

제 | 3 | 주 | 제

생태산업적 지역농업의 자원순환체계에
관한 연구

이지은 | 단국대학교



생태산업적 지역농업의 자원순환체계에 관한 연구

허승욱*·이지은**

I. 서론

농업생태계는 농지에 태양에너지와 인위적인 투입물을 외력¹⁾으로 하여 농지내의 균집을 유지하는 생태계를 말한다²⁾. 농업은 작물과 가축을 중심으로 하여 흙, 기후, 생물, 농자재, 에너지 등의 생산요소에 의해 성립되며, 이들 사이에서 복잡한 상호작용이 일어남에 따라 물질 및 에너지의 순환이 발생한다. 인간은 작물이나 가축 생산을 위해 다양한 에너지를 투입하고 관리하며, 작물이나 가축은 투입된 에너지에 반응하여 인간에게 유용한 에너지를 공급해준다. 이러한 관점에서 인간과 농업생물은 생태학적으로 공생관계라 할 수 있다. 그러나 자연의 환경용량 안에서 자연의 생태시스템에 의존하는 농업은 생산성이 낮기 때문에 생산성을 높이기 위해 보조에너지의 투입량을 증가시켜왔고, 그 결과 농업생태계는 더욱 불안정하게 되었으며 오히려 식량 생산을 저해하는 요소로 작용하기에 이르렀다. 이처럼 보조에너지의 투입량 변화는 농업생태계를 생태적 순환이 단절된 구조로 변화시켰다. 따라서 농업생태계의 순환구조를 회복시키기 위해서는 보조에너지의 투입량을 최소화하고 자연생태계로 배출되는 폐기물의 발생량을 감소시켜야 한다. 구체적으로는 재생불가능한 에너지의 투입을 줄이고, 농업생태계 내에 있는 자원을 중점 활용함으로써 순환기능을 강화하여 농업생태계의 생물학적 다양성을 유지할 수 있어야 할 것이다.

산업생태학(Industrial Ecology)은 자연생태계 내에서 일어나는 물질과 에너지의 순환원리를 산업생산에 적용시키고자 하는 학문이다. 자연생태계의

* 단국대학교 교수

** 단국대학교 대학원 (대표저자)

1) 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.

2) 이승현·최우정, “농업생태계의 특징과 지속가능 관리방안”, 「농어촌과 환경」, 통권 제76호, 농업기반공사 농어촌연구원, 2002, p.101.

순환구조를 갖는 생산시스템에서는 폐기물을 다른 산업활동의 투입물로 재 활용할 수 있기 때문에 외부효과라는 구조적인 문제를 개선할 수 있다. 이처럼 한기업의 폐기물이 다른 기업의 원료로 이용될 수 있는 물질 재활용 네트워크를 형성하여 순환적인 자원이용을 도모하고, 이를 통해 자기 충족적이고 순환적인 생산방식을 갖는 생산시스템을 산업생태시스템이라 한다.

본 연구에서는 산업생태시스템적 관점에서 농업생태계의 물질순환 시스템을 회복할 수 있는 대안으로서 지역에서 발생하는 농업부산물의 순환이용 유형에 대해 고찰해보고자 한다. 농업부산물의 재활용 내지 재이용 구조가 형성되면 농산물 생산 주체가 협력하여 상호이익을 얻는 동시에 농업환경을 개선할 수 있을 것이다. 농업부산물(農業副産物)을 농업에서 기본 생산물 이외에 부차적으로 얻는 생산물로 정의하고, 농산부산물(農産副産物)과 축산부산물(畜産副産物) 부분에서 발생하는 부산물을 대상으로 하였다. 그리고 농산부산물과 축산부산물은 각각 농산물과 축산물의 생산 과정에서 부수적으로 생산되어 이용가치가 있는 생산물로 정의하였다. II장에서는 농산부산물과 축산부산물, 농축산부산물이 발생하는 지역에서의 자원순환이용 유형에 대해 살펴보고, III장에서는 부산물의 순환이용에 따른 경제적·환경적 편익을 도출하고자 한다.

II. 농업부산물의 자원순환이용 유형

1. 농산부산물 중심의 자원순환 체계

(1) 농산부산물의 순환이용

순환농업은 가축분뇨의 사용 유무에 따라 무축자연순환농업과 유축자연순환농업으로 구분할 수 있다. 무축자연순환농업은 가축분뇨의 공급없이 녹비작물을 재배하며, 볏짚, 보리짚, 작물잔사의 환원에 의해 화학비료를 첨가하지 않고 작물을 생산하는 농업을 의미한다. 반면 유축자연순환농업은 작물이나 가축에 대한 인위적인 간섭을 최소화하고 최적의 생활환경을 제공하여 농축산물의 품질과 수량을 높이는 동시에 토양의 양분 공급 능력을 높이는 농업이다³⁾. 여기에서는 가축분뇨를 사용하지 않는 무축자연순환농업을 대상

³⁾ 이승현, “자연순환형 농업”, 「농어촌과 환경」, 통권 98호, 한국농촌공사 농어촌연구원, 2008, p.148.

으로 하여 부산물이 제품과 에너지의 형태로 이용되는 경우를 살펴보았다.

먼저 농산부산물이 제품형태로 이용되는 경우는 사료, 축사깔짚, 퇴비 등이며, 처리공정은 원형, 절단, 파쇄, 가공 등이 있다. 사료로 이용가능한 부산물은 벗짚, 왕겨, 보리짚, 옥수수대, 콩깍지, 고구마·감자줄기 등이며, 축사깔짚으로는 벗짚이나 왕겨가 이용되고 있다. 그리고 왕겨와 파쇄한 과수전정지는 퇴비로 농지에 살포되기도 한다. <표 2-1>은 조사시점이 1980년대 말이기 때문에 현 시점의 부산물 이용현황과는 다소 차이가 있지만, 농산부산물의 자원화유형을 제시하고 있다는 점에서 참고자료로서의 가치는 크다고 본다. 퇴비로 이용되는 비율이 가장 높은 부산물은 벗짚과 왕겨, 맥류이고, 서류와 잡곡, 두류, 벗짚 등이 사료로 이용되었다. 연료이용 비율이 높은 부산물은 과수 전정가지와 특용작물, 두류 등이 있으며 과수 전정가지는 모두 연료로 이용되었음을 알 수 있다.

<표 2-1> 농산부산물의 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, 「바이오매스 자원조사 및 에너지 평가분석(Ⅲ)」, 한국에너지기술연구소, 1991, pp. 32~34.

수도작 농가에서 발생하는 벗짚은 지대에 따라 차이를 보이지만, 퇴비 이용 비율이 가장 높고, 사료로 이용하거나, 외부에 판매하고 있었다(표 2-2). 그리고 왕겨와 미강은 퇴비로 활용되거나 가축사료 및 축사깔개의 이용비율이 높은 편이고, 썰미와 청미는 가축사료나 축사깔개로 사용되거나 식용으로 이용되고 있는 것으로 나타났다(표 2-3).

