

## 생태산업적 지역농업의 자원순환시스템 유형 및 구축방안

이지은\* · 허승욱\*\*

### A Study on the Resource Circulation System and Construction of the Regional Agriculture focused on Eco-industrial Approach

Lee, Ji-Eun · Heo, Seung-Wook

The objectives of this study were to analysis the nutrient cycles of agricultural by-products. The region, in which agricultural by-products are circulated for use within the agroecosystem for minimizing the input of artificial nutrients as well as generation of wastes, and where ecologically industrial diversity is formed, was defined as the regional agriculture focused on eco-industrial approach. Plan in stages for promoting ahead with the regional agriculture focused on eco-industrial approach is as follows: First of all, "The Consultation Body for Circulating & Using By-products" should be formed. Secondly, usage of agricultural by-products is identified to select the facilities of recycling and its location including the type and amount. Thirdly, the facilities for recycling of resources and infrastructure are installed. Finally, the facilities for recycling and resource circulation system within the area are efficiently managed.

Key words : *nutrient cycle, the regional agriculture focused on eco-industrial approach, agricultural by-products*

## I. 서 론

농업생산은 흙, 기후, 생물, 농자재, 에너지 등 다양한 요소의 결합과정이며, 이 과정에서 나타나는 상호작용에 따라 물질 및 에너지의 순환이 발생된다. 인간은 농축산물 생산을 위

---

\* 대표저자, 단국대학교 대학원

\*\* 단국대학교 교수

해 다양한 에너지를 투입하고 관리하며, 작물이나 가축은 투입된 에너지에 상응하여 인간에게 유용한 에너지를 공급해준다. 이러한 관점에서 인간과 농업생물은 생태적으로 공생관계라 할 수 있다. 그러나 자연의 생태시스템에만 의존하는 농업은 생산성이 낮기 때문에 보조에너지의 투입량을 증가시켜왔고, 그 결과 농업생태계는 균형을 상실하고 불안정화 되었으며, 농업생태계의 물질적 가치인 생태적 순환을 저감시키게 되었다.

지속적인 농업생태계의 기능 저하에 따라 국제기구나 국가차원에서 농촌사회를 유지하고, 환경부하를 줄이면서 생산성과 수익성을 추구할 수 있는 지속가능한 농업발전시스템에 대한 논의와 정책들이 추진 중이다. 국내에서는 지역농업클러스터사업이나 광역친환경농업단지 조성을 통해 농업환경을 개선하고 친환경농업을 육성하려는 정책들이 시행되고 있으며, 지역단위 환경농업에 대한 다양한 연구들도 이루어지고 있다.

산업생태학(Industrial Ecology)은 자연생태계 내에서 일어나는 물질과 에너지의 순환원리를 산업생산과의 연계선상에서 접근하는 학문이다. 자연생태계의 순환구조를 갖는 생산시스템에서는 폐기물을 다른 산업활동의 투입물로 재활용할 수 있기 때문에 외부효과라는 구조적인 문제를 개선할 수 있다. 이처럼 한 기업의 폐기물이 다른 기업의 원료로 이용될 수 있는 물질 재활용 시스템을 형성하여 순환적인 자원이용을 도모하고, 이를 통해 자기충족적이고 순환적인 생산방식을 갖는 생산시스템을 산업생태시스템이라 한다.

이 연구에서는 이러한 관점에서 농업·농촌의 지속가능성을 유지하고 농업생태계의 물질순환 시스템을 회복할 수 있는 대안으로서 생태산업적 지역농업을 정의하고, 지역에서 발생하는 농업부산물의 순환시스템 유형에 대해 고찰해보고자 한다. 농업부산물의 재활용, 재이용 구조가 구축되면 생산 주체들의 수익구조는 안정되고 더불어 농업환경 개선효과도 클 것으로 생각된다. 이 논문의 II장에서는 생태산업단지의 이론적 배경을 토대로 하여 생태산업적 지역농업을 정의하고, III장에서는 경중부산물과 축산부산물 등 농업부산물이 발생하는 지역에서의 자원순환시스템을 유형화하였다. 그리고 IV장에서는 생태산업적 지역농업을 구축하기 위한 단계별 추진방안 및 주체별 역할을 도출하였다.

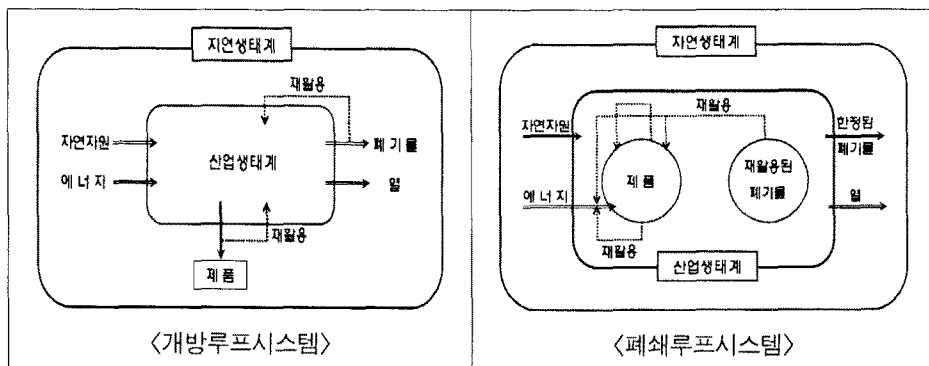
## II. 생태산업적 지역농업의 정의

### 1. 산업생태학과 산업생태시스템

생태학(Ecology)은 생물과 환경 및 함께 생활하는 생물과의 관계를 논하는 과학이며, 산업생태학(Industrial Ecology)은 자연생태계 내에서 일어나는 물질과 에너지의 순환원리를 산업생산에 적용시키고자 하는 연구분야이다. 자연생태계에서 유기체들은 서로의 폐기물을 소비하는 망(Chain)을 통해 연결되며, 이 과정에서 에너지나 자원은 거의 손실되지 않는

다. 또한 폐기물을 이용하여 살아가는 유기체가 존재하기 때문에 유기체를 둘러싼 자연생태계에서의 작용은 제품 생산을 위한 원료의 조달에서 폐기에 이르는 전과정과 유사하다. 이처럼 산업활동을 생태계에 비유하는 것은 자연생태계처럼 산업시스템도 서로간의 물질과 생산품, 폐기물의 직접이용이라는 측면에서 상호작용하며 서로 의존하는 관계이기 때문이다. 그러나 자연생태계가 재활용에 의한 순환적인 물질흐름 구조를 갖고 있는 반면 산업시스템은 과도한 물질 집중으로 인해 오염을 유발하고 자원을 낭비하는 물질흐름의 구조를 보이고 있다. 따라서 산업생태학은 산업이 유기체라는 것을 기본가정으로 하며, 자원이용의 효율성을 높이는 동시에 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 자연생태계를 모델로 한 ‘폐쇄루프시스템(Closed-loop System)’<sup>1)</sup> 또는 ‘자원이용의 순환구조’를 만드는 것을 목표로 한다.

자원이용의 순환구조를 갖는 생산시스템에서는 폐기물을 다른 산업활동의 투입물로 재활용할 수 있기 때문에 산업생태시스템(Industrial Ecosystem)에서의 제조과정은 단순히 하나의 형태에서 다른 형태의 물질로 ‘물질저장량(Material Stock)’만을 변화시키는 과정에 불과하다. 개방루프시스템(Open-loop System)에서의 산업은 자연환경으로부터 새로운 물질과 에너지를 받아 제품을 생산하고 폐기물을 발생시키는 구조이다. 이 과정에서는 제품의 생산과 사용, 폐기처리가 에너지나 물질의 재사용 또는 재활용 없이 한 방향으로 흐르는 직선적인 흐름을 갖는다. 반면 폐쇄루프시스템에서는 물질과 에너지의 완전한 내부순환이 이루어지기 때문에 상당량의 물질과 에너지가 절약되고 보존되며, 폐기물이 전혀 발생하지 않는다. 이는 자연생태계의 흐름과 매우 유사한 구조라 볼 수 있다(<그림 1>).



자료 : Frosch R. A., “Industrial Ecology : Adapting Technology for a Sustainable World”, Environment, 37(10), p. 20를 참고하여 작성.

