

Carbofuran의湛水土壤中 分解에 대한 土壤의 滅菌과 黃酸鹽 添加의 影響에 關한 研究

杜玉珠
서울市 保健環境研究院

A Study on Degradation Rate of Carbofuran in Sterilized Soil and Sulfate-added Paddy Soil

Ock-Ju Tu (Seoul Metropolitan Government Institute of Health and Environment, Seoul, 137-130, Korea.)

Abstract : Carbofuran was incubated for four weeks in five types of paddy soil samples at 25°C. The soil samples prepared in the study were as follows : control soil, sterilized soil, 10% cellulose added soil, 10% cellulose and 1% ferrous sulfate added soil, and 10% cellulose and 1% magnesium sulfate added soil. The degradation rate of carbofuran was significantly decreased ($p < 0.05$) in sterilized soil. The degradation rate of carbofuran was significantly decreased by addition of cellulose ($p < 0.05$) in ferrous sulfate added soil and magnesium sulfate added soil ($p < 0.01$).

서 론

Carbofuran은 미국의 FMC社에 의해 1967년에 개발되어 상품화된 carbamate계 침투성살충제로, FMC社에서는 상표명 Furadan®으로, Bayer社에서는 Curater®로 생산하고 있다. 우리나라에서는 1975년부터 水稻의 멸구(Brown plant hoppers)와 이화명나방(Rice stem borers) 등의 방제용으로, 그리고 각종 야채와 토양해충 방제에 광범하게 사용되고 있으며¹⁾, 1996년 현재 국내 총 살충제 생산량의 약 33%를 차지하고 있는 대표적인 살충제 중 하나이다²⁾.

Carbofuran은 용점 150~152°C, 증기압 2×10^{-5} mmHg(33°C), 비중 1.80의 백색결정으로 물에 대한 용해도는 320~700ppm(25°C)이고, 환경에 대한 높은 급성경구독성을 지닌 고독성 농약에 속하는데, 포유동물에 대한 급성경구독성은 약한 편이지만 I급 어독성을 지닌 물질이다³⁾.

토양에 첨가된 살충제가 제거되는 주요경로는 1) 토양내의 유기물과 토양입자에 의한 흡착, 2) 강우, 관개수에 의한 유출, 3) 대기로의 증발, 4) 토양내 미생물에 의한 분해, 5) 토양내 조건이나 토양의 구성성분에 의한 분해, 6) 햇빛에 의한 광분해, 그리고 7) 식물 등의 생물체로의 이행 등을 들 수 있으며³⁾, 이들 중 1), 4)와 5)의 과정은 토양의 유기물함량, 미생물 그리고 무기염의 종류와 함량에 의해 영향을 받는 제거 과정들이다.

이외에 토양에서 carbofuran의 분해에 관여하는 요인으로 토양의 carbofuran 노출 여부를 들 수 있다. Carbofuran에 노출되었던 토양에서는 carbofuran 분해 속도가 빨라지는 데⁴⁻⁶⁾, 이는 토양에 존재하는 미생물이 혼입된 carbofuran을 대사에 이용할 수 있도록 이미 적응되어 있기 때문으로 보고되었다^{7,8)}. 그러나, carbofuran을 반복 처리한 토양에서 carbofuran의 분해능을 지닌 미생물의 증식이 활발해지지는 않는다는 연구결과들도 보고된 바 있어서^{9,10)}, 토양에

carbofuran을 반복 처리했을 때 분해 미생물의 작용에 의해 분해속도가 증가하는 것인지의 여부는 명확히 밝혀지지 않았으며, 토양중 carbofuran의 분해과정에서 토양 미생물의 작용이 차지하는 비중에 관한 연구는 별로 없다.

