

용담호소 내 Chlorophyll-*a*와 유기물 저감을 위한 부상기법 적용 연구

A Study for Application of DAF Technology to Remove Chlorophyll-*a* and Dissolved Organic Compound in Yongdam Reservoir

독고석^{1,*} · 이형집²

Dockko, Seok^{1,*} · Lee, Hyungjib²

1 단국대학교 토목환경공학

2 우석대학교 토목환경공학과

(2006년 3월 8일 논문 접수; 2006년 4월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Yongdam reservoir located in Jeollabuk-do has had a lot of concerns for its algal blooming since it has started to fill water. Many water utilities near Yongdam area use reservoirs even though they have some problems with certain algae that cause tastes and odors and clog filters. In this research, dissolved air flotation (DAF) technology was examined for feasibility for removal of algae. DAF can save the capital cost for its compactness, because its hydraulic loadings (overflow rates) are 10 times higher than sedimentation, and hydraulic detention times are much shorter, typically 5 to 15 minutes. As a result of this research, PAC is effective rather than Alum to DAF for pretreatment. Higher DOC plays an important role to change zeta potential negatively to inhibit destabilization of particle to coagulation. The length of pipeline to carry pressurized water into reactor does not affect reaction.

Key words: Dissolved Air Flotation, Algae, Chlorophyll-*a*, Dissolved Organic Carbon

주제어: 용존공기부상법, 조류, Chlorophyll-*a*, 용존유기물질

1. 서론

용담댐에서 담수가 시작된 이후로 수몰된 토사지역으로부터 인·질소 성분이 지속적으로 용출되어 수면에서 대량의 조류를 발생시켜 이로 인한 맛·냄새 발생문제가 지역적 환경오염의 문제로 확대되고 있

며, 나아가서 용담댐 전체의 수생 생태계까지 심각하게 교란시키고 있다. 조류는 성장 부산물인 AOM (Allogenic Organic Matter)이 응집침전에 있어 응집을 방해하고 floc의 침강성을 약화시켜 여과지 막힘 현상을 유발시킨다(Klute, 1995, 왕창근, 2002). 조류는 낮 동안에 동화 작용을 함으로서 호소수의 pH를 상승시키고, 세포 내 저장, 체외분지, 분해산물 방출

*Corresponding author Tel: +82-41-550-3516, FAX: +82-41-550-3520, E-mail: dockko@dku.edu (Dockko, S.)

등을 통하여 물에 맛, 냄새를 유발하는 물질을 발산시킨다(유재현, 2002). 이로 인하여 정수과정에 있어 응집작용을 방해하고, 낮은 밀도로 인하여 생성된 floc의 침전성을 저하시켜 floc의 재부상을 유발시킨다(최영균, 2002). 특히 용담댐에서 발생된 남조류 등이 발생된 호소에서 물놀이 등에 의한 피부 접촉시 또는 음용시 피부염 또는 복통·두통 등 건강상의 피해 등을 일으킨다(전주지방환경청, 2002).

이러한 조류의 난침강 특성으로 인하여 기존의 침강법을 이용한 저감방식으로는 제거에 한계가 있으며 부상분리기법을 도입의 필요성이 신중하게 검토되고 있다(Taki, 2004). 본 연구에서는 용담 호소수중에 함유된 조류 발생 지표인 chlorophyll-*a* 성분과 용존 유기물을 분석하여 이를 실험실에서 기존의 침강법이 아닌 부상분리공법을 도입하는 경우, 제거효율을 검토함으로써 향후 용담댐 녹조저감을 위한 부상공법의 적용성을 연구하는데 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 용담호소 내 각각 녹조유발물질의 변화추이를 분석하여 가장 심각하게 변화를 보이는 기간을 선택하여 조류를 직접 채취하여 녹조 및 유기

물에 대한 분석과 침전/부상실험을 실시하였다. 자연 시료의 특성과 chlorophyll-*a* 농도는 Table 1과 같으며, 실험실에서 용담호소수의 유기물 농도에 기초하여 각각의 특성에 맞도록 농도를 변화시키면서 인공 시료를 만들어 실험에 사용하였다. 인공시료내의 유기물 농도를 변화시키면서 이에 대한 탁도에 미치는 영향을 알기 위하여 휴믹물질(humic substance)을 수도수 250mg/L로 희석하여 4개 시료를 용담호소수와 유사하도록 만들어 사용하였다. 탁도 물질은 카올린을 주입하여 제조하였으며, 이러한 인공시료의 처리 전 특성이 Table 2에 나타나 있다.

