

Growth-promoting Effect of New Iron-chelating Fertilizer on Lettuce

Ji Young Hwang¹, Sang Eun Jun², Nam-Jo Park³, Ju Sung Oh², Yong Jik Lee⁴, Eun Ju Sohn³ and Gyung-Tae Kim^{1,2*}

¹Department of Medical Bioscience, Dong-A University, Busan 49315, Korea

²Department of Molecular Genetics, Dong-A University, Busan 49315, Korea

³Bioapplications Inc., Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea

⁴Division of Integrative Biosciences and Biotechnology, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea

Received November 18, 2016 / Revised November 21, 2016 / Accepted November 22, 2016

Iron (Fe) is an important micronutrient for the health and growth of plants. Iron is usually provided by fertilizers, and iron-chelate fertilizers are well absorbed by plants. This study presents the plant growth-promoting effects of a new functional iron fertilizer, Fe-chelating crab shell powder (FCSP), which is generated from the chelation of Fe ions with crab shell powder. Iron chelate was derived from spent pickling liquor, which is rich in reductive iron, iron(II) oxide. To analyze the effects of FCSP on plant growth, we treated lettuce with several concentrations of FCSP in both lab- and field-scale experiments. In the lab-scale test, the treatment of 50 ppm of FCSP highly promoted growth and resulted in increases in the size, weight, number and chlorophylls content of leaves of plants compared to the treatment of crab shell powder. Fifty ppm of FCSP also increased the size and weight of leaves up to 2 times compared to the application of chemical fertilizer and/or compost in field conditions. In addition, the FCSP treatment resulted in the highest ion uptake of Fe in lettuce leaves. Moreover, FCSP led to increases in the amounts of Fe, Ca, available phosphorus and organic matter in treated soil, indicating that soil quality was improved. Taken together, our results demonstrate that FCSP promotes lettuce growth via enhancement of Fe availability and improves soil quality. Therefore, FCSP can be utilized as a new functional iron fertilizer.

Key words : Crab shell powder, iron chelate, lettuce, new fertilizer, plant growth promotion

서 론

철은 생명활동에 있어서 필수적인 미량원소 중 하나이다. 철은 생리환경에서 환원된 형태의 2가철이온과 산화된 형태의 3가철이온, 두 형태의 이온을 존재할 수 있는 산화환원력을 가지고 있다. 이 때문에 고등 생명체의 생명활동 동안 철은 공통적으로 미토콘드리아에서 에너지 생성을 위한 전자전달계의 전자운반체들을 구성하는 시토크롬(cytochrome)의 성분으로 기능한다[13]. 또한 산화환원력 때문에 생물체의 산화환원비율을 유지하기 위한 NADPH oxidase, catalase, peroxidase 등의 산화효소와 항산화효소의 구성인자로서 기능한다[13]. 특히, 식물은 엽록체에서 빛에너지로부터 화학에너지를 생산하는 과정 동안 필수적으로 철을 필요로 한다. 식물에서 철은 식물체 내 철의 80%가 엽록체에 존재하면서 광합성의

광반응계에서 빛에너지 흡수를 위한 엽록소의 생산과 물의 산화와 화학에너지의 생산을 위한 전자전달자인 시토크롬과 페레독신(Ferredoxin)의 구성에 관여한다[5]. 이처럼 에너지 생산에 필수적인 철의 결핍은 식물체의 심각한 성장 저하와 더불어 작물의 생산량과 품질의 저하를 야기한다[4]. 그러므로 식물은 철의 생체 항상성 유지를 위해 생체 내 철의 저장과 외부로부터의 효율적인 철 흡수를 위한 기작을 갖추고 있다. 우선, 식물은 체내의 철 항상성 유지를 위해 과잉 흡수된 철을 3가철이온 화합물인 페리틴(Ferritin)의 형태로 저장하여 철 결핍상태를 대비한다. 그러나 이는 외부로부터의 철 흡수가 충분할 때 가능하다. 외부로부터의 철 흡수가 불충분한 상태는 필연적으로 식물의 철 결핍을 가져온다.

토양에서 대부분이 불용성의 산화된 철 화합물로 존재하고 있으며 식물이 흡수할 수 있는 2가철 이온의 함량은 매우 낮다. 특히, 철은 산성 산도에서 2가철이온으로 환원되는 반면, 대부분의 토양은 약알칼리성이기 때문에 식물의 토양 내 철 접근성과 이용률은 매우 낮다[13]. 이를 개선하기 위해 철분 비료가 제공된다. 킬레이트철은 알칼리 산도에서 킬레이트율이 떨어져 안정성이 낮고 안정성이 높은 킬레이트철은 가격이 고가이다. 또한 액체 상태에서의 엽면시비나 관주시비는 철의 유실이 발생하여 지속적이고 효율적인 철 공급이 어려운 단점

*Corresponding author

Tel : +82-51-200-7519, Fax : +82-51-200-7524

E-mail : kimgt@dau.ac.kr

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.

이 있다. 그러므로 식물의 철 흡수 기작을 고려한 안정적인 흡수가 용이한 철 형태의 신소재 비료의 개발이 요구된다.

산세수는 철강 산업에서 강산을 이용해 강판의 표면에 있는 철과 산화철 등의 불순물을 제거하는 과정에서 나오는 산업 폐기물로서 다량의 2가철 이온을 포함하고 있다. 알칼리 토양에 대한 산세수 처리가 토양 내 무기물의 함량 증대와 함께 작물의 성장과 영양분의 함량 증대 효과를 가져오는 것으로 보고되었다[7, 18]. 이는 식물 내 효과적인 철분 공급과 이로 인한 성장 촉진 효과를 위한 재료로서 산세수의 가능성을 제시하고 있다.

