

토양오염지표에 의한 천안시 토양환경 평가

장인성 · *정창모 · **임계규

호서대학교 환경공학과, *한화종합화학중앙연구소 환경연구센터, **호서대학교 화학공학과

Assessment of the Soil Quality of Chonan City using Soil Pollution Index

In-Soung Chang, Chang-Mo Chung*, Gye-Gyu Lim**

Dept. of Environmental Engineering, Hoseo University

**Environmental Research Center, R&E Center of Hanwha Chemical Inc.*

***Dept. of Chemical Engineering, Hoseo University*

ABSTRACT

To assess the soil quality of Chonan City, soil analyses were conducted according to the 14 different sampling sites. The soil pH of the agricultural area near the expressway was lower than that of the other farming area, which indicated that this acidification was probably attributed to the acid rain caused by the traffic exhaust gas such as SO_x and NO_x. Acidification was more severe in the dry farming area than in the rice paddy area. All concentration of 6 different heavy metals (As, Cu, Cd, Cr⁶⁺, Hg, Pb) and organic contaminants (cyanide, organic-P, PCBs, phenols) were found to be lower than the standard of soil pollution. The concentration of BTEX also lower than the standard of soil pollution. An assessment using the SPI (Soil Pollution Index), which was developed to estimate an overall soil quality, was performed. Each SPC (Soil Pollution Score) were evaluated with the results of the data from this study. The soil quality of most area of Chonan City was determined to Class 1, which indicated that the soil was healthy.

Key words : Heavy Metal, Oil Contamination, Soil Pollution Index, Soil Pollution Score

요 약 문

천안시의 토양 환경을 종합적으로 평가하기 위하여 각 지역별(농경지 3개소, 공단지역 3개소, 도심지 2개소, 하천주변 3개소, 매립지 주변 3개소)로 13개 항목에 관한 오염도 조사를 실시하였다. 각 측정 항목마다 토양오염 우려기준에 못 미치는 오염도를 보였다. 토양의 산성화는 농경지에서 심한 것으로 나타났으며, 특히 고속도로 주변의 농경지는 자동차 배기가스에 의한 산성 강하물의 영향으로 의심되는 산성화가 진행되는 것으로 나타났다. 또한, 밭 지역의 산성화가 심화되어서 토양 측정망의 채취지점 추가가 요구되었다. 중금속 6종과 기타 유기독성물질은 모두 토양오염 우려기준에 못 미치는 값을 나타냈다. 유류성분인 BTEX 성분 역시 우려기준에 못 미치는 값을 보였으며, TPH는 BTEX보다 광범위한 오염도를 보였다.

오염물질에 의한 토양의 상태를 종합적으로 판단할 수 있도록 고안된 토양오염지표(SPI, Soil Pollution Index)를 이용하여 천안시의 토양오염도를 평가하였다. 토양오염점수(SPC, Soil Pollution Score)에 의해 산출된 토양오염 등급은 모두 1등급으로 판명되어 천안시의 토양은 비교적 건전한 것으로 나타났다.

주제어 : 유류오염, 중금속, 토양오염점수, 토양오염지표, 토양측정망

1. 서 론

토양은 물, 공기와 더불어 인간을 포함한 모든 동식물의 생존 기반이며, 오염물질을 분해 또는 완충시키는 역할을 하는 자정능력이 있다. 그러나 급속한 산업발전과 함께 배출되는 오염물질은 허용한계 이상으로 누적되어 토양의 유익한 기능을 파괴하고 있다. 토양 오염은 수질, 대기, 폐기물 등에 함유된 오염 물질이나 유해 화학물질로 인하여 토양 본래의 기능을 상실하며 다른 오염형태와는 달리 그 영향이 서서히 나타나는 특징이 있다.

따라서 토양에 대한 오염현황을 종합적으로 파악하여 토양오염 예방대책과 오염토양에 대한 복원사업 등의 조치가 취해져야 한다. 이를 위하여 토양환경보전법에 의거한 토양측정망이 운영중이며 1997년부터는 토양측정망을 전국망, 지역망으로

이원화하여 총 2,904 개소가 운영되었으며, 전국망 949 개소는 환경관리청에서 지역망 1,955 개소는 지자체에서 운영중에 있다¹⁾.

