

시설원에 운영이 금강수계 수질오염 부하에 미치는 영향 평가

오우현^{*,**}, 손진관^{***}, 윤성욱^{*}, 김현우^{**}, 임류갑^{****}

^{*}농촌진흥청 국립농업과학원

^{**}전북대학교 환경공학과

^{***}현대농기계 기업부설연구소

^{****}순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

e-mail:son007005@naver.com

Impact of Protected Horticulture on Water Quality Load in the Geum River Basin

Woohyun Oh^{*,**}, Jinkwan Son^{***}, Sungwook Yun^{*}, Hyunwoo Kim^{**}, Ryugap Lim^{****}

^{*}Agricultural Researcher, National Institute of Agricultural Science, RDA

^{**}Dept. of Environmental engineering, Jeonbuk National Univ., Jeonju, Korea

^{***}Hyundai Agricultural Machinery R&D Institute, Iksan, Korea

^{****}Dept. of Convergence Bio-Systems Mechanical Engineering, Sunchon Univ., Sunchon, Korea

요약

한국의 시설원예 산업은 계속해서 확장하고 있고 그 중 수경재배 방식은 증가하는 추세로 폐양액 관리 필요성이 확대되고 있다. 본 연구는 금강유역에 미치는 수경재배 운영 시 배출되는 폐양액의 양을 판단하고 대응방안을 수립하고자 하였다. 금강수계 전체를 대상으로 평가하기 위해 농림축산식품부와 농림수산물품질관리원으로부터 제작한 현황을 반영한 농경지 전자지도인 판매품 공간정보(SHP)에서 제공하는 시설원예 피복도 GIS를 통해 금강수계에 중첩하고 지류별 면적을 표와 같이 구분하였다. 금강수계 전체의 시설원예 면적은 약 14,565ha로 국내 시설원예 약 54,844ha 대비 26.6% 이상이 분포하는 것으로 분석된다. 이 면적은 국내 분포 면적의 1/4 이상으로, 유역 중심 평가 시 국내 주요강 유역 중에서 가장 큰 분포로 예상된다. 금강유역 전체 중 가장 높은 집중분포 지역은 금강중류 지역과 논산천, 금강하구인 부근으로 금강유역 전체 중 약 35.9%의 비율로 구분된다. 이 지역은 방울토마토, 딸기, 오이 등이 집중적으로 분포하는 주산단지가 밀집하고 있다. 충남 부여군 세도면 토마토 주산단지 290농가 조사 결과, 재배작물은 토마토(방울토마토 포함)가 226농가, 충남 천안시 목천읍 오이 주산단지의 174농가 중 오이가 103농가로 가장 많은 비율로 분석되었다. 부여 세도면은 전체 290 농가 중 “토경”재배가 266농가 92%, 천안 목천읍은 226 농가 중 154농가 89%가 토경의 비율이 우세하여 약 10% 정도의 수경재배 비율이 확인되고 있다. 작물별 배출되는 폐양액의 농도는 선행연구 결과에 근거하고 면적은 금강수계 시설면적에 대입하여 배출되는 폐양액의 부하량을 평가하고자 하였다. 이러한 연구 결과를 활용하여 금강수계 관리가 필요한 영농시설의 배출부하량을 산정하여 폐양액의 적정 관리방안 마련의 필요성을 제시하고자 한다. 더불어 시설원예 주산단지에서 수경재배를 통해 배출되는 처리가 필요한 폐양액의 수처리 용량 산정하고 오염물질 배출 저감 시설 설치를 제안하고자 한다. 이러한 폐양액에 대한 연구는 수질오염 물질 배출 저감 등 지속가능한 농업에 기여할 수 있다고 기대한다.

1. 서론

한국의 시설원예 산업은 비닐하우스 및 유리온실을 이용한 보온을 통해 겨울철에도 다양한 채소와 과일 등을 재배할 수 있게 되었고[1, 2, 3], 많은 농가소득을 창출하여 ‘백색혁명’으로 평가받아왔다[2, 3], 이러한 시설원예가 차지하는 농가소득 비중은 원예산업의 40% 이상으로 면적에서는 세계 3위권으로 농업 소득 전체에서 차지하는 비중 또한 크게 자리 잡고 있다[1, 4, 5, 6]. 시설원예 농업은 연중생산, 자동화, 단시간 생산, 노동력 절감, 고소득 창출 등 여러 장점으로 인해 면적이 계속해서 증가하는 추세이다[4, 7, 8].

