

강변여과에서 여과거리에 따른 페놀, 1,4-다이옥산 그리고 다이아지논의 거동에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Behavior of Phenol, 1,4-dioxane and Diazinon along the Travel Distance in Riverbank Filtration

최홍규* · 정일화 · 정관수** · 이영득*** · 김승현[†]

Hong-Gyu Choi* · Il-Hwa Jeong · Kwan-Sue Jung** · Young-Deuk Lee*** · Seung-Hyun Kim[†]

영남대학교 환경공학과 · *수자원기술 · **충남대학교 토목공학과 · ***대구대학교 생명환경학부

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University · *Water Resources Engineering Corporation

**Department of Civil Engineering, Chungnam National University

***Division of Life and Environmental Science, Daegu University

(2013년 4월 9일 접수, 2013년 5월 23일 채택)

Abstract : An experiment using a 5 m-long sand column was performed to evaluate the resisting capability against micro-pollutants of the infiltration gallery, multi-purpose filtration pond and riverbank/bed filtration, of which the filtration distance is becoming increasingly shorter in Korea. Results suggested that the Korean riverbed sand contained significant amount of organics, resulting in a relatively vigorous adsorption of chloride ion on the sand surface. Results also indicated that while phenol was not detected in the column filtrate, both 1,4-dioxane and diazinon were exposed to adsorption by the sand as they moved through the column, decreasing their peak concentrations during the movement. It can be expected that the peak concentrations will diminish significantly in the practical scale due to its longer travel distance.

Key Words : Riverbank/bed Filtration, Infiltration Gallery, Multi-Purpose Filtration Pond, Micro-Pollutant, Column Experiment

요약 : 복류수와 천변여과지 그리고 점차 여과거리가 짧아지고 있는 우리나라의 강변/하상여과 등이 가지는 미량오염물에 대한 저항능력을 평가하기 위하여 5 m 길이의 모래칼럼을 이용한 실험을 수행하였다. 실험결과 우리나라 하상의 토양은 유기물 함량이 상당하여 염소이온의 토양표면 흡착이 비교적 활발함 알 수 있었다. 페놀은 칼럼의 여과수에서 검출되지 않았고, 1,4-다이옥산과 다이아지논은 하상토양과 흡착반응을 일으키면서 이동하며, 2.5 m의 이동과정에서 1,4-다이옥산의 침투농도는 유입농도의 약 40%로 그 농도가 감소하였고, 다이아지논의 침투농도는 약 60%로 감소하는 것으로 나타났다. 실규모 설비에서는 여과거리가 5 m 보다 더 길기 때문에 침투농도의 감소효과는 상당히 클 것으로 기대되었다.

주제어 : 강변/하상여과, 복류수, 다목적 천변여과지, 미량오염물, 칼럼실험

1. 서론

1991년 낙동강에 페놀오염사건이 발생하고부터 우리나라에서도 보다 안전한 먹는 물에 대한 요구가 커졌고, 그 일환으로 낙동강에서 강변여과가 논의되기 시작하였다.¹⁾ 그 결과 1997년 함안군 칠서면에 하루 산출유량 1,000 m³ 규모의 강변여과정이 5정 설치되었고, 창원시 대산면에 일산 6만 m³ 규모의 강변여과정이 건설되어 현재 운영되고 있으며, 김해시 탄성에도 일산 18만 m³ 규모의 강변여과정이 건설되고 있다.²⁻⁴⁾ 또한, 한국수자원공사에서 창원군 길곡면에 일산 68만 m³ 규모의 대용량 강변여과수 개발사업을 추진하고 있어서 상수원수중 강변여과수가 차지하는 비중이 점차 커질 것으로 예상된다.⁵⁾ 한편, 여과거리가 다소 짧지만 강변여과와 매우 유사한 간접취수법인 하상여과도 울산광역시 태화강, 서울시의 탄천, 홍제천, 장지천, 세곡천 등에 설치되어 하천수질개선 또는 건천의 유지용수 공급용으로 활용되고 있어서 우리나라에서 이 분야의 산업이 앞으로 크게

활성화 할 것으로 예상된다.