실험에 사용된 응집제는 PAC(Poly-Aluminum Chloride)와 Alum($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$)을 사용하였고 응집제의 투입량은 Jar-tester 실험을 통하여 나온 값을 이용하여 인공시료 1000ml당 1.0ml를 투입하여 반응조안에서 응집을 유도하였다.

본 연구에서는 수질오염공정시험법을 기초로 다음의 장치와 방법을 사용하여 실험하였다. Fig. 1은 부상 실험이 가능하도록 아크릴 반응조로 제작되었고, 하단부엔 가압수를 주입시킬 수 있고 처리 수질을 측정할 수 있는 밸브를 설치한 DAF 회분식 반응조를 사용하였다. 원수의 상이한 수질상태하에서 가압탱크와 반응조의 연결관 길이변화에 따른 기포크기에 미

Table 1. 용담호 수질분석결과

	1회	2회	3회	4회	5회	6회
수온(°C)	25	25	25	25	25	24
pH	8.72	9.23	9.29	9.16	9.23	9.04
DO (mg/L)	4.18	5.13	5.52	5.62	5.13	5.04
T-N (mg/L)	0.33	0.33	0.33	0.38	0.33	0.22
T-P (mg/L)	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Chlorophyll- <i>a</i> (µg/ml)	6.75	7.87	10.14	11.81	7.87	4.55
전기전도도 (µmhos/cm)	104.00	112.00	113.00	116.00	112.00	99.00
DOC (mg/L)	3.51	3.78	3.67	3.62	3.78	3.86
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
탁도 (NTU)	2.70	2.47	2.45	2.65	2.47	2.04
SS (mg/L)	1.90	1.30	2.40	2.80	1.30	1.20

Table 2. 인공시료 구성

	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4
DOC (mg/L)	2.41	6.17	8.01	11.9
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.164	0.399	0.587	0.819
SUVA (L/cm/mg)	6.80	6.47	7.33	6.88
탁도 (NTU)	22.5	26.1	23.6	24.0

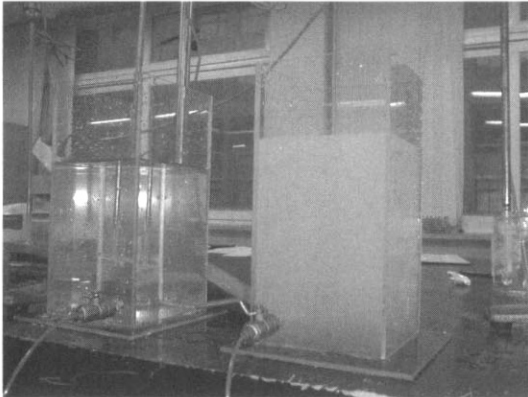
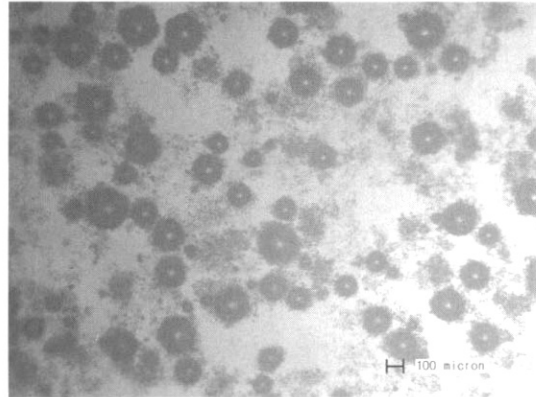


Fig. 1. 반응조 및 floc과 결합된 미세기포.



치는 영향을 알기 위하여 연결관 길이를 각각 1, 5, 10, 15m로 변화하면서 기포크기를 측정하였다. 또한 floc 크기에 따른 기포크기와의 반응효율을 알기 위하여 가압탱크의 압력을 2, 3, 4 기압으로 변화시키면서 제거율을 비교 검토하였다.

