

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.1.039>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Characteristics of Maize Roots under Subsurface Drip Irrigation through Various Oxygen Treatment

Dong Hyeok Gong^{1*}, Sang hun Lee¹, Ki Yuol Jung², and Hyen Chung Chun¹¹Researcher, Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea²Senior Researcher, Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea*Corresponding author: dhgong1@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 15, 2022

Revised: February 6, 2023

Accepted: February 6, 2023

Edited by

Sang Soo Lee,
Yonsei University, Korea

ORCID

Dong Hyeok Gong
<https://orcid.org/0000-0003-2612-4282>

In Korea, irrigation technology using subsurface drip irrigation (SDI) is new in agriculture system. Many limitations of SDI are not well known. SDI can damage crops from overwatering. To address this weakness, it is important to improve and test the applicability of the SDI with air injection (oxygation). Therefore we investigated soil oxygen (O₂) and carbon dioxide (CO₂), root characteristics and yield of maize using two conditions of soil moisture regime: field capacity (FC) × 100% and 120%. Maize was planted, and then air was injected by compressor and venturi. In the field, irrigation was controlled by a controller connected to soil moisture sensors. Soil moisture sensors were measured at 20 cm below soil surface. Soil O₂ and CO₂ were measured at 10 and 30 cm below soil surface before and after oxygation. Root activity was measured from tip of roots. Root volume and dry weight were measured. Post-harvest, number and weight of maize ears were surveyed as well. As a result, soil oxygen values increased by 59% in the compressor treatment and by 34% in the venture treatment. However, soil CO₂ values did not depend on the oxygation. In all soil moisture treatments, the activity of oxygated roots was greater than that of the control, and root activity was increased by 152%. Root volume and dry weight were also greater than those in the control. No significant effect of soil moisture was found on the number and weight of ears of maize. The average ear weight of maize in the FC 100% soil moisture treatment was 1,292 kg 10a⁻¹ in the oxygation and 1,278 kg 10a⁻¹ in the control. In addition, no effect of oxygation was observed on number and weight of ears. The average ear weight of maize in the FC 120% soil moisture treatment was 1,229 kg 10a⁻¹ in the oxygation and 960 kg 10a⁻¹ in the control. Maize yield was 28% greater in the oxygation treatment than that in the control. The yield of maize grown in the control field showed a tendency to decrease as the soil moisture content increased. At FC 120% soil moisture, the ear weight of control maize was reduced by 25% compared to FC 100% soil moisture. These results reflected that the oxygation process had a great effect on the root growth even in humid conditions, which was expected to have a positive effect on the maize plants planted above-ground.

Keywords: Field capacity, Maize yield, Maize, Plant characteristics, Sensors, Soil moisture

Root activity, dry weight and volume of corn as a result of soil moisture and oxygation; Soil moisture treatments (field capacity × 100%, field capacity × 120%), Oxygation treatments (compressor, venturi), Control (no air was injected).

Soil moisture regime	Oxygation treatment	Root activity (μg g ⁻¹ h ⁻¹)	Root dry weight (g)	Root volume (cm ³)
100% of field capacity	Compressor	50.1 ± 1.69 b [†]	49.5 ± 19.25 a	269 ± 83.8 a
	Venturi	67.8 ± 3.25 a	44.6 ± 10.17 a	224 ± 34.9 a
	Control	32.2 ± 2.08 c	12.5 ± 5.55 b	59 ± 43.8 b
120% of field capacity	Compressor	50.8 ± 1.07 a	42.4 ± 0.74 ab	225 ± 5.0 b
	Venturi	39.2 ± 1.54 b	73.7 ± 25.75 a	326 ± 56.6 a
	Control	35.8 ± 1.52 c	14.6 ± 9.81 b	60 ± 48.2 c

[†] a, b and c represent significant difference level at 95%.



Introduction

지중 점적관개 (subsurface drip irrigation, SDI)는 기후변화에 대응하여 작물에 적정량의 물을 관개함으로써 물 이용 효율 (water use efficiency)을 향상시키고 물을 효율적으로 사용하도록 하는 효과가 있다 (Bhattarai et al., 2008). 지중 점적관개는 고랑 관개, 지표 관개와 비교하여 수분이용 효율이 더 좋은 것으로 알려졌고 (Smith et al., 2005), 이는 작물의 생육과 수량을 증가시키는 것으로 나타났다 (McHugh et al., 2008).

그러나 잦은 경운, 점토의 집적으로 경반층이 형성되어 토양 배수성이 좋지 못한 경우, 지중 점적관개로 인하여 작물에 과습 스트레스를 유발할 수 있다 (Thongbai et al., 2001; Chun et al., 2022). 과습 조건은 뿌리에 산소 공급이 부족하기 쉽고 이로 인한 작물 산소부족 현상은 뿌리 발달의 저하를 일으키는 것으로 알려져 있다. 뿌리가 발달하면서 토양 내 수분과 양분을 흡수하여 식물체의 생육이 이루어지지만, 과습으로 인하여 뿌리의 산소공급이 어려워지면 뿌리의 발달이 저해된다 (Ashraf and Rehman, 1999). 산소부족 현상은 뿌리의 성장을 저하하고 이는 뿌리/식물체 비율 (Araki, 2006), 수량 (Lone and Warsi, 2009; Palta et al., 2010; Ren et al., 2014; Sathi et al., 2022) 감소에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 기존 연구에서는 포장시험에서 과습 상태가 7일 이상 유지가 되면, 옥수수 수량이 4.69% 감소가 발생한다고 밝혔다 (Kaur et al., 2017).

