

가축·비료부문 양분 생성 저감의 경제적 효과*

권오상** 정학균***

Keywords

농업 영양물질(Agricultural Nutrients), 인 배출권(Phosphorus Emission Permit), 연산일반균형모형(Computable General Equilibrium Model), 후생효과(Welfare Effects)

Abstract

This study analyzes the general equilibrium impacts of regulating agricultural phosphorus emissions in Korea. A static computable general equilibrium model is constructed for the analysis. The study introduces a hypothetical phosphorus emission trading scheme that aims to reduce 10 percent of the total emission from the livestock sector in 2015. Scenario 1 of the analysis assumes that both livestock and fertilizer industries are subject to the regulation, while Scenario 2 assumes that only the livestock industry is subject to the regulation. The government's emission permit revenue is recycled so that farm households maintain their pre-regulation welfare level. The welfare cost of non-farm households is about 0.4 percent of their total expenditure under both scenarios. The result shows that the marginal abatement cost of Scenario 2 is about 50 percent higher than that of Scenario 1. Although those two policy scenarios result in very similar simulated overall welfare impacts, they have substantial differences in industry-specific effects on domestic production, consumer price, and import/export.

차례

- 1. 서론
- 2. 분석모형 구축
- 3. 양분 저감 정책의 도입과 효과 분석
- 4. 요약 및 결론

* 본 논문은 서울대학교 산학협력단이 수행한 『축산환경개선 기본계획수립을 위한 정책연구』의 일부 내용을 분석모형과 자료를 개선하고 재분석하여 논문 형식으로 작성한 것이며, 연구 의뢰기관의 공식 입장과는 관련이 없는 저자들의 개인 학술저작물임. SAM 구축과 일부 도표 작성에 도움을 준 서울대학교 대학원의 이승호, 한미진, 박윤선 학생에게 감사드립니다.

** 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학전공 및 글로벌 스마트팜 융합전공 교수, 농업생명과학연구원 겸무연구원, 호카이도대학교 GCF-Agr 초빙교수, 교신저자. e-mail: kohsang@snu.ac.kr

*** 한국농촌경제연구원 연구위원

1. 서론

농업부문은 다른 산업과 달리 국가 경제 성장에도 불구하고 그 생산 규모가 크게 늘어나지 않고, 또한 농가는 도시가구에 비해 소득이 상대적으로 낮은 어려움을 겪고 있다. 이런 상황에서 한국 농업이 직면하는 또 다른 어려움 중 하나는 농업 환경오염 부하를 줄일 것에 대한 요구가 갈수록 커진다는 것이다. 농업 생산 활동은 농촌 공간의 자원 관리와 환경 개선에 기여하기도 하지만, 특히 생산 과정에서 배출되는 질소, 인, 칼륨과 같은 양분(nutrients)은 농촌을 넘어 국가 전체의 수질·토양 오염원 중 하나가 되고 있다. 아울러 경종과 축산부문은 비에너지원 온실가스를 배출하는 대표적인 산업부문이라 기후변화 대처 책임에서도 자유롭지 않다. 또한 가축 사육과정이나 분뇨를 농지에 살포하는 과정에서 발생하는 암모니아와 악취는 농촌지역 주민 간 가장 큰 환경 분쟁 요인이 되고 있다. 따라서 어떻게 하여야 농업 생산을 위축시키지 않으면서도 환경 부하를 줄일 것인지가 국가적인 과제가 되고 있다.

우리 농업 생산은 협소한 국토에서 집약적으로 이루어지기 때문에 환경 부하가 높을 수밖에 없는 근본적인 한계를 가지고 있다. 특히 농가소득원으로서 축산업의 비중이 커지면서 가축분뇨의 수질 오염과 악취 문제의 심각성도 커지고 있다. 축산업은 경종부문과 달리 생산 규모가 지속적으로 커지고 있는데, 통계청 『가축동향조사』 자료에 의하면 2020년 3/4분기의 한육우 사육두수는 약 340만 두로서, 2014년 이래 분기별 사육두수로는 가장 큰 수치를 보인다. 2020년 3/4분기의 돼지 사육두수는 약 1,140만 두이고, 이는 2017년 이래 몇몇 분기를 제외하고는 가장 큰 수치이다. 이렇게 성장하는 축산부문은 생산 규모 면에서 쌀을 제치고 우리 농업의 대표적인 품목으로 이미 오래전에 자리 잡았다. OECD(2017, Annex 1.C)에 따르면, 한국은 2013년 기준 OECD 회원국 중 네덜란드 다음으로 가축 사육밀도가 높은 나라이다.

한편, 비료는 여전히 필수적인 경종 투입물이고, 농업 생산의 가장 중요한 중간 투입재 중 하나이다. 비료부문에서는 화학비료의 생산과 소비가 주된 양분 생성원이지만, 축산분뇨가 유기질비료로 사용되는 양도 있기 때문에 비료부문은 양분 발생 측면에서는 축산부문과 일종의 대체/보완관계를 형성하고, 긴밀한 관계를 맺고 있다.

경종부문의 필수 투입요소인 비료와 축산부문에서 계속 늘어나는 가축 사육두수는 이 두 부문으

로부터 생성·배출되는 각종 양분의 관리 문제를 심각한 과제로 제시하고 있다. 양분 관리에는 크게 생성량 혹은 배출량 자체를 줄이는 방안과 이미 생성된 가축분뇨/양분을 처리하는 방법을 개선하여 환경 부하를 줄이는 방안, 두 가지를 사용할 수 있다. 두 번째의 처리 방법과 관련해서는 가축분뇨의 자원/에너지화, 정화 처리, 농지 살포 등의 방법을 사용할 수 있고 국내에서도 이러한 처리 방법과 관련하여 각종 정책과 지원이 실행되고 있다. 첫 번째의 생성량 자체를 줄이는 방안은 필연적으로 경작면적이나 사육두수의 감소를 요구하기 때문에 농업 생산 규모 감소를 크게 우려하는 국내 현실에서는 쉽게 추진하기 어려운 방법이다. 그러나 전체 생성량을 줄이지 않는 상태에서 처리 방법 개선만으로 양분 과잉 문제를 해결하는 데에는 근본적인 한계가 있을 것이다. 가축분뇨의 해양 투기가 국가 간 협정에 의해 금지된 상태이고, 우리의 경우 분뇨의 해외 수출/이전도 거의 불가능하기 때문에 처리 방식 개선만으로는 문제 해결에 한계가 있다.

해외의 실제 사례를 보면, 지난 30여 년 동안 주요 농업 생산국의 위치를 유지하면서도 양분, 특히 인의 배출을 크게 감소시키는 데 성공한 네덜란드의 경우 가축분뇨와 비료의 가공·처리 방법, 농지 살포량과 살포 방법 등에 관한 규제를 실행하면서도, 축산과 경종부문에서의 인 생성량을 줄이도록 유도하는 정책도 지속적으로 함께 사용하여 왔음이 확인된다. 하지만 이러한 생성량 감소 정책이 농업 생산자와 소비자들에 의해 채택될 수 있는지를 확인하고, 적절한 정책을 찾으려는 노력을 시행하기 위해서는, 그러한 저감 정책이 유발하는 경제적 효과, 특히 비용이 어느 정도인지를 계량적으로 분석할 필요가 있다.

본고는 따라서 한국에서 비료부문과 축산부문이 생성·배출하는 양분을 정책수단을 매개로 하여 줄일 때 어떤 경제적 변화가 발생하는지를 분석하고자 한다. 분석모형으로는 농가와 비농가 두 가지 가구 형태, 그리고 36개의 산업을 가지는 경제 전체의 일반균형(computable general equilibrium: CGE)모형을 사용한다. 실측 자료로서는 가장 최근 자료인 2015년 산업연관표를 기준으로 구축한 CGE모형을 이용하되, 해외 정책 사례 등을 참고하여 2015년에 우리나라 축산부문이 배출했던 인 총 배출량의 10%를 저감하는 경우 발생하는 경제적 효과를 시뮬레이션을 통해 분석한다.

이러한 저감을 유도할 수 있는 정책수단으로는 규제 정책이지만 경제적 유인을 활용하는 제도로써, 인을 대상으로 적용되는 배출권거래제를 검토한다. 그리고 이 정책이 축산부문에 대해서만 적용될 경우와 축산부문과 비료부문에 동시에 적용될 경우의 효과를 각각 분석하도록 한다. 이 두 가지 시나리오별 경제적 효과를 분석하되, 정책 도입에 따른 농업부문 손실이 발생하지 않도록 정부

가 소득이전 정책을 병행하여 농가의 후생 수준은 정책 도입 이전과 동일하게 유지할 때의 효과를 분석하도록 한다. 본고는 이와 같은 분석을 통해 정책의 후생효과와 더불어 부문별 국내 생산, 가격, 그리고 수출입 및 인 배출량 변화에 미치는 영향을 비교하여 제시한다.

그동안 농업부문의 양분 과다 배출 문제와 관련해서는 권오상 외(2017), 성재훈 외(2020), 지인배 외(2014), 그 외 여러 연구들이 이 문제를 완화하고 축산부문의 친환경성을 제고하기 위한 국민들의 지불의사를 추정하였다. 하지만 이 연구들은 배출 저감을 위해 지불해야 하는 사회적 비용을 분석한 연구는 아니다. 또한 인을 포함하는 양분 배출량을 제한하기 위해 송주호 외(2004)가 사육두수 총량제, 그리고 김창길 외(2015)가 양분 총량제 등의 도입 가능성을 연구했지만, 총량 제한의 경제적 효과를 계량분석하는 단계까지 이르지 못했다는 점에 있어서도 본고는 선행연구들과 차별화된다.

본고의 제2장은 분석모형과 그 구축과정에 대해 설명한다. 제3장은 시나리오별 효과분석의 실행과 그 결과를 설명한다. 마지막 제4장은 논문을 요약하고 결론을 내린다.