교반속도는 150 rpm에서 급속교반 2분, 50 rpm에서 완속교반 2분을 실시한 후 위의 실험에서 나온 각각의 밸브를 제어하면서 가압수를 투입하여 기포를 발생시킨 후 부상시킨 다음 가압수의 유입시점으로부터 5분을 경과 후 부상처리수의 탁도를 측정하여 처리효율을 유도하였다. 각각 탁도 측정은 3회를 실시하였다. 그리고 용담호소 원수의 부상과 침전처리에 요구되는 최적 응집계량을 산정하였고, DAF 처리 전후의 DOC, UV₂₅₄, SUVA, 탁도 물질의 제거능 분석을 실시하였다. 여기서 SUVA(Specific Ultra-Violet Absorbance)는 254nm에서 단위 유기물질(DOC, Dissolved Organic Carbon)당 흡광도 값을 나타내며, 수중의 유기물질 농도가 높을수록 값이 높아진다.

3. 결과 및 고찰

3.1 운전압력결정을 위한 예비실험

유기물이 변화할 때 수질변화에 따라 기포의 크기도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 예비실험으로서 가압탱크와 연결관의 길이를 1, 5, 10, 15m로 변화시키면서 발생하는 미세기포의 크기를 측정한 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 가압탱크 쪽 밸브는 완전히 개방된 상태이고, 연결관 끝부근에서만 밸브개방을 조

절하면서, 연결관 길이만을 변화시킨 실험으로서 최종 유출전에 연결관내부는 가압탱크의 압력이 거의 유지되었다. Fig. 2의 결과를 보면 회수수내에 유기물이 함유되어 있더라도 연결관 길이 변화에 따른 발생 기포 크기에는 큰 영향이 거의 없음을 알 수 있었으며, 이는 압력만 그대로 유지된다면 결국 연결관도 일종의 압력탱크와 같은 역할을 한다고 사료된다. 가압탱크의 운전압력은 DAF에서 일반적으로 4~5기압을 사용하고 있으나, 실제로 저압상태하에서의 운전 효율저하 및 그 원인에 대한 규명이 불확실하게 이루어져 왔다. 이는 저압상태하에서 발생하는 미세기포의 크기에 대한 정확한 측정과 분석자료의 부족이라 사료되며, 본 실험에서는 2~4기압의 가압상태에서 발생된 미세기포의 크기를 측정한 실험자료(Han et

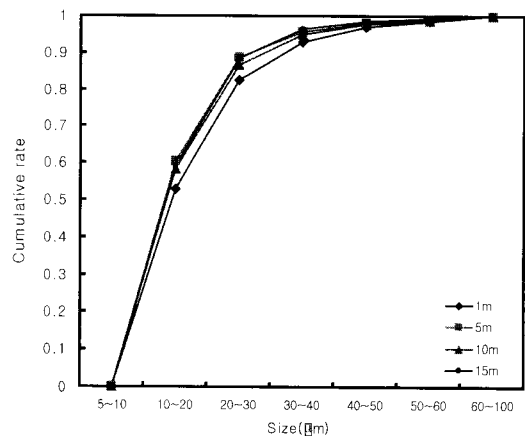


Fig. 2. 연결관 길이에 따른 bubble size 분포.

Table 3. 압력에 따른 반응효율

압력(atm)	반응효율(%)
2	96.0
2.5	96.3
3	98.1
3.5	97.6
4	98.4

al., 2002)에 근거하여 이 기압상태에서의 조류 flocc(거대 flocc)과의 반응효율을 검토하였다. 2~3기압의 저압상태하에서는 기포의 크기가 증가하게 되어 50~90 μ m 정도의 기포발생량이 증가하는 결과(Han et al., 2002)를 나타낸다고 하였으며, 4~6기압의 고압에서는 30~50 μ m 정도의 미세기포가 발생된다고 하였다.

Table 3에는 압력을 조정하여 발생하는 기포의 크기를 변화시킴으로서 거대 flocc에 대한 반응효율을 나타내고 있다. 결과를 보면 flocc의 특성상 거대한 flocc이기 때문에 미세기포와 거대기포가 모두 flocc과 반응하여 반응효율이 96% 이상을 나타내고 있다. 따라서 조류 flocc의 경우는 저압에서도 운전하더라도 DAF 반응효율의 저하가 발생되지 않는다.

3.2 응집제 종류 및 주입량 결정실험

본 연구를 통하여 용담호소수내 녹조, 유기물, 탁도 물질을 제거하는데 DAF 기법을 적용할 경우, Alum을 사용시에 요구되는 응집제량을 산정하기 위하여 아래와 같은 실험을 실시하였다. 일반적으로 전처리에 사용되는 응집제량과 처리효율과의 관계는 Fig. 3과 같다.

