

서울지역 土壤에서의 BTEX 舉動에 관한 研究

독성조사과

朴贊九 · 許恒綠 · 金廣來 · 張桂榮 · 柳仁哲 · 李允國 · 嚴石源

Study on the behavior of BTEX in Seoul soil

Environmental Toxicity Division

Chan-Koo Park, Hang-Rok Heo, Kwang-Rae Kim, Kay-Young Jang,
In-Chul Yu, Yun-Kook Lee and Seog-Won Eom

=Abstract=

Among various pollutants in soil, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, ortho, meta and para-Xylene (BTEX) of Monocyclic Aromatic Hydrocarbons(MAHs) were classified to be major volatile organic compounds(VOCs) caused by environmental contamination by U.S.EPA. The content of BTEX in soil was analyzed for 90 sampling points divided by usage of land from May to August 1997 in Seoul area.

The results were as follows :

The total average concentration of BTEX was 1,778mg/kg and the maximum and minimum concentration of them were 5,836mg/kg and 0,072mg/kg, respectively. No significance was shown in the variation of BTEX content at different sampling points selected according to the land usage. The average concentration of Toluene was highest, while that of Ethylbenzene was lowest. The order of average concentration was as follows : Toluene 0,849mg/kg >, Benzene 0,655mg/kg > Xylene 0,351mg/kg > Ethylbenzene 0,169mg/kg.

The contamination of BTEX in soil was caused not by point source of area source around the surface of the earth, but by BTEX emitted to ambient air.

서 론

서울 지역은 좁은 면적(605Km²)에 많은 인구(1,100만)¹⁾가 밀집되어 있고, 환경에 악영향을 미치는 다양한 산업시설이 다량 혼재되어 있어 대기와 수질이 크게 오염되고 있으며

근래에는 토양오염도 우려할만한 수준이라 생각된다. 또한 서울시 주변은 북한산, 도봉산, 인왕산, 관악산등 500m내외의 산과 구릉이 자연성벽과 같이 둘러싸여 분지를 형성하고 있으며, 대도시 지역의 특성인 열섬효과 등에 의해 대기 중으로 배출된 가스상 물질의 확산과 이동이 제한을 받게 되리

Table 2. BTEX Content in soils collected from 90 sampling sites (mg/kg)