2. 분석모형 구축

2.1. 관련 연구 검토

서론에서 밝힌 바와 같이 본고의 주제와 관련하여, 국내에서는 송주호 외(2004)가 사육두수 총량제, 그리고 김창길 외(2015)가 양분 총량제 등의 도입 가능성을 연구했지만, 정책효과의 계량적 분석은 시행하지 않았다. 사실 해외에서도 본고처럼 양분 생성량 규제를 배출권거래제와 같은 정책 매개를 통해 시행할 때의 일반균형효과 분석을 시행한 사례는 찾기 어렵다. 우선 질소, 인 등의 양분을 배출부과금이나 배출권거래제와 같은 경제적 유인제도를 이용해 규제한 사례가 스웨덴, 덴마크, 핀란드, 오스트리아, 네덜란드 등의 일부 유럽국가에서만 주로 관찰이 되고, 특히 양분 규제를 위해 거래가 되는 배출권을 정책수단으로 도입한 사례는 네덜란드 외에는 찾기 어렵기 때문에(Wossink 2004: 99), 관련 선행연구를 구하기가 어렵다. 아울러 방법론 측면에서도 본고가 사용하는 CGE분

석법은 농업부문 고유 정책의 효과분석보다는 국가 경제 전체에 공히 적용되는 정책효과 분석에 주로 사용되었고, 농업부문에 초점을 맞춘 연구도 Mardones and Lipski(2020)처럼 양분보다는 온실가스 배출 규제와 관련하여 최근에 등장하고 있다. 다만 크로아티아를 대상으로 하는 Jelić and Šimurina(2020)의 최근 연구가 CGE모형을 이용해 질소에 대한 배출부과금 도입의 효과를 분석하고 있다.

본고가 분석 대상 정책의 설계에 많이 참조하고 있는 네덜란드의 양분 저감 정책에 대한 설명과 효과분석은 Backus(2017), Oenema and Berentsen(2005) 등이 행하고 있지만 계량분석에 기초를 둔 엄밀한 논의는 아니며, 특히 배출권거래제를 통한 양분 생성 억제 정책에 초점을 둔 논의도 아니다. 반면 Wossink(2004, 2000), 그리고 Wossink and Gardebroek(2006)는 CGE분석법을 적용한 것은 아니지만 네덜란드의 인 배출권거래제에 초점을 맞추어 정책의 동향, 성과 등을 정리하였고, 정책이 가지는 불확실성이 배출권에 대한 투자 행위에 미치는 영향 등을 실증분석하였다. 본고는 이들 선행연구들이 제공하는 정보를 분석 대상 정책의 설계에 반영하였다.

2.2. CGE모형의 구축

본고가 사용하는 분석모형은 Löfgren et al.(2002), Burfisher(2017) 등이 자세히 설명하는 비교적 표준적인 1국가 정태 CGE모형이지만, 소비자를 도시가구와 농가로 구분하는 다소비자 모형이다. 또한 개방경제를 가정하며, 정부가 여러 종류의 조세 및 보조 정책을 통해 경제에 개입하는 모형이다.

소비자들은 선형지출체계(Linear Expenditure System: LES)를 효용함수로 가지고 있다. LES의 파라미터 식별을 위해서는 각 소비재 수요의 자기가격 탄력성과 Frisch파라미터가 필요한데, 전자의 경우 가계동향조사 자료를 이용해 가능한 한 세분된 소비재의 수요 행위를 분석한 박윤선(2021)이 제시하는 탄력성 추정치를 사용하였고, 후자는 관련 기존 연구의 수치를 감안하여 -1.1을 적용하였다.¹

¹ Frisch파라미터는 Clements et al.(2020)의 주요 선진국 자료 추정치를 반영하였다. 본고는 소비자를 농가와 비농가로 구분하는데, 두 가지 가구 유형 간 수요함수의 유의미한 차이를 실증적으로 보여주는 선행연구 결과를 얻기 어렵기 때문에 두 유형의 가구는 동일한 효용함수를 가진다고 가정하였다. 하지만 두 유형의 가구는 소비에 사용할 수 있는 소득과 정부 지원금 액수 등에 있어 차이가 있다.

소비자들은 보유한 자본과 노동력으로부터 소득을 얻으며, 기준 연도인 2015년의 실제 저축률을 반영하는 저축 행위를 한다. 본고가 2015년 산업연관표를 이용해 구축한 사회계정행렬(social accounting matrix: SAM)에서 농림업부문에 투입된 자본량과 노동량을 모두 합한 것을 각각 농가의 자본보유량과 노동보유량으로 간주하였고, 나머지 산업에 투입된 자본과 노동의 합은 비농가의 자본보유량과 노동보유량으로 간주하였다.² 각 유형의 가구는 이와 같이 보유한 노동과 자본으로부터 얻은 소득을 효용을 극대화하도록 소비하는 데 사용하고, 일부는 저축한다.

경제의 생산부문은 <표 1>과 같이 총 36개 산업으로 분할된다. 이 산업분류는 농축산부문은 최대의 세분되게 분류하는 방식이다. 생산함수로는 [노동-자본] 복합투입재와 사료가 연이어 CES(constant elasticity of substitution) 함수를 통해 결합되어 ([노동-자본]-사료) 복합투입재가 만들어지고, 이어서 이 ([노동-자본]-사료) 투입재가 사료를 제외한 여타 중간투입재와 Leontief 결합하는 계층(nested) CES함수가 사용된다. 인 배출 저감을 목표로 하는 정책분석의 특성에 맞게 단일 투입물로서는 인을 가장 많이 배출하는 사료의 역할을 강조하기 위해 이런 생산함수 설정법을 사용하였지만, 생산함수는 이 외에도 다양한 방식으로 설정될 수 있다.

노동과 자본의 결합 시, 그리고 [노동-자본] 복합재와 사료의 결합 시에는 각각 CES함수의 대체탄력성 값을 부여하여야 한다. 마지막 단계에서 ([노동-자본]-사료) 복합재와 여타 중간투입재가 결합될 때에는 Leontief 결합이므로 대체탄력성은 0의 값을 가진다. 계층단계별 CES 생산함수의 대체탄력성 추정치는 경제 전체 35개 산업의 계층 CES 대체탄력성을 추정한 권오상 외(2018)와 한국환경정책·평가연구원(2021)의 탄력성 추정치를 반영하였다. 이들 연구에서는 대부분 산업에서의 대체탄력성이 1에 가깝게 추정되었기 때문에 본 연구에서는 0.9를 노동-자본 결합에 적용하였다. 다만 사료와 [노동-자본] 복합재 간의 대체탄력성에 관해서는 관련 선행연구나 근거 자료를 찾을 수 없는 문제가 있었다. 사료는 반드시 필요한 가축 영양원이라는 점에서 노동, 자본, 여타 중간투입재와는 차별화되고 따라서 사료와 다른 투입물 간의 대체탄력성은 매우 낮을 것으로 생각되지

2 가구 유형별 자본과 노동 보유량은 이 방법 외에도 이한빈·권오상(2015)이 시도한 바와 같이 농가와 도시가구의 수, 자산보유 현황, 평균소득의 차이 등을 반영해 정해줄 수도 있고, 이 방식을 실제로 본고의 분석에 적용해보기도 하였다. 본고의 분석에서는 가구 유형별 자본량과 노동량 배분 방식의 선택은 최종 분석 결과에 민감한 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3 양분은 가축 사육과정이나 비료 시비과정에서 “생성”되지만 사후 처리 정도에 따라 자연으로 “배출”되는 양이 달라지므로 배출량과 생성량은 같다고 볼 수 없다. 본고의 주 관심은 양분의 생성량에 있지만, 환경 관련 문헌에서는 배출량이라는 용어가 보다 일반적으로 사용됨을 감안해 두 용어를 혼용하기로 한다.

만,4 자본장비나 축사시설, 사육지 면적, 관리 노동력 등 여러 조건에 의해 사료 효율이 달라질 수 있어 대체탄력성을 0이라 볼 수도 없다. 이런 두 가지 측면을 모두 감안하여 사료와 [노동-자본] 복합재 간의 대체탄력성은 가능한 한 작은 값으로 하되, 모형의 안정성을 저해하지 않는 수준에서의 값을 선택하도록 하였다. 이 기준에 따라 0.3을 [노동-자본] 복합재와 사료 간의 대체탄력성으로 부여하였다.

표 1. 산업구분

번호	산업	번호	산업
1	벼	19	살충제 및 농약
2	채소	20	농림어업서비스
3	과실	21	하수, 폐수 및 분뇨 처리(가축분뇨 처리 포함)
4	화훼	22	광산품
5	기타농산물	23	섬유 및 가죽제품/목재 및 종이, 인쇄
6	낙농	24	석탄 및 석유제품/화학제품
7	축우	25	1차 금속제품/금속가공제품
8	양돈	26	컴퓨터, 전자 및 광학기기/전기장비
9	가금	27	기계 및 장비/운송장비
10	기타축산	28	비금속광물제품/기타제조업 제품/제조임가공 및 산업용 장비수리
11	임업	29	전력, 가스 및 증기
12	수산물/수산가공품	30	수도 및 폐기물 처리, 재활용서비스(하수, 폐수 및 분뇨 처리 제외)
13	육류 및 육가공품	31	건설
14	낙농품	32	도소매 및 상품증개서비스/운송서비스
15	정곡	33	음식점 및 주점
16	음식료품	34	정보통신 및 방송서비스/금융 및 보험서비스/부동산서비스/전문, 과학 및 기술 서비스/사업지원서비스
17	사료	35	공공행정, 국방 및 사회보장/교육서비스/보건 및 사회복지 서비스
18	비료 및 질소화합물	36	숙박서비스/예술, 스포츠 및 여가 관련 서비스/기타서비스

주: 본고가 한국은행의 2015년 실측 산업연관표를 반영해 설정한 분류 방식임.

