

## PAC를 이용한 2-MIB와 Geosmin의 흡착특성과 제거에 관한 연구

전대영 · 이현주 · 홍성호 · 윤제용\*

승실대학교 환경·화학공학과  
\*서울대학교 응용화학부

(2000년 5월 29일 접수, 2000년 10월 12일 채택)

## The Removal and Adsorption Characteristics of 2-MIB & Geosmin using PAC

Dae-Young Jun · Hyeon-Ju Lee · Seongho Hong · Jeyong Yoon\*

*Department of Chemical & Environmental Engineering, Soongsil University*  
*\*School of Chemical Engineering, Seoul National University*

### ABSTRACT

Naturally occurring taste and odor problems include those produced by micro-organism, notably algae and bacteria. The major compounds causing taste and odor are MIB and Geosmin which can cause earthy-musty at very low concentration 9 ng/L and 4 ng/L, respectively. Especially, the problem is very serious from summer to fall in source and finished water. It is well known that using PAC is one of the best technology to control these compounds in drinking water treatment. In this study, optimum dosage and dosing time of PAC were observed with the adsorption isotherm experiments in single and binary compounds. Also, the effect of natural organic matter(NOM) was investigated by using a natural water with JSW. The adsorption capacity of Geosmin was higher than MIB in both with NOM and without NOM. The adsorption capacity of Geosmin and MIB was 4 times lower with NOM than that of without NOM, which was caused by competition adsorption. When the initial concentration of Geosmin and MIB were 100 ng/L in JSW, at least 4 hours of reaction time was needed to achieve 99% removal with 20 mg/L of the PAC.

---

Key Words : Geosmin, MIB, NOM, Adsorption

## 요약문

자연계에서 발생하는 이취미 문제는 주로 조류나 박테리아와 같은 미생물의 신진대사에 기인한다. 이취미와 관련한 원인물질은 주로 MIB와 Geosmin으로서 이는 9 ng/L와 4 ng/L의 아주 저농도에서도 흙과 곰팡이 냄새를 일으킨다. 정수처리과정에서는 분말활성탄을 이용한 이취미 유발물질 제어기술이 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 단일성분과 이성분계에 있어서의 흡착 등온실험을 통하여 최적의 PAC 투여량과 반응시간에 대하여 고찰하였으며 또한 원수를 이용하여 수중에 포함된 자연유기물질의 영향을 고찰하였다. 연구결과 자연유기물질의 유무에 관계없이 Geosmin의 흡착능이 우수하였으며, 자연유기물질이 존재할 경우 MIB와 Geosmin 모두 4배 정도의 흡착능 저하를 보였다. 초기농도 100 ng/L 정도의 원수의 경우 99%의 제거율을 얻기 위해서는 PAC 투여량 20 mg/L, 4시간 이상의 반응시간을 필요로 하였다.

주제어 : Geosmin, MIB, 자연유기물질, 흡착

## 1. 서론

산업의 발달은 국민 삶의 질적 향상과 풍요로움을 가져다 주었으나 환경오염이라는 부산물을 초래하였다. 현재 상수원은 관리의 부재로 인한 폐수와 생활오수의 과다 유입, 잦은 공사로 인한 토사유입 등으로 오염이 갈수록 심각해지고 있다. 특히, 여름에서 가을까지는 질소나 인과 같은 영양염류의 증가와 수온의 상승에 따른 부영양화 현상으로 조류와 미생물이 과다증식 되고 있으며 이들 신진 대사물의 증가는 먹는 물에서 맛·냄새를 유발하여 물에 대한 혐오감을 불러일으키기도 한다.<sup>1,2)</sup>

현재까지 조류와 미생물에 의한 맛·냄새 유발물질은 대표적으로 2-MIB(2-methylisoborneol), Geosmin(trans-1, 10-di-methyl-trans-9-decalol), IPMP(2-isopropyl-3-methoxypyrazine), IBMP(2-isobutyl-3-methoxypyrazine), TCA(2,3,6-trichloroanisole) 등으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 이 중 MIB와 Geosmin은 actinomycetes, blue-green algae 그리고 cyanobacteria와 같은 조류와 미생물에 의해 발생되는 것으로 알려져 있는 대표적인 이취미 물질로서 각각 9 ng/L와 4 ng/L의 극미량의 농도에서도 흙이나 곰팡이 냄새를 유발하여 이취미에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>4,5)</sup>

