

Marsh와 Pond 형태의 인공 습지를 이용한 Parathion 농약의 처리에 관한 연구

김세경 · 최종규 · 오세희 · 강호정* · 조경덕[†]

서울대학교 보건대학원 보건환경연구소, *이화여자대학교 과학기술대학원 환경학과

A Study on the Treatment of Parathion Pesticide Using Marsh and Pond Type Constructed Wetlands

Se-Kyung Kim · Jong-Kyu Choi · Sehee Oh · Hojeong Kang* · Kyung-Duk Zoh[†]

Institutue of Health & Environment, School of Public Health, Seoul National University

**Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*

(Received May 17, 2004; Accepted August 10, 2004)

ABSTRACT

The microcosm type wetland systems were constructed in order to treat wastewater contaminated with parathion. The microcosm reactor consisted of marsh and pond type. The experiment was carried out using batch (marsh or pond) and continuous (marsh-pond and pond-marsh type) systems. In the batch reactor, marsh-type wetland completely removed parathion in water within 8 days, while pond reactor removed 97% of parathion during the same period. During parathion degradation, the amount of 4-nitrophenol production, one of the metabolites from parathion degradation, was higher in marsh-type batch reactor. In the continuous systems, both marsh-pond and pond-marsh combination systems effectively removed parathion from water, and the production of 4-nitrophenol was also minimal. In the extraction experiment, the parathion and its metabolite were not found in the wetland soil and the plant. In order to achieve both aerobic and anaerobic conditions, the continuous wetland system combining marsh and pond type can be the alternative for the non-point source pollutants such as parathion pesticide.

Keywords: parathion, 4-nitrophenol, constructed wetland, marsh, pond

I. 서 론

과거에 버려진 땅으로 간주되었던 습지가 70년대 이후 환경 생태적 가치를 인정받으며 개발하고 보호해야 할 중요한 생태계로 받아들여지고 있다. 경제적, 생태적, 문화적으로 다양한 기능을 수행할 뿐만 아니라, 특히 환경오염물질에 의해 오염된 오염수의 정화 기능면에서 친환경적이고 수질 정화능력이 크며 인공적 하수처리시설에 비해 경제적이란 이점까지 가지고 있기 때문이다. 습지를 이용한 수처리 현황을 살펴보면, 주로 북유럽과 북미에서 오래전부터 진행되어 왔고, 습지 식물을 이용한 하수처리에 관한 과학적인 연구는 1952

년 독일의 Seidel에 의해 최초로 수행되었다.¹⁾ 정확한 숫자가 알려져 있지는 않으나 현재 약 1000여개에 가까운 인공 혹은 자연 습지가 수처리 및 수질 개선에 이용되고 있다.

현재 미국 EPA에서 제안하고 있는 도시 폐수 처리를 위한 습지 디자인은 [Marsh-Pond-Marsh] 형태이다. 첫 번째 marsh에서는 BOD, TSS, 병원균 등이 제거되고, ammonification 반응이 활발히 일어난다. 이후 pond로 보내지면 무기인(inorganic phosphorus)을 제거하고 질산화(nitrification)를 통해 질소가 제거된다. 그리고 마지막 marsh에서 탈질화(denitrification)가 일어나게 된다. 이러한 습지 디자인은 자연습지의 형태를 그대로 모방한 것으로 여러 가지 난분해성 오염물질들의 처리를 위해서도 적용되어져 왔다.²⁾ 최근 우리나라에서도 소규모의 인공습지를 이용한 축산폐수 및 질소, 인 등의 제거에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{3,5)}

[†]Corresponding author : Institute of Health & Environment,
Seoul National University
Tel: 82-2-740-8891, Fax: 82-2-745-9104
E-mail : zohkd@snu.ac.kr

우리나라의 농약 중에서, 살충제의 경우 연간 생산량은 약 91,642 ton이고 연간 소비량은 약 91,770 ton으로 다른 농약류에 비해 월등히 높다. 이중 methyl parathion(0,0-dimethyl O p-nitrophenyl thiophosphate, 일명 parathion)은 유기인계 살충제(organophosphorus insecticide)로써 가장 독성이 강한 살충제의 하나로 미국 EPA에 toxicity class I로 등록된 물질이며, Restricted Use Pesticide(RUP) 범위 내에 포함시켜 구입과 사용에 엄격한 제재를 가하고 있다. 또한 parathion은 독성 범위가 넓고, 포유류에 대한 독성이 높으며 잔류기준이 0.1 mg/kg으로 낮은 편으로, 자연 환경 존재 시에 빠르게 분해되나 분해 부산물인 paraoxon, p-benzoquinone, 4-nitrophenol의 경우 독성이 커서 문제가 된다.

