creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000267009

2018년 8월

박사학위논문

파일롯 플랜트 운전을 통한 고도정수처리공정의 최적화

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

임 형 복

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

파일롯 플랜트 운전을 통한 고도정수처리공정의 최적화

Optimization of Advanced Water Treatment Process by Pilot Plant Operation

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

임 형 복

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

파일롯 플랜트 운전을 통한 고도정수처리공정의 최적화

지도교수 김 성 홍

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

임 형 복

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

임형복의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 金璽中 (인)

위 원 조선대학교 교수 朴正雄 (인)

위 원 조선대학교 교수 金大賢 (인)

위 원 광주대학교 교수 최재완 (인)

위 원 조선대학교 교수 金聖洪 (인)

2018년 6월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT
제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구내용 및 범위 ····· 3

제 2 장 이론적 고찰 ····· 4
2.1 오존에 의한 고도정수처리 ····· 4
2.1.1 개 요 ····· 4
2.1.2 오존처리 Mechanism ····· 6
2.2 과산화수소(H_2O_2)를 이용한 잔류오존 제거 ····· 10
2.2.1 과산화수소(H_2O_2) ····· 10
2.2.2 과산화수소를 이용한 오존 Quenching ····· 11
2.3 고도산화공정(AOP)에 의한 고도정수처리 ····· 14
2.3.1 개 요 ····· 14
2.3.2 AOP 종류별 특징 ····· 15
2.4 활성탄(Activated Carbon)에 의한 고도정수처리 ····· 19
2.4.1 개 요 ····· 19
2.4.2 분말활성탄(Powdered Activated Carbon) 공정 ····· 21
2.4.3 입상활성탄(Granular Activated Carbon) 공정 ····· 22
2.4.4 입상활성탄(GAC) 공정 배열 ····· 25
2.4.5 생물활성탄(Biological Activated Carbon) 흡착공정 ····· 26
2.5 조류에 의한 맛·냄새 현황 ····· 29
2.5.1 기후변화와 조류발생 ····· 29
2.5.2 2-MIB와 Geosmin의 발생특성 ····· 31
2.5.3 2-MIB와 Geosmin의 발생사례 ····· 33

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.6 국내 고도정수처리시설 운영현황 ····· 35
2.7 중점 제거대상 물질 ····· 37

제 3 장 모형실험장치 및 방법 ····· 38
3.1 모형실험장치(Pilot Plant) ····· 38
3.1.1 모형실험장치 구성 ····· 38
3.1.2 모형실험장치 원수 주입 ····· 38
3.1.3 모형실험장치 설치 ····· 39
3.2 실험방법 ····· 42
3.2.1 강제투입실험 ····· 42
3.2.2 연속모형실험 ····· 43
3.2.3 분석방법 ····· 43

제 4 장 연구결과 고찰 ····· 45
4.1 실험대상 정수장 유입수질 현황 ····· 45
4.2 강제투입실험 결과 ····· 47
4.2.1 1계열 모형실험 결과 ····· 47
4.2.2 2계열 모형실험 결과 ····· 49
4.2.3 과산화수소 AOP의 맛·냄새물질 강제투입실험 ····· 51
4.3 연속모형실험 결과 ····· 54
4.3.1 수질항목별 연속모형실험 결과 ····· 54
4.3.2 입상활성탄 흡착효율 변화 ····· 60
4.4 AOP 및 전 오존공정 적용성 ····· 62
4.4.1 AOP 도입 필요성 검토결과 ····· 62
4.4.2 전 오존공정 추가도입 필요성 검토결과 ····· 66

제 5 장 결 론 ····· 68
참고문헌 ····· 70

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

표 2.1 산화제에 따른 전위차 비교 ····· 14
표 2.2 처리물질별 오존과 OH Radical의 반응속도 비교 ····· 14
표 2.3 오존공정 및 Peroxone공정 특성 비교 ····· 16
표 2.4 Geosmin과 2-MIB의 특성 ····· 32
표 3.1 강제투입실험 계획 ····· 42
표 3.2 연속모형실험 수질분석 항목 ····· 43
표 4.1 실험대상 정수장 도착수(원수) 수질현황 ····· 45
표 4.2 난분해성 화학물질의 오존과 OH radical과의 반응속도 ····· 63

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 목 차

그림 2.1 Ozone/H_2O_2 AOP 모식도 ····· 15
그림 2.2 Ozone/High pH AOP 모식도 ····· 17
그림 2.3 UV 광분해법 AOP 모식도 ····· 17
그림 3.1 모형실험장치 공정 개요도 ····· 38
그림 3.2 모형실험장치 P&ID(1계열) ····· 40
그림 3.2 모형실험장치 P&ID(2계열) ····· 41
그림 4.1 1계열 전 오존공정 실험 결과(망간) ····· 47
그림 4.2 1계열 전 오존공정 실험 결과(맛・냄새물질) ····· 47
그림 4.3 1계열 후 오존공정 실험 결과(2-MIB) ····· 48
그림 4.4 1계열 후 오존공정 실험 결과(Geosmin) ····· 48
그림 4.5 1계열 활성탄공정 실험 결과 ····· 49
그림 4.6 2계열 후 오존공정 실험 결과(2-MIB) ····· 50
그림 4.7 2계열 후 오존공정 실험 결과(Geosmin) ····· 50
그림 4.8 2계열 활성탄공정 실험 결과 ····· 51
그림 4.9 과산화수소 AOP의 2-MIB 제거율 실험 결과-$[O_3]_0 = 0.7\text{mg}/L$ ·· 52
그림 4.10 과산화수소 AOP의 2-MIB 제거율 실험 결과-$[O_3]_0 = 1.5\text{mg}/L$ ·· 52
그림 4.11 과산화수소 AOP의 Geosmin 제거율 실험 결과-$[O_3]_0 = 1.5\text{mg}/L$ · 53
그림 4.12 연속모형실험 결과(색도, 1계열 후 오존 1.0mg/L) ····· 55
그림 4.13 연속모형실험 결과(색도, 2계열 후 오존 0.3mg/L) ····· 55
그림 4.14 연속모형실험 결과(DOC, 1계열 후 오존 1.0mg/L) ····· 56
그림 4.15 연속모형실험 결과(DOC, 2계열 후 오존 0.3mg/L) ····· 56
그림 4.16 연속모형실험 결과(망간, 1계열 후 오존 1.0mg/L) ····· 57
그림 4.17 연속모형실험 결과(망간, 2계열 후 오존 0.3mg/L) ····· 58
그림 4.18 연속모형실험 결과(탁도, 1계열 후 오존 1.0mg/L) ····· 59
그림 4.19 연속모형실험 결과(탁도, 2계열 후 오존 0.3mg/L) ····· 59

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 4.20 활성탄 사용 전·후 2-MIB 제거효율 실험 결과 ····· 61
그림 4.21 원수와 여과수의 오존분해특성(오존 2.0㎎/L) ····· 62
그림 4.22 원수와 여과수의 오존분해특성(오존2.0㎎/L+$H_2O_2$2.0㎎/L) ····· 63
그림 4.23 맛·냄새물질 제거율([2-MIB]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L) ····· 64
그림 4.24 맛·냄새물질 제거율([Geosmin]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L) ···· 65
그림 4.25 맛·냄새물질 제거율([2-MIB]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L+과수 0.2~3㎎/L) ····· 65
그림 4.26 맛·냄새물질 제거율([Geosmin]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L+과수 0.2~3㎎/L) ···· 66
그림 4.27 전 오존공정의 망간 제거율(오존 1.0㎎/L, CT 5분) ····· 67
그림 4.28 전 오존공정의 맛·냄새물질 제거율(오존 1.0㎎/L, CT 5분) ····· 67

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Optimization of Advanced Water Treatment Process by Pilot Plant Operation

Im, Hyeong Bog
Advisor : Prof. Kim, Sung Hong, Ph.D
Department of Civil Engineering Graduate School of Chosun University

The unpleasant taste and odor in the tap water cause various problems for both citizens and water supplier. These days, taste and odor problems are often reported in some water purification plants. Geosmin and 2-MID are known as the major taste and odor causing materials in water purification plants. There are many ways to remove these materials such as advanced oxidation process, activated carbon adsorption and its combination process. In order to apply such a process to water purification plants, pilot plant experiments must be carried out first. Dongbok-Ho is one of the water source of Gwangju city and has a possibility of taste and odor causing potential. Gwangju city plans to retrofit the conventional water purification system into a advanced water purification system in order to prepare for such taste and odor problems.

Ozone alone process, Ozone and hydrogen peroxide combination process, activated carbon adsorption process are considered as advanced water purification process. Pilot scale experiments were carried out to find the appropriate processes and to obtain the design and operation parameters. Ozone alone could remove 50% of geosmin. On the other hand, the combination of ozone and 3mg/L of hydrogen peroxide could remove 90% of geosmin and 90% of 2-MIB, simultaneously.

Residual ozone is harmful to citizens. Therefore, ozone quenching step is necessary after ozone oxidation process. Considering residual ozone and oxidation efficiency, the optimal ozone dosage is obtained as 0.3 to 2.0mg/L

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

with the 15 minutes of contact time as the result of the experiments.
Manganese also threatened water quality. Very often, manganese concentration of the source water exceed 0.05mg/L but it reduced less than 0.0lmg/L by the conventional rapid sand filtration. However, 0.3mg/L of ozone could remove 60% more manganese.
Biological activated carbon(BAC) adsorption increased the removal rate of both turbidity and dissolved organic Carbon(DOC).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 전 지구적인 기후변화로 인한 이상기온, 수온상승, 가뭄, 일조량 증가에 기인한 식물성 플랑크톤 및 조류의 대량 발생, 산업화에 따른 오염물질 유입 등이 빈발하고 있다. 기상청의 한반도 장기 미래 전망에 따르면 2000년 이전에 비해 21세기말 우리나라의 기온은 약 4℃ 상승하고, 강수량도 증가할 것으로 전망했다(기상청 통계, 2009).

기온이 상승함에 따라 갈수기 또는 여름철 고수온기 상수원의 수질악화 및 빈번한 조류발생으로 수돗물에서 맛·냄새 등이 발생하는 일이 잦아지고 있다. 이들 맛·냄새를 유발하는 물질들은 혼화/응집/침전/여과 등과 같은 전통적인 형태의 정수처리공정으로는 잘 제거되지 않는다.

다양한 요인들로부터 기인한 수질오염사고가 빈발함에 따라 국민들은 불편, 불안감이 가중되고 있다. 따라서 우리나라는 원수의 연평균 수질이 3등급 이하인 경우 또는 수돗물의 맛·냄새로 인한 민원이 발생한 경우 고도정수처리시설 도입을 검토하도록 하는 '고도정수처리 도입 및 평가지침(환경부. 2013)'을 제정하여 운영하고 있다.

광주시 상수도사업본부에 의하면 동복호가 취수원인 실험대상 정수장에서도 봄·가을철 갈수기 또는 여름철 고수온기 수질악화에 따른 조류발생으로 급수구역에서 수돗물 냄새민원이 발생된 바 있다. 수돗물 민원발생 현황을 보면 2007년(15건), 2008년(67건), 2009년(20건) 등 실험대상 정수장 급수구역에서 대대적으로 발생하였다. 특히 2009년 6월에는 수돗물에서 곰팡이 냄새를 유발하는 것으로 알려진 2-MIB가 가장 고농도로 정수장에 유입되어 취수원인 동복호의 취수탑에 분말활성탄을 긴급 투입하여 처리하였으나, 완전한 제거가 어려워 취수탑 106ng/L, 정수장 도착수 75ng/L, 정수장 처리수 51ng/L로 나타났다. 흙냄새를 유발하는 Geosmin은 동 기간 정수장 유입수와 유출수에서 8~10ng/L로 나타나 처리가 곤란했음을 확인할 수 있었다. 2011년 6~7월 기간에도 실험대상 정수장으로 2-MIB가 중농도로 유입(도착수 26ng/L, 정수 12ng/L)되었음을 볼 때 지속적으로 냄새물질이 발생되고 있음을 알 수 있다.

조류예보제가 최초 도입된 2004년에 주의보 15일 발령을 시작으로 동복호는 조

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

류발생 지속일수가 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 이와 같은 현상은 가뭄으로 저수율이 12~14%로 낮아지면서 남조류가 증가한 것이 원인으로 파악되고 있다. 동복호의 경우 겨울~봄에 이르는 장기 가뭄 시 유역 내에 다량의 영양염류가 축적되고, 축적된 고농도의 영양염류(질소, 총인 등)는 여름 집중강우 시 일시적으로 호소 내로 유입되어 일조량 증가 등 고수온 환경에서 조류가 대량 발생하고 있다. 특히 2007~2009년의 7~9월에는 COD 5.0~5.8㎎/L로 Ⅳ등급을 나타내는 등 수돗물의 맛·냄새 관련민원이 대대적으로 발생하였다.

본 연구에서는 유입 원수특성에 따른 최적의 고도정수처리공정 도출을 위하여 오존 및 입상활성탄 흡착을 기본 공정으로 한 모형실험장치를 설치·운영하였다. 강제투입실험과 연속실험을 통하여 원수의 특성에 따른 맛·냄새물질의 제거효율을 평가하였으며, 그 결과를 토대로 고도정수처리공정의 구성 및 운전방법에 대한 최적화 방안을 도출하고자 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

1.2 연구내용 및 범위

본 연구는 2015년 8월부터 정상가동을 시작하여 공정별 운전조건에 따라 실제 정수처리공정과 유사한 수질의 상수를 생산함으로써 실험대상 정수장에 적합한 고도정수처리공정을 구성하기 위하여 실시하였다. 연구는 먼저 오존처리 Mechanism과 오존처리공정에 대한 이론, 과산화수소(H_2O_2)를 이용한 오존의 산화력 제고 및 잔류오존의 제거특성, 고도산화공정(Advanced Oxidation Process; AOP), 활성탄공정 등에 대한 이론적 고찰을 하였다. 다음으로 모형실험장치(Pilot Plant)를 통한 연속모형실험과 상시 발생되지 않아 연속실험이 어려우나 고도정수처리의 주요 제거대상물질인 2-MIB, Geosmin 등의 맛·냄새 유발물질에 대해서는 강제투입실험(Spiking Test) 등을 실시하여 그 결과를 분석하였다.

본 논문은 위 연구내용을 기초로 다음과 같이 총 5장으로 구성하였다.

제1장에서는 연구배경 및 목적, 연구내용 및 범위 등을 기술하였고,

제2장에서는 국내외 연구사례, 관련기준 및 지침 등의 검토를 통하여 오존에 의한 고도정수처리, 과산화수소를 이용한 잔류오존 제거, 고도산화공정에 의한 고도정수처리, 활성탄에 의한 고도정수처리, 조류 및 맛·냄새물질 발생 등 고도정수처리 관련 이론들에 대하여 고찰하였다. 또한 국내 고도정수처리시설 운영현황, 실험대상 정수장의 중점 제거대상 물질 선정 등도 함께 제시하였다.

제3장에서는 본 연구의 모형실험을 위한 모형실험장치의 공정구성 및 설치계획, 실험원수의 인입계획, 제거대상물질별 분석방법 등을 제시하였다.

제4장에서는 제3장에서 제시한 모형실험장치를 이용한 강제투입실험, 연속모형실험 등의 결과로부터 전 오존공정 적용성, 후 오존과 활성탄여과지 조합공정의 처리효율, 고도산화공정의 적용성, 입상활성탄의 흡착효율 검토 등을 실시하여 고도정수처리공정들에 대한 처리효율을 평가하였다.

제5장에서는 제4장의 '연구결과 고찰'의 결과를 요약하고, 이를 토대로 실험대상 정수장에 적합한 고도정수처리공정을 제시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 이론적 고찰

고도정수처리란 기존의 일반적인 정수처리공정(혼화/응집/침전/여과)으로는 제거하기 어려운 맛·냄새물질, 소독부산물 및 미량유기물질 등의 처리를 위한 정수처리기술이다. 주요 공정으로는 오존(O_3), 입상활성탄(GAC, Granular Activated Carbon) 등 단독공정, 오존, 입상활성탄(Filter/Adsorber, GAC, BAC(Biological Activated Carbon)), 막(Membrane)여과, 자외선(UV)조사 등에 대해 한 개 이상의 공정을 적용한 조합공정, 오존(O_3), 과산화수소(H_2O_2), UV, High pH 등의 뛰어난 산화력을 발휘하는 산화제를 이용한 고도산화공정(Advanced Oxidation Process; AOP) 등 다양한 정수처리공정들이 있다.

본 연구에서는 이들에 대한 이론들을 관련 기준 및 지침, 국내·외 타 연구사례들을 통하여 고찰하였다.

2.1 오존에 의한 고도정수처리

2.1.1 개 요

1970년대 THMs(Tri Halo Methanes)가 발견된 후부터 오존공정은 최근까지 상수 원수의 오염심화와 오염물질의 다양화, 먹는 물 수질기준 강화, 염소처리 등으로 인한 소독부산물(DBPs, Disinfection By Products) 발생 등의 복합적인 문제에 대응하여 조류 및 소독부산물을 제어할 목적으로 도입되고 있다.

오존처리는 THMs(Tri Halo Methanes)와 HAAs(Halo Acetic Acids) 등의 전구물질을 저감시키는 전처리 산화제로는 물론, 염소보다 훨씬 강한 오존의 산화력을 이용한 대체 소독제로서 소독, 맛·냄새물질 및 색도의 제거, 소독부산물 발생저감 등의 효과가 있다. 오존은 유기물과 반응하여 부산물을 생성하므로 일반적으로 오존처리와 입상활성탄처리를 조합하여 공정을 구성한다. 오존처리공정의 설계와 운전요소로서 처리목적에 따라 주입지점, 주입률 등을 고려하여야 하며, 이는 모형실험장치 등을 이용한 모형실험 결과에 근거하여 결정하는 것이 바람직하다.

오존은 강한 산화력을 가진 불소(F)와 OH Radical 다음으로 높은 전위차(2.07V(Volt))를 가지므로 모든 유기물을 이산화탄소(CO_2)와 물(H_2O)로 완전 분해시켜야 하나, 대다수의 유기물질(맛·냄새 유발물질인 Geosmin, 2-MIB(2-Methyl

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Iso Borneol), THMs와 같은 포화 탄화수소 등과 반응이 느리거나 또는 전혀 반응하지 않을 수 있다.

이와 같은 오존의 단점을 보완하기 위하여 오존과 산화제를 동시에 반응시켜 OH Radical의 생성을 가속화하여 유기물질들을 처리하는 방법을 고도산화법(AOP, Advanced Oxidation Process)이라 한다. 정수처리에 응용될 수 있는 AOP는 O_3/High pH, O_3/H_2O_2(PEROXONE), O_3/UV, O_3/TiO_2, O_3/Electron Beam, O_3/Metallic Oxides 등의 방법들이 있다(상수도시설기준. 환경부. 2010).

오존처리에 수반되는 문제점으로는 용존 잔류오존과 배오존의 처리가 있다. 처리공정의 과도한 용존 잔류오존은 강력한 산화력으로 후단공정(Membrane, GAC, BAC 등)의 기계설비 및 배관 등의 강도를 약화시킬 수 있다. 또한, 배오존이 대기중에 방출될 경우에는 노동안전 또는 환경상의 문제를 일으킬 우려가 있으므로 충분히 저농도가 되도록 처리해야 한다.

정수처리의 단위공정으로 오존처리법이 다른 처리법에 비하여 우수한 점으로 오존은 높은 산화력으로 염소에 비해 살균효과가 뛰어나 Cryptosporidium과 Giadia를 포함한 모든 병원성 미생물에 대한 소독시간을 단축할 수 있다. 맛·냄새물질과 색도의 제거에 효과가 우수하여 조류 및 조류와 관련된 맛·냄새 유발물질의 발생을 억제하고, Geosmin이나 2-MIB 등에 의한 냄새나 부식질 등에 의한 색도, 염소와의 반응에 의해 냄새를 유발하는 페놀류 등을 제거하는데 효과적이다.

또한, 유기물질의 생분해성을 증가시키므로 미생물에 의하여 제거되도록 유기물을 부분적으로 산화시키며, 난분해성 유기물질의 생분해성을 증대시켜 후속공정인 GAC를 생물활성탄(BAC)으로 운전 시 처리효율을 향상시킬 수 있고, 염소주입에 앞서 오존을 주입하면 염소의 소비량도 감소시킬 수 있다.

오존은 철(Fe), 망간(Mn)에 대한 산화능력이 우수하며, 수중에서 철과 망간은 $Fe(HCO_3)_2$, $Mn(HCO_3)_2$, $Mn(HCO_3)_2$ 또는 착염상, 콜로이드상, 규산/암모니아 등과 공존하는 형태로 존재한다. 오존은 이러한 철, 망간을 산화시키는 능력을 가지고 있다. 그러나 과잉의 오존 주입으로 생성된 MnO_4^-에 의해 색도 유발가능성이 있으며, 오존 주입으로 MnO_4^-가 발생되면 오존 접촉조 후반부에 이를 다시 환원시켜 색도를 제거하는 단위공정이 필요한 경우도 발생한다.

오존은 강한 산화력에 의해 수중의 브롬화합물 등의 물질들과 반응하여 Bromate(BrO_3), Chlorate(ClO_3), Aldehydes 등의 오존계 소독부산물들(DBP)이 생

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

성될 수 있다.

소독부산물을 유발하는 THMFP(TriHaloMethane Formation Potential)의 저감 실험에서 유리기 포획제(Radical Scavenger)가 존재하는 경우 Humic 물질(10㎎/L)에 오존을 1㎎/L 접촉시키면 UV_{254}와 색도의 경우 접촉시간(Contact Time) 5분시 CO_3^{-2}의 존재에 크게 상관없이 각각 75%와 90% 이상의 제거효율을 보인다. 반면에 DOC의 경우 접촉시간을 증가시키더라도 CO_3^{-2}를 첨가(80㎎/L as $CaCO_3$)하지 않았을 때와 비교하여 제거효율에서 42~61% 감소하는 경향을 보인다(김현철 등, 1999).

원수에 브롬화합물(Bromide)이 포함된 경우 오존의 강한 산화력에 의해 오존처리 후 Bromate(BrO_3^-)가 생성된다. Bromate를 WHO에서는 발암가능성 물질로 분류하고 있으며, 미국, 일본 등에서는 수질기준을 0.01㎎/L 이하로 규정하고 있다.

Bromate 생성과 관련한 인자들의 제어방법 연구에 의하면 국내 대부분의 수계에서 유입수 중 Bromide는 검출되지는 않으며, Bromate 생성에 관여하는 수질인자는 원수 중 Bromide 농도, 암모니아 농도, pH, DOC 등인 것으로 확인하였다. 이때 운전인자는 오존의 주입농도와 접촉시간이 주요하다. 또한 과량으로 Bromide를 주입하여 O_3 AOP의 운전조건별 Bromate 생성능을 분석한 결과 국내 수계의 일반적인 DOC(Desolved Organic Carbon) 농도에서 Bromate 생성능은 상당 수준 이하로 저하되며, 저농도의 암모니아 및 pH 조절 등으로 효과적인 제거가 가능한 것을 확인하였다(서재승 등, 1999).

Aldehyde는 오존이 자연상태 부식질로부터 유래하여 색도를 유발하는 것으로 알려진 Humic이나 Fulvic 물질과 반응하여 생성되는 DBPs로 Formaldehyde, Acetaldehyde, Glyoxal, Methylglyoxal 등이 있다. 이 중 Formaldehyde는 US EPA (IRIS CASRN 50-00-0) 인체유해도 B1등급(사람에게 발암성 물질)으로 분류하고 있으며, WHO 수질기준 0.9㎎/L, 일본 환경기본법 0.08㎎/L 등으로 제한하고 있다.

2.1.2 오존처리 Mechanism

오존은 공기 중 산소나 순산소를 이용하여 가스 상태로 발생시키며, 정수처리에 응용할 때에는 액상으로 용해시켜 사용한다. 액체 상태에서 잔류오존은 매우 불안정하여 20℃에서 반감기가 30분 미만으로 단시간에 산소와 물로 분해된다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

오존의 분해특성을 이용한 O_3/GAC 공정을 평가한 한 실험에서 오존의 분해속도는 활성탄 양에 비례하여 증가하고, 동적(Kinetic) 연구결과 GAC는 0.0434/g/min로 계산되었다. 또한 동 실험에서 메탄올/아세트산의 비가 증가함에 따라 오존의 분해속도는 선형적으로 증가함을 확인하였다(오병수 등, 2003).

오존의 분해속도는 오존의 농도, 불순물의 존재여부, 압력 및 pH 등에 영향을 받으며, pH가 높을수록 분해속도는 빨라지게 된다. 오존의 분해속도가 pH에 영향을 받는 것은 수산화기(OH^-)에 의하여 오존이 스스로 분해할 수 있는 특성(Self Decomposition)을 가지고 있기 때문이다. 즉 오존은 산성에서는 비교적 안정하나 알칼리성으로 갈수록 분해속도가 빨라진다. 증류수 기준 pH 6.5~8.5 범위에서 분해속도가 급격히 변화하며, 이는 유입수의 pH에 따라 오존 주입인자가 크게 달라질 수 있음을 의미하는 것이다. 즉, 증류수와 동일한 pH를 가진 지표수의 경우 오존의 분해속도는 비슷하나, 특정 지표수의 경우에는 2~3배의 오존 분해속도 상승을 보인다. 이는 물속에 존재하는 용존 유기물과 같은 다른 인자에 의해 영향을 받기 때문이다. 증류수에 초기 오존농도 1㎎/L를 투입할 경우 과산화수소 대 오존의 비를 0.25~2.28까지 변화시키면서 오존의 분해속도 k(/min)를 측정해보면 1.2 정도에서 오존의 분해가 가장 빠름을 알 수 있다. 이는 오존의 소모로 OH Radical 생성을 빠르게 유도할 수 있으므로 O_3/H_2O_2 AOP를 적용할 경우 최적 운전인자로서 사용할 수 있음을 의미한다고 할 수 있다(박훈수 등, 1996).

