

ORIGINAL ARTICLE

방사성 핵종 CS 처리된 토양에 유기물 함량이 배추의 생육에 미치는 영향

최연주 · 배은영 · 김상림 · 모함마드 파라즈 아흐메드 · 강점순*

부산대학교 원예생명과학과

Effect of Organic Matter Content in Soil Treated with Radionuclides Cesium on the Growth of Chinese Cabbage

Yeon Ju Choi, Eun Young Bae, Sang Rim Kim, Mohammad Faraaz Ahmed, Jum-Soon Kang*

Department of Horticulture Bioscience, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

Abstract

This study aimed to analyze the effects of cesium (Cs) treatment concentrations and organic matter on the growth of Chinese cabbage plants. The growth responses of cabbage to the Cs treatment varied depending on the concentration of Cs and the organic matter content in the soil. Higher concentrations of Cs in the soil presented a detrimental effect on cabbage growth. Specifically, increased Cs levels led to a reduction in leaf number, leaf area, chlorophyll content, and fresh and dry weights. However, an increase in the soil organic matter content positively affected the fresh and dry weights. These trends were particularly pronounced in Chinese cabbage plants grown for 80 days after treatment. Soil organic matter proved to effectively mitigate the negative effects of Cs on plant growth. Incorporating organic matter into Cs-contaminated soils can, therefore, enhance the immobilization of radioactive isotopes and contribute to the stabilization of contaminated soils, making it a useful strategy for managing radioactive contamination.

Key words : Cesium treatment, Organic matter content, Radionuclide, Seedling growth

1. 서 론

최근 환경오염과 관련된 연구가 증가하면서 방사성 물질이 생태계와 농작물에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 그중에서도 Cs (Caesium)은 주로 핵 사고나 원자력 발전소에서 방출되며 여러 가지 동위원소를 포함하고 있다(Chino et al., 2011; Steinhäuser et al., 2014). 자연 상태에서는 자연방사성핵종인 ^{133}Cs 으로 존재하며, 인공방사성핵종인 ^{134}Cs 와 ^{137}Cs 은 원자로의 우라늄 핵분열 과정에서 발생하며 반감기는 각각 2.06년 및 30년이다(Davis and Eberline,

1997). 이들 동위원소는 인체에 유입될 경우 적은 양으로도 골수암, 폐암, 백혈병을 유발하는 등 치명적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Lee, and Yoon, 2010).

원자력 시설로부터 대기로 방출된 방사성 핵종인 Cs은 작물체의 지상부 표면에 집적되는 직접 오염 경로와 토양에 침적된 후 작물체의 뿌리를 통하여 흡수되는 간접 오염 경로를 통해 농작물을 오염시키며, 결국 이를 섭취하는 인체에까지 내부 피폭을 초래한다(With et al., 2021).

섭취 피폭선량 평가 모델에서는 뿌리 흡수에 의한 식

Received 29 July, 2024; Revised 22 August, 2024;

Accepted 28 August, 2024

*Corresponding author : Jum-Soon Kang, Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

Phone : +82-55-350-5523

E-mail : kangjs@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

물체 내 핵종 농도를 예측하기 위해 토양 중 핵종 농도에 대한 작물체 내 핵종 농도의 비로 정의되는 전이계수(Transfer factor, TF)라는 인자를 사용하고 있다(Nedelkoska, and Doran, 2000; Lee et al., 2018). 토양-작물 간 전이계수는 작물의 종류, 토양의 산도, 토성 및 유기물 함량과 유사 원소의 존재 등 토양 조건에 따라 그 값이 달라진다(Smolders et al., 1996; Chibowski and Zygmunt, 2002; Ehlken and Kirchner, 2002; Fedorkova et al., 2012).

지금까지 방사성 핵종과 작물체에 관련된 연구는 주로 토양-작물 간 전이계수에 관한 것이었고(Lee et al., 2018), 작물의 생육 및 피해 증상을 체계적으로 구명한 연구는 매우 부족한 실정이다. 토양에 노출된 방사성 핵종인 세슘(¹³⁷Cs)은 식물의 뿌리를 통해 흡수되는데, 흡수율은 작물의 종류, 생육상태, 토양의 pH, 유기물 함량, 세슘의 농도 등에 따라 달라질 수 있다. Cs이 식물에 축적되면 세포 내 이온 불균형을 일으켜 식물의 성장을 억제하고 전반적인 생육에 부정적인 영향을 미친다(Park et al., 2019; Panday, and Kumar, 2020). 또한 Cs은 K⁺ 등과 같은 양이온 흡수를 방해하고 유전적 변이를 유발하는 등 식물체의 생육을 저하시킨다(Kim et al., 2020).

토양 유기물은 방사성 핵종이 토양에 유입되었을 때 이들의 거동에 중요한 역할을 한다. 토양 유기물은 토양의 화학적, 물리적, 생물학적 특성에 영향을 미치며 방사성 핵종의 이동성을 조절한다고 알려져 있다(Fedorkova et al., 2012; Park et al., 2019).

또한 토양 유기물은 방사성 핵종을 고정화하여 식물 뿌리가 방사성 물질을 흡수하는 것을 억제함으로써 식물에 의존하는 동물, 나아가 인간에 대한 방사선 피폭을 줄이는 데 도움을 준다(Rafferty et al., 1994). 이뿐만 아니라 토양 유기물은 식물의 성장에 필요한 영양분을 제공하며, 식물 뿌리가 방사성 핵종을 흡수하지 않도록 하는 역할도 한다(Chibowski and Zygmunt, 2002).

