

발간등록번호

11-1543000-003708-01

「농업인의 비료 적정사용 방안 연구」

연구용역 최종보고서

2021. 06.



농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부장관 귀하

본 보고서를 “농업인의 비료 적정사용 방안 연구” 최종보고서로 제출합니다.

2021년 06월

강원대학교산학협력단장

신 대 용

사업수행자

참여기관: 강원대학교, 경상국립대학교

연구책임자: 양재의 (강원대학교)

공동연구원: 이용복 (경상국립대학교)

김혁수 (강원대학교)

요약문

I. 연구용역 개요

1. 연구용역명: 농업인의 비료 적정사용 방안 연구

2. 과업의 목적

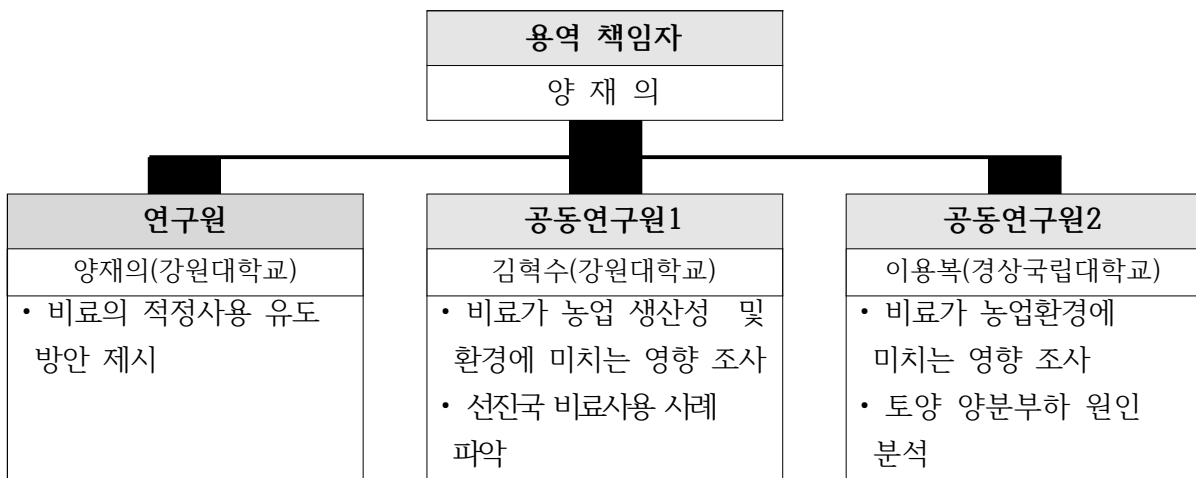
- 우리나라 농업 및 비료 사용 현황을 파악하여 OECD 국가 중 최고 수준을 보이고 있는 양분부하 원인을 파악하고, 이를 선진국 사례와 비교 평가하여 최종적으로 우리나라 농업인의 비료 적정 사용을 유도할 수 있는 시스템 및 제도 개선 방안 제시

3. 주요 연구 내용

- 주요 연구수행 내용은 비료사용처방 등에 근거한 비료 유통체계 구축 및 이를 바탕으로 한 비료사용량 감축 방안을 제시하고 아래와 같이 진행하고자 함.
 - 1) 국내 비료 사용 현황 파악
 - 2) 비료사용량 과다 원인 분석
 - 3) 국내·외 관련 사례 분석
 - 4) 제도 개선방안 제시

4. 연구 추진체계

- 연구진은 본 과제에서 제시한 문제점을 정확히 파악하고 있는 토양 및 비료 전문가로 구성되었으며, 긴밀한 협력 체계를 유지하기 위해 상시 회의를 통해 지속적인 연구 결과 교류와 정보 공유를 할 것임.



II. 주요 연구결과

1. 우리나라 농업 현황 분석

가. 국내 작물 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라 농경지 면적은 1981년 2,188천ha에서 2019년 1,580천ha로 감소하였으며, 벼 재배면적은 1981년 대비 2019년 약 40%가 감소하였음
- 벼를 비롯한 36개 작물에 대한 단위면적당 생산량(1992-1995 평균 대비 2016-2019년 평균)은 고구마 등 5개(복숭아, 시금치, 메밀, 보리, 참깨) 작물을 제외하고 증가하였음
- 사료작물의 재배면적은 2009년 이후 급격히 증가하고 있음

나. 국내 무기질 비료 사용량 변화

- 국내 무기질 비료 사용량은 1994년 질소질(N) 474.6천톤, 인산질(P₂O₅) 227.6천톤으로 가장 높았으며 2010년 이후 큰 변화가 없었음
- 무기질 비료사용량이 가장 많았던 1992-1995년 대비 최근 4년(2016-2019) 우리나라 전체 질소질 및 인산질 비료 사용량은 각각 48%, 61%가 감소하였으며 동시기 단위면적당 질소질 및 인산질 비료 사용량은 각각 34%, 51% 감소하였음
- 1992-1995년 무기질 비료 사용량 대비 요구량(표준시비량)은 질소질 비료가 174%, 인산질 비료가 178%로 다량의 무기질 비료가 사용되었고, 2016-2019년 사용량 대비 요구량은 질소질 비료가 131%, 인산질 비료가 89%로 조사되었다. 따라서 농가 현장에서 표준시비량 준수율이 향상되고 있는 것으로 나타났음

다. 국내 가축분뇨를 통한 질소 및 인 발생량

- 1981년 이후 한우 사육두수는 두 번의 급격한 감소가 있었으나 2000년 이후로는 지속적으로 증가하고 있고, 돼지 사육두수는 2010년 구제역이 발생한 해를 제외하고 현재까지 꾸준히 증가하고 있음
- 최근 5년간 평균 가축분뇨를 통한 질소(N) 및 인(P) 발생량은 각각 276.8천톤/년 및 64.8천톤/년이며 이는 동시기 우리나라 전체 농경지 질소 및 인 요구량(표준시비량)의 약 1.5배임

라. 농경지 토양의 화학성 변화

- 농경지 유효인산의 집적이 심화되고 있고, 특히 시설재배지는 토양 중 유효인산 적정합량보다 2배가 높은 것으로 조사됨
- 표준시비량의 평균 N/P는 5.9, 농가 현장에 시비하는 무기질 비료의 N/P비는 4.8, 가축분 퇴비의 N/P비는 2.03으로 농경지 유효인산 집적의 주 원인은 가축분퇴비로 추정됨

2. 우리나라 양분 과다 사용에 대한 원인 분석

가. OECD 주요 국가별 양분수지 변화

- OECD 주요 국가별 1990년 질소(N) 수지는 네덜란드(332 kg/ha), 벨기에(272 kg/ha), 한국(210 kg/ha, 1990-1991년 평균), 덴마크(178 kg/ha), 일본(171 kg/ha) 순으로 높았지만 최근 5년 평균 질소 수지는 한국(208 kg/ha, 2013-2017년), 네덜란드 (181 kg/ha, 2013-2017년), 일본(177 kg/ha, 2013-2017년), 벨기에(138 kg/ha, 2011-2015년), 덴마크(84 kg/ha, 2011-2015년) 순으로 보고되어 있음
- 최근 5년간 인(P) 수지는 일본(58 kg/ha, 2013-2017년), 한국(44 kg/ha, 2013-2017년), 덴마크(7.2 kg/ha, 2011-2015년), 벨기에(5.4 kg/ha, 2011-2015년), 네덜란드(3.2 kg/ha, 2013-2017년) 순으로 보고되어 있음
- 우리나라는 1990년 이후 무기질 질소와 인산 비료 사용량은 크게 감축하였지만 국가단위 양분수지 저감효과는 없었음

나. OECD 주요 국가의 양분투입량 대비 제거량

- 우리나라에서 무기질 비료 감축량에 비해서 양분수지 개선효과가 나타나지 않은 이유는 가축분뇨를 통한 양분 배출량이 증가했기 때문임
- 양분수지 개선에 성공한 벨기에, 네덜란드 가축분뇨발생량과 무기질 비료 시용량 동시에 감축하였고, 덴마크는 사료작물을 통한 양분 회수율을 증가시켰음
- 인(P) 투입량 중에서 가축분뇨가 차지하는 비율(최근 5년 평균)은 네덜란드, 벨기에, 덴마크가 각각 90.7, 88.1, 79.1%로 우리나라의 62.3%보다 매우 높은 것으로 조사됨
- 사료작물 재배 확대 및 가축분뇨 활용을 통해서 양분수지 개선에 성공한 네덜란드의 단위면적당 질소(N)와 인(P) 회수율은 각각 200 kg/ha, 30.8 kg/ha 로 우리나라에 비해서 약 2배가 높은 것으로 조사됨

3. 비료 사용이 농업생산성 및 환경에 미치는 영향

가. 농업생산성에 미치는 영향

- 우리나라 ‘작물별 비료사용처방’에 제시된 곡물 재배 적정 토양 유효인산 함량은 미국 일부 주(Arkansas, Delaware, Oklahoma)에서 제시한 함량과 유사한 것으로 나타남.
- 현재 우리나라 밭토양 및 시설토양의 평균 유효인산 함량은 경제적 수량에 요구되는 적정 함량보다 높은 수준임.

가. 환경에 미치는 영향

- 우리나라는 무기질 비료에 의한 온실가스(N_2O) 배출량은 감소하고 있으나, 가축분뇨에 의한 배출량은 지속적으로 증가하고 있으며, 우리나라가 포함된 동아시아의 농업분야 N_2O 배출량이 다른 대륙보다 가장 가파르게 상승하여 2016년 가장 많은 양의 N_2O 를 배출함
- 우리나라 농업분야(비료사용 농경지, 분뇨관리) 암모니아(NH_3) 배출량은 2017년 244,335톤으로 전체 배출량의 79%를 차지하였음. 농업분야에서 배출된 NH_3 중 93%는 분뇨관리에서 배출됨. 우리나라 농업분야에서 배출되는 NH_3 는 농경지 면적이 비슷한 벨기에, 덴마크, 네덜란드 각 국가의 총 NH_3 배출량보다 높은 것으로 나타남

4. 국내의 양분 관리 사례 분석

가. 국내의 토양검정 및 시비처방 프로그램 비교

- 국내외 토양 검정을 위한 분석방법은 국가별로 다양한 방법들이 사용되고 있으며, 우리나라와는 다른 방법을 쓰는 국가가 많았음. 분석항목은 pH, 유기물, 교환성양이온, 유효인산 등으로 대부분이 비슷하였으나 일반 농경지에 대해 미량원소와 무기태 질소를 분석하지 않는 우리나라와 달리 미국 등 주요 농업선진국에서는 무기태 질소와 미량원소에 대해서도 분석 및 관리하고 있었음
- 시비처방은 국외 주요 선진국 모두 경제적 수량에 요구되는 양분 적정 시비량을 산출하고, 이를 바탕으로 토양 중 양분 상태를 고려하여 시비처방이 이뤄지고 있음
- 질소 시비처방에서 우리나라는 유기물을 기준으로 시비처방을 실시하지만 주요 선진국은 무기태 질소 및 토양 양분상태를 종합적으로 고려해 시비처방이 이뤄지고 있음

나. 국외 양분 관리 정책 분석

- 주요 선진국의 양분 관리 정책을 살펴보면 캐나다의 4R과 같이 최적관리기법으로 양분 손실을 줄이고자 모두 노력하고 있음.
- 유럽은 EU의 질산염정책에 따라 환경부하를 줄이고자 노력하고 있으며, 유럽의 각국에서는 가축두수 제한, 토양 양분 투입량 제한 등 다양한 규제 정책과 더불어 양분통합관리 시스템을 구축해 국가별로 양분에 대한 체계적인 관리가 이뤄지도록 노력하고 있음
- 무기질 비료사용에 대한 관리 뿐 아니라 가축분의 양분 회수 및 재이용 등 잉여양분을 통한 환경부하를 줄이고자 노력하는 중임

5. 농업인 비료 적정 사용 및 국가 양분 수지 개선 방안

- 비료 적정 사용 및 양분수지 개선의 궁극적 목표는 환경보존에 의한 지구 생태계 보호지만 과도한 규제는 식량안보 및 농축산업까지 영향을 줄 수 있기에 이를 모두 고려한 개선 방안이 필요함
- 무기질 비료 사용량은 1990년대 대비 2010년대에는 크게 감축시켰으나 가축 사육두수 증가, 농경지 면적 감소 등으로 양분수지 개선은 크게 효과를 거두지 못함. 이에 비료 사용량 절감 뿐 아니라 가축분뇨 관리, 제도 개선 등 양분수지를 위한 다른 노력이 없다면 비료 사용 관리만으로 양분수지의 획기적인 개선을 어려울 것으로 판단됨.
- 양분수지 개선을 위한 방안은 양분수지 계산 방식에 맞춰 양분 유입량 감소, 제거량 증대, 경지면적 증대로 나뉠 수 있으며, 이를 위한 전략으로 무기질 비료(경종), 가축분뇨(축산), 제도 개선으로 나누어 개선방안을 제시하였음



〈그림〉 양분수지 개선 목표 핵심 요인 및 방안

- 경종 분야(무기질비료)에서의 양분수지 개선 방안
 - 표준시비량 재설정, 무기질 비료 대비 가축분뇨 사용 확대, 교육·홍보를 통한 비료 적정사용 유도, 비료 양분 이용율 향상(완효성비료)
- 축산 분야(가축분뇨)에서의 양분수지 개선 방안
 - 적정 사육 두수 설정, 사료작물 재배면적 확대, 곡물사료 대체 작물 개발, 가축분뇨 공공처리 확충 및 가축분뇨 처리방식 다각화, 가축분 퇴액비 품질 개선, 가축분뇨 자원화 기술 개발, 가축분 퇴비 해외 수출 및 북한 지원, 가축분뇨솔루션 연구센터
- 제도 개선을 통한 양분수지 개선 방안
 - 공익직불제와 연계한 비료 사용량 관리, 국가 양분관리 포털 시스템 구축(농과원-농협-농민), 비료 산업 현실화

목 차

요약문	I
목차	VII
그림 목차	VIII
표 목차	XI
제1장. 연구 목적 및 추진체계	1
1. 연구 목적	1
2. 연구 추진체계	1
제2장. 연구 내용 및 방법	2
1. 우리나라 농업 현황 분석	2
2. 우리나라 양분 과다 사용에 대한 원인 분석	4
3. 비료사용이 농업생산성 및 환경에 미치는 영향	4
4. 국내외 양분 관리 사례 분석	5
제3장. 연구 결과	6
1. 우리나라 농업 현황 분석	6
2. 우리나라 양분 과다 사용에 대한 원인 분석	33
3. 비료사용이 농업생산성 및 환경에 미치는 영향	43
4. 국내외 양분 관리 사례 분석	57
5. 농업인 비료 적정사용 및 국가 양분 수지 개선 방안	67
제4장. 요약 및 결론	81
참고문헌	83

그림 목차

그림 1. 연도별 농경지면적 변화	6
그림 2. 농가 호당 재배면적 변화	6
그림 3. 농가 호당 소유 재배면적 분포비율	6
그림 4. 연도별 벼 재배면적 변화	7
그림 5. 연도별 벼 생산량 변화	7
그림 6. 연도별 맥류 재배면적 변화	8
그림 7. 연도별 맥류 생산량 변화	8
그림 8. 연도별 잡곡 재배면적 변화	9
그림 9. 연도별 잡곡 생산량 변화	9
그림 10. 연도별 두류 재배면적 변화	10
그림 11. 연도별 두류 생산량 변화	10
그림 12. 연도별 서류 재배면적 변화	11
그림 13. 연도별 서류 생산량 변화	11
그림 14. 연도별 잡곡 재배면적 변화	12
그림 15. 연도별 잡곡 생산량 변화	12
그림 16. 연도별 엽채류 재배면적 변화	13
그림 17. 연도별 엽채류 생산량 변화	13
그림 18. 연도별 배추 재배면적 변화	13
그림 19. 연도별 배추 생산량 변화	13
그림 20. 연도별 근채류 재배면적 변화	14
그림 21. 연도별 근채류 생산량 변화	14
그림 22. 연도별 조미채소 재배면적 변화	15
그림 23. 연도별 조미채소 생산량 변화	15
그림 24. 연도별 노지 과채류 재배면적 변화	16
그림 25. 연도별 노지 과채류 생산량 변화	16
그림 26. 연도별 시설 과채류 재배면적 변화	17
그림 27. 연도별 시설 과채류 생산량 변화	17

그림 28. 연도별 과실류 재배면적 변화	17
그림 29. 연도별 과실류 생산량 변화	17
그림 30. 연도별 사료작물 재배면적 변화	18
그림 31. 연도별 질소(N) 및 인산(P ₂ O ₅)비료 소비량 변화	19
그림 32. 단위면적(ha)당 질소(N) 및 인산(P ₂ O ₅) 비료 소비량	19
그림 33. 1992-1995년 대비 2016-2019년 작물별 평균 생산량 변화 비율(%)	26
그림 34. 소 사육두수 변화	27
그림 35. 돼지 사육두수 변화	27
그림 36. 닭 사육두수 변화	27
그림 37. 가축분뇨를 통한 질소 발생량	30
그림 38. 가축분뇨를 통한 인 발생량	30
그림 39. 양분수지 평가기법(Land balance)	33
그림 40. OECD 주요 국가의 질소(N) 수지	34
그림 41. OECD 주요 국가의 무기질 질소(N) 사용량(kg/ha)	34
그림 42. OECD 주요 국가의 인(P) 수지	35
그림 43. OECD 주요 국가의 무기질 인(P) 사용량(kg/ha)	35
그림 44. OECD 주요 국가별 질소 투입량 및 비율	37
그림 45. OECD 주요 국가별 질소 제거량 및 비율	38
그림 46. OECD 주요 국가의 최근 5년간 단위면적당 질소 제거량	39
그림 47. OECD 주요 국가별 인 투입량 및 비율	40
그림 48. OECD 주요 국가별 인 제거량 및 비율	41
그림 49. OECD 주요 국가의 최근 5년간 단위면적당 인(P) 제거량	42
그림 50. 토양검정수준과 토양검정추천방법에 따른 최대 경제수량 반응(Hergert, 1997)	43
그림 51. 미국 Kansas State University에서 제시한 인(P) 최대 경제적 수량 반응곡선	44
그림 52. 우리나라 비료 이용에 따른 N ₂ O 배출량	49
그림 53. 유럽연합(EU) 27개국의 분야별 N ₂ O 배출량	49
그림 54. 2007-2016년 전세계 연평균 N ₂ O(백만톤) 수지(Tian et al., 2020)	50
그림 55. 대륙별 N ₂ O 배출량 변화(Tian et al., 2020)	51
그림 56. 유럽 국가별 질소수지 변화(빨간선: 질산염지침 시행시점)(Grizzetti et al., 2011) ...	52
그림 57. 2000~2004년 OECD 농업지역 지하수의 먹는 물 질소 기준 초과 비율 (Parris, 2011)	53

그림 58. 연도별 농업분야 NH ₃ 배출량 변화	54
그림 59. EU 국가별 암모니아 배출량(Gg N yr ⁻¹) 분류 (Leip et al., 2011)	55
그림 60. 유기농, 관행농 식량(곡물, 두류 및 유류 작물, 과일, 채소, 유제품 및 달걀, 육류) 생산시스템이 온실가스 배출, 토지 이용, 부영양화, 산성화, 에너지 이용에 미치는 영향 비율(Clark and Tilman, 2017)	56
그림 61. 비료 사용에 따른 수량 반응곡선	60
그림 62. 토양 무기 질소에 따른 적정 비료 사용량	60
그림 63. 토양 인 상태에 따른 인산 시비량 변화	61
그림 64. 토양 중 칼륨 상태에 따른 칼륨 시비량 변화	61
그림 65. 덴마크 비료 회계 시스템 data overview	65
그림 66. 양분수지 개선 목표 핵심 요인 및 방안	68
그림 67. 논에서 가축분 액비 시용에 의한 사료작물 생산량	70
그림 68. 논 이모작에서 가축분 퇴·액비 시용에 의한 사료작물 생산량	70
그림 69. 가축분으로 발생하는 질소 총량 대비 회수되는 가축분 질소 총량	75
그림 70. 가축분으로 발생하는 인 총량 대비 회수되는 가축분 인 총량	75
그림 71. 2005년 기준 남북한 농경지의 잉여 양분량 및 부족량 추정(김과 권, 2008)	77
그림 72. 가축분뇨솔루션 연구 센터 추진체계	78

표 목차

표 1. 농작물 재배면적 및 생산량 변화분석 대상 작물	2
표 2. 10년 주기 논밭 재배면적 변화 및 농가당 재배면적 변화	7
표 3. 10년 주기 평균 벼 재배면적 및 생산량 변화	7
표 4. 10년 주기 평균 맥류 재배면적 및 생산량 변동	8
표 5. 10년 주기 평균 잡곡 재배면적 및 생산량 변동	9
표 6. 10년 주기 평균 두류 재배면적 및 생산량 변동	10
표 7. 10년 주기 평균 서류 작물 재배면적 및 생산량 변동	11
표 8. 10년 주기 평균 특용작물 재배면적 및 생산량 변화	12
표 9. 10년 주기 평균 엽채류 재배면적 및 생산량 변화	13
표 10. 10년 주기 평균 배추 재배면적 및 생산량 변화	14
표 11. 10년 주기 평균 근채류 재배면적 및 생산량 변화	14
표 12. 10년 주기 평균 조미채소 재배면적 및 생산량 변화	15
표 13. 10년 주기 평균 노지 과채류 재배면적 및 생산량 변화	16
표 14. 10년 주기 평균 시설 과채류 재배면적 및 생산량 변화	17
표 15. 10년 주기 평균 과실류 재배면적 및 생산량 변화	18
표 16. 10년 주기 평균 무기질 비료 소비량 변화	20
표 17. 농협을 통한 유기질 비료 판매량	20
표 18. 1997년과 2017년 작물별 표준소비량	21
표 19. 작물재배에 필요한 비료 요구량(표준소비량 기준)	24
표 20. 축종별 가축분뇨 배출원단위	29
표 21. 연대별 논, 밭, 시설재배지 화학성 변화	31
표 22. 우리나라 작물별 표준소비량과 현장 사용량의 질소/인 비율	32
표 23. OECD 주요 국가의 농경지 면적	34
표 24. 미국 South Dakota 주 토양 인(P) 함량 분류(South Dakota State University, 2005)	44
표 25. 미국 주별 토양 유효 인(P) 함량 임계수준(Howard, 2006)	45
표 26. 국외 연구진이 수행한 토양 유효 인(P) 함량의 임계수준 연구결과	45
표 27. 농촌진흥청 작물별 비료사용처방에 따른 작물별 토양 적정 유효인산 함량	47

표 28. 2015-2017년 유럽 국가별 NH ₃ 배출량	55
표 29. 국내외 시비처방을 위한 토양 분석법 비교	57
표 30. 우리나라 작물별 시비처방 기준	58
표 31. South Dakota 주 시비처방 기준(South Dakota State University, 2005)	59
표 32. Wisconsin 주 시비처방 기준(Laboski 등, 2018)	59
표 33. 네덜란드의 작물별 질소 추천량 산출 공식	60
표 34. SNS Index 등급표	62
표 35. SNS Index를 이용한 밀 질소 시비추천량	62
표 36. 덴마크의 환경 보호를 위한 단계적 인 한계치	64
표 37. 토양 중 인 상태를 기초로 한 P 최대 허용량	65
표 38. 작물별 질소와 인산의 표준시비량 변화	67
표 39. 주요작물별 질소 표준시비량 감축에 따른 생산성 변화 예측	69
표 40. 완효성비료 세대별 특징(Kaneta, 1995)	72
표 41. 가축분뇨 발생량 및 처리현황(김 등, 2018a)	74
표 42. 기본형 공익직접지불사업 시행지침서 개정(안)	79

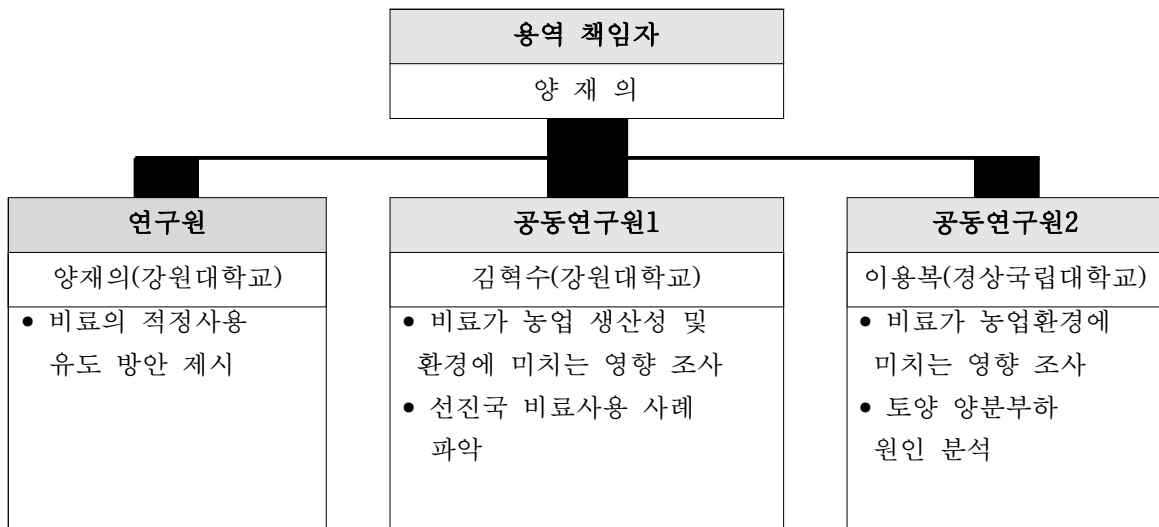
제1장 연구 목적 및 추진체계

1. 연구 목적

- 우리나라 농업의 현황을 살펴보고 비료 사용에 대한 통계적 지표를 종합하여 OECD 국가 중 최고 수준을 보이고 있는 양분부하 원인을 파악하고자 하였다.
- 해외 선진국의 양분저감 사례 및 정책 등을 조사하여 양분수지 저감을 위한 다양한 방법 및 우리나라 정책과 비교 분석을 하였다.
- 현황 분석 및 원인 분석, 해외 사례분석을 종합하여 우리나라 농업인의 비료 적정 사용을 유도할 수 있는 시스템 및 제도 개선 방안을 제시하고자 하였다.

2. 연구 추진체계

- 본 연구과제에서 제시한 문제점을 정확히 파악하고 있는 토양 및 비료 전문가로 연구진이 구성되었다.
- 연구의 효율성을 높이고자 현황 분석/원인 분석/해외 사례 분석/개선방안 제시로 연구분야를 세분화하였고, 아래 그림과 같이 역할을 분담하였다.
- 각 연구진은 긴밀한 협력 체계를 유지하기 위해 상시 회의를 통한 연구 결과 교류 및 정보 공유가 원활히 이뤄지도록 하였다.



제2장 연구 내용 및 방법

1. 우리나라 농업 현황 분석

○ 농작물 생산을 위해 농경지에 투입되는 양분(비료)은 크게 무기질 비료와 가축분뇨 유래 퇴액비로 구분할 수 있다. 작물 생산을 위한 양분(비료) 사용량은 작물의 종류, 목표수량 그리고 재배면적에 가장 큰 영향을 받는다. 국내 농경지에 투입되는 양분(비료) 사용량 변화, 과다사용 원인 파악 및 개선방안 제시를 위해 농작물 재배면적, 무기질비료 사용량, 가축분 유래 양분발생량 등의 농업현황을 분석하였다.

가. 농경지 면적 및 무기질 비료 사용량

1) 국내 작물 재배면적 및 생산량 변화

○ 국내 농작물 재배면적 및 생산량 변화는 KOSIS 통계자료를 이용하여 1981년에서 2019년까지 변화량을 10년 주기로 분석하였다. 조사대상 작물은 식량작물, 맥류, 서류, 잡곡, 두류, 특용작물, 채소류, 과수, 기타로 분류하였다(표 1).

<표 1> 농작물 재배면적 및 생산량 변화분석 대상 작물

대분류		소분류
• 식량작물		논벼, 밭벼
• 맥류		겉보리, 쌀보리, 매주보리, 밀
• 서류		봄감자, 고령지감자, 가을감자, 고구마
• 잡곡		조, 수수, 옥수수, 메밀, 기타
• 두류		콩, 팥, 녹두, 기타
• 특용작물(유지)		참깨, 들깨, 땅콩
• 채소류	엽채류	배추(노지, 시설), 시금치(노지, 시설), 상추(노지, 시설) 양배추
	근채류	무(노지, 시설), 당근
	조미채소류	건고추, 풋고추, 파(노지, 시설), 양파, 마늘, 생강
	과채류	수박(노지, 시설), 참외(노지, 시설), 딸기(노지, 시설), 오이(노지, 시설), 호박(노지, 시설)
• 과수		사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤, 감, 자두, 매실, 기타
• 기타		사료작물, 화훼류, 섬유작물, 기호작물, 약용작물

2) 국내 비료 사용량

- 국내 무기질 비료 사용량 변화는 질소(N)와 인산(P_2O_5)을 대상으로 농림수산통계연보를 활용하여 1981년부터 2019년까지 성분별 판매량을 연 단위로 분석하였다.
- 국내 유기질 비료 사용량 변화는 2011-2019년까지 농협 유통망을 통해서 판매된 혼합유박과 혼합유기질 판매량을 사용량으로 분석하였다.

3) 표준시비량 대비 작물생산량 변화

- 작물별 표준시비량 변화는 1999년과 2019년 농촌진흥청에서 발간한 “작물별 비료사용처방”에서 제시한 자료를 비교 분석하였다.
- 우리나라 무기질 비료 요구량은 작물별 비료사용처방에서 제시한 표준시비량과 작물별 재배면적의 곱으로 계산하였으며, 국내에서 무기질 비료 사용이 가장 많았던 1992-1995년 요구량과 최근 4년(2016-2019)간 요구량을 비교분석 하였다.
- 무기질 비료 사용량 대비 단위면적당 작물 생산량(kg/ha) 변화는 주요작물(36개)을 대상으로 비료사용이 가장 많았던 1992-1995년 단위면적당 평균 생산량 대비 최근 4년간 평균 생산량의 비율로 평가하였다.

나. 국내 가축분뇨를 통한 질소 및 인 발생량

- 가축분뇨를 통한 양분발생량 조사를 위해 대상 축종은 소(한우, 젓소), 돼지, 닭(육계, 산란계)으로 선정하였으며, 1985년부터 2019년까지 사육두수 변화는 KOSIS 통계자료를 이용하였다.
- 축종별 질소 및 인 발생량 조사를 위한 축종별 배출원단위는 1999년, 2007년, 2017년 세 번 개정되었으며, 1999년 배출원단위는 환경부고시(1999-109호)를 활용하였다. 2007년 배출원단위는 한우와 젓소는 350 kg 보정계수를 이용하였고, 돼지는 70 kg 보정계수를 활용하였고, 닭의 경우 육계는 1-5주령 평균치 그리고 산란계는 1-7주령 평균치를 활용하였다(농촌진흥청, 2009). 2017년 원단위는 가축분뇨 배출원단위 재산정 및 깔짚축사 유형별 분뇨 발생량 산정(농촌진흥청, 2019)에 보도된 자료를 활용하였다.
- 축종별 질소 및 인 발생량 변화는 배출원단위와 사육두수의 곱으로 계산하였으며, 2008년까지 발생량은 1999년 배출원단위를 적용하였으며, 2009-2017년까지는 2007년 배출원단위, 그리고 2018-2019년은 2017년 배출원단위를 이용하여 계산하였다.

다. 국내 토양의 화학성 변화

- 무기질 비료 및 가축분 유래 퇴/액비 사용에 의한 국내 농경지 화학성 변화를 논, 밭, 시설재배지를 구분하여 작물별시비처방기준(농촌진흥청, 2010)과 농업환경변동조사 사업 자료를 활용하였다(농촌진흥청, 2020). 조사기간은 1950년부터 2019년까지 10년 주기로 분석하였으며 조사항목은 pH, EC(시설), 유기물, 유효인산, 치환성 양이온(K, Ca, Mg), 유효규산(논) 이었다.

2. 우리나라 양분 과다 사용에 대한 원인 분석

가. OECD 주요 국가별 양분수지 변화

- 비교 대상국가는 OECD 회원국 중에서 경지면적, 가축사육 밀도, 경제수준, 양분수지 개선 등을 고려하여 일본, 벨기에, 덴마크, 네덜란드를 선발하였다.
- 국가별 양분수지는 한국, 일본, 네덜란드는 1990년-2017년, 덴마크와 벨기에는 1990년-2014년까지 OECD 사무국에 보고한 자료를 활용하였다.

나. OECD 주요 국가의 양분투입량 대비 제거량

- 국가단위 양분수지 계산은 국가 전체 양분투입량에서 제거량의 차이를 단위면적(ha)당 잉여량으로 산출하고 있다. 이때 양분투입량은 무기질 비료와 가축분뇨 발생이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 제거량은 작물과 사료작물을 통한 회수율이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 비교 대상국가들의 양분 투입량과 제거량을 우리나라와 비교 분석하였다.

3. 비료 사용이 농업생산성 및 환경에 미치는 영향

가. 비료 사용이 농업생산성에 미치는 영향

- 비료 사용에 따른 농업생산성의 변화는 국내외 학술자료 및 문헌, 보고서를 바탕으로 조사를 수행하였다.
- 조사 내용으로는 최대 경제적 수량 반응곡선에 따른 비료 사용량 비교, 비료 사용 및 현재 토양의 양분 상태를 고려한 시비 처방에 따른 농업생산성 변화 등을 알아보았다.

나. 비료 사용이 환경에 미치는 영향

- 비료 사용에 따른 환경의 변화 역시 국내외 학술자료 및 문헌, 보고서 등을 바탕으로

조사를 수행하였다.

- 조사 내용으로는 온실가스, 암모니아 배출, 수질 오염 등 농업 활동으로 문제가 되고 있는 환경 이슈를 중심으로 비료 사용의 영향을 알아보았다.

