

不飽和 土壤에서의 PCP의 分布와 移動에 대한 研究

A study on the Distribution and Transport of Pentachlorophenol(PCP) in Unsaturated Soils

張 秉 郁* · 李 到 燮**
Chang, Pyoung Wuck · Lee, Do Seob

Summary

A series of laboratory tests was performed with soil-columns which were compacted with sands and different amount of silt collected from the mid-stream of Gungang, Korea. A known degree of concentration of PCP(Pentachlorophenol) was poured into the soil-columns and concentration of PCP was monitored and analyzed with time and depth.

The results of the study are summarized as follows :

1. PCP was transported into soil along with the movement of moisture under gravitational force. The amount of PCP transported through soil or absorbed by soil varied with soil types.
2. The great amount of PCP was remained at 4~8cm section for the specimen No.2 and at 0~4cm section for the specimen Nos. 3 and 4. Based upon this result it is said that the amount of silt between 30 and 40% may be a threshold value for PCP transported through soil.
3. The amount of PCP remained in the specimen Nos. 2, 3 and 4 is greater than that in the specimen No.1 due to high specific surface of silt and high attraction force between PCP and silt particles in the specimen Nos. 2, 3 and 4.
4. It is said that groundwater under highly permeable soil layer such as specimen No.1 is easily polluted by PCP. That is because the PCP is basically migrated with water under the gravitational force.

* 서울대학교 農業生命科學大學

** 제일엔지니어링(주)

키워드 : Pentachlorophenol, Soil Moisture, Pollutant
Migration, Gravitational Force, Pollutant
Distribution.

I. 緒 論

최근 산업화에 따른 도시 및 産業廢棄物의 증가로 인한 土壤 및 地下水 汚染이 전 세계적으로 큰 문제로 되어 있으며 우리 나라에서도 이에 대한 관심이 고조되고 있다.

有機毒性廢棄物은 1800년대에 처음 合成有機化合物이 생산되면서 발생하기 시작하였고 産業의 급속한 發展과 함께 그 양도 증가하였으며 폐기물의 종류도 더욱 多樣해지고 또 복잡한 형태로 토양에 버려지고 있는 실정이다. 유기 독성폐기물의 有害成分은 주로 有機溶媒, 農藥 등과 같은 有機化合物과 重金屬, 放射能物質(Radionuclide) 등과 같은 無機物로 대별되는데, 미국에서의 조사결과에 의하면 발생빈도와 물질의 유해성으로 보아 有機化合物質에 의한 汚染이 무기물에 의한 것보다 더욱 더 큰 문제가 되고 있다고 한다.⁶⁾

有機化合物質들은 대부분 人體 및 生物에 有害하며, 대체로 高濃度에서 猛毒性을 나타내고 低濃度에서도 장기 노출되는 경우 發癌, 遺傳子變異, 畸形兒 出産, 혹은 기타 疾病의 原因이 되는 경우도 많다.³⁾ 특히, 有機溶媒類의 경우 대부분 물에 잘 녹지 않으며 難分解性이어서 한번 토양 속으로 스며들면 토양입자에 吸着되거나 공극에 갇히게되기 쉽기 때문에, 오염이 발생하면 이로 인한 環境被害는 오랜 기간에 걸쳐 지속된다.

우리 나라에서는 아직 埋立地 주변의 土壤 및 地下水 汚染에 대한 조사가 未洽한 관계로 그 실상을 자세하게 알 수는 없으나 외국에서 조사된 바에 의하면 廢棄物 埋立이 적절히 관리되지 않았거나 침출수의 收集 및 處理施設이 잘 갖추어져 있지 않은 不良 廢棄物 埋立地의 경우 地下水나 周邊環境의 汚染으로 말미암아 여러가지 문제가 심각하게 발생하는 것으로 나타나고 있다.³⁾

지하수는 일단 汚染되면 그 處理費用이 莫大

하고 淨化 또는 回復에 長時間이 所要된다는 점에서 지하수층의 오염조사보다는 지하수가 汚染되기 以前에 不飽和土壤層에서의 오염물의 舉動을 調査 및 豫測하여 對策을 세우는 것이 重要하다고 하겠다.