각 산업의 산출물은 국내시장에 공급되기도 하고 해외에 수출되기도 한다. 산출물은 국내와 해외 판매수입의 합을 극대화하도록 배분되며, 이 의사결정에 CET(constant elasticity of

4 Mathews et al.(2008)의 미국 텍사스 농가들을 대상으로 한 연구는 비용함수 추정을 통해 사료와 여타 투입요소 간 수요의 교차가격 탄력성이 상당히 작다는 것을 보여주었다. 이는 대체탄력성도 값이 작아야 함을 시사한다. 하지만 이 연구는 에너지, 사료 외에는 별 다른 투입물을 분석에 포함하지 않았기 때문에 이들의 추정치에만 의존하여 본고의 대체탄력성을 부여하기 어려운 점이 있다.

transformation)형의 함수가 적용된다. 또한 생산에 사용되는 투입물들은 국내에서 생산되어 국내 시장에 공급된 것과 해외에서 수입된 것이 차별화되도록 Armington 가정에 의해 결합되고, 이때 CES형의 함수가 국내산과 수입산의 비용합을 최소화하는 데 적용된다. 이렇게 결합된 국내산과 수입 투입물이 최종 산출물 생산에 사용된다. CET함수와 Armington-CES함수의 탄력성은 한국환경정책·평가연구원(2021)에서 1988~2013년의 자료를 이용해 18개 산업에 대해 추정하였는데, 대부분의 산업에서 그 절댓값으로 1과 가까운 값을 제시하였다. 따라서 본고에서는 CET 탄력성은 -1.2, Armington-CES 탄력성으로는 1.2를 적용하였다.

도시가구와 농가는 소득의 일부를 저축하며, 정부와 해외부문도 저축을 행한다. 이들 저축이 모여 투자재원이 되며, 총 투자액은 산업별로 일종의 Cobb-Douglas 투자효용함수를 통해 배분된다. 산업별 재고 역시 모형에 반영되어야 하는데, 재고량은 기준 연도 수준으로 고정된 것으로 가정한다.

정부는 자본과 노동에 대해 과세하고, 소비재에 대해서도 과세할 수 있으며, 기타 생산 행위에 대해서도 과세할 수 있다. 또한 수입 상품에 대해서는 관세를 매길 수 있다. 이들 조세의 세율은 기준 연도인 2015년의 실적에 맞게 설정된다. 정부 세입은 정부 스스로의 소비에 사용되고, 또한 가계에 대한 지원금이나 생산자에 대한 보조금으로 사용될 수 있다. 아울러 본고에서는 정책변수로서 농축산부문 인(phosphorus)에 대한 배출권시장을 설정하고 그 판매수입이 정부 세입이 되므로, 이 또한 가계에 대한 보조금으로 환급될 수 있게 한다.

이상과 같이 설계된 비교적 표준적인 1국가 정태 CGE모형의 파라미터 중 외부에서 도입되지 않는 것들은 모두 2015년의 한국은행 산업연관표 실측치를 토대로 만들어진 SAM과 일치하도록 캘리브레이션(calibration) 되었다. 그리고 일반균형모형의 동차성(homogeneity) 특성상 가격변수 중 하나가 고정될 필요가 있으므로 소비자물가지수를 도입하여 이 값이 항상 1이 되도록 하였다(=numeraire). 따라서 모형의 가격변수들은 모두 소비자물가지수 대비 상대가격이다.⁵

5 아울러 모형 전체의 내생변수 수와 방정식 수가 일치하도록 하기 위해 배출권 판매대금 환급분 외의 소비자 지원금과 해외 저축, 두 변수도 2015년 수준에 고정시킨다.

2.3. 배출계수 추정

농업부문 양분에는 인, 질소, 칼륨 등 여러 가지가 있지만, 유럽 등의 해외 국가에서 양분 배출 저감의 매체로 주로 사용된 것은 인이기 때문에 본고도 인 배출 저감을 양분 배출 저감의 지표로 우선 사용하고자 한다. 그러한 분석을 위해서는 인 성분의 배출량을 경제 활동과 연결하는 것이 필요하다. 인의 생성·배출은 가축분뇨, 화학비료, 유기질비료(유기질비료, 부숙유기질비료)로부터 유래한다. 산업부문별 인 배출량은 2015년 산업연관표와 김창길 외(2015)가 시행한 『양분총량제 도입방안 연구』의 산정 방식을 2015년 축종별 사육두수와 비료산업 생산 규모에 적용한 결과를 연계하여 산정하였다. 인 배출량 산정은 생산과 소비의 어느 단계에서 인이 생성·배출된다고 보느냐에 따라 여러 가지 방법으로 이루어질 수 있다. 특히 각 산업에서는 국내 생산과 수출 및 수입이 동시에 이루어지기 때문에 이들 활동 중 어디에서 인이 생성된다고 볼지가 관건이 된다.

관련하여 <그림 1>은 이미 앞에서 설명한 바와 같이 특정 산업 i 에 있어서 국내 생산 XD_i 가 σ_i^T 를 탄력성으로 하는 CET함수를 통해 국내 공급 XDD_i 와 수출 E_i 로 할당되고, 국내 생산자에 의해 공급된 XDD_i 가 수입량 M_i 와 σ_i^A 를 탄력성으로 하는 Armington함수에 의해 결합되어 최종 공급량 X_i 가 결정되는 구조를 보여주고 있다. 축산의 경우 가축을 사육하는 과정에서 분뇨를 통해 인이 배출되므로 XD_i 의 국내 생산과정에서 인이 배출되며, 축산물이나 그 가공품의 수출과 수입은 배출량 산정에 반영할 필요가 없을 것이다. 반면 비료의 경우 비료 자체의 생산과정보다는 국내에서 작물에 투입되고 사용되는 과정에서 인이 배출되기 때문에 XD_i 의 일부인 XDD_i 와 수입량 M_i 에서 배출되는 것으로 산정하여야 한다. <표 2>는 2015년의 인 배출량 산정의 기준이 되는 산출, 즉 축산부문의 경우 XD_i 와 비료부문의 경우 $[XDD_i + M_i]$ 를 보여준다.

그림 1. 국내 생산, 수입, 수출의 관계

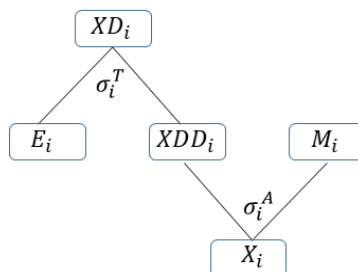


표 2. 사회계정행렬의 인 배출부문 산출액

단위: 십억 원

낙농	축우	양돈	가금	기타축산	비료/질소화합물
2,591	4,656	6,533	5,109	624	3,927

주: 2015년 산업연관표를 기준으로 본고가 구축한 SAM에서 도출됨.
 축산부문의 경우 XD_i 이며 비료/질소화합물의 경우 $XDD_i + M_i$ 임.

가축분뇨로부터 배출되는 인을 추정하기 위해서는 먼저 <표 2>가 보여주는 바와 같은 2015년 산업연관표에서의 각 축산부문 산출 규모와 2015년 기준 가축 사육두수를⁶ 연결하여 금액 단위의 산업 생산 규모를 가축 사육두수 단위로 전환하여야 한다. 이어서 축종별 배출원단위를⁷ 곱하여 가축분뇨 배출량을 산정하여야 한다. 그리고 축종별 가축분뇨 배출량에 축종별 가축분뇨의 양분 환산계수를⁸ 적용하여 인 배출량을 산정한다. 인 생성량 추정은 오산화인(P_2O_5)을 기준으로 하며, 산정 결과, 낙농 1만 8,989톤, 축우 5만 6,115톤, 양돈 3만 6,090톤, 가금 7만 4,500톤, 기타축산 1,741톤으로⁹ 나타났다<표 3>.

다음으로 비료산업으로부터 배출되는 인을 추정하였는데, 비료산업은 산업연관표의 비료/질소화합물로 제시된다. 비료는 화학비료, 유기질비료(유박, 혼합유기질 등), 부숙유기질비료(가축분퇴비, 가축분뇨발효액, 퇴비 등)로 나뉜다. 농협경제지주 자재부(2019)에서 발간한 『비료사업통계연감』의 2015년 기준 화학비료 인 성분량은 8만 5,857톤이어서 이를 그대로 적용하였다. 유기질비료의 인 성분량을 산정하기 위해 『비료사업통계연감』의 2015년 기준 유기질비료 판매량 62만 2,781톤에 인 성분 환산계수 2%를 적용한 결과,¹⁰ 1만 2,456톤으로 나타났다. 마지막으로 부숙유기질비

6 2015년 기준 가축 사육두수는 젓소 0.453백만 두, 소 2.85백만 두, 돼지 10.64백만 두, 닭/오리 216백만 수 등이다(환경부 내부자료 2020).

7 가축분뇨 배출원단위는 농림축산식품부에서 적용하는 배출원단위와 환경부에서 적용하는 발생유량원단위가 있다. 배출원단위는 분, 뇨, 세정수로 구분하고 있고, 발생유량원단위는 고형물질발생유량과 폐수발생유량으로 구분된다. 여기에서는 분과 뇨에 포함되어 있는 양분을 계산해야 하기 때문에 농림축산식품부 배출원단위를 적용하였다. 한육우 13.7kg/1일/1두, 젓소 37.7kg/1일/1두, 돼지 5.1kg/1일/1두, 산란계와 육계는 각각 124.7kg/(1일/천수)과 85.5kg/(1일/천수)을 배출한다(농사로 가축분뇨 배출원단위, <http://www.nongsaro.go.kr/>, 검색일: 2021. 6. 1.).

8 국립축산과학원의 가축분뇨 인 환산 파라미터를 적용하였다. 한우의 경우 분 0.60, 요 0.07, 젓소의 경우 분 0.49, 요 0.27이며, 돼지의 경우 인산은 분 0.83, 요 0.09이고, 닭은 분만 고려되며, 인산 0.62이다(농촌진흥청 국립축산과학원 2009; 김창길 외 2015 재인용).