4. 국내외 양분 관리 사례 분석

가. 국내외 토양검정 및 시비처방 프로그램 비교

- 대상 국가: 한국, 일본, 미국, EU 등
- 조사 방법: 논문 및 보고서
- 조사 항목: 분석 항목 및 방법 비교

나. 국외 양분 관리 정책 분석

- 대상 국가: EU, 미국 등
- 조사 방법: 논문 및 보고서

제3장 연구 결과

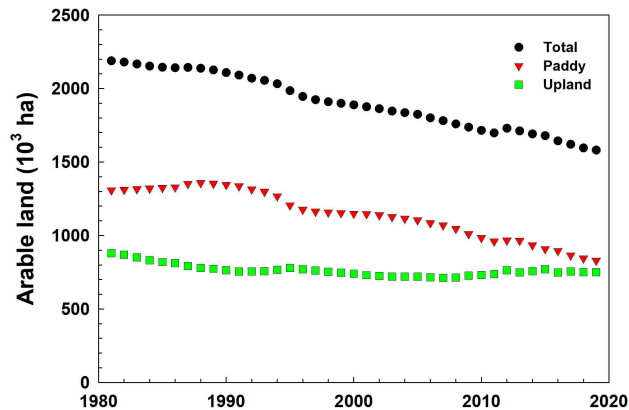
1. 우리나라 농업 현황 분석

가. 농경지 면적 및 무기질 비료 사용량

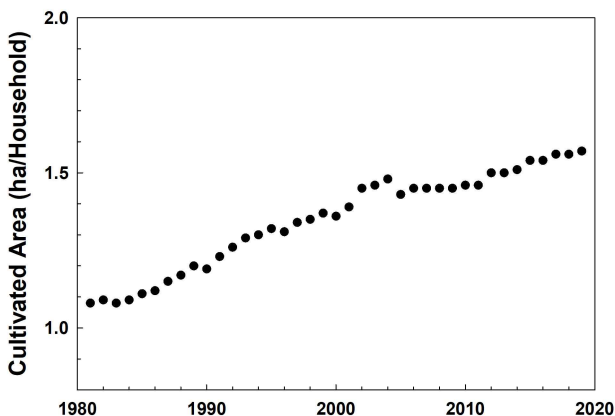
1) 국내 작물 재배면적 및 생산량 변화

○ 논밭 재배면적 변화

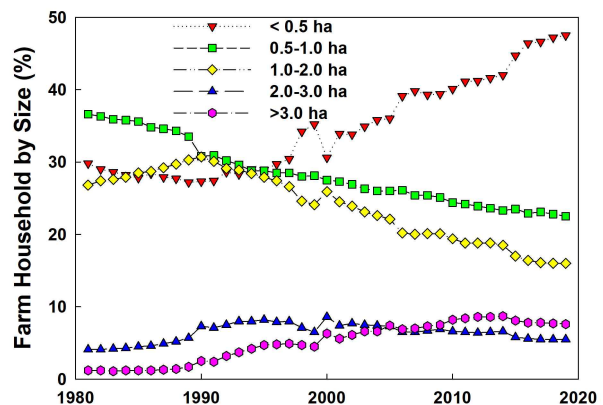
- 우리나라 농경지 면적은 1968년 2,318천 ha에서 '80년대 2,149천 ha, '10년대 1,661천 ha로 매년 감소하고 있다(그림 1). 농경지 면적감소는 밭보다는 논면적 감소가 크며 '10년대 논면적은 1,000천 ha 이하로 조사되었다(표 2). 농경지 면적 감소의 주요 원인은 농지전용과 유희지 면적 증가로 보고하고 있다 (박과 채, 2013).
- 농가 가구당 재배면적은 1981년 1.08 ha에서 2019년 1.57 ha로 증가하고 있다(그림 2). 가구당 경지면적 규모는 0.5-3.0 ha 보유 비율은 줄어들고 있으나 0.5 ha 이하와 3.0 ha 이상은 증가하고 있는 경향을 보이고 있다(그림 3).



<그림 1> 연도별 농경지면적 변화



<그림 2> 농가 호당 재배면적 변화



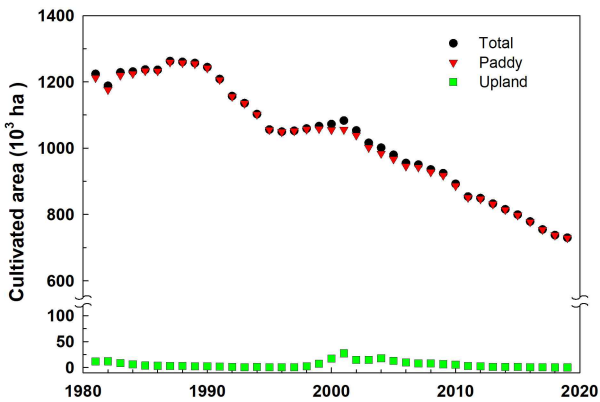
<그림 3> 농가 호당 소유 재배면적 분포비율

<표 2> 10년 주기 논밭 재배면적 변화 및 농가당 재배면적 변화

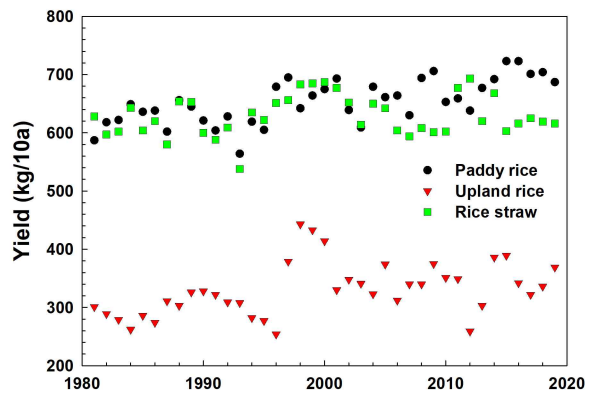
	농경지 면적(10 ³ ha)			재배면적 (ha/농가)	농가당 재배면적 비율(%)					
	논	밭	계		<0.5 ha	0.5-1.0 ha	1.0-2.0 ha	2.0-3.0 ha	3.0-5.0 ha	>5.0 ha
'80년대	1,331.6	817.3	2,148.9	1.13	28.2	34.8	28.7	4.9	1.4	
'90년대	1,221.9	758.1	1,980.0	1.31	30.2	28.9	27.3	7.7	4.3	
'00년대	1,082.5	721.2	1,803.7	1.45	37.2	25.9	21.6	7.1	6.9	
'10년대	907.4	753.8	1,661.2	1.53	44.3	23.3	17.4	6.0	4.5	3.6

○ 벼 재배면적 및 생산량 변화

- 벼 재배면적은 1980년 1,212천 ha에서 2019년 729천 ha로 약 40%가 감소하였다. 이와 같은 감소 추세는 1990-1995년 연평균 31천 ha/년이 감소하였으며, 2000년 이후에는 연평균 17천 ha/년씩 지속적으로 감소되고 있다(그림 4).
- 단위면적당 논벼 생산량은 '80년대 627 kg/10a에서 '10년대 700 kg/10a로 증가하였지만 밭 벼는 큰 변화가 없었다(그림 5, 표 3).



<그림 4> 연도별 벼 재배면적 변화



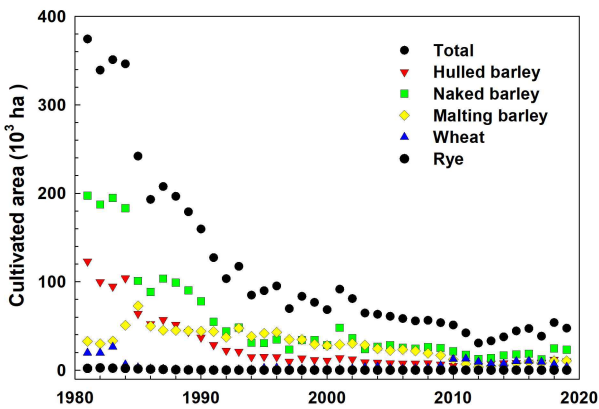
<그림 5> 연도별 벼 생산량 변화

<표 3> 10년 주기 평균 벼 재배면적 및 생산량 변화

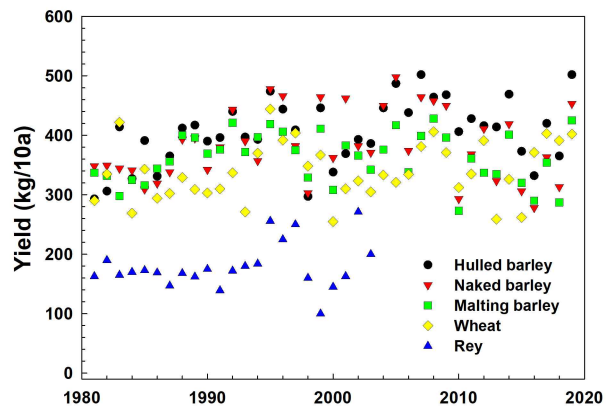
	벼 재배면적(10 ³ ha)			벼 생산량(kg/10a)		
	논	밭	계	논벼(조곡)	밭벼(조곡)	벼짚
'80년대	1,231.0	5.7	1,236.7	627.4	295.9	618.1
'90년대	1,092.5	3.4	1,095.9	637.5	342.1	635.4
'00년대	966.6	12.5	979.1	662.8	343.4	624.4
'10년대	793.4	1.2	794.6	689.3	339.4	637.4

○ 맥류 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라 맥류 재배면적은 '80년대 258.9천 ha에서 '10년대 41.6천 ha로 '80년대 대비 80% 이상 감소하였다(그림 6, 표 4). 밀은 우리밀 재배 장려 정책으로 현재 '80년대 재배면적을 회복하고 있다. 단위 면적당 생산량은 겉보리와 쌀보리의 경우 '00년대까지 증가하였으며 이후 큰 변화를 나타내지 않고 있다. 맥주보리는 '10년대 감소 추세를 보였고, 밀은 지난 30년간 단위면적당 생산량 변화는 없는 것으로 조사되었다(그림 7). 그리고 호밀 재배면적은 '90년대 이후는 통계적 의미가 없는 것으로 확인되었다.



<그림 6> 연도별 맥류 재배면적 변화



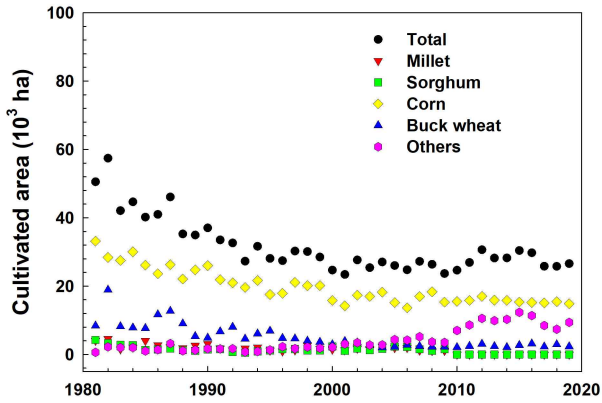
<그림 7> 연도별 맥류 생산량 변화

<표 3> 10년 주기 평균 맥류 재배면적 및 생산량 변동

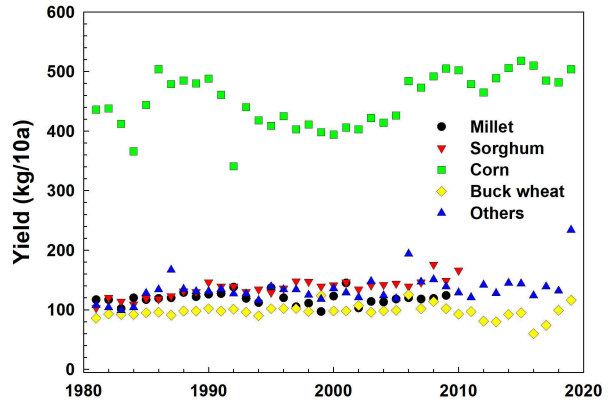
	맥류 재배면적(10 ³ ha)						맥류 생산량(kg/10a)				
	겉보리	쌀보리	맥주보리	밀	호밀	계	겉보리	쌀보리	맥주보리	밀	호밀
'80년대	72.6	132.3	44.7	7.9	1.3	258.9	365	348	347	320	168
'90년대	16.3	36.3	37.8	1.2	<0.1	91.6	403	403	381	350	181
'00년대	8.6	28.6	22.8	3.6	<0.1	63.6	436	420	372	340	211
'10년대	8.0	17.5	7.5	8.6	-	41.6	413	359	346	349	-

○ 잡곡 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라의 대표적 잡곡은 조, 수수, 메밀, 옥수수로 이들의 재배면적 변화는 맥류와 비슷한 경향을 보였다. 옥수수와 메밀을 제외한 잡곡 재배면적은 '10년대 통계에서는 확인되지 않았으며, 옥수수가 15.6천 ha, 메밀이 2.6천 ha로 확인되었다(그림 8, 표 5). 그리고 현재 잡곡의 생산량은 '80년대와 큰 차이가 없는 것으로 조사 되었다(그림 9).



<그림 8> 연도별 잡곡 재배면적 변화



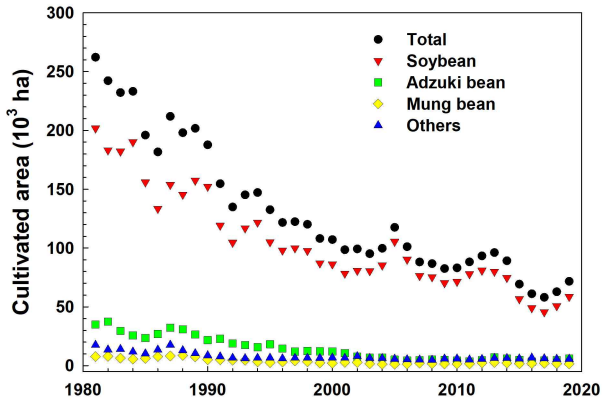
<그림 9> 연도별 잡곡 생산량 변화

<표 5> 10년 주기 평균 잡곡 재배면적 및 생산량 변동

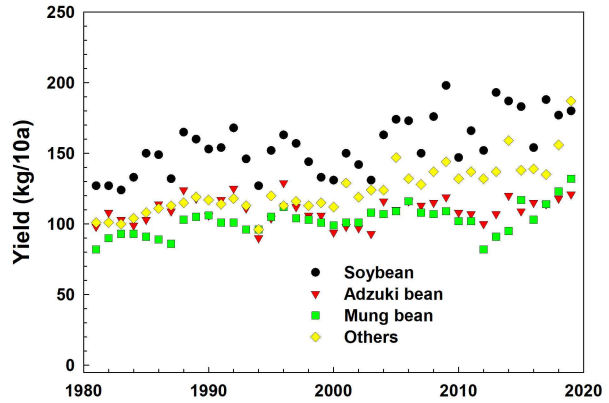
	잡곡 재배면적(10 ³ ha)						잡곡 생산량(kg/10a)				
	조	수수	옥수수	메밀	기타	계	조	수수	옥수수	메밀	기타
'80년대	2.9	2.1	26.8	9.5	1.6	42.9	119	121	453	94	124
'90년대	1.6	1.3	19.7	5.2	1.6	29.4	119	138	410	101	129
'00년대	1.4	1.4	16.2	2.6	4.0	25.6	119	148	453	103	140
'10년대	-	-	15.6	2.6	9.8	28.0	-	-	444	79	131

○ 두류 재배면적 및 생산량 변화

- 두류의 재배면적은 '80년대부터 현재까지 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있다(그림 10). 현재 두류 전체의 재배면적은 '80년대 대비 약 65% 감소하였으며 쌀의 재배면적은 82% 이상 감소 하였다(표 6). 콩을 제외한 두류의 단위면적당 생산량은 지난 40년간 큰 변화가 없었다(그림 11). 콩의 경우 지난 30년간 꾸준히 품종개량과 재배법 개선 연구의 일환으로 생산량이 꾸준히 증가하고 있는 것으로 확인되었다.



<그림 10> 연도별 두류 재배면적 변화



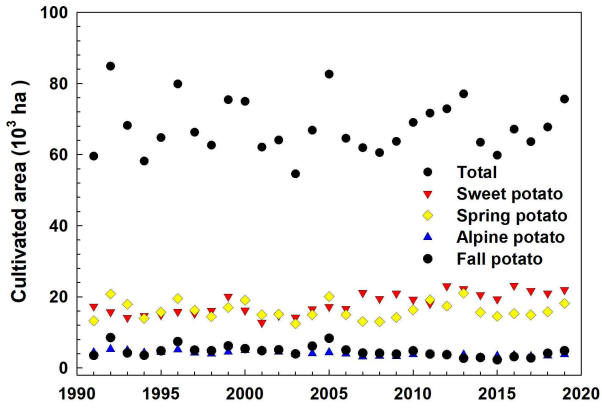
<그림 11> 연도별 두류 생산량 변화

<표 6> 10년 주기 평균 두류 재배면적 및 생산량 변동

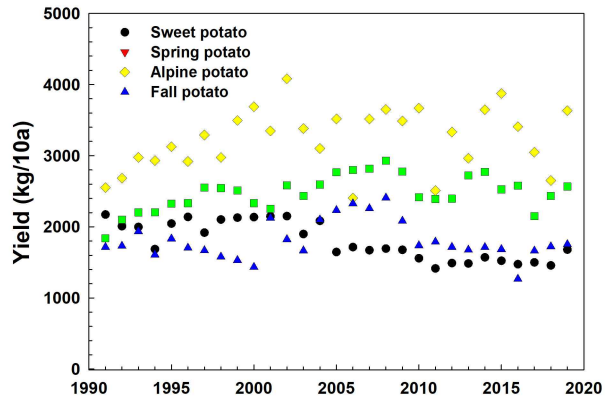
	두류 재배면적(10 ³ ha)					두류 생산량(kg/10a)			
	콩	팥	녹두	기타	계	콩	팥	녹두	기타
'80년대	165.5	28.9	7.1	13.1	214.7	142	108	94	109
'90년대	103.6	15.6	3.5	6.6	129.4	148	109	102	113
'00년대	81.4	6.1	1.8	6.0	95.2	160	109	107	132
'10년대	63.8	5.0	1.9	6.0	76.6	176	112	107	147

○ 서류 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라 서류 재배면적과 단위면적당 생산량 통계자료는 1991년부터 작성되기 시작하였다. '90년대 대비 현재 서류의 재배면적은 큰 변화가 없었다(그림 12). 서류 중에서 감자의 경우 고랭지 감자와 가을 감자 재배면적이 다소 감소한 반면 고구마 재배면적이 '90년대 대비 '10년대 약 30% 이상 증가하였다.
- 단위면적당 서류 생산량은 고구마를 제외하고 '90년대 대비 현재 증가한 것으로 조사되었다(그림 13). 고구마의 경우 조사가 시작된 '90년대부터 현재까지 지속적으로 감소하고 있다(표 7). 이러한 고구마의 단위면적당 생산량 감소는 '90년대 고구마는 주로 가공용으로 150일 이상 재배하여 대형으로 생산하였으나 이후 소비자의 기호가 소형 고구마로 전환되어 밀식으로 짧은 기간(110일) 재배하여 단위면적당 생산 개수는 증가하였지만, 생산량이 감소한 것으로 확인되었다(국립식량과학원).



<그림 12> 연도별 서류 재배면적 변화



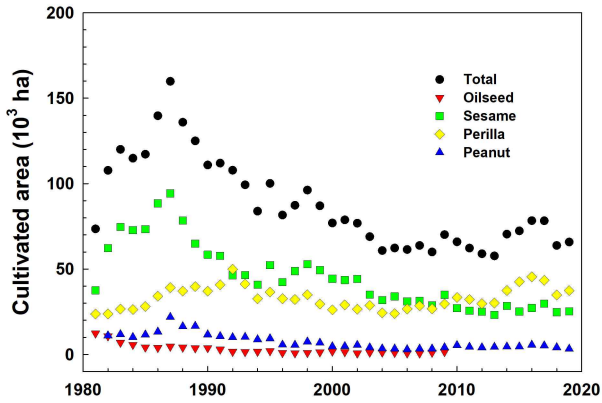
<그림 13> 연도별 서류 생산량 변화

<표 7> 10년 주기 평균 서류 작물 재배면적 및 생산량 변동

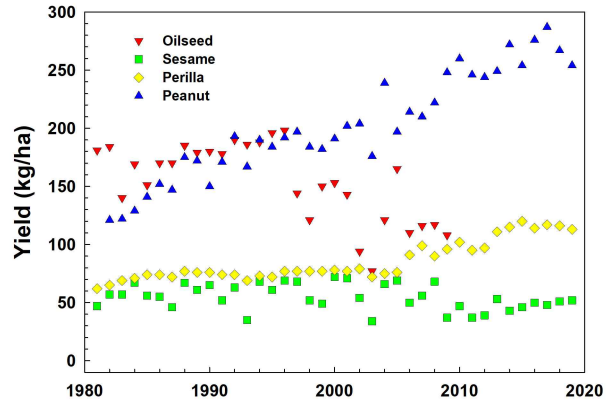
	서류작물 재배면적(10 ³ ha)					서류작물 생산량(kg/10a)				
	고구마	감자			계	고구마	봄감자	고랭지 감자	가을 감자	계
		봄감자	고랭지 감자	가을 감자						
'90년대	16.0	16.8	4.6	5.3	26.7	69.5	2,033	2,294	3,064	1,674
'00년대	17.3	14.9	3.9	5.0	23.9	65.0	1,824	2,637	3,416	2,077
'10년대	21.2	16.9	3.5	3.4	23.8	68.8	1,510	2,505	3,230	1,665

○ 특용(유지) 작물 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라의 대표적인 유지작물은 참깨와 들깨이다. 참깨의 재배면적은 지속해서 감소하는 추세를 보이지만, 들깨는 '10년대 들어서 재배면적이 37천 ha로 '80년대 31.6천 ha보다 증가하였다(그림 14, 표 8). 들깨의 재배면적 확대는 최근 들기름의 수요가 증가하면서 농가의 새로운 소득 작물로 인식되고 있다. 땅콩은 '80년대 이후 재배면적 변화는 크지 않았으나 단위면적당 생산량은 '80년대 145 kg/10a에서 '10년대 392 kg/10a로 증가하였다(그림 15). 이는 연구기관의 소면적 작물에 대한 품종개량과 재배법 연구의 결과로 판단된다.



<그림 14> 연도별 잡곡 재배면적 변화



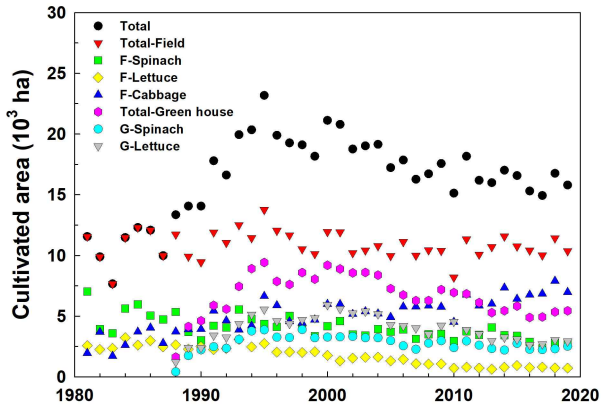
<그림 15> 연도별 잡곡 생산량 변화

<표 8> 10년 주기 평균 특용작물 재배면적 및 생산량 변화

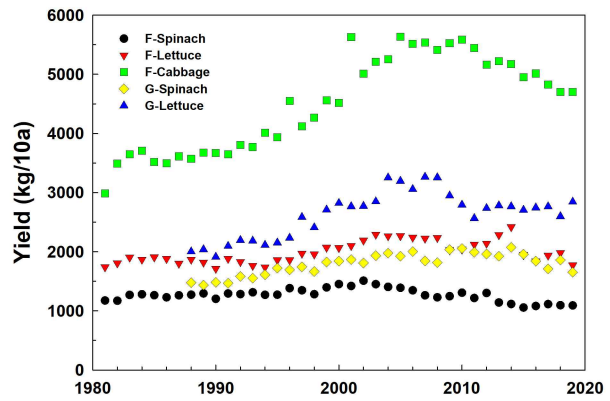
	특용작물 재배면적(10 ³ ha)					특용 작물 생산량(kg/10a)			
	유채	참깨	들깨	땅콩	계	유채	참깨	들깨	땅콩
'80년대	6.0	70.5	31.6	13.8	120.5	171	58	72	145
'90년대	1.5	48.1	35.6	7.9	93.2	170	59	75	185
'00년대	1.0	34.2	27.8	4.0	66.9	105	55	86	217
'10년대	-	26.0	37.0	6.7	67.5	-	47	111	392

○ 엽채류 및 근채류 재배면적 및 생산량 변화

- 엽채류 재배면적은 '90년대 중반까지 증가하는 경향을 보였지만 '00년대 이후 큰 변화를 보이지 않고 있다(그림 16). 단위면적당 생산량 경우 시금치는 큰 변화가 없지만 상추와 양배추는 '00년대까지 증가하다 이후 큰 차이가 없었다(그림 17, 표 9). 엽채류 중에서 재배면적이 가장 많은 배추는 '80년대 이후 재배면적이 지속적으로 감소하고 있으며 '80년대에 비해서 '10년대 약 35%가 감소하였다(그림 18). '10년대부터 겨울 배추를 재배하기 시작하였지만 배추 전체 재배면적의 약 14%이다. 근채류인 무와 당근의 재배면적도 엽채류와 비슷한 경향을 보였다(그림 20).



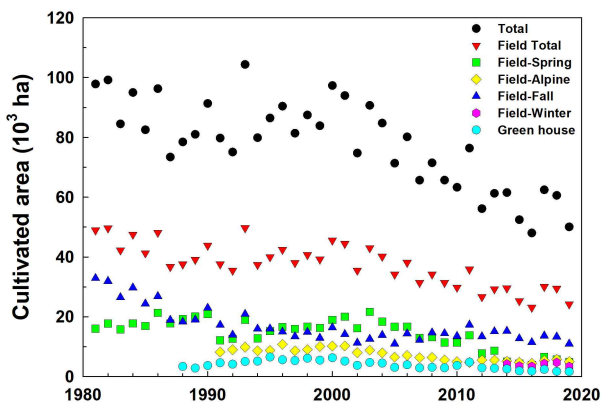
<그림 16> 연도별 엽채류 재배면적 변화



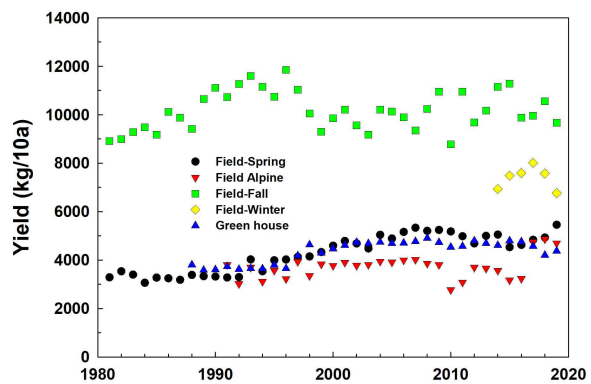
<그림 17> 연도별 엽채류 생산량 변화

<표 9> 10년 주기 평균 엽채류 재배면적 및 생산량 변화

	엽채류 재배면적(10 ³ ha)								엽채류 생산량(kg/10a)				
	노지				시설			계	노지			시설	
	시금치	상추	양배추	소계	시금치	상추	소계		시금치	상추	양배추	시금치	상추
'80년대	4.8	2.6	3.2	10.6	1.5	2.0	3.5	14.1	1,242	1,831	3,537	1,465	1,985
'90년대	4.4	2.3	5.0	11.7	3.2	4.6	7.9	19.5	1,329	1,899	4,119	1,671	2,351
'00년대	3.6	1.3	5.4	10.3	2.9	4.6	7.5	17.8	1,357	2,189	5,432	1,927	3,016
'10년대	3.2	0.8	6.8	10.7	2.5	3.1	5.6	16.3	1,135	2,049	5,022	1,886	2,723



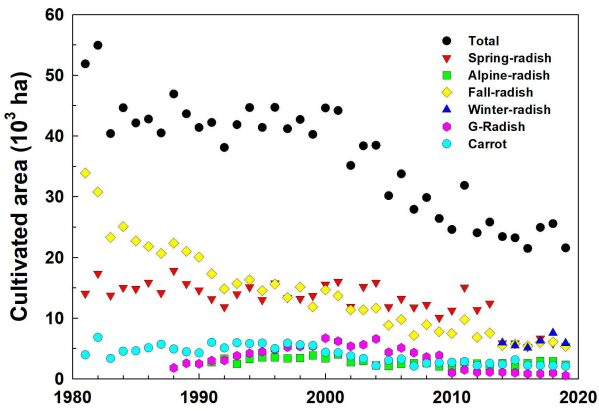
<그림 18> 연도별 배추 재배면적 변화



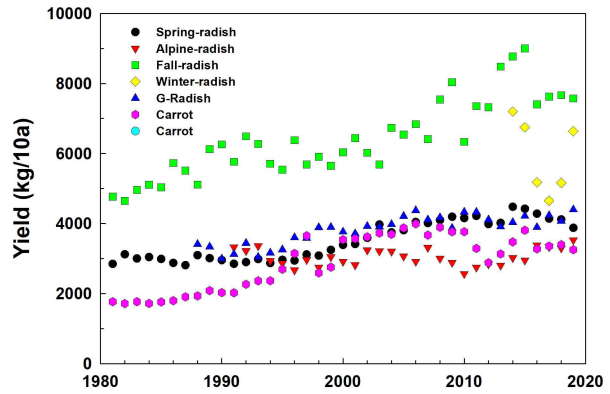
<그림 19> 연도별 배추 생산량 변화

<표 10> 10년 주기 평균 배추 재배면적 및 생산량 변화

	배추 재배면적(10 ³ ha)							배추 생산량(ton/10a)				
	노지					시설	계	봄배추	고령지 배추	가을 배추	겨울	시설
	봄배추	고령지 배추	가을 배추	겨울	계							
'80년대	18.3	-	25.1	-	43.5	3.3	46.8	3.30	-	9.7	-	3.67
'90년대	15.6	9.3	15.7	-	40.6	5.4	46.0	3.93	3.53	10.8	-	3.97
'00년대	15.8	7.2	13.2	-	36.2	3.8	40.0	5.00	3.78	9.9	-	4.71
'10년대	6.7	5.1	13.7	3.9	28.1	2.5	30.6	4.90	3.85	10.4	7.39	4.60



<그림 20> 연도별 근채류 재배면적 변화



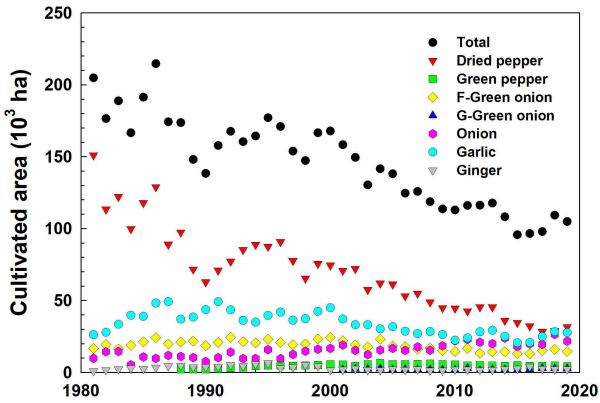
<그림 21> 연도별 근채류 생산량 변화

<표 11> 10년 주기 평균 근채류 재배면적 및 생산량 변화

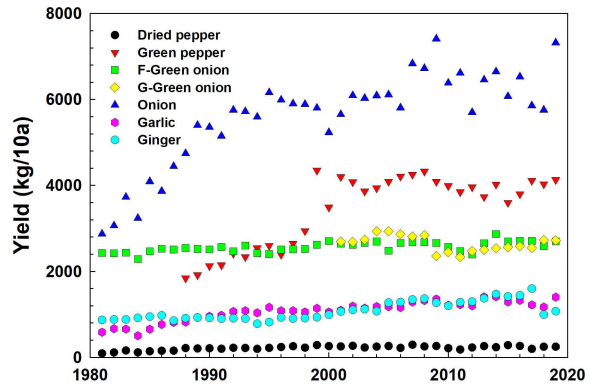
	근채류 재배면적(10 ³ ha)							근채류 생산량(ton/10a)								
	무우						당근	계	무우						당근	계
	봄	고령지	가을	겨울	시설	계			봄	고령지	가을	겨울	시설	계		
'80년대	15.3	-	24.2	-	2.3	41.8	4.8	46.6	3.0	-	5.3	-	3.2	11.5	1.8	13.3
'90년대	13.9	3.3	14.9	-	4.6	36.7	5.5	42.2	3.0	3.0	5.9	-	3.5	15.4	2.7	18.1
'00년대	12.9	2.6	9.8	-	4.6	29.9	3.0	32.9	3.9	3.0	6.7	-	4.1	17.7	3.8	21.5
'10년대	8.2	2.5	6.5	6.0	1.0	24.2	2.4	26.6	4.2	3.1	7.9	5.9	4.1	25.2	3.3	28.5

○ 조미채소 재배면적 및 생산량 변화

- 조미채소의 전체 재배면적은 '80년대 대비 '10년대 약 40% 감소하였으며, 특히 건고추 재배면적이 약 65% 이상 감소하였다(그림 22, 표 12). 마늘의 재배면적은 지난 30년간 지속적으로 감소하였고, 양파는 '90년대 급격히 감소하다 최근 다시 증가하고 있는 경향을 보이고 있다.



<그림 22> 연도별 조미채소 재배면적 변화



<그림 23> 연도별 조미채소 생산량 변화

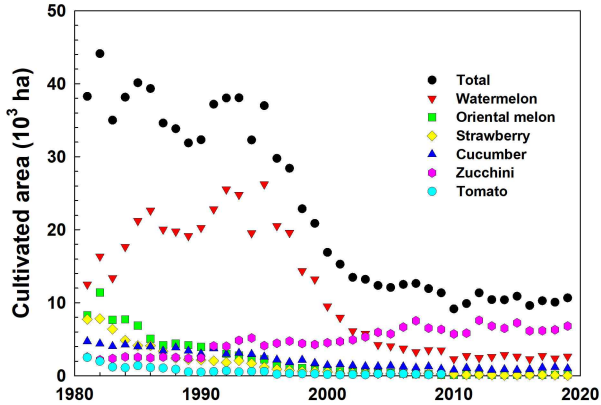
<표 12> 10년 주기 평균 조미채소 재배면적 및 생산량 변화

	조미채소 재배면적(10 ³ ha)								조미채소 생산량(kg/10a)						
	건고추	풋고추	파		양파	마늘	생강	계	건고추	풋고추	파		양파	마늘	생강
			노지	시설							노지	시설			
'80년대	105.4	2.2	19.8	-	35.1	38.3	3.0	177.7	156	588	2,465	-	4,082	736	908
'90년대	79.3	4.3	21.8	-	12.9	40.6	4.4	163.4	233	2,787	2,533	-	5,720	1,075	897
'00년대	57.0	5.7	18.1	2.1	16.8	29.8	1.9	131.4	251	4,103	2,635	2,731	6,315	1,213	1,211
'10년대	36.1	4.7	14.5	3.4	21.5	25.4	2.4	107.0	239	3,915	2,644	3,832	6,329	1,295	1,328

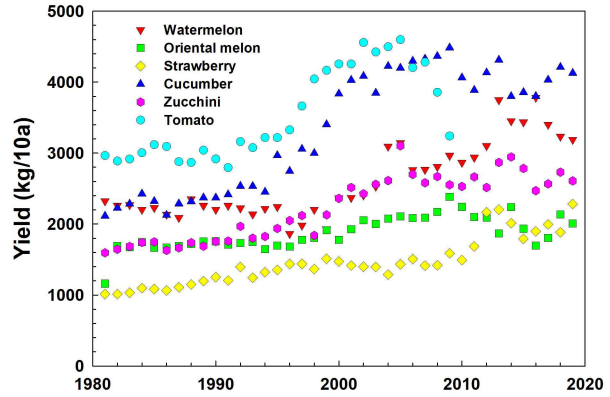
○ 과채류 재배면적 및 생산량 변화

- 노지 과채류의 재배면적은 '90년대 후반 급격히 감소하였다(그림 24, 표 13). 특히 노지 수박은 '80년대 19.6천 ha에서 '10년대 2.6천 ha로 약 87%가 감소하였고, 시설수박은 '80년대 4.1천 ha에서 '10년대 11.6천 ha로 증가하였다(그림 26). 따라서 노지 과채류의 재배면적 감소는 대부분 노지 수박이 시설 수박으로 전환되었기 때문으로 판단된다. 그리고 노지 참외, 딸기, 오이의 재배면적은 '00년대 이후 1천 ha 이하로 조사되었고 토마토는 '00년대 이후 노지 재배 면적에 대한 통계자료가 집계되지 않았다.