Parathion 살충제는 지표수에서 주로 생물학적 분해, 가수분해, 휘발, 광분해 등에 의해 분해된다.⁶⁾ 이중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 생물학적 분해이고, 퇴적물이나 부유물질로의 흡착 등이 분해과정에 주로 영향을 미치게 된다.⁷⁾ 실제로 parathion은 물만 포함된 조건이 아닌 식물이나 퇴적물 조건이 더해졌을 때 제거 효율이 높은 연구 결과를 보였다.⁷⁾ 또한 parathion은 N과 P의 oxide기가 붙어 있어, 습지의 호기조와 혐기조를 거치면서 분해가 일어나기에 좋은 조건을 갖추었다. Marsh와 pond 형태의 인공 습지(constructed wetland)는 혐기성과 호기성 조건들을 갖추었을 뿐만 아니라, parathion이 비점오염원(nonpoint source)에서 주로 배출됨을 감안할 때 습지 시스템을 이용한 처리가 매우 유용할 것으로 여겨진다.

따라서 본 연구에서는 배치식과 연속식 형태의 인공 습지 시스템을 parathion 처리에 적용하였다. 먼저 배치식에서는 수심을 약 10 cm로 하고 다양한 식생을 높은

밀도로 식재한 시스템인 marsh 형태의 인공 습지 시스템과 pond 형태로써 수심이 약 75~150 cm인 인공 습지 시스템을 구축하여, parathion의 분해 효율 및 부산물의 생성 경향을 관찰하고, 계절적 요인의 영향을 살펴보았다. 또한 연속식에서는 marsh-pond와 pond-marsh 두 시스템을 이용하여 혐기성과 호기성 조건을 모두 제공하여 parathion의 분해 효율 및 부산물의 생성 경향을 관찰하였다.

II. 연구방법

1. 재료

시료는 ChemService사의 순도 99.4% methyl parathion과 순도 99% 4-nitrophenol을 사용하였으며, acetonitrile 용매는 J. T. Baker사의 HPLC grade용을 사용하였다.

2. 반응조의 구성

본 연구에서는 미국 EPA의 보고서인 Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters⁷⁾와⁸⁾ Yang 등의 연구⁹⁾를 참고하여 microcosm 형태의 반응조를 건설하였다.

Fig. 1은 배치식인 marsh 및 pond 형태의 습지 시스템 모식도를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 marsh 형태의 반응조는 지름이 35 cm, 높이가 50 cm이고, pond 형태의 반응조는 지름이 35 cm, 높이가 60 cm인 acryl 재질의 소재로 제작하여 사용하였다. Marsh 반응조와 pond 반응조의 매질은 동일하게 구성하였다. 여기서 매질의 조건은 투수율이 높아야 하며 식물의 생장조건에도 부합하여야 한다. 본 실험에서 식

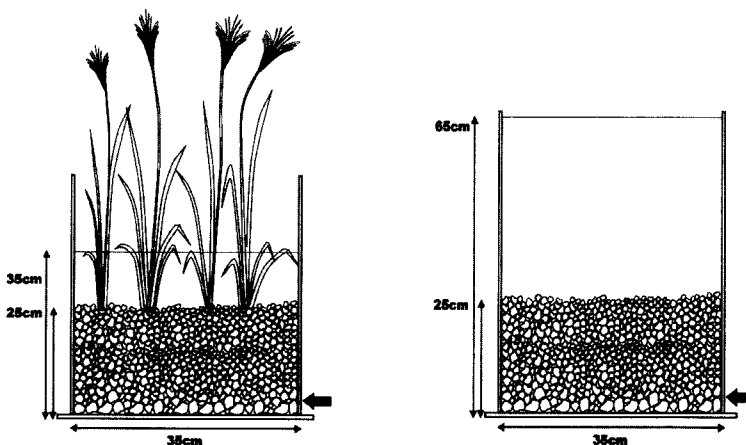


Fig. 1. Schematic representation of the 25 l marsh (left) and 50 l pond (right) microcosms setup.