우리나라에서 강변/하상여과정의 실용화에 병행하여 이에 관한 연구도 상당히 진행되었으며 주로 산출유량과 여과거리에 따른 다량오염물질의 거동 그리고 배후지의 오염관리에 관한 것들이었다.⁶⁻¹⁵⁾ 이들 연구로부터 우리나라의 강변/하상여과에서 큰 산출유량을 얻기 위해서는 양수정이 하천에 근접해야 한다는 것을 알 수 있었고, 유기물 함량이 높고 세립질인 우리나라의 지층특성으로부터 다량오염물 제거에 필요한 여과거리가 유럽이나 미국만큼 길지 않아도 되며, 상당량의 질산성질소가 배후지에서 자연지하수를 통해 유입된다는 것을 알 수 있었다. 세계적으로도 강변여과에 관한 연구는 주로 여과수의 수질에 집중되었고, 특히 병원성 미생물과 다량오염물질 및 독성물질에 관한 연구가 주를 이루었으며, 전체 대수층에서 오염물질이 균등하게 제거되는 것이 아니라 오염제거의 대부분은 대수층 유입초기의 짧은 여과거리에서 이루어지고 나머지 여과거리에서는 그 제거율이 낮아진다고 하였다.^{16,17)}

[†] Corresponding author E-mail: kimsh@yu.ac.kr Tel: 053-810-2548 Fax: 053-810-4624

강변/하상여과는 지역의 특성에 크게 영향을 받는다.¹⁵⁾ 지역특성을 지배하는 주요 인자로는 기후, 지질, 토지이용 등을 들 수 있으며, 이들 요소들은 서로 밀접하게 연결되어 있다. 지질은 오랜 기간 동안의 기후작용에 큰 영향을 받고, 토지이용은 지질과 현재의 기후에 큰 영향을 받기 때문이다. 대부분이 빙적토인 유럽이나 미국의 지층과 달리 우리나라의 지층은 충적토로 구성되어 세립질이 많고 유기물 함량이 높다. 이 차이로 인해 우리나라에서의 강변여과는 유럽이나 미국에 비해 산출유량이 작고 오염물에 대한 저항이 커서 양수정이 하천에 매우 가깝게 접근하는 하상여과방식이 유리하다고 한다.^{15,18)} 이러한 특성을 반영하듯이 우리나라의 강변여과에서 그 여과거리는 점차 짧아지고 있다. 창원시의 경우 수직정은 수변에서 100~250 m 이격하여 설치되었고 이후 설치된 방사형 집수정은 수변으로부터 약 80 m 지점에 설치되었으며, 김해시의 경우에는 집수정이 수변 30 m까지 근접하였으며 집수정에 부착된 수평집수관은 수변선까지 근접하여 설치되었다.^{3,4)} 가장 최근에 한국수자원공사에서 창녕군 증산리에 설치예정인 강변여과정은 수평집수관의 대부분이 하천의 수변선 바깥쪽 평수로의 하상에 설치될 예정이다.⁵⁾ 우리나라의 강변여과에서 이와 같이 여과거리가 점차 짧아지는 것은 초창기에 도입되었던 유럽형 강변여과로부터 우리나라의 특성에 맞는 형태의 강변여과로 점차 진화하는 과정이라 할 수 있으며, 지질조건이 우리나라와 유럽의 중간 정도인 미국의 강변여과 방식에 크게 영향을 받은 것이라 할 수 있다.^{19,20)} 예를 들어, 하천폭이 약 600 m에 이르고 하류 약 23 km 지점에 댐이 있어 풍수기인 봄 이외의 기간에는 하천의 흐름이 거의 없으며, 농업지대를 관통하여 제초제 등의 독성 화학물질이 상당히 많이 함유되어 있을 뿐 아니라 정체된 흐름으로 인해 하절기에 조류가 크게 번성하는 등 유럽에 비해 강변여과에 불리한 조건을 가지는 미국 켄터키주 루이빌의 강변여과에서도 정당 하루 약 5만 m³의 여과수를 생산하고 있다.²¹⁾ 이곳의 투수계수는 60 m/day로 우리나라에 비해 상당히 크지만 여과깊이가 15 m에 불과한 하상여과 형태로 설치되었으며, 이는 우리나라의 강변여과정 형태의 결정에 적지 않은 영향을 끼쳤다고 할 것이다.¹⁹⁾ 우리나라의 대하천에서 강변여과가 고려되는 지역의 하상의 투수계수가 대략 20~30 m/day 정도로 루이빌의 절반 정도에 불과함을 감안하면 오염물 제거에 필요한 여과거리가 우리나라에서는 더 짧아질 수도 있을 것이다. 대수층에서의 오염물 제거는 대부분 표면반응에 의하고, 우리나라의 대수층과 같이 세립질이고 유기물함량이 클수록 비표면적이 커지고 유기오염물의 흡착이 활발하여 오염제거에 필요한 여과거리는 더 짧아지기 때문이다.^{18,22-24)}

강변여과에서는 대수층이 가지는 물리적, 화학적 그리고 생물학적 기작에 의해 하천수에 함유된 오염물이 완전히 제거되기도 하지만, 보통은 오염물의 농도가 크게 낮아짐과 동시에 오염물이 여과정에 도달하는 시간이 지연되는 특성을 이용한다. 이러한 특성은 개별 오염물질뿐 아니라 지층 특성에 따라라도 달라지며, 따라서 유럽이나 미국에서의 강

