



# 유입원수 조류제거를 위한 high rate DAF 최적화 연구

## High Rate Dissolved Air Flotation (DAF) for the Removal of Algae Species

정우식<sup>1</sup>·안주석<sup>1</sup>·송근원<sup>2</sup>·오현재<sup>1\*</sup>

Woosik Jung<sup>1</sup>·Ju-Suk An<sup>1</sup>·Keun-Won Song<sup>2</sup>·Hyun-Je Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 환경플랜트연구소, <sup>2</sup>(주)삼진정밀

<sup>1</sup>Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT),

<sup>2</sup>Environmental Plant & Energy Division, Samjin Precision Co., Ltd

### ABSTRACT

In recent years there have been large increases in the hydraulic loading rates used to design dissolved air flotation (DAF) facilities for drinking water applications. High rate DAF processes are now available at loading rates of 20 to 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h. This research evaluated dissolved air flotation as a separation method for algae and organic compounds from water treatment plants. During the service period of 2016. 5. to 2017. 6., DAF pilot plants (500 m<sup>3</sup>/day) process has shown a constantly sound performance for the treatment of raw water, yielding a significantly low level of turbidity (DAF treated water, 0.21~1.56 NTU). As a result of analyzing the algae cell counts in the influent source, it was expressed at 100-120 cells/mL. In DAF treated water, the removal efficient of alge cell counts was found to be upto 90%. The stable turbidity and algae removal were confirmed by operating the high rate DAF process under the condition of the surface loading rate of 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·hr.

**Key words:** Algae, Coagulation, Dissolved air flotation, Surface loading rate, Turbidity

**주제어:** 조류, 응집, 용존공기부상공정, 표면부하율, 탁도

## 1. 서 론

기존 정수처리공정은 하절기 및 동절기에도 다량 발생하는 조류 및 부유물질이 발생하고 있어 여러 가지 전처리 방법, 침전공정 개선 및 변경, 여과재의 변경 등의 방법으로 처리되고 있지만, 여러 가지 2차 오염 등의 부작용이 발생할 가능성이 있어 제한적으로 적용되고 있다 (Jung and Kim, 2017; Ministry of Environment, 2012). 또한, 중간가압장의 저류지를 활용하여 가압공기부상법을 사용할 수 있으나 현 정수장 여건상 시설

을 증설해야 하는 어려움이 있다. 모래여과의 조류 대처방안은 이중여재 도입 (안트라사이트/모래) 및 활성탄을 이용한 여과공정으로 효율의 증대를 기대할 수 있다. 기존 정수장의 원수 수질은 저탁도의 평균수질을 유지하고 있지만, 강우시 및 하절기에는 조류 및 탁질에 의해 고탁도가 발생하고 있다 (Ministry of Environment, 2017). 원수의 처리수질이 악화되는 경우의 대안으로서 저밀도의 탁질을 용존공기부상 공정에 의해 부상시키는 방법이 대안으로서 제시되고 있으며 (Filhop et al., 2016), 현재 스칸디나비아, 미국 및 유럽 등지에서 정수장의 실 공정에 적용된 사례가 보고되고 있다 (Haarhoff and Van Vuuren, 1993; Chu et al., 2011). 이러한 장점 때문에 미국과 유럽 등지의 상용

Received 31 July 2017, revised 28 September 2017, accepted 11 October 2017

\* Corresponding author: Hyun Je Oh (E-mail: [hjoh@kict.re.kr](mailto:hjoh@kict.re.kr))

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469

화된 용존공기부상 공정을 도입하고 있지만 가압수조형 용존공기부상 공정에 한정되어 있다. 현재 우리나라에서는 정수처리 공정에 있어서 용존공기부상 공정을 일부 도입한 사례가 있지만, 우리나라의 원수수질에 적합하도록 공정의 최적화나 설계상의 노하우의 축적이 미진한 실정이다.