과습 환경에서 산소부족으로 인한 뿌리 성장 저하를 막기 위해 여러 방법이 개발되어왔다. 이 중에는 근권부에 공기를 주입하는 방법이 활발히 연구되어 왔다. 공기주입이란 지중 점적관개 시스템을 통해 기계적으로 또는 화학적으로 공기를 관개수에 주입하는 방법을 뜻한다 (Bhattarai et al., 2005). 공기를 주입하는 방법도 압축기를 이용하여 공기를 넣거나 벤츄리를 이용하여 공기 방울 형태로 관개수에 주입하는 방법 (oxygation) 등이 있다 (Huber, 2000; Goorahoo et al., 2001; Bhattarai et al., 2005; Pendergast et al., 2013). 공기주입을 통하여 토양 내 산소함량은 2.4 - 32.6% 증가하였고 (Chen et al., 2010), 토양 내 산소 증가는 호기성 조건을 향상하고 이는 작물 뿌리 호흡을 개선하는 효과를 보였다 (Wen-Quan et al., 2011). 이러한 토양 내 환경 개선은 작물의 수량을 증가시키는 효과를 보였다 (Pendergast et al., 2013).

노지 재배에서 지중 점적관개 기술은 우리나라에서 이제 보급되는 기술이다. 잦은 경운 및 점토의 집적 등으로 경반층이 형성되어 배수가 불량한 농경지가 많은 우리나라에서 지중 점적관개 기술만으로는 작물의 과습 스트레스를 유발하기 쉬운 것으로 예상된다 (Han et al., 2014). 이와 같은 문제를 해결하기 위해 공기주입을 접목한 지중 점적관개 시스템의 국내 노지재배에서 적용 가능 여부를 실험하는 것이 중요하다.

본 연구는 옥수수 노지 재배지에서 공기주입을 접목한 지중 점적관개 시스템이 토양 내 공기 함량을 증진하고, 그 영향으로 뿌리 생육 및 옥수수 수량 특성을 향상하는지 알기 위해서 수행하였다.

Materials and Methods

전체 배관 구성 본 연구는 국립식량과학원 남부작물부 내 (경상남도 밀양시) 포장에서 2020년 3월부터 2021년 7월까지 수행하였다. 실험을 수행하기 위해 설치된 배관 구성은 Fig. 1과 같다. 물탱크 이후에 공기주입 장치 (벤츄리, 압축기)를 설치하였다. 벤츄리와 압축기에는 전자밸브를 설치하여 특정 처리 구에서만 작동하도록 하였다.

벤츄리 이후에는 펌프를 설치하여 일정한 압력이 항시 유지되어 공기가 균일하게 주입되도록 하였다. 압축기 이후에는 PE 용수관을 설치해 지중 점적관 (Uniram, Netafim, Israel)과 연결하였다. 지중 점적관은 지하 30 cm 깊이에 설치하였으며, 지중 점적관의 각 점적공은 시간당 2.3 L의 수분을 공급하였다.

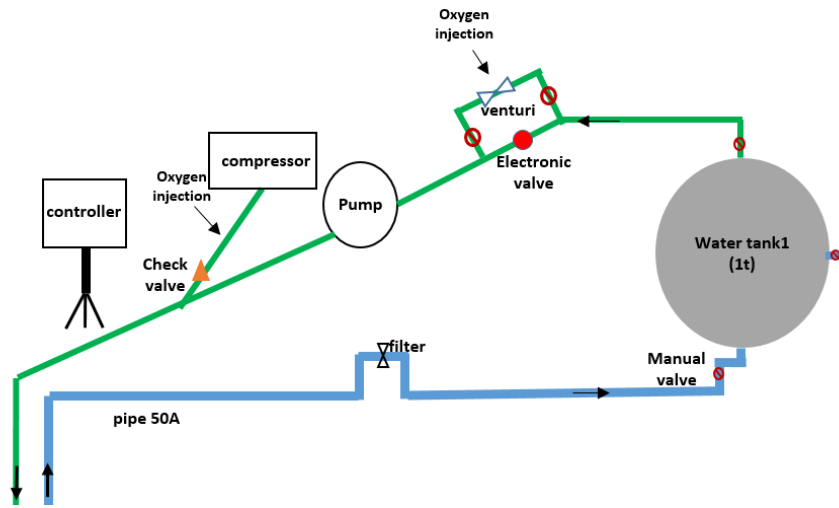


Fig. 1. Oxygation piping design. compressor and venturi are connected to a 50 mm pipe, oxygation is controlled by a controller connected to a soil moisture sensor.