생으로 사용한 식물은 우리나라 습지에서 가장 많이 발견되는 갈대(*Phragmites australis*)를 이용하였는데, 갈대는 공극율이 큰 사질 토양 및 습지의 조건에서 적합한 식생을 갖고 있다. 따라서 이 조건을 고려하여 사질 토양과 자갈을 적절히 혼합하여 media를 구성하였다. 토양 및 자갈은 강에서 채취한 것을 이용하였으며, 모래(15 kg)를 상부의 주요 구성성분으로 하고 중간부위는 10~20 mm 정도의 자갈(15 kg), 맨 아래 부분은 40~60 mm 정도 크기의 큰 자갈(10 kg)을 이용하였다(건조중량 기준).

Marsh 반응조에는 갈대를 식재하였다. 평균 질량이 224 g/plant인 갈대를 반응조 크기를 고려하여 일정한 간격으로 반응조당 다섯 포기씩 식재하였다. Marsh 반응조의 물 부피는 25 l이었고, pond 반응조는 50 l이었다.

연속식 반응조의 경우, Fig. 1에 나타나 있는 marsh와 pond 형태의 반응조를 연결하여 marsh-pond 형태와 pond-marsh 형태의 조합을 가진 습지 시스템을 구축하였다.

3. 배치(batch)식 실험

배치식 실험은 marsh 형태의 반응조와 pond 형태의 반응조를 이용하여 총 40일에 걸쳐 수행하였다. 기온이 높은 여름철(marsh와 pond 형태)과 기온이 낮은 겨울철(marsh 형태) 두 번에 걸쳐 수행하였으며, 환경 조건과 parathion 분해 효율과의 관계를 알아보기 위해 pH, DO, 온도 등을 측정하였다. 샘플은 반응조의 상부와 하단에 설치된 tab에서 채취하였고, 실험기간동안 반응조의 상, 하부에서 나타나는 parathion의 분해 경향과 분해부산물인 4-nitrophenol 생성 경향을 관찰하였다. Parathion(수용해도 50 mg/l)의 초기 주입농도는 10 mg/l로 하였으며, 초기 농도가 parathion의 제거 효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 겨울철 실험시 marsh 형태의 반응조에서 parathion의 초기농도를 2, 10, 15 mg/l로 변화시켜 parathion의 제거효율과 분해부산물인 4-nitrophenol의 생성 정도를 살펴보았다.

4. 연속식 실험

질소와 인계열의 화합물은 고도 처리 방법 중 A₂O (Anaerobic-Anoxic-Aerobic) 공법과 이 방법을 응용한 방법을 통하여 제거가 잘 이루어진다.^{10,11)} 이 기법을 marsh와 pond의 습지 시스템 조합에 적용하여 적합한 모형을 파악하고자 연속식 실험을 수행하였다. 조합은 Marsh-pond와 pond-marsh 형태로 구성하고 실험 시작

시에 각각의 반응조와 reservoir에 parathion 용액 5(mg/l)을 주입하였다. 반응조의 유속은 350에서 450 ml/hr로 동일하게 유지하였고, 체류시간은 배치식 실험의 결과를 고려하여 총 7일로 하였다. 연속식 실험에 이용된 두개의 marsh 반응조에는 평균 무게가 232 g/plant인 갈대를 각각 다섯 포기씩 식재하였다. 각 조합에 이용된 네 개의 반응조 상부와 하부에서 실험 초기에는 2일마다, 실험 후반부에는 3일마다 시료를 채취하였다. 배치식 실험과 마찬가지로 환경 조건과 분해 효율과의 관계를 알아보기 위해 pH, DO, 온도 등을 측정하였으며, 제거 효율을 측정하기 위해 반응조와 reservoir에서 parathion과 분해부산물인 4-nitrophenol의 농도를 분석하였다.

5. 추출 실험

먼저 배치식 실험이 완료된 후 식물에 축적된 parathion의 양을 알아보기 위하여 갈대에 대한 추출실험을 실시하였다. 갈대 추출실험은, 배치식 실험이 끝난 후 갈대의 뿌리, 줄기, 잎을 각각 분리하여 60°C oven에서 약 6시간 정도 건조시킨 다음, acetonitrile과 methanol 용매를 이용하여 갈대 1g당 5ml 용매의 비율로 ultrasonicator를 이용하여 12시간 동안 sonication을 시켜 추출하였다. 추출액을 0.2 µm filter (Advantec MFS Inc., USA)를 이용하여 거른 후, parathion과 4-nitrophenol의 농도를 HPLC로 분석하였다.¹²⁾

