

담수조류의 대량번식에 따른 피해를 최소화하기 위한 녹조제거기 개발

한재호⁽¹⁾, 박우식⁽¹⁾, 김종현⁽¹⁾, 이영식⁽¹⁾, 노준혁⁽¹⁾, 김연규⁽¹⁾, 윤범상⁽²⁾

The development of algae removal system to minimize the damage of algae bloom on freshwater

by

J.H.Han⁽¹⁾, W.S.Park⁽¹⁾, J.H.Kim⁽¹⁾, Y.S.Lee⁽¹⁾, J.H.Rho⁽¹⁾, Y.K.Kim⁽¹⁾ and B.S.Yoon⁽²⁾

요 약

본 연구는 담수조류의 대량 번식에 따른 정수장의 여과막 막힘, 어류의 대량폐사 등 각종 피해를 최소화하기 위하여 응집제를 이용한 응집-여과공정을 녹조제거시스템에 적용하기 위한 것이다. 응집-여과 공정에서 최적의 응집상태를 결정하기 위하여 시료로는 낙동강 원수를 사용하였고 Jar test와 실험실용 반응기를 사용하여 알칼리도, 탁도, Chl-a, pH를 측정하였다. 응집시간, 응집제 주입량, 드럼필터 회전속도 그리고 Chl-a는 각각 5min, 5mg/l, 3rpm 그리고 90 $\mu\text{g/l}$ 의 조건에서 높은 조류제거율을 보였다. Alum을 사용하였을 때의 조류 및 탁도 평균제거율은 50~60%, 30~50%이었고, PAC는 Chl-a의 제거율이 Alum보다 약 20% 더 좋은 효율을 보였다.

Abstract

The study was performed to apply the algae removal system to coagulation-filtration process for minimize the damage to screen interruption of water treatment plants and died of fish by algae bloom on freshwater. Sample used Nokdong river water and Alkalinity, turbidity, chlorophyll-a and pH measured using Jar test and drum filter for coagulation-filtration process to determine optimum coagulation condition. A jar test apparatus and laboratory reactor were used in this study. The highest removal efficiency was observed when condition of flocculation time, coagulant dosage, drum filter rpm and chlorophyll-a concentration were to be 5min, 5mg/l, 3rpm and 90 $\mu\text{g/l}$, respectively. The average removal efficiencies measured of chlorophyll-a and turbidity using Alum were 50~60% and 30~50%, respectively. PAC was more effective than Alum in removal chlorophyll-a about 20%.

Keywords: algae removal system, coagulation-filtration process, PAC, Alum, flocculation, drum filter rpm, coagulant

(1) (주) 플러스 인터내셔널

(2) 울산대학교 수송시스템공학부

1. 서 론

우리 나라는 급속한 산업화와 경제성장으로 인해 각종 오염물질의 양적인 증가를 보였으며 이러한 오염 부하량의 끊임없는 증가로 인하여 자연환경은 자정능력의 한계에 시달리고 있으며, 호소나 저수지 등 모든 담수에서 부영양화로 인해 매년 녹조현상이 발생함으로써 수질을 급격히 악화시키고 있다.

녹조현상은 물이 고여있는 하천이나 호소에서 수온이 올라가고 물 속의 영양염류가 많아지게 되어 녹조류나 남조류가 과다 번식하는 현상이다.

녹조가 발생하면 수중에 산소가 부족하게 되고 정수처리 과정에서 여과지의 상층부에 녹조막을 형성하여 여과기능을 떨어뜨리며 녹조가 심하게 발생하면 수돗물에 풀 또는 곰팡이와 같은 냄새를 유발한다. 뿐만 아니라, 페인트처럼 점액질을 띠고 있어 어류의 아가미를 덮어 질식사키는 등 수질의 급격한 악화로 인해 수생태계를 파괴시키는 문제점을 야기시킨다.

금강환경관리청에 따르면 대청호에서 매년 여름철에 녹조가 발생되고 있는 점을 감안하여 1996년부터 녹조발생이 우려되는 지점의 수질을 주1회 이상 조사하여 녹조발생과 그로 인한 피해를 사전에 예방하고자 녹조예보제를 시행하고 있다. 대청호의 경우 연도별 조류발생일수는 96년 84일, 97년 7일, 98년 31일 동안 발생하였고 3년간 조류제거 및 정수처리 등을 위해 집행한 비용은 16억2천 만원에 달한다[2].