- 시설 과채류 재배면적은 1988년 통계조사가 시작된 이후 2000년까지 지속적으로 증가하였지만 이후 감소하는 경향을 보이고 있다.



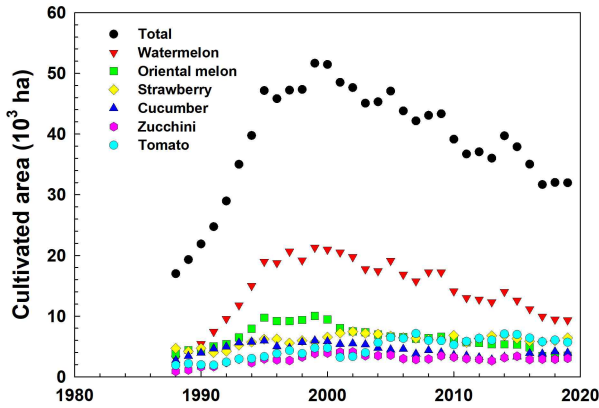
<그림 24> 연도별 노지 과채류 재배면적 변화



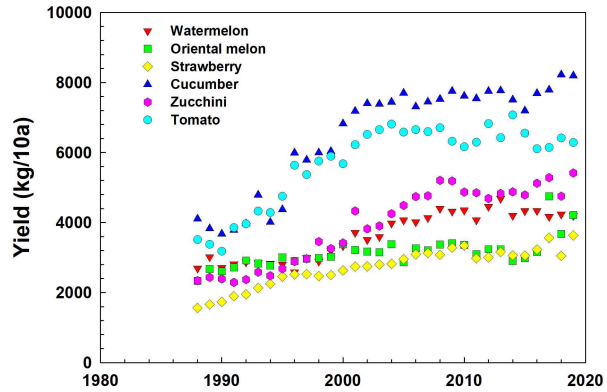
<그림 25> 연도별 노지 과채류 생산량 변화

<표 13> 10년 주기 평균 노지 과채류 재배면적 및 생산량 변화

	노지 과채류 재배면적(10 ³ ha)							노지 과채류 생산량(ton/10a)					
	수박	참외	딸기	오이	호박	토마토	계	수박	참외	딸기	오이	호박	토마토
'80년대	18.3	6.4	4.5	3.9	2.5	1.2	36.8	2.23	1.65	1.10	2.29	1.69	2.97
'90년대	19.6	2.0	1.2	2.5	4.5	0.4	30.1	2.14	1.75	1.37	2.90	1.98	3.49
'00년대	4.4	0.3	0.3	1.2	5.9	0.2	12.4	2.77	2.11	1.44	4.19	2.63	4.21
'10년대	2.6	0.2	0.1	1.0	6.6	-	10.4	3.36	1.99	1.99	4.02	2.68	-



<그림 26> 연도별 시설 과채류 재배면적 변화



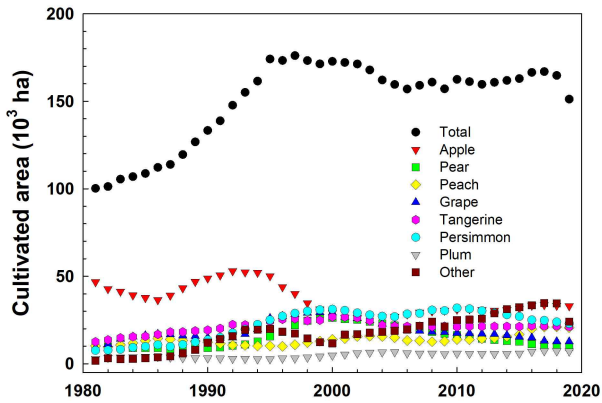
<그림 27> 연도별 시설 과채류 생산량 변화

<표 14> 10년 주기 평균 시설 과채류 재배면적 및 생산량 변화

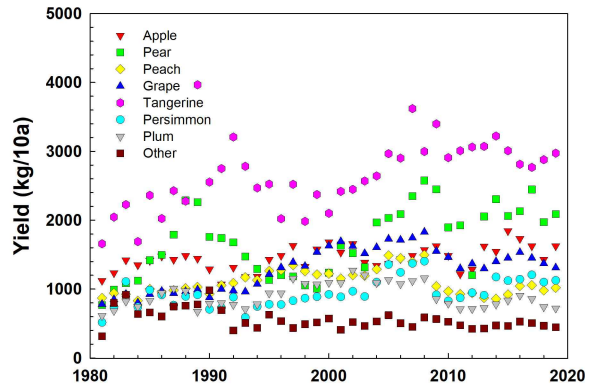
	시설 과채류 재배면적(10 ³ ha)							시설 과채류 생산량(ton/10a)					
	수박	참외	딸기	오이	호박	토마토	계	수박	참외	딸기	오이	호박	토마토
'80년대	4.1	4.1	4.5	3.4	1.2	2.0	19.4	2.80	2.54	1.65	3.87	2.39	3.36
'90년대	16.4	8.2	5.5	5.4	2.9	3.5	41.9	2.92	2.95	2.33	5.16	2.84	4.95
'00년대	17.6	6.8	6.7	4.6	3.4	5.9	44.5	4.01	3.24	3.00	7.48	4.56	7.25
'10년대	11.6	4.7	6.2	3.6	3.0	6.2	35.3	4.30	3.47	3.19	7.74	4.96	6.46

○ 과실류 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라 작물별 재배면적은 대부분이 감소하고 있는 경향을 보이고 있지만 과수는 '90년대 이후 현재까지 160천 ha 수준을 유지하고 있다(그림 28). 사과 재배면적은 '00년까지 감소하다가 최근 다시 증가하고 있으며 이는 기후변화로 인해서 재배면적이 강원도까지 확대되고 일반 후지 단 품종에서 아리수, 썸머킹과 같은 신품종 보급 때문인 것으로 보고되고 있다(농촌경제연구원). 과수 중에서 복숭아의 재배면적은 '80년대 이후 꾸준히 증가하고 있다. 복숭아의 재배면적 증가는 다른 과일에 비해서 가격이 높고, 출하기간이 짧아 상대적으로 경영비 부담이 적기 때문인 것으로 보고되고 있다(농촌경제연구원). 기타 과수는 '80년대 4.7천 ha에서 '10년대 30.0천 ha로 증가하였으며 이는 키위, 블루베리, 체리, 매실, 무화과 등의 품종 다양화에 기인된 것으로 생각된다.



<그림 28> 연도별 과실류 재배면적 변화



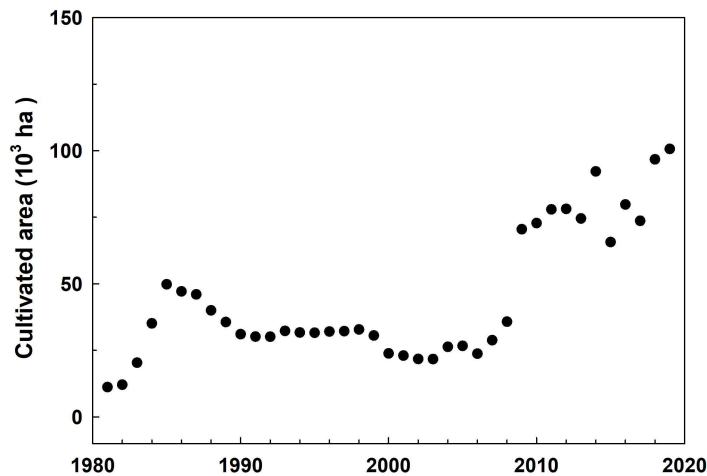
<그림 29> 연도별 과실류 생산량 변화

<표 15> 10년 주기 평균 과실류 재배면적 및 생산량 변화

	과실류 재배면적(10 ³ ha)				과실류 생산량(ton/10a)			
	'80년대	'90년대	'00년대	'10년대	'80년대	'90년대	'00년대	'10년대
사과	42.2	43.7	28.2	32.0	1.37	1.39	1.49	1.55
배	9.0	17.6	21.2	12.3	1.50	1.30	1.98	2.02
복숭아	12.3	11.3	14.3	17.5	0.95	1.20	1.27	0.96
포도	14.7	23.6	21.4	15.2	0.90	1.24	1.65	1.39
감귤	16.3	23.9	22.8	21.4	2.32	2.47	2.89	2.98
감	10.0	24.8	29.2	26.9	0.83	0.80	1.10	1.07
자두	3.5	3.3	6.0	6.4	0.81	0.93	1.08	0.78
기타	4.7	16.3	20.0	30.0	0.72	0.52	0.52	0.47
계	112.8	164.4	163.0	161.8				

○ 사료작물 재배면적 및 생산량 변화

- 우리나라 사료작물 재배면적은 2009년 이후 급격히 늘어나고 있다(그림 30). 사료작물 재배면적 증가는 조사료 자급률 향상을 위한 정부 정책과 소 사육두수 증가에 기인된 것으로 생각되며 2019년에는 사료작물 재배면적이 100천 ha가 넘었다. 이와 같은 사료작물 재배면적의 증가는 논 타작물 재배 등의 정책에 의해 계속 증가할 전망이다.

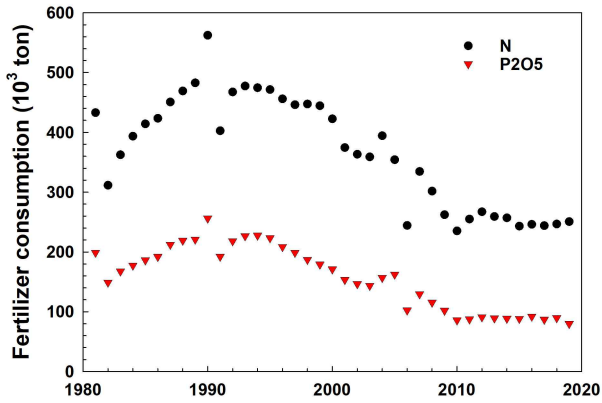


〈그림 30〉 연도별 사료작물 재배면적 변화

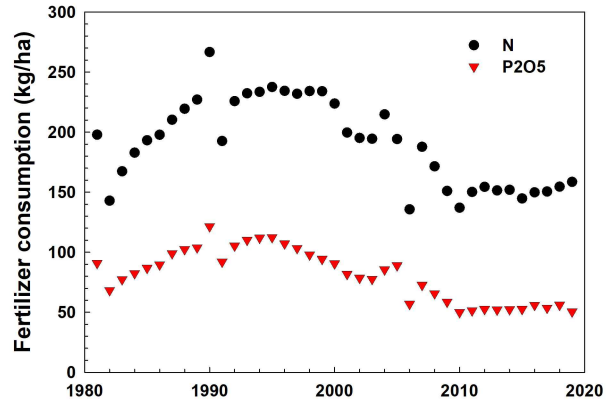
2) 국내 비료 사용량 변화

○ 무기질 비료 사용량 변화

- 우리나라 경지면적은 지속적으로 감소하고 있는 반면 비료 소비량은 1990년 일시적인 증가를 제외하고 1994년 질소질 474.6 천톤, 인산질 227.6 천톤까지 증가하다가 2010년까지 감소 추세를 보이고 이후는 큰 변화가 없다(그림 31). 우리나라 전체 무기질 비료 소비량은 '90년대 10년간 평균치에 비해서 '10년대 평균 소비량이 질소의 경우 약 45%, 인산의 경우 56%가 감소하였다(표 16). 그리고 동일 시기의 단위면적당 사용량은 질소의 경우 40%, 인산의 경우 54%가 감소하였다(그림 32). 이와 같은 비료소비량 변화는 정부의 무기질 비료 가격보조제도와 양분관리 정책에 의해 크게 영향을 받고 있다. 1962년부터 시작된 비료가격 보조제도는 1987년에 폐지되었고, 1991-2005년, 그리고 2008-2009년 국제원자재가격 상승에 의한 농가 부담경감을 위해서 일시적인 비료가격 보조가 있었다. 2006년 일시적인 비료 사용량 격감은 비료가격보조금 폐지에 영향을 받은 것으로 사료된다. 2010년까지의 비료사용량 감소는 비료가격보조제도 폐지, '07년 친환경농업확대, '08년 무기질비료 가격의 큰 폭 인상 그리고 무기질비료 감축 목표설정과 적정시비추천 등의 영향으로 평가되고 있다. 그리고 2010-2012년에 실시한 토양검정 결과를 고려한 맞춤형 비료 공급제도는 큰 효과를 나타내지 않았다.



<그림 31> 연도별 질소(N) 및 인산(P₂O₅)비료 소비량 변화



<그림 32> 단위면적(ha)당 질소(N) 및 인산(P₂O₅) 비료 소비량

<표 16> 10년 주기 평균 무기질 비료 소비량 변화

	비료 소비량(10 ³ ton)			비료 소비량/단위면적(kg/ha)		
	질소(N)	인산(P ₂ O ₅)	계	질소(N)	인산(P ₂ O ₅)	계
'80년대	430.3	197.9	628.3	200.5	92.2	292.8
'90년대	451.0	203.2	654.2	228.0	102.5	330.5
'00년대	322.3	129.7	452.1	178.1	71.6	249.7
'10년대	252.1	88.1	340.2	136.6	47.7	184.4

○ 유기질 비료 사용량 변화

- 우리나라 유기질 비료 사용량 변화를 농협을 통한 판매량을 토대로 조사한 결과는 표 17과 같다. 현재 시판되고 있는 혼합유박 199점을 대상으로 질소(N)와 인산(P₂O₅)함량을 조사한 결과, 각각 4.8%, 3.1%이었으며 혼합유기질은 각각 5.0%, 2.5%이었다(김 등, 2018b). 그리고 2019년 혼합유박과 혼합유기질 비료를 통해서 우리나라 농경지에 투입된 질소와 인산은 각각 23.2, 12.0 천톤으로 계산되었다.

<표 17> 농협을 통한 유기질 비료 판매량

종류	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
혼합유박 (10 ³ ton)	193	252	243	383	305	263	232	392	259
혼합유기질 (10 ³ ton)	218	295	12	414	285	286	271	233	214

3) 시비량 대비 작물 생산량 변화

○ 표준시비량 변화

- 작물별 비료 사용처방은 작물에 필요한 양분을 균형적으로 공급하고, 토양의 양분 집적을 최소화하여 농업환경부하를 줄이는 목적으로 실시하고 있다. 작물별 비료사용처방은 1990년 “작물별시비처방기준”을 시초로 하여 4번의 개정을 거쳐 2019년 146개 작물에 대한 “작물별 비료사용처방”을 발간하였다.
- 표준시비량은 품종 및 재배법 개선과 그 당시 토양비옥도가 반영된 작물별 적정 시비량으로 1999년에 비해 2019년 인산시비량이 크게 개선되었다. 이는 가축분 퇴비 사용량 증가에 따른 농경지 유효인산 집적이 반영된 것으로 판단된다. 그리고 농경지 인산집적을 개선하기 위해서 퇴비는 우분, 벧짚, 돈분, 계분 및 혼합가축분퇴비를 구분하여 시비량을 제시하고 있으며, 유효인산 집적 농경지는 인산질 비료 최소 시비량을 추천하고 있다.
- 벼의 경우 자급율을 고려한 양질미 생산목적을 반영하여 목표수량 500, 480, 460 kg/10a에 맞추어서 표준시비량을 제시하고 있다. 그리고 작물별 질소와 인산 표준시비량은 차나무가 가장 높았으며, 사료작물이 타 작물에 비해 높은 것으로 확인되었다.

<표 18> 1997년과 2017년 작물별 표준시비량

대분류	중분류	소분류	토성	표준시비량(kg/10a)			
				2019년		1999년	
				N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
식량작물	벼			9.0	4.5	11.0	4.5
	밭벼			9.0	4.5	11.0	4.5
	간척지			17.0	4.5	-	-
맥류	보리		사질	8.2	6.9	8.5	7.1
			식양질	8.7	7.2		
	맥주보리		사질	6.3	7.0	6.5	7.1
			식양질	6.7	7.2		
	밀		사질	8.2	7.7	8.5	7.9
			식양질	8.7	8.0		
서류	고구마			5.5	6.3	5.5	15.8
	감자	봄감자		10.0	8.8	15.0	15.8
		고랭지감자		13.7	3.3	15.0	19.0
		가을감자		12.0	10.6	18.0	10.6
잡곡	옥수수		사질	14.5	3.0	16.0	3.0
			식양질	17.1	3.5		

	메밀			5.4	3.1	5.4	3.1	
	기타			11.3	3.3	5.4	3.1	
두류	콩		사질	3.0	3.0	3.0	3.0	
			식양질	3.2	3.3			
	팥			4.2	5.2	4.2	5.2	
	녹두			4.2	5.2	4.2	5.2	
	기타			3.7	4.2	3.8	4.5	
특용(유지)	참깨			2.9	4.7	2.9	7.8	
	들깨			12.6	1.5	12.6	7.8	
	땅콩			3.0	10.4	3.0	7.8	
엽채류	노지	봄배추		32.0	7.8	32.0	7.8	
		고랭지배추		23.8	3.0	32.0	7.8	
		가을배추		32.0	7.8	32.0	7.8	
		겨울배추		32.0	7.8	-	-	
		시금치		25.0	5.9	25.0	5.9	
		미나리		4.7	3.0			
		쑥갓		20.0	5.8			
		부추		38.0	10.7			
		상추		20.0	5.9	20.0	5.9	
	양배추		27.2	5.0	27.2	5.0		
	시설	배추		17.8	3.0	22.2	6.4	
		시금치		6.5	3.0	9.4	4.9	
		상추		7.0	3.0	10.2	4.9	
		부추		24.3	3.0			
	근채류	노지	봄무우		23.4	5.1	28.0	5.9
			고랭지		25.2	3.0	28.0	5.9
가을무우				23.4	5.1	28.0	5.9	
겨울무우				23.4	5.1			
당근				17.0	7.7	20.0	9.6	
우영				17.3	15.5			
연근				36.5	11.1			
토란			20.6	12.2				
시설		무우		17.5	4.9	17.5	4.9	
조미채소		노지	건고추		19.0	11.2	19.0	11.2
	파			20.5	7.0	25.0	6.6	
	양파			23.7	5.4	23.7	5.4	
	마늘			25.0	7.7	25.0	7.7	
	생강			17.3	3.5	24.0	9.3	
	시설	풋고추		22.5	6.4	22.5	6.4	
		파		6.2	3.0	6.2	3.0	

과채류	노지	수박		20.0	5.9	20.0	5.9
		참외		25.0	7.7	25.0	7.7
		딸기		19.0	5.9	19.0	5.9
		오이		24.0	16.4	24.0	16.4
		호박		20.0	13.3	20.0	13.3
		가지		30.0	12.6	30.0	12.6
	시설	수박		13.8	4.9	13.8	4.9
		참외		18.7	6.3	18.7	6.3
		딸기		9.6	4.9	9.6	4.9
		오이		19.7	10.3	19.7	10.3
		호박		20.0	8.4	20.0	8.4
		가지		19.3	8.7		
		멜론		8.8	3.0		
		파프리카		21.6	8.7		
	토마토		24.0	16.4	24.0	16.4	
과실류	사과		10.0	5.0	10.0	5.0	
	배		17.0	8.5	17.0	8.5	
	복숭아		12.3	6.8	12.3	6.8	
	포도		12.0	6.8	12.0	6.8	
	감귤		23.0	26.6	23.0	26.6	
	감		19.7	8.7	19.7	8.7	
	자두		15.0	6.7	15.0	6.7	
	매실		14.0	7.1	14.0	7.1	
	기타		21.9	13.4	21.9	13.4	
화훼		40.0	31.5				
기호작물	차		60.0	20.0	60.0	20.0	
섬유작물	대마		7.3	4.5	7.3	4.5	
약용작물			12.0	8.3	12.0	8.3	
사료작물	목초		29.0	35.0	19.0	17.0	
	청보리+호밀		12.0	10.0			
	IRG		14.0	10.0			
	옥수수		20.0	15.0			
	수단글라스		20.0	15.0			

○ 무기질 비료 요구량 대비 사용량

- 우리나라 전체 농경지를 대상으로 무기질비료 요구량 대비 사용량은 비료사용량이 가장 높은 1992-1995년과 최근 4년(2016-2019년) 비교 분석하였다. 무기질 비료 요구량은 표준소비량에 작물별 재배면적의 곱으로 계산하였다. 그리고 1992-1995년 무기

질 비료 요구량 산정을 위한 표준시비량은 1999년 표준시비량을 적용하였으며, 2016-2019년 요구량은 2017년 표준시비량을 적용하였다. 토성별로 표준시비량이 구분되어있는 작물의 경우 흙토람 자료를 활용하여 논과 밭의 사질과 식양질 분포비율을 적용하여 비료 요구량을 계산하였다.

- 벼는 목표수량 480 kg/10a에 해당하는 보통논의 표준 시비량을 적용하였으며 보리, 밀, 맥주보리는 도복에 대해 강한 품종과 약한 품종의 표준시비량 평균치를 적용하였다. 풋고추 표준시비량은 고추의 시설재배 표준시비량을 적용하였다. 그리고 과수와 기호작물의 차는 성목의 표준시비량을 적용하였다. 화훼작물은 재배면적이 많은 장미, 국화, 카네이션의 표준시비량 평균치를 적용하였으며, 목초재배지 표준시비량은 Orchardgrass, Tallfescue, Clover, Alfalfa 등의 혼파지 표준시비량을 적용하였고, 1999년 사료작물 표준시비량은 사료작물 표준시비량의 평균치를 적용하여 비료 요구량을 산출하였다.
- 무기질 비료 사용량이 가장 높은 1992-1995년 질소질 비료 요구량은 273 천톤이었으며, 인산질 비료는 127 천톤이었다(표 19). 그리고 이때 질소 및 인산질 비료 사용량은 각각 472 및 223 천톤이었다. 따라서 요구량 대비 사용량은 질소의 경우 173%이었으며 인산은 176%이었다. 하지만 동일한 방법으로 계산된 2016-2019년 평균 질소와 인산질 비료 요구량 대비 사용량은 각각 131% 및 89%로 계산되었다. 이와 같은 무기질 비료 사용량 감소는 표준시비량 감소와 농업현장에서 표준시비량 준수율이 크게 개선되고 있는 증거로 생각된다.

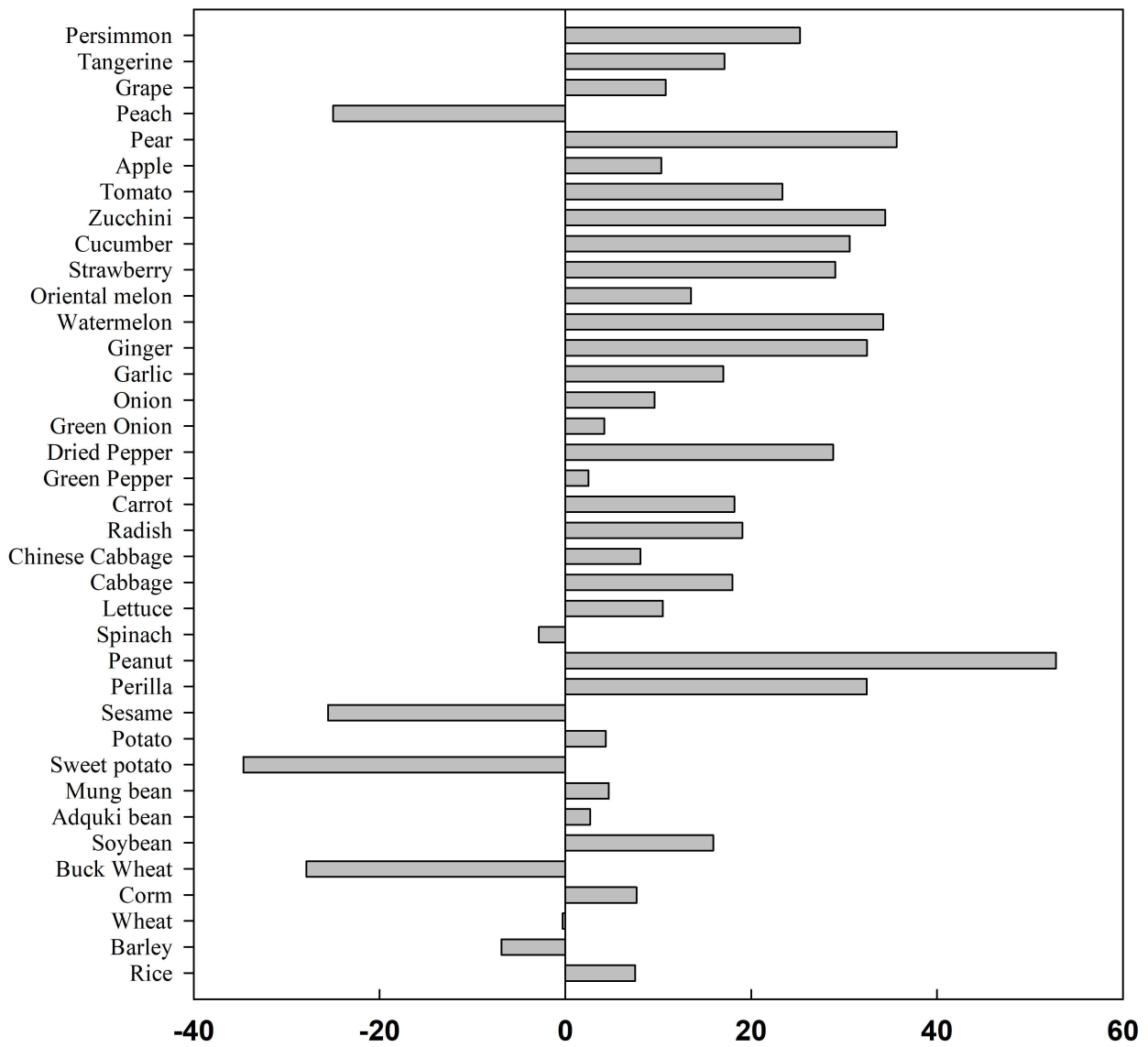
<표 19> 작물재배에 필요한 비료 요구량(표준시비량 기준)

대분류	재배면적(ha)		비료 요구량(ton)			
	1992-1995 평균	2016-2019 평균	1992-1995 평균		2016-2019 평균	
			N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
벼	1,112,626	819,865	122,389	50,068	73,188	34,194
맥류	98,876	46,686	7,534	6,984	3,779	3,369
서류	41,928	45,232	5,037	6,502	3,742	3,305
잡곡	27,509	26,974	3,599	833	3,606	885
두류	139,936	63,412	4,507	4,764	2,080	2,206
유지류	96,077	71,282	6,680	3,037	5,956	2,328
엽채류	105,841	47,457	27,945	6,920	12,124	2,734
근채류	41,520	24,417	10,764	2,621	5,655	1,313

조미채소	167,378	92,168	36,449	15,360	19,460	7,250
과채류	74,078	45,685	13,695	5,556	8,003	4,020
과실류	159,611	170,720	24,842	16,280	28,193	18,035
화훼류	4,761	4,725	1,904	1,500	1,890	1,488
기호작물	731	2,901	439	146	1,741	580
섬유작물	456	48	33	21	4	2
약용작물	13,741	12,734	1,649	1,134	1,528	1,044
사료작물	31,425	87,718	5,971	5,342	16,666	14,912
계	2,116,492	1,562,024	273,437	127,068	187,614	97,666
비료소비량			472,766	223,863	246,867	87,087
소비량/ 요구량(%)			172.9	176.2	131.6	89.2

○ 무기질 비료 사용량 대비 작물 생산량 변화

- 무기질 비료 사용량이 가장 높은 1992-1995년 대비 2016-2019년 주요 작물의 단위면적당 생산량은 6개 작물(복숭아, 시금치, 고구마, 참깨, 메밀, 보리)을 제외하고 모두 증가하였다. 두 시기에 단위면적당 질소 및 인산질 비료 사용량은 각각 34 및 51%가 감소하였지만 생산량은 오히려 증가하였다(그림 33).
- 이와 같은 단위면적당 생산량 증가는 지금까지의 품종 개량 및 재배법 개선의 효과로 판단된다. 특히 땅콩의 경우 두시기 비교에서 약 50% 이상의 수량 증가를 보이고 있다. 예외로 복숭아의 단위면적당 수량 감소는 신규과원 증가에 의한 어린 묘목 분포 면적이 많기 때문이며, 고구마의 경우 소비자 기호 변화에 따른 크기가 작은 고구마 생산이 주를 이루고 있기 때문으로 사료된다.
- 무기질 비료가 본격적으로 공급되고, 다수확이 농정목표였던 1980년대 대부분의 농민은 무기질 비료 사용량에 비례하여 작물의 수량이 증가된다고 믿었을 것으로 추정된다. 따라서 무기질 비료가 가장 많이 사용된 1992-1995년 질소와 인산질 비료는 표준소비량대비 약 78% 이상 사용하였다. 하지만 현재의 통계자료에서 표준소비량 이상의 무기질 비료 사용은 수량증수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 안정된 농업생산성 유지와 농업환경보전을 위한 올바른 무기질 비료 사용은 표준소비량 준수를 향상을 위한 농업정책이 뒷받침되는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

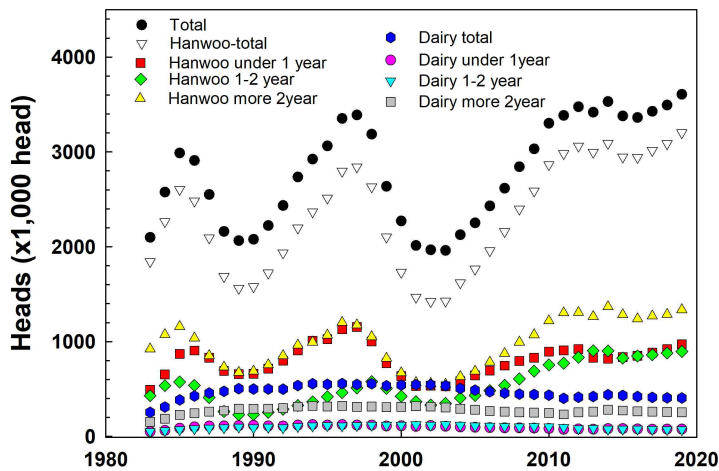


<그림 33> 1992-1995년 대비 2016-2019년 작물별 평균 생산량 변화 비율(%)

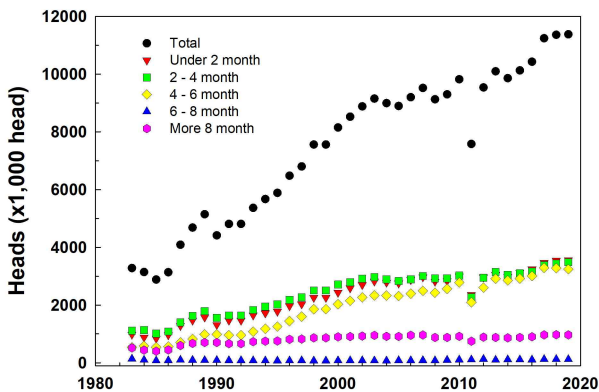
나. 국내 가축분뇨를 통한 질소 및 인 발생량

○ 가축사육두수 변화

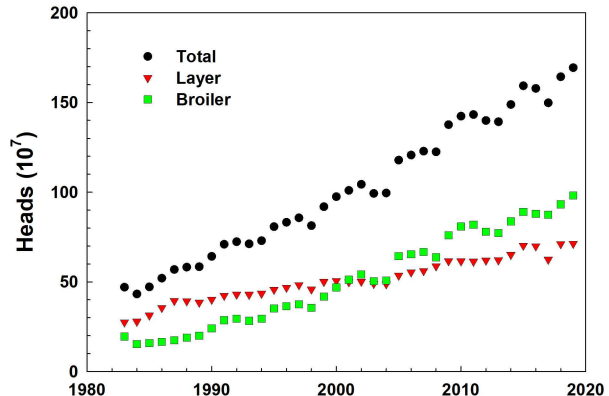
- 우리나라 가축사육은 1980년 이후 꾸준히 증가하고 있다. 소 사육두수에서 젖소 사육두수는 큰 변화가 없지만 한우 사육두수는 소값 파동에 의해서 10년 주기로 사육두수의 급격한 변화를 보였다(그림 34). 그러나 2000년 이후에는 현재까지 소 사육두수는 꾸준히 증가하였고, 그 결과 우리나라 전체 소 사육두수는 1983년 2,099 천만두에서 2019년 3,607 천만두로 1.7배가 증가하였다.
- 돼지 사육두수는 2010-2011년 구제역이 발생한 해를 제외하고 1983년 이후 현재까지 꾸준히 증가하고 있으며 1983년에 비해서 2019년 약 3.5배가 증가하였다(그림 35). 닭의 사육두수 변화는 돼지와 동일한 경향을 보이고 있으며 산란계의 증가보다 육계의 증가폭이 큰 것으로 조사되었다. 2019년 닭의 사육두수는 1983년에 비해서 2.7배 증가하였다(그림 36).



