

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호(○)  
농업기반 및 재해대응기술 개발사업 2022년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004352-01

# 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 시설 개발

2023.05.17

주관연구기관 / 한국농어촌공사  
농어촌연구원

협동연구기관 / 군산대학교  
(주)지엔에스엔지니어링

농림축산식품부  
농림식품기술기획평가원



## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

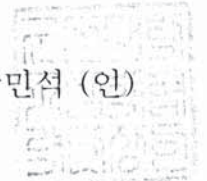
본 보고서를 “농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 시설 개발” (개발기간 : 2020.04.29 ~ 2022.12.31)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 05. 17.

주관연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원 (대표자) 서상기 (인)



협동연구기관명 : 군산대학교 산학협력단 (대표자) 장민석 (인)



참여기관명 : (주)지엔에스엔지니어링 (대표자) 박성민 (인)



주관연구책임자 : 이병선

협동연구책임자 : 김강주

참여기관책임자 : 손봉호

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.





최종보고서										보안등급		
										일반[ <input checked="" type="checkbox"/> ], 보안[ <input type="checkbox"/> ]		
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명	사업명		농업기반 및 재해대응 기술개발 사업				
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원				내역사업명 (해당 시 작성)		농업용수 및 기반시설 관리효율화 기술				
공고번호		제농축2020-99호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
					연구개발과제번호		320052-03					
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0904	60%	LB0903	15%	LB0504	15%					
	농림식품과학기술분류	RA0403	60%	RA0105	15%	RA0103	15%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발									
		영문	Development of a low impact development facility customized in rural area using agricultural byproducts									
연구개발과제명		국문	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발									
		영문	Development of a low impact development facility customized in rural area using agricultural byproducts									
주관연구개발기관		기관명	한국농어촌공사 농어촌연구원			사업자등록번호		134-82-04362				
		주소	(15634) 경기도 안산시 상록구 해안로 870			법인등록번호		135271-0000021				
연구책임자		성명		이병선		직위		책임연구원				
		연락처	직장전화		***-***-****		휴대전화		***-***-****			
			전자우편		***** @ekr.or.kr		국가연구자번호		**** *			
연구개발기간		전체		2020. 04. 29 - 2022. 12. 31( 2년 8개월)								
		1단계 (해당 시 작성)	1차		2020. 04. 29 - 2020. 12. 31( 0년 8개월)							
			2차		2021. 01. 01 - 2021. 12. 31( 1년 0개월)							
			3차		2022. 01. 01 - 2022. 12. 31( 1년 0개월)							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비 외 지원금	
			현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금		현물
총계		712,000	-	216,750					712,000	216,750	928,750	
1단계	1년차	194,000	-	65,000					194,000	65,000	259,000	
	2년차	259,000	-	87,000					259,000	87,000	346,000	
	3년차	259,000	-	64,750					259,000	64,750	323,750	
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고					
공동연구개발기관		군산대학교	김강주	교수	*****-****	*****@kunsan.ac.kr	공동연구	대학교				
		(주)엔에스Eng	손봉호	이사	*****-****	*****@hanmail.net	공동연구	중소기업				
위탁연구개발기관												
연구개발기관 외 기관												
연구개발담당자 실무담당자		성명		서상진		직위		선임연구원				
		연락처	직장전화		***-***-****		휴대전화		***-***-****			
			전자우편		***** @ekr.or.kr		국가연구자번호		**** *			



이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2023년 05월 17일

연구책임자: 이 병 선



주관연구개발기관의 장: 한국농어촌공사 농어촌연구원장 (직인)



공동연구개발기관의 장: 군산대학교 산학협력단장



공동연구개발기관의 장: (주)지엔에스엔지니어링 대표이사



농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하



## < 요약 문 >

사업명	농업기반 및 재해대응기술개발 사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)	농업용수 및 기반시설 관리효율화 기술			연구개발과제번호		320052-03	
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0904	60%	LB0903	15%	LB0504	10%
	농림식품 과학기술분류	RA0403	60%	RA0105	15%	RA0103	10%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발						
연구개발과제명	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발						
전체 연구개발기간	2020.04.29.~2022.12.31.						
총 연구개발비	총928,750천원 (정부지원연구개발비: 712,000천원, 기관부담연구개발비 : 216,750천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계	기초[ ] 응용[ ] 개발[ √ ] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준( ) 종료시점 목표( )	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 개발 및 실용화로 물부족 농어촌에 대한 지하수 인공함양(추가 지하수 확보) 및 지하수 수질 개선				
	전체 내용		물부족 농어촌에 대하여, 추가 지하수 확보가 가능하고, 질산성 질소 등 오염물질 정화가 가능한 농어촌형 저영향개발(LID) 기술 개발, 현장시설 설치 및 효율 분석, 실용화 추진(안) 수립				
	1단계 (1차년도)	목표	농어촌형 저영향개발(LID) 요소기술 개발 : 농업부산물을 이용한 지하수 인공함양 및 비점오염원(질산염) 제거 요소기술 개발				
		내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 농업부산물 선정 및 오염물질 제거에 대한 평가(실내실험)</li> <li>▪ 실내실험 기반 농어촌형 저영향개발 시설 주입여재 비율 산출</li> <li>▪ 저영향개발 시설 현장실증을 위한 현장시험지구(TB) 선정</li> <li>▪ 현장시험부지 지하수 부족량 및 수질오염 분석 부지 특성화</li> </ul>				
	1단계 (2차년도)	목표	현장시험부지(물부족 시설원예지역) 농어촌형 저영향개발 시설 개발 및 시험시공				
		내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 농업부산물 내 유기물에 의한 지하수 수질개선 효율 평가</li> <li>▪ 농업부산물 최종 정화여재(목재펠릿, 석회석)의 정화 효율 산출</li> <li>▪ 하동군 물부족 시설원예지역 시범사업화를 위한 MOU 체결</li> <li>▪ 물부족 시설원예지역 저영향개발(LID) 시설 최적 설계 및 시공</li> </ul>				
1단계 (3차년도)	목표	농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 지하수 관리방안 수립					
	내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 동절기 현장시설 탈질효율 및 추가지하수 확보 정량적 해석 평가</li> <li>▪ 동절기 현장시설 주입유량(120 m<sup>3</sup>/d) 최적화 및 장기주입시험</li> <li>▪ 추가지하수 확보를 위한 관리방안 수립 및 LCC 15년 산출</li> <li>▪ 농어촌형 저영향개발 시설 현장운영지침서 개발</li> </ul>					

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>농업부산물을 이용한 저비용 고효율 오염지하수 정화 여재 개발</li> <li>지하수 오염물질 제거와 추가 지하수 확보가 동시에 가능한 저영향기술 개발</li> <li>물부족 농어촌 지역 맞춤형 농어촌형 저영향기술 표준설계기준 수립 및 보급</li> </ul>												
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<p>1) 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>농어촌 지하수 수량·수질 우려지역(시설재배단지 등)에 농림사업 추진</li> <li>통합물관리의 유역 내 물 자립 기초 대응 지자체의 지하수 자체 수급 계획에 활용</li> </ul> <p>2) 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 물부족 농어촌지역의 지하수 수량확보 및 수질관리로 지속가능한 지하수 이용 도모, 농식품부 정책지원 사업 활용</li> <li>농어촌형 저영향개발(LID) 시설의 활용성 제고로 신산업 분야 창출 및 지하수 환경보전 기여, 안정적인 지하수 공급, 산업체 활용 가능성 증대</li> </ul>												
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음												
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종		
	3	2	1					생명 정보	생물 자원		정보	실물	
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호				
국문핵심어 (5개 이내)	농업부산물		저영향개발		지하수		확보		정화				
영문핵심어 (5개 이내)	Agricultural by-product		Low Impact Development		Groundwater		Securing		Remediation				

**<1차년도 연구 요약>**

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
1차 년도 (2020)	농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 추가지하수 확보 기술 개발	현장시험부지 선정 및 구축	· 현장시험부지(Test bed) 선정을 위한 조사 : 시설원에농업지역 대상으로 조사 및 선정 · 현장시험부지(Test bed) 농업현황 및 지하수 이용특성 조사	· 경남 하동군 시설원에농업지역을 당초 목표대로 현장시험부지로 선정 · 재배작물 조사, 관정현황조사, 지하수 이용특성 조사, 지하수 부족량 조사 등 완료
		현장시험부지 수리지질 특성화	· 현장시험부지(Test bed) 지하수 수질(이화학, 농업용수, 동위원소 등) 조사 · 현장시험부지 겨울철 수막재배에 따른 물부족 지역 및 물풍부 지역 조사	· 수질분석 결과, 현장시험부지는 하천변과 내륙의 지하수 수질이 크게 구분되며, 하천변 천부지하수가 순환이용에 따른 질산성질소 오염 심각 · 지하수 관정심도는 내륙쪽으로 깊어짐 : 내륙으로 갈수록 수량 부족에 따른 관정심도 증가
	농어촌형 저영향개발 적용에 오염물질 저감 기술 개발	농업부산물 정화여재 선정	· 볏짚, 쌀겨, 나뭇잎, 우드칩 등에 대한 난분해성물질(cellulose, hemicellulose, lignin 등)함량분석 · 이들 재료에 대한 탈질성능실험 수행	· 우드칩은 난분해성물질의 함량이 가장 많아 서서히 오랜기간 환원환경을 유지 · 볏짚의 탈질능력이 매우 탁월하게 나타남
		농업부산물을 이용한 질산염정화 배치실험	· 나뭇잎과 우드칩을 이용하여 모래를 채운 조건에서 탈질실험 수행 · 모래 속에 탄산칼슘이 포함될 경우에 대한 효과 분석	· 우드칩보다는 나뭇잎이 탈질능력이 좋으나, 수질장애물질인 철, 망간, 암모니아 등의 농도증가도 크게 나타남. · 석회석과 같은 탄산칼슘성분은 공극수내 pH를 미생물활동에 유리한 상태를 유지시켜 탈질속도를 현격하게 촉진시킴. 아울러, 높은 알칼리도를 발생시켜 철, 망간 등의 침전유에도 유리한 환경을 조성하는 것으로 확인됨.
	최적 농어촌형 저영향개발 시설 시공기술 개발	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발 시설 설계(안) 수립	· 농어촌형 저영향개발 시설 설계(안) 수립	· 장방형 구조물로 설계하였으며, 설치 장소에 따라 구조물을 변경하여 설치 할 수 있도록 구상한 상향류식 모래여과형 지하수 함양장치로 하향류 시설과 비교하여 긴 체류시간을 통해 처리효과를 향상
		현장시험부지 에 시설 설치 사전 조사 및 배치방법	· 현장시험부지 특성 조사 시행 · 현장시험부지 장치 배치(안) 수립 · 정화 여재 부착 설계(안) 수립	· 표토 지질 조사 및 인근 관정 유향유속 실험 완료 · 설치지점 선정(모니터링 관정 설치 지점 포함 배치계획 수립) · 침사지 → 1차 모래여과 → 유량조정조 → 여재부로 1차 모래여과 및 여재부(우드칩+모래)의 흐름방향을 상향류로 설계

**<2차년도 연구 요약>**

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
2차 년도 (2021)	농어촌형 저영향개발 시설 적용에 다른 추가 청정지하수 확보 기술 개발	현장시험부지 에 추가로 확보가능한 지하수 수량 산출	· 현장시험부지 기후변화 분석 기반 상습 가뭄에 따른 지하수 부족량 분석 · 겨울철 수막재배로 인한 지하수 부족량 산출	· IPCC 5차보고서 기반, 현장시험부지의 RCP 4.5 및 8.5에 따른 기후변화(강수량 변화) 분석 · 강수량 부족에 따른 상습가뭄 일수 및 지하수 부족량 산출 · 강수량 부족에 더불어 겨울철 수막재배로 인한 경쟁적 지하수 개발 이용에 따른 지하수 부족량 산출
		저영향개발 시설물의 지하수 함양에 따른 효과분석	· 현장시험부지 재배작물 수요량 분석, 계절별 지하수 수요량 분석 등 필요수량 산출 · 현장시험부지 내 저영향개발 시설 시공 이 후, 지하수의 추가 수량 확보 및 수질개선 모니터링이 가능한 관측공 개발	· 현장시험부지의 재배작물 조사, 관정현황조사, 지하수 이용특성 조사, 지하수 부족량 조사 등 완료하여 실제 지하수 필요수량 산출 · 현장 실증형 저영향개발 시설 주변에 관측공 설치 : 저영향개발 시설을 통한 지하수 함양 시 수량 및 수질 모니터링 및 분석(예정)
	농어촌형 저영향개발 적용에 따른 오염물질 저감 기술 개발	실내컬럼 시험을 통한 최종 정화 여재의 제거 효율 산출	· 석회석을 이용한 탈질효율 증대	· 유기물의 분해로 발생하는 CO <sub>2</sub> 로 공극수의 pH는 5이하까지 낮아져 탈질에 유리한 pH 조건 (7~8)에 비하여 너무 낮아 탈질이 억제됨. · 석회석을 사용한 결과, 유기물 분해로 pH가 낮아지는 것을 저감하고, 매우 빨라진 탈질효과를 반복실험하여 확인.
			· 황산염을 공급함으로써 황산염 환원으로 발생한 황화수소(H <sub>2</sub> S)가 철과 반응하여 침전되는지 검토하는 실험	· 황산염 환원을 통하여 철, 망간의 농도를 억제하고자 하였으나, 실험시간동안에 황산염의 환원은 이루어졌으나 철,망간의 농도감소는 관찰하지 못함. · 황산염의 환원으로 악취가 심하게 발생하였으며, 물색도 변화되어 수질개선에 큰 효과를 주지는 못함
	최적 농어촌형 저영향개발 시설 시공기술 개발	농업부산물 이용한 농어촌형 저영향개발 정화여재 최적 배치	· 하동군 시설원예지역의 현장시험부지 특성에 최적화 된 농어촌형 저영향개발 시설 설계	· 하동군 현장시험부지 시추조사, 지하수 유향유속 조사, 침투율 조사 등 지하수 인공함양에 요구되는 현장 지하수 대수층 농공학적 분석 · 현장시험부지 지하수 대수층 특성에 적합하고, 비용경제적으로 저렴한 자연형 시설로 저영향개발 시설 계획, 무동력 운전이 가능하도록 설계 · 현장시설 내부 채움재(여재구성)은 실내실험에서 구한 모래: 여재 : 석회석의 조합을 그대로 반영
			농업부산물 이용한 농어촌형 저영향개발 시설 시험시공	· 하동군 물부족 시설원예지역 내 현장시험부지에 대한 저영향개발 시설 시공



### <3차년도 연구 요약>

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
3차 년도 (2022)	농어촌형 저영향개발 시설 적용에 따른 추가 청정지하수 확보 기술 개발	농어촌형 저영향개발 이용 지하수 관리방안 수립	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시설원에단지 추가 청정지하수 확보를 위한 농어촌형 저영향개발 시설 적용방안 수립</li> <li>· 현장 실용화 시 고려해야 할 사항</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 현장시험 기반 최적 탈질을 위한 적정 유입수량(120 m<sup>3</sup>/d) 산정</li> <li>· 용배수로 유입수의 유량 대비 분지형 저영향개발 시설의 설계규모 산정 : LCC (Life cycle costs) 15년 산출</li> <li>· 주입수 수질개선을 위한 최적 탈질 방안 수립</li> </ul>
		농어촌형 저영향개발 현장운영지침서 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 현장 농림사업화(실용화) 방안 수립</li> <li>· 현장운영지침서 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 농식품부 국고사업(한국농어촌공사 대행 사업)인 「순환형 지하수자원 확보사업」에 실용화 할 수 있도록 추진</li> <li>· 연구보고서와 독립적인 현장운영지침서를 개발하여, 개발된 농어촌형 저영향개발 기술의 범용화 및 실용화 추진</li> <li>· 농식품부 정책지원 사업 활용</li> <li>· 안정적인 지하수 공급, 산업체 활용 가능성 증대</li> </ul>
	농어촌형 저영향개발 적용에 따른 오염물질 저감 기술 개발	현장 시험시설의 탈질 효율 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 현장규모 오염지하수 수질개선을 위한 시험계획 수립</li> <li>· 현장 농어촌형 저영향개발 시설의 탈질 효율 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 인공오염수(KNO<sub>3</sub>)를 이용한 동절기 농어촌형 저영향개발(LID) 시설의 탈질효율 분석</li> <li>· 순간주입유형의 주입시험으로, 주입수의 유량 및 시설 내 체재시간 대비 탈질을 산정</li> <li>· 비반응용질(Br) 및 탈질 중간산물(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) 분석을 통한 탈질 효율 정량 분석</li> <li>· 시간적, 공간적 오염수 확산 및 저감능 모니터링 및 분석</li> </ul>
	최적 농어촌형 저영향개발 시설 시공기술 개발	농어촌형 저영향개발 시설의 요소기술 정립	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 용배수로 용수의 주입유량 정량화를 위한 역사이편 형식 주입관 개발</li> <li>· 용배수로 용수의 주입유량 조절을 위한 볼밸브 형식 개폐장치 개발</li> <li>· 침전물에 의한 투수량 감소 우려 사전제거를 위한 야자매트 주기적 교체 방법 제안</li> <li>· 비닐하우스 단동형 저영향개발 시설 정량화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 용배수로 주입수의 부유물 사전 투입 예방을 위한 2중 망사 유입장치 개발</li> <li>· 용배수로 용수의 주·야간 유량 변화에 따른 유입량 차이에 따른 주입유량 미정량화 발생 : 역사이편 주입관 시설로 정량화</li> <li>· 농어촌형 저영향개발 시설 적정주입량 보전 및 역유입 방지를 위한 볼밸브 형식 주입 개폐장치 개발</li> <li>· 계절별 탈질의 정량적 차이 평가를 위한 오염수 제조 및 주입장치, 균등 분사장치 개발</li> <li>· 외부 기상여건에 따른 탈질을 변화 사전방지를 위한 외부보호장치 개발</li> <li>· 침전물에 의한 공극막힘 현상제거를 위한 야자매트 주기적 교환방안 제시</li> <li>· 비닐하우스 단동형 저영향개발 시설 최종(안) 개발, 현장적용, 추가 지하수 확보량 정량화</li> </ul>



# 차 례

<b>1. 연구개발과제의 개요</b> .....	<b>29</b>
<b>가. 연구 개요</b> .....	<b>29</b>
(1) 통합물관리 정책과 지하수 .....	29
(2) 대규모 하천 주변 지하수 이용 .....	29
(3) 시설재배단지 확대 .....	30
(4) 지하수 인공함양 .....	30
<b>나. 연구 필요성</b> .....	<b>32</b>
<b>다. 연구 목표</b> .....	<b>32</b>
<b>2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용</b> .....	<b>35</b>
<b>가. 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID)</b> .....	<b>35</b>
(1) 농업부산물 .....	35
(가) 농업부산물의 정의 .....	35
(나) 농업부산물 발생 현황 .....	36
(다) 농업부산물의 기술적 잠재량 .....	39
(2) 저영향개발 .....	40
(가) 저영향개발(LID; Low impact development) 정의 .....	40
(나) 저영향개발(LID) 시설을 이용한 비점오염원 관리 현황 .....	41
(3) 농어촌지하수 오염 현황 .....	48
(가) 농어촌지하수 비점오염원 현황 .....	48
(나) 농어촌지하수 오염 특성 .....	48
(다) 농어촌지하수 중 질산성질소 오염 현황 .....	49
(라) 농어촌지하수 질산성질소 저감 방법 .....	50
(4) 국내·외 유사연구 및 시장 현황 .....	52
(가) 국내 유사연구 현황 .....	52
(나) 국외 유사연구 현황 .....	53
(다) 시장 현황 .....	54
(라) 지식재산권 현황 .....	56
(5) 농어촌형 저영향개발(LID) .....	57
(가) 물부족 농어촌지역 저영향개발(LID) 필요성 .....	57
(나) 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) .....	57
(다) 핵심기술 .....	58

<b>나. 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발 실내실험 연구</b> .....	<b>60</b>
(1) 연구개요 .....	60
(가) 연구배경 및 목적 .....	60
(나) 농어촌지하수 주요 오염물질 순환 및 거동 .....	62
(2) 연구개발의 개요 .....	66
(가) 연구개발 개요 .....	66
(나) 정화여재가 탑재된 저영향개발 시설의 지하수 정화 메커니즘 .....	67
(3) 연구방법 .....	69
(가) 질산성질소 제거에 적합한 농업부산물 선정 .....	69
(4) 연구결과 (Ⅰ) : 실내실험 .....	72
(가) 농업부산물 선정을 위한 간이 배치실험 (실험 A) .....	72
(나) 우드칩과 나뭇잎을 활용한 질산성질소 제거 효율 비교 실험 (실험 B) .....	76
(다) 석회석에 의한 질산성질소 제거 효율 비교 실험 (실험 C) .....	81
(라) 주요 성과 요약 .....	86
(5) 연구결과 (Ⅱ) : 추가 실내실험 .....	87
(가) 모래를 채운 컬럼반응조 실험 .....	87
(나) 모래를 채우지 않은 컬럼반응조 실험 .....	95
(6) 결론 .....	102
<b>다. 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 개발 및 시험</b> .....	<b>103</b>
(1) 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 개발 .....	103
(가) 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 구상 .....	103
(나) 저영향개발(LID) 시설 선정 및 파일럿 규모 시설 제작 .....	109
(다) 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 평가실험 .....	118
(2) 파일럿규모 저영향개발(LID) 시설 현장 적용 .....	125
(가) 현장 선정 .....	125
(나) 현장 시설 설치 .....	125
(다) 현장 시험 방법 .....	126
(라) 현장 시험 결과 .....	126
(3) 결론 .....	127
<b>라. 연구지역 선정 및 용수공급 현황 조사</b> .....	<b>128</b>
(1) 연구지역 개요 .....	128
(가) 연구지역 지형 .....	128
(나) 연구지역 지질 .....	128
(다) 연구지역 기상 .....	131
(2) 기후변화 시나리오 .....	133
(가) 대표농도경로 시나리오 .....	133

- (나) 한반도 기후변화 시나리오 ..... 134
- (다) 가뭄지수 ..... 134
- (3) 관정 현황 조사 ..... 140
  - (가) 용도별 관정 현황 ..... 140
    - (나) 수막재배용 관정 현황 ..... 141
    - (다) 구경별 관정 현황 ..... 141
    - (라) 심도별 관정 현황 ..... 141
    - (마) 기타 ..... 142
- (4) 수막재배 용수량 ..... 143
  - (가) 수막재배 시설 지하수 이용량 분석 ..... 143
    - (나) 수막재배 관개용수 수요량 산정 ..... 143
    - (다) 추가 지하수 필요수량 산출 ..... 144
- (5) 지하수 수질분석 ..... 148
  - (가) 1차 시료 분석 ..... 148
    - (나) 2차 시료 분석 ..... 150
- (6) 현장시험 부지 지하수 수위 변동 분석 ..... 161

**마. 현장시험부지 지반 조사 ..... 163**

- (1) 조사 개요 ..... 163
  - (가) 조사목적 ..... 163
  - (나) 조사항목 ..... 163
  - (다) 조사기간 ..... 164
  - (라) 조사장비 ..... 164
  - (마) 조사지점 선정 ..... 165
- (2) 조사 방법 ..... 168
  - (가) 현장시험 ..... 168
    - (나) 실내시험 ..... 173
- (3) 조사 결과 ..... 174
  - (가) 지형 및 지질 ..... 174
    - (나) 측량조사 결과 ..... 175
    - (다) 핸드오거보링 결과 ..... 176
      - (라) 지하수 유형·유속시험 결과 ..... 179
      - (마) 시추조사 결과 ..... 182
      - (바) 지하수위 측정 결과 ..... 192
      - (사) 표준관입시험 결과 ..... 193
      - (아) 현장투수시험 결과 ..... 195
      - (자) 토질시험 결과 ..... 202
      - (차) 실내투수시험 결과 ..... 202

(4) 결론 .....	207
<b>바. 현장규모 저영향개발(LID) 시설 설치 .....</b>	<b>208</b>
(1) 현장답사 .....	208
(2) 현장시험부지 측량 .....	209
(가) 조사 개요 .....	209
(나) 지형현황측량 .....	209
(다) 제방법선 측량 .....	210
(3) 현장규모 저영향개발(LID) 시설 설계 .....	211
(가) 부지 조성 계획 .....	211
(나) 시설 통과시간(체류시간) 산정 .....	215
(4) 현장규모 저영향개발(LID) 시설 시공 .....	218
(가) 시공 일정 .....	218
(나) 시공 방법의 보완 .....	218
(다) 현장규모 저영향개발(LID) 시설 시공 .....	219
(5) 결론 .....	227
<b>사. 현장규모 저영향개발(LID) 현장시험 연구 .....</b>	<b>228</b>
(1) 용배수로 용수 함양 및 배출시험 .....	228
(가) 함양시험 (1차) .....	228
(나) 함양시험 (2차) .....	230
(다) 함양시험 (3차) .....	239
(라) 함양시험 (4차) .....	242
(마) 배출시험 (양수시험) .....	244
(2) 지하수 오염물질 탈질 시험 .....	249
(가) 배경농도 조사 및 오염수 주입시험 .....	249
(나) 연구 결과 .....	251
(3) 결론 .....	256
<b>아. 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용한 지하수 관리 방안 .....</b>	<b>257</b>
(1) 농어촌형 저영향개발(LID)을 이용한 지하수 관리방안 .....	257
(가) 기술 적용 범위 .....	257
(나) 기술 적용 방법 .....	258
(다) 기술 활용계획(안) .....	259
(라) LCC (Life Cycle Cost) 분석 .....	259
(2) 제언 : 포스트 코로나 시대의 농어촌지하수 관리방안 .....	261
(가) 서언 .....	261
(나) 코로나-19에 의한 농식품 분야의 피해 .....	261

(다) 코로나-19 시기 물 관리 .....	263
(라) 포스트 코로나 시대 뉴노멀 트렌드 .....	264
(마) 포스트 코로나 시대 지하수 관리 방안 .....	265
(바) 결    언 .....	268
<b>3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 .....</b>	<b>269</b>
가. 연구수행 결과 .....	269
나. 목표 달성 수준 .....	307
<b>4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도 .....</b>	<b>309</b>
가. 농어촌형 저영향개발(LID) 대외기여도 .....	309
(1) 대외기여도 .....	309
나. 사업화 추진 계획 .....	311
(1) 사업화 대상 .....	311
(2) 경제적 목표 .....	311
(3) 추정 매출액 .....	312
다. 해외시장 진출 기회 가능성 증대 .....	312
<b>5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....</b>	<b>315</b>
가. 연구개발 결과의 활용 방안 .....	315
나. 기대성과 .....	317
(1) 기술적 측면 .....	317
(2) 경제·사회적 측면 .....	317
(3) 환경적 측면 .....	317
다. 파급효과 .....	317
라. 향후 연구를 위한 제언 .....	318
<b>참고문헌 .....</b>	<b>319</b>





## 표 차례

표 1-1. 농업부산물의 이용용도 .....	36
표 1-2. 농가의 벚짚 활용 용도 .....	36
표 1-3. 경기 안성시 미이용 농업부산물 발생량 산정 .....	36
표 1-4. 강원 평창군 미이용 농업부산물 발생량 산정 .....	37
표 1-5. 충남 예산군 미이용 농업부산물 발생량 산정 .....	37
표 1-6. 전북 정읍시 미이용농업부산물 발생량 산정 .....	38
표 1-7. 전북 완주군 미이용 농업부산물 발생량 산정 .....	38
표 1-8. 경남 산청군 미이용 농업부산물 발생량 산정 .....	39
표 1-9. 농업부산물 가용잠재량 및 기술적 잠재량 .....	39
표 1-10. 저영향개발의 기관별 정의 .....	40
표 1-11. 저류형 시설 .....	44
표 1-12. 인공습지 .....	45
표 1-13. 침투 저류지 .....	46
표 1-14. 침투도랑 .....	47
표 1-15. 2020년도 지하수 수질기준 초과항목 현황 .....	49
표 1-16. 오염우려지역별 지하수 오염특성 .....	50
표 1-17. 국가 수질측정망 중 질산성질소 초과 현황 .....	50
표 1-18. 대표적인 지하수 내 질산성 질소 저감 처리 공정 .....	51
표 1-19. 농업용수 수질개선 증장기 계획 .....	55
표 2-1. 각종 논문 및 보고서에 제시된 지하수의 질산성질소 먹는물기준치 초과현황 .....	61
표 2-2. 금강유역(부여) 충적층지하수에서 채수된 지하수(n = 55)시료에 대한 중복오염 분석결과 .....	65
표 2-3. 실험에 사용된 농업부산물에 대한 cellulose, hemicellulose, lignin 분석결과 .....	70
표 2-4. 재료들의 Ca <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Fe, Mn 함량 분석결과 .....	72
표 2-5. 실험 A의 각 반응조에 대한 조건 .....	73
표 2-6. 각 컬럼에 이용된 채움재료(실험 B) .....	78
표 2-7. 컬럼 채움재료의 현황과 각 컬럼별 공극수의 초기 공극수 조성 .....	89
표 2-8. 실험 A의 각 반응조에 대한 조건 .....	96
표 3-1. 부유물질 분석절차 및 결과보고 .....	119
표 3-2. 1차 실험 결과 .....	121
표 3-3. 2차 실험 결과 .....	122
표 3-4. GNS_TANK 부유물질 제거율 .....	124
표 3-5. 시설 유량 확인 .....	126
표 3-6. 지하수 수질분석 .....	127
표 3-7. 파일럿규모 저영향개발(LID) 시설 효율 .....	127
표 4-1. 연구지역 재배시설 면적 .....	128
표 4-2. 시나리오별 대기 중 이산화탄소 농도 예측 .....	133

표 4-3. 파머가뭇지수(PDSI)에 따른 가뭇상태	135
표 4-4. 표준강수지수(SPI)에 따른 가뭇상태	135
표 4-5. SPI와 PDSI 가뭇지수 비교	136
표 4-6. 가뭇지수 산정을 통한 가뭇예측	136
표 4-7. 북방지구 용수구역 가뭇예측	138
표 4-8. 용도별 관정 현황	140
표 4-9. 수막재배용 관정 현황	141
표 4-10. 구경별 현황	141
표 4-11. 심도별 현황	142
표 4-12. 수막재배 시설 겨울철 지하수 추정 이용량	143
표 4-13. 타 시설재배단지 수막재배 지하수 추정 이용량	143
표 4-14. 연구지역(TB) 발작물 증발산량 산정에 이용된 작물계수	144
표 4-15. 연구지역(TB) 작물 증발산량 산정 결과	144
표 4-16. 진주기상대 월별 강수량	146
표 4-17. 수막재배 용도 지하수 과부족량 산출	147
표 4-18. 농업용수 수질기준 시료분석 결과	149
표 4-19. 수질이화학 분석 결과)	154
표 4-20. 농업용수 수질시료 분석 결과	158
표 5-1. 현장시험부지 지반조사 조사항목	163
표 5-2. 현장시험부지 지반조사 조사기간	164
표 5-3. 현장시험부지 지반조사 조사장비	164
표 5-4. 기존 관정 위치 측량	165
표 5-5. 핸드오거 표토지점 위치 측량	166
표 5-6. 시추조사 위치	167
표 5-7. BH-2 조사 결과	179
표 5-8. BH-3 조사 결과	180
표 5-9. 지하수 유형 유속 결과 분석	181
표 5-10. 시추조사 결과	182
표 5-11. 지층개황	183
표 5-12. 지하수위 측정 결과	192
표 5-13. 표준관입시험 결과	193
표 5-14. 현장투수시험 결과	195
표 5-15. 실내 토질시험 결과	202
표 5-16. 실내 투수시험 결과	202
표 6-1. 기준점 측량 성과	209
표 6-2. 각종 지질매체의 공극율	215
표 6-3. 시설 층별 투수계수	216
표 7-1. 1차 함양시험 중 외부 관측공 수위의 변화	230

표 7-2. 2차 함양시험으로 산출한 총적대수층 수리상수 .....	237
표 7-3. 배출시험(양수시험)으로 산출한 암반대수층 수리상수 .....	247
표 7-4. 지하수 수질분석 항목 및 수량 .....	250
표 8-1. LCC (Life Cycle Cost) 분석 .....	259



# 그림 차례

그림 1-1. 농업부산물의 종류 .....	35
그림 1-2. 농업부산물 중 벧짚(좌)과 전정가지(우) .....	35
그림 1-3. 빗물의 지하수 함양을 위한 저영향개발(LID) 시설 모식도 .....	40
그림 1-4. 도시화에 따른 물순환 체계 파괴 .....	41
그림 1-5. 농촌 비점오염원의 정의 .....	42
그림 1-6. 오염물질 초과 비율 .....	49
그림 1-7. 제주 지역 질산성 질소 변화 추이 및 지질분포도 .....	50
그림 1-8. 전주시 덕진공원 저영향개발(LID) 시설을 이용한 빗물침투사업 .....	53
그림 1-9. 미국 시애틀 저영향개발(LID) 시설 설치 전 후 .....	54
그림 1-10. 용도별 지하수 개발현황 .....	55
그림 1-11. 기존 방식과 물순환 방식의 저영향개발 비교 .....	58
그림 1-12. 농어촌형 LID 개념도 .....	58
그림 1-13. 침투도랑형 저영향개발 시설 모식도 실례 .....	59
그림 2-1. 2001-07년 동안 국내 지하수수질측정망 자료 .....	60
그림 2-2. 자연상에서 질소순환개념모델 .....	62
그림 2-3. Ammonification, nitrification, denitrification, anammox과정에 대한 설명도 .....	64
그림 2-4. pH 변화에 따른 Ammonium과 ammona의 상대적인 농도 변화 .....	64
그림 2-5. Kim et al.(2009)이 만경강유역에서 관찰한 NO <sub>3</sub> , Fe, SO <sub>4</sub> 및 PO <sub>4</sub> 의 심도별 농도변화 .....	65
그림 2-6. 기존 방식과 물순환 방식의 저영향개발 비교 .....	66
그림 2-7. 농어촌형 LID 개념도 .....	66
그림 2-8. 침투도랑형 저영향개발 시설 모식도 실례 (출처 : Google 이미지) .....	68
그림 2-9. 본 실험에 사용된 농업부산물 들. 우드칩(woodchip, 소나무), 나뭇잎(leaves, 벧나무), 벼지 푸라기(rice straw), 쌀겨(rice hull) .....	69
그림 2-10. 목재의 구성성분인 cellulose, hemicellulose, lignin을 보여주는 모식도 .....	70
그림 2-11. 재료들의 Ca <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Fe, Mn 함량 .....	71
그림 2-12. 간이 batch실험(실험 A)의 반응조와 sampling에 이용된 주사기와 바늘 .....	73
그림 2-13. 실험 A의 시간에 따른 반응조의 색변화 .....	74
그림 2-14. 간이 batch실험(실험 A)에서 시간에 따른 수질변화 .....	75
그림 2-15. 실험B와 C에 이용된 컬럼의 도면과 실물 사진 .....	77
그림 2-16. 실험에 이용된 재료 사진(실험 B) .....	77
그림 2-17. Batch 실험(실험B)에 이용된 컬럼의 packing 내역 .....	78
그림 2-18. 실험 B의 시간에 따른 질산성질소 제거효율(상) 및 제거 속도(하) .....	79
그림 2-19. 시간에 따른 수질변화(실험 B) .....	80
그림 2-20 실험 C의 각 컬럼에 이용된 재료와 packing 조건 .....	82
그림 2-21. 실험 C의 시간에 따른 질산염 제거량 .....	83
그림 2-22. 실험 C의 시간에 따른 수질변화 .....	84

그림 2-23. 실험 C의 시간에 따른 광물포화지수 변화 .....	86
그림 2-24. 본 실험에 이용된 컬럼의 도면과 실물 사진 .....	87
그림 2-25. 실험에 이용된 재료 사진(실험 B) .....	88
그림 2-26. 실험에 사용된 컬럼의 재원과 사진 .....	89
그림 2-27. 모래를 채운 실험에서 채수된 물의 시간에 따른 색깔 변화 .....	90
그림 2-28. 컬럼반응용기에서 질소화합물들의 시간별 농도변화 .....	91
그림 2-29. 컬럼반응용기에서 질소화합물들의 시간별 질산염 제거율변화 .....	91
그림 2-30. 컬럼반응용기에서 pH, EC, Eh, DO의 시간별 변화 .....	92
그림 2-31. 컬럼반응용기에서 alkalinity, pCO <sub>2</sub> , DOC, DIC의 시간별 변화 .....	93
그림 2-32. 주요 양이온, Fe, Mn, SO <sub>4</sub> 의 농도변화 .....	94
그림 2-33. 시간에 따른 광물포화지수의 변화 .....	95
그림 2-34. 간이 batch실험(실험A)의 반응조와 sampling에 이용된 주사기와 바늘 .....	96
그림 2-35. 실험A의 시간에 따른 반응조의 색변화 .....	97
그림 2-36. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 무기질소화합물의 농도변화 .....	98
그림 2-37. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 pH, EC, Eh, DO의 변화 .....	99
그림 2-38. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 alkalinity, pCO <sub>2</sub> , DOC, DIC의 변화 .....	100
그림 2-39. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 주요 양이온, Fe, Mn, SO <sub>4</sub> 의 변화 .....	101
그림 2-40. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 광물포화지수 변화 .....	102
그림 3-1. 스크린 교체형 지하수 함양장치 구상(안) .....	103
그림 3-2. 여재 스크린 교체형 지하수 함양장치 구상(안) .....	104
그림 3-3. 토사유입방지장치 형 지하수 함양장치 구상(안) .....	105
그림 3-4. 상향류식 지하수 함양장치 구상(안) .....	106
그림 3-5. 상향류식 모래여과형 지하수 함양장치 구상(안) .....	107
그림 3-6. 유량조절이 가능한 자연형 지하수 함양장치 구상(안) .....	108
그림 3-7. GNS_TANK 개념도 및 장치사진 .....	110
그림 3-8. GNS_TANK-분해도 .....	111
그림 3-9. GNS_TANK-하단부 .....	112
그림 3-10. GNS_TANK-측면 .....	112
그림 3-11. GNS_TANK-정면 .....	113
그림 3-12. GNS_TANK-중간 스크린 .....	113
그림 3-13. GNS_TANK-지지대 분해도 .....	114
그림 3-14. GNS_TANK-지지대 상부 .....	115
그림 3-15. GNS_TANK-지지대 정면 .....	115
그림 3-16. GNS_TANK-지지대 측면 .....	116
그림 3-17. GNS_TANK-모래여과 케이스 .....	117
그림 3-18. GNS_TANK-부유물질 제거실험 .....	120
그림 3-19. 실험결과(유리섬유여지) .....	123
그림 3-20. 부유물질 변화 추이 .....	124