본 연구에서는 산업 폐기물의 토양내에서의 거동을 조사하기 위하여 실험실에서 模型 Soil-Column을 만들고 유독성 有機化合物의 일종인 PCP(Pentachlorophenol)가 土壤層을 어떻게 移動하고 分布하는가를 調査하는 것을 目的으로 한다.

II. 材料 및 實驗方法

1. 汚染物의 選定 및 特性

PCP는 猛毒性 有機毒性物質을 代表할 수 있는 物理 化學的 特性을 지닌 難分解性이며, 生化學的으로도 안정되어 있고, 산업분야에서도 사용도가 큰 것이기에 汚染物質로 선정하였다.

PCP는 ¹⁴C표식 화합물로서 벤젠 고리에 균일하게 표식된 것이며, 比放射能은 11.2 mCi/mmol이다. PCP는 석탄산(Phenolic) 냄새를 가진 무색의 結晶體이다. 또한 PCP는 대부분의 유기용매에 溶解되고 사염화탄소(Carbon Tetrachloride)와 과라핀에서는 약간 용해되며, 可燃性도 없고, 弱酸이고, 皮膚를 損傷시키며, 哺乳動物인 쥐의 경우 반수치사량(LD₅₀)은 210 mg/kg이고 또 개나 쥐는 70~190일 동안 3.9~10mg/day를 투여했을 때 모두 죽었고, 무지개 송어와 강송어와 같은 非哺乳動物인 魚類의 경우 반수치사농도(LC₅₀)가 0.17mg Sodium Pentachlorophenoxide/l 정도인 猛毒性 物質이다.

본 시험에 사용한 PCP의 物理 化學的 特性은 分子量이 266.3g/mol, 녹는점이 191°C, 100°C에서의 蒸氣壓이 16Pa, 30°C 물에서의 溶解度가 20mg/l이다.

2. 土壤 供試體의 製作 및 實驗 方法

본 실험에서 사용한 土壤은 금강中流에서 採取한 비교적 均等하고 石英質이 많고, 堅固한 모래와 실트이며 모래는 표준체 No. 4(4.75mm)체를 전부 통과하고 No. 200(0.074mm)체에 남는 시료이며, 실트는 No. 200체를 통과한 供試體 중에서 粘土分을 除去한 試料이다. 供試體는 4가지를 만들었고 각 供試體의 모래와 실트의 구성 비율과 供試體의 物理的 特性은 Table-1에서 보는 바와 같다.

Soil Packing은 PCP가 猛毒性 有機化合物이므로 아크릴을 사용할 경우, 汚染物에 의해 壁面이 溶解되므로 유리관을 사용하였다. 유리관의 직경은 3.5cm, 높이는 22cm로서 試料을 깊이 별로 採取할 수 있도록 높이 4cm의 Column 3개를 연결하고 제일 위쪽에 設置하는 1개의 Column은 10cm로 하여 물과 汚染物이 머무르도록 6cm의 空間部를 두고 나머지 4cm는 土壤으로 채웠다. 각 시료에 대하여 공시체를 4개 만들었다. 토양은 건조상태로 채웠으며 공시체가 균일성을 갖도록 진동을 주어 다졌고 각 층이 분리되지 않도록 하였다.

아세톤 500ml에 50mg을 溶解시켜 100ppm의 溶液을 만들었으며 5ml를 4개의 供試體 土壤에 흘려 보내고 1분 후에 60ml의 물을 注入하였다. 각 공시체는 1일 간격으로 4개의 試料로 分離하여 무게를 측정하고 PCP의 濃度 分析을 할

때까지 冷凍室에 保管하였다.

