 얻어진 데이터를 계산치라 한다. 데이터 품질 요건에 따라 1년간의 누적평균 데이터가 필요하나 수개월간의 데이터 밖에 없을 경우, 수개월간의 데이터를 1년으로

환산한 데이터 등을 추정치라 한다.

Table 1. Data source and quality requirements of the data

Classification	Life Cycle Step	
	Raw material extraction, manufacturing raw materials, transportation, disposal	Wood pellet production
Temporal range	As defined by the database of the state certified the latest	Data for one year in December January 2011
Technical range	Industry average data	Cumulative average data
Data source	1. Database of state certified 2. Literature data	Field data (estimated measurement, or calculation)

5) 할당

전력은 데이터 수집기간 내에 사용한 총 전력량과 해당 제품을 생산하는데 소모한 전력량을 구한 다음 각 공정별로 사용한 전력량을 구해야 타당하나, 현실적으로 공정별 전력 사용량을 기록하는 경우는 거의 없고 시설 전체 또는 건물 전체에서 사용한 전력량 데이터로 존재한다. 따라서 시설 전체에서 사용한 데이터를 기반으로 하여 해당 목재 펠릿 제조에 사용한 전력량과 각 공정별 사용 전력량을 계산하여 할당하였다.

기본적으로 할당 기준은 연간 전체 목재펠릿 생산량의 생산량 비율을 기본으로 하고, 각 공정별 할당은 설비용량과 월간 평균 사용시간을 기준으로 하여 산출하였다. LNG 역시 전력과 같은 기준으로 할당하였다.

6) 가정 및 제한사항

본 연구에서 개별 시설별로 공통적으로 적용된 가정 및 제한사항은 다음과 같다.

첫째, 원료물질의 수송은 전국각지로부터 들어오나, 개별데이터가 존재하지 않기 때문에 산림청 통계의 제주지역을 제외한 전국 별채수집량을 근거로 가중평균거리를 적용하였다.

둘째, 원료물질 중 톱밥의 경우 수송거리가 발생하지 않으나, 톱밥의 원료가 원목이고, 그 원료가 공장 내 목재가공소로 수송되므로 동일하게 수송거리를 적용시켰다.

셋째, 목재펠릿 제조공정에서 배출되는 부산물 및 스크랩은 전량 파쇄공정을 통해 톱밥으로 재활용되어, 폐기물이 발생하지 않기 때문에 폐기물 처리공정은 고려하지 않았다.

2. 주요 배출원의 온실가스 배출량 계산식

목재펠릿 생산에 필요한 주요 원료들의 수송에 따른 온실가스 배출량 계산 및 생산에 사용되는 각종 에너지들의 온실가스 배출은 다음의 수식에 의해서 계산된다.

1) 원자재 운송에 따른 온실가스 배출량

운반은 최대 5t를 적재할 수 있는 트럭을 사용하는 것으로 가정하였다. 환경부의 LCI인 벤토리에는 5t트럭을 이용한 수송 작업 시 온실가스배출량을 산정하고 있는데, 이 자료를 이용하여 각 수집·생산과정에서의 산물량(t)을 시나리오에 따른 운반 거리만큼 운반할 경우의 온실가스배출량을 산출하였다. 실제 운반 작업에서는 트럭 1대가 하루에 2회 이상 왕복 운행을 할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 운송에 따른 온실가스배출량은 5t 트럭의 운행거리의 비례하여 산출되므로 운행 횟수는 고려하지 않았다. 또한 운반 작업은 짐재 작업장에서 공장으로의 운반, 공장에서 소비처로의 운반으로 구분되는데 본 연구에서는 목재펠릿의 생산까지의 데이터를 수집하고 LCA를 진행하였기 때문에 공장에서 소비처로 운반되는 운송거리는 고려하지 않았다.

