

17CTAP
-C11496
9-02

지하
저수지
자정작용
평가 및
유지관리
기술
개발

최
종
보
고
서

2018

국
토
교
통
부

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

국
토
교
통
기
술
촉
진
연
구
사
업
R&D
Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
17CTAP-C114969-02

지하저수지 자정작용 평가 (AOC<50 $\mu\text{g}/\text{L}$) 및 유지관리 기술 개발

최종보고서

2018. 7. 20.

주관연구기관 / 세종대학교산학협력단

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘지하저수지 자정작용 평가 (AOC<50 µg/L) 및 유지관리기술 개발’ (연구개발 기간 : 2016. 06. 24 ~ 2018. 06. 23) 과제의 최종보고서 7부를 제출합니다.

2018. 07. 20.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 김 선 재



주관연구기관책임자: 맹 승 규



국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

〈보고서 요약서〉

과제 고유 번호	17CTAP-C11496 9-02	해당 단계 연구 기간	2017. 06. 24- 2018. 06. 23	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창조형 모험과제			
연구과제명	대과제명	지하저수지 자정작용 평가 (AOC<50 µg/L) 및 유지관리 기술 개발			
	세부과제명	-			
연구책임자	맹 승 규	해당단계 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 50,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 50,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단				
국제공동연구					
위탁연구					
요약				보고서 면수: 69면	

연구의 목적 및 내용	- 본 연구는 기후변화 대응 청정 지하저수지 토탈 솔루션에 부합하는 관리 기준으로 동화가능 유기탄소(Assimilable organic carbon; AOC), 유기물 특성 그리고 미생물 모니터링과 함께 지하저수지의 자정작용을 처음으로 평가 및 정량화하고 저장기간에 따른 안정성 향상(AOC 기준 50µg/L 이하)을 통한 청정 상수원 확보 및 운영기술 고도화 기법으로 제시. - AOC는 대수층 내 미생물이 직접적으로 가용 가능한 탄소원으로 지하저수지의 자정작용을 통한 수질개선 효과를 정확하게 정량 평가할 수 있으며, 저장기간에 따른 AOC 제거율 차이 확인을 통하여 청정 상수원 확보 및 안정성 높은 물을 생산할 수 있는 새로운 지표로 설정. - 지하저수지 전처리별 AOC, BDOC 및 유기물 제거 특성 등을 파악하여 함양 원수의 적절한 전처리 기법을 선정하고 bench-scale 실험을 수행하였음. - AOC, BDOC 뿐만 아니라 소독부산물 생성능, 의약품질 제거율을 확인하여 지하저수지 처리 후와 물 공급 시에 소독과정에서 유해물질 최소화 등 안정적인 수질을 공급할 수 있는 전처리 기법(오존산화)을 확인하였음. - 본 연구에서 다양한 지표를 통해 지하수 저장기간의 단축(5~30일)이 가능할 것으로 확인됨.				
연구개발성과	- AOC 기반 청정 지하저수지의 생물학적 자정작용 평가 기법을 도입. - 전처리기법과 저장기간 축소에 따른 지하저수지 관리 및 운용 제시.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 지하저수지 최적 함양기간 설정을 통해 응집제와 염소소독이 필요 없는 청정지하수를 확보할 수 있어 소독부산물 저감, 수질오염사고 대응 등 국민 보건 향상과 대체 청정 수자원 확보 가능함. - 운영 최적화 및 검증이 가능하므로 수도사업자에게 관리 기술 제공 및 국가 물안보 향상에 기여 가능할 것으로 기대됨. - 후속연구를 통하여 기술성숙도가 높은 pilot, full-scale 규모 연구에서 활용 가능성이 높고 기존 국토부 중장기 연구개발과 연계 가능성 기대.				
핵심어	동화가능유기탄소	자정작용	지하저수지	대체수자원	생물학적 안정성

< SUMMARY >

Purpose & Contents	• This study is to evaluate the storage time of water in the underground reservoir for the first time, together with assimilable organic carbon (AOC), organic matter characteristics, and microbial monitoring as a management standard. The performance of natural treatment and improvement of biostability according to period (less than 50µg/L based on AOC) • AOC is a carbon source that is directly available to microorganisms growth in aquifers. It can accurately quantify the water quality improvement effect of the underground reservoir through the self-purification of the underground reservoir. It can secure a clean water source and produce highly stable water Set as a new indicator. • AOC, BDOC and organic matter removal characteristics were determined, and appropriate pretreatment techniques of recharge water were selected and bench-scale experiments were conducted. • AOC, BDOC, as well as disinfection byproduct formation potential and emerging contaminants concerns were use to confirm the pretreatment technique that can provide safe water quality such as minimization of harmful substances in disinfection process during water supply. • In this study, we confirmed the possibility of shortening the storage period of groundwater (5 ~ 30 days) through various indicators.				
Results	• Offers a biological evaluation method on water treatment through the underground reservoir by AOC techniques. • Optimizing aquifer storage management technique by time and water quality.				
Expected Contribution	• Through aquifer storage management techniques provided from this study, clean groundwater can be obtained without disinfection and coagulants. • Can contribute to resolve acute water shortage problems and enhance the national plans of water security in Korea. • Offers advanced management techniques to public water utilities.				
Keywords	assimilable organic carbon	natural water treatment	underground reservoir	water resources	biological stability

< Contents >

1. Introduction	1
2. Status of the technology development	10
3. Results of the present project	17
4. Technologic achievement and contribution	48
5. Future application	54
6. Relevant previous projects	57
7. Security of the present project	58
8. List of devices on NTIS system	59
9. Laboratory safety protocols	60
10. Main products of the present project	61
11. Additional notes	62
12. References	63

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	10
3. 연구 수행 내용 및 성과	17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	48
5. 연구개발성과의 활용 계획	54
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	57
7. 연구개발성과의 보안등급	58
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	59
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	60
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	61
11. 기타 사항	62
12. 참고 문헌	63

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 배경

가. 연구개발의 배경

(1) 수자원 위기

- UN은 물안보(Water security)와 관련된 전세계 수자원에 대한 문제를 언급하고 기후변화에 따른 종합적인 수자원 관리에 대한 문제인식이 세계적으로 확산되는 계기가 되고 있으며, 세계적인 수자원 불균형과 가뭄 발생 등으로 인한 관련 정부예산 지출 증가 및 수원 다변화 연구들이 수행되고 있음.

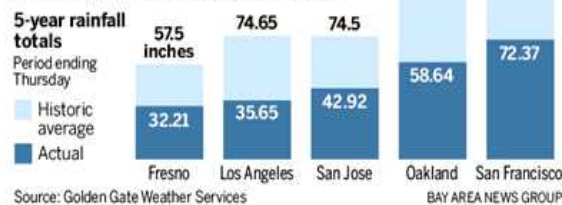
California drought: How will we know when it's over?

By Paul Rogers | paulrogers@sfchronicle.com

POSTED: 01/09/2016 04:28:25 PM PST | UPDATED: ABOUT A MONTH AGO | 32 COMMENT

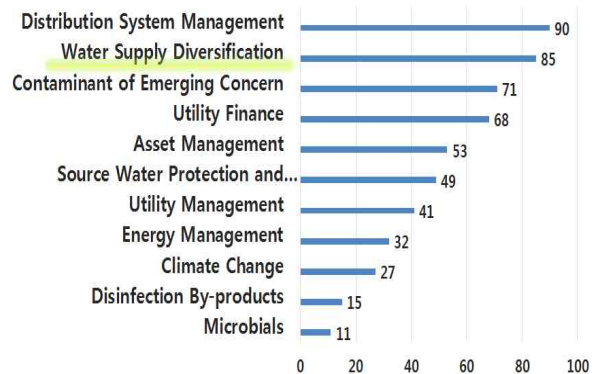
BIG RAINFALL DEFICITS

After four years of drought, California is significantly behind on rainfall. Although the fifth year is still underway, big storms are needed to make up the shortfall.



(a) 가뭄 등 수자원 위기 증가

Water Research Foundation (1991-Present)



(b) 수자원 다변화 연구 증가

그림 1. 수자원 관리에 대한 위기의식 증가 및 최근 연구 현황

- 우리나라 역시 최근 잦은 가뭄을 비롯하여 계절에 따른 강수량 차이로 하상계수가 큰 하천 특성을 지니고 있어 여름철에 연간 강우량의 3분의 2정도가 집중되는 탓에 수자원 불균형이 심각한 상황임.
- 최근 다양한 기후적, 환경적 원인 등으로 하천 내 난분해성 유기물의 증가 및 조류 발생 등의 수질 문제로 인해 양질의 상수원을 확보하는 것이 점점 어려워질 것으로 예측되며 우리나라는 하천을 용수공급원으로 57%(172억 톤) 가량 의존하기 때문에 용수공급원의 직접적인 수질 문제 증가 및 사고 발생에 대한 대응력이 미흡한 현실.
- 기존 지표수는 난분해성 유기물, 미량유해물질 유입과 부영양화로 인한 조류 기원 물질(Algal organic matter; AOM)의 맛, 냄새 및 독성 문제가 점차 증가하고 있으며, 이에 따른 고에너지·고비용의 고도정수처리 시스템이 확산되고 있음.

(2) 수자원 다변화

- 하천 및 지표수를 주요 용수공급원으로 의존하는 현실에서 다양한 수질 사고와 수자원 부족에 대응하기 위하여 다양한 대체 수자원 개발이 필요함. 이와 같은 대체 수자원기술로는 해수담수화, 하수 재이용과 지하저수지 등을 예로 들 수 있음.

- 한편, 지하저수지란 지표수 등을 대수층에 인공적으로 함양 및 저장한 다음 일정기간이 지나 양수함으로서 자연 자정효과에 의한 수질 처리가 가능한 저수 시스템과 일련 시설을 말함.
- 상시 주입과 양수가 가능한 시스템일 뿐만 아니라, 수질사고 발생 시에 이미 저장되어 있는 물을 활용하여 일정기간 필요한 곳에 물을 공급할 수 있는 장점을 지닌 시스템.
- 대수층에 대한 인공함양 시 일정 부분의 잉여 수자원을 함양을 통해 저장 가능하기 때문에 계절별, 건기 및 우기별 수자원의 변화와 불균형을 다소 상쇄시킬 수 있으며 비상상황 등 발생 시에 일정 기간 동안은 해당 대수층으로부터 양수가 가능하기 때문에 상시 및 비상시 대체 수자원으로서 모두 역할 가능한 장점이 있음.
- 따라서 지하저수지는 대체 수자원으로서 처리 기법이 친환경적이고 수자원을 미리 저장할 수 있는 기능이 있기 때문에, 기후변화 등 급변하는 수자원 위기의 대응에 적절한 기술로 판단되고 있음.

2. 연구개발 필요성

가. 연구개발의 필요성

(1) 친환경적인 수자원 개발 필요

- 대체 수자원으로서 해수담수화 시설의 경우 좋은 수질을 얻을 수 있으나 높은 운영비용과 유지관리 문제 및 전문 기술력을 요구하는 단점들이 있어 기술 확산 및 적용에 분명한 제약이 있음. 또한 해수담수 처리 이후 발생하는 고염도의 농축수 등은 2차적인 환경 오염원이 될 수 있기 때문에 해수담수화와 막(membrane) 시설은 친환경적인 수자원 개발 기술이라 할 수 없음.
- 지하저수지는 유럽, 미국 등에서 활발히 적용하고 있는 강변여과와 인공함양과 유사하거나 동일한 기술로서 자연 환경을 이용하는 수처리 및 저장 기법으로 친환경적인 대체 수자원 기술로서 주목받고 있음.
- 지하 대수층을 이용한 물리, 화학 및 생물학적 자정효과를 통해 유기물 및 미생물 저감 효과를 얻을 수 있어 지표수와 비교하여 다양한 유기물, 유해물질의 저감이 기대되고 수질이 양호하기 때문에 청정 수자원으로서 활용성이 높은 기술.

(2) 다양한 환경오염 대응 능력 필요

- 지하저수지는 조류 발생 수원, 하수처리 방류수 및 방류수 영향을 받은 지표수 등 상수원으로서 직접적으로 사용이 어려운 수자원을 대수층 인공함양으로 처리하여 사용할 수 있기 때문에 적극적인 용수 다변화 대책으로서 수자원 불균형 및 부족 현상을 완화시키는데 기여할 수 있을 것으로 예상.
- 따라서 지표수의 처리뿐만 아니라 하수 재이용 용도로도 지하저수지 기술의 사용이 가능함. 생물학적 여과(biofiltration)를 이용하여 다양한 미량오염물질과 조류 독성물질의

제거 가능 기술로서 효과가 있을 것으로 기대되기 때문에, 물 종합 관리 대책 및 물 자원 순환에 긍정적인 기능을 할 수 있는 기술로 평가 가능.



(a) 난분해성, 미량유해물질 위험 증가 (b) 상수원 조류로 인한 식수 공급 차질

그림 2. 기존 용수공급원의 위험 요소 증가

(3) 토지의 입체적인 개발과 이용

- 우리나라는 외국에 비하여 가용 토지가 부족하고 자연적으로 강변여과를 활용하기에는 여건이 마땅치 않기 때문에 인공적으로 조성한 지하저수지 혹은 인공함양 등이 적절.
- 기존에는 댐이나 저수지 등의 지표수 수자원 개발에 치중하여(김상태, 2016) 환경 사고나 자연 현상에 대한 대응력이 부족하였음. 따라서 다른 수자원보다 환경피해를 최소화하고 지하공간을 입체적으로 사용할 수 있는 지하저수지 개발이 필요.

3. 연구개발 창의성

가. 연구개발의 창의성·차별성

(1) 지하저수지 모형 연구

- 기후변화 적응을 위한 용수 다변화 시 다양한 원수 수질변화를 고려하여 지하저수지의 운영이 이뤄져야 하고 총유기탄소, 동화가능유기탄소(Assimilable organic carbon; AOC), 생분해성 용존 유기탄소(Biodegradable dissolved organic carbon; BDOC)와 소독부산물 전구물질의 제거 효과가 각기 다를 수 있기 때문에 이를 모사할 수 있는 Bench-scale의 구축 및 지하저수지 공정 효율 평가가 가능한 분석 기법이 함께 기초 연구로서 본 연구가 활용 가능. 대체 수자원으로서 안정적인 활용을 위해서는 원수의 수질변화 및 함양기간, 전처리, 등에 따른 미생물학적 자정효과 변화와 최종 생산수의 수질에 대한 연구가 필요함. 이를 실제 스케일에서는 실험하기 어렵기 때문에 지하저수지 컬럼 모형을 제작하여 연구를 수행하였음.

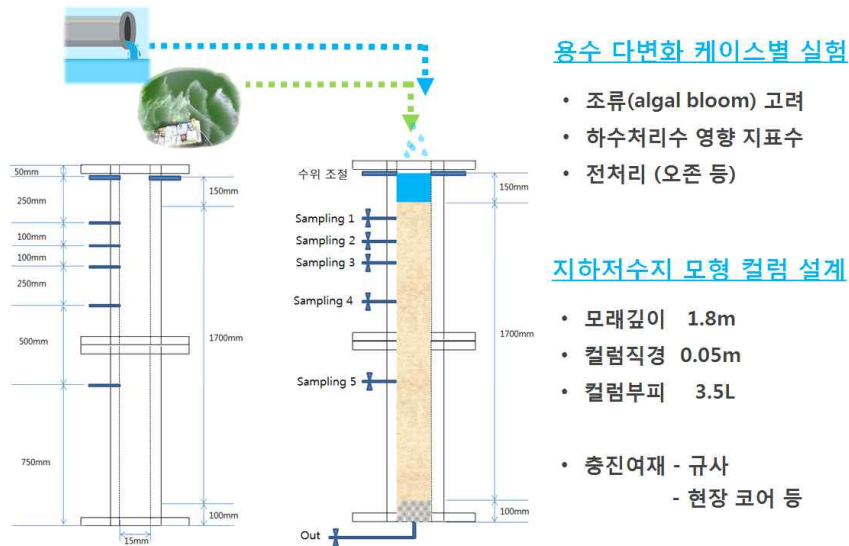
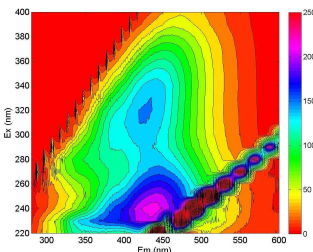
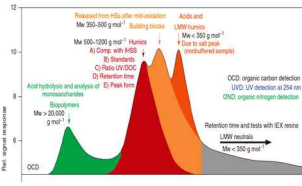
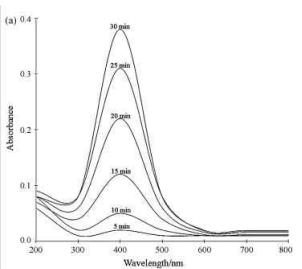
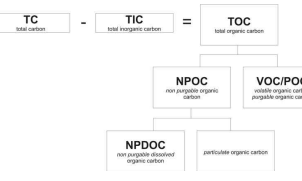
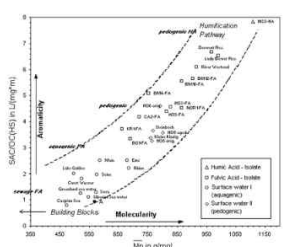


그림 3. 지하저수지 모형실험 설계

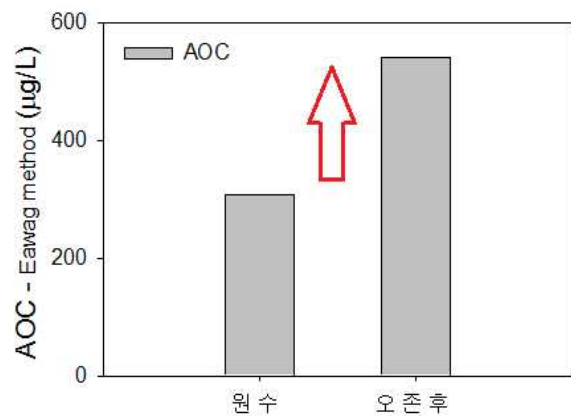
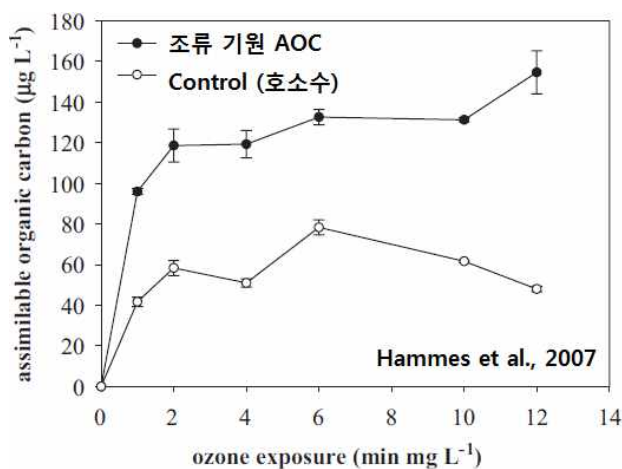
- 지하저수지 모형 내에서 자정작용에 기여 및 제거되는 유기물 특성을 이해하기 위하여 자연유기물(Natural organic matter; NOM) 특성 분석을 실시하였음.
- 지하저수지의 전처리 케이스별 연구를 도입하여 생분해성을 증가시켜 자정작용을 향상 가능한지 확인하였음. 주입관정이나 함양지 표면의 다양한 자연 종속영양 미생물과 대수층 내부 다양한 토착미생물이 서식함으로써 효과적인 자정작용이 이뤄지기 때문에, 하천 및 방류수 등에 존재 가능한 인간활동 기원의 미량유해물질, 난분해성 유기물, 소독부산물 전구체 등을 제거하는지 실험적으로 함께 확인하고자 하였음.
- 자정작용 중 미생물의 활성도 및 정량적인 변화를 보기 위하여 유세포 분석기법을 이용하여 총세균과 adenosine tri-phosphate(ATP) 분석을 함께 수행.
- 지하저수지의 자정작용에 따라 다양한 유기물 제거가 가능할 것으로 기대되기 때문에 수돗물 소독 시 발암성의 소독부산물 생성을 최소화 할 수 있도록 전구물질 저장 효과를 확인하고자 하였음. 따라서 후 염소소독 시의 총 트리할로메탄, 할로아세틱산 등의 소독부산물 감소를 확인하여 대체 상수원으로 적용 가능성을 파악하고자 하였음.
- 지하저수지 저장과 공급과정과 효율성을 향상하고자 저장기간에 대한 연구를 실시하였으며, 실제 대수층의 자정작용을 모사할 수 있는 현장 코어 토양샘플을 이용하였음. Bench-scale의 제작을 통해 본 연구의 현장 적용성을 높이고 기술개발 성숙도가 높은 Pilot 및 Full-scale 연구와 연계 및 후속연구에 활용 가능하도록 하였음.

표 1. 자연유기물 분석 기법

명칭	분석 장비/장치	분석 목적 및 결과	단위
EEM (fluorescence excitation emission matrices)			Tryptophan, Humic-like, Fulvic-like. + PARAFAC analysis Arbitrary Unit
LC-OCD (liquid chromatography -organic carbon detector)			유기물을 구성하는 각각의 화학적 성 분을 retention time에 따라 Biopolymer, Humic, Building block, NMW acid, Neutral로 나타낼 수 있는 장비 mg/L
UV254 (ultraviolet 254nm)			자연 하천에는 자 연 유 기 물 질 (NOM)이 복합유 기물질로 존재하 며, 이러한 물질은 소독부산물 생성, 생물학적 미생물의 재성장, 색도, 맛· 냄새에 영향 1/cm
DOC (dissolved organic carbon)			SUVA 값이 상대 적으로 높으면 DOC는 비교적 소 수성이며, 방향족 고분자 유기물 (Humic substance)로 구성 mg/L
SUVA (specific ultraviolet absorbance)	ABS/DOC x 100 (cm ⁻¹ of absorbance per mg/L of DOC)		SUVA가 상대적으 로 낮으면 DOC는 친수성에 가까우며 저분자 유기물로 구성 L/mg · m

(2) 생물학적 여과 지표로서 AOC, BDOC 도입

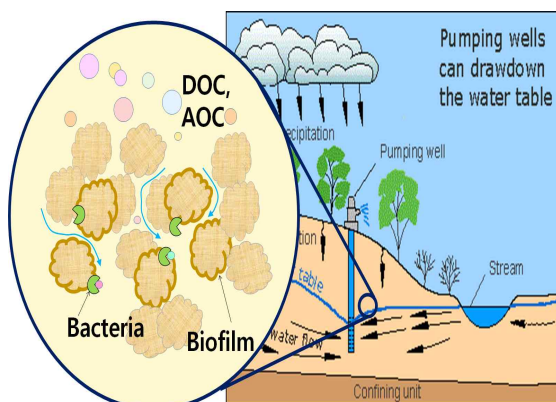
- 지하저수지의 유기물, 미량오염물질 제거 및 자정효과는 생물학적 기작에 의한 동화작용 등으로서 다양한 토착 미생물에 의하여 난분해성 유기물의 분해가 이뤄지며 함양지에 주입되는 자연 유기물의 방향성, 소수성, 생분해성, 기원 등의 다양한 특성이 자정작용 중 유해물질 및 유기물 처리 효율에 전반적인 영향을 미칠 수 있게 됨.
- 지하저수지의 다양한 관리 인자가 존재할 수 있지만, 본 연구에서는 생물학적 자정 기능의 파악 및 수질 관리를 위하여 대수층에서 함양 후 자연유기물의 거동 및 특성 변화를 검토하고 저장수의 생물학적 안정성 변화의 판단 근거로서 AOC, BDOC를 공정 모니터링 및 관리 기법으로 새롭게 도입하였음.
- 조류기인 유기물(AOM) 오염 시 대수층 함양 과정에서 전처리 기법 및 대수층 내 생물학적 분해에 따라 AOC가 크게 증가할 수 있으며(Hammes et al., 2007) 생산수의 수질 변화가 예상됨. 또한 하수방류수 영향이나 전처리법 케이스별 자정효과의 영향을 파악하였음.
- 한편, 유기물 특성분석을 통하여 생물학적으로 제거 가능한 자연유기물(Natural organic matter; NOM)의 특성을 파악하였고 처리 효율을 높이기 위한 전처리 기법의 유기물 변화 효과 등을 파악하는데 이용하였음.