그림 3-21. 저영향개발(LID) 시설 설치 지점 .....	125
그림 3-22. 파일럿규모 저영향개발(LID) 시설 설치 .....	126
그림 4-1. 연구지역(북방들) 사진 .....	129
그림 4-2. 연구지역(북방지구) 지형도 .....	129
그림 4-3. 연구지역 지질계통도 .....	129
그림 4-4. 연구지역 지질도 .....	131
그림 4-5. 진주관측소 연간 강수량 .....	132
그림 4-6. 진주관측소 연간 기온 .....	132
그림 4-7. RCP 시나리오별 이산화탄소 농도 예측 .....	133
그림 4-8. 가뭄예측 .....	137
그림 4-9. 조사 대상 관정 .....	140
그림 4-10. 용도별 비닐하우스 전경 .....	141
그림 4-11. 연구지역 관정 외관 .....	142
그림 4-12. 발작물 수요량 분석 방법 .....	144
그림 4-13. 연구지역 수질시료 채수 .....	148
그림 4-14. 연구지역 수질시료 채수 지점도 (1차, 2020.05) .....	149
그림 4-15. 연구지역 수질시료 채수 지점도 (2차, 2020.10) .....	150
그림 4-16. 연구지역 수질시료 전기전도도( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 분포 (2차, 2020.10) .....	151
그림 4-17. 연구지역 수질시료 수소이온농도(pH) 분포 (2020.10) .....	152
그림 4-18. 연구지역 수질시료 수온( $^{\circ}\text{C}$ ) 분포 (2020.10) .....	153
그림 4-19. 연구지역 배경수질 (2020.10) .....	155
그림 4-20. 연구지역 질산성질소 농도 분포 (2020.10) .....	156
그림 4-21. 수질시료의 질산성질소-중탄산 상관관계 (2020.10) .....	157
그림 4-22. 수질시료의 질산성질소-질소동위원소 상관관계 (2020.10) .....	159
그림 4-23. 수질시료의 SAR-전기전도도 상관관계 (2020.10) .....	160
그림 4-24. 「하동7」 농어촌지하수 관측공의 북방지구 내 위치 .....	161
그림 4-25. 「하동7」 관측공의 동절기 지하수 수위 강하 .....	162
그림 4-26. 「하동7」 관측공의 동절기 전기전도도 미계측 기간 .....	162
그림 5-1. 지하수 유향·유속 조사 위치도 .....	165
그림 5-2. 핸드오거보링 조사 위치도 .....	166
그림 5-3. 시추조사 위치도 .....	167
그림 5-4. 토질시험 시험장비 .....	173
그림 5-5. 현장시험부지 인근 지질도 .....	174
그림 5-6. 핸드오거보링 주상도 .....	177
그림 5-7. 시추조사 전경 .....	183
그림 5-8. 폐공사진첩 .....	185
그림 5-9. 시추주상도 .....	186
그림 5-10. 지층단면도 .....	191

그림 5-11. 지하수위 측정	192
그림 5-12. 표준관입시험 전경	193
그림 5-13. 현장투수시험 전경	195
그림 5-14. 현장투수시험 결과	196
그림 5-15. 물성시험 성적서	203
그림 5-16. 실내투수시험 성적서	205
그림 6-1. 현장시험부지 위치도	208
그림 6-2. 현장답사	209
그림 6-3. 측량성과	210
그림 6-4. 실증부지 현황도	212
그림 6-5. 시설배치도	212
그림 6-6. 종단면도(주용수로~용수로)	213
그림 6-7. 종단면도(용수로~실증부지)	213
그림 6-8. 시설상세도	214
그림 6-9. 시설구성도	214
그림 6-10. 관측공 설치도	215
그림 6-11. 흙의 입경에 따른 투수계수 범위	216
그림 6-12. 시공 방법의 보완	218
그림 6-13. 유입부 개선	225
그림 6-14. 배수로 설치	225
그림 6-15. 시설 내부 개선	226
그림 6-16. 오염수 분배시설 설치	226
그림 7-1. 1차 함양시험 시 지하수 수위 심도	229
그림 7-2. 여재부 상·하 야자매트의 위치	229
그림 7-3. 2차 함양시험 시 지하수 수위 심도	230
그림 7-4. 2차 함양시험 80 m <sup>3</sup> /day 주입 시 현황	232
그림 7-5. 2차 함양시험 100 m <sup>3</sup> /day 주입 시 현황	232
그림 7-6. 2차 함양시험 시 내부관측공 LID-2의 수위변화	233
그림 7-7. 2차 함양시험 시 내부관측공 LID-3의 수위변화	233
그림 7-8. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-1의 수위변화	234
그림 7-9. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-2의 수위변화	235
그림 7-10. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-3의 수위변화	235
그림 7-11. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-4의 수위변화	235
그림 7-12. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-5의 수위변화	236
그림 7-13. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-6의 수위변화	236
그림 7-14. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-7의 수위변화	236
그림 7-15. Theis (1935) 방법을 이용한 2차 함양시험 80 m <sup>3</sup> /d 주입 시 총적 수리상수 산출	237
그림 7-16. Theis (1935) 방법을 이용한 2차 함양시험 100 m <sup>3</sup> /d 주입 시 총적 수리상수 산출	238



그림 7-17. 이방성 타원체 해석을 위한 x-y 축 설정 .....	239
그림 7-18. 현장시험 지구 이방성 타원체 분석 결과 .....	239
그림 7-19. 3차 함양시험 80 m <sup>3</sup> /d 주입 시 현황 .....	240
그림 7-20. 3차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 근거리 관측공 5개소의 수위변화 .....	241
그림 7-21. 3차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 원거리 관측공 2개소의 수위변화 .....	241
그림 7-22. 4차 함양시험 100 m <sup>3</sup> /d 주입 시 현황 .....	242
그림 7-23. 4차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 근거리 관측공 5개소의 수위변화 .....	243
그림 7-24. 4차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 원거리 관측공 2개소의 수위변화 .....	244
그림 7-25. 양수시험 시 지하수 수위 심도 .....	244
그림 7-26. 배출시험 시 양수관정(암반관측공) 위치 .....	246
그림 7-27. 배출시험 시 충전관측공에서의 지하수 수위 강하 .....	246
그림 7-28. Cooper-Jacop (1946) 방법을 이용한 20 m <sup>3</sup> /d 양수시험 시 암반 수리상수 산출 .....	247
그림 7-29. Cooper-Jacop (1946) 방법을 이용한 40 m <sup>3</sup> /d 양수시험 시 암반 수리상수 산출 .....	248
그림 7-30. 침투시설 내외부 수질조사 수행지점(상)과 침투시설(LID pond)내 관측지점사진(하). LID관정에 쓰여진 숫자는 관정의 심도 .....	249
그림 7-31. 실험실 수질분석 장비 사진 .....	250
그림 7-32. 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(LID1-3) .....	252
그림 7-33. 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(LID4-6) .....	253
그림 7-34. 저영향개발(LID) 시설 외부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(W-1, 2, 3) .....	254
그림 7-35. 저영향개발(LID) 시설 외부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(W-4, 5, 6, 7) .....	255
그림 11-1. 사업화 과정 .....	312
그림 11-2. 해외 사업화(안) .....	313



# 1. 연구개발과제의 개요

## 가. 연구 개요

### (1) 통합물관리 정책과 지하수

통합물관리 정책이 실행되면서, 물관리는 유역 단위로 수질과 수량을 통합 관리하고, 물순환 과정에서 물에 영향을 주는 사항을 종합적으로 고려해서 관리한다. 현재의 논의에서는 물관리 일원화에 정부 조직 차원의 대상에 농업용수는 계량화가 힘들고 정확한 통계가 없으며 관리 또한 어려워 제외되어 있다. 그러나, 국가 수자원 이용량 중 농업용수가 차지하는 비중(41%)을 고려할 때 농업용수를 제외하고 통합물관리의 최종 목표를 달성하기란 어렵다. 같은 맥락으로 지표수와 지하수를 분리해서 관리하는 것 또한 지하수와 지표수의 상호 작용을 고려할 때 완전한 관리에 어려움이 있다. 일례로, 미국 전역 54개 하천 내부로 지하수가 유입되는 수량은 전체 하천 유량의 약 14~90% 이고(Winter et al., 1998), 지하수의 질산성질소 부하 기여율은 37% 이상으로 보고되어(Dubrovsky et al., 2010), 지하수와 지표수는 하나의 수체로 고려하고 관리해야 함을 나타낸다. 국내의 경우, 4대강 하천 유량의 약 62~86%는 지하수의 기저유출에 기인하고(Lee et al., 2017), 국내 254개 하천관측망 자료 분석 결과 지하수의 기저유출은 약 28~89%(Jung et al., 2016)에 이르며, 농업유역에서 기저유출에 의한 질산성질소 부하량도 약 22~41%에 이른다(Kim et al., 2015). 결과적으로 통합물관리 유역기반의 물관리를 종합적으로 이루기 위해서는 지표수와 지하수를 통합하여 관리하여야 한다.

향후 농업용수가 포함된 통합물관리 정책이 본격적으로 시행되면, 기존의 지표수 공급에서 소외된 농어촌지역의 4계절 용수수요 평가, 작물 생육단계에 따른 작부체계를 이용한 필요수량의 정량적 평가 기반 하천변 시설재배단지 용수 수요 평가, 농지범용화에 따른 논 관개기간 이외에 용수수요 평가가 이루어져야 한다. 그리고 농업 작물별로 구성된 작목반을 포함한 권역별 물사용자협회를 구성하여 수요자 중심의 지표수 및 지하수 공급체계를 구축하는 방안을 적극적으로 검토할 필요가 있다. 또한 질산성질소 등 지하수 오염에 따른 하천수의 수질에 대한 평가 체계를 구축할 필요가 있다. 또한 지하수 수량, 수질의 과학을 위한 농업용 공공관정 이용량 모니터링을 통한 실이용량 분석, IoT 기반 관정가동 및 제어, 모니터링 등 SMART 관리 시스템을 구축하여 농어촌지역의 지하수 수량과 수질을 동시에 관리하여야 한다.

### (2) 대규모 하천 주변 지하수 이용

2011년 4대강 보 설치 후 자연환경과 생태복원 등의 목적으로 다시 보를 개방하고 있다. 당시 보 설치로 높아진 하천수위로 인해 하천변 농경지의 지하수위도 동반 상승하여 농작물 피해를 방지하기 위해 낮게는 30 cm, 높게는 1 m 내외의 복토 작업을 진행하였다. 그러나 높였던 보를 다시 개방하게 되면 낮아진 하천수위와 지하수위로 인해 하천변 농경지에 자라는 농작물에 끼치는 영향을 생각하지 않을 수 없다. 환경부는 하천수의 수질오염 방지를 위해 2017년 11월부터 단계적으로 보를 부분적 또는 완전 개방해왔다. 환경부 산하 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공하는 보 개방현황(2017.6 ~ 2020.6)을 보면, 보의 효율적인 운영을 위해 설정한 관리수위와 하한수위를 1.0~9.9 m 이내로 설정하여 하천수위를 관리하고자 하였으나, 실제로는 강우와 보 개방으로 관리수위보다 높아지거나 최저수위로 낮아져 수위차가 작게는 2.26m, 크게는 45.96 m 까지 차이를 보이는 것으로 나타났다. 수계별로 보면 한강 2.26~6.71 m, 금

강 5.54~12.81 m, 낙동강 0.63~45.96 m, 영산강 7.69~29.93 m이다.

이렇게 하천수위가 변화하면서 하천변 농경지의 지하수위에도 영향을 끼쳐 하천에서 가까운 지역은 지하수 확보가 수월하여 시설재배단지가 밀집되어 있으며, 이를 활용해 4계절 지하수를 양수하여 작물을 재배하고 있다. 하천에서 멀리 떨어진 지역은 지하수 확보가 어려워 지하수보다는 지표수를 이용하여 논이나 밭에서 노지작물을 재배하고 있어 그 만큼 하천변보다 더 적게 지하수를 이용하고 있는 것으로 나타났다. 또한 과거 바다였거나 보가 바다와 인접한 지역에서의 보 개방은 하천수위 저하에 따른 대기압 감소로 하천수의 염분농도 상승을 초래해 하천변 지하수 이용 농가의 염해피해가 예상된다. 이에 농가에서는 암반관정을 개발하기 시작하면서 하천주변 지하수위는 점차 낮아지고 있으며, 염해피해가 우려되는 지역은 반대로 그나마 염분농도가 낮은 층적층 지하수를 개발하여 이용하고 있는 실정이다. 따라서 보를 개방할 경우 하천변 시설재배단지나 농경지는 그만큼 하천수위 하강에 따른 지하수위도 동반 저하되거나 염분농도 상승 등 보 개방의 영향을 더 많이 받는 지역에 대해서는 지하수 인공함양, 대체용수 개발, 집수정 개발 등 하천 주변 지하수 사용 농가에 대한 지하수 공급대책이 우선적으로 마련되어야 한다.

### (3) 시설재배단지 확대

시설재배는 유리온실, 비닐하우스 등에서 재배환경(기온, 용수량)을 조절하며 작물을 생산하는 농업의 일종으로서, 시설재배단지에서는 농가 소득향상을 위하여 채소류(호박, 오이, 토마토, 파프리카, 풋고추, 가지 등), 과실류(딸기, 수박, 참외, 멜론 등), 화훼류, 기타 작물(버섯 등) 등 부가가치가 상대적으로 높은 작물을 재배한다. 시설재배 작물은 연중 수요가 끊이지 않기 때문에, 농업분야 개방화 시대에 있어 농가의 경쟁력 확보, 농산물 수출을 위한 필수 육성산업으로 분류된다. 우리나라의 총 농지면적은 1990년 약 211만 ha에서 2018년 약 160만 ha로 지속적으로 감소된 반면, 시설재배지역 면적은 1980년 약 7천 ha, 1990년 약 25천 ha, 2018년 약 38천 ha로 증가하였다(KOSIS, 2019). 이러한 시설재배지역의 면적은 국내 전체 농지면적의 약 2~3% 수준인 반면, 농업생산성(2017년 현재)은 전체 농업(48조 2천억원)의 약 10%(4조 9천억원)로 타 농작물에 비해 성장잠재력 큰 산업으로 분류된다(KREI, 2019).

시설재배 작물은 생육조건상 청정 수질의 용수가 필요하기 때문에, 하천수에 비해 상대적으로 수질이 양호한 지하수가 주로 이용되고 있다. 이와 더불어, 겨울철 비닐하우스를 이용한 시설재배에서는 양수한 지하수를 비닐하우스 표면에 분사하여 수막을 형성, 겨울철 낮은 외부기온이 비닐하우스 내부로 영향을 미치는 것을 차단하여 비닐하우스 내부의 온도를 보전하는 수막재배 방식으로 농작물을 생산한다. 따라서 비닐하우스를 이용한 시설재배에서는 막대한 양의 지하수를 이용함에 따라, 시설재배단지는 지하수 확보가 용이한 한강, 낙동강 등 대규모 하천 주변 평야에 집중되어 있다(MAFRA and KRC, 2015).

그러나 수막재배 방식의 시설재배는 비닐하우스의 열손실을 최소화하는 효과가 있지만, 대수층 조건에 따라 지하수 과잉양수에 따른 급격한 지하수위 저하가 발생할 가능성이 있다. 2015년 전국 10 ha이상 총 323개 지구 시설재배단지(총면적 18,936 ha)에 대한 조사 결과, 약 68%인 219개 지구에서 수막재배에 필요한 지하수 수량이 부족한 것으로 나타났다(MAFRA and KRC, 2015). 특히 대규모 시설재배단지(면적 50 ha이상, 비닐하우스 밀집도 50% 이상인 130개 지구)에 대한 분석 결과, 75%인 98지구에서 지하수 수량이 부족한 것으로 분석되었다.

### (4) 지하수 인공함양

지하수 인공함양(artificial recharge)은 강수, 하천수 및 하수 재처리수 등의 수자원을 확보하

여, 관정, 인공함양 분지 및 습지, 수로, 우수 침투시설 등을 이용한 대수층 주입으로 양질의 지하수를 추가로 확보하는 방법이다(MST and K-water, 2004). 인공함양 기술은 지하수관리기본계획 수정계획(2017~2026)에서 「지속가능한 지하수 활용으로 국민의 삶의 질 향상과 물복지 실현」을 목적으로 지하수 부족 문제 해결을 위한 주요 수단으로 지정한 바 있다(MOLIT, 2017).

국내에서는 집중호우 시 바다로 흘러나가는 하천유출수를 하천변 저류지로 유입시켜 지하수 함양을 유도하는 제주 한천저류지 인공함양 시설(KIGAM, 2011), 강변여과수를 취수하여 관정을 통해 대수층으로 주입하는 방법(KRC, 2014), 대수층 특성에 따른 융복합형 인공함양 증진 및 관정주입 방법(MSIT and KIGAM, 2013), 수막재배지에서 운영되었던 대수층 순환식 수막재배 방법(Moon et al., 2016) 등이 대표적이다. 외국의 경우에는 미국 서부, 동부 및 남부(플로리다 주)의 여러 지역에서 인공함양 시설 중 오리건 주에서의 관정 주입방식을 이용한 현무암 대수층 내 지하수 저장 및 회수 이용 시설이 대표적이다(Kim et al., 2003). 네덜란드에서는 1900년대 초부터 인공함양을 이용한 지하수 함양 및 이용을 시도해 왔으며, 최근에는 연간 약 1,100백만  $m^3/year$ 의 생활용수 생산을 위하여, 총 39개 인공함양 시설을 운영 중이다(Stuyfzand, 2016). 스페인의 바르셀로나에서는 인공함양 대상 대수층의 투수량 계수가 매우 높고(최대 40,000  $m^3/day$ ) 인공함양 주입수가 매우 낮은 탁도( $<1$  NTU)를 꾸준히 유지하는 상태로, 1970년대 초반부터 현재까지 대수층 저장 및 회수 12개소를 활발하게 운영 중이다(Hernández et al., 2015). 인도의 자와하리알 네루 기술 대학(Jawaharal Nehru Technological University)에서는 옥상 빗물 수집을 통한 대수층 인공 함양 연구의 일환으로, 3개 빗물 수집시설(용량 100  $m^3/개$ )을 이용한 대수층 인공함양으로 2012~2013년 기간 동안 약 5,044  $m^3$ 의 추가 지하수를 확보한 바 있다(Rao and Giridhar, 2014).

지하수 인공함양 기술을 국내에 적용 시, 우리나라는 강수량의 편차가 크기 때문에 강수의 인공함양을 통한 상시 지하수 수량 확보는 어려운 형편이기 때문에, 용배수로의 배출수 내지 강변여과수를 물 부족 지역의 대수층에 인공함양 시키는 방법이 국내 대수층 환경에 유리한 기술로 분류된다. 인공함양 기술 적용 시 가장 중요하게 고려되어야 하는 점은 시설재배단지의 필요수량과 대수층의 수리지질학적 특성(투수성, 저류성 등 부존특성, 지하수 유동과 관련된 대수층 이방성) 분석으로, 이를 기반으로 주입수 저장과 대수층 조건 변화에 따른 최적의 주입방법과 함께 주입공 구경, 심도, 배열 등을 결정해야 한다.

최근 경상남도 진주시 OO지구에는 시설재배지역 동절기 물 문제 해결을 위하여 지하수 인공함양 사업이 실시된 바 있다. OO지구 지하수 용도는 작물 재배 용수와 겨울철 비닐하우스 수막에 필요한 용수로 구분되며, 지하수 공급 가능량에 대한 평가없이 연구지역 전체적으로 지하수 양수가 이루어지고 있었다. 특히 겨울철 수막용수 공급을 위한 집중적인 양수로 인하여, 연구지역 인근(진주시 수곡면 효자리)에 설치된 「진주2」 관측공의 지하수위는 동절기 마다 반복적으로 약 20 m 하강하였다(Fig. 2)(MAFRA and KRC, 2018). OO지구 관정 개소수는 2017년 현재 315개소(신고공 313개소, 허가공 2개소)로, 대부분 시설재배에 이용되고 있다. 이 중 수막재배를 하는 겨울철 4개월(11월~2월)동안 하루 평균 14시간 양수(관정별 일평균 이용량 약 117  $m^3/day/공$ )로, 전체 관정의 일평균 이용량은 약 37,000  $m^3/day$ 이다. 이는 OO지구 일평균 함양량(약 27,468  $m^3/day$ )의 약 135%로, 겨울철 수막재배 기간 동안 대수층의 공급 능력에 비해 많은 양의 지하수를 양수하는 것으로 분석되었다. 따라서 OO지구에 대한 겨울철 지하수 부족 문제 해결을 위한 최적의 인공함양 방법이 요구되어 층적대수층에 강변여과수를 이용한 인공함양 시설을 설치하고 최적 주입량(100  $m^3/day$ )으로 주입을 실시하고 있다(KRC, 2017).



## 나. 연구 필요성

농업부산물이란, 농업 생산에서 기본 생산물 이외에 부수적으로 얻는 생산물로서, 초본계(벼짚, 왕겨, 보리짚, 옥수수대, 깻대, 고춧대 등) 농업부산물과 목질계(사과, 배, 포도 등의 전정가지) 농업부산물로 구분할 수 있다. 국내에서 발생된 대부분의 농업부산물은 원형 또는 가공의 형태로 식용, 사료, 퇴비로 이용되고 있으나, 벼짚·왕겨를 제외한 대부분의 부산물은 수확 후 농경지에 방치하여 자연 분해시키거나 소각 처리하는 실정이다. 농업부산물의 소각은 과도한 미세먼지 발생 요인이 되므로, 농어촌지역 미세먼지 발생에 의한 대기오염 방지를 위해 농업부산물 소각을 대체하는 재이용이 필요한 시점에 이르렀다.

상수도 통계(환경부, 2020)에 따르면, 전국 읍면동 단위 인구 약 32만명이 생활용수의 대부분을 전적으로 지하수와 계곡수에 의존 중이다. 그리고, 지하수 연보(환경부, 2020)에 의하면, 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 지하수의 주된 오염물질로 나타났고(수질기준초과 시료의 약 12.8%), 주로 축사, 분뇨, 비료 등 농업활동에 기인하며, 주로 농어촌지역에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 질산성 질소는 비점오염원으로서 농어촌지역 넓은 지역에 분포하며, 과도하게 빠른 지하 침투가 유도되어 지하수 오염이 발생할 수 있으므로, 농어촌지역 지하수의 수질보호 및 비점오염 유출저감을 추진할 필요가 있다.

대수층으로 빗물의 침투를 유도하는 저영향개발(LID; low impact development) 시설은 도시지역 지하수의 고갈을 방지하고, 건전한 수문순환을 유도하기 위해 고안된 기술로서, 침투형, 수로형, 저류형 등 다양한 방법으로 상용화 된 기술이다. 1990년대부터 미국, 독일, 호주 등에서 발전된 기술이며, 침투형, 수로형, 저류형 등 다양한 방법으로 상용화 된 기술이며, 국내의 경우, 주로 빗물의 함양을 통한 도시지역 물 순환 체계 개선을 위해 적용 중에 있다.

종합하면, 농업부산물을 독자 상품이 아닌, 기설 고부가가치 제품인 저영향개발(LID) 시설의 질산성질소 탈질 여재로 개발하여 공급할 수 있다면, 농업부산물 재생 상품의 대량보급으로 가공상품의 부가가치(경제성)를 높일 수 있으며, 배수개선을 통한 홍수 예방과 건천화 방지, 농어촌지역 주된 비점오염원(질산성질소)의 오염 및 확산방지가 가능하고, 환경적으로도 소각비용을 절감하고, 미세먼지 발생 저감으로 대기환경 보전 가능할 것으로 판단된다.

이에 따라, 통합물관리 시대 지표수 배수개선과 지하수 함양의 공동목표를 달성하고, 대규모 하천변 시설재배단지의 지하수 수요에 부응하며, 농업부산물 이용으로 수질이 개선된 함양수만 지하 대수층에 함양시킬 수 있는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발이 필요하다.

## 다. 연구 목표

농업부산물 가공 여재를 저영향개발 시설에 수질 정화 재료로 활용하여, (i) 지하수 부족 시설재배단지에 용배수로 배출수를 인공함양하여 배수 개선 및 지하수 함양을 동시에 추구하고, (ii) 배출수 내 질산성질소를 저감하여 맑은 물만 함양시키도록 하는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발을 연구 목표로 한다. 이 연구의 세부요소 기술에 따른 연구목표는 다음과 같다.

- 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발
- 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 적용으로 인공함양 및 비점오염원(질산성질소) 제거
- 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용한 시설재배단지 지하수 관리방안 도출

## 추가 지하수량 확보

### 농어촌연구원

농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 추가 지하수 확보기술 개발

- ▶ 농어촌형 저영향개발 시설 현장시험부지 선정, 부지 특성화
- ▶ 농어촌형 저영향개발 시설 적용에 따른 추가 지하수 확보량 평가
- ▶ 농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 지하수 관리방안 수립

## 지하수질 개선 기술

### 근산대

농어촌형 저영향개발 시설 적용에 오염물질 저감기술 개발

- ▶ 농업부산물을 이용한 최적 정화 여재 선정 및 평가
- ▶ 최적 농업부산물 여재를 이용한 오염물질 저감 kinetics 수립
- ▶ 현장시험부지 저영향개발 시설의 오염물질 저감 평가

### GNS

농어촌형 저영향개발 시설 시공기술 개발

## 공법 개발 및 상용화

- ▶ 농어촌형 저영향개발 시설 설계
- ▶ 농어촌형 저영향개발 시설 시험 시공, 운전조건 정립
- ▶ 농어촌형 저영향개발 시설 표준 설계(안) 수립

- 핵심 기술
  - 농업부산물 정화 여재와 저영향시설(LID)을 결합한 농어촌형 저영향기술(LID) 개발
  - 물 부족 시설재배지역 지하수 인공함양, 비점오염원에 의한 오염 지하수의 대수층 유입 이전 농업부산물 정화 여재를 활용한 정화 기능
- 주요 성능치
  - 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용한 시설재배단지 배수 개선 및 배출수 인공함양
  - 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 체류시간 12시간 이내에서, 질산성질소 수질기준(20 mg/L) 오염 지하수에 대하여 제거효율 95% 이상 확보
- 적용범위(또는 서비스)
  - 물 부족 시설재배단지, 배수개선 사업지구, 비점오염원에 의한 오염지하수 발생지구

현황 및 문제점(As Is)	개선사항(To Be)
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 막대한 에너지 잠재량을 지닌 농업부산물의 낮은 재이용, 낮은 부가가치 활용</li> <li>○ 대규모 하천변 시설재배지역은 동절기 지하수 과다 이용으로 지하수 부족 발생</li> <li>○ 수질개선 기능이 미탑재 된 저영향개발 시설의 보급은 추가 지하수 확보는 가능하나 충전에 따른 지하수 수질 문제 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 퇴비사용, 소각처리 되는 농업부산물을 친환경 정화 여재로 재활용</li> <li>○ 물 부족지역 용배수로 배출수의 인공함양으로 배수 개선 및 추가 지하수 확보</li> <li>○ 농어촌형 저영향개발(LID) 시설의 보급으로 비점오염원 저감 및 추가 지하수 확보 가능</li> </ul>





## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### 가. 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID)

#### (1) 농업부산물

##### (가) 농업부산물의 정의

농업부산물은 초본계 농업부산물인 벼짚, 왕겨, 보리짚, 옥수수대, 깻대, 고춧대 등과 목질계 농업부산물인 사과, 배, 포도 등의 전정가지 등으로 구분할 수 있다(그림 1-1~1-2). 국내의 대부분의 농업부산물중 벼짚, 왕겨는 사료, 퇴비로 이용되고 있지만, 이를 제외한 대부분의 농업부산물은 수확 후 농경지에 방치하여 자연 분해시키거나 소각 처리하는 실정이다(표 1-1~1-2). 농업부산물의 소각은 과도한 미세먼지 발생 요인이 되므로 소각을 대체하는 재이용이 필요하다.

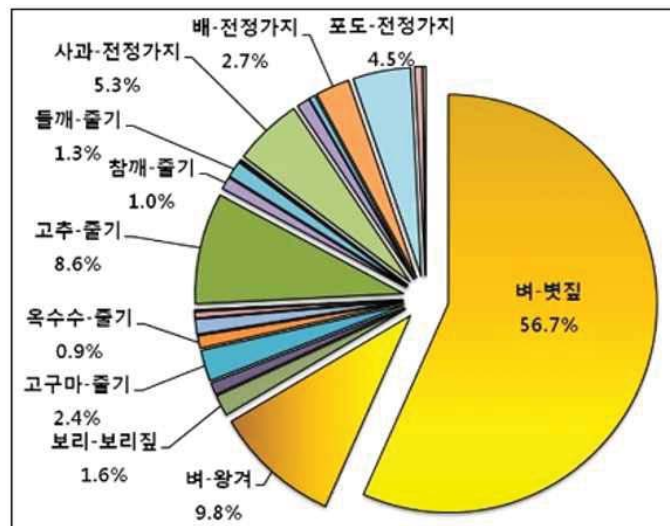


그림 1-1. 농업부산물의 종류 (농촌진흥청,2012)

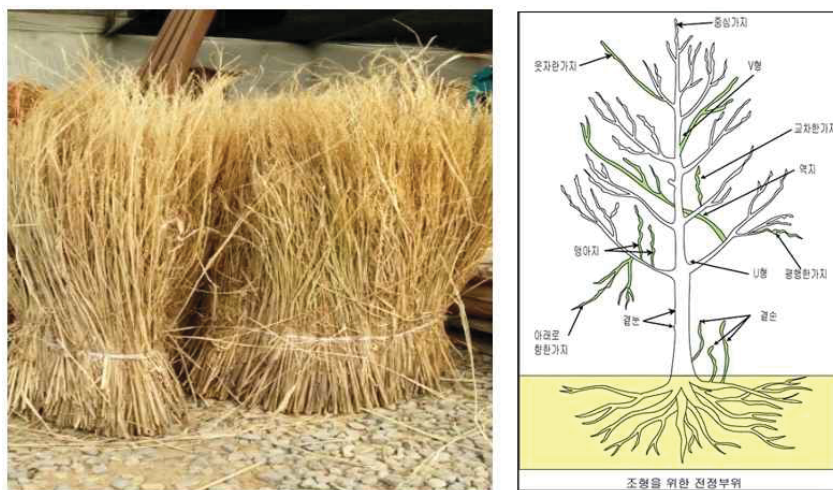


그림 1-2. 농업부산물 중 벼짚(좌)과 전정가지(우)

표 1-1. 농업부산물의 이용용도(KREI, 2007)

작물	종류	이용용도	이용형태
수도작	벼짚	조사료, 축사, 깔짚	원형, 절단
	왕겨	축사 깔개, 사료, 퇴비, 공산품(헬멧)	원형, 왕겨숯, 왕초액 등
	미강	사료, 퇴비, 현미유 등	원형, 펠릿
	쇄미	사료, 떡용	가공
	청미	사료	가공
과실	전지	퇴비, 펄감, 타용도(올타리) 등	파쇄, 원형
유채	줄기	사료, 퇴비, 연료용	원형
	씨	식용유, 바이오디젤	가공

표 1-2. 농가의 벚짚 활용 용도(박현태와 김연중, 2008)

구분	퇴비	가축사료	외부 무상공급	외부 판매	과수원 등에 이용	계
평균(%)	59.3	25.1	2.7	8.2	4.7	100

(나) 농업부산물 발생 현황

농업부산물 자원은 넓은 지역에 저밀도로 산재되어 수집비용이 많이 소요되고, 발생량과 처리현황에 대한 정확한 통계가 부족한 실정이다. <표 1-3> ~ <표 1-8>에는 전국 광역시도별 6개 대표 시군구의 미이용 농업부산물의 종류 및 발생량을 조사한 결과, 벼, 옥수수 등 초본계 농업부산물이 발생하는 작물 13종과 사과 전정지 등 목질계 농업부산물을 발생하는 작물 3종 등 16개 작물을 선정하여 정리하였다.

표 1-3. 경기 안성시 미이용 농업부산물 발생량 산정(안성통계연보, 2020)

종 류 별		면적(ha)	생산량(ton/년)	부산물발생량(ton/년)
미곡	벼	7,506.0	48,398.0	49,366.0
	왕겨			8,566.4
맥류	보리	25.0	30.0	19.9
잡곡	옥수수	28.0	96.6	114.9
두류	콩	548.0	844.0	1,195.9
서류	고구마	74.0	1,258.0	1,069.3
	감자	156.0	3,579.0	644.22
과채류	수박	0.0	0.0	0.0
	오이	131.0	13,713.0	
	호박	0.0	0.0	0.0
	토마토	8.0	329.0	
조미채소	고추	205.0	451.0	1,172.6
특용작물	참깨	63.0	26.0	150.8
	들깨	46.0	33.0	202.6
과실류	사과	8.0	99.0	130.3
	포도	484.0	8,719.0	13,619.1
	배	905.0	18,100.0	11,873.6

표 1-4. 강원 평창군 미이용 농업부산물 발생량 산정(평창통계연보, 2020)

종 류 별			면적(ha)	생산량(ton/년)	부산물발생량(ton/년)
미곡	벼	벼짚	221.3	1,157.0	1,180.1
		왕겨			204.8
맥류	보리	0.0	0.0	0.0	
잡곡	옥수수	586.0	7,354.1	8,744.0	
두류	콩	128.0	293.1	415.3	
서류	고구마	8.0	808.0	686.8	
	감자	5,516.0	54,126.0	46,007.1	
과채류	수박	4.5	172.2		
	오이	0.2	2.0		
	호박	28.9	1,236.9		
	토마토	18.3	1,115.6		
조미채소	고추	205.0	451.0	1,172.6	
특용작물	참깨	63.0	26.0	150.8	
	들깨	46.0	33.0	202.6	
과실류	사과	134.9	1,875.9	2,468.7	
	포도	1.0	8.3	13.0	
	배	3.4	11.7	7.7	

표 1-5. 충남 예산군 미이용 농업부산물 발생량 산정(예산통계연보, 2021)

종 류 별			면적(ha)	생산량(ton/년)	부산물발생량(ton/년)
미곡	벼	벼짚	11,226.0	63,484.0	64,753.7
		왕겨			11,236.7
맥류	보리	55.9	226.3	278.3	
잡곡	옥수수	40.3	110.0	130.8	
두류	콩	683.1	1,034.4	1,465.7	
서류	고구마	286.5	4,340.0	3,689.0	
	감자	90.5	2,391.5	430.5	
과채류	수박	450.0	21,809.0		
	오이	18.0	1,851.0		
	호박	35.0	1,192.0		
	토마토	89.0	1,016.0		
조미채소	고추	180.0	1,988.0	5,168.8	
특용작물	참깨	133.6	73.5	426.3	
	들깨	311.1	308.0	1,891.1	
과실류	사과	1,122.2	28,411.0	37,388.9	
	포도	0.0	0.0	0.0	
	배	222.2	6,401.0	4,199.1	

표 1-6. 전북 정읍시 미이용농업부산물 발생량 산정(정읍통계연보, 2020)

종 류 별			면적(ha)	생산량(ton/년)	부산물발생량(ton/년)
미곡	벼	벼짚	13,242.0	70,279.0	71,684.6
		왕겨			12,439.4
맥류	보리	811.0	3,523.0	3,290.7	
잡곡	옥수수	19.0	91.5	108.8	
두류	콩	373.0	768.3	1,088.7	
서류	고구마	27.2	297.8	253.1	
	감자	22.0	534.6	96.2	
과채류	수박	89.0	3,475.0		
	오이	9.6	903.0		
	호박	16.7	567.0		
	토마토	17.5	1,084.0		
조미채소	고추	686.0	1,720.0	4,472.0	
특용작물	참깨	197.0	118.0	684.4	
	들깨	144.0	162.0	994.7	
과실류	사과	117.0	3,720.0	4,895.5	
	포도	16.2	312.0	487.3	
	배	41.0	1,520.0	997.1	

표 1-7. 전북 완주군 미이용 농업부산물 발생량 산정(완주통계연보, 2020)

종 류 별			면적(ha)	생산량(ton/년)	부산물발생량(ton/년)
미곡	벼	벼짚	3,794.0	18,297.0	18,662.9
		왕겨			3,238.6
맥류	보리	63.6	184.9	145.7	
잡곡	옥수수	120.6	347.3	412.9	
두류	콩	297.0	499.0	707.1	
서류	고구마	172.0	2,322.0	1,973.7	
	감자	170.0	3,825.0	688.5	
과채류	수박	115.3	5,181.0		
	오이	13.5	1,379.4		
	호박	36.5	1,800.8		
	토마토	32.8	2,043.5		
조미채소	고추	314.5	701.4	1,823.6	
특용작물	참깨	124.0	34.7	201.3	
	들깨	356.8	289.0	1,774.5	
과실류	사과	13.2	173.7	228.6	
	포도	24.6	256.5	400.7	
	배	74.9	1,648.2	1,081.2	

표 1-8. 경남 산청군 미이용 농업부산물 발생량 산정(산청통계연보, 2020)

종 류 별		면적(ha)	생산량(ton/년)	부산물발생량(ton/년)
미곡	벼	3,247.0	17,533.0	17883.7
	벼짚 왕겨			3,103.3
맥류	보리	23.0	55.0	52.3
잡곡	옥수수	27.4	19.1	22.7
두류	콩	52.6	98.7	139.9
서류	고구마	5.5	263.2	223.7
	감자	12.4	130.5	23.49
과채류	수박	27.4	856.0	
	오이	2.3	56.9	
	호박	16.5	500.2	
	토마토	5.0	162.2	
조미채소	고추	30.0	134.4	349.4
특용작물	참깨	10.3	8.2	47.6
	들깨	16.8	12.9	79.2
과실류	사과	81.0	1,256.0	1,652.9
	배	39.0	789.0	517.6
	포도	0.0	1.0	1.6

(다) 농업부산물의 기술적 잠재량

농업부산물로부터 산출 가능한 에너지 가용잠재량은 571천TOE/년이며, 현재의 재배, 수집 및 변환 기술로써 합리적으로 활용될 수 있는 양을 추정한 기술적 잠재량은 약 190천TOE/년으로 추산된다(표 1-9; KIER, 2010). 여기서 TOE란 tones of oil equivalent 의 약자로, 1 TOE는 1,000 kcal 에 해당한다. KIER(2010)에 의하면, 일부 농업부산물은 바이오가스 생산, 바이오플라스틱 생산 등에 재생 이용 가능성을 나타내었으나, 농업부산물을 이용한 독자적 재생 상품 생산·보급에는 경제성 측면에서 한계가 노출되었다. 이에 따라, 농업부산물을 독자상품이 아닌, 기설 고부가가치 제품의 부속물질로 개발하여 공급할 수 있다면, 농업부산물 재생 상품의 대량보급으로 경제성을 높일 수 있고, 환경적으로도 소각 비용을 절감하고 탄소발생량 저감도 가능할 것으로 판단된다.

