

비료의 최적 사용량 결정분석:
토양 상태에 따른 동태적
최적화 모델과 모형 정립

차 례

제1장 서론

1. 연구 배경 및 필요성	1
2. 선행연구 검토	2
3. 연구방법	3
4. 연구자료	7

제2장 함수추정 및 동태적 최적화 분석

1. 수도작 생산량과 투입 비료 및 토양상태의 관계	9
2. 비료사용량에 따른 토양 상태변화 함수	26
3. 토양 상태에 따른 비료사용량 함수	27
4. 동태적 최적화 모델 설정 및 향후 30년간 농업생산 분석	31
5. 최적 비료 사용량 추정	32
6. 동태적 최적 토양 상태추이 추정	35
7. 최적 농업 생산량 추정	37

제3장 결론

<부록>

부록1: 한국 수도작 생산비 및 생산량 시계열 자료 :1971-2009.	43
부록2: 한국 수도작 논 토양의 상태변화 추이 시계열 자료 :1971-2009.	44
참고 문헌	46

표 차례

제2장

표 2-1. 수도작 기타 복비의 배합도	12
표 2-2. 수도작 토양의 적정 토지 함량	16
표 2-3. 생산함수 추정 결과	25
표 2-4. 유기물 함량 상태 함수 추정 결과	26
표 2-5. 유효인산 함량 상태 함수 추정 결과	27
표 2-6. 토양상태에 따른 질소비료 시비량 함수	29
표 2-7. 토양상태에 따른 인산비료 시비량 함수	30
표 2-8. 동태적 장기 균형 정리	38

부록

부표 1. 한국 수도작 생산비 및 생산량 시계열 자료: 1971~2009	43
부표 2. 한국 수도작 논 토양의 상태변화 추이 시계열 자료: 1971~2009 ...	44

그 립 차 례

제1장

그림 1- 1. 토양상태와 변수들 간의 장기균형관계그림	6
--------------------------------------	---

제2장

그림 2- 1. 쌀 수확량 단수(kg/10a): 1971-2009	10
그림 2- 2. 단위당 수도작 전체 화학 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009	11
그림 2- 3. 단위당 수도작 질소 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009	12
그림 2- 4. 단위당 수도작 인산 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009	13
그림 2- 5. 단위당 수도작 가리 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009	14
그림 2- 6. 단위 면적당 질소,인산 가리 비료의 총 사용량: 1971~2009	15
그림 2- 7. 단위당 수도작 유기질 비료 사용량(kg/10a)	15
그림 2- 8. 논 토양의 산성화 지수: 적정범위: 6~6.5.	16
그림 2- 9. 논토양의 유기물 함량(%), 적정함량: 2.5~3.0(%)	17
그림 2-10. 논토양의 유효인산(ppm) 추세: 적정 수준: 80~120ppm.	17
그림 2-11. 논토양의 유효규산(ppm) 추세: 적정 수준: 130~180ppm.	18
그림 2-12. 수도작 논의 토양개량제 시비량(kg/10a)	19
그림 2-13. 질소 비료와 단수의 관계	19
그림 2-14. 인산 및 가리 비료와 단수의 관계	20
그림 2-15. 질소, 인산 및 가리 전체 화학 비료 사용량과 단수의 관계	20
그림 2-16. 산도, 유기함량, 및 유효인산의 추이	21
그림 2-17. 쌀 생산단수와 총 화학 비료 사용량과의 관계 및 추세식	22

그림 2-18.	쌀 생산단수와 유기함량과의 관계 및 추세식	22
그림 2-19.	쌀 생산단수와 유효인산 정도의 관계	23
그림 2-20.	쌀 생산단수와 유효규산 정도의 관계	24
그림 5-21.	질소 시비량과 유기물 함량과의 관계 및 추세식	28
그림 2-22.	인산비료 시비량과 유효인산 함량과의 관계	30
그림 2-23.	최적 질소비료 사용량	33
그림 2-24.	최적 인산비료 사용량	33
그림 2-25.	최적 가리비료 사용량	34
그림 2-26.	동태적 최적 화학비료 사용량 추이	35
그림 2-27.	논토양의 동태적 최적 유기물 함량 추이	36
그림 2-28.	논토양의 동태적 최적 유효인산 함량(ppm) 추이	36
그림 2-29.	동태적 최적 단위당 수확량(kg/10a) 추이	37
그림 2-30.	단수와 유기물 함량 및 질소 시비량의 장기 균형	38
그림 2-31.	단수와 유효인산 함량 및 인산 시비량의 장기 균형	39

제 1 장

서 론

1. 연구 배경 및 필요성

한국의 화학비료 사용량은 환경보전과 건강식품의 수요 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.¹ 한편 토양 환경 오염에 따른 한국농업의 지속 가능성에 대한 논의도 일고 있다. 이러한 시점에서 비료 사용에 대한 한국 농업의 장기방향 설정이 필요하나 현재 농수산부에서는 그에 대한 정책의 실증적 연구에 근거한 미래의 방향을 설정하지 못한 실정이다.²

이에 본 연구는 비료 사용에 따른 수확량의 증대와 논 토양 환경의 변화에 따른 비용을 함께 고려하여 장기적 미래의 최적 비료사용량을 제시하고자 한다. 이는 동태적인 분석으로서 농진청에 의한 토양생태에 따른 정태적 최적 비료 시비량을 추천하는 분석의 한계를 극복한 것이다.³

1 부록 1의 단위면적당 화학 비료 사용량 참조

2 농림부의 기준은 농진청의 최적 시비량에 근거하여 현재수준에서의 절감 목표 정도를 갖고 있다.

경제학의 최적 투입량 결정은 투입재 사용에 따른 한계비용과 한계수입이 동일한 선에서 결정된다. 토양환경 변화에 따른 비료의 최적 사용량은 비료 사용에 따른 한계생산과 비료사용으로 인한 토양환경변화에 따른 한계비용이 같은 점에서 결정된다고 볼 수 있다. 즉 농업생산과 환경비용을 함께 고려하여 결정된다는 것이다. 이는 지속가능한 농업 투입요소의 최적 결정량이라고 볼 수 있는 것이다.

2. 선행연구 검토

한국 수도작 농업의 최적 시비량에 대한 연구로는 농진청 국립과학연구원의 장병춘 (2010)에 의한 작물별 시비 처방 기준에서 살펴 볼 수 있는데, 여기서는 단위면적 10a당 쌀 수확량 460~500kg 생산을 위하여 질소비료 7~11kg과 인산 4.5kg, 그리고 가리비료 5.7kg으로 추천되고 있으며 논 토양의 적정 상태로는 산도가 5.5~6.5, 유기물 함량이 2.5~3%, 유효인산 함량이 80~120 mg/kg(ppm), 유효 규산 함량이 157~180mg/kg(ppm)으로 나타나고 있다. 그 이외에도 토양 감정에 의한 시비추천공식을 제시하고 있는데, 질소의 경우 일반답에서 쌀 500kg/10a의 생산을 위해서는 $N(kg/10a)=11.17-0.133.OM+0.025*Sio_2$ 로 나타나는데 여기서 N은 질소 시비량을, OM은 논 토양 중 유기물 함량을, Sio₂는 토양중 유효규산 함량을 나타낸다. 이는 논 토양 중 유기물 함량이 높을수록 질소시비량을 줄이며 유효규산의 함량이 높을수록 질소시비량을 늘리는 것을 의미한다. 인산비료의 경우, 동일한 생산량의 목표량을 달성하기 위해서 $P(kg/10a)=(100-Avail\ P_2O_5)*0.1$ 로 나타나는데, 여기서 P는 인산 비료시비량을, Avail. P₂P₅는 토양 중 유효인산 함량을 의미하는데 인산시비량은 유효인산 함량이 높을 수록 작은 것으로 나타난다. 이외에도 가리 및 규간 비료의 추

³ 농진청의 최적 시비량 추천량은 장병춘(2010) 참조³

천 시비량도 제시되고 있다. 그러나 이러한 추천시비량과 현재 시비량과의 차이를 극복하기 위한 년차별 실천방안 등에 대해서는 언급하지 못하는 한계를 지니고 있다.

한국 수도작 생산의 최적 시비량 결정을 위한 동태적 최적화 분석은 아직까지 전무하여 본 연구는 동태적 분석의 첫 시도라고 볼 수 있다.

동태적 최적 농업 투입량은 최적 조절 이론(Optimal Control Theory)이나 수리적 동태적 프로그래밍(Dynamic Programming, DP) 모델링에 의해서 결정될 수 있다. 이들에 대한 모델의 설명은 Bellman(1957), Rust(1996), Kamien and Schwartz(1998) 그리고 Kennedy(1986)에서 읽을 수 있다.

3. 연구방법

본 연구에서 쌀 농가는 농지 및 비료(F_t) 등 투입재를 이용하여 생산량을 극대화 하고 투입재 사용에 따른 비용을 최소화 함으로써 최적 투입재 사용량을 결정 하고자 한다. 또한 논 토양의 시간에 의한 자연 회복(자정)능력도 고려할 것이다. 본 연구는 한국 쌀농가는 t 시기에 비료(F_t)와 농약($Pest_t$)을 일정 정도의 토양상태(Pol_t) 농지에 투입하여 쌀을 생산(Y_t)하되 그 동태적 생산량의 총량을 극대화하는 것으로 가정한다.

농지의 상태를 고려한 한국 쌀농가의 비료와 농약을 이용한 쌀농업 생산량 극대화 모델은 아래와 같이 정의할 수 있다. 본 모델은 처음단계로 무한대의 시간대를 가정한다.

여기서 δ 는 토양상태의 자정능력 정도를 나타내는 계수이다. 위 수식을 보면 현재가치화된 생산량의 총계를 극대화하는 비료와 농약의 시계열 최적 해를 구하되 토양상태의 변화가 비료와 농약 등 투입재 사용량에 따라 영향을 받을 뿐 아니라 생산량에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 토양상태의 초기값(Pol_0)이 A 로 주어졌을 때의 경우이다.

$$\begin{aligned} & \underset{F_t, Pest_t}{Max} \quad \int_0^{\infty} e^{-rt} Y_t(F_t, Pest_t, Pol_t) dt \\ & \text{s.t.} \end{aligned}$$

$$\dot{Pol}_t = f(F_t, Pest_t) - \delta * Pol_t = g(F_t, Pest_t, Pol_t)$$

$$Pol_0 = A$$

동태적 최적 사용량을 발견하기 위한 현재가치 해밀토니언 함수는 다음과 같다.

$$H(Pol, F, Pest, m) = Y_t + mg(Pol, F, Pest) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $m(t) = e^{rt}\lambda(t)$ 로서 이는 제약식의 한계값의 현재가치승수 (a current value multiplier)이다.

최적해는 해밀토니언 함수의 필요조건에 의해 다음과 같이 결정된다. 먼저 조정변수 (control variables) 들의 일차미분 함수들이 0인 지점에서 결정된다.

$$H_F = Y_F + mg_F(Pol, F, Pest) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$H_{Pest} = Y_{Pest} + mg_{Pest}(Pol, F, Pest) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

다음으로는 상태변수(state variables)들의 일차미분함수들이 m 의 일차미분과 같아야 한다.

$$\dot{m} = rm - H_{pol} = rm - Y_{pol} - mg_{pol}(Pol, F, Pest) \dots\dots\dots (4)$$

마지막으로 해밀토니언 함수에 의한 일차미분함수들이 상태변수들의 일차미분함수()와 같아야 한다. 즉 상태변수 함수이다.

$$Pol_t = f(F_t, Pest_t) - \delta^* Pol_t = g(F_t, Pest_t, Pol_t) \dots\dots\dots (5)$$

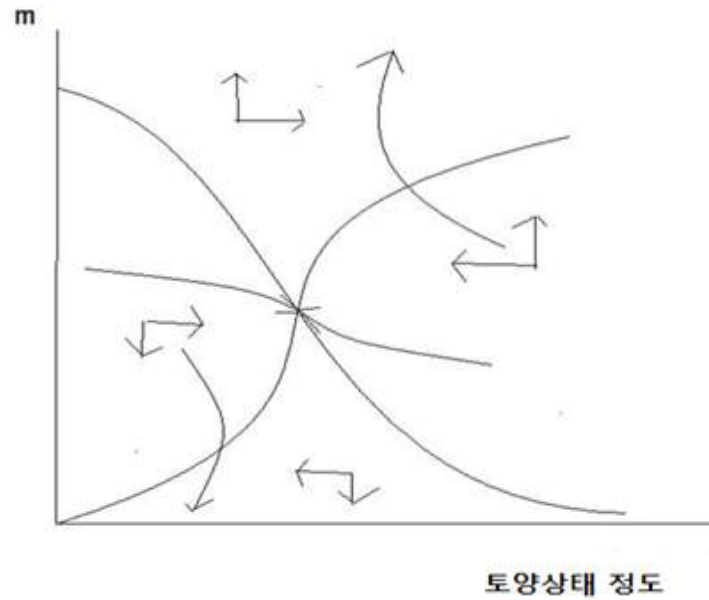
연립 미분 방정식 (2),(3),(4) 그리고 (5)를 함께 보면 $F^*(pol)$, $Pest^*(pol)$ 와 $Pol^*(F^*, Pest^*)$ 을 얻게 된다.

또한 무한대의 시간대상에서 장기 수렴점인 안정균형점(a steady state)을 $Pol = m = F = Pest = 0$ 에서 발견하게 된다. 변수들의 부호에 따라 수렴될수도 있고 분산될 수도 있다. 주요 관심사항이 논 상태정도와 비료, 농약의 사용 관계에 있으므로 토양 상태와 비료의 관계를 살펴보면 다음과 같다. 다소 수식이 복잡한 관계로 여기서는 오직 토양상태정도와 토양상태의 현재가치 한계승수의 관계만을 중심으로 보고자 한다.

먼저 토양상태 정도의 수렴점은 수식(5)에서 발견되는데, 균형점은 $f(F_t, Pest_t) = \delta^* Pol_t$ 에서 이뤄진다. 즉 비료 및 농약 사용에 따른 토양상태의 변화인 증감 정도가 토양상태의 자연적 정화도와 같은 점에서 이루어진다는 것이다. 농약 및 비료의 장기적 최적 사용량은 자연이 정화할 수 있는 정도에서만 사용한다는 것이다. 여기서 $f' > 0$ 이고 $f(0,0) = 0$ 임으로 Pol_t 과 F_t 또는 $Pest_t$ 의 그래프에서 $Pol = 0$ 함수는 원점을 지나면서 오른 쪽 위로 상승하는 곡선이 된다. 그리고 곡선의 위에서는 오염도가 증가하고 아래서는 감소하는 경향을 보이게 된다.