한편, 게껍질 분말은 키틴과 키토산 비료의 재료로서 이들 비료는 병원균에 대한 면역반응, 식물의 성장, 이차 대사 산물의 생산, 작물의 품질과 생산성을 증진시킨다고 잘 알려져 있다[2, 14-15]. 특히, 키토산 내 아미노기의 질소는 전자공여체로서 작용할 수 있어 금속이온과의 킬레이션에 효과적인 생체흡착제이다[10, 12].

따라서, 본 연구는 작물의 재배 기간 동안 지속적이고 안정적인 철 공급을 위해 공급되는 철의 형태와 공급방법을 개발하여 식물의 철분 이용률과 성장 촉진 효과를 분석하였다. 산세수와 게껍질을 이용한 신기능성 철분 비료(Fe-chelating crab shell powder, FCSP)의 적정량 토양시비는 상추의 엽록체 함량 증대와 더불어 식물체와 잎의 생육 촉진 효과를 가져왔다. 이러한 결과는 신기능성 철분 비료가 작물의 재배 기간 동안 철 결핍을 극복하고 철의 효과적인 체내 흡수를 통한 작물의 성장 촉진과 생산성 및 품질 향상을 위한 경제적이고 안정적인 서방형 신소재 철분 비료로서 활용 가능성을 제시한다.

재료 및 방법

산세수와 게껍질을 이용한 신기능성 철분 비료(Fe-chelating crab shell powder, FCSP) 제조

철 이온의 농도가 약 33,000 ppm인 산세수 원액을 철 이온의 농도가 최종 2,500 ppm, 6,200 ppm, 12,400 ppm이 되도록 각각 물로 희석한 다음, 이를 게껍질 분말과 25℃에서 1시간 동안 교반시켰다. 이 반응물을 2,000 rpm에서 10분간 원심분리하여 상층액을 버리고 남은 침전물을 3차례 물로 씻어낸 후, 60℃에서 건조하였다. 최종적으로 만들어진 철 이온이 킬레이트된 게껍질 분말의 철 이온 농도를 ICP-ES (Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy)를 이용해서 측정, 확인한 다음 실험에 사용하였다.

식물 재료 및 성장 조건

산세수와 게껍질을 이용한 신기능성 철분 비료(Fe-chelating crab shell powder, FCSP)의 생육 효과를 확인하고자 작물은 상추[품종: 토말린(권농종묘), 학명: *Lactuca sativar* L.]를 사용하였다. 실험은 재배실과 필드로 나뉘어 진행되었다. 재배

실 시험에서 상추의 씨앗은 생장상[24시간/0시간(명/암), 50-100 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$]에서 증류수에 적신 종이필터 위에서 발아된 후, 무처리구(Control), 게껍질 분말(CSP) 처리구, FCSP 처리구로 옮겨 50-100 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 광도에서 16시간/8시간(명/암)의 장일 조건 하에서 성장하였다. 필드 시험은 온실 포장에서 2015년 9월 23일부터 11월 7일까지 실시되었다. 각 처리구 별로 상추 모종을 이식하여 실험을 진행하였으며 한 처리구 당 18개체씩 3반복으로 진행하였다. 실험 토양은 무처리구(Control), 화학비료 처리구(CF), 화학비료와 퇴비 혼합 처리구(CFC), 그리고 농도별 FCSP 처리구로 나뉘어 실험하였다.

엽록소 함량 측정

상추 잎 생체중 100 mg으로부터 80% 아세톤을 사용하여 시험관에서 추출하였다. 분광광도계를 사용하여 750 nm, 630 nm, 646 nm 에서 흡광도 값을 측정하였으며, 함량 계산은 다음의 방법에 따라 나타내었다[1, 8].

토양분석

무처리구를 포함한 각 처리구에서 상추 재배 후 토양분석을 실시하였다. 토양분석은 토양시료를 1개의 처리구에서 4군데를 채취하여 고루 섞은 후 그늘에서 풍건한 후 20 메쉬체로 거른 토양분말을 농촌진흥청 토양 화학분석법에 준하여 분석하였다[11].

생체 내 Fe, Ca 함량 분석

다양한 농도의 FCSP와 여러 대조구들에서 잎의 시료를 채취하여 80℃ 건조기에서 1~2일 완전히 말린 후 1 g의 건조중량을 계량하여 120℃에서 70% HNO_3 로 완전히 녹이고 ICP-ES를 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

산세수와 게껍질을 이용한 신기능성 철분 비료의 처리조건 확립

작물 성장에 흔히 발생하는 철 결핍 현상을 극복하기 위해서 본 연구에서는 철강 산업에서 나오는 부산물인 2가철[Iron (II)]이 다량 함유된 산세수를 이용하였다. 실제로 식물에 흡수된 철분은 2가철의 환원된 형태로 식물의 성장 발달에 사용된다[9]. 따라서 산세수의 다량의 철 이온을 게껍질 분말에 킬레이트하여 식물의 이용률을 높일 수 있도록 하였고 동시에 유기질 비료인 게껍질 분말의 키틴 성분과의 시너지 효과도 이루고자 하였다. 실제로 산세수와 같은 다양한 산업폐기물들은 작물 재배에 활용되어 성장과 생산력을 높이거나 토질을 개선시키는데 사용되고 있다[7, 18]. 식물 생육의 최적 조건을 찾기 위해서 산세수와 게껍질을 이용한 신기능성 철분 비료(Fe-chelating crab shell powder, FCSP)를 제작하였다. 고농도