배추는 김치의 주요 재료로 연중 소비되기 때문에 안정적인 생산과 공급이 매우 중요한 노지 재배 채소작물이다. 2022년 기준으로 한국의 배추 재배 면적은 약 35,000 ha 정도이며, 배추 생산량은 연간 200만 톤 규모로 이는 전 세계 배추 생산량의 약 10%를 차지한다. 따라서 한국은 세계 주요 배추 생산국 중 하나이다(MAFRA, 2022).

본 연구는 원자력 사고 시 섭취 피폭 경로에서 주요 방사성 핵종으로 간주되고 있는 Cs을 유기물 함량이 다른 토양에 농도별로 처리하여 세슘이 배추의 생육에 미치는 영향과 세슘과 유기물의 상호작용이 배추의 생장에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 이를 통해 방사성 오염 토양에서의 작물 재배 및 환경 복원 전략 수립에 기여하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험설계

실험에 사용된 배추 품종은 단오봄배추(Jinheung, Gyeonggi-do, Korea)였고, 실험은 86.4(28.8 x 3) m² 규모의 벤로형 유리온실에서 고설벤치를 설치하여 포트재배 하였으며 재배온도는 20℃ 였다.

2.2 방사성 핵종 Cs 처리

방사성 핵종인 Cs이 토양에 유입될 때, 토양 유기물이 핵종의 거동과 작물 생육에 미치는 영향을 조사하기 위해 혼합토양을 제조하여 사용하였다. 혼합토양은 피트모스(PRO-MOSS TBK, 수도용 상토(Seonghwa, Boseong, Korea), 유기질 비료(Hyeondaeteugsan, Gimhae, Korea)로 조합하였다. 혼합토양에 유기물 함량을 5%(peatmoss 12 : organic matter 2 : bed soil 240 v/v), 10%(peatmoss 24 : organic matter 2 : bed soil 240 v/v), 15%(peatmoss 36 : organic matter 2 : bed soil 240 v/v)로 달리하였다. 이와 같이 유기물 함량을 5%, 10% 및 15% 조성된 토양에 cesium chloride를 0, 50, 100, 200 mg·kg⁻¹ 혼합처리하여 시기별 생육 및 피해증상을 조사하였다. Cs은 방사성 핵종인 ¹³⁷Cs의 대체용으로 cesium chloride(Cs, Sigma, CAS No. 7647-17-8)을 사용하였다.

각각의 유기물을 함량별로 조성한 토양에 Cs를 농도별로 처리한 후 1/5,000 와그너 포트에 상토를 80% 채운다음 2주 정도 안정화 단계를 거친 후 본엽이 2매 전 개된 배추를 와그너 포트에 정식하였다. 시험구는 난괴법 3반복 이었고, 처리구 당 3주의 식물체를 배치하였다. 비오염 토양은 유기물 함량별로 조성한 토양에 Cs를 처리하지 않은 토양이었다.

Table 1. Effects of Cs treatment on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height, root length for various growth state of Chinese cabbage at 20°C in greenhouse

Organic matter (%)	Radionuclide conc. (mg·kg ⁻¹)	No. of leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf		Plant height (cm)	Root length (cm)
				Length (cm)	Width (cm)		
<i>Growth stage: 50 days</i>							
5	50	16.5	2268.6	13.1	7.8	27.8	36.9
	100	16.0	2048.5	14.9	9.5	28.4	27.0
	200	17.0	1953.8	12.2	8.1	26.8	31.0
	Untreated	16.0	2222.5	15.1	9.9	24.7	25.5
	Means	16.4	2123.4	13.8	8.8	26.9	30.1
10	50	14.5	2322.1	15.1	8.8	27.7	28.4
	100	16.5	2034.4	13.1	9.0	25.8	25.4
	200	15.5	1954.2	13.1	9.4	27.6	24.9
	Untreated	18.0	2154.4	15.0	9.3	27.9	24.8
	Means	16.1	2116.3	14.1	9.1	27.3	25.9
15	50	17.5	2379.3	14.1	9.3	30.5	25.5
	100	14.0	1744.3	16.6	10.2	30.7	20.5
	200	14.0	1814.0	14.1	9.3	26.4	23.9
	Untreated	17.5	2381.7	13.5	9.9	31.6	31.7
	Means	15.8	2079.8	14.6	9.7	29.8	25.4
Significances							
Organic matter(A)		NS ^z	NS	NS	NS	*	NS
Radionuclide conc.(B)		NS	*	NS	NS	*	NS
A × B		NS	NS	NS	NS	NS	NS
<i>Growth stage: 80 days</i>							
5	50	29.5	3532.3	11.6	8.0	28.0	28.8
	100	28.5	3372.0	7.0	6.8	28.0	23.0
	200	26.0	3142.1	10.4	9.2	28.5	18.7
	Untreated	22.5	3836.3	18.1	11.0	30.3	24.5
	Means	26.63	3470.7	11.78	8.75	28.70	23.75
10	50	27.6	3443.8	9.8	9.6	28.8	22.3
	100	26.0	3154.3	8.3	9.3	27.2	22.3
	200	23.5	2838.2	8.7	8.3	27.5	26.4
	Untreated	27.5	3640.6	13.8	10.4	29.3	26.9
	Means	26.15	3269.23	10.15	9.40	28.20	24.48
15	50	28.5	3789.7	9.9	8.9	31.5	30.5
	100	27.5	3399.3	9.7	8.5	29.8	21.8
	200	25.5	3348.7	8.2	8.8	31.1	30.1
	Untreated	29.0	3701.4	12.8	10.8	32.3	26.5
	Means	27.6	3559.78	10.15	9.25	31.18	27.23
Significances							
Organic matter(A)		NS ^z	NS	NS	NS	NS	NS
Radionuclide conc.(B)		*	*	NS	NS	NS	NS
A × B		NS	NS	NS	NS	NS	NS

