

전산화 공정을 이용한 조류제거

손희종 · 정철우* · 배상대** · 최영익** · 강임석***

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소, *울산산업진흥TP 전략산업기획단

신라대학교 환경공학과, *부경대학교 환경공학과

(2008년 8월 28일 접수; 2008년 11월 7일 수정; 2009년 1월 20일 채택)

The Removal of Algae by Pre-oxidation

Hee-Jong Son, Chul-Woo Jung*, Sang-Dae Bae**,
Young-Ik Choi** and Lim-Seok Kang***

Water Quality Institute, Waterauthority, Busan 621-813, Korea

*Ulsan Regional Innovation Agency, Ulsan Industry Promotion Techno Park, Ulsan 683-804, Korea

**Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

***Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Manuscript received 28 August, 2008; revised 7 November, 2008; accepted 20 January, 2009)

Abstract

The blue-green algae which caused odor problem in the tap water are difficult to precipitate in sedimentation basin and clogged the filter void rapidly. The studies of this paper were not only oxidation, coagulation and sedimentation processes for effectively removing blue-green algae but yellow clay and polyamine for verification as coagulants aids. The results of this research are summarized as follows: Higher ozone dose(C) and longer contact time(T) were needed for a high degree of removing blue-green algae efficiency. the removal rate of blue-green algae was proportional to the C×T value. The removal percent of chlorophyll-a by sedimentation and filter without pre-ozonation was about 75% but 1 mg/L pre-ozonation could increase the removal percent of chlorophyll-a to 99% and more pre-ozonation could remove completely. Though the removal efficiency of turbidity could increased by high dose of chlorination, the dissolved organic carbon was increased. More chlorine dose from 4 to 10 mg/L dissolved organic carbon was decreased. Using yellow clay as coagulant aids increased density of floc so the settling velocity of floc become rising but polyamine could not increase settling velocity of floc though it could formated large floc.

Key Words : Algae removal, *Microcystis* sp., Pre-oxidation, Microcystin, Coagulation, Filtration

1. 서론

낙동강 하류는 중·상류지방의 점오염원 및 비점오염원에서 유입되는 영양염류에 의해 여름철에

는 남조류가 대량으로 번식하여 수화현상(water bloom)을 일으키고, 겨울철에는 규조류가 대량 번식하여 정수처리 공정에 여러 가지 장애를 초래하고 있다.

일반적으로 담수 중에 존재하는 남조류는 식물플랑크톤의 일종으로 수온이 높고 영양염류가 풍부할 때 대량 증식하여 수중의 산소고갈, pH 상승, 이취

미 발생, 트리할로메탄(Trihalometanes : THMs) 전구 물질생성 및 시각적 혐오감 등을 유발시킬 뿐만 아니라 동물 플랑크톤, 어류, 포유류 등에 독성을 나타내는 물질을 생성하여 수질을 악화시키는 것으로 알려져 있다^{1~3)}.

남조류 중에서 대표적인 종이 *Microcystis* sp.로 국내 대부분의 부영양호에서 여름철에 우점하며, 낙동강 하류에서도 해마다 하절기에 95% 이상의 우점율을 차지한다고 알려져 있다⁴⁾.

조류에 의한 정수처리 문제점으로는 조류의 낮은 비중, 높은 음전하 및 조류에서 유래되는 조류성장 부산물인 AOM(algogenic organic matter)은 응집·침전공정에 있어서 응집을 방해⁵⁾하고 플록의 침강성을 악화시켜 후속공정인 여과지의 막힘 현상을 유발시키는 것으로 알려져 있으며, 응집·침전공정에서 대부분의 조류가 제거되어도 수중에 잔존하는 조류가 여과공정으로 유입되면 여과지의 폐색이 단 시간에 발생한다⁶⁾.

조류는 그 자체의 형태나 운동성(motility)으로 인하여 무기성 입자에 비하여 제거가 매우 어렵고, 조류를 응집·침전시키기 위해서는 조류세포를 응집 전에 불안정화(destabilization)시켜야 한다⁷⁾. 따라서 최근에는 응집공정에서의 교반 조건의 변화, 새로운 응집제의 개발 및 산화공정을 이용하여 조류제거 효율을 높이려는 연구가 진행중이다^{8,9)}. 산화처리는 조류의 운동성을 없애고, 산화처리에 의해 조류에서 유출되는 biopolymer가 응집보조제 역할을 함으로 응집공정에서 응집 효율 향상을 유도한다고 알려져 있다¹⁰⁾. 그러나 산화처리를 할 경우 조류 종(species)과 성장형태에 따라 응집 효율의 결과가 상이하게 나타난다는 연구결과도 있다^{11,12)}.

오존과 염소가 후속공정인 응집공정과 수질에 미치는 영향에 대한 연구는 아직도 크게 미흡한 실정으로 후속공정에 대한 고려 없이 산화제를 투입하고 있는 실정이다^{13,14)}.