정수장 원수의 특성 중 대표적으로 나타낼 수 있는 탁도와 Chlorophyll-a에 따른 공정별 처리능의 경계는 Janssens (1993)에 의해 정리된 바 있다. Janssens에 의하면, 원수의 탁도가 약 20 NTU 이상이고 Chlorophyll-a 농도가 낮을 경우는 응집된 플럭의 밀도가 높아 침전 공정이 용이한데, 이는 밀도가 낮은 조류 (일반적인 조류의 밀도: 1.01~1.18 g/cm<sup>3</sup>)보다 밀도가 높은 탁질 (예, 카올린계 점토의 밀도: 2.6 g/cm<sup>3</sup>)이 상대적으로 많이 함유되어 침전이 용이하기 때문이다. 그러나 Chlorophyll-a가 10 µg/l 이상이고 탁도가 20 NTU 이하일 경우는 조류에 의해 밀도가 낮은 플럭이 생성되어 침전지에서 가라앉지 않고 월류할 가능성이 높다. 또한 이러한 현상은 겨울철 플럭의 크기가 100 µm이고 수온이 4 °C일 경우, alum 플럭의 밀도는 1.01 g/cm<sup>3</sup> 밖에 되지 않아 침전지의 처리효율을 급격히 떨어뜨린다. 그러나 우리나라의 장방형 침전지는 주로 표면부하율이 약 1.0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h인 것을 감안하면, 침전으로 제거하기에는 무리가 따른다. 따라서 이러한 경우에 DAF 공정을 사용하는 것이 오히려 효율적일 수 있다. 우리나라 정수장 중 댐을 수원으로 하는 경우, 대부분 탁도보다는 고농도 조류로 인해 정수장애가 발생하고 있어 이에 대한 적절한 공정의 선택이 필요하다. 플럭 제거공정의 처리능력을 나타내는 표면부하율은 Viitasaari (1995) 등에 의해 정리된 바 있다. Viitasaari 등에 의하면, 침전지의 표면부하율이 최대 2.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h인 것에 반해 DAF와 급속여과 등은 SS 농도에 따라 침전지에 최고 10배까지의 효율을 보이고 있다. 이러한 표면부하율의 차이는 SS 농도가 증가함에 따라 점점 줄어든다. 그러나, 실제 정수장에 유입되는 원수의 SS량이 낮다는 것을 감안하면 침전과 부상의 차이는 상당히 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서, 정수처리에 있어 침전공정 대신 부상공정을 적용하며 표면부하율이 증가되고 결국, 집적화가 가능하다.

본 연구에서는 high rate DAF 공정을 구현하기 위해 응집제 주입량, saturator 압력 및 수위 변화 등의 운전 조건에 따른 영향에 대하여 고찰하고 유입원수의 탁

도 및 조류개체수의 제거 효율을 평가함으로써 high rate DAF 공정의 성능을 검증하고 실 플랜트 적용가능성을 확인하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 High Rate DAF 파일럿 플랜트 설계

High Rate DAF 파일럿플랜트(500 m<sup>3</sup>/d)는 설계조건에 따라 일 500 m<sup>3</sup>의 처리 용량으로 설계되었으며, 크게 원수에 대한 약품 혼화와 응집의 전처리부, DAF Saturator 탱크 및 Recycle Pump 배관에 해당되는 기포 발생부, 생성된 플록의 미세 기포에 의한 부상 분리부, 처리수에 대한 탁도 및 조류개체수 제거를 위한 후 처리부로 이루어져 있는 공정이다. High Rate DAF 파일럿플랜트(500 m<sup>3</sup>/d)의 현장 운영에 따른 실증시설 구축에 필요한 설계인자 도출과 연속운영 과정에서 나타나는 운전 개선점 및 최적화 방안을 다루고자 하였다. 기존 기술개발 되어있는 일반적인 DAF의 표면부하율 (10~15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h)에 비해 보다 높은 효율을 나타내는 High Rate DAF 공정 (30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h)을 구현하기 위하여 부상조 내 체류시간을 높여주기 위한 방법으로 부상조의 높이를 4,000 mm로 제작하였고, 부상조 처리조 수위 높이를 가변적으로 설치하여 스크래퍼에서 슬러지 처리를 최적화하도록 하였다. 또한, 버블발생량을 조절하기 위하여 노즐을 2개의 line으로 구성하였다. 부상조 내 하부다공판을 설치하여 유량의 흐름 및 구간 별 유속의 변화를 유도하여 발생된 버블이 부상조 내 오래 머물러 High Rate 구현을 위한 필수적인 장치를 구성하였다. 또한, 처리수 기준 탁도와 SS는 Y 정수장이 위치한 댐 하류의 연 평균 탁도와 SS를 기준으로 설계하였다.