^z NS, *, **, **** Nonsignificant or significant at $P=0.05$, 0.01, and 0.001, respectively

Table 2. Effects of Cs treatment on fresh weight and dry weight for various growth state of Chinese cabbage at 20°C in greenhouse

Organic matter (%)	Radionuclide conc. (mg·kg ⁻¹)	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
		Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>Growth stage: 50 days</i>							
5	50	140.5	3.6	144.1	8.9	0.4	9.3
	100	132.6	2.5	135.1	8.2	0.3	8.5
	200	127.5	2.6	130.1	4.9	0.3	5.2
	Untreated	135.2	4.9	140.1	8.0	0.4	8.4
	Means	134.0	3.4	137.4	7.5	0.4	7.9
10	50	143.1	2.9	146.0	8.6	0.3	8.9
	100	127.3	2.6	129.9	6.5	0.2	6.7
	200	129.5	2.1	131.6	6.3	0.2	6.5
	Untreated	141.5	3.9	145.4	8.1	0.4	8.5
	Means	135.4	2.9	138.3	7.4	0.3	7.7
15	50	150.5	3.9	154.4	9.5	0.4	9.9
	100	119.2	2.1	121.3	8.9	0.2	9.1
	200	128.0	2.0	130.0	6.4	0.3	6.7
	Untreated	146.5	3.9	150.3	8.9	0.4	9.3
	Means	136.1	3.0	139.0	8.4	0.3	8.7
Significances							
Organic matter(A)		NS ^z	NS	NS	NS	NS	NS
Radionuclide conc.(B)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
A × B		NS	NS	NS	NS	NS	NS
<i>Growth stage: 80 days</i>							
5	50	342.2	5.4	347.6	14.9	0.6	15.5
	100	311.5	5.7	317.2	14.5	0.5	15.0
	200	278.0	5.9	283.9	13.1	0.5	13.6
	Untreated	349.3	6.0	355.3	12.4	0.4	12.8
	Means	320.2	5.75	325.9	13.7	0.5	14.2
10	50	338.1	5.2	343.3	14.4	0.4	14.8
	100	311.5	5.6	317.1	13.7	0.4	14.1
	200	299.0	5.3	304.3	13.1	0.5	13.6
	Untreated	342.7	6.1	348.8	14.6	0.6	15.2
	Means	322.8	5.5	328.3	13.9	0.5	14.4
15	50	378.3	7.1	385.4	15.2	0.7	15.9
	100	332.1	5.3	337.4	14.2	0.6	14.8
	200	305.0	7.2	312.2	13.3	0.5	13.8
	Untreated	364.5	5.7	370.2	15.7	0.7	16.4
	Means	344.9	6.3	351.30	14.6	0.6	15.2
Significances							
Organic matter(A)		*z	NS	*	NS	NS	*
Radionuclide conc.(B)		*	NS	*	*	NS	*
A × B		NS	NS	NS	NS	NS	NS

z NS, *, **, *** Nonsignificant or significant at P= 0.05, 0.01, and 0.001, respectively

Table 3. Effects of Cs treatment on chlorophyll content of Chinese cabbage after 50 days and 80 days after transplanting at 20°C in greenhouse

Organic matter (%)	Radionuclide conc.(mg·kg ⁻¹)	Chlorophyll (SPAD unit)
<i>Growth stage: 50 days</i>		
5	50	40.3
	100	41.2
	200	40.2
	Untreated	43.7
	Means	41.4
10	50	41.9
	100	39.8
	200	38.8
	Untreated	41.8
	Means	40.6
15	50	40.5
	100	38.9
	200	38.1
	Untreated	42.9
	Means	40.1
Significances		
Organic matter(A)		NS ^z
Radionuclide conc.(B)		NS
A × B		NS
<i>Growth stage: 80 days</i>		
5	50	40.7
	100	37.3
	200	37.7
	Untreated	41.9
	Means	39.4
10	50	39.9
	100	40.1
	200	36.4
	Untreated	40.6
	Means	39.2
15	50	42.3
	100	40.5
	200	38.9
	Untreated	45.7
	Means	41.8
Significances		
Organic matter(A)		* ^z
Radionuclide conc.(B)		*
A × B		NS

^z NS, *, **, *** Nonsignificant or significant at P = 0.05, 0.01, and 0.001, respectively

2.3 작물재배 관리

작물의 비배관리는 농촌진흥청 재배법에 준하여 실시하였고, 생육 조사는 Cs 처리한 후 50일 및 80일째에 실시하였다. 조사항목은 초장, 엽수, 엽면적, 엽장, 엽폭, 근장, 생체중, 건물중 및 엽록소 함량을 조사하였다. 이를 위해 반복당 3주의 식물체를 채취하였고, 식물체의 생육조사 방법 중 엽수는 잎 면적이 1 cm² 이상인 것을 조사하였으며, 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3000, LI Cor., USA)를 이용하였다. 엽록소 함량은 3번째로 전개한 본엽의 3 지점에 Chlorophyll meter (SPAD-502, Minolta Co., Ltd., Japan)를 이용하여 측정하고 후 평균값을 나타내었다.