여름에 집중적으로 발생하는 조류인 남조류 중 일부는 독소를 함유하여 물놀이시 피부접촉에 의한 피부염이나 물을 마셨을 경우에는 복통·두통 등을 유발하는 것으로 알려져 있다.

현재 조류와 관련한 연구는 많은 연구기관에서 연구를 수행하고 있으나 조류의 물리적 또는 화학적 제거 등 조류의 제어에 관한 기술개발은 미약한 실정이며, 일부 개발된 조류제거기술들을 실용화하기까지는 2차오염에 대한 검증 등 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

녹조발생에 따른 피해를 최소화하기 위한 대책으로 조류발생으로 인한 피해를 최소화하기 위하여 1996년부터 팔당·대청·주암호를 대상으로 '조류예보제'를 실시하고 있으며[2], 조류발생시에는 활성탄 투입, 오존처리 등으로 정수처리를 강화하고 있다. 또한, 녹조방지대책으로 성층과피를 위한 심층폭기나 강제순환, 수심이 깊은 호소에서 영양염류농도가 높은 심층수의 방류, 영양염류가

농축되어 있는 저질토 준설, 생물학적 제어, 황산동 살포, 가압부상방법을 이용한 조류제거사업, 수초재배섬(부도) 설치, 운영, 조류제거선 도입, 운영 및 퇴적물 영향조사 등이 있다.

본 연구 개발의 초점은 저렴한 비용으로 대량의 녹조조류를 제거할 수 있는 녹조제거 시스템을 개발하여 보다 능동적이고 효과적으로 대처하고자 하는데 있다. 본 연구에서는 녹조생물이 황토물질과 결합하는 원리를 이용하여 녹조생물, 녹조원인물질 등을 흡착(응집)력이 강한 응집물질(응집제)과 반응하게 한 후 이 물질들을 큰 입자로 만들어 Drum Filter방식으로 단 시간에 많은 양을 여과처리 할 수 있는 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 시료 및 분석방법

시료로는 낙동강 원수를 사용하였고 물금취수장에서 취수하여 Jar test와 실험실용 반응기(드럼필터)를 이용하여 실험실 실험을 수행하였다.

Table 1 Raw water quality

Parameter	Raw water
Temperature(℃)	24 ~ 30
Alkalinity(CaCO ₃ mg/ℓ)	30 ~ 75
pH	6.5 ~ 8.5
Turbidity(NTU)	3.0 ~ 10.5
Chlorophyll-a(μg/ℓ)	11 ~ 90

Table 2 Experimental parameter and Analysis method

Parameter	Analytical method
Alkalinity	Titrimetry
pH	pH meter (ORION model 410A)
Turbidity	Turbidimeter (HF scientific.inc DRT 100B)
Chlorophyll-a	UV Spectrophotometer (SHIMADZU UV-1201)

본 실험에서 응집제는 PAC(Poly Aluminum Chloride)와 Alum을 증류수에 녹여 각각 5000mg/ℓ로 제조하여 실험하였고, Jar test실험은 시료 2ℓ를 사각형 시료용기에 채운 후 급속교반 30초(150rpm), 완속교반 5~15분(60rpm)을 수행하였다.

Jar test를 수행한 후 시료를 드럼필터에 통과시켜 나오는 유출수의 탁도와 Chlorophyll-a, pH를 측정하였다.

2.2 실험장치

2.2.1 Jar test기

본 기기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 6개의 교반 장치를 갖춘 것으로 Paddle의 크기는 2×6.2cm이며, rpm을 조절할 수 있다. 시료용기의 크기는 11×11×20cm인 사각으로 제작하였으며, 이 용기에 시료를 2ℓ 채우고 급속교반 및 완속교반으로 응집시킨 후 드럼필터에 통과시켰다.