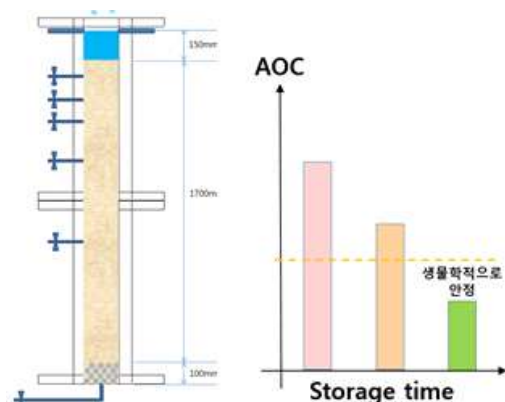
본 연구진 예비 실험

(a) 오존 산화에 인한 조류 기원 AOC 증가 (b) 오존처리 후 지표수의 AOC 변화

그림 4. 함양 원수 특성 및 전처리의 영향



(a) 토착 미생물에 의한 유기물의 제거



(b) 지하저수지 AOC 예상결과

그림 5. 지하저수지의 AOC의 저감 예상효과

(3) 지하저수지 생산수의 생물학적 안정성 고려

- AOC, BDOC는 정수장의 전염소, 오존처리 등 고도산화 적용 시 증가할 수 있고 잔류하는 과정에서 수돗물 소비자 공급과정의 미생물의 2차 오염 및 바이오필름(Biofilm) 형성 등에 기여하기 때문에 최종적으로 처리 효과를 높이는 것이 필요함.
- 네덜란드를 비롯한 유럽의 일부 무염소 수돗물을 공급하는 국가에서는 AOC 기준 10µg/L 이하로 관리할 경우 잔류염소를 투입하지 않더라도 수돗물 공급과정에서 일반세균 재증식 가능성이 매우 낮아진다는 것을 확인하였음(van der Kooij et al., 1989).
- 우리나라와 같은 잔류염소를 필수적으로 요구하는 정수시스템의 경우는 AOC 기준 50-100µg/L 이하로 유지하도록 생물학적 안정성 가이드라인으로 권장(수질 기준 아님)하고 있으며 (LeChevallier et al., 1991), BDOC로는 0.2 mg/L 이하일 경우 생물학적으로 안정적인 것으로 판단되고 있음 (Servais et al., 1992).
- 우리나라의 경우 상수도 배관 및 2차 오염 문제에 대한 우려와 더불어 수질기준에 의거하여 잔류염소를 사용하고 있음. 따라서 무염소 정수처리의 현실성은 낮으나, 염소로 인한 발암성 소독부산물 생성과 해결되지 않는 미생물 2차 오염 등을 고려할 때 AOC, BDOC 등을 도입하여 이와 같은 문제를 줄일 수 있을 것으로 기대하고 있음(박지원, 2016).
- 따라서 청정 지하저수지의 생물학적 자정작용은 우수한 수준으로 다양한 오염물질의 제거가 가능하고 AOC 제거 등 생산수의 생물학적 안정성을 향상시킴으로서 잔류염소 등의 약품을 최소화 할 수 있는 친환경적인 수자원으로서도 활용이 가능할 것으로 보임.

표 2. 생물학적 안정성: AOC, BDOC

Threshold	AOC 10 µg/L 이하	AOC 50-100 µg/L 이하	BDOC 0.2 mg/L 이하
조사 국가	네덜란드 등	미국	프랑스
후 염소 소독	무염소	사용	사용
Reference	van der Kooij et al., 1989	LeChevalier et al., 1991	Servais et al., 1992

- 궁극적으로 본 연구 결과를 토대로 하여 청정 지하저수지의 취지의 부합하는 자정작용을 실증 및 평가 가능한 모니터링 기법으로 AOC 방법을 제시 및 운영관리 기준으로는 저장시간 관리기법을 제안하고자 하며, 적극적인 청정 지하저수지 기술 개발 및 적용으로 우리나라의 수자원 불균형 및 용수 부족현상 해소에 일조하는 사회문제 해결형 연구가 되고자 함.

4. 연구개발 목표

가. 연구개발의 최종 목표

- (1) AOC 기반 지하저수지 자정작용 평가기술
 - 자연유기물의 생물학적 안정성 평가, AOC 기여 분석
 - AOC 분석 한계(최소값 : 10ppb) 확인 및 분석 최적화
 - 원수수질 변화 (조류기인 유기물) AOC 증가 및 저장기간별 제거율 평가
 - 지하저수지 심도별 AOC 프로파일링 (0, 10, 30, 60, 110, 180cm)
- (2) 모형실험을 통한 청정 지하저수지 유지관리기술 개발
 - 모형 컬럼에 현장 코어 (낙동강 홍수터, full-scale 함양지 고려) 충전 및 안정화
 - 지하저수지 함양기간 (5, 10, 20일)별 수질 개선 능력 평가 (AOC, BDOC, ATP, 탁도, 용존유기탄소, 소독부산물 생성능)
 - 지하저수지 심도별 용존유기탄소, 용존산소, 미생물 활성도(ATP) 등 컬럼프로파일링

나. 기술개발 성숙도

- (1) AOC 기반 지하저수지 자정작용 평가기술
 - 본 연구는 청정 지하저수지 효율 및 관리 기법 제시를 위한 수단으로 AOC 분석 및 유기물 특성분석으로 용수 다변화 시나리오에 의한 의약품물질, 조류 등의 지하저수지 영향을 실험적으로 증명하고 Bench-scale의 모형 컬럼 테스트를 통해 수행하므로 실험적인 증명 단계(TRL 3)에 해당.
- (2) 모형실험을 통한 청정 지하저수지 유지관리기술 개발
 - 청정 지하저수지 효율 및 관리 기법 제시를 저장기간(30, 60, 90일) 케이스에 따른 실험과 현장 코어 시료를 적용한 컬럼 테스트를 수행하여 현장 적용성을 높임으로서 지하저수지의 AOC 거동을 실험실 규모에서 유사평가 할 수 있기 때문에, 실험실 성능평가 단계(TRL4)로 진행.

표 3. 핵심성과 목표 및 TRL 단계

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	TRL
1	AOC 기반 지하저수지 자정작용 평가기술	청정 지하저수지의 생물학적 자정작용 효율 평가를 위하여 최신 AOC 측정기법을 이용하여 지하저수지 자정작용 평가 기술 개발	공법·기법	세종대학교 산학협력단	3
2	모형실험을 통한 청정 지하저수지 유지관리기술 개발	청정 지하저수지의 자정작용을 함양 원수 수질변화 연구 및 함양 후 유기물 특성 변화와 AOC 제거율, 소독부산물, 잔류의약품 저감 등을 위한 최적 저장기간을 파악하여 효율적인 공법 운영을 위한 지하저수지 유지관리 기술로 제시하여 적정 유지관리 및 효율적인 저장기간 산정	공법·기법	세종대학교 산학협력단	4

표 4. TRL 단계별 설명

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

다. 연구개발의 정량적 목표

(1) AOC 기반 지하저수지 자정작용 평가기술

- 1차년도: AOC, BDOC 분석 최적화 및 모니터링 (국외 SCI 1건)

(2) 모형실험을 통한 청정 지하저수지 유지관리기술 개발

- 2차년도: 지하저수지 저장기간별 평가 (국외 SCI 1건, 국내학술지 1건), 지하저수지 저장기간 관리 및 평가기법 도입 (특허출원 1건)

표 5. 정량적 연구성과 목표

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	2건	1건
일반학술지 게재(1점)	1건	1건
특허출원(1점)	1건	1건
특허등록(2점)	-	-
디자인 등록(1점)	-	-
소프트웨어(1점)	-	
하드웨어(1점)	-	
기타(1점)	-	
소계(점수)	6점	4점

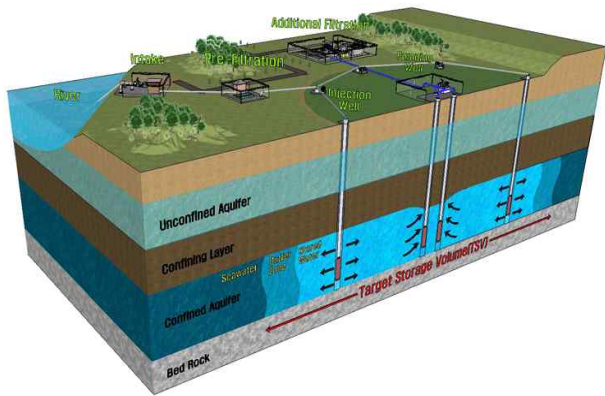
제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

가. 국내 연구개발의 현황

(1) 국내 현황 (2016-2018)

- 국토교통부에 따르면 국내 수자원 장기종합계획(2006~2020)의 수자원 및 물이용 중점 사항 및 계획으로서 기후변화에 따른 수자원 영향평가 및 취약성, 극한홍수·극한가뭄·하천환경 대응력 강화, 기후변화 대응 연구과제 발굴 등을 기후변화 대응 기본 전략으로 수립하고 있음. 물 부족지역 문제 해소를 위하여 신규 수자원으로서 다목적 저류지, 지하수 및 대체 수원 개발 대책의 필요성이 인식되고 있으며 기술의 경제성, 수용성, 친환경성, 안정성 등이 필수 요소로 꼽히고 있음.
- 4대강 사업으로 인한 강변여과수 개발과 극한 가뭄 및 수질사고 대응체계 구축 등의 최신 기술 수요에 맞는 물 관리 대책이 요구되고 있고 이에 따른 각종 수문 및 수자원 모니터링과 지하수, 대체 수원의 효율적 관리 및 이용체계 구축을 핵심 물이용 계획으로 언급되고 있음.
- 국토교통기술 물관리 연구사업으로 기후변화에 따른 물관리 위기상황 극복 및 물재해 저감, 안정적 수자원 확보 등의 2016년 사업 규모는 317억 원으로 대규모 청정 지하저수지 개발 사업(24억원)도 중장기 연구 및 중점 추진 내용으로 진행중임.



(a) 청정 지하저수지 시스템 모식도

(b) 2016년 청정 지하저수지 센터 개소

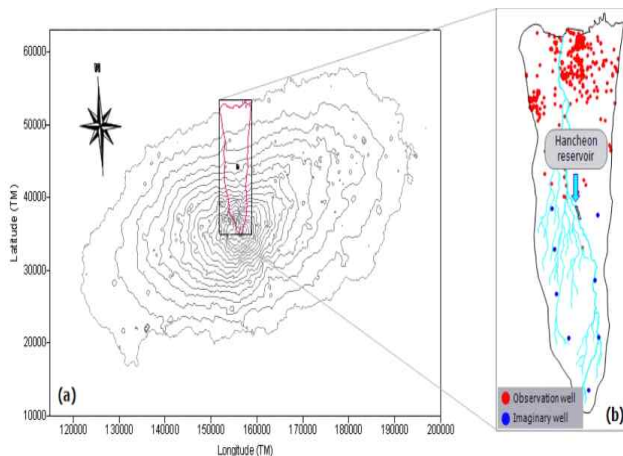
그림 6. 대규모 지하저수지 실증 사례

- 2017년 3월, 환경부와 국토교통부는 세계 물의 날 기념식에서 유엔이 권고한 하수 발생량 감축과 재이용 증가 촉진을 주제로 물산업 육성 행사를 마련하였음. 한국농어촌공사는 워크숍을 통해 식량안보·국민안전 위협하는 기후변화 대응 물 생산 기반을 강조하며 지하저수지 등 대체 수자원 개발의 필요성을 강조하였음.
- 2017년 7월, 충남지역의 가뭄극복 대토론회 (주관: Kwater, 주최: 국토교통부 · 충청남도 · Kwater)에서 충남지역 가뭄 대응 현황과 해수담수화 등 대체 수자원 기술이 지하저수지와 함께 제안되었으며, 대전 MBC에서 해당 토론회 내용을 <가뭄 해법 “지하저수지·해수담수화”>로 언론 보도하면서 대중적으로 지하저수지 개념이 소개되었음.



그림 7. 가뭄 대응 지하저수지 보도 (MBC, 2017)

- 현재 운영중인 지하저수지 유사 기술로는 지하댐, 인공함양, 강변여과 등의 관련 연구 및 일련의 시설물들이 중·소규모로 운영되고 있으며 지하댐 사례로서 이안, 남송, 옥성, 고천, 우일 등은 농업용수로 사용 및 강원도 속초의 쌍천 지하댐 시설의 경우 생활용수 목적으로 일당 4만 톤 이상을 주민들에게 공급하고 있음.
- 창원시와 김해시의 경우 낙동강 하류지역에서의 충적층 발달 조건 등을 고려하여 강변여과를 개발하고 있는 대표적 사례로서 대산면, 북면 등에서 일련의 강변여과수 취수 시설과 후속 정수처리 공정을 운영하여 시민들에게 공급하고 있음.



(a) 제주도 한천의 함양 관정
(오세형 등, 2010)



(b) 진주시 대곡 인공함양 사업

그림 8. 국내 인공함양 사업 사례

- 제주도의 경우, 연평균 강수량은 높으나 화산성 지질의 투수성으로 인하여 하천 발달이 부족하여 용수 확보에 어려움을 겪고 있기 때문에 2007년부터 한국지질자원연구원에서 '수자원의 지속적인 확보 기술' 사업을 추진하여 수리 및 지질 특성에 맞는 실용화 기술을 개발해왔으며 한천유역에서는 인공함양 관정이 20개 설치되어 운영 중임.
- 안성천에는 일당 5,000 톤 규모의 방사형 집수정을 통해 대용량 간접취수 및 철·망간 저감 플랜트 기술 등의 실증 시험 시설을 구축하여 운영하고 있음. 경남 진주시는 가뭄 및 농업용수 확보를 위하여 대규모 인공함양 양수정 20공, 함양정 80공 규모 설치 및 사업 시행 중임 (35억 원).

- 2018년 3월부터 국토교통기술 수요대응형 물공급서비스사업 “상시 가뭄지역의 지하수 최적 공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 well network 기술 개발”진행하고 있음. 가뭄에 취약한 지류 하천 상류에서의 IT 기술을 기반으로 지표수 연계 지하수 확보를 위한 다양한 인공함양 (모래저장형 dam, 선상지 함양 등) 기술 및 기존 관정 시설 연계 기법인 Well Network System을 활용한 지역 맞춤형 가뭄 대응 용수확보 기술을 개발하고 있음.

(2) 학술연구 현황 (2016-2018)

- 2016 춘천국제물포럼에서는 물과 지속가능발전 주제로 토론회를 개최하고 신개념 수자원-지하저수지, 도시 물순환, 기후변화와 물 재해 등의 문제의식을 공유하였음.
- 대규모 청정 지하저수지의 경우, 2016년 4월 국토진흥원에서 청정 지하저수지 실증센터를 개소함으로써 국토교통부 R&D 과제로서 ‘대규모 청정 지하저수지 기술개발’을 실증할 수 있는 테스트 시설과 일련의 운영 시스템을 통해 용수 다변화를 위한 실증 과정 (일일 저수용량 1백만 톤 및 일일 취수용량 2천 톤 규모의 청정 지하저수지 실증센터, 부산 삼락공원). 민간에서는 (주)동해이앤지의 대규모 지하저수지 시험시설, (주)지오그린21의 도서·산간 지역 우기주입-건기회수 소규모 청정 지하저수지 구축 기술이 개발.
- 대규모 지하저수지의 수리모형 개발 및 기술 검증, 시험시설 부지 평가 및 국내 최초로 시험시설을 설치하여 지하저수지에 대한 검증을 수행하고 있음 (과제명: 대규모 지하저수지 시험시설 개발).
- 수질 위해성 관리 기술 검증으로 수처리 공정 성능 평가를 수행하였고, 물수지 분석 및 지하수 함양량 평가를 통하여 연구후보지 수질지질 현장 조사를 실시하였음 (과제명: 복합 인공함양기법을 이용한 지하수확보.활용기술개발).
- 2017년 7월 가뭄극복 대토론회(Kwater 주관)에서 가뭄대응을 위한 지하저수지 연구 발표가 있었으며, 국내 청정 지하저수지 후보지 도출(충남지역) 및 잠재 저수량 등 지하저수지의 확대 적용 가능성을 보였음. 충남 지하저수지 후보지로 태안군 태안읍(잠재 저수량: 1.6억 m³), 서산시 대산면(1.3억 m³), 서천군 한산면(1.2억 m³)과 당진시 석문면(1.2억 m³) 등이 검토되었으며 추후 지하저수지 적용 가능성이 있는 것으로 파악됨.

표 6. 관련분야 연구 현황

(단위: 천원)

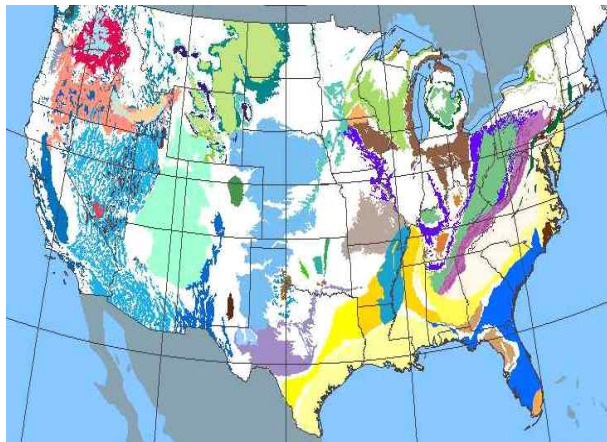
부처명	사업명	과제명	예산	비 고
국토교통부	물관리연구사업	대규모 지하저수지 시험시설 개발	542,500	2017
국토교통부	물관리연구사업	대규모 지하저수지 토탈 솔루션 기술 개발	1,496,500	2017
국토교통부	물관리연구사업	도서산간지역 우기주입-건기회수 소규모 청정 지하저수지 구축 기술	140,000	2017
국토교통부	수요대응형 물공급서비스	선상지 인공함양 기반의 Hybrid형 용수 확보 기술 개발	300,000	2018
국토교통부	수요대응형 물공급서비스	다단식 Sand 댐 활용 소규모 인공함양 기술 개발	250,000	2018

2. 국외 현황

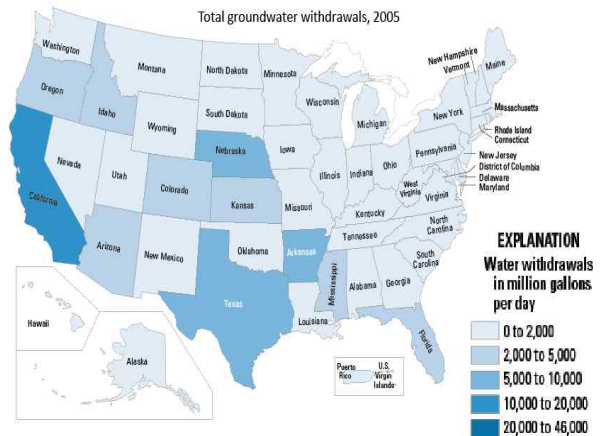
가. 국외 연구개발의 현황

(1) 국외 현황

- Global water intelligence에 의하면 국제적으로 인공함양 기술 및 관련 시설물 수요와 건설 사례가 증가하고 있을 뿐만 아니라, 생산 용량이 일일 10억 갤런에 이르는 것으로 알려지고 있음.
- 인공함양수를 수원으로 이용하는 사례로 미국 전역뿐만 아니라 독일, 오스트리아, 스위스, 네덜란드 등이 강변여과와 인공함양 등을 함께 도입하여 운영 중이며 수질이 저하된 상수원수를 개선하는 효과와 용수 저장, 지하수위 유지 등의 이점을 활용하고 있음.
- 미국은 인공함양·지하저수지 개념을 1969년 뉴저지에서 최초로 도입하고 현재는 캘리포니아, 텍사스, 알칸사스, 네브래스카, 아리조나, 캔자스 등 미주지역 전역에 이르는 대규모의 인공함양 시설 및 지하저수지를 운영하고 주요 수원으로 사용하고 있다(박종원, 2016). 전체 취수량의 20%를 지하수로 충당하고 있으며 대부분 담수 대수층에 해당하는 것으로 알려졌다.



(a) 미국 대수층 분포 지도

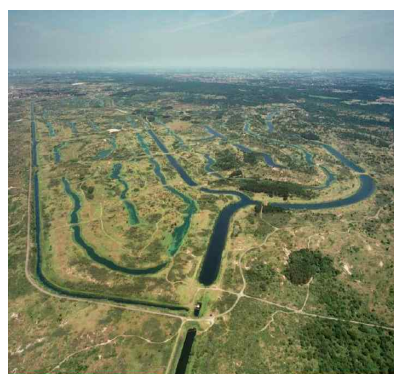


(b) 지역별 지하수 취수량 비교

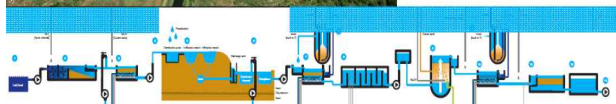
그림 9. 미국 대수층 분포 및 지하수 현황

- 캘리포니아 지역은 미국 전역에서 가장 지하수 취수량이 높고, 2016년부터 서부지역 지하저수지(Headworks underground reservoir) 추가 착공을 통해 1억 갤런 규모의 저장 시설 운영 계획하고 있으며 이는 기존 저수 수단인 실버레이크 및 아이반 호수의 저수 용량을 대체하는 서부지역 최대 규모에 해당됨.
- 미주지역의 대표적인 대수층으로 오갈랄라(Ogallala) 대수층이 널리 알려져 있으며 미국 8개 주에 걸쳐있는 거대 대수층으로 인근 지역 용수 공급원으로서 20세기 중반부터 사용되어 왔으나 최근에는 지하수위 강하 등의 문제로 관개수 부족 등 지하수 대수층에 대한 지속가능한 개발의 중요성을 인식시키고 있음.

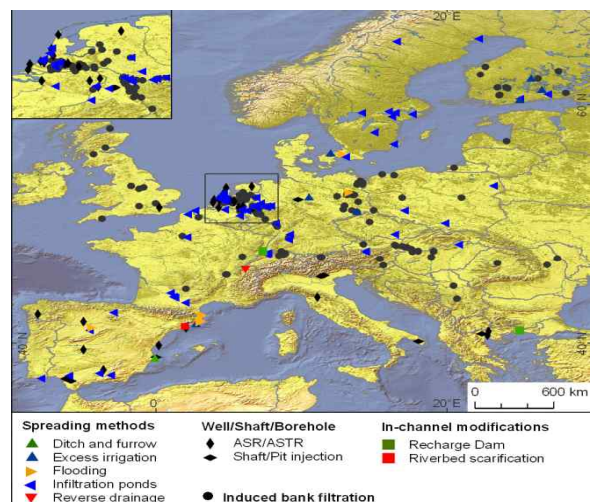
- 한편, 1972년에 지하수관리 구역법(Groundwater Management Districts Act)을 발효하고 대수층 수명 연장을 위한 계획고갈 정책 설정 및 안전취수량 정책을 통해 지하수 함양 용량을 초과하는 양수를 할 수 없도록 규정하는 등 지속가능한 지하저수지 이용 및 지하수 개발 설정 노력 중.
- 각 주 및 연방정부 차원의 대수층 관리 법규가 존재하지만 지속가능성, 지하수 오염방지 및 대수층 수위 회복 방법 등에서 미흡한 점이 다소 있음. 지하주입 오염 방지 차원에서는 Safe Drinking Water Act에 의하여 Underground Injection Control 프로그램이 정한 규제를 지키도록 하고 있음. 이에 따라 주입 원수와 대상 대수층에 대한 조건과 허가 요건을 준수하는 등 주정부 차원의 관리가 이뤄지고 있으며(텍사스), 일부 주정부는 지하주입에 대한 지나친 규제에 대해 반대하여 프로그램을 조정하는 등(박종원, 2016) 인공함양 주입 원수 변화에 대한 이해와 법제적인 허용 기준이 다소 미비함.
- 지하저수지 설계, 저장기간 설정 및 운영에서는 경험적 요소 등에 의존하는 경향이 다소 있기 때문에 지속가능 청정 지하저수지 설계 및 최적 운영·관리, 수질 모니터링, 수위·양수 모델링 등 관련 기술의 개발 필요성은 지속적으로 제기될 것으로 보임.
- 독일의 경우, 루르강(Ruhr)의 공업화로 인한 수질오염 대책으로 뮐하임 정수장에서는 루르강 지표수를 자연유하로 유입시켜 인공함양 후, 취·정수처리하여 공급하고 있으며(용량 : 244,000m³/일), 비텐시 정수장은 급속여과를 거친 인공함양수(90%)를 정수처리 및 생산(용량 : 27,400m³/일), 쾰른, 에센, 드레스덴 정수장에서도 인공함양을 도입하고 있음.
- 네덜란드의 경우, 암스테르담 정수장에서는 라인강에서 취수한 물을 사구에 함양하여 양수 및 오존, 활성탄, 완속여과 후속처리 후 공급하며 뉘즈강에서 취수하는 WPH 정수장의 경우 인공호수 저류법을 이용하여 함양 및 양수한 물을 활성탄 흡착과 자외선 소독 후 공급함.



**Artificial
recharge and
storage
Amsterdam
Dune Area**



(a) 네덜란드 암스테르담 사구를 이용한 함양



(b) 유럽 인공함양 시설 분포

그림 10. 유럽의 인공함양 및 지하저수지 운영 사례

- 유럽의 경우, Groundwater Directive를 통하여 주입 원수의 오염으로 인한 대수층 악화를 방지할 수 있도록 주입 원수를 규제할 것을 권고하고 있으나, Urban Wastewater Treatment Directive에 따르면 처리된 하폐수를 적절하게 재사용할 것으로 규정(박종원, 2016)하고 있기 때문에 지하저수지를 통한 물 재이용 시 대수층에 대한 적절한 모니터링과 주입 원수의 규제 등이 필요할 것으로 제시하고 있음.
- 싱가포르는 물 부족에 대한 심각성을 인지하고 70년대부터 사용한 물을 음용수로 재이용하는 등의 수자원 확보 기술과 관심도가 높음. 2017년 싱가포르 정부는 ‘20 연구개발 사업계획을 통해 다양한 수자원 인프라를 개발중이며 날씨에 영향을 받지 않는 담수화, 재생수 개발과 더불어 빗물을 최대한 저장할 수 있는 지하저수지 기술 개발을 시행중. 이는 싱가포르의 좁은 국토를 입체적으로 사용하면서 수자원을 확보하는 데 효과적일 것으로 전망됨.