변여과의 오염제거능력을 우리나라에 그대로 적용하는 것은 타당하지 않고 우리나라 지층특성을 반영할 필요가 있다. 이러한 관점에서 다량오염물질의 제거현상에 대해서는 이미 상당한 연구성과가 있으나 미량오염물의 거동에 대한 연구는 아직 미미하며, 여과거리가 점점 짧아지고 있는 우리나라의 강변/하상여과를 고려할 때 여과수의 안전성을 확보하기 위해서는 미량오염물에 대한 우리나라 지층의 제거능력을 평가할 필요가 있을 것이다.^{7,9,11-14)}

우리나라의 간접취수에서 매우 짧은 여과거리를 가지는 설비로 복류수를 들 수 있으며, 우리나라 지방상수도의 약 10%를 차지하고 있고, 그 여과거리는 1~7 m로 다양하다.^{9,25)} 이 설비는 그 중요성에 비해 효능에 대한 연구가 미미하며, 부유물질 등 다량오염물에 대한 제거능력이 일부 보고되어 있을 뿐이다.^{9,26)} 또한, 최근에는 4대강사업의 일환으로 설치되는 천변저류지를 보다 효율적으로 이용하기 위하여 다목적 천변저류지가 고려되고 있으며, 하천주변에 비상시에 대비한 저류지를 설치하되 저류지 내부에 인공하천을 조성하여 여과거리 약 3 m인 하상여과를 적용함으로써 하천수질개선이나 친수활동용수 등을 생산하려는 시도이다.²¹⁾ 이러한 설비는 주로 다량오염물을 제거하기 위함이지만 그 여과수가 친수활동용수나 상수원수로 사용되기 때문에 이들 설비의 미량오염물질에 대한 방어능력도 평가되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 여과거리가 점점 짧아지고 있는 우리나라의 강변/하상여과나 복류수 그리고 다목적 여과저류지 등의 설비가 가지는 미량 오염물질에 대한 방어능력을 파악하기 위하여 이를 모사하는 모래칼럼실험을 수행하였으며, 낙동강에 오염사고가 발생한 적이 있는 유기오염물질(폐놀, 1,4-다이옥산)과 농약(다이아지논)을 선택하여 이들 오염물질이 여재층에서 지체되는 정도와 제거되는 정도를 파악하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 연직으로 세운 내경 10 cm, 두께 8 mm, 길이 2.5 m인 2조의 아크릴통을 직렬로 연결하여 유효길이가 5.0 m인 칼럼을 구성하였다. 칼럼 사이는 내경 4 mm의 테프론 튜브로 연결하였다. 이외에도 실험장치에는 70 L들이 저류조, 3 L들이 공급조 그리고 펌프가 포함되었고, 내경 4 mm인 테프론 튜브를 이용하여 이들을 연결하였다. 칼럼에는 50 cm 간격으로 시료채취구를 설치하였다. 실험장치의 개요도는 Fig. 1에 나타내었다.

칼럼에 채운 토양은 낙동강의 4대강사업 준설토에서 얻었고, 채취지점은 성주군 선남면이었다. 토양의 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. 토양의 밀도와 간극률 그리고 유기물함량도 구했으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 밀도와 간극률은 Blake법으로 구했고, 유기물함량은 건조토양시료 300 g을 취하여 360℃에서 2시간 동안 가열처리하기 전후의 중량차이로 보았다.²⁸⁻³⁰⁾

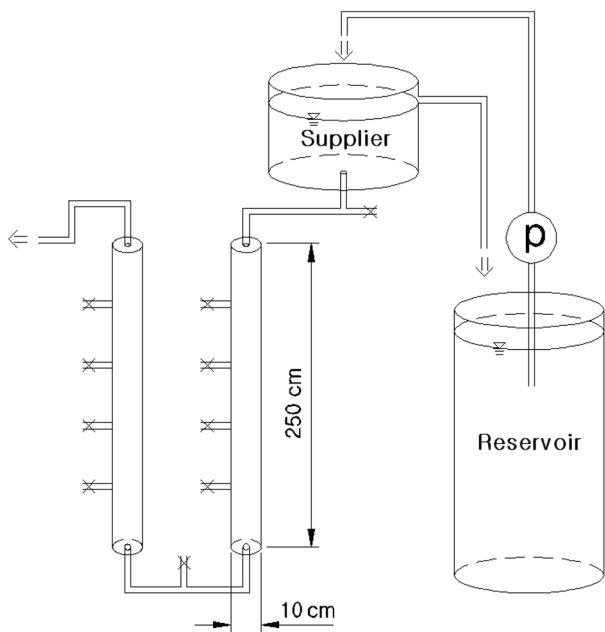


Fig. 1. Schematic diagram of the column experiment.

