

대청호 원수와 하류 역조정지 원수에서의 이취미 비교

배병욱[†] · 이유정^{*} · 임문구

대전대학교 환경공학과
*대전광역시 보건환경연구원

Comparison of Taste and Odor in Raw Water from the Main Daecheong Reservoir and Its Regulating Reservoir Downstream

Byung-Uk Bae[†] · Yu-Jeong Lee^{*} · Mun-Gu Lim

Department of Environmental Engineering, Daejeon University
*Daejeon Metropolitan City Institute of Health and Environment
(Received 8 July 2008, Accepted 5 August 2008)

Abstract

The Daecheong Reservoir is the largest multi-purpose reservoir in the Keum River basin. This water supply is subject to some of the most serious taste and odor (T&O) problems in the region. The intensity of T&O events increased due to eutrophication during the 1990s. In this study, the temporal occurrence of T&O in raw water from the main Daecheong Reservoir and its regulating reservoir was compared using both an instrumental method (CLSA+GC/MS) and threshold odor number (TON) test from April to December 2006. In addition, biofilms on the submerged macrophytes and rocks were analyzed for two typical T&O causing compounds, Geosmin and 2-MIB. The maximum concentration of Geosmin in the main reservoir was almost two times higher than that in the regulating reservoir. Interestingly, 2-MIB was only detected in water samples from the main reservoir. In the case of T&O causing compounds present in the biofilm on the submerged macrophytes and rocks, the regulating reservoir had lower concentrations compared to those of the main reservoir. It was found that both Geosmin and 2-MIB were detected from the biofilms much earlier than from the water samples. This result suggests that the occurrence of T&O compounds in the biofilms could be used as an early warning indicator of an imminent T&O outbreak in the water body.

keywords : Biofilm, Daecheong reservoir, Geosmin, Submerged macrophytes and rocks, Taste and odor (T&O) problems, 2-MIB

1. 서론

환경부 통계에 의하면, 2006말 현재 1일 취수시설용량기준으로 취수원별 비율은 댐 48.9%, 하천표류수 43.9%, 하천복류수 4.5%, 지하수 1.4%, 기타 저수지 1.3%로 전체의 90% 이상이 지표수를 상수원으로 사용하는 것으로 나타났다(환경부, 2007). 이처럼 많은 정수장에서 지표수를 상수원으로 사용하고 있는 우리나라에서는 조류와 관련된 이취미(algae-related taste and odor)가 심각한 문제로 대두되고 있다. 음용수에서의 이취미는 매년 발생하는 민원의 많은 부분을 차지하고 있고, 이취미는 소비자가 음용수의 질을 평가하는 척도로 이용되기 때문에 각 정수장에서는 이취미를 제거하기 위해 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.

Table 1은 최근에 대청호에서 발령된 조류예보를 정리한 것이다(국립환경과학원, 2007). 대청호의 이취미는 조류의 활동이 활발한 5월부터 7월까지와 장마철 이후인 9월부터 11

Table 1. Duration of algae forecast at the Daecheong reservoir

Year	Duration of algae forecast		
	Caution	Warning	Outbreak
2000	28	18	-
2001	35	42	7
2002	16	-	-
2003	57	33	-
2004	14	-	-
2005	67	-	-
2006	63	15	-

월 사이에 주로 발생하고 있다. Table 1에서 보이는 것처럼 조류예보발령일자가 점차적으로 증가하고 있는 추세이다.

최근에는 조류발생기간이 아닌 시기에도 상수원수에서 이취미가 감지된다는 사실에 착안하여 조류 이외의 이취미 원인에 관한 연구가 이루어지고 있다. Zaitlin 등(2003)은 캐나다 Ontario호의 수체, 부유물질, 수생식물, 거대수생식물, 조개로부터 방선균류를 분리하고, 분리된 방선균류가 Geosmin과 2-Methylisoborneol(2-MIB)를 생성함을 보고하

[†] To whom correspondence should be addressed.
baebu@dju.ac.kr

였다. Ontario호에 대한 또 다른 연구인 Watson and Ridal (2004)의 연구에서는 물가에 사는 수생식물(macrophytes)이나 여기에 부착된 생물막(biofilm)이 Geosmin 발생원이며, 특히 세포와 결합된 상태로 존재하는 Geosmin과 2-MIB의 농도가 수중농도보다 약 100배 높음을 밝혀내었다. 또한, Ridal 등(2007)은 캐나다 St. Lawrence 강에서 수생식물이 이취미 물질의 생산과 크게 관련이 있음을 인지한 후, 수생식물과 바위에 부착된 생물막에서 발생하는 이취미를 비교하였고, 이들 생물막이 Geosmin과 2-MIB의 주요 발생원임을 확인하였다.