오존산화 시 유기물 제거경로는 오존분자에 의해 직접 제거되는 직접경로와 OH Radical에 의해 분해되는 간접경로로 구분된다. 오존은 수중에서 가수분해되어 Hydroperoxy Radical($HO_2^-\cdot$)을 생성하고, 다시 중간 생성물인 Superoxide Radical ($O_2^-\cdot$)과 Ozonide Radical($O_3^-\cdot$)을 거쳐 Hydroxy Radical(OH·)을 생성하게 된다.

OH Radical은 오존보다 높은 전위차를 가지며(O_3 ; 2.07V, OH Radical ; 3.08V), 거의 모든 유기물과 매우 빠른 속도로 골고루 반응하는 특징이 있다. OH Radical은 복합적인 반응들을 통해 O_3와 H_2O_2에 의해 생성된다. 이러한 반응들은 전체반응(Overall Reaction)으로서 한 개의 과산화수소(H_2O_2)와 두 개의 O_3 분자를 가지고 두 개의 OH Radical을 형성한다(Langlais et al. 1991).

이러한 연쇄반응을 통해 생산되는 Hydroxy Radical(OH·)에 의해 강력한 산화반응이 진행되며, 오존과 물의 화학반응 과정은 식 (2.1)~(2.4)와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$O_3 + H_2O \rightarrow HO_3^+ + OH^- \quad (2.1)$$

$$HO_3^+ + OH^- \rightarrow 2HO_2\cdot \quad (2.2)$$

$$HO_2\cdot + O_3 \rightarrow OH\cdot + 2O_2 \quad (2.3)$$

$$OH\cdot + O_3 \rightarrow HO_2\cdot + O_2 \quad (2.4)$$

오존은 염소보다 강력한 산화력을 가지고 있어 소독을 목적으로 사용할 경우에는 Radical이나 과산화물에 의해 세포조직 내의 생화학적 반응효소에 독성을 주고 염색체에 이상을 초래하여 세포막을 파괴시킴으로써 살균효과가 있는 것으로 알려져 있다. 강한 산화력에도 불구하고 맛·냄새물질인 Geosmin, 2-MIB, THMFP와 같은 포화탄화수소, 농약 등의 대다수 유기물질과 반응이 느리거나 어떤 유기물과는 전혀 반응하지 않는 경우도 있다.

정수처리공정 중 오존의 주입위치에 따라 전 오존처리, 중오존처리, 후 오존처리가 있으며, 전 오존은 착수정에 오존을 주입함으로써 원수 중의 철(Fe), 망간(Mn) 등을 산화시키고 THMs 등 소독부산물 생성을 저감시킨다. 중 오존처리는 침전지 후단에 오존을 주입함으로써 전 오존에 비해 오존 주입량을 줄일 수 있으며, 철, 망간 농도가 높을 때 사용한다. 후 오존처리는 일반적인 정수처리공정과 입상활성탄(GAC) 사이에 오존을 주입함으로써 난분해성 유기물의 생분해성 증가시켜 생물활성탄(BAC)으로 운영할 수 있다.

파일롯 플랜트 규모 입상활성탄여과지(GAC)의 흡착과 생물학적 제거가 진행되는 동안 전처리공정으로서 오존처리의 영향을 평가한 연구결과 GAC공정에서 오존공정이 전처리로서 DOC의 제거에 미치는 영향은 활성탄의 흡착능이 유지되는 기간에는 거의 없고, 생물학적 제거능이 발생되는 기간에는 10% 정도 향상된다. 오존+GAC 공정에서는 소수성(Hydrophobic DOM; HPO)과 반친수성(Transphilic DOM; THP)의 제거에는 오존의 영향이 없으나, 생물학적 제거능이 활성화되는 운영기간에는 오존이 전처리로서 친수성(Hydrophilic DOM; HPI) 생물학적 제거를 활성화시킨다. 오존공정을 지나면서 생분해성 용존 유기물이 증가하므로 AOC (Assimilable Organic Carbon), BDOC(Biodegradable Dissolved Organic Carbon) 농도가 높아지고, F/A (Filter/Adsorber), GAC, Post O_3+GAC 등 모든 공정은 생물학적 유기물 제거능을 가진다. Post O_3+GAC는 오존처리로 인해 GAC에서 더욱 활성화된 생물학적 활동도에 의해 AOC와 BDOC의 저감효과가 더 크게 나타난다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

활성탄 여재에 고정된 미생물의 생체량인 Biomass(에너지원으로 이용되는 식물, 미생물 등의 생물체)는 전처리로서 오존처리의 유·무에 상관없이 공정별로 큰 차이를 보이지 않는 반면, 유출수에서의 일반세균(Geterotropic Plate Count; HPC)은 F/A나 GAC에 비해 Post O_3+GAC에서 매우 낮다. 오존공정이 존재하는 활성탄공정(Pre O_3+F/A과 Post O_3+GAC)은 오존의 위치에 상관없이 입상활성탄 단독공정(F/A, GAC)에 비해 생물학적 제거능이 활성화된 장기간 운영 후 DOC, HPI, BDOC, AOC의 제거율이 10~20% 정도 높다. 오존공정은 전반적인 DOC 제거에는 큰 영향을 주지 못하나, AOC를 약 20% 정도 감소시켜 관로 내 미생물의 재 증식을 저감시킨다(안효원 등, 2008).

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.2 과산화수소(H_2O_2)를 이용한 잔류오존 제거

2.2.1 과산화수소(H_2O_2)

과산화수소는 수소와 산소가 결합된 분자량 34.0147g/mol의 화합물로 분자구조가 불안정하며 강한 산화력을 가진다. 상처가 났을 때 소독약으로 사용되며, 푸른색을 띄는 물보다 점성이 큰 액체로 산화력이 강하기 때문에 분석시약의 산화제, 견사나 양모 등의 표백제, 플라스틱 공업에서 비닐 중합의 촉매로도 사용된다. 과산화수소의 밀도는 1.463g/㎤이며, 녹는점은 -0.43℃, 끓는점 150.2℃이다(NAVER 지식백과 두산백과).

과산화수소는 햇빛에 의해서도 산소와 물로 분해될 수 있으며, 특히 80% 이상의 농도에서는 자체적으로 폭발할 가능성이 있을 정도로 강한 산화력을 가진 물질로 위험물안전관리법 시행령에 의해 36% 이상의 고농도 과산화수소는 제6류 위험물로 지정, 이를 다루기 위해서는 특정한 자격요건이 필요하다.

과산화수소의 분해 반응은 알칼리성 상태에서는 쉽게 이루어지지만 산성의 상태에서는 비교적 안정하기 때문에 쉽게 분해되지 않는다. 과산화수소는 생물체 내에서 생명활동을 돕는 역할을 하며, 적은 양이 존재하면 생명활동이 둔화되고, 양이 과다하면 괴사할 수 있다.

저농도의 과산화수소는 그 증기를 마셔 호흡기나 눈에 닿으면 가벼운 자극이 나타날 수 있다. 고농도의 과산화수소는 위궤양이나 천공을 유발할 수 있으며, 피부와 머리카락이 탈색되고 심하면 화상과 물집이 생길 수 있다. 과산화수소의 치사농도 LC50(Lethal Concentration 50)은 쥐의 경우 2,000mg/kg이며, 유엔 산하의 국제암연구소(IARC)에서는 '사람에게 암을 일으키는 것으로 분류하기 어려운 물질'인 발암성 등급 3군으로 분류하고 있다(IARC 1985).

따라서 과산화수소는 고농도의 경우 독성이 있으므로 정수처리에 사용할 경우 분해 및 제거되어야 하며, 환경부의 "수처리제의 기준과 규격 및 표시기준" 에는 여분의 과산화수소를 제거하기 위해 과산화수소 투입공정의 후속공정으로 입상활성탄 또는 염소처리 공정이 따라야 한다고 제시하고 있다.

과산화수소는 오존의 반응을 촉진하는 촉매제의 역할을 하므로 오존처리와 병행해서 맛·냄새물질인 Geosmin, 2-MIB의 산화에도 유용하다. O_3/H_2O_2 반응실험에 의하면 오존 단독공정에 비해 O_3/H_2O_2 혼합공정에서 접촉시간별로 Geosmin 제거

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

율이 월등히 증가하고, 2-MIB보다 Geosmin이 오존 및 O_3/H_2O_2공정에서 제거가 용이하다. 원수와 여과수에 함유된 Geosmin과 2-MIB에 대해 오존 투입농도 0.5~2.0㎎/L에서 오존과 과산화수소 주입비(O_3/H_2O_2)에 따른 각각의 반응속도상수 k의 변화는 오존주입량 및 오존과 과산화수소의 비율이 증가할수록 반응 속도상수 k가 급격히 커진다. 그러나 일정 한계(오존주입농도 0.5~2.0㎎/L에 대해 1.0~2.0)에 도달한 후 k값은 더 이상 증가하지 않는다. 급속 모래여과 처리수 보다는 오존과 OH Radical 소비물질이 많이 존재하는 원수에서의 반응속도 상수가 더 작다. 오존 주입농도별 과산화수소 주입농도에 따른 모래여과 처리수중의 Geosmin 반감기는 오존과 과산화수소 주입농도가 증가할수록 급격히 줄어들며, 오존만 2㎎/L 주입하여 산화시킨 경우보다 오존 2㎎/L와 과산화수소 10㎎/L를 함께 주입한 경우의 반감기가 38.9분에서 4.6분으로 8.5배 정도 감소한다(이화자 등, 2007).

정수처리공정으로 유입되는 원수의 유입수질에 따라서도 공정별 처리효율이나 공정에 따른 부산물의 발생경향, 발생빈도 등도 달라진다. 이와 관련하여 현재 고도정수공정이 도입되어 운영 중에 있는 부산 덕산, 화명, 명장정수장에 대해 낙동강 원수(덕산, 화명), 호소수(명장 회동 수원지)의 오존부산물(OBPs) 7종에 대해 고도정수처리 공정별 OBPs 생성분포에 대한 조사결과를 보면 전 오존공정에서는 OBPs 농도가 43.3~143.9㎍/L로 전염소공정보다 2~3배 높은 농도로 검출되며, 오존+GAC공정은 9.4~43.4㎍/L 검출되었다. OBP 혼합물 7종(Form-A, Acet-A, PP, BT, GX, Methyl-G, PT)을 대상으로 유입수의 DBPs농도가 가장 높은 8월에 공정별 OBPs 생성분포를 조사한 결과 Acet-A가 가장 높게 검출되었고, 전염소공정의 OBP는 유입농도 대비 2~7%로 소폭 증가하였으며, 전 오존공정의 OBP는 유입농도 대비 60~70%로 대폭 증가되는 것으로 확인하였다(김영진 등, 2007).

2.2.2 과산화수소를 이용한 오존 Quenching

산화제를 정수처리공정에 주입하여 발생한 강한 산화력의 OH Radical을 이용하는 공정을 고도산화(AOP, Advanced Oxidation Process)라 한다. 고도산화의 한 종류인 O_3/H_2O_2법은 오존공정에 H_2O_2를 추가 주입하여 오존을 더 빠른 속도로 분해시켜 OH Radical을 생성하는 방법으로 AOP는 물론 후단의 잔류오존제거에도 효과도 뛰어나므로 잔류오존의 제거공정에도 적용된다.

증류수에 초기 오존농도 1㎎/L를 투입할 경우 과산화수소 대 오존의 비를 0.25~

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.28까지 변화시키면서 오존의 분해속도 k(/min)를 측정해보면 1.2 정도에서 오존의 분해가 가장 빠름을 알 수 있다. 이는 오존의 소모로 OH Radical 생성을 빠르게 유도할 수 있음을 나타내는 것으로 O_3/H_2O_2 AOP를 적용할 경우 최적 운전인자로서 사용할 수 있음을 의미한다고 할 수 있다.(박훈수 등, 1996)

잔류오존제거를 위한 H_2O_2의 주입비율 결정을 위하여 오존 대비 0.2, 0.5, 0.8 (w/w%)로 변화시키면서 실시한 실험에서 H_2O_2 비율이 0, 0.2, 0.5wt%로 증가함에 따라 OH Radical-CT값이 선형적으로 증가하고, Rct값도 Radical 생성특성에 따라 일정한 상관성을 가지나, O_3/H_2O_2 적용 시 과도한 H_2O_2의 주입은 OH Radical 생성을 억제시킨다(강준구 등, 2002).

수중에서 H_2O_2의 분해 및 O_3와의 반응식은 식 (2.5)~(2.11)과 같다.

$$H_2O_2 \rightarrow H^+ + HO_2^- \tag{2.5}$$

$$HO_2^- + O_3 \rightarrow HO_2\cdot + O_3^-\cdot \tag{2.6}$$

$$O_3^-\cdot + H^+ \rightarrow HO_3\cdot \tag{2.7}$$

$$HO_3\cdot \rightarrow O_2 + OH^-\cdot \tag{2.8}$$

$$HO_2^- \rightarrow H^+ + O_2^-\cdot \tag{2.9}$$

$$O_2^-\cdot + O_3 \rightarrow O_2 + O_3^-\cdot \tag{2.10}$$

$$2O_3 + H_2O_2 \rightarrow 2OH\cdot + 3O_2 \tag{2.11}$$

식 (2.6)의 HO_2^-는 과산화수소의 짝염기로 수중 오존분해를 개시하는 역할을 하고, 그 반응을 시작으로 연쇄반응에 의하여 OH Radical이 생성된다. 다시 말해 오존이 분해되는 반응이 가속화되는 것이다(상수도시설기준, 2010). 물속의 OH^-이온이 오존분해 개시제로 사용되기 때문에 높은 pH에서는 오존의 분해가 빨라진다. 일반적으로 오존분해의 Mechanism에 관한 반응은 Hoigné 등에 의해 광범위하게 연구된 과정을 따른다.

$$O_3 + HO^- \rightarrow HO_2\cdot + O_2\cdot \qquad k = 70/M/\mathrm{sec} \tag{2.12}$$

$$O_3 + HO_2^- \rightarrow HO_2\cdot + O_3\cdot \qquad k = 2.2 \times 10^6/M/\mathrm{sec} \tag{2.13}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (2.12)와 (2.13)은 오존과 OH^- 이온, HO_2^- 이온과 같은 오존분해를 시작하게 하는 개시제로서의 이차반응 속도상수를 나타낸 값이다. 이 식에 따르면 HO_2^- 이온이 OH^- 이온에 비해 훨씬 빠르게 오존을 분해하는 것을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.3 고도산화공정(AOP)에 의한 고도정수처리

2.3.1 개 요

오존은 산성에서 비교적 안정하나, 알칼리성으로 갈수록 분해속도가 빨라지며, 오염물이 없는 수용액 속에서도 수산화기에 의해 분해가 재개되어 중간 생성물질로 Hydroperoxy Radical($HO_2^- \cdot$)과 Superoxcide Radical($O_2^- \cdot$)을 형성한다. 이들은 다시 오존분자와 반응하여 Ozonide Radical($O_3^- \cdot$) 중간경로를 거쳐 OH Radical을 형성한다. 중간물질인 OH Radical은 오존 자체보다 높은 전위차를 가지며(3.08V), 거의 모든 유기물과 매우 빠른 속도로 골고루 반응하는 특징이 있다. 이처럼 산화력 보강을 위해 산화제를 함께 반응시켜 OH Radical의 생성을 가속화하여 유기물질을 처리하는 방법을 고도산화공정(Advanced Oxidation Process; AOP)이라 한다.

AOP의 종류는 공정에 추가되는 산화제의 종류에 따라 O_3/H_2O_2(PEROXONE), Ozone/High pH, Ozone/UV, TiO_2/UV, H_2O_2/UV, O_3/Election Beam, Fe/H_2O_2, O_3/TiO_2, O_3/Metallic Oxides 등의 방법들이 있다. 산화제에 따른 전위차와 오존과 OH Radical의 반응속도는 표 2.1와 표 2.2에 나타내었다.

표 2.1 산화제에 따른 전위차 비교

산 화 제	산화전위(V)	산화제	산화전위(V)
OH Radical	2.80	과망간산칼륨	1.68
오존	2.07	염소	1.36
과산화수소	1.77		

표 2.2 처리물질별 오존과 OH Radical의 반응속도 비교

구 분	$K_{O_3}(/M/\mathrm{sec})$	$K_{OH}(/M/\mathrm{sec})$	비 고
Geosmin	약 10 이하	8.2×10^9	
2-MIB	약 10 이하	3×10^9	
1,4 Dioxane	0.32	2.5×10^9	
Benzene	2	7.9×10^9	
Atrazine	6	3×10^9	
Ethanol	0.37	1.9×10^9	

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.3.2 AOP 종류별 특징

1) Ozone/H_2O_2

과산화수소의 짝염기 HO_2가 수산화기(OH)보다 훨씬 빠르게 오존을 분해하여 OH Radical을 생성하는 원리를 이용하여 유기물 분해를 촉진하는 산화공정으로 오존(O_3)에 과산화수소(H_2O_2)를 첨가하여 OH Radical을 생성하는 방법을 O_3/H_2O_2 AOP라 하며, PEROXONE공법이라고도 불린다.

$$2O_3 + H_2O_2 \rightarrow 2OH\cdot + 3O_2 \qquad (2.14)$$

식 (2.14)와 같은 반응에 의해 생성된 OH Radical은 오존에 비해 산화력이 높고 대부분의 유기물들과 비 선택적으로 반응하기 때문에 오존 단독공종보다 높은 산화효율을 나타낸다.

과산화수소를 무작정 많이 주입할 경우 생성된 OH Radical이 식 (2.15)와 같이 유기물과 반응하지 못하고 과산화수소와 반응하여 오히려 산화효율이 낮아질 수 있다. Ozone/H_2O_2 AOP의 일반적인 공정모식도는 그림 2.1에 나타내었다. 표 2.3은 오존 단독공정과 PEROXONE공법의 특성을 나타낸다.

$$H_2O_2 + OH\cdot \rightarrow HO_2 + H_2O \qquad (2.15)$$

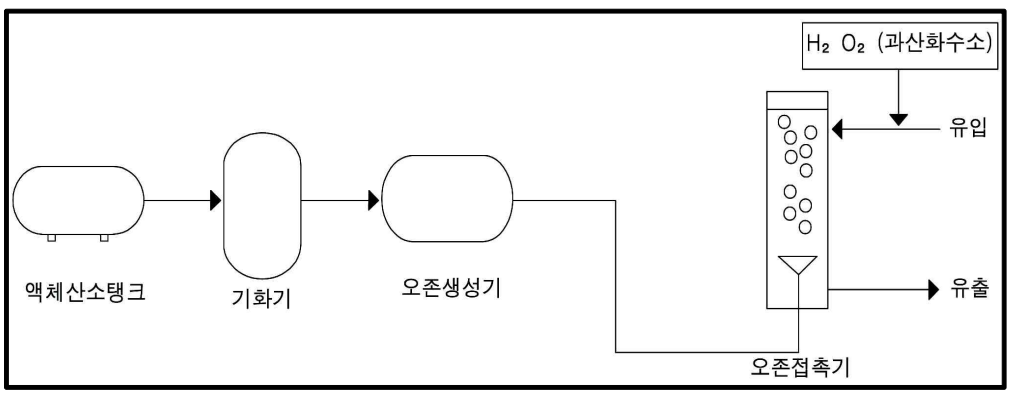


그림 2.1 Ozone/H_2O_2 AOP 모식도

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

표 2.3 오존공정 및 Peroxone공정 특성 비교

구 분	Ozone	Peroxone
오존 분해속도 (water at a pH 10.9)	연계반응 생성물로 OH Radical을 생성하므로 보통의 분해속도(1.9sec)	오존단독공정보다 OH Radical 농도가 증가하여 오존 분해속도 증가(0.047sec)
오존 잔류성	5~10분	빠른 반응으로 매우 짧음.
주 산화반응	오존분자에 의한 직접 산화반응	OH Radical에 의한 산화반응
Fe, Mn 산화능	우수	다소 비효과적
맛·냄새물질 산화능	반응조건에 따라 변함	양호
소독부산물 산화능	불량	양호
소 독 능	우수	양호
잔류소독능 제어	양호	불량(CT값 산출 불가능)

Geosmin, 2-MIB, 1,1-Dichloropropene, TCE, PCE, 1-Chloropentane 및 1,2-Dichloroethane 등의 염소계 유기화합물들 산화제거에도 오존공정보다 Peroxone 공정이 효과적이다. 과산화수소/오존의 최적 주입비는 여러 연구결과들에서 0.2~1.4 정도로 다양하게 보고되고 있으며, 오존(O_3)과 과산화수소(H_2O_2) 적정비율이 무게비로 약 3:1 정도라고 제시하고 있다. 유입수 성상과 반응기 형태와 같은 다양한 변수의 영향을 받는다(KDS 57 55 00 상수도 정수시설 설계기준, 환경부)

2) Ozone/High pH

오존은 높은 pH에서 많은 OH Radical이 생성되는 원리를 이용한 공정으로 pH의 변화는 OH Radical 생성측면에서 뿐만 아니라 소모측면에서도 중요하며, 원수 수질에 따른 최적 pH를 결정하는 것이 필요하다. 수용액에서 OH Radical을 소모하는 물질은 여러 가지가 존재할 수 있으며, 이러한 물질의 농도 및 분포가 pH에 영향을 받을 수 있다. 오존과 OH Radical의 반응식은 식 (2.16)~(2.17)과 같고, 그림 2.2는 Ozone/High pH 공정에 대한 모식도를 나타냈다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$O_3 + OH^{-}\cdot \rightarrow O_3^{-} + OH \quad (2.16)$$

$$O_3 + H_2O \rightarrow OH^{-}\cdot + OH + O_2 \quad (2.17)$$

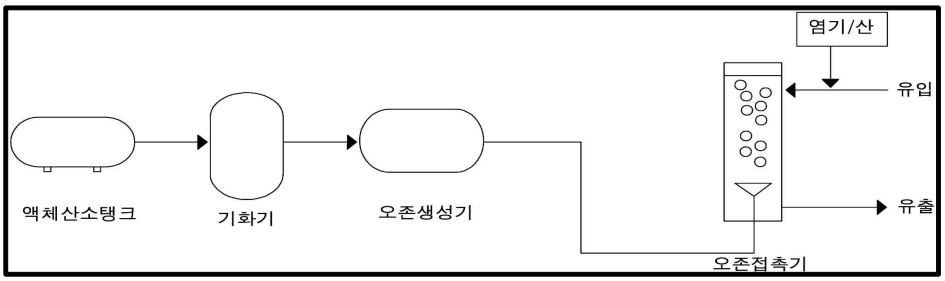


그림 2.2 Ozone/High pH AOP 모식도

3) UV 광분해법(UV/O_3, UV/H_2O_2)

UV/O_3는 산화제에 자외선을 조사하여 OH Radical을 생성하는 방법이며, Taube Payton 등에 의해 연구된 공정이다. 자외선 에너지에 의해 중간 생성물인 H_2O_2가 생성되고, OH Radical을 생성하는 측면에서는 O_3/H_2O_2공정과 동일하며, 유기물을 UV 자체만으로도 제거할 수 있는 장점이 있다. 오존이 자외선 에너지에 의해 광분해(Photolysis)되어 OH Radical을 생성하는 방법으로 식 (2.18)~(2.19)와 같이 중간 생성물로 과산화수소가 발생된다. 그림 2.3은 UV 광분해법의 공정 모식도를 나타낸다.

$$O_3 + H_2O + h\nu \rightarrow O_2 + H_2O_2 \quad (2.18)$$

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2OH\cdot \quad (2.19)$$

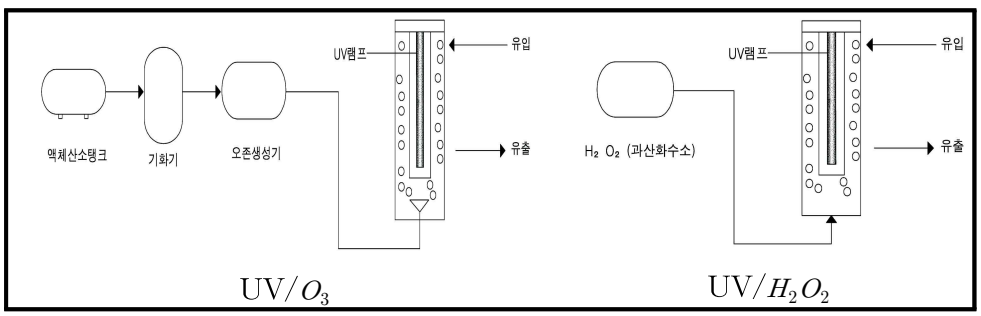


그림 2.3 UV 광분해법 AOP 모식도

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Geosmin, 2-MIB 및 염화 DBPs는 주로 H_2O_2의 광분해를 통해 생성된 OH Radical과의 반응에 의해 분해된다. UV 직접조사에 의한 광분해가 Geosmin과 2-MIB를 제거에 중요한 역할을 하는 것은 아니나, 과염화된 DBPs는 직접 광분해에 의해 분해되지 않는다. 브롬계 DBPs는 직접 광분해에 의해 분해되며, 브롬화된 THMs, HAAs의 광분해 속도상수는 10^{-3}~10^{-2}/sec 사이이고, 브롬원자 수에 따라 커진다. Tribromomethane과 Dibrmochloromethane은 6㎎/L의 H_2O_2와 1,200mJ/㎠의 UV선량에서 99%와 80%의 분해율을 보이며, Geosmin은 90%, 2-MIB는 65% 제거된다. 동일조건에서 Tribromoacetic Acid와 Dibromoacetic Acid는 각각 99 % 및 80 % 분해된다. 결론적으로 냄새제어를 위해 UV/H_2O_2 공정을 설치하면 DBPs 제거라는 추가적인 이점을 얻을 수 있으며, 특히 원수중의 Bromide 농도가 높아 Bromated DBPs 농도가 높은 지역에서 더욱 그렇다. 오존처리 중에 브롬화물 이온으로부터 브롬산염이 형성되기 때문에 UV/H_2O_2가 오존처리보다 더 바람직할 수 있다(Chang Hyun Jo .et al. 2011).