표 1-9. 농업부산물 가용잠재량 및 기술적 잠재량(2010)

부문별	세부자원별	가용 잠재량 (천TOE/년)	기술적 잠재량 (천TOE/년)	비 고
농산부산물 총량	벼짚	324	108	기술적잠재량은 가용잠재량의 33.3% 사용 추정
	보리짚	19	6	
	왕겨	128	43	
	콩줄기	40	13	
	사과전정지	60	20	
잠재량 합계		571	190	

출처: 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원 데이터센터(<http://kredc.kier.re.kr>)

## (2) 저영향개발

### (가) 저영향개발(LID; Low impact development) 정의

저영향개발(LID; low impact development)이란, 개발 이전의 수문학적 특성을 유지 또는 회복시키기 위해, 불투수면 감소를 통해 빗물의 표면 유출 감소와 빗물의 토양 침투를 증가시켜 물 순환을 개선시키기 위해 고안된 기술이다(그림 1-3). 즉, 강우 유출수를 최대한 발생 지역에서 관리하는 토지개발 방식 개념으로, 지하수의 고갈을 방지하고, 건전한 수문순환을 유도하기 위해 고안된 기술이다.

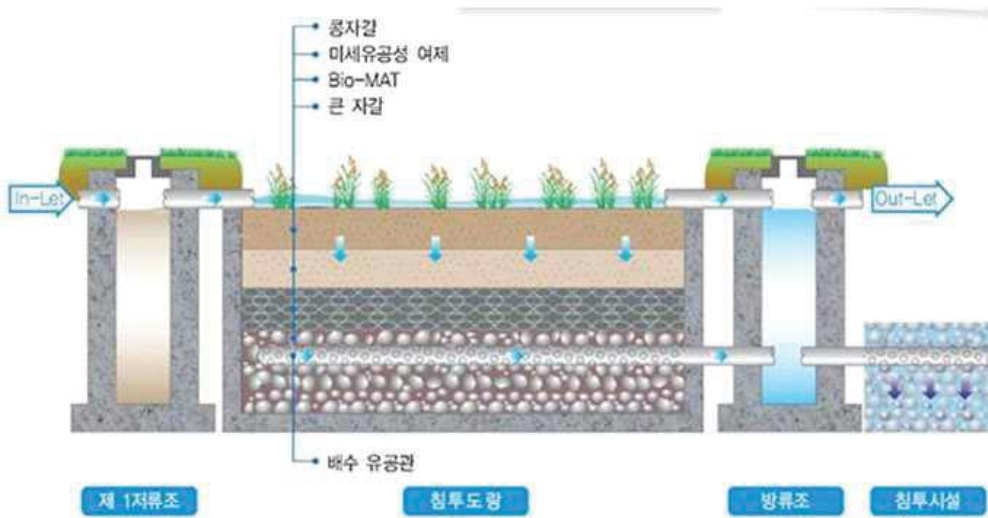


그림 1-3. 빗물의 지하수 함양을 위한 저영향개발(LID) 시설 모식도

저영향개발(LID)에 대한 정의는 지역과 기관 따라 다음 매우 다양하게 정의되고 있다(표 2-10). 국외의 경우, 미국 환경 보호청은 저영향개발 기법을 도시화로 인해 변화되는 수문특성 때문에 발생하는 문제점들에 대해 지역 내의 수문학적 기능을 도시화 이전의 수문 특성과 같게 보존하는 계획과 설계의 접근 방법으로 정의하였다. 이는 도시지역이 자연 상태와 유사한 물순환 체계를 갖출 수 있도록 하는 접근 방법으로, 기존의 최적관리 기법 (Best Mnagement Practices: BMPs) 적용뿐만 아니라 도시지역 토지이용계획 수립 시 물순환을 고려한 강우유출수 관리체제로 정의하였다.

표 1-10. 저영향개발의 기관별 정의

기관	정의
국립환경과학원	저영향개발 기법을 자연에 미치는 영향을 최소로 하여 개발하는 것
국토교통부	홍수 및 수질오염 저감을 위한 우수의 침투, 저류, 물순환 체계를 고려한 토지이용 계획기법
토지주택연구원	개발 이전 수문학적 체계의 유지와 향상을 위한 광범위한 토지 계획 및 공학적 설계를 고려하는 방식이며, 발생원에서 가까운 곳에서 빗물을 관리함으로써 지표 유출과 오염부하를 줄이기 위해 설계된 일련의 시설들과 그 관리방법



저영향개발(LID) 기술은 1990년대부터 미국, 독일, 호주 등에서 발전되었으며, 침투형, 수로형, 저류형 등 다양한 방법으로 상용화 된 기술이다. 국내의 경우, 주로 빗물의 함양을 통한 도시 지역 물 순환 체계 개선을 위해 적용 중이고, 최근 들어 우리나라에서도 신규 택지개발지구에 적용되어, 강우유출량 및 수질오염물질 저감 등 주로 도시지역 물순환체계 개선을 위해 적용 중이다. 저영향개발(LID) 시설은 정부의 환경정책방향과 일치하는 사업이나, 농어촌형 시설, 특히 비점오염원 저감에 대한 기술 개발이 미미하다. 아울러, 기존의 시설은 빗물의 함양을 통한 하천유출 비점오염저감에 치중하고 있으며, 직접 영향을 받는 지하수 수질에 대한 고려는 미미한 실정이다.

(나) 저영향개발(LID) 시설을 이용한 비점오염원 관리 현황

① 도심 비점오염원 저감기술 현황

도시개발사업은 다양한 환경수리학적 영향을 발생시키는데, 그 중에서 포장지역의 확대는 비점오염물질의 축적과 유출을 발생시킨다(그림 2-4). 이에 따라, 미국을 비롯한 선진국에서는 1990년대 후반부터 비점오염물질의 저감을 위하여 다양한 최적관리방안(Best Management Practices, BMPs)을 도입하고 기술을 개발하여 접목하였다. 그러나, 이러한 BMPs 적용은 유역의 수계 수질오염에 초점을 맞춘 관리방안으로 개발로 발생하는 물 순환 왜곡 문제를 원천적으로 해결이 불가능하였다. 2000년대 이후 비점오염 및 물순환 전문가와 선진국의 행정가들은 빗물 또는 강우 유출수 유량의 정량적 저감 없이 비점오염 유출 저감 및 수계의 수질개선은 힘들다는 결론을 도출하였고, 새로운 강우 유출수 관리 및 비점오염 저감방안을 도입하였다. 새로운 강우유출수 및 비점오염저감 방안은 도시 및 개발지역의 물순환 구축, 비점오염물질 저감, 기후변화 대응, 도시홍수 및 온도를 저감하기 위해 빗물 및 강우유출수의 침투, 저류, 이용 기능의 중요성을 인식하고 이러한 기능을 접목한 방안이며, 미국 및 선진국에서는 도시 확대 및 개발로부터 발생하는 환경수리학적 영향을 저감하기 위하여 2004년부터 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기술을 개발하여 접목하는 추세이다.



그림 1-4. 도시화에 따른 물순환 체계 파괴  
 (한국건설기술연구원, 2011, 수자원 에너지 기반의 물순환 기술 기획보고서)

저영향개발(LID) 기법으로 많이 적용되는 기술요소는 식생체류지(Bio-retention), 빗물정원(Rain garden), 옥상녹화(Green roof), 침투 도랑(Infiltration trench), 침투포장(Pemeable pavement), 식생수로(Vegetative swale) 등이 있다(2019년, 백상수 외, 저영향개발 모델링 기법 비교연구: 사례중심으로).

- 식생체류지 : 토양층과 자갈로 이루어진 층으로 이루어져 있으며, 빗물정원의 경우 토양층으로만 이루어져 있음.
- 옥상녹화 : 토양층과 배수층을 이용하여 건물 옥상에 설치. 침투 도랑의 경우 자갈로만 이루어져 있어 빠른 침투가 가능함.
- 침투포장 : 상단의 침투성 있는 도로포장을 사용하여, 도시유출을 저감
- 식생수로 : 식생이 덮인 개수로 이용하여, 강우유출수를 배출하는 시설

## ② 농어촌 비점오염원 저감기술 현황

우리나라 공공수역의 수질오염원 중에서 비점오염원의 영향은 지속적으로 증가하는 추세이다. 비점오염원 중 대부분은 강우 시 토지계에 기인하며 특히, 논, 밭 등 농업비점오염원이 52%를 차지하고 있으며 축산계를 고려하면 70% 이상을 차지하는 것으로 나타났다(2012년, 장정렬 외, 새만금유역 농업오염 저감기법개발 2차년도 연구결과). 여기서 농촌비점오염원은 크게 논, 밭 등의 농업에 의한 오염과 가축사육으로 인한 오염으로 나누어지는데, 농업비점은 영농방법 등에 따라 뚜렷한 배출경로를 찾기가 어렵고, 축산계 가축분뇨는 생활하수보다 오염부하량이 더 높음에도 불구하고 대부분 퇴비, 액비 등 자원화물로 전환되어 농경지에 뿌려져 실질적인 관리가 어려우며, 특정시설을 설치하여 저감하는 것 역시 어려운 실정이다(2014년, 국립환경과학원, 농촌지역 비점오염원 관리계획 수립 가이드라인 마련 연구).

농업지역 비점오염원의 경우 농업에 의한 관개배수, 강우 시 지표유출, 침투유출, 지하유출에 의해 비점오염원이 발생되며, 토지이용 특성에 따라 오염원 배출 경로가 다르다. 논은 비료, 가축분뇨(액비, 퇴비)의 살포 후 강우에 의해 비점오염 발생되고 겨울철 유기물이 축적되었다 해빙기에 배출, 경작 및 강우시 토양침식에 의해 토사가 발생한다. 특히, 과량의 퇴액비 살포에 의한 비점오염원 발생 대책이 시급한 실정이다(그림 1-5).

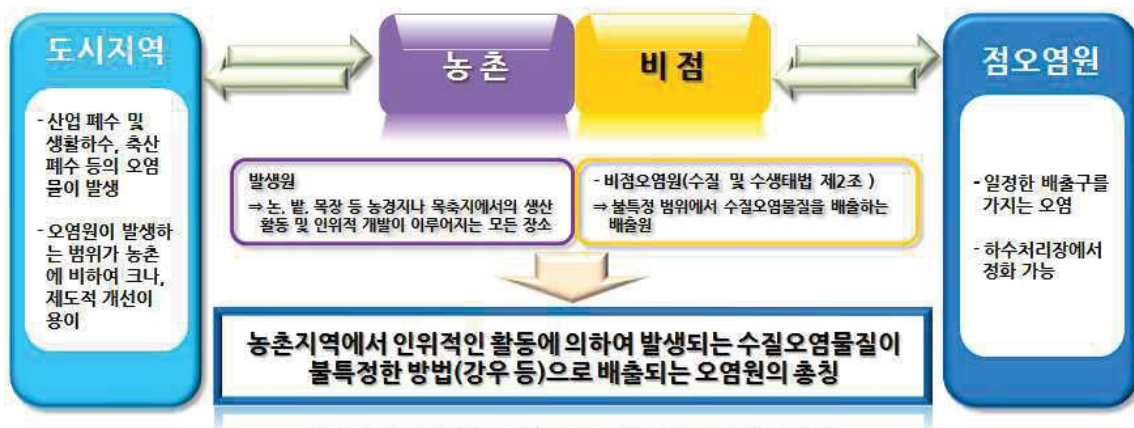


그림 1-5. 농촌 비점오염원의 정의

(국립환경과학원, 2014, 농촌지역 비점오염원 관리계획 수립 가이드라인 마련 연구)



밭은 대부분 경사지에 위치하고 있어 강우 시 부유물질 유출량이 논 지역보다 약 4배 이상 높으며 논과 같이 시비에 의해 비점오염원이 발생한다. 과수원의 경우 표토시비가 많아 비점오염 발생량이 많은 것으로 알려져 있다(2016년, 전북연구원, 섬진강유역 비점오염 현황 및 관리방안). 농업 비점의 구조적 저감방안으로는 적용되는 기술요소는 저류형시설, 인공습지, 침투도랑, 식생수로, 초생대가 있다.

- 저류형 시설 : 모든 형태의 토지이용에 적용 가능한 시설 중 하나로 주요 제거기작은 입자상 물질의 침전이며 비점오염저감 뿐만 아니라 방재목적의 용도로도 적용이 가능한 시설이나 여름철 모기 등 위생해충과 냄새 등으로 민원 유발 가능. 또한 공간적 활용 측면에서 인공습지에 비해 우월하나 부지요구도와 건설비가 높다는 단점.
- 인공습지 : 강우유출수를 처리하기 위하여 인위적으로 얕은 습지를 조성하는 것으로, 침전, 여과, 흡착, 미생물분해, 식생 식물에 의한 정화 등 자연상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 오염물질을 저감하는 시설.
- 침투도랑 : 강우유출수를 처리하기 위하여 1~2.5m(현장여건에 따라 0.3~3.0m) 깊이로 굴착한 도랑에 자갈이나 돌을 충전하여 조성한 일종의 지하 저수조로서 차집된 강우유출수는 도랑의 바닥을 서서히 통하여 하부토양층을 침투해서 지하 수면에 도달하게 되는 시설.
- 식생수로 : 식생으로 덮인 개수로를 통하여 강우유출수를 이송시키는 시설로 식생에 의한 여과, 토양으로 침투 등의 기작으로 강우유출수의 오염물질을 제거하는 시설.
- 초생대 : 식생여과대, 완충식생대가 같은 의미로써 혼용되어 사용되고 있으며 경작지 경계, 혹은 하천, 호수, 연못, 습지 등의 수변구역 경계를 따라 밀도 있게 조성된 띠모양의 식생대(국립환경과학원, 2014, 농촌지역 비점오염원 관리계획 수립 가이드라인 마련연구)

국내 저영향개발(LID)의 경우 도시 지역의 지하수 함양을 위한 시설이 대부분을 차지하며, 농촌지역에서는 비점오염원 관리 방안으로 연구개발이 진행 되는 중이다. 도심에 주로 설치되는 형태는 강우 시 빗물의 지하수 함양을 위한 침투시설(유공포장, 침투저류지, 침투도랑 등)이 대부분 차지하고 있으며, 도시의 녹지화를 위한 공원에는 식생시설(인공습지, 식생여과재, 식생수로 등)이 조성되어 사용되고 있다. <표 1-11>~<표 1-14>는 도심형 저영향개발(LID)에 사용되는 기술을 나열한 것으로 기술의 특성, 장단점 등 본 과제에 필요한 요소를 도출하기 위한 방법으로 제시하였다.

표 1-11. 저류형 시설



저류시설							
기술요약 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 우수저류시설을 지하에 설치하여 지상부를 주차장, 공원 등 다른 용도로 이용할 수 있도록 만든 구조화 시설</li> <li>● 홍수다발구역인 고밀도 주택가에서 사용하는 방법으로 주로 고층 주택 및 큰 건물 등의 지하공간을 이용하여 설치</li> <li>● 기존 빗물펌프장의 유수지를 활용하여 초기강우시 오염물질 유출을 저감하기 위한 방안으로 사용</li> <li>● 지가가 비싼 도심지의 전용저류로 대부분을 차지</li> </ul>						
실시 예	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>실시 예상도면</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>공원 및 운동장 지하저류조</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>전용 저류시설</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>지하주차장 공간활용</p> </div> </div>						
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 강우유출수의 수질과 수량 모두를 조절할 수 있는 수단</li> <li>● 기존의 유수지를 개선해 사용가능</li> <li>● 저류수를 정원수, 하천수, 청소용수 등으로 활용 가능함</li> <li>● 악취, 해충발생 미비 및 비점오염 처리성 우수</li> </ul>						
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 비교적 대규모의 토지를 필요로 함</li> <li>● 용존성 오염물질은 제거효율 저조</li> <li>● 침전물이 제거되지 않았을 경우 대규모 강우 후 침전물 재부상 우려</li> <li>● 침전물 제거(준설)에 비교적 높은 비용 소요</li> </ul>						
처리효율(%)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">BOD</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-N</td> <td style="text-align: center;">24</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-P</td> <td style="text-align: center;">20</td> </tr> </tbody> </table>	BOD	25	T-N	24	T-P	20
BOD	25						
T-N	24						
T-P	20						

표 1-12. 인공습지


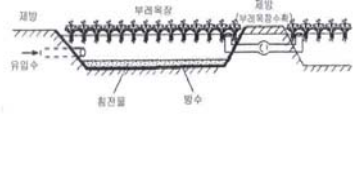
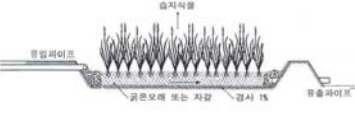
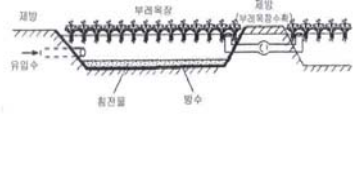
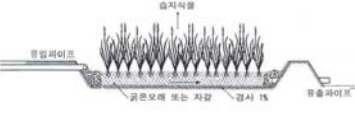
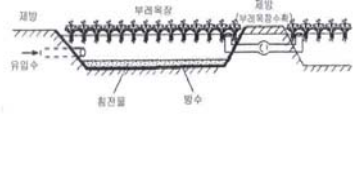
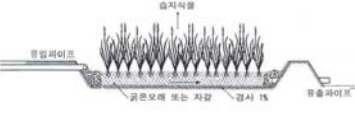
인공습지										
기술요약 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>강우유출을 통해 발생하는 비점오염물질을 침전 및 여과, 흡착과 미생물 분해 등의 기작을 통해 제거할 수 있으며, 도시 및 농업지역, 축산단지 등에 다양하게 적용이 가능</li> <li>인간의 요구와 필요성에 의해 자연습지의 형태 및 기능을 모방하여 설계, 시공, 운영되는 인위적 습지</li> <li>다양한 오염부하에 대한 적응능력이 높고, 에너지의 필요성이 낮으며 유지관리가 용이하여 경제적이라는 측면 외에 경관과 친수공간의 가치를 가질 수 있어 자연친화적인 기능</li> </ul>									
실시 예	<div style="text-align: center;">  <p>실시 예상도면</p> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">명칭</th> <th colspan="2">내용</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">지표흐름형 습지</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>유입수가 대부분 하부토양층위로 흐르며, 하부 토양층은 주로 원래의 토양이 위치</li> <li>정수식물이 자라는 수심 0.2~0.6m 정도의 구간과 수심이 다소 깊어 정수식물이 자라지 않는 1~1.2m 구간으로 이루어짐</li> </ul> </td> <td style="text-align: center;">  </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">지하흐름형 습지</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>유입수가 하부층으로 전부 흘러 표면에는 흐름을 볼 수 없는 시스템</li> <li>하부층은 전형적으로 여러 가지 크기의 자갈, 쇠석 또는 토양으로 이루어짐</li> </ul> </td> <td style="text-align: center;">  </td> </tr> </tbody> </table>	명칭	내용		지표흐름형 습지	<ul style="list-style-type: none"> <li>유입수가 대부분 하부토양층위로 흐르며, 하부 토양층은 주로 원래의 토양이 위치</li> <li>정수식물이 자라는 수심 0.2~0.6m 정도의 구간과 수심이 다소 깊어 정수식물이 자라지 않는 1~1.2m 구간으로 이루어짐</li> </ul>		지하흐름형 습지	<ul style="list-style-type: none"> <li>유입수가 하부층으로 전부 흘러 표면에는 흐름을 볼 수 없는 시스템</li> <li>하부층은 전형적으로 여러 가지 크기의 자갈, 쇠석 또는 토양으로 이루어짐</li> </ul>	
명칭	내용									
지표흐름형 습지	<ul style="list-style-type: none"> <li>유입수가 대부분 하부토양층위로 흐르며, 하부 토양층은 주로 원래의 토양이 위치</li> <li>정수식물이 자라는 수심 0.2~0.6m 정도의 구간과 수심이 다소 깊어 정수식물이 자라지 않는 1~1.2m 구간으로 이루어짐</li> </ul>									
지하흐름형 습지	<ul style="list-style-type: none"> <li>유입수가 하부층으로 전부 흘러 표면에는 흐름을 볼 수 없는 시스템</li> <li>하부층은 전형적으로 여러 가지 크기의 자갈, 쇠석 또는 토양으로 이루어짐</li> </ul>									
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>조성비가 저렴하고 유지관리비용 낮음</li> <li>스스로 유지되도록 설계되므로 관료, 유량조절, 독이 잘 보전되도록 주기적인 검사만이 필요</li> <li>적정한 설계와 적당한 면적이 확보되면, 질소와 인의 경우도 쉽게 처리될 수 있음</li> </ul>									
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>하수처리장에 비해 많은 면적이 필요로 하며, 비교적 평탄한 지면을 요구함</li> <li>최고효율은 식물의 성장과 조성상태에 의존하기 때문에 설계효율이 나타나려면 2~3년은 지나야 함</li> <li>해충이나 모기 또는 설치류 문제로 인하여 인근 주민들에게 악영향을 미칠 수 있음</li> </ul>									
처리효율(%)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">BOD</td> <td style="text-align: center;">53</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-N</td> <td style="text-align: center;">37</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-P</td> <td style="text-align: center;">60</td> </tr> </tbody> </table>	BOD	53	T-N	37	T-P	60			
BOD	53									
T-N	37									
T-P	60									

표 1-13. 침투 저류지




침투 저류지							
기술요약 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 굴착이나 독을 쌓아 형성한 저수지로 강우유출수를 얇은 수심의 저류지에 차집하여 임시 저장 및 침투를 통해 빗물의 직접유출을 저감하는 동시에 오염물질이 제거되도록 설계된 시설</li> <li>● 현장부지여건에 따라 이격거리를 조정할 수 있음</li> <li>● 저류지 사면에는 식생 등을 통하여 주변환경과 조화를 이뤄야 함</li> </ul>						
실시 예	 <p style="text-align: center;">실시 예상도면</p>						
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 지역의 홍수피크를 감소시킴</li> <li>● 부유성 침전물과 부유쓰레기, 박테리아 등 효과적인 제거 가능함</li> <li>● 다음 강우에 대비할 수 있고 저류된 물의 혐기화를 방지할 수 있음</li> <li>● 관리빈도가 비교적 적은 편임</li> </ul>						
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 토질조사 등의 기초현황조사가 부족하거나 설계가 부적절한 경우 저감효과가 미흡</li> <li>● 토양층 내에서 처리되지 않은 오염물질에 의해 지하수 오염 유발 가능</li> <li>● 용존성 영양물질 제거에는 큰 효과가 없어 지하수를 통해 수계로 배출될 수 있음</li> </ul>						
처리효율(%)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">BOD</td> <td style="text-align: center;">69</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-N</td> <td style="text-align: center;">58</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-P</td> <td style="text-align: center;">69</td> </tr> </tbody> </table>	BOD	69	T-N	58	T-P	69
BOD	69						
T-N	58						
T-P	69						



표 1-14. 침투도랑

침투도랑													
기술요약 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 강우유출수를 처리하기 위하여 1.0~2.5m(현장여건에 따라(0.3~3.0m)깊이로 굴착한 도랑에 자갈이나 돌을 충전하여 조성한 일종의 지하 저수조</li> <li>● 차집된 강우유출수는 도랑의 바닥을 서서히 통하여 하부토양층을 침투해서 지하수면에 도달을 유도하는 시설물임</li> <li>● 도로유역 또는 오염 발생 지역의 오염물을 침투 및 여과기작을 통해 제거하고, 지하수 충진을 목적으로 설치함</li> </ul>												
실시 예	<div style="text-align: center;">  <p>실시 예상도면</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>침투도랑</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>완충대(식생여과,침강지)+침투도랑</p> </div> </div>												
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 지역의 범람을 감소</li> <li>● 자연적 배수시스템을 이용</li> <li>● 지하수 재충전</li> <li>● 공간이 제한된 지역에서 사용가능</li> <li>● 설계에 따라 유지관리가 용이</li> </ul>												
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 부적절한 설계, 오염물질 부하, 유지관리에 의한 실패 가능성 높음</li> <li>● 빈도 높은 관리 필요</li> <li>● 침전물에 의한 막힘의 우려 있음</li> <li>● 지하수 오염문제 유발</li> </ul>												
처리효율(%)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">유출저감량</td> <td style="text-align: center;">15~35</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">BOD</td> <td style="text-align: center;">77</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-N</td> <td style="text-align: center;">62</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T-P</td> <td style="text-align: center;">73</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Zn</td> <td style="text-align: center;">80~100</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Pb</td> <td style="text-align: center;">80~100</td> </tr> </table>	유출저감량	15~35	BOD	77	T-N	62	T-P	73	Zn	80~100	Pb	80~100
유출저감량	15~35												
BOD	77												
T-N	62												
T-P	73												
Zn	80~100												
Pb	80~100												

### (3) 농어촌지하수 오염 현황

#### (가) 농어촌지하수 비점오염원 현황

정부의 ‘4대강 물관리종합대책’에서 비점오염원이 오염부하량(BOD 기준)의 22~37% 정도를 차지하고 있다. 이에 정부는 비점오염원 관리를 위한 ‘4대강 비점오염원 관리종합대책(2004~2020)’과 제2차 비점오염원관리 종합대책(2012~2020)을 수립하여 비점오염원에 대한 관리를 지속 수행 중이다(환경부, 2009, LID 기법을 활용한 자연형 비점오염원 관리방안 마련). 우리나라 공공수역에 대한 비점오염원 중 대부분은 강우시 토지계에 기인하며, 논, 밭 등 농업비점오염원이 52%를 차지하며, 축산계를 추가로 고려하면 농업비점오염원은 70%이상 차지한다(장정렬 외, 2012, 새만금유역 농업오염 저감기법 개발). 농업비점오염원은 크게 논, 밭 등에서의 영농행위에 의한 오염과 가축사육에 의한 오염으로 구분되는데, 농업비점은 영농방법에 따라 뚜렷한 배출경로를 찾기 어렵고, 축산계 가축분뇨는 생활하수보다 오염부하량이 높음에도 불구하고 대부분 퇴비, 액비 등 자원화물로 전환되어 농경지에 살포되므로 실질적인 관리가 어려운 실정이다(국립환경과학원, 2014, 농촌지역 비점오염원 관리계획 수립 가이드라인 마련 연구).

#### (나) 농어촌지하수 오염 특성

상수도 통계(환경부, 2020)에 따르면, 전국 읍면동 단위 인구 약 32만명이 생활용수의 대부분을 전적으로 지하수와 계곡수에 의존한다. 지하수 측정 연보(환경부, 2020)에 의하면, 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 지하수의 주된 오염물질로 나타났고(수질기준초과 시료의 약 12.8%), 주로 농어촌지역에 집중되어 있다. 질산성질소가 다량 함유된 지하수를 섭취할 경우, 체내에 흡수된 질산성질소는 성인의 경우 위액이 pH 4.6 이하이어서 환원 작용이 거의 발생하지 않으나, 유아의 위액은 pH가 7 부근으로 많은 양의 질산성질소가 아질산성질소로 환원되어 헤모글로빈의 산소 운반 작용을 방해하여 청색증(blue baby syndrome or methemoglobinemia)을 유발시켜 사망하게 할 수 있다(Maxy, 1950). 그리고 가축에도 영향을 미쳐 출산율을 저하 시키거나(Chandler, 1959) 하천과 해수의 총 질소 농도를 높여 부영양화를 일으킬 수 있다(Fennessy and Cronk, 1997). 이와 같은 위해성으로 인해, 세계보건기구(WHO, 1984)와 우리나라는 질산성질소 농도가 먹는 물 수질기준 10 mg/L 미만, 농업용수 수질기준 20 mg/L 미만으로 제시하고 있다.

질산성질소의 기원은 (1) 대기 중 질소 등 자연기원(Fernando and David, 2002), (2) 사람과 동물의 분뇨·생활하수·산업 슬러지나 폐수·침출수 기원(김연태·우남철, 2003), (3) 비료의 과다 사용, 토양 내 유기 질소 등(Keeney, 1986) 기원에 따라 무기 또는 유기 질소의 형태로 지하에 유입되어 화학적 작용과 미생물학적 작용을 통해 생성된다(Reddy and Patrick, 1981). 질산성질소의 생성과 소멸에 관련된 작용을 질산화작용과 탈질작용이라고 하나 질산성질소는 농어촌지하수에 자주 사용되는 클로라이드 소독법으로는 제거되지 않는다. 이 외에도 농어촌지역에서는 관개 농업과 축산에 관련된 분뇨와 비료 살포, 농약 사용, 축사 폐기물 유출, 정화 시설의 미비로 인한 정화조의 누수, 생활하수 유입 등이 수질오염의 원인이 된다(Canter, 1997).

대부분의 농어촌지역 주민들에게 주 상수원으로 존재하는 지하수의 오염은 상수원 환경개선의 관점을 넘어 삶의 기본인 물 문제 및 삶의 근거를 좌우하는 중요한 문제이며, 또한 지하수는 우리가 청정하게 보전·관리하여 후세까지 물려줄 국가의 자원이므로 농어촌 지하수 수질의 안전을 위해, 농어촌 지하수의 주요 오염 물질 제거를 통한 재이용이 필요하다.

(다) 농어촌지하수 중 질산성질소 오염 현황

지하수의 질산성질소 오염 현황은 측정망별로는 국가지하수관리측정망 8.5%, 국가지하수오염측정망 16.8%, 농촌지하수관리관측망 17.5%, 오염우려지역지하수측정망 6.9%, 일반지역지하수측정망 6.8%로 나타났다. 지하수에 대한 의존도가 높은 제주도의 경우 양돈분뇨 등에 의한 지하수의 질산성질소 과다 문제로 오염원 차단 및 관리가 시급한 실정이다.

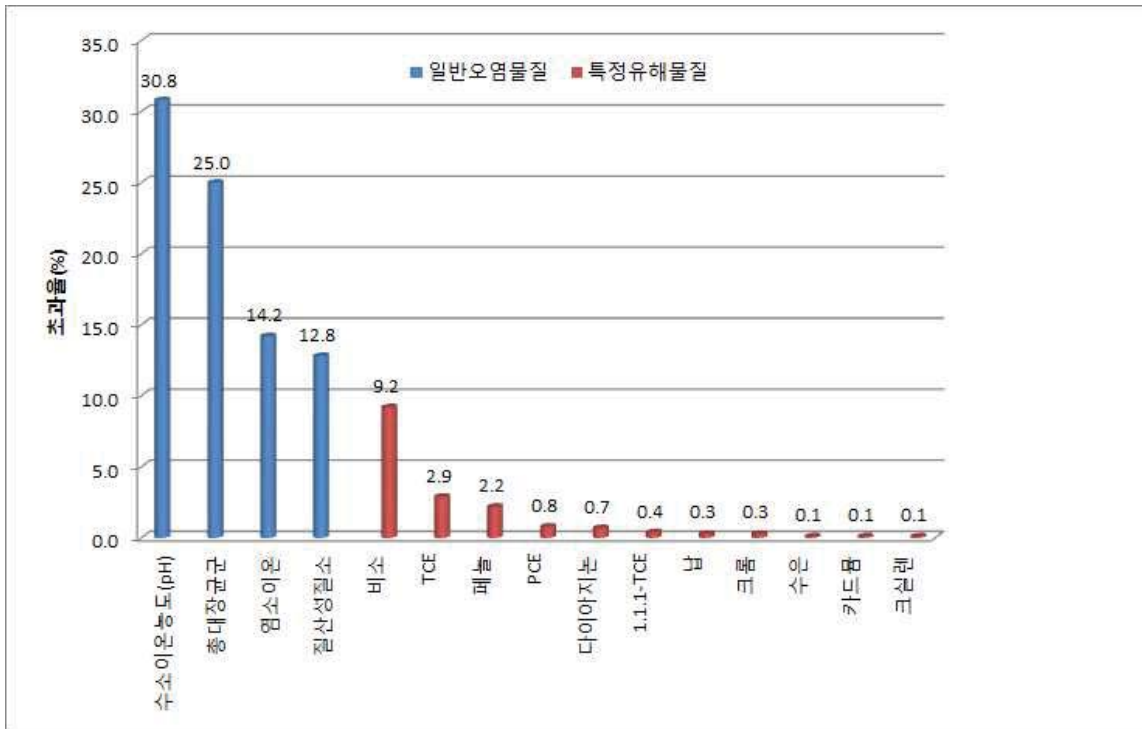


그림 1-6. 오염물질 초과 비율(2020년, 환경부 지하수 측정 연보)

표 1-15. 2020년도 지하수 수질기준 초과항목 현황(환경부, 2020)

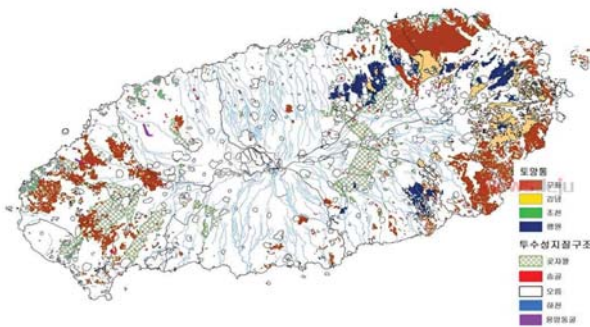
구분	조사 시료수	초과 시료수	초과율 (%)	초과 항목수	pH	총대장 균군	질산성 질소	염소 이온	카드 뮴	비소	페놀	TCE	PCE	
계	7,573	733	9.7	773	309	163	85	132	3	32	6	33	10	
오염 우려 지역	계	1,562	108	6.9	111	11	43	15	10	0	9	0	16	6
	상	781	45	5.8	47	8	17	6	5	0	0	0	8	2
	하	781	63	8.1	64	3	26	9	5	0	9	0	8	4
일반 지역	계	2,475	168	6.8	172	4	135	21	7	0	1	0	3	0
	상	1,240	81	6.5	82	2	65	10	3	0	0	0	2	0
	하	1,235	87	7.0	90	2	70	11	4	0	1	0	1	0
지하수 관리	계	2,524	214	8.5	226	143	8	21	31	1	11	7	2	0
	상	1,262	96	7.6	100	66	3	9	14	0	5	1	1	0
	하	1,262	118	9.4	126	77	5	12	17	1	6	6	1	0
농촌 지하수	계	120	21	18.3	22	4	4	3	8	0	2	0	0	0
	상	60	9	15.0	9	1	1	2	4	0	1	0	0	0
	하	60	12	21.7	13	3	3	1	4	0	1	0	0	0
지하수 오염	계	1,100	185	16.8	228	72	0	37	52	0	47	10	1	0
	1	275	41	14.9	45	16	0	6	10	0	4	9	0	0
	2	275	50	18.2	65	20	0	12	13	0	16	0	0	0
	3	275	43	15.6	54	14	0	10	14	0	14	0	0	0
	4	275	51	18.5	64	22	0	9	15	0	13	1	1	0

표 1-16. 오염우려지역별 지하수 오염특성(환경부, 2020)

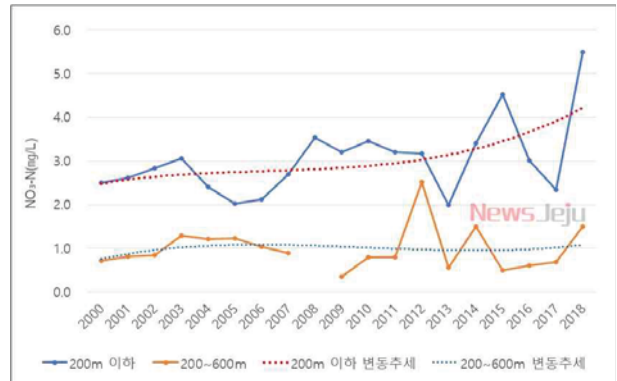
오염항목	오염우려지역	비고
질산성질소	농업용수 사용지역, 농작물 주산단지 등	농어촌지역
TCE, PCE	공단지역, 도시주거 지역 등	도시지역

표 1-17. 국가 수질측정망 중 질산성질소 초과 현황(2017년, 환경부 토양지하수종합시스템)

구분	전체	오염우려지역	일반지역	국가관측망	농촌관측망	지하수수질전용
'17년초과율	0.097 (733/7,573)	0.064 (93/1,451)	0.066 (143/2,165)	0.071 (83/1,162)	0.144 (17/118)	0.148 (397/2,677)
'16년초과율	0.089 (594/6,657)	0.071 (104/1,471)	0.064 (141/2,188)	0.072 (82/1,138)	0.136 (16/118)	0.144 (251/1,742)
'15년초과율	0.085 (584/6,900)	0.084 (124/1,483)	0.063 (136/2,175)	0.061 (67/1,104)	0.178 (21/118)	0.117 (236/2,020)
'14년초과율	0.079 (514/6,540)	0.063 (92/1,461)	0.058 (132/2,294)	0.064 (69/1,078)	0.126 (15/119)	0.13 (206/1,588)
'13년초과율	0.08 (484/6,073)	0.064 (93/1,458)	0.074 (169/2,273)	0.065 (68/1,050)	0.128 (15/117)	0.118 (139/1,175)



a. 제주지역 지질분포도



b. 제주 구좌읍 질산성 질소 변화 추이

그림 1-7. 제주 지역 질산성 질소 변화 추이 및 지질분포도(2019, 뉴스제주)

(라) 농어촌지하수 질산성질소 저감 방법

질산성질소는 수중에서 매우 안정적으로 용해되어 있으므로 흡착(adsorption) 또는 침전(precipitation) 등 일차적인 수처리 공정을 통해 저감 또는 제거시키기 어렵다. 질산성질소 저감 처리 공정 중 생물학적 처리 공정은 질산성질소의 처리 방법 중 가장 대중적으로 적용되고 있으며, 생물학적 처리 공정은 주로 박테리아 등 미생물학적 탈질 반응을 통해 질산성질소를 다양한 기체상의 무기물 형태를 거쳐 질소기체(N<sub>2</sub>)로 환원시킨다.