현재 이취미 물질을 제거하기 위한 가장 효과적인 공정으로는 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)에 의한 흡착공정이 널리 이용되고 있으며 먹는 물에서의 이취미 문제는 여름부터 가을철에 조류와 미생물이 급증할 때 일시적으로 발생되므로 PAC를 그 시기에 맞춰 사용한다면 입상활성탄(granular activated carbon, GAC) 공정을 설치하여 운영하는 것 보다 경제적인 것으로 알려져 있다.<sup>6)</sup> 또한 이러한 이취미 유발물질은 매우 미량으로 존재하며, PAC에 의한 처리시 원수의 자연유기물질의 농도와 화학적 특성에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 그러나 이러한 상호영향에 관하여 아직 정량적인 평가가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. MIB와 Geosmin의 경우 원수에 극미량으로 존재하므로 정량분석이 어려운 것도<sup>8)</sup> PAC사용에 따른 MIB와 Geosmin 제거에 따른 각 공정간의 영향을 파악하기에 어려운 요인 중의 하나로 작용하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 초순수에 Geosmin과 MIB가 존재할 때의 흡착능을 평가하였고, 국내의 상수원에서 채취한 물을 사용하여 자연유기물질이 Geosmin과 MIB의 흡착에 미치는 영향을 평가하였으며, 최적 투여량을 도출하기 위하여 PAC 투여량의 변화에 따른 제거율을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험재료

실험에 사용한 활성탄은 역청탄을 원료로 한 F-400(Calgon corp., Pittsburgh)을 100×200 (dp=0.11 mm)과 325(dp=44 μm) U. S. Standard mesh 이하로 분쇄하여 사용하였다. MIB와 Geosmin(Wako, Japan)의 stock solution은 acetone에 용해시켜 400 mg/L의 농도로 제조하여 사용하였다. 추출용매로는 CS<sub>2</sub>(J.T. Baker, Japan)를 사용하였고, 세척용 시약으로는 CS<sub>2</sub>, acetone (Duksan, Korea), dichloromethane(Duksan, Korea)을 사용하였다. 실험에 사용한 물은 초순수 (laboratory clean water, LCW)와 잠실수중보 (Jamsil water, JSW)의 물을 사용하였고, 원수의 특성은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 분석장치

MIB와 Geosmin의 추출에는 CLSA(CLSA-2 System, Brechbühler, Switzerland)를 이용하였으며, Fig. 1에 장치도를 나타내었다. 또한 DOC 분석에는 DC-180(Dohrmann)을 사용하였으며, UV<sub>254</sub> 분석에는 spectrophotometer(DR-4000, HACH)를 사용하였고, CLSA 장치를 이용하여 추출한 MIB와 Geosmin을 GC/MS와 GC/FID(HP 5890 series II, HP 5972)를 사용하여 정성·정량분석 하였다. 탁도는 Turbidimeter(model No. 2100, HACH)를 pH는 pH-meter(model 420A, Orion)를 사용하였다.

### 2.3. 실험방법

#### 2.3.1. Isotherms

MIB와 Geosmin의 흡착등온식을 얻기 위하여 동일한 초기농도에서 활성탄의 양을 변화시키는 bottle point isotherm을 사용하였다. 활성탄은 325 mesh 이하로 분쇄한 후 ±0.1 mg의 오차범위 내에서 정확히 측정하였고, 이 활성탄의 양을 변화시켜 가며

Table 1. Characteristics of source water

Parameter	Source	JSW
Turbidity(NTU)		6.4~6.5
UV <sub>254</sub> (/cm)		0.023
DOC(mg/L)		1.80
Alkalinity(CaCO <sub>3</sub> mg/L)		20
pH		7.3

