Research Paper

The Effect of Carbon Dioxide Leaked from Geological Storage Site on Soil Fertility: A Study on Artificial Leakage

Seung Han Baek¹, Sang-Woo Lee¹, Woo-Chun Lee¹, Seong-Taek Yun², Soon-Oh Kim^{1,*}

¹Department of Geology and Research Institute of Natural Science (RINS), Gyeongsang National University (GNU), Jinju 52828, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Korea

*Corresponding author : sokim@gnu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 16 July 2021

Received in revised form 18 August 2021

Manuscript accepted 20 August 2021

Available online 31 August 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.4.409>

Research Highlights

- The effect of carbon dioxide leaked from geological storage sites on soil fertility was evaluated using an artificial injection facility in the laboratory.
- Several indicators of soil fertility were compared before and after the artificial injection of carbon dioxide into soils.
- Some indicators, such as nitrate-N, ammonia-nitrogen, available-phosphorus, available-sulfur, and available-boron, showed a tendency to decrease after the experiments, indicating that soil fertility could be affected by the leakage of carbon dioxide.

ABSTRACT

Carbon dioxide has been known to be a typical greenhouse gas causing global warming, and a number of efforts have been proposed to reduce its concentration in the atmosphere. Among them, carbon dioxide capture and storage (CCS) has been taken into great account to accomplish the target reduction of carbon dioxide. In order to commercialize the CCS, its safety should be secured. In particular, if the stored carbon dioxide is leaked in the arable land, serious problems could come up in terms of crop growth. This study was conducted to investigate the effect of carbon dioxide leaked from storage sites on soil fertility. The leakage of carbon dioxide was simulated using the facility of its artificial injection into soils in the laboratory. Several soil chemical properties, such as pH, cation exchange capacity, electrical conductivity, the concentrations of exchangeable cations, nitrogen (N) (total-N, nitrate-N, and ammonia-N), phosphorus (P) (total-P and available-P), sulfur (S) (total-S and available-S), available-boron (B), and the contents of soil organic matter, were monitored as indicators of soil fertility during the period of artificial injection of carbon dioxide. Two kinds of soils, such as non-cultivated and cultivated soils, were compared in the artificial injection tests, and the latter included maize- and soybean-cultivated soils. The non-cultivated soil (NCS) was sandy soil of 42.6% porosity, the maize-cultivated soil (MCS) and soybean-cultivated soil (SCS) were loamy sand having 46.8% and 48.0% of porosities, respectively. The artificial injection facility had six columns: one was for the control without carbon dioxide injection, and the other five columns were used for the injections tests. Total injection periods for NCS and MCS/SCS were 60 and 70 days, respectively, and artificial rainfall events were simulated using one pore volume after the 12-day injection for the NCS and the 14-day injection for the MCS/SCS. After each rainfall event, the soil fertility indicators were measured for soil and leachate solution, and they were compared before and after the injection of carbon dioxide. The results indicate that the residual concentrations of exchangeable cations, total-N, total-P, the content of soil organic matter, and electrical conductivity were not likely to be affected by the injection of carbon dioxide. However, the residual concentrations of nitrate-N, ammonia-N, available-P, available-S, and available-B tended to decrease after the carbon dioxide injection, indicating that soil fertility might be reduced. Meanwhile, soil pH did not seem to be influenced due to the buffering capacity of soils, but it is speculated that a long-term leakage of carbon dioxide might bring about soil acidification.

Keywords : carbon dioxide, geological storage, leakage, soil fertility, artificial injection test

Citation: Baek, S.H., Lee, S.-W., Lee, W.-C., Yun, S.-T., Kim, S.-O. (2021) The Effect of Carbon Dioxide Leaked from Geological Storage Site on Soil Fertility: A Study on Artificial Leakage. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.54, p.409-425, doi:10.9719/EEG2021.54.4.409.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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 original work is properly cited.

pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

지중 저장지로부터 누출된 이산화탄소가 토양 비옥도에 미치는 영향: 인위 누출 연구

백승한¹ · 이상우¹ · 이우준¹ · 윤성택² · 김순오^{1,*}

¹경상국립대학교 지질과학과 및 기초과학연구소(RINS)

²고려대학교 지구환경과학과

*책임저자 : sokim@gnu.ac.kr

요 약

이산화탄소가 지구온난화를 초래하는 대표적인 온실가스로 지목되면서 대기 중의 이산화탄소 농도를 줄이기 위하여 많은 노력들이 진행되어 왔다. 그러한 노력들 중 특히 CO₂ 포집 및 지중 저장기술(carbon dioxide capture and storage, CCS)이 감축 목표량을 달성하기 위해서 필수적으로 고려되고 있다. 그러나 이러한 지중 저장기술이 상용화되기 위해서는 안전성이 보장되어야 한다. 특히 이산화탄소 누출이 농경지에서 발생할 경우에는 작물 성장과 관련되어 많은 문제를 야기할 수 있다. 이에 본 연구에서는 지중 저장지로부터 누출된 이산화탄소가 토양 비옥도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 이를 위하여 인위적인 이산화탄소 누출 시험을 수행하였으며, pH, 양이온치환용량, 교환성 양이온, 전기전도도, 토양 유기물 함량, 총 질소, 질산태 질소, 암모니아태 질소, 총 인, 유효태 인산, 총 황, 유효태 황, 유효태 붕소 등과 같은 토양의 화학적 특성들을 비옥도 지시 인자로 선정하였다. 누출 시험은 비경작지 토양 한 종류와 경작지 토양 두 종류(옥수수과 콩 재배)를 대상으로 이루어졌다. 비경작지 토양은 거친 모래가 많은 사질토양으로 공극률은 42.6%로 조사되었으며, 경작지 토양인 옥수수 재배 토양은 양질 사토(loamy sand)로 공극률이 46.8%이었다. 콩과식물(soybean) 재배 토양은 옥수수 재배 토양과 동일한 양질 사토로서 공극률이 48%로 조사되었다. 누출시험을 위해 6개의 인공누출 칼럼 장치를 이용하여 이산화탄소를 주입하였다. 이산화탄소 주입은 비경작지와 경작지 토양의 경우 각각 60일과 70일 동안 진행하였다. 이산화탄소 누출 후 비경작지 및 경작지 토양에 대하여 각각 12, 14일 간격으로 1 공극 부피의 인공강우 모사 시험을 수행한 후 용출액과 토양 시료를 채취하여 비옥도 지시 인자를 분석하였으며, 이산화탄소 누출 전후 변화 양상을 비교 평가하였다. 토양 내 잔류 교환성 양이온, 전기전도도, 토양 유기물 함량, 총질소, 총인 등은 이산화탄소의 영향을 크게 받지 않은 것으로 나타났다. 그러나 질산태 질소, 암모니아태 질소, 유효 인산, 유효 황, 유효 붕소 등은 감소하는 경향을 보였으며 이에 의해 토양 비옥도를 저하시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 토양의 완충능력 때문에 pH의 변화가 없었지만, 이산화탄소가 장기간 누출된다면 pH의 감소에 의한 토양 산성화가 초래될 가능성이 있을 것으로 예측된다.