다음으로 오염도의 현재가치 승수의 수렴점은 (4)에서 $m = 0$ 과 함께 발견된다. 이는 $m = Y_{pol} / (r - g_{pol}(Pol, F, Pest)) = Y_{pol} / (r + \delta)$ 에서 이뤄지는데 여기서 $Y'_{pol} < 0$ 임으로 그래프는 왼쪽 위에서 아래로 향하는 그래프가 된다. 그래프의 위에서는 m 이 증가하고 아래서는 감소한다. 이를 아래의 도표1에서 보면 균형점은 변곡점(saddle point)이 되고 일부 초기값만이 장기균형에 이르게 됨을 알 수 있다.

그림 1-1. 토양상태와 변수들 간의 장기균형관계그림



만약 목적함수를 생산량의 극대화만이 아닌 현재가치화된 이윤의 최적화로 본다면 모델의 수식은 다음과 같이 달라진다.

$$\text{Max}_{F_t, Pest_t} \int_0^{\infty} e^{-rt} (p_t Y_t - C_t(F_t, Pest_t)) dt$$

s.t.

$$Pol_0 = A$$

$$\dot{Pol}_t = f(F_t, Pest_t) - \delta * Pol_t = g(F_t, Pest_t, Pol_t)$$

즉 모든 수식은 생산함수만이 이윤함수로 달라진 것 외에는 동일하다고 볼 수 있다.

4. 연구자료

먼저 쌀 생산함수 $Y_t(F_t, Pest_t, Pol_t)$ 및 토양상태 변동함수 $Pol_t = g(F_t, Pest_t, Pol_t)$ 의 추정이 필요하다. 이를 위해 쌀 생산량 Y_t , 벼농사 화학 비료사용량 F_t , 벼 화학 농약사용량 $Pest_t$, 논토양 상태 측정치 Pol_t 의 시계열 자료와 논토양의 자정정화 능력치 δ 의 자료 등의 수집이 필요하다. 본 연구에서 사용된 자료 중 수도권작 생산량 및 생산요소 투입량 자료는 한국 통계청의 논벼 생산의 주요투입 물량 및 시간, 생산량 자료에서 인용되었다.⁴ 이들 자료 중 1970년에서 2009년까지의 시계열 자료를 중심으로 분석하였다. 이들의 구체적인 통계는 부록 1에서 살펴볼 수 있다. 논토양상태의 변화 자료는 농협중앙회(2012)의 비료사업통계요람에서 구하였다. 이는 부록 2에서 정리하였다.

⁴ 통계청의 수도권작 생산비 및 단위자료는 다음의 웹사이트에서 다운로드 받으실 수 있다. http://kosis.kr/abroad/abroad_01List.jsp?parentId=E

제2 장

함수추정 및 동태적 최적화 분석

통계 패키지인 STATA를 이용하여 모델에 나오는 쌀 생산함수 $Y_t(F_t, Pest_t, Pol_t)$ 와 논 토양 상태 변동함수 $Pol_t = g(F_t, Pest_t, Pol_t)$ 추정하여 생산량의 극대화를 위한 동태적 최적 시비량을 알아보는 것이 본 장의 목표다. 함수추정에 앞서 각 설명변수들과 독립변수들 간의 관계를 도표를 통하여 살펴보고자 한다.

1. 수도권 생산량과 투입 비료 및 토양상태의 관계

이 연구는 시간 제약상 우선 생산의 극대화를 위한 최적 비료사용량 연구에 초점을 맞추었다. 본 연구는 우선 한국의 단위면적당 쌀 생산함수의 추정을 통하여 최적 비료 사용량을 계측하고자 한다.

쌀 생산함수는 전국 평균 생산량에 기초하여 추정되었다. 먼저 함수식은 노동, 기계, 비료투입량의 2차 방정식 형태를 가정하고 토양성분변수 및 1980년도의 더미변수 등이 추가되었는데 그 수식은 다음과 같다.

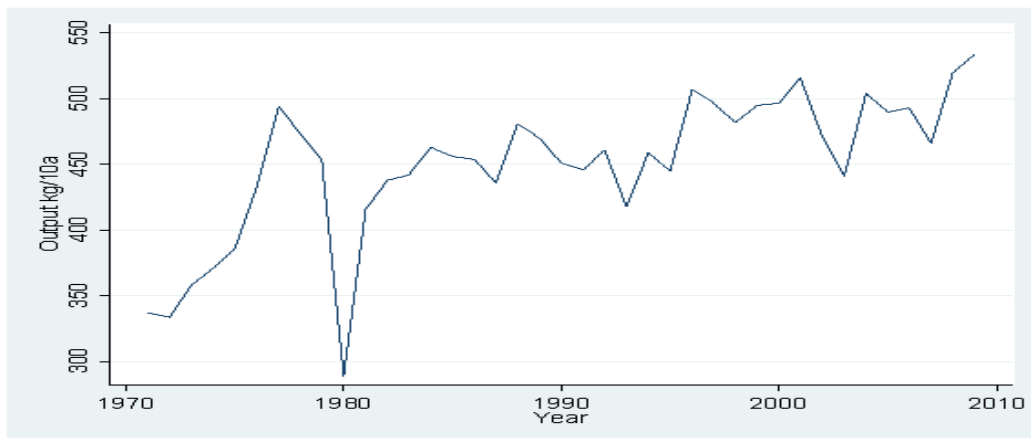
$$y_t = f(\text{투입요소(종자, 노동, 기계, 질소, 인산, 가리, 유기질 비료, 농약 등)}, \text{기후변수, 토양상태 변수들(유기물 함량, 유효인산함량, 산도 등)} \dots\dots (6)$$

수식 (6)에서, y_t 즉 t 기의 단위면적당 쌀 생산량은 단위면적당 종자사용량, 노동 투입시간, 기계사용시간, 화학비료(질소, 인산, 가리) 및 유기질 비료 투입량을 포함하는 투입요소와 여름철 강우량 및 일조시간 등의 기후변수 그리고 유기물 함량이나, 유효인산함량 및 토양산도 등의 토양상태 변수 등에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

본 장에서는 단위면적당 쌀 생산량을 포함한 생산량의 설명변수들을 먼저 살펴본 후 생산함수 추정을 논하고자 한다. 본 연구에서 사용된 자료는 한국 통계청의 논벼 생산의 주요투입 물량 및 시간 자료에서 인용되었다.⁵

여기서 연도별 시계열 쌀 10a단위당 생산량을 보면 다음 그림 2-1과 같다.

그림 2-1. 쌀 수확량 단위(kg/10a): 1971~2009



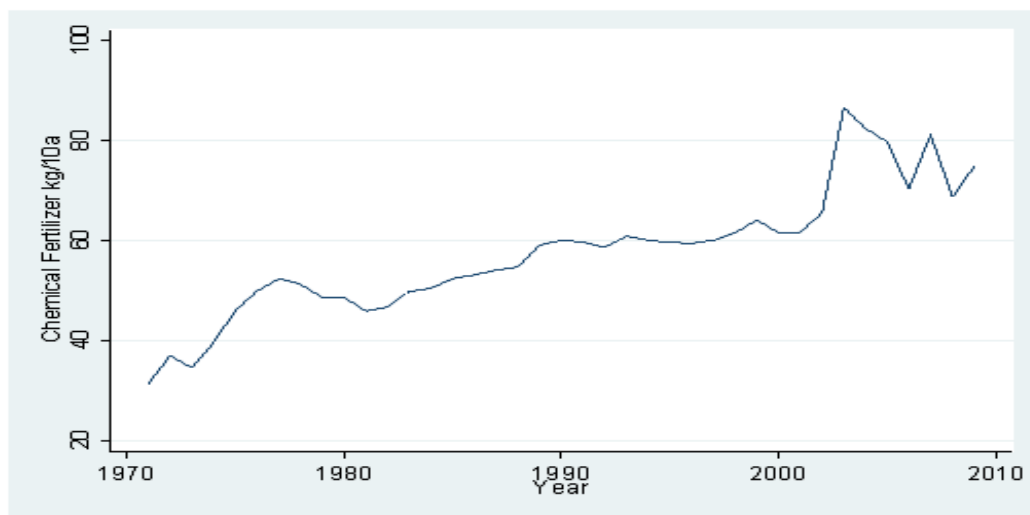
1970년대 후반부터 1990년대 중반까지 평균 단수는 10a당 450kg을 유지하고 있었으며, 1990년대 중반부터는 500kg대를 유지하고 있고 2009년에는 534kg을 생산하였다. 오직 1980년도만 기상악화에 따른 단수의 감소를 보이고 있을 뿐, 전체적으로 상승추세를 보이고 있다. 이러한 단위면적당 쌀 생산량의

⁵ 한국 통계청 http://kosis.kr/abroad/abroad_01List.jsp?parentId=E과 나라지표
http://www.index.go.kr/egams/stts/jsp/potal/stts/PO_STTS_IdxMain.jsp?idx_cd=1401
 참조함.

상승과 변동은 여러 생산 투입요소들과 기후 및 토양영양분의 변동에 의하여 설명될 수 있는 것이다.

다음으로 단위 면적 10a당 화학비료의 총사용량은 그림 2-2에서 보듯이 1971년도 31.4kg 에서 2009년도 74.86kg으로 138% 증가하는 것으로 나타나는데 이는 질소질 비료와 인산질 비료, 가리질 비료 그리고 복합비료의 합계를 나타내고 있다. 즉 수도용 복합비료의 경우복비21-17-17(통일계 기비)와 17-21-17(벼 기비용) 외에도 기타 복비로 21-9-16(저인산 복비), 22-12-12+3(고토) (고토함유 신세대 비료), 12-7-6+3(붕소, 석회, 규산) [알찬들 비료], 11-6-6+4(고토, 석회, 규산) [쌀맛나 비료], 15-10-10(도우미 비료), 11-9-8+2(고토, 붕소, 제오라이트)[으뜸쌀 비료], 15-15-15(못자리용), 18-0-18(벼이삭 거름), 21-9-14(흙사랑 비료) 등 다양하게 사용되고 있다.

그림 2-2. 단위당 수도작 전체 화학 비료 사용량(kg/10a): 1971-2009



특히 전통적으로 사용하던 복비인 21-17-1, 17-21-17가 아닌 기타 복비의 비중이 1982년 5%에서 2009년 81%를 차지하고 있을 정도로 그 중요성이 증가한 실정이다. 수도작 기타 복합비료의 질소, 인산, 가리의 비중은 다음의 표 2-1에서 볼 수 있다.

표 2-1. 수도작 기타 복비의 배합도

수도작 기타 복비	N	P	K
저인산복비	21	9	16
고도함유 신세대비료	22	12	12
알찬들비료	12	7	6
쌀맛나비료	11	6	6
도우미비료	15	10	10
으뜸쌀비료	11	9	8
못자리용	15	15	15
벼이삭거름	18	0	18
흙사랑비료	21	9	14

자료: 친환경 유기농업 연구소, 비료, <http://blog.daum.net/aceykh/11671179>.

기타 복비의 질소 인산 가리의 평균비중치를 적용하여 통계청 화학비료자료의 질소 인산 가리의 사용량을 계측하였다. 이들을 질소질 인산질 가리질 비료의 사용량과 합하여 전체화학 비료 중 질소질, 인산질 및 가리질 각각의 사용량을 계산하였다.

그림 2-3. 단위당 수도작 질소 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009

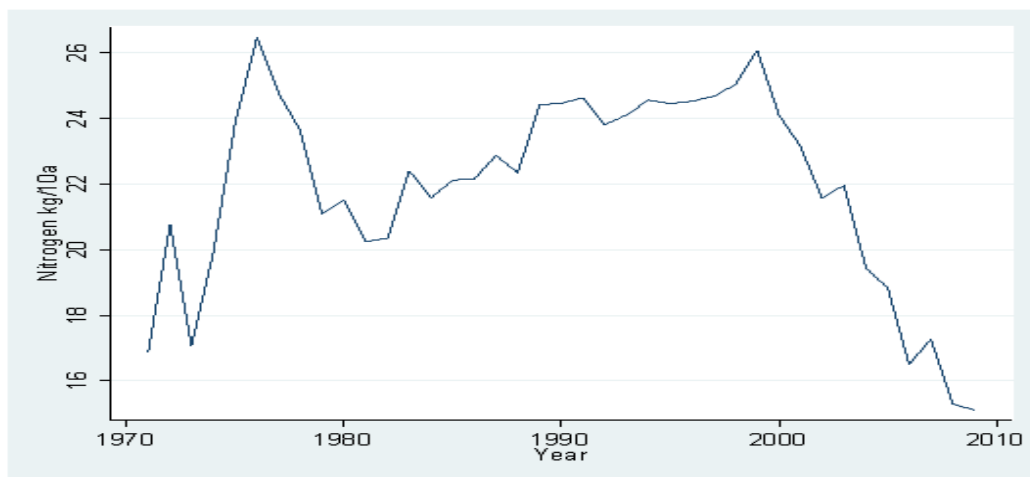


그림 2-3에 나타난 수도작 10a 단위당 질소질 비료 사용량은 1971년 16.89kg에서 1976년 26.48kg으로 증가한 후 다시 1981년 20.25kg까지 감소했다가 1999년도의 26.07kg까지 증가한 후 정부의 환경정책과 비료사용량 절감 방침에 따라 계속 감소하여 2009년 15.11kg이 사용 중이다.

농촌진흥청의 자료에 따르면, 10a당 500kg의 생산량을 위해서는 질소 비료 사용량을 10a당 11kg을 추천하고 있다. 2009년 15.11kg에서 27%의 절감을 이룬다고 볼 수 있지만 2009년 10a당 단수가 534kg임을 감안할 때 그보다 훨씬 적은 량의 절감이 목표라고 볼 수 있다.

10a 단위당 수도작 인산 비료 사용량을 그림 2-4에서 보면 1971년도에 4.2kg에서 1978년에 8.47kg으로 정점에 이른 후 다소 감소해 1981년 5.71kg까지 감소하다 다시 증가해 1991년 7.45kg까지 증가한 후, 2009년 4.86kg으로 거의 1971년도의 수준에 이르렀다. 농진청의 인산비료 추천시비량이 460-500kg 목표생산량이 4.5kg임을 볼 때 2009년 534kg 단수에 4.86kg은 거의 현재 최적시비량에 가깝다고 볼 수 있다.