엽장과 엽폭은 3번째로 전개된 본엽을 측정하였으며, 초장은 지상부에서 가장 긴 부분을 측정하였고, 근장은 뿌리의 가장 긴 부분을 측정하였다. 생체중은 생체 무게를, 건물중은 70°C에서 24시간 건조 후 측정하였다.

실험 결과의 통계분석은 SAS 프로그램 SAS program (Version SAS 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 신뢰수준 95%에서 Least Significance Difference test를 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

20°C 온실조건에서 자연계에 존재하는 방사선 동위원소인 cesium chloride를 사용하여 토양에 50, 100, 200 mg·kg⁻¹으로 처리농도를 다르게 하여 Cs과 유기물 함량의 상호작용이 배추의 생장에 미치는 영향을 조사하였다(Table 1). 배추의 생육에는 유기물 함량 및 Cs 처리농도에 따라 유의미한 변화가 관찰되었다(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3).

유기물 함량과 방사성 핵종인 Cs의 처리농도에 따라 시기별 생육을 조사한 결과 50일 생장단계에서는 유기물 함량에 따라 식물의 초장과 엽면적 성장에는 유의적인 영향을 주었다. 초장은 유기물 함량이 15%에서 초장이 29.8 cm 가장 높았고, Cs 처리농도가 높아지면 초장생장이 감소하였다. 또한 Cs 처리농도는 엽면적과 식물체의 초장에 유의적인 영향을 주었다. Cs 처리농도가 증가할수록 엽면적은 감소하였다. 반면 엽장, 엽폭, 엽수 등은 유기물 함량과 방사성 핵종의 처리농도에 의한 유의적인 영향을 주지 않았다.

Cs 토양처리 후 80일 생육시킨 배추에서는 토양의 유기물 함량이 식물의 초장, 엽수, 엽면적, 엽장과 뿌리

길이 등의 생육에 큰 영향을 주지는 않았다. 반면 Cs 처리농도에 따라 엽수와 엽면적 등 지상부 성장에는 영향을 주었으며, Cs의 처리농도가 증가하면 엽수와 엽면적은 감소하였다(Table 1). 엽수는 토양 유기물 함량 15% 조건에서 Cs에 오염되지 않은 무처리구는 식물체당 29장 이었으나 Cs의 처리농도가 상대적으로 높았던 200 mg·kg⁻¹ 조건에서는 식물체당 엽수는 25.5장으로 무처리구에 비해 3장 적었다. 이러한 결과는 토양 유기물 함량 5% 및 10% 처리구에서도 비슷한 경향이였다. 엽면적 또한 토양에 Cs의 처리농도가 증가하면 엽면적은 감소하였다.

Kim et al.(2020)은 식물이 Cs 노출되면 생장이 저해되고, 광합성 효율을 감소시키는 생리적 스트레스를 유발한다고 하였다. 이러한 부정적인 영향은 Cs 농도에 따라 더욱 두드러지게 나타났으며, 고농도 Cs는 뿌리와 잎의 성장을 현저히 억제하였다고 하였다.

Park et al.(2019)은 Cs에 오염된 토양은 미생물 활동을 저해하고, 토양의 물리화학적 특성을 변화시켜 식물의 영양 흡수를 방해하며, 식물의 전반적인 성장을 저하시킨다고 하였다.

토양 유기물 함량을 달리한 토양에 방사성 핵종인 Cs를 농도별로 처리하여 배추의 생육단계별 생체중과 건물중을 조사하였다(Table 2). 50일 생장단계에서는 유기물 함량에 따라 식물체의 생체중과 건물중 변화에는 유의적인 영향을 주지 않았다. 50일 생장단계의 식물체당 평균 생체중은 5% 토양 유기물 함량조건에서는 134.0 g/plant, 10%에서는 135.4 g/plant, 15%에서는 136.1 g/plant 였으며, 식물체 평균 건물중도 7.5 g/plant에서 8.4 g/plant 범위로 토양 유기물을 함량에 따라 유의적인 차이는 없었다. 또한 Cs 처리농도에 따라서도 식물체의 생체중과 건물중에는 큰 변화가 없었다.

반면 80일 생장단계에서는 유기물 함량 5%에서는 식물체당 평균 생체중이 320.2 g/plant, 10%에서는 320.3 g/plant, 15%에서는 344.9 g/plant으로 나타나 유기물 함량이 증가하면 식물체의 생체중이 증가하였다. 방사성 핵종인 Cs의 처리농도에 의해 생체중에 변화가 있었고, Cs의 처리농도가 높아지면 생체중은 감소하였다. 건물중도 유기물 함량 5%에서는 식물체당 평균 건물중이 13.7 g/plant, 10%에서는 13.9 g/plant, 15%에서는 14.6 g/plant으로 나타나 토양 유기물이 함량이 높을수록 건물중이 증가하였다. 또한 Cs의 처리농도가 높아지면 식물체의 건물중은 감소하였다.

