

Research Article



CrossMark

Open Access

## 중량식 라이시미터에서 동계 작물(청보리) 재배에 따른 밭토양 양분수지

안진희, 이찬욱, 옥정훈, 박혜진, 송요성, 이예진\*

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 토양비료과

### Nutrient Balance during Crop (Forage Barley) Cultivation in Winter Season: A Weighing Lysimeter Study

Jin-Hee An, Chan-Wook Lee, Jung-Hun Ok, Hye-Jin Park, Yo-Sung Song and Ye-Jin Lee\* (Soil and Fertilizer Management Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 9 August 2023/ Revised: 29 August 2023/ Accepted: 31 August 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### ORCID

Jin-Hee An

<https://orcid.org/0009-0000-0141-2443>

Chan-Wook Lee

<https://orcid.org/0000-0002-8901-8631>

Jung-Hun Ok

<https://orcid.org/0000-0002-5854-0179>

Hye-Jin Park

<https://orcid.org/0000-0001-9718-7876>

Yo-Sung Song

<https://orcid.org/0009-0007-4002-2385>

Ye-Jin Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4415-846X>

#### Abstract

Nutrient balance is an environmental indicator for assessing the potential of sustainable agriculture. Improving the use of arable land is crucial for reducing the nutrient balance. This study monitored soil water content, seepage water, crop growth, and nutrient balance in weighing lysimeters during forage barley (*Hordeum vulgare* L., “Yeongyang”) cultivation from October to April. The study was conducted from 2020 to 2022, and the treatments included forage barley cultivation (clay loam, CL-FC; sandy loam, SL-FC) and bare soils. During the regeneration period (March to April), the soil moisture contents of bare and forage barley-cultivated soils were approximately 30-40% and 18.1-21.8%, respectively. The daily evapotranspiration of forage barley was 6.09 mm. The nitrogen balances for SL-FC and CL-FC

were -0.43 to -2.93 g m<sup>-2</sup> and -0.79 to 0.75 g m<sup>-2</sup>, respectively, which can be attributed to the higher nutrient uptake of forage barley in SL-FC than in CL-FC. Consequently, the forage barley cultivation in SL-FC can potentially reduce nutrient leaching during the spring rainy season. Furthermore, nutrient balance can be reduced by cultivating forage crops during the winter season.

**Key words:** Forage barley, Nutrient balance, Weighing lysimeter

#### 서론

OECD는 농업환경지표로 양분수지를 활용하고 있으며, 농경지에서 작물 재배에 필요한 양분량을 초과한 양분의 공급은 수계 양분 유출 등 환경에 영향을 미친다[1]. 2017년 기준 우리나라의 양분수지는 OECD 국가 중 질소 수지는 221.9 kg·ha<sup>-1</sup>로 1위, 인 수지는 46.3 kg·ha<sup>-1</sup>로 2위를 차지하고 있어 양분 관리가 시급한 실정이다[2]. Yang 등[3]은 축산물의 소비

\*Corresponding author: Ye-Jin Lee

Phone: +82-63-238-2446; Fax: +82-63-238-3822;

E-mail: leeyj418@korea.kr

량 증대와 도시화로 인해 농경지 면적의 감소가 가장 큰 원인으로 양분수지를 관리하기 위해서는 유입되는 양분의 양을 줄이고 작물 생산을 통하여 산출되는 양분량을 늘려야 한다고 보고하였다. 우리나라는 1990년 환경 오염 문제가 대두되며 토양의 생산 능력 및 유지를 위한 비옥도 관리 기술의 전환을 요구하는 시점으로 친환경 토양 관리로 전환이 시작되었다[4]. 현실적으로 농경지를 확장하여 양분산출량을 늘리는 것은 어려움이 있으므로 기존 농경지에 간작으로 재배하는 것이 양분산출량을 증진시킬 수 있을 것이며, 환경 농업 실천의 한 방안으로 소득 작물 전·후작으로 곡류 작물을 도입하는 윤작의 작부 체계가 유리함을 보고하였다. 농업기술서에서 농한기 후기작으로 청보리 재배는 -8°C 이상의 지역에서 가능하다고 보고하였으며, 2000년대 중반부터 조사료 급여 및 수입 대체 목적으로 국내 동계 사료작물 활용성이 평가되었고[5], 한우의 성장과 육질 향상에 청보리 사일리지의 효과가 있다고 사료 작물로서 이용성이 보고되었다[6].

농경지의 작물 재배는 기상 조건에 영향을 받는데 강우 등의 환경요인에 따라 토양 수분 상태와 식물의 양분 흡수가 달라지게 되며 토양의 수분 상태는 작물 생산량에 결정적인 역할을 할 수 있다. 토양의 보수성은 모래, 점토 함량 등의 토성과 입단 형성과 관련된 유기물 함량 등에 따라 달라질 수 있으며, 토양 공극은 식물이 이용할 수 있는 수분을 저장하지만 토양 중 뿌리, 미소동물, 점토의 수축 및 팽창 등에 의해 형성된 대공극은 수분을 보유하지 못하고 아래로 침투시키기 때문에 지하 배수와 직접적으로 연관된다[7-9]. 라이시미터는 토양에서 수분의 이동을 직접적으로 측정할 수 있는 장비로서 스위스에서는 중량식 라이시미터를 이용하여 토양 피복조건, 비료 사용량, 유기 농업 등 다양한 처리 조건에서 물 수지를 평가하였으며[10], 미국에서는 라이시미터를 활용하여 기상 조건에 따른 작물 종류별 누적 질소 용탈량을 평가하였다[11]. 토양 단면을 그대로 채취한 중량식 라이시미터는 설치 비용이 비싸기 때문에 반복구를 설치하거나 처리구를 다양하게 할 수 없는 단점은 있으나 현장의 토양 상태를 유지한 상태에서 토양 특성에 따른 물의 이동을 정량하고, 용탈된 양분을 정밀하게 측정할 수 있다. 국립농업과학원에서는 2013년에 비교란 중량식 라이시미터를 도입하여 논토양에서 양분유출량, 밭토양의 양·수분 유출량을 모니터링 하여 콩 재배에서 물관리 방법에 따른 양분의 용탈과 작물 흡수[12], 배추 재배에서 토성별 물수지 비교와 질소 수지 분석[13] 등이 정량적으로 측정 및 연구되고 경사지 라이시미터에서 토양유실량[14] 등이 연구되고 있다. 지속적이고 안전한 작물 생산을 위해 장기적인 관점에서