그림 2-4. 단위당 수도작 인산 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009

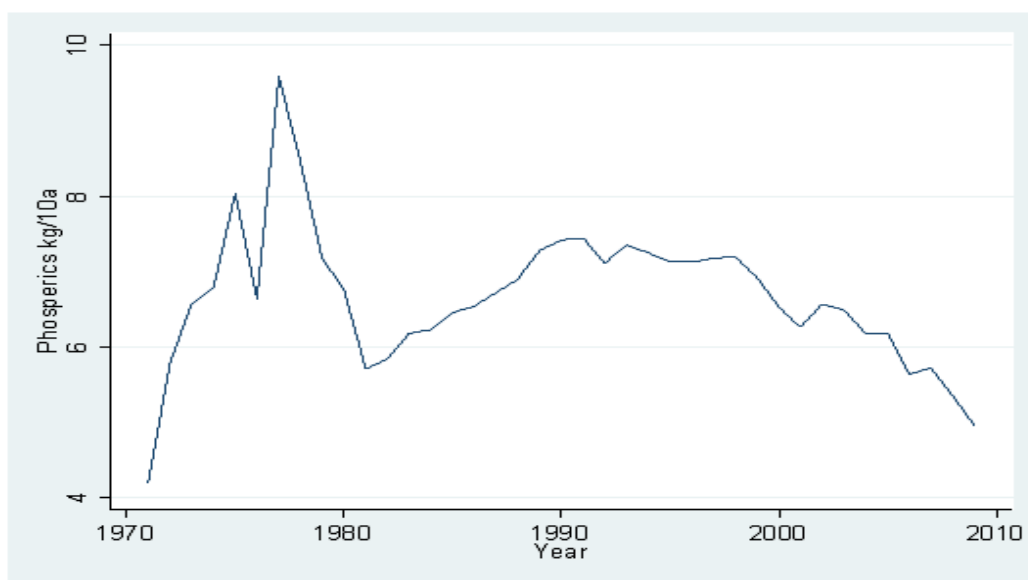


그림 2-5. 단위당 수도작 가리 비료 사용량(kg/10a): 1971~2009

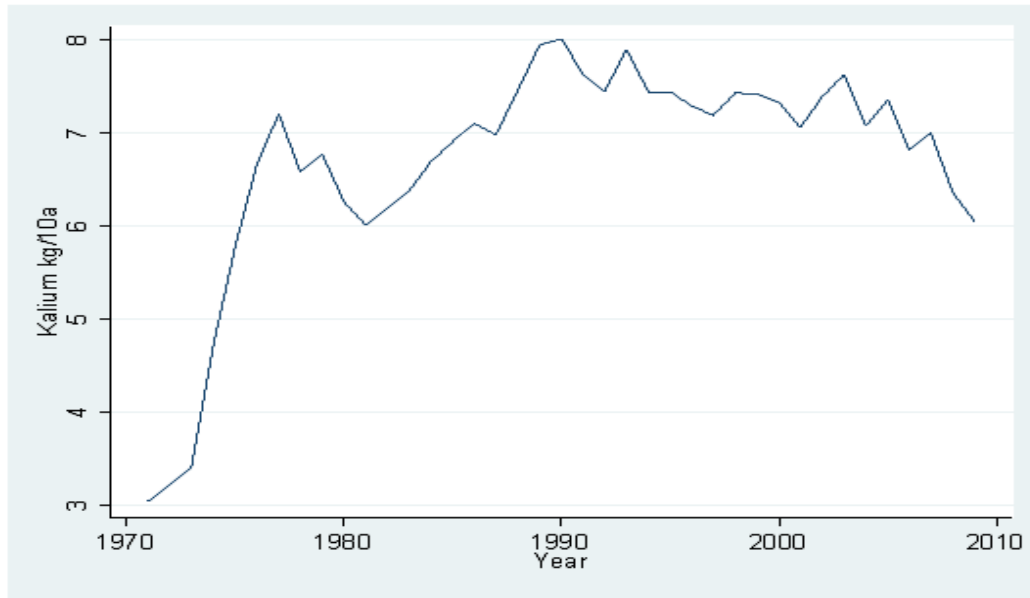
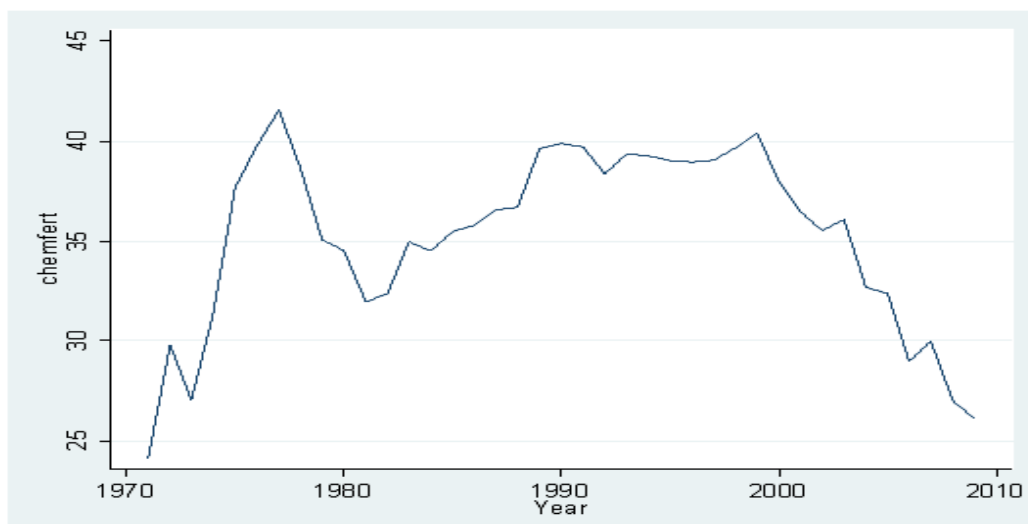


그림 2-5에 나타난 10a당 가리 비료 사용량은 1971년도에 3.05kg에서 1977년도 7.21kg까지 증가한 후 다시 감소해 1981년 6.01kg이 된 후 다시 증가하여 1990년 8.01kg에서 정점을 이르고 증가와 감소의 변동을 보이면서도 2009년 6.05kg까지 감소추세를 보이고 있다. 10a당 단수 460~500kg 목표 시 5.7kg이 농진청 표준시비 추천량임을 볼때 현재 534 단수에서의 6.05kg은 거의 목표수준에 와 있다고 볼 수 있다.

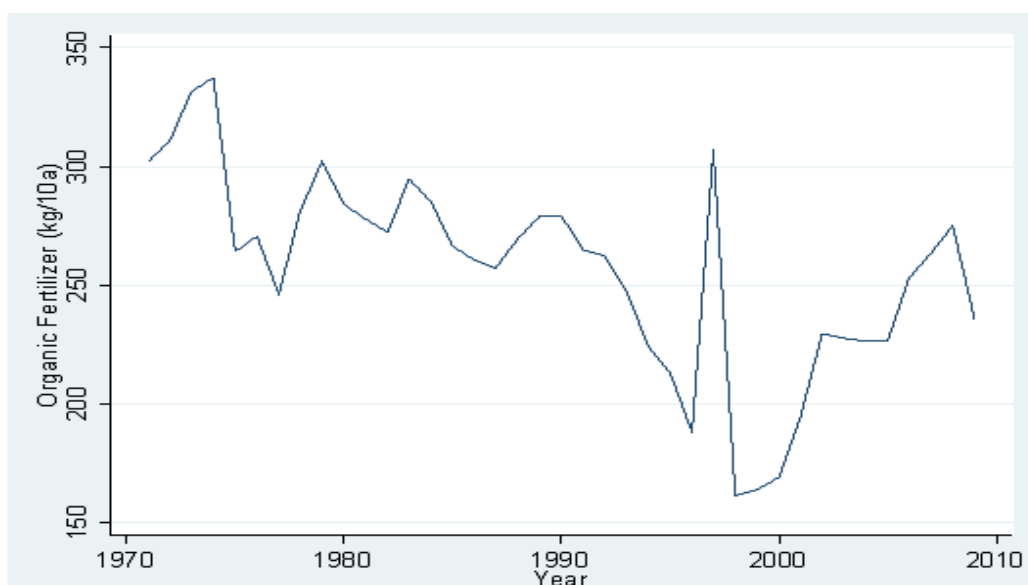
질소 인산 가리비료의 총합계 추세를 도표7에서 보면 1971년 현재 24.14kg에서 시작하여 1977년 41.56kg까지 지속적으로 증가한 후 다시 감소하여 1981년에 31.97kg에 이르고 다시 반전하여 1999년 40.41kg을 정점으로 계속 하락하여 2009년 26.11kg에 이르고 있다. 이는 500kg 단위당 생산량 하에서 21.2kg이 농진청의 추천시비량임을 감안할 때 2009년도의 534kg 생산량 하에서 26.11kg은 추천시비량과 비슷한 수준에 다가가 있다고 볼 수 있다. 이는 1999년 이후 35%의 화학비료 사용량의 감소를 보였음을 알 수 있다.

그림 2-6. 단위 면적당 질소,인산 가리 비료의 총 사용량: 1971~2009



단위면적당 유기질 비료의 사용량을 그림 2-7에서 보면 1971년 이후 계속 감소추세를 보이다 1998년 161.5kg으로 최하점을 돌아 증가추세를 보이고 있어 2009년 235.7kg을 투입하고 있다.

그림 2-7. 단위당 수도작 유기질 비료 사용량(kg/10a)

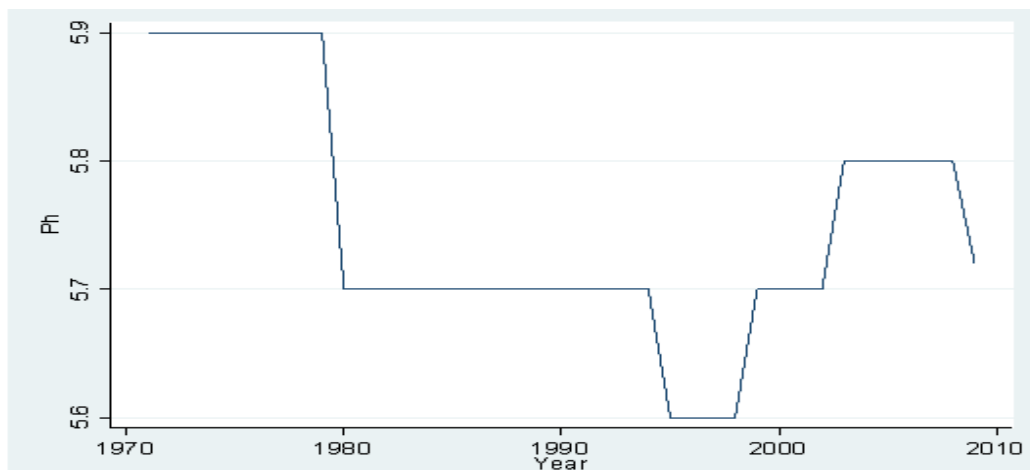


비료사용량은 토양의 영양 및 환경상태에 따라 다르게 결정되어야 한다. 한국 수도작 생산의 경우 토양의 최적 토지 상태는 농진청의 자료에 따르면 아래 표 2-2와 같다. 산도의 경우 6.0 내지 6.5로 중성토양이 최적으로 나타나며 유기물 함량은 2.5~3.0% 정도, 유효인산은 80~120ppm 정도를, 유효규산은 130~180ppm이 적정수치로 나타나고 있다.

표 2-2. 수도작 토양의 적정 토지 함량

수도작	적정함량
산도	6.0~6.5
유기물 함량(%)	2.5~3.0
유효인산(ppm)	80~120
유효규산(ppm)	130~180

그림 2-8. 논 토양의 산성화 지수: 적정범위: 6~6.5.



이러한 토양의 적정상태에 비교하여 우리나라 평균 논토양의 상태를 시계열 별로 살펴 보고자 한다. 먼저 토양의 산도를 그림 2-9에서 살펴보면 1971년이 후 우리나라의 논토양은 한번도 6.0 이상의 적정토양 상태를 유지한 적이 없고 다소 산성화 경향을 보이고 있다. 즉 1970년대 5.9에서 1980년대 5.7로 산성화 되다 1990년 중반에 5.6으로 더욱 산성화 경향을 보였다. 다시 2000년 이후 5.7 과 5.8 그리고 2009년 현재 5.72로 여전히 약산성화의 경향을 보이고 있다.

그림 2-9. 논토양의 유기물 함량(%), 적정함량: 2.5~3.0%

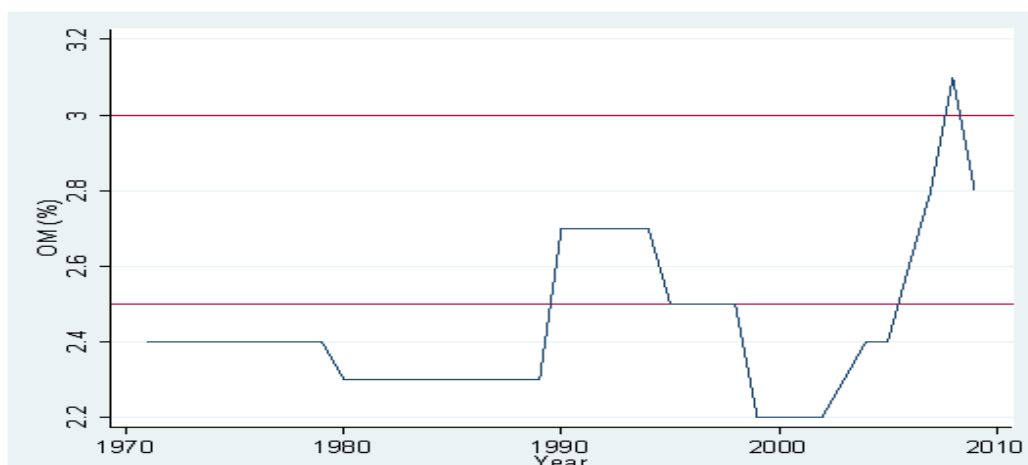


그림 2-9에 의하면 논 토양 비옥도를 나타내는 유기물 함량은 1970년부터 토 1990년대까지 2.4와 2.3 정도로 다소 빈곤한 함량을 보이다 1990년대에는 2.5에서 2.7 정도로 충분한 함량을 보여주었다. 다시 1999년부터 2004년까지 2.2나 2.4의 다소 빈약한 영양상태를 보여주다 2006년 이후 토양의 유기물 함량은 2.5에서 3.1 사이로 작장 범위 내에 머무르고 있음을 알 수 있다.

그림 2-10. 논토양의 유효인산(ppm) 추세: 적정 수준: 80~120ppm.