목재펠릿의 원료인 톱밥 그리고 포장에 사용되는 LDPE 비닐의 사용을 위해서는 제조설비까지의 운송이 필요하며 운송에 따른 온실가스 배출량은 탄소배출 계수에 의해서 계산된다(수식 1).

$$T_{i-transpotation} = (D_i \times C_i \times E_i) \tag{1}$$

- $T_{i-transpotation}$  : 원자재 i의 운송에 따른 온실가스 배출량(kgCO<sub>2</sub>)
- $D_i$  : 원자재 및 포장재 운송 i의 운송거리(km)
- $C_i$  : 원자재 및 포장재 i의 단위환산계수 (kg/km)
- $E_i$  : 원자재 및 포장재 운송 i의 탄소 배출계수(kgCO<sub>2</sub>/kg)

2) 에너지 생산 및 사용단계에 따른 온실가스 배출량

LNG의 경우 온실가스배출은 에너지 생산단계뿐만 아니라 사용단계에서도 온실가스 배출이 이루어진다. 때문에 전기를 제외한 화석연료 에너지는 생산단계의 배출계수와 사용단계의 배출계수를 구분하여 적용한다(수식 2). 전기에너지는 사용단계의 온실가스배출이 없으므로 생산단계의 온실가스배출만을 평가한다.

$$En_i = \sum_i [(M_i \times C_i \times E_{i-Production}) + (M_i \times C_i \times E_{i-use})] \tag{2}$$

- $En_i$  : 에너지 i의 생산 및 사용 시 발생하는 온실가스 배출량(kgCO<sub>2</sub>)
- $M_i$  : 에너지 i의 사용량(L or M<sup>3</sup> or kWh)
- $C_i$  : 에너지 i의 단위환산계수(Table 2 참조)
- $E_{i-Production}$  : 에너지 I의 생산 탄소배출계수(kgCO<sub>2</sub>/kg or kWh)
- $E_{i-Use}$  : 에너지 i의 사용 탄소배출계수(kgCO<sub>2</sub>/kg)

Table 2. Conversion coefficient and Carbon emission coefficient of energy

	Classification	Conversion coefficient	Unit	Emission coefficient by energy production (kgCO <sub>2</sub> /kg)	Emission coefficient by energy use (kgCO <sub>2</sub> /L or Nm <sup>3</sup> or kg)
Energy	Diesel oil	0.860	kg/L	0.068	2.67
	Kerosene	0.840	kg/L	0.253	2.52
	Heavy oil	0.950	kg/L	0.325	3.04
	Volatile oil	0.750	kg/L	0.083	2.2
	LPG	0.579	kg/L	0.596	3.65
	LNG	0.805	kg/m <sup>3</sup>	0.595	2.58
	Briquette	3.750	kg/장	0.480	1.91
	Electricity	-	kg/kWh	0.495	-

\* IPCC(2006)

### 3) 포장공정에 따른 온실가스 배출량

목재펠릿 1kg을 상품으로 생산할 때에는 운송, 제조 그리고 포장까지의 공정들이 진행된다. 하지만 목재펠릿과 관련된 선행연구들에서는 포장공정을 고려하지 않은 연구들이 많다. 포장공정에서는 운송, 제조 공정들보다 지구온난화에 많은 영향을 끼치는 N<sub>2</sub>O가 가장 많이 배출되기 때문에 이 공정을 고려하여 환경성 평가를 진행하여야 한다. 가장 많이 LDPE를 통한 목재펠릿의 포장공정에서 발생하는 온실가스배출량은 LDPE의 탄소배출계수에 의해서 산출된다(수식 3).

$$P_{i-packaging} = (L_i \times C_i \times E_i) \tag{3}$$

$P_{i-packaging}$  : 포장재 i의 포장공정에서 발생하는 온실가스 배출량(kgCO<sub>2</sub>)

$L_i$  : 포장재 i의 사용량(kg)

$C_i$  : 포장재 i의 단위환산계수

$E_i$  : 포장재 i의 탄소배출계수(kgCO<sub>2</sub>/kg)

## 3. 목재 펠릿 INPUT & OUTPUT 데이터

### 1) 원료 및 에너지 투입물질 및 투입량

데이터 수집기간 중에 목재펠릿 제조시설이 사용한 원료 및 에너지 투입물질들과 투입

량을 INPUT데이터로 사용하였다. INPUT데이터를 가지고 목재펠릿 제조시설이 수집기간동안 발생시킨 온실가스배출량을 산정한다.