| Sampling site | Region | Concentration | | | | Total |
|----------------|-------------------|---------------|---------|--------------|--------|-------|
| | | Benzene | Toluene | Ethylbenzene | Xylene | |
| Farming | Chagok-Dong | 0.465 | 0.755 | 0.055 | 1.194 | 2.469 |
| | Hail-Dong | 1.186 | 0.691 | 0.482 | 0.453 | 2.812 |
| | Sangge 4-Dong | 0.373 | 0.985 | ND | 0.297 | 1.655 |
| | Chingwanae-Dong | 0.067 | 0.664 | 0.354 | 0.273 | 1.358 |
| | Jangji-Dong | 0.180 | 1.085 | 0.482 | 0.175 | 1.922 |
| | Magok-Dong | 4.155 | 1.364 | 0.317 | ND | 5.836 |
| AVERAGE | | 1.071 | 0.924 | 0.282 | 0.399 | 2.675 |
| Orchard | Yangjae-Dong | 0.593 | 0.987 | ND | 0.123 | 1.703 |
| | Dunchon-Dong | 0.164 | 0.721 | 0.076 | 0.208 | 1.169 |
| | Tobong-Dong | ND | 0.597 | ND | 0.111 | 0.708 |
| | Shinnae-Dong | 0.164 | 0.991 | ND | 0.111 | 1.266 |
| AVERAGE | | 0.230 | 0.824 | 0.019 | 0.138 | 1.212 |
| Yard | Shinjong-Dong | 0.406 | 0.885 | 0.163 | 0.526 | 2.980 |
| | Shihung-Dong | ND | 0.089 | ND | 0.208 | 0.297 |
| | Shillim 10-Dong | 2.561 | 0.935 | ND | ND | 3.496 |
| | Songsan-Dong | 2.171 | 0.273 | 0.163 | 0.505 | 3.112 |
| | Ui-Dong | 0.428 | 0.785 | 0.229 | 0.100 | 1.542 |
| | Kongnung 2-Dong | 0.445 | 0.692 | ND | 0.238 | 1.375 |
| | Pukkajwa-Dong | 0.675 | 0.163 | ND | 0.089 | 0.927 |
| | Myonmok-Dong | 0.408 | 1.071 | ND | 0.138 | 1.617 |
| | Pangbae-Dong | 0.155 | 0.837 | ND | 0.103 | 0.095 |
| AVERAGE | | 0.805 | 0.637 | 0.062 | 0.323 | 1.827 |
| Forest | Naegok-Dong | 0.628 | 1.035 | ND | 0.097 | 1.760 |
| | Shihung-Dong | 0.408 | 0.998 | 0.056 | 0.171 | 1.633 |
| | Shillim 7-Dong | 1.893 | 1.134 | 0.214 | ND | 3.241 |
| | Banghak-Dong | 0.896 | 0.952 | 0.038 | 0.133 | 2.019 |
| | Hongun 3-Dong | 0.120 | 0.183 | ND | 0.115 | 0.418 |
| | Kuui-Dong | 0.591 | 0.895 | ND | 0.117 | 1.603 |
| | Chongyangni | 0.509 | 0.909 | 0.154 | 0.421 | 1.993 |
| | Mangu-Dong | 0.192 | 1.085 | 0.064 | 0.184 | 1.525 |
| | Chongnung-Dong | 0.610 | 0.809 | ND | ND | 1.419 |
| | Pyongchang-Dong | 0.377 | 0.910 | ND | 0.116 | 1.403 |
| AVERAGE | | 0.622 | 0.891 | 0.053 | 0.135 | 1.701 |
| School Zone | Chungdam-Dong | 0.465 | 0.623 | ND | 0.204 | 1.292 |
| | Chamshil-Dong | 0.269 | 0.991 | 0.403 | 0.141 | 1.804 |
| | Chonho-Dong | 0.109 | 0.747 | 0.097 | 0.259 | 1.212 |
| | Sangdo-Dong | 0.711 | ND | ND | ND | 0.711 |
| | Pongchon 8-Dong | 2.310 | 1.156 | ND | ND | 3.466 |
| | Kuro-Dong | 0.113 | 0.964 | 0.048 | ND | 1.125 |
| | Nokpon-Dong | 0.175 | 0.770 | 0.095 | 0.088 | 1.128 |
| | Yongdu-Dong | 0.398 | 1.096 | ND | 0.226 | 1.720 |
| | Hawolgok-Dong | 1.004 | 0.942 | ND | 0.100 | 2.046 |
| | Gyongwoon-Dong | 0.261 | 0.966 | 0.053 | 0.131 | 1.411 |
| | P' il-Dong | 0.414 | 0.771 | 0.149 | 0.062 | 1.396 |
| | Shindang-Dong | 0.524 | 0.964 | ND | 0.241 | 1.729 |
| AVERAGE | | 0.563 | 0.833 | 0.070 | 0.121 | 1.587 |
| Street area | Panpo-Dong | 0.372 | 0.925 | ND | 0.181 | 1.478 |
| | Shinwol-Dong | 0.531 | 0.706 | 0.054 | 0.179 | 1.470 |
| | Wonhyoro 3-Dong | 0.448 | 0.936 | ND | 0.052 | 1.436 |
| | Yongsan-Dong 2-ga | 0.439 | 0.914 | 0.059 | 0.183 | 1.595 |
| AVERAGE | | 0.448 | 0.870 | 0.028 | 0.149 | 1.495 |
| Rail road area | Yongdungpo-Dong | 0.288 | 0.982 | 0.059 | 0.314 | 1.643 |
| | Sangam-Dong | 0.098 | 0.202 | 0.092 | 0.536 | 0.928 |
| | Jeonngong-Dong | 0.889 | 1.358 | 0.129 | 0.552 | 2.928 |
| | Hengdang-Dong | 1.170 | 1.148 | 0.064 | 0.261 | 2.643 |
| AVERAGE | | 0.611 | 0.923 | 0.086 | 0.416 | 2.036 |

