

ORIGINAL ARTICLE

# 토양 처리된 스트론튬이 다양한 유기물 함량 조건에서 무의 생육에 미치는 영향

김상림 · 모함마드 파라즈 아흐메드 · 이지구 · 맥 셰릴 술란 찰스 엠파랑 · 조민건 · 정대근 · 김민재 · 강점순\*  
부산대학교 원예생명과학과

## Influence of Soil Strontium Concentration on Growth of Radish under Varying Organic Matter Content

Sang Rim Kim, Faraaz Ahmed Mohammad, Ji Gu Lee, Mac Cheryl Sulan Charles Emparang,  
Min Geon Cho, Dae Geun Jeong, Min Jae Kim, Jum-Soon Kang\*  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

### Abstract

This study evaluated the effects of soil strontium (Sr) concentration and organic matter content on the growth and physiological responses of radish (*Raphanus sativus* L.) using strontium chloride hexahydrate ( $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) as a non-radioactive surrogate for radioactive  $^{90}\text{Sr}$ . Sr, has chemical properties similar to those of calcium (Ca), and can competitively interfere with  $\text{Ca}^{2+}$  uptake and function in plants, which is relevant for assessing  $^{90}\text{Sr}$  transfer in crops. Radish was cultivated under controlled greenhouse conditions ( $20^\circ\text{C}$ ), and growth was recorded after 50 and 80 days with varying Sr concentrations (50, 100, and  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and soil organic matter levels (5, 10, and 15%). After 50 days, a trend of reduced biomass was observed with increasing Sr concentration, however, the differences were not statistically significant. After 80 days, Sr-induced growth inhibition became evident in a concentration-dependent manner. High Sr treatment ( $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) significantly reduced the number of leaves, leaf area, root length, fresh weight, and dry weight. Soil organic matter addition partially increased dry matter accumulation, however its mitigating effect was limited under prolonged Sr exposure owing to continued Sr accumulation in plant tissues. These results indicate that Sr negatively affects radish growth and biomass in a dose and duration dependent manner, and that organic matter amendment alone is insufficient to alleviate Sr toxicity. This study provides fundamental insights into the physiological mechanisms underlying Sr induced growth inhibition and offers useful data for managing  $^{90}\text{Sr}$  transfer and mitigating soil contamination in affected agricultural systems.

**Key words** : Organic matter content, Radionuclide, Seedling growth, Strontium

### 1. 서 론

스트론튬(Strontium, Sr)은 자연계에 존재하는 알칼리 토금속 원소로, 안정동위원소와 방사성 동위원소 형태로 구분된다. 특히 방사성 스트론튬-90( $^{90}\text{Sr}$ )은

핵분열 반응에서 생성되는 대표적 장주기 방사성 핵종으로 반감기가 약 28.8년에 달하며, 환경 중에서 화학적, 생물학적 이동성이 높은 오염원으로 알려져 있다 (Nisbet and Woodman, 2000; Zhu, and Shaw, 2000). Sr은 칼슘(Ca)과 유사한 화학적 성질을 가지게

Received 19 November, 2025; Revised 1 December, 2025;

Accepted 2 December, 2025

\*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.

된다. 따라서 토양에서 용해된  $Sr^{2+}$ 는 식물의 Ca 흡수 경로를 통해 쉽게 유입된다(White and Broadley, 2003). 이는 농작물의 생리적 기능 및 오염된 식물체 섭취를 통해 인간에게 내부 피폭으로 이어질 수 있어 환경, 농업적 위해성이 크다(Sysoeva et al., 2005; Burger and Lichtscheid, 2019; Ujwal et al., 2022).

식물체 내에서 Sr 흡수는  $Ca^{2+}$ 와 경쟁적으로 이루어져, Sr 처리 시 식물의 받아들임 감소, 생장 저해, 엽록소 함량 감소, 산화적 스트레스 증가 등 다양한 생리-대사적 장애가 보고되었으며(Panda et al., 2016; Yan, et al., 2022; Kim et al., 2025), 이러한 영향은 토양 특성, 식물 종, 생육단계에 따라 유의하게 달라지는 것으로 알려졌다(Ujwal et al., 2022).

방사성 Sr-90의 실제 실험적 사용은 방사선 안전관리, 시설 규제, 폐기물 처리 문제로 인해 제한적이기 때문에, 안정된 동위원소 스트론튬 화합물을 이용한 대체 연구가 일반적이다. 특히 Strontium chloride hexahydrate ( $SrCl_2$ )는 토양-식물계에서 Sr의 거동을 재현하는데 적합한 비방사성 대체물로 널리 활용되고 있으며(Srikhumsuk et al., 2023; Fu et al., 2024), Sr-90의 환경 중 이동성과 생물유효도 평가를 위한 실험 모델로 높은 활용 가치를 가진다. 한편 방사성 핵종의 식물 흡수를 감소시키기 위한 토양 관리 기술 중 유기물 투입은 대표적인 완화 전략으로 제시되고 있다(Zhu and Smolders, 2000). 유기물은 토양의 양이온 교환능(CEC)을 증가시키고, 유기물의 음전하가  $Sr^{2+}$ 와 같은 양이온을 흡착하거나 불용성 구조로 고정화하여 식물 이용성을 낮추는 것으로 알려져 있다(Rusli et al., 2022).

