

남조류 제거를 위한 선회식 가압부상장치 현장 적용에 관한 연구*

오홍석^{1),2)} · 강선홍¹⁾ · 남숙현³⁾ · 김은주³⁾ · 구재욱³⁾ · 황태문³⁾

광운대학교 환경공학과¹⁾ · (주)경호엔지니어링종합건축사사무소²⁾ · 한국건설기술연구원³⁾

A Study on Pilot Scale Cyclonic-DAF Reactor for Cyanobacteria Removal*

Oh, Hong-Sok^{1),2)} · Kang, Seon-Hong¹⁾ · Nam, Sook-Hyun³⁾ · Kim, Eu-Ju³⁾ ·
Koo, Jae-Wuk³⁾ and Hwang, Tae-Mun³⁾

¹⁾ Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University,

²⁾ Kyong-Ho Engineering & Architects Co., Ltd.,

³⁾ Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

ABSTRACT

Cyclonic-dissolved air flotation(Cyclonic-DAF), an advanced form of pressure flotation, applies a structure that enables the forming of twirling flows. This in turn allows for suspended matter to adhere to microbubbles and float to the surface of a treatment tank during the process of intake water flowing through a float separation tank. This study conducted a lab-scale test and pursued geometrical modeling using computational fluid dynamics(CFD) to establish a pilot scale design. Based on the design parameters found through the above process, a pilot cyclonic-DAF system(10m³/hr) for removing algae was created. Upon developing the pilot-scale cyclonic-DAF system, a type of algae coagulant(R-119) was applied as the coagulant to the system for field testing through which the removal rates of chlorophyll-a and cyanobacteria were evaluated. The chlorophyll-a and harmful cyanobacteria of the raw water at region B, the field-test site, were found to be 177.9mg/m³ and 652,500cells/mL respectively. Treated waters applied with 60mg/L and 100mg/L of algae coagulant presented removal efficiencies of approximately 95% and 97%, respectively. The cyanobacteria cell number of the treated waters applied with 60mg/L and 100mg/L of algae coagulant both that were equal to or less than 1,000cells/mL and were below attention level criteria for the issuance of algae boundary.

Key Words : *Algae, Algae removal, Cyclonic-DAF, Cyanobacteria, Coagulant*

* 본 연구는 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원(과제번호 18AWMP-B098632-04)에 의하여 수행되었습니다.

First author : Oh, Hong-Sok, Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea,
Tel : +82-2-2224-6165, E-mail : khbnr@daum.net

Corresponding author : Hwang, Tae-Mun, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
Tel : +82-2-910-0741, E-mail : taemun@kict.re.kr

Received : 2 August, 2018. **Revised** : 29 October, 2018. **Accepted** : 23 October, 2018.

I. 서론

최근 우리나라는 기후변화에 의한 하천의 물리적 환경변화, 비점오염원에 의한 영양염류의 유입증가 등으로 인해 하천 및 호소 등에 녹조 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 녹조의 발생 시기와 농도가 증가하고 있는 추세이다(Han et al., 2001; Figueiredo, et al., 2004). 남조류(Cyanobacteria)는 조류 대발생(Algae bloom)을 일으키는 주요 원인중의 하나이다(Moreno, et al., 2005; Mohamed, et al., 2007). 현장 조건에 따라 녹조 중 약 70%는 수중에 조류 독성을 유출시키는 것으로 나타났다(National Rivers Authority 1990; Codd, 1995; Ho, et al. 2006). 남조류 중 일부 종은 맛, 냄새물질(Geosmin, 2-MIB)을 배출하여 물의 심미적 가치와 안전성을 떨어뜨린다(MOE, 2015; Ikawa, et al., 2001). 또한, 남조류 중 일부는 동물에 대해 간독, 신경독, 사람에게 대해 피부독, 미생물에 대해 세포독으로 작용하는 여러 종류의 독소를 단독 또는 복수 함유하고 있으며, 외국 여러 나라에서는 예전부터 남조류로 인한 가축이나 야생동물의 폐사가 보고되었다(Dawson, 1998; Carmichael et al., 2001).

따라서 이러한 문제점으로 조류 제거에 사용되는 다양한 기술 중 하나로 대표적인 물리화학적 처리기술인 가압부상법(Dissolved air flotation; DAF)이 있다. DAF 기술이 수처리 기술에 사용되기 시작하면서, 몇몇 연구자들은 미세 기포와 입자 사이에서 발생하는 충돌효율에 관한 연구를 수행했다(Baeyens et al., 1995; Eades et al., 1995; Edzwald et al., 1995). 이 방법은 용존 공기 부상 등의 물리적 처리 방법을 통하여 수중의 조류 및 부유물질을 제거하는 방법으로 대규모로 적용이 가능한 가장 잘 알려진 방법이다(Ometto et al., 2014). DAF 기술은 사전 응집된 조류 생물량(Biomass)에 부착된 미세 기포가 조류 플록을 표면에 부유시켜 높은 제거율을 가지는 장점이 있다(Rawat et al., 2013; Edzwald,