(2) 학술연구 현황

- 인공함양·지하저수지 관련 기술의 연구는 지속적인 증가 추세를 이어가고 있음. 특히, “managed aquifer recharge” 키워드 검색 결과를 보면 2010년 기준으로 인공함양 연구는 2017년까지 2.8배 증가하였으며 현재까지도 계속 증가 추세를 보이고 있음.
- 2018년 현재까지 인공함양·지하저수지의 다양한 수질 악영향과 조류, 미량오염물질 발생 대응 능력과 처리효과 연구가 지속되고 있으며 이에 따라 주입 원수에 따른 대수층 영향 등이 지속적으로 연구될 것으로 보임.

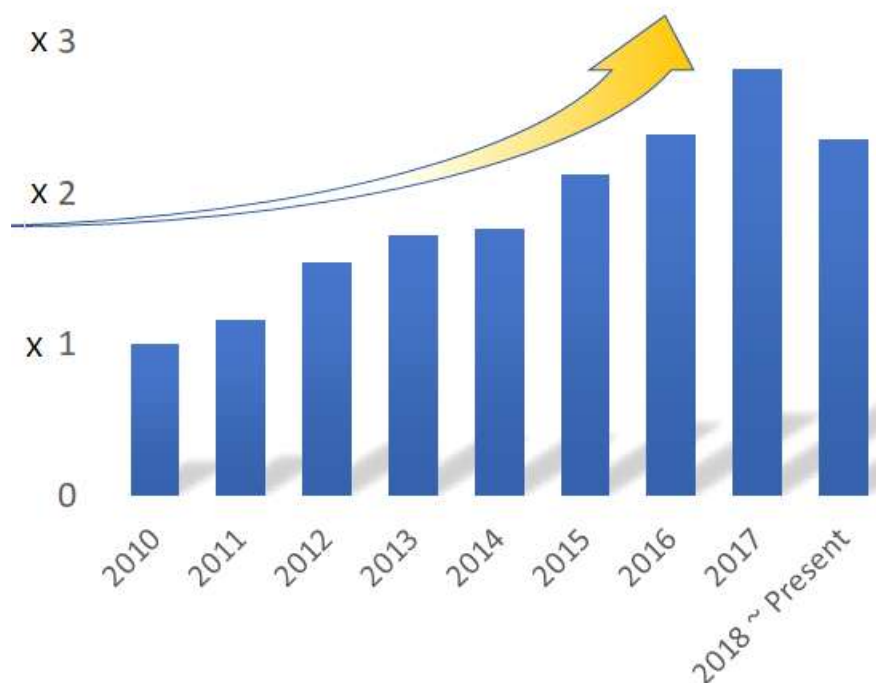


그림 11. 지하저수지·인공함양 관련 연구 증가 (Elsevier)

3. 본 연구의 차별화 방안

가. 본 연구의 차별성

(1) 연구 방법의 차별성

- 본 연구에서는 AOM, 미량오염물질과 소독부산물 전구물질 등을 고려하여 주입 원수 수질 악화를 이해하는 측면에서 주입 원수 변화와 전처리 케이스에 따른 생산수의 변화를 이해할 수 있음. 따라서 지하저수지의 효율성과 대응 능력 등을 파악하는데 다양한 변수를 고려한 연구로서 활용이 가능.
- Bench-scale 컬럼 장치를 이용하여 실제 스케일에서 파악하기 힘든 저장기간별 평가를 수행하여 경제적이고 효율적인 지하저수지 저장기간 설정 등에 기초 연구로 활용이 가능할 것이며 추후 스케일업(Scale-up) 연구에 적용할 경우 실증 지하저수지의 수질 변화 등에 기반하여 최적 저장기간을 설정하는 도구로서 활용성이 높다고 판단.
- AOC, BDOC를 관리 지표로서 첫 도입하여 자정작용으로 제거되는 유기물을 정성 및 정량적으로 제시하였으며, 특히 AOC는 지하저수지 생산수가 음용수로서 공급될 때 2차 오염 가능성을 판단하는 지표이기 때문에 시민들에게 미생물학적으로 더욱 안전하고 깨끗한 물을 공급하는데 해당 지표가 기여할 수 있을 것으로 예상함.

(2) 기대효과

- 본 연구를 통해서 지구 온난화 등 다양한 원인에 의한 수질 변화 및 악화에 따라 지하저수지를 대체 수자원으로 적용할 때 다양한 오염물질의 자정작용과 수질 개선 효과 등을 물리·화학적(탁도, TOC, DOC 등) 및 생물학적(AOC, BDOC) 지표로 종합 평가하는 방법을 제시할 수 있을 것으로 기대.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구 결과

가. 지하저수지 전처리 기술

(1) 전처리(오존, 오존+과산화수소) 케이스 별 수질특성

- 지하저수지 인공함양에서의 수질개선 연구에 사용된 인공함양 대상원수인 탄천원수, O_3 처리된 탄천수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리된 탄천수의 기초 수질, 특성분석과 DOC, SUVA 결과를 나타냄(표7, 그림12). 탄천원수의 DOC, SUVA 분석결과 약 3.8 mg/L, 1.7 L/mg·m로 나타남.
- 미국환경보건국에서는 소독부산물 생성 저감을 위해 음용수로 사용되어지는 원수의 DOC 농도를 2 mg/L 이하, SUVA 값을 2 L/mg·m로 권고하나(Kim and Dempsey, 2012), 탄천원수는 하수처리장 영향 등이 있는 하천으로 정수장 원수로 사용하기 전 다양한 처리가 필요할 것으로 보임(수질 등급: ‘약간 나쁨’).
- 지하저수지 인공함양의 효율 증진을 위해 사용되는 O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 전처리 공정에 따른 탄천원수 기초수질특성 변화를 보면 O_3 처리된 탄천수의 DOC는 3.6 mg/L, SUVA는 1.3 L/mg·m으로 나타남. O_3 처리 전 과 비교하였을 때 DOC는 5.3%, SUVA는 23.5%의 저감이 나타났으며, DOC 전체의 총량은 거의 변화가 없으나 SUVA 값에서는 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 오존의 선택적 산화 방법으로 인해 방향족 구조 분해 및 고분자 물질의 저분자화가 이루어져 UV 흡광도와 SUVA의 저감이 나타난 것으로 판단됨(Yan et al., 2007; Treguer et al., 2010).
- $O_3 + H_2O_2$ 처리된 탄천수의 DOC는 3.3 mg/L, SUVA는 1.5 L/mg·m으로 나타났으며, $O_3 + H_2O_2$ 처리 전 대비 DOC는 13%, SUVA는 11.8%의 저감을 나타냈으며, 이는 O_3 처리수의 결과와 비교하였을 때 O_3 처리수 대비 DOC의 저감은 크게 발생하지만, SUVA 값의 저감은 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있었음.
- O_3 산화방식은 주로 O_3 의 직접산화에 의한 방향족 물질의 고리구조를 분해하는 선택적 산화이지만, $O_3+H_2O_2$ 의 산화방식은 O_3 보다 산화력이 강한 OH라디칼의 지방족 물질 및 방향족 물질 모두 산화가 일어나는 비선택적 산화방식. 따라서 산화 메커니즘 및 산화력 차이에 의하여 $O_3 + H_2O_2$ 처리 수에서 O_3 처리수보다 큰 DOC 저감이 나타나는 것으로 판단됨.
- SUVA값의 경우 방향족 유기물질을 선택적으로 산화하는 O_3 과 달리 $O_3 + H_2O_2$ 에서는 방향족 유기물질과 지방족 유기물질의 저감이 같이 나타나기 때문에, 이로 인한 간접영향에 의해 O_3 보다 방향족 물질의 저감 효율이 낮은 영향으로 판단됨.

표 7. 원수와 전처리수의 수질 변화

Parameters	Unit	Raw water	O ₃	O ₃ + H ₂ O ₂
pH	-	8.3 ± 0.2	7.9 ± 1.5	7.8 ± 0.2
Conductivity	μs/cm	396 ± 78	275 ± 78	258 ± 78
DOC	mg/L	3.8 ± 0.8	3.6 ± 0.4	3.3 ± 0.3
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.08 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01
SUVA	L/mg · m	1.7 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.5 ± 0.1
Turbidity	NTU	20.1 ± 10.2	0.4 ± 0.2	0.24 ± 0.2
DO	mg/L	9.8 ± 0.7	12.5 ± 1.2	12.3 ± 1.8
ORP	mV	108 ± 24	378 ± 41	390 ± 37

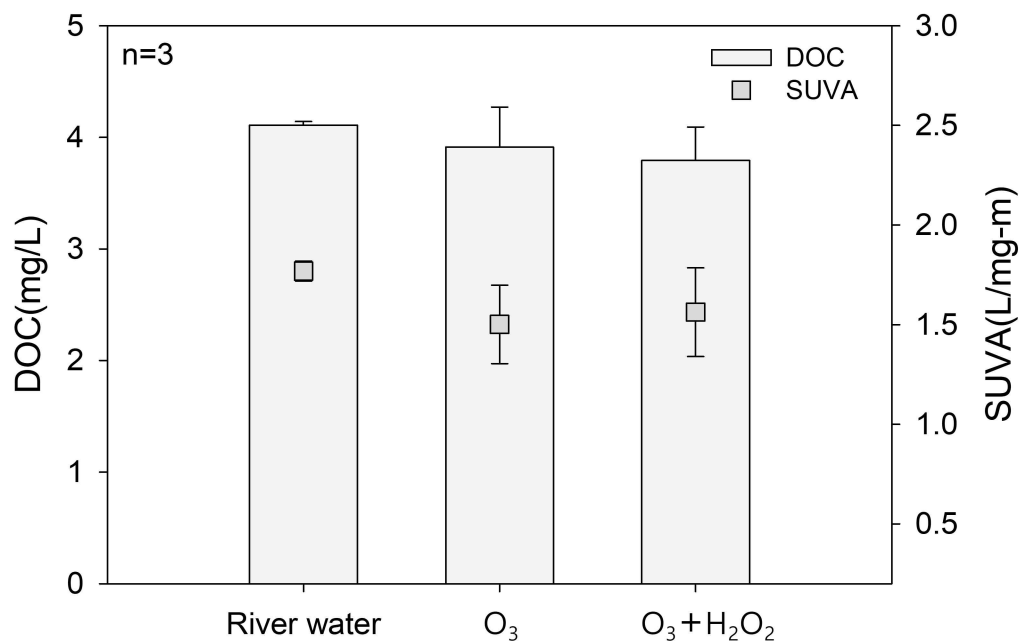


그림 12. 전처리 기법에 따른 DOC, SUVA

(2) 전처리(오존, 오존+과산화수소) 케이스 별 LC-OCD & EEM

- 탄천원수, O₃ 처리된 탄천수와 O₃ + H₂O₂ 처리된 탄천수의 LC-OCD 및 EEM 결과를 그림 13-14 및 표 8에 나타내었음. LC-OCD 분석 결과 탄천원수 대비 O₃ 처리수의 경우 Humic substances 와 Building blocks 부분은 각각 31.6%, 27.6% 저감이 되며, low molecular weight(LMW) neutrals 와 LMW acids 부분은 100.2%, 55.4% 증가되는 것을 확인.
- O₃ 산화에 의해 휴믹물질의 저감과 고분자 물질의 저분자화가 이루어진 영향으로 판단(Yan et al., 2007; Treguer et al., 2010; Molnar et al., 2013).
- O₃ + H₂O₂ 처리수의 경우 Humic substances 와 Building blocks 부분은 각각 24%, 30.2%, 저감이 되며, LMW neutrals 와 LMW acids 부분은 90.2%, 12.9% 증가되는 것을 확인함. 이는 OH라디칼의 산화에 의한 유기물 분해에 따라 고분자 물질의 저분자화가 나타난 영향으로 판단(Von Gunten et al., 1994).

- O_3 처리수 대비 $O_3 + H_2O_2$ 에서 LMW neutrals 와 LMW acids 영역의 증가량이 낮은 것($p < 0.05$)은 OH라디칼에 의한 산화에서 방향족 유기물질과 지방족 유기물질의 저감이 같이 나타나기 때문으로 판단.
- LMW neutrals 와 LMW acids 영역은 저분자 물질로서 알콜, 알데히드, 케톤 및 아미노산 계열 등의 유기물로 구성되어있다(Huber et al., 2002). 또한 저분자 유기물은 상대적으로 고분자 유기물과 비교하여 미생물이 빠르게 가용 가능하며, 동화유기탄소를 구성하는 주요 성분이다(Nawrocki et al., 2003). 따라서 $O_3 + H_2O_2$ 처리수 대비 더 많은 LMW neutrals 와 LMW acids를 갖는 O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수보다 생분해에 더 용이할 것으로 판단.
- EEM 분석 결과에서는 O_3 처리수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리수의 모든 형광에서 탄천원수 대비 약 40 ~ 75% 저감이 나타내는 것을 확인하였으며, 이는 O_3 과 $O_3 + H_2O_2$ 산화로 형광특성을 가지고 있는 방향족 유기물 구조가 분해되어 형광강도가 저감된 것으로 판단(소수현, 2016).
- O_3 처리수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리수의 EEM 영역별 형광강도를 비교해보면 O_3 처리수의 A Peak 과 C Peak에서 각각 2.2%, 1.9% 더 저감되는 것을 확인하였으며 T1 Peak, T2 Peak은 각각 10%, 2.3% 덜 저감되는 것을 확인할 수 있었다($p = 0.12$). 그러나 이러한 결과는 유의성 판단지표인 p-value값이 유의수준인 0.05보다 높은 값이 나타나는 것을 통하여 저감의 차이는 큰 차이가 없음을 확인.

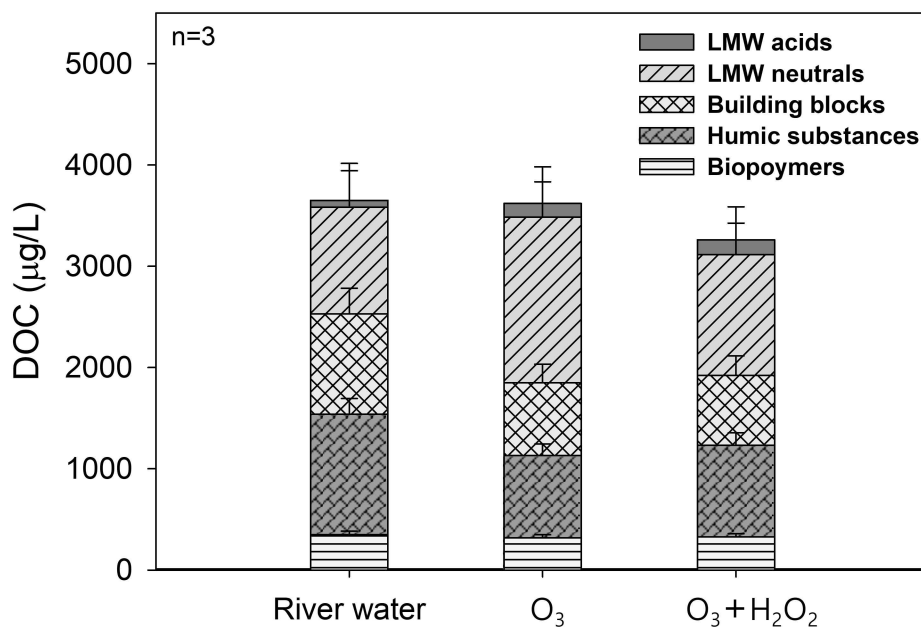


그림 13. 전처리 기법에 따른 LC-OCD 결과

표 8. 전처리 기법에 따른 LC-OCD 유기물 분획 함량 (%) (n=4)

	Bio polymers	Humic substances	Building blocks	LMW Neutrals	LMW Acids
O ₃ treated	9.0 (±0.9)	31.6 (±0.7)	27.6 (±0.7)	-55.4 (±1.0)	-100.2 (±1.0)
O ₃ + H ₂ O ₂ treated	6.3 (±0.9)	24.0 (±0.8)	30.2 (±0.8)	-12.9 (±0.9)	-90.2 (±0.9)

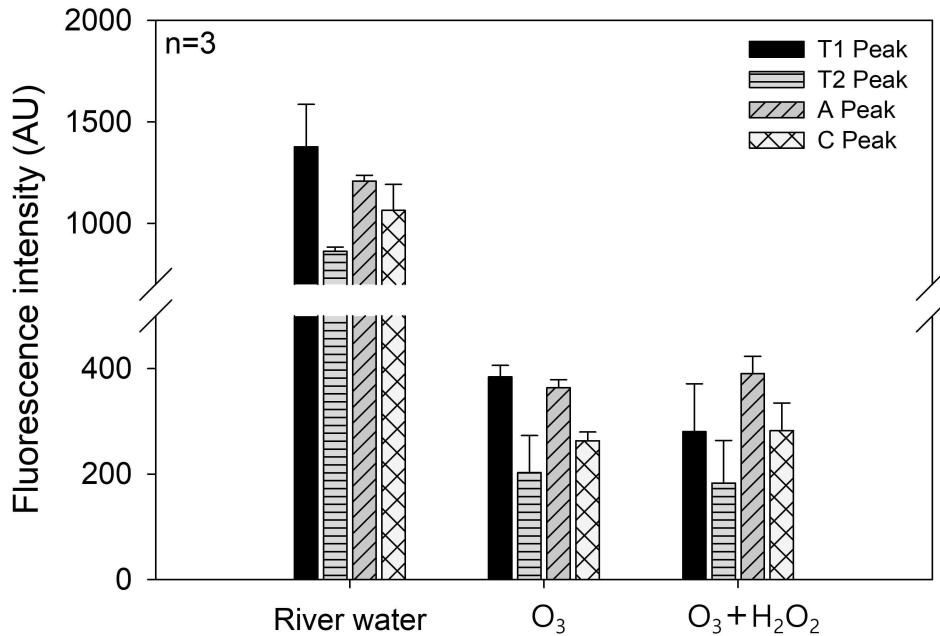


그림 14. 전처리 기법에 따른 EEM 형광 변화

(3) 전처리(오존, 오존+과산화수소) 케이스 별 BDOC & AOC

- 탄천원수, O₃ 처리된 탄천수와 O₃ + H₂O₂ 처리된 탄천수의 생분해성을 파악하기 위하여 생물학적 안정성 지표인 BDOC 및 AOC 분석 진행 및 결과를 그림 15에 나타내었음. 먼저 “BDOC 결과”를 보면 탄천원수는 1.2 mg/L O₃ 처리수는 2.4 mg/L O₃ + H₂O₂ 처리수는 2.2 mg/L로 나타났으며, 탄천원수 대비 O₃ 처리수는 2배, O₃ + H₂O₂ 처리수는 1.8배 증가.
- 전처리에 따른 산화에 의한 방향족 유기물 구조의 분해에 의한 소수성 유기물의 친수성화 와 유기물 분해에 따라 고분자 물질의 저분자화가 나타난 영향으로 판단(Von Gunten., 2003; Treguer et al., 2010; Molnar et al., 2013).
- AOC결과에서는 탄천원수 276.5 µg/L O₃ 처리수는 528.5 µg/L, O₃ + H₂O₂ 처리수는 380.8 µg/L로, 탄천원수 대비 O₃ 처리수는 1.9배, O₃ + H₂O₂ 처리수는 1.4배 증가.
- 전 처리에 따른 AOC의 증가 역시 산화에 의한 방향족 유기물 구조의 분해에 의한 소수성 유기물의 친수성화 및 유기물 분해에 따라 고분자 물질의 저분자화가 나타난 영향으로 판단.

- BDOC와 AOC 결과 모두에서 O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수에 비해 높은 값이 나타나는 경향이 나타났는데, 이는 $O_3 + H_2O_2$ 에서는 방향족 유기물질의 저감과 함께 미생물의 소비에 용이한 지방족 유기물질의 저감이 같이 나타나기 때문으로 판단된다. 또한 생분해성 지표인 BDOC 와 AOC를 통해 확인한 처리 원수의 생분해성 결과에서는 O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수보다 높음을 확인.
- 탄천원수, O_3 처리된 탄천수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리된 탄천수의 AOC 값을 이용하여 전체 DOC 중에서 동화가능한 용존유기탄소의 비율인 생체이용률을 계산함(Leigh et al., 2018; 박지원, 2016; 이원모, 2016). 탄천원수의 생체이용률은 6.7%, O_3 처리수의 생체이용률은 13.5% 그리고 $O_3 + H_2O_2$ 처리수의 생체이용률은 10%로 나타났음($p < 0.05$). 탄천원수 대비 생체이용률이 O_3 처리수는 2배 그리고 $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 1.5배로 증가하는 것을 확인.

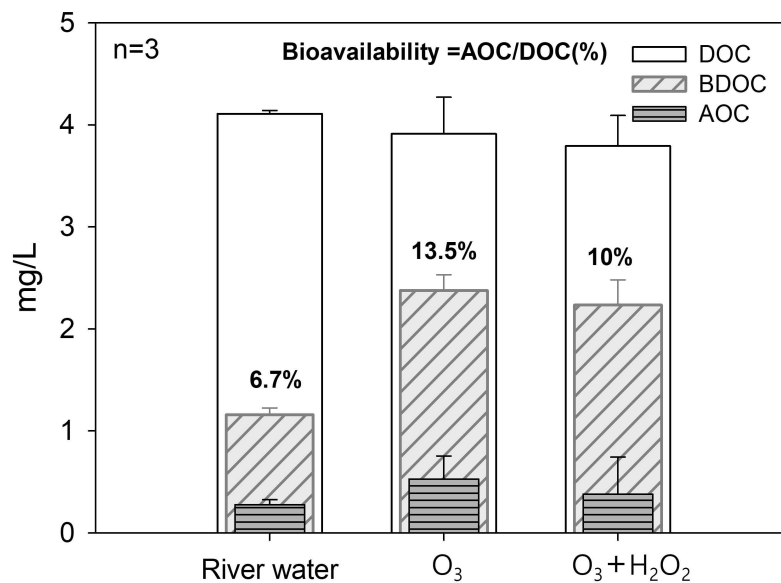


그림 15. 전처리 기법에 따른 AOC, BDOC 및 생분해율 변화

(4) 전처리(오존, 오존+과산화수소) 케이스 별 ATP & TCC

- Adenosin Tri-phosphate(ATP)는 미생물의 에너지 대사 단위로, Total ATP와 Free ATP를 분석을 통하여 Cellbound ATP도 환산할 수 있으며, 이를 통해 미생물의 에너지 대사 능력 및 활성도를 판단.
- 탄천원수, O_3 처리수 그리고 $O_3 + H_2O_2$ 처리수의 Total ATP를 Cellbound ATP와 Free ATP로 나누어 그림 16에 나타내었음. 탄천원수의 Total ATP는 평균 $1,850 \pm 150$ ng ATP/L, Cellbound ATP는 평균 $1,350 \pm 97$ ng ATP/L를 나타내 Total ATP의 약 73%를 차지함을 확인.
- O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 의 경우 산화에 따른 강한 살균효과로 미생물 세포막이 손상되어 방출된 세포외 ATP(Extracellular ATP)에 의해 탄천원수 대비 Cellbound ATP는 각각 94.6%, 96.2%의 저감율을 나타냈으며, Free ATP는 각각 295.4%, 271.8% 이상의 증가율을 나타냄.

- 탄천원수와 O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 처리에 따른 미생물 세포수의 변화를 확인하기 위하여 FCM 분석을 진행하였고, 그림 17에 나타내었음. 탄천원수의 미생물 총 세포 수는 평균 6.10×10^6 cells/mL가 검출되어졌으며, low nucleic acid-content(LNA), high nucleic acid-content(HNA), Damaged cell의 비율은 평균 35.4%, 47.9%, 16.7%로 나타남.
- O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 처리 이후 총 세포 수는 각각 3.74×10^6 cells/mL, 3.57×10^6 cells/mL로 탄천원수 대비 저감율은 각각 38.7%, 41.5%를 나타남.
- O_3 처리, $O_3 + H_2O_2$ 처리방법에 따른 LNA, HNA의 제거율을 보면 LNA에서는 각각 98.5%, 98%의 저감이 나타났고, HNA에서는 각각 98.7%, 99.1%의 저감이 나타났음. 또한 Damaged cell의 경우 각각 360.4%, 350.7%의 증가율이 나타나는 것을 확인하였음. 이는 O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 산화로 Intact cell(LNA, HNA)이 파괴되거나 산화되어, Damaged cell영역에 나타났기 때문으로 판단.