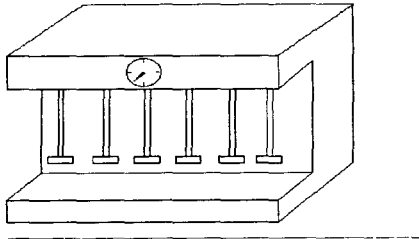


Fig. 1 Jar test

2.2.2 드럼필터

응집제를 주입하여 형성된 floc을 여과처리 하기 위해 드럼필터를 사용하였다. 본 실험에 사용된 드럼필터는 Fig. 2에 나타낸 개념도와 같이 본 연구진이 자체 제작한 장치로 120 μ m 망을 사용하며 세척수를 분사하여 망의 막힘 현상을 방지하고 슬러지는 슬러지 받이를 통해 배출된다.

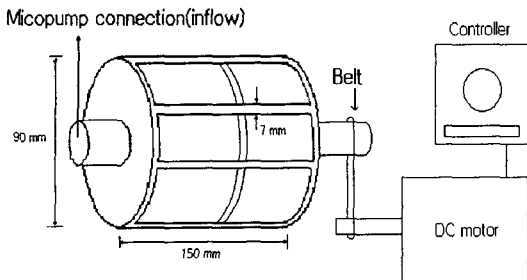


Fig. 2 Schematic diagram of drum filter

2.3 실험방법

2.3.1 실험순서

① 원수의 알칼리도, pH, 탁도, 클로로필-a 농도

를 측정한다.

- ② 원수를 2ℓ 준비하고 드럼필터 rpm을 조절한다.
- ③ 급속 및 완속교반시간에 따라 시간을 조절한 후 응집제를 주입한다.
- ④ 드럼필터로 여과를 한 후 탁도와 클로로필-a 농도, floc size를 측정한다.

▶ 알칼리도 측정

증류수와 원수를 각각 100ml씩 취한 후 지시약 (메틸레드)을 첨가한 후 황산으로 적정한다. 사용된 황산 ml양에 5배를 한 것이 알칼리도이며 알칼리도에 따라 응집제의 주입범위가 결정된다.

▶ 클로로필-a 농도 측정

채수한 원수(100ml)를 GF/C 여지로 여과한 후 아세톤(9+1) 10ml에 넣어 4℃ 어두운 곳에서 하룻밤 방치한 다음 20분간 원심분리한다. 원심분리 후 상등액의 일부를 취하여 층장 10mm 흡수셀에 옮겨 630, 645, 663, 750nm에서 흡광도를 측정한다.

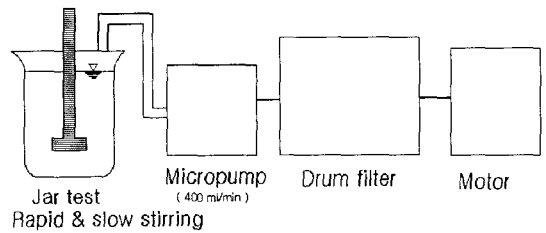


Fig. 3 Experimental process

2.3.2 저농도 조류가 포함된 원수에서의 실험조건

- ▶ 응집제의 주입량은 0mg/l, 5mg/l, 10mg/l, 15mg/l, 20mg/l 으로 하였다.
- ▶ 응집제의 종류로는 Alum과 PAC를 사용하였다.
- ▶ 응집제와 조류의 응집을 위한 완속교반시간으로는 5min, 10min, 15min으로 하였다.
- ▶ 저농도에서의 조류농도는 30~60(μ g/l)으로 하였다.
- ▶ 여과를 위한 드럼필터의 회전속도는 3rpm, 6rpm, 10rpm으로 하였다.

2.3.3 고농도 조류가 포함된 원수에서의 실험조건

- ▶ 응집제의 주입량은 0mg/l, 5mg/l, 7.5mg/l, 10mg/l 으로 하였다.
- ▶ 응집제의 종류로는 Alum과 PAC를 사용하였다.
- ▶ 응집제와 조류의 응집을 위한 완속교반시간으로는 3min, 5min, 8min으로 하였다.
- ▶ 고농도에서의 조류농도는 채수한 원수를 농축하여 80~90(μ g/l)으로 하였다.