농업 재배 환경과 토양 양분 변화, 양분 수지 및 작물 수량에 대한 다양한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 동계 작물 재배에 따른 양분 수지 절감 효과를 분석하기 위하여 중량식 라이시미터를 이용하여 청보리 재배 여부에 따른 양분 유출과 양분 수지를 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 라이시미터 시험구 처리 및 비료사용

본 실험은 전라북도 완주군 소재 국립농업과학원의 토양 수분이동 실험동에 위치한 깊이 1.5 m, 면적 1.0 m<sup>2</sup>인 중량식 라이시미터에서 고추 재배 후기작으로 청보리(*Hordeum vulgare* L., 영양)를 2020년 10월 30일부터 2021년 4월 25일까지(1년차)와 2021년 10월 29일부터 2022년 4월 24일까지(2년차) 재배하였다. 점토함량이 18% 이상인 식질 토양에서 청보리 재배(CL-FC)와 작물을 재배하지 않은 나지(CL), 점토함량이 18% 미만인 사양질 토양에서 청보리 재배구(SL-FC)와 나지(SL)로 총 4처리를 두었다.

실험에 사용된 토양의 화학성은 밭토양 적정범위와 비교했을 때 식질 토양은 유효인산 함량이 적정범위 이하이고, 사양질 토양은 유기물 함량이 적정범위 이하이며 유효인산 함량이 적정범위를 초과한 상태였다(Table 1). 청보리의 표준시비량에 따라 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 12-10-10 kg·10a<sup>-1</sup>으로 사용하였다(National Institute of Agricultural Science, 2017).

관수개시시점은 라이시미터 표면에서 10 cm 깊이에 설치되어 있는 토양수분장력계(Tensio160, UGT, Germany)의 토양수분장력 값이 -50 kPa에 도달하면 관수가 되게 설정하였다.

### 조사항목

재배 기간 중 온도는 국립농업과학원 중량식 라이시미터 포장에 설치된 자동기상관측시스템으로 측정하였으며, 강우량은 기상대의 강우량계 측정값을 사용하였다. 관수량은 라이시미터 무게 변화 값을 측정하여 강우량과 관수량을 비교 및 분석하여 투입 물량으로 산정하였다.

라이시미터 무게 변화 값은 라이시미터의 베셀 바닥에 설치된 로드셀(무게측정)에서 10분 간격으로 무게 변화를 자동 관측 저장하였으며, 라이시미터 표면에서 유거되는 물량은 전량 수집하여 무게를 측정하여 지표면 유출량으로 기록하였고, 토양 함수율은 라이시미터의 지표면에서 30 cm 깊이에 설치되어 있는 토양 수분센서(UMP-1, UGT, Germany)에 측정된 값을 사용하였다(Fig. 1).

Table 1. Soil characteristics of lysimeter soils before experiment

| Soil texture      | pH<br>(1:5 H <sub>2</sub> O) | EC<br>(dS m <sup>-1</sup> ) | OM<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | T-N<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Ex. Cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) |         |         |
|-------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|---|---------|---------|
|                   |                              |                             |                             |                              |   | K   | Ca      | Mg      |
| Clay loam         | 6.9                          | 0.2                         | 25                          | 1.5                          | 197   | 0.40  | 5.7     | 3.0     |
| Sandy loam        | 6.6                          | 0.2                         | 15                          | 1.2                          | 918   | 0.50  | 5.2     | 2.0     |
| Appropriate range | 6.0-7.0                      | ≤ 2                         | 20-30                       | -                            | 300-500   | 0.5-0.8   | 5.0-6.0 | 1.5-2.0 |

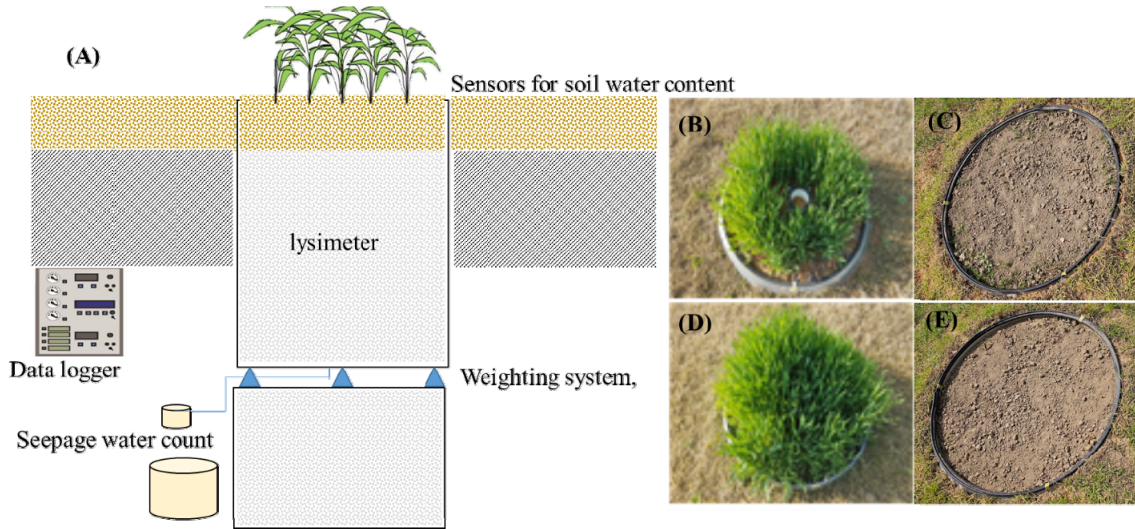


Fig. 1. Appearance of weighting lysimeter and experiment. weighting lysimeter vertical view (A), cultivation of forage barley on clay loam soil with more than 18% clay content (B), bare clay loam (C), cultivation of forage barley on sandy loam soil with less than 18% clay content (D), and bare sandy loam soil (E).