방사성 핵종인 세슘(^{137}Cs)이 식물에 미치는 영향이 복잡하며 식물체로의 흡수 및 이동 경로는 나트륨(Na)과 비슷하다고 알려져 있다(Smolanders et al., 1996). 토양에 존재하는 Cs의 식물 흡수율은 토양의 pH, 유기물의 함량, 세슘의 Cs농도 등에 따라 달라진다고 보고되고 있다(Park et al., 2019; Panday and Kumar, 2020).

Cs이 식물체에 축적되면, 칼륨(K)과 같은 중요한 영양소의 흡수를 방해할 뿐 아니라 세포 내 이온 불균형을 일으켜 식물의 성장을 억제하거나(Smolanders et al., 1996), 세포 구조를 손상시키고, 유전적 변형을 유발하는 등 식물생육에 부정적으로 영향을 미친다. 본 연구에서도 Cs 처리농도가 증가하면 식물의 생육을 억제하는 작용이 있었다.

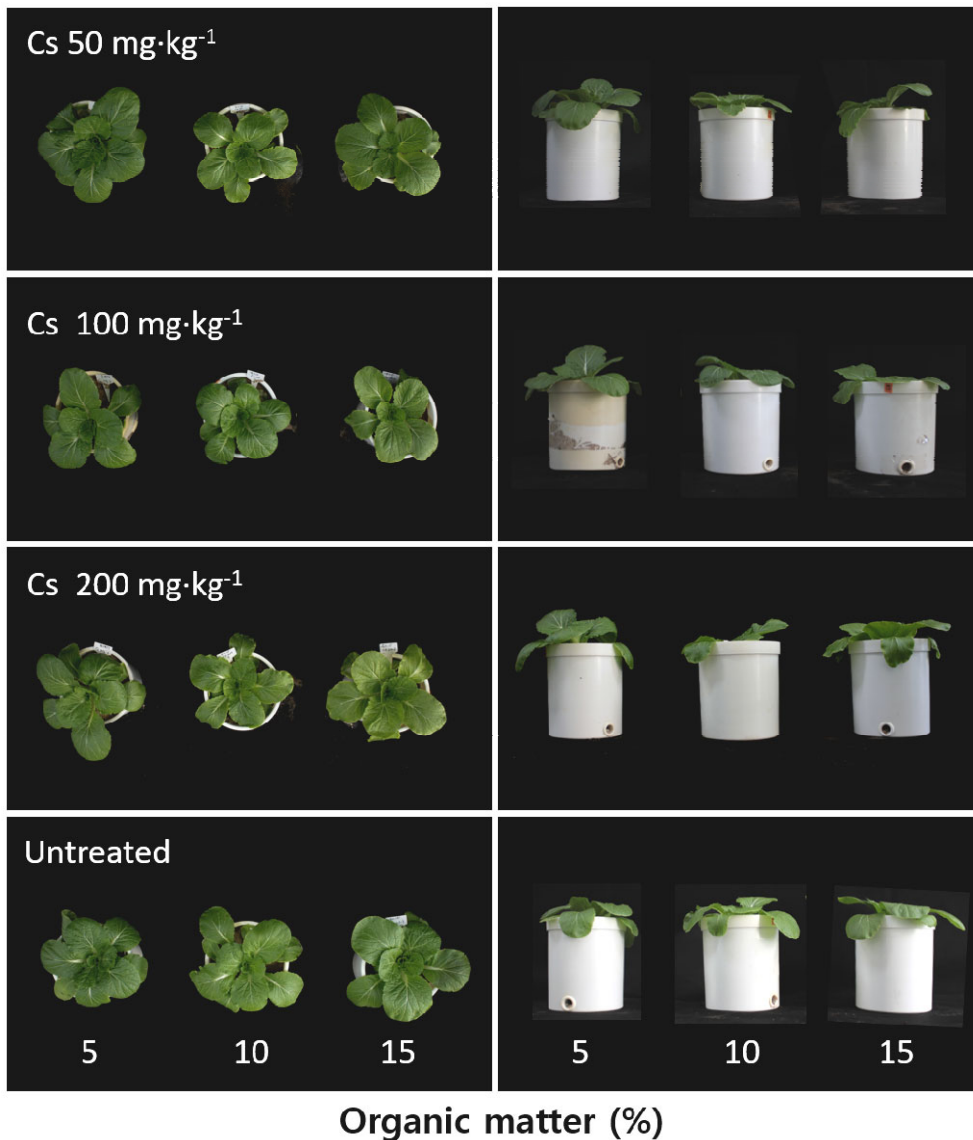


Fig. 1. Growth of changes in Chinese cabbage seedlings cultivated for 50 days in radionuclide Cs treated soil with varying levels of organic matter.

엽록소는 광합성의 핵심 요소로 식물체에서 빛 에너지를 화학 에너지로 변환하여 생장을 촉진한다. 식물의 엽록소 함량은 광합성 효율성, 성장상태 및 강건한 식물체의 상태를 평가하는 지표로 활용된다. 토양 유기물 함량을 달리한 토양에 방사성 핵종인 Cs를 농도별로 처리하여 배추의 생육단계별 엽록소 함량을 조사한 결과,

50일 성장단계에서는 배추의 엽록소 함량이 유기물 함량 및 Cs 처리농도에 의해 통계적으로 유의미한 차이가 없었다. 반면 생육이 진전되어 80일 생육단계에서는 배추의 엽록소 함량이 유기물 함량과 Cs 처리농도에 따라 유의미한 차이를 보였으나, 유기물 함량과 Cs 처리농도의 상호작용에 의한 유의성은 없었다.

