

## 산림 대기중 인위적 VOCs와 자연적 VOCs의 농도 비교 연구

김기준 · 김조천<sup>†</sup> · 임준호\*

건국대학교 환경공학과, \*국립환경과학원 실내환경과

### Comparison of Anthropogenic and Natural VOC Concentrations in the Forest Ambient Air

Ki-Joon Kim, Jo-Chun Kim<sup>†</sup>, and Jun-ho Lim\*

Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701 Korea

\*Indoor Air Quality Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

The ambient concentrations of benzene, toluene, and  $\alpha$ - $\beta$ -pinene were measured at the Gumsung mountain site, also the ambient concentrations of VOCs were investigated from forests of *Cryptomeria japonica* and *Pinus koraiensis*. The mean concentration of benzene for this study was  $62.6 \pm 43.9$  pptv (Min. 20.4~Max. 151.2 pptv), and that of toluene was  $619.8 \pm 330.2$  pptv (264.8~1,386 pptv) at the site. It was observed that the concentrations of  $\alpha$ -pinene and  $\beta$ -pinene were  $169.0 \pm 97.7$  pptv (72.9~396.1 pptv) and  $34.9 \pm 27.9$  pptv (7.5~95.9 pptv), respectively. The ambient concentrations of aromatic and natural VOCs were found at the pptv level. In this study, the toluene/benzene ratios were  $13.9 \pm 11.2$ , but they were a little higher than those found in Korea and approximately 5 times greater than the values in the foreign countries. The  $\alpha$ -pinene/toluene ratios ranged between 0.31 and 0.81, and this range was found to be similar to the foreign cases.

**Key words** : NVOCs, monoterpene, benzene, toluene, ambient concentration

## 1. 서 론

대기 중에 존재하는 다양한 종류의 휘발성유기화합물(VOCs)은 인위적 그리고 자연적인 발생원으로 부터 대기 중으로 배출된다<sup>1)</sup>. 도시 대기 중에 존재하는 주요한 인위적 VOCs(Anthropogenic VOCs, AVOCs)는 다양한 산업시설 또는 자동차 배출원으로 부터 배출된다<sup>2)</sup>. 대기 중으로 배출된 VOCs는 질소산화물과 태양광이 관여하는 반응에 의해 O<sub>3</sub>, PAN 등의 광화학 생성물을 형성하여 건강, 식물, 물질 등에 악영향을 미치는 오존의 전구물질(Ozone precursor)로 알려져 있다<sup>3)</sup>. 일부 VOCs는 그 자체로 독성을 나타내거나 발암성 또는 돌연변이성 같은 건강에 악영향을 나타낸다<sup>4)</sup>. 자연 배출원에 의해 배출되는 NVOCs(Natural VOCs)는 기후변화에 영향을 미치고 광화학 반응에 의한 오존 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고

있다<sup>5-7)</sup>. 특히, NVOCs 물질 중 일부 모노테르펜(monoterpene)은 OH 라디칼과의 반응상수가 매우 크므로 개별 모노테르펜에 대한 관심도 증가되고 있는 상황이다<sup>8)</sup>. 또한 blue haze나 에어로졸의 형성 등 전 지구적 대기화학반응과 비도시 지역의 산성침적에 기여하는 유기산의 생성 등에 주요한 영향을 주는 것으로 보고되고 있다<sup>7,9,10)</sup>. 이러한 이유로 산림으로 부터 배출되는 NVOCs의 배출량을 측정하는데 전 세계적으로 많은 노력을 기울여 왔으며, 최근에는 환경 대기 중 모노테르펜의 농도 분포와 그 변화 특성에도 관심을 기울이고 있다<sup>11-13)</sup>. 국내에서는 NVOCs에 대한 배출량 연구도 부족한 현실이지만 대기 중 NVOCs 농도 관련 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 연구에서는 산림 대기 중 VOCs 농도 분포 특성을 연구하기 위하여 대표적인 AVOCs(benzene, toluene)와 NVOCs( $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene)를 대상으로 농도를 측정하였고, toluene/

