

상수원수 내 이취미 조기감지를 위한 조기경보장치의 최적운전인자 도출

Determination of Optimum Operational Parameters on Early Warning Device for Early Detection of Taste and Odor in Drinking Water Supplies

김영일¹ · 배병욱^{2*} · 주대성³

Kim, Young-Il¹ · Bae, Byung-Uk^{2*} · Ju, Dae-Sung³

1 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

2 대전대학교 환경생명공학과

3 에스아이비(주)

(2006년 8월 8일 논문 접수; 2006년 11월 27일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Taste and odor (T&O) problems in drinking water supplies caused by eutrophication have become increasingly important because aesthetic qualities are the primary measures by which consumers estimate the quality of their drinking water. In order to overcome T&O problem, it is necessary to early detection method for T&O compounds before these compounds enter to water treatment plant. In this background, a early warning device for T&O compounds was developed and its performance tested under different operating condition. According to the experimental results on the adsorption efficiency of T&O compounds, when the raw water flowrate was 5 mL/min, the optimum stripping time and air flowrate were 5 hrs and 0.5 L/min, respectively. Comparison of activated carbon showed that foreign activated carbon was better than domestic activated carbon in terms of adsorption efficiency.

Key words: Taste and odor(T&O), Early warning device, Stripping time, Air flowrate, Activated carbon

주제어: 이취미, 조기경보장치, 탈기시간, 공기유량, 활성탄

1. 서 론

호소수를 상수원으로 사용하고 있는 우리나라 대부분의 정수장에서는 매년 늦여름과 가을에 호소의

부영양화로 인한 이취미로 인해 정수공정에 큰 애로를 겪고 있다. 이러한 이취미가 인체에 해로운 영향을 미친다는 보고는 없지만, 소비자가 음용수의 질을 판단하는 일차적인 기준이 되기 때문에 무엇보다도 중요하다(Mallevalle and Suffet, 1987; Suffet et al.,

*Corresponding author Tel: +82-42-280-2535, FAX: +82-42-284-0109, E-mail: baebu@dju.ac.kr (Bae, B.U.)

1995). 그러나 정부와 관련기관의 노력에도 불구하고 호소의 부영양화 현상은 계속 심화되고 있으며, 이로 인한 이취미 문제를 상수원에서 해결하는 것은 쉽지 않을 전망이다. 따라서 정수공정에서 이취미를 적극적으로 제거하는 방법이 강구되어야 할 것이며, 이에 앞서 이취미 발생을 조기에 알아낼 수 있는 장치의 개발이 선행되어야 한다.

정수산업에서는 일반적으로 수도물의 심미적인 특성을 평가하기 위하여 관능법을 사용하고 있으며, 현재 표준화된 2종류의 이취미 분석법-TON(threshold odor number), FPA(flavor profile analysis)-을 가장 널리 사용하고 있다(Krasner et al., 1985; Bartels et al., 1986; Meng and Suffet, 1992). 그러나 TON은 이취미의 종류에 대한 유용한 정보를 충분히 제공하지 못하는 반면, FPA는 TON에 비해 유용한 정보를 제공하는 대신 시간이 너무 많이 소모되고 복잡하기 때문에 정수장의 요구에 완벽하게 부응하지 못하고 있다. 이러한 단점들을 보완하고자 수중에 미량으로 존재하는 이취미 물질을 LLE(liquid-liquid extraction), SDE (steam distillation extraction), Purge and Trap, OLSA (open loop stripping analysis), CLSA(closed loop stripping analysis), 그리고 SPME(solid phase micro extraction) 등과 같은 농축장치와 GC/MS를 이용하여 정량정성 분석하는 기기분석법을 최근에 많이 사용하고 있는 실정이다(Suffet et al., 1980; Krasner et al., 1983; Borén et al., 1985; Khiari et al., 1995; 배병욱 등, 1999; Watson et al., 2000). 이러한 방법들은 이취미 물질에 대한 정확한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면, 분석하는데 시간이 오래 걸린다는 단점이 있어 정수장에서 쉽게 이용하기에는 한계가 있다.