주요어 : 이산화탄소, 지중 저장, 누출, 토양비옥도, 인위 주입 시험

1. 서 론

지구온난화는 대량의 온실가스가 대기로 방출됨으로써 발생한다. 온실가스는 크게 이산화탄소, 아산화질소, 메탄, chlorofluorocarbons (CFCs) 등으로 나눌 수 있으며, 이 중 이산화탄소가 대표적인 온실가스로 알려져 있다. 대기 중의 이산화탄소 방출량을 감축하기 위하여 신재생 에너지 개발 및 활용, 원자력 에너지 대체 등과 같은 다양한 기술들이 요구되지만, 감축 목표량을 달성하기 위해서는 이산화탄소 포집 및 지중 저장기술(Carbon dioxide Capture and Storage, CCS)이 필수적으로 고려되고 있다 (White et al., 2003; Mikkelsen et al., 2010; Al-Traboulsi et al., 2012; Morales and Holben, 2013; Seigo et al., 2014; Chen et al., 2017).

지중 저장된 이산화탄소(CO₂)의 누출이 발생한다면 이산화탄소에 의해 토양의 물리·화학적 특성 및 비옥도에 영향을 미칠 수 있다. 토양의 비옥도는 식물이 필요로 하는 영양소의 적절한 공급을 포함한 식물의 생육을 가능하게 하는 토양의 능력으로 정의된다(Zhao et al., 2017; Buragienė et al., 2019; Gao et al., 2020; He et al., 2019). 토양 비옥도 특성 인자로는 pH, 양이온치환용량(cation exchange capacity, CEC), 교환성 양이온(exchangeable cations), 전기전도도(electrical conductivity, EC), 토양 유기물(soil organic matter, SOM), 총 질소(total-nitrogen, T-N), 질산태 질소(nitrate-nitrogen, NO₃-N), 암모니아태 질소(ammonia-nitrogen, NH₄-N), 총 인(total-phosphorus, T-P), 유효태 인산(available-phosphorus, Av. P (Av. P₂O₅)), 총 황(total-sulfur, T-S) 유효태 황(available-sulfur, Av. S

(SO_4)) 유효태 붕소(available-boron, Av. B)등이 있다.

토양의 다양한 특성 중 이산화탄소의 누출로 인하여 가장 큰 영향을 받는 인자는 pH로 알려져 있는데 이는 이산화탄소에 의한 탄산염의 생성으로 토양의 pH가 저하될 수 있기 때문이다(Oh and Richter, 2004). 토양 pH는 토양의 완충능력으로 인하여 회복될 수 있으나, 장기적인 관점에서는 이산화탄소의 영향으로 토양의 산성화가 진행될 수 있다. 또한, 총 인 및 총 질소 등 식물이 성장하는데 필요한 단백질 구성요소 등과 같은 비옥도 인자의 변화가 일어날 수 있다. 기존 선행연구에서 이산화탄소의 주입에 따라 pH 및 Av. P_2O_5 등과 같은 토양 비옥도에 대한 몇몇 인자만 다루었다(Oh and Richter, 2004; Boise et al., 2016; Moonis et al., 2017; Buragienė et al., 2019; Derakhshan-Nejad et al., 2020; Gao et al., 2020; Touhami et al., 2020). 이에 본 연구에서는 토양 비옥도에 영향을 미칠 수 있는 여러 인자들을 비교하여 지중 저장된 이산화탄소의 누출이 토양의 비옥도에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구지역 및 토양특성

지중 저장된 이산화탄소의 누출을 모사하기 위하여 비경작지 토양 한 종류와 경작지 토양 두 종류를 대상으로 시험을 진행하였다. 비경작지토양(non-cultivated soil, NCS)은 작물을 재배하지 않아 상대적으로 비옥도가 낮을 것으로 예상되는 토양으로 고려하였으며, 두 가지 경작지 토양은 옥수수 재배 토양(maize-cultivated soil, MCS)과 콩과식물(soybean-cultivated soil, SCS) 등이었다. 경작지 토양은 비경작지 토양보다 상대적으로 토양 비옥도가 높을 것으로 예상되었다. MCS는 질소를 소모(고갈)하는 특성이 있으며, SCS는 질소를 고정(생산)하는 특성이 있다(Yu et al., 2017; Kozhukhov et al., 2020). 따라서, 서로 다른 특성을 갖는 두 종류의 작물을 재배한 경작지 토양에 이산화탄소가 누출되었을 때 토양 비옥도는 어떠한 변화를 보이는지 비교 평가하고자 하였다. NCS는 이산화탄소 지중 저장 환경관리연구단(K-COSEM)에서 운영 중인 충북 음성군 소재 CO_2 인위누출시험 부지에서 채취하였으며, 거친 모래가 많은 사질토양으로 공극률은 42.6%로 나타났다. MCS는 경상남도 진주시 수곡면에 위치한 토양을 채취하였으며, 양질사토(loamy sand)로 공극률이 46.8%로 나타났다. SCS는 경상남도 진주시 내동면에 위치한 경작지에서 채취하였으며, 재배된 작물은 검은콩이며, 토성은 MCS와 동일한 양질사토(loamy sand)로 공극률이 48.0%로 나타났다.

2.2. 토양 비옥도 지시 인자 선정

토양의 비옥도를 나타내는 주요 인자와 보조 인자로 구분하여 선정하였다. 주요 인자는 식물의 생육과 대사 과정에 직접적으로 영향을 미치는 인자들을 의미하고, 보조 인자는 식물의 생육에 필수적이지는 않지만 유익하거나 해로운 작용을 할 수 있는 인자를 의미한다. pH는 작물의 생육을 결정하는 가장 중요한 요소로 작용하며, CEC와 교환성 양이온은 식물이 직접적으로 이용할 수 있는 영양분의 함량을 나타내는 지표로 이용된다(Kouadio et al., 2018). EC는 토양 용액 중 녹아있는 이온의 양으로 양분의 흡수할 수 있는 능력을 알 수 있고, SOM은 양분을 저장할 수 있는 능력을 나타내며, Total-N, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, Total-P, Av. P_2O_5 , Total-S, Av. S(SO_4)의 경우 단백질의 구성요소로 식물체의 성장에 영향을 준다. Av. B는 식물 효소의 보조 인자로 작용한다(Hong and Park, 1999; Hong et al., 2000; Yang et al., 2001; Kim et al., 2006; Choi et al., 2010; Ma et al., 2014; Souza et al., 2018). 또한, 중금속 중들은 식물의 대사 작용을 위해 소량으로 필요하지만, 고함량인 경우에 식물의 생육을 저해할 수도 있다.

2.3. 토양 및 강우 용출액 분석법

이산화탄소 인위 누출 시험을 수행한 토양의 pH와 EC의 분석은 토양과 증류수를 1:5로 혼합한 후 multi-meter로 측정하였고, CEC는 sodium acetate 방법, 교환성 양이온(exchangeable Na, Ca, Mg, K)은 1M ammonium acetate 방법을 이용하였다(US EPA, 1986; van Reeuwijk, 2002). T-N은 Kjeldahl 방법을 이용하였으며, T-P는 HClO_4 로 추출 후 ascorbic acid에 의한 몰리브덴(Mo) 청법을 이용하여 발색한 후 자외선-가시광선 분광광도계(UV-Vis spectrophotometer, Libra S22, Biochem, 미국)로 측정하였으며, Av. P (Av. P_2O_5)는 Lancaster 방법을 이용하였다. T-S는 $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ 추출 후 유도결합플라즈마분광기(ICP-OES, OPTIMA 8300DV, PerkinElmer, 미국)를 이용하여 측정하였으며, Av. S (SO_4)는 0.01M의 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 시약으로 30분 추출 후 이온크로마토그래프(IC, ICS-2000, Dionex, 미국)로 측정하였다(Table 1)(Ketterings et al., 2011; Saha et al., 2018). SOM은 tyurin 방법을 이용하여 측정하였다(RDA, 2010). $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 2M KCl로 2시간 추출 후 비색계(colorimeter)로 측정하였다. Av. B는 열수를 이용하여 추출 후 ICP-OES를 이용하여 측정하였다. 토양 중금속은 왕수 추출 후 ICP-OES를 이용하여 측정하였다. 강우 용출액의 pH, EC는 pH 미터기를 이용하였으며, 교환성 양이온(Na, K, Ca, Mg), T-S 및 Av. B의 경우 ICP-OES를 이용하여 분석하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 Av. S (SO_4)는