토양을 정확히 평가하고 이를 바탕으로 복원사업을 수행하기 위해서는 일반적으로 다음과 같은 세 단계의 과정을 필요로 한다.

첫 번째 단계로는 관계법령의 분석, 지형적 분석, 문헌 및 자료의 수집과 분석, 오염토양의 분석 등을 포함하는 토양환경영향 평가를 실시하는 것이다. 두 번째 단계로는 오염토양에 대한 정밀평가에 돌입하는 것이고 이를 바탕으로 하여 세 번째 단계에서는 적절한 물리, 화학, 생물학적인 복원기술을 선정하고 복원사업을 구체화하는 것이다.

첫 번째 단계 중에서 정확한 토양질 측정자료의 확보는 토양환경 정책을 수립, 결정하는 핵심요소이다. 정확하지 않은 측정자료의 이용에 따른 정책

수립은 위험한 결과를 초래할 수도 있기 때문이다. 대부분의 지방 자치 단체는 토양측정망을 운영하고 있으나 측정지점의 수가 부족하며, 아직 체계적이고 과학적인 관리가 부실한 실정이다.

천안시는 충남 동북부에 위치한 지역으로 인구는 약 40만 명이고 면적은 636.5 km² 에 이르는 전형적인 도·농 복합지역이다. 천안시는 최근 들어 공업화가 급속히 진행되고 있기 때문에 향후 토양 오염이 예상되는 지역이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 천안시의 토양 오염도 현황을 용도별로 정확히 파악하고 이를 바탕으로 천안시의 토양 환경을 종합적으로 평가하는데 그 목표가 있다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 토양시료의 채취

천안시의 공단지역 3 개소, 농경지 3 개소, 매립지 주변 3 개소, 도심지역 2 개소 및 하천지역 3 개소 등 모두 14 개소의 지점을 선정하여 시료채취를 실시하였다. 토양의 표면을 깨끗이 치운 후 10 cm 이하의 흙을 채취하였고, 대표성을 부여하기 위하여 1개 조사 지역 당 각각 5 개소에서 채취하였다. 채취된 시료는 토양오염 공정시험방법, 공정시험방법³⁾의 각 분석항목별 시료조제방법에 따라 시료를 조제하여 분석하였다.

2.2 토양시료의 분석

수소이온농도(pH)와 중금속 6종(As, Cd, Cr⁶, Cu, Hg, Pb)과 기타 독성물질(PCB, Phenol류, 유기인, 시안, 유류(BTEX, TPH) 등 13종의 모든 분석은 토양오염 공정시험 방법에 의해 측정되었다. 중금속류 6종은 모두 원자흡광광도법(Smith Heiftje, Thermo Jarrel Ash, U.S.A.)으로 측정하였고 BTEX, TPH, PCB, 유기인, Phenol류는 모두 기체 크로마토그래프

(5890II, HP, U.S.A)에 의해 측정되었다. 유류 분석은 퍼지 트랩(Purge & Trap) 장치가 부착된 GC를 사용하였고, 검출은 질량분석기가 부착된 GC/MS 검출기를 사용하여 분석하였다. 시안(CN)은 흡광광도법(DR4000, HACH, U.S.A.)으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양산도

각 측정지역에 대한 토양 산도(pH) 분석 결과를 Fig. 1 에 제시하였다. 그림에서 보듯이 농경지를 제외하면 전체적으로 6.5 ~ 8.6 정도의 pH를 보이고 있다. 농경지 1, 2, 3 을 제외한 천안 다른 지역의 토양산도는 대부분 중성이나 약염기성을 띄고 있는 것을 알 수 있다.

