

수경재배 양액 내 탄산정 처리에 의한 상추의 생육 및 생리활성물질 함량 변화

복권정¹ · 노승원¹ · 김영국² · 남창수³ · 진채린³ · 박종석^{4*}

¹충남대학교 농업생명과학대학 원예학과 대학원생, ²충남대학교 공과대학 컴퓨터융합학부 교수,

³충남대학교 농업생명과학대학 원예학과 학부생, ⁴충남대학교 농업생명과학대학 원예학과 교수

Changes in Growth and Bioactive Compounds of Lettuce According to CO₂ Tablet Treatment in the Nutrient Solution of Hydroponic System

Gwonjeong Bok¹, Seungwon Noh¹, Youngkuk Kim², Changsu Nam³, Chaelin Jin³, and Jongseok Park^{4*}

¹Graduate Student, Department of Horticulture Science, College of Agriculture & Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Professor, Department of Computer Science and Engineering, College of Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Under Graduate Student, Department of Horticulture Science, College of Agriculture & Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁴Professor, Department of Horticulture Science, College of Agriculture & Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract. In hydroponic cultivation, in order to investigate the change of lettuce growth and physiologically active substances through CO₂ tablet treatment in nutrient solution, we used a solid carbonated tablets commercially available in the Netherlands. The experiment consisted of 0.5-fold, 1-fold, and 2-fold treatment groups with no treatment as a control. As a result, the atmospheric CO₂ concentration in the chamber after CO₂ tablet treatment showed the highest value at 472.2 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ in the 2-fold treatment zone immediately after treatment, and the pH in the nutrient solution decreased the most to pH 6.03 in the 2-fold treatment zone. After that, over time, the CO₂ concentration and pH recovered to the level before treatment. Leaf width and leaf area of lettuce showed the highest values of 17.1cm and 1067.14 cm² when treated 2-fold with CO₂ tablet, while fresh weight and dry weight of the above-ground part were highest at 63.87 g and 3.08 g in 0.5-fold treatment. The root length of lettuce was the longest (28.4 cm) in the control, but there was no significant difference in the fresh weight and the dry weight among the treatments. Apparently, it was observed that the root length of the lettuce was shortened by CO₂ tablet treatment and a lot of side roots occurred. In addition, there was a growth disorder in which the roots turned black, but it was found that there was no negative effect on the growth of the above-ground part. As a result of analyzing the bioactive compounds of lettuce by CO₂ tablet treatment, chlorogenic acid and quercetin were detected. As a result of quantitative analysis, chlorogenic acid increased by 249% compared to the control in 1-fold treatment, but quercetin decreased by 37%. As a result of comparing the DPPH radical scavenging ability showing antioxidant activity, the control and 0.5-fold treatment showed significantly higher values than the 1-fold and 2-fold treatments. This suggests that carbonated water treatment is effective in increasing the growth and bioactive compounds of hydroponic lettuce.

Additional key words : antioxidant activity, chlorogenic acid, DFT, DPPH, HPLC, quercetin

서 론

상추(*Lactuca sativa* L.)는 국화과에 속하는 1년생 초본식물로 대표적인 쌈 및 샐러드 채소로 엽채류 중 배추, 양배추 다음으로 많이 생산되는 작물로 알려져 있으며(KOSIS, 2019),

비타민 A, B, C 및 다량의 철분을 함유하여 경제적 가치가 높은 작물로 알려져 있다(Jang 등, 2007). 특히 최근에는 소비자들의 청정채소에 대한 수요가 증가함에 따라 수경재배 상추에 대한 선호도가 높아지고 있으며 실제 식물공장을 필두로한 우리나라의 수경재배 면적 중 상추가 차지하는 비중이 주를 이루고 있다. 실제 수경재배 상추는 노지재배와 비교하여 농약 및 오염물질로부터 안전하므로 상품성이 매우 높다(Ryoo, 2009).

*Corresponding author: jongseok@cnu.ac.kr

Received January 15, 2021; Revised January 25, 2021;

Accepted January 25, 2021

환경 조절이 가능한 식물 생산 시스템에서 엽채류 생산을 위한 환경과 생육에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 파장별 광원에 따른 생육 특성(Um 등, 2010) 및 LED를 이용한 엽채류 재배(Lee 등, 2010) 등과 같은 광 조건과 양액 조성(Choi 등, 2005; Kang과 Kim, 2007; Kwack 등, 2015)과 관련된 연구가 주를 이루고 있으며, 부분적으로 양액 내 마이크로버블(Park과 Kenji, 2009), 전기자극(Lee와 Oh, 2020) 등과 같은 환경 스트레스 조건이 엽채류 생육에 미치는 영향에 관한 연구들도 이루어지고 있다.

식물은 주변 환경요인에 의한 생육 및 대사활동에 영향을 받게 되는데 이산화탄소는 식물의 광합성에 관여하는 효소들의 활성을 결정하고, 식물체 내 탄수화물의 이동을 활성화해 영양 성장을 촉진한다(Huang 등, 2007). 따라서 CO₂ 농도 증가는 식물의 광합성을 촉진하며(Alexandrov과 Oikawa, 2002) 더불어 식물 세포의 팽압을 조절하여 기공전도도를 낮출 수 있다고 보고되었다(Ainsworth과 Rogers, 2007). 더불어 식물체 내 생리활성물질을 함량을 변화시키며 탄닌과 같은 페놀류의 함량을 증가시킨다고 알려져 있으며(Akula과 Ravishankar, 2011) 이와 같은 결과를 바탕으로 다양한 작물에 대한 제한적인 공간에서 탄산 시비를 이용한 연구가 보고되었다. 착색 단고추(*Capsicum annuum* L.)의 경우 시설재배 시 탄산가스 시비 농도와 시간이 증가함에 따라 작물의 지상부 생육이 증가하였으며(Kang 등, 2007), 딸기(*Fragaria × ananassa*)의 경우 탄산 시비를 통해 수확 후 딸기의 경도, 당도, 산도가 증가하는 결과(Choi 등, 2017)가 보고되었다. 최근에는 다양한 탄산 시비 공급원에 관한 연구로 드라이아이스를 이용한 대기 중 CO₂ 농도 증가시킨 연구(Paek 등, 2020), 연소식 탄산가스 발생기를 이용하여 이산화탄소 농도를 증가시킨 연구(Lee 등, 2018) 등이 보고되었다. Hwang(2012)의 보고에 따르면 탄산수로 6일간 콩나물을 재배한 결과 콩나물의 중량, 두께 등의 성장과 비타민 C, isoflavone과 같은 유효성분 함량이 대조구에 비해 증가하였다. 하지만 현재까지 엽채류 수경재배 시 양액 내 탄산가스 농도 증가가 상추의 생육 및 품질 등에 관한 연구는 보고되지 않았다.

