

공기공급이 토양내 페놀화합물 제거에 미치는 영향

박준석·남궁완·황의영*

건국대학교 공과대학 환경공학과

*경호기술단 부설기술연구소

Effect of Aeration on Removal of Phenolic Compounds in Soil

Joon-Seok Park, Wan Namkoong, Eui-Young Hwang*

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University

**Institute of Technology, Kyong-Ho Engineering Co., Ltd.*

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the effect of aeration on removal of phenolic compounds in soils. Phenol, 2,4-dichlorophenol, and pentachlorophenol as phenolic compounds were chosen in this study. Texture of soil used was sandy loam. Temperature and moisture content of the soils in lab-scale reactors were maintained at 25°C and at 15%, respectively. Phenolic compounds vaporized from reactors were trapped by methylene chloride solution. Phenolic compounds were applied to the soils as individual compound. Aeration improved the phenol degradation rate in soil, while it did not in case of 2,4-dichlorophenol and pentachlorophenol. The amount of phenol vaporized by aeration was only 0.3% of that of initial phenol compound added to the soil. First order kinetics described the degradation rates of phenolic compounds better than zero order kinetics.

Key words : aeration, removal, phenol, 2,4-dichlorophenol, pentachlorophenol

요 약 문

본 연구는 인위적인 공기공급이 토양내에 존재하는 페놀화합물들의 분해효과에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실시하였다. 페놀화합물들로는 페놀, 2,4-DCP, 그리고 PCP를 선정하였다. 실험에 사용된 토양은 sandy loam이었으며 모든 실험은 25℃ 항온에서 실시하였다. 수분함량은 토양미생물 활성화에 적합하도록 15%로 하였다. 공기공급에 의하여 휘발되는 페놀화합물들은 메틸렌클로라이드 용매를 통과시킨 후 배출하였다. 페놀화합물들은 개별화합물로 토양에 오염시켰으며 시너지효과 등은 고려하지 않았다. 공기공급은 페놀의 제거속도를 향상시켰으나 2,4-DCP, 그리고 PCP의 경우에는 뚜렷한 제거효율 증가를 볼 수 없었다. 약 30일간 공기공급시 페놀의 휘발량은 초기 토양에 오염시킨 페놀량의 약 0.3%로 무시할 정도로 작았다. 각 화합물의 반응속도를 0차반응과 1차반응에 적용시킨 결과 1차반응 모델이 더 적합하였다.

주제어 : 공기공급, 제거, 페놀, 2,4-DCP, PCP

1. 서 론

산업발달과 더불어 합성유기화학제품의 사용 및 생산량이 빠른 속도로 증가하였고 이들 합성유기화학제품의 잘못된 사용과 남용으로 인한 환경오염문제가 중요한 관심사항이 되었다. 유기화합물 중에서 페놀화합물들은 오일정제산업, 코우크스생산공장, 화학제품생산공장, 가정용 가스, 페인트, 플라스틱 제조, 직물 및 목재가공 그리고 합성수지제조 공장 등에서 다양하게 사용되어 왔다. 페놀화합물들은 환경에서 독성을 유발하며 불쾌한 냄새를 일으킬 수 있다. 특히 토양에 유출될 경우 토양오염뿐만 아니라 지하수오염을 야기시킨다¹⁾. 오염된 토양을 정화하기 위한 방법으로는 소각, 고화처리, 토양증기추출(SVE, soil vapor extraction), 토양세척(soil washing, soil flushing), 전기영동법(electrokinetic), 식물 및 미생물을 이용한 처리방법 등이 있다^{2,3,4,5,6)}. 이 중에서 소각, 고화처리, 토양세척 등은 유기화합물로 오염된 토양을 정화하는데에 적합하지 않은 기술이거나 비용이 많이 소요