| Sampling site | Region | Concentration | | | | |
|-------------------|--------------------|---------------|---------|--------------|--------|-------|
| | | Benzene | Toluene | Ethylbenzene | Xylene | Total |
| Stream | Taechi-Dong | 0.377 | 0.832 | 0.055 | 0.213 | 1.447 |
| | Pungnap-Dong | 0.110 | 0.626 | 0.205 | 0.378 | 1.319 |
| | Youido | 1.015 | 0.964 | 0.086 | 0.337 | 2.402 |
| | Kuro-Dong | 0.272 | 1.832 | 0.184 | 2.118 | 4.406 |
| | Sangge 1-Dong | 0.553 | 1.078 | 0.384 | ND | 2.015 |
| | Ttuksom-Dong | 0.346 | 0.954 | ND | ND | 1.300 |
| | Ichon-Dong | 0.060 | 0.919 | ND | 0.122 | 1.101 |
| AVERAGE | | 0.390 | 1.029 | 0.131 | 0.453 | 2.003 |
| Water supply area | Pon-Dong | 1.990 | ND | 0.532 | ND | 2.552 |
| | Hwagok 5-Dong | 0.578 | ND | ND | ND | 0.578 |
| | Chungsan-Dong | 0.064 | 0.812 | ND | 0.132 | 1.008 |
| | Kuui-Dong | 0.125 | 1.763 | 0.191 | 1.087 | 3.886 |
| | Songsu 1-ga | 0.213 | 0.899 | ND | ND | 1.112 |
| AVERAGE | | 0.594 | 0.695 | 0.145 | 0.388 | 1.821 |
| Gymnasium area | Pangi-Dong | 0.108 | 0.834 | ND | 0.364 | 1.036 |
| | Gasan-Dong | ND | 0.048 | ND | 0.151 | 0.199 |
| | Mok-Dong | 0.184 | 0.967 | 0.032 | 0.044 | 1.227 |
| AVERAGE | | 0.097 | 0.616 | 0.011 | 0.186 | 0.911 |
| Park | Shinsa-Dong | 0.525 | 0.771 | 0.223 | 0.159 | 1.678 |
| | Shintaebang 2-Dong | ND | 0.072 | ND | ND | 0.072 |
| | Shillim 1-Dong | 3.203 | 1.162 | ND | ND | 4.365 |
| | Hyonjo-Dong | 0.457 | 0.134 | ND | 1.094 | 1.685 |
| | Hapchong-Dong | 0.095 | 0.678 | 0.121 | 1.228 | 2.122 |
| | Pon 3-Dong | 0.517 | 1.441 | 0.330 | 1.7566 | 4.054 |
| | Taejo-Dong | 0.187 | 0.715 | 0.044 | 0.160 | 1.106 |
| | Changan-Dong | 0.378 | 0.925 | ND | 0.154 | 1.457 |
| | Hoonjung-Dong | 1.645 | 0.996 | ND | ND | 2.641 |
| | Sajik-Dong | 1.981 | 1.125 | 0.194 | ND | 3.300 |
| | Hyochang-Dong | 0.054 | 0.961 | 0.067 | 0.274 | 1.356 |
| Nung-Dong | 0.142 | 0.877 | ND | 0.180 | 1.199 | |
| AVERAGE | | 0.765 | 0.821 | 0.082 | 0.418 | 2.086 |
| Religious | Pomun-Dong | 0.441 | 0.987 | ND | 0.114 | 1.542 |
| | Myongdong 2-ga | 0.393 | 0.708 | 0.048 | 0.224 | 1.373 |
| AVERAGE | | 0.417 | 0.848 | 0.024 | 0.169 | 1.458 |
| Historical place | Amsa 2-Dong | 0.442 | 0.876 | ND | 0.296 | 1.614 |
| | Kayang-Dong | ND | 0.063 | ND | 0.148 | 0.211 |
| | Songbuk-Dong | 0.439 | 0.984 | ND | 0.114 | 1.537 |
| AVERAGE | | 0.294 | 0.641 | ND | 0.186 | 1.121 |
| Cemetery | Tongjak-Dong | 0.074 | 1.058 | 0.399 | 1.900 | 3.431 |
| | Suyu-Dong | 0.561 | 0.737 | ND | 0.171 | 1.469 |
| | Mangu-Dong | 0.266 | 0.960 | 0.043 | 0.150 | 1.419 |
| | | 0.300 | 0.918 | 0.147 | 0.740 | 2.106 |
| Reclamated waste | Sangam-Dong | 0.378 | 0.231 | 0.085 | 0.156 | 0.850 |
| | Sangam-Dong | 0.055 | 0.217 | 0.120 | 0.031 | 0.423 |
| AVERAGE | | 0.217 | 0.224 | 0.103 | 0.094 | 0.637 |
| Industrial area | Mullaedong 3-ga | 0.698 | 0.975 | 0.395 | 0.203 | 2.271 |
| | Oryu-Dong | 0.063 | 1.036 | ND | 0.332 | 1.431 |
| | Chang-Dong | 0.175 | 0.962 | 0.061 | 0.195 | 1.393 |
| | Songsu 2-ga | 1.683 | 1.001 | ND | ND | 2.684 |
| AVERAGE | | 0.655 | 0.994 | 0.114 | 0.183 | 1.945 |
| TOTAL | m a x i m u m | 4.155 | 1.832 | 0.523 | 2.118 | 5.836 |
| | m i n i m u m | ND | ND | ND | ND | 0.072 |
| | a v e r a g e | 0.619 | 0.849 | 0.169 | 0.351 | 1.778 |

에서는 농업지역중 마곡동 논에서 Benzene이 4.155 mg/kg 의 농도로 조사지역중 최대의 농도를 나타내고 있는데, 이는 주변의 비위생적으로 처리되는 쓰레기 재활용 단지과 무허가 공장들이 있어 시료채취시에 심한 악취가 난점을 고려해보면 이의 원인으로 생각할 수 있으나, 정확한 원인을 규명하기 위하여는 좀 더 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

또한 토지 사용 용도별이 아닌 특성이 있는 6개구를 선정하여 각 구별 농도를 Table 4.에 나타내었다.

