



# 의사결정 알고리즘을 이용한 DAF 공정 제어에 관한 연구

## A study on dissolved air flotation (DAF) process control using decision algorithm

정우식·안주석·박지영·오현제\*

Woosik Jung·Ju-Suk An·Ji-Young Park·Hyun-Je Oh\*

한국건설기술연구원 환경플랜트연구소

Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

### ABSTRACT

In this study, we divided the process operation scenarios into three categories based on raw water temperature and turbidity. We will select and operate the process operation scenario according to the characteristics of the raw water. The number of algae in the DAF treated water has been analyzed to be less than 100 cells/mL. These results indicated that the DAF process is effective in removing the algae. In addition, the scenario of the integrated management decision algorithm of the DAF process was developed. 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).

**Key words:** algae, dissolved air flotation, control logic, decision algorithm, integrated management system

**주제어:** 조류, 용존공기부상공정, 제어로직, 의사결정 알고리즘, 통합관리시스템

## 1. 서 론

최근 상수원의 부영양화에 의하여 조류가 급속히 번식하여 정수처리에 어려움을 겪고 있다. 이러한 조류는 매우 가볍기 때문에 침전이 잘 일어나지 않아 제거가 어려우며, 맛·냄새 유발물질을 배출하는 큰 원인이 된다. 국내 기존의 정수처리 공정은 응집, 침전, 모래여과 및 염소소독을 통한 처리를 주된 공정으로 사용하고 있다. 그러나 이 공정은 수질이 비교적 양호한 수원에 적합한 처리방법으로, 하천의 오염 및 원수의 부영양화가 심각해짐에 따라 발생하는 조류 및 조류에 의한 맛·냄새물질이 정수처리공정에 장애요인이 되고 있으며, 탁도 및 색도가 높은 원수의 경우, 처

리과정에서 매우 느리게 침전되는 가벼운 플러키 생성되기 때문에 침전공정으로 처리하기에 어려움이 있다 (Jang et al., 2016). 친수성인 조류와 휴믹물질과 같은 저밀도 입자는 기존의 혼화/응집/침전공정에 의해 고액 분리하는 것이 어렵기 때문에 효율적으로 처리하기 위한 방안으로 부상분리공정의 일종인 용존공기부상(dissolved air flotation : DAF)을 적용하고 있다. 특히, 이 공정은 하절기에 하천 및 호소수에서 발생하는 저밀도 조류의 제거에 효율적이라고 알려져 있다 (Zabel, 1985).

DAF 공정의 특징은 조류, 색도 제거에 침전지보다 월등한 성능을 지니고 있어 이에 대한 연구가 유럽 및 미국을 중심으로 활발히 진행되어 왔다. 영국의 경우, 봄과 여름철에 Thames강의 조류로 인한 모래여과지의 폐쇄현상을 해결하기 위해 침전지를 DAF로 대체한 바가 있으며 (Eades and Brignall, 1995), 독일의 경우, 탁도가

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

낮고, 높은 농도의 Chlorophyll-a를 함유한 원수의 경우 DAF를 이용한 처리가 타 공정과 비교하여 상당히 우수한 처리효율을 나타낸 바 있다 (Puffelen et al., 1995). 또한, 조류 중에 따른 DAF의 효율의 검토도 연구 되었는데, 규조류와 남조류에 높은 처리효율을 나타내었다 (Edzwald et al., 1993; Vlaški, 1997; Markham et al., 1997). 그리고 수인성 질병을 일으키는 미생물인 *Cryptosporidium* 과 *Giardia*를 대상으로 용존공기 부상법을 적용한 연구결과에서도 용존공기부상법이 침전과 비교하여 높은 처리효율을 나타내었다 (Plummer and Edzwald, 1995).