이와 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 이취미에 노출된 기존 정수장의 성공적인 운영을 위하여 현장에서 쉽고 빠르게 이취미를 측정할 수 있는 이취미 조기경보장치를 개발하였으며, 조기경보장치의 운전인자를 도출하고자 이취미 유발물질인 geosmin과 MIB를 대상으로 유입유량과 포기시간, 그리고 공기 유량에 따른 흡착효율을 조사하였으며, 이취미 흡착용 적정 활성탄을 선정하기 위하여 국내외 활성탄을 대상으로 흡착실험을 수행하였다.

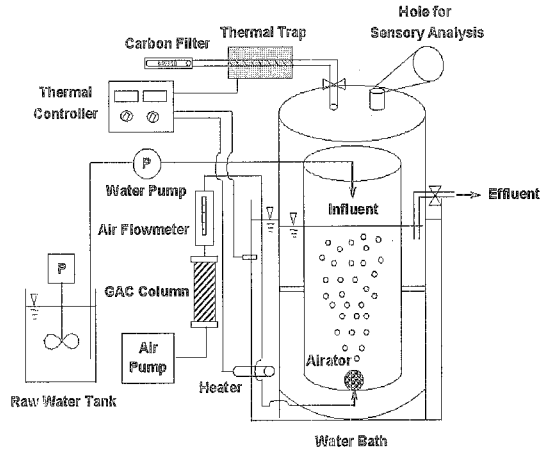


Fig. 1. Schematic diagram of early warning device for taste and odor in drinking water.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 이취미 조기경보장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 이취미 조기경보장치의 구성도이다. 이취미 조기경보장치는 상수원수가 일정하게 유입되도록 하는 유입펌프, 펌프를 통해 유입된 원수에 존재하는 이취미 물질이 원활히 탈기되도록 고안된 내부튜브를 갖춘 2L 용량의 탈기용 수조, 수조에서 포기를 위해 공기를 공급하는 공기 펌프, 펌프를 통하여 유입된 공기 중의 오염물을 걸러주는 활성탄 흡착칼럼, 칼럼을 통과한 무취공기를 일정하게 조절하는 유량계, 유량계를 통한 공기가 탈기조 내에서 포기되도록 하는 포기장치, 탈기조 내에서 이취미 유발물질의 분자 운동량을 촉진시킬 수 있도록 온도를 상승시키기 위한 가열 히터, 탈기조에서 탈기된 이취미 물질의 냄새를 후각으로 측정하기 위한 취기구, 탈기조에서 탈기된 이취미 가스를 흡착하기 위한 활성탄 필터, 그리고 활성탄 필터의 흡착을 방해하는 수증기를 제거하기 위한 열드랩 장치 등으로 구성되어 있다. 참고로 각 세부장치들에 대한 설명을 Table 1에 요약 정리하였다.

2.2. 이취미 조기경보장치의 운전방법

이취미 조기경보장치의 운전에 앞서 이취미 물질을 흡착하는데 필요한 입상활성탄(granular activated carbon, GAC)을 200°C 오븐에서 24시간 동안 건조

Table 1. Explanation of particular equipments in early warning device

Equipment	Explanation
Raw water tank (원수 저류조)	일정한 원수가 공급될 수 있도록 원수를 저장
Water pump (원수 유입펌프)	대상 원수를 탈기용 수조로 일정하게 유입
Air pump (공기 펌프)	탈기용 수조에 공기를 공급
GAC column (GAC 칼럼)	펌프를 통하여 유입된 공기 내에 오염물을 걸러줌
Air flowrate (공기 유량계)	GAC 칼럼을 통과한 무취공기량을 조절
Water bath (탈기용 수조)	이취미 물질이 원활히 탈기되도록 고안된 내부튜브를 갖춘 2L 용량의 수조
Heater (가열히터)	탈기조 내 원수의 온도를 조절
산기장치 (Airtor)	유량계를 통한 무취공기가 탈기조 내에서 잘 포기되도록 함
hole for sensory analysis(취기구)	탈기된 이취미 물질을 후각으로 측정하기 위한 구멍
Carbon filter (활성탄 필터)	탈기조에서 탈기된 가스상 이취미 물질을 흡착
Thermal trap (열트랩장치)	활성탄 필터 이전에 수분을 제거