펠릿제조시설의 원료 투입물질은 목질이며, 이를 세분화하면 톱밥, 원목(침엽수), 원목(활엽수)로 나누어진다. 투입비율은 톱밥이 약 70%, 침엽수 약 21%, 활엽수 약 9% 정도이다. 원목 중 침엽수 비율이 높은 이유는 펠릿의 품질을 높이기 위함이다.

Table 3. Input energy and input materials and raw materials

Material	Unit	Input	Remarks
Sawdust	Ton	5,040	Transportation distance application
Wood (softwood)	Ton	1,512	Transportation distance application
Wood (hardwood)	Ton	648	Transportation distance application
Electricity	KWh	1,389,280	Pellet palletizing
LNG	Nm <sup>3</sup>	262,643	converted to kg
Pakaging	Ton	180	Material: LDPE, unit weight: about 0.5kg

## 2) LCA INPUT-OUTPUT LIST

목재펠릿 제조시설에서 목재펠릿 1kg을 생산하기 위하여 투입·배출되는 요소들의 수를 모두 이 논문에 나타낼 수 없어서 가장 많은 비중을 차지하는 순으로 각 30개의를 뽑아 LIST로 나타냈다. Table 5에서 알 수 있듯이 목재펠릿 제조에 투입물 중 톱밥이 0.967kg, 그리고 물 0.495kg으로 거의 대부분을 차지하고 그 다음으로 원유 0.0468kg, LNG 0.0458kg 순으로 투입되는 것을 알 수 있다. Table 4는 목재펠릿 1kg을 생산할 때에는 생산품과 배출물들의 LIST로써 목재펠릿 생산에서 배출되는 배출물들을 나타낸다. 가장 많이 배출되는 물질은 Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>)로 지구온난화에 가장 영향을 많이 주는 온실가스 이며 이번 연구에서 주로 다룰 물질이며, 펠릿을 1kg 생산할 때 배출되는 CO<sub>2</sub>의 양은 0.162kg이다. 그 다음으로는 목재에 포함되어 있던 수분 0.134kg, 0.0601kg, 비유해폐기물 0.0556kg 순으로 배출되었다.



Table 4. 30 list the percentage of INPUT top of the entire process

Material	Classification			Unit	Quantity
	INPUT	Raw material	technosphere		
Sawdust	INPUT	Raw material	technosphere	kg	9.76E-01
Water	INPUT	Resource	water	kg	4.95E-01
Crude oil	INPUT	Resource	soil	kg	4.68E-02
LNG	INPUT	Resource	soil	kg	4.58E-02
Coal	INPUT	Resource	soil	kg	3.75E-02
Materials (unspecified)	INPUT	Raw material	technosphere	kg	1.39E-02
Air	INPUT	Resource	air	kg	7.68E-03
Chemicals (unspecified)	INPUT	Raw material	technosphere	kg	6.35E-04
Hard coal	INPUT	Resource	soil	kg	3.65E-04
Energy (unspecified)	INPUT	Energy ware	technosphere	kg	1.87E-04
Barite	INPUT	Resource	soil	kg	3.63E-05
Sodium chloride	INPUT	Resource	soil	kg	2.36E-05
Bauxite	INPUT	Resource	soil	kg	1.53E-05
Soft coal	INPUT	Resource	soil	kg	1.41E-05
Wood	INPUT	Resource	soil	kg	7.68E-06
Uranium (U)	INPUT	Resource	soil	kg	2.63E-06
Bentonite	INPUT	Resource	soil	kg	2.33E-06
Caliche	INPUT	Resource	soil	kg	1.50E-06
Sodium hydroxide (50%)	INPUT	Raw material	technosphere	kg	1.38E-06
Sulfur (S)	INPUT	Resource	soil	kg	9.24E-07
Limestone	INPUT	Resource	soil	kg	7.44E-07
Tetrahydrothiophene	INPUT	Raw material	technosphere	kg	4.57E-07
Hydrogen chloride	INPUT	Raw material	technosphere	kg	4.16E-07
Uranium ore	INPUT	Resource	soil	kg	3.50E-07
Phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	INPUT	Resource	soil	kg	3.39E-07
T-butyl methacrylate	INPUT	Raw material	technosphere	kg	1.96E-07
Sand	INPUT	Resource	soil	kg	1.61E-07
Iron ore	INPUT	Resource	soil	kg	1.36E-07
Energy (unspecified)	INPUT	Raw material	technosphere	kg	1.21E-07
Iron (Fe)	INPUT	Resource	soil	kg	1.07E-07