중부권 최대 상수원인 대청댐 원수에서는 80년대 중반부터 조류 이취미가 보고되기 시작하였고, 90년대 초반에는 많은 민원이 제시된 바 있다. 이에 대청댐광역상수도 II 단계사업을 주관한 한국수자원공사는 조류 이취미 문제에 대응하고자 대청댐 역조정지에 새로운 취수장을 건설하였다. 또한, 최근에 신설된 대전광역시 신탄진정수장의 경우에도 역조정지 원수를 취수원으로 사용하고 있다.

“대청댐광역상수도 II 단계사업 취수원 수질조사 보고서”에 의하면, 역조정지 원수의 이취미 강도는 댐 내부에 비해 양호하다. 이는 역조정지에 존재하는 물이 수심이 깊은 발전 방류구를 통해 빠져나온 물이기 때문이다(Bae et al., 2007). 그러나 전술한 보고서가 작성될 당시에는 조류 이취미를 TON(threshold odor number)이라는 관능법으로 측정하였는데, 이 방법으로는 이취미의 정성적인 분석이 불가능하다. 이상과 같은 배경에서 본 연구에서는 최신 기기분석법(CLSA+GC/MS)과 새로운 관능분석법으로 대청댐 역조정지 원수(현도취수장 지점)와 댐 내부 원수(추동취수탑 지점)의 이취미 발생특성을 비교하였다. 즉, 대청댐 원수를 대상으로 10여 년 전에 내려진 공학적인 의사결정을 현재의 분석기술로 검증하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료채취

대청호 내 추동취수탑 지점과 대청댐 하류 역조정지 지점의 조류 이취미를 분석하기 위하여 2006년 4월부터 12월까지 시료를 채취하였다. 수체에 존재하는 이취미와는 별도로 수생식물과 하천가 돌에 부착된 생물막에 의해 유발되는 이취미 양을 정량화하기 위하여, 원수와 수중 조류가 포함된 원수, 그리고 부착성 생물막이 포함된 원수를 따로 채취하였다.

먼저 이취미 물질을 물 속에 용해되어 있는 부분과 세포와 결합되어 있는 부분으로 구분하기 위해 유리점유여지(GF/C)를 이용해 원수를 여과한 후, 원수와 여과수의 이취미물질의 농도를 분리하여 측정하였다. 원수의 이취미 농도에서 여과수의 이취미 농도를 뺀 값을 입자상으로 존재하는 이취미 물질, 즉 세포와 결합된 상태로 존재하는 이취미 물질로 정의하였다. 또한 수생식물과 돌에 부착되어 있는 생물막 등의 이취미 기여도를 알아보기 위하여 수생식물과 돌에 부착되어 있는 생물막(돌이끼 등)을 초음파로 전처리한 후 원수와 함께 분석하였으며, 그 결과를 총 고형

물(total solids)로 측정한 생물막 단위무게 당 이취미 물질의 양(ng/mg TS)으로 나타내었다.

2.2. 이취미 물질 분석 방법

실험기간동안 채취한 시료의 이취미를 관능법과 기기분석법으로 분석하였다. 관능법으로는 Threshold Odor Number (TON)을 사용하였고, 기기분석은 closed-loop stripping analysis(CLSA)+GC/MS로 분석하였다. TON은 Standard Methods 2150B로, 그리고 기기분석방법은 Standard Methods 6040B에 따라 분석하였다(APHA, 1998). 본 실험에서 사용한 CLSA는 Brechbühler AG 제품이며, GC와 MS는 각각 Agilent 6890N 및 Agilent MSD 5973N 제품이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관능법에 의한 이취미 분석