되기 때문에 미생물을 이용한 토양정화방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 생물학적 처리방법은 처리 후 잔류물 발생량이 적으며 정화한 토양의 20% 이상을 재이용할 수 있기 때문에 선호할 만한 토양처리방법이 될 수 있다⁷⁾. 또한 환경인자만 조절하여 주면 미생물은 자생적으로 성장하기 때문에 처리비용면에서 유리하다. 오염토양의 생물학적 처리공정으로는 콤포스팅, 슬러리 생물상법, 토양경작법, 그리고 지중처리법(in-situ bioremediation) 등이 있다. 이 중 콤포스팅의 경우 처리효율을 향상시키기 위한 공정조절인자로는 온도, 수분함량, pH, C/N비, 공기공급량 등이 있다⁸⁾. 공정조절인자 중에서 공기공급에 대한 처리효율의 결과는 화합물에 따라 다른 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 페놀, 2,4-DCP (2,4-dichlorophenol), PCP (pentachlorophenol) 등의 페놀화합물들로 오염된 토양의 생물학적 처리시 각 화합물별 공기공급의 영향을 살펴보는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 외부온도를 일정하게 유지하기 위한 항온실 및 반응조, 온도조절기, 공기주입기, 휘발성분포집장치 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 반응조는 두께 5mm의 아크릴 원통으로 내경 18cm, 높이 24cm로 유효용적은 6.4L가 되도록 제작하였다. 반응기 내벽에는 페놀화합물들의 흡착을 줄이기 위하여 알루미늄 테이프로 코우팅하였다. 가능한한 공기가 반응조에 고르게 확산될 수 있도록 다공판을 설치하였고, 그 위에는 토양이 하부로 떨어져 공기유입관이 폐쇄되는 것을 방지하기 위하여 미세한 망을 부착하였다.

공기공급은 다공판과 반응조 바닥 사이에 설치된 유입관을 통하여 주입하였다. 공기유량은 페놀화합물들의 휘발을 최소화하면서 토양내 호기성을 유지시킬 수 있도록 약 31L/m³(토양)/min (약 200mL/min)으로 주입하였다. 이는 Hwang(1999)이 디젤오염토양을 호기성으로 유지하기 위하여 공급한 공기주입량인 약 200L/m³(토양)/min (약 100mL/min) 보다는 작은 양이

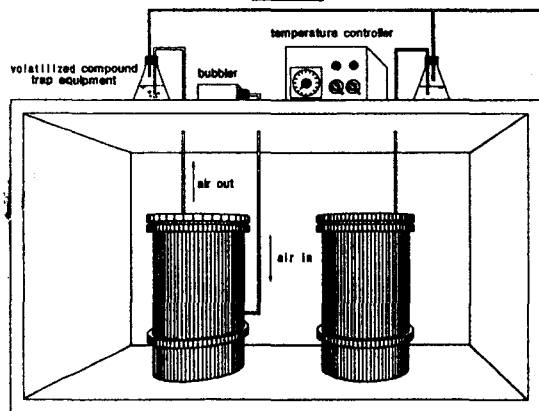


Fig. 1. Experimental apparatus used in this study.

었다⁹⁾. 유입된 공기는 상부의 배출라인을 통하여 배출시켰다.

배출라인에는 배출된 공기 중에 포함되어 휘발되는 페놀화합물을 포집할 수 있도록 메틸렌클로라이드(methylene chloride) 용매가 채워진 500mL 삼각플라스크를 저온이 유지되도록 설치한 후 배출가스가 용매를 통과하여 대기 중으로 배출되도록 하였다. 항온실의 온도는 25℃로 일정하게 유지하였다.

2.2 실험재료 및 성상

토양은 건국대학교 공과대학 부근의 토양을 상부에서 15cm 깊이까지 채취하였으며 실내에서 약 1주일 간 풍건시킨 후 2mm 체를 통과시킨 후 4℃에서 보관, 사용하였다. 본 토양은 calgon test 결과 모래, 실트 그리고 점토가 각각 62.9%, 22.9%, 그리고 14.2%로 나타난 sandy loam이었다. pH는 6.8로 중성에 가까웠으며, TOC와 수분함량은 각각 0.5%와 9.8%이었다. 중금속함량은 Pb, Cu, Cr, Ni의 농도가 각각 12.8, 23.2, 11.1, 19.5mg/kg이었고, Cd은 검출한계 미만이었다. 이는 토양내 중금속의 평균적 농도와 비교하면 그리 높지 않은 수치이다⁹⁾. 페놀화합물들을 오염시키기 전 토양 내의 페놀화합물 농도는 검출한계 미만으로 나타났다. 본 연구에서는 페놀화합물로서 페놀, 2,4-DCP, 그리고 PCP를 선정하였다. 본 실험에서는 각 물질별 혼합에서 발생할 수 있는 시너지효과 등은 고려하지 않았다.

