

신재생에너지 적용기술이 저탄소녹색도시건설에 미치는 영향연구

박영규*, 김정인, 김갑철

Study for the Design of Zero-carbon City through the Application of Renewable Energies

Younggyu Park*, Jeongin Kim and Kapchul Kim

Abstract

In order to make the best choice for CO₂ abatement using renewable energy technologies, it is important to be able to adapt these technologies on the basis of their sustainability, which may include a variety of environmental indicators. This study examined the comparative sustainability of renewable technologies in terms of their life cycle CO₂ emissions and embodied energy, using life cycle analysis. The models developed were based on case studies of bioenergy pilot plant in P city of Kyungki province. Final results were total emission of CO₂ in Pocheonsi is 670,041 tCO₂, around 500,877 tCO₂ for electricity and for heat generation, and 169,164 tCO₂ for transportation. When used 1,984 m³/day of waste (pig manure etc.) and operated CHP with wood chips of 144,664 ton/year, the CO₂ emission in P city was left as is an emission of 449,274 tCO₂ and an abatement of CO₂ in this region was increased by 32.9%.

Key words

Green village(녹색마을), Bioenergy(바이오에너지), Biogas(바이오가스), CO₂ emissions(탄소배출량), P city(피 도시), LCA(전과정평가)

(접수일 : 2010. 10. 14, 1차 수정 : 2010. 12. 15, 게재확정일 : 2010. 12. 15)

* 대전대학교 화학공학과

■ E-mail : ypark@daejin.ac.kr ■ Tel : (031)539-1994 ■ Fax : (031)536-6676

1. 서론

경제성장과 에너지 소비량 증가는 밀접한 관계가 있는 데, 1990년 이후의 국민총생산량이 연평균 5.9%씩 증가함에 따라서 에너지 소비증가율은 연평균 6.9%를 기록하였다. 2007년 기준으로 1인당 에너지소비량은 4.9 TOE이며, 1인당 온

실가스배출량의 경우 일인당 2.93탄소 톤을 나타내고 있어 1990년~2007년 사이 평균 4.7%의 증가량을 보이고 있다. 이러한 상황에서 만일 선진국과 같이 온실가스 감축 목표를 받게 되면 에너지 사용규제는 필연적일 것이다. 이는 에너지 집약형 산업의 비중이 높은 우리나라로서는 경제발전의 커다란 장애요인으로 작용할 가능성이 높다⁽¹⁾.

또한 온실가스 감축의무를 가진 선진국들은 자국의 산업보호와 에너지 소비량 증가를 막기 위하여 무역 규제형 산업부문에서 국제협회 등을 비관세 무역장벽과 같은 형태를 검토하고 있다. 교토의정서가 발효됨에 따라 2013년 이후의 온실가스 감축방안이 자연스럽게 논의 될 것으로 보이며, 이에 따라 우리나라 등 선발 개도국은 지구온난화를 유발하는 대기 중의 온실가스 농도를 적극적으로 줄여야 한다. 온실가스의 대부분은 에너지 사용의 결과로 발생하므로 에너지 사용량을 줄이기 위한 에너지 절약 및 이용효율 향상이야말로 기후변화를 완화시킬 수 있는 기본적인 방안이라 할 수 있다. 이에 대부분의 선진국들도 기후변화 방지를 위하여 에너지 절약산업과 효율 향상 위주로 정책의 틀을 짜고 있으며 신재생에너지 및 저탄소연료사용 확대 등에도 관심을 갖고 적극적으로 추진하고 있다⁽²⁾.

환경정책평가연구원의 연구결과⁽³⁾에 따르면 2010년 기준 온실가스 발생을 10% 저감하기 위해서는 11조원 이상의 비용이 발생할 것으로 추정하고 있다. 이러한 기후변화협약의 후속조치로 이산화탄소 배출저감을 위해 노력하고 있으며 장기적으로 에너지절약기술 추진, 청정에너지 이용확대, 첨단 환경기술개발, 이산화탄소 흡수원 확대 및 차세대 에너지 기술개발을 통하여 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 혁신적인 계획을 제시하고 있다. 또한 저효율 에너지기기의 보급 확대, 대체연료 개발의 가속화, 풍력 및 태양광 발전의 개발, 메탄가스의 연료화 기술 및 장치개발 등이 거론되고 있으나, 이러한 기술접목에 따른 구체적인 이산화탄소 저감대책에 대한 환경적인 평가 등이 제대로 수립되지 못한 실정이다^(2,4). 최근 정부에서도 저탄소 녹색성장을 국가의 추진동력으로 생각하고 있으며 이를 구체화하기 위한 일환으로 녹색마을 600개 시범사업 등을 통해서 저탄소 녹색도시를 그 대책의 일환으로 추진하고 있다⁽⁵⁾. 이에 따라 국내 신재생에너지 기술개발도 기후변화협약에 대한 장기적인 대책으로 연구개발을 추진할 필요성이 있으며, 대체에너지 기술개발 등 기후변화협약에 능동적으로 대처할 수 있는 대응책이 필요하다. 이러한 상황에 대비하고 저탄소 녹색마을을 제도적으로 보급하기 위해서는 주민들에게 유효 에너지단위당 방출되는 온실효과 유발가스를 양으로 환산하여 에너지기술과 시스템을 비교하고 우열을 가릴 수 있도록 하는 새로운 저탄소녹색마을 기본설계 방안을 연구 방안으로 강구되어야 할 것이다.

그러므로 국내 대체에너지 자원으로는 태양에너지, 풍력, 지열, 바이오매스, 일반폐기물 그리고 산업폐기물 등이 있다. 이 가운데 개발 가능 잠재량 대비 잠재량이 가장 높은 것은 태양에너지, 바이오매스, 지열의 순으로 평가되고 있다⁽⁶⁾. 일반폐기물의 경우 최근 다이옥신과 같은 오염물질의 유발로 인해 여러 가지 장애요인이 많이 남아 있다. 이와 달리 바이오매스의 경우 농산 부산물, 임산폐기물, 목초, 동물의 배설물 등으로서 재생가능 한 유기물질을 일컫는다. 최근에 이르러 온실가스의 감축 및 환경오염의 방지, 그리고 대체에너지의 개발이라는 효과를 달성할 수 있기 때문에 실용화를 위한 노력이 경주되고 있다.

이러한 바이오매스를 적절히 에너지로 전환하는 경우 산업 및 농업시설에서의 냉난방용 에너지원으로, 더 나아가서는 녹색 마을단위의 에너지원으로 활용하여 농업생산력의 제고 및 국가차원의 대체에너지개발 및 온실가스 감축의 효과를 기대할 수 있을 것이다. 그러므로 저탄소 녹색도시의 성패는 신재생에너지 기술과 그 기술을 녹색마을에 어떻게 접목하는가가 중요한 이슈가 될 것이다. 그 중에서도 바이오에너지의 경우는 녹색마을에서 쉽게 접목이 가능하고 이를 통해서 탄소중립소재를 활용하여 현재 사용하고 에너지원에서 발생하는 CO₂배출량을 저감할 수 있는 방안으로 바이오에너지별 적용하고 저 한다. 따라서 본 논문에서는 경기도내에서 발생하는 바이오매스인 임산폐기물 및 축분 등의 바이오에너지원과 태양열 및 지열을 이용하여 전과정적으로 CO₂발생량을 계산하고 이를 저탄소 녹색마을에 적용하는 데 있다. 이를 위하여 경기도내 P 도시의 년 CO₂발생량을 산정하고 이를 토대로 바이오매스를 재활용한 대체에너지 등의 기술적용을 통하여 실제 CO₂배출량을 저감할 수 있는 방안의 일환으로 연구를 시도하는 것이다.

2. 연구방법 및 실험방법

2.1 사용모델 연구방법

축산분뇨의 혐기성 소화가스와 우드칩을 이용한 바이오에너지를 적용, 태양광 및 지열을 이용한 온실가스 배출저감 잠재량을 분석하기 위해 Simapro 7.2의 LCA모델을 이용하였

다⁽⁷⁾. Simapro 7.2의 LCA모델은 신재생에너지 등의 모델적용이 가능하여 에너지부문과 이에 영향을 주는 환경요인의 목록분석을 통하여 환경영향지표 중 이산화탄소배출량을 계산하고 있다. 전과정 분석을 통한 신재생에너지 부분 중 태양광, 지열, 바이오에너지 부분의 환경영향성 평가를 구체화하고 이를 통하여 LCA 모델구축 시스템을 에너지 사용량 원단위 당 배출되는 CO₂의 양을 계산하였다. 또한 에너지의 생산, 이용, 전환, 수요 등을 묘사하는 에너지 전과정에서의 모델을 구축하여 신재생에너지를 적용한 CO₂배출량 산정과 환경영향성 평가를 분석하였다.

본 연구를 위해 기본 설정 변수는 인구, 가구 수, 수송(승용차수, 화물수송, 승합차수) 분야로 나뉘어져 있다. 수요구조는 가정, 수송, 산업, 상업 및 기타 공공시설부분으로 나누어지며 각각 최종사용 에너지량, 전력소모량 및 연료별 자료를 설정하였다. 이러한 에너지 소비와 공급 관계에서 발생하는 에너지 수요·공급, 비용, 자원 사용 및 환경오염물질 발생량 등을 산출하기 위한 연구를 수행하였다.