Fig. 1은 추동취수탑의 원수와 여과수의 이취미를 TON으로 측정한 결과이다. TON 값은 7월초까지 10 정도까지 증가하다가 많은 비로 인해 7월과 8월에는 10 미만으로 유지되었다. 8월 후반부터 TON값은 다시 증가하기 시작하여 9월말에 최대값을 나타낸 후 10월 중반부터는 다시 감소하였다. 11월부터는 다시 일시적으로 증가하였다가 12월부터는 급격하게 감소하였다. 여과수의 TON 값은 원수에 비해 상대적으로 낮게 유지되었고, 11월에 일시적으로 증가하였던 것만 제외하면 급격한 변화 없이 대체로 고른 경향을 보였다.

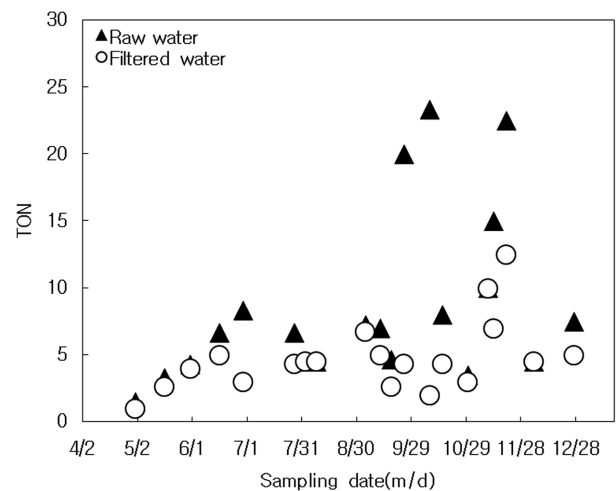


Fig. 1. Variation of TON values in raw and filtered water samples taken from the Chudong Intake.

Fig. 2는 역조정지 원수와 여과수의 이취미를 TON으로 측정한 결과이다. 전체적으로 추동취수탑보다 양호한 경향을 보였으며, 계절에 따른 변화 양상은 추동취수탑과 유사하였다.

3.2. 기기분석에 의한 이취미 분석

두 지점에서 채취한 시료(원수와 여과수)를 CLSA+GC/MS로 분석한 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3의 추동

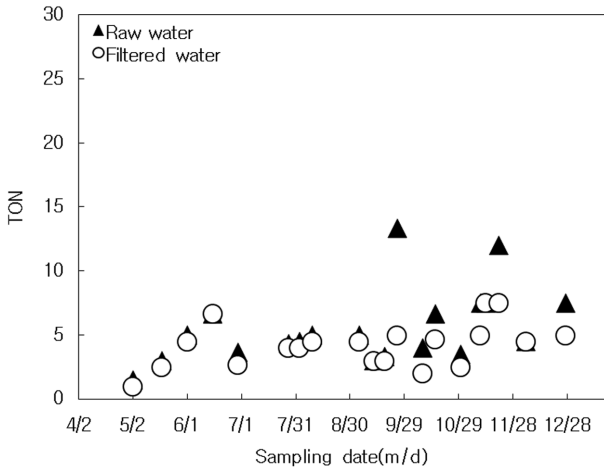
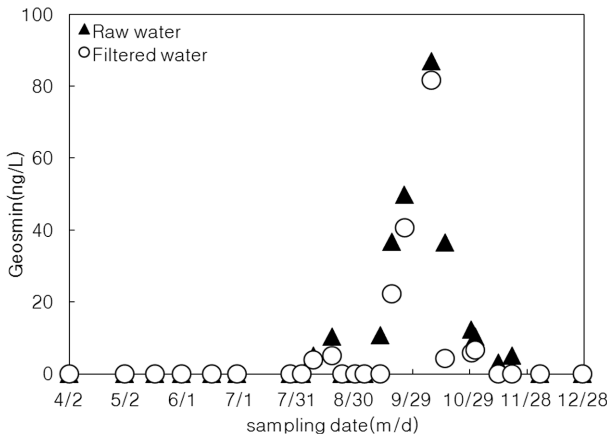


Fig. 2. Variation of TON values in raw and filtered water samples taken from the regulating reservoir.