토양 수분 및 공기주입 처리 토양수분함량과 공기주입의 영향을 평가하였다. 토양수분함량에 의한 영향은 $FC \times 100\%$, $FC \times 120\%$ 처리로 비교하였다 (Fig. 2). 재배 토양을 채취해 압력 챔버 (1600 Extractor, Soil Moisture Equipment Corp., USA)를 활용해 0.3 기압에서 측정된 값 25.7%를 기준으로 하여 $FC \times 100\%$ 를 $[25\% (v v^{-1})]$ 으로 정하였고, $FC \times 120\%$ 는 $[30\% (v v^{-1})]$ 로 설정하였다. 토심 20 cm 이하부터는 토양수분이 안정적으로 유지된다고 가정하고 토심 20 cm를 기준으로 수분함량을 조절하였다. $FC 100\%$ 는 토양수분함량 25%가 되었을 때 5분간 관수하였고,

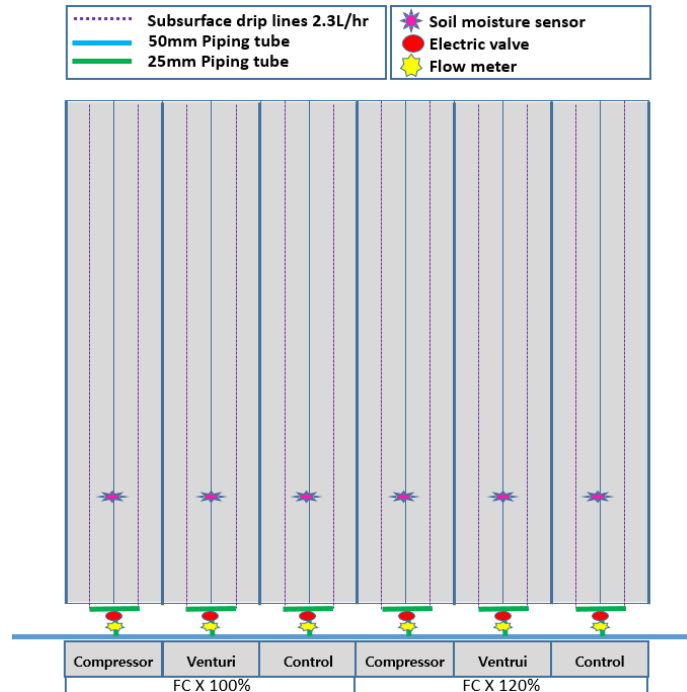


Fig. 2. Piping and subsurface drip line design. Soil moisture treatment: Field capacity $\times 100\%$, Field capacity $\times 120\%$, Oxygation treatment: Compressor, Venturi and Control (no air was injected).

FC 120%는 30%가 되었을 때 5분간 관수하였다. 토양수분 처리를 위한 토양수분함량은 지하 20 cm에 토양수분 센서 (Terros 11, METER, USA)를 매설하여 측정하였다.

공기주입에 의한 영향은 대조구, 압축기, 벤츄리를 비교하여 평가하였다. 공기주입은 벤츄리와 압축기를 이용하여 관수와 동시에 공기를 주입하였다. 압축기는 오일을 이용해 공기를 압축 분사하는 장비이며, 출력 5.5 HP, 분당 에어 토출량 430 L의 성능을 가졌다. 벤츄리는 배관의 굵기가 점점 좁혀졌다가 다시 천천히 넓어지는 형태의 관이다. Baylar and Ozkan (2006)은 벤츄리로 추가적인 설비 필요 없이 유체의 속도만으로 공기나 비료를 쉽게 혼합시킬 수 있다고 보고하여 공기주입 장치로 차용하였다. 벤츄리, 컴프레서의 용수관 연결 부위에는 역류 방지를 위해 체크밸브를 설치하였다. 관개 수의 산소 농도는 대조구 10.9 mg L^{-1} , 압축기, 벤츄리 처리구 11.2 mg L^{-1} 이었다 (Table 1). 공기는 관개 수와 함께 5분간 주입되었다.

Table 1. Oxygen values of supplied water through subsurface drip lines. Oxygation treatment (compressor, venturi), Control (no air was injected).

Oxygation treatment	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	DO (%)	DO (mg L^{-1})
Compressor	$19.4 \pm 0.64 \text{ ab}^{\dagger}$	$122.5 \pm 2.29 \text{ a}$	$11.2 \pm 0.14 \text{ a}$
Venturi	$18.8 \pm 0.60 \text{ b}$	$120.7 \pm 1.17 \text{ ab}$	$11.2 \pm 0.20 \text{ a}$
Control	$19.5 \pm 0.78 \text{ a}$	$118.8 \pm 4.03 \text{ b}$	$10.9 \pm 0.25 \text{ b}$

[†]a and b represent significant difference level at 95%.

옥수수 재배 옥수수는 6월 10일에 파종하였고, 품종은 일미찰 (Ilmichal)이다. 1주 1본을 $60 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 간격으로 파종하였다 (Fig. 3). 시비는 작물별 비료 사용 처방 기준 (RDA, 2021)에 따라 $\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 7.25:3:6 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 을