<표 2-2> 지대별 수도작 농가의 볏짚 이용용도

(단위 : %)

구 분	자가논밭 퇴비이용	본인 가축 사료이용	외부 무상공급	외부판매	과수원 등에 이용	합 계
도시근교	66.0	-	4.0	28.0	2.0	100.0
평야지	62.8	18.6	-	18.6	-	100.0
산간지	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 : 박현대·김연중 외, 「농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략(2차연도)」, 한국농촌경제연구원, 2007, p.88.

<표 2-3> 수도작 농가의 볏짚 외 부산물 이용실태

(단위 : %)

구 분	퇴비 활용	가축사료, 축사갈래	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
쇄 미	-	80.0	10.0	10.0	100.0
청 미	-	76.9	19.2	3.9	100.0

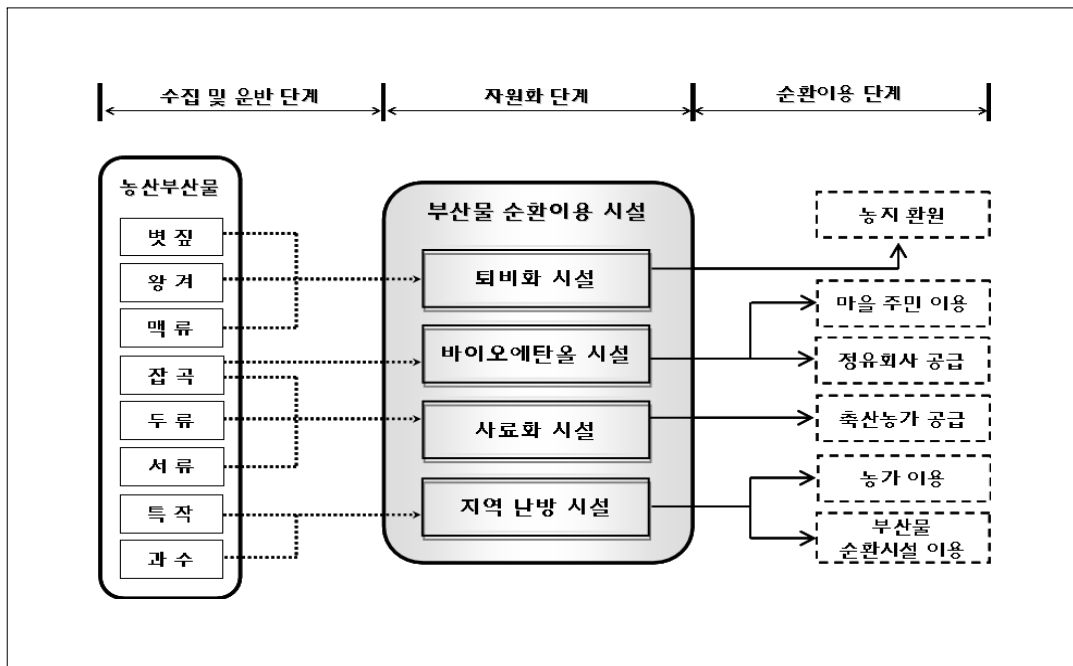
자료 : 앞의 책, p.89.

한편 농산부산물은 직접연소나 열병합발전, 발효 또는 화학적 분해를 통해 발전이나 열원용 연료로 이용이 가능하다. 농산부산물의 에너지화는 화석연료의 대체가능성이 높고, 지구온난화 등의 환경문제를 개선한다는 측면에서 주목을 받고 있다. 그러나 에너지형태로의 전환을 위해서는 기술도입과 시설투자가 이루어져야 한다는 점이 제약요인으로 작용하고 있다. 직접연소는 오래전부터 이용되어온 방법이며, 최근에는 기름 및 가스보일러를 대체하는 화목보일러의 설치도 증가하고 있다. 이는 국제 원자재 가격 및 유가 상승을 배경으로 하여 등장한 것이며, 농가 주변에서 쉽게 구할 수 있는 폐목이나 볏짚 등의 농산부산물을 연료로 사용하기 때문에 연료비 부담이 적다. 또한 화목보일러는 비닐하우스, 화훼단지, 양식장, 전원주택 등 용도나 난방면적에 따라 다양하게 선택할 수 있다는 면에서 경제적이다.

그러나 연소하여 열을 생산하는 방법은 적용이 용이한 반면 생산된 에너지의 부가가치가 가장 낮기 때문에 보다 유용한 형태로 이용하려는 시도들이 이루어지고 있다. 대표적인 예로 고품 연료를 혐기성 상태에서 열분해 및 가스화하여 이산화탄소나 메탄 등 가스연료를 생산하는 열병합발전이 있다. 또한 가솔린을 대체할 가능성이 높은 바이오에탄올의 생산도 가능하며 사탕수수나 옥수수, 밀 등이 원료로 사용된다.

위에서 살펴본 내용을 바탕으로 농산부산물만 발생하는 지역에서 가능한 순환이용체계는 그림 <그림 2-1>과 같으며, 부산물 순환이용 시설은 사료화 시설, 퇴비화시설, 지역난방시설, 바이오에탄올시설 등이 필요하다.

<그림 2-1> 농산부산물 순환이용 체계



주 : 부산물 순환이용 시설은 농산부산물의 이용률이 높은 용도를 고려하여 선택함.

(2) 농산부산물의 순환이용 사례

스웨덴이나 덴마크⁴⁾에서는 1970년대 오일쇼크 이후 벼짚을 원료로 하여 지역난방용으로 개발된 보일러 시스템을 이용하고 있는데, 덴마크의 오텐센 시 교외의 한 농장이 대표적인 사례이다. 이 농장에서는 1년 동안 생산되는

4) 덴마크의 면적은 4만 3천km², 인구는 526만이다. 국토의 60%가 농지인 낙농국이며, 겨울이 춥고 길기 때문에 지역난방이 완비되어 있는 것이 특징이다.

4,600만톤의 밀짚을 이용하여 발생시킨 열을 지역 내 난방 및 밀짚의 건조용으로 이용하고 있다. 처리 과정을 살펴보면, 함수량 14%까지 건조한 밀짚을 1개의 보일러에 500kg씩 15개 묶음으로 나누어 8시간 동안 연소시킨다. 연소 후에 발생하는 약 7톤의 재는 밭에다 뿌리고, 발생한 열은 16만ℓ의 물을 95℃까지 가열하기 위한 열원으로 사용한다. 가열된 물은 먼저 탱크에 저장된 후 지역난방이나 볏짚 건조용으로 순환이용하고, 50~60℃의 상태로 되돌아온다. 이때 탱크 수온은 컴퓨터로 관리한다⁵⁾. 시설의 장점은 메커니즘이 간단하고 초기비용 및 유지보수 비용이 저렴하다는 것이지만, 매일 아침 볏짚을 투입해야하는 번거로움이 있다. 국내 볏짚의 발생량이 비교적 안정적이고, 바이오매스를 이용한 지역난방의 설치비용이 비교적 저렴하기 때문에 수도권 농가가 밀집된 지역에서 도입을 고려해 볼 만하다.