<그림 34> 소 사육두수 변화



<그림 35> 돼지 사육두수 변화



<그림 36> 닭 사육두수 변화

○ 축종별 가축분뇨 배출원단위 변화

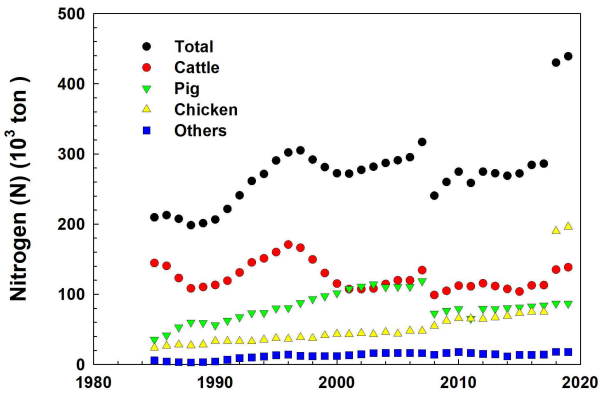
- 가축분뇨를 통한 양분배출량은 국가단위 양분수지 평가에 중요한 위치를 차지하고 있으며 가축분뇨 발생량은 축산기술의 수준에 따라 변화한다.
- 따라서 국가단위의 양분수지 평가를 위해서 가축분뇨 발생량의 정확한 계산은 반드시 필요하다. 가축분뇨를 통한 양분발생량은 축종별 사육두수와 배출원단위의 곱으로 계산되며 우리나라는 1999년 환경부고시로 최초로 보고하였다. 이후 10년 주기로 2008년, 2017년 사양기술변화가 반영된 배출원단위를 농촌진흥청에서 보고하고 있다.
- 한우의 배출원단위는 1999년에 비해서 질소는 44 kg/두/년에서 28.7 kg/두/년으로 크게 감소된 반면 인은 증가하였으며 2008년과 2017년 큰 차이가 없었다(표 20). 돼지의 경우는 질소와 인 모두 크게 개선되었으며 특히 인의 경우 1999년에 비해서 2017년 약 80%가 감소하였다. 닭의 경우 1999년 대비 2008년은 큰 차이가 없으나 2017년 육계 및 산란계의 질소 배출원단위가 2008년 대비 약 2배가 증가하였다. 따라서 2017년 닭의 배출원단위 자료는 본 연구의 가축분뇨 배출량 산정에 포함시키지 않았다. 이상과 같은 배출원단위의 감소는 사양기술의 발달에 따른 결과로 사료되며 특히 인의 배출원단위 감소는 배합사료 내 인의 효율 증진을 위한 사료첨가제 개발에 의한 것으로 판단된다.

<표 20> 축종별 가축분뇨 배출원단위

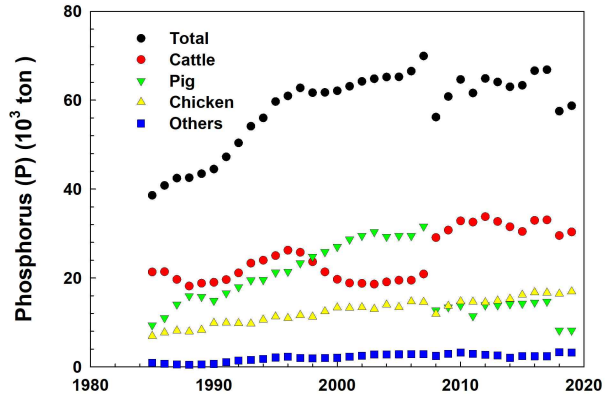
	축종			분뇨 배출량 (kg/일/두)		비료 성분 함유율 (g/kg)				양분배출량 (kg/두/년)	
				분	뇨	분		뇨		N	P
						N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅		
1999	소	한우	OECD	10.1	4.5					44	5.1
		젖소	OECD	24.6	11.0					84	21
	돼지		OECD	1.6	2.6					12	3.3
	닭	육계	OECD	0.12						0.3	0.1
		산란계	OECD	0.12						0.6	0.1
2008	소	한우	OECD	8.0	5.7	5.0	6.0	6.8	0.7	28.7	8.2
			<1yr	5.2	3.3	4.7	3.1	5.1	0.8	15.1	3.0
			1-2yr	10.9	7.3	5.6	8.5	11.0	1.1	51.6	16.0
			>2yr	10.2	7.6	4.7	6.3	4.2	0.2	29.1	10.5
			평균	8.8	6.1	5.0	6.0	6.8	0.7	31.9	9.8
	젖소	OECD	24.6	11.0	3.3	4.9	10.2	2.6	63.7	19.5	
		<1yr	12.0	8.8	3.4	3.0	10.0	2.1	47.0	8.7	
		1-2yr	17.9	11.6	3.4	5.1	5.6	0.3	45.9	15.1	
		>2yr	34.9	22.5	3.1	5.7	12.6	4.0	142.5	45.8	
		평균	21.6	14.3	3.3	4.6	9.4	2.1	78.5	23.2	
	돼지	OECD	0.9	1.7	9.6	8.3	8.0	0.9	8.2	1.4	
		20kg	0.5	0.8	10.2	6.7	3.1	0.8	2.8	0.6	
		50kg	0.9	1.9	11.6	6.7	11.9	1.2	11.8	1.3	
		80kg	1.1	1.9	8.2	5.9	14.5	1.3	13.2	1.4	
		>110kg	1.4	2.0	7.7	6.1	11.1	1.5	12.0	1.8	
		평균	1.0	1.7	9.4	6.4	10.2	1.2	10.0	1.3	
	닭	OECD	육계	0.085		11.9	2.9			0.37	0.04
			산란계	0.124		13.9	6.2			0.63	0.12
			육계	0.134		11.9	2.9			0.58	0.06
			산란계	0.124		13.9	6.2			0.63	0.12
2017	소	한우	<1yr	7.7	3.9	5.4	5.3	10.5	0.6	30.0	6.9
			1-2yr	7.3	3.8	5.4	5.3	10.5	0.6	29.0	6.6
			>2yr	9.1	4.3	5.4	5.3	10.5	0.6	34.2	8.1
			평균	8.0	4.0	5.4	5.3	10.5	0.6	31.1	7.2
	젖소	<1yr	9.6	5.3	6.2	3.8	7.3	2.6	35.9	8.0	
		1-2yr	15.1	12.1	5.7	4.5	12.4	1.0	86.0	12.7	
		>2yr	32.4	17.8	4.7	4.1	8.9	0.2	112.8	21.8	
		평균	19.0	11.7	5.5	4.1	9.5	1.3	78.2	14.2	
	돼지	20kg	0.4	2.1	9.8	6.9	2.2	0.3	3.1	0.5	
		60kg	1.2	3.1	9.6	3.2	2.8	0.1	7.3	0.6	
		80kg	1.3	4.7	9.4	4.4	4.1	0.1	11.6	1.0	
		평균	1.0	3.3	9.6	4.8	3.0	0.2	7.3	0.7	
	닭	육계	0.11		29.1	5.5			1.2	0.1	
산란계		0.11		26.0	5.6			1.1	0.1		

○ 가축분뇨를 통한 양분발생량

- 가축분뇨를 통한 양분발생량은 2007년까지 가축 사육두수 증가에 비례하여 증가하였다. 그리고 2008년 새로운 배출원단위 적용에 의해서 감소하였다. 최근 5년간 분뇨를 통한 평균 질소(N) 및 인(P) 발생량은 각각 276.8 천톤/년 및 64.8 천톤/년이었다. 축종별 양분발생량은 질소의 경우 소, 돼지, 닭 순으로 높았으며 인산은 소, 닭, 돼지 순으로 높았다(그림 37, 38). 가축분뇨를 통해서 배출되는 질소와 인은 2016-2019년 우리나라 전체 농경지에 필요한 무기질 질소(N) 및 인산(P_2O_5)질 비료 요구량 187 천톤 및 42.6 천톤을 초과하는 양이다. 따라서 가축분뇨로 배출되는 양분의 저장없이 무기질 비료사용량 감축만으로 양분수지 개선은 어려운 실정이다.



<그림 37> 가축분뇨를 통한 질소 발생량



<그림 38> 가축분뇨를 통한 인 발생량

다. 국내 토양의 화학성 변화

○ 국내 농경지 토양화학성 변화

- 국내 농경지에 투입되는 양분 중 무기질 비료와 가축분 퇴액비가 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 벼 재배시 투입되는 양분은 대부분이 무기질 비료에 의존하고 있으며 밭과 시설재배지는 무기질 비료와 가축분 퇴비를 혼합하여 사용하고 있다. 그리고 가축분 퇴비는 양분공급 측면보다는 토양유기물 증진에 의한 농경지 비옥도 증진 측면에서 사용되고 있다.
- 가축분 퇴비를 거의 사용하지 않는 논외의 경우 '80년 이후 10년 주기로 토양 중 유효인산의 농도가 약 10 mg/kg이 증가하였다(표 21). 현재 우리나라 논외의 유효인산 함량 평균은 142 mg/kg으로 논 토양 유효인산 적정함량 80-120 mg/kg을 약간 상회하고 있다. 밭토양의 유효인산함량은 '80년대 231 mg/kg에서 '90년대 557 mg/kg으로 급격히 상승하였으며 현재 657 mg/kg으로 밭토양 적정함량(500 mg/kg)을 크게 상회하고 있다. 시설재배지의 유효인산 집적은 밭토양보다 더 심각한 수준에 이르고 있다.

<표 21> 연대별 논, 밭, 시설재배지 화학성 변화

구분	성분	연대						
		'50	'60	'70	'80	'90	'00	'10
논토양	pH (1:5)	5.5	5.5	5.9	5.7	5.7	5.8	6.0
	OM (g/kg)	-	26	24	23	25	24	27
	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	69	60	88	107	128	136	142
	Ex.-K (cmol ⁺ /kg)	0.24	0.23	0.31	0.27	0.32	0.29	0.32
	Ex.-Ca (cmol ⁺ /kg)	-	4.5	4.4	3.8	4.1	4.7	5.6
	Ex.-Mg (cmol ⁺ /kg)	-	1.8	1.7	1.4	1.4	1.3	1.4
	Av.SiO ₂ (mg/kg)	-	78	75	88	82	122	
밭토양	pH (1:5)	5.4	5.7	5.9	5.8	5.5	6.0	6.4
	OM (g/kg)	-	20	20	19	24	22	27
	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	152	114	201	231	557	587	657
	Ex.-K (cmol ⁺ /kg)	0.33	0.32	0.48	0.59	0.72	0.81	0.96
	Ex.-Ca (cmol ⁺ /kg)	-	4.2	5.0	4.6	4.4	5.8	7.6
	Ex.-Mg (cmol ⁺ /kg)	-	1.2	1.9	1.4	1.4	1.7	2.1
시설재배지	pH (1:5)	-	-	5.8	5.8	6.0	6.4	6.6
	OM (g/kg)	-	-	22	26	32	34	38
	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	-	-	811	945	943	993	1053
	Ex.-K (cmol ⁺ /kg)	-	-	1.08	1.01	1.14	1.64	1.74
	Ex.-Ca (cmol ⁺ /kg)	-	-	6.0	6.4	6.0	8.6	10.9
	Ex.-Mg (cmol ⁺ /kg)	-	-	2.5	2.3	2.5	3.4	3.3
	EC (dS/m)	-	-		3.7	2.9	3.1	4.0

- 우리나라에서 재배되고 있는 주요작물 표준시비량의 평균 질소/인 비는 5.9이며 농가에 실제 사용하고 있는 무기질 질소/인의 비율은 4.8로 조사되었다(표 22). 김 등(2018a)에 의하면 2016년에서 2017년까지 국내에서 유통되는 가축분 퇴비 659점에 대한 조사결과에서 질소/인의 비율은 2.03으로 보고 하였다. 우리나라는 밭 작물재배시 퇴구비는 1-2 ton/10a를 추천하고 있으며 돈분퇴비를 시용할 경우 퇴구비의 22% 상당량을 추천하고 있다. 따라서 현재 밭 토양과 시설재배지 토양 내 유효인산의 집적은 가축분퇴비의 낮은 질소/인에 의한 과량의 인산투입에서 기인된 것으로 해석된다.

<표 22> 우리나라 작물별 표준시비량과 현장 사용량의 질소/인 비율

작물	표준시비량(kg/10a)			현장사용량 [†] (kg/10a)		
	N	P	N/P	N	P	N/P
벼	9.0	2.0	4.5	11.3	1.6	7.1
보리	8.5	3.1	2.7	15.2	2.9	5.2
고구마	5.5	2.8	2.0	2.9	1.4	2.1
감자	11.9	3.3	3.6	16.8	6.0	2.8
옥수수	15.8	1.4	11.3	20.4	3.7	5.5
콩	3.1	1.4	2.2	6.7	1.9	3.5
봄배추	32.0	3.4	9.4	24.5	5.7	4.3
양배추	27.2	2.2	12.4	32.5	6.2	5.2
고추	19.0	4.9	3.9	21.2	3.4	6.2
마늘	25.0	3.4	7.4	25.9	4.6	5.6
평균			5.9			4.8

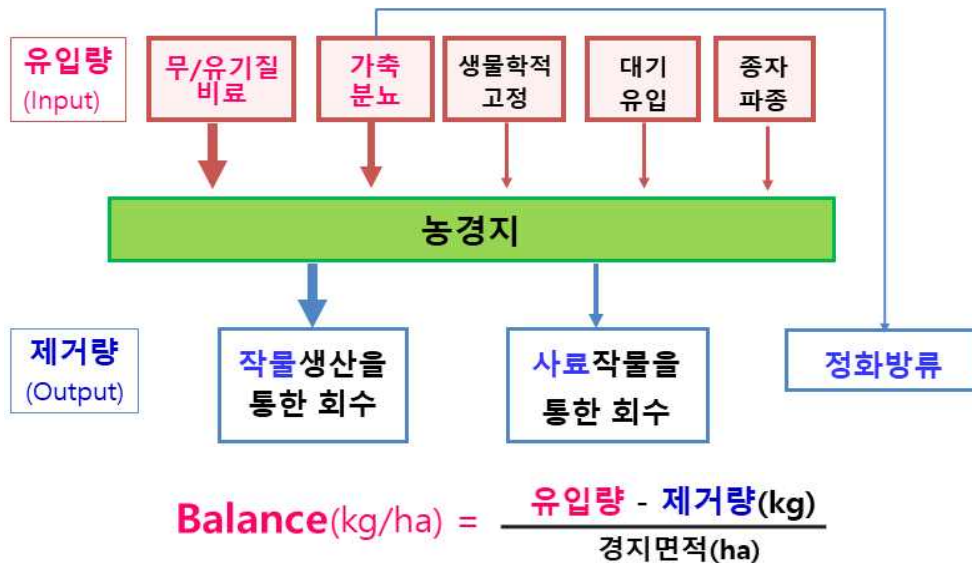
† 농업환경변동조사(농촌진흥청, 2020)

2. 우리나라 양분 과다 사용에 대한 원인 분석

가. OECD 주요 국가별 양분수지 변화

○ 양분수지 평가 기법

- 국가단위 농경지 양분 사용량의 높고 낮음을 평가하는데 널리 이용되고 있는 평가기법이 양분수지 평가(Land balance)이다. 국가단위 양분수지는 유입량에서 제거량을 제외하고 남는 잉여양분을 국가 전체 농경지 면적으로 나누어서 단위면적당 질소 및 인 성분량으로 표기한다(그림 39). 양분유입량은 대부분 무/유기질비료와 가축분뇨 투입량이 대부분을 차지하고, 제거량은 작물 및 사료작물을 통한 회수량이다. 따라서 국가단위 양분수지 개선 방법은 투입량을 최소화하고 회수율을 극대화하는 것이다.



<그림 39> 양분수지 평가기법(Land balance)

○ OECD 주요 국가별 양분수지 변화

- 우리나라를 비롯한 OECD 회원국은 매년 Land balance 기법을 통해서 계산된 질소와 인의 수지를 보고하고 있다. OECD 회원국 중에서 우리나라와 농경지 면적이 비슷한 벨기에, 네덜란드, 덴마크, 일본의 질소와 인 수지변화를 우리나라와 비교 분석하였다(표 23). 일본을 제외한 나머지 유럽국가는 '90년대 초반 질소와 인 수지가 높았지만 양분수지를 성공적으로 개선한 국가들이다. 양분수지 비교 대상 OECD 주요 국가별 농경지 면적은 벨기에, 네덜란드가 우리와 비슷한 농경지 면적을 보유하고 있으며 덴마크는 우리보다 약 1,000 천ha를 많이 가지고 있다. 그리고 1990년 대비 최근 5년간 OECD 주요 국가별 농경지 면적 변화는 우리나라가 25.2%로 가장 많이 감소하였고 벨

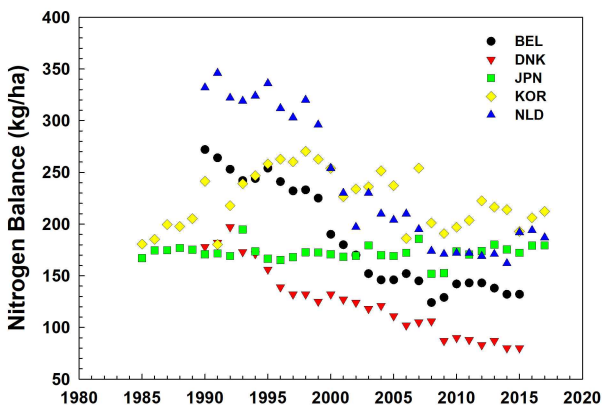
기에와 덴마크는 큰 변화가 없으며 이웃 일본은 15% 감소하였다.

<표 23> OECD 주요 국가의 농경지 면적

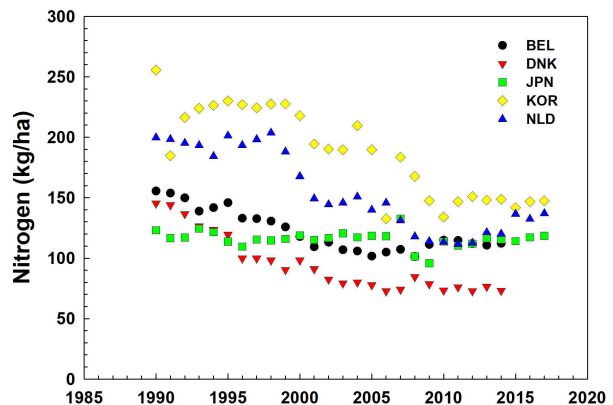
	농경지 면적 (10 ³ ha)				
	벨기에	덴마크	네덜란드	일본	한국
1990	1,384	2,788	2,019	5,242	2,199
2000	1,396	2,650	1,969	4,830	1,969
2010	1,358	2,676	1,872	4,592	1,754
최근 5년 평균	1,345	2,629	1,814	4,457	1,644
감소율(%)†	2.8	5.7	10.2	15.0	25.2

† 감소율: 1990년 대비 최근 5년 평균

- OECD 주요 국가별 1990년 질소 수지는 네덜란드(332 kg/ha), 벨기에(272 kg/ha), 한국(210 kg/ha, 1990-1991 평균), 덴마크(178 kg/ha), 일본(171 kg/ha) 순으로 높았지만, 최근 5년 평균 질소 수지는 한국(208 kg/ha, 2013-2017년), 네덜란드 (181 kg/ha, 2013-2017년), 일본(177 kg/ha, 2013-2017년), 벨기에(138 kg/ha, 2011-2015년), 덴마크(84 kg/ha, 2011-2015년) 순으로 보고하고 있다(그림 40). 질소 수지가 높았던 네덜란드와 벨기에에는 질소 수지를 각각 45%, 50% 낮추었으며, 일본의 질소 수지는 큰 변화가 없다.
- 질소 수지 개선에 성공한 덴마크와 네덜란드의 단위면적당 평균 무기질 질소 사용량은 1990-1994년 대비 2013-2017년 각각 45 및 33%를 감축하였다(그림 41). 그리고 동일기간 우리나라의 무기질 질소 사용량은 약 34% 감축하였지만, 실제 질소 수지 개선에는 반영되지 않고 있다.

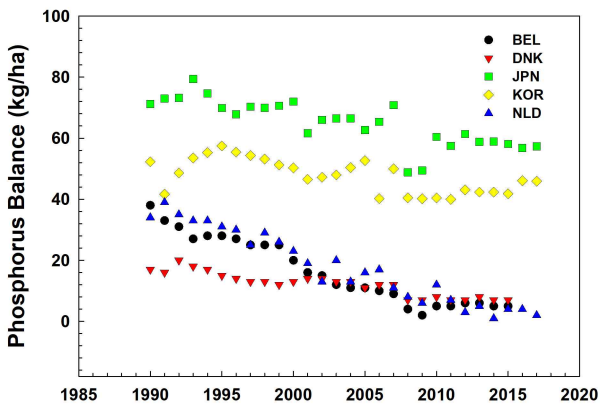


<그림 40> OECD 주요 국가의 질소(N) 수지

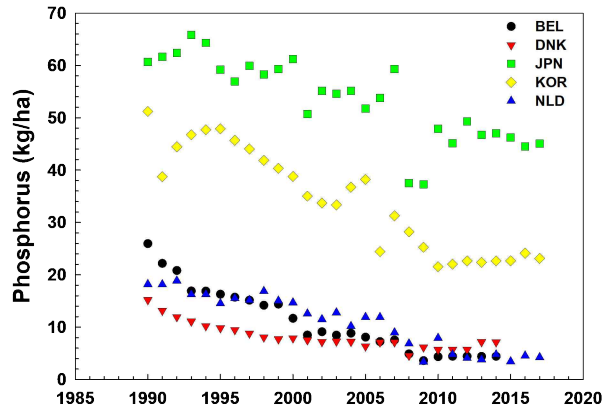


<그림 41> OECD 주요 국가의 무기질 질소(N) 사용량(kg/ha)

- 1990년 OECD 주요 국가별 인 수지는 일본(71 kg/ha), 한국(47 kg/ha, 1990-1991년 평균), 벨기에(38 kg/ha), 네덜란드(34 kg/ha), 덴마크(17 kg/ha) 순으로 높았다(그림 42). 그리고 최근 5년간 인(P) 수지는 일본(58 kg/ha, 2013-2017년), 한국(44 kg/ha, 2013-2017년), 덴마크(7.2 kg/ha, 2011-2015년), 벨기에(5.4 kg/ha, 2011-2015년), 네덜란드(3.2 kg/ha, 2013-2017년) 순으로 보고하고 있다.
- 일본의 인 수지가 높은 것은 일본의 농경지 토양이 대부분 화산회토로서 인의 이용률이 매우 낮기 때문인 것으로 생각된다. 인 수지개선에 성공한 덴마크, 벨기에, 네덜란드는 인 수지를 10 kg/ha 미만으로 개선하였으며 우리나라는 네덜란드에 비해 10배 이상 높은 인 수지를 가지고 있다. 인 수지가 크게 개선된 네덜란드, 벨기에, 덴마크는 단위면적당 평균 무기질 인 사용량을 1990-1994년 대비 최근 5년간 각각 76, 78, 49%를 감축하였다(그림 43). 우리나라도 동일기간 단위면적당 무기질 인 사용을 50% 이상 감축하였지만, 질소와 같이 국가단위 인 수지 개선 효과가 나타나지 않고 있다.



<그림 42> OECD 주요 국가의 인(P) 수지

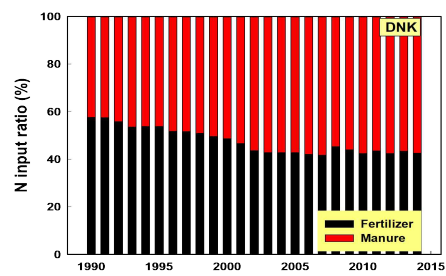
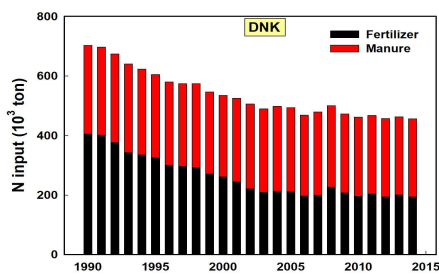
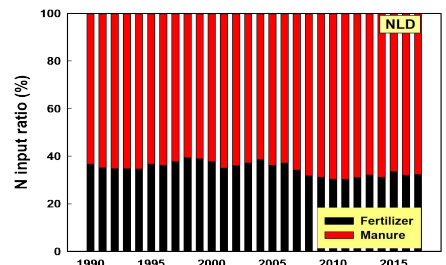
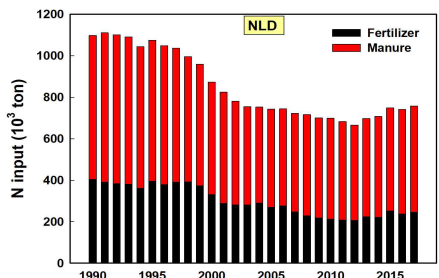
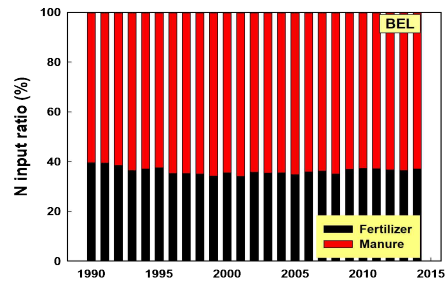
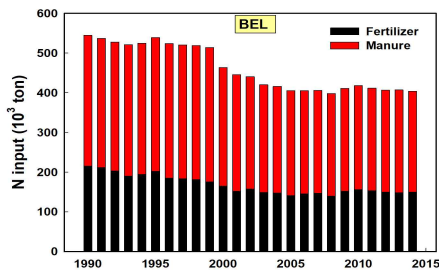
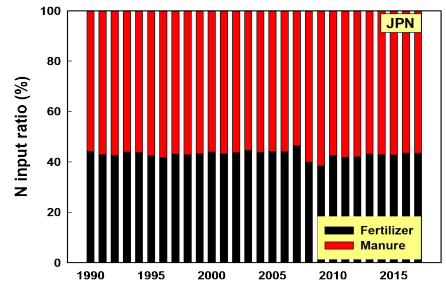
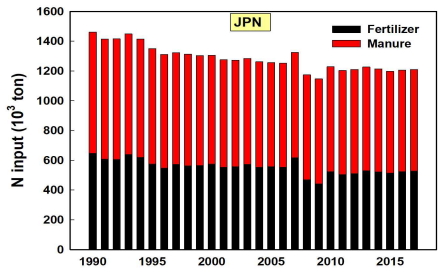
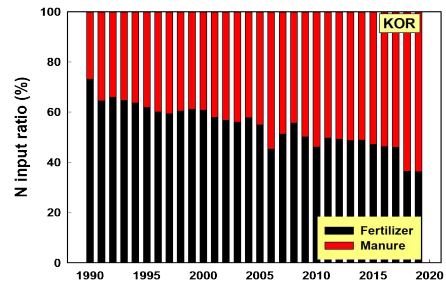
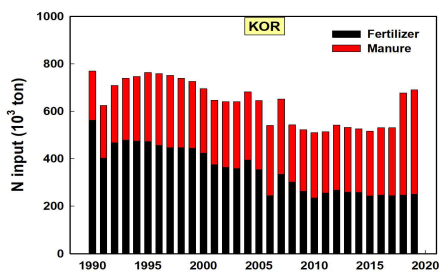


<그림 43> OECD 주요 국가의 무기질 인(P) 사용량(kg/ha)

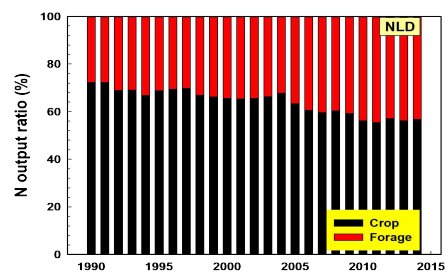
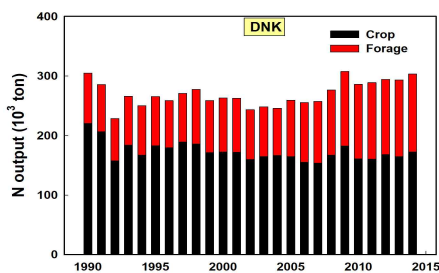
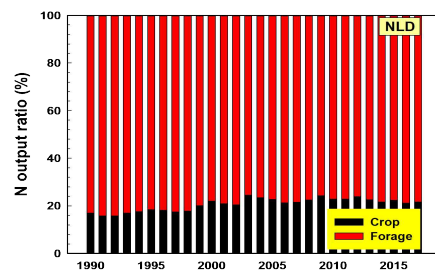
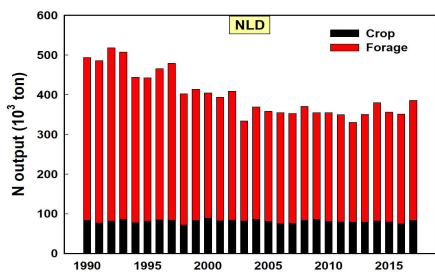
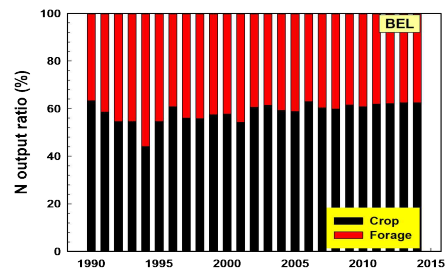
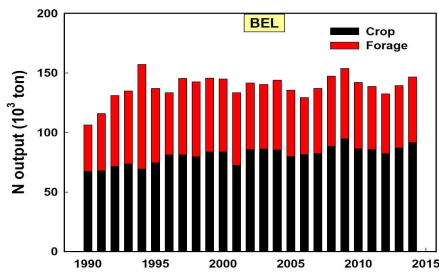
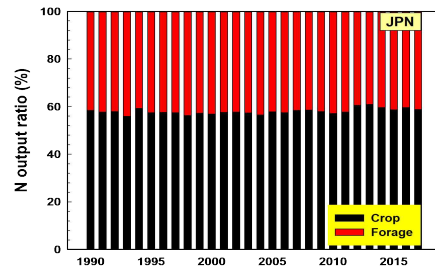
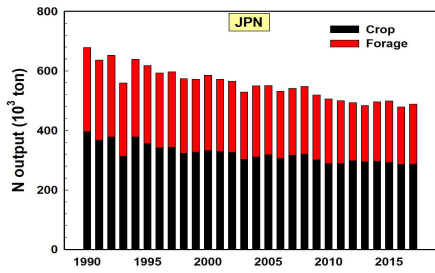
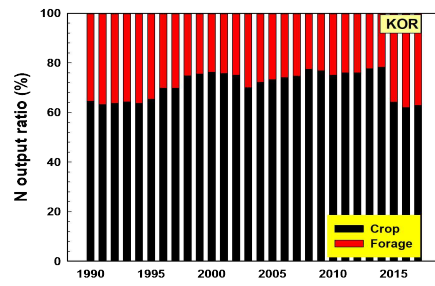
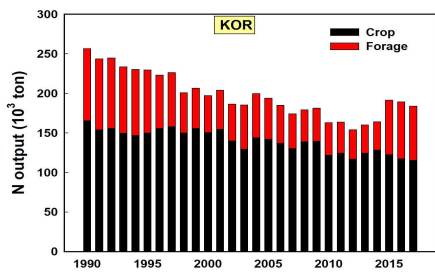
나. OECD 주요 국가의 양분투입량 대비 제거량

○ OECD 주요 국가별 질소 투입량 대비 제거량

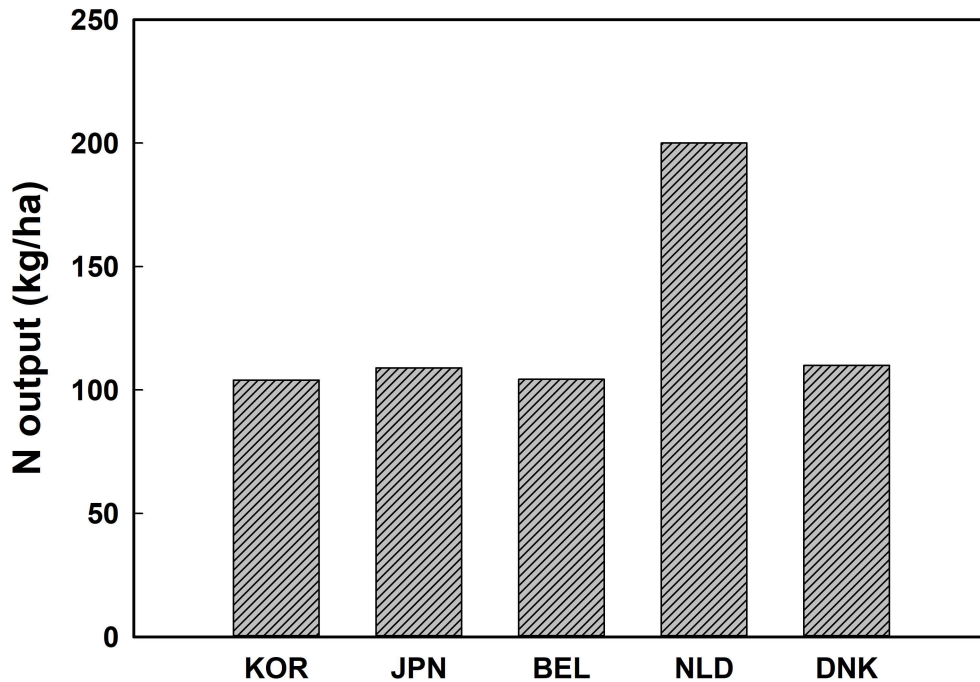
- Land Balance에 의한 양분수지 평가에 투입량은 가축분뇨와 무기질 비료가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 제거량은 작물과 사료작물 수확을 통한 회수율이 큰 비중을 차지하고 있다.
- 우리나라의 전체 질소 투입량(2018-2019년 제외)은 점점 감소 추세를 보이고 있으며 일본은 큰 변화가 없다. 1990년 우리나라의 전체 질소 투입량 중 무기질 비료가 73.1%, 가축분뇨가 26.9%에서 2016년 무기질 비료가 46.0%, 가축분뇨가 54.0%로 무기질 비료 비중은 감소한 반면 가축분뇨 비율이 증가하였다(그림 44). 최근 국가단위 전체 질소 투입량 중 무기질 비료의 비율은 벨기에, 네덜란드, 덴마크가 각각 37.0, 32.3, 42.9%로 우리나라보다는 무기질 비료 비율이 낮은 것으로 나타났다.
- 국가단위 질소 회수율은 우리나라와 일본은 점점 감소하고 있으며 벨기에와 덴마크는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 이와같은 현상은 경지면적 감소에서 기인된 것으로 생각된다. 사료작물을 통한 질소 회수율은 벨기에와 덴마크는 우리나라와 비슷한 비율을 보이고 있지만 네덜란드의 경우 사료작물을 통한 회수율 비율이 매우 높았다(그림 45). 사료 작물을 통한 질소 회수율은 네덜란드, 덴마크, 일본, 벨기에, 한국 순으로 높았다. 질소의 경우 사료작물을 통한 회수율 비중이 높은 네덜란드가 단위면적당 제거율이 200 kg/ha로 다른 국가에 비해서 월등히 높은 것으로 나타났다(그림 46). 따라서 시비된 질소 제거는 일반작물보다 사료작물의 효율이 매우 높은 것으로 평가되었다.