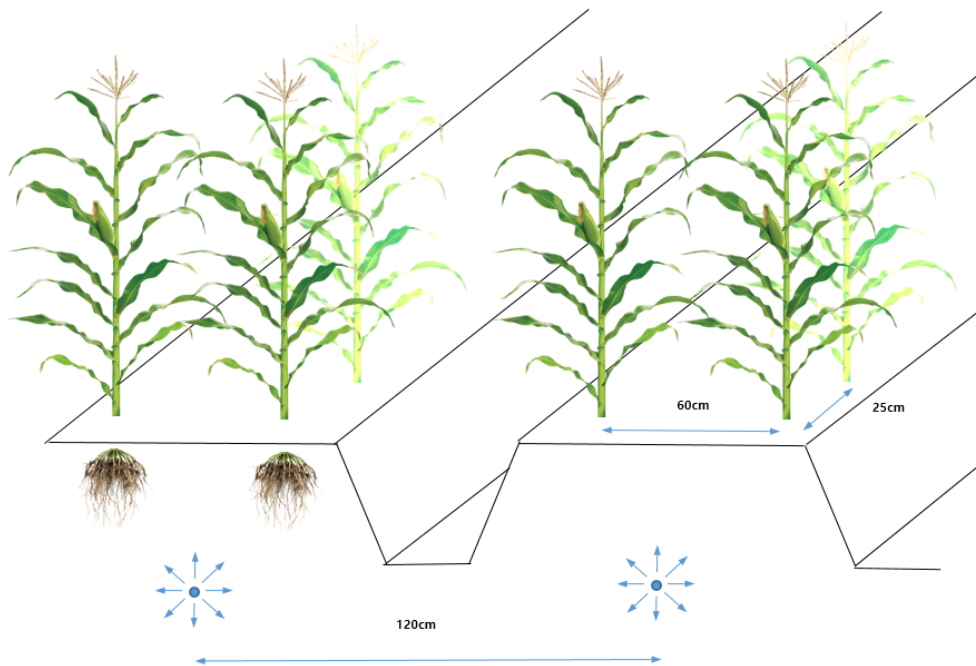


Fig. 3. Experimental corn spacing design (one treatment). Blue dot: SDL, Row width 60 cm, Row length 25 cm, SDL spacing 120 cm, SDL was installed 30 cm underground.

기비로 시비하였고, N = 7.25 kg 10a⁻¹을 옥수수 V 11 시기에 추비로 시비하였다. 파종 후 옥수수 재배 및 관리는 농촌진흥청 표준재배법에 준하였다.

시험 전 토양 특성 분석 옥수수 파종 전에 토양시료를 채취하여 분석하였다. 토성 (sand, silt, clay), 화학성 (pH, EC, 유기물, 유효인산, 양이온). 토양분석은 농촌진흥청 토양화학 분석법 (NAAS, 2010)에 따라 검정하였다. 토성과 화학성을 분석한 결과 토양은 작물 재배에 적합한 화학성을 보였다 (Table 2).

Table 2. Results of soil chemical and physical analysis (2020, 2021).

	pH _{1:5}	EC _{1:5} [†] (dS m ⁻¹)	T-N [‡] (g kg ⁻¹)	O.M. [§] (g kg ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ [¶] (mg kg ⁻¹)	Exch. cations [§] (cmol _c kg ⁻¹)			Texture (%)		
						K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay
2020	7.65	0.38	1.0	18.58	728.26	0.68	6.64	1.59	47.54	41.26	11.20
2021	7.65	0.39	0.5	18.83	223.10	0.56	6.75	1.78	44.13	51.47	4.40

[†]EC_{1:5}: obtained by multiplying by 5, [‡]T-N: soil total nitrogen, [§]O.M.: organic matter, [¶]Avail. P₂O₅: available phosphorus, [§]Exch. cations: exchangeable cations.

토양 내 산소, 이산화탄소 함량 분석 토양 내 산소, 이산화탄소 함량은 옥수수 생육 이후에 2차례 측정하였다. 각 처리구 지중 점적관과 수평 방향으로 5 cm 떨어진 토양 벽면을 수직으로 깎고, 산소 측정 포일 (Oxygen Sensor Foil SF-RPSu4, PreSens, Germany), 이산화탄소 측정 포일 (CO₂ Sensor Foil SF-CD1R, PreSens, Germany)이 부착된 아크릴판을 토양 벽면에 설치하였다. 토양 지하 10 cm, 30 cm의 산소, 이산화탄소 함량을 광학 측정기 (산소 - Detector Unit DU01, 이산화탄소 - Detector Unit DU03, PreSens, Germany)를 사용하여 촬영하였다. 촬영한 이미지를 VisiSens AnalytiCal 1 Software를 통해 산소 함량을 측정하였다. 토양 내 산소, 이산화탄소 함량은 공기 주입 전과 후에 측정하였다.

뿌리 분석 옥수수 수확기에 옥수수 뿌리를 채취해 근활력, 뿌리 부피, 뿌리 건물 중을 측정하였다. 근활력을 측정하기 위해 처리별로 뿌리 말단 부위를 채취하였다. 근활력은 비색계 (Thermo Scientific Multiskan Spectrum, Massachusetts, USA)를 사용하여 측정하였고, 농촌진흥청 식량작물환경 분석법 (RDA, 2014)에 따라 검정하였다.

뿌리 부피는 물을 가득 채운 비커에 뿌리를 담갔을 때 흘러넘치는 물의 무게를 측정하였고, 물의 밀도를 기준으로 무게를 부피로 환산하였다. 뿌리 건물 중은 옥수수 수확기에 뿌리를 채취 후 건조하여 측정하였다.

옥수수 이삭수, 이삭중 분석 주요 발작물 시험 연구 조사 기준 필드 북 (RDA, 2021)에 준하여 조사하였다.

통계처리 통계는 SPSS program (IBM, v. 27, New York, USA)을 사용하여 95% 유의수준에서 분석하였다. 옥수수 뿌리, 이삭수, 이삭중 분석은 주요 발작물 시험 연구 조사 기준 필드 북 (RDA, 2021)을 기준으로 반복하였고, 관개수·토양 내 수분 분석과 식물체 뿌리 분석은 3반복으로 수행했다. 모든 데이터 값은 평균 값 ± 표준 편차로 나타냈으며, 동일한 토양수분함량 처리 내에서 공기주입 방법별로 통계 분석하였다.