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.4 활성탄(Activated Carbon)에 의한 고도정수처리

2.4.1 개 요

활성탄은 목재, 톱밥, 야자껍질, 석탄 등을 900℃ 전후의 고온에서 수증기로 처리하는 수증기 활성화법과 목질 재료를 염화아연, 황산 등의 약품에 담근 후 탄화시키는 약품활성화법이 있다. 정수처리에는 주로 수증기 활성화법에 의한 활성탄이 주류를 이룬다. 활성탄은 내부에 무수한 세공이 있는 다공성 탄소입자로 세공의 비표면적이 약 700~1,400㎡/g 내외이다. 활성탄은 주로 용해된 비극성 유기물질을 흡착하는 기능을 나타내는데 피흡착물질은 세공의 내부 표면에 흡착된다. 활성탄의 흡착기능에 의해 수중의 2-MIB, Geosmin과 같은 맛·냄새 원인물질, THMs과 HAAs 등의 소독부산물 및 그 전구물질, 농약 등의 미량유해물질과 수원 유역에서의 사고 등으로 인하여 일시적으로 혼입되는 화학물질 등을 제거할 수 있다(상수도 시설기준, 2010, 환경부).

정수처리공정에서의 DOC 제거효율은 활성탄 흡착공정 약 19%, 오존 단독공정 38%, O_3/GAC 혼합공정 약 80%로 활성탄 흡착공정과 오존 단독공정의 DOC 처리효율을 합한 것 보다 훨씬 높은 처리효율을 나타낸다. O_3/GAC 조합공정에서는 반응시간이 증가함에 따라 활성탄 표면이 거칠어지면서 세공이 발달하여 활성탄의 세공이 부식산의 흡착과 분해에 영향을 끼친다. 분자량 크기분포는 흡착에 큰 영향이 없으며, 오존 단독처리 시에는 3~30kda(daltons, 1da=1.66×10^{-27}kg) 사이의 분자가 감소하여 0.5~3kda 범위의 분자들로 전환된다. O_3/GAC 혼합공정에서는 3kda 이상의 분자크기가 상당히 감소하면서 3kda 이하의 분자들 특히 0.5kda 이하의 저분자들이 많이 증가한다. 즉, O_3/GAC 혼합공정에서 활성탄이 오존의 분해반응을 촉진시키고, 반응 중 유기물 흡착뿐만 아니라 흡착 후 유기물과 오존의 접촉을 증가시키는 반응 자리를 제공하거나, 오존으로 인한 활성탄 표면변화로 인하여 고분자 유기물인 부식산의 흡착과 분해가 활발히 진행된다(최은혜 등, 2005).

활성탄은 재질, 원수수질, 통수조건, 흡착제거하는 대상물질에 따라 성과가 다르며, 활성탄 흡착시설의 도입 시 이러한 조건들을 고려한 적정 시설설치가 필요하다. 활성탄의 사용방법으로는 지름이 150μm 이상의 입상활성탄을 모래여과지 후단에 설치하고, 모래여과지와 유사하게 물을 통수시켜 흡착하는 방법과 착수정 등에 활성탄 분말을 투입하여 용해성분을 흡착·제거하는 방법이 있다. 활성탄은 다공질

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

구조가 발달한 탄소재료로서 그 원료, 탄화 및 재생방법에 따라 여러 가지특성을 나타내며, 그 흡착성능은 공극률, 비표면적, 세공용적, 세공분포 등에 따른다. 원료로는 식물계, 석탄계, 석유계로 나뉘며 각각 성질이 다르다. 식물계는 목재, 톱밥(분말, 연질), 야자껍질(분말, 경질), 석탄계는 역청탄(입상), 석유계는 석유의 찌꺼기인 Pitch(입상)를 주로 사용한다.

정수처리를 위한 활성탄의 흡착방식에는 고정층식과 유동층식이 있으며, 고정층식은 조작이 간단하고, 처리수중에 활성탄입자 유출이 적은 장점이 있는 반면, 단점으로는 부유물질로 인한 손실수두에 의해 정기적인 역세척이 필요하며, 역세척에 의해 활성탄이 유출될 우려가 있다. 고정층식에는 단일 고정층식과 직렬 고정층식 등이 있으며, 단일 고정층식은 한 개의 조만 설치하므로 활성탄 사용기간이 길고 교체 또는 재생비용이 문제가 되지 않는 경우에 가능하다. 직렬 고정층식은 하향류 2조 이상의 고정층을 직렬로 연결하여 처리하는 연속 흡착처리의 전형적인 방식으로 흡착속도가 늦고 포화흡착에 가까운 상태로 운영하기 위해 다단화 하는 것이 경제적으로 뛰어난 경우에 선택된다.

유동층식은 손실수두가 작아 역세가 불필요하고, 고정층식에 비해 미세한 활성탄을 사용할 수 있어 접촉시간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 활성탄 입경의 균일성, 비중 등에 유의하여야 하며, 처리수를 통해 활성탄 미립자가 월류하는 경우가 있으므로 유량변경이 어렵다. 유동층식은 상향류 접촉식 원리, 설비면적을 작게 하고자 할 때, 활성탄 교체빈도가 많고 재생량도 많아 활성탄 교체 및 재생로 이송 등을 자동화하고 싶을 때 등에 선택한다. 흡착지의 깊이는 깊을수록 유리하며, 공상 체류시간(EBCT, Empty Bed Contact Time)은 길수록 유리하다(상수도시설기준, 2010, 환경부).

중력식 하향류 흡착지는 모래여과지처럼 빈번한 역세척은 필요 없으며, 2주 내외에서 역세척하여 침적된 입자성 물질 또는 과도하게 성장된 미생물을 제거한다. 이때 활성탄층의 팽창은 가능한 억제하는 것이 유리하다. 이는 역세척으로 인하여 활성탄층 및 흡착대가 교란되어 파과가 일찍 발생할 가능성이 높아지기 때문이다. 입상활성탄 흡착을 통해 소독부산물의 전구물질은 비교적 잘 흡착되나, 염소계 화합물인 소독부산물은 흡착이 잘되지 않는다.

총 THMs을 구성하는 성분 중에서는 Chloroform이 다른 물질에 비하여 파과가 빨라 흡착효과가 나쁘다. THMs의 흡착효과는 염소 주입방법에 따라 다르며, 입상활성탄을 THMs제거에 사용할 경우 전 염소주입은 될 수 있는 한 하지 않거나 적

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

게 함으로써 활성탄의 수명을 연장할 수 있다고 알려져 있다. 활성탄흡착지의 유출수는 일상적으로 관찰·점검하여야 하며, 목표수질에 포함되어 있거나 특정 오염물질 중 어느 것에 의해서라도 파과가 일어나면 곧 운전을 중지하고 재생공정을 거쳐야 한다.

재생활성탄의 수처리 특성을 파악하기 위해 국내 최초로 설치·운영 중인 부산 H정수장의 입상활성탄(4년 6개월간 사용된 야자계 활성탄) 여과지를 이용한 연구에서 운영초기부터 공정운영효율을 조사한 결과 BAC의 활성탄 흡착능은 운전기간 3년 또는 Bed Volume 100,000(/hr)이 지나면 처리효율이 10~20% 미만으로 낮아져 재생 또는 교체를 고려해야 하는 것으로 나타났다. 이 연구에서 재생탄은 신탄에 비해 활성탄 흡착능을 나타내는 요오드 흡착능(요오드가)이 90% 정도 회복된다. 세공용적은 17% 정도 증가하여 저분자 단일물질에 대한 흡착능은 신탄에 미치지 못하는 반면 고분자 단일물질 및 복합물질은 재생탄이 신탄보다 우수하다. 이는 열 재생으로 인한 세공용적(Pore Volume)의 변화가 직·간접적으로 재생탄의 흡착성능에 영향을 미치는 것으로 평가하였다.

수처리 성능회복 정도를 평가하기 위해 실시한 파일롯 플랜트와 Full Scale Plant를 이용하여 실시한 실험에서 $KMnO_4$ 소비량은 신탄과 재생탄에서 비슷한 제거특성을 보이나, DOC, THMFP, UV_{254}에 있어서는 재생탄이 신탄에 비해 초기 흡착능이 우수하고, 정상상태 도달 이후에도 7~13% 정도 높은 제거효율을 보여 전반적으로 수질항목별 제거율이 신탄보다 재생탄이 높은 것을 확인하였다(나영신 등, 2001).

활성탄의 재생공정은 활성탄의 흡착능력을 재생시키기 위한 것으로서 약 850℃에서 약 30분간에 이루어진다. 재생공정은 위탁하거나 규모에 따라서는 정수장에서 직접 운영할 수 있다. 재생 시의 손실률은 통상 10%에 달한다.

2.4.2 분말활성탄(Powdered Activated Carbon) 공정

분말활성탄은 지름이 150μm 이하인 활성탄으로 지름 1~20nm 정도의 세공이 많으며, 주로 기존 정수처리시설(착수정 등)을 활용한다. 비교적 단기간에 적용되므로 자재구입 및 저장시설이 작아 경제적이다. 그러나 탄분을 포함한 슬러지로 인한 환경오염이나 공해 등의 2차적인 문제를 일으킬 수 있으며, 활성탄의 재생은 불가하다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

분말활성탄의 기공 분포와 입자 크기가 이취미 물질의 흡착에 미치는 영향에 대한 연구결과에 의하면 PAC, GAC, 활성탄소섬유(Activated Carbon Fiber; ACF) 등에 대한 이취미 물질 흡착제거 효율은 PAC, ACF, GAC 순으로 효율이 높다. 이처럼 흡착능이 좋고 흡착속도가 빠른 PAC는 현장에서 조류발생 등 비상 시에 적용하는 것이 가장 효율적이다. 흡착특성이 우수한 ACF는 GAC를 대체하는 대안으로서 가능성이 있다. PAC의 기공크기 분포는 활성탄의 원료물질에 따라 달라지고, PAC의 Geosmin, 2-MIB의 흡착효율을 결정하는 인자는 비표면적 값, 총 기공용적, 평균 기공크기 보다는 PAC의 미세기공의 분포가 가장 중요한 요인이다. 또한, PAC의 입자크기가 작을수록 Geosmin, 2-MIB의 흡착제거 효율이 높아 취급상의 문제가 크지 않은 경우에는 입자 크기가 작은 분말활성탄을 사용하는 것이 유리하고, 20㎎/L의 PAC를 주입하는 것이 적정하다고 제시하였다(채아나 등, 2017).

타 공정과의 조합에 대한 연구 중 PAC와 Membrane 조합에 대한 연구에서 2-MIB 50ng/L, Geosmin 200ng/L의 유입농도를 완전히 제거하기 위해서는 각각 18㎎/L와 20㎎/L의 PAC가 주입이 필요하다. 2-MIB와 Geosmin 제거를 위한 PAC 적정 주입농도는 15㎎/L가 적정하며, Coarse-PAC 접촉기에서 2-MIB와 Geosmin의 7% 이상이 겨울철에도 PAC 흡착의 도움 없이도 제거된다. Coarse-PAC 접촉기에서 2-MIB와 Geosmin의 제거효율은 수온에 비례하고, 원수의 온도가 5에서 20으로 상승함에 따라 효율은 거의 두 배가 되어 수온과 제거효율 간에는 BAC의 개발과 생물학적 효과가 밀접한 상관관계가 있음을 증명한다. Membrane 간의 차압(Transmembrane Pressure; TMP)은 3개월 이상 -0.20bar 미만으로 유지되었으며, 공정의 작동 유속 및 회수율은 각각 33LMH(L/㎡/hr, 막의 단위면적당 여과되는 양)과 98%였다(Chansik Kim. et al. 2014).

2.4.3 입상활성탄(Granular Activated Carbon) 공정

1) NOM(Natural Organic Matter)의 영향

자연수에 포함된 천연유기물인 NOM은 맛·냄새물질의 흡착에 방해를 주는 물질로서 초기 흡착용량지수인 k와 Isotherm Slope(등온선경사, 1/n)를 감소시킨다. 2-MIB 제거효율을 높이기 위한 입상활성탄의 구조적 특징은 2-MIB를 흡착할 수 있는 20Å이하의 Micropores(미세공)가 많아야 하며, NOM의 Pore Blockage(세공막힘)을 최소화하면서 2-MIB를 세공 안쪽까지 이동시킬 수 있는 Mesopores(중간

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

크기 공극, 20~500Å)가 함께 발달되어 있어야 한다. 입상활성탄 관련 다양한 연구들이 진행되어왔으며, 현재도 많은 학자들에 의해 연구가 진행되고 있다.

석탄계, 야자계, 목탄계 등의 활성탄과 Anthracite를 이용한 NOM 흡착 및 생분해율에 대한 실험에 의하면 GAC, BAC공정의 탄종별 DOC 흡착능은 수중의 유기물질이 가지는 전하(Charge), 활성탄 세공에서의 표면전하와 관계된다. 목탄계는 pH 4 부근에서 표면전하가 0 부근으로 나타나나, pH가 증가할수록 음전하도 커진다. 야자계나 석탄계는 pH가 산성에서는 양전하를 띄나, pH가 증가할수록 표면전하의 감소 폭이 작아 pH 7 부근에서 0에 가깝다(Bjelopavlic 등).

수중의 유기물질들은 중성부근 pH에서는 음전하를 가지므로 목탄계 활성탄에서는 표면전하와 수중 유기물질들과의 반발력으로 인하여 흡착능이 매우 낮은 것으로 보았다. 목탄계 활성탄에서의 이런 결과는 세공을 만드는 활성화(Activation) 시 야자계나 석탄계는 증기(Steam), 목탄계는 화학약품을 사용함에 따라 세공에서의 표면전하가에 많은 차이가 나고, 석탄계의 경우 야자계보다 중간세공이 더 많기 때문이다. 활성탄의 흡착능은 석탄계>야자계>목탄계, 탄종별 부착미생물의 생체량과 활성도는 거대 세공분포와 양이 큰 석탄계>목탄계>야자계>Anthracite 순으로 우수하다. Anthracite를 이용한 생물여과공정에서 NOM의 생분해율은 15분 이상의 EBCT가 주어져야 BV에 따라 평균 10~17% 최대 18~24% 정도의 생분해율을 얻는다. NOM의 활성탄 흡착은 친수성보다 소수성 유기물질과 10,000da 이하 유기물질 제거가 용이하며, HAA5FP(HaloAceticAcid 5 Formation Potential)보다 THMFP (TriHaloMethan Formation Potential), BDOCrapid 보다는 BDOCslow의 제거가 용이하다. 생물활성탄공정에 의한 유기물질 제거특성은 주로 친수성과 1,000da 이하의 유기물질제거가 용이하고, THMFP보다는 HAA5FP, BDOCslow보다는 BDOCrapid의 제거가 용이하다(손희종 등, 2007).

수계의 맛·냄새물질 생산, 수질오염 사고 등을 일으키는 원인물질의 효율적인 제거를 위한 미량 유해물질(농약류, 페놀류, 벤젠류)과 DBPs에 대한 모형실험장치에 의한 연속모형실험을 실시한 결과에 의하면 미량유해물질은 기존 공정에서 응집/침전까지 25% 미만, 여과까지는 50~60% 제거되며, 오존+활성탄 공정에서는 97% 이상 제거할 수 있다는 것을 확인하였다. 오존은 이미 생성된 THMs, HAAs의 제거에는 효과적이지 못하나, DBPs의 효율적 제어를 위해서는 오존이 HAAs의 COOH기와 낮은 반응성을 갖기 때문에 염소주입 전 오존처리가 요구된다는 사실

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

을 확인하였다. 또한, 수원에 NH_3-N, 조류의 문제가 발생한다면 전 염소처리가 필요하나, 전 염소처리 이후에는 후 오존보다 중 오존이 효과적으로 염소계 DBPs을 제어할 수 있다(김경숙 등, 2004).

GAC에서 EBCT가 7분일 때 50,000~100,000BV 후 측정 가능한 미량 유해물질(MicroPollutants; MPs)의 파과는 발생되지 않으며, 이는 우수한 흡착능이나 생물분해에 기인한다. EBCT 15분에서는 일부 MPs만이 파과되었고, EBCT 7분에 비해 10% 이상 빠른 속도로 CURs(Carbon Use Rates)를 낮춘다. 응집된 DOM과 동일한 GAC를 사용 3회에 걸친 실험에서 DOCo 농도가 높을수록 초기 MPs의 파과가 발생한다(Anthony M. et al,. 2015).

Geosmin과 2-MIB은 직경이 0.54nm(5.4Å) 정도이고, 분자량(Molecular Weight; MW)이 작은(Geosmin MW : 182, 2-MIB MW : 169) 물질이기 때문에 주로 분자량 200 이하의 저분자 유기물과 경쟁관계에 놓이게 된다. 세공(Micropores; 20Å 이하)이 주로 발달된 야자계보다 Micropores, 중간공(Mesopores; 20~500Å 이하)이 고루 발달된 석탄계가 맛·냄새물질 제거효율이 오랫동안 지속된다. GAC에서 Gosmin은 2-MIB보다 흡착성이 좋아 2-MIB가 존재할 때 흡착성능을 보수적으로 나타내는 지표로 사용할 수 있다. TOC 농도로 측정한 유입수 중 DOMs의 증가는 2-MIB에 대한 GAC 흡착능을 감소시킨다(R. Scott Summers et al. 2013).

수중의 Geosmin, 2-MIB와 TCA(TriChloroAcetic Acid) 제거를 위한 입상활성탄 연구에 의하면 외산 석탄계 활성탄이 국산 석탄계 활성탄보다 유기물제거에 있어서 5~10% 정도 효율이 좋다. 맛・냄새 유발물질의 경우 운영초기에는 외산 석탄계 활성탄과 국산 석탄계 활성탄이 모두 좋은 제거율을 보였으나, 운영기간이 길어질수록 외산 석탄계 활성탄에 의한 제거율이 높다. 국산 야자계 활성탄은 유기물 제거에 있어서 국산 석탄계 활성탄과 크게 차이가 나지 않으나, 운영초기 맛・냄새 유발물질의 검출로 인하여 맛・냄새 제어를 위해서는 부적당하다(유병훈 등, 2014).

2) 탈착(Desorption)

장기간 지속적으로 맛·냄새물질이 유입되는 경우 입상활성탄 내에서 이들은 농도의 평형상태를 이루기 위해 흡착과 탈착이 반복된다. 저농도 유입 시 평형을 위해 맛·냄새물질이 탈착되므로 일정기간 유출수 중의 2-MIB 농도가 증가되는 현상이 발생한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.4.4 입상활성탄(GAC) 공정 배열

정수처리시설에서 공정배열에 따라 GAC공정이 위치하는 지점별로 공정특성이 다른데 Pre-Adsorber, Post-Adsorber, Filter-Adsorber 등이 있다.

Pre-Adsorber는 일반적인 표준 정수처리공정의 응집·침전지와 모래여과지 사이에 위치하며, 매우 낮은 탁도의 원수유입 시 주로 적용한다. Post- Adsorber는 모래여과지 이후에 위치하며, 가장 많이 적용되는 형태로 양질의 유입수 공급으로 활성탄효율을 극대화할 수 있고, 재생빈도도 최소화 할 수 있다. Filter-Adsorber는 전통적인 정수처리시설의 응집·침전지 후단의 급속 모래여과지를 개량하여 여과와 흡착이 동시에 이루어지도록 하는 공정으로 기존 여과지를 활용하므로 도입비용이 절감된다. 그러나 탁도제거에 의해 활성탄 내 세공이 막혀 유기물의 흡착을 방해하므로 유입 TOC 농도가 낮을 경우에 경제성이 있다. 잦은 역세척 시 흡착대를 교란하여 THMs과 같은 VOCs 물질들에 대한 초기파과를 유발하므로 활성탄의 흡착효율을 저하시킬 우려가 있다. 활성탄의 재생 시 입상활성탄에 모래가 혼입되면 재생로 운전이 어려워 신탄 구매에 대한 비용부담이 증가될 수 있다.

GAC공정은 단독 공정보다는 맛·냄새물질 제거효율을 증가시키기 위하여 전단에 오존산화 공정을 추가하는 조합공정을 주로 적용하고 있으며, 다양한 연구가 진행되고 있다.

한강수계를 중심으로 한 한국수자원공사 연구에서는 맛·냄새를 유발하므로 제거되어야 하는 대상물질인 DOC에 대하여 모형실험장치를 설치하여 운전한 결과 전 오존공정의 처리효율은 주입농도 1.0~3.0㎎/L, 2-MIB 100ng/L Spike, 접촉시간 5분에서 제거율은 38~70% 범위로 오존 주입률이 증가할수록 제거율도 증가하였다. 후 오존공정의 처리효율은 1.0~3.0㎎/L 범위에서 Geosmin 제거율이 66.8% 정도이므로 맛·냄새물질 제거 측면에서는 GAC단독, F/A(Filter & Absorber)보다는 후 오존+GAC 공정이 우수한 것으로 보고하였다(한국수자원공사, 2004).

GAC와 O_3/GAC 모형실험장치를 설치하여 1년 4개월 동안 약 45,000BV까지 운전 후 석탄계 신탄으로 교체하여 약 10,000BV까지 운전한 실험을 통해 활성탄 교체 전후를 분석한 결과 전반적인 유기물 지표(UV_{254}, Abs, COD_{Mn}, TOC, DOC)는 GAC와 O_3/GAC에서 처리효율이 비슷하였다. 약 25,000~30,000 BV에서 실질적인 파과에 도달하고, 신탄으로 교체 후 처리효율은 80~90%에 도달한다(최현정 등, 1996).

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

현대의 수원은 다양한 환경에 의해 오염되어 조류가 발생하기 때문에 NOM과 냄새문제가 증가하고 있다. 활성탄공정의 흡착효율 평가를 위하여 GAC, O_3/BAC, Membrane 등에 대해 모형실험장치에 의한 연속모형실험을 실시하였는데 이 때 원수 중 NPDOC, UV_{254}, THMFP, HAAFP, 2-MIB 및 Geosmin이 고농도로 분포되어 있었다. 실험 결과 일반적인 정수처리공정에 비해 GAC, O_3/BAC 공정은 제거불가능 용존 유기탄소(Non-Purgeable Dissolved Organic Carbon; NPDOC)의 제거효율을 각각 0% 및 30% 증가시킬 수 있었고, 2-MIB와 Geosmin은 쉽게 제거되었다.

원수 중에 Bromide가 포함된 경우 Chloro-DBPFP가 Bromo-DBPFP로 전환된다. 종래의 GAC 및 O_3/BAC 공정에서는 $CHClBr_2FP$를 효과적으로 감소시킬 수 없었으며, 브롬화물을 함유하는 물의 오존처리는 $CHBr_3$ 등의 부산물을 생성시켰다. HAAFP가 GAC 또는 O_3/BAC 공정에 의해 처리되었을 때 HAAFP는 THMFP보다 더 저감시킬 수 있으며, 이는 HAA가 GAC나 O_3/BAC 공정에서 THM보다 쉽게 흡착되고 생분해되기 때문이다. UF와 NF Membrane 복합공정에 의한 고도정수처리에서는 NPDOC 88.7%, UV_{254} 94%, THMFP 84.3%, HAAFP 97.5%의 제거율을 나타내 최고 품질의 정수를 생산할 수 있었다. 그러나 Membrane 공정에서 본 공정 및 후속공정에 심각한 문제를 초래할 수 있는 Fouling이나 Scaling 등은 NF공정에서 중요하게 고려되어야 할 사항이다(Jong-Sheng Yang et al. 2010).

이와 같이 Membrane 공정은 O_3공정이나 GAC 공정과 조합할 경우 최고 품질의 정수를 생산할 수 있으므로 향후 국내에서도 보다 많은 연구와 검토가 이루어져야 할 것이다.

2.4.5 생물활성탄(Biological Activated Carbon) 흡착공정

오존처리 후 입상활성탄을 거친 경우 두 개의 공정을 독립적으로 적용하였을 때보다 더 오랜 기간 정화효과를 나타낸다는 것이 밝혀졌다. 입상활성탄 흡착 전에 오존산화 단계를 첨가하면 생물학적 처리기능을 최적화 할 수 있다. 오존을 사용하면 난분해성 유기물을 더 간단하고 생물학적 분해가 용이한 동화가능 유기탄소(Assimilable Organic Carbon; AOC), 생물분해가능 용존 유기탄소(Biodegradable Dissolved Organic Carbon; BDOC)로 바꿀 수 있을 뿐 아니라 동시에 초기 소독효과도 가져올 수 있기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

BAC의 최대 장점은 유기물질의 제거를 흡착에만 의존하는 GAC에 비하여 흡착과 생물분해라는 두 가지 제거기구를 활용한다는 점이다. BAC의 흡착능은 GAC와 거의 동일하다고 보는데 이것은 BAC에서 미생물이 크기의 제약상 Macro Pore(10~100Å)에서만 서식하므로 활성탄 표면적의 99% 이상을 점유하는 Transitional Pore(100~2,000Å)와 Micropore(20Å 이하)가 건재하기 때문이다.

