

친환경농업 시스템 구축을 위한 지역단위 물질균형 분석*

김 창 길** 김 태 영***

Key words: 물질균형(Material Balance), 농업생태계(Agro-ecosystem),
자정작용(Assimilative Capacity), 열역학 제1법칙(The 1st Law of Thermodynamics),
열역학 제2법칙(The 2nd Law of Thermodynamics), 엔트로피(Entropy)

Abstract

The material balance approach provides a method for assessing nutrient surpluses of specific villages or regions, and hence their environmental loads. This approach makes it possible to assess the effect of agri-environmental policy measures on nutrient runoff. The objectives of this paper are to present a nutrient balance model relating to Yangpyeong County, and to discuss the problem of using it for assessing environmental pressure from agricultural production activities in order to give an overview of the agri-environmental policy programs. This paper reviews the conceptual framework for the material balance approach using the Condition-State-Plan (C-S-P) system and formulates a regionally based material balance model using the nutrient balance equation. The regional material balance model based on inflow and outflow of nutrients in Yangpyeong County is set up as an illustrative example. Also included are policy implications for activating integrated nutrient management, a multi-level approach involving all stakeholder, and suggestions for further study for increasing the accuracy of a material balance model.

1. 서론
2. 지역단위 물질순환 분석을 위한 농업환경 모형
3. 지역단위 농업환경부하 분석 방법
4. 지역단위 물질균형 분석 결과 : 양평군 사례를 중심으로
5. 지역단위 물질순환 분석을 통한 친환경농업 발전방안

경농업 실천 방안 심포지움”의 주제발표 자료를 보완하여 작성한 것임을 밝혀둔다.

* 이 논문은 농업과학기술원 주관으로 2003년 9월 23일에 개최된 “양분수지를 이용한 친환경

** 부연구위원

*** 위촉연구위원

1. 서론

현대 농업은 새로운 기술과 품종개량, 비료와 농약 등 화학적 투입재 사용 등 외부 에너지의 투입량을 증가시킴으로써 자연환경에 대한 의존성을 최소화하는 과정을 통해 높은 생산성을 증대시키는 방향으로 발전해 왔다. 그러나 ‘고투입-고산출’의 집약적 생산으로 인한 화학적 투입재의 과다 사용, 가축분뇨의 대량 발생과 부적절한 처리 등 지속적인 오염원 배출로 엔트로피가 축적됨으로써 농업생태계의 환경 문제를 심화시키고 있다. 특히 작물생산 증대를 위한 양분요구량 이상의 과다한 화학비료 투입으로 인해 상당한 무기물이 토양에 축적·유출됨으로써 토양유기물 감소와 물리성을 악화시키고 있으며, 농경지로부터의 잉여양분 유출로 인해 지표수 오염 및 질산태 질소의 지하수 오염 등을 초래하고 있다. 또한 규모화·전문화 등 집약적 축산업의 확산으로 가축분뇨의 자가경영권 내 순환이용이 어려워지고 있으며, 특히 가축사료의 절대량을 수입사료에 의존하는 우리나라의 집약적 가축생산 체계는 농업생태계의 원활한 순환의 장애요인으로 작용하고 있다.

이러한 집약적 농축산업 생산방식에서 파생되는 환경오염 문제는 생산체계와 기술 등에 의해 큰 영향을 받으나, 입지적·지역적 환경용량에 따른 자정능력에 따라 문제 해결을 위한 접근방식이 달라질 수

있다. 따라서 친환경농업의 건실한 발전을 위해서는 지역단위의 농업환경을 종합적으로 파악하여 진단하고 평가할 수 있는 물질순환을 기초로 한 체계적인 분석모형이 필요하며, 지역별 농업자원환경의 자정용량을 기초로 종합 진단·관리할 수 있는 적절한 자원관리시스템의 도입이 필요하다. 이러한 지역단위 친환경농업의 개념은 지역적 농업여건 및 환경적 특성을 고려한 친환경농업의 실천을 의미하며, 현행 친환경농업육성법에서도 지역단위 친환경농업 실천계획 수립 및 추진을 강조하고 있다.

지역단위의 물질균형 분석을 다룬 국내 연구로 김진수, 오광영(2000)은 농촌지역의 유기물 흐름에 관한 모형을 설정하고 금강의 제2지천인 무심천의 상류지역인 충북 청원군 가덕면 지역의 질소수지를 제시하였다. 김창길, 강창용(2002)은 지역단위 농업환경모형을 기초로 사례지역인 경기도 양평군과 충북 진천군의 물질균형 분석을 시도하였다. 이 연 등 5인(2003)은 OECD 양분지표 계산방식에 따라 질소수지지표를 산정하였고 경기도 화성군과 충주시를 사례로 영농형태별(수도작, 시설하우스, 복합영농) 질소수지 분석결과를 제시하였다. 일본의 松本成夫(1998)는 농업생태계의 질소 순환에 초점을 맞추어 농지에서의 양분수지, 분뇨, 짚 등 잔여물의 처리·이용, 그리고 식료 및 사료의 수입에 따른 환경부하 메커니즘을 종합적으로 분석하였고, 이바라키현 우시쿠 지역의 질소 흐름을 도식화하여 체계적으로 설명하였다.

이 논문은 그동안 이루어진 국내외 연구

결과를 기초로 지역단위 물질순환분석의 접근방법을 적용하여 친환경농업 발전방안을 제시하는데 연구목적이 있다. 논문의 구성은 제2장에서는 물질순환분석을 위한 농업환경모형을 체계화하였고, 제3장에서는 지역단위 농업환경부하 방법을 제시하였다. 다음으로 제4장은 물질균형 분석의 실제적인 연구로 경기도 양평군 사례를 제시하였다. 끝으로 제5장에서는 사례분석 결과를 기초로 물질순환분석을 통한 친환경농업 발전방안을 제시하였다.

2. 지역단위 물질순환 분석을 위한 농업환경모형

2.1. 농업환경모형의 개념

농업 환경 모형(Agri-Environmental Model)은 농업환경의 변화에 영향을 미치

는 요소를 파악하고 그 작용방식, 영향의 정도와 범위 등을 일련의 관계 형태로 제시함으로써 복잡한 현상을 단순화하여 이해하려는 틀을 의미한다(허장, 정은미, 김창길, 2000). 지역단위 농업환경모형은 자연적·지리적·행정적 요소 등을 복합적으로 고려하여 구성한 모형으로, 구체적으로는 자연순환을 기초로 지역내, 지역간 순환을 포괄하는 모형으로 설정될 수 있다. 지역단위 농업환경모형의 구축에 있어서 물질순환계의 경계영역 설정범위에 따라 자연순환형 농업은 농가내 순환, 지역내 순환, 지역간 순환으로 대별될 수 있다(표1 참조).

그러나 현실적으로 개별 농가 내부에서 물질순환이 이루어지는 경우는 매우 제한적이기 때문에 지역단위 농업환경모형에서는 물질순환의 세 유형을 모두 포함하되 주로 지역내 순환 및 지역간 순환이 주류를 이룬다고 볼 수 있다.

표 1 자연순환의 유형과 환경친화적 농법 및 농업형태

	순환의 유형	환경친화적 순환농법	농업형태
	서브 시스템		
농가내 순환	경지내 순환	벼짚, 왕겨 등 농산부산물의 경지환원	개별복합농업, 유기농업, 유축농업
	작목간 순환	윤작·혼작·녹비작물의 이용	
	농가구내 순환	생활쓰레기의 사료 또는 퇴비 이용	
지역내 순환	경지-지목간 순환	농산부산물·산야초의 이용	지역복합농업, 유기농업, 유축농업
		방목·휴경지(사료작물 재배)의 윤환 톱밥, 폐목재 등의 축분퇴비재료 활용	
	농가간 순환	경종-양축농가간 축분퇴비·벼짚교환 경종-양축농가간 액비화	개별농업, 개별축산업
지역간 순환	농업지역간순환	경종 - 축산 부문의 유기물교환	지역간 복합농업
	농공간 순환	식품산업 폐기물의 퇴비화 톱밥·우드칩 등의 이용	지역간 순환농업
	농촌-도시간 순환	농촌·도시 생활쓰레기의 사료화·퇴비화	

자료: 김창길·강창용(2002), p.10에서 인용.

2.2. 지역단위 농업환경모형의 기본구조

지역단위 농업환경모형의 기본구조는 C(조건)-S(상태)-P(계획)체계로 구성된다(그림1 참조).

C(condition)는 지역의 입지적 특성과 농업환경자원 여건 등을 의미한다. 이 단계에서는 지역의 입지적 특성과 부존자원인 농업환경자원의 실태 파악이 이루어진다. 다음으로 S(state)는 지역단위의 농업생산 활동으로부터 발생하는 환경부하 상태를 의미하며, 환경부하 실태 분석을 위해 물질순환 체계의 투입-산출분석과 지역단위 환경용량의 추정이 이루어진다. 끝으로 P(plan)는 지역단위의 환경농업 육성계획을 수립하는

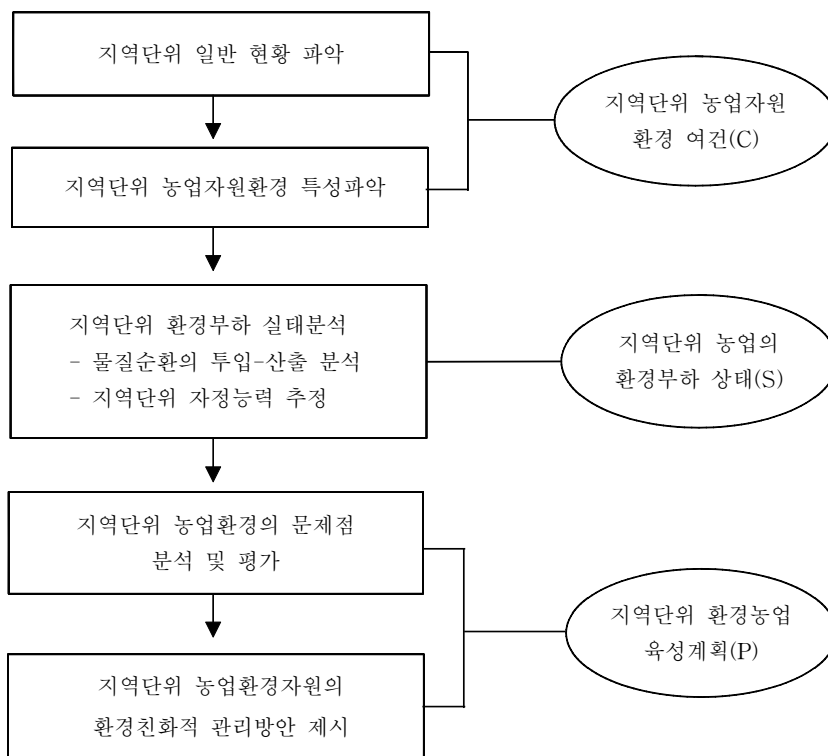
단계로 지역단위 물질순환분석을 기초로 농업환경의 문제점을 분석하여 건설한 친환경농업 육성을 위한 농업환경자원의 적절한 관리방안을 제시하게 된다.