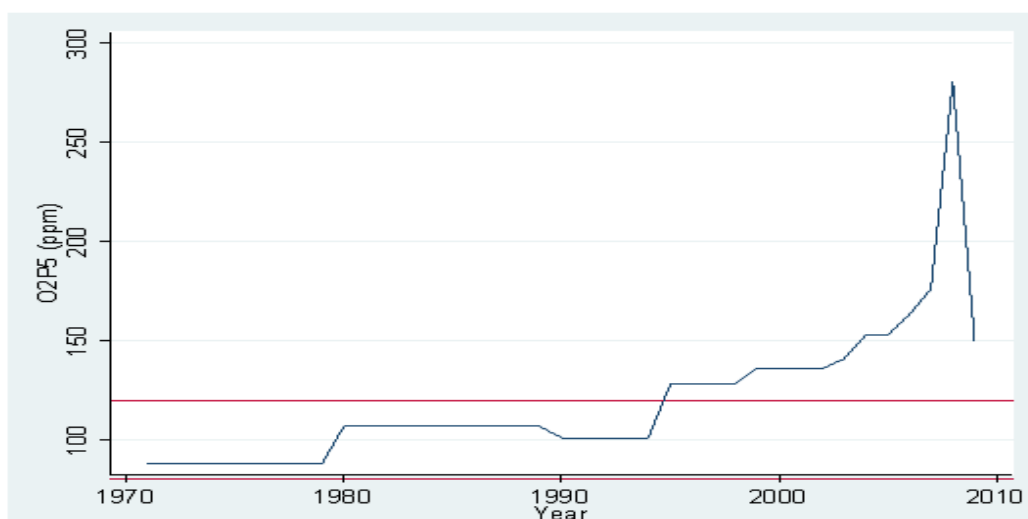
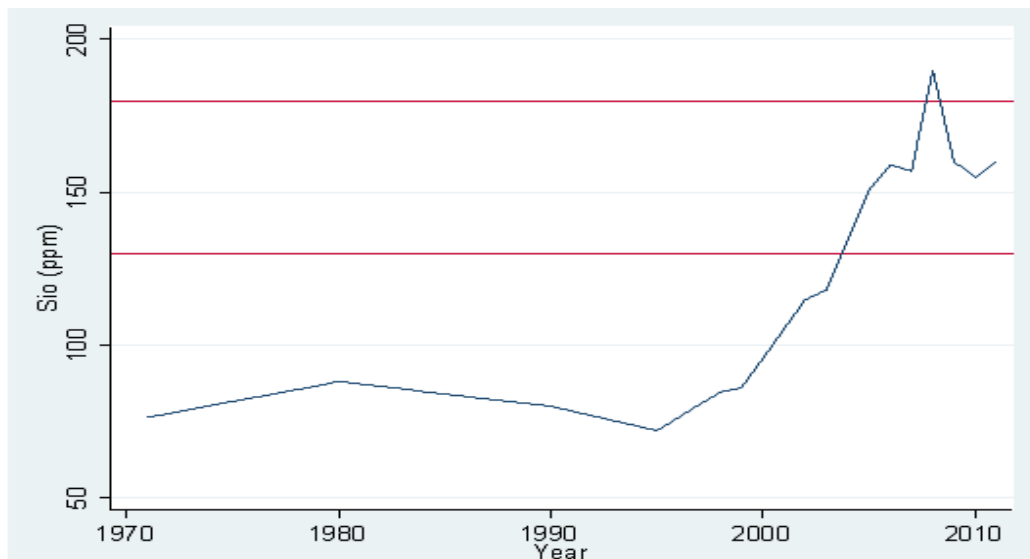


그림 2-10에서 토양 중 유효인산의 추세를 보면 1971년부터 1994년까지 80ppm에서 120 ppm 사이의 적정 수준을 유지하다 1995년 이후 급격히 증가해 2008년 281ppm으로 최대 허용치의 2배 이상 증가를 보이고 있다. 2009년 다시 감소해 2009년 현재 150ppm을 유지하고 있다.

논토양 중 유효규산의 추세를 그림 2-11에서 보면 2006년 이후에야 최소 적정함량인 130ppm을 넘고 있음을 볼 수 있다. 2009년 현재는 160ppm으로서 적정수준에 머물러 있다.

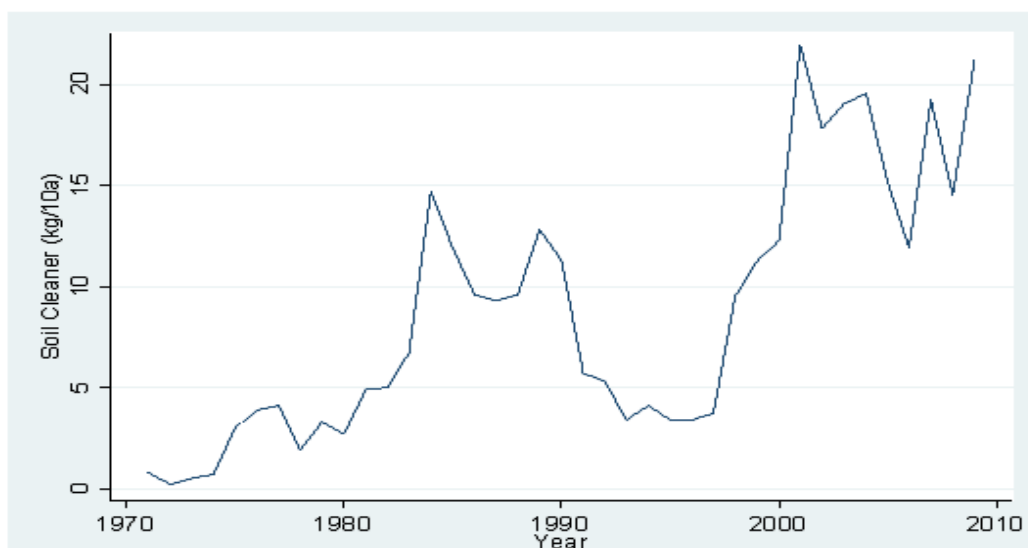
그림 2-11. 논토양의 유효규산(ppm) 추세: 적정 수준: 130~180ppm.



2000년 이후 논토양의 전반적인 상태의 호전은 그림에서 보듯이 화학비료 사용량의 감소와 유기질 비료 사용의 증가 및 토양개량제 사용의 증가로 볼 수 있다. 다음 그림은 토양개량제 사용량의 추세를 보여주고 있다. 1970년대에 10a당 0.8kg을 투입하던 것이 계속 증가추세를 보여 2009년 현재 21.25kg으로 지난 40년간 26.5배의 증가추세를 보이고 있다.

다음으로 생산함수의 추정에 앞서 단수와 각 생산 요소들 간의 관계를 그래프로 살펴봄으로써 설명 변수들 간의 관계를 예측해 보고자 한다. 그림 2-13과 그림 2-14에서는 단수와 각 질소, 인산 가리 비료 간의 관계를 시계열에서

그림 2-12. 수도작 논 토양개량제 시비량(kg/10a)



살펴보았다.

질산비료와 생산 단수의 관계는 2003년까지는 거의 양의 상관관계를 갖고 있음을 보이나, 2003년 이후부터 질소비료의 사용량은 계속 감소추세인 반면 단수는 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 2003년 이후 질소비료가 감소함에도 단수가 증가하는 이유가 설명되어야 함을 알 수 있다.

그림 2-13. 질소 비료와 단수의 관계

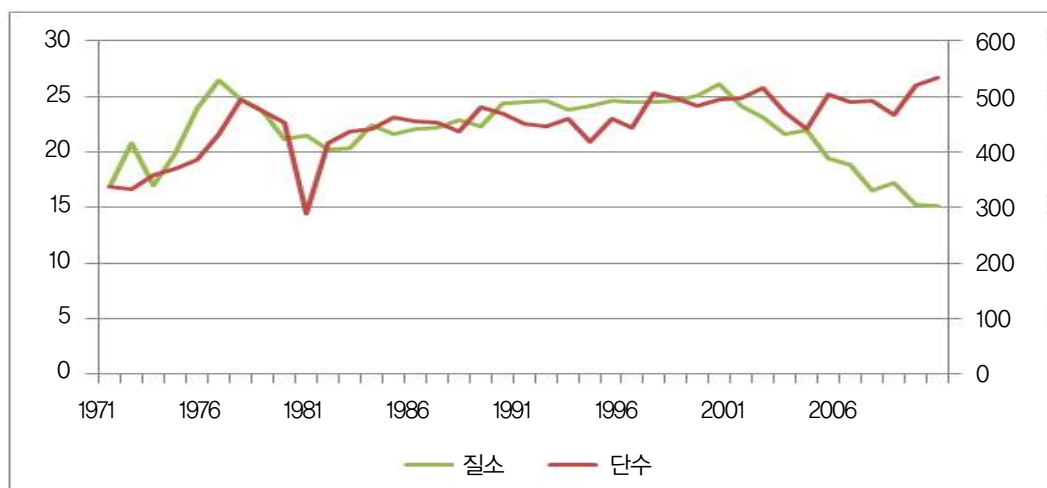
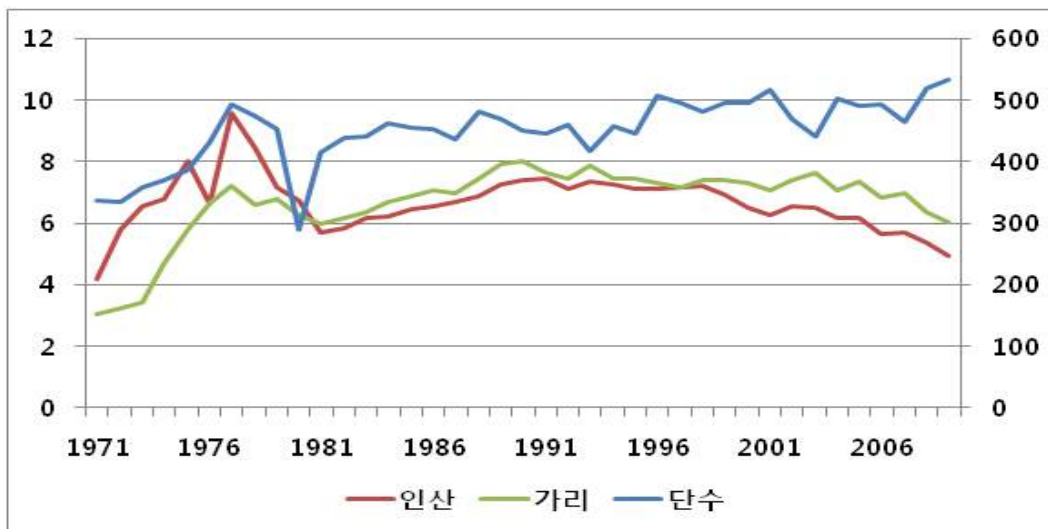


그림 2-14. 인산 및 가리 비료와 단수의 관계



인산과 가리비료도 생산단수와는 질소비료에서와 같이 동일한 추세를 보이고 있다. 즉 2000년까지는 비료 사용량과 단수의 관계가 양의 상관관계 하에서 움직이는 반면 2000년 이후부터는 인산과 가리비료의 감소하에서도 단수는 계속 증가하고 있음을 보여 주고 있다.

그림 2-15. 질소, 인산 및 가리 전체 화학 비료 사용량과 단수의 관계

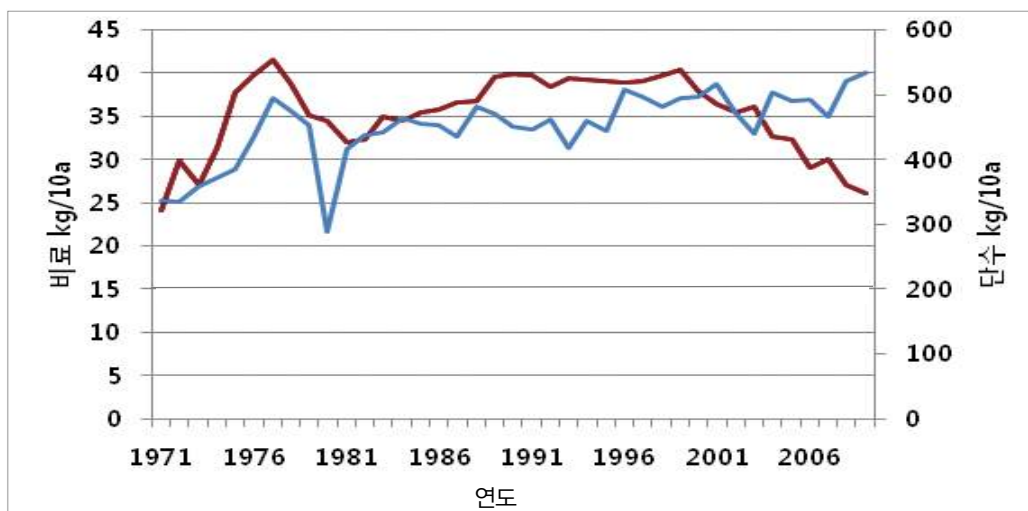
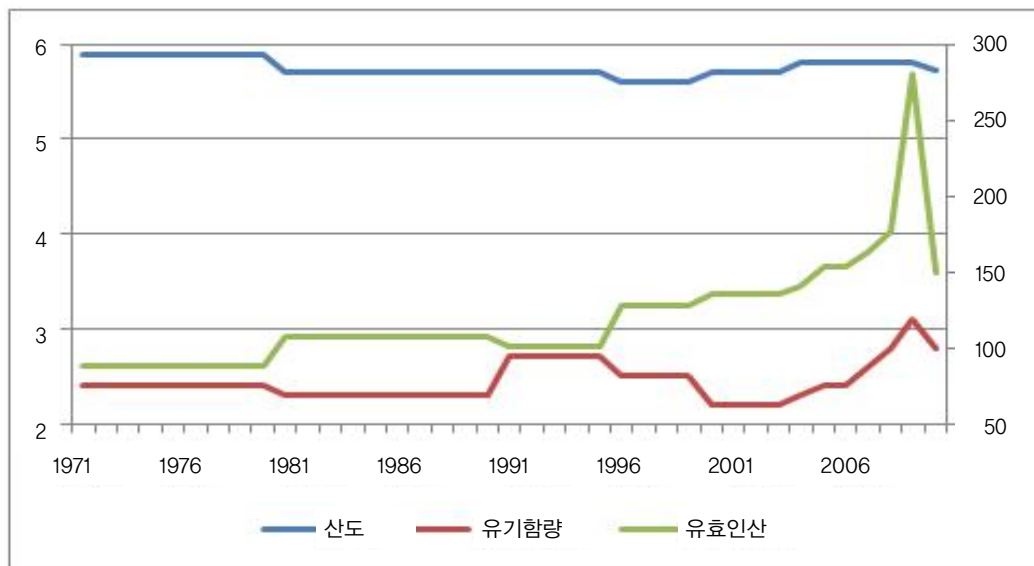


그림 2-15를 통해 질소 인산 가리의 합계인 순 화학 비료사용량의 총계와 단수의 관계는 질소비료와 거의 비슷한 관계를 보이고 있음을 보여 주고 있다.