<그림 44> OECD 주요 국가별 질소 투입량 및 비율



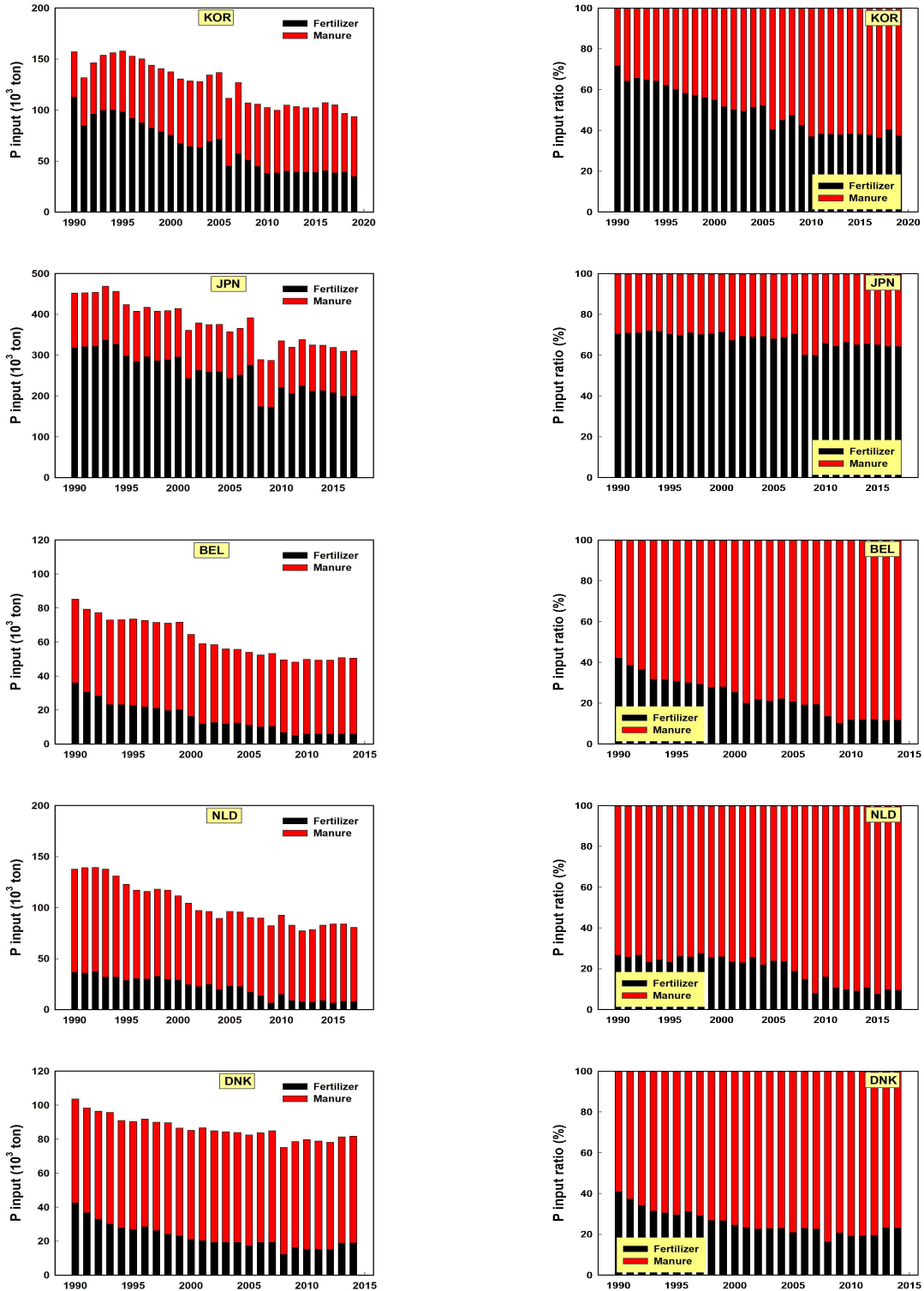
<그림 45> OECD 주요 국가별 질소 제거량 및 비율



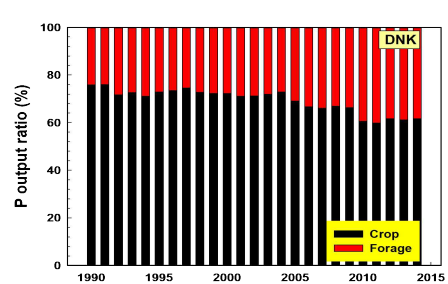
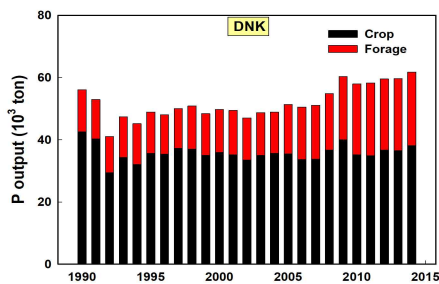
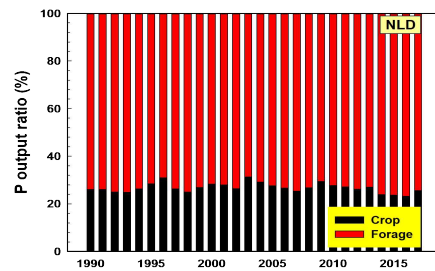
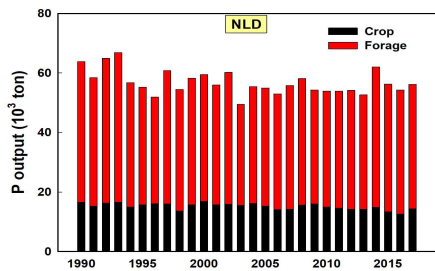
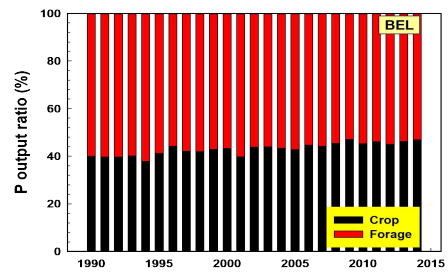
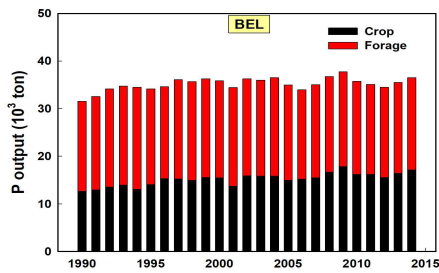
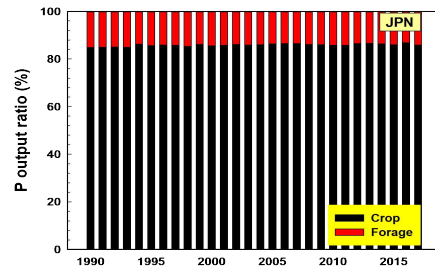
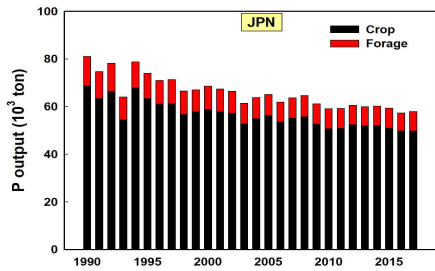
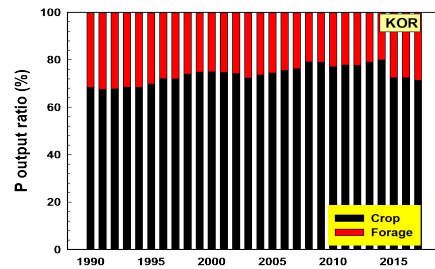
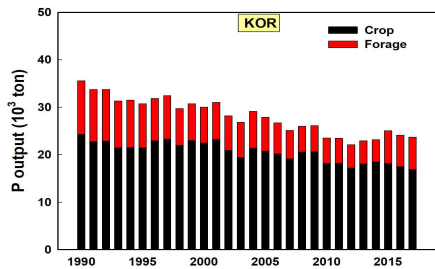
<그림 46> OECD 주요 국가의 최근 5년간 단위면적당 질소 제거량
(한국, 일본, 네덜란드 2013-2017 평균, 벨기에, 덴마크 2010-2014년 평균)

- OECD 주요 국가의 인 수치 개선은 일본을 제외하고 모든 국가에서 무기질 인산비료 사용량의 지속적인 감소와 가축분뇨 활용 비율의 증가로 인해 나타났다(그림 47). 최근 5년간 국가단위 전체 투입량에서 가축분뇨 차지 비율은 네덜란드, 벨기에, 덴마크, 한국, 일본 순으로 각각 90.7, 88.1, 79.1, 62.3, 35.1%로 나타났다.
- 우리나라의 전체 인 투입량 중 무기질 인산비료가 차지하는 비율은 1990년 72%에서 2017년 36.4%로 크게 감소한 반면 가축분뇨 차지 비율은 증가하였다. 따라서 무기질 인산 비료 감축이 국내 인 수치 개선효과로 반영되지 않은 것으로 평가된다. 따라서 현재의 축산업규모가 유지된다는 가정하에서 가축분뇨에 대한 효율적인 활용방안 없이는 국내 양분수지 개선은 어려울 것으로 판단된다.
- 최근 5년간 국가단위 인 제거량 중 사료작물 차지 비율은 네덜란드(75%), 벨기에(54%), 덴마크(39%), 한국(25%), 일본(13.6%) 순으로 높았다(그림 48). 국가단위 단위면적당 인 제거량은 우리나라와 일본의 경우 각각 14.0 및 13.1 kg/ha로 비슷하였고, 네덜란드가 30.8 kg/ha로 가장 높았다. 네덜란드는 우리나라보다 농경지 인 제거 효율이 2배가 넘는 것으로 나타났다(그림 49). 그리고 국가단위 인 제거량은 사료작물을 통한

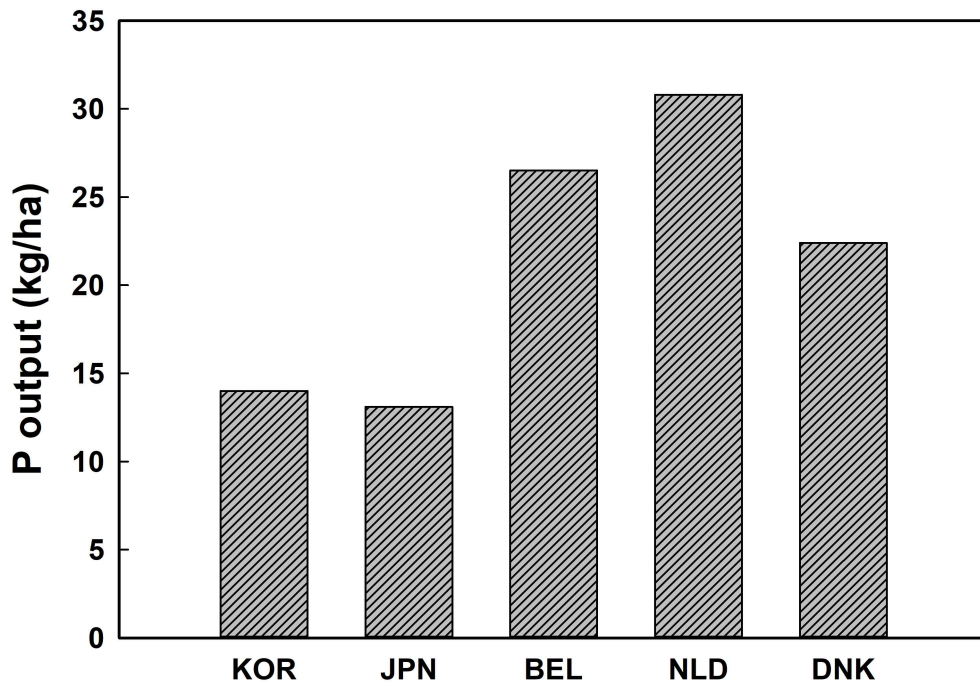
제거율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 농경지 인 제거는 일반작물에 비해서 사료작물의 효율이 높은 것으로 판단된다.



<그림 47> OECD 주요 국가별 인 투입량 및 비율



<그림 48> OECD 주요 국가별 인 제거량 및 비율

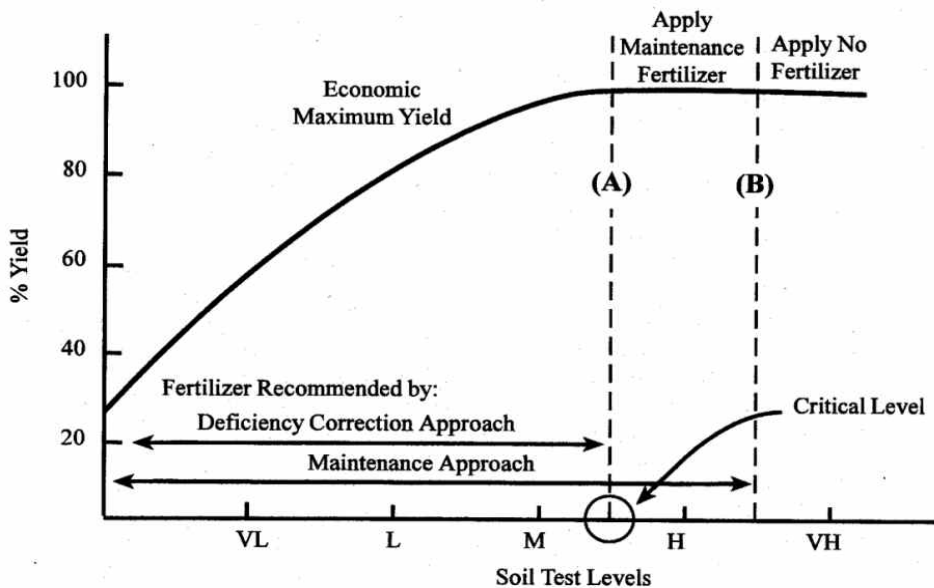


<그림 49> OECD 주요 국가의 최근 5년간 단위면적당 인(P) 제거량
(한국, 일본, 네덜란드 2013-2017 평균, 벨기에, 덴마크 2010-2014년 평균)

3. 비료 사용이 농업생산성 및 환경에 미치는 영향

가. 비료 사용이 농업생산성에 미치는 영향

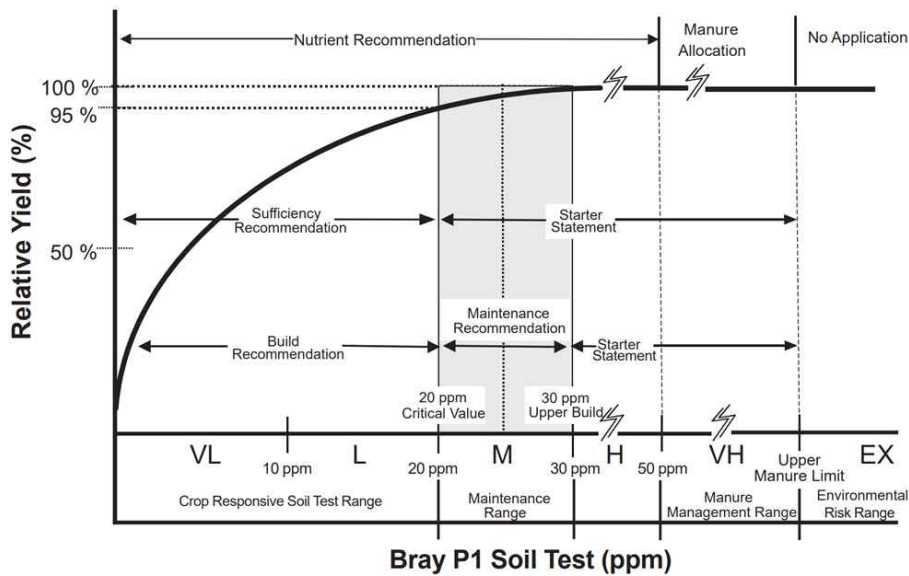
- 작물의 생산성은 주로 품종, 환경 및 재배기술에 의해 결정되는데, 재배기술 분야에서 가장 직접적인 영향을 미치는 요인은 작물의 무기양분 이용을 들 수 있다 (Lee et al., 2020). 농업환경에서 작물의 생육 제한 요인인 양분의 양을 비료를 통해 늘려주면 공급된 양에 비례하여 어느 한도까지는 농업생산성이 증가하게 된다. 하지만 양분이 한도 이상으로 공급되면 생산성의 증가 비율이 점차 낮아지다가 과잉 양분 공급 시 생산성은 오히려 감소하는 현상이 발생한다.
- 따라서 미국, 유럽 등에서는 최대 경제적 수량 반응곡선(Economic Maximum Yield)을 이용하여 적정 시비량을 결정하는 연구가 지속적으로 이뤄져 왔다. 최대 경제적 수량 반응곡선은 토양의 양분 함량, 비료 투입 비용 등을 고려하여 최적(95~100%)의 농업생산성을 나타내는 곡선을 의미한다(그림 50).



<그림 50> 토양검정수준과 토양검정추천방법에 따른 최대 경제수량 반응(Hergert, 1997)

- 그림 50에서 볼 수 있듯이 최대 경제적 수량 반응곡선에서 토양의 양분 수준은 임계수준(critical level)을 기준으로 5등급(매우 낮음, 낮음, 적정 또는 보통, 높음, 매우 높음)으로 구분하고 있다. 토양 양분의 임계수준은 토양 중 양분 함량 뿐만 아니라 재배

환경, 재배기술, 토양특성 등 다양한 영향을 받을 수 있으므로 지역마다 고유한 값이 산출된다. 한 예로 미국 Kansas State University에서 제시한 토양 중 적정 유효 인(P) 함량은 20-30 mg/kg (Bray 1 분석법)으로 제시하였으며(그림 51), 이를 근거로 토양 중 유효 인(P) 함량을 매우 낮음(0~10 mg/kg), 낮음(10~20 mg/kg), 적정(20~30 mg/kg), 높음(30~50 mg/kg), 매우 높음(>50 mg/kg)으로 구분하였다(Kansas State University, 2003).



<그림 51> 미국 Kansas State University에서 제시한 인(P) 최대 경제적 수량 반응곡선

- 미국 South Dakota 주에서도 토양 인(P) 함량을 최대 경제적 수량 반응곡선에 근거하여 토양 인(P) 분석방법(Bray 1, Olsen 분석법)에 따라 5등급으로 토양 인(P) 함량을 분류하였고(표 24), 이에 따른 적정 시비처방량을 제공하고 있다(South Dakota State University, 2005).

<표 24> 미국 South Dakota 주 토양 인(P) 함량 분류(South Dakota State University, 2005)

분석방법	토양 인(P) 함량 분류				
	Very low	Low	Medium	High	Very high
	----- mg/kg -----				
Bray P-1	0-5	6-10	11-15	16-20	21<
Olsen	0-3	4-7	8-11	12-15	16<

- 미국 Arkansas, Delaware, Idaho, Ohio, Oklahoma, Michigan, Texas, Wisconsin 주의 최대 경제적 수량 반응곡선(곡물 대상)에 따른 토양 유효 인(P) 함량의 임계수준은 표 25와 같다.

<표 25> 미국 주별 토양 유효 인(P) 함량 임계수준(Howard, 2006)

미국 주명	토양 유효 인(P) 임계수준(mg/kg)	분석방법
Arkansas	50	Mehlich-3
Delaware	25	Mehlich-1
Idaho	12	Olsen
Ohio	40	Bray-1
Oklahoma	30	Mehlich-3
Michigan	40	Bray-1
Texas	44	Texas A&M
Wisconsin	20	Bray-1

- 이 외에도 미국, 유럽 등의 연구진이 특정 지역, 특정 작물을 대상으로 최대 경제적 수량 반응곡선을 이용한 토양 유효 인(P) 함량의 임계수준을 연구한 사례를 표 26에 정리하였다.

<표 26> 국외 연구진이 수행한 토양 유효 인(P) 함량의 임계수준 연구결과

토양 P 분석방법	토양 유효 P 임계수준 (mg/kg)	측정 근거	작물	지역, 토양특성	참고문헌
Olsen	13	임계수준 이상에서 작물 반응 없음	겨울 밀 + 겨울보리 + 사탕무	독일, loess	Baumgartel, 1989
H ₂ O 추출	9	최대 수확량의 90%	감자	네덜란드	Van der Paauw, 1977
	14	최대 수확량의 95%			
	20	최대 수확량의 97.5%			

Olsen	25	최대 수확량의 97~98%	감자	영국, sandy clay loam	Johnston et al., 1986
	20		사탕무		
	33		봄 보리		
	20		겨울 밀		
Olsen	21-35	임계수준보다 낮을 시 생산량 감소	곡물 + 뿌리 작물	덴마크	Sibbesen and Sharpley, 1997
Mehlich-1	14	최대 수확량의 95%	옥수수 + 콩	미국 Alabama	Whitney et al., 1985
Mehlich-1	16	최대 수확량의 95%	옥수수 + 콩	미국 North Carolina, Fine sandy loam	McCollum, 1991
Mehlich-3	27				
Bray-1	11	최대 수확량의 95%	옥수수	미국 Iowa	Mallarino and Blackmer, 1992
Mehlich-3	11				
Olsen	5				
Bray-1	16-20	경제적 P 처리	옥수수 + 콩	미국 Iowa, typic haplaquoll	Webb et al., 1992
Bray-1	127	최대 수확량의 80%	옥수수	마다가스카르, 베트남, 케냐	Six et al., 2012
	27		벼		
Olsen	18	최대 수확량의 95%	밀	벨기에, 독일, 프랑스, 영국, 스웨덴	Nawara et al., 2017
	76		감자		
	23		사탕무		
	22		보리		
	18		옥수수		
Olsen	14.7	최대 수확량의 95%	겨울 밀	스위스	Cadot et al., 2018
	11.9		옥수수		

- 우리나라도 경제적 수량 반응곡선을 기반으로 농촌진흥청 ‘작물별 비료사용처방’에 146종 작물별 재배 적정 토양 특성을 제시하고 있으며, 이 중 일부 작물에 대한 토양 적정 유효인산 함량을 표 27에 정리하였다.

<표 27> 농촌진흥청 작물별 비료사용처방에 따른 작물별 토양 적정 유효인산 함량

작물	토양 적정 유효인산(P ₂ O ₅) 함량 (mg/kg)
벼	80-120
보리	150-250
밀	150-250
콩	150-250
옥수수	150-250
감자	250-350
고추	450-550
배추	350-450
상추	250-400

- 우리나라의 작물별 토양 적정 유효인산 함량과 미국의 각 주에서 제시한 토양 중 인(P)의 임계수준 함량(표 25)을 비교하고자 우선 미국에서 표현한 인(P) 함량에 2.29을 곱하여 유효인산(P₂O₅) 함량으로 변환하였다($P \times 2.29 = P_2O_5$). 그리고 Yang 등(2006)에서 수행한 우리나라 분석방법(Lancaster 법)을 포함한 다양한 분석방법(Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 법) 간 토양 유효인산 함량 관계식에 따라 미국 각 주의 토양 인산(P₂O₅) 임계수준 함량을 우리나라 토양 적정 유효인산 함량과 비교할 수 있게 변환하였다. 그 결과 미국 Wisconsin 주의 토양 인산(P₂O₅)의 임계수준은 17 mg/kg으로 가장 낮은 수준을 나타냈고, Arkansas 주는 181 mg/kg으로 가장 높은 수준을 보였다. 그 외 Delaware 주와 Oklahoma 주의 임계수준은 각각 131, 151 mg/kg으로 나타났는데, 미국의 작물별 시비처방이 주로 곡물을 대상으로 이뤄지고 있다는 점을 고려하면 미국 Arkansas, Delaware, Oklahoma 주의 토양 유효인산 임계수준은 우리나라 곡류(보리, 밀, 콩, 옥수수 등)의 토양 적정 유효인산 함량과 비슷한 수준을 나타냈다.
- 결과적으로 우리나라 작물별 토양 적정 유효인산 범위는 논토양 80-120 mg/kg, 밭토양 500 mg/kg (최대 550 mg/kg)이지만, 1990년대 밭토양의 평균 유효인산 함량이 557 mg/kg으로 1980년대 보다 2.4배 증가한 이후 2010년대(657 mg/kg)까지 지속적으로 증가한 경향을 보였다. 따라서 경제성과 농업생산성을 모두 만족할 수 있는 토양 유효인산 균형 조절을 위해 인산 시비량 재설정이 필요할 것으로 사료된다.

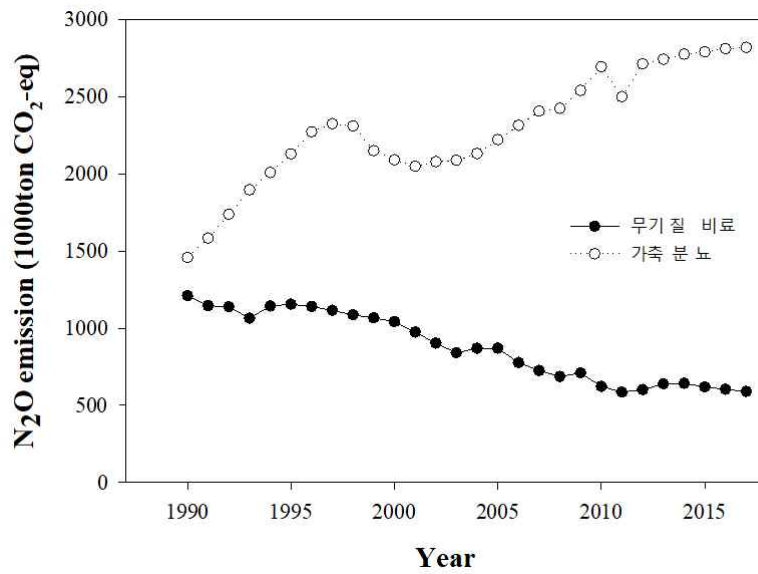
나. 비료 사용이 환경에 미치는 영향

- 비료는 토양의 비옥도를 증진시키고, 작물을 안정적, 지속적으로 생산할 수 있게 해 주는 물질로 농업환경에서 매우 중요한 농자재이다. 그러나 비료를 필요 이상으로 사용하여 토양의 수용능력을 초과할 경우 오히려 작물 생육에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 환경오염을 유발할 수 있다.

1) 온실가스 배출

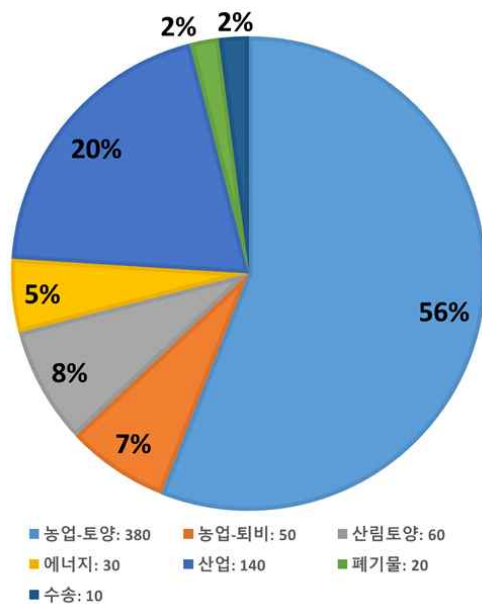
- 농경지 토양에 무기질 질소 비료나 가축분뇨를 처리하면 공급된 질소 중 일부는 탈질작용을 통해 대기 중으로 손실되는데, 이때 배출되는 질소 형태 중 온실가스인 아산화질소(N_2O)도 포함된다.
- 현재 농업분야의 온실가스 총 배출량(2017년 기준)은 20.4 백만톤(CO_2 -eq.)¹⁾으로 국가 총배출량(709.1 백만톤 CO_2 -eq.)의 2.9%를 차지한다. 농업분야의 온실가스 배출원은 1) 축산 분야의 ‘장내 발효’, ‘가축분뇨 처리’, 2) 경종 분야의 ‘벼재배’, ‘농경지 토양’, ‘작물 잔사 소각’ 이 있다(환경부 온실가스종합정보센터, 2019). 이 중 ‘농경지 토양’은 다시 ‘직접배출’, ‘목초지 및 방목지 분뇨’, ‘간접배출’로 분류가 되고 있으며, 비료 사용과 관련된 항목은 ‘직접배출’ 항목이다. 직접배출에 해당하는 온실가스 세부배출원은 무기질 비료, 가축분뇨, 질소고정 작물(두과류)과 작물 잔사의 토양환원이 있으며, 배출하는 온실가스 형태는 N_2O 이다. 이 중 무기질 비료와 가축분뇨의 온실가스 배출량은 각각 590천톤(CO_2 -eq.), 2,821천톤(CO_2 -eq.)이다. 무기질 비료 이용에 따른 온실가스 배출량은 1990년 대비 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이와 반대로 가축분뇨의 온실가스 배출량은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 52). 비료 사용에 따른 온실가스 배출량은 2017년 기준 3,411천톤(CO_2 -eq.)으로 총배출량(709.1 백만톤 CO_2 -eq.) 대비 0.48%, 농업분야 총배출량(20.4백만톤 CO_2 -eq.) 대비 16.7%에 해당하는 양이며, 우리나라 총 N_2O 배출량(14.0백만톤 CO_2 -eq.) 중 24%를 차지하였다.

1) 현재 우리나라에서 조사하고 있는 온실가스는 교토의정서에서 규정한 6대 직접온실가스인 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF_6)이며, 온실가스는 종류에 따라 대기 잔류 기간 동안 방열(radiative activity) 수준이 서로 다르므로, 배출량의 수준 파악 및 상호 비교를 위해서 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 사용하여 계산한 CO_2 환산량(carbon dioxide equivalent, 이하 ‘ CO_2 -eq.’)으로 국가 총배출량을 산정한다.



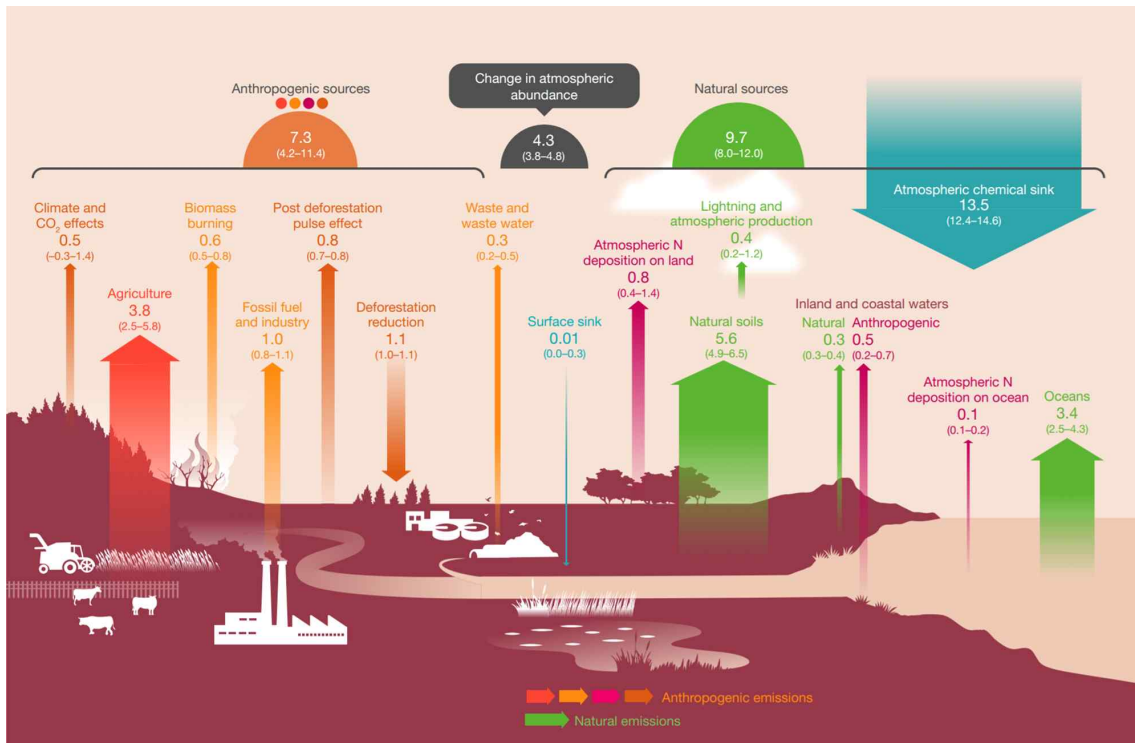
<그림 52> 우리나라 비료 이용에 따른 N₂O 배출량

- 유럽연합(EU) 27개국의 아산화질소(N₂O) 배출량을 조사한 결과(그림 53)에서도 전체 N₂O 배출량 중 비료 사용 등에 따른 농경지 토양에서 배출되는 N₂O가 가장 높은 비중(56%)을 차지하였다(Leip et al., 2011).



