

셀레늄 및 게르마늄을 이용한 수경재배 치커리의 고품질화 및 생산량 증진 연구

이궁표

(서울여자대학교 자연과학연구소)

Studies on the Improved Quality and Production of Hydroponically Grown Chicory Using Selenium and Germanium

Lee, Gung-Pyo

Institute of Natural Science, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea

적 요

본 연구는 사람에게 필수원소인 셀레늄 및 항암성 등의 기능이 보고된 게르마늄을 쌈채소로 이용되는 치커리에 흡수시켜 기능성을 높이고자 하였다. 양액재배를 이용한 셀레늄 처리시 selenate와 selenite 중에서 selenate가 낮은 처리농도에서 더욱 높은 축적량을 보였고, 최적의 셀레늄 처리농도는 selenate 4-6ppm로 7일간 처리하는 경우, 섭취 필요량 (100-200 μ g/성인1인)을 충족시킬 수 있었다. 축적경향은 지하부보다는 지상부에서 상대적으로 많은 양의 셀레늄이 축적되었고, 지상부에서도 활발한 생육이 이루어지는 부위 (신초 등)에서 더 많은 양의 셀레늄 축적이 이루어졌다. 또한, 비타민C 및 총항산화성의 증가를 야기하여 치커리 총항산화능 증가가 이루어졌다. 식물체의 생육유지 측면에서는 selenate 2ppm 수준이 가장 좋았다. 게르마늄 처리 (GeO₂)를 통하여 약 2-4ppm의 수준에서 식물의 광합성량과 생육량이 현저히 증가되는 결과를 얻었고, 지상부보다는 지하부에서 월등히 많은 양의 게르마늄이 축적되었다. 섭취를 통한 적정함량 (50 μ g/성인1인)을 유지하기 위한 업체류의 게르마늄 처리 연구를 통하여, 배양액을 통한 흡수로는 섭취 대상인 지상부 축적량이 부족하였다. 셀레늄과 게르마늄의 복합처리를 통하여 항산화성과 품질이 향상된 쌈채소로서의 치커리 재배가 가능하였다.

I. 서론

많은 현대인이 쌈채소 소비를 선호하고 있으며, 상추, 호박잎, 들깨잎 외에도 수많은 쌈채소들이 쌈바구니에 모아져서 모습으로 식탁에 오르고 있다. 이들 쌈채소들은 은은한 향, 특색은 매운맛, 입가에 스미는 단맛, 아름다운 모양, 감칠 맛 나는 노란, 분홍, 자주, 푸른 빛깔을 띠고 있어 형형색색이 입맛을 돋구며, 고기를 자주 먹으면서 산성화된 체질 및 채소의 식

이섬유 섭취를 통한 체질개선의 효과를 줄 수 있다 (박권우, 류경오, 1998). 많은 의학계의 보고에 따르면, 현대인에게 채식비율의 증가는 곧 건강과 직결될 수 있으며, 채소 고유의 영양성분이 신체의 항상성을 유지하는데 중요한 관건이 된다고 한다. 농가에서도 이에 따라 쌈채소 생산량을 늘리는 등 다양한 쌈채소를 개발, 소개하고 있다.

한편, 최근 의학계에서는 사람에게 필수원소인 셀레늄 섭취의 중요성과 항암효과 (Brown과 Arthur, 2001; Mukhopadhyay-Sardar 등, 2000; Mukherjee 등,

1996) 및 유기계르마늄의 항암효과 (Mainwaring 등, 2000; Ernst, 2000; Gerber와 Leonard, 1997; Ming 등, 1996; Yu 등, 1995; Kopf-Maier, 1994)에 관한 관련 결과가 약 10,000여 편이 보고되어 있다.

셀레늄은 인체에서 glutathion peroxidase(GPx)의 조효소로 작용하며, 필수미량원소로 작용하고 있다. 사람은 셀레늄은 대부분 식물체 또는 해산물에서 얻고 있는데, 만주지역에서는 토양 내에 셀레늄 부족으로 인하여 어린이의 심장병 환자가 발생하였다는 보고가 있었고, 셀레늄을 주사하여 회복시킬 수 있었음이 보고되었다(Brown과 Arthur, 2001). 이것은 식물체의 셀레늄 함량이 토양 내 셀레늄 함량에 의존적이기 때문이며, 해산물이나, 셀레늄이 풍부한 초식동물을 섭취하지 못하는 만주와 같은 지역에서는 부족증이 야기되는 일례로 볼 수 있다. 이런 부족지역에서는 50-100ug 셀레늄(sodium selenite 혹은 sodium selenate 형태: 알약)을 매일 섭취하는 방안이 권장되고 있다.

실제로 식물체에서 셀레늄을 섭취하는 경우, 그 양은 대부분 FDA에서 권장하는 성인 1인당 1일 섭취량인 100ug에 크게 못 미치는 경우가 대부분이다. 미국, 캐나다, 중국 및 핀란드 등 스칸디나반도 국가들의 경우, 토양내 셀레늄 함량이 부족한 경작지에 sodium selenate의 형태로 시비하여 곡류 종자 및 채소 잎 내의 셀레늄 함량을 증가시킨 예가 보고되고 있다(Chen et al., 2002; Lintschinger et al., 2000; Wang et al., 1998; Makela et al., 1995).

한편, 미국 서부지역은 토양 모암 내의 셀레늄 함량이 매우 높아, 동일 지역의 셀레늄 축적종 초본류를 섭취하는 초식동물이 과잉증(selenosis)을 나타내었다는 보고가 있다. 따라서, 셀레늄은 사람과 동물에게 필수원소이지만, 요구량의 범위가 매우 적은 필수미량원소이기 때문에 최적의 함량과 섭취량을 유지하기 위한 노력이 필요하다고 할 수 있다.

국내의 경우, 시장에서 유통되는 일부 쌈채소용을 비롯한 엽채류의 셀레늄 함량을 조사해 본 결과, 수경재배로 생산된 채소류에서는 셀레늄이 거의 측정되지 않았고 유기농법을 사용한 경우에는 약 5ug/100g 생체중 정도의 함량만이 측정되었다. 국내 전체 경작

지 및 토양에 대한 셀레늄 함량 조사가 이루어지지 않는 상황에서 쉽사리 결론짓기 어려운 문제이지만, 이러한 낮은 함량 및 차이점이 발생하는 이유로 토양내 셀레늄 함량 차이, 식물종에 따라 흡수, 축적하는 경향의 차이, 화학농약의 사용 및 최근 공해와 산성비에 의한 토양내 아황산 이온의 증가로 셀레늄 이온의 흡수가 저하된 것 등이 주요한 원인들로 판단하고 있다.

따라서, 식물체 내에서 적정 함량의 셀레늄이 유지될 수 있는 바람직한 방법 중의 하나는 인위적으로 조절된 농도의 셀레늄이 수경재배를 통하여 식물체로 적정함량이 축적되도록 하는 것이다. 이 방법은 제한된 환경이 주어지므로 흡수기작 연구에도 바람직하며 실제 생산에도 응용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

계르마늄은 자연상태에서 주로 약리효과가 큰 인삼, 황기, 마늘, 알로에 등의 식물체에 많게는 약 2000ppm에서부터 적게는 약 20ppm 정도로 함유되어 있는 것으로 보고되어 있다. 의학계의 보고에 따르면, 유기계르마늄으로 인체에 흡수될 경우에 산소 운반자로서의 역할을 하여 많은 양의 산소를 각 신체조직에 전달할 수 있으며, 암의 발생지연 및 항암효과를 나타내었다고 한다.

이들 기능성 영양원소들은 인체에 미치는 영향은 잘 알려져 있는 반면에, 식물체에서는 그 보고가 매우 미약한 실정이다. 셀레늄은 식물체에게는 비필수원소로 알려져 있으며, 따라서, 적은 양의 처리에도 생육이 억제되는 독성원소로서의 역할을 할 수 있다고 보고되어 있다. 독성의 원인은 황이온과 화학적 구조의 유사성에 기인하며, 흡수시 식물체의 단백질 구조변형의 결과를 보이기 때문인 것으로 보고되었다 (Banuelos et al., 1997). 그러나, 낮은 농도에서는 오히려 식물의 생육이 증진되는 효과를 나타내어 이 부분에서의 추가연구가 필요한 실정이다. 또한, 계르마늄도 식물체에게는 비필수원소이나, 붕소(B)의 역할을 대신할 수 있는 원소로 세포벽의 강화에 중요한 역할을 한다.