Table 5. 30 list the percentage of OUTPUT top of the entire process

Material	Classification			Unit	Quantity
	OUTPUT	Product	technosphere		
Wood pellet	OUTPUT	Product	technosphere	kg	1.00E+00
Carbon dioxide	OUTPUT	Emission	air	kg	1.62E-01
Water	OUTPUT	Emission	water	kg	1.34E-01
Waste water	OUTPUT	Emission	water	kg	6.01E-02
Non-hazardous wastes (domestic)	OUTPUT	Waste	technosphere	kg	5.56E-02
Steam	OUTPUT	Emission	air	kg	1.82E-02
Wastes (unspecified)	OUTPUT	Waste	technosphere	kg	9.77E-03
Hazardous wastes (domestic)	OUTPUT	Waste	technosphere	kg	3.04E-03
Exhaust	OUTPUT	Emission	air	kg	2.87E-03
Carbon monoxide	OUTPUT	Emission	air	kg	2.38E-03
Steam	OUTPUT	Emission	water	kg	1.58E-03
NMVOC	OUTPUT	Emission	air	kg	6.96E-04
Dissolved solids	OUTPUT	Emission	water	kg	6.79E-04
Nitrogen oxides (NOx)	OUTPUT	Emission	air	kg	4.54E-04
Chloride (Cl)	OUTPUT	Emission	water	kg	4.08E-04
Sulphur oxides (SOx)	OUTPUT	Emission	air	kg	3.60E-04
Hydrocarbons (unspecified)	OUTPUT	Emission	air	kg	2.33E-04
Methane	OUTPUT	Emission	air	kg	1.40E-04
Non-hazardous wastes (foreign)	OUTPUT	Waste	technosphere	kg	1.06E-04
Sulfur dioxide	OUTPUT	Emission	air	kg	8.84E-05
Off gas	OUTPUT	Emission	air	kg	7.27E-05
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	OUTPUT	Emission	water	kg	6.29E-05
Heavy Oil	OUTPUT	Emission	air	kg	3.83E-05
Dust	OUTPUT	Emission	air	kg	3.16E-05
SS	OUTPUT	Emission	water	kg	2.52E-05
Ethylene	OUTPUT	Emission	air	kg	2.15E-05
Air	OUTPUT	Emission	air	kg	1.99E-05
Sodium (Na)	OUTPUT	Emission	water	kg	1.82E-05
PM	OUTPUT	Emission	air	kg	1.71E-05
Nitrous oxide	OUTPUT	Emission	air	kg	1.33E-05

### Ⅲ. 전과정 목록분석 및 평가

#### 1. 전과정 목록분석

Table 6은 LCI DB 구축을 위한 데이터 수집결과 목재펠릿 제조시설에서 목재펠릿 1kg을 생산할 때 투입되는 투입물과 배출물에 대한 정량적인 양과 데이터 정보를 나타낸 표이다.

목재펠릿 1kg을 생산할 때 원목을 톱밥으로 파쇄·건조한 후에 톱밥을 성형하여 펠릿으로 생산을 하게 되는데, 이때 톱밥은 폐기물이 발생하지 않고, 전량 재활용이 가능하기 때문에 톱밥의 투입량과 펠릿의 생산량은 각각 1kg으로 동일하게 투입·발생되었다.

원자재 이외의 전기, LNG, LDPE가 투입되었는데 그 중 전기의 사용량이 1.92E-01로 투입물질 중 가장 많은 사용량을 나타내었는데, 이는 제조시설에서 원목을 톱밥으로 파쇄·건조하는 과정과 만들어진 톱밥을 성형하는 과정에서 많은 양의 전기가 사용되는 것을 나타낸다.

LNG와 LDPE는 목재펠릿을 제조하는 과정, 포장하는 과정에서 각각 사용되었고 그 양은 LDPE 2.50E-02, LNG 3.64E-02 순으로 투입되었다.

