

정수처리에서 응집제 종류와 분리공정이 조류 제거에 미치는 영향

박홍석 · 이상윤

울산대학교 토목 · 환경공학부

(1999년 8월 20일 접수, 1999년 10월 29일 채택)

Effect of Coagulants and Separation Methods on Algal Removal in Water Treatment Process

Hung-Suck Park · Sang-Yoon Lee

Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the effect of coagulants and solid-liquid separation methods on algal removal in water treatment processes. Thus characterization of raw water quality in terms of turbidity, UV-254, KMnO_4 consumption, chlorophyll-a and correlation analysis of these parameters were conducted. In addition, the effect of commercial Al-based coagulants(Alum, PAC and PACS) on algal removal was studied by turbidity and organic removal, algal species removal, characteristic of pH drop and alkalinity consumption using laboratory jar tests.

Organic components including UV-254, KMnO_4 consumption, chlorophyll-a in case of algal bloom were highly correlated with turbidity and the correlation coefficients of UV-254, KMnO_4 consumption, chlorophyll-a with turbidity were 0.775, 0.674 and 0.623, respectively. In coagulation and sedimentation, the Al-based coagulants showed similar efficiency of organic and turbidity removal in low organic(KMnO_4 consumption below 15mg/l) and low turbidity(below 30NTU). However, PAC and PACS showed better algal removal than alum in high organic concentration(KMnO_4 consumption above 20mg/l) and high turbidity(above 100NTU) raw water conditions generated by high algal growth, which is considered to be due to the floc settleability. In comparison of sedimentation and flotation after chemical coagulation and flocculation, the removal efficiency of organic and turbidity were higher in case of alum dose with flotation than with sedimentation, while those were better in case of PAC and PACS with sedimentation than with flotation. Thus, Alum with flotation and PAC and PACS with sedimentation is recommended for efficient algal removal.

The dominant phytoplankton in raw water were *Microcystic* and *pediastrum simplex* and the removal efficiency of algae with sedimentation using alum, PAC and PACS were 27%, 45% and 22% respectively, while those with DAF showed 100% removal of phytoplankton and zooplankton.

Key Words : Algal Removal, Coagulants, Solid-Liquid Separation, Sedimentation, Flotation

요 약 문

본 연구에서는 정수공정에서 응집제 종류와 고액분리방법이 조류제거에 미치는 영향을 조사하였다. 따라서, 원수의 특성을 탁도, KMnO_4 소비량, UV-254, chlorophyll-a 등으로 파악하고 이들 수질인자간의 상관관계를 분석하였다. 또한 시판중인 Alum계열 응집제(Alum, PAC, PACS)가 조류제거에 미치는 영향을 실험실 차테스트를 이용하여 탁도 및 유기물제거, pH 저하특성 및 알칼리도 소모특성 및 개체수 제거율 등으로 연구하였다. 상관관계 분석에 의하면 유기물함목인 UV-254, KMnO_4 소비량, chlorophyll-a와 탁도의 상관계수는 각각 0.775, 0.674 및 0.623으로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다.

조류발생시 응집제 종류별 응집침전에서 유기물 제거특성은 조류의 농도가 적을 경우에는 유사한 효율을 보였으나 조류농도 증가에 의한 높은 유기물 농도(KMnO_4 소비량 20mg/l 이상)와 높은 탁도(100NTU 이상)에서는 PAC, PACS와 같은 무기고분자 응집제가 Alum보다 제거효율이 우수하였다.

조류변성시 응집공정을 거친 후 침전과 부상공정의 비교실험에서 부상분리공정을 사용할 경우 Alum이 모든 분석항목에서 고분자 응집체인 PAC, PACS보다 우수하였으며, 95% 이상의 제거율을 나타내었다. 반면에 PAC와 PACS의 경우는 침전공정이 부상공정보다 효율이 높았으며, KMnO_4 소비량의 경우 부상법 제거율의 2배 이상 효율을 보여주었다. 따라서 조류제거를 향상시키기 위해서는 Alum을 사용할 경우 부상분리, PAC, PACS를 사용할 경우 침전공정이 바람직한 것으로 나타났다.

대상원수에서는 남조식물문의 *Microcystic*와 녹조식물문의 *pediastrum simplex* 등 두 가지의 속이 다수 속으로 출현하였으며, Alum, PAC, PACS의 투입후 침전실험에서 27%, 45%, 22%의 조류개체수의 제거율을 보였으나, 용존공기부상법(DAF)을 적용한 경우에는 모든 응집제에서 동, 식물플랑크톤 모두가 100%에 가까운 제거율을 보여주었다.

주제어 : 조류제거, 응집제종류, 고액분리방법, 침전, 용존공기부상

1. 서 론

상수원의 오염원은 일차오염원과 이차오염원으로 나눌 수 있다. 일차오염원으로는 상류에서의 생활하수, 축산폐수, 공장폐수의 유입과 토지이용 등에 따른 탁질 및 유기물질, 영양염류, 중금속 등의 유입을 들 수 있으며, 이차오염원은 일차오염물 중 영양염류를 이용한 유기물의 증가로 나타나는 조류의 대량

증식인 부영양화가 여기에 해당된다¹⁾. 국내 대부분의 정수장은 청정한 원수에서 무기성 탁질을 제거 대상으로 하는 혼화, 플록형성, 침전, 여과 및 소독공정으로 이루어진 표준정수공정으로 설계 및 운전되고 있어 이와 같은 유기오염물질유입과 이차오염물질인 조류의 증식에 효과적으로 대처하지 못하고 있는 실정이다.²⁾