한편, 토양의 무기염 성분이 유기인체와 유기염소계 농약의 분해반응에 미치는 영향에 관하여 연구한 Rao 등¹¹⁾은 유기물의 함량이 비교적 풍부한 토양에 여러 형태의 황산염을 첨가하여 실험한 결과 황산제일철의 첨가에 의해 parathion의 분해속도가 촉진되었다고 하였으며, Wahid 등¹²⁾도 γ -HCH를 대상으로 한 연구에서 황산염의 첨가에 의해 γ -HCH의 분해속도가 증가되었다고 보고하였다. 그러나 토양내에 자연적으로 함유되어있는 황성분에 의해 생성될 수 있는 황산염에 의한 carbofuran의 토양내 분해 양상의 변화에 관한 연구는 미비한 상태이다.

따라서, 이 연구에서는 담수토양 조건에서 토양에 처리된 carbofuran이 시간의 경과에 따라 분해될 때 토양에 존재하는 미생물적 요인이 carbofuran의 분해에 기여하는 정도를 분석하고, 토양내 유기탄소의 양이 비교적 풍부할 때 토양에 존재하는 황산염 성분이 carbofuran의 분해 속도에 미치는 영향을 분석하여 보고자 한다.

재료 및 방법

토양의 채취

1996년 3월 下旬 경기도 시흥시에 소재한 논에서 토양을 표층 20cm 깊이에서 채취하여 그늘에서 건조시킨 후, 2mm 눈금체에 통과시켰으며, 분석한 토양의 물리화학적 특성은 table 1과 같다. 시료토양의 유기물함량은 2.37%로 국내 담수토양의 평균적인 유기물함량 범위^{13,14)}에 속하였다.

토양시료의 조제

위의 토양을 자연상태로서 대조토양(토양 A)으로 사용하였으며, 각 시료토양의 처리 내용은 table 2에 나타내었다.

멸균토양(토양 B) : 대조토양을 20g 씩 시험관(25×200mm)에 넣고, pH를 7.0으로 조정한 25ml의 증류수를 넣어 침수상태로 한 다음, 솜마개로 봉하여 121℃에서 30분간 멸균하였다.

Cellulose와 황산염 동시 첨가 토양(토양 C,D,E) : 대조토양에 10%(wt/wt)의 cellulose를 첨가시킨 토양(토양 C)에 1%(wt/wt)의 황산제일철($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, purity 99%, Sigma Co., 토양 D)과 1%(wt/wt) 황산마그네슘($MgSO_4 \cdot 7H_2O$, Sigma Co., 토양 E)을 각각 첨가하여 균일하게 혼합하였다.

Table 1. Physico-chemical properties of the soil used

Characteristics	
Sand(%)	36.7
Silt(%)	29.4
Clay(%)	33.9
Soil type	Silty clay
pH	5.1
Organic carbon content(%)	1.37
Organic matter content(%)	2.37
Moisture(%)	10.9
Redox-potential(mV)	234.7

시약 및 기구

Hexane, acetone, dichloromethane, ethylacetate, Sodium chloride, sodium sulfate(anhydrous)은 Wako Co.의 잔류농약 분석용을 사용하였고, Florisil은 Wako Co.의 제품을 이용하였다. Rotary vacuum evaporator는 Brinkmann Instrument Co.(Switzerland)의 Model Buch RE-120 Gas chromatography는 NPD를 장착한 Hewlett Packard 5890 II를 이용하였다.

Table 2. Preparation of soil samples for the experiment

Type of soil	Treatment
A	Control
B	Sterilization, at 121 °C, 30 min.
C	Soil A + 10%(wt/wt) cellulose
D	Soil C + 1%(wt/wt) ferrous sulfate
E	Soil C + 1%(wt/wt) magnesium sulfate

Carbofuran의 첨가 및 토양의 배양

각 시료토양 20g을 시험관(25×200mm)에 넣고, pH를 7.0으로 조정한 증류수를 각각 25ml씩 가하여 토양위의 수층이 약 1.5cm 높이가 되도록 하였다. 위의 시험관에 acetone에 녹인 carbofuran을 총 50ppm 농도가 되도록 첨가하여 은박지로 덮은 후, 25℃의 항온배양기에서 4주동안 배양하였다. 배양 0, 1, 2, 3, 4주가 되는 날에 각 토양별로 3점의 시료를 취하여 carbofuran의 잔류량 측정에 사용하였다.