본 연구에서는 목재펠릿 생산과정에서 투입된 톱밥은 전량 재활용되고, 온실가스배출량과 지구온난화의 영향성을 평가하는 본 연구에서는 온실가스와 관련없는 수계, 토양계 폐기물은 제외하였다. 때문에 배출물은 온실가스로 한정하였고, 그 양은 1.70E-01이었다. 이는 목재펠릿 1kg을 생산할 때 온실가스가 0.17kg이 배출됨을 의미한다.

Table 6. Data of inputs and outputs for LCI of Wood pellets production

Input/Output	Unit	Quantity	Data source	Linked inventory DB
Input		Kg <sup>-1</sup> product		
Sawdust	kg	1.00E+00	Direct research	
Electricity	kWh	1.92E-01	Incomes data (RDA, 2008)	MKE (energy, electricity)
LNG	kg	3.64-E02	Incomes data (RDA, 2008)	ME (energy, LNG)
LDPE	kg	2.50-E02	Incomes data (RDA, 2008)	MKE (chemicals, LDPE)
Output				
Direct emissions (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O)	kg	1.70E-01	IPCC 1996	
Product (Wood pellet)	kg	1,00E+00	Incomes data (RDA, 2008)	

## 2. 전과정평가

목재펠릿 1kg의 제조과정(운송, 생산, 포장)에서 발생하는 온실가스가 운송, 생산, 포장 단계 중 공정별 온실가스배출량을 나타낸 표이다(Table 7). 각 공정별로 투입물질과 형태별로 온실가스배출량을 나누었는데, 운송과정에서는 원목 및 톱밥, 포장재 운송으로 나누어지고 생산공정에서는 전기사용, LNG 사용에서 각각 온실가스가 배출된다. 운송과정은 원목과 톱밥을 운송할 때 1.04E-02 kgCO<sub>2</sub>가, 포장재를 운송할 때에는 1.72E-03 kgCO<sub>2</sub>가 배출되었다. 생산과정에서 발생하는 온실가스는 전기사용에서 9.32E-02 kgCO<sub>2</sub>, LNG 사용에서 1.87E-02 kgCO<sub>2</sub>가 배출되었다. LNG의 사용에서 발생하는 온실가스의 양보다 전기사용에서 발생하는 온실가스의 양이 4.98배 차이가 나기 때문에 목재펠릿 생산 단계에서는 주로 전기부분에서 온실가스가 배출되는 것으로 나타났다.

Table. 7 Greenhouse gas emissions in the manufacturing process for each

Classification	item	Transportation			
		Wood and sawdust (KgCO <sub>2</sub> )	LDPE (KgCO <sub>2</sub> )	Total (KgCO <sub>2</sub> )	Ratio
Wood pellet production	CFC-13	2.68E-10	4.55E-11	3.14E-10	0.00%
	CF4	-	-	-	0.00%
	Carbon dioxide(CO <sub>2</sub> )	1.03E-02	1.69E-03	1.19E-02	98.09%
	HCFC-22	6.78E-11	1.15E-11	7.93E-11	0.00%
	CF3Br	1.77E-06	3.01E-07	2.07E-06	0.02%
	Methane(CH <sub>4</sub> )	1.89E-04	3.20E-05	2.20E-04	1.81%
	Nitrous oxide(N <sub>2</sub> O)	8.97E-06	1.52E-06	1.05E-05	0.09%
Emission of each production process		1.04E-02	1.72E-03	1.22E-02	
Classification	item	Production			
		Electricity (KgCO <sub>2</sub> )	LNG (KgCO <sub>2</sub> )	Total (KgCO <sub>2</sub> )	Ratio
Wood pellet production	CFC-13	-	9.29E-12	9.29E-12	0.00%
	CF4	-	-	-	0.00%
	Carbon dioxide(CO <sub>2</sub> )	9.17E-02	1.71E-02	1.09E-01	97.25%
	HCFC-22	-	2.35E-12	2.35E-12	0.00%
	CF3Br	1.20E-09	6.93E-08	7.05E-08	0.00%
	Methane(CH <sub>4</sub> )	1.40E-03	1.01E-03	2.41E-03	2.15%
	Nitrous oxide(N <sub>2</sub> O)	8.93E-05	5.80E-04	6.69E-04	0.60%
Emission of each production process		9.32E-02	1.87E-02	1.12E-01	