이 논문에서는 지역단위 농업생산 활동의 환경부하 상태를 분석하고 평가하는 S에 초점을 맞추어 다루고자 한다. 이러한 실태분석은 궁극적으로 지역단위 친환경농업발전을 위한 계획 및 전략수립의 기초자료가 된다는 점에서 체계적이고 설득력 있게 다루어져야 한다.

2.3. 지역단위 농업환경 분석을 위한 주요 지표

지역단위 농업환경모형을 구축하기 위해서는 우선 해당 지역의 농업환경과 연관이

그림 1 지역단위 농업환경모형 개발을 위한 C-S-P의 기본골격



자료: 김창길 · 강창용(2002), p.12에서 인용.

표 2 지역단위 농업환경 분석을 위한 주요 지표

부 문	지역 특성 요인	관련 지표
인문사회 경제	인구부하 사회·경제구조 환경·토지이용 규제현황 공공지출	인구, 인구밀도, 농업인구 교육수준, 소득수준, 산업구조 규제의 유무, 정도 농업환경 부문 지출예산
자연지리	기후와 기상조건 입지 병충해, 기타 자연재해	기온, 강수량 농업지대(평야/중간/산간 등) 종류별 발생빈도, 피해상황
토 양	농업적성도 물리화학적 성질	토양적성등급, 전답토양의 유형 산도, 유기물, 유효인산
영농활동	작부체계 투입재 사용 경종 축산	윤작, 작부체계 비료 사용량, 유기질비료 사용량 작물별 재배면적 및 생산량 축종별 사육두수, 가축분뇨처리
자원관리	농업자원관리정책 환경농업 실천	환경농업정책 프로그램 친환경농업 실천 농가 수

자료: 김창길·강창용(2002), p.13.

있는 요인과 부문별 관련지표를 개발하여 지역단위 농업환경의 전체적인 특성과 지역 단위 환경농업 여건을 파악해야 할 것이다.

<표 2>에서 제시된 바와 같이 지역단위 농업환경모형의 체계화를 위한 지역적 특성 파악을 위해서는 인문사회경제, 자연지리, 토양, 영농활동 및 자원관리 부문에서 여러 가지 지표가 활용될 수 있다.

3. 지역단위 농업환경부하 분석 방법

3.1. 농업생태계 물질순환의 이론적 기초

자연생태계에서 영양물질은 ‘식물흡수 → 유기물분해 → 토양 → 식물흡수’의 과정을 반복하면서 순환을 계속하기 때문에 일정한 시간적·공간적 범위에서 양분의 투입과 유출이 균형을 이루면 정상상태

(steady state)가 유지된다. 그러나 농업생태계(agro- ecosystem)는 생산물의 일부가 외부로 유출되고 이를 보충하기 위해 화학비료와 유기질 비료 등 영양분물질을 투입하기 때문에 자연생태계에 비해 순환하는 양분물질의 양이 많을 뿐만 아니라 순환하는 속도도 빨라지게 된다. 특히 작물의 생산성 증대를 위해 인위적 영양분물질을 투입함으로써 순환속도는 더욱 빨라지게 된다.

농업생태계의 물질순환 분석에 있어서는 토양에서의 양분물질이 여러 가지 화학적 형태로 존재하기 때문에 작물에 따른 양분 이용률·흡수율 등을 고려해야 하며 물질흐름의 양을 산정하는 경우 시간적 차원을 고려하여 제시해야 한다. 농업생태계의 물질순환 분석 절차는 다음과 같이 네 단계로 이루어진다.

- ① 농업생태계의 경계를 결정하고 경계를 통해 투입·산출되는 물질흐름을 파악

- ② 농업생태계내 하부생태계의 구성요소를 결정하고 상호작용을 파악
- ③ 농업생태계 내부에서 이루어지는 물질흐름의 양을 산출
- ④ 물질흐름을 기초로 성분별 양분지표(질소, 인산 등 양분지표)를 선택하여 생태계 분석

3.2. 지역단위 농업생태계의 물질순환 구조

지역단위 환경오염 부하 정도를 파악하기 위해 물질의 유입(inflow)과 유출(outflow)을 체계화한 모형을 물질순환 시스템이라 한다. 물질균형모형(materials balance model)은 물질순환을 기초로 환경과 경제활동의 상호관련성을 체계적으로 설명해 주는 대표적인 모형(Kneese, Ayres and D'Arge, 1970)으로 지역단위 농업환경모형의 이론적 기초를 제공한다.

지역단위 농업생태계의 물질순환 구조를 보면, 농업 부문의 「자원투입 → 생산 → 소비」의 경제활동을 근간으로 하는 물질순환 구조는 각 경제활동으로부터 잔여물(residuals)이 발생하고,¹ 이를 재활용하면 다시 농업자원으로 활용할 수 있다. 한편 활용되지 않는 잔여물은 폐기물로 배출되는데 지역단위 농업생태계의 자정능력(assimilative capacity) 범위 내에서 처리되는 경우 다시 농업자원으로 쓰일 수 있으나, 자정능력을 초과하는 경우 환경오염원으로 작용하여

부정적 영향을 미치게 된다.

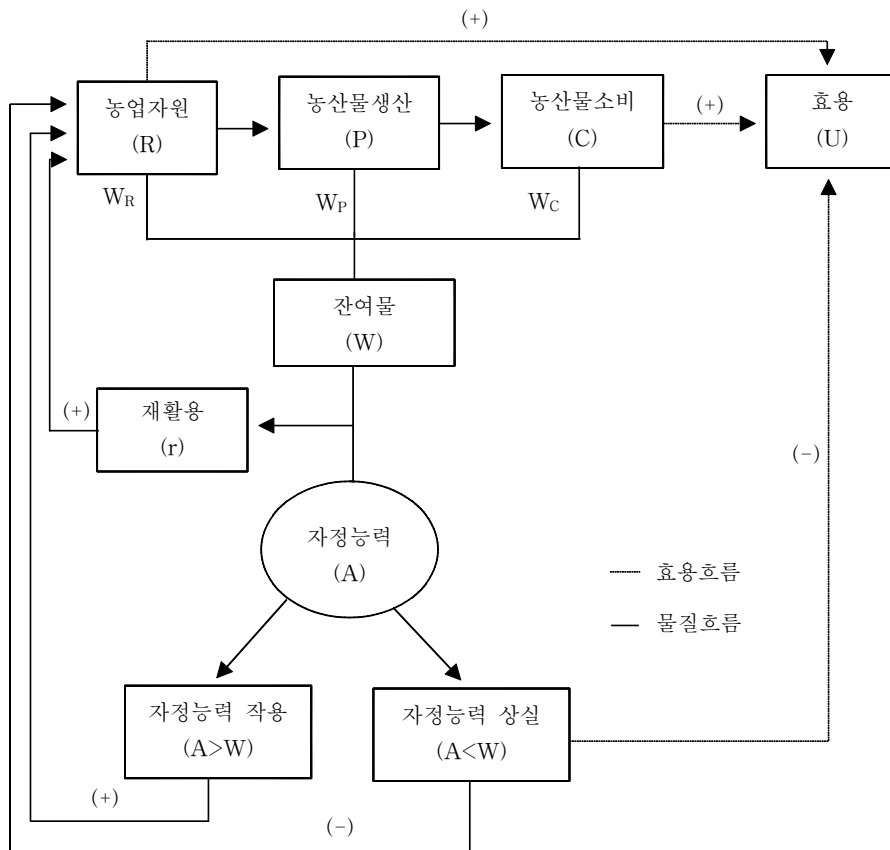
<그림 2>에서 제시된 바와 같이, 자원(resources, R)의 채취, 생산(production, P) 및 소비(consumption, C)의 모든 경제활동 과정에서는 잔여물(wastes, W)이 발생하기 마련이며, 일부는 재활용(recycling, r)되고 일부는 환경의 자정능력(assimilative capacity, A)에 의해 흡수된다. 환경으로부터 추출한 농업자원은 생산과 소비과정을 거쳐 사람들에게 효용을 제공하게 된다.

물질수지의 관점에서 각 부문에서 발생하는 잔여물의 양은 투입된 자원의 양과 같다는 것이 열역학 제1법칙(the first law of thermodynamics)이다. 열역학 제1법칙에 의하면 물질은 창조되거나 파괴되지 않고 단지 다른 형태로 전환될 뿐이므로 농업생산활동에 사용된 자원은 궁극적으로 잔여물이라는 다른 형태로 전환되어 환경계로 배출하게 된다. 따라서 물질순환의 투입-산출을 정량적으로 나타낸 물질균형방정식은 $R = W = W_R + W_P + W_C$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 W_R , W_P , W_C 는 각각 농업환경자원의 채취 과정, 농업생산 활동 과정, 농산물의 소비과정에서 발생하는 잔여물을 나타낸다. 이 방정식은 환경계로부터 경제계로 유입되는 에너지와 자원의 총량은 경제계로부터 환경계로 유출되는 잔여물의 총량과 일치한다는 의미를 수리적으로 나타낸 것이다.²

¹ 경제활동의 부산물로 발생하는 잔여물(residuals)은 오염물질(pollutant)이나 폐기물(wastes)을 포함하는 보다 넓은 개념이다. 농업생태계 외부로 배출되는 모든 잔여물이 모두 환경오염을 유발시킨다고 볼 수 없다.