추출 및 정제

Carbofuran 잔류량의 측정을 위한 추출법은 carbamate계의 多性分析法의 용매-용매추출법¹⁵⁾을 변형하여 사용하였으며, 토양시료의 전처리법을 간략히 기술하면 다음과 같다.

토양시료를 250ml 삼각플라스크에 옮긴 후 acetone을 100

ml 가하여 12시간동안 침지시킨 다음 1 시간 동안 진탕하여 여지에 여과시켜 그 여액을 250ml 등근 플라스크에 모았다. 이 토양에 50ml의 acetone을 가하여 30분간 진탕시킨 후 받은 여액을 위의 여액과 합하여, 감압농축기에서 농축시켰다.

위의 농축액을 250ml 분액깔대기에 옮겨 포화염화나트륨 용액 50ml와 증류수 200ml를 가하고 여기에 hexane과 dichloromethane을 6:4로 혼합한 것을 100ml 넣어 진탕시킨 후, 유기용매층을 여지에 여과하여 여액을 모았다. 위의 과정을 2회 반복하여 모아진 여액을 합하여 감압농축하였다.

위의 과정에서 남은 잔사를 acetone 10ml에 녹여 용고액 50ml를 넣고 흔들어 섞은 다음 30분간 정치하고, 이를 여과하여 여액을 받았다. 이 여액을 250ml 분액깔대기에 넣고 dichloromethane 100ml를 가하여 진탕시켜 추출한 후 여과하여 dichloromethane층을 모았다. 이 과정을 2회 반복하여 모아진 dichloromethane층을 건조시까지 감압농축하여 그 잔사를 4ml의 hexane에 녹여 정제과정에 사용하였다.

추출액의 정제를 위하여 미리 활성화시켜 hexane에 담긴 5g의 florisil을 column에 채우고, sodium sulfate(anhydrous) 3g을 넣은 다음 20ml의 hexane으로 씻어낸 다음, 위의 용출액을 column에 loading한 다음 10% ethylacetate 함유 hexane 20ml을 넣어 column을 통과시켜 용출액을 모으고, 30% ethylacetate 함유 hexane 15ml를 넣어 통과액을 위의 용출액에 합하였다. 이것을 감압농축하여 잔사를 4ml의 acetone에 녹인 다음 GC-NPD 분석에 사용하였다.

GC-NPD 분석

시료토양을 위와 같은 방법으로 전처리한 후 GC-NPD에 주입하여 carbofuran 농도를 측정하였으며, GC-NPD의 분석 조건은 다음과 같다.

Column : HP-5, 길이는 30m 이었으며, 온도조절은 Oven 170 °C, Injection port 230 °C, Detector 270 °C이었다.

회수율 조사

토양 20g에 증류수 25ml을 넣은 후, 총농도 50ppm, 10ppm 그리고 1ppm이 되도록 carbofuran 표준용액을 가한 시료와 carbofuran을 가하지 않은 시료를 위의 방법으로 전처리한 후, GC-NPD로 분석한 결과와 표준용액을 직접 GC-NPD로 분석한 결과를 비교하여 회수율을 조사하였으며, 조사결과 이 실험방법에 의한 회수율은 79.9-101.0%(평균 87.2%)였다.

측정자료의 분석

Carbofuran의 잔류량에 대한 배양기간별 측정치를 statistical analysis system(SAS)을 이용하여 분석하였고, 그 내용은 다음과 같다. 토양별 carbofuran 잔류량 평균치의 비교를 위하여 t-검정을 실시하였고, 각 토양에서의 배양기간 경과에 따른 carbofuran 잔류량 변화의 비교는 배양기간과 토양종류에 의한 분산분석(two factor ANOVA test)의 결과를 이용하여 평가하였다.