한편 전라남도 구례군에서는 볏짚 환원 지원사업을 실시하고 있는데, 이 사업의 목적은 토양유기물 함량 및 땅심을 높여 친환경농업의 실천기반을 조성하기 위한 것이다. 이 사업의 대상자는 친환경농업을 실천하는 유기농 및 무기농, 저농약 농가이며, 벼를 수확할 때 볏짚을 3~4등분으로 절단하여 400~500kg을 전체 면적에 골고루 뿌려주면 된다. 2008년에는 2억원(군비)의 예산을 마련하여 친환경농업지구 1,000ha을 대상으로 ha당 20만원을 지원하며, 환원되는 볏짚량은 4,500톤으로 계획하고 있다. 구례군은 볏짚 등 농산부산물을 논에 되돌려주기 운동을 대대적으로 전개하고, 연차적으로 확대하여 2016년까지 발생하는 농산부산물 전체를 모두 환원하는 것을 목표로 하고 있다⁶⁾.

2. 축산부산물 중심의 자원순환 체계

(1) 축산부산물의 순환이용

가축분뇨는 부업규모의 축산이 주를 이루었던 시기에 농촌에서 작물의 영양원 또는 토양개량제로 사용되었다. 그러나 국민소득 증대와 식생활 변화로 육류소비량이 증가함에 따라 사육두수가 늘어나면서 규모화되었고, 지역에 따라서는 경지면적 대비 가축분뇨의 이용량이 초과하는 경우도 발생하였다. 가축분뇨는 각종 유기물을 함유하고 있어 작물생산에 필요한 비료성분을 공급하는 등 유용한 자원으로 활용될 수 있다(표 2-4).

5) 이치웅, “덴마크의 바이오매스 이용 사례, 첨단기술정보 분석보고서, 2004.

6) 구례군 친환경농정과, “2008년도 친환경농정과 소관 주요시책”, 2008.

<표 2-4> 가축분뇨의 이용효과

작물에 대한 영양공급	토양의 물리적·화학적 개선	토양 중 생물상의 활성유지 및 증진
<ul style="list-style-type: none"> • 다량·미량요소의 공급 • 완효성, 누적적 양분공급 • 탄산가스 공급원 • 작물생육 촉진물질 공급 	<ul style="list-style-type: none"> • 토양입단형성 : 투수성, 공극분포, 보수성, 통기성 등 개선 • 양이온치환용량 증대 • 킬레이트 기능 • 토양 완충능력 증대 	<ul style="list-style-type: none"> • 미생물 다양성 증대 • 물질 순환기능 증대 • 생물적 완충기능 증대 • 유해물질의 분해 및 제어

자료 : 농촌진흥청, 「가축분뇨 처리와 자원화」, 2008, p.22.

가축분뇨를 처리하는 방법은 메탄가스로 이용하거나 사료화, 정화처리 후 방류 또는 액비 및 퇴비화를 통해 농지에 환원하는 방식 등이 있다. 2006년 가축분뇨발생량은 4,391만 5천톤이며, 이 중 80.3%인 3,525만 3천톤이 퇴비처리되었고 액비처리 물량은 3.0%인 130만톤이다(표 2-5). 가축분뇨는 많은 유기물과 영양염류를 함유하고 있어 정화처리하는 경우 상대적으로 많은 처리비용이 소요되기 때문에 대부분의 액비 또는 퇴비화를 통한 자원화 방향으로 추진되고 있다.

<표 2-5> 가축분뇨 처리 실태(2006년)

(단위 : 천톤, %)

연 간 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)

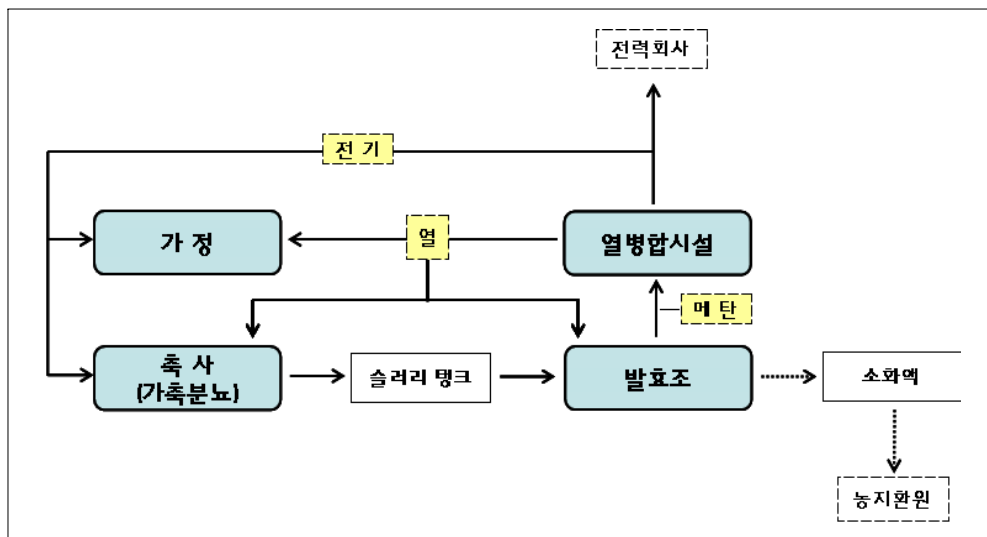
자료 : 이상철, “가축분뇨 자원화 촉진을 위한 대책”, 「가축분뇨 자원화의 과제와 대응방안」, 2007. p.25.

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 불균형되기 쉽기 때문에 이에 대한 적절한 조정이 필요하다. 특히 비료 성분 중 인산은 질소나 칼륨과는 달리 토양에 잘 흡착되어 거의 유실되지 않기 때문에 과다하게 시용되는 경우 수질오염을 유발 할 수 있다. 따라서 토양에 대한

정확한 유효비료성분을 조사하고, 재배작물의 정확한 영양소 요구량을 산정하여 알맞은 맞춤형 퇴비와 액비를 공급하는 것이 성공적인 가축분뇨의 자원화 방법이 될 것이다. 그러나 생산된 퇴비는 수요처를 찾지 못하는 경우가 대부분이며, 수요처를 찾더라도 살포하는데 추가적인 노동력을 필요로 하기 때문에 농촌의 현실을 고려할 때 확대 및 보급의 한계가 있다. 또한 양분수치가 초과상태에 있고 퇴비화하는 과정에서 열을 필요로 하기 때문에 추가적인 에너지를 소비해야 한다는 문제점이 있다. 그 결과 최근 축산분뇨를 연소시킴으로써 에너지를 획득하는 방법이 주목을 받고 있다.

가축분뇨 및 농산부산물, 유기성폐기물 등의 혐기 발효과정에서 발생하는 바이오가스⁷⁾를 이용하여 전기와 열에너지를 획득할 수 있는 기술시스템을 바이오가스플랜트라 한다. 바이오가스플랜트는 특히 축산부문에 많은 주목을 받고 있는데, 그 이유는 분뇨를 밀폐한 공간에서 처리함으로써 악취문제를 해소하고, 온실가스인 메탄의 배출을 최소화하기 때문이다. 또한 발효과정에서 발생하는 잔여물에는 질소, 인산, 칼륨 등 비료성분이 남아있어 비료효과가 높은 액비로 활용할 수 있다. <그림 2-2>는 가축분뇨만이 원료로 투입되는 경우의 처리공정을 나타낸 것이다.

