

ORIGINAL ARTICLE

하절기 심층취수를 이용한 남조류 및 남조류 부산물질의 유입 저감

박흥기 · 정은영 · 손희종* · 최진택
부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

Reduction of Blue-green Algae and Its By-products using Intake of Deep Water in Summer

Hong-Ki Park, Eun-Young Jung, Hee-Jong Son*, Jin-Taek Choi
Water Quality Institute, Busan Water Authority, Gimhae 50804, Korea

Abstract

In order to determine the optimal water intake point, the distribution of blue-Green algae and water quality factors in relation to the depth of the Mulgum and Maeri stations located downstream of the Nakdong River were investigated from Jun. 2015 to Sep. 2016. When the current surface water intake system was converted to the deep water intake system, Chl-a concentration and blue-Green algae were reduced by 64.1% and 80.5%, respectively. Microcystin-LR was reduced by 50% to 100%, while geosmin and 2-MIB of the odorant substances were reduced by 42.9% and 11.8%, respectively. The water quality factors such as pH, water temperature, TOC and COD were gradually decreased by 30% in deep water. Therefore, if we used the deep water intake system selectively in the summer season when blue-Green algae masses occur, the concentration of the influx of blue-green algae and its by-products can be expected to decrease, leading to reduced operation costs in tap water production and improved of raw water quality.

Key words : Blue-green algae, Summer, Intake, Deep water, Algal by-product

1. 서론

조류는 수중 부유생활을 하는 미세생물로서 클로로필 색소에 의한 광합성을 하는 하등식물군으로서 해수보다는 담수에 풍부하게 서식한다. 조류의 증식에는 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 영향을 미친다(Son, 2013a).

낙동강의 경우, 2012년도에 보 완공 이후 강 흐름의 정체로 체류시간이 증가하여 하절기 남조류 대량

발생문제가 언론에 보도되어 사회적으로 많은 관심과 주목을 받고 있다. 수온 상승기인 하절기에 발생하는 남조류는 다른 조류와 달리 원핵세포로 부정형 군체 및 세포가 길게 연결된 사상체와 같은 다양한 형태로 이루어져 있다. 또한, 세포 내에 공기 주머니(공포)가 있어 수면위에 부유하여 수화(algae bloom)현상을 유발한다(Cho et al., 1989; Barret et al., 1996). 이들 남조류는 특이하게 일주기 수직이동 특성을 나타낸다. 즉, 낮에는 광합성을 통해 조체 내에 영양물질을 저장

Received 23 December, 2016; Revised 11 January, 2017;

Accepted 23 January, 2017

*Corresponding author: Hee-Jong Son, Water Quality Institute,
Busan Water Authority, Gimhae 50804, Korea
Phone: +82-51-669-4788
E-mail: menuturk@hanmail.net

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하여 무게가 늘어나면서 점차 하강하다가 밤이 되면 저장된 영양물질을 소모하여 아침에 다시 수표면 위로 부상한다. 따라서 오전에는 수표면에 다량 분포하며, 늦은 오후에는 수층 내에 많이 분포하는 특성을 가진다(NIER, 2008).

하절기 상수원에 남조류가 대량으로 번식할 경우 정수처리에 많은 문제점을 유발한다. 정수처리 공정의 운영측면에서는 응집 약품 사용량 증가, 응집 플록의 침전능 저하, 모래 여과지의 폐색 유발 및 역세척 주기 단축 등의 문제를 유발하며(Jun et al., 2001; Choi et al., 2006; Ma et al., 2007; Joh et al., 2011), 처리수질 측면에서는 조류가 분비하는 독소물질과 이취 유발물질이 문제시된다(Ando et al., 1992; Fleming et al., 2002). 특히, 수중에 잔존하는 조류와 조류가 분비하는 유기물질들이 정수처리시 소독제로 사용되는 염소와 반응하여 인체에 유해한 다양한 소독부산물을 생성시킨다(Huang et al., 2008; Bond et al., 2011; Son et al., 2015).