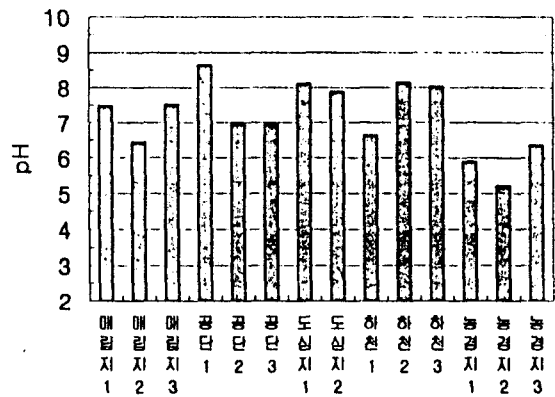


Fig. 1. Variation of soil pH according to sampling sites

토양 산도는 농작물의 생육에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 토양의 산도가 증가할수록 중금속의 용출이 증가하므로 토양 생물 및 작물에 미치는 영향이 크기 때문에 중요하게 다루어져야 한다⁴⁾. 농경지 1, 2, 3 의 산도는 각각 5.89, 5.21,

6.36이다. 조 등⁵⁾이 제시한 pH에 따른 토양분류에 의하면 농경지 2는 이미 강산성으로 분류될 만큼 산성화가 상당히 진행되었음을 시사하고 있다.

토양의 산성화는 비료에 의한 산성화, 규산염광물의 가수분해, 부식에 의해 진행되는 것으로 알려져 있다. 이 외에도 산성비와 같은 형태의 첨가에 의한 산성화도 원인으로 지목되고 있다⁶⁾. 그런데 농경지 1과 2는 부근에 차량통행이 많은 경부고속도로가 인접해 있는 지역이다. 농경지 1은 경부고속도로에서 100 m 이내에 위치해 있으며, 농경지 2는 500 m 이내에 위치해 있다. 즉, 이 지역의 산성화는 비료의 사용 및 그 외의 원인으로 인한 산성화뿐만 아니라 자동차 배기가스에 의한 산성강하물도 큰 역할을 하고 있는 것으로 의심된다. 이와 같은 지적은 차량통행이 거의 없는 농경지 3의 산성도가 6.36으로 매우 약한 산성으로 분류되는 것을 보아도 알 수 있다. 물론 이 세 지점의 거리는 산성강하물이 영향을 미치는 거리에 비하면 매우 미미한 거리로 인식된다. 따라서, 위와 같은 결론을 도출하기 위해서는 보다 정밀한 조사가 선행되어야 할 것이며 도로 밀집지역에서 발생하는 산성화 현상이 진행되고 있다고 사료된다. 이와 같은 사실은 산성강하물의 주요 원인물질인 SO_x와 NO_x가 경부고속도로를 따라서 높은 농도 분포를 보이고 있다는 연구결과와도 일치한다⁷⁾.

농경지 중에서 가장 산성화가 심한 농경지 2는 과채류를 생산하는 밭 지역이다. 그러나 농경지 1과 3은 각각 논 지역이다. 일반적으로 밭보다는 논 지역의 산성화가 보다 심한 것으로 알려져 있으나⁸⁾ 본 연구에서는 반대의 결과를 보여주고 있다. 이 사실은 최근 들어서 농사의 형태가 논농사보다는 부가가치가 높은 작물 위주의 농업 형태로 전환되고 있으며, 이로 인하여 과채류를 생산하는 밭 지역의 산성화가 심화되고 있음을 간접적으로 시사하는 것이다. 따라서 천안시를 비롯한 지방자치 단체는 현재 운영중인 토양측정망에 과·채류 생산 지역의

측정장소가 추가되거나 증가되어야 한다고 사료된다.

3.2 중금속

측정지역에 대한 중금속 6종의 측정 결과를 Fig. 2(a~f)에 각각 제시하였다. 구리(Fig. 2-a)의 경우, 토양오염 우려기준과 대책기준인 50 mg/kg과 125 mg/kg에 못 미치고 있는 것을 알 수 있다. 가장 큰 오염을 보이고 있는 도심지 2의 경우에는 27 mg/kg을 보여서 우려기준의 1/2에 육박하는 정도이다.