PCP를 抽出하기 위하여 사용된 計器인 GLC (Gas Liquid Chromatograph)는 일반적으로 特定 成分의 氣에 대한 定量 分析을 수행할 때 이용되는 것으로서 感度는 優秀하지만 칼럼에 의한 분리 과정을 거쳐야 하므로 連續測定이 不可能한 計器이다. 본 실험에서 PCP를 檢出하기 위하여 GLC를 사용한 것은 톨루엔에 溶解된 PCP를 最大限으로 抽出해 낼 수 있고 PCP의 檢出에서는 連續測定을 할 必要가 없기 때문이다.

III. 結果 및 考察

1. 標準檢定線의 分析

사용된 GLC를 檢證하기 위하여 標準檢定線을 만들었다. 이때 溶液을 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 PPM을 사용하였고 실험에서 얻은 결과를 最小自乘法에 의해 계산한 결과 $y=0.197079x-0.05226$ 식을 얻었다.

총 시료 80개가 175초 부근에서 PCP의 피크가 나타나고 있어 標準檢定線과 試料分析의 결과가 信賴할 만한 것으로 判斷된다.

2. 實驗의 結果 分析

가. 殘留 PCP의 깊이 分布

Fig. 1은 각 공시체에서 깊이 별로 殘留한 PCP의 量을 나타내고 있고, 그림에서 Y軸은

Table-1. Characteristics of Soil Specimens

| Soil Parameters \ Specimen | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Constitution | Sand 100% | Sand 70% Silt 30% | Sand 60% Silt 40% | Sand 50% Silt 50% |
| Specific Gravity | 2.72 | 2.74 | 2.75 | 2.76 |
| Effective Size(D ₁₀ , mm) | 0.32 | 0.01 | 0.008 | 0.006 |
| Dry Density(g/cm ³) | 1.42 | 1.49 | 1.56 | 1.63 |
| Coefficient of Permeability(cm/sec) | 6.31×10^{-2} | 2.68×10^{-4} | 2.12×10^{-4} | 2.11×10^{-4} |

4cm의 Column을 4개 연결한 총 16cm 공시체 Column의 中央 값이다. Fig. 1(a)에서 공시체 No.1은 0~4cm 구간에서 殘留하는 PCP 양은 PCP의 總量(0.5mg)의 0.4~3%가 殘留하고 있고 4~8cm 區間은 4~4.8%이고 8~12cm 區間은 7~8.2%이고 12~16cm 區間은 27.8~28%

이고 PCP가 가장 많이 檢出된 곳은 Collector 區間으로서 56~60.6%이다. Collector에 모인 PCP의 양은 1일 경과 후에는 56%, 2일 경과 후에는 58%, 3일 경과 후에는 58.2%, 4일 경과 후에는 60.6%이다. Fig. 1(a)에서 0~4cm 區間에서는 시간에 따라 PCP의 양이 현저히 減