2.3 실험조건 및 운전방법

본 연구를 수행하기 위한 실험조건을 Table 1에 간략히 나타내었다. P-A, 2,4-D-A, PCP-A는 약 31L/m³(토양)/min으로 공기를 공급하였고, P-NA, 2,4-D-NA, 그리고 PCP-NA는 각각의 대조실험으로서 공기공급을 하지 않았다. 여기에서

Table 1. Experimental conditions of this study

Experiment	Contamination Compound	Ini. Conc. ^{a)} (mg/kg)	Aeration Flow Rate (L/m ³ of soil/min)
P-A	Phenol	661.2±9.4	about 30
P-NA	Phenol	670.2±29.2	—
2,4-D-A	2,4-Dichlorophenol	91.5±5.6	about 30
2,4-D-NA	2,4-Dichlorophenol	87.4±15.3	—
PCP-A	Pentachlorophenol	114.5±1.6	about 30
PCP-NA	Pentachlorophenol	118.2±3.4	—

a) Ini. Conc. = Initial Concentration(Average ± Standard Deviation)

약자로 사용한 P, 2,4-D, 그리고 PCP는 각각 페놀과 2,4-dichlorophenol, 그리고 pentachlorophenol을 의미하며, A는 공기공급을 한 경우를 N은 공기공급을 하지 않은 대조실험을 나타낸다. 토양수분함량은 습윤질량기준으로 15%가 되도록 조절하였다. 이는 토양내 수분함량이 일반적으로 10~20%인 것을 고려하여 선정한 것이다. 페놀의 초기농도는 20 Soil Toxicity Unit (20 TU)을 고려하여 토양미생물에 충격을 주지 않도록 약 700mg/kg으로 하였다¹⁾. 2,4-DCP의 초기농도는 20TU를 고려하여 약 100mg/kg으로 하였다. PCP는 20 TU가 30mg/kg으로 낮았지만 난분해성물질로 주목을 받고 있는 페놀화합물로서 이보다 고농도인 약 120mg/kg으로 오염시켰다. 페놀화합물들은 물에 대한 용해도가 낮아 메틸렌클로라이드에 용해하여 토양에 주입하였으며 메틸렌클로라이드가 미생물 활성에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 토양 50g당 1mL씩 총 60mL의 메틸렌클로라이드를 사용하였다. 이는 토양 10g에 메틸렌클로라이드 0.2mL를 가한 양이며 미생물의 분해활동에 독성을 미치지 않는 정도이다. Namkoong(1988)의 연구에서는 토양 10g(건조질량 기준)에 증류수를 첨가한 후 10일 뒤 0.1mL의 메틸렌클로라이드를 첨가하여 토양의 ATP를 비교한 결과 메틸렌클로라이드 첨가 후 약 10%의 감소

를 보였다¹⁾. 본 실험에서는 페놀화합물들이 토양에 고르게 오염될 수 있도록 하기 위하여 토양 50g씩을 200mL 비이커에 분취한 후 페놀화합물을 용해한 메틸렌클로라이드 0.2mL를 열십자방향으로 5군데 주입하였다. 이를 유리막대를 이용하여 충분히 혼합 후 5회 반복하여 1mL를 첨가하였다. 이 과정에서 혼합은 페놀화합물을 토양에 고르게 분포시키며, 용매를 휘발시키는 효과를 가져온다.

2.4 분석방법

시료채취 시에는 반응조 내벽에 접하고 있는 부분의 토양을 긁지 않고 채취하였다. 채취한 토양은 농도분석시에 건조질량으로 환산하고 토양내의 수분함량을 모니터링하기 위하여 즉시 수분함량을 측정하였다. 페놀화합물 추출은 미국 환경보호청이 제시한 Test Methods for Evaluating Solid Waste의 the Method 3540 (Soxhlet Extraction)를 기초로 하였으나¹⁰⁾, 예비실험결과 회수효율에 큰 차이가 없는 것으로 나타나 추출시간을 4시간으로 조정하였다. 추출액은 유기용제에 내성이 있는 0.2 μ m polytetrafluoroethylene 여지로 여과 후 회전식 농축기(rotary evaporator)를 사용하여 농축하였다. 농도분석은 the Method 8040 (phenols)에 따라 가스크로마토그래프