하지만 대규모 시설원예단지 조성은 급격한 토지이용 변경, 지하수 고갈, 폐기물 방치, 비점오염 배출 등 여러 가지 환경적, 생태적 문제점이 보고되고 있다[9, 10, 11, 12, 13, 14]. 시설원예와 관련된 최신의 연구들은 농작물 생산에 초점이 이루어져 있어

친환경, 생태적 온실단지 조성에 대한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

Son et al.(2017) 연구에서는 시설원예단지 조성 시 고려해야 할 환경생태적 기능에 대해 12를 제시하였고 그중 가장 필요성이 크게 언급된 분야는 양액(수경)재배 시 폐양액 배출로 인한 수질오염이 가장 시급하고 중요한 대책 분야로 평가되었다.

따라서 본 연구에서는 금강유역 시설원예로부터 배출되는 영양물질이 하천환경 기준으로 어느 정도의 부하이며, 이것이 하천에 미치는 영향에 대해 분석을 실시하고 향후 추가적인 연구를 통해 수질정화 부하에 필요한 경제적 비용을 평가하고자 진행되었다.

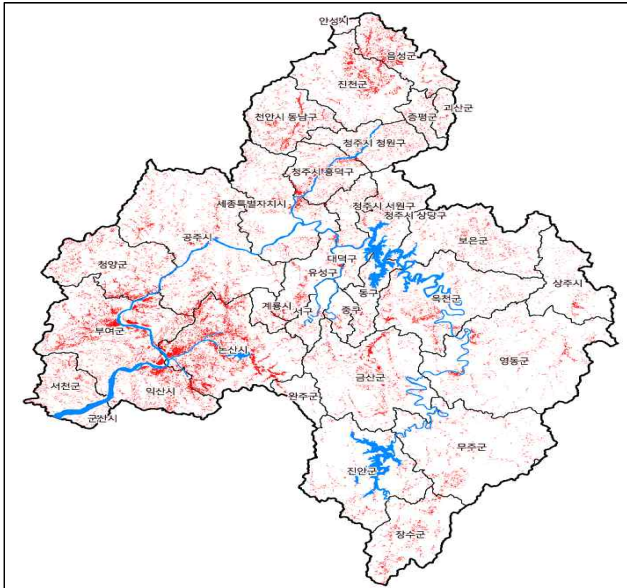
본 연구를 통해 지속가능한 농업을 위한 시설원예의 개선점과 향후 친환경적 시설원예단지 조성 시 수질정화 시설의 투입 필요성과 당위성, 경제적 산출 근거의 기초자료로 활용할 수 있다고 판단하였다.

2. 대상유역선정 및 자료조사

금강의 유역면적은 9,835.3km²로 낙동강과 한강을 이어 국내에서 3번째로 큰 규모를 가지고 있다[15]. 금강 상류구간에 위치하고 있는 대청댐과 용담댐은 각각 1980년과 2001년에 완공되었다. 이에 따라 금강 상류구간의 물 흐름은 인위적으로 조절할 수 있는 특성을 가지게 되었다[15]. 더불어 금강 상류구간은 대부분 사람과 인접하고 있어 생태계 연결성이 우수하고 다양한 서식처가 조성되어 있다[16, 17, 18].

재배유형별 구분으로는 2022년 기준 조사 결과는 토경재배가 49,491ha로 90.23%이며, 양액재배는 5,316ha로 9.69%의 분포로 조사되었다.

[그림 1] 금강유역 내 시설하우스 분포지도



금강수계 전체를 대상으로 평가하기 위해 농림축산식품부와 농림수산물교육문화정보원에서 제작한 현장을 반영한 농경지 전자지도인 팜맵 공간정보(SHP)에서 제공하는 시설원에 피복도 GIS를 통해 금강수계에 중첩하고 지류별 면적을 표와 같이 구분하였다.

또한 작물별 양액 배출수 특성 평가를 위해 시험구를 딸기와 토마토 수경재배 하우스에서 각각 설정하였다. 각 시험구는 관행적 양액재배 방식(NFT)을 적용하였으며, 배액 채수 시작일(0일)부터 채수한 배액의 경과일(21일)까지 매일 배액을 채수하였다.

측정 항목은 전기전도도(EC), 총질소(T-N), 총인(T-P) 측정 방법은 EC는 휴대용 전도도계로 현장 측정하였고, T-N과 T-P는 「수질오염공정시험기준」에 따라 실험실 분석을 실시하였으며, 데이터 처리는 시험기간 동안의 변화 양상을 [그림 2]와 [그림 3]에 각각 제시하여 시간적 부하 증가 패턴을 비교하였다.