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

benzene(T/B ratio)와  $\alpha$ -pinene/toluene( $\alpha$ /T ratio) 등의 농도 비를 조사하여 농도 분포 특성을 연구하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 측정 지점 및 조건

대기 중 VOCs 농도를 측정하기 위하여 전라남도 나주시에 위치한 금성산(GS) 지역과 전라남도 장성에 위치한 삼나무(*Cryptomeria japonica*)림 지역(CJ), 경기도 포천에 위치한 잣나무(*Pinus koraiensis*)림 지역(PK)을 선정하였다. GS 지점은 광주광역시와 20 km 정도 거리에 떨어져 있고 VOCs 배출원에 직접적으로 영향을 받지 않는 지역으로 침엽수와 낙엽수가 혼합하여 분포되어 있다. CJ 지점은 VOCs 오염원에 영향을 받지 않는 산림 지역이고, PK 지점은 수도권에 위치한 산림 지역이다. GS 지점의 시료채취 기간은 2002년 7월 12일부터 8월 28일까지 여름철에 수행되었다. 측정은 낮 시간에 이루어졌고, 시간은 09:20부터 17:20까지 이루어졌다. 이때, 측정기간 동안의 온도 범위는 20.7~36.0°C 이었고, 평균온도는 27.8°C이었다. 지점 CJ와 PK의 측정기간은 2001년 8월 21일과 9월 13일 이었고, 이때 평균온도는 28°C와 26°C이었다. 측정은 GS 지점과 동일하게 낮 시간대(09:00~18:00)에 수행되었다. 산림에서의 시료채취 지점은 바닥의 수풀로부터 직접적인 영향을 받는 것을 고려하여 지상으로 부터 1.5 m 위에서 시료채취가 수행되었고, CJ와 PK지점에서의 시료채취는 산림 내부에서 약 50~100 m 간격으로 4 곳(Site A, B, C, D)에서 수행되었다.

### 2.2. 시료채취 및 분석

대기 중 VOCs 시료채취를 위하여 흡착트랩법을 사용하였고, 흡착트랩은 Tenax TA (60/80 mesh, Supelco, USA)와 Carbotrap (20/40 mesh, Supelco, USA)이 충전된 트랩(0.45 cm o.d.×17.7 cm L.)을 사용하였다. 실질적인 분석에 앞서 흡착트랩의 성능시험을 수행한 결과 94.7%(± 4.5%, n=5)의 회수율이 얻어졌고, 상대표준편차(RSD)는 4.7%로 나타났다. 흡착트랩 준비를 위하여 3시간동안 280°C에서 cleaning을 하였으며, 사용 전에 trap blank test를 통하여 trap의 초기상태를 확인하였다. 시료채취는 100 ml/min 유량으로 4~9시간 수행되었고, 대기 중 산화물의 영향을 고려하여 트랩 전단에 오존 스크리버(KI)를 설치하였다. 채취된 시

료는 냉장 보관되어 실험실로 운반되었고 24시간 이내에 분석이 이루어졌다.