지하 배수량은 라이시미터에 설치되어 있는 지하 배수측정기(Tipping Counter, 100 ml/1 tipping)를 이용하여 1시간 간격으로 자동 측정하였다. 증발산량은 총 강우량(mm·day<sup>-1</sup>)과 관수량(mm·day<sup>-1</sup>)의 합에 총 유출량인 유거수량(mm·day<sup>-1</sup>), 지하 배수량(mm·day<sup>-1</sup>)의 합을 뺀 것으로 아래와 같이 산출하였다[15]. 일 증발산량 값은 0시부터 24시까지 합산하여 결정하였으며, 재배 기간 중 유거수는 발생하지 않았다. 양분 지하 유출량은 지하로 배수되어 나온 토양 용액 전량을 채취하여 양분 함량을 아래와 같이 분석하였다.

$$\text{증발산량(ET)} = \text{총 강우량} + \text{관개량} - \text{지하배수량} - \text{유거수량} \quad (1)$$

$$\text{양분 유출량(kg·ha}^{-1}\text{)} = \text{지하 배수량(L·ha}^{-1}\text{)} \times \text{토양용액 중 양분별 함량(mg·L}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

양분수지 산정은 라이시미터 내에서 양분 투입량(Input: 비료, 퇴비, 강우 등)에 따른 제거량(Output: 작물 흡수, 지표 유출수, 지하 유출수)으로 아래와 같이 산출하였다[16].

$$\text{양분수지(kg·ha}^{-1}\text{)} = \text{양분별 input} - \text{output} \quad (3)$$

토양용액 양분함량 분석은 지하 유출로 나온 토양 용액과 강우에 의한 지표면의 유거수를 전량 채취하여 분석을 진행하였으며, 토양 용액은 수질오염공정시험기준(Ministry of Environment, 2017)에 준하여 분석하였다. 토양 pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 진탕 후 각각 pH, EC meter를 사용하여 측정하였고, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Laca-ster법으로 분석하였다. 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 양이온은 1 M NH<sub>4</sub>OAc (pH 7)로 침출하여 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES, GBC, Australia)로 분석하였다.

생육조사는 초장, 생체중, 건물중을 수확기에 조사하였다. 식물체 분석은 식물체를 건조 후 분쇄하여 시료 0.5 g에 cons H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 mL와 50% HClO<sub>4</sub>용액 10 mL를 가한 후 310-410°C 정도에서 분해 후 냉각시켜 여과하여 사용하였으며, 질소, 인산, 칼륨 등의 무기 성분의 함량은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법(National Institute of Agricultural Science, 2000)에 따라 분석하였다. 침출수 NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N은 이온 자동분석기(OuAAtro, Seal analytical, USA)로 측정하였다. 양분 흡수량은 식물체 분석값을 사용하여 분석에 사용된 시료량에 전체 건물중으로 환산하여 수확된 작물의 전체 양분 흡수량으로 산정하였다.

**통계처리**

생육 특성은 10반복하였으며, 각 처리간 통계적 유의성 검정은 SAS package (Enterprise Guide V.7.1, SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 유의수준 p<0.05에서 t검정하였다.

**결과 및 고찰**

**청보리 재배기간 중 기상과 지하 유출량**

청보리의 겨울작기 재배기간은 10월부터 이듬해 4월로 재배 기간 중 월 평균 온도와 월 누적 강우량을 조사하였다(Fig. 2). 청보리는 -8°C 이상에서 재배가 가능한데, 재배 기간 중 월 평균 온도는 1월에 가장 낮아 평균 -1°C를 나타내어 청보리 재배에 적합하였다[7]. 보리의 생육은 출아기, 아생기, 이유기, 유모기, 분얼기, 유수형성기, 절간신장기, 수잉기 이후 출수하게 되는데, 일반적으로 11월 하순경 평균 기온이 0°C 이하로 떨어지면 보리의 생육은 정지하게 되고 월동 상태에 들어가며 일평균 온도가 0°C 이상이 5-7일 지속될 때 재생기로 판단한다[7]. 본 실험에서는 2020년 12월 4일과 2021년 12월

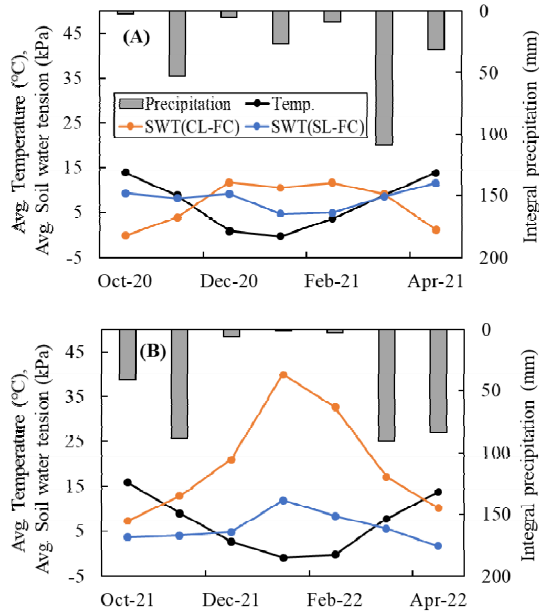


Fig. 2. Monthly precipitation, average temperature, and average soil water tension (SWT) during forage barley cultivation. From October 2020 to April 2021 (A) and from October 2021 to April 2022 (B). Forage barley cultivation in clay soils (CL-FC), and sandy loam soils (SL-FS).