(Hewlett Packard 5890 Series II)로 분석하였다. 검출기는 FID, 컬럼은 methyl silicone이 코팅된 capillary column HP-1 (길이 25m × 내경 0.32μm × 필름막 두께 0.52μm)을 사용하였다. 시료주입구와 검출기의 온도는 각각 200℃와 250℃로 하였다. 초기온도는 페놀과 2,4-DCP의 경우 70℃, 그리고 PCP의 경우에는 200℃로 하였으며, 분당 10℃씩 250℃까지 승온하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공기공급이 페놀분해에 미치는 영향

임의농도의 페놀, 2,4-DCP, 그리고 PCP를 오염되지 않은 토양에 오염시킨 후 시료분석과 같은 방법인 속실텐 추출법(soxhlet extraction)으로 추출하였다. 추출액의 분석결과 각 화합물에 대한 회수율은 페놀, 2,4-DCP, 그리고 PCP가 각각 약 87%, 81%, 그리고 98%로 PCP가 가장 높게 나타났다. 미생물활성에 큰 영향을 주지 않는 범위에서 공기공급이 페놀의 생물학적 분해에 미치는 영향을 살펴보고자 토양을 700mg/kg으로 오염시켰으며 초기시료를 분석한 결과 P-A는 661.2 ± 9.4mg/kg, P-NA는 670.2 ± 29.2mg/kg로 검출되었다. Fig. 2는 반응시간 경과에 따른 페놀의 농도변화를 나타낸 것이다. 공기를 공급한 P-A와 공기를 공급하지 않은 P-NA 모두 반응 초기 1일이 경과한 후 급격한 농도감소를 보였다. P-A의 경우 반응 1일째의 페놀분해율은 초기농도의 약 35%이었으며, P-NA는 약 26%였다. 반응 1일 이후 P-A는 계속적으로 페놀의 농도가 감소하였다. P-NA의 경우에는 약 7일경까지는 P-A와 경향이 비슷하였으나 그 이후에는 P-A보다 상대적으로 감소 경향이 뚜렷하지는 않았다. 이는 페놀이 호기성조건에서 비교적 분해가 잘 되기 때문이다¹¹⁾. 공기를 공급한 경우에는 약 20일이 지난 후 페놀이 거의

분해되었으나 공기공급을 하지 않은 경우에는 약 30일 이후에도 80%정도만이 제거되었다. 결과적으로 공기공급으로 토양내부의 호기성을 유지하는 경우 페놀의 분해반응을 촉진하였다. 본 실험에서 분해가 활발히 일어났던 초기에 공기공급이 분해를 크게 촉진하지 못한 것은 반응기의 높이가 24cm로 낮아 토양층 두께가 두텁지 못하였으므로 공기공급 없이도 반응기 상부의 head space에 있는 공기만으로 호기성유지가 가능하였을 것이다. 약 2주 후부터 P-NA의 분해가 저조한 것은 공기공급이 없어서 head space의 공기가 모두 소모되었기 때문인 것으로 판단된다.

대기 중으로 휘발되는 페놀의 양을 측정하여 토양내 페놀의 제거가 생물학적 분해에 의한 것인지 아니면 휘발 등의 물리적 인자에 의한 것인지를 판단해 보았다. 공기를 공급한 경우 페놀 휘발누적량은 반응 1일째 0.2355mg이었던 것이 7일째까지는 4.7790mg으로 증가하다가 이후 서서히 감소하였으며 17일 이후에는 검출되지 않았다. 27일 동안 휘발된 페놀의 양은 5.4909mg이었으며 이는 초기 페놀오염량의 약 0.3%로 매우 미미하였다. 페놀휘발 누적량은 초기에 토양을 오염시킬 때 반

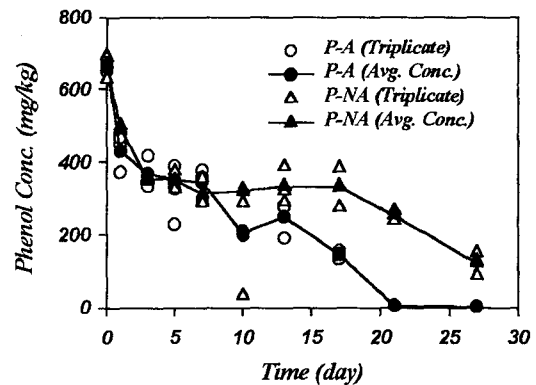


Fig. 2. Effect of aeration on degradation of phenol in soil.