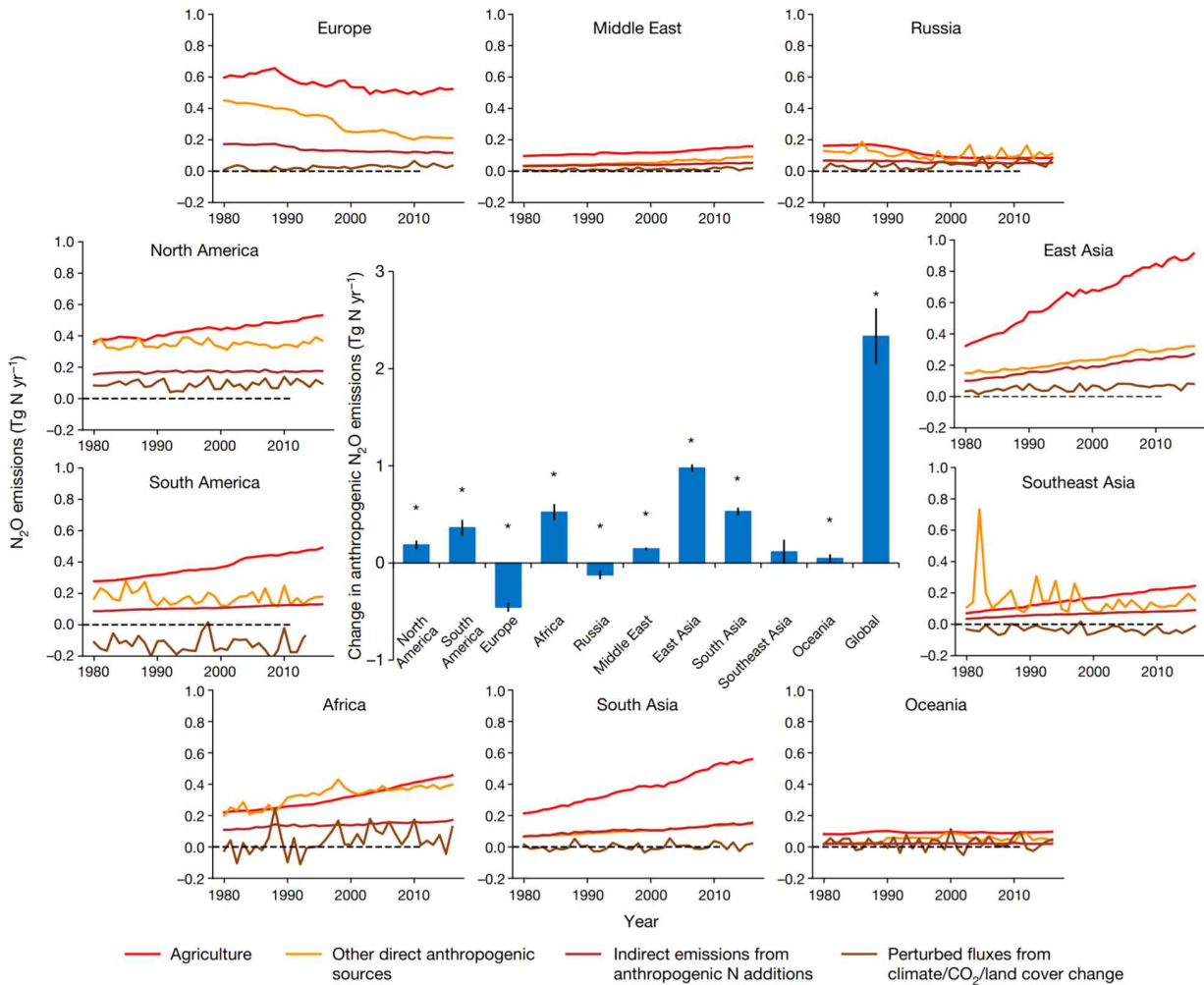
<그림 53> 유럽연합(EU) 27개국의 분야별 N₂O 배출량

- 최근 미국, 유럽, 중국 등 14개국 48개 연구기관이 참여하여 N₂O의 다양한 생성원별 배출량을 조사한 결과가 Nature지에 출판되었다(Tian et al., 2020). 연구 결과에 따르면 2007년부터 2016년까지 지구에서 생성된 N₂O가 연 1,220~2,340 만톤으로 연평균 1,700 만톤에 달하였고, N₂O 발생량 중 인간 활동에 의해 배출된 N₂O는 연평균 730 만톤이었다(그림 54). 농업분야에서 N₂O는 380 만톤이 배출되었는데, 그 중 비료 사용이 주요 원인인 토양의 N₂O 직접 배출량은 230 만톤으로 농업분야 중 61%를 차지하는 것으로 나타났다.



<그림 54> 2007-2016년 전세계 연평균 N₂O(백만톤) 수지(Tian et al., 2020)

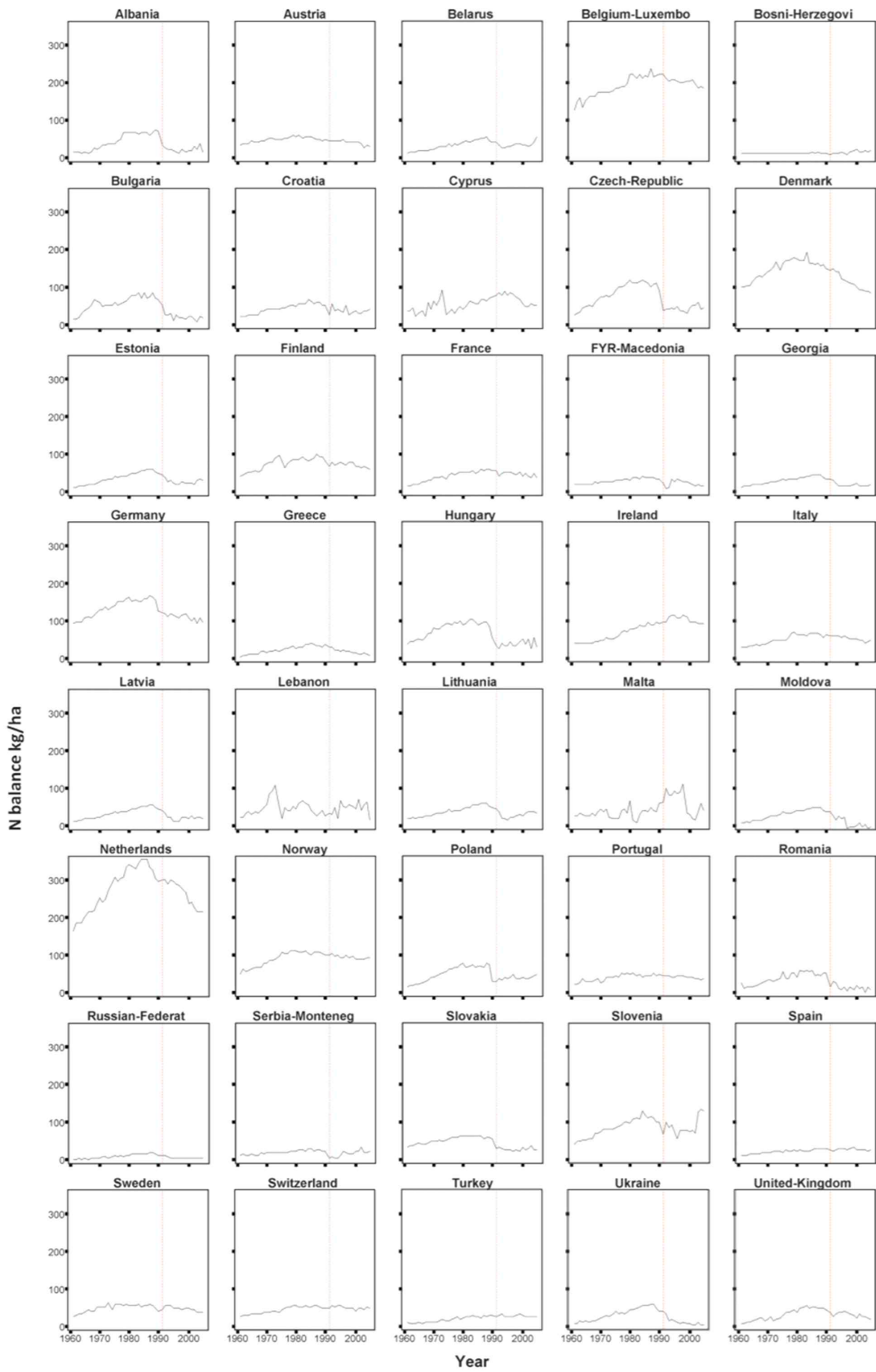
- 우리나라가 포함된 동아시아 지역은 농업분야 N₂O 배출량이 1980년 이후 가장 가파르게 상승하여 2016년 가장 많은 양의 N₂O를 배출하는 것으로 나타났다(그림 55). 이에 반해 유럽은 질산염 지침으로 질소 비료 사용량을 감축하여 1990년 대비 2010년 농경지 토양의 N₂O 배출량이 21% 감소한 것으로 나타났다. 따라서 기후변화의 심각성을 고려할 때 비료 사용에 따른 온실가스 배출량을 효율적으로 감축할 수 있는 방안이 시급히 마련되어야 한다.



<그림 55> 대륙별 N_2O 배출량 변화(Tian et al., 2020)

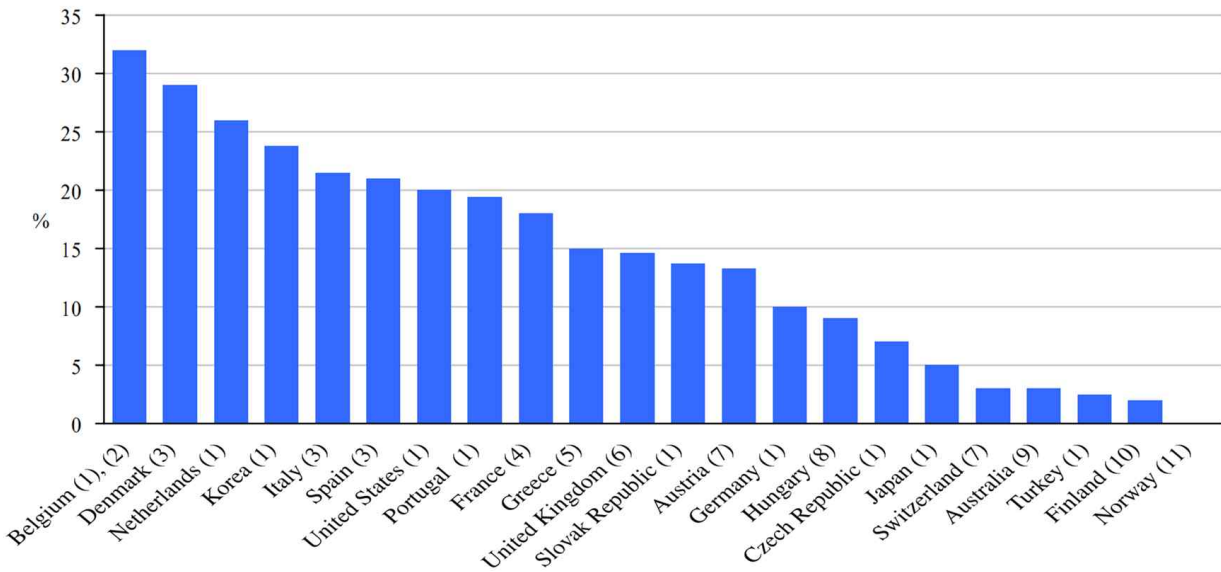
2) 수질

- 우리나라는 비료의 과다 또는 부적절한 사용으로 환경오염물질로 인식되는 경향이 많고, 토양 유실, 용탈 등에 의해 토양 중 질소, 인 등이 농업지역 주변 수계에 유입되어 부영양화 문제가 발생하고 있다. 하지만 실제 비료 사용에 대한 평가는 주로 단편적인 작물생육 및 토양환경 평가만 이루어졌을 뿐 유역 규모에서의 비료 사용이 수질환경에 미치는 영향평가는 거의 전무한 실정이다.
- Grizzetti et al. (2011)은 유럽에서 질소가 수질에 미치는 영향에 대해 분석했는데, 1991년 유럽에 질산염 지침(Nitrates Directive)이 시행된 후 많은 국가에서 질소 수지가 감소하는 추세를 보였지만(그림 56), 실제 이들 질소수지 감축이 주변 수계에 미치는 긍정적인 영향에 대해서는 명확한 결론을 내릴 수 없는 것으로 나타났다.



<그림 56> 유럽 국가별 질소수지 변화(빨간선: 질산염지침 시행시점)(Grizzetti et al., 2011)

- Parris (2011)에서 OECD 국가의 2000-2004년 농업지역 지하수의 먹는물 질소 기준 초과 비율을 조사했는데(그림 57), 벨기에, 덴마크, 네덜란드 그리고 우리나라 순으로 높은 것으로 나타났다. 2000년대 초반 벨기에, 덴마크, 네덜란드 그리고 우리나라는 모두 질소 양분수지도 높은 국가임을 고려할 때, 비료와 농업지역 지하수간 관련성이 있는 것으로 사료되나, 이에 대한 명확한 근거는 부족하다.

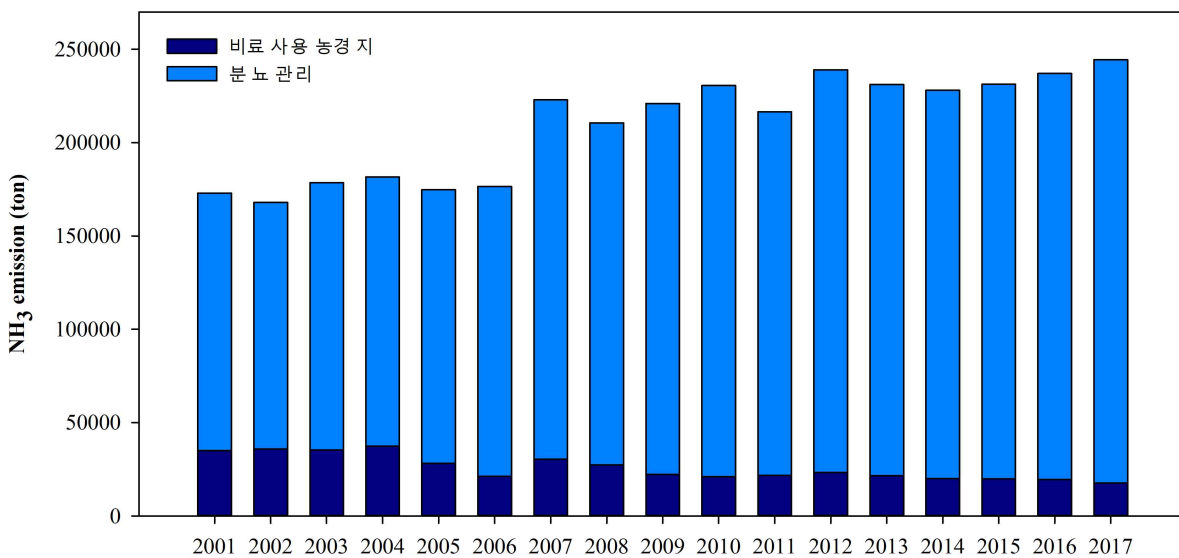


<그림 57> 2000~2004년 OECD 농업지역 지하수의 먹는 물 질소 기준 초과 비율 (Parris, 2011)

3) 암모니아 배출

- 최근 미세먼지가 사회적 이슈로 부상함에 따라 미세먼지 문제 해결에 대한 국민적 관심 및 요구가 증대하고, 정부도 미세먼지 대응 및 저감 방안에 대한 정책을 활발히 추진 중이다.
- 미세먼지는 발생원에서 고체 상태로 직접 배출되는 1차 발생원과 전구물질이 공기 중에서 다른 물질과 화학반응을 통해 생성되는 2차 발생원으로 분류되는데, 2차 발생원에 참여하는 원료물질은 경유차 및 화력발전소 등에서 나오는 질소·황산화물과 페인트, 주유소 등에서 나오는 휘발성 유기화합물 그리고 농축산 분야에서 나오는 암모니아(NH₃)를 들 수 있다.
- 우리나라는 대기오염물질 배출목록에 근거한 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 활용하여 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5},

VOC, NH₃) 배출량을 매년 산정하고 있는데, 2017년 기준 우리나라 NH₃ 전체 배출량은 308,298톤 이었으며, 이 중 농업분야(비료 사용 농경지, 분뇨관리)가 244,335톤으로 79%를 차지하였다. 농업분야에서 배출된 NH₃ 중 93%는 분뇨관리에에서 배출되었고, 7%만 비료 사용 농경지에서 배출되었다. 2001년 이후 농업분야 NH₃ 배출량의 변화는 그림 58과 같으며, 분뇨관리에 의한 배출량은 2001년 이후 최근까지 증가 추세를 보이지만, 비료 사용 농경지에서는 감소/유지 추세를 보이고 있다. 이는 무기질 질소 비료 사용량과 관련이 있는 것으로 보여진다.

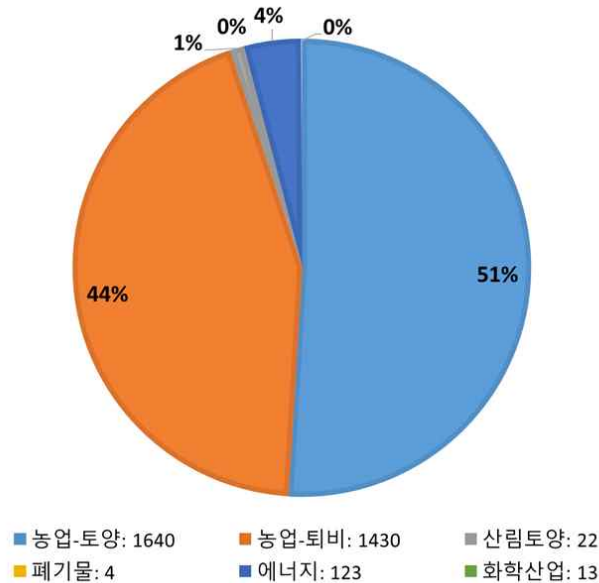


〈그림 58〉 연도별 농업분야 NH₃ 배출량 변화

- 유럽연합 28개국에서 배출되는 NH₃는 2017년 기준 3,635,852톤으로 독일, 프랑스, 스페인 순으로 배출량이 높은 것으로 나타났다(표 28). Leip et al. (2011) 연구에 따르면 유럽 내 분야별 NH₃ 배출량은 비료 사용 농경지 51%, 분뇨관리 44%로 95%가 농업분야에서 대부분의 NH₃가 배출되었다(그림 59). 우리나라와 농경지 면적이 비슷한 벨기에, 덴마크, 네덜란드와 우리나라 NH₃ 배출량을 비교해보면 벨기에(62,323 톤), 덴마크(72,216 톤), 네덜란드(113,834 톤) 각 국가의 총 NH₃ 배출량보다 우리나라 농업분야에서 배출되는 NH₃ 양(244,335 톤)이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 우리나라 비료 사용에 따른 NH₃ 저감 대책이 수립되어야 한다는 것을 시사한다.

<표 28> 2015-2017년 유럽 국가별 NH₃ 배출량

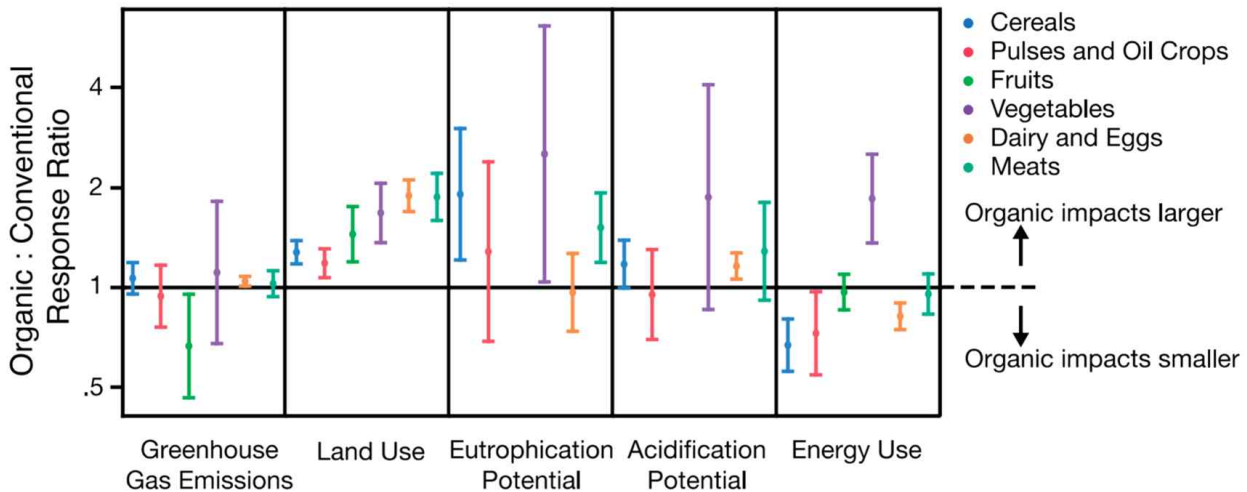
국가	2015		2016		2017	
	톤	%	톤	%	톤	%
Belgium	63,994	1.78	63,013	1.74	62,323	1.71
Denmark	70,578	1.96	70,852	1.96	72,216	1.99
Germany	655,750	18.20	647,625	17.88	639,807	17.60
Ireland	109,408	3.04	114,931	3.17	117,382	3.23
Greece	52,163	1.45	51,392	1.42	50,130	1.38
Spain	442,427	12.28	453,398	12.51	469,857	12.92
France	571,392	15.86	569,858	15.73	568,243	15.63
Italy	355,409	9.87	370,022	10.21	362,178	9.96
Hungary	78,256	2.17	78,438	2.17	79,622	2.19
Netherlands	111,100	3.08	109,720	3.03	113,834	3.13
Austria	62,945	1.75	63,874	1.76	64,615	1.78
Poland	266,270	7.39	272,841	7.53	287,914	7.92
Portugal	46,257	1.28	46,691	1.29	47,060	1.29
Romania	150,781	4.19	147,135	4.06	144,309	3.97
Sweden	47,873	1.33	46,803	1.29	46,999	1.29
United Kingdom	238,996	6.63	244,037	6.74	244,928	6.74
EU (28)	3,602,262	100	3,622,865	100	3,635,852	100



<그림 59> EU 국가별 암모니아 배출량(Gg N yr⁻¹) 분류 (Leip et al., 2011)

4) 기타

- 2017년 유기농과 관행농의 식량 생산시스템이 환경에 미치는 영향을 평가한 논문이 소개되었다(Clark and Tilman, 2017). 이 연구는 Web of Knowledge, PubMed, AGRICOLA, Google Scholar 등 학술검색 사이트를 이용하여 2015년 7월 이전까지 출판된 식품 생산시스템(비료 생산 및 이용, 종자 생산, 에너지 사용, 사료 생산, 가축분뇨 생산(비료 사용 시), 가축분뇨 관리, 인프라 구축 등) 전과정평가(LCAs, life cycle assessments)를 연구한 164편의 논문(742종 식량 생산시스템)을 수집하였고, 이들 결과를 바탕으로 온실가스 배출, 토지 이용, 부영양화, 산성화, 에너지 이용 등에 미치는 영향을 유기농과 관행농으로 구분하여 평가하였다(그림 60). 그 결과, 식량의 종류별로 차이는 있지만 유기농 식량 생산시스템이 관행농 식량 생산시스템보다 25-110% 높은 토지 이용 ($p < 0.001$)이 요구되었고, 15% 낮은 에너지($p = 0.0452$)를 사용했으며, 37% 높은 부영양화 잠재력($p = 0.0383$)을 나타냈다. 또한 온실가스 배출 및 산성화 잠재력은 유기농 식량 생산시스템이 관행농 식량 생산시스템보다 각각 4% 낮거나, 13% 높았지만 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다.



<그림 60> 유기농, 관행농 식량(곡물, 두류 및 유류 작물, 과일, 채소, 유제품 및 달걀, 육류) 생산시스템이 온실가스 배출, 토지 이용, 부영양화, 산성화, 에너지 이용에 미치는 영향 비율(Clark and Tilman, 2017)

4. 국내외 양분 관리 사례 분석

가. 시비처방을 위한 주요 국가의 토양 분석법 비교

- 국내외 토양 분석법을 표 29에 정리하였다. 토양 시비처방에 필요한 분석항목들은 대부분 유사하였으나 우리나라에서는 pH, EC, 유기물, 유효인산, 치환성양이온을 분석하는 것에 비해 미국에서는 미량원소인 Mn, Cu, Zn, Fe, B도 분석을 실시하고 있었다. 또한 우리나라에서는 무기태질소 분석을 시설재배지 토양에서만 분석하고 있는 것과 달리 많은 나라에서 무기태질소인 NO₃-N을 일반농경지에서도 분석하고 있었다.
- 그리고 유기물 분석법 역시 최근 강열감량법(Loss on ignition, LOI)을 주로 이용하는 것으로 나타났고, 우리나라는 Turin법을 농촌진흥청에서 사용하다가 최근 C/N 분석기를 이용하는 방법도 도입하고 있는 것으로 나타났다.
- 이 외에 미국의 뉴욕주와 뉴저지주, 그리고 영국의 분석법을 보면 단일침출액(Morgan, Mehlich3)으로 유효인산과 치환성 양이온, 미량원소 등을 모두 분석하고 있었다.

표 29. 국내외 시비처방을 위한 토양 분석법 비교

	한국	일본 (이바라키)	미국(NY)	미국(NJ)	미국(WD)	캐나다 (Ontario)	영국
pH	water(1:5)	water(1:5)	water(1:1)	water(1:1)	water(1:1)	water(1:1)	water(1:2.5)
EC	water(1:5)	water(1:5)	water(1:1)	water(1:1)			
OM	Turin, C/N analyzer	C/N analyzer	LOI	LOI or C/N analyzer	LOI	Walkley-Blac k	LOI
CEC	-	-	-	Summation or ammonium acetate	Sum of cation	BaCl ₂	Sum of cation
Avail-P	Lancaster	Truog	Morgan	Mehlich3	Bray 1	NaHCO ₃	Mehlich3
Ca, Mg, K	ammonium acetate	ammonium acetate	Morgan	Mehlich3	ammonium acetate	ammonium acetate	Mehlich3
Mn, Cu, Zn, Fe	-	-	Morgan	Mehlich3	Mn: 0.1N H ₃ PO ₄ Zn: 0.1 N HCl	Cu, Fe, Zn: DPTA Mn: H ₃ PO ₄	Mehlich3
B	-	-	Hot water extractable	Mehlich3	Hot water extractable	-	Hot water extractable
NO ₃ -N	2M KCl	water	Morgan	0.5 M NaCl	2M KCl	KCl	

나. 국내·외 시비처방 비교

○ 우리나라

- 우리나라의 시비처방은 지역 농업기술센터 또는 도농업기술원에 농민이 직접 토양 시료를 채취하여 의뢰하면 무료로 토양을 분석하여 시비처방서를 제공해주는 시스템으로 운영 중이다. 또한, 흙토람을 통해 토양 분석결과가 있다면 누구나 분석결과를 입력하여 시비처방서를 받을 수 있도록 체계가 잘 구축되어 있다.
- 작물별 시비처방 기준은 표 30과 같이 잘 정립되어 있다. 작물별, 그리고 벼는 목표수량에 따른 시비량이 다르게 정립되어 있고, 토성이나 지대(고랭지), 시설 유무, 과수의 수령 등 여러 요인에 따라 일부 시비처방공식이 다르게 나타나 있다.

표 30. 우리나라 작물별 시비처방 기준

작물	질소 추천량(kg/10a)	인산(P ₂ O ₅) 추천량(kg/10a)
벼, 목표수량 500 kg/ha	= 11.17 - 0.133 · OM + 0.025 SiO ₂	= (100 - 토양P ₂ O ₅) x 0.1
벼, 목표수량 480 kg/ha	= 9.14 - 0.109 · OM + 0.020 SiO ₂	= (100 - 토양P ₂ O ₅) x 0.1
벼, 목표수량 460 kg/ha	= 7.10 - 0.085 · OM + 0.016 SiO ₂	= (100 - 토양P ₂ O ₅) x 0.1
보통옥수수, 사질~사양질	= 21.220 - 0.184 · OM	= 73.545 - 29.394 · log(토양P ₂ O ₅)
보통옥수수, 식양질~식질	= 24.951 - 0.217 · OM	= 109.375 - 43.715 · log(토양P ₂ O ₅)
감자, 고랭지	= 16.329 - 0.098 · OM	= 12.469 - 0.014 · 토양P ₂ O ₅
감자, 남부해안 봄재배	= 20.935 - 0.125 · OM	= 18.337 - 0.020 · 토양P ₂ O ₅
감자, 남부해안 가을재배	= 26.169 - 0.1564 · OM	= 22.921 - 0.025 · 토양P ₂ O ₅
콩, 사질~사양질	= 8.178 - 0.232 · OM	= 51.316 - 21.120 · log(토양P ₂ O ₅)
콩, 식양질~식질	= 9.297 - 0.264 · OM	= 61.914 - 25.481 · log(토양P ₂ O ₅)
고추, 노지	OM 10 g/kg 이하: 24.8 kg/10a OM 11~20 g/kg: 22.5 kg/10a OM 21 g/kg 이상: 18.0 kg/10a	= 26.200 - 0.038 · 토양P ₂ O ₅
배추, 평nan지	= 44.082 - 0.588 · OM	= 132.40 - 46.630 · log(토양P ₂ O ₅)
배추, 고랭지	= 38.351 - 0.512 · OM	= 132.40 - 46.630 · log(토양P ₂ O ₅)

OM = organic matter

○ 미국

- 미국은 주별로 고유의 토양검정 프로그램이 운영 중이며, 주로 주립대학을 통해 시비처방 기준 마련 및 토양 검정이 이뤄지고 있다. 시비처방의 기본 원리는 그림 50과 같이 경제적 수량반응 곡선에 따라 적정 수준의 시비가 이뤄지도록 매뉴얼이 작성되

어 있다.

- 이를 기초로 하여 아래 표 31과 같이 원하는 수량 및 현재의 토양 양분 상태에 따른 시비처방을 얻을 수 있게 되는 것이다.

표 31. South Dakota 주 시비처방 기준(South Dakota State University, 2005)

작물, 생산량 단위	질소 추천량	인산(P ₂ O ₅) 추천량
옥수수(grain), bu	= 1.2 x YG - STN - LC	= (0.700 - 0.044 x STP) x YG
옥수수(silage), ton	= 10.4 x YG - STN - LC	= (5.62 - 0.35 x STP) x YG
보리(feed), bu	= 1.7 x YG - STN - LC	= (0.785 - 0.05 x STP) x YG
보리(malting), bu	= 1.5 x YG - STN - LC	= (0.785 - 0.05 x STP) x YG
콩, bu	none	= (1.55 - 0.14 x STP) x YG
밀, bu	= 2.5 x YG - STN - LC	= (1.071 - 0.067 x STP) x YG

YG = yield goal; STN = soil test nitrogen (0-2 ft), lb/a; STP = soil test Olsen phosphorus (ppm); LC = legume credit (lb/a)

- 또한 Wisconsin주에서는 경제적인 가치를 고려하여 옥수수 재배시 질소질 비료와 옥수수의 가격비율을 고려하여 경제적인 시비처방 기준을 제시하여 활용하고 있다(표 32). 토양 분석을 직접 하지 않더라도 우리나라의 토양 적성등급과 같은 토양 등급(생산성)에 따라 시비량을 다르게 설정하였다.
- 이처럼 미국은 농가당 재배면적이 매우 크기 때문에 비료의 비중이 커 적절한 토양 검정 및 시비처방은 농민에게 매우 중요한 요소로 작용하고 있다.

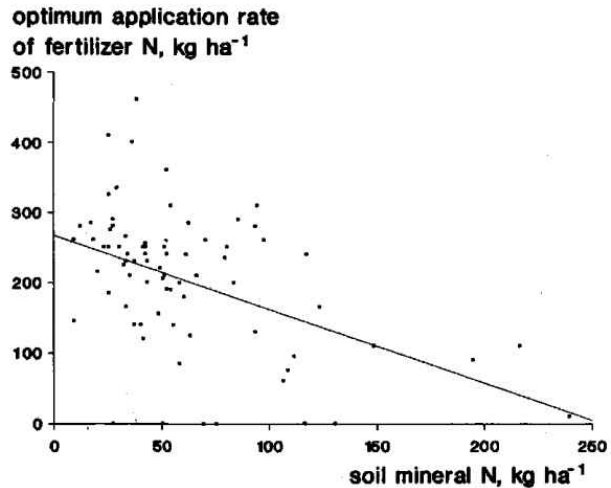
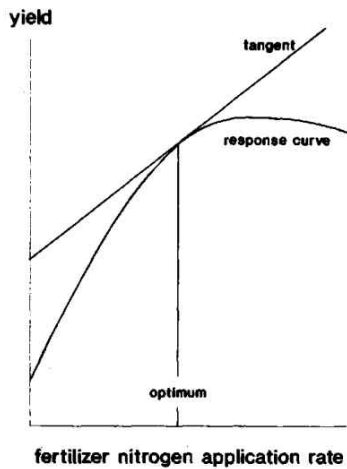
표 32. Wisconsin 주 시비처방 기준(Laboski 등, 2018)

Soil	Nitrogen:corn 가격 비율			
	0.05	0.10	0.15	0.20
	-----lb N/a (total to apply)-----			
High/very high potential soils	165 ⁺ 135 - 190	135 120 - 155	120 100 - 135	105 90 - 120
Medium/low yield potential soils	120 100 - 140	105 90 - 120	95 85 - 110	90 70 - 100
Sands/loamy sands	215 200 - 230	205 190 - 220	195 180 - 210	190 175 - 200

† 최대 경제적 수량을 얻을 수 있는 질소 시비량

○ 네덜란드

- 네덜란드는 1970-1980년대 개발된 대부분의 작물 적정 기준을 활용하여 시비처방이 이뤄지고 있다. 네덜란드 역시 그림 61의 비료 사용에 따른 수량 반응곡선을 기준으로 적정 수준의 비료 사용량을 알아낸 뒤 실험을 통해 그림 62처럼 토양 양분함량에 따른 적정 비료 사용량을 산출할 수 있는 회귀식을 도출하였다(Neeteson, 1989).



<그림 61> 비료 사용에 따른 수량 반응곡선

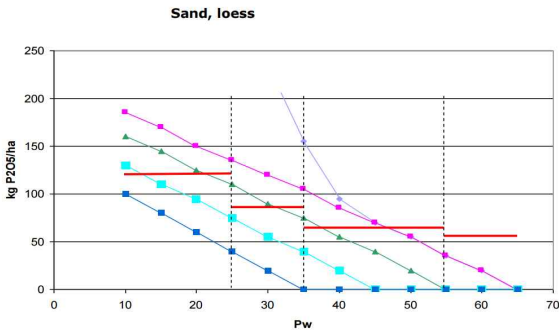
<그림 62> 토양 무기 질소에 따른 적정 비료 사용량

- 그 결과 아래 표 33처럼 작물별, 토양에 따른 질소 추천 공식을 도출해 시비처방에 활용하고 있으며, 우리나라와 다르게 토양 중 무기태 질소(SMN, soil mineral N) 함량을 기준으로 시비처방이 이뤄지고 있다.