<그림 1> 개방루프시스템과 폐쇄루프시스템의 물질 및 에너지 흐름

1) 공학의 제어이론에서 사용되는 용어이며 Open-loop는 제어신호를 주었을 때 피드백이 없는 회로나 시스템이고, Closed-loop는 제어신호가 다시 입력되는 회로나 시스템이다. 산업생태학에서는 제조공정에서 나온 폐기물을 처리해서 재활용하는 시스템을 의미하며, 순환시스템이라고도 한다.

## 2. 생태산업단지의 정의 및 기대효과

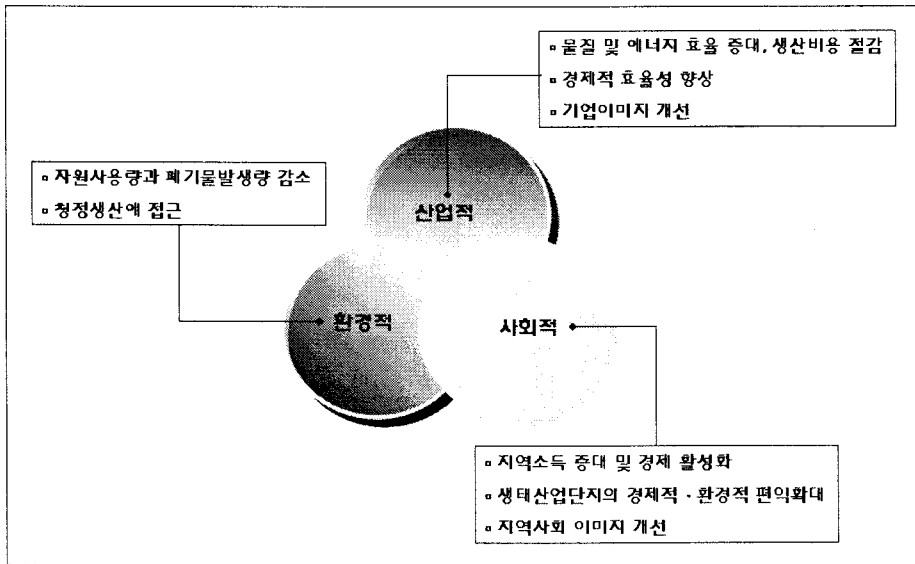
생태산업단지(Eco-industrial Park, EIP)는 산업생태학적 이론체계를 기반으로 하여 시스템적 이해와 지식을 응용한 산업단지이다. 기존의 산업시스템은 피드백을 통한 폐기물의 순환이 원활하게 이루어지지 않았기 때문에 생태산업단지는 한 기업의 폐기물이 다른 기업의 원료가 되도록 기업들간 연계구조를 형성함으로써 자원순환의 폐쇄루프시스템을 지향한다. 2001년 초 미국 내에는 최소한 40개 지역에서 생태산업개발 프로젝트가 착수되었으며, 생태산업단지, 산업생태계 또는 부산물교환으로 불리고 있다. 아시아, 유럽, 남미, 호주, 남아프리카, 나미비아 등지에서 최소 60개의 생태산업 프로젝트가 개시되었고, 일본에서만 30개 이상의 프로젝트가 진행되었다.<sup>2)</sup> 생태산업단지의 급속한 확산은 생태산업단지가 지속가능한 개발에 대한 공공 및 민간 부문 모두의 관심에 부합한다고 볼 수 있으며, 생태산업단지의 개발자와 지역사회가 기존의 산업단지보다 경쟁력 있고 효율적인 청정한 산업발전의 토대를 구축하고자 한다는데 의미가 있다.

생태산업단지의 개념은 진행되고 있는 단계이기 때문에 정의를 내리기는 어렵지만 세계적으로 사용되는 생태산업단지의 개념에는 다음과 같은 중요한 의미가 내포되어 있다. 첫째, 정보, 물질, 용수, 에너지, 하부시설, 자연서식지 등을 포함하는 자원을 효율적으로 공유하거나 이용하고, 둘째, 에너지와 1차 물질의 이용을 최소화하고, 폐기물을 포함한 환경영향을 최소화한다는 점이다. 셋째, 기업과 지역사회 모두에게 경제적·환경적 편익을 도모할 수 있는 지속가능한 경제, 환경, 생태, 사회관계의 형성이 궁극적인 목적이며, 넷째, 기업끼리 그리고 지역사회와 협력하여 순환적인 물질 및 에너지 교환·이용시스템을 갖춘 산업공동체를 지향하고 있다는 점이다(이재준 외, 2002).

그러나 생태산업단지 구축을 통한 기대효과는 연관산업, 입지여건, 지역의 경제적 여건, 개발주체들, 정치적·규제적 여건, 협력하는 기업들의 의지 등에 따라 국가나 지역마다 다르게 나타날 것이다. 또한 대부분의 생태산업단지들은 계획 중이거나 개발초기 단계이기 때문에 기대효과를 정확하게 파악하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 산업생태학의 원리를 가장 효과적으로 이용하고 있다고 평가되는 덴마크의 칼룬버그(Kalundborg) 생태산업단지<sup>3)</sup>

- 
- 2) 우리나라도 산업자원부와 국가청정생산지원센터가 중심이 되어 15년간 27개의 한국형 생태산업단지를 구축하기 위한 사업을 추진하고 있다. 지역균형 발전을 위한 청정생산 기반 조성(2005~2009), 자원순환형 지역 청정생산네트워크의 확산(2010~2014), 한국형 생태산업단지 설계 및 운영(2015~2019)의 단계별 추진계획을 수립하고, 포항, 여수, 울산 미포-온산, 반월-시화, 청주 5곳에서 시범단지가 운영 되고 있다.
  - 3) 칼룬버그 생태산업단지의 참여집단은 화력발전소, 정유소, 석고판생산업체, 제약회사, 토양처리업체의 5개 주요 기업과 지방정부, 재활용업체로 구성되어 있으며, 25년 동안 기업들간 경제적 이익을 얻었으며 있는 에너지나 물 등의 교환에서 출발하여 생산공정에서 발생하는 부산물, 폐기물의 교환체계를 형성하는 점진적인 과정을 보여주고 있다.

의 사례와 생태산업단지 관련 연구들은 산업적·환경적·사회적 측면에서 나타날 수 있는 기대효과를 다음과 같이 제시하고 있다. 먼저 산업적 측면에서는 참여기업들이 물질과 에너지의 효율성을 높이고, 폐기물을 재활용함으로써 생산비용을 절감할 수 있다. 또한 폐기물관리, 비상사태관리, 교육 및 훈련, 환경정보 등의 서비스를 공유하고, 산업비용의 분담을 통해 기업들은 경제적 효율성을 향상시킬 수 있으며, 대외적인 기업이미지 또한 개선할 수 있다. 환경적 측면에서는 자원의 사용량이나 오염 및 폐기물 발생량을 감소시켜 환경부하량을 최소화할 수 있다.<sup>4)</sup> 또한 공해방지, 에너지효율, 수질관리, 자원재생, 환경관리 방법 및 기술 등 보다 혁신적인 방법으로 청정생산에 접근할 수 있다. 사회적 측면의 기대효과는 참여기업들의 경제적 성과가 향상됨에 따라 지역사회 경제발전에 효과적인 도구가 될 것이라는 점이다. 동시에 선도적인 첨단기업을 유치하거나 지역 신규 벤처기업들에게 좋은 입지여건을 제공할 수 있으며, 청정산업의 발전과 일자리 창출이 가능하다. 나아가 생태산업단지의 경제적·환경적 편익을 지역사회의 전 산업부문으로 확대할 수 있는 제도를 마련할 수 있고, 지역사회의 이미지도 크게 개선할 수 있다(<그림 2>).



<그림 2> 생태산업단지의 기대효과

4) 칼룬버그 생태산업단지는 연간 석유 4.5만톤, 석탄 1.5만톤, 물 60만m<sup>3</sup>을 절감하였으며, 연간 17.5만톤의 이산화탄소와 1만톤의 아황산가스 배출량을 절감하였다. 또한 분진 20만톤, 연료가스 6.8만톤, 석고 8.5만톤, 슬러지 100만톤 등 연간 290만톤의 폐기물 및 부산물을 재활용하였다.