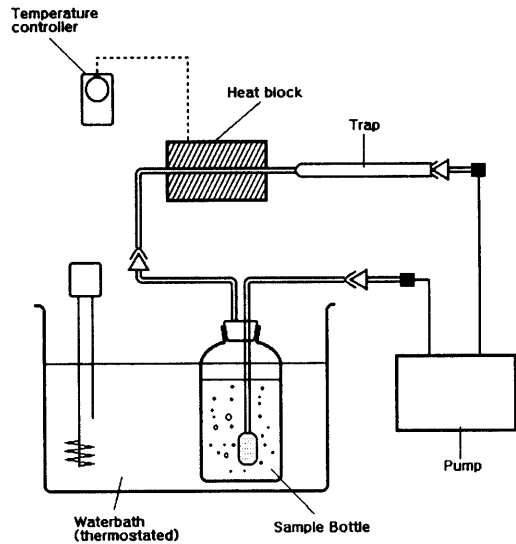


Fig. 1. Schematic diagram of CLSA-2 apparatus.

1.225 mL의 시료병에 투입한 후 시료를 기포없이 완전히 채웠다. 시료병의 뚜껑은 테프론으로 코팅된 것을 사용하였으며 유기물 분해를 최소화하기 위하여 갈색병을 사용하였다. 실험은 8개의 시료를 1조로 하여 교반장치(tumbler)에서 약 10 rpm의 속도로 3일간 반응하였으며, 2개의 시료는 활성탄이 없는 control로 하여 이를 시료의 초기농도로 하였다. 3일 후에 시료를 교반장치에서 꺼내어 수중에 존재하는 활성탄 입자를 제거하기 위하여 1.2 μm Millipore membrane과 0.45 μm Millipore membrane을 사용하여 여과 후, 즉시 CLSA 장치를 이용하여 농축시킨 후 GC/FID로 분석하였다. Freundlich 등온식을 흡착등온식으로 사용하였다.

### 2.3.2. Kinetics

초순수를 20 L의 용기에 채운 후 MIB와 Geosmin의 stock solution을 사용하여 균일한 농도로 조제하여 동일한 양의 PAC를 시료병에 넣은 후 교반장치에 장착하여 시간의 변화에 따른 제거율을 고찰하였다. 이때 사용된 PAC는 325 mesh(44 μm)를 99% 이상 통과한 F-400을 사용하였으며, PAC의 투여량에 따른 제거율을 고찰하기 위하여, PAC의 양을 5, 10, 20 mg/L로 증가시키고, 반응시간은 0, 15, 30, 60, 120, 그리고 240분으로 하여 실험하였다. 자연유기물질이 존재하는 경우는 시료를 JSW로 하여 위와 동일한 방법으로 하였으며, 자연유기물질이 제거율에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 단일성분계의 2-MIB와 Geosmin의 흡착특성

#### 3.1.1. Kinetics

Fig. 2와 3에 MIB와 Geosmin을 초순수에 용해시킨 경우 PAC 투여 후 시간에 따른 제거율을 나타내었다. 이 때 MIB와 Geosmin의 초기농도는 각각 109.9과 126.0 ng/L이었다.

MIB의 경우 PAC를 5, 10, 20 mg/L로 투여량을 증가시키며 따라 흡착평형에 도달하는 시간은 감소하였으며 평형 상태에서 액상에서의 농도는 1 ng/L 이하의 낮은 농도로 약 99% 이상의 MIB가 PAC에 흡착된 상태임을 알 수 있었고, 흡착평형에 도달하는 시간은 PAC를 5 mg/L 투여했을 때 약 2시간, 10 mg/L 투여했을 때는 1시간, 그리고 20 mg/L를 투여했을 때는 약 30분 정도로 나타나 PAC 투여량이 증가함에 따라 평형에 도달하는 시간이 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. Geosmin의 경우도 MIB와 마찬가지로 PAC 투여량을 동일하게 증가시키며 따라 흡착평형에 도달하는 시간은 1시간에서 15분으로 감소하였으며, 흡착평형에 도달했을 때의 액상에서의 농도는 MIB와 마찬가지로 1

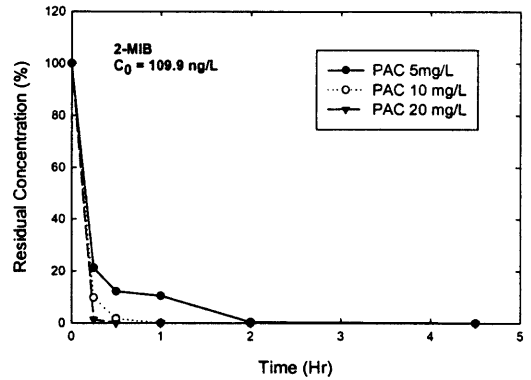


Fig. 2. Variations of MIB concentration in batch adsorption using LCW.