13일에 일 평균 온도가 0°C 이하로 떨어져 월동기에 접어들었으며, 이듬해 2021년 2월 16일, 2022년 2월 24일 이후에는 일 평균 기온이 0°C 이상으로 3월부터는 재생기로 확인되었다. 생육이 왕성하였던 4월의 경우 13.7-13.8°C 정도를 나타내었다. 월 누적 강우량은 1년차인 2021년 3월에 누적 강우량이

108.8 mm으로 가장 많았으며, 2020년 10월, 12월과 2021년 2월에는 거의 발생하지 않았고, 2년차에는 2021년 12월부터 2022년 2월까지 강우가 거의 없었다(Fig. 2). 재배 기간 중 누적 강우량은 1년차에는 234.9 mm, 2년차에는 313.6 mm로 연도마다 차이가 있었다. Park[17]은 보리의 수분스트레스 실험에서 토양수분장력은 -0.05 bar, -0.2 bar, -0.5 bar, -1.0 bar, -5.0 bar, -10.0 bar에서 토양수분장력이 -1.0 bar 이하로 떨어지면 간장과 절간장이 짧아지고 엽폭과 엽장이 짧아졌으며, -0.5 bar (-50 kPa) 이하에서는 생육에 큰 차이가 없었고 수분이용효율이 높았다고 보고하였던 것으로 보아 본 실험에 관수 개시점을 토양수분장력 -50 kPa로 설정한 것은 적절한 것으로 생각되며, 재배기간 동안 토양수분장력이 -50 kPa 이하로 내려가지 않아 추가 관수가 발생하지 않았고, 청보리 재배에 한발 스트레스는 없었던 것으로 생각된다(Fig. 2).

지하유출량은 작물을 재배하지 않는 나지 식질 토양에서 61.7-78.4 mm로 가장 많았다. 사양토는 급격하게 수분 유출량이 증가하지 않았고 강우에 따라 증가했다가 감소하는 양상을 보였으며, 강우량이 20 mm 정도 이상 많이 올 경우 발생하였다(Fig. 3). 토양의 수분 이동은 강우량과 수리전도도에 따라 달라지는데 토양을 구성하고 있는 구조에 따른 공극의 크기, 분포 양상 등에 따라 토양내 물의 이동이 달라지며 토양 수분 상태에 영향을 받는다[18,19]. 일반적으로 사질 토양이 식질 토양보다 수분의 침투 속도가 빠르지만 식질 토양이 건조 시 수축으로 인하여 대공극의 형성이 쉽게 일어나게 되면 토양의 침투 속도가 달라질 수 있다[20]. 본 실험에서 사용한 라이시미터의 토양은 비교란 상태로서 식토의 경우 점토에 의한 수축 팽창 등에 대공극이 그대로 유지되고 있어 배수량이

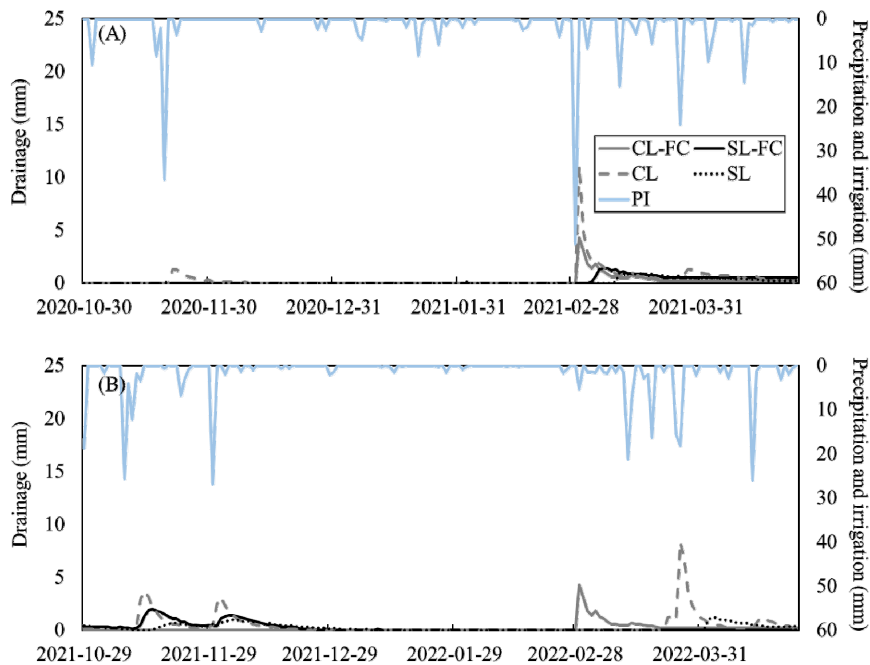


Fig. 3. Precipitation and irrigation (PI), and evapotranspiration (ET) (CL-FC, forage barley cultivation in clay soils; SL-FS, forage barley cultivation in sandy loam soils; CL, clay bare soils; SL, sandy bare soils) during forage barley using weighing lysimeter. From October 2020 to April 2021 (A) and from October 2021 to April 2022 (B).