정성분석을 위하여 cryogenic system인 자동열탈착장치(Tekmar 6000, Tekmar-Dohrmann, USA)와 GC/MSD(HP 6890/HP5973 Hewlett Packard, USA) 시스템을 동시에 이용하여 분석하였다. 정량분석을 위하여 또 다른 동일한 자동열탈착장치(Tekmar 6000, Tekmar-Dohrmann, USA)와 연결된 GC/FID(HP5890 Hewlett Packard, USA) 시스템이 이용되었다. MSD용 column으로는 HP-624 Capillary(60 m × 0.32 mm, 1.8  $\mu$ m)가 사용되었고, FID용 Column으로는 DB-624 Capillary(60 m × 0.53 mm, 3  $\mu$ m)가 사용되었다. Trap Desorber에서 열 탈착 과정은 250°C에서 25 ml/min (운반기체 헬륨)의 유량으로 8분간 수행되었고, 탈착된 VOCs물질은 내부의 액체질소를 사용하는 Cryo Trap (초저온 응축기)에서 -150°C로 농축되었다. Cryo Trap에 농축된 시료는 2차 열탈착 과정을 거쳐 190°C의 Transfer Line을 통해 Cryo Focus로 옮겨진 후 GC Column으로 주입되었다. MDL(Method Detection Limit, 3 standard deviation)는 모든 물질에 대하여 0.39 ng(n=5) 이하로 나타났고, 분석 정밀도는 상대표준편차(RSD) 값이 6.7%(n=7)로 나타났다. FID를 이용하여 toluene,  $\alpha$ -pinene 등 여러 물질의 검량선을 작성한 결과 모든 물질의 결정계수( $r^2$ ) 값이 0.999이상으로 나타났다.

## 3. 결과 및 고찰

산림대기중에 존재하는 AVOCs와 NVOCs의 농도 특성을 연구하기 위하여 두 그룹의 대표적인 물질인 benzene과 toluene,  $\alpha$ -pinene과  $\beta$ -pinene의 대기 중 농도를 측정하였다. Table 1에는 GS 지점(전라남도 금성산)의 4가지 VOCs에 대한 대기 중 농도의 통계자료

**Table 1.** A statistical summary of concentrations of aromatic and natural VOCs

(Unit: pptv, n=13)

|        | Benzene | Toluene | $\alpha$ -Pinene | $\beta$ -Pinene |
|--------|---------|---------|------------------|-----------------|
| Mean   | 62.6    | 619.8   | 169.0            | 34.9            |
| Stdev  | 43.9    | 330.2   | 97.7             | 27.9            |
| RSD(%) | 70.2    | 53.3    | 57.8             | 80.1            |
| Max    | 151.2   | 1386.2  | 396.1            | 95.9            |
| Min    | 20.4    | 264.8   | 72.9             | 7.5             |
| Median | 44.8    | 509.5   | 154.0            | 19.7            |

가 나타나 있다. Benzene과 toluene의 평균 농도는 62.6(±43.9) pptv과 619.8(±330.2) pptv으로 나타났고, α-pinene과 β-pinene의 농도는 169.0(±97.7) pptv 34.9(±27.9) pptv으로 나타났다.

Fig. 1과 2에는 CJ 지점(장성 삼나무림)과 PK 지점(포천 잣나무림)의 측정결과가 나타나 있다. 각 지점에 대하여 각기 다른 4 곳의 지점(Site A, B, C, D)에서 측정을 수행하였다. 그 결과 CJ 지점에서는 benzene과 toluene 농도가 66.0(±12.2) pptv와 274.5(±120) pptv로 나타났고, α-pinene과 β-pinene의 농도는 113.4(±20.3) pptv와 53.4(±3.8) pptv로 나타났다. CJ 지점의 대기 중에서 α-pinene과 β-pinene이외의 모노테르펜 물질로는 d-limonene이 낮은 농도로 확인되었고, 기타 camphene, p-cymene 등이 정성적으로 확인되었다. Fig. 2의 PK 지점에서는 benzene과 toluene 농도가 48.6(±20.3) pptv와 197.9(±16.1) pptv으로 측정되었고, α-pinene과 β-pinene의 산림대기중 농도는 93.9(±25.9) pptv 129.7(±98.6) pptv로 나타났다.