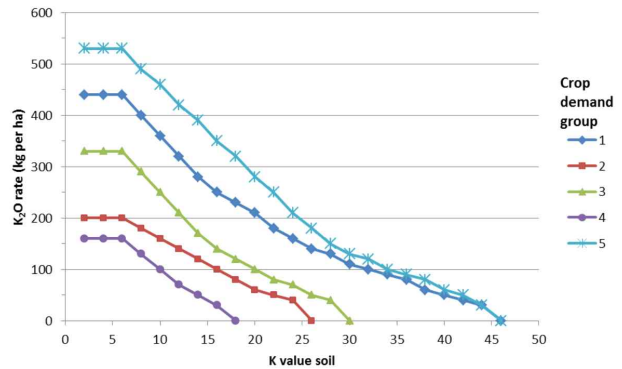
표 33. 네덜란드의 작물별 질소 추천량 산출 공식

작물, 생산량 단위	질소 추천량
감자(ware potatoes), clay / loess soil	$285 - 1.1 \times \text{SMN (0-60 cm)}$
감자(ware potatoes), sandy soil	$300 - 1.8 \times \text{SMN (0-60 cm)}$
감자(starch potatoes), sandy soil	$275 - 1.8 \times \text{SMN (0-60 cm)}$
겨울밀(feed), clay soil	$140 - \text{SMN (0-60 cm)} + 90 + 40$
겨울밀(bread), clay soil	$140 - \text{SMN (0-60 cm)} + 80 + 80$
겨울밀(feed), sand soil	$140 - \text{SMN (0-60 cm)} + 90$
사탕무(sugar beets)	$200 - 1.7 \times \text{SMN (0-60 cm)}$
옥수수, all soil types	$205 - \text{SMN (0-30 cm)}$

- 질소 뿐만 아니라 인산과 칼륨에 대해서도 토양 중 양분 상태를 고려한 시비량을 조절할 수 있는 공식을 산출하였고, 이를 바탕으로 시비처방이 이뤄지고 있다.



<그림 63> 토양 인 상태에 따른 인산 시비량 변화



<그림 64> 토양 중 칼륨 상태에 따른 칼륨 시비량 변화

- 또한, 최근에는 재배기간 중 양분의 유실 및 암모니아 휘산을 줄이기 위해 시비 방법 및 시비 시기 등에 대한 것들도 연구하여 배포하고 있다.

○ 영국

- 영국의 시비처방에는 SNS(Soil Nitrogen Supply) index를 기준으로 하고 있다. SNS는 전 작기에 시비한 비료의 잔존량을 포함한 작물이 생육기간 중에 흡수할 수 있는 토양유래의 질소를 뜻한다. 이에 SNS는 토양 무기태 질소(SMN, Soil mineral N)와 SMN 측정 시 작물이 흡수한 질소량, 그리고 남은 생육 기간동안 토양유기물과 식물잔사에서 무기화되는 질소량을 합친 개념이다.
- 아래 표 34는 산출된 SNS에 따라 SNS Index를 구하는 등급표이다. 즉, SMN과 현재 작물 중 N, 토양 중 유기물과 잔재로부터 올 수 있는 N를 모두 합한 SNS를 7개의 SNS Index로 세분화하는 것이다. 이후 각 작물별 SNS Index의 시비기준에 따라 시비량을 결정하는 것이다.
- 표 35는 밀에 대한 시비처방 기준을 나타낸 표이다. SNS Index와 더불어 토양의 종류에 따라 질소 시비량을 달리하도록 하고 있다. 토양 종류가 매우 다양한데 이는 영국의 특성상 유기물이 많은 토양이 많아 이에 대한 분류가 다양하게 나타났다.

표 34. SNS Index 등급표

SNS = SMN + N in crop + net mineralisable N (kg N/ha)	SNS Index
< 60	0
61 - 80	1
81 - 100	2
101 - 120	3
121 - 160	4
161 - 240	5
240 <	6

표 35. SNS Index를 이용한 밭 질소 시비추천량

	SNS Index						
	0	1	2	3	4	5	6
	kg N/ha						
Light sand soils	160	130	100	70	40	0-40	0-40
Shallow soils	280	240	210	180	140	80	0-40
Medium soils	250	220	190	160	120	60	0-40
Deep clay soils	250	220	190	160	120	60	0-40
Deep silty soils	220	190	160	130	100	40	0-40
Organic soils	-	-	-	120	80	40-80	0-40
Peat	-	-	-	-	-	0-60	

다. 국외 양분 관리 정책 비교

○ 캐나다

- 캐나다의 양분관리 프로그램은 대표적으로 최적관리기법(Best Management Practices, BMP)인 ‘4R Nutrient Stewardship’ 이 있다. 여기서 4R은 Right source(올바른 양분 원), Right rate(올바른 비율), Right time(올바른 시기), Right place(올바른 장소)로 농경지로 유입되는 양분을 관리하기 위해서는 4개의 R을 준수하도록 하는 제도이다.
- 이 제도의 목적은 양분관리에 있어 작물의 영양 공급은 최적화하고 손실되는 양분은 최소화하는 것을 목적으로 하는 현장 특화형 관리 프로그램이며, 작물 생산자가 농업과 직접 농업과 관련된 환경 문제를 최소화하는 동시에 경제적 이익을 극대화할 수 있도록 개발되었다.

- ‘4R Nutrient Stewardship’ 을 통한 농가의 양분관리 개선을 위해, ‘Nitrous oxide Reduction Protocol(NERP)’ 이라는 정밀 관리 프로토콜이 제공되며 공인된 전문 자문가(accredited professional advisor, APA)가 작물 및 토양에 대한 관리를 지원하고 있다.
- 성공적인 양분관리 계획 수립을 위하여 일관성이 요구되는 농가 정보, 수확 목표, 과거 생산 이력 및 토양검정 결과 등 복합적인 정보가 요구되며, 이에 따라 농가 조사표를 생산자가 직접 작성하여 APA에게 제출하도록 되어 있다.

○ 네덜란드

- 네덜란드는 양분수지가 매우 심각한 국가 중 하나였으며, 이에 1980년대 중반부터 단계적으로 가축분뇨에 의한 환경 문제 해결을 위한 양분 감축 정책을 추진하였고, 효과적인 양분감축이 이뤄졌다고 알려진 국가이다.
- 네덜란드의 양분관리는 Ministry of Infrastructure and Water Management에서 양분관리를 담당하고 있다.
- 단계적 양분관리 정책을 살펴보면 제1단계(1986~1990년)인 안정기와 제2단계(1991~1994년)인 감축기, 제3단계(1995~2005년) 균형기로 나눌 수 있다. 제1단계에서는 환경부하를 줄이기 위해 우선 가축 사육두수를 안정시키고자 하였고, 1986년에 비료법, 가축분뇨법, 토양보전법을 제정하여 제도적인 틀을 구축함과 동시에 작물별 양분 투입량, 가축분뇨 살포시기 등을 규제하였으며, 잉여양분(인산)에 대한 부과금제도도 도입하였다.
- 이후 제2단계에서는 양분유출 감축을 위해 가축분뇨 생산쿼터제(livestock production quota system)을 1994년부터 실시하였으며, 가축분뇨 살포 기준 및 시기 등 수질오염과 관련된 환경규제를 대폭 강화하였다. 가축분뇨 생산쿼터제에는 쿼터 거래도 허용했으나 축종간, 지역간 거래제한을 두었으며, 쿼터 거래시 25%는 정부가 취득하게 하여 양분 생산을 감축시키도록 노력하였다.
- 제3단계에서는 단순 규제에서 벗어나 투입-산출 물질균형을 통한 환경부하를 최소화하기 위한 MINAS(MINeral Accounting system), 가축분뇨이동계약제 등 신규 제도들을 도입하였다. MINAS는 1998년 비료법을 개정하여 ‘EU 질산염 지침(91/676/EEC)’에 부합하도록 하기 위해 만들어진 제도로 네덜란드의 대표적인 양분관리 정책프로그램이다. MINAS는 모든 농민들이 농장의 양분 투입물과 산출물을 기록하고 매년 양분기장 보고서를 해당 기관에 제출함과 동시에 해당기관은 보고서의 정확성을 검토하였

다. 이 제도에서는 가축분뇨 최대시비량인 170 kg N/ha/yr를 보고서를 바탕으로 양분 초과량을 관리하고 초과분에 대해서는 부담금(2.3 Euro/kg N, 9 Euro/kg P)을 부과하도록 하였다.

- 하지만 이 MINAS도 2003년 EU commission이 EU의 질산염 지침을 준수하지 못하는 것으로 판단하여 2006년 폐지되었고 이후 네덜란드 역시 규제로 정책을 전환하였다.

○ 덴마크

- 덴마크는 가축분뇨 처리를 위해 농업 규제 측면에 초점을 맞춰 양분관리를 하고 있다. 주요 정책의 목적은 가축분뇨 및 부산물의 재사용 효율을 증가시켜 농업 생산 시스템 내에서 양분순환을 최적화하여 화학비료의 사용을 제한하고 환경 부하를 감소시키는 것이다.

- 그리고 농지 조화법(Harmony rules)는 농지면적당 가축 사육두수를 허가하는 제도로 가축분뇨 발생량 중 질소 함량에 따라 ha당 가축단위(Livestock Unit, LU)을 제한하고 있다. LU는 100 kg N으로 정의되며 축종 상관없이 ha당 1.7LU로 제한이 되어 있다. 이 기준은 EU의 질산염 지침과 동일한 170 kg N/ha이다.

- 인은 ‘phosphorus ceiling’이라는 직접적인 제한기준을 설정하여 2025년까지 단계적인 강화 계획을 수립하였다(표 36). 이 외에도 표 37과 같이 농가의 토양 상태에 따라 추가할 수 있는 인의 양을 제한하였다.

- 효율적이며 체계적인 양분 관리를 위해 덴마크는 농무부 기구(Danish AgriFish Agency)의 비료 회계 등록 시스템(Danish Register of Fertilizer Accounts)에 농민을 의무적으로 가입하게 하여 전산화된 비료 회계 시스템 (Fertilizer Accounting System)에 가축분뇨 발생량, 사육 현황, 재배 현황 등 기초자료를 입력하도록 하고 있다. 여기에 비료 회사의 공급 이력 뿐 아니라 유기 폐자원 등 종합적인 데이터베이스를 구축하였고(그림 65), 이 정보를 바탕으로 각 작물 및 재배면적에 따른 질소·인 표준 시비량, 최대 허용 질소, 인 량 등이 자동으로 계산되며 비료 투입원별 사용 가능량 등의 정보가 농민에게 제공되도록 하고 있다.

표 36. 덴마크의 환경 보호를 위한 단계적 인 한계치

	2018	2019	2020-2021	2022-2024	from 2025
Average limit for level of protection (kg P/ha)	34.7	34.5	33.2	32-33	30-31

표 37. 토양 중 인 상태를 기초로 한 인 최대 허용량

P-status in soil (mg P/kg)	Extra P (kg P/ha)
>40.0	+ 0
35.0-40.0	+ 1
30.0-35.0	+ 2
27.5-30.0	+ 4
25.0-27.5	+ 6
22.5-25.0	+ 8
20.0-22.5	+ 10
17.5-20.0	+ 12
<17.5	+ 14

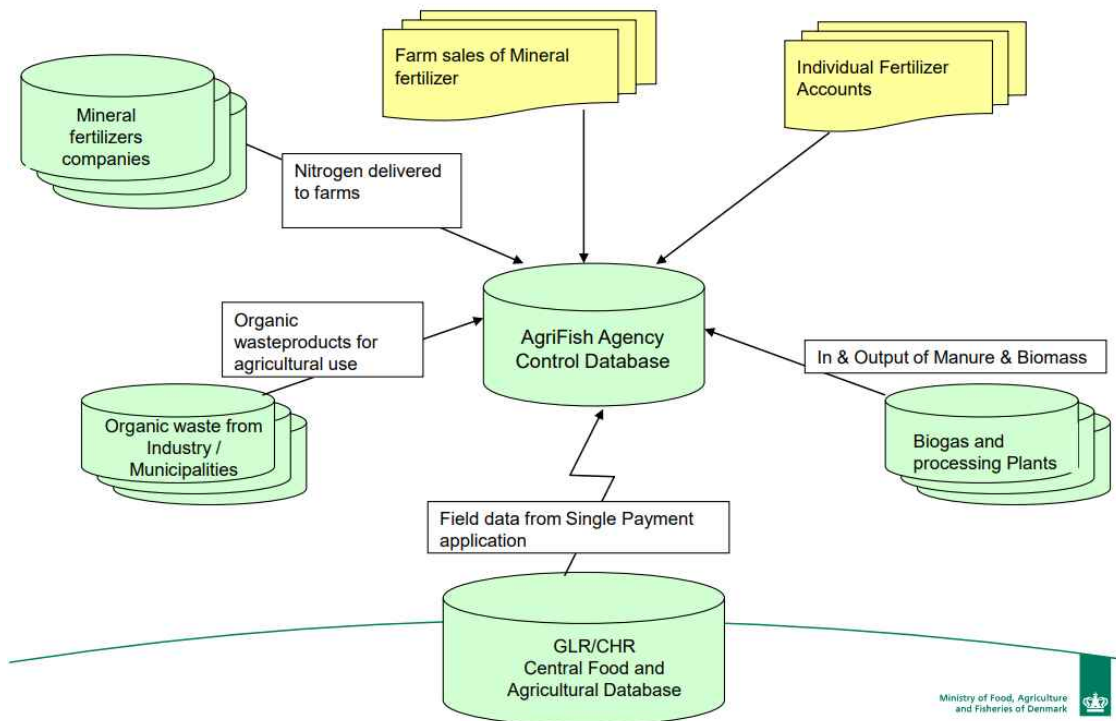


그림 65. 덴마크 비료 회계 시스템 data overview

○ 핀란드

- 핀란드는 발트해와 인접한 국가 특성으로 부영양화 방지를 위한 수계 관리를 핵심으로 하고 있으나 토양 내 인 유실 및 토양 손실 자체가 수계오염의 직접적인 원인이

된다는 점에 착안하여 토양을 주요 관리대상으로 하고 있다. 이에 2014년 핀란드 농경지의 토양 침식 위험도를 mapping하는 연구를 수행·발표하였다.

- 양분 재활용인 퇴비 및 유기물 비료의 활용을 촉진하기 위해 유기농 식료품 섭취를 국가 차원에서 권고하고 있고, 이를 통해 무기질 비료 사용을 줄이고 자원 재활용을 늘리는 노력을 하고 있다.
- 이 외에도 다양한 분야에서 자원 재활용을 위해 노력하고 있다. 향후 인광석의 지속적인 가격 상승에 대비하기 위해 폐수 및 슬러지로부터 인을 회수하는 다양한 방법을 도입하고자 노력하고 있다.
- 핀란드 식품안전청(Evira)은 하수처리과정에서 발생한 잉여 슬러지를 퇴비화한 것도 토양 개량제로 인정하여 농업 토양에서 사용할 수 있도록 하였다. .

○ 독일

- 독일은 양분수지가 높은 국가가 아니기에 양분관리 계획은 대부분 자원 회수에 초점을 맞추고 있다.
- 핀란드처럼 하수 슬러지의 재활용은 허용하지 않았으나, 슬러지로부터의 양분 회수에 대한 법적 의무화를 진행 중에 있으며 그 내용은 ‘2% 이상의 인을 함유한 슬러지의 경우 의무적으로 인을 회수’ 및 ‘폐수 처리 플랜트의 경우 의무적으로 50% 이상의 인 회수 효율 달성’ 등이 있다.

○ 미국

- 미국의 양분관리는 농무부(USDA)와 환경보전청(EPA)에서 주관하는 종합양분관리계획(Comprehensive Nutrient Management Plan, CNMP)에 의해 관리되고 있다.
- CNMP의 가축분뇨 관리를 위한 주요 요소는 아래와 같다.
 - ① 분뇨와 오수의 관리 및 저장, ② 토양 관리와 활용, ③ 양분관리, ④ 통계자료의 확보, ⑤ 가축사료 관리, ⑥ 다른 이용대안
- 양분관리 계획의 설계를 위해 개발한 Manure Management Planner(MMP)는 분뇨의 총 발생량, 토양, 해당 작물의 요구양분과 무기 및 유기양분 등을 예측하는 프로그램으로 사용자는 토지의 운영 계획을 세우고, 토양 검정정보를 입력하여 양분요구량 및 시비량 정보를 확보할 수 있다.

5. 비료 적정사용 및 양분수지 개선 방안

가. 무기질 비료 사용량 감축이 국가 양분수지 개선에 미친 영향

○ 표준시비량 변화

- 우리나라의 무기질비료는 1980년 이후 본격적으로 공급되었고, 1992-1995년 최대 사용량을 나타내고 있다(그림 32). 1970년대 이후 농경지 토양 비옥도변화에 따라서 작물별 표준시비량은 지속적으로 개선하고 있다(표 38). 특히 농경지 유효인산 집적 해결을 위해서 인산의 표준시비량은 크게 감소하였다. 그리고 단위면적당 무기질 질소와 인산비료 사용량은 1992-1995년 대비 최근 4년에 각각 34, 51% 감소되었다. 그리고 농가 현장에서 사용하는 무기질 비료량/요구량은 1992-1995년 질소의 경우 174%, 인산은 178%이었다. 하지만 2016-2019년 질소와 인산은 각각 131, 89%로 표준시비 준수율이 크게 개선되었다(표 19). 지금까지 국가 양분수지 개선을 위해 무기질 비료 사용량을 크게 감축시켰지만, 국가 양분수지 개선은 큰 효과를 거두지 못했다. 이와 같은 결과는 양분수지 평가에서 모수가 되는 농경지 면적이 1990년 대비 최근 5년 25%가 감소된 반면 가축분뇨에 발생량은 지속적으로 증가하였기 때문으로 판단된다.

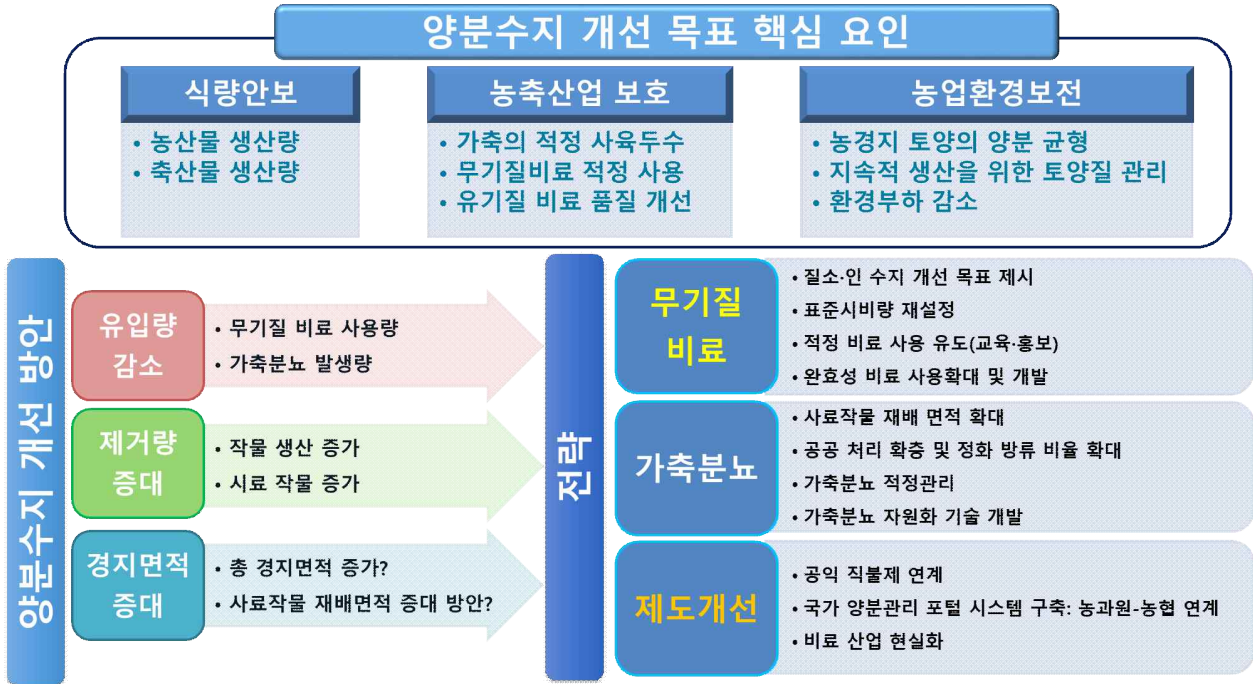
<표 38> 작물별 질소와 인산의 표준시비량 변화

작물	성분	연대						
		'50	'60	'70	'80	'90	'00	'10
벼	질소(N)	3.5	6.7	11.7	11.0	11.0	9.0	9.0
	인산(P ₂ O ₅)	3.8	5.3	5.8	7.0	4.5	4.5	4.5
노지채소	질소(N)	-	-	25.9	25.9	23.3	23.3	23.3
	인산(P ₂ O ₅)	-	-	18.7	18.7	8.5	8.1	8.1
시설채소	질소(N)	-	-	25.9	25.9	16.1	15.3	15.3
	인산(P ₂ O ₅)	-	-	18.7	18.7	6.2	5.6	5.6

나. 국가 양분수지 개선 목표 및 방안 설정을 위한 배경

- 농업인의 비료(양분) 적정 사용에 의한 국가단위 양분수지 개선의 궁극적 목적은 환경 보존에 의한 지구 생태계 보호이다. 하지만 양분수지 개선을 위한 무기질 비료 사용량 및 가축분뇨 발생량 조절은 해당 국가의 식량안보 및 농축산 관련 산업에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 국가단위 양분수지 개선은 농축산물 자급률, 농축산 유관

산업, 농업환경보존에 대한 국민들의 인식, 그리고 국가 경쟁력 등을 바탕으로 개선 방향과 목표가 설정되어야 할 것이다(그림 66).



<그림 66> 양분수지 개선 목표 핵심 요인 및 방안

다. 국가 양분수지 개선방안

- 현재 우리나라의 양분수지 악화에 있어 가축분뇨는 매우 높은 비중을 차지하고 있다. 따라서 우리나라의 축산규모 및 가축분뇨 활용방안의 개선 없이는 양분수지 개선은 불가능한 것으로 판단된다. 그리고 본 과제에서 우리나라의 적정 축산규모를 제시하는 것은 어렵기 때문에 이에 대한 추후 연구가 반드시 필요할 것으로 사료된다. 본 과제에서 제시하는 국가 양분수지 개선방안은 현재의 축산규모에서 국가 양분수지 개선을 위한 경종방법, 축산방법, 정책 및 연구 방향을 제시하고자 한다.

1) 경종방법

○ 질소 수지 개선 방안

- 우리나라 전체 질소 투입량 중 가축분뇨 활용 비율은 덴마크와 큰 차이가 없으며 벨기에와 네덜란드에 비해서 약 10% 정도 낮은 수준이다. 그리고 사료작물에 의한 질소 회수율은 벨기에와 덴마크에 비해서 큰 차이가 없다.

- 무기질 비료 사용량 감소를 위한 작물별 표준시비량 조절은 최소 3-5년의 시간이 필요하며, 질소시비량은 작물 생산에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 성급한 질소 시비량 조절은 국가 농업생산성에 큰 영향을 미칠 가능성을 가지고 있다. 현재의 표준시비량에서 제시하는 질소시비량에 따른 작물 생산성을 비교한 결과 질소 표준시비량 10% 감축은 약 1.5%의 생산성 감소가 있고, 20% 감축은 2-4% 생산성 감소가 있을 것으로 예측된다(표 39). 최근 4년간 우리나라 무기질 질소 사용량 대비 요구량은 약 130%이다.

<표 39> 주요작물별 질소 표준시비량 감축에 따른 생산성 변화 예측

작물	표준시비량 감비율에 따른 수량변화 예측		
	10%	20%	30%
벼	1.3	2.8	4.4
고구마	1.5	3.8	6.8
감자	2.0	4.0	6.1
옥수수	1.7	3.6	5.9
고추	0.9	2.2	3.9
배추	1.9	4.1	6.8
콩	0.4	0.8	1.2
땅콩	1.0	2.1	3.3

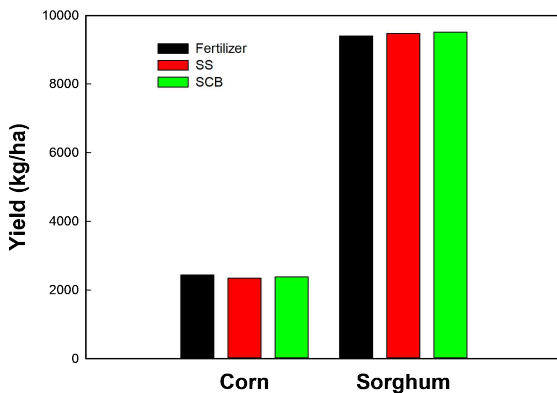
- 따라서 표준시비량보다 과량 사용되고 있는 30%의 질소 비료는 59,253 ton에 해당되며 이를 감축시킬 경우 38 kg/ha 의 국가단위 질소수지 개선효과가 있을 것으로 예측된다. 결과적으로 작물생산성 감소 위험과 농자재 산업 피해를 최소화하는 동시에 질소 수지개선 효과를 극대화하는 것은 현재의 표준시비량 준수율 향상 및 검정시비량 확대에 판단된다.

○ 인 수지 개선 방안

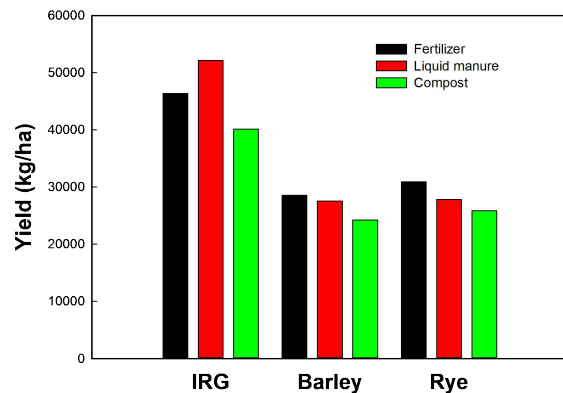
- 1980년 이후 우리나라 농경지 유효인산 집적은 매우 심각한 수준에 이르고 있다(표 21). 특히 밭 토양과 시설재배지 토양은 작물재배의 적정함량 약 500 mg/kg을 상회하고 있지만 1990년 이후 인산 표준시비량의 조절은 없었다. 따라서 농경지 양분 균형

조절을 위한 인산 시비량 재설정이 필요할 것으로 판단된다.

- 인 수지 개선에 성공한 벨기에, 덴마크, 네덜란드의 경우 농경지 전체 인산투입량에서 가축분뇨가 차지하는 비율이 약 80% 이상으로 높다. 현재 우리나라의 전체 인산투입량 중에서 가축분뇨가 차지하는 비율은 약 62%로서 무기질 인산 비료에 대한 가축분뇨 대체율 향상이 필요할 것으로 판단된다.
- 사료작물은 일반작물에 비해서 인산제거 효율이 대단히 높기 때문에(그림 2-11) 사료작물의 재배면적 확대는 경종방법에 있어 양분수지 개선효과가 매우 높을 것으로 예측된다. 하지만 사료작물은 일반작물에 비해서 표준시비량이 높은 단점을 가지고 있다. 옥수수, 수수, 이탈리아글라스와 같은 사료작물 생산시 표준시비량을 전량 가축분액비와 퇴비 사용시 무기질 비료 사용에 비해서 생산성 변화는 크지 않았으며 액비 사용은 봄 가뭄기 수분 공급에 의해서 무기질 비료에 비해 생산성이 높았다(그림 67, 68). 따라서 사료작물 재배시 인산 비료는 가축분 퇴·비로 대체하고 부족한 질소는 무기질 비료를 사용하는 새로운 재배방법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.



<그림 67> 논에서 가축분 액비 사용에 의한 사료작물 생산량



<그림 68> 논 이모작에서 가축분 퇴·액비 사용에 의한 사료작물 생산량

○ 교육·홍보를 통한 농민의 비료 적정사용 유도

- 우리나라 무기질 비료 사용량은 1990년대 대비 현재 큰 폭으로 감소하였다. 여기에는 과거와 달리 농민들이 적정 시비량 준수, 시비처방을 이용한 시비 등 무기질 비료에 대한 올바른 사용법을 준수하였기 때문으로 판단된다.
- 이는 농민을 대상으로 지속적인 무기질 비료 사용에 대한 교육 및 홍보에 따른 결과물이라고 판단되며, 많은 농민들이 적정한 무기질 비료 사용에 대해 긍정적으로 생각하고 적정 시비량을 준수하고자 노력하고 있다.

- 따라서 앞으로도 농민을 대상으로 한 무기질 비료 적정 사용에 대한 전문적인 교육 및 홍보를 지속적으로 실시하고, 비료 사용 절감 및 농가 소득(비료비 절감, 생산량 상승 등)과 관련한 실제 사례들을 홍보한다면 현재의 무기질 비료 사용량을 절감하는데 효과적일 것으로 판단된다.

○ 양분이용률 증대, 완효성비료 사용 확대

- 비료 사용량을 절감하기 위해서는 양분이용률을 높이는 것이 중요하다. 일반적으로 토양에 시용한 질소질 비료는 토양층에서 용탈, 휘산, 유실 등으로, 인산은 토양과 강하게 흡착하는 경향이 있어 비료 이용률이 감소하게 된다. Raun and Johnson(1999)에 따르면 곡물 생산에 이용되는 질소이용률은 33% 수준이며 나머지는 다양한 경로로 손실된다고 보고하였다. 따라서 비료 이용효율을 높일 수 있다면 무기질 비료 사용량을 절감할 수 있게 된다.
- 양분 이용률을 높이기 위해서는 생육시기에 맞춰 필요한 성분만 공급하는 방법, 양분 용탈 및 휘산을 줄이는 시비 방법, 완효성 비료 사용 등이 있다. 이 중 시비 방법에 따른 차이는 일반비료를 전층시비할 경우 질소이용률은 9.3%이나, 측조시비할 경우 32.5%까지 높일 수 있어 비료 사용을 줄일 수 있다.
- 또한, 속효성인 무기질 비료를 대신하여 양분 이용률이 높은 완효성 비료로 대체한다면 비료사용량을 크게 절감할 수 있다. 완효성 비료는 IBDU(Isobutylidene diurea), CDU(Crotonylidene diurea), UF(Urea formaldehydes), 코팅비료 등이 있다. IBDU와 CDU, UF는 모두 속효성인 비료 성분을 물에 잘 녹지 않는 지효성 성분으로 합성한 비료이며, 최근 사용량이 증가하고 있는 코팅비료는 비료의 용출을 지연시키기 위해 난용성 물질을 피복한 것이다.
- 코팅비료는 질소만 코팅되어있는 1세대 완효성비료(코팅율 25% 내외)부터, 질소와 칼리가 코팅되어있는 2세대 (코팅율 35% 내외), 그리고 질소, 인산, 칼리 모든 성분이 100% 코팅되어 있는 3세대로 구분되어 있다(표 40). 각 세대별 양분이용률은 코팅율에 따라 영향을 받는다. 질소는 58.1%~83.2%, 칼리는 32.5%~83.2%로서 3세대 100% 코팅 완효성비료 사용 시 가장 높은 이용률을 보인다.
- 완효성 비료에 사용되는 코팅물질은 광물질이나 폴리머 등 다양한 재료를 이용한 연구가 있었고, 폴리머를 이용한 코팅비료가 현재 많이 보급되고 있다. 또한, 최근 환경 친화적인 비료 생산을 위해 생분해성 폴리머나 친환경 물질을 이용하여 환경에 영향을 미치지 않는 코팅비료에 관한 연구도 이뤄지고 있다.

<표 40> 완효성비료 세대별 특징(Kaneta, 1995)

세대별	1세대	2세대	3세대	
코팅율	25% 내외	35% 내외	100%	
코팅성분	질소 코팅	질소, 칼리 코팅	질소, 인산, 칼리 코팅	
시비형태	축조	축조	축조	뿌리
질소이용률	58.1%	58.7%	77.7%	83.2%
칼리이용률	32.5%	43.1%		

- 완효성 비료는 양분 이용률을 높이는 효과로 인해 환경보전(수질오염 감소) 및 온실가스 저감에 기여할 수 있다. 일반비료 대비 양분 이용률이 높기 때문에 주변 수계로 유출되는 양분을 줄일 수 있어 하천으로 유입되는 오염량 감소가 가능하며, 일반비료 대비 수질오염을 약 15% 정도 감축하는 효과를 얻을 수 있다고 알려져 있다.
- 대기로 휘산되는 온실가스 발생량이 일반비료 대비 적으며, 3세대 100% all 코팅비료인 비료는 저탄소 녹색성장 기본법에 의거 녹색기술 및 녹색기술제품 인증된 완효성비료로서 ha당 235 kg 이산화탄소(CO₂) 감소효과가 있다고 알려져 있다.
- 완효성비료 이외에 기능성비료도 토양 내 양이온 용탈을 감소시켜 비료 이용 효율을 증가시키는 등의 기능성은 통해 일반비료대비 25% 감비효과 및 절약된 시비량을 통해 온실가스(N₂O) 발생량을 줄일 수 있다고 알려져 있다.
- 그러나 폴리머를 활용한 코팅비료가 시비 후 토양에 미세플라스틱 잔류하게 되어 환경에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다. 이 부분에 대해서는 아직 토양 중 미세플라스틱에 대한 연구가 미흡한 실정이며 토양 환경 및 수계로의 이동 등 코팅비료가 미치는 환경 영향에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.
- 이처럼 완효성·기능성 등 친환경비료는 질소이용률을 높혀 비료 사용량을 감소시킬 뿐 아니라 온실가스 발생량 감축과 수질오염 경감 효과를 기대할 수 있고, 고령화된 농촌사회에서 시비 노동력 절감 효과 등을 높일 수 있기 때문에 정부 차원의 정책적 지원을 한다면 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

2) 가축분뇨 처리 방법

○ 적정 사육 두수 설정

- 축산업계에서 가장 강력하게 양분수지를 조절하고자 한다면 유럽의 네덜란드와 같이 농가 면적당 적정 사육 두수를 설정하여 적극적인 가축분뇨 발생을 억제해야 한다고

생각한다. 하지만 축산업계의 반발 및 국내 축산업의 현실, 그리고 지속적인 육류 소비량 증가 등 현실적인 문제가 있어 실현 가능성은 매우 낮지만 가장 강력하며 효과적인 양분수지 방안은 가축두수를 적정수준으로 유지하는 것이 기본으로 이뤄져야 한다.

○ 사료작물 재배면적 확대

- 경종분야의 양분수지 개선 방안에서도 언급하였지만 사료작물 재배면적 확대가 양분수지 개선 및 축산산업보호에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단된다.
- 현재 양분수지 개선방법인 Land balance의 제거량에 사료작물을 통한 제거량이 포함되므로 사료작물 재배면적을 확대한다면 양분수지 개선 효과와 더불어 현재 수입에 의존하는 곡물 사료의 양을 줄여 곡물 자급률을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

○ 곡물사료 대체 작물 개발

- 축산업 생산비에서 곡물사료는 큰 비중으로 차지하고 있으나 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이에 곡물 사료를 대체할 수 있는 우리나라 실정에 맞는 사료작물을 개발하여 재배면적을 넓힌다면 사료작물 재배에 퇴액을 주로 사용하고 생산된 사료작물로 곡물사료를 대체해 곡물사료 자급률을 높일 수 있는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

○ 공공 처리 확충 및 가축분뇨 처리방식의 다각화

- 양분수지 개선을 위해서 제거량을 늘려야 하는데 현재의 계산 방법인 Land balance에서는 가축분뇨 중 정화방류, 해양배출 된 것은 제거량에 포함하고 있다. 표 40에 2006년부터 가축분뇨 발생량 및 처리현황을 정리하였다. 2012년부터 해양배출이 금지되었고, 전체 발생량 중 자원화 물량은 지속적으로 증가하고 정화방류량은 조금씩 감소하는 경향을 보여주고 있다.