우리나라에서 널리 대표적인 근채류인 무는 뿌리 발달이 왕성해 토양 오염물질의 흡수 및 전이 특성을 평가하기 위한 적합한 모델 작물이다. 그럼에도 불구하고 Sr 오염 토양에서 무의 생육 반응, 생리적 피해 증상, 그리고 유기물 첨가 시 Sr 거동 변화에 대한 체계적인 연구는 제한적이었다.

이에 본 연구는 방사성 Sr-90의 비방사성 대체물질인  $SrCl_2$ 를 무 재배 토양에 처리한 후 작물의 생육 반응 및 피해 증상을 검정하고, 유기물이 스트론튬 거동에 미치는 영향을 규명하는 것으로 목표로 한다. 따라서 본 연구는 방사성 Sr-90 거동 연구를 위해 비방사성 대체물질인 염화스트론튬  $SrCl_2$ 를 무 재배 토양에 처리하는 방법을 채택하고(Burger and Lichtscheidl, 2019),

토양 유기물 함량 증가는 Sr의 토양-식물체 전이를 감소시켜 무의 생육 저해를 완화할 수 있다라는 가설 설정하여, 유기물 수준별 Sr의 무 생육 저해 반응과 거동 특성을 정량적으로 규명하는 것을 최종 목표로 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 토양조성 및 스트론튬(Sr) 처리

본 실험은 부산대학교 내 유리온실(벤로형, 86.4  $m^2$ ; 28.8 m × 3 m)에서 수행되었으며, 재배온도는 20°C를 유지하였다. 시험에 사용된 무 품종은 청자무(Jinheung, Gyeonggi-do, Korea)였다. 포트 재배를 위해 고실벤치를 설치하고, 1/5,000 Wagner 포트에 혼합토양을 80% 채운 후 2주간 안정화 과정을 거쳤다.

토양은 피트모스(PRO-MOSS TBK), 수도용 상토(Seonghwa, Boseong, Korea), 유기질 비료(Hyeondaeteugsan, Gimhae, Korea)를 혼합하여 조성하였다. 유기물 함량은 혼합비(volume ratio) 기준으로 5% (peat moss 20 : organic matter 22 : bed soil 400, v/v), 10% (peat moss 20 : organic matter 47 : bed soil 400, v/v), 15% (peat moss 20 : organic matter 74 : bed soil 400, v/v)로 설정하였다. 최종 pH는 토양 유기물 함량 5%, 10%, 15% 혼합 토양에서 각각 5.5, 5.65, 5.75였으며, EC는 0.1, 0.15, 0.20  $dS \cdot m^{-1}$ 로 측정되었다.

실험에 사용된 50–200  $mg \cdot kg^{-1}$  농도는 뿌리 작물에 설정된 임계 식물 독성 한계를 초과하지 않으면서, 유기물에 의한 Sr 고정(immobilization) 및 무(Raphanus sativus)로의 토양-식물 평가를 용이하게 토양 오염 수준을 모사하기 위해 선정되었다(Kabata-Pendias, 2011; IAEA, 2014).

혼합토양에는 strontium chloride hexahydrate ( $SrCl_2 \cdot 6H_2O$ , CAS No. 10025-70-4; Daejung Chemicals, Korea)를 0, 50, 100, 200  $mg \cdot kg^{-1}$  수준의 농도로 처리하였다. 비오염 대조구는 동일한 유기물 함량의 토양에 Sr을 처리하지 않았다. 각 처리구는 난괴법(RCBD)으로 3반복 배치하였으며, 본업이 2매 전개된 무를 처리구 당 3주씩 포트에 식재하였다. 실험에서는 방사성 핵종 Sr-90 대신  $SrCl_2$ 를 사용하였다. Sr-90을 이용할 경우 방사성 물질 취급 자격증과 전용 실험실이 필요하므로, 본 실험에서는 방사성 Sr-90 대신 비방사성 대체물질인  $SrCl_2$ 를 사용하였다.

**Table 1.** Effects of Sr treatment with varying organic matter content on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height, root length for various growth state of radish at 20°C in greenhouse

Radio-nuclide	Organic matter (%)	Radio-nuclide conc.(mg·kg <sup>-1</sup> )	No. of leaves	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Leaf		Plant height (cm)	Root length (cm)	
					Length (cm)	Width (cm)			
<i>Growth stage: 50 days</i>									
Sr	5	50	7.5	599.3	22.1	9.0	33.5	27.4	
		100	9.0	831.8	22.4	8.5	32.5	25.7	
		200	6.5	507.0	21.4	8.1	29.5	15.6	
		Untreated	8.0	573.0	24.0	8.0	28.3	22.1	
		Means	7.8	627.8	22.5	8.4	31.0	22.7	
		50	6.5	518.2	16.4	6.5	23.4	19.8	
	10	100	7.5	590.3	17.8	6.8	25.3	16.9	
		200	7.5	545.1	22.0	8.6	29.0	20.8	
		Untreated	9.0	613.7	22.1	9.5	28.2	22.7	
		Means	7.6	566.8	19.6	7.9	26.5	20.1	
		50	7.5	541.2	21.7	8.7	25.7	21.4	
		100	8.5	598.2	21.4	7.8	28.2	22.4	
	15	200	7.0	566.1	21.5	8.9	28.9	21.3	
		Untreated	8.5	598.2	22.8	10.2	25.6	23.9	
		Means	7.9	575.9	21.9	8.9	27.1	22.3	
		Significances							
	Organic matter(A)			NS <sup>z</sup>	*	NS	NS	*	NS
	Radionuclide conc.(B)			*	NS	NS	NS	NS	NS
A × B			NS	NS	NS	NS	NS	NS	
<i>Growth stage: 80 days</i>									
Sr	5	50	12.0	1446.4	19.1	6.0	36.8	15.5	2.5
		100	13.5	1425.1	20.4	5.9	41.7	14.6	1.6
		200	17.0	1219.3	9.1	2.1	40.9	17.2	2.3
		Untreated	7.0	961.9	34.5	10.6	40.4	15.3	1.2
		Means	7.8	634.9	20.78	6.2	40.0	15.7	1.9
		50	11.0	1008.6	13.8	4.9	33.4	15.4	1.3
	10	100	12.0	1264.9	18.2	5.4	35.5	23.3	2.1
		200	8.5	1003.7	18.2	8.2	38.3	12.8	1.4
		Untreated	7.0	551.2	36.8	9.7	37.2	15.5	1.5
		Means	7.9	579.0	21.8	7.1	36.1	16.8	1.6
		50	9.5	805.9	17.1	2.6	34.5	14.4	1.5
		100	10.5	988.2	14.2	3.0	37.5	15.9	1.7
	15	200	17.5	655.6	11.8	2.8	37.0	18.3	2.2
		Untreated	11.0	1215.2	34.3	8.4	35.7	14.1	1.5
		Means	7.9	916.23	19.4	4.2	36.2	15.7	1.7
		Significances							
	Organic matter(A)			NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Radionuclide conc.(B)			*	*	***	**	NS	NS
A × B			NS	NS	NS	*	NS	NS	

