



미국 일리노이주 옥수수 재배 농경지 내 암거배수 시설 설계에 따른 배수량 및 질산성질소 배출 평가

Assessment of Drainage Discharge and Nitrate-Nitrogen Loads According to Subsurface Drainage Design in Corn Cultivated Agricultural Land in Illinois, USA

황순호^{a,†} · 정한석^b · 바타라이 라빈^c

Hwang, Soonho · Jeong, Hanseok · Bhattarai, Rabin

ABSTRACT

Subsurface drainage improves crop productivity in poorly drained soils but may also substantially contribute impairment of surface water quality due to excess leaching losses of nutrients like Nitrate-Nitrogen (NO₃-N). This research presents preliminary findings from a 3-years tile depth and spacing study in Illinois state that includes three drain spacings implemented in 2 plots. We found that the plot with the narrower subsurface drainage (Case 1) exported more drainage water compared to the plot with the narrower subsurface drainage system (Case 2). The total drainage water from Case 1 plot showed 57% more compared to Case 2 plot. Whereas we observed that the plot with narrower drain spacing (Case 1) exported only 9% more NO₃-N leaching losses compared to the wider plot (Case 2). The average corn yield was observed higher in plot Case 1 compared to Case 2. Especially, we observed about 7% higher corn yield in plot Case 1 compared to Case 2 plot in the relatively dried year (2022). The preliminary findings for this study suggest that subsurface drainage systems can be optimized to reduce nutrient losses while improving the crop productivity.

Keywords: Subsurface drainage water; nitrogen; subsurface drainage design; best management practice

1. 서론

암거배수 (artificial subsurface drainage 혹은 tile drainage)는 미국 일리노이주를 포함하는 미국 중서부 지역에서 배수가 잘되지 않는 토양의 생산성을 향상시키기 위해 적용하는 중요한 농공학적 공법이라 할 수 있다 (Kalita et al., 2007). 1800년대부터 적용되기 시작한 암거배수공법은 배수가 잘되지 않는 토양 내 지표하수위 (혹은 지하수위, water table)의 높이를 조절하기 위해 도입되었으며, 암거배수관은 토양 내 잉여 수량을 효과적으로 제거하기 위한 경로로 활용된다 (Bhattarai et al., 2009). 궁극적으로 암거배수공법은 배수 기능 향상을 통해, 높은 지표하수위가 작물 뿌리 성장에 방해가 되지 않게

돕고, 작물의 생산성 향상을 도모하기 위해 적용하게 된다 (Skaggs, 1982).

암거배수공법은 전세계적으로 오랫동안 작물생산성 향상에 큰 도움이 되어 왔고, 영농인들에게 많은 이익을 가져다 주었으나, 암거배수공법의 특징으로 인해 하천, 호소 등의 지표수에 과도한 영양물질을 공급하는 주요한 원인으로 지목되고 있다 (Rabalais et al., 2019; Blann et al., 2009; Rabalais and Turner, 2019). 암거배수의 부정적 효과를 유발하는 주된 이유는 암거배수는 지표하 (subsurface)에 침투한 물을 신속하게 배수하고, 신속하게 배수된 물속 영양물질들의 하류 수질에 대한 영향력이 더 크게 작용하기 때문이다. 즉, 암거배수 시스템은 영양물질이 다량 함유한 물을 토양 내 흐름 속에 충분히 노출시키지 않고, 하류 수체로 빠르게 전달하는 우선적인 경로로 역할을 한다 (Fausey et al., 1995). 이러한 암거배수 시스템의 수질에 대한 부정적인 영향에도 불구하고, 미국 중서부 내 암거배수 설치는 작물생산량 증가와 기후변화에 대응하기 위한 측면으로 증가하고 있는 추세이다 (Sloan et al., 2016).

우리나라는 농경지가 주로 논으로서, 배수가 불량한 것이 오히려 벼 재배에 유리한 측면이 있다. 단, 국내에서도 암거배수 시스템을 주로 활용하고 있는 농경지가 있는데 바로 간척 농경지이다. 간척농경지의 경우, 지리적으로 경사가 거의 없고, 토양이 불량하여 작물 생산을 위한 암거배수가 필수적이

^a Research Scholar, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA

^b Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

^c Associate Professor, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: soonho@illinois.edu

Received: October 11, 2023

Revised: April 18, 2024

Accepted: April 23, 2024

라 할 수 있다. 특히, 농경지 내 토양 제염을 위해서는 신속 배수가 필요하며 이를 위해 암거배수가 활용되고 있다. 이외에도 최근 농경지의 전작화 및 생산성을 높이기 위한 배수시스템으로서 암거배수 적용을 검토하고 있다 (Bae et al., 2016; Kim et al., 2018). 따라서 국내에서도 작물생산량 및 수질오염간의 트레이드오프 (trade-off)의 정도를 결정하기 위한 암거배수 시스템의 환경적 영향을 평가하는 연구가 필요하다.

Kalita et al. (2006)는 암거배수 시스템이 하류 지역 수체 (water body)에 기여하는 수질 문제를 관리하기 위한 적극적인 방안이 필요하다고 한 바 있다. 여러 최적관리기법 중 하나로 고려되고 있는 것은 암거배수 시스템의 최적 설계 (design)이다. 암거배수 시스템의 설계 요소인 설치 깊이와 배치 간격은 경작지로부터 배수되는 물의 양과 직접적인 관련이 있으므로, 영양물질의 배출량에도 영향을 미치게 된다. 이론적으로는 암거배수 시스템의 배치 간격이 조밀하고, 설치 깊이가 깊을수록 농경지로부터 배수되는 물의 양이 증가한다 (Skaggs et al., 2005). 그럼에도 불구하고 암거배수 설치 현장에 대한 불확실성으로 인해 이를 실증적으로 검증하기 위한 연구가 지속적으로 요구되고 있다.