취수탑의 경우, 시료채취를 시작한 4월부터 8월초까지는 Geosmin과 2-MIB 모두 검출한계(2 ng/L) 이하이었으나, 8월 8일부터 8월 중순 사이에 10.3 ng/L까지 검출되었다. 이후 지속된 강우로 인하여 검출되지 않다가 9월 12일에 Geosmin이 10.8 ng/L의 농도로 검출되었고, 10월 9일에 최대 농도 86.9 ng/L를 보였다. Geosmin은 11월말까지 지속적으로 검출되지만 10월 중반 이후에는 농도가 감소하는 경향을 보였다. 여과수의 경우 Geosmin과 2-MIB가 검출되는 양상은 원수의 경우와 거의 유사하였다. 모든 여과수 시료의 분석치가 원수 시료보다 낮게 나타났는데, 이는 원수를 GF/C여지로 여과하는 과정에서 걸러지는 조류나 남조류 세포 속에 저장된 이취미 물질이 함께 걸러졌기 때문인 것으로 사료된다. 여과수의 최대 Geosmin 농도는 10월 9일에 81.6 ng/L를 나타내었다.

추동취수탑 시료에서 2-MIB는 9월 12일에 처음으로 24.4 ng/L로 검출된 후, 9월 18일에 한 번 더 검출되었다. 원수와 여과수에서의 최대 농도는 9월 18일에 측정된 32.8 및 26.9 ng/L이었다.



(a) Geosmin

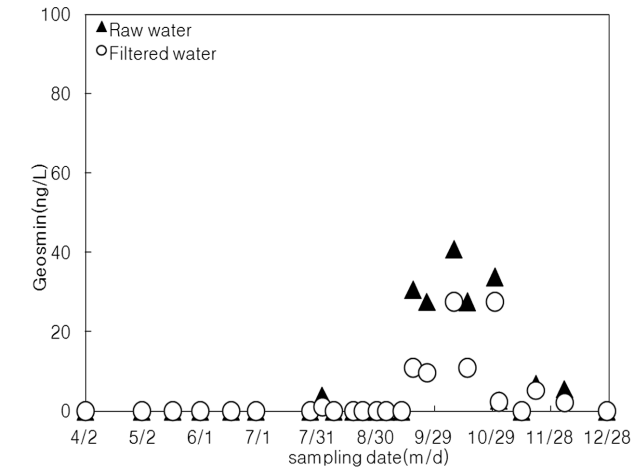
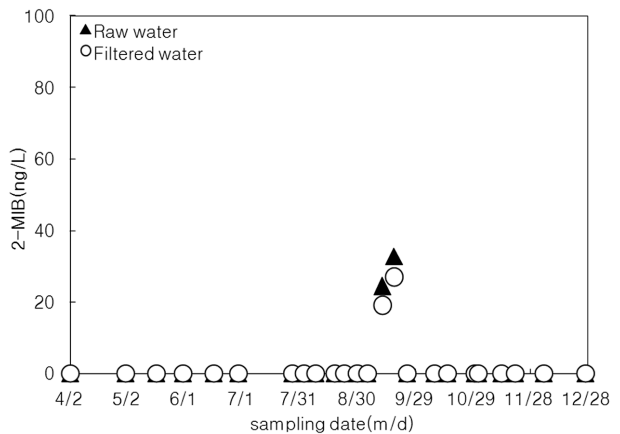


Fig. 4. Instrumental analysis of Geosmin for water samples taken from the regulating reservoir.

Fig. 4의 역조정지의 경우, 8월 초에 Geosmin이 한 번 검출된 것을 제외하면 9월 중반까지 Geosmin과 2-MIB는 검출한계 미만이었다. 9월 중반부터 검출되기 시작한 Geosmin의 농도는 계속 상승하여 10월 9일에 최고농도 40.7 ng/L을 기록한 다음, 수온이 16°C 이하로 떨어진 11월 초부터 Geosmin 농도가 급격하게 감소하였다. 그러다가 11월 말과 12월 초에 다시 일시적으로 증가하였는데, 이는 조류와 남조류가 사멸하면서 세포 속에 존재하던 Geosmin이 세포 밖으로 방출되었기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 역조정지 시료에서 2-MIB는 전혀 검출되지 않았다.