2.2 시나리오 가정 구축

에너지 소비의 증가에 따라 증가하는 전력수요를 충족하기 위해서는 발전소의 추가 건설이 필요하고 그 결과 증설되는 발전소의 수만큼 온실가스 배출량 또한 증가할 것으로 예상된다. 추가로 건설될 발전소를 석탄 및 석유화력발전소로 건설할 경우, 많은 양의 온실가스가 추가로 발생할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 발전소 추가건설과 온실가스발생 저감을 동시에 충족할 방안으로 신재생에너지인 바이오에너지, 태양광과 지열 등에서 얻어지는 에너지를 이용하여 전력 및 열에너지 사용을 위한 설비를 도입하는 것으로 가정하여 분석하였다. 대안시나리오는 기본적으로 혐기성 소화가스의 주성분인 CH₄와 바이오매스 연료로 사용하여 열에너지와 태양광 및 지열을 이용한 전기에너지를 대체되는 것으로 가정하였다.

- 1) 대안 시나리오 I는 축분 처리 과정 중 혐기성 발효과정에서 발생하는 바이오가스를 이용한 보일러 연료설비를 도입하여 화석연료의 일부를 대체하는 것으로 가정하였다.

- 2) 대안 시나리오 II은 축분처리 과정 중 혐기성 발효과정에서 발생하는 바이오가스를 이용한 가스엔진발전설비를 도입하여 발전설비의 일부를 대체하는 것으로 가정하였다.
- 3) 대안 시나리오 III은 녹색마을에서 발생하는 목질 바이오매스를 이용한 보일러 연료설비를 도입하여 화석연료의 일부를 대체하는 것으로 가정하였다.
- 4) 대안 시나리오 IV는 녹색마을에 태양광을 설치하여 전기 생산을 통한 전력공급을 대체하는 것이다.
- 5) 대안 시나리오 V는 녹색마을에 지열을 설치하여 전기 생산을 통한 전력공급을 대체하는 것이다.

2.3 시스템 경계

본 연구를 위해 설정한 저탄소 녹색마을의 대상지역을 시 전체로 대상하기엔 규모가 크고 현 시점의 신재생에너지 개발 시기 및 경제성을 고려했을 경우에 현실성이 없지만 시단위의 통계자료수집 등 LCA분석을 위한 데이터분석을 위해 시단위로 시스템 경계를 정하였다. 그러므로 경기도의 P 도시를 정하여 지역 내에서 발생 가능한 CO₂배출량을 산정하였다. 경기도내 P 도시는 돼지사육농가가 전국적으로 제일 많고 발생하는 축분의 양이 많기 때문에 이를 적절히 처리하면서 바이오가스 등의 에너지로 활용하는 방안을 적극적으로 고려하고 있다. 또한 P 도시 인근에는 바이오매스 등을 활용하여 바이오매스 열공급 집단 에너지 사업소(E 주식회사, P 도시소재 사업부지 면적 5,601m²) 등의 시설은 바이오칩 1,920톤/일을 처리할 수 있으며 주요 처리 장비로는 원료용 합마용 파쇄기 등의 파쇄장비를 가동하고 있다⁽⁸⁾. 그러므로 사용된 바이오에너지로는 임산폐기물을 이용한 연소열을 이용한 바이오에너지와 축분 등을 이용해 발생하는 메탄가스를 이용한 바이오에너지 그리고 지역 내 바이오매스인 숲 등이 CO₂흡수 등을 대상으로 전 과정평가를 실시하였다.

LCA분석을 통해 얻어진 결과의 이용을 쉽게 하기 위하여 기능단위와 동일하게 바이오에너지 및 화석연료 소재별 1kg과 태양광 및 지열의 전력생산량 1MJ로 선정하였다. 각 대상 소재 1kg, 1MJ를 생산하기 위한 원료 취득부터 제품 생산까지 대표적이고 일반적인 공정 및 투입물/배출물을 시스템 경계 내에 포함시켰다. 본 연구의 목표에 비추어 전과정의 단계

중 사용 및 폐기 단계를 제외한 전과정에 대해 연구를 수행하였다. 즉, 관계자 및 산업계 전문가의 조언을 통해 바이오에너지 제조공정을 원료수집, 제조 공정 및 에너지 사용공정의 3단계로 구분하였다. 또한 신재생에너지 생산 공정과 직접 관련이 없고 환경부하가 적을 것으로 판단되는 공정의 데이터는 조사대상에서 제외하였다.

할당의 결정 : 원자재로 사용되는 바이오매스는 재활용되며 이와 같은 폐기물은 다른 시스템에서 폐기된 것으로써 같은 시스템 내에서 재활용되지 않고 열병합 발전소 등과 같은 다른 시스템에서 재활용된다. 바이오매스는 그 자체의 고유 성질의 변화 없이 재활용되며, ISO 14041에 근거하여 바이오매스는 닫힌 고리 재활용 절차를 가진 열린 고리 재활용 시스템(연소공정)에 적용하였다. 또한 태양광 및 지열에너지도 닫힌 고리 재활용 시스템에 적용하였다. 지역적 경계로는 원/부자재는 국내외 데이터를 기준으로 작성하였다. 특히 기술적 경계는 국내 생산 기술을 대표할 수 있는 평균 공정들을 선정하였다. 도출된 내용을 생산량 기준으로 평균하여 데이터베이스를 완성하였다⁽⁹⁾.

2.4 전과정 데이터

데이터 범주는 크게 에너지, 천연 자원, 대기 배출물, 수계 배출물, 폐기물로 분류하였으며 대상제품의 전과정 중 원료의 취득부터 바이오에너지 생산 공정까지를 시스템 경계로 정의하였다. 대상제품 제조공정의 데이터는 Pre Consultant가 LCI목록에서 제공하는 데이터베이스를 기초로 하여 데이터를 수집하였다⁽⁷⁾.

정의된 시스템 경계를 통과하는 투입물 및 배출물을 자연계 흐름으로 간주하였으며, 의사결정 기준 시 각 대상제품 1kg, 1MJ을 생산하기 위한 원료 취득부터 제품생산까지 대표적이고 일반적인 공정 및 투입물/배출물을 시스템 경계 내에 포함하였다. 전과정의 단계나 공정 혹은 데이터 요구의 생략은 이 연구에 비추어 봤을 때 전과정의 단계 중 폐기 단계를 제외한 대상제품 제조공정에 대해 연구를 수행하였다. 또한 단위 공정 중 제품 출하시의 검수 등 제품 생산 공정과 직접 관련이 없고 환경부하가 적을 것으로 판단되는 공정은 조사대상에서 제외하였으며, 자료수집이 어려운 데이터는 외국의 데이터를 인용하였다. 또한 ISO 14041에 제시된 에너지 및 환경관련성 등의 기준을 적용하였으며 에너지 및 유해 화

학물질로 규정된 투입물은 투입량에 관계없이 제품 시스템에 포함시켰다.

Table 1에서 보듯이 투입 바이오매스, 물 등 국내에서 이용 가능한 전과정 데이터 중 정량적인 데이터가 적기 때문에, 투입 및 배출되는 화학물질의 농도 등은 해외의 LCI 자료를 사용하였다⁽⁷⁾. 바이오에너지 시설의 플랜트 건설에 대한 LCI의 자료는 본 연구의 논문이 추구하는 목표를 생각하면 데이터양이 너무나 방대하며 이 분야에 대한 LCI의 자료는 기존 존재하는 데이터를 수집하여 사용하였다. 참고문헌에 따르면 건설단계의 총CO₂ 발생량은 건축공사 86%, 토목공사 2% 그리고 설비공사 12%의 비율로 나누어지며 이들의 구성비를 감안할 때 LCI데이터 수집 등의 복잡성을 감안하여 토목공사와

Table 1. LCI database for the solar energy of 1 MJ⁽⁷⁾

	Name	Amount	Unit	
Input	Aluminium	0.001198	kg	
	Calcite	0.0044188	kg	
	Carbon dioxide	0.0028459	kg	
	Brown coal	0.0104130	kg	
	Natural gas	0.011862	m ³	
	Copper	0.0001249	kg	
	Sodium chloride	0.0016118	kg	
	Water	0.000589	m ³	
	Zinc	0.000039	kg	
	Limestone	1.6318	kg	
	Natural gas	3.7603E-03	kg	
	Quartzite	0.008892	kg	
	SiO ₂	2.9855E-04	kg	
	Shale	1.8764E-02	kg	
	Water	1.5708	kg	
	Unspecified chemicals	1.8093E-02	kg	
	Sulfate	6.4797E-02	kg	
	Coal energy	8.3686E-02	kg	
	Output	CO ₂	0.0075566	kg
		Carbon-14	0.00076	kg
Heat		0.9709	MJ	
Krypton		0.003414	kg	
Radon		1	bpt	
calcium		0.005928	kg	
chloride		0.001835	kg	
hydrogen		0.0034218	kg	
particulate		0.0002312	kg	
Waste gas		0.007179	kg	

설비공사의 비율은 전과정 평가를 위해 제외하였다⁽¹⁰⁾.

2.5 목록분석

조사 완료된 자료를 투입물/kg 대상제품 및 산출물/kg 대상제품의 형태로 나타낸 뒤 데이터를 작성하였다. 이때 사용된 원/부자재에 대한 성분조사도 함께 이루어졌으며 투입물에 대한 LCI 데이터베이스 조사도 함께 수행되었다. 투입물을 Simapro 등으로 LCA관련 소프트웨어의 데이터베이스 및 국내외 문헌 데이터를 이용하였다. 대상제품 생산과 관련하여 정량화된 투입물 및 배출물 자료와 투입물에 대한 환경부하를 나타내는 소프트웨어를 이용하여 목록분석 결과를 도출하였다.