<sup>z</sup>NS, \*, \*\* or \*\*\* Nonsignificant or significant at  $P < 0.05$ , 0.01 or 0.001, respectively

## 2.2. 작물재배 및 생육 조사

무의 비배관리는 농촌진흥청 재배법에 준하여 실시하였고, 생육조사는 스트론튬( $\text{SrCl}_2$ )을 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  $1 \text{ cm}^2$  이상인 것을 조사하였으며, 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3000, LI Cor., USA)를 이용하였다. 엽록소 함량은 3번째로 전개한 본엽의 3 지점을 chlorophyll meter (SPAD-502, Minolta Co., Ltd., Japan)을 이용하여 측정 후 평균값을 나타내었다.

엽장과 엽폭은 3번째로 전개된 본엽을 측정하였으며, 초장은 지상부의 최장 길이를 측정하였고, 근장은 뿌리의 가장 긴 부분을 측정하였다. 생체중은 생체 무게를, 건물중은  $70^\circ\text{C}$ 에서 72시간 건조 후 측정하였다.

## 2.3. 데이터 분석

모든 실험 데이터는 SAS 통계 프로그램(SAS 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 분석하였다. 실험 설계는 토양 유기물 수준(요인 A)과 Sr 처리 농도(요인 B)를 고정요인으로 한 요인배치법(해방방식)  $A \times B$  이원 분산분석(two-way ANOVA)으로 수행하였으며, 50일 및 80일 생육 단계의 자료는 각각 독립적으로 분석하였다. 각 처리구의 반복 3개체 평균값을 통계 분석에 사용하였으며, 포트 1개에 개체 1개를 정식하였다.

분산분석에서 주효과 또는 교호작용이 유의한 경우 ( $P < 0.05$ ), 처리 평균 간 비교를 위해 LSD (Least Significant Difference) 검정을 95% 신뢰수준에서 실시하였다. 표의 유의성 표기는 NS(비유의), \*, \*\*, \*\*\*는 각각  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$  수준에서 유의함을 의미한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Sr 처리 및 토양유기물이 무의 생육에 미치는 영향

온실( $20^\circ\text{C}$ ) 조건에서 토양 내 Sr 농도(50, 100, 200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )와 유기물 수준(5, 10, 15%)이 무의 생육에 미치는 영향을 50일과 80일 두 생육단계에서 평가하였다

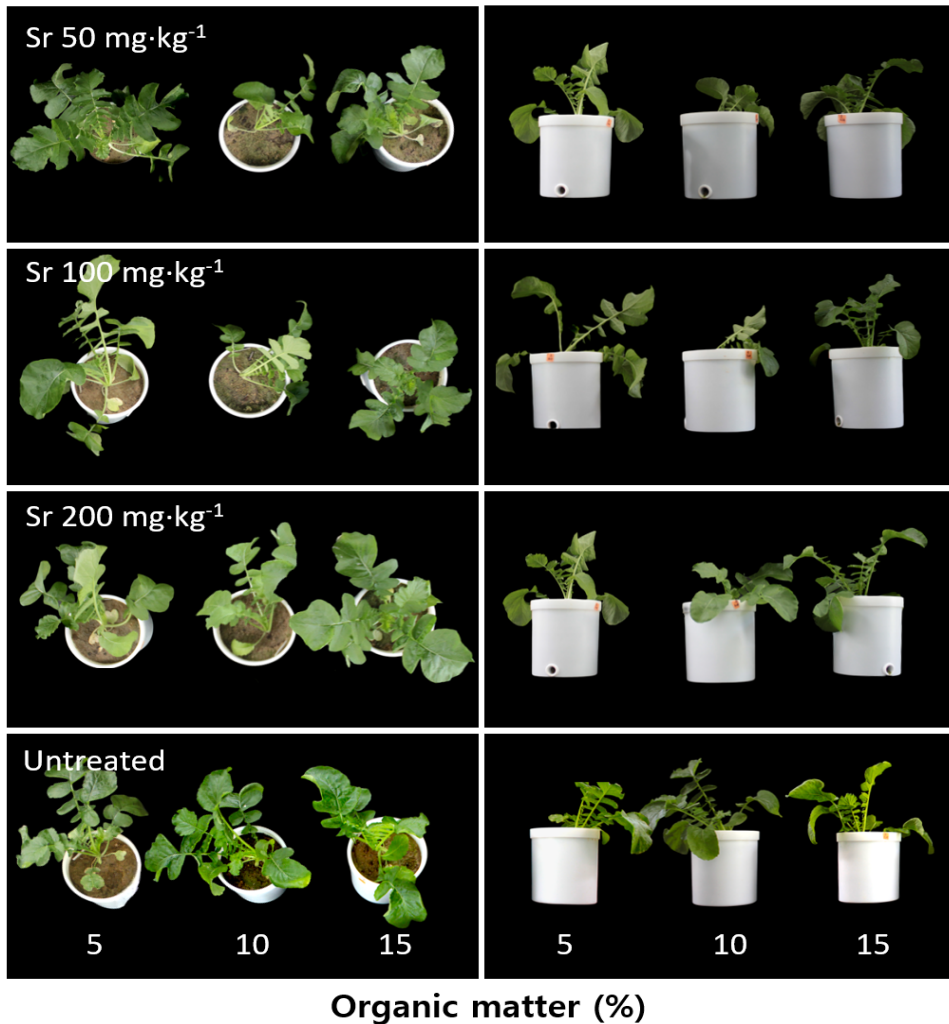
(Table 1). 주요 생육지표로 엽수, 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장, 근장을 분석하였다.