### 2.2 High Rate DAF 파일럿 플랜트 운영

High Rate Micro Bubble Generator가 적용된 500 m<sup>3</sup>/d의 처리용량의 DAF 파일럿 플랜트를 운영하여 성능을 평가하였다. 본 플랜트는 경상북도 영천시 Y 정수장 내에 설치하였으며, 이 장치의 구조는 원수 유입배관, 혼화공정, 응집공정, 부상공정, 가압부상시스템 및 장치 제어부로 구성되어 있다. 이 장치의 유입 유량은 최대 27 m<sup>3</sup>/hr로 하였으며, 응집공정은 2단으로 구성하여 체류시간을 각각 10분으로 설계하였다.

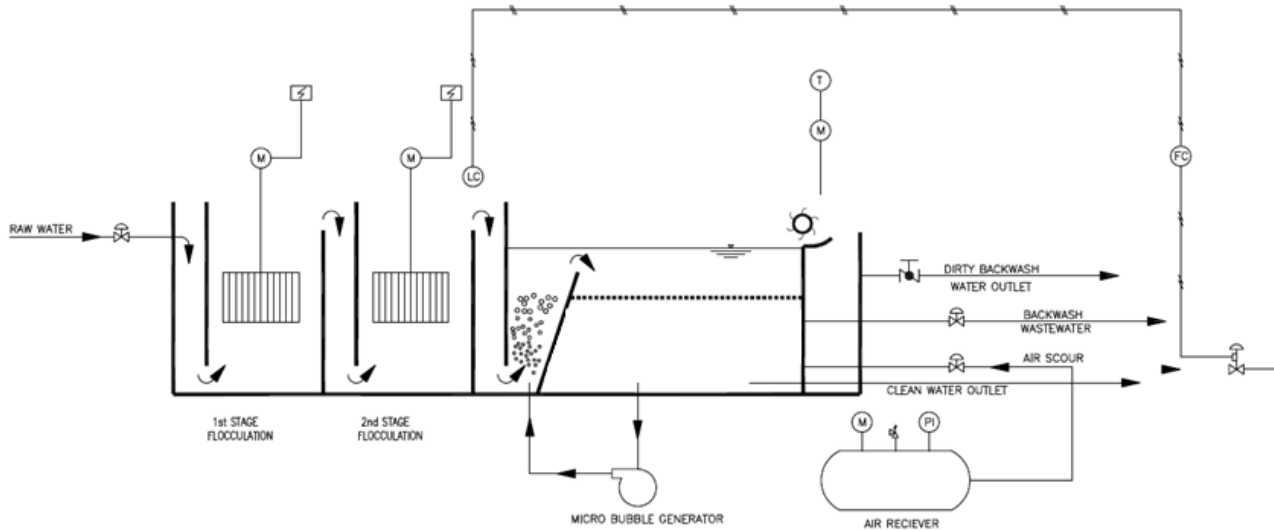


Fig. 1. Schematic Diagram of High Rate DAF Pilot Plant.

부상조의 체류시간은 약 20분으로 하였으며, 스크류 타입의 스키머는 부상된 슬러지를 효율적으로 제거하도록 설계하였다. 전처리 조건은 Jar-test를 통해 도출된 조건을 기준으로 하여 초기 원수의 탁도에 따라 주입량을 결정하였다. 또한, 실제 운전에서는 Jar-test에서 도출된 약품주입량과 Y 정수장에서 적용되고 있는 주입조건을 비교하여 최적 응집조건으로 운영하였으며, Y 정수장에서 사용되는 응집제는 PAC 10% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 10~30 mg/L의 농도범위에서 사용하고 있다. 또한 혼화/응집 반응조 설계의 경우, 실제 정수장에서의 혼화조/응집조의 설계 기준은 30분 이상으로 되어 있으나, 본 연구에 적용한 High Rate DAF 파일럿플랜트의 경우, 전처리 연구 결과에서 체류시간이 정수장 설계 기준보다 작게 설계되어도 부상공정의 운전에는 크게 영향을 미치지 못하는 결과를 나타냄에 따라 최소 10분, 전체 20분으로 결정하였다. 본 연구에서는 혼화/응집 반응조를 동일 구조로 2단으로 설계하였으며, 각 조의 교반속도는 가변적으로 운전이 가능하도록 하였고, 조의 경계는 weir type으로 설계하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 High Rate DAF 공정 구현을 위한 응집제 주입량 최적화

High Rate DAF 파일럿플랜트 (500 m<sup>3</sup>/d) 운영 시 최

적의 운전 효율을 얻기 위한 응집제 주입량 실험을 Jar-Test를 통해 진행하였다. 실험에 사용된 응집제는 10% PAC이며, 적용 농도는 0~25 mg/L의 범위에서 실험을 진행하였다. Jar-Test를 통해 원수에 대한 최적의 응집제 농도 및 주입량 선정하였으며, 실험에 사용된 응집제는 10% PAC이며, 적용농도는 0~25 mg/L 범위에서 실험 진행을 수행하였다. 선정된 응집제 주입 농도에 대한 High rate DAF 파일럿플랜트의 플럭 상태 확인 및 처리수 수질을 관찰하였다.