본 연구는 담액 수경재배 시 발포형 고체 탄산정을 배양액에 투입하였을 때 근권부 pH와 EC에 대한 영향과 탄산정 처리에 의해 발생하는 이산화탄소가 상추의 지하부와 지하부의 생육 및 생리활성물질 함량에 미치는 영향을 살펴보고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 실험재료 및 재배환경

실험에는 적축면 상추(Seonpung Plus+, Kwonnong Seeds Co. Ltd., Cheongjusi, Korea)를 사용하였으며, 종자를 240공 암면배지(Rockwool, Grodan Co. Ltd., The Netherlands)에 파종하여 2일간 암조건의 챔버에서 발아를 시킨 뒤, 챔버 내 온도 22 ± 2°C, 습도 70 ± 5%, 형광등 광도 230 ± 20 μmol·m⁻²·s⁻¹, 광주기 16/8h(명기/암기) 조건의 완전제어형 식물 재배실에서 21일간 육묘하였다. 육묘 3주 차에는 본엽이 3~4매가 전개되었으며 균일한 묘를 선발하여 처리구에 따라 semi-DFT 수경재배 장치(Gafatech Co. Ltd., Hwaseongsi, Korea) 4대에 각각 14주씩 총 56주를 정식하였다. 정식이 완료된 수경재배 장치를 처리구별 각 챔버로 옮겨 온도 23 ± 1°C, 습도 70 ± 5%, 고압나트륨등 광도 330 ± 20 μmol·m⁻²·s⁻¹, 광주기 16/8h(명기/암기) 조건으로 같게 설정하여 재배하였다. 수경재배 시 양액은 Hoagland 배양액을 변형하여(Table 1) 사용하였고 양액 내 탄산정 처리에 의한 양액의 EC와 pH 변화를 고려하여 3일마다 양액을 새로 교체해 주어 EC 1.3 ± 2dS·m⁻¹, pH 6.5 ± 0.2로 유지해 주었다. 정식 3주 후 수확하여 생육 및 항산화 물질 분석을 수행하였다.

2. 양액 탄산정 처리 및 양액 모니터링

양액 내 탄산정 처리를 위해 알약 형태로 제작된 고품 탄산정(CO₂-TABS, No Mercy Supply, The Netherlands)을 이용하였다. 해당 제품은 알약 형태의 탄산정으로 양액에 넣으면 탄산 기체가 양액 내에서 발포되어 30분 이내에 전부 용해되고 탄산가스가 서서히 기화되는 특징을 가지고 있다. 해당 탄

Table 1. Composition of the nutrient solution used in the experiment.

Chemical	Conc. (mg·L ⁻¹)	Chemical	Conc. (mg·L ⁻¹)
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	960.0	H ₃ BO ₃	3.02
KNO ₃	620.0	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.05
NK ₄ H ₂ PO ₄	120.0	MnSO ₄ ·5H ₂ O	2.18
MgSO ₄ ·7H ₂ O	500.0	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.02
Fe-EDTA	24.49	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22

산정 1정의 무게는 2g이며 사용 기준 용량은 100L를 기준으로 사용하게 되어 있다. 따라서 본 실험의 수경재배 장치 용량인 18L를 고려하여 탄산정을 분말화한 뒤 0.36g의 분말을 수경재배 장치 양액에 녹인 것을 1배 처리로 기준으로 하여 사용하였다. 탄산정 처리 농도에 따른 상추의 생육 및 품질 차이를 알아보기 위하여 무처리를 대조구로 하여 18L의 양액에 탄산정 0.18g(0.5배), 0.36g(1배), 0.72g(2배)을 각각 처리하였으며, 탄산정 처리는 탄산의 효력을 유지하기 위해 정식 후 3일간격으로 양액을 새로 교체할 때마다 각 처리구별 기준량의 탄산정을 새로 용해해 주었으며 양액 교체는 오후 6시에 실시하였다. 탄산정 처리에 따른 챔버 내 대기 중 CO₂ 변화 및 양액 내 pH를 측정하기 위하여 CO₂ Analyzer(Li-820, Licor Co. Ltd., USA)와 pH meter(HI5221-02, Hanna Instruments Co. Ltd., The Netherlands)를 이용하여 대기 중 CO₂ 변화는 탄산정 처리 시작 후 24시간 동안 30분 간격으로 챔버 내 CO₂를 측정하였으며, 양액 내 pH는 탄산정 처리 후 3일간 매일 측정하였다.