Kladivko et al. (2004)과 Sands et al. (2008)은 암거배수 설치에 따른 질소부하량 배출에 대한 영향을 조사한 결과, 배치 간격이 넓고 설치 깊이가 얇은 농경지에서 질소부하량이 적게 배출된다는 것을 보고한 바 있다. Davis et al. (2000)도 역시 미국 미네소타 지역에서 장기시물레이션 (1915-1996) 결과와 현장모니터링 결과를 통해, 넓은 배치 간격과 얇은 깊이를 가진 배수시설이 질소부하량 배출이 적게 나타남을 확인하였다. 이론적인 결과와 유사한 결론을 도출한 연구가 있는 반면, Hofmann et al. (2004)은 미국 인디애나주에서 6년간 수행한 연구에서 10 m, 20 m, 30 m 간격의 암거배수를 설치한 연구대상지의 연구결과, 배수량은 20 m의 배치 간격을 가진 플롯, 질소부하량 배출은 10 m의 배치 간격을 가진 플롯에서 가장 많은 것으로 보고 하기도 하였다. 본 연구 결과가 이론적 결과를 따르지 않는 것에 대해서는 Beven and Germann (1982)이 지적한 바를 인용하며, 각 플롯별로 물의 토양 내 공극(특히 대공극, macropores)을 통한 이동의 정도가 다른 점 (preferential flow의 형성 정도의 차이)을 이유로 설명을 하였다. 따라서 연구사례와 같이 농경지의 특징에 따라 불확실성이 존재하므로 이에 대한 평가를 위해서는 많은 연구사례를 축적하는 것이 중요하다. 특히, 암거배수 시스템의 설계와 영양물질 손실간의 관계는 다양한 현장 연구를 통해 불확실성에 기여하는 요소를 분석할 필요가 있다.

본 연구는 서로 다른 암거배수 설치 간격을 가지는 플롯을 대상으로 총 3년간의 모니터링을 통해 작물 생육기간을 주기

로 1. 암거배수량 배출 특징, 2. 질소부하량 배출 특징을 분석하고 평가하는 것이 목적이라 할 수 있다. 연구대상지는 미국 일리노이주에 위치하며, 연구기간동안 옥수수와 대두를 윤작 하였으나 본 연구에서는 일관적인 분석을 위하여 미국 중서부의 대표 재배 작물인 옥수수의 재배기간을 대상으로 배수량과 질소배출량 모니터링 결과를 비교 평가하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상지

본 연구대상 농경지는 일리노이대학교 얼바나-샴페인 (University of Illinois Urbana-Champaign)에서 암거배수 시스템의 설계에 따른 영향을 평가하기 위한 목적으로 2017년에 미국 일리노이 주 샴페인 카운티 내에 구축하였다. 연구대상지 내 6개 플롯은 2개씩 서로 다른 암거배수 설계 구성 (간격과 깊이)을 가지고 있다. Fig. 1과 같이 CS-1과 CS-3, CS-2와 CS-4, CS-5와 CS-6가 각각 같은 암거배수 설계를 가지고 있다. CS-1 플롯과 CS-3 플롯에 설치된 타일은 간격이 12.2 m이고 깊이가 1.1 m이다. CS-2 플롯과 CS-4 플롯의 경우 간격은 0.8 m이고 깊이는 1.1 m이며, CS-5와 CS-6의 경우 간격은 18.3 m이고, 깊이는 0.8 m이다 (Fig. 1). 본 연구대상지의 주요 토양은 Drummer silty clay loam이며, 배수가 매우 불량한 토양 종류로서 대략 0.15 cm/hr의 침투율을 가진 것으로 보고되고 있다 (Stauffer, 1949). 본 연구에서는 지형학적 차이와 암거배수 설치 방향 등의 불확실성을 줄이기 위하여, Case 1 (CS-3. 설치 간격 12.2 m, 설치 깊이 1.1 m)과 Case 2 (CS-4, 설치 간격 24.4 m, 설치 깊이 1.1 m)를 대상으로 연구결과를 비교 평가하였다.

이 연구대상지는 총 6개의 플롯으로 구획되어 있으며, 각 플롯은 면적이 2.02 ha의 수리적으로 분리된 개별 암거배수가 설치되어 있다 (Fig. 1). 본 연구대상지는 연구기간동안 작물 수확 후 피복 작물 (cover crop)을 식재하지 않았으며, 봄에는 경운 (tillage)을 하였다. 본 연구대상지는 연작을 하는 농경지이며, 연작은 단작 (monoculture)에 비해 타감작용 (allelopathy) 유발 (Meese et al., 1991) 혹은 작물수확량 감소 (Porter et al., 1997)에도 영향을 미친다. 본 연구대상지 역시 미국 중서부 지역의 일반적인 농경지와 같이 옥수수와 대두를 윤작 (rotation)하는 경작지이며, 2019년, 2020년, 2022년에는 옥수수를 경작하였고, 2021년에는 대두를 경작하였다. 본 연구에서는 작물의 윤작에 따른 불확실성의 효과를 줄이기 위하여, 옥수수 재배기간인 2019년, 2020년, 2022년의 수량 및 수질 자료에 대해서만 해석을 수행하였다.