Table 1. Analytical methods for soil fertility indicators in soils

	Indicator	Pretreatment (extraction)	Analysis
Major	pH/EC	Distilled water	pH/EC meter
	CEC	Sodium acetate method	ICP-OES
	Ex. cation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})	1M ammonium acetate method	ICP-OES
	Soil organic matter (SOM)	Tyurin method	Titration
	Total-N (T-N)	Kjeldahl method	Titration
	$\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$	2M KCl extraction	Colorimeter
	Total-P (T-P)	HClO_4 digestion and Mo colorimetry	UV-vis spectrophotometer
	Available-P (Av. P (Av. P_2O_5))	Lancaster method	UV-vis spectrophotometer
	Total-S (T-S)	$\text{HNO}_3+\text{HClO}_4$ extraction	ICP-OES
	Available-S (Av. S (SO_4))	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ extraction	IC
Auxiliary	Available-B (Av. B)	Hot water extraction	ICP- OES
	Trace element (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, etc)	Aqua regia extraction	ICP- OES

Table 2. Analytical methods for soil fertility indicators in rainfall leachates

	Indicator	Analytical instrument
Major	pH/EC	pH/EC meter
	Ex. cation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})	ICP-OES
	Total organic carbon (TOC)	Autoanalyzer
	Total-N (T-N)	Autoanalyzer
	$\text{NO}_3\text{-N}$	IC
	$\text{NH}_4\text{-N}$	Colorimeter
	Total-P (T-P)	UV-vis spectrophotometer
	Available-P (Av. P (Av. P_2O_5))	UV-vis spectrophotometer
	Total-S (T-S)	ICP-OES
	Available-S (Av. S (SO_4))	IC
Auxiliary	Available B (Av. B)	ICP-OES
	Trace element (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, etc)	ICP- OES

이온크로마토그래프(IC)로 측정하였으며, T-N 및 TOC는 TN/TOC 자동 분석기(TOC-VCPN, Shimadzu, 일본)를 이용하였다. 또한, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 colorimeter를 이용하여 측정하였으며, T-P 및 Av. P (Av. P_2O_5)는 자외선-가시광선 분광광도계(UV-Vis spectrophotometer)를 이용하여 측정하였다(Table 2).

2.4. 이산화탄소 누출 시험 방법 및 장치

지중 저장된 이산화탄소의 인위 누출 기간, 토양 내 수분함량, 이산화탄소의 반응시간 등을 결정하기 위하여 영구위조점(permanent wilting point)을 측정하였다. 영구위조점은 HYPROP II장치를 이용하여 측정하였으며, 이를 바탕으로 하여 누출시험 기간을 결정한 후 이산화탄소 인위 누출 시험을 수행하였다. 영구위조점을 측정한 후 이산화탄소가 토양의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 실내 누출시험을 수행하였으며, 누출시험 기간에 따른 이산화탄소 주입 후 인공강우를 수행하여 수분함량을

유지하였다. 실험에 수행된 인공강우는 총 5회 수행되었으며, 1 공극 부피(pore volume, PV)의 강우를 5회 반복하였다. 여기서 1 공극 부피는 토양의 공극 부피를 의미한다.

지중 저장된 이산화탄소가 누출되는 것을 모사하기 위하여, 실내 누출시험 장치를 제작하였다. 시험을 수행하기 위해 6개의 실험용 칼럼을 제작하였다. 한 개의 칼럼은 대조군 실험을 위하여 이산화탄소 누출을 하지 않았으며, 나머지 5개의 칼럼은 이산화탄소를 주입하면서 누출 시간에 따른 토양 비옥도 인자들의 변화 양상을 고찰하였다. 칼럼은 아크릴 재질로 제작하였으며, 각 칼럼의 지름은 10 cm, 높이 4 cm 이었다.

한 개의 비경작지 토양과 두 종류의 경작지 토양을 이용한 칼럼 시험은 모두 동일한 조건으로 이루어졌다. 칼럼 누출시험을 시작하기 전에 건조된 토양 300 g을 포장용수량 상태로 습윤하게 제조하였으며, 습윤 토양을 6개의 칼럼에 채워 넣은 후 영구위조점이 될 때까지 이산화탄소를 50 mL/min의 유량으로 주입하였다. 앞에서 언급

하였듯이 HYPROP II 분석 결과에 따라서 결정된 각 토양의 1 배치당 이산화탄소 주입 기간은 NCS의 경우는 12일, MCS와 SCS에 대하여는 14일이었다. 각 배치별로 이산화탄소를 주입한 후 1 공극 부피(pore volume, PV)의 인공강우 시험을 수행하였으며, 인공강우는 증류수를 사용하였다. 각 토양별로 대조군을 포함한 6개의 칼럼을 이용하여 이산화탄소 주입 및 인공강우 시험을 총 5 배치로 반복하여 수행하였다. 따라서 총 시험 기간은 NCS의 경우 60일, MCS와 SCS의 경우에는 84일이었다. 이산화탄소 누출이 없는 대조군 칼럼은 5번의 인공강우 시험 후 생성되는 용출액을 분석하였으며, 시험 최종일에 칼럼을 해체하여 토양을 분석하였다. 그 외 이산화탄소를 주입하는 5개 칼럼의 경우에는 각 누출시험 배치별로 토양 및 인공강우 용출액을 분석하였다. 즉, 5개의 칼럼 중 1번 칼럼은 첫 번째 배치용으로 이산화탄소 주입과 인공강우 시험이 끝난 후에 해체하여 토양 및 강우 용출액을 분석하였다. 그리고 2번 칼럼은 2 배치의 이산화탄소 주입과 인공강우 시험을 수행한 후 각 배치별 인공강우 용출액을 2회 채취하였으며, 2번의 배치시험이 완료된 후 최종적으로 칼럼을 해체하여 토양시료를 채취하여

분석하였다. 이와 같이 5개의 칼럼을 이용하여 각 칼럼마다 이산화탄소 주입 및 인공강우 모사 시험 횟수(배치)를 달리하여 각 배치별 인공강우 용출액 분석과 더불어 시험이 완료된 후 최종적으로 토양을 분석하였다. 이렇게 수행한 이유는 각 배치별 토양 시료의 교란을 최소화하기 위해서였다.

2.5. 토양 수분 특성 곡선 분석

토양수분 특성 곡선 및 토양 영구위조점을 측정하기 위하여 HYPROP II 장치를 이용하여 측정하였다. HYPROP II는 토양수분 함량의 변화에 따른 토양수분장력(pF), 불포화 수리전도도를 측정할 수 있는 장치로 보조 프로그램에 내장된 다양한 모델과 측정값을 회귀 분석하여 시험 대상인 토양의 수분 변화에 따른 최적의 토양수분 특성 곡선을 선정할 수 있다. HYPROP II는 상하의 두 지점에 설치된 세라믹 센서를 통해 토양수분 함량 변화를 자동으로 기록해주는 장치로 원리는 Fig. 1a와 같다.