토양에 축적된 parathion의 양을 알아보기 위해 역시 배치식 실험이 완료된 후 토양에 대한 추출 실험을 수행하였다. 배치식 실험이 끝난 토양을 oven에서 건조시키고 토양 1g 당 10 ml acetonitrile 용매의 비율로 ultrasonicator를 이용하여 약 18시간 동안 추출하였다. 추출한 용액 5 ml를 CaCl₂(5 g/l) 용액 5 ml와 혼합한 후, 0.45 µm filter(Millipore Co., USA)를 이용하여 거른 뒤 HPLC로 분석하였다.¹³⁾

6. 분석 방법

Parathion과 분해부산물인 4-nitrophenol의 분석은 Dionex사의 Summit™ HPLC system을 이용하였다. Detector는 UVD340S(Dionex)를 이용하였고, 칼럼은 Supelcosil™ LC-18(25 cm×4.6 mm i.d., 5 µm Particles)을 이용하였으며, eluent 구성은 acetonitrile:H₂O(50:50 v/v%)로 하였다. 분석 시 flow rate는 1.0 ml/min이었으며, parathion은 277 nm 파장에서 14분대에, 4-nitrophenol은 314 nm 파장에서 4분대에 peak가 관찰되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 배치식 실험 결과

먼저 marsh와 pond 형태의 배치식 습지 시스템을 이용하여 parathion의 제거 효율을 살펴 보았다. 실험이 이루어진 기간은 무더운 여름이었으며, marsh와 pond 두 시스템에서 측정된 반응조의 온도는 평균 28.4°C로 차이를 나타내지 않았다. 실험 기간 동안 관찰한 DO 농도는 Fig. 2에서 보듯이 marsh 반응조의 상, 하부에서 각각 11.3 mg/l, 3.4 mg/l의 농도를 보였고, pond 반응조의 상, 하부에서 각각 8.2 mg/l, 3.6 mg/l의 농도를 보였다. 상, 하부의 농도차가 크다는 것을 알 수 있는데 이로써 호기성 조건과 혐기성 조건이 모두 존재함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 2를 살펴보면, 반응조 상부의 경우 시간이 지나면서 DO의 농도가 증가하는 경향을 보이는데, 그 원인은 chlorophyll의 농도가 증가함

에 따라 조류의 양이 증가하고 갈대가 성장함에 따라 광합성이 활발해져 수중 산소의 농도가 증가하였기 때문이라 여겨진다. 반면에 두 반응조의 하부 DO 농도는 증감 없이 일정한 경향을 보였다. pH 역시 반응조의 상부에서는 점점 증가하는 경향을 보였고, 하부에서는 일정한 경향을 보였다. pH의 증가 역시 반응조 상부에서 조류가 생성되고 식물이 광합성을 할 때 CO₂를 사용함으로써 산도가 줄어들어 나타난 현상으로 여겨진다.⁸⁾

반면에 겨울철에는 낮은 기온으로 인하여 갈대가 성장 및 광합성을 멈추고 조류 또한 번식하지 않았다. 따라서 상부의 DO 농도가 8.7 mg/l로 여름철의 11.7 mg/l보다 낮았으며, 하부의 DO 농도는 5.0 mg/l로 여름철보다 다소 높은 경향을 보였다. 여름철에 비해 호기성 조건과 혐기성 조건이 뚜렷이 구별되지 않았다.

여름철 marsh 형태와 pond 형태 반응조 상, 하부에서의 parathion 제거 효율을 비교한 결과는 Table 1에 나타내었다. 실험 결과 pond 반응조의 상, 하부와 marsh 반응조의 하부에서 8일 만에 거의 모든 parathion이 제거되는 높은 효율을 보였고, marsh 반응조의 상부에서는 같은 시간 동안 약간 낮은 96%의 제거 효율을 보였다. 이 분해속도를 유사1차 반응속도식에 적용시킨 결과, 반응속도 k값이 약 0.25에서 0.89 day⁻¹ 사이로, 반응조 형태와 위치에 따라서 약간의 차이를 나타내었으나 대체로 1차 반응속도식에 부합하였다.