상수원에서 이차오염원인 조류의 대량증식은 단

순히 수체의 착색뿐만 아니라 2-MIB와 Geosmin 등의 체외효소분비로 맛과 냄새를 유발시키고, 독성 물질인 Microcystin 등과 같은 독소를 생성하여 건강상의 위협을 줄 수도 있어 수화(Water-Bloom)라는 표현을 유해조류의 대발생(Harmful Algal-Bloom, HAB)이라고 부르기도 한다.³⁾ 한편 조류의 증식은 수중의 CO₂를 감소시켜 pH가 상승되면서 응집제의 용해도를 증가시키고 flocc 형성을 저하시킨다. 또한, 조류자체도 밀도가 매우 낮아 응집된 조류 flocc의 침강성을 저하시키고, 침전된 flocc이 쉽게 재부상하는 등 침전공정의 효율을 크게 저하시키고 있다. 이와 같이 재부상될 슬러지는 침전지에서 여과지로 넘어가 여과지속시간을 크게 단축시키는 것으로 알려져 있다. 1998년도에 대청댐을 취수원으로 하는 대청수도에 규조류인 Synedra가 증식하여 여과지속시간이 5시간 이내로 단축된 보고가 있다.⁴⁾

국내의 경우 하천이나 호소의 부영양화가 심화되면서 상수원의 녹조현상이 빈발하고 있으며, 1990년 초에 조류의 독성도 알려지기 시작하여 처리에 대한 관심도 증가하고 있다. 조류 및 조류부산물을 제어하는 방법으로는 살조제를 살포하거나, 성충과 괴/공기주입, 그리고 유입수역의 관리 등과 같은 발생원제어와 염소, 과망간산 칼륨, 오존 및 이산화염소등을 기존 공정에 투입하여 산화하거나 활성탄 흡착 및 포기 등을 이용하는 정수처리공정 내에서의 제어가 있다. 현재 우리 나라에서는 조류번성시에 주로 염소로 산화시키거나 분말활성탄을 주입하여 대처하고 있으며,^{5,6)} 원수수질이 나쁜 4대 강 유역의 18개 정수장은 활성탄 및 오존을 중심으로 한 고도정수 처리시설을 도입하였거나 도입중에 있다.

현재, 호소 및 저수지수를 상수원으로 하는 많은 정수장에서는 계절에 관계없이 조류가 증식하고 있어 무기성 탁질을 처리대상으로 하였던 응집·침전과 같은 기존 정수처리공정에서 조류증식에 의한 유기성 탁질과 용존유기물질을 효과적으로 제어하기 위한 연구가 절실히 요청된다. 다행히, 소독/소독부산물(D/DBPs: Disinfection/Disinfection By Products)을 제어하기 위한 Enhanced Coagulation 개념이 보편화되면서 국내에서도 응집공정을 이용한 용존유기물의 제어뿐만 아니라 조류제어에 대한 연구가 최근 시작되고 있다. 전⁴⁾ 등은 대청댐의 취수원에서 여과지 폐색 원인종인 Synedra에 의한 여

과지의 부하를 효율적인 응집·침전공정으로 낮추기 위한 연구에서 응집제와 응집보조제의 종류 및 주입량에 따른 조류개체수와 탁도 등을 비교하여 Alum이 가장 우수하며, polymer를 0.25mg/l 사용하여 99%의 제거효율을 얻었다. 하⁵⁾ 등도 낙동강 원수를 이용하여 조류제거를 위한 활성규산의 혼합주입량과 전염소효과를 연구하여 활성규산이 첨가된 응집제가 잔류탁도와 침강속도면에서 효율이 증가함을 보였다. 이상의 연구는 조류의 특성이 저밀도인 점을 감안할 때, 응집과 분리공정을 함께 고려하지 못한 아쉬움이 있다.

본 연구는 부영양화로 조류증식이 높은 저수지수를 상수원으로 하는 정수장에서 조류제거를 향상시키기 위한 연구를 행하였다. 따라서, 본 연구에서는 조류의 특성을 감안하여 응집·침전 및 응집·부상 분리공정을 함께 검토하여 전체공정의 효율향상 방안을 모색하였다. 이를 위해 원수의 특성을 수질기준 측면과 정수처리 측면에서 검토하고 응집처리 가능성을 평가하였다. 응집제별 조류제거 효과는 응집제 주입량에 따른 탁질, 유기물 및 Chlorophyll-a와 조류개체수로 응집·침전효율을 평가하였다. 분리공정에 대한 평가는 응집제별로 주입량을 변화시키면서 응집한 후 부상분리하여 탁질, 유기물 및 Chlorophyll-a와 조류개체수를 응집·침전효율값과 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 응집침전 및 부상실험장치

응집제별 조류 및 부산물의 응집침전 제거효율은 응집시험조작을 프로그램하여 콘트롤할 수 있는 Flocculator 2000 Test를 이용하여 실시하였다. Jar-Test는 급속교반 400 rpm(30sec), 완속교반 40 rpm(10 min), 침전시간 10 min으로 실험하였다.¹⁵⁾ 부상분리실험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 투명아크릴 원형관과 알루미늄으로 제작하였으며, 가압조(pressure chamber)의 재원은 D=10cm, H=27cm, V=2ℓ이며, 부상조(flotation column)는 D=7cm, H=60cm, V=2ℓ이다. 또 부상조의 바

탁에는 가압수가 주입되도록 노즐을 설치하였고, 시료채취를 위해서 바닥에서 5cm의 지점에 port를 설치하였다. 가압수는 순수를 사용하여 순환비 10~30%로 주입하였고 compressor를 이용하여 pressure chamber의 압력은 5 atm으로 조정하여 실험하였다. 고액분리공정의 효율평가는 Jar-test기를 사용하여 응집제 주입후 침전시킨 후 상정수를 채취하여 응집침전수로 하였고, 같은 원수를 사용해서 동일한 응집제를 투여하여 급속교반 시킨 후 Fig. 1의 장치를 이용하여 부상시킨 실험수를 응집부상수로 하여 비교분석을 하였다. 부상실험의 조건은 기초실험을 통해서 얻어진 순환비 10%, 부상시간 10min으로 하여 실험하였다.¹⁶⁾