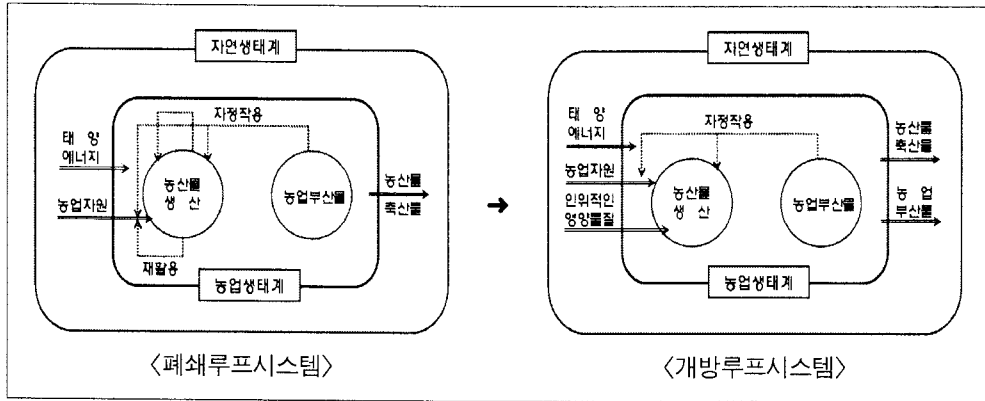
### 3. 생태산업적 지역농업의 정의

농업생태계는 농지에 태양에너지와 인위적인 투입물을 외력<sup>5)</sup>으로 하여 농지내의 균집을 유지하는 생태계를 말하며(이승헌 외, 2002), 에너지흐름, 물질순환, 개체군 조정, 안정성 측면에서 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, 인간이 투입하는 보조에너지는 생태계를 개방체계로 만들기 때문에 작물의 재배와 수확에 필요한 많은 양의 에너지가 농업생태계 외부에서 투입된다. 그 결과 농업생태계는 생태계 내에서 생체량의 축적으로 저장되는 에너지보다 투입되는 보조에너지가 훨씬 많아 지속성이 낮아지게 된다. 둘째, 대부분의 농업생태계는 생태계 내에서의 물질순환은 미미한 반면, 작물 생산을 통해 대부분의 영양물질이 생태계 밖으로 유출되는 흐름 구조를 형성하고 있다. 셋째, 농업생태계는 높은 생산성을 창출하기 위해 작물이나 가축의 영양단계를 줄이고 환경을 단순화하기 때문에 개체군 스스로 생식을 통해 세대를 지속하거나 조정해나가는 경우는 거의 없다. 그 결과 생물다양성은 축소되고 영양구조가 단순해지게 된다. 넷째, 농업생태계는 작물이나 가축을 생산하는 동안 일정한 균형을 유지하지만, 수확 후 필연적으로 균형이 파괴되기 때문에 농업생태계는 인간의 노동력과 보조에너지의 투입에 의해 안정성이 유지된다는 특징이 있다.

그러나 주어진 환경용량(carrying capacity) 내에서 생태시스템에만 의존하는 농업은 생산성이 제약되기 때문에 농업생산성을 높이기 위해서 보조에너지의 투입량을 지속적으로 증가시켜왔다. 이러한 변화를 산업생태학적으로 해석하면, 농업생태계는 자연의 생태시스템에 의존하는 폐쇄루프시스템 구조에서 자연환경에 대한 의존성을 최소화하는 개방루프시스템 구조로 전환된 것으로 볼 수 있다. 개방루프시스템 구조에서는 농업생산 과정에서 발생하는 농업부산물이 자정능력을 초과하여 발생하기 때문에 환경오염원으로 작용하며 생태계에 부정적인 영향을 주게 된다(<그림 3>). 따라서 농업생태계를 폐쇄루프시스템으로 전환시키기 위해서는 보조에너지의 투입량을 최소화하고 자연생태계로 배출되는 폐기물의 발생량을 감소시켜야 할 것이다. 구체적으로는 재생불가능한 에너지의 투입을 줄이고, 농업생태계 내에 있는 자원을 중점 활용함으로써 순환기능을 강화하여 농업생태계의 생물학적 다양성을 유지할 수 있어야 한다.

생태산업적 지역농업에서 추구하는 기본목표는 바로 지역 내에서 작용하는 농업생태계의 폐쇄루프시스템을 복원, 강화하는 것이다. 지역에서 발생하는 부산물을 분석하고 부산물을 중심으로 재활용 내지 재이용 구조가 형성되면 농산물 생산 주체가 협력하여 상호이익을 얻는 동시에 농업환경을 개선할 수 있다. 따라서 생태산업적 지역농업이란, “지역의

5) 같은 계(係)에 속한 물체들 사이에서 작용하는 힘이 내력(內力: Internal Force)이며, 물체가 속한 계 바깥의 물체에 의해서 작용되는 힘을 외력(外力: External Force)이라고 한다.

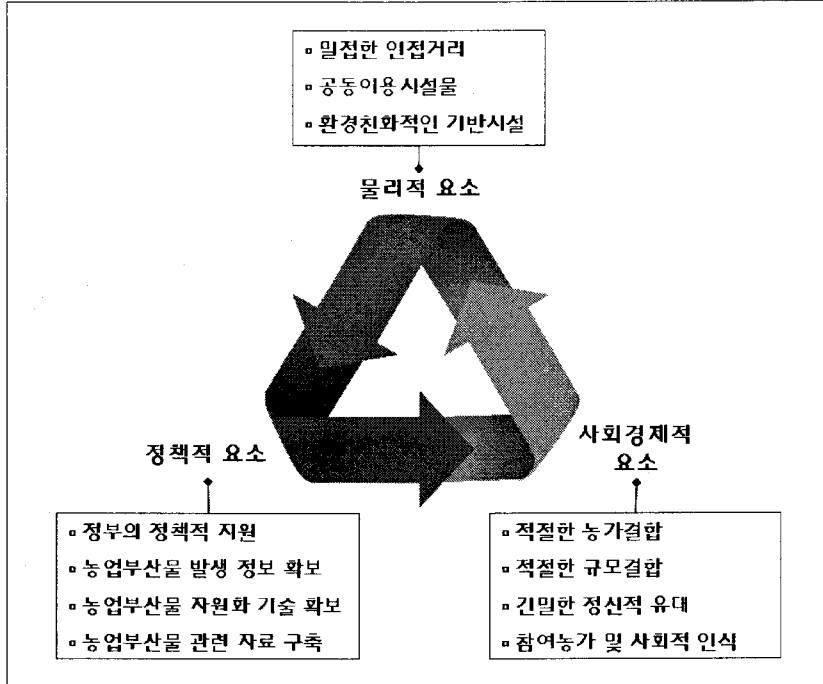


〈그림 3〉 농업생태시스템의 변화

농업부산물을 농업생태계 내에서 순환 이용함으로써 인위적인 영양물질의 투입과 폐기물 발생을 최소화하는 폐쇄루프시스템 구조를 지향하며 생태산업적 다양성이 형성되는 지역”으로 정의하고자 한다. 생태산업적 지역농업이 성립하기 위해서는 우선 농업부산물의 자원순환 구조가 형성될 수 있도록 발생하는 부산물의 종류가 다양해야 한다. 또한 부산물의 공급이 일정하지 못한 반면 자원화된 부산물의 수요는 연중 일정하기 때문에 농업부산물의 발생량이 충분해야 할 것이다. 그리고 농업부산물을 순환 이용하는 지역의 범위는 부산물의 수집 및 운반과 자원순환의 범위에 따라 다르게 나타날 수 있다. 경종부산물의 발생 부산특정시기에 집중되지 수비교적 넓은 범위에 분포하며, 축산부산물은 위생상의 문제 때문에 수집 및 운반의 한계가 있다. 또한 자원화된 부산물의 이용이 지역 내로 한정되는지, 지역외부로의 공급까지 고려할 것인지에 따라 그 범위가 좁거나 넓게 설정될 수 있다. 그러나 생태산업적 지역농업에서 지향하는 바는 농업부산물의 자원순환구조를 형성하는 것이기 때문에 부산물의 발생량과 수집 및 운반비용을 고려하여 마을단위나 읍, 면단위가 바람직하다. 이는 농업부산물의 자원순환 구조 속에서 관련 주체들이 부산물의 공급자이면서 동시에 수요자이기 때문에 부산물의 안정적인 수급을 위한 참여주체들의 신뢰구조 형성 측면에서도 유리하다.