이취미 물질을 물 속에 용해되어 있는 부분과 세포와 결합되어 있는 부분으로 구분한 결과, 계절에 따라 차이가 있음을 확인하였다. 즉, 이취미가 본격적으로 발생하지 않을 때는 용존상태의 Geosmin 농도와 세포와 결합된 상태로 존재하는 Geosmin이 모두 낮았지만, 이취미 발생기에는 용존상태의 Geosmin 분율이 급격히 증가하였다. Fig. 3의 추동취수탑에서 이취미가 최대로 검출되었던 10월 초순의 용존 Geosmin 분율이 최대 94%로 측정되었는데, 이는 Durrer



(b) 2-MIB

Fig. 3. Instrumental analysis of Geosmin and 2-MIB for water samples taken from the Chudong Intake.

등(1999)이 스위스의 Zurich호에서 측정된 수치인 93%와 매우 유사한 결과이다. 한편, Fig. 4의 역조정지에서는 이취미 발생기 동안에 용존 Geosmin의 최대 분율이 81%로서 추동취수탑에 비해 상대적으로 적었는데, 이는 Geosmin의 분포가 공간적인 인자에 의해서도 영향을 받음을 의미한다.

3.3. 이취미 분포특성

수체에 존재하는 조류와 남조류 이외에, 물속에 존재하는 수생식물과 돌에 부착되어 있는 생물막(돌이끼 등), 즉 부착성 미생물이 상수원수의 이취미에 기여하는 정도를 조사하기 위하여, 수생식물과 돌에 부착되어 있는 생물막을 채취하여 이취미 물질의 함량을 조사하였다. 생물막에 함유되어 있는 이취미 물질의 양을 평가하기 위해서, 생물막이 포함된 원수의 이취미 농도에서 원수 자체의 이취미 농도를 제외하고 계산하였다. Fig. 5는 추동취수탑에서 채취한 수생식물과 돌 생물막에 함유되어 있던 이취미 물질을 분석한 결과이다. 대체로 돌에 부착된 생물막보다는 수중식물 생물막에 함유하고 있던 이취미 물질의 농도가 높았고 검출시기도 더 빨랐다. 수생식물 생물막의 경우, 7월 초순부터 Geosmin이 검출되기 시작하였고 최대 함량은 10월 16

일에 총 고형물질(TS) 무게 1 mg 당 2.8 ng이었다. 2-MIB는 8월 초순부터 수생식물과 돌 생물막에서 현저하게 검출되기 시작하였고, 9월 12일에 수생식물 생물막에서 3.0 ng/mg TS까지 검출되었다. 돌 생물막의 경우, Geosmin 최대함량이 8월 23일에 0.81 ng/mg TS, 2-MIB 최대함량이 9월 12일에 0.69 ng/mg TS로 검출되었다.

수체에서 이취미물질이 검출된 시기와 수생식물 혹은 돌 생물막에서 이취미 물질이 검출된 시기를 비교하면 흥미로운 결과를 얻을 수 있다. Fig. 3의 추동취수탑 원수에서는 8월 초순 이후에 Geosmin이 본격적으로 검출된 반면에, Fig. 5의 수생식물 생물막에서는 7월 초순부터 Geosmin이 검출되기 시작하였다. 2-MIB의 경우에도 수생식물과 돌에 부착된 생물막에서 먼저 검출되었다.

Fig. 6은 역조정지에서 채취한 수생식물과 돌에 부착되어 있는 생물막의 이취미 물질 함량을 분석한 결과이다. 전반적으로 수생식물 생물막에 함유되어 있던 이취미물질의 농도가 Fig. 5의 추동취수탑에 비해 상대적으로 낮은 경향을 보이고 있다. 수생식물 생물막의 Geosmin 최대함량이 10월 16일에 0.50 ng/mg TS이었고, 2-MIB 최대 함량도 같은 날 0.39 ng/mg TS이었다. 한편, 돌 생물막의 경우 Geosmin 최

