



상용 바이오차의 유기염소계 농약 endosulfan 흡착능 비교평가

배지연¹ · 이득영¹ · 최익원² · 이진환³ · 김진호^{1*}

¹경상대학교 농업생명과학연구원 (IALS) 응용생명과학부 농화학과, ²환경부 국립환경과학원 물환경공학연구원, ³동아대학교 생명자원과학대학 생명자원산업학과

Examination of Commercial Biochars to Compare Their Endosulfan Adsorption Properties

Ji-Yeon Bae¹, Deuk-Yeong Lee¹, Ik-Won Choi², Jin-Hwan Lee³ and Jin-Hyo Kim^{1*}

¹Department of Agricultural Chemistry, Division of Applied Life Science, Institute of Agriculture and Life Science (IALS), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

²Water Environmental Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon 22689, Republic of Korea

³Department of Life Resources Industry, Dong-A University, Busan 49315, Republic of Korea

(Received on September 10, 2019. Revised on September 16, 2019. Accepted on September 17, 2019)

Abstract Endosulfan was a widespread soil contaminant in Korean agricultural environment, and an eco-friendly carbonaceous adsorbent such as activated carbon and biochar was one of the candidates for soil remediation material. However, the information for biochar about its production, source material, and contaminant adsorption properties was not well introduced, unlike activated carbon. Thus, the commercially available biochars were collected total 14 in the Korean market and their endosulfan adsorption properties were compared with the physicochemical properties like pH, H/C, O/C, specific surface area and pore volume. In here, the biochars that had over 350 m²/g of the specific surface area showed a potent endosulfan adsorption property (45.2-68.1% of adsorption ratio). On the other hand, 43% of total collected biochars that had below 20 m²/g of the specific surface area showed no endosulfan adsorption properties. In addition, H/C and O/C ratio showed no relationship with endosulfan adsorption properties of biochar.

Key words Commercial biochar, Specific surface area, Endosulfan, Adsorption

서 론

유기염소계 농약은 1950년대 이후 DDT, endosulfan 등 다양한 종류가 개발되어 살충제로 주로 사용되어 왔으며, 농산물의 생산량 증가, 품질 향상 및 노동력 절감 등에 역할을 하는 필수 영농 자재로 기여하였다. 하지만, 유기염소계 농약은 DDT와 endosulfan과 같이 잔류성이 길고, 생물농축성과 독성이 높으며, 장거리 이동성이 있어 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)로 분류되었고, 이들 농약의 생산과 사용, 그리고 배출은 법적으로 규제되

고 있다(Choi et al., 2018b; Kim et al., 2015). 2004년 스톡홀름 협약 발효 이후 우리나라는 2007년 잔류성 유기오염물질 관리법이 제정되었고, 스톡홀름 협약에서 규정하는 POPs 물질에 대해 생산과 사용, 배출을 엄격하게 규제하고 있다. 하지만, 이들 오염물질 중 endosulfan은 비교적 최근 사용이 금지되어 2011년까지 경작지에 살충을 목적으로 사용되었고, 이로 인해 최근까지 경작지 토양 잔류와 이로 인한 작물 잔류 문제가 꾸준히 제기되고 있다(Choi et al., 2018c; Hwang et al., 2015; Park et al., 2013).

경작지 토양에 잔류하는 POPs 물질의 저감화는 객토, 열분해, 세척 등 다양한 방법으로 접근할 수 있지만, 경제적 효율성 등을 이유로 적극적인 토양 복원 방법을 통한 오염정화 처리는 매우 제한적으로 이루어지고 있다. 따라서, 이

*Corresponding author
E-mail: jhkim75@gnu.ac.kr

를 대신하여 오염토에서 작물로의 잔류 이행을 억제시키고, 토양에서의 이동성을 낮추는 흡착제를 활용한 저감기술 수요가 높다(Ali et al., 2019; Choi et al., 2018a; Wang et al., 2016). 특히 최근에는 기후 변화 대응전략으로 탄소계 흡착제를 사용하여 경작지 내 이산화탄소 저장과 오염 물질의 토양 부동화 목적을 달성하고자 바이오차(biochar)를 활용한 경작지 적용 연구가 활발히 진행되고 있다(Varjani et al., 2019).