최근의 정수기술은 운전자의 경험을 바탕으로 운전하는 근대적인 방식보다는 고도정수공정을 포함한 정수기술을 고급화하는 동시에 자가진단 및 성능평가에 의해 정수기능을 최적으로 유지할 수 있도록 하는 첨단화된 기술이 주도하고 있다. 또한, 먹는 물 관련 정보의 공개 요구에 따라 전국 모든 정수장의 운영현황이 실시간으로 공개되는 e-상수도 체계와 연계하여 정수공정의 효율향상과 수질의 안전성을 확보하는 자동화설비 및 제어시스템의 개발이 활발히 이루어지고 있다 (Ministry of Environment, 2012). 계절적으로 수질 변화가 심하고, 낮과 밤의 처리수량 변동에 따라 정수장 가동률 변화가 큰 우리나라의 경우, 수질변화와 수량변동 이원적인 제어변인에 따라 제어변수를 선정하고, 이를 제어인자로 변화시켜 처리공정의 특성에 적합한 제어 Logic과 Algorithm을 구성하여 정수처리 각

단위공정을 자동으로 제어하는 방식이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 PLC와 계측기 (다항목수질측정장치, SCD, particle counter, 실시간조류모니터링 장치 등)의 연동을 통해 유입수 및 처리수의 수질 (온도, pH, 전기전도도 및 탁도), 조류 농도 및 개체수를 실시간으로 모니터링한 데이터베이스를 바탕으로 DAF 공정의 운전 상태를 예측하고 평가함으로써, 자동운전에 의한 통합 관리가 가능하도록 자동으로 제어하는 DAF 공정 운전 조건의 의사결정 알고리즘을 개발하고자 하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서 의사결정 알고리즘을 이용한 제어 방법은 정수처리 단위공정의 기존 제어방식과 달리 일반적인 수질인자를 포함하여 조류, 맛냄새 유발물질 등의 각종 미량 유해물질에 대한 모니터링 기술을 연계하고 수량 및 수질의 변동에도 최상의 공정의 기능으로 최적화 할 수 있도록 하였다. 또한 단순히 각 공정을 모니터링 및 제어만 하던 기존의 기술을 개선하여 모니터링 결과를 바탕으로 자동제어 시스템을 적용하고, 공정예측 및 평가를 통해 제어할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

통계적 공정관리 개념을 도입하고, 공정별 자동측정이 가능한 계측기를 이용하여 정수공정에서 조류제어가 효율적으로 운전되고 있는지 공정 감시와 진단이 가능하도록 구축하였다 (Fig. 1). 공정기능 인자 및 수질