중구는 교통소통량이 서울시내에서 가장 적으며, 은평구는 교통량이 가장 많은 구이다¹⁴⁾. 성동구와 영등포구는 산업시설이 다른 구에 비해 많은 편¹⁵⁾이며 서초구와 관악구는 교통량과 산업시설이 다른 구에 비해 적은 편이다. 중구와 은평구의 BTEX 농도는 Table 4.에서 보듯이 차이를 보이지 않으며,

또한 성동구, 영등포구, 서초구도 90개 지점 전체 평균 농도와 큰 차이를 보이고 있지 않다. 다만 관악구의 4개 지점 모두 Benzene이 전체 평균 농도보다 큰 수치를 기록하고 있는데 이는 시료채취지점 뒤에 관악산이 있어 영등포와 구로 등에서 배출된 오염물질이 확산되지 않고 채취지점에 영향을 주었다고 생각되나 정확한 원인에 대해서는 좀 더 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다. 이러한 점을 고려해보면 서울지역에서의 지역에 따른 BTEX 농도의 차는 몇 개 지점을 제외하고는 농도의 차를 볼 수 없었다. 각 항목별로는 Toluene이 대부분의 지점에서 Toluene의 평균농도와 유사한 농도를 나타내면서 가장 높은 농도를 나타내었으며, Ethylbenzene은 많은 지역에서 검출이 되지 않았으며 평균농도 또한 가장 낮았다. 90개 지점의 평균농도는 Toluene 0.849mg/kg >

Table. 3. General properties of BTEX

| Component | Mol. formula | Mol. wt. | Lifetime (day) | POCP | Main source | Carcinogen index (IRIS) | Effects |
|---------------|--------------------------------|----------|----------------|------|--|-------------------------|---|
| Benzene | C ₆ H ₆ | 78.11 | 9.04 | 20 | Vichele Organic solvent use | A | Carcinogen, Hemorrhage, Central nerve system disease, Cataract, Pulmonary disease |
| Toluene | C ₇ H ₈ | 92.13 | 1.87 | 55 | Mobile source Solvent evaporation | D | Visual dysfunction, Leukemia, Mental disease, Hepatic necrosis, Pulmonary edema |
| Ethyl benzene | C ₈ H ₁₀ | 106.16 | 1.54 | 60 | Organic solvent use | D | Conjunctivitis, Anesthesia, Inflammation of skin, eye and neck |
| o - Xylene | C ₈ H ₁₀ | 106.16 | 0.79 | 60 | Solvent evaporation Petrol refining | D | Hepatic&Renal dysfunction, Inflammation of skin, eye and neck |
| m - Xylene | C ₈ H ₁₀ | 106.16 | 0.47 | 105 | Petrol refining & Distribution | D | Hepatic & Renal dysfunction, Inflammation of skin, eye and neck |
| p - Xylene | C ₈ H ₁₀ | 106.16 | 0.76 | 90 | Petrol refining & Distribution | D | Hepatic & Renal dysfunction, Inflammation of skin, eye and neck |

Benzene 0.619mg/kg > Xylene 0.351mg/kg > Ethylbenzene 0.169mg/kg의 순으로 나타났으며 BTEX 전체 평균농도는 1.778mg/kg이었으며 농도범위는 0.072mg/kg~5.863mg/kg이었다.

대조군 3개 지점에서는 BTEX는 검출되지 않았으며(non detect) 단지 강원도 송정지역에서 Toluene이 검출한계(0.001µg/g) 이하의 농도인 흔적(trace)을 나타내었다.

Fig. 2에서 Standard chromatogram과 조사지역중의 하나인 합정동 지역의 chromatogram을 나타내었다. BTEX의 chromatogram의 RT는 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, m,p,o-Xylene의 순이며 meta, para, Xylene은 동일 peak에서 나타남을 알 수 있다.