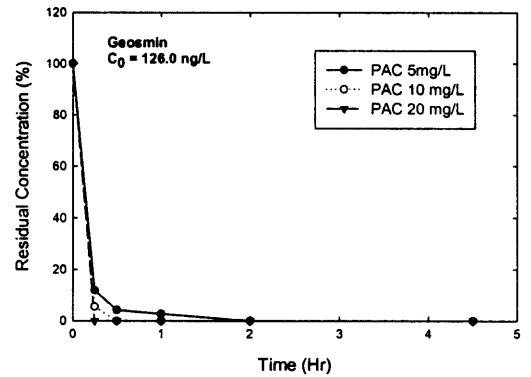


Fig. 3. Variations of Geosmin concentration in batch adsorption using LCW.

ng/L 이하의 낮은 농도로 나타나 PAC에 의해 흡착이 잘 될 뿐만 아니라 PAC에 의한 제거가 효과적인 것으로 나타났다.

#### 3.1.2. 단일성분의 흡착등온실험

Fig. 4와 5에 단일성분계에서의 초기농도를 변화시켜가며 PAC에 의한 MIB와 Geosmin 흡착등온선을 나타내었다. Fig. 4에서 MIB의 초기농도를 64.9 ~ 206 ng/L로 변화시켜 가며 초기농도가 흡착제에 미치는 영향을 살펴본 결과 각각의 농도에서 선형성을 보였으며 이는 PAC에 의한 흡착제거시 초기농도가 미치는 영향은 크지 않음을 보여준 결과이며, 이때의 Freundlich 상수 k값은 7.18이었고, n값은 0.36이었다.

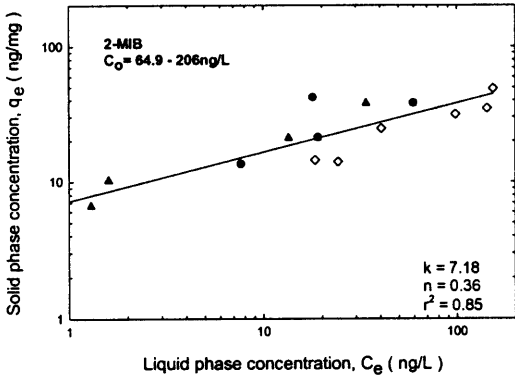


Fig. 4. Adsorption isotherm of 2-MIB in LCW.

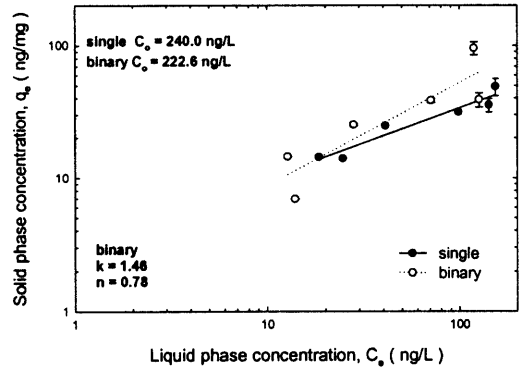


Fig. 6. Adsorption isotherms of MIB with Geosmin in LCW.

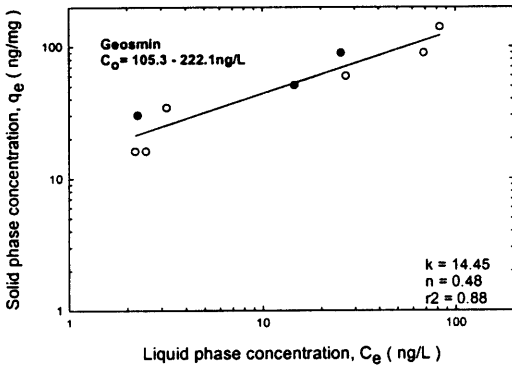


Fig. 5. Adsorption isotherm of Geosmin in LCW.