3. 생육 분석 방법

정식 3주 후 처리구별로 10주의 상추를 수확하여 생육 조사를 수행하였다. 버니어 캘리퍼스(SD500-300PRO, Shin Con CO. Ltd., Korea)를 이용하여 가장 큰 잎의 엽장, 엽폭, 1cm² 크기 이상의 엽수를 측정하였으며, 개체별 총 엽면적을 엽면적 측정기(LI-3100, Licor Co. Ltd., USA)를 이용하여 측정하였다. 단위면적당 엽록소 함량 비교를 위하여 SPAD-502 (Minolta Camera Co. Ltd., Japan)을 이용하여 SPAD 값을 측정하였다. 상추의 생체중은 지상부와 지하부로 나누어 전자저울(MW-2N, CAS Co. Ltd., Korea)로 측정하였고, 생체중을 측정한 시료를 봉투에 담아 80°C로 설정된 열풍 건조기(HB-501M, Hanback Scientific Technology Co. Ltd., Bucheon, Korea)를 이용해 1주일간 건조한 후 전자저울을 사용해 건물중을 측정하였다.

4. 생리활성물질 정량 분석

탄산정 처리에 따른 상추의 생리활성물질 및 항산화도 분석을 위하여 처리구별 상추 3주씩 수확한 잎을 액체질소로 급속 냉각시켜 -70°C에 냉동보관 하였다. 냉동된 시료는 동결건조하여 믹서기와 막자사발을 이용해 분말화 시켰으며, 분말 시료 100mg에 80% MeOH 2mL을 넣고 1시간 동안 초음파처리(sonication)를 한 뒤, 12,000rpm에서 15분간 원심 분리한 상등액을 0.45µm의 syringe filter로 필터링하여 분석 시료로 사용하였다. Chlorogenic acid, quercetin 두 물질에 대한 정량 분석을 위하여 HPLC(1260 Infinity II, Agilent Technologies

Co. Ltd., USA)를 이용하였으며, 컬럼은 optimapak C18 column (250 × 4.6mm, 5µm)을 사용하였고 컬럼 온도는 30°C, 유량은 1.0mL·min⁻¹, 검출파장은 280nm로 설정하였다. 이동상 용매로는 0.15% 아세트산을 포함한 solvent A와 80% MeOH의 solvent B를 이용하였다. Chlorogenic acid와 quercetin 표준물질(Sigma-Aldrich Co., USA)을 99.9% MeOH에 1000, 500, 250, 200, 100, 50µg·mL⁻¹ 농도로 희석한 후 검량선을 작성하여 정량 분석에 사용하였다.

5. DPPH 라디칼 소거능 분석

상추의 항산화도를 알아보기 위해 DPPH 라디칼 소거능을 측정하였다. 측정은 생리활성물질 분석 시 제조한 상춧잎 추출 시료를 사용하였으며, 1.5mL 튜브에 1mM의 DPPH 용액 500µL와 100배 희석한 상춧잎 추출 시료 500µL를 실온에서 30분간 반응시킨 후 UV/Vis 분광광도계(OPTIZEN POP BIO, Mecasys Co. Ltd., Daejeon, Korea)를 이용하여 517nm에서 흡광도를 측정하였다. 측정값은 [1-시료 첨가구의 흡광도/시료 무첨가구의 흡광도] × 100의 계산식을 이용하여 DPPH 라디칼 소거능을 계산하였다.

6. 통계분석

모든 분석 결과는 처리구별 평균 간 비교를 위하여 SPSS 프로그램(SPSS Statistic 26, IBM Co. Ltd., USA)을 사용하여 one-way ANOVA 분석을 수행하였으며 평균간 유의차 검증을 위하여 Duncan의 다중검정법으로 유의수준 $p \leq 0.05$ 에서 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 탄산정 처리에 따른 CO₂ 농도 및 양액 pH 변화

탄산정 처리에 의한 챔버 안 CO₂ 농도를 측정한 결과, 탄산정 처리 직후 챔버 내 대기 이산화탄소 농도는 대조구의 경우 375µL·L⁻¹로 가장 낮았으며, 0.5배 처리구는 437µL·L⁻¹, 1배 처리구는 444µL·L⁻¹, 2배 처리구는 442µL·L⁻¹까지 증가하는 모습을 나타내다가 이후 2시간에 걸쳐 점차 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 1). 처리 4시간 이후 야간 암조건에 들어서자 식물의 호흡에 의한 이산화탄소 배출량이 증가함에 따라 야간 챔버 내 이산화탄소 농도가 증가하는 경향을 나타내었는데 야간 최대 이산화탄소 농도는 대조구, 0.5, 1.0, 2.0배의 경우 각각 450, 455, 464, 472µL·L⁻¹를 나타내었다(Fig. 1). 이후부터 탄산정 처리의 챔버 내 이산화탄소 농도가 대조구 농도 수준으로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 CO₂ 농도가 높을수록 야간 CO₂ 배출량이 증가하는 이유는 지상부 발달 정

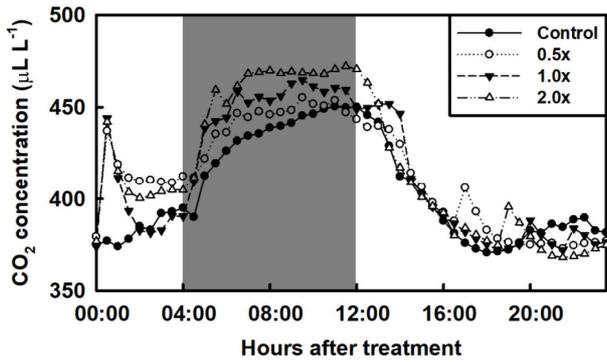


Fig. 1. Time course of CO₂ concentration in the atmosphere of chambers by different CO₂ tablet treatments. The CO₂ concentration measured every 30 minutes for 24 hours after treatment. The white and gray zones represent day and night time, respectively.