결과 및 고찰

이 연구는 토양의 멸균처리와 토양에 첨가된 cellulose와 황산염 성분이 澁水土壤내에서 carbofuran 분해에 미치는 영향을 평가하기 위한 것으로서, 대조토양, 멸균토양, cellulose 첨가토양 및 cellulose와 황산염 동시 첨가 토양에 carbofuran을 첨가하고 4주 동안 25℃에서 배양하면서

carbofuran의 토양내 잔류량을 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

토양의 멸균에 의한 영향

토양에 존재하는 미생물이 carbofuran의 분해에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 멸균처리된 미생물을 제거한 토양과 대조토양에 carbofuran을 첨가하여 4주간 25°C에서 배양하면서 carbofuran의 잔류량을 측정하였으며, 그 결과는 table 3, Fig. 1과 같다.

측정 결과를 살펴보면, carbofuran 잔류량은 대조토양에 비하여 멸균토양에서 많은것으로 나타났는데($p < 0.05$), 대조토양에서는 배양 1주째에 초기에 첨가된 carbofuran의 59.3%, 배양 4주째에는 34.3%의 잔류량이 측정되었다.

반면, 멸균토양은 배양 1주째의 carbofuran 잔류량이 84.2%로 첨가된 carbofuran의 15.8%만이 토양에서 제거된 것으로 나타나서 대조토양에 비하여 1/4 정도의 분해율을 나타내었다. 또한, 배양 2, 3, 4 주에는 carbofuran 잔류량이 66.1%, 56.6% 그리고 52.1%로서 전 배양기간에 걸쳐 멸균토양에서 대조토양에 비해 약 1.5배의 carbofuran이 잔류되는 결과를 보였다($p < 0.05$).

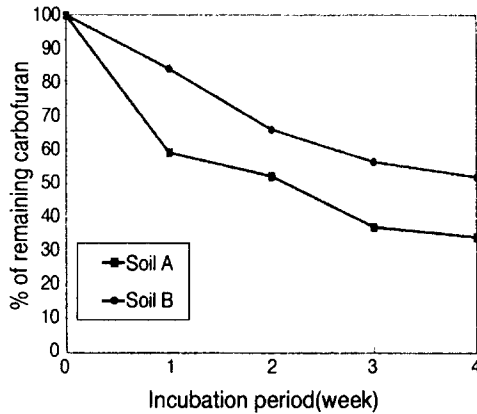


Fig. 1. Residual content of carbofuran in sterilized paddy soil for incubation period of four weeks at 25°C.

Soil A : control soil Soil B : sterilized soil

Table 3. Trends of degradation of carbofuran in the sterilized paddy soil for incubation period of four weeks at 25°C

Incubation period (week)	Detected amount in soil (percent of carbofuran initially added, %)*	
	Control	Sterilized
1	59.3	84.2
2	52.3	66.1
3	37.3	56.6
4	34.3	52.1

* carbofuran initially added 2,250 µg/20g soil.

토양에서 주로 세균과 곰팡이류가 농약의 분해에 관여하는 것으로 알려져있는데, 한 등¹⁶⁾은 작물을 심지 않은 담수 토양에서 carbofuran 첨가 후 3주까지는 세균과 곰팡이의 증식량이 크게 변화되지 않았고, 그람음성균의 총수는 오히려 감소되었으며, carbofuran 첨가후 3주에서 4주 사이에 토양내의 세균과 곰팡이류가 수적으로 현저히 증가되었는데, 그 중에서도 특히 혐기성세균과 곰팡이류의 총수가 증가되었다고 보고하였다. 위의 연구에 따르면, 토양내 미생물이

외래화합물인 농약성분에 적응하기까지 약 3주 정도의 기간이 소요되며, 담수토양에서 carbofuran의 분해에 혐기성세균과 곰팡이류가 주로 관여하는 것으로 볼 수 있다.