1993). 또한, 약품 주입을 병행하는 경우 조류 제거효율을 향상시킬 수 있다(Yuheng et al., 2011; Yap et al., 2014). 가압부상법 중 성능이 향상된 선회식가압부상법(Cyclonic-DAF)은 선회류(Twirling flows)를 형성시킬 수 있는 구조를 갖추고 있어 원수가 부상 분리조(Float separation tank) 내부를 통과하는 과정에서 미세기포(Microbubble)에 부유물질(Suspended matter)을 흡착하여 부상시킨다(Li et al., 2016). 부상된 부유물질은 중심부에 구비된 배출관을 통하여 외부로 배출시키는 보다 향상된 가압부상 장치이다. 본 연구에서는 랩 스케일의 실험과 전산유체역학(Computational fluid dynamics; CFD)에 의한 형상을 모델링하여 파일럿 스케일의 설계에 반영하였다. 이를 이용하여 조류 제거를 위한 파일럿용 이동식 선회식가압부상장치를 제작하였다. 전산유체역학(CFD)은 여러 가지 프로세스 해석을 수행하여 유체 역학에 관한 많은 결과를 이끌어 낼 수 있다(Lundh et al., 2000). 결과 녹조 대발생시 취수원 또는 수변인접지역에 긴급하게 녹조를 제거하기 위하여 활용가능한데, 본 연구에서는 파일럿 규모인 10m³/hr의 선회식가압부상장치(Cyclonic-DAF)를 개발하여 실제 현장 적용하였으며, 클로로필-a 및 남조류 제거율을 평가하였다.

II. 연구방법

1. 랩 스케일 선회식가압부상장치

선회식가압부상장치의 구성은 Figure 1과 같다. 선회식가압부상장치는 원통형 부상분리조, 유입수와 미세버블 주입관, 농축수가 배출되는 수직형 이중관으로 구성된다. 가압부상조의 작동원리는 미세버블과 유입수가 유입되면 부상되어 외부 선회류를 형성하여 상승된다. 물에 있는 부유 조류는 선회 부상하고 표층 중심에 모여 중심관으로 배출된다. 조류가 제거된 처리수는 선회류를 형성하여 하강되고 처리관으로 배출된

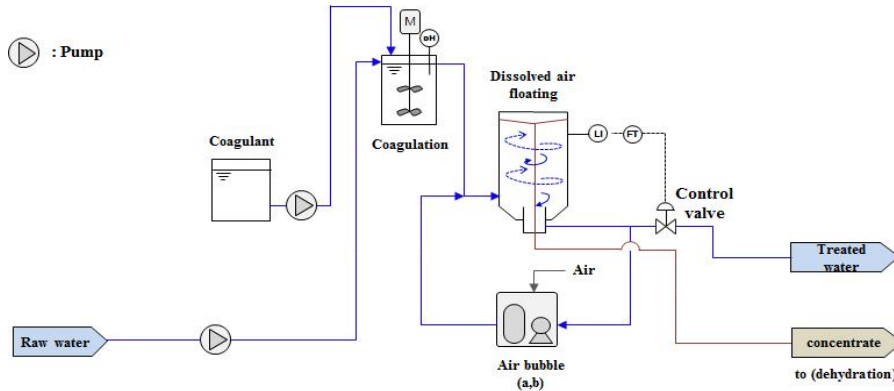


Figure 1. Schematics of cyclonic-DAF



Figure 2. Test of lab-scale cyclonic-DAF

다. 비중 높은 입자는 원심력 작용으로 벽체 쪽으로 이동하여 침전되고 농축수관으로 배출된다. 랩 스케일 선회식가압부상장치를 0.03m³/hr로 제작하였으며, 이동성을 고려하여 차량에 탑재하기 위한 최적의 형태를 결정하기 위하여 선회식가압부상조의 높이/직경변화 비율을 1:1.1, 1.35:1, 1.6:1 및 1.85:1로 선정하여 실험하였으며, Figure 2와 같다. 선회식가압부상장치 가동시간은 1시간으로 하였으며, 미세기포는 2L/min으로 주입하였다. 원수는 N 수계 하천수를 사용하였으며 클로로필-a의 제거율로 처리효율을 평가하였다. 응집제는 Polyacrylamide 고분자응집제 0.05% 용액을 2mg/L로 주입하였다.

2. 선회식가압부상장치 전산유체해석

본 연구에서는 부유성 탁질을 제거하기 위한

선회식가압부상반응조를 대상으로 최적 설계 및 운전방안 도출을 위하여 전산유체해석 모사를 통해 선회식가압부상조를 모사하였다. 해석대상을 작은 체적의 메쉬(Mesh) 또는 그리드(Grid)로 분할한 다음 유한체적법(Finite volume method; FVM)을 이용하여 초기조건 및 경계조건을 만족하는 유체거동 방정식(연속, 모멘텀과 에너지 방정식 등)의 해를 컴퓨터를 이용하여 반복적으로 구하는 작업을 통해 모사를 수행하였다. 선회식가압부상조는 2개의 형상으로 나누어 수행하였으며, 전산유체해석 형상 모델링 조건은 다음과 같다. DAF 반응조 전처리는 응집이며, 부상조의 체류시간은 9분이다. 집축과 부상이 하나의 반응조에서 일어나며 연속으로 운전이 가능하다. 원수 유량은 10m³/hr로 유지하였으며, 용존 공기는 0.1m³/hr로 공급하였다. 공