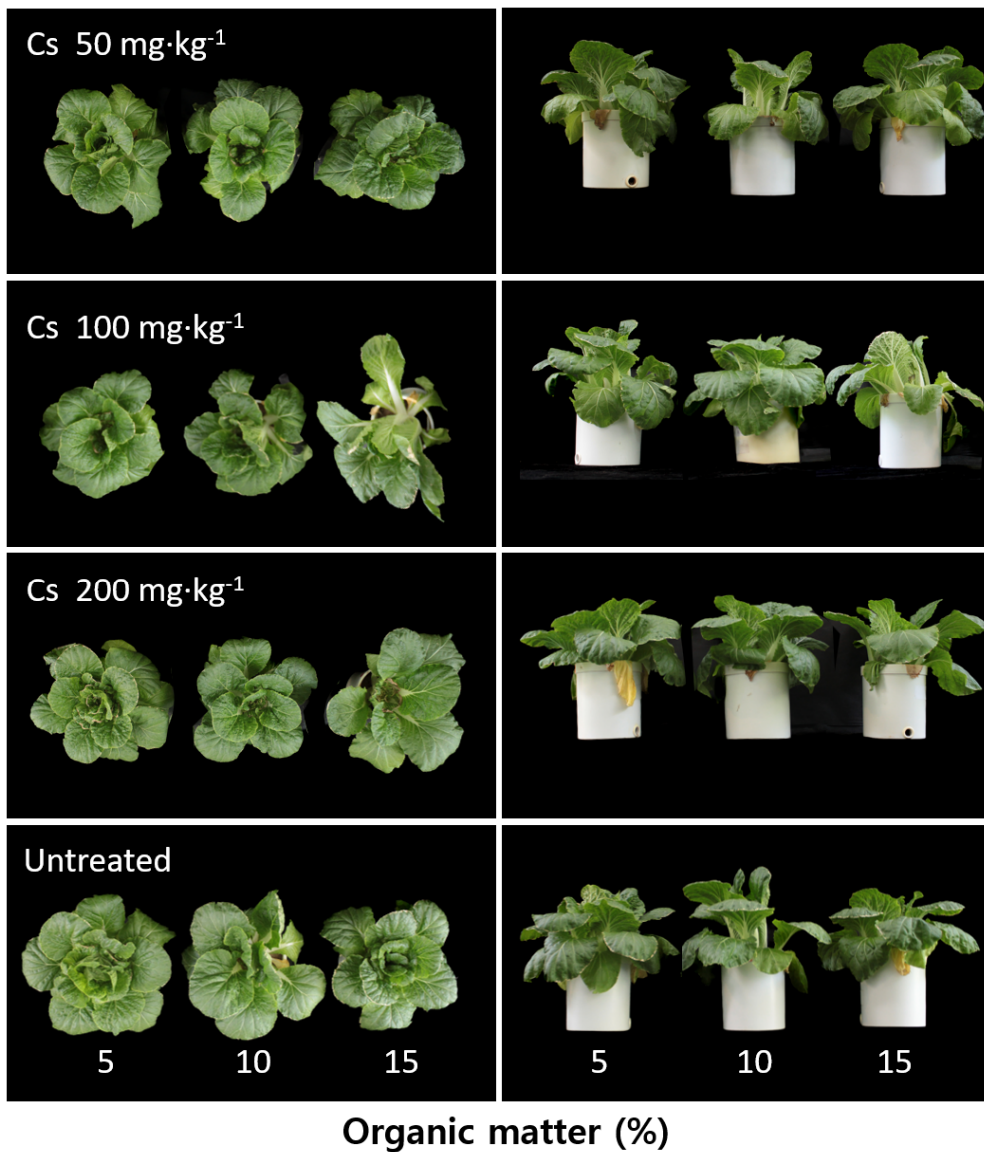


Fig. 2. Growth of changes in Chinese cabbage seedlings cultivated for 80 days in radionuclide Cs treated soil with varying levels of organic matter.

엽록소는 토양 유기물 함량 15% 조건에서 Cs에 오염되지 않은 무처리구에 비해 42.9 SPAD로 가장 높았다. 반면 동일한 유기물 함량조건에서 Cs의 처리농도가 200 mg·kg⁻¹ 높아지면 엽록소 함량이 38.9 SPAD로 무처리구에 비해 4 SPAD 낮은 엽록소 함량을 보였다.

이는 유기물 함량이 높을수록 엽록소 함량에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단되며, 토양에 유기물 함량이 증가함에 따라 유기물이 방사성 핵종의 흡수를 억제하고 엽록소 함량을 증가시키는 등 식물 생육을 개선하는 역할을 한 것으로 판단된다(Table 3).

토양 유기물은 방사성 핵종이 토양에 유입될 때 핵종의 거동에 중요한 역할을 하며(Cornell, 1993), 일반적으로 토양 유기물은 방사성 핵종을 흡착하거나 고정화

하여 토양 내에서 이동을 제한하여 식물체의 흡수율을 저하시킨다고 하였다.

결론적으로, Cs 처리에 따른 배추의 생장반응은 유기물 함량과 Cs 처리 농도에 따라 다르게 나타났으며, 생장과 관련된 요인에서 유의미한 차이를 보였다. 특히, 유기물 함량이 증가함에 따라 생체중과 건물중이 증가하였고, 반면 방사성 핵종인 Cs 처리농도가 높을수록 생체중과 건물중이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 방사성 오염 토양의 복원에는 유기물의 활용이 효과적일 수 있다. 이는 유기물이 방사성 핵종의 이동성을 낮추고, 식물 성장에 필요한 영양성분 제공에 의한 것으로 판단된다.