토양의 영구위조점 측정 및 누출 기간을 정하기 위하여 NCS 400 g을 증류수로 포화시켜 HYPROP II 장치를 이용하였다. 회귀분석에 의하여 선정된 가장 적합한 토

Fig. 1. The principle and results of HYPROP II analyses. (a) schematic diagram showing the principle of HYPROP II (Meter Group AG, 2018), (b) the results of non-cultivated soil, (c) the results of maize-cultivated soil, (d) the results of soybean-cultivated soil.

양수분 특성 곡선 모델은 Kosugi PDP이었으며, 도출된 NCS의 토양 수분 특성 곡선 모델로부터 구해진 영구위조점($pF=4.2$)의 수분함량은 12%로 나타났다(Fig. 1b). 이에 따라 예비실험을 통하여 결정된 이산화탄소 누출에 따라서 초기 포장용수량(field capacity) 함수량으로부터 토양수분장력(pF)이 4.2인 영구위조점까지 걸린 기간은 12일이었으며, 이렇게 결정된 영구위조점까지의 도달 기간을 누출 기간으로 결정하였다. 동일한 방법을 이용하여 HYPROP II로 측정한 후 모델을 이용하여 회귀 분석한 결과, MCS에 가장 적합한 토양 수분 특성 곡선은 Van Genuchten *mnvar* bimodal PDI 모델로 나타났으며, 도출된 MCS의 수분 특성 곡선 모델로부터 결정된 pF 가 4.2인 영구위조점의 수분함량은 17%로 나타났다(Fig. 1c). 이에 따라 MCS의 이산화탄소 누출시험 기간을 14일로 결정하였다. 유사한 방법으로 획득한 SCS의 최적 토양 수분 특성 곡선 모델은 Van Genuchten *mnvar* PDI 모델이었으며 이로부터 도출된 SCS의 영구위조점은 15%로 나타났으며(Fig. 1d), 이로부터 결정된 누출시험 기간은 14일이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양의 초기 특성

비경작지 토양(NCS)의 특성은 일반적인 밭 토양이 보이는 기본적인 범위보다 대부분 낮았으며, 실험 대상인

세 종류의 토양 중 비옥도가 가장 낮았다(Table 3). 특히 pH가 낮은 것으로 나타났는데 이는 2.1절에서 언급했듯이 NCS를 K-COSEM이 운영하는 이산화탄소 인위 누출 시험 부지에서 획득하였기 때문에 이전에 현장에서 수행된 인위 누출에 의한 결과, 토양이 다소 산성화된 것으로 보인다. 또한, 낮은 pH로 인하여 교환성 양이온의 함량과 CEC가 다른 토양보다 낮은 특징을 가지고 있다. 이로 인하여, 다른 경작지 토양에 비하여 NCS의 비옥도가 낮게 나타나서 작물 생산의 능력이 떨어질 것으로 예측된다.

옥수수 재배 토양(MCS)와 콩 재배 토양(SCS)의 경우 NCS에 비해 전반적으로 비옥도가 양호한 것으로 조사되었다. 2.1절에서 언급하였듯이 MCS에서는 질소가 소모되는 반면, SCS에서는 질소가 고정(생산)되는 질소 함량에 대한 상반된 특성을 보인다. 이로 인하여 MCS보다 SCS에서 높은 T-N 함량이 나타났다(Table 3). 그리고 모든 토양에서 중금속 종과 같은 식물에 유해한 성분의 농도는 낮은 것으로 조사되었다(Table 4).

3.2. 이산화탄소 누출시험 결과

3.2.1. 물리화학적 비옥도 인자 변화 양상

이산화탄소 주입에 의한 토양 내 pH는 모든 대상 토양에서 큰 변화가 없었다(Fig. 2a). 또한, 모든 강우 용출액의 pH는 이산화탄소 주입이 있는 경우와 없는 경우 사이에 유의한 차이를 보이지 않았다(Figs. 2b-d). 이산화탄소 주입에 따른 토양의 pH는 토양 광물조성에 의한 pH

Table 3. Initial values of major indicators

Indicator (unit)	Value			Common range	Reference
	Non-cultivated soil (NCS)	Maize-cultivated soil (MCS)	Soybean-cultivated soil (SCS)		
pH	4.8±0.2	5.8±0.1	8.2±0.2	6.0-7.0	Chae et al. (2018)
EC ($\mu S/cm$)	56±5	211±7	135±2	2,000	Chae et al. (2018)
CEC ($cmol_c/kg$)	4.7±0.3	9.9±0.4	12.7±0.4	10-12	Kim et al. (2018)
Ex. cation					
Na ⁺ ($cmol_c/kg$)	0.001	0.033	0.10	0.15	Kim et al. (2018)
K ⁺ ($cmol_c/kg$)	0.14	0.47	0.50	0.5-0.8	Chae et al. (2018)
Ca ²⁺ ($cmol_c/kg$)	3.0	7.8	25	5-6	Chae et al. (2018)
Mg ²⁺ ($cmol_c/kg$)	1.9	1.5	0.5	1.5-2.0	Chae et al. (2018)
SOM (%)	1.1	3.5	3.9	3-5	Chae et al. (2018)
Total-N (T-N) (mg/kg)	311±50	800±307	1,648±20	1,090-1,250	Onyenali et al. (2019)
NO ₃ -N (mg/kg)	16±3	79±8	35±3	-	
NH ₄ -N (mg/kg)	17±2	20±1	270±10	-	
Total-P (T-P) (mg/kg)	328±46	1,090±94	2,192±140	-	
Available-P (Av. P ₂ O ₅) (mg/kg)	9.1±1.0	123±2	258±10	300-550	Chae et al. (2018)
Total-S (T-S) (mg/kg)	72±25	310±10	480±24	-	
Available-S (Av. S) (SO ₄) (mg/kg)	60±7	111±7	21±4	10-100	Yoon et al. (1996)

Table 4. Initial value of auxiliary indicators

Indicator (unit)	Value			Common range	Reference
	Non-cultivated soil (NCS)	Maize-cultivated soil (MCS)	Soybean-cultivated soil (SCS)		
Available-B (Av. B) (mg/kg)	0.28±0.03	0.38±0.03	0.16±0.01	0.2	RDA (2010)
Trace element (mg/kg)					
Al	17,213	13,358	16,008		
Cd	ND*	ND*	ND*		
Co	4.76	6.19	ND*		
Cr	3.99	14.1	35.2		
Cu	1.89	17.4	15.0		
Fe	24,715	22,810	23,848		
Mn	577	640	460		
Ni	1.89	13.2	24.0		
Pb	13.8	10.9	12.0		
Zn	39.9	43.0	68.0		

*Not detected

Fig. 2. Variation in pH during the period of artificial injection of carbon dioxide. (a) within soil and (b, c, and d) within the leachate solutions after artificial rainfall events. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

완충력 크기에 따라서 영향을 받는다고 알려져 있다 (Derakhshan-Nejad et al., 2020). 본 연구에서는 이산화탄

소 주입에 의하여 토양 pH가 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타났는데, 이는 이산화탄소의 낮은 주입량과 짧

Fig. 3. Variation in electrical conductivity (EC) during the period of artificial injection of carbon dioxide. (a) within soil and (b, c, and d) within the leachate solutions after artificial rainfall events. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