따라서 본 연구에서는 정수처리시 조류에 의한 응집장애를 개선하기 위해 산화처리인 염소 및 오존처리에 의한 조류제거 특성을 평가하였으며, 산화제 투입농도별로 조류제거 특성 및 조류독소 용출 특성을 조사하여 전산화 공정에서의 최적 산화

제 투입량을 결정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 오존 발생기 및 오존 접촉조

실험에 사용된 오존 접촉조의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 오존 접촉조는 용량 10 L 용량으로 시료수를 오존 접촉조에 채운 후 오존을 연속적으로 접촉시키는 semi-batch 식이다. 오존 반응조의 재질은 아크릴로 제작하였다. 오존 접촉조는 직경 10 cm, 높이 150 cm이며, 기·액접촉반응의 효율을 높이기 위해 하부에 원형 diffuser를 설치하여 주입되는 오존을 효과적으로 산기시켰다. 연결 tube는 부식 및 오존과의 반응을 고려하여 실리콘 tube를 사용하여 가능한 짧게 연결하였다. 오존 발생장치는 OZAT[®] CFS-1A(Ozonias, Swiss)를 이용하였으며, 발생된 오존 양은 오존 모니터(PCI Ozone & Control System Inc., U.S.A.)에 자동적으로 산정되어 표시된다.

2.2. 시료 및 분석방법

2.2.1. 처리대상 원수

본 실험에 사용한 시료수는 낙동강 하류 매리지역의 원수를 사용하였으며, 실험에 사용된 *Microcystis* sp. 생시료는 낙동강 하류 호포지역에서 채집하여

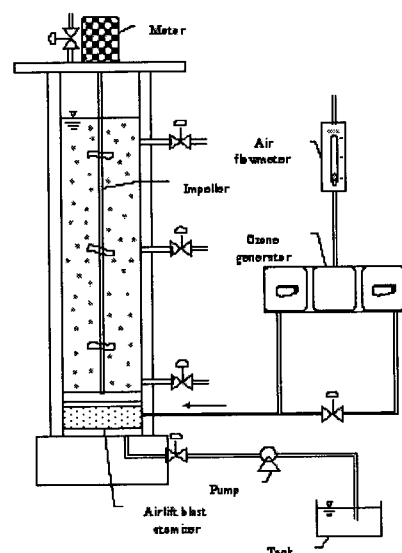


Fig. 1. Schematic diagram of ozonation apparatus.

Table 1. Characteristics of raw water

Item	Data
TOC [mg/L]	4.85
DOC [mg/L]	4.02
UV-254 [cm^{-1}]	0.0659
SUVA [$\text{m} \cdot \text{mg/L}^{-1}$]	1.639
Turbidity [NTU]	8.8
Alkalinity [mg/L CaCO_3]	64
pH [-]	7.8

냉장보관하면서 24시간 이내에 실험을 완료하였으며, 실험시 매리원수에 호포지역에서 채집한 *Microcystis* sp. 생시료를 일정량 투입하여 실험하였다. 매리지역에서 취수한 원수는 계절별 평균치 범위내에서 변동의 폭이 가장 적은 시점을 택하여 실험에 사용하였으며, Table 1에 실험에 사용한 원수의 성상을 나타내었다.

2.2.2. 분석방법

시료수는 오존처리, 염소처리, 자-테스트 실험, 상등액 및 GF/C 여지 여과액을 각각 채수하여 분석하였다. UV-254와 DOC는 GF/C 여지(Whatman社, UK)로 여과한 후 그 여액을 사용하여 UV-Vis spectrophotometer(UV-2401PC, Shimadzu, Japan)와 TOC analyzer(Sievers 820, Sievers, U.S.A.)로 분석하였으며, 탁도는 HACH 2100P(HACH社, U.S.A.)을 이용하여 분석하였다.

*Microcystin*의 경우 시료수 500 mL를 auto-trace(SPE Workstation, Tekmar, U.S.A.)를 이용하여 sep-pak cartridge(C_{18})에 통과시킨 후 수세과정을 거치고 최종적으로 20% MeOH로 용출시켜 0.2 μg 멤브레인 여지(Sartorius Minisart RC4, Germany)로 여과하여 HPLC로 분석하였다¹⁵⁾.

2.3. 실험방법

본 연구에서 오존처리는 오존 주입량을 0~5 mg/L 범위로 주입하였으며, 오존 접촉시간을 1~5 분으로 하여 오존처리에 따른 변화를 평가하였다. 또한, 조류농도에 따른 조체에서의 조류독소 물질 용출 및 제거실험의 경우, 오존접촉 시간을 최대 8 분까지로 하여 실험하였다.

염소 처리는 접촉시간 30분으로 차아염소산 나트륨 원액(Samchun chemical社, Korea)을 5000 mg/L의

농도로 희석·조제하여 시료수에는 유효염소 농도로 2~10 mg/L로 주입하였다.

응집·침전실험은 응집제 PSO-M(서정화학, 알루미늄 농도 7%)을 사용하여 자-테스트기(PB-700, phipps & bird社, U.S.A.)에서 2 L 자를 이용하여 급속혼화 조건은 120 rpm($G=200 \text{ sec}^{-1}$, 20°C)으로 1분, 완속혼화는 60 rpm($G=60 \text{ sec}^{-1}$, 20°C), 15분으로 하였으며, 완속혼화 후 침전시간은 30분으로 하여 침전 후 상등액을 수표면 밑 10 cm 지점에서 채취하였다. 또한, 응집보조제로 사용한 황토와 polyamine은 (주)삼정 및 (주)아해에서 직접 구입하여 실험에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존처리에 의한 조류제거 및 응집여과 특성

오존은 강력한 산화제로써 조류세포 내에 존재하는 클로로필-a와 접촉하면 클로로필-a를 산화 제거하게 된다. 초기 클로로필-a 농도가 44.3 $\mu\text{g/L}$ 로 비교적 낮은 농도인 원수를 이용하여 오존주입농도 및 접촉시간 변화에 따른 클로로필-a의 산화에 따른 제거율을 Fig. 2 (a)에 나타내었으며, 초기 클로로필-a 농도가 161 $\mu\text{g/L}$ 로 상대적으로 높은 원수를 이용하여 오존 접촉시간과 오존농도에 따른 클로로필-a의 산화 과정을 Fig. 2 (b)에 나타내었다.