본 연구에서는 남조류가 대량으로 번성하는 하절기에 정수장으로 유입되는 원수를 취수하는 취수장에서 표층과 심층의 원수를 채수하여 남조류 개체수와 이들이 생산하는 조류독소 및 이취물질과 같은 조류 부산물질들의 농도를 조사하였으며, 이 결과를 바탕으로 현재 시행하고 있는 표층취수 방식과 본 연구에서 계획하는 심층취수 방식의 효과를 비교·분석하였다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 정수장에서의 남조류 유입량을 저감시킬 수 있는 최적의 취수방안을 채택할 수 있는 근거자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 채수지점

채수지점은 낙동강 하류에 위치한 물금취수장(MG)과 매리취수장(MR)을 대상으로 하였다. 시료 채수는 2015년도와 2016년도 6월에서 9월까지 주 1회 실시하여 조류 및 수질항목 등을 분석하였다. 물금취수장의 경우는 표층, 수심 4 m 및 수심 8 m까지 채수하였으며, 매리 취수장의 경우는 표층, 수심 2 m 및 수심 4 m까지 채수하여 분석하였다. 모든 시료의 채수 시간은 13~15시 사이에 일정하게 실시하였다.

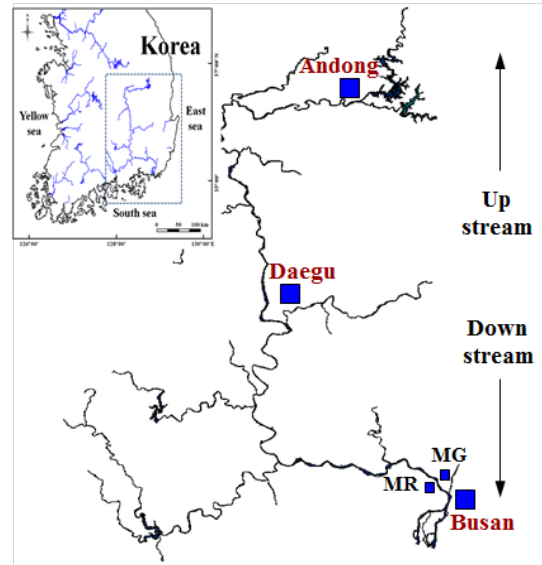


Fig. 1. Sampling sites in downstream of Nakdong River (MG: Mulgum, MR: Maeri).

2.2. 분석

시료수 중의 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC) 농도는 TOC analyzer (Sievers 820, Sievers, U.S.A.)로 분석하였다. 그리고 chlorophyll-a (Chl-a) 농도는 조류농도 분석기(bbe fluorometer, Moldaenke, Germany)를 사용하여 분석하였다. 그리고 남조류 세포수 및 우점종의 동정은 시료를 균일하게 혼든 후, 시료수 1 mL를 취하여 Sedwick-Rafter counting chamber를 사용하여 Schoen의 방법으로 계수하여 평가하였다(Schoen, 1988).

시료수에 함유된 조류 독성물질(microcystin-LR)은 on-line SPE 장치가 구비된 LC-MS/MS (Thermo, Exactive plus)로 분석하였으며, 컬럼은 XTerra C18 (3.5 μ m, 2.1 \times 150 mm)을 사용하였다. 시료수 중에 함유된 조체는 초음파 분쇄기로 분쇄시켜 조체 내에 함유된 microcystin-LR을 용출시킨 후 0.45 μ m 멤브레인 여지(Millipore, U.S.A.)에 여과하여 분석하였다.