▶ 여과를 위한 드럼필터의 회전속도는 3rpm, 6rpm, 10rpm으로 하였다.

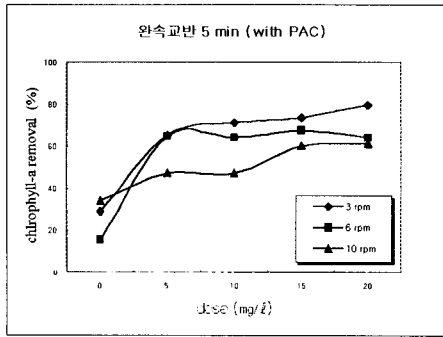
3. 실험결과 및 토의

3.1 저농도 조류가 포함된 원수를 이용한 실험

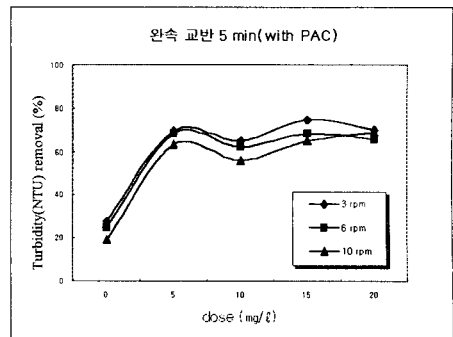
3.1.1 PAC 사용 시 Drum filter의 회전속도(rpm)와 완속교반시간에 따른 조류제거율

Fig. 4는 드럼필터 rpm변화에 따른 조류제거율을 나타내고 있는데 완속교반시간 5분과 15분에서는 낮은 rpm(3rpm)에서 대체적으로 좋은 제거율을 나타내었으며, 완속교반 10분에서는 높은 rpm (10rpm)에서 좋은 제거율을 나타내었다.

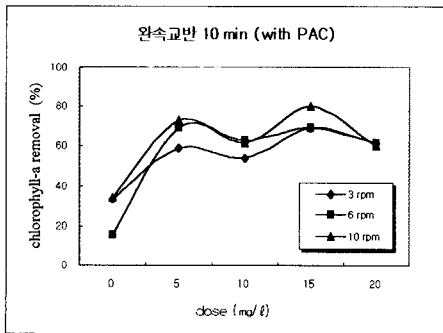
완속교반시간 5분에서 3rpm 과 10rpm 사이는 약 20%의 효율 차이를 보여, 드럼필터 회전 속도가 영향이 크음을 알 수 있었다. 완속교반시간이 15



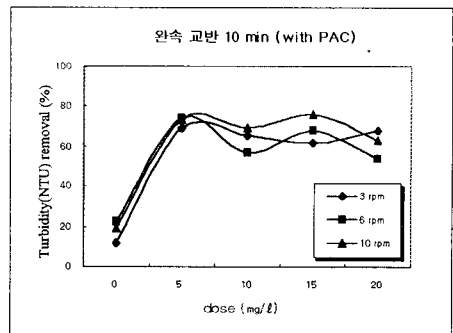
(a)



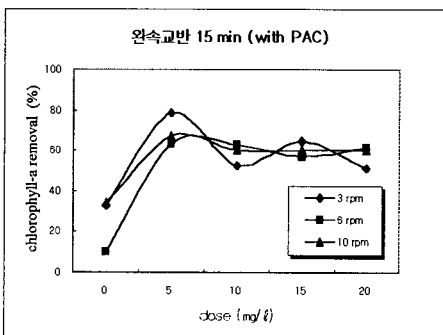
(a)



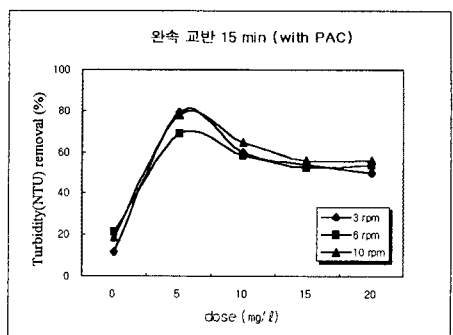
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 4 Removal efficiency of chlorophyll-a with drum filter rpm and flocculation time for PAC.