연구대상지 선정은 대상 유역 전체의 수경재배 부하량을 평가하기 위해 그림과 같이 금강유역 전체에 시설원에 분포 도면을

중첩하여 제시하였으며, 조사를 통해 작물별, 지역별 수경재배 분포정도를 파악하여 금강에 미치는 수경재배에 의한 부하량을 평가하고자 한다.

[표 1] 금강유역 시설재배농가(온실재배) 현황 (20~21년도)

구분	개소			면적(ha)		
	농경지	시설	비율(%)	농경지	시설	비율(%)
미호강	269,893.0	28,693.0	10.6	38,293.5	2,875.7	7.5
대청댐하류	19,491.0	1,613.0	8.3	2,166.2	84.6	3.9
대청댐	62,674.0	7,249.0	11.6	5,917.9	438.8	7.4
보청원	61,314.0	4,437.0	7.2	8,968.7	240.5	2.7
대청댐상류	15,038.0	1,768.0	11.8	1,840.6	205.4	11.2
영동원	69,078.0	6,423.0	9.3	8,374.4	470.0	5.6
호강	56,604.0	3,263.0	5.8	8,210.8	322.3	3.9
용담댐하류	8,371.0	842.0	10.1	790.3	18.6	2.4
무주남대원	25,510.0	2,643.0	10.4	2,692.0	58.4	2.2
용담댐	82,861.0	8,592.0	10.4	8,987.3	353.9	3.9
금강공주	250,345.0	32,808.0	13.1	32,737.7	5,372.8	16.4
갈천	76,918.0	8,048.0	10.5	4,943.8	377.0	7.6
논산원	122,743.0	18,403.0	15.0	19,269.8	2,729.2	14.2
금강하구언	108,825.0	10,823.0	9.9	19,366.7	1,018.1	5.3
합계 (금강유역)	1,229,665.0	135,605.0	11.0	162,559.7	14,565.4	9.0

* 자료출처 : 농림축산식품부와 농림수산물교육문화정보원에서 제작한 현장을 반영한 농경지 전자지도인 팜맵 공간정보(SHP) 제공 - 「공공데이터포털」



[폐양액 배출구의 발생 녹조류]



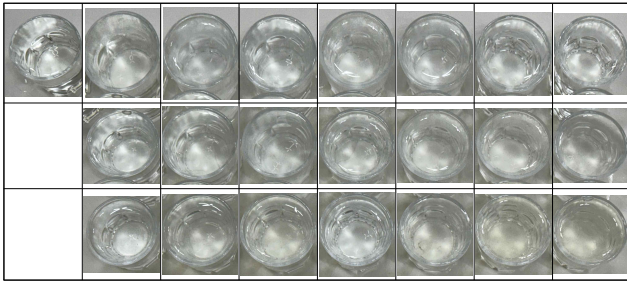
[하천 및 수로의 발생 녹조류]

3. 결과 및 고찰

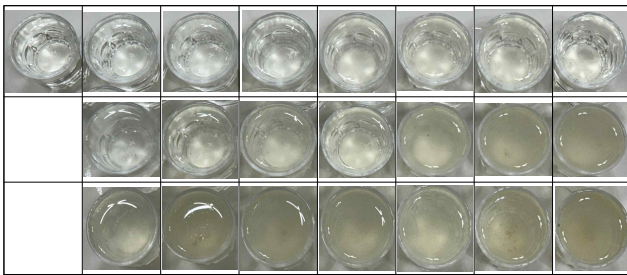
본 연구에서는 농림축산식품부 및 농림수산물교육문화정보원에서 제공한 팜맵 공간정보(SHP)를 활용하여 금강수계 내 시설원에 재배 면적을 정량화하고, 기존 연구에서 제시된 작물별 배출수질 특성을 결합하여 폐양액의 부하량을 산정하였다. 분석 결과, 금강유역 전체 시설하우스 면적은 약 14,565ha로 국내 시설온실 총면적(약 54,844ha)의 26.6%를 차지하였으며, 이는 국내 주요 하천 유역 중에서도 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 확인되었다. 특히 금강공주·논산천·금강하구언 부근이 전체의 35.9%를 점유하며 시설원에 집적도가 높게 나타났다.

작물별 재배 현황을 살펴보면, 충남 부여군 세도면의 토마토(방울토마토 포함) 재배 농가는 290호 중 226호(78%)였으며, 충남 천안시 목천읍의 오이 재배 농가는 174호 중 103호(59%)로 분석되었다. 두 지역 모두 토경재배가 우세하여 부여 세도면은 전체 농가 중 92%, 천안 목천읍은 89%가 토경재배를 유지하고 있었으며, 양액재배 비율은 약 10% 내외로 파악되었다.