동일한 대상제품에 대해 조사된 각 업체별 목록분석 결과물 바탕으로 생산량 기준에서 가중평균 값을 구하였고, 이는 해당 제품군의 국내 전과정 목록분석 데이터베이스가 된다. Table 1과 Table 2에 대체에너지의 LCI 데이터베이스 중 주요 데이터만을 선정하여 제시하였다⁽⁷⁾. LCA의 수행은 전과정 평가 소프트웨어인 Simapro 7.2를 이용하여 수행하였다.

전과정 영향평가는 전과정 목록분석 결과를 토대로 공정내의 잠재적 환경영향을 평가하는 것이 주목적이며, 이를 통한 GWP(Global Warming Potential), ODP(Ozone Depletion), AP(Acidification potential), EP(eutrophication potential) 등 특성화된 환경영향을 나타내었다. 위에서 언급한 환경영향평가 지수 중 온실가스양은 지구온난화계수(Global Warming Potential, GWP)를 적용하여 이산화탄소 상당량(CO₂-eq.)으로 환산하였다. GWP는 온실가스가 100년 동안에 미친 온난화 효과를 이산화탄소의 효과를 1로 하였을 때 환산한 값으로 메탄은 21, 아산화질소는 310을 적용하였다. 이외의 환경영향지수인 ODP, AP와 EP는 참고자료로만 활용하였으며 이산화탄소 배출에 따른 지구온난화지수를 전과정 영향평가를 통하여 나타내었다. 데이터 질 요구사항으로 시간적 경계는 제조 단계의 데이터는 2009년 5월 1일부터 2009년 12월 31일 8개월간의 데이터를 수집하였으며 기타 데이터는 5년 이내의 데이터를 사용을 목표로 하였다.

2.6 실험방법

2.6.1 바이오에너지 생산 공정

Fig. 1은 본 연구를 수행한 바이오매스 연소 플랜트의 시설

Table 2. Inventory data for geothermal energy of 1 MJ⁽⁷⁾

	Name	Amount	Unit
Input	Boryte	5.53	kg
	Bauxite	356	kg
	Clay	206	kg
	Lead	4.73	kg
	Chromium	0.998	kg
	Iron	325	kg
	gravel	15	kg
	copper	84.3	kg
	Manganese	0.408	kg
	Nickel	0.554	kg
	Sand	3350	kg
	Sodium chloride	22.7	kg
	water	113	m ³
	Zinc	0.00754	kg
	Gas	81.6	kg
	Coal	310	kg
	Natural gas	208	m ³
	Kaolinite	0.021542	kg
	Output	Acetaldehyde	0.00104
Acetone		0.00101	kg
Aluminium		0.04141	kg
Aldehyde		0.000837	kg
Arsenic		0.001090	kg
Boron		0.013800	kg
Barium		0.000560	kg
Benzene		0.191130	kg
Butane		0.109490	kg
Ethane		0.003871	kg
Carbon monoxide		5769.1	kg
Copper		0.003885	kg
Iron		0.0513	kg
Heptane		0.0228	kg
Hexane		0.0483	kg
NMVOG		10.617	kg
Mercury		0.000219	kg
Potassium		0.0674	kg
Nitrogen		0.0584	kg
Ammonia		0.0207	kg
Nickel	0.01300	kg	
Nitrogen oxide	16.136	kg	
particulate	5.25	kg	
Sulfur oxide	34.78	kg	



Fig. 1 Pictures of experimental apparatus for measuring combusted CO₂ emission.

Table 3. Specifications of Biomass Bioenergy Pilot Plant⁽²⁴⁾

Item	Pilot plant for the Experimental Measurement
Size/Heat supply capacity	1,150 × 1,070 × 1,810
Input Biomass	Maximum 30 kg/hr
System Efficiency	88%
Input Material	Pine Tree Biochip
Heating Area	3,2 m ²
Weight	490 kg

모습이며 이 플랜트의 기본 시스템 제원은 Table 3에 자세하게 나타냈으며 시료 1~10kg을 연소시켜 발생하는 이산화탄소량을 측정하는 것이다. 바이오칩 등은 연소보일러 등의 전량을 사용하고 있으며, 생산량이 수요를 충족시키지 못하고 있다. 바이오칩 생산 공정은 바이오매스 반입공정-투입공정-조대파쇄공정-분쇄공정-반출공정으로 구성되며 투입된 폐기물은 크레인 등을 조대파쇄기에 투입되고 20cm 전후크기로 파쇄한 후 정량공급기를 거쳐서 최종 제품 출하를 위해 반출된다⁽¹¹⁾. 1kg의 바이오칩의 무게를 잰 후 목탄 보일러를 이용하여 연소시킨 후 발생하는 CO₂가스를 이산화탄소 가스측정기(RAE, USA)를 이용하여 CO₂농도를 측정하였으며 측정된 실험 데이터를 이용하여 LCA과정상 얻어진 CO₂발생량 데이터와 함께 사용하였다. 현재 P 도시에서 운영하고 있는 바이오매스 열 공급 집단에너지 사업소의 실험 플랜트 기본제원은 집단에너지 공급회사인 E회사에서 제공하는 데이터를 이용⁽⁸⁾하였으며 E회사는 목질 바이오매스를 함마용 파쇄기 160톤/일이 5대, 고정용 원목파쇄기 96톤/일 5대 등을 가지고 80t/hr의 우드칩을 투입하는 시스템을 가동하고 있다.

2.6.2 바이오가스 생산 공정

본 연구에 사용한 바이오가스 시설은 D 회사에서 설치한

Table 4. Total annual CO₂ emissions in P city

Item	Number	Electric Consumption ⁽¹⁵⁾ (106×KWh)	Heat Consumption ⁽²³⁾ (106×Mcal)	CO ₂ Production (tCO ₂)
House	44,907	172	1,558	144,843
Building	14,533	264	1,008	103,684
School	149	32	469	70,555
Factory	6,150	304	1,494	238,853
Agricultural sector	9,933	63	241	52,400
Total	75,672	837	4,770	500,877

pilot plant시설에서 수행되었다. 본 연구에서 실시된 축분은 인근 지역 내에 운반되며 하루 1~5m³/일까지 처리 할 수 있는 혐기소화조 크기는 높이 3m, 직경 2m의 원통형으로 제작하였다. 반응기 내부에는 축분을 공급하며 소화조의 교반 효과를 내도록 CRST(Continuous stirred-tank reactor) 방식의 혐기소화조로 주원료로는 P 도시에서 발생하는 돈 분뇨를 사용하였다. Pilot 플랜트 실험은 1m³/day의 규모의 유입유속으로 혐기소화조로 투입하였으며, 혐기소화조의 HRT(Hydraulic Retention Time)와 SRT(Solids Retention Time)는 30일이었다. 혐기소화조의 운전온도는 30℃ 내외로 유지하였다. 바이오가스 생산 시설의 모든 부분은 중앙제어실의 컴퓨터에서 제어하였으며, 각 부분에 센서를 이용하여 유량과 온도, 가스 조성 등을 온라인 모니터링 하였다. 생산된 바이오가스는 유량계(KTR 550, 한국유량계)를 이용하여 자동 모니터링 하였으며, 제습 및 탈황을 거친 후 가스 저장탱크에 저장하였다. 바이오가스 조성은 비분산적외선(Nondispersive Infrared, NDIR) 방식의 센서 측정기(SSSM 6000, GmbH & Co.KG)를 이용하여 측정하였다.

축분 폐기물을 혐기성 소화처리 할 때는 유입물의 종류와 처리량, 소화온도, pH, 알칼리도, 휘발성 지방산, 총고형물 및 휘발성 고형물 등 여러 가지 인자들이 소화처리에 영향을 미친다. 또한 이때 발생된 바이오가스도 운전조건에 따라 차이가 있지만 메탄 55~75%, 이산화탄소 17~31%, 황화수소 0.1~1%, 수소 3~10%이며⁽¹²⁾ 혐기성소화로 생성된 바이오가스로부터 전기 에너지를 회수하기 위한 목적으로 소화조의 상태와 운전조건의 파악을 위해 pH, 암모니아 농도, 알칼리도, 휘발성 지방산, 총고형물 및 휘발성 고형물 등을 측정하고 생성된 바이오가스 양을 측정하였다. 측정된 데이터는 Table 4에 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 녹색도시 BAU(Business As Usual) 시나리오 구축

녹색마을 대상지인 경기도 P 도시의 기본 인프라에 대한 결과값을 Table 4에 나타내었다. 그 결과 산업부문이 가장 많은 에너지 수요를 차지하였고 온실가스 배출량도 그에 따라 가장 많은 것으로 예상된다. 우리나라의 에너지수요는 아직까지 화석연료사용에 많이 의존하고 있으며 이로 인하여 앞으로 기후변화협약에 대비하여 화석연료 사용을 줄이는 동시에 대체에너지 등에 신재생에너지의 사용이 요구되어진다.