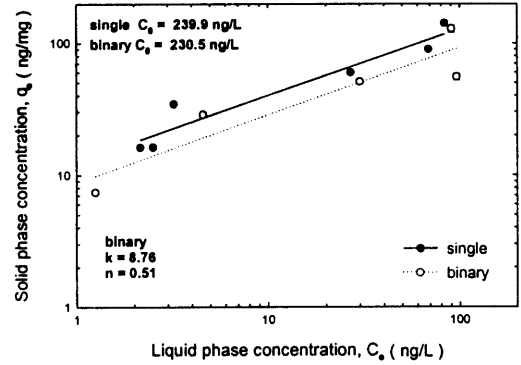


Fig. 7. Adsorption isotherms of Geosmin with MIB in LCW.

Fig. 5에 나타난 Geosmin의 경우도 초기농도를 105.3~222.1 ng/L로 변화시켜 가며 수행한 결과 초기농도가 흡착에 미치는 영향은 뚜렷하지 않았으며 이때 Freundlich 상수  $k$ 와  $n$ 값은 각각 14.45와 0.48이었다.

### 3.1.3. 이성분계에서의 흡착등온실험

Fig. 6과 7에 초기농도가 비슷한 MIB와 Geosmin의 이성분계에서의 흡착등온선을 단일성분계에서의 흡착등온선과 함께 나타내었다. 이성분계 실험에서 MIB와 Geosmin의 초기 농도는 각각 222.6 ng/L와 230.5 ng/L이었다. Fig. 6에서 나타난 바와 같이 PAC에 의한 MIB 흡착량은 이성분계에서 단일성분계보다 크게 감소하지 않는 것으로 나타났으며 단일성분계에서의 MIB의  $k$ 값은 3.03이었으나 Geosmin이 공존하는 이성분계에서는 1.46으로 절

반 가까이 감소하는 경향을 보였으나 Freundlich 상수  $n$ 값의 변화로 인하여 실제적인 흡착량의 감소를 정량적으로 평가하기는 어려웠으며, 두 물질 상호간의 경쟁적 흡착으로 다소 흡착능의 저하가 이루어졌다고 사료된다.

Fig. 7에서와 같이 Geosmin의 경우는 단일성분계에서의  $k$ 값 12.45에서 MIB가 비슷한 농도로 존재하는 이성분계에서 8.76으로 감소하는 경향을 보였으며  $n$ 값도 각각 0.48과 0.51로 비교적 일정한 것으로 보아 두 물질 상호간의 경쟁적 흡착으로 30% 정도의 흡착능 저하를 보인 것으로 나타났다. 일반적으로 다성분계에 유기물질이 공존하는 경우 한 물질이 다른 유기물의 흡착에 상당한 영향을 주는 것으로 알려져 있는데 이는 다성분계에서의 각각의 흡착질이 한정된 흡착 site에 상호 경쟁적으로 흡착하기 때문에 흡착성능이 저하되는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 결과 이성분계에서도 뚜렷한 흡

착능의 저하를 보이지 않은 것은 초기농도가 저농도이기 때문으로 사료된다.

### 3.2. 자연유기물질의 존재하에서의 2-MIB와 Geosmin의 흡착특성

상수원에는 다양한 유기물질이 공존하고 있으며 이들 대부분은 식물이나 미생물의 생태학적 순환에 의해 발생하는 자연유기물질(natural organic matters, NOM)이다. 이취미를 유발하는 대표적인 물질인 2-MIB와 Geosmin의 경우 조류와 일부 미생물의 대사작용에 의해 발생하는 물질로 그 농도가 극미량으로 존재하기 때문에 실제 정수처리과정 가운데 자연유기물질은 특히 흡착공정에서 상당한 영향을 미친다. 따라서, 본 실험에서는 자연유기물질 존재하에서의 MIB와 Geosmin의 흡착특성을 고찰하였다.