Table 1. Material mixture ratio for R-119 synthesis

Materials	Ratio(%)	Materials	Ratio(%)
Chestnut Tree	7~12	Feldspar Porphyry	15~20
Oak	7~12	Ocher	15~20
Tea Tree	7~12		
Ash Tree	7~12		
Pine needles	7~12	Zeolite	15~20

기는 5~6bar의 압력으로 용존시켰다. 반응조 형상 1의 경우 유동 영역에서는 노드수를 약 223,000개, 요소수는 약 857,000개로 구성하였으며, 형상 2의 경우에는 노드수를 266,000개, 요소수를 1,035,000개로 구성하였다. 본 연구에서는 전산유체해석에 ANSYS CFX를 사용하였다. 유동장에 기포가 추가됨으로써 흐름은 더 이상 단일상 흐름이 아니지만 두 단계로 구성된다. 기포와 물의 이상 유동을 모사하기 위하여, 수치해석 근간의 다상(Multi-phase) 이론을 적용하였으며, 각각의 상에 대한 운동방정식을 따로 계산하여 커플링하는 Eulerian-Eulerian 방법을 사용하였다. 선행연구에 따르면 $k-\epsilon$ 난류 모델(Turbulence model)을 적용할 경우의 전산해석 결과가 유동을 층류로 가정 한 전산해석 결과보다 실험값에 더 유사하다는 것을 밝힌 바 있다(Hague et al., 2001). 수치해석에서의 난류모델의 적용부분에서는 상업적 코드에서 널리 사용되고 있는 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다(Davidson, 1997).

3. 파일럿용 선회식가압부상장치

파일럿 선회식 가압부상장치의 반응조 규모는 랩 스케일 및 전산유체역학 결과를 토대로는 10m³/hr로 처리할 수 있는 용량으로 제작하였다. 장치의 전체 크기는 1,120mm(D) × 1,350mm(H), Scum 회수관은 58mm(D) × 1,200mm(H)이며, 총 유효용량은 1,100L이다. 파일럿용 선회식 가압부상장치는 B 지역 원수를 대상으로 현장에서 테스트하였으며, 남조류 개체수를 분석하여 처리효율을 평가하였다. 미세기포의 공급은

용해관 내부 압력 4.5kgf/cm²의 운전 조건하에서 공기 공급량을 10L/min으로 하여 공기용해 가압수를 30L/min으로 공급하였다. 응집제는 조류 제거제(R-119)(MCKorea, Co., Korea)를 사용하였다. 조류제거제는 M사에서 개발한 제품으로 식물추출액과 광물추출액을 혼합하여 만든 제품이며, 응집된 플러크이 침전되었다가 부상되는 특징을 가지고 있다(Nam et al., 2016). 사용된 조류제거제는 하천에 발생하는 녹조제거를 대상으로 하는 응집제로 R-119라는 명칭을 부여하였으며, 응집제 조성성분은 Table 1과 같다. 선회식 가압부상장치는 미세기포처리수, 조류제거제(R-119) 60 mg/L 및 100mg/L를 주입하여 현장에서 운전하였으며, 결과는 처리수의 클로로필-a 및 남조류 세포수로 비교 평가하였다.

4. 수질 분석

클로로필-a 농도는 수질오염공정시험기준 ES 04312.1a법으로 분석하였다. 조류 시료는 포르말린용액 8%로 플랑크톤을 고정시키고 수질오염공정시험기준 ES 04705.1b 식물성플랑크톤-현미경계수법으로 분석하였으며 개체수 분석은 식(1)과 같이 격자 이용 계수법을 이용하였다. 현미경은 OLYMPUS(Japan)를 이용하여 200배 범위로 10스트립 이상 반복 계수하였다.

$$\text{개체수}(cells/mL) = \frac{C}{L \times D \times W \times N} \times 1,000 \quad \dots (1)$$

여기서, C는 개수된 개체수의 합, L은 검경구획의 길이(mm), W는 검경구획의 폭(mm), D는 검경구획의 깊이(mm), N은 검경한 셀 수이다.

III. 연구결과

1. 랩 스케일 선회식가압부상장치

랩 스케일 선회식가압부상조의 높이/직경변화 비율을 1:1.1, 1.35:1, 1.6:1 및 1.85:1로 선정하여 실험하였다. 응집제는 Polyacrylamide 고분자응집제 0.05% 용액을 2mg/L로 주입하였다. 모든 조건에서 가동시간은 1시간, 미세기포는 2L/min이었다. 반응조 유입 원수의 탁도는 12.4 NTU 및 클로로필-a는 53.1mg/m³로 나타났다. 높이/직경변화 비율을 1:1.1, 1.35:1, 1.6:1 및 1.85:1로 선정하여 실험한 수질 결과는 Table 2와 같다. 높이/직경변화 비율 모든 결과에서 클로로필-a는 약 90%의 처리 효율을 보였으며, 높이에 따라 탁도 및 클로로필-a 처리효율에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 파일럿 선회식가압부상장치는 높이제한이나 저항을 최소화한 이동이 가능한 형태로 제작하기 위하여 높이/직경변화 비율을 1:1.1로 선정하였다.