Fig. 5 Removal efficiency of turbidity with drum filter rpm and flocculation time for PAC

분일 때 적은 양의 응집제 주입으로 양호한 효율을 나타내었고, 교반시간 5분일 때는 응집제를 많이 주입할수록 효율 증가하였다.

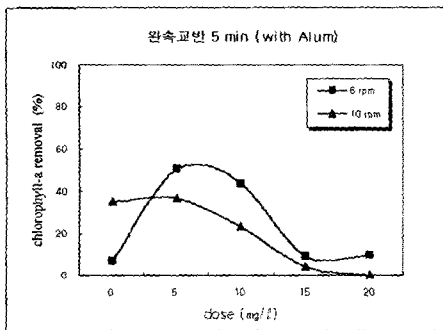
3.1.2 PAC 사용 시 Drum filter의 회전속도(rpm)와 완속교반시간에 따른 탁도 제거율

Fig. 5는 드럼필터 회전속도와 완속교반시간에 따른 탁도제거율을 나타내고 있는데 탁도제거율 역시 조류제거율과 비슷한 경향을 보이며, 최고 81%의 제거율을 나타내었다.

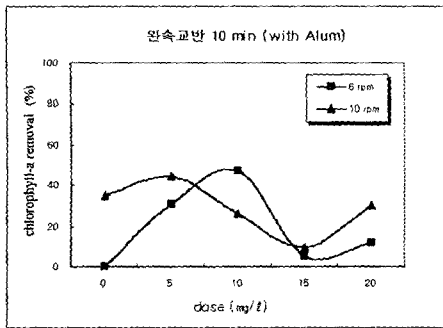
응집제 주입량이 0~5mg/l로 증가함에 따라 높은 제거율을 나타내나, 그 이후의 농도(5~20mg/l)에서는 비슷하거나 감소하는 경향을 보인다. 그러므로 응집제 주입량은 5mg/l 전후가 적당할 것으로 판단된다.

3.1.3 Alum 사용 시 Drum filter의 회전속도(rpm)와 완속교반시간에 따른 조류제거율

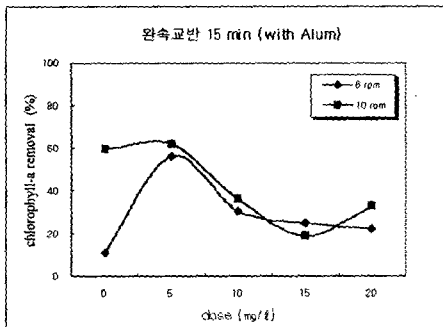
Fig. 6은 Drum filter의 속도(rpm)와 완속교반시간에 따른 조류제거율을 나타내며, 5 mg/l 이상의



(a)

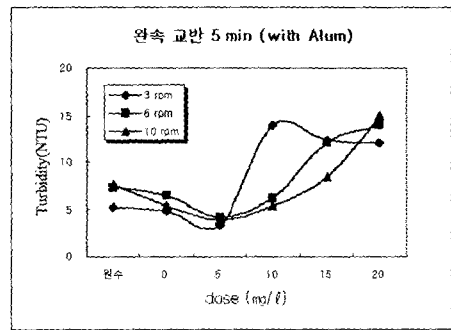


(b)

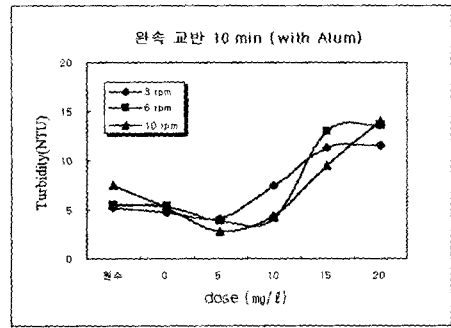


(c)

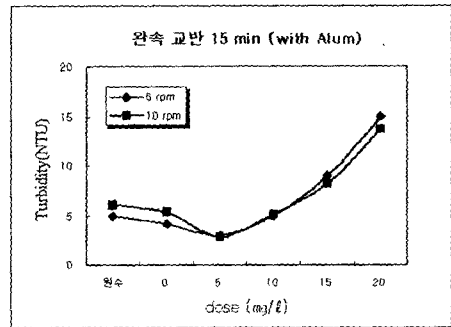
Fig. 6 Removal efficiency of chlorophyll-a with drum filter rpm and flocculation time for Alum



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Removal efficiency of turbidity with drum filter rpm and flocculation time for Alum

주입량에서는 효율이 안 좋음을 보여주고 있다. 응집제 주입량 5 mg/ℓ와 완속교반시간 15min에서 가장 좋은 50~60% 정도의 제거율을 보였다.