Kampbell, Don H.에 의하면 gasoline이 토양 층으로 유출되면 8시간 후에 지표면에서 하방향으로 1.3m, 경사진 방향 길이로 200m, 폭 60m정도 이동된다는 실험을 surrogate tracers를 사용하여 실험하였으며, 또한 이동되는 범위 내에 지하수 층이 존재하게 되면 토양이 오염되는 것과 같이 오염된다고 보고하고 있다.¹⁶⁾

또한 Odermatt, John R.도 Gasoline에 오염된 토양 층에서 지하수로 유입되는 BTEX 이동속도는 Benzene > Toluene > Ethylbenzene > Xylene 순이며 토양 층에서의 이동속도도 같다고 보고하고 있다¹⁷⁾. 이는 Table 3.에서 보듯이 각 물질의 분자량 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

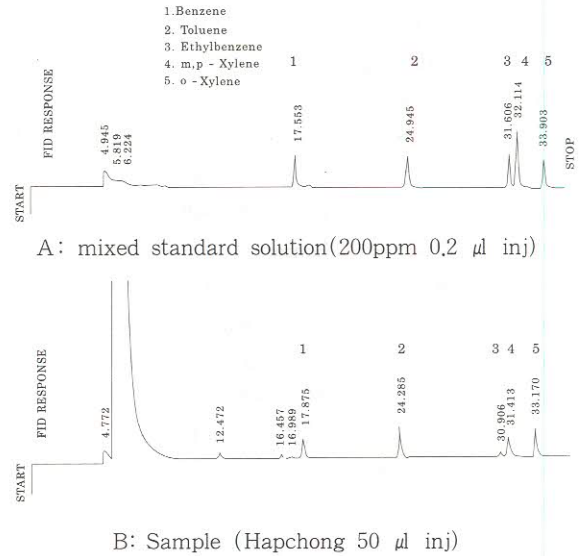


Fig. 2. Capillary Chromatograms of the BTEX

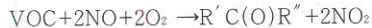
인공 오염원으로 부터 격리된 대조지점에서 BTEX가 검출되지 않은 점과 토양 환경 보전법상 Gasoline에 오염된 토양의 기준치가 80mg/kg이상인 점, 각 지점에서의 평균농도가 1.778mg/kg이며, Table 2. 와 Table 4.에서 농도가 특히 높은 지역이 없는 점을 고려해 보면 조사된 서울시 토양중의

Table 4. BTEX concentration in soils of the studied area (mg/kg)

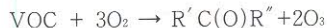
| Region | | Sampling site | Concentration | | | | |
|---------------|-----------------|-------------------|---------------|---------|-----------|--------|-------|
| | | | Benzene | Toluene | E-benzene | Xylene | Total |
| Chung-Gu | P' il-Dong | Forest | 0.414 | 0.771 | 0.149 | 0.062 | 1.396 |
| | Shindang-Dong | School zone | 0.524 | 0.964 | ND | 0.241 | 1.729 |
| | Myongdong 2-ga | Religious | 0.393 | 0.708 | 0.048 | 0.224 | 1.373 |
| Songdong-Gu | Hengdang-Dong | Rail road area | 1.170 | 1.148 | 0.064 | 0.261 | 2.643 |
| | Songsu 1-ga | Water supply area | 0.213 | 0.899 | ND | ND | 1.112 |
| | Songsu 2-ga | Industrial area | 1.683 | 1.001 | ND | ND | 2.684 |
| Unpyong-Gu | Chingwanwe-Dong | Faming | 0.067 | 0.664 | 0.354 | 0.273 | 1.358 |
| | Nokpon-Dong | School zone | 0.175 | 0.770 | 0.095 | 0.088 | 1.128 |
| | Chungsan-Dong | Water supply area | 0.064 | 0.812 | ND | 0.132 | 1.008 |
| | Taejo-Dong | park | 0.187 | 0.715 | 0.044 | 0.160 | 1.106 |
| Yongdungpo-Gu | Yongdungpo-Dong | Rail road area | 0.288 | 0.982 | 0.059 | 0.314 | 1.643 |
| | Youido | stream | 1.015 | 0.964 | 0.086 | 0.337 | 2.402 |
| | Mullaedong 3-ga | Industrial area | 0.698 | 0.975 | 0.395 | 0.203 | 2.271 |
| Kwanak-Gu | Shillim 7-Dong | Forest | 1.893 | 1.134 | 0.214 | ND | 3.241 |
| | Shillim 10-Dong | yard | 2.561 | 0.935 | ND | ND | 3.496 |
| | Pongchon 8-Dong | School zone | 2.310 | 1.156 | ND | ND | 3.466 |
| | Shillim 1-Dong | park | 3.203 | 1.162 | ND | ND | 4.365 |
| Soch,o-Gu | Yangjae-Dong | Orchard | 0.593 | 0.987 | ND | 0.123 | 1.703 |
| | Pangbae-Dong | yard | 0.155 | 0.837 | ND | 0.103 | 1.095 |
| | Naegok-Dong | Forest | 0.628 | 1.035 | ND | 0.097 | 1.760 |
| | Panpo-Dong | street area | 0.372 | 0.925 | ND | 0.181 | 1.478 |

BTEX농도에 영향을 주는 인자는 토양 층에서의 어떤 점 또는 면오염원에 의한 유출 또는 사고로 인한 것이 아닌 다른 오염원에 기인된다고 생각된다.