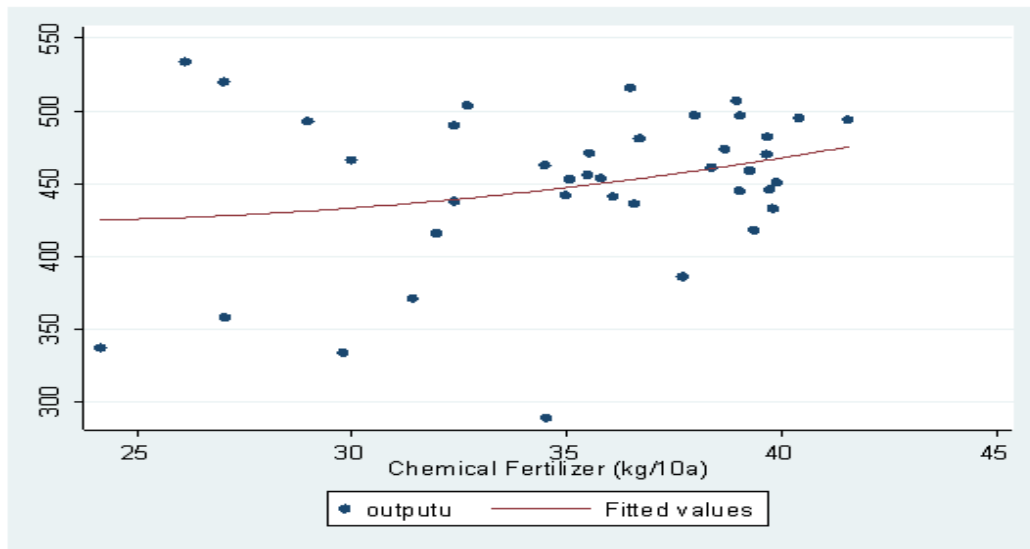
그러면 무엇이 2003년 이후 단수의 증가추세를 설명하는가? 본 저자는 이를 토양변수에 의해서 설명해 보고자 한다. 그림 2-16에서 보면 산도는 크게 변화를 보이지 않는 반면, 2000년대 들어서 화학 비료 사용량의 감소에도 불구하고 유효인산의 갑작스런 증대와 유기함량의 증가가 단수를 증가시키는 요인이라는 것을 확인할 수 있다. 즉 토양의 상태변수가 단수에 결정변수로 작용함을 볼 수 있다. 이는 또한 그림 2-12의 토양개량제 사용량의 증대와도 맥락을 같이 한다고 볼 수 있다.

그림 2-16. 산도, 유기함량, 및 유효인산의 추이



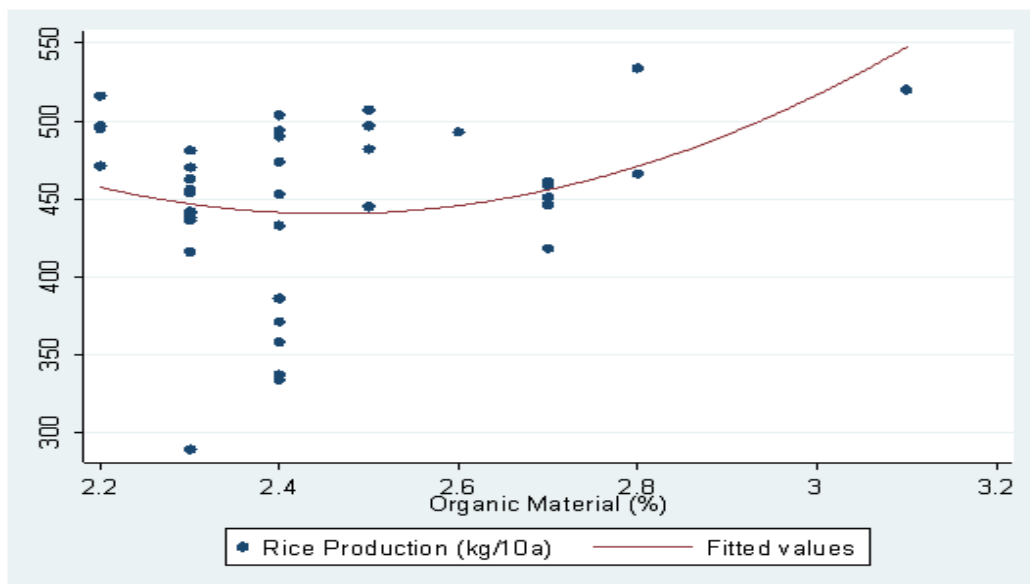
쌀 생산량과 투입량 및 토양상태와의 관계를 Scatter Plotting에 의하여 살펴 보고자 한다. 먼저 쌀 생산 단수와 총화학 비료 사용량과의 관계를 그림 2-17에서 추세식으로 살펴보면, 양의 상관관계를 보이는 반면 왼쪽 상단면의 자료들의 경우 토양 상태 등에 의해 설명될 필요를 느낀다.

그림 2-17. 쌀 생산단수와 총 화학 비료 사용량과의 관계 및 추세식



다음으로 토양의 상태에 따른 쌀 수확량 함수의 관계 중 유기함량과의 관계는 그림 2-19에서 볼 수 있다. 쌀 단위당 생산량은 유기함량이 2.5% 이하에서

그림 2-18. 쌀 생산단수와 유기함량과의 관계 및 추세식



는 감소하지만 2.5% 이상 3%까지는 증가함을 볼 때 적정 유기물 함량이 2.5%에서 3%임을 보여 주고 있다고 볼 수 있다.

쌀 생산량과 유효인산 정도와의 관계에 있어서도 80ppm에서 120ppm의 적정수준에서는 증가함을 볼 수 있다. 그러나 2008년도의 281ppm 유효인산도 하에서의 500kg 이상의 단수는 통계상 outlier로 볼 수 있다. 만약 2008년을 제외한다면 150ppm 정도까지 생산량은 증대한다고 볼 수 있다.

그림 2-19. 쌀 생산단수와 유효인산 정도의 관계

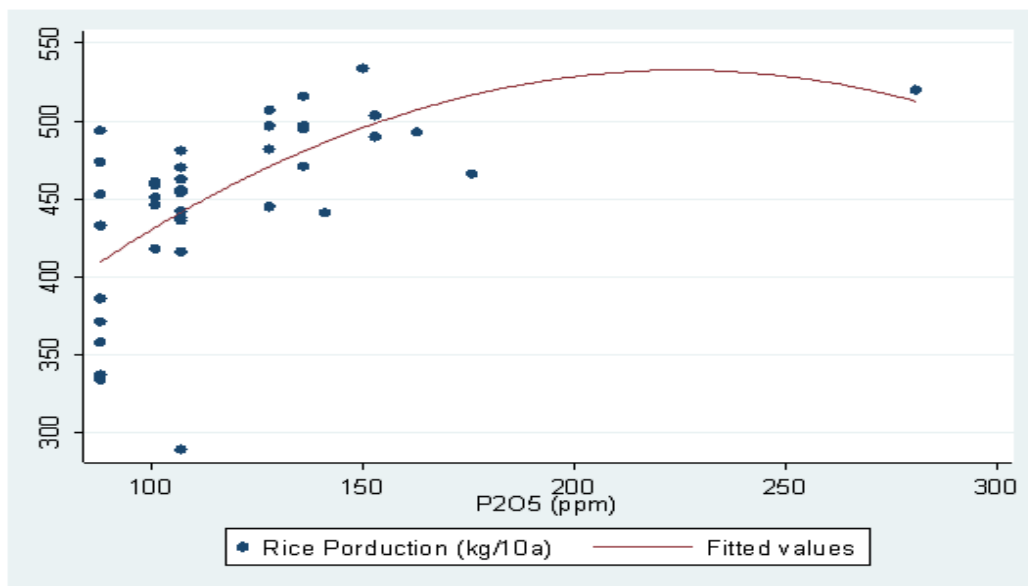
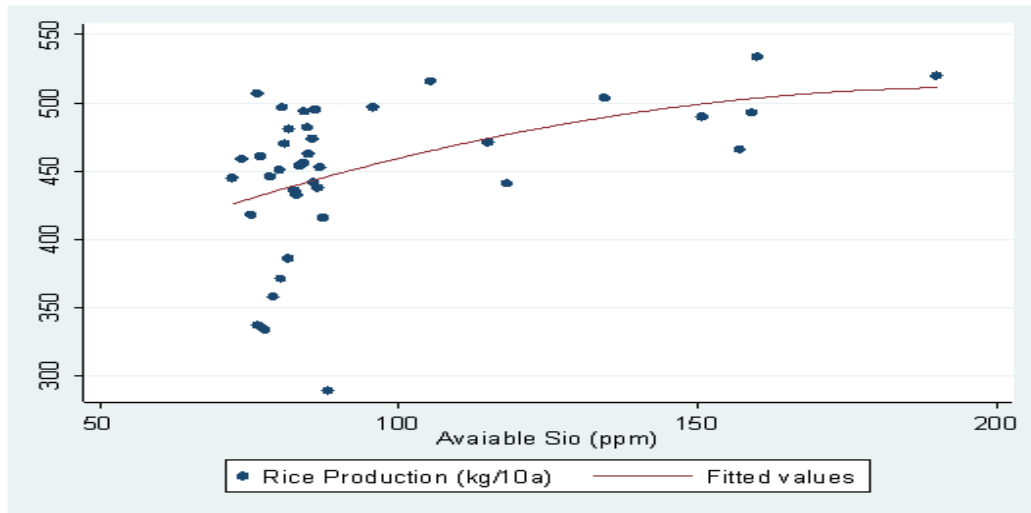


그림 2-20에서 쌀생산과 유효규산과의 관계에 있어서는 적정 범위의 최대치인 180ppm까지 생산 단수가 증가함을 알 수 있다. 그러나 적정 범위의 최소치인 130ppm 이하에서는 생산량이 급감함을 알 수 있다.

그림 2-20. 쌀 생산단수와 유효규산 정도의 관계



$$y_t = \beta_0 + \beta_1 Labor_t + \beta_2 Labor_t^2 + \beta_3 Machine_t + \beta_4 Machine_t^2 + \beta_5 ChemFert_t + \beta_6 ChemFert_t^2 + \beta_7 OM_t + \beta_8 OM_t^2 + \beta_9 P2O5_t + \beta_{10} P2O5_t^2 + \beta_{11} Dummy1980 + \varepsilon_t \quad \dots\dots (7)$$

이러한 생산량과 투입량 및 토양생태와의 관계를 고려하여 한국 수도작 생산함수가 아래 수식 (7)과 같이 생산요소 투입량의 2차 함수 및 토양생태변수의 2차 함수식으로 추정하였다.

여기서 y_t 는 t 년도의 수도작 단위 면적당 생산량(kg/10a)을, $Labor_t$ 는 단위면적당 노동 투입시간, $Machine_t$ 는 기계사용시간, $ChemFert_t$ 는 질소 인산 및 가리 비료 총사용량(kg/10a), OM_t 는 토양 중의 유기물 함량(%)을, $P2O5_t$ 는 토양의 유효인산지수(ppm)를, $dummy1980_t$ 는 1980년의 더미변수를, 마지막으로 ε_t 는 iid(independent identical distribution, 독립동일분포)을 가정한 에러 변수이다. β_0 에서 β_{10} 까지 모든 모수값들은 각 변수들에 한계적 증가에 의한 생산량의 증감정도를 나타내는 값들이고, β_{11} 는 1980년대 생산량의 평행적 이동정도를 말한다.

실제 자료는 1971년에서 2009년 모든 자료를 사용하고 통계패키지는 STATA로 OLS방식에 의해 추정하였다. 생산함수 (7)의 추정된 각각의 설명변수들의

coefficients의 평균 통계치와 표준오차 및 t-값과 p-값은 다음의 표 2-3과 같다. R^2 는 80%로 어느 정도의 설명력을 갖추었고 F-값이 10.15로 함수 추정치 의미 있는 것으로 나온다. 노동 및 기계 외 설명변수들의 경우 그다지 통계적 유의성을 보여주고 있지 않지만 계수값의 평균 및 부호에 있어서는 의미있는 수치들을 보여주고 있다. 특히 유기물 함량과 유효인산 함량과의 관계에 있어서 생산량은 증가하지만 그 토양성분의 한계적 증가에 따른 생산량(한계 생산량)은 감소하는 것으로 나타난다. 1981년 더미변수의 영향은 평균단수가 평년작에 비해 생산 단수가 173.59kg/10a 감소하는 것으로 나타난다.

표 2-3. 생산함수 추정 결과

설명변수	계수값	표준오차	t-값	p-값
β_0	411.0617	1164.957	0.35	0.73
β_1	4.863884	2.562348	1.9	0.07
β_2	-0.043182	0.020546	-2.1	0.05
β_3	-22.86338	19.23929	-1.19	0.25
β_4	1.010918	0.972161	1.04	0.31
β_5	-10.88177	20.25758	-0.54	0.6
β_6	0.186912	0.297505	0.63	0.54
β_7	13.78877	965.2802	0.01	0.99
β_8	-7.492344	195.7656	-0.04	0.97
β_9	2.44289	2.202864	1.11	0.28
β_{10}	-0.004652	0.005942	-0.78	0.44
β_{11}	-173.5899	35.34795	-4.91	0

$R^2=0.8053$, F-Value:10.15.

2. 비료사용량에 따른 토양 상태변화 함수

생산함수가 식 (7)에 의해서 추정되었다면 비료사용의 동태적 최적 결정을 위하여 다음으로는 비료 사용에 따른 토지 영양상태의 변화식이 추정되어야 한다. 비료사용에 따른 논 토양 유기물 함량의 변화는 아래 식 (8)과 같이 추정되었다.

$$OM_{t+1} = OM_t + \delta^o OM_t + \gamma_1^o N_t + \gamma_2^o N_t^2 + \epsilon_t \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 N_t 는 단위면적 10a당 질소비료 사용량을 나타내고, δ^o 는 토양 중 유기물 함량의 자연 감소율을 나타낸다. γ_1^o 와 γ_2^o 는 각각 질소비료의 한단위 증가에 따른 토양 중 유기물 함량의 증감정도를 나타내는 계수들이다. 즉 위 수식 (8)은 토양 중 다음시기의 유기물 함량은 현재의 유기물 함량에서 자연 증감을 고려한 뒤 인산비료의 투입량에 따라 결정된다고 가정한 것이다. 유기물 함량은 화학비료 중 질소비료와 연관되어 있기에 오직 질소만이 수식에 포함되었다. OLS 방법에 의해 계측된 결과는 다음 표 2-4와 같다. 매년 논 토양 중 유기물 함량은 14.6%씩 자연 감소되는 반면, 논 단위면적당 질소비료 1kg사용 증가당 0.044477~0.001232의 유기물 함량이 증가함을 알 수 있다. 2009년 현재 단위면적당 15.11kg의 질소가 투입되고 있는 상황에서 질소비료의 한계유기물 함량은 0.026%로 나타난다.

표 2-4. 유기물 함량 상태 함수 추정 결과

설명변수	계수값	표준오차	t-값	p-값
δ^o	-0.148536	0.090069	9.45	0.000
γ_1^o	0.044477	0.023453	1.90	0.066
γ_2^o	-0.001232	0.000646	-1.91	0.065

F-통계: 5091.44, $R^2 = 0.9977$

다음으로 토양 중 유효인산함량의 상태함수는 수식(9)와 같이 추정되었다. 다음 시기의 유효인산함량은 현재의 유효인산함량에서 자연증감분을 고려한 뒤 인산비료 사용량에 따라 결정된다고 가정하였다.

$$P2O5_{t+1} = P2O5_t + \delta^P P2O5_t + \gamma_1^P P_t + \gamma_2^P P_t^2 + \gamma_3^P d2007 + \varepsilon_t \dots\dots\dots (9)$$

여기서 P_t 는 단위면적당 인산비료 사용량을, $d2007$ 은 2008년도의 특이하게 높은 유효인산 함량을 고려한 2007년도의 더미변수를 나타낸다. δ^P 는 유효인산의 자연증감분을 나타내며, γ_1^P 와 γ_2^P 는 인산비료 사용에 따른 토양 중 유효인산 함량분의 증감분은 나타내는 계수값들이다. OLS 방법에 의해 추정된 유효인산 함량의 상태함수 계수값들은 다음 표 2-5와 같다.