- 이는 국가 정책이 가축분뇨 자원화 위주이기 때문이다. 2012년 환경부의 ‘가축분뇨 관리 선진화 대책’에서는 2020년까지 공공처리 시설을 100개소 신·증설하면서 자원화와 정화처리가 되도록 운영을 하도록 하였고, 2013년 농림축산식품부의 ‘가축분뇨관리 중장기 대책’에서도 2017년까지 150개소의 공동자원화 시설을 설치하면서 연간 450 만톤을 퇴·액비로 자원화하고자 하였다.

- 가축분뇨 발생량은 지속적으로 증가하고 있고 퇴·액비 비중도 늘려가는 상황에서 N/P 비율이 낮은 가축분 퇴·액비 활용은 제한적일 수 밖에 없는 실정이다.

- 우리와 유사한 농업 환경인 네덜란드와 벨기에, 덴마크, 일본의 가축분 처리 양상을 우리나라와 비교해보니 그림 69와 그림 70과 같이 우리나라만 유독 가축분뇨 질소와 인의 인출량 비율이 점차 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이는 표 41과 같이 정화방류 및 해양배출이 줄어들었기 때문이다. 양분수지를 크게 절감한 네덜란드와 벨기에는 가축분뇨 질소와 인의 인출량이 점차 증가하였는데 이를 통한 양분수지 개선 효과도 매우 컸을 것으로 판단된다.

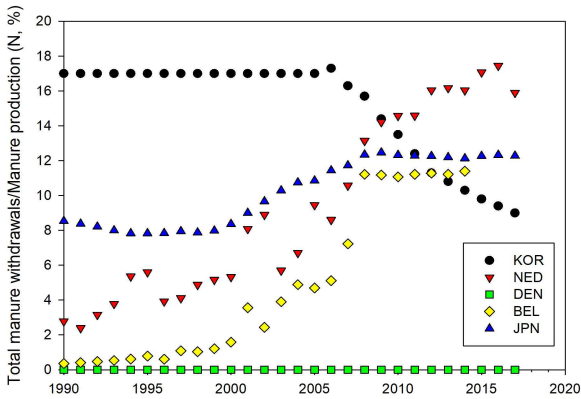
- 이에 우리나라도 양분수지 개선을 위해서라면 퇴·액비로의 양분보존형 자원화에서 정화처리 확대 및 연료자원화, 양분회수 등으로 가축분뇨 인출량을 늘릴 수 있는 방안들이 필요하다고 판단된다.

- 2017년 자료를 기준으로 공공처리(정화방류) 비율을 10% 상승시킨다는 가정하에 질소 수지는 212.2 kg/ha에서 194.9 kg/ha로 17.3 kg/ha 감소시킬 수 있으며, 인 수지는 45.9 kg/ha에서 41.9 kg/ha로 4.0 kg/ha 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

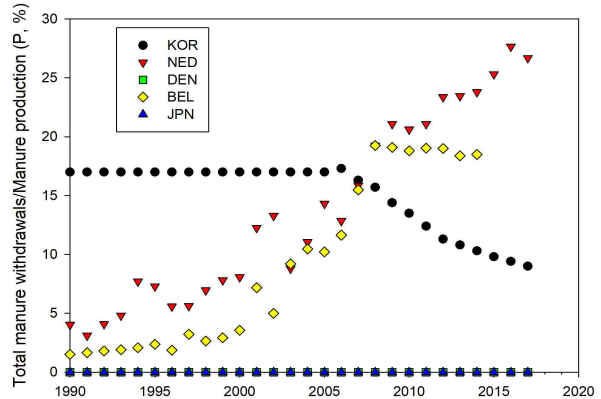
<표 41> 가축분뇨 발생량 및 처리현황(김 등, 2018a)

단위: 천 톤, %

연도	발생량	자원화 물량			정화방류		해양배출	기타
		소계	퇴비	액비	개별처리	공공처리		
2006	40,255 (100)	33,298 (82.7)	31,998 (79.5)	1,300 (3.2)	870 (2.2)	2,784 (6.9)	2,607 (6.5)	696 (1.7)
2007	41,417 (100)	34,656 (83.7)	32,862 (79.3)	1,794 (4.3)	894 (2.2)	2,871 (6.9)	2,019 (4.9)	977 (2.4)
2008	41,743 (100)	35,207 (84.3)	32,912 (78.8)	2,295 (5.5)	1,184 (2.8)	2,907 (7.0)	1,460 (3.5)	985 (2.4)
2009	43,703 (100)	37,396 (85.6)	34,742 (79.5)	2,654 (6.1)	1,199 (2.7)	2,973 (6.8)	1,171 (2.7)	964 (2.2)
2010	46,534 (100)	40,286 (86.6)	37,220 (80.0)	3,066 (6.6)	1,427 (3.1)	2,727 (5.9)	1,070 (2.3)	1,024 (2.2)
2011	42,685 (100)	37,396 (87.6)	34,393 (80.6)	3,003 (7.0)	1,527 (3.6)	2,057 (4.8)	767 (1.8)	938 (2.2)
2012	46,489 (100)	41,236 (88.7)	37,656 (81.0)	3,580 (7.7)	1,999 (4.3)	2,211 (4.8)	- 0	1,043 (2.2)
2013	47,235 (100)	42,129 (89.2)	38,132 (80.7)	3,997 (8.5)	1,552 (3.3)	2,510 (5.3)	- 0	1,043 (2.2)
2014	46,233 (100)	41,469 (89.7)	37,495 (81.1)	3,974 (8.6)	1,339 (2.9)	2,496 (5.4)	- 0	929 (2.0)
2015	46,530 (100)	41,991 (90.2)	37,244 (80.0)	4,747 (10.2)	1,064 (2.3)	2,997 (6.4)	- 0	478 (1.0)
2016	46,988 (100)	42,576 (90.6)	37,417 (79.6)	5,159 (11.0)	1,084 (2.3)	2,762 (5.9)	- 0	566 (1.2)
2017	48,460 (100)	44,104 (91.0)	38,848 (80.2)	5,256 (10.8)	1,095 (2.3)	2,762 (5.7)	- 0	499 (1.0)



<그림 69> 가축분으로 발생하는 질소 총량 대비 회수되는 가축분 질소 총량



<그림 70> 가축분으로 발생하는 인 총량 대비 회수되는 가축분 인 총량

○ 가축분 퇴비 사용량 증대를 위한 품질 관리 개선

- 다량으로 발생하는 가축분을 처리하기 가장 좋은 방법은 퇴비화하는 것이지만 현재 가축분 퇴비에 대한 품질관리 문제는 꾸준히 제기되고 있다.
- 이에 2020년부터 부숙포 기준을 적용하여 품질개선을 위해 노력하고 있으나 농가는 7만여개에 달하지만 부숙도 및 퇴비 분석을 위한 검사기관은 매우 부족한 실정이다. 여기에 부숙도 판정도 간이 키트인 콤팩(Comme-100)과 솔비타(Solvita) 측정법으로 하고 있는데 이 측정장비에 대한 정확성도 짚고 넘어가야 할 문제라고 판단된다.
- 축산업계 자체적으로 가축분퇴비에 대한 품질 개선 및 품질 인증을 통해 가축분퇴비에 대한 인식을 높일 필요가 있다.
- 개선 방안: 가축분뇨 액비의 고유가치반영, 부숙도기준 강화, 유용미생물 기준 설정, 양분(N, P, K) 함량 기준 완화

○ 가축분뇨 자원화 기술 개발

- 가축분뇨 자원화는 현재 대부분 퇴액비로의 전환에 그치고 있는 실정이다. 일부 바이오가스 및 자원화가 이뤄지고 있지만 전체 발생량 중 일부에 그치고 있다. 이에 다양한 방법으로 퇴액비보다 효율적인 자원화 전화 기술을 개발할 필요성이 있다.
- 가축분뇨 인 회수 기술: 양분 재이용
 - Struvite를 이용한 인 회수 공정을 농가에 설치하여 인 회수 효율을 분석한 결과용해성 인의 약 80~85% 정도를 회수할 수 있는 것으로 보고되었다(라 등, 2011)
- 퇴비화 과정에서 나오는 암모니아 휘산 발생량 감소 기술 개발

- 돈분뇨 퇴비화 실험을 통해 전체 질소 중 약 35-40%가 퇴비화 과정에서 암모니아로 휘산되는 것으로 나타났고, 공장규모의 퇴비화 공장에서 N/P 비율변화를 이용한 질소 손실량 추정시에도 약 40%의 질소가 공기 중으로 휘산되는 것을 확인하였다(이 등, 2008).
- 소규모로 퇴비화시 (NH₄)₂SO₄를 첨가했을 때 암모니아 휘산이 현저히 줄어들었고 퇴비 중의 인산도 비가용태로 바뀌었다. 가축분뇨 액비화 과정에서는 MgCl₂처리와 추가 인산 공급에 의해 암모니아휘산을 줄일 수 있었다(이 등, 2008).
- 가축분 Biochar 기술 개발
 - IPCC에서 탄소저감방안으로 승인한 Biochar의 원료로 가축분을 활용한다면 주요 이슈인 탄소중립 및 양분수지 개선에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.
 - 또한, Biochar는 그 자체로 토양 개량 및 오염저감 등 다양한 가치를 가지고 있기 때문에 현재 일부 실험실 연구단계인 가축분 Biochar에 대한 규모화가 가능하도록 지원이 이뤄져야 할 것으로 보인다.
- 가축분뇨 고체연료
 - ‘가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률’ 시행령 및 시행규칙 일부 개정을 통해 가축분뇨를 이용한 고체연료를 활용할 수 있도록 설정되었다. 점차 그 규모는 커져갈 것으로 예상되며 가축분뇨 고체연료는 신재생에너지에 포함돼 신재생에너지 공급의무화(Renewable Portfolio Standard, RPS) 의무이행을 위한 발전소 보조연료로 각광을 받을 수 있을 것으로 전망된다.

○ 가축분 퇴비 해외 수출 및 북한 지원

- 국내에서는 지속적으로 가축분 발생량이 증가하는 상황이며, 농경지에 투입하기에는 한계가 있다. 이에 가축분 퇴비를 해외로 수출하거나 북한에 지원하는 것도 양분수지를 개선하는 방법 중 하나이다.
- 2020년 7월 바래봉비료영농조합법인이 최초로 베트남으로 가축분 퇴비를 수출하였으며, 이후 전라북도 농업기술원도 베트남에 가축분 퇴비를 수출하기로 하였다. 기존 퇴비의 단점을 개선하여 수출이 가능하도록 제품을 개선하고 품질을 높인다면 국내에서 과다하게 생산되는 퇴비를 수출을 통해 처리 가능할 것으로 판단된다.
- 또한, 토양 양분이 절대적으로 부족한 북한에 원조를 하는 것도 하나의 방법이다. 우리나라는 양분이 그림 71과 같이 잉여 상태이기에 다량으로 발생하는 퇴비를 처리해야 하는 상황이고, 양분이 부족한 북한은 양분 문제 해결이 시급하기 때문에 대북제재

가 어느정도 완화된다면 무기질 비료보다는 우리나라에 과다 발생하는 가축분 퇴비를 원조한다면 양분수지 개선도 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

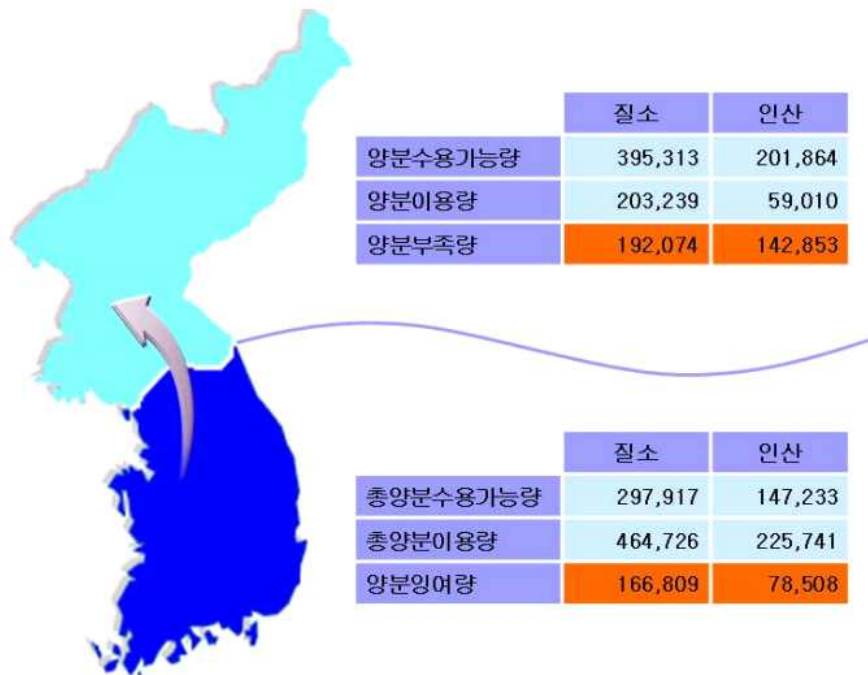


그림 71. 2005년 기준 남북한 농경지의 잉여 양분량 및 부족량 추정(김과 권, 2008)

○ 가축분뇨솔루션 연구 센터

- 현재 가축분뇨에 대한 문제점은 경종분야 뿐 아니라 축산, 환경 모두 관심을 가지고 해결을 위해 노력하고 있다. 그러나 모두 해당 분야에서만 연구가 이뤄지고 그 요소 기술들을 종합하여 시너지를 이뤄낼 종합 연구는 미흡한 실정이다.
- 이에 가칭 ‘가축분뇨솔루션 연구 센터’로 가축분뇨 처리, 자원화, 기후변화에 미치는 영향, 환경 보전에 미치는 영향 등 가축분뇨와 관련된 모든 분야를 아우르는 연구 센터를 출범시켜 국가차원에서 가축분뇨를 종합적으로 해결하고자 하는 노력을 보여야 할 것으로 생각한다.
- 또한, 현재까지 각자의 분야에서 성과를 이룬 부분들을 잘 조합하여 현실적으로 활용가능하고 보다 효율적인 기술을 개발할 수 있는 여건을 마련해줘야 한다고 판단한다.

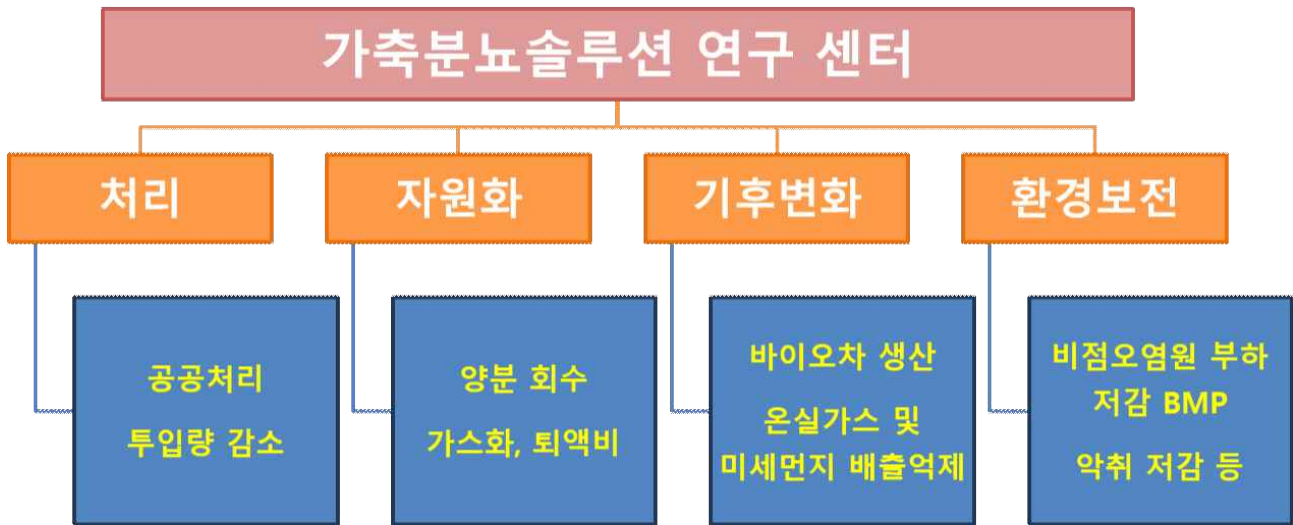


그림 72. 가축분뇨솔루션 연구 센터 추진체계

3) 제도 개선

○ 공익직불제와 연계한 비료 사용량 관리

- 기본형 공익직불제에서 비료 사용기준 준수에 해당하는 사항은 두 가지로 농경지 토양화학성분 기준 준수와 토양 검정 결과에 따라 처방한 비료량 기준을 준수하는 것이다.
- 여기에서 이뤄지는 토양검정 및 시비처방에 나아가 비료 구매, 비료 사용 등을 종합적으로 관리할 수 있는 시스템을 구축하여 공익직불제 준수사항을 잘 이행했을 때 인센티브를 지급한다면 무기질비료 사용량 절감 및 비료사용에 대한 체계적인 관리가 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다.
- 다만 현재 토양 검정은 농업기술센터에서 이뤄지고 있으며, 작년 기준 약 60만점을 분석하였다. 만일 공익직불제를 위해 농업경영체(약 800만개) 1개당 1점을 의뢰한다고 하면 연간 약 800만점의 토양을 분석해야 하며, 이모작 및 수확 전후 분석, 대규모 경영체의 다수 시료 분석 등 시료 숫자가 늘어나는 점을 감안하면 2배 이상 시료 숫자가 늘어날 것으로 판단된다.
- 따라서 현시점의 토양 검정 시스템으로는 전체 물량 소화가 불가능하다고 판단되고, 이를 위한 시스템 보완이 필요하다. 하지만 표 42에서와 같이 시행지침서에는 지방자치단체의 장이 토양검사결과에 따라 권장하는 비료량 기준이기 때문에 이는 농업기술센터의 결과만 가능하다는 것으로 해석이 된다. 따라서 개정(안)과 같이 농림부 지정

토양 분석기관을 추가한다면 농협, 국립대 토양분석센터, 농업 관련 회사 등 다양한 기관이 공익직불제를 위한 토양 분석에 참여가 가능할 것으로 보인다.

<표 42 기본형 공익직접지불사업 시행지침서 개정(안)>

현행	개정
<p>II. 자격요건 등 주요내용</p> <p>6. 공익직불 준수사항</p> <p>④ 비료 사용기준 준수(법 제12조제2호 및 시행령 제13조)</p> <p>△ 농촌진흥청장이 정하여 고시하는 농경지 토양 화학성분 기준을 준수할 것</p> <p>△ 지방자치단체의 장이 토양검사 결과에 따라 권장하는 비료량 기준을 준수할 것</p>	<p>II. 자격요건 등 주요내용</p> <p>6. 공익직불 준수사항</p> <p>④ 비료 사용기준 준수(법 제12조제2호 및 시행령 제13조)</p> <p>△ 농촌진흥청장이 정하여 고시하는 농경지 토양 화학성분 기준을 준수할 것</p> <p>△ 지방자치단체의 장 및 농림부 지정 토양 분석기관의 장이 토양검사 결과에 따라 권장하는 비료량 기준을 준수할 것</p>

- 국가 양분관리 포털 시스템 구축: 농과원-농협-농민 연계
 - 우리나라의 현재 양분관리 시스템은 시비처방(농과원), 비료 구매(농협)으로 구분되어 시스템이 구축되어 있다. 여기에 앞으로 직불제를 통한 농민의 database(비료사용량, 영농규모, 수확량, 재배 방법 등)가 추가될 예정이며, 농민 사용량에 대한 자료가 추가된다면 경종분야에서 농과원과 농협, 농민을 연계한 하나의 양분관리 포털 시스템 구축이 가능할 것으로 판단된다.
 - 이와 같은 하나로 구축된 시스템이 있다면 이를 바탕으로 지역별, 농가별 체계적인 양분관리가 가능하고, 양분관리에 따른 인센티브 및 규제, 크레딧 제도 등 양분관리에 대한 다양한 프로그램을 적용하여 국가 양분수지 개선에 큰 보탬이 될 것으로 보인다.
- 비료 산업 현실화
 - 통계청의 농가경제조사 자료에 따르면 농업경영비 중 비료비 비중은 2019년 6.23%이며, 이 중 무기질 비료는 2.51% 수준으로 매우 낮다. 이는 현재 우리나라의 무기질 비료 가격이 저렴하기 때문이며, 무기질 비료에 대한 가격 부담은 상대적으로 농민입장에서 적은 편이다.
 - 이렇게 무기질 비료에 대한 가격 부담이 상대적으로 적은 것은 90% 이상 농협을 통

해 유통되고 있고, 최저가 입찰 등을 통해 농민들에게 상대적으로 저렴한 가격으로 공급되고 있기 때문으로 추정된다.

- 하지만 최근 농민들도 저렴한 가격의 비료 수요에서 벗어나 기능성 및 고품질의 비료에 대한 관심이 증가하고 있고 무분별한 비료 사용에 대한 부정적인 인식이 늘어나고 있다. 또한 직불제 도입으로 비료 사용에 대한 준수사항을 지키기 위해 노력하고 있는 상황이다.
- 이러한 추세를 반영하여 기능성 및 고품질 비료에 대한 농업인의 관심을 고려 정부에서도 이에 대한 지원방안을 마련한다면 양분수지 개선, 농업인의 비료 사용절감 및 비료 산업발전도 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다.

제4장 요약 및 결론

- 우리나라의 농업현황을 분석한 결과 논을 중심으로 농경지 면적은 지속적으로 감소하는 추세이며, 단위면적당 작물 생산량은 일부 작물을 제외하고 크게 증가한 것으로 나타났다.
- 무기질 비료 사용량은 1992-1995년에 가장 많은 양을 사용하였고, 이후 표준시비량 개선, 양분관리 정책(보조금 폐지 등), 시비처방, 농민 인식 개선, 유기질 비료 사용 등으로 2010년까지 감소 추세를 보였고, 이후는 큰 변화가 없다.
- 가축사육두수는 1980년 이후 꾸준히 증가하고 있으며, 가축분뇨를 통한 양분 발생량도 2007년까지 가축 사육두수 증가에 비례하여 증가하다 2008년 새로운 배출원단위 적용에 의해 감소하였다. 가축분뇨를 통해서 배출되는 질소와 인은 2016-2019년 우리나라 전체 농경지에 필요한 무기질 질소(N) 및 인산(P_2O_5)질 비료 요구량 187 천톤 및 42.6 천톤을 초과하는 양이다. 따라서 가축분뇨로 배출되는 양분의 저감없이 무기질 비료사용량 감축만으로 양분수지 개선은 어려운 실정이다.
- 우리나라의 양분수지가 높은 것은 집약적인 농업이 이뤄지는 환경과 가축사육두수 증가에 따른 가축분뇨 발생량 증가, 농경지 면적 감소 등에 따라 OECD 국가 중 양분수지가 매우 높은 나라로 분류가 되고 있다. 이에 우리나라와 비슷한 농업환경인 주요 국가와 양분수지를 비교한 결과 네덜란드와 덴마크, 벨기에 등 유럽의 국가들은 90년대 대비 큰 폭으로 양분수지를 개선한 것으로 나타났다. 이는 적극적인 가축분뇨 발생에 대한 규제 및 양분관리 정책에 의한 것으로 판단된다.
- 현재 우리나라 밭 토양 및 시설재배지 토양은 국내·외 자료에서 제시한 경제적 수량에 요구되는 토양 유효인산 함량보다 높은 수준으로 나타났고, 이는 가축분퇴비 사용 증가에 의해 인산 집적 결과로 사료된다.
- 우리나라 포함 동아시아의 농업분야 온실가스(N_2O) 배출량은 다른 대륙에 비해 가장 높은 수준을 나타냈는데, 우리나라는 가축분 퇴비 사용량이 증가함에 따라 N_2O 배출량도 증가하는 것으로 나타났다 농업분야 암모니아(NH_3) 배출량은 벨기에, 덴마크, 네덜란드 각 국가의 총 NH_3 배출량보다 높은 것으로 나타났다. 비록 비료 사용 농경지 부분에서의 NH_3 배출량은 감소/유지 추세를 보이고 있지만 분뇨관리 부분의 NH_3 배출량은 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다.
- 따라서 비료 이용에 따른 경제적 수량 확보 및 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해

서는 효율적인 가축분뇨 관리정책이 마련되어야 한다.

- 국내외 토양 검정을 위한 분석방법은 국가별로 다양하였고, 일반 농경지에 대해 미량원소와 무기태 질소를 분석하지 않는 우리나라와 달리 미국 등 주요 농업선진국에서는 무기태 질소와 미량원소에 대해서도 분석 및 관리를 하고 있었다. 시비처방과 관련해서는 국외 주요 선진국 모두 경제적 수량에 요구되는 양분 적정 시비량을 산출하고, 이를 바탕으로 토양 중 양분 상태를 고려하여 시비처방이 이뤄지고 있다.
- 양분관리 정책에 대한 주요 선진국의 양분 관리 정책을 살펴보면 캐나다의 4R과 같이 최적관리기법으로 양분 손실을 줄이고자 모두 노력하고 있으며, 유럽은 EU의 질산염정책에 따라 가축두수 제한, 토양 양분 투입량 제한 등 다양한 규제 정책과 더불어 양분 통합관리 시스템을 구축해 체계적인 관리가 이뤄지도록 노력하고 있다. 이와 더불어 양분 회수 및 재이용에 대한 노력도 기울여 가축분을 통한 환경부하를 줄이고자 노력하는 중이다.
- 비료 적정 사용 및 양분수지 개선의 궁극적 목표는 환경보존에 의한 지구 생태계 보호이다. 하지만 과도한 규제는 식량안보 및 농축산업까지 영향을 줄 수 있기에 이를 모두 고려한 개선 방안이 필요하다. 또한, 무기질 비료 사용량은 최근까지 크게 감축시켰지만 가축 사육두수 증가, 농경지 면적 감소 등으로 양분수지 개선은 크게 효과를 거두지 못했다. 이에 비료 사용량 절감 뿐 아니라 가축분뇨 관리, 제도 개선 등 양분수지를 위한 다른 노력이 없다면 비료 사용 관리만으로 양분수지의 획기적인 개선을 어려울 것으로 판단된다.
- 양분수지 개선을 위한 방안은 크게 양분 유입량 감소, 제거량 증대, 경지면적 증대로 나눌 수 있으며, 이를 위한 전략으로 무기질 비료(경종), 가축분뇨(축산), 제도 개선으로 나누어 양분수지 개선 방안을 아래와 같이 제시하였다.
 - 무기질 비료: 교육·홍보를 통한 비료 적정사용 유도, 표준시비량 재설정, 무기질 비료 대비 가축분뇨 사용 확대, 비료 양분 이용율 향상(완효성비료)
 - 가축분뇨: 적정 사육 두수 설정, 사료작물 재배면적 확대, 곡물사료 대체 작물 개발, 가축분뇨 공공처리 확충 및 가축분뇨 처리방식 다각화, 가축분 퇴액비 품질 개선, 가축분뇨 자원화 기술 개발, 가축분 퇴비 해외 수출 및 북한 지원, 가축분뇨솔루션 연구센터
 - 제도 개선: 공익직불제와 연계한 비료 사용량 관리, 국가 양분관리 포털 시스템 구축 (농과원-농협-농민), 비료 산업 현실화

참고문헌

- 김명숙, 김석철, 박성진, 이창훈. 2018a. 국내 유통중인 가축분퇴비의 품질 특성. 유기물자원화. 26(4):21-29.
- 김명숙, 김석철, 윤순강, 박성진, 이창훈. 2018b. 국내 유통중인 유기질비료의 품질 특성. 유기물자원화. 26(1):21-28.
- 김현중, 박성진, 김태후, 강수진. 2018. 가축분뇨처리 사업군 심층평가. 한국농촌경제연구원.
- 농림통계연보. 1980-2007.
- 농림수산식품통계연보. 2008-2012.
- 농림축산식품통계연보. 2013-2019.
- 농촌진흥청. 2016. 논에서 벼와 조사료의 안정생산을 위한 가축분뇨 이용 농토양 관리 실증 연구.
- 농촌진흥청. 2011. 사료작물 및 초지에 대한 가축분뇨 퇴·액비 이용 기술개발.
- 농촌진흥청. 1999. 작물별 시비처방기준.
- 농촌진흥청. 2006. 작물별 시비처방기준.
- 농촌진흥청. 2010. 작물별 시비처방기준.
- 농촌진흥청. 2017. 작물별 시비처방기준.
- 농촌진흥청. 2019. 작물별 시비처방기준.
- 농촌진흥청. 2019. 가축분뇨 배출원단위 재산정 및 깔짚축사 유형별 분뇨 발생량 산정
- 농촌진흥청. 2009. 가축분뇨 발생량 및 주요성분 재설정
- 라창식, 이창민, 이현주, 이진의, 김미정, 유영호. 2012. 가축분뇨내 질소/인자원 회수 및 제어기술 실증연구. 농촌진흥청
- 박석두, 채광석. 2013, 농지전용의 원인과 영향에 관한 연구, 한국농촌경제연구원
- 이연, 윤홍배, 이용복. 2008. 가축분뇨자원화 과정에서의 암모니아 발생연구. 농촌진흥청.
- Baumgärtel, G. 1989. Phosphat-Düngerbedarf von Getreide und Zuckerrüben im Südniedersächsischen Lössgebiet. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 152: 447-452.
- Cadot, S., Bélanger, G., Ziadi, N., Moreau, C., Sinaj, S. 2018. Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 112:417-433.

- Clark, M., Tilman, D. 2017. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environ. Res. Lett.* 12:064016.
- Grizzetti, B., Bouraoui, F., Billen, G., van Grinsven, H., Cardoso, A.C., Thieu, V., Garnier, J., Curtis, C., Howarth, R., Johnes, P. 2011. Nitrogen as a threat to European water quality. In: Sutton, M., Howard, C., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., van Grinsven, H., Grennfelt, P., Grizzetti, B.(Eds.), *European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 379-404.
- Hergert, G.W., Pam, W.L., Herggins, D.R., Grove, J.H., Heck, T.R. 1997. Adequacy of Current Fertilizer Recommendations for Site/Specific Management. In *The Site-Specific Management for Agricultural Systems*. pp. 283-300. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Howard, A.E. 2006. Agronomic thresholds for soil phosphorus in Alberta: A review. 42 pp. In *Alberta Soil Phosphorus Limits Project. Volume 5: Background information and reviews*. Alberta Agriculture, Food and Rural Development, Lethbridge, Alberta, Canada.
- Johnston, A.E., Lane, P.W., Mattingly, G.E.C., Poulton, P.R. 1986. Effects of soil and fertilizer P on yields of potatoes, sugar beet, barley and winter wheat on a sandy clay loam soil at Saxmundham, Suffolk. *J. Agric. Sci. Cambridge*. 106: 155-167.
- Kansas State University. 2003. Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations, MF-2586. <https://www.agronomy.k-state.edu/services/soiltesting/fertilizer-recommendations/index.html>.
- Lee, J.H., Choi, B.R., Cho, G.G., Jang, E.K., Kim, Y.R., Ji, J.H., Na, H.S., Lee, S.E., Ku, H.H. 2020. Effect of controlled-release coated fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in a red pepper cultivated field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):519-527.
- Leip, A., Achermann, B., Billen, G., Bleeker, A., Bouwman, L., de Vries, W., Dragosits, U., Döring, U., Fernall, D., Geupel, M., Johnes, P., Le Gall, A.C., Monni, S., Nevececal, R., Orlandini, L., Prud'homme, M., Reuter, H., Simpson, D., Seufert, G., Spranger, T., Sutton, M., van Aardenne, J., Voss, M., Winiwarter, W, 2011. Integrating nitrogen fluxes at the European scale. In: Sutton, M., Howard, C., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., van Grinsven, H., Grennfelt, P., Grizzetti, B.(Eds.), *European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 345-376.
- Mallarino, A.P. Blackmer, A.M. 1992. Comparison of methods for determining critical

concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agronomy J.* 84: 850-856.

- McCollum, R.E. 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30 year trends on a Typic umprabult. *Agron. J.* 83: 77-85.
- Nawara, S., Van Dael, T., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., McGrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Lobermann, B., Borjesson, G., Goos, P., Akkermans, W., Smolders, E. 2017. A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *Eur. J. Soil Sci.* 68:873-885.
- Neeteson, J.J. 1989. Assessment of fertilizer nitrogen requirement of potatoes and sugar beet (Doctoral dissertation, Neeteson).
- OECD. Sata, <https://stats.oecd.org/>
- Parris, K. 2011. Impact of Agriculture on Water Pollution in OECD Countries: Recent Trends and Future Prospects. *Int. J. Water Resour. Dev.* 27(1):33-52.
- Raun, W.R. and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91:357-362.
- Sibbesen, E. Sharpley, A.N. 1997. Setting and justifying upper critical limits phosphorus in soils. Pages 151-176 in H. Tunney, O.C. Carton, P.C. Brookes and A.E. Johnston (eds.). Phosphorus loss from soil to water. CAB International. New York, New York.
- Six, L., Smolders, E., Merckx, R. 2013. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils—maize and rice responses to P application. *Plant Soil* 366:49-66.
- South Dakota State University. 2005. Fertilizer Recommendations Guide, EC750.
- Tian, H., Xu, R., Canadell, J.G. et al. 2020. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586:248-256.
- van der Paauw, F. 1977. Die stellung der P-Wassermethode zur Erfassung des P-Angebotes des Bodens. *Landwirtschaftliche Forschung.* 34(2):109-120.
- Webb, J.R., Mallarino, A.P., Blackmer, A.M. 1992. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* 5:148-152.
- Whitney, D.A., Cope, J.T., Welch, L.F. 1985. Prescribing soil and crop nutrient needs. Pages. 25-52 in O.P. Engelstad (ed.) Fertilizer technology and use. 3rd edition. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Yang, W.S., Kang, S.S., Kim, K.I., Hong, S.D. 2006. Comparison of determination methods

for available-P in soil of plastic film house. Korean J. Soil Sci. Fert. 39(3):163-172.