한편, 부산물자원화시설은 발생하는 농업부산물의 종류가 다양하고 발생지역이 광범위하며, 수집 및 운반비용을 고려하여 농업부산물의 발생량이 많은 지역을 중심화 하는 것이 바람직하다. 특히 부산물자원화시설이나 순환이용을 위한 기반시설들은 지역의 환경파괴를 최소화하는 범위 내에서 설계되어야 한다. 이외에도 농업부산물의 자원순환 이용이 효율적으로 이루어지기 위해서는 조례 제정이나 재정 지원 등의 정책적 지원 또한 중요하며, 부산물을 유용한 형태로 바꿀 수 있는 다양한 기술개발이 필요하다. 그리고 지역에서 재배하는 작물 및 가축사육에 대한 자료를 정기적으로 조사하고 분석함으로써 부산물 순환의 흐름을 예측할 수 있어야 한다. 생태산업적 지역농업을 조성하기 위해 필요한 구성요소를

도출하면 <그림 4>와 같다.<sup>6)</sup>



<그림 4> 생태산업적 지역농업의 구성요소

### Ⅲ. 농업부산물의 자원순환시스템 유형

#### 1. 경종부산물 중심의 자원순환시스템

농업부산물(農業副産物)은 농업에서 기본생산물 이외에 부차적으로 얻는 생산물을 의미

6) 문석웅(2003)은 생태적 산업네트워크(Eco-industrial Network : EIN)를 조성하기 위해서는 상호보완적인 다양한 업종의 구성, 위치의 근접성, 기업간의 열린대화, 교섭과 체결은 상업적이고 건전한 이득이 있을 것, 교섭과 체결은 규제당국과의 긴밀한 협조 아래 자발적일 것, 기업간의 정보공유와 공동목표를 추구하는 협조증진을 위한 기구의 존재가 필요하다고 보았다. 또한 이재준(2002)은 생태산업단지의 구성요건을 사회경제적 요소(산업결합, 규모결합, 친밀한 정신적 거리, 참여기업 및 사회적 인식), 환경정책적 요소(강력하고 유연한 환경규제, 기업에 대한 정보의 확보, EIP에 필요한 기술의 확보, 포괄적인 환경정보의 축적), 물리적 요소(밀접한 기업간 거리, 공동이용시설물, 환경친화적 기반시설의 설치)로 구분하여 제시하고 있다. 두 연구의 구성요건을 토대로 하여 생태산업적 지역농업의 구성요소를 도출하였다.



하며, 경종부산물(耕種副産物)과 축산부산물(畜産副産物)은 각각 농산물과 축산물의 생산 과정에서 부수적으로 생산되어 이용가치가 있는 생산물로 정의할 수 있다.

먼저 경종부산물이 제품형태로 이용되는 경우는 사료, 축사갈짚, 퇴비 등이며, 처리공정은 원형, 절단, 파쇄, 가공 등이 있다. 사료로 이용가능한 부산물은 벗짚, 왕겨, 보리짚, 옥수수대, 콩각지, 고구마·감자줄기 등이며, 축사갈짚으로는 벗짚이나 왕겨가 이용되고 있다. 그리고 왕겨와 파쇄한 과수전정지는 퇴비로 농지에 살포되기도 한다. <표 1>은 조사시점이 1980년대 말이기 때문에 현 시점의 부산물 이용현황과는 다소 차이가 있지만, 이용 가능한 경종부산물의 자원형태를 제시하고 있다는 점에서 참고자료로서의 가치는 크다고 본다. 벗짚과 왕겨, 맥류는 퇴비로 이용되는 비율이 높으며, 사료로 이용된 부산물은 서류와 잡곡, 두류, 벗짚 등이 있다. 또한 연료이용 비율이 높은 부산물은 과수 전정가지와 특용작물, 두류 등이 있으며 과수 전정가지는 모두 연료로 이용되었다.

<표 1> 경종부산물 이용현황

(단위 : %)

구분	퇴비	사료	연료	판매	폐기	기타	합계
벗짚	53.4	26.6	14.6	2.1	0.3	2.9	100.0
왕겨	66.2	1.3	30.2	0.5	0.4	1.4	100.0
맥류	68.3	2.3	25.2	0.1	0.6	3.4	100.0
잡곡	18.0	38.5	14.4	28.2	0.9	0.0	100.0
두류	10.1	29.2	59.8	0.3	0.5	0.1	100.0
서류	18.4	76.0	0.6	0.6	3.3	1.1	100.0
특작	5.2	8.0	70.6	0.1	15.4	0.7	100.0
과수	-	-	100.0	-	-	-	100.0

자료 : 홍종준 외, 1991.

수도작 농가에서 발생하는 벗짚은 지대에 따라 차이를 보이지만, 도시근교와 평야지, 산간지, 준산간지 모두 퇴비이용 비율이 가장 높게 나타났다. 도시근교는 외부판매가 28.0%로 비교적 높고, 산간지와 준산간지는 사료로 이용하는 비율이 각각 39.0%와 26.5%로 나타났다. 평야지는 가축사료 이용비율과 외부판매 비율이 각각 18.6%를 차지하고 있다(<표 2>).

〈표 2〉 지대별 수도작 농가의 볏짚 이용용도

(단위 : %)

구 분	자가논·밭 퇴비이용	본인 가축 사료이용	외부 무상공급	외부판매	과수원 등에 이용	합 계
도시근교	66.0	-	4.0	28.0	2.0	100.0
평 야 지	62.8	18.6	-	18.6	-	100.0
산 간 지	46.0	39.0	5.0	-	10.0	100.0
준산간지	62.6	26.5	2.3	4.3	4.3	100.0
평 균	59.3	25.1	2.7	8.2	4.7	100.0

자료 : 박현태 외, 2007.

수도작 농가의 볏짚 외 부산물 이용실태는 <표 3>과 같다. 왕겨는 퇴비로 이용되는 비율(82.9%)이 매우 높고, 미강은 퇴비(41.0%)나 가축사료 및 축사갈개(48.7%)로 이용되고 있으며, 쉼미와 청미는 가축사료나 축사갈개로 이용하는 비율이 각각 80.0%와 76.9%로 높은 편이다.

〈표 3〉 수도작 농가의 볏짚 외 부산물 이용실태

(단위 : %)

구 분	퇴비 활용	가축사료, 축사갈개	식용활용	정미소에 두고 음	합 계
왕 겨	82.9	9.8	-	7.3	100.0
미 강	41.0	48.7	-	10.3	100.0
쉼 미	-	80.0	10.0	10.0	100.0
청 미	-	76.9	19.2	3.9	100.0

자료 : 박현태 외, 2007.

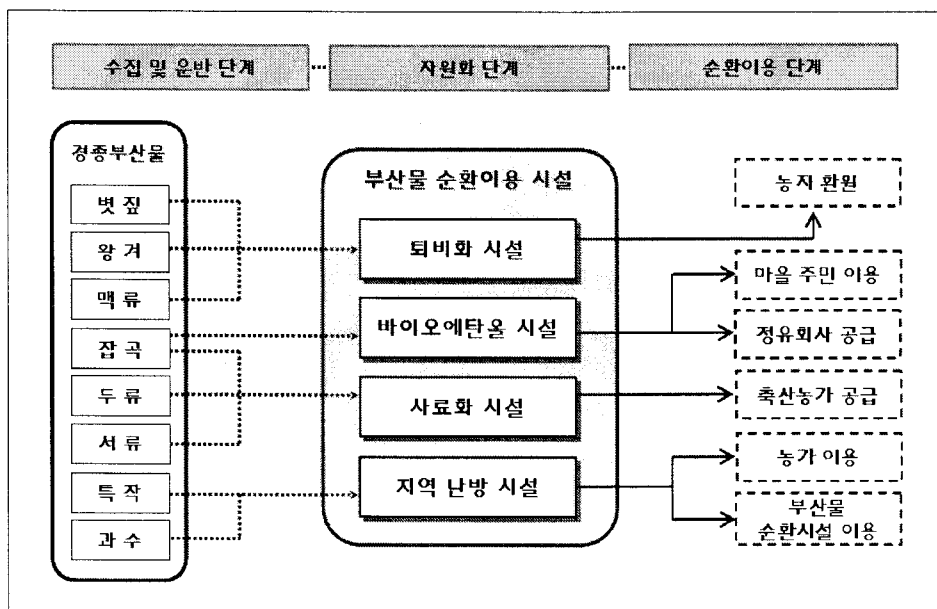
비량이 증가함에 따라 사육두수가 늘어나면서 규모화 되었고, 지역에 따라서는 경지면적 대비 가축분뇨 이용량이 초과하는 경우도 발생하였다.