3.1.4 Alum 사용 시 Drum filter의 회전속도(rpm)와 완속교반시간에 따른 탁도 변화

Fig. 7은 Drum filter의 속도(rpm)와 완속교반시간에 따른 탁도 제거율을 나타내고 있으며, Alum 사용시는 응집제로 PAC를 사용 할 때보다 제거율은 떨어져 30~ 50%정도 제거됨을 보여주고 있다.

3.1.5 응집제별 조류제거율 비교

Fig. 8과 Fig. 9는 각각의 응집제에서의 평균 제거율을 나타내고 있는데, 같은 실험조건일 때 PAC가 Alum보다 약 20% 정도 조류제거율이 높음을 보여주고 있다.

3.2 고농도 조류를 포함한 원수

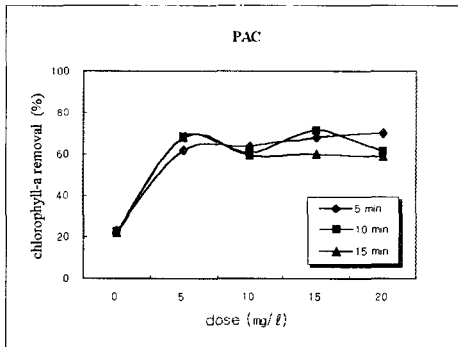
3.2.1 응집제 종류와 완속교반시간에 따른 제거율 비교

Fig 10은 Chlorophyll-a 농도를 85 ~ 90 $\mu\text{g}/\ell$ 로 조정하여 Drum filter 회전 속도 3 rpm으로 운전한 결과를 나타내고 있다. 응집제 주입량 5 mg/ℓ를 최적으로 봤을 때, 비슷하거나 Alum이 조금 높은 효율을 나타내었으며, 알칼리도가 낮을 때는 Alum 사용 시 pH강하 문제가 발생하였다.

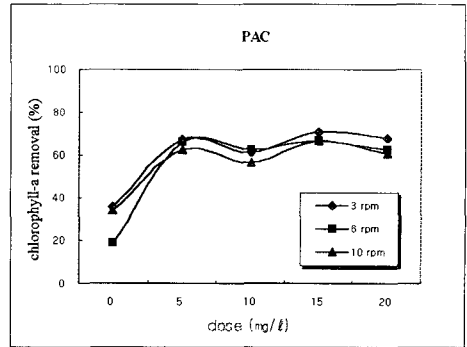
Fig. 11은 Chlorophyll-a 농도를 85 ~ 90 $\mu\text{g}/\ell$ 로 조정하여 Drum filter 회전 속도 6 rpm으로 실험한 결과이다.

3.2.2 드럼필터 회전속도와 교반시간에 따른 조류농도 및 탁도 제거율

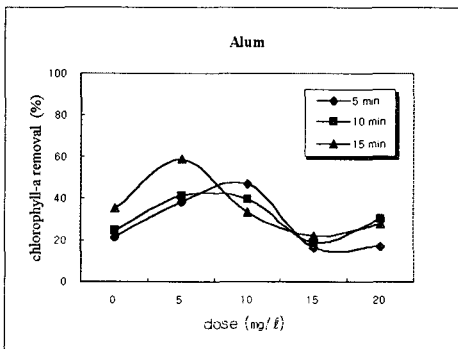
Fig 12에서 보는 바와 같이, 드럼 필터 회전속도



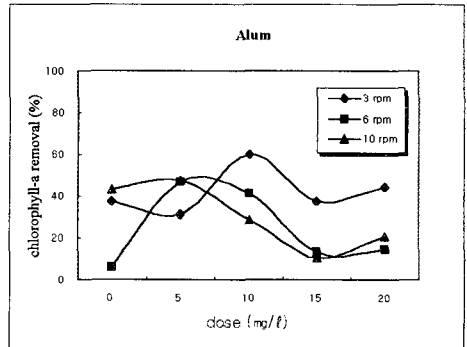
(a)