지하수와 토양 내에서 질산성질소를 원위치에서 제거할 수 있는 미생물학적 방법은 크게 독립영양 탈질 미생물을 이용한 방법과 종속영양 탈질 미생물을 이용한 방법이 있다. 독립영양탈질은 탄소원으로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 이용하며, 에너지원으로 무기물의 산화환원반응을 이용한다.



중속영양탈질은 탄소원으로 외부 유기탄소를 이용하며, 에너지원으로 유기물의 산화환원반응을 이용한다. 중속영양탈질을 위한 외부 유기탄소로 톱밥, 나무토막, 액상당밀을 활용한 연구가 진행된 바 있다(농업기술원, 1999; Robertson and Cherry, 1995; Schipper and Vojvodić-Vuković, 2001; Dutta et al., 2005; Najafpour and Shan, 2003). 중속영양탈질을 위한 외부 유기탄소로는 전술한 재료 외에 농업부산물인 볏짚, 왕겨 등을 활용할 수 있다.

표 1-18. 대표적인 지하수 내 질산성 질소 저감 처리 공정(김은식, 2016)

구분	원리	처리 결과	장점	고려사항
생물학적 처리	전자공여체로 유기물을 사용하여 생물학적으로 질산이온을 환원	N <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 질산성질소를 질소로 변환</li> <li>■ 유지비용 저렴</li> <li>■ 대규모 처리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 잔존 유기물의 제거</li> <li>■ 다량의 슬러지</li> <li>■ 유지·관리 어려움</li> </ul>
이온교환 처리	음이온 교환수지에 흡착 제거	NO <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 신속한 반응속도</li> <li>■ 부산물이 없음</li> <li>■ 유지·관리 용이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 다량의 소금을 재생제로 사용</li> <li>■ 고농도의 폐액 발생</li> </ul>
역삼투 처리	역삼투에 의한 이온의 제거	NO <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 부산물 없음</li> <li>■ 유지·관리 용이</li> <li>■ 적은 약품 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 다른 염류도 동시에 제거</li> <li>■ 농축액에 고농도 염류 함유</li> <li>■ 높은 유지·관리 비용</li> </ul>
전기투석 처리	전기투석막에 의해 질산이온을 제거	NO <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 부산물 없음</li> <li>■ 유지·관리 용이</li> <li>■ 적은 약품 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 다른 염류도 동시에 제거</li> <li>■ 농축액에 고농도 염류 함유</li> <li>■ 높은 유지·관리 비용</li> </ul>

#### (4) 국내·외 유사연구 및 시장 현황

##### (가) 국내 유사연구 현황

국내 농업부산물 재생 이용 기술은 바이오매스 물질 자원화, 에너지화 등에 주로 연구가 이루어졌다.

- 한국에너지기술연구원 : 농업계, 축산계, 수산계, 임산계, 도시폐기물(음식물쓰레기) 등 기술적으로 산출가능한 에너지 잠재량 도출(총 약245만TOE)
- 가축분뇨 바이오가스 활용(1,044천톤/년) : 안성, 공주, 무주, 고창, 장수, 제주 등 에너지 자원화
- 서울대학교 : 농업부산물을 이용한 바이오플라스틱 개발

국내 저영향개발(LID) 시설 기술은 최근 도시화에 따른 물순환체계 문제점 해결을 위한 대안기술로 고려되며, 국내의 여러 신규택지 개발 지역에 적용 중이다.

- 행정중심복합도시 6-4생활권 적용 : 친수구역 활용에 따른 도시지역 물순환체계 개선
- 아산 탕정신도시(175만㎡) : 분산식 빗물관리 시스템 적용하여 연강우량의 약 40%의 빗물을 가두고 일강우량 15mm까지 저장
- 이 외, 광고신도시, 평택고덕신도시, 에코델타시티 등에 적용
- 제주형 물순환 기본체계 수립 : 2018년 제주특별자치도에서 저영향개발기술을 이용한 지하수 확보 및 물순환 목표 하에 시행계획 수립 중
- 전주덕진공원 그린빗물인프라 LID사업(선정당시 예산 330억원) : 비점오염저감을 목적으로 수행되고 있으나, 빗물침투로 인한 계곡기저유출을 증가시켜 장기적으로는 계곡유량 확보 및 덕진연못유지를 위한 양질의 수량확보를 위해 사업진행 중.

## 전주시, 덕진공원 일원 '빗물관리' 5년간 337억 투입

2019년까지 '덕진공원 유역 LID그린빗물관리인프라 조성사업'

(전주=뉴스1) 김동균 기자 | 2015-11-27 17:12 송고

기사보기 | 네타관리관 | 좋아요 6개 | 공유하기 | 트위터 | 페이스북 | 뉴스 | 현대 | 확대 | 인쇄



전주시는 2019년 덕진공원 일원 LID그린빗물관리인프라 조성사업대상지역인 덕진공원유역(377㎡)에 지붕 침투통과 식생재유지 조성, 도로 및 보행로 나무여과상자 등을 설치하는 '덕진공원 유역 LID(Low Impact Development, 저영향개발) 그린빗물관리인프라 조성사업'을 추진한다고 27일 밝혔다.

전북 전주시가 빗물을 활용한 수질개선사업을 추진한다.

전주시는 2019년까지 5년간 총사업비 337억원 투입해 덕진공원 유역 일원 377㎡에 지붕 침투통과 식생재유지 조성, 도로 및 보행로 나무여과상자 등을 설치하는 '덕진공원 유역 LID(Low Impact Development, 저영향개발) 그린빗물관리인프라 조성사업'을 추진한다고 27일 밝혔다.



그림 1-8. 전주시 덕진공원 저영향개발(LID) 시설을 이용한 빗물침투사업 (김강주, 2018)

### (나) 국외 유사연구 현황

농업부산물은 탄소배출권과 맞물려 유럽에서 널리 활용 중이다.

- 스웨덴 : 삼림부산물을 활용한 열분해 오일 생산(16만톤/년) 및 가스화 발전소로 탄소배출권 프로그램에서 12억 유로 보상금 수령, 2013년 스웨덴 자동차 85%는 에탄올과 바이오가스를 이용한 연료 사용
- 독일 : 농업부산물을 가공한 목재펠릿 시장의 급격한 증가(175만USD/년, 2010년), 바이오디젤 생산 및 보급 사업 개시

1990년대 미국에서 처음 제안된 저영향개발기술은 미국, 영국, 호주, 독일, 일본 등에서 널리 활용 중이다.

- 미국 : 뉴욕 시 분산형 빗물관리 시설 사업(24억 달러)
- 일본 : 동경도, 세타가야구 스미다구 등에서 호우대책방안 적용
- 호주 : 10여년 전부터 물민감도시(Water sensitive city) 사업을 통해 도시 물순환을 통합하는 저영향개발(LID) 기술을 주정부 차원에서 적용
- 독일 : 함부르크 엘베강 하구 110 km 양안 지역, 하노버 크론스베르크 주거단지(150 ha)
- 네덜란드 : 암스테르담 rainroof 프로젝트





그림 1-9. 미국 시애틀 저영향개발(LID) 시설 설치 전 후 (김강주, 2018)

#### (다) 시장 현황

국내 지하수이용량은 2000년대 이후로 개발 및 이용이 증가추세에 있으며 2001년부터 2017년까지 지하수 시설은 1.5배 증가 추세에 있음. 특히 농업용수 시설의 수는 41만개소에서 80만 개소로 약 2배 늘어난 결과로 나타난다(그림 1-9)(2019년, 국회입법조사처, 지속가능한 지하수의 활용 및 관리방안). 2016년 농림축산식품부의 농업용수 수질개선 추진계획에 따르면 농업용수 수질개선 요구도 증가에 따라 농업용수 수질개선 중장기대책을 재수립하였다. 동 대책에서 수질개선 대상지구를 당초 2008년 대책시의 53지구에서 87지구로 확대하였으며 2026년까지 총 3,805억원을 투입한다는 계획이다(표 1-19).



그림 1-10. 용도별 지하수 개발현황(2002~2018년, 국토교통부·환경부·K-water, 지하수 조사연보)

표 1-19. 농업용수 수질개선 중장기 계획

구분	합계	15년 까지	소계	16년 ~20년					21년~ 26년	
				16	17	18	19	20		
합계	사업량(준공/신규)	87	20	21/28	2/5	3/3	3/4	6/7	7/7	46/28
	사업비	3,805	718	1,062	150	148	166	268	330	
기존	사업량(준공/신규)	41	20	21/8	2/5	3/3	3/-	6/-	7/-	-
	사업비	1,401	718	683	150	141	146	162	84	-
추가	사업량(준공/신규)	46	-	-/18	-/-	-/-	-/	-/7	-/7	46/28
	사업비	2,404	-	379	-	7	20	106	246	2,025

국내의 경우, 지자체 신규택지지구 물순환체계 개선사업과 맞물려 저영향개발기술 사업화가 이미 진행 중에 있으며, 국민의 환경에 대한 관심과 쾌적한 생활에 대한 욕구 고조로 시장은 꾸준히 확장될 전망이다. 본 과제에서 농어촌형 저영향개발기술이 농어촌 신규택지지구의 사업화에 부가된다면, 관련 산업의 활성화와 관련 업체의 매출액 창출에 기여 가능하고, 나아가 농어촌지역 주민의 웰빙에 기여가 가능하다. 저영향개발 시설은 주로 관급공사로 진행되고 있으며, 특히 도시 지역 물순환 체계 개선을 위해 적용되는 바, 농어촌지역 저영향개발 시설 적용에 있어서 경쟁기관은 현재까지 드러나지 않는다. 현재까지 수주공사 실적 기반, LH공사(아산탕정신도시, 광교신도시, 평택고덕신도시, 행복도시 등), Kwater(에코델타시티), 환경부 주관 그린빗물인프라 조성사업, 빗물제로화 시범사업, 물순환 선도도시 사업, 지자체(서울특별시) 주관 LID 기법 적용 시범사업 등이 있다.

영국의 물 전문 리서치 기관인 GWI(Global Water Intelligence)에 따르면 세계 물 시장 규모는 2013년 기준 5560억 달러(약 606조 원)로, 2018년까지 연평균 4.2%씩 성장할 것으로 전망된다. 이 같은 성장세를 감안하면 2018년에는 6890억 달러(약 751조 원), 2025년에는 9000억 달러(약 981조 원)에 이를 것으로 추산된다. 마찬가지로, 급격한 경제성장으로 과다한 지하수 채수가 이루어지고 있는 동남아 개도국(베트남, 태국 등)에서는 대수층 교란을 최소화할 수 있는 빗물함양기술에 대

한 수요가 큰 실정. 본 연구에서 개발되는 기술을 바탕으로 기술의 글로벌화 및 국내 기업의 해외 시장 점유가 가능할 것으로 예상된다.

#### (라) 지식재산권 현황

국내 특허정보 시스템인 키프리스(KIPRIS) 특허정보 검색시스템에서 ‘저영향개발’을 키워드로 하여 검색을 해보면 약 97건의 등록특허를 확인 가능하다. 이들 특허의 대부분은 저영향개발 장치에 대한 특허가 대다수이고, 저영향개발 장치에 부착되는 자재, 여과장치 등이 그 다음으로 많이 검색된다. 또한 ‘비점오염원, 저영향개발’을 키워드로 검색을 하면 약 47건의 등록특허를 확인이 가능하다. 이들 특허는 전술한 97개 특허의 일부로 검색된다. 그러나 ‘농업부산물, 저영향개발’을 키워드로 검색을 하면 화면에 검색결과가 나타나지 않으며, ‘바이오매스, 저영향개발’을 키워드로 검색시 1개의 특허가 검색되나 이는 본 과제에서 목적으로 하는 주제와 다른 특허로 판단된다.

해외 특허정보 시스템인 위포(WIPO) 웹사이트에서 ‘Low impact development’를 키워드로 하여 검색을 해보면 약 81건의 등록특허를 확인 가능하다. 이들 특허의 대부분은 빗물의 지하수 대수층 저장과 관련된 저영향개발 장치에 대한 특허가 대다수이고, 저영향개발 장치에 부착되는 자재, 여과장치 등이 그 다음으로 많이 검색된다. 그러나 ‘biomass, low impact development’를 키워드로 검색을 하면 화면에 검색결과가 나타나지 않는다..

## (5) 농어촌형 저영향개발(LID)

### (가) 물부족 농어촌지역 저영향개발(LID) 필요성

비점오염원 저감시설의 설치 및 관리지침에 따르면 비점오염원자감시설은 배수구역 내 수질 및 비점오염물질 현황, 하류하천의 목표수질, 설치부지 현황, 주변여건(농촌·도시지역) 등을 종합적으로 검토하여 시설의 종류를 결정하여야 하며 농촌의 경우 원활한 유출입을 위한 자연 단차를 확보해야 하며 인근지역 생태서식처(피난처)로서의 기능을 고려하여 비점오염 저감시설을 적용해야 한다.

농어촌지역 비점오염원은 넓은 지역에 분포하며, 과도하게 빠른 대수층 침투가 유도되어 지하수의 오염이 발생될 수도 있으므로, 농어촌지역 지하수의 수질보호 및 비점오염 유출저감을 위해서는 기존의 저영향개발(LID) 시설을 개량할 필요가 있다. 나아가, 외부기원 수원(빗물)의 함양으로 가용 지하수량은 증가될 수 있으나, 빗물 주입에 의해 지하수 대수층 환경이 변화되어 대수층 교란물질(중금속 농도 증가, 공극막힘, 탁도증가 등)이 발생될 가능성이 높으므로, 이에 대한 대책 마련이 시급하다. 이에 따라, 농업부산물을 이용한 정화 여재를 개발하여 기존의 저영향개발(LID) 시설에 부착하여 보급한다면, 농어촌지역 비점오염원 확산방지가 가능할 것으로 기대된다. 더불어 농업부산물을 저영향개발(LID) 시설의 정화 여재로 적극적 재생 이용으로, 농업부산물 가공 상품의 부가가치 상승 및 탄소발생량 저감이 가능할 것으로 기대된다.

비점오염원 관리 중 도시 비점오염은 단위면적당 배출부하량이 높고 저감시설 설치 등이 용이하여 현재에도 다양한 구조물을 통한 저감이 이루어지고 있으나, 농촌 비점오염은 배출원이 광범위하여 시설설치가 어려워 비구조적 방법이나 친환경을 고려한 유역구성원의 참여가 절실히 필요한 상황이나 명확한 기준이 없어 농촌 비점오염원 저감활동을 유도하는데 한계가 있다. 기존 저영향개발(LID) 시설은 비점오염원 기여율이 농촌 비점오염이 높음에도 도시 비점오염을 대상으로 발전이 되었으며, 이에 본 과제에서는 도시형 저영향개발(LID) 시설을 보완하여 농촌에서 적용 가능한 시설로 개발을 추진하였다.

### (나) 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID)

본 연구에서는 농업부산물을 이용하여 최적 정화 여재를 개발하고 저영향개발(LID) 시설에 부착하여, 농어촌지하수의 비오염물질인 질산염 제거 및 확산 방지하는 기술을 개발하고자 한다.



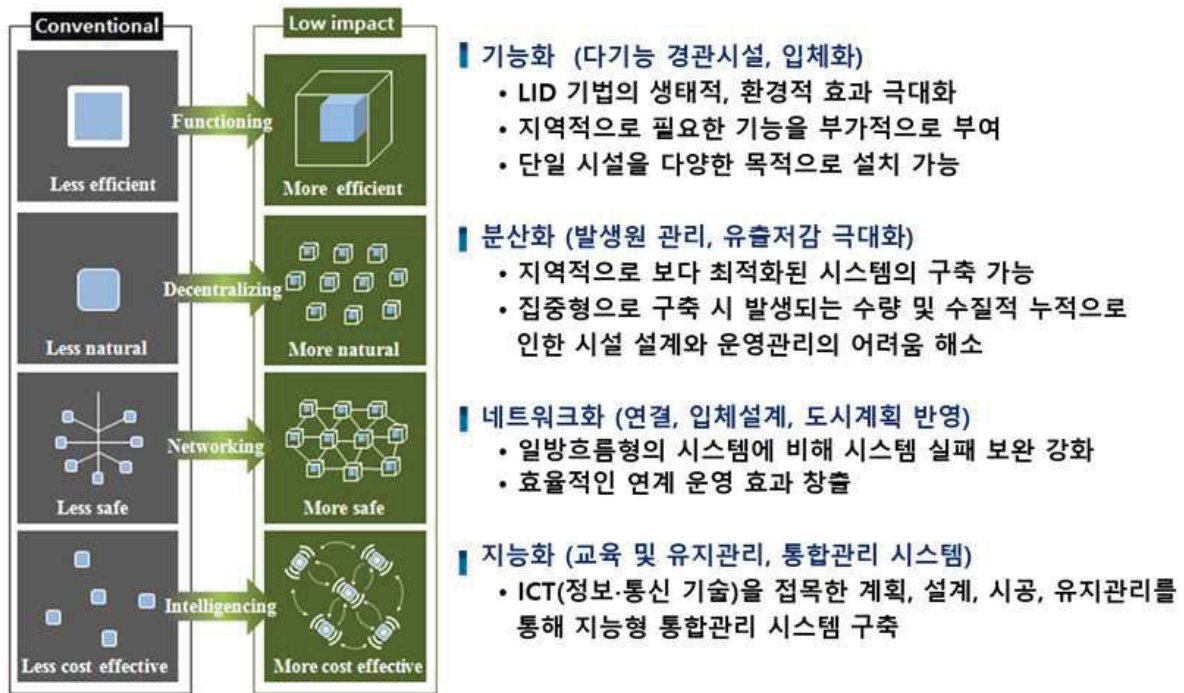


그림 1-11. 기존 방식과 물순환 방식의 저영향개발 비교 (김강주, 2018)



그림 1-12. 농어촌형 LID 개념도

### (다) 핵심기술

#### ① 농업부산물 재이용

농어촌지하수 내 비점오염원(질산염) 제거를 위한 여재는, 가공하지 않은 저가의 농업부산물 원재료, 저가의 목재펠릿과 같은 농업부산물 가공재료 등을 사용하고자 한다. 이 때, 정화 효율이 가장 높고 동시에 정화 여재 적용으로 부수적인 환경 문제(악취, 변색 등)를 최소화 하고, 최대한 장주기적으로 교환을 할 수 있는 농업부산물 정화 여재를 사용하는 것을 목표로 한다.

#### ② 농업부산물 여재를 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발

농어촌의 광범위한 지역에 분포하는 비점오염원(질산염)에 대하여, 제거 기작이 우수한 정화 여재를 기존의 저영향개발(LID) 시설에 부착하여, 농어촌지역 지하수 수질을 보호하고 비점오염 유출을 방지하는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 개발하고자 한다. 농업부산물 가공 상품의 부



가가치 상승 및 탄소발생량 저감을 동시에 가능하게 하도록 농업부산물 정화 여재가 부착된 저영향개발 시설을 개발하고자 한다.

③ 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용한 지하수 관리방안 수립

농업부산물을 활용한 농어촌형 저영향개발(LID) 적용에 따른 지하수 수량 확보 및 수질 관리방안을 수립하고, 현장 시공 설계(안), 운전조건 등 세부 요소기술을 정립하며, 최적 수질, 수량 확보를 위한 현장표준설계 지침서를 개발하여 보급하고자 한다.

④ 침투도랑형 시설을 개량하여 농어촌형 저영향개발 시설을 개발 예정

현장시험부지 용배수로의 배출수 용량 대비 농업부산물을 이용한 정화여재의 주입량 최적화를 통해 개량 기술을 개발할 예정이다.



그림 1-13. 침투도랑형 저영향개발 시설 모식도 실례 (출처 : Google 이미지)

## 나. 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발 실내실험 연구

### (1) 연구개요

#### (가) 연구배경 및 목적

질산성질소는 지하수에서 가장 흔하게 관찰되는 오염물질로 2001-2007년 환경부의 지하수수질측정망 운용자료에 따르면 질산성질소의 음용수 수질기준 부적합 비율은 8.4%로 나타나고 있다(그림 2-1). 많은 보고서나 연구논문의 결과에서의 지하수 오염상황은 매우 심각하게 나타나고 있으며(표 2-1) 특히, 인구가 밀집된 지역이나 농경지역에서 심각하고 어떤 축산지역에서는 최대 81%의 지하수가 먹는물기준치를 초과하는 것으로 나타나고 있다. 아울러 고심도 관정보다는 저심도의 관정에서 심각하게 나타나는 특징이 있다.

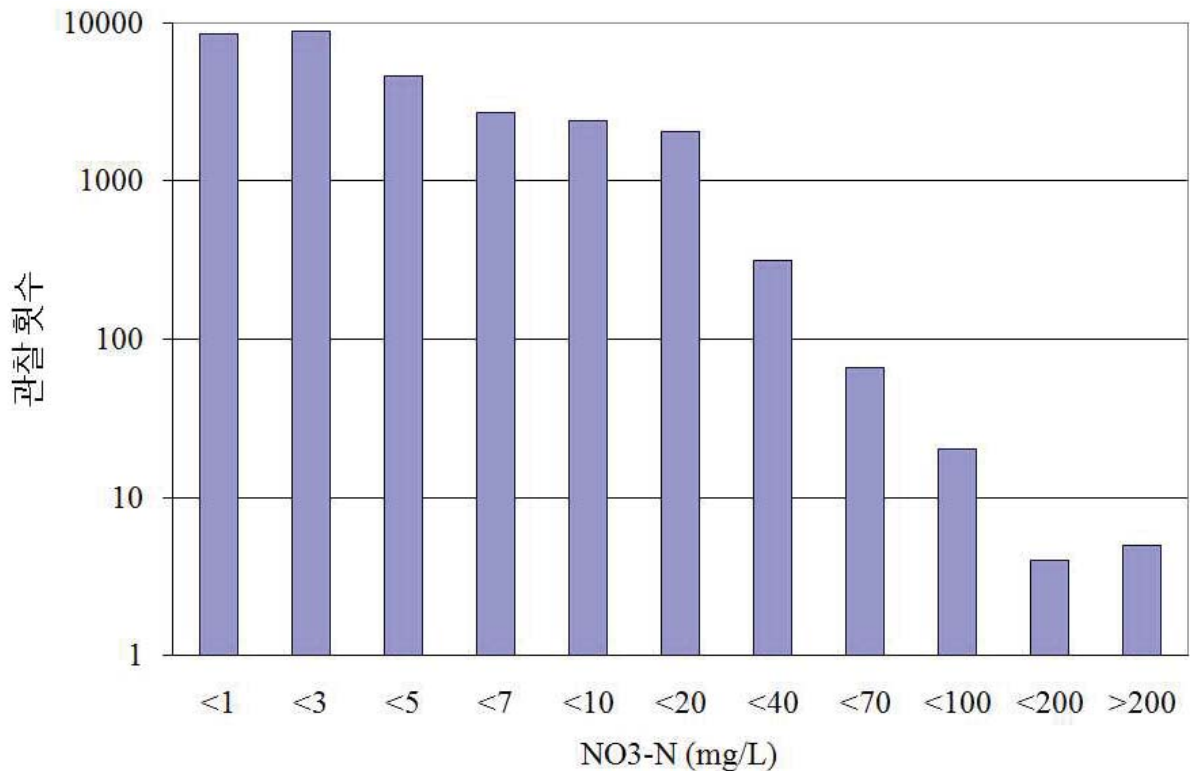


그림 2-1. 2001-07년 동안 국내 지하수수질측정망 자료(총 29,711개)를 농도별로 분석한 결과(김강주, 2014).

표 2-1. 각종 논문 및 보고서에 제시된 지하수의 질산성질소 먹는물기준치 초과현황

지역	초과율	비고	출처
안성시 일죽면 일대	32-42%	천부지하수	김연태·우남철 2003
안성시 일죽면 일대	50%	천부지하수	서울대학교 2004
경기도 모 농경지역	81%	천부지하수	이은재 외 2008
창원시 대산면 강변여과수 부지	21%	층적층지하수	현승규 외 2006
경상남도 용당, 월하	62%	층적층지하수	Min et al. 2003
전북 만경강일대	7.2% (NH <sub>4</sub> -N 42%)	층적층지하수	환경부 2010
전주시 만경강유역	17%	층적층지하수	문정태 외 2008
부여군 군수리 일대	45%	층적층지하수	Chae et al. 2004
부여군 군수리 일대	20%	층적층지하수 (다심도 관측공)	박기훈 2008
남원시 전역	7.5%	암반/층적지하수	Kim et al. 2005
군산시 전역	30%	층적/암반지하수	Kim et al. 2004
제주도 대정수역	47%	암반지하수	우남철 외 2001
완주군 운주면	3.9%	암반지하수	환경부 2010
금산군 복수면/진산면 일대	6.9%	암반지하수	환경부 2009

농어업용수의 수질기준에는 포함이 되어 있지는 않으나 암모니아성 질소, 철, 망간 등도 농촌 지하수에서 흔하게 관찰되는 오염물질이다(Kim et al., 2009, 2012). 따라서, 본 과제에서는 질산성질소를 농촌형 LID시설을 이용하여 제거하는 주된 대상물질로 선정하였으며, 질산성질소 제거과정 중 암모니아성 질소, 철, 망간 등의 거동을 같이 조사함으로써 이들의 동시제거 가능성을 검토하였다. 본 과제에서 다루고자하는 지하수 오염물질인 질산성질소, 암모니아성 질소를 포함한 철, 망간 등의 지하수농도는 모두 산화환원 반응과 밀접한 관련이 있으며, 이러한 화학반응은 미생물에 의해 매개된다. 특히, 이러한 오염물질을 제거하는 화학반응은 주로 환원반에 의해 일어나며, 이를 위해서는 유기물과 같은 전자공여체가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 농업 부산물들을 전자공여체로 이용함에 따른 장단점을 분석하고, 질산성질소제거에 가장 적합한 농업 부산물을 선정하여, 이를 본 연구의 LID시설에 적용하는 연구를 수행하였다.

(나) 농어촌지하수 주요 오염물질 순환 및 거동

① 질소

자연계에서 질소는 암모니아성 질소( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), 아질산성질소( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )와 같은 무기성 질소나 생물체에서 유래되는 유기성 질소로 존재한다(그림 2-2). 지하수에서는 질산성질소, 아질산성질소, 암모니아성 질소 등 무기의 형태로 용존되어있다. 유기성질소는 분해되어 암모니아성 질소를 생성하며, 암모니아성 질소는 식물에 의해 이용되거나 호기성환경에서 질화균에 의해 아질산성질소로 산화되고, 다시 아질산성질소는 질산성질소로 변화되며, 이를 질산화과정(nitrification)이라고 한다(그림 2-2). 질산성 질소는 미생물에 의해 탈질과정(denitrification)을 통하여 질소가스( $\text{N}_2$ )로 전환되며 탈질은 다시  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ 의 과정을 거쳐 진행된다(그림 2-2~2-3).

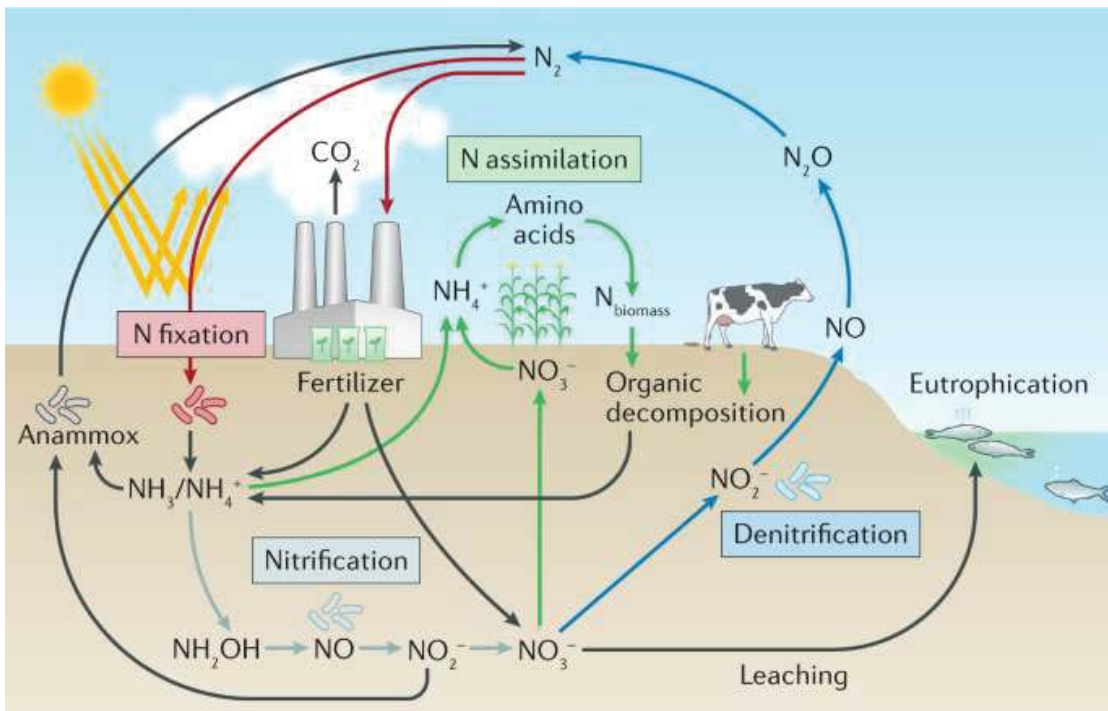


그림 2-2. 자연상에서 질소순환개념모델 (after Lehnert et al., 2018)

㉓ 암모니아성 질소

지하수내의 암모니아성 질소는 유기물의 분해에 의해 주로 생성되며, 비료살포에 의해서도 농도가 증가될 수 있다. 유기물의 분해에 의한 암모니아의 생성과정을 ‘ammonification’이라고 한다(그림 2-2). 비료성분이 도달하기 힘든 지하수 환경에서의 높은 암모니아성질소 농도는 유기물의 분해가 그만큼 왕성하게 일어남을 지시한다고 할 수 있다. 충적층지하수에서의 높은 암모니아성질소 농도는 대부분 유기물의 분해에 의한 것이라고 볼 수 있다. 암모니아성질소는 pH<9의 수중조건에서는 주로 양이온인  $\text{NH}_4^+$ 의 형태로 존재하며(그림 2-4), 이 때문에 점토광물에 잘 흡착되는 특성을 가지게 된다.

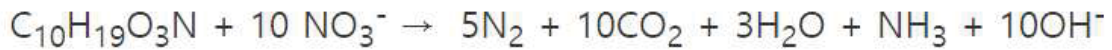
㉔ 질산성 질소

질산성질소는 비료 또는 유기물에서 유래된 암모니아성질소의 산화에 의해 생성되기 때문에 산소가 존재하는 산화환경에서 유기물이 분해될 때 생성된다고 할 수 있으며, 이를

nitrification 이라고 한다.



따라서, 질산성질소가 지하수에서 관찰되는 경우, 그 지하수는 산화환경을 거쳤거나, 여전히 산화환경에 있다고 볼 수 있다. 질산성질소는 지표면이나 산소를 포함한 불포화대에서 생성된다고 할 수 있으며, 지표투수성이 높은 토지의 저심도지하수는 높은 질산성질소 농도를 보이는 경향이 있다. 질산성질소는 지하수에서 가장 흔하게 관찰되는 오염물질이지만, 산소가 없는 환경에서는 유기물에 의해서 쉽게 탈질(denitrification)된다. 여기에서 유기물은 질산성질소의 환원을 위한 전자공여체로 작용하며, 유기물에 의한 질산성질소 환원과정 화학식은 다음과 같다.



#### ㉔ 아질산성 질소

탈질과정 중의 질산성질소와 질산화과정의 암모니아성 질소는 중간단계로 아질산성질소가 된다. 아질산성질소는 공기중으로 탈기되면 일산화이질소( $\text{N}_2\text{O}$ )로 전환되며, 일산화질소는 이산화탄소보다 300여배나 큰 온실효과를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 대지에서 대기 중으로 배출되는  $\text{N}_2\text{O}$  양은 전체 온실가스 배출량의 6%(이산화탄소 환산기준)나 차지한다고 알려져 있다(김득수 2007). 따라서 지하수내 질산성질소의 관리는 수질적 측면 뿐만 아니라, 지구온난화의 측면에서도 매우 중요한 일이다.

#### ㉕ Anammox 과정

Anammox는 암모니움이 질산염이 탈질과정 중 발생하는 NO와 반응하여 곧바로  $\text{N}_2$ 가스로 전환되는 과정을 말한다(그림 2-3). 과거에는 암모니아성질소가 질소가스로 제거되기 위해서는 먼저 질산화되어 질산성질소로 변화되고, 이후 탈질되어야 한다고 믿었으나, 1990년대 중반이후, 암모니아성질소가 아질산성질소와 반응하여 직접 질소가스로 제거시킬 수 있는 박테리아(Anammox 박테리아), 현재는 암모니아성 질소를 제거하는 폐수처리에 이용하고 있다. 최근에는 Anammox과정이 자연 상에서 매우 흔하게 일어나는 질소 제거과정으로 밝혀지기도 하였다.

