



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

어승생 수원지 색도발생 원인 규명 및
정수처리 방안 연구

濟州大學校 大學院

環境工學科

李正勳

2016年 2月

어승생 수원지 색도발생 원인 규명 및 정수처리 방안 연구

指導教授 金 鎮 瑾

李 正 勳

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 2 月

李 正 勳의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 許 喆 九 印

委 員 趙 恩 一 印

委 員 金 鎮 瑾 印

濟州大學校 大學院

2016 年 2 月

A Study on Identification of Chromaticity Cause in Eoseungsaeng
Lake and Water Treatment Methods.

Jeong-Hoon Lee
(Supervised by professor Jin-Keun Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Engineering

2016 . 2

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Chul-Goo Hu, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Eun-Il Cho, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Jin-Keun Kim, Prof. of Environmental Engineering

February. 2016

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT	VII
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
제 2 장 이론적 배경	3
2.1 상수원의 색도 발생	3
2.2 색도 제거 기술	8
2.2.1 염소산화 처리	10
2.2.2 오존산화 처리	13
제 3 장 연구 방법	17
3.1 연구 대상	17
3.2 원수수질 조사	21
3.2.1 시료 채취	21
3.2.2 현장 측정 항목	23
3.2.3 실험실 측정 항목	24
3.3 색도 제거 실험	27
3.3.1 염소산화를 이용한 색도제거 실험	27
3.3.2 오존산화를 이용한 색도제거 실험	28
제 4 장 연구 결과 및 고찰	32
4.1 수질 현황 및 색도원인 규명	32
4.1.1 제1저수지 수질 현황	32
4.1.2 제2저수지 수질 현황	37
4.1.3 색도의 발생원인 규명	43
4.2 염소산화를 이용한 색도제거 실험 결과	48

4.3 오존산화를 이용한 색도제거 실험 결과	57
4.4 염소 및 오존산화를 이용한 색도제거 효율 비교 및 현장 적용방안	62
제 5 장 결 론	63
참고문헌	65
감사의 글	70

List of Tables

Table 1. Cause and kind of chromaticity in tap water	4
Table 2. Chromaticity and kind of Algae	5
Table 3. Control methods of eutrophication in lake	9
Table 4. Characteristics and kinds of chlorine oxidizer	10
Table 5. Factor of effect on chlorine disinfection	12
Table 6. Physical characteristics of ozone	13
Table 7. Advantage and disadvantage of ozone oxidation	14
Table 8. Effect on human of ozone concentration in air	15
Table 9. Typical ozone concentration for water treatment	16
Table 10. Water facilities in Jeju	17
Table 11. Specification of Eoseungsaeng lake	18
Table 12. Method and device for each criterion	25
Table 13. Sampling date and measurement parameters	26
Table 14. Manufacturing method of KI-method	28
Table 15. Specification of ozonizer	29
Table 16. Cell count and Chl-a by depth at 1st lake	38
Table 17. Measurement items by depth(pH, DO, Conductivity, TOC, Chromaticity, Turbidity, SS, Chl-a, Cell count)	43
Table 18. Monthly water quality at Eoseungsaeng WTP	44
Table 19. Correlation among water factors	45
Table 20. Water quality of law water(1st exp.)	48
Table 21. Experimental result at pH 7(1st exp.)	49
Table 22. Experimental result at pH 8(1st exp.)	49
Table 23. Experimental result at pH 9(1st exp.)	49
Table 24. Experimental result with contact time(1st exp.)	50
Table 25. Water quality of law water(2nd exp.)	52
Table 26. Experimental result at pH 7(2nd exp.)	52
Table 27. Experimental result at pH 8(2nd exp.)	53

Table 28. Experimental result at pH 9(2nd exp.)	53
Table 29. Experimental result with contact time(2nd exp.)	53
Table 30. Chromaticity removal of non-filtered sample with ozone dosage and pH 7	57
Table 31. Chromaticity removal of filtered sample with ozone dosage and pH 7	57
Table 32. Chromaticity removal of non-filtered sample with ozone dosage and pH 9	58
Table 33. Chromaticity removal of filtered sample with ozone dosage and pH 9	58

List of Figures

Fig. 1 Effect of algae on water treatment process.	6
Fig. 2. Freshwater algae.	6
Fig. 3. Chlorine ratio among pH.	11
Fig. 4. Flowchart of Eoseungsaeng WTP(water treatment plant).	19
Fig. 5. Location of water sampling point at 1st lake.	21
Fig. 6. Location of water sampling point at 2nd lake.	22
Fig. 7. Chlorine Oxidation diagram.	27
Fig. 8. Ozone oxidation diagram.	30
Fig. 9. pH at Eoseungsaeng 1st lake.	33
Fig. 10. DO concentration at Eoseungsaeng 1st lake.	34
Fig. 11. Temperature at Eoseungsaeng 1st lake.	34
Fig. 12. Chl-a concentration at Eoseungsaeng 1st lake.	36
Fig. 13. pH at Eoseungsaeng 2nd lake.	39
Fig. 14. DO concentration at Eoseungsaeng 2nd lake	40
Fig. 15. Temperature at Eoseungsaeng 2nd lake.	40
Fig. 16. Chl-a concentration at Eoseungsaeng 2nd lake.	42
Fig. 17. Relationship between chromaticity and cell count.	46
Fig. 18. Chromaticity, Chl-a and turbidity by depth.	47
Fig. 19. Chromaticity removal with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(1st exp.).	51
Fig. 20. Chlorine consumption with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(1st exp.).	51
Fig. 21. Chromaticity removal with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(2nd exp.).	54
Fig. 22. Chlorine consumption with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(2nd exp.).	55
Fig. 23. Chlorine consumption with contact time.	55
Fig. 24. Chromaticity with contact time(2nd exp.).	56

Fig. 25. Chromaticity removal of pH 7 with ozone dosage and filtration (before, after).	59
Fig. 26. Chromaticity removal of pH 9 with ozone dosage and filtration (before, after).	60
Fig. 27. Chromaticity removal of non-filtered sample with ozone dosage and pH(7, 9).	61
Fig. 28. Chromaticity removal of filtered sample with ozone dosage and pH(7, 9).	61

Summary

This study investigated the cause of chromaticity and its removal methods at Eoseungsaeng water treatment plant(WTP) in Jeju. For removing the origin material of chromaticity, suitable water treatment process was sought by the comparison and the analysis of efficient chromaticity removal methods through the lab-tests by each process.

To find the source material of chromaticity, monitoring the raw water was carried out by separating the field measurement with the lab test. And using the chlorine and ozone oxidation, the application of chromaticity removal through changing the conditions of oxidation was evaluated.

The test results of field and lab showed that the concentration of Fe, Mn were N.D.~0.02 mg/L, N.D.~0.003 mg/L, respectively at 1st lake and N.D.~0.02 mg/L, N.D.~0.002 mg/L, respectively at 2nd lake which suggested that those were the least reason of chromaticity occurrence. The variations of pH, DO, chromaticity, Chl-a were similar along the depth. At 3~4 m of depth, there were inflection point presumably due to algae. To find the basis about this theory, quantitative experiments of algae were conducted. This experiment showed that the variations of number of algae was similar to the trend of pH, DO, chromaticity, Chl-a along the depth. For estimating the source material of chromaticity, correlation of water quality parameters was analyzed. The correlation value between chromaticity and number of algae was the most high value of 0.4308, so algae was estimated as a cause of chromaticity.

The chlorine oxidation experiments were implemented with various dosages(0.3~1.5 mg/L) and pHs(7, 8, 9), and ozone oxidation experiments performed under pre&post injection with various dosages and pHs(7, 9). In chlorine oxidation, optimal dose of 1.0 mg/L with contact time of 30~60 min. led to 43% of chromaticity removal.

On the other hand, 71.43% of chromaticity removal rate was noticed at post-ozone dosage of 0.931 mg/L under pH 9, and 86.71% of chromaticity removal rate was noticed at post-ozone dosage of 3.0 mg/L under pH 9. If the chromaticity concentration of raw water is low, present chlorine disinfection facility can be available. But if degree of chromaticity is higher, the introduction of ozone oxidation process may be necessary.

I. 서론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라는 경제성장과 더불어 상수도사업도 함께 성장하였으며, 수돗물에 대한 인식수준과 관심이 높아지고 있다. 특히 건강상에 큰 문제를 야기하지는 않지만 소비자가 직접적으로 인지하여 불쾌감을 줄 수 있는 색도나 맛·냄새와 같은 심미적 영향물질로 인한 수돗물에 대한 불신이 증가하여 매년 수돗물품질에 대한 민원이 증가하고 있는 실정이다¹⁾. 제주도의 경우 2013년 수질만족도조사에 따르면 수돗물 음용률이 24.7%로 전국평균(5.3%)²⁾에 비하여 높은 수준이지만 미국 56.0%, 캐나다, 47.0%, 일본 33.0%와 비교하면 낮은 수준이다³⁾. 이에 따라 환경부를 비롯하여 수도사업자들은 수돗물을 안전하게 공급하고 쾌적한 이미지를 제고하기 위해서 먹는 물 수질기준 강화, 고도정수처리공정 등의 선진기술을 도입, 정수장 운영 및 관리 능력향상 등에 힘쓰고 있다⁴⁾.

제주도는 국내 최대의 다우지역임에도 불구하고 투수성이 높은 다공질의 화산회토와 화산암류로 이루어져 있어 강수가 지하로 침투하여 대부분의 하천들은 건천을 이루고 있다⁵⁾. 따라서 제주도의 정수장은 대부분 지하수를 원수로 사용하고 있다. 제주도 지하수의 수질은 매우 양호한 편이며, 상수원수로 사용할 경우 대부분이 정수처리공정 없이 소독만을 실시 한 후 수돗물로 시민들에게 공급하고 있다. 제주도내 상수도 시설의 57%가 하류 해안지역에 위치하고 있기 때문에⁶⁾ 중산간지역의 시민들에게 공급이 어려운 문제점이 있어 중산간지역에 계곡물을 저수하여 원수로 사용하는 어승생 수원지를 준공하였다. 용천수를 저수하여 원수로 사용하는 어승생 수원지의 경우에는 지표에 노출되어 다양한 오염물질에 의한 오염가능성이 있으며, 원수의 수질이 지하수에 비해 좋지 않기 때문에 급속여과와 완속여과공정을 거쳐 소독 후 공급하고 있다⁷⁾.

어승생 수원지의 제1저수지는 1971년 12월 10일에 준공되어 40여년이 지난 현재까지 사용 중에 있으며, 저수지 사용이 오래됨에 따라 저수지 저부에서의 퇴적물에 의한 영양염류의 용출로 인해 저수지 내 부영양화현상이 발생 할 수 있으

며, 이로 인한 원수의 수질 저하가 일어날 수 있다. 제주도 수자원본부 조사에 따르면 2013년 3월에는 원수의 색도가 40 도, pH가 9.46으로 매우 높은 수준으로 관찰되었다⁷⁾.

먹는 물 수질기준에 ‘색도는 5 도를 넘지 아니할 것’이라고 명시되어 있다⁸⁾. 국내 정수장의 경우 간혹 색에 대한 심미적 영향에 대한 민원이 발생하고 하고 있다. 어승생 수원지 제1저수지의 경우에도 매우 높은 수준의 색도가 관찰되었으며 지속·반복된다면, 정수처리공정에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 심미적 영향물질인 색도로 인하여 민원이 발생할 것으로 판단된다.

고품질의 수돗물을 안전하고 안정적으로 공급하기 위해서는 어승생 수원지 저수지 내 발생하는 색도의 원인을 규명하고 원수의 수질 향상을 위해 저수지를 보다 철저히 관리하고, 색도가 발생했을 때에는 색도유발물질을 제거하는 방안을 수립하는 것이 필요하다.

어승생 제1,2저수지의 수질모니터링을 통하여 저수지 내 원수의 수심별 색도, 수온, pH, 전기전도도, BOD, SS, 탁도, 클로로필-a 등을 조사하여 수질 특성을 파악하였다. 수질분석 결과를 통해 원수의 수질인자간의 상관성을 분석하여 색도 발생의 원인 물질이 무엇인지 규명하였다. 또한 색도를 제어하는 정수처리공정의 방안으로 염소산화공정과 오존산화공정을 Lab Test 규모로 실시하여 두 공정 간의 효율특성을 파악하였다. 염소산화공정의 경우에는 현재 어승생 수원지에서 소독공정으로 활용하고 있고 주입농도의 조절을 통한 색도제거율을 알아보하고자 하였으며, 오존산화공정의 경우에는 정수장에서 사용되는 산화공정 중 한가지이며 염소산화와 색도제거율 비교 분석을 하고자 하였다.

염소산화를 통한 색도제거는 염소의 주입농도와 잔류염소를 측정하여 염소소모량에 대한 색도제거율을 도시화하였고 접촉시간과 pH에 변화를 주어 실험하였다. 오존산화를 통한 색도제거는 오존발생기를 이용하여 압력을 동일조건으로 하고 발생시간을 조작하여 오존발생량을 조절하였으며 배 오존을 측정하여 실제 시료에 용해된 오존농도를 주입농도로 산정하였다. 주입농도에 따른 색도제거율을 pH조건과 여과 전·후 오존 주입 방식으로 변화를 주면서 실험하였다.

두 가지 산화공정 실험을 비교분석하여 색도제거율에 대한 평가를 하였으며 현장에서 색도를 제거하는데 어느 공정이 더 효율적인 공정인지를 찾고자 하였다.

Ⅱ. 이론적 배경

2.1 상수원의 색도 발생

순수한 상태의 물은 색이 없다. 하지만 자연수에서는 이물질 등에 의해서 물이 색을 띠 수 있는데 이를 나타내는 지표가 색도이다. 색도는 주로 지표수에서 나타나며 유기물이 많은 토양지역에서도 나타날 수 있다. 지표수 중에서도 정체되어있는 호소수나 습지대에서 색도가 높게 나타나며, 강, 하천에서는 지표를 흘러가면서 일어나는 자정작용이나 산화반응 등에 의해서 대부분의 색도가 제거되어 상대적으로 낮게 나타난다. 색도는 완속여과 공정으로는 처리하기 쉽지 않기 때문에 색도가 높은 물은 정수장의 상수원수로서 좋다고 할 수 없다⁹⁾.

상수에서의 색도의 발생은 수질에 대한 안전정보보다는 소비자로 하여금 심미적으로 미치는 영향 물질로 분류할 수 있다. 색도는 수생생물, 무기화학물질, 미네랄, 금속물질(망간, 철 등), 토양, 식물 등에 기인한 유기물질의 분해반응에서 발생할 수 있다. 수중에서의 색도는 겉보기 색도(apparent color)와 진색도(true color)로 구분한다. 겉보기 색도는 여과를 거치지 않은 원수에 부유물질에 의한 색도이며, 진색도는 여과를 거쳐 탁도 물질이 제거된 물의 색도 값을 의미한다¹⁰⁾. 색도의 먹는 물 수질기준은 5도 이하이며, 시험결과 표시한계는 1도, 시험결과 표시자릿수는 '0'의 자리수이다¹¹⁾. 색도의 측정은 수질오염공정시험기준 주해에 제시되어 있는 방법으로 0.45 μm 유리섬유여과지를 이용하여 여과 후 여액을 측정하는 값을 의미한다. 본 연구에서 명시하는 색도는 별도의 언급이 없는 경우 수질오염공정시험기준 주해에 따라 측정된 색도를 의미한다.

사람이 눈으로 인지할 수 있을 정도의 색도가 나타나는 물은 음용수로서 안전하지 않다고 할 수는 없지만 소비자로 하여금 색도로 인한 수돗물의 신뢰도를 떨어트릴 우려가 있다. 가정의 수도꼭지에서 물을 사용하는데 있어서 착색되어진 물이 공급된다면 공급된 물의 색으로 정수처리공정과 공급과정에서 어떤 이상이 있다는 것을 알 수 있는 지표가 된다. Table 1은 수돗물에 착색된 색의 종류에 따른 원인들을 나타내고 있다¹²⁾.

Table 1. Cause and kind of chromaticity in tap water

Kind of coloring	Typical causes
White	<ul style="list-style-type: none"> • Small bubble • Zinc elusion from galvanized steel pipe
Blue	<ul style="list-style-type: none"> • Colored by scattering and absorption of light • Elusion of copper ion from steel pipe
Red	<ul style="list-style-type: none"> • Rust of iron pipe
Black	<ul style="list-style-type: none"> • Manganese elusion from a source of water supply

색도는 다양한 원인에 의해서 발생 할 수 있으며 주요한 원인중의 하나는 천연유기물질(NOM, natural organic matter)이다. 특히 휴믹물질(humic matter)은 yellow-brown의 색도를 발생시킨다. 휴믹물질은 휴믹산과 펠빅산으로 구분 할 수 있는데 일반적으로는 휴믹산이 색도의 발생에 영향이 큰 것으로 알려져 있으며, 철성분이 있을 경우에는 용존성 ferric humates를 생성하여 색도를 더욱 진하게 한다. 철, 망간, 점토와 같은 콜로이드 형태의 부유물질들도 색도를 발생시킨다¹³⁾.

수중의 조류 또한 색도 발생의 원인이 될 수 있다. 조류(algae)는 수중에서 부유하면서 엽록소-a로 광합성을 통해 생식하는 식물성 플랑크톤을 말한다. 조류는 수중생태계에서 광합성을 통하여 수중에 산소를 공급하고 동물플랑크톤의 먹이가 되는데 이는 육상의 식물과 같은 역할 수행이라 할 수 있다¹⁴⁾. 조류에 의한 색도는 1차적으로 조류 체내에 가지고 있는 색소에 의해서 발생된다. 하지만 이 뿐만 아니라 조류에 의해 분비되는 대사산물에 의해서도 나타난다. 수질오염공정 실험기준 주해에 나와 있는 색도측정방법에 의하면 조류 체내에서 나타내는 색은 0.45 μm 유리섬유여과지에 여과되지만 조류의 대사산물은 유리섬유를 통과하여 색도를 나타낼 것이다. 조류의 대사산물로는 지질, 색소, Polymers, 생리활성 물질 등이 있으며, 색소의 경우 남조류에서는 Chlorophyll의 녹색의 색소를 나타내며, 위 색소를 포함한 적색의 Phycoerythrin과 청색의 Phycocyanin이 대표적인 색소이다¹⁵⁾. 조류체내에서 나타내는 색에 비해서는 적은 양이지만 색을 낸다는 의미에서 매우 중요하다. 또한 조류 개체수에 따라서 색도의 차이가 뚜렷이 달라

지며, 조류의 종에 따라서도 달라진다. 다음 Table 2는 물을 착색시키는 조류의 종류와 색과 색도를 나타낸다¹⁶⁾.

Table 2. Chromaticity and kind of Algae

Algae	Kind of coloring	Chromaticity(°)
<i>Euglena agilis</i>		14
<i>Scenedesmus quadricauda</i>		13
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Green	12
<i>Chlorella sp.</i>		13
<i>Chalmydomonas facitata</i>		13
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Blue-green	6
<i>Anabaena flos-aquae</i>		7
<i>Melosira italica</i>		15
<i>Tabellaria fenestrata</i>	Brown	15
<i>Ceratium hirundinella</i>		16
<i>Peridinium willei</i>		16
<i>Dinobryon divergens</i>	Yellow	17

조류는 일반적으로는 흐르는 지표수 보다는 정체되어 있는 호소수나 연못과 같은 환경에서 더 잘 성장하게 된다. 조류에 의한 색도는 정체된 수계에서 질소나 인과 같은 영양염류의 유입에 의해 특정 플랑크톤이 급격히 번식하면서 수화를 일으키며 색도 또한 증가하게 된다. 부영양화로 인하여 급격히 증가한 조류는 색도뿐만 아니라 상수원의 수질관리에 여러 가지 문제를 야기 시킨다. 먼저 급격하게 증가한 조류에 의하여 호소나 연못의 수중 생태계에 산소를 고갈시켜 수중의 어류나 수중생물의 질식을 유발하거나 수화현상으로 인하여 수생태계에 햇빛을 차단하여 수중의 물의 부패시켜 수질을 악화 시킬 수 있으며, 특정 조류는 정수처리과정 중 여과지 폐색의 원인이 되기도 한다. 또한 조류는 이취·미 유발 물질로서 다량 번식했을 경우 심미적 영향을 줄 수 있는 물질이다. 뿐만 아니라 특정 조류의 경우에는 독성 성분을 가지고 있기 때문에 과다번식 할 경우 생태계 교란을 일으킬 수도 있다. Fig. 1은 조류가 정수처리공정에 일으키는 장애에 대하여 나열하였다¹⁷⁾.