본 연구는 최근 쌈채소로 많이 소비되고 있는 엽채류인 치커리 재배시 새로운 기능성 영양원소인 셀

레늄(selenium)과 게르마늄(germanium)을 적정농도로 사용하여 상추의 항암성 등 기능성분 강화, 품질 향상, 그리고 생산량 증대를 이루는 방안을 연구하여 농업현장에서 농민의 소득증대에 기여할 수 있는 재배방법을 제안하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 식물재배방법 및 기능성 영양원소의 처리

치커리의 재배 및 처리는 양액재배 방법을 적용하였으며, 셀레늄과 게르마늄의 처리농도는 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 ppm 수준으로 하였다. 처리방법은 양액재배용 배양액에 첨가하여 식물체의 뿌리로 흡수될 수 있도록 하였다. 셀레늄의 처리형태는 NaSeO_4 와 NaSeO_3 로 하며, 게르마늄은 GeO_2 로 하였다. 처리기간은 총 4주로 하였으며, 각 1주마다 수확하여 아래의 조사항목에 의거 분석하였다.

2. 생육조사항목

생육의 변화정도는 처리에 따라 초장, 지상부 및 지하부 생체중, 엽면적, 정상생육 정도 등을 측정하였다. 특히, 기능성 영양원소의 첨가에 따른 외형적 생육특성 변화를 집중적으로 관찰하였으며, 무치커리와 생육정도 비교시 통계적 유의성 분석방법에 따랐다.

3. 기능성 영양원소의 함량분석

셀레늄, 게르마늄의 함량 분석은 다음의 방법에 따랐다. 식물체를 약 50C에서 3일간 건조시킨 후 Mill로 곱게 분쇄하였고 분쇄된 건물은 질산 및 과산화수소를 이용한 acid-wet digestion 방법에 따라 분해하였으며 여과지를 이용하여 분해된 잔류물을 제거하였다. 여과된 분해물은 ICP(induced coupled plasma)를 이용하여 각 원소의 표준물질에 대한 총량을 정량하였다.

4. 식물체의 품질요인 조사

식물의 품질요인 분석을 위하여 주요 다량원소, vitamin C, nitrate함량 및 총항산화물질 함량 변화를 조사하였다.

가. 주요 다량원소의 분석은 AAS(atomic absorption spectrometry)를 이용하였으며, 식물체의 분해방법은 상기의 acid-wet digestion 방법을 이용하였다.

나. Vitamin C는 생체를 액체질소로 급속히 얼려 -80C에 분석 전까지 보관하였으며, 형광광도법을 적용하였다. 분석 표준물질로 L-ascorbic acid를 이용하였다.

다. 엽내에 함유된 nitrate(질산이온) 함량은 식물체를 증류수 또는 에탄올에서 침출 후 여과액을 thiosulfonic acid와 반응시켜 흡광도를 측정하였고, 표준물질과 비교하여 함량을 결정하였다.

라. 총항산화성 물질의 함량은 수용성과 지용성 분획으로 나누어 vitamin E analog (Trolox)를 기준으로 하였으며, 전자를 환원시킬 수 있는 능력으로 결정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 셀레늄 처리를 통한 셀레늄 함유 기능성 치커리의 생산

본 연구는 최근 수경(양액)재배를 통하여 다양한 엽채류들이 청정채소 및 쌈채소로 시판되는 상황에서, 양액재배를 통하여 보다 더 영양가치가 높고 보건적 기능을 향상시킬 수 있는 방안을 연구하기 위하여 수행되었다.

쌈채소중 쓴맛(sesquiterpene lactone: lactucin)을 선호하는 사람들에게 많이 이용되고 있는 치커리를 대상으로 항산화 기능성의 향상을 위하여 셀레늄을 화합물 형태별(NaSeO_4 와 NaSeO_3)로 그리고, 농도별로 배양액에 처리한 후, 식물체 내에 축적되는 셀레늄의 양과 식물체의 생육 및 생리적 반응을 조사하여, 양액재배 치커리의 기능성화 가능성을 알아보았다.

치커리의 재배 및 처리는 양액재배 방법을 적용하

였고, 셀레늄의 처리농도는 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 ppm 수준으로 하였다. 처리방법은 양액재배용 배양액에 첨가하여 식물체의 뿌리로 흡수될 수 있도록 하였다. 셀레늄의 처리형태는 NaSeO_4 와 NaSeO_3 로 하였고 총 4주간 처리 후, 각 1주마다 수확하여 조사항목에 의거 분석하였다.

가. 셀레늄 처리시 식물체내에 축적된 셀레늄의 양

그림 1은 셀레늄을 화합물 형태별 (NaSeO_4 와 NaSeO_3)로 그리고 농도별로 배양액에 처리한 후, 28일간 식물체의 잎에 축적된 총 셀레늄의 양을 조사한 결과이다.

결과를 보면, NaSeO_4 처리의 경우, 8ppm 처리시 건물 1kg당 최고 40mg의 셀레늄을 축적하였고, 농도별로 보면, 낮은 농도에서 높은 농도처리에 따라 축적량도 함께 증가하는 결과를 보였다. 또한 처리기간의 영향을 살펴보면, 전체적으로는 처리기간의 증가에 따라 축적량도 증가하였으나, 낮은 농도에 비하여 높은 농도에서 그 증가비율이 높았다.

반면, NaSeO_3 처리의 경우는 전체적인 양상은 sodium selenate의 처리와 비슷하였지만, 그 축적량은 약 1/2~1/3의 수준에 머물렀다. 즉, 8ppm 처리시 건물 1kg당 최고 약 30mg 정도의 셀레늄 축적량을 보였고, 처리기간에 따른 셀레늄의 축적량 변화도 매우 완만함을 알 수 있었다.

표 1은 그림 1중 처리 14일째의 셀레늄 축적량을 수치화하여, 셀레늄 농도별 처리에 따른 식물체의 축적량의 경향을 나타내었다.

셀레늄 화합물 형태별로 동일 처리농도에서의 축적량을 보면, 1ppm의 처리시에 건조 치커리의 잎 1kg당, selenate의 경우는 약 5mg, selenite의 경우는 1mg 정도로 축적되어 5배의 축적량 차이를 보였다. 또한, 각각의 처리농도 증가에 따라 그 축적량도 비례하여 증가하였음을 알 수 있었다.

이러한 결과는 셀레늄의 처리시, 화합물의 형태별 처리를 통하여 얼마나 효율적으로 셀레늄을 식물체에 축적시킬 수 있는 가에 대한 매우 중요한 정보를 제공하고 있다고 판단된다. 이 결과를 토대로 재배가

(농민)는 치커리 재배시에 축적시키고자 하는 셀레늄의 양에 따라 처리기간과 처리농도를 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

셀레늄을 처리하지 않은 식물체에서 극소량의 셀레늄이 축적된 것은, 양액재배 베드로 옮겨지지 전 육묘기간 동안 유기비료를 사용한 배양토에서 흡수된 양으로 판단하였다. 다양한 농도 수준의 sodium selenate 및 sodium selenite 처리후, 14일째에 'Radichio' 치커리의 셀레늄 축적량을 조사한 결과는 표2에 정리하였다. 전체적인 결과는 잎(지상부)에서의 축적량이 뿌리에서의 축적량보다 월등히 높을 것으로 나타났다. 또한, 잎의 부위별 축적량 비교에서도 생육이 가장 활발이 이루어지는 부위에서의 축적량이 높아 셀레늄은 활발한 대사 및 생장활동이 이루어지는 곳에서 높은 요구도가 있었음을 짐작할 수 있었다.

실제로 셀레늄은 기존 보고에 따르면, 황이온과 경쟁적으로 식물체의 대사에 참여하고 있고, 또한 이 대사참여는 각 이온들의 농도에 의하여 결정된다고 하였다.

본 연구결과만을 볼 때는, 셀레늄의 처리시 selenate의 처리가 selenite의 처리보다 처리효과가 높으며, 섭취를 위한 부위에 있어서도 외부, 중간, 내부엽의 위치별 축적량 차이가 적어 더 좋은 처리 화합물 형태로 판단된다.