및 방냉한 후 이취미 조기경보장치의 흡착 filter에 장착하였다. 수욕조와 열트랩 장치의 온도를 각각 45 및 90°C로 맞춘 다음, 원수 유량펌프를 통하여 시료를 일정하게 유입하였으며, 유입된 시료는 공기펌프에 의해 유입된 무취공기에 의해서 탈기되었다. 시료는 원수 유량펌프를 통해 이취미 탈기조로 일정하게 유입되고, GAC 칼럼을 통과한 무취공기로 탈기조 내에서 탈기된 다음 유출수 밸브를 통하여 밖으로 유출되었다. 이러한 과정에서 시료의 이취미 물질은 탈기조 내에서 탈기되어 이취미 흡착용 활성탄 filter에 가스상으로 흡착되었다. 일정시간 이후 활성탄 filter를 제거하여 활성탄에 흡착된 이취미 물질을 CS₂로 추출하였으며, 추출된 이취미 물질은 GC/MS(Agilent, 6890N GC/5973N MSD)를 이용하여 분석하였다 (APHA, 1998).

2.3. 이취미 조기경보장치의 운전인자 도출

이취미 조기경보장치의 운전인자를 도출하고자 최적 유입유량, 탈기시간, 그리고 공기유량을 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 조기경보장치에 사용된 활성탄 필터(Brechbühler AG)는 1.5mg의 charcoal filter이었으며, geosmin(077-01891, 1.0mg/mL)과 MIB(134-10581, 0.1mg/mL)는 Wako Chemical사의 표준시약을 사용하였다. 실험에 사용된 시료는 대청호 원수와 초순수에 geosmin 또는 MIB를 각각 spike하여 초기농도가 약 15~25ng/L의 범위가 되도록 제조한 다음 사용하였다.

2.3.1. 최적 유입유량 및 탈기시간

이취미 조기경보장치의 최적유입 유량과 탈기시간을 결정하기 위하여 유량과 탈기시간 변화에 따른 geosmin과 MIB의 흡착량을 조사하였다. 시료의 유량은 5~50mL/min, 탈기조의 공기유량은 0.5 L/min, 그리고 탈기시간은 1, 2, 5, 12, 그리고 24시간으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2.3.2. 최적 공기유량

이취미 조기경보장치에 유입되는 이취미 물질의 유량과 탈기시간 뿐만 아니라 시료의 탈기를 위해 불어 넣어주는 공기의 유량도 중요하다. 최적 공기유량을 결정하기 위하여 공기유량을 0.3, 0.5, 1, 1.5, 그리고 2L/min으로 변경시키면서 실험을 수행하였다. 이취미 조기경보장치의 유입유량 및 탈기시간은 2.3.1절에서 결정된 최적의 조건을 이용하였다.

2.4. 이취미 흡착용 적정 활성탄의 선정

이취미 흡착용 적정 활성탄을 선정하기 위하여 국산 1종(DY)과 외산 4종(Calgon의 F300, F400, Norit의 PK1-3, PK3-5)의 입상활성탄을 대상으로 이취미 흡착효율 비교실험을 수행하였다. 시료는 대청호 원수에 geosmin과 MIB를 각각 spike하여 약 20ng/L가 되도록 제조하여 사용하였다. 이취미 조기경보장치는 최적의 운전조건에서 EPA의 TO-17 Method(EPA/625/R-96/010b)에 따라 활성탄의 양을 50mg으로 하여 실험을 수행하였다(EPA, 1999).