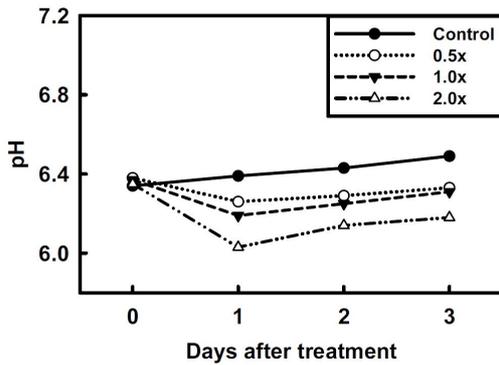


Fig. 2. pH change of the nutrient solution in the hydroponic systems. pH change measured daily for 3 days after treatment.

도에 기인한 것으로 Kimball(1983)에 따르면 지상부 발달에 따른 동화 산물 소모 증가가 CO₂ 배출에 영향을 미친다는 연구 결과와 일치한 것으로 보인다.

탄산정 처리 후 3일간 양액 내 pH 농도를 측정한 결과 대조구의 경우 양액 내 pH가 측정 첫날 pH 6.34에서 측정 마지막 날 pH 6.49까지 증가하는 경향을 나타냈다. 탄산정 0.5배, 1배, 2배 처리구의 경우 탄산정 처리 전 각각 pH 6.38, pH 6.37, pH 6.35로 모두 비슷한 수준의 값을 나타내었지만, 탄산정 처리 1일 후 탄산정 처리구의 모든 양액 내 pH가 0.12에서 0.32만큼 감소하는 모습을 나타냈다. 감소 폭은 탄산정 처리량이 클수록 크게 나타났으며 처리 후 2일, 3일 차에 측정한 양액 내 pH 값으로 보아 pH가 처리 전 수준으로 회복하는 모습을 나타내었다(Fig. 2). Lee 등(2013)은 pH가 급격하게 높아진 정수장의 원수에 CO₂ 주입을 통해 정상범위의 pH로 조절시켰는데 이는 물에 용해된 CO₂는 H₂CO₃로만 존재하는 것이 아니고 물과 맞닿고 있는 대기 중의 CO₂와 평형을 이루고 있어서 CO₂가 과도하게 용해될 때 H⁺가 증가하게 되어 pH가 낮아지기 때문이라 설명하고 있다. 본 연구에는 CO₂에 의한 양액의 pH가 작물의 생육에 부정적인 영향을 미치지 않는 수준에서 유지되었으며 양액에 용해되어 있던 CO₂가 지속해서 대기 중으로 발산하며 작물의 생육을 증가시키는 작용을 한 것으로 판단된다.

2. 생육 분석

수확 후 상추의 외관을 관찰한 결과 형태학적으로 탄산정 처리에 의한 시각적 차이는 발견되지 않았다. 하지만 지하부의

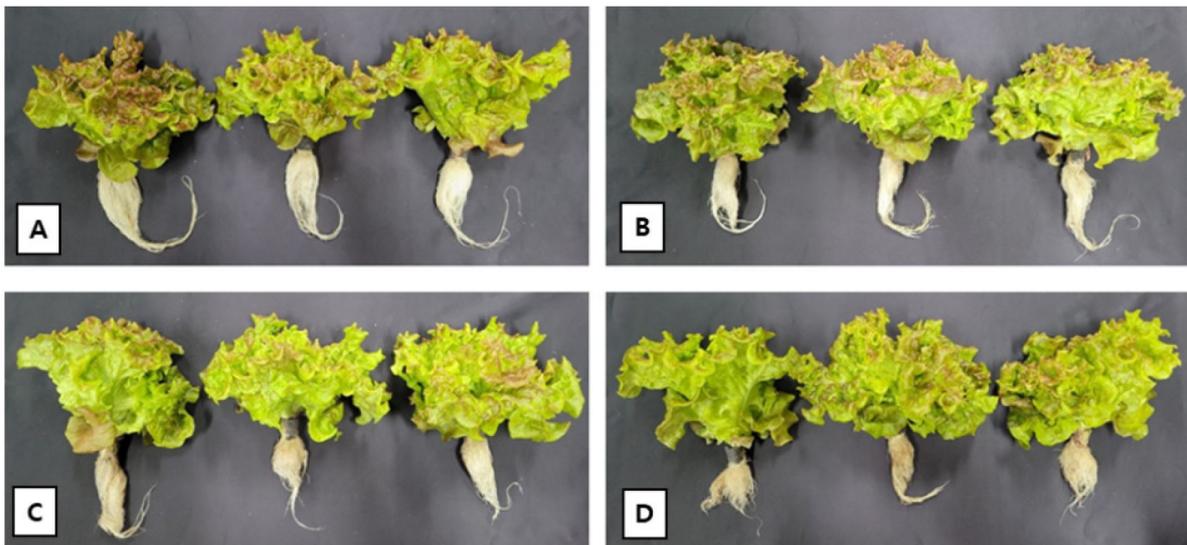


Fig. 3. Photos of the lettuces grown in different CO₂ tablet treatments for 3 weeks after transplanting. (A, B, C, D mean Control, 0.5x 1.0x 2.0x treatment)

경우 대조구와 비교하여 탄산정 처리 농도가 높아질수록 뿌리의 길이가 짧아지고 진한 갈색을 띠는 모습을 나타내었다(Fig. 3). 생육 분석 결과 뿌리의 형태적인 변화가 지상부의 생육에 부정적인 영향을 주지 않은 것으로 보인다.