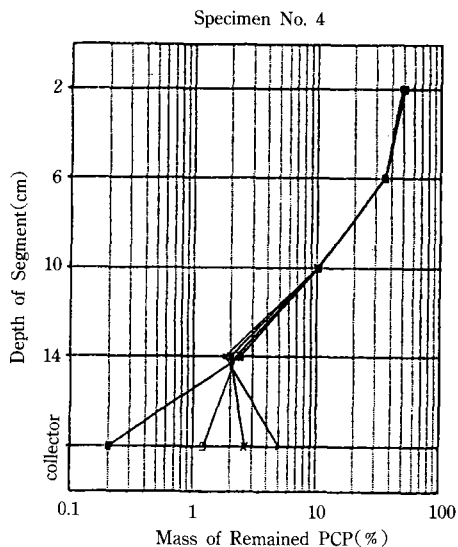
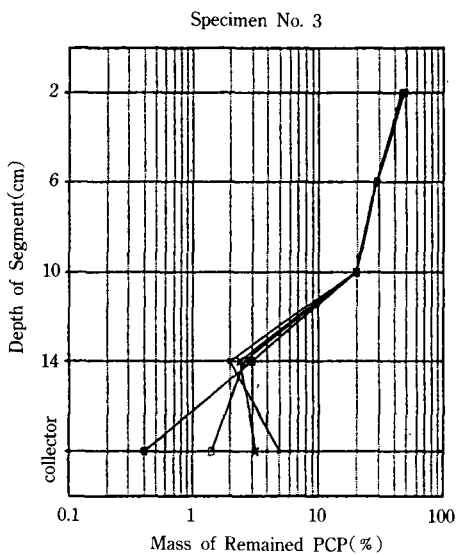
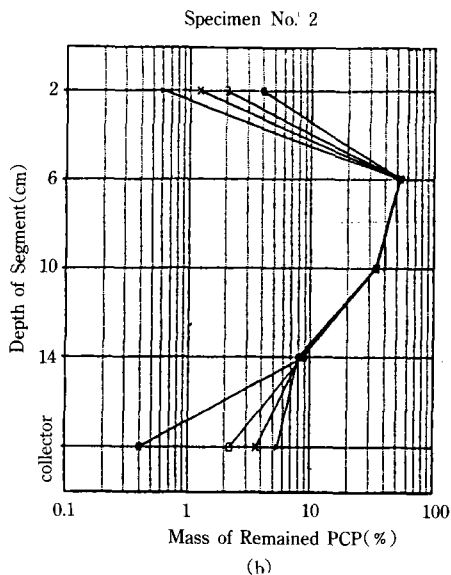
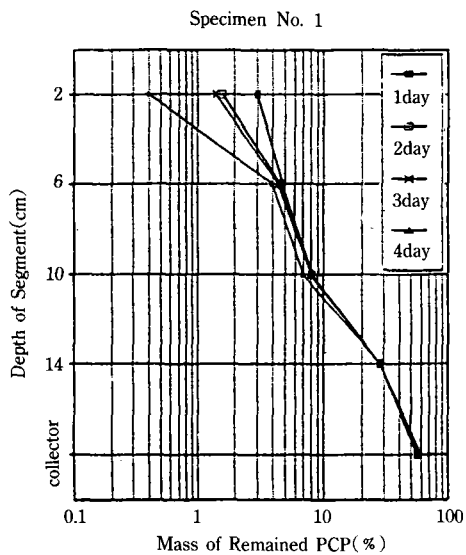


Fig. 1. Variation of PCP Concentration with Depth

少하였으나 나머지 區間에서는 소량으로 增加하였으므로 汚染物의 移動이 일어나고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 1(b)에서 供試體 No. 2는 0~4cm 區間에 0.6~4%가 殘留하고 있고, 4~8cm 區間은 52.7~53.4로 PCP가 가장 많이 檢出되었고 8~12cm 區間은 33.2~34.2%이고 12~16cm 區間은 8~8.8%이고 Collector 區間은 0.4~5.4%가 檢出되었다. Collector에 모인 PCP의 양은 1일 경과 후에는 0.4%, 2일 경과 후에는 2.2%, 3일 경과 후에는 3.6%, 4일 경과 후에는 5.4%이다. Fig. 1(b)에서 4~16cm 區間에서는 시간의 經過에 따른 PCP의 양의 變化는 거의 없음을 볼 수 있다.

Fig. 1(c)에서 공시체 No. 3은 0~4cm 구간에 45.4~47.8%로 PCP가 가장 많이 檢出되었고 4~8cm 구간은 28.2~28.8%이고 8~12cm 구간은 19.4~20%이고 12~16cm 구간은 2~3%이고 Collector 구간은 0.4~5%가 檢出되었다. Collector에 모인 PCP의 양은 1일 경과 후에는 0.4%, 2일 경과 후에는 1.4%, 3일 경과 후에는 3.2%, 4일 경과 후에는 5%로 약간의 變化를 보였다. Fig. 1(c)에서 0~16cm 구간에서는 시간의 경과함에 따른 PCP의 양의 변화는 거의 같은 形狀을 나타냈다.