[그림 2] + 배액 채수 시작일(0일) ~ + 경과일(21일) 까지
딸기 배액 변화 양상



[그림 3] + 배액 채수 시작일(0일) ~ + 경과일(21일) 까지
토마토 배액 변화 양상



폐양액 부하량 평가를 위해 선행연구에서 보고된 작물별 평균 배출수질 농도를 활용하였다. 토마토 및 딸기 양액재배에서 배출되는 배액의 전기전도도(EC), 질소(T-N), 인(T-P) 농도는 배액 채수 시작일(+0일)부터 채수한 배액의 경과일(+21일)까지 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며(그림 2, 그림 3 참조), 이는 재배 후반부에 영양분 축적과 과다 시비로 인한 배출수질 악화가 가능성을 시사한다. 특히 토마토 배액의 T-N과 T-P 농도는 초기 대비 최대 2~3배까지 상승하여 수계에 부하를 유발할 잠재력이 높았다.

또한, 시간별 배액 특성을 보면 [그림 2]의 딸기 시험구에서는 EC, T-N, T-P가 배액 채수 시작일(0일) 대비 경과일(21일)까지 완만하게 상승하였다. 특히 EC는 안정적인 증가세를 보였고, T-N과 T-P는 재배 후반부에도 비교적 일정한 범위에서 변화하여 배출수질이 급격히 악화되지 않았다. 반면 [그림 3]의 토마토 시험구에서는 14~21일차에 T-N과 T-P 농도가 급격히 증가하였으며, 초기 대비 최대 2~3배까지 상승하는 고농도 배출이 확인되었다. 이는 토마토 재배가 딸기에 비해 질소·인 부하 잠재력이 현저히 크고, 재배 후반부 집중 배출이 발생할 가능성을 시사한다.

수질오염 및 생태계 영향은 하천·수로 현장조사에서 시설원에 인근 수계에 국지적 녹조류 발생이 확인되었으며, 이는 토마토 시험구에서 나타난 후반부 질소·인 급증 패턴과 밀접하게 연관된 것으로 판단된다. 딸기 시험구처럼 상대적으로 완만한 배출 패턴은 하천 생태계 영향이 제한적일 수 있으나, 토마토 시험구와 같이 급격한 부하 증가는 유역 내 비점오염 및 부영양화 가속을 유발할 가능성이 높다.

연구적 의의와 한계는 본 연구는 GIS 기반 면적 데이터와 시험구 실측 자료를 결합하여 작물별·시간별 부하 특성을 정량화한 점에서 의의가 있다. 다만, 시험구 규모가 제한적이며 계절별·작형별 변동성 반영에 한계가 있어 향후 장기 모니터링이 필요하다.

4. 결론 및 제언

본 연구를 통해 금강수계 내 시설원에 활동이 지역 수질환경에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫 번째, 금강수계 시설원에 집중도로 금강유역 전체 시설하우스 면적은 약 14,565 ha로 국내 전체의 26.6%를 차지하였으며, 금강공주·논산천·금강하구언 부근에 전체의 35.9%가 집중 분포하였다. 이들 지역은 수질오염 잠재성이 높은 관리 우선지역으로 판단된다.

두 번째, 양액재배의 부하 기여로 주요 시설작물(토마토, 딸기 등)의 양액재배 면적은 전체의 약 10% 수준으로 비교적 적지만, 단위 면적당 질소·인 배출 농도가 높아 수질 부하 기여도가 크다. 특히 재배 후반부(수확기)에 배액의 T-N, T-P 농도가 최대 2~3배 상승하는 경향을 보였다.

세 번째, 비점오염 및 녹조 발생 연계성으로 하천·수로에서 녹조 발생이 관찰되었으며, 이는 시설원에 배출수의 질소·인 농도와 직결되는 것으로 추정된다. 이는 기존의 비점오염 문제와 동일한 맥락에서 수질 관리 대책의 필요성을 강조한다.

이에 따라 다음과 같은 정책적·기술적 제언을 하고자 한다.

첫 번째, 양액배출수 집수·처리 시스템 구축으로 양액재배 단지별로 집수조를 설치하고, 간이 수처리시설(질소·인 제거)이 포함된 폐양액 집수·처리 모델을 도입할 필요가 있다.

두 번째, GIS 기반 부하 모니터링 체계 구축으로 본 연구에서 활용한 GIS 기반 시설원에 분포도와 작물별 배출 특성을 연계하여 유역 단위 오염부하 예측 및 관리시스템을 구축하면 효과적일 것이다.