남조류에서 분비되는 이취 유발물질들인 2-methylisoborneol (MIB)와 geosmin의 분석은 solid phase microextraction (SPME) 전처리 장치가 구비된 GC-MS/MS (Bruker, SCIION TQ System, U.S.A.)을

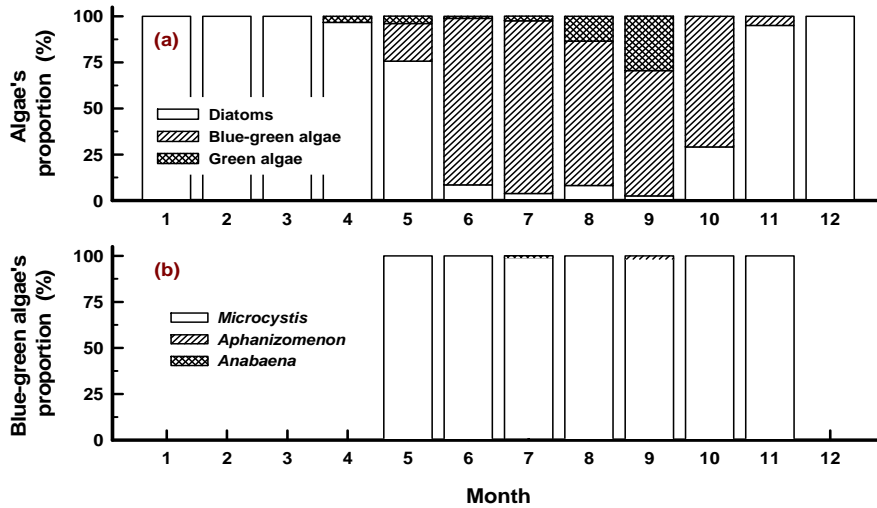


Fig. 2. Monthly change of percentage for cell number of dominant algal species at Mulgum.

사용하여 분석하였다. GC 컬럼은 DB-5MS (30 m × 0.25 mm ID × 0.25 μm)을 사용하였고, SPME fiber는 Supelco사(U.S.A.)의 polydimethylsiloxane/divinylbenzene (PDMS/DVB, 65 μm)를 사용하였으며, 추출효과를 높이기 위해 시료 10 mL에 NaCl 3 g을 첨가하였다 (Lee and Kang, 2009).

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙동강 하류지역의 남조류 분포현황

낙동강 하류지역에서는 *Microcystis* spp., *Anabaena* spp., *Oscillatoria* spp., *Phormidium* spp. 그리고 *Aphanizomenon* spp. 등 다양한 남조류가 혼재하여 출현한다고 보고되고 있다(Son, 2013b). 2015년과 2016년 낙동강 하류 물금지역의 조류 종별 및 남조류 종별 우점종의 월평균 개체수 비율변화를 Fig. 2(a)와 (b)에 나타내었다. 월별 조류 종별 우점종의 개체수 비율변화를 나타낸 Fig. 2(a)를 보면 11월부터 5월까지의 규조류가 거의 우점하고 있으며, 수온이 상승하는 6월부터 9월까지의 남조류가 최소 68%에서 최대 94% 정도의 개체수 우점율을 나타내었다. 수온이 낮아지는 10월부터 다시 규조류의 개체수가 증가하는 경향을 보였다. 남조류 종의 우점종 월평균 개체수 비율변화를 나타낸 Fig. 2(b)를 보면 남조류가 출현한 5월부터 11

월까지 *Microcystis* spp.가 개체수에서 월등한 우점비율을 차지하였으며, 비교적 고수온기인 6월~9월에서 우점종의 월평균 개체수 비율(Fig. 2(a))에서 80% 이상을 차지하였다. 따라서 하절기에 낙동강 하류 지역의 우점 조류종은 *Microcystis* spp.임을 알 수 있다.