9 기타가축부문 인 배출량은 우선 한우, 젓소, 돼지, 가금, 기타가축 등 산업별 분뇨 배출계수(산업별 분뇨배출량/산업별 규모)를 구한 후 다음처럼 도출하였다. 기타가축부문 인 배출량=한육우 인 배출량×(기타가축산업규모/한육우산업규모)×(기타가축배출계수/한육우배출계수)

10 유기질비료 환산계수는 유박비료의 성분량을 고려한다.

료의 인 성분량을 산정하였다. 그런데 부숙유기질비료는 가축분퇴액비(=가축분퇴비+가축분뇨발효액)가 대부분을 차지하고 있기 때문에 전체 부숙유기질비료의 인 성분량을 산정하게 되면 가축분뇨 인 성분량과 중복 계산이 된다. 이를 피하기 위해 부숙유기질비료에서 가축분퇴액비를 제외한 양만 인 성분량을 산정하는 데 이용하였다. 즉 『비료사업통계연감』의 2015년 기준 부숙유기질비료 공급량(판매량) 450만 3,991톤 가운데 가축분퇴액비 348만 6,438톤을 제외한 101만 7,553톤에 부숙유기질비료 환산계수 0.5%를 적용한 결과,¹¹ 5,088톤으로 산정되었다. 따라서 비료/질소화합물의 인 성분량은 화학비료, 유기질비료, 부숙유기질비료를 합하여 10만 3,400톤이다.

이상과 같이 산출된 인 배출량을 전체적으로 보면, 축산부문 배출 비율은 64.4%였으며(비료/질소화합물부문은 35.6%), 축산부문 중 배출량은 가금>축우>양돈>낙농>기타축산의 순서로 나타났다<표 3>. 이렇게 수량적으로 산정된 산업별 배출량을 정책효과 분석에 반영하기 위해서는 <표 2>의 산업별 생산금액과 연계하고 산업별로 십억 원 단위당 배출계수를 도출하여야 한다. <표 2>의 XD_i (축산부문)와 $XDD_i + M_i$ (비료부문)의 산출금액을 <표 3>의 산업별 배출량으로 나누어주면 십억 원당 인 배출량이 낙농 7.33톤, 축우 12.05톤, 양돈 5.52톤, 가금 14.58톤, 기타축산 2.79톤, 비료/질소화합물 26.33톤으로 나타났다. 따라서 축산업 생산액당 배출계수는 가금>축우>낙농>양돈>기타축산의 순서를 보였다<표 3>.

표 3. 2015년 축종별 적용 인 배출계수 및 비중

부문	인(P) 배출량 (톤)	배출 비율 (%)	배출계수 (톤/십억 원)
낙농	18,989	6.5	7.33
축우	56,115	19.3	12.05
양돈	36,090	12.4	5.52
가금	74,500	25.6	14.58
기타축산	1,741	0.6	2.79
비료/질소화합물	103,400	35.6	26.33
축산부문 비중			64.4

주: 배출계수는 <표 2>의 부문별 산출액을 반영한 것임.
작성과정은 본문 참조.

¹¹ 부숙유기질비료 환산계수는 특정하기 어렵지만 자문에 응한 관련 전문가 의견을 반영하여 유기질비료 환산계수의 1/4 수준으로 설정한다.

3. 양분 저감 정책의 도입과 효과분석

본고가 시뮬레이션을 통해 그 효과를 분석하는 정책은 가상의 정책으로서, 서론에서 밝힌 바와 같이 농업부문 인 생성·배출량을 저감하되, 강제적인 직접규제가 아닌 경제적 유인을 제공하는 정책이다. 이러한 정책의 도입 필요성을 간접적으로 확인하기 위해 본고는 네덜란드의 정책 사례를 검토하였다. 양분에는 인, 질소, 칼륨 등이 있지만 이 중 한 가지를 지표로 삼아 정책을 도입할 수밖에 없을 것이다. 이는 산업 활동이 배출하는 대기 오염물질의 종류는 많지만 온실가스 배출을 지표로 정책을 설정하는 것과 유사하다 하겠다. 본고가 주로 참조하는 네덜란드의 정책이 인 배출량을 기준으로 하여 설계되었기 때문에 본고 역시 그렇게 하도록 한다.

<그림 2>는 OECD의 농업환경지표를 이용해 권오상 외(2021)가 작성한 주요 OECD 회원국의 단위면적당 인(P) 수지의 수준과 변화 형태를 보여준다. 국토면적이 넓은 미국, 호주, 캐나다는 현재는 물론 과거에도 인 수지가 양호한 모습을 보이지만 한국, 일본, 네덜란드처럼 국토가 좁고 집약적 영농이 이루어지는 국가에서는 인 수지가 대단히 높다. 하지만 인 수지 개선이 부진한 한국, 일본과 달리 네덜란드는 1990년 이래 매우 빠른 속도로 인 수지가 개선되었고, 현재에는 미국, 호주, 캐나다와 거의 대등한 수준에 이르렀다.

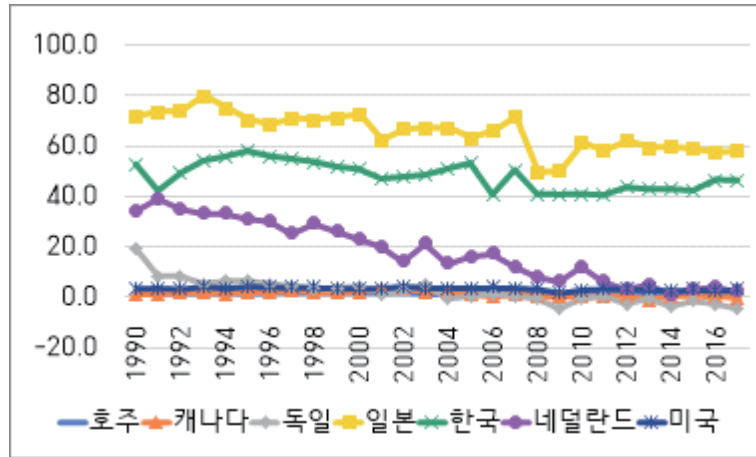
한때 OECD에서 단위면적당 인 수지가 가장 높은 국가였고, 유럽연합의 기준을 충족하지도 못했던 네덜란드가 이러한 농업환경 개선을 이룰 수 있었던 데에는 여러 가지 규제 정책과 농업구조 개선 정책의 기여가 있었다. Backus(2017)에 의하면 네덜란드의 ha당 인 농경지 살포량은 1980년 160kg에서 2010년 84kg으로 감소했다. 질소의 경우 같은 기간 447kg에서 336kg으로 역시 크게 감소하였다.

이와 같은 성과를 얻기 위해 네덜란드는 생성된 양분의 처리능력 강화와 양분 생성량 자체의 저감을 동시에 추진하였다. 보다 구체적으로, <그림 3>은 1984년 이래 네덜란드에서 도입·시행된 양분 관련 여러 정책들을 시기별로 정리하여 보여준다. 이 그림에 의하면 양분 문제 개선에는 발생한 분뇨의 관리와 농경지 살포 방식 규제(예: 살포 상한과 계절 제한, 토양주입(soil injection) 의무화 등), 관련 R&D와 기반시설에 대한 투자, 생산자에 대한 교육·훈련과 더불어 원인물질인 분뇨의 발생량을 줄이려는 정책이 함께 필요하며, 이는 네덜란드는 물론, EU와 다수의 국가에서 정책 사례

로 확인되는 바이기도 하다(OECD 2010; Oenema 2004).

그림 2. 주요 국가별 단위면적당 인(P) 수치

단위: kg/ha



출처: 권오상 외(2021).

자료: OECD Statistics, Agri-environmental indicators: Nutrients.

그림 3. 네덜란드의 양분 관련 정책

네덜란드 정책수단		1984	1986	1988	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
기후 사양 제한 정책	1. 양돈과 양계에 관한 임시 법 (C)																	
	2. 부과금을 이용한 인 배출량 규제 (C)																	
	3. 양분배출권거래제 (M)																	
	4. 양돈 및 양계 사육권 (C)																	
	5. 폐업장려금 (M)																	
분뇨 살포 규제	6. 인 살포규제 (C)																	
	7. 분뇨 및 비료 살포 상한 (C)																	
	8. 분뇨 살포 계절 제한 (C)																	
신기술 정려	9. 분뇨의 토양주입 의무화 (C)																	
	10. 토지비기반쿼터 삭감 (M)																	
	11. 분뇨 의무가공비용 (C)																	
양분 계정	12. MINAS 양분계정과 부과금제도 (M)																	
	13. 연간양분순환평가, ANCA (M)																	
토지- 가축 연계	14. 분뇨 이전계약 (M)																	
	15. 토지연계 낙농업 확대 (C)																	
지 원 정책	16. 분뇨은행 (M, E)																	
	17. 분뇨저장 보조 (M)																	
	18. 선도농가활용 (E)																	

주: 괄호 안의 C, M, E는 해당 정책이 각각 직접규제, 인센티브제도, 교육/훈련의 형태에 가까운 정책임을 의미함.

자료: Backus(2017); 권오상 외(2021)의 번역본을 일부 수정함.

분뇨와 양분의 발생량 자체를 줄이기 위해서 네덜란드는 1987년에 단위면적당 인의 초과 배출량에 대해 배출부과금을 징수하였고, 1994년에는 양분배출권 거래제를 도입하여 이로 부과금제를 대체하였으며, 1998년에는 양돈과 양계를 대상으로 하는 사육권제도를 도입하여 배출권/쿼터제를 대체하는 등, 발생량에 대한 직접규제보다는 부과금이나 배출권 형태의 경제적 유인제도를 꾸준히 사용해 왔다. 또한 배출권의 총량을 줄이고 폐업 장려금을 지급하는 등의 조치를 통해 발생량 감소를 추진해왔다(Oenema and Berentsen 2005; Backus 2017; 권오상 외 2021: 151-156).¹²

본고의 정책 시뮬레이션은 다양한 경우에 대해 적용될 수 있지만, 네덜란드 정부가 1998년 사육권 제한을 통해 도입하려 했던 바와 같이 10%의 분뇨발생량 감축을 인 성분량을 기준으로 추진하는 경우의 효과를 분석한다.¹³ 이러한 배출 감소를 추진하되, 정책 수단으로서는 인의 배출권거래제를 도입한다. 그리고 이 정책의 대상으로서 <표 1>의 산업 6에서 산업 10에 이르는 축산부문, 즉 낙농, 축우, 양돈, 가금, 기타축산만으로 한정하는 경우와, <표 3>이 보여주는 바와 같이 농업부문인 배출량의 35.6%를 차지하는 산업 18, 즉 비료 및 질소화합물까지 포함하는 경우, 두 가지 경우 모두를 분석한다.