본 연구에서 얻어진 산림 대기 중의 benzene과 toluene의 농도를 타 연구자들에 의해 연구된 도시지역의 농도 분포와 비교하기 위하여 Table 2에 농도 특성을 비교하였다. 본 연구의 산림 대기 중 농도와 타 연구의 도심 지역 농도와는 시료채취 지점, 시료채취 기

간, 그리고 대기 중 온도 등의 인자들이 다르므로 직접적인 비교는 어렵지만 그 경향은 비교가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구의 산림지역에서의 benzene과 toluene의 농도는 pptv 수준으로 다른 도시지역의 농도에 비해 매우 낮게 나타났다. 특히, CJ와 PK 지점의 toluene 농도는 GS 지점보다도 2~3배 정도 낮게 분포하였다. 이는 Finland의 Hyytiala에 위치한 산림에서의 측정결과와 유사한 것으로 benzene의 농도는 유사하였으나 toluene의 농도는 Hyytiala에서 더욱 낮은 분포를 보였다<sup>20)</sup>. 본 연구의 측정지점과 가장 거리가 가까운 광주광역시 대기 중 농도는 benzene의 농도가 평균 350 pptv로 보고되었고, toluene의 농도는 평균 2,720 pptv로 보고된 바 있다<sup>16)</sup>. 서울특별시 광화문근처의 1998년 측정결과에서 benzene과 toluene의 농도가 1,100 pptv와 10,600 pptv로 보고되었고<sup>14)</sup>, 청량동의 결과에서 750 pptv와 5,800 pptv로 보고되었다<sup>17)</sup>. 대구광역시, 울산공단, 여천공단 등과 외국의 Osaka의 Hamburg와 London의 경우도 ppbv 수준으로 보고되고 있다<sup>15,18,19)</sup>. 대부분 도시에서 benzene의 농도는 750~1,100 pptv, toluene의 농도는 2,200~13,000 pptv 수준으로 보고되어 산림대기중의 pptv 수준의 농도와는 분명한 차이를 보여주고 있다.

특정 VOCs 물질에 대한 VOCs의 비율(toluene/benzene)은 어떤 발생원이 주요 영향인자 인가를 평가하는 방법으로 사용된다<sup>14)</sup>. Benzene과 toluene은 주로

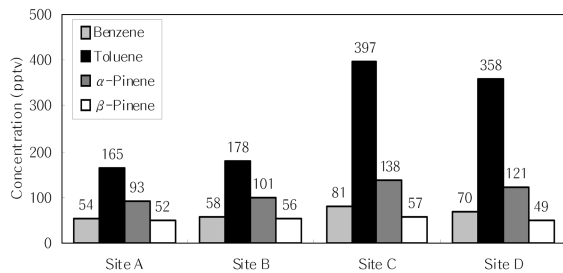


Fig. 1. Ambient concentrations of VOCs in the forest of *Cryptomeria japonica* at the Jangsung site.

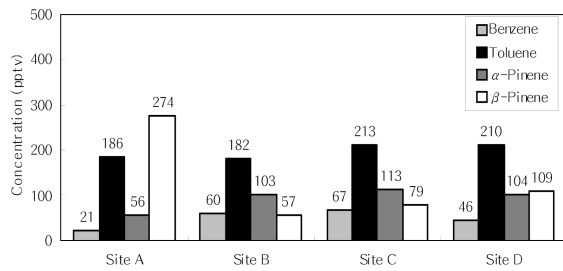


Fig. 2. Ambient concentrations of VOCs in the forest of *Pinus koraiensis* at the Pochun site.

Table 2. Ambient VOC concentrations in various cities (Unit: pptv)