Results and Discussion

토양 내 산소 및 이산화탄소 함량 분석 토양 내 산소함량은 공기주입 방법에 따라 차이가 나타났다 (Table 3). 토양 깊이 10 cm에서 공기주입 전에 모든 토양은 10.3 - 12.6%의 산소함량을 보였다. 공기주입을 처리한 결과 모든 토양은 7.1 - 13.3%의 산소함량을 보였다. 산소함량 값은 압축기 처리에서만 공기주입 전보다 7% 높아졌고, 다른 처리구에서는 산소함량 값이 낮아졌다. 10 cm 깊이의 토양에서는 공기주입이 토양 산소값 증가에 영향을 미치지 못하였다. 이는 공기주입 시간이 짧아 (5분간 주입) 토양 산소가 토양 10 cm까지 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다. 토양 깊이 30 cm에서 공기주입 전에 모든 토양은 7.0 - 7.8%의 산소함량을 보였다. 산소함량 값이 처리구 별로 통계적 차이가 나타나지 않았다. 공기주입을 처리한 결과 산소함량 값이 압축기 처리구는 242% 증가하였고, 벤츄리 처리구는 88% 증가하였다. 반면에 대조구는 7.5%의 산소함량으로 공기주입 전과 비슷한 수준을 유지하였다. 기존 연구에서 지중 점적관 시스템에 공기 주입한 결과 공기 대조구보다 산소함량이 50% 이상 높은 값을 보였다 (Przywara and Stępniewski, 1999, Bhattarai et al., 2008). 본 연구에서도 공기 주입의 결과 공기주입구에서 대조구보다 산소함량이 압축기, 벤츄리 각각 242%, 88% 높은 값을 보였다.

Table 3. Oxygen values in the soil at different depths (10 cm, 30 cm underground), supplied through a subsurface drip lines. Oxygation treatment (compressor, venturi), Control (no air was injected). Oxygen values were measured twice before and after air injection.

Oxygation treatment	Soil O ₂ (% air saturation)			
	10 cm		30 cm	
	Before oxygation	After oxygation	Before oxygation	After oxygation
Compressor	12.4 ± 4.25 ns	13.3 ± 3.52 a [†]	7.8 ± 0.24 ns	26.8 ± 5.26 a
Venturi	12.6 ± 0.60 ns	7.1 ± 1.59 b	7.0 ± 1.34 ns	13.4 ± 2.85 b
Control	10.3 ± 5.90 ns	7.9 ± 1.62 b	7.1 ± 0.24 ns	7.5 ± 2.67 c

[†]a, b and c represent significant difference level at 95%.

이산화탄소 함량을 측정한 결과 (Table 4), 모든 처리구에서 공기주입 전과 후 함량 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$). Edwards et al. (2018)은 지중 점적과 지표 점적 관개 시스템에 따른 토양 내 이산화탄소 함량을 비교한 결과 관개방법에 따른 이산화탄소 함량의 차이는 없다고 보고하였다. 기존 연구들에서 토양 내 이산화탄소는 토양수분보다는 토양온도에 더 영향을 받는다고 밝혔다 (Lessard et al., 1994; Kallenbach et al., 2010; Schaufler et al., 2010).

Table 4. Carbon dioxide values in the soil at different depths (10 cm, 30 cm underground), supplied through a subsurface drip lines. Oxygation treatment (compressor, venturi), Control (no air was injected). Measure the carbon dioxide value twice, before and after air injection.

Oxygation treatment	Soil pCO ₂ (%)			
	10 cm		30 cm	
	Before oxygation (%)	After oxygation (%)	Before oxygation (%)	After oxygation (%)
Compressor	6.6 ± 0.01 ns	6.6 ± 0.01 ns	6.6 ± 0.05 ns	6.6 ± 0.03 ns
Venturi	6.6 ± 0.41 ns	6.6 ± 0.02 ns	6.6 ± 0.02 ns	6.6 ± 0.02 ns
Control	6.6 ± 0.01 ns	6.6 ± 0.01 ns	6.6 ± 0.05 ns	6.6 ± 0.02 ns

본 연구의 토양온도는 처리 구별로 큰 차이가 나지 않았으므로 (Table 1), 이에 따라 토양 내 이산화탄소 함량도 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

뿌리 생육 변화 분석 옥수수 재배 후 수확기에 뿌리를 채취하여 뿌리 근활력을 측정한 결과는 Table 5과 같다. 토양수분 100%, 120% 모두에서 공기주입 처리한 토양에서 뿌리 근활력이 공기주입 처리하지 않은 대조구보다 더 큰 값을 보였다 ($p < 0.05$). 압축기와 벤츄리는 토양수분 100%일 때 뿌리 근활력 값은 각각 $50.1 \pm 1.69 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, $67.8 \pm 3.25 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 이고, 대조구는 $32.20 \pm 2.08 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 이었다. 토양수분 120%일 때도 토양수분 100%와 비슷한 처리별 뿌리 근활력은 비슷한 경향을 보였다. 토양수분 120%와 토양수분 100%의 뿌리 근활력을 비교하였을 때, 압축기는 뿌리 근활력이 차이가 없었으나 벤츄리는 토양수분 100%가 더 큰 근활력 값을 보였다 ($p < 0.05$). 토양 내 산소량과 뿌리 근활력에 대한 연구는 오랜 기간 연구가 됐다. Bhattarai et al. (2008)은 지중 점적 시스템에서 산소를 공급한 토양 내 콩 뿌리는 밀도, 길이 그리고 근활력이 더 좋은 것으로 밝혔다. 이와 같은 결과는 이후 목화 (Pendergast et al., 2013), 알파파 (Fox and Lipps, 1964), 토마토 (Zhu et al., 2022) 등 다양한 작물에서 공통적으로 나타났다. 본 연구결과 또한 옥수수 뿌리는 지중 점적관개 공급 시 산소를 같이 공급하면 뿌리 근활력을 높이는 결과를 보였다.