LCA 모델의 결과로써 BAU 시나리오의 전력사용량별 예상 연간 CO₂발생량을 Table 4에 나타내었다. 2009년에 83,700 MWh의 전력이 사용되었으며, 연간 발전량을 토대로 발생하는 CO₂배출량을 각각 산출하였다. 앞으로 국가에너지기본계획 등의 에너지 절약 및 온실가스 감축을 위하여 신재생에너지를 이용한 발전량을 증가시키고 석탄화력 발전량을 감소시키는 정책을 펼 것으로 예상되므로 석탄 화력발전소의 발전량이 점차 줄어들 것으로 예상된다.

대안시나리오는 기본적으로 혐기성 소화가스의 주성분인 CH₄를 연료로 사용하는 열 보일러 설비가 대체되는 것으로 가정하였다. BAU시나리오에서 예상된 보일러설비가 증가되는 양의 일부를 혐기성 소화가스의 보일러 열에너지 열원과 전력생산 발전설비로 대체하는 것과 바이오매스를 이용한 보일러 열에너지 열원으로 대체하는 것을 기초로 모델링하였다. P 도시 내 일정규모 이상의 하수처리장이 3개소가 있으며, 2010년부터 각 하수처리장에 축분처리를 위한 대안설비를 도입하여 향후 축분 처리량을 증대시키는 것으로 가정하여 작성하였다.

Table 4는 본 연구를 위해 발생하는 CO₂양을 산정하기 위한 지방자치제 지역 내 수집 가능한 통계자료를 나타낸 것이며 이 지역에 소재해 있는 주요시설 및 인구수 등을 조사하였다. P 도시 내 각 사용처별로 구분하여 사용하는 전력 및 에너지 소비량 등의 데이터를 P 도시 시청의 도움과 연구원들이 수집한 데이터를 토대로 얻어진 수치를 나타냈다.

3.1.1 기존 P도시구성요소에서 발생하는 CO₂배출량

본 연구를 위해 발생하는 CO₂양을 산정하기 위한 P 도시의 시스템 경계 내에 소재해 있는 주요시설 및 인구수 등을 조사하였다. P 도시의 시청 내에서 수집된 데이터⁽¹³⁾와 연구원들이 수집한 데이터⁽¹⁴⁾를 토대로 얻어진 수치를 나타냈다. Fig. 2는 P 도시 내 S 동의 일 년 중 가구 수 변동 및 전력소요량 변화를 나타낸 것이며 2009년을 기준으로 일 년에 발생한 CO₂배출량 산정을 위해 데이터로 사용하였다. 연중 가구의 변동은 크게 차이가 나지는 않았지만 가을보다는 봄철에 가구 변동률이 10%정도 차이가 나는 것으로 나타났고 각 가정의 전력사용량은 여름철이 겨울에 비해 전력사용량이 30%이상 적게 사용하는 것으로 조사되었다. 이와 같이 조사된 통계치들은 한국전력공사⁽¹⁵⁾에서 수집된 2009년도 분야별 건물 및 시설에 대한 전력사용량을 이용해 각 가정의 CO₂발생량을 산정하고 같은 방법으로 P 도시 내 분포되어 있는 상업시설, 공장 그리고 기타시설에 대한 전력사용에 따른 화석연료사용에 의한 CO₂발생량을 계산하였다.

Table 3에서 보듯이 P 도시 내에서 발생하는 CO₂ 배출량의 분포를 보게 되면 가정에서 발생하는 전체의 28.8%, 산업체에서 발생하는 CO₂배출량은 47.6%, 상업빌딩은 20.6%, 학교 14.0% 그리고 농업생산시설에서 10.4% 비율로 발생하는 것으로 나타났다. 결론적으로 Table 4에서 얻어진 CO₂발생량은 500,877 tCO₂-eq./yr인 것으로 계산되었다.

3.1.2 기존 P 도시에서 유입차량에서 발생하는 CO₂배출량

운송수단별 온실가스 배출량을 산정하는 데 있어 운송수단

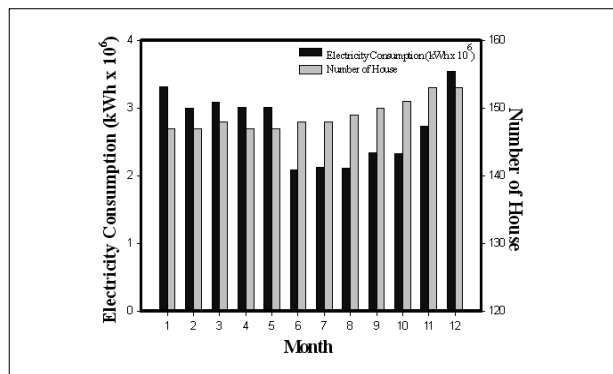


Fig. 2 Variations of electricity and number of house during a year in the Songwoori of P city

별 거리 및 연료소비량을 산정하기 위하여 이를 운송수단당별 거리당 배출계수를 이용하여 차량별 연료소비량을 근거로 계산하였다. 이를 위하여 차량별 연료소비량 및 거리 당 계산은 P 도시 내 주요 일반국도인 43도로와 47번 도로 그리고 37번 도로에서 차량대수별 CO₂배출량 표본을 수집하여 유입되는 차량들에 대한 연료소비량을 계산하여 CO₂발생량을 계산하였다. 그러므로 수송에 의한 CO₂배출량은 운행거리, 운송수단의 개체의 수 그리고 각 사용연료의 배출계수 및 평균연비의 데이터를 이용하여 이를 운행거리, 개체의 수 및 배출계수를 곱하고 얻어진 값을 평균연비로 나누어서 계산하였다⁽¹⁶⁾. 이에 대한 데이터 산정을 위하여 Table 5에 나타난 계산 데이터는 연료별 배출계수를 기산정하여 운행거리 당 CO₂배출량을 표시한 것이다.

P 도시 내 주민들이 보유하고 있는 자동차는 모두 62,561대⁽¹³⁾이며 이중 61.7%가 승용차이고 화물차가 29.4%, 승합차 8.5% 등으로 분포하고 있다. 그러나 실제로 일반국도 및 지방도로에 유입되는 자동차의 현황은 보유차량 현황과는 다르기 때문에 연구원들이 일반국도, 지방도 등으로 나누어 통행하는 시간대별 운행 대수(Fig. 3(a)) 및 자동차의 종류(Fig.

3(b)와 (c)) 등의 통계적인 데이터를 도출하였다.

Table 6과 Fig. 3(b), Fig.3(c)에 나타난 데이터는 외부차량의 통행빈도수를 차량의 유형별을 중심으로 나타난 데이터이다. 데이터에서 보듯이 주로 퇴근시간 전후로 크게 증가하

Table 5. CO₂ emissions depending on types of fuel, car and travel distance

Item	Capacity (cc)	Avg. Fuel Efficiency (km/l) ⁽¹⁶⁾	CO ₂ Emission per travel distance (gCO ₂ /km) ⁽¹⁶⁾	CO ₂ Emission per fuel consumption (gCO ₂ /l)	
passenger car	gasoline	light	18,25	129,17	2,337
		small	14,01	169,34	2,338
		medium	11,14	212,41	2,341
		large	7,79	311,34	2,340
	LPG	medium	9,40	188,80	1,766
		large	7,33	241,25	1,764
		diesel	small	18,58	145,31
	medium		13,69	198,56	2,683
	SUV/ VAN	LPG	light	11,50	152,00
large			6,80	260,00	1,768
diesel		medium	10,86	248,82	2,689
Truck	gasoline	large	5,70	410,00	1,762
	LPG	light	12,18	144,75	2,688
	diesel	medium	12,10	222,50	2,683
		large	10,67	252,02	2,701

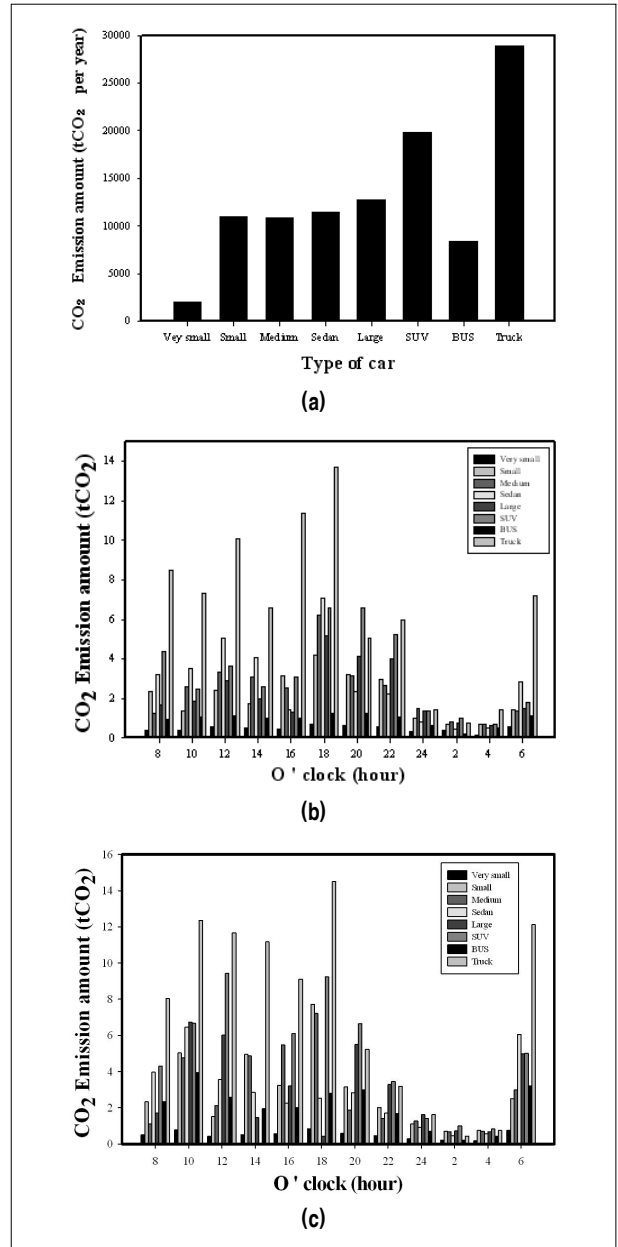


Fig. 3 Variations of traveling car during a daytime (a) Comparison of CO₂ emissions depending upon cars, (b) Comparison of CO₂ emissions depending upon cars and traveling hour on the road # 43 of P city, (c) Comparison of CO₂ emissions depending upon cars and traveling hour on the road # 47 of P city.