대기 중으로 배출되는 BTEX의 양과 대기중의 농도를 구한 문헌은 국내외에 많이 소개되고 있다.¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾ 이들 연구결과에 의하면 대기 중으로 가장 많이 배출되는 물질은 Toluene으로 다른 물질에 비해 2배 이상 배출되며, 대기중의 농도 역시 가장 높게 나타난다. Benzene은 가장 독성이 강한 물질로 사용이 억제되어 비교적 작은 양이 대기 중으로 배출되나 Ethylbenzene, m,p-Xylene o-Xylene보다 오히려 대기중의 농도는 높다. Table 3에서 보면 Benzene은 대기 중에서의 잔류시간(Life time)이 다른 물질에 비해 길어 대기 중에서의 체류시간이 오래 지속된다. 즉 대기 중으로 배출된 Benzene이 다른 물질로 변환되는 반응도는 다른 VOCs보다 낮다. 일반적으로 VOCs가 대기 중에서 다른 물질로 변환되는 반응은 아래와 같은 것으로 알려져 있다.²¹⁾



위 반응의 순반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



대기 중에서 BTEX의 일중, 년중(계절별)변화는 많은 국내의 학자들에 의해서 연구되었다.²²⁾²³⁾²⁴⁾²⁵⁾ 이들의 연구결과에 의하면 대기 중에서 BTEX의 년중 농도는 여름철에 가장 낮고 그 원인은 여름철의 강한 직사광선과 다량의 자외선에 의해 광화학 반응이 활발하기 때문이라 생각된다.

VOCs물질은 $\text{VOCs} + 3\text{O}_2 \rightarrow \text{R}'\text{C}(\text{O})\text{R}'' + 2\text{O}_3$ 에서 보듯이 대기 중에서 산소와 반응하여 O_3 을 생성한다. 서울시 대기 오염환경 자료에서 보면 오존의 월별 1시간 환경기준 초과횟수가 1년 동안에 여름철인 6월, 7월, 8월에 98% 정도가 집중된 것으로 보고 되고 있다.²⁶⁾ 여름을 제외한 다른 계절에서는 대개 대기중 기온이 높은 경우 대기중의 VOCs의 농도가 일반적으로 높게 나타나고, 일별 변화에서는 오후 2시경에서 가장 높은 농도로 나타나며, 해가 뜨기 직전인 06시경의 농도가 부근 시간대에 비해 비교적 높게 나타난다. 이는 BTEX의 잔류시간을 고려하면 인간의 활동이 계속되는 시간대에 계속 증가하지 않고 오후 2시경에 정점을 기록한 후 감소되는 것과, 해가 뜨기 직전의 농도가 높게 나타나는 것은 VOCs가 온도와 기류, 기온역전 등 기타 다른 원인에 의해서 대기층과 토양층 사이에 순환 Cycle을 그리며 이동하는 것으로 생각된다.

Joel E. Baker는 대기중의 PAHs(Polycyclic aromatic hydrocabons)물질이 대기 중에서 Coagulation Grazing현상