Table 2. Growth of forage barley during harvest season according to soil types

| Year      | Treatment | Plant height (cm)    | Fresh weight (g m <sup>-2</sup> ) | Dry weight (g m <sup>-2</sup> ) |
|-----------|-----------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 2020-2021 | CL-FC     | 77.9                 | 2480                              | 706.4                           |
|           | SL-FC     | 84.7 <sup>***y</sup> | 3830                              | 714.3                           |
| 2021-2022 | CL-FC     | 86.0                 | 3030                              | 1035.8                          |
|           | SL-FC     | 106.5 <sup>***</sup> | 5935                              | 1458.9                          |

<sup>y</sup>Asterisks indicate significant differences (t-test < 0.05), each value is the mean of 10 replications.

증가한 것으로 생각된다.

#### 토성별 작물 생육과 토양 수분함량 변화

Table 2는 2020년 10월부터 2022년 4월까지 청보리를 재배한 수확기 생육을 조사하였던 결과이다. 2년간 수확한 청보리의 평균 초장이 식질토양에서 77.9-86.0 cm으로 84.7-106.5 cm인 사양질 토양보다 작았다. 배추의 경우에도 생체중, 엽면적 등 전반적인 생육이 사양토 > 양토 > 미사질 식토 순으로 나타났으며, 증발산량도 같은 경향을 보였던 것이 토양의 수분 보유력 차이라고 보고한 것과 같은 결과이다[19]. 노지 재배의 경우 기상 상태에 따라 토양의 수분 상태가 달라지고 점토 함량이 높은 토양이 상대적으로 수분 보유력이 높는데, 본 실험에 사용한 식질 토양이 사양질 토양보다 점토 함량이 높고 토양 함수율이 높았던 것으로 보아 토양 수분에 민감한 작물인 보리의 생육에 차이가 발생한 것으로 생각된다.

재배 동안 토심 30 cm 깊이의 토양 수분함량은 작물이 없었던 나지에서 30-40%를 유지하였으나, 작물 재배구인 SL-FC와 CL-FC에서는 보리의 생육 재생기인 3월 이후에는 18.1-

21.8%까지 낮아졌다(Fig. 4). 식물이 토양의 수분을 흡수하는 기작은 수동적인 흡수가 90% 이상으로 증산에 의하여 잃어버리는 수분량을 모세관 현상에 의해 끌어올리게 된다[4]. 나지와 청보리 재배구의 근권 깊이의 수분함량 변화를 보면 청보리 재배구에서 가장 생육이 좋았던 4월에 나지 대비 20.6-27.7% 감소한 것을 확인하였다(Fig. 4). 식물이 흡수한 물의 대부분은 기공을 통해 증발산으로 공기 중으로 이동하는데[21], 청보리 재배구에서 근권의 수분함량이 감소한 것은 청보리의 생체중이 증가함에 따라 증발산량이 증가했기 때문인 것으로 생각된다. 체코의 봄보리와 겨울밀 재배에서 증발산량을 기반으로 하여 2001-2018년 수확량을 예측한 것과 같이 청보리의 생체중이 컸던 사양질 토양에서 근권의 토양 수분 감소율이 가장 많았다[22].

증발산량은 기온뿐만 아니라 토양의 수분 상태에 따라서 많은 영향을 받으며, 강우 등에 의해 토양의 수분이 많아지면 증발산량이 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 5). Kim 등[23]의 간지 라이시미터 콩 재배에서 습도가 85% 이상 강우가 있던 날 증발산량이 급격히 감소하였으며 초장이 적었던 것은 과습

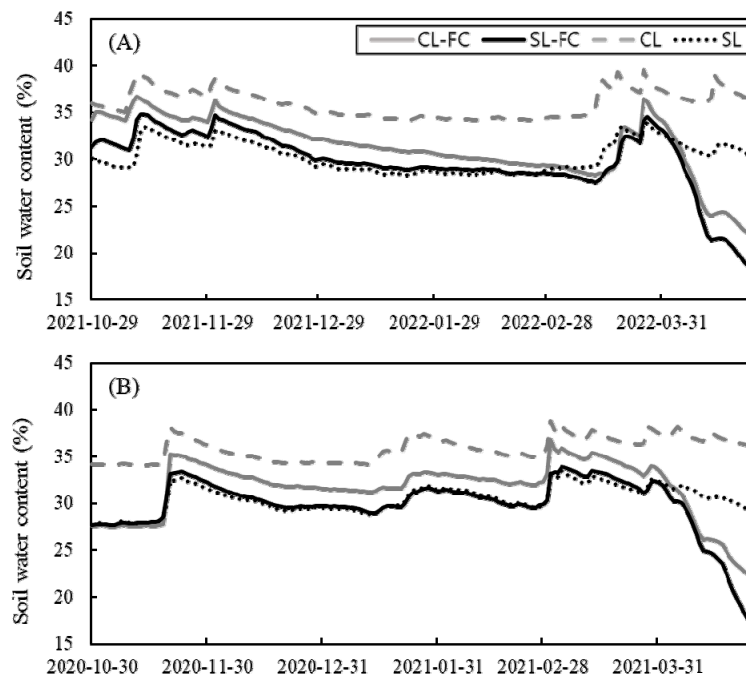


Fig. 4. Soil water content at 30 cm depth during forage barley cultivation. From October 2020 to April 2021 (A) and from October 2021 to April 2022 (B). CL-FC, forage barley cultivation in clay soils; SL-FS, forage barley cultivation in sandy loam soils; CL, clay bare soils; SL, sandy bare soils.