Table 6. Daily estimated CO₂ emissions by transporters traveled on the road #43 of P city

Type	Fuel Efficiency (km/l)	Travel distance (km)	Number of Transporter	CO ₂ Production (g CO ₂)
Very small	18,25	43	448	2,025,385,6
Small	14,01	43	6536	38,738,218,4
Medium	11,14	43	5016	37,290,699,6
Large	10,86	43	1720	14,978,964
Bus	11,02	43	824	7,286,800
Truck	12,10	43	4136	32,209,100

다가 저녁 8시 이후부터는 차량운행 빈도수가 줄어들며 자정이 넘으면 빈도수가 아주 적어지는 것으로 조사되었다. 이를 통행차량대수의 통계치를 통해 얻어진 CO₂발생량은 일반국도인 43도로에서 P 도시 횡단길이가 43km인 경우에 이를 바탕으로 측정된 CO₂발생량은 일 년에 47,450,3 tCO₂-eq. 발생하였다. P 도시 내 다른 국도인 47번 도로에서는 일 년에 33,183 tCO₂-eq., 37번 도로에서는 19,822 tCO₂-eq.가 발생한 것으로 측정되었다. 이를 바탕으로 P 도시 전역으로 확대해서 계산하면 자동차에 의해 발생하는 CO₂의 양으로 계산할 수 있다. P 도시는 총연장도로의 길이가 일반국도 145km, 지방도 173km 그리고 시군도 228km이며 전체 총연장길이는 511km이다. 모든 도로에서 운영되는 자동차의 운영 상태는 다르게 나타나지만 이를 평균적으로 도로마다 통행차량의 대수를 조사하여 CO₂발생량을 계산을 하였다. 그 결과 얻어진 총 CO₂발생량은 169,164 tCO₂/yr인 것으로 나타났다.

3.1.3 P 도시 산림에 의한 CO₂ 흡수량

교토의정서의 온난화방지를 추진하는 기본사항에는 삼림 등의 흡수원의 CO₂흡수량이 한정적이지만 저감 목표 산정에 가미되는 것으로 도입되었다. 즉 삼림을 지속적으로 경영, 관리하고 환경에 배려하면서 목재를 적절하게 이용하는 것이 지구온난화 방지에 공헌할 수 있다고 국제적인 IPCC(기후변화에 관한 정부 간 패널)는 CO₂ 증가를 완화하는 생물학적 완화 대책을 추진하였다. 현재 P 도시에 산재하는 수종 및 그 수종별 CO₂흡수량의 데이터 및 현지 자료 수집이 중요하고 이들에 데이터는 Table 7에 나타냈다. 이러한 생물학적 완화는 다시 세 가지 전략(보호, 흡수, 대체)으로 대별되며 P 도시내 에너지원의 CO₂저감은 삼림경영 등에 의한 CO₂흡수기능에 크게 의존하는 모양으로 되어 있다. 저탄소 녹색도시를 위해서는 바이오에너지로

Table 7. Annual average absorption of CO₂ depending upon types of tree

Tree Name	Percentage (%)	Forest Area (ha) ⁽¹⁸⁾	Annual Average CO ₂ Absorption (tCO ₂ eq)
Pitch Pine	10	6,337	14,258
Japanese Red Pine	12,5	7,921	12,594
Black Locust	7,5	1,814	2,884
Japanese Chestnut	13,3	3,224	5,126
Mongolian Oak	18,7	4,534	19,179
Variabilis	9,5	2,318	3,686
Acutissima	5	1,209	3,784
Korea Pine	4,5	2,741	6,230
Daimyo Oak	2,1	504	801
Japanese Flowering Cherry	0,8	202	321
Rhynchophylla	1,2	302	480
Japanese Larch	1,7	1,056	3,263
Betula costata	1,6	403	480
Sargent Cherry, North Japanese Hill Cherry	1,6	403	480
Etc.	10	2,418	3,845
Total	100	35,386	77,894

바이오매스를 전환하는 대체과정도 중요하지만 삼림을 보존하는 보호적인 전략이 CO₂저감을 안정적으로 처리할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 저탄소 녹색도시를 위해서 삼림의 보존 뿐 만 아니라 삼림을 신규조립하거나 재조립 등의 방법으로 탄소 저류량을 증가시키는 흡수적인 전략이 요구되며 이를 성립시키기 위해서는 기존의 P 도시의 수종 및 탄소의 흡수량을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 수목 20년 성장한다는 가정 하에 수목의 전과정분석이 수목재배, 벌채, 운송 그리고 가공 등에서 소요되는 CO₂양은 수목 1ha당으로 나타낸 데이터다. Fig. 4(a)에서 수목의 전과정 중 재배, 벌채, 운송 그리고 가공 중 발생하는 에너지와 CO₂의 배출량은 수목이 20년 동안 CO₂를 흡수하는 양과 비교하여 훨씬 작다는 것을 Fig. 4(b)에 나타낸 것이며 이는 카본중립을 의미한다⁽¹⁷⁾.

현재 P 도시의 전체 면적은 826.44km²이며 이중의 삼림의 면적은 571.11km²로서 전체 면적의 69.1%인 57,111ha이다. P 도시내 삼림의 수목의 종류는 Table 7에서 보듯이 P 도시에는 약 19종의 수목이 존재하며 그들이 차지하는 면적과 각

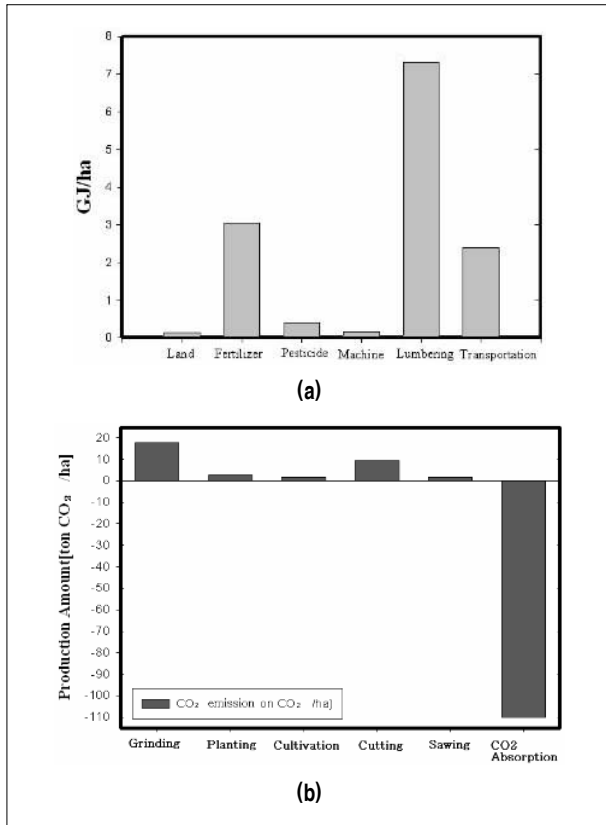


Fig. 4 LCA results for the bioenergies (a) LCA result by wood cultivation and manufacturing biochips using Simapro 7.2, (b) Life cycle energy by wood cultivation and manufacturing biochips^(4,6).

수종별 탄소흡수량을 파악하여 현재 삼림면적에 따른 CO₂ 흡수량을 계산하였다. P 도시 지역 내 삼림 수목은 Table 7에서 보듯이 신갈나무 18.7%로 가장 많이 서식하고 다음으로는 밤나무가 13.3%로 다음으로 많고 적송(12.5%), 솔나무(10%), 굴참나무(9.5%) 순으로 10%이상 존재한다⁽¹⁸⁾. 이외에도 아까시나무, 상수리나무, 벚꽃나무, 상실나무, 참나무 등의 나무들이 존재하며 이들이 갖는 CO₂ 흡수량은 분포되어 있는 면적(ha)과 비례하여 계산하여 본 결과 1년에 125,716 tCO₂의 양이 흡수되는 것으로 계산 되었다.