으로 호수의 퇴적층에 흡착된다는 발표를 하고 있다.²⁷⁾ 상기한 모든 점을 고려해 보면 조사된 서울시 토양층의 BTEX농도는 지표면 부근의 점 또는 면오염원으로 부터의 오염이 아닌 대기 중에 배출된 BTEX가 위에 열거한 여러 원인에 의해 토양표면층을 오염시켰다고 볼 수 있다. 만일 토양표면층이 BTEX 또는 다른 VOCs물질에 고농도로 오염되면 직접 지하수 층까지 전달되어 지하수를 오염시키며, 또한 표층에 남아있는 BTEX와 다른 VOCs물질은 토양 자체내의 고유한 특성을 혼란시켜 토양 생태계를 파괴하게 된다. 뿐만 아니라 식물에 의해서 섭취되어 식용으로 하는 부분에 농축되며 그 식물을 먹이로 하는 동물에 의해서 고농도로 농축되어 Food Chain의 정점에 있는 인간에게 섭취된다. 식물이나 동물에 섭취되는 B.T.E.X에 대하여는 Regine Keymeulen등에 의한 식물 잎에 MAHs(Monocyclic aromatic hydrocabones)흡착기전에 대한 연구²⁸⁾²⁹⁾, J.Hellou & C.Upshall에 의한 석유류에 오염된 넉치 류의 담즙에 함유된 MAHs에 대한 연구³⁰⁾, Anna Gorna-Binkul등에 의한 과일과 식용으로 하는 식물에 흡착되는 MAHs에 대한 연구³¹⁾ 등 해외에서는 동, 식물에 섭취되는 MAHs에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 Anna Gorna-Binkul 등의 논문에서는 식물(Chicory, Parsley, Cabbage)의 잎에서 토마토와 과일(Apple, Orange, Kiwi, Pear)에서는 Peel층에서 뿐만 아니라 Pulp층에서까지 MAHs가 검출되었다고 보고하고 있다. 이러한 기전에 의해서 인간에게 BTEX가 섭취되면 Table 3에서와 같이 인간에게 유해한 증상이 일어난다. 특히 MAHs중 Benzene은 EPA에서 분류한 인체의 발암 가능성 물질중 오염물질과 암사이의 뚜렷한 역학적 인과관계가 확인된 등급인 A Group으로 평가하고 있는 물질로(자료:IRIS 1996), 미국 캘리포니아 주민을 대상으로한 15가지 화학물질에 대한 잠재적 위해성에서 암발생이 가능한 백만인중 220명으로 가장 위해성이 큰 물질로 평가되었으며, 현재 국내에서 가장 관심이 많은 Dioxins은 암발생이 가능한 백만인중 80명으로 Benzene의 암발생 추정량의 1/3수준으로 평가되었다.³²⁾ 또한 EPA에서 분류한 등급은 인체 실험자료는 불충분하나 충분한 동물실험 자료가 있는 등급인 B2 Group으로 분류되었다. 미국 질병통제소(Centers for Disease Control)의 V. N. Houk에 의하면 다이옥신은 산업재해에서 처럼 많은 양을 체내에 흡수하면 약간의 발암성이 존재하지만 적은 양을 흡수할 경우에는 도시폐기물 소각로 주변의 대기중의 농도에 의하여 증명된 것처럼 발암성이 없는 것으로 그의 논문에서 주장하고 있다.³³⁾ 이와 같이 Dioxins이 인체에 대한 유해성에 대해 학자들 간에 논란이 많아 종합적인 연구검토가 이루어지고 있는 상태에서 지나친 관심은 다른

유해한 유기화합물과 분진, NOx, SOx, CO등의 일반적인 오염물의 대책을 세우는 데 지장을 초래할수있으며, 특히 매립지에서 대기 중으로 다량 발생하는 VOCs와 토양과 하천을 오염시키는 침출수 등을 고려하면 특정한 오염물질에 대한 지나친 관심보다는 환경 오염물질 전체적인 측면에서의 관리와 관심이 환경을 개선시키는데 도움이 될 것으로 생각된다.

서울시 토양중의 BTEX농도에 영향을 주는 인자는 Table 3에서 나타나는 오염원에 주로 기인하며, 이에 대한 저감노력(산업시설에서 용매사용시 Benzene 대신에 인체에 덜 유해한 Toluene사용)과 방지시설을 설치하면 대기중의 유해한 VOCs가 감소하게 되고 따라서 토양으로 유입되는 VOCs도 동시에 감소하게 된다. 또한 이 자료는 BTEX 이외의 다른 VOCs(Styrene, Chloroform, Napthalene등)와 Semi volatile organic compounds(PAHs), Non Volatile organic compounds(Dioxins)등이 여러 원인에 의해 대기중으로 배출되면 MAHs가 토양에 흡착되는 경로와 유사하므로²⁷⁾ 이러한 물질들이 토양에 흡착되는 기전에 참고 자료로 할 수 있다고 생각된다.

결 론

토양을 오염시키는 물질에는 여러 종류의 오염원이 있는데 그중 Monocyclic Aromatic Hydrocabons(MAHs)인 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, ortho-meta and para-Xylene (BTEX)은 Volatile Organic Compounds(VOCs)에 속하는 물질로 U.S. Environmental Protection Agency(EPA)에서 환경을 오염시키는 주요한 유기오염물로 분류하고 있는 물질이다.

서울시 토양에 함유된 BTEX의 양을 알기 위하여 1997년 5월부터 8월까지 토지용도별로 90개 지점에서 시료를 채취하였으며, 또한 MAHs에 오염되지 않았다고 생각되는 3개 지점에서 시료를 채취하여 Purge&Trap이 부착된 G.C. FID로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 서울시 일원의 90개 지점의 BTEX 전체 평균농도는 1.778mg/kg 이었으며, 최대 5.836mg/kg, 최소0.072 mg/kg 이었으며, 대조군 3개 지점에서는 검출되지 않았다.

2. 조사된 지역을 토지이용 용도별(공업, 농업, 녹지, 상업 지역등)로 구분하여 농도의 차이를 알아보았으나 지역에 따른 상이한 점을 볼 수 없었다.

3. BTEX의 각 항목별 평균농도는 Toluene이 가장 높은 농도를 나타내었으며, Ethylbenzene이 가장 낮았으며, 90개 지점의 평균농도는 Toluene 0.849mg/kg > Benzene

0.619mg/kg > Xylene 0.351mg/kg > Ethylbenzene 0.169mg/kg의 순으로 나타났다.