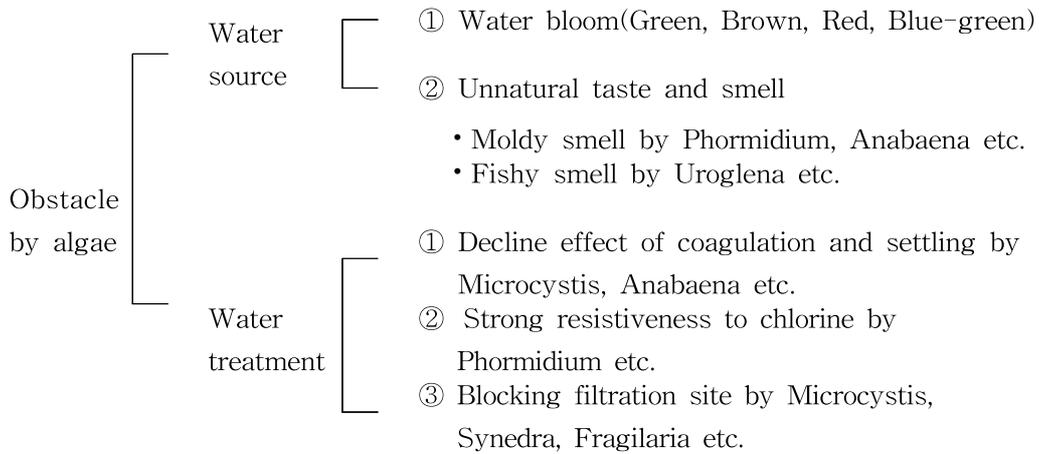


Fig. 1 Effect of algae on water treatment process.

Fig. 2는 조류분류와 조류를 관찰하여 그림으로 나타내었다¹⁷⁾.

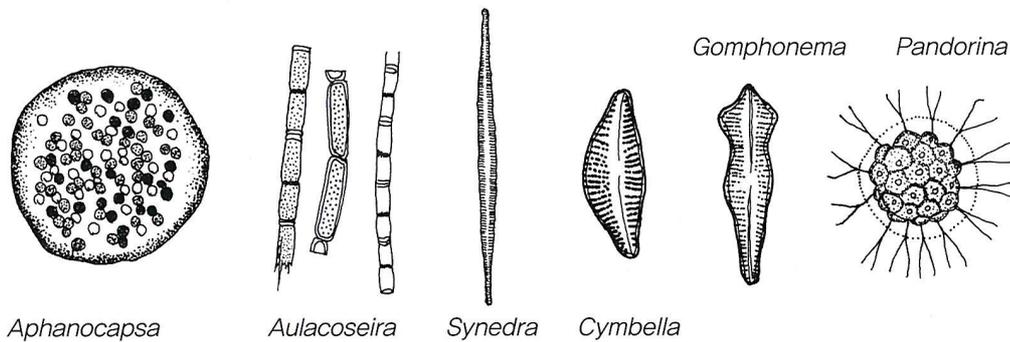


Fig. 2. Freshwater algae.

조류는 광합성을 통해서 성장하기 때문에 조류의 성장과 생식, 사멸은 일사량(빛), 수온, 질소·인(영양염류) 및 수계의 체류시간 등 환경조건에 많은 영향을 받는다. 국내 호소수의 경우에는 영양염류가 매우 풍부한 상태이기 때문에 계절별 일사량과 수온에 따라 우점종이 결정된다. 대부분의 조류에 의한 색도는 녹색을 띄지만 우점종이 어떤 조류인가에 따라 수계의 색은 갈색, 녹색, 옅은 녹색 등으로 변화한다. 조류의 대량 번식을 막기 위한 단기적인 대책으로는 발생초기에 신속한 대처가 필요하며 유입되는 영양염류를 제어하거나 사전에 수계에 수생식물을 재배하여 조류의 발생을 억제할 수 있으며, 수중폭기장치를 이용하여 호소수를 순화시키거나 조류 제거선을 활용하여 조류의 발생을 억제할 수 있다.

또한 정수장에서 고도정수처리공정을 도입, 운영을 강화하는 방법과 정수의 수질 기준을 강화하는 방법 등이 조류발생을 억제할 수 있다. 중·장기적인 대책으로는 호소바닥에 침전된 퇴적층을 준설 하거나, 지천 유입부에 인공습지 등을 조성하여 완충지대(buffer zone)를 만드는 방법 등이 있다.

조류에 의한 색도의 발생은 조류가 유기물을 함유하고 있기 때문에 정수처리 공정에서 염소소독의 소독효과를 감소시키고 염소 요구량을 증가 시킬 수 있다. 또한 색도물질이 전구물질이 되어 급수과정에서 소독제인 염소와 반응하여 소독 부산물 생성에 기여 할 수 있다¹⁸⁾.

일반적으로 호소수를 상수원수로 사용할 경우에는 원수를 저수하여 이용하기 때문에 온도에 따른 호소수의 독특한 성질인 성층현상과 전도현상이 일어날 수 있다. 수온변화에 따라 만들어진 호소의 성층이 계절이 변화하면서 전도현상이 일어나게 되는데 이 과정에서 호소바닥으로 가라앉아 있었던 퇴적물에 포함된 영양염류가 용출되어 부영양화를 가속화 시킬 우려가 있다. 또한 저질의 용출은 영양염류뿐만 아니라 망간과 철도 함께 용출시킴으로써 흑수나 적수의 원인이 되기도 한다¹⁹⁾.

2.2 색도 제거 기술

국내의 색도제거에 관한 연구는 대부분이 산업시설이나 공장등과 같은 시설에서 나오는 배출수를 대상으로 수행되어 왔으며, 고도산화법과 같은 고도처리공정을 활용하여 색도물질을 제거하고 있다. 산업폐수에서는 고농도의 색도를 제거하는데 그 목적이 있지만 유사한 기술을 활용하면 정수장에서의 색도제거에도 유용할 것으로 판단된다.

정수처리공정을 거치면서 색도발생 물질을 처리 할 수 있으며 색도의 발생 원인에 따라 다양한 방법으로 처리가 가능하다. 부식질에 의한 색도의 경우 응집침전공정, 염소산화공정을 거쳐 처리할 수 있으며, 고도처리공정인 활성탄흡착, 오존산화 등을 통해 처리효율을 향상 시킬 수 있다.

응집침전공정은 Alum(황산알루미늄) 또는 PAC(폴리염화알루미늄)와 같은 응집제를 주입하여 처리수의 pH조절과 함께 수중의 휴믹산을 효과적으로 제거할 수 있다²⁰⁾.

염소산화공정은 산화반응을 통해 색도물질을 산화시켜 제거하는 방법이며, 대부분의 정수장에서 염소소독공정을 활용하고 있으며 어승생 수원지 또한 염소소독공정을 사용하고 있어 색도제거 방안으로 활용하기 유용하다.

고도처리공정인 활성탄의 경우 휴믹산과 펠빅산 모두를 제거 할 수 있으며, 빠른 시간 안에 처리 할 수 있다²¹⁾. 하지만 활성탄을 재생하거나 활성탄에 의해 발생한 침전물을 처리하기 위한 후속공정이 필요하다.

오존산화공정은 산화력이 강한 오존을 이용하여 색도성분을 제거 할 수 있으며, THMs(trihalomethanes)와 HAAs(haloacetic acids)의 생성을 저감시키고 염소보다 강한 산화력을 통해 염소의 대체 소독제로 활용 할 수 있을 뿐만 아니라 맛·냄새의 제거에도 탁월하다.

저수지 내에서 부영양화를 억제하고 색도의 발생을 줄일 수 있는 방법으로는 저수지로 유입되는 상류유역의 오염원을 관리하는 방법과 저수지 내 조류를 억제 하는 방법이 있다. Table 3은 호소수 내에서 부영양화를 줄일 수 있는 방법을 표로 나타내었다. 생물증식을 억제하는 황산구리, 염소제 등과 같은 약제를 살포, 공기를 불어 넣어 저수지를 인공적으로 순환시켜 수질을 개선시킬 수 있는 수중

폭기장치를 설치하는 방법과 영양염류의 공급원인 바닥퇴적물을 준설하여 부영양화를 억제하는 방법 등이 있다²²⁾.

Table 3. Control methods of eutrophication in lake

Method	Note
Pollution management of water resource basin	<ul style="list-style-type: none"> • Blocking the inflow of nutrient by constructing basic environmental treatment facility • Construct buffer zone or dam for management non-point pollutant source
Spraying chemicals	<ul style="list-style-type: none"> • Control the algae caused unnatural taste and smell • Be harmless to humans and no effect on crops or fishes • Copper sulfate, sodium hypochlorite, calcium hypochlorite, etc.
Circulation of storage water	<ul style="list-style-type: none"> • Artificial circulation by air-lift or pump • Classified aeration , deep-aeration system, on purposes
Dredge bottom	<ul style="list-style-type: none"> • Dredge sediment source of nutrient • No contaminate storage water • Secure dispose place of earth and sand
Discharge the algae	<ul style="list-style-type: none"> • Discharge the upper water which had many algae or the bottom water which had much nutrient • Consider the effect on down stream
Etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetation purification, algae fence

2.2.1 염소산화 처리

염소는 정수장에서 가장 널리 사용되는 화학약품이다. 염소는 19세기이후 상수 처리에 실제로 사용되기 시작하였고, 이후부터 장티푸스와 같은 수인성전염병이 급격하게 감소하였다²³⁾. 염소소독은 통상 소독을 목적으로 여과 후에 주입하는 후염소처리가 대표적이지만, 산화력을 가지고 있기 때문에 정수처리의 일환으로 전염소와 중간염소처리를 이용하여 정수처리공정의 효율을 향상시킬 수 있다. 전염소처리를 활용하면 여과 전에 세균을 감소시켜 침전지나 여과지 내부를 위생적으로 유지 할 수 있으며, 조류, 소형동물, 철박테리아 등이 생식하고 있는 경우 이들을 사멸시켜 정수시설 내에서 번식하는 것을 억제 할 수 있다. 또한 철·망간, 맛·냄새를 제거하는데 효과적이다. 중간염소처리도 전염소와 마찬가지로의 효과를 가지고 있으며 원수 중에 부식질이나 유기물이 많이 함유되어 전염소처리 시 THMs의 발생이 우려될 경우 응집과 침전으로 부식질이 어느 정도 제거된 후 중간염소처리를 하는 것이 바람직하다²²⁾.

염소산화제의 종류로는 염소(Cl_2), 차아염소산나트륨(NaOCl), 차아염소산칼슘($\text{Ca}(\text{OCl})_2$)가 있다. 다음 Table 4는 염소산화제의 중요한 성질과 일반적인 적용을 비교한 표이다²⁴⁾.

Table 4. Characteristics and kinds of chlorine oxidizer

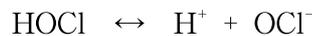
Characteristic	Chlorine	Sodium hypochlorite	Calcium hypochlorite
Formular	Cl_2	NaOCl	$\text{Ca}(\text{OCl})_2$
Phase	Liquid, Gas	Solution	Power, 1% solution
Stability	Stable	Unstable	Stable
Handling risk	High	Middle	Middle
Corrosive	High	Middle	Middle
Deodorization	High	Middle	Middle
Cost	Low	Middle	Middle

염소는 물에 잘 용해되기 때문에 적용성이 높으며, 경제적이고 측정과 제어 또한 용이하다. 염소는 많은 정수장에서 사용되고 있으나 잔류성이 있어 소독과정과 공급과정에서 발암물질로 의심되는 THMs와 같은 소독부산물을 생성하는 단점을 가지고 있다²⁴⁾.

염소가스가 물에 용해되면서 염소는 수화되어 차아염소산을 형성한다. 이형태에서 염소는 유리 잔류염소로서 존재하게 된다. 염소가스가 수중에서 수화되는 반응식은 다음과 같다.



차아염소산은 약산으로 차아염소산이온으로 해리된다.



HOCl(차아염소산)과 OCl⁻의 상대적인 농도는 수온, pH 등에 따라 변한다. HOCl과 OCl⁻은 둘 다 유효염소이지만 소독력에 있어서는 HOCl이 OCl⁻에 비하여 약 80배 정도 강하다²⁵⁾. HOCl과 OCl⁻은 pH조건에 따라 존재 비율이 변화하는데 pH에 따른 유효염소존재의 백분율은 Fig. 3과 같다²⁶⁾.

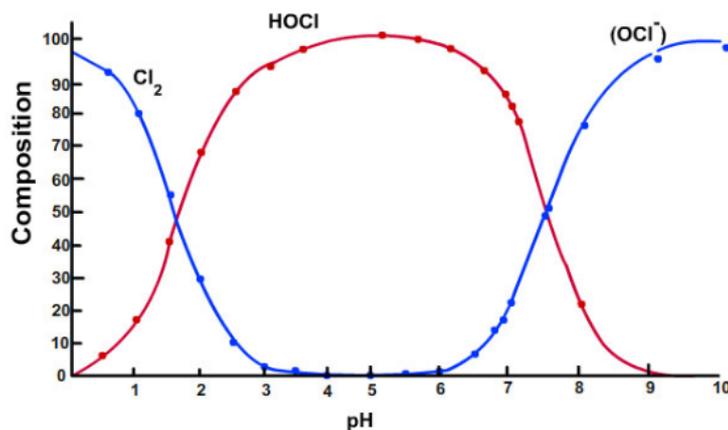


Fig. 3. Chlorine ratio among pH.

pH에 따라 유효염소의 존재비율이 달라지기 때문에 pH의 변화는 살균력에 영향을 미친다. HOCl의 존재 비율이 높은 pH가 3~7 조건일 때 살균력이 좋을 것이다. 정수처리공정에 적용할 경우 먹는 물 수질기준에 pH는 5.8 이상이어야 하므로 pH 5.8이상 7.5이하의 범위에서 적용하는 것이 바람직하다. pH 뿐만 아니라 염소의 살균력에 영향을 미치는 인자들과 특성을 다음 Table 5에 나타내었다²⁷⁾.

Table 5. Factor of effect on chlorine disinfection

Factor	Note
Chlorine concentration	<ul style="list-style-type: none"> Higher sterilizing, unnatural taste and smell, THMs with higher concentration
Contact time	<ul style="list-style-type: none"> Higher sterilizing, THMs with longer contact time
Temp.	<ul style="list-style-type: none"> Rising disinfection rate with higher temp More chlorine consumption in summer than winter
Turbidity	<ul style="list-style-type: none"> Deplete efficiency
Conc. of microorganism	<ul style="list-style-type: none"> Need longer time with higher microorganism concentration

염소산화를 이용한 색도제거는 국내 정수장 대부분이 염소주입시설을 갖추고 있기 때문에 별도의 추가 시설 없이 색도제거 기술로 활용 할 수 있어 저농도의 색도를 제거하는 기술로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2.3 오존산화 처리

오존(O₃)은 상온에서 무색을 띠는 기체로서 코를 자극하는 독특한 냄새를 가지고 있으며, -180℃로 냉각시키면 검푸른색의 액체로 액화된다. 액체상의 오존은 매우 불안정한 상태이며 폭발성을 가지나 통상 상온에서는 폭발성을 가지지 않는다. 오존은 산소보다 용해도가 10배가량 높지만 오존발생기에서의 오존의 분압은 약 2%에 불과하며, 수중에 용해되는 오존은 1 기압, 20℃상태에서 산소와 비슷한 값을 가진다. 오존의 물리적 특성은 Table 6과 같다²⁸⁾.

Table 6. Physical characteristics of ozone

Character Name	Character Value
Molecular weight	48 g
Boiling point	-111.9℃
Melting point	-192.7℃
Critical temp.	-12.1℃
Critical pressure	54.6 kg/cm ²
Critical density	0.437 L/mL
Critical volume	0.147 L/mL
Gaseous density(0℃)	2.144 g/L
Liquid density(-112℃)	1.354 g/mL
(-183℃)	1.571 g/mL
(195.4℃)	1.614 g/mL
Surface tension(-183℃)	38.4 dyne/cm
Mole specific heat at static pressure	
(100℃)	43.4 kJ/mol · deg
(-173℃)	33.2 kJ/mol · deg
Viscosity(liquid)(-183℃)	1.57 cp
Evaporation heat(-112℃)	316 kJ/g
Heat of formation	144 kJ/mol
Heat of dissolution(water, 18℃)	15.3 kJ/mol
Ion Potential	12.8 eV
Electron affinity	1.9~2.7 eV
Dipole moment	0.53 D
Permittivity(gas, 0℃)	1.0019
(liquid, -183℃)	4.73

상수처리에서 오존을 사용한 것은 1886년 de Matrens에 의한 최초의 오존살균 실험 이후 1893년 네덜란드 Oudshoorn에서 시작되었다. 현재는 음용수의 염소 소독에서 THMs와 같은 소독부산물의 생성이 문제로 부각되면서 오존산화처리가 관심을 받게 되었다. 오존을 이용하여 소독을 할 경우 소독이외에도 박테리아 살균, 미생물의 불활성화, 조류의 제거, 맛·냄새의 제거, 색도의 제거, 철, 망간의 제거, NOM의 제거, 시안의 제거 등과 같이 부가적인 효과가 있어 오존의 사용이 많아지고 그 활용도 또한 점차 증가하고 있다. 그러나 오존산화는 강한 산화력으로 살균력은 향상되지만 잔류성이 없는 단점을 가지고 있다²⁸⁾. 다음 Table 7은 오존산화의 장점과 단점을 나타낸다²²⁾.

Table 7. Advantage and disadvantage of ozone oxidation

Advantage	Disadvantage
<ul style="list-style-type: none"> Effectively remove taste, smell, color Rapidly oxidation of organic impurity Effective oxidizer because wide range of water temp. and pH Short contact time No make THMs 	<ul style="list-style-type: none"> Non-persistence High cost and electronic energy Inhibit ozone generation at high temp. and humidity Difficult to corresponding to flow rate and water quality change Need preconditioning

오존은 저농도로 사용하여도 염소소독보다 좋은 살균력을 가질 수 있으나 발생하는 농도와 pH에 따라 생체에 대하여 기질, 단백질, 핵산 그리고 생체막 등을 파괴 할 수 있다. 다음 Table 8은 대기 중에서 오존농도에 따라 인체에 미치는 영향을 나타내었다²⁹⁾.

Table 8. Effect on human of ozone concentration in air

Ozone concentration	Effect
0.02~0.05 mg/L	• Smell
0.23 mg/L	• Bronchial mucosal injury
1~2 mg/L	• Helplessness, Headache
10 mg/L	• Dyspnoea
15~20 mg/L	• Died of exposure 2 hours
1000 mg/L	• An Hour at death

오존산화 공정을 정수처리공정에 적용할 때는 처리목적에 따라 적절한 처리공정 배열이 필요하다³⁰⁾. 오존은 전오존(원수), 중오존(침전수), 후오존(여과수)으로 3가지로 나누어 주입할 수 있으며 원수에 주입하는 전오존 처리는 색도성분이 많은 경우 적합하고 원수가 저탁도일 경우 응집효과를 개선시킬 수 있으나 원수에 현탁물질이 많이 존재하면 소모량이 많아지게 된다. 따라서 일반적으로는 중오존, 후오존처리를 이용하여 주입한다.

오존의 산화 반응은 오존분자로부터 산화반응이 일어나는 직접반응과 오존이 분해되는 과정에서 생성된 자유 라디칼이 산화반응을 일으키는 간접반응으로 나눌 수 있다. 수처리공정에 응용 할 때에는 처리수에 반응성이 큰 물질들이 많이 존재한다면 직접반응이 진행되도록 하고, 오염물질과 오존과의 반응이 상대적으로 느릴 때에는 간접반응에서 생성되는 산화력이 우수한 자유라디칼의 생성을 증가시킬 수 있도록 제어하는 것이 효율적일 것이다. 오존분자보다 중간생성물인 자유라디칼의 경우가 더 강한산화력을 가지고 있으며, 중간생성물이 만들어지는 반응은 pH 8이상의 조건에서 가속화 된다. 따라서 pH가 8이상으로 증가하는 조건에서 산화력이 더욱 강해질 것이다.

주입된 오존은 산화반응이 다 이루어질 때까지 소비되고, 이후에 수중에 용해된다. 수중에 용해된 오존의 농도를 잔류오존 농도라고하며 일반적인 잔류오존 농도는 0.3~0.9 mg/L이며, 적정주입농도는 1~5 mg/L로 알려져 있다²²⁾.

오존주입농도는 원수의 수질특성과 제거대상의 종류와 농도 등에 따라 다르게 주입해야 하며, 주입농도에 따라 처리효과에 많은 영향을 줄 수 있다. 따라서 제거 대상물질의 농도범위에 대한 실험실 실험을 통하여 여러 조건 하의 적정주입농도를 선정하는 것이 매우 중요하다. 또한 효과적으로 오존처리공정을 운영하려면 오존이 잔류하지 않을 정도의 주입농도를 선정하는 것이 효율적이다.