(a)



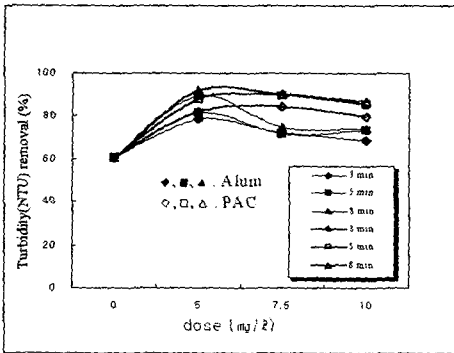
(b)



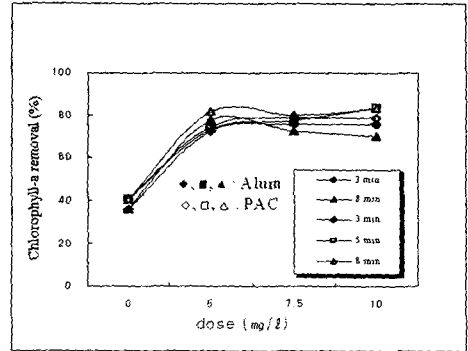
(b)

Fig. 8 Average chlorophyll-a removal efficiency for PAC and Alum

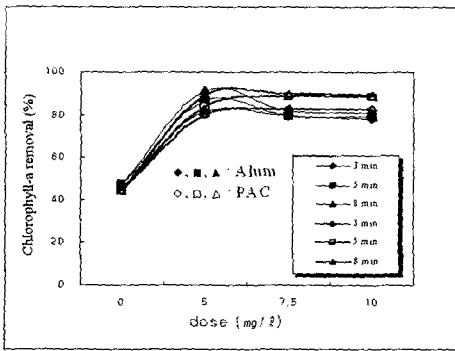
Fig. 9 Average chlorophyll-a removal efficiency for PAC and Alum



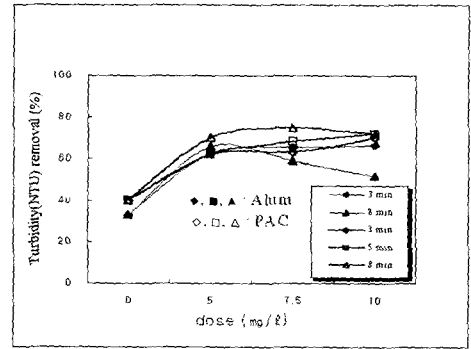
(a)



(a)



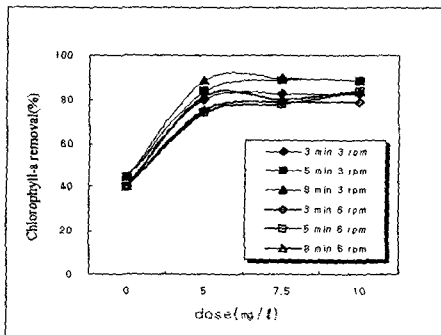
(b)



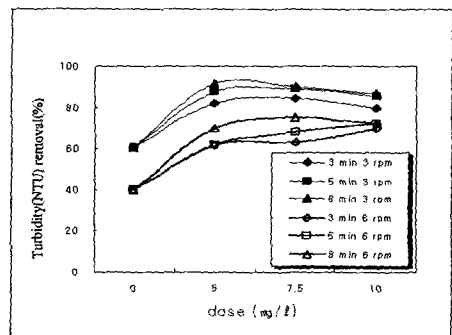
(b)

Fig. 10 Removal efficiency of chlorophyll-a and turbidity with coagulant and flocculation time

Fig. 11 Removal efficiency of chlorophyll-a and turbidity with coagulant and flocculation time



(a)



(b)

Fig. 12 Removal efficiency of chlorophyll-a and turbidity with drum filter rpm and flocculation time

가 증가함에 따라 각각의 조건에서 제거효율은 감소함을 나타내고 있어 드럼필터 10rpm은 실험을 수행하지 않았다.