표 2-5. 유효인산 함량 상태 함수 추정 결과

설명변수	계수값	표준오차	t-값	p-값
δ^P	-0.50485	0.07784	6.36	0.000
γ_1^P	18.71500	4.58237	4.08	0.000
γ_2^P	-1.47853	0.51868	-2.85	0.007
γ_3^P	135.17810	16.28773	8.30	0.000

F-통계: 614.6, $R^2 = 0.9864$

3. 토양 상태에 따른 비료사용량 함수

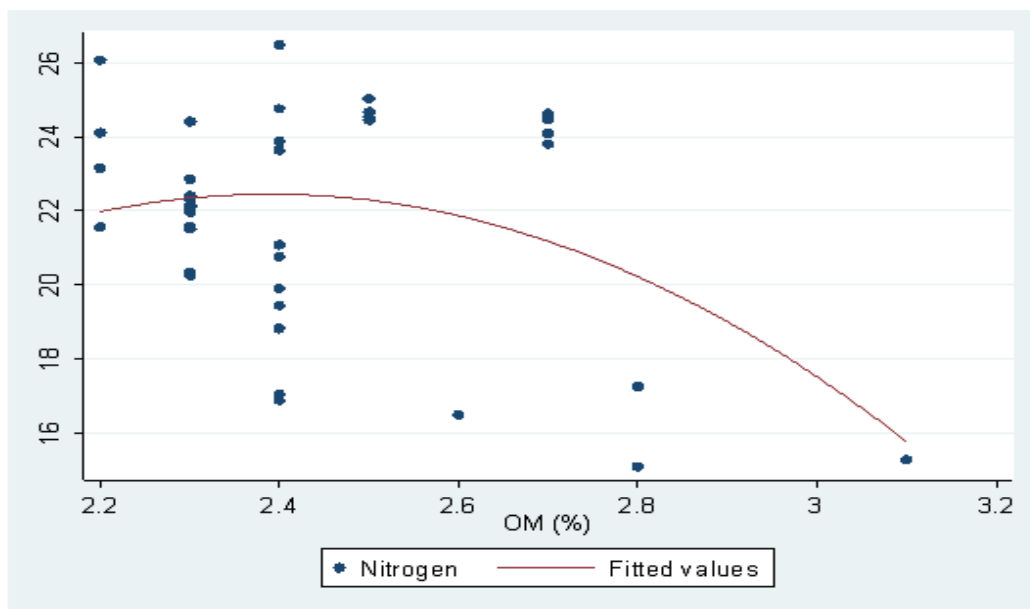
비료사용량에 따라 토양상태가 변하는 것 이외에도 비료 사용량은 또한 토양 중에 유기물 및 비료성분들에 의해서 비료사용량이 달라진다. 즉 현재 한국 수도작에서 실시하는 최적 추천시비량은 토양의 상태에 따라 시비량을 결정하

는 맞춤형 시비가 실시되고 있다.

농진청에서 추천하는 질소비료 사용량 수식은 10a 단위면적당 500kg의 생산을 위해서는 $N_t = 11.17 - .133 * OM_t + 0.025 * Sio_t$ 으로 제시하고 있다. 여기서는 토양 중 유효규산 함량을 나타내고 있어 질소비료는 토양 중 유기물 함량이 높을수록 적게 시비하는 반면, 유효규산 함량이 높을수록 많이 시비하는 것으로 나타나고 있다.

먼저 위의 추천 질소 시비량의 수식에 따라 질소비료 사용량과 유기질 함량 및 유효규산 함량과의 관계를 scatter plotting에 의해 살펴보고자 한다. 그림 2-21은 질소비료 사용량과 유기질 함량과의 관계를 하향 2차 곡선으로 보여주고 있다. 즉 2.5% 정도의 유기물 함량까지는 질소 시비량이 증가하지만 2.5% 이상의 유기물 함량에서는 질소시비량이 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 2-21. 질소 시비량과 유기물 함량과의 관계 및 추세식



본 분석은 수도작 생산 단수를 고정하지 않은 관계로 1971년부터 2009년의 시

계열 자료에 의하여 추정하되 일차선형보다는 유기물 함량과 유효규산의 2차 함수로 가정하여 식(10)과 같다.

$$N_t = \alpha_{No} + \alpha_{N1} OM_t + \alpha_{N2} OM_t^2 + \alpha_{N3} SiO_t + \alpha_{N4} SiO_t^2 + \varepsilon_t \dots\dots\dots (10)$$

OLS 방법에 의한 식(10)의 추정 결과는 표 2-6과 같다.

표 2-6. 토양상태에 따른 질소비료 시비량 함수

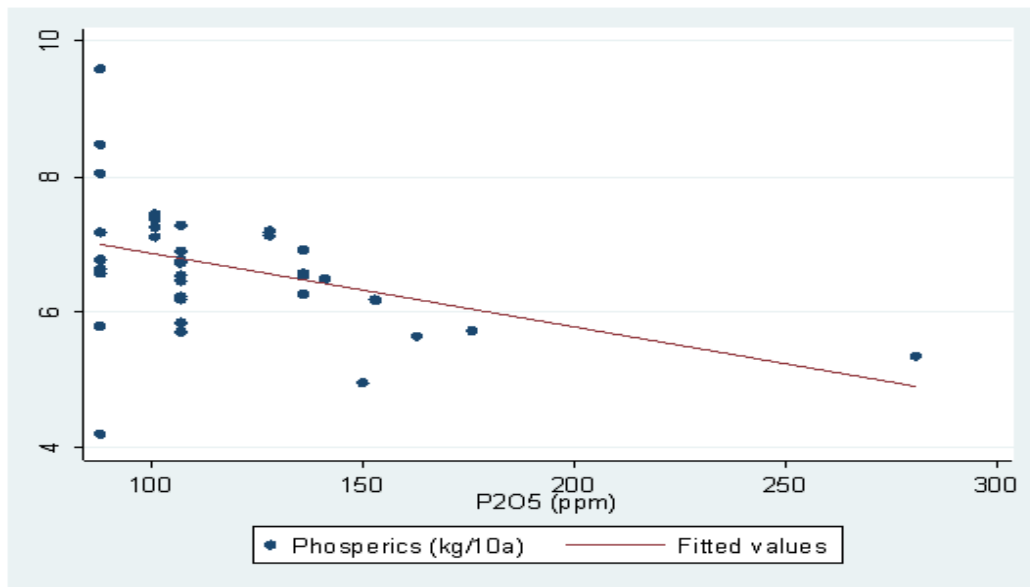
설명변수	계수값	표준오차	t-값	p-값
α_{N1}	-78.45714	43.63820	-1.80	0.081
α_{N2}	16.62669	8.88034	1.87	0.070
α_{N3}	0.33568	0.18290	1.84	0.075
α_{N4}	-0.00181	0.00080	-2.26	0.030
α_{No}	99.64813	50.40017	1.98	0.056

F-통계: 10.70, $R^2 = 0.5572$

표에서 질소시비량 수식의 모든 계수값들이 10%의 임의 수준 내에서 모두 통계적 유의성이 있는 것으로 나타나며, 질소시비량은 유기물 함량이 많을수록 감소하는 반면, 유효규산 함량이 많을수록 증가하는 것으로 나타난다.

다음으로 인산 비료 시비량을 구할 때 농진청 추천 시비량 수식은 $P_t = (100 - P2O5_t) \cdot 0.1$ 으로 현실적인 2009년도 유효인산함량이 150으로 마니너스의 인산 비료 시비량이 추천되기 때문에 동태분석에는 적합하지 않다. 다만 인산비료의 시비량은 논토양의 유효인산함량에 따라 결정된다는 점은 알 수 있다. 먼저 인산비료시비량과 유효인산함량과의 관계를 그림 2-22의 scatter plot으로 살펴보면 2008년도의 극단적인 유효인산 함량 이외에는 대체로 일차 함수식으로 정의할 수 있다.

그림 2-22. 인산비료 시비량과 유효인산 함량과의 관계



이에 유효인산함량의 1차 함수로 식 (11)과 같이 가정하였다. 1차함수식은 유효인산의 한계시비량이 일정함을 가정하며, 이는 농진청의 추천시비식과도 일치하는 선상이다.

$$P_t = \alpha_{Po} + \alpha_{P1} P2O5_t + \varepsilon_t \dots\dots\dots (11)$$

OLS에 의한 추정식은 다음 표 2-7과 같다.

표 2-7. 토양상태에 따른 인산비료 시비량 함수

설명변수	계수값	표준오차	t-값	p-값
α_{P1}	-0.01089	0.00397	-2.74	0.009
α_{Po}	7.95973	0.49241	16.16	0.000

F-통계: 7.53, $R^2 = 0.1692$

여기서 농진청과의 차이는 유효인산 함량 1ppm 증가의 한계 인산 시비량이 0.011kg/10a 감소하여 농진청의 0.1kg/10a 감소량보다 10배 작게 나타나고 있다. 이는 시계열 그림 2-22에 의한 분석이다.

4. 동태적 최적화 모델 설정 및 향후 30년간 농업생산 분석

위의 모든 수식들을 총 정리하여 향후 30년간의 10a당 수도작 쌀 생산량의 극대화를 위하여 논토양의 상태를 고려한 최적 비료 시비량 결정을 위한 동태적 최적화 함수식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max } \sum y_t = & \sum (\beta_0 + \beta_1 \text{Labor}_t + \beta_2 \text{Labor}_t^2 \dots\dots\dots (7-1) \\ & + \beta_3 \text{Machine}_t + \beta_4 \text{Machine}_t^2 + \beta_5 \text{ChemFert}_t \\ & + \beta_6 \text{ChemFert}_t^2 + \beta_7 \text{OM}_t + \beta_8 \text{OM}_t^2 \\ & + \beta_9 \text{P2O}_5 + \beta_{10} \text{P2O}_5^2 + \beta_{11} \text{Dummy1980}) \end{aligned}$$

Subject to.

$$\text{OM}_{t+1} = \text{OM}_t + \delta^o \text{OM}_t + \gamma_1^o N_t + \gamma_2^o N_t^2 \quad (8-1)$$

$$\text{P2O}_{5,t+1} = \text{P2O}_{5,t} + \delta^P \text{P2O}_{5,t} + \gamma_1^P P_t + \gamma_2^P P_t^2 \quad (9-1)$$

$$N_t = \alpha_{N0} + \alpha_{N1} \text{OM}_t + \alpha_{N2} \text{OM}_t^2 + \alpha_{N3} \text{SiO}_t + \alpha_{N4} \left[\text{SiO} \right]_t^2 \dots\dots\dots (10-1)$$

$$P_t = \alpha_{P0} + \alpha_{P1} \text{P2O}_{5,t} \dots\dots\dots (11-1)$$

$$\text{ChemFert}_t = N_t + P_t + K_t \dots\dots\dots (12)$$

$$K_t = N_t + P_t * 0.301595 \dots\dots\dots (13)$$

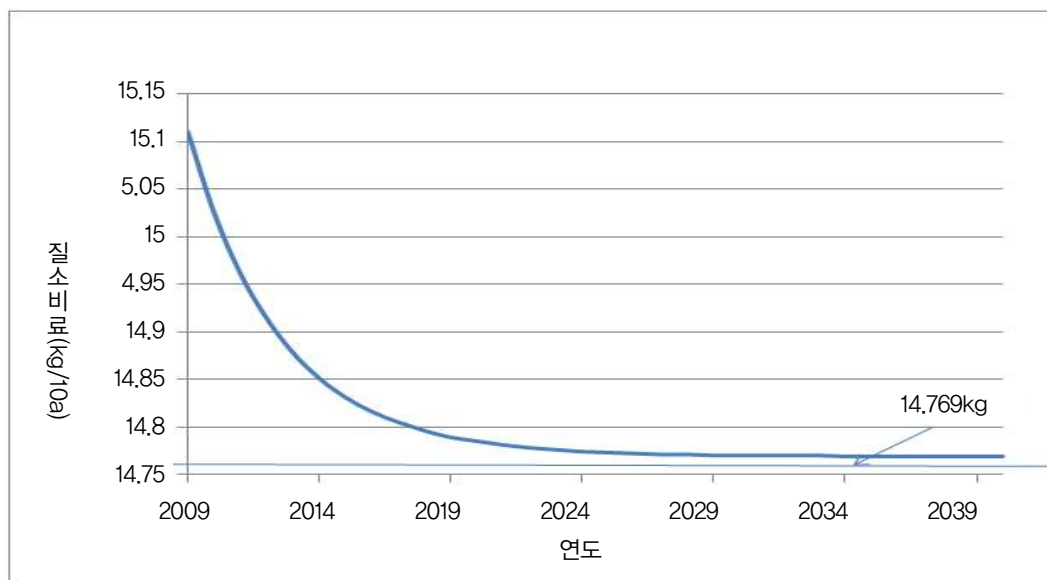
$$N_t, P_t, K_t, ChemFert_t, OM_t, \text{ 그리고 } P2O5_t \geq 0, \text{ for all } t.$$

위의 수식은 대부분 전에 설명된 함수들에서 에러변수와 더미변수들을 제외한 수식들이다. 수식 (12)는 화학 비료 사용량은 질소, 인산 그리고 가리 비료 사용량의 합계를 나타내는 정의 수식(Identity equation)이며, 식 (13)은 가리 비료의 사용량은 질소과 인산 비료 사용량의 30.16%로 계산하였는데 이는 2009년 질소, 인산, 가리 사용량의 비중으로 가정한 것이다. 그리고 결정변수들의 값이 최소 0보다 커야한다는 것이 마지막 제약식이라 할 수 있다. 이 수식들의 의미를 다시 요약하면 수식 (7-1)의 동태적 생산량의 합계를 최대화하되 수식 (8-1)과 (9-1)의 토양상태 방정식 및 (10-1)과 (11-1)의 토양상태에 따른 비료 최적 시비량 제약식, 그리고 가리비료 및 전체 화학비료 사용량의 정의식, 비음제약식의 제약하에서 결정변수들의 동태적 최적해를 구하는 것이다. 이에 대한 해를 구하는 방법은 GAMS(General Algebraic Modeling System) 프로그램의 비선형 프로그램(Non Linear Programing)에 의해 구하여졌다.