다음 Table 9는 오존처리공정에 제거대상물질의 농도범위에 따른 오존주입농도에 대한 표이다²²⁾.

Table 9. Typical ozone concentration for water treatment

Material	Ozone concentration
Taste, smell	<ul style="list-style-type: none"> • 0.5~2.0 mg/L, contact time 10~20 min • 100% remove 2-MIB at 0.5~3.0 mg/L
THMs made by precursor	<ul style="list-style-type: none"> • Non-effect on THMs created already but effect on restrain THMs created by precursor
Mn	<ul style="list-style-type: none"> • 0.5~1.0 mg/L
1,4 dioxin	<ul style="list-style-type: none"> • 38~62% remove in Nakdong-river raw water at 1.9~6.0 mg/L(consider of ozone in off-gas)

Ⅲ. 연구 방법

3.1 연구 대상

제주도는 지질학적 특성상 대부분의 지역이 투수성이 좋은 다공질의 현무암으로 이루어져 있어 지표수를 이용하기 보다는 지하수를 상수원으로 이용하여 운영하고 있다. 한라산 Y계곡의 용천수를 지표에 저수하여 상수원수로 사용하고 있는 어승생 수원지의 저수지를 대상으로 하였다. 어승생 수원지는 원수를 지표에 저수하여 수원으로 사용하기 때문에 지하수와 비교하여 상대적으로 오염원에 노출되어 있고 원수를 저수하기 때문에 호소수의 특성을 나타 낼 수 있으며, 보다 철저한 시설관리가 필요 할 것으로 판단된다.

Table 10은 제주도 상수도시설에 수원 종류별 현황을 나타낸 표이다. 대부분 상수원은 지하수이며 어승생 수원지는 농업용수를 위한 저수지 담수시설을 제외하면 상수원수를 목적으로 하는 유일한 저수지 담수시설에 해당된다. 어승생 수원지 정수장에서 생산하는 일일 물 생산량은 약 15,000 m³이며, 이는 중산간지역을 비롯한 제주 주민 약 2만 여명에게 공급하고 있다⁷⁾.

Table 10. Water facilities in Jeju (2013.12.31)

Source	Sites	Population	Production Capacity (m ³ /day)
Spring water	8	146,137	111,700
Underground water	263	424,430	324,400
Eoseungsaeng	1	19,625	15,000
Reservoir and freshwater facilities	8	2,257	1,725

어승생 수원지는 한라산 Y계곡의 용천수를 저수하여 상수원수로 사용하고 있으며, 저수 후 정수처리공정을 거쳐 급수 하고 있다. 어승생 수원지는 2개의 저수지를 보유하고 있다. 제1저수지의 경우 1971년 12월 10일 준공되어 현재 까지 사용 중에

있다. 제1저수지의 만수위 수심은 6 m이며, 저수 용량은 약 100,000 m³이다. 하지만 가뭄 시에 물 부족 현상이 있어 주민들이 생활하는데 불편을 초래해 왔다. 이에 따라서 제주도는 강우 시 Y계곡에서 하류로 흘러가는 물을 이용하기 위해 저수용량이 제1저수지의 약 5배 큰 총 저수용량이 500,000 m³이고 만수위가 17 m인 제2저수지를 조성하였다. 제2저수지는 2012년 11월에 완공되었으며, 2013년 2월부터 저수 된 물을 이용하여 주민들에게 공급하고 있다⁷⁾. Table 11은 어승생 수원지의 시설현황이다.

Table 11. Specification of Eoseungsaeng lake

Criterion	Situation	Note
Location	• San 50-3, Haean-dong, jeju-si, jeju-do	
Site area	• 95,214 m ²	• Except 2 nd lake
Water intakes	• Eorimok 1·2, Gugu-valley	
1 st lake	• Reservoir capacity 106,800 m ³ , depth 6 m	• Start construction at 20. Apr.. 1967
	• Reservoir area 24,000 m ²	• Completion at 10. Dec.. 1971
	• Leeve L=250 m, H=18.6 m	
2 nd lake	• E.L. of full leve 596.00 m	
2 nd lake	• Reservoir capacity 500,00 m ³ , depth 17 m	
Effluent	• 3 sites 18,000 m ³ /day	• 553,000 m ³ /month
Supply	• Average 10,000 m ³ /day, max 15,000 m ³ /일	
Service area	• 11 vallage, 19,625 persons	• Dec.. 2013
	• 50 farms, 42 facilities	
Water pipe	• D=200~450 mm, L=48.17 km	
Conduct pipe	• L=7.9 km	
Purification plant	• Conveyance pipes(D500 mm) L=221 m	• Scale 15,000 m ³ /day
	• Water pipes(D300~500 mm) L=585 m	• Automatic filtration 5,000 m ³ /day·site
	• Pumping station Q=3.47 m ³ /min X H22m X 4 pumps	• Clear well 2,700 m ³ /site
	• Automatic filtration φ 7.5m X L28m X H4m X 4 sites	• Slow filtration 5,000 m ³ /day·site
	• Slow filtration B25m X L40m X H2.5m X 3 sites	• Start construction at 17. Aug.. 2005
	• Clear well B24m X L28m X H4m X 2 sites	• Completion at 22. Dec.. 2006
	• Chlorination facility 1 site	

어승생 수원지의 원수수질은 육지에서 지표수를 원수로 사용하는 정수장보다 상대적으로 좋기 때문에 표준정수처리공정 중 스크린을 거치면서 낙엽이나 큰 이물질들을 제거하고 응집제의 사용 없이 바로 급속여과기를 통과하여 완속여과지를 거치고 정수지에서 차아염소산칼슘($\text{Ca}(\text{ClO})_2$)을 이용한 염소소속을 거쳐 자연유하방식에 의해 각 가정으로 공급한다. Fig. 4는 어승생 정수장의 정수처리공정의 모식도이다.

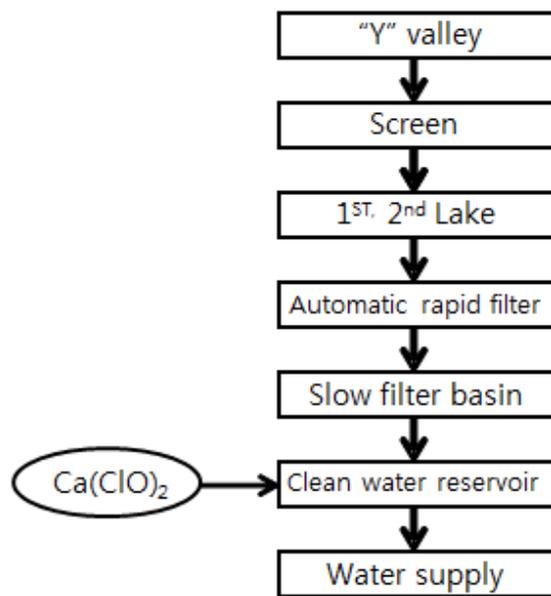


Fig. 4. Flowchart of Eoseungsaeng WTP(water treatment plant).

어승생 정수장은 제주도 수자원본부에서 일일, 주간, 월간, 분기, 연간으로 수질 검사를 실시하고 있으며, 제주도의 기후 특성상 강수량이 많기 때문에 Y계곡의 물을 취수하여 사용하고 있는데 Y계곡의 경우 강수가 지표를 따라 바로 어승생 수원지 저수지로 유입되고 수원지의 위치가 고산지대이기 때문에 인위적인 오염 물질의 유입이 적어 Y계곡의 물을 직접 취수하는 경우에는 원수의 수질이 매우 우수하여 월별로 검사하는 먹는 물 수질기준 항목에 적합한 것으로 나타났다. 2014년 1월부터 2015년 3월까지 수자원본부 월별 먹는 물 수질기준 검사결과에서 59개 항목 전체에서 수질기준에 적합한 것으로 나타났다. 본 연구에서 중점을 두고 있는 색도와 색도유발물질인 철, 망간 또한 불검출 되었다.

강수량이 많은 경우에는 Y계곡의 물을 직접 취수하여 사용하지만 강수량이 적거나 가뭄이 있을 때에는 저수지의 물을 원수로 사용하기 때문에 원수 수질에 변동이 있을 것으로 판단된다. 제1저수지는 강우량이 적은 경우 높은 pH 등과 같은 수질저하 현상이 관찰되었으며, 2013년에는 원수에서 매우 높은 수준의 색도가 관찰되기도 하였다.

3.2 수질 조사

3.2.1 시료 채취

제주도 어승생 수원지의 색도 발생 원인을 조사하기 위해서 2015년 5월부터 10월까지 월별 수질 모니터링을 실시하였다. 시료를 채취 할 때는 조류의 활동이 활발하여 색도의 발생이 높을 것으로 예상되는 낮 시간을 고려하였으며, 흐린 날 보다는 맑은 날 시료를 채취하였다. 시료는 water sampler를 이용하여 제1, 2저수지에서 수심별로 채수하였다. 시료 채취지점은 제1, 2저수지 각각 율류탑과 취수탑에서 채취하였다. 즉시 측정 항목에 대해서는 현장에서 바로 측정 하였으며, 실험실로 운반 중 시료가 외부요인으로부터 오염되는 것을 막기 위해 2 L 무균 채수병에 시료를 담아 운반하였다. 나머지 수질 항목에 대해서는 실험실 실험을 실시하였으며, 실험 후 시료를 보관 할 때는 암실을 만들어 4℃에서 냉장보관 하였다³¹⁾. Fig. 5, 6은 각각 제1, 2저수지 수질모니터링을 위한 시료채취를 한 위치를 나타내는 위성사진이다.



Fig. 5. Location of water sampling point at 1st lake.



Fig. 6. Location of water sampling point at 2nd lake.

색도제거 실험을 위한 다량의 시료는 수질모니터링 실험결과를 통하여 색도의 발생이 많을 것으로 판단되는 제1저수지에서 채취하였다. 제1저수지에서 시료를 채취 할 때는 현장측정결과와 현장에서 색도를 측정하여 색도가 가장 높은 수심의 시료를 water sampler와 rotary pump를 이용하여 다량 채취 하였다. 실험실에서 시료를 보관할 때는 조류의 생장을 억제하기 위하여 4℃ 암실에서 냉장보관 하였다³¹⁾.

3.2.2 현장 측정 항목

현장에서 측정해야 하는 항목으로는 pH, 수온, DO, 전기전도도, 수심, 투명도가 있으며, 색도의 경우 색도제거 효율을 위한 다량의 시료를 채취 할 때 현장과 실험실에서 모두 측정하였다. 현장측정 항목에 대해서는 water sampler를 이용하여 수심별로 시료를 채취한 후 실험실에서 미리 세척해 온 500 mL 비커에 옮겨 담은 후 측정하였으며 나머지는 2 L 무균 채수병에 옮겨 담아 실험실로 운반하였다.

pH, 수온, DO, 전기전도도는 HACH사의 수질 다항목측정기 중 하나인 HQ40d를 사용하여 측정하였다. HQ40d는 본체에 프로브를 연결하여 실험 항목을 측정한다. 최대 2개의 프로브를 연결하여 동시 측정을 할 수 있다. 또한 각 프로브에는 온도센서기능이 추가되어 있으며 DO 프로브의 경우 포화도까지 측정 할 수 있다. 프로브의 교정은 HACH사의 교정절차에 의해 실시하였으며, 수온의 경우 수질오염공정시험기준 주해에 기재되어 있는 KSB 5316유리제 수온 온도계와 pH 프로브의 온도센서를 비교 실험하여 교정하였다. 수온의 교정은 제2저수지 2차 3차 수질모니터링 샘플링에서 실시하였으며, 비교분석 결과 수온온도계와 pH 프로브의 온도센서의 온도 오차가 미미한 것으로 판단되었다.

제1저수지 제원에 나와 있는 만수위는 수심 6 m이지만, 수심에 대한 자료가 충분하지 않기 때문에 현장측정 시 수심을 측정하였다. 수심의 측정방법은 m단위로 눈금이 표시되어 있는 줄에 추를 달아 표층부터 바닥까지의 깊이를 측정하였다. 제2저수지도 마찬가지로 수심을 측정하였고, 제2저수지의 경우 채수위치인 취수탑에 초음파수위계가 설치되어 있어 샘플링 시 자료를 인용하였다.

시료 채취 시 수심뿐만 아니라 부영양화와 클로로필-a를 간접적으로 간단하게 측정할 수 있는 투명도도 측정하였다. 투명도판은 Lamotte사의 Secchi disk를 사용하였고, 그늘진 곳에서 투명도판이 시야에서 보이지 않을 때까지 가라앉히고 천천히 올리면서 보이기 시작한 수심을 3회 이상 측정하여 평균값을 0.1 m단위로 나타내었다.

3.2.3 실험실 측정 항목

실험실로 운반한 시료는 실험실 측정 항목에 대하여 실험을 실시하였다. 실험실 측정 항목으로는 우선 수심 별로 겉보기색도, 진색도, SS, 여과 전 탁도, 여과 후 탁도, 클로로필-a, 조류정성, 조류정량 항목을 측정하였으며, 수심을 상, 중, 하로 구분하여 T-N, T-P, 철, 망간, BOD를 측정하였다. 철과 망간과 색도를 제외한 각 항목의 시험방법은 ‘수질오염공정시험법기준 주해’에 제시되어 있는 실험방법을 통하여 측정했으며, 철, 망간과 색도는 HACH사의 DR2700을 통해 측정하였다.

조류 농도는 클로로필-a를 측정하여 간접적으로 평가하였다. 클로로필(Chl.)은 구조적인 차이에 따라 a, b, c(c1+c2), d로 나눌 수 있으며 식물성 플랑크톤의 경우 클로로필-d를 가지고 있지 않다. 식물성 플랑크톤의 경우 거의 모든 종이 클로로필-a의 정도는 다르나 가지고 있다. 클로로필-a는 식물플랑크톤의 종에 따라 차이가 있으나 식물플랑크톤의 밀도를 간접적으로 나타내는 지표로 사용되고 있다. 식물플랑크톤의 생장은 영양염류의 농도, 수온, 일사량 조건, 식물플랑크톤의 사멸속도, 침강속도, 동물플랑크톤의 활동 정도에 따라 결정된다. TOC, DOC의 분석은 한국수자원공사 경남지역본부에 분석을 의뢰하였으며, 조류정성, 정량 분석은 직접 방문하여 측정하였다.

Table 12는 실험실 측정 항목에 대한 실험방법과 분석기기를 표로 나타내었다.

Table 12. Method and device for each criterion

Criterion	Mrthod	Device	Note
Chromaticity			-
Mn	Method of DR2700	DR2700 (HACH)	-
Fe			-
Turbidity		2100AN (HACH)	-
Chl-a			200 mL filtration
T-N		Lamda25 (Perkinelmer)	-
T-P			-
BOD	Standard method	HQ40d (HACH)	DO meter
Algae		CX31 (OLYMPUS)	S-R camber
SS		-	200 mL filtration
TOC		TOC-VCPH (Shimadze)	-

본 연구에서 중점적으로 다루는 색도의 실험방법에 대해서는 겉보기 색도와 진색도 2가지로 구분하여 측정하였다. 겉보기 색도는 여과 전의 원수를 사용하여 측정된 색도를 의미하며, 진색도는 여과 후의 색도를 의미한다¹⁰⁾. 본 연구에 색도 제거 효율실험에서는 모두 진색도를 이용하여 실험을 진행하였으며, 겉보기 색도의 측정은 원수 시료의 겉보기 색도를 측정함으로써 진색도가 어느 정도 측정될 지에 대한 사전 과정이라고 할 수 있다. 색도의 분석 방법은 수질오염공정시험법기준 주해에 제시된 분석방법에 따라 실시하였고, 색도의 측정은 HACH사의 DR2700에 내장되어 있는 색도프로그램을 사용하여 값을 측정하였다. DR2700의 경우 색도의 측정 UV파장은 455 nm와 465 nm의 단일파장에서 측정할 수 있으며 본 연구에서는 455 nm 단일파장을 이용하여 색도를 측정하였다.

색도의 측정에 있어 단일 파장을 이용하는 분광광도계 보다는 다중파장을 이용한 분광광도계에서 더욱 정확한 색도를 측정 할 수 있는 것으로 알려져 있다. 색도의 성분이 유·무기화물질에 복합적인 반응에서 기인하는 경우에는 단일파장의 분광광도계로 측정이 어려운 것으로 알려져 있다. 반면 색도의 성분이 NOM이거나 지표수에서 나타나는 색도의 경우에는 단일파장을 이용한 색도측정 또한 적합한 것으로 알려져 있다³²⁾.

진색도의 측정은 SS시험 방법에 따라 시료를 여과한 후의 여액 20 mL를 정방향 셀에 옮겨 담아 DR2700으로 값을 측정하였다. 겉보기 색도의 경우에는 SS과정을 제외한 시료로 동일하게 실험하였다.

Table 13은 시료채취 날짜와 항목을 나타내었다.

Table 13. Sampling date and measurement parameters (2015 Year)

Date	Location	Practical measurement	Lab measurement
10-May	2 nd lake		Turbidity, SS, Chromaticity, Fe, Mn, T-N, T-P
23-May	1 st lake	pH, Temperature, DO,	Turbidity, SS, Chromaticity, Fe, Mn, T-N, T-P, BOD
20-Jun	1 st lake	Conductivity	
	2 nd lake		Turbidity, SS, Chromaticity, Fe, Mn, T-N,
5-Jul	1 st lake		T-P, BOD, Chl-a
	2 nd lake		
25-Jul	1 st lake	pH, Temperature, DO,	Turbidity, SS, Chromaticity, Fe, Mn, T-N,
1-Aug	1 st lake	DO-saturation, Conductivity	T-P, BOD, Chl-a, Algae, Cell count, TOC, DOC
	1 st lake		
5-Sep	2 nd lake		Turbidity, SS, Chromaticity, Fe, Mn, T-N,
			T-P, BOD, Chl-a
10-Oct	1 st lake		

3.3 색도 제거 실험

3.3.1 염소산화물을 이용한 색도제거 실험

염소 산화처리 실험은 어승승 수원지의 정수처리공정 중 염소소독공정에 사용하는 차아염소산칼슘을 대신하여 차아염소산나트륨을 사용하여 실험하였다. 어승승 정수장에서는 완속여과지를 거친 후 정수지에서 염소소독을 실시한다. 따라서 염소산화 실험에 사용한 시료 또한 제1저수지 내 원수를 0.45 μm GF/C로 여과하여 시료로 사용하였다.

먼저 차아염소산나트륨을 100 mg/L으로 제조하고 여과한 시료 100 mL를 등근바닥플라스크에 옮겨 담은 후 각각 주입농도가 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5 mg/L가 되도록 주입하였다. 주입 후에는 주입구를 밀봉하여 동일하게 섞은 후 30분간 정치 한 후 잔류염소 농도와 색도를 측정하였다. 같은 방법으로 NaOH와 H_2SO_4 를 이용하여 pH를 7, 8, 9조건으로 만든 후 pH에 따른 색도제거와 염소소모량에 대한 실험을 하였다.

또한 접촉시간에 따른 색도제거율과 염소소모량을 알아보기 위하여 위에서 실험한 데이터를 바탕으로 염소제거율이 50%인 잔류염소 농도에서 접촉시간에 따른 색도제거율 실험을 실시하여 분석하였다. 접촉시간의 조건은 1, 3, 5, 10, 20, 30, 60, 120분으로 나누어 위와 같은 방법으로 실험을 하였다. 잔류염소의 측정은 HACH사의 pocket colorimeter를 사용하여 측정하였다. Fig. 7은 염소산화 실험의 모식도 이다.

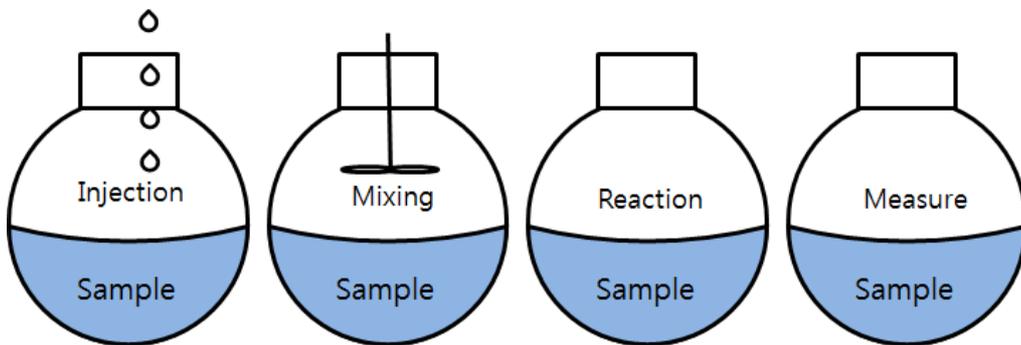


Fig. 7. Chlorine Oxidation diagram.