다른 연구에서는 토양에서 어떠한 조건의 변화에 의해 미생물의 성장이 억제되거나 분해에 관여하는 미생물이 존재하지 않을 경우, 살충제의 분해반응은 시간의 경과에 따른 1차반응에 근접하게 되며, 토양의 미생물이 존재하는 경우에는, 토양 미생물이 살충제 성분에 적응하기까지의 기간 동안 미생물에 의한 분해작용이 위축되기 때문에 경시적인 살충제의 분해반응은 sigmoidal kinetics를 나타내는 것으로 보고되었다^{17,18)}.

한편, 토양에서 carbofuran의 분해능력을 지닌 *Achromobacter species*¹⁹⁾와 *Pseudomonas* 및 *Flavobacterium*⁷⁾을 분리한 후, 유일한 질소원 또는 탄소원으로 carbofuran를 제공하여 배양한 연구에서는 24~42시간 이내에 첨가된 carbofuran의 99% 이상이 분해되었으며, 이 때 carbofuran의 가수분해에 의해 carbonyl기가 제거되어 carbofuran phenol과 methylamine 및 이산화탄소가 생성되고, 이산화탄소와 methylamine은 위의 미생물들이 탄소원과 질소원으로 이용할 수 있으나, carbofuran phenol과 같이 benzofuran 고리구조를 지닌 분해산물은 이들 미생물이 생장에 필요한 탄소원이나 질소원으로 이용하지 못하는 것으로 보고되었다⁷⁾. 그리고 살균제인 myclobutanil을 토양에 처리한 6주 후에 살균토양에서 살충제의 잔류량이 비살균토양에 비해 2.7배나 높게 나타났으며, 산성 토양에 비해 알칼리성 토양에서 농약의 반감기가 감소되었다는 연구 결과가 보고되어 있다²⁰⁾.

이 연구에서는 배양 초기 토양의 pH가 5.0로 산성이어서, carbofuran의 분해에 미생물의 작용이 포함될 수 있는 pH 조건을 지니고 있으며, 멸균토양에서 대조토양에 비해 약 18% 정도 많은 carbofuran 잔류량을 나타낸 이 연구의 결과로 볼 때, 산성조건의 토양에서 토양에 첨가된 carbofuran의 약 18% 정도가 미생물의 작용에 의해 분해되는 것으로 해석된다.

Cellulose와 황산염의 동시 첨가에 의한 영향

유기물 함량이 높은 토양에 존재하는 황산염이 carbofuran의 분해에 미치는 영향을 평가하기 위해 자연적인 유기물 함량이 2.37%인 대조토양에 有機物源으로서 cellulose를 10% 첨가한 토양, 10% cellulose와 1%의 황산제일철($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)을 동시에 첨가한 토양 및 10% cellulose와 1%의 황산마그네슘($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)을 동시에 첨가한 토양에 carbofuran을 첨가하여 4주간 배양하면서 1주 간격으로 잔류량을 측정한 결과는 table 4, Fig. 2, 3과 같다.

토양내에서 황산염은 황석철광이 산화되거나 황성분이 박테리아에 의해 산화됨으로써 생성되고²¹⁾, 토양내 각종 화합물의 free radical 반응을 시작시키는 역할을 담당하며, 유기물 함량이 높은 灌水土壤 조건에서 DDT를 DDE로 전환시키는 반응과 parathion의 분해를 촉진시키는데, 특히 parathion이 aminoparathion으로 분해된 후의 dealkylation 반응을 촉진시키는 작용을 하는것으로 보고되었다²²⁾.