의 산세수 원액을 물로 희석하여 3가지 농도의 희석산세수(L, M, H)를 만들고 이를 계껍질 분말에 각각 킬레이트시켜 각각 6,100 ppm, 15,100 ppm, 30,250 ppm (FCSP-L, FCSP-M, FCSP-H) 농도의 FCSP를 제조하였다. FCSP의 상추에 대한 농도별 효과를 확인하기 위해 토양 100 g 당 앞서 제작한 FCSP-L, FCSP-M, FCSP-H를 각각 0.33 g 처리하여 토양 내 철 이온의 최종 농도가 각각 20 ppm, 50 ppm, 100 ppm 이 되도록 하였다. 또한, 처리방법과 효능 분석을 실용화 단계 수준에서 검증하기 위해 온실 포장에서 후속 시험을 진행하였으며 대조구로 무처리구, 화학비료 처리구, 화학비료와 퇴비 혼합 처리구 그리고 퇴비와 FCSP를 각각의 농도로 혼합한 FCSP-L, FCSP-M, FCSP-H 처리구 조건을 Table 1과 같이 처리하여 기존의 시비 방식과 비교하여 상추 생육 실험을 진행하였다.

FCSP 처리에 의한 상추의 생육 효과

FCSP 처리로 인한 상추의 생육에 미치는 효과를 확인하기 위해 재배실 환경에서 실험한 결과, Fig. 1과 같이, 무처리구 (Control)와 계껍질 분말(CSP)만 처리한 대조군에 비해서 FCSP 처리구에서 뚜렷한 성장 증진 효과가 나타났으며, 특히 FCSP-M 처리구에서 다른 처리구에 비해 월등한 성장 증진 효과를 보였다(Fig. 1A).

성장 촉진 효과를 상세히 관찰하고 측정하기 위해, 잎의 크기가 가장 큰 9번째 잎을 사용하였다. 9번째 잎의 무게는 무처리구에서 10.8 g이었으며 계껍질 분말 처리구에서는 11.4 g으로 0.6 g 증가 한 것에 비해 FCSP-M 처리구에서는 16.2 g으로

5.4 g 증가하였다. 이는 계껍질만 처리된 경우엔 무처리구에 비해 5.5% 증가된 반면 FCSP-M 처리에서는 50.9% 증가하였다(Fig. 1B). 무게 뿐만 아니라 9번째 잎의 길이와 폭은 무처리구에서 각각 150.0 mm, 63.7 mm였으며 계껍질 분말 처리구에서는 158.9 mm, 62.1 mm으로 각각 8.9 mm, -1.6 mm 증가한 것에 비해 FCSP-M 처리구에서는 176.9 mm, 79.1 mm으로 각각 20.9 mm, 15.4 mm 증가하였다. 이는 계껍질 분말 처리구에서는 무처리구에 비해 길이가 5.9% 증가된 반면 FCSP-M 처리에서는 길이가 17.9%, 폭이 24.2% 증가하였으며 잎의 형태를 나타내는 leaf index 지수(길이/폭)는 크게 차이 나지 않았다(Fig. 1C - Fig.1E). 이 결과로 볼 때, FCSP는 잎의 형태 변화보다는 잎의 성장을 촉진하는 효과를 가진 것으로 판별되었다. 생장의 촉진이 성장률의 증가인지 생육 기간의 단축인지를 알아보기 위하여, 3번째 잎의 성장률을 측정 한 결과, 대조구들에 비해 FCSP-M 처리구에서 가장 높은 성장률을 보였으며(Fig. 1F - Fig. 1G) 계껍질 분말 처리구에 비해 길이 6.2%, 폭 4.4% 증가를 보였다. 엽수의 경우 무처리구에서 11.5장이었으며 계껍질 분말 처리구에서는 11.9장으로 거의 변화 없는 것에 비해 FCSP-M 처리구에서는 13.8장으로 2.3장 증가하여 계껍질 분말 처리구에 비해 16.0%의 증가를 보였다(Fig. 1H). 대부분의 흡수된 철 이온은 시토크롬, 파이토크롬(phytochrome), 페레독신으로서 엽록체와 미토콘드리아 내에 존재하여 에너지 생산을 위해 전자 전달의 역할을 수행하며, 식물체 내 철 이온의 항상성의 유지는 생육과 생산성에 직결 된다고 알려져 있다[13]. 따라서, FCSP 처리로 인한 엽록소의 함량의 변화를 분석한 결과, 가장 높은 생육 증진 효과를 나타낸

Table 1. Composition amount of Fe-chelating crab shell powder (FCSP) and other components for growth test both in lab- and in field-scale

In lab-scale		In field-scale	
Treatment group	Amount of components treated in 100 g soil*	Treatment group	Amount of components treated in 13.2 m ² field**
Control	Non-treatment	Control	Non-treatment
Crab shell powder (CSP)	Fe: 0 ppm, CSP 0.33 g	Chemical fertilizer containing N, P, K (CF)	N (20.4 kg) + P (10.3 kg) + K (12.2 kg)
20 ppm Fe-chelating crab shell powder (FCSP-L)	Fe: 20 ppm, FCSP 0.33 g	Chemical fertilizer containing N, P, K mixed with compost (CFC)	N (20.4 kg) + P (10.3 kg) + K (12.2kg) + Compost (8.8 kg)
50 ppm Fe-chelating crab shell powder (FCSP-M)	Fe: 50 ppm, FCSP 0.33 g	FCSP-L mixed with compost (FCSP-L)	Fe: 20 ppm; FCSP-L (4.4 kg) + Compost (8.8 kg)
100 ppm Fe-chelating crab shell powder (FCSP-L)	Fe: 100 ppm, FCSP 0.33 g	FCSP-M mixed with compost (FCSP-M)	Fe: 50 ppm; FCSP-M (4.4 kg) + Compost (8.8 kg)
		FCSP-H mixed with compost (FCSP-H)	Fe: 100 ppm; FCSP-H (4.4 kg) + Compost (8.8 kg)

* The Test in lab-scale was performed using 10 pots containing 100 g soil per one pot in each treatment group.