50일 생육단계에서 유기물 수준은 엽면적과 초장에서 유의한 영향을 미쳤으며(Fig. 1), 엽수, 엽장, 엽폭, 근장에는 통계적인 차이가 나타나지 않았다. 그러나 유기물 함량을 5%에서 10-15% 증가시켜도 엽면적과 초장이 추가적으로 증가하지 않았고, 일부 처리에서는 오히려 5% 처리보다 낮은 값을 보여, 유기물 수준이 일정 수준을 초과하면 생육 촉진 효과가 더 이상 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 판단된다. 이는 유기물이 일반적으로 양분 보유력 개선, 토양 구조 안정화, 미생물 활성 증가 등에 기여하더라도, 본 실험 조건에서는 유기물 함량을 높이는 것이 반드시 생육 향상으로 직결되지는 않음을 시사한다(Schaetzl and Thompson, 2015).

Sr 농도는 50일 생육단계에서 엽수에만 유의한 영향을 미쳤으며, 엽면적, 엽장, 근장 등 기타 생육지표에는 통계적 차이가 나타나지 않았다. 그러나 저농도인 Sr 50-100  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리에서는 엽수 및 엽면적이 상대적으로 양호하였으나, 200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  고농도 처리에서는 엽수 감소와 더불어 엽면적과 초장 등이 감소하였다.

이는 저농도의 Sr 처리에서는 Sr이 Ca와 구조적으로 유사한 이온 특성 때문에 일시적으로 세포벽 안정화에 긍정적으로 작용할 수 있다. 따라서 농도가 높아지면  $\text{Ca}^{2+}$ 에 대한 경쟁적 흡수를 유발하여 세포벽 펙틴 결합, 막 안정성, 세포 신장 과정이 저해되어 생육이 억제되는 것으로 해석된다(White and Broadley, 2003; Krzeslowska, 2011).