뿌리 근활력과 같이 뿌리 건물 중과 부피를 조사한 결과, 공기주입 처리구 뿌리가 더 큰 건물 중과 부피 값을 보였다 (Table 5) ($p < 0.05$). 건물 중은 토양수분 100%와 120%에서 압축기, 벤츄리 처리에 따른 통계적 차이는 나타나지 않았다. 압축기와 벤츄리 처리는 대조구와 비교하여 건물 중이 상대적으로 더 큰 값이 나타났다. 수분이 충분한 경우 또는 과습한 조건인 경우 토양 내 뿌리 발달은 공기 분포에 따라 달라진다 (Klepper, 1991). Bhattarai et al. (2008)은 지중 점적관개 시스템에 공기주입 방식을 결합하여 병아리콩과 호박의 뿌리 발달을 분석하였다. 두 작물 모두 공기주입이 처리된 토양 내 뿌리 길이가 공기주입 처리가 없는 토양 내 뿌리길이보다 더 큰 값을 보였다. 지중 점적관개 시스템 내에서 충분한 관개를 실시할 경우 뿌리 길이는 깊이가 깊어질수록 감소한다고 알려져 있다 (Kamara et al., 1991). Bhattarai et al. (2008)은 공기주입을 같이 처리하면 뿌리 길이는 깊이에 따라 차이가 나타나지 않거나 감소하지 않는 결과를 보였다. Bhattarai et al. (2004)은 지중 점적관개 시스템에 공기주입을 하여 콩을 재배하여 뿌리 건물 중을 조사하였다. 그 결과 수분이 포장용수량일 경우 공기주입에 따른 뿌리 건물 중은 증가하지 않았다. 그러나 과습한 조건에서는 공기주입 처리로 재배한 콩 뿌리의 건물 중은 공기를 주입하지 않은 토양 내 뿌리보다 월등하게 더 큰 값을 보였다.

Table 5. Root activity, dry weight and volume of corn as a result of soil moisture and oxygation. Soil moisture treatments (field capacity \times 100%, field capacity \times 120%), Oxygation treatments (compressor, venturi), Control (no air was injected).

Soil moisture regime	Oxygation treatment	Root activity ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Root dry weight (g)	Root volume (cm^3)
100% of field capacity	Compressor	$50.1 \pm 1.69 \text{ b}^\dagger$	$49.5 \pm 19.25 \text{ a}$	$269 \pm 83.8 \text{ a}$
	Venturi	$67.8 \pm 3.25 \text{ a}$	$44.6 \pm 10.17 \text{ a}$	$224 \pm 34.9 \text{ a}$
	Control	$32.2 \pm 2.08 \text{ c}$	$12.5 \pm 5.55 \text{ b}$	$59 \pm 43.8 \text{ b}$
120% of field capacity	Compressor	$50.8 \pm 1.07 \text{ a}$	$42.4 \pm 0.74 \text{ ab}$	$225 \pm 5.0 \text{ b}$
	Venturi	$39.2 \pm 1.54 \text{ b}$	$73.7 \pm 25.75 \text{ a}$	$326 \pm 56.6 \text{ a}$
	Control	$35.8 \pm 1.52 \text{ c}$	$14.6 \pm 9.81 \text{ b}$	$60 \pm 48.2 \text{ c}$

† a, b and c represent significant difference level at 95%.

옥수수 이삭수, 이삭중 압축기, 벤츄리 그리고 대조구에서 재배한 옥수수의 이삭수, 이삭 중 결과는 Table 6과 같다. 이삭수에서는 유의성 있는 차이가 나타나지 않았고, 이삭 중에서 토양수분 함량에 따라 공기주입 처리구와 대조구간에 차이가 나타났다. 토양수분 100% 처리구에서 옥수수 이삭 중은 공기주입처리구 평균 $1,292 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, 대조구 평균 $1,278 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로, 공기주입에 따른 차이가 나타나지 않았다. 120% 처리구에서 옥수수 이삭 중은 공기주입 처리구 평균 $1,229 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$, 대조구 $960 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로, 공기주입 처리구에서 대조구 대비 28% 수량이 높았다. 대조 구에서 재배한 옥수수는 토양수분 함량이 증가할수록 수량이 감소하는 경향을 보였다. 토양수분 120%에서 대조구 옥수수 이삭 중은 토양수분 100% 대비 25% 감소했다. 이는 Ren et al. (2014)이 보고한 옥수수에 과습 처리를 하면 수량이 32% 감소한다는 결과와 일치하였다. Ren et al. (2014)은 수량 감소의 원인으로 과습 시 불임률이 증가하여 수확 가능한 이삭수가 감소하기 때문이라고 보고하였다. 반면 공기주입을 처리한 구역의 옥수수 이삭 중은 토양수분이 증가하여도 차이를 보이지 않는 결과를 보였다. 이러한 경향은 지중 점적관개 시 공기주입을 같이 처리하면 과습한 조건에서 수량의 감소를 예방하는 효과를 보인다는 것을 알 수 있다. 공기주입 시 작물 수량 증수 효과에 대한 연구는 오랜 기간 지속돼 왔다. Midmore et al. (2012)은 지중 점적 시스템에서 산소를 공급하여 재배한 파인애플의 수량이 증수한 것으로 밝혔다. 이와 같은 결과는 멜론 (Goorahoo et al., 2004), 목화 (Bhattarai et al., 2004), 옥수수 (Zhou et al., 2019) 등 다양한 작물에서 공통적으로 나타났다. 본 연구결과 또한 지중 점적관개 공급 시 산소를 같이 공급하면 옥수수 수량이 대조구보다 증수하는 결과를 보였다.