2.2. 측정항목 및 방법

원수의 수질과 처리수는 일반 정수처리 수질기준 항목인 탁도, pH, 알칼리도, KMnO₄ 소비량과 대체

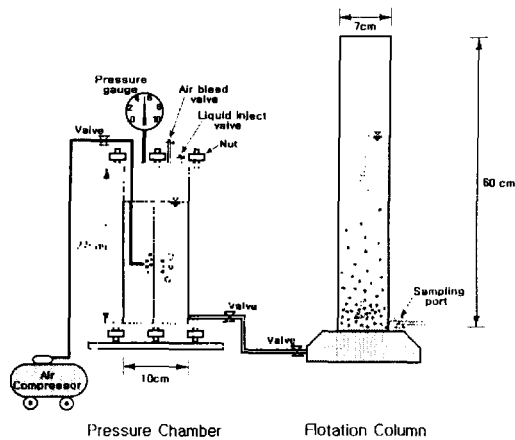


Fig. 1. DAF(dissolved air flotation) experimental system.

유기물 측정항목으로 UV-254도 병행하여 측정하였다. 또한 조류의 농도를 측정하기 위하여 Chlorophyll-a외에도 plankton 및 bacteria도 조사하였으며, 측정방법은 아래와 같다.

2.2.1. Chlorophyll-a 농도 측정

Chlorophyll-a 농도 측정법은 아세톤용액으로 클로로필 색소를 추출하여 UV Spectrophotometer로 663nm, 645nm, 630nm, 750nm에서 측정하여 Chlorophyll-a량을 계산하는 방법을 사용하였다.⁷⁾

2.2.2. 조류개체 분석^{8~10)}

시료들을 counting chamber에 0.1ml씩 떨어뜨려 cover glass로 덮어 현미경으로 계수한다. 이것을 각 시료마다 3회 계수한 뒤 평균값을 구하며, 평균값은 각 종에 대한 것이다. 이렇게 계수한 평균값에 ml당 개체수로 환산하기 위해서 10을 곱하여 조류개체수를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수수질

조류제거를 위한 최적 약품과 주입률에 따른 효과를 파악하기 위한 실험은 7, 8월에 조류가 최대로 성장하였을 때 실시하였으며, 4회 측정된 울산시 선암호의 원수의 수질은 Table 1과 같다. 표에서와 같이 수온은 27~31.6℃, pH 9.19~9.99, 탁도 30~194NTU, 알칼리도 29.0~50.4mg/l, KMnO₄ 소비량 13.3~32.8mg/l, Chlorophyll-a는 36.9~466μg/l로 각각 나타났다.

Table 1. Characteristics of raw water in SunAm lake during algal bloom

No	Items	Temp. (°C)	pH	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/l)	KMnO ₄ consumption (mg/l)	UV-254 (cm ⁻¹)	Chlorophyll-a (μg/l)
1		31.2	9.3	77	39	23.07	0.21	58.8
2		27	9.19	120	50.4	32.8	0.253	124.2
3		31.6	9.52	30	29	13.29	0.163	36.93
4		30.4	9.99	194	45	25.86	0.323	465.88

Table 2. Correlation coefficients between the variables of analyzed component

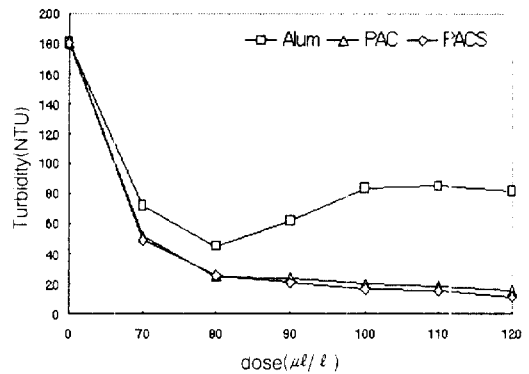
	Turbidity	KMnO ₄ consumption	UV-254	Chlorophyll-a
Turbidity	1			
KMnO ₄ Consumption	0.6736	1		
UV-254	0.7749	0.9705	1	
Chlorophyll-a	0.6299	0.1581	0.238	1

Table 2는 수질자료간의 상관성을 파악하기 위해 탁도, KMnO₄ 소비량, UV-254, Chlorophyll-a의 상관관계를 표로 나타낸 것이다. 이 표에 의하면 조류에 의하여 유발되는 탁도는 UV-254와 상관계수가 0.775로 가장 높은 상관성을 보였으며, KMnO₄ 소비량 및 Chlorophyll-a와도 0.674, 0.623으로 양호한 상관관계를 보여주고 있다. 특히, UV-254와 KMnO₄ 소비량은 0.97로 매우 높은 상관관계를 보여줌에 유기를 항목을 잘 나타내 주었다. 그러나 조류의 양을 나타내는 Chlorophyll-a와 KMnO₄ 소비량과 UV-254와 같은 용존성 유기물과의 상관성은 0.158 및 0.238로 매우 낮게 나타났다. 이는 Chlorophyll-a가 탁도와 높은 상관관계를 보여줌을 고려할 때 조류개체를 나타내는 인자를 용존물질로 보는 것이 적합하지 않음을 보여주는 것이다.