생물학적 난분해성 물질(Non-Biodegradable Substance)에 대한 BAC의 흡착능은 GAC와 거의 동일한데 생물학적 분해 가능한 물질을 생물 분해하여 제거하므로 모든 흡착능력을 생물학적 난분해성 물질의 흡착에 할애할 수 있으므로 재생 Cycle이 GAC보다 훨씬 길어져 유지관리비의 직접적인 절감을 가져오게 된다. 비용절감 외에 또 하나 BAC공정의 장점은 오존주입과 BAC를 거친 처리수는 염소 요구량이 적고 안정되어 소량의 염소 또는 이산화염소 주입으로 충분한 잔류 소독 효과를 거둘 수 있다는 것이다. 그러나 생물활성탄 공정의 특성인 생물분해 기능은 장점인 동시에 단점이기도 하다.

생물활성탄 공정에 대한 연구 중 수도권 S정수장 내 설치·운영한 모형실험장치(오존+GAC, GAC 등)에서는 BAC 조건으로 운전개시 후 9개월부터 오존공정이 활성탄 재생주기 연장에 도움을 주며, 운전초기에는 두 계열 모두 DOC제거율이 69.7~73.8%로 나타났다. 시간이 경과할수록 파과의 영향에 따라 DOC 제거율이 감소하며, UV_{254}는 여름철에 높고 겨울철에 낮은 특성이 있었다. DOC 파과 후에는 수온 즉, 생물활성도에 영향을 받아 GAC 단독공정의 경우 오존+GAC 공정에 비해 생물활성도가 떨어져 저수온기에는 Geosmin 검출이 우려된다(이현주 등, 2006).

앞서 논한 바와 같이 우리나라 정수장들에서 정수 중의 맛·냄새를 유발하는 대표적인 물질은 2-MIB와 Geosmin 등이다. Beihai Zoul 등은 이들 맛·냄새 유발물질 중 수중의 Geosmin을 제거할 수 있는 3가지 Gram-Negative 박테리아 균주를 BAC에서 분리하여 생화학적 분석, 16S rRNA(16S Ribosomal RNA) 유전자서열 분석을 통해 Chryseobacterium sp., Sinorhizobium sp. 및 Stenotrophomonas sp.를 확인하였다. 이들을 무기물 배지에서 배양하여 Geosmin 농도 2㎎/L일 때 제거효율을 분석한 결과 Chryseobacterium sp., Sinorhizobium sp., Stenotrophomonas sp.는 각각 84.0%, 80.2%, 74.4%의 제거율을 보였다. 560ng/L Geosmin일 때는 각각 84.8%, 82.3 %, 82.5 %가 제거되는 것을 확인하였다(Beihai Zhou1 et al,. 2011).

위 연구에서와 같이 BAC 내에는 유기물 등을 제거할 수 있는 미생물군이 존재

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하며, BAC가 미생물군을 형성하여 안정적인 기능을 발휘하기까지 약 4~8주의 기간이 필요하다. 온도, pH, 유입물질의 종류 등 미생물의 활동에 영향을 미칠 수 있는 환경인자가 변할 경우 다시 4~8주의 안정화 기간이 소요되어 BAC 실증 플랜트 운영은 적어도 12개월 이상의 기간이 소요되므로 2년 이상의 운영이 권고되고 있다. 따라서 최적 설계조건 및 운영조건을 파악하기 위한 장기간의 조사·검토 및 실증플랜트 운영이 요구되며, 전처리 공정이 다양해지므로 유지관리에 고도의 숙련된 운영요원이 필요하다.

BAC 유출수 중에는 활성탄 표면에서 탈리된 미생물들과 미생물들의 활동결과로 생성된 미량의 분비물들이 포함되므로 BAC 유출수에는 미량이지만 일정한 양의 유기물질이 항상 포함되어 있다. 그러나 유출수 내의 유기물질의 농도가 균일하게 낮은 상태이므로 처리대상 물질이 유출되는 파과를 감지하는 데는 어려움이 없으며, 유출수 내의 미생물도 소량의 소독제로 쉽게 살균할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.5 조류에 의한 맛·냄새 현황

2.5.1 기후변화와 조류발생

우리나라는 하천 및 호소 등 지표수에 대한 수자원 의존도가 매우 높다. 2016년 환경부 상수도통계에 의하면 댐(호소) 51.7%, 하천표류수 39.5%, 복류수 6.7%로 상수원의 97.9%가 지표수이다. 지표수는 지표상에 노출되어 있어 기후변화에 따라 물리화학적, 생태학적 특성이 민감하게 변화하게 된다. 특히, 수생태계에서 1차 생산자 역할을 담당하고 있는 식물성 플랑크톤은 빛, 수온, 영양염류 등 조류 생장에 영향을 미치는 조건의 변화에 따라 민감하게 반응하기 때문에 기후변화에 따라 다양한 변화가 나타난다. 기후변화에 따른 수온상승, CO_2농도 상승, 가뭄 등은 식물성 플랑크톤 군집의 발생패턴을 변화시키며, 냄새 및 독성을 내는 유해성 조류의 대 발생을 촉진시킬 수 있다.

서울시 통계에 의하면 한강의 결빙기간은 10여일로 1910년대 약 3개월에 비해 크게 줄어들어 동절기 수온상승현상이 나타나고 있다. 최근 20여년간 2~4월의 팔당호 Chl-a 농도는 뚜렷한 상승 경향을 보였다. 환경부에서 발표한 통계에 따르면 2011년 동절기 팔당 상수원에서 Geosmin 발생에 따른 수돗물 냄새민원은 1,586건에 달했다. 상수원에서 조류의 과다증식은 응집장해, 여과지 폐색, 맛·냄새 유발, 유해물질 생성 등 상수원 이용에 부정적 영향을 미치게 된다. 상수원으로 지표수를 주로 이용하는 우리나라는 기후변화로 인한 조류발생 증가가 수자원 관리상의 매우 중요한 현안이라 할 수 있다.

최근 상수원 조류발생 증가로 문제가 되고 있는 것은 수돗물의 맛·냄새와 조류독소이다. 환경부에서는 조류에 의한 피해 최소화를 위해 1998년부터 조류경보제를 시행하고 있으며, 대상항목은 Chl-a와 남조류 세포수(Anabaena, Aphanizomenon, Microcystis, Oscillatoria 속 세포수의 합)이다.

부산을 비롯한 경남 남부권의 주요 수원인 낙동강의 원수 중 맛·냄새물질, 방선균 및 조류 등의 상관관계를 규명한 연구에 의하면 Geosmin은 봄과 여름철(3, 8, 9 월), 2-MIB는 겨울과 봄철(2, 3, 5월)에 주로 검출되는 것으로 나타났다. 3월 분리된 방선균의 배양 희석액에서 맛·냄새물질이 검출되어 방선균 또한 맛·냄새의 유발원인임을 확인하였다. 또한 하천수계에서 일정 균수(150 CFU/500mL) 이상의 방선균이 검출될 때 수계 맛·냄새물질 농도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 3월,

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

8월의 높은 맛·냄새물질 검출은 방선균에 의한 것이며, 9월 맛·냄새물질 농도가 높게 검출된 것은 남조류인 Microcystis속의 영향이다. 물질별로 방선균 수와의 상관성은 Geosmin이 높고, 2-MIB는 상대적으로 낮게 나타났다(김정아 등, 2013).

조류경보제는 맛·냄새물질과 조류 독소물질을 직접 감시하는 제도는 아니나, 수돗물 음용 기피원인으로 작용하는 대표적 맛·냄새 물질인 Geosmin과 2-MIB를 2009년 7월부터 먹는 물 수질감시항목으로 지정하여 수돗물에서 월 1회 모니터링 하도록 하고 있다. 조류독소에 대해서도 2011년 동절기 수도권 Geosmin 발생, 2012년 한강 및 낙동강 조류번성으로 남조류가 사회적으로 큰 이슈가 됨에 따라 2013년부터 조류 독소물질인 Microcystin-LR을 먹는 물 수질감시항목으로 추가 지정하여 정수에 대해 모니터링하게 되었다. 이와 같이 조류는 수돗물에서 맛·냄새를 유발하는 Geosmin과 2-MIB를 생성시키는 원인이 되므로 정수처리과정에서 제거되어야 한다.

한강원수를 대상으로 Bench Scale 실험과 Post-Ozonation+GAC, GAC, F/A (Filter/Adsorber) 등의 모형실험장치를 설치하여 4년에 걸쳐 장기간 운전함으로써 실제 원수의 맛·냄새물질 유입에 따른 처리효과를 상호 비교하여 각 공정에서 입상활성탄의 사용기간을 파악한 실험(목표수질 2-MIB, Geosmin 각 10ng/L 이하)에 의하면, 한강원수는 비교적 고수온시기에 발생하는 Geosmin보다는 저수온 시기에 장기간 발생하는 2-MIB 제거를 위한 고도정수처리공정 운전조건을 설정해야 하고, 가장 효과적인 고도정수처리 공정은 후 오존+GAC의 공정구성이 적합하다. 이에 따른 오존 주입량은 0.5~2㎎/L 사이에서 유입수의 맛·냄새물질 농도에 따라 탄력적으로 운전하여 CT를 활용한 오존처리 운전조건 설정이 가능하다. GAC공정의 경우 맛·냄새물질 목표수질(10ng/L)에 도달하는 시점은 TOC 60% 파과 수준에 해당하므로 사용연수 약 2년, 60,000BV에서 입상 활성탄의 재생이 이루어지는 것이 바람직함을 제시하였다(조우현 등, 2007).

조류는 그 자체만으로도 하천수질의 악화 등 수계에 나쁜 영향을 미치며, 상수원으로 활용 시 맛·냄새를 유발하기도 하므로 조류뿐만 아니라 2-MIB, Geosmin, Microcystin 등의 용존 유기물질들을 제거하기 위해서는 AOP나 GAC 등 기존 공정의 개선이 필요하다. 조류로부터 기인한 유해물질들은 고도정수처리를 하면 제거할 수 있으나, 독성물질이 처리수중에 잔류할 수 있으므로 유입 조류는 우선적으로 제거시킨 후 처리수 내 맛·냄새물질은 흡착 혹은 AOP 등으로 제거되어야 한다(김문경 등, 2015).

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

맛·냄새물질의 국내 권고기준은 20ng/L 이하이며, Microcystin-LR에 대한 권고기준은 1μg/L 이하로 설정되어 있다. 현재까지 국내에서 조류독소에 의한 피해사례는 보고된 바가 없다.

2.5.2 2-MIB와 Geosmin의 발생특성

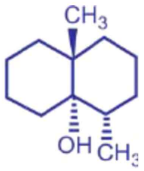
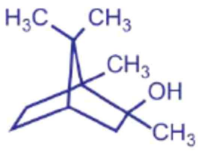
수돗물에서 맛·냄새문제를 일으키는 대표적인 물질은 남조류와 몇몇 방선균의 대사산물로부터 발생하는 Geosmin과 2-MIB이다. 이들 맛·냄새 유발물질의 발생특성 확인을 위하여 경남지역 수원별 8개 지점의 정수장 원·정수를 대상으로 2013년 1월~12월까지 1년간 냄새물질의 영향인자인 조류 종 및 개체 수 등에 대해 비교연구를 실시하였다. 그 결과 Geosmin은 ND~274.0(±17.0)ng/L 수준으로 검출되었고, 우점종은 Anabaena Flos-Aquae가 2,560cells/mL였고, Anabaena Planctonica 1,380cells/mL 등 남조류가 74.1%를 차지했다. 2-MIB는 ND~386.0(±46.0)ng/L 수준으로 검출되었고, 발생 조류 중 남조류는 48.3%, 출현 조류종은 Microcystis Aeruginosa 종이 12,600cells/mL로 남조류 중 67.9%로 우점종이었다. Aphanocapsa sp.종은 4,560cells/mL로 24.6%, Oscillatoria sp.는 1,240 cells/mL로 6.7%를 나타냈다. 맛·냄새물질과 수질항목들의 상관도 분석결과 Geosmin은 하천수의 경우 남조류 0.545, 호소수의 경우 녹조류 0.799로 높은 상관도를 나타냈다. 2-MIB는 하천수, 호소수 모두 0.5 이상의 높은 상관도를 나타낸 항목은 없었다(박미애 등, 2014).

1965년 Gerber와 Lechevalier는 방선균으로부터 흙냄새가 나는 성분을 분리해 Geosmin이라 규명하고, 이후 1969년 방선균으로부터 또 하나 곰팡이냄새를 유발하는 물질을 분리해 그것이 2-MIB임을 확인하였다. 이후 많은 조류종과 방선균류들이 흙냄새와 곰팡이냄새를 발생하는 것으로 조사되었으며, 특히 남조류인 Anabaena sp., Oscillatoria sp., Phormidium sp. 등은 맛·냄새물질을 빈번히 발생시킨다(유경아 등, 2013).

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

표 2.4 Geosmin과 2-MIB의 특성

구 분	Geosmin	2-MIB
분자구조		
화합물 명칭	trans-1, 10- dimethyl-trans-decalol	2-methyiosborneol
분자식	$C_{12}H_{22}O$	$C_{11}H_{20}O$
분자량	182.31	168.15
최저감지농도	4ng/L	9ng/L
유발냄새	흙·곰팡이 냄새	흙·곰팡이·소독약 냄새

Geosmin과 2-MIB의 일반적인 특성은 표 2.4와 같고, 이 물질들은 남조류의 대사작용 중 광합성 색소인 Chl-a 생산경로(Isoprenoid Pathway)를 통해 생산되는 것으로 밝혀졌다. 생산된 맛·냄새물질은 세포 내 저장, 체외분비물(Extracellular Products), 분해산물 방출(Release by Decomposition) 등과 같은 형태로 맛·냄새를 유발한다.

Lyngbya kuetzingii는 여러 가지 온도와 광도조건 중 가장 최적 성장조건에서 Geosmin을 배지(세포외)로 방출되었으나, 대부분은 세포 내에 남겨졌다고 보고하였다(Zhang et al.,에서 재인용 2009). 남조류의 일종인 Oscillatoria tenuis를 대상으로 한 연구에서는 세포 내에 합성된 Geosmin이 틸라코이드막과 세포질막에 포함되어 있는 것을 확인하였다. 남조류의 성장단계 중 Lag Phase(유도기, 지체기)에서 Geosmin의 합성이 증가하며, 최적성장을 보이지 못하는 조건에서 Geosmin 생산이 높아진다고 보고하였다. 또한 Anabaena Circinalis 및 Aphanizomenon Flos-Aquae를 대상으로 한 연구에서는 남조류가 성장함에 따라 Geosmin이 세포 내에 축적되고, 사멸기에 이르러서는 세포 밖으로 방출되는 것으로 나타났으며, 성장단계 중 유도기에 Geosmin 생산이 가장 높은 것으로 나타났다. 위 내용을 종합해 보면 Geosmin과 2-MIB는 남조류의 세포 내에서 생산되며, 남조류 성장의 초기단계(유도기)와 성장이 원활하지 않은 조건에서 생산이 증가하여 세포 내에 축적되고, 최적 성장조건과 남조류의 사멸 시 세포 밖으로 방출되는 양이 증가한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.5.3 2-MIB와 Geosmin의 발생사례

수돗물에서의 맛·냄새 문제는 국내를 비롯하여 미국, 일본, 호주, 중국, 유럽, 아프리카 등 전 세계적으로 발생하고 있다. 특히 Geosmin 및 2-MIB에 의한 흙냄새, 곰팡이 냄새의 발생사례가 많은 것으로 보고되고 있다. Arizona, Texas, California, Florida 등 미국남부 지역은 여름~가을에 2-MIB와 Geosmin이 100~150ng/L 발생하는 것으로 보고되었다. 미국북부에서도 1997년 Michigan호에서 2-MIB가 90ng/L 농도로 발생하여 유역 정수장의 수돗물에서 흙·곰팡내가 발생하는 문제가 있었다고 보고되었다. 미국에서는 2-MIB 발생과 수온이 비례하는 경향을 보이며, 20℃ 미만에서는 2-MIB 발생빈도가 낮다고 보고하였다.

일본은 맛·냄새 문제를 가장 심하게 겪은 나라로 세계에서 유일하게 2-MIB와 Geosmin을 수질기준으로 규정하고 있다(일본 후생성, 2004). 1996년 일본 후생성에서 전국 373개 정수장을 대상으로 실시한 조사에 의하면 50% 이상 의 정수장이 맛·냄새 문제를 겪고 있으며, 발생한 냄새의 70%가 흙·곰팡이 냄새였다. 원수 중 최대값은 2-MIB가 9,660ng/L, Geosmin 2,880ng/L였으며, 정수 최대값은 각각 380ng/L, 338ng/L였다고 한다. 호주에서도 Myponga Resevoir, Happy Valley 등에서 Geosmin이 수천ng/L 농도로 발생하여 어려움을 겪고 있으며, 중국은 Yanghe Reservoir에서 Geosmin이 7,000ng/L까지 발생하였다고 보고하였다(최인철 등, 국립환경과학원 재인용).

국내에서는 대청호에서 1986년 이후부터 남조류 중 Anabaena에 의한 냄새가 발생하였으며, 광주시 동북호에서 1995년 Anabaena Macrospora가 대량 발생하여 곰팡이 냄새 민원이 발생하였다. 2004년 10월 광주시 D정수장에서 Geosmin에 의한 냄새가 발생하였고, 2005년 8월 춘천 Y정수장에서는 Geosmin이 원수에서 124ng/L, 정수에서 85ng/L까지 증가하여 언론보도 및 민원이 발생되었다(국립환경과학원, 2006). 2009년에는 울산시 상수원인 회야호에서 2-MIB가 818ng/L, 사연호에서 Geosmin이 337ng/L 농도로 발생하였으며(서울시상수도연구원, 2010), 충남 예산군 옥계저수지에서는 2009년 10월부터 약 7개월간 Oscillatoria에 의해 2-MIB가 320ng/L까지 농도가 증가하여 D정수장에서 정수처리에 장애를 겪기도 하였다. 낙동강 수계는 2012년 7, 8월 Microcystis가 번성하였으나, Geosmin은 4~24ng/L, 2-MIB는 중하류 지역에서 6~16ng/L 농도로 검출되어 비교적 낮은 농도로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

수도권에서는 팔당호에서 2001년 6월에 Geosmin이 89ng/L, 2004년 2월에 2-MIB가 26ng/L, 5월에 51ng/L 검출되었으며(서울시상수도연구원, 2010), 2008년 7월 팔당호 조류주의보 발령으로 남조류 발생 및 수돗물 냄새가 언론에 보도되기도 하였다. 이후 매년 조류에 의한 냄새발생으로 언론 및 민원발생이 있었으며, 2012년에는 언론보도 약 420여건, 수돗물 냄새민원이 약 200여건에 달했다. 이때 팔당호의 Anabaena 개체수는 6,118cells/mL까지 나타났으며, 수도권 광역 취수원에서 Geosmin이 최고 1,125ng/L까지 검출되었다.

한강수계 Geosmin과 2-MIB 발생이 점차 심화되고 낙동강 수계에 조류발생이 큰 이슈가 됨에 따라 국내에서는 이에 대한 발생원인 조사 등의 연구도 더욱 활발해지고 있는 추세에 있다.

실제 정수처리 공정에서 맛·냄새 물질의 안정적 제거 및 효율증대를 위해 고도정수처리 공정에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2.6 국내 고도정수처리시설 운영현황

우리나라 정수장의 고도처리는 오존공정과 입상활성탄공정을 주로 적용하고 있으며, 최근에는 UV, AOP, Membrane 등에 대한 연구와 적용성 검토도 활발하게 이루어지고 있다.

오존공정의 경우 일반적인 설계 오존주입농도는 1.5~4.0㎎/L이며, 후 오존의 경우 실제로 주입되는 오존의 농도는 0.05~3.0㎎/L를 적용하고 있다. 원료 가스는 과거에는 대부분 공기를 사용하였으나 최근에는 액체산소를 주로 사용하고 있다. 후오존공정의 경우 대부분 잔류 오존농도 및 유량에 비례하여 주입량을 제어하고 있다. 오존 소모량은 원수특성에 따라 많은 차이를 보였으며, 0.23~1.0㎎/L의 범위를 나타내었다. 오존의 주입방식은 과거에는 주로 산기관 방식(Diffuser)으로 적용하였으나 최근에는 Injection 방식 중 Side Stream을 많이 적용하고 있으며, 접촉형태는 향류식이 많았고 일부는 향류식과 병류식을 병행하는 경우도 있다. 접촉시간은 6~22분이었으며, 가동률을 고려한 실 접촉시간은 8~39분이었다(광주광역시 상수도사업본부, Pilot 실험보고서, 2016).

또한, 활성탄공정에서 GAC 층고는 1.2~4.1m, EBCT는 8.17~30분을 적용하고 있고, 역세척 공정은 공기와 물을 함께 사용하는 공기·물 병용 역세척을 하는 경우가 대부분이다. 역세척 빈도는 3~10일로 계절에 따라 차이를 나타냈다. GAC 재생주기는 3년 정도이며, 재생시점은 정수처리효율, 처리유량, 요오드 흡착능 평가 등을 통해 결정하는 것으로 나타났다. 역세척주기는 대부분 손실수두를 고려한 여과지속시간을 기준으로 하고 있으며, 일부에서는 계절(수온)에 따라 결정하고 있는 것으로 조사되었다. 하부 집수장치는 대부분 스트레이너블록 또는 유공블록방식을 적용하고 있다.

해가 갈수록 악화되어가는 기상환경, 그에 따른 원수의 수질오염 등에 따라 전국 대다수의 정수장들에서 고도정수처리 공정의 도입을 위한 연구를 자치단체 주관으로 시행하고 있으며, 광주지역 정수장 고도처리공정 도입을 위한 연구결과를 보면 오존의 분해속도는 용존 유기물의 농도와 온도에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 용존 유기물농도는 원수에서 1.5~1.8㎎C/L, 여과수에서 0.9~1.1㎎C/L로 큰 변화가 없으나, 원수와 여과수 간에는 약 1.5~2배 차이를 보인다. 오존 주입량 1㎎/L인 경우 반응시간 약 15분경 오존 노출량이 10배 이상의 차이를 보이기도 하며, 이는 오존 주입량이 낮을수록 용존 유기물에 의한 초기 오존소모량(IOD)의 영향을 크게

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

받기 때문이었다. OH Radical 노출량은 15분경 원수와 여과수에서 큰 차이를 보이나 반응시간을 30분까지로 했을 때 여과수에서 OH Radical의 느리지만 지속적인 증가로 노출량의 차이가 대폭 감소하며, 온도는 여름철 27℃에서 12월 10℃로 감소하여 큰 변화 폭을 보인다.

원수조건에서 오존 주입량이 1㎎/L로 동일할 경우 오존 노출량이 8월부터 12월까지 점차 증가하여 증가 폭이 두 배에 이른 반면, OH Radical 노출량은 점차 감소하여 1.5배의 감소 폭을 보인다. Geosmin, 2-MIB와 같은 맛·냄새물질은 대부분의 조건에서 오존주입량 1㎎/L일 경우 80% 이상 제거 가능하나, 반응시간이 충분하지 않은 경우(10분 이내)에는 여과수에서 Geosmin, 2-MIB의 제거가 충분하지 않을 수 있으므로 오존 주입량을 늘리거나 O_3/H_2O_2 고도산화공정을 도입하면 계절에 상관없이 단시간 내 대부분의 Geosmin, 2-MIB를 제거할 수 있다.

조류에서 기인한 독성물질과 병원성 미생물은 오존과의 반응성이 높아 계절이나 오존 주입량에 상관없이 단시간 내에 대부분 제거가 가능하며, 병원성 미생물 중 Cryptosporidium의 경우 오존과 반응성이 상대적으로 낮아 유도기(Lag-phase)가 존재하므로 원수조건에서는 오존 주입량을 2㎎/L 이상으로 적용하여야 3log 이상 제거할 수 있다.

오존산화 부산물로 널리 알려진 Bromate는 발암성 물질로 수중에 브롬이온이 고농도로 존재하면 오존과 반응하여 생성되는데 8월 시료에 2.5㎎/L의 오존처리 후 Bromate 농도를 측정한 결과 2,500㎎/L(2.5ppb) 이하로 매우 낮은 값을 보였는데 이는 원수 중 Bromide 농도가 5,000㎎/L 이하의 낮은 농도로 존재하기 때문이다. 오존처리 후 염소를 주입하면 염소소모 속도가 감소하리라는 예상과 달리 11월 여과수에서 1㎎/L의 염소를 주입했을 때 오존 처리한 여과수의 경우 염소가 약 4.5배 빠른 속도로 분해되었다. 다만 오존처리 후 생물학적 여과를 거칠 경우 THMFP를 제거하여 염소소독 후 발생하는 THMs의 생성량을 50%까지 억제할 수 있다(광주녹색환경지원센터, 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.7 중점 제거대상 물질

우리나라 수돗물에서 주로 발생되는 민원은 맛·냄새가 주를 이룬다. 따라서 고도정수처리공정의 도입 시 고려되는 중점 제거대상물질 또한 맛·냄새물질이 주를 이룬다. 이론적 고찰에서 논한 바와 같이 고도정수처리시설을 도입하면 맛·냄새물질 외 THMs(TriHaloMethanes)과 HAAs(HaloAcetic Acids) 등의 소독 부산물, 망간, 색도, 탁도, TOC도 추가적인 제거효과를 볼 수 있다.

일찍부터 고도정수처리가 도입된 낙동강수계의 정수장들도 맛·냄새물질과 미량유기물질(1,4-Dioxin, Perchlorate; 과염소산염) 등을 제거대상으로 정하고 있다.