<그림 2-2> 바이오가스플랜트의 처리공정



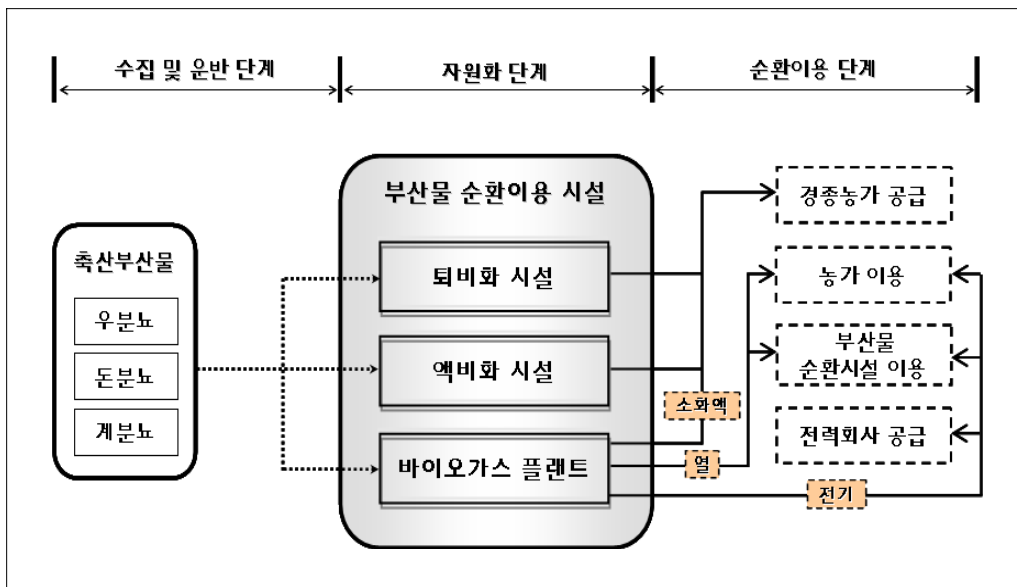
자료 : 淡路和則, “ドイツにおける資源循環型畜産の現状”, 社団法人三重県畜産協会の講演要旨集을 참고하여 재작성한 것임.

7) 바이오가스는 박테리아가 혐기상태에서 탄소를 포함하는 유기원료를 분해할 때 형성되는 가스혼합물로 열량은 1m³당 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.

먼저 축사에서 이송된 가축분뇨는 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 활용이 가능하다.

위에서 살펴본 것처럼 가축분뇨는 퇴비 및 액비화, 바이오가스화를 통한 열에너지 및 전기 등의 자원화가 가능하다. 따라서 축산부산물만 발생하는 지역에서의 순환이용은 <그림 2-3>과 같으며, 부산물 순환이용 시설은 퇴비화시설, 액비화시설, 바이오가스플랜트 등이 필요하다.

<그림 2-3> 축산부산물 순환이용 체계



(2) 축산부산물 순환이용의 사례

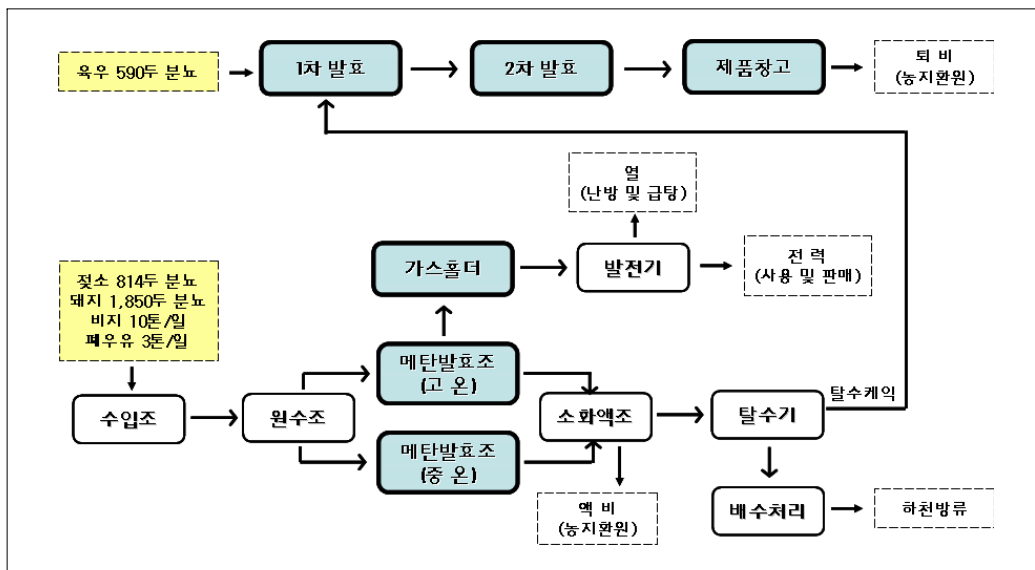
남단시(南丹市)⁸⁾ 야기초(八木町) 지역의 지역순환 네트워크는 바이오에콜로지 센터(バイオエコロジーセンター)를 중심으로 이루어지고 있다. 야기초는 축산업이 발달한 지역으로 양돈 및 낙농가의 사육두수가 증가됨에 따라 가

⁸⁾ 2006년 1월 1일에 소노베초(園部町), 야기초(八木町), 히요시초(日吉町), 미야마초(美山町)가 통합되었으며, 남단시 전체 면적(616.31km²) 중 야기초가 차지하는 면적은 49.56km²(8.0%)이다. 2006년 1월말 야기초 인구는 8,735명, 세대수는 3,091세대이며, 단위면적당 수도작 생산량이 554kg/10a로 비교적 높은 편이고 낙농가가 많은 지역이다.

축분뇨 배출량이 증가하였다. 이러한 분뇨는 대부분 야적되거나 미숙된 비료 상태로 처리되었기 때문에 경종농가의 이용도 어렵고, 하천오염 및 해충번식 등의 문제를 유발하였다. 그 결과 야기초는 가축분뇨를 처리하는 시설을 1992년부터 검토하여 비료화시설의 건설계획을 추진하였다. 1994년에는 지역에너지를 도입하기 위한 야기종합계획에 의해 가축배설물의 처리뿐만 아니라 배설물 처리 과정에서 발생하는 메탄을 발전용으로 이용하기 위한 메탄발생처리시설의 건설이 추진되었다. 바로 이 처리시설이 야기 바이오에콜로지 센터이다.

<그림 2-4>는 바이오에콜로지 센터의 처리공정이며, 메탄발효공정과 퇴비 공정으로 구분된다. 퇴비공정에서는 옥우 590두의 배설물을 25일 동안 1차 발효하고, 이를 다시 65일 동안 2차 발효하여 퇴비로 농지에 환원한다.

<그림 2-4> 야기 바이오에콜로지 센터의 처리공정



자료 : 中川悦光 “南丹市八木町地区バイオマスタウン構想”, 바이오마스情報
 ヘッドクォーター, 2006, pp.21~22를 참고하여 작성한 것임.