은 주입 기간에 의해서이기도 하지만, 본 연구에서는 분석하지 않았지만 토양 내 조성 광물의 pH 완충 효과에 의한 것으로 생각된다. 뿐만 아니라, 이산화탄소 주입에 의하여 생성되는 탄산 이온종과 토양 내 존재하는 교환성 수소이온의 반응과 그 역반응인 해리 반응에 의한 평형 효과에 의하여 토양 pH가 변하지 않은 것으로 판단된다(Oh and Richter, 2004). 이산화탄소의 주입량이 작을 때는 토양 pH 변화가 관찰되지 않지만, 주입량을 증가할수록 토양 pH가 감소한다는 보고들이 있어 왔다. 본 누출실험에서 이산화탄소 주입 플럭스는 $412 \text{ g/(m}^2 \text{ day)}$ 로써 약 2~3개월 누출시켰는데, Ma et al. (2017)의 연구에서는 이산화탄소 주입량을 400, 1,000, 1,500, 2,000 $\text{g/(m}^2 \text{ day)}$ 으로 달리하여 4개월간 주입하였을 때, 초기 pH가 8.15이었는데, 낮은 두 개의 농도로 주입하였을 때는 최종 pH가 7.43로, 높은 주입량에서는 7.29까지 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 좀 더 많은 양으로 보다 더 장기적으로 이산화탄소를 누출시킬 경우에는 이러한 토양의 완충력 저하에 의하여 토양 pH가 감소할 것으로 판단된다.

토양 EC의 경우 NCS와 MCS에서는 이산화탄소 주입에 의하여 감소하는 양상을 보였으나, SCS에서는 오히려 소폭 증가하는 양상을 보였다(Fig. 3a). 이러한 양상은 강우 용출액에 유사하게 반영되어 NCS와 MCS에서는 용출액 내 EC가 감소하였으며(Figs. 3b and c), SCS 용출액에서는 EC가 증가하는 양상을 보였다(Fig. 3d). 하지만, 토양 EC의 이러한 변화 양상은 이산화탄소 주입이 없는 대조군인 5C에서의 결과와 유사하게 나타나서 이산화탄소 주입에 의한 효과보다는 강우에 의한 용출 효과로 보여진다(Fig. 3a). 그리고 NCS와 MCS의 강우 용출액 내 EC의 경우에도 이산화탄소 주입이 없는 대조군과 유사한 변화 양상을 보이고 있어서 강우에 의한 효과로 판단된다(Figs. 3b and c). 하지만, SCS의 강우 용출액 내 EC 변화는 시험 기간 동안 이산화탄소 주입을 한 경우와 그렇지 않은 경우에 다소 차이가 나타나는데, 마지막 배치인 5 공극 부피(PV)에서는 대조군과 유사한 양상을 보이고 있어, 이도 역시 강우에 의한 용출 효과로부터 기인된 것으로 생각된다(Fig. 3d).

토양 내 CEC의 변화 양상은 크게 나타나지 않았으며,

이산화탄소를 주입하지 않은 대조군과 유사한 값을 보이고 있어 이산화탄소 주입에 의한 영향은 관찰되지 않았다(Fig. 4). Ma et al. (2014)의 연구에 의하면, 이산화탄

Fig. 4. Variation in cation exchange capacity (CEC) within soil during the period of artificial injection of carbon dioxide. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

소 주입량이 낮을 때는 CEC에 영향을 주지 않지만, 이산화탄소 농도를 증가시키면, CEC는 감소하는 것으로 보고되었다. 이는 교환성 양이온들이 탄산염 형태로 침전되기 때문인 것으로 해석하였다. 하지만, 본 연구에서는 낮은 이산화탄소 주입량으로 인하여 이러한 CEC의 감소 양상은 관찰되지 않았다.

이산화탄소 주입에 따른 토양 내 교환성 양이온들의 함량 변화를 Fig. 5에 제시하였다. 모든 토양에서 이산화탄소를 주입한 경우와 주입하지 않은 경우에 교환성 양이온들의 최종적인 함량은 유사하게 나타나서 이산화탄소 주입에 의한 영향은 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 하지만, SCS의 경우 교환성 Na와 K의 경우 시험 기간 중간에 다소 증가하는 양상을 보이는데, 이는 이산화탄소 주입에 따라서 생성되는 탄산 이온종과 교환성 수소이온의 반응에 따라서 교환성 Na와 K의 함량이 증가한 것으로 판단된다(Figs. 5a and b). 앞에서도 언급하였듯이 이러한 이온교환 효과와 탄산 이온종의 해리 반응에 의하여 토양의 pH가 변화하지 않은 것으로 판단된다. 하지만, 교환성 Ca와 Mg의 경우에는 이러한 경향이 나타나지 않았는데, 이 두 이온 종은 탄산염 형태로 침전이 일어났거나

Fig. 5. Variation in the concentrations of exchangeable cations within soil during the period of artificial injection of carbon dioxide. (a) Na, (b) K, (c) Ca, and (d) Mg. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

이온 교환능이 Na와 K보다 상대적으로 크기 때문에 토양 내 함량이 변화하지 않은 것으로 생각된다(Figs. 5c and d). 강우 용출액 내 교환성 양이온들의 함량 변화는 NCS와 MCS의 경우 이산화탄소를 주입한 경우와 그렇지 않은 경우와 유사하게 나타났다(Figs. 6a-k). 하지만, SCS의 경우에는 이산화탄소 주입한 경우의 용출액 내 K와 Ca의 농도가 주입하지 않은 경우보다 증가하는 것을 확인할 수 있었는데(Figs. 6f and i), 이는 다른 두 토양보

다 교환성 K와 Ca의 초기함량이 높았고, 이산화탄소 주입과 인공강우에 의한 용출 효과로부터 기인한 것으로 판단된다.

3.2.2. 영양분 비옥도 인자 변화 양상

토양 내 SOM의 함량은 모든 대상 토양에서 감소하는 경향을 보였으나, 이산화탄소 주입한 경우(5 PV)와 주입하지 않은 대조군의 경우(5C PV)의 함량이 유사한 것으

Fig. 6. Variation in the concentrations of exchangeable cations within the leachate solutions after artificial rainfall events during the period of artificial injection of carbon dioxide. (a, b, and c) Na, (d, e, and f) K, (g, h, and i) Ca, and (j, k, and l) Mg. PV: pore volumes, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

Fig. 7. Variation in the content of soil organic matter (SOM) within soil (a) and the concentrations of total organic carbon (TOC) within the leachate solutions after artificial rainfall events (b, c, and d) during the period of artificial injection of carbon dioxide. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

로 나타나서 이산화탄소 주입에 기인한 것보다는 강우 용출에 의한 것으로 판단된다(Fig. 7a). 이러한 경향은 강우 용출액 내 TOC 함량에도 나타나는데, 이산화탄소 주입하지 않은 대조군과 유사한 함량은 보인다(Figs. 7b-d). 본 연구에 사용된 토양의 누출시험 전 초기 SOM 함량이 1.1~3.9%로 일반적인 경작지 토양보다 다소 낮은 값을 보여서 이산화탄소 주입에 의한 영향을 관찰하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 이산화탄소 주입에 의하여 토양 내 호기성 미생물의 대사 작용이 방해받으면서 유기물 함량의 변화를 초래하지 않은 것으로 판단된다(Ma et al., 2017).