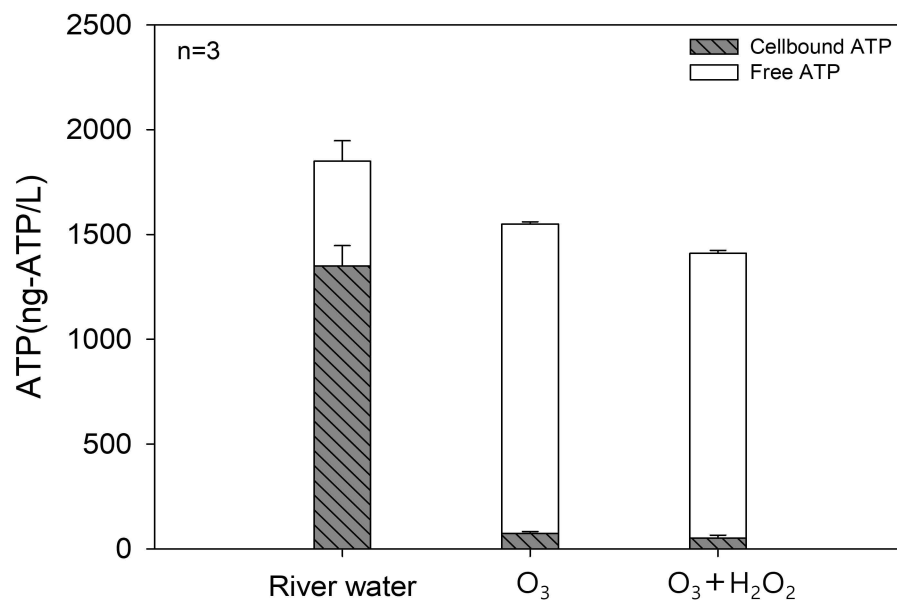


그림 16. 전처리 기법에 따른 cellbound ATP 감소

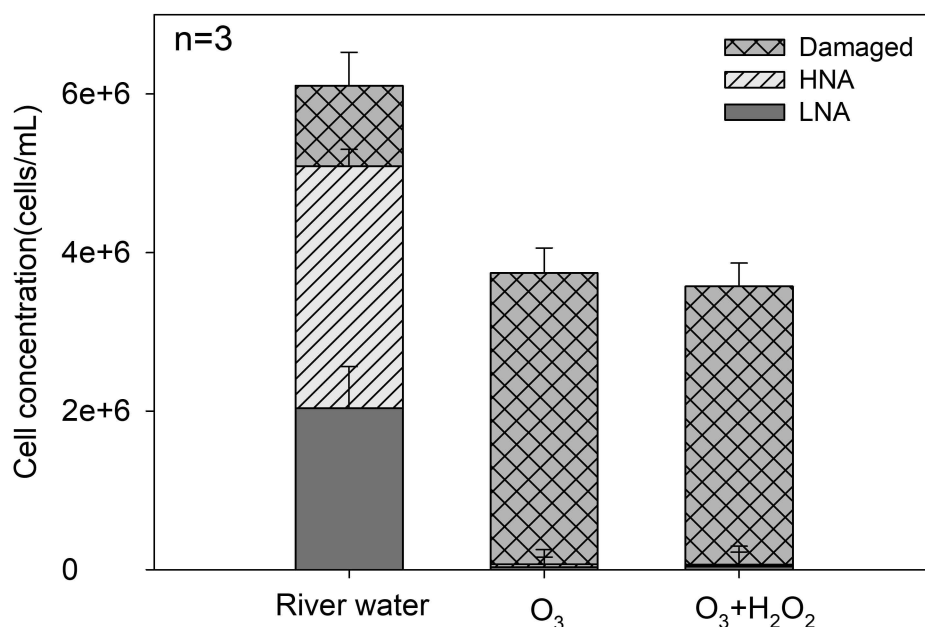


그림 17. 전처리 기법에 따른 Damaged cell 증가

(5) 전처리(오존, 오존+과산화수소) 케이스 별 소독부산물 생성능

- 탄천원수, O_3 처리된 탄천수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리된 탄천수의 기타수질 인자로서 소독부산물 생성능을 파악하기 위하여 U.S EPA에서 제시한 U.S EPA Method 551.1을 이용하여 소독부산물 중 THM에 관하여 분석을 진행하였음.
- 탄천원수에서는 $103.1 \mu\text{g/L}$ 의 값이 나타났으며, 이는 U.S EPA에서 제시하는 최대 THM 기준 농도인 $80 \mu\text{g/L}$ 를 초과하는 결과였다. O_3 처리수에서는 $61.8 \mu\text{g/L}$, $O_3 + H_2O_2$ 처리수에서는 $80.8 \mu\text{g/L}$ 로 각각 40%, 22% 저감이 나타나는 것을 확인.
- THMFPs의 저감은 THM 종중에서 지배적인 부분을 차지하는 $CHCl_3$ 의 감소 정도에 의해서 결정될 수 있으므로 전처리 방법에 따른 $CHCl_3$ 의 저감율을 추가로 확인. O_3 처리수의 결과는 약 45.6%, $O_3 + H_2O_2$ 처리수에서는 26.8%의 저감이 나타남($p < 0.05$). O_3 처리수에서의 THM의 45.6% 저감은 O_3 처리를 통해 THM을 40% 이상 저감이 가능하다는 기존 연구 결과와 상응하는 것을 확인(Chang et al., 2002).
- O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 처리에 의하여 소독부산물의 전구물질로 알려진 Humic 부분의 저감과 유기전구물질의 제거 이외에도 구조적 변형에 의한 영향으로 제거가 가능한 영향으로 판단(Kim and Yu, 2005).
- 소독부산물 생성의 전구물질 제거의 영향을 확인하기 위하여 LC-OCD 결과를 보면, O_3 처리수에서는 Humic 부분이 31.6% 저감이 나타나며, $O_3 + H_2O_2$ 처리수에서는 24%의 저감이 나타나는 것을 비교 가능함.
- 유기물질의 구조적 변형을 파악하기 위하여 그림 1의 DOC와 SUVA 결과를 보면 O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 처리 결과에서 하천수 대비 DOC 저감은 거의 나타나지 않는 반면, SUVA 값은 상대적으로 크게 감소하는 것을 통하여, 유기물질의 구조적 변형이 이루어졌음.

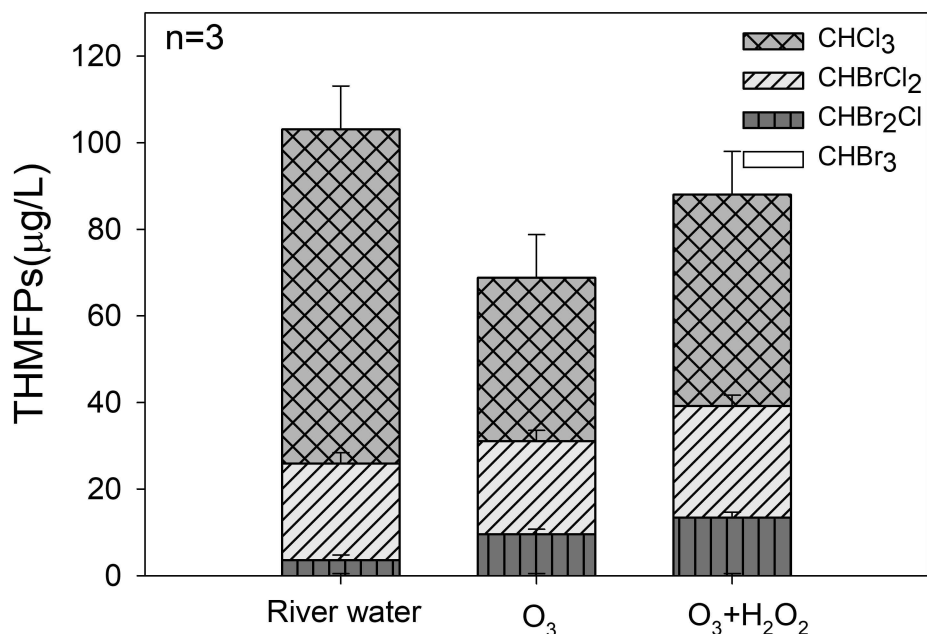


그림 18. 전처리 기법에 따른 THMFPs 변화

(6) 전처리(오존, 오존+과산화수소) 케이스 별 잔류의약품질

- 전처리 방법 및 지하저수지 내 함양 기간에 따른 잔류의약품질의 거동을 파악하기 위하여 11종의 의약품질에 한하여 Stock solution을 만들어 실험을 진행함. 실험 결과(그림 19) 전처리 산화공정 없이 지하저수지 내 함양 1일의 공정 결과를 통해서도 Carbamazepine을 제외한 10 종의 의약품질에서 71~100%의 높은 제거율이 나타나는 것을 확인.
- 이는 친수성 및 소수성의 ionic한 성질을 가진 잔류의약품질과 친수성의 neutral한 성질을 가진 잔류의약품질 모래여과를 통해 저감이 잘 되는 것을 확인하였음. 이러한 결과는 기존 Maeng et al.,(2011)의 결과에서도 생물학적 조건의 강변여과 모사 컬럼에서 ionic 한 성질 및 친수성의 neutral한 잔류의약품질의 저감율이 59% 이상 나타난 것과 유사한 결과.
- 소수성의 neutral한 성질을 가진 carbamazepine의 경우 지하저수지 내 함양 후 약 3% 저감율을 통하여 생물학적으로 저감이 어려움을 확인. 또한 이러한 결과는 기존 연구들에서 같은 경향을 나타냄(Kim et al., 2015).
- O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 산화공정 후의 잔류의약품질 저감 결과에서 잔류의약품질 11종에서 35~100%의 저감율이 나타나는 것을 확인하였음. 특히 11종 중 Cabamazepine, naproxen 및 Gemibrozil은 O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 산화공정 후 95% 이상 저감됨.
- 이는 Cabamazepine, naproxen 및 Gemibrozil의 경우 O_3 산화 및 OH 라디칼에 의한 분해속도상수는 O_3 산화에서는 각각 $3 \times 10^5 M^{-1}s^{-1}$, $2 \times 10^5 M^{-1}s^{-1}$, $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^4 M^{-1}s^{-1}$ 로 나타나며, OH 라디칼에서는 각각 $8.8 \times 10^9 M^{-1}s^{-1}$, $9.6 \times 10^9 M^{-1}s^{-1}$, $10 \times 10^9 M^{-1}s^{-1}$ 로 알려져 있으며, 이는 다른 의약품질들에 비하여 높은 수치로 구분되어 이에 따른 영향으로 O_3 산화 및 OH 라디칼에 의한 저감에 효과가 좋은 것으로 판단.
- Caffein의 경우 O_3 처리수에서는 35%의 저감이 $O_3 + H_2O_2$ 처리수에서는 72%의 저감이 나타나는 것을 통하여 Caffein 저감에 있어 $O_3 + H_2O_2$ 처리수가 더 효율적인 것을 확인하였음. 이는 Caffein의 화학구조가 Purine으로 명명되는 Pyrimidine ring + Imidazole 구조가 결합된 고리구조로 되어있으며, 이러한 구조들은 O_3 처리에 있어 저항성이 있어 상대적으로 저감효과가 적은 것으로 판단.
- 기존에 O_3 과 OH 라디칼에 의한 의약품질의 저감율은 반응속도상수와 비례하다고 보고되고 있다(Lee et al., 2013). 이를 통하여 O_3 와 OH 라디칼에 대한 반응속도상수를 비교하면 O_3 의 반응속도는 Purine과 Pyrimidine에 대한 반응속도상수는 $0.76 \times 10^3 \sim 6.8 \times 10^3 M^{-1}s^{-1}$ 으로 보고되며(Nompex et al., 1991), Caffeine에 대하여는 $5.73 \times 10^2 M^{-1}s^{-1}$ 로 보고되었다(Broseus et al., 2009). 반면에 OH 라디칼에 대한 반응속도상수를 보면 Caffeine의 경우 $5.9 \sim 6.9 \times 10^9 M^{-1}s^{-1}$ 로 O_3 보다 높은 반응속도를 보이는 것을 확인함(Broseus et al., 2009). 이를 통하여 OH 라디칼이 Caffein 분해에 더 효율적임을 확인.

- 전처리 공정 이후 함양을 통해 모든 의약품물질에서 99%이상의 저감하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 O_3 , $O_3 + H_2O_2$ 산화를 통해 생분해 힘든 구조를 가진 의약품물질의 구조가 분해되어짐으로서, 생분해 속도 및 가능성을 증가시키며 이후 함양을 통해 저감되어지는 제거효과를 나타내는 것으로 판단(Drewes and Jekel, 1998; Huber et al., 2003; Yoon et al., 2013).

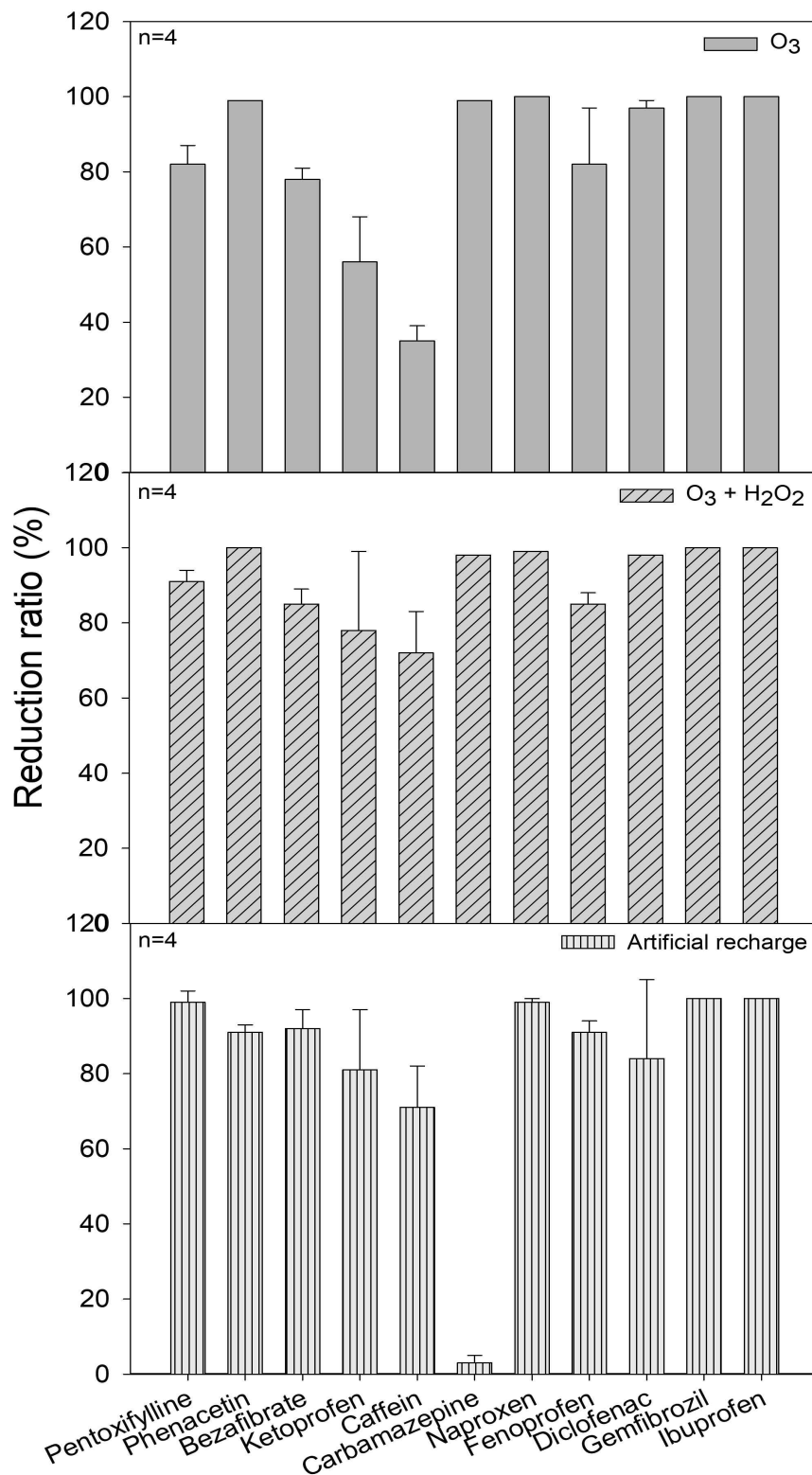


그림 19. 전처리 산화와 인공함양 잔류의약품물질 제거율 비교

나. 지하저수지 함양기간 연구

(1) 지하저수지 함양기간 (1, 5, 15, 30일)별 DO & ORP

- 함양기간에 따른 DO 값과 ORP 값을 고려할 때(그림 20) 두 전처리 샘플 모두 함양기간이 장기화되면서 DO 농도가 저감하는 것이 확인되었으며, 이는 지하저수지 내에 존재하는 미생물들의 소비에 의한 영향으로 판단.
- 기존 연구에서 제시되는 산소조건을 DO 농도에 따라 표 9에 표시함. 기존 표에 근거하여 O_3 처리수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리수 모두 함양 기간 5일까지는 호기 조건으로 판단되며, 함양 15일 이후부터는 무산소 조건으로 접어드는 것으로 예상됨(Diaz et al., 1995).
- ORP 값(그림 21) 역시 두 전처리 샘플 모두 함양기간이 장기화되면서 값이 저감하는 것이 확인되었으며, 이는 지하저수지 내에 존재하는 미생물들의 산소 소비에 따른 영향으로 판단됨. 기존 연구에서 제시되는 ORP 조건에 따른 산소조건을 표 4에 표시.
- 기존 표에 근거하여 O_3 처리수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리수 모두 함양 기간 5일까지는 호기 조건으로 판단되었으며, 함양 15일 이후부터 ORP 값이 200 mV 이하로 접어드는 것을 통해 무산소 조건으로 접어드는 것으로 판단.

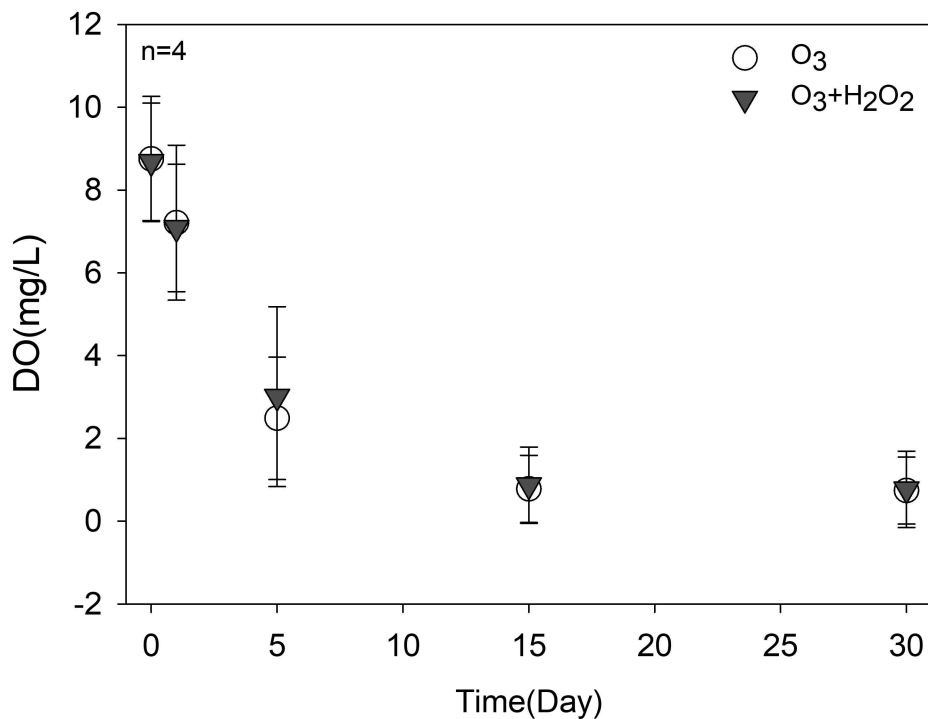


그림 20. 저장기간별 DO 변화

표 9. DO 농도에 따른 호기, 무산소 조건 구분

	Aerobic condition	Low Aerobic condition	Anoxic condition
DO value (mg/L)	> 2	3 - 0	< 0

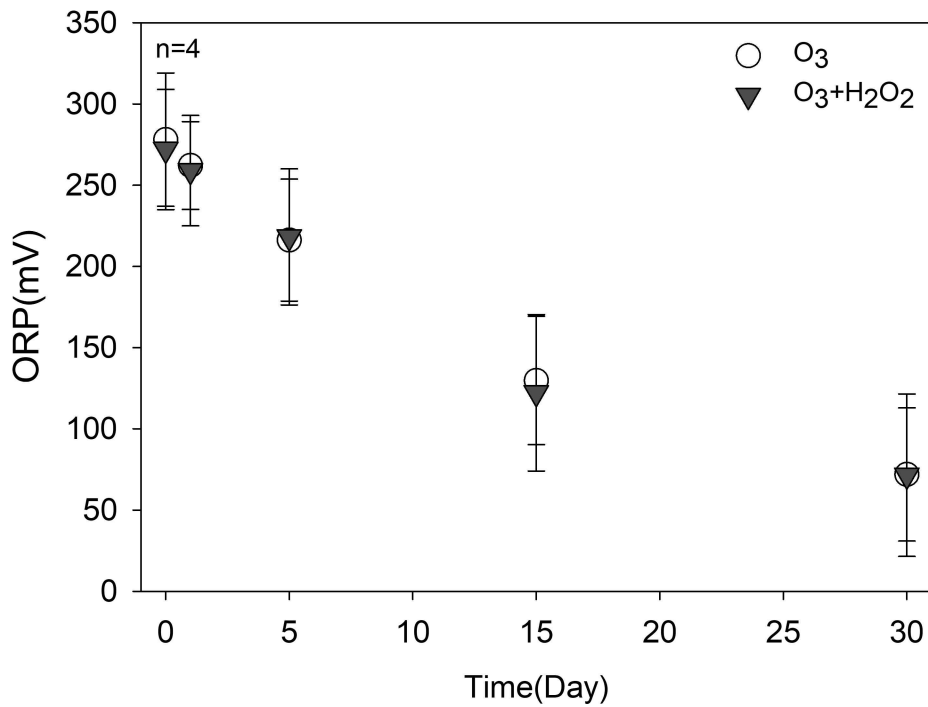


그림 21. 저장기간별 ORP

표 10. ORP에 따른 호기, 무산소, 혐기 조건 구분

	Aerobic condition	Anoxic condition	Anaerobic condition
ORP value (mV)	> 200	200 - 50	< 50

(2) 지하저수지 함양기간 (1, 5, 15, 30일)별 ATP 및 TCC

- 지하저수지 함양에 있어 전처리 이후 함양기간에 따른 미생물의 에너지 대사 능력 및 활성도를 파악하기 위하여 ATP를 측정하였음. 전처리 함양 공정에서 Total ATP는 함양 전과 비교하여 약 50% 이상 저감되는 것을 확인하였으며, 이는 지하저수지 함양과정에서 모래여과 및 흡착에 의한 미생물 저감 영향으로 판단
- Cellbound ATP는 함양 전과 비교하여 함양 1일에서는 약 10배 이상 증가하였으며, 함양기간이 장기화되면서 함양 1일 때 증가된 Cellbound ATP 기준으로 저감하는 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었음. 이는 함양기간동안 지하저수지 컬럼 모래층에 부착되어있는 토착미생물의 유출에 의한 영향으로 판단(소수현, 2016; 이원모, 2016).