**The test in field-scale was performed in 13.2 m² field in each treatment group.

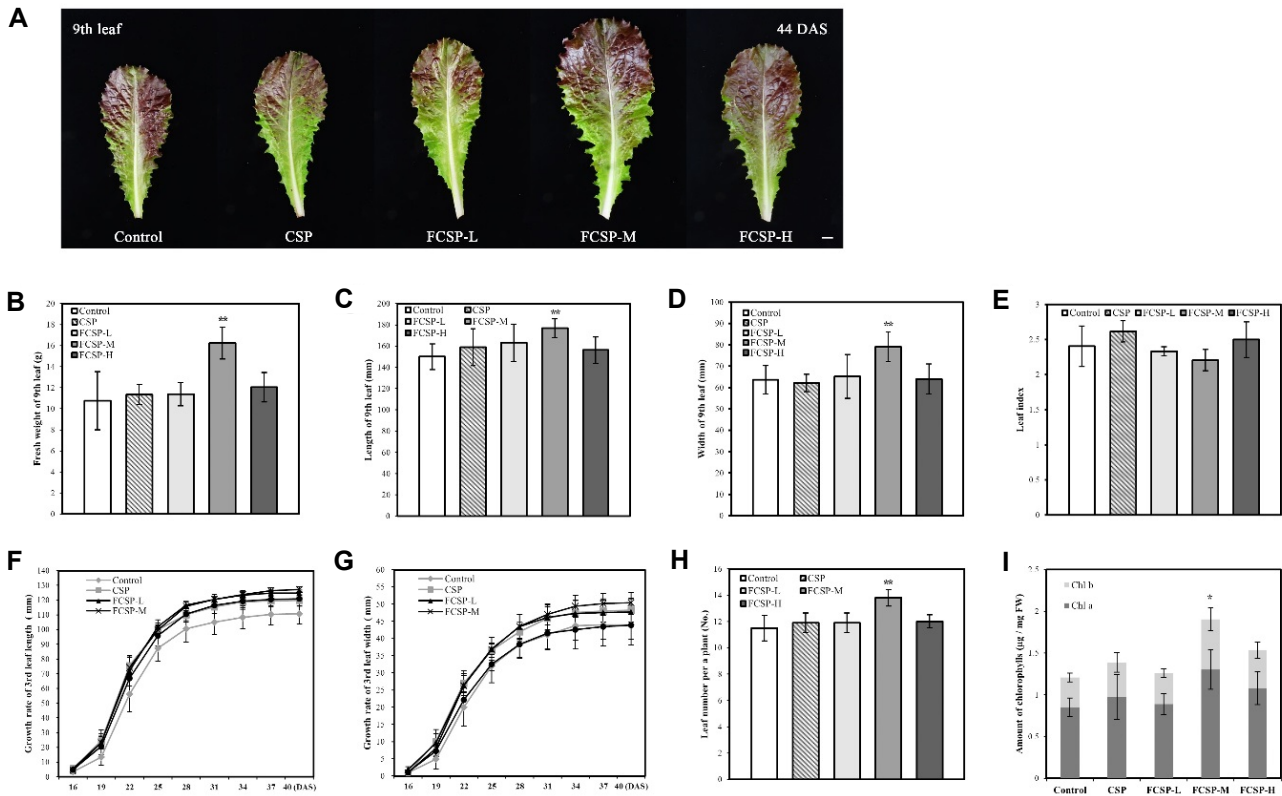


Fig. 1. The growth promoting on effect of lettuce by Fe-chelating crab shell powder (FCSP) in laboratory. Control: no treatment, CSP: Crab shell powder treatment, FCSP-L: 20 ppm Fe-chelating crab shell powder treatment, FCSP-M: 50 ppm Fe-chelating crab shell powder treatment, FCSP-H: 100 ppm Fe-chelating crab shell powder treatment, DAS: days after sowing. (A) Phenotypes of lettuce on 44 DAS, Scale bar: 1 cm. (B-E) Fresh weight (B), length (C), width (D), and leaf index, the ratio of leaf length to leaf width (E) of the 9th leaf of lettuce. (F, G) Growth rates of the 3rd leaf length (F), and leaf width (G) from leaf initiation phase (16 DAS) to leaf maturation phase (40 DAS). (H) Number of leaves at 40 DAS. (I) Amount of chlorophylls in the 9th leaf of lettuce. Asterisks indicate a significant difference from Control using a student T-test (* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$).

FCSP-M 처리구에서 상추의 엽록소의 함량이 생장물에 비해 가장 높게 나타났다(Fig. 1I). 이러한 결과로 볼 때 대조구인 무처리구와 계껍질 분말 처리구에 비해 적절한(50 ppm) 농도의 철을 포함한 FCSP-M 처리구에서 생육 촉진효과가 나타났고, 이는 엽록소 함량의 증가와도 상당한 관련이 있는 것으로 판단된다.