2006년 가축분뇨발생량은 4,391만 5천톤이며 이 중 80.3%인 3,525만 3천톤이 퇴비처리되었고, 액비처리 물량은 3.0%인 130만톤이다(<표 4>). 가축분뇨는 많은 유기물과 영양염류를 함유하고 있어 정화처리하는 경우 상대적으로 많은 비용이 소요되기 때문에 대부분 액비나 퇴비형태로 자원화되고 있다.

제적이다.

그러나 연소하여 열을 생산하는 방법은 적용이 용이한 반면 생산된 에너지의 부가가치가 가장 낮기 때문에 보다 유용한 형태로 이용하려는 시도들이 이루어지고 있다. 대표적인 예로는 농업부산물이나 유기성폐기물을 혐기성 상태에서 발효시켜 발생하는 메탄을 이용하여 전기와 열을 생산하는 방법과 가솔린을 대체할 수 있는 바이오에탄올의 생산이 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 경종부산물만 발생하는 지역에서 가능한 순환이용체계는 <그림 5>와 같으며, 부산물 순환이용 시설은 사료화시설, 퇴비화시설, 지역난방시설, 바이오에탄올시설 등을 고려해 볼 수 있다. 경종부산물에 따른 부산물 순환이용 시설의 선택은 지역에서 발생하는 부산물과 이용하고자 하는 순환이용의 형태에 따라 상이할 것이다. 또한 순환이용 단계에서 자원화된 부산물의 이용이 지역 내에만 국한되는지, 외부로의 공급까지 고려할 것인지에 따라 경종부산물의 순환이용 체계는 다양하게 선택될 수 있다.



주 : 부산물 순환이용 시설은 <표 1, 2, 3>의 내용을 참고하여 경종부산물의 이용률이 높은 용도를 고려하여 선택하였으며, 순환이용 단계는 자원화된 부산물이 지역 내부와 외부에서 이용되는 경우를 모두 고려하였음.

<그림 5> 경종부산물 순환이용시스템

## 2. 축산부산물 중심의 자원순환시스템

가축분뇨는 각종 유기물을 풍부하게 함유하고 있어 작물생산에 필요한 비료성분을 공급하는 등 유용한 자원으로 활용될 수 있다. 그러나 국민소득 증대와 식생활 변화로 육류소

비량이 증가함에 따라 사육두수가 늘어나면서 규모화 되었고, 지역에 따라서는 경지면적 대비 가축분뇨 이용량이 초과하는 경우도 발생하였다.

2006년 가축분뇨발생량은 4,391만 5천톤이며 이 중 80.3%인 3,525만 3천톤이 퇴비처리되었고, 액비처리 물량은 3.0%인 130만톤이다(<표 4>). 가축분뇨는 많은 유기물과 영양염류를 함유하고 있어 정화처리하는 경우 상대적으로 많은 비용이 소요되기 때문에 대부분 액비나 퇴비형태로 자원화되고 있다.

〈표 4〉 가축분뇨 처리 실태(2006년)

(단위 : 천톤, %)

연간 발생량	자원화 물량		정화방류	공공처리	해양배출	기타
	퇴비	액비				
43,915 (100.0)	35,253 (80.3)	1,300 (3.0)	1,472 (3.4)	2,819 (6.4)	2,607 (5.9)	464 (1.1)

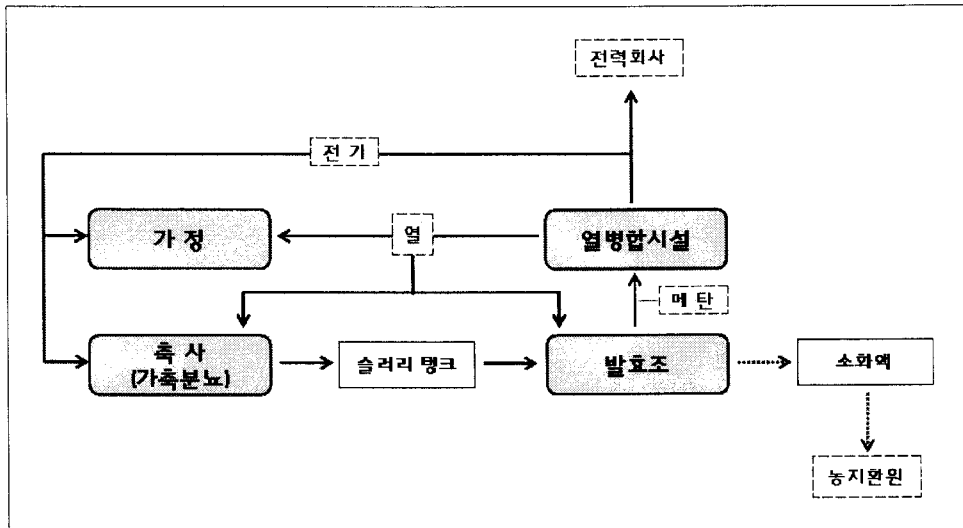
자료 : 이상철, 2007.

그러나 지역 내 작물이 필요로 하는 영양소와 토양 자체의 정화능력을 초과하여 퇴비 또는 액비를 사용하게 되면 잉여 영양분이 토양 내에 지속적으로 축적되거나 용탈되어 토양과 수질에 악영향을 미치게 된다. 그리고 가축분뇨를 이용한 퇴비와 액비는 화학비료에 비하여 영양성분이 낮거나 불균형 되기 쉽기 때문에 이에 대한 적절한 조정이 필요하다. 특히 비료 성분 중 인산은 질소나 칼륨과는 달리 토양에 잘 흡착되어 거의 유실되지 않기 때문에 과다하게 사용되는 경우 수질오염을 유발 할 수 있다. 따라서 토양에 대한 정확한 유효비료성분을 조사하고, 재배작물의 정확한 양분요구량을 산정하여 알맞은 맞춤형 퇴비와 액비를 공급하는 것이 성공적인 가축분뇨의 자원화 방법이다. 그러나 생산된 퇴비의 수요처가 한정되어 있으며, 수요처를 찾더라도 살포하는데 따른 추가적인 비용 때문에 보급의 한계가 있다. 또한 양분수지가 초과상태에 있고 퇴비화 하는 과정에서 열을 필요로 하기 때문에 추가적인 에너지를 소비해야 한다는 문제점이 있다. 그 결과 최근 축산분뇨를 연소 시킴으로써 에너지를 획득하는 여러 방법들이 주목을 받고 있다.

그 중 가축분뇨 및 경중부산물, 유기성폐기물을 혐기상태에서 발효시켜 발생하는 바이오가스를 이용하여 전기와 열에너지를 획득할 수 있는 기술시스템을 바이오가스플랜트라 한다. 바이오가스플랜트는 특히 축산부문에서 많은 주목을 받고 있는데, 그 이유는 분뇨를

7) 바이오가스는 박테리아가 혐기상태에서 탄소를 포함하는 유기원료를 분해할 때 형성되는 가스혼합물로 열량은 1m<sup>3</sup>당 5,500~6,500kcal이다, 주요 성분은 메탄이 60~70%, 이산화탄소가 30~40%를 차지하며, 나머지는 질소, 산소, 황화수소 및 물 등으로 구성된다. 이산화탄소가 분리되고 메탄함유량이 95%일 때를 바이오메탄이라 하며 자동차 연료로 이용가능하다.

밀폐한 공간에서 처리함으로써 악취문제를 해소하고, 온실가스인 메탄의 배출을 최소화하기 때문이다. 또한 발효과정에서 발생하는 잔여물에는 질소, 인산, 칼륨 등 비료성분이 남아있어 비료 효과가 높은 액비로 활용할 수 있다. <그림 6>은 가축분뇨만이 원료로 투입되는 경우의 처리공정을 나타낸 것이다.