Fig. 1(d)에서 공시체 No. 4는 0~4cm 구간에 48.2~51.4%로 PCP가 가장 많이 檢出되었고 4~8cm 구간은 35~35.6%이고 8~12cm 구간은 10~10.4%이고 12~16cm 구간은 1.8~2.4%이고 Collector 구간은 0.2~5%가 檢出되었다. Collector에 남은 PCP의 양은 1일 경과 후에는 0.2%, 2일 경과 후에는 1.2%, 3일 경과 후에는 2.6%, 4일 경과 후에는 5%로 약간의 變化를 보였다. Fig. 1(d)에서 0~16cm 구간에서는 시간의 경과함에 따른 PCP의 양의 변화는 거의 같은 形狀을 나타내었다.

실험 결과는 時間이 經過할수록 상부층에서의 PCP의 양이 감소하며 Collector 구간에는 PCP의

量이 增加하는 경향을 뚜렷히 보여준다. 이는 시간의 경과에 따라 重力에 의해 PCP가 아래로 移動하기 때문이며 이는 김¹⁾이 연구한 결과와 잘 一致된다. 공시체 No. 2 즉, 重量比로 모래에 실트 30%를 섞은 것은 4~8cm 구간에서, 공시체 No. 3, No. 4 즉 重量比로 모래에 실트를 40%, 50%를 섞은 것은 0~4cm 구간에서 PCP가 많이 殘留하였다. 이것은 모래에 실트를 30% 섞은 것과 40%를 섞은 것과의 사이에서 PCP의 分布形에 顯著的한 變化가 생겼음을 알 수 있으며 이러한 量의 실트가 PCP의 移動에 影響을 주는 境界值로 볼 수 있다.

Fig. 1(a)는 透水係數가 큰 모래만으로 구성된 공시체의 경우로 土壤水分의 移動에 따라 쉽게 PCP가 移動하기 때문에 地下水의 汚染可能性이 아주 크게 됨을 보여준다. 공시체 No. 2, No. 3, No. 4의 경우 PCP가 모래보다 比表面積(Specific Surface)이 넓고 PCP와 粒子間에 牽引力(Attraction Force)이 큰 실트에 吸着하려는 性質 때문에 실트의 含水量이 많을수록 PCP가 上部土層에 많이 殘留한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 PCP 등의 汚染物質은 土壤水分의 移動에 따라 이동하며 土壤의 種類에 따라 移動하거나 吸着되는 量이 달라진다.

나. PCP의 殘留量과 流出量

Fig. 2는 공시체에 殘留하는 PCP의 量을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 供試體 No. 1의 경우 공시체에 殘留하는 PCP 量은 1일 경과 후 44%이고 4일 경과 후 39.4%이고, 공시체 No. 2는 1일 경과 후 99.6%이고 4일 경과 후 94.6%이고, 공시체 No. 3은 1일 경과 후 99.6%이고 4일 경과 후 95%이고, 공시체 No. 4는 1일 경과 후 99.8%이고 4일 경과 후 95%이다. 공시체 No. 2, 공시체 No. 3, 공시체 No. 4는 土壤 속의 PCP 含有量이 소량의 차이를 보이면서 相當量이 殘留하고 있음을 나타내고 있으나 공시체 No. 1은 다른 공시체보다 顯著히 작은 量의 PCP가 殘留하고 있다. 이는 공시체 No. 2,