Fig. 2 (a)에 나타난 바와 같이 저농도 클로로필-a 포함한 원수의 오존산화시 주입되는 오존농도가 높을수록 잔류하는 클로로필-a의 농도가 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 또한 접촉시간이 증가할수록 잔류 클로로필-a 제거율이 높아졌다. Fig. 2 (b)의 상대적으로 고농도인 161 $\mu\text{g/L}$ 인 클로로필-a를 함유한 원수의 경우에도 Fig. 2 (a)에 나타난 것과 마찬가지로 접촉시간과 오존농도가 높아질수록 잔류하는 클로로필-a의 농도가 낮아졌다.

특히, 오존주입농도(C)와 오존접촉시간(T)에서 $C \times T$ 와 잔류하는 클로로필-a의 관계를 살펴보면 잔류하는 클로로필-a 농도가 $C \times T$ 와 깊은 관계를 보였다. $C \times T$ 가 10일 때를 비교하면 오존주입 농도가 2 mg/L, 접촉시간이 5분인 경우와 오존주입농도가 5 mg/L, 접촉시간이 2분인 경우 각각의 클로로필-a 잔류율은 43.4%와 40.5%로 거의 유사한 잔류율을 나타내었다.

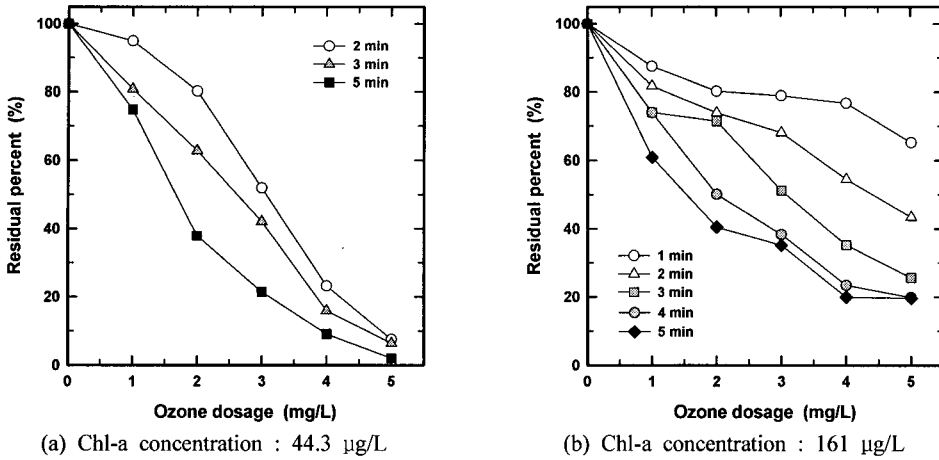


Fig. 2. The residual percent of chlorophyll-a with ozone dose and contact time.

전산화 공정으로 오존산화 공정이 후속 공정인 응집·침전·여과공정에 미치는 영향을 파악하기 위해 1~3 mg/L의 농도로 오존산화 후 자-테스트를 이용하여 응집·침전, GF/C 필터를 사용하여 여과하였을 경우와 오존을 처리하지 않고 응집·침전 및 여과시켰을 때의 클로로필-a의 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 오존 처리를 하지 않고 응집·침전·여과처리한 경우에는 여과수 중에 클로로필-a가 25% 정도 잔류하였으나 오존을 1 mg/L 주입한 후 응집·침전처리하면 침전수에서는 18% 정도 클로로필-a가 잔류하였으나, 여과 후 수중의 클로로필

-a는 98% 이상 제거되었다. 전오존을 2 mg/L 이상 주입 후 응집·침전·여과처리를 하면 여과수 중의 클로로필-a는 완전히 제거 가능하였으며, 또한 전오존 주입농도를 3 mg/L로 증가시킬수록 침전수에 잔류하는 클로로필-a의 농도도 비례해서 감소하였다. Reckhow 등¹⁶⁾과 Becker 등¹⁷⁾의 유기물 제거를 위한 전오존-응집-여과에 대한 연구에서도 오존공정이 응집-여과공정의 보조 역할을 하는 것으로 보고하였다.

3.2 염소처리에 의한 조류제거 및 응집여과 특성

원수중의 클로로필-a 농도가 128 µg/L인 원수를 전염소 3, 5, 10 mg/L 처리 후 응집제 주입율에 따른 자-테스트를 행한 후 상징수 중의 잔류탁도 변화를 Fig. 4 (a)에 나타내었다. 원수 중에 조류가 있을 때 염소 주입율이 증가할수록 동일 응집제 주입율에서 탁도 제거효율이 높아졌다. 염소 처리를 3 mg/L의 농도로 주입시 응집제를 70 mg/L까지 주입하면 최저 잔류탁도가 3.8 NTU까지 저감시킬 수 있으나, 전염소 처리를 10 mg/L 주입시 응집제를 40 mg/L만 주입하여도 잔류탁도를 3.4 NTU까지 낮출 수 있었으며, 응집제를 60 mg/L까지 증가시키면 잔류탁도를 0.94 NTU까지 낮출 수 있었다.