이산화탄소 주입에 따른 총 질소(T-N)의 함량은 모든 대상 토양에서 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 8a). 강우 용출액에서는 NCS와 SCS에서 이산화탄소를 주입한 경우에서 주입하지 않은 경우보다 다소 높게 나타났다(Figs. 9a-c). 토양 내 T-N의 함량은 변하지 않았는데 강우에 의하여 소량 용출되어 나온 이유는 두 함량 간의 단위 차이에 의한 것으로 보인다. 인공강우에 의하여 용출된 T-N의 질량은 NCS의 경우 1.34 mg 정도이고, SCS

의 경우에는 29.1 mg 정도이다. 이를 토양 내 함량으로 산정하면 각각 2.80 mg/kg와 67.1 mg/kg 정도이며, 초기 토양의 T-N 함량을 기준으로 할 때 약 1%와 4% 정도에 해당된다. 따라서 인공강우에 의한 용출량은 무시할 정도이며, 이에 따라 이산화탄소 주입에 의한 영향이 없다고 생각할 수 있다. 토양 내 총 질소(T-N)의 함량 변화와는 다르게 MCS와 SCS와 같은 경작지 토양에서는 질산태 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)와 암모니아태 질소($\text{NH}_4\text{-N}$) 함량이 이산화탄소 주입에 따라서 변하는 양상을 보였다(Figs. 8b and c). 비경작지 토양인 NCS에서는 이산화탄소를 주입한 경우와 주입하지 않은 경우의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 함량이 유사하게 나타나서 이러한 양상이 관찰되지 않았다. 경작지 토양에서 먼저 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 함량은 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 이와는 상반되게 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 함량은 이산화탄소 주입에 따라서 증가하는 것으로 나타났다. 특히 이러한 경향은 MCS 토양에서 좀 더 뚜렷하게 나타났다. 이는 이산화탄소 주입에 따라서 탈질 반응(denitrification)에 의한 결과로 해석된다. 토양 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 함량의 변화 양상이 강우 용출액에 반영되어, MCS와 SCS

Fig. 8. Variation in the concentrations of (a) total-nitrogen (T-N), (b) nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), and (c) ammonia-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) within soil during the period of artificial injection of carbon dioxide. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

Fig. 9. Variation in the concentrations of (a) total-nitrogen (T-N), (b) nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), and (c) ammonia-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) within the leachate solutions after artificial rainfall events during the period of artificial injection of carbon dioxide. PV: pore volumes, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

의 경우 강우 용출액 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 이산화탄소 주입에 의하여 감소한 것으로 나타났으며, $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 증가한 것으로 나타났다. 하지만, NCS의 경우에는 이러

한 경향이 뚜렷하게 관찰되지 않았지만, 어느 정도 유사한 양상으로 나타났다.

인은 식물 성장에 필수 불가결한 영양분 중 하나이며,

Fig. 10. Variation in the concentrations of (a) total-phosphorus (T-P) and (b) available-phosphorus (Av. P) within soil and (c and d) T-P within the leachate solutions after artificial rainfall events during the period of artificial injection of carbon dioxide. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

인은 토양에 쉽게 고정되고 식물에 의한 이용률(소모 속도)은 매우 작다. 이산화탄소 주입에 의한 T-P와 Av. P의 함량 변화는 뚜렷하게 관찰되지 않았지만, 전체적으로 이산화탄소 주입 초기에 감소하다가 후기에 증가하는 경향을 나타냈다(Figs. 10a and b). 이러한 양상은 SOM에서도 유사하게 관찰되었다(Fig. 7a). 인은 유기물과 더불어 토양 내 미생물 대사 작용과 관련해서 매우 중요한 영양분이다. 일반적으로 유기물 함량과 음의 상관관계를 나타낸다고 알려져 있다(Ma et al., 2017). 본 연구에서도 토양 내 SOM의 함량 변화와 T-P와 Av. P의 함량 변화는 서로 음의 상관관계를 보이고 있으며, 특히 이러한 경향은 토양 내 T-P와 Av. P의 농도가 높은 경작지 토양(MCS와 SCS)에서 뚜렷하다. 용출액 내 인의 함량을 살펴보면, 먼저 NCS의 경우 강우 용출액에서 T-P와 Av. P 함량은 모두 검출한계 이하로 나타났다. 그리고 MCS와 SCS의 경우 강우 용출액 내 Av. P는 검출되지 않았다. 따라서 MCS와 SCS의 강우 용출액 내 T-P의 함량 변화만 관찰할 수 있었다(Figs. 10c and d). MCS의 경우 이

산화탄소 주입 초기에는 증가하다가 후기에는 감소하는 경향으로 나타났으며, SCS의 경우 전 기간 동안 이산화탄소를 주입한 경우가 주입하지 않은 경우보다 T-P의 농도가 낮았다. 이렇게 T-P가 감소하는 이유는 앞서서도 설명하였듯이, 이산화탄소가 주입됨에 따라 미생물 활동에 영향을 미치면서 인의 함량 변화에 영향을 미치는 것으로 생각된다(Ma et al., 2017). 한편, Sáenz de Miera et al. (2014)의 연구에서는 이산화탄소 주입과 T-P와 Av. P의 함량 변화와는 무관하다는 결과를 제시하였고, Fernández-Montiel et al. (2016)은 Av. P 함량이 이산화탄소 주입과 함께 현저하게 증가했다고 보고하였다. 이러한 선행연구 결과들을 종합해 보면, 각 토양의 특성 및 이산화탄소 누출량 등과 같은 실험조건에 따라서 이산화탄소 누출이 인에 미치는 영향은 상이한 것으로 판단된다.

이산화탄소 주입에 따른 토양 내 총 황(T-S) 함량의 변화를 살펴보면, NCS와 SCS는 주입에 의한 영향이 관찰되지 않았지만, MCS의 경우에는 초반에는 증가하다가 후반에 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 이산화탄소를

Fig. 11. Variation in the concentrations of (a) total-sulfur (T-S) and (b) available-sulfur (Av. S) within soil and (c, d, and e) T-S and (f, g, and h) Av. S within the leachate solutions after artificial rainfall events during the period of artificial injection of carbon dioxide. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

주입하지 않은 경우보다 주입한 경우에서 감소한 것으로 나타났다(Fig. 11a). 이는 이산화탄소 주입에 따른 탄산의 생성과 그에 따른 T-S의 용출에 의한 영향으로 판단된다. 토양 내 Av. S의 경우도 유사하게 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으며, T-S의 용해, 강우에 의한 용출 효과 및 양이온들과 반응하여 황산염 형태로의 침전 등과 같은 복합적인 원인에 의한 결과로 판단된다(Fig. 11b). 강우 용출액 내 T-S 및 Av. S의 경우에도 지속적으로 감소하는 경향을 보였지만, 최종 함량이 모두 이산화탄소를 주입하지 않은 경우와 유사하게 나타나서 이산화탄소에 의한 직접적인 영향보다는 강우에 의한 용출 효과가 우세하게 작용한 것으로 판단된다(Figs. 11c-h).