Table 1. Some characteristics of the soil used in the experiment

Porosity (-)	Bulk density (g/cm ³)	Organic content (%)
39%	1,647	0,3

칼럼운전시 저류조의 원수를 공급조로 양수하고, 공급조의 수위가 항상 일정하게 유지되도록 하였으며, 공급조와 칼럼의 최종출구 사이에 수위차를 두어 칼럼을 통한 흐름이 유지되도록 하였다. 유입수는 증류수를 사용하였다. 본 실험 이전에 30일 동안 오염물질을 혼합하지 않은 유입수를 이용한 흐름실험을 수행하여 토양칼럼의 안정화를 도모하였다. 이 흐름실험의 초기에는 일정한 수위차에 대해서도 칼

럼을 통과하는 유량이 점차 감소하였으며, 이 유량감소가 더 이상 발생하지 않는 것을 안정화가 완료된 것으로 보았다. 안정화 이후 통과유량은 분당 21.8 mL로 이는 4 m³/m²-day에 해당되며, 적용된 수위차는 94 cm이었다. 토양칼럼의 안정화 이후 오염물질을 이용한 본 실험 이전에 토양칼럼의 분산도를 파악하기 위한 예비실험을 수행하였다. 이를 위해 일정한 유입유량으로 운전되는 상태에서 추적자를 함유한 유입수를 투입하였으며, 추적자로는 토양중에서 비교적 잘 보존되는 물질로 알려진 Cl⁻ 이온을 사용하였고, NaCl 용액을 유입수에 주입하여 제조하였다. 유입수의 추적자 농도는 8.9 mg/L였으며, 유입지속시간은 약 90분 동안으로 유입량은 2 L였고, 추적자의 투입이 끝난 후에는 다시 추적자가 없는 유입수를 흘려 넣었다. 추적자 투입이 시작된 순간부터 3시간, 8시간, 13시간 후 각 시료채취구에서 시료를 채취하여 염소의 농도를 측정하였다.¹⁸⁾

본 실험에서는 낙동강에서 수질사고가 발생한 적이 있는 페놀과 1,4-다이옥산, 그리고 사고 경력은 없지만 살충제로 비교적 널리 사용되는 농약인 다이아지논을 원수에 투입하였으며, 유입수에 먼저 페놀을 넣고 예비실험과 같은 방법으로 실험을 수행하였다.¹⁾ 페놀을 이용한 실험을 마친 후 20일 동안 증류수만을 이용하여 칼럼을 운전하였으며, 이후 1,4-다이옥산을 이용한 실험을 앞서서와 같이 수행하였다. 다이아지논의 경우 물에 대한 용해도가 페놀(8.7 g/L)이나 1,4-다이옥산(물과 혼합)에 비하여 60 mg/L로 상당히 낮으므로 34% 유제를 희석하여 유입수를 조제한 후 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 실험에서 페놀, 1,4-다이옥산, 다이아지논의 유입농도는 각각 0.21 mg/L, 0.09 mg/L, 그리고 0.39 mg/L이었다. 염소이온의 농도는 HS-3100 Water Analyzer (휴마스사, 대한민국)로 채취수를 직접 측정하였고, 페놀은 자외선/가시선 분광법(UV/Visible Spectrometry)을 이용, 280