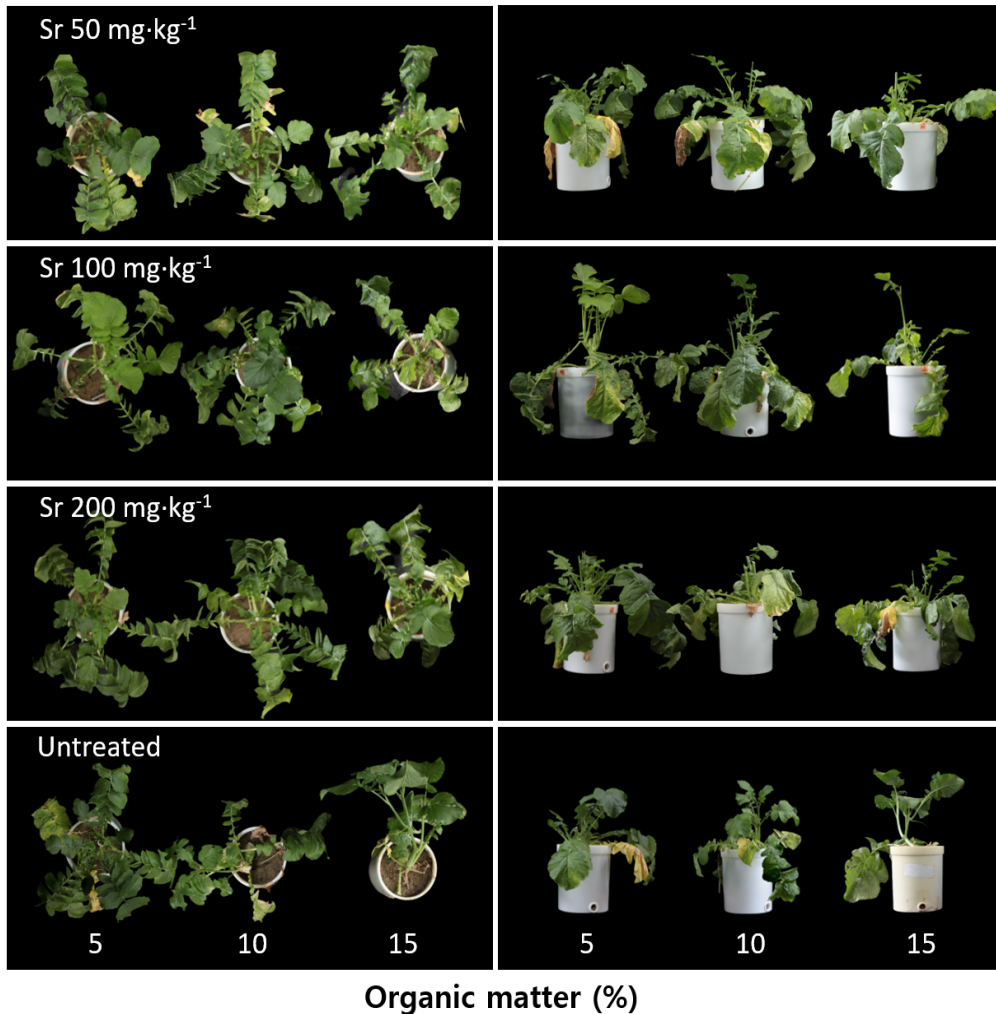
80일 생육단계에서는 50일과 달리 Sr 농도의 영향이 여러 생육지표에서 유의한 영향을 미쳤다(Table 1, Fig. 2). 엽수, 엽면적, 엽장 등에서 Sr 처리농도 간 차이가 나타났으나, 모든 지표에서 고농도 Sr 처리구가 항상 무처리구보다 낮은 값을 보인 것은 아니었고, 일부 조합에서는 Sr 200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리에서 엽수나 엽면적이 무처리구보다 높게 나타나는 등 생육 반응이 지표별로 상이하게 나타났다. 그럼에도 불구하고, 특히 고농도 Sr 처리에서 엽장과 엽폭 감소, 잎의 형태적 왜곡, 일부 처리구에서의 생장 저하 양상이 관찰되어, 장기 노출 조건에서 Sr에 의한 생육 저해 경향이 부분적으로 확인되었다. 이러한 변화는 Sr이 시간이 경과할수록 Ca를 부분적으로 대체하여 세포벽 구조를 교란하고, 활성산소 축적 및 동화산물 이동성 저해 등을 유발하기 때문으로 해석할 수 있다(Shahid et al., 2014; Qiu et al., 2021).



**Fig. 1.** Effects of strontium (Sr) treatment using  $\text{SrCl}_2$  on radish growth after 50 days under soil organic matter levels of 5%, 10%, and 15%

80일 생육단계에서 유기물과 Sr 농도의 상호작용은 대부분 유의하지 않았으나, 엽폭에서만 유의하였는데, 이는 유기물에 포함된 음전하 콜로이드가  $\text{Sr}^{2+}$ 의 일부 흡착하여 유효도를 낮춘 결과로 해석된다(Zhang et al., 2020). 전반적인 생육 수준을 뚜렷하게 회복시키거나 Sr 독성을 일관되게 완화하는 수준에는 이르지 못한 것으로 보인다. 이러한 경향은 유기물 단독 첨가만으로는 Sr의 식물 이용 가능성을 충분히 감소시키기 어렵다는 기존 보고와도 대체로 일치한다(Wang et al., 2017; Liu et al., 2023).

Sr의 생리적 영향은 농도 의존적이지만 생육지표별 반응 양상이 서로 상이하며, 장기 노출 조건에서도 모든 지표에서 선형적인 농도-반응 관계가 명확하게 나타나는 것은 아니었다. 본 시험에서 관찰된 Sr에 대한 생육 반응은 농도 자체뿐 아니라 노출 기간, 생육 단계, 지상부, 지하부 부위별 민감도 차이 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석되며, 고농도 Sr 처리에서 관찰된 엽장, 엽폭 감소 및 일부 생육 저하는 Sr의 Ca 대체 메커니즘과 광합성 저해 효과를 반영하는 특징적 반응으로 볼 수 있다.



**Fig. 2.** Effects of strontium (Sr) treatment using  $\text{SrCl}_2$  on radish growth after 80 days under soil organic matter levels of 5%, 10%, and 15%

### 3.2. 스트론튬 처리농도와 토양유기물 함량이 무의 건물 생산에 미치는 영향

Sr 처리 농도와 토양 유기물 수준이 무의 생육 및 생체, 건물 생산에 미치는 영향을 20°C 온실 조건에서 50일과 80일에 평가하였다(Table 2). Sr 처리에 따른 무의 생육과 바이오매스 생산은 지표별, 처리별로 상이하게 나타났으며, 일부 조건에서 고농도 Sr 처리에서 생육 및 바이오매스 감소 양상이 관찰되었다. 이러한 변화는 Sr이 식물체 내에서  $\text{Ca}^{2+}$ 의 기능을 부분적으로 대체하거나 경쟁적으로 억제함으로써 세포의 생리적

균형을 교란한 결과로 해석될 수 있다(Burger and Lichtscheidl, 2019; Qiu et al., 2021).