다음으로, 배치식 반응조에서의 parathion 제거 양상과 분해부산물인 4-nitrophenol의 생성경향에 대하여 살펴보았다. 실험 결과 Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 parathion은 marsh와 pond에서 약 일주일 안에 모두 제거되는 경향을 보였다. 또한 분해부산물인 4-nitrophenol의 최대 생성량은 marsh의 경우가 pond의 경우보다 많았다. 이는 marsh 형태의 습지 시스템이 pond 시스템보다 parathion의 분해와 분해부산물의 분

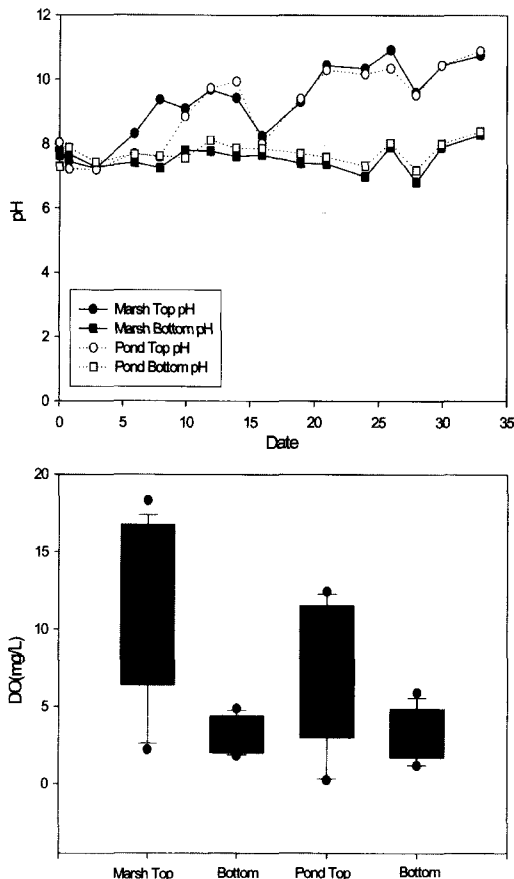


Fig. 2. The pH change and DO concentration in the batch type reactors during parathion degradation.

Table 1. Summary of removal efficiency (%), pseudo first-order rate constant (day⁻¹), and the metabolite production (4-nitrophenol, %) from the batch type marsh and pond reactors

Wetland Type	Marsh		Pond	
	Top	Bottom	Top	Bottom
Removal (%)	99.9	99.8	97.9	99.5
k (day ⁻¹)	0.25	0.89	0.55	0.67
4-nitrophenol production (%)	12.0	82.1	5.3	15.2

*k: pseudo first-order rate constant for parathion degradation.

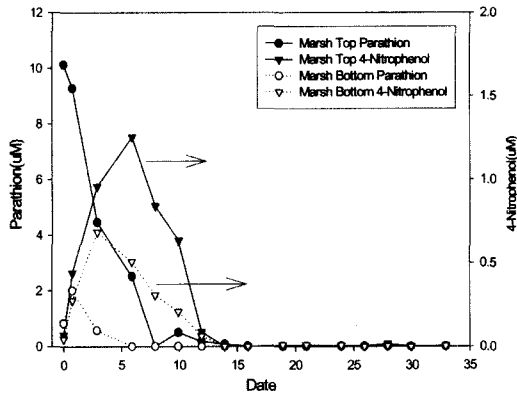


Fig. 3. Parathion degradation and 4-nitrophenol production in the marsh type batch reactor experiment (average temperature: 28.3°C, initial parathion concentration: 10 mg/l).

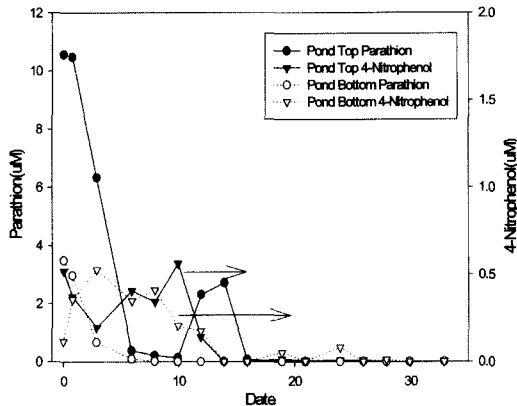


Fig. 4. Parathion degradation and 4-nitrophenol production in the pond type batch reactor experiment (average temperature: 28.3°C, initial parathion concentration: 10 mg/l).