카드뮴(Fig. 2-b)은 토양오염 중금속 물질 6가지 중에서 우려기준과 대책기준이 가장 낮게 책정되어 있는 유독한 물질이다. 조사된 지역에서 검출된 토양중 카드뮴의 오염도는 토양오염 우려기준과 대책기준인 1.5와 4 mg/kg에 못 미치고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 도심지 2의 경우에는 우려기준인 1.5 mg/kg의 1/3 수준임을 알 수 있다. 나머지 지역은 일반적인 자연 함유량(0.135 mg/kg)에도 못 미치는 결과를 보이고 있다.

납(Fig. 2-c)은 다른 중금속 물질보다 자연에 존재하는 양이 많으며 그만큼 우려기준(100 mg/kg)과 대책기준(300 mg/kg)이 다른 중금속보다 높게 책정되어 있는 물질이나, 과량섭취할 경우 신경계통과 신장에 나쁜 영향을 미치는 독성물질이다⁹⁾. 조사된 지역에서 검출된 토양중 납의 오염도는 모든 지점에서 우려기준과 대책기준에 크게 못 미치는 낮은 값을 보이고 있다. 천안시의 과거 1991년부터 1996년까지의 토양 중 납 오염 자료¹⁰⁾와 비교해 볼 때에도 납의 과거 평균농도(약 4.5 mg/kg)와 비슷하거나 적은 값을 보이고 있는 것으로 보아서 오염 정도가 심화되지 않은 것으로 사료된다. 특히 무연 휘발유의 사용으로 인하여 대기로부터 기인되는 오염의 정도가 감소하는 것을 감안한다면 앞으로도 납의 농도는 크게 증가할 것으