또한, 셀레늄은 휘발성이 매우 강하여 식물체내로 유입전 매우 빨리 대기중으로 휘발이 가능하며, 흡수된 경우에도 아미노산으로 변환된 유기형태의 셀레늄이 식물체내에서 dimethylselenide의 형태로 대기중에 증산과정을 통하여 휘발되는 것이 보고된 바 있다. 셀레늄의 식물체내 축적 농도는 결국 휘발되고 남은 셀레늄의 양을 간접적으로 시사한다고 할 수 있다.

이러한 관점에서 셀레늄의 두가지 형태중 selenite가 selenate보다 매우 적은 축적량을 보이는 것은 화합물의 구조상 더 많은 양이 휘발되었을 가능성과 selenite가 좀더 빨리 식물의 2차적인 휘발대사과정에 참여하였을 것이라는 추측을 갖게 한다. Pickering 등 (2003)의 보고에 의하면, sodium selenate와 sodium selenite를 식물체에 처리할 경우 흡수된 대부분의 셀

레늄은 selenate의 경우, 아미노산 대사과정에 참여하지 않고 이온의 형태로 도관 및 식물체 세포질에서 발견된다고 하였고, selenite 처리의 경우에는 selenite 이온의 형태로는 발견되지 않는 것으로 보아 대부분이 dimethylselenide의 형태로 대사되어 대기중으로 휘발되었거나, 아니면 흡수된 대부분의 selenite

가 단백질 합성에 이용되었을 것으로 판단하였다.

나. 셀레늄 처리시 식물의 생육변화

기능성 식물체 재배를 위하여 우리는 많은 영양소를 인위적으로 배양액에 첨가하여 식물체에 기능성

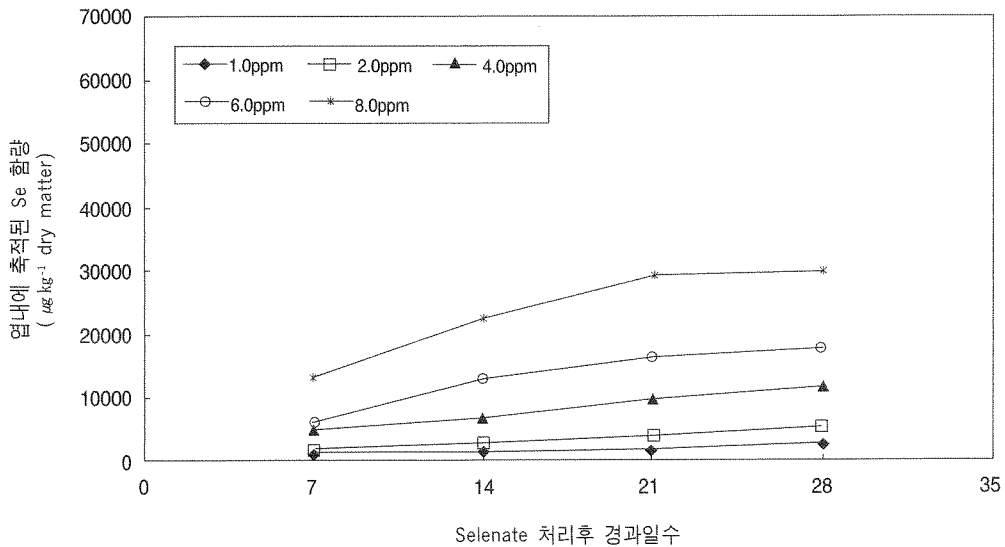
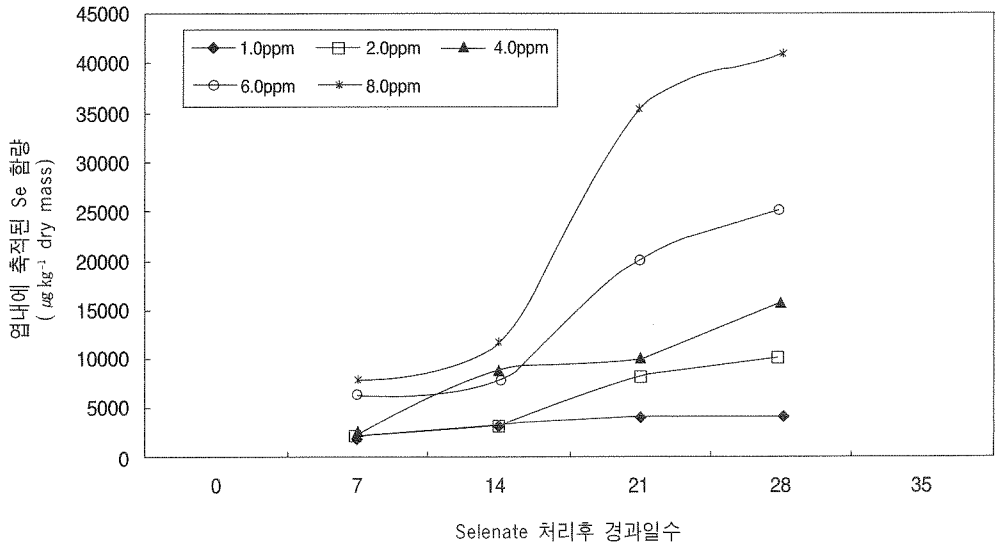


그림 1. 두가지 형태의 셀레늄 화합물인 sodium selenate(a)와, sodium selenite(b)의 처리후, 처리기간에 따른 'Radichio' 치커리의 잎내에 축적된 양의 비교. 엽 시료는 4주간 매주 수확하였으며, 처리된 농도는 두 화합물 모두 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0mg liter⁻¹의 수준으로 하였다.

을 부여할 수 있지만, 현실적으로 이러한 영양소의 처리가 식물체의 생육에 얼마나 큰 영향을 주는 가도 매우 중요한 점이라 할 수 있다. 즉, 기능성 물질의 처리에 따라 식물체가 최소한 생육의 억제 혹은 생산량의 감소가 나타난다면, 기능성 물질의 처리는 고려하여야 할 점이 될 수 있다. 이러한 의미에서 셀레늄의 처리후, 식물체의 생육량 변화 측정은 매우 중요한 조사항목이다.

표 3은 다양한 농도 수준의 sodium selenate 및 sodium selenite 처리 7일후, 'Radichio' 치커리의 생육 변화를 조사한 내용이다. 처리한 셀레늄 화합물의 형태별로 분석하여 보면, selenate 처리시에는 약 6ppm 까지 비처리구와 생육차이에 있어 유의성이 없었으며, selenite의 처리시에는 약 4ppm까지 생육의 변화를 볼 수 없었다. 그러나, 이들 각각의 농도범위를 넘어서는 처리구에서는 생육이 처리농도의 증가에 따

표 1. 다양한 농도수준의 sodium selenate 및 sodium selenite 처리 14일후, 'Radichio' 치커리의 셀레늄 축적량

셀레늄 처리구분	Treated concentration (mg · liter ⁻¹)	Leaf tissues (µgSe · kg ⁻¹ DM)
대조구 ^z	0.0	72 ± 5.50 ^y
Sodium selenate (Na ₂ SeO ₄)	1.0	5,624 ± 25.3
	2.0	8,997 ± 21.3
	4.0	13,276 ± 23.1
	6.0	15,195 ± 40.7
	8.0	23,674 ± 16.2
Sodium selenite (Na ₂ SeO ₃)	1.0	1,002 ± 11.3
	2.0	3,496 ± 27.2
	4.0	5,772 ± 30.8
	6.0	12,105 ± 28.5
	8.0	14,830 ± 52.4

^z 셀레늄을 처리하지 않은 배양액을 이용하여 재배한 셀레늄 무처리구

^y 20개체의 평균

표 2. 다양한 농도 수준의 sodium selenate 및 sodium selenite 처리 7일후, 'Radichio' 치커리 식물체 부위별 셀레늄의 축적 함량 비교

전기전도도 (EC: mS · cm ⁻¹)	처리한 셀레늄의 화학적 형태	각 식물체 부위별 셀레늄 축적량(mg · kg ⁻¹ dry matter)			
		잎 부위			뿌리
		내부	중간부위	바깥부위	
0.5	Na ₂ SeO ₄	311c ^y	356a	324b	92d
	Na ₂ SeO ₃	105b	87c	124a	53d
1.0	Na ₂ SeO ₄	187c	244b	261a	170d
	Na ₂ SeO ₃	89c	91b	121a	93b
2.0	Na ₂ SeO ₄	106c	138b	144a	72d
	Na ₂ SeO ₃	50c	84a	62b	63b
3.0	Na ₂ SeO ₄	66b	100a	112a	39c
	Na ₂ SeO ₃	43c	84a	82a	51b

^z 셀레늄 함량분석은 셀레늄 처리후 7일째에 수행됨.