해에 더 효과적임을 나타낸다. 그 이유로는 pond 시스템에 비하여 marsh 시스템내 갈대 뿌리 등에 존재하는 미생물들에 의한 효과와 토양 흡착 등에 의해 parathion의 분해가 더 잘 이루어졌기 때문이라고 여겨진다.

겨울철 marsh 형태의 습지 시스템에서 parathion의 초기 농도를 변화시켜 제거율과 4-nitrophenol의 생성율을 살펴본 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 각 농도별 8일간의 parathion 제거율은 여름철과 비교하여 현저히 낮았으며 이는 외부 기온의 차이에 의한 것으로 사료된다. 낮은 농도인 2 mg/l를 주입하였을 때는 marsh의 상부와 하부에서 모두 제거되었다. 그러나 초기 농도를

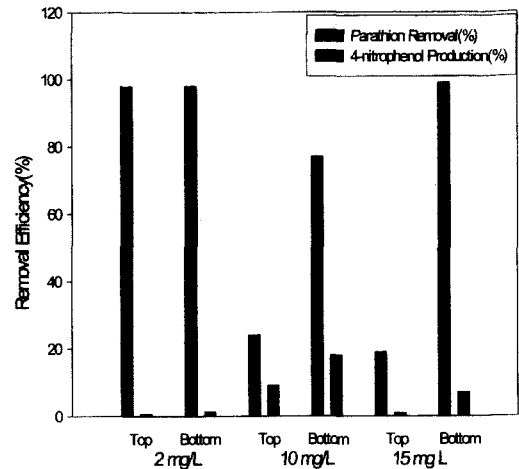


Fig. 5. Parathion removal efficiency and 4-nitrophenol production % in the marsh type batch reactor while changing initial concentration of parathion within 8 days (average temperature : 6.7°C).

10, 15 mg/l로 증가시켰을 때는 marsh 상부에서 제거율이 현저히 감소됨을 보인 반면 유출수(effluent)에서는 여전히 높은 제거율을 보였다. 이는 비록 고농도의 오염물질이라 하더라도 습지 토양을 통과하면서 흡착(adsorption)이나 식물의 뿌리, 그리고 토양 미생물 등에 의해 수중에서 제거되기 때문이다.¹⁴⁾

2. 연속식 실험

배치식 실험의 결과를 통하여 marsh와 pond 형태의 습지 시스템이 안정적으로 parathion을 분해시키는지 살펴보았다. 다음으로 이 두 시스템을 조합한 연속식 습지 시스템(marsh-pond, pond-marsh)을 구축하여 호기성 조건과 혐기성 조건을 모두 제공하면서 parathion의 분해 효율 및 분해 부산물의 생성 경향을 관찰하였다.

먼저 두 시스템의 DO 농도 변화 결과를 Fig. 6에 나타내었다. marsh-pond 조합의 상부 DO는 9.8 mg/l의 평균을 보였고, 하부 DO의 경우 5.6 mg/l의 평균을 보였다. 또한 pond-marsh 조합의 상부 DO도 9.8 mg/l의 평균을, 하부도 6.1 mg/l의 평균을 보여 배치식처럼 용존산소의 농도가 marsh와 pond에서 뚜렷이 구분되지는 않았으나 역시 두 시스템 모두 호기성과 혐기성의 상태가 공존하고 있음을 알 수 있었다. 반응조 상부에서 용존산소의 농도가 증가한 이유는 역시 조류(algae)의 증가에 의한 광합성의 결과로 여겨진다.