² 환경경제학 측면에서 열역학 제1법칙은 환경계로부터 유입되는 자연자원의 양이 많으면 많을수록 다시 환경계로 유출되는 잔여물의 양도 궁극적으로 많아진다는 점에서 환경의 자정능력을 초과하는 수준의 잔여물이 발생될 가능성

그림 2 농업생태계의 물질순환 기본구조



현실적으로 보면 농업자원의 사용 과정에서 이용할 수 없는 에너지나 물질의 양은 잔여물로 환경에 배출되며, 잔여물이 환경의 자정능력을 초과하는 수준에서 발생하는 경우 엔트로피(사용 불가능한 실체로 오염 상태를 나타냄)의 증가를 가져온다.

이는 열역학 제2법칙(the second law of thermodynamics)인 엔트로피 증가의 법칙을 의미한다. 실제로 폐기물을 발생시키지

않는 완전한 경제활동은 거의 불가능하다. 즉, 농업생산 활동으로부터 발생한 폐기물 가운데 재활용되지 않는 부분은 엔트로피로 축적되어 농업생태계에서 유용하게 쓸 수 있는 농업환경자원의 공급을 줄임으로써 농업활동의 위축은 물론 부정적 어메니티(negative amenity)를 발생시켜 효용수준을 떨어뜨리는 결과를 초래하게 된다. 농업생태계에 있어서 엔트로피를 감축시키는 방법은 크게 원료사용(R)과 생산활동(P)을 줄이는 방안, 각 경제활동별 잔여물(W)의 발생량을 줄이거나 재활용(r)을 높이는 방법 등을 들 수 있다.

이 높아진다는 점에서 환경오염 부하를 증가시킬 수 있다는 점을 시사해 준다. 또한 생산 및 소비 과정에서 발생하는 잔여물을 재활용할 경우 그만큼 잔여물의 배출량을 감소시켜 환경부하를 감소시킨다.

3.3. 지역단위 농업환경부하 분석 방법

3.3.1. 물질순환 흐름도 분석

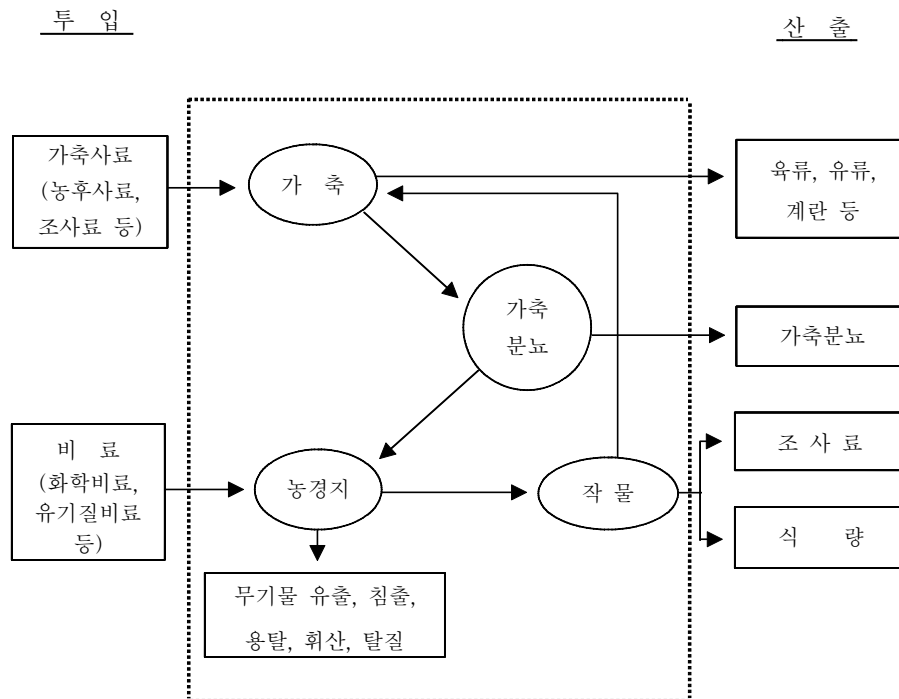
작물 및 가축생산 활동에서 농자재(화학비료, 농약, 퇴비, 사료) 투입산출의 물질수지 파악을 위해서는 흐름도(flow chart) 접근방식이 시각적이고 설득력이 높다(그림3 참조). 물질순환의 흐름도 방식은 작물·축종별 투입재 소요량, 양분이용량, 분뇨 발생량 등 발생 원단위의 계측으로 투입산출(I/O)의 수지분석이 가능하며, 농업생산활동에 따른 기타 오염 물질(메탄가스, 아산화질소 등)의 발생량 추정도 가능하다.

농업 부문의 물질순환 투입-산출 개념도에서 농업생태계 외부에서 투입되는 부문

은 크게 가축생산을 위한 농후사료와 일부 조사료 등을 들 수 있다. 가축사양에 있어 농후사료는 배합사료의 형태로 구입하여 사용하게 되며, 조사료는 농산 부산물이나 인근의 벼짚 등을 이용하므로 지역단위 농업생태계 내에서 이루어진다고 볼 수 있다. 또한 작물생산을 위한 양분 공급원으로 화학비료와 유기질 비료가 외부에서 투입된다.

농업생태계 외부로부터 투입된 농후사료와 조사료를 이용한 가축생산 과정으로부터 주산물인 고기, 우유, 달걀 등이 생산되어 외부로 나가고 부산물로 가축분뇨가 발생한다. 발생한 가축분뇨는 퇴비화와 액비화 등 자원화방법에 의해 적절하게 처리되는 경우 작물재배를 위한 양분 공급원으로 농경지에 살포된다. 이 경우 농경지에는 화

그림 3 농업 부문의 물질순환 투입-산출의 개념도



학비료로 투입된 양분과 가축분뇨로부터 공급된 비료 성분의 무기물이 투입된다. 작물은 생육 과정에서 필요로 하는 양분요구량 이상으로 양분이 과잉 투입되는 경우 이를 흡수하지 못하고 무기물의 유출, 침출, 용탈, 휘산 등이 이루어지게 된다. 이 과정에서 환경의 자정 능력이 초과되는 경우 과잉 양분은 지역단위 농업생태계의 환경오염 부하요인으로 작용하게 된다.

3.3.2. 농업생산활동의 환경부하량 산출

환경부하량 산출에 있어서 발생량은 오염원으로부터 생성되어 아무런 정화과정을 거치지 않은 양을 지칭한다. 정화량은 정화시설 또는 오염원에서 지천까지의 자연정화에 의한 양을 말하며, 배출량은 발생량에서 정화량을 제외한 양으로 지천에 도달하는 양을 의미한다. 경종부문의 발생량은 배출량이 되며, 축산 부문의 발생량은 분뇨발생 원단위(환경부 고시 제1999-110호, 1999. 7. 8)에 의해서 계측되며, 가축분뇨의 비료 성분량은 축종별 비료 성분 함유율에 의해 산정된다(김창길, 강창용. 2002. pp.23-24).

축종별 가축분뇨의 발생원단위는 분뇨 발생량과 세정수에 의해 결정된다. 한우의 성축 1두를 기준으로 1일 분뇨배출량 원단위를 보면 분은 10.1kg, 뇨가 4.5kg 발생하여 분뇨 발생량은 14.6kg이다. 또한 돼지의 경우 성돈 1마리당 1일 분뇨 발생량을 보면 분이 1.6kg, 뇨가 2.6kg로 분뇨 발생량은 4.2kg이며, 여기에 세정수로 4.4kg이 발생하여 축산폐수 배출 일당 원단위 총량은

8.6kg이 된다.

작물별, 토양별 또는 지대별 적정시비량과 실제시비량의 차이는 농업생태계로 유출되는 손실량으로 이는 환경부하 발생량으로 고려될 수 있다.³ 여기서 적정시비량의 산정은 양분의 균형공급과 양분축적경감에 의한 환경오염을 방지하기 위한 기준으로 환경친화적 추천시비량으로 볼 수 있다. 실제적으로, 단위 면적당 시비량은 양분요구량에서 실제공급량을 공제한 양을 비료의 이용률로 나누어 계산될 수 있다. 실제적으로 작물이 단위수량당 흡수하는 양분량인 양분요구량(uptake level)은 토양의 종류, 지역특성, 시비량 및 품종 등에 따라 달라질 수 있다. 표준시비량은 작물별, 지대별로 적량시험을 통하여 결정된 성분별 추천량에 관한 자료는 「작물별 시비처방 기준」(농업과학기술원, 1999)에서 제공하고 있다.

위에서 제시된 관련정보를 기초로 농업생산활동의 환경부하량을 나타낼 수 있는 지역단위 물질균형 양분별 수지지표는 아래 식에 의해 산출될 수 있다.⁴

³ 작물별로 양분요구량 수준에 상응하는 적정시비량은 100% 작물에 흡수된다고 볼 수 없으므로 일부가 외부로 유출된다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 보면 실제시비량에서 적정시비량을 뺀 발생량 이상으로 농업생태계로 양분이 유출된다고 볼 수 있다. 그러나 현실적으로 적정시비량을 살포하는 경우 작물이 흡수하고 유출되는 양은 토양특성, 작물별 성장단계와 비료 성분 등에 따라 차이를 보이므로 정확한 평가에는 어려움이 있었음을 밝혀둔다.

⁴ 농업부문의 물질균형 분석에 있어서 가축분뇨에서 산출되는 비료성분은 유기질비료 투입량에 포함되어 있다.

$$(1) RNB_k = \sum_i \sum_j [CFERT_{ijk} + OFERT_{ijk}] \times ALNAD_{ijk} \\ - \sum_i \sum_j [CREQ_{ijk} \times ALAND_{ij}] - \sum_i ABSL_{ik}$$

여기서,

RNB_k : 지역단위 물질균형 양분별(k) 수치

$CFERT_{ijk}$: 농가별(i) 작물재배(j)시 성분
별 화학비료 투입량

$OFERT_{ijk}$: 농가별 작물재배시 성분별 유
기질비료 투입량

$ALAND_{ijk}$: 농가별 작물재배 면적

$CREQ_{ijk}$: 작물별 환경친화적 재배시 양
분요구량

$ABSL_{ik}$: 농가별 경작지의 자정작용 조
정능력

4. 지역단위 물질균형 분석 결과 : 양평군 사례를 중심으로

4.1. 농업자원환경 여건분석

농업생태환경 분석과 관련 지역단위의 구분은 모니터링을 위한 면적 범위와 연계하여 수계 또는 행정구역(군단위, 면단위 또는 마을단위)로 대별될 수 있다. 여기서는 분석의 편의상 군단위 행정구역으로 하였으며, 우리나라 친환경농업 실천지역으로 대표되는 양평군을 연구대상 지역으로 선정하였다.