3.3.2 오존산화를 이용한 색도제거 실험

오존산화처리는 고도처리의 한 종류이며 정수처리공정에 적용 할 때에는 전 오존, 중 오존과 후 오존으로 나누어 적용한다. 본 연구에서는 원수를 대상으로 하는 전 오존과 여과수를 대상으로 하는 후 오존의 산화처리에 대한 색도 제거율을 비교 분석하기 위해서 원수를 SS여과 전과 후로 나누어 실험을 실시하였다. 또한 오존산화공정은 pH의 변화에 따라 산화력에 영향을 받기 때문에 pH를 7과 9조건으로 하여 비교분석 실험을 실시하였다. 오존농도의 측정은 Standard method에 제시되어 있는 KI공법을 이용하여 측정하였다. KI공법에 필요한 시약은 Table 14와 같다³³⁾.

Table 14. Manufacturing method of KI-method

Name	Manufacturing method
KI(2%)	• Take exactly KI 20 g dissolved in distilled water 1L
2N - H ₂ SO ₄	• Take exactly H ₂ SO ₄ 54.3 mL dissolved in distilled water 1L
0.025N - Na ₂ S ₂ O ₃	• Take exactly 0.1N-Na ₂ S ₂ O ₃ 250 mL dissolved in distilled water 1L
Starch solution	• Starch 1 g dissolved in water 100 mL → 1min boiling → Cooling → Using the supernatant

KI공법의 오존측정은 요오드화칼륨 수용액에서 오존이 유리되는 요오드의 양으로부터 오존의 양을 구하는 방법이다. 유리된 요오드는 티오황산나트륨으로 적정하여 산출 할 수 있다. 원수와 여과 한 시료에 오존발생기를 이용하여 오존을 주입하고 오존 주입농도에 따른 실험을 실시하였다. 오존발생기는 TRIOGEN사의 LAB-2B를 사용하였다. 오존발생기의 제원은 다음 Table 15와 같다.

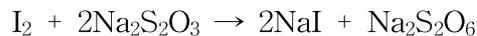
Table 15. Specification of ozonizer

Model	Ozone		Feed Gas Flow		Variable	Power	Power
	Output(2)		Rate		Output Control	Supply	Consumption
	g/h	lb/h	L/min air	L/min Oxygen	%	v/ph/Hz	W
LAB2B	10.0	0.35	4~10	2~5	15~100	230/1/50 or 115/1/60	105

KI공법의 오존농도 측정 방법은 다음과 같다.

- ① 증류수 980 mL에 제조한 KI용액 20 mL를 넣어 1000 mL로 한다.
- ② 오존발생기를 이용하여 오존을 발생시킨다.
- ③ 오존과 반응한 KI용액은 노란색으로 변한다.(오존농도가 높을수록 갈색)
- ④ 황산(H₂SO₄) 5 mL를 가한다. (진한 갈색으로 변함)
- ⑤ 0.025N-티오황산나트륨을 이용하여 무색이 될 때까지 적정한다.
- ⑥ 종말점에 가까워지면 전분용액을 넣는다.(흑색으로 변함)
- ⑦ 0.025N-티오황산나트륨으로 무색이 될 때까지 계속 적정한다.
- ⑧ 0.025N-티오황산나트륨의 적정 양을 토대로 오존량을 산출 한다.

위 실험에 대한 반응식은 다음과 같다.



$$1N-Na_2S_2O_6 \ 1 \text{ mL} = 1/2 I_2 = O_3 = 48/2 = 24 \text{ mg}(O_3)$$

$$0.1N-Na_2S_2O_6 \ 1 \text{ mL} = 2.4 \text{ mg}(O_3)$$

$$0.025N-Na_2S_2O_6 \ 1 \text{ mL} = 0.6 \text{ mg}(O_3)$$

$$O_3(\text{mg}) = a \times 0.6$$

여기서,

$$a : \text{적정에 들어간 } 0.025N-Na_2S_2O_6(\text{mL})$$

실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 7과 같다.

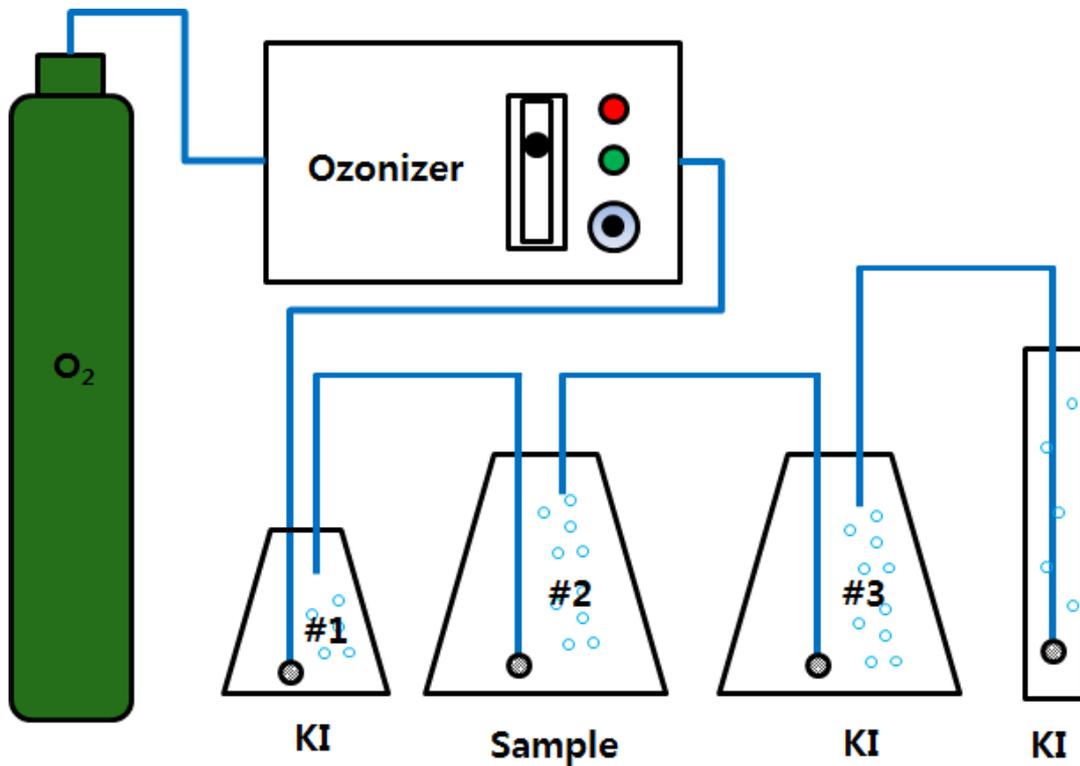


Fig. 8. Ozone oxidation diagram.

산소통은 총 산소량이 40 L이고 1번 삼각플라스크는 1 L, 2, 3번 삼각플라스크는 2 L, 후단 배오존을 확인하기 위하여 500 mL 매스실린더를 사용하였다.

오존산화처리 실험은 두 단계로 나누어 진행하였다. 첫 번째 단계에서는 오존 발생기에서 발생하는 오존의 발생량이 같은 압력조건에서 동일하게 발생되는지를 평가하기 위한 재현성 평가에 대하여 실험하였고, 두 번째 단계로 발생된 오존이 시료 안에 얼마만큼 용해되는지에 대한 본 실험으로 나누었다. 용해되어 산화반응을 일으키는 오존의 양은 재현성실험에서 얻은 오존량에서 시료 실험에서 용해되고 나온 배오존의 차로 산출하였다. 오존발생기를 가동하였을 때 말단 까지 배오존이 발생하는지를 알아보기 위하여 실험장치 말단에는 500 mL 매스실린더에 증류수 490 mL를 넣고 제조한 KI용액 10 mL를 넣어 500 mL로 하고 황산용액 2.5 mL를 주입하여 색의 변화를 관찰 하였다. 또한 각 플라스크에 오존 주입구에는 에어스톤을 연결하여 오존이 시료와 KI용액에 잘 녹을 수 있게 하였다.

먼저 재현성평가 실험은 최소 3번의 반복 실험을 통하여 오존주입량의 오차율이 적을 경우 본 실험으로 넘어 갔으며 오차율이 클 경우 재현성평가를 다시 실시하였다. 재현성평가는 1, 2, 3번 삼각플라스크 안에 제조한 KI용액을 각각 500 mL, 1000 mL, 1000 mL를 넣고 오존을 발생시킨 후 각 플라스크에서 발생한 오존량을 측정하여 합하였다.

재현성 실험이 끝나면 동일 조건에서 본 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 2번 삼각플라스크에 KI용액 대신 시료 1000 mL를 넣어 재현성실험과 동일조건으로 실험을 실시하였다. 재현성실험의 오존량에서 첫 번째 플라스크와 세 번째 플라스크의 오존량을 측정하여 뺀 값을 시료에 녹은 오존량으로 하였다. 동일 조건에서 시료를 여과 전·후와, pH 7, 9조건으로 구분하여 주입된 오존량에 따라 색도제거율을 산정하였다.

재현성실험을 통해 오존발생유량을 도출하고 이를 통해 시간에 변화를 주면서 오존주입농도를 변화 시켰다. 시간조건을 다르게 할 때 마다 재현성 실험을 반복적으로 실시하였다.

IV. 연구 결과 및 고찰

4.1 수질 현황 및 색도원인 규명

본 연구는 어승생 수원지의 색도 발생 원인을 규명하는데 목적이 있으므로 하천 보다는 호소수에서 나타나는 색도의 발생으로 볼 수 있다. 어승생 수원지의 색도의 발생 원인을 크게 3가지로 예상 할 수 있는데 첫째, 저수지로 유입되는 원수에 휴믹물질이 다량 함유되어 저수지의 색도를 유발. 둘째, 저수지 내 저질 퇴적층에서 용출되는 철·망간에 의한 색도. 마지막으로 영양염류의 유입으로 조류가 과다번식하여 발생한 색도이다.

어승생 수원지의 색도의 발생 원인을 찾기 위해서는 저수지의 수질현황을 파악하고 분석을 통하여 색도유발물질의 기인이 어느 것인지를 추적이 가능 할 것으로 판단되어 본 연구에서는 어승생 수원지 내 제1, 2저수지를 대상으로 색도와 관련된 수질분석 항목을 설정하여 조사 실험하였다.

4.1.1 제1저수지 수질 현황

(1) 현장측정 결과

제1저수지는 5월 23일을 시작으로 6월 20일, 7월 05일, 8월 01일, 9월 05일, 10월 10일까지 총 6차례에 걸쳐 수질모니터링을 실시하였다. 제1저수지의 제원에 따르면 만수위는 6 m로 나와 있으나 현장측정 시 채수지점에서의 만수위는 7 m로 측정되었다.

제1저수지의 현장측정 실험 결과 pH와 DO의 수심에 따른 경향이 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 물의 밀도차에 의해 수심이 깊어질수록 수온이 점차 감소하였으나 수심이 깊지 않아 수온에 따른 성층현상은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 전기전도도의 경우 간혹 저층에서 높게 측정되었으나 수심에 따른 변화는 거의 없는 것으로 조사되었다.

pH와 DO의 경우 표층으로부터 3~4 m지점까지는 소폭 증가하거나 거의 변화가 없었지만 3~4 m지점을 지나고 나서는 급격하게 줄어드는 것이 조사되었다.

pH와 DO값이 급격히 변하는 구간에 층이 생겼을 것으로 예상되며, DO가 표층 ~4 m 지점까지 높은 것을 보아 조류의 과다번식에 의한 것으로 판단되며 층이 생긴 이유는 저수지 내 서식하는 조류에 의한 영향이 클 것으로 추측하였다. 조류는 광합성을 하기 때문에 저층보다 비교적 햇빛이 잘 투과하는 표층~4 m지점에 많이 서식할 것으로 판단된다. 또한 부영양화의 간접지표인 투명도의 값이 1.0~1.2 m로 측정되었는데 이는 저수지가 부영양화단계라고 판단 할 수 있다. 실제 실험실측정 항목과 조류실험을 통해 수심 2~4 m지점에서 조류가 가장 많이 서식하고 있는 것으로 조사되었다.

Fig. 9, 10, 11은 제1저수지의 수질분석 데이터를 활용하여 수질인자간의 경향성을 파악하기 위하여 pH, DO, 수온을 곡선그래프로 나타내었다.

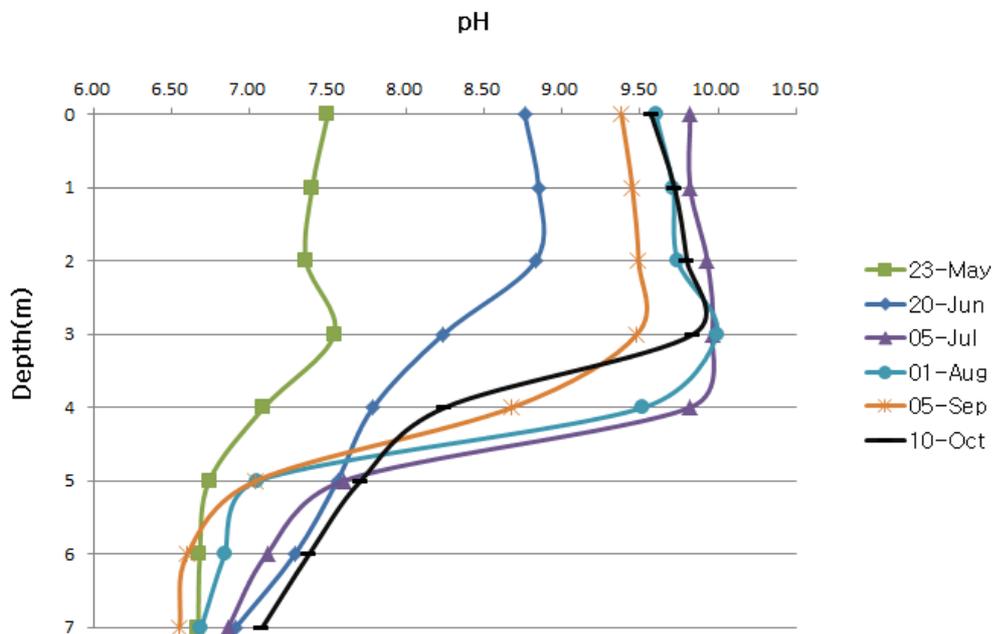


Fig. 9. pH at Eoseungsaeng 1st lake.

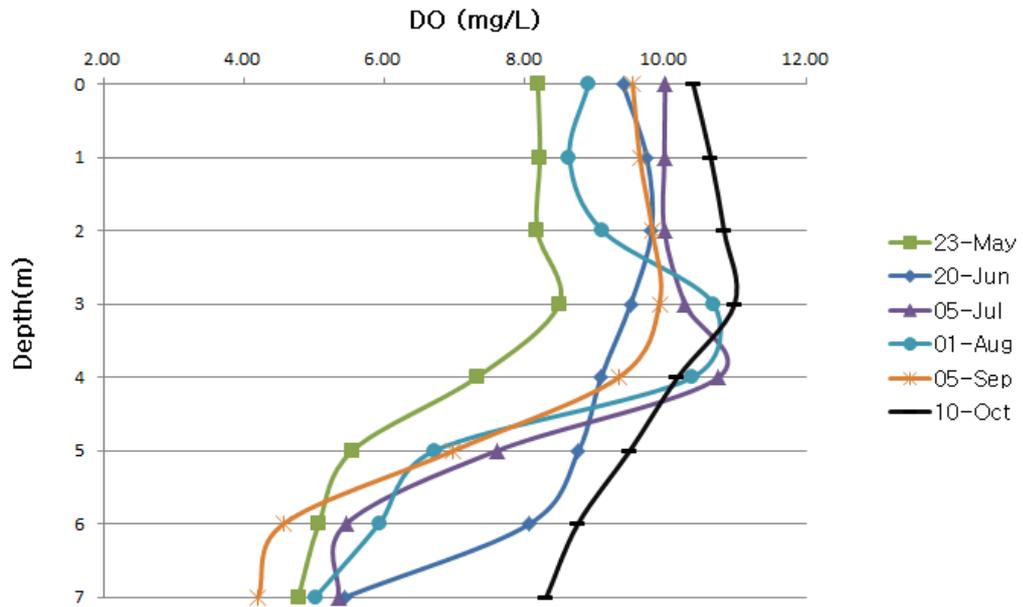


Fig. 10. DO concentration at Eoseungsaeng 1st lake.

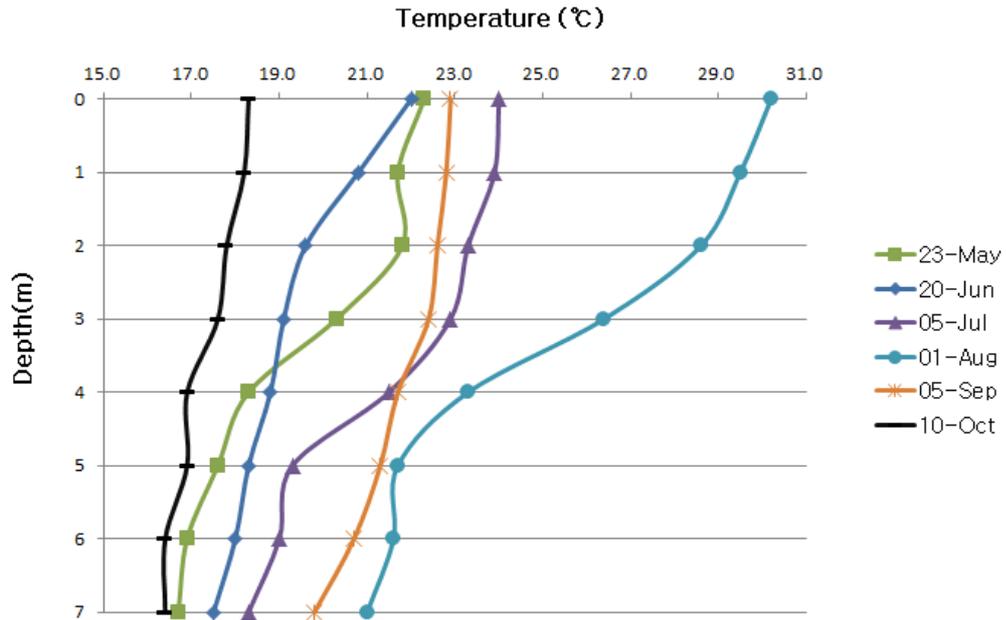


Fig. 11. Temperature at Eoseungsaeng 1st lake.

5월 23일 실험을 제외한 모든 실험에서 표층부터 3~4 m지점까지 pH가 8.5이상으로 나타났다. 먹는 물 수질기준이 pH 8.5 이하임을 고려하였을 때 정수장에서 원수의 pH 조정이 필요할 것으로 판단된다. DO의 경우 pH곡선과 유사한 경향의 곡선을 보였으며 변곡이 가장 심할 때는 8월 01일 실험에서 나타났으며, 이는 조류의 활동과 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다. 또한 표층부터 변곡점이 생기는 지점까지는 산소포화도가 100%이상의 과포화상태로 나타났으며, 이는 채수를 실시한 낮 시간에 조류의 광합성에 의한 산소가 과량 발생함에 따라 증가한 것으로 판단된다. 제1저수지 내 조류는 매우 많을 것으로 예상된다. 수온의 경우 8월 01일 실험에서 표층의 수온이 30.2℃로 가장 높게 측정되었으며, 수심이 깊어질수록 수온이 낮아지는 경향을 보였다 이는 수온이 낮아지면서 비중이 증가하는 물의 특성에 의한 현상으로 파악된다.

(2) 실험실측정 결과

어승생 수원지 저수지 내 색도는 철, 망간에 의한 색도, 영양염류의 유입으로 인하여 부영양화 된 조류에 의한 색도, 단순히 부유물질에 의한 색도로 구분 할 수 있으며 이에 대한 규명을 위해 실험실에서 추가적으로 실험을 실시하였다.