검토하는 정책은 <표 3>이 보여주는 축산부문의 연간 총 인 배출량 18만 7,435톤의 10%인 1만 8,744톤의 배출 저감을 목표로 한다. 이는 비료부문을 포함한 국가 전체 배출량 29만 835톤의 6.4%에 해당된다. 따라서 정책이 도입되면 27만 2,091톤의 인 배출권이 설정되고, 정책 적용 대상 산업의 생산자들은 구매한 배출권만큼의 인을 생성할 수 있다. 생산 규모로 얘기하자면, <표 3>의 마지막 열이 보여주는 바와 같은 배출계수와 연계하여 생산량이 결정된다. 따라서 각 산업 생산자는 구매한 인 배출량에 <표 3>의 배출계수의 역수를 곱한 것만큼의 산출을 할 수 있다.

배출권은 이처럼 산업의 산출량을 기준으로 계산되는 배출계수를 활용해 설정될 수도 있지만, 보다 직접적으로 인의 원인물질인 사료나 비료 원료 등에 대해 적용될 수도 있다. 하지만 사료와 비료

12 KOSIS의 『국제통계연감: 주제별 국제통계』 네덜란드 편 자료를 이용하되, 주요 정책들이 도입되기 직전인 1985~89년 기간의 연평균 사육두수와 정책이 대부분 도입되고 전체 모습이 갖추어진 시기인 2000~09년간의 사육두수를 비교하면, 소는 약 27%, 돼지는 약 15% 감소하였다. 하지만 2010년 이후에는 사육두수가 소는 더욱 감소, 돼지는 다시 늘어나는 추세를 보이기도 하는데, 사육두수에는 환경 규제와 더불어 시장 상황과 기술 발전, 주기적 변동요인 등 많은 요인들이 영향을 미치기 때문에 이러한 수치가 정확히 규제 정책의 효과를 반영한다고 얘기할 수는 없다.

13 네덜란드에서 실제 실행된 배출권거래제에는 농가가 보유한 토지면적과 연계된 배출권과 연계되지 않은 배출권을 구분하고, 거래 지역을 지정하며, 배출권을 축종별로 배정하는 등의 여러 구체적인 적용 절차가 있다. 이에 관해서는 Wossink(2004)를 참조할 수 있다. 환경 정책으로서의 배출권거래제의 특성과 거래제 설계 시 고려해야 할 요소들에 대해서는 권오상(2020, 제8장)을 참고할 수 있다.

에는 다양한 종류의 영양물질이 포함되어 있기 때문에 사료 혹은 비료 원료물질 종류별로 일일이 배출계수를 적용하기 어려운 문제가 있다. 또한 본고가 참고하는 김창길 외(2015)가 OECD 방식을 활용해 인 배출량을 구한 방식도 사료보다는 사육두수 기준을 적용했다는 것과, 축산부문과 비료부문의 인 배출량을 합산할 때에도 산업별 산출금액을 가축 사육두수와 비료 산출량으로 전환한 후 여기에 인 배출계수를 적용하는 방식이 더 편리하다는 점을 감안해 본고는 그러한 방법을 선택하였다.¹⁴

본고의 시나리오 1(=S1)에서는 국내 농업생산부문 인 배출량이 27만 2,091톤이 되게 하되, 축산부문과 비료부문이 함께 참여하는 배출권시장이 형성된다. 따라서 축산부문 생산자와 비료부문 생산자는 본인들이 원하는 산출량을 생산하기 위해서는 필요한 만큼의 인 배출권을 보유하여야 한다. 이 배출권 구입액은 추가적인 생산비로 작용하여 생산자의 생산량과 생산 방법 선택에 영향을 미치게 된다. 또한 축산부문과 달리 비료부문에서는 수입업자에게도 배출권시장 참여가 의무화되고, 수입업자는 수입량에 배출계수를 반영한 만큼의 배출권을 구입하여야 한다. 대신 비료 생산자가 수출을 할 경우 수출품에 대해서는 배출권 구입 의무가 적용되지 않도록 배출권시장을 설계한다.

시나리오 2(=S2)에서는 동일한 배출 저감 목표 1만 8,744톤이 설정되지만 그 책임이 모두 축산부문에만 부여된다. 따라서 축산부문에 한해서 $187,435 \times 0.9 = 168,692$ 톤의 배출 상한이 부여되고, 축산 생산자들은 인 배출권을 보유하여야만 가축을 사육할 수 있다. 시나리오 2에서는 비료부문은 인 배출 규제 대상이 아니다.

시나리오 1, 2 모두에 있어 배출권은 유상으로 배분되는 것으로 가정한다. 하지만 일반균형분석에서는 완전경쟁시장이 가정되고 생산자 이윤은 0이기 때문에 배출권의 배분이 유상인지 무상인지의 여부가 모형의 균형에 직접 영향을 미치지 않는다. 다만 유상으로 배분된 배출권으로부터 얻는 정부 수입을 어떻게 처리할 것인지의 문제가 대두되는데, 본고는 유상으로 배출권을 판매하되 배출권 판매수입을 농가의 후생이 정책 도입 이전과 완전 일치하도록 농가에게 우선 돌려주고, 남은 금액은 비농가에게 환급하는 정책을 가정한다. 이를 위해 LES효용함수에 상응하는 후생지표인 보상잉여(compensating variation: CV)를 다음과 같이 도출한다(Just et al. 2004: 178-179).

14 이 때문에 본고의 배출권시장이 인 배출량을 기준으로 설정되지만 네덜란드 등의 유럽국가에서 사용되었던 거레가 가능한 가축 사육권의 설정 정책과 결과적으로 유사하게 된다. 한국에서도 송주호 외(2004) 등에 의해 가축 사육두수 총량제의 도입 방안이 연구·논의된 적이 있다.

$$(1) \quad CV = (m_1 - m_0) + \left[\sum_{i=1}^N p_{i0} \gamma_i + u_0 \prod_{i=1}^N p_{i0}^{\beta_i} \right] - \left[\sum_{i=1}^N p_{i1} \gamma_i + u_0 \prod_{i=1}^N p_{i1}^{\beta_i} \right]$$

$$\text{단, } u(x) = \prod_{i=1}^N (x_i - \gamma_i)^{\beta_i}$$

식 (1)에서 $u(x)$ 는 효용함수이고 $x_i (i = 1, \dots, N)$ 는 소비량, p_i 는 가격, 그리고 m 은 소득이다. 시나리오 1, 2의 도입에 의해 생산자들은 변화된 생산비의 일부를 소비자에게 시장을 통해 전가하기 때문에 소비자가격이 벡터 p_0 에서 벡터 p_1 으로 바뀐다. u_0 는 정책이 도입되기 전에 가구가 얻던 효용 수준이다.¹⁵ 본고에서는 각 시나리오 시행 결과 얻어진 정부의 배출권 판매액을 농가에게 우선적으로 반환하여 정책 도입 후의 가처분 소득 m_1 이 농가의 CV 가 정확히 0이 되도록 하며(즉 u^0 의 효용 수준을 계속 유지하게 하며), 그러고도 남은 배출권 판매수입은 도시가구에 지급하는 방식을 설정한다. 따라서 정책 도입에 따른 농가의 후생변화는 없도록 모형을 설정하며, 정책 도입의 전체 후생효과는 비농가의 CV 로 계측된다.

<표 4>는 두 가지 시나리오에 따른 정책 도입의 거시적인 변수에 대한 영향을 보여준다.¹⁶ 먼저 후생효과인데, 앞에서 설명한 바와 같이 배출권 판매수입 환급을 통해 농가의 CV 는 0이 되도록 정책이 실행된다. 2015년 전국 2,087만 가구의 94.3%를 비농가라 간주할 경우 비농가의 가구당 연간 CV 는 음(-)의 값이 되어 후생이 감소하는데, 이의 절댓값을 취하면 S1과 S2에서 각각 16만 7천 원과 16만 6천 원으로, 월간으로는 약 1만 3,800원이고 거의 차이가 없었다. 이 금액은 통계청이 발표한 2015년 가구당 평균 지출액 4,048만 원의 약 0.4%에 해당된다. 이것이 두 가지 정책 도입이 가져다줄 후생손실이고 정책비용이다.

이어서 인의 배출권 가격은 두 시나리오에서 각각 톤당 1,963만 원과 2,923만 원이 된다. 이는 오산화인(P_2O_5)으로 계측되는 순수한 인 성분의 저감비용이라 단위당 금액이 큰데, 이를 가늠하기 위해 돼지의 분뇨 톤당 가격으로 환산해볼 수 있다. <표 3>에서 돼지가 배출한 총 인의 양 3만 6,090톤을 환경부(2020)가 『가축분뇨 처리통계(2015년 기준)』에서 집계하는 돼지의 2015년 분뇨 배출량 $91,511 \times 365$ 톤으로 나누면 돼지 분뇨 1톤당 0.00108톤의 인이 함유되어 있다. 따라서 인 배출권

15 보상인여 CV 는 정책으로 인해 소득과 가격이 변했음에도 정책 도입 이전과 동일한 효용 수준 u^0 를 계속 유지하도록 하기 위해 추가로 조정해주어야 하는 소득이다. 식 (1)의 설정에서는 후생이 정책으로 인해 감소하면 CV 는 음(-)의 값을 가진다.

16 본고의 CGE모형은 GAMS 25.1.3을 이용해 코딩하였고, solver로는 conopt를 사용하였다.