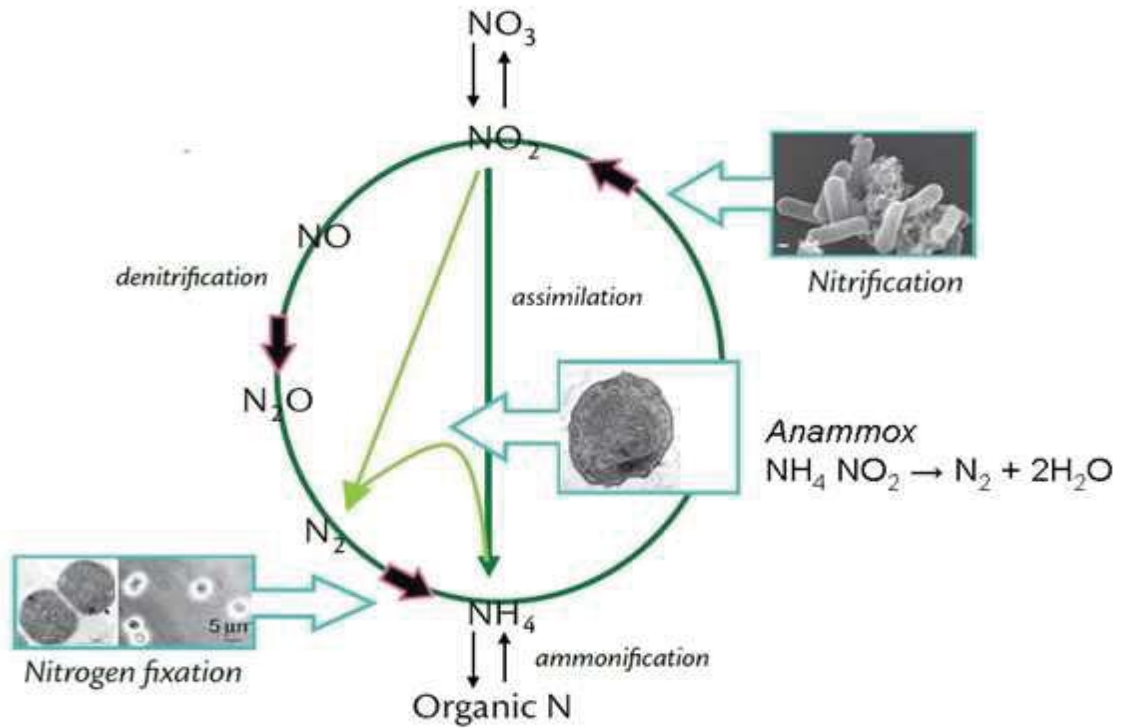


그림 2-3. Ammonification, nitrification, denitrification, anammox과정에 대한 설명도(<http://archive.sswm.info/>)

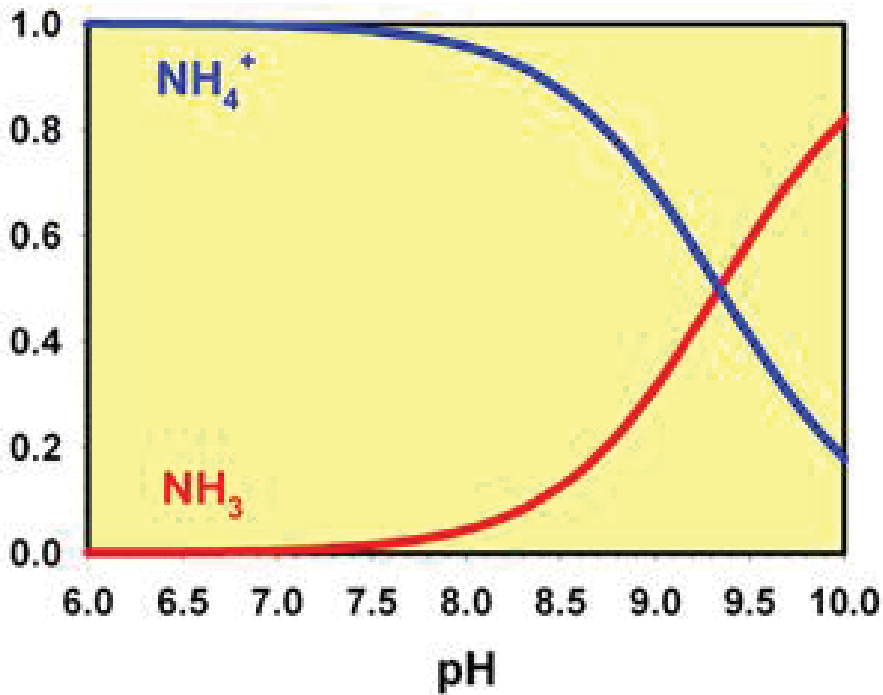


그림 2-4. pH 변화에 따른 Ammonium과 ammonia의 상대적인 농도 변화

② 철, 망간, 황산염

질소화합물은 산화환원조건에 민감한 화합물이기 때문에, 산화환원반응에 민감한 타 화학종의 거동과도 밀접한 관련이 있다. 질산성질소는 산소가 소모되면 곧바로 탈질되기 시작하나, 질산성질소가 탈질로 모두 제거되면, 다시 Fe, Mn 등의 농도가 증가되는 것으로 알려져 있다(그림 2-5). 박기훈 등(2008)이 만경강충적평야에서 수행한 연구 결과에 의하면, 지하수 시료 55개 중 질



산성질소 먹는물기준을 초과한 시료는 총 11개(20%)이었으나, 철 기준치를 초과한 시료는 40개이었으며, 망간의 기준치를 초과한 시료는 51개였다(표 2-2). 반면, 질산성질소와 철의 기준을 동시에 초과한 경우는 4개, 질산성질소와 망간의 기준치를 동시에 초과한 경우는 8개로 나타났다. 이러한 상황은 만경강유역에서 수행된 유사연구에서도 마찬가지였으며(문정태 외, 2009) 이처럼 질산성질소와 철(또는 망간)의 중복오염이 잘 관찰되지 않는 이유는 질산성질소의 존재가 산화환원 조건을 완충시켜 철 또는 망간산화물의 환원적 용해가 이루어지는 조건에 이르지 못하게 하여 철, 망간의 농도가 낮은 상태를 유지하도록 하기 때문이다(Kim et al. 2009). 그러나, 심한 환원환경에서는 유기물의 분해로 인하여 암모니아성질소, 철, 망간의 농도가 같이 높아질 수 있을 것이며(Kim et al., 2012) 따라서, 우리의 연구에서처럼 농업부산물을 이용하면 질산성질소는 제거시킬 수 있을 것이지만, 암모니아성질소와 철, 망간 등의 농도도 같이 높아지는 현상이 초래될 수 있을 것이다. 이러한 측면에서 이들의 농도도 같이 제어할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

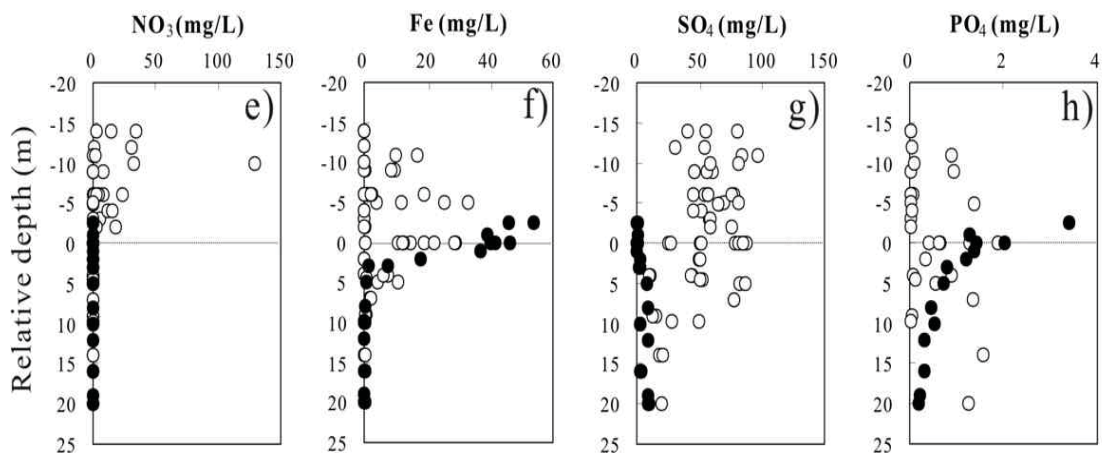


그림 2-5. Kim et al.(2009)이 만경강유역에서 관찰한 NO<sub>3</sub>, Fe, SO<sub>4</sub> 및 PO<sub>4</sub>의 심도별 농도변화

표 2-2. 금강유역(부여) 총적층지하수에서 채수된 지하수(n = 55)시료에 대한 중복 오염 분석결과 (박기훈, 2008).

구분	pH	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Fe	Mn
먹는물 기준치	5.8-8.5	44.3mg/L	200mg/L	0.3mg/L	0.3mg/L
(n=55) pH	25*				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	11			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3	0	3		
Fe	11	4	3	40	
Mn	21	8	3	40	51

\* 모두 < 5.8

## (2) 연구개발의 개요

### (가) 연구개발 개요

농업부산물을 이용하여 최적 정화 여재를 개발하고 저영향개발(LID) 시설에 부착하여, 농어촌지하수의 비오염물질인 질산염 제거 및 확산 방지하는 기술을 개발하고자 한다(그림 2-6~2-7).

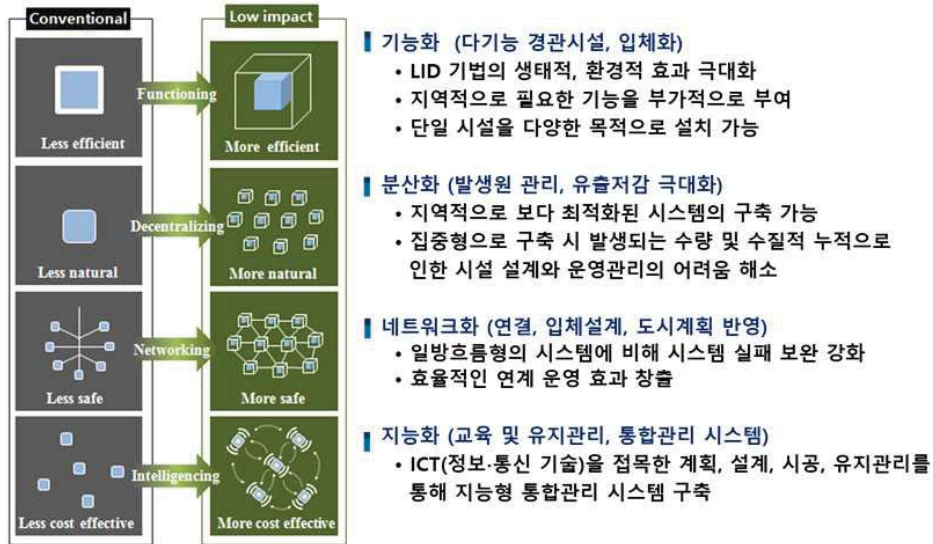


그림 2-6. 기존 방식과 물순환 방식의 저영향개발 비교 (김강주, 2018)



그림 2-7. 농어촌형 LID 개념도

#### ① 농업부산물을 이용한 정화 여재 개발

농어촌지하수 내 비점오염원(질산염) 제거를 위한 여재는, 가공하지 않은 저가의 농업부산물 원재료, 저가의 목재펠릿과 같은 농업부산물 가공재료 등을 사용하였다. 정화 효율이 가장 높고 동시에 정화 여재 적용으로 부수적인 환경 문제(악취, 변색 등)를 최소화 할 수 있는 농업부산물 정화 여재로 선택하였으며 최대한 장주기적으로 교환을 할 수 있도록 하였다.

#### ② 농업부산물 정화 여재를 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발

농어촌의 광범위한 지역에 분포하는 비점오염원(질산염)에 대하여, 제거 기작이 우수한



정화 여재를 기존의 저영향개발(LID) 시설에 부착하여, 농어촌지역 지하수 수질을 보호하고 비점 오염 유출을 방지하는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 개발하였다. 또한, 농업부산물 가공 상품의 부가가치 상승 및 탄소발생량 저감을 동시에 가능하게 하도록 하였다.

③ 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용한 지하수 수질 관리방안 수립

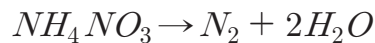
농업부산물을 활용한 농어촌형 저영향개발(LID) 적용에 따른 지하수 수질 관리방안 수립하고 현장 시공 설계(안), 운전조건 등 세부 요소기술을 정립하였다. 또한, 최적 수질, 수량 확보를 위한 현장표준설계 지침서를 개발하였다.

④ 농업부산물을 이용한 구체적인 실무 매뉴얼 개발 방안

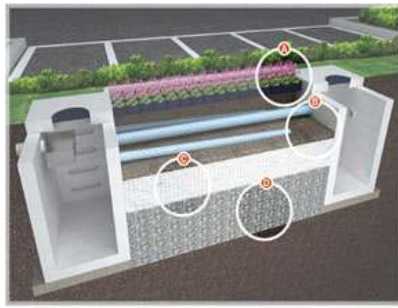
농업부산물은 군산대학교에서 실시한 실내실험을 통해 우드칩, 나뭇잎, 벼지푸라기, 쌀겨 중 우드칩으로 최종선정하였다. 가공이 필요 없도록 규격을 사전에 탐색하고 견적과 비교를 통해 운반료를 포함한 가격이 가장 저렴하고 현지 조달운반이 가능한 일반 중소기업체에서 구매(가격: 473,000원)하여 이용하였다. 현장 LID 시공 시, 모래, 자갈, 우드칩 등 규격별로 분류하여 여재부 및 함양부에 매립 시 가장 효율적인 구성으로 배치하였다.

(나) 정화여재가 탑재된 저영향개발 시설의 지하수 정화 메커니즘

ANAMMOX 메커니즘은 1990년대 후반에 처음 알려진 과정으로, 에너지 효율이 매우 높은 특성을 보이며, 현재 오폐수처리에 응용되고 있다. 자연상에서는 탈질 70%가 anammox과정에 의한 것이라는 주장이 있다. 이 연구에서는 anammox과정이 극대화될 수 있는 저영향개발(LID) 설비를 개발하여 유기물에서 발생하는 암모니아와 질산성질소들 동시에 제거하고자 하였다.



과거에는 암모니아를 제거하기 위해서는 질산화시킨 후 탈질을 시켜야 한다고 생각하였으나, Anammox 박테리아는 질산성질소와 암모니아를 이용한다. 기존의 침투도랑형 저영향개발(LID) 시설을 개량하여 농어촌형 저영향개발 시설을 개발하였다(그림 2-8). 또한, 현장시험부지(TB)의 방류수 용량 대비 농업부산물을 이용한 정화여재의 주입량 최적화를 통해 개량 기술을 개발하였다.



- 1 침투화분
- 2 모자갈
- 3 이격재
- 4 자갈



그림 2-8. 침투도랑형 저영양개발 시설 모식도 실례 (출처 : Google 이미지)

### (3) 연구방법

#### (가) 질산성질소 제거에 적합한 농업부산물 선정

우리나라 농촌지역의 농업부산물의 종류는 매우 다양하나 모든 종류를 분석할 수는 없기 때문에 주요 유기성폐자원이며 매년 발생량이 증가하고 있는 벼 부산물(Suh et al., 2017)과 주변에서 흔히 볼 수 있는 것을 재료로 선정하였다. 본 연구에서는 대표적인 부산물인 우드칩(woodchip, 소나무), 나뭇잎(leaves, 벚나무), 벼지푸라기(rice straw), 쌀겨(rice hull) 등 4종(그림 2-9)에 대하여 질산성질소 제거를 위한 유기물공급 재료로써의 가능성을 검토 하였다. 벼지푸라기(rice straw)는 경기도 고양, 쌀겨(rice hull)는 전라남도 장성에서 채집된 것이다.

##### ① Cellulose, hemicellulose, lignin 함량분석

목재는 Cellulose, hemicellulose, lignin등을 주성분으로 하며(그림 2-10) 이들은 비교적 분해가 어렵다. Cellulose는 식물 세포벽의 기본구조이며, 모든 식물성 물질의 30% 이상을 차지하는 식물의 세포막과 목질부를 이루고 있는 주성분이다. Hemicellulose는 세포벽을 구성하는 다당류 중에서 셀룰로오스(cellulose) 이외의 다당류를 말한다. 세포벽에서는 섬유 중의 셀룰로오스 분자를 접착시키고, 또 섬유 틈을 채워, 세포벽의 구조를 유지하는 역할을 한다. Lignin은 나무의 단단함을 제공하고 쉽게 부패되지 않는 성분이다.



그림 2-9. 본 실험에 사용된 농업부산물 들. 우드칩(woodchip, 소나무), 나뭇잎(leaves, 벚나무), 벼지푸라기(rice straw), 쌀겨(rice hull)

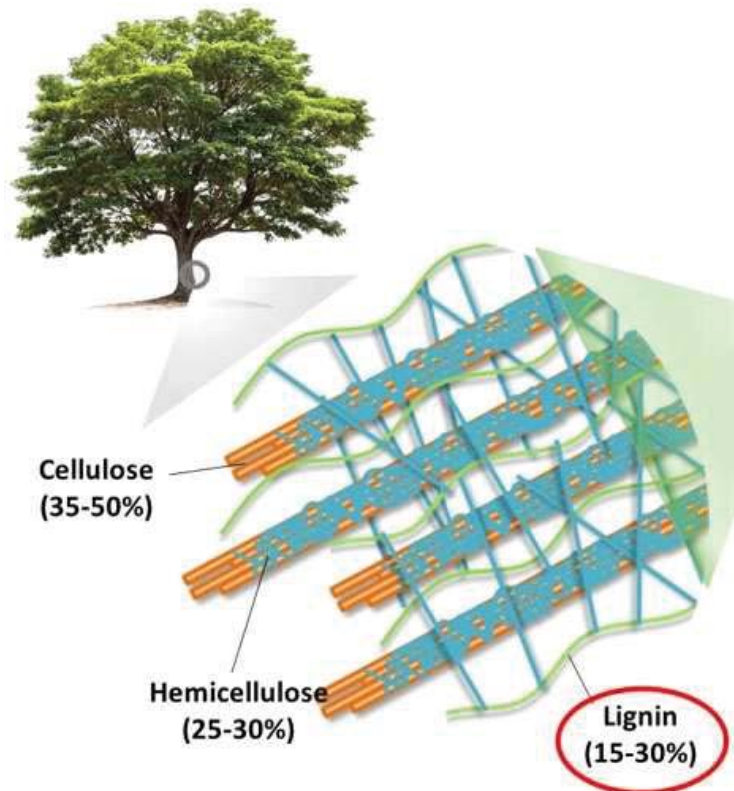


그림 2-10. 목재의 구성성분인 cellulose, hemicellulose, lignin을 보여주는 모식도. (Solar Today, 2019. 12. 30일자에 게재된 울산대 제공자료)

이들 물질들은 토양속에서 매우 느리게 분해되기 때문에, 토양층내 환원환경을 반영구적으로 만들어주는데에 유용하다. 본 연구에 사용된 재료들에 대한 이들 성분의 분석결과는 다음과 같다(표 2-3).

표 2-3. 실험에 사용된 농업부산물에 대한 cellulose, hemicellulose, lignin 분석결과

구분	Cellulose(%)	Hemicellulose(%)	Lignin(%)	Ash(%)	기타(%)
Wood chip	40.67±0.64	23.00±0.25	31.05±0.52	0.5±0.04	4.77±0.34
Leaves	14.76±0.38	13.06±0.19	46.97±0.4	5.48±0.00	19.73±0.17
Rice Straw	38.76±0.04	23.6±0.07	18.46±0.04	11.36±0.06	7.81±0.07
Rice hulls	34.05±0.76	20.57±0.34	27.13±0.45	13.82±0.07	4.44±0.04

가장 분해가 어려운 lignin의 함량은 나뭇잎과 우드칩에서 가장 높았으며, 벼지푸라기에서는 가장 적게 관찰되었다. 셀룰로스는 우드칩에서 가장 많은 함량을 보였으며, 벼지푸라기, 쌀겨도 30%이상의 함량을 보였다. 벼지푸라기와 쌀겨는 다른 재료들에 비하여 상당히 높은 Ash의 함량을 보였으며, 나뭇잎은 기타 성분이 약 20%에 이르렀으며 기타 성분은 상대적으로 쉽게 분해되는 탄수화물류의 함량을 반영하는 것으로 판단된다.

② 금속성분 분석

재료 각각에 대하여 0.5 g, 1.0 g씩을 취하여 질산으로 가열분해하여 알칼리(토)금속과 Fe, Mn의 함량을 분석하였다(그림 2-11, 표 2-4). 나뭇잎은 다른 재료들에 비하여 높은  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Fe, Mn 함량을 보였으며, 벼지푸라기는  $Na^+$ ,  $K^+$ 의 함량이 굉장히 높았다. 우드칩과 쌀겨는 모든항목에서 상대적으로 낮은 함량을 보였다. 우드칩과 쌀겨만을 비교해 보면  $Ca^{2+}$ 의 함량은 우드칩이 높고,  $K^+$ , Mn의 함량은 왕겨가 높았으며, 나머지 항목은 서로 대등하게 관찰되었다.

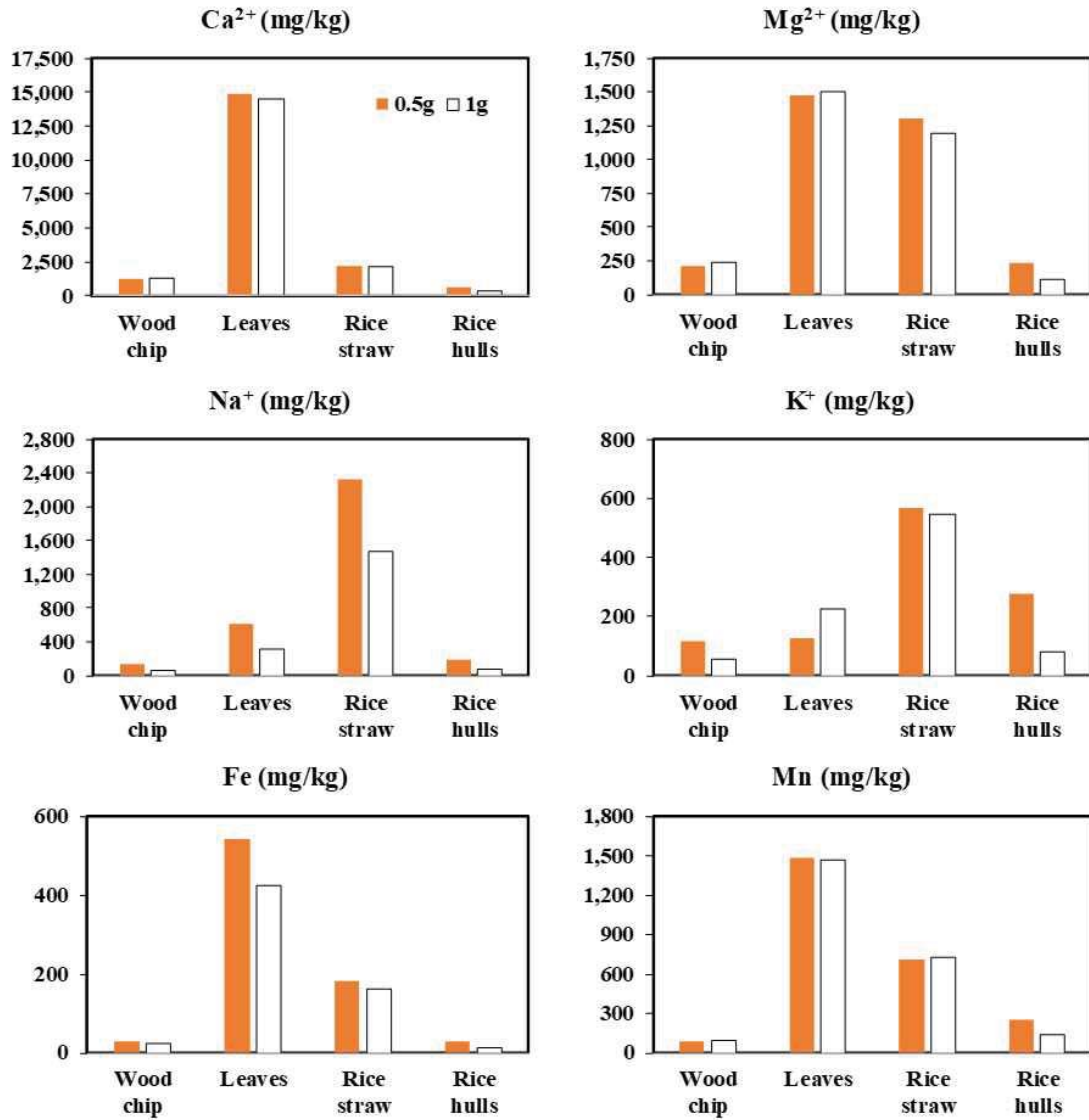


그림 2-11. 재료들의  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , Fe, Mn 함량



표 2-4. 재료들의 Ca<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe, Mn 함량 분석결과

ID		Wood chip	Leaves	Rice straw	Rice hulls
Ca <sup>2+</sup>	0.5g	1,249	14,905	2,197	638
	1g	1,301	14,541	2,181	337
Mg <sup>2+</sup>	0.5g	218	1,479	1,308	230
	1g	239	1,500	1,192	113
Na <sup>+</sup>	0.5g	129	617	2,333	189
	1g	69	316	1,473	74
K <sup>+</sup>	0.5g	117	126	566	278
	1g	58	225	544	80
Fe	0.5g	29	542	181	28
	1g	24	423	162	13
Mn	0.5g	89	1,490	709	249
	1g	91	1,469	730	136
Si	0.5g	0	0	0	0
	1g	0	0	0	0

#### (4) 연구결과 (1) : 실내실험

##### (가) 농업부산물 선정을 위한 간이 배치실험 (실험 A)

###### ① 실험목적

본 연구에서는 선택된 각 농업부산물재료의 질산성질소 저감능력과 파생되는 수질영향을 검토하기 위하여 간이 batch실험을 수행하였다.

###### ② 실험방법

본 실험은 각 농업부산물 재료 50 g을 취하여 2 L 반응조에서 1.5 L의 KNO<sub>3</sub>(20 mg N/L) 용액과 반응시키고(표 2-5), 시간에 따른 수질변화를 관찰하였다. 본 실험에서는 pH를 따로 조절하지 않았다. 따라서, 용액의 pH는 농업부산물과의 반응에 따라 변화되도록 설정하였다. 반응조의 상부공간(head space)는 초순수 질소로 채웠다(그림 2-12). 반응도중 발생하는 CO<sub>2</sub>가스 배출 또는 수질시료채취에 따른 부피수축으로 내부가 음압상태가 되는 것을 막아주기 위하여 역시 초순수 질소가스로 채워진 Tedlar bag을 연결하여, 반응용기 내의 압력과 외부의 압력이 항상 일정해지도록 조절하였다. 반응조는 농업부산물을 첨가하지 않은 대조군(control)과 다양한 농업부산물들과 반응시킨 시료 등 총 5개의 반응조를 준비하였다. 반응용기 내의 물시료는 뚜껑에 설치된 고무스토퍼를 통하여 20 cm길이의 바늘(20 G)을 이용하여 주사기로 시료를 채취하였다.

표 2-5. 실험 A의 각 반응조에 대한 조건

	Reactor A (Control)	Reactor B (wood chip)	Reactor C (leaves)	Reactor D (rice straws)	Reactor E (rice hulls)
material	-	50.39 g	50.49 g	50.72 g	50.36 g
KNO <sub>3</sub> Solution (N-20ppm)	1.5 L	1.5 L	1.5 L	1.5 L	1.5 L

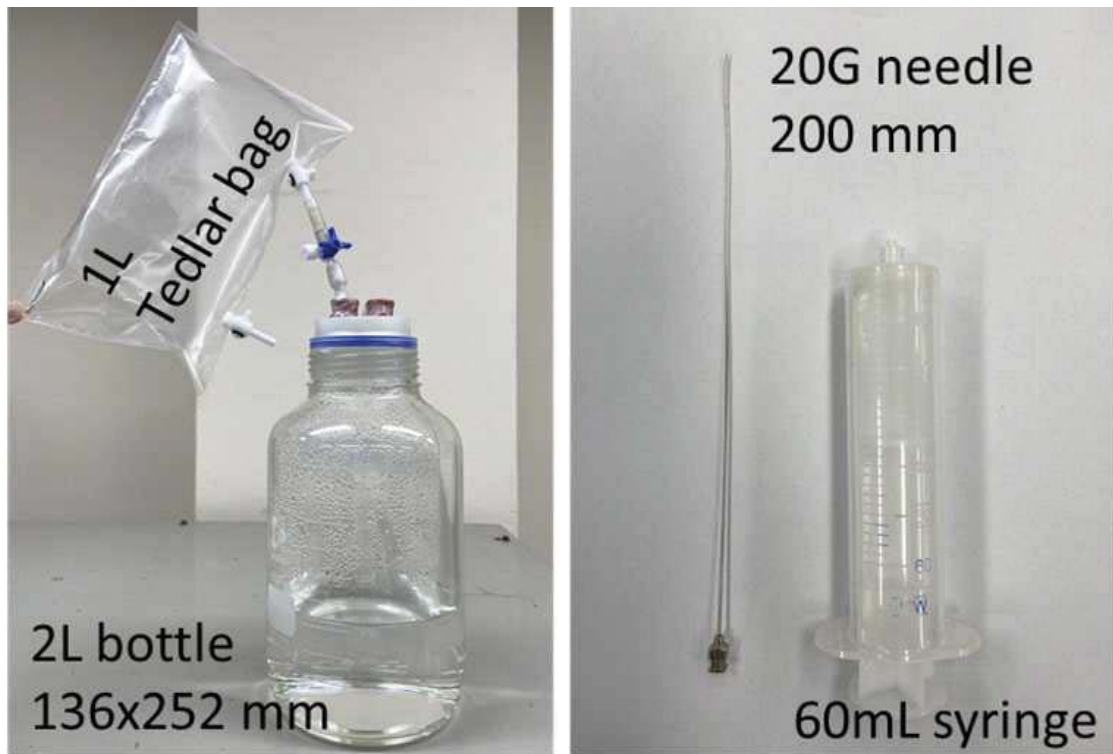


그림 2-12. 간이 batch실험(실험 A)의 반응조와 sampling에 이용된 주사기와 바늘

③ 시간에 따른 색의 변화

유기물의 용해는 용의 색을 변화시키는 바, 색의 변화는 각 농업부산물이 얼마나 빨리 분해되는 지를 지시한다고 할 수 있다. 시간에 따른 반응조의 색변화를 관찰한 결과, 우드칩과 쌀겨의 색변화가 가장 느리게 나타났으며, 나뭇잎의 색변화가 가장 빨랐다(그림 2-13). 벼지푸라기도 비교적 빠른 색변화를 보였다. 이러한 결과는 나뭇잎의 분해속도가 가장 빠른 것을 보이는 것이며, 이는 나뭇잎의 많은 기타성분과 관련이 있어 보인다. 즉, 나뭇잎의 높은 기타성분은 분해가 빠른 탄수화물의 함량을 반영하는 것으로 보인다.



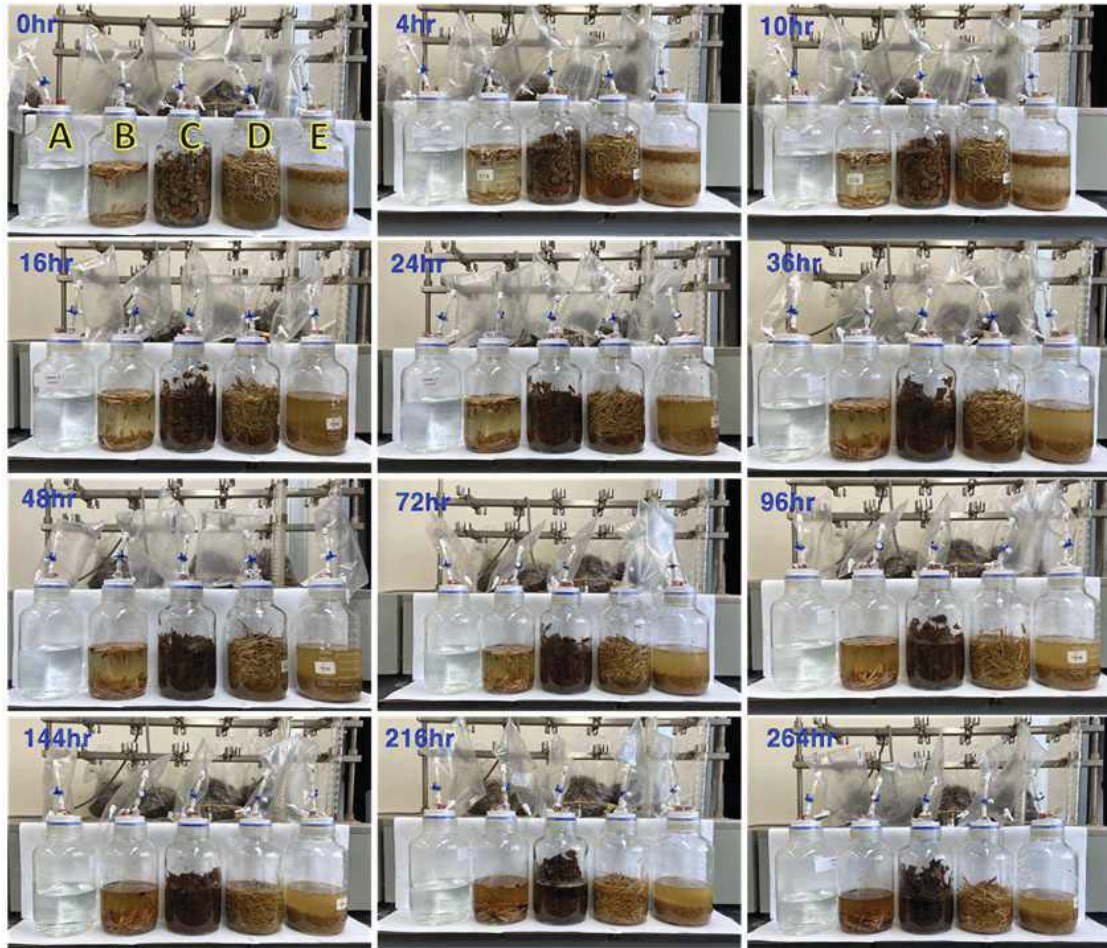


그림 2-13. 실험 A의 시간에 따른 반응조의 색변화 (reactor A-control, B-woodchips, C-leaves, D-rice straws, E-rice hulls)

#### ④ 시간에 따른 수질의 변화

질산성질소 농도변화를 보면, 겨와 지푸라기와 같은 벼 부산물들에 의한 탈질 반응속도가 가장 빨랐다(그림 2-14). 지푸라기를 이용한 실험에서는 불과 4시간 만에 질산성질소가 모두 제거되었으며, 겨를 시용한 실험에서도 지푸라기만큼은 아니지만 매우 빠른 질산성질소 제거속도를 보였다. 아질산염은 탈질과정 중에 발생되기 때문에, 아질산염이 모두 사라지는 시간이 바로 탈질이 완료되었음을 지시한다. 지푸라기를 이용한 실험에서는 4시간에서도 아질산염이 관찰되지 않았으며, 이는 지푸라기를 이용하였을 때에는 단 4시간 만에 탈질이 완전히 종료되었음을 의미한다. 겨를 이용한 실험에서 질산성질소의 대부분은 4시간 만에 제거되지만 아질산성질소의 농도가 크게 높아지는 양상을 보였다. 이는 4시간 반응으로는 아직 탈질이 종료되지 않는 것을 알 수 있다. 겨를 이용한 실험에서 아질산염농도는 16시간 후에 완전히 제거되었다. 지푸라기와 쌀겨를 이용한 실험에서는 암모니아성 질소의 농도가 급격히 증가되는 양상을 보였으며, 이는 이들의 빠른 분해속도를 반영하는 것으로 보인다. 벼부산물 다음으로 탈질속도가 빠른 농업부산물은 나뭇잎이었다. 그러나, 나뭇잎은 48~96시간에서 높은 아질산염농도를 보였고, 144시간이 지나서야 완전히 제거된 아질산염농도를 보였다. 우드칩은 24시간이 지난 후부터 서서히 아질산염의 농도가 증가하여 216시간에서 최대의 농도를 보이고 이후 감소되는 경향을 보였다. 즉, 216시간이 지난 후에도 탈질이 완전히 종료되지 않은 것으로 보인다. 이러한 탈질 반응속도는 관찰된 DO의 제거속도와도 잘 일치한다. EC역시 벼지푸라기에서 가장 빠르게 증가되었으며, 이는 벼지푸라기의 분해속도와 관련이 있어 보인다. Eh는 쌀겨와 벼지푸라기에서 초반에 급격히 감소되는 양상을 보였으며, 이는 급격한 탈질반응과도 관련이 있을 것이라고 판단된다.

⑤ 시사점

각 농업부산물별 실제적인 탈질속도는 벼지푸라기가 가장 빨랐으며, 쌀겨도 비교적 빠른 속도를 보였다. 이러한 결과는 농업부산물의 탈질능이 분해가 잘 되지 않는 cellulose, hemicellulose, lignin의 총량과는 크게 관련이 없는 것으로 나타났다. 아마도, 미량존재 하더라도 분해가 잘 이루어지는 물질의 함량과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

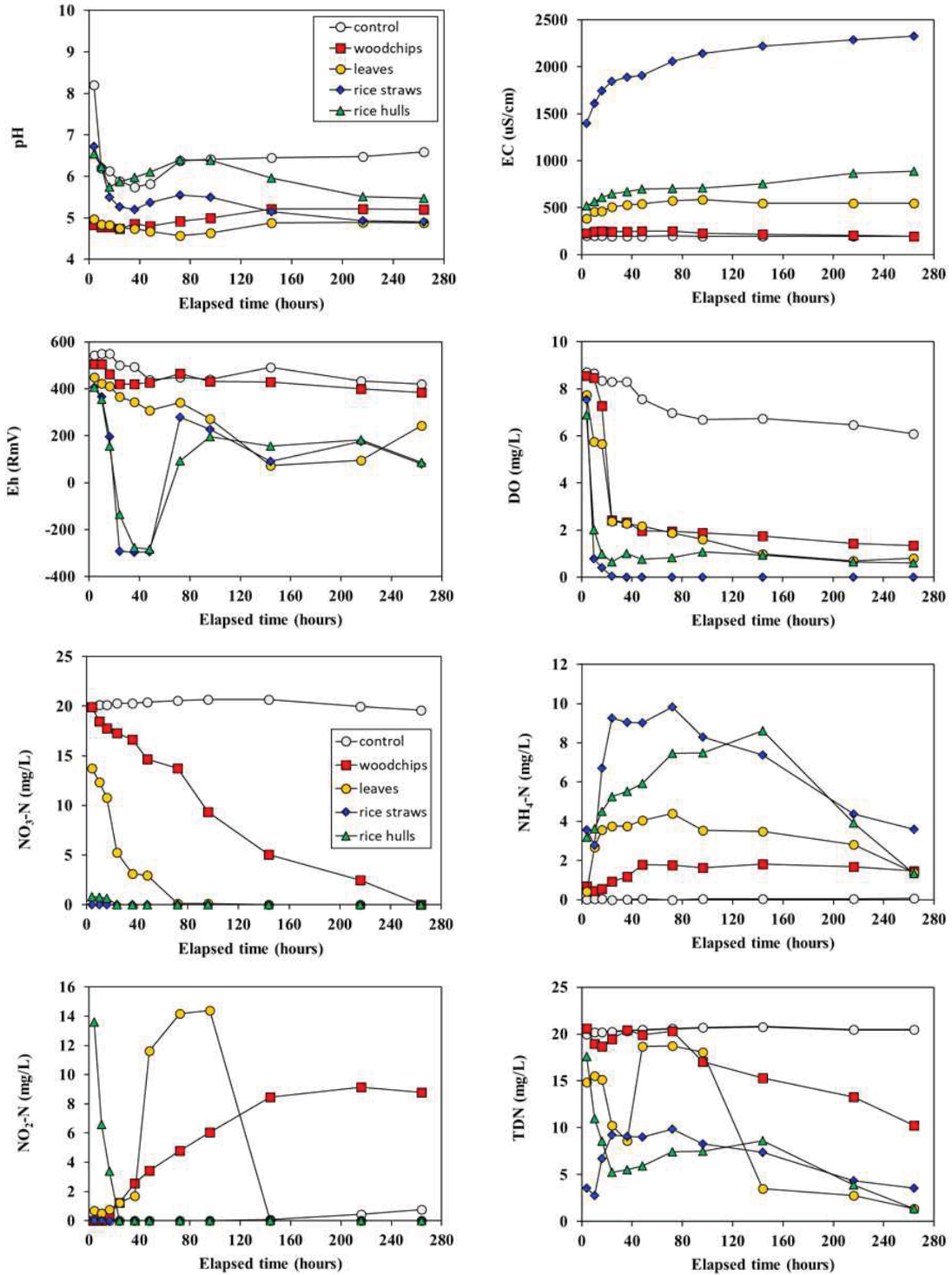


그림 2-14. 간이 batch실험(실험 A)에서 시간에 따른 수질변화

## (나) 우드칩과 나뭇잎을 활용한 질산성질소 제거 효율 비교 실험 (실험 B)

### ① 실험목적

난분해성물질을 많이 함유하고 있는 우드칩과 상대적으로 분해가 빠른 나뭇잎을 이용하여 실제 자연조건, 즉 모래 속에서의 질산염제거실험을 수행하고, 그에 따른 문제점을 고찰하기 위한 목적으로 실험이 수행되었다.