3.2 대안 시나리오 분석 및 결과

3.2.1 대안시나리오 I: 바이오가스에 의한 열에너지원의 대체

P 도시는 경기도의 타 지역과 비교해서 돼지사육농가가 많은

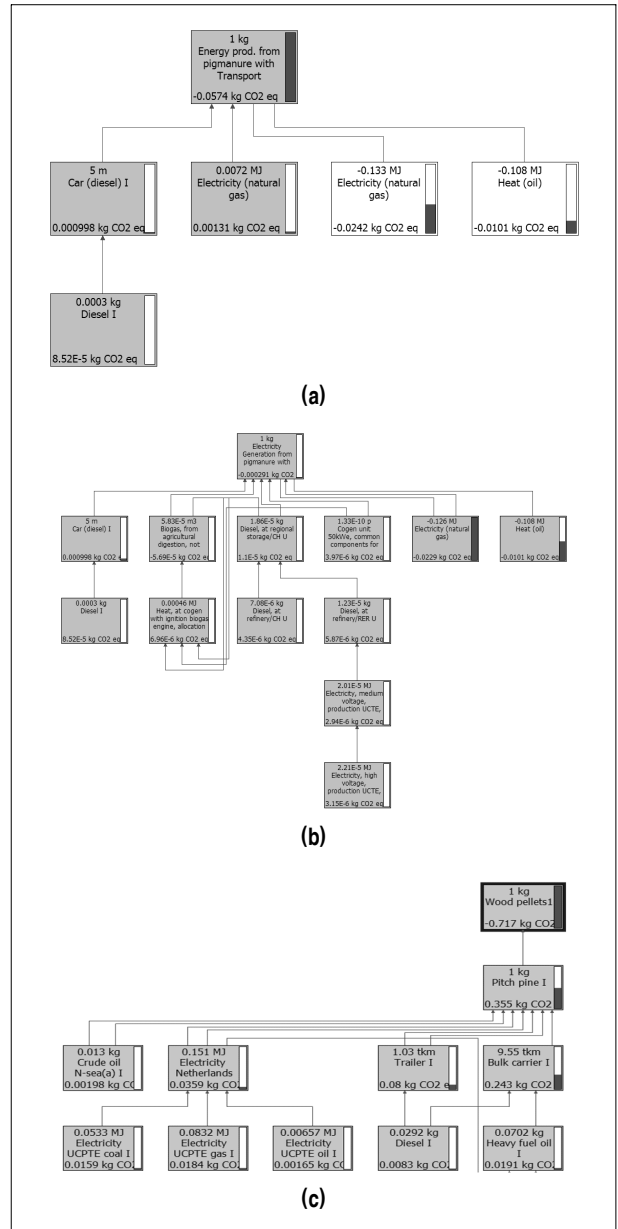


Fig. 5 Estimation of LCA result for the bioenergies (a) LCA result of heat energy by biogas generation of pig manure, (b) LCA result of electricity generation by biogas generation of pig manure, (c) LCA result of heat energy by combustion of biochip.

곳이며 일반적으로 1개 사육농가의 돼지 사육두수를 평균적으로 1,800마리라고 가정하면 돼지 1마리의 하루 분뇨의 양은 평균적으로 8.6kg이며 1개 사육농가에서 발생하는 하루 돈 분뇨의 양은 15,480kg이다. 이는 216.72m³/일의 메탄가스 발생량에 해당한다. 경기도에서 사육되는 돼지사육의 양은 1,839,000두(전국의 21%)⁽¹⁹⁾이며 P 도시의 사육두수는 230,232두이며

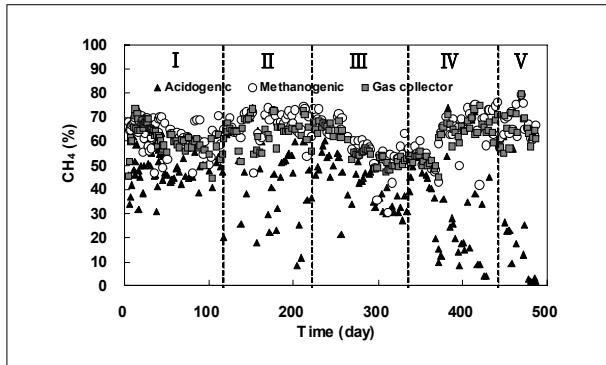


Fig. 6 CH₄ emissions from biogas anaerobic fermentation.

Table 8. Input and out data of the biogas plant for a day ⁽¹²⁾

	Input	Output	Comments
Input materials (m ³ /d)			
-Swine waste (m ³ /d)	5	-	TS 2.2%, VS 1.4%
Electricity (kW/d)	84.9	626	Assuming that all biogas was converted to electricity
Biogas (Nm ³ /d)	-	252±20	CH ₄ 68.1%, CO ₂ 31.4%, H ₂ S 0.5%
Diesel (L/d)	36.9		Used for the generator
Heat (Mcal/d)	-	689	Currently the heat produced is not used for maintaining the facility
Liquid fertilizer	-	5	N : 0.45% (not used for LCA data)

이를 돼지가축 분뇨 량으로 환산하면 1,980ton/일인 것으로 나타났다⁽¹⁹⁾. 앞서 얻어진 LCA분석결과를 토대로 가축분뇨의 폐자원을 대체에너지로 사용하게 되면 발생하는 이산화탄소의 발생량을 감소시킬 수 있을 것이다.

Fig. 6(a)에서 얻어진 LCA분석결과는 1kg의 축분을 혐기 발효하는 전과정 분석결과는 -0.0584 kgCO₂-eq.가 얻어졌다. Fig. 6(b)에서 보듯이 1kg의 돈 분뇨에서는 바이오가스 0.0504Nm³가 생산되며, 또한 발생하는 CH₄의 열 에너지원 연소하는 경우에 발생하는 CO₂발생량은 0.0572 kg의 CO₂가 발생하여 결과적으로 총 -0.001kg의 CO₂가 발생한다. 이 때 H₂S가 0.00191kg 오염물질로 발생한다. 하지만 이 때 발생하는 CO₂는 대기 중 CO₂를 광합성을 통하여 동화한 것으로 간주하여 추가적인 온실가스 영향은 없는 탄소중립(carbon neutral)으로 간주 한다고 보고⁽¹⁸⁾하고 있고 실제로 위 LCA 분석결과 -0.001kg의 CO₂가 발생하는 것으로 나타났다.

본 실험에 사용한 바이오가스 생산 자료를 이용하여 1톤의

돈 분뇨에 대한 전과정 영향평가(LCA)결과를 Table 8과 Fig. 5(a)에 나타내었다. 먼저 기본 시나리오인 시험플랜트 운영 결과와 축분 폐기물 수송 20km를 적용하였을 때 온실가스는 52kg CO₂-eq./ton 감축 가능하다는 것을 나타내고 있다. (LCA 분석결과 58kg CO₂-eq./ton, Fig. 6(a) & (b)참조) 실제로 5ton/d 시설에서 연간 감축할 수 있는 양은 95ton CO₂-eq./yr에 달하는 것을 의미한다⁽¹²⁾. 온실가스 감축효과의 양은 주로 전기와 열의 생산에 의한 회피효과로 분석되었다. P 도시내에서 발생하는 돈분의 양은 1,984±20 ton/day인 것으로 나타났으며 축분을 이용한 발생 CH₄의 함유율은 68±0.9%인 것으로 보고되고 있으며⁽²⁰⁾ 발생하는 축분의 양으로 발효에 의해 발생하는 일 년 CO₂발생량을 계산하면 - 59,979.2 tCO₂eq.인 것으로 나타났다eq. 인축분 1ton에 110m³의 바이오가스가 발생하므로, 인열에너지로 환산하면 1,058.4MJ(253 Mcal)이고 이를 P 도시내 필요한 에너지사용량으로 환산하여 계산하면 일 년에 1.88×10⁷ton의 축분이 필요하다^(21,22). 그러나 현재 P 도시에서 가용 가능한 최대한의 축분 양은 일 년에 731,460톤 정도이다. 이는 P 도시에서 열 에너지원으로 가용 가능한 최대한의 축분 양은 일년에 731,460톤 정도이다. 이는 P 도시에 열에너지원으로 대체를 위해서 3.9%에 해당하는 양이다. 그러므로 모든 열 에너지원을 축분으로 이용하여 대체하기에는 부족하다. 이와 같은 P 도시에서 가각 가정 바이오용하는 석유나 천연가스 대신에 바이오가스 연료로 사용하였을 경우에 이산화탄소의 양만을 고려하여 계산하면 일 년에 325,400 tCO₂-eq/년의 이산화탄소 발생량을 감소할 수가 있다.

3.2.2 대안시나리오 II: 바이오가스에 의한 전기 생산의 대체

LCA 모델의 결과로써 BAU 시나리오의 발전설비별 예상 연간발전량을 Table 5에 나타내었다. P 도시내 847,000MWh의 전력이 사용되었다. 국내 기본 발전 부하인 석탄화력 발전량은 139,340GWh으로 전체 발전량의 약 0.6%를 공급하고 있다. 앞으로 국가에너지기본계획 등의 에너지 절약 및 온실가스 감축을 위하여 원자력 발전량과 신재생에너지를 이용한 발전량을 증가시키고 석탄화력 발전량을 감소시키는 정책을 펼 것으로 예상되므로 석탄화력 발전소의 발전량이 점차 줄어들 것으로 예상된다.