바이오차는 바이오매스(biomass)를 열 분해시켜 얻은 물질로 탄소 격리, 저분자 물질의 고정화 및 토양 물리성 개선 등 다기능 물질로 인식되고 있는 난분해성 탄소 자원이다. 바이오차는 제한된 산소 공급 하에서 생산되며, 다양한 유형의 바이오매스인 작물 부산물, 산림 부산물, 축산 분뇨, 하수 오니 및 제지 슬러지 등을 원료로 하여 다양한 종류의 바이오차를 생산할 수 있기 때문에, 이들 자원의 수집과 이용은 환경 부하를 줄이는 부가적인 이익이 발생한다. 특히, 바이오차는 높은 표면적을 갖는 구조화된 탄소 구조로 인해 유기 혹은 무기 오염 물질을 흡착하는 능력이 탁월하다(Leng et al., 2019; Pourhashem et al., 2019; Shaheen et al., 2019). 하지만, 바이오차의 원료 특성과 제조 특성에 따라 바이오차의 specific surface area, pore size, pH 및 고정 탄소의 구조적 특성 등이 달라질 수 있으며, 이는 바이오차의 오염물질 흡착 특성과 직접적인 관계가 있다(Cha et al., 2016; Mohan et al., 2014). 따라서, 많은 연구자들이 바이오차의 원료와 제조 방법에 따른 오염물질별 흡착특성을 비교 검토하고 특정한 오염물질에 최적화된 바이오차 제조방법을 연구하고 있다(Lin et al., 2018; Shaheen et al., 2019). 그러나, 이미 상업화된 다양한 바이오차에 대해서는 오염물질 흡착능 비교연구가 미흡하여, 신속하게 현장 투입이 가능한 오염물질 정화 소재에 대한 상용 제품정보가 부족하였다. 따라서, 본 연구에서는 endosulfan이 잔류하는 경작지에 바로 사용할 수 있는 상용 바이오차를 수집하고, 이들의 endosulfan 흡착능을 바이오차의 이화학적 특성과 비교하여, 유통 바이오차를 활용한 경작지 endosulfan 흡착 부동화 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

표준품 및 시약

Endosulfan 표준품인 α -endosulfan, β -endosulfan과 endosulfan sulfate는 Dr. Ehrenstorfer GmbH (Augsburg, Germany)에서 구입하였고, 시험에 사용한 acetone, acetonitrile, ethyl acetate, *n*-hexane, sodium sulfate anhydrous, silica gel (0.063-0.200 mm)는 Merck (Darmstadt, Germany)에서 구입하여 사용하였다. 흡착 시험에 사용한 endosulfan은 α -endosulfan과 β -endosulfan이 3:1비율로 혼합된 35% technical grade 유제(Hankook Samgong Co. Ltd., Seoul, Republic of

Korea)를 사용하였다.

상용 바이오차 수집 및 시료준비

상용 바이오차는 전국 바이오차 제조장에서 분상으로 판매되는 제품 14종을 구매하였으며, 수집된 바이오차는 0.10-0.25 mm 크기의 입자 분포가 50% 이상이었고, 흡착 시험에는 0.1-0.25 mm 크기의 바이오차를 선별하여 시험에 사용하였다. 시험 대조구로 사용된 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)은 Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA) 제품을 사용하였으며, 입상활성탄(granulated activated carbon, GAC)은 Samchully Active Carbon Co. Ltd. (Seoul, Republic of Korea)에서 입상 제품을 구매하여 사용하였다.