5. 최적 비료 사용량 추정

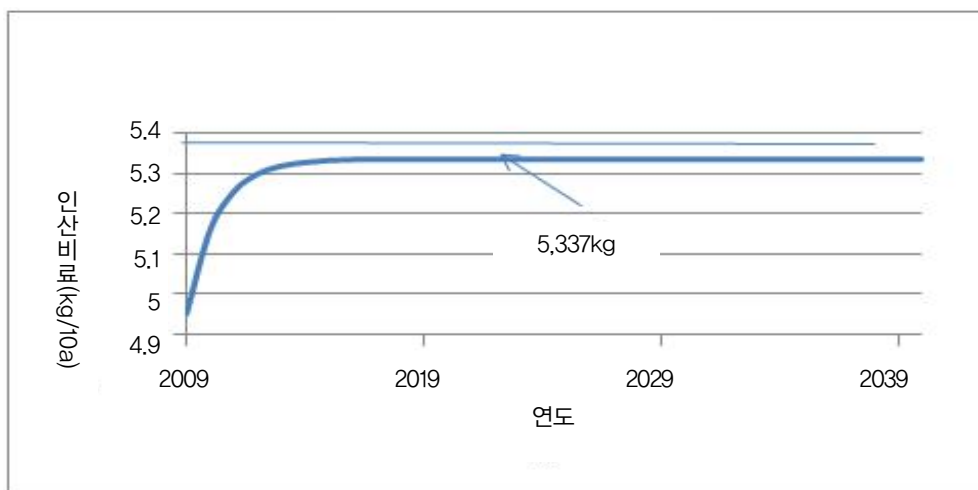
위의 함수식들의 분석한 결과로 먼저 비료 사용량부터 살펴보고자 한다. 단위면적당 최적 질소비료의 사용량은 2009년 15.11kg에서 점차 감소하여 2034년부터 14.769kg으로 장기 수렴되고 있다. 즉 2009년 현재 15.11kg에서 2.3% 감소하는 것은 생산량 극대화를 위한 최적 질소비료 사용량으로 추정되었다. 이는 이윤극대화로 목적 함수가 바뀔 시보다 량에서 수렴 될 것으로 추정된다.

그림 2-23. 최적 질소비료 사용량



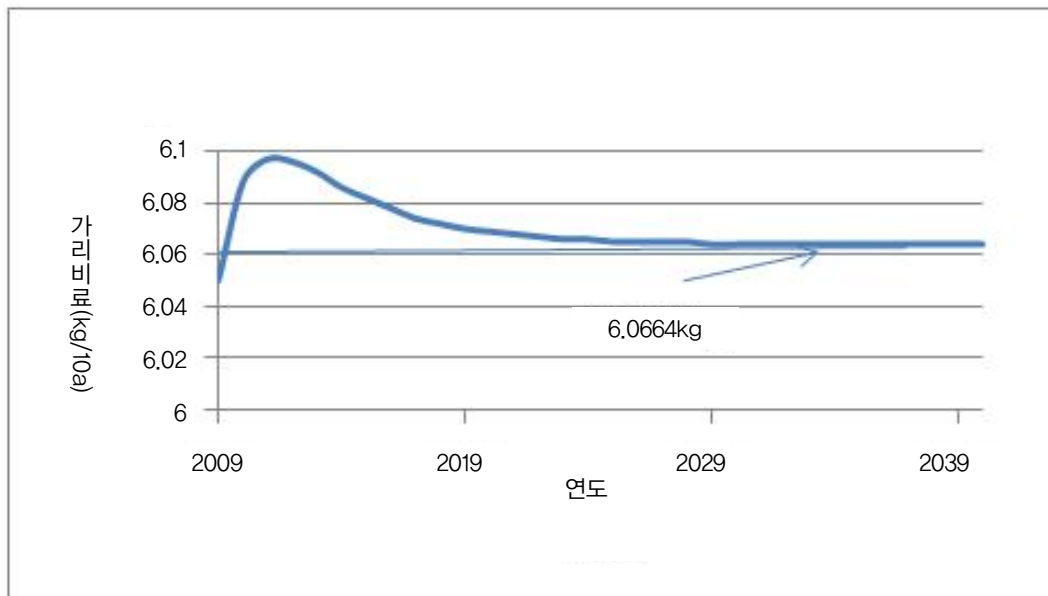
다음으로 인산 비료의 동태적 최적 사용량은 그림 2-24에서 보면, 인산비료는 2009년 4.95kg에서 시작했을 때 2017년 경부터 5.337kg으로 장기 수렴되어 2009년 현재에서 7.8% 증가하여 단위면적당 수확량을 최대화하는 것으로 나타난다.

그림 2-24. 최적 인산비료 사용량



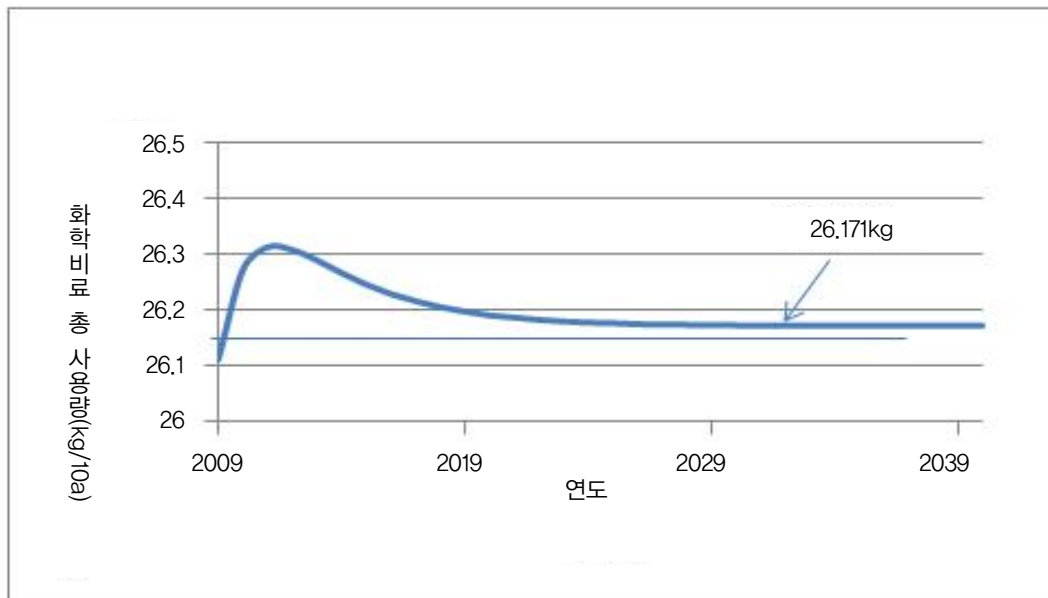
다음으로 가리비료의 단위면적당 동태적 최적 사용량은 그림 2-25에서 보듯이 2009년 10a당 6.05kg에서 시작하여 처음 2년간은 증가하여 6.097kg에 이른 후 다시 감소하여 2029년에 6.0664kg에 장기 수렴되고 있다. 2009년과 비교 시 장기수렴 사용량은 0.23% 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 2009년 가리비료 사용량이 현재 수확량 극대화를 위한 장기적 최적 사용량과 일치하고 있음을 보여주고 있다.

그림 2-25. 최적 가리비료 사용량



질소와 인산 및 가리비료의 총 합계인 화학비료 사용량의 추세를 2009년을 시작점으로 하여 그림 2-26에서 살펴보면 가리비료의 추세와 같이 처음 2009년 10a 단위 면적당 26.11kg에서 시작하여 처음 2년간은 26.314kg까지 증가하다 다시 감소하여 2003년에 장기적인 수렴점인 26.171kg에 수렴되고 있다. 이는 2009년 현재와 비교 시 0.23% 증가하는 것으로 나타나 2009년 현재의 화학비료 시비량은 생산량 극대화를 위한 장기 최적 시비량과 거의 일치함을 보여주고 있다.

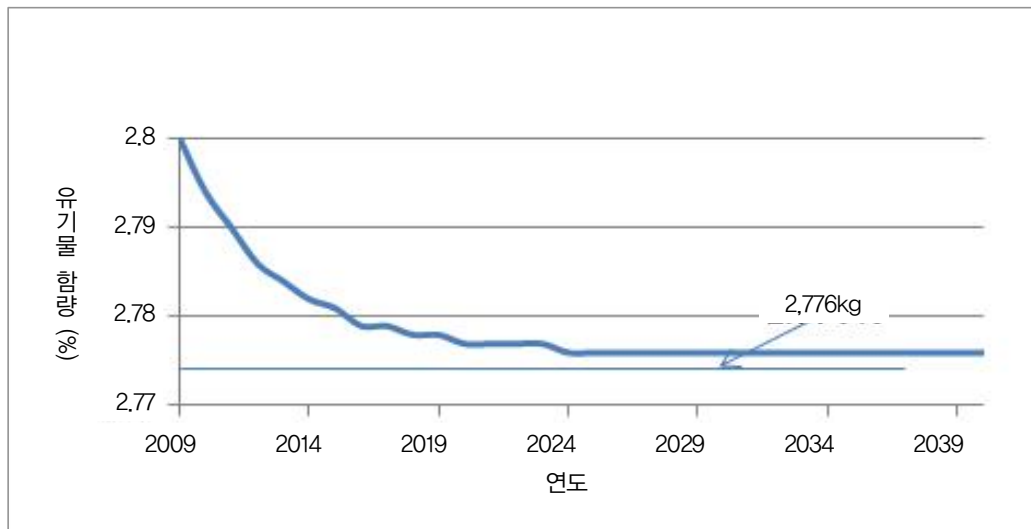
그림 2-26. 동태적 최적 화학비료 사용량 추이



6. 동태적 최적 토양 상태추이 추정

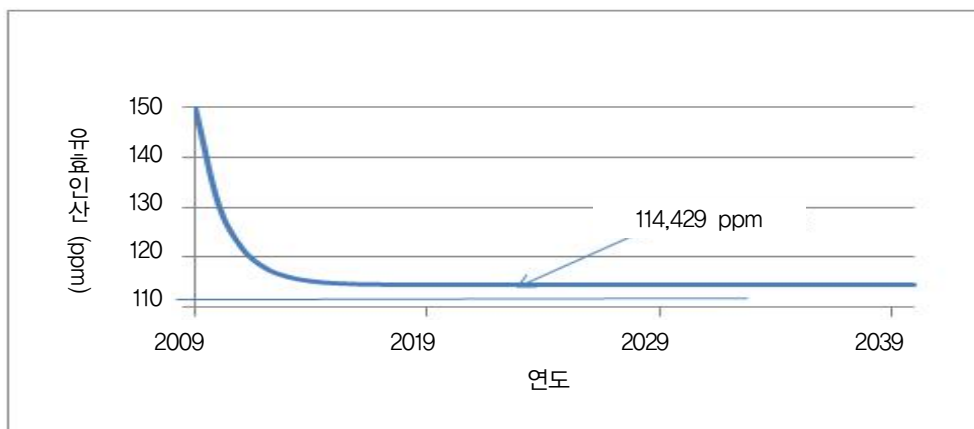
최적 화학비료사용량의 추이에 따른 논 토양 상태의 동태적 추이를 살펴보고자 한다. 먼저 질소비료 시비량과 관련된 논 토양의 유기물 함량의 최적 상태 추이를 그림 2-27에서 보면 2009년 2.8%에서 계속 감소하여 2024년에 2.776%로 수확량 극대화의 장기 수렴 함량에 이르게 된다. 이는 2009년 함량에서 단지 -0.86% 감소한 수치로 2009년 상태가 장기수렴점과 매우 근접하다는 것을 보여주고 있다. 또한 적정 유기물 함량 범위가 2.5%에서 3% 임을 감안할 때 2.776%는 그 범위의 중간치 정도로 매우 적절한 결과임을 알 수 있다.

그림 2-27. 논토양의 동태적 최적 유기물 함량 추이



다음으로 논토양의 유효인산 함량(ppm)의 장기 균형점을 그림 2-28에서 살펴보면 2009년 150ppm에서 시작하여 2026년에 이르러 114.429ppm으로 장기 균형 함량에 이르게 된다. 이 균형 수렴함량 또한 농진청의 적정범위인 80-120ppm 안에 이름을 볼 때 매우 적절한 결과임을 알 수 있다. 그러나 유효인산함량의 장기수렴점은 2009년에 비해 23.7% 감소하였음을 보여주어 논 토양 중 유기 함량의 과다 축적 상황을 보여 주고 있다.

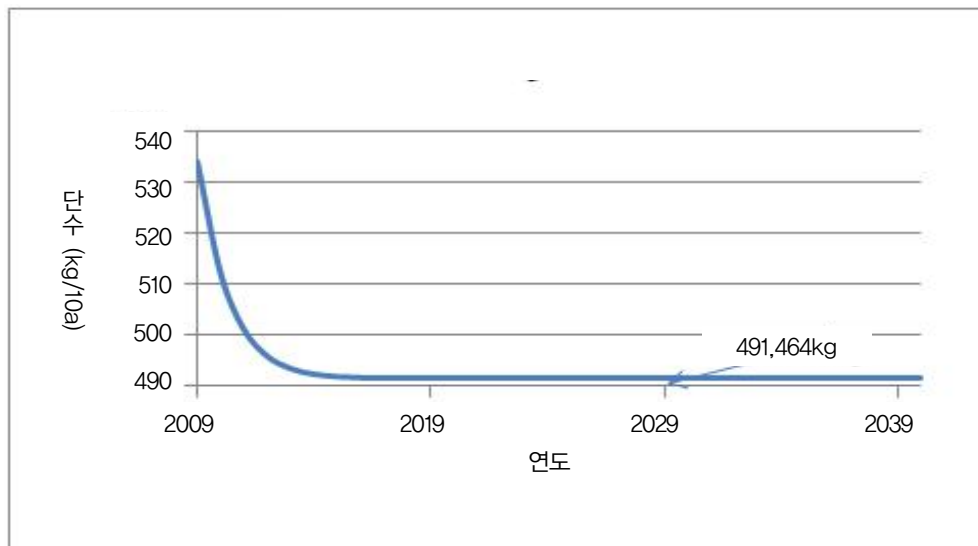
그림 2-28. 논토양의 동태적 최적 유효인산 함량(ppm) 추이



7. 최적 농업 생산량 추정

최적 논 토양 상태의 변화와 그에 따른 동태적 최대 수도작 생산을 위한 비료사용량의 추이에 맞추어 동태적 최적 단위면적 10a당 수확량은 다음 그림 2-29과 같다. 2009년 534kg의 단수는 계속 하락하다 2032년 491.464kg으로 2009년 대비 7.97% 감소한 상태에서 장기 수렴하고 있다. 즉 장기수렴의 최적 수도작 단수는 490.464kg으로 농진청의 460~500kg 단수 생산을 위한 추천시비량 등에 일치하는 장기 수렴점이다.