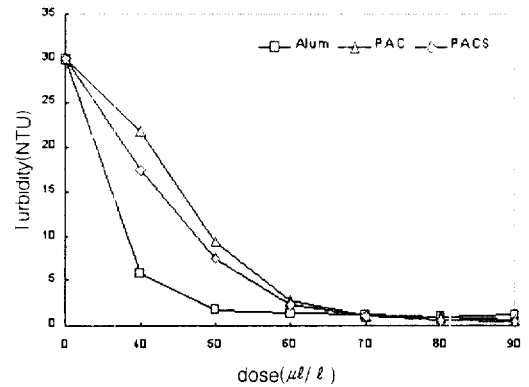
3.2. 응집제별 조류의 응집·침전 특성

3.2.1. 탁도제거

Fig. 2는 조류발생으로 야기되는 고탁도와 저탁도를 대상으로 응집제의 종류와 주입량에 따라 탁도제거 특성을 나타낸 그래프이다. Fig. 2(a)에서와 같이, 조류의 대량발생으로 원수탁도가 180 NTU인 고탁도의 경우, Alum이 PAC와 PACS 보다 모든 구간에서 처리수의 잔류탁도가 높게 나타났으며, 최적점인 80 mg/l를 중심으로 잔류탁도가 증가하는 전형적인 탁도제거 특성을 보여주었다. 그러나, 무기고분자 응집제인 PAC와 PACS는 응집제의 주입량이 80 mg/l 이상 증가하여도 잔류탁도의 증가가 없어 탁도관리가 용이함을 보여주고 있다. Fig. 2(b)는 초기탁도가 30 NTU인 저탁도의 응집특성을 보여주는 것으로 이 경우는 Alum과 무기고분자 응집제인 PAC 및 PACS 모두가 주입량의 증가에 따라 잔류



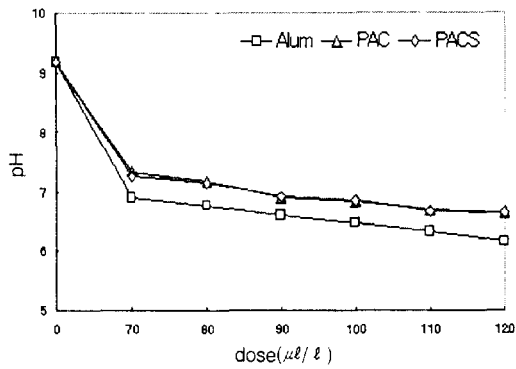
(a) high turbidity



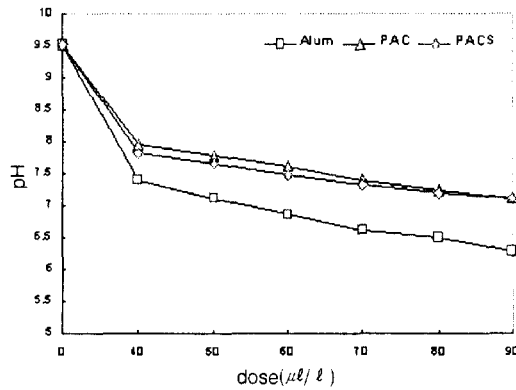
(b) low turbidity

Fig. 2. Residual turbidity with different coagulants and doses.

탁도가 감소하다가 안정화되는 비슷한 탁도제거 특성을 보여주고 있다. 특이한 것은 저탁도인 경우, Alum이 더욱 효과적이었으며, 응집제 주입량의 70 mg/l 이상인 경우 Alum과 PAC 및 PACS의 잔류탁도가 비슷하였다. 저탁도의 실험결과는 전⁵⁾ 등이 여과지폐색의 원인종인 Synedra를 대상으로 한 실험에서 Alum이 가장 우수하였다는 결과와 일치하고 있으나, 고탁도인 경우도 함께 고려할 경우, 조



(a) high turbidity

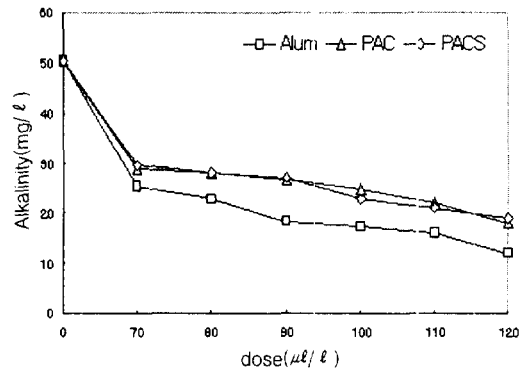


(b) low turbidity

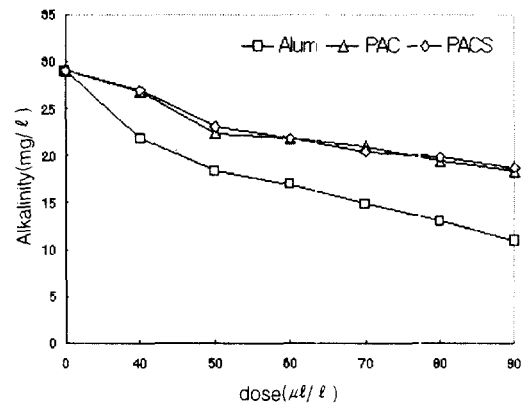
Fig. 3. Characteristics of pH drop in high and low turbidity water.

류발생에 유발되는 탁도는 조류의 종과 탁도유발 정도에 따라 최적응집제가 상이함을 실험적으로 보여 주었다고 할 수 있다.

실험기간동안 원수의 pH는 조류의 발생으로 인해서 9~10 정도로 나타났으며, 응집제 주입량의 증가에 따라 pH와 알칼리도가 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 감소하는 것으로 나타났다. 콜로로필-a 농도가 100μg/l 이상 발생하였을 경우 Fig. 4를 이용하여 각 응집제 1μl/l 당 알칼리도 감소 폭을 계산하여 보면 PAC의 경우 0.157 ppm을 보여 주었고, PACS는 0.182 ppm, Alum 0.222 ppm이 강하하는 것으로 나타났다. 따라서 조류의 증식으로 유발되는 탁도를 제거하기 위한 응집제의 선정시 원수의 조류의 종과 탁도범위 및 pH 저하 특성과 알칼리도 소모특성을 고려하여 응집제 종류와 주입량이 결정되어야 한다고 판단된다.