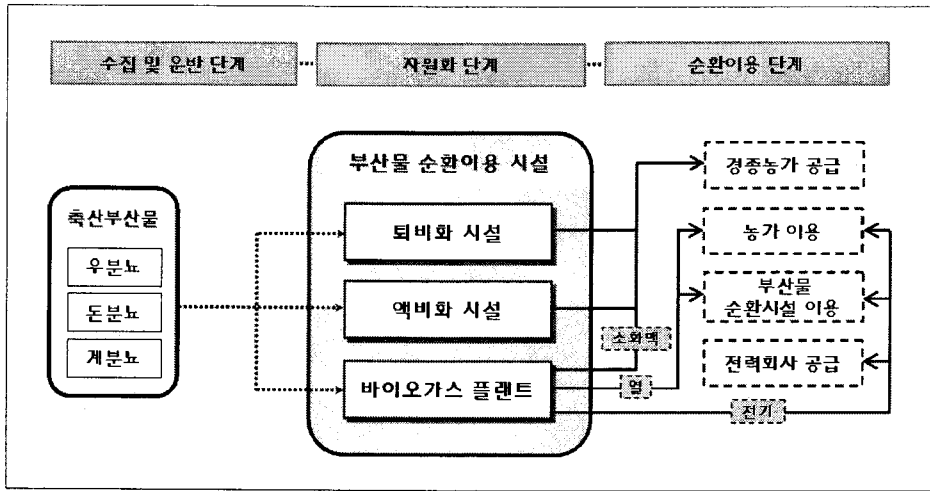


자료 : 淡路和則, 社団法人三重県畜産協会の講演要旨集을 참고하여 재작성.

<그림 6> 바이오가스플랜트의 처리공정

이 공정에서는 축사에서 이송된 가축분뇨가 물과 혼합시키는 슬러리탱크를 거쳐 발효조에 투입되고, 발효조에서 발생하는 메탄가스는 열병합시설에서 열과 전기를 생산하는 원료로 사용된다. 발생한 열은 축사나 가정, 발효조의 온도를 유지시켜주기 위한 용도 등으로 재사용하고, 전기는 이용하거나 전력회사에 판매할 수 있다. 한편 발효조에서 발생하는 소화액은 비료효과가 높아 인근 농지에서 액비로 활용할 수 있다.

위에서 살펴본 것처럼 가축분뇨는 퇴비 및 액비화, 바이오가스화를 통한 열에너지 및 전기 등의 자원화가 가능하다. 따라서 축산부산물만 발생하는 지역에서의 순환이용은 <그림 7>과 같으며, 부산물 순환이용 시설은 퇴비화시설, 액비화시설, 바이오가스플랜트 등이다. 축산부산물의 자원화단계는 지역에서 발생하는 가축분뇨의 종류 및 발생량과 순환이용의 형태에 따라 선택될 것이며, 자원화된 부산물의 이용범위가 지역내로 한정되는지, 지역의 부까지 고려할 것인지에 따라 순환이용 체계는 매우 다양하다.



〈그림 7〉 축산부산물 순환이용시스템

### 3. 농업부산물 중심의 자원순환시스템

지역 내에 경종농가와 축산농가가 혼재할 때 일반적으로 경종부산물의 자원화 과정에서 발생하는 사료와 축산부산물의 자원화 과정에서 발생하는 퇴비 및 액비를 순환 이용하는 경우가 많다. 또한 바이오가스플랜트는 초기비용이 많이 소요되기 때문에 운영효율성을 높이지 않는다면 채산성이 악화될 가능성이 크다. 바이오가스플랜트에서 발생하는 경제적 편익의 90%는 전기와 열의 에너지 이용에서 나타나기 때문에 수익을 향상시키기 위해서는 바이오가스 발생량을 증가시켜야 한다. 따라서 가축분뇨와 경종부산물 및 유기성폐기물의 혼합발효를 통해 가스발생량을 증대시키는 방법이 시도되고 있다. 이를 위해서는 바이오가스 플랜트 시설의 경제성을 확보할 수 있는 시설의 규모와 적정 가축사육두수가 규명되어야 하겠지만, 현재는 이를 검토할 수 있는 데이터가 구축되어 있지 못하다.

독일에 존재하는 바이오가스 플랜트 시설의 약 67%는 우분뇨를 이용하고, 약 15%는 돈분뇨를 이용하며, 나머지는 계분이나 혼합분뇨를 이용하고 있다(淡路和則). 독일 또한 혼합발효에 대한 연구는 연구기관의 사례나 소수의 플랜트 데이터를 통해 경제성을 분석하는 정도에 머물고 있다. 그러나 독일의 바이오가스 관계자들은 유기폐기물과 혼합발효하기 위해 적어도 100가축단위<sup>8)</sup>의 분뇨가 필요하다고 보고 있다. 이에 대해 독일 라인랜트 농업회

8) 가축단위(Livestock Unit)는 가축 또는 가금(家禽)의 마리수를 통계적으로 나타낼 때 각 가축의 마리수를 그대로 나타내면 그 지역의 종합적인 가축수를 다른 지역과 비교하는 것이 불편하기 때문에 사료소요량이나 가축분뇨 배설량을 기준으로 하되 질소나 인산의 성분량을 기준으로 하는 경우가 많다. 독일은 순수 질소 80kg을 1단위로 하여 가축단위를 성우 1.5두, 비육돈 7두, 산란계 100수, 육계 300수로 설정하였으며, EU에서는 젖소 2두, 육우 4두, 번식돈 5두, 비육돈 16두, 산란계 133수를

의소는 가축규모를 100가축단위, 150가축단위, 300가축단위로 설정하고, 혼합원료는 음식물쓰레기와 덴트 콘(dent corn, 말먹이용 옥수수)을 사용하여 바이오가스플랜트 시설의 경제성을 검토하였다. 그 결과 가축분뇨만을 이용하는 것보다 가축분뇨와 덴트콘, 가축분뇨와 음식물쓰레기를 혼합발효하게 되면 발생하는 가스량 및 발전량, 열생산량 모두 약 2~3배 더 많다(<표 5>).

<표 5> 혼합발효에 따른 바이오가스플랜트의 경제성

(단위 : m<sup>3</sup>/년, kWh/년)

구 분		가축분뇨	가축분뇨+덴트콘	가축분뇨+음식물쓰레기
100 가축단위	가스생산량	54,750	118,380	160,350
	발전량	109,226	255,848	346,556
	열생산량	82,125	253,392	260,568
150 가축단위	가스생산량	82,115	145,755	251,475
	발전량	163,839	315,012	580,769
	열생산량	133,453	236,851	449,512
300 가축단위	가스생산량	164,250	346,050	481,050
	발전량	327,678	747,900	1,039,669
	열생산량	266,906	562,231	781,706

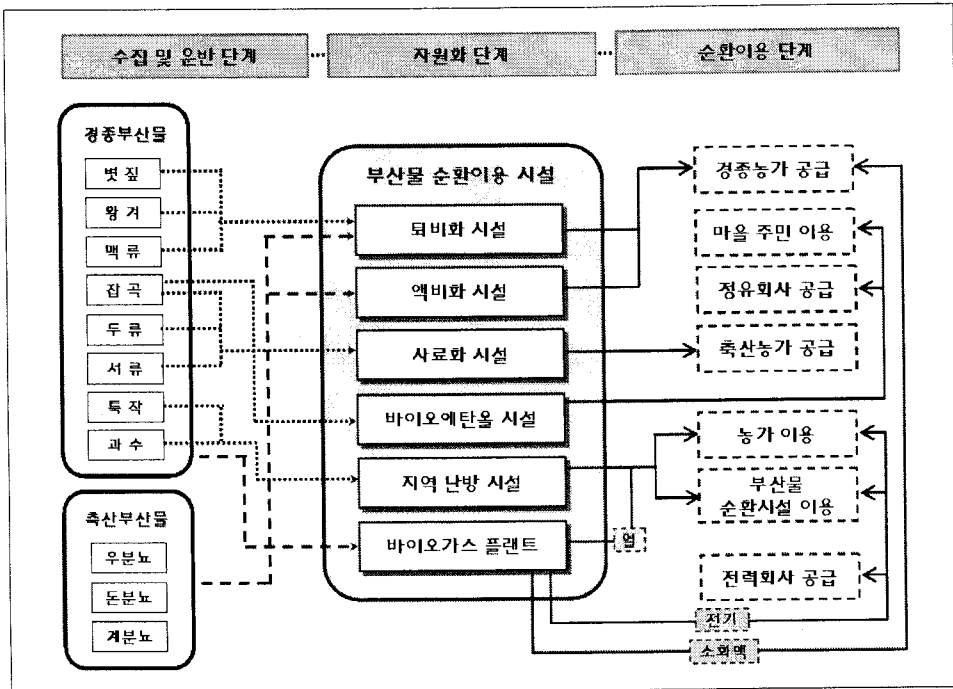
주 : 1) 100가축단위, 150가축단위는 개별시설이고, 300가축단위는 공동시설이며, 가축분뇨의 투입량을 가축단위로 표시하고 있어 축종별 가축분뇨의 발생량은 파악할 수 없음.