클로로필-a 농도가 208 µg/L인 원수에 염소를 3과 5 mg/L의 농도로 주입하여 산화시킨 후 응집제 주입율에 따른 상징수의 탁도변화를 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 클로로필-a 농도가 Fig. 4 (a)의 실험에 사용

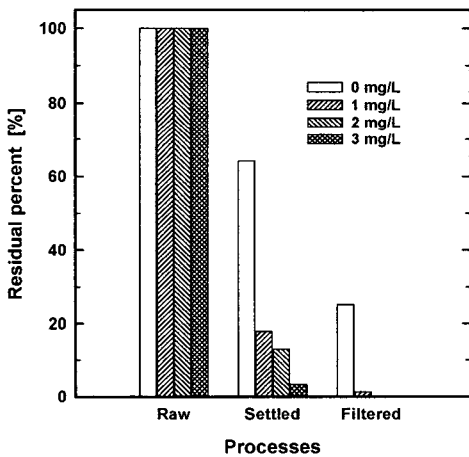


Fig. 3. The residual percent of Chlorophyll-a with treatment processes (ozone contact time : 5 min).

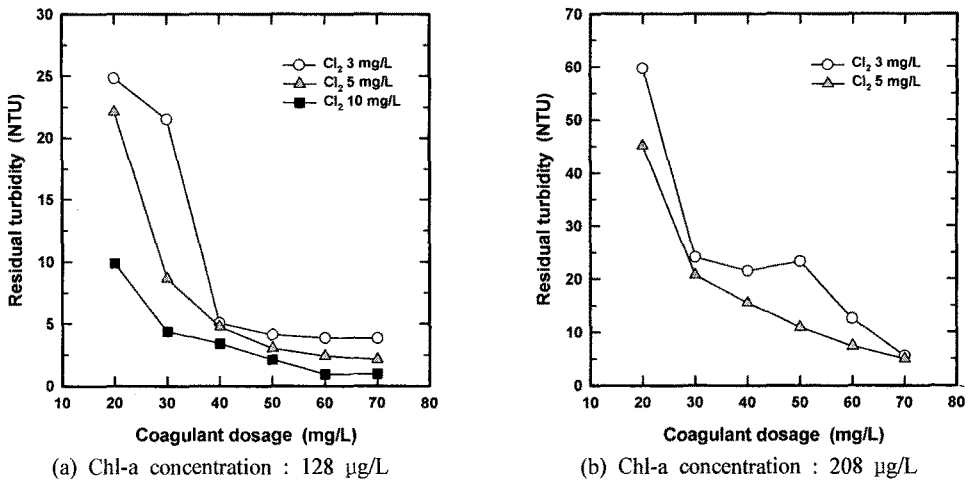


Fig. 4. The residual turbidity by chlorination treatment.

된 원수의 클로로필-a 농도보다 80 µg/L 정도 높아 동일한 염소 처리와 응집제 주입을 하여도 상정수의 잔류탁도는 클로로필-a가 128 µg/L인 원수에 비해 상대적으로 높게 나타나 원수중의 조류 증가로 클로로필-a 농도가 증가하면 응집효율 상승을 위하여 클로로필-a 상승에 비례한 전산화 처리공정이 필요한 것으로 판단된다.

이상의 결과 원수 중에 남조류가 많이 존재하는 경우에는 원활한 정수처리를 수행하기 위해서 오존 및 염소 처리 등 전산화 공정을 통한 전처리 공정이 필요한 것으로 판단되어지며, 전산화 공정이 남조류 등 조류 발생 원수에 적용할 때 처리효율이 개선되는 이유로는 염소 및 오존과 같은 산화제가 남조류 세포의 파괴를 유도하고 세포 파괴에 의해 남조류 자체의 부력이 감소하여 응집·침전효율이 양호해진 것으로 판단된다.

Microcystis sp. 발생시 수중의 클로로필-a 농도가 186 µg/L인 원수를 이용하여 염소를 처리하지 않고 응집 후, 침전 상정수의 잔류탁도, GF/C 여과 후 잔류탁도와 DOC 실험결과와 4, 10 mg/L의 농도로 전염소 처리한 시료에 응집 후, 침전 상정수의 잔류탁도, GF/C 여과 후 잔류탁도, DOC 실험결과를 비교한 것을 Fig. 5~7에 나타내었다. 침전 후 상정수의 경우 염소 주입량이 증가할수록 탁도 제거율이 높은 것으로 나타났으나, Fig. 6에서 GF/C 필터에 여과 후 여과된 탁도를 비교·평가해 보면 전염소와 응

집처리하지 않은 원수를 GF/C에 여과하면 여과수 탁도가 1.44 NTU였으나 전염소를 4, 10 mg/L로 처리하여 GF/C 필터에 여과한 여과수 탁도는 각각 4.46, 2.97 NTU로 원수를 GF/C 필터로 직접 여과하였을 때 보다 높게 나타났다. 이와 같이 전염소 처리에 의해 탁도가 증가하는 이유는 염소 처리에 의하여 조류의 세포가 파괴됨에 따라서 세포내에 있던 미세물질이 수중으로 용출되었기 때문으로 판단되어지며, 또한 염소를 4 mg/L 처리한 여과수 탁도가 염소를 10 mg/L로 처리한 여과수 탁도 보다 높게 나온 이유는 염소를 4 mg/L로 주입하면 염소 주입에

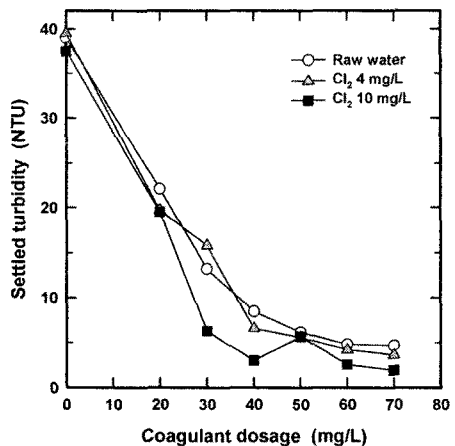


Fig. 5. Settled turbidity by Jar-test with and without chlorination (Chl-a: 186 µg/L).