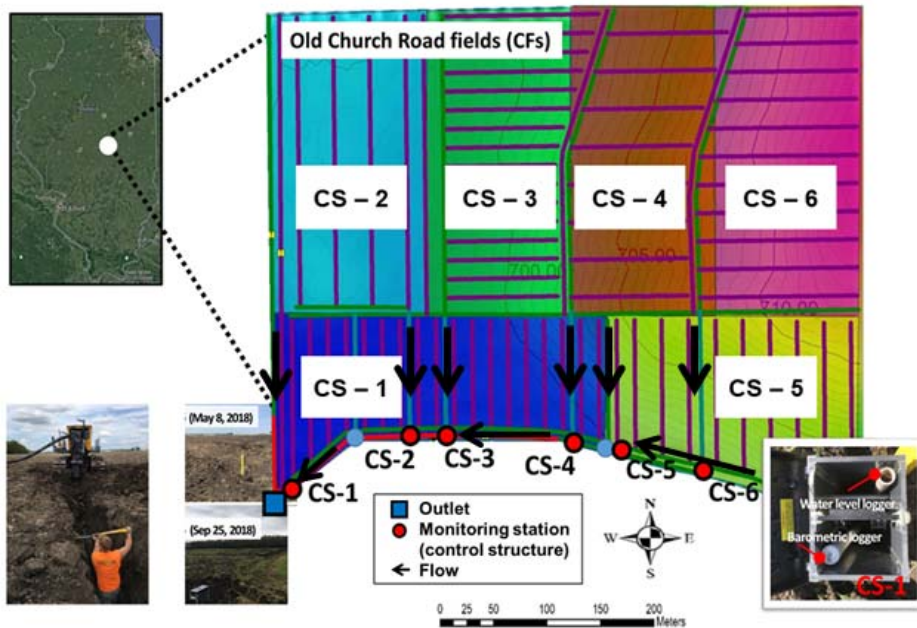


Fig. 1 Schematic of the study field

2. 자료 구축 및 모니터링

본 연구에서는 기상자료를 얻기 위하여, 일리노이주 수자원 조사기관 (Illinois State Water Survey)에서 제공하는 기상 모니터링 프로그램의 샴페인 관측소 데이터를 활용하였다 (ISWS, 2022). 일리노이 수자원 조사기관 자료에 의하면 10년 (2010-2020) 연간 평균강수량은 920 mm/yr로 국내에 비해 상대적으로 적은 강수량을 보인다. 일리노이주 수자원조사 기관에서 제공하는 자료에서 일부 결손이 있는 경우, 현장 기상 관측 자료로 보완하였다. 플롯별 물수지를 산정하기 위하여 MODIS 위성영상 기반의 증발산량 데이터를 활용하였다. 본 자료는 500 m의 공간해상도와 8일 간격의 시간해상도를 가지고 있으므로, 본 대상지에 해당하는 값을 GIS 프로그램을 통해 추출하여 8일 간격 자료로 구축하였다.

각 플롯에 대한 수량 및 수질을 모니터링하기 위하여, 암거 배수관 출구 지점에 모니터링함을 설치하고, 수위조절판, V-노치 위어와 수위계측을 위한 압력식 수위계를 설치하였다. 수위계측은 10분 간격으로 이루어지며, 압력식 수위계로 계측한 수위를 실제 수위로 환산하기 위하여, 대기압 기록을 위한 압력식 수위계도 CS-1과 CS-6 두 개 지점 모니터링함 내에 설치를 하였다. 수위자료는 정기적으로 수위계측기 자료를 수집하여, V-노치 위어의 제원을 유량계산식 (Chun and Cooke, 2008)에 대입한 후 유량자료로 환산하였다. 수위자료에 대한 검증을 위하여, 모니터링 현장에서 실제 수위와 압력식 계측기의 수위를 정기적으로 확인하였다. 일별 배수량은

10분 간격으로 계측된 유량자료를 일별 자료로 변환하여 활용하였다. 또한 실내 실험실 환경에서 현장에 설치된 계측기를 정기적으로 수거하여 검정 및 보정을 수행하거나, 수위 계측기가 불량한 경우 교체를 하였다.

수질모니터링은 옥수수 생장기 (5월 15일부터 10월 15일까지)에는 주 2회 수행하였고, 수확 후와 작물을 파종 전까지 (이듬해의 10월 15일부터 다음해의 5월 15일까지)는 주 1회 모니터링을 수행하였다. 수집된 물은 일리노이대학교 얼바나-샴페인 내 농공학과 수질 실험실에서 하이드라진 황산염 환원 방법을 통해 질산성질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 농도를 분석하였다. 마지막으로 정기적 혹은 비정기적으로 계측된 수질 자료를 활용하여, 유량-부하량 산정식을 도출하여 질산성질소 부하량 산정에 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우량, 증발산량 및 암거배수량 모니터링 결과

본 연구에서는 작물 수확 기간을 고려하여, 강우량, 증발산량 및 암거배수량 분석 결과를 이듬해의 10월 15일부터 다음해 10월 15일까지로 한정하였다. 수문연도 (Hydrological year 혹은 Water year)는 가을 혹은 겨울에 내리는 강수량의 일부가 봄이나 여름에 땅이 녹기 전까지 배수가 어려운 점을 고려한 수문학적 표현의 연도로, 최대한 표면유출량을 한 개의 연도

에 포함시키기 위한 방법이다 (Johnstone and Cross, 1949). 즉, 수문연도는 강우량의 배수 측면을 고려한 개념으로, 지역의 기상 및 지상학적 특성에 따라 수문연도의 기간은 연구별로 상이하나, 미국 USGS (The United States Geological Survey) 에서는 이듬해의 10월 1일부터 다음해의 9월 30일까지를 수문연도 정의하고 있다 (USGS, 2022). 따라서 본 연구에서는 수문연도 및 작물 수확시기 (10월 15일경)를 함께 고려하여, 앞선 설명과 같이 연구 결과를 정리하였다.

Table 1은 3년간의 현장 수문 조사 결과를 나타낸 것이다. 우선, 강우량의 경우 3년 동안의 연평균 강우량은 지난 10년간의 조사 결과보다 소폭 높게 나타났다. 강우량 대비 증발산량은 평균적으로 약 50% 수준으로 조사 되었다. 본 연구 결과에서는 농경지로부터의 표면유출량 및 침투량을 측정하기 어려운 점을 고려하여, 전체 강수량에서 증발산량과 암거배수량 (6개 플롯 평균)을 뺀 값을 통해 추정하였다. 그 결과 평균적으로 강우량 대비 약 8%의 표면유출량 및 침투량을 보였다. 암거배수량의 경우, 3년간의 관측값을 평균한 결과, 강우량 대비 약 41.8%의 유출량을 보였다. 기존 연구에서 표면유출량을 측정할 연구는 많지 않으므로 수치를 직접적으로 비교하기는 어려우나, Van Esbroeck et al. (2016)은 암거배수량을 현장 모니터링한 연구에서 암거배수량 대비 표면유출량이 평균 15%로 나타나 본 연구 결과와 유사한 결과를 보였다.