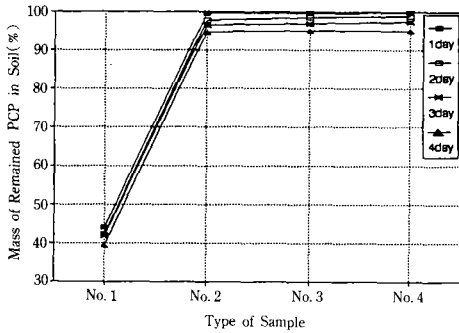


Fig. 2. Total Mass of PCP Remained in Soil

공시체 No. 3, 공시체 No. 4는 공시체 No. 1과는 달리 공시체 내에 함유된 실트가 PCP를 흡착하는 성질을 가지고 있기 때문이다. 이는 박²⁾의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

시간이 경과할수록 Collector내의 PCP가 증가하고 공시체내의 PCP량이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 불혼성 오염물질인 PCP가 중력에 의해 아래층으로 이동하였기 때문이다. 2일 경과 후 Collector로 흘러 나가는 PCP의流出量은 No. 1의 경우 58%로 2일 경과 후 No. 2의 경우의 2.2%에 비해 26.4배 가량 많은 양이流出되었다. No. 1의 경우 PCP는注入된 뒤 바로 地下水層으로 침출되고, 공시체 No. 2, No. 3, No. 4는 실트를 함유하고 있기 때문에 공시체 No. 1 보다 서서히 침출된다. 이런 점에서 볼 때 不良埋立地의 침출수나 毒性有機물이 土壤에 이동 放流되었을 때 地盤이 사질토라면 地下水層까지 상당히 빠른 速度로 汚染되므로 土壤 및 地下水의 汚染 防止策을 신속히 마련해야 할 것이다. 그러나, 그 地盤이 細粒質을 함유한 土壤이라면, 사질토보다 시간적인 餘裕를 가지고 적절히 對處할 수 있다. 또한 細粒質의 含有程度에 따라 汚染된 地下水의 改良工法들로 사용되는 양수공법(Extraction and Pumping)과 汚染層을 씻어 내는 공법(Flushing)을 選擇하여 處理할 수 있다.

다. 殘留 PCP의 時間的 分布

Fig. 3은 각 깊이 별로 土壤에 남아있는 PCP의 量을 보여주는 그림이다. Fig. 3(a)에서 0~4 cm 구간에서 공시체 No. 4는 전 구간의 PCP 총량(0.5mg)의 48.2~51.4%로 가장 많이 殘留하고 공시체 No. 3은 45.4~47.8%, 공시체 No. 2는 0.6~4%, 공시체 No. 1은 0.4~3%가 殘留한다. 즉, 실트의 含量이 많을수록 PCP가 上部地層에 많이 殘留하였다.

Fig. 3(b)에서 4~8 구간에서 공시체 No. 2는 전 구간의 PCP 총량(0.5mg)의 52.74~53.4%로 가장 많이 殘留하고 공시체 No. 4는 35~35.6%, 공시체 No. 3은 28.2~28.8%, 공시체 No. 1은 4~4.8%가 殘留한다. 여기에서 공시체 No. 2가 공시체 No. 3이나 공시체 No. 4보다 PCP의 量이 많은데 이것은 모래에 실트를 30% 섞은 것과 40%를 섞은 것과의 사이에서 PCP의 殘留量에 顯著的 變化가 생겼음을 알 수 있으며 이러한 量의 실트가 PCP의 移動에 影響을 주는 境界值로 볼 수 있다.

Fig. 3(c)에서 8~12cm 구간에서 공시체 No. 2는 전 구간의 PCP 총량(0.5mg)의 33.2~34.2%로 가장 많이 殘留하고 공시체 No. 3은 28.2~28.8%, 공시체 No. 4는 10~10.4%, 공시체 No. 1은 7~8.2%가 殘留한다. 이 구간에서 공시체 No. 2가 PCP를 가장 많이 含有하는데 이는 Fig. 4(b)의 4~8cm 구간에서 공시체 No. 2가 PCP를 가장 많이 含有하였기 때문에 重力에 의해 PCP가 아래 層으로 移動하므로 최고 分布層 바로 밑에 있는 層이 PCP의 殘留量이 많게 된다.