그리고 메탄발효공정에서는 젓소 814두, 돼지 1,850두의 배설물과 비지 10톤/일, 폐우유·폐산 3톤/일을 계량하여 수입조에 투입한다⁹⁾. 투입된 배설물은 파쇄기와 원수조를 거쳐 중온 및 고온의 메탄 발효조에 투입되며, 중온 발효조에서 발생한 생물가스는 가스홀더에 일시 저장한 후 황화수소를 제거하여 발전기 연료로 사용한다. 발전된 전기는 센터내 시설 및 근처 하수처리

9) 가축배설물의 반입은 개별 농가가 직접 수입조에 투입하며, 식품가공 찌꺼기는 센터 직원이 회수하고 있다.

장에서 사용하며 남은 전기는 전력회사에 판매한다. 그리고 발전기에서 회수된 온수는 중온발효조 가온과 관리실의 급탕 및 난방에 사용한다. 한편 메탄발효된 소화액은 탈수기에서 고형분리하여 분리액은 배수처리 후 하천에 방류하고, 일부(10톤/일)는 액비 상태로 농지에 환원하고 있다.

3. 농축부산물 중심의 자원순환 체계

(1) 농축부산물 순환이용의 유형

지역내에 경종농가와 축산농가가 함께 있는 경우 일반적으로 농산부산물의 자원화 과정에서 발생하는 사료와 축산부산물의 자원화 과정에서 발생하는 퇴비 및 액비를 순환이용하고 있다. 또한 바이오가스플랜트는 초기비용이 많기 때문에 시설의 수익성을 높이지 않는다면 채산이 맞지 않게 될 수 있다. 바이오가스플랜트에서 발생하는 경제적 편익의 90%는 전기와 열의 에너지 이용에서 나타나기 때문에 수익을 향상시키기 위해서는 바이오가스 발생량을 증가시켜야 한다. 따라서 가축분뇨와 농산부산물 및 유기폐기물의 혼합발효를 통해 가스발생량을 증대시키는 방법이 시도되고 있다.

<표 2-6> 혼합발효에 따른 바이오가스플랜트의 경제성

(단위 : m³/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

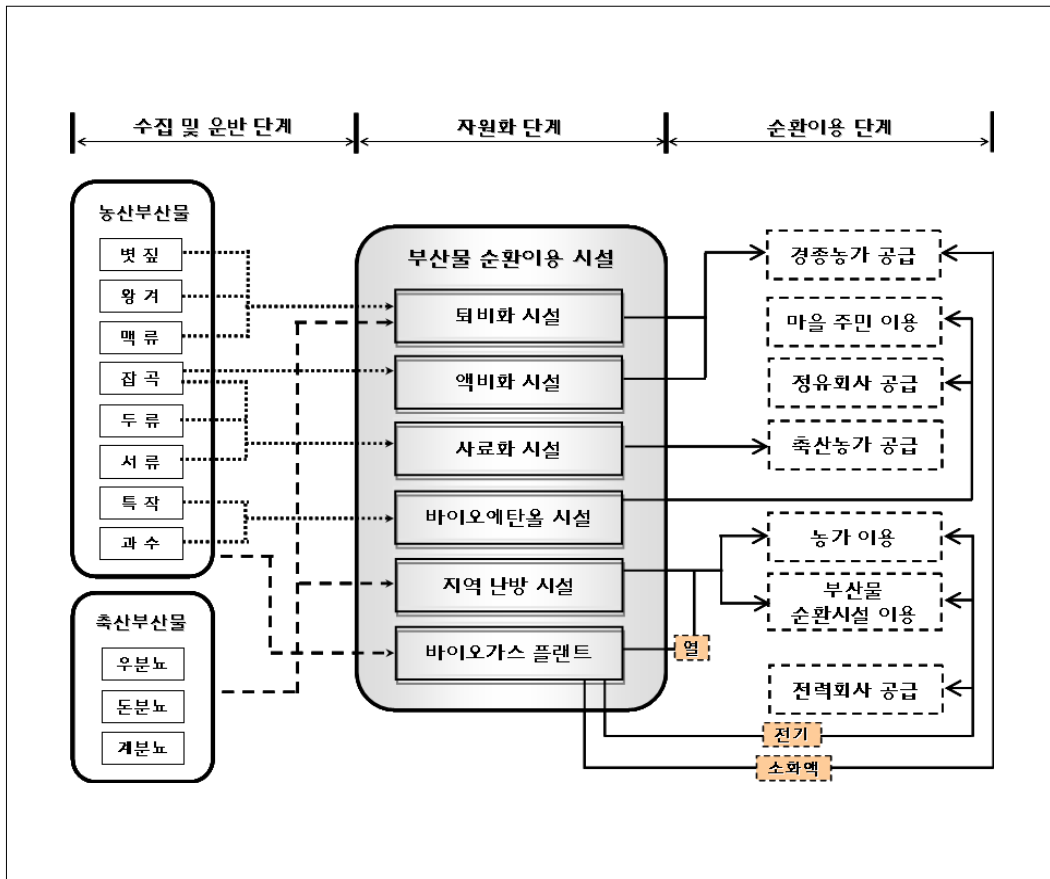
주 : 100가축단위, 150가축단위는 개별시설이고, 300가축단위는 공동시설임.

자료 : 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의 내용을 참고하여 작성한 것임.

<표 2-6>은 독일 라인 란트 농업회의소에서 가축사육규모와 원료별 혼합발효에 따른 시설의 경제성을 검토한 결과의 일부를 정리한 것이다. 가축규모는 100가축단위, 150가축단위, 300가축단위로 구분하였고, 혼합원료는 음식물쓰레기와 덴트 콘(dent corn, 말떡이용 옥수수)을 사용하였다. 그 결과 가축분뇨만을 이용하는 것보다 가축분뇨와 덴트콘, 가축분뇨와 음식물쓰레기를 혼합발효하게 되면 발생하는 가스량 및 발전량, 열생산량 모두 약 2~3배 더 많은 것으로 나타났다.

따라서 지역내에서 발생하는 농축부산물의 순환이용 체계는 <그림 2-5>와 같다. 부산물 순환이용 센터에 필요한 시설은 퇴비화시설, 액비화시설, 사료화시설, 바이오에탄올시설, 지역난방시설, 바이오가스플랜트이며, 지역에서 필요로 하는 부산물의 최종형태에 따라 자원화 방법을 결정하는 것이 바람직하다.

<그림 2-5> 농축산부산물 순환이용 체계



(2) 농축부산물 순환이용의 사례

독일의 윤데마을은 약 800년 정도 된 전통마을이며, 괴팅겐 시내에서 자동차로 약 15분 거리에 있다. 180여 가구에 인구는 800명이며, 농지면적은 1,300ha, 삼림면적은 800ha이다. 농가는 낙농가 8가구와 양돈농가 2가구가 있고, 마을 주민의 대부분은 괴팅겐으로 출퇴근을 하고 있어 농가와 비농가가 혼재되어 있다¹⁰⁾.