양평군은 경기도 동부에 위치하며 북쪽으로는 가평군, 서쪽으로는 남양주시와 동쪽으로는 강원도 횡성군에 접하고 있으며, 남쪽으로는 여주군과 경계를 두고 있는 지역으로 특히 상수원 관리지역(상수원 보호구역,

특별대책지역 I·II 권역, 수변구역)이다.⁵

군 전체면적의 70%가 팔당상수원 특별대책지역에 속하고 있으며, 행정구역은 1개읍, 11개면, 255동리로 구성되어 있고, 총인구는 약 82,921명(2001년 기준), 농가인구는 35%인 29,124명, 인구밀도는 94명/㎢(경기도 480명/㎢)으로 매우 낮은 편이다.

양평군의 연평균 기온은 11.6℃이며, 강수량은 1,034mm로 전국 평균치보다 모두 낮은 편이다. 2001년도의 평균 강수량은 8월과 9월의 강수량이 크게 낮아 양평군의 통상적인 평균치인 1,400mm 수준 보다 매우 낮은 수준으로 기록되고 있다.

양평군은 우리나라에서 환경농업 육성에 있어 선도적인 지방자치단체로 군 전체예산 1,687억 원의 18.8%인 318억 원을 친환경농업 육성 부문에 배분하고 있다(표3 참조).

양평군의 영농활동과 관련된 투입-산출 현황을 보면, 농경지면적은 10,228ha(전국 경지면적의 0.6%, 경기도 경지면적의 4.8% 차지)이고, 이 가운데 논이 6,109ha로 60%, 밭은 4,119ha로 40%를 차지하고 있다. 농가 호당 평균경지면적은 1.1ha로 전국평균 1.3ha보다 낮은 수준이며, 작물생산을 위한 비료공급량(성분량 기준)을 보면 질소가 1,392톤, 인산이 474톤, 칼리가 609톤으로 NPK 3대성분의 총량은 2,475톤이며, 이 밖에도 토양개량제 등 기타성분으로 3,178톤이 공급된 것으로 나타났다.

⁵ 상수원관리 지역은 크게 수도법에 의한 상수원 보호구역, 환경정책기본법에 의한 특별대책지역 I·II권역, 한강수계법에 의한 수변구역, 산림법에 의한 제3종 수원함양 보안림지정 지역 등을 포함함.

표 3 양평군의 사회경제 및 자연지리 관련 주요 지표(2001년 기준)

구 분		지표치	비중(%)	구 분		지표치
토지 (km ²)	총면적	878.3	100.0	기상	강수일수(일)	92
	농경지	136.5	15.5		서리일수(일)	70
	- 전	60.9	6.9		눈오는 일수(일)	38
	- 답	75.6	8.6		평균기온(℃)	11.6
	과수원	0.6	0.1		강수량(mm)	1,034.1
	목장용지	2.5	0.3	인구	총인구(명)	82,921
	임야	657.3	74.8		인구밀도(명/km ²)	94.4
	기타	81.4	9.3		농가인구(명)	29,124
예산 (억원)	예산총액	1,687	100.0	행정	읍(개)	1
	환경농업	318	18.8	구역	면(개)	11
					동리(개)	255

자료: 양평군 통계연보(2002).

양평군의 전체 농가 중 논벼 재배농가는 60% 정도를 차지하고, 축산농가가 8% 정도를 차지하고 있다. 또한 양평군 논토양의 지형별 분포를 보면 주로 곡간지가 74%를 차지하고, 평탄지는 22% 정도를 차지하고 있으며, 논토양의 유형별 분포를 보면 85% 이상이 사질답이며, 보통답은 7% 정도에 불과한 것으로 나타났다(농업과학기술원, 2000).

4.2. 물질균형 순환체계 분석

비료사용량은 군단위 농협지부에서 농협을 통해 공급되고 판매되는 양을 기초로 공급량과 재고량을 이용하여 실제 소비량을 추정할 수 있다. 성분별로 공급량은(2001년도 기준) 질소 1,392톤, 인산 474톤, 칼리 609톤으로 총 2,475톤에 달한다. 농협 양평군지부의 자료에 따르면 질소의 재고율이 31.9%로 444톤 정도가 재고량이므로 실제 판매량은 948톤, 인산은 재고율이 31%로 147톤이 재고량이므로 327톤이 판매되고, 칼리는 30%인 183톤이 재고량이므로 실제 판매량은 426톤으로 추정된다. 따라서 실제 판매량은 총공급량 2,475톤에서 재고량인 773톤을 뺀 1,702톤이 된다. 이러한 판

매량 추정치를 농가가 구입하여 실제로 농지에 투입한 소비량으로 간주하면 경지면적 10,228ha를 기준으로 단보당 성분별 화학비료 투입량은 질소 9.3kg, 인산 3.2kg, 칼리 4.2kg인 것으로 산정되어 NPK 총투입량은 20.0kg로 추정된다.

가축생산을 위해 외부에서 투입되는 농후사료 사용량은 공식적인 통계자료가 발표되고 있지 않아 간접적인 방식을 적용하여 추정한 결과 한육우에서 36,318톤, 젖소가 22,842톤, 돼지 10,171톤, 닭 56,421톤으로 총 125,752톤으로 나타났다. 따라서 양평군 외부에서 들어오는 상당한 양의 농후사료가 물질순환의 관점에서 환경부하 요인으로 작용하고 있는 것으로 분석되었다.⁶

⁶ 농가표준소득 자료에 의하면 한우 비육우 1두를 생산하는데 농후사료 3,212.6kg, 조사료 1,364kg이 투입되고, 젖소 1두를 생산하는 데는 농후사료 4,611.7kg, 조사료 4,316.0kg이 투입되며, 비육돈 1두를 생산하는 데는 배합사료 268.1kg, 육계 100수를 생산하는 데는 배합사료 271.7kg가 투입되는 것으로 제시되고 있다(농촌진흥청, 2001). 두당 사료소비량에 사육두수를 곱하여 농후사료 소비량을 추정할 수 있다. 양평군의 가축 사육두수 가운데는 송아지, 자돈, 병아리 등도 포함되어 있어 전체 가축을 모두 성숙으로 간주하여 사료 소비량을 추정하는 데는 문제가 있다. 그러나 개략적인 사료투입량을 파악하는

한편 가축사육두수와 축종별 발생원단위를 이용하여 추정한 가축분뇨 발생 총량은 243,481톤이고, 이중 축분이 169,023톤으로 69.4%를 차지하고, 가축뇨가 74,458톤으로 30.6%를 차지하는 것으로 나타났다. 양평군의 1일 가축분뇨 발생량은 평균 667톤이며, 이 중에 분이 463톤, 뇨가 204톤 발생되는 것으로 추정되고 있다.

축종별로 보면 한육우가 60,244톤으로 24.8%를 차지하고, 젖소가 64,359톤으로 26.4%, 돼지가 58,159톤으로 23.9%, 닭이 60,718톤으로 24.9%를 차지하는 것으로 추정되었다. 이러한 가축분뇨 총발생량을 비료 성분량으로 환산하면 질소 성분이 1,430톤, 인산 성분이 487톤, 칼리성분이 680톤으로 총 2,597톤으로 추정되어 화학비료 성분의 약 1.5배에 상당하는 비료 성분량으로 나타났다.

양평군의 경우 실제 작물재배로 논 6,062ha, 밭 3,685ha, 과수원 221ha 등 총 9,968ha의 경지에서 소요되는 성분별 양분요구량은 질소 1,172톤, 인산 513톤, 칼리 702톤으로 총 2,388톤으로 추정되었다.⁷ 경작지 단보

당 양분요구량은 질소 11.8kg, 인산 5.6kg, 칼리 7.1kg로 총 24.5kg에 상당하는 양이다.

화학비료에만 의존하는 경우 작물의 양분공급량은 질소 80.9%, 인산 63.8%, 칼리 60.7% 정도만이 충족되므로 가축분뇨를 이용한 유기질 비료 성분의 공급이 필요하다. 양평군의 경우 가축사육에 따라 상당한 가축분뇨가 발생되므로 적절한 자원화 처리에 의해 양분공급원으로 비료 성분을 공급할 수 있다. 가축분뇨 발생량의 실제 양분 이용률을 60%로 상정하여 가축분뇨의 실제 양분 이용량을 추정하면 질소 858톤, 인산 292톤, 칼리 408톤으로 총 1,558톤의 양분을 공급할 수 있는 것으로 추정된다.⁸ 따라서 양분요구량을 충족시키기 위해 화학비료 공급량과 가축분뇨로부터의 실제 양분공급량을 모두 고려하면 초과양분 공급량은 질소가 54.1%로 가장 많은 것으로 나타났다고, 인산과 칼리는 각각 20.7%, 18.7%로 추정되었다(표4 참조).

물질순환의 투입과 산출 부문에 있어 관련 요소들의 추정자료를 기초로 양평군 지역단위의 농업생태계 물질순환 구조의 흐름도를 작성할 수 있다(그림4 참조). 여기서 여러 가지 작물생산을 위해 농업생태계 외부에서 질소 949톤, 인산 327톤, 칼리 426톤 등 총 1,702톤의 화학비료 성분이 투

테는 가축 사육두수를 성축으로 간주하여 추정해도 큰 무리는 없는 것으로 사료된다. 특히 가축분뇨 발생량의 원단위도 성축을 기준으로 정하여 산정하고 있으므로 사료 소비량 추정도 유사한 방식으로 간주할 수 있을 것이다.

⁷ 양평군에서 생산되는 모든 작물과 과일을 재배한 면적과 각 작물별, 과일별 표준소비량 자료(농업과학기술원, 1999)를 알고 있으면, 실제로 작물재배시 필요로 하는 성분별 양분요구량을 구할 수 있다. 이러한 작물별 양분요구량은 토양조건과 기상 등의 요인에 따라 차이를 보일 것이나, 이 연구에서는 보통의 경우를 상정하여 전체 작물의 성분별 요구량을 추정하였음을 밝혀둔다.