Case 1과 Case 2 플롯의 암거배수량을 모니터링한 결과, 3년 평균의 암거배수량은 배치간격이 좁게 설계된 Case 1 (12.2 m 간격) 플롯이 암거배수 배치 간격이 상대적으로 넓게 설계된 Case 2 (24.4 m) 플롯에 비해 약 57% 더 많게 나타났

다. 이는 암거배수시설의 설계에 따른 배수량의 차이 (좁게 설계된 암거배수가 설치된 농경지에서 암거배수량이 상대적으로 높게 나타남)에 대한 이론적인 결론을 따르는 것이다 (Skaggs et al., 2005). 연도별 결과를 살펴보면, Case 1 플롯의 경우 강우량이 적은 세 번째 해에서도 높은 수준의 암거배수량을 나타내고 있는데, 이는 Beven and Germann (1982)이 지적한 바와 같이 대공극의 형성에 따른 선호 흐름 (preferential flow)가 발생하진 않았는지 추정해 볼 수 있다.

Fig. 2는 연구수행 전체 기간에 대한 암거배수량 관측 결과를 나타낸 것이다. Fig 2에서 회색으로 표시된 구간은 작물 비생장기를 나타낸다. Case 1의 작물 비생장기간의 암거배수량 모니터링 결과는 첫 번째 해에 501.1 mm, 두 번째 해에 467.5 mm, 세 번째 해는 745.7 mm로 나타났다. Case 1의 작물 생장기간의 암거배수량 모니터링 결과는 첫 번째 해에 106.2 mm, 두 번째 해에 277.3 mm, 세 번째 해는 40.1 mm로 나타났다. Case 2의 작물 비생장기간 암거배수량 모니터링 결과는 첫 번째 해에 315.3 mm, 두 번째 해에 303.3 mm, 세 번째 해는 444.0 mm로 나타났다. Case 2의 작물 생장기간 암거배수량 모니터링 결과는 첫 번째 해에 43.3 mm, 두 번째 해에 218.3 mm, 세 번째 해는 37.1 mm로 나타났다. 3년간의 모니터링 결과를 분석한 결과, Case 1의 작물 비생장기간 암거배수량 평균은 571.4 mm, 작물 생장기간 평균은 141.2 mm로 나타났으며, Case 2의 작물 비생장기간 동안 암거배수량 평균은 354.2 mm, 작물 생장기간 평균은 99.6 mm로 나타났다. 총 3년간의 작물 생장기간 동안 암거배수량은 강우량 대비 Case 1이 22.1 %, Case 2가 21.5%로 타 연구에서 보고된 범위인

Table 1 The results of the water balance analysis for three years

| Water year | Precipitation (mm) | Evapotranspiration (mm) | Surface flow+Infiltration (mm) | Average subsurface drainage flow from all fields (mm) | Subsurface drainage flow in Case 1 (12.2 m x 1.1m) (mm) | Subsurface drainage flow in Case 2 (24.4 m x 1.1 m) (mm) |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|---|---|--|
| | (a) | (b) | (c) | (d) | | |
| 1st year (2018/10/16-2019/10/15) | 1,077.2 | 575.7 (53.4%) | 93.0 (8.60%) | 408.5 (37.9%) | 607.4 (56.4%) | 358.6 (33.3%) |
| 2nd year (2019/10/16-2020/10/15) | 1,141.5 | 527.7 (46.2%) | 119.7 (10.5%) | 494.1 (43.3%) | 744.8 (65.3%) | 521.6 (45.7%) |
| 3rd year (2021/10/16-2022/10/15) | 930.4 | 474.7 (51.0%) | 43.4 (4.70%) | 412.3 (44.3%) | 785.8 (84.5%) | 481.1 (51.7%) |
| Average | 1,049.7 | 526.0 (50.1%) | 85.4 (8.1%) | 438.3 (41.8%) | 712.7 (67.9%) | 453.8 (43.2%) |

* Estimated_Surface_flow+Infiltration (c) = Observed_precipitation (a) - Observed_evapotranspiration (b) - Observed_ average drainage flow from all fields (d)

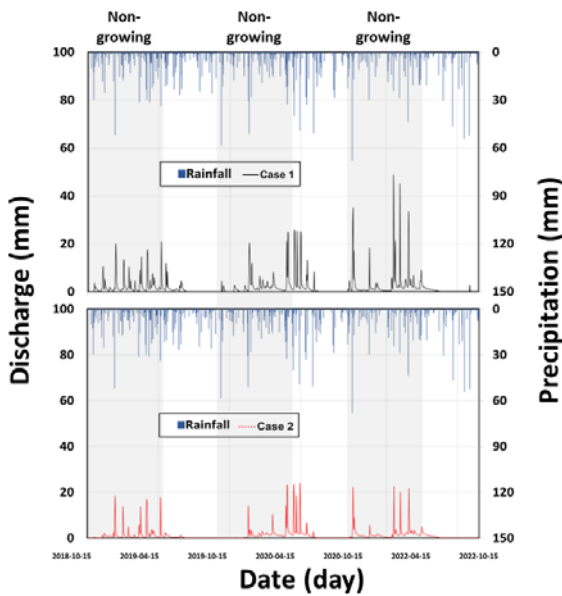


Fig. 2 Three years monitoring results of the daily precipitation and daily drainage discharge

약 20% 내외 수준과 유사하다 (Kladivko et al. 2004; Kalita et al. 2006).