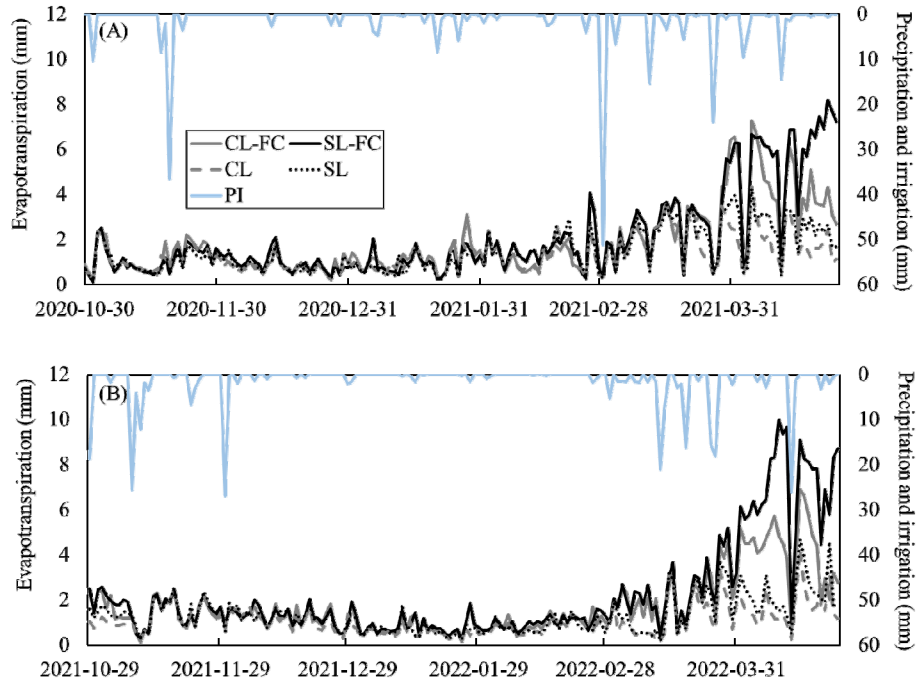


Fig. 5. Precipitation and irrigation (PI), and evapotranspiration (ET) (CL-FC, forage barley cultivation in clay soils; SL-FS, forage barley cultivation in sandy loam soils; CL, clay bare soils; SL, sandy bare soils) during forage barley using weighing lysimeter. From October 2020 to April 2021 (A) and from October 2021 to April 2022 (B).

에 의한 성장량 감소에 기인한 것으로 보고하였던 것과 같은 결과이다.

**청보리의 양분 흡수량과 양분수지**

청보리의 양분 흡수량은 2년차에 질소, 인산과 칼륨 모두 가장 높았으며, CL-FC보다 SL-FC에서 높았다(Table 3). 토양 양분은 물에 이온 형태로 녹아 물과 함께 이동하기 때문에 수분 이동과 양분 유출을 함께 비교하여야 한다. 추파한 보리는 월동 직후 평균 기온이 0°C 이상으로 올라가면 다시 생장을 시작하여 초장과 분얼이 증대되는데, 본 실험 결과에서는

동일한 양분을 사용하였으며 강우에 의한 양분량도 비슷하였으나 사양토에서 생육과 증발산량이 높았던 것이 작물 흡수량에 영향을 준 것으로 보여진다.

토성별 양분 유출량이 청보리 재배구보다 나지에서 높았고, 질소는 식질 토양에서 높았으며, 인산은 거의 용출되지 않았고, 칼륨은 사양질 토양에서 유출량이 높았다(Table 3). 수분 보유력이 높은 식질 토양은 사질 토양보다 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 확산이 느리게 일어난다[24]. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 달리 토양에 흡착하는 힘이 약하여 용탈되거나 휘산되기 쉽다. Lee 등[13]의 배추 재배에서도 점토 함량이 높았던 식토에서 건조시 수축으로 인하여

Table 3. Nutrient balance according to soil types and crop cultivation

| Year      | Treatments         | Input (g m <sup>-2</sup> ) |      |      |               |     |     | Output (g m <sup>-2</sup> ) |      |       |               |                 |      | Input - Output |       |        |
|-----------|--------------------|----------------------------|------|------|---------------|-----|-----|-----------------------------|------|-------|---------------|-----------------|------|----------------|-------|--------|
|           |                    | Rainfall                   |      |      | Fertilization |     |     | Crop uptake                 |      |       | Seepage water |                 |      | N              | P     | K      |
|           |                    | N                          | P    | K    | N             | P   | K   | N                           | P    | K     | N             | P               | K    |                |       |        |
| 2020-2021 | CL-FC <sup>z</sup> | 0.44                       | 0.15 | 0.31 | 12            | 4.3 | 8.3 | 13.17                       | 1.82 | 14.36 | 0.06          | ND <sup>y</sup> | 0.01 | -0.79          | 2.63  | -5.76  |
|           | CL                 | 0.44                       | 0.15 | 0.31 | -             | -   | -   | -                           | -    | -     | 0.25          | 0.01            | 0.04 | 0.19           | 0.14  | 0.27   |
|           | SL-FC              | 0.44                       | 0.15 | 0.31 | 12            | 4.3 | 8.3 | 12.85                       | 2.97 | 16.21 | 0.02          | 0.01            | 0.08 | -0.43          | 1.47  | -7.68  |
|           | SL                 | 0.44                       | 0.15 | 0.31 | -             | -   | -   | -                           | -    | -     | 0.01          | 0.01            | 0.12 | 0.43           | 0.14  | 0.19   |
| 2021-2022 | CL-FC              | 0.47                       | 0.03 | 0.19 | 12            | 4.3 | 8.3 | 11.42                       | 2.43 | 15.18 | 0.3           | ND <sup>y</sup> | 0.1  | 0.75           | 1.9   | -6.79  |
|           | CL                 | 0.47                       | 0.03 | 0.19 | -             | -   | -   | -                           | -    | -     | 0.65          | 0.01            | 0.18 | -0.18          | 0.02  | 0.01   |
|           | SL-FC              | 0.47                       | 0.03 | 0.19 | 12            | 4.3 | 8.3 | 15.34                       | 5.65 | 36.62 | 0.07          | ND              | 0.25 | -2.93          | -1.32 | -28.38 |
|           | SL                 | 0.47                       | 0.03 | 0.19 | -             | -   | -   | -                           | -    | -     | 0.05          | ND              | 0.25 | 0.42           | 0.03  | -0.06  |

<sup>z</sup>CL-FC, forage barley cultivation in clay soils; SL-FS, forage barley cultivation in sandy loam soils; CL, clay bare soils; SL, sandy bare soils

<sup>y</sup>ND: Non detected

대공극 형성으로 투수 속도가 달라져 수분 특성이 질소 용탈량에 영향을 미쳤다고 보고하였던 것과 같이 청보리 재배에서도 식토에서 지하 유출수의 질소 용탈량이 많았다.