윤데의 바이오에너지 마을 프로젝트는 독일 괴팅겐 대학교의 ‘지속가능한 발전을 위한 학제간 연구센터(IZNE)’를 중심으로 시작되었다. 마을프로젝트를 진행하기 위해 협동조합을 결성하고 조합원들이 일정금액의 조합참여비를 부담하면서 사업이 시작되었다. 2001년 4월에 윤데 바이오에너지 마을 추진위원회를 결성하고, 2002년 5월에 바이오에너지 마을 추진기획이 통과되어 2004년 10월에는 바이오에너지 마을 추진주체 또는 운영형태로 협동조합체계를 유지한다는 결정이 내려졌다¹¹⁾. 프로젝트 추진을 위해 필요한 바이오매스 발전소 설비와 마을 전체의 온수파이프라인 설치비용은 협동조합 조합원의 출자 50만유로와 연방정부 및 주정부의 지원금 150만 유로, 은행융자 280만유로를 통해 조달하였다.

윤데마을의 에너지 순환의 중심은 바이오가스 발전시설에 의한 전력 및 열 공급과 목질바이오매스에 지역난방 공급시설이다. 마을에서 필요한 에너지의 대부분은 바이오가스 발전시설만으로 공급되며, 동절기에는 많은 열이 필요하기 때문에 지역난방 공급시설을 가동한다. 에너지 공급을 위한 연료는 가축농가에서 발생하는 가축분뇨 9,500m³와 300~350ha(마을전체 농지의 25%)에서 1년 동안 생산하는 작물량, 그리고 연간 300톤의 우드칩을 이용한다¹²⁾. 가축분뇨와 작물은 농가가 무료로 제공하며, 용량이 16m³인 축분수거차를 이용하여 수거하고, 작물은 크기는 0.5~5cm로 유지하기 위해 절단기(shredding machine)를 이용하여 수확하여 사일로(silo)에 저장한다.

윤데마을의 에너지 순환 과정을 살펴보면 마을에서 생산한 밀과 옥수수, 해바라기 건초는 생목초 상태로 저장되었다가 기계적인 탈수과정을 통해 압축액과 압축된 목초로 구분된다. 압축액은 가축분뇨와 함께 1차, 2차 발효가 이루어지며, 발생된 메탄은 열병합발전소에서 전기와 열을 생산하고, 메탄

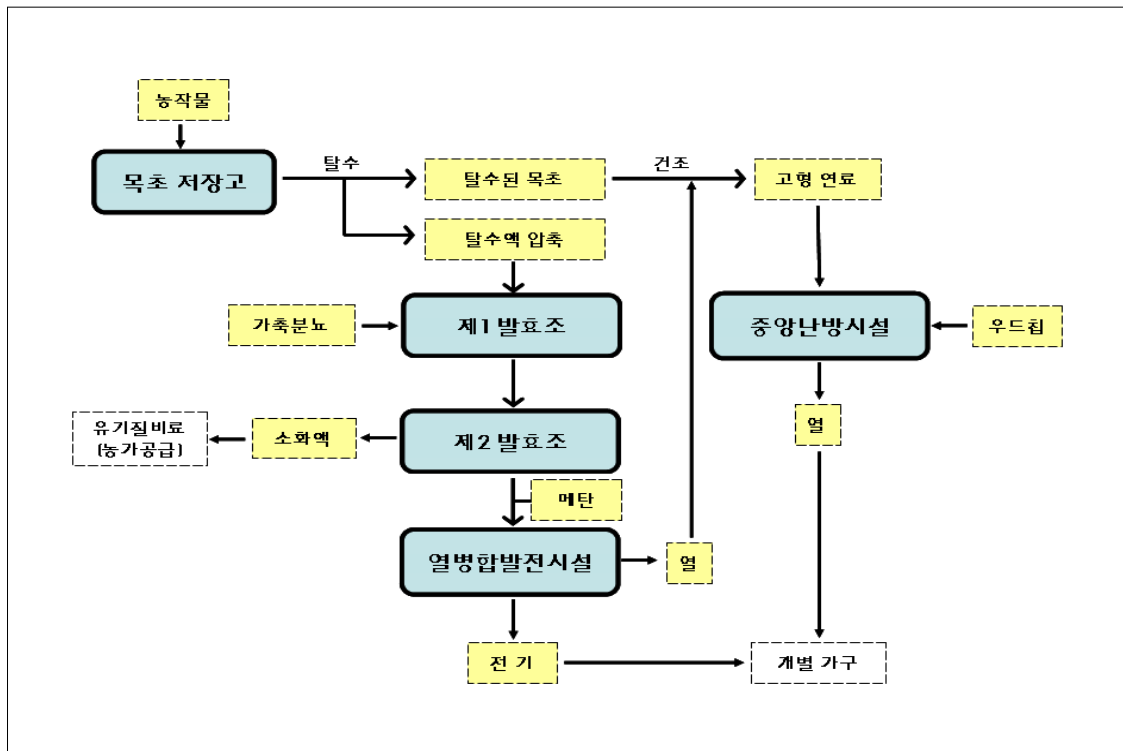
10) “ドイツにおけるバイオマス利用”, 바이오マス情報ヘッドクォータ(www.biomass-hq.jp).

11) 협동조합체제를 지향한 이유는 바이오에너지의 운영체제는 주민모두가 민주주의 방식으로 참여하도록 하기 위함이며, 지방의제21의 핵심이 자본주의식 생산양식이나 운영방식의 폐해를 거부하거나 극복하기 위한 것이므로 모든 조합원이 공동으로, 공평하게 참여하는 방식이 바람직하다는 주민들의 의견이 지배적이었기 때문이다.

12) 주요작물은 밀(63%)과 옥수수(30%), 해바라기 건초로 윤데마을 내에서 생산되며, 우드칩의 원료는 지역반경 15~20km에서 공급되는 목질바이오매스이다.

발생 후 남은 잔여물들은 유기질 비료로 농가에 공급한다. 그리고 열병합발전소에서 생산된 전기는 운데마을에서 이용하며, 일부는 전력회사에 판매하고, 폐열은 압축된 목초를 건조하는데 재사용한다. 그리고 건조된 목초는 고품연료화하여 목질바이오매스로부터 만들어진 펠릿과 함께 중앙난방시설에서 난방용 온수공급을 위한 열 생산원료로 투입된다(그림 2-6). 메탄가스를 이용하여 생산되는 전기는 연간 최대 5,500MWh이고 이는 운데마을에서 1년동안 사용하는 전기량(2,000MWh)의 2배가 넘는다¹³⁾. 또한 가정에 공급되는 열은 온수난방으로 사용하며 141개 가구가 참여하고 있다¹⁴⁾.

<그림 2-6> 운데마을의 에너지순환 공정



자료 : Konrad Scheffer, “독일 운데마을 추진사례”, 「기후변화대응을 위한 충남 에너지 자립만들기 국제초청 심포지엄」, 푸른충남21추진협의회·충청남도, 2007, p.13, 29를 정리하여 작성한 것임.

13) 잉여전력은 전력회사에 1kw당 17.33센트에 판매하며 이는 독일의 일반 가정이 납부하는 1kw당 6센트의 전기료보다 3배가 높다. 그 이유는 독일정부의 신재생에너지 육성정책에 따른 지원금이 전력회사에 지급되며, 20년 동안 고정판매가 가능하도록 보장하고 있기 때문이다.

14) 폐열온수난방 운영비는 연간 2,000유로가 소요되는데 이는 연간 기름보일러의 운영비가 3,500유로 인 점을 감안하면 매년 1,500유로의 비용이 절약된다.