흡착제의 이화학적 특성 분석

바이오차의 pH는 Choi 등(2018a)의 방법과 같이, 1 g의 시료를 20 mL의 증류수에 넣어 48 h 동안 150 rpm으로 교반 후 pH meter (Orion, Thermo Electron Corp., Waltham, USA)를 사용하여 측정하였으며, 비표면적과 공극 부피는 질소 등온흡착법을 사용하여 ASAP2020 (Micromeritics instrument Co., GA, USA)으로 분석하였다. 원소분석은 CHN628 (Leco Co., MI, USA) 원소분석기를 사용하였다.

Endosulfan 흡착 시험

증류수 100 mL가 담긴 250 mL flask에 흡착제 20 mg과 35% endosulfan 용액 40 μ L를 넣고 24 h 동안 암조건에서 150 rpm으로 교반하였다. 이후 5분간 정치하고 상등액 1.0 mL를 취한 뒤, ethyl acetate (5 mL)를 넣어 vortex 및 원심분리 후 상등액을 ethyl acetate로 20배 희석하여 0.22 μ m syringe filter (Biofact Co. Ltd., Daejeon, Korea)로 여과한 뒤 GC-MS (Shimadzu Co., Kyoto, Japan)로 총 endosulfan 함량을 분석하였다. 각 시험은 6반복 실시하였으며, 바이오차의 endosulfan 흡착률은 아래의 식과 같이 endosulfan 초기농도와 흡착 후 평형농도의 비를 사용하여 산출하였다.

$$\text{흡착률(\%)} = [1 - (\text{평형농도} / \text{초기농도})] \times 100\%$$

Endosulfan 기기분석

총 endosulfan의 함량은 α -endosulfan과 β -endosulfan, 그리고 endosulfan sulfate의 합으로 산출하였으며, endosulfan 분석은 아래의 Table 1과 같은 조건에서 Rtx-5MS 칼럼 (0.25 mm \times 30 m, 0.25 μ m)을 사용하여 분리하였으며, 각각의 정량이온과 정성이온은 표에서 나타낸 바와 같다. 시험 분석의 검출한계는 endosulfan 이성질체와 대사체별 각각 0.02 mg/L이었으며, 각 성분의 검량선은 0.02 - 2.00 mg/L로 작성하였고 R²은 0.999 이상을 나타내었다.

Table 1. GC-MS instrumental condition for endosulfan analysis

Instrument	GC-MS (QP2020, Shimadzu Co. Ltd)	
Column	Rtx-5MS (0.25 mm × 30 m, 0.25 μm)	
Injection	1 μL (Temp. 270°C)	
Oven condition	Holding 150°C (2 min); Ramping 8°C to 220°C; Holding 220°C (5 min); Ramping 10°C to 320°C; Holding 320°C (7 min)	
	α-endosulfan	207 <i>m/z</i> (Quantitative ion) 195, 237 <i>m/z</i> (Qualitative ions)
Detection (SIM mode)	β-endosulfan	195 <i>m/z</i> (Quantitative ion) 237, 241 <i>m/z</i> (Qualitative ions)
	endosulfan	272 (Quantitative ion)
	sulfate	274, 387 (Qualitative ions)

결과 및 고찰

상용 바이오차의 이화학적 특성

시중에서 확보한 14 종의 바이오차는 대부분 참나무(O1-O8)를 원료로 제조되었으며, 왕겨 2종(R1-R2), 커피박 1종(C1), 리그닌 3종(L1-L3)이 수집되었다. 수집된 바이오차의 pH는 5.5-12.2를 나타내었지만, 수집 바이오차의 75% 이상이 pH 8 이상의 염기성인 것을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 고온의 열 분해과정을 거치면서 금속 이온이 원자화되고, 이들 금속원자들로 인해 염기성을 갖는 것으로 보여지며, 일부 활성탄과 바이오차는 산 중화 처리로 산성 혹은 중성 pH를 갖는 제품이 생산, 판매되고 있었다(Fan et al., 2019; Feng and Zhu 2018; Shaheen et al., 2019).