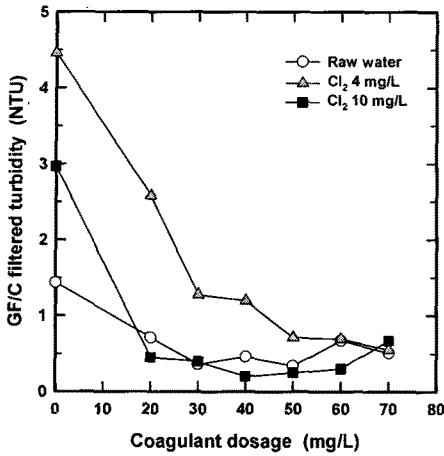


Fig. 6. GF/C filtered turbidity by Jar-test with and without chlorination(Chl-a: 186 µg/L).

비하여 원수중의 유기물질 산화에 필요한 염소량이 부족하여 탁도가 높아졌고, 염소를 10 mg/L 과량 주입하면 수중으로 용출된 물질들조차도 염소에 의해 산화분해 되어 탁도가 다시 감소하는 현상 때문인 것으로 보여진다.

전염소 처리 유무에 따라서 용존 유기탄소(DOC)의 농도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 전염소 처리를 하지 않고 GF/C 필터에 여과한 여과수의 DOC 농도는 4.3 mg/L였으나, 전염소 처리를 4, 10 mg/L 처리 후 GF/C필터에 여과한 여과수의 DOC농도는 6.4, 6.79 mg/L로 전염소 처리에 의해 2.1~2.4 mg/L 정

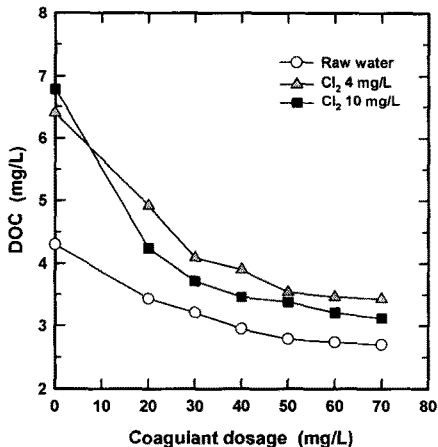


Fig. 7. DOC by Jar-test with and without chlorination (Chl-a: 186 µg/L).

도 DOC의 농도가 증가한 것으로 나타났다. 이는 조류세포내의 Intercellular Organic Matter(IOM)이 염소 산화에 의해 수중으로 용출되어 수중의 용존유기물질의 농도가 증가한 것으로 판단된다. 즉 조류세포 자체의 크기는 15~30 µm로 GF/C 필터의 여과공극인 1.2 µm 전·후 크기의 공극 사이를 통과할 수 없어 염소 처리를 하지 않으면 수중의 DOC 물질만 GF/C 필터를 통과하고 조류세포 내의 유기물질은 조류와 함께 GF/C 필터에 여과되어 제거되지만 염소 처리를 행하면 조류세포 내에서 수중으로 용출된 유기물질이 GF/C 필터를 통과할 수 있는 크기까지 작아져 GF/C 필터 여과수의 유기물질의 농도가 증가한 것으로 보인다. 또한 염소처리 후, 응집실험을 하여 상정수 중의 DOC 농도 변화를 보면 염소를 처리하지 않고 응집처리만 한 경우의 수중 DOC 농도가 전염소 처리를 한 경우보다 낮은 DOC 농도를 유지하였다. 따라서 조류 발생시 염소 처리를 하여 조류세포내의 유기물질을 용출시키는 것보다 염소 처리를 하지 않고 응집·침전시키는 편이 수중 유기물질 저감에 효과적인 것으로 판단된다.

이상의 결과 조류가 원수중에 있을 때 탁도제거를 위해서는 오존이나 염소 등에 의한 전처리를 행하는 것이 유리하나 수중의 유기물질 제거의 관점에서서는 오존이나 염소 등에 의한 전산화 처리를 하지 않는 것이 수중의 용존유기물질 제거에 유리할 것으로 판단된다.

3.3. 오존 및 염소 혼합처리에 의한 조류제거 및 응집·여과 특성

원수와 원수에 오존, 염소 및 오존과 염소를 혼합 산화처리 후 응집·침전 처리수의 탁도와 DOC 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 탁도의 경우 산화처리하지 않고 응집·침전시킨 것보다 산화처리를 한 후 응집·침전시키면 탁도 제거효율이 상승되었으며 이는 이전의 실험 결과와 같은 결과를 보였다. 오존 전처리의 경우도 1 mg/L 보다 2 mg/L 처리한 것이 탁도 제거율이 높았으며 염소처리도 염소 처리 농도를 증가시킬수록 탁도제거율이 상승하였으며, 전산화 공정으로 염소와 오존을 함께 사용하면 탁도 제거율은 더욱 상승되었다.