(a) high turbidity

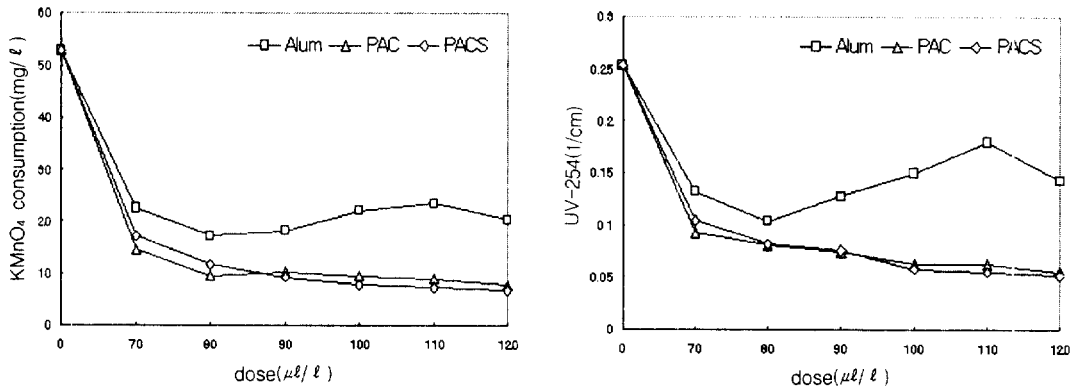


(b) low turbidity

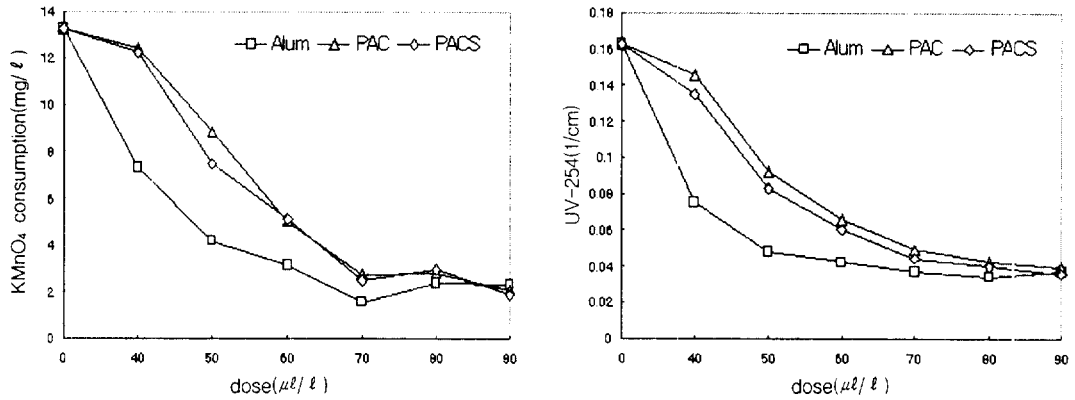
Fig. 4. Characteristics of alkalinity consumption in high and low turbidity water.

3.2.2. 유기물 제거

조류발생시의 응집제별 주입량에 따른 유기물 제거는 KMnO₄ 소비량과 UV-254를 이용하여 측정하였으며, Fig. 5에 그 결과를 도시하였다. KMnO₄ 소비량의 경우, 원수의 KMnO₄ 소비량이 20mg/l 이상일 때 PAC나 PACS는 비슷한 경향을 보였으며 Alum은 처리효율이 탁도에서와 마찬가지로 상당히 떨어지는 것으로 나타났다. 반면 원수의 KMnO₄ 소비량이 15mg/l 이하일 경우에는 PAC와 PACS에 비해서 Alum의 처리효율이 상당히 우수함을 알 수가 있었다. UV-254는 KMnO₄ 소비량과 유사한 경향을 보여주어 KMnO₄ 소비량과 UV-254 모두 유기물 특성을 나타내는 인자로 상관성이 큼을 보여 주었다. 따라서 조류농도 증가시 KMnO₄ 소비량이 높지 않을 경우에는 Alum이 유리하며, 조류농도가 높



(a) high organic concentration



(b) low organic concentration

Fig. 5. Effect of coagulants on organic removal with sedimentation.

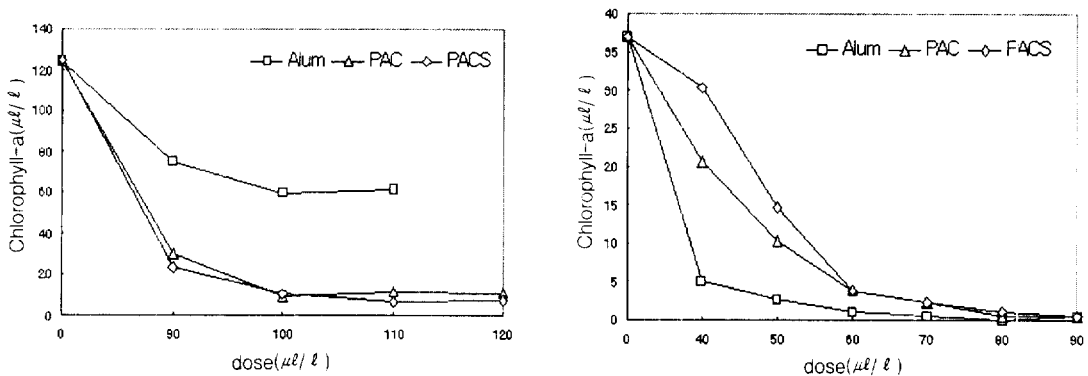


Fig. 6. Effect of coagulants on algal removal with sedimentation.

은 경우는 Prepolymerized된 PAC와 PACS가 유리한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 응집제의 종류와 투입량에 따른 조류 제거효과를 파악하기 위하여 조류의 지표로 사용되고

있는 클로로필-a의 농도를 이용하여 제거효율을 평가하였다.

그림에서와 같이 클로로필-a로 나타난 조류의 제거효율은 탁도제거율과 유사한 형태를 보여주어, 조

류번성시 Chlorophyll-a의 제거가 조류증식으로 나타나는 탁도, 유기물제거와 직접관계가 있음을 보여 주었다.