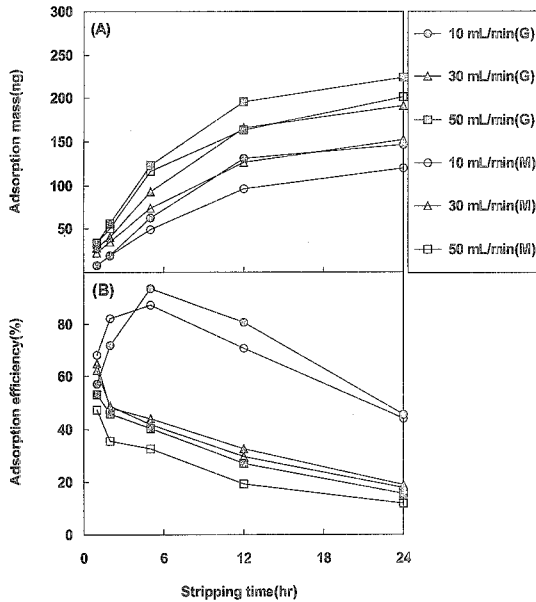


Fig. 2. Variation in adsorption mass (a) and adsorption efficiency (b) of Geosmin (G) or MIB (M) in distilled water according to flow rate and stripping time.

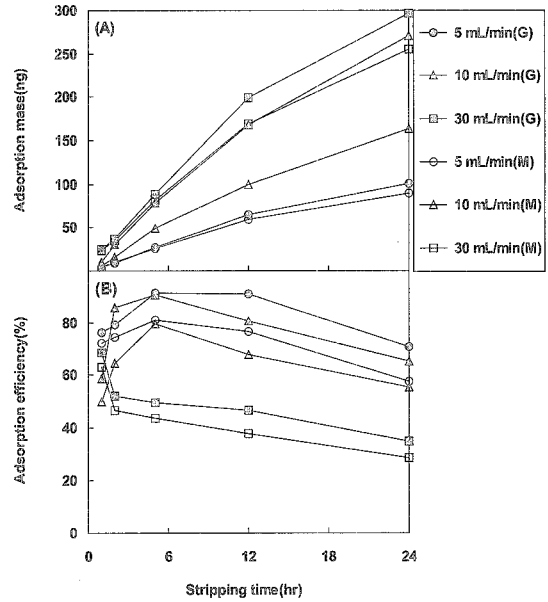


Fig. 3. Variation in adsorption mass (a) and adsorption efficiency (b) of Geosmin (G) or MIB (M) in raw water from Daechung Reservoir according to flow rate and stripping time.

3. 결과 및 고찰

3.1. 최적 유입유량 및 탈기시간

3.1.1. 인공원수

Fig. 2는 인공원수의 유입유량이 각각 10, 30, 그리고 50mL/min일 때, 탈기시간에 따라 활성탄에 흡착되는 geosmin 및 MIB의 흡착량 및 흡착효율을 나타낸 결과이다. 모든 실험에서 geosmin이 MIB보다 흡착량 및 흡착효율이 우수하였는데, 이는 두 물질의 물리적인 특성이 달라 활성탄에 대한 흡착능의 차이를 보였기 때문이다(Lalezary et al., 1986). Geosmin 및 MIB의 흡착효율은 유입유량이 10mL/min이고 탈기시간이 5시간일 때까지는 이론적인 흡착량(원수 내 이취미 물질의 농도 × 포기시간 동안 유입된 유량)의 약 90%까지 증가하였으나, 탈기시간이 증가함에 따라 흡착효율은 감소하는 경향을 보였다. 반면, 유입유량이 30 및 50mL/min일 때의 흡착효율은 탈기시간이 증가할수록 오히려 감소하는 경향을 보였는데, 이는 체류시간의 감소로 인해 탈기조에서 geosmin 및 MIB가 충분히 탈기되지 않았기 때문이다.

3.1.2. 상수원수

Fig. 3은 대청호원수를 각각 5, 10, 그리고 30 mL/min 유입하였을 때 탈기시간에 따른 geosmin 및 MIB의 흡착량 및 흡착효율을 나타낸 결과이다. 인공원수를 대상으로 수행한 실험결과에서와 마찬가지로 유입유량이 5 및 10mL/min일 때 흡착효율은 탈기시간이 5시간일 때까지 증가하였으나, 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 한편, 유입유량이 30mL/min일 경우에는 인공원수 실험에서와 마찬가지로 탈기시간이 증가함에 따라 흡착효율이 감소하였다. 이취미 조기경보장치에 유입되는 인공원수와 상수원수의 실험결과를 바탕으로 이취미 조기경보장치의 최적 유입유량과 탈기시간은 각각 5mL/min, 5시간인 것으로 판단된다.