Table 6. Number of ear, ear weight of corn as a result of soil moisture and oxygation. Soil moisture treatment (field capacity \times 100%, field capacity \times 120%), Oxygation treatment (compressor, venturi), Control (no air was injected). The index was set to 100% for the control.

Soil moisture regime	Oxygation treatment	Number of ear (number 10a^{-1})	Ear weight (kg 10a^{-1})	Index	
				Number of ear (%)	Ear weight (%)
100% of field capacity	Compressor	$5,775 \pm 0.0$ ns	$1,255 \pm 127.8$ ns	93	104
	Venturi	$5,958 \pm 317.5$ ns	$1,330 \pm 98.4$ ns	96	106
	Control	$6,233 \pm 317.5$ ns	$1,278 \pm 105.1$ ns	100	100
120% of field capacity	Compressor	$5,591 \pm 317.5$ b [†]	$1,207 \pm 133.1$ a	89	125
	Venturi	$6,600 \pm 476.3$ a	$1,252 \pm 141.3$ a	105	130
	Control	$6,233 \pm 317.5$ ab	960 ± 136.5 b	100	100

[†]a and b represent significant difference level at 95%.

Conclusions

젖은 경운 및 점토의 집적으로 경반층이 형성될 경우 지중 점적관개를 이용하여 관개를 실시한다면, 토양은 쉽게 과습 환경이 될 수 있다. 과습으로 인한 작물의 손실을 최소화하기 위해서는 공기주입 처리와 같은 방법이 효과적인 것으로 나타났다. 두 가지 공기주입 방식의 효과는 비슷하게 나타났으나, 경제성을 고려하면 벤츄리 장치가 효율적인 것으로 나타났다 (벤츄리 690천원, 압축기 822천원). 공기주입은 과습한 조건에서도 뿌리의 발달이 대조구보다 양호하였고 이는 지상부의 생육조건에도 좋은 영향을 주어 옥수수 이삭 중도 증가하였다. 수행된 지중 점적 관개관을 활용한 공기주입 평가를 기반으로 토양 과습 피해 예방에 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (과제번호: PJ01419702)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Araki, H. 2006. Water uptake of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during exposure to O₂ deficiency and field level CO₂ concentration in the root zone. *Field Crops Res.* 96(1):98-105.
- Ashraf, M. and H. Rehman. 1999. Mineral nutrient status of corn in relation to nitrate and long-term waterlogging. *J. Plant Nutr.* 22(8):1253-1268.
- Baylar, A. and F. Ozkan. 2006. Applications of venturi principle to water aeration systems. *Environ. Fluid Mech.* 6(4): 341-357.
- Bhattarai, S.P., D.J. Midmore, and L. Pendergast. 2008. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols. *Irrig. Sci.* 26(5):439-450.
- Bhattarai, S.P., N. Su, and D.J. Midmore. 2005. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments. *Adv. Agron.* 88:313-377.
- Bhattarai, S.P., S. Huber, and D.J. Midmore. 2004. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils. *Ann. Appl. Biol.* 144(3):285-298.
- Chen, X., J. Dhungel, S. Bhattarai, M. Torabi, and D. Midmore. 2010. Impact of oxygation on soil respiration and crop physiological characteristics in pineapple. *J. Drain. Irrig. Mach. Eng.* 28(6):543-547.
- Chun, H.C., S. Lee, D.H. Gong, W.C. Kim, S.H. Lee, and K.Y. Jung. 2022. Growth characteristics and physiological responses of soybean (*Glycine max* L.) under excessive soil moisture stress. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 55(3):185-197.
- Edwards, K.P., C.A. Madramootoo, J.K. Whalen, V.I. Adamchuk, A.S. Mat Su, and H. Benslim. 2018. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from surface and subsurface drip irrigated tomato fields. *Can. J. Soil Sci.* 98(3):389-398.
- Fox, R.L. and R.C. Lipps. 1964. A comparison of stable strontium and P³² as tracers for estimating alfalfa root activity. *Plant Soil* 20:337-350.
- Goorahoo, D., D. Adhikari, G. Carstensen, and D. Zoldoske. 2004. Impact of aerated subsurface irrigation water on the growth and yield of crops. Technical Paper. In Proceedings of the Irrigation Show and Education Conference, Tampa, FL, USA.
- Goorahoo, D., G. Carstensen, and A. Mazzei. 2001. A pilot study on the impact of air injected into water delivered through subsurface drip irrigation tape on the growth and yield of bell peppers. California Agricultural Technology Institute, California State University, Fresno, CA, USA.
- Han, K.W., H.R. Cho, A.S. Ro, B.S. Yoon, H.J. Kim, Y.O. Yun, J.I. Lee, B.K. An, B.H. Kim, S.J. Park, K.H. Jung, and Y.S. Zhang. 2014. Soil physical properties under upland cultivation as affected by clay content. p. 103-104. In Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Conference, Jangsu-gun, Korea.
- Huber, S. 2000. New uses for drip irrigation: Partial root zone drying and forced aeration. MSc Thesis, Technical University, Munich, Germany.
- Kallenbach, C.M., D.E. Rolston, and W.R. Horwath. 2010. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation. *Agric., Ecosyst. Environ.* 137(3-4):251-260.
- Kamara, L., R. Zartman, and R.H. Ramsey. 1991. Cotton-root distribution as a function of trickle irrigation emitter depth. *Irrig. Sci.* 12(3):141-144.