50일 생육단계에서 지상부 및 뿌리 생체중은 Sr 농도 및 토양 유기물 수준에 따른 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았으며, 무처리와 비교했을 때 Sr 처리구 간에도 증가와 감소가 혼재되어 명확한 감소 경향을 보이지 않았다. 다만 일부 처리에서 200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Sr 처리구의 생체중이 상대적으로 낮게 나타나는 등 고농도 Sr에 대한 민감 반응 가능성이 부분적으로 관찰되었다. 이는  $\text{Sr}^{2+}$ 가  $\text{Ca}^{2+}$ 와 유사한 이온 반경과 전하를 가져

**Table 2.** Effects of Sr treatment with varying organic matter content on fresh weight and dry weight for various growth state of radish at 20°C in greenhouse

Radio-nuclide	Organic matter (%)	Radio-nuclide conc.(mg·kg <sup>-1</sup> )	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)			Chlorophyll (SPAD unit)		
			Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total			
<i>Growth stage: 50 days</i>											
Sr	5	50	51.1	4.2	55.3	2.9	0.3	3.2	39.2		
		100	55.6	4.2	59.8	3.2	0.3	3.6	37.9		
		200	29.7	1.8	31.4	1.8	0.2	2.0	40.1		
		Untreated	28.6	2.1	30.6	1.9	0.2	2.1	45.9		
		Means	41.3	3.1	44.3	2.5	0.3	2.7	39.1		
		50	21.9	0.8	22.7	1.1	0.1	1.2	36.9		
	10	100	25.6	1.3	26.8	1.1	0.1	1.2	38.4		
		200	35.5	2.7	38.2	2.0	0.2	2.2	40.0		
		Untreated	34.9	2.2	37.1	2.3	0.2	2.4	44.8		
		Means	29.5	1.8	31.2	1.6	0.2	1.8	38.6		
		50	34.8	1.7	36.5	1.0	0.2	1.2	39.2		
		100	46.2	2.5	48.7	2.1	0.2	2.3	43.5		
	15	200	35.6	2.8	38.3	2.3	0.2	2.5	38.2		
		Untreated	33.1	2.3	35.5	2.1	0.2	2.3	42.5		
		Means	37.4	2.3	39.8	1.9	0.2	2.1	39.9		
		Significances									
		Organic matter(A)			NS <sup>z</sup>	NS	NS	*	NS	*	NS
		Radionuclide conc.(B)			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
A × B			NS	NS	NS	*	NS	*	NS		
<i>Growth stage: 80 days</i>											
Sr	5	50	127.1	35.7	162.8	10.9	3.3	14.2	40.2		
		100	126.6	12.3	139.0	9.6	1.1	10.7	41.8		
		200	112.4	26.7	142.1	10.0	2.8	12.8	41.8		
		Untreated	48.0	8.8	56.8	4.8	1.2	6.0	43.4		
		Means	103.53	20.88	125.18	8.82	2.10	10.93	39.1		
		50	82.1	10.4	92.5	7.0	1.0	8.0	36.3		
	10	100	108.4	22.7	131.0	8.7	2.0	10.8	36.7		
		200	88.2	6.4	94.6	7.1	3.6	10.8	32.6		
		Untreated	73.3	14.1	87.4	7.1	1.6	8.7	36.8		
		Means	88.00	13.40	101.38	7.48	2.05	9.57	38.6		
		50	87.8	16.1	103.8	7.8	1.7	9.5	42.3		
		100	93.4	8.8	102.1	7.0	0.6	7.6	32.7		
	15	200	139.3	35.8	175.0	12.5	3.6	16.0	41.6		
		Untreated	89.6	11.9	101.5	6.7	1.1	7.9	37.7		
		Means	102.53	18.15	120.60	8.50	1.75	10.25	39.9		
		Significances									
		Organic matter(A)			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
		Radionuclide conc.(B)			*	NS	NS	NS	NS	NS	*
A × B			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		

<sup>z</sup>NS or \* Nonsignificant or significant at P 0.05, respectively

Ca<sup>2+</sup> 흡수 경로를 통해 유입되며, 세포벽 펙틴 결합 및 세포막 안정성 유지에 필요한 Ca<sup>2+</sup> 작용을 부분적으로 방해할 수 있기 때문에 해석된다(White and Broadley, 2003). 또한 Sr에 의한 Ca 의존적 신호전달 교란은 칼모듈린(CaM) 활성 변화를 유도하여 초기 잎 성장과 뿌리신장신장에 부정적 영향을 줄 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2009).

뿌리 생체중 감소가 잎보다 더 민감하게 나타난 것은 Sr 독성이 근단 분열 조직을 직접적으로 억제하고, 이온 불균형에 따른 삼투 조절 이상을 유발하기 때문으로 추정된다(Shahid et al., 2014). 뿌리는 Ca 요구도가 높은 기관이므로 Sr-Ca 길항작용이 보다 뚜렷하게 발현될 수 있다.

건물중은 유기물 수준에 따라 미세한 차이가 있기는 했으나, 유기물 증가에 따른 일관적인 증가 또는 감소 패턴은 나타나지 않았다. 이는 유기물 증가에 따른 양이온교환용량(CEC) 향상으로 토양에서 Sr<sup>2+</sup>의 흡착이 증가하여 식물체로의 유효도가 부분적으로 낮아졌기 때문으로 판단된다(Zhu and Smolders, 2000). 그러나 이러한 완충 효과는 생체중 증가로 이어지지 않았으며, 식물체 내부에서 이미 Sr에 의한 Ca 대체 및 신호전달 교란이 진행되고 있어 생육 초기 단계부터 피해가 누적된 것으로 해석된다.