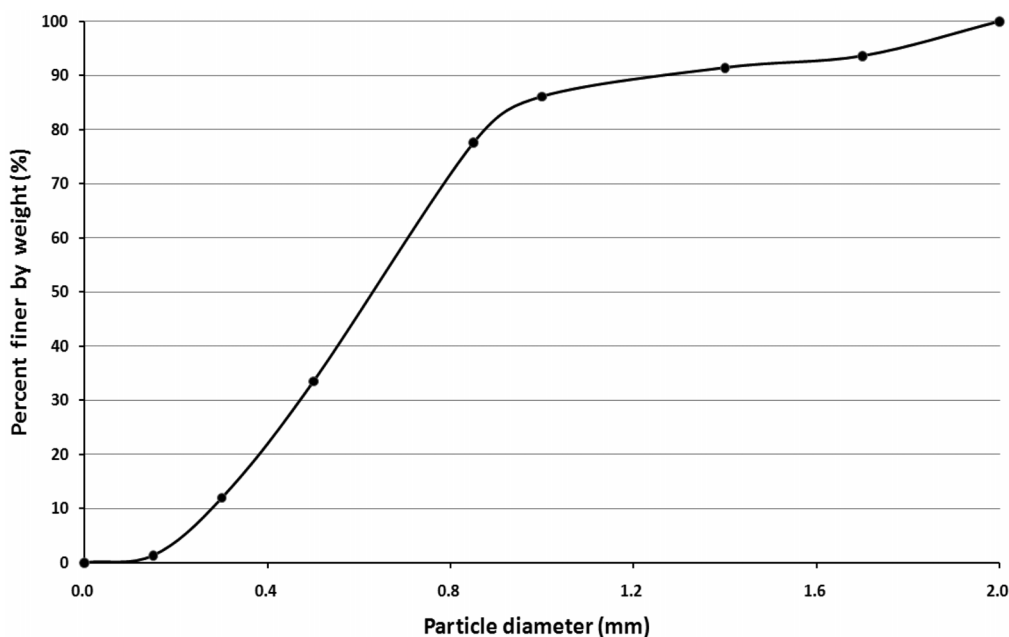


Fig. 2. Particle size distribution of the soil used in the experiment.

nm에서 측정하였다. 1,4-다이옥산은 채취수를 톨루엔으로 분배 추출한 후 기체크로마토그래프/질량분석법(Gas Chromatograph/Mass Spectrometry)으로 분석하였다. 다이아지논은 채취수를 n-hexane으로 분배 추출한 후 감압 농축하고 아세톤에 재용해하여 가스크로마토그래피/질소-인 검출기를 이용하여 분석하였다. 각 시료는 3회 측정하여 평균값을 취하였다. 모든 실험은 20±1℃로 조절된 실험실에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

칼럼실험에 적용한 수위차와 통과유량을 Darcy의 법칙에 대입하여 칼럼의 투수계수를 구했으며, 21.2 m/day이었고, 이 값은 낙동강 중류의 다른 지점의 투수계수와 유사하였다.⁵⁾ 예비실험에서 얻은 염소이온의 시간과 거리에 따른 농도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 칼럼을 통과하면서 농도가 분산되고 있으며 용액상의 질량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 유입된 염소의 총량은 17.8 mg이었고, 3시간, 8시간, 13시간 후에 칼럼에 잔류하는 용액상 염소의 질량은 각각 16.8 mg, 14.0 mg, 10.9 mg이었으며, 이 질량은 각 농도곡선을 적분하여 얻었다. 이러한 질량감소는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 오염원 전선의 앞쪽에서 단회로를 통해 빠른 속도로 칼럼을 빠져나가는 현상에 크게 기인하는 것으로 판단되었다. 또한, 토양의 무기질 표면은 음이온을 띠고 있어 음이온인 염소이온은 토양중에서 반응하지 않는 보존성으로 알려져 있으나 Table 1에서 알 수 있듯이 토양에는 상당한 유기물이 부착되어 있고 이는 음이온 교환능력이 있으므로 상당한 염소이온이 이 유기물에 흡착되었을 것으로도 판단되었다.^{18,31)} 그 이유는 칼럼의 유량이 4 m³/m²-day이고 간극률은 0.39 이어서 토양내부에서의 선속도는 10.3 m/day이므로 10시간 동안 침투농도의 이동거리가 4.29 m이어야 하는데, Fig. 3에서 3시간과 13시간 사이의 침투농도 사이의 거리는 약 2.30 m이므로 염소이온의 이동속도에 대한 지체상수가 1.87로 계산되기 때문이다. 지체상수가 작지만 1보다는 크므로 이는 염소이온이 토양표면과 약간의 흡착반응을 가졌음을 의미한다.¹⁸⁾ 한편, 여과수가 3.2 m 이동하는 동안 염소이온의 침투농도는 분산에 의해 8.9 mg/L에서 약 3.8 mg/L로 약 43%로 줄어들었음을 알 수 있었다.

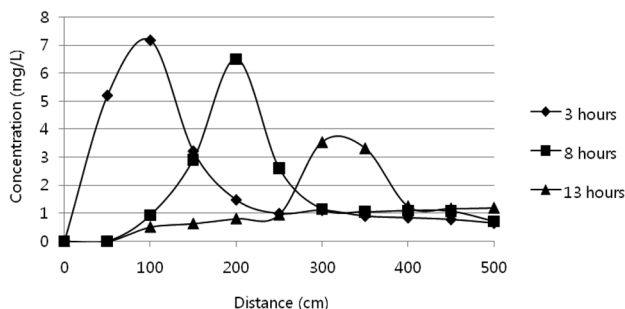


Fig. 3. Behavior of chloride plume in the column.