2. 선회식가압부상장치 전산유체해석

본 연구에서는 개발된 선회식가압부상장치의 수리학적 특성을 조사하기 위해 전산유체역학 모사를 수행했다. 전산유체해석을 위한 선회식가압부상장치 반응조는 Figure 3과 같이 구성하였다. 가압시킨 용존 공기가 대기압으로 배출될 때의 기포의 크기는 압력과 수온에 따라 상이하지만 약 10~120 μ m정도로 알려져 있다. 생성된 마이크로 버블은 상부로 배출된다. 반응조 형상 1의 경우 유동 영역에서는 노드수를 약 223,000

개, 요소수는 약 857,000개로 구성하였으며, 형상 2의 경우에는 노드수를 266,000개, 요소수를 1,035,000개로 구성하였다. 격자의 형상은 ‘Tetragonal’ 과 ‘Hexagonal’ 격자로 혼합되어 있는 ‘Hybrid’ 격자 형태로 주었다. 유동 현상의 변화가 심한 영역에서는 더욱 세밀한 격자를 생성으로 만들어 삽입하는 기법을 주었다. 선회식가압부상장치 반응조를 전산유체역학으로 모사하기 위해서 1개의 유입 조건과 3개의 유출 조건을 부여하였다. 반응조의 벽면은 ‘No-slip condition’을 적용하였다. 공기 관점에서 물질 수지를 이룰 수 있도록 Degassing boundary로 설정하였다. 난류 모델로 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.

Figure 4는 형상 1과 형상 2를 대상으로 전체적인 물의 유속분포를 도시한 것이다. 형상 1의 반응조가 형상 2의 반응조에 비해 작은 이유로 내부의 평균 유속이 작게 도출되었다. 중간 슬러지 배출관 근처의 유속 분포를 관측하면(녹색부분; 상대적으로 느린 흐름 영역) 형상 2의 경우가 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 형상 1의 경우 반응조 내 평균 유속은 0.281m/s이고 형상 2의 경우 0.261m/s로 나타났다. 이와 같은 결과는 형상 2의 하부 구조가 형상 1에 비해 넓어진 것으로 인해 발생하였다.

본 연구에서 개발된 선회식가압부상장치 반응조의 특징은 유입원수가 중심축에서 왼쪽으로 편향되게 유입된다. 유입 속도 에너지가 반응조 내부의 물을 시계 반대방향으로 선회를 유도한다. 생성된 마이크로버블은 반응조 내 체류시간을 증가시키고 탁질과 충돌한다. 형상 1과 2로

Table 2. The results of lab-test

Test No.	Height/diameter	Turbidity(NTU)	Chrophyll-a(mg/m ³)
Raw water		12.4	53.1
1	1.1/1	1.0	2.8
2	1.35/1	1.2	2.9
3	1.6/1	1.1	2.9
4	1.85/1	1.4	3.5