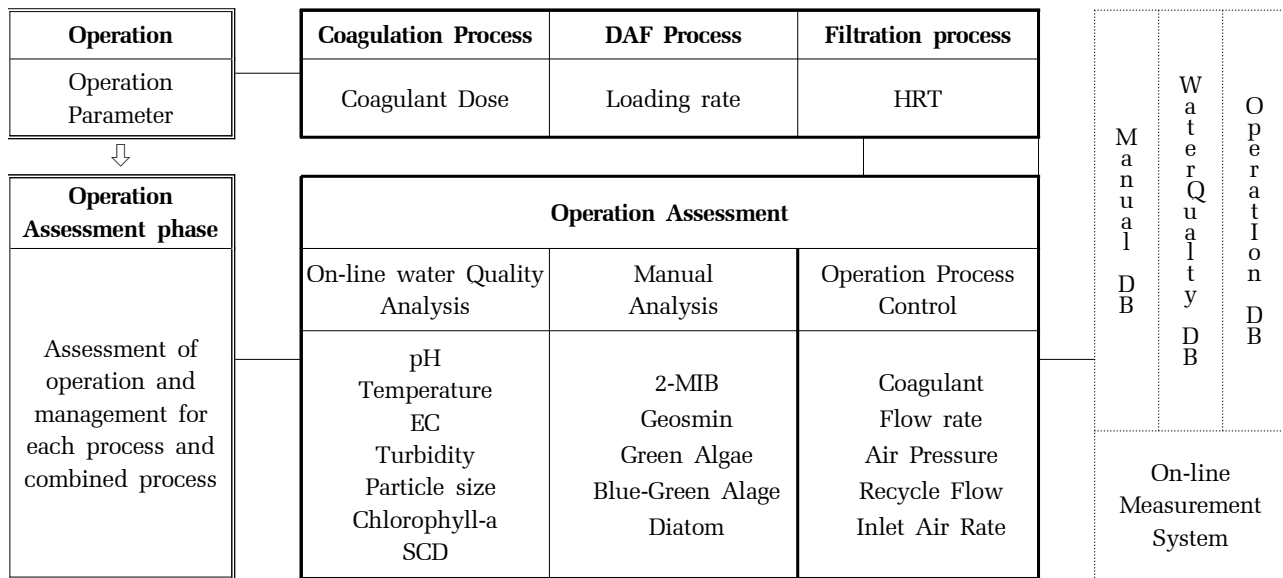


Fig. 1. Automatic Control System of DAF Process.



인자의 종합적 통계적 공정관리를 통하여 1단계에서는 각각 단위 공정별 성능을 평가하고, 실시간 수집된 온라인 데이터와 수질에 대한 매뉴얼 분석결과를 통합하여 데이터베이스화하는데 목적을 두고 설계하였다. DAF 공정의 제어는 각 공정의 계측기(압력, 유량, MBG 시스템 등)와 수질 계측기(온도, 수소이온농도, 탁도, 전기전도도), SCD, 입자계수기를 DAF 통합관리 시스템 내부의 WINDOWS 기반 CIMON-PC 및 HMI를 통해 운영되도록 하였고, 통합 DB의 운영 자료는 인터넷기반 환경에서 DAF 공정의 운전상태 확인 및 자료 조회, 원격 접속을 통한 운전 제어를 목적으로 구축하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 DAF 자동제어시스템

DAF 자동제어시스템은 응집제 등의 약품 자동 투입설비, DAF 순환펌프 유량 조절을 위한 자동제어, 처리수 유출부의 레벨제어, 공정 모니터링 및 이상 진단 등을 중심으로 이루어진다. 1단계에서는 다항목수질측정장치를 이용하여 원수 및 처리수의 수질 (온도, pH, 전기전도도, 탁도), SCD를 이용한 응집제 투입량 제어, Particle Counter를 이용한 플럭의 사이즈 및 개수 측정하여 DAF 공정의 수질 특성을 모니터링하는 것이다. 또한 혼화/응집공정의 약품주입량, 유입펌프 유량, 교반기 회전속도 및 부상조의 MBG 시스템의 반송유량, 유입공기량, 토출압력 등을 모니터링하여 공정의 운영 조건에 따른 수질 및 운전인자를 DB화하고 축적된 수질 및 운영인자의 DB를 토대로 혼화/응집반응조 및 DAF 공정을 제어하는 것이다.

또한, 2단계에는 DAF 공정 제어의 핵심기술인 조류 종 및 조류 개체수를 분석할 수 있는 분석 장치를 통하여 1단계에 구축한 원수 및 처리수의 수질 (온도, pH, 전기전도도, 탁도) 모니터링과 더불어 DAF 공정의 조류 제거 효율을 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다 (Fig. 2). 본 연구에서는 통계적 공정관리 및 의사결정 알고리즘 개념을 도입하여, 공정별 자동측정이 가능한 계측기를 이용하여 정수공정에서 조류제거가 효율적으로 운전되고 있는지 공정 감시에 중점을 두었고, 공정기능 인자 및 수질인자의 종합적 통계적 공정관리를 통하여 각각 단위 공정별 성능을 평가함으로써,

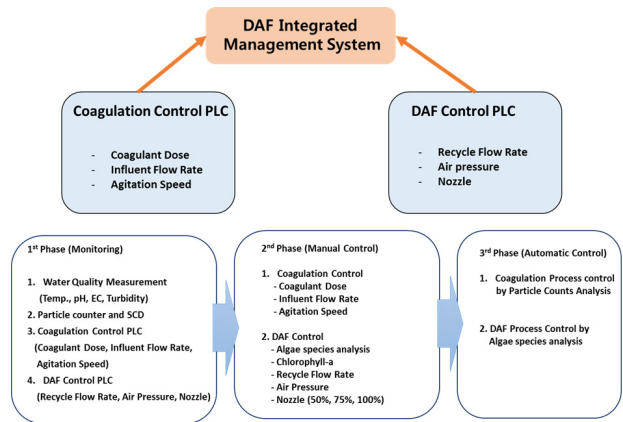


Fig. 2. Overview of DAF Integrated Management System.