2) 가스발생량은 1GV당 1.7m<sup>3</sup>, 덴트콘 202m<sup>3</sup>/ton, 음식물쓰레기 220m<sup>3</sup>/ton이며, 바이오가스 에너지량은 6.5kWh/m<sup>3</sup>, 열병합발전시설의 열효율은 50%이며, 발전비율은 30~37%임.

자료 : 淡路和則, 社団法人三重県畜産協会の講演要旨集의 내용을 참고하여 작성.

따라서 지역 내에서 발생하는 농축부산물의 순환이용시스템은 <그림 8>과 같다. 부산물 순환이용 센터에 필요한 시설은 퇴비화시설, 액비화시설, 사료화시설, 바이오에탄올시설, 지역난방시설, 바이오가스플랜트 등이며, 지역에서 필요로 하는 부산물의 최종형태에 따라 자원화 방법을 결정하는 것이 바람직하다.

기준으로 하고 있다(정광용·김형호, 1999). 우리나라는 한우 1마리당 질소배출량 112g/일을 기준으로 하여 젓소 0.5두, 돼지 2.9두, 산란계 70.0두, 육계 135.0두로 설정하고 있다.



〈그림 8〉 농업부산물 순환이용시스템

#### IV. 생태산업적 지역농업의 구축방안

##### 1. 단계별 추진방안

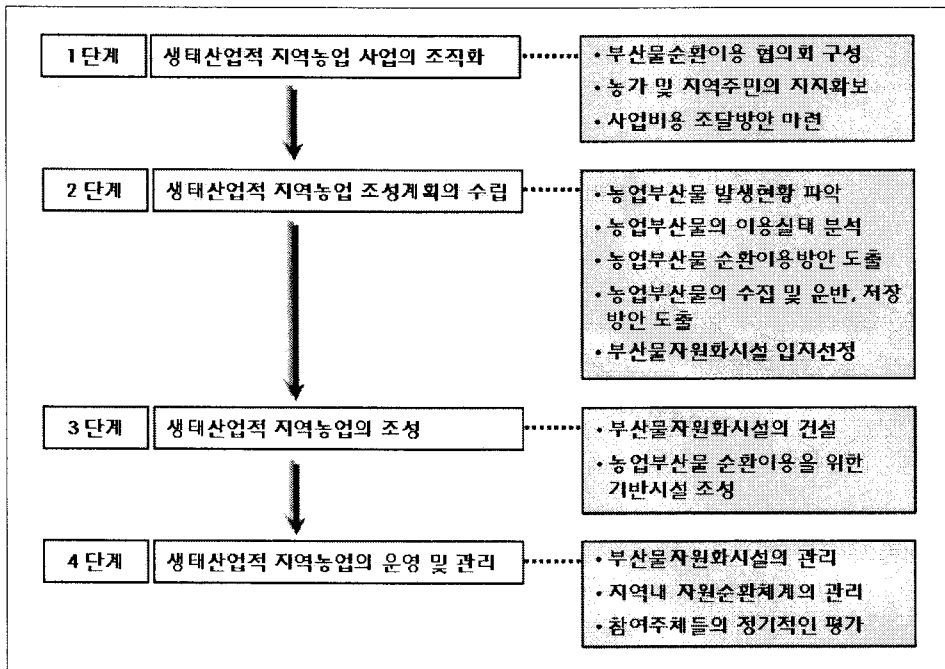
생태산업적 지역농업의 조성은 사업의 조직화에서 출발한다. 이 단계에서는 농업부산물 순환이용의 관련 주체들을 중심으로 하는 ‘부산물순환이용 협의회’의 구성이 필요하다. 계획단계에서부터 지속가능한 순환시스템이 형성될 수 있도록 협의회는 농업부산물을 공급하는 농가와 자원화된 부산물을 이용하는 농가 및 지역주민을 중심으로 구성되어야 하며, 전문가 그룹의 참여도 필요하다. 또한 부산물의 순환이용에 따른 경제적·환경적 편익 등에 대한 설명회를 개최하여 지역사회의 주민과 농가의 충분한 지지를 확보하고, 생태산업적 지역농업의 비전과 목표를 명확하게 제시해야 한다. 그리고 부산물자원화시설 및 기반시설을 조성하기 위해 필요한 비용의 조달 계획도 마련해야 한다. 부산물을 순환이용함에 따라 발생하는 경제적·환경적 편익이 지역주민과 농가에 일부 귀속되므로 사업비용의 일부를 지역 내에서 기금을 조성하여 마련할 수도 있으며, 또는 중앙정부 및 지자체의 지원이나

9) 윤대마을에서는 바이오매스 발전설비와 온수파이프 설치 등 초기설비 비용만 총 530만유로(약 87



은행융자 등을 통해 조달하는 방안도 가능하다.

두 번째 단계에서는 생태산업적 지역농업의 조성계획을 수립해야 한다. 지역에서 발생하는 부산물의 종류나 양, 이용실태 등에 따라 자원화시설이나 순환이용 체계가 다르게 결정되므로 우선적으로 농업부산물의 발생량을 파악하고, 농업부산물의 순환이용 방안을 도출함이 바람직하다. 동시에 농업부산물을 자원순환시설까지 수집하여 운반하는 비용이나 방법 등도 결정해야 한다. 특히 경종부산물의 발생 시기는 가을철이나 겨울철에 집중되는 경향이 있으므로 부산물의 저장시설에 대한 검토도 병행되어야 한다. 이러한 모든 요소들을 고려하여 지역에 필요한 부산물자원화시설을 선택하고, 입지를 선정하도록 한다.



〈그림 9〉 생태산업적 지역농업의 단계별 추진방안

세 번째 단계에서는 부산물자원화시설과 부산물의 순환이용에 필요한 기반시설을 설치해야 한다. 설치되는 시설들은 되도록 경제적이어야 하며, 유지관리가 쉬워야 한다. 그리고 무엇보다도 설치과정에서는 지역의 지형을 최대한 고려하여 자연 환경의 훼손을 최소화하는 것이 바람직하다.

네 번째 단계는 생태산업적 지역농업의 운영 및 관리단계이다. 설치된 부산물자원화시설

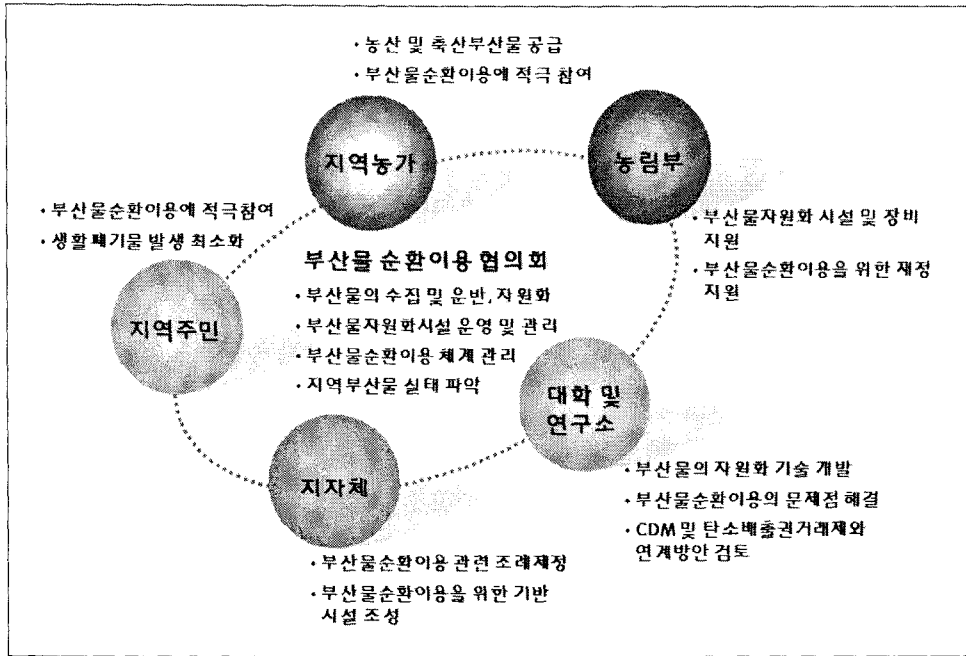
역원이)가 필요했다. 이를 위해 지역주민들로 구성된 협동조합의 조합원 기금으로 100만유로(16억원)를 마련하고, 중앙정부와 지방정부로부터 각각 130만유로(21억원)와 20만유로(4억원)를 지원받았으며, 280만유로(46억원)는 은행에서 융자를 받았다.