⁸ 가축분뇨가 발생하면 수거되고, 처리를 위해 이동하고, 처리방식(퇴비화, 액비화 등)에 따라 제조공정이 필요하다. 가축분뇨가 발생하면 여러 변환 단계를 거치면서 실제로 경지에 투입하는 경우 활용 가능한 비료성분은 성분별, 처리공정별로 다르나 전체적으로 약 40% 정도의 가축분뇨 이용률이 제시되고 있다(USDA, 1992; Midwest Plan Service, 1993).

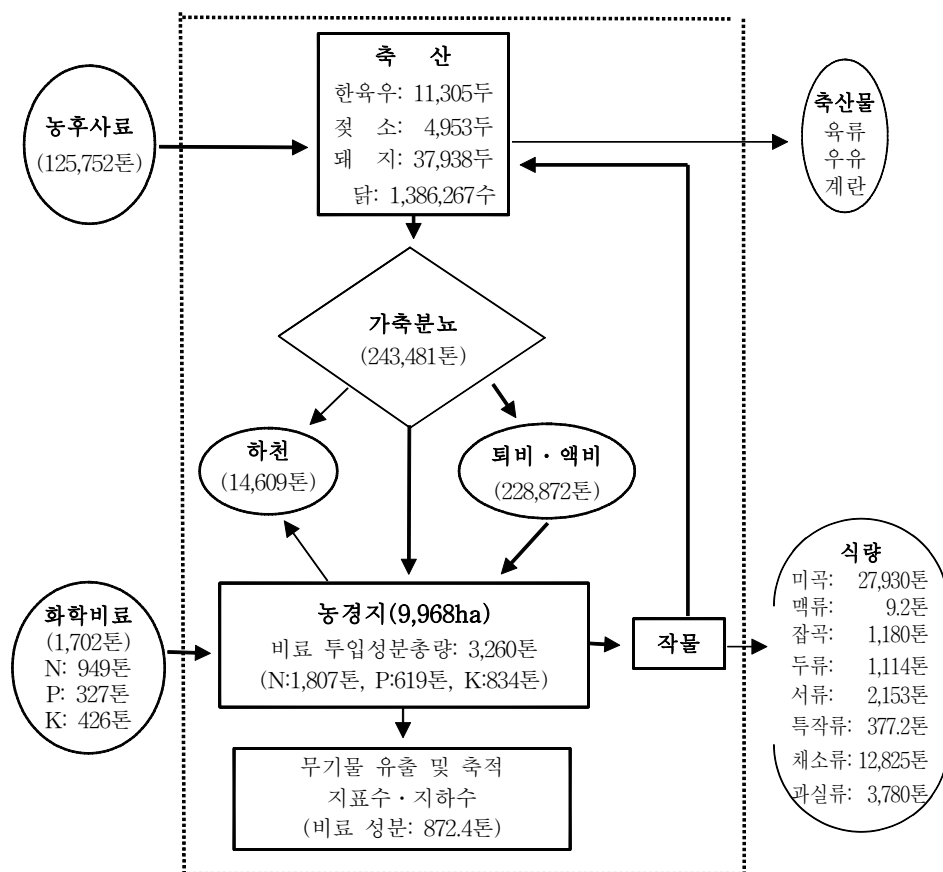
표 4 양평군의 작물 양분요구량 및 양분공급 구조

단위: 톤, %

구 분	질소	인산	칼리	계
작물재배 양분요구량(A)	1,172.4	512.8	702.4	2,387.6
화학비료 사용량(B)	949.0	327.0	426.0	1,702.0
가축분뇨 양분공급 가능량(C)	1,430.5	486.7	679.8	2,596.9
가축분뇨 실제활용가능량(D)	858.3	292.0	407.9	1,558.1
경지면적당 화학비료 성분 투입도(kg/10a)	9.5	3.3	4.3	17.1
경지면적당 축분비료 성분 투입도(kg/10a)	8.6	2.9	4.1	15.6
경지면적당 총양분 투입도(kg/10a)	18.1	6.2	8.4	32.7
양분수지-화학비료충족도(B/A)	80.9	63.8	60.7	71.3
양분수지-총양분공급도((B+D)/A)	154.1	120.7	118.7	136.5

입되며, 농경지(9,968ha)에서 재배되는 작물의 양분요구량을 충족시키기 위해 화학비료 외에도 가축분뇨의 퇴비화·액비화 등에 의한 양분공급으로 성분량 기준 질소가 858.3톤, 인산이 292톤, 칼리가 407톤 등 총 1,558톤에 상당하는 양분이 투입된다. 따라서 양평군의 총 양분공급량 3,260톤에서 실제 작물 재배면적에서 추정된 양분요구량 2387.6톤을 제외하면 872.4톤(NPK 비료성분 기준)의 무기물이 토양에 축적되거나

그림 4 양평군 농업생태계의 물질순환 구조(2001년 기준 시산)



나 농지로부터 유출되어 엔트로피를 증가시켜 환경부하 요인으로 작용하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 농업 및 가축생산 활동에 따른 환경부하 정도는 양평군 지역의 기후적·지형적·환경자정능력 정도에 따라 달라지게 될 것이나, 매년 상당한 과잉양분투입에 따른 지속적인 무기물의 유

출은 환경부하를 가중시키는 요인으로 작용할 수 있다는 점이다.

양평군의 물질균형수지는 지역별 농업생산 여건에 따라 큰 차이가 발생하므로 지역별 환경부하 정도도 다르다고 볼 수 있다. <표 5>는 양평군의 읍면별 경지면적당 양분 공급량을 나타낸 것이다. 지역별로 단

표 5 경지면적당 양분투입도

단위: kg/10a

지역명	구 분	질소	인산	칼리	계
양평읍	화학비료투입도	9.7	4.0	4.2	17.9
	가축분뇨투입도	11.0	3.8	5.1	19.9
	총양분투입도	20.7	7.8	9.3	37.8
강상면	화학비료투입도	7.3	2.2	2.8	12.3
	가축분뇨투입도	5.5	1.9	2.8	10.1
	총양분투입도	12.8	4.1	5.5	22.4
강하면	화학비료투입도	6.6	2.1	3.2	11.8
	가축분뇨투입도	4.7	1.8	2.6	9.2
	총양분투입도	11.3	3.9	5.8	21.0
양서면	화학비료투입도	17.8	6.6	8.1	32.6
	가축분뇨투입도	2.8	0.9	1.7	5.4
	총양분투입도	20.6	7.6	9.8	38.0
옥천면	화학비료투입도	7.1	2.3	3.2	12.6
	가축분뇨투입도	3.7	1.5	2.1	7.2
	총양분투입도	10.8	3.8	5.3	19.9
서종면	화학비료투입도	7.0	3.2	3.7	14.0
	가축분뇨투입도	3.3	1.1	1.6	5.9
	총양분투입도	10.3	4.4	5.3	20.0
단월면	화학비료투입도	8.8	2.9	3.6	15.3
	가축분뇨투입도	7.3	2.7	4.1	14.2
	총양분투입도	16.1	5.6	7.7	29.4
청운면	화학비료투입도	9.8	3.5	4.7	18.0
	가축분뇨투입도	16.9	6.4	8.6	31.9
	총양분투입도	26.7	9.9	13.4	49.9
양동면	화학비료투입도	10.3	3.6	4.9	18.9
	가축분뇨투입도	20.5	5.8	8.0	34.2
	총양분투입도	30.8	9.4	12.9	53.1
지제면	화학비료투입도	11.2	3.3	5.1	19.6
	가축분뇨투입도	6.6	2.5	3.5	12.6
	총양분투입도	17.8	5.9	8.5	32.2
용문면	화학비료투입도	12.9	4.2	5.6	22.6
	가축분뇨투입도	3.5	1.1	1.7	6.3
	총양분투입도	16.4	5.3	7.3	29.0
개군면	화학비료투입도	7.6	2.5	3.2	13.3
	가축분뇨투입도	12.1	4.4	6.2	22.6
	총양분투입도	19.6	6.9	9.4	35.9
양평군 평균	화학비료투입도	9.5	3.3	4.3	17.1
	가축분뇨투입도	8.6	2.9	4.1	15.6
	총양분투입도	18.1	6.2	8.4	32.7

보당 총양분투입도를 비교해 보면, 양동면의 경우 질소 30.8kg, 인산 9.4kg, 칼리 12.9kg으로 총 53.1kg 투입된 것으로 나타나 가장 높은 투입수준을 나타냈다. 한편 옥천면의 경우는 질소 10.8kg, 인산 3.8kg, 칼리 5.3kg로 총 19.9kg으로 가장 낮은 투입수준으로 보여, 군지역내에서도 지역간 양분투입도 격차가 매우 큰 것으로 나타났다. 양평균 전체의 단보당 평균투입수준을 보면 질소 18.1kg, 인산 6.2kg, 칼리 8.4kg 등으로 총 32.7kg가 투입된 것으로 추정된다. 지역단위 물질균형 양분수지지표 산출식

(1)을 이용하여 지역별 양분충족도를 파악할 수 있다. 산출식에 포함된 농가별 경작지의 자정작용 조정 능력은 토양조건, 기후요인 및 농가별 기술수준 등에 따라 달라질 것이나, 분석의 편의상 지역단위의 해당 농가의 자정작용 조정능력은 동일하다는 조건하에서 양분수지지표 산출을 시도하였다. 이러한 전제조건하에 산정된 지역별 양분수지 수준은 <표 6>에서 제시된 바와 같이 양동면의 경우 총양분공급의 성분별 초과 정도를 보면 질소 140.1%, 인산 69.5%, 칼리 66.4%로 환경에 미치는 부하

표 6 양평균의 지역별·성분별 양분수지충족도

단위: %

지역명	구 분	질소	인산	칼리	계
양평읍	화학비료충족도	80.6	75.2	57.7	72.6
	총양분충족도	172.2	146.9	127.5	153.5
강상면	화학비료충족도	61.1	41.9	38.1	50.2
	총양분충족도	106.6	77.4	76.3	91.3
강하면	화학비료충족도	52.4	38.4	41.9	46.3
	총양분충족도	90.1	71.9	76.6	82.2
양서면	화학비료충족도	144.3	125.3	108.6	129.7
	총양분충족도	166.8	143.1	130.8	151.1
옥천면	화학비료충족도	57.2	42.9	43.3	50.0
	총양분충족도	86.8	69.9	71.1	78.5
서종면	화학비료충족도	55.1	56.5	46.1	52.7
	총양분충족도	80.7	76.1	65.3	75.0
단월면	화학비료충족도	68.8	49.9	45.6	57.8
	총양분충족도	125.6	97.1	98.1	111.2
청운면	화학비료충족도	81.3	66.1	65.1	73.3
	총양분충족도	222.0	187.6	183.3	203.1
양동면	화학비료충족도	80.6	65.4	63.2	72.2
	총양분충족도	240.1	169.5	166.4	203.2
지제면	화학비료충족도	93.2	63.4	70.4	80.1
	총양분충족도	148.2	112.1	118.6	131.8
용문면	화학비료충족도	109.0	80.7	77.9	93.7
	총양분충족도	138.5	102.0	101.9	119.8
개군면	화학비료충족도	61.8	48.0	44.7	53.9
	총양분충족도	159.9	133.1	131.0	145.9
양평균	화학비료충족도	80.9	63.8	60.7	71.3
	총양분충족도	154.1	120.7	118.7	136.5

주: 양분충족도 지표치 가운데 100% 수준은 물질균형을 이룬 상태를 나타내며, 100%를 초과하는 수준은 양분의 과잉공급 수준을 나타냄.