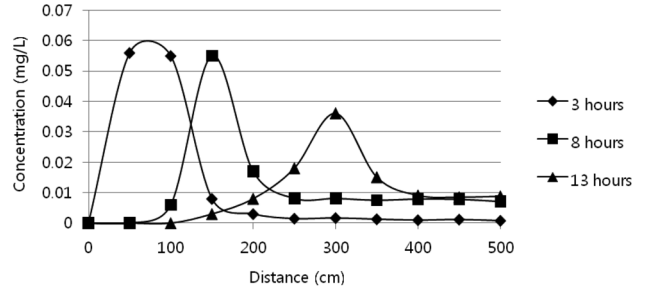


Fig. 4. Behavior of 1,4-dioxane plume in the column.

본 실험에서 얻은 1,4-다이옥산의 이동현상을 Fig. 4에 나타내었다. 1,4-다이옥산의 시간과 거리에 따른 농도분포는 염소이온과 매우 비슷함을 알 수 있었으며, 따라서 1,4-다이옥산도 염소이온과 마찬가지로 토양표면과 약간의 흡착반응을 일으킴을 알 수 있었다. 유입된 1,4-다이옥산의 총질량은 0.18 mg이었으며, 3시간, 8시간, 13시간 후 용액상 1,4-다이옥산의 질량은 각각 0.16 mg, 0.14 mg, 0.12 mg이었다. 이러한 질량감소는 염소이온과 마찬가지로 토양입자에 흡착하는 현상과 Fig. 4에서 알 수 있듯이 단회로에 의해 일부가 출구에서 조기에 빠져나가는 현상에 기인하는 것으로 판단되었다. 1,4-다이옥산의 유입농도는 0.09 mg/L였으며 3 m 통과 후 침투농도가 0.036 mg/L로 약 40%로 감소하여 염소이온과 유사한 정도의 농도감소 경향을 보였으며, 그 원인은 흡착 이외에도 토양이 가지는 분산효과에 의한 것으로 판단되었다. 한편, 모래칼럼에서 1,4-다이옥산의 이러한 비교적 빠른 이동속도에 대한 원인은 매우 작은 옥탄올-물 분배계수(log Kow = -0.27)에서 알 수 있듯이 토양유기물에 잘 흡착되지 않는 특성에 기인하는 것으로 판단되었다.^{18,32)}

본 실험에서 얻은 다이아지논의 이동현상을 Fig. 5에 나타내었다. 토양칼럼에서의 이동속도는 염소이온이나 1,4-다이옥산보다도 더 느렸다. 이는 다이아지논이 log Kow가 3.3으로 비극성 화합물이므로 염소이온이나 1,4-다이옥산보다 물에 대한 용해도가 낮을 뿐만 아니라 토양표면 및 유기물과의 흡착 정도가 더 강하여 상대적으로 이동속도가 느려지기 때문으로 판단되었다.³³⁾ 유입된 다이아지논의 총질량은 0.78 mg이었으며, 3시간, 8시간, 13시간 후에 용액상 다이아지논의 질량은 각각 약 0.48 mg, 0.63 mg, 0.61 mg이었다. 3시간에서의 질량이 8시간에서보다 더 적게 나온 것은 Fig. 5의 3시간에서의 농도곡선에서 칼럼 유입구에서의

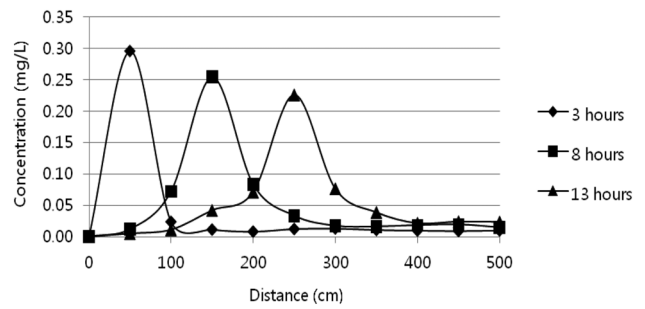


Fig. 5. Behavior of diazinon plume in the column.

농도를 0으로 보았으나 실제로는 이보다 큰 값이었을 것으로 판단되었다. 또한, 시료채취구의 간격이 너무 커서 농도 분포곡선과 실제의 농도분포 사이에도 오차가 있을 것으로 판단되었으며, 이는 Fig. 2와 3에도 해당되는 현상이다. 다이아지논의 유입농도는 0.39 mg/L이었으며 2.5 m 통과 후 침투농도가 0.23 mg/L 즉, 유입농도의 약 60%로 감소하였고 이는 염소나 1,4-다이옥산의 약 40%에 비해 큰 결과였다.