Marsh-pond와 pond-marsh 시스템의 pH 변화를 Fig. 6에서 나타내었다. 습지에서의 pH 변화를 살펴보

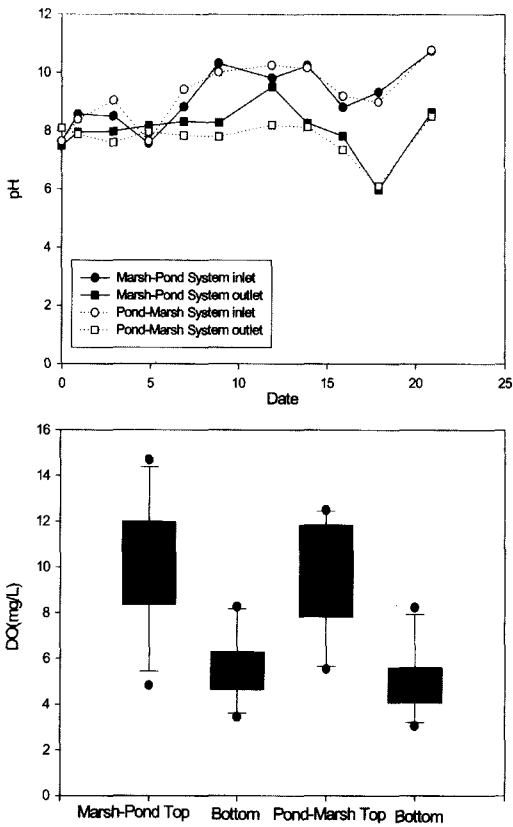


Fig. 6. The change of pH and DO concentration in the marsh-pond and pond-marsh type continuous reactors during parathion degradation.

면, pH가 증가됨을 알 수 있다. 이는 parathion 분해가 진행됨에 따라 인산염이나 질산염과 같은 영양 염류들이 줄어들어 이들이 pH에 영향을 주었다고 판단되며, marsh 반응조의 경우 겨울철에 실험이 진행된 관계로 기온이 낮아져 반응조내 온도가 낮아질 뿐만 아니라, 광량의 감소로 갈대의 성장이 둔화되면서 뿌리 주변 미생물의 양이 감소하여 pH가 약간 감소하는 경향을 보였다고 여겨진다.

연속식 반응조에서의 parathion 분해율과 분해부산물의 생성 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7에 의하면, 약 5 mg/l의 유입수(influent) marsh-pond와 pond-marsh 조합의 습지 시스템을 통과하면서, 약 5일 정도의 안정화 기간을 거친 후 거의 모두 제거되었다. 또한 Fig. 8에 의하면 초기와 약 10일 이후에 parathion의 분해부산물인 4-nitrophenol이 소량 발견되었다. 이 결과에 의하면 marsh-pond와 pond-marsh 두 조합의 parathion 제거율이 커다란 차이를 보이지는 않

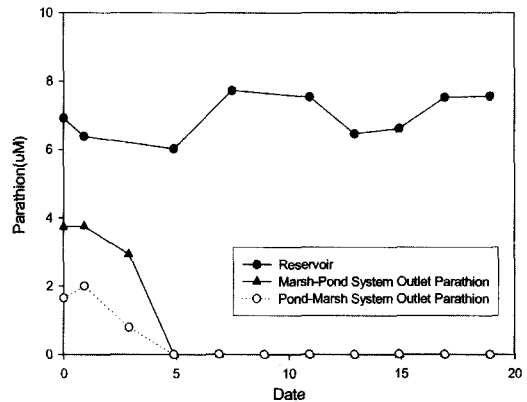


Fig. 7. Parathion degradation in the effluent of marsh-pond and pond-marsh continuous systems (average temperature: 24.4°C, initial concentration of parathion : 5 mg/l).

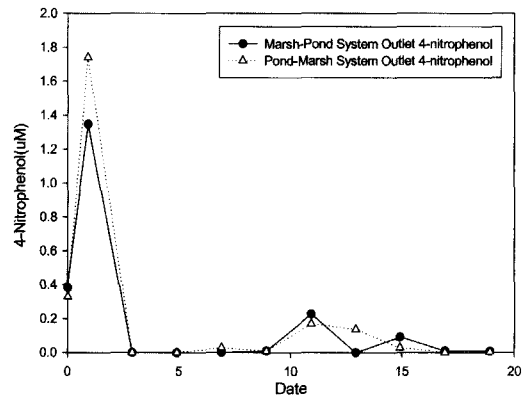


Fig. 8. 4-nitrophenol production in the effluent of marsh-pond and pond-marsh continuous systems during parathion degradation (initial parathion concentration : 5 mg/l).

았다. 이는 연속식 실험의 경우 호기성 상태와 혐기성 상태가 구분되는 조건이 형성되기는 하였으나, 용존산소의 농도가 높아서 완벽한 혐기성 상태가 이루어지지 않았기 때문이라고 생각된다. 또한 배치식 반응조와는 달리 체류시간이 같지 크기 않기 때문에, 미생물에 의한 작용이 충분하지 못하여 parathion이 분해는 되나 최종 무기화 전단계인 4-nitrophenol까지 잘 진행이 되지 않고 그 이전단계의 부산물인 paraoxon이나 p-benzoquinone 상태로 머물러 있을 것이라 판단된다. 따라서 습지를 이용한 parathion 분해에서 중요한 것은, marsh나 pond 반응조의 조합보다는 오염물질이 습지 시스템을 통과하는 동안 생물학적 분해가 충분히 일어날 수 있는 환경을 조성해 주는 것이라 사료된다.