10% PAC를 0~25 mg/L 범위의 응집제 주입농도에서 Jar-Test를 진행한 결과, 10~25 mg/L의 농도 범위에서 56~62%의 탁도 제거율이 나타났으며, 응집제 주입량에 대한 운영비 등을 고려할 때, 10 mg/L의 주입농도가 가장 최적의 주입농도로 판단된다(그림 2). 이후

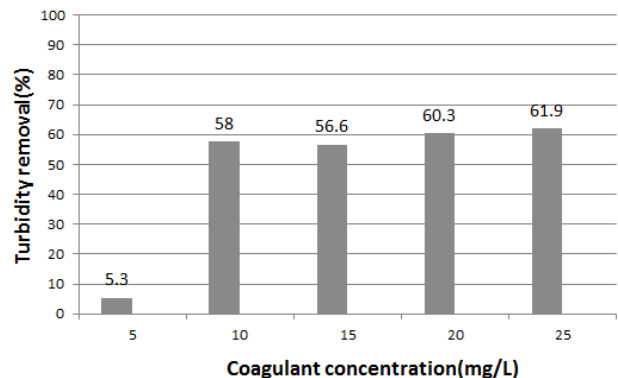


Fig. 2. Turbidity Removal Rate in High Rate DAF Pilot Plant by Coagulant Concentration.

pp. 373-381  
pp. 383-388  
pp. 389-395  
pp. 397-407  
pp. 409-414  
pp. 415-419  
pp. 421-430  
pp. 431-440  
pp. 441-445  
pp. 447-457  
pp. 459-469

DAF 파일럿플랜트 운영에서는 본 실험을 통해 도출된 응집제 주입농도인 10 mg/L를 적용하여 운영하였다.

### 3.2 High Rate DAF 공정 구현을 위한 운전조건

#### 3.2.1 Saturator 수위/압력 변화에 따른 운전효율

자동제어가 가능한 가압부상시스템을 통하여 Saturator 내의 수위 및 압력 변화에 따른 High rate DAF 파일럿플랜트에서의 탁도 제거율 실험을 진행하였다. Saturator 내 수위는 33~48 mm의 범위를 설정하여 각 수위에서의 DAF 처리수의 탁도 제거율을 관찰하였으며, Saturator 내 압력은 4.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서 6.0 kgf/cm<sup>2</sup>의 범위에서 DAF 처리수의 탁도 제거율을 관찰하였다. 표면부하율 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·hr에서 Saturator 수위 및 압력 변화 실험에서는 각각 수위 38%, 압력 5.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서 가장 효과적인 결과를 나타내었으며 (Fig. 3), High Rate 구현을 위해서는 Saturator 내부 형상 개발도 함께 필요할 것으로 판단된다.

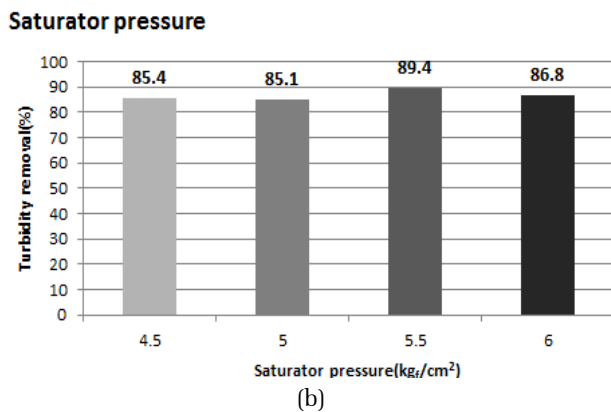
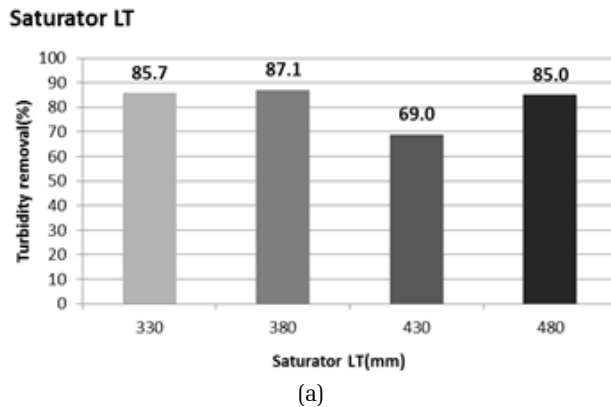


Fig. 3. Turbidity Removal Rate in High Rate DAF Pilot Plant by Saturator Water Level Change (a) and Saturator Pressure (b).