하절기 낙동강 하류지역에서 우점하는 대표적인 남조류로는 *Microcystis* spp., *Anabaena* spp., *Aphanizomenon* spp., *Phormidium* spp. 4종이다(Fig. 3). 일반적으로 *Microcystis* spp.의 경우 세포의 직경은 2.5~9 μm 정도의 작은 구형으로 규칙 또는 불규칙한 형태로 군체를 형성하며 간장독인 microcystin을 생산하는 종으로 대량발생시 응집·침전 장애, 여과지 폐색 및 누출되는 문제점을 가지고 있다. 또한 전염소 처리시 개개의 세포들이 수중에 분산되어 제거 효율이 악화될 우려가 있으며 35,000 cell/mL 이상시 냄새를 유발한다고 알려져 있다(Chapman, 2010). *Anabaena* spp.는 이취미를 유발하는 대표적인 조류로 신경독인 anatoxin을 생산한다. 환경이 불리한 휴면포자를 형성하며 세포의 직경은 5~14 μm의 구형 또는 연주 모양의 사상체를 형성하고 있다(Chapman, 2010). 그리고 *Aphanizomenon* spp. 세포 직경은 4~6 μm, 길이는 5~15 μm 정도의 긴 원통형의 사상체로 다발을 이루어 부유를 하며 세포의 끝부분은 길고,

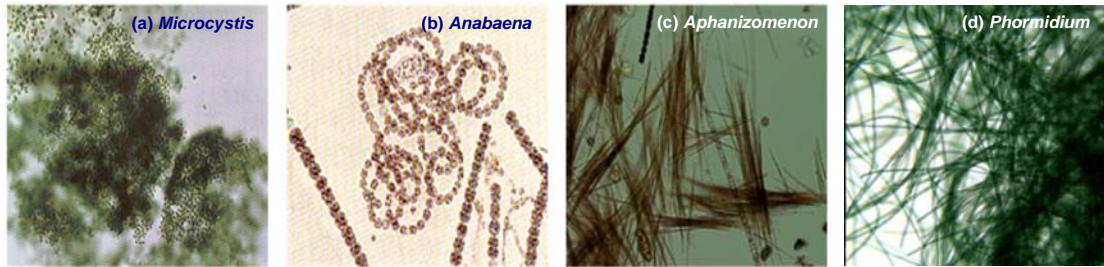


Fig. 3. Dominant species of blue-green algae at the Mulgum and Maeri in the downstream of Nakdong River.

약간 가늘며 끝으로 갈수록 투명해진다. 대부분의 수계에서 7~12월중에 출현하며 특히 저온(10℃ 내외)에서 성장이 가능한 종으로 알려져 있다(Chapman, 2010). *Phormidium* spp.은 세포의 폭은 1.5~2 μm 정도이고 일직선으로 된 짧은 사상체를 이루고 있으며 수화발생시 혼재하여 소량으로 나타나며 주로 *Microcystis* spp.와 같이 출현한다. 또한 종에 따라 곰팡이 냄새물질인 geosmin이나 2-MIB를 생산하는 것으로 알려져 있다(Chapman, 2010).

2015년과 2016년 하절기(6월~9월)에 낙동강 하류 물금취수장과 매리취수장의 표층수와 심층수를 총 18회 채수하여 Chl-a 농도와 남조류 개체수를 분석한 결과를 Fig. 4(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타낸 Chl-a의 경우, 물금지점에서는 심층(8 m)에서 채수한 시료수에서 평균 12.7 mg/m³으로 나타나 표층의 35.4

mg/m³에 비해 64.1% 정도 감소하였으며, 매리지점에서는 심층(4 m)에서 채수한 시료수에서 28.1 mg/m³으로 나타나 표층의 41.5 mg/m³에 비해 32.3% 정도 감소하였다. 또한, Fig. 4(b)에 나타낸 남조류 세포수의 경우에서도 물금과 매리지점 모두에서 표층에 비해 심층에서 채수한 시료수에서의 남조류 개체수가 각각 3,320 cells/mL와 13,776 cells/mL로 나타나 표층의 17,008 cells/mL와 24,160 cells/mL에 비해 각각 80.5%와 43.0% 정도의 감소율을 나타내었다. Ehrlich (2010)에 의하면 조류의 개체수와 Chl-a 농도는 표층보다는 수심이 깊어질수록 감소하는 것으로 보고하였다. 따라서 하절기 남조류 번성기에 표층취수 보다는 심층취수 방식이 정수공정으로의 조체(algal cell) 유입 저감에 적합한 것으로 나타났다. 또한, 매리취수장보다 물금취수장 심층수에서의 Chl-a 농도와 남조류