### ② 실험방법

본 실험에 사용된 컬럼은 <그림 2-15>와 같다. 본 컬럼은 아크릴로 제작되었으며, 컬럼의 바닥과 측면에서도 깊이별로 수질을 채취할 수 있도록 제작되었다. 컬럼바닥에는 mesh (#100)로 덮은 시료지지대를 두었다. 컬럼을 채운 재료로는 모래, 나뭇잎, 우드칩이 이용되었다(그림 3-16). 컬럼은 약 26 cm 길이로 모래(컬럼 A), 우드칩+모래(컬럼 B), 나뭇잎+우드칩+모래(컬럼 C)를 채워 준비하였다(그림 2-17, 표 2-6). 위 컬럼을 채위기 전에는 바닥에 3cm의 굵은 자갈과 3.6 cm의 모래를 깔았으며, 컬럼을 채운 후에는 다시 같은 두께의 모래와 굵은 자갈을 덮어주었다. 이렇게 채워진 컬럼에는 모래의 염분기를 제거하기 위하여 바닥의 배출구 통하여 수돗물을 2바닥에서 위로 24시간동안 흘려 보내주었다. 이후에는 같은 방법으로  $\text{KNO}_3$  용액 (20 mg-N/L)을 지속적으로 컬럼의 위로 흘러나온 용액의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도가 주입된 농도와 같아진 상태에서 4시간을 더 흘려보냈다. 실험은  $\text{KNO}_3$  용액 (20 mg-N/L)흘리기를 중단하고, 컬럼상부의 수위가 일정하게 유지되도록 조정된 상태에서 수행되었다. 시료는 시간에 따라 컬럼바닥 위 10 cm지점에 만들어진 배출구를 열어 흘러나오는 물을 150 ml씩을 채취하여 다양한 수질을 측정하였다. 이때 시료채취로 줄어든 컬럼 내의 수위는  $\text{KNO}_3$  용액 (20 mg-N/L)으로 상부의 수층으로 자동적으로 채워지도록 하는 방법으로 일정하게 유지되도록 조정하였다.



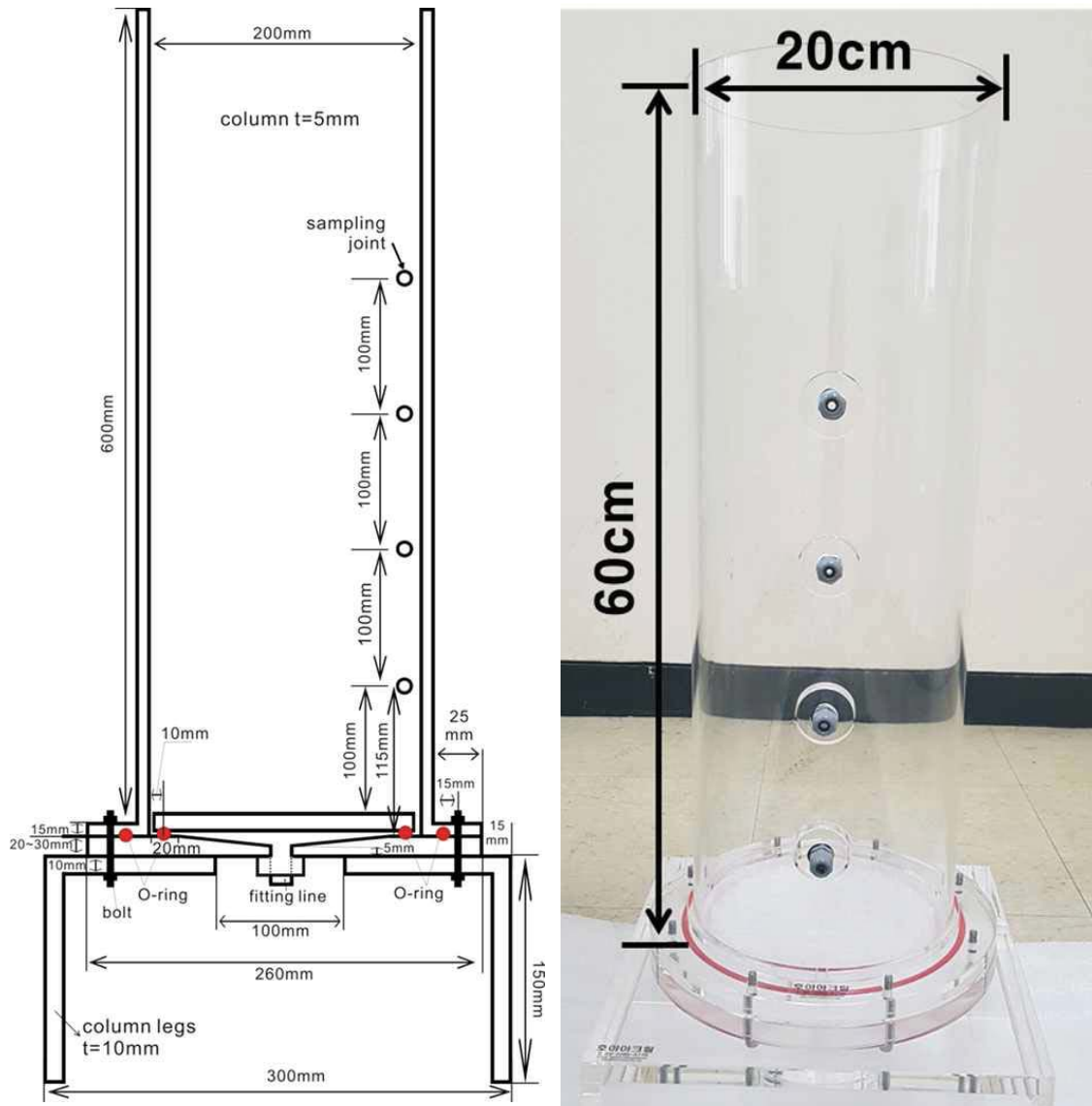


그림 2-15. 실험B와 C에 이용된 컬럼의 도면과 실물 사진



그림 2-16. 실험에 이용된 재료 사진(실험 B)

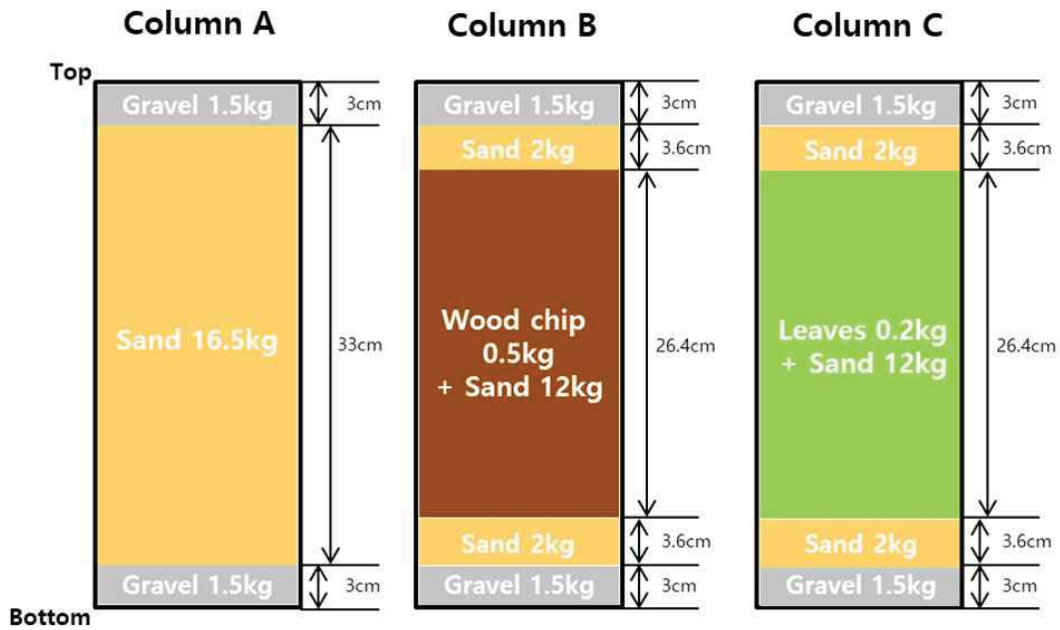


그림 2-17. Batch 실험(실험 B)에 이용된 컬럼의 packing 내역

표 2-6. 각 컬럼에 이용된 채움재료(실험 B)

	Column A (Control)	Column B	Column C
Gravel	3 kg	3 kg	3 kg
Sand	12.5 kg	16 kg	16 kg
Wood chip	-	0.5 kg	-
Leaves	-	-	0.2 kg
Solution	N-20ppm (KNO <sub>3</sub> 로 제조)		

### ③ 탈질속도

컬럼내 질산염의 제거속도는 나뭇잎(200 g)을 첨가한 컬럼(column C)에서 가장 빠르게 일어났다(그림 2-18). 24시간이 지났을 때, 질산염의 99%가 제거되었고, 36시간 후에는 질산염이 검출되지 않았다. 우드칩을 첨가한 Column B에서는 36시간이 지났을 때, 질산성질소가 90%정도 제거되었고, 120시간이 지나서부터는 질산염이 검출되지 않았다. 모래로만 컬럼을 채운 경우(Column A)에도 질산염농도가 느리게나마 줄어드는 양상을 보였다. 본 컬럼의 경우 144시간이 지난 후 질산염이 80%정도 감소되는 양상을 보였다. 그러나, 아질산성질소의 농도가 여전히 높은 값을 보인 것으로 보아, 완전한 탈질이 이루어진 것은 아닌 것으로 판단된다. 이처럼 컬럼 A에서도 질산염의 농도가 감소되는 양상을 보인 것은 실험에 사용한 모래에 어느 정도의 유기물이 포함되어 있었던 것으로 판단된다. 나뭇잎을 사용한 경우, 탈질의 반응속도가 빠르다는 장점이 있었으나, 유기물분해로 인한 암모니아성질소의 농도가 우드칩을 이용한 경우보다 높게 나타났다는 단점이 있었다.

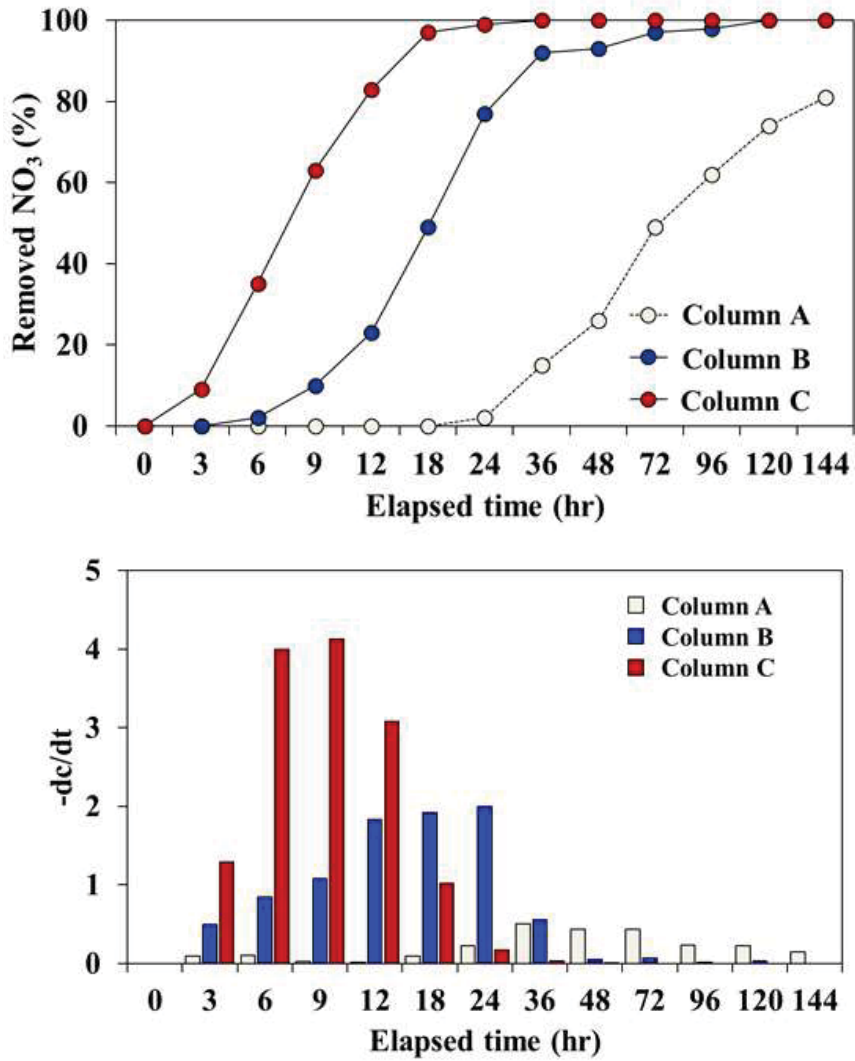


그림 2-18. 실험 B의 시간에 따른 질산성질소 제거효율(상) 및 제거 속도(하)

④ 수질변화

유기물의 분해속도는 pH, Eh, DO, alkalinity, pCO<sub>2</sub>, EC 등의 시간별 변화에도 잘 반영되어 있다(그림 2-19). pH는 Column C에서 가장 낮았으며, 이는 유기물 분해로 발생된 CO<sub>2</sub>와 관련이 있다. 즉, 나뭇잎의 분해가 가장 빨랐다고 할 수 있다. Column C의 빠른 유기물 분해속도는 그것의 낮은 DO, 높은 alkalinity와 Ca농도 등에도 잘 반영되어 있다. Column A는 8 이상의 pH를 보였으며, 이는 실험에 사용된 모래에 조개껍데기 등이 포함되어 있던 것과 관련이 있다.

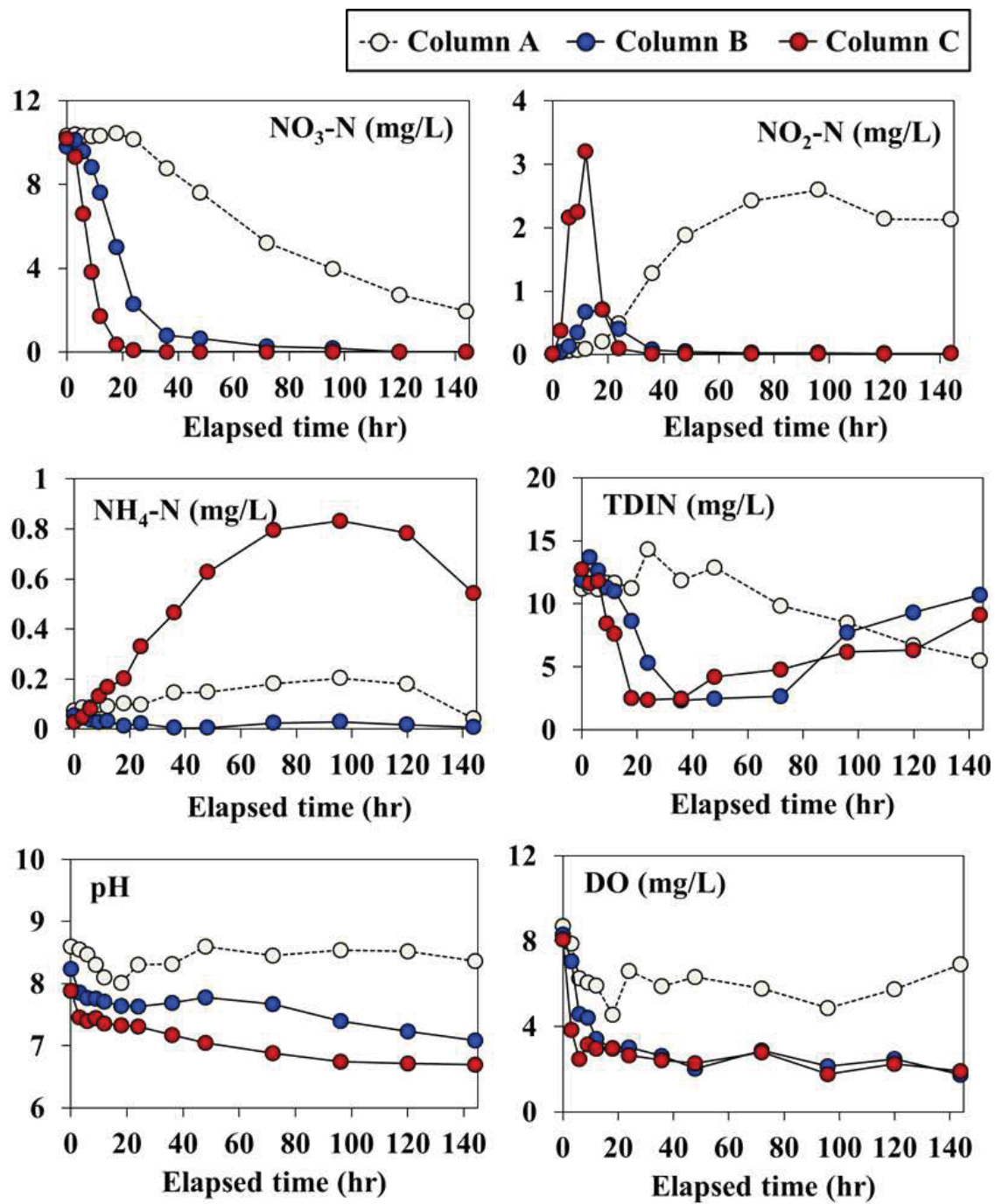


그림 2-19. 시간에 따른 수질변화(실험 B)



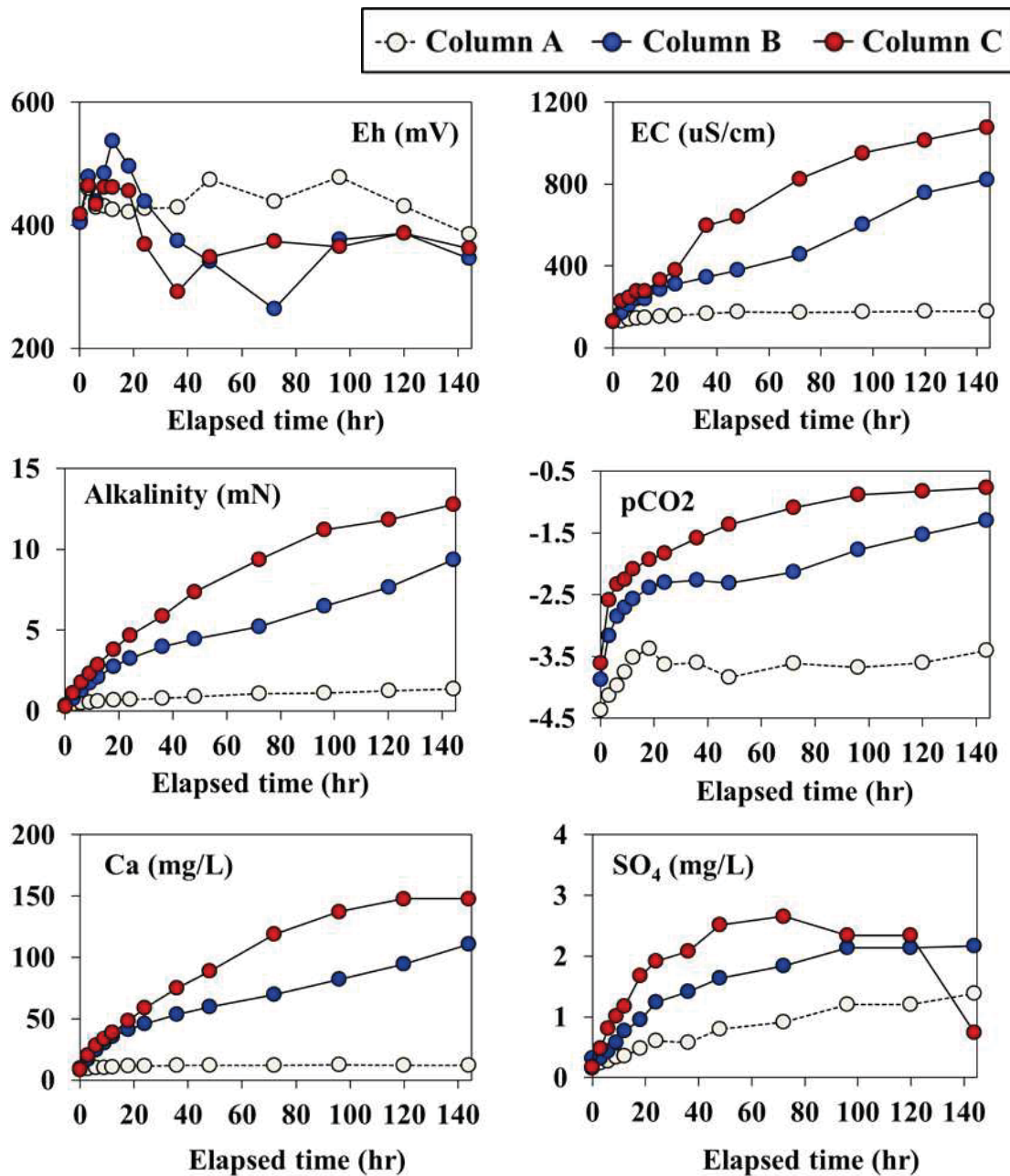


그림 2-19. 계속

(다) 석회석에 의한 질산성질소 제거 효율 비교 실험 (실험 C)

① 실험목적

모래에 석회석 또는 조개껍데기와 같은 탄산칼슘성분이 포함되었을 때에 대한 탈질효과를 분석하기 위하여 본 실험이 수행되었다.

② 실험방법

본 실험에서 사용한 컬럼은 실험 B에 사용된 것과 같은 컬럼(그림 2-15)이다. 컬럼을 채운 재료로는 모래, 우드칩, 석회석이 사용되었다. 모래는 실험 B에 이용한 것과 같은 모래를 염산 (pH<1)으로 반복처리하여 더 이상 기포가 발생되지 않을 때까지 폐각성분을 완전히 제거하고, 세척수의 pH가 5를 넘어설 때까지 수돗물로 세척한 다음 완전히 건조하여 실험에 이용하였다. 유기물 재료인 우드칩은 전자공여체로 이용하였으며, 석회석은 분쇄하여 125~250  $\mu\text{m}$ 크기의 입자만을

채로 걸러 사용하였다. 이 재료들의 혼합비율과 채우기 방법은 <그림 2-20>과 같다. 각 컬럼 내 초기조건은 실험 B와 동일하다.

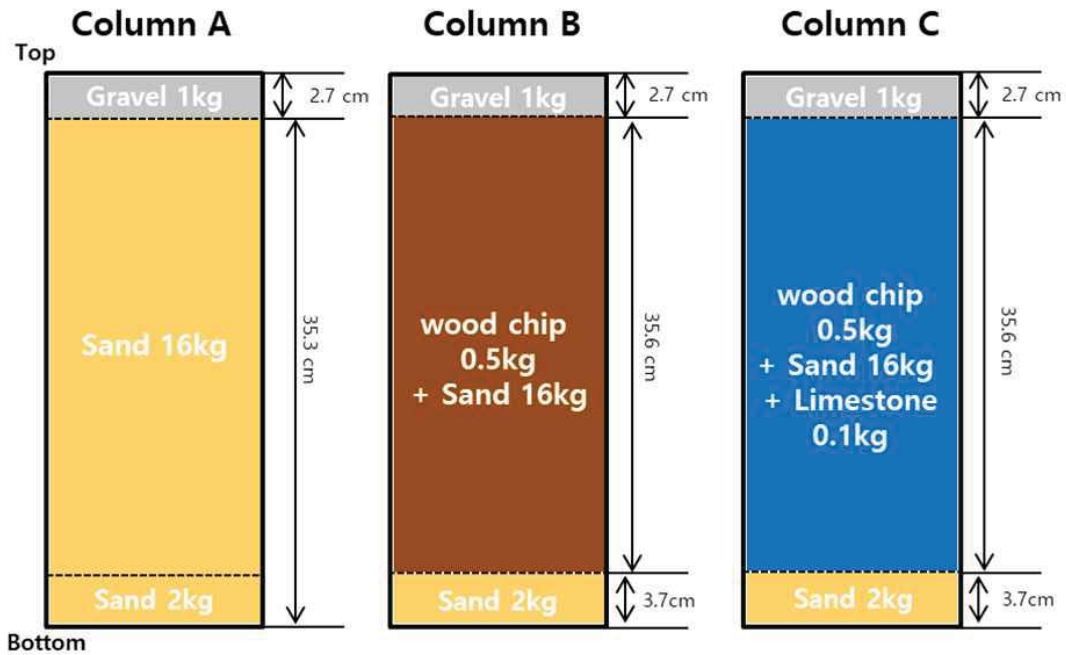


그림 2-20 실험 C의 각 컬럼에 이용된 재료와 packing 조건

### ③ 탈질속도

실험결과 질산염의 제거속도는 석회석을 포함한 경우(컬럼 C)가 석회석을 포함하지 않은 경우(컬럼 B)보다 약 3배정도 빨랐다(99%제거 기준; 그림 2-21). 대조군에서도 질산염의 제거가 관찰되었으나 200시간의 관찰기간동안 완전히 제거되지는 않았다. 본 실험을 통하여 탄산칼슘을 첨가하는 경우 탈질의 속도는 명백히 증가됨을 알 수 있었다. 아질산염의 농도는 컬럼 C의 경우 대부분의 관찰기간 동안 0.2 mg-N/L를 유지한 반면, 컬럼 B의 경우는 48시간 이전에서는 0.5 mg-N/L이상의 농도를 보였다. 암모니아성질소의 농도도 컬럼 C의 경우가 컬럼 B의 경우보다 낮게 유지되었다.

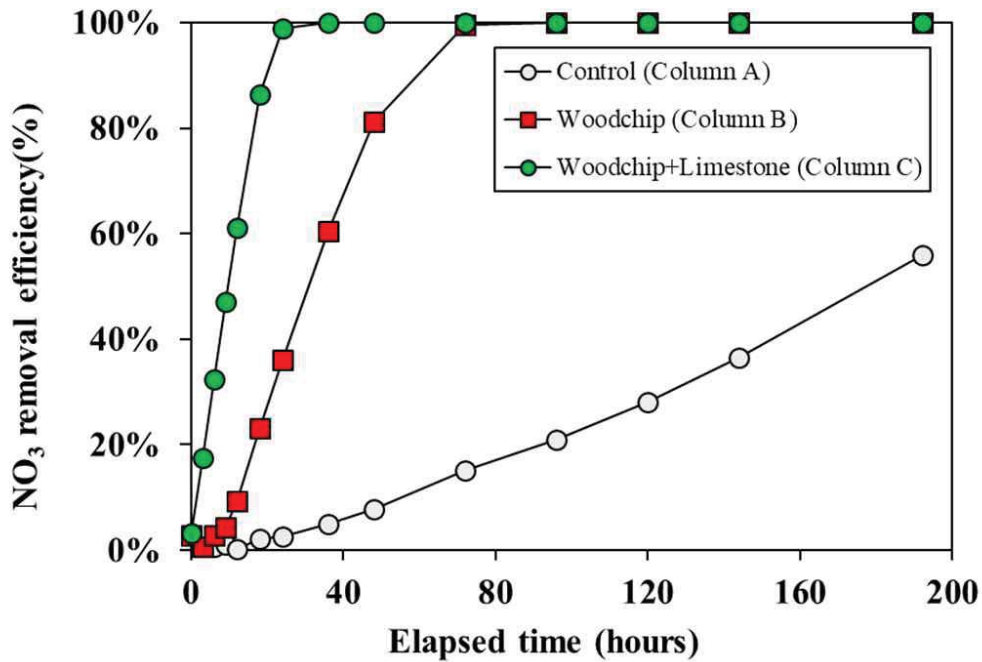


그림 2-21. 실험 C의 시간에 따른 질산염 제거량

④ 수질변화

예상할 수 있는 대로 컬럼 C의 pH가 가장 높았다. 컬럼 C의 pH는 7.8정도의 초기 값에서 계속해서 감소하는 양상을 보였으며, 그 값은 항상 컬럼 A 및 B보다 높게 나타났다(그림 2-22). 이와 같은 pH의 감소는 유기물의 분해에 따른 CO<sub>2</sub>발생에 의한 것으로 보인다. alkalinity는 컬럼 C가 다른 컬럼들에 비하여 매우 높은 값을 보였는데, 이는 석회석의 용해에 의한 것으로 판단된다. 컬럼 B와 컬럼 C가 비슷한 DOC값을 보인 것을 보면 양 컬럼에서의 유기물분해 속도는 거의 비슷한 것으로 판단된다. 컬럼 C는 상대적으로 높은 pH와 alkalinity로 인하여 초기에는 컬럼 B보다 상대적으로 낮은 pCO<sub>2</sub>값을 보였으나, 후에는 서로 비슷해졌다. 이는 과포화된 탄산염광물들의 침전에 의한 것으로 판단된다. 석회석의 용해로 인하여 컬럼 C의 Ca 농도도 높게 나타났다. 컬럼 C는 반응 후반부에서 다른 컬럼들에서보다 훨씬 높은 Fe와 Mn농도를 보였다. 황산염의 경우 컬럼 B와 C에서 초반부에 증가된 후 후반부에서는 감소되는 경향을 보였고, 컬럼 C에서는 100시간 이후부터는 농도가 거의 검출되지 않았다.

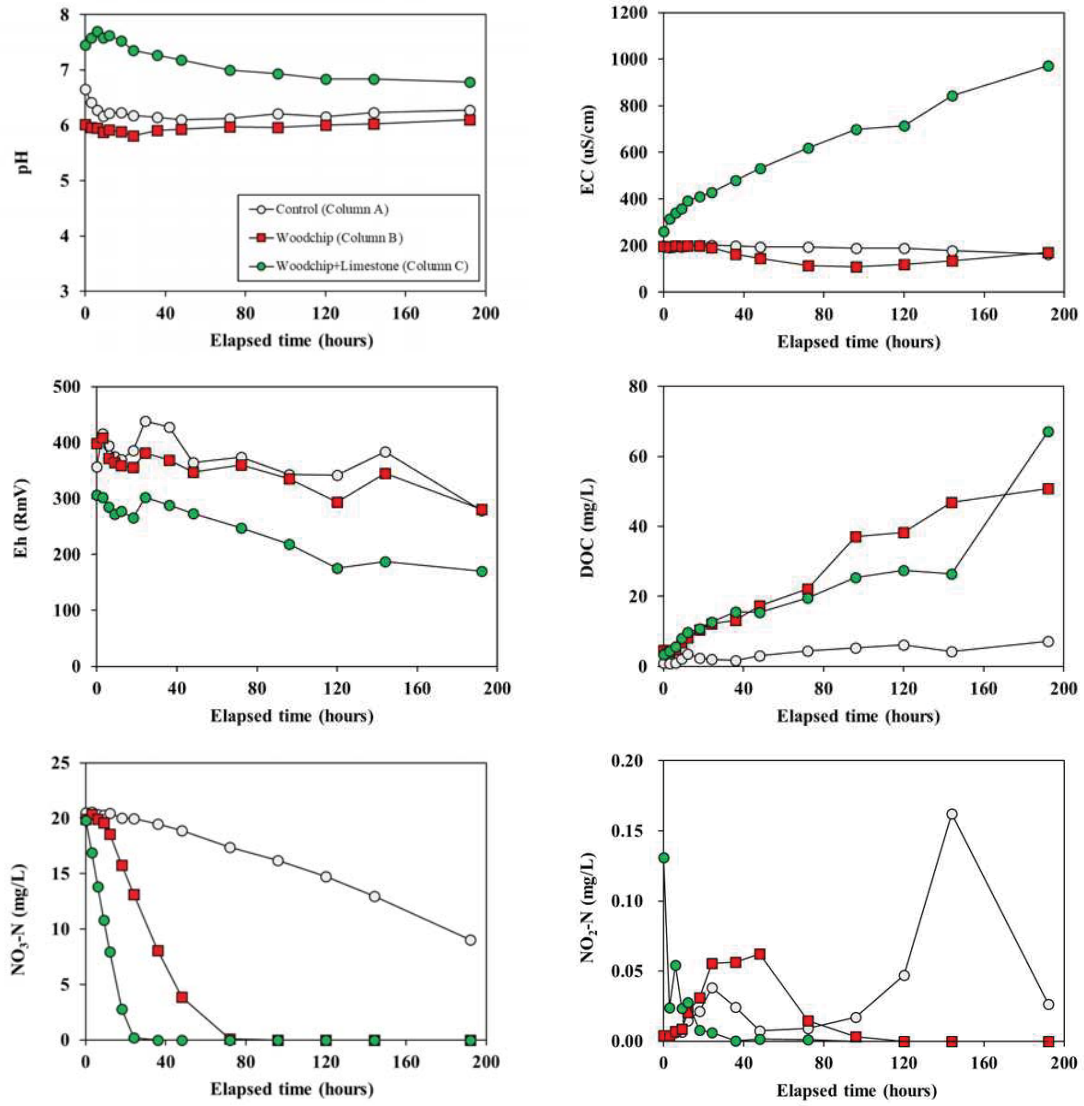


그림 2-22. 실험 C의 시간에 따른 수질변화

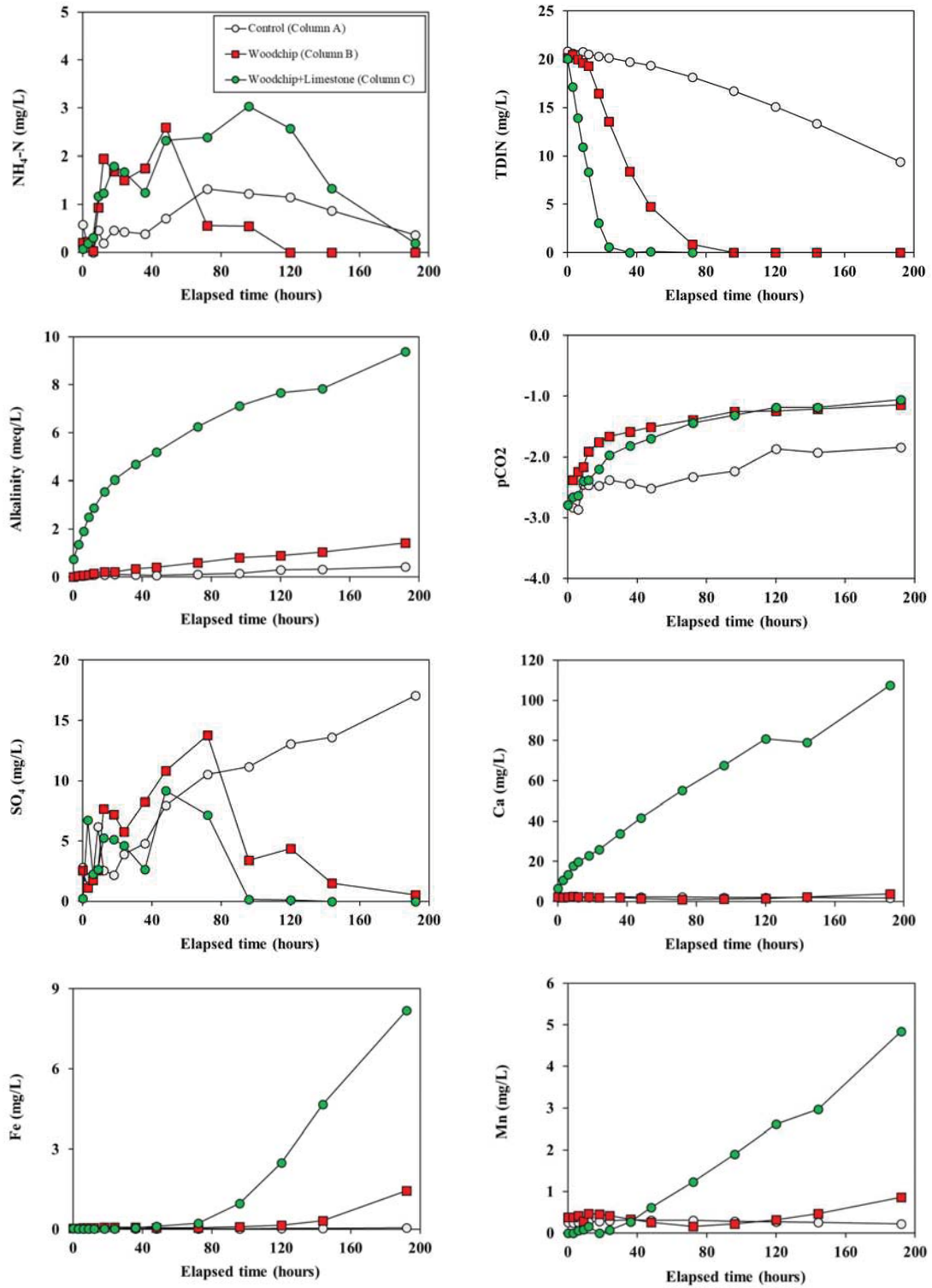


그림 2-22. 계속



⑤ 고찰

실험결과를 보면, 석회석이 포함된 경우 질산염의 제거속도가 훨씬 빠름을 알 수 있으며, 이는 낮은 Eh, 빨리 제거되는 황산염농도, 높은 Fe 및 Mn농도 등을 고려할 때 미생물의 높은 활성도와 관련이 있는 것으로 판단된다. 컬럼 C에서 이처럼 반응이 빨랐던 이유는 석회석으로 인하여 미생물의 활성에 적합한 pH가 유지되었기 때문으로 보인다. 유기물의 분해는 이산화탄소를 발생시키고 이것이 소모되지 못하면 물의 pH를 낮추게 된다. 이로 인하여 컬럼 B에서는 가장 낮은 pH를 보였고, 그 값은 6이하를 보였다. 탈질미생물의 활성에 적합한 pH는 7~9정도로 알려져 있으며, 컬럼 실험에서는 발생된 이산화탄소가 석회석을 녹이는 데에 소모되어 pH가 낮아지지 않고 비교적 적절한 범위를 유지할 수 있었던 것으로 보인다. 그러나, 이러한 미생물의 활성으로 인하여 컬럼 C에서는 산화철과 산화망간의 환원으로 인하여 다른 컬럼들에 비하여 높은 Fe와 Mn농도가 도출되었다. 또한 컬럼 C는 반응 후반부에 능철석(siderite)과 능망간석(rhodochrosite), 비정질 수산화철( $Fe(OH)_3(a)$ )에 대하여 과포화된 포화지수값을 보였다(그림 2-23). 이를 바탕으로 판단할 때, 컬럼 C에서 관찰된 높은 Fe와 Mn은 어느 정도의 시간이 흐르면 모두 침전 제거될 것으로 판단된다.