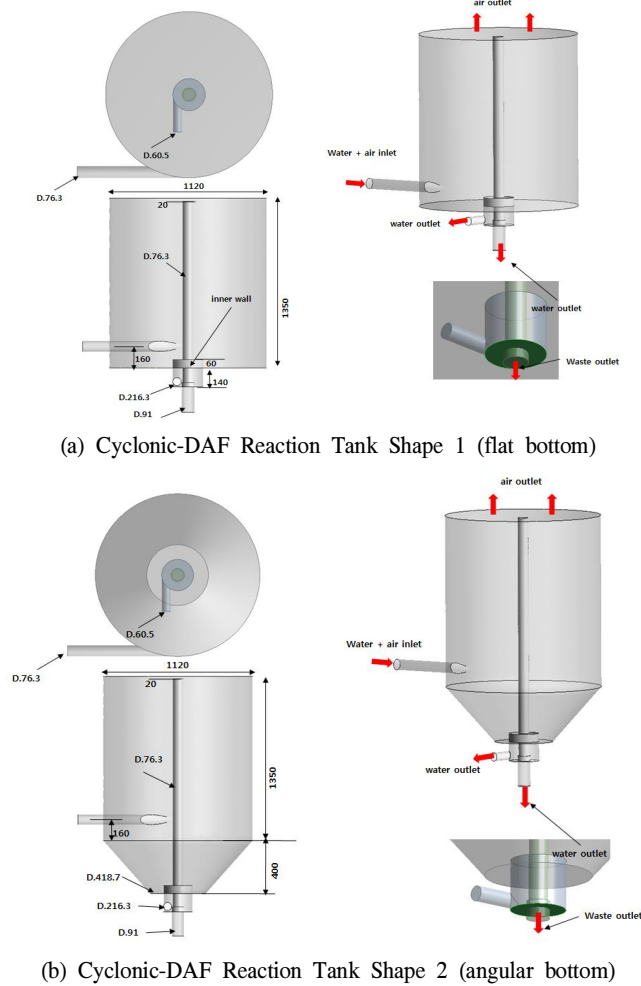


Figure 3. Shape of Cyclonic-DAF for CFD

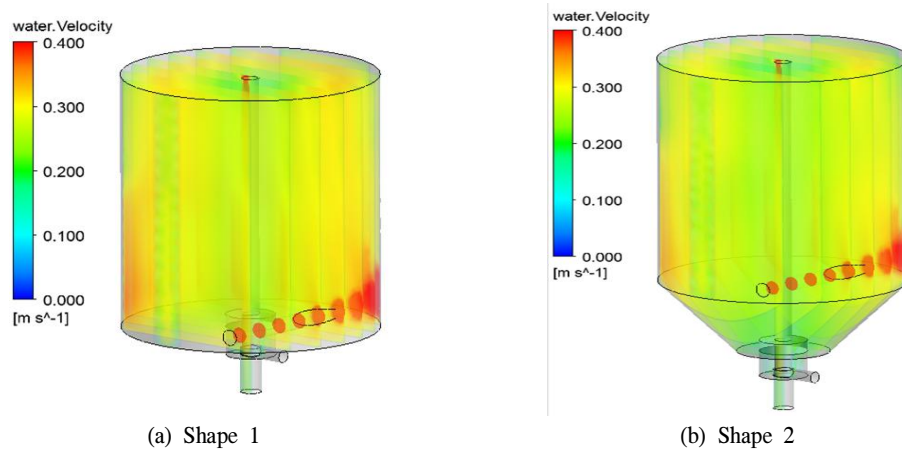


Figure 4. A schematic presentation of the distribution of water flow velocities in Cyclonic-DAF reaction tanks

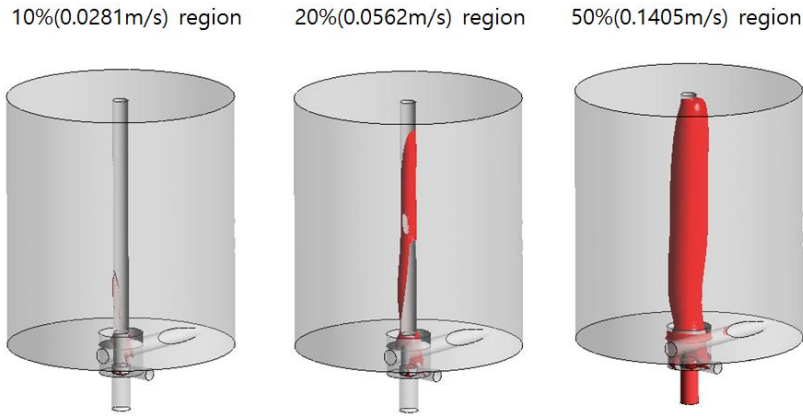


Figure 5. A schematic presentation of local velocity region from Shape 1

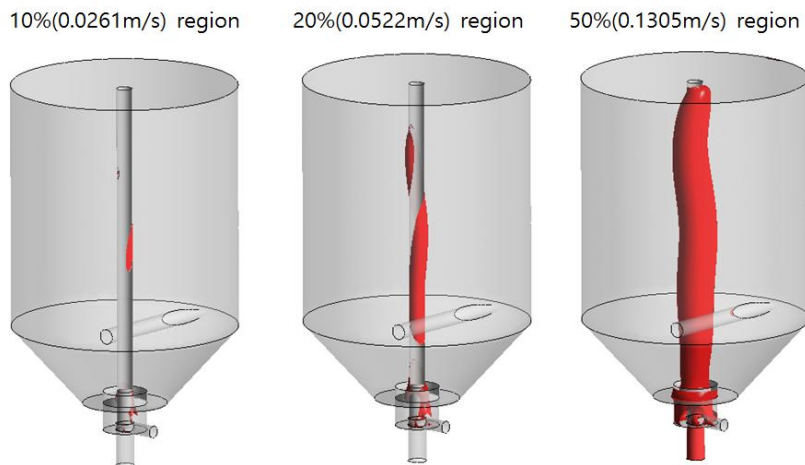


Figure 6. A schematic presentation of local velocity region from Shape 2

구분한 것은 반응조 내부의 경사를 준 것이다. 공기 부상으로 제거되지 않는 무거운 탁질의 경우 침전으로 쌓이는 슬러지를 바닥으로 배출하는 효과를 내기 위해서이다. Figure 5와 Figure 6은 선회식가압부상장치 반응조 형상 1과 2를 평균 유속의 10%가 나타나는 영역과, 20% 및 50%가 나타나는 영역을 나타내었다. 일반적으로 평균 유속의 10%나 20% 이하가 되는 영역은 사류(Dead zone)라고 표현한다. 이러한 영역은 전체 반응조 부피에서 이를 제외하고 나서 ‘유효 용적(Effective volume)’을 구해낸다. Figure 5는 형상 1에서 평균 유속 0.261m/s일 때 10%, 20%

및 50% 되는 위치를 영역으로 표시한 것이다. 반응조 내부에서 평균 유속의 10% 미만 영역이 거의 나타나지 않았다. 20% 미만인 영역도 중간 슬러지 배출관 주위에 미미하게 나타났다. 50% 미만인 영역도 슬러지 배출관 주위를 중심으로 총 용적에 비해 약 5% 미만으로 나타났다.