Classification	item	Packaging	
		LDPE (kg CO <sub>2</sub> )	Ratio
Wood pellet production	CFC-13	1.44E-10	0.00%
	CF4	6.07E-12	0.00%
	Carbon dioxide(CO <sub>2</sub> )	4.16E-02	91.69%
	HCFC-22	3.65E-11	0.00%
	CF3Br	4.10E-07	0.00%
	Methane(CH <sub>4</sub> )	3.21E-04	0.71%
	Nitrous oxide(N <sub>2</sub> O)	3.45E-03	7.60%
Emission of each production process		4.54E-02	

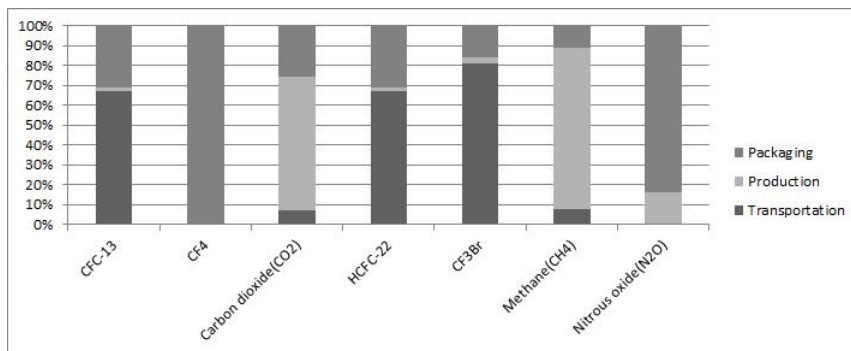


Fig. 3. Emission rate of greenhouse gases in each process

목재펠릿을 생산할 때 발생하는 온실가스의 종류별로 각 공정이 차지하는 비율을 나타낸 표이다. 지구온난화를 유발하는 온실가스 종류는 모두 7가지지만 가장 많은 배출량과 영향을 미치는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O의 3가지 온실가스의 비중이 가장 중요하다.

CFC-13은 운송과정에서 60% 이상 배출되고, 포장단계에서 30% 그리고 생산단계에서는 5% 이하로 배출되었다. CF<sub>4</sub>의 경우 생산과 운송과정에서는 발생하지 않았고 전량 포장과정에서 배출되었다. HCFC-22와 CF<sub>3</sub>Br은 각각 비율은 다르지만 운송과정에서 가장 많은 배출이 이루어 졌고 다음으로 포장과정과 생산과정 순으로 배출비율이 나타났다. CO<sub>2</sub>의 경우 운송과정에서 8% 생산과정에서 64%, 포장과정 26%로 배출비율이 나타났다. 생산과정에서 CO<sub>2</sub>의 절반 이상이 배출되는 것을 알 수 있고 생산과정에서는 전기사용에서 배출되는 온실가스배출량이 LNG보다 4.98배가 많기 때문에 목재펠릿 1kg을 생산하는데 전기사용을 통한 온실가스배출이 가장 많은 것으로 나타났다. CH<sub>4</sub>의 경우는 운송과 포장과정에서는 8%, 11%로 생산과정보다 상대적으로 낮은 비율로 배출되었고 생산과정에서 80%이상 배출되는

것으로 나타났다. N2O의 경우 포장과정에서 83%, 생산과정에서 17% 발생했으며 운송단계에서는 배출되지 않았다(Fig. 3).