가격을 돼지의 분뇨 톤당으로 환산하면 S1에서는 2만 1,200원, S2에서는 3만 1,600원이 된다. 한편 가축분뇨 배출원단위는 환경부와 농림축산식품부에서 다르게 적용하고 있다. 환경부의 발생유량원단위는 국립환경과학원(2014)의 『수질오염총량관리기술지침』에 따라 8.6kg(/마리/일)이고, 농림축산식품부의 배출원단위는 각주 7에서 제시한 대로 5.1kg(/마리/일)이다. 따라서 농림축산식품부의 배출원단위를 적용하고, 돼지의 인 배출권 가격을 돼지의 분뇨 톤당으로 환산할 경우에는 S1에서는 3만 5,800원, S2에서는 5만 3,300원이 된다.

한국축산경제연구원(2018)은 돼지 분뇨를 위탁 처리하는 71개 농가를 대상으로 처리비용을 조사하였다. 농가 시설투자가 필요한 정화 처리를 제외한 공공처리장 이용, 공동자원화시설 이용, 액비유통센터 이용 등의 비용을 조사했을 때 공공처리장과 공동자원화시설의 평균 처리비용은 톤당 각각 1만 5,821원과 2만 3,052원이었다. 그리고 액비유통센터의 수거비용은 수분 함유량 등에 따라 차등화되어 1만 8,000~4만 원의 분포를 보였다.¹⁷ 따라서 S1과 S2의 시나리오는 현재의 돼지 분뇨 톤당 처리비용과 유사한 정도의 배출권 가격이 형성될 것임을 의미한다. 배출권이 무상으로 배분되거나 배출권 구입비용이 기존 농가에 반환될 경우 이는 추가 부담이 되지 않겠지만, 사육 규모를 늘리거나 신규 진입하려는 농가는 이 정도의 비용을 추가로 지불해야 한다.

아울러 본고가 도출한 인 배출권의 가격은 본고가 정책 사례로 참조하는 네덜란드에서 기록된 실제 배출권 가격과 비교해볼 수도 있다. Wossink(2000)에 의하면 1996년 4월에서 1998년 5월 사이 네덜란드에서의 평균 인 배출권 가격은 오산화인(P_2O_5) kg당 48.69길더(guilders) 혹은 66.11길더였다. 이를 달러 가치로 전환하고 1달러당 1,200원의 환율을 적용하면 톤당으로는 각각 2,900만 원과 4,000만 원 정도이다. 네덜란드에서의 실제 배출권 가격은 시기별로 변동이 있었고, 환율을 어떻게 적용하는지도 수치에 영향을 미치며, 농업/정책환경이 본고가 상정한 경우와 다르기는 하지만, 본고가 시뮬레이션을 통해 도출한 인 배출권 가격은 네덜란드에서 관측된 실제 배출권 가격과 상당히 유사하거나 좀 더 적은 금액이라 할 수 있다.

이어서 총 배출량을 보면, S1에서는 정책 목표인 27만 2,091톤이 정확히 달성된다. S2에서는 비료산업은 배출권거래제에 포함되지 않지만 정책 도입의 파급효과로 인해 정책 도입 이전에 비해 생산량이 달라지기 때문에 S1과 S2의 인 배출 저감이 완전 일치하지는 않는다. 하지만 본고 후반부에

17 본고 저자들의 현장 경험에 의하면, 최근 연도에 있어 분뇨 위탁 처리비용은 이 수치들보다 좀 더 높은 수준으로 파악되기도 한다.

서 <표 5>가 보여주는 바와 같이 S2에서 비료산업의 생산량과 수입량 변화 폭이 작기 때문에 S2에서도 정책 목표인 27만 2,091톤보다 미세하게 적은 양의 배출인 27만 1,383톤을 기록하고 있다.¹⁸

표 4. 정책 도입에 따른 주요 거시변수 변화

시나리오	비농가 가구당 부담액 (만 원/년)	인 배출권 가격 (만 원/톤) ¹⁾	인 총 배출량 (톤) ²⁾
S1	16.7	1.963 (2.12)	272,091 (241,906)
S2	16.6	2.923 (3.16)	271,383 (248,456)
비료 국내 생산만 규제	4.2	533 (0.58)	283,531 (248,999)

주 1) () 안은 양돈 분뇨 톤당 가격(단위 만 원).

2) () 안은 축산부문과 비료부문 국내 생산의 인 함유량임.

<표 4>가 보여주는 거시변수들의 변화는 두 가지 정책 S1과 S2에 있어 후생지표인 도시가구의 CV에 있어 서로 거의 차이가 없고, 따라서 정책의 효율성 측면에서도 거의 차이가 없음을 의미한다. 축산업과 비료부문 모두를 인 배출권거래제 대상 사업으로 하는 S1 시나리오에서는 인을 배출하는 모든 산업을 정책 대상에 포함하기 때문에 비료산업은 정책 대상으로 포함하지 않는 S2 시나리오에 비해 전체 인 배출 저감을 보다 적은 소비자비용을 지불하고 달성할 수도 있겠으나, <표 4>에서는 그러한 결과가 나타나지 않는다. 이는 첫째, S1에서는 비료가격이 상승하기 때문에 비료를 투입요소로 사용하는 경종부문의 생산 충격도 상당한 정도로 발생하고, 또한 둘째, S1에서는 국내 생산뿐 아니라 수입되는 비료에 대해서도 배출권 구입을 요구하는 일종의 무역 규제가 추가되기 때문에 그로 인한 추가 후생 부담이 발생하기 때문인 것으로 해석된다. 이 두 가지 이유로 인해 S1과 S2에서의 후생지표는 거의 동일한 값을 보여준다.

다만 배출권 가격은 S1의 경우가 S2보다 상당한 정도로 더 낮다. 이는 S1에서는, 배출계수가 축산업에 비해 크기 때문에 산출을 조금만 줄여도 인 배출량을 크게 줄일 수 있는 비료산업까지 배출권거래제 대상에 포함되기 때문에 발생한다. 배출권의 시장가격은 배출 저감의 한계비용을 반영하기 때문에 본고의 시뮬레이션은 축산부문과 비료부문을 동시에 정책 프로그램에 포함하는 S1에서

18 한편 순수한 국내 생산행위 XD_i 에 인 배출계수를 적용해보면 S1(=241,906톤)이 S2의 경우(=248,456톤)보다 더 적다. 이는 비료 산업은 규제하지 않는 S2의 경우와 달리 S1의 경우 해외 비료 생산자에게 배출권의 일부를 넘겨주기 때문에 발생한다.

의 인 한계 저감비용이 더 낮음을 확인한다.

한편 <표 4>의 마지막 행은 참고로 행한 추가 시물레이션의 결과로서, 비료의 경우에도 축산부문과 마찬가지로 국내 생산만을 규제할 경우의 효과이다. 2015년 비료의 경우 $XD_i(=3,050)$, $XDD_i(=2,650)$, $M_i(=1,277)$, $E_i(=400)$ 이기 때문에 이를 <표 3>에 적용하면 국내 생산 XD_i 에 의해 공급되는 비료의 인 함유량은 $103,400 \times [3050 / (2650 + 1277)] = 80,308$ 톤이다. 이를 축산부문 배출량과 합하면 국내 생산 활동의 인 함유량은 총 26만 7,743톤이 된다. <표 4>의 마지막 행은 여기에서 역시 국내 축산부문 배출량의 10%를 차감한 24만 8,999톤에 해당되는 배출권을 축산부문과 비료부문에 발행하여 인 배출을 규제할 경우의 효과이다. 이 배출권은 비료의 경우 국내 비료 생산에 대해서만 부여되고 수입되는 비료에는 부과되지 않는다. 정책을 실행하면 축산부문과 비료부문의 국내 생산 활동 XD_i 의 총 인 함유량 목표 24만 8,999톤은 정확히 달성된다. 하지만 대신 국산 비료 가격 상승 때문에 비료 수입 M_i 가 크게 늘어나기 때문에(=21.2%) 국내에서 사용되는 비료를 기준으로 평가한 인 배출량은 28만 3,531톤이 되어, 비료의 수출입까지 모두 반영하는 두 정책 S1, S2에 비해 실제 인 배출량이 더 많게 된다. 이는 비료의 경우 수출액보다는 수입액이 더 많은 우리 경제 여건을 반영하기도 한다. 다만 이렇게 국내 생산 활동에만 초점을 맞추는 정책을 시행하면 생산자들이 비료 수입을 늘려 비료 사용 제약을 완화시킬 수 있기 때문에 농산물 가격 상승에 따른 도시 소비자의 후생 부담도 줄어들고, 인 배출권의 가격도 상대적으로 낮게 형성됨이 확인된다.

<표 4>의 후생지표나 거시변수들의 경우 배출권 가격을 제외하고는 S1, S2 두 시나리오 간 큰 차이가 없음을 보여주지만, 개별 품목이나 산업은 둘 중 어느 시나리오가 도입되느냐에 따라서 큰 차이를 가지게 된다. 이를 확인하기 위해 <표 5>는 농축산업과 관련 산업에 있어서의 생산, 소비자가격, 수입량의 구체적인 변화를 정리하여 보여준다.¹⁹ 정책효과가 축산업과 사료부문으로 분산되는 S1에서는 낙농, 축우, 양돈, 가금, 기타축산의 축산업과 비료산업의 국내 생산량이 모두 줄어드는데, 단위 산출당 인 배출량이 많은 비료산업의 생산 감소율이 가장 높다. 비료산업의 산출이 약 15% 감소하지만 수입 비료 역시 규제 대상이 되기 때문에 수입량은 약 11%만 늘어나고, 전체 비료 소비에서 수입보다는 국내 생산의 비중이 더 크기 때문에 결과적으로 상당한 양의 국내시장 비료 공급이 감소하게 된다. 따라서 비료의 소비자가격은 약 64%로 크게 상승한다. 이러한 비료가격 상승은 비

¹⁹ 농축산업 외의 제조업 및 기타 서비스업이 받는 영향은 시나리오별로 큰 차이를 보이지 않고 그 크기 자체도 변화율로는 매우 작기 때문에 <표 5>에 포함하지 않았다.