4. 조사된 서울시 토양중의 BTEX 오염은 지표면 부근의 점 또는 면 오염원으로 부터의 오염이 아닌 대기 중에 배출된 BTEX가 여러 원인에 의해 토양 표면 층을 오염시켰다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. 서울특별시 : 환경백서, pp 55 (1994).
2. AnnaGorna - Binkul : Regine Keymeulen, Journal of Chromatography A, pp 297 - 302(1996).
3. Atmospheric Environment, 24A(11): 2855-2860 (1990).
4. EPA: Air (1993).
5. 한화진: 유해 대기오염물질 규제에 관한 국내 대응방안 연구, KETRI, 1994/RE-08 연구보고서, pp 3-226, (1994).
6. Brosset C: The mercury cycle, Water air soil pollut, 16, : 253 - 255 (1981).
7. Spyros G. Pavlostathis, Geeyerpuram N. Mathavan Environ, Sci. Technol., Vol. 26(3):(1992).
8. Van Genuchten, M.T., Davidson, J.M., wierenga, P.J: Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 278 (1974).
9. Mccall, P.J. ; Agin, G.I, Environ, Toxicol. Chem. , 4, 37,(1985).
10. Vaccri, D.A. , Kaouris, M.J: Environ. Sci Health , A23: 797(1988).
11. 환경부: 토양오염공정시험법 (1996).
12. Minnich, Marti M. , Zimmerman, John H. ; Schumacher, Briam A: Long-term study of volatile organic compound recovery from amputated, dry fortified soils, Journal of Environmental Quality, 26(1): 108 - 114.(1997).
13. Thomas, C. volce ; Static and Dymamic headspace Analysis of volatile organic Compopounds in Soils, Environ. Sci. Technol., 27(4) (1993).
14. 서울특별시, 서울시 교통현황 조사, pp 3-65 (1990).
15. 서울특별시, 서울통계연보, pp354-355, (1997).
16. Kampell, Don H. : Wiedemeier, T. H. : Intrinsic bioremediation of fuel contamination in ground water at a field site, Journal of Hazardous

- Materials, 49(Aug) pp 197 - 204(1996).
17. Oermatt, John R.: Natural chromatographic separation of BTEX compounds in a gasoline contaminated ground water aquifer, *ORG. GEOCHEM.* 21: pp1141 - 1150(1994).
 18. Liou, Daisey Paul, U, pp 234-256 (1986).
 19. 신혜수, 김윤신, 허귀석: 실내외 공기중 VOCs의 농도 조사에 관한 연구 *J. KAPRA*, 9(4): 310 - 319(1996).
 20. 色材(日本): 66(2): pp 96 - 103(1993).
 21. 塗裝工學(日本): 27(7): pp 276-287(1992).
 22. 김성렬 외 3인: 도시 대기 중 방향족 휘발성 유기화합물 질의 농도측정. 한국대기보전학회 추계 학술대회 요지집, pp127 - 128.(1997)
 23. 김소영 외 4인: 여름철 유기화합물의 일증변화, 한국대기보전학회 추계학술대회 요지집, pp 129 - 130(1997).
 24. Boudries, H., Toupance G., and Dutot. A: 1997 Seasonal Variation of Atmospheric Nonmethanol Hydrocarbons of the western coast of Brittany, France, *Atmospheric Environment*, 28(6): 1095 - 1112(1997).
 25. Clyde W. sweet and stephen J. Vermette : Toxic volatile organic compounds in urban Air in Illinois. *ES & T* (1992).
 26. 서울특별시: 서울시 대기오염 환경, pp 147-170(1997).
 27. Joel E. Baker, Brian. j. Eadie: Sediment Trap Fluxes and Benthic Recycling of organic carbon , PAHs congeners in Lake Superior, *Environ. Sci. Technol.* 25(3) (1991).
 28. Regine Keymeulen, Bart Parewijck : *Journal of Chromatograph A.* pp 247 - 253 ,765(1997).
 29. Regine Keymeulen, Niceas Schamp: *Atmospheric Environment*, vol. 27(2): 175 - 180(1993).
 30. J. Hellou & C. Upshall: *J. Environ. Anal. Chem.*, 60: P 101 - 111.
 31. Anna Gorna - Binkul, Regin Keymeulen: *Journal of Chromatography A.* pp 297 - 302, 734(1996)
 32. Chow and Connor: *Managing Hazardous Air pollutants.*(1993).
 33. Houk,V.N: Dioxin : Risk Assessment for Human Health,"*The Diplomat*, 27(4), American Academy of Environmental Engineers, MD, October (1991).