그림 2-29. 동태적 최적 단위당 수확량(kg/10a) 추이: 유효인산 함량(ppm)



모든 동태적 최적량을 아래 표8에서 정리해보면, 장기적 생산량의 최대화를 위해서는 2009년 대비 질소비료는 2.3% 감소하는 반면 인산비료와 가리비료는 다소 증가하여 전체적으로는 별 차이를 보이지 않고 있으나 토양 중 유효인산 함량이 적정 수준으로 돌아감이 필요함을 보이고 있다. 반면 토양 상태를 고려한 동태적 최적 단수량을 보면 현재 단수에서 약 8% 감소함을 최적으로 보고 있다. 이 결과는 오직 생산량의 극대화만을 추구하였을 경우의 균형점이

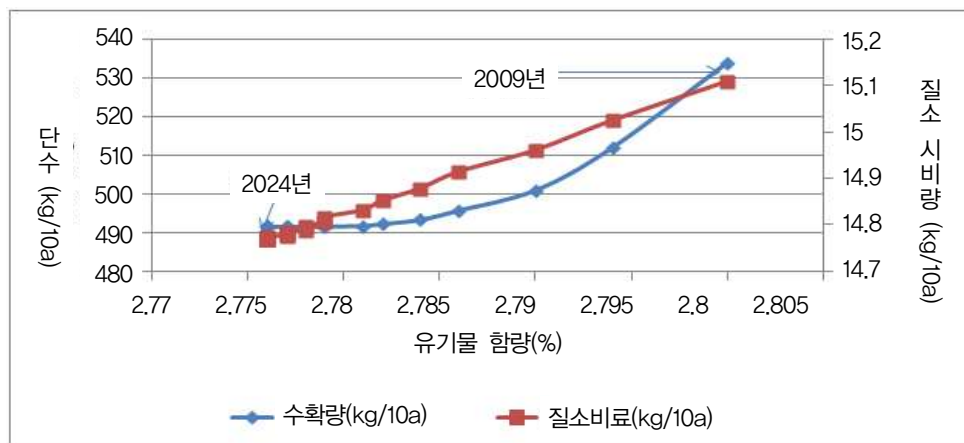
다. 분명 현재가치화된 이윤의 극대화를 목표로 할 경우 이론적으로 화학 비료 시비량은 더욱 감소하고 단수 또한 감소할 것으로 보인다.

표 2-8. 동태적 장기 균형 정리

결정변수	장기균형점	2009년 대비 증감 비율
질소비료 시비량	14.769kg/10a	-2.3%
인산비료 시비량	5.337 kg/10a	7.8%
가리비료 시비량	6.0664 kg/10a	0.23%
화학비료 총 시비량	26.167 kg/10a	0.23%
유기물 함량	2.776%	-0.86%
유효인산 함량	114.429 ppm	-23.7%
단위당 수확량	491.464kg/10a	-7.97%

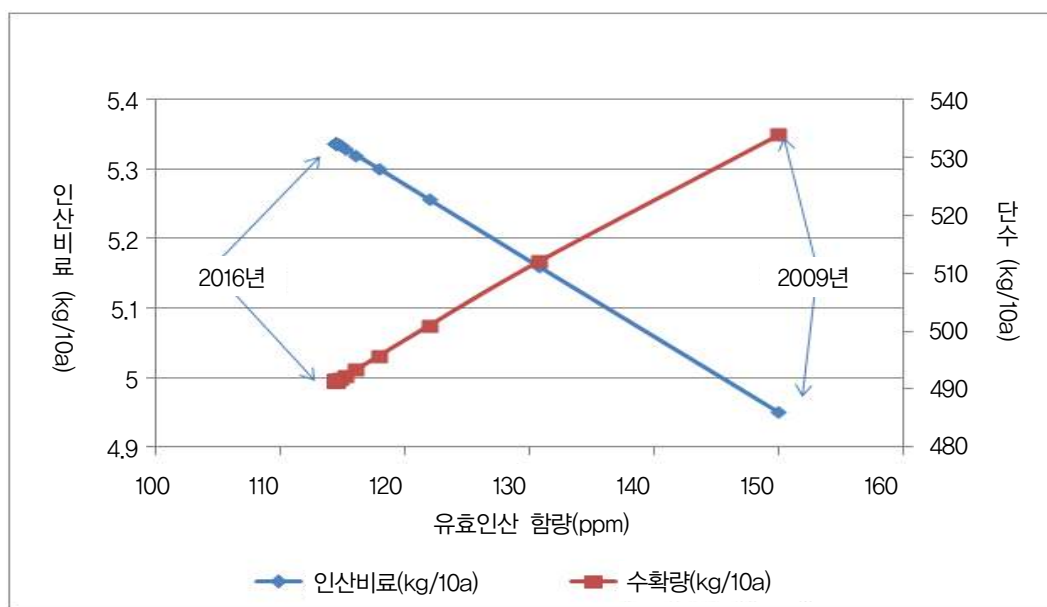
동태적 최적 값들 간의 관계를 2차원 도표에서 살펴보면 다음과 같다. 먼저 질소 비료 사용량과 수확량 및 토양 중 유기물 함량과의 관계를 그림 2-30에서 보면 2009년도에 오른쪽 상단부에서 출발하여 왼쪽하단부로 질소 시비량과 유기물 함량이 모두 감소하면서 단수도 감소하는 방향으로 장기 수렴되고 그 시기는 2024년쯤으로 보인다.

그림 2-30. 단수와 유기물 함량 및 질소 시비량의 장기 균형



다음으로 인산 비료 사용량과 수확량 및 토양 중 유효인산 함량과의 관계를 그림 2-31에서 보면 인산비료의 시비량은 증가하지만 유효인산 함량과 수확량은 감소하는 방향으로 수렴되며 그 시기는 2016년쯤으로 보인다.

그림 2-31. 단수와 유효인산 함량 및 인산 시비량의 장기 균형



제 3 장

결 론

본 연구에서는 한국 수도작 농업의 최적 비료사용량을 토양상태의 동태적 변화에 따른 생산량의 극대화를 이루는 측면에서 계측해 보고자 하였다. 이를 위해 동태적 최적화의 수리적 모델을 세우고 이를 최적제어이론(optimal control theory)에 의해 이론적인 수렴점을 알아본 후 실증적인 분석에서는 GAMS의 비선형 프로그램(Non-Linear Programming)에 의하여 2009년에 시작하여 2040년까지 향후 30년간의 동태분석을 행하였다. 실증 분석 모델에서 생산함수는 비료를 포함한 투입요소 및 토양 생태변수의 2차 함수로 가정하였고 토양 상태함수로는 유기물 함량과 유효인산 함량의 2변수가 고려되었다. 또한 질소 비료 시비량은 논 토양 중 유기물 함량 정도에 따라 결정되고, 인산비료는 유효인산 함량에 따라 결정되는 맞춤형 시비 공식을 추가 제약식으로 고려하였다. 물론 본 연구는 질소와 인산 외의 가리비료는 2009년 비중에 의하여 결정되는 한계가 있다. 분석 결과는 최적의 장기적인 질소시비량은 다소 감소하지만 인산과 가리 시비량의 증가로 전체 화학 비료 시비량은 증가를 보이고 있다. 이에 따른 장기적인 유기물 함량과 유효인산 함량의 감소로 수도작 쌀 생산 단위 또한 다소 감소하는 정도에서 장기 균형을 이루고 있다. 다만 본 연구 결과는 생산량의 극대화에 초점을 맞춘 관계로 이윤극대화를 위한 장기균형과 비교하면 다소 과대 평가되어 있다고 볼 수 있다. 차후로 추가 연구가 필요하다고 본다.

부록 1

한국 수도작 생산비 및 생산량 시계열 자료: 1971~2009

단위: kg/10a.

연도	단수	종자	노동 시간	가금류	기계	질소	인산	가리	화학비료 총 사용량	유기질 비료	토양개 량제
1971	337	4.9	122.3	10.1	0.6	16.89	4.2	3.05	24.14	302	0.8
1972	334	5.4	123.5	9	0.8	20.77	5.79	3.23	29.79	311.3	0.2
1973	358	5	115.4	8	1.6	17.06	6.57	3.41	27.04	331.6	0.5
1974	371	4.8	113.6	8	1.4	19.91	6.78	4.72	31.41	337.5	0.7
1975	386	5.4	117.6	8	1.8	23.88	8.04	5.78	37.7	264.2	3
1976	433	5	103.7	8	2.3	26.48	6.64	6.67	39.79	270.7	3.9
1977	494	5.4	96.8	6.5	3.5	24.76	9.59	7.21	41.56	246.2	4.1
1978	474	5.4	93.7	5.6	4.8	23.64	8.47	6.58	38.69	281.3	1.9
1979	453	5.3	92.4	4.9	4.2	21.1	7.18	6.78	35.06	302.2	3.3
1980	289	4.7	92.8	4.6	4	21.51	6.76	6.26	34.53	284	2.7
1981	416	5.5	92.5	3.9	5.5	20.25	5.71	6.01	31.97	277.9	4.9
1982	438	5.8	94.5	3.5	7.3	20.35	5.84	6.2	32.39	272.4	5
1983	442	5.8	90.3	2.8	7	22.41	6.18	6.38	34.97	294.8	6.7
1984	463	5.9	85.5	2.4	7.1	21.58	6.23	6.69	34.5	285.2	14.7
1985	456	6	85.5	2.1	6.9	22.12	6.46	6.91	35.49	266.4	11.9
1986	454	6.1	79.9	1.8	7.4	22.16	6.54	7.1	35.8	260.7	9.6
1987	436	6.1	76.3	1.5	7.5	22.87	6.72	6.98	36.57	257.3	9.3
1988	481	5.9	67.7	1.1	11.5	22.34	6.9	7.46	36.7	269.5	9.6
1989	470	5.9	65.4	1	12.9	24.42	7.28	7.95	39.65	279.1	12.8
1990	451	6	59.4	0.8	9.9	24.47	7.42	8.01	39.9	279.2	11.3
1991	446	5.9	51.6	0.5	11.2	24.64	7.45	7.63	39.72	265	5.7
1992	461	5.8	45.2	0.3	9.7	23.81	7.11	7.45	38.37	262.4	5.3
1993	418	5.9	40.8	0.2	8.3	24.1	7.36	7.9	39.36	247.8	3.4
1994	459	5.9	37.2	0.2	13.2	24.57	7.25	7.44	39.26	224.1	4.1
1995	445	6	34.7	0.1	10.2	24.46	7.13	7.44	39.03	213	3.4
1996	507	6.1	32.8	0.1	9.5	24.53	7.13	7.29	38.95	188	3.4
1997	497	6.1	31	0.1	8.2	24.67	7.18	7.19	39.04	306.9	3.7
1998	482	6.18	32.82	0.04	7.77	25.03	7.2	7.43	39.66	161.5	9.52
1999	495	6.23	31.06	0.02	7.29	26.07	6.92	7.42	40.41	163.8	11.24
2000	497	6.37	29.63	0.01	8.3	24.11	6.53	7.33	37.97	169.2	12.28
2001	516	6.5	28.57	0	13.45	23.16	6.26	7.06	36.48	194.2	21.93
2002	471	6.57	26.99	0	8.91	21.57	6.57	7.39	35.53	229.7	17.82
2003	441	6.92	26.46	0.01	7.16	21.97	6.49	7.63	36.09	227.77	19.03
2004	504	7.09	21.66	0	6.63	19.44	6.17	7.08	32.69	226.4	19.54
2005	490	7.24	20.81	0	6.68	18.83	6.18	7.36	32.37	226.67	15.13
2006	493	7.18	19.85	0	6.78	16.51	5.64	6.82	28.97	253	11.92
2007	466	7.19	17.64	0	6.42	17.27	5.72	7	29.99	263.4	19.23
2009	534	7.14	16.29	0	4.8	15.11	4.95	6.05	26.11	235.7	21.25

자료: 통계청, 2012.

부록 2

한국 수도작 논 토양의 상태변화 추이 시계열 자료 :1971~2009

연도	산도	유기물 함량 (%)	유효인산 함량 (ppm)	유효규산 함량 (ppm)
1971	5.9	2.4	88	76.3
1972	5.9	2.4	88	77.6
1973	5.9	2.4	88	78.9
1974	5.9	2.4	88	80.2
1975	5.9	2.4	88	81.5
1976	5.9	2.4	88	82.8
1977	5.9	2.4	88	84.1
1978	5.9	2.4	88	85.4
1979	5.9	2.4	88	86.7
1980	5.7	2.3	107	88
1981	5.7	2.3	107	87.2
1982	5.7	2.3	107	86.4
1983	5.7	2.3	107	85.6
1984	5.7	2.3	107	84.8
1985	5.7	2.3	107	84
1986	5.7	2.3	107	83.2
1987	5.7	2.3	107	82.4
1988	5.7	2.3	107	81.6

한국 수도작 논 토양의 상태변화 추이 시계열 자료 :1971~2009 (계속)

연도	산도	유기물 함량 (%)	유효인산 함량 (ppm)	유효규산 함량 (ppm)
1989	5.7	2.3	107	80.8
1990	5.7	2.7	101	80
1991	5.7	2.7	101	78.4
1992	5.7	2.7	101	76.8
1993	5.7	2.7	101	75.2
1994	5.7	2.7	101	73.6
1995	5.6	2.5	128	72
1996	5.6	2.5	128	76.2
1997	5.6	2.5	128	80.4
1998	5.6	2.5	128	84.6
1999	5.7	2.2	136	86
2000	5.7	2.2	136	95.6
2001	5.7	2.2	136	105.2
2002	5.7	2.2	136	114.8
2003	5.8	2.3	141	118
2004	5.8	2.4	153	134.4
2005	5.8	2.4	153	150.8
2006	5.8	2.6	163	159
2007	5.8	2.8	176	157
2009	5.72	2.8	150	160

자료: 농협중앙회, 2012.

참고 문헌

- 농협중앙회. 2012. 2012 비료사업 통계요람, 농협중앙회 자재부.
- 장병준. 2010. 작물별 시비처방기준, 국립농업과학원, 농진청.
- 통계청. 2012. 한국 수도작 논벼의 생산비 및 생산량.
<http://kosis.kr/abroad/abroad_01List.jsp?parentId=E>.
- Bellman, R. 1957. Dynamic Programming Princeton University Press.
- Kamien, M. and N. Schwartz , Dynamic Optimization, 2ndEdition,North-Holland,1991.
- Kennedy, J.O.S. 1986. “ Dynamic Programming: Applications to Agriculture and Natural Resources”, Elsevier Applied Science, London, 341 pp.
- Rust, j. 1996. Numerical Dynamic Programming in Economics, Handbook of Computational Economics, H. Amman, D. Kendrick and J. Rust.

R 665 연구자료-2

비료의 최적 사용량 결정분석:

토양 상태에 따른 동태적 최적화 모델과 모형 정립

등 록 제6-0007호(1979. 5. 25)

인 쇄 2012. 12.

발 행 2012. 12.

발행인 이동필

발행처 한국농촌경제연구원

130-710 서울특별시 동대문구 회기로 117-3

02-3299-4000 <http://www.krei.re.kr>

인쇄처 동양문화인쇄포럼

02-2242-7120 e-mail: dongyt@chol.com

- 본 내용은 “농림업 후방 연관산업의 전략적 방지방안(1차년도)” 연구와 관련하여 위용석 박사의 위탁원고 내용을 정리한 것입니다.
 - 이 책에 실린 내용은 한국농촌경제연구원의 공식 견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.
 - 이 책에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다.
-