서로 다른 암거배수 설계를 가진 농경지로부터 배출되는 누적 암거배수량을 비교하기 위하여, Fig. 3과 같이 결과를 도시하였다. 옥수수 재배기간만을 고려하기 위하여 앞선 Table 1과 같이 2018년 10월 16일부터 2020년 10월 15일, 2021년 10월 16일부터 2022년 10월 15일 기간의 누적된 값을 나타내고 있다. 누적 배수량을 모니터링한 결과, 배치 간격이 상대적으로 좁게 설계된 Case 1 플롯의 누적 배수량이 Case 2 플롯에 비해 약 57% 정도 많은 것으로 나타났다. 따라서 본 암거

배수량 모니터링 결과를 통해, 배치 간격이 좁은 암거배수시스템이 배수의 효율성 측면에서 유리한 것으로 나타났으며 이는 작물의 수확량에도 영향을 미치게 된다. 실제 작물 모니터링 결과에서도 3년간 옥수수 재배 수확량을 비교해 보면, 두 플롯 간에 큰 차이를 보이고 있지는 않지만 Case 1에서는 3년 평균 대략 11,296 kg/ha, Case 2에서는 3년 평균 대략 11,032 kg/ha로 나타나 소폭 Case 1의 수확량이 큰 것으로 나타났다.

2. 질소배출 농도 및 부하량 모니터링 결과

본 연구에서는 앞선, 강우량, 증발산량 및 암거배수량 분석 결과와 같이, 질소배출 농도 및 부하량 분석 결과를 이듬해의 10월 15일부터 다음해 10월 15일까지 정리하였다 (Fig. 4). 본 분석 결과에서도 앞선 설명과 같이, 대두 재배 해를 제외하였다. 3년간의 질산성질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 배출 평균 농도를 분석한 결과, Case 1 플롯의 경우 평균 8.9 mg/L, 표준편차 8.9 mg/L로 나타났으며, Case 2 플롯의 경우, 평균 13.7 mg/L, 표준편차 11.1 mg/L 수준으로 나타났다. 즉, Case 2 플롯에서 배수된 물의 질산성질소 농도의 변동성이 Case 1 플롯에서 배수된 물의 질산성질소 농도보다 더 큰 것으로 나타났다. Case 1 플롯의 경우, 최대 배출 농도는 53.2 mg/L, Case 2 플롯은 45.3 mg/L로 나타나 Case 1 플롯의 질산성질소 최대 배출 농도가 더 큰 것으로 나타났다. Case 1 플롯의 질산성질소 배출 농도는 US EPA에서 제시하고 있는 배출 한계 농도 (10 mg/L)를 대부분 초과하고 있지 않았지만, Case 2 플롯의 경우, 질산성질소 배출농도가 Case 1 플롯보다 US EPA 배출 기준 농도를 초과하는 경우가 많은 것으로 나타났다.

Fig. 4에서 질산성질소 농도변화를 살펴보면 일반적으로 5

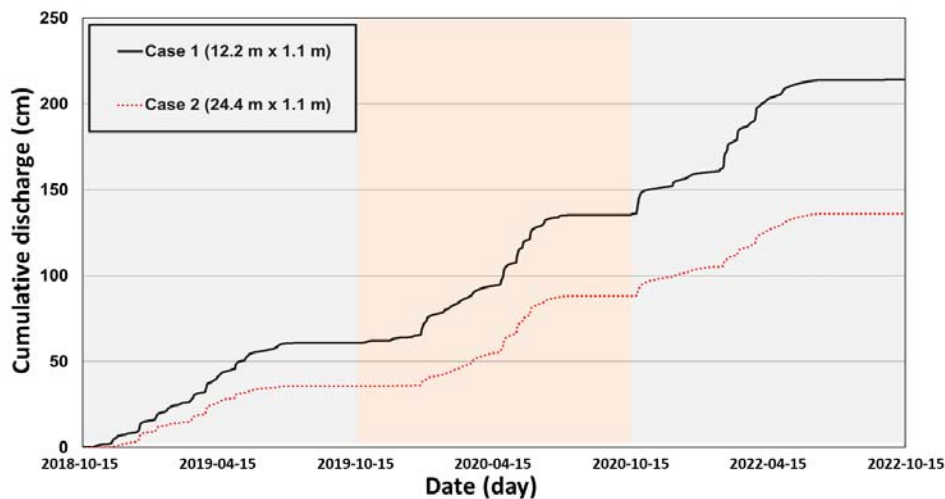


Fig. 3 Three years monitoring results of the cumulative drainage discharge

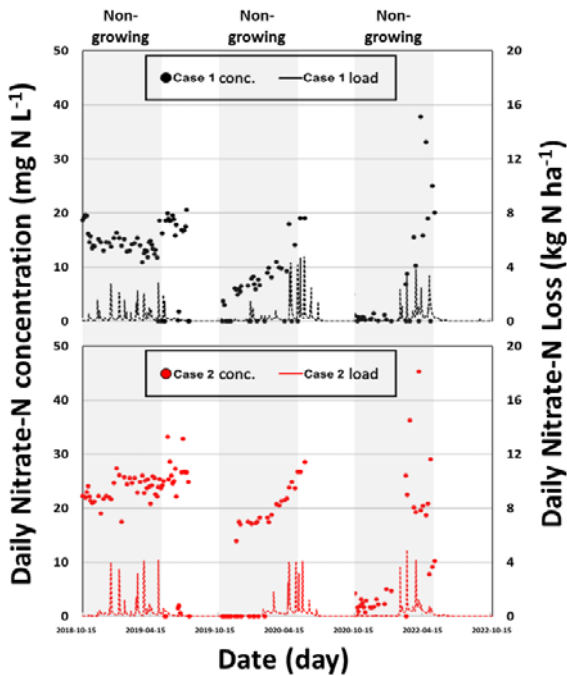


Fig. 4 Three years monitoring results of the daily NO₃-N concentrations and losses