| Site   | Benzene          | Toluene              | T/B ratio |
|--|------------------|----------------------|-----------|
| GS (Gumsung Mt.),<br>Our study, 2002                   | 63<br>(± 44)     | 620<br>(± 330)       | 13.9      |
| CJ ( <i>Cryptomeria japonica</i> ),<br>Our study, 2001 | 66<br>(± 12)     | 275<br>(± 120)       | 4.0       |
| PK ( <i>Pinus koraiensis</i> ),<br>Our study, 2001     | 49<br>(± 20)     | 200<br>(± 16)        | 4.9       |
| Gwangju, 1999 <sup>16)</sup>                           | 350<br>(60~820)  | 2,720<br>(50~7,050)  | 7.8       |
| Kwanghwamun, Seoul 1998 <sup>14)</sup>                 | 1,100            | 10,600               | 9.6       |
| Cheongyong, Seoul 1998 <sup>17)</sup>                  | 750              | 5,800                | 7.7       |
| Taegu, 1999 <sup>15)</sup>                             | 1,630<br>(± 710) | 13,000<br>(± 12,800) | 8.0       |
| Hamburg, Osaka <sup>18)</sup>                          | 3,200            | 8,200                | 2.6       |
| London <sup>19)</sup>                                  | 1,100            | 2,200                | 2.0       |
| Hyytiala Forest, Finland<br>2000-2002 <sup>20)</sup>   | 87.0<br>(± 54.0) | 55.0<br>(± 66.0)     | 0.6       |

도시지역에서 자동차와 관련하여 배출된다. 특히, toluene은 용제사용과 관련하여 배출되는 대표적인 VOCs 물질이며, benzene은 용제사용과는 관련이 적은 VOCs 물질이다. GS 지점 연구 결과에서 T/B(Toluene/Benzene ratio) 값은 13.9±11.2로 매우 높게 관찰되었다. 이것은 자동차 관련 오염원 보다는 다른 오염원에 의해 영향을 받는다는 것을 의미하는 것이다<sup>5)</sup>. 또한, CJ와 PK 지점의 T/B 값(4.0~4.5)은 국내 대도시의 비율보다 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서 측정된 산림지역에서의 α-pinene과 β-pinene의 대기 중 농도를 타 산림지역의 결과와 비교하기 위하여 Table 3과 같이 α-pinene과 β-pinene의 농도를 정리하였다. 두 모노테르펜 물질의 GS 지점 농도는 앞서 말한 바와 같이 169.0±97.7 pptv와 34.9±27.9 pptv로 각각 측정되었고, α-pinene의 경우 GS 지점 결과가 CJ와 PK 지점보다 높았으며, β-pinene의 경우 CJ와 PK 지점의 결과가 GS 지점 보다 높게 나타났다. 비교자료로 조사한 외국의 산림은 CJ와 PK 지점과 유사하게 특정한 수종이 우점종을 차지하는 산림지역이다. Finland의 경우 *Pinus sylvestris*가 대부분을 차지하고, Portugal의 경우 *Pinus pinaster*와 *Eucalyptus globulus*, Greece의 경우 *Abies Borisii-regis*, Florida의 경우 slash pinene 등이 주를 이루고 있는 산림지역이다. Finland의 산림지역에서의 평균 α-pinene의 농도는 104±54 pptv, β-pinene의 농도는 25

±21 pptv로 보고되어 본 연구의 결과와 유사한 것을 알 수 있다(Table 3). Florida의 slash pine 산림의 측정 결과를 보면 α-pinene과 β-pinene의 평균 농도는 177±114 pptv와 112±73 pptv이었고, 다른 연구 결과도 유사한 범위에 속하였다. 또한, 대표적인 산림지역인 Amazonia의 Balbina의 결과를 보면 α-pinene의 대기 중 농도는 400 pptv 이하이었고, β-pinene의 농도는 200 pptv이하로 보고되었다<sup>1)</sup>.