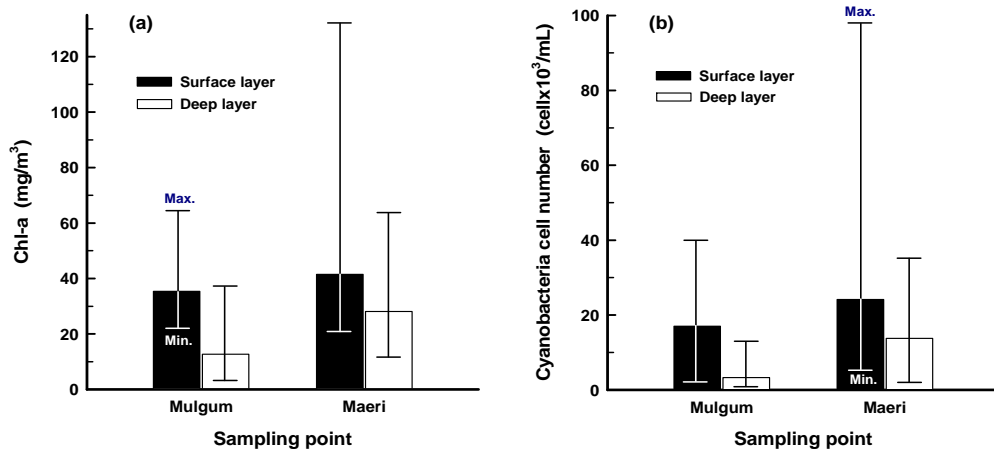


Fig. 4. Chl-a concentrations and cyanobacteria cell numbers according to the depth of water at intake (Mulgum and Maeri station).

세포수 감소율이 더욱 높게 나타난 이유는 매리취수장(심층 수심: 4 m)과 물금취수장(심층 수심: 8 m)과의 심층수의 수심 차이에서 기인한 결과로 판단되었다.

3.2. 표층과 심층의 조류 부산물 분포현황

남조류가 생산하는 독소 중에서 가장 널리 알려진 것은 간독성을 가진 microcystin으로, 주요 원인종은 *Microcystis* spp., *Oscillatoria* spp., *Nostoc* spp. 등이 알려져 있다(Pantelić et al., 2013). Microcystin은 총 7개의 아미노산으로 이루어진 분자량 1,000 정도의 환상 펩타이드로 이를 구성하는 아미노산의 종류에 따라 LR, LA, YR, RR 등을 포함하여 약 70여 종의 다양한 종류가 있다(Pantelić et al., 2013). 특히 microcystin-LR의 경우 독성이 가장 강하며, 산화공정에 대한 내성이 다른 microcystin들에 비해 강한 것으로 알려져 있다(Pantelić et al., 2013).

2015년과 2016년 하절기(6월~9월)에 낙동강 하류 물금취수장과 매리취수장의 표층수와 심층수를 총 18회 채수하여 microcystin-LR 농도를 분석한 결과의 경우, 매리와 물금 표층에서 각각 최대 1.1 µg/L 및 0.5 µg/L로 검출되었으며, 평균농도는 각각 0.4 µg/L 및 0.2 µg/L로 검출되었다. 심층의 경우 물금에서는 불검출되었으며, 매리에서는 평균 0.2 µg/L로 나타나 50% 이상의 저감율을 나타내었다.

상수원수중에 존재하는 이취 유발물질은 인체에

직접적인 유해성을 나타내지 않으나, 정수공정에서 제대로 제거되지 않고 유출될 경우 심미적 불쾌감을 유발하여 수돗물에 대한 막연한 불신을 초래하게 된다. 자연발생적으로 나는 냄새의 원인은 조류, 방선균, 곰팡이 등이 있으나 대부분 조류에 의한 것으로 알려져 있으며, 특히 최근 하천의 부영양화로 인한 남조류의 수화현상이 빈번히 발생하면서 이들 조류의 대사산물에 의한 것으로 추정되는 냄새 유발사태가 빈번히 발생하고 있는 실정이다(Barnett, 1984).