3.2.3. 보조 비옥도 인자 변화 양상

토양 내 Av. B의 경우 모든 대상 토양에서 감소하는 양상을 보였으며, 이산화탄소를 주입한 경우(5 PV)와 주입하지 않은 경우(5C PV)에서의 함량을 비교하였을 때 주입한 경우에서 더 낮은 함량이 나타난 것으로 보아 이산화탄소의 영향으로 판단된다(Fig. 12a). 이러한 감소 양상은 붕산(borate) 이온이 토양 내 존재하는 Al/Fe 산화물 등과 같은 광물 표면에 흡착됨으로써 초래된 결과인 것으로 판단된다. 강우 용출액 Av. B의 경우 NCS와 MCS는 전체적으로 감소하는 양상을 보이는 반면, SCS에서는 증가하는 양상을 보인다(Figs. 12b-d). 이러한 토양별 Av. B의 함량이 다르게 나타나는 이유는, NCS와 MCS의 경

Fig. 12. Variation in the concentrations of available-boron (Av. B) during the period of artificial injection of carbon dioxide. (a) within soil and (b, c, and d) within the leachate solutions after artificial rainfall events. I: initial, PV: pore volumes, 5C: 5 pore volumes in the control tests with no injection of carbon dioxide, NCS: non-cultivated soil, MCS: maize-cultivated soil, and SCS: soybean-cultivated soil.

우 토양 pH가 각각 4.8과 5.8이기 때문에(Table 3), 붕산 이온의 흡착반응이 지속적으로 가능하여 Av. B의 함량이 감소한 것으로 판단된다. 하지만, SCS의 경우에는 토양 pH가 8.2로 비교적 높기 때문에(Table 3), Al/Fe 산화물 등과 같은 흡착제의 표면이 음전하를 띠게 되고, 붕산 이온의 전하가도 음의 값이 커지기 때문에 흡착량이 감소한 이유에서 기인된 것으로 판단된다. 지금까지 논의한 토양 비옥도 인자 외 중금속 등과 같은 보조인자들의 토양 내 함량은 크게 변하지 않음을 확인하였고, 용출액 내 함량이 검출되지 않아서 본 논문에서는 그 결과를 제시하지 않았다.

4. 결 론

이산화탄소 누출에 의하여 다양한 토양 비옥도 인자들이 영향을 받는 것으로 판단된다. 특히, 질소와 관련된 인자들이 이산화탄소에 의하여 뚜렷하게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 토양 유기물과 인과 관련된 인자들도

유의하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 비록 본 연구에서 이산화탄소 누출에 의한 토양 pH 변화는 분명하게 관찰되지 않았으며, 이는 본 연구의 누출시험 조건에 의한 결과인 것으로 판단된다. 토양 비옥도 인자들이 이산화탄소 주입에 의하여 영향을 받는 이유는 이산화탄소 주입에 의한 탄산의 생성과 연이은 탄산의 해리 반응, 산소의 고갈로 인한 환원 환경 조성, 미생물 대사 작용에 대한 영향, 토양 비옥도 인자들과 토양 내 존재하는 광물 간의 흡착반응 등을 들 수 있다. 상기한 다양한 기작들이 복합적으로 작용함으로써 토양 비옥도에 영향을 주는 것으로 판단된다. 본 연구는 단일 이산화탄소 주입 농도와 비교적 짧은 누출 기간 등과 같은 국부적인 실험조건에서 수행되었기 때문에 세부적인 영향을 파악하기에는 한계가 있었으며, 앞으로 좀 더 확장된 조건으로 연구가 이루어져야 할 필요가 있다. 하지만, 다른 연구들에서 고려하지 않은 다양한 토양 비옥도 인자들을 대상으로 연구함으로써 이산화탄소 누출에 의한 토양 비옥도에 대한 영향을 전체적으로 조망할 수 있는 기초자료를 제

공했다는 데에 본 연구의 의의가 있을 것으로 생각된다. 향후 본 연구 결과를 바탕으로 하여 좀 더 세밀한 관점에서 이산화탄소 누출에 의한 토양 환경에 대한 영향을 살펴볼 필요가 있다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 환경산업기술원의 이산화탄소 지중 저장 환경관리(K-COSEM) 연구단의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2018001810001).

References

- Al-Traboulsi, M. Sjögersten, S., Colls, J., Steven, M., Craigon, J. and Black, C. (2012) Potential impact of CO₂ leakage from carbon capture and storage (CCS) systems on growth and yield in spring field bean. *Environ. Exper. Botany*, v.80, p.43-53. doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.02.007
- Boise, E., Amaechi, C.F., Nnaji, G.U., Boise, O. and Erhunmwunse, N.O. (2016) Effects of elevated soil carbon dioxide (CO₂) concentrations on spring wheat(*Triticum aestivum* L.) and soil chemical properties in Sutton Bonington Campus of the University of Nottingham, UK. *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, v.20, p.293-301. doi: 10.4314/jasem.v20i2.9
- Buragienė, S., Šarauskis, E., Romanekas, K., Adamavičienė, A., Kriaučiūnienė, Z., Avižienytė, D., Marozas, V. and Naujokienė, V. (2019) Relationship between CO₂ emissions and soil properties of differently tilled soils. *Sci. of Total Environ.*, v.662, p.786-795. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.236
- Chae, M.-J., Roh, A.-S., Yoon, B.-S., Kim, S.-K., Yun, Y.-U., Ahn, B.-G., Kim, S.G., Park, S.-J., Cho, H.-J., Kang, H.-J., Yun, S.-G., Kim, Y.-H., Kong, M.-S., Lee, E.-J., Jung, H.-I., Hong, S.-Y. and Jung, G.-B. (2018) Evaluation of chemical properties and heavy metals in upland soils in Korea. *Proceedings of the Spring conference of the Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer*, p.74-75. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07448455>
- Chen, F., Zhang, F., Ma, J., Yang, Y., Zhang, S. and Chen, R. (2017) Experimental study on the effects of underground CO₂ leakage on soil microbial consortia. *Intern. J. Greenhouse Gas Control*, v.63, p.241-248. doi: 10.1016/j.ijggc.2017.05.017
- Cheng, L., Zhu, J., Chen, G., Zheng, X., Oh, N.-H., Ruffy, T.W., deB, Richter, D. and Hu, S. (2010) Atmospheric CO₂ enrichment facilitates cation release from soil. *Ecology Letters*, v.13, p.284-291. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01421.x
- Choi, M.-T., Lee, J.-I., Yun, Y.-U., Lee, J.-E., Lee, B.-C., Yang, E.-S. and Lee, Y.-H. (2010) Characteristics of fertility on strawberry cultivated soil of plastic film house in Chungnam Province in Korea. *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, v.43, p.160-165.
- Derakhshan-Nejad, Z., Lee, W., Han, S., Choi, H., Yun, S.-T. and Lee, G. (2020) Effects of soil moisture content on CO₂ triggered soil physicochemical properties in a near-surface environment. *J. Soils and Sediments*, v.20, p.2107-2120. doi: 10.1007/s11368-020-02585-4
- Fernández-Montiel, I., Pedescoll, A. and Bécares, E. (2016) Microbial communities in a range of carbon dioxide fluxes from a natural volcanic vent in Campo de Calatrava, Spain. *Inter. J. Greenhouse Gas Control* v.50, p.70-79. doi: 10.1016/j.ijggc.2016.04.017.
- Gao, Z., Zhang, H., Shi, M., Fang, S. Cui, Y. and Liu, J. (2020) Characteristics of soil CO₂ under different conditions and its influence on water chemical composition: an experimental and modeling study in the laboratory. *Environ. Earth Sci.*, v.79, article no: 431. doi: 10.1007/s12665-020- 09183-0
- Hasegawa, S., Macdonald, C. and Power, S.A. (2016) Elevated carbon dioxide increases soil nitrogen and phosphorus availability in a phosphorus-limited Eucalyptus woodland. *Global Change Biology*, v.22, p.1628-1643. doi: 10.1111/gcb.13147
- He, W., Yoo, G., Moonis, M., Kim, Y. and Chen, X. (2019) Impact assessment of high soil CO₂ on plant growth and soil environment: a greenhouse study. *PeerJ*, v.7, article no: e6311. doi: 10.7717/peerj.6311
- Hong, S.-D., Kim, J.-J., Min, K.-B., Kang, B.-G. and Kim, H.-J. (2000) Fertility evaluation of upland fields by combination of landscape and soil survey data with chemical properties in soil. *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, v.33, p.221-233.
- Hong, S.-D. and Park, H.-T. (1999) Soil fertility evaluation with adoption of soil map database for tobacco fields. *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, v.32, p.95-108.
- Ketterings, Q., Miyamoto, C., Mathur, R.R., Dietzel, K. and Gami, S. (2011) A comparison of soil sulfur extraction methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.75, p.1578-1583. doi: 10.2136/sssaj2010.0407
- Kim, K.H., Kim, G.Y., Kim, J.G., Sa, D.M., Seo, J.S., Son, B.G., Yang, J.E., Eom, G.C., Lee, S.E., Jeong, K.Y., Jeong, D.Y., Jeong, Y.T., Jeong, J.B. and Hyun, H.N. (2006) *Soil. Hyangmoonsa*, 471p.
- Kim, Y.-S., Goo, N.-I. and Kang, Y.-S. (2018) Evaluation of properties of forest soils using plant response methods. *Research Report 18-18*, National Institute of Forest Science. 69p.
- Kouadio, L., Deo, R.C., Byrareddy, V., Adamowski, J.F. Mushtaq, S. and Nguyend, V.P. (2018) Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.155, p.324-338. doi: 10.1016/j.compag.2018.10.014
- Kozhukhov, A., Gurin, A. and Rezvyakova, S. (2020) Main elements of nutrition content in the soil for maize crops, depending on the predecessors and methods of soil treatment. *E3S Web of Conferences*, v.106, article no: 01103. doi: 10.1051/e3sconf/202016101103
- Ma, J., Zhang, W., Zhang, S., Zhu, Q., Feng, Q. and Chen, F. (2017) Short-term effects of CO₂ leakage on the soil bacterial community in a simulated gas leakage scenario. *PeerJ*, v.5, article no: e4024. doi: 10.7717/peerj.4024
- Ma, J., Zhu, X., Liu, D., Wang, S., Xue, L., Li, Q., Ma, J., Li, X., Nie, L., Zhao, X., Qi, B., Wei, Y., Jiang, S., Yu, H. and Huang, C. (2014) Effects of simulation leakage of CCS on physical-chemical properties of soil. *Energy Procedia*, v.63, p.3215-3219.

- doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.347
- Meter Group AG (2018) Operation manual HYPROP II. v.3, p.2. http://library.metergroup.com/Manuals/18263_HYPROP_Manual_Web.pdf
- Mikkelsen, M., Jorgensen, M. and Frederik, C.K. (2010) The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide. *Energy Environ. Sci.*, v.3, p.43-81. doi: 10.1039/B912904A
- Moonis, M., He, W., Kim, Y. and Yoo, G. (2017) Effect of potential CO₂ leakage from carbon capture and storage sites on soil and leachate chemistry. *KSCE J. Civil Engng.*, v.21, p.1640-1647. doi: 10.1007/s12205-016-1867-5
- Morales, S.E. and Holben, W.E. (2013) Functional response of a near-surface soil microbial community to a simulated underground CO₂ storage leak. *PLOS ONE*, v.8, article no: e81742. doi: 10.1371/journal.pone.0081742
- RDA(Rural Development Administration of Korea) (2010) Methods of soil chemical analysis. National academy of agricultural science of Korea. http://lib.rda.go.kr/search/mediaView.do?mets_no=000000012988
- Oh, N.-H. and Richter Jr, D.D. (2004) Soil acidification induced by elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, v.10, p.1936-1946. doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00864.x
- Onyenali, T., Olowe, V., Fabunmi, T. and Soretire, A. (2019) Organic fertilizers improve the growth, seed quality and yield of newly released soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) varieties in the tropics. *Organic Agriculture*, v.10, p.155-170. doi: 10.1007/s13165-019-00258-2
- Sáenz de Miera, L.E., Arroyo, P., Calabuig, E.L., Falagán, J. and Ansola, G. (2014) High-throughput sequencing of 16S RNA genes of soil bacterial communities from a naturally occurring CO₂ gas vent. *Inter. J. Greenhouse Gas Control*, v.29, p.176-184. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.08.014
- Saha, U.K., Sonon, L. and Biswas, B.K. (2018) A comparison of diffusion-conductimetric and distillation-titration methods in analyzing ammonium- and nitrate-nitrogen in the KCl-extracts of Georgia soils. *Communications in Soil Sci. Plant Anal.*, v.49, p.63-75. doi: 10.1080/00103624.2017.1421647
- Seigo, S.L'O., Dohle, S. and Siegrist, M. (2014) Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, v.38, p.848-863. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.017
- Souza, J.A., Fraton, M.M.J., Moraes, L.A.C. and Moreira, A. (2018) Boron and amino acid foliar application on wheat-soybean intercropping in a non-tillage system. *Communications in Soil Sci. Plant Anal.*, v.49, p.1638-1649. doi: 10.1080/00103624.2018.1474902
- Touhami, D., McDowella, R.W., Condon, L.M., Lieffering, M. and Newton, P.C.D. (2020) Long-term atmospheric carbon dioxide enrichment decreases soil phosphorus availability in a grazed temperate pasture. *Geoderma*, v.378, article no: 114621. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114621
- US EPA (1986) SW-846 test method 9081: Cation-exchange capacity of soils (sodium acetate), In: Test methods for evaluating solid waste: Physical/chemical methods. <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-9081-cation-exchange-capacity-soils-sodium-acetate>
- van Reeuwijk, L.P. (2002) Technical paper 09: Procedures for soil analysis (6th ed.), International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands. https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC_TechPap09.pdf
- White, C.M., Strazisar, B.R., Granite, E.J., Hoffman, J.S. and Pennline, H.W. (2003) Separation and capture of CO₂ from large stationary sources and sequestration in geological formations—coalbeds and deep saline aquifers. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, v.53, p.645-715. doi: 10.1080/10473289.2003.10466206
- Yang, J.-E., Cho, B.-O., Shin, Y.-O. and Kim, J.-J. (2001) Fertility status in northeastern alpine soils of South Korea with cultivation of vegetable crops. *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, v.34, p.1-7.
- Yoon, J.H., Jung, B.G., Kim, Y.H. and Shin, J.S. (1996) The contents of sulfate-sulfur of the recent soils of Korea. *Proceedings of the International Conference on the Sulfur, The Mineralogical Society of Korea*, p.25-35.
- Yu, L., Lu, X., He, Y., Brookes, P.C., Liao, H. and Xu, J. (2017) Combined biochar and nitrogen fertilizer reduces soil acidity and promotes nutrient use efficiency by soybean crop. *J. Soils Sediments*, v.17, p.599-610. doi: 10.1007/s11368-016-1447-9
- Zhao, X., Deng, H., Wang, W., Han, F., Li, C., Zhang, H. and Dai, Z. (2017) Impact of naturally leaking carbon dioxide on soil properties and ecosystems in the Qinghai-Tibet plateau. *Scientific Reports*, v.7, article no: 3001. doi: 10.1038/s41598-017-02500-x