흡착능과 관련되는 바이오차의 또 다른 특징은 바이오차 내 H와 O원소의 비이다. 원소분석결과 나타난 H/C 원소 비와 O/C 원소 비를 보면, 수집된 바이오차의 H/C비는 0.05-0.87를 나타내고 있으며, O/C비는 <0.01-0.46의 비를 나타내었다. H/C비의 경우, 활성탄인 PAC를 제외하면 바이오차의 H/C비는 모두 0.30 이상이었으며, O/C비는 PAC가 0.08로 산소 원소비가 낮은 것이 확인되었으나, 수집제품의 약 60%에 해당하는 9 종에서 O/C비가 활성탄과 유사하거나 이보다 낮은 값이 확인되었다. 지금까지 이들 원소 비와 오염물질의 흡착능에 대해서는 많은 연구가 진행되었으며, H/C비가 1에 근접할수록 바이오차의 aromaticity가 증가하고, 이로 인해 π결합을 갖는 저분자와의 인력이 증가하여 방향족성 물질에 대한 흡착능이 높아지는 경향이 보고된 바 있다(Feng and Zhu 2018; Shaaban et al. 2018; Shaheen et al., 2019; Varjani et al., 2019). 또한, O/C비가 높으면 바이오차 내 carboxylate기의 증가로 바이오차의 음이온적 특성이 강화되어 양이온성 물질 흡착능이 증가하는 경향이 알려져 있다(Feng and Zhu 2018; Shaheen et al., 2019; Varjani et

Table 2. Physicochemical properties of collected biochars

	pH (1:20)	H/C	O/C	Specific surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)
PAC	7.9	0.05	0.08	1117	0.657
GAC	10.2	0.42	0.14	1230	0.452
C1	10.9	0.87	0.05	383	0.138
L1	7.2	0.66	<0.01	508	0.185
L2	5.5	0.59	0.01	515	0.186
L3	10.3	0.72	0.02	0.7	0.018
O1	12.2	0.37	0.02	408	0.162
O2	7.4	0.55	0.17	<0.1	<0.001
O3	10.5	0.34	0.04	353	0.128
O4	9.9	0.31	0.02	350	0.131
O5	8.5	0.58	0.31	4.6	0.011
O6	10.1	0.52	0.38	352	0.167
O7	10.1	0.30	0.02	378	0.166
O8	9.7	0.39	0.05	0.3	<0.001
R1	8.0	0.65	0.46	1.8	0.006
R2	10.1	0.53	0.27	0.3	0.003

al., 2019). 하지만, 이러한 특성이 aromaticity가 낮고 양이온성이 아닌 endosulfan의 흡착능에는 직접적인 영향을 미치지 못할 것으로 생각되며, 본 시험에서도 이들 원소 비와 endosulfan 흡착능 사이에서 특이한 연관성을 찾지 못하였다.

상용 바이오차의 비표면적은 <0.1-1230 m²/g까지 넓은 범위에서 제조되고 있음을 확인할 수 있었으나, 적극적인 활성화 공정이 이루어진 PAC와 GAC를 제외하면, 수집된 바이오차 14종의 최대 비표면적은 515 m²/g로 확인되었다. 바이오차의 공극부피는 최대 0.657 cm³/g을 나타내었으나, 이 역시 활성탄계 PAC와 GAC를 제외하면, 일반적인 바이오차의 공극부피는 <0.001-0.186 cm³/g으로 활성화 공정이 적용되지 않은 바이오차의 물리적 구조는 PAC와 GAC에 비해 구조화가 덜 진행된 것을 확인할 수 있었다. PAC와 GAC를 제외한 수집된 바이오차 중 6종 바이오차 분말은 비표면적이 20 m²/g 이하, 공극부피가 0.018 cm³/g 이하로 유통 바이오차의 43%는 물리적 다공성 구조 발달이 되지 못한 제품으로 확인되었다. 이러한 물리적 특성은 대조물질인 PAC의 비표면적(1117 m²/g)과 공극부피(0.657 cm³/g)와 비교하면 큰 차이를 나타내었다.