2년차의 토성 간 청보리 양분흡수량을 보면, 식질 토양은 사양질 토양 대비 질소는 74%, 인은 43%, 칼륨은 41% 수준이었다. 사양질 토양에서 청보리가 흡수한 인산은 시용한 인산질 비료의 양(4.3 kg 10a<sup>-1</sup>)의 130% 수준으로 토양 인산을 이용했다고 볼 수 있으며, 토양의 유효인산 함량은 작물의 양분 흡수와 양분수지에 영향을 미쳤다고 판단된다. 토양 중 인산의 함량이 높은 것은 생육의 제한 요소로 작용하지 않고 질소 비료와 상승효과를 나타내어 질소 흡수량을 높일 수 있다[25]. 배추 재배에서도 인산의 함량이 5.8배 높았던 사양토에서 질소의 이용율을 높이는데 기여하였다고 보고하였는데[13], 본 실험에서도 Table 3의 토양분석 결과와 비교하여 보면 사양질 토양에서 인산의 양이 4-5배 가량 많았던 것이 작물의 질소 흡수량을 높인 것으로 생각된다.

청보리 재배 시 양분수지는 식질 토양에서는 1, 2년차, 사양질 토양에서는 1년차에 인 수지가 양의 값을 나타냈고, 나지보다 높은 수지를 보였다. 양분수지는 강우와 비료로 투입한 양분에서 작물의 흡수와 지하 유출된 양분을 뺀 값으로 양분수지가 양의 값을 나타내면 토양에 양분이 남아있다고 할 수 있다. 인의 경우 토양에서 이동성이 낮아 지하 유출량이 거의 없고, 질소와 칼리에 비해 투입한 비료량 대비 작물 흡수량이 적기 때문에 청보리 재배구에서 인 수지가 높게 나타났다. 따라서 인 수지를 줄이기 위해서는 토양검정을 통해 적정량의 인산질 비료를 주고, 비료의 이용효율을 높이는 시비 방법이 필요할 것으로 판단된다.

질소와 칼륨의 경우, 청보리가 비료 투입량 이상을 흡수해 인과 달리 수지가 감소하기 때문에 동계 작물 재배는 양분수지 감축에 긍정적인 효과가 있을 것으로 판단된다. 뉴질랜드에서 겨울철 라이그라스 재배는 질소 흡수가 높아 효과적이라고 보고하였던 것[26]과 같은 결과로 SL-FC에서 질소 수지가 음의 값이 컸다. 칼륨은 식물체의 팽윤화 촉진에 중요한 역할을 하며 K<sup>+</sup>는 식물체 구성성분은 아니지만 동해 및 냉해를 감소시켜주는 작용을 한다. 칼륨은 식물은 세포의 팽압이 떨어지며 증산과 호흡이 왕성해지고 가뭄 및 냉해 피해가 커지게 되는데, 온실 토양 관리에서는 칼륨 이온의 투과성 변화는 동해의 주요한 증상 중 하나이며 칼슘 이온이 충분할 경우 칼륨 이온의 유출이 감소한다고 하였다고 보고하였다. 본 실험은 청보리는 겨울철 재배로 SL-FC에서 식물에 K<sup>+</sup>의 식물 흡수량이 많았던 것이 Table 2의 결과 동계작형 청보리 재배에서 CL-FC보다 SL-FC보다 생중량이 컸던 것에 영향이 있었을 것으로 생각된다. 농진청에서는 소득 작물 재배 전·후작으로 맥류 등 곡류 작물을 도입하는 것이 환경농업 실천의 방안으로 바람직하고 발표하였으며, Klammler와 Fank [15]가 3개의 중량식 라이시미터를 이용하여 2007-2011년간 옥수수 및 동계 보리 등에 질소 비료 저감과 유기농법을 적용하였을 때 질소 용탈을 감소시킬 수 있음을 보고하였던 것과 같이 본 실험에서도 청보리를 농한기에 후기작으로 재배하는 것이 양분수지에서

유리함을 확인할 수 있었다.

이상의 결과 사양토에서 겨울철 청보리 재배가 생육, 증발산량과 양분 흡수량이 높았고, 양분수지가 음의 값으로 적합하였으며, 후기작으로 작물을 재배할 경우 앞그루 작물과 뒷그루 작물의 양분이용특성을 파악하여 작물을 선정하는 것이 바람직할 것으로 이에 관한 다양한 연구 수행이 필요할 것으로 생각된다.

## 적 요

중량식 라이시미터를 이용하여 사양질과 식질 토양에서 동계 작물인 청보리 재배 여부에 따른 양분 유출과 양분 수지를 평가하였다. 양분 유출과 관련된 지하 배수량은 식질에서 가장 많았으며, 동계 작물 재배 여부에 따른 토양 수분함량을 비교해보면 나지에서는 사양질과 식질 토양 모두 30-40%를 유지하였고, 청보리 재배구는 생육 재생기인 3-4월에 평균 증발산량이 평균 2.1-6.7 mm·day<sup>-1</sup>이었으며, 토양 수분함량은 18.1-21.8%까지 낮아졌다. 동계작물 재배 시 봄철 생육재생기에 생체량이 증가함에 따라 증발산량도 증가하기 때문에 수분이 지상부로 이동하므로 양분의 지하유출을 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 사양질 토양에서 청보리의 재배에 따른 양분수지는 비료 공급량에 비해 작물 흡수량이 많아 음의 값을 나타냈으며, 토양에 집적된 양분을 이용했을 것으로 추측된다. 따라서 동계에 적정량의 비료를 주고 사료작물을 재배하면 경지 이용율을 높이고, 양분수지를 낮추는데 도움이 될 것으로 판단된다.