Ⅲ. 농업부산물의 순환이용에 따른 편익

1. 경제적 편익

농업부산물 순환이용의 가장 큰 경제적 편익은 농가 및 농업생산에 투입되는 화학연료의 사용량을 줄일 수 있다는 점이다. 바이오가스플랜트는 부산물의 처리과정에서 발생하는 전기와 열을 재사용함으로써 전기 소비량을 줄일 수 있고, 발생한 열은 농가의 난방이나 바이오가스플랜트의 내부시설에서 재이용함으로써 기존 연료의 사용량을 대체한다. 강원도 횡성군과 (주)이레는 2008년 7월에 소분뇨를 난방연료로 만드는 ‘축분연료화설비¹⁵⁾’를 공동 개발하였다. 강원도 횡성군 청일면 내 한 축산농가를 대상으로 시범운영한 결과, 한우 40마리에서 연간 발생하는 우분연료는 3만 2,444kg이며 이는 보일러 등유 1만 2,688ℓ와 전력 13만 2,040kw, 무연탄 2만 5,234kg을 대체할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 농가에서 사용하는 보일러 등유를 우분연료로 대체할 경우 연간 1,915만여원(ℓ당 1,509원 적용)의 절감효과를 가져올 수 있는 것으로 나타났다¹⁶⁾.

둘째, 농산부산물의 사료화 및 퇴비화를 통해 농업용 원자재의 사용량을 줄일 수 있다. 이를 통해 농업생태계 외부에서 투입되는 사료 및 화학비료를 지역의 부산물로 대체할 수 있고, 지속가능한 농업 생산기반을 구축할 수 있다. 그리고 바이오가스플랜트에서 발생하는 소화액은 액비 형태로 농가에서 이용할 수 있기 때문에 비료사용량 또한 감소하게 된다.

셋째, 농업부산물의 순환이용 과정에서 발생하는 전기를 전력회사에 판매하는 경우 수익이 발생하기도 한다. 독일 바이에른 주의 한 축산 농가는 소분뇨와 덴트콘(dent corn, 말떡이용 옥수수), 유제품찌꺼기 등을 이용하여 연간 26만kWh의 전력을 생산하고 있다. 이 농가의 전기 판매 수입¹⁷⁾은 약 3만 9천마르크로 경제적 편익의 57%를 차지하며, 전기 및 연료유 사용량 감소에 따라 발생하는 편익은 2만 2천마르크(33%)에 이르고 있다¹⁸⁾(그림 3-1).

넷째, 농업부산물의 에너지 및 제품화를 통해 새로운 사업기회와 고용기회

15) 축사에서 발생한 소의 분뇨를 설비에 넣고 건조반죽발효과정을 거쳐 5cm 크기의 가래떡 모양 혼합물을 만든 다음 비닐하우스에서 자연건조 시킨 후 전용보일러에서 땀감으로 사용한다.

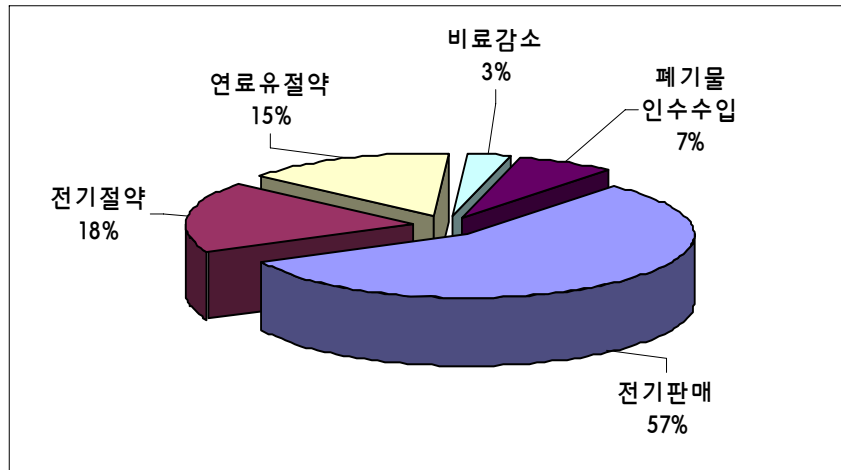
16) 강원일보, “축산분뇨 활용 보일러 연료 시설 개발”, 2008. 8. 4.

17) 2004년 4월에 시행된 신에너지법은 2010년까지 온실효과 가스 발생량을 21% 삭감하고 대체에너지 비율을 증가시킨다는 독일 연방정부의 목표를 실현하기 위해 도입되었으며, 풍력, 태양, 바이오 가스 등의 청정에너지 비율을 2010년까지 6%에서 12%까지 확대하고자 한다. 이와 관련하여 환경부하를 주지 않는 발전방법에 의해 생산된 전력을 상대적으로 높은 가격에 구매할 의무를 전력 공급회사에 부과하는 정책을 실시하고 있어 전기 판매는 독일 농가의 안정된 수입원이 되고 있다.

18) 野風舎有限会社 홈페이지(www6.ocn.ne.jp/~kamui/).

가 창출될 수 있다는 점이다. 에너지 및 제품화와 관련된 산업은 퇴비 및 사료화, 발전, 연료전지, 바이오디젤 산업 등이며, 동시에 농업부산물의 생산, 수집, 운송 등의 분야에서 고용기회를 확대할 수 있다.

<그림 3-1> 독일 바이에른 축산농가의 경제적 편익 구조



2. 환경적 편익

농업부산물의 순환이용에 따른 가장 큰 환경적 편익은 이산화탄소의 배출량이 감소한다는 점이다. 탄소는 저장소인 대기, 토양, 해양에서 자연과 인간 활동에 의해 배출과 흡수의 과정을 통해 순환한다. 토양은 식물이나 산림 등에 의해 비교적 빠르게 형성되는 이산화탄소를 저장할 뿐만 아니라, 오랜 시간 동안 지형적, 화학적 변화를 통해 형성된 화석연료를 저장하고 있다. 따라서 화석연료를 채취하여 에너지원으로 사용하는 것은 탄소순환의 탄소량을 증가시키므로 지구온난화에 영향을 주게 된다. 반면 농산부산물은 탄소순환의 한 부분을 구성하며, 지속적으로 재생산이 가능한 자원이기 때문에 대기 중의 탄소를 비교적 안정된 상태로 유지할 수 있다. 농산부산물로부터 생산된 에너지가 화석연료 및 기존에너지의 사용을 대체하면 그에 따라 이산화탄소 배출량은 감소할 것이며, 지구온난화 문제를 해결할 수 있다.

둘째, 축산분뇨 처리과정에서 발생하는 메탄의 배출량이 감소한다는 점이다. 혐기 발효과정에서 발생하는 바이오가스의 60~70%는 메탄이며, 30~40%는 이산화탄소이고, 그 외는 물, 황화수소, 질소, 물 등이 함유되어 있다. 처리과정에서 발생하는 바이오가스량의 60~70%가 메탄가스이며, 열이나 전기를 생산하는 용도로 사용되기 때문에 메탄가스의 감소량을 추정할 수 있다.