3.2. 최적 공기유량

Fig. 4는 탈기조로 공급되는 적정 공기유량을 결정하기 위하여 인공원수와 대청호원수를 대상으로 공기유량에 따른 geosmin 및 MIB를 흡착효율을 평가한 결과이다. MIB의 흡착효율은 대상원수와 공기유량에 관계없이 geosmin에 비해 떨어지는 경향을 보였다

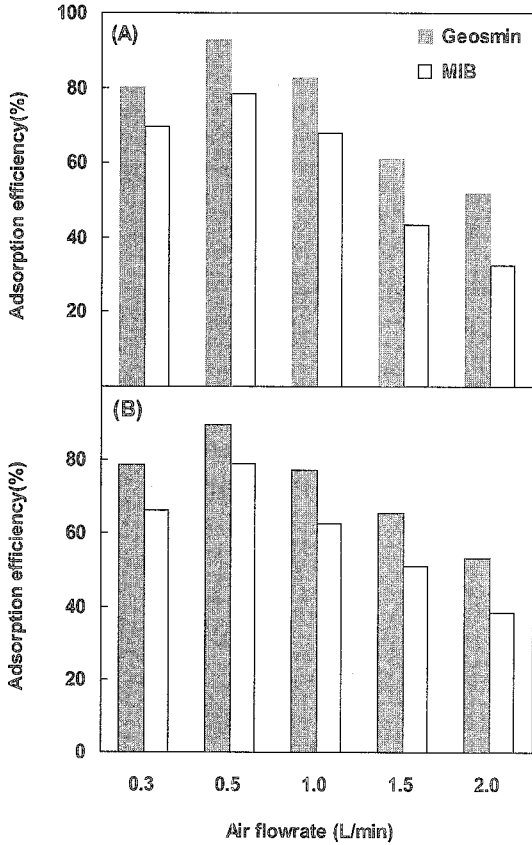


Fig. 4. Variation in adsorption efficiency of Geosmin or MIB in distilled water (a) and raw water (b) from Daechung Reservoir according to air flow rate.

(Lalezary et al., 1986). 인공원수와 대형호원수에 투입된 geosmin과 MIB 모두 공기유량이 0.5L/min까지는 활성탄의 흡착효율이 증가한 반면, 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 이는 공기유량이 증가함에 따라 유속이 증가하여 탈기조에서 탈기된 이취미 물질이 이취미 흡착용 활성탄 filter 흡착되지 않고 밖으로 배출되었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 이취미 조기경보장치의 최적의 운영을 위해서는 탈기조로 공급되는 공기유량을 0.5L/min 이하로 운전하는 것이 안정적인 것으로 판단된다.

3.3. 이취미 흡착용 적정 활성탄의 선정

이취미 흡착용 적정 활성탄을 선정하기 위하여 실험에 사용한 활성탄들의 geosmin 및 MIB의 흡착효율을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 geosmin 및 MIB 모두 Calgon의 F300이 약 50% 정도

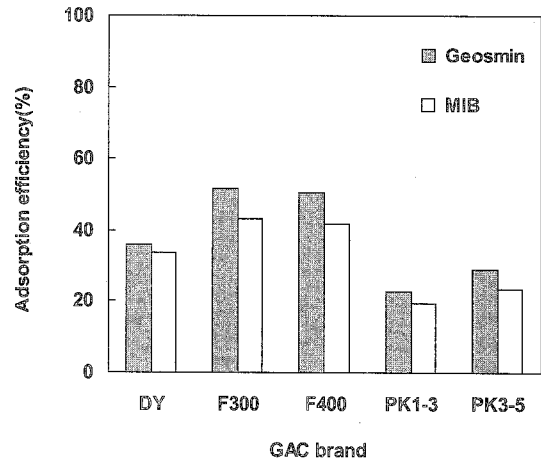


Fig. 5. Variation in adsorption efficiency of Geosmin or MIB in raw water from Daechung Reservoir according to GAC brands.