색도의 원인 물질이 되는 철, 망간의 농도는 각각 불검출~0.02 mg/L, 불검출~0.003 mg/L로 먹는 물 수질기준 농도 이하로 검출되었다. 따라서 제1저수지의 색도의 원인으로 예상되었던 철, 망간은 어승생 수원지 제1저수지의 색도발생의 영향이 미미할 것으로 판단된다. 또한 유입되는 Y계곡에 영양염류가 혼입되어 들어올 경우 영향을 미칠 것으로 예상했던 T-N, T-P에 대한 분석 실험 결과에서 T-N은 0.39~0.84 mg/L으로 호수의 생활환경기준에 4~5등급에 해당하는 수준이었으며, T-P는 0.024~0.045 mg/L로 생활환경기준에 2~4등급에 해당하였다. T-N의 경우 간혹 바닥지점에 높게 측정되기도 하였는데 이는 강우 시 유입수에 포함되어 있는 영양염류가 밀도류에 의하여 저층으로 유입된 것으로 판단된다. 탁도의 경우 여과 전·후의 차이가 크게 나타났으며 이로 하여금 SS에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 겉보기 색도와 진색도의 차이도 큰 차이를 보였는데 이는 겉보기색도의 대부분이 부유물질에 의한 색도라고 할 수 있다. 대부분의 실험에서 진색도는 먹는 물 수질기준인 5 도 이상을 나타냈으며 색도제거에 대

한 방안이 필요할 것으로 보인다. 7월 05일 실험에서 저층에서 탁도와 SS가 높게 측정되었는데 이는 채수 2일전 어리목에 약 65 mm의 강우가 내렸고 강우로 인하여 상류로부터 탁수가 유입되었고 밀도류에 의해 저수지 바닥으로 가라앉아 나타난 현상으로 판단할 수 있다. 7월 05일 실험의 저층에서 T-N의 값이 다른 시기에 비하여 급증하였는데 이도 강수에 의한 영향으로 판단된다. 색도발생에 영향을 미칠 것으로 예상했던 철, 망간이 미량 검출되어 다른 발생원인인 조류에 대한 추가적인 실험을 진행해야 할 것으로 판단된다. Fig. 12는 7월 05일, 8월 01일, 9월 05일의 조류정량분석에 간접지표가 될 수 있는 클로로필-a의 수심별 곡선그래프이다.

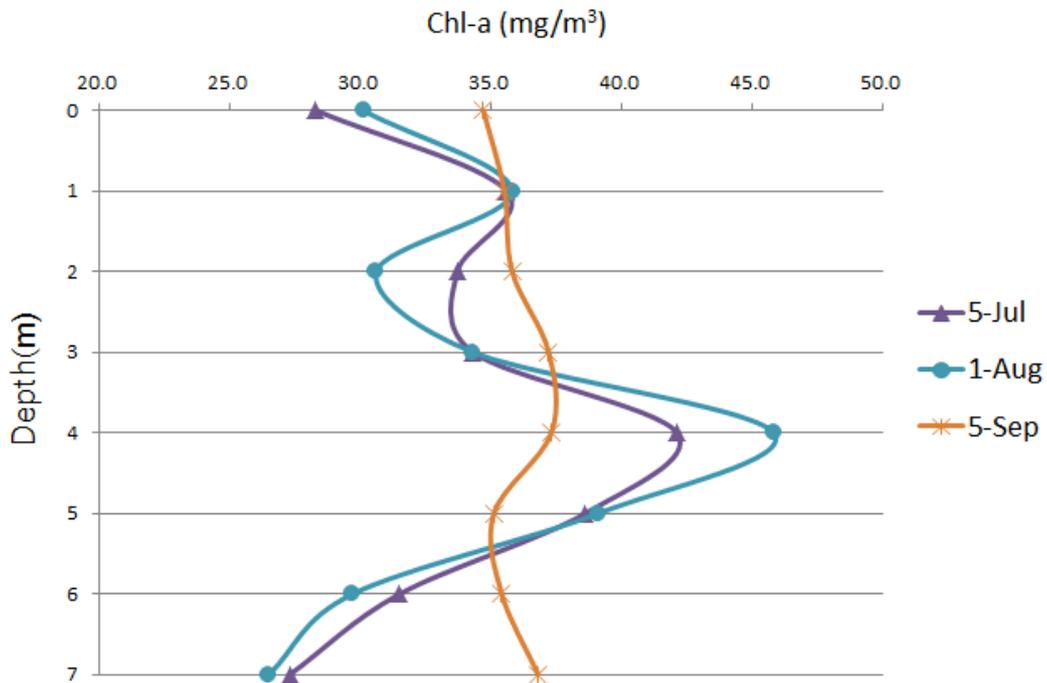


Fig. 12. Chl-a concentration at Eoseungsaeng 1st lake.

Fig. 12에서 보이는 것과 같이 클로로필-a의 곡선은 현장측정에서 pH와 DO의 곡선과 비슷한 경향을 보이고 있다. 수심 4 m지점에서 변곡점이 나타났으며 실험분석결과 색도 또한 수심 3~4 m지점에서 가장 높게 측정되었다. 이는 제1저수지의 색도의 발생은 조류에 의한 것으로 추정할 수 있다.

한편, 조류의 분포 특성을 알아보기 위하여 수심별로 채수하여 조류정성 및 정량 실험을 실시하고 이를 클로로필-a와 색도의 수심별 자료와 비교 분석 하였다. 전 수심에 걸쳐 가장 많이 보인 조류는 녹조류인 *Staurastrum*이었으며, 이외에도 *Anabaena*, *Asterionella*, *Ceratium*, 등 20여종의 조류가 관찰되었다.

Table 16은 수심별 클로로필-a 농도와 조류의 정성 실험을 통해 조류의 종류를 파악한 후 농축한 시료에서 조류개체수를 조류종별로 분류한 실험 결과이다.

조류 개체수에서도 녹조류인 *Staurastrum*이 가장 많이 관찰되었고 그 뒤로는 남조류인 *Aphanocapsa*와 *Microcystis*가 많이 관찰되었다. 수질모니터링 실험결과 층이 생겼을 것으로 예상되는 수심 4 m 지점에서 조류의 개체수가 가장 많이 나타났다. 우점종인 *Staurastrum*의 경우 전국 수원에서 발생은 하지만 발생량이 많지는 않은 것으로 알려져 있다.

팔당호의 월별 조류개체수를 분석한 결과에 의하면, 연중 규조류의 개체수가 가장 높게 나타났으며, 지점에 따라 3~4월, 6~7월 사이에 녹조류가 급증하는 것을 볼 수 있었다³⁵⁾. 또한 소양호와 대청호, 충주호에서도 연중 대부분 규조류가 우점종으로 나타났으며 여름에 국지적으로 남조류와 녹조류가 우점하여 부영양화가 일어나고 있다³⁶⁾. 우리나라 4대강인 한강, 낙동강, 금강, 영산강에서도 연중 규조류의 발생이 가장 많은 것으로 나타났으나 여름철에 녹조류의 개체수가 급증하는 것을 알 수 있다³⁷⁾.

어승생 수원지의 제1저수지의 경우 우리나라의 댐·호나 4대강에 가장 많이 발견되는 규조류는 적은 것으로 나타났으며, 주로 여름철에 급증하는 녹조류가 우점하고 있는 것을 알 수 있었다.

Table 16. Cell count and Chl-a by depth at 1st lake

Kinds	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	
Chl-a (mg/m ³)	30.1	35.8	30.6	34.3	45.8	39.1	29.7	26.5	
Cell Count (#/mL)	6,981	9,633	7,066	9,493	13,877	11,089	7,644	7,370	
Cyanobacteria	3,044	5,711	3,430	4,913	7,997	6,790	4,290	4,247	
<i>Anabaena</i>	121	88	76	107	1,173	922	719	519	
<i>Aphanocapsa</i>	1,079	3,570	1,544	2,805	3,623	3,554	1,667	1,902	
<i>Aphanizomenon</i>	329	302	663	54	408	238	244	226	
<i>Chroococcus</i>	23	17	15	20	61	28	25	27	
<i>Merismopedia</i>	34	27	20	81	163	115	81	111	
<i>Microcystis</i>	1,001	1,048	668	795	1,851	1,482	1,055	989	
<i>Oscillatoria</i>	8	17	20	76	25	14	30	10	
<i>Pseudanabaena</i>	449	462	424	484	693	437	469	463	
Diatoms	176	200	154	334	691	464	340	316	
<i>Fragilaria</i>	104	119	112	175	517	357	244	230	
<i>Nitzschia</i>	6	6	2	25	7	9	10	10	
<i>Stephanodiscus</i>	64	74	39	127	165	95	84	73	
<i>Synedra acus</i>	2	1	1	7	2	3	2	3	
Green Algae	3,588	3,532	3,315	4,109	5,116	3,780	2,967	2,762	
<i>Coelastrum</i>	8	27	-	20	17	28	-	-	
<i>Gloeocystis</i>	17	34	15	40	30	36	40	41	
<i>Golenkinia</i>	2	5	2	12	17	19	12	13	
<i>Oocystis</i>	4	13	20	30	40	21	20	34	
<i>Pediastrum</i>	17	13	20	61	20	28	20	13	
<i>Scenedesmus</i>	8	13	15	40	153	50	40	41	
<i>Staurastrum</i>	3,532	3,427	3,243	3,906	4,839	3,598	2,835	2,620	
Dinoflagellates	<i>Peridinium</i>	173	190	167	137	43	39	35	33

4.1.2 제2저수지 수질 현황

(1) 현장측정 결과

다음은 어승생 제2저수지의 현장 측정항목에 대한 자료이다. 제2저수지는 5월 10을 시작으로 6월 20일, 7월 05일, 8월 01일, 9월 05일 까지 총 5차례에 걸쳐 월별 수질모니터링을 실시하였다. 제2저수지의 만수위는 17 m이지만 현장측정 시 수위의 변동이 나타났다.

제2저수지의 현장측정 실험 결과 pH는 수심 6~7 m지점에서 급격히 변화하는 것을 볼 수 있었다. DO는 pH에 비하여 서로간의 경향성은 낮은 것으로 판단되나 pH와 마찬가지로 수심 6~7m 지점에서 변곡점이 형성되는 것을 알 수 있었다. 제1저수지 3~4m 지점에서 형성된 층이 제2저수지의 경우 투명도가 높고 제1저수지에 비하여 시설운영기간이 짧아 유입되는 원수로부터의 오염원이 적을 것으로 보아 6~7 m지점까지 내려간 것으로 판단된다. Fig. 13, 14, 15는 제2저수지의 수질모니터링 데이터를 통해 수심별 pH, DO, 수온을 곡선으로 표현하였다.

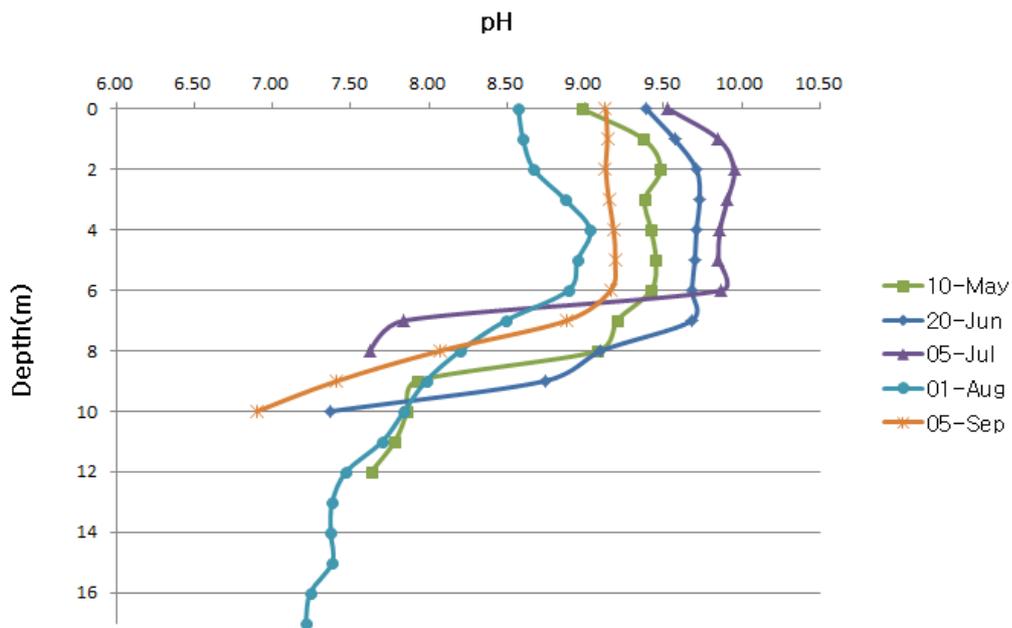


Fig. 13. pH at Eoseungsaeng 2nd lake.

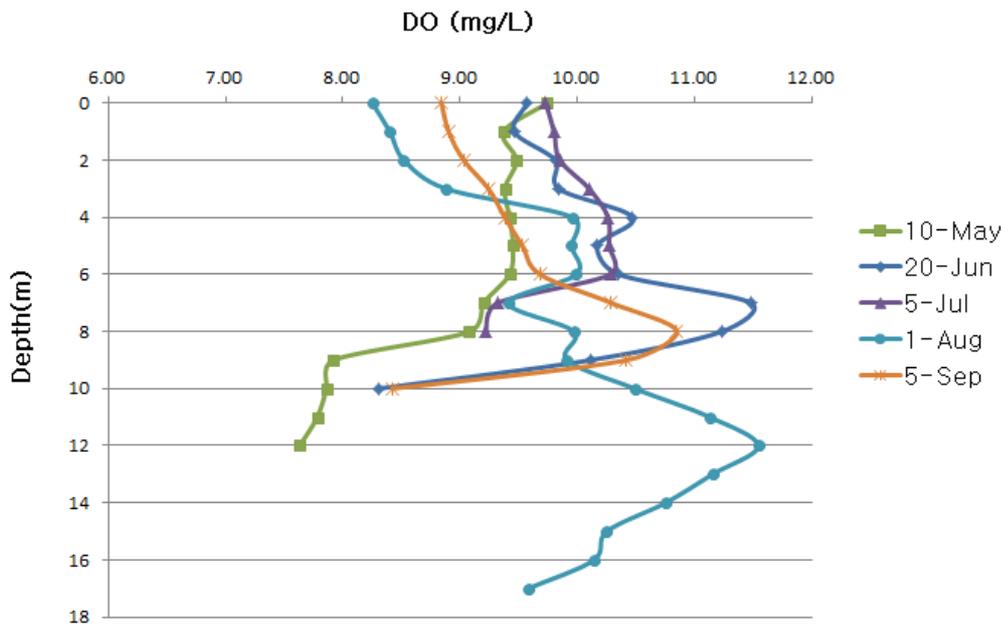


Fig. 14. DO concentration at Eoseungsaeng 2nd lake

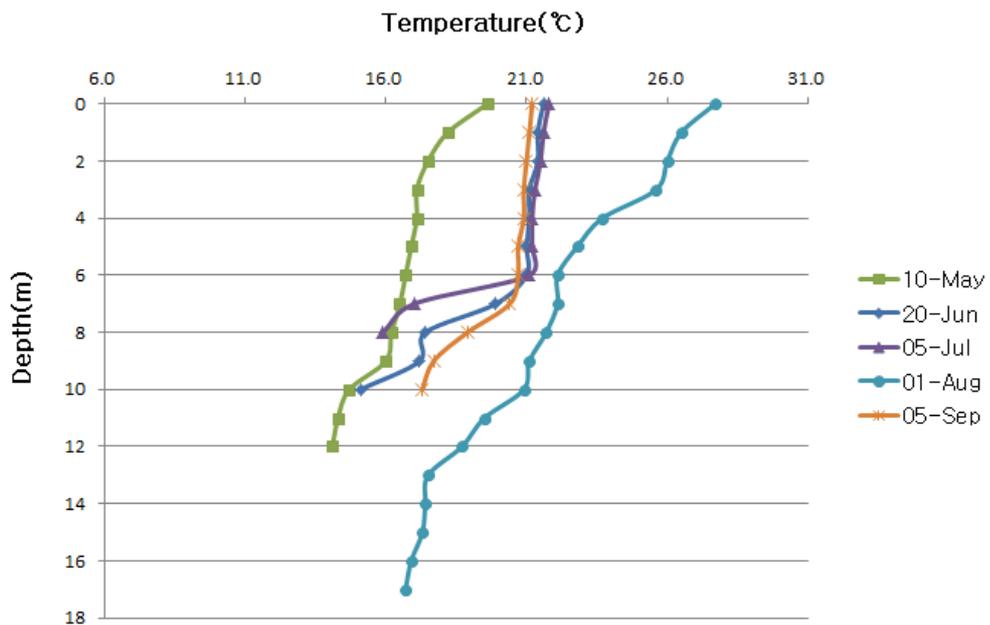


Fig. 15. Temperature at Eoseungsaeng 2nd lake.

수온측정데이터를 통한 그래프에서는 수심 6~7 m부근에서 변곡점이 형성되었으며 이는 제1저수지의 변곡점보다 2~3 m가량 깊은 수심에서 형성되었다. 제2저수지 역시 수온변곡점과 pH의 변곡점이 비슷한 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 변곡점 수심에서 조류의 활동이 왕성하게 일어나고 있다고 예상할 수 있다. 수온과 pH에 비하여 DO의 곡선은 경향성을 찾기 어려운데 이는 제2저수지에서 운영 중에 있는 수중폭기장치의 영향도 있을 것으로 판단된다.

(2) 실험실측정 결과

제2저수지의 철, 망간의 농도는 제1저수지와 마찬가지로 각각 불검출~0.02 mg/L, 불검출~0.002 mg/L로 먹는 물 수질기준 이하로 검출되었다. T-N, T-P에 대한 분석 실험 결과에서는 T-N은 0.26~0.67 mg/L으로 호수의 생활환경기준에 2~5등급에 해당하는 수준이었으며, T-P는 0.009~0.016 mg/L로 생활환경기준 1등급에 해당하였다. 제1저수지와 비교하였을 때 수질이 상대적으로 양호하다는 것을 알 수 있었다. 이는 제2저수지는 준공 된지 얼마 되지 않아 아직은 오염원의 축적이 적을 것으로 판단된다. 클로로필-a 곡선에서는 제1저수지와 비슷한 경향을 보였으나 수심 3~4 m가 아닌 6~7 m지점에서 변곡점이 형성되었다. 이는 현장측정시험에서 pH와 DO분포 곡선과 같은 결과라고 할 수 있다. 제2저수지의 색도는 3~6 도로 먹는 물 수질기준인 5 도와 근접하게 측정되었으며, 클로로필-a농도가 20 mg/m³으로 낮게 측정되었다. 클로로필-a의 농도가 낮은 것으로 보아 제2저수지에도 조류는 분포하고 있지만 제1저수지에 비하여 적을 것으로 예상된다. Fig. 16은 6월 20일, 7월 05일, 9월 05일의 클로로필-a의 수심별 곡선그래프이다.

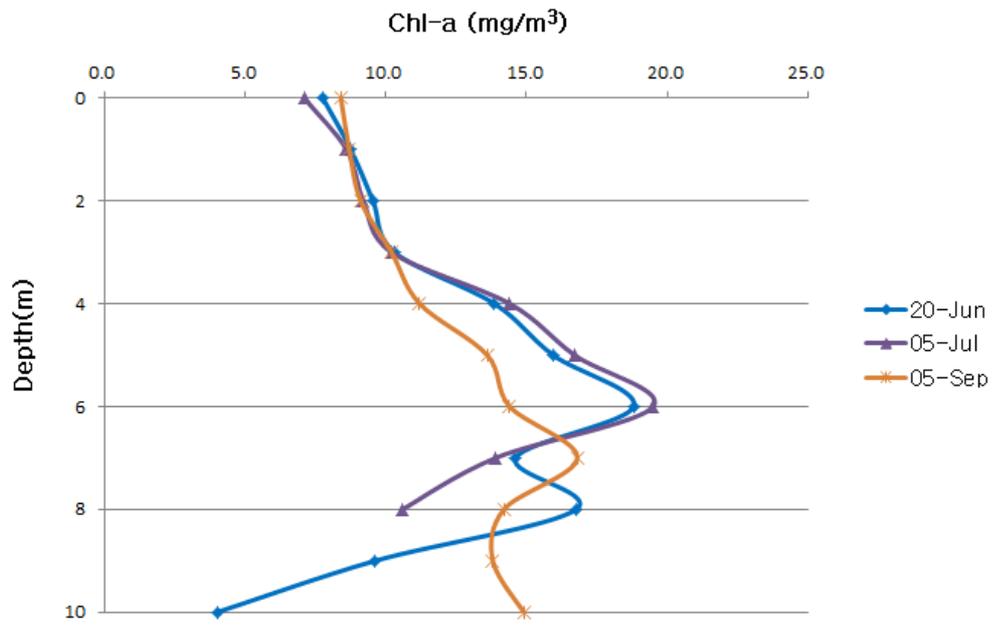


Fig. 16. Chl-a concentration at Eoseungsaeng 2nd lake.