실험 결과(table 4), 10%의 cellulose를 첨가한 토양에서는 배양 1주에 첨가된 carbofuran의 70.7%, 4주 후에는 37.2%의 잔류량이 측정되어 대조토양에 비해 많은 양의

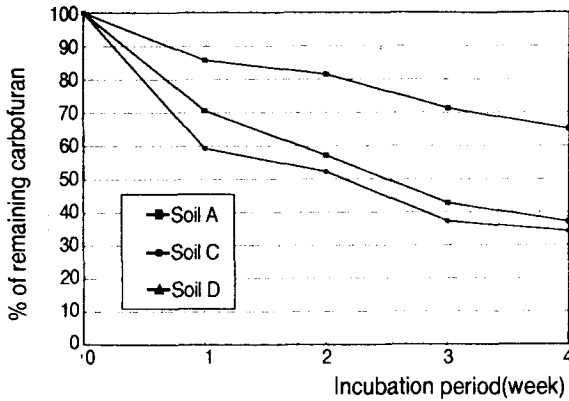


fig. 2. Residual content carbofuran in cellulose and ferrous sulfate added paddy soil for incubation period of four weeks.
Soil A : control Soil C : control + 10% cellulose
Soil D : soil C + ferrous sulfate

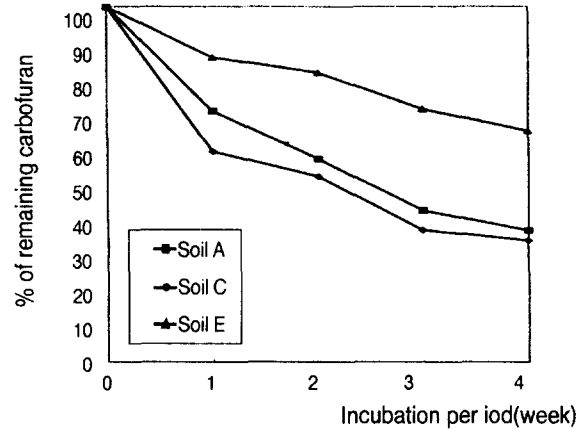


fig. 3. Residual content carbofuran in cellulose and magnesium sulfate added paddy soil for incubation period of four weeks.
Soil A : control Soil C : control + 10% cellulose
Soil E : soil C + magnesium sulfate

Table 4. Trends of degradation of carbofuran in cellulose-added paddy soils for incubation period of four weeks at 25°C

Incubation period (week)	Detected amount in soil (percent of carbofuran initially added, %)*			
	Control	Control + 10% cellulose	10% cellulose + 1% ferrous sulfate	10% cellulose + 1% magnesium sulfate
1	59.3	70.7	70.6	85.8
2	52.3	57.2	57.8	81.5
3	37.3	42.8	47.1	71.3
4	34.3	37.2	39.5	65.1

* carbofuran initially added 2,250 µg/20g soil.

carbofuran이 토양에 잔류되는 결과를 나타내었다(p<0.05). 10%의 cellulose와 1%의 황산제일철을 동시에 첨가한 토양에서는 배양 1주에 70.6%, 배양 4주째에 39.5%로 측정되어 배양시간에 따른 carbofuran의 잔류량이 대조토양에 비해 높게 나타났으나(p<0.05), cellulose만을 첨가한 토양과는 유의한 차이가 없었다(p>0.05). 10%의 cellulose와 1%의 황산마그네슘을 동시에 첨가한 토양에서는 carbofuran 잔류량이 배양 1주째에 85.8%로서 대조토양에 비해 매우 많았고(p<0.05), cellulose만을 첨가한 토양과 cellulose와 황산제일철을 동시에 첨가한 토양에 비해서도 약 15% 정도 많은 잔류량을 나타내었으며, 배양 2, 3, 4 주에 각각 81.5%, 71.3% 그리고 65.1%가 측정되어 다른 세 토양에 비해 전 배양기간에 걸쳐 carbofuran 잔류량이 유의하게 많은 것으로 나타났다(p<0.01).