3.3. 분리공정에 따른 조류제거효율

3.3.1. 유기물 및 탁도제거 효율

본 실험에서는 저밀도인 조류를 효과적으로 제거하기 위한 방안으로 응집제별 응집침전과 응집부상법을 사용하여 조류제거공정의 효율을 비교하였다. 응집부상법의 최적조건을 알아보기 위해서 녹조현상이 발생한 선암저수지의 원수를 사용하여 Jar-test를 통해 각 응집제를 100 μ l/l 투여시 최적의 조건을 보이는 것을 확인한 후, 가압조에 투입된 증류수를 순환수로 하여 순환비 10%에 대해서 실험을

하였다. 분리공정의 효율은 응집침전수와 응집부상수의 탁도, UV-254, KMnO₄ 소비량, Chlorophyll-a를 이용하여 Fig. 7에 비교하여 나타내었다.

Fig. 7에서 Alum은 모든 항목에서 응집부상처리의 효율이 95% 이상의 우수한 제거율을 나타내었다. 하지만 응집침전처리에서는 항목별로 차이는 있지만 20%~70% 정도의 효율을 나타내었다. 반면에 PAC와 PACS의 경우는 탁도, UV-254, Chlorophyll-a의 항목에서는 응집부상법과 응집침전법은 약 10% 정도의 효율차이를 나타내었으며, KMnO₄ 소비량 항목의 경우에는 응집침전법의 처리율에 비해서 응집부상법의 제거율이 50% 정도 밖에 발휘되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Edzwald 등의 연구에서 algae synthetic water (Chlorella vulgaris)에서 10⁸ cell/ml의 경우 pH 6.2~6.4, Alum 28mg/l로 부상 처리한 결과 순환

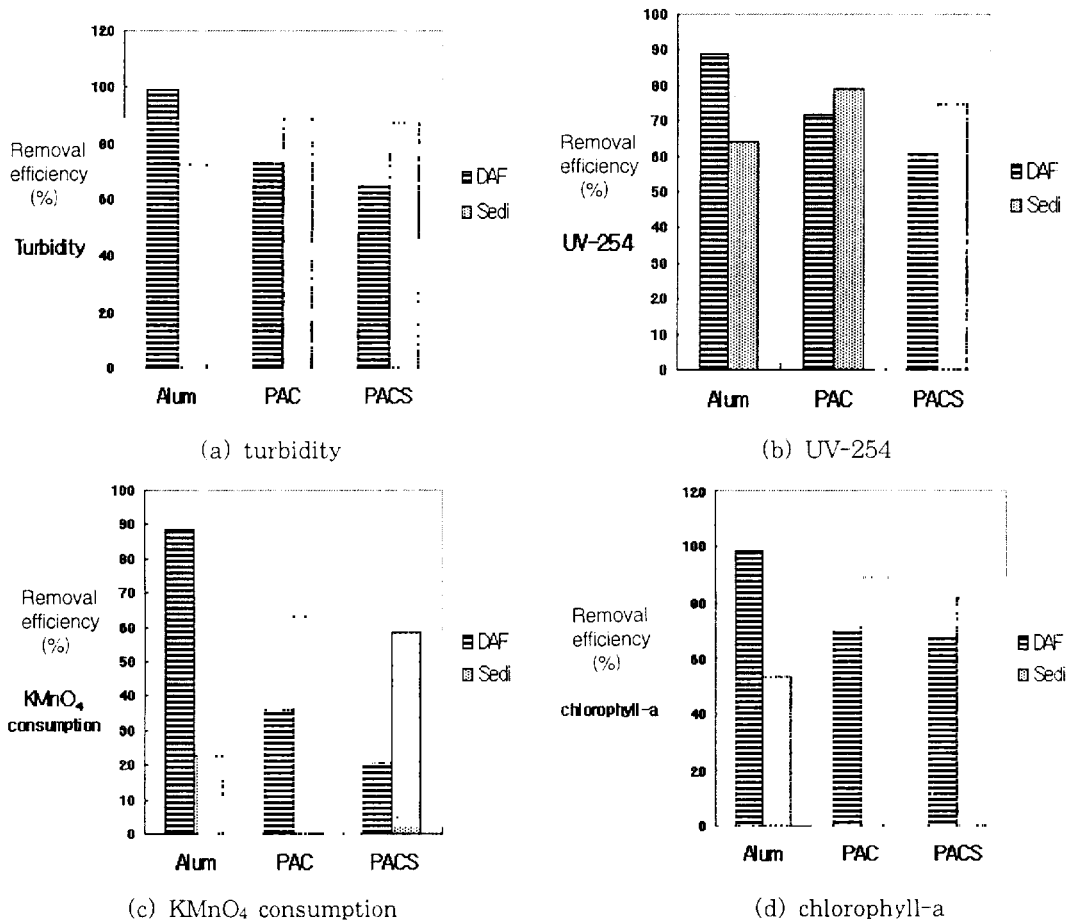


Fig. 7. Comparison of removal efficiency of DAF and sedimentation after coagulation.