4.1.3 색도의 발생원인 규명

제1저수지의 수심별 현장측정실험 데이터와 실험실측정데이터 조류정량데이터를 활용하여 수질인자간의 상관성분석을 실시하였다. Table 17은 8월 01일 수심별 측정항목(pH, DO, 전기전도도, 색도, 탁도, SS, 클로로필-a) 데이터와 조류 개체수 실험데이터와 TOC, DOC 분석 데이터 수심별로 나타내었다.

Table 17. Measurement items by depth(pH, DO, Conductivity, TOC, Chromaticity, Turbidity, SS, Chl-a, Cell count)

Depth (m)	pH	DO (mg/L)	Conductivity (μ s/cm)	TOC (mg/L)	Chromaticity ($^{\circ}$)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	Cell count (#/mL)
0	9.60	8.9	42	2.243	5	1.85	6	30.1	6981
1	9.71	8.63	41.2	2.245	5	1.92	5.5	35.8	9633
2	9.75	9.10	41.5	2.116	5	1.97	6	30.6	7066
3	9.99	10.68	44.8	2.255	9	2.01	6.5	34.3	9493
4	9.52	10.38	40	1.404	9	2.41	7	45.8	13877
5	7.05	6.71	40.1	1.190	5	3.44	8	39.1	11089
6	6.84	5.92	40	1.179	6	4.76	10	29.7	7644
7	6.69	5.01	42.2	1.004	8	5.63	10.5	26.5	7370

색도 발생의 원인이 되는 NOM의 경우 TOC 분석을 통해 간접적으로 알 수 있는데 TOC의 경우에는 표층에서 3 m지점까지는 높게 나타났으며 저층으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. TOC의 경우 호소 생활환경기준에 1a~1b 등급으로 다른 기준 항목들에 비하여 좋은 수중으로 나타났다. 따라서 어승생 수원지의 저수지 내 색도유발 물질의 NOM에 의한 영향은 없을 것으로 판단하여 색도발생 원인에서 제외 하였다.

두 번째로 색도의 원인이 될 수 있는 철과 망간의 경우에는 수질 모니터링 실험결과에서 각각 불검출~0.02 mg/L, 불검출~0.003 mg/L로 먹는 물 수질기준 농도 이하로 검출되었다. 또한 어승생 정수장의 월별 먹는 물 검사에서 철과 망간은 각각 불검출 되었다. 망간의 경우 발색 한계 농도는 0.02 mg/L이기 때문에 망간에 의한 색도의 발생은 없을 것으로 판단된다. 따라서 철과 망간은 어승생 수원지 색도발생에 원인이 아닌 것으로 판단된다.

Table 18은 어승생 정수장 정수의 월별 먹는 물 수질기준 항목 중 색도에 연관이 있을 것으로 예상되는 pH, 철, 망간, 탁도, 과망간산칼륨소비량에 대한 수질 검사 결과를 2014년 11월부터 2015년 10월까지 항목 별로 나타내었다⁷⁾.

Table 18. Monthly water quality at Eoseungsaeng WTP

Criterion	Standard	2014/11	2014/12	2014/1	2015/2	2015/4	2015/4
KMnO-consumption	≤ 10 mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
pH	5.8~8.5	7.6	7.5	7.7	7.9	7.7	7.7
Fe	≤ 0.3 mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mn	≤ 0.05 mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Criterion	Standard	2015/5	2015/6	2015/7	2015/8	2015/9	2015/10
KMnO-consumption	≤ 10 mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
pH	5.8~8.5	7.7	7.8	7.8	7.7	7.5	7.7
Fe	≤ 0.3 mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mn	≤ 0.05 mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND

* ND : non detected.

Table 19는 각 수질인자간의 상관성을 분석한 결과를 표로 나타내었다. 색도의 경우 조류 개체수와 상관성의 R값이 0.4308로 수질인자들 중 가장 높게 측정되었고, 전기전도도, DO, 클로로필-a, SS와의 R값은 각각 0.3878, 0.2683, 0.2701, 0.2540으로 나타났다. 탁도와 pH는 색도와의 R값이 각각 0.1758, 0.0636으로 낮게 나타났다. TOC와 DOC는 색도와의 R값이 각각 -0.2251, -0.2673으로 나타나 상관성이 없는 것으로 나타나 위에서의 NOM이 색도발생에 원인이 아니라는 이유를 뒷받침 한다. 따라서 색도발생의 원인은 R값이 가장 높은 조류 개체수와 관

런이 있을 것으로 판단된다. 조류 개체수의 경우 클로로필-a와 0.9701로 매우 높은 상관성을 나타냈다. 탁도와 SS가 R값이 0.9856으로 가장 높은 상관성을 보였으며, 서로의 상관성은 높지만 다른 인자의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. pH의 경우 DO와의 R값이 0.9332로 상관성이 높았으며, DO의 경우 클로로필-a, 조류 개체수와의 R값이 각각 0.5288, 0.4051로 DO에 영향을 주는 것으로 판단된다. 이는 조류의 광합성에 의한 용존산소가 증가한 것으로 예측할 수 있다.

Table 19. Correlation among water factors

R	pH	DO (mg/L)	Conductivity (μ s/cm)	TOC (mg/L)	Chromaticity (°)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	Cell count (#/mL)
pH	1.0000								
DO (mg/L)	0.9332	1.0000							
Conductivity (μ s/cm)	0.4089	0.3599	1.0000						
TOC (mg/L)	0.8895	0.7292	0.5394	1.0000					
Chromaticity (°)	0.0636	0.2683	0.3878	-0.2251	1.0000				
Turbidity (NTU)	-0.9332	-0.8933	-0.2445	-0.8705	0.1758	1.0000			
SS (mg/L)	-0.9204	-0.8315	-0.2365	-0.8880	0.2540	0.9856	1.0000		
Chl-a (mg/m ³)	0.3010	0.5288	-0.3589	-0.0420	0.2701	-0.4115	-0.3581	1.0000	
Cell count (#/mL)	0.1527	0.4051	-0.3259	-0.2072	0.4308	-0.2208	-0.1690	0.9701	1.0000

Fig. 17은 색도와 상관성이 제일 높은 조류 개체수와 색도의 수심별 비교 그래프이다. 수심변화에 따른 색도와 조류 개체수는 비슷한 경향을 나타냈으며 층이 생겼을 것으로 예상되는 3~4 m 지점에서 가장 높은 수치를 보였다. 수심 6~7 m 에서는 반비례 형태로 나타났는데 이는 채수 전 7월 말 어리목에 약 100 mm 이상의 강우가 내렸고 이로 인한 탁수의 유입이 영향을 미친 것으로 판단된다.

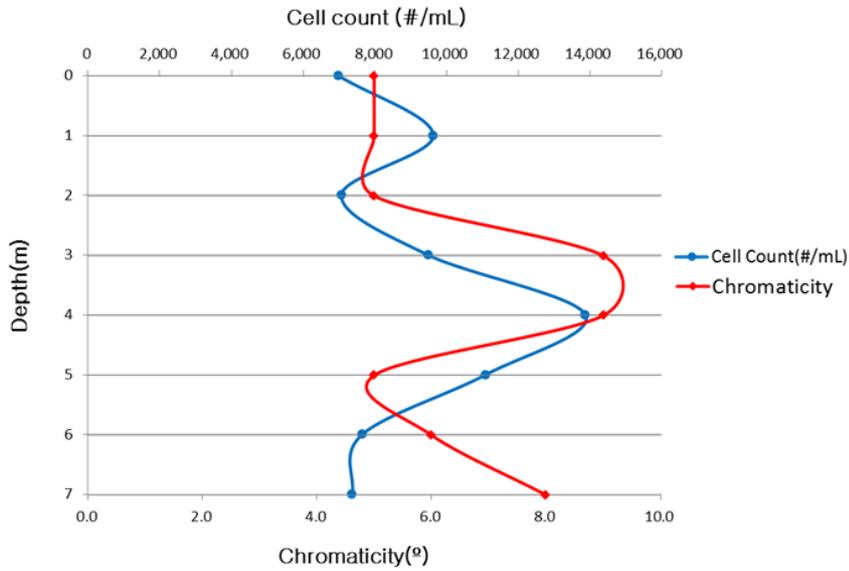


Fig. 17. Relationship between chromaticity and cell count.

Fig. 18은 색도와 클로로필-a, 탁도의 수심별 곡선을 나타내었다. 색도와 클로로필-a의 두 곡선이 비슷한 경향을 보였으며 층이 형성되어 있을 것으로 예측되는 3~4 m 지점에서 최고값을 나타내었다. 하지만 수심 5 m 이후에는 색도와 조류 개체수에서 나타났던 반비례 형태의 곡선이 나타났으며, 탁도는 수심이 깊어짐에 따라 조금씩 증가하다가 수심 5 m 지점 이후 급격하게 증가하였는데 이는 밀도류 현상에 의해서 강우 시 발생한 탁수가 저층으로 유입된 것으로 예측되며, 이로 인하여 색도와 조류 개체수, 클로로필-a에 영향을 미친 것으로 판단된다.

탁수 유입에 의한 영향이 있을 것으로 판단되는 수심 6~7 m 지점을 제외한 표층~5 m 지점까지의 색도와 수질인자간의 상관성 다시 분석하였다. 그 결과 색도와 조류 개체수의 상관관계 R값이 0.4308에서 0.5406으로 상승했으며 색도와 클로로필-a의 상관관계 R값은 0.2701에서 0.5406으로 상승하여 다소 높은 상관성을 보였다. 이는 탁수의 영향으로 색도, 조류 개체수, 클로로필-a 영향을 끼친 것을 뒷받침 하며 보다 명확하게 색도의 원인이 조류와 다소 깊은 관계가 있다고 판단 할 수 있다.

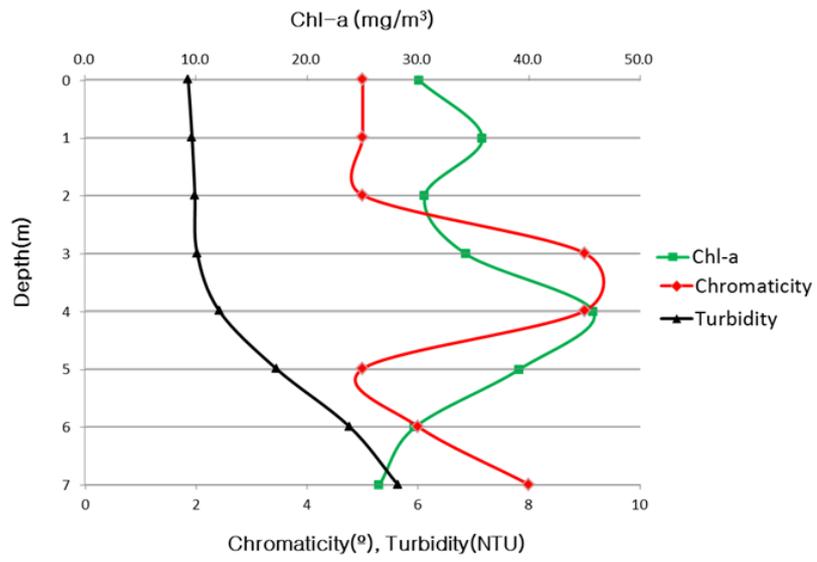


Fig. 18. Chromaticity, Chl-a and turbidity by depth.

4.2 염소산화를 이용한 색도제거 실험 결과

염소 소독제로는 차아염소산나트륨, 액화염소, 차아염소산칼슘 등이 있다. 본 연구에서는 차아염소산나트륨(NaOCl)을 이용하여 염소산화공정을 통한 색도 제거에 관하여 연구하였다.

염소산화 실험을 위한 모니터링에서 어승생 수원지 제1저수지의 수심 1 m 이후에 전층에서 고른 색도를 나타내어 표층보다 색도가 높은 수심 1 m 채수한 원수를 사용하였다. 어승생 수원지의 염소소독은 후 염소처리로 소독을 위한 공정이며 정수지에서 이루어지기 때문에 원수를 0.45 μm GF/C에 여과한 시료를 대상으로 차아염소산나트륨(NaOCl)의 주입률을 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5 mg/L로 하고 반응시간을 30분으로 하면서 pH를 변화 시켜 그에 따른 색도 제거율을 도출하는 1차 실험을 실시하였다.

다음 Table 20은 1차 실험에 사용 원수의 수질 현황이고, Table 21, 22, 23은 1차 실험에 각각 pH 7, 8, 9에서의 잔류염소, 염소소모량, 색도, 색도 제거율이며 Table 24는 1차 실험에 pH 8, 염소주입농도 1.0 mg/L의 동일 조건에서 접촉시간에 따른 잔류염소, 염소소모량, 색도, 색도제거율에 대한 결과표이다.

Table 20. Water quality of law water(1st exp.)

Chromaticity (°)	pH	Temperature (°C)	Oxidizer	Injection dosage
7	9.24	20.8	NaOCl	0.3~1.5 mg/L

Table 21. Experimental result at pH 7(1st exp.)

No.	NaOCl (mg/L)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	0.00	7	0.00	0
1	0.3	0.09	7	0.21	0
2	0.4	0.12	6	0.28	14
3	0.5	0.16	5	0.34	29
4	0.6	0.20	5	0.40	29
5	0.8	0.28	5	0.52	29
6	1.0	0.45	4	0.55	43
7	1.5	0.81	4	0.69	43

Table 22. Experimental result at pH 8(1st exp.)

No.	NaOCl (mg/L)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	0.00	7	0.00	0
1	0.3	0.05	6	0.25	14
2	0.4	0.11	6	0.29	14
3	0.5	0.21	5	0.29	29
4	0.6	0.24	5	0.36	29
5	0.8	0.37	5	0.43	29
6	1.0	0.53	4	0.47	43
7	1.5	0.86	4	0.64	43

Table 23. Experimental result at pH 9(1st exp.)

No.	NaOCl (mg/L)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	0.00	7	0.00	0
1	0.3	0.13	6	0.17	14
2	0.4	0.21	6	0.19	14
3	0.5	0.29	6	0.21	14
4	0.6	0.38	6	0.22	14
5	0.8	0.51	5	0.29	29
6	1.0	0.68	5	0.31	29
7	1.5	1.02	5	0.48	29

Table 24. Experimental result with contact time(1st exp.)

No.	Contact time(min)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0	1.00	7	0.00	0
1	1	0.95	6	0.05	14
2	3	0.90	6	0.10	14
3	5	0.87	6	0.13	14
4	10	0.84	5	0.16	29
5	20	0.76	5	0.24	29
6	30	0.73	4	0.27	43
7	60	0.68	4	0.32	43
8	120	0.62	4	0.38	43
9	240	0.58	4	0.42	43

1차 실험결과 차아염소산나트륨(NaOCl)의 주입농도가 증가함에 따라 색도제거율이 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며, 염소산화제의 주입농도를 1.0 mg/L이상으로 하였을 경우에는 색도제거율의 변화가 없는 것으로 판단된다. pH변화에 따라 pH가 7일 때 염소소모량이 가장 많았으며, 색도제거율 또한 상대적으로 좋은 것을 나타냈다. 이는 pH가 낮을수록 HOCl이 많아지기 때문에 산화력이 상승했을 것으로 판단된다. pH 8의 접촉시간에 따른 실험 결과에서는 동일 주입 농도에서 시간의 흐름에 따라 잔류염소는 점차 감소하였으며, 염소소모량 또한 비례하여 증가하였다. 색도제거율의 경우 30분에서 가장 좋은 제거율을 나타냈다. 그 이후부터는 색도제거율의 변화가 없었다. 따라서 염소산화 1차 실험결과 염소산화제 적정주입 농도는 1.0 mg/L이고, 적정접촉시간은 30분인 것으로 나타났다.

Fig. 19, 20은 염소산화 1차 실험결과를 토대로 염소주입농도에 따른 상이한 pH 조건에서 염소소비량과, 색도 제거율에 관한 그래프를 작성하였다.

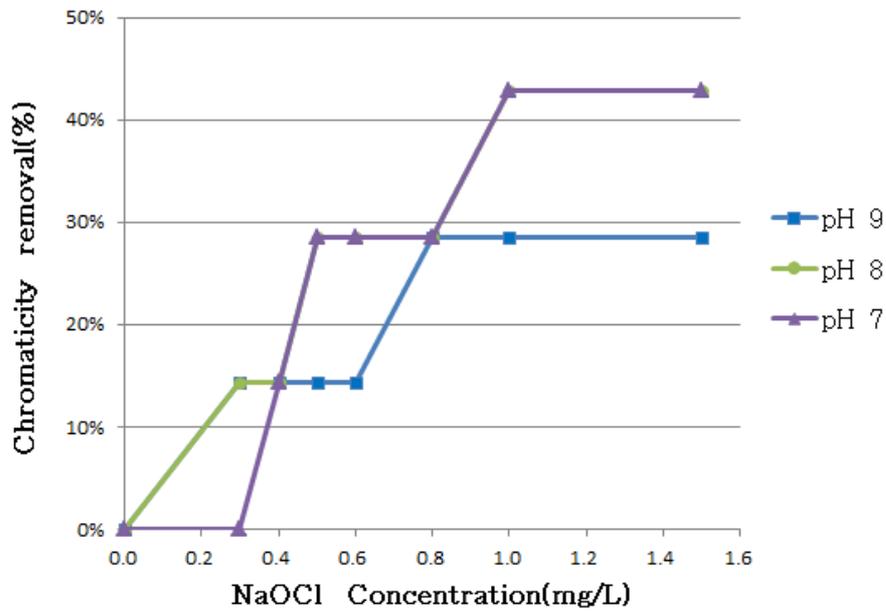


Fig. 19. Chromaticity removal with NaOCl dosage (0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(1st exp.).

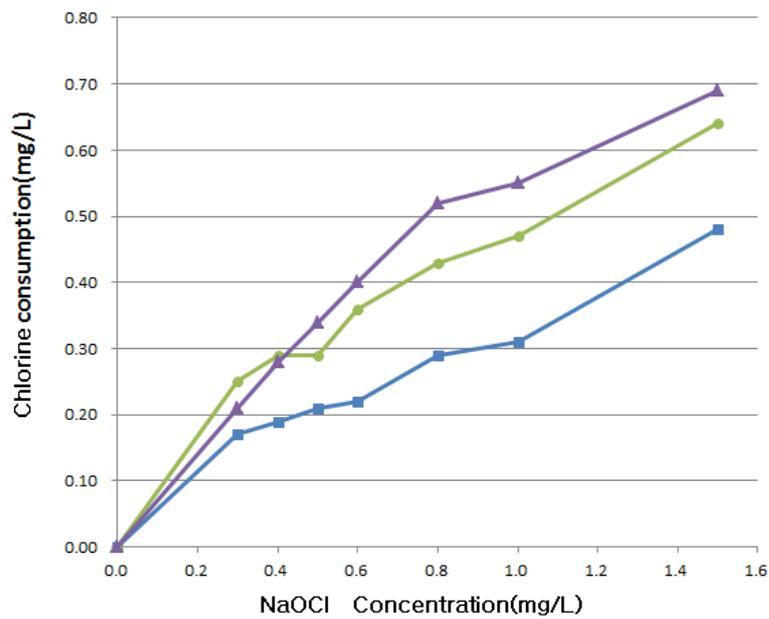


Fig. 20. Chlorine consumption with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(1st exp.).

염소산화제 적정주입 농도로 판단했던 1.0 mg/L에서 pH 7, 8 모두 40%이상의 색도 제거율을 보였다. 염소소모량의 경우 pH 7조건에서 가장 높게 나타났는데 이는 pH 7조건에서 염소가 산화하기에 좋은 환경이 만들어져 이온화가 잘 이루어진 것으로 판단된다. pH 7, 8, 9를 비교하여 보았을 때 색도의 제거율과 염소소모량에서 대체적으로 비슷한 경향을 보였으나 염소 주입농도가 0.5 mg/L이하 일 때는 pH 8조건에서 색도의 제거율과 염소소모량이 pH 7조건보다 높은 것으로 나타났다. 이는 이론적 고찰에서 pH 가 낮을수록 산화력이 좋아지는 염소의 특성에 어긋난다고 판단하여 동일 조건의 2차 염소 산화처리 실험을 실시하였다. Table 25는 2차 실험에 사용 원수의 수질 현황이고, Table 26, 27, 28은 2차 실험에 각각 pH 7, 8, 9에서의 잔류염소, 염소소모량, 색도, 색도 제거율이며 Table 29는 2차 실험에 pH 8, 염소주입농도 1.0 mg/L의 동일 조건에서 접촉시간에 따른 잔류염소, 염소소모량, 색도, 색도제거율에 대한 결과표이다.