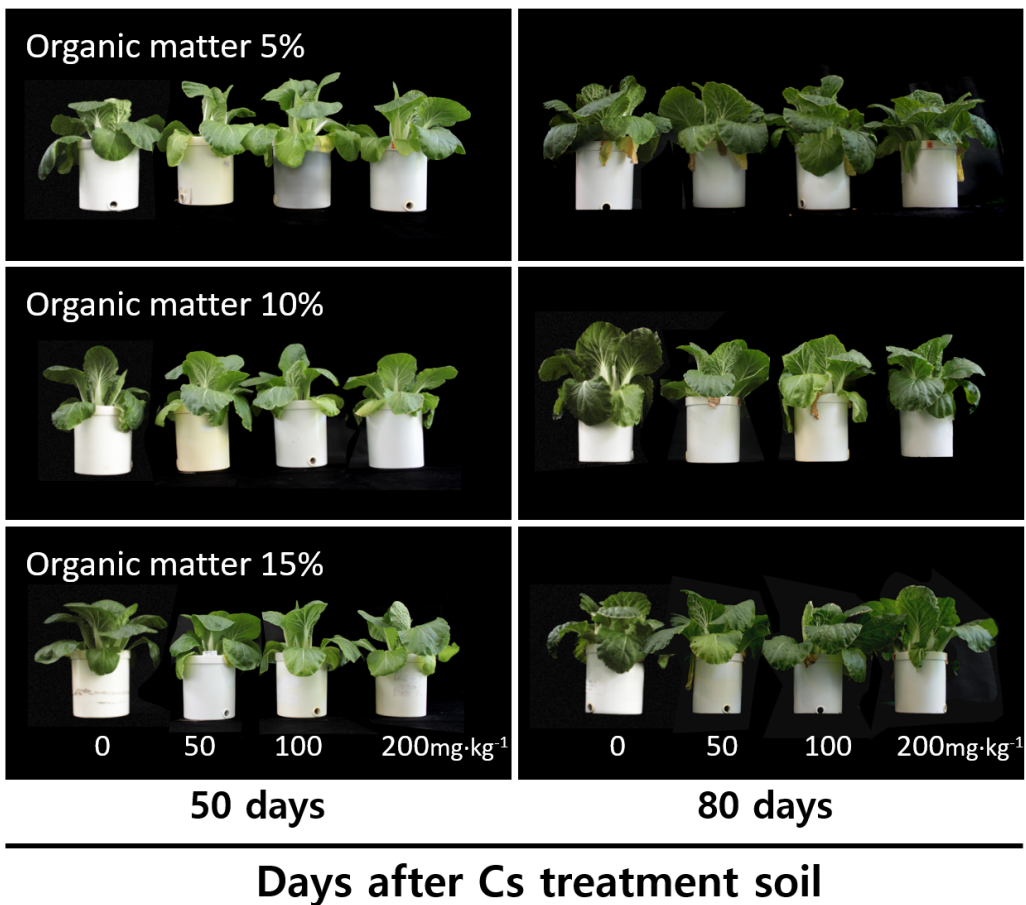


Fig. 3. Changes in growth of Chinese cabbage seedling by radionuclide Cs treatment with 5, 10, 15% of organic matter at 50 and 80 days after transplanting.

방사성 핵종이 오염된 토양에서 방사성 오염이 식물의 생장에 미치는 영향을 분석하고, 생태복원 및 방사성 오염물 제거를 위해 다양한 식물을 활용한 생태계 복원 가능성을 제시하기도 하였다(Cunningham and Berti, 1993; Nedelkoska and Doran, 2000; Soudek et al., 2004; Tang et al., 2011; Sugiura et al., 2016; Huang and Zhao, 2017; Khan and Ahmed, 2019; Panday and Kumar, 2020).

본 연구와 선행연구의 결과를 고찰하여 볼 때 방사성 오염 토양에 유기물을 추가하면 방사성 핵종의 고정화를 촉진하여 오염된 토양을 안정화시키는데 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것이며, 이는 식물에 의존하는 동물, 나아가 인간에 대한 방사선 피폭을 경감시키는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다(With et al., 2021).

4. 결론

본 연구는 방사성 핵종 Cs 처리농도와 유기물이 배추의 생육에 미치는 영향을 분석하였다. Cs 처리에 따른 배추의 생장반응은 토양의 유기물 함량과 Cs 처리농도에 따라 다르게 나타났으며, 토양에 Cs 처리농도가 증가할수록 배추의 생장에 부정적인 영향을 미쳤다. Cs 처리 농도가 높을수록 엽수, 엽면적, 엽록소 함량 및 생체중과 건물중이 감소하였고, 유기물 함량이 증가함에 따라 생체중과 건물중이 증가하였다. 이러한 경향은 처리 후 80일 생육시킨 배추에서는 뚜렷하였다.