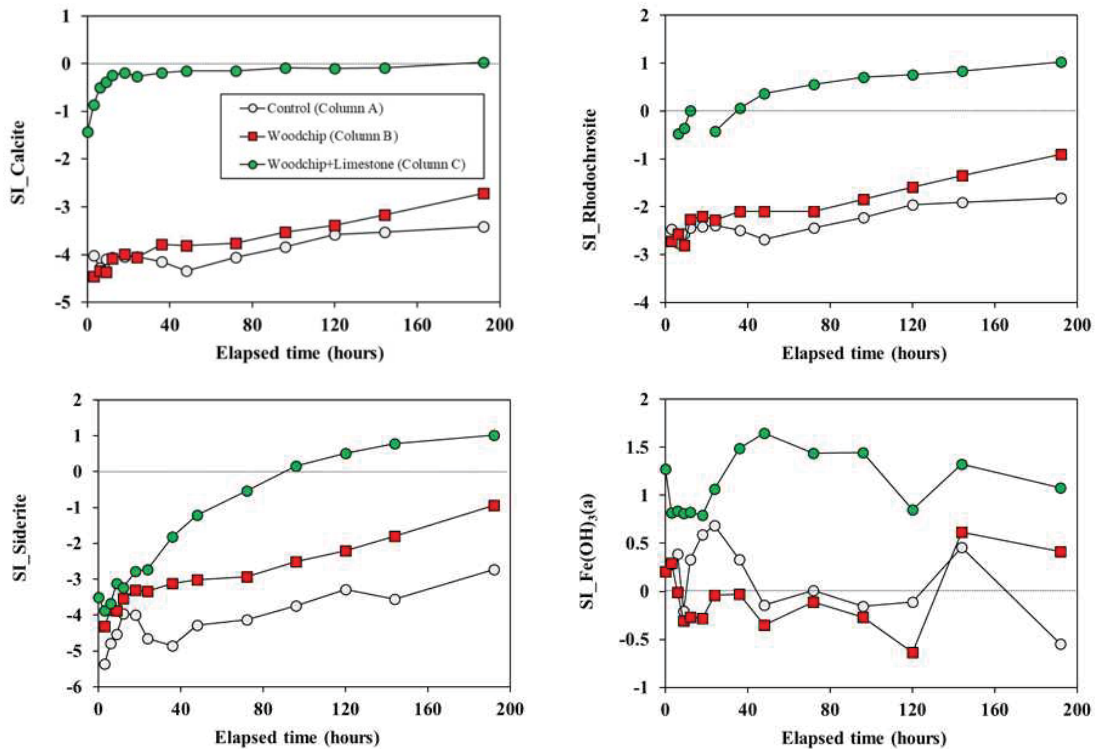


그림 2-23. 실험 C의 시간에 따른 광물포화지수 변화

(라) 주요 성과 요약

1차년도 연구를 통하여 우리나라의 대표적인 농업부산물인 벼지푸라기의 탈질 속도가 우드칩, 나뭇잎, 짚겨 등 다른 부산물들에 비하여 매우 탁월함을 알 수 있었다. 아울러, 매질에 탄산칼슘을 첨가하게 되면, 질산염 제거속도(탈질)가 약 3배까지 빨라지는 현상도 관찰하였다. 탄산칼슘을 포함한 실험에서 탈질이 빨라지는 만큼 다른 수질장애 물질인 철과 망간농도도 같이 증가되는 현상이 관찰되었다. 그러나, 물들이 탄산칼슘의 용해로 발생된 높은 alkalinity로 인하여 능철석과 능망간석,  $Fe(OH)_3(a)$ 에 대하여 과포화된 것을 보면, 어느 정도의 시간이 지난 후에는 이들의 침전으로 인하여 철 망간의 농도는 매우 낮아질 것으로 판단된다.



(5) 연구결과 (II) : 추가 실내실험

(가) 모래를 채운 컬럼반응조 실험

① 실험목적

우리는 지난 과제 연도 동안 유기물을 이용하여 탈질을 유도할 경우, 유기물 분해로 발생되는 CO<sub>2</sub>로 인하여 pH가 지나치게 낮아지고 이로 인하여 탈질미생물의 활성이 억제될 수 있음을 발견하였고, 탄산염(석회석 분말)을 이용하여 이러한 현상으로 인한 문제를 해결할 수 있음을 밝혀낸 바 있다. 그러나, 반응 후반부에는 Fe와 Mn의 농도가 크게 증가되는 현상을 관찰하였다. 본 연구에서는 유기물을 이용한 질산염 제거 시 부수적으로 높아지는 Fe, Mn의 농도를 제어할 수 있는 방법을 고안하는 연구를 수행하였다. 이를 위하여 전년도에 실시한 컬럼 실험에서 황산염을 공급함으로써 황산염이 환원되면서 발생된 황화수소 (H<sub>2</sub>S)가 철과 반응하여 침전되도록 하는 아이디어가 효과적일 수 있는지를 검토하는 실험을 수행하였다. 본 실험은 모래를 채운 컬럼 반응조와 모래를 채우지 않은 일반 반응조를 이용하여 다양한 조건별로 수행하였다.

② 실험방법

본 실험에 사용된 컬럼은 <그림 2-24>와 같다. 본 실험에는 전년도에 이용된 컬럼이 이용되었다. 컬럼은 아크릴로 제작되었으며, 컬럼의 바닥과 측면에서도 깊이별로 수질을 채취할 수 있도록 제작되었다. 컬럼바닥에는 mesh (#100)로 덮은 시료지지대를 두었다. 컬럼을 채우는데 이용된 재료들은 전년도에 이용된 모래, 나뭇잎, 우드칩, 석회석분말이 이용되었으며(그림 2-25), 황산염을 공급하기 위하여 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 석고(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) 등이 사용되었다.

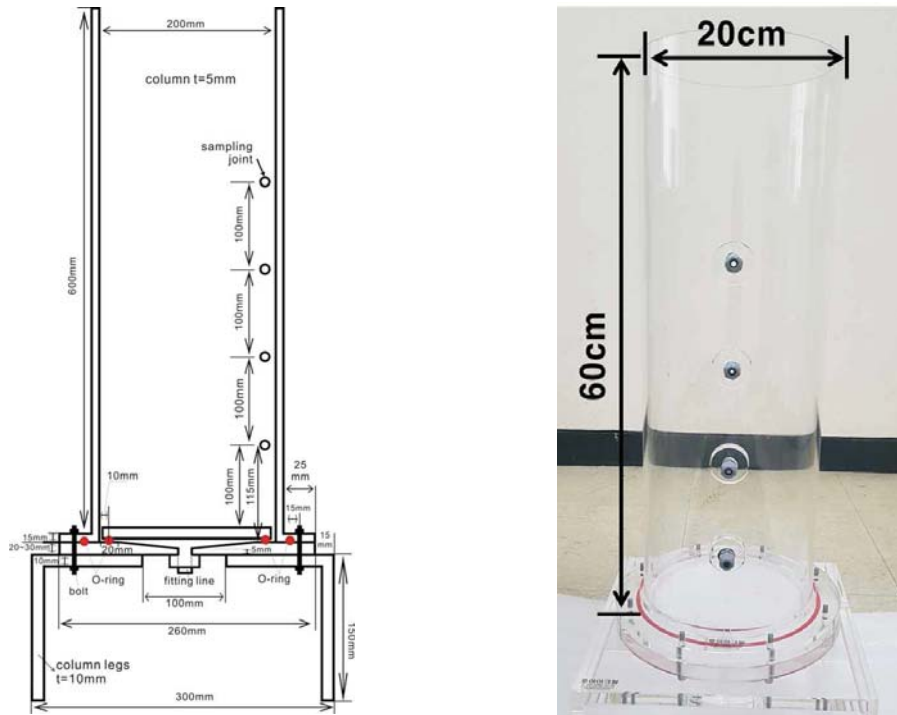


그림 2-24. 본 실험에 이용된 컬럼의 도면과 실물 사진, 실험장면



그림 2-25. 실험에 이용된 재료 사진(실험 B).

컬럼은 약 26cm 길이로 모래(컬럼 A), 우드칩+모래(컬럼 B), 나뭇잎+우드칩+모래(컬럼 C, D), 나뭇잎+우드칩+모래+석고(컬럼 E)를 채워 준비함(그림 2-26, 표 2-7). 컬럼 D 및 E는 황산염을 공급하였을 때 일어나는 화학반응을 관찰하기 위한 것으로써, 컬럼 D는  $K_2SO_4$ 를 주입수에 녹여 황산염을 공급하는 방식이고, 컬럼 E는 석고를 포함시켜 컬럼을 채움으로써, 석고에서 황산염이 녹아나오도록 고안하였다. 위 컬럼을 채우기 전에는 바닥에 3cm의 굵은 자갈을 깔고 3.6 cm의 두께로 모래를 덮었으며 계획된 재료로 컬럼을 채운 후에는 다시 같은 두께로 굵은 자갈을 덮어주었다. 각 컬럼의 채움재 비율은 <표 2-7>과 같다. 이렇게 채워진 컬럼에는 모래의 염분기를 제거하기 위하여 바닥의 배출구 통하여 수돗물을 바닥에서 위로 24시간동안 흘러 보내주었다. 이후에는 같은 방법으로  $KNO_3$  용액(20 mg-N/L)을 지속적으로 흘러 보내주었으며, 컬럼의 위부분으로 흘러나온 용액의  $NO_3-N$  농도가 밑으로 주입된 농도와 같아진 상태에서 4시간을 더 흘려보냈다. 단, 컬럼 D의 경우는  $K_2SO_4$ 로 조제된  $SO_4$ 가 100 ppm으로 포함된  $KNO_3$  용액(20 mg-N/L)을 흘려보내 주었다(표 2-7). 실험은  $KNO_3$  용액(20 mg-N/L)흘리기를 중단하고, 컬럼상부의 수위가 일정하게 유지되도록 조정된 상태에서 수행되었다. 컬럼상부의 수위가 낮아질 경우 주입용액으로 채워진 60L PET병에서 자동적으로 흘러들어올 수 있도록 장치를 구성함으로써 컬럼상부의 수위가 일정하게 유지되도록 하였다. 시료는 미리 정해진 시간에 컬럼바닥 위 10 cm지점에 만들어진 배출구를 열어 흘러나오는 물을  $150 \pm 1$  ml씩을 채취하여 수질을 측정하였다. 시료채취로 줄어든 컬럼 내의 수위는 상부의 PET병에서  $KNO_3$  용액 (20 mg-N/L)이 자동적으로 공급되게 하였다.

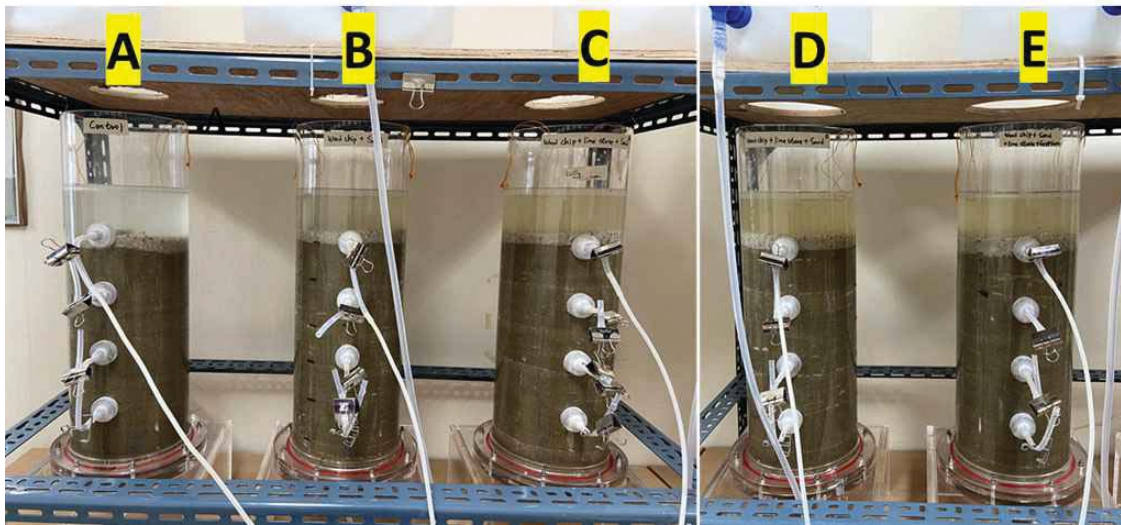
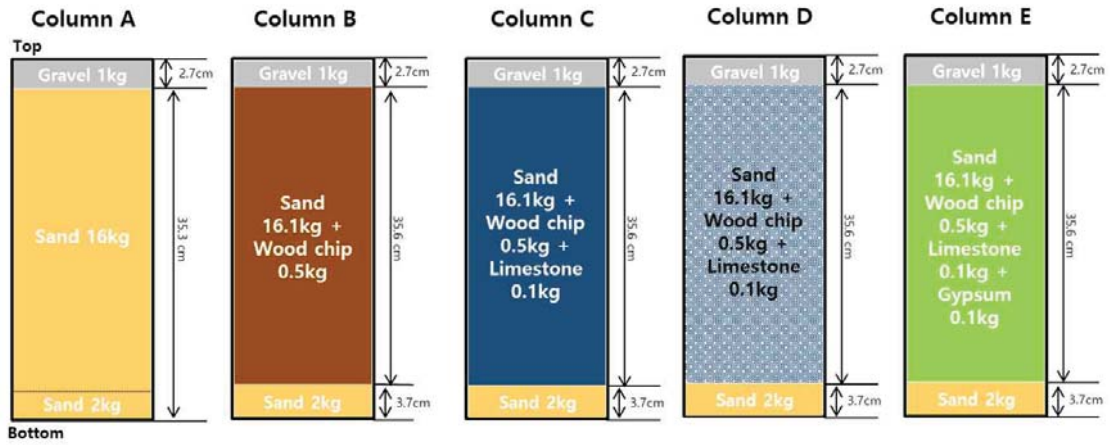


그림 2-26. 실험에 사용된 컬럼의 재원과 사진

표 2-7. 컬럼 채움재료의 현황과 각 컬럼별 공극수의 초기 공극수 조성

	Column A (Control)	Column B	Column C	Column D	Column E
Gravel	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Sand	18.0 kg	18.1 kg	18.1 kg	18.1 kg	18.1 kg
wood chips	-	0.5 kg	0.5 kg	0.5 kg	0.5 kg
Limestone	-	-	0.1 kg	0.1 kg	0.1 kg
Gypsum	-	-	-	-	0.1 kg
Solution	KNO <sub>3</sub> (N-20 ppm)	KNO <sub>3</sub> (N-20 ppm)	KNO <sub>3</sub> (N-20 ppm)	KNO <sub>3</sub> + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (N-20 ppm, SO <sub>4</sub> -100 ppm)	KNO <sub>3</sub> (N-20 ppm)

### ③ 실험결과

시간이 지남에 따라 채수되는 물의 색은 갈색을 띠었으나, 모래를 채우지 않은 reactor 실험에서 나타나는 색깔(뒷부분에서 보임)보다는 훨씬 약하게 나타났다. 이를 통하여 모래가 유기물 용출로 발생하는 색도를 줄여주는 것에 유리함을 알 수 있었다(그림 2-27).

반면, 황산염이 포함된 컬럼(D, E)에서는 황산염의 환원으로 인하여 계란 썩는 냄새가 강하게 발생되었다. 이 역시 모래를 채우지 않은 reactor 실험에서 발생하는 냄새에 비하여는 상대적으로 강하지는 않았다.

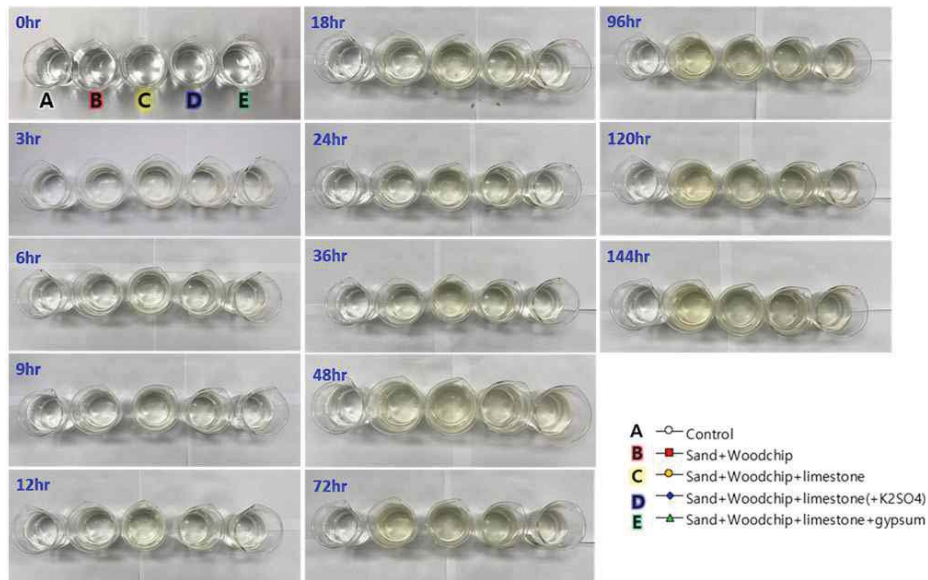


그림 2-27. 모래를 채운 실험에서 채수된 물의 시간에 따른 색깔 변화

질산염의 탈질속도는 석회석이 포함된 경우(컬럼 C-E)가 그렇지 않은 경우(컬럼 B)보다 현격히 빠르게 나타났다(그림 2-28). 그러나, 석회석을 포함한 경우들만 비교해보면, 석고를 포함한 실험(컬럼 E)에서 다소 느린 탈질속도를 보였다. 컬럼 C와 D는 매우 유사한 제거속도를 보였다. 아질산염이 완전히 제거되는 데까지의 시간도 컬럼 C와 D가 가장 빨랐고, 이후 컬럼 E, 컬럼 B의 순으로 나타났다(그림 2-29). 유기물이 포함되지 않은 컬럼 A에서도 아질산염이 증가되었다가 감소되는 양상을 보였으나, 침투농도가 나타나는 시간은 가장 늦게 관찰되었다. 지하수 속에서 암모니아성질소는 일반적으로 유기물의 분해로 인하여 발생된다. 암모니아성질소는 모든 컬럼에서 시간이 지날수록 농도가 증가되었다가 감소되는 양상을 보였으며, 석회석이 포함되지 않은 컬럼 B의 실험에서 가장 빠르게 제거되었다. 다른 컬럼에서도 반응후반부에 농도가 감소되는 양상을 보이기는 하였지만 컬럼 B와 같이 검출한계 이하까지 낮아지지는 않았다. 총용존무기질소(Total dissolved inorganic nitrogen; TDIN)은 질산성질소의 시간별 농도변화양상과 매우 유사하였다.



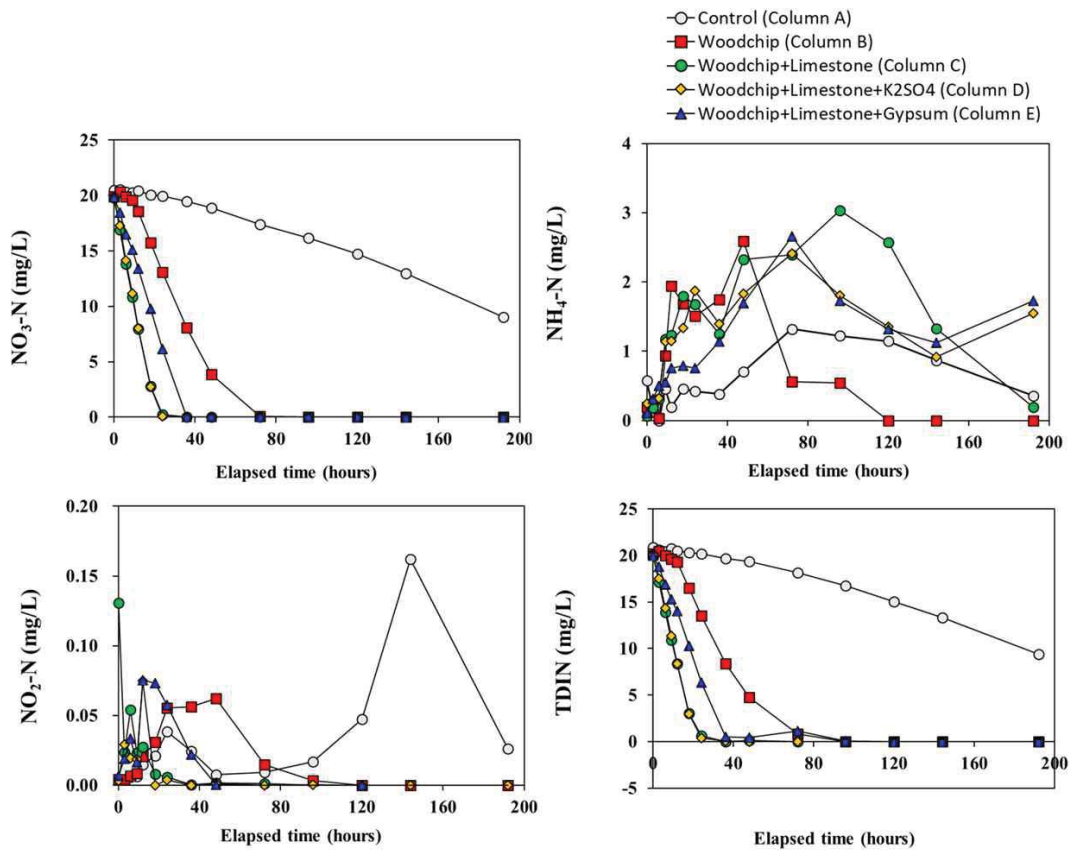


그림 2-28. 컬럼반응용기에서 질소화합물들의 시간별 농도변화

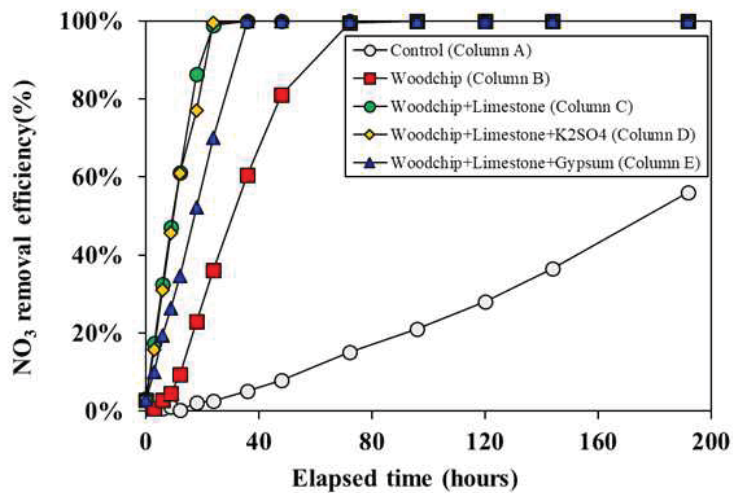


그림 2-29. 컬럼반응용기에서 시간별 질산염 제거율변화

석회석이 포함되지 않은 컬럼 B는 반응내내 가장 낮은 pH를 보였으며(그림 2-30). 석회석이 포함되어 있지 않아 유기물의 분해로 발생된 이산화탄소에 강하게 영향을 받은 결과라고 판단된다. 반면, 컬럼 C, D, E는 7이상의 pH값을 보였다. EC는 컬럼 E에서 가장 높은 값을 보였으며, 이는 석고의 용해로 공급된 Ca와 SO<sub>4</sub>에 의한 결과라고 생각된다. K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 추가로 첨가된 용액으로 채워진 컬럼 D에서 다음으로 높은 EC값을 보였으며, 황산염의 근원 물질을 포함시키지 않았던 컬럼 C에서 다음으로 높은 EC값을 보였다. Eh는 석회석이 포함된 컬럼 C, D, E가 상대적으로 낮은 값을 보였고, 컬럼 B와 대조군에 해당하는 컬럼 A에서는 상대적으로 높은 값을 보였다. DO는 측정의 오차로 인하여 컬럼별로 뚜렷한 차이를 구분하기가 힘들었다.

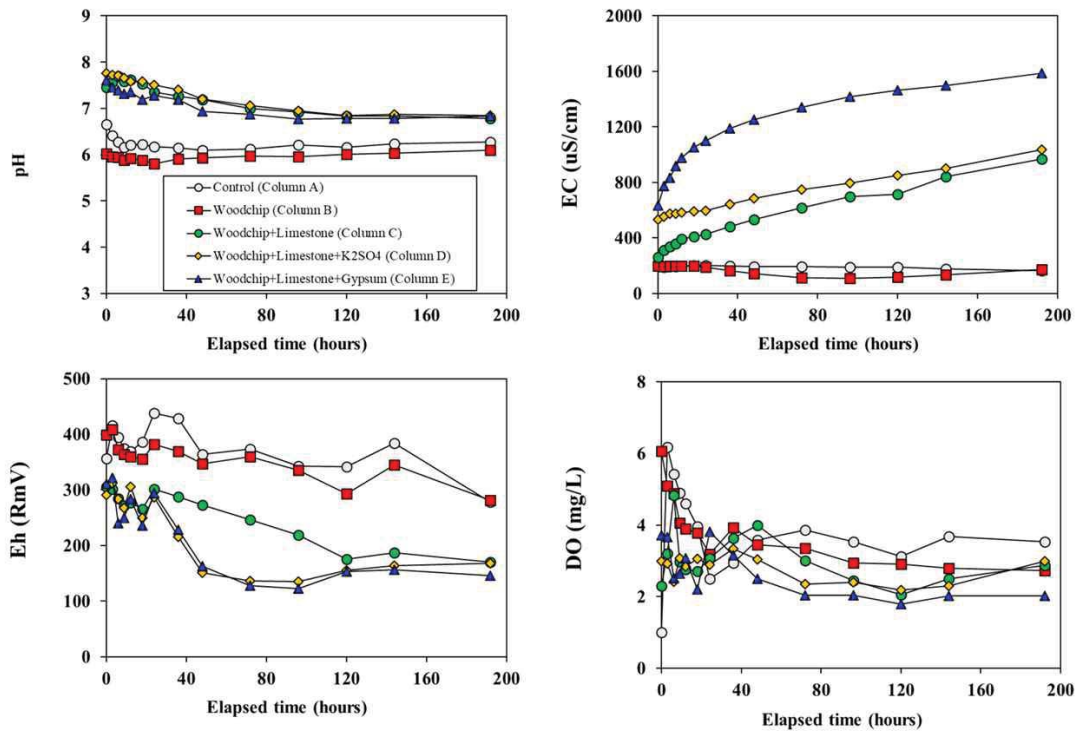


그림 2-30. 컬럼반응용기에서 pH, EC, Eh, DO의 시간별 변화

석회석이 포함된 컬럼 C-E는 높은 alkalinity와 DIC를 보였다(그림 2-31). 이는 발생한 이산화탄소의 상당부분이 석회석의 용해로 소모되었고, 이는 DO는 alkalinity와 DIC의 증가로 이어진 것으로 보인다. 석회석이 포함되지 않은 컬럼 B는 높은 DOC를 보였지만, 상대적으로 낮은 DIC와 alkalinity로부터 판단해 볼 때, 이는 용존된 유기물이 낮은 pH로 인하여 분해가 왕성하지 못했던 것으로 판단된다.



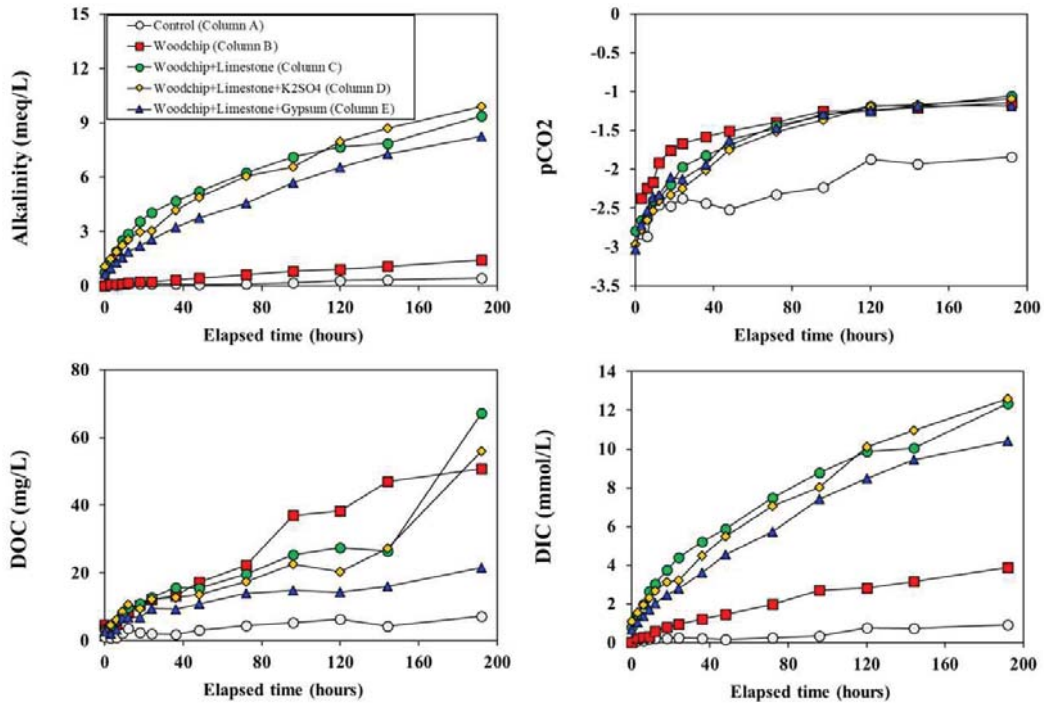


그림 2-31. 컬럼반응용기에서 alkalinity, pCO<sub>2</sub>, DOC, DIC의 시간별 변화

Ca는 시간이 지남에 따라 증가되는 양상을 보였으며, 컬럼 E는 증가세가 다른 어떤 컬럼보다 강하게 나타났다(그림 2-32). 이는 석고의 빠른 용해에 의한 것으로 판단된다. 컬럼 D는 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 초기용액을 조제하였음에도 불구하고 처음부터 Ca의 농도가 높았고, 증가속도도 황산염이 포함되지 않은 컬럼 C보다 높게 나타났다. 이는 황산염의 존재가 탄산칼슘의 용해를 증가시키는 것으로 판단된다. Mg의 용출은 컬럼 C와 D에서 빠르게 일어났으며, 석고가 포함된 컬럼 E는 상대적으로 느렸다. Mg는 석회석에서 Ca를 치환하여 존재하는데, 컬럼E에서의 느린 Mg증가는 왕성한 석고의 용해가 공통이온효과로 인하여 탄산염의 용해를 억제한 것을 지시한다. 이러한 해석은 상대적으로 alkalinity의 증가세가 느렸던 것으로도 뒷받침된다고 할 수 있다. 컬럼 B에서의 미미한 Mg증가는 석회석이 아예 포함되어 있지 않았기 때문이다. 시간에 따른 Na의 농도변화는 컬럼 C, D, E가 비슷하게 나타났다. K는 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 첨가된 컬럼 D에서 가장 높았으나, 컬럼 C와 E를 비교해보면 컬럼 C가 높게 나타났다. 본 시험에서는 산처리된 모래가 사용되었고 철광물을 따로 첨가하지 않았음에도 불구하고 석회석이 포함된 컬럼 C, D, E가 높은 Fe, Mn농도를 보였다. 이는 이들이 미생물분해에 적합한 pH를 보임에 따라 가장 왕성한 유기물의 분해가 일어났고, 이로 인하여 낮은 Eh조건을 보임으로써 모래에 미량 포함된 철성분이 환원되어 나타난 현상으로 판단된다. 반응 후반부로 가면서 황산염의 농도가 감소되는 양상을 보였으며, 이는 황산염이 환원되고 있음을 지시한다.

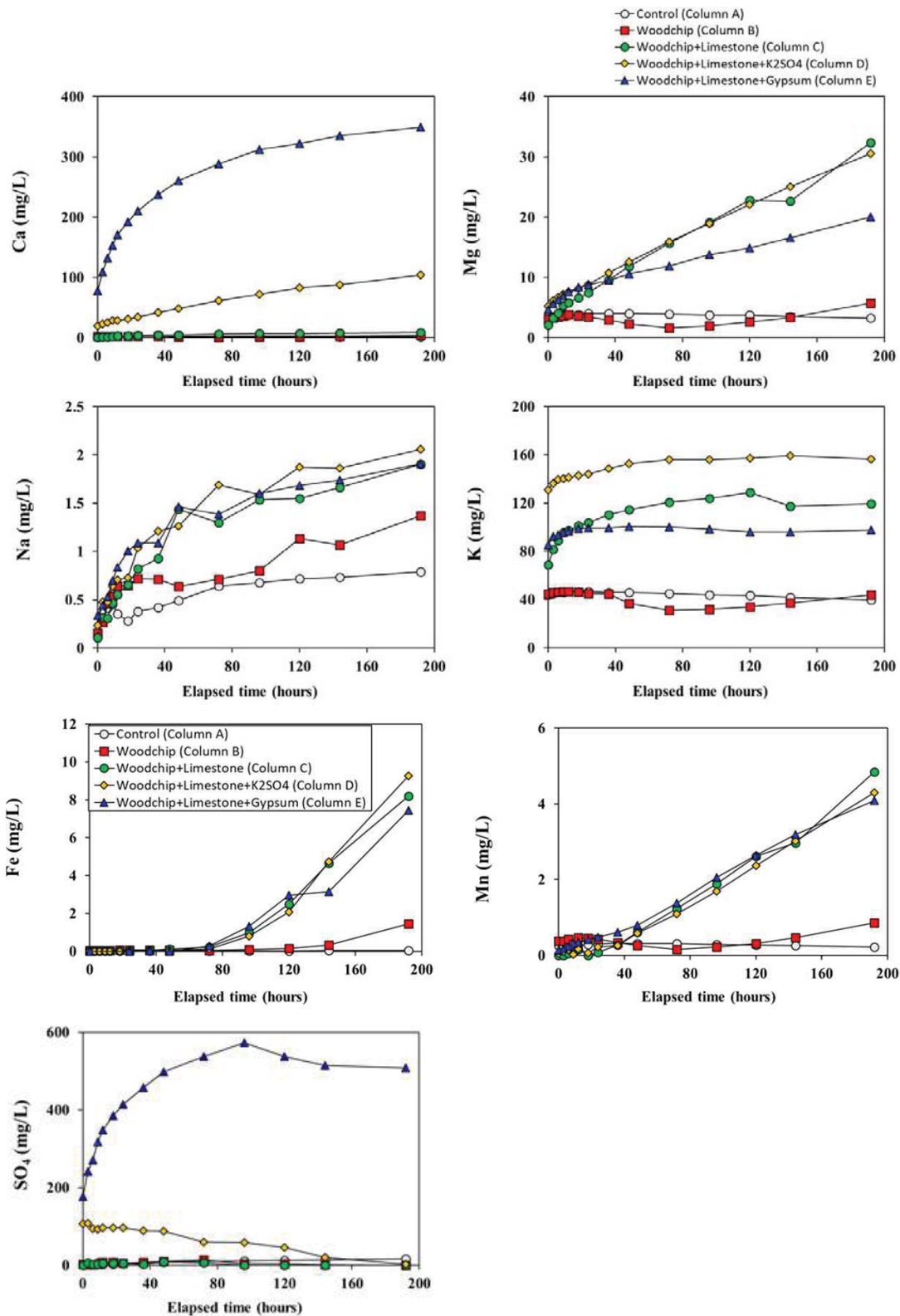


그림 2-32. 주요 양이온, Fe, Mn, SO<sub>4</sub>의 농도변화

석회석을 포함한 컬럼 C, D, E는 반응이 얼마 진행되지 않아 곧바로 방해석에 대하여 포화 또는 과포화되는 양상을 보였다(그림 2-33). 석고를 포함한 컬럼 E에서는 다소 과포화된 양상을 보였다. 바로 이러한 이유로 이들 세 컬럼들 중에서 상대적으로 낮은 alkalinity를 보인 것으로 판단된다. 석고를 포함한 컬럼 E는 석회석이 포함된 세 컬럼들 중에서 상대적으로 낮은 능철석과 능만간석의 포화지수를 보였다. 이는 석고의 용해로 인하여 alkalinity증가가 다소 억제되었던 것과 관련이 있어 보인다. 당초 본 실험은 황산염의 환원을 통하여 용출되는 철, 망간의 농도를 억제하려는 목적으로 수행되었으나, 실험기간 동안에는 황산염의 환원은 이루어진 것으로 판단되며 이

에 수반하여 철, 망간의 농도감소를 관찰하지는 못하였다. 황산염의 환원으로 인하여 극심한 악취가 발생하였고, 물의 색깔도 크게 변화되어 당초 생각한 것처럼 황산염이 수질의 개선에 큰 효과를 주지는 못하는 것으로 판단된다.