세 번째, 정책적 유인 제공으로 친환경 양액순환시스템 도입을 위한 보조금 및 세제 혜택 제공, 폐양액 관리 의무화 및 규제 강화가 필요하다.

네 번째, 장기 모니터링 및 계절별 실측 데이터 확보로 계절·작형 변화에 따른 부하량 변화를 반영하기 위해 장기 실측 기반 데이터베이스 구축이 요구된다.

본 연구는 금강수계와 같은 대규모 유역에서 시설원예로 인한 수질부하를 정량화하고 관리 대책을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 향후 경제성 분석을 포함한 수질정화 비용 산정 연구와 친환경 시설원에 단지 설계 지침 마련을 통해 지속가능한 농업 발전과 하천 수질 보전을 동시에 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Ko, D.K., Kwon, J.K. and Lee, E.H., 2013, Starting and development of the horticulture industry, Korea. Korean society for Horticultural Science, Separate, 458-489.
- [2] Son, J.; Kong, M.; Choi, D.; Kang, D.; Park M.; Yun S.; Lee, S.; Lee, S.; A Characteristics and Improvement of Thermal Envi-ronment in Summer of Protected Horticulture Complex Using CFD Simulation. J. Korean Soc. Rural. Plan. 2018, 24, 73-86.
- [3] Son, J.; Kong, M.; Choi, D.; Kang, D.; Park, M.; Yun, S.; Lee, S.; Lee, S. The Maximum Temperature Distribution and Im-provement Plan of Protected Horticulture Planning Area in Saemanguem Using CFD Simulation. J. Korean Soc. Rural Plan. 2019, 25, 115-128.
- [4] Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017, 2016 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance.
- [5] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017, The organic law about agriculture, farming village & food industry.
- [6] Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2014, 2013 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance.
- [7] Jeoung, J.H., and S.K. Park., 2003, Calculation of Pumping Rate Considering the Change of Groundwater Level, KCID Journal, 10(1), 64-72.
- [8] Malhotra, Suresh K. "Water soluble fertilizers in horticultural crops-An appraisal." Indian Journal of Agricultural Sciences 86.10 (2016): 1245-56.
- [9] Wang, Y.L., Fan, P., Kim, D.B. and K.S. So., 2009, A Study on the Problems and Countermeasures of Environmental Pollution Caused by China's Rural Development : Enlightened from the Semaul movement in Korea, The Korean Journal of Local Government & Administration Studies, 23(1), 159-178.
- [10] Heo, J., Moon, S.C. and Song, M.R., 2001, A Study on the Problem of Rural Sohld Waste in Korea, ECO. 1, 92-121.
- [11] Ministry of Environment (MOE), 2012b, Research on appropriate management of rural waste.
- [12] Son, JK, Kong, MJ, Kang, DH, Park, MJ, Yun, SW and Lee, SY., 2016a, The Change Analysis of Plant Diversity in Protected Horticulture of Agricultural Ecosystems, Journal of Wetlands Research, 18(2), 173-182.
- [13] Son, JK, Kong, MJ, Kang, DH, Kang, BH, Yun, SW and Lee, SY., 2016b, The Comparative Studies on the Terrestrial Insect Diversity in Protected Horticulture Complex and Paddy Wetland, Journal of Wetlands Research, 18(4), 395-402.
- [14] Kong, M.J., Lee, S.Y., Kang, D.H., Park, M.J., Yun, S.W., Shin, J.H., and J.K. Son., 2017, A Study on the Image Evaluation for the Improvement of the Landscape of Horticultural Complex in Rural Area, Protected horticulture and plant factory, 26(2), 78-86.
- [15] Son, S.H. and J.Y. Choi(2021) Influence of environmental characteristics on the community structure of benthic macroinvertebrates in stream-type waterways constructed at upper reaches of Guem River. Korean Journal of Ecology and Environment 54(1): 24-38.
- [16] Hur, J.W., D.S. In, M.H. Jang, H. Kang and K.H. Kang(2011) Assessment of inhabitation and species diversity of fish to substrate size in the Geum River basin. Journal of Environmental Impact Assessment 20(6): 845-856.
- [17] Yang, S.G., Y.C. Cho, H. Yang and E.J. Kang(2012) Characteristics of fish fauna and community structure in Yongdam reservoir by inhabiting environment changes. Korean Journal of Environmental Biology 30(1): 15-25.
- [18] Kwak, I.S., D.S. Lee, C. Hong and Y.S. Park(2018) Distribution patterns of benthic macroinvertebrates in streams of Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 51(1): 60-70.