그러나 녹조가 많은 경우에는 많은 양의 응집제가 요구되지는 않으나, 용존유기물질이 다량 함유된 원수의 경우에는 상당히 많은 양의 응집제가 요구되기도 한다. 그 결과를 보면 탁도의 경우 주입되는 응집제량에 따라서 제거효율이 변화하는 행태를 보이고 있다. 즉, 응집제량이 8mg/L에서 최대를 제거능을 보이다가 그 양이 증가하면 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 탁도 물질의 특성이 응집제량에 따라 크기가 급격하게 증가하기 때문에 응집제량이 많아지는 sweep flocc의 단계로 들어가면 지나치게 커진 flocc이 미세기포의 충돌에도 불구하고 자체적인

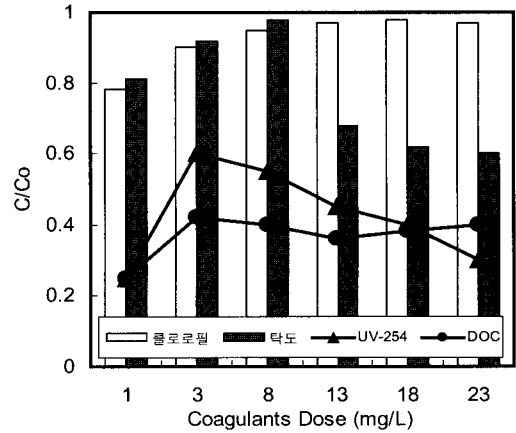


Fig. 3. 응집제 주입량 변화와 부상효율 비교.

무게로 침전하며 일부는 부상이 동시에 발생하는 혼재상태에 도달하여 결국 처리효율이 저하된다. 반면 chlorophyll-a의 경우에는 응집제량이 약간만 주입되어도 응집의 효과가 충분히 나타나고 flocc의 형태역시 매우 비중이 가볍고 상대적으로 크기가 커서 부상하는 기포와 충돌/부착작용이 매우 수월하게 일어나는 특징을 보이고 있다. 따라서 적은 응집제로 최대의 제거효과를 얻을 수 있다. 용존유기물질의 경우는 전술한 바와 같이 부상법으로 제거하거나 침전법으로 제거하거나 크게 차이가 없는 물질로서 전처리 단계에서 충분한 응집제를 주입함으로써 입자화하는 단계가 제거에 매우 중요하다. 이는 강화응집(enhanced coagulation)단계로서 이러한 전처리 이후에 기타 함유물질 예를 들면, 조류 혹은 탁도 성분의 함유도에 비추어 부상기법이 적합한지 침전기법이 적합한가를 선정할 필요가 있다. 본 실험결과를 보면 전체적으로 지나친 응집제의 사용은 부상법에서 그다지 효과가 없기 때문에 적합한 양을 사용하는 것이 바람직하다. 특히 Alum에 비하여 PAC가 탁도 및 조류 제거에 효과적이다.

3.3 용담호소수의 침전능 및 부상능 결과비교

용담호소의 원수가 응집제에 따라서 침전과 부상 공정에 보다 적합한 것인가를 알기 위하여 PAC과 Alum을 각각 사용하였을 때 chlorophyll-a, TOC, UV₂₅₄에 대한 침전능 및 부상능을 검토하였다. Fig. 4의 결과를 보면 용담 호소수를 시료로 하는 경우

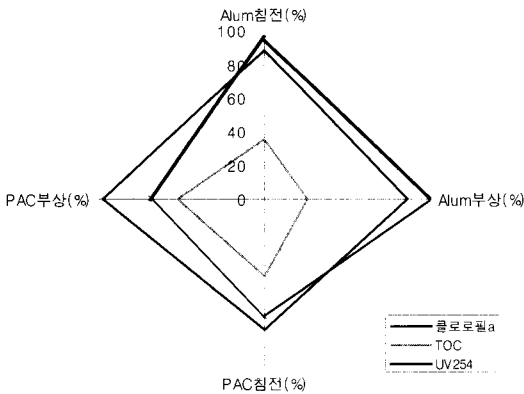


Fig. 4. PAC과 Alum에 대한 침전 및 부상능 비교.

chlorophyll-*a*에 대해서는 PAC 부상공정이 98%로서 가장 높았으나, PAC 침전공정은 80%로서 Alum 침전 및 부상에 비하여 낮은 효율을 나타내고 있다. 이는 조류의 특성상 부유성 성질이 큰데 비하여 비중이 낮아서 거대한 flocc을 형성하기 쉬워서 폴리머를 사용하더라도 침전효과가 저하되기 때문에 이러한 경우에 부상공정이 적합하다는 것을 나타내는 결과이다. Alum에 대하여는 부상공정과 침전공정이 모두 유사한 정도의 제거능을 나타내고 있다.