상용 바이오차의 endosulfan 흡착률

본 흡착시험은 고상인 바이오차에 대한 endosulfan 흡착능 시험으로 negative control로 silica gel을 사용하였고, positive control로 PAC와 GAC를 사용하였다. Negative control인 silica gel의 endosulfan 흡착률은 32.4%로 관찰되었으며, 이에 따라 endosulfan 흡착률이 약 35% 이하인 경

우 다공성 바이오차의 endosulfan 부동화 특성으로 판단하기 어렵다.

Positive control인 PAC와 GAC는 상용바이오차에 비하여 비표면적과 공극부피가 2배이상 높은 특성을 갖고 있으며, 일반적으로 비표면적이 큰 흡착제가 오염물질 흡착능이 큰 것으로 알려져 있다. Choi 등(2018a)의 보고와 같이 PAC의 endosulfan 흡착률은 본 시험에서 84.6%, 단위 g당 흡착량은 359 mg을 나타내어 매우 강력한 endosulfan 흡착제임을 확인할 수 있었다. 또한, GAC는 PAC와 달리 활성화되어 있으나, 입상 제품으로 흡착속도가 PAC에 비해 느린 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 본 시험의 흡착시험 조건에서 흡착률(40.1%)과 흡착용량(167 mg/g)이 PAC에 비하여 다소 낮게 관찰되었다(Choi et al., 2018a).

Table 3에서 제시한 시험 결과에서 볼 수 있듯이, PAC와 GAC를 제외한 8종의 바이오차는 endosulfan 흡착률이 45% 이상(흡착용량 133 - 244 mg/g)으로 우수한 흡착특성을 나타내었다. 이들 바이오차는 비표면적이 350 - 515 m²/g을 갖는 C1, L1, L2, O1, O3, O4, O6, O7으로 PAC와 비교하면, 물리적 특성인 비표면적이 2-4배, 공극부피는 4-5배 가량 작지만, endosulfan 흡착률은 45.2 - 68.1%로 우수하였다. 따라서, 비표면적이 350 m²/g 이상인 상용바이오차의 경우 endosulfan 흡착률 45% 이상을 확보할 수 있어, 경작지 오염 정화에 사용가능한 우수한 흡착제 후보로 고려되었다. 반면, 비표면적이 20 m²/g 이하인 바이오차의 endosulfan 흡착률은 35% 미만으로 흡착 부동화 특성이 매우 낮고, 친환경 흡착제로서의 특성을 갖추지 못한 것을 확인하였다.

상용 바이오차의 오염물질 흡착특성 차이는 이미 일부 문

헌들을 통해 예상할 수 있었으나, 본 연구에서는 바이오차의 이화학적 특성과 endosulfan 흡착률을 실험적으로 비교하여 endosulfan 우수 흡착제의 1차 선별기준이 되는 비표면적 지표를 제시할 수 있었다. 특히, 상용 바이오차 중 비표면적이 350 m²/g 이상인 경우 endosulfan 흡착률 45% 이상을 확보할 수 있었으며, 이들 제품의 endosulfan 흡착용량은 133 - 244 mg/g으로 이는 Choi 등(2018)이 보고한 것과 같이 오염토에서 작물로의 endosulfan 흡수이행을 효과적으로 억제할 수 있는 수준으로 예상된다. 반면, 비표면적이 20 m²/g 이하인 바이오차는 endosulfan 흡착능이 미약하였으며, 이는 전체 수집된 바이오차의 43% 수준으로 시중에 유통되는 바이오차의 흡착능 편차가 매우 큰 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 endosulfan 오염지 복원에 필요한 바이오차를 비교적 간편한 비표면적 분석을 통하여 1차 선별 할 수 있고, 이를 통해 경작지 endosulfan 부동화를 통한 endosulfan 잔류저감 농작물 생산에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립원예특작과학원 공동연구사업 (PJ01381603)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

Literature cited

Ali, N., S. Khan, Y. Li, N. Zheng and H. Yao (2019) Influence of biochars on the accessibility of organochlorine pesticides and microbial community in contaminated soils. *Science of the total environment*, 647:551-560.