### 3.3 High Rate DAF 파일럿플랜트(500톤/일)의 탁도 제거 효율

High Rate DAF 파일럿플랜트 (500 m<sup>3</sup>/d)를 이용하여 2016년 05월 22일부터 2017년 05월 24일까지 연속운전을 수행하였다. 연속운전 결과, 평균 유입유량 약 27 m<sup>3</sup>/hr로써 약 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h의 표면부하율을 나타내었으며, DAF 공정의 순환율은 10~15%로 운영되었다. 원수 데이터의 경우 계절별, 날씨별에 따라 탁도 값의 변화가 큰 것으로 보이며, 2016년 6월 27일 이후 급격한 고탁도 원수의 유입으로 인하여 DAF 공정의 탁도 제거효율이 소폭 감소하였지만, 처리수 탁도는 1.0 NTU 이하를 만족하는 데이터를 얻을 수 있었다. 주어진 조건에서의 High Rate DAF 파일럿플랜트의 연속운전에 따른 탁도 결과는 유입수 약 1.0~6.0 NTU, 처리수 약 0.48~1.0 NTU를 나타내었다 (Fig. 4).

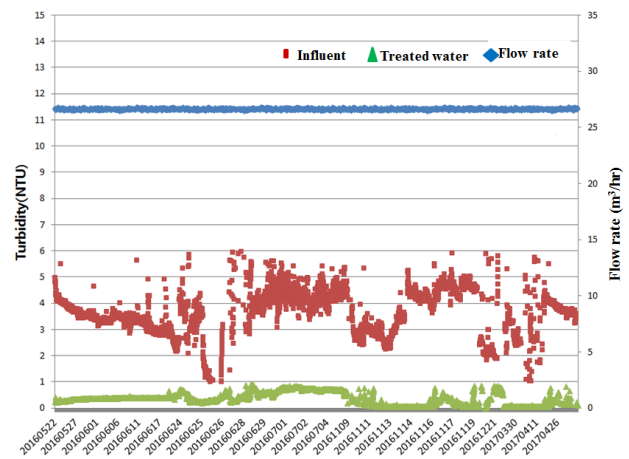


Fig. 4. Variation Flow Rate and Turbidity in the Raw and Treated Water during the Operation of DAF Pilot Plant.

### 3.4 High Rate DAF 파일럿플랜트(500톤/일)의 조류 개체수 제거 효율

2015년 8월- 2017년 5월 기간의 Y 정수장 원수의 총 조류개체수 분석 결과에 따르면, 3-4월부 사이에 규조류, 6-7월 녹조류, 8월-11월 남조류가 발현한 것으로 확인되었다. DAF 복합공정 파일럿 플랜트 (500 m<sup>3</sup>/d) 운전을 통하여 조류 제거 효율 평가를 수행하였으며, 조류개체수 분석 결과, 2016년 겨울부터 지금까지 발현되는 조류 종은 대부분 규조류인 것으로 나타났다 (Kim et al., 2007;Choi et al., 2007).

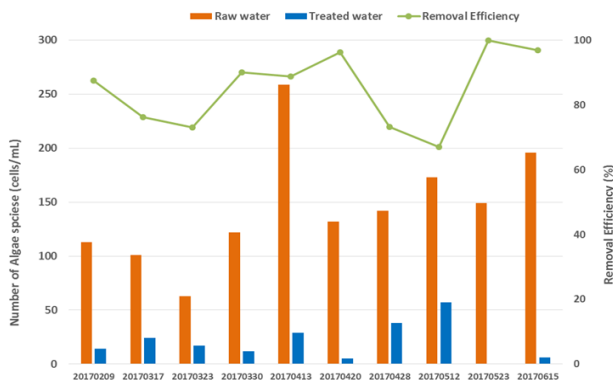


Fig. 5. Evaluation of Algae Cell Counts by High Rate DAF Pilot Plant.