DOC의 경우도 앞선 결과와 마찬가지로 오존 및 염소처리를 하면 DOC의 농도가 증가하였으며 응집

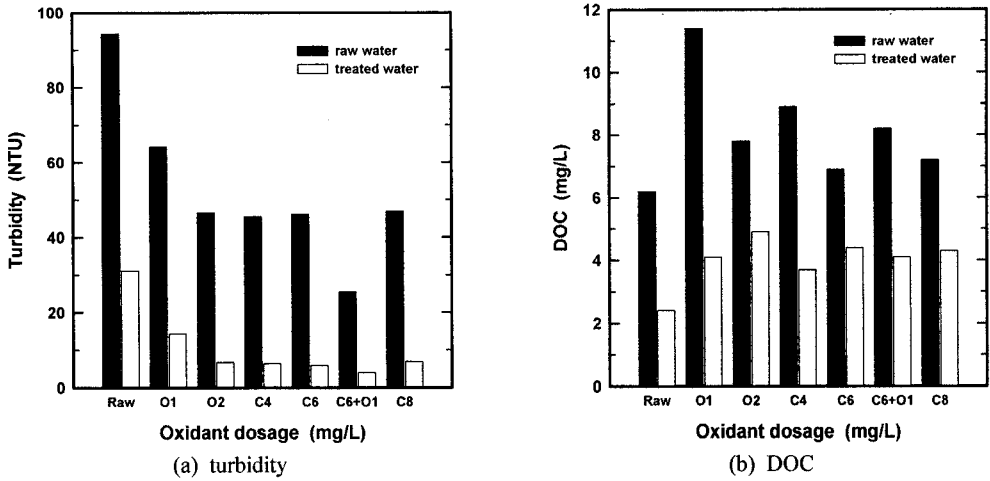


Fig. 8. Residual Turbidity and DOC by Jar-test with and without chlorination and ozonation(initial concentration : 186 µg/L).

처리 후의 잔류 DOC 농도변화도 산화처리를 하지 않는 쪽이 산화처리를 한 경우에 비하여 잔류 DOC 농도가 낮았다.

3.4. 응집보조제를 이용한 조류 제거

응집보조제로 황토와 고분자 유기물질인 폴리아민을 이용한 조류 제거효율을 Fig. 9와 10에 나타내었다. 황토를 첨가하지 않고 응집제만에 의한 잔류탁도는 8.5 NTU였으나 황토를 5 mg/L 주입하면 4.3 NTU로 낮아지고 황토를 10 mg/L 주입하면 잔류탁도가 3.1 NTU까지 감소시킬 수 있어 남조류 발생시 황토를 응집보조제로 사용하면 처리효율을 증가시킬 수 있었다. 응집처리시 남조류는 응집제와 결합하여 양호한 응집플록을 형성하나 남조류 세포내에 기포를 가지고 있어 부력이 크게 작용하여 침전이 불량한 특성이 있다. 이때 비중이 무거운 황토가 주입되면 플록의 비중을 증가시켜 침강성을 향상시켜 잔류탁도가 낮아지는 것으로 판단된다. 하지만 DOC와 같은 용존유기물질의 농도변화는 없는 것으로 나타나 수중의 용존성 유기물질에 대한 제거능은 없는 것으로 나타났다.

염소처리 유무에 따른 폴리아민의 효과를 Fig. 10에 나타내었다. 염소를 처리하지 않고 응집제(PSO-M)를 40 mg/L 주입한 후 폴리아민을 1.0 mg/L 까지 0.2 mg/L씩 증량·첨가에 따른 잔류탁도를 나타낸 것으로 폴리아민의 주입율에 따른 탁도개선

효과는 거의 없었다. 폴리아민을 주입하면 플록은 크게 형성을 할 수 있으나 앞의 황토 첨가실험과 마찬가지로 남조류의 플록은 비중이 낮아 침전효율이 낮아졌기 때문에 남조류 발생시 응집처리가 곤란한 이유는 응집형성이 불량한 것보다 침강성이 낮아 생기는 문제가 큰 것으로 판단된다.

3.5. 전산화 처리에 의한 조류독소 제거

염소와 오존처리를 하였을 경우 조체에서 수중으로 유출되는 조류독소 농도와 산화제의 농도 증가에 따른 조류독소 잔류농도의 변화를 Fig. 11와 Fig.

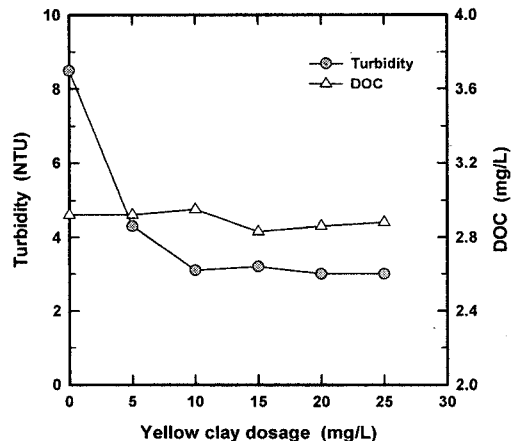


Fig. 9. Residual Turbidity and DOC by Jar-test with yellow clay dosage.