최근 광주지역에서도 실험대상 정수장을 포함 동복호를 수원으로 하는 정수장에서 Geosmin, 2-MIB 등의 맛·냄새 유발물질로 인한 민원이 발생하고 있으므로 본 연구에서도 Geosmin, 2-MIB 등의 맛·냄새유발 물질을 중점 제거대상 물질로 선정하였다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 모형실험장치 및 방법

3.1 모형실험장치(Pilot Plant)

3.1.1 모형실험장치 구성

본 연구를 위한 모형실험장치는 원활한 원수공급 등을 고려하여 실험대상 정수장 내에 시설용량 Q=60㎥/일(30㎥/일×2계열) 규모로 설치하였다. 모형실험장치의 공정은 국내 고도정수처리공정을 도입한 대부분의 정수장들에서 설치·운영되고 있는 기존 정수처리공정+후 오존+GAC를 기본으로 구성하였다.

1계열에는 기본공정 전단에 전 오존공정을 추가로 구성하여 전 오존공정의 적용성 평가를 함께 실시하여 실험기간의 단축이 가능하도록 하였다. 또한 1~2계열 모두 오존공정에 과산화수소 주입을 통한 AOP 도입 효율성 평가가 가능하도록 그림 3.1과 같이 공정을 구성하였다.

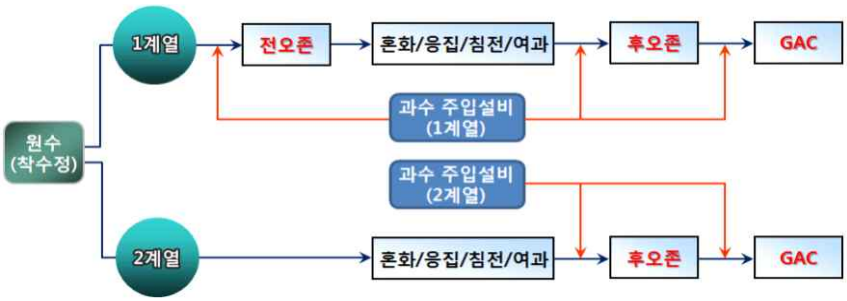


그림 3.1 모형실험장치 공정 개요도

3.1.2 모형실험장치 원수 주입

모형실험장치에 주입할 원수는 일반적인 정수처리공정에 대한 전·후 오존 비교 실험과 후 오존+GAC 연속모형실험에 따라 채수지점을 다르게 하였다. 전·후 오존공정의 효율성 비교를 위해 전 오존공정을 추가한 1계열은 산화제인 전 염소의 영향이 없도록 착수정의 전 염소 주입 전 지점에서 원수를 채수하였고, 2계열은 전 오존 미설치 계열로 전 오존과의 비교를 위해 전염소가 주입된 상태인 착수정의 전 염소주입 후단 지점에서 채수되도록 하였다. 후 오존+GAC 연속모형실험을 위한 원수는 후 오존이 급속여

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

과지 후단에 설치되어 기존 정수장 운영수질을 고려하여 실험함이 합리적이므로 급속여과지 정수거에서 채수되도록 하였다.

3.1.3 모형실험장치 설치

모형실험장치는 기존에 운영 중인 표준공정(혼화/응집/침전/여과)에 고도처리공정인 후 오존+GAC 도입을 기본으로 30㎥/일×2계열을 설치하였으며, 이 중 1계열에는 전 오존처리공정을 추가하였다. 고도산화공정의 효율성 검토를 위하여 전 오존공정의 전단과 1, 2계열의 후 오존공정 전·후단에는 각각 과산화수소(H_2O_2) 주입라인을 설치하였다.

오존 주입률에 따른 제거효율의 원활한 검증실험을 수행하기 위해 오존발생기 및 주입장치는 각 계열별로 분리하여 설치하였다. 이때 오존 주입방식은 국내 수처리시설에서 일반적으로 적용하고 있는 Ejector방식을 적용·운영하였다. 전체적인 모형실험장치의 구성과 설치계획은 그림 3.2~3.3에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

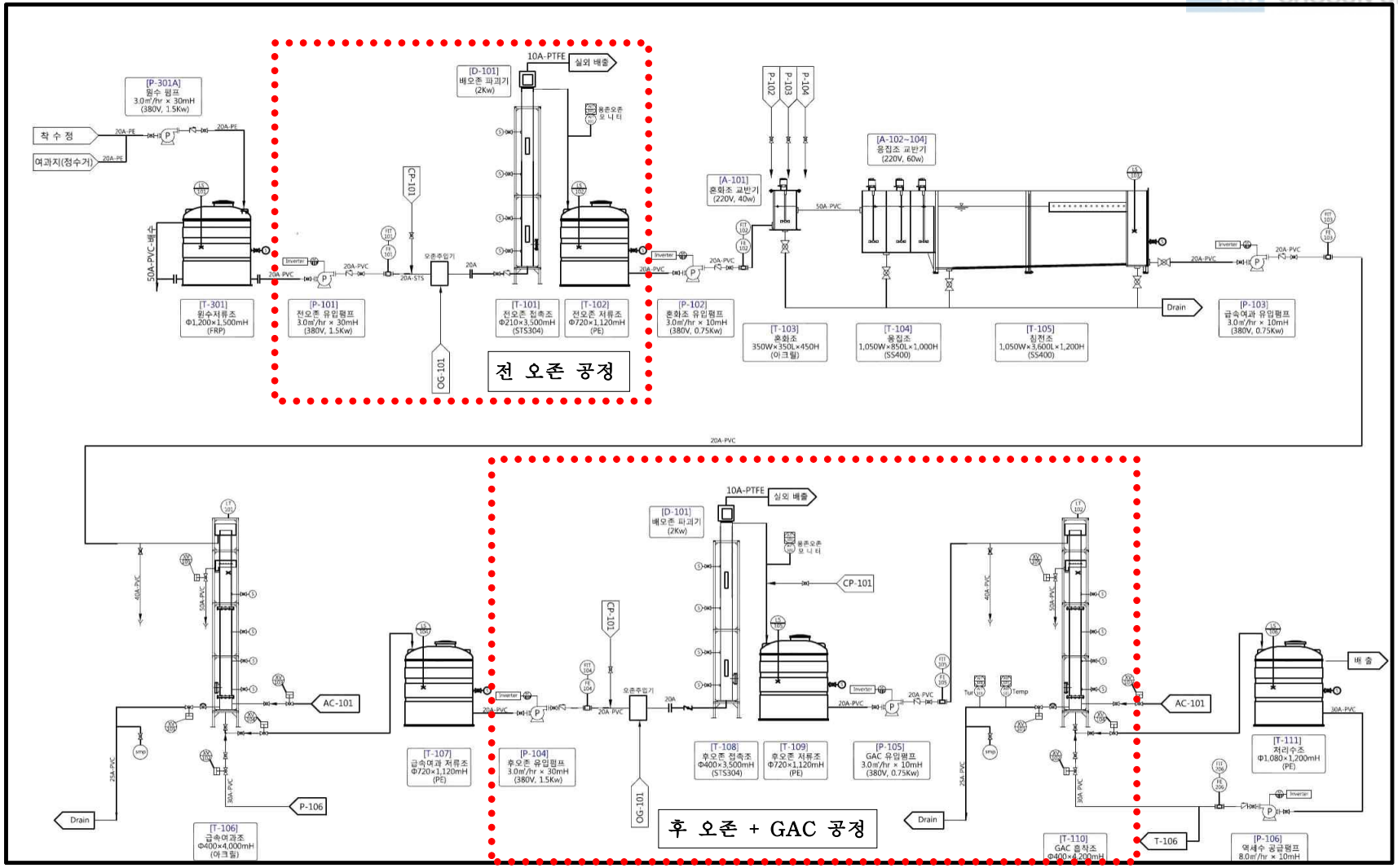


그림 3.2 모형실험장치 P&ID(1계열)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

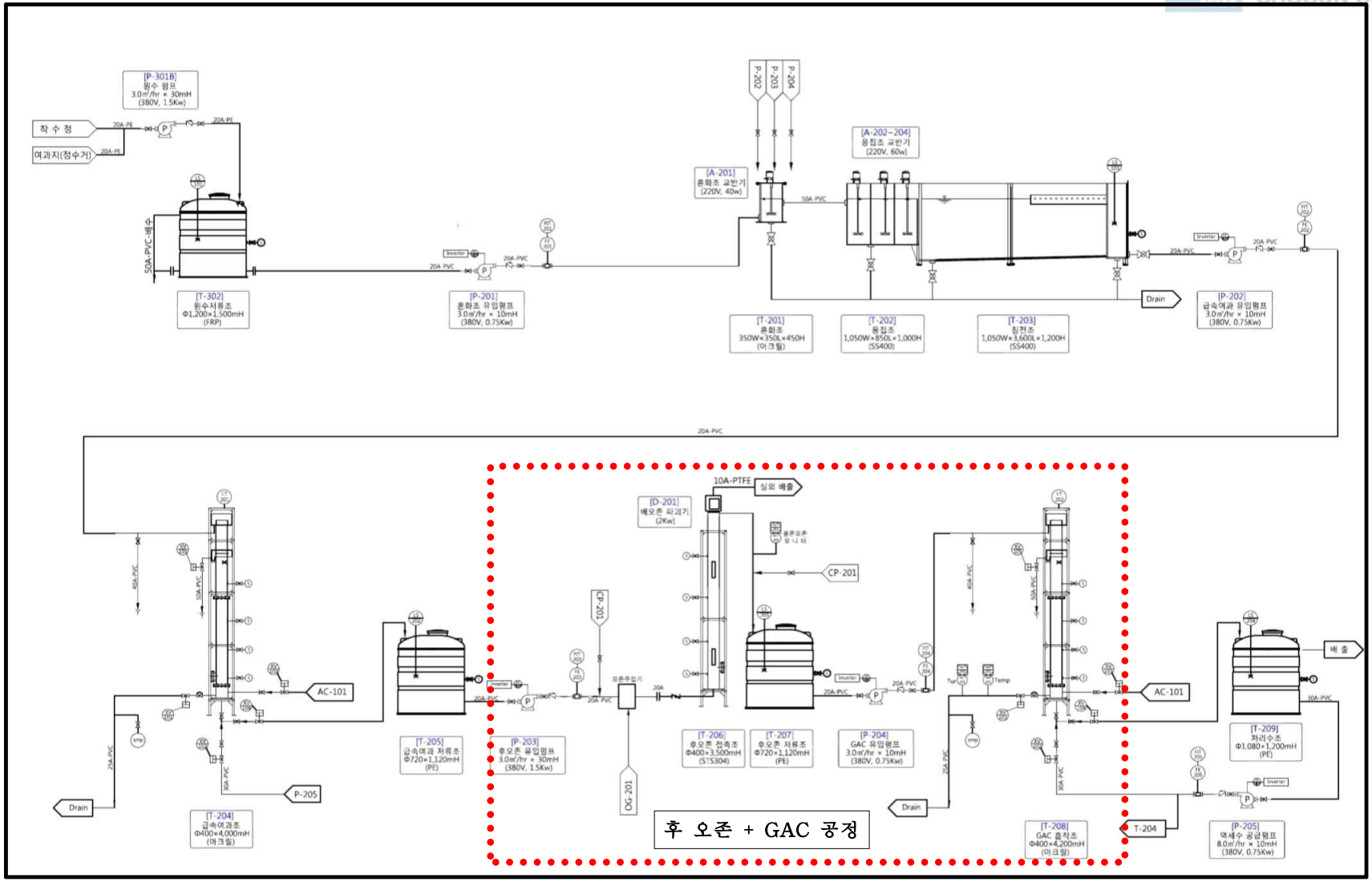


그림 3.3 모형실험장치 P&ID(2계열)

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

3.2 실험방법

실험은 연속모형실험을 기본으로 하였고, 상시 발생되지 않는 맛·냄새물질에 대해서는 강제투입실험을 실시하였다. 강제투입실험은 국내 정수장에서 측정 및 검출빈도가 많은 맛·냄새물질인 Geosmin과 2-MIB에 대해 Supelco 사의 SPME(Solid Phase Micro Extraction)를 이용하여 실시하였다. 연속모형실험은 강제투입실험과 더불어 설계인자, 전 오존, 후 오존+GAC 등의 공정조합에 따른 처리효율 검증을 위하여 수온, pH, UV_{254}, 색도, 탁도 등을 국립환경과학원의 표준시험방법에 따라 분석하였다.

3.2.1 강제투입실험

강제투입실험(Spiking Test)은 오존 접촉시간, O_3/H_2O_2 비, 활성탄 EBCT 등에 대해 실시하여 연속모형실험 및 실 공정의 적정 운전조건과 설계인자를 도출코자 하였다.

실험에서 Target 물질은 2-MIB, Geosmin, 1,4-Dioxane, 미생물, 망간이었으며, 실험에 사용한 원수는 공정구성에 나타낸 바와 같이 실험대상 정수장의 원수와 여과수를 사용하였다.

표 3.1 강제투입실험 계획

년 월	강제투입실험
2015. 08	▪ 전 오존 Vs 후 오존 비교 실험(1차)
2015. 10	▪ 전 오존 Vs 후 오존 비교 실험(완료) ▪ AOP 적용성 검토 실험 ▪ 전 오존 적용성 검토 실험
2015. 12 2016. 02 2016. 04 2016. 06	▪ 각종 보완 및 추가 실험 수행

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

3.2.2 연속모형실험

연속모형실험은 설정된 설계인자와 공정조합을 반영하여 연속적인 처리효율 검증을 위해 1년간(4계절) 1일 5개 항목(수온, pH, UV_{254}, 색도, 탁도)을 분석하였으며, 주간 분석에서는 소독부산물 등 15개 항목을 분석하였으며, 각각의 분석방법은 국립환경과학원의 표준시험방법에 따라 수행하였다.

표 3.2 연속모형실험 수질분석 항목

구 분	1계열(전·후 오존 + GAC)	2계열(후 오존 + GAC)
원 수	수온, pH, COD, DOC, UV_{254}, 색도, 탁도, THMFP, HAAFP, $KMnO_4$소비량, 총 대장균군, 일반세균, 2-MIB, Geosmin, 망간, 염소이온 (16개)	
전오존 처리수	pH, COD, UV_{254}, 색도, 탁도, THMFP, HAAFP, 2-MIB, Geosmin, 망간, 브로메이트, 알데하이드 (12개)	-
침전수	pH, UV_{254}4, 색도, DOC, 2-MIB, Geosmin, 망간 (7개)	
여과수	pH, UV_{254}, 색도, 탁도, DOC, THMs, HAAs, 2-MIB, Geosmin, 망간 (10개)	
후오존 처리수	pH, DOC, UV_{254}, 색도, 탁도, THMs, HAAs, 2-MIB, Geosmin, 망간, 브로메이트, 알데하이드 (12개)	
활성탄 처리수	수온, pH, DOC, UV_{254} 색도, 탁도, THMs, HAAs, $KMnO_4$소비량, 총 대장균군, 일반세균, 2-MIB, Geosmin, 망간, 염소이온, 브로메이트, 알데하이드 (17개)	

3.2.3 분석방법

먹는 물에서 맛·냄새물질 함량을 평가하는 방법으로는 기기분석법과 관능법이 있으며, 기기분석법으로 정량화 가능한 맛·냄새물질 Geosmin, 2-MIB와 TCA, IPMP(2-IsoPropyl-3-Methoxy Pyrazine), IBMP(2- IsoButyl-3-Methoxy Pyrazine) 등이 있다. 전 세계적으로 Geosmin과 2-MIB의 검출빈도가 비교적 높으므로 국내 정수장에서도 두 물질을 측정하는 경우가 많다.

본 실험에서 Geosmin과 2-MIB는 SPME(Solid Phase Micro Extraction)를 이용하여 분석하였다. 사용된 SPME Fiber는 Poly Dimethyl Siloxane

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(PDMS) 비극성 고정상을 50/30㎛ 코팅한 Supelco사의 제품을 사용하였으며, 실험은 국가기술표준원의 “KS I 3224 수질 - 수질 중 냄새물질 시험분석방법”에 의하여 수행하였다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 연구결과 고찰

4.1 실험대상 정수장 유입수질 현황

과거 유입수질과의 변화추이 검증을 위하여 모형실험 실시 전까지 2014. 07. 01~2015. 7. 31의 수질자료를 수질분석 항목별 일단위, 주단위, 월단위 등으로 나누어 분석하였으며, 그 결과는 표 4.1과 같다.

표 4.1 실험대상 정수장 도착수(원수) 수질현황

수질분석 항목	단 위	최 소	최 대	평 균	비 고
수온	℃	3.70	22.8	13.70	일간
pH	-	6.5	7.2	6.7	일간
탁도	NTU	0.7	17.8	2.4	일간
알칼리도	mg/L	16.6	23.9	19.9	일간
색도	도	11	75.0	20.4	일간
전기전도도	μs/cm	42.27	86.10	77.30	일간
용존산소(DO)	mg/L	6.7	11.2	9.2	일간
과망간산칼륨 소비량	mg/L	2.20	3.80	3.16	월간
암모니아성 질소	mg/L	0.00	0.06	0.01	주간
질산성 질소	mg/L	0.64	0.93	0.80	월간
망간	mg/L	0.001	0.09	0.013	주간
총 유기탄소(TOC)	mg/L	1.39	2.40	1.82	주간
용존성 유기탄소(DOC)	mg/L	1.07	1.67	1.37	월간
총 용존고형물(TDS)	mg/L	45.0	82.0	50.63	주간
2-MIB	ng/L	0.00	20.00	0.53	주간
Geosmin	ng/L	0.00	0.00	0.00	주간
SS	mg/L	0.7	2.00	1.54	월간
UV_{254}	/cm	0.029	0.049	0.038	월간
염소이온	mg/L	4.41	5.07	4.64	월간

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

앞의 과거 분석자료에 의하면 2014년 7월~2015년 7월 사이 실험대상 정수장 원수의 색도는 최대 75.0도, 최소 11도, 평균 20.4도였으며, 정수의 색도는 최대 1.4도, 최소 0도, 평균 0.9도로 기존의 표준 정수처리공정만으로도 색도는 손쉽게 제어되고 있음을 볼 수 있다. 먹는 물 수질기준의 색도기준은 5도 이하이다.

TOC는 1.39~2.4㎎/L로 나타났으며, 이는 한강수계 2~4㎎/L, 낙동강수계 3~7㎎/L에 비해 현격히 낮은 수준이다(광주광역시 상수도사업본부. 용연정수장 고도정수처리설 기본 및 실시설계 Pilot 모형실험보고서).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.2 강제투입실험 결과

4.2.1 1계열 모형실험 결과

1계열 전 오존공정은 과산화수소 주입이 없는 단독공정으로 오존 주입농도 1㎎/L, 접촉시간 5분으로 운전조건을 설정하고, 유입 유량을 고려하여 망간 0.64㎎/L, 2-MIB 47ng/L, Geosmin 51ng/L를 강제 투입하여 실험하였다.

산화고형물의 제거효율 확인을 위해 모래여과 후 모형실험을 실시한 결과 그림 4.1~4.2와 같이 0.64㎎/L의 망간은 전 오존공정에 의해 쉽게 제거되었지만 맛·냄새물질의 경우 10~20%만 제거되는 것으로 나타났다.

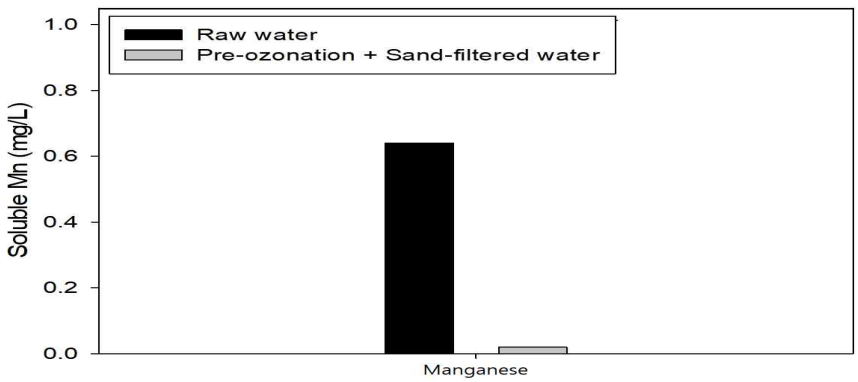


그림 4.1 1계열 전 오존공정 실험 결과(망간)

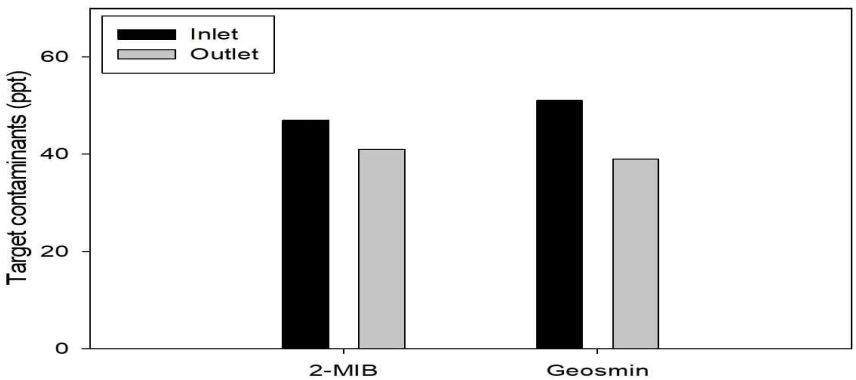


그림 4.2 1계열 전 오존공정 실험 결과(맛·냄새물질)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1계열 후 오존공정(오존농도 1㎎/L, 체류시간 15분)은 AOP의 도입 필요성과 맛·냄새물질 제거효율을 평가하기 위하여 온도 20℃, DOC 0.752㎎/L, UV_{254} 0.0110, pH 6.8 수질조건에서 H_2O_2 주입농도를 0, 1, 2㎎/L 변화시키면서 실험을 수행하였다. 실험 결과 그림 4.3~4.4와 같이 H_2O_2의 주입량이 많아질수록 제거효율이 급격히 상승하는 것으로 나타났다.

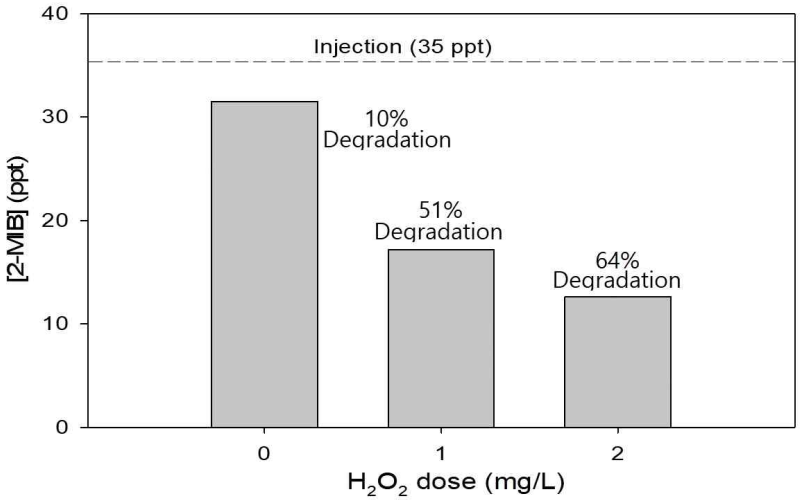


그림 4.3 1계열 후 오존공정 실험 결과(2-MIB)

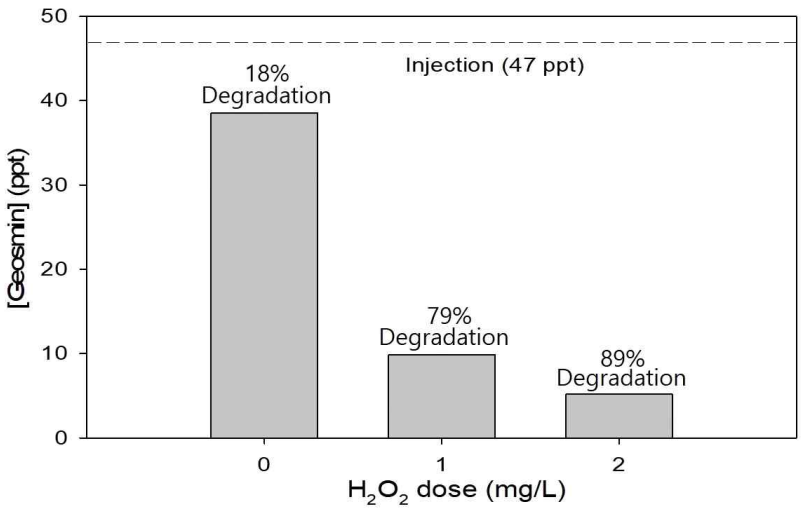


그림 4.4 1계열 후 오존공정 실험 결과(Geosmin)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

낮은 유기물 농도로 인해 그림 4.1~4.4와 같이 오존을 1㎎/L 주입한 경우 전 오존 단독공정은 맛·냄새물질 제거효율이 10~20%정도로 낮았으나, 추가로 과산화수소를 1~2㎎/L 주입한 AOP로 처리한 경우에는 그림 4.5와 같이 2-MIB와 Geosmin를 60%까지 제거할 수 있었다.