응기에 첨가된 폐놀질량에 대하여 약 30일의 운전 기간 동안 휘발된 폐놀의 질량비를 의미한다. 공기 공급을 하지 않은 경우에는 휘발된 폐놀의 양이 검출되지 않았다. 공기공급시 배가스중에는 폐놀성분이 함유되었을 경우에는 대기환경에 위해하므로 바이오필터 등에 의하여 처리한 후 배출하는 것이 바람직하다. 대기중에서 폐놀의 TLV-TWA와 TLV-STEL은 각각 5ppmv (19mg/m³)와 10ppmv (38mg/m³)이며, 냄새를 감지할 수 있는 한계농도는 0.047ppmv(0.2mg/m³)이다¹²⁾. 여기에서 TLV-TWA (Threshold Limit Value - Time Weighted Average)는 작업자가 1일 8시간, 주당 40시간을 기준으로 매일 반복적으로 노출되어도 건강에 악영향이 없는 시간가중 평균농도를 의미하며, TLV-STEL (Threshold Limit Value - Short Time Exposure Limit)은 작업자가 자극, 피부질환, 정신적 혼란상태 없이 15분 이내로 1일 4회 이내로 노출될 수 있는 시간가중 평균농도를 의미한다¹³⁾. Zilli 등(1996)의 연구결과에 의하면 140mg/m³의 농도를 92m³/m³(충전물질)/h의 부하율로 유입시 냄새감지농도 미만으로 처리되었다¹²⁾.

3.2 공기공급이 2,4-DCP분해에 미치는 영향

염소기가 비교적 적은 염소계 폐놀화합물들은 여러 가지 미생물들에 의하여 호기성 조건에서 즉시 분해가 가능하지만 염소기가 많을 수록 미생물학적 분해에 저해를 일으킨다¹⁴⁾. 2,4-DCP는 폐놀에 비하여 상대적으로 난분해성이기 때문에 미생물 대사에 저해를 일으키지 않도록 초기농도를 100mg/kg으로 조절하였다. 2,4-DCP의 퇴비화가 능성 실험은 공기를 공급한 2,4-D-A와 공기를 공급하지 않은 대조실험(2,4-D-NA)으로 하였다. 초기농도 분석결과 2,4-D-A는 91.5±5.6mg/kg, 2,4-D-NA는 87.4±15.3mg/kg이었다. 반응시간

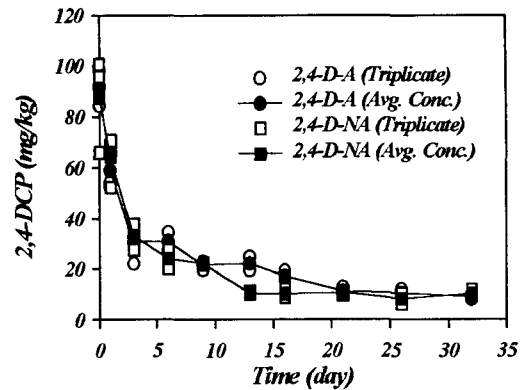


Fig. 3. Effect of aeration on degradation of 2,4-dichlorophenol in soil.

경과에 따른 2,4-DCP의 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 반응 3일째 2,4-DCP는 초기농도의 66.6%, 2,4-D-A는 62%가 분해되었으며 그 이후 모두 서서히 분해되는 양상을 보였다. 32일이 지난 후 2,4-DCP는 초기농도의 90.5%가 분해되었고 2,4-D-A는 88.2%가 분해되었다. 2,4-DCP의 경우 폐놀과는 달리 공기공급에 의한 분해율의 뚜렷한 차이는 보이지 않았다. 공기공급에 의하여 휘발되는 2,4-DCP의 양은 기기의 검출한계 미만이었다. 2,4-DCP의 경우 공기공급에 의한 분해효율의 증가는 거의 없는 것으로 나타났다.