폐놀을 이용한 실험에서는 유입수 이외의 모든 시료에서 폐놀이 검출되지 않았다. 폐놀은 log Kow가 1.46으로 1,4-다이옥산보다는 비극성이며, pKa가 9.99인 약산성의 화합물이나 본 연구에서 사용한 증류수나 국내 하천수의 pH 5.5~7 범위에서는 해리하지 않으므로 상대적으로 이동 속도가 느릴 것으로 판단된다.³⁴⁾ 또한 분자 내에 부분 음전하와 벤젠 고리를 함유하고 있으므로 토양유기물 중에 존재하는 양하전이나 소수성 부위에 흡착되었을 가능성도 높다고 추정되었다. 토양에 흡착된 폐놀은 이동성이 현격히 감소하여 장시간 체류 후에는 결국 생분해될 것으로 예상되므로 강변여과는 물론 여과거리가 짧은 복류수나 다목적 천변여과지 등의 설비만으로도 폐놀오염에 대한 대비책이 충분할 것으로 판단되었다.

이상의 실험결과로부터 미량오염물질에 대한 강변여과의 방어능력을 일부 파악할 수 있었다. 폐놀과 같이 토양에 강한 흡착성을 보이는 물질은 강변여과뿐 아니라 여과거리가 짧은 복류수나 천변여과지에서도 거의 완전히 방어할 수 있음을 알 수 있었다. 토양표면에 흡착된 유기물은 미생물과의 접촉시간이 늘어나서 생분해에 노출되므로 결국은 무해한 물질로 분해될 것으로 예상할 수 있을 것이다. 그러나 1,4-다이옥산이나 다이아지논 등 흡착이 강하지 않은 오염물질은 토양 중에서 상당히 빠른 속도로 이동하여 여과수에 유입되므로 복류수나 천변여과지 또는 강변여과도 이들 오염물질에 대한 완벽한 방어벽이 될 수 없고, 이들에 대한 완벽한 제거를 위해서는 여과수를 추가적으로 처리해야 함을 알 수 있었다. 다만, 복류수나 천변여과지에서도 수평집수관의 매설간격이 매설깊이에 비해 훨씬 커서 오염물이 이동하는 실제의 여과거리는 강변여과수와 유사한 10~20 m에 달하므로 오염물의 침투농도가 감소되는 효과는 본 연구에서보다 훨씬 더 클 것으로 판단되었다. 한편, 본 연구의 결과를 강변여과나 복류수 또는 천변여과지의 설계에 직접 적용하는 것은 어렵다고 할 수 있으며, 이는 여재의 투수계수, 산출유량, 여과거리, 여과속도 등의 여러 설계 및 운영요소들이 먼저 결정되어야 하고, 이들 요소들은 각 현장에 따라 다른 값들이 적용되기 때문이다.

4. 결론

우리나라 하상의 토양은 유기물 함량이 상당히 높고 염소이온의 토양표면에서의 흡착이 비교적 활발한 것을 알 수 있었다. 폐놀은 칼럼의 여과수에서 검출되지 않았고, 1,4-다이

옥산과 다이아지논은 하상토양과 흡착반응을 일으키면서 이동하며 이동과정에서 침투농도가 감소하는 것으로 나타났다. 실규모 설비에서는 여과거리가 더 길기 때문에 침투농도의 감소효과는 상당히 클 것으로 기대되었다.

KSEE

참고문헌

1. Daegu Metropolitan Government, "100-year history of public water supply, 1906~2005" (2006).
2. Ministry of Environment, Korean Government, Gyeongnam Provincial Government, "Investigation of riverbank filtration site at Iryong site," (1998).
3. Changwon City Government, "A research report on the feasibility study on riverbank filtration using collector well and on the investigational result using pilot-plant," (2003).
4. Gimhae City Government, "A research report on the basic and working design for riverbank filtration," (2005).
5. K-water, "A research report on the feasibility study of the riverbank filtration project for the Gyeongnam-Busan regional water supply," (2011).
6. Kim, S. H., Park, Y. K. and Lee, C. H., "Model Development for the Design of Pumping Well Locations in Bank Filtration," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **20**(1), 83~92(1998a).
7. Kim, S. H., Kwon, O. O., Kong, I. C., Kim, I. J., Lee, C. H. and Park, Y. K., "A Study on Ground Water Recharge and Nitrogen Infiltration in a Bank Filtration Site," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **20**(12), 1689~1703(1998b).
8. Kong, I. C., Choi, E. Y., Lee, Y. D., Kim, C. S. and Kim, S. H., "Investigation of Residual Pesticides in Soil and Groundwater and Biodegradation Characteristics of a Model Pesticide of the Bank Filtration Site at Iryong," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **23**(1), 1~11(2001).
9. Gyeongbuk Provincial Government, "A research report on the diminishing of the pollutant loading using riverbed filtration," (2007).
10. Gyeongsan City Government, "A research report on the feasibility of the application of riverbed filtration to Kumho river in Gyeongsan," (2006).
11. Sung, C. D., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Kong, I. C. and Kim, S. H., "A Study on the Water Quality Improvement through Riverbed Filtration-Model Development and Parameter Determination," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(4), 486~494(2003a).
12. Sung, C. D., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Kong, I. C. and Kim, S. H., "A Study on the Water Quality Improvement through Riverbed Filtration-Model Analysis and Model Verification," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(5), 580~587(2003b).
13. Ahn, K. H., Sohn, D. B. and Kim, S. H., "Removal of Organic Matter and Nitrogen in a Model System of Riverbed Filtration," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**(5), 525~534(2005a).
14. Ahn, K. H., Moon, H. J., Kim, K. S. and Kim, S. H., "An Experimental Study on the Distributions of Residual Head and Discharge Rate along Collector Well Laterals of a Mo-