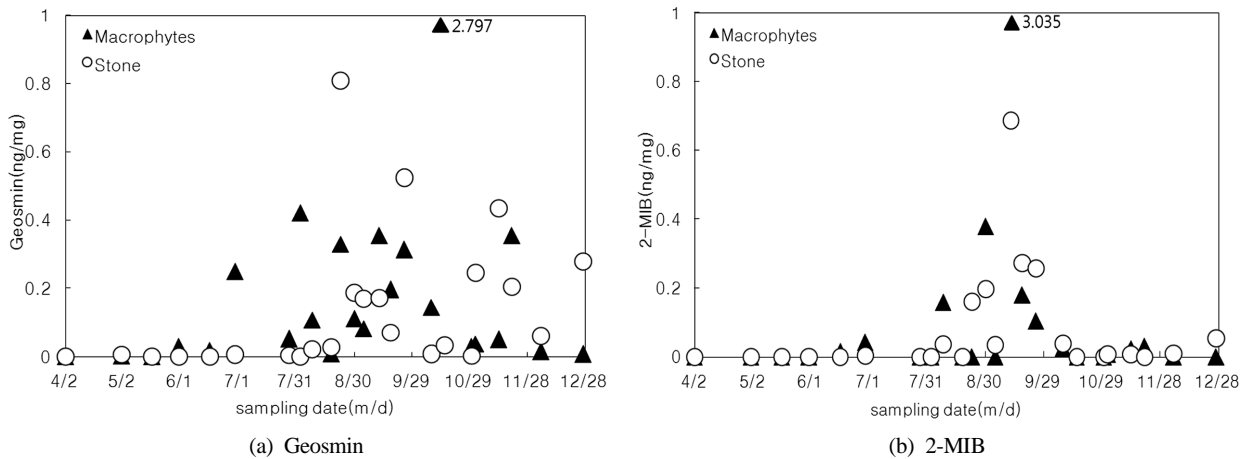


Fig. 5. Geosmin and 2-MIB concentrations in biofilms collected from macrophytes and stone surfaces at Chudong Intake.

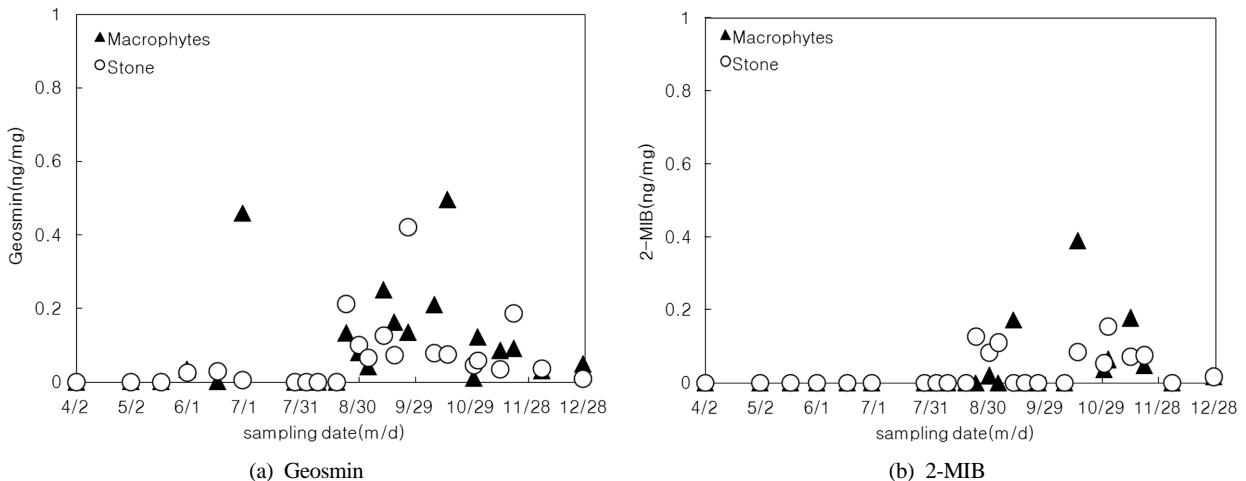


Fig. 6. Geosmin and 2-MIB concentrations in biofilms collected from macrophytes and stone surfaces at regulating reservoir.

대함량이 9월 25일에 0.42 ng/mg TS, 2-MIB 최대함량은 11월 10일의 0.15 ng/mg TS이었다.