3.3 공기공급이 PCP분해에 미치는 영향

공기를 공급한 PCP-A와 공기를 공급하지 않은 대조실험(PCP-NA)에서의 농도변화를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 4). PCP-A와 PCP-NA의 초기농도는 각각 114.5mg/kg와 118.2mg/kg이었다. PCP는 폐놀이나 2,4-DCP 보다는 분해가 느리게 일어났으며 29일이 지난 후 PCP-A는 초기농도의 37.9%, PCP-NA는 26.6%가 분해되었다. PCP의 경우 초기농도에 제거율은 낮았지만 공기공급 유무에 따른 제거특성이 다르게 나타나 공기를 공

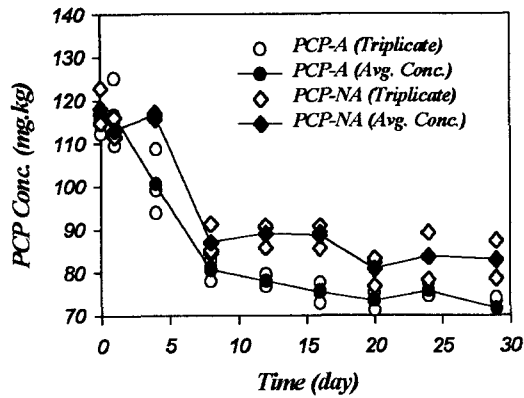


Fig. 4. Effect of aeration on degradation of pentachlorophenol in soil.

급하는 경우 제거효율을 다소 증진시켰다. 공기공급에 의하여 휘발된 PCP의 양은 2,4-DCP과 마찬가지로 기기의 검출한계 미만이었다.

3.4 분해속도상수 비교

Table 2에는 각 페놀화합물들의 분해반응을 0차 반응과 1차반응에 각각 적용하여 나타내었다. 주로

1차반응이 0차반응보다 더 높은 상관성을 가지고 있었으며 특히 페놀과 2,4-DCP의 경우에는 1차반응 모델에 대한 상관성이 높았다. 상관도가 더 높았던 1차반응에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 페놀의 경우 공기를 공급한 P-A는 반감기가 3.7일로 공기공급을 하지 않은 P-NA의 반감기인 16.5일보다 짧았다. 호기성 토양상태에서 일반적인 페놀의 반감기는 고농도의 경우에는 10일 정도이며 저농도의 경우에는 1일 정도라고 한다¹⁵⁾. 반응속도상수 K도 P-A가 0.18/day로 P-N의 0.04/day보다 높게 나타났다(Fig. 5(a) 참조). 공기공급을 하지 않고 페놀의 제거를 실시한 Namkoong(1988)의 연구에서는 초기농도 700mg/kg일 때 K값은 0.17/day이었다¹⁾. 본 실험의 반응속도상수 K값은 공기공급을 한 경우가 0.19/day로써 Namkoong(1988)의 실험결과 보다는 다소 높았으나 공기공급을 하지 않은 경우에는 0.04/day로써 매우 낮았다. 이는 토양의 종류가 달라 토양의 물리·화학적 특성과 미생물종류 등이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

2,4-DCP의 분해경향을 살펴보면 공기를 공급한

Table 2. Estimation of kinetic parameters based on zero order and first order models

Experiment	Compound	Initial Conc. ^{a)} (mg/kg)	First order			Zero order	
			H-L ^{b)}	r ^{c)}	K ^{d)}	r	K ^{e)}
P-A	Phenol	661.2±9.4	3.7	0.92	0.18	0.93	20.63
P-NA	Phenol	670.2±29.2	16.5	0.86	0.04	0.81	13.05
2,4-D-A	2,4-dichlorophenol	91.5±5.6	10.8	0.86	0.06	0.77	1.82
2,4-D-NA	2,4-dichlorophenol	87.4±15.3	14.9	0.93	0.06	0.77	1.73
PCP-A	pentachlorophenol	114.5±1.6	41.3	0.88	0.02	0.87	1.53
PCP-NA	pentachlorophenol	118.2±3.4	51.8	0.86	0.01	0.85	1.27

a) Initial concentration ± standard deviation

b) H-L = Half life (day)

c) Correlation coefficient

d) First order kinetic constant (1/day)

e) Zero order kinetic constant (mg/kg/day)

경우와 공급하지 않은 경우 1차반응에서는 반응속도상수 K는 0.06/day로 같게 나타났다(Table 2와 Fig. 5(b) 참조). 다만 반감기가 공기를 공급한 경우 10.8일로 공기를 공급하지 않은 14.9일보다 다소 짧았으나 큰 차이는 없었다. 결과적으로 2,4-DCP의 경우 공기공급의 효과는 거의 없었다. Howard 등(1991)은 호기성 토양에서의 2,4-DCP의 반감기가 고농도일 경우에는 약 70일이며 저농도일 경우에는 약 7.3일 정도라고 하였다¹⁵⁾. Namkoong(1988)의 연구에서는 자연상태하에서 초기농도 90mg/kg인 2,4-DCP의 분해시 분해속도상수 K는 0.46/day이었다¹¹⁾.