본 연구와 마찬가지로 대부분 연구의 측정은 낮 시간대에 수행되었다. 이와 달리 밤 시간대에 측정이 수행된 Cerqueira와 Harrison의 결과에서는 낮 시간대의 농도 보다 매우 높은 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 밤 시간대에 모노테르펜의 농도가 높게 나타나는 것은 모노테르펜이 대기 중의 오존, OH 라디칼 등의 산화물질들과 급속하게 반응하여 소멸되고, 또한 대기혼합의 일변화에 의해 밤 시간대에는 대기가 안정되고 낮 시간대에는 혼합이 잘 이루어지기 때문에 모노테르펜의 일변화가 발생하는 것으로 설명되고 있다<sup>11,12,21)</sup>. 본 연구에서는 대기 중 VOCs의 일변화를 고려하여 측정이 수행되지는 못하였으나, 향후에는 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

AVOCs와 NVOCs의 대기 중 농도 경향을 비교하기 위하여 대표적인 방향족 VOCs인 Toluene과 대표적인 NVOCs인 α-pinene의 비를 α/T 비율로 표현하였다. GS 지점의 α/T 값은 0.31±0.16이었고, CJ 지점 경우 0.45±0.13, PK 지점의 경우 0.47±0.12로 나타났다. 외국의 산림 지역에서의 측정 결과에서도 α/T 값은 0.71 이상으로 보고되었고, 대부분 1 이상의 값을 보이는 경우가 많았다<sup>20,24)</sup>.

**Table 3.** Ambient concentrations of monoterpene at various forest sites (Unit: pptv)

| Site  | α-Pinene    | β-Pinene   |
|---|-------------|------------|
| GS (Gumsung Mt.) Naju, 2002                       | 169.0±97.7  | 34.9±27.9  |
| CJ ( <i>Cryptomeria japonica</i> ) Jangsung, 2001 | 113.4±20.3  | 53.4±3.8   |
| PK ( <i>Pinus koraiensis</i> ) Pochun, 2001       | 93.9±25.9   | 129.7±98.6 |
| Anadia, Portugal, 1996 <sup>11)</sup>             |             |            |
| Day   | 180         | 130        |
| Night   | 460         | 450        |
| Tabua, Portugal, 1996 <sup>11)</sup>              |             |            |
| Day   | 190         | 160        |
| Night   | 600         | 580        |
| Hyytiala, Finland, 2000-2002 <sup>20)</sup>       | 104±54      | 25±21      |
| Agrafa Mt. Greece, 1997 <sup>12)</sup>            |             |            |
| Day   | below 400   |            |
| Night   | below 2,300 |            |
| Ilomantsi, Finland, 1997-1998 <sup>21)</sup>      | 99~148      | 18~28      |
| Hsinghua and 3 site, Taiwan, 1998 <sup>22)</sup>  | 72~477      | 54~773     |
| Austin Cary, Florida, 1994-1995 <sup>23)</sup>    | 177±114     | 112+73     |

#### 4. 결 론

산림지역의 환경대기중의 인위적/자연적 VOCs 농도를 측정하기 위하여 전라남도 금성산 지역에서 benzene, toluene, α-/β-pinene의 농도를 측정하였으며, 전라남도 장성 삼나무림, 경기도 포천 잣나무림에서 각각 농도를 측정하였다.

금성산 지역에서 benzene의 평균 농도는 62.6 (±43.9) pptv이었고, toluene은 619.8(±330.2) pptv이었다. 이때, T/B 비율은 13.9±11.2로 나타났다. 타 지역의 연구 결과보다 높은 것으로 나타났다. 또한, 금성산 지역의 α-pinene과 β-pinene의 대기 중 농도는 각각 169.0(±97.7) pptv와 34.9(±27.9) pptv로 나타났

고, 삼나무림에서는 113.4( $\pm$ 20.3) pptv과 53.4( $\pm$ 3.8) pptv, 잣나무림에서의 농도는 93.9( $\pm$ 25.9) pptv과 129.7( $\pm$ 98.6) pptv로 나타났다.

본 연구의 산림에서의 대기 중 monoterpene 농도 결과는 외국의 측정 결과들과 유사한 범위를 보였으며,  $\alpha$ /T 값을 살펴본 결과 평균 0.31~0.81을 나타내었다. 외국의 경우 산림지역의  $\alpha$ /T 값은 0.71 이상으로 보고 되었고, 산림지역에서의 NVOCss의 비율이 높은 것으로 확인되었다.