Table 2는 탄산정 처리에 의한 상추의 생육 분석 결과이다. 엽수와 엽장의 경우 탄산정 처리에 따른 유의적 차이가 나타나지 않았으며, 엽폭의 경우 탄산정 처리 1배, 2배 처리에서 각각 17.8, 17.9cm로 대조구와 비교하여 유의하게 증가하였다. 상추 개체별 총 엽면적 역시 대조구와 비교하여 0.5배, 1배, 2배 처리구 모두 각각 15.0, 16.8, 20.2%씩 유의적으로 증가하였다. 하지만 엽록소 지표를 나타내는 SPAD 값은 2배 처리구에서 높은 평균값을 나타내었지만 대조구와 비교하여 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 지상부 생체중과 건물중의 경우 0.5배 처리에서 각각 63.9g과 3.08g으로 가장 높은값을 나타냈으며 모든 탄산정 처리의 지상부 생육이 대조구와 비교하여 유의적으로 증가되었다. 상추의 지하부 생육 조사 결과 근장의 경우 대조구와 비교하여 탄산정 처리 농도가 높을수록 근장이 유의적으로 감소했으나(Fig. 3) 지하부 건물중의 경우 근장과 반대되는 경향으로 탄산정 처리 농도가 높아질수록 증가하였다(Table 2). 양액에 탄산정을 용해 시키면 H₂CO₃의 형태로 존재하며 pH가 약간 하강하여 6.1 정도를 유지하였다. 상추는 pH 5.0에서 7.0까지 생육에 큰 장애가 발생하지 않는다고 보고되었으며(Park 등, 1999), 식물은 종에 따라서 스트레스에 대한 저항성이 다르므로(Lichtenthaler, 1996) 토양의 CO₂가 과도하게 높아지는 환경에서 식물 종에 따라 그 반응 역시 다양하게 나타난다. Patil(2012)은 외떡잎식물이 쌍떡잎 식물보다 토양 CO₂ 증가에 대한 저항성이 더 클 것이라고 보고하였으며, 실제 토양 CO₂가 증가하였을 때 쌍떡잎식물인 알팔파의 생육 저해가 외떡잎식물인 옥수수보다 더 크게 나타났다(Wu 등, 2014). 본 실험의 상추의 경우 쌍떡잎식물에 속

하며 뿌리 신장은 대조구보다 저해되었지만, 생육에는 차이가 나타나지 않았다. 백합나무에서 CO₂ 농도가 증가함에 따라 결가지의 발생이 증가(Lee 등, 2013)한 것으로 보아, 기포 형태의 탄산이 뿌리에 자극을 주어 뿌리의 길이 생장은 억제됐지만 2차 또는 3차 지근이 발달하여 전체 뿌리의 생육은 증가한 것으로 판단된다.

식물은 CO₂ 포화점까지 CO₂ 농도가 증가함에 따라 광합성량 역시 증가하게 된다. 광합성량의 증가는 식물의 엽면적 및 생육의 증가 등 다양한 식물 생리 반응으로 나타나게 된다(Nederhoff 등, 1992). 또한, 이산화탄소 처리는 잎의 표피 조직 세포의 신장을 촉진하고, 작물과 품종에 따라 정도의 차이는 있지만, 식물의 엽면적 및 엽수를 증가시키기 때문에 식물의 생장에 효과가 있다고 보고되었다(Taylor 등, 2001). 따라서 생육 조사 결과, 양액에 용해시킨 탄산정이 이산화탄소로 기화되면서 공기 중의 CO₂ 농도가 증가하였고, 이러한 영향이 지상부 상추의 생리, 성장 반응에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3. 생리활성물질 정량 분석 결과

탄산정 처리에 따른 상추 내 생리활성물질 분석 결과 chlorogenic acid와 quercetin이 검출되었다. 단위 건물중 당 chlorogenic acid 함량은 탄산정 처리구에서 대조구보다 더 높게 나타났다. 1배 처리구에서 단위 건물중 당 3.24mg·g⁻¹로 대조구보다 114% 증가하여 가장 높은 값을 나타냈으며 0.5배 처리구에서는 2.42mg·g⁻¹, 2배 처리구에서는 2.21mg·g⁻¹로 대조구 대비 각각 60.3, 47.4% 증가한 결과를 나타내었다. Quercetin 함량은 대조구에서 0.236 mg·g⁻¹로 가장 높았으며 1.0배 처리구에서 대조구보다 54% 감소한 0.169mg·g⁻¹으로 가장 낮은 값을 나타냈다(Fig. 4A). 단위 건물중 당 생리활성물질 함량을 실제 건물중에 곱하여 식물 1개체당 생리활성물

Table 2. Influences of carbonated water on lettuce growth parameters at harvest (21 days after transplanting).

Treatment	Above-ground						Under-ground				
	Number of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf area (m ²)	SPAD	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Root length (cm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	
Control ^z	9.7 a ^y	16.1 a	16.9 b	887 b	14.4 a	51.9 b	2.52 b	28.4 a	10.5 a	0.44 a	
0.5x	10.0 a	16.7 a	16.8 b	1021 a	15.2 a	63.8 a	3.08 a	25.1 ab	11.4 a	0.44 a	
1.0x	10.0 a	17.0 a	17.8 a	1036 a	13.6 a	60.7 a	2.93 a	20.6 bc	11.2 a	0.52 a	
2.0x	9.5 a	17.0 a	17.8 a	1067 a	17.3 a	61.7 a	2.92 a	16.2 c	9.9 a	0.53 a	
ANOVA test ^x	NS	NS	*	*	NS	*	*	**	NS	NS	

^zControl, no treatment.

^yMean separation within columns and different letter means significant difference by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

^xNS, *, **, ***, Nonsignificant or significant at $p \leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

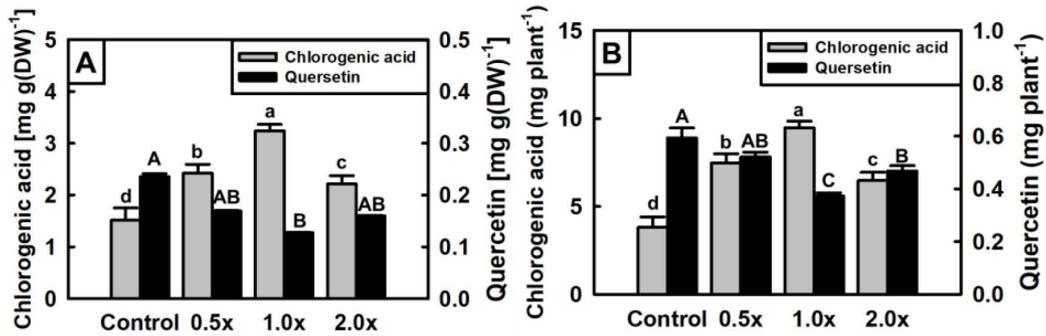


Fig. 4. Contents of chlorogenic acid and quercetin in the lettuce treated with different CO₂ tablet concentration. In the graph, the X axis means the CO₂ tablet concentration. The bars represent the means and the error bars indicate standard error (n=3). Different letters at the top of bars indicate significant differences between the CO₂ tablet treatments ($p \leq 0.05$).