로 실험에 사용한 입상활성탄들 중에서 가장 우수한 흡착효율을 보였으나, 이취미 조기경보장치의 운전인자 도출을 위해 사용된 Brechbühler AG사의 charcoal filter(1.5mg)보다는 다소 낮은 경향을 보였다. 즉, 고가의 수입품인 charcoal filter에 비해 흡착효율은 다소 낮지만, 입상활성탄은 정수장에서 쉽게 구할 수 있을 뿐만 아니라 활성탄의 용도가 조기경보를 위한 것이므로 일반적인 활성탄을 사용하는 것이 조기경보장치의 운영비 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

3.4. 이취미 조기경보장치의 최적 운전조건 및 운영방안

본 연구에 사용한 이취미 조기경보장치는 CLSA(close-loop stripping analysis)와 SPME(solid phase microextraction)에 비해 조작이 간편하고 연속측정이 가능하며, 관능법을 이용하여 실시간으로 이취미 발생을 감지할 수 있을 뿐만 아니라 이취미 물질에 대한 정량정성분석이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한, 이취미 조기경보장치는 OLSA(open-loop stripping analysis) 형태로 구성되어 있기 때문에 배경물질에 의한 오염문제를 최소화할 수 있으며, 휘발성이 작고 보다 친수성인 물질들의 회수율을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 반 휘발성인 이취미 물질의 흡착효율을 높이기 위해 대상 시료의 온도를 높게 유지하더라도 수증기에 의한 문제없이 탈기를 원활하게 수행할 수 있다는 장점도 가지고 있다(Borén et al.,

1985).

앞서 수행한 실험결과에 의해 이취미 조기경보장치의 최적 운전조건은 유입유량 5mL/min, 탈기시간 5시간, 그리고 공기유량 0.5L/min으로 나타났으며, 설계측면에서 탈기용 수조용량은 원수 유입펌프나 공기 펌프의 용량을 고려하여 2L가 적당할 것으로 판단된다. 이취미 조기경보장치의 최적의 운전조건에서 후각을 이용한 관능법으로 이취미를 실제 감지할 수 있었는데, 이는 본 연구에 사용한 이취미 조기경보장치가 후각을 이용한 관능법과 기기분석법을 함께 사용할 수 있는 장점을 가지고 있음을 의미하는 결과라 할 수 있다.

이취미 조기경보장치는 이취미 발생기와 비발생기로 나누어 운영할 수 있다. 이취미가 발생하는 기간 동안에 조기경보장치의 운전조건을 최적으로 맞추어 활성탄 칼럼에 흡착된 이취미 물질을 분석하게 되면, 원수 내 조류 이취미의 농도변화를 5시간 간격으로 모니터링 할 수 있다. 반면, 이취미가 거의 발생하지 않는 겨울철 및 이른 봄 동안에는 원수 유입유량과 공기유량을 감소시킨 상태에서 탈기시간을 길게 유지함으로써 시료분석 주기를 길게 할 수 있다. 즉, 탈기시간을 24시간으로 조정하고 하루에 한 번씩 활성탄 칼럼에 흡착된 이취미 물질을 분석하여도 소기의 목적을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

1) Geosmin 및 MIB의 흡착효율은 유입유량이 5 mL/min이고 탈기시간이 5시간일 때까지는 이론적인 흡착량의 약 90%까지 증가하였으나, 유입유량 및 탈기시간이 증가함에 따라 흡착효율은 감소하는 경향을 보여 원수 유입유량은 5mL/min, 탈기시간은 5시간이 최적인 것으로 나타났다.

2) Geosmin 및 MIB의 흡착효율은 공기유량이 0.5 L/min까지는 증가하였으나 그 이후에는 감소하는 경향을 보였는데, 이는 공기유량이 증가함에 따라 유속이 증가하여 탈기조에서 탈기된 이취미 물질이 이취미 흡착용 활성탄 filter 흡착되지 않고 밖으로 배출되었기 때문이다. 따라서 이취미 조기경보장치의 최적의 운영을 위해서는 탈기조로 공급되는 공기유량을 0.5L/min 이하로 운전하는 것이 안정적일 것으로 판

단된다.