3. 추출 및 흡착 실험

여름철 배치식 실험이 완료된 후 갈대와 토양에 대한 추출실험을 수행하여 parathion 및 그의 부산물 농도를 살펴보았다. 그 결과 marsh와 pond의 토양 및 갈대에서는 parathion 및 4-nitrophenol이 전혀 관찰되지 않았다. 이는 parathion이 식물이나 토양에 흡착되는 속도보다 분해되어 제거되는 속도가 더 빠르기 때문에 퇴적물에서는 검출되지 않는다는 EPA(1988)의 연구결과와 일치하는 것이다.²⁾

IV. 결 론

marsh와 pond로 이루어진 배치식 인공 습지 시스템과 두 형태를 조합한 연속식 습지 시스템을 이용하여 parathion의 분해 경향을 살펴본 결과, 배치식과 연속식 두 시스템 모두에서 높은 분해효율을 보였으며 분해부산물인 4-nitrophenol이 모두 생성되었다. 연속식 실험의 경우 marsh-pond와 pond-marsh 조합 간의 차이가 크지 않았는데, 이는 marsh와 pond 반응조가 완벽한 호기성, 혐기성 상태를 띄지 않았고, 체류시간이 짧아 미생물에 의한 분해가 충분히 이루어지지 못했기 때문이라고 여겨진다. 실험이 끝난 후 갈대와 토양에 대한 추출실험을 실시한 결과 parathion과 4-nitrophenol이 검출되지 않았다. 본 연구의 결과를 통해, marsh와 pond 형태의 인공습지 시스템이 비점오염원인 parathion 농약 처리의 한 대안이 될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

이 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업 연구비에 의해 수행된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Seidel, K. : Macrophytes and water purification. Biological control of water pollution. J. Tourbier and R. W. Peterson Jr., eds. University of Pennsylvania Press, Philadelphia, PA, 109-120, 1976.
2. U.S. EPA : USEPA Design Manual, Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. EPA/625/1-88/022, 1988.
3. 박재홍, 최의소, 조일형 : 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리. 한국물환경학회지, **20**(2), 157-162, 2004.
4. 김영철, 강민기, 이진우 : 고속 산화지와 인공습지 수생처리 시스템에 의한 2차 처리수의 영양소 처리에 관한 연구. 한국물환경학회지, **19**(5), 543-554, 2003.
5. 양홍모 : 하천수정화 근자연형 인공습지의 초기 질소 제거. 한국환경농학회지, **21**(4), 269-273, 2002.
6. U.S. EPA : Bioindicators for assessing ecological integrity of prairie wetlands, EPA/600/R-96/082, 1995.
7. Lartigues, B. S. and Garriages, P. P. : Degradation kinetics of organophosphorous and organonitrogen pesticides in different waters under various environmental conditions. *Environmental Science and Technology*, **29**, 1246-1254, 1995.
8. U.S. EPA : Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. EPA/625/R-99/010, 1999.
9. Yang, L., Chang, H. T. and Huang, M. N. : Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation. *Ecological Engineering*, **18**, 91-105, 2001.
10. Chuang, S. H., Ouyang, C. F., Yuang, H. C. and You, S. J. : Evaluation of phosphorus removal in anaerobic-anoxic-aerobic system - via - polyhydroxyalkanoates measurements. *Water Science and Technology*, **38**(1), 107-114, 1998.
11. Park, S. H., Jun, H. B., Hong, S. P. and Kwon, J. C. : Small sewage treatment system with an anaerobic-anoxic-aerobic combined biofilter. *Water Science Technology*, **48**(11), 213-220, 2004.
12. Means, J. L. and Hinchee, R. E. : Wetlands & Remediation. Battelle Press, Columbus, OH, 358-359, 1996.
13. Jenkins, T. F. and Walsh, M. E. : Development of an analytical method for explosive residues in soil. CREL Rep. 87-7, USATHAMA, AMXTH-TE-FR. 861602, U.S. Army, 1987.
14. Pritchard, P. H., Cripe, C. R., Walker, W. W., Spain, J. C. and Bourquin, A. W. : Biotic and abiotic degradation rates of methyl parathion in freshwater and estuarine water and sediment samples. *Chemosphere*, **16**, 1509-1520, 1987.