엽록소 함량(SPAD)은 50일 단계에서 Sr 농도 및 유기물에 따른 유의한 차이가 없었으며, 80일 단계에서는 Sr 농도 간 유의한 차이가 확인되었으나 감소 폭은 크지 않았다. 일부 고농도 처리구에서는 SPAD 값이 미세하게 낮아지는 양상이 관찰되었으며, 이는 Sr이 Mg 생합성 과정 또는 광합성 관련 효소 메커니즘을 간접적으로 교란하여 엽록소 축적을 약하게 억제했기 때문으로 해석된다(Shahid et al., 2014).

80일 단계에서는 Sr 농도 증가에 따른 생체중, 건물중 감소가 일부 조합에서 나타났으나, 모든 유기물 수준에서 일관된 농도-반응 관계를 보이지는 않았다. 예를 들어 일부 처리에서는 Sr 처리구의 생체중이 무처리보다 높게 나타나는 경우도 존재하였다. 이는 Sr의 조직 내 축적이 장기간 누적되더라도, 생육 반응이 유기물 수준, 생육단계, 부위별로 다르게 나타나는 복합적 작용에 의해 결정되기 때문으로 판단된다.

무는 뿌리가 주요 저장기관인 작물이므로 근부로 Sr이 상대적으로 많이 축적될 수 있고, 이는 근권 이온 불균형과 삼투 조절 이상을 유발하여 생육에 영향을 줄 수

있다(Shahid et al., 2014). 그러나 본 실험 범위 내에서는 Sr 처리에 따른 생체중, 건물중 저해가 일부 조건에서만 부분적으로 나타났으며, 전반적 패턴으로 일반화하기는 어려웠다. 토양 유기물 첨가는 생체중, 건물중, SPAD 모두에서 일관된 완화 효과를 보이지 않았으며, Sr 독성 저감 능력은 제한적으로 나타났다. 이는 유기물의 음전하 특성, Sr 농도 및 노출 기간, 무의 Ca 요구도 등 다양한 요인과 상호작용한 결과일 수 있다(Qiu et al., 2021).

본 연구 결과 Sr 처리는 무의 생육 및 생리적 반응에 영향을 줄 잠재력을 가지고 있으나, 바이오매스 및 엽록소 반응은 지표별, 처리별로 상이하게 나타났으며 농도-반응 관계가 일관적으로 나타나지는 않았다. 또한 유기물 첨가만으로 Sr 독성을 충분히 완화하기는 어려웠으며, Sr은 식물 내 Ca 이동 경로를 따라 뿌리-지상부-저장기관으로 전이되어 식품사슬을 통해 생태계 및 인간에 영향을 미칠 수 있다(Tsukada et al., 2005; Zhang et al., 2020). 따라서 Sr 오염 지역에서는 유기물 관리만으로는 충분하지 않으며, 토양 정화 및 전이계수 관리 등 종합적 대응 전략이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구는 방사성 핵종인 스트론튬-90(<sup>90</sup>Sr)을 대체 물질은 strontium chloride hexahydrate (SrCl<sub>2</sub>)를 이용하여 토양 내 Sr 농도와 유기물 함량이 무의 생육 및 생리 반응에 미치는 영향을 평가하였다.

Sr은 Ca와 유사한 이온 특성으로 식물 내 Ca<sup>2+</sup> 흡수와 기능을 경쟁적으로 교란하며, 이는 방사성 Sr-90의 식물 전이 평가와도 관련이 있다. 20°C 온실 조건에서 Sr 처리농도(50, 100, 200 mg·kg<sup>-1</sup>)와 토양 유기물 수준(5, 10, 15%)을 달리하여 50일과 80일간 무를 재배한 결과, 50일 단계에서는 Sr 농도 증가에 따른 생체중 감소 경향이 관찰되었으나 통계적 유의성은 제한적이었다.

반면 80일 단계에서는 Sr 농도 증가에 따른 생육 저해 경향이 50일에 비해 보다 분명하게 나타났으며, 특히 200 mg·kg<sup>-1</sup> 고농도 처리에서 엽수, 엽면적, 뿌리 길이, 생체중 및 건물중이 전반적으로 감소하는 양상이 관찰되었다. 다만 일부 지표에서는 고농도 처리구가 무처리보다 높은 값을 보이기도 하여, Sr의 영향이 지표별로 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.

토양 유기물 첨가는 일부 처리에서 건물중을 부분적으로 증가시키는 등 생육에 긍정적인 영향을 보였으나, 장기 노출 시에는 식물체 내 Sr 축적이 지속되어 독성 완화 효과는 제한적이었다. 이는 본 연구에서 사용된 유기물의 종류와 특성, Sr 농도 및 노출 기간, 무의 높은 Ca 요구도 등으로 인해 선행 연구에서 보고된 것과 같은 강한 Sr 억제 효과가 충분히 발현되지 않았기 때문으로 해석된다. Sr은 처리농도와 노출 기간에 따라 무의 생육 및 바이오매스를 저해하지만, 유기물 첨가만으로는 Sr 독성을 충분히 상쇄하기 어려운 것으로 나타났다.

따라서 본 연구는 Sr 오염 토양에서 작물 생육 저해 메커니즘 이해와 방사성 Sr 전이 관리 및 토양 오염 대응 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료 관리핵심기술개발사업단 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구사업이다 (No. RS-2021-KP002656).