실시간 수집된 온라인 데이터와 수질에 대한 매뉴얼 분석결과를 통합하여 데이터베이스화하고 이를 통해 자동제어 및 운전이 가능하도록 하였다.

#### 3.2 DAF 복합공정의 자동제어 의사결정 로직

DAF 복합공정의 자동제어 의사결정 로직은 Fig. 3과 같이 도시할 수 있다. 응집제 주입량, 목표수질, 표면부하율, 조류개체수 등 실시간 공정 기능에 대한 감시항목을 계측기 (다항목수질측정장치, Particle Counter, 조류 및 유기물 성상 분석 모니터링 장치에서 측정하고, 수질 분석 장치에서는 공정기능에 영향을 주는 pH, 탁도, 전기전도도, 유량, Particle Counter, 조류개체수를 측정하여 DAF 공정 자동제어의 PLC로 전송한다. DAF 공정 최적화를 위해 혼화/응집 반응조와 DAF 부상조로 2개의 공정으로 나누어 혼화/응집 반응조의 수질 및 플럭 사이즈 분석을 통해 혼화/응집 반응조를

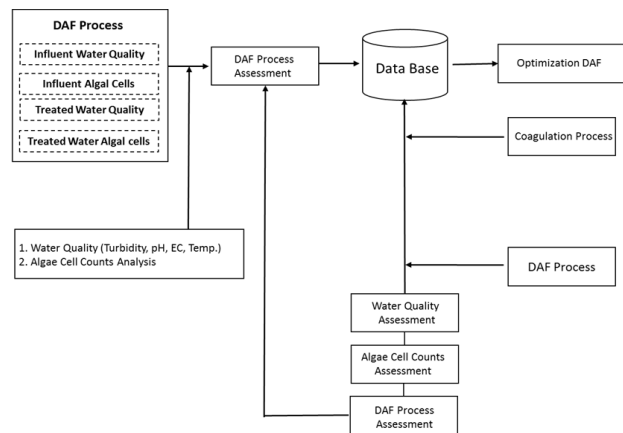


Fig. 3. Automatic Control Decision Logic of DAF Process.

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

최적화하고자 한다. 예를 들어, 혼화/응집 반응의 분석 결과, 탁도가 10 NTU 이상이면 약품주입량 증가 또는 교반속도 증가, 플럭 사이즈가 1,000  $\mu\text{m}$  이상이면 약품주입량 감소 또는 교반속도 감소 등의 제어를 통해 혼화/응집 반응을 최적화한다. DAF 공정은 처리수의 조류개체수를 분석하여 조류개체수가 1,00 cell/mL 이상이면 약품주입량 증가 또는 마이크로 버블 생산량을 증가하여 DAF 공정을 최적화하고자 한다. 또한, DAF 복합공정 통합관리시스템은 DAF 복합공정 성능 평가 및 수질 및 조류개체수 분석을 통해 목표수질 및 조류제거 효율을 주기적으로 재정리하며, 수집된 데이터의 시점을 기준으로 선정된 최적의 운전조건을 모니터링하고 제어하여 종합적인 효율 평가할 수 있도록 하였다.

### 3.3 DAF 공정 운전조건 의사결정 알고리즘

DAF 공정의 운전조건 의사결정 알고리즘은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. Y 정수장 유입원수의 수질 인자 분석을 통해 원수 수온 및 원수 탁도를 기준으로 공정 운영 시나리오를 세 가지 분류하였다. 우선 유입원수의 특성에 따른 공정 운영 시나리오를 선택하여 운전하게 되며, 생산수의 조류개체수 및 맛·냄새 물질의 분석을 통해 조류개체수 100 cells/mL 이하, 맛·냄새 물질 제거 효율 50% 이상의 수질을 만족하면 생산수를 공급하는 알고리즘을 구축하였다. 생산수의 수질을 만족하지 못하면, 다시 생산수 수질 조건에 따라 적합한 시나리오를 선택하여 공정을 운영하도록 알고리즘을 구축하였다.