다음으로 고려해야 할 요소로 바이오가스를 전력생산으로

대체하는 대안시나리오 II를 생각해 보자. Fig. 6에서 보듯이 바이오가스에 의해 발생하는 메탄가스의 농도는 67~75%를 유지하고 있으며 축분 혼합물의 톤당 생성되는 바이오가스의 양은 108~134m³/ton의 비율이다. 바이오가스 1월 생산량이 1,800,000m³일 경우에 전력생산량은 2,370,000kWh이었다. 그러므로 바이오가스의 양에 대한 전력생산량의 비는 1.8 kWh/m³정도인 것으로 실험결과 얻어졌다. 또한 LCA분석결과 Fig. 5(b)에서 1kg축분으로 전력 생산시 -0.000291kgCO₂-eq. 발생하는 것으로 나타났으며 축분 1 ton에 0.291kgCO₂-eq. 감소되었다. 이는 축분 1ton에 50.4 m³의 바이오가스가 발생하며 1m³의 바이오가스 당 CO₂ 0.006 kgCO₂-eq.을 감축할 수 있는 것으로 분석하였다⁽⁶⁾.

Table 8의 LCA결과에 의한 데이터를 이용하면 P 도시내 소재한 일반가정, 공공건물, 상업용 빌딩, 공장 그리고 농업시설 등에서 사용하는 화석연료에 의한 전기사용을 바이오가스로 대체한 전기사용(외연기관 및 호소설비 등을 이용)으로 전환사용이 가능하다⁽⁶⁾. 그러나 현실적으로 가능한 축분의 양을 생각하면 전력생산은 기존의 화석연료와 바이오가스를 혼합하여 사용하는 경우가 대체일 것이다. 기존의 발전설비에 공급되는 축분에 의한 바이오가스가 하수처리장 등으로 확대되어 공급된다면 화석연료와 바이오가스의 비율은 19:1정도의 비율이 될 것이다. 이를 P 도시내 발생하는 축분을 전력생산으로 전환하는 경우에 건물 및 이용시설 등에 적용하면 저감할 수 있는 CO₂의 양은 일 년에 212,86 tCO₂eq.인 것으로 나타났다.

3.2.3 대안 시나리오 III: 바이오매스 연소에너지로의 열 공급원 대체

대체에너지 사용방법으로는 인근에서 발생하는 임산폐기물에서 발생하는 폐자원을 대체에너지로 사용하게 되면 발생하는 이산화탄소의 발생량을 감소시킬 수 있을 것이다. Fig. 7에서 얻어진 LCA분석결과는 1kg의 바이오칩 전과정 제조과정에서 발생하는 순수 CO₂는 -0.717kgCO₂-eq.으로 나타났다. 이는 Fig. 5(c)에서 보듯이 수목의 탄소흡수가 크다는 것을 나타내며, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change:기후변화에 관한 정부 간 패널)에서 생물적 완화의 방법으로 산림의 보존과 흡수는 보다 많은 탄소저장을 유도하는 동시에 자연적으로 탄소배출을 감소하는 중요한 작용을 한다고 평가하고 있다⁽¹⁷⁾. Fig. 1은 바이오칩에서 발생하는 CO₂배출량 측정을 수행하기 위한 바이오매스 연소 플랜트의 시설모습이다. 이

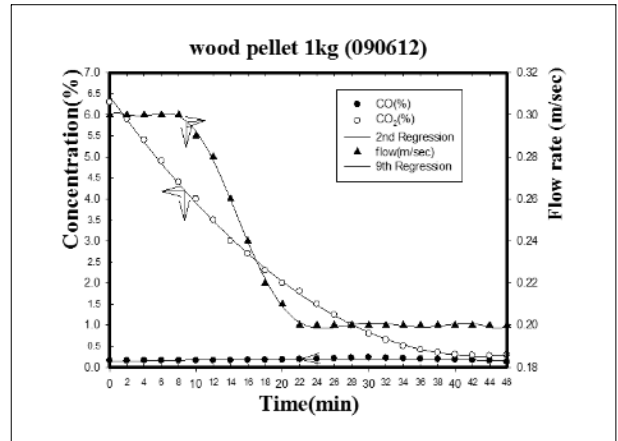


Fig. 7 measurement of CO₂ emissions from the combustion of biochip.

플랜트는 우드칩 시료 1kg을 연소시켜 발생하는 이산화탄소량을 Fig. 5(c)에서와 같이 측정하였다. 우드칩 등을 에너지원으로 연소보일러 등에 전량 사용하는 것이다. Fig. 5(c)에서 보듯이 1kg의 우드칩을 사용하게 되면 보일러 연소시 발생하는 CO₂의 양은 65g발생하는 것으로 실험결과 측정되었다. 이 경우에 사용되는 바이오매스는 1kg기준으로 보일러 등의 열 에너지원으로 사용하는 경우에 발생하는 연소 CO₂발생량은 0.065kgCO₂-eq./kg이다. 또한 바이오에너지 생성을 위한 집단에너지 시설에 다른 CO₂ 발생량은 시스템제원⁽⁸⁾을 기준으로 참고문헌⁽¹⁰⁾에서 제시한 데이터를 토대로 계산한 36.06 tCO₂-eq. 배출량을 사용하였다. 단위 면적당 CO₂ 배출원 단위(kg-CO₂/m²)에서 5.4641로 계산되었다. 그러므로 바이오가스 플랜트가 6,600m²임을 감안하면 36.063 tCO₂-eq.가 배출되는 것으로 계산되었다.

이와 같은 결과를 토대로 Table 7에서 보듯이 각 가정이나 건물 및 공공시설 그리고 공장 등에서 사용하는 화석연료 대신에 바이오매스를 연소에 의한 열 에너지원을 고려해 볼 수가 있다. 이 경우에 P 도시에서 사용되는 폐임산자재(생활폐목재 및 임지폐목재, 산업폐목재 포함)인 경우에 발생하는 바이오매스 144,664톤/연을 석유 등의 화석연료를 대체하는 경우에 -102,277 tCO₂-eq.의 CO₂흡수량이며 바이오매스 연소에 의한 CO₂발생량은 9,403 tCO₂-eq가 CO₂발생하므로 전체적으로 94,320 tCO₂-eq.을 줄일 수 있을 것이다.

3.2.4 대안 시나리오 IV, V 결과 및 분석

대안시나리오 IV는 화석연료의 사용에 의한 전력사용량을

Table 9. LCA results of CO₂ emissions depending upon types of energy sources

Fuel	Heat Source	Electricity
	CO ₂ Emission (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Emission (kgCO ₂ /MJ)
Biochip	- 0,642	0,0000069
Biogas	- 0,082	0,0405
Coal	0,423	0,095
Diesel	0,578	0,0897
LNG	0,318	0,0596
Solar	-	0,0211
Geothermal	-	0,00815
Nuclear	-	0,00857

태양광 및 지열로 대체하는 경우에 Table 9에서 보듯이 다른 화석연료들(무연탄, 경유, 천연가스)과 비교하여 CO₂배출량을 크게 줄일 수 있을 것이다. Table 1에서 나타난 P 도시 통계자료에 따르면 전체 가구 수 44,907의 전력사용을 10% 태양광과 10% 지열로 대체하는 경우에 발생하는 CO₂의 감소량은 5,887 tCO₂-eq.와 6,918 tCO₂-eq.의 양을 감소시킬 수 있는 것이다. 만일 전체 가구 수의 전력사용을 태양광과 지열로 대체하기는 현재로서는 불가능하지만 이를 가정하면 줄어드는 CO₂의 양은 화석연료인 석탄을 이용한 전력생산에 비하여 77.79%와 91.42%의 CO₂발생량을 줄일 수 있을 것이다.

그러나 태양광의 소재 기술개발 및 일조량 그리고 경제성을 종합적으로 감안하면 현재 태양광을 P 도시내 보급하기엔 시기상조일 것이다. 그러나 경기도 지역은 H강 지역주변으로 지반 구조적으로 지열에 적합한 것으로 나타나고 있어 이를 각 가정마다 적극적으로 홍보 및 신재생에너지로 전환을 유도하면 기대이상의 성과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 현재 가구 수의 30%이상을 지열로 전환하면 저감 할 수 있는 CO₂의 양은 20,754 tCO₂-eq./yr양이 된다. 이는 P 도시의 산림에 의한 CO₂ 흡수량이 1년에 125,716 tCO₂/yr의 양이 흡수되는 것을 감안하면 현재 포천시 산림면적의 거의 20%에 가까운 CO₂의 양을 저감할 수 있기 때문에 이를 적극적으로 홍보하여야 할 것이다.

이외에도 공공시설, 상업용 빌딩, 산업용 공장 그리고 농업시설 등에서는 태양광과 지열이용을 적극적으로 보급하게 되면 감소되는 CO₂의 양은 크게 증가할 것이다. Table 1에 나타난 통계수치를 이용하여 사용하는 전력비를 10% 태양광과 10% 지열로 대체하는 경우에 발생하는 CO₂의 감소 양은

22,760 tCO₂-eq.와 26,747 tCO₂-eq.의 양을 감소한다. P 도시내 모든 가구와 빌딩 및 공장 등이 신재생에너지인 태양광을 이용한 전력사용비율을 3%만 대체하여도 8,694.1 tCO₂-eq./yr. 그리고 지열로 대체하는 경우에 10,099.5 tCO₂-eq./yr이 줄어든다. 그러므로 국가에서 추진하고 있는 태양광과 지열을 이용한 저탄소 녹색마을 보급 사업은 매우 긍정적인 것으로 나타났다.