### REFERENCES

- Burger, A., Lichtscheid, I., 2019, Strontium in the environment, review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes, *Sci. Total Environ.*, 653, 1458-1512.
- Fu, S., Liu, D., Tian, Y., Xu, X., Shi, Z., 2024, Foliar application of strontium for the identification of roots from specific wheat plants, *Agriculture*, 14, 877.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2014, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments (Technical reports series No. 472), IAEA Publishing, Vienna, Austria.
- Kabata-Pendias, A., 2011, Trace elements in soils and plants (4th ed.), CRC Press, Boca raton, FL.
- Kim, M. C., Seo, H. M., Kim, S. G., Shin, S. K., 2009, Calcium- and calmodulin-mediated regulation of gene expression in plants, *Ann. Bot.*, 103, 439-449.
- Kim, S. R., Mohammad, F. A., Lee, J. G., Emparung, M. C. S. C., Cho, M. G., Jeong, D. G., Kim, M. J., Kang, J. S., 2025, Growth and biomass response of chinese cabbage to soil application of strontium chloride hexahydrate under different organic matter levels, *J. Bio-Env. Con.*, 34, 308-315.
- Krzeslowska, M., 2011, The cell wall in plant cell response to trace metals: Polysaccharide remodeling and its role in defense strategy, *Acta. Physiol. Plant.*, 33, 35-51.
- Liu, J., Zhang, X., Yang, J., Zhang, Y., Zhao, W., Zhao, X., 2023, Strontium alleviated the growth inhibition and toxicity of cadmium in rice seedlings by improving antioxidant defense system and modulating metal uptake, *Environ. Pollut.*, 316, 120876.
- Nisbet, A. F., Woodman, R. P. M., 2000, Soil to plant transfer factors for radiostrontium in agricultural systems, *Health Phys.*, 78, 279-288.
- Panda, S. K., Choudhury, S., Patra, H. K., 2016, Heavy metal induced oxidative stress in plants: Physiological and molecular perspectives, in: John Wiley & Sons (ed.), *Abiotic Stress in Plants*, Wiley, 203-229.
- Qiu, N., Tian, L., Yan, X., Dong, H., Zhang, M., Han, G., Zhou, F., 2021, The interplay between calcium and strontium in chinese cabbage under normal and low calcium conditions, *HortScience*, 56, 875-880.
- Rusli, L. S., Abdullah, R., Yaacob, J. S., Osman, N., 2022, Organic amendments effects on nutrient uptake, Secondary metabolites, and antioxidant properties of *Melastoma malabathricum* L., *Plants*, 11, 153.
- Schaetzl, R. J., Thompson, M. L., 2015, *Soils, Genesis and geomorphology*, 2nd (ed.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Srikhumsuk, P., Peshkur, T., Renshaw, J. C., Knapp, C. W., 2023, Toxicological response and bioaccumulation of strontium in *Festuca rubra* L. (red fescue) and *Trifolium pratense* L. (red clover) in contaminated soil microcosms, *Environ. Syst. Res.*, 12, 15.
- Sysoeva, A. A., Konopleva, I. V., Sanzharova, N. I., 2005, Bioavailability of radiostrontium in soil, Experimental study and modeling, *J. Environ. Radioact.*, 81, 269-282.
- Tsukada, H., Takeda, A., Takahashi, T., Hasegawa, H., Hisamatsu, S., Inaba, J., 2005, Uptake and distribution of <sup>90</sup>Sr and stable Sr in rice plants, *J. Environ. Radioact.*, 81, 221-231.
- Ujwal, P., Ranjan, R., Khandaker, M. U., Bradley, D. A., Jojo, P. J., 2022, Environmental transfer parameters of strontium for soil to grass pathway, *Sci. Rep.*, 12, 7385.

- Wang, X., Chen, C., Wang, J., 2017, Phytoremediation of strontium contaminated soil by *Sorghum bicolor* L. Moench and soil microbial community-level physiological profiles, CLPPs, Environ. Sci. Pollut. Res. Int., 24, 7668–7678.
- White, P. J., Broadley, M. R., 2003, Calcium in plants, Ann. Bot., 92, 487–511.
- Yan, D., Ding, K., He, Y., Fan, L., Che, Y., Zhao, Y., Jiang, X., 2022, Effect of strontium on nutrient uptake, physiological parameters, and strontium localization in lettuce, Environ. Sci. Pollut. Res. Int., 29, 34874–34886.
- Zhang, W., Kang, W., Wang, Q., Qiu, N., Chen, M., Zhou, F., 2020, The biological effects of strontium 88Sr on chinese cabbage, Plant Soil Environ. 66, 149–154.
- Zhu, Y. G., Shaw, C., 2000, Soil contamination with radionuclides and potential remediation, Chemosphere, 41, 121–128.
- Zhu, Y. G., Smolders, E., 2000, Plant uptake of radiocaesium, A Review of mechanisms, regulation and application, J. Exp. Bot., 51, 1635–1645.

- 
- Graduate Student. Sang Rim Kim  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
ksrim1135@pusan.ac.kr
  - Graduate Student. Faraaz Ahmed Mohammad  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
mdfaraazbio1803@gmail.com
  - Graduate Student. Ji Gu Lee  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
dlwlrn15@naver.com
  - Graduate Student. Mac Cheryl Sulan Charles Emparang  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
mcchryl@gmail.com

- 
- Graduate Student. Min Geon Cho  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
mg6188@naver.com
  - Graduate Student. Dae Geun Jeong  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
daegeunjeong99@gmail.com
  - Graduate Student. Min Jae Kim  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
atom0821@pusan.ac.kr
  - Professor. Jum-Soon Kang  
Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University  
kangjs@pusan.ac.kr