(-1.62%), 채소(-3.24%), 과실(-4.87%), 화훼(-2.77%), 기타농산물(-5.62%) 등 경종의 국내 생산량도 모두 감소시킨다. 경종(쌀의 경우 정곡)의 국내 생산 감소와 국내 소비자가격 상승은 경종 농산물 수입 증대를 야기한다. 비료가격의 상승률은 매우 높지만 경종 생산비에서 비료가 차지하는 비중이 크지는 않기 때문에 경종의 국내 생산 감소율은 비료가격 상승률에 비하면 매우 낮다.

축산업의 경우 국내 생산이 모두 감소하지만 그 감소율은 낙농 4.30%, 축우와 양돈 8.19% 수준으로 비료에 비해서는 높지 않다. 하지만 경종보다는 높은 생산 감소율을 보여준다. 축산부문 가격 상승률은 기타축산의 2.92%에서 가금의 30.44%의 범위를 보여준다. 국내 생산 감소는 수입 증가로 이어져 축산 생산부문 모두의 수입 증가가 이루어진다. 그러나 실제로 소비자가 소비하는 축산 제품은 육류 및 육가공품인데, 여기에서는 국내 공급이 8.18% 감소하고 소비자가격은 10.05% 상승하며, 수입량은 19.52%가 상승한다. 전체적인 축산부문 생산 감소로 인해 사료는 국내 생산이 6.18%, 그리고 수입량은 4.82%가 감소한다.

경종과 축산의 생산 감소로 인해 이를 원료로 사용하는 낙농품(-3.66%), 정곡(-1.53%), 음식료품(-1.51%)의 국내 생산 감소와 가격 인상이 발생하고 수입량은 대신 늘어난다. 살충제/농약은 경종 생산 감소에 따른 수요 감소로 인해 국내 생산(-2.40%)과 수입(-2.21%)이 모두 감소한다. 농림어업 서비스 역시 산출이 줄어든다(-3.13%). 축산분뇨를 포함하는 하수/폐수/분뇨 처리의 경우 분뇨 발생량 감소로 인해 생산이 소폭 감소하고(-0.03%), 처리비용이라 할 수 있는 가격도 소폭 하락한다.

S1의 시나리오에서 전자제품, 건설업 등 일반 제조업의 경우 농축산업의 국내 생산이 감소하면서 자본과 노동 등의 투입요소가 이농을 통해 옮겨오기 때문에 미약하기는 하지만 국내 생산 증가, 소비자가격 하락, 수입량 감소가 발생한다. 하지만 <표 5>를 보면 음식점 및 주점의 경우는 반대로 국내 농축산물 공급이 감소하면서 매출이 1.03% 줄어들고 소비자가격의 소폭 인상이 발생한다.

축산부문만 배출권거래제 대상 업종으로 정하는 S2에서는 비료부문은 정책의 영향을 거의 받지 않고 국내 생산이 0.67%만 감소한다. 비료가 정책 대상이 아니기 때문에 가격 인상요인이 없고 수입량도 거의 늘어나지 않는다. 비료가격이 거의 상승하지 않기 때문에 국내 경종 생산도 S1에 비하면 거의 변하지 않는다. 다만 기타농산물(-2.33%)과 벼(-1.01%)의 경우 주산물과 부산물의 일부가 축산부문에서 사료 등의 용도로 사용되고, S2에서는 축산 생산 활동이 크게 위축되기 때문에 유발 수요 감소에 따른 생산 감소가 나타난다.

표 5. 농축산업 및 관련 산업에 미치는 영향

산업	S1			S2		
	생산량	소비자가격	수입량	생산량	소비자가격	수입량
벼	-1.62	5.24	N/A	-1.01	-0.55	N/A
채소	-3.24	5.82	10.40	-0.55	-0.46	-0.48
과실	-4.87	3.94	6.92	-0.38	-0.50	-0.40
화훼	-2.77	4.73	9.78	-0.08	-0.52	-0.17
기타농산물	-5.62	0.61	-0.03	-2.33	-0.50	-2.41
낙농	-4.30	14.54	26.81	-5.88	21.25	39.77
축우	-8.19	23.82	42.22	-11.38	35.08	63.43
양돈	-8.18	10.76	13.77	-11.38	15.86	20.16
가금	-6.90	30.44	60.39	-9.39	45.28	93.87
기타축산	-5.75	2.92	5.66	-8.02	4.39	8.31
임업	-1.47	1.09	2.49	-0.34	-0.54	-0.48
수산물/수산가공품	-0.57	-0.43	-0.39	-0.58	-0.46	-0.51
육류 및 육가공품	-8.18	10.05	19.52	-11.39	14.73	28.93
낙농품	-3.66	4.09	7.56	-4.99	6.04	11.00
정곡	-1.53	3.95	8.04	-0.70	-0.54	-0.81
음식료품	-1.51	0.40	0.82	-1.35	0.07	0.12
사료	-6.18	0.19	-4.82	-8.31	-0.19	-7.73
비료 및 질소화합물	-15.23	63.86	11.15	-0.67	-0.50	-0.70
살충제 및 농약	-2.40	-0.42	-2.21	-0.96	-0.51	-1.01
농림어업서비스	-3.13	1.75	1.30	-2.46	-0.50	-2.48
하수, 폐수, 분뇨 처리	-0.03	-0.52	-0.10	-0.06	-0.52	-0.12
음식점 및 주점	-1.03	1.42	3.07	-1.16	1.66	3.46

축산부문만 정책 대상이 되면서 S2 시나리오에서는 국내 축산 생산 감소가 S1에 비해 크게 나타난다. 생산 규모가 큰 양돈과 축우(각각 -11.38%), 가금(-9.39%)에서 생산 감소율이 비교적 크지만, 반대로 낙농(-5.88%), 기타축산(-8.02%)의 경우 목표 인 배출 저감률 10%보다도 낮은 생산 감소율을 보여준다. 실제 소비자의 소비 대상인 육류/육가공품은 국내 생산이 11.39% 감소하고, 가격은 14.73% 상승하며, 수입은 28.93%가 증가하는 변화를 보여준다.²⁰ 축산 생산 감소는 사료의 수요를 줄여 국내 생산은 8.31% 감소하고, 수입도 7.73% 감소한다.

S2에서 농산물을 원료로 하는 산업 중 정곡은 거의 영향을 받지 않지만, 낙농품의 국내 생산은 4.99% 감소하고 대신 수입이 11% 증가한다. 음식료품의 국내 생산은 경종까지 영향을 받는 S1에

²⁰ 가금의 경우 수입이 94% 정도 늘어나는 것으로 나타나지만, 가금 육류가 아닌 가금 자체의 수입액은 기준 연도에서 매우 작은 수치를 가지기 때문에 이렇게 높은 증가율이 기록된다.

비해서는 적은 1.35%의 국내 생산 감소를 보여준다. 살충제/농약부문은 거의 영향을 받지 않으며, 농림어업서비스와 하수/폐수/분뇨 처리 부문도 수요 감소로 인한 국내 생산 감소가 있지만 그 영향이 상대적으로 크지는 않다. 음식점 및 주점도 S1의 경우와 유사한 정도의 생산 감소가 있다.

이상 정리한 바와 같이 국내 축산 생산 활동과 국내에서 사용되는 비료를 모두 정책 대상으로 하는 S1과 축산 생산 활동만을 대상으로 하는 S2가 유발하는 거시적인 영향과 최종 인 배출량은 별 차이가 없는 것으로 나타난다. 하지만 인 배출권의 가격은 S2에서 약 49% 더 높게 형성되기 때문에 사육 규모를 늘리거나 축산시장에 신규 진입하려는 축산농가에게는 보다 큰 부담으로 작용할 것이다.

세부적으로 보면 예상할 수 있는 바와 같이 S1에서는 정책효과가 전체 농축산부문으로 골고루 퍼지는 반면, S2에서는 축산부문에 집중되는 경향이 있다. 정책 설계가 농가의 후생 수준을 정책 도입 전과 동일하도록 배출권 판매수입을 환급하는 것을 전제로 하고 있지만, 생산 규모 감소를 우려하는 축산업 농가에게는 S2의 생산 감소 유발효과가 보다 큰 정책비용으로 인식될 것이다.

인 배출량 감소를 유도하는 정책은 이상의 효과 외에도 특히 환경적 측면에서 여러 부가적인 효과, 즉 공편익(co-benefits)을 가질 수 있다. 예를 들면 축산업, 경종은 물론이고 모든 제조업과 서비스업의 생산 규모가 달라질 것이기 때문에 온실가스과 암모니아를 비롯한 여러 오염물질 배출량이 달라질 수 있다. 또한 농업 생산이 배출하는 영양물질 중 인 외에 질소나 칼륨 등의 배출량도 당연히 정책에 의해 달라질 것이다. 하지만 본고의 분석 목적은 정책비용의 평가에 있고, 이러한 추가적인 편익의 크기나 방향을 분석하는 것은 본고의 직접적인 목표가 아니다. 또한 온실가스 배출량 변화의 정교한 측정을 위해서는 생산함수에서 에너지 투입물을 세분화하는 등의 추가 작업이 필요하며, 암모니아의 경우 총 배출량보다는 배출되는 환경과 생산시설과 거주지 간의 거리 등이 보다 중요한 요인이기 때문에 본고에서는 이들 공편익을 수치화하지는 않기로 한다.

4. 요약 및 결론

한국은 협소한 국토를 가지면서도 생산과 소비 면에서 축산의 비중이 지속적으로 커지면서 농업 부문 양분 배출이 환경적 부담으로 작용하고 있다. 양분의 관리는 생성량 자체를 줄이려는 노력과 생성된 양분을 적절히 처리하는 방안 두 가지를 통해 이루어질 수 있다. 본고는 이 두 가지 방법 가운데 생성량 혹은 배출량 자체를 저감하는 정책을 도입할 경우의 경제적 효과를 일반균형모형을 이용해 분석하였다. 정책수단으로는 인(phosphorous)을 기준으로 설정되는 배출권거래제를 가정하였으며, 축산부문에만 거래제가 적용될 경우와 국내에서 생산-소비되고 수입되는 비료 모두에 대해서도 적용되는 경우, 두 가지 경우를 분석하였다.