질 함량을 분석한 결과 chlorogenic acid와 quercetin 모두 건물중 당 생리활성물질 함량과 동일한 경향성을 나타냈다. 1배 처리구에서 chlorogenic acid의 함량이 가장 높았으며 9.47 mg·plant⁻¹으로 대조구 3.81mg·plant⁻¹보다 249% 높게 나타났다. 하지만 1배 처리구에서 quercetin 함량이 가장 낮았으며 0.373mg·plant⁻¹으로 대조구 0.593mg·plant⁻¹보다 37% 낮게 나타났다. 상추는 중간 정도의 가벼운 환경 스트레스 조건에 의해 식물체 내 페놀 화합물 축적 및 항산화도가 향상될 수 있다는 많은 연구 결과가 보고되었다(Sgherri 등, 2017; Samuolienė 등, 2012). 탄산정 처리는 상추의 생리활성물질을 증가시키는데 이러한 가벼운 환경 스트레스로 작용한 것으로 보이며, 이는 실제 탄소-영양소 균형 가설(Bidart-Bouzat와 Imeh-Nathaniel, 2008)에 기초하여 광합성이 과도해질 경우 더 많은 비율의 탄수화물이 2차 대사산물 합성을 유도한다(Becker와 Kläring, 2016; Pérez-López 등, 2013)는 이전 연구 결과와도 유사하였다. HPLC를 이용하여 상추 6품종에 대한 주요 항산화 폴리페놀 화합물을 분석한 이전 연구 결과 chlorogenic acid, caffeic acid, dicaffeoyl tartaric acid, quercetin 3-O-glucuronide 등의 물질이 검출됨을 확인하였으며(Nicolle 등, 2004), Oh 등(2009)은 ‘Baronet’라는 품종의 상추에 온도 및 광도 조절을 통한 가벼운 환경 스트레스 처리를 통해 chlorogenic acid와 quercetin의 함량이 모두 대조구와 비교하여 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 본 연구에서는 두 물질의 함량이 탄산정 농도에 대해 반대되는 경향성을 나타내어 향후 상추의 품종에 따른 생리활성물질 함량에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. DPPH 라디칼 소거능 분석 결과

상추 잎의 추출액을 이용하여 DPPH 라디칼 소거능을 분석한 결과 대조구와 0.5배 처리구에서 각각 49.2, 49.3%로 1배

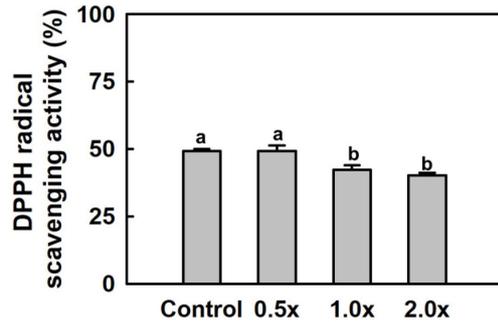


Fig. 5. DPPH radical scavenging activity in the lettuce leaves treated with different CO₂ tablet concentration. In the graph, the X axis means the CO₂ tablet concentration. The bars represent the means and the error bars indicate standard error (n=3). Different letters at the top of bars indicate significant differences between the CO₂ tablet treatments ($p \leq 0.05$).

처리구 42.4%와 2배 처리구 40.2%에 비교하였을 때 유의적으로 높은 값을 나타내었다(Fig. 5). DPPH 라디칼 소거능은 항산화 활성을 나타내는 지표로 측정 시 작물의 종류나 샘플의 상태, 추출용매의 종류에 따라 측정 결과가 매우 다양하게 나올 수 있다(Proteggente 등, 2002; Suh 등, 2013; Kim 등, 2009). 적치마 상추와 청치마 상추의 안토시아닌과 카로티노이드에 의한 항산화 활성을 측정된 결과 이들 물질의 농도와 항산화 활성이 양의 상관관계를 나타내었지만, 물질에 따라 활성도가 크게 차이가 나는 결과를 나타내기도 하였다(Park 등, 2015). 이들은 식물의 항산화 활성에 관여하는 물질에는 비타민 C와 같은 다른 수용성 항산화 물질이 관여하는 것으로 추정하였는데, 본 연구의 DPPH 연구 결과 역시 본 연구에서 분석한 chlorogenic acid, quercetin 외의 항산화 관련 물질이 많이 관여한 것으로 사료 된다.