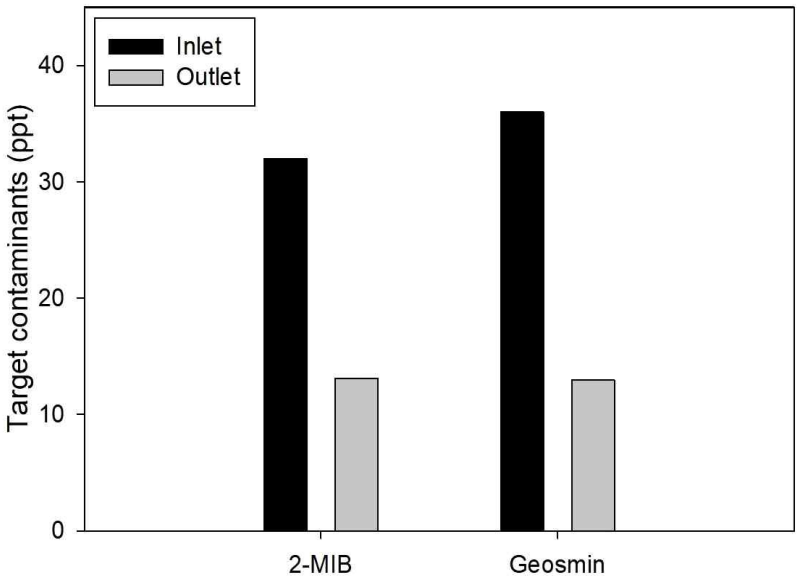


그림 4.5 1계열 활성탄공정 실험 결과

4.2.2 2계열 모형실험 결과

2계열 평가는 1계열 후 오존공정+GAC공정 평가 실험과 동일하게 수행하였으며, 그 결과는 1계열과 동일하게 O_3/H_2O_2 AOP에서 효과적으로 맛·냄새물질을 불활성화시키는 것으로 나타났다. GAC공정에서도 55% 정도의 맛·냄새물질 제거효율을 보였으며, 망간의 경우 오존의 주입지점에 상관없이 제거될 수 있는 대상물질이므로 2계열 평가에서는 추가 실험을 실시하지 않았다. 실험 결과는 그림 4.6~4.8과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

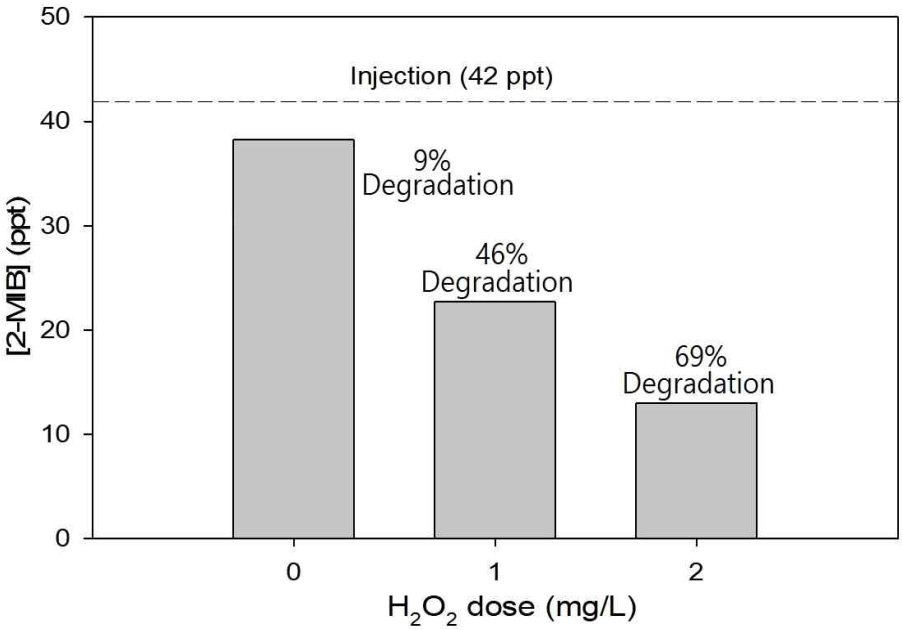


그림 4.6 2계열 후 오존공정 실험 결과(2-MIB)

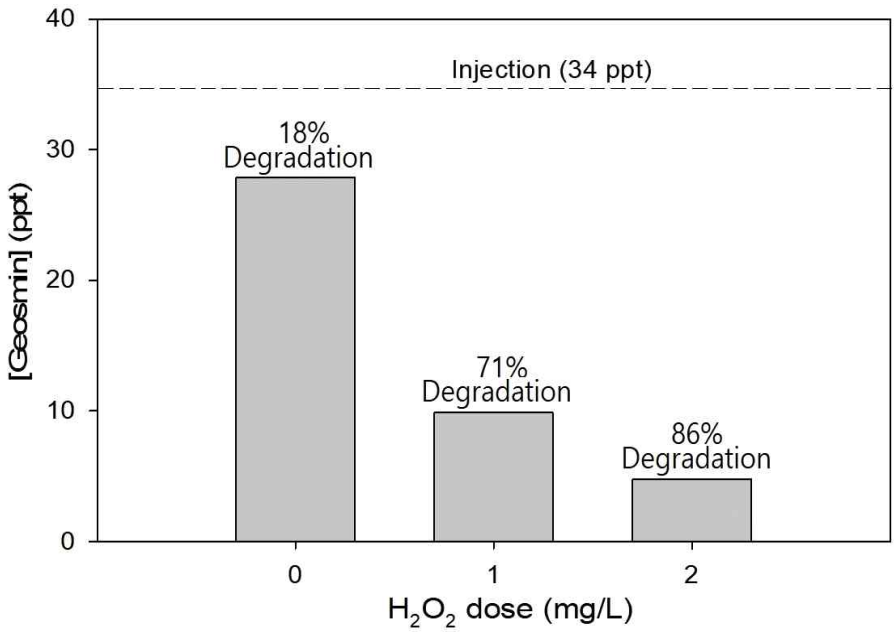


그림 4.7 2계열 후 오존공정 실험 결과(Geosmin)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

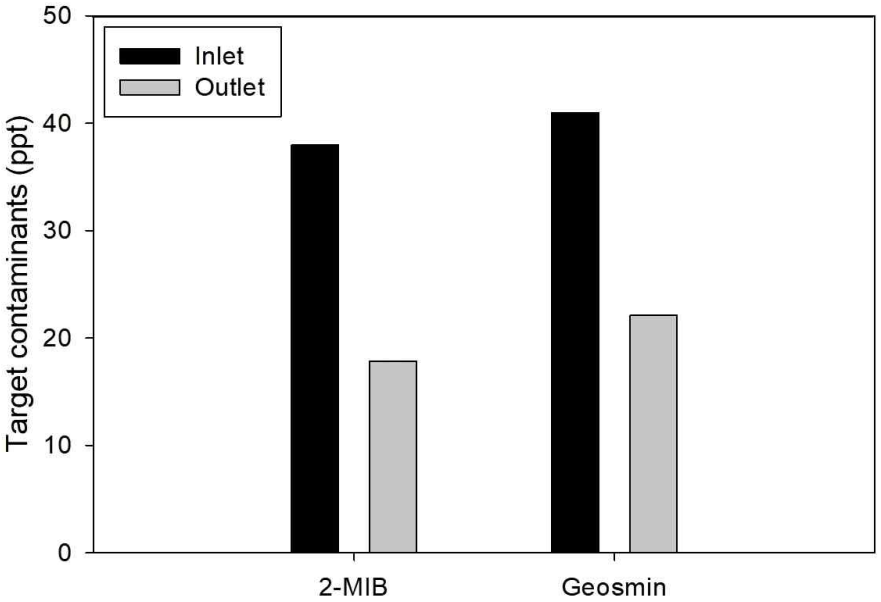


그림 4.8 2계열 활성탄공정 실험 결과

4.2.3 과산화수소 AOP의 맛·냄새물질 강제투입실험

모형실험장치 중 1계열의 오존주입 농도를 0.7㎎/L과 1.5㎎/L로 조절하여 2015년 9월(DOC 0.752㎎/L, 22.1℃), 11월(DOC 0.807㎎/L, 16.3℃), 2016년 1월(DOC 0.844㎎/L, 6.4℃), 3월(DOC 0.769㎎/L, 8.0℃), 4월(DOC 1.103㎎/L, 11.2℃), 5월(DOC 0.906㎎/L, 16.0℃), 6월(DOC 1.012㎎/L, 19.0℃) 등 총 7회에 걸쳐 강제투입실험(Spiking Test)를 수행하였다.

$[O_3]_0/[H_2O_2]_0 = 1.5$, $[2-MIB]_0 = 30 \pm 10ng/L$ 조건에서 실험한 결과 그림 4.9~4.10과 같이 오존 주입농도가 0.7㎎/L인 경우에는 30~50%의 2-MIB 제거율을 나타낸 반면, 오존 주입농도가 1.5㎎/L인 경우에는 60~85%의 제거율을 보였다. 특히, 겨울철의 낮은 온도에서도 2-MIB가 60% 이상 제거되는 것으로 나타났다.

1.5㎎/L의 오존 주입조건($[O_3]_0/[H_2O_2]_0 = 1.5$, $[Gosmin]_0 = 40 \pm 10ng/L$에서 Geosmin을 Spiking하여 실시한 유사 실험 수행 결과 90% 이상의 Geosmin 제거율을 보였으며, 그 결과는 그림 4.11과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

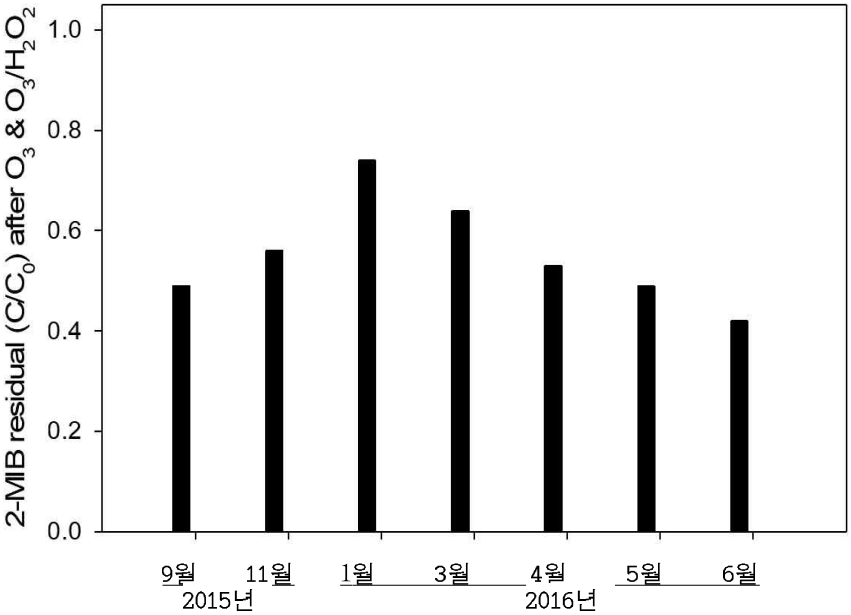


그림 4.9 과산화수소 AOP의 2-MIB 제거율 실험 결과 - $[O_3]_0 = 0.7\mathrm{mg}/L$

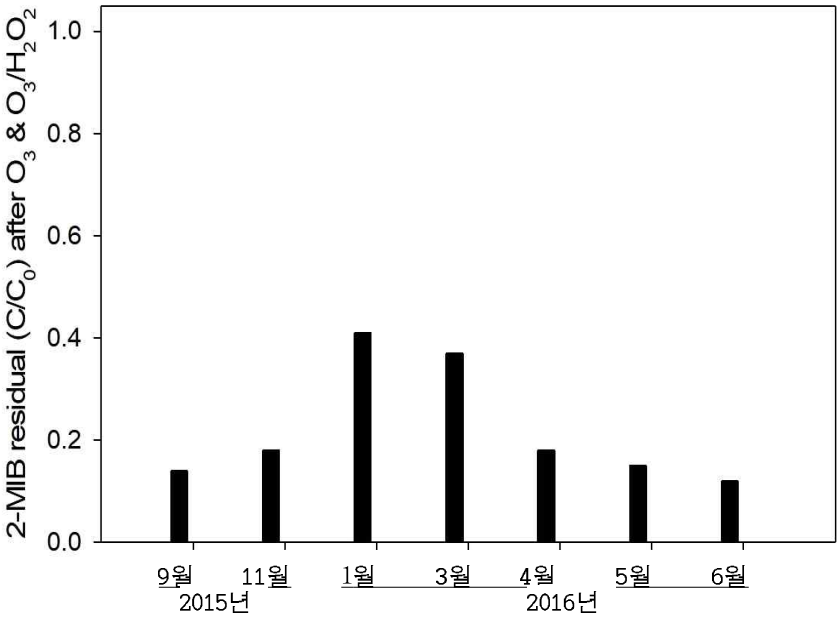


그림 4.10 과산화수소 AOP의 2-MIB 제거율 실험 결과 - $[O_3]_0 = 1.5\mathrm{mg}/L$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

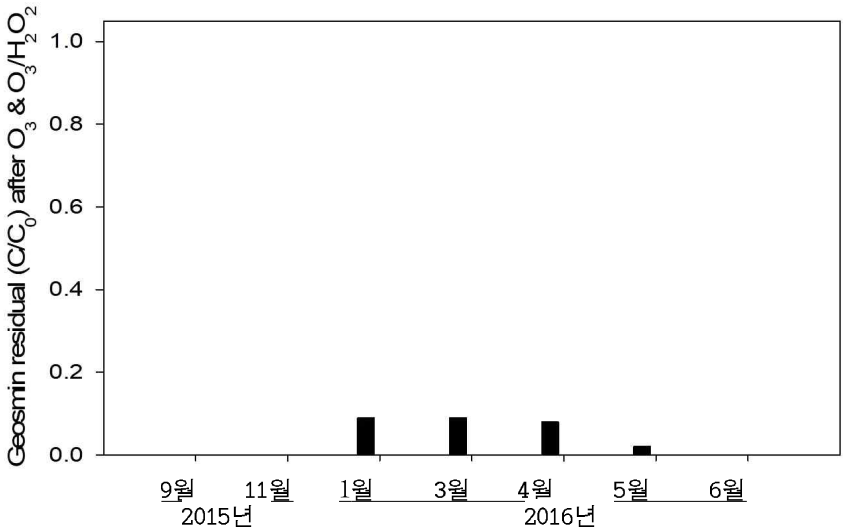


그림 4.11 과산화수소 AOP의 Geosmin 제거율 실험 결과-$[O_3]_0 = 1.5\mathrm{mg}/L$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

4.3 연속모형실험 결과

모형실험장치가 운전된 기간(2015. 07~2016. 07)동안 2-MIB와 Geosmin은 검출되지 않았으며, 고도정수처리 시 염소계 소독부산물의 발생이 줄었고, 실험대상 정수장 처리수의 경우 오존처리에 의한 오존계 소독부산물(Bromate) 또한 거의 검출되지 않았다.

입자성 물질(탁도 관련)과 대장균 계열의 미생물 관점에서 볼 때는 실험대상 정수장의 원수는 한강이나 낙동강 수계와 비교하여 상대적으로 양호한 상태였다.

4.3.1 수질항목별 연속모형실험 결과

2015. 7월~2016. 8월 기간 동안 운전된 연속모형실험 결과에 따르면 그림 4.12~4.13과 같이 1㎎/L의 오존을 주입할 경우 40~50% 수준의 색도제거를 확인할 수 있었으며, 0.3㎎/L의 낮은 수준의 오존 주입만으로도 20~30%의 색도 제거효율이 나타났다. 또한 EBCT 15분을 가지는 활성탄공정에서도 추가적으로 30~50%의 색도 제거효율을 확인할 수 있었다.

DOC는 현재 국내의 먹는 물 수질기준에 별도기준은 규정되어있지 않으나, 다양한 소독부산물(THMs, HAAs, Bromate 등)의 전구물질이며, 기타 난분해성 유해 화학물질의 지표 중 하나이므로 보다 안전한 수돗물을 공급하기 위해 최근 Issue가 되고 있는 항목이다.

그림 4.14~4.15와 같이 모형실험장치 운전기간 실험대상 정수장 여과수의 DOC는 0.7~1.2㎎/L 수준으로 확인되었으며, 이러한 낮은 수준의 DOC로 인해 오존공정 유입수는 타 수계에 비해 느린 오존 감소패턴을 가지게 된다.

오존에 의한 난분해성 화학물질의 산화가 간접반응(Indirect Reaction)에 의해 생성된 OH Radical에 의하는 경우가 많고, 오존에 의한 간접반응이 pH와 유기물에 기인하는 점을 고려하면 실험대상 정수장의 낮은 DOC는 오존반응 시 오존 단독공정보다 O_3/H_2O_2 AOP가 보다 효과적임을 나타낸다. 또한 후 오존+GAC 공정 운전 시 30~60% 수준까지 추가적으로 DOC가 감소하는 것이 확인되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

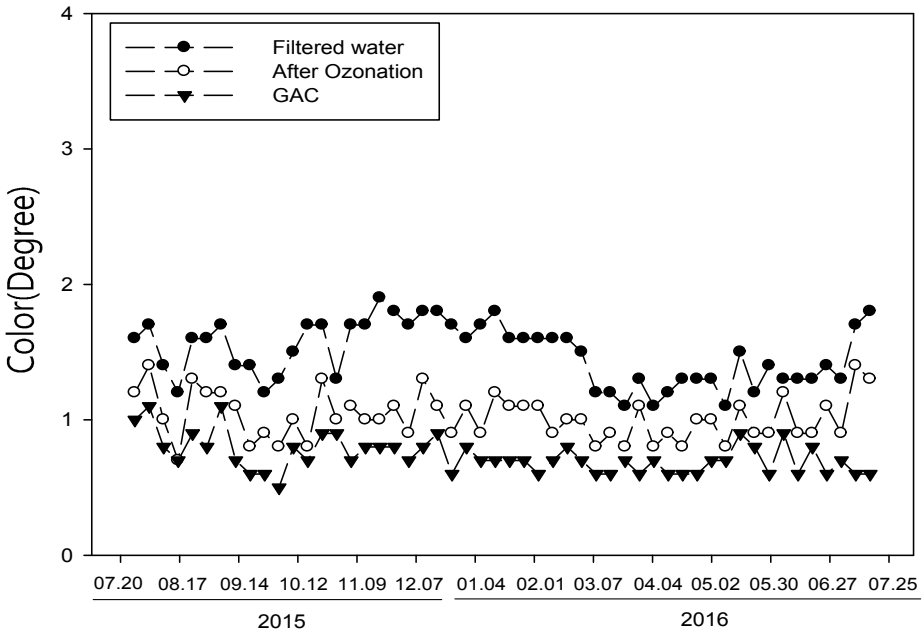


그림 4.12 연속모형실험 결과(색도, 1계열 후 오존 1.0mg/L)

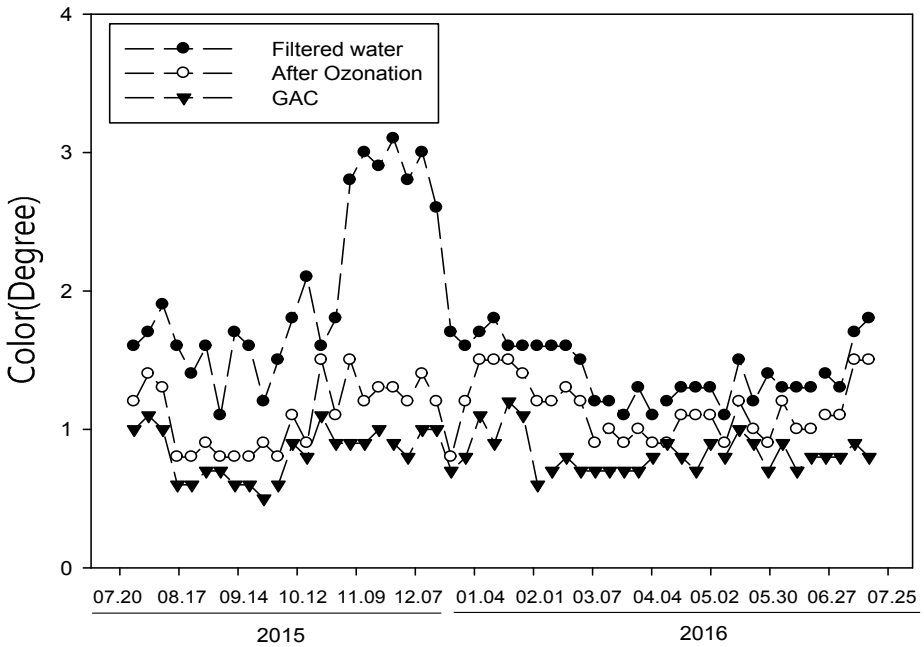


그림 4.13 연속모형실험 결과(색도, 2계열 후 오존 0.3mg/L)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

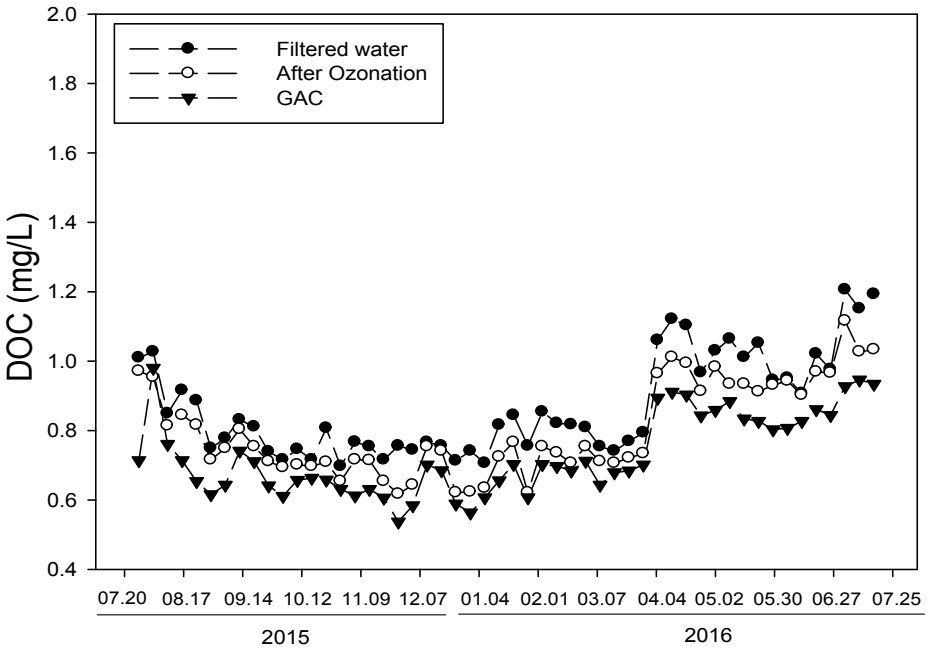


그림 4.14 연속모형실험 결과(DOC, 1계열 후 오존 1.0mg/L)

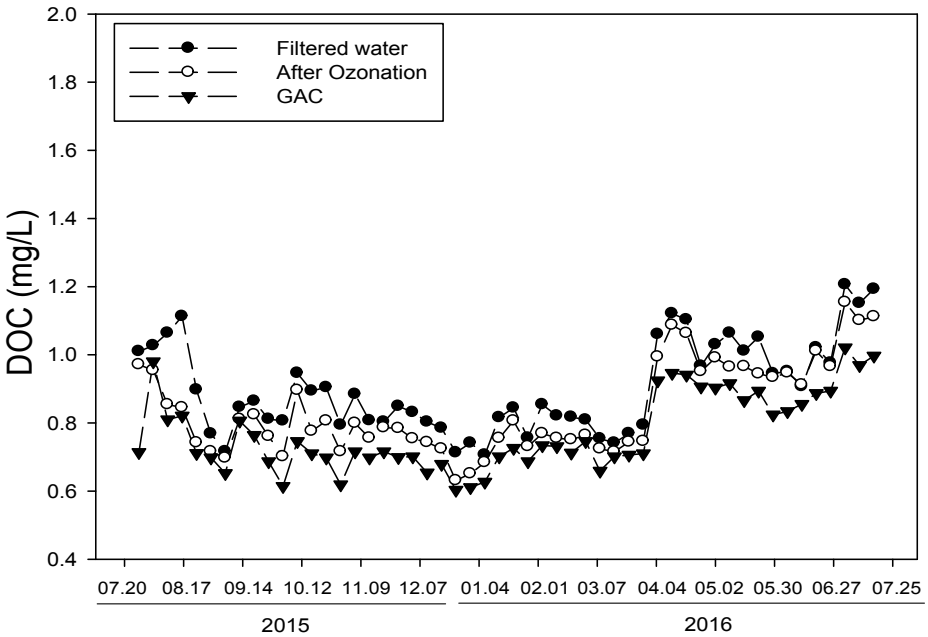


그림 4.15 연속모형실험 결과(DOC, 2계열 후 오존 0.3mg/L)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

망간(Mn)은 국내 먹는 물 수질기준에 따르면 0.05㎎/L 이하를 만족하도록 되어 있으며, K-Water의 경우 2배 이상 강화하여 0.02㎎/L 이하를 만족시키도록 하고 있다. 실험대상 정수장의 경우 2012년 1월 이후 총 187회에 대한 자료를 검토한 결과 원수 중 망간농도가 0.05㎎/L 이상으로 유입된 횟수는 11회였으나, 정수의 경우 최대 0.022㎎/L에 불과한 수준이었다. 특히 아래 그림 4.16~4.17에 나타낸 것처럼 여과수에서 최근 1년간 최대 0.01㎎/L에 불과하였으며, 0.3㎎/L의 낮은 오존 주입 및 입상활성탄 처리만으로도 유입된 망간의 60% 이상이 제거되는 것을 확인할 수 있었다.