본 연구는 산림지역을 대상으로 대표적인 AVOCss와 NVOCss를 연구하였으나, 향후에는 도시지역과 산림지역의 두 VOCss 그룹간의 비교자료와 일변화에 따른 그룹간의 비교 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- Kesselmeier J.U., A. Kuhn, M. O. Wolf, P. Andreae, E. Ciccioli, M. Brancaleoni, A. Frattoni, J. Guenther, P. C. Greenberg, T. Vasconcellos, T. T. Oliva, and P. Artaxo, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 4063~4072.
- Mayer H., *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 4029~4037.
- Michael. E.J., M.S. Sandra, and J.P. Michael, *Atmospheric Environment*, **1997**, 31(1), 81~104.
- Keith, L.H. and M.M. Walker, *Handbook of air toxics: sampling, analysis, and properties*, Lewis Publishers, **1995**, 182~185, 349~351, 567~608.
- Chameides, W.L., R.W. Linsay, J. Richardson, and C.S. Kiang, *Science*. **1988**, 241, 1473~1475.
- Guenther A., C. N. Hewitt, D. Erickson, R. Falland, and C. Beron, *J. Geophys. Res*, **1995**, 98, 12609~12617.
- Coeur C., V. Jacob, and P. Foster, *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 1615~1620.
- Calogirou, A., B.R. Larsen, and D. Kotzias, *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 1423~1439.
- Fehsenfeld, F., Calvert, J., Fall, R., Goldan, P. and Guenther, A.B., *Global Biochemical Cycles*, **1992**, 6, 389~430.
- Odum, J., T. Hoffmann, F. Bowman, D. Collins, D. Klockow, R.C. Flagan, and J.H. Seinfeld, *Journal of Aerosol Science*, **1996**, 27, S233~S234.
- Cerqueira M.A., C.A. Pio, P.A. Gomes, J.S. Matos and T.V. Nunes, *The Science of The Total Environment*, **2003**, 313(1-3), 49~60.
- Harrison D., M.C. Hunter, A.C. Lewis, P.W. Seakins, B. Bonsang, V. Gros, M. Kanakidou, M. Touaty, I. Kavouras, N. Mihalopoulos, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35(27), 4699~4711.
- Pio C.A., T.V. Nunes, L.M. Castro and D.A. Lopes, *Chemosphere-Global Change Science*, **2001**, 3(3), 283~293.
- Na K.S., Y.P. Kim, and K.C. Moon, *Atmospheric Environment*, **2003**, 37, 733~742.
- Kim M.H., S.G. Park, and S.O. Baek, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, **2002**, 18(2), 113~126.
- Lee Y.J., D.Y. Shin, H.S. Lee, B.W. Kang, and J.S. Han, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, **2001**, 17(2), 169~177.
- Na K.S. and Y.P. Kim, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35, 2603~2614.
- Derwent R.G., T.J. Davies, M. Delaney, G.J. Dollard, R.A. Field, P. Dumitrean, P.D. Nason, B.M.R. Jones, and S.A. Pepler, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 297~312.
- Moschonas N. and S. Glavas, *Atmospheric Environment*, **1996**, 30, 2769~2772.
- Hakola H., V. Tarvainen, T. Laurila, V. Hiltunen, H. Hellen, and P. Keronen, *Atmospheric Environment*, **2003**, 37(12), 1623~1634.
- Hakola H., T. Laurila, J. Rinne, and K. Puhto, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34(29-30), 4971~4982.
- Hsieh C.C., K.H. Chang, and L.T. Wang, *Chemosphere*, **1999**, 39(5), 731~744.
- Kim J.C. and K.H. Kim, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, **2002**, 18(E3), 175~180.
- Cooke K.M., S. Hassoun, S.M. Saunders, and M. J. Pilling, *Chemosphere - Global Change Science*, **2001**, 3(3), 249~257.