결 론

본 연구의 결과 담액 수경 재배 시 고형 탄산정 0.5배 처리시 상추의 엽폭과 엽면적, 생체중과 건물중이 대조구와 비교하여 유의적으로 증가하는 것을 확인하였다. 1배와 2배 처리구 역시 대조구와 비교하여 생육이 증가하였지만 엽폭을 제외하고 0.5배 처리와 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 뿌리의 생체중과 건물중은 탄산정 처리와 대조구간 유의적인 차이가 발견되지 않았지만, 뿌리 길이의 경우 탄산정 처리 농도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 모습을 나타냈다. 이는 탄산정 처리를 통한 추가적인 이산화탄소 공급이 전체적인 식물의 생육 증대에 긍정적인 역할을 하지만 탄산정 처리로 인해 발생된 양액 내 발포 탄산가스의 직접적인 자극이 식물 뿌리의 형태 형성에 영향을 주는 것으로 보인다. 따라서 향후 이러한 물리적 자극이 식물 근권부에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요해 보인다. 상추의 생리활성물질의 함량은 물질의 종류에 따라 축적되는 함량이 상이하게 나타났으며, 실제 항산화 활성을 나타내는 DPPH 라디칼 소거능 분석 결과 탄산정 1배 처리와 2배 처리는 대조구보다 항산화 활성능이 감소하는 것으로 나타났는데, 향후 상추의 항산화 활성에 직접적으로 관여하는 생리활성물질에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

적 요

수경재배시 양액 내 탄산정 처리를 통한 상추의 생육 및 생리활성물질 변화를 조사하기 위해 네덜란드에서 시판되는 고형 탄산정을 사용하였다. 실험은 무처리를 대조구로 하여 0.5배, 1배, 2배 처리구로 구성하였다. 실험결과, 탄산정 처리 후 챔버내 대기 CO₂ 농도는 처리 직후 2배 처리구에서 472.2μL·L⁻¹로 가장 높은 수치를 보였으며, 양액내 pH는 2배 처리구는 pH 6.03로 가장 많이 감소하였다. 이후 시간이 경과함에 따라 CO₂ 농도와 pH는 처리 전 수준으로 회복하는 모습을 나타냈다. 상추의 엽폭과 엽면적은 탄산정 2배 처리시 17.1cm, 1067cm²로 가장 큰 값을 나타내었으며 지상부 생체중, 건물중은 0.5배 처리구에서 63.87g, 3.08g으로 가장 높게 나타났다. 상추의 근장은 대조구에서 28.4cm로 가장 길었으나 처리구들간에 지하부의 생체중, 건물중은 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 외관상 탄산정 처리에 의해 상추의 근장이 짧아지고 결뿌리가 많이 발생한 것이 관찰되었다. 또한 뿌리가 갈색으로 약간 변하는 결과가 있었지만, 지상부 생육에는 부정적인 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 탄산정 처리에 의한 상추의 생리활성물질을 분석한 결과 chlorogenic acid와

quercetin 두가지 물질이 검출되었으며 이를 정량분석한 결과 1배 처리구에서 chlorogenic acid는 대조구보다 249% 증가하였지만 quercetin은 37% 감소한 결과를 나타냈다. 항산화 활성을 나타내는 DPPH 라디칼 소거능을 비교한 결과 대조구와 0.5배 처리가 1배, 2배 처리보다 유의적으로 높은 값을 나타냈다. 이를 통해 탄산정 처리가 수경재배 상추의 생육과 생리활성물질을 증대에 효과가 있음을 제시한다.

추가 주제어: chlorogenic acid, DPPH, quercetin, 담액수경, 액체크로마토그래피, 항산화 활성

사 사

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임[No. 2020-0-01441, 인공지능융합연구센터지원(충남대학교)].

Literature Cited

- Ainsworth E.A. and A. Rogers. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment* 30:258-270.
- Akula R. and G.A. Ravishankar. 2011. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling & Behavior* 6:1720-1731.
- Alexandrov G. and T. Oikawa. 2002. TsuBiMo: a biosphere model of the CO₂-fertilization effect. *Climate Research* 19:265-270.
- Becker C. and H.P. Kläring. 2016. CO₂ enrichment can produce high red leaf lettuce yield while increasing most flavonoid glycoside and some caffeic acid derivative concentrations. *Food chemistry* 199:736-745.
- Bidart-Bouzat M.G. and A. Imeh-Nathaniel. 2008. Global change effects on plant chemical defenses against insect herbivores. *Journal of Integrative Plant Biology* 50:1339-1354.
- Choi I.L., J.S. Yoon, H.S. Yoon, K.Y. Choi, I.S. Kim, and H.M. Kang. 2017. Effects of carbon dioxide fertilization on the quality and storability of strawberry 'Maehyang'. *Protected Horticulture and Plant Factory* 26:140-145 (in Korean).
- Choi K.Y., E.Y. Yang, D.K. Park, Y.C. Kim, T.C. Seo, H.K. Yun, and H.D. Seo. 2005. Development of nutrient solution for hydroponics of Cruciferae leaf vegetables based on nutrient-water absorption rate and the cation ratio. *J. Bio-Environ. Con.* 14:289-297 (in Korean).
- Huang J.G., Y. Bergeron, B. Denneler, F. Berninger, and J. Tardif. 2007. Response of forest trees to increased atmospheric CO₂. *Critical Reviews in Plant Sciences* 26:265-283.