비 2%로 탁도 1 NTU 미만, 조류입자의 경우에는 70% 정도가 제거되었고 순환비를 6% 이상으로 했을 때는 90% 이상이 제거되었으며,¹¹⁾ James 등은 조류가 대량번성 하였을 경우에는 분리공정에서 침전법보다는 부상법이 더 효과적이며 조류의 90% 정도가 제거될 수 있었다는¹²⁾ 연구결과는 본 실험결과와 상당히 일치하고 있다.¹³⁾

Alum이 PAC나 PACS에 비해서 응집부상법에서 우수한 제거율을 보인 것은 응집제 종류에 따른 성능실험에서는 최적 pH조건에서 Alum이 최고의 제거율¹⁴⁾을 나타내었다는 연구결과에서도 확인할 수 있었으며 이러한 결과는 Alum입자의 플록 밀도가 PAC나 PACS투입시 생성된 플록의 밀도에 비해서 상대적으로 저밀도이기 때문인 것으로 추정되며, 이것은 앞에서 확인한 바와 같이 응집침전법에서 높은 탁도와 클로로필-a의 농도를 나타내는 원수에서 Alum이 PAC나 PACS의 제거율에 크게 못 미치는 실험결과로 나타난 것으로 사료된다. 하지만 응집제에 따른 플록의 밀도에 관해서는 추후 여러 가지 실험을 통해서 보다 명확한 설명이 이루어져야 할 필요성이 있다. 이상의 실험결과를 종합해 보면 조류 제거시 Alum을 사용하면 응집부상공정이 응집침전공정에 비해서 상당히 효과적이며, 고분자 응집제인 PAC, PACS인 경우는 침전공정이 유리할 것으로 판단된다.

3.3.2. 조류 개체수 변화

조류 중에는 특히 독성을 띠고 있는 종이 있으며, 현재 우리 나라에서도 Microcystin을 분비하는 Microcystic이 상수원에 존재하고 있음이 보고되고 있다. 따라서 실험대상 수계에서 응집제의 투입과

분리공정에 따른 조류개체량 변화를 살펴보기 위해서 3종류의 응집제를 사용하여 실험하였다. 실험에 사용된 원수의 수질은 탁도가 194 NTU, 클로로필-a 농도가 465.9 $\mu\text{g}/\ell$ 였고, 응집침전법에서는 원수에 각 응집제 100 $\mu\ell/\ell$ 를 첨가하여 실험하였다. 물론 당량비를 고려하여 PAC와 PACS는 Alum당 100을 기준으로 환산된 양을 투입하였다. 공기부상분리법(DAF)에는 Alum 100 $\mu\ell/\ell$ 를 투입하여 급속교반(400rpm에서 30sec동안)을 한 후 DAF장치에서 분리하여 처리수를 얻었다. 이것을 응집침전법에서 얻어진 수질과 비교분석 하였다. Table 3과 Table 4는 원수와 응집제별 응집침전 및 Alum 100 $\mu\ell/\ell$ 주입후 부상분리한 처리수의 식물성플랑크톤과 동물성프랑크톤의 개체수를 요약 정리한 것이다.

Table 3 및 Table 4에서와 같이 식물성플랑크톤에서는 *Microcystic.*, *pediastrum simplex*, 동물성 프랑크톤으로는 *Euglypha sp.*가 다수속으로 출현하였다. 특히, 남조식물문인 *Microcystic*속은 수면에 청록색의 가루를 뿌린 것처럼 조류가 번식하기도 하고, 이 시기 원수의 pH는 9 이상으로 상승하거나 푸른 풀냄새를 띄기도 한다.¹⁰⁾ *Microcystic* 속의 대표종으로는 *Microcystic aeruginosa*, *Microcystic viridis*, *Microcystic wesenbergii*, *Microcystic incerta* 등이 있으며, 이 중에서 *Microcystic viridis*는 독성이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 외형적인 부분은 본 실험에 사용된 샘플 채취시 관찰된 현상과 거의 일치하였으며 결과 또한 유사한 경향을 보이는 것으로 나타나고 있다. 또 다른 발견 조류의 하나인 녹조식물군의 *pediastrum simplex*는 세포의 집락형태를 보이며 비운동성인 것으로 알려져 있다.

Table 3. Effect of coagulants for drinking water on phytoplankton removal

Sample	Item	Phytoplankton (cells no./ml)		Total cells (cells no./ml)	Removal rate (%)
		<i>Microcystic.</i>	<i>pediastrum simplex</i>		
Raw water (Sun-Am)		2640	86	2726	-
	Alum (100 $\mu\ell/\ell$)	1910	78	1988	27.07
	PAC (100 $\mu\ell/\ell$)	1420	82	1502	44.90
	PACS (100 $\mu\ell/\ell$)	2050	70	2120	22.23
	DAF (Alum 100 $\mu\ell/\ell$)	0	24	24	99.12

Table 4. Effect of coagulants for drinking water on zooplankton removal

Sample	Item	Zooplankton (cells no./ml)					Total cells (cells no./ml)	Removal rate (%)	
		<i>Colep hirtus</i>	<i>Euglena sp.</i>	<i>Euglypha sp.</i>	<i>Lecane sp.</i>	<i>Trichocerca sp.</i>			<i>Vorticella sp.</i>
Raw water(Sun-Am)		15	12	1005	10	10	8	1060	--
Alum (100 $\mu\text{l}/\ell$)		5	7	515	0	8	5	540	49.06
PAC (100 $\mu\text{l}/\ell$)		3	8	146	5	10	0	172	83.77
PACS (100 $\mu\text{l}/\ell$)		10	10	765	3	5	2	795	25.00
DAF (Alum 100 $\mu\text{l}/\ell$)		0	0	0	0	0	0	0	100

응집침전 및 응집부상분리에 의한 조류종의 개체 수 변화는 PAC, Alum, PACS의 순서대로 제거율을 나타내었는데 이것은 조류에 대한 지표로써 사용되고 있는 Fig. 6의 클로로필-a 농도변화의 경향과 잘 일치하였다. Table 4의 동물성플랑크톤의 경우에는 PAC, Alum, PACS의 순으로 제거율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 용존공기부상법(DAF)의 경우에는 동,식물플랑크톤 모두가 100%에 가까운 제거율을 보여주었다.