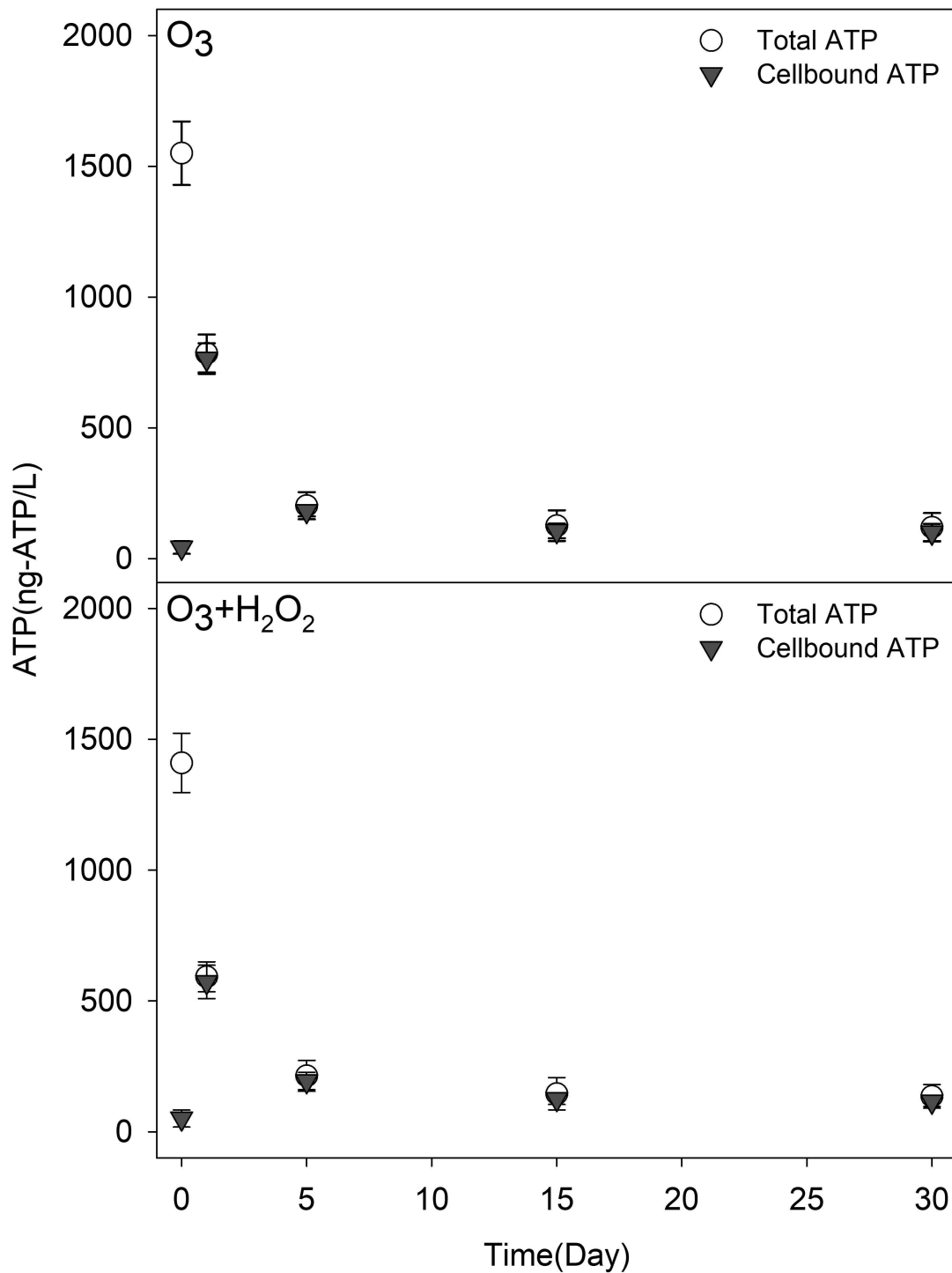


그림 22. 저장기간별 Total & cellbound ATP

- 유입수가 컬럼을 통과하면서 컬럼 내 미생물에 의한 유기물의 저감으로 빈 영양 환경이 조성되며, 이로 인한 영향으로 미생물의 활성도를 나타내는 Cellbound ATP의 저감이 나타난 것으로 판단.
- O₃ 및 O₃ + H₂O₂ 처리 후 컬럼 통과를 거치면서 총세포의 수는 저감되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 함양과정에서 모래여과 및 흡착에 의한 미생물 저감 영향으로 판단됨(Vital et al., 2012).

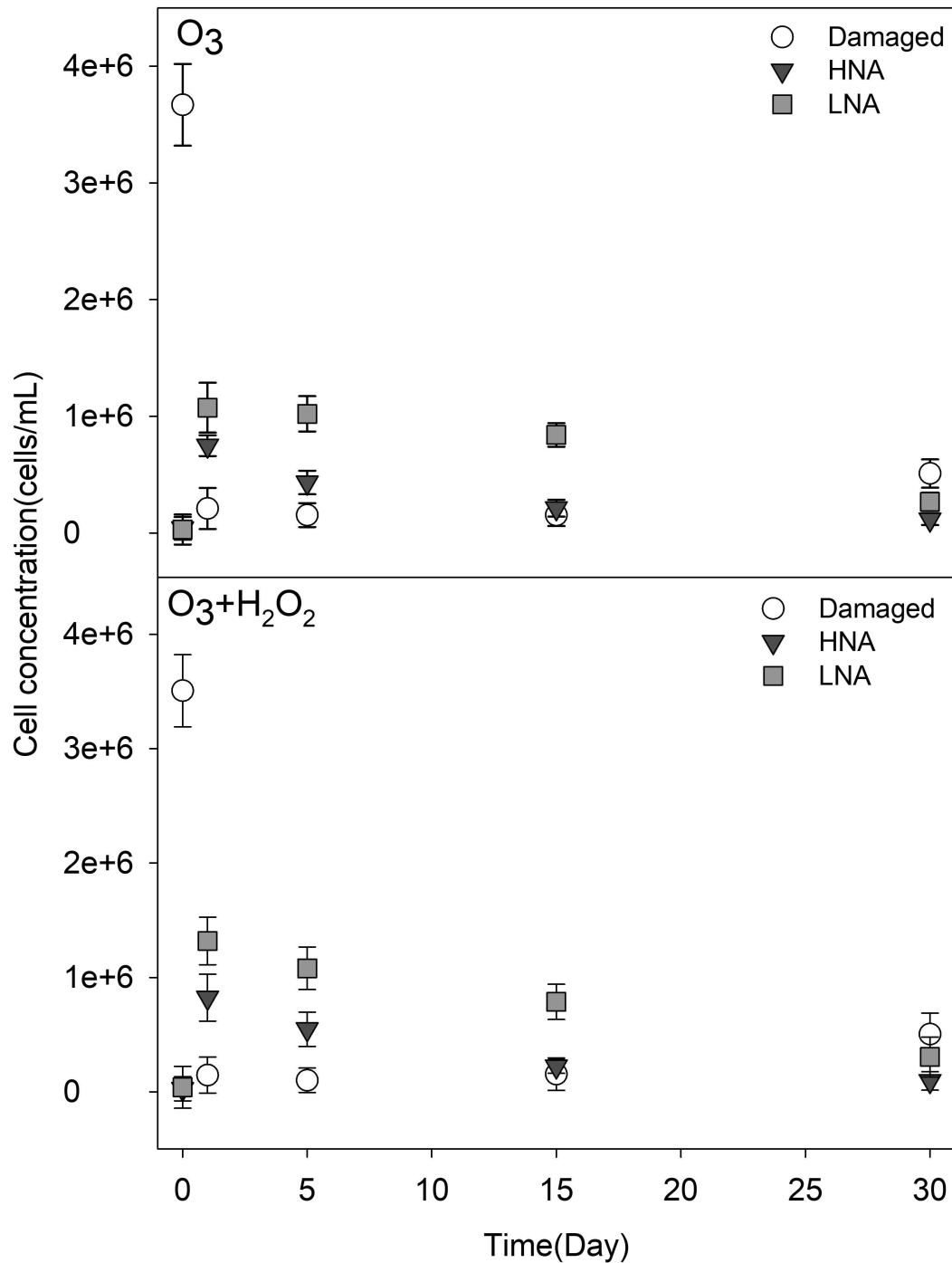


그림 23. 저장기간별 총세균수(intact HNA, LNA & damaged cell) 변화

- O_3 및 $O_3 + H_2O_2$ 처리 후 함양기간에 따른 HNA, LNA 및 Damaged 영역의 비율을 보면, 지하저수지 상단에서는 HNA 영역이 약 30% 정도 LNA 영역이 약 50% 정도로 있으나 하단부로 내려오면서 HNA영역의 비율이 저감되고 LNA 비율이 증가.
- HNA영역은 활성 및 성장 세포로서 Cellbound ATP와 큰 상관성을 보이는 영역이며(Gasol and Del Giorgio., 2000; Liu et al., 2013; Magic-Knezev et al., 2009), 본 연구에서 $R^2=0.87$ 로 상관성이 높음을 확인. LNA 영역은 HNA와 비교하여 비활성, 휴면 세포. 지하저수지 상단에서는 높은 활성도를 나타내지만 하단부로 이동하면서 ATP 등 세포의 활성도가 감소하면서 LNA 증가와 관계있는 것으로 판단됨.

- 지하 저수지 하단부로 오면서 미생물이 수원 내 존재하는 영양분을 이미 소비하여 점차적으로 수원 내 환경이 빈 영양 상태가 되었을 것으로 판단되며, 빈영양 상태가 되면서 미생물들이 가지고 있는 핵산소비에 따른 핵산량 감소에 의해 LNA 미생물 그룹이 우점화가 되는 경향이 나타는 것으로 판단(Jochem et al., 2004; Longnecker et al., 2005).

표 11. 전처리와 저장기간에 따른 ATP 증감

	Retention time (Day)	Total ATP (%)	Cellbound ATP (%)
O ₃	1	49.4 (±25.7)	- 1678.8 (±75.2)
	5	86.9 (±21.4)	- 325.6 (±21.5)
	15	91.8 (±8.7)	- 147.5 (±11.2)
	30	92.2 (±6.1)	- 133.5 (±8.2)
O ₃ + H ₂ O ₂	1	58 (±38.2)	- 1023.1 (±64.5)
	5	84.8 (±42.6)	- 280.6 (±23.2)
	15	89.7 (±18.1)	- 146.6 (±7.8)
	30	90.4 (±4.8)	- 127 (±10.0)

Cellbound ATP vs HNA

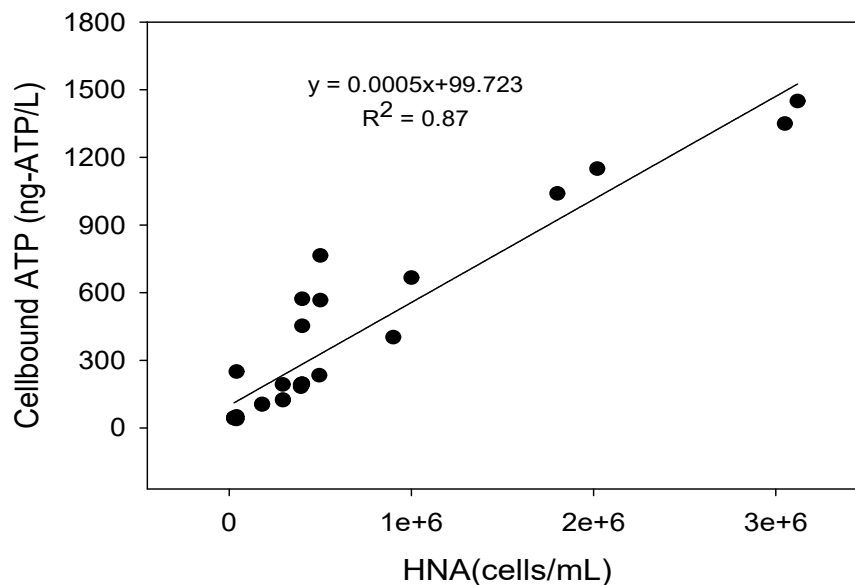


그림 24. Cellbound ATP와 intact HNA cell의 상관성

(3) 지하저수지 함양기간 (1, 5, 15, 30일)별 DOC 및 SUVA

- 지하저수지 함양에서 전처리 이후 함양기간에 따른 DOC 분석을 진행하였음. O₃ 처리수의 경우 함양 5일 이내에 DOC 농도가 50%이상 저감이 되는 것을 확인 할 수 있었음. LC-OCD 결과에서 확인한 것처럼 O₃ 처리 이후 고분자 물질들의 저분자화가 발생하면서 미생물의 소비에 용이한 저분자 물질들이 증가된 영향으로 판단(Molnar et al., 2013; Treguer et al., 2010).
- 함양기간동안 미생물의 소비에 의해 DOC가 저감된 것으로 판단됨. O₃ + H₂O₂ 처리수의 경우 O₃ 처리수와 마찬가지로 미생물의 소비에 의해 함양기간에 따른 DOC

저감이 나타나는 것을 확인. 또한 함양 5일 기준 유입수대비 저감이 47.9%로 O_3 처리수 대비 저감효율이 낮음을 확인 할 수 있었는데($p < 0.05$), $O_3 + H_2O_2$ 처리수가 O_3 처리수대비 생분해성 측면에서 낮은 영향으로 인하여 미생물에 의한 분해가 느리게 나타나는 것으로 판단.

- 함양기간에 따른 DOC 분해속도상수를 보면 함양 5일 이내의 분해 속도와 5일 이후부터 30일 이내의 분해 속도를 비교하였을 때, 함양 5일 이내에 DOC 농도가 빠르게 저감하며, 이후에는 상대적으로 거의 저감이 나타나지 않음을 확인 할 수 있었음. 이는 함양 초기 미생물의 분해에 용이한 유기물질들의 분해가 이루어지며 이후에는 상대적으로 느리게 분해가 이루어지는 유기물질들이 제거될 가능성.
- 수용액 속에서 상대적인 방향족 화합물의 지표로 이용되는 SUVA 값의 결과를 함양기간별로 보았을 때, 두 전처리 공정 모두함양 5일까지의 결과에서 SUVA 값이 유입수 대비 증가하는 것을 확인. 이는 지하저수지 대수층을 이용한 처리에서 상대적으로 분해가 쉬운 지방족물질이 방향족 물질보다 생물학적으로 분해가 먼저일어나 제거가 된 영향으로 판단됨(Grünheid et al., 2005).
- 함양 15일 이후로는 두 전처리 방법 모두 증가되던 SUVA 값이 감소되는 경향을 나타내는 것을 확인 할 수 있었음. 이는 무산소 조건에서는 상대적으로 분해속도가 느린 물질인 방향족 화합물의 제거가 더 용이한 영향과 함께 함양이 장기화 되면서 상대적으로 미생물이 빠르게 분해가 힘든 유기물질들의 저감이 나타난 영향으로 판단.
- 미국 콜로라도 South Platte river에서 실시한 대수층 함양 파일럿 실험에서도 함양이 장기화 되면서 SUVA 값이 감소되는 결과를 나타내는 등 본 실험과 유사한 경향이 나타날 수 있음을 확인(Hoppe-Jones et al., 2010).

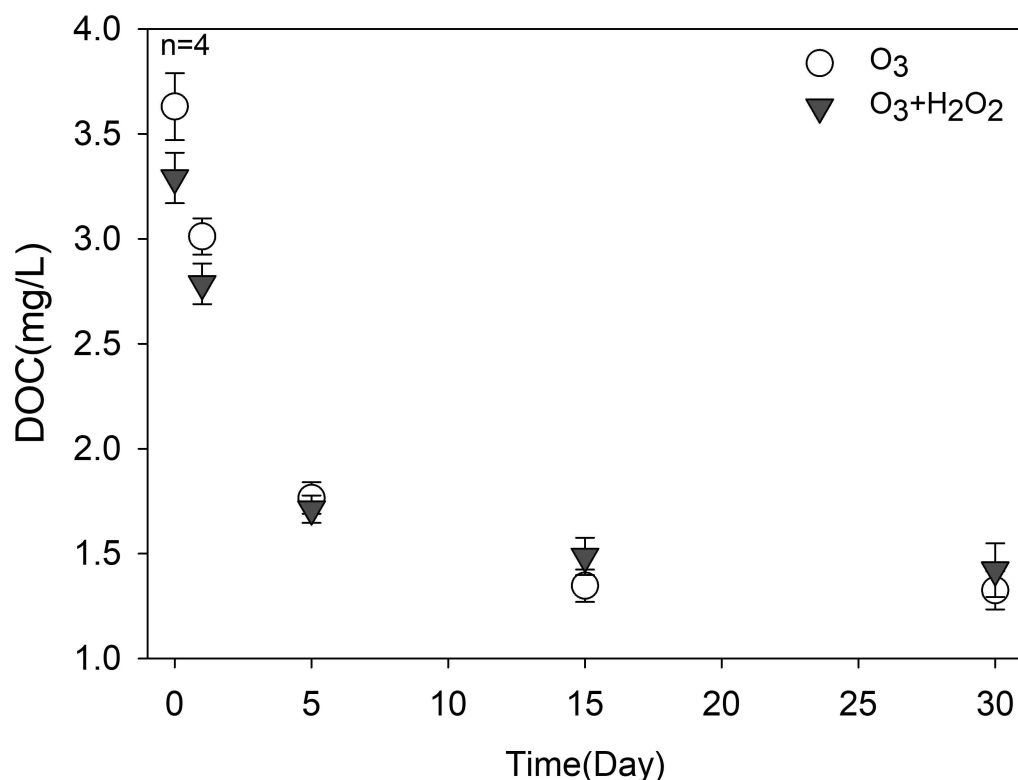


그림 25. 저장기간별 DOC

표 12. 전처리 및 저장기간별 DOC 제거율 및 분해상수 K (n=4)

	Retention time (Day)	DOC (%)	K (mg/day)	
O ₃	1	17 (±8.2)	0.07 (K _{In-30})	0.10 (K ₁₋₁₅)
	5	53.1 (±2.8)		
	15	63.2 (±3.4)		0.01 (K ₅₋₃₀)
	30	64.6 (±21.2)		
O ₃ + H ₂ O ₂	1	15.3 (±6.2)	0.05 (K _{In-30})	0.08 (K ₁₋₁₅)
	5	47.9 (±3.2)		
	15	54.8 (±28.7)		0.02 (K ₅₋₃₀)
	30	56.1 (±14.3)		

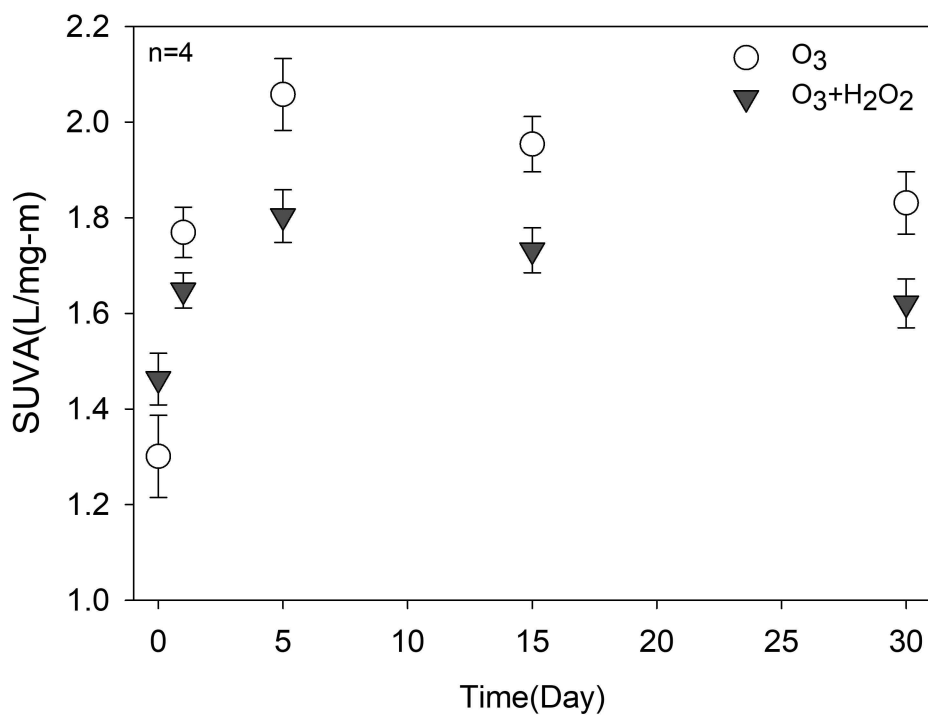


그림 26. 저장기간별 SUVA 변화

(4) 지하저수지 함양기간 (1,5,15,30일)별 EEM-PARAFAC

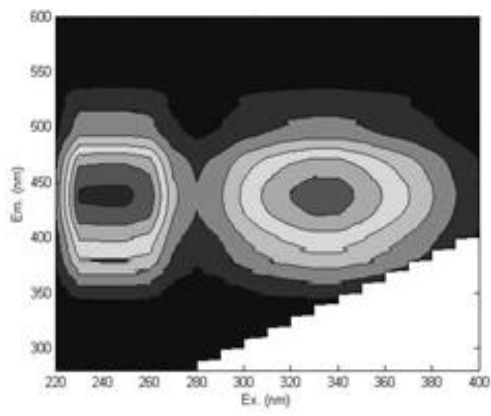
- 지하저수지 함양에서 전처리 이후 함양기간에 따른 유기물 형광특성 파악을 위하여 유기물 형광분석인 EEM 분석과 EEM data를 PARAFAC 모델링 프로그램을 통하여 통계적인 비교 분석을 진행하였고(그림 27), 총 5개의 Component를 추출(그림 27, 표 13). 함양기간에 따른 형광 특성별 분해속도상수를 나타냄(표 14). 각각 Component 형광강도는 모델링 프로그램에서 Component별 형광강도의 최대치 기준 표준화를 통하여 Fmax 값으로 표시.
 - Component 1, 2, 3, 4는 Humic 계열의 형광 특성이었으며, Component 5는 Tryptophan 계열의 형광특성이었음. O₃ 처리수의 함양기간별 Component 결과를 보면 Humic 계열로 표시되는 Component 1에서는 함양 초기 5일 이내에서는 Fmax 값이 0.3 이내의 변화로 거의 나타나지 않았으며, 15일에서 30일 사이에는 Fmax 값이 1.4 정도로 상대적으로 큰 저감이 나타나는 것을 확인.
 - Humic 계열로 표시되는 Component 2, 3, 4 는 함양기간 동안 거의 변화가 나타나지 않았으며, Tryptophan으로 표시되는 Component 5에서는 함양 5일 이내에 Fmax 값 3 정도의 저감이 나타났으며, 5일 이후부터 30일까지 Fmax 값 0.5 이내로 상대적으로 거의 저감이 나타나지 않음을 확인.
 - 분해속도상수를 형광에 민감한 생물학적으로 분해가 쉬운 유기물질과(Readily biodegradable fluorescent organic matter)과 형광에 민감한 생물학적으로 분해가 느린 유기물질(Slowly biodegradable fluorescent organic matter)로 구분지어 비교한 결과에서 Component 5의 경우 생물학적으로 분해가 쉬운 유기물질의 분해속도가 생물학적으로 분해가 느린 유기물질 부분의 분해속도보다 4배 이상 높음을 보였으며 DOC 결과와도 일치하는 경향.
 - O₃ + H₂O₂ 처리수의 함양기간별 Component 결과를 보면 Humic 계열로 표시되는 Component 1에서는 함양 초기 5일 이내에서는 Fmax 값이 0.2 이내의 변화로 거의 나타나지 않았으며, 15일에서 30일 사이에는 Fmax 값이 1.2 정도로 상대적으로 큰 저감이 나타나는 것을 확인.
 - Humic 계열로 표시되는 Component 2, 3, 4 는 O₃ 처리수와 유사하게 함양기간동안 거의 변화가 나타나지 않았으며, Tryptophan으로 표시되는 Component 5에서는 함양 5일 이내에는 Fmax 값이 2 정도의 저감, 5일에서 15일 사이에는 Fmax 값 1 정도의 저감이 나타났으며, 그리고 15일 이후부터 30일 까지는 Fmax 값 0.2가 저감되는 것을 확인. 또한 분해속도상수측면에서 보면 O₃ 처리수 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인.
-

표 13. PARAFAC 모델링에 의한 component 추출

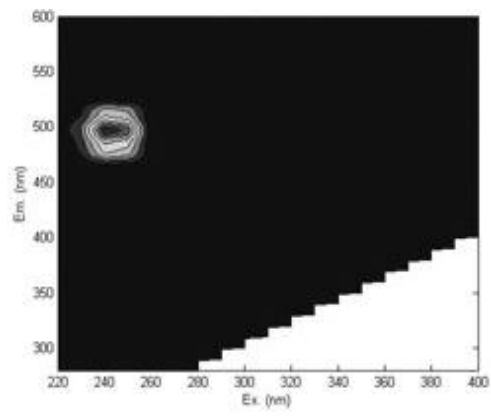
	Excitation (nm)/ Emission (nm)	Component	References
Component 1	240/ 410 - 460	Humic - like Fulvic - like	Baker and Lamont-Black, 2001; Cory et al., 2007; Colin et al., 2003
Component 2	240/ 450 - 460	Humic - like	
Component 3	230/ 400 - 500	Humic - like	
Component 4	260/ 500	Humic - like	
Component 5	230 - 280/ 336 - 350	Tryptophan - like	Coble., 2007

표 14. EEM-PARAFAC Component의 분해상수 비교 (n=55)

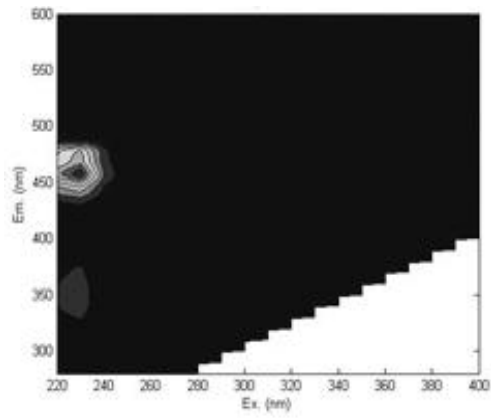
	Reten tion time (Day)	Component 1		Component 2		Component 3		Component 4		Component 5	
		K _{C1} (R.U/day)		K _{C2} (R.U/day)		K _{C3} (R.U/day)		K _{C4} (R.U/day)		K _{C5} (R.U/day)	
O ₃	1	0.07 (K _{n-3})	0.05 (K ₁₋₁₅)	0.01 (K _{n-30})	0.01 (K ₁₋₁₅)	0.02 (K _{n-30})	0.03 (K ₁₋₁₅)	0.02 (K _{n-30})	0.03 (K ₁₋₁₅)	0.1 (K _{n-30})	0.12 (K ₁₋₁₅)
	5										
	15		0.07 (K ₅₋₃₀)		0.01 (K ₅₋₃₀)		0.02 (K ₅₋₃₀)		0.02 (K ₅₋₃₀)		0.03 (K ₅₋₃₀)
	30										
O ₃ + H ₂ O ₂	1	0.06 (K _{n-3})	0.06 (K ₁₋₁₅)	0.01 (K _{n-5})	0.01 (K ₁₋₁₅)	0.02 (K _{n-5})	0.02 (K ₁₋₁₅)	0.02 (K _{n-5})	0.03 (K ₁₋₁₅)	0.1 (K _{n-5})	0.16 (K ₁₋₁₅)
	5										
	15		0.07 (K ₅₋₃₀)		0.01 (K ₅₋₃₀)		0.01 (K ₅₋₃₀)		0.02 (K ₅₋₃₀)		0.05 (K ₅₋₃₀)
	30										