Fig. 3(d)에서 12~16cm 구간에서 공시체 No. 1은 전 구간의 PCP 총량(0.5mg)의 27.8~28%로 가장 많이 殘留하고 공시체 No. 2는 8~8.8%, 공시체 No. 3은 2~3%, 공시체 No. 4는 1.8~2.4%가 殘留한다. 여기서 공시체 No. 1이 PCP를 가장 많이 含有하는데 이는 土壤水分의 影響을 크게 받기 때문이다.

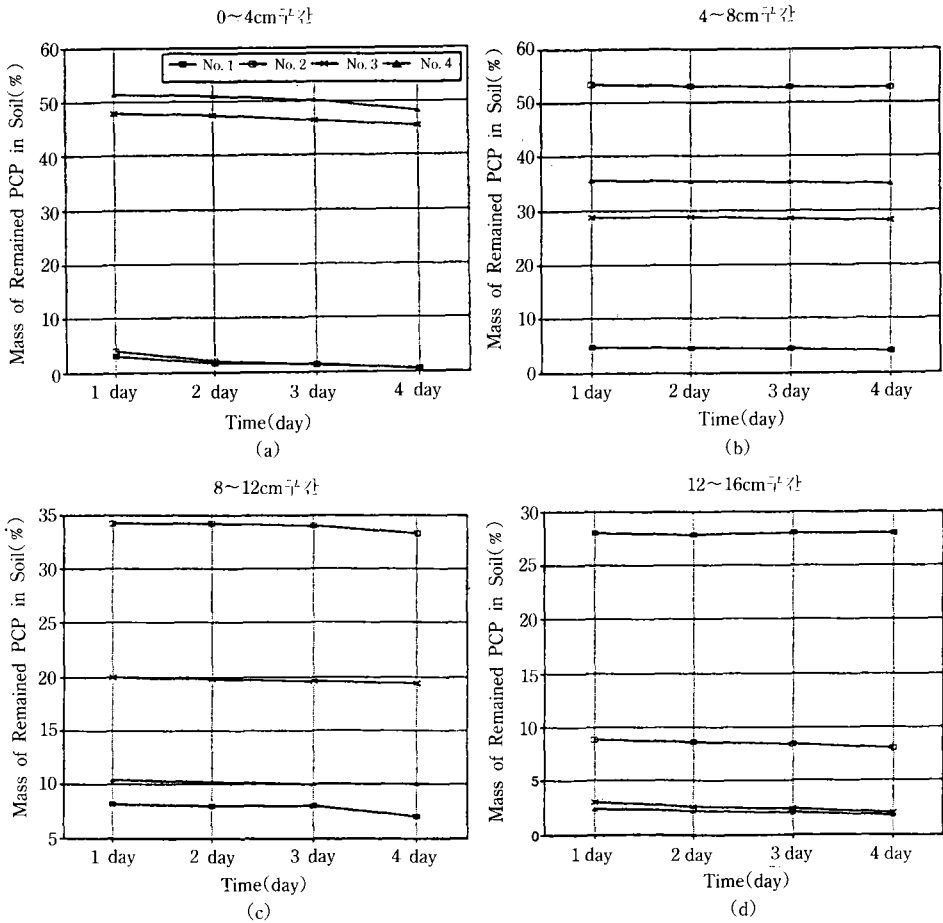


Fig. 3. Remained PCP at Each Depth

Fig. 3에서 4종류의 공시체는 시간이 지날수록 PCP의 量이 減少하는 傾向을 보이는데, 이는 重力에 의해 PCP가 밑으로 移動하기 때문이다.