월 중순경과 10월 중순 후에 농도가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 첫 번째 이유는 일리노이주 샴페인 지역의 경우 매년 5월이 옥수수 파종 시기이며, 파종 전 질소질 비료를 투입하기 때문이다. 비록 대두 재배 해는 본 연구범위에 포함되지는 않으나 대두 재배 해와 비교할 경우 그 경향을 명확히 확인할 수 있는데, 대두 재배 해에는 질소질 비료를 파종 전에 투입하지 않기 때문에 옥수수 재배 해에 비해 암거배수시설을 통해 배출되는 물의 질소 농도가 상대적으로 낮게 유지된다. 두 번째 이유는 10월에 질산성질소 농도가 증가하는 경향 역시 질소질 비료 투입과 관련이 있으며, 본 연구대상 지역인 일리노이주는 일반적으로 10월 중순에 작물을 수확하며, 작물 수확 후 늦가을에 질소질 비료를 투입하기 때문이다.

연별 질산성질소 배출부하량 결과 및 누적된 질산성질소 배출 경향을 비교해 보면 각각 Table 2와 Fig. 5와 같다. 3년간 총 질산성질소 배출량은 Case 1 플롯이 Case 2 플롯보다 소폭 많은 것으로 나타났으며, 3년 총합 약 9% 많은 질산성질소를 배출하는 것으로 나타났다. 비록 Case 1 플롯의 암거배수량이 상대적으로 높게 나타났지만, 총 질산성질소 배출량은 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 암거배수 설치 간격이 더 넓게 설계된 Case 2 플롯에서 암거배수가 발생하는 빈도 및 배수량이 상대적으로 적게 나타나고, 질산성질소가 토양 내에 머무르는 시간이 높기 때문인 것으로 보여진다. 즉, Case 2 플롯에서 질산성질소가 상대적으로 오랫동안 머물면서 축적되고, 배수

Table 2 The results of the NO₃-N losses analysis for three years

| Water year | NO ₃ -N loss in Case 1 (kg/ha) | NO ₃ -N loss in Case 2 (kg/ha) |
|----------------------------------|---|---|
| 1st year (2018/10/16-2019/10/15) | 85.4 | 77.0 |
| 2nd year (2019/10/16-2020/10/15) | 98.2 | 96.7 |
| 3rd year (2021/10/16-2022/10/15) | 74.7 | 63.1 |
| Total | 258.3 | 236.8 |

가 발생할 시에 일시적으로 높은 농도의 질산성질소 배출이 발생할 수 있기 때문이다. 이를 위해 앞선 질산성질소 농도 모니터링 결과를 살펴보면 (Fig. 4), Case 2 플롯이 배수 빈도는 낮고 높은 질산성질소 농도를 유지하는 것을 통해 확인할 수 있다. 특히 2번째 해 (2019년 10월 중순-2020년 10월 중순)에는 늦가을 시비 후에 배수가 상대적으로 오랫동안 발생하지 않았고, 이후 Case 1 플롯에 비해 높은 수준의 질산성질소 배출 농도를 가지는 것을 알 수 있다.

Case 1 플롯의 작물 생장기간에 대한 3년 평균 질산성질소 배출부하량은 23.4 kg/ha, 작물 비생장기간의 3년 평균 질산성질소 배출부하량은 62.7 kg/ha로 나타났다. Case 2 플롯의 작물 재배 시기의 3년 평균 질산성질소 배출부하량은 13.6 kg/ha, 비재배시기의 3년 평균 질산성질소 배출부하량은 62.8 kg/ha로 나타났다. 작물 생장기간과 작물 비생장기간에 대한 배출부하량 차이를 분석해보면, 작물 생장기간보다 작물 비생장기간에 배출부하량이 두 플롯 모두 약 2.7배 (Case 1)에서 4.6배 (Case 2) 가량 더 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 비록 작물 생장시기의 강수량이 작물 비생장시기의 강수량보다 더 큰 값을 보이지만, 작물 생장시기의 경우, 작물이 성장함에 따라 증가하는 증발산량과 옥수수 작물의 차단량 등으로 인해 농경지로부터 암거배수량이 줄어들기 때문이다. 이 결과는 Fig. 2의 결과에서도 확인할 수 있는데, 비록 작물 비생장기간에 강우 일수 및 강수량이 적지만 암거배수관을 통한 유출량 관측 횟수가 더 많은 것을 알 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 3년 평균 수확량은 두 플롯 간에 큰 차이를 보이고 있지는 않지만, 그럼에도 불구하고 Case 1 플롯에서는 상대적으로 강수량이 적은 3년차에 수확량이 12,416 kg/ha로 Case 2 플롯의 11,643 kg/ha 보다 큰 값을 보였다. 본 결과를 통해 암거배수의 배치 간격이 상대적으로 좁게 설계된 Case 1 플롯이 배수관리에 유리하고, 유사한 수준의 질소 손실량을 보이며, 수확량 측면에서도 장점이 있다는 것을 알 수 있다. Skaggs and Chescheir (2003) 역시, 현장 연구와 더불어 모델링 연구에서 얇고 좁게 설계된 암거배수를 활용