## Note

The authors declare no conflict of interest.

## Acknowledgement

This work was supported by the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01722104) and 2023 the Rural Development Administration Fellowship Program of National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

1. Kremer AM (2013) Methodology and Handbook Eurostat/OECD-Nutrient Budgets, pp. 18-64, European Commission Eurostat, Luxembourg.
2. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

3. Yang HY, Kim JG, Oh BW, Seo IH (2020) Improvement of nutrient balance using feed crops for regional nutrient management. *Journal of Bio-Environment Control*, 29(1), 89-95.  
<https://doi.org/10.12791/KSBEC.2020.29.1.89>.
4. Ryu JH, Lee KS, Chung DY (2008) Review of management methods and criteria for environmentally-sound soil. *Korean Journal of Agricultural Science*, 35(1), 53-67.
5. Park HS, Hwang KJ, Park NG, Choi GJ, Lee JK, Cheon DW, Ko MS (2008) Comparison of forage production and feed value of winter forage crops in Jeju. *Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science*, 28(3), 215-220.
6. Cho WM, Cho YM, Hong SK, Jeong ES, Lee JM, Yoon SK (2000) Effects of feeding whole crop barley silage on growth performance, feed efficiency and meat quality in hanwoo steers. *Korean Journal of Animal Science*, 42(2), 181-188.
7. Kung KJ, Steenhuis TS, Klavivko EJ, Gish TJ, Bubbenzer G, Helling CS (2000) Impact of preferential flow on the transport of adsorbing and non-adsorbing tracers. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1290-1296. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441290x>.
8. Shipitalo MJ, Gibbs F (2000) Potential of earthworm burrows to transmit injected animal wastes to tile drains. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2103-2109.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462103x>.
9. Akay O, Fox GA (2007) Experimental investigation of direct connectivity between macro pores and subsurface drains during infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 71(5), 1600-1606.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0359>.
10. Oberholzer S, Prasuhn V, Hund A (2017) Crop water use under Swiss pedoclimatic conditions-Evaluation of lysimeter data covering a seven-year period. *Field Crops Research*, 211, 48-65.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.003>.
11. Meisinger JJ, Ricigliano KA (2017) Nitrate leaching from winter cereal cover crops using undisturbed soil-column lysimeters. *Journal of Environmental Quality*, 46(3), 576-584.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2016.09.0372>.
12. Lee YJ, Han KH, Lee SB, Sung JK, Song YS, Lee DB (2017) Nutrient leaching and crop uptake in weighing lysimeter planted with soybean as affected by water management. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 36(3), 147-153.  
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.3.30>.
13. Lee YJ, Ok JH, Lee SB, Sung JK, Song YS, Lee DB (2018) Nitrogen leaching and balance of soils grown with cabbage in weighing lysimeter. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 37(4), 166-171.  
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2018.37.3.23>.
14. Lee SI, Ok JH, Son JW, Hwang SA, Oh BY, Hur SO (2022) Changes of soil physico-chemical properties by soil loss of bare condition using slope lysimeter. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 55(4), 402-412. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.4.402>.
15. Klammler G, Fank J (2014) Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). *Science of the Total Environment*, 499, 448-462.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.009>.
16. Baligar VC, Fageria NK, He ZL (2001) Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8), 921-950.  
<https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>.
17. Park ME (1995) The effect of soil moisture stress on growth of barley and grain quality. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 28(2), 165-175.
18. Durner W (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211-223.  
<https://doi.org/10.1029/93WR02676>.
19. Ritchie JT (1981) Soil water availability. *Plant and Soil*, 58(1/3), 327-338.
20. Beven, K, Germann P (1982) Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18, 1311-1325. <https://doi.org/10.1029/WR018i005p01311>.
21. Nguyen HT, Park J, Ann T, Lee J, Myoung D, Cho Y, Son J (2010) Analysis of relationship among growth, environmental factors and transpiration in soilless culture of paprika plants. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 28(1), 59-64.
22. Jurečka F, Fischer M, Hlavinka P, Balek J, Semerádová D, Bláhová M, Anderson MC, Hain C, Žalud Z, Trnka M (2021) Potential of water balance and remote sensing-based evapotranspiration models to predict yields of spring barley and winter wheat in the Czech Republic. *Agricultural Water Management*, 256, 107064.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107064>.
23. Kim JS, Kim DH, Jung KY, Lee SH, Chun HC, Kwon SH, Seo JD, Kim JH (2016) Analyzing evapotranspiration of soybean at different groundwater levels using mini lysimeters. *Korea Journal of Soil Science and*



- Fertilizer Conference, 69.
24. Gaines TP, Gaines ST (1994) Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(13-14), 2561-2570. <https://doi.org/10.1080/00103629409369207>.
  25. Kamprath, EJ (1987) Enhanced phosphorus status of maize resulting from nitrogen fertilization of high phosphorus soils. *Soil Science Society of America Journal*, 51(6), 1522-1526. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060021x>.
  26. Woods RR, Cameron KC, Edwards GR, Di HJ, Clough TJ (2016) Effects of forage type and gibberellic acid on nitrate leaching losses. *Soil Use and Management*, 32(4), 565-572. <https://doi.org/10.1111/sum.12297>.