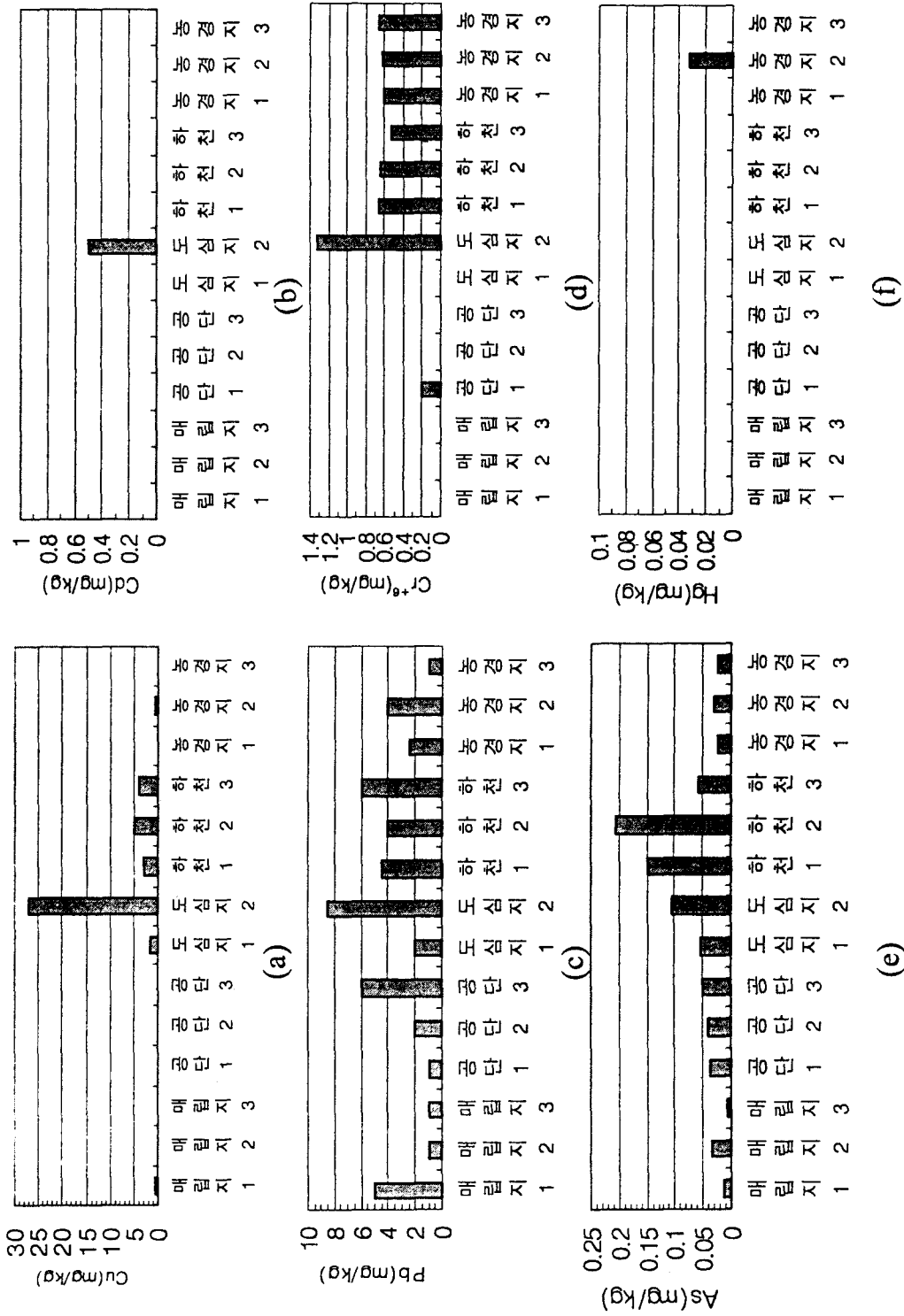


Fig. 2. Variation of heavy metal concentrations according to the sampling sites.

로 전망되지는 않는다.

크롬(Fig. 2-d)은 pH가 높은 토양에서는 주로 Cr^{6+} 가 (CrO_4^{2-})의 상태로 존재한다¹¹⁾. 토양오염 측정 시에는 독성이 강한 Cr^{6+} 를 측정한다. Cr^{6+} 은 우려기준과 대책기준이 각각 4 mg/kg과 10 mg/kg으로서 납(Pb), 구리(Cu) 등에 비해서는 기준치가 낮은 편에 속한다. 조사된 지역에서 검출된 토양중 Cr^{6+} 의 양은 모든 지점에서 우려기준과 대책기준에 못 미치는 낮은 값을 보이고 있다.

비소(Fig. 2-e)의 경우 하천 1과 2에서 다른 지역보다 높은 수치가 측정되었으나 모두 우려기준(6 mg/kg)과 대책기준(15 mg/kg)에는 크게 못 미치는 것을 알 수 있다. 수은(Fig. 2-f)은 농경지 2를 제외하고는 검출되지 않았다. 수은의 우려기준(4 mg/kg)과 대책기준(10 mg/kg)에 크게 못 미치는 결과를 보여주고 있다. 농경지 2에서도 우려기준의 1/100에도 못 미치는 낮은 오염도(0.033 mg/kg)를 보이고 있다. 한편, 시안(CN), PCBs, 유기인, 페놀류(phenols)는 분석 결과 모두 검출되지 않았다.

이상에서 살펴보았듯이 천안시의 경우 아직까지는 토양오염 우려기준을 상회하는 수치를 보이지 않고 있어서 우려할 만한 수준의 오염 형태는 없다고 볼 수 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 도심지의 오염도가 다른 지역보다 비교적 높은 것으로 나타났다. 이는 천안시의 여러 지역중에서 개발과 산업화가 가장 먼저 시작된 곳이다. 따라서 오랜 시간 동안 오염이 축적 가중되어 왔기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 하천지역의 오염도가 비교적 높은 이유는 홍수 및 범람으로 인한 오염물질의 유입, 축적에 따른 것으로 추정된다.