- Hwang T.Y. 2012. Quality characteristics of soybean sprouts cultivated with carbonated water. *Korean Journal of Food Preservation* 19:428-432 (in Korean).
- Jang S.W., E.H. Lee, and W.B. Kim. 2007. Analysis of research and development papers on lettuce in Korea. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* 25:295-303 (in Korean).
- Kang H.M. and J.S. Kim. 2007. Effect of nutrient solution composition modification on the internal quality of some leaf vegetables in hydroponics. *J. Bio-Environ. Con.* 16:248-351 (in Korean).
- Kang Y.I., S.Y. Lee, H.J. Kim, S.H. Yum, and H. Chun. 2007. Effects of CO₂ enrichment concentration and duration on growth of bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Bio-Environment Control* 16:352-357 (in Korean).
- Kim J.Y., C.R. Lee, K.H. Cho, J.H. Lee, and K.T. Lee. 2009. Antioxidative and Lp-PLA₂ inhibitory activities in 29 fruits and vegetables. *Korean Journal of Food Preservation* 16:512-517 (in Korean).
- Kimball B.A. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations 1. *Agronomy Journal* 75:779-788.
- Korea Statistical Information Service (KOSIS). Crop production survey. 2019. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0028&conn_path=12 (Last accessed 20 20-12-13).
- Kwack Y.R.N., D.S. Kim, and C.H. Chun. 2015. Growth and quality of baby leaf vegetables hydroponically grown in plant factory as affected by composition of nutrient solution. *Protected Horticulture and Plant Factory* 24:271-274 (in Korean).
- Lee G.S., M.C. Kim, J.K. Kwon, and G.T. Seo. 2013. Effect of pH adjustment by CO₂ on coagulation and aluminum elution in water treatment. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* 35:17-22 (in Korean).
- Lee J.G., S.S. Oh, S.H. Cha, Y.A. Jang, S.Y. Kim, Y.C. Um, and S.R. Cheong. 2010. Effects of red/blue light ratio and short-term light quality conversion on growth and anthocyanin contents of baby leaf lettuce. *J. Bio-Environ. Con.* 19:351-359 (in Korean).
- Lee J.H., J.S. Lee, K.S. Park, J.K. Kwon, J.H. Kim, D.S. Lee, and K.H. Yeo. 2018. Effect of using Burn-type CO₂ generators when cultivation strawberry in a greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 27:111-116 (in Korean).
- Lee S.R. and M.M. Oh. 2020. Electric stimulation promotes growth, mineral uptake, and antioxidant accumulation in Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*). *Bioelectrochemistry* 138:107727.
- Lichtenthaler H.K. 1996. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Journal of Plant Physiology* 148:4-14.
- Nederhoff E.M., A.A. Rijdsdijk, and R. de Graaf. 1992. Leaf conductance and rate of crop transpiration of greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. *Scientia Horticulturae* 52:283-301.
- Nicolle C., A. Carnat, D. Fraisse, J.L. Lamaison, E. Rock, H. Michel, P. Amouroux, and C. Remesy. 2004. Characterisation and variation of antioxidant micronutrients in lettuce (*Lactuca sativa* folium). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84:2061-2069.
- Oh M.M., E.E. Carey, and C.B. Rajashekar. 2009. Environmental stresses induce health-promoting phytochemicals in lettuce. *Plant Physiology and Biochemistry* 47:578-583.
- Paek Y., S.W. Kang, J.K. Jang, and J.K. Kwon. 2020. Variations of carbon dioxide concentration in a strawberry greenhouse using dry ice. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 21:182-188 (in Korean).
- Park J.S. and K. Kenji. 2009. Application of microbubbles to hydroponics solution promotes lettuce growth. *HortTechnology* 19:212-215.
- Park M.H., M.Y. Shim, and Y.B. Lee. 1999. Effects of pH level and electrical conductivity on growth, nutrient absorption, transpiration and CO₂ assimilation of leaf lettuce in hydroponics. *J. Bio-Environ. Con* 8:115-124 (in Korean).
- Park W.S., H.J. Kim, H.J. Chung, M.S. Chun, S.T. Kim, S.Y. Seo, S.H. Lim, Y.H. Jeong, J.W. Chun, S.K. An, and M.J. Ahn. 2015. Changes in carotenoid and anthocyanin contents, as well as antioxidant activity during storage of lettuce. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition* 44:1325-1332 (in Korean).
- Patil R.H. 2012. *Impacts of carbon dioxide gas leaks from geological storage sites on soil ecology and above-ground vegetation.* chap. 2 in *DIVERSITY OF ECOSYSTEMS*, M Ali 27-50. InTech.
- Pérez-López U., J. Miranda-Apodaca, A. Muñoz-Rueda, and A. Mena-Petite. 2013. Lettuce production and antioxidant capacity are differentially modified by salt stress and light intensity under ambient and elevated CO₂. *Journal of plant physiology* 170:1517-1525.
- Proteggente A.R., A.S. Pannala, G. Paganga, L. Buren, E. Wagner, S. Wiseman, F. Put, C. Dacombe, and C.A. Rice-Evans. 2002. The antioxidant activity of regularly consumed fruit and vegetables reflects their phenolic and vitamin C composition. *Free radical research* 36:217-233.
- Ryoo J.W. 2009. Effects of compost leachate on growth and yield of leaf lettuce in hydroponic culture. *Journal of Animal Environmental Science* 15:51-58 (in Korean).
- Samuolienė G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, A. Viršilė, and P. Duchovskis. 2012. Supplementary red-LED lighting and the changes in phytochemical content of two baby leaf lettuce varieties during three seasons. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 10:701-706.
- Sgherri C., U. Pérez-López, F. Micaelli, J. Miranda-Apodaca, A. Mena-Petite, A. Muñoz-Rueda, and M.F. Quartacci. 2017.

- Elevated CO₂ and salinity are responsible for phenolics-enrichment in two differently pigmented lettuces. *Plant Physiology and Biochemistry* 115:269-278.
- Suh J.H., O.J. Paek, Y.W. Kang, J.E. Ahn, J.S. Yun, K.S. Oh, Y.S. An, and S.H. Park. 2013. Study on the antioxidant activity in the various vegetables. *Journal of Food Hygiene and Safety* 28:337-341(in Korean).
- Taylor G., R. Ceulemans, R. Ferris, S.D.L. Gardner, and B.Y. Shao. 2001. Increased leaf area expansion of hybrid poplar in elevated CO₂. From controlled environments to open-top chambers and to FACE. *Environmental Pollution* 115:463-472.
- Um Y.C., S.S. Oh, J.G. Lee, S.Y. Kim, and Y.A. Jang. 2010. The development of container-type plant factory and growth of leafy vegetables as affected by different light sources. *J. Bio-Environ. Con.* 19:333-342 (in Korean).
- Wu Y., X. Ma, Y.E. Li, and Y.F. Wan. 2014. The impacts of introduced CO₂ flux on maize/alfalfa and soil. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 23:86-97.