- del Riverbed Filtration,” *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**(12), 1305~1310(2005b).
15. Kim, S. H., “Comparison of Riverbank and Riverbed Filtrations in Korea,” *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(10), 1153~1161 (2007).
 16. Ray, C., Melin, G. and Linsky, R. B. (editors), “Riverbank filtration-improving source-water quality, Part II : Contaminant removal,” Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands(2002).
 17. Tufenkji, N., Ryan, J.N. and Elimelech, M., “Bank Filtration, A simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water,” *Environ. Sci. Technol.*, **36**(21), 423~428 (2002).
 18. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., “Physical and chemical hydrogeology,” John Wiley & Sons, Inc., New York(1990).
 19. Hubbs, S., Ball, K., Haas, D. and Robison, M. J., “Chapter 4. Riverbank Filtration Construction Options Considered at Louisville, Kentucky,” Riverbank filtration-improving source-water quality, Ray, C., Melin, G. and Linsky, R.B. (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (2002).
 20. Wang, J., “Chapter 7. Riverbank Filtration Case Study at Louisville, Kentucky,” Riverbank filtration-improving source-water quality, Ray, C., Melin, G. and Linsky, R. B. (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002.
 21. Ball, K., Manager of the Louisville Water Company, personal correspondent(2011).
 22. Paul, E. A. and Clark, F. E., “Soil Microbiology and Biochemistry,” Academic Press, INC., San Diego, California (1989).
 23. Rittmann, B. E., “The Significance of biofilms in porous media,” *Water Resour. Res.*, **29**, 2195~2202(1993).
 24. Bear, J., “Dynamics of fluids in porous media,” Dover Publications, Inc., New York(1972).
 25. Ministry of Environment, Korean Government, “Statistics on water supply,” (2010).
 26. Baik, M. Y., “A study on purifying efficiency of water quality analysis for infiltrated water as filtered distance-focusing on Purification Plant at Goryeong, Gyeongbuk,” Graduate School of Environmental Study, Yeungnam University, Korea (2012).
 27. Son, D. H., Park, J. Y. and Kim, S. H., “A Study on the Design of Artificial Stream for Riverbed Filtration in Multi-purpose Filtration Pond,” *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(7), 536~543(2011).
 28. Blake, G. R. Bulk density. In Black, C. A., Evans, D. D. Ensminger, L. E. White, J. L. and Clark, F. E. Eds.; Methods of soil analysis part 1-physical and mineralogical Properties, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, pp. 374~390(1965a).
 29. Blake, G. R. Particle density. In Black, C. A., Evans, D. D., Ensminger, L. E., White, J. L. and Clark, F. E. Eds.; Methods of soil analysis part 1-physical and mineralogical Properties, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, pp. 371~373(1965b).
 30. Schulte, E. E., Kaufmann, C. and Peter, J. B., “The influence of sample size and heating time on soil weight loss-on-ignition,” *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **22**(1&2), 159~168 (1991).
 31. Kim, G. H., Kim, K. Y., Kim, J. K., Sah, D. M. and 10 others, “Soil Science,” Hyangmoonsa, Korea(2006).
 32. Howard, P. H., Handbook of Environmental Fate and Exposure Data for Organic Chemicals, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI, pp. 216~221(1990).
 33. Tomlin, C. D. S., “The Pesticide Manual,” 15th ed., British Crop Protection Council, Hampshire, UK, pp. 321~322(2009).
 34. Canadian Council of Ministers of the Environment, “Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health-Phenol 1997,” pp. 1~8(1999).