정도가 심한 것으로 나타났다. 이는 양동면의 경우 집약적 가축사육으로 인한 가축분뇨발생량이 많음에도 불구하고 화학비료를 타 지역에 비해 상대적으로 많이 사용하고 있는데 주요한 원인이 있는 것으로 파악된다. 양동면 뿐만 아니라 총양분공급량이 양분요구량을 50% 이상 초과하는 지역은 양평읍, 양서면, 청운면 등으로 나타났다. 이들 지역은 가축사육두수가 타 지역에 비해 많은 것으로 나타나 물질균형 유지를 위해서는 특히 가축분뇨의 효율적인 처리 및 관리가 요구된다. 반면 옥천면의 경우 작물

의 양분요구량 대비 총양분충족도는 질소 86.8%, 인산 69.9%, 칼리 71.1%로 각각 23.2%, 30.1%, 28.9%의 양분이 부족한 것으로 나타났다. 따라서 양평군의 지역단위 물질균형을 달성하기 위해서는 옥천면과 같이 양분이 부족한 지역은 양평읍과 같이 양분이 과잉 공급되는 주변지역으로부터 필요한 양분을 가져올 수 있도록 지역간의 적절한 양분 이동을 유도해야 할 것이다.

<그림 5>~<그림 7>은 양평군의 읍면별 양분수지 현황 및 양분수급의 지역적 격차를 한눈에 볼 수 있게 나타냄으로써

그림 5 양평군 지역 질소질 충족도의 지역 분포

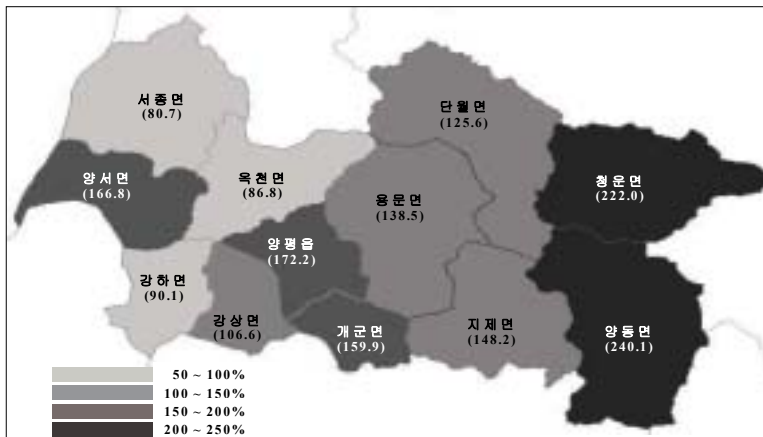


그림 6 양평군 지역 인산질 충족도의 지역 분포

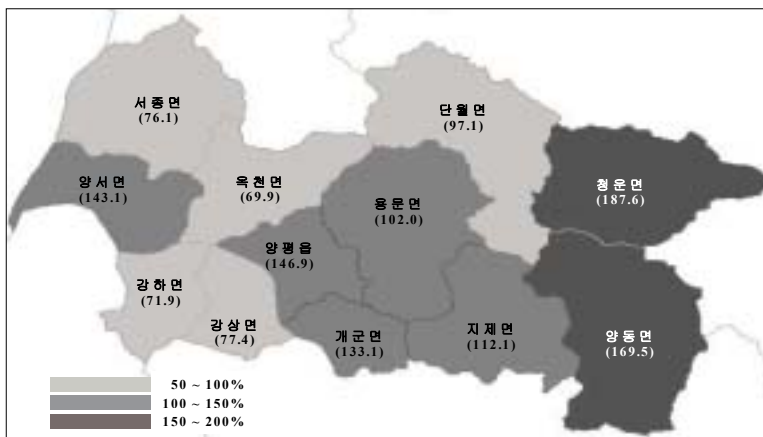
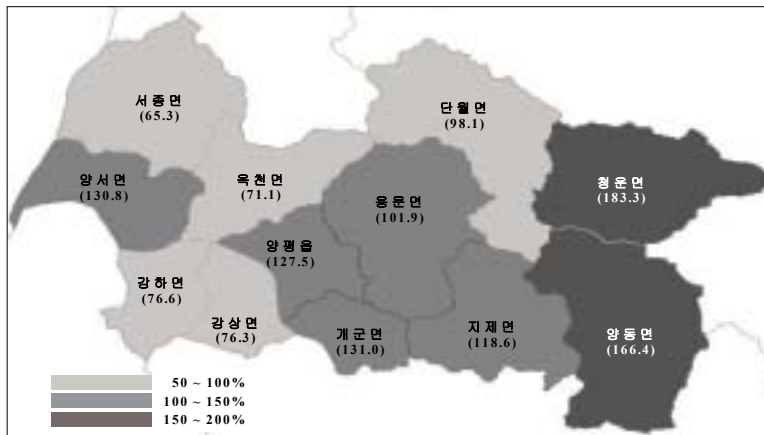


그림 7 양평군 지역 칼리질 충족도의 지역 분포



지역단위 물질균형 유지를 위한 전략 수립의 기초 자료로 활용될 수 있다.

양평군의 질소충족도의 지역적 분포를 살펴보면 서종면, 옥천면, 강하면이 양분요구량을 충족하지 못하고 있으므로 가축분뇨 발생량 및 질소부하량이 심한 인근의 양평읍, 양서면, 개군면 등지에서 가축분뇨를 가져옴으로써 지역간 양분불균형을 해소할 수 있을 것으로 보인다. 한편 양평군의 인산과 칼리의 지역적 분포 형태는 정도의 차이는 있지만 거의 흡사한 것으로 나타났다. 인산질 및 칼리질 양분요구량을 충족시키지 못하는 지역이 5개 면이고 과잉인 지역이 7개 면으로 읍면간 가축분뇨의 이동을 통해 군지역 내의 양분불균형을 해결하는 것은 질소에 비해 수월할 것으로 보인다.

그러나 양평군 전체의 양분 과잉이 질소 54%, 인산 20%, 칼리 19%에 이르므로 지역내에서 물질균형에 도달하기는 쉽지 않을 것으로 보인다. 또한 가축분뇨의 경우 비료성분만을 별도로 구분할 수 없기 때문

에 성분별 지역간 이동을 유도하기는 사실상 불가능하다. 따라서 양분과잉이 가장 심각한 성분을 기준으로 양분이동을 유도하는 전략이 필요하다. 아울러 양평군 지역내 물질 균형에 도달하기 위해서는 지역내에서 발생하는 가축분뇨를 우선 사용하고 그 부족분을 화학비료 형태의 단비(單肥)로 보충하는 방식으로 화학비료 투입량을 줄여 나가도록 해야 한다. 특히 가축분뇨 발생량이 지나치게 많은 경우 가축사육두수를 억제하거나 인접 군지역으로 이동시키는 전략을 개발하여 추진해야 할 것이다.

4.3. 물질수지를 통한 친환경농업 성과 분석

양평군은 농업생태계의 물질순환 모형에서 제시된 무기물 과다 투입에 따른 환경부하의 부정적 영향을 줄이기 위해 여러 가지 정책을 수립하여 추진해 오고 있다. 상수원 보호구역이라는 특수성으로 여러 가지 제약이 부과됨에 따라 친환경농업 육성의 필요성이 타지역보다 절실하여 지역순환형 환경친화적 농업 시스템 구축을 위해 부단

표 7 양평군 작물 양분요구량 및 양분공급 구조 비교

단위: 톤, %, %p

구 분		질소	인산	칼리	계
화학비료공급량	1995년	1,794.0	794.0	875.0	3,463.0
	2001년	949.0	327.0	426.0	1,702.0
	감소율(%)	47.1	58.8	51.3	50.9
가축분뇨공급량	1995년	1,649.5	560.0	782.2	2,991.7
	2001년	1,430.5	486.7	679.8	2,596.9
	감소율(%)	13.3	13.1	13.1	13.2
경지면적당 비료투입도 (kg/10a)	1995년	18.5	8.2	9.0	35.7
	2001년	9.5	3.3	4.3	17.1
	감소율(%)	48.6	60.0	52.7	52.2
경지면적당 가축분뇨투입도 (kg/10a)	1995년	10.2	3.5	4.8	18.5
	2001년	8.6	2.9	4.1	15.6
	감소율(%)	15.7	15.5	15.5	15.6
경지면적당 총양분투입도 (kg/10a)	1995년	28.7	11.7	13.9	54.2
	2001년	18.1	6.2	8.4	32.7
	감소율(%)	36.9	46.7	39.7	9.7
양분수지-화학비료충족도	1995년	147.9	150.6	120.3	140.3
	2001년	80.9	63.8	60.7	71.3
	감소분(%p)	67.0	86.8	59.6	69.0
양분수지-총양분충족도	1995년	229.5	214.4	184.8	213.1
	2001년	154.1	120.7	118.7	136.5
	감소분(%p)	75.4	93.7	66.1	76.6

히 노력해 오고 있다. 1998년부터 “땅을 살

리고, 물을 깨끗이 하고, 자연을 보호하여 인류를 지구상에서 살리기 위한 대사업”으로 「양평환경농업-21(YEAM-21)」을 추진하여 환경의 질적 개선 성과를 거두고 있다.