Cha, J. S., S. H. Park, S. C. Jung, C. Ryu, J. K. Jeon, M. C. Shin and Y. K. Park (2016) Production and utilization of biochar: a review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40:1-15.

Choi, G. H., D. K. Jeong, S. J. Lim, J. H. Rho, S. H. Ryu, B. J. Park, B. C. Moon and J. H. Kim (2017) Plant uptake potential of endosulfan from soil by carrot and spinach. *Journal of Applied Biological Chemistry* 60(4):339-342.

Choi, G. H., D. Y. Lee, D. C. Seo, L. Kim, S. J. Lim, S. H. Ryu, B. J. Park, J. H. Kim and J. H. Kim (2018a) Endosulfan plant uptake suppression effect on char amendment in oriental radish. *Water Air Soil Pollution* 229(1):24(1-7)

Choi, G. H., D. Y. Lee, J. Y. Bae, J. H. Rho, B. C. Moon and J. H. Kim (2018b) Bioconcentration factor of perfluorochemicals for each aerial part of rice. *Journal of Applied Biological Chemistry* 61(2):191-194.

Choi, G. H., D. Y. Lee, S. H. Ryu, J. H. Rho, B. J. Park, B. C. Moon and J. H. Kim (2018c) Investigation of the bioconcentration factor of endosulfan for rice from soil. *Korean Journal of pesticide science* 22(1):25-28.

Ding, Y., Y. Liu, S. Liu, Z. Li, X. Tan, X. Huang, G. Zeng, L.

Table 3. Endosulfan adsorption properties of commercial biochars

	Adsorption ratio (Average±SD, %)	Adsorption amount (mg/g)
PAC	84.6±6.2	359
GAC	40.1±12.6	167
C1	45.2±8.8	133
L1	64.9±14.4	194
L2	55.5±16.7	162
L3	27.8±15.4	83
O1	68.1±9.0	244
O2	6.1±18.4	24
O3	54.1±11.1	228
O4	62.0±9.4	225
O5	31.0±8.6	131
O6	64.9±16.7	196
O7	51.9±7.4	156
O8	25.5±9.9	79
R1	34.4±13.4	110
R2	16.4±8.3	50