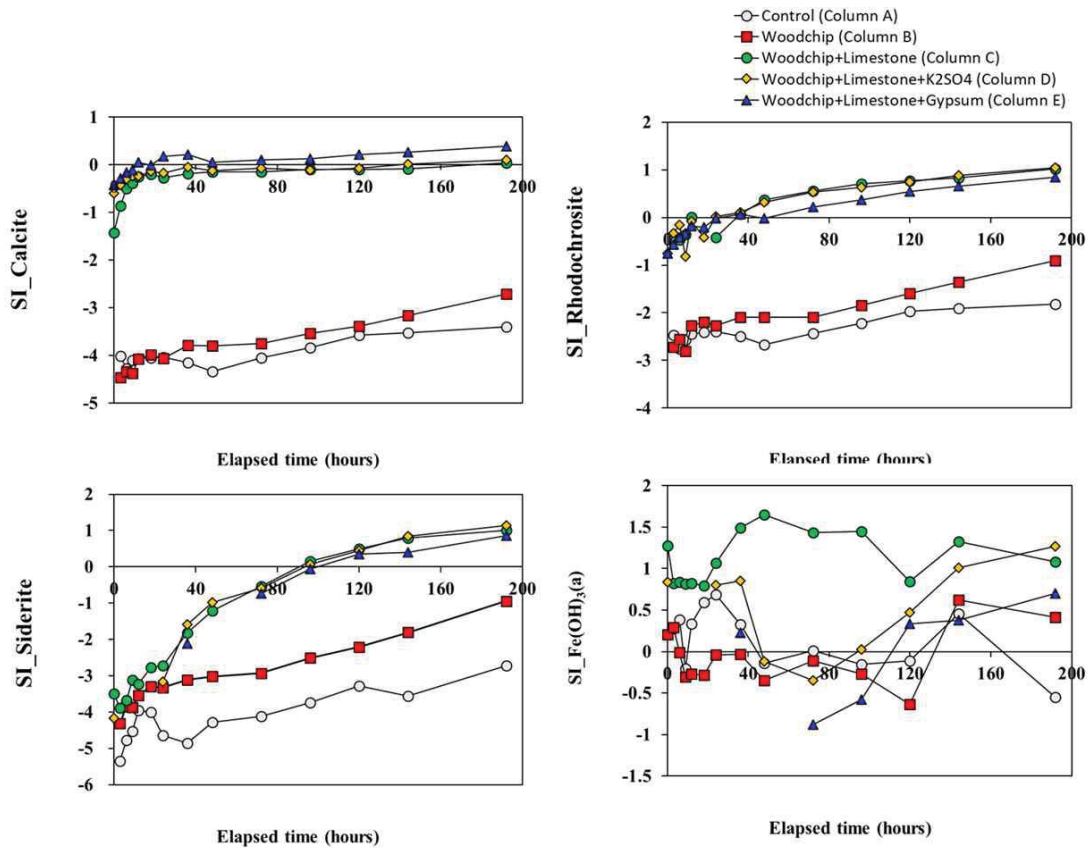


그림 2-33. 시간에 따른 광물포화지수의 변화

#### (나) 모래를 채우지 않은 컬럼반응조 실험

##### ① 실험목적

철, 망간은 토양에 항상 포함되어 있기 때문에 극심한 환원환경이 조성될 경우, 철, 망간의 농도가 크게 높아질 수 있을 것으로 판단되는 바, 본 실험에서는 황산염의 환원이 철, 망간의 농도를 저감시킬 수 있는지를 실험을 통하여 검토하였다.

##### ② 실험방법

본 실험은 각 2 L 반응조(B~G)에 우드칩 150 g을 넣고 1.5 L의 KNO<sub>3</sub> (20 mg N/L) 용액과 반응시키고(그림 2-34), 시간에 따른 수질변화를 관찰하였다. 반응조 C~G에는 석회석을 첨가하여 탈질에 유리한 pH조건이 형성되도록 하였다(표 2-8). 반응조 D, F는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 녹여 초기 SO<sub>4</sub>농도가 100 ppm이 되도록 하였고, 반응조 E, G에는 석고를 첨가하였다. 반응조 F, G에는 수산화철을 첨가하여 철의 공급원으로 작용하도록 하였다. 반응조 A에는 KNO<sub>3</sub> (20 mg N/L)만으로 채워 대조군으로 사용하였다. 반응조의 상부공간은 질소로 채우고, 질소로 반쯤 채워진 tedler bag을 연결하여 유기물 분해로 발생하는 CO<sub>2</sub>가스로 인하여 내부 압력이 지나치게 높아지는 것을 방지하였다. 반응조의 상부공간(head space)는 초순수 질소로 채웠다(그림 2-34). 또한 반응도중 발생하는 CO<sub>2</sub> 가스 배출 또는 수질시료채취에 따른 부피수축으로 내부가 음압상태가 되는 것을 막아주기 위하

여 역시 초순수 질소가스로 채워진 Tedlar bag을 연결하여, 반응용기 내의 압력과 외부의 압력이 항상 일정해지도록 조절하였다. 반응용기 내의 물시료는 뚜껑에 설치된 고무스토퍼를 통하여 20 cm길이의 바늘(20 G)을 이용하여 주사기로 시료를 채취하였다(그림 2-34).

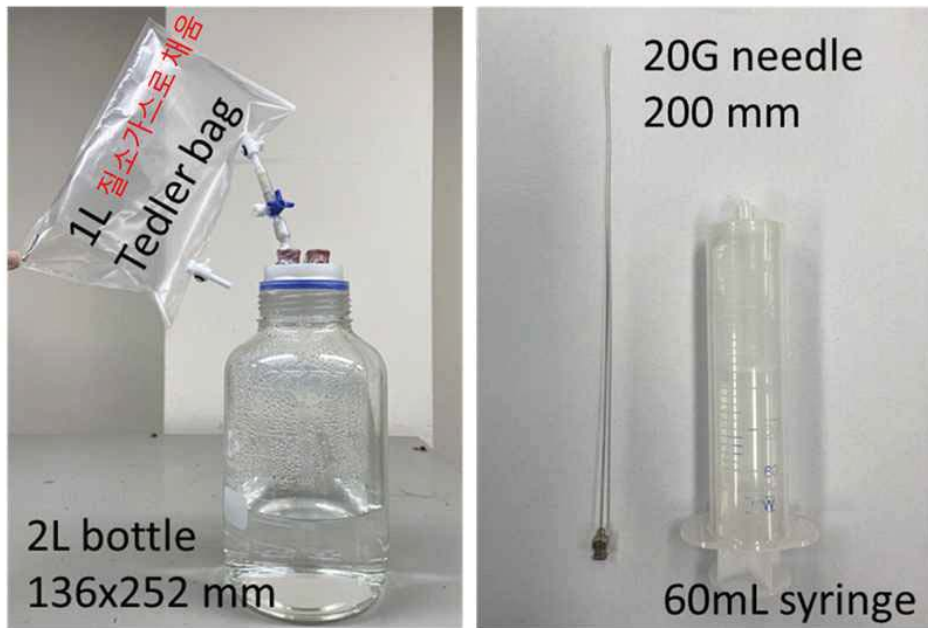


그림 2-34. 간이 batch실험(실험 A)의 반응조와 sampling에 이용된 주사기와 바늘

표 2-8. 실험 A의 각 반응조에 대한 조건

반응조	A (컨트롤)	B	C	D	E	F	G
wood chip	-	150g	150g	150g	150g	150g	150g
limestone	-	-	50g	50g	50g	50g	50g
gypsum	-	-	-	-	50g		50g
Fe(OH) <sub>3</sub>	-	-	-	-		2g	2g
solution	KNO <sub>3</sub> (N-20ppm)	KNO <sub>3</sub> (N-20ppm)	KNO <sub>3</sub> (N-20ppm)	KNO <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (N- 20ppm, SO <sub>4</sub> -100pp m)	KNO <sub>3</sub> (N-20ppm)	KNO <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (N- 20ppm, SO <sub>4</sub> -100pp m)	KNO <sub>3</sub> (N-20ppm)

### ③ 실험결과

그림 3-35은 시간에 따른 색의 변화를 사진으로 찍어둔 결과이다. 황산염과 철이 포함된 반응조 F, G가 가장 어두운 색을 보였다. 아마도 황화철의 침전을 반영하는 것으로 보인다. 황산염이 포함된 반응조에서 채수된 시료는 반응 후반부로 갈수록 고약한 냄새(계란 썩는 냄새)가 났다. 반면, 황산염을 따로 첨가하지 않은 반응조 B, C에서는 그러한 냄새가 미약하였다.



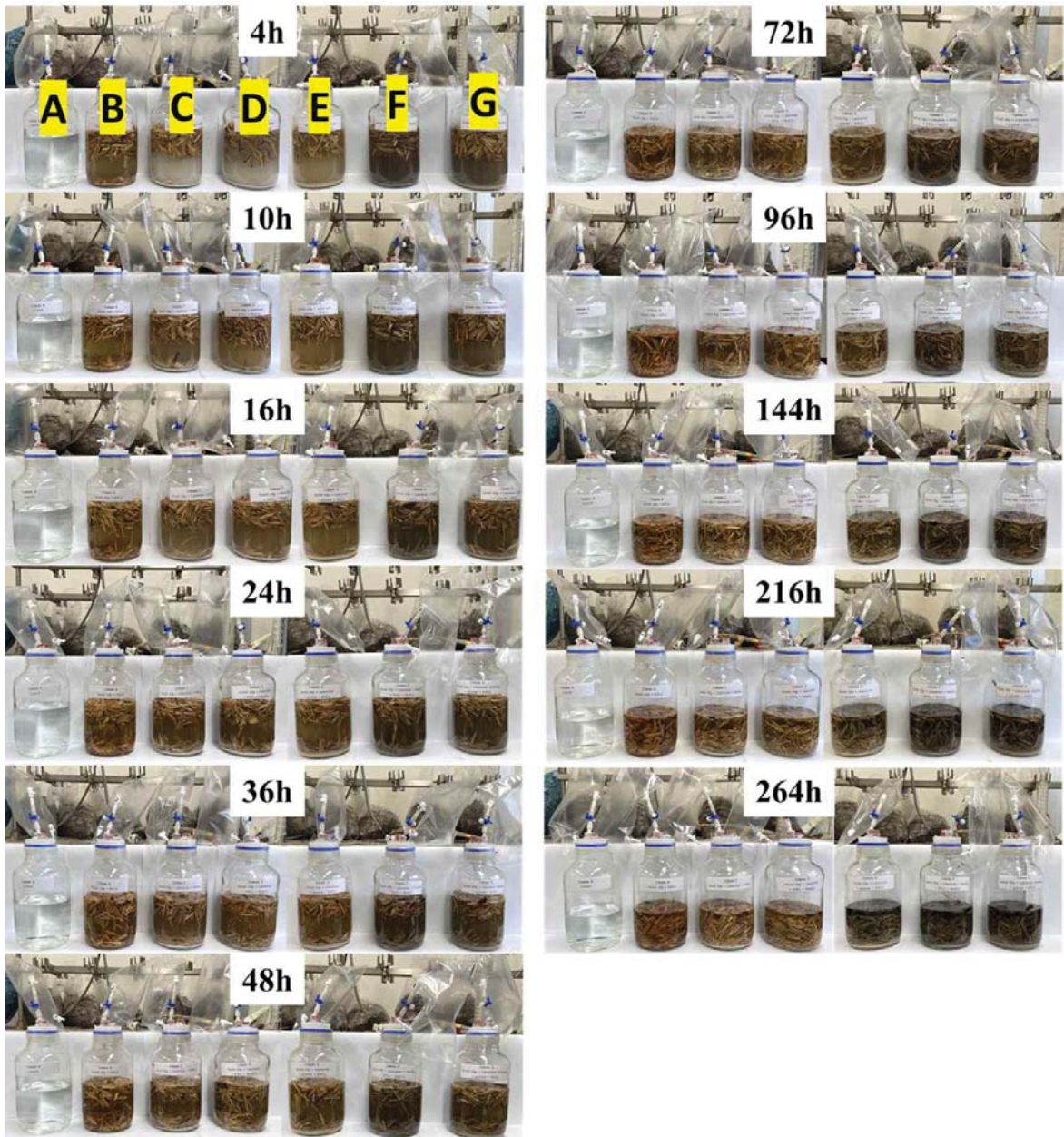


그림 2-35. 실험 A의 시간에 따른 반응조의 색변화 (reactor A-control, B-woodchips, C-leaves, D-rice straws, E-rice hulls)

석회석이 포함된 반응조(C-G)에서는 매우 빠르게 질산성질소의 농도가 감소되는 양상을 보였다(그림 2-36). 아질산염은 반응 초반부에 급격히 증가된 후에 감소되는 양상을 보였다. 아질산염을 기준으로 보면 컬럼실험에서와 마찬가지로 석고를 포함 한 경우가 다소 탈질속도가 다소 느려지는 것으로 나타났다. 암모니아성 질소는  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 를 통하여 황산염이 용존상태로 공급되었을 때(반응조 D, F)가 가장 피크농도가 낮았고 가장 이른 시간에 제거되는 양상을 보였다. 그 이후, 석고를 통하여 황산염이 공급되었을 때(반응조 E, G), 암모니아성질소가 제거되는 양상을 보였다. 황산염이 공급되지 않은 반응조(C)에서는 상대적으로 늦은 시간에 암모니아성 질소의 제거가 나타났다. 반면 석회석이 포함되지 않은 반응조(B)에서는 관찰시간동안 암모니아성질소가 감소되는 양상은 미미하였다. 총용존무기질소의 시간별 농도변화는 질산성질소와 비슷하게 나타났다.

- A:** KNO<sub>3</sub>
- B:** woodchip + KNO<sub>3</sub>
- C:** woodchip + limestones + KNO<sub>3</sub>
- D:** woodchip + limestones + KNO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

- E:** woodchip + limestones + gypsum + KNO<sub>3</sub>
- F:** woodchip + limestones + Fe(OH)<sub>3</sub> + KNO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- G:** woodchip + limestones + Fe(OH)<sub>3</sub> + gypsum + KNO<sub>3</sub>

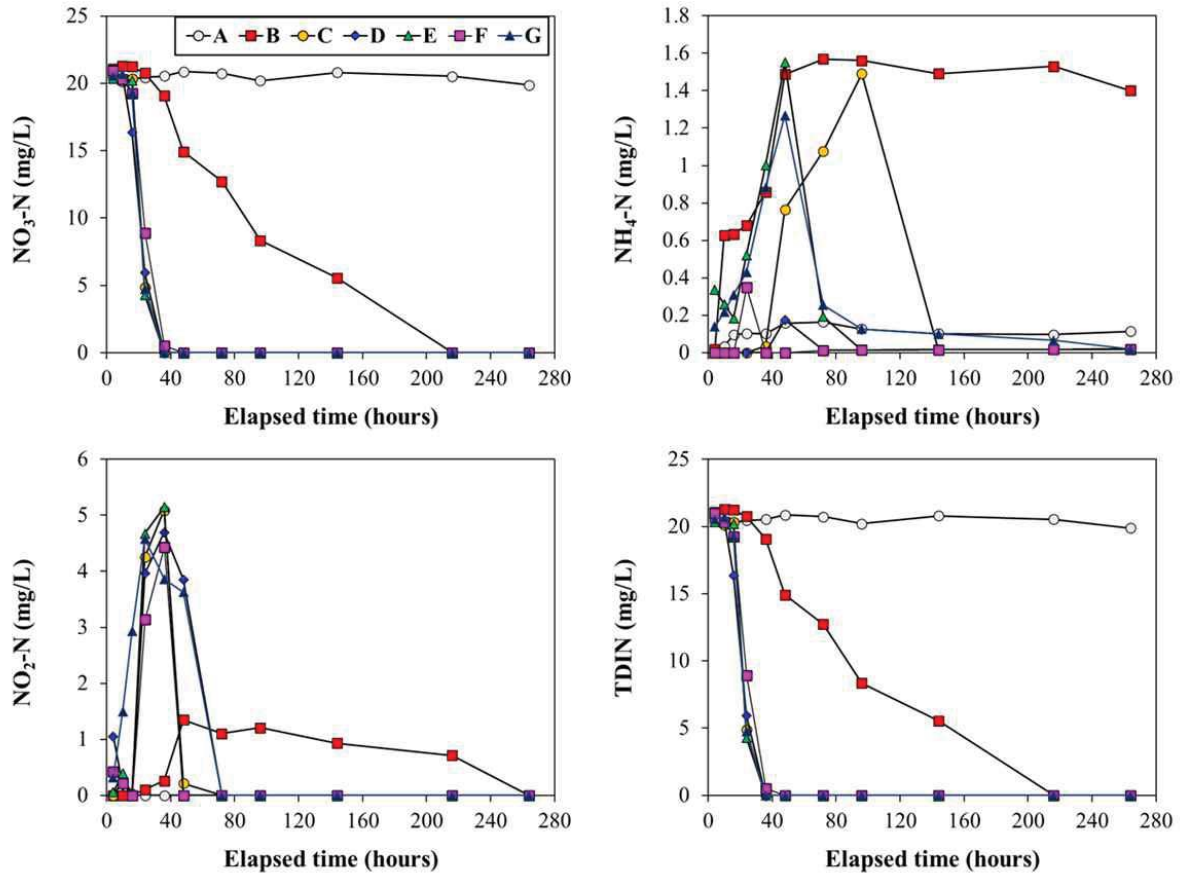


그림 2-36. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 무기질소화합종의 농도변화



- A:** KNO<sub>3</sub>
- B:** woodchip + KNO<sub>3</sub>
- C:** woodchip+ limestones + KNO<sub>3</sub>
- D:** woodchip + limestones + KNO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

- E:** woodchip + limestones + gypsum + KNO<sub>3</sub>
- F:** woodchip + limestones + Fe(OH)<sub>3</sub> + KNO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- G:** woodchip + limestones + Fe(OH)<sub>3</sub> + gypsum + KNO<sub>3</sub>

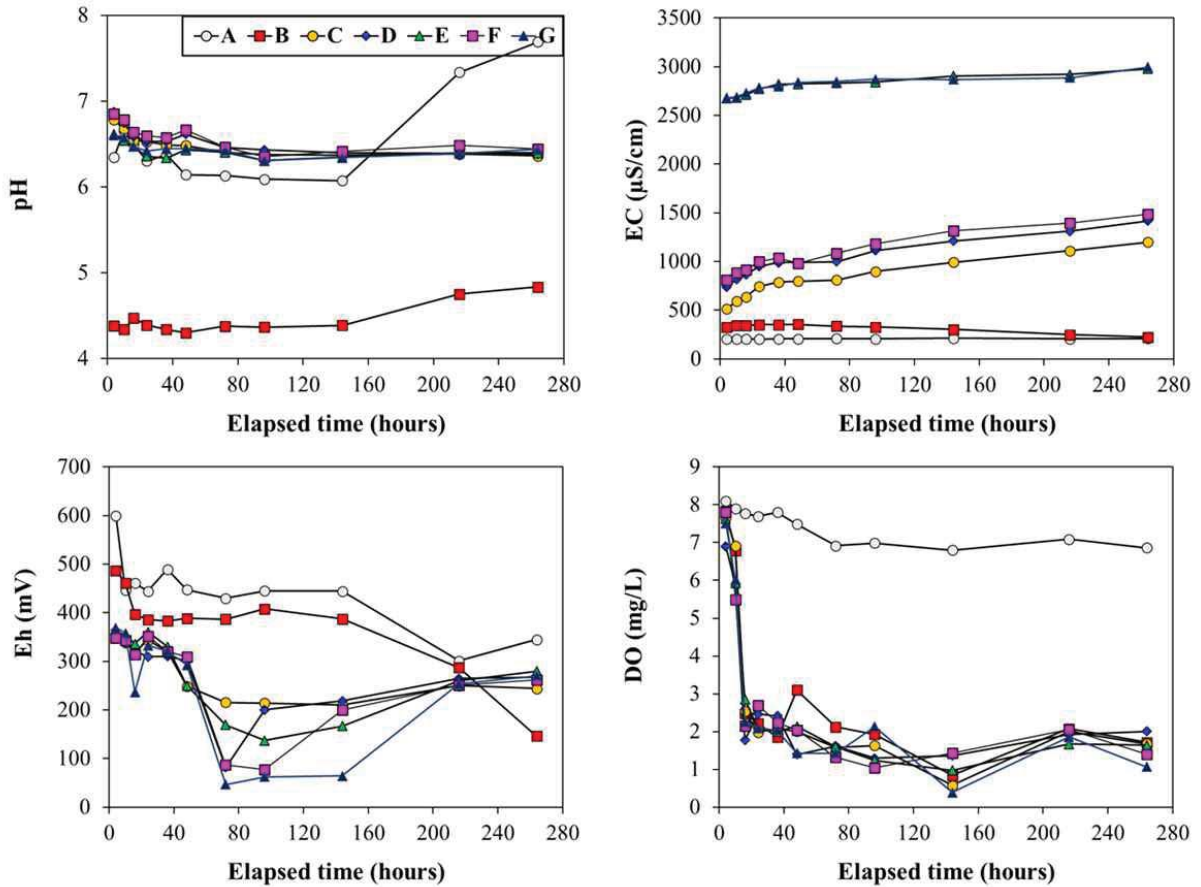


그림 2-37. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 pH, EC, Eh, DO의 변화

석회석이 포함되지 않은 반응조 B는 반응내내 가장 낮은 pH(5이하)를 보였으며(그림 2-37) 석회석이 포함되어 있지 않아 유기물의 분해로 발생된 이산화탄소에 강하게 영향을 받은 결과라고 판단된다. 반면 석회석이 포함된 다른 반응조들(C-G)은 6.5이상의 pH를 보였다. EC는 석고를 포함한 반응조 E, G에서 가장 높은 값을 보였으며, 이는 석고의 용해로 공급된 Ca와 SO<sub>4</sub>에 의한 결과라고 생각된다. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 첨가된 반응조 D, F에서 다음으로 높은 EC값을 보였으며, 황산염이 첨가되지 않고 석회석만 포함시켰던 반응조 C에서 다음으로 높은 EC값을 보였다. Eh는 석회석이 포함된 반응조 C 석회석이 포함되지 않은 컬럼 B는 반응내내 가장 낮은 pH를 보였으며(그림 2-37) 석회석이 포함되어 있지 않아 유기물의 분해로 발생된 이산화탄소에 강하게 영향을 받은 결과라고 판단된다. 해석은 후에 보이는 탄소화합종의 농도변화로 뒷받침된다. EC는 컬럼 E에서 가장 높은 값을 보였으며, 이는 석고의 용해로 공급된 Ca와 SO<sub>4</sub>에 의한 결과라고 생각된다. K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 추가로 첨가된 용액으로 채워진 컬럼 D에서 다음으로 높은 EC값을 보였으며, 황산염의 근원물질 을 포함시키지 않았던 컬럼 C에서 다음으로 높은 EC값을 보였다. Eh는 석회석이 포함된 컬럼 C, D, E가 상대적으로 낮은 값을 보였고, 컬럼 B와 대조군에 해당하는 컬럼 A에서는 상대적으로 높은 값을 보였다. DO는 측정의 오차로 인하여 컬럼별로 뚜렷한 차이를 구분할 수는 없었다. 석회석이 포함되지 않은 컬럼 B는 반응내내 가장 낮은 pH를 보였으며(그림 2-37) 석회석이 포함되어 있지 않아 유기물의 분해로 발생된 이산화탄소에 강하게 영향을 받은 결과라고 판단된다. 해석은 후에 보이는 탄소화합종의 농도변화로 뒷받침된다. EC는 컬럼 E에서 가장 높은 값을 보였으며, 이

는 석고의 용해로 공급된 Ca와 SO<sub>4</sub>에 의한 결과라고 생각된다. K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 추가로 첨가된 용액으로 채워진 컬럼 D에서 다음으로 높은 EC값을 보였으며, 황산염의 근원물질을 포함시키지 않았던 컬럼 C에서 다음으로 높은 EC값을 보였다. Eh는 석회석이 포함된 컬럼 C-E가 상대적으로 낮은 값을 보였고, 반응조 B와 대조군에 해당하는 반응조 A에서는 상대적으로 높은 값을 보였다. DO는 측정의 오차로 인하여 컬럼별로 뚜렷한 차이를 구분하기는 어려웠다. Alkalinity는 석회석이 포함되고 황산염이 용존된 형태로 공급되었거나(반응조 D, F) 공급되지 않은 경우(반응조 C)에 높게 나타났다(그림 2-38). 석회석과 석고가 포함되었던 반응조 (E, G)에서는 다소 낮게 나타났으며, 이는 석고로부터 공급된 Ca가 석회석의 용해를 억제하였던 것으로 판단된다. 석회석이 포함되지 않은 반응조 B에서는 낮은 알칼리도를 보였지만, 매우 높은 pCO<sub>2</sub>와 DIC를 보였다. 이는 pH가 낮을수록 유기물의 분해는 왕성하나, 탈질은 느리게 일어나는 것을 의미하는 것으로 판단된다. DOC는 반응 초반부에 급격히 증가한 후 급격히 감소되는 양상을 보였으며, 특히 황산염을 첨가하지 않은 반응조 B, C에서는 상대적으로 오랜시간동안 높은 농도를 유지하였다.

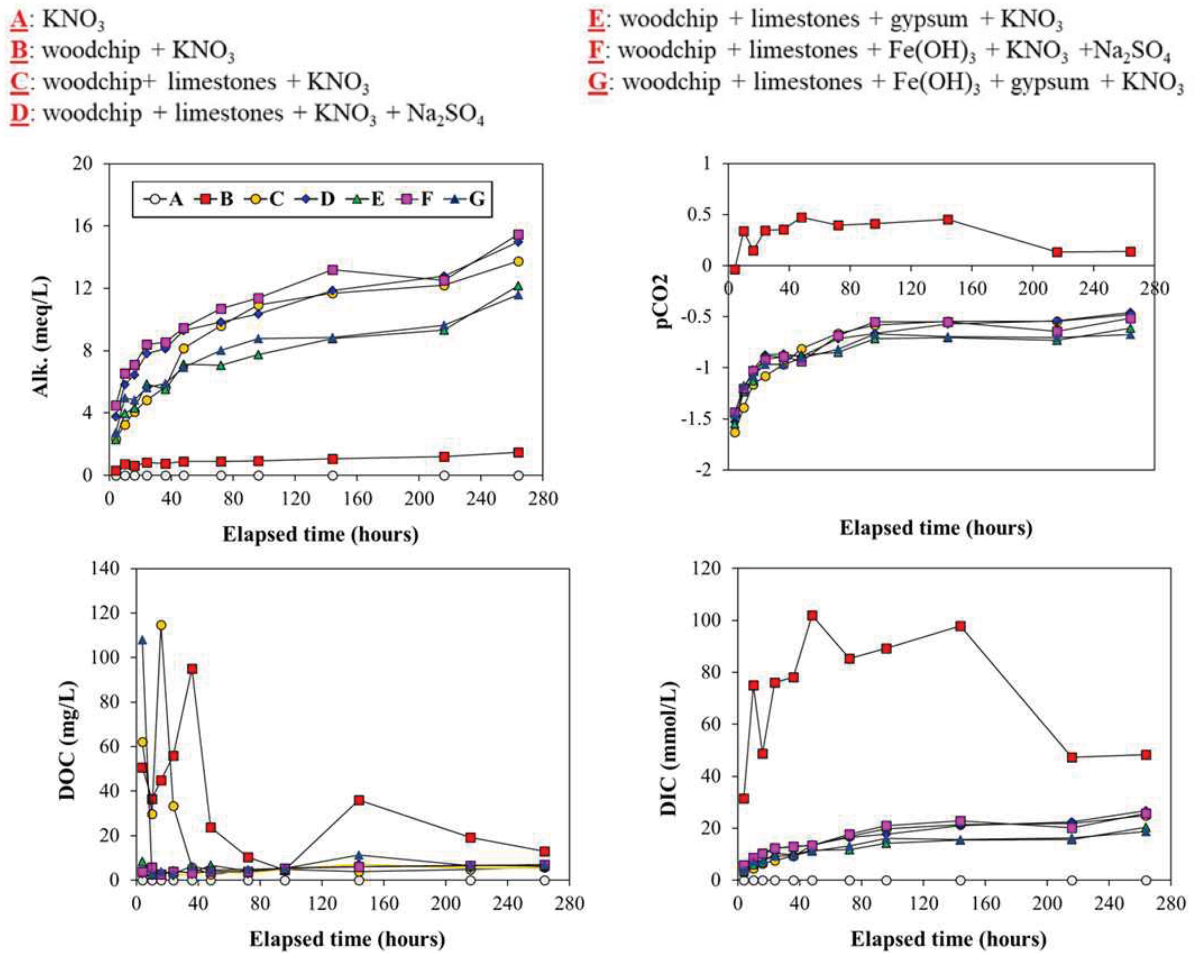


그림 2-38. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 alkalinity, pCO<sub>2</sub>, DOC, DIC의 변화

전반적으로 Ca, Mg는 시간이 지남에 따라 증가되는 양상을 보였으며, 석고가 포함된 반응조 E, G는 초기에 매우 높은 농도를 보인 이후 일정한 값을 보였다(그림 2-39). 이는 석고의 빠른 용해에 의하여 포화상태에 도달함에 따라, 더 이상의 석회석의 용해가 일어나지 않음에 따른 것으로 판단된다. Mg가 Ca와 유사한 패턴을 보인 것은 Mg의 기원이 석회석을 기원으로 하기 때문으로 판단된다. 반면, 석고를 포함하지 않은 반응조 C, D, F는 꾸준히 Ca, Mg가 꾸준히 증가되는 양

상을 보였다. 즉, 유기물의 분해로 인하여 꾸준히 석회석이 용해되고 있음을 지시한다. Fe, Mn의 농도는 석고를 포함한 반응조(E, G)에서 매우 높은 농도를 보였다. 반응조 E는 Fe(OH)<sub>3</sub>를 포함시키지 않았음에도 불구하고 반응조 G와 마찬가지로 매우 높은 Fe, Mn 농도를 보였다.

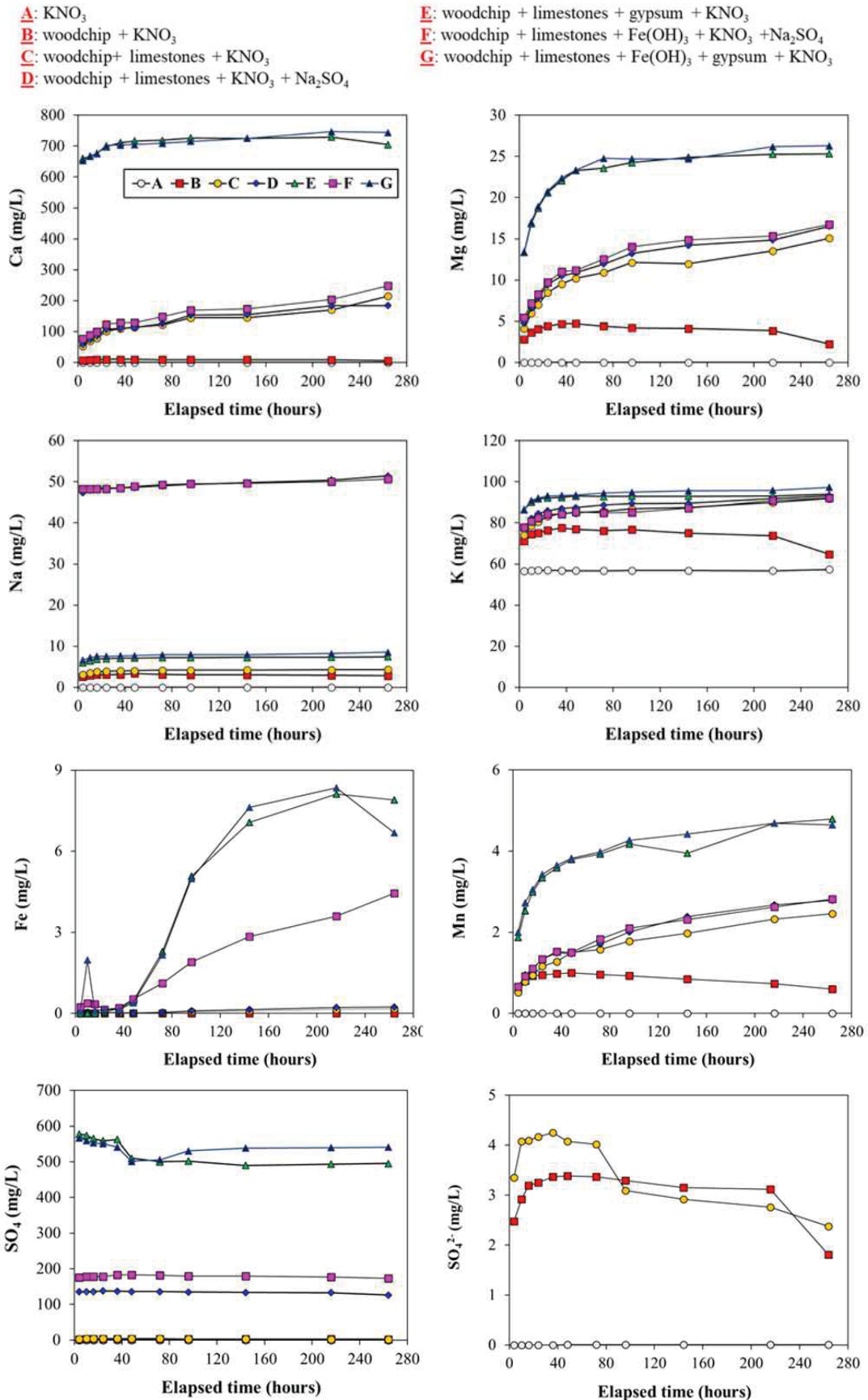


그림 2-39. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 주요양이온 및 Fe, Mn, SO<sub>4</sub>의 농도변화

Fe농도는 반응조 F에서 다음으로 높았고, 반응조 C, D에서는 매우 낮은 수준을 유지하였다. Mn농도는 반응조 E, G 다음으로 D, F가 높았고, 반응조 C는 이들보다 조금 낮게 나타났다. 반면, 반응조 B는 전반적으로 낮은 농도를 유지하였다. 모든 반응조에서 반응 후반부로 가면서 황산염의 농도가 감소되는 양상을 보였으며, 이는 황산염이 환원되고 있음을 지시한다. 석회석을 포함한 반응조들은 방해석과 능망간석에 대하여 반응 초반부에서부터 포화상태를 유지하였다(그림 2-40). 반응조 E, F, G만이 반응 후반부에 능철석에 대하여 포화상태를 보였다. 석고를 포함한 반응조 E, G만이 석고에 대하여 포화상태를 유지하였다. 망간의 농도는 능망간석의 포화상태 유지에 따라 농도가 좌우되는 것으로 판단되나, 철농도는 능철석의 포화상태와는 크게 관련이 없었다.

- A:** KNO<sub>3</sub>  
**B:** woodchip + KNO<sub>3</sub>  
**C:** woodchip + limestones + KNO<sub>3</sub>  
**D:** woodchip + limestones + KNO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
**E:** woodchip + limestones + gypsum + KNO<sub>3</sub>  
**F:** woodchip + limestones + Fe(OH)<sub>3</sub> + KNO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
**G:** woodchip + limestones + Fe(OH)<sub>3</sub> + gypsum + KNO<sub>3</sub>