DAF 공정 운전조건 의사결정 시스템의 시나리오는 유입 원수의 특성 중 DAF 공정 운영 및 조류 발생 원인과 가장 연관성이 높은 온도, 탁도, 조류개체수를 대상으로 운전조건 의사결정 시스템을 구축하였다 (Fig. 5). 수온의 기준을 10°C 이상, 이하 그리고 탁도의 기준을 유입원수의 특성을 고려하여 2와 5 NTU로 구분한 총 3가지의 원수 수질 조건별로 시나리오를 구상하였다. 원수 수질 조건에 따른 혼화/응집 공정 및 부상공정의 각각 운전 조건을 제어하여 최적화 가능하도록 알고리즘을 구축하였다. 혼화/응집 공정 제어인자는 응집제 주입량과 교반 속도로 원수 수질 조건에 따라 3가지 운전 조건을 제시하였으며, 부상공정 제어인자는 포화조 수위, 처리수 반송율, 노즐 개폐율, 스키머

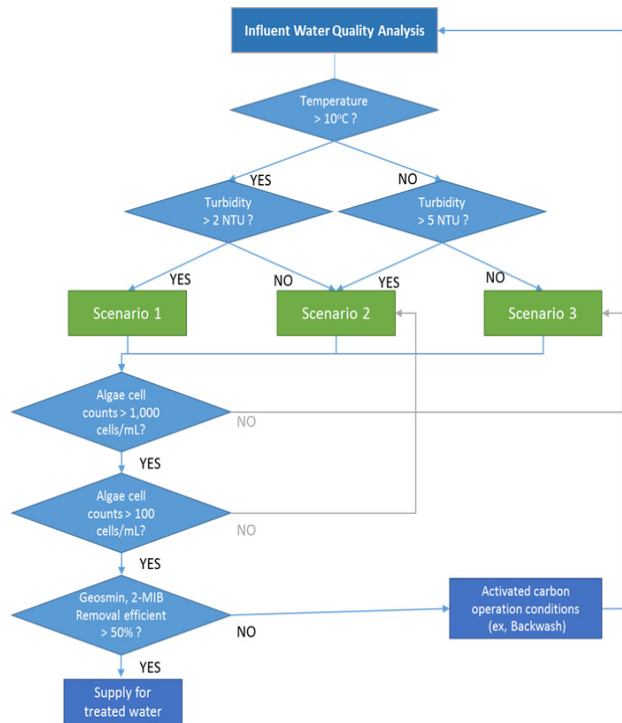


Fig. 4. Operating Condition Decision Algorithm for DAF Process.

속도 제어를 통해 공정을 운영할 수 있도록 운전조건을 구성하였다. 또한 생산수의 수질, 조류개체수 및 맛·냄새 물질 분석을 통해 DAF 복합공정 목표인 조류개체수 100 cells/mL 이하, 2-MIB 및 geosmin 제거 효율 50% 이상을 여부를 파악하고 분석결과를 토대로 설정된 시나리오로 운전하여 목표 수질을 만족할 수 있도록 운전조건 의사결정 시스템을 구축하였다.