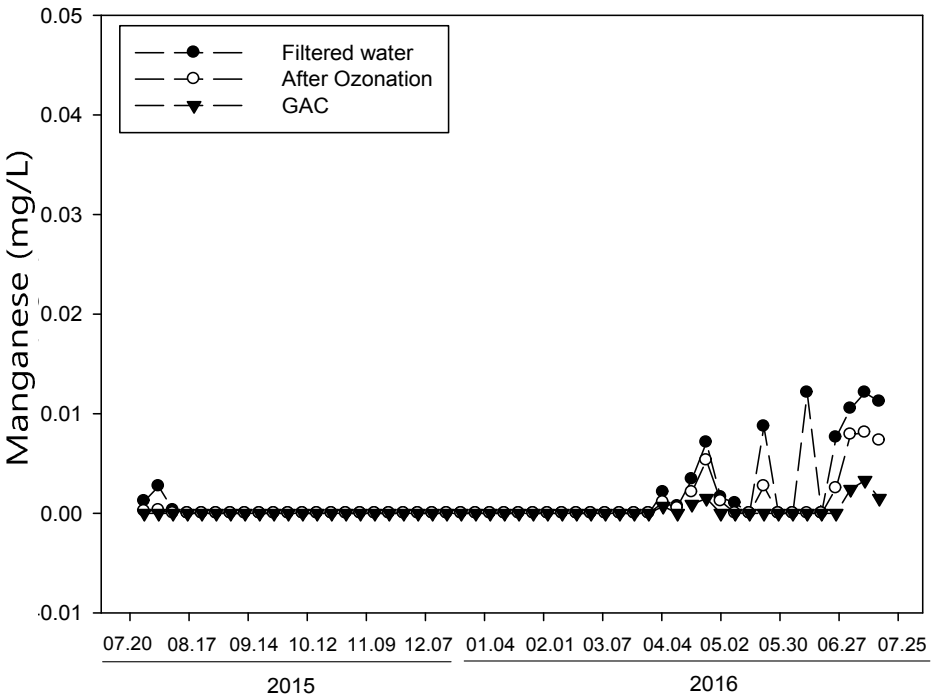


그림 4.16 연속모형실험 결과(망간, 1계열 후 오존 1.0㎎/L)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

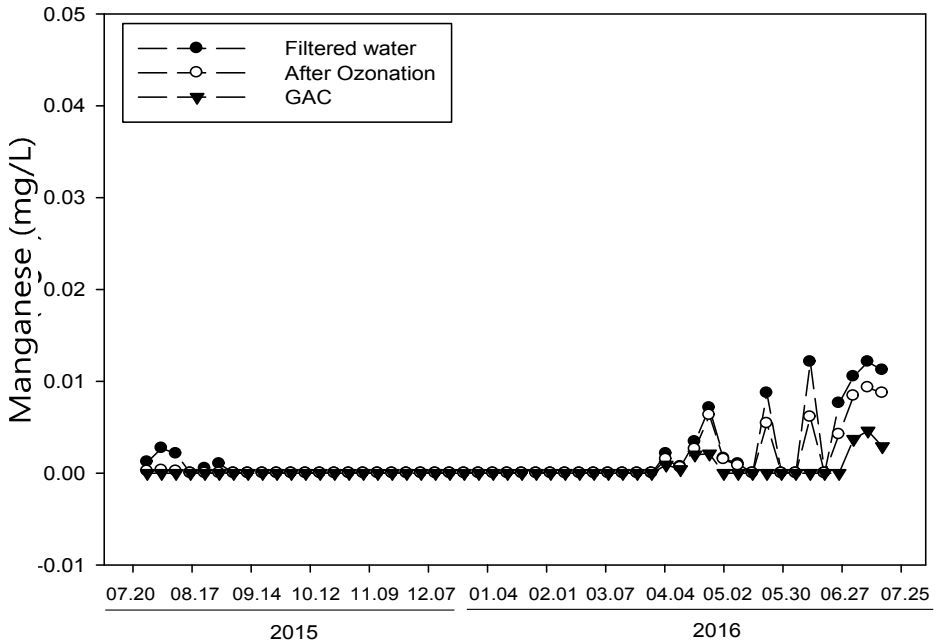


그림 4.17 연속모형실험 결과(망간, 2계열 후 오존 0.3㎎/L)

탁도 수질기준에 대해 K-Water는 95% 이상에서 0.1NTU 이하를 만족시키고, 각 지점에서 0.3NTU 이하를 만족시키는 것을 목표하고 있으며, 광주광역시의 『수돗물 바로 마시기 종합계획』의 성과지표는 2010년 0.1NTU 이하, 2017년 0.06NTU 이하를 만족시키도록 되어 있고, 광주광역시 『맛있는 물 Guideline』에서는 0.3NTU를 목표하고 있다.

연속모형실험 결과 그림 4.18~4.19와 같이 모형실험장치의 최근 1년간 실험대상 정수장 여과수 탁도는 0.1~0.2 NTU의 낮은 수준을 유지하고 있었으며, 입상활성탄공정이 일부 여과효과를 보여 고도정수처리 시에도 약간의 탁도 감소가 확인되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

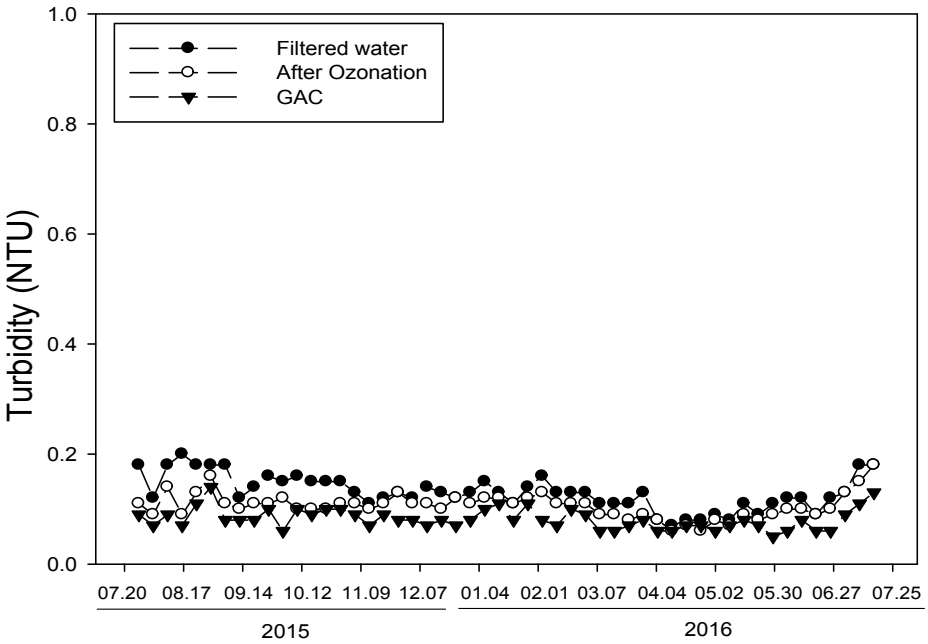


그림 4.18 연속모형실험 결과(탁도, 1계열 후 오존 1.0㎎/L)

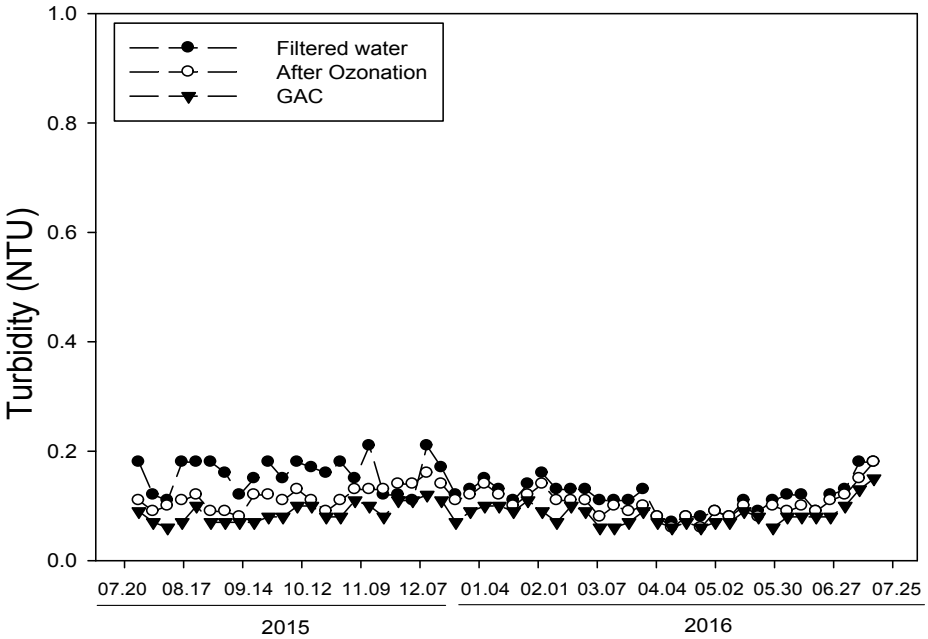


그림 4.19 연속모형실험 결과(탁도, 2계열 후 오존 0.3㎎/L)

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

맛·냄새물질(2-MIB, Geosmin)은 국내 정수처리공정에서 가장 중요한 제어 목표물질 중 하나로 기후변화로 인한 수온상승 등 다양한 요인에 의해 전국에서 지속적으로 그 발생량이 증가하고 있다. 환경부에서는 20ng/L를 권고기준으로 하고 있고, K-Water에서는 일반 정수처리 20ng/L, 고도정수처리 10ng/L를 목표하고 있다. 또한, 광주광역시 『맛있는 물 Guideline』에 따르면 보다 강화된 기준으로 8ng/L를 목표하고 있다.

모형실험장치가 운전된 2015. 07~2016. 07 1년 동안 2-MIB와 Geosmin은 검출되지 않았으나, Spking Test 및 Lab Scale 실험을 통하여 간헐적으로 발생할 가능성이 있는 맛·냄새물질이 유입 시 O_3/H_2O_2, 활성탄공정을 적용하면 효과적으로 제어가 가능한 것으로 나타났다.

4.3.2 입상활성탄 흡착효율 변화

1년간 모형실험장치에서 운전된 활성탄(2계열)을 회수하여 기본적인 미생물 분석방법인 ATP(Adenosine Tri-Phosphate)를 이용한 BAC분석을 수행하였다. 모든 생물은 ATP가 방출하는 에너지를 통해 생물활동을 하게 된다. ATP와 Luciferase라는 효소가 반응하면 비례적으로 빛(Light)을 발생하게 되는데 이 때 발생되는 빛을 Luminometer로 측정하면 미생물의 상대적 양을 측정할 수 있으며, ATP 분석키트를 활용해 빛의 상대적 발광성을 이용하여 오염도(Relative Light Unit; RLU) 분석을 수행하였다. 그 결과 0.3g의 활성탄에서 사용 전과 사용 후(1년) 각각 15RLU와 3,100RLU로 나타나 활성탄 표면에 미생물이 다량 존재하고 있음이 확인되었다. 활성탄 표면에 존재하는 우점종 확인을 위해 종속영양세균 선택배지(R2A)에 배양 후 군체(Colony)를 유전자 추출, 전기영동과정에서 증폭된 유전자를 이용 염기서열을 해독하는 Sequencing을 수행한 결과 우점종은 Ralstania Pickettii 혹은 Ralstonia sp.와 99%의 상동성을 가지는 것으로 나타났다.

사용 전·후 동일한 활성탄의 2-MIB 제거율(EBCT 15분)에 대해 칼럼 평가한 결과 그림 4.20과 같이 신탄은 73%가 제거된 반면 1년 사용 후에는 64%만이 제거되어 20% 가량 활성탄의 흡착효율이 감소하는 것으로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

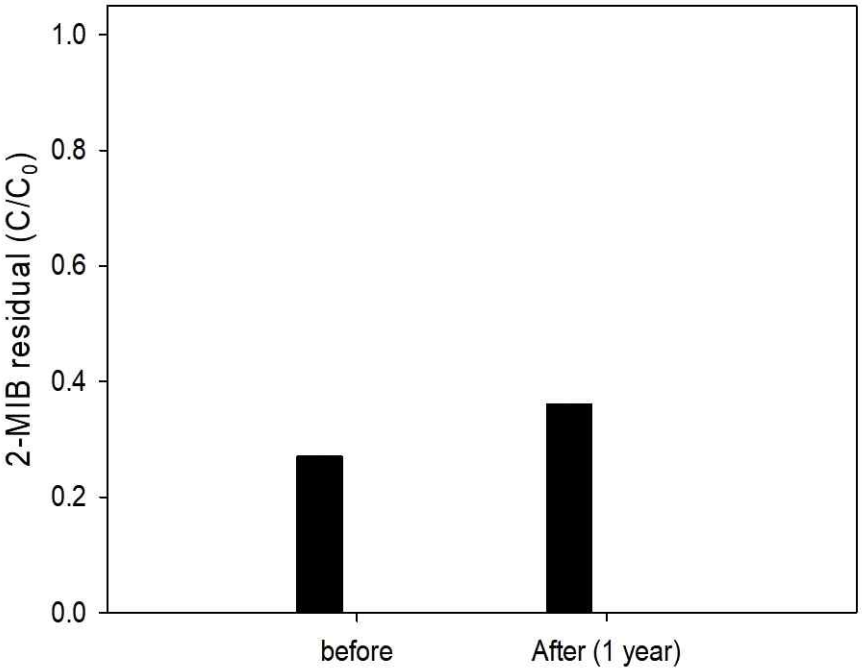


그림 4.20 활성탄 사용 전·후 2-MIB 제거효율 실험 결과

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

4.4 AOP 및 전 오존공정 적용성

4.4.1 AOP 도입 필요성 검토결과

연속모형실험이 수행된 5개월간(2015년 7월~11월)을 포함하여 최근 2년간 실험대상 정수장 원수의 DOC는 0.92~1.671㎎/L이었으며, 여과수(GAC 유입)의 경우 DOC가 0.75㎎/L 수준이었다.

그림 4.21~4.22는 앞서 언급한 실험대상 정수장의 원수와 여과수에서의 오존분해특성을 다시 요약하여 정리한 그래프다. 실험대상 정수장은 원수와 여과수의 DOC가 낮고, IOD 및 Kc 값이 작음에 따라 오존분해속도가 느리고, 이로 인해 수중에서의 잔류성이 높은 수준이다.

오존은 자체(Molecular Ozone)의 직접반응과 오존의 Chain-Reaction에 의해 생성된 OH Radical에 의한 간접반응으로 나뉘는데 OH Radical의 생성량은 용존 유기물과 직접적인 영향이 있다.

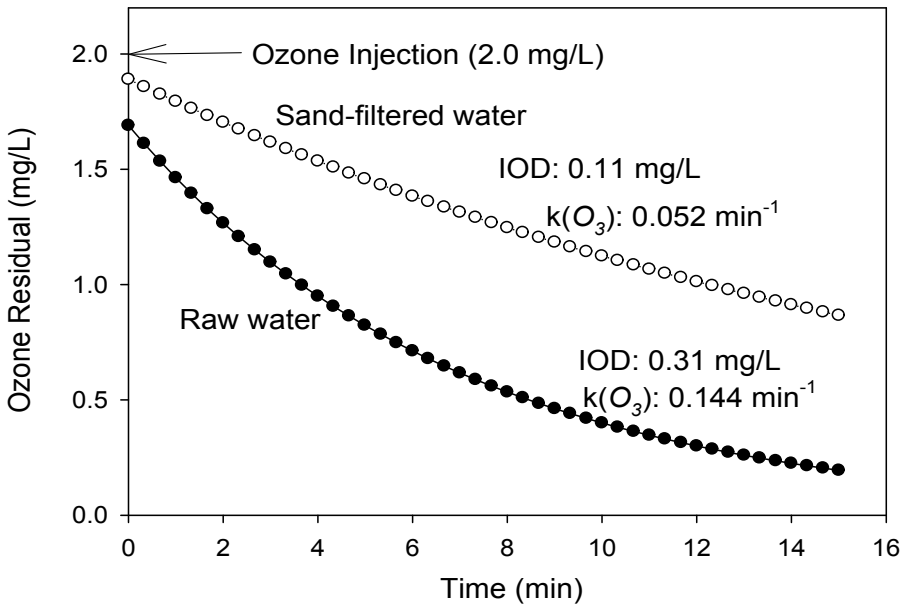


그림 4.21 원수와 여과수의 오존분해특성(오존 2.0㎎/L)

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

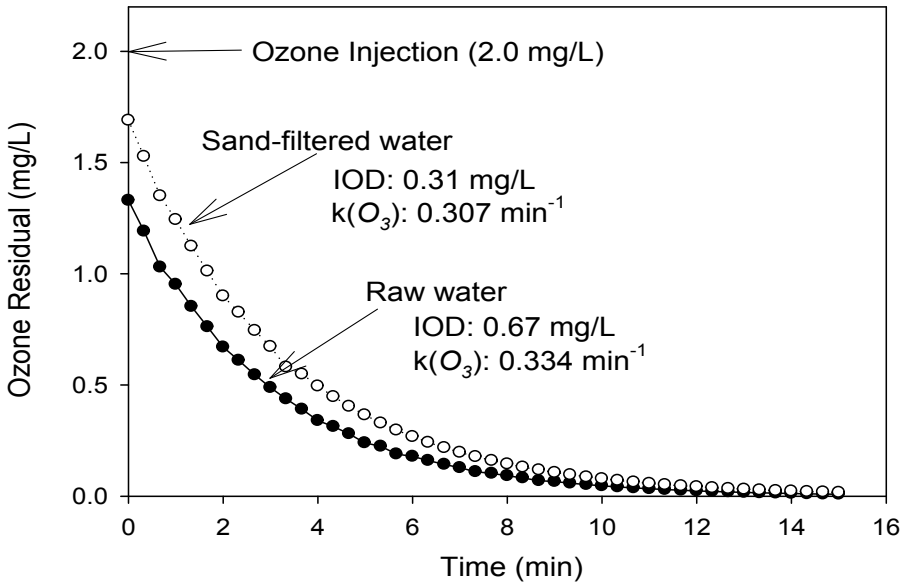


그림 4.22 원수와 여과수의 오존분해특성(오존 2.0㎎/L+H_2O_2 2.0㎎/L)

오존의 효과 중 병원성 미생물(원생동물 등)의 제거는 오존에 의한 직접반응의 영향을 많이 받는데 반해 Geosmin 등의 난분해성 물질은 대부분 간접반응인 OH Radical에 의해 처리된다.

따라서 DOC 농도가 낮은 실험대상 정수장에서 오존을 사용할 경우 미생물학적 안전성 측면에서는 유리한데 반해 난분해성 화학물질 산화에는 불리하다. 주요 난분해성 화학물질에 대한 오존과 OH radical과의 반응속도는 표 4.2와 같다.

표 4.2 난분해성 화학물질의 오존과 OH radical과의 반응속도

화 학 물 질	kO_3(/M/sec)	kOH(/M/sec)
Geosmin	7.5	8.2×10^9
2-MIB	1	3.0×10^9
1.4-Dioxane	0.32	2.5×10^9
Phenol	$10^3 \sim 10^6$	$10^9 \sim 10^{10}$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

그림 4.23~4.24와 같이 2-MIB와 Geosmin의 초기투입이 각각 30ng/L인 경우 주입률 1.5㎎/L의 오존 단독공정에서는 2-MIB가 10~20%, Geosmin이 30~40%만 제거되었다. 오존공정에 과산화수소를 추가 주입하였을 때는 그림 4.25~4.26과 같이 빠르게 오존이 소모되면서 2-MIB가 40~90%, Geosmin이 80~99% 까지 제거율이 상승하는 것으로 나타났다.

반면에 H_2O_2 주입농도가 높을수록 반응은 빠르게 일어났으며, 2-MIB 초기농도가 20~150ng/L인 조건에서 제거율은 약 74%($[H_2O_2]/[O_3]=0.67$)로 확인되었다.

이상의 실험 결과를 볼 때 실험대상 정수장의 고도정수처리공정에는 H_2O_2 주입 시스템이 필요한 것을 확인할 수 있으며, 특히 오존에 H_2O_2를 주입할 경우 맛·냄새물질 및 유해화학물질 유입 등 비상시에 간헐운전이 가능하기 때문에 운영에도 효율적이다.

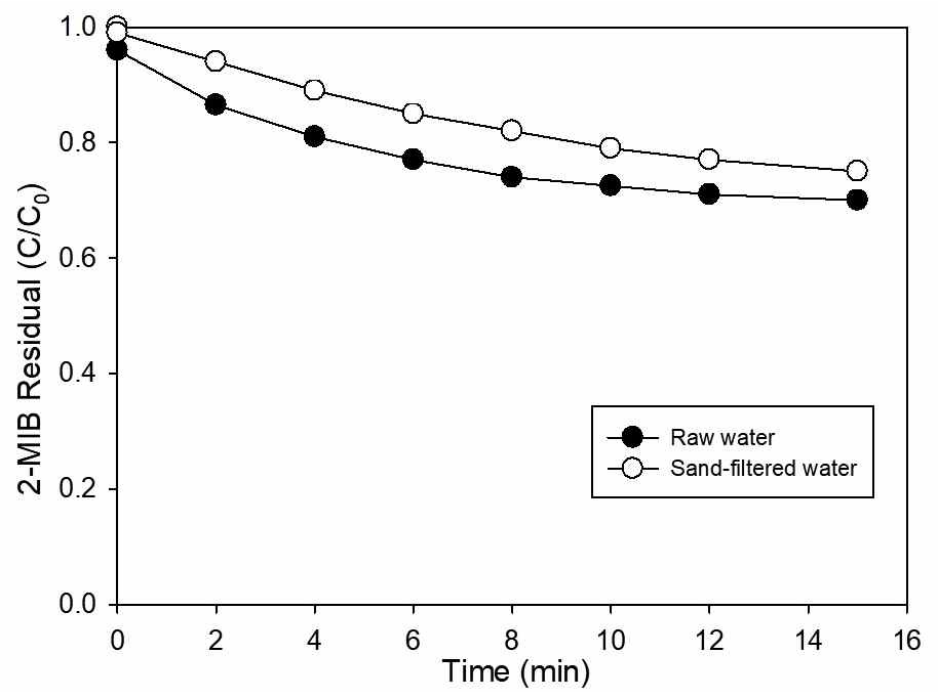


그림 4.23 맛·냄새물질 제거율([2-MIB]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

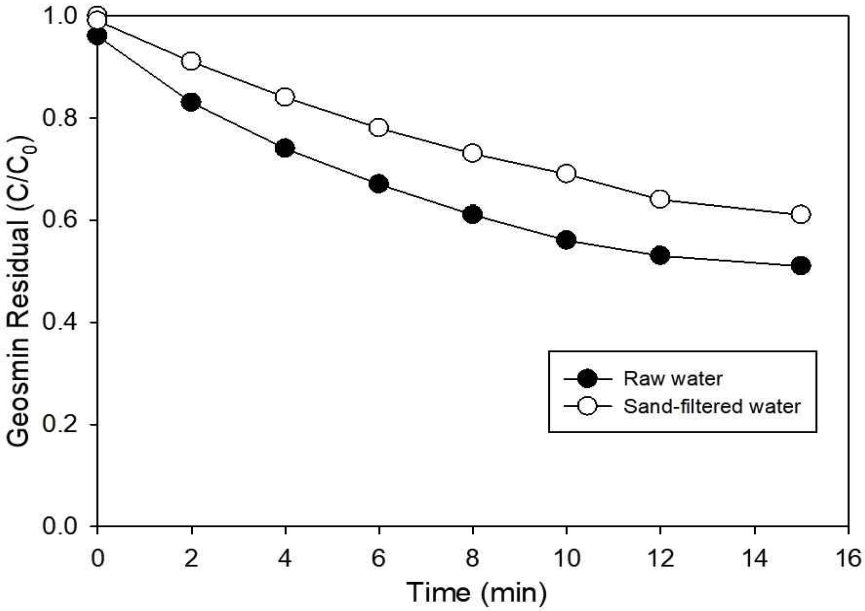


그림 4.24 맛·냄새물질 제거율([Geosmin]o=30ng/L, 오존 1.5mg/L)

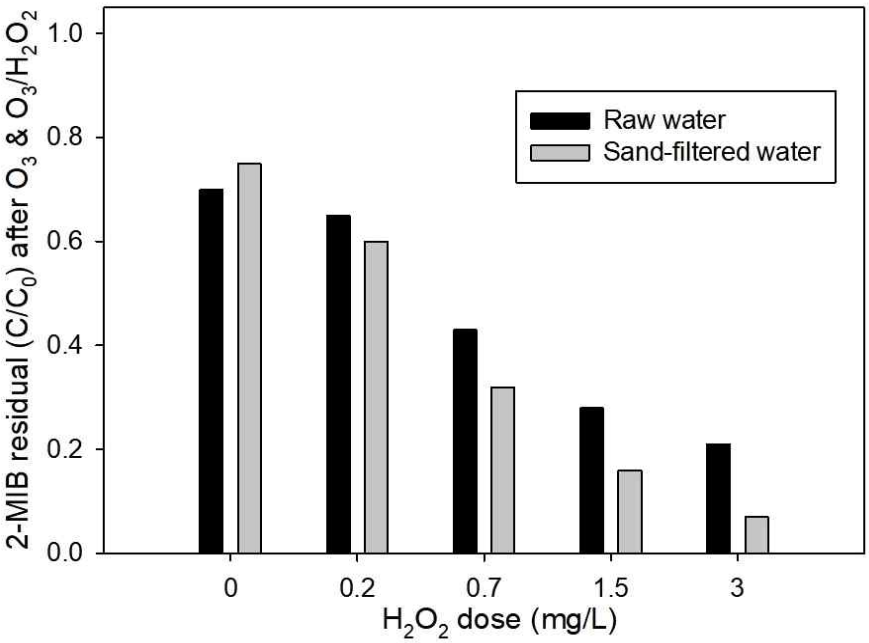


그림 4.25 맛·냄새물질 제거율([2-MIB]o=30ng/L, 오존 1.5mg/L+과수 0.2~3mg/L)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

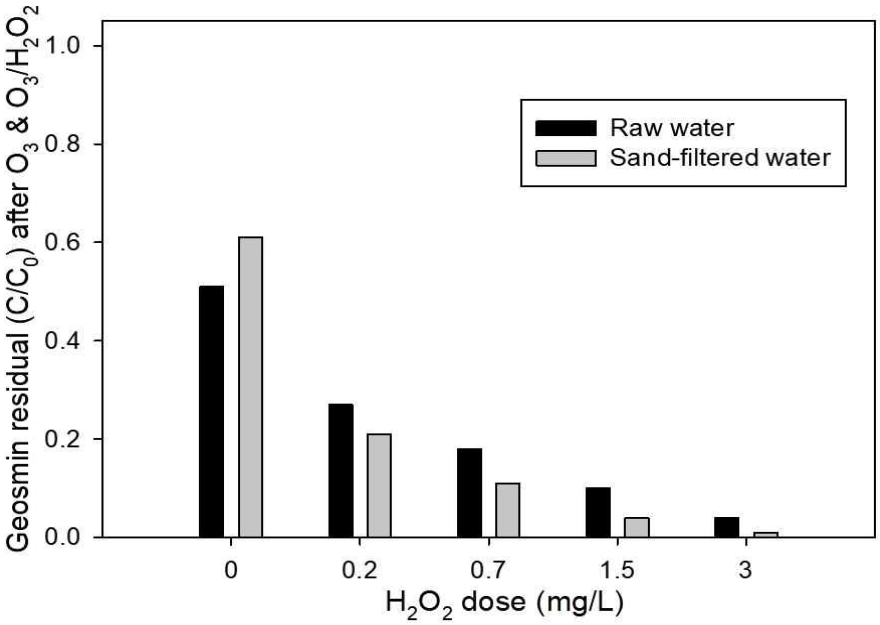


그림 4.26 맛·냄새물질 제거율([Geosmin]o=30ng/L, 오존 1.5mg/L+과수 0.2~3mg/L)

4.4.2 전 오존공정 추가도입 필요성 검토결과

일반적인 전 오존 공정의 기대효과는 유기물질 제거, UV_{254} 제거, 염소계 소독부산물 감소, 암모니아성 질소 제어, 맛·냄새물질 등 미량유해물질 산화, 망간 산화 등이 있다.