연간 축산부문 인 생성량의 10%에 해당되는 양을 줄이는 것을 목표로 하되, 농촌 가구의 후생은 변하지 않도록 배출권 판매수입을 재활용하면, 도시가구에 한해서 연간 지출액의 0.4%에 해당되는 후생손실이 발생하는 것으로 분석되었다. 이 수치는 두 가지 유형의 정책 모두에 있어 발생하는 것으로서, 주로 배출 규제에 따른 농축산물 가격 상승 때문에 발생한다.

도시가구당 후생효과는 두 가지 유형의 정책에서 거의 동일하지만 세부적인 면에 있어서는 정책 간 많은 차이를 보여서 이러한 종류의 저감 정책효과의 부문 간 분배 문제가 상당할 것임을 보여주었다. 축산부문만 정책 대상으로 할 경우 인의 배출권 가격 혹은 한계저감비용이 비료부문까지 포함할 경우의 약 1.5배에 달하며, 국내 생산과 가격, 수입량에 미치는 영향 역시 축산부문에 집중되게 된다. 아울러 같은 축산부문 내에서도 인의 배출계수와 생산 및 시장구조 등에 따라서 영향의 크기가 축종별로 상이하였다.

본고가 분석한 바에 의하면 인 생성량 감축 시 예상되는 배출 저감비용이 상당한 수준이기 때문에 향후 농축산부문의 구조 개선 등을 통해 생산 규모, 사육설비, 축종 선택, 분뇨 처리 기술 투자 정도 등의 측면에서 배출비용이 상대적으로 적은 생산자의 생산 점유율을 높이는 것이 필요함을 확인했다. 본고의 분석 결과는 또한 양분 생성량 저감과 함께 자원화, 정화 처리 등 양분 처리의 효율을 높이고 배출계수를 줄이는 노력도 강화할 필요가 있음을 시사한다. 아울러 배출권거래제 대상 산업이나 부문의 설정이 한계 저감비용에 작지 않은 영향을 미치는 것으로 나타났으므로 실제로 이런 정책을 도입하고자 할 때에는 대상 산업/품목의 선택, 배출권의 배분 방식 등 다양한 요소들을 면밀

히 고려해야 함도 제안할 수 있다.

본고는 축산부문을 중심으로 배출되는 양분에 관한 대책으로서, 그동안 자원화와 정화 처리 등 사후 처리 방식 위주의 개선책을 논의하던 데에서 벗어나 생성량 자체를 줄이는 방안의 경제적 효과를 분석한다는 점에서 기여도를 찾고자 하였다. 하지만 실제로 실행되는 양분 대책은 보다 정교하고 다면적으로 설계되어야 하기 때문에 본고와 같은 균형모형만으로는 실질적인 개선책을 찾는 데 한계가 있다. 이 문제가 가지는 국가적인 중요도를 감안하여 생성량 저감은 물론, 자원화/저장/정화 등 생성된 양분의 관리 행위까지를 반영할 수 있는 분석모형이 개발될 필요가 있다. 이를 위해서는 일종의 통합모형을 개발하여, 생산자의 미시적인 세부 기술 선택 행위와 소비와 수출입을 포함하는 시장 균형조건을 연계하여 분석하는 것이 유용할 것이다. 아울러 R&D나 농축산업 구조 개선을 통해 양분의 배출계수를 낮추고 생성된 양분의 환경 부하를 줄여나가는 노력을 반영하는 동태 모형의 개발도 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 국립환경과학원. 2014. 『수질오염총량관리기술지침』.
- 권오상. 2020. 『환경경제학』 제4판. 박영사.
- 권오상, 김창길, 박윤선, 한미진. 2021. 『축산환경 개선 기본계획 수립을 위한 정책 연구』. 서울대학교 산학협력단.
- 권오상, 김한호, 이문호, 이승호, 이홍립, 한미진. 2017. “국가 농산물 품질관리의 소비자 후생효과 분석.” 『농촌경제』 40(2): 1-30. <http://doi.org/10.36464/jrd.2017.40.2.001>
- 권오상, 한미진, 반경훈, 윤지원. 2018. “한국 경제의 KLEM DB 구축과 중첩 CES 생산함수 추정.” 『자원·환경경제연구』 27(1): 1-38. <http://doi.org/10.15266/KEREA.2018.27.1.029>
- 김창길, 정학균, 임평은, 김태훈. 2015. 『양분총량제 도입방안 연구』. 한국농촌경제연구원.
- 농사로 가축분뇨 배출원단위. <<http://www.nongsaro.go.kr/>>. 검색일: 2021. 6. 1.
- 농촌진흥청 국립축산과학원. 2009. 『가축분뇨 발생량 및 주요 성분 재설정』.
- 농협경제제주 자재부. 2019. 『비료사업통계연감』.
- 박윤선. 2021. 『생애주기별 가계 수요함수 추정과 온실가스 감축 정책 후생효과 분석』. 서울대학교 경제학박사학위논문.
- 성재훈, 조원주, 김수석. 2020. “지속가능한 축산에 대한 지불의향 분석.” 『농촌경제』 43(3): 1-25. <http://doi.org/10.36464/jrd.2020.43.3.001>
- 송주호, 김창길, 허덕, 임성진. 2004. 『가축 사육두수 총량제의 도입 방안에 관한 연구』. R487. 한국농촌경제연구원.
- 이한빈, 권오상. 2015. “농업부문 연구투자의 후생효과: 다가가 CGE모형 분석.” 『농업경제연구』 56(4): 89-118.
- 지인배, 권오상, 송우진, 김진년, 이용건. 2014. “Estimating Willingness to Pay for Livestock Industry Support Policy to Solve Livestock’s Externality Problem in Korea.” 『농촌경제』 37(4): 97-116. <http://doi.org/10.36464/jrd.2014.37.4.005>
- 통계청 국가통계포털(KOSIS). 주제별 국제통계. <https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?vwcd=MT_RTITLE&menuId=M_02_01#content-group>. 검색일: 2021. 6. 1.
- 통계청 국가통계포털(KOSIS). 가축동향조사. <https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?vwcd=MT_ZTITLE&menuId=M_01_01>. 검색일: 2021. 6. 1.
- 한국은행경제통계시스템. 2015년 실측 산업연관표. <<https://ecos.bok.or.kr/>>. 검색일: 2021. 6. 1.
- 한국축산경제연구원. 2018. 『기후변화에 따른 양돈분뇨 적정 처리방안 연구』.
- 한국환경정책·평가연구원. 2021. 『한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발』.
- 환경부 내부자료. 2020. 『2016년(2015년 기준) 가축사육농가 및 사육두수현황』.
- 환경부. 2020. 『가축분뇨 처리통계(2015년 기준)』.
- Backus, G. B. C. 2017. *Manure Management: An Overview and Assessment of Policy Instruments in the Netherlands*, World Bank Group.
- Burfisher, M. E. 2017. *Introduction to Computable General Equilibrium Models*. 2nd ed. Cambridge University Press.
- Clements, K. W., M. J. M. Mariano, and G. Verikios. 2020. “Estimating the Linear Expenditure System with Cross-Sectional Data.” Economics and Business Statistics Discussion Paper Series 2020-06. Griffith University.
- Jelić, O. N., and J. Šimurina. 2020. “Evaluating Sectoral Effects of Agricultural Nitrogen Pollution Reduction Policy

- in Croatia within a CGE Framework.” *Agricultural and Food Economics* (2020) 8: 9. Springer Open. <https://doi.org/10.1186/s40100-020-0152-6>.
- Just, R. E., D. L. Hueth, and A. Schmitz. 2004. *The Welfare Economics of Public Policy: A Practical Approach to Project and Policy Evaluation*. Edward Elgar.
- Löfgren, H., R. L. Harris, and S. Robinson. 2002. *A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS*. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Mardones, C., and M. Lipski. 2020. “A Carbon Tax on Agriculture? A CGE Analysis for Chile.” *Economic Systems Research* 32: 262-277. <https://doi.org/10.1080/09535314.2019.1676701>
- Mathews, K. H. Jr., C. Arnade, and K. Jones. 2008. “Derived Demand for Cattle Feeding Inputs.” *Journal of Agribusiness* 26: 41-60.
- OECD. 2010. *Policy Measures Addressing Agri-environmental Issues*.
- OECD. 2017. *OECD Environmental Performance Reviews: Korea 2017*.
- OECD Statistics. <<https://stats.oecd.org>>. 검색일: 2021. 3. 15.
- Oenema, O. 2004. “Governmental Policies and Measures Regulating Nitrogen and Phosphorus from Animal Manure in European Agriculture.” *Journal of Animal Science* 82(suppl_13). E196-E206.
- Oenema, O., and Berentsen, P. B. M. 2005. *Manure Policy and MINAS: Regulating Nitrogen and Phosphorus Surpluses in Agriculture of the Netherlands*. OECD.
- Wossink, A. 2000. “The Failure of Marketable Permits Systems and the Uncertainty of Environmental Policy: A Switching Regime Model Applied to the Dutch Phosphate Quota Program.” Paper presented at the AAEE annual meeting, July 30-August 2, 2000, Tampa FL. Available from <http://agecon.lib.umn.edu/>.
- Wossink, A. 2004. “The Dutch Nutrient Quota System: Past Experience and Lessons for the Future.” in OECD. *Tradeable Permits: Policy Evaluation, Design and Reform*.
- Wossink, A., and C. Gardebroek. 2006. “Environmental Policy Uncertainty and Marketable Permit Systems: The Dutch Phosphate Quota Program.” *American Journal of Agricultural Economics* 88: 16-27. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2006.00836.x>

원고 접수일: 2021년 6월 03일
원고 심사일: 2021년 6월 17일
심사 완료일: 2021년 9월 21일