IV. 結 論

本 實驗에서는 금강 中流의 모래와 실트를 採取하여 Soil-Column에 채우고 濃度を 알고 있는 PCP를 물과 함께 Soil-Column에 흘려 보낸 후 PCP가 토양의 種類, 時間, 깊이에 따라 어떻게 移動하고, 分布하는가를 調査하여 分析한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. PCP와 같은 不溶性 汚染物質은 土壤水分의 移動에 따라 重力에 의해 移動하며, 土壤의 種類에 따라 移動하거나 吸着되는 量이 달라진다.

2. 공시체 No.2 즉 重量比로 모래에 실트를 30%를 섞은 것은 4~8cm 구간에서, 공시체 No. 3, No.4 즉 中量비로 모래에 실트를 40%, 50%를 섞은 것은 0~4cm 구간에서 PCP가 많이 殘留하였다. 이것은 모래에 실트를 30% 섞은 것과 40%를 섞은 것과의 사이에서 PCP의 殘留量의 分布에 顯著的 變化가 생겼음을 알 수 있으며 이러한 量의 실트가 PCP의 移動에 影響을 주는 境界值로 볼 수 있다.

3. 공시체 No. 2, 공시체 No. 3, 공시체 No. 4 는 공시체 No. 1보다 土粒子의 比表面積(Specific Surface)이 넓고 PCP와 粒子間에 牽引力(Attraction Force)이 작용하기 때문에 PCP가 실트에 吸着되는 量이 많게 된다. 따라서 실트의 含水量이 많을수록 PCP가 土壤層에 많이 殘留한다.

4. Collector로 흘러 나가는 流出量은 2일 경과 후 No. 1의 경우 전 구간 的 PCP 總量(0.5mg)의 58%이고, 2일 경과 후 No. 2의 경우는 2.2%로 No. 1이 No. 2보다 26.4배 가량 많은 양이 流出되었다.

5. 공시체 No. 1과 같이 透水係數가 큰 모래만으로 된 경우 土壤水分과 함께 PCP가 重力에 의해 移動하기 때문에 地下水의 汚染 可能性이 아주 크다.

參 考 文 獻

1. 김동하, 1988, 토양내 유기독성물질의 평형 분포에 미치는 토양수분과 온도의 영향, KAIST 토목공학과 석사학위 논문.
2. 박갑성, 1989, 폐수토양처리공법에서의 유해물질의 거동, 대한환경공학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 37-41.
3. 이수영, 1991, 배수조건의 불포화 토양에서의 난분해 휘발성 유기독성 오염물질의 거동, KAIST 토목공학과 석사학위 논문.
4. 장연수, 1992, 지하수 흐름과 지반오염, 한국지반학회지, Vol. 8, No. 2, pp. 112-127.
5. 장연수, 정하익, 김진만, 1992, 해안 도시폐기물 매립지의 침출수 이동 특성 및 부식성, 지반환경 및 매립 학술발표회, 한국지반공학회지, pp. 33-63.
6. 장철희, 1992, 밭 토양 및 담수 토양 중 PCP의 행적에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문.
7. 博角田, 1965, 土壤による PCP 吸着 (1)-PCP の土壤吸着による魚毒害の推定, 日本土壤肥料學雜誌, Vol. 36, No. 7, pp. 191-194.
8. Kuwatsuka, S., and Igarashi, M., 1975, Degradation of PCP in Soils, Sci, Plant Nutr., Vol 21, No. 4, pp. 404-414.
10. Koo, J. K., 1985, Organic Transport in Unsaturated Porous Media by Atmospheric Breathing Processes, Ph .D .dissertation, The University of Texas at Austin
11. Nair, S., Longwell, D., and Seigneur, C., 1990, Simulation Chemical Transport in Unsaturated Soil, J. of Environmental Engineering, Vol. 116, No. 2, pp. 214-235.
12. Schwille, F., 1984, Migration of Organic Fluids Immiscible with Water in the Unsaturated Zone, Ecological Studies, No. 47, Springer Verlag, pp. 27-48.