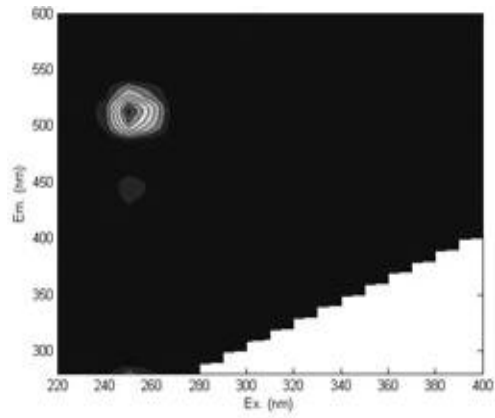
Component 1



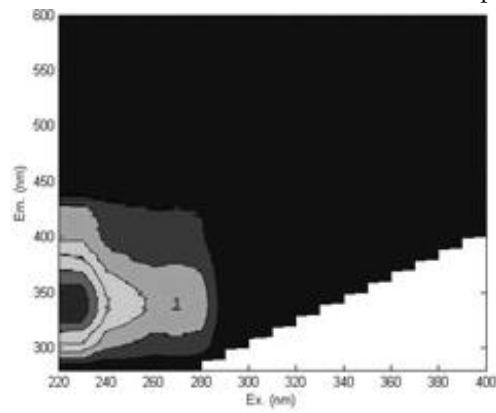
Component 2



Component 3



Component 4



Component 5

그림 27. 추출된 PARAFAC component의 영역 비교

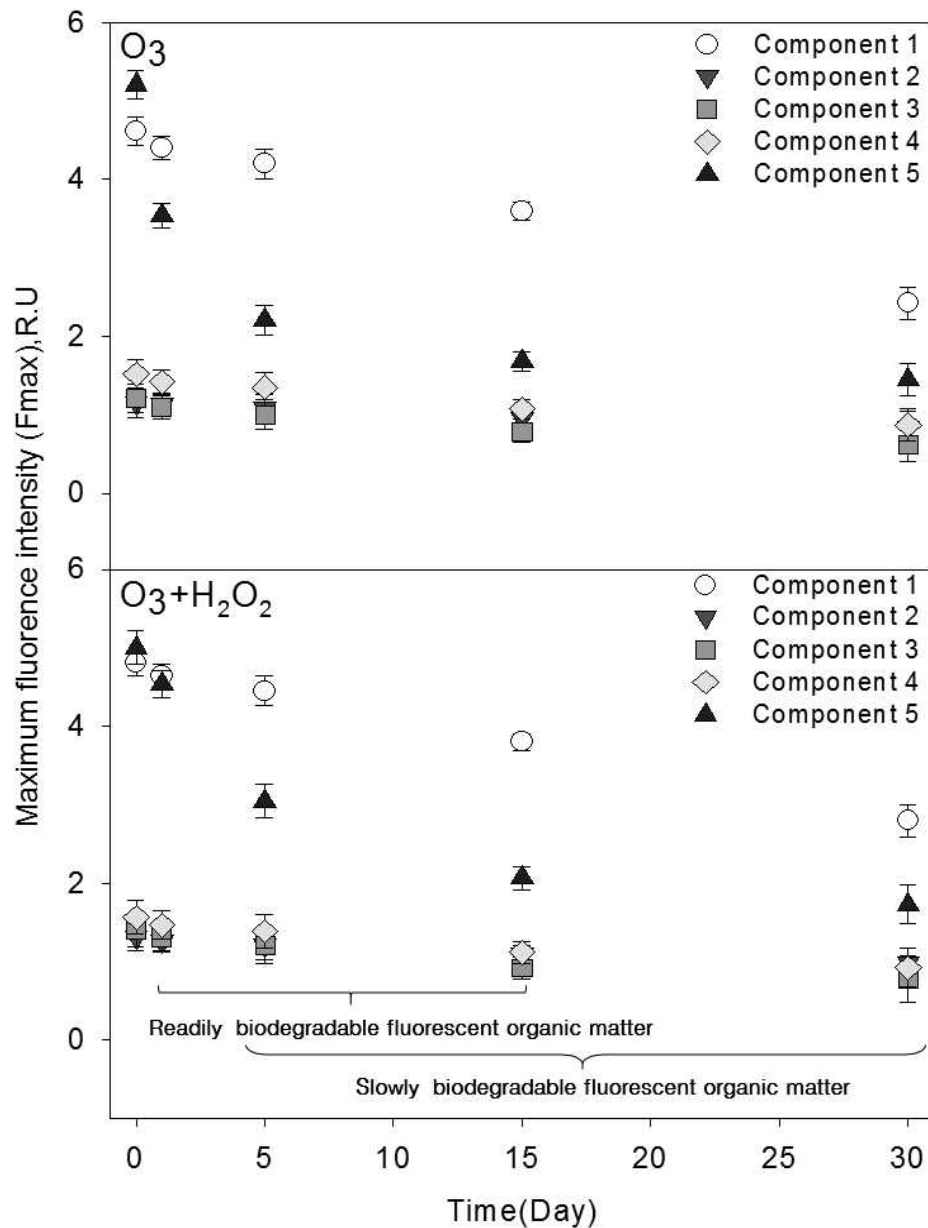


그림 28. 저장기간별 PARAFAC component 변화 (n=55)

(5) 지하저수지 함양기간 (1,5,15,30일)별 LC-OCD

- LC-OCD 분석을 통하여 지하저수지 함양에서 전처리 이후 함양기간에 따른 유기물의 분자량 크기에 따른 정량분석 결과를 비교하면 Biopolymers (20,000 Da 이상의 단백질, 다당류 등 고분자 유기물)의 경우 지하저수지 모사 컬럼을 통과하면서 평균 90% 이상이 제거되는 것을 확인하였음.
- 기존의 함양 모사 컬럼실험에서도 모래 여과를 통해서 Biopolymers가 높은 제거율을 나타내는 것이 관찰되었다는 기존 모래컬럼 실험에서의 경향과 일치(Kolehmainen et al., 2007; Maeng et al., 2012).
- Humic substances 으로 명명되는 1,000 ~ 20,000 Da 유기물은 O_3 처리수와 $O_3 + H_2O_2$ 처리수 모두 2.5% 이내로 거의 저감이 되지 않는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 상대적으로 분해속도가 느린 물질인 Humic 물질이 미생물에 의해 소모 되는데 어려움이 있기 때문으로 판단.

- 함양이 15일 30일 장기화됨에 따라 27% 이상의 저감이 나타나는 것을 확인하였음. 이는 함양이 장기화 되면서 상대적으로 느리게 분해가 되는 유기물질의 분해가 나타난 것으로 판단되며 또한 무산소 조건에 도달하면서 다소 분해가 어려운 방향족 유기물질이 분해가 용이하게 변하는 영향에 의해서 저감이 나타난 것으로 판단. 15일 이후부터 방향족 물질인 Humic 부분의 저감은 함양기간에 따른 SUVA 감소 결과와도 일치하는 부분임.
- LMW acids와 neutrals로 표시되는 350 Da 이하의 저분자 물질들은 지하저수지 상단부로 구분되는 함양 5일 이내에 84% 이상 저감되는 것을 확인 할 수 있었음. 이는 미생물의 소비에 용이한 저분자 물질이 미생물 활동에 의해 제거가 된 것으로 보임(이원모, 2016).

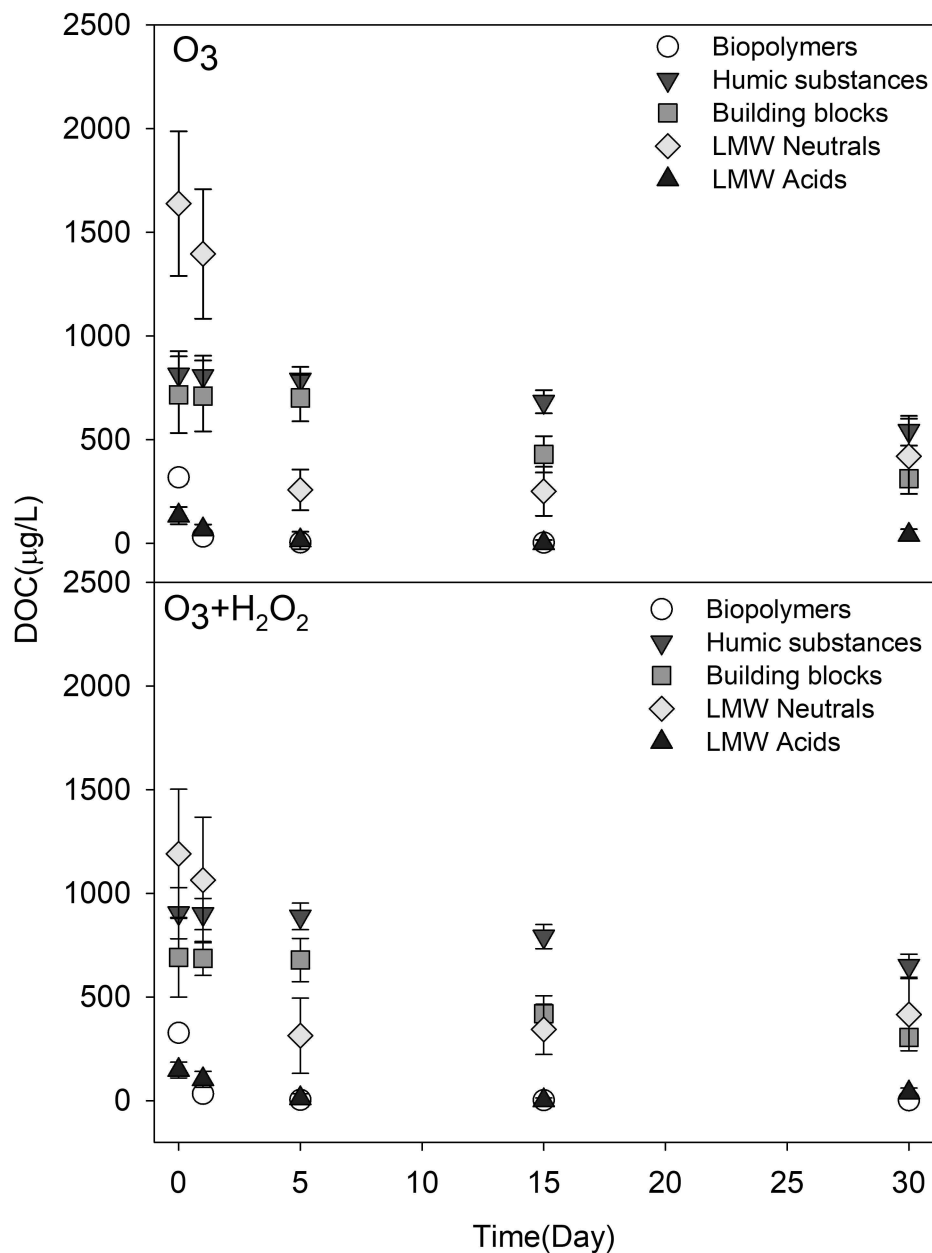


그림 29. 저장기간별 LC-OCD 유기물 분획 결과

표 15. 저장기간별 LC-OCD 유기물 분획 농도

	Retention time (Day)	Biopolymers ($\mu\text{g/L}$)	Humic substances ($\mu\text{g/L}$)	Building blocks ($\mu\text{g/L}$)	LMW Neutrals ($\mu\text{g/L}$)	LMW Acids ($\mu\text{g/L}$)
O_3 treated	Influent	317.5 ± 31.8	813.6 ± 113.1	716.7 ± 184.7	1638.0 ± 348.5	133.7 ± 41.8
	1	31.7 ± 3.7	807.2 ± 97.2	710.5 ± 171.2	1395.5 ± 312.3	66.6 ± 24.1
	5	3.7 ± 1.5	789.3 ± 61.0	701.1 ± 112.4	257.5 ± 98.5	13.7 ± 41.8
	15	3.3 ± 3.7	682.9 ± 55.3	428.9 ± 87.7	250.5 ± 118.2	0.04 ± 15.7
	30	1.9 ± 1.6	542.9 ± 71.1	311.5 ± 35.2	420 ± 181.5	40.7 ± 27.2
$\text{O}_3 +$ H_2O_2 treated	Influent	327.2 ± 32.7	904.4 ± 123.1	691.4 ± 192.2	1190.5 ± 311.3	147.6 ± 38.2
	1	32.7 ± 1.0	900.1 ± 75.2	685.9 ± 81.2	1064.2 ± 303.1	102.9 ± 38.2
	5	4.2 ± 1.5	888.3 ± 64.0	678.1 ± 104.5	313.2 ± 181.3	11.1 ± 21.5
	15	2.1 ± 1.0	791.6 ± 58.1	418.9 ± 87.1	343.7 ± 121.3	1.4 ± 11.5
	30	1.7 ± 1.5	651.2 ± 55.3	305.1 ± 12.4	415 ± 174.1	39 ± 22.3

(6) 지하저수지 함양기간 (1,5,15,30일)별 소독부산물 생성능

- 전처리 공정 이후 지하저수지 내 함양 기간에 따른 THMFPS(그림 30) 분석함. 함양 5일 기준 THMs 중 CHCl_3 의 저감이 O_3 처리수에서는 12.8% 저감이 되었으며, $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ 처리수에서는 9.9% 저감이 나타났음($p < 0.05$). 이는 지하저수지 함양에 따른 DOC 저감의 영향과 THM 생성에 기여하는 acidic한 유기물질의 저감에 의한 영향으로 판단(Weiss et al., 2003).
- 함양이 장기화 되면서 함양기간 30일 기준으로 CHCl_3 의 저감이 O_3 처리수에서는 75.5% 저감이 되었으며, $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ 처리수에서는 57.4% 저감이 나타났음($p < 0.05$). 이는 소독부산물의 전구물질로 알려진 Humic 부분의 저감 영향으로 보임. LC-OCD 결과(그림 29)에서 함양 기간 30일 기준 Humic 부분이 O_3 처리수에서는 33.3% , $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ 처리수에서는 28%의 저감이 나타나는 것을 볼 때, 영향 있을 것으로 판단.

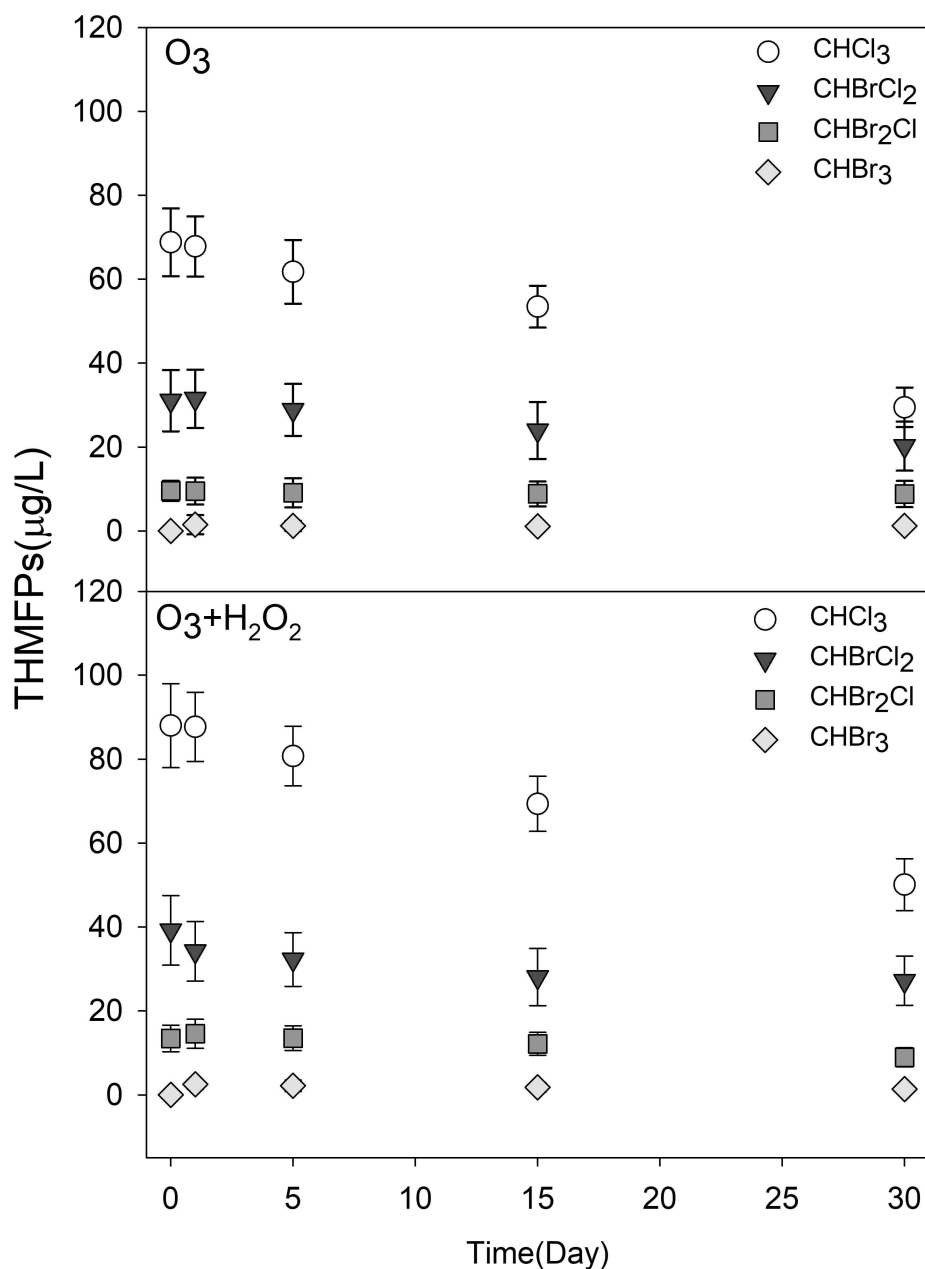


그림 30. 저장기간별 THMFPS 변화

다. 지하저수지 AOC 평가

(1) 지하저수지 함양기간 (1,5,15,30)별 AOC 및 BDOC

- 생분해성 및 생물학적 안정성을 확인 할 수 있는 판단지표인 BDOC와 AOC 분석을 이용하여 지하저수지 내 함양기간에 따른 비교함(그림 21-22). 그림 21에 나타낸 BDOC의 결과를 보면 두 전처리 방법 모두에서 함양이 장기화 될수록 감소되는 경향을 보였으며, 이는 미생물의 유기물 분해와 모래 흡착 제거 등에 의한 영향.
 - 함양 5일 이내의 결과에서 보면 O_3 처리수는 76.7%, $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 55% 저감되는 것을 확인하였으며($p < 0.05$), O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수 대비 더 높은 저감을 나타내는 것을 확인.
 - 함양 기간 15일 기준으로 O_3 처리수는 0.18 mg/L, $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 1 mg/L의 농도 값을 나타냈으며, 30일 기준으로 O_3 처리수는 0.12 mg/L, $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 0.27 mg/L의 농도 값을 나타냄.
 - O_3 처리수의 BDOC 농도는 함양 15일 기준으로 BDOC 가이드라인인 0.2 mg/L 이하의 기준을 만족하는 결과였으며(Servais et al., 1992), $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 함양기간 30일에서도 가이드라인을 만족하지 못하는 것을 확인하였음. 이를 통하여 BDOC 측면에서의 생물학적 안정성 평가에서 O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수보다 안정적임.
 - AOC 결과에서도 BDOC 결과와 유사하게 두 전처리 방법 모두에서 함양이 장기화 될수록 감소되는 경향을 보였으며 이는 미생물의 유기물 소비에 의한 영향으로 판단되었음. 함양 5일 이내의 결과에서 O_3 처리수는 84.7%, $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 43% 저감되는 것을 확인하였으며 O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수 대비 더 높은 저감을 나타내는 것을 확인($p < 0.05$).
 - 함양 기간 15일 기준으로 O_3 처리수는 51.5 $\mu\text{g/L}$, $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 133.4 $\mu\text{g/L}$ 의 농도 값을 나타냈으며, 30일 기준으로 O_3 처리수는 30.5 $\mu\text{g/L}$, $O_3 + H_2O_2$ 처리수는 51.4 $\mu\text{g/L}$ 의 농도 값을 나타냈음. O_3 처리수의 AOC 농도는 함양 기간 30일 기준으로 미국 및 일본 정수시스템에서 제시하는 생물학적 안정성관련 AOC 가이드라인인 50 $\mu\text{g/L}$ 이하의 농도 기준을 만족하는 값으로 AOC 기준 함양 30일 이후 생물학적으로 안정적인 상태가 됨을 확인(LeChevalier et al., 1991).
 - $O_3 + H_2O_2$ 처리수 역시 함양 30일 기준으로 AOC 값이 52 $\mu\text{g/L}$ 의 농도 값을 가지는 것을 통하여 가이드라인으로 제시되는 50 $\mu\text{g/L}$ 이하 조건에 근접하는 것을 확인. 이를 통해 함양이 장기화 되면서 두 전처리 수 모두 생물학적으로 상당히 안정적으로 되는 것을 확인.
 - AOC 결과에서도 BDOC 결과와 마찬가지로 O_3 처리수가 $O_3 + H_2O_2$ 처리수대비 생물학적 안정성 측면에서 유리함을 확인 할 수 있었으며, 함양 30일을 기점으로 두 전처리 방법 모두 가이드라인으로 제시되는 AOC 농도인 50 $\mu\text{g/L}$ 를 만족 또는 근접함을 통해 생물학적으로 안정적인 상태에 도달하는 것을 확인.
-