3.4 가압순환수의 순환비율과 응집제 주입량 결과검토

용담호소의 경우는 chlorophyll-*a* 농도가 계절별로 변화하는데 이때 DAF를 적용하는 경우 최적의 순환비율을 결정하는 것은 운전에 매우 중요하다. 왜냐하면 순환비율은 결국 펌프를 가압하여 가압용존수를 어느 정도 만들어야 하는 가를 결정하는 것으로 최종적인 동력비와 직접 관련이 되기 때문이다. 본 연구에서는 용담호소의 원수의 경우(chlorophyll-*a*가 함유되고 유기물이 존재하는 상황)의 순환비를 다르게 적용함으로써 순환비를 5, 10, 15, 20, 25, 30%로 증가시키면서 이때 물질에 따른 제거효율을 비교분석하였다.

Fig. 5의 결과를 보면, 탁도의 경우에 가압순환비가 10% 이상이 되면 90% 이상의 높은 제거율을 나타내고 있다. 이는 조류의 경우에 미세기포와 함께 결합되어 수면위로 상승하는 부상성이 높기 때문에 적은 순환비로도 제거가 이루어지기 때문이며, 용담호소의

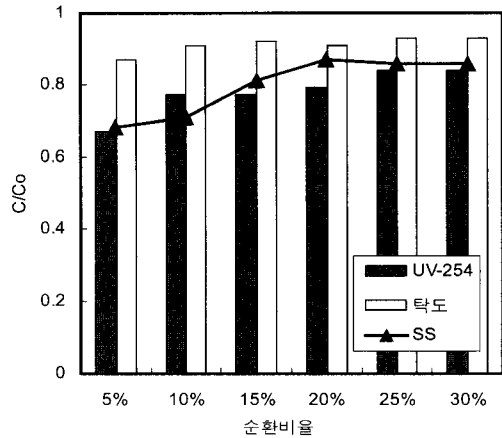


Fig. 5. 순환비에 따른 제거능.

경우에도 일반적인 DAF공정에서 사용되는 가압순환비율은 10~15% 내외로 운전하는 것이 적합하다고 할 수 있다. 이러한 결과는 부상기법이 적은 순환비율, 적은 동력비로도 높은 효율을 얻을 수 있다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다. 반면 SS 및 UV₂₅₄의 경우는 순환비가 증가함에 따라서 함께 제거율도 상승하는 것을 나타내며 이것은 미세한 입자화된 유기물이 많은 순환량에 의하여 보다 많이 제거될 수 있기 때문이라고 설명될 수 있다. 본 실험결과에 따르면 조류가 많이 함유된 용담호소수의 경우에 약 10~15% 내외의 순환율을 가지고 운전하는 것이 가장 적절하다.

3.5 DAF 처리 전후의 DOC, UV₂₅₄, 탁도 물질의 제거능 분석

인공시료의 유기물량을 변화시키면서 이때 탁도 및 유기물에 대한 DAF 제거능을 나타낸 결과가 아래 Fig. 6~Fig. 9에 나타나 있다. 그 결과를 보면 DOC 농도가 높아짐에 따라서 탁도 제거율에 방해 작용이 발생되어 상대적인 제거효율이 저하되는 경향을 보이고 있다. 이는 수중의 용존 유기물량은 체대전위(zeta potential)을 증가시켜 일반적인 탁도가 -20~-30mV의 상태를 보이는 반면 용존물질이 많아질수록 -40~-50mV로 증가한다(Edzwald, 1983). 따라서 이를 전기적으로 중화시키기 위한 응집제가 많이 요구되며, 만일 더 이상의 응집제가 전처리에 투입되지 못하면 탁도제거율이 현저하게 저하되는 문제가 발생한다.