Table 25. Water quality of law water(2nd exp.)

Chromaticity (°)	pH	Temperature (°C)	Oxidizer	Injection dosage
7	8.04	18.4	NaOCl	0.3~1.5 mg/L

Table 26. Experimental result at pH 7(2nd exp.)

No.	NaOCl (mg/L)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	0.00	7	0.00	0
1	0.3	0.08	6	0.22	14
2	0.4	0.17	6	0.23	14
3	0.5	0.24	6	0.26	14
4	0.6	0.29	5	0.31	29
5	0.8	0.42	5	0.38	29
6	1.0	0.51	4	0.49	43
7	1.5	0.81	4	0.69	43

Table 27. Experimental result at pH 8(2nd exp.)

No.	NaOCl (mg/L)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	0.00	7	0.00	0
1	0.3	0.09	6	0.21	14
2	0.4	0.18	6	0.22	14
3	0.5	0.26	6	0.24	14
4	0.6	0.31	5	0.29	29
5	0.8	0.44	5	0.36	29
6	1.0	0.58	5	0.42	29
7	1.5	0.95	4	0.55	43

Table 28. Experimental result at pH 9(2nd exp.)

No.	NaOCl (mg/L)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	0.00	7	0.00	0
1	0.3	0.18	7	0.12	0
2	0.4	0.27	6	0.13	14
3	0.5	0.37	6	0.13	14
4	0.6	0.45	6	0.15	14
5	0.8	0.63	5	0.17	29
6	1.0	0.81	5	0.19	29
7	1.5	1.25	5	0.25	29

Table 29. Experimental result with contact time(2nd exp.)

No.	Contact time(min)	Residual chlorine(mg/L)	Chromaticity (°)	Chlorine consumption(mg)	Chromaticity removal(%)
Sample	0	1.00	7	0.00	0
1	1	0.84	6	0.16	14
2	3	0.62	6	0.38	14
3	5	0.58	5	0.42	29
4	10	0.55	5	0.45	29
5	20	0.50	5	0.50	29
6	30	0.46	5	0.54	29
7	60	0.42	4	0.58	43
8	120	0.39	4	0.61	43

2차 실험결과 차아염소산나트륨(NaOCl)의 주입농도가 증가하면 염소소모량과 색도제거율 또한 비례 하여 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며, 1차실험 결과와 마찬가지로 염소산화제의 적정주입 농도는 1.0 mg/L로 판단되며, 접촉시간은 30분에서 1시간 사이에서 적정시간이 나타날 것으로 보인다. 1, 2차 실험결과 어승생 수원지 제1저수지의 원수의 색도제거를 위한 염소 산화처리공정의 적정 산화제 주입농도는 1.0 mg/L이고 적정 접촉시간은 30분 이상으로 도출하였다.

Fig. 21, 22은 2차 실험 결과를 토대로 염소주입농도에 따른 pH별 색도제거율과, 염소소모량을 나타내었다. 또한 Fig. 23, 24에서는 적정 주입농도에서 접촉시간에 따른 염소소모량과 색도변화에 대한 그래프도 나타내었다.

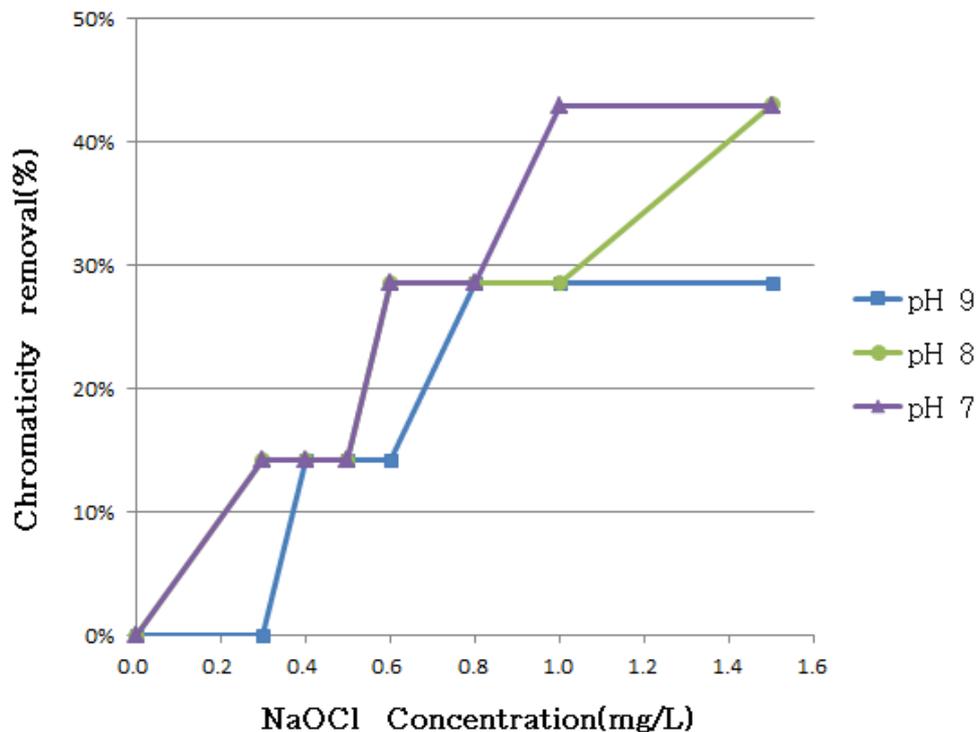


Fig. 21. Chromaticity removal with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(2nd exp.).

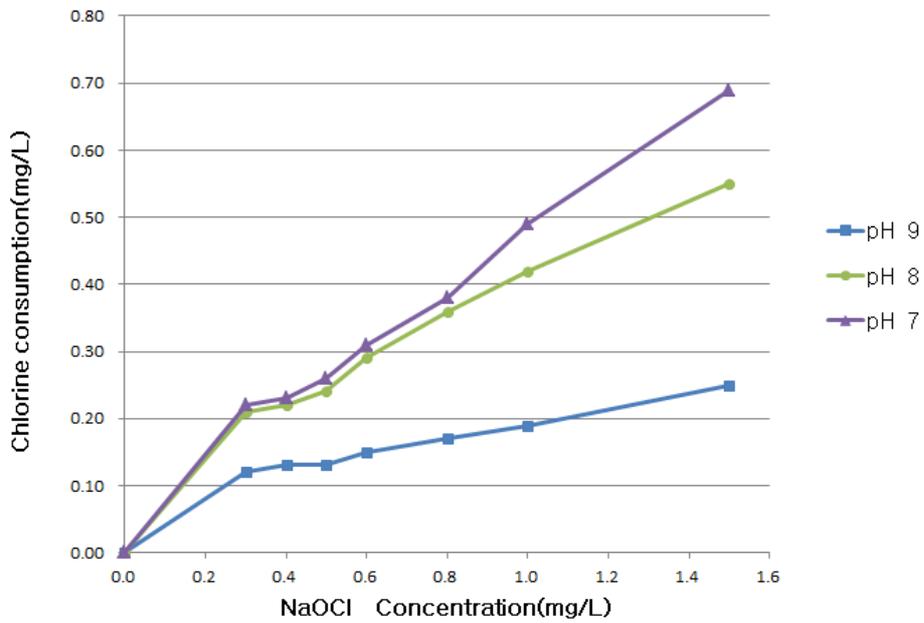


Fig. 22. Chlorine consumption with NaOCl dosage(0.3~1.5 mg/L) and pH(7~9)(2nd exp.).

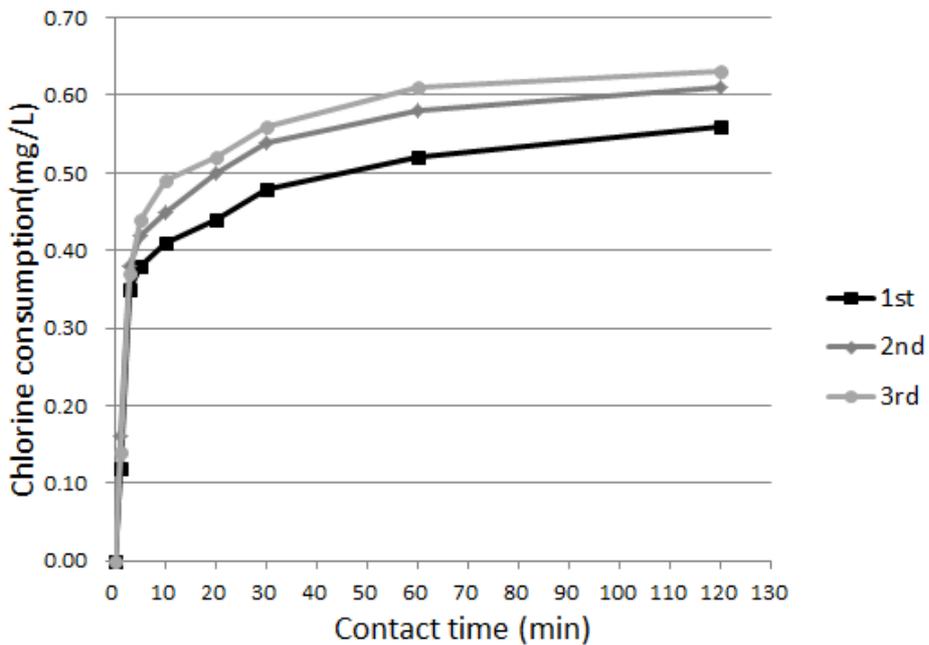


Fig. 23. Chlorine consumption with contact time.

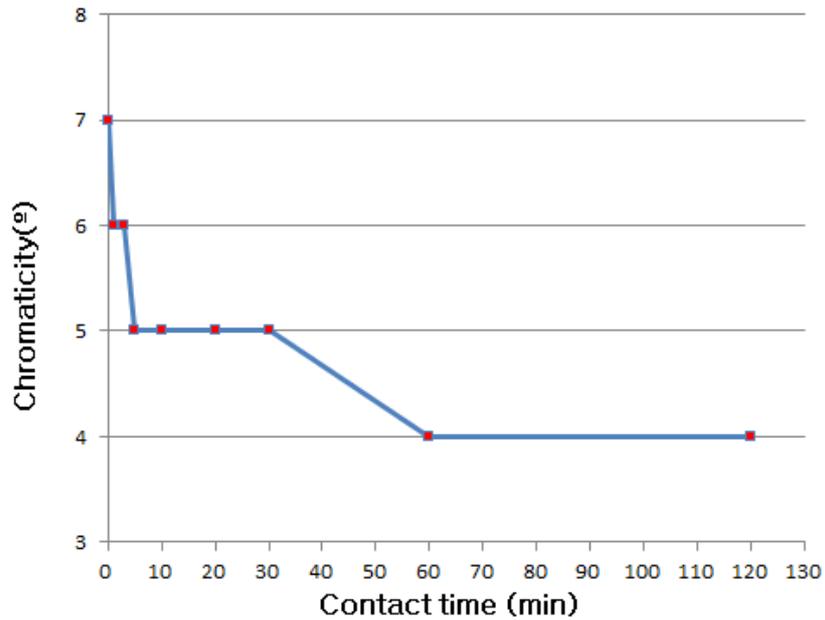


Fig. 24. Chromaticity with contact time(2nd exp.).

2차 실험을 통해 이론적 고찰의 pH가 낮아짐에 따라 염소의 소독능이 좋아지는 것을 알아 볼 수 있었다. 1차 실험에서 역전되었던 저농도에서의 색도제거와 염소소모량 모두 pH 7조건에서 염소소모량이 가장 많은 것으로 나타났다. 염소소모량이 많다는 것은 그만큼 산화반응이 많이 일어난 것이고 산화반응이 많이 일어나면 색도물질이 산화 반응하여 사라지므로 색도가 제거되는 것으로 판단된다. 접촉시간에 따른 염소소모량의 경우 30분까지는 급격하게 줄어들었으며 그 이후에는 소모되는 비율이 점점 줄어들었다.

원수의 pH 7~8일 경우 적정주입농도와 적정 접촉시간을 가졌을 때 염소산화처리를 이용하면 원수 색도의 약 43%를 제거 할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 오존산화를 이용한 색도제거 실험 결과

본 연구에서는 강력한 산화력을 가진 오존을 이용하여 고도정수처리공정 중 오존산화처리를 통한 색도 제거에 관하여 연구하였다. 오존산화 실험은 원수를 사용하여 pH, 오존주입농도, 여과 전·후 오존을 구분하여 색도 제거율을 도출하였다. Table 30, 31은 pH 7조건에서 각각 여과 전·후의 오존주입농도에 따른 색도와 색도제거율을 나타내었으며 Table 32, 33는 pH 9조건에서 각각 여과 전·후의 오존주입농도에 따른 색도와 색도제거율을 나타내었다.

Table 30. Chromaticity removal of non-filtered sample with ozone dosage and pH 7

Oxidizer		Injection dosage	
Ozone		0.22~4.732 mg/L	
No.	Ozone injection concentration(mg/L)	Chromaticity (°)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	7	0
1	0.220	5	28.57
2	1.230	4	42.86
3	2.150	3	57.14
4	2.573	3	57.14
5	4.732	2	71.43

Table 31. Chromaticity removal of filtered sample with ozone dosage and pH 7

Oxidizer		Injection dosage	
Ozone		0.459~4.657 mg/L	
No.	Ozone injection concentration(mg/L)	Chromaticity (°)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	7	0
1	0.459	3.5	50.00
2	1.005	3	57.14
3	2.255	2.5	64.29
4	2.542	2	71.43
5	4.657	1	85.71

Table 32. Chromaticity removal of non-filtered sample with ozone dosage and pH 9

Oxidizer		Injection dosage	
Ozone		0.553~6.634 mg/L	
No.	Ozone injection concentration(mg/L)	Chromaticity (°)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	7	0
1	0.553	4	42.86
2	0.885	3.5	50.00
3	1.271	3	57.14
4	3.146	2.5	64.29
5	3.243	2	71.43
6	6.634	1	85.71

Table 33. Chromaticity removal of filtered sample with ozone dosage and pH 9

Oxidizer		Injection dosage	
Ozone		0.343~7.348 mg/L	
No.	Ozone injection concentration(mg/L)	Chromaticity (°)	Chromaticity removal(%)
Sample	0.0	7	0
1	0.343	4	42.96
2	0.625	3	57.14
3	0.931	2	71.43
4	1.918	2	71.43
5	3.051	1	85.71
6	7.348	1	85.71

오존산화 처리 실험 결과 여과 후의 조건에서 색도제거율이 가장 높게 측정되었다. 오존 주입농도는 각 조건에 따라 다르게 측정되었는데, 정수처리공정에 적용하기 위해서는 5.0 mg/L이하의 농도가 적당 할 것으로 판단되며, 주입농도가 3.0 mg/L이상 이 되면 어느 조건에서든지 색도제거율이 71.43%이상 이 되는 것을 알 수 있었다. 색도 제거율이 가장 높은 조건인 pH 9, 여과 후의 경우 오존 주입 농도가 0.931 mg/L이상 이 되면 71.43%가 제거되었으며, 3.0 mg/L이상 일 때는 86.71%가 제거되었다.

다음은 pH 조건과 여과 전·후의 색도제거율을 비교하기 위하여 Table 29, 30, 31, 31 데이터를 통해 도출해낸 그래프이다.

Fig. 25, 26은 각각 pH 7, 9조건에서 여과 전·후의 오존주입량에 따른 색도제거율을 비교한 그래프이다. 주입농도에 따라 두 조건에서 비슷한 경향을 보였으며, 주입농도가 2.0 mg/L이상만 되어도 색도가 50%이상 제거되는 것을 볼 수 있다. 여과 전·후를 비교하면 여과 후의 색도제거율이 여과 전보다 높게 나타났으며, 이는 pH 9조건에서도 마찬가지로 나타났다. 여과 후의 조건에서 색도의 제거율이 높은 이유는 같은 오존주입농도에서 여과 전에는 여러 가지 방해 물질에 의해서 오존이 색도유발물질과의 산화반응을 방해 한 것으로 판단된다.

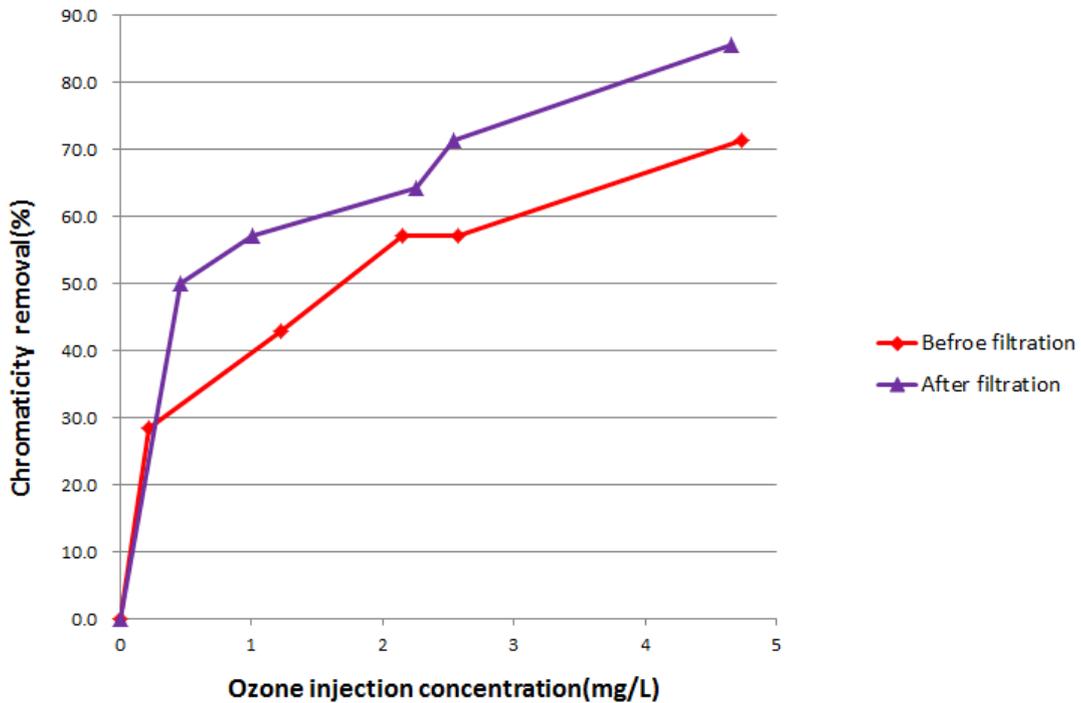


Fig. 25. Chromaticity removal of pH 7 with ozone dosage and filtration (before, after).

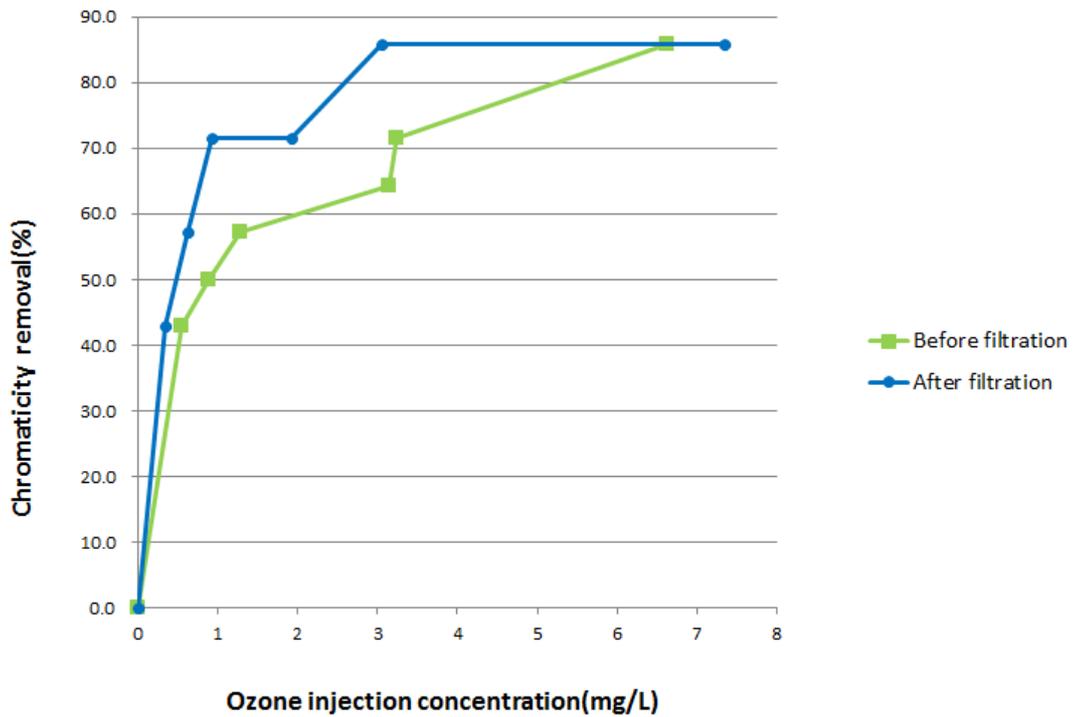


Fig. 26. Chromaticity removal of pH 9 with ozone dosage and filtration (before, after).