Figure 6은 형상 2를 나타낸 것이다. 반응조 내 평균 유속은 0.261m/s였다. 각 %별 국부적 속도 분포는 형상 1과 크게 다르지 않으며, 10% 및 20% 미만의 사류 영역의 분포도 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 선회식가압부상 반응조의 장점 중에 하나는 사류지역을 저감시킬 수

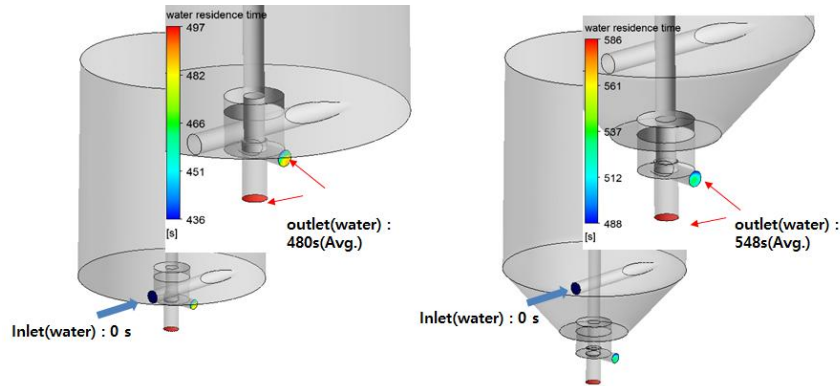


Figure 7. A schematic presentation of water retention time from cyclonic-DAF tank

있는 것이다.

Figure 7은 유입구로 유입된 물 분자가 평균적으로 조 내에서 머무르는 시간을 분석한 결과이다. 그 결과 형상 1의 경우는 평균 480초, 형상 2의 경우에는 548초로 나타났다. 형상 2의 경우가 68초 더 소요되는데 이는 하부 콘(Cone) 부분의 용적이 추가됨에 따라 평균 체류시간이 증가한 것으로 판단된다.

전산유체역학 모사를 통하여 형상 1과 형상 2의 평균유속, 사류지역, 기포체류시간 등을 분석한 결과 유사한 결과값이 나와 차량 탑재 용이성 등 이동성을 고려하여 형상 1의 모양으로 파일럿용 선회식가압부상장치를 선정하였다.

4. 파일럿용 선회식가압부상장치

선회식가압부상장치의 랩 스케일 실험 및 전산유체역학 모사를 통한 설계 검증 결과를 토대로 10m³/hr로 처리할 수 있는 파일럿 스케일로 이동이 가능한 구조로 Figure 8과 같이 제작하였다. 실험은 남조류가 발생된 B 지역을 대상으로 하였으며, 처리효율은 남조류 개체수를 분석하여 평가하였다. 현장에서 사용된 응집제는 환경부예규 제625호 ‘조류제거시설 설치, 운영 및 살포용 조류제거물질 사용지침’에 의해 허가 받은 제품만 가능하기 때문에 천연응집제인 조류제거제(R-119)를 선택하여 실험하였다. 조류경보제 운영 매뉴얼(국립환경과학원, 2017년)에 따르면 조

류경보 발생대상 수질 오염물질은 남조류 세포수이다. 남조류 세포수는 마이크로시스티스(*Microcystis*), 아나베나(*Anabaena*), 아파니조메논(*Aphanizomenon*), 오실라토리아(*Oscillatoria*) 속(屬) 세포수의 합을 말한다. Table 3은 조류경보제 발령기준을 나타낸 것이다. 조류경보제는 관심, 경계 및 대발생 단계로 나누어지며, 단계별 남조류 세포수 발령기준은 1,000cells/mL, 10,000 cells/mL 및 1,000,000cells/mL로 나누어진다.



Figure 8. Cyclonic-DAF pilot system

파일럿용 선회식가압부상장치의 운전은 미세기포 운전, 조류제거제 60mg/L 및 100mg/L 주입 조건으로 현장에서 운전하였다. 조류제거제 주입 조건은 Oh et al.(2018) 등에 의한 연구결과에서 클로로필-a에 의한 약품주입농도별 실험 결

Table 3. Criteria for the issuance of algae boundary

Division		Level
Item		Cell number of cyanobacteria
Stage of issuance	Attention	1,000 cells/mL
	Alert	10,000 cells/mL
	Outbreak	1,000,000 cells/mL

Table 4. The results of cyanobacteria removal

	Cyanobacteria(cells/mL)				Chlorophyll-a (mg/m ³)
	<i>Chroococcus</i> sp.	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Anabeana</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp.	
Raw water	208,500	32,500	412,500	240,000	177.9
Microbubble	7,100	2,000	33,000	27,000	41.5
R-119 60 mg/L	66	0	160	413	8.6
R-119 100 mg/L	41	0	103	263	5.1