High Rate DAF 파일럿플랜트 유입 원수의 조류개체수를 분석한 결과, 겨울~봄 시즌에 100~120 cells/mL의 개체수로 발견되고 있었으며, DAF 처리수에서는 조류개체수가 대부분 100 cells/mL 이하로 검출되었다 (Fig. 5). 특히 2017년 4월 13일에 유입원수의 총 조류 개체수가 257 cell/mL로 나타났는데, DAF 처리수에서는 27 cells/mL로 제거 효율이 약 90%로 나타났다. 현재까지 Y 정수장 유입원수에 대한 실험결과, DAF 처리수의 조류개체수가 100 cells/mL 이하로 분석되었으며, 이는 DAF 공정이 유입원수의 조류 제거에 효과적이라고 판단된다.

## 4. 결 론

현장인 Y 정수장 원수에 대한 파일럿 플랜트에서의 응집제 주입농도 실험결과, 주입농도 10 mg/L에서 가장 효율적인 결과를 나타내었으나, 추후 다양한 원수 특성에 따른 응집제 주입량 최적화 실험은 지속되어야 할 것으로 사료된다. 표면부하율 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·hr에서 Saturator 수위 및 압력 변화 실험에서는 각각 수위 38%, 압력 5.5 kgf/cm<sup>2</sup> 에서 가장 효과적인 결과를 나타내었으며, High Rate 구현을 위해서는 Saturator 내부 형상 개발도 함께 필요할 것으로 판단된다. High Rate DAF 파일럿플랜트 연속운전 결과, 평균 유입유량 약 27 m<sup>3</sup>/hr로써 약 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h의 표면부하율을 나타내었으며, 순환율은 10~15%로 운영되었다. High Rate DAF 파일럿플랜트의 연속운전에 따른 탁도 결과는 유입수의 탁도 약 1.0~6.0 NTU에서 처리수의 탁도가 약 0.48~1.0 NTU를 나타내었다. 또한 유입 원수의 조류 개체수를 분석한 결과, 100~120 cells/mL의 개체수로

분석되었으며, DAF 처리수에서는 조류개체수가 대부분 100 cells/mL 이하로 검출되었다. Y 정수장 유입원수에 대한 실험결과, 표면부하율 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·hr의 조건으로 High Rate DAF 공정을 운전하면서 안정적인 탁도 및 조류 제거 가능성을 확인하였다.

## 사 사

본 연구는 환경부의 “조류감시 및 제거활용기술 개발 실증화 사업”을 통해 지원받은 과제임 (20150018 00002).

## References

- Choi, C.M., Kim, J.H., Kim, W.I., Lee, J.S., Jung, G.B., Lee, J.T., Moon, S. G., 2007, “Phytoplankton Flora and Community Structure in the Lower Nakdong River,” *Korean J. Environ. Agric.*, 26(2), 159~170.
- Chu, W., Gao, N., Deng, Y., Templeton, M.R., Yin, D., 2011, Impacts of drinking water pretreatment on the formation of nitrogenous disinfection by-product, *Bioresource Technology*, 102(24), 11161-11166.
- Filho, J. A., Azevedo, A., Etchepare, R., Rubio, J., Removal of sulfate ions by dissolved air flotation (DAF) following precipitation and flocculation, *Int. J. of Mineral Prece*, 149, 1-8.
- Haarhoff, J. and van Vuuren, L. (1993) *Dissolved Air Flotation, A South African Design Guide*, Water Research Commission, Pretoria, Republic of SA.
- Jannsens, J. G. and Buekens, A. (1993) *J. Water Supply Res. Technol. AQUA*, 42, No. 5, 279-288.
- Jung, S. Y., Kim, J. K., 2017, Analysis of the water quality and correlation of impact factors during summer season in changnyeong-haman weir section, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 31(1), 83-91
- Kim, H. S., Hwang, S. J. and Kong, D. S., 2007, Cyanobacterial development and succession and affecting factors in a eutrophic reservoir,” *Korean J. Limnol.*, 40(1), 121~129.
- Ministry of Environment, 2017, *Guideline for Water Treatment Plant (Algae)*
- Ministry of Environment, 2012, *Water Quality Policy of Water Supply Source*
- Viirasaari, M., Jokela, P., Heinanen, J., 1995, Dissolved air flotation in the treatment of industrial wastewaters with a special emphasis on forest and foodstuff industries, *Wat. Sci. Tech.*, 31(3-4), 299-313.