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 전과정평가를 이용하여 대표적인 목질연료중 하나인 목재펠릿 1kg 생산할 때 배출되는 온실가스배출량에 대한 환경성 평가를 진행하였다. 분석 과정은 목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 결과해석의 단계로 이루어졌다. 전과정 목록을 분석하기에 앞서 주요 배출원의 온실가스 배출량에 관한 계산식을 나타내어 배출원의 온실가스 배출량을 어떻게 계산하였는지 나타내었다. 다만, 이번 연구에서는 제조시설에서 생산하기까지의 목재펠릿을 1kg 생산과정까지를 고려하였기 때문에 소비과정에 대한 환경성 평가는 진행되지 않았다는 한계는 존재한다. 하지만 목재펠릿을 생산하기까지의 운송 및 제조 그리고 포장까지의 전과정을 고려하였고, 환경영향범주 중 지구온난화(Global Warming) 영향 범위를 중점적으로 분석하였기 때문에 선행되었던 목재펠릿과 목재칩과 관련된 환경성 평가연구들과는 차별성이 존재한다. 목재펠릿 1kg 생산할 때 배출되는 온실가스에 대한 환경성 평가의 평가결과는 선행연구들에 비해서 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 환경성평가의 여러 영향범주 중 지구온난화범주를 중점적으로 다루었다. 때문에 지구온난화에 영향을 주는 온실가스배출량에 대한 환경성평가와 분석을 진행하였고, 목재펠릿 1kg를 제조할 때 필요한 운송, 제조, 포장공정에 대하여 각 공정별로 배출하는 온실가스의 종류와 배출량, 그리고 배출비중까지 환경성평가를 하였다. 각 공정별로 배출하는 비율은 CO<sub>2</sub>가 90% 이상 차지하는 것은 거의 비슷하였지만 Fig. 3에서 온실가스별 공정들이 차지하는 비율은 각각 달랐고 각 공정별로 많이 배출하는 온실가스의 종류들이 어떤 것인지를 분석하였다.

본 연구에서는 목재펠릿의 운송부터 생산 그리고 포장까지의 공정들을 다루었지만 소비단계까지는 고려하지 않았다는 한계가 존재한다. 하지만 이는 국내 목질연료의 생산 및 소비와 관련된 자료의 부족에 기인한 것이다. 특히 온실가스 감축과 관련하여 임업 부문에서는 일정 수준의 이점을 지니고 있는 것이 사실이지만, 전체적인 환경성을 평가하는 경우에는 소비과정까지의 운송과 목재펠릿이 사용되면서 발생하는 온실가스배출량까지 고려한 환경성 평가가 진행되어야 한다. 이번 연구를 통해 소비단계 전까지의 온실가스 배출량연구가 진행되었기 때문에 앞으로 목재펠릿과 관련된 LCA연구들에 좋은 데이터가 되어 앞으로 소비단계까지의 환경성 평가가 진행되어야 한다. 또한 최근 생태농업 혹은 유기농업, 자원순환농업 등 친환경농업에 대한 관심과 연구들이 진행되고 있지만 아직 활성화 되지 못했기 때문에 지속적인 연구들이 진행되어야 지속가능한 농업시스템의 구축이 가능할 것이다.

[논문접수일 : 2013. 9. 5. 논문수정일 : 2013. 9. 16. 최종논문접수일 : 2013. 9. 23.]

## Reference

1. Yoon, S. Y., Y. R. Kim, T. H. Kim, J. H. Park, and S. W. Ahn. 2012. Study of Garlic's Carbon Footprint through LCA, Dongguk University.
2. Yoon, S. Y. and H. J. Kwon. 2011. A Study on the Amount of Carbon Emission of Organic Materials through Life-Cycle Assessment (LCA), Dongguk University.
3. Ann, C. M. 1998. Environmental Life-Cycle Assessment, McGraw-Hill.
4. Ann, K. P. and Birger S. 2002. Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction.
5. Antti, K. 1998. Finnish forest energy system and CO<sub>2</sub> consequences, Biomass and Bioenergy.
6. Berg, S. 1997. Some aspects of LCA in the analysis of forestry operations, Journal of Cleaner Production.
7. González-García, S., A. Hospido, G. Feijoo, and M. T. Moreira. 2010. Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills, Resources, Conservation and Recycling.
8. Joelsson, J. M. and L. 2010. Gustavsson. Reduction of CO<sub>2</sub> emission and oil dependency with biomass-based polygeneration, Biomass and Bioenergy.
9. RDA(Rural Development Administration). 2011. 2010 Income Kit agricultural and livestock products(www.rda.go.kr).
10. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.