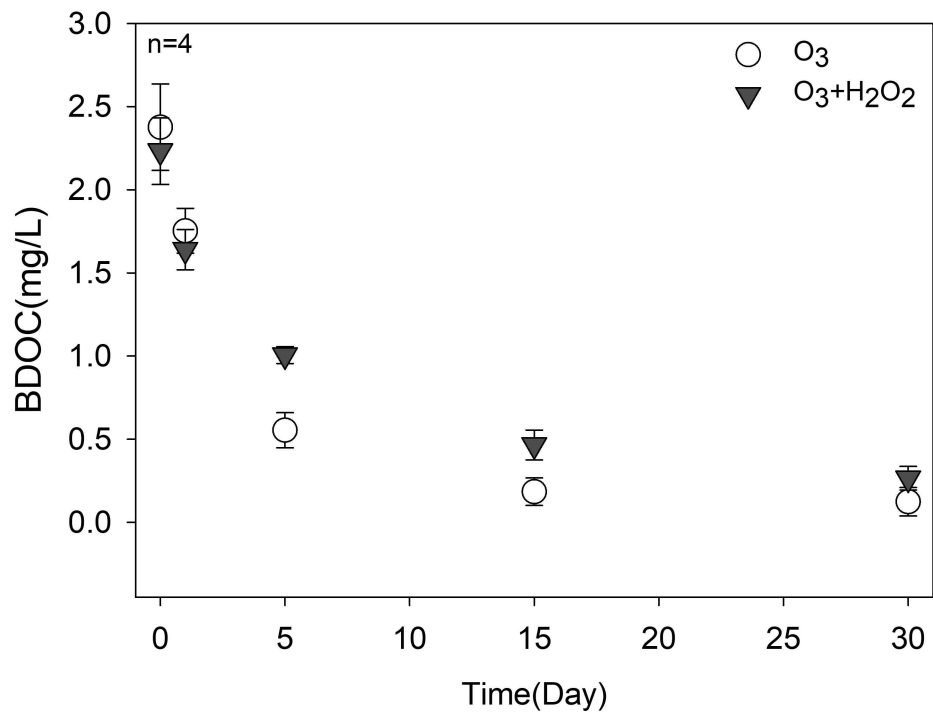


그림 31. 저장기간별 BDOC 변화

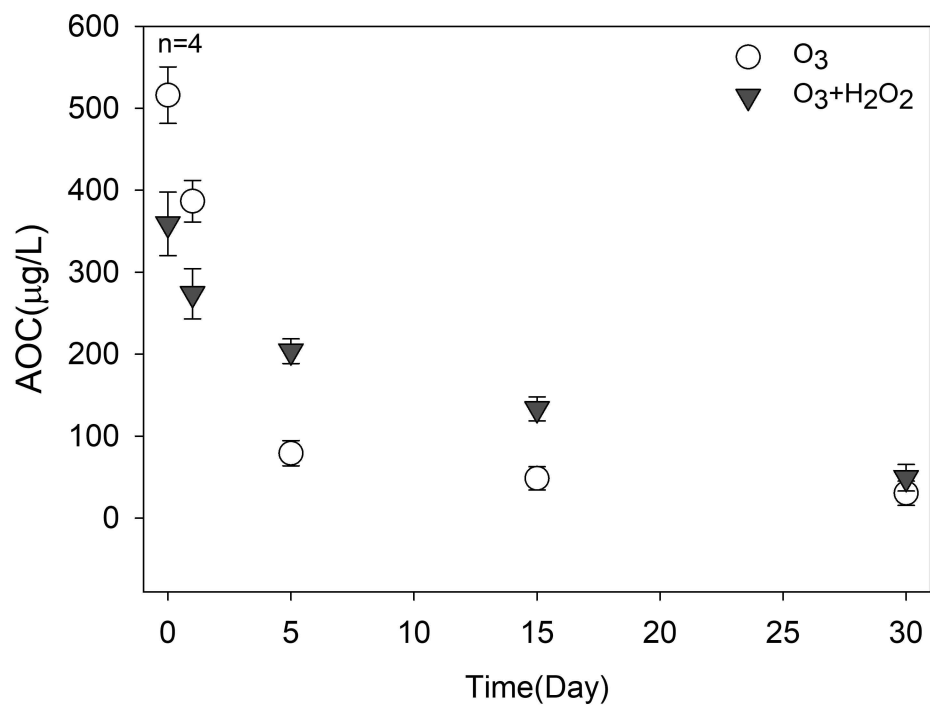


그림 32. 저장기간별 AOC 변화

(2) 지하저수지 함양기간 60일 Batch 실험에 따른 수질 특성

- 본 실험에서는 함양기간에 따른 수질 특성 평가에 사용된 모래컬럼을 이용하여 함양기간 60일에 따른 유출수 확보에 한계가 있었음. 따라서 함양 60일 유출수 확보를 위하여 Batch 실험으로 대체하여 진행.
- Batch 실험을 통한 결과를 컬럼 실험과 직접 비교를 하는 것은 환경적 요인 등 여러 조건에서 다소 무리가 있음을 인지하였으며, Batch 실험을 통하여 지하저수지 컬럼 실험을 대체하는데 있어서 어떠한 한계점이 있는지를 파악하기 위한 기초자료로서 컬럼과 동일한 수질 항목을 분석하여 결과를 표 16에 나타냄.
- 두 전처리 방법 모두 컬럼실험에서는 함양 15일 기준으로 DO와 ORP 값이 무산소 조건에 도달하는 것을 확인 할 수 있었으나, Batch를 통한 함양 60일 유출수의 경우 DO값은 약 3 mg/L 정도에 해당되며, ORP 값 역시 약 210 mV 정도로 호기성 조건에 있음을 확인 할 수 있었음. 이는 Batch 반응기의 특성상 무산소 조건을 구현하기 힘든 한계에 의한 차이로 판단.
- Batch를 통한 60일 함양 유출수의 유기물 형광 특성분석인 EEM 분석결과를 보면 Tryptophan 계열로 분류되는 생물학적으로 분해가 용이한 유기물의 형광특성인 T1, T2 Peak이 60% 이상 저감되는 것을 확인 할 수 있었으며(그림 33), 이는 상당부분의 생분해 가능한 유기물의 소비 및 모래층에 흡착에 의한 결과로 판단.
- Humic 계열로 분류되는 상대적으로 분해속도가 느린 유기물질의 특성인 물질인 A, C Peak의 경우 Batch test 내에서 흡착에 의한 제거만 나타났기 때문에 15% 이내의 저감만 나타나는 것을 확인. 분자량에 따른 유기물질의 정량분석인 LC-OCD 결과에 따라 미생물의 소비에 용이한 저분자 유기물질들이 95% 이상 저감이 되는 반면 Humic substances로 표시되는 상대적 분해속도가 느린 유기 물질의 영역의 경우 약 16% 정도의 저감이 나타났음. Humic substance의 저감의 경우, 모래에 의한 흡착의 영향이 함께 있는 것으로 판단되며 EEM 특성과 유사한 경향이 나타나는 것을 확인.
- Batch 실험 결과와 컬럼 실험의 비교에 있어 컬럼실험은 함양 컬럼 상단부에서는 생분해에 용이한 유기물질들의 저감이 나타나고 하단으로 내려가면서 상대적 분해속도가 느린 물질들의 저감이 나타나는 경향이 나타나는 것으로 추정함.
- Batch 실험에서는 함양이 장기화 되었음에도 분해속도가 느린 유기물질들의 저감이 거의 나타나지 않는다는 것을 확인 할 수 있었음. 실험 방식에 따른 경향 차이는 컬럼에서는 무산소 조건이 갖춰짐에 따라 미생물의 방향족 물질의 소비가 용이해지지만 Batch 실험에서는 밀폐 조건 등의 불완전성으로 무산소 환경이 충족되지 못한 영향이 고려되어야 할 것임.
- 생물학적 안정성 지표인 BDOC와 AOC의 경우(표 16) BDOC는 0 mg/L에 가까운 농도였으며, AOC 역시 약 28 ~ 35 $\mu\text{g/L}$ 로 상당히 낮은 수치가 나타남을 확인. 이는 60일 간의 장기간의 함양동안 미생물이 가용 가능한 유기물질들이 상당부분 저감이 된 영향으로 판단.

-
- Batch 실험을 통한 함양 60일 유출수에서의 미생물 거동 결과(그림 35)를 보면, 총 세포수의 경우 유입수 대비 함양 후 약 70%의 세포수가 저감되었으며, 이는 장기간 함양에 따른 빈 환경 상태 조성으로 인한 사멸의 영향으로 판단되어 졌으며, HNA, LNA 비율로 본 결과에서도 함양이 장기화됨에 따라 LNA의 비율이 우점화 되는 것을 확인(Jochem et al., 2004; Longnecker et al., 2005).
 - 미생물의 활성도를 나타내는 ATP 값 역시 함양 후 약 90% 정도 저감되는 것을 확인하였으며, 이는 함양이 장기화됨에 따른 빈 영향 환경에 의하여 미생물의 활성도가 저감이 된 것으로 판단.
 - Batch 실험의 결과를 통하여, Column 실험에서와 같이 생물학적 분해기작과 관련한 결과에서는 유사한 결과를 보이는 반면, 컬럼과 같은 무산소 조건 조성의 한계로 인하여, 상대적으로 분해속도가 느린 유기물질들의 거동을 파악하는데 한계가 보이는 것을 확인.

표 16. Batch 테스트 후 측정 결과 (60일 저장) (n=3)

		Retention time (Day)	DO (mg/L)	ORP (mV)	DOC (mg/L)	BDOC (mg/L)	AOC (μg/L)	SUVA (L/mg·m)
O ₃		Influent	12 ± 1.51	378 ± 41	3.63 ± 0.16	2.38 ± 0.36	516 ± 19.5	1.3 ±0.09
	Batch	60	3.3 ± 0.78	212.5 ± 68	1.34 ± 0.05	0 ± 0.02	28 ± 5.8	1.98 ± 0.02
O ₃ + H ₂ O ₂		Influent	12.3 ± 1.42	372 ± 37	3.29 ± 0.12	2.23 ± 0.3	359 ± 14.2	1.46 ±0.05
	Batch	60	3.29 ± 0.81	214.8 ± 71	1.47 ± 0.06	0 ± 0.03	35.7 ± 5.8	1.78 ± 0.03
		Retention time (Day)	EEM (AU)					
			T1 Peak	T2 Peak		A Peak	C Peak	
O ₃		Influent	383.9 ± 22.1	202.6 ± 70.6		363.4 ± 15.4		263.1 ± 16.6
	Batch	60	132.1 ± 12.8	101.2 ± 10.0		302.1 ± 21.5		254.1 ± 4.5
O ₃ + H ₂ O ₂		Influent	280.1 ± 91.1	182.9 ± 80.9		390.2 ± 33.2		282.4 ± 52.2
	Batch	60	156.34 ± 3.2	110.3 ± 10.4		357.8 ± 6.7		261.5 ± 5.8
		Retention time (Day)	LC-OCD (μg/L)					
			Biopolymers	Humic substances	Building blocks	LMW neutrals	LMW acids	
O ₃		Influent	317.5 ± 31.8	813.6 ± 113.1	716.7 ± 184.7	1638.0 ± 348.5	133.7 ± 11.8	
	Batch	60	3.25 ± 2.65	682.9 ± 56.7	593.9 ± 93.8	34.1 ± 15.2	51.3 ±28.7	
O ₃ + H ₂ O ₂		Influent	327.2 ± 32.7	904.4 ± 123.1	691.4 ± 192.2	1190.5 ± 311.3	147.6 ± 18.2	
	Batch	60	2.1 ± 1.0	722 ± 57.1	665.9 ± 83.4	31.7 ± 21.8	64.7 ± 22.5	
		Retention time (Day)	ATP (ng-ATP/L)		TCC (cells/mL)			
			Total	Cell bound	HNA	LNA	Damaged	
O ₃		Influent	1550 ± 121.5	43 ± 24.1	40,244 ± 98,000	30,500 ± 128,400	3,669,500 ± 350,100	
	Batch	60	121.5 ± 0.7	90.5 ± 5.2	83,293 ± 14,820	236,990 ± 71,000	510,515 ± 27,400	
O ₃ + H ₂ O ₂		Influent	1410 ± 113.2	51 ± 32.5	26,048 ± 104,900	39,810 ± 182,800	3,506,700 ± 315,000	
	Batch	60	133.7 ± 1.5	102.8 ± 3.7	91,716 ± 11,510	274,593 ± 58,200	503,868 ± 38,210	

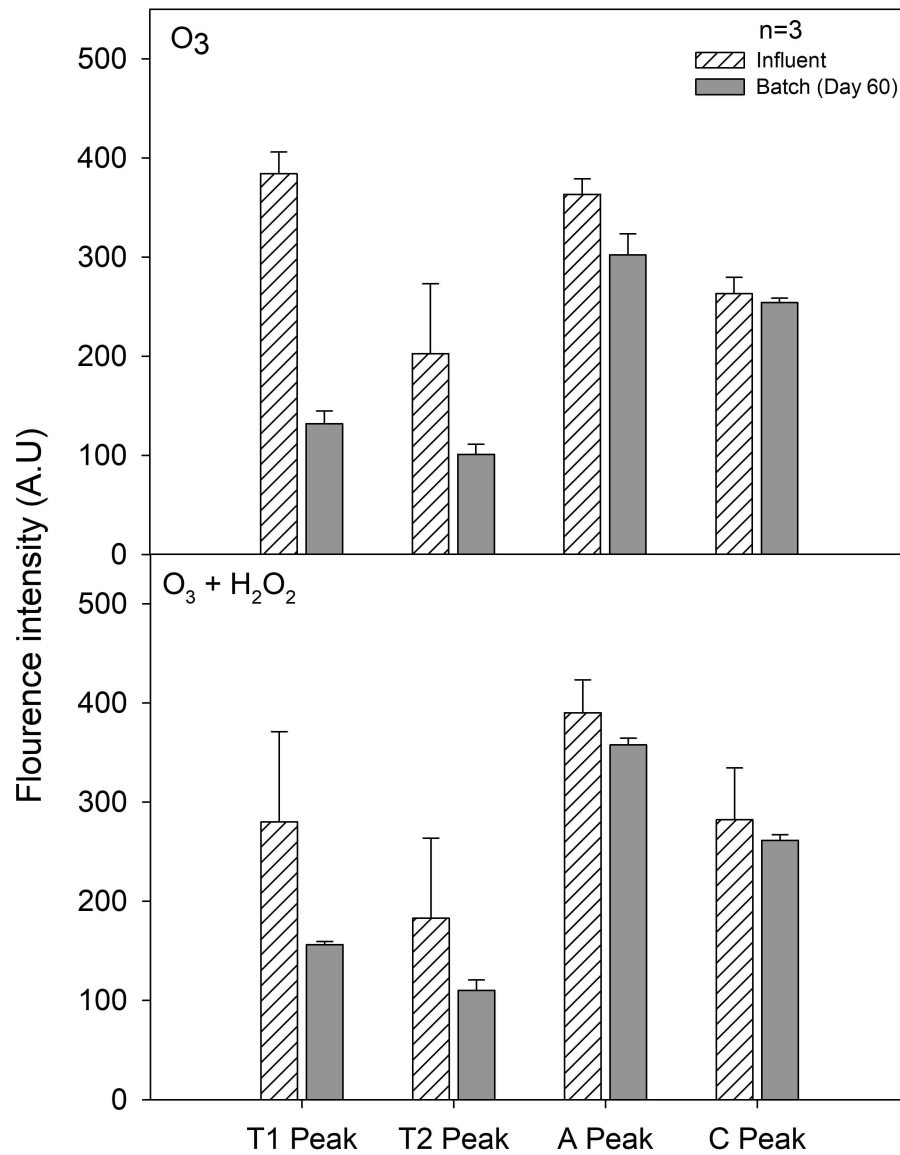


그림 33. Batch 테스트 후 EEM 변화 (60일 저장)

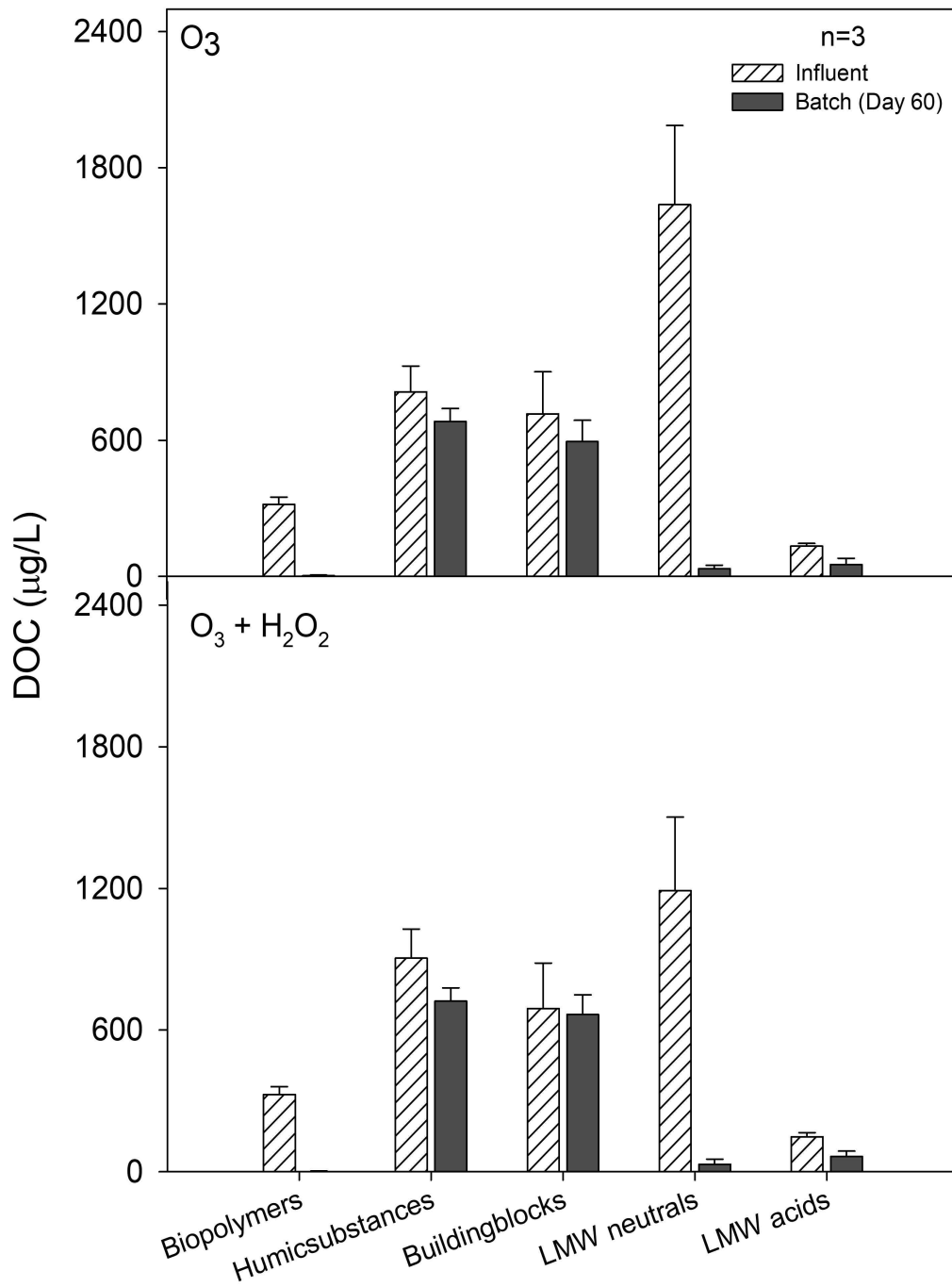


그림 34. Batch 테스트 후 LC-OCD 분석 결과 변화 (60일 저장)

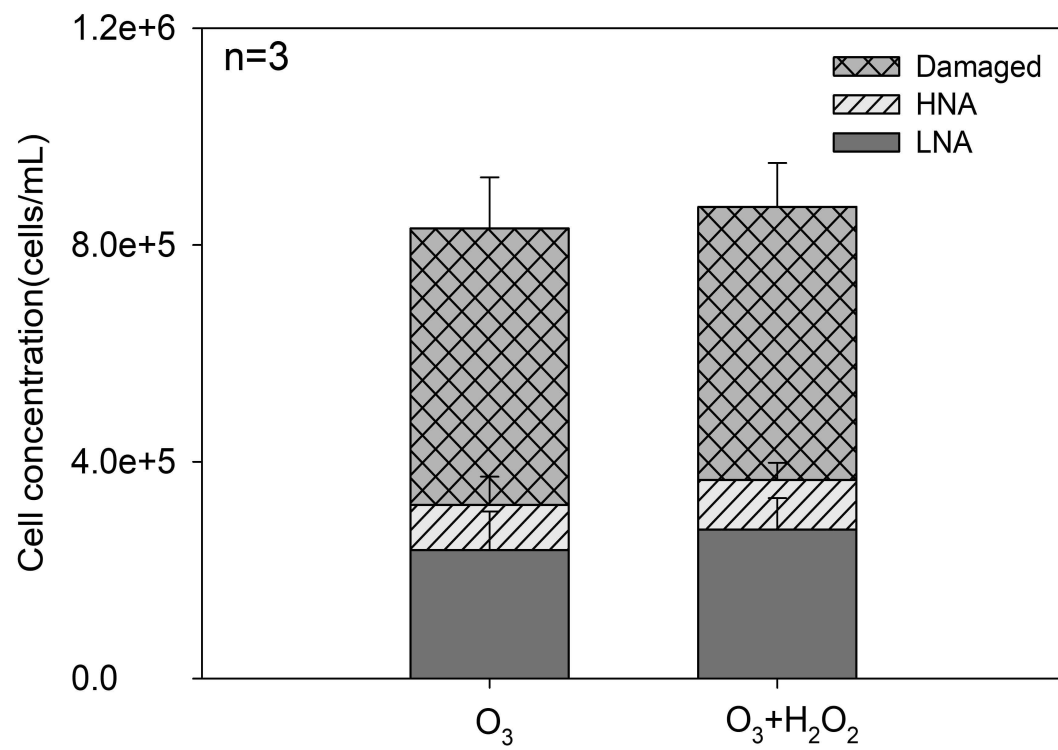


그림 35. Batch 테스트 후 총세균수 변화 (60일 저장)

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 핵심연구성과 목표 및 달성도

(1) 자체평가

- 핵심연구성과에 대한 계획사항을 모두 충실히 수행하였으며 성과 목표 100% 달성.
- 기존 문헌 등을 통하여 AOC, BDOC의 정량적인 함량과 본 연구 결과가 유사하였으며 평가 시스템이 최적화 된 것으로 판단함.
- 전처리, 저장기간별 수질의 변화를 정성·정량적으로 정확히 판별하고 최적 지하저수지 운영에 기초 연구로서 활용성이 높은 결과를 산출하였음.

표 17. 핵심연구성과 목표 및 달성 여부

성과 목표	자체 평가
AOC 기반 지하저수지 자정작용 평가기술	• AOC는 연차별 분석 한계를 개선시키는데 성공하였으며 추후 후속연구 등을 통해 분석 한계가 더욱 향상될 것으로 기대함. 다만 저농도의 AOC는 원수가 청정한 수원이 고려되어야 할 필요가 있음. • AOC, BDOC 등을 이용한 지하저수지 자정작용으로 제거되는 탄소를 정량화 가능하였으며, 다양한 수원의 자정작용 잠재능 평가. • AOC/BDOC와 DOC와 비교 및 함량에 따라 각 수원 특성별 생물학적 분해 가능성을 비교하고 지하저수지 원수 선택 등에 활용이 가능하게 됨. • 후속연구가 이뤄질 경우 분석한계 향상 가능할 것으로 기대.
모형실험을 통한 청정 지하저수지 유지관리기술 개발	• 취수 원수의 수질변화(조류)등 용수다변화에 따른 지하저수지 수질 개선능 확인 실험을 진행하였으며, 지하저수지를 통한 수질 개선은 확인하였으나, 전처리 없이 저장 효과를 통한 자정작용에 의한 수질 개선에는 한계가 있음을 확인함. • 취수원수에 전처리방법(오존산화)을 이용 후 지하저수지 함양을 통한 수질 개선능을 확인하였으며, 오존 처리 후 지하저수지 내 자정작용능이 증가하는 것을 확인 함. 후속연구 등을 통해 최적 주입량 및 경제성 평가 등이 고려되면 실제 함양 기술에 활용 가능할 것으로 기대됨. • AOC, BDOC 측정 지표를 이용하여 저장기간에 따라 자정작용으로 수질 향상과 생물학적 안정성이 증가하는 것을 확인하였으며, 특히 AOC, BDOC 목표 수치 이하로 달성할 수 있는 전처리 기법과 저장기간을 선정 가능하였으며 기존 기술수준보다 저장기간의 단축 가능성을 제시하였음. • 소독부산물 생성능, 미량유해물질 제거능 등을 함께 확인하여 지하저수지의 다양한 수질 개선 효과의 우수성을 확인하였음.

표 18. 핵심성과1 내용과 목표 달성도

핵심성과 1		
정의	AOC 기반 지하저수지 자정작용 평가기술	
목적	• 청정 지하저수지의 생물학적 자정작용 효율 평가를 위한 AOC, BDOC 기반 평가기술 개발 • 극한 가뭄, 계절변화 등 취수원수 변화(조류 포함)에 따른 지하저수지 수질 개선능 제시 • 오존 등 전처리 기법을 함께 평가하여 지하저수지의 자정작용 극대화 방안 제시	
성능목표	• 기존 최신 기술 수준 : 10 µg/L-AOC 분석 단계 • 개발기술 수준 : 분석 한계 50 µg/L-AOC(1차년도)	
성과달성 책임자 (소속기관)	맹승규 교수 (세종대학교 산학협력단)	
소요기간	2016.06 ~ 2017.06	
성과달성 확인방법	• AOC 스탠다드 분석 및 표준검정선 작성 • AOC 스탠다드 시료 농도에 대한 연차별 분석 한계 향상 • 하천수 원수의 전처리에 따른 AOC, BDOC 변화와 유기물 특성 변화에 대한 연구 • AOC, BDOC 측정 최적화 및 모니터링 적용 (SCI 게재) - 본 연구에서는 정수장 처리수의 BDOC 모니터링과 유기물 특성변화 조사에 기여하였으며, KIST 연구과제 중복사사의 경우 한강 원수에 대한 조사 및 원수의 계절별 변화에 따른 특징을 조사하여 원수에서의 생물학적으로 분해 가능한 유기물의 특성을 조사하였음. 해당 연구들을 통해 상위 15% SCI 논문을 게재 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.063).	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI(E) : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

표 19. 핵심성과2 내용과 목표 달성도

핵심성과 2		
정의	모형실험을 통한 청정 지하저수지 유지관리기술 개발	
목적	• 청정 지하저수지의 자정작용을 함양 원수 케이스별 연구(전처리 기법) 및 함양 후 유기물 특성 변화와 AOC, BDOC 제거율에 따른 최적 공법 운영을 위한 지하저수지 유지관리기술로 제시 • 기존에는 지하저수지 설계 및 시공자의 경험적 기준에 의거한 저장기간이 선정되어 운영되는 경향이 크기 때문에 다양한 지하저수지 현장에서 적용 가능한 저장기간 산정법으로 AOC와 유기물 특성분석법을 도입하고자 함 • 명확한 저장기간 설계 및 관리 기준이 없기 때문에 본 핵심성과 기술 개발을 통해 청정 지하저수지의 자정작용의 적정 유지관리 및 효율적인 저장기간의 산정이 가능한 방법으로 제시하여 기술력 확보 및 국내 지하저수지 관련 기술 경쟁력 향상 • 지하저수지에서 다양한 미량유기오염물질(잔류의약품) 자정작용 조사	
성능목표	• 기존 기술 수준 : 캘리포니아(미국) : 6-12개월, 네덜란드 : 5개월 • 개발 기술 수준 : 3개월 이내	
성과달성 책임자 (소속기관)	맹승규 교수 (세종대학교 산학협력단)	
소요기간	2016.12 ~ 2018.06	
성과달성 확인방법	• 지하저수지 모형실험에서의 AOC, BDOC 제거율 측정 - AOC, BDOC 전처리 시료 측정 최적화 및 유기물특성 분석으로 국내 학술지 게재 (DOI: 10.11001/jksww.2018.32.2.159) • 원수수질 변화 (조류, 잔류의약품 영향)에 따른 수질개선능 변화 및 평가와 함양기간(30, 60, 90일)에 따른 유기물특성, AOC, BDOC, 미생물 활성도 변화 등 생물학적 안정화 파악 - 지하수 인공함양 시스템: 특허출원(10-2017-0183787) - 환경부 중북사사 연구에서 활성탄에서 유기물특성, 미생물 활성도 평가 등을 본 연구기법을 활용하여 수행하고 논문 게재하였음. (DOI: 10.5004/dwt.2017.21648) • AOC 자정 평가뿐만 아니라 ATP, 탁도, 잔류의약품 제거와 소독부산물 생성능 저감 등 수질 관리 항목을 함께 검토하여 객관성 확보	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI(E): 1건, 국내학술지: 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

표 20. 정량적 성과 목표와 달성 점수

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표	성과 달성
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	2건	1건	2건
일반학술지 게재(1점)	1건	1건	1건
특허출원(1점)	1건	1건	1건
특허등록(2점)	-	-	-
디자인 등록(1점)	-		-
소프트웨어(1점)	-		-
하드웨어(1점)	-		-
기타(1점)	-		-
소계(점수)	6점	4점	6점

표 21. 국내외 논문 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호
1	Seasonally related effects on natural organic matter characteristics from source to tap in Korea	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	So, S.H.	592	-	Elsevier (UK)	SCI	2017. 08.15	DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.063
2	Evaluation of chemical washing for granular activated carbon during drinking water treatment	DESALINATION AND WATER TREATMENT	Woo, H.M.	97	-	Desalination Publication (US)	SCI	2017. 10.28	DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.063
3	하천수 내 생물학적 안정성에 따른 유기물 특성변화와 오존산화기반 전처리 연구	상하수도 학회지 (JKSWW)	박세희	32	-	대한상하수도학회	비SCI	2018. 3.21	DOI: 10.11001/jksww.2018.32.2.159

표 22. 특허 출원/등록

번호	특허 명칭	발명자	출원일자	출원번호	출원인 명칭
1	지하수 인공함양 시스템	맹승규, 박세희	17.12.29	10-2017-0183787	세종대학교 산학협력단

표 23. 국내 및 국제학술대회 발표이력

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2017 대한상하수도학회·한국물 환경학회 공동학술대회	박세희	17.03.23	광주광역시 김대중컨벤 션센터	유기물특성변화에 따른 지하저수지 생물학적 안정성(AOC/BDOC) 연구
1	2017 대한환경공학회 국내학술대회	박세희	17.11.17	제주국제컨 벤션센터	전처리 방법 및 함양기간에 따른 지하저수지 수질특성 평가

2. 관련 분야 기여도

가. 학술 성과

(1) SCI 논문 2건, 국내학술지 1건으로 지하저수지 운영 및 평가기법에 대한 관련 분야의 과학적 기여도가 높다고 판단함.