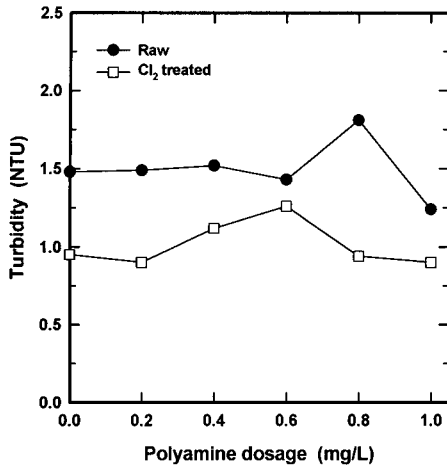


Fig. 10. Residual Turbidity by Jar-test with polyamine dosage.

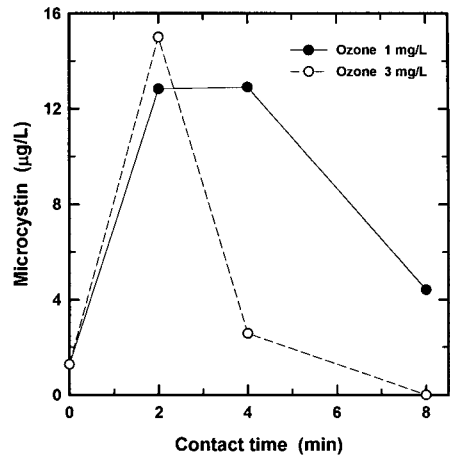


Fig. 12. Variation of microcystin concentration according to various ozone dosage and various contact time. (Chl-a: 330 µg/L)

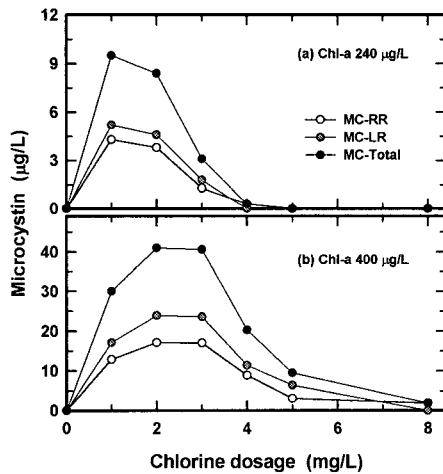


Fig. 11. Variation of microcystin concentration according to various chlorine dosage.

12에 나타내었다. 조류독소는 *Microcystis* sp.에서 생성되는 microcystin-RR 및 -LR을 측정하였다.

Microcystis sp.를 원수에 Chl-a 농도로 240 및 400 µg/L가 되도록 투입한 후 염소처리 농도에 따른 microcystin 용출농도 및 잔류농도 변화를 Fig. 11에 나타내었다. Chl-a 농도가 240 µg/L일 경우에는 1 mg/L의 염소처리에 의해 수중의 조류독소가 최고 농도를 나타내었다. 염소농도가 증가될수록 수중에 잔류하는 조류독소의 농도도 감소하는 경향을 보이고 있으며, 4 mg/L 이상의 염소처리에 의해서는 대

부분 제거되는 것으로 나타났다. 또한, Chl-a 농도가 400 µg/L일 경우에는 240 µg/L일 때와 유사한 증가 및 감소경향을 보이고 있으나, 유출되는 독소농도는 조류농도가 240 µg/L일 경우 보다 4배 정도 높은 것으로 나타나 8 mg/L의 염소처리에 의해서도 완전한 제거가 어려운 것으로 나타났다.

Microcystis sp.를 원수에 Chl-a 농도로 330 µg/L가 되도록 투입한 후 오존처리 농도 1, 3 mg/L에서의 접촉시간에 따른 microcystin 용출농도 및 잔류농도 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 오존 투입농도가 1 mg/L의 경우 오존접촉 초기에는 조체내의 독소물질이 수중으로 유출되어 수중의 독소농도가 높아지며, 접촉시간이 길어질수록 감소되는 포물선 형태를 나타내고 있으며, 8분 동안의 오존접촉에 의해서 완전산화는 어려운 것으로 나타났다. 또한, 오존 투입농도가 3 mg/L의 경우에도 오존접촉 시간에 따라 수중에 잔류하는 독소농도가 포물선 형태를 나타내고 있으며, 오존접촉 8분에 완전히 산화되어 제거되는 것으로 나타났다.

따라서, 원수중에 조류농도가 높을 경우 응집·여과 효율을 높이기 위해 전산화 공정을 채택시에는 산화에 의해 조류 체내에서 유출되는 조류독소를 고려하여 고농도의 산화제를 투입하거나 아니면 산화제의 접촉시간을 늘려주어야 하는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

조류 제거를 위하여 오존과 염소를 이용한 산화 처리, 응집 침전처리, 응집보조제로써 황토 및 폴리 아민을 이용하여 남조류 제거효율을 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 오존투입농도(C)가 높고 접촉시간(T)이 길어질 수록 클로로필-a의 제거효율이 증가되었으며, 또한 클로로필-a의 제거율과 오존투입농도(C)와 접촉시간(T)과의 관계에서 클로로필-a의 제거율은 $C \times T$ 에 비례하였다.

2. 오존처리 없이 침전·여과 후에는 클로로필-a가 약 75% 제거되었으나 전오존 1 mg/L 처리 후 여과수에서 99%, 그 이상의 오존투입농도에서는 100% 제거가 가능하였다.