2015년과 2016년 하절기(6월~9월)에 낙동강 하류 물금취수장과 매리취수장의 표층수와 심층수를 총 18회 채수하여 이취 유발물질인 geosmin과 2-MIB 농도를 분석한 결과를 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다.

물금의 경우 geosmin은 표층에서 평균 0.042 µg/L, 심층에서는 평균 0.024 µg/L의 농도로 검출되어 표층의 농도에 비해 심층에서는 42.9% 감소되는 것으로 나타났다. 또한, 2-MIB는 표층에서 평균 0.017 µg/L, 심층에서는 평균 0.015 µg/L로 나타나 표층에 비해 심층수에서 11.8% 정도 저감되었다. 매리도 물금의 경우와 매우 유사한 결과를 나타내고 있으며, 표층에 비해 심층수에서의 geosmin 및 2-MIB 감소율이 각각 23.1% 및 5.9%로 나타났다.

이취 유발물질인 geosmin과 2-MIB의 경우는 조류 독소물질인 microcystin-LR에 비해 상대적으로 낮은 저감율을 나타내고 있다. 이는 geosmin과 2-MIB의

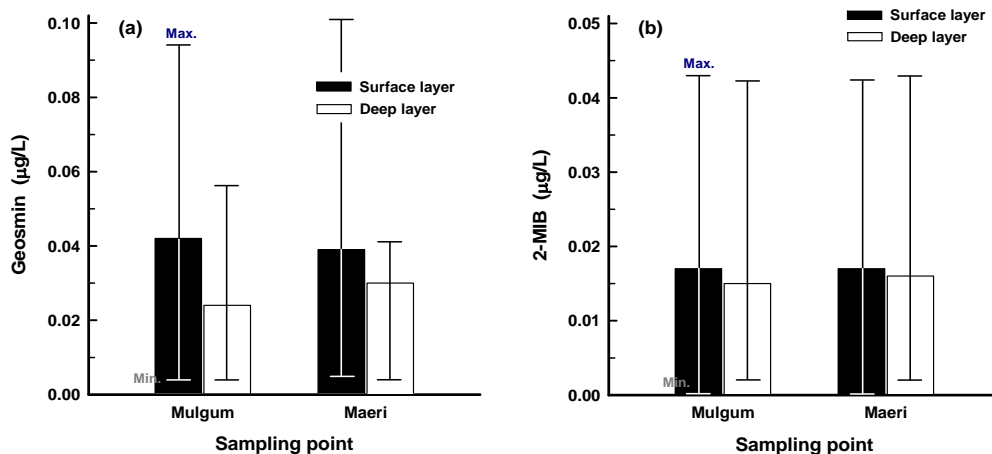


Fig. 5. Reduction rate of geosmin and 2-MIB concentrations according to the depth of water at intake (Mulgum and Maeri station).

Table 1. Change of water quality at the Mulgum and Maeri station from Nakdong River

Point	Parameter	pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Water temperature (°C)	TOC (mg/L)	COD (mg/L)
Mulgum	Surface layer	9.1	11.3	27.4	7.7	7.0
	Deep layer(8 m)	8.3	7.1	25.5	5.3	4.5
	Reduction rate(%)	-	-	-	31.2	35.7
Maeri	Surface layer	9.2	11.3	27.2	9.4	7.3
	Deep layer(4 m)	8.7	8.3	26.2	6.3	6.8
	Reduction rate(%)	-	-	-	33.0	6.4