과에 따라 결정하였는데, B 지역 원수의 클로로필-a 농도는 177.9mg/m³이었으며, 적정 주입량은 약 89mg/L로 나타났다. 현장에서 운영된 파일럿 선회식가압부상장치의 처리수의 결과는 클로로필-a 및 남조류 세포수로 비교 평가하였다. Table 4는 원수 및 처리수 결과를 나타낸 것이다. 미세기포 처리수에서 클로로필-a는 약 77% 제거되었으며, 조류제거제 60mg/L 및 100mg/L 처리수의 제거효율은 약 95% 및 97%로 나타났다. 원수의 남조류 세포수는 893,500cells/mL로 나타났으며, 유해남조류는 652,500cells/mL로 나타났다. 조류경보제에 의하면 경계와 대발생 사이의 수준이며, 거의 대발생 수준에 가까운 것으로 나타났다. 원수의 유해남조류 종류는 *Anabeana* sp. 및 *Microcystis* sp. 이었으며, 전체 남조류의 73%를 차지하는 것으로 나타났다. 미세기포 처리수에서 남조류는 69,100cells/mL, 조류제거제 60mg/L 및 100mg/L 처리수에서 639cells/mL 및 407cells/mL로 나타났다. 유해남조류는 미세기포 처리수에서 573cells/mL 및 366cells/mL로 나타났다. 처리수 결과 클로로필-a는 선회식가압부상장치에 응집제로 조류제거제를 사용하였을 경우 그 처리효율이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 남조류 세포수는 미세기포만으로도 약 92%의 제거율

을 나타내었으나, 조류경보제 기준으로 관심수준 이하인 1,000cells/mL 이하를 만족하지는 못하는 것으로 나타났다. 조류제거제를 주입한 경우 60 mg/L 및 100mg/L 처리수에서 모두 관심수준 이하인 1,000cells/mL 이하를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 선회식 가압부상장치에 조류제거제를 응집제로 사용한 경우 남조류 세포수 및 클로로필-a 농도 제거에 효율적인 것으로 나타났으며, 현장에서 계산된 적정 조류제거제 농도보다도 적게 주입해도 되는 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구는 녹조 대발생시 취수원 또는 수변인 접지역에 긴급하게 녹조를 제거하기 위한 방안을 마련하기 위하여 랩 스케일 선회식가압부상조 실험을 실시한 결과이다. 실험 과정에서 전산유체해석 모사를 통해 이동이 가능한 10m³/hr 용 파일럿 선회식가압부상장치를 제작하여 남조류가 발생된 현장에서 선회식가압부상장치를 직접 운영하였으며, 그 결과 클로로필-a에 대해 90%이상의 처리효율을 얻을 수 있었다.

1. 랩 스케일 선회식가압부상조의 높이/직경 변화 비율을 1:1.1, 1.35:1, 1.6:1 및 1.85:1로 선

- 정하여 실험한 결과 모든 조건에서 클로로필-a의 90% 이상의 비슷한 제거율을 얻어 파일럿용으로는 높이제한이나 저항을 받지 않는 이동이 가능한 형태로 구성하기 위해 높이/직경변화 비율을 1:1.1로 선정하였다.
2. 전산유체해석 모사 결과 선회식가압부상 반응조의 장점 중에 하나는 사류지역을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 원통형 형상과 콘형 형상으로 나누어 모사한 결과 유속분포, 체류시간이 유사한 것으로 나타났으며 이동 용이성을 고려하여 파일럿 선회식가압부상장치는 원통형 형태로 결정하였다.
 3. 랩 스케일 및 전산유체해석 모사를 통해 파일럿 선회식가압부상장치를 제작하고 효율을 검증하기 위해 실제 현장에서 하천에 살포할 수 있도록 등록된 응집제인 조류제거제(R-119)를 사용하여 운전하였다. 운전 결과 클로로필-a는 조류제거제 60mg/L 및 100mg/L 처리수에서 제거율이 약 95% 및 97%로 나타났다.
 4. 현장에서 선회식가압부상장치의 운영결과 미세기포 처리만으로는 유해남조류 세포수가 조류경보제 기준으로 관심수준 이하인 1,000cells/mL 이하를 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 조류제거제 60mg/L 및 100mg/L 처리수에서 유해남조류 세포수는 모두 관심수준 이하인 1,000cells/mL 이하를 만족하는 것으로 나타났다.
 5. 클로로필-a 제거율과 유해남조류 세포수 제거 결과를 토대로 조류제거제 적정 투입량은 이론적으로 약 89mg/L로 나타났으나, 실제 현장 적용시 효율적인 제거율을 만족하는 투입량은 60mg/L로 이론적인 결과보다 현장에서 적게 투입해도 되는 것으로 나타났다.