FCSP 처리에 의한 상추 재배 필드 테스트

FCSP 처리에 의한 상추에서의 생육 효과를 실제 작물 재배 환경에서의 분석을 위해 온실 포장에서 필드 시험을 처리구의 위치를 달리해서 각각 3반복하여 실시, 분석하였다. 그 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이, 화학비료 처리구나 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에 비해서 FCSP 처리구에서 확실한 생육 증진 효과를 나타내었으며 특히, FCSP-M 처리구에서 재배실 실험 결과와 비교해 더 높은 성장 촉진 효과를 나타내었다(Fig. 2A - Fig. 2B). 엽수의 경우에는 무처리구에서 16.0장이었으며 화학비료 처리구와 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서 엽수가

각각 18.1장, 19.8장으로 무처리구보다 13.1%, 23.7% 늘어난 것에 비해 FCSP-L 처리구에서는 19.7장, FCSP-M 처리구에서는 24.8장, FCSP-H 처리구에서는 23.3장으로 무처리구에 비해서 상당히 증가하였다. 이는 무처리구에 비해 FCSP-M 처리구에서는 약 54.6%, FCSP-H 처리구에서는 약 45.3% 증가 효과가 있는 것으로 나타났다(Fig. 2C). 엽중의 경우, 무처리구에서 64.6 g 이었으며 화학비료 처리구와 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서는 각각 79.5 g, 88.0 g으로 무처리구보다 23.0%, 36.2% 증가한 것에 비해 FCSP-L 처리구에서는 138.6 g, FCSP-M 처리구에서는 183.0 g, FCSP-H 처리구에서는 163.5 g으로 무처리구에 비해서 114.6%~183.2% 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 FCSP-M 처리구에서 약 183.2% 증가하여 가장 큰 효과를 나타냈다(Fig. 2D).

잎의 크기를 자세히 살펴 본 결과(Fig. 2B), 엽장의 경우 무처리구에서 222.8 mm 였으며 화학비료 처리구와 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서는 각각 236.0 mm, 236.0 mm로 무처리구보다 5.8% 커진 것에 비해 FCSP-L 처리구에서는 274.3 mm,

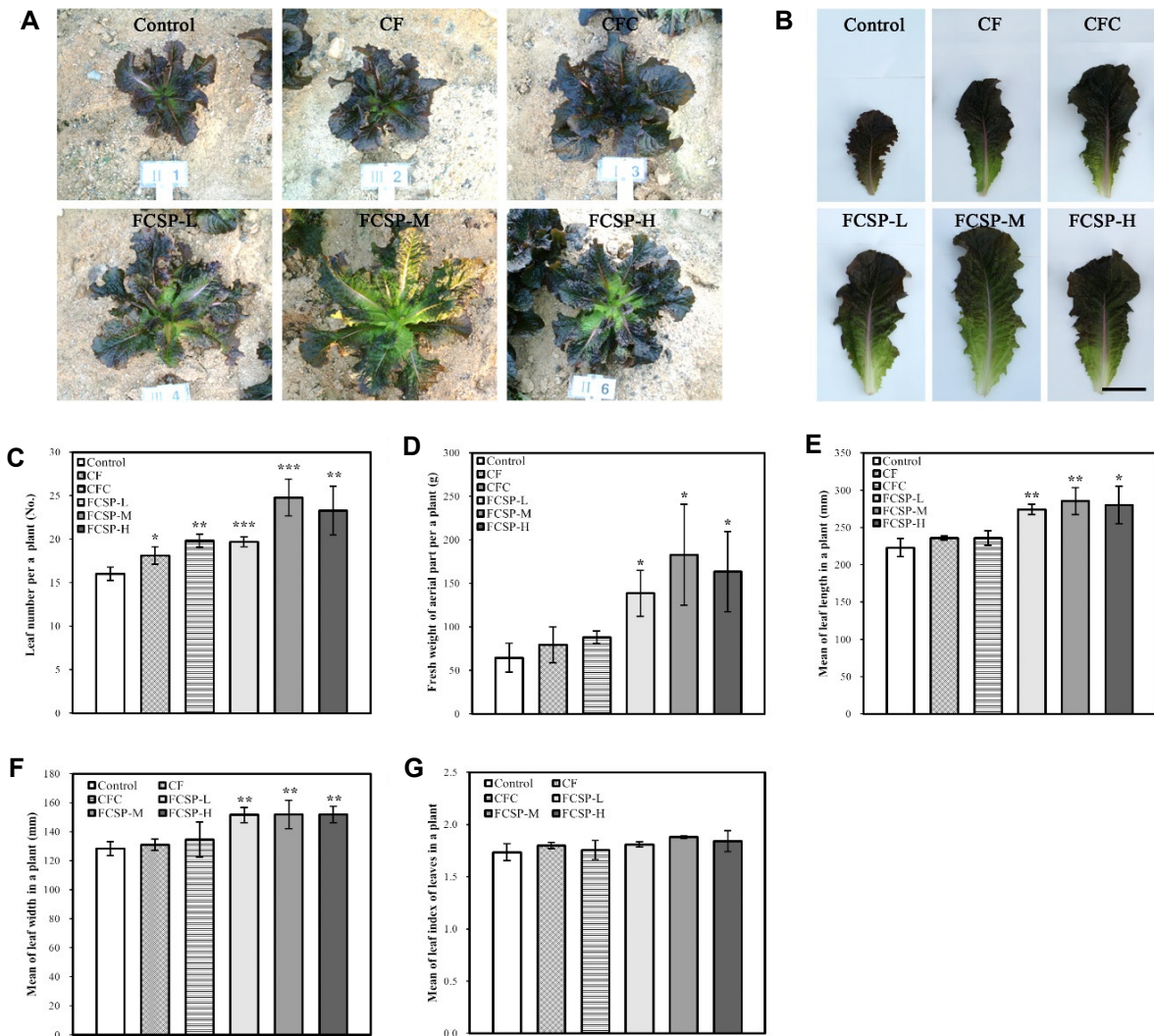


Fig. 2. The growth promoting effect on lettuce by Fe-chelating crab shell powder (FCSP) in field-scale. Control: no treatment; CF: Chemical fertilizer containing N, P, and K; CFC: Chemical fertilizer containing N, P, and K mixed with compost; FCSP-L: 20 ppm Fe-chelating crab shell powder treatment; FCSP-M: 50 ppm Fe-chelating crab shell powder treatment; FCSP-H: 100 ppm Fe-chelating crab shell powder treatment. (A-C) Growth phenotypes (A), leaf phenotype (B), and number of leaves (C). (D) Fresh weight of aerial part. (E) Length of the largest leaf. (F) Width of the largest leaf. (G) Leaf index, the ratio of leaf length to leaf width of lettuce on 44 DAS. Scale bar: 10 cm. Asterisks indicate a significant difference from Control using a student T-test (* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.003$).