경우 심층수에도 microcystin-LR에 비해 검출농도가 비교적 높게 나타나 유발된 결과로 보여지며, 일반적으로 geosmin이나 2-MIB를 생산하는 남조류 종들은 *Anabaena* spp., *Aphanizomenon* spp., *Phormidium* spp. 및 *Pseudanabaena* spp. 등으로 보고되고 있으며(Watson, 2003), 특히, *Phormidium* spp.와 *Pseudanabaena* spp.는 저서종으로 주로 표층 보다는 강이나 호수의 저층에서 서식하는 것으로 알려져 있어서 이들이 서식하는 상수원에서는 심층취수 방식의 정수공정으로는 geosmin과 2-MIB 유입을 저감시키기 어려운 것으로 보고되고 있다(Chapman, 2010). 따라서 본 연구기간 동안 표층과 심층시료에서 검출된 남조류들은 대부분이 *Microcystis* spp.로 이들이 직접 생산에 관여하는 microcystin-LR은 수중에 잔존하는 *Microcystis* spp. 농도에 직접적인 영향을 받았으나 geosmin과 2-MIB의 경우는 *Microcystis* spp.와는 큰 상관성이 없기 때문에 서로 다른 경향의 결과가 유발된 것으로 판단된다.

3.3. 수심별 이화학적 항목 수질변화

2012년 4대강 공사사업인 낙동강 8개보 준공 이후 하절기에는 남조류가 중류지역에 빈번하게 발생하여 많은 문제를 일으킨다고 보고되고 있다. 그리고, 부산 시 취수원인 낙동강 하류 물금 및 매리 지역의 경우에는 조류의 생체대사 작용에 의한 생산력이 높아져 pH는 평균 8.5 내외를 유지하고 있으며 용존산소 또한 연평균 10 mg/L를 상회하고 있어 연중 수온상승에 따른 용존산소의 농도가 과포화 수준임이 조사된 바 있다.

이번 조사결과 수심별 수질변화 또한 위에서 언급한 남조류 분포와 마찬가지로 두 지점 모두 수심이 깊

을수록 각 항목의 수치가 낮아짐을 알 수가 있었으며 수심이 깊은 물금 지점이 매리 보다 감소하는 폭이 큰 것으로 나타났다. 먼저 pH의 경우 표층은 평균 9.2 이었으나 심층으로 갈수록 최대 8.3까지 떨어졌으며, 용존산소 또한 심층에서 평균 7 mg/L 이상 유지하고 있어 환경 단체에서 제거하는 어패류가 폐사할 만한 농도수준은 아닌 것으로 조사되었다. 수온의 경우 표층 최대 27.4°C에서 심층 25.5°C로 약 2°C 정도 감소하였으며, 특히 유기물 지표인자인 COD와 TOC는 물금 심층은 표층에 비해 각각 35.7%, 31.2% 그리고 매리 심층은 표층에 비해 각각 6.4%, 33.0% 저감되는 것으로 나타났다.

4. 결론

남조류가 번성하는 하절기에 정수공정으로 유입되는 남조류를 저감할 수 있는 심층취수를 위해 낙동강 하류지점의 물금, 매리 취수구 주변 수심별 남조류 분포 및 수질변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 남조류가 번성하는 하절기에는 현재 운영 중인 표층 취수방식을 심층 취수방식으로 전환하여 운전할 경우, Chl-a 농도와 남조류 세포수가 각각 최대 64.1% 및 80.5% 정도 감소되었다.
2. 남조류 독성물질인 microcystin-LR은 표층 취수방식을 심층 취수방식으로 전환할 경우, 50%에서 최대 100%의 저감율을 보였다.
3. 이취 유발물질인 geosmin과 2-MIB는 표층 취수방식을 심층 취수방식으로 전환할 경우, 각각 최대 42.9% 및 11.8% 정도 저감되었다.

4. 또한 TOC와 COD 등과 같은 유기성 오염물질들도 표층 취수방식을 심층 취수방식으로 전환할 경우, 최대 30% 이상 감소됨을 알 수 있었다.

5. 남조류가 대량 발생하는 하절기에 심층지점을 선택적으로 취수시에 정수장으로 유입되는 남조류 및 남조류 부산물질의 농도가 저감되어 수돗물 생산원가 절감과 수질개선에 효과가 있는 것으로 나타났다.