- Kaur, G., B.A. Zurweller, K.A. Nelson, P.P. Motavalli, and C.J. Dudenhoefter. 2017. Soil waterlogging and nitrogen fertilizer management effects on corn and soybean yields. *Agron. J.* 109(1):97-106.
- Klepper, B. 1991. Crop root system response to irrigation. *Irrig. Sci.* 12(3):105-108.
- Lessard, R., P. Rochette, E. Topp, E. Pattey, R.L. Desjardins, and G. Beaumont. 1994. Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites. *Can. J. Soil Sci.* 74(2):139-146.
- Lone, A.A. and M.Z.K. Warsi. 2009. Response of maize (*Zea mays* L.) to excess soil moisture (ESM) tolerance at different stages of life cycle. *Bot. Res. Int.* 2(3):211-217.
- McHugh, A.D., S. Bhattarai, G. Lotz, and D.J. Midmore. 2008. Effects of subsurface drip irrigation rates and furrow irrigation for cotton grown on a vertisol on off-site movement of sediments, nutrients and pesticides. *Agron. Sustainable Dev.* 28(4):507-519.
- Midmore, D.J., J. Dhungel, and S.P. Bhattarai. 2012. Aerated water irrigation (oxygation) benefits to pineapple yield, water use efficiency and crop health. *Adv. Hortic. Sci.* 26(1):3-16.
- NAAS. 2010. Method of soil chemical analysis. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Palta, J.A., A. Ganjeali, N.C. Turner, and K.H.M. Siddique. 2010. Effects of transient subsurface waterlogging on root growth, plant biomass and yield of chickpea. *Agric. Water Manage.* 97(10):1469-1476.
- Pendergast, L., S.P. Bhattarai, and D.J. Midmore. 2013. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a vertisol. *Crop Pasture Sci.* 64(12):1171-1181.
- Przywara, G. and W. Stępniewski. 1999. The influence of waterlogging at different temperatures on penetration depth and porosity of roots and on stomatal diffusive resistance of pea and maize seedlings. *Acta Physiol. Plant.* 21(4):405-411.
- RDA. 2014. Handbook on food and crop environment analysis. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.
- RDA. 2021. Good practice of agricultural technology 035; corn. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.
- Ren, B., J. Zhang, X. Li, X. Fan, S. Dong, P. Liu, and B. Zhao. 2014. Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions. *Can. J. Plant Sci.* 94(1):23-31.
- Sathi, K.S., A.A.C. Masud, T.I. Anee, K. Rahman, N. Ahmed, and M. Hasanuzzaman. 2022. Soybean plants under waterlogging stress: Responses and adaptation mechanisms. p. 103-134. In M. Hasanuzzaman et al. (ed.) *Managing Plant Production Under Changing Environment*, Springer, Singapore.
- Schaufler, G., B. Kitzler, A. Schindlbacher, U. Skiba, M.A. Sutton, and S. Zechmeister-Boltenstern. 2010. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: Effects of soil moisture and temperature. *Eur. J. Soil Sci.* 61(5):683-696.
- Smith, R.J., S.R. Raine, and J. Minkevich. 2005. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. *Agric. Water Manage.* 71(2):117-130.
- Thongbai, P., S. Milroy, M. Bange, G. Rapp, and T. Smith. 2001. Agronomic responses of cotton to low soil oxygen during waterlogging. p. 1600-1730. In *Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference*, Hobart, Tasmania, Australia.
- Wen-Quan, N., G. Chao, S. Hongbo, and W. Pute. 2011. Effects of different rhizosphere ventilation treatment on water and nutrients absorption of maize. *Afr. J. Biotechnol.* 10(6):949-959.
- Zhou, Y., Y. Li, X. Liu, K. Wang, and T. Muhammad. 2019. Synergistic improvement in spring maize yield and quality with micro/nanobubbles water oxygation. *Sci. Rep.* 9(1):1-10.
- Zhu, J., N. Xu, K.H. Siddique, Z. Zhang, and W. Niu. 2022. Aerated drip irrigation improves water and nitrogen uptake efficiencies of tomato roots with associated changes in the antioxidant system. *Sci. Hortic.* 306:111471.