이상의 결과를 볼 때, 조류로 유발되는 탁도 물질의 제거를 위해서 Alum을 사용할 경우 응집침전보다는 응집부상분리가 적절하며 PAC와 PACS를 사용할 경우 침전공정이 바람직한 것으로 판단된다. 특히, 국내 많은 호소수를 상수원으로 이용하는 정수장의 연중 낮은 탁도와 조류번성시의 중 및 고탁도를 고려할 경우, 응집침전 공정보다는 응집부상공정의 적응성이 클 것으로 판단되며, 추후 수질에 따른 응집 및 분리공정에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 기존 정수공정에서 조류를 효과적으로 제거하기 위한 연구로 응집제 종류와 분리공정에 따른 조류제거정도를 탁도, 유기물 제거 및 조류개체 제거효과를 실험하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 대상원수의 조류번성시 수온은 27~31.6°C로 평균 30°C, pH 9.19~9.99로 평균 9.5, 탁도

30~194NTU로 평균 105NTU, 알칼리도 29.0~50.4mg/l로 평균 40.8mg/l, KMnO_4 소비량 13.3~32.8mg/l로 평균 23.8mg/l, Chlorophyll-a는 36.9~466 $\mu\text{g}/\text{l}$ 으로 평균 171 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 나타났다. 또한, 조류에 의하여 유발되는 탁도는 UV-254와 KMnO_4 소비량 및 Chlorophyll-a와도 양호한 상관관계를 보여주고 있다.

- 2) 조류발생시 응집제 종류별 유기물 제거특성에서 조류의 농도가 적을 경우에는 특별한 문제가 없었지만 조류농도 증가에 의한 높은 유기물 농도(KMnO_4 소비량 20mg/l 이상)와 높은 탁도(100NTU 이상)인 경우는 PAC와 PACS의 효율이 우수하였고, Alum은 제거효율이 저조하였다. 이러한 결과는 Alum과 무기고분자 응집제(PAC, PACS)를 사용하였을 때 생성되는 플록의 침강성이 상이하기 때문으로 판단된다.
- 3) 조류번성시 응집공정을 거친 후 분리공정의 비교실험에서 부상분리공정을 사용할 경우 Alum이 모든 분석항목에서 고분자 응집제인 PAC, PACS보다 우수하였으며, 95% 이상의 제거율을 나타내었다. 반면에 PAC와 PACS의 경우는 침전공정이 부상공정보다 효율이 높았으며, KMnO_4 소비량의 경우 부상법의 제거율의 2배 이상의 효율을 보여주었다. 따라서 조류제거를 향상시키기 위해서는 Alum을 사용할 경우 부상분리, PAC, PACS를 사용할 경우에는 침전공정이 바람직할 것으로 판단된다.
- 4) 조류번성시 원수의 조류개체량 실험에서 남조

식물군의 Microcystic와 녹조식물군의 pediastrum simplex 등 두 가지의 속이 다수 속으로 출현하였으며, 응집제를 투입하기 전후의 개체량 변화에서는 PAC가 다른 응집제에 비해서 조류개체수의 제거율이 우수하였다. 또 용존공기부상법(DAF)을 적용한 경우에는 동·식물플랑크톤 모두가 100%에 가까운 제거율을 보여주었다.

사 사

본 연구는 1997년도 선도기술개발사업(G-7프로젝트)연구개발비의 지원에 의하여 이루어졌으며 감사의 뜻을 표합니다. 또한 조류분석에 도움을 준 울산대학교 생명과학부 생물다양성실험실에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 조석주, 소명이, "서울시 취수장 원수의 조류 분포," 상하수도('95) 학술발표회 및 세미나, pp. 10~15(1995).
2. H. Konno, "Settling and Coagulation of slender type diatoms," *Wat. Sci. Tech.*, **27**(11), 231~240(1993).
3. 류재근, 박혜경, "Cyanobacteria가 생산하는 Microcystin의 재특성 및 그 제거기술 현황," *첨단환경기술*, **5**(12), 40~45(1997).
4. 전항배, 이영주, 이동주, 이병두, "여과지 폐색 조류제거를 위한 최적응집제 조합연구," *대한환경공학회지*, **20**(12), 1803~1809(1998).
5. 하기성, 정현석, 이동한, 우희철, "응집제에 의한 조류제거효과에 관한 연구," 정수공정에 관한 최신기술 세미나초록집, 부경대학교 부설 환경연구소, 부산, pp. 35~39(1997).
6. 하기성, 이성우, 이병선, "상수원수중의 조류(Synedra A.)의 응집제거," *춘계 학술발표회 논문초록집*, 대한환경공학회, 서울, pp. 316~317(1998).
7. 최규철, 김무식, 류근우, 황재석, *수질오염 공정시행법 주해*, 동화기술, pp. 415~416(1996).
8. 조규송 편저, *한국 담수 동물플랑크톤 도감*, 아카데미출판사(1993).
9. 심재형, *한국 동·식물 도감*, 제34권 식물편(해양식물플랑크톤), 국정교과서(주)(1994).
10. 정 준, *한국담수 조류 도감*, 아카데미출판사(1993).
11. James K. Edzwald and John P. Walsh, *Dissolved Air Flotation : Laboratory and Pilot Plant Investigation*, AWWA(1992).
12. James P. Malley, Jr. and James K. Edzwald, *Laboratory Comparison of DAF with Conventional Treatment*, *Research and Technology*, *Journal AWWA*(1991. 9).
13. P. Mavros and K. A. Matis, *Innovations in Flotation Technology*, Kluwer Academic Publishers, pp. 431~445(1992).
14. J. K. Edzwald, "Algae, Bubbles, Coagulants, and Dissolved Air Flotation," *Wat. Sci. Tech.*, **27**(10), 67~81(1993).
15. 박홍석, 이상윤, "정수장 응집공정 형상을 위한 수처리제의 최적사용," *대한환경공학회지*, **20**(10), 1435~1447(1998).
16. 김미정, 이병호, "정수처리공정의 침전법을 개선하기 위한 대체공정으로 용존공기부상법(DAF)을 사용할 때 여러 조건에 대한 처리효율 비교," *대한상하수도학회지*, **11**(4), 118~125(1997).