은 일정기간 동안 시운전하여 시설을 점검하고, 적절한 기술인력을 두어 운영하도록 한다. 그리고 부산물순환이용 협의회를 중심으로 하여 참여주체들이 정기적으로 부산물 순환이용과 관련한 사항들을 평가함으로써 지속적인 관리가 이루어져야 한다. 동시에 농업부산물의 자원화 및 이용에 대한 정보들이 지역주민과 농가들에게 공유될 수 있도록 정기적인 교육도 실시할 필요가 있다.

## 2. 농업부산물 순환시스템의 주체별 역할

농업부산물의 자원순환 이용이 효율적으로 이루어지기 위해서는 무엇보다도 지역주민과 농가, 지자체, 대학 및 연구기관, 농림부 등의 적절한 역할 분담이 필요하다. 그리고 지역에서 재배하는 작물 및 가축사육에 대한 자료를 정기적으로 조사·분석함으로써 부산물 순환의 흐름을 예측할 수 있어야 하며, 지역 농업부산물의 발생 특성에 맞는 순환이용 체계를 구축해야 한다. 이를 위해 가장 중요한 요소가 경종농가 및 축산농가, 지역주민의 협조이므로 협의체를 구성하여 부산물 순환이용에 대한 의견을 수렴하고, 지속적인 모니터링 및 평가가 이루어질 수 있어야 한다. 따라서 생태산업적 지역농업의 조성은 부산물의 순환이용과 관련된 모든 주체들이 참여하는 협의회를 중심으로 추진되어야 한다. 가칭 ‘부산물순환이용협의회’는 부산물의 수집 및 운반, 자원화시설의 운영 등 농업부산물의 순환이용 체계를 관리하는 주체이며, 부산물 순환이용의 환경적·경제적 편익과 필요성에 대한 지역주민의 공감대 형성을 위해 노력해야 한다. ‘부산물순환이용협의회’의 구성원은 지역주민이나 관련주체 뿐만 아니라 부산물의 자원화 방안이나 기술적인 부분의 전문가 또한 참여토록 하는 것이 바람직하다.

그리고 지역농가는 농산물의 생산과정에서 발생하는 농업생산물을 자원화시설이나 지역 내 부산물의 수요자에게 공급함으로써 부산물순환이용에 적극 참여토록 한다. 지역주민들 또한 부산물순환이용에 적극 참여해야 하며, 아울러 일상생활에서 이용하는 에너지 및 폐기물의 발생량을 최소화하도록 노력해야 할 것이다. 또한 지자체는 지역 내 부산물의 적극적인 이용을 유도하기 위한 부산물순환이용 관련 조례를 제정하고, 부산물의 순환이용에 필요한 기반시설 및 운송 등에 대한 지원을 하도록 한다. 농림부는 부산물자원화 시설 및 장비에 대한 지원과 생태산업적 지역농업의 조성에 필요한 재정적 지원을 담당토록 한다. 지역 내 대학 및 연구소에서는 부산물 자원화 기술을 개발하고, 부산물순환이용 과정에서 발생하는 문제점들을 해결하며, 탄소배출권거래제나 청정개발체제(CDM)와의 연계방안 제시 등 부산물순환이용에 따른 경제적·환경적 편익이 극대화될 수 있는 다양한 방안들을 모색하여야 할 것이다.



〈그림 10〉 농업부산물의 순환이용을 위한 주체별 역할

## V. 결 론

농촌지역에서 발생하는 경종부산물과 축산부산물은 매우 다양하며, 발생량 또한 점차 증가하고 있다. 경종부산물의 순환주기는 대략 1년 정도로 매우 짧고, 저장성이 좋지 않기 때문에 적절한 시기에 이용하지 않으면 자연적으로 폐기되는 특성을 갖고 있다. 그러나 매년 일정량의 부산물이 생산되기 때문에 안정적 공급원과 다양한 활용가능성이라는 장점도 있다. 그리고 축산부산물은 가축사육 두수와 축종별 가축분뇨의 배출원 단위에 의해 발생량을 추정할 수 있기 때문에 가용자원의 계측과 활용이 경종부산물 보다 비교적 용이하다. 따라서 경종부산물과 축산부산물을 포괄하는 농업부산물의 적절한 활용을 위해서는 수집, 운반 등을 고려한 효율적인 계획과 이용방안을 수립하여야 할 것이다.

그러나 볏짚이나 왕겨 등 기존에 다른 용도로 이용하고 있는 경종부산물의 이용부분에서 경합관계가 발생할 수 있고, 부산물의 공급이 특정 시기에 집중되는 반면 자원화된 에너지나 제품의 수요는 연중 일정하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 농업부산물의 자원순환이용을 위해서는 지역에서 발생하는 농업부산물의 발생량 및 발생시기 등의 상황을 분석하고, 에너지나 제품의 수요처에 대한 요구를 파악해야 한다. 아울러 바이오가스플랜트나 퇴·액비시설 등 부산물 자원화시설과 순환이용을 위한 기반시설의 조성에 대

한 초기 투자비용이 매우 높기 때문에 경제적 타당성에 대한 검토가 필요하다. 또한 휴경지 및 경작포기 농지에 에너지 작물을 재배함으로써 지속가능한 에너지를 안정적으로 확보하기 위한 노력도 병행되어야 할 것이다.

[논문접수일 : 2009. 2. 10. 논문수정일 : 2009. 5. 20. 최종논문접수일 : 2009. 6. 25.]

## 참 고 문 헌

1. 강원일보. 2008. 8. 4. 축산분뇨 활용 보일러 연료 시설 개발.
2. 문석웅. 2003. 자원 순환형 산업개발의 유형연구. 자원·환경경제연구. 12(2).
3. 박석환. 2007. 환경생태학. 신광문화사.
4. 박현태 외. 2007. 농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략(2차 연도). 한국농촌경제연구원.
5. 이상철. 2007. 가축분뇨 자원화 촉진을 위한 대책. 가축분뇨 자원화의 과제와 대응방안. 국회의원 우원식의원실·(사)자원순환사회연대.
6. 이승현. 2008. 자연순환형 농업. 농어촌과 환경. 98: 145-158.
7. 이승현·최우정. 농업생태계의 특징과 지속가능 관리방안. 농어촌과 환경. 76: 100-112.
8. 이재준 외. 2002. 지속가능한 개발을 위한 생태산업단지 구축방안. 환경부.
9. 정광용·김형호. 1999. 우리나라 가축분뇨 처리 및 자원화 현황. 가축분뇨 처리 및 축산 폐기물 자원화시설 유지관리 교육(II). 국립환경연구원.
9. 최정석. 2002. 생태산업단지 개발을 위한 우리나라의 산업·환경정책의 개선방안. 도시행정학보. 15(1): 96.
10. 홍종준 외. 1991. 바이오매스 자원조사 및 에너지 평가분석(III). 한국에너지기술연구소.
11. 淡路和則. ドイツにおける資源循環型畜産の現状. 社団法人三重県畜産協会の講演要旨集 (<http://mie.lin.go.jp>).
12. 野風舎有限会社 홈페이지([www6.ocn.ne.jp/~kamui/](http://www6.ocn.ne.jp/~kamui/)).
13. Frosch R. A. 1995. Industrial Ecology : Adapting Technology for a Sustainable World. Environment. 37(10): 20.