3. 염소처리 농도가 높을수록 응집·침전 처리에서 탁도 제거효율이 증가되었으나, 전염소에 의한 산화 처리하는 경우 수중 유기물 농도가 증가되나, 전염소 처리 농도를 4 mg/L보다 10 mg/L 처리하여 염소량을 과다 투입하면 유기물질농도가 다시 감소하였다.

4. 응집보조제로 황토를 사용하면 응집플록의 비중을 높여 침전효율을 상승시켰으나, 폴리아민을 이용하면 응집제 플록의 크기는 증대시키나 플록의 비중이 낮아 침전효율을 증가시키지는 않았다.

5. *Microcystis* sp.를 원수에 Chl-a 농도로 240 및 400 $\mu\text{g/L}$ 가 되도록 투입한 후 염소처리 농도에 따른 microcystin 용출농도 및 잔류농도 변화를 조사한 결과, Chl-a 농도가 240 $\mu\text{g/L}$ 일 경우에는 4 mg/L 이상의 염소처리에 의해서는 대부분 제거되었으나 Chl-a 농도가 400 $\mu\text{g/L}$ 일 경우에는 8 mg/L의 염소처리에 의해서도 완전한 제거가 어려웠다.

6. *Microcystis* sp.를 원수에 Chl-a 농도로 330 $\mu\text{g/L}$ 가 되도록 투입한 후 오존처리 농도 1, 3 mg/L에서의 접촉시간에 따른 microcystin 용출농도 및 잔류농도 변화를 조사한 결과 오존 투입농도가 1 mg/L의 경우, 8분 동안의 오존접촉에 의해서 완전산화는 어려운 것으로 나타났으며, 오존 투입농도가 3 mg/L의 경우에 오존접촉 8분에 완전히 산화되어 제거되었다.

참 고 문 헌

- 1) Mallevialle J., Suffet I. H., 1987, Final Report: Identification and Treatment of Taste and Odors in Drinking Waters, AWWA Research Foundation, Denver, Colorado.
- 2) Graham N. J. D., Wardlaw V. E., Perry R., Jiang J. Q., 1998, Significance of algae as trihalomethane precursors, *Wat. Sci. Technol.*, 37(2), 83-89.
- 3) Yoo R. S., Carmichael W. W., Hoehn R. C., Hruddy S. E., 1995, Cyanobacterial(Blue-green Algal) Toxins: A Resource Guide, AWWA Research Foundation, Denver, Colorado.
- 4) 김우현, 최애란, 이진애, 1999, 낙동강 수계의 microcystin 분포, *Algae*, 14(4), 237-246.
- 5) Bernhardt H., Clasen J., 1991, Flocculation of micro-organisms, *Jour. Wat. Suppl.: Res. & Technol.-Aqua*, 40(2), 76~87.
- 6) Bernhardt H., 1984, Treatment disturbances with water out of eutrophic reservoirs as consequences of extensive algal development, *Wat. Suppl.*, 2(3-4), SS4-7~SS4-14.
- 7) Steynberg M. C., Pieterse A. J. H., Geldenhuys J. C., 1996, Improved coagulation and filtration of algae as a result of morphological and behavioral changes due to pre-oxidation, *Jour. Wat. Suppl.: Res. & Technol.-Aqua*, 45(6), 292-298.
- 8) Plummer J. D., Edzwald J. K., 2002, Effects of chlorine and ozone on algal cell properties and removal of algae by coagulation, *Jour. Wat. Suppl.: Res. & Technol.-Aqua*, 51(6), 307-318.
- 9) 이철희, 이세환, 오카다미쯔마사, 2004, 정수처리에 있어서 철-실리카 무기고분자 응집제를 이용한 조류 및 *Cryptosporidium*의 제거, 대한환경공학회지, 26(8), 876-882.
- 10) Petruševski B., van Breeman A. N., Alaerts G. J., 1996, Effect of permanganate pre-treatment and coagulation with dual coagulants on algae removal in direct filtration, *Jour. Wat. Suppl.: Res. & Technol.-Aqua*, 45(5), 316-326.
- 11) Hoyer O., Bernhardt H., Lusse B., 1987, The effect of ozonation on the impairment of flocculation by algogenic organic matter, *Z. Wasser-Abwasser*, 20, 123-131.
- 12) Chandrakanth M. S., Krishnan S., Amy G. L., 1996, Interactions between ozone, AOM and particles in water treatment, *Jour. Environ. Engng-ASCE*, 122(6), 459-468.
- 13) Yun Y. S., Lim S. R., Cho K. K., Park J. M., 1997, Variations of photosynthetic activity and growth of freshwater algae according to ozone contact time in ozone treatment, *Biotechnology Letters*, 19(9), 831-

- 833.
- 14) Ginocchio J. C., 1982. Effect of ozone on the elimination of various algae by filtration, pp. 69-72, In Masschelein W. J. (ed.), *Ozonation Manual for Water and Wastewater Treatment*, John Wiley & Sons, New York.
- 15) Harada K. I., 1996, Chemistry and detection of microcystins, *Toxic Microcystis*, CRC Press, Tokyo, 103-148.
- 16) Reckhow D. A., Edzwald J. K., Tobiasson J. E., 1993, *Ozone as a coagulant aid to coagulation and filtration*, Denver, CO80235, AWWARF and AWWA.
- 17) Becker W. C., O'Melia G. R., 1996, *Optimizing Ozonation for Turbidity and Organics (TOC) Removal by Coagulation and Filtration*, Denver, CO80235, AWWARF and AWWA.