3) Geosmin 및 MIB 모두 Calgon의 F300이 약 50% 정도로 실험에 사용한 입상활성탄들 중에서 가장 우수한 흡착효율을 보였으나, 이취미 조기경보장치의 운전인자 도출을 위해 사용된 Brechbühler AG사의 charcoal filter보다는 다소 낮은 경향을 보였다. 그러나 고가의 수입품인 charcoal filter에 비해 흡착효율은 다소 낮지만, 입상활성탄은 정수장에서 쉽게 구할 수 있을 뿐만 아니라 활성탄의 용도가 조기경보를 위한 것이므로 일반적인 활성탄을 사용하는 것이 조기경보장치의 운영비 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

4) 이취미 조기경보장치의 최적 운전조건은 유입유량 5mL/min, 탈기시간 5시간, 그리고 공기유량 0.5L/min으로 나타났으며, 설계측면에서 탈기용 수조용량은 원수 유입펌프나 공기 펌프의 용량을 고려하여 2L가 적당할 것으로 판단된다. 한편, 이취미 조기경보장치는 이취미 발생기에는 최적의 운전조건에서 운영하고, 이취미가 거의 발생하지 않는 겨울철 및 이른 봄 동안에는 원수 유입유량과 공기유량을 감소시킨 상태에서 탈기시간을 길게 늘려 운영하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 대전환경기술개발센터의 2003년도 연구개발사업(03-4-20-22) 지원에 의해 이루어진 것이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 배병욱, 김영일, 김현영, 김계남 (1999) CLSA(closed-loop stripping apparatus)와 GC/MS를 이용한 상수원수 내 이취미 물질의 분석, *한국물환경학회지*, 15(4), pp. 479-487.
2. APHA, AWWA, WEF (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., APHA.
3. Bartels, J.H.M., Burlingame, G.A., and Suffet, I.H. (1996) Flavor Profile Analysis: Taste and Odor Control of the Future, *AWWA*, 78(3), pp. 50-55.
4. Borén, H., Grimvall, A., Palmberg, J., Savenhed, R. and Wigilius, B. (1985) Optimization of the Open Stripping System for the Analysis of Trace Organics in Water. *J.*

- Chromatography*, **348**, pp. 67-78.
5. EPA (1999) *Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air*, 2nd Ed., EPA/625/R-96/010b.
 6. Khiari, D., Suffet, I.H. and Barrett, S.E. (1995) The Determination of Compounds Causing Fishy/Swampy Odors in Drinking Water Supplies, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(11) pp. 105-112.
 7. Krasner, S.W., Hwang, C.J., and McGuire, M.J. (1983) A Standard Method for Quantification of Earth-Musty Odorants in Water, Sediments, and Algal Cultures, *Wat. Sci. Tech.*, **15**(6/7), pp. 127-138.
 8. Krasner, S.W., McGuire, M.J., and Ferguson, V.B. (1985) Taste and Odors: The Flavor Profile Method, *AWWA*, **77**(3), pp. 34-39.
 9. Lalezary, S., Pirbazari, M. and McGuire, M.J. (1986) Evaluating Activated Carbons for Removing Low Concentrations of Taste- and Odor- Producing Organics, *AWWA*, **78**(11), pp. 76-82.
 10. Mallevalle, J., and Suffet, I.H. (1987) *Identification and Treatment of Tastes and Odors in Drinking Water*, Report of American Water Works Association Research Foundation (AWWARF).
 11. Meng, A.K., and Suffet, I.H. (1992) Assessing the Quality of Flavor Profile Analysis Data, *AWWA*, **84**(6), pp. 89-96.
 12. Suffet, I.H., Mallevalle, J., and Kawczynski, E. (1995) *Advances in Taste and Odor Treatment and Control*, Report of American Water Works Association Research Foundation (AWWARF).
 13. Suffet, I.H., Brenner, L. and Cairo, P.R. (1980) GC/MS Identification of Trace Organics in Philadelphia Drinking Waters During a 2-Year Period, *Wat. Res.*, **14**(7), pp. 853-867.
 14. Watson, S., Brownlee, B., Satchwill, T. and Hargesheimer, E. (2000) Quantitative and Analysis of Trace Levels of Geosmin and 2-MIB in Source and Drinking Water using Headspace SPME. *Wat. Res.*, **34**(10), pp. 2818-2828.