본 실험에서는 완속교반시간을 5분 전후로 조작

하여 운전하였고, 조류가 저농도인 원수에서는 완속교반시간이 고농도에서보다 많이 필요하였다. 저농도, 고농도 모두에서 응집제 주입량별 제거효율 형태는 비슷하였다.

4. 결론

- 1) 응집제로 PAC를 사용 시 드럼필터 회전속도에 따른 조류제거 효율은 높은 rpm(10rpm)에서 보다는 낮은 rpm(3rpm)에서 좋은 결과를 나타내었으며, 완속교반시간 5분, 3rpm에서 20%정도의 더 나은 결과 값을 보였다. 탁도 제거율 또한 비슷한 경향을 보여 최고 81%의 제거율을 나타내었다.
- 2) 조류농도가 저농도일 때 응집제로 Alum 사용시는 각각의 조건에서 조류제거율 50~60%, 탁도제거율 30~50%로 PAC보다 약 20%정도 제거율이 떨어짐을 알 수 있다.
- 3) 응집제 주입량은 5mg/ℓ 전후가 적당할 것으로 판단된다.
- 4) 조류농도를 85~90 $\mu\text{g}/\ell$ 로 조정하여 응집제 주입량 5mg/ℓ, 완속교반시간 5분 전후로 실험하였을 시에는 PAC, Alum은 비슷한 제거율을 나타내었고, 드럼필터 회전속도가 낮을수록 좋은 제거율을 나타내었다. 조류농도가 고농도(85~90 $\mu\text{g}/\ell$)인 원수에서는 저농도(30~60 $\mu\text{g}/\ell$)의 원수보다 짧은 완속교반시간이 요구되었다.
- 5) 실험결과 조류농도가 저농도일 때는 PAC를 사용하고, 고농도일 때는 Alum을 사용하는 것이 더 효율적이다.
- 6) 응집제 주입 후 응집제에 따른 2차오염에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국산업기술진흥협회의 연구지원 사업의 일환으로 수행되었으며, 울산대학교 토목환경공학부 수질실험실에서 모형실험을 수행하였고 원수는 양산 물금취수장에서 채수한 낙동강 물을 사용하였다.

발표에 즈음하여, 본 연구의 수행에 협조해 주신 위 기관의 관계자 분들에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 국립수산진흥원, 1994, “적조발생기구와 유독성 플랑크톤에 관한 연구”, 사업보고 제117호, 117.
- [2] 금강환경관리청 보도자료
- [3] 김상구, 류제익, 류병순, 1998, “원수중의 알칼리도와 유기물농도에 따른 응집제 주입을 결정”, 한국물환경학회지 제14권 제2호, 161~166
- [4] 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, “한국연안의 적조 ; 최근 적조의 발생원인과 대책”, 국립수산진흥원, 280
- [5] 박혜경, 류재근 등, 1997, “국내주요 상수원에서의 조류발생추이에 관한 연구”, 한국수질보전학회 추계학술발표회 논문초록집, 53~56
- [6] 이만호, 박성찬, 김한호, “혼화지의 효율적인 운영방안”, 수도기술연구소
- [7] 이옥희, 1998, “유해성 적조생물의 성장에 미치는 환경요인”, 경성대학교 이학석사학위논문, 80.
- [8] Akihiro Shiomoto and Satsuki Matsumura, 1993, “Diel periodicity in dark uptake of ammonium by natural populations of marine phytoplankton”, *Journal of Plankton ReLa Mer*, Tokyo, 32:107-117.
- [9] Berland B. R., Maestrini S. Y., Bechemin C. and Legrand C., 1994, “Photosynthetic capacity of the toxic dinoflagellates *Dinophysis* cf. *acuminata* and *Dinophysis acuta*”, *search*, 15(11):1333-1339.
- [10] Yoshihiko Matsui, Akira Yuasa, 1996, “Dynamic analysis of coagulation with alum and PA Cl”, *JOURNAL AWWA* Vol. 90, 96~1060