Rao 등¹³⁾은 parathion을 대상으로 행한 연구에서 유기물 함량이 높은 토양에 1%의 황산제일철(FeSO₄·7H₂O)을 첨가한 경우 parathion의 분해량이 증가되었으며, 이러한 분해반응의 촉진 효과가 황산염에 의한 것인지를 확인하기 위하여 황산마그네슘(MgSO₄·7H₂O), 황산칼륨(K₂SO₄), 황산망간(MnSO₄) 및 염화제일철(FeCl₃) 등을 첨가해본 결과, 황산마그네슘, 황산칼륨 및 황산망간을 첨가한 토양에서는 parathion의 분해가 촉진되었으나, 염화제일철은 parathion의 분해에 촉진 효과를 나타내지 않았다고 보고하였다.

이와같이 이들의 연구에서는 토양중 황산염에 의해

parathion 분해가 촉진되는 효과가 확인되었으며, 특히, 황산염과 철 성분이 동시에 토양내에 존재할 경우에는 parathion의 분해반응이 매우 촉진된 결과를 보고하였다. 그러나, 이 연구에서는 cellulose와 황산제일철 동시 첨가 토양에서 carbofuran 잔류량은 대조토양에 비해서 증가되었으나, cellulose만을 첨가한 토양과의 차이는 없는 것으로 나타나서 cellulose와 함께 토양에 존재하는 황산염이나 철(Fe+2) 이온이 carbofuran의 분해에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Venkateswarlu 등¹⁰⁾은 carbamate계 농약의 ester결합을 분해하는 Pseudomonas striata 등의 미생물에서 분리된 esterase는 최적 pH가 8.5이며, pH 6.0~9.5의 범위에서 작용하는데, Mg²⁺, Mn²⁺, Ca²⁺ 그리고 Co²⁺는 이 효소의 작용에 관여하지 않는다고 하였다. 따라서, 이 연구에서 유기물 함량이 높은 토양에 마그네슘과 황산염이 존재할 때 carbofuran의 토양내 잔류량이 약 25%정도 증가한 것은 토양에 첨가된 황산마그네슘 성분 중 마그네슘성분이 미생물의 분해작용이나 화학적인 분해반응을 억제함으로써 carbofuran의 분해가 지연되었기 때문으로 추정된다.

요 약

이 연구는 담수토양 조건에서 토양에 처리된 carbofuran이 시간의 경과에 따라 분해될 때 토양에 존재하는 미생물적 요인이 carbofuran의 분해에 기여하는 정도를 분석하고, 토양내 유기탄소의 양이 비교적 풍부할 때 토양에 존재하는 황산염 성분이 carbofuran의 분해 속도에 미치는 영향을 평가하기 위한 것으로서, 1996년 3월 하순 경기도 시흥시의 논에서 채취한 토양을 대조토양으로 하여 이 대조토양에 cellulose와 황산염의 첨가와 멸균 처리를 하여 대조토양, 멸균토양, 10%의 cellulose 첨가 토양, 10% cellulose와 1%의 황산제일철(FeSO₄·7H₂O) 동시 첨가 토양, 그리고 10% cellulose와 1%의 황산마그네슘(MgSO₄·7H₂O) 동시 첨가 토양 등의 다섯 종류의 토양시료를 만들었다. 이들 토양시료에 총 농도 50ppm가 되도록 carbofuran을 첨가하여 25°C에서 4주간 배양하면서 carbofuran의 토양내 잔류량을 측정하였다.

멸균토양의 carbofuran의 잔류량은 대조토양에 비해 매우

많았는데($p < 0.05$), 4주 동안 배양시 대조토양에 비해 잔류량이 약 18% 정도 많았다. 토양내 carbofuran의 잔류량을 배양 4주 동안 측정한 결과, 10%의 cellulose와 황산마그네슘을 동시에 첨가한 토양에서 carbofuran의 잔류량이 대조토양과 10% cellulose만을 첨가한 토양이나 10% cellulose와 황산제일철 동시 첨가 토양에 비해 매우 많아서($p < 0.01$), 황산염과 마그네슘 함량이 일정 농도 이상으로 높은 토양에서 carbofuran의 분해가 지연되는 결과를 나타내었다.