Fig. 4의 역조정지 내 원수의 Geosmin 분석결과를 Fig. 6의 생물막 분석결과와 비교하면, 원수에서 Geosmin이 본격적으로 발생하기 시작한 시기는 9월 중순인데 비해 수생식물과 돌 생물막에서는 8월 23일부터 Geosmin이 본격적으로 검출되기 시작하였다. 뿐만 아니라, 수체에서는 검출되지 않았던 2-MIB도 각각의 생물막에서 검출되었다. 수체에서 이취미 물질에 검출되기 전에 이들 생물막에서 이취미 물질이 먼저 검출된다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 결론

상수원수의 조류 이취미 발생특성을 파악하기 위하여 대청댐 내 추동취수탑 지점과 댐 하류 역조정지 지점을 대상으로 이취미 물질의 시간적인 변화와 공간적인 분포, 그리고 수생식물과 돌 생물막의 기여도를 조사하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 추동취수탑 원수와 역조정지 원수의 TON 값을 비교한 결과, 10여 년 전에 수행된 대청댐광역상수도 II 단계사업 취수원 수질조사에서 확인한 바와 같이 역조정지 원수의 이취미가 추동취수탑보다 양호하였다. 추동취수탑 원수의 최대 Geosmin 농도는 10월 9일에 측정된 86.9 ng/L이었던 반면에, 역조정지 원수의 경우 동일한 날짜에 측정된 40.7 ng/L가 최대 Geosmin 농도이었다. 2-MIB의 경우, 추동취수탑 원수에서는 9월 18일에 최대 32.8 ng/L로 검출되었으나, 역조정지에서는 전혀 검출되지 않았다.
- 2) 계절에 따른 Geosmin의 분포특성을 알아보기 위하여 원수와 여과수의 Geosmin의 농도차를 분석하였다. 두 지점 모두 이취미가 본격적으로 발생하지 않을 때는 용존상태의 Geosmin 농도와 세포와 결합된 상태의 Geosmin 농도가 모두 낮았지만, 이취미 발생기에는 용존 Geosmin의 분율이 급격히 증가하였다. 추동취수탑의 경우에는 10월 초순에 용존 Geosmin 분율이 최대 94%이었고, 역조정지의 경우 최대 81%까지 증가하였다.
- 3) 수중미생물이 상수원수의 조류 이취미에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수생식물과 돌에 부착된 생물막을 채취

하여 이취미 물질의 함량을 조사하였다. 대체로 역조정지 지점에서 채취한 수생식물과 돌 생물막의 이취미 물질 함량이 추동취수탑보다 낮은 경향을 보였다. 한편, 수체에서 이취미 물질이 검출된 시기보다 생물막에서 이취미 물질이 검출된 시기가 더 빨랐다. 따라서 생물막 시료에 대해 주기적으로 이취미를 분석한다면 수체에서의 이취미 발생을 사전에 예보할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 대전환경기술개발센터의 2006년도 연구개발사업(06-2-30-33) 지원에 의해 이루어진 것이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 국립환경과학원(2007). *대청호 조류예보제 시행결과*.
 환경부(2007). *상수도통계*.
 APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition.
 Bae, B. U., Shin, H. S., and Choi, J. J. (2007). Taste and Odor Issues in South Korea's Drinking Water Industry. *Water Science and Technology*, **55**(5), pp. 203-208.
 Durrer, M., Zimmermann, U., and Juttner, F. (1999). Dissolved and particle-bound geosmin in a mesotrophic lake (Lake Zurich): spatial and seasonal distribution and effect of grazers. *Water Research*, **33**(17), pp. 3628-3636.
 Ridal, J., Watson, S. B., and Hickey, M. B. C. (2007). A comparison of biofilms from macrophytes and rocks for taste and odour production in the St. Lawrence River. *Water Science and Technology*, **55**(5), pp. 15-21.
 Watson, S. B. and Ridal, J. (2004). Periphyton: a primary source of widespread and severe taste and odour. *Water Science and Technology*, **49**(9), pp. 33-39.
 Zaitlin, B., Watson, S. B., Ridal, J., Satchwall, T., and Parkinson, D. (2003). Actinomycetes in Lake Ontario : habitats and Geosmin and MIB production. *Journal AWWA*, **95**(2), pp. 113-118.