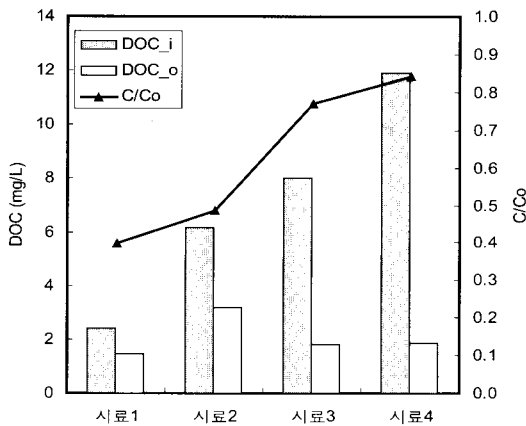


Fig. 6. DOC 제거능.

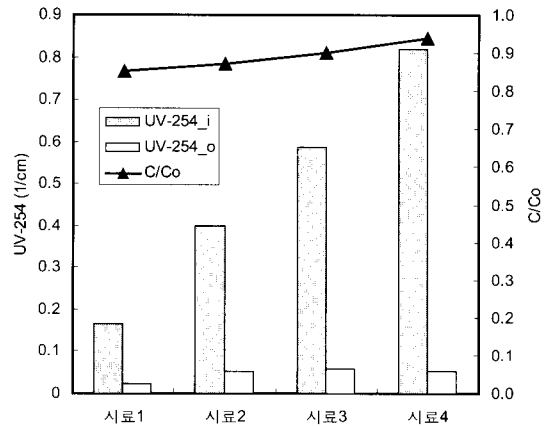


Fig. 7. UV₂₅₄ 제거능.

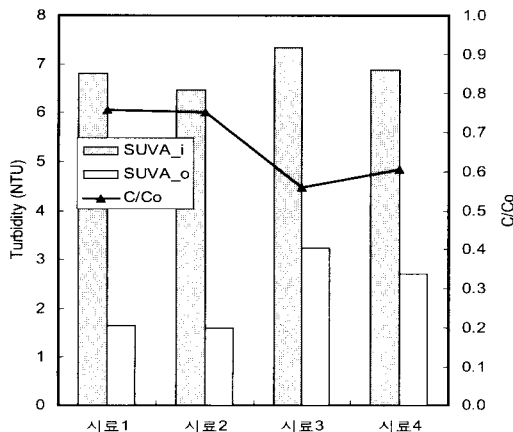


Fig. 8. SUVA 변화.

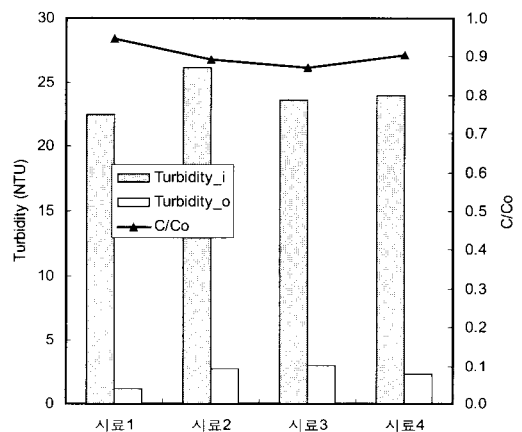


Fig. 9. 탁도 제거능.

다. 따라서 용존유기물량은 탁도 제거에도 직접적으로 영향을 미친다.

본 실험에서 나타난 결과 중 용존유기물량이 증가하면 오히려 제거율이 상승하는 것을 보여주는데 이는 실험실에서 최적의 응집조건을 맞추어 실험하였기 때문에 유기물 제거가 전반적으로 상승한 것으로 사료된다.

시료 4에 대하여 부상 처리법(2분 부상)과 침전법(50분 침전)을 적용한 결과는 탁도가 각각 90%, 94% 제거되었고 DOC는 84%, 86%가 제거되어, 부상법과 침전법이 제거능 면에서는 큰 차이 없이 나타내었지만, 체류시간을 고려하면 같은 처리능을 확보하는데 부상법이 매우 효과적이라 할 수 있다. 단지 체류

시간이 확보되는 상황에서는 처리원수에 조류가 아닌 일반적인 용존 유기물질만이 많이 함유되어 있는 경우에는 침전법도 효과적이라 할 수 있다. 유기물이 변화할 때 수질변화에 따라 기포의 크기에도 영향을 미칠 수 있다.

4. 결 론

1) 용담호소수를 시료로 하여 각각 탁도, chlorophyll-*a*, UV₂₅₄, TOC에 대하여 그 효능을 검토한 결과, chlorophyll-*a*의 제거능은 PAC를 이용한 부상법이 Alum을 이용한 부상법보다 효능이 높았고, 유기물 제거능은 Alum을 이용한 부상법이 PAC를 사

용한 경우보다 유리하게 나타났다.