^y 각 전기전도도에서 Na₂SeO₄와 Na₂SeO₃ 처리시 식물체 부위별로 Duncan's Multiple Range Test를 수행 (5% 수준).

라 매우 억제된 결과를 얻을 수 있었다.

즉, 사람 및 동물에게는 필수원소이지만, 식물체에 대해서는 비필수원소인 셀레늄이 고농도로 흡수될 경우에는 생육억제 현상이 일어나는 것을 알 수 있고, 실제로 이들을 흡수시키기 위해서는 적절한 처리농도 수준이 요구됨을 알 수 있다. 또한, 이러한 생육억제 현상은 selenite의 처리가 동일농도의 selenate 처리보다 더 심하게 나타나, 기능성 향상을 위해서는 축적량 효과가 높은 selenate가 selenite보다 식물의 생육면에서 더 좋은 처리 화합물 형태라고 할 수 있다.

더욱이, selenate 2ppm 처리 시에는 무처리 치커리보다 오히려 생육량이 증가하는 현상을 보여, 기능성 물질의 함유량 증가와 더불어 생육량의 증가라는 매우 바람직한 결과를 얻을 수 있었다.

다. 셀레늄 처리후 식물의 내적성분 변화

기능성 물질의 처리후, 식물체의 다른 내적성분 변화는 어떠한 가에 대한 의문을 가지고, 동일한 처리 및 처리농도에 따라, 엽록소, 비타민 C, 질산태질소, 단백질 및 다량원소로의 무기물함량을 조사하였다. 이들 조사항목은 실제로 섭취하는 채소의 중요한 품질판단 항목이기도 하다.

표 4의 결과를 보면, 엽록소 함량은 큰 차이가 없었으며, 엽채류의 주요 품질판단 항목인 selenate 처리의 경우, 질산태질소(nitrate) 함량은 별 차이가 없었지만, selenite의 경우는 상당히 함량을 낮추는 결과를 나타내었다. 질산태질소의 식물체내 함량은 유럽의 경우 약 2,000~3,000ppm 정도로 제한하고 있는데, 질산태질소의 엽내 함량이 어린이의 청색증을 유발할 수 있기 때문이다. 그러나, 실제로 식물체는 다양한 항산화물질과 엽록소, 비타민류를 함유하기 때문에 큰 문제가 되지 않는다는 반론도 존재한다. 현실적인 측면에서 채소류는 대부분 질산태질소를 선호하고, 광량이나 온도가 불충분할 경우 질산태질소 함량이 증가하게 마련인데, 셀레늄의 처리를 통하여 질산태질소 함량을 어느정도 적정범위로 낮출 수 있다면, 매우 고무적인 현상이라 할 수 있다.

식물의 영양분 흡수기작에서 아마도 음이온으로 흡수되는 셀레늄이 역시 음이온인 질산태질소와 결합을 벌여 상대적 흡수량이 낮아졌을 것으로 예상되나 감자에 셀레늄 용액을 분무한 경우, 감자 가식부 내의 질산태 질소함량이 감소하였다는 보고로 볼 때, 셀레늄의 식물체내 대사기작은 아직 불분명한 점이 많다고 할 수 있다. 또한, 단백질 및 무기물의 함량은 selenite의 고농도 처리를 제외하고는 큰 차이를

표 3. 다양한 농도 수준의 sodium selenate 및 sodium selenite 처리 7일후, 치커리의 생육변화

셀레늄 처리	처리농도 (mg · liter ⁻¹)	초장(cm)	엽수(개)	총엽면적 (cm ²)	생체중 (g)		건물물(%)	
					지상부	지하부(뿌리)		
Sodium selenate (Na ₂ SeO ₄)	대조구	0.0	15.3±2.6 ^a	8.5±1.5 ^a ^y	1,538b	192.3±8.5b	20.5±3.7ab	12.2±0.5a
	1.0	13.7±4.3a	8.5±1.0a	1,659ab	202.5±7.3ab	22.5±5.2a	13.1±0.4a	
	2.0	14.5±3.5a	9.0±1.0a	1,898a	217.5±6.8a	21.4±8.8ab	10.8±0.5b	
	4.0	12.8±4.1a	9.0±1.0a	1,532b	182.3±4.5bc	20.2±4.1ab	10.5±0.5ab	
	6.0	14.3±3.4a	9.0±1.0a	1,488bc	190.4±8.6b	19.7±3.3ab	10.5±0.4b	
Sodium selenite (Na ₂ SeO ₃)	대조구	0.0	15.3±2.6a	8.5±1.5a	1,538ab	192.3±8.5bc	20.5±3.7a	12.2±0.5a
	1.0	15.5±2.5a	8.5±1.0a	1,567a	198.5±6.5a	20.2±2.1a	12.4±0.5a	
	2.0	15.8±1.8a	9.0±2.0a	1,486bc	195.6±4.8b	20.6±2.5a	12.5±0.1a	
	4.0	15.0±2.2a	8.0±1.0b	1,522b	195.5±4.2b	20.7±1.3a	12.2±0.8a	
	6.0	14.2±1.7a	8.0±1.0b	1,480c	186.8±5.6c	18.4±1.0b	11.5±1.5b	
	8.0	10.9±2.1b	7.0±0.0c	1,372d	182.5±3.6c	19.2±2.3a	10.3±0.7b	

^a 식물 시료 4개체의 평균±표준편차.

^y Sodium selenate 및 sodium selenite의 농도별 처리에 따른 식물생육을 DMRT (5% 수준)로 유의성 검정.

나타내지 않았다.

가장 주목할만한 결과는 비타민 C 함량의 변화로, selenate 처리시 무처리구에 비하여 약 4.7mg의 증가를 나타내었다. 이 결과는 앞서의 생육량의 증가와 더불어 매우 바람직한 결과로 결론지을 수 있다. 비타민 C는 생물체 내에서 주로 항산화제로서의 역할을 수행하는데, 이 함량의 증가는 셀레늄의 처리가 식물체의 항산화성을 직·간접적으로 높여주고 있다는 점을 반증하기 때문이다.

결론적으로 싹채소의 품질적 측면에서, 기능성 물질인 셀레늄도 비타민 E와 더불어 항산화물질로서의 역할을 수행하는데, 셀레늄의 처리를 통하여 식물체의 자체 항산화물질인 비타민 C의 양도 증가한 점은, 사람이 이 식물체를 섭취함으로써 2중의 유의한 효과를 볼 수 있다는 중요한 결과를 나타내는 것이다.

라. 셀레늄 처리후 식물체의 총항산화성의 변화

식물체는 실제로 위에 언급한 화합물만이 항산화성을 나타내기 보다는, 다양한 페놀화합물 등 2차대사산물의 영향이 더 크게 항산화성에 영향을 주므로, 표 5와 같이 총항산화성을 살펴보았다.

식물 추출물을 수용성과 지용성으로 분획하여 Trolox equivalent와 α -tocopherol equivalent로 나누어

측정하고, 이들의 합을 총항산화능으로 표현하였다. 이때의 결과는 sodium selenate의 처리농도가 높을수록 총항산화성은 증가하였는데, 생체중의 감소가 이루어지지 않는 범위 내에서 4~6ppm의 처리가 가장 유의성 있게 항산화성이 높은 것으로 나타나 앞서의 결과들을 보완할 수 있었다.

본 연구에서 총항산화능의 중요성은 기존의 지용성 분획에 대해서만 이루어졌던 α -tocopherol equivalent에 더하여 α -tocopherol의 isoform으로 수용성인 Trolox와 비교하여 항산화능을 측정할 수 있는 점에 있다. 즉, 식물세포에서 세포막 등의 지용성 부위에 존재하는 대부분의 항산화물질 외에도 세포질, 액포, 세포간극에 존재하는 수용성 항산화물을 동시에 측정하는 방법을 선택하여 실제 사람이 섭취 시에 유의할 것으로 예상되는 총항산화물질의 양을 측정하였다.