FCSP-M 처리구에서는 285.5 mm, FCSP-H 처리구에서는 280.3 mm로 대조구에 비해서 23.0%~28.1% 늘어난 것을 확인할 수 있었다. 이는 엽장도 FCSP-M 처리구에서 28.1% 증가하여 가장 큰 효과를 나타냈다(Fig. 2E). 엽폭의 경우 무처리구에서 128.5 mm 였으며 화학비료 처리구와 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서는 각각 131.1 mm, 134.7 mm로 대조구보다 2.0%, 4.8% 커진 것에 비해 FCSP-L 처리구에서는 151.7 mm, FCSP-M 처리구에서는 151.9 mm, FCSP-H 처리구에서는 152.1 mm로 대조구에 비해서 18.0%~18.4% 늘어난 것을 확인할 수 있었다. 이는 무처리구에 비해 FCSP 처리구들에서 비슷한 증가효과를 나타냈다(Fig. 2F). 따라서 leaf index 지수는

앞서의 실험실 재배 조건과 크게 차이를 나타내지 않았다(Fig. 2G). 이러한 결과로 볼 때 기존의 시비 방식인 화학비료 처리나 화학비료와 퇴비 혼합 처리 방식보다 새로운 신소재 비료 처리에서 성장과 생산성이 월등히 증가하였으며, 50 ppm 농도에서 가장 큰 효과를 나타내었다.

본 실험에 사용된 게껍질 철분 신소재 비료의 공급으로 인한 식물 내 철분과 칼슘의 흡수율의 분석을 위하여 Fe와 Ca의 함량 분석과 엽록소의 함량 분석을 상추 모종 이식 후 4주차, 7주차에 나눠 두 차례 실시하였다(Table 2). 함량 분석 결과, 가장 생육 증진 효과가 뛰어났던 FCSP-M 처리구에서 7주차 Fe의 함량이 가장 높게 나타났으나, 다른 처리구의 Fe의 함량

Table 2. Analysis of the amount of Fe ion, Ca ion, and chlorophylls in lettuce leaves which grew on Fe-chelating crab shell powder (FCSP) treated soil in field-scale

	In plants on 4 weeks after sowing			In plants on 7 weeks after sowing		
	Ca* (ppm)	Fe* (ppm)	Chlorophyll** (µg/mg)	Ca* (ppm)	Fe* (ppm)	Chlorophyll** (µg/mg)
Control	10500	310	7.38	6870	320	10.56
CF	10300	310	8.29	7460	180	10.85
CFC	8350	210	7.90	9010	290	10.62
FCSP-L	9940	380	7.59	7850	350	9.58
FCSP-M	10400	220	7.77	6400	540	9.52
FCSP-H	9850	220	7.92	9150	290	11.21

*Ca and Fe were measured by using ICP-ES.

**Calculation of chlorophyll content was followed by Arnon's method [1].

이나 엽록소의 함량은 재배실 환경조건의 결과와는 달리 일관성을 보이지 않았다. Ca의 함량 측정은 계겹질에 의한 효과를 분석하고자 실시하였다. 실제로 키토산의 처리는 칼슘의 흡수량과 함량의 변화를 나타내었다[6]. 이 경우, 크게 일관성 있는 함량 변화는 없었으나 FCSP-M 처리구에서는 조금 낮게 나타났다(Table 2). 식물의 양이온의 흡수에 있어서 원소간에 경쟁이 일어나게 되고, 특히 Fe와 Ca의 경우, 식물에서 Fe 결핍 스트레스가 Ca 함량의 증가로 이어지는 보고가 있으므로[16], FCSP-M 처리구에서 낮은 Ca의 함량을 보였다고 생각된다. 본 실험은 상추를 대상으로 온실 포장에서 FCSP의 효과를 살펴보고 실용화 가능성을 확인하고자 한 시험이며, 소규모로 진행하였던 재배실 환경조건과 생장 양상이 일치하는 긍정적인 면도 있었으나 환경이 다른 농경지나, 다른 작물에 대해서도 같은 효과가 나타나는지에 대해 추가 시험이 필요할 것으로 생각된다.

또한 생육 증진 효과가 나타난 FCSP 처리구에서 식물 내의 함량의 증가가 확인된 철 이온이 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해서 Fe 항상성 조절 관련 유전자 및 수송 단백질들의 발현량과 더불어 잎의 크기와 생장 조절에 관련된 세포 증식과 세포 크기를 결정하는 유전자들의 발현량의 확인이 필요할 것이라 생각된다. 앞선 연구에 의하면, 뿌리에서 철분의 수송을 담당하는 유전자(AHRT1)의 기능을 상실한 애기장대 돌연변이체에서 철분의 함량이 감소와 더불어 어린 시기에 식물이 성장을 멈추는 표현형을 가지며[17], 엽록체 내부로의 철분 수송에 관여하는 유전자의 과발현(AHPI1 O/X)에 의해서는 산화 스트레스 등에 의해 생산성 감소와 바이오매스 감소 등 철 과잉 현상이 연상되는 표현형이 나타난다고 보고되었다[3]. 철 결핍 상태의 식물에서 특히, 세포 분열 조절 인자인 CyclinD2.1의 발현 감소로 인해 식물체의 크기와 뿌리의 길이 감소가 보고되었다[19]. 따라서, 새로운 기능성 비료인 FCSP