#### 3.2.1. 자연유기물질 존재하에서의 2-MIB와 Geosmin의 Kinetics

Fig. 8과 9에 자연유기물질의 존재하에서 PAC에 의한 2-MIB와 Geosmin의 흡착제거율을 시간 변화에 따라 나타내었다. 실험에 사용한 상수원수는 JSW이었으며 실험을 수행한 시기의 DOC 농도는 1.80 mg/L, UV<sub>254</sub>는 0.023(/cm)이었고, MIB와 Geosmin은 stock solution을 사용하여 자연유기물질이 흡착공정에 미치는 영향을 고찰하였으며 이때 두 물질의 초기농도는 MIB 104.3 ng/L와 Geosmin 120.7 ng/L이었다.

Fig. 8에 JSW에 있어서 시간에 따른 MIB 제거율을 나타내었는데 PAC를 5, 10, 20 mg/L로 투여량을 점차 증가함에 따라 흡착평형에 도달하는 시간은 감소하는 경향을 보였으며 흡착평형상태에서 액상에서의 농도는 48.2, 24.6, 그리고 4.0 ng/L로 이를 MIB 제거율로 살펴보면 53.6%, 76.3%, 96.2%이었다. Fig. 2에서 나타내었던 바와 같이 자연유기물질이 존재하지 않는 경우의 MIB의 평형상태 하에서의 제거율은 PAC 5 mg/L 이상 투여했을 때 99%이었음을 고려해 볼 때, 이상의 결과는 자연유기물질이 MIB의 제거율에 미치는 영향은 상

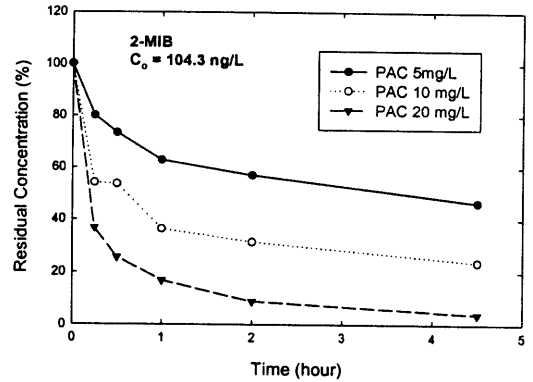


Fig. 8. Variations of MIB concentration in batch adsorption using JSW.

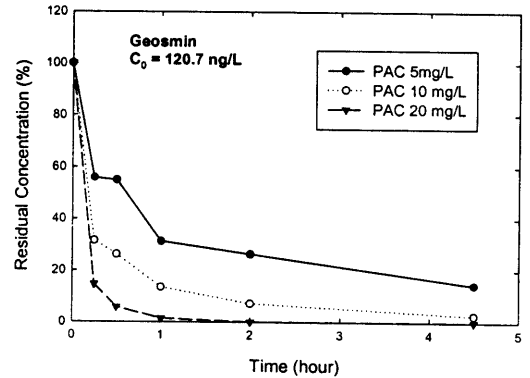


Fig. 9. Variations of Geosmin concentration in batch adsorption using JSW.

당히 크다는 것을 알 수 있었으며 MIB의 초기농도에서 이취미 감지농도인 9 ng/L까지 제거하기 위해 요구되는 MIB 제거율은 약 92%이고, 이는 PAC를 20 mg/L를 투여했을 때 약 2시간의 접촉시간을 요구하는 것으로 해석할 수 있다. 실제 정수장에서의 PAC와 MIB의 접촉시간은 처리공정에 따라 2시간 이내인 것을 고려해 볼 때, 본 실험의 경우 일반 상수원에 존재하는 MIB의 농도보다 다소 높게 하여 수행하였으나 약 20 mg/L 이상의 PAC를 투여하여 야만 MIB에 의한 이취미 발생은 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 9에 시간에 따른 Geosmin의 제거율을 나타내었으며, MIB와 동일한 조건으로 PAC의 투여량을 증가시켰을 경우 Geosmin의 흡착평형에서 액상에서의 농도는 17, 2.8, 그리고 1.40 ng/L로 제거