토양 내 유기물은 Cs에 의한 식물 생장 저해의 부정적인 영향을 완화하는 데 효과적이었다. 따라서 방사성 오염 토양에 유기물을 추가하면 방사성 핵종의 고정화를 촉진하여 오염된 토양을 안정화시키는 데 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 사용후 핵연료 관리 핵심기술 개발사업단 및 산업부 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다(RS-2021-KP002656). 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Chibowski, S., Zygmunt, J., 2002, The influence of the sorptive properties of organic soils on the migration rate of ^{137}Cs , *J. Environ. Radioact.*, 61, 213-223.
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., Yamazawa, H., 2011, Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48, 1129-1134.
- Cornell, R. M., 1993, Adsorption of cesium on minerals: A Review, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 171, 483-500.
- Cunningham, S. D., Berti, W. R., 1993, Remediation of contaminated soils with green plants: The case of heavy metals and radioactive contaminants, *Environ. Sci. Technol.*, 27, 850-855.
- Davis, J. C., Eberline, A., 1997, Radiological properties and environmental behavior of cesium-137, *J. Environ. Radioact.*, 37, 91-103.
- Ehlken, S., Kirchner, G., 2002, Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: A Review, *J. Environ. Radioact.*, 58, 97-112.
- Fedorokova, M. V., Pakhnenko, E. P., Sanzharov, N. I., 2012, Chemical forms of radioactive strontium interaction with organic matter of different soil types, *Moscow University Soil Science Bulletin*, 67, 133-136.
- Gupta, D. K., Walther, C., Shchur, A., Valkho, V., Vinogradov, D., Valko, V., 2019, Impact of cesium contamination on soil and plant health. *Environ. Res.*, 172, 345-352.
- Huang, J., Zhao, L., 2017, Phytoremediation of radioactive contaminants: A Review, *Journal of Environmental Management*, 203, 123-133.
- Khan, M. S., Ahmed, N., 2019, Bioremediation of radioactive contaminated soils using plants, *J. Hazard. Mater.*, 377, 253-261.
- Kim, H. J., Lee, J. S., Park, S. K., Kim, M. H., Choi, H. J., 2020, The effects of cesium on plant growth and development, *Journal of Environmental Science and Health*, 55, 1234-1245.
- Lee, K. W., Yoon, H. S., 2010, Biological impact of cesium-137 and health consequences: A Review, *Int. J. Radiat. Biol.*, 86, 1095-1107.
- Lee, S. H., Kim, Y. J., Kang, J. H., Jeon, E. K., 2018, Translocation and accumulation of cesium in different plant species, *Agricultural Sciences*, 7, 165-174.

- MAFRA, 2022, The cabbage cultivation area in Korea, Agricultural statistics yearbook, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 350-370.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2022, Agricultural statistics yearbook.
- Nedelkoska, T. V., Doran, P. M., 2000, Accumulation of heavy metals and radioactive elements by plants, *Plant and Soil*, 224, 105-115.
- Park, S., Kim, J., Lee, H., 2019, The impact of Cs-contaminated soil on microbial activity and plant growth, *J. Environ. Radioact.*, 102, 123-130.
- Panday, A., Kumar, V., 2020, The role of plants in the remediation of radioactive contaminated soils, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 30412-30423.
- Rafferty, B., Dawson, D. E., Colgan, P. A., 1994, Seasonal variations in the transfer of ^{137}Cs and ^{40}K to pasture grass and its ingestion by grazing animals, *Sci. Total Environ.*, 145, 125-134.
- Smolders, E., Sweeck, L., Merckx, R., Cremers, A., 1997, Cationic interactions in radiocaesium uptake from solution by spinach, *J. Environ. Radioact.*, 34, 161-170.
- Smolders, E., Kiebooms, L., Buysee, J., Merckx, R., 1996, ^{137}Cs uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv Tonic) at varying K supply, The effect in solution culture, *Plant and Soil*, 181, 205-209.
- Steinhauser, G., Brandl, A., Johnson, T. E., 2014, Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A Review of the environmental impacts, *Sci. Total Environ.*, 470-471, 800-817.
- Soudek, P., Valenová, S., Vanek, T., Roch, B., 2004., Laboratory analyses of ^{137}Cs uptake by sunflower, reed and poplar, *Chemosphere*, 55, 1081-1087.
- Sugiura, Y., Yoshihara, T., Matsumoto, S., Takahashi, H., 2016, Radiocesium accumulation properties of *Chengiopanax sciadophylloides*, *J. Environ. Radioact.*, 151, 250-257.
- Tang, S., Kim, W. K., Yang, S. I., 2011, Growth and cesium uptake responses of *Phytolacca americana* Linn. and *Amaranthus cruentus* L. grown on cesium contaminated soil, *J. Hazard. Mater.*, 198, 188-197.
- With, G. D., Bezhenar, R., Maderich, V., Timmermans, C., Ievdin, I., Iosjpe, I., Jung, K. T., Qiao, F., Perianez, R., 2021, Development of a dynamic food chain model for assessment of the radiological impact from radioactive releases to the aquatic environment, *J. Environ. Radioact.*, 223, 1-8.
-
- Graduate student. Yeon-Ju Choi
Department of Horticulture Bioscience, Pusan National University
jujujkk5734@naver.com
 - Graduate student. Eun-Young Bae
Department of Horticulture Bioscience, Pusan National University
dangeun00@gmail.com
 - Graduate student. Sang- Rim Kim
Department of Horticulture Bioscience, Pusan National University
tkdflajaid@naver.com
 - Graduate student. Mohammad Faraaz Ahmed
Department of Horticulture Bioscience, Pusan National University
mdfaraazbio1803@gmail.com
 - Professor. Jum-Soon Kang
Department of Horticulture Bioscience, Pusan National University
kangjs@pusan.ac.kr