실험대상 정수장의 경우 낮은 DOC가 확인되었으며, 전 오존에 의한 수질 개선 효과도 낮다. 특히, 후 오존(또는 후 오존 AOP)+GAC공정의 경우 맛·냄새물질의 산화/흡착, 미량유해물질 산화/흡착, 망간산화, 병원균 불활성화, DOC · UV_{254} · 색도 감소 등 필요로 하는 기능을 가지고 있기 때문에 전 오존 설치의 당위성은 더욱 낮다고 할 수 있다.

망간의 경우 그림 4.27과같이 전 오존공정으로 쉽게 제거되나, 맛 · 냄새물질은 그림 4.28과 같이 10~20% 정도만 제거되는 것으로 나타나 처리효과가 미미하다. 따라서 실험대상 정수장에 전 오존공정의 추가도입은 불필요한 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

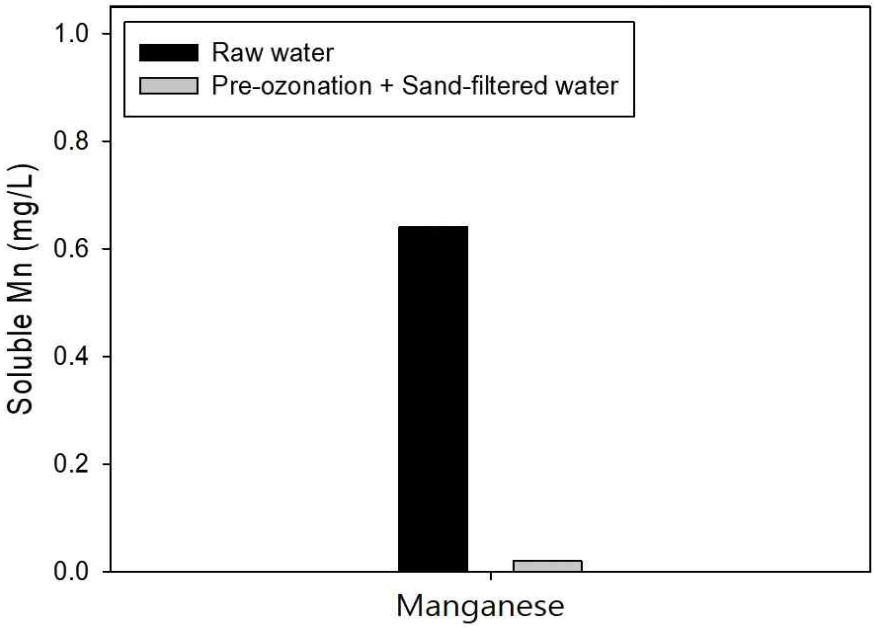


그림 4.27 전 오존공정의 망간 제거율(오존 1.0㎎/L, CT 5분)

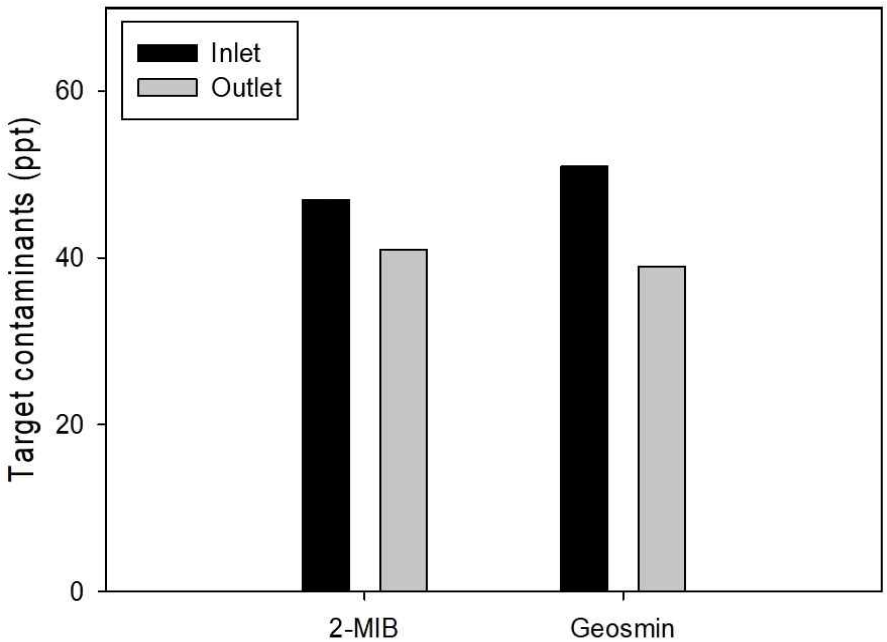


그림 4.28 전 오존공정의 맛·냄새물질 제거율(오존 1.0㎎/L, CT 5분)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

2015년 7월부터 1년간 실험대상 정수장의 모형실험장치를 이용하여 전 오존공정, 후 오존+GAC공정, H_2O_2 AOP 및 잔류오존 제거 등에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 여과수를 대상으로 오존 주입농도 1㎎/L, 접촉시간 5분, 대상물질은 망간 0.64㎎/L, 2-MIB 47ng/L, Geosmin 51ng/L로 설정하여 강제투입실험에 대한 연구결과 0.64㎎/L의 망간은 전 오존 단독 공정만으로도 쉽게 제거되나, 맛·냄새물질의 경우 10~20%만 제거되어 효과가 미미한 것으로 나타났다.

   그러나 오존 주입농도 1㎎/L, 접촉시간 15분, 과산화수소 주입농도 2㎎/L의 후 오존 AOP에서는 60%가 제거되어 과산화수소를 추가 주입하면 제거효율이 높아짐을 알 수 있었고, AOP 후단에 배치한 GAC 공정에서도 추가적으로 55%의 제거효율을 나타냈다.

   따라서 실험대상 정수장 고도처리공정의 오존 주입방식은 후 오존공정이 적합하며, 고도정수처리의 효율성 향상, 오존의 산화력 제고 및 DOC 제거효율 향상을 위하여 후 오존 AOP+GAC 공정이 적합할 것으로 판단된다.

2. 오존 단독공정에서는 2-MIB가 10~20%, Geosmin이 30~40%만 제거된 것에 비해 오존공정에 과산화수소를 추가 주입하였을 때 2-MIB가 40~90%, Geosmin이 80~99%까지 제거율이 상승하는 것으로 나타났다.

   오존과 과산화수소의 반응성은 과산화수소 주입농도가 높을수록 반응이 빠르게 일어났고, 2-MIB 초기농도가 20~150ng/L인 경우 제거율은 74% ($[H_2O_2]/[O_3]=0.67$)로 확인되어 실험대상 정수장의 고도정수처리공정에는 H_2O_2 주입에 의한 AOP 공정이 타당함을 확인할 수 있었다.

   특히 오존공정에 과산화수소를 추가 주입할 경우 맛·냄새물질 및 유해화학물질 유입 시 간헐운전이 가능하기 때문에 정수처리공정의 효율적인 운영이 가능하다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

3. 1년간 모형실험장치에서 운전된 활성탄을 회수하여 ATP분석을 통한 실험 결과 0.3g의 활성탄에서 사용 전·후 각각 15RLU와 3,100RLU로 나타나 활성탄 표면에 미생물이 존재함을 확인하였다. 2-MIB의 제거효율은 EBCT 15분에서 사용 전 활성탄에서는 73%, 1년 사용 후 활성탄에서는 64%의 제거율을 보여 1년에 약 20% 정도의 흡착효율감소를 확인하였다.

위와 같은 연구결과들을 토대로 얻어진 결론은 다음과 같다.

첫째, 실험대상 정수장의 최적 고도정수처리공정은 기존 정수처리공정(혼화/응집/침전/급속여과)에 "후 오존 AOP(H_2O_2 Quenching 포함)+GAC"의 공정을 조합하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

둘째, 위와 같이 고도정수처리공정을 구성할 경우 단위 공정별 목표 제거율은 2-MIB가 고농도(100ng/L)로 유입 시 후 오존 AOP에서 80%, GAC 공정에서 70%가 제거되어 최종적으로 약 96%의 제거효율을 보여 처리수질은 최종 목표수질인 8ng/L 이하로 처리가 가능할 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1. 강준구, 황태문, 임형남, 오현제, 강준원 (2002). 고도정수처리를 위한 오존/AOP(오존/H_2O_2) 공정 적용시 H_2O_2가 오존소모특성에 미치는 영향, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.163~164.
2. 광주녹색환경지원센터(2012) 광주지역 정수장의 오존 및 활성탄 고도정수처리 도입을 위한 기초연구.
3. 광주광역시 상수도사업본부(2012). 용연정수장외 2개소 고도정수처리 타당성조사 및 기본계획.
4. 광주광역시 상수도사업본부(2016). 용연정수장 고도정수처리시설 기본 및 실시설계 Pilot 모형실험보고서.
5. 국가 상수도정보 시스템(http://www.waternow.go.kr). 환경부.
6. 김경숙, 오병수, 노우현, 강준원(2004). 정수처리시스템에서 유기물 제거 효율 향상을 위한 오존과 활성탄공정의 영향, 대한환경공학회지 26(10), pp.1101~1108.
7. 김문경, 문보람, 김태경, 조경덕(2015). 녹조에 의하여 배출되는 이취미물질 및 독성물질의 배출 및 제어에 대한 고찰, 보건학논집, 52(1), pp.33~42.
8. 김영진, 현길수(2007). 유입수질 변동에 따른 고도정수처리 공정별 오존 부산물 거동조사. 한국수처리학회지, 15(1), pp.69~75.
9. 김정아, 김경아, 윤철종, 박홍기, 정은영, 차동진, 최진택, 손희종(2013). 낙동강 상수원수 중 이취물질과 방선균 및 조류의 상관관계 연구, 대한환경공학회지, 35(3), pp.213~219.
10. 김현철, 김용환, 유명진(1999) 오존 및 입상활성탄을 이용한 수중 THMFP의 저감에 관한 연구, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.261~262.
11. 기상청 (2009). 기상청통계.
12. 나영신, 류동춘, 김상구, 배은영, 송미정, 손희종, 이상준(2001). 생물활성탄 공정에서 신탄과 재생탄의 수처리 특성, 대한환경공학회지, 23(6),

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

pp.1001～1012.

13. 박귀수, 고주연, 조우현, 백영애, 유명진(2005). O_3 및 O_3/H_2O_2를 이용한 Geosmin과 MIB 산화에 관한 연구, 대한환경공학회 학술발표논문집, 2005. 12, pp.317～324.
14. 박미애, 이정준, 최형섭(2014). 경남지역 상수 원・정수의 냄새물질 발생특성 평가, 한국환경분석학회지 17(4), pp.223～235.
15. 박훈수, Rong Yan Wang, 강준원, 고창일, 남성남, 이응택, 오성민(1996) 오존/AOP 공정 최적화를 위한 오존분해속도 인자 연구, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.393～396.
16. 손희종, 최근주, 김상구(2007). 활성탄 공정과 생물여과공정에서의 자연유기물질 제거특성, 대한환경공학회지, 29(2), pp.205～213.
17. 서재승, 정진흥, 김원재, 오현제(1999). 오존/AOP 산화공정에서의 브로메이트 생성특성 연구, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.299～300.
18. 안효원, 채선하, 왕창근, 임재림(2008), 오존공정이 입상 활성탄공정에서 용존 유기물질의 제거에 미치는 영향, 대한환경공학회지 30(6), pp.601～608.
19. 오병수, 김경숙, 이응택, 나승진, 강준원(2003). 오존/활성탄 공정에서의 오존 분해 및 OH 라디칼 생성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 25(11), pp.1465～1470.
20. 유경아, 변명섭, 윤석제, 황순진, 류덕희(2013). 북한강 수계에서 이취미를 유발화는 남조류(Anabaena spiroides)의 증식 특성, 한국하천호수학회지 46(1), pp.135～145.
21. 유병훈, 이동곤, 왕창근(2004). 수중의 Geosmin, 2-MIB와 TCA 제거를 위한 입상활성탄 평가, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.690～692.
22. 이현주, 김성수, 이경혁, 임재림, 최영철(2006). 한강수계 고도정수처리 공정에서의 유기물과 맛・냄새의 제거특성, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.209～213.
23. 이화자, 손희종, 노재순, 이상원, 지기원, 유평종, 강임석(2007). 오존과 과산화수소를 이용한 Geosmin과 2-MIB 산화, 대한환경공학회지,

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

29(7). pp.826~832.

24. 조우현, 백영애, 최인철, 최영준, 유명진(2007). 한강원수에서의 맛·냄새물질 제거를 위한 고도정수처리공정 최적 설계방안, 대한환경공학회 학술발표논문집. 2007. 12. pp.233~240.
25. 채아나, 신재원, 조강우, 이병찬, 송경근(2017). 분말 활성탄에 의한 먹는 물 내의 이취미 물질 제거, 대한토목학회논문집, 37(2), pp.475~483.
26. 최은혜, 김계월, 김석구, 이동석(2005). 활성탄 흡착, 오존단독 그리고 오존/활성탄 혼합공정에서 부식산의 분해 특성, 대한환경공학회지, 27(9), pp.989~994.
27. 최인철, 정현미, 박주현, 정동환, 조양석, 안경희, 민병대, 양미희, 이이내, 손보영, 김은석, 김지혜, 이시원, 주윤리, 최별(2016). 상수도 이취미 관리를 위한 활성탄 규격기준 및 이취미물질 실시간 분석시스템 연구(III), 국립환경과학원, NIER-RP2016-189.
28. 최현정, 왕창근(1996). 오존산화/입상활성탄 흡착공정의 설계 및 운영조건에 따른 처리효율 및 경제성 분석, 대한환경공학회 학술발표논문집, pp.401~404.
29. 한국수자원공사 수자원연구원(2004). 한강수계를 중심으로 한 맛·냄새의 효율적 제거 연구.
30. 환경부(2013). 고도정수처리 도입 및 평가지침.
31. 환경부(2014). 수처리제의 기준과 규격 및 표시기준.
32. 환경부(2016). 상수도통계.
33. 환경부(2010). 상수도시설기준.
34. 환경부(2017). 상수도설계기준.
35. Anthony M. Kennedy, Allison M. Reinert, Detlef R.U. Knappe, Imma Ferrer, R.Scott Summers(2015). Full- and pilot-scale GAC adsorption of organic micropollutants. Water Research 68, pp.238~248.
36. Beihai Zhou1, Rongfang Yuan, Chunhong Shi1, Liying Yu1, Junnong Gu, Chunlei Zhang(2011). Biodegradation of geosmin in drinking water

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

by novel bacteria isolated from biologically active carbon, Journal of Environmental Sciences. 23(5), pp.816~823.

37. Bjelopavlic, M., Newcomvbe, G., and Hayes, R.,(1999). Adsorption of NOM onto activated carbon: dffect of surface charge, ion strenth and pore volume distribution, J. Colloid and Interface Science, 210, pp.271~280.
38. Chansik Kim, Sueng Il Lee, Suhyun Hwang, Myungsu Cho, Han-Seung Kim, Soo Hong Noh(2014). Removal of geosmin and 2-methylisoboneol (2-MIB) by membrane system combined with powdered activated carbon (PAC) for drinking water treatment. Journal of Water Process Engineering 4, pp.91~98.
39. Chang Hyun Jo, Andrea M. Dietrich, James M. Tanko(2011). Simultaneous degradation of disinfection byproducts and earthy-musty odorants by the UV/H_2O_2 advanced oxidation. Water Research 45, pp.2507~2516.
40. Hoff, J. C.(1986). Inactivation of microbial agents by chemical disinfectants. National Technical Information Bulletin EPA600/2-86/067, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
41. Hoigné, J., Bader, H.,(1983) a. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water. I:Non-dissociating organic compounds. Water Research 17(2), pp.173~183.
42. Hoigné, J., Bader, H.,(1983) b. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water. II:Dissociating organic compounds. Water Research 17(2), pp.185~194.
43. IARC(1985). MONOGRAPHS VOLUME 71, pp.671~683.
44. Jong-Sheng Yang, Dong-Xing Yuan, Tzu-Pao Weng(2010). Pilot study of drinking water treatment with GAC, O_3/BAC and membrane processes in Kinmen Island, Taiwan. Desalination 263, pp.271~278.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

45. Langlais, B., Reckhow, D.A., Brink, D.R.,(1991). Ozone in Water Treatment: Application and Engineering. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO.
46. R. Scott Summers, Soo Myung Kim, Kyle Shimabuku, Seon-Ha Chae, Christopher J. Corwin(2013). Granular activated carbon adsorption of MIB in the presence of dissolved organic matter. Water Research 47, pp.3507~3513.
47. US EPA Integrated Risk Information System, http://www.epa.gov/IRIS/, November 2013.
48. World Health Organization(WHO)(2011). Guideline for Drinking Water Quality(FOURTH EDITION), ISBN 978 92 4 154815 1(NLM classification: WA 675), pp.325~326

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<제목 차례>

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구내용 및 범위 ····· 3
제 2 장 이론적 고찰 ····· 4
2.1 오존에 의한 고도정수처리 ····· 4
2.1.1 개 요 ····· 4
2.1.2 오존처리 Mechanism ····· 6
2.2 과산화수소()를 이용한 잔류오존 제거 ····· 10
2.2.1 과산화수소() ····· 10
2.2.2 과산화수소를 이용한 오존 Quenching ····· 11
2.3 고도산화공정(AOP)에 의한 고도정수처리 ····· 14
2.3.1 개 요 ····· 14
2.3.2 AOP 종류별 특징 ····· 15
2.4 활성탄(Activated Carbon)에 의한 고도정수처리 ····· 19
2.4.1 개 요 ····· 19
2.4.2 분말활성탄(Powdered Activated Carbon) 공정 ····· 21
2.4.3 입상활성탄(Granular Activated Carbon) 공정 ····· 22
2.4.4 입상활성탄(GAC) 공정 배열 ····· 25
2.4.5 생물활성탄(Biological Activated Carbon) 흡착공정 ····· 26
2.5 조류에 의한 맛·냄새 현황 ····· 29
2.5.1 기후변화와 조류발생 ····· 29
2.5.2 2-MIB와 Geosmin의 발생특성 ····· 31
2.5.3 2-MIB와 Geosmin의 발생사례 ····· 33
2.6 국내 고도정수처리시설 운영현황 ····· 35
2.7 중점 제거대상 물질 ····· 37
제 3 장 모형실험장치 및 방법 ····· 38
3.1 모형실험장치(Pilot Plant) ····· 38
3.1.1 모형실험장치 구성 ····· 38
3.1.2 모형실험장치 원수 주입 ····· 38
3.1.3 모형실험장치 설치 ····· 39
3.2 실험방법 ····· 42

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

3.2.1 강제투입실험 ····· 42
3.2.2 연속모형실험 ····· 43
3.2.3 분석방법 ····· 43
제 4 장 연구결과 고찰 ····· 45
4.1 실험대상 정수장 유입수질 현황 ····· 45
4.2 강제투입실험 결과 ····· 47
4.2.1 1계열 모형실험 결과 ····· 47
4.2.2 2계열 모형실험 결과 ····· 49
4.2.3 과산화수소 AOP의 맛·냄새물질 강제투입실험 ····· 51
4.3 연속모형실험 결과 ····· 54
4.3.1 수질항목별 연속모형실험 결과 ····· 54
4.3.2 입상활성탄 흡착효율 변화 ····· 60
4.4 AOP 및 전 오존공정 적용성 ····· 62
4.4.1 AOP 도입 필요성 검토결과 ····· 62
4.4.2 전 오존공정 추가도입 필요성 검토결과 ····· 66
제 5 장 결 론 ····· 68

<표 차례>

표 2.1 산화제에 따른 전위차 비교 ····· 14
표 2.2 처리물질별 오존과 OH Radical의 반응속도 비교 ····· 14
표 2.3 오존공정 및 Peroxone공정 특성 비교 ····· 16
표 2.4 Geosmin과 2-MIB의 특성 ····· 32
표 3.1 강제투입실험계획 ····· 42
표 3.2 연속모형실험 수질분석 항목 ····· 43
표 4.1 실험대상 정수장 도착수(원수) 수질현황 ····· 45
표 4.2 난분해성 화학물질의 오존과 OH radical과의 반응속도 ····· 63
표 9 ····· 75

<그림 차례>

그림 1 ····· 4
그림 2.1 Ozone/ AOP 모식도 ····· 15
그림 2.2 Ozone/High pH AOP 모식도 ····· 17

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

그림 2.3 UV 광분해법 AOP 모식도 ····· 17
그림 3.1 모형실험장치 공정 개요도 ····· 38
그림 3.2 모형실험장치 P&ID(1계열) ····· 40
그림 3.3 모형실험장치 P&ID(2계열) ····· 41
그림 4.1 1계열 전 오존공정 실험 결과(망간) ····· 47
그림 4.2 1계열 전 오존공정 실험 결과(맛・냄새물질) ····· 47
그림 4.3 1계열 후 오존공정 실험 결과(2-MIB) ····· 48
그림 4.4 1계열 후 오존공정 실험 결과(Geosmin) ····· 48
그림 4.5 1계열 활성탄공정 실험 결과 ····· 49
그림 4.6 2계열 후 오존공정 실험 결과(2-MIB) ····· 50
그림 4.7 2계열 후 오존공정 실험 결과(Geosmin) ····· 50
그림 4.8 2계열 활성탄공정 실험 결과 ····· 51
그림 4.9 과산화수소 AOP의 2-MIB 제거율 실험 결과 - ····· 52
그림 4.10 과산화수소 AOP의 2-MIB 제거율 실험 결과 - ····· 52
그림 4.11 과산화수소 AOP의 Geosmin 제거율 실험 결과- ····· 53
그림 4.12 연속모형실험 결과(색도, 1계열 후 오존 1.0㎎/L) ····· 55
그림 4.13 연속모형실험 결과(색도, 2계열 후 오존 0.3㎎/L) ····· 55
그림 4.14 연속모형실험 결과(DOC, 1계열 후 오존 1.0㎎/L) ····· 56
그림 4.15 연속모형실험 결과(DOC, 2계열 후 오존 0.3㎎/L) ····· 56
그림 4.16 연속모형실험 결과(망간, 1계열 후 오존 1.0㎎/L) ····· 57
그림 4.17 연속모형실험 결과(망간, 2계열 후 오존 0.3㎎/L) ····· 58
그림 4.18 연속모형실험 결과(탁도, 1계열 후 오존 1.0㎎/L) ····· 59
그림 4.19 연속모형실험 결과(탁도, 2계열 후 오존 0.3㎎/L) ····· 59
그림 4.20 활성탄 사용 전·후 2-MIB 제거효율 실험 결과 ····· 61
그림 4.21 원수와 여과수의 오존분해특성(오존 2.0㎎/L) ····· 62
그림 4.22 원수와 여과수의 오존분해특성(오존 2.0㎎/L+ 2.0㎎/L) ····· 63
그림 4.23 맛·냄새물질 제거율([2-MIB]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L) ····· 64
그림 4.24 맛·냄새물질 제거율([Geosmin]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L) ····· 65
그림 4.25 맛·냄새물질 제거율([2-MIB]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L+과수 0.2~3㎎/L) ····· 65
그림 4.26 맛·냄새물질 제거율([Geosmin]o=30ng/L, 오존 1.5㎎/L+과수 0.2~3㎎/L) ····· 66

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 4.27 전 오존공정의 망간 제거율(오존 1.0㎎/L, CT 5분) ····· 67
그림 4.28 전 오존공정의 맛·냄새물질 제거율(오존 1.0㎎/L, CT 5분) ···· 67

Collection @ chosun