### 3.4 의사결정 알고리즘에 의한 DAF 공정 운전결과

DAF 공정 운전조건 의사결정 알고리즘에 의한 운전 결과를 (Fig. 6)에 나타내었다. DAF 파일럿 플랜트의 각 공정별 안정화 이후 2016년 9월부터 2017년 4월까지 운전을 수행하였으며, 유입원수 수질 인자 중 탁도 변화를 분석하였을 때, 1.5~4.2 NTU로 평균 약 2.5 NTU의 원수가 유입되었다. 본 연구에서는 의사결정 알고리즘에 의한 DAF 공정 운전은 유입원수 중 탁도를 기준으로 운영하였고, 의사결정 시나리오 2에 의해 운전되었다. 그 결과, DAF 공정으로 유입되는 탁도 변화는 1.3~4.2 NTU, 처리수는 0.28~0.81 NTU로서, 운전기간 동안 1.0 NTU 이하의 비교적 안정적인 분석 결과를 나타내었다. 추후 DAF 공정의 장기간 운영을

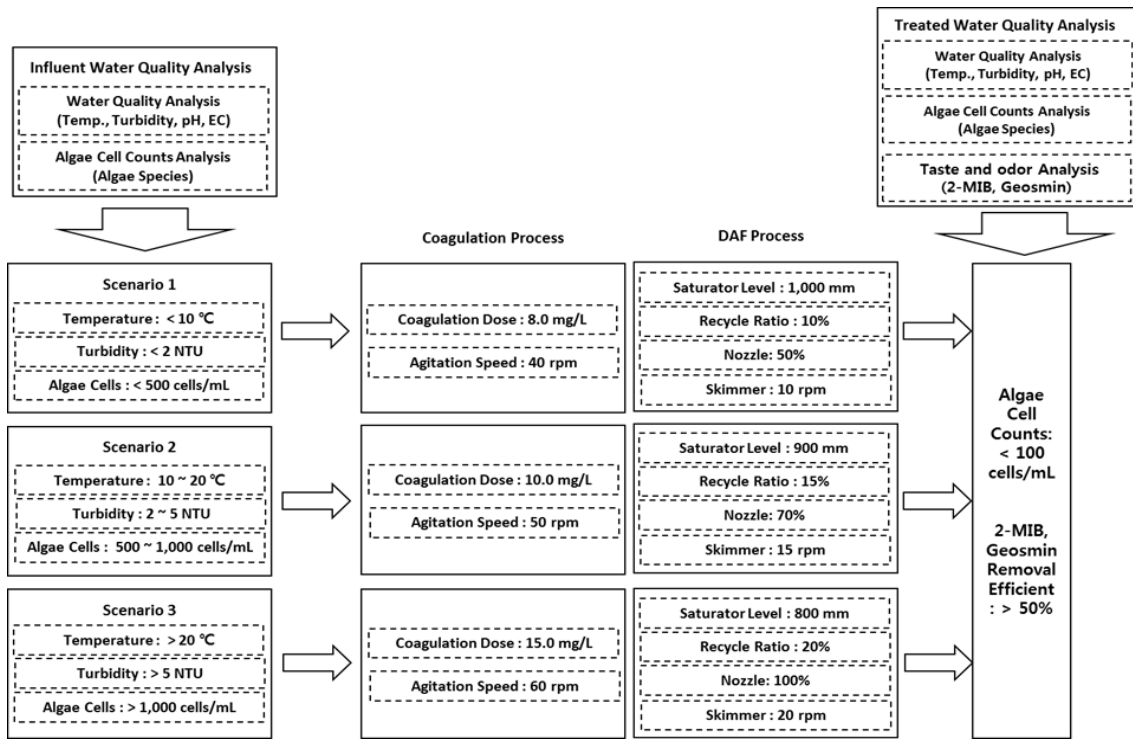


Fig. 5. Integrated Management Decision Making System Depending on the Raw Water Characteristics.

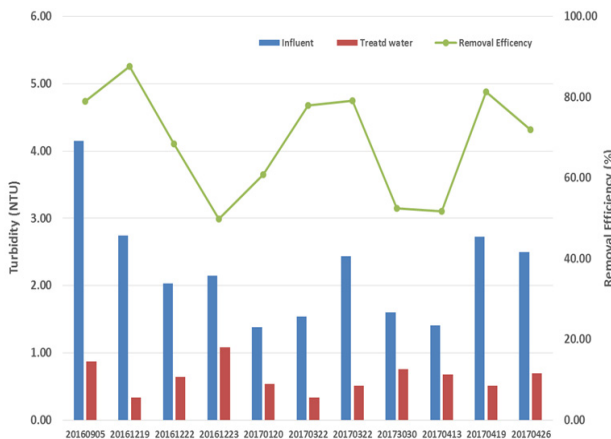


Fig. 6. Variation of Turbidity in the Raw and Treated Water by Operating Condition Decision Algorithm.