이러한 양평군의 친환경농업 성과는 관행농법만을 실천했던 1995년과 친환경농업을 실천하고 있는 2001년의 물질양분수지 비교분석을 통해서 알 수 있다(표7 참조).

양평군의 경우 1990년대 후반부터 친환경농업을 실천하는 농가가 늘어나면서 화학비료의 사용량이 현저하게 줄어들었다. 경지면적 당보당 성분별 화학비료 투입량은 1995년의 경우 질소 18.5kg, 인산 8.2kg, 칼리 9kg에서 2001년에는 질소 9.5kg, 인산 3.3kg, 칼리 4.3kg으로 각각 48.6%, 60%, 52.7% 정도 비료 사용량이 감소한 것으로

나타났다.

또한 가축분뇨 발생량의 경우 환경농업 실천 전후의 소와 돼지 등 주요가축의 사육두수가 감소하여 단보당 가축분뇨 성분별 투입량은 1995년에 질소 10.2kg, 인산 3.5kg, 칼리 4.8kg에서 2001년에 질소 8.6kg, 인산 2.9kg, 칼리 4.1kg으로 각각 15.7%, 15.5%, 15.5% 감소한 것으로 나타났다.⁹

이에 따라 단보당 화학비료 및 가축분뇨 투입량을 합한 총양분투입도는 1995년 총 54.2kg에서 2001년 총 32.7kg으로 39.7% 감소하였다. 또한 작물 양분요구량을 충족시키기 위한 화학비료 공급량과 가축분뇨로부터의 실제 양분 공급량을 모두 고려한 경지

⁹ 1995년도 대비 2001년의 가축사육두수 변화를 보면 한우의 경우 41.7%, 젓소 15%, 돼지 20.2% 감소하였고, 닭은 20.2% 증가한 것으로 나타났다.

면적당 총 양분충족도의 초과정도는 1995년 구량에 비해 양분충족도는 초과하고 있지만
의 경우 질소 129.5%, 인산 114.4%, 칼리 친환경농업 실천 이후에 환경에 미치는 부
84.8%에서 2001년에는 질소 54.1%, 인산 하는 상당히 줄어들었음을 제시하고 있다.
20.7%, 칼리 18.7%로 성분별 감소폭은 각각 한편 <표 8>에서 나타난 바와 같이 양평
75.4%p(포인트), 93.7%p, 66.1%p에 이르는 군 읍·면 지역별 총 양분충족도의 변화를
것으로 나타났다. 이는 여전히 작물양분요 비교해 보면 변화 폭이 가장 낮은 양평읍의

표 8 양평군 지역별 총양분충족도 변화

단위: %, %p

지역별	구분	질소	인산	칼리	계
양평읍	1995	188.5	160.8	128.0	164.8
	2001	172.2	146.9	127.5	153.5
	감소분	16.3	13.9	0.5	11.3
강상면	1995	228.9	314.0	187.0	234.9
	2001	106.6	77.4	76.3	91.3
	감소분	122.3	236.6	110.7	143.6
강하면	1995	232.1	207.9	155.7	204.4
	2001	90.1	71.9	76.6	82.2
	감소분	142.0	136.1	79.1	122.2
양서면	1995	287.6	299.7	249.8	278.9
	2001	166.8	143.1	130.8	151.1
	감소분	120.9	156.6	119.1	127.8
옥천면	1995	161.1	154.5	118.7	147.3
	2001	86.8	69.9	71.1	78.5
	감소분	74.3	84.6	47.6	68.7
서종면	1995	156.1	150.8	125.1	145.7
	2001	80.7	76.1	65.3	75.0
	감소분	75.4	74.7	59.8	70.7
단월면	1995	205.9	197.3	171.5	193.8
	2001	125.6	97.1	98.1	111.2
	감소분	80.2	100.1	73.4	82.6
청운면	1995	286.2	220.6	275.9	269.0
	2001	222.0	187.6	183.3	203.1
	감소분	64.2	33.0	92.6	65.9
양동면	1995	320.9	265.4	240.0	284.8
	2001	240.1	169.5	166.4	203.2
	감소분	80.8	95.9	73.6	81.6
지제면	1995	219.1	210.5	179.4	205.6
	2001	148.2	112.1	118.6	131.8
	감소분	70.9	98.4	60.9	73.9
용문면	1995	185.0	172.5	150.3	172.0
	2001	138.5	102.0	101.9	119.8
	감소분	46.5	70.5	48.4	52.1
개군면	1995	239.7	229.2	203.0	226.7
	2001	159.9	133.1	131.0	145.9
	감소분	79.7	96.0	72.0	80.9
양평군	1995	229.5	214.4	184.8	213.1
	2001	154.1	120.7	118.7	136.5
	감소분	75.4	93.7	66.1	76.5

경우 2001년 질소, 인산, 칼리의 총축도가 1995년에 비해 각각 16.3%p, 13.9%p, 0.5%p 감소하는데 그친 것으로 나타났다. 반면, 전체적인 변화 폭이 가장 큰 강상면의 경우 총 양분총축도가 1995년에 비해 각각 122.3%p, 236.6%p, 110.7%p로 큰 폭으로 감소하여 읍면별 양분총축도의 변화 격차가 매우 큰 것으로 나타났다.¹⁰ 즉, 양평군의 지역순환형 환경친화적 농업 시스템 구축의 성과는 지역별 차이는 있지만 전체적으로 상당한 개선효과를 가져온 것으로 평가된다.¹¹

5. 지역단위 물질순환 분석을 통한 친환경농업 발전방안

5.1. 지역단위 농업환경모형의 정교화

지역단위 농업환경모형을 정교화하고 체계화하기 위해서는 여러 가지 추가적인 자료 및 지표의 개발이 필요하다.

우선 지역단위 개별 농가들의 영농작업 기록대장을 비치하여 농가들이 토지별·작목별 화학비료 투입량, 농약사용량 및 가축

분뇨퇴비 및 액비의 투입량 등을 기록토록 해야 할 것이다. 향후 이들 자료를 DB화하여 지역단위 농업환경모형 구축, 환경개선 성과분석, 친환경농업발전 계획 수립의 기초 자료로 활용할 수 있다. 양평군의 경우 2002년부터 “친환경농업 실천 영농작업기록 및 관리대장”을 친환경농업 실천농가에게 배부하여 작성토록 하고 있다. 실제로 농가들이 영농작업 기록에 적극 참여할 수 있도록 인센티브를 제공하는 방안이 적극 추진되어야 할 것이다.

다음으로 지역단위 농업환경실태에 관한 현황자료 이외에 생태환경 모니터링 및 세부 권역별 오염부하에 관한 파라미터 산출에 관한 연구도 지속되어야 할 것이다. 물질순환모형의 정교화를 위해 지역단위 총체적 양분 흐름에 관한 자료, 화학비료의 유실량에 관한 자료, 시설재배지의 양분 유출에 관한 자료, 농산부산물의 농지환원 유기물량, 비료 성분의 작물 흡수량, 친환경농법별 환경영향 평가에 관한 자료 등이 지속적으로 제공되어야 할 것이다.

5.2. 지역단위 물질균형 달성 방안

작물의 양분요구량과 양분공급량이 균형을 이루는 것은 토양비옥도 유지 및 고품질 농산물 생산, 환경오염의 방지, 그리고 장기간의 농업 생산성 유지를 위해 필수적이다. 지역단위 물질균형을 달성하기 위한 방안으로는 농업생태계의 물질순환에 관한 이론적 분석에서 제시된 바와 같이 크게 세 가지를 고려할 수 있다.

첫째, 지역단위 물질균형을 위해 가장 우

¹⁰ 양평읍의 경우 1995년 대비 2001년도 비료사용량(성분량 기준) 감소폭은 질소 34.7%, 인산 29.0%, 칼리 21.0%인 반면, 가축사육두수 감소폭은 한우 5.5%, 젖소 18.3%, 돼지 16.9%, 닭 9.3%로 나타났다. 한편 강상면의 경우 동기간 대비 질소 66.2%, 인산 85%, 칼리 71.2%로 큰 폭으로 줄어들었고, 또한 가축사육두수의 경우도 한우 57.1%, 젖소 38%, 돼지 56.5%, 닭 41.2% 등으로 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다.

¹¹ 양평군 전체 농가중 친환경농업 실천농가의 비중은 1997년 4.2%에서 2002년에는 50.6%로 큰 폭으로 증가하여 친환경농업의 실천은 거의 정착단계에 이르고 있다.

표 9 농업부문 물질순환모형 정교화를 위해 필요한 자료

필요 자료	내용
지역단위 총체적 양분흐름	농가별 양분 투입실태 파악, 토양의 질소수지에 관한 계량적 지표, 물질별(식품, 배합사료, 음식물 잔반 등) 질소함량 지표, 가축분뇨 자원화의 동태적 양분이용도
화학비료의 유실량	화학비료의 성분별 지하유실량 파악
시설재배지 양분유출	시설재배지의 양분이용 및 양분유출 등 양분흐름에 대한 파악
농산 부산물의 농지환원 유기물량	볏짚 등 부산물의 농지환원 유기물량 파악
비료 성분의 작물흡수량	농업환경에 유출되는 비료 성분의 양을 작물, 시비방법, 토양조건, 비료종류 등을 고려하여 추정
친환경농법별 환경영향 평가	저투입농업(무농약농법)과 유기농법(오리농법, 우렁이농법 등)의 환경부하 정도 파악
농업생태계의 에너지 흐름	작물별 생산에 따른 에너지(재생가능에너지와 재생불가능에너지)의 투입과 산출, 자재별 에너지 환산계수
농약이용의 환경영향 평가	지역단위 농약사용량과 작물별 농약이용에 따른 환경영향 평가

선적으로 고려되어야 할 사항은 화학비료 사용량을 감축하는 것이다. 양분수지 분석을 통해서 양분 과잉지역의 경우 지역 내에서 발생하는 가축분뇨를 우선적으로 양분공급원으로 사용하고 그 부족분을 화학비료로 보충하는 방식으로 화학비료 사용량을 줄여야 할 것이다. 만약 가축분뇨만으로 경작지 토양의 양분축적이 충분하다면 무화학비료 농법도 고려할 수 있을 것이다. 양평군의 경우 가축분뇨의 자원화를 통한 양분충족도가 질소 73.2%, 인산 57%, 칼리 58%이므로 양분요구량 대비 화학비료를 질소 26.8%, 인산 43%, 칼리 42% 정도만 충족시켜도 될 것이다. 따라서 양평군은 화학비료 투입량을 현 수준보다 질소 67%, 인산 32.5%, 칼리 31% 정도 줄일 수 있어 단보당 화학비료를 질소 3.2kg, 인산 2.2kg, 칼리 3kg만 투입하면 물질수지 균형에 도달할 수 있을 것이다. 이 경우 화학비료의 시비방식을 기존의 복비 위주에서 단비나 BB비료를 사용하는 방식으로 바꾸는 것보다 효과적일 것이다.