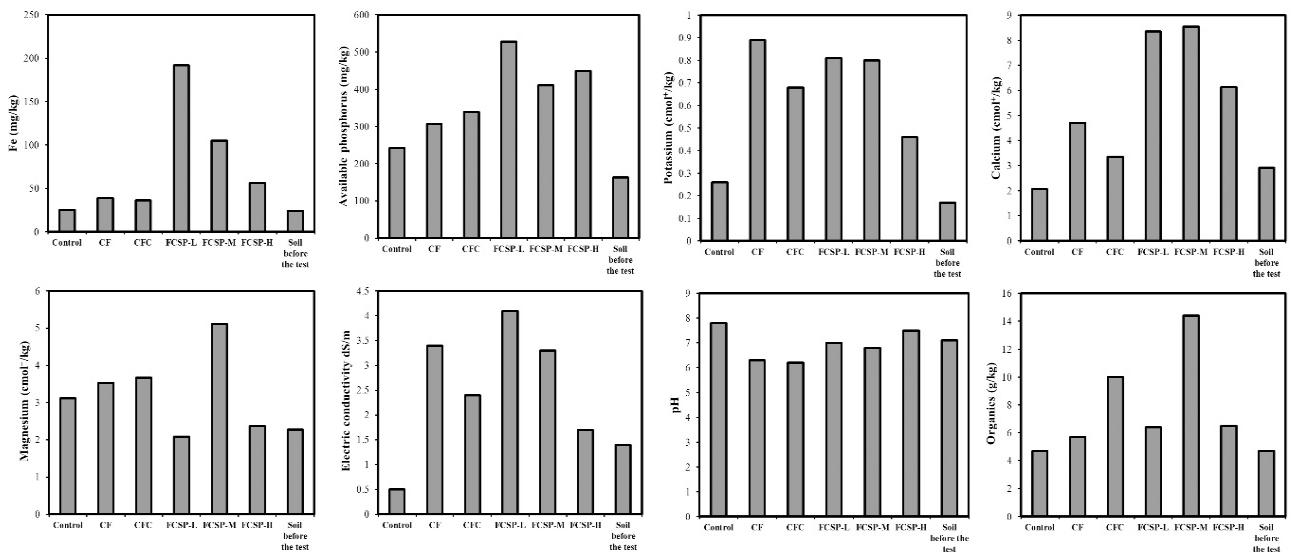


Fig. 3. Characterization of soil quality after lettuce cultivation by treatment of Fe-chelating crab shell powder (FCSP). Control: no treatment; CF: Chemical fertilizer containing N, P, and K; CFC: Chemical fertilizer containing N, P, and K mixed with compost; FCSP-L: 20 ppm Fe-chelating CSP treatment; FCSP-M: 50 ppm Fe-chelating CSP treatment; FCSP-H: 100 ppm Fe-chelating CSP treatment; Soil before the test: raw soil without treatment before the test.

의 적절한 첨가가 식물체의 생장에 어떻게 긍정적인 영향을 주는지를 확인하는 상세한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