율은 86%, 98%, 99%로 증가하였으며 Fig. 9에서 주어진 Geosmin의 초기농도에서 4 ng/L까지 제거하기 위해 요구되는 제거율은 97% 이상으로 이를 만족시키기 위해서는 PAC를 20 mg/L를 투여했을 때 약 1시간의 접촉시간을 요구하며 PAC를 10 mg/L를 투여했을 때 약 4시간 이상의 접촉시간을 필요로 하였다. 본 실험에서 주어진 초기농도와 일반적인 정수장의 접촉시간을 고려해 볼 때 PAC의 농도 10~20 mg/L 범위에서 Geosmin에 의한 이취미 문제를 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2.2. 자연유기물질 존재하에서의 2-MIB와 Geosmin의 Isotherms

Fig. 10과 11에 자연유기물질 존재시의 초기농도가 비슷한 MIB와 Geosmin의 단일성분계에서의 흡착등온선과 이성분계에 의한 흡착등온선을 함께 나타내었다. 이성분계에서의 MIB와 Geosmin의 초기농도는 각각 86.7 ng/L와 68.7 ng/L이었다.

Fig. 10에서와 같이 단일성분계에서의 MIB의 k 값은 1.56이었고 Geosmin이 공존하는 이성분계에서는 1.96으로 MIB 흡착량은 이성분계에서 단일성분계보다 크게 감소하지는 않았다. 이는 자연유기물질이 존재하는 경우의 흡착공정에서 원수 중에 MIB와 Geosmin이 존재한다고 하더라도 극미량으로 존재하기 때문에 상대적으로 높은 농도로 존재하고 있는 자연유기물질이 전체적인 흡착량을 결정하게 되므로 MIB와 Geosmin 두 물질간의 경쟁적인 흡착에서의 차이는 보이지 않는 것으로 판단된다. Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 Geosmin의 경우도 단일성분계에서의 k 값은 3.89이었으나 MIB가 비슷한 농도로 존재하는 이성분계에서는 2.70으로 다소 감소되기는 하였으나 그다지 큰 차이를 나타내지는 않았다. MIB의 경우와 마찬가지로 자연유기물질이 수중에 존재하면 Geosmin의 농도 보다 월등히 높은 농도로 존재하므로 MIB와 Geosmin 두 물질 상호간의 경쟁적인 흡착보다는 자연유기물질이 흡착에 미치는 영향이 훨씬 크기 때문에 상대적으로 경쟁적인 흡착의 영향이 낮은 것으로 나타났다.

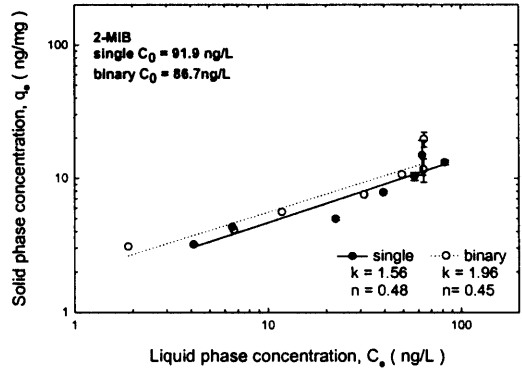


Fig. 10. Adsorption isotherms of MIB in JSW.

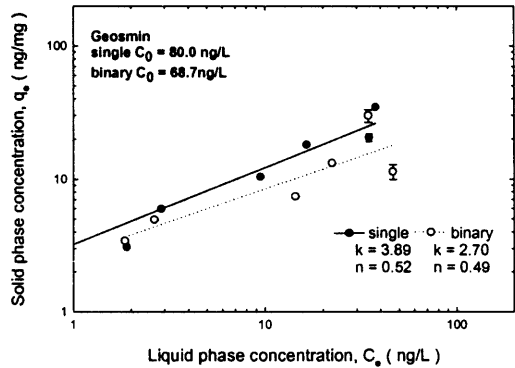


Fig. 11. Adsorption isotherms of Geosmin in JSW.