총항산화성 증가라는 측면에서, 실제로 셀레늄이 어떻게 항산화성의 증가를 야기한 것인지는 명확하지 않다. 셀레늄의 흡수를 통한 식물체 내에서의 항산화성 증가는 다음의 세가지 가능성을 예측해 볼 수 있다.

첫번째로 셀레늄 그 자체가 항산화성 물질로서 역할을 수행하여 총항산화능에 기여할 수 있을 가능성, 두번째로 셀레늄이 주로 황화합물이 주된 역할을 하는 항산화물질 pool을 증가시킬 수 있을 가능성, 세번

표 4. 다양한 농도 수준의 sodium selenate 및 sodium selenite 처리 7일후, 치커리의 내적성분변화

셀레늄 처리	처리농도 (mg · liter ⁻¹)	엽록소함량 (mg · g ⁻¹ FW)	Vitamin C함량 (mg · 100 ⁻¹ FW)	질산염 함량 (mg · g ⁻¹ FW)	단백질 함량 (mg · g ⁻¹ FW)	무기원소 함량(% , 건물)			
						K	Ca	Mg	
대조구	1.0	21a ^z	185c	3,403a	10,5b	2,555a	1,605a	0.153b	
	1.0	2.1a	18.6c	3,520a	10.5a	2,521a	1,685a	0.165a	
	Sodium selenate (Na ₂ SeO ₄)	2.0	2.1a	23.2a	3,507b	10.3b	2,524a	1,625a	0.152b
		4.0	2.1a	19.0bc	3,511b	10.5b	2,515a	1,664a	0.158ab
		6.0	2.1a	19.5b	3,52b	10.b	2,482a	1,630a	0.160ab
8.0	1.9b	18.4c	3,455bc	10.5b	2,505a	1,625a	0.155b		
대조구	0.0	2.1a	19.5ab	3,403a	10.5a	2,555a	1,605a	0.153a	
	1.0	2.1a	18.5b	3,002b	10.3a	2,168c	1,532b	0.105d	
	Sodium selenite (Na ₂ SeO ₃)	2.0	2.1a	20.0a	2,945bc	10.0a	2,302b	1,478c	0.149a
		4.0	2.1a	19.5ab	2,958bc	10.8a	2,545a	1,625a	0.120c
		6.0	2.1a	19.0ab	2,865c	8.9b	2,258b	1,415c	0.155a
8.0	2.1a	19.0ab	2,830c	9.5ab	2,175c	1,529b	0.130b		

^{z, y} 표3 참조.

제로 셀레늄의 흡수가 식물체에게는 스트레스 (주로 산화적스트레스)원으로서 인식되어 이에 대항한 항산화물질을 다량 합성하게 되었을 가능성이이다.

그 원인을 명확히 밝히기 위해서는 추가적인 실험이 요구되는 상황이나, 분명한 것은 식물체는 자체의 항산화성이 증가되는 방향으로 대사가 진행되었으며, 적절한 항산화성 약기로 인한 식물체의 2차적 방어기작들이 충분히 주변의 환경스트레스를 극복할만큼 유도되고 있다는 점이다. 이를 이용한다면 섭취시 사람이 흡수하게 되는 항산화물 외에도 식물의 생육기간동안 주변 환경스트레스를 극복할 수 있는 내적 항산화성 증진의 효과를 더불어 얻을 수 있게 된다.

식물체 자체가 여러 가지 원인에 의하여 (heat shock, 병해충의 침입, 저온 하 고광도 등) 생육에 큰 저해가 되지 않는 범위 내에서 충분한 항산화물을 합성하게 되면, 식물체는 전혀 다른 종류의 스트레스에 대한 저항성을 보일 수 있다는 "cross resistance"의 이론에 의거할 때 (Welling, 2001; Maleck and Dietrich, 1999), 셀레늄 처리에 의한 항산화성의 증가는 식물체의 생육에 매우 중요한 의의를 갖는다 하겠다.

앞으로의 연구에서는 항산화능이 증가된 식물체가 주변의 산화적 환경스트레스에 대한 저항성이 향상되는 지에 대한 실험이 필요할 것이며, 이것이 검증된 제한적인 13가지 필수원소만으로 식물을 재배하게 되는 수경(양액)재배의 한계성을 극복하는데 중요한 자료가 될 수 있으리라 생각된다. 반면, 유기재배에서는 그 성분이 정확히 분석되지 않은 상황에서 다양한 유기물을 사용하여 재배되는 상황이기 때문에, 미량 유용원소의 기능과 역할이 정확히 밝혀진다면, 양대 재배법에 매우 효과적인 지침이 될 수 있으

리라 기대한다.

2. 게르마늄 처리를 통한 게르마늄 함유 기능성 쌈채소용 치커리의 생산

쌈채소중 쓴맛을 선호하는 사람들에게 많이 이용되고 있는 치커리를 대상으로 최근 항암성 등 기능성을 보이는 게르마늄의 식물체 축적을 위하여 무기형태의 게르마늄 화합물인 GeO₂를 농도별로 배양액에 처리한 후, 식물체 내에 축적되는 게르마늄의 양과 식물체의 생육 및 생리적 반응을 조사하여, 양액재배 치커리의 기능성화 가능성을 알아보았다.

치커리의 재배 및 처리는 셀레늄 처리와 동일한 양액재배 방법을 적용하였고, 처리농도는 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0ppm 수준으로 하였다. 처리방법은 양액재배용 배양액에 첨가하여 식물체의 뿌리로 흡수될 수 있도록 하였다. 게르마늄 처리형태는 GeO₂로 하였고, 총 4주간 처리하였으며, 1주일 단위로 4회 수확하여 조사항목에 의거 분석하였다.

가. 게르마늄 처리시 식물의 게르마늄 축적량 변화

게르마늄을 농도별로 배양액에 처리한 후, 식물체의 잎에 축적된 총 게르마늄의 양을 조사한 결과를 그림 2와 표 7에 정리하였다.

지상부의 경우, 1주일동안 8ppm을 처리시 건물 1kg당 최고 12mg의 게르마늄을 축적하였고, 반면 지하부인 뿌리에서는 83mg의 상대적으로 매우 높은 양을 축적하였음을 알 수 있다(표 6).

농도별로 보면 낮은 농도에서 높은 농도처리에 따

표 5. 셀레늄(sodium selenate) 농도별 처리 3일째 'Radichio' 치커리의 총항산화성의 차이

셀레늄 처리농도 (mg · L ⁻¹)	항산화성(μM)		(A) / (B)	총항산화성(μM)
	Trolox equivalent(A)	α-tocopherol equivalent(B)		
0.0	1052d ^a	1843c	0.57	2895d
2.0	1132c	2226b	0.51	3358c
4.0	1367b	2605ab	0.52	3972b
8.0	1512a	2748a	0.55	4260a

^a 셀레늄의 농도별 처리에 따른 총항산화성의 변화를 DMRT (5% 수준)으로 유의성 검정

라 축적량도 함께 증가하는 결과를 보였다. 그러나 역시 뿌리에서 상대적으로 높은 함량이 유지됨을 볼 수 있다. 또한 처리기간의 영향을 살펴보면, 게르마늄을 1, 2, 4, 6, 8ppm의 수준으로 총 28일간 배양액에 처리한 후, 식물체의 축적량을 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다.

축적되는 경향은 대체로 1차 함수적 증가를 보였으며, 전체적으로는 처리기간의 증가에 따라 축적량도 증가하였으나, 낮은 농도에 비하여 높은 농도에서 그 증가비율이 높았다. 이것은 식물체가 생육을 위하여 필수적으로 게르마늄을 필요로 하지 않음을 의미하는 것이며 다른 중금속 이온의 경우처럼, 생육에 악영향을 줄 수 있으므로 앞으로의 이동을 억제시키고 뿌리에 킬레이트화합물로서 축적하는 대사를 예상하게 하였다.