FCSP 처리 후의 토양 성질의 변화

신기능성 철분 비료로써 FCSP 처리가 토양의 성질에 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석을 위해 대조구와 FCSP를 처리한 포장에 상추를 재배 한 후 각각의 토양을 채취하여 농촌진흥청 토양 화학분석법[11]에 준한 토양분석을 실시하였다(Fig. 3). 토양의 철분 함량의 경우 무처리구에 비해 화학비료 처리구에서 1.5배, 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서 1.4배 가량 증가한 반면 FCSP를 처리한 토양에서는 2.2배~7.6배의 증가가 나타났다(Fig. 3). 유효인산의 경우 무처리구에 비해 화학비료 처리구에서 1.2배, 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서 1.4배 가량 증가한 반면 FCSP를 처리한 토양에서는 1.7배~2.1배의 증가를 보였다. 치환성 양이온(K, Ca, Mg)의 경우에는 칼륨 함량은 무처리구에 비해 FCSP 처리구에서 크게 변화가 없었지만, 칼슘 함량은 무처리구에 비해 FCSP처리 토양에서 4.0배~4.1배로 높게 나타났고, 마그네슘의 함량은 경우에는 무처리구에 비해 FCSP처리 토양에서 1.6배 가량 증가하였다. 전기전도도의 경우에도 무처리구에 비해 FCSP처리 토양에서 6.6배~8.2배로 증가한 것을 볼 수 있었다. 또한 유기물 함량은 무처리구에 비해 화학비료 처리구에서는 1.2배, 화학비료와 퇴비 혼합 처리구에서 2.1배 증가한 반면, FCSP처리 토양에서는 3.0배로 가장 많이 증가하였다. 토양 pH의 경우 무처리구에 비해 모든 처리구가 크게 차이 나지 않았으나, 약산성을 띠고 있었다. 이러한 결과들로 볼 때 산세수와 계겹질을 이용한 신기능성 철분 비료의 토양 내 처리는 토양의 Fe 함량 증가의 효과를 가져왔고, 계겹질의 효과로 보여지는 Ca의 증가를 가져왔다. 또한 유효인산, 유기물 등의 함량이 증가한 것으로 보아, FCSP 처리가 기존의 시비 방법보다 토질 개선 효과가 있는 것으로 사료된다. 추후 실험을 통해서 변화한 토양 성분이 미생물에 미치는 영향과 더불어 작물에 어떠한 영향을 미쳤는지 구체적인 분석이 필요할 것이라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 교내 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* **24**, 1.
- Bautista-Baños, S., Hernandez-Lauzardo, A. N., Velazquez-Del Valle, M. G., Hernández-López, M., Barka, E. A., Bosquez-Molina, E. and Wilson, C. L. 2006. Chitosan as a potential natural compound to control pre and postharvest diseases of horticultural commodities. *Crop Prot.* **25**, 108-118.
- Duy, D., Stübe, R., Wanner, G. and Philippar, K. 2011. The chloroplast permease PIC1 regulates plant growth and development by directing homeostasis and transport of iron. *Plant Physiol.* **155**, 1709-1722.
- Guerinot, M. L. and Yi, Y. 1994. Iron: nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiol.* **104**, 815.
- Hänsch, R. and Mendel, R. R. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Curr. Opin. Plant Biol.* **12**, 259-266.
- Jang, E. J., Gu, E. H., Hwang, B. H., Lee, C. and Kim, J. K. 2012. Chitosan stimulates calcium uptake and enhances the capability of Chinese cabbage plant to resist soft rot disease caused by *Pectobacterium carotovorum* ssp. *carotovorum*. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* **30**, 137-143.
- Karimian, N., Kalbasi, M. and Hajrasuliha, S. 2012. Effect of converter sludge, and its mixtures with organic matter, elemental sulfur and sulfuric acid on availability of iron, phosphorus and manganese of 3 calcareous soils from central Iran. *Afr. J. Agric. Res.* **7**, 568-576.
- Koski, V. M. 1950. Chlorophyll formation in seedlings of *Zea mays* L. *Arch Biochem.* **29**, 339-343.
- Mori, S. 1999. Iron acquisition by plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* **2**, 250-253.
- Muhaemin, M. 2005. Chelating ability of crab shell particles and extracted acetamido groups (chitin and chitosan) from *Portunus* sp to lead (Pb^{2+}). *J. Coast. Dev.* **9**, 1-7.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilization standard of crop. Rural Development Administration. Korea.
- Pradhan, S., Shukla, S. S. and Dorris, K. L. 2005. Removal of nickel from aqueous solutions using crab shells. *J. Hazard. Mater.* **125**, 201-204.
- Rout, G. R. and Sahoo, S. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science* **3**, 1-24.
- Salachna, P. and Zawadzka, A. 2014. Effect of chitosan on plant growth, flowering and corms yield of potted freesia. *J. Ecol. Eng.* **15** 97-102.
- Sharp, R. G. 2013. A review of the applications of chitin and its derivatives in agriculture to modify plant-microbial interactions and improve crop yields. *Agronomy* **3**, 757-793.
- Silveira, V. C. D., Oliveira, A. P. D., Sperotto, R. A., Espindola, L. S., Amaral, L., Dias, J. F., da Cunha, J. B. and Fett, J. P. 2007. Influence of iron on mineral status of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Braz. J. Plant Physiol.* **19**, 127-139.
- Vert, G., Grotz, N., Dédaldéchamp, F., Gaymard, F., Guerinot, M. L., Briat, J. F. and Curie, C. 2002. IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *Plant Cell* **14**, 1223-1233.
- Xian, W. A. N. G. and Qing-Sheng, C. A. I. 2006. Steel slag as an iron fertilizer for corn growth and soil improvement in a pot experiment. *Pedosphere* **16**, 519-524.
- Zhang, P., Ma, D., Wang, Y., Li, S. and Yin, L. 2012. Overexpression of *OsDPR*, a novel rice gene highly expressed under iron deficiency, suppresses plant growth. *Sci. China Life Sci.* **55**, 1082-1091.

초록 : 산세수와 게껍질을 이용한 신기능성 철분 비료의 상추 생육 촉진 효과

황지영¹ · 전상은² · 박남조³ · 오주성² · 이용직⁴ · 손은주³ · 김경태^{1,2*}

(¹동아대학교 의생명과학과, ²동아대학교 유전공학과, ³(주)바이오엠플, ⁴포항공과대학교 생명과학과)

작물 재배에서 빈번히 발생하는 철분 부족 현상은 식물의 생육 저하와 생산성 감소를 야기한다. 철분의 흡수는 철분 킬레이트제를 이용해서 높일 수 있다. 본 연구에서는 제철산업의 부산물인 산세수 유래의 2가 철 이온을 게껍질(CSP)에 킬레이트시킨 신기능성 철분 비료(FCSP)를 제작하고, 상추 재배에 적용하여 생육 촉진 효과를 분석하였다. 제조한 철 비료의 효과를 검증하기 위해, 연구실 내 소규모 시험에서 무처리구, 게껍질 처리구, 그리고 여러 농도의 Fe-게껍질 킬레이트 처리구에서 상추의 생장을 분석한 결과, 50 ppm Fe-게껍질 킬레이트 처리구에서 엽수, 엽중, 엽장 및 엽폭이 무처리구와 게껍질 처리구에 비해 증가하였으며, 상추 잎의 엽록소의 함량 또한 증가하였다. 포장 시험 역시 50 ppm Fe-게껍질 킬레이트 처리구에서 엽수, 엽중, 엽장 및 엽폭에서 화학비료와 퇴비를 혼합한 기존 재배 방식 처리구에 비해 최대 2배 이상의 증가를 보였고, 식물체내 Fe의 함량 또한 가장 높게 나타났다. 또한 철 이온을 게껍질에 킬레이트한 비료의 처리가 토양 내의 Fe와 Ca의 함량을 증가시켰으며 유효인산과 유기물의 함량 또한 증가시켜 토질을 개선시키는 효과를 보였다. 이러한 결과들을 종합할 때, Fe-게껍질 킬레이트 복합체는 기존의 비료 처리 방식인 화학비료와 퇴비 사용 보다 뛰어난 생육 증대 효과와 토질 개선 효과를 나타냄으로써 작물 재배에 있어서 효과적인 신기능성 철분 소재로서 활용 가치가 있을 것으로 사료된다.