Fig. 27은 여과 전의 pH 7과 9조건에서의 색도제거율을 나타낸다. 주입농도에 따른 색도제거율을 나타낸 두 곡선은 비슷한 경향으로 점차 증가하는 것을 볼 수 있으며, pH 9조건에서 색도제거율이 좀 더 높게 나타났다. 여과 후의 실험에서도 이는 마찬가지로 나타났다. Fig. 28은 여과 후의 pH 7, 9조건에서 오존주입농도에 따른 색도제거율을 나타내었다.

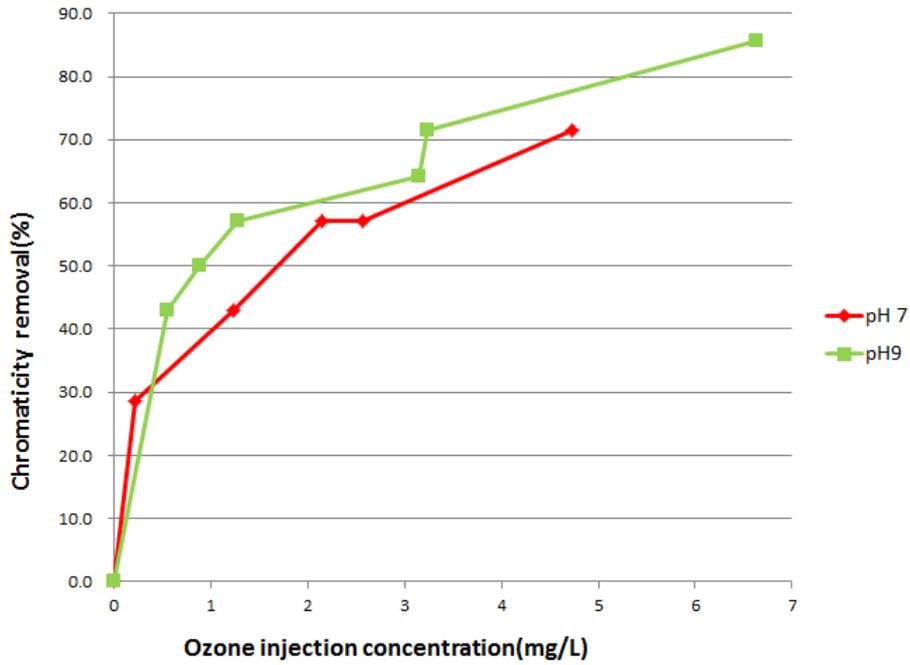


Fig. 27. Chromaticity removal of non-filtered sample with ozone dosage and pH(7, 9).

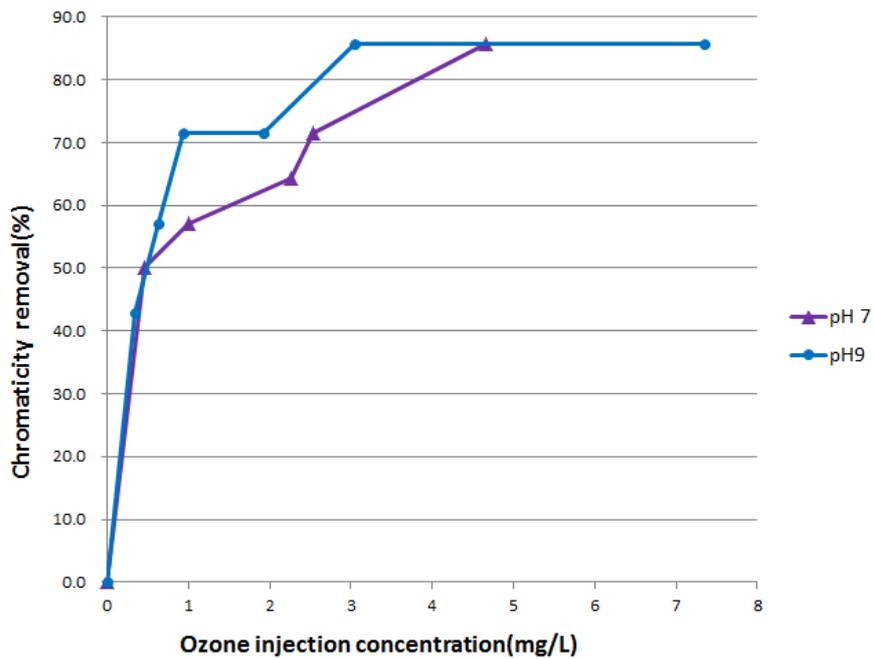


Fig. 28. Chromaticity removal of filtered sample with ozone dosage and pH(7, 9).

4.4 염소 및 오존산화를 이용한 색도제거 효율 비교 및

현장 적용방안

염소산화와 오존산화를 이용한 색도제거 효율은 주입농도 1.0 mg/L과 같은 조건인 여과 후 반응, pH 7조건에서 염소산화는 43%, 오존산화는 약 57%의 색도제거율을 나타내었다. 산화제 주입농도를 0.5 mg/L로 낮추었을 때는 염소산화는 26%, 오존산화는 약 50%의 색도제거율을 나타내었다. 또한 산화제 주입농도를 1.0 mg/L이상으로 주입했을 경우 염소산화의 경우 43%에서 더 이상 증가하지 않았으며 오존산화의 경우는 최대 약 85%까지 제거율이 상승하였다.

비교 결과 색도제거 효율은 오존산화가 염소산화에 비하여 좋다고 판단할 수 있다. 하지만 어승생 수원지는 오존산화공정이 없기 때문에 도입하려면 경제적인 부분이 고려되어야 할 것이다. 염소산화의 경우에는 어승생 수원지에서 소독용으로 주입하고 있기 때문에 추가적인 시설이 필요 없어 경제적인 측면에서 유용한 방법이다. 경제적인 측면과 색도제거 효율적인 측면을 고려하여 색도제거공정을 산정하는 것이 바람직 할 것이다. 따라서 염소 산화처리의 효율을 고려하였을 때 40%의 색도가 제거 된다고 가정하면 최대 8 도의 색도가 유입될 경우에는 현 정수처리공정의 효율화를 통해서 대응하여 먹는 물 수질기준 안으로 만들 수 있지만, 그 이상을 색도가 유입 될 경우에는 염소산화 처리로는 먹는 물 수질기준을 초과하게 되므로 오존산화 공정의 도입을 검토하는 것이 바람직하다.

V. 결론

제주도 어승생 수원지에서 발생한 색도발생 원인을 규명하고 염소산화와 오존산화처리를 이용하여 색도 제거효율을 알아보기 위한 Lab-test를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제1저수지의 현장측정 실험결과 수심에 따른 pH와 DO의 변화는 비슷한 경향을 나타냈다. 표층으로부터 3~4 m 지점에서 변곡점이 나타나는 것을 알 수 있었으며 조류에 의해서 층이 생겼을 것으로 예상하였으며, 제1저수지의 pH는 5월 23일 실험을 제외한 모든 실험에서 표층부터 4 m 지점까지 pH 8.5 이상을 나타냈으며 이는 먹는 물 수질기준을 고려하였을 때 정수장에서 원수의 pH조절이 필요할 것으로 판단된다.
2. 색도의 원인물질로 예상되는 철, 망간의 경우 각각 제1저수지에서는 불검출~0.02 mg/L, 불검출~0.003 mg/L, 제2저수지에서는 불검출~0.02 mg/L, 불검출~0.002 mg/L로 모두 수질기준이하의 농도로 측정되었으며, 색도원인 물질인 NOM과 관련 있는 TOC의 경우에도 1.004~2.243 mg/L로 호소 생활환경기준에 1a~1b등급에 해당하였다. 따라서 어승생 수원지의 색도발생에 NOM과 철, 망간은 영향이 미미할 것으로 판단된다.
3. 클로로필-a는 제1저수지에서 pH와 DO의 곡선과 비슷한 경향을 보였으며 변곡점이 나타난 3~4 m 지점에서 가장 높게 측정되었다. 이는 조류의 생장이 변곡점 지점에서 활발하게 일어난다고 할 수 있으며, 제1저수지의 색도의 발생은 조류에 의한 것으로 추정 할 수 있다.

4. 제1저수지의 조류정성 분석 결과 남조류, 녹조류, 규조류를 비롯하여 20여종의 조류가 관찰되었으며 녹조류인 *Staurastrum*이 우점종으로 나타났다. 조류정량실험 결과 수심 4~5 m 지점에서 남조류의 개체수는 5,000 cells/mL이상으로 조류경보수준으로 나타났다.

5. 색도의 발생 원인으로 예상했던 철과 망간, NOM을 제외한 수질인자간의 상관성 분석결과 색도의 경우 조류 개체수와의 상관성이 0.4308로 수질인자들 중 높게 측정되었다. 따라서 색도발생의 원인은 조류발생과 영향이 있을 것으로 판단된다. 탁도와 SS가 R값이 0.9856으로 가장 높은 상관성을 보였으며, 클로로필-a와 조류 개체수 또한 R값 0.9701로 높은 상관성을 보였다. pH의 경우 DO와의 R값이 0.9332로 상관성이 높았으며 DO는 클로로필-a, 조류 개체수와 R값이 각각 0.5288, 0.4051로 DO에 영향을 주는 것으로 판단된다.

6. 염소산화처리를 이용한 색도제거 실험 결과 최적주입농도와 최적접촉시간은 1.0 mg/L, 30~60분 사이에서 나타났다. 최적주입농도와 접촉시간에서 pH 7~8 조건이라면 염소산화처리를 하면 색도를 43% 제거할 수 있으며, 오존산화 처리에서는 모든 조건에서 주입농도가 5.0 mg/L이상이면 색도의 제거율에 대한 변화는 없는 것으로 판단된다. 색도제거율이 가장 높은 조건은 pH 9, 여과 후의 오존처리이며 오존주입농도가 0.93 mg/L 이상이 되면 71.43%가 제거되었으며, 최대 86.71%가 제거 되었다.

7. 염소 산화처리의 효율을 고려하였을 때 40%의 색도가 제거 된다고 가정하면 최대 8 도의 색도가 유입될 경우에는 현 정수처리공정의 효율화를 통해서 대응하여 먹는 물 수질기준 안으로 만들 수 있지만, 그 이상을 색도가 유입될 경우에는 염소산화 처리로는 먹는 물 수질기준을 초과하게 되므로 오존산화 공정의 도입을 검토하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. Gyeonggi Research Institute, <http://www.gri.re.kr/>(2013)
2. Jeju Province Water Resources Headquarters, “Citizen Satisfaction Survey for tap water in Jeju”(2013)
3. Kim, J. R., Sin, K. U. and Hong, S. T., “Establishment of Wired and Wireless-based Information Service System for Ensuring the People’s Right to Know the Tap Water,” The Korean Institute of Communication Information Sciences(2014)
4. Kim, S. H., “The Study of Oxidation Processes of Controlling Taste and Odor in Watertreatment,” A thesis for the degree of Master of Engineering in Chungbuk national university, p 1(2011)
5. Kang, M. S., Yang, S, K., Kim, D. S., Jung, W. Y., Yang, W. S., Lee, J. H. and Kim, Y. S., “Analysis of the Water Resources on Baseflow River Basin in Middle Seogwi Watershed, Jeju Island”, Proceedings of the *Korean Environmental Sciences Society Conference*, Vol 21, (2012)
6. Bae, S. H., “Water Integrated Management in Jeju” *Journal of Water Industry*, Val.4, pp. 13~15(2005)
7. Jeju Province Water Resources Headquarters, <http://www.jewater.go.kr>, Dec.(2015)

8. Ministry of Environment, Korea, “Rule for Standard of Drinking Water Quality and Test”(2014)
9. Yu, M. J. and Cho, Y. M., “Water Treatment -Water Treatment Technology-,” Seoul, Korea:Donghwae, pp. 426~428(2005)
10. American Water Works Association, “Water Quality”(2010)
11. Notification NO. 2015-214(2015.11.5) of the Ministry of Environment, Korea, “Korean Ministry of Environment Standard of drinking water”(2015)
12. Park, S. K. “Drinking water quality management,” Donghwae(1996)
13. Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D. and Clesceri, L. S., “Standard methods for the examination of water and wastewater,” American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, pp. 2-50~2-21(2012)
14. Ministry of Environment, “Annual reports for Corresponding and Occurrence of Algae in 2014”(2015)
15. Joo, D. S., “Microalgae as a Biomass,” East Coastal marine Bioresources Research Center(2009)
16. Baek, Y. G., Baek, S. J., “The Smell of phytoplankton growth in Water Supply,” Minister of Science, ICT and Future Planning(1995)

17. Cho, Y. G., Jeong, J., Park, C. M., Jeong, J. M., Kim, J. Y., Park, P. K., Roh, H. Y., Han, N. S. and Kim, M., "Summa of freshwater algae at Water Resources in Korea", Seoul, Korea:Council of water and sewage research institutions(2012)
18. Pang, J. I., Park, H. S. and Kim, H. R., "Introduction to water pollution," Donghwae(2004)
19. Lee, S. W., Lee, H. D., Han, M. H. and Kim, C. H., "Advanced Water Treatment," Donghwae(2003)
20. Kim, K. D. and Lee, W. M., "The Variation of Turbidity and residual aluminum concentration on using coagulants based on aluminum for water treatment system," Applied Chemistry, 1(2), pp. 441-444(1997)
21. Lee, J. W., Oh, Y. K., Cha, D. K., Lee, T. W. and Ko, K. B., "Optimization of Zero-valent Iron Technology for Color Removal from Real Dye Wastewater," Journal of Korean Society on Water Quality, 25(5), pp. 758-763(2009)
22. Ministry of Environment, "Standard of Water Supply Facilities ," Korea Water and Wastewater Works Association(2010)
23. Han, J. A. "Application of pipe network model for the equalization of residual chlorine in tap water of Jeju," A thesis for the degree of Master of Engineering in Jeju national university(2014)
24. Yu, M. J. and Cho, Y. M., "Water Treatment -Water Treatment Technology-", Seoul, Korea:Donghwae, pp. 452~552(2005)

25. Kim, K. Y., "Synergistic effect of CO₂ and sodium hypochlorite on marine phytoplankton and macroalga," A thesis for the degree of Master of Engineering in Cheonnam national university(2009)
26. National Programme on Technology Enhanced Learning , [http://www.nptel.ac.in/courses/116102016/1\(2015\)](http://www.nptel.ac.in/courses/116102016/1(2015))
27. Kim, J. K., "Water treatment engineering", Jeju-do, Korea:SinWoo, pp. 141 ~152(2013)
28. Hwang, J. J., "Removal of Color and Nonbiodegradable Material in Pigment Wastewater Using PO₂(Pressurized Ozone Oxidation)," A thesis for the degree of Master of Engineering in Hongik national university(2004)
29. Kim, T. H., "Dye Wastewater Treatment by Ozone Oxidation," A thesis for the degree of Master of Engineering in Kangnung national university (2003)
30. Yu, B. H., "Removal of Taste and Odor in Drinking Water by Ozonation and Activated Carbon Adsorption" A thesis for the degree of Master of Engineering in Chungnam national university(2005)
31. Choi, G. C., Sung, I. H., Kim, D. W., Kim, Y. H., Kim, T. Y., Yu, B. R., Lee, S. S., Lee, J. Y., Lee, H. S. and Jo, N. Y., "Official test methods of water quality," Donghwae(2011)
32. Jeong, G. J., Jo, B. S., Song, M. S., Park, H., Lee, J. G. and Choi, Y. J., "Conformity Assessment of Color Measurement Methods," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **35**(6), pp 442-448(2013)

33. Kim, S. H. “Advanced Treatment of the Secondary Wastewater Treatment Plant Effluent Using the DOF(Dissolved Ozone Flotation)System,” A thesis for the degree of Master of Engineering in University of Ulsan(2005)
34. Byun, M. S., Kang, P. K., Jin, Y. H., Kim, H. N., Yun, S. J., Lee, S. J. and Yoon, S. A., “How to be familiar with phytoplankton,” Han River Environment Research Center(2013)
35. Park, H. K., Kim, S. H., Byun, M. S., Kim, E. K., Jeon, M. J. and Jung, D. I., “Characteristics of Algal Abundance and Statistical Analysis of Environmental Factors in Lake Paldang,” *Joynal of Korea Society Water Quality* Vol. 21, No. 6, PP. 584-594(2005)
36. Park, H. K., Cheon, S. U., Park, S. I., Lee, M. H. and Ryu, J. K. “Seasonal Succession of Phytoplankton in some Artificial Lakes of Korea,” *Joynal of Korea Society on Water Environment* , 8(3), pp. 150~158(1992)
37. K-water Report, “Algae of 4-rivers in Korea Q&A”(2012)

감사의 글

제주도에 와서 공부를 시작한 것이 엇그제 같은데 학부생 4년과 석사과정 2년이라는 시간을 보냈고 어느덧 29살이 되었습니다. 고향을 떠나 타지에서 지내온 지난 시간이 처음에는 어색하고 낯설었지만 어느덧 제주도가 많이 익숙하고 편안해졌습니다. 이제 석사과정을 마치고 지내 온 학교를 떠나려 하니 아쉬움이 많이 남습니다. 학부생활을 비롯하여 이번 석사까지 많은 분들에게서 도움을 주셔서 잘 마칠 수 있었습니다. 직접 찾아뵙지 못하여 이렇게 글로나마 감사의 인사를 전합니다.

무엇보다도 먼저 제가 연구실에 들어올 때 진심으로 환영해주시고 항상 응원 해주시며 저의 뜻을 존중해주시고 제가 바른길로 나아갈 수 있게 이끌어 주신 김진근 교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡아 논문의 완성도를 높여주신 허철구 교수님과 조은일 교수님, 학부와 대학원 과정에서 열과 성의를 다해 강의 해주신 허목 교수님, 이기호 교수님, 감상규 교수님에게도 감사드립니다.

대학원 석사과정에서 줄 곧 붙어서 실험도 하고 공부도 하고 여러 추억을 만들었던 2014학번 동기 희남이형과 정태형, 말 많은 동생 힘들 때면 말동무도 되어주고 스트레스 받을 때는 위로해주고 술 먹고 싶을 때 언제든지 술동무가 되어 주신 지안이 누나. 명찬이형, 룬용이형 그리고 친구 같은 태웅이형에게도 감사를 표하며 학부 때 혼자 외롭게 생활하던 나를 연구실로 이끌어 주고 2년간 한방에 같이 살았던 내 동생 중환이에게도 감사를 포함합니다.

멀리 떨어져 있지만 항상 마음속에 있는, 해줄 수 있는 것이 없다고 항상 미안하다 말하시는 아버지, 어머니. 저를 사랑하시는 그 마음 충분히 잘 알고 있으니까 아프지 마시고 건강하셨으면 합니다. 저를 낳아주시고 길러주신 것만으로도 감사하고 사랑합니다. 그리고 내 하나뿐인 핏줄 이정미 공부에 관심 없던 난데 너 때문에 공부했다. 그래서 너무 고맙다. 철부지 누나지만 내 인생에 누나만한 스승은 없어. 사랑해.

친구가 뭐라고 매번 보고 싶다, 언제 오냐 연락하고 포천 갈 때마다 시간 내서 술 한 잔으로 내 스트레스 날려주는 포천촌놈 동명, 석형, 승용, 우석, 찬규, 한상이 제주도에 비라도 많이 오면 매번 전화하는 이관장 찬형이에게도 고마움을 전합니다. 항상 뒤에서 묵묵히 응원해주시고 서포터 해주신 송동건 사장님에게도 감사를 표합니다. 마지막으로 논문 쓰느냐고 데이트다운 데이트도 못하고 일하느냐고 힘들 텐데 맨날 피곤해 하는 나를 이해해주고 응원과 사랑을 아끼지 않은 경혜에게도 고마움과 사랑을 전합니다.

많은 도움을 주신 분들의 이름을 하나하나 적지 못함을 죄송하게 생각하며 여러 분들이 베풀어 주신 마음을 가슴 깊게 새기고 더욱 발전해 나가는 사람이 되 고자 최선을 다하겠습니다. 다시 한 번 도움을 주시고 걱정과 응원해주신 모든 분들께 감사 합니다.

2016년 2월

이 정 훈 올린