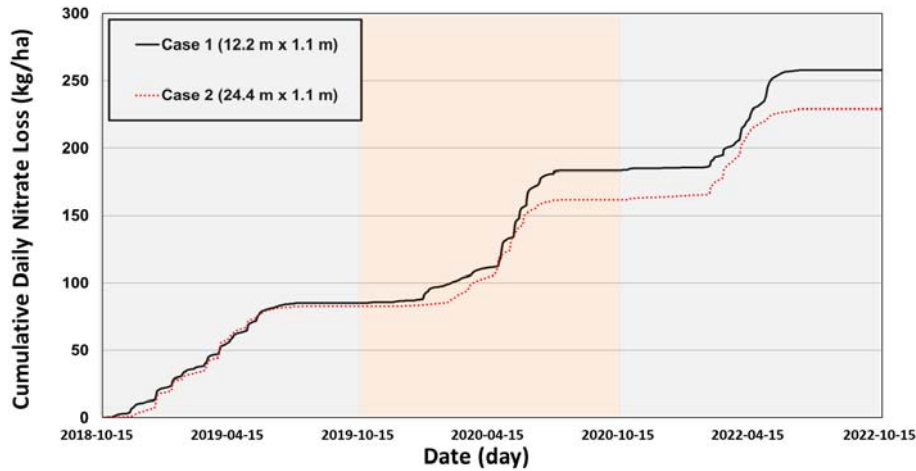


Fig. 5 Three years monitoring results of the cumulative $\text{NO}_3\text{-N}$ losses

하면 상대적으로 질소 손실량을 줄일 수 있다는 가설을 제시한 바 있다. 그럼에도 불구하고 Skaggs and Chescheir (2003)는 수질과 관련한 현장 연구 결과는 농경지의 지형적 효과, 토양 내 대공극의 형성 정도, 토양 온도, 토양 유기물 구성, pH 및 기타 요인 등 다양한 영향을 받을 수 있다고 한 바 있다. 따라서 본 연구와 같이 서로 다른 설계를 가진 플롯에 대한 암거배수의 효과를 분석하는 장기적인 연구가 지속되어야 할 것으로 보인다.

IV. 요약 및 결론

암거배수는 앞서 언급한 바와 같이 작물 성장을 돕기 위한 효율적인 농공학적 기법으로 흔히 Corn belt라 부르는 배수가 불량한 농경지가 많은 미국 중서부 지역에서 오래전부터 적용 되어왔다. 그동안 암거배수 시스템은 농업생산량 증대 측면에서 많은 역할을 해왔지만, 최근 들어 과도한 영양물질의 배출에 따른 환경적 측면에서 우려가 증대됨에 따라 이를 보완하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 그 중 대표적인 연구 주제로써 암거배수 시스템의 최적 설계 요건에 따른 생산량 증대와 질소 손실량 감소에 관한 연구가 지속적으로 요구되고 있다.

본 연구에서는 미국 일리노이주에 위치한 옥수수대두 순환재배 농경지를 대상으로 농경지를 분할하여, 서로 다른 설계를 가진 암거배수 시스템을 설치하고, 암거배수의 간격과 깊이에 따른 효과를 분석하는 연구를 수행하였다. 3년간의 모니터링 결과를 요약하면, 암거배수 설치 간격이 더 좁게 설계된 Case 1 플롯에서 Case 2 플롯에 비해 약 57% 더 많은 누적 유출량을 나타냈다. 3년간 누적 질소부하량 배출 결과는 Case

1 플롯에서 배수량이 상대적으로 많았음에도, Case 1 플롯이 Case 2 플롯에 비해 단지 9% 정도 크게 나타났다. 이는 암거배수 설치 간격이 더 넓게 설계된 Case 2 플롯에서 암거배수 빈도 및 배수량이 상대적으로 적어 질산성질소가 농경지 내에 머물면서 축적되고, 배수가 발생할 시에 일시적으로 높은 농도의 질산성질소 배출이 이루어지기 때문이다. 마지막으로 3년간의 옥수수 수확량을 비교한 결과, 배수 능력이 더 우수한 Case 1 플롯에서 소폭이지만 더 많은 수확량을 보였다.

결론적으로 암거배수가 더 좁게 설계된 농경지는 배수의 효율성, 작물수확량 확보 측면에서 유리한 것으로 보인다. 반면에 암거배수가 더 넓게 설계된 농경지는 상대적으로 적은 질소부하량을 배출한 것으로 나타나 환경적으로는 유리한 시스템으로 보인다. 단, 암거배수가 더 넓게 설계된 농경지의 경우, 배수되지 못한 질산성질소의 토양 내 축적으로 인해 배수가 발생할 시에 일시적으로 높은 농도의 질산성질소가 배출될 우려가 있다. 따라서 암거배수의 설계에 따른 한계를 보완하기 위해서 지표하수위 (water table)를 능동적으로 조절하거나 추가적인 시설 (예를 들어, bioreactor 등) 등의 농공학적 대책이 마련되어야 할 것으로 보인다.

뿐만 아니라 현재 연구가 내재하고 있는 현장의 불확실성 문제를 보완할 수 있는 방안도 함께 고려되어야 할 것으로 보인다. 배수량과 관련한 불확실성의 경우, 토양 내 지표하수위 (water table)의 변화 측정, 토양 수분 상태, 대공극의 형성, 현장 침투량 계산 등이 보완된다면 물수지의 계산 및 농경지 간의 차이를 좀 더 세부적으로 해석이 가능할 것이다. 또한 수질과 관련한 세부적인 해석 및 불확실성을 줄이기 위해서는 각 플롯별 시비량 측정, 정기적인 토양 내 영양염류 분석 (최소 월별), 토양 환경 변수 측정 (온도, pH 등) 이 수반되어야