- Zhou and B. Zheng (2016) Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36(2): 36.
- Fan, R., C. L. Chen, J. Y. Lin, J. H. Tzeng, C. P. Huang, C. Dong and C. P. Huang (2019) Adsorption characteristics of ammonium ion onto hydrous biochars in dilute aqueous solutions. *Bioresource technology*, 272:465-472.
- Feng, Z. and L. Zhu (2018) Sorption of phenanthrene to biochar modified by base. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(2):1.
- Hwang, J. I., S. E. Lee and J. E. Kim (2015). Plant uptake and distribution of endosulfan and its sulfate metabolite persisted in soil. *PloS one*, 10(11):e0141728.
- Kim, J. H., Y. S. Ok, G. H. Choi and B. J. Park (2015) Residual perfluorochemicals in the biochar from sewage sludge. *Chemosphere* 134:435-437.
- Leng, L., H. Huang, H. Li, J. Li and W. Zhou (2019) Biochar stability assessment methods: a review. *Science of the total environment*, 647:210-222.
- Chen, Y. D., Y. C. Lin, S. H. Ho, Y. Zhou and N. Q. Ren (2018). Highly efficient adsorption of dyes by biochar derived from pigments-extracted macroalgae pyrolyzed at different temperature. *Bioresource technology*, 259:104-110.
- Mohan, D., A. Sarswat, Y. S. Ok and C. U. Pittman Jr (2014) Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent-a critical review. *Bioresource technology*, 160:191-202.
- Park, B. J., B. M. Lee, C. S. Kim, K. H. Park, S. W. Park, H. Y. Kwon, J. H. Kim, G. H. Choi and Lim, S. J. (2013) Long-term monitoring of pesticide residues in arable soils in Korea. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 17(4):283-292.
- Pourhashem, G., S. Y. Hung, K. B. Medlock and C. A. Masiello (2019) Policy support for biochar: Review and recommendations. *GCB Bioenergy*, 11(2):364-380.
- Shaaban, M., L. Van Zwieten, S. Bashir, A. Younas, A. Nunez-Delgado, M. A., Chhajro, K. A. Kubar, U. Ali, M. S. Rana, M. A. Mehmood, R. Hu (2018) A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of environmental management*, 228:429-440.
- Shaheen, S. M., N. K. Niazi, N. E. Hassan, I. Bibi, H. Wang, D. C. Tsang, Y. S. Ok, N. Bolan and J. Rinklebe (2019) Wood-based biochar for the removal of potentially toxic elements in water and wastewater: a critical review. *International Materials Reviews*, 64(4):216-247.
- Varjani, S., G. Kumar and E. R. Rene (2019). Developments in biochar application for pesticide remediation: Current knowledge and future research directions. *Journal of environmental management*, 232:505-513.
- Wang, P., Y. Yin, Y. Guo and C. Wang (2016) Preponderant adsorption for chlorpyrifos over atrazine by wheat straw-derived biochar: experimental and theoretical studies. *RSC Advances*, 6(13):10615-10624.

상용 바이오차의 유기염소계 농약 endosulfan 흡착능 비교평가

배지연¹ · 이득영¹ · 최익원² · 이진환³ · 김진호^{1*}

¹경상대학교 농업생명과학연구원 (IALS) 응용생명과학부 농화학과, ²환경부 국립환경과학원 물환경공학연구과, ³동아대학교 생명자원과학대학 생명자원산업학과

요약 Endosulfan은 최근 잔류성 유기오염물질로 지정된 유기염소계 농약으로 국내 농경지 토양에서 자주 검출되고 있으며, 이로 인한 농산물 잔류오염문제가 지속적으로 발생하고 있다. 최근에는 경작지 endosulfan 잔류문제를 해결하고자, 바이오차를 활용하는 토양부동화 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 그러나, 오염물질 흡착부동화에 대한 바이오차 특성연구가 실험실에 국한되어 있고, 이미 제조공정이 확보되어 경제적으로 생산되는 상용 바이오차에 대한 endosulfan 흡착특성 비교연구가 부족하여 오염우려 경작지에 사용할 수 있는 상용 바이오차의 선발에 어려움을 겪고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내에서 제조 유통되는 상용 바이오차 분말 14종을 수집하여 이들의 이화학적 특성을 분석하고, 이와 함께 endosulfan 흡착 특성을 비교하여 상용 바이오차의 오염정화제로서 활용 가능성을 검토하였다. 시험결과, 수집된 상용 바이오차의 57%는 비표면적이 350 m²/g 이상이었고, 이들의 endosulfan 흡착률이 45.2 - 68.1%, 흡착용량이 133-244 mg/g으로 우수하였다. 반면, 수집 바이오차의 43%는 비표면적이 20 m²/g 이하였고, endosulfan 흡착능이 높지 않았다. 또한, 바이오차의 이화학적 특성 중 H/C비와 O/C비는 endosulfan 흡착능과 밀접한 관련이 없는 것으로 추정되었다.

색인어 바이오차, 엔도설판, 흡착, 비표면적