(2) 국내학술대회 발표 2건으로 지하저수지의 효율성과 관리기술 방향 등을 환경공학자들에게 소개하고 본 연구의 핵심성과와 관련하여 결과 공유 및 연구내용을 홍보하는 데 적극적으로 참여하였음.

나. 특허 성과

(1) 지하저수지 운영 및 평가방법으로 AOC, BDOC 및 유기물 특성분석법을 최초로 도입하였으며 해당 기술을 특허로 출원하여 지하저수지 관련 지식재산 축적에 기여하였음.

다. 인력 배출

(1) 본 연구를 통하여 참여 연구원으로 박사 1인, 석사 2인을 졸업생으로 배출하였음.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용방안 및 기대효과

가. 연구개발성과의 활용방안

(1) 지하저수지 설계 및 운영

- 대규모 청정 지하저수지는 기후변화·수질사고 대비에 최적화된 대체 수자원 기술로서, 수질 만족을 위한 대수층 자정작용 및 최적 저장기간 설정 등의 운영 기술 확보 및 모니터링 시스템 등 기술 수요가 있을 뿐만 아니라 강변여과 기술 여과거리 시간 최적화에도 접목할 수 있음
- 특히, 설계자의 주관적인 저장기간 설정 및 운영 조건이 각 지하저수지의 수리·수문·지질학적 차이 미반영 및 수질 만족 어려움 등의 문제가 있을 수 있으나 본 연구 기술을 통해 국내외로 미비한 지하저수지 관리 및 운영 체계의 개선 및 고도화 실현에 기여
- 본 연구가 제안하는 시스템을 통하여 각 지하저수지의 주입수, 생물학적 차이, 유기물 특성 등 최종 시스템/환경에서 수질 및 환경적 인자를 비교 및 최적 운영지침 마련에 기여 가능할 것으로 기대

(2) 후속연구 활용

- 본 연구는 최종 운영 시스템/환경 적용을 고려하여 모래, 자갈 및 현장시료 등을 이용한 Bench-scale 규모의 지하저수지 모사와 성능 검증을 수행함으로써 Full-scale 지하저수지 현장 적용과 R&D 기술성숙도가 높은 유사 연구와의 연계성이 높으므로 국토부 중장기 연구개발 주제인 청정 지하저수지 기술개발과 함께 활용 가능성 기대

(3) 정수약품 최소화

- AOC는 유럽 등 선진 상수도 기술 보유국가에서 먹는물에서 생물학적 안정성 평가에 이용되고 있는 분석기법으로, 소독부산물 저감 및 저염소 정수처리 시스템 구축을 위하여 국내 수도사업자의 관심도가 높은 기술이며, 지하저수지의 식수원 적용을 위한 평가에 적절하고 지하저수지 운영 시에도 미생물에 의한 clogging의 발생, 자정작용 효율 등과 직접적인 연관성이 높아 수질 지표로서 활용성이 높다 판단됨

(4) 대체 수자원 활성화

- 대체 수원으로서 지하저수지 적용 지자체 및 수도사업자의 수요를 만족하고 안전한 물을 공급할 수 있도록 본 연구가 활용될 수 있으며 저장기간 연구 결과를 통해 제한적인 지하저수지 운영 가이드라인으로 제시가 가능할 것으로 판단됨
- 관련 물산업 경제 및 시장 육성을 통해 기존 고착화된 물산업 시장을 혁신할 수 있는 새로운 국가 물산업 브랜드와 시장 창출이 가능하며 전문인력 양성 및 고용효과 증진

나. 기대효과

(1) 기술적 측면

- 대규모 청정 지하저수지는 기후변화로 인한 수량 부족 및 조류 발생과 같은 수질사고 대비에 최적 기술로서, 주입을 멈추더라도 일정기간동안 지속적인 양수가 가능하여 시민들의 물 부족 및 기타 수자원 비상상황 대응에 능동적 대처가 가능한 기술임
- 그러나 지하저수지 기술의 설계, 시공 및 관리에 있어 경험적 지식에 의존하는 경향이 다소 클 뿐만 아니라 현재 우리나라와 대규모의 청정 지하저수지 개발 국가 및 선진국과의 기술 격차가 크지 않은 장점이 있어, 상대적으로 새로운 공법 및 관리 기술이 진출하기 용이한 상황이라고 판단됨
- 음용수 및 다양한 산업적 목적으로 사용되는 물의 안정적인 확보와 이용을 위해서는 국가적인 물관리 기술 개발과 용수 다변화 등 대체 수원 확보가 핵심이며, 해당 기술을 통해 다양한 용수 수요를 충족할 수 있을 것으로 기대됨
- 용수 다변화를 위해서는 다양한 잉여 수자원의 재이용이 핵심적이며, 조류 발생이나 하수처리수 및 강우유출수 등에 대한 지하저수지 적용성 평가를 통해 수질 악조건에서 대체 용수 개발 가능성을 파악하는 것이 중요하므로 해당 기술에 대한 본 연구의 실험 설계 및 핵심성과의 활용 가능성이 높다고 판단됨
- 지하저수지 운영 최적화 및 검증이 가능하므로 수도사업자에게 관리 기술 제공이 가능하며, 기존 지표수 댐 건설, 해수담수화, 하수재이용 정수시설 등에 소모되는 고비용·고에너지 시설을 대체하는 친환경적 물이용 효과
- 지하저수지의 최적 함양기간 설정을 통해 기존 지표수 정수장과 대비하여 응집제와 염소소독 사용량을 줄일 수 있어 안전하고 깨끗한 청정 지하수를 얻을 수 있는 기술적인 성과 기대
- 본 연구결과를 활용하여 강변여과수의 우물정 위치에 따른 강물 체류시간 및 지하수 수위영향을 최소화할 수 있는 인공함양 기술에도 활용이 가능할 것으로 기대

(2) 경제적 · 산업적 측면

- 본 국내외로 미비한 지하저수지 관리 및 운영 체계를 보완하는 시스템으로서 다양한 현장에서 적용이 가능하며, 이에 따라 국내 지하저수지 및 해외 현장에서도 지하저수지 생산수 안정성 평가 도입 및 기술 이전 등의 경제적 성과 기대
- Global water intelligence에 의하면 국제적으로 지하저수지 관련 기술 (인공함양 등) 및 일련의 시설물 수요가 꾸준히 증가할 것으로 예상되며, 이미 일일 10억 갤런에 이르는 주요 대체 수자원으로 활용되고 있어 관련 기술의 산업적 수요가 계속 향상될 것으로 파악
- 대체 수원이 필요한 농경지, 도서지역 등의 소규모 지하저수지뿐만 아니라 다양한 용수 공급원으로서 미국 서부지역 사례와 같은 대규모의 full-scale 지하저수지, 인공함양 등

대체 수원 개발 사례와 관련 기술 수요가 증가할 것으로 예상되기 때문에 본 연구의 관리 기법이 경제적·산업적인 효과를 지닐 것으로 예상

(3) 사회적 측면

- AOC 관리 기반의 청정 지하수는 기존 지표수에 비하여 생물학적 안정성이 높아 간단한 처리로 이용이 가능하기 때문에 소독부산물, 기타 유해물질 등에 대하여 상대적으로 안전하고 우수한 수원으로서 국민 보건 향상에도 기여 가능
- 지하저수지의 효과는 응집제 및 염소소독 등이 약품처리 최소화가 가능하기 때문에 국민들이 수자원에 대해 갖는 불신 해소 및 음용률 향상 등을 기대할 수 있음
- 수질오염사고 대응, 깨끗한 청정 수원 확보 등 국민 보건 향상과 국가 물안보 향상 효과로 국민 물 수급 불안정 및 수질 불안감을 해소할 것으로 기대
- 기존 수도사업자 및 정부의 지하수 등 개발 시 농민·주민과의 지하수 수위영향 관련 문제 마찰이나 이·취수 관련 시민사회와 사회적 분쟁을 최소화할 수 있는 친환경적 기술로 판단됨

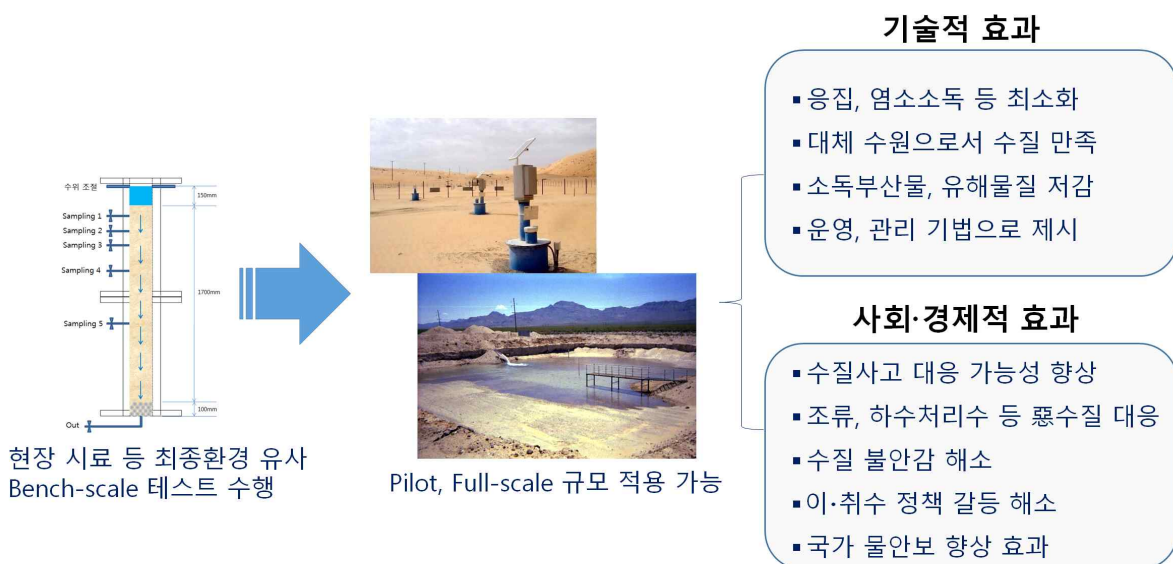


그림 36. 연구 기대효과

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

본 연구를 통하여 수집한 국내외 과학기술 정보를 제2장에 정리하였음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

본 연구의 개발성과는 보안등급을 부여하지 않으며 일반과제 결과로 공개하고자 함.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

본 연구를 통하여 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 및 장비가 없음.

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수 량	구입 연월일	구입 가격 (천 원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전조치 이행

가. 연구실 안전조치 이행계획

(1) 안전 환경 조성의 법적 근거

- 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」 및 「산업안전보건법」에 따른 연구실 안전조치 이행계획 운영 (연구실안전점검 및 정밀안전진단실시, 참여연구원의 교육훈련 및 건강검진실시, 보험가입 등)

(2) 안전조치 실시 계획

- 안전관리 책임자 및 안전담당자 주도하 일상 안전점검 및 정밀안전점검 실시
 - 대상 : 연구개발활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업 안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
 - 진단주기 : 매년 1회 (매년 전체 연구실에 대해 정기안전점검 및 정밀안전진단)
- 교내 인터넷 안전교육 강의 수강 - 법정 의무 교육 6시간
- 참여 연구원 및 연구보조원을 대상으로 학기별 교내 안전관리센터 주관 교육 훈련
 - 매년 1회 연구실 안전법에서 정하는 유해인자에 노출된 인원(학부생, 대학원생, 이공계열 전체 연구 활동 종사자[교원, 직원, 연구원, 기타 참여하는 모든 자])
- 참여 연구원 및 연구보조원의 건강검진실시

(3) 사전유해인자분석 계획

- 해당 연구의 주 분석기기 동선, 안전사항 숙지 및 사용일지 작성
- 주 연구재료 및 시약 MSDS 확인, 위험물질 보유 시 관리대장 작성 및 보관
- 보호장비, 실험복, 실험용 장갑 착용 숙지 및 소화기, 응급상자 등 배치 규정 준수
- 실험실 소화기, 구급장비 배치도 부착 및 비상연락망 운영
- 가스용기에 용기 캡 부착, 낙하 가능 물품 정리하기

2. 연구실 안전조치 실적

가. 연구실 안전조치 및 관리 실적

(1) 안전 점검 활동

- 일상점검: 안전관리자 주도하에 실험실 매일 일상점검을 실시.
- 정밀안전진단: 2018년 3월 실시. 문제점 개선 및 분야별 안전등급 부여.

(2) 사전유해인자분석

- 사전유해인자분석: 연구개발활동, 보유 약품에 따른 연구실 내부 안전사고 가능성 등을 세종대학교 안전관리통합시스템을 통하여 관리하였음. MSDS 자료 업데이트.

(3) 안전교육

- 연구실 종사자, 연구 책임자 100% 교육 수료

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분	논문명/특허명/기타	소속기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부	특기 사항
1	특허	지하수 인공함양 시스템	세종대학교 산학협력단	발명자	대한 민국	-	10-2017- 0183787 (출원)	단독	출원
2	논문	Seasonally related effects on natural organic matter characteristics from source to tap in Korea	세종대학교 산학협력단	교신	SCIENC E OF THE TOTAL ENVIRO NMENT	4.610	2017.08.15	중복	SCI
3	논문	Evaluation of chemical washing for granular activated carbon during drinking water treatment	세종대학교 산학협력단	교신	DESALI NATIO N AND WATER TREAT MENT	1.383	2017.10.28	중복	SCI
4	논문	하천수 내 생물학적 안정성에 따른 유기물 특성변화와 오존산화기반 전처리 연구	세종대학교 산학협력단	교신	상하수도 학회지	-	2018.03.21	단독	비SCI

제11장. 기타 사항

없음.

제12장. 참고 문헌

- 김상태 (2016). 대수층 인공함양 지하저수지 개발 법제 수립을 위한 연구-일본의 대심도 지하사용법을 중심으로- 한국법정책학회, 법과 정책연구 16(1), 67-93.
- 대전 MBC, (2017). 가뭄해법 “지하저수지·해수 담수화”. 7월 11일 뉴스 보도.
- 박지원 (2016). 고도처리 정수장에서의 유기물 특성 및 생물학적 안정성 변화. 세종대학교 학위논문
- 박종원 (2016). 미국과 EU의 청정 지하저수지 관련 법제의 현황과 법정책적 시사점. 한국법정책학회, 법과 정책연구 16(1), 95-123.
- 소수현 (2016). 대수층 함양관리를 통한 조류기인 유기물 및 잔류의약품질 거동 연구. 세종대학교 학위논문
- 이원모 (2016). 전처리 방법에 따른 인공함양에서의 수질개선 연구. 세종대학교 학위논문
- 오세형, 구민호, 김용철 (2010). 제주도 한천유역 홍수저감용 저류지에서의 인공함양 지하수 모델링. 대한지질공학회 학술발표논문집 2010(1), 351-355.
- Baker, A., & Lamont-Black, J. (2001). Fluorescence of dissolved organic matter as a natural tracer of ground water. *Groundwater*, 39(5), 745-750.
- Broseus, R., Vincent, S., Aboulfadl, K., Daneshvar, A., Sauvé, S., Barbeau, B., & Prévost, M. (2009). Ozone oxidation of pharmaceuticals, endocrine disruptors and pesticides during drinking water treatment. *Water research*, 43(18), 4707-4717.
- Chang, C. N., Ma, Y. S., & Zing, F. F. (2002). Reducing the formation of disinfection by-products by pre-ozonation. *Chemosphere*, 46(1), 21-30.
- Coble, P. G. (2007). Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color. *Chemical reviews*, 107(2), 402-418.
- Cory, R. M., McKnight, D. M., Chin, Y. P., Miller, P., & Jaros, C. L. (2007). Chemical characteristics of fulvic acids from Arctic surface waters: Microbial contributions and photochemical transformations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G4).
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and marine biology. An annual review*, 33, 245-03.
- Drewes, J. E., & Jekel, M. (1998). Behavior of DOC and AOX using advanced treated wastewater for groundwater recharge. *Water Research*, 32(10), 3125-3133.
- Gasol, J. M., & Del Giorgio, P. A. (2000). Using flow cytometry for counting natural planktonic bacteria and understanding the structure of planktonic bacterial communities. *Scientia Marina*, 64(2), 197-224.
- Grünheid, S., Amy, G., & Jekel, M. (2005). Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge. *Water research*, 39(14), 3219-3228.

-
- Hammes, F., Meylan, S., Salhi, E., Köster, O., Egli, T., & Von Gunten, U. (2007). Formation of assimilable organic carbon (AOC) and specific natural organic matter (NOM) fractions during ozonation of phytoplankton. *Water research*, 41(7), 1447–1454.
- Hoppe-Jones, C., Oldham, G. & Drewes, J.E. (2010) Attenuation of total organic carbon and unregulated trace organic chemicals in U.S. riverbank filtration systems. *Water Research*, 44(15), 4643–4659.
- Huber, S. A. (2002). Significance, origin, and fate of natural organic matter in boiler feedwater preparation using surface water. *Ultrapure Water*, 19(4), 18–25.
- Jochem, F. J., Lavrentyev, P. J., & First, M. R. (2004). Growth and grazing rates of bacteria groups with different apparent DNA content in the Gulf of Mexico. *Marine Biology*, 145(6), 1213–1225.
- Kim, H. C., & Dempsey, B. A. (2012). Comparison of two fractionation strategies for characterization of wastewater effluent organic matter and diagnosis of membrane fouling. *Water research*, 46(11), 3714–3722.
- Kim, H. C., Noh, J. H., Chae, S. R., Choi, J., Lee, Y., & Maeng, S. K. (2015). A multi-parametric approach assessing microbial viability and organic matter characteristics during managed aquifer recharge. *Science of the Total Environment*, 524, 290–299.
- Kim, H. C., & Yu, M. J. (2005). Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control. *Water research*, 39(19), 4779–4789.
- Kolehmainen, R. E., Langwaldt, J. H., & Puhakka, J. A. (2007). Natural organic matter (NOM) removal and structural changes in the bacterial community during artificial groundwater recharge with humic lake water. *Water research*, 41(12), 2715–2725.
- LeChevallier, M. W., Schulz, W., & Lee, R. G. (1991). Bacterial nutrients in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(3), 857–862.
- Lee, Y., Gerrity, D., Lee, M., Bogeat, A. E., Salhi, E., Gamage, S., Trenholm, R.A., Wert, E.C., Snyder, S.A. & Von Gunten, U. (2013). Prediction of micropollutant elimination during ozonation of municipal wastewater effluents: use of kinetic and water specific information. *Environmental science & technology*, 47(11), 5872–5881.
- Liu, G., Van der Mark, E.J., Verberk, J.Q.J.C. & Van Dijk, J.C. (2013) Flow Cytometry Total Cell Counts: A Field Study Assessing Microbiological Water Quality and Growth in Unchlorinated Drinking Water Distribution Systems. *Biomed Research International*.
- Longnecker, K., Sherr, B. F., & Sherr, E. B. (2005). Activity and phylogenetic diversity of bacterial cells with high and low nucleic acid content and electron transport system activity in an upwelling ecosystem. *Applied and environmental microbiology*, 71(12), 7737–7749.
-

-
- Maeng, S. K., Sharma, S. K., Lekkerkerker-Teunissen, K., & Amy, G. L. (2011). Occurrence and fate of bulk organic matter and pharmaceutically active compounds in managed aquifer recharge: a review. *Water research*, 45(10), 3015–3033.
- Maeng, S. K., Sharma, S. K., Abel, C. D., Magic-Knezev, A., Song, K. G., & Amy, G. L. (2012). Effects of effluent organic matter characteristics on the removal of bulk organic matter and selected pharmaceutically active compounds during managed aquifer recharge: Column study. *Journal of contaminant hydrology*, 140, 139–149.
- Magic Knezev, A., Wullings, B., & Van der Kooij, D. (2009). Polaromonas and Hydrogenophaga species are the predominant bacteria cultured from granular activated carbon filters in water treatment. *Journal of applied microbiology*, 107(5), 1457–1467.
- Molnar, J., Agbaba, J., Dalmacija, B., Tubić, A., Krčmar, D., Maletić, S., & Tomašević, D. (2013). The effects of matrices and ozone dose on changes in the characteristics of natural organic matter. *Chemical engineering journal*, 222, 435–443.
- Nawrocki, J., Świetlik, J., Raczyk-Stanisławiak, U., Dąbrowska, A., Biłozor, S., & Ilecki, W. (2003). Influence of Ozonation Conditions on Aldehyde and Carboxylic Acid Formation. *Ozone: science & engineering*, 25(1), 53–62.
- Nompex, P., Dore, M., De Laat, J., Bawa, M., & Legube, B. (1991). Ozonation of selected molecules constituting cellular matter.
- Servais, P., Billen, G., Laurent, P., Levi, Y., & Randon, G. (1992). Studies of BDOC and bacterial dynamics in the drinking water distribution system of the Northern Parisian suburbs. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 5, 69–89.
- Treguer, R., Tatin, R., Couvert, A., Wolbert, D., & Tazi-Pain, A. (2010). Ozonation effect on natural organic matter adsorption and biodegradation - application to a membrane bioreactor containing activated carbon for drinking water production. *Water research*, 44(3), 781–788.
- Van der Kooij, D., Hijnen, W.A.M. & Kruithof, J.C. (1989). The effects of ozonation, biological filtration, and distribution on the concentration of easily assimilable organic carbon (AOC) in drinking water. *Ozone Sci. Eng.*, 11(3), 297–311.
- Vital, M., Stucki, D., Egli, T., & Hammes, F. (2010). Evaluating the growth potential of pathogenic bacteria in water. *Applied and environmental microbiology*, 76(19), 6477–6484.
- Von Gunten, U., & Hoigne, J. (1994). Bromate formation during ozonation of bromide-containing waters: interaction of ozone and hydroxyl radical reactions. *Environmental Science & Technology*, 28(7), 1234–1242.
- Weiss, W. J., Bouwer, E. J., Ball, W. P., O'Melia, C. R., Lechevallier, M. W., Arora, H., & Speth, T. F. (2003). Riverbank filtration—fate of DBP precursors and selected microorganisms. *Journal American Water Works Association*, 95(10), 68–81.
-

-
- Yan, M., Wang, D., Shi, B., Wang, M., & Yan, Y. (2007). Effect of pre-ozonation on optimized coagulation of a typical North-China source water. *Chemosphere*, *69*(11), 1695–1702.
- Yoon, M. K., Drewes, J. E., & Amy, G. L. (2013). Fate of bulk and trace organics during a simulated aquifer recharge and recovery (ARR)-ozone hybrid process. *Chemosphere*, *93*(9), 2055–2062.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.