통하여 유입원수의 특성에 따른 의사결정 알고리즘 및 공정 시나리오를 검증하는 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

최근 전 세계적으로 이상기후 발생과 급격한 산업화

로 인한 영양염류의 증가로 호소 및 강에서 조류발생이 증가하고 있으며, 이에 따른 상수원 및 수환경 피해가 급증하고 있다. 친수성인 조류와 저밀도 입자는 기존의 응집/침전공정으로 처리하기 어렵기 때문에 효율적인 처리방안으로 용존공기부상(DAF) 공정을 적용하고 있다. 본 연구에서는 유입원수의 수질 인자 분석을 통해 원수 수온 및 원수 탁도를 기준으로 공정 운영 시나리오를 세 가지로 분류하였다. 유입원수의 특성에 따른 공정 운영 시나리오를 선택하여 운전하게 되며, 생산수의 조류개체수 및 맛·냄새 물질의 분석을 통해 조류개체수 100 cells/mL 이하, 맛·냄새 물질 제거 효율 50% 이상의 수질을 만족하면, 생산수를 처리하고 공급하는 알고리즘을 구축하였다. 또한, DAF 공정 운전조건 의사결정 시스템의 시나리오는 유입 원수의 특성 중 DAF 공정 운영 및 조류 발현 원인과 가장 연관성이 높은 온도, 탁도, 조류개체수를 대상으로 운전조건 의사결정 시스템을 구축하였다. DAF 공정 운전조건 의사결정 알고리즘에 의한 운전 결과, 유입되는 탁도 변화는 1.3~4.2 NTU, 처리수는 0.28~0.81 NTU로, 가동기간 동안 1.0 NTU 이하의 수질결과 값이 안정적으로 운영되는 것으로 나타났다.

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

## 사 사

본 연구는 환경부의 “조류감시 및 제거활용기술 개발 실증화 사업”을 통해 지원받은 과제임 (2015001800002)

## References

- Eades, A., Brignall, W. J. (1995). Counter-current dissolved air flotation/filtration, *Wat. Sci. Technol.*, 31(3-4), 173-178
- Edzwald, J. K. (1993). Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation, *Wat. Sci. Technol.*, 27(10), 67-81.
- Jang, Y. J., Jung, J. H., Lim, H. M., Yoon, Y. H., Ahn, K. H., Chang, H. Y., Kim, W. J. (2016). Decision Algorithm of Natural Algae Coagulant Dose to Control Algae from the Influent of Water Works, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(9), 482-496.
- Markham, L., Porter, M., Schofield, T. (1997). Algae and zooplankton removal by dissolved air flotation at severn trent Ltd. Surface Water Treatment Works. In Schofield, Proceedings of CIWEM Dissolved Air Flotation International Conference, The Lavenham Press, London, 112-119.
- Ministry of Environment, 2012, Water Quality Policy of Water Supply Source
- Plummer, J. D., Edzwald, J. K., Kelley, M. B. (1995). Removing *Cryptosporidium* by dissolved-air flotation, *J. of AWWA*, 87(9), 85-95.
- Puffelen, J., Buils, P.J., Nuhn, P., Hijnen, W.A. (1995). Dissolved air flotation in portable water treatment : the Dutch experience, *Wat. Sci. Technol.*, 31(3-4), 149-157
- Vlaski, A., Breemen, N., Alaerts, G.J. (1997). The role of particle size and density in dissolved air flotation and sedimentation, *Wat. Sci. Tech.*, 36(4), 177-189
- Zabel, T. (1985). The Advantages of dissolved-air flotation for water treatment, *J. of AWWA.*, 77(5), 42-45