또한 본 결과로 식물이 게르마늄을 축적하는 것은 매우 수동적 흡수에 의존적임을 알 수 있고, 뿌리에서 축적이 높게 일어나는 것으로 보아 흡수된 게르마늄은 이동성이 매우 낮음을 알 수 있다. 따라서, 식물체는 활발한 생육을 위하여 게르마늄을 요구하지는 않으며, 대부분 다른 중금속 이온처럼 축적하려는

경향을 갖는 것으로 판단되었다.

만약 식물체에 게르마늄을 흡수 대사시켜 섭취용으로 이용하고자 한다면, 열채류보다는 오히려 뿌리를 섭취하게 되는 근채류에서 유리할 수 있을 것으로 판단된다.

섭취 적정량을 성인이 하루에 50 μ g을 섭취하는 것으로 볼 때 (FDA 기준), 이 기준에 부합시키기 위해서는 지상부를 섭취하게 되는 열채류로서는 매우 적은 양의 게르마늄이 축적되고 있음을 알 수 있다.

그리고 게르마늄을 처리하지 않은 식물체에서 극소량의 게르마늄이 측정된 것은, 양액재배 배드로 옮겨지지 전 육묘기간 동안 유기비료를 사용한 배양토에서 흡수된 양으로 판단하였다.

그러나 현재까지 반금속이온으로 Si와 비슷한 화학적 특성을 갖는 것으로 알려진 게르마늄이 식물체내 흡수시 어떤 대사경로를 거치는 것인가에 대한 의문은 해결되지 않고 있다.

나. 게르마늄 처리시 식물의 생육변화

치커리 양액재배시 배양액 내에 7일간 게르마늄

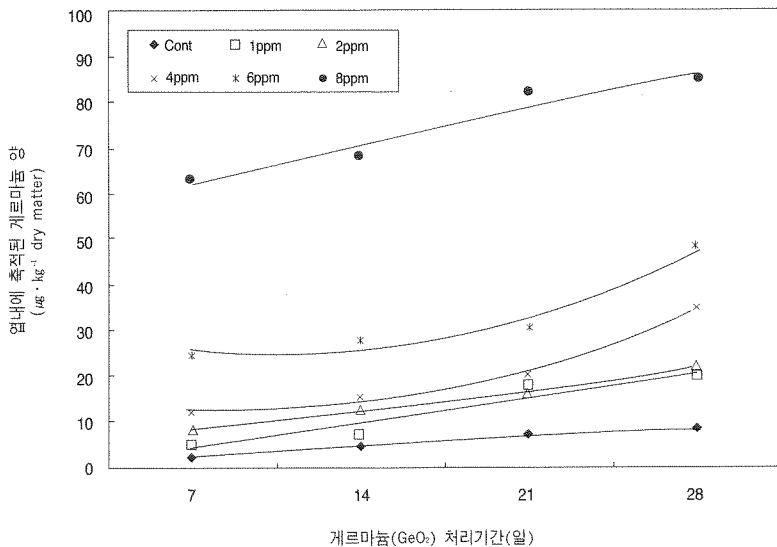


그림 2. 게르마늄 화합물인 GeO₂ (germanium dioxide)의 처리후, 처리기간에 따른 'Radichio' 치커리의 잎내에 축적된 양의 비교. 엽 시료는 4주간 매주 수확하였으며, 처리된 농도는 두 화합물 모두 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 mg liter⁻¹ 의 수준으로 하였다.

(GeO₂) 농도별 처리 (1, 2, 4, 6, 8ppm) 후, 작물별 생육변화의 비교 결과는 표 7과 같다. 대체로 약 2~4ppm의 게르마늄 처리에서 전체적인 생육량 (초장, 엽수, 지상부 생체중, 지하부 생체중, 건물율)이 증가하였다.

따라서 2~4ppm의 적정량의 게르마늄 처리는 식물 생육 증진에 큰 역할을 하고 있었음을 알 수 있고, 이 경우 건물율도 동일하게 증가하였으므로 광합성량 증가 및 광합성산물의 동화량도 마찬가지로 증가하였음을 추측할 수 있다.

기능성 식물체 재배를 위하여 우리는 많은 영양소를 인위적으로 배양액에 첨가하여 식물체에 기능성을 부여할 수 있지만, 현실적으로 이러한 영양소의 처리가 식물체의 생육에 얼마나 큰 영향을 주는 가도 매우 중요한 점이라 할 수 있다. 이런 점을 고려할 때, 게르마늄 처리후 식물의 성장량 증가의 결과

는 매우 고무적이라 할 수 있다.

다. 게르마늄 처리시 식물의 내적품질 변화

치커리 양액재배시 배양액 내에 7일간 게르마늄 (GeO₂) 농도별 처리 (1, 2, 4, 6, 8ppm) 후, 품질변화의 비교 결과 (비타민 C, 총질소, 총황, 총인산, 질산염함량, 무기양이온함량, 건물율)는 표 8과 같다. 대체로 비타민 C는 게르마늄 처리에 의한 생육증가가 이루어진 식물체에서는 대조구와 비교하여 약간 낮아지는 경향을 나타내었고, 총질소, 총황, 총인, 질산염함량, 건물율에 있어서는 큰 변화를 나타내지 않아 게르마늄이 함유된 채소를 생산하기 위한 게르마늄의 처리는 식물의 품질에 큰 영향을 주지 않을 수 있다.

표 6. 치커리 (cv. Radichio) 양액재배시 배양액내 7일간 게르마늄(GeO₂) 처리후, 게르마늄 축적량의 비교

게르마늄 처리	처리농도(mg · L ⁻¹)	앞내에 축적된 게르마늄의 양($\mu\text{gGe} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}$)		
		앞 부위		뿌리
		내부	외부	
대조구 ²⁾	0.0	0±0.0 ^y	0.3±0.1	8±3.9
Germanium dioxide (GeO ₂)	1.0	1±0.2	1±0.6	23±2.4
	2.0	1±0.3	3±0.8	41±3.3
	4.0	1±0.3	6±1.2	55±5.2
	6.0	2±0.4	9±2.4	61±4.6
	8.0	6±1.5	12±2.7	82±7.3

²⁾ 표2 참조.

표 7. 몇가지 농도의 germanium dioxide 처리가 치커리 (cv. Radichio) 생육에 미치는 영향

게르마늄 처리	Treated conc. (mg · liter ⁻¹)	Top length (cm)	Number of leaves	Fresh weight(g)		Dry weight ratio(%)
				Top	Root	
대조구	0.0	22.5a ²⁾	22a	138.4d	21.4c	20.5cd
Germanium dioxide (GeO ₂)	1.0	20.4b	22a	142.5c	22.3c	20.1cd
	2.0	19.5bc	22a	169.3b	28.9a	20.6c
	4.0	18.5c	22a	183.2a	27.5ab	19.4a
	6.0	20.2b	22a	136.6d	20.3c	20.3b
	8.0	21.3ab	18b	125.6e	19.6d	15.6d

²⁾ 표3 참조.

라. 게르마늄 처리시 식물의 생리적 반응 비교

치커리 양액재배시 배양액 내에 7일간 게르마늄 (GeO₂) 농도별 처리 (2, 4, 6, 8ppm) 후, 식물체의 생리적 변화를 조사하였다. 게르마늄 처리시 게르마늄

이 과량 축적되는 경우, 식물 뿌리의 생육이 부진했는데, TTC 분석결과 표 9와 같이 뿌리의 활성이 저하하고 있음을 알 수 있었다.

게르마늄의 처리시 약 4ppm 처리에서 대조구에 비하여 왕성한 생육이 나타나 기공전도, 이산화탄소 이

표 8. 몇가지 농도의 germanium dioxide 처리가 치커리 (cv. Radichio)의 성분 변화에 미치는 영향

게르마늄 처리농도 (mg · liter ⁻¹)	비타민 C 함량 (mg · 100g ⁻¹ FW ²)	총 질소 (%, DM ^y)	총 황 (%, DM)	총 인 (%, DM)	질산염 함량 (ppm, FW)	무기원소 함량 (%, DM)			건물율 (%)
						K	Ca	Mg	
0.0	37.2bc ^w	4.13d	0.45a	2.20e	2,78d	5.56b	1.44d	0.23c	5.2a
1.0	38.3b	4.48b	0.44a	3.24b	3,11c	5.44c	1.62b	0.26b	5.0a
2.0	34.1d	4.72a	0.38b	3.51a	3,95b	6.59a	1.81a	0.27b	4.6b
4.0	35.8d	4.44b	0.30c	2.21e	4,35a	5.55b	1.53c	0.29a	4.4b
6.0	38.9b	4.36b	0.27d	2.48d	3,85b	5.07d	1.42d	0.27b	4.2bc
8.0	42.5a	4.28bc	0.26d	2.64c	3,09c	5.04d	1.66b	0.27b	3.5d

² FW: 생체중, y DM: 건물중, w 처리농도별 각 성분의 함량변화 유의성 검정 (DMRT, 5%).