PCP의 분해반응속도를 살펴보면(Table 2와 Fig. 5(c) 참조) 1차반응 적용시 공기를 공급한 PCP-A의 경우에는 K가 0.02/day이었으며 PCP-NA에서는 0.01/day이었다. 공기공급에 따른 분해속도상수 K값은 0.01/day로 큰 차이를 보이지 않았으나 PCP는 매우 독성이 강하며 난분해성 화합물이기 때문에 폐놀과는 달리 이 값의 차이가 큰 의미를 가질 수도 있다. 따라서 공기공급이 PCP 분해를 촉진하였는지를 알아보기 위하여 이원배치법으로 분산분석표를 작성하여 F-검정을 하였다. 이원배치법은 실험계획법 중의 한 방법으로 반복이 있는 실험에서(예, triplicate) 2개 이상의 인자들이 실험결과에 영향을 미치는지를 검정하는데 유용한 방법이다.

검정결과 각 인자의 F0값이 F보다 클 경우에는 이 인자가 실험결과에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 본 실험결과를 F-검정한 결과 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 $F_0 = 59.11$, $F = 7.31$ 이었다. F0값이 F값보다 매우 큰 값을 나타내므로 공기공급은 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 PCP의 분해를 촉진하는 것으로 판단되었다. 반감기는 PCP-A가 41.3일 그리고 PCP-NA가 51.8일이었다. Howard 등(1991)은 호기성 토양하에서의 PCP의 반감기는 고농도일 경우에는 약 178일, 저농도일

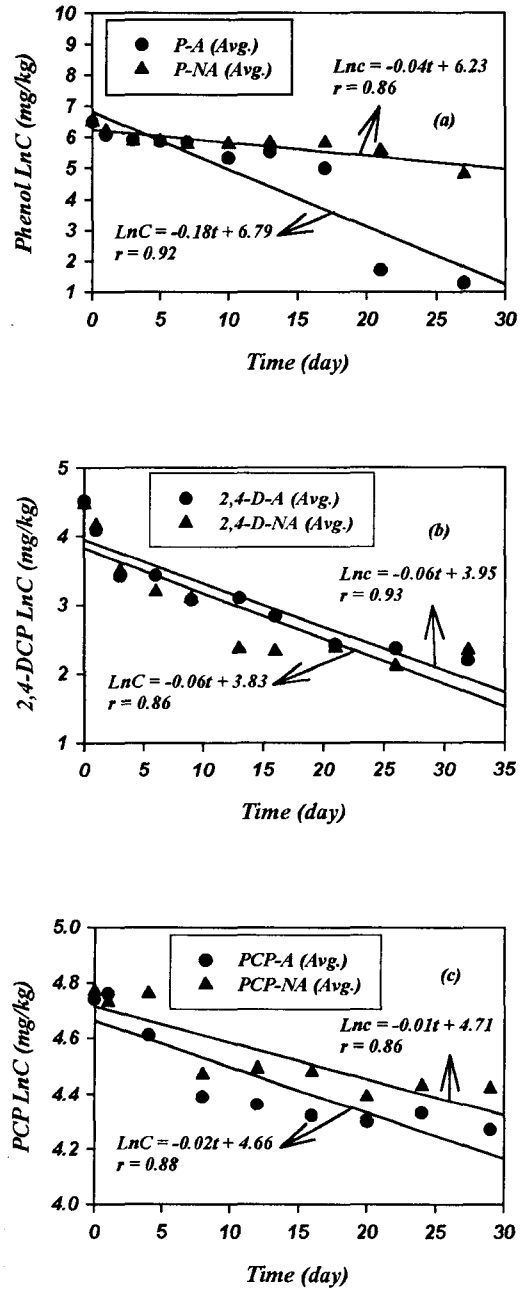


Figure 5. First order kinetic models of phenolic compounds in soil by aeration[(a) phenol, (b) 2,4-DCP (c) PCP]