토양중의 중금속 농도에 의한 토양질의 상태를 종합적으로 판단할 수 있는 지표로 박^{12), 13), 14)}에 의해 개발된 토양오염지표(SPI, Soil Pollution Index)를 사용하여 천안시의 토양질을 평가하였다. 즉, 식 (1)과 같이 토양오염점수(Soil

Pollution Score)를 산출하여 토양을 등급화 한다. 토양오염점수가 300점 이상이면 4 등급, 300 ~ 200 사이는 3 등급, 200 ~ 100 점 사이는 2 등급, 100 점 미만은 1 등급으로 분류한다. 토양오염 4 등급은 토양이 오염된 지역이라 할 수 있고, 토양오염 2, 3 등급은 토양오염이 우려되어 이 지역에 대한 토양 상태의 재검측이 필요한 지역, 토양오염 1 등급은 토양상태가 건전한 지역으로 볼 수 있다.

토양오염점수(Soil Pollution Score)

$$= \sum_i \frac{C_i}{TV_i} \times 100 \quad (1)$$

i: As, Cd, Cr^{6+} , Cu, Hg, Pb

C_i : 각 중금속의 분석농도

TV_i : 각 중금속의 토양오염 우려기준

원래 토양오염점수(SPS)는 아연(Zn)을 비롯한 6종류(As, Cu, Cd, Hg, Pb, Zn)의 중금속을 대상으로 하였으나 본 연구에서는 현재 토양환경보전법 상에서 규정한 Cr^{6+} 를 포함한 6종류(As, Cu, Cd, Cr^{6+} , Hg, Pb)의 중금속을 대상으로 천안시의 토양오염점수를 산출하여 보았다(Table 1). 토양오염점수의 산출에 필요한 우려 기준치는 농경지와 공단지역의 값을 각각 사용하였다.

표에서 보듯이 도심지 2를 제외하고는 모두 100 미만의 값을 나타내고 있다. 농경지보다 우려기준이 높은 공단지역을 기준으로 계산한 값들은 모두 100을 넘지 않는 것으로 나타났다. 즉, 도심지 2를 제외하고는 모두 토양오염 1 등급으로 간주할 수 있다. 즉, 토양오염 상태가 건전한 지역으로 평가될 수 있다. 도심지 2 지역은 농경지 우려기준을 적용하여 계산하였을 경우에 2 등급으로 분류되었지만 공단지역 우려기준을 적용하였을 경우에는 100 미만의 값을 보이고 있다. 따라서, 향후 토양오염이 심화되는 것으로 의심될 경우에는 우선

Table 1. Calculation of SPC (Soil Pollution Score) for Chonan City

지 역	토양오염점수(SPS) (농경지 우려기준 적용)	토양오염점수(SPS) (공단 우려기준 적용)
매립지1	6.2	1.6
매립지2	1.6	0.4
매립지3	1.1	0.3
공단1	6.6	2.1
공단2	2.7	0.7
공단3	6.9	1.8
도심지1	5.9	1.5
도심지2	131	31.4
하천1	29.7	9.0
하천2	33.7	10.0
하천3	28.2	8.2
농경지1	17.9	5.7
농경지2	22.1	6.9
농경지3	18.2	6.0

이 지역에 대한 재조사를 실시할 필요가 있다. 토양오염 3, 4 등급 지역은 측정장소 14 곳 중에서 발견되지 않았으므로 천안시의 토양오염은 비교적 건전한 것으로 결론지을 수 있다. 이상과 같은 평가는 중금속을 기준으로 한 오염의 정도를 표시한 것이다. 다른 유기, 무기 독성물질에 대한 현실적이고 객관적인 평가기준이 아직 마련되어 있지 않은 실정이다. 따라서 향후 기타 유기, 무기독성물질과 유류오염을 포함한 종합적인 평가법의 개발이 필요하다고 사료된다. 오염지표로 사용되는 SPS만을 기준으로 보았을 때 천안시의 토양은 비교적 안전한 상태라고 결론지을 수 있다.

3.3 유 류

각 지역에 대한 유류의 분석 결과를 Fig. 3에 제시하였다. BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)에 대한 우려기준과 대책기준은 각각 80과 200 mg/kg이다. 거의 모든 지

점에서 BTEX는 20 mg/kg 미만의 낮은 수치를 보이고 있다. 본 연구에서는 표토층의 토양을 채취하였기 때문에 오염의 양상이 심하지 않은 것으로 사료된다. 심토층을 포함한 보다 광범위한 조사를 실시한다면 이와는 다른 양상의 오염형태를 보일 것으로 예상된다.

TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)는 거의 모든 경우에 있어 BTEX보다 높은 값을 보이고 있다. 경우에 따라서는 300 mg/kg 이상의 값(하천 3의 경우)을 보이기도 하였다. 그러나 TPH에 관한 토양오염 우려기준인 2,000 mg/kg과 대책기준인 5,000 mg/kg에 비해 크게 낮은 수준이었다.

4. 결 론

천안시의 토양오염도 현황을 파악하여 본 결과 특별한 오염양상을 보이는 곳은 나타나지 않았다.

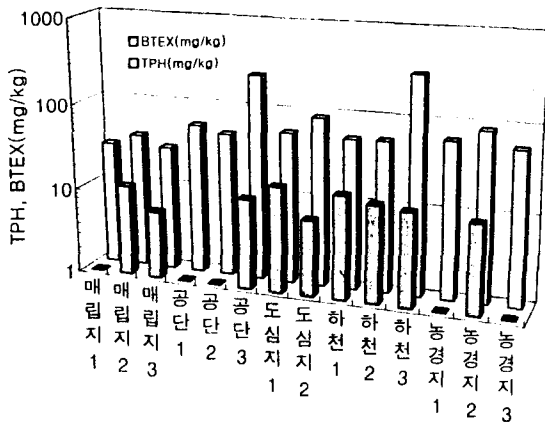


Fig. 3. Variation of BTEX and TPH concentration

각 측정항목마다 토양오염 우려기준에 못 미치는 결과를 보였다. 토양의 산성화는 농경지에서 심한 것으로 나타났다. 특히, 고속도로 주변의 농경지가 보다 산성화가 심한 것으로 나타났는데 이는 자동차 배기가스에 의한 산성강하물의 영향이라고 의심된다. 또한, 밭 지역의 산성화가 심화되는 것으로 나타났으므로 토양측정망 채취지점의 추가가 요구된다.

오염물질에 의한 토양의 상태를 종합적으로 판단할 수 있도록 고안된 토양오염지표(SPI)를 이용하여 천안시의 토양오염도를 산출하여 보았다. 토양오염점수(SPS)에 의해 산출된 토양오염 등급은 대부분 건전한 1 등급으로 판단되었다. 유류중 BTEX 성분은 토양오염 우려기준에 못 미치는 값을 보였으며, TPH는 BTEX보다 광범위한 오염도를 나타내었다.

참고 문헌

1. 환경부, 환경백서, pp259 (1998)
2. Pepper I.L., Gerba C.P. and Brusseau M.L., Pollution Science, Academic Press, pp152-154 (1996)
3. 토양오염공정시험방법, 동화기술, pp555-557 (1996)
4. Sparks D.L., Environmental Chemistry, Academic Press, p204 (1995)
5. 조성진, 박천서, 엄대익, 토양학, 향문사, p199 (1980)
6. Elis S, Mellor A. and Routledge, Soils and Environment, p264 (1995)
7. 천안시, 환경보전종합계획 중 대기오염분야, pp269-416 (1998)
8. 심상칠, 토양비료개론, 선진문화사, pp112-116 (1982)
9. Manahan S.E., Fundamentals of Environmental Chemistry, Lewis Publisher, p745(1993)
10. 충청남도, 충남 환경보전 종합대책 기본계획 수립 최종보고서, pIX-5 (1996)
11. McBride M.B., Environmental Chemistry of Soils, Oxford Press, p331 (1994)
12. 박용하, 토양질 측정자료의 관리체계 구축방안, 한국환경정책평가연구원, pp147-149. (1997)
13. 박용하, "중금속 및 비소오염 토양질 평가를 위한 토양오염지표의 고안과 응용가능성", 한국토양환경학회지, 1(1) pp47-54 (1996).
14. 박용하, 윤정호, 이승희, 김강석, "토양오염지표에 의한 국내토양의 중금속과 비소 오염도 및 향후전망", 한국토양환경학회지, 1(1) pp55-65 (1996).