야 할 것으로 보인다. 마지막으로 추후 나머지 플롯에 대한 장기적이고 종합적인 결론을 통해 현재 연구가 가진 한계점을 보완할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 미국 내 연구소 the Illinois Nutrient Research & Education Council의 재원 (No. 2018-3-360624-356)과 국내 과학기술정보통신부 한국연구재단의 재원 (No. RS-2023-00250791)으로 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- Bae, H., S. Lee, J. Hwang, H. Park, G. Lee, K. Lee, D. Lee, B. Hong, J. Lee, and D. Chung, 2016. Drainage effect on desalinization and crop growth on a poorly drained soil in the reclaimed tidal flat land. *Journal of the Korean Society of International Agriculture* 28(4): 512-519. doi: 10.12719/KSIA.2016.28.4.512.
- Beven, K., and P. Germann, 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* 18(5): 1311-1325. doi: 10.1029/WR018i005p01311.
- Bhattarai, R., P. K. Kalita, and M. K. Patel, 2009. Nutrient transport through a vegetative filter strip with subsurface drainage. *Journal of Environmental Management* 90(5): 1868-1876. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.12.010.
- Blann, K. L., J. L. Anderson, G. R. Sands, and B. Vondracek, 2009. Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 39(11): 909-1001. doi: 10.1080/10643380801977966.
- Chun, J. A., and R. A. Cooke, 2008. Technical note: Calibrating Agridrain water level control structures using generalized weir and orifice equations. *Applied Engineering in Agriculture* 24(5): 595-602. doi: 10.13031/2013.25274.
- Davis, D. M., P. H. Gowda, D. J. Mulla, and G. W. Randall, 2000. Modeling nitrate nitrogen leaching in response to nitrogen fertilizer rate and tile drain depth or spacing for southern Minnesota, USA. *Journal of Environmental Quality* 29(5): 1568-1581. doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900050026x.
- Fausey, N. R., L. C. Brown, H. W. Belcher, and R. S. Kanwar, 1995. Drainage and water quality in Great Lakes and Cornbelt states. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(4): 283-288. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:4(283).
- Hofmann, B. S., S. M. Brouder, and R. F. Turco, 2004. Tile spacing impacts on Zea mays L. yield and drainage water nitrate load. *Ecological Engineering* 23(4-5): 251-267. doi: 10.1016/j.ecoleng.2004.09.008.
- ISWS (Illinois State Water Survey), <https://www.isws.illinois.edu>. Accessed 1 Nov. 2022.
- Johnstone, D., and W. P. Cross, 1949. Elements of applied hydrology. London: Chapman and Hall.
- Kalita, P. K., A. S. Algoazany, J. K. Mitchell, R. A. C. Cooke, and M. C. Hirschi, 2006. Subsurface water quality from a flat tile-drained watershed in Illinois, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115(1-4): 183-193. doi: 10.1016/j.agee.2006.01.006.
- Kalita, P. K., R. A. C. Cooke, S. M. Anderson, M. C. Hirschi, and J. K. Mitchell, 2007. Subsurface drainage and water quality: The Illinois experience. *Transactions of the ASABE* 50(5): 1651-1656. doi: 10.13031/2013.23963.
- Kim, H., J. Ryu, K. Jung, and D. Seo, 2018. Comparative study on the subsurface drainage discharge performance by the type of non-excavation subsurface drainage culvert. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(6): 73-81. doi: 10.5389/KSAE.2018.60.6.073.
- Kladivko, E. J., J. R. Frankenberger, D. B. Jaynes, D. W. Meek, B. J. Jenkinson, and N. R. Fausey, 2004. Nitrate leaching to subsurface drains as affected by drain spacing and changes in crop production system. *Journal of Environmental Quality* 33(5): 1803-1813. doi: 10.2134/jeq2004.1803.
- Meese, B. G., P. R. Carter, E. S. Oplinger, and J. W. Pendleton, 1991. Corn/soybean rotation effect as influenced by tillage, nitrogen, and hybrid/cultivar. *Journal of Production Agriculture* 4(1): 74-80. doi: 10.2134/jpa1991.0074.
- Porter, P. M., J. G. Lauer, W. E. Lueschen, J. H. Ford, T. R. Hoverstad, E. S. Oplinger, and R. K. Crookston, 1997. Environment affects the corn and soybean rotation effect. *Agronomy Journal* 89(3): 442-448. doi: 10.2134/agronj1997.00021962008900030012x.

17. Rabalais, N. N., and R. E. Turner, 2019. Gulf of Mexico hypoxia: Past, present, and future. *Limnology and Oceanography Bulletin* 28(4): 117-124. doi: 10.1002/lob.10351.
18. Sands, G. R., I. Song, L. M. Busman, B. J. Hansen, 2008. The effects of subsurface drainage depth and intensity on nitrate loads in the northern Cornbelt. *Transactions of the ASABE* 51(3): 937-946. doi: 10.13031/2013.24532.
19. Stauffer, R. S., 1949. Infiltration of soils in the Peoria area. Illinois State Water Survey, Report of Investigation; no. 05.
20. Sloan, B. P., N. B. Basu, and R. Mantilla, 2016. Hydrologic impacts of subsurface drainage at the field scale: Climate, landscape and anthropogenic controls. *Agricultural Water Management* 165: 1-10. doi: 10.1016/j.agwat.2015.10.008.
21. Skaggs, R. W., 1982. Field evaluation of a water management simulation model. *Transactions of the ASAE* 25(3): 666-674. doi: 10.13031/2013.33592.
22. Skaggs, R. W., M. A. Youssef, G. M. Chescheir, and J. W. Gilliam, 2005. Effect of drainage intensity on nitrogen losses from drained lands. *Transactions of the ASAE* 48(6): 2169-2177. doi: 10.13031/2013.20103.
23. Skaggs, R. W., and G. M. Chescheir III, 2003. Effects of subsurface drain depth on nitrogen losses from drained lands. *Transactions of the ASAE* 46(2): 237-244.
24. USGS (United States Geological Survey), Explanations for the National Water Conditions. Available online: http://water.usgs.gov/nwc/explain_data.html. Accessed 1 Nov. 2022.
25. Van Esbroeck, C. J., M. L. Macrae, R. I. Brunke, and K. McKague, 2016. Annual and seasonal phosphorus export in surface runoff and tile drainage from agricultural fields with cold temperate climates. *Journal of Great Lakes Research* 42(6): 1271-1280. doi: 10.1016/j.jglr.2015.12.014.