표 9. 치커리 (cv. Radichio) 양액재배시 배양액내 농도별 게르마늄(GeO₂) 처리후, 뿌리의 활성측정을 위한 Triphenyl-tetrazoliumchloride (TTC) test 결과

게르마늄 처리농도 (mg · L ⁻¹)	게르마늄 처리기간	뿌리활성 (mg · L ⁻¹ · mg DM ⁻¹ · hour ⁻¹)
		0.0
2.0	7	5,159
	12	5,248
	17	5,277
	M(평균)	5,228ab
4.0	7	5,318
	12	5,422
	17	5,183
	M(평균)	5,308a
6.0	7	5,070
	12	4,845
	17	4,536
	M(평균)	4,817c
8.0	7	4,893
	12	4,662
	17	3,876
	M(평균)	4,477d

² 표 8 참조

용율, 증산율, 물이용율, 광합성량을 측정해본 결과는 표 10과 같다. 본 결과는 게르마늄을 흡수한 치커리의 앞에서 높은 비율로 탄소고정/동화작용이 일어났음을 보여준다.

게르마늄 처리시 생육이 왕성했던 약 2~4ppm 처리구에서 비타민 C 등 항산화물질의 총합량이 낮아진 결과를 얻었는데 (그림 3), 이것은 건물율과 관련하여 희석효과가 이루어진 것으로 판단된다.

3. 셀레늄 및 게르마늄의 동시 처리를 통한 기능성 치커리의 생산

가. 셀레늄 및 게르마늄의 축적함량 변화

치커리 양액재배시 배양액 내에 7일간 셀레늄 (Na₂SeO₄)과 게르마늄(GeO₂)을 농도별로 (0, 2, 4, 8ppm) 조합처리한 후, 식물체가 축적하는 셀레늄 및 게르마늄의 함량 변화를 조사하였다.

표 10. 치커리 (cv. Radichio) 양액재배시 배양액내 농도별 게르마늄(GeO₂) 처리후, 광합성을, 기공전도, 증산, 물이용효율의 비교

게르마늄 처리농도 (mg · L ⁻¹)	게르마늄 처리기간	광합성량 (μmol · CO ₂ · m ⁻² · sec ⁻¹)	기공전도 (mol m ⁻² s ⁻¹)	증산량 (mol m ⁻² s ⁻¹)	수분이용효율 (μmol CO ₂ / mol H ₂ O)
0.0	7	22.8	0.84	25.1	0.91
	12	21.7	0.91	16.4	1.32
	17	20.4	1.22	17.7	1.15
	M	21.6b	0.99	19.7d	1.13a
2.0	7	24.5	0.75	20.4	1.20
	12	20.2	1.03	15.8	1.28
	17	25.4	0.68	19.2	1.32
	M	23.7a	0.82c	18.5e	1.27a
4.0	7	23.5	0.62	20.8	1.13
	12	23.2	0.84	18.1	1.28
	17	25.4	1.07	29.5	0.86
	M	24.0a	1.09a	22.8b	0.92b
6.0	7	23.8	0.89	25.6	0.93
	12	20.1	1.08	17.0	1.18
	17	20.5	0.87	19.5	1.05
	M	21.5b	0.95b	20.7c	1.05ab
8.0	7	21.9	0.78	26.4	0.83
	12	19.2	0.72	21.1	0.91
	17	18.4	0.69	24.2	0.76
	M	19.8c	0.73d	23.9a	0.83c

표 11과 같이 각 화합물의 단독 및 혼합처리를 통하여 셀레늄과 게르마늄의 축적량 변화가 나타났는데, 단독처리의 경우는 앞서의 연구결과와 동일한 경향을 보여주었다. 혼합처리의 경우, 동일한 게르마늄 농도에 대하여 셀레늄의 처리농도가 높을수록 식물

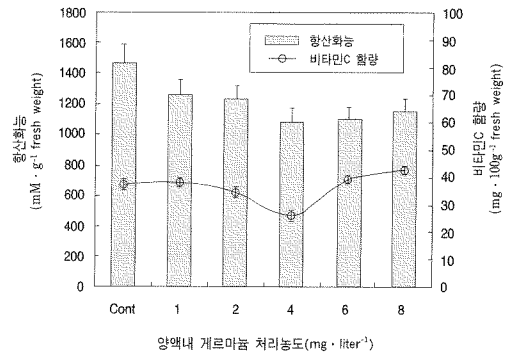


그림 3. 7일간의 게르마늄 농도별 처리에 따른 식물체의 항산화능과 비타민C 함량의 변화

체에 축적되는 셀레늄의 양은 증가하였고, 동일한 셀레늄 농도에 대하여 게르마늄 처리농도에 따른 식물체내 게르마늄 축적량은 증가하였다.

나. 양액재배시 배양액내 셀레늄(Na_2SeO_4)과 게르마늄(GeO_2)의 농도별 동시처리에 따른 식물체의 생육 및 품질변화 비교

치커리 양액재배시 배양액 내에 7일간 셀레늄(Na_2SeO_4)과 게르마늄(GeO_2)을 농도별로 (0, 2, 4, 8ppm) 조합처리한 후, 식물체의 생육량 및 품질변화를 비교하였다.

표 12와 같이 생체중은 $\text{Na}_2\text{SeO}_4/\text{GeO}_2=0/4, 2/2, 2/4\text{ppm}$ 에서 월등히 높은 수치를 나타내었다. 즉, 셀레늄은 0~2ppm, 게르마늄은 2~4ppm의 수준에서 복합처리될 경우 식물의 생육량을 증진시킴과 동시에 바람직한 양의 셀레늄과 게르마늄이 식물체에 축적될 수 있었음을 보여주는 결과이다.

또한 식물생육량의 증가에 따라 광합성량이 증가하였으며, 총질소, 총황, 총인산의 양도 감소하지 않는 결과를 나타내었다.

채소의 영양성분 중 중요한 평가항목인 비타민 C, 질산염, 기타 무기양이온(K, Ca, Mg)의 함량변화 조

사시 대조구와 큰 차이가 없었다.

비타민 C는 4/2ppm 처리구에서 가장 높은 증가를 보였으며, 2/4ppm에서도 대조구에 비하여 높은 비타민 C함량을 나타내었다. 질산염은 2/4ppm 처리구에서 약간 증가하였으나, 무기양이온 함량은 대조구에 비하여 큰 차이를 보이지 않았다.

표 13은 셀레늄과 게르마늄이 처리되었을 경우, 식물체가 갖게되는 총항산화성을 나타낸 것이다.

총항산화성은 식물체 내에서 유도되는 항산화물질의 양을 의미하는데, 높은 항산화성을 갖는 식물체를 동물이 섭취할 경우 동물의 항산화체계 및 건강유지에 매우 큰 도움을 주게 된다.

본 연구의 결과로 식물체는 셀레늄이 약 8ppm 처리될 때 항산화성이 증가되는 결과를 보여주며, 게르마늄 동시처리에 의하여 항산화성이 감소함을 보여주고 있다. 최적 처리농도 조합으로 평가되는 셀레늄 0~2ppm, 게르마늄 2~4ppm의 농도범위에서도 대조구에 비하여 높은 항산화성을 보여주고 있다.