3.3 온실가스 배출량 분석

이상의 계산결과를 놓고 볼 때, P 도시내 매년 산림에서 흡수하는 CO₂의 양은 125,716 tCO₂-eq/년, 축분에 의한 바이오가스 대체에 의한 CO₂감소량은 731.5 tCO₂-eq.의 CO₂ 양 그리고 바이오매스로 바이오에너지로 전환하는 경우에 94,320tCO₂-eq.이 감소하는 것으로 예상되기 때문에 바이오매스에 의해 발생하는 전체 CO₂의 양은 220,767 tCO₂-eq.인 것으로 계산된다. 삼림에 의한 CO₂흡수량을 고려하면 18.8%만 감소하지만 현재 바이오매스 처리량을 최대한 대체에너지로 전환할 것을 가정하면 현재 P 도시에서 발생하는 CO₂의 전체의 양 670,041 tCO₂-eq.의 32.9%가 흡수되는 것으로 나타났다. P 도시내 제로탄소 녹색도시를 이룩하기 위해서는 현재 발생하는 바이오매스 뿐 만 아니라 산림재배 면적을 확대하여야 할 것이다. 이를 위해서 바이오매스의 양을 현재 발생하는 양보다 3.4배 늘리고 삼림의 수량을 배로 늘렸을 경우에 제로탄소도시가 될 수 있을 것이다. 그러나 태양광과 지열을 전체 지역주민가구, 공공시설 및 상업시설에 3%와 10%적용하면 18,793.6 tCO₂-eq.와 49,507 tCO₂-eq.가 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 전체 P도시에서 발생하는 CO₂ 양의 2.8%와 7.4%를 저감하는 비율이다.

그 외에도 산성화(AP) 영향을 제외한 모든 범주에서 환경 개선에 도움이 될 것이라는 것을 이 분석을 통해 확인할 수 있었다. 다른 영향범주와는 달리 산성화 영향이 증가하는 것으로 나타나는 것은 혼소형 발전기에 사용된 경유에 의한 영향이 주로 반영된 것으로 평가되었다. 이를 감축하기 위해서는 발전기를 순수 바이오가스만을 사용하는 것으로 교체하면 개선이 가능할 것으로 기대되었다. LCA 분석결과로부터 알 수 있듯이 바이오가스를 생산하는 방식의 유기성 폐기물 처리방법은 친환경성이 매우 우수하다고 평가할 수 있었다.

4. 결론

P 도시에서 발생하는 CO₂의 양은 가정, 공공시설 그리고 공장 및 농촌지역 시설 등에서 발생하는 CO₂와 수송 등 차량에서 발생하는 CO₂로 대별되며 배출량을 조사해 보면 전자는 연 500,877 tCO₂ 그리고 후자는 169,164 tCO₂이며 전체적으로 의 670,041 tCO₂의 CO₂양이 배출되는 것으로 조사되었다. 또한 P 도시내 산재한 축분뇨 폐기물 바이오가스 생산 시설에 대한 온실가스 배출량을 전과정평가(LCA) 방법을 사용하여 분석하였다. 돈분폐기물이 바이오가스 생산량에 24%를 기여하는 것으로 나타났으며, 전체적으로 돈분뇨 폐기물 1톤 처리시 52kg CO₂-eq./ton의 온실가스가 배출 저감되는 것으로 나타났다. 폐임산물 등의 바이오매스 수집후, 연소하여 열에너지로 전환하여 사용할 경우에는 온실가스 -0.642 tCO₂-eq./ton을 배출하는 것으로 평가되었다. 또한 P 도시내 산림의 면적은 전체면적의 64%를 차지하고 있으며 이들이 흡수하는 CO₂의 양은 125,716 tCO₂-eq.이다. 이와 같은 바이오에너지 생산 방법으로 전환함으로써 694kg CO₂-eq./ton를 저감할 수 있는 것으로 평가되었다. 궁극적으로 현재 P 도시가 가용 가능한 바이오매스 등을 활용하여 열에너지원으로 전환사용하는 경우에 현재 P 도시에서 발생하는 CO₂량의 32.9%를 저감하는 것으로 것으로 계산되었으며 추가적으로 지열 및 태양광을 P 도시 지역내 10%만 공급하여도 7.4%의 CO₂발생량을 저감할 수가 있다. 바이오매스의 양을 현재 발생하는 양보다 3.4배 늘리고 산림의 수목량을 배로 재조림하였을 경우에 제로탄소도시(현재 발생하는 CO₂량을 상쇄하는)가 될 수 있을 것이다. 그러므로 대체에너지의 적극적인 활요이 환경부하 경감이라는 측면에서도 유리한 것으로 평가되었다. 바이오에너지 시설의 환경성과 경제성을 함께 향상 할 수 있을 것으로 기대되었는데, 국내에는 가축분뇨 이외에 도축폐기물, 식품공정폐기물 등 다양한 유기성 폐기물이 이용 가능함으로 이를 바이오가스의 원료로 적극적으로 활용하는 것이 가축분뇨의 바이오가스화에 더 유리하게 적용할 것으로 기대된다. 또한 발전 폐열의 활용처를 확보하는 것 역시 에너지 절약과 온실가스 배출 감축에 크게 기여할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구를 위해 도움을 준 홍유나양과 한국 환경산업기술원 류재룡 박사님께 감사드립니다.

References

1. Yang, S., 2009, "Understanding of International Carbon Market", 1st ed., Seoul, pp. 22-25, Ajin.
2. Kim, Y., 2009, Green Growth and Low Carbon, 1st ed., Seoul, 2009, pp. 133-145, Books-Hills.
3. Lee, S., 2009, Water Environment Management strategy: response to Climate Change, Research Report, KEI.
4. Bae, J., 2006, Advanced Energy Technology in Environmental Technology, 1st ed., Seoul, pp. 9-13, Ajin Press.
5. Park, Y., Kim, J. and Kim, G., 2010, "Study of CO₂ Abatement through Renewable Technologies", GIN Conference, June 12, 27, Seoul, Korea.
6. J. Bae, 2008, Bionass and Biogasification Technology, pp. 191, Ajin Press.
7. Goedkoop, M., Schryver, A., Olle, M. and Roest, D., 2009, LCI data from Simapro 7.2, Pre Consultants.
8. Kernertech, Company Pamphlet, . 2009, pp. 2.
9. Park, Y., 2010, "CO₂ abatement by renewable technology", *J. of Korean Society of Waste Management*, in press.
10. Shin, S. Soo, M., Oh, S., Lee, K., Lee, S., Park, J., Lee, K., Lee, Y., and S. Tae, 2007, Dasin Technology and Performance Assessment of Environmental Building, 1st ed., Seoul, pp. 111-113, KiMoon Press.
11. Yeon, Y., Cho, B., Shin, S., Han, K., Cho, J. and Kim, K., 2010, "Charateristics of Wood Pellets using Waste Pine Trees", *J. of Korean Society of Waste Management*, Vol. 27, pp. 243-247.
12. Nam, J., Youn, Y., Lee, Y., So, K., Kim, C. and Kim, C., 2008, "Life Cycle Assessment of Greenhouse gas Emissions from Livestock and Food waste Co-digestive Biogas production System", *J. Kor. Agri. Environ.*, Vol. 27, No. 4, pp. 406-412.
13. Road Department, 2010, Practice Plan for Traffic Document in the P city, P city, pp. 4.
14. Park, Y., 2009, "Development of Carbon Recycle System through LCE analysis", Environmental Technical Report

- of KIEIT.
15. Park, Y., 2009, Personal Communication.
 16. Park, J., Kim, D. and Cho, J., 2006, CDM Activation in the Traffic Sector, 1st ed., pp. 82-85, Shark Communication.
 17. Lee, D., Chung, T. and Oh, Y., 2006, Climate Change and Forestry Business, 1st ed., Seoul, pp. 30-43, Bomoon Press.
 18. Dept. of Forestry, 2008, Report of Forest Investigation in P city, P city, pp. 23.
 19. P city, 2005, Practice Plan for the Animal-cultivation Industry, P city, pp. 4.
 20. Kim, H. and Ahn, J., 2009, Education Report in Kyungki Technopark, pp. 12.
 21. Deublein, D., 2006, Biogas from waste and Renewable resources, 1st ed., New York, pp. 145-153, Wiley-VCH.
 22. Klass, D., 1998, Biomass for Renewable energy, fuels, and Chemicals, 1st ed., Academic Press, pp. 45-56.
 23. www.kemco.co.kr
 24. www.krb.co.kr

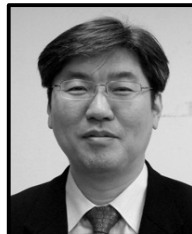
박 영 규



1980년 한양대학교 화학공학부 공학사
 1989년 플로리다주립대학교 화학공학과 공학석사
 1993년 플로리다주립대학교 의공학화학공학과 공학박사

현재 대전대학교 화학공학과 교수
 (E-mail : ypark@daejin.ac.kr)

김 정 인



1985년 중앙대학교 산업경제학과 경제학사
 1986년 위스컨신대학 자원경제학과 국제 무역 및 자원경제학석사
 1989년 미네소타대학 응용경제학과, 환경경제학박사

현재 중앙대학교 산업경제학과 교수
 (E-mail : jeongin@cau.ac.kr)

김 갑 철



1988년 서울대학교 국제경제학과 경제학사
 1990년 서울대학교 국제경제학과 경제학석사

현재 (주)네오에코즈 대표이사
 (E-mail : ecocap@neoecos.com)