셋째, 가축분뇨의 처리 과정에서 발생하는 수질오염 및 악취, 위생문제를 개선하거나 해결할 수 있다. 가축분뇨는 많은 유기물을 함유하고 있어 적절하게 처리하면 작물생산에 필요한 비료성분을 공급하는 유용한 자원으로 활용될 수 있으나, 부적절하게 처리되는 경우 지하수나 지표수의 오염, 토양오염, 악취발생 등 환경오염원으로 작용할 가능성이 높아지게 된다. 전라북도 익산시 왕궁면 지역의 축산폐수 처리장을 대상으로 하여 바이오가스화 공정 시설의 도입을 검토한 결과 수질정화 기능이 높은 것으로 나타났다(표 3-1).

<표 3-1> 축산분뇨 바이오가스화의 유출수질 정화 성능

(단위 : mg/ℓ, m³/일)

구 분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	방류량
돈사슬러리	44,900	129,200	106,000	3,040	3,750	200
소화유출수 ¹⁾	17,000	25,200	3,000	3,500	-	250
수처리후 유출수 ²⁾	15	20	15	30	4	250

주 1) 소화후 고분자 응집, 탈수를 거친 유출수이며, 총인에 대한 자료는 없음.

2) 수처리 방법은 MBR(Multiple Batch Reactor), UF/RO 방식이며 독일 Hasse GmbH의 기술로 구체적 공정 현황은 미파악함.

자료 : 박순철 외, 「전라북도 지역의 축산폐기물 바이오가스화 타당성 조사연구」, 한국에너지기술연구원, 2001, p.75.

넷째, 농산부산물물의 농지환원 및 축산부산물물의 퇴·액비화를 통해 토양의 유기물 함량 및 땅심을 높일 수 있다. 특히 바이오가스플랜트에서 발생하는 소화액은 비료성분 뿐만 아니라 아미노산이나 비타민, 식물호르몬 등 다양한 유기물을 풍부하게 함유하고 있어 토양개량효과가 높다. <표 3-2>는 토양에 소화액과 퇴비를 살포한 후 토양의 단립화 비율을 분석한 결과이며, 토양에 소화액을 살포한 경우의 토양개량효과가 가장 높게 나타났다.

<표 3-2> 소화액과 퇴비 사용에 따른 토양개량효과

(단위 : %)

구 분	당일	60일	120일
토양 (대조군)	62.1	62.0	62.2
토양 + 소화액	70.1	77.5	72.4
토양 + 소화액(건조후)	62.8	70.0	64.6
토양 + 퇴비	61.5	64.5	62.2

자료 : 野風舎有限会社 홈페이지(www6.ocn.ne.jp/~kamui/).

다섯째, 순환형 지역사회의 구축에 기여한다는 점이다. 지역 내에서 발생하는 폐기물은 농업뿐만이 아니라 목재나 임업, 일반 가정·식품가공·식당 등에서 발생하는 음식물 쓰레기까지 매우 다양하다. 부산물의 순환이용은 비단 농업부문에만 한정되는 것이 아니라 한 지역에서 발생하는 모든 부산물까지 포함할 수 있다. 따라서 농촌과 도시, 농업과 타산업의 부산물이 순환이용될 수 있는 물적·인적 네트워크를 구성함으로써 자원순환형 농업을 기반으로 한 순환형지역사회가 구축될 수 있다.

IV. 결 론

농촌지역에서 발생하는 농산부산물과 축산부산물은 비교적 다양하며, 발생량 또한 적지 않다. 농산부산물의 순환주기는 대략 1년 정도로 매우 짧고, 저장성이 좋지 않기 때문에 적절한 시기에 이용하지 않으면 자연적으로 폐기되는 특성을 갖고 있다. 그러나 매년 일정량의 부산물을 생산할 수 있기 때문에 계획적인 공급 내지 이용이 가능할 것으로 보인다. 반면 축산부산물은 가축사육 두수와 축종별 가축분뇨의 배출원 단위에 의해 발생량을 추정할 수 있기 때문에 가용자원의 공급이 농산부산물 보다 비교적 용이한 편이다. 따라서 농업부산물의 적절한 활용을 위해 수집 및 운반을 고려하여 효율적인 계획과 이용방안이 마련되어야 할 것이다.

그러나 볏짚이나 왕겨 등 기존에 다른 용도로 이용하고 있는 농산부산물의 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 파악해야만 한다. 아울러 바이오가스플랜트나 퇴·액비시설 등 부산물 자원화시설과 순환이용을 위한 기반시설의 조성에 대한 초기 투자비용이 매우 높기 때문에 경제적 타당성에 대한 검토가 병행되어야 한다. 그리고 휴경지 및 경작포기 농지에 에너지 작물을 재배함으로써 지속가능한 에너지원을 안정적으로 확보하기 위한 노력도 병행될 필요가 있다. 다만 에너지작물의 재배는 식량작물이 에너지작물로 전환됨에 따라 국제 곡물가격을 상승시킬 가능성이 높기 때문에 합리적인 선택이 필요한 부분이다.

- 참고 문헌 -

- 강창용·박현태 외, 「농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략(1차연도)」, 한국농촌경제연구원, 2006.
- 김창길 외, 「농업생태계의 물질순환 및 환경부하 분석」, 한국농촌경제연구원, 2003.
- 박순철 외, 「전라북도 지역의 축산폐기물 바이오가스화 타당성 조사연구」, 한국에너지기술연구원, 2001.
- 박현태·김연중 외, 「농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략(2차연도)」, 한국농촌경제연구원, 2007.
- 서세욱, “바이오매스 자원의 활용과 조건”, 「농촌과 사회」, 한국농어촌사회연구소, 2005.
- 이상철, “가축분뇨 자원화 촉진을 위한 대책”, 「가축분뇨 자원화의 과제와 대응방안」, 국회의원 우원식의원실·(사)자원순환사회연대, 2007.
- 이승현, “자연순환형 농업”, 「농어촌과 환경」, 통권 98호, 농어촌연구원, 2008.
- 이승현·최우정, “농업생태계의 특징과 지속가능 관리방안”, 「농어촌과 환경」, 통권 제76호, 농업기반공사 농어촌연구원, 2002.
- 이치용, “덴마크의 바이오매스 이용 사례”, 첨단기술정보 분석보고서, 2004.
- 정승현, “가축분뇨관리의 문제점 및 자원화 촉진을 위한 과제”, 「가축분뇨 자원화의 과제와 대응방안」, 국회의원우원식 의원실·(사)자원순환사회연대, 2007.
- 홍성구 외, 「농촌지역 바이오매스자원의 최적이용기술개발」, 농림부, 2005.
- 홍성구, “바이오매스 부존특성을 고려한 농촌지역 바이오에너지 보급전략”, 「한국농공학회논문집」, 제50권 제4호, 한국농공학회, 2008.
- 홍종준 외, 「바이오매스 자원조사 및 에너지 평가분석(Ⅲ)」, 한국에너지기술연구소, 1991.
- 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>).
- 野風舎有限会社 홈페이지(www6.ocn.ne.jp/~kamui/).
- 畜産環境技術研究所 홈페이지(www.chikusan-kankyo.jp).