REFERENCES

- Ando, A., Miwa, M., Kajino, M., Tatsumi, S., 1992, Removal of musty-odorous compounds in water and retained in algal cells through water purification processes, *Water Sci. Technol.*, 25(2), 299-306.
- Barnett, R. H., 1984, Research on control of taste and odor producing algae in surface reservoir, *Proc. AWWA WQTC*, Denver, Colo.
- Barrett, P. R. F., Curnow, J. C., Littlejohn, J. W., 1996, The control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barely straw, *Hydrobiologia*, 340, 307-311.
- Bond, T., Huang, J., Templeton, M. R., Graham, N., 2011, Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water - A Review, *Water Res.*, 45, 4341-4354.
- Chapman, A. D., 2010, Cyanobacteria, In *Algae: Source to Treatment*, Am. Water Works Assoc. Denver, 125-145.
- Cho, K. S., Kim, B. C., Heo, W. M., Cho, S. J., 1989, The succession of phytoplankton in Lake Soyang, *Kor. J. Lim*, 22, 179-189.
- Choi, S. K., Lee, J. Y., Kwon, D. Y., Cho, K. J., 2006, Settling characteristics of problem algae in the water treatment process, *Water Sci. Technol.*, 53(7), 73-119.
- Ehrlich, L., 2010, Sampling and identification: methods and strategies, In *Algae: Source to Treatment*, Am. Water Works Assoc. Denver, 25-69.
- Fleming, L. E., Rivero, C., Burns, J., Williams, C., Bean, J. A., Shea, K. A., Stinn, J., 2002, Blue green algal (cyanobacterial) toxins, surface drinking water, and liver cancer in Florida, *Harmful Algae*, 1, 157-168.
- Huang, J., Graham, N. J. D., Templeton, M. R., Zhang, Y., Collins, C., Nieuwenhuijsen, M., 2008, Evaluation of *Anabaena flos-aquae* as a precursor for trihalomethane and haloacetic acid formation, *Water Sci. Technol. Water Suppl.*, 8(6), 653-662.
- Joh, G., Choi, Y. S., Shin, J. K., Lee, J., 2011, Problematic algae in the sedimentation and filtration process of water treatment plants, *J. Water Suppl. Res. Technol.-Aqua*, 60(4), 219-230.
- Jun, H. B., Lee, Y. J., Lee, B. D., Knappe, D. R. U., 2001, Effectiveness of coagulants and coagulant aids for the removal of filter-clogging *Synedra*, *J. Water Suppl. Res. Technol.-Aqua*, 50(3), 135-148.
- Lee, H. J., Kang, L. S., 2009, Analysis of geosmin and 2-MIB in water by stir bar sorptive extraction (SBSE) and GC/MS, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 31(1), 64-69.
- Ma, J., Lei, G., Fang, J., 2007, Effect of algae species population structure on their removal by coagulation and filtration processes - A Case study, *J. Water Suppl. Res. Technol.-Aqua*, 56(1), 41-54.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2008, The Instruction of sampling and Cynobacterial toxic method, 56-57.
- Pantelić, D., Svirčev, Z., Simeunović, J., Vidović, M., Trajković, I., 2013, Cyanotoxins : Characteristics, production and degradation routes in drinking water treatment with reference to the situation in Serbia, *Chemosphere*, 91, 421-441.
- Schoen, S., 1988, Cell counting, in *experimental phycology a laboratory manual*, Christopher, S. L., David, J. C., Bruno, P. K. (Eds.), Cambridge Univ. Press, London, 16-22.
- Son, H. J., 2013a, Long-term variations of phytoplankton biomass and water quality in the downstream of Nakdong River, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 35(4), 263-267.
- Son, H. J., 2013b, The analysis of phytoplankton community structure in the middle-lower part of the Nakdong River, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 35(6), 430-435.
- Son, H. J., Park, H. K., Hwang, Y. D., Jung, J. M., Kim, S. G., 2015, Characteristics of formation of chlorination disinfection by-products in extracellular organic matter of various algal species, *J. Environ. Sci. Intl.*, 24(3), 353-358.
- Watson, S. B., 2003, Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? a review of their biological activity, *Phycologia*, 42, 332-350.