2) 용담호소의 경우에도 일반적인 DAF 공정에서 사용되는 가압순환비율은 10% 내외로 운전하는 것이 적합하다고 할 수 있다. 반면 SS 및 UV₂₅₄의 경우는 순환비가 증가함에 따라서 함께 제거율도 상승하는 것을 나타내며 이것은 용존유기물이 입자화되어서 미세기포와 반응하면서 보다 많이 제거될 수 있기 때문이다.

3) 유기물에 변화에 대한 탁도제거능 실험결과를 보면 유기물량이 증가하면 오히려 제거율이 상승하는 것을 보여주었고, 침전의 경우에도 유기물량이 많더라도 제거효율이 DAF 처리결과와 크게 차이 없이 높은 결과를 보이고 있다. 용담호소수의 유기물 함량이 크게 높지 않은 경우에는 부상법이 침전법에 비하여 효과적이라 할 수 없다.

4) 호소수내 함유된 탁도 물질을 제거하는 경우 용존 유기물량에 따라서 요구되는 응집제량에 매우 밀접하게 연관되어 변화하는 행태를 보이고 있다. 미세기포의 충돌에도 불구하고 자체적인 무게로 침전하며 일부는 부상이 동시에 발생하는 혼재상태에 도달하여 결국 처리효율이 저하되게 된다. 반면 chlorophyl-*a*의 경우에는 응집제량이 약간만 주입되어도 응집의 효과가 충분히 나타나고 floc의 형태역시 매우 비중이 가볍고 상대적으로 크기가 커서 부상하는 기포와 충돌/부착작용이 매우 수월하여 높은 처리율을 보인다. 용존유기물질의 경우는 전술한 바와 같이 부상법으로 제거하거나 침전법으로 제거하거나 크게 차이가 없는 물질로서 전처리 단계에서 충분한 응집제를 주입함으로써 입자화하는 단계가 제거에 매우 중요하다.

참고문헌

1. 왕창근, 이승근 (2002) 대청호 상수원수 중의 탁도, 유기오염물질, 조류 및 투입분말활성탄 제거를 위한 DAF 공정응용, *상하수도학회지*, **16**(5), pp. 553-561.
2. 유재연, 유희엽, 권병채, 문동연, 박정재, 박수, 오양수 (2002) 용담댐 유역의 수질과 부영양화 예측에 관한 연구. 전주지방환경청, *환경소식*, 보도/해명자료.
3. 전주지방환경청 (2002) 용담호 조류예보제 실시계획, 용담댐 조류예보제 보도자료.
4. 최영균, 김규동, 김희준, 관중운, 정태학 (2002) 무기고분자응집제를 이용한 조류의 응집제거, *상하수도학회지*, **16**(5), pp. 596-604.
5. Aldrich, C., Feng, D. (2000) The effect of frothers on bubble size distributions in flotation pulp phases and surface froths, *Minerals Engineering*, **13**(10-11), pp.1049-1057.
6. Chen, F., Comez, C.O., Finch, J.A. (2001) Bubble size measurement in flotation machines, *Minerals Engineering*, **14**(4), pp. 427-432.
7. Edzwald, J. K. (1983) Coagulation-Sedimentation-Filtration Processes for Removing Organic Substances From Drinking Water, Control of Organic Substances in Water and Wastewater (B.B. Berger, ed.), EPA-600/8-83-011, Washington, D.C., U.S.A.
8. Han M.Y., Park Y.H. and Yu T.J. (2002) Development of new method of measuring bubble size, *Wat. Sci. & Tech.: Water Supply*, **2**(2), pp 77-83.
9. Kazuo Taki, Yoriumi Ishiyama, 독고석, 김학수 (2004) 부영양화 호소에서의 우점종 조류제거를 위한 DAF기술, *상하수도학회지*, **18**(2), pp. 247-253.
10. Mooyoung Han, Wontae Kim, Seok Dockko (2001) Collision efficiency factor of bubble and particle (α_{bp}) in DAF: theory and experimental verification, *Water Science & Technology*, **43**(8), pp. 139-144.
11. Seok Dockko, Mooyoung Han (2004) Fundamental characteristics of bubbles and ramifications for the flotation process, *Water Science & Technology*, **50**(12), pp. 207-214.