IV. 결론

본 연구는 사람에게 필수원소인 셀레늄 및 항암성 등의 기능성이 보고된 게르마늄을 쌈채소로 이용되

표 11. 몇가지 농도조합의 sodium selenate와 germanium dioxide 처리(7일간)가 치커리 (cv. Radichio)에 축적되는 셀레늄 및 게르마늄 함량에 미치는 영향

Na ₂ SeO ₄ / GeO ₂	처리농도(mg · L ⁻¹)		식물체내 축적량(μg · kg ⁻¹ 건물)	
	Se		Ge	
	지상부	지하부	지상부	지하부
0.0/0.0	9	9	3	3
2.0/0.0	91	105	0	2
4.0/0.0	103	86	0	8
8.0/0.0	902	457	0	0
0.0/2.0	3	3	3	171
0.0/4.0	0	2	8	297
0.0/8.0	0	0	29	437
2.0/2.0	69	77	4	124
4.0/2.0	364	211	3	119
8.0/2.0	1032	910	5	160
2.0/4.0	80	79	7	153
2.0/8.0	73	74	20	314

는 치커리에 흡수시켜 가능성을 높이고자 하였다. 양액재배를 이용한 셀레늄 처리시 selenate와 selenite 중에서 selenate가 낮은 처리농도에서 더욱 높은 축적량을 보였고 최적의 셀레늄 처리농도는 selenate 4~6ppm로 7일간 처리하는 경우, 섭취 필요량(100~200 μ g/성인1인)을 충족시킬 수 있었다. 축적경향은 지하부보다는 지상부에서 상대적으로 많은 양의 셀레늄

이 축적되었고, 지상부에서도 활발한 생육이 이루어지는 부위(신초 등)에서 더 많은 양의 셀레늄 축적이 이루어졌다. 또한 비타민C 및 총항산화성의 증가를 야기하여 치커리 총항산화능 증가가 이루어졌다. 식물체의 생육유지 측면에서는 selenate 2ppm 수준이 가장 좋았다. 게르마늄 처리(GeO₂)를 통하여 약 2~4ppm의 수준에서 식물의 광합성량과 생육량이 현저

표 12. 몇가지 농도조합의 sodium selenate와 germanium dioxide 처리가 치커리의 생육과 성분에 미치는 영향

Se/Ge 처리 (mg · L ⁻¹)	생체중 (g)		순 광합성량 (μ mol · m ⁻² · sec ⁻¹)	총 질소 (%, DM)	총 황 (%, DM)	총 인 (%, DM)	건물물 (%)
	지상부	지하부					
0,0/0,0	152.8	25.4	22.85	4.13f	0.49	2.20	6.4
2,0/0,0	162.2	24.8	22.57	4.48b	0.34	2.21	6.3
4,0/0,0	136.6	23.3	18.22	4.20ef	0.28	1.70	6.3
8,0/0,0	58.1	18.1	15.89	3.18h	0.60	0.44	16.3
0,0/2,0	214.0	31.1	20.79	4.72a	0.38	3.51	6.3
0,0/4,0	263.9	39.9	22.65	4.45bc	0.29	2.21	6.3
0,0/8,0	140.3	36.4	23.38	4.29d	0.27	2.64	5.7
2,0/2,0	252.3	31.1	26.62	4.73a	0.65	2.24	6.4
4,0/2,0	131.3	29.9	26.02	4.19ef	0.42	1.34	6.5
8,0/2,0	44.2	14.3	13.40	3.64g	0.46	0.76	8.9
2,0/4,0	223.5	32.3	27.08	4.39c	0.29	1.54	6.7
2,0/8,0	176.0	23.2	18.75	4.24d	0.39	1.47	6.0

표 13. 몇가지 농도조합의 sodium selenate와 germanium dioxide 처리가 치커리의 총항산화성에 미치는 영향

Se/Ge 처리농도 (mg · L ⁻¹)	항산화성(μ M)		(A)/(B)	총항산화성 (μ M)
	Trolox equivalent(A)	α -tocopherol equivalent(B)		
0,0/0,0	1052f ²	1843g	0.57	2895g
2,0/0,0	1132e	2226e	0.51	3358e
4,0/0,0	1367c	2605b	0.52	3972c
8,0/0,0	1512ab	2748b	0.55	4260b
0,0/2,0	1004bc	1938f	0.52	2942fg
0,0/4,0	980f	2137e	0.46	3117f
0,0/8,0	1252d	2402d	0.52	3654d
2,0/2,0	1221d	2346de	0.52	3567de
4,0/2,0	1506ab	2545c	0.59	4051c
8,0/2,0	1621a	2457c	0.66	4078c
2,0/4,0	1241d	2974a	0.42	4215b
2,0/8,0	1309cd	3114a	0.42	4423a

² 처리농도별 항산화성 변화 유의성 검정 (DMRT, 5% 수준)

히 증가되는 결과를 얻었고, 지상부보다는 지하부에서 월등히 많은 양의 게르마늄이 축적되었다. 섭취를 통한 적정함량(50 μ g/성인1인)을 유지하기 위한 엽채류의 게르마늄 처리 연구를 통하여, 배양액을 통한 흡수로는 지상부 축적량이 부족하였다. 셀레늄과 게르마늄의 복합처리를 통하여 항산화성과 품질이 향상된 쌈채소로서의 치커리 재배가 가능하였다.

인용 문헌

- Banuelos, G.S., Ajwa, H.A., Wu, L., Guo, X., Akohoue, S. and Zambruski, S., 1997. Selenium-induced growth reduction in Brassica land races considered for phytoremediation. *Ecotoxicol Environ Saf* 36:282~287.
- Brown, K.M. and Arthur, J. R., 2001. Selenium, selenoproteins and human health: a review. *Public Health Nutr*, 4(2B):593~599.
- Chen, L., Yang, F., Xu, J., Hu, Y., Hu, Q., Zhang, Y. and Pan, G., 2002. Determination of selenium concentration of rice in china and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice. *J Agric Food Chem* 50:5128~5130.
- Ernst E., 2000. Unconventional cancer therapies : what We need is rigorous research, not closed minds. *Chest*, 117(2):307~308.
- Gerber, G.B. Leonard, A., 1997. Mutagenicity, carcinogenicity and teratogenicity of germanium compounds. *Mutat Res*, 387(3):141~146.
- Kopf-Maier, P., 1994. Complexes of metals other than platinum as antitumour agents. *Eur J Clin Pharmacol*, 47(1):1~16.
- Lintschinger, J., Fuchs, N., Moser, J., Kuehnelt, D. and Goessler, W., 2000. Selenium-enriched sprouts, A raw material for fortified cereal-based diets. *J Agric Food Chem* 48:5362~5368.
- Mainwaring MG, Poor C, Zander DS, and Harman E., 2000. Complete remission of pulmonary spindle cell carcinoma after treatment with oral germanium sesquioxide. *Chest*, 117(2):591~593.
- Makela, A.L., Wang, W.C., Hamalainen, M., Nanto, V., Laihonon, P., Kotilainen, H., Meng, L.X. and Makela, P., 1995. Environmental effects of nationwide selenium fertilization in Finland. *Biol Trace Elem Res* 47:289~298.
- Maleck, K. and Dietrich, R. A., 1999. Defense on multiple fronts: how do plants cope with diverse enemies? *Trends Plant Sci* 4(6): 215~219.
- Ming, X., Yin H., Zhu, Z., 1996. Effect of dietary selenium and germanium on the precancerous lesion in rat glandular stomach induced by N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*, 34(4):221~223.
- Mukherjee, B., Ghosh, S., Chatterjee, M., 1996. Chemopreventive efficacy of selenomethionine and its role in the antioxidant defense system in 2-acetylaminofluorene-induced hepatocarcinogenesis in rats. *J. Exp. Ther. Oncol*, 1(4):209~217.
- Mukhopadhyay-Sardar, S., Rana, M. P., Chatterjee, M., 2000. Antioxidant associated chemoprevention by selenomethionine in murine tumor model. *Mol. Cell. Biochem*, 206(1-2):17~25.
- Pickering, I.J., Wright, C., Bubner, B., Ellis, D., Persans, M.W., Yu, E.Y., George, G.N., Prince, R.C. and Salt, D.E., 2003. Chemical form and distribution of selenium and sulfur in the selenium hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus*. *Plant Physiol* 131:1460~1467.
- Wang, W.C., Makela, A.L., Nanto, V., Makela, P. and Lagstrom, H., 1998. The serum selenium concentrations in children and young adults: a long-term study during the Finnish selenium fertilization programme. *Eur J Clin Nutr* 52:529~535.

16. Welling, L. L., 2001. Induced resistance: from the basic to the applied. *Trends Plant Sci* 6(10):445~447.
17. Yu, B., Wu, J., Zhou, X., 1995. Interference of selenium germanium and calcium in carcinogenesis of colon cancer. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*, 33(3):167~169.