둘째, 만약 여러 가지 여건상 가축분뇨 발생량이 그 지역의 토지에서 수용할 수 있는 양을 초과할 경우에는 가축분뇨 발생량을 줄이는 방안을 강구해야 한다. 우선 단기적으로는 지역의 가축분뇨 처리용량을 초과하여 환경피해를 야기할 경우 적정 가축사육두수를 설정하여 축산농가의 가축사육두수의 감축을 유도하는 전략이 필요할 것이다. 또한 장기적으로는 유기농업 단지와 연계된 유기축산의 육성이 바람직한 전략이 될 수 있을 것이다. 유기축산을 육성하면 가축사양에 있어서 농후사료의 투여를 줄이고 조사료 비중을 늘려서 가축분뇨 발생량도 줄어들고 분뇨내 비료성분량도 줄어들 수 있을 것이다. 또한 가축군의 유전적 성장잠재력을 극대화할 수 있는 기술을 개발하여 질소와 인산을 다량 함유한 농후사료 급여를 최소화하여 비료성분의 배출을 줄이는 방법이 현실화될 수 있도록 지속적인 연구·개발이 추진되어야 할 것이다.

셋째, 읍면단위 양분균형 분석을 기초로 군지역 내에서 경종-축산의 원활한 연계를

통한 물질균형이 이루어지지 않을 경우 광역단위로 확대하여 과잉양분 발생지역에서 양분부족 지역으로 양분을 이동시키는 방안도 강구할 수 있을 것이다. 이를 위해 현재 지역별로 운영 중에 있는 축분비료유통센터를 “지역순환농업지원센터”로 개편하여 보다 활성화될 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다.

물론 위에서 제시한 이들 방안이 효과적으로 이루어지기 위해서는 몇 가지 선행조건이 충족되어야 할 것이다. 우선 가축분뇨를 지역 내에서 효과적으로 자원화하기 위해서는 경종농가와 축산농가의 적절한 연계방안이 마련되어야 하며, 아울러 가축분뇨의 저장성, 수송성, 취급성 및 비료성분의 안정성과 균질성을 향상시킬 수 있는 기술 및 조직이 확립되어야 할 것이다. 특히 가축분뇨처리 수용능력을 상당히 초과하여 가축이 사육되는 경우 가축사육 쿼터제 및 가축사육권(livestock production right) 거래제 등도 검토되어야 할 것이다. 또한 중장기적으로는 현재 네덜란드에서 운영하고 있는 무기물산정시스템(Mineral Accounting System, MINAS)의 도입을 통해서 양분의 발생량 및 사용량을 정확히 기재하고, 영농장부의 기록을 통해서 작물재배 면적 및 양분요구량을 정확히 파악하여 물질균형을 유도하는 제도적인 장치도 도입되어야 할 것이다.¹² 또한 경종과 축산의 유기적인 연

계를 위해서는 민간업체가 참여하는 방안도 적극 검토하여야 할 것이다. 이러한 선행 조건들이 단계적으로 갖추어지면 지역단위의 물질균형을 달성할 수 있는 최적관리시스템이 구축될 수 있을 것이며 환경친화적인 농축산업도 정착될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 권영근, 허헌중(역). 2002. 「순환의 경제학」. 室田 武, 多辺田 政弘(저). 삼신각.
- 김완배 등 4인. 1999. 「양평환경농업-21」 추진 계획 수립을 위한 연구」. 서울대학교 농업개발연구소.
- 김진수, 오광영. 2000. “농촌지역에서의 유기물 흐름의 평가.” 「한국농공학회지」 42(5). pp.114-124.
- 김창길, 김정호. 2002. 「지속가능한 농업 발전 전략」. C2002-13. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 강창용. 2002. 「지역단위 농업환경모형의 체계화에 관한 연구」. 연구보고 R441. 한국농촌경제연구원.
- 김춘수, 최홍림, 강성모. 1995. 「분뇨 처리 시스템 개선 및 자원화기술 개발」. 농촌진흥청.
- 농림부. 2001. 「친환경농업육성법령집」.
- 농업과학기술원. 1999. 「작물별 시비처방기준」.
- 농업과학기술원. 2000. 「밭 토양환경보전 관리기술 종합보고서 (1995 -1999)」.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1992. 「증보 한국 토양해설」. 토양조사자료 13.
- 농촌진흥청. 2001. 「2000 농축산물소득자료집」, 을 지불하는 제도이다. 1998년 처음으로 일정 규모의 양축농가를 대상으로 도입된 이래 2001년부터는 전농가를 대상으로 의무적으로 시행하고 있으며, 이 제도가 물질균형 유지에 상당한 기여를 한 것으로 평가되고 있다 (MANMF, 2002).

¹² 무기물기장 시스템 제도는 영농장부를 기초로 농민들이 스스로 각자의 농장에 대한 무기물 투입과 산출을 기초로 손실을 계산하여, 정부에서 제시된 단위 면적당 양분수용 수준을 초과하여 양분 투입이 이루어지는 경우 과징금

- 농업경영연구보고 제66호.
- 농협중앙회. 1999. 「개정증보판- 흙 살리기와 시비기술」, 비료 No 1-4.
- 류순호, 노희명. 1996. 「한국의 지형 및 영농형태에 적합한 농업환경오염예측모형 개발」, 농촌진흥청.
- 박승우 등 8인. 2000. 「농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리 시스템 개발 사업」, ARPC 최종보고서. 농림부.
- 서보훈. 2002. “국내 BMW기술 보고.” 아시아 BMW 기술교류회실행위원회. 「아시아 BMW기술교류회 자료집」, pp.128-138.
- 양평군. 2001. 「양평환경농업-21(YEAM-21)」.
- 양평군. 2002. 「2002 양평통계연보」. 제42회.
- 엄기철 등 8인. 2002. 「권역별 환경농업모형 개발에 관한 연구」. ARPC 최종보고서. 농림부.
- 이병욱. 1998. 「환경경영론」. 비봉출판사.
- 이승현, 최우정. 2002. “농업생태계의 특징과 지속가능 관리 방안.” 농업기반공사. 「농어촌과 환경」. No. 76. pp.100-112.
- 이 연 등 5인. 2003. “한국농경지의 양분수지와 문제점.” 농업과학기술원. 「양분수지를 이용한 친환경농업 실천방안 심포지움 자료집」. pp.35-59.
- 임경수. 1998. 「쌀 경작체계의 환경친화성에 관한 연구」. 서울대학교 환경대학원. 공학박사학위논문.
- 최지용, 신은성. 1998. 「농업지역 비점오염원 관리방안 연구」. 한국환경정책·평가연구원.
- 통계청. 2002. 「2000 농업총조사보고서」 경기도.
- 허 장, 정은미, 김창길. 2000. 「지역단위 농업환경모형 개발에 관한 기초연구」. 연구보고 R417. 한국농촌경제연구원.
- 農林水産省農業環境技術研究所編. 2000. 「農業におけるライフサイクルアセスメント」. 東京: 養賢堂.
- 松本成夫. 1998. “農業生態界の物質循環.” 陽 悽行 編著. 「環境保全と農林業」. 朝昌書店. pp.157-167.
- 合田素行. 2000. “物質循環から見た農村社會の自足型社會への轉換可能性.” 農業綜合研究所, 「持續的農業と農村の發展を目標して一所内プロジェクト研究成果」. pp.66-73.
- Ayres, Rober U. “Eco-thermodynamics: Economics and the Second Law.” *Ecological Economics* 26(1998): 189-209.
- Bontkes, T.S. and H. van Keulen. “Modelling the Dynamics of Agricultural Development at Farm and Regional Level.” *Agricultural Systems* 76(2003): 379-396.
- Dijk, Jan, Hans Leneman and Marianne van der Veen. “The Nutrient Flow Model for Dutch Agriculture: A Toll for Environment Policy Evaluation.” *Journal of Environmental Management* 46(1996): 43-55.
- Harris, Jonathan M. and Scott Kennedy. “Carrying Capacity in Agriculture: Global and Regional Issues.” *Ecological Economics* 29(1999): 443-461.
- Kneese, Allen V., Robert U. Ayres and Ralph C. D’Arge. 1970. *Economics and the Environment: A Materials Balance Approach*, Washington, D.C.: Resources for the Future.
- Midwest Plan Service. 1993. *Livestock Waste Facilities Handbook*, MWPS-18.
- Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries (MANMF). 2002. *Manure and the Environment: The Dutch Approach to Reduce the Mineral Surplus and Ammonia Volatilization*, The Netherlands.
- Pearce, David W. and R. Kerry Turner. 1990.

- Economics of Natural Resources and the Environment*, Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- Schroder, Hans. "Input Management of Nitrogen in Agriculture." *Ecological Economics* 13(1995): 125-140.
- Steinborn, Wolf and Yuri Svirezhev. "Entropy as an Indicator of Sustainability in Agro-Ecosystems: North Germany Case Study." *Ecological Modelling* 133(2000): 247-257.
- Tivy, Joy. 1990. *Agricultural Ecology*, Harlow, U.K.: Longman Scientific & Technical.
- USDA, Soil Conservation Service. 1992. *Agricultural Waste Management Field Handbook*.
- van Eerd, M.M. and P.K.N. Fong. "The Monitoring of Nitrogen Surpluses from Agriculture." *Environmental Pollution* 102(1998): 227-233.
- Zessner, Matthias and Christoph Lampert. "The Use of Regional Balances in Water Quality Management." *Urban Water* 4(2002): 73-83.

■ 원고접수일 : 2003년 11월 5일
 원고심사일 : 2003년 11월 6일
 심사완료일 : 2003년 12월 15일