경우에는 23일로 페놀이나 2,4-DCP의 경우보다 훨씬 더 길다고 하였다⁹⁾. 초기농도가 30mg/kg인 PCP의 토양제거에 관한 Namkoong (1988)의 연구에서는 0.01/day이었다¹⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 페놀, 2,4-DCP (2,4-dichlorophenol), PCP (pentachlorophenol) 등의 페놀화합물들로 오염된 토양의 생물학적 처리시 각 화합물별 공기공급의 영향을 살펴보는 것을 목적으로 하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 페놀은 초기농도 약 700mg/kg으로 약 30일 간 운전하였을 때에 공기를 공급한 경우 거의 분해되었으나 공기공급을 하지 않은 경우에는 약 80%가 제거되었다. 토양내 공기공급은 페놀의 제거반응을 촉진하였다.
2. 2,4-DCP는 초기농도를 약 100mg/kg으로 하여 운전하였을 경우 공기공급에 따른 제거 효율향상은 없었다.
3. PCP는 초기농도 120mg/kg에서 공기를 공급하였을 경우 공기공급하지 않은 경우 보다 제거효율을 크게 향상시키지는 못하였으나 이원배치법에 의한 F-검정결과 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 제거를 촉진하는 것으로 나타났다.
4. 페놀은 공기공급을 한 경우 1차반응속도 상수가 공기를 공급하였을 때에는 0.18/day로 공기공급을 하지 않은 0.04/day보다 높았다. 그러나 2,4-DCP는 공기공급 유무에 상관없이 0.06/day로 동일하였으며, PCP는 각각 0.02/day와 0.01/day이었다.
5. 공기공급에 의한 페놀의 휘발량은 초기 오염량의 0.3%로 매우 작았다.
6. 페놀화합물의 제거특성을 표현하기에는 1차 반응모델이 0차반응보다 더 적합하였다.

참 고 문 헌

1. Namkoong, W., "Removal of Phenolic Compounds in Soil", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin(1988)
2. NATO/CCMS, "Demonstration of Remedial Action Technologies for Contaminated Land and Groundwater", EPA/600/R-93/012a, Final Report, Vol.1(1993)
3. Boulding, J.R., "Practical Handbook of Soil Vadose Zone, and Ground-Water Contamination : Assessment, Prevention, and Remediation", Lewis Publishers, pp.731-760(1995)
4. US, EPA, "Innovative Treatment Technologies : Annual Status Report (7th ed.), Application of New Technologies at Hazardous Waste Sites", EPA-542-95-008, No.7, Revised September, Office of Solid Waste and Emergency Response, p10(1995)
5. Acar, Y.B., Alshwabkeh, A.N., "Principles of Electrokinetic Remediation", Environ. Sci. Technol., Vol.27, No.13, pp.2638-2647(1993)
6. Leeson, A. and Alleman, B.C., "Phytoremediation and Innovative Strategies for Specialized Remedial Applications", The Fifth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, Battle Press(1999)
7. Keehan, K.R., Sick, W., and Myler, C.A., "Composting to Bioremediation Explosives Contaminated Soils", EPA Forum on Innovative Hazardous Waste Technologies, pp.479-491(1991)
8. Hwang, E.Y., "Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil Using Simulated Composting

- Process”, Ph. D. Dissertation, The University of Konkuk in Korea(1999)
9. Fuller, W.H. and Warrick, A.W., “Soils in Waste Treatment and Utilization”, Vol. I, CRC, pp.3-73(1985)
 10. US, EPA, “Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846”, 3rd ed.(1986)
 11. Alexander, M., “ Introduction to Soil Microbiology”, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp.219-222(1977)
 12. Zilli, M., Fabiano, B, Ferraiolo, A., and Converti, A., “Macro-Kinetic Investigation on Phenol Uptake from Air by Biofiltration : Influence of Superficial Gas Flow Rate and Inlet Pollutant Concentration”, Biotech. & Bioeng., Vol.49, pp.391-398(1996)
 13. Massacci, G., “Physico-Chemical Characteristics and Toxicology of Landfill Gas Components” in “Landfilling of Waste : Biogas” edited by Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R., E&FN SPON, pp.73-84(1996)
 14. Wilson, D.J. and Clarke, A.N., “Hazardous Waste Site Soil Remediation : Theory and Application of Innovative Technologies”, Marcel Derker, pp.311-431(1994)
 15. Howard, P.H., Boethling, R.S., Jarvis, W.F., Meylan, W.M., and Michalenko, E.M., “Handbook of Environmental Degradation Rates”, Lewis publishers(1991)