參考文獻

- 정영호, 박영선(1990) 農藥學, 全國農藥技術者協會, p. 308-310.
- 韓國農藥工業協會(1997). 農藥年譜.
- Chakarabarry, A.M.(1982), Biodegradation and detoxification of environmental pollutants, CRC Press. Boca Raton. Florida, p. 10-12.
- Shelton, D.R., and Parkin, T.B.(1991). Effect of moisture on sorption and biodegradation of carbofuran in soil, J. Agric. Food Chem. 39 : 2063-2068.
- Scow, K.M., Merica, R.R., and Alexander, M.(1990), Kinetic analysis of enhanced biodegradation of carbofuran, J. Agric. Food Chem. 36 : 908-912.
- Chapman, R.A., Harris, C.R., and Harris, C.(1986). Observation on the effect of soil type, treatment intensity, insecticide formulation, temperature and moisture on the adaptation and subsequent activity of biological agents associated with carbofuran degradation in soil, J. Environ. Sci. Health, B21(2) : 125-141.
- Chaudhry, G.R., and Ali, A.N.(1988). Bacterial metabolism of carbofuran, Appl. and Environ. Microbiol. 54(6) : 1414-1419.
- Harris, C.R., Chapman, R.A., Harris, C., and Tu, C.M.(1984). Biodegradation of pesticides in soil : rapid induction of carbamate degrading factors after carbofuran treatment, J. Environ. Sci. Health. B19(1) : 1-11.
- Siddaramappa, R., and Seiber, J.N.(1979). Persistence of carbofuran in flooded rice soils and water, Progr. Water Technol. 11 : 103.
- Venkateswarlu, K., and Sethunathan, N.(1978). Degradation of carbofuran in rice soils as influenced by repeated application and exposure to aerobic conditions following anaerobiosis, J. Agr. Food Chem. 26 : 1148.
- Rao, Y.R., and Sethunathan, N.(1979). Effect of ferrous sulfate on the degradation of parathion in flooded soil, J. Environ. Sci. Health 14B : 335.
- Wahid, P.A., and Sethunathan, N.(1979). Sorption-desorption of α and γ -isomers of hexachlorohexane in soils, J. Agric. Food Chem. 27 : 1050.
- 玄根洙, 朴昌緒, 鄭碩在, 文準(1989). 우리나라 農耕地土壤의 地形別 理化學的 特性, 韓國土壤肥料學會誌, 22(4) : 271-279.
- 玄根洙, 朴昌緒, 鄭碩在, 林尙奎, 嚴基泰(1991). 우리나라 土壤의 土性別 양이온 置換容量, 韓國土壤肥料學會誌, 24(1) : 10-16.
- 農村振興廳, 農藥研究所(1992). 農藥殘留性試驗法, p. 154.
- 韓成洙, 金成朝, 白承和, 崔孝正(1990). 農藥이 湛水土壤中 微生物相 變化에 끼치는 影響, 韓國環境農學會誌, 9(2) : 83-95.
- Simkins, S., and Alexander, M.(1985). Models for mineralization kinetics with the variables of substrate concentration and population density. Appl. Environ. Microbiol. 47 : 1299-1306.
- Parkin, T.B., Shelton, D.R., and Robinson, J.A.(1991). Evaluation of methods for characterizing carbofuran hydrolysis in soil, J. Environ. Qual. 20 : 763-769.
- Karns, J.S., Mulbry, W.W., Nelson, J.O., and Kearney, P.C.(1986). Metabolism of carbofuran by a pure bacterial culture, Pestic. Biochem. Phys. 25 : 211-217.
- 이규승(1997). 農業生態界에 대한 殘留農藥의 影響評價. 韓國環境農學會誌. 16(1) : 80-93.
- 鄭文植, 鄭文鎬, 李鎮憲, 金英奎 共編(1994). 環境化學, 新光文化社, p. 482.
- Matsmura, F.(1982). Toxicology of insecticides, 2nd ed., Plenum Press, New York and London, p. 101-110.