References

Baeyens, J. · Mochtar, I. Y. · Liers, S. and

- DeWit, H. 1995. Plugflow dissolved air flotation, *Water Env. Res.*, 67(7) : 1027-1035.
- Carmichael, W. 2001. Health effects of toxin-producing cyanobacteria: The Cyano HABs, *Hum. Ecol. Risk Assess.: An Int. J.* 7(5) : 1393-1407.
- Davidson, L. 1997. *An Introduction to Turbulence Models*. Gothenburg: Dept. of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology.
- Dawson, R. M. 1998. The toxicology of microcystins, *Toxicol.* 36(7) : 953-962.
- De Figueiredo, D. R. et al. 2004. Microcystin-producing blooms-a serious global public health issue, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 59(2) : 151-163.
- Eades, A. and Brignal, W. J. 1995. Counter-current dissolved air flotation/filtration, *Wat. Sci. Tech.*, 31(3-4) : 173-178.
- Edzwald, J. K. 1995. Principles and applications of dissolved air flotation, *Wat. Sci. Tech.*, 31(3-4) : 1-23.
- Edzwald, J. K. 1993. Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation. *Water Sci. Technol.*, 27(10) : 67-81.
- Gorge, R. D. 1986. Contribution of chlorination to the mutagenic activity of drinking water extracts in Salmonella and Chinese hamster ovary Cells, *Environ. Health Perspective*, 69, 81-87.
- Han, M. Y. and Kim, W. 2001. A theoretical consideration of algae removal with clays, *Microchemical Journal*, 68 : 157-161.
- Hague, J. · Ta, C. T. · Biggs, M. J. and Sattary, J. A. 2001. Small scale model for CFD validation in DAF application, *Water Science and Technology*, 43(8) : 167-173.

- Ikawa, M. · Sasner, J. J. and Haney, J. F. 2001. Activity of cyanobacterial and algal odor compounds found in lake waters on green alga *Chlorella pyrenoidosa* growth, *Hydrobiologia*, 443(1-3) : 19-22.
- Li, X. · Xu, H. · Liu, J. · Zhang, J. · Li, J. and Gui, Z. 2016. Cyclonic state micro-bubble flotation column in oil-in-water emulsion separation, *Separation and Purification Technology*, 165(13) : 101-106.
- Lundh, M. · Jonsson, L. and Dahlquist, J. 2000. Experimental studies of the fluid dynamics in the separation zone in dissolved air flotation, *Wat. Res.*, 34(1) : 21-30.
- Ministry of Environment Korea, 2017. Guidance on the use of algae removal materials for the installation, operation and distribution of algae removal facilities. (in Korean)
- Ministry of Environment, Ministry of Science, 2014. ICT and Future Planning, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, Supply of safe water protecting from algae, 22-27. (in Korean with English summary)
- Ministry of Environment Korea, National Institute of Environmental Research, 2017. Manual for operating the algae warning system. (in Korean)
- Ministry of Environment Korea, 2015. Occurrence and corresponding of algae (green algae) annual report in 2015, 3.
- Mohamed, Z. A. and Shehri, A. M. 2007. Cyano- bacteria and their toxins in treated- water storage reservoirs in Abha city, Saudi Arabia, *Toxicon*, 50(1) : 75-84.
- Moreno, I. · Repetto, G. · Carballal, E. · Gago, A. and Cameán, A. M. 2005. Cyanobacteria and microcystins occurrence in the Guadiana River (SW Spain), *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 85(7) : 461-474.
- Nam, S. H. · Koo, J. W. · Kim, E. J. · Park, J. R. · Jeon, S. L. · Park, J. H. · Mun, B. C. and Hwang, T. M. 2016. Investigating applicability of natural material based coagulant to control algae bloom, *KSWST Journal of Water Treatment*, 24(6) : 103-113. (in Korean with English summary)
- National Institute of Environmental Research, 2012. Occurrence and Management of the Green Tide caused by Cyanobacterial Bloom” Symposium of The Korean Society of Environmental Toxicology (2012.10), 75-77.
- Oh, H. S. · Kang, S. H. · Yang, S. C. · Nam, S. H. · Kim, E. J. and Hwang, T.M. 2018. Comparison of different type coagulants for the removal of harmful algae in pilot scale cyclonic- DAF system, *KSWST Journal of Water Treatment*, 26(4) : 69-80. (in Korean with English summary)
- Ometto, F. · Pozza, C. · Whitton, R. · Smyth, B. · Torres, A. G. · Henderson, R. K. · Jarvis, P. · Jefferson, B. and Villa R. 2014. The impacts of replacing air bubbles with microspheres for the clarification of algae from low cell-density culture, *water research*, 53 : 168-179.
- Rawat, I. · Kumar, R. R. · Mutanda, T. and Bux, F. 2013. Biodiesel from microalgae: a critical evaluation from laboratory to large scale production. *Appl. Energy*, 103 : 444-467.
- Wang, Y. · Zhuo, S. · Li N. and Yang, Y. 2011. Influences of various aluminum coagulants on algae floc structure, Strength and flotation effect, *Procedia Environmental Sciences*, 8 : 75-80.

- Weisburger, E. K. 1977. Carcinogenicity studies on halogenated hydrocarbons, *Environ. Health Perspect*, 21, 7-16.
- Yap, R. K .L. · Whittaker, M. · Diao, M. R., Stuetz, M. · Jefferson, B. · Bulmus, V. · Peirson, W. L. A. · Nguyen, V. and Henderson, R. K. 2014. Investigating dissolved air flotation performance with cyanobacterial cells and filaments, *Water Research*, 61 : 253-262.