## 4. 결 론

CLSA 장치를 이용하여 농축·추출하여 GC/MS와 GC/FID에 의하여 이취미 유발물질의 대표적 성분인 2-MIB와 Geosmin을 정량분석 하였다. LCW와 JSW에 대한 이취미 물질의 흡착능 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) LCW에서 흡착평형에 도달하는 시간은 2-MIB의 경우 PAC의 투여량을 5, 10, 20 mg/L로 증가시킴에 따라 각각 2시간, 1시간, 30분으로 나타났으며 Geosmin의 경우 5 mg/L의 PAC를 투여하였을 경우 1시간 경과 후 약 97%의 제거율을 보였다.
- 2) Isotherm 실험에서 Geosmin이 2-MIB보다 약 4배의 더 좋은 흡착능을 나타내었다.
- 3) PAC에 의한 두 물질의 흡착능에 있어서 초기 농도가 미치는 영향을 살펴본 결과 두 물질 모

두 초기농도의 영향은 크지 않았다.

- 4) 2-MIB와 Geosmin의 단일성분계와 이성분계의 경쟁적인 흡착의 영향을 살펴 본 결과 LCW의 경우 이성분계에서 Geosmin이 약 30%의 흡착능 저하를 보였을 뿐 JSW에 있어서는 이성분계에서의 흡착능 저하는 보이지 않았다.
- 5) LCW와 비교하여 자연유기물질이 동시에 존재하는 JSW에 있어서 2-MIB와 Geosmin의 경우 각각 30%와 40%의 흡착능 저하를 보였다.
- 6) 2-MIB와 Geosmin이 NOM과 경쟁적인 흡착을 하는 경우 흡착속도가 NOM이 존재하지 않는 경우와 비교하여 현저히 감소함을 나타내었다.

## 사 사

본 연구는 G7 환경공학기술개발 사업 중 기존 정수장 효율 향상 연구와 정수장 진단기술 개발연구의 일부로 수행되었으며 환경부 및 수자원 공사 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. McGuire, M. J., Krasner, S. W., Hwang C. J., and Izaguirre, G., "Closed-loop stripping analysis as a tool for solving taste and odor problems," *Jour. AWWA research & technology*, **10**, 530~537 (1981).
2. Graham, M. R., Optimization of Powered Activated Carbon Use in Water Treatment, B. S. Civil Engineering, Stanford University(1992).
3. Pirbazari, M., Lalezary, S., and McGuire, M. J., "Oxidation of five Earthy-Musty Tastes and Odor compounds," *Jour. AWWA research & technology*, **3**, 62~69(1986).
4. Suffet, I. H., Mallevalle, J., and Kawczynski, E., "Advances in Tastes-and-Odors Treatment and Control," *Jour. AWWA research foundation*, 157~208(1995).
5. Mallevalle, J. and Suffet, I. H., "Identification and Treatment of Tastes-and-Odors in drinking Water," *Jour. AWWA research foundation*, 34~52(1995).
6. Herzing, D. R., Snoeyink, V. L., and Wood, N. F., "Activated Carbon Adsorption of the Odorous Compounds 2-Methylisoborneol and Geosmin," *Jour AWWA*, **4**, 223~228(1977).
7. Crittenden, J. C., Luft, P., and Hand, D. W., "Prediction of Multicomponent Adsorption Equilibria in Background Adsorption Mixtures of Unknown Composition," *Wat. Res.*, **19**(12), 1537~1548(1985).
8. Hwang, C. J., Krasner, S. W., Mecquire, M. J., Moylan, M. S., and Dale, M. S., "Determination of Subnanogram per Liter Levels of Earthy-Musty Odorants in Water by the Salted Closed-Loop Stripping Method," *Environ. Sci. Technol.*, **18**(7), 535~539 (1984).
9. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., APHA, American Water Works Association(1992).
10. 조동구, "분말활성탄의 처리 최적화를 위한 재질 선정," *수자원환경*, 81~96(1998).
11. Najm, I. N., Snoeyink, V. L., Suidan, M. T., Lee, C. H., and Richard, Y., "Effect of Particle Size and Background Natural Organics on the Adsorption Efficiency of PAC," *Jour. AWWA*, **1**, 65~72(1990).
12. Huang, C., van Benschoten, J. E., and Jensen, J. N., "Adsorption kinetics of MIB and Geosmin," *Jour. AWWA*, **88**(4), 116~128(1996).
13. 김영석, 수도물에서 Geosmin과 2-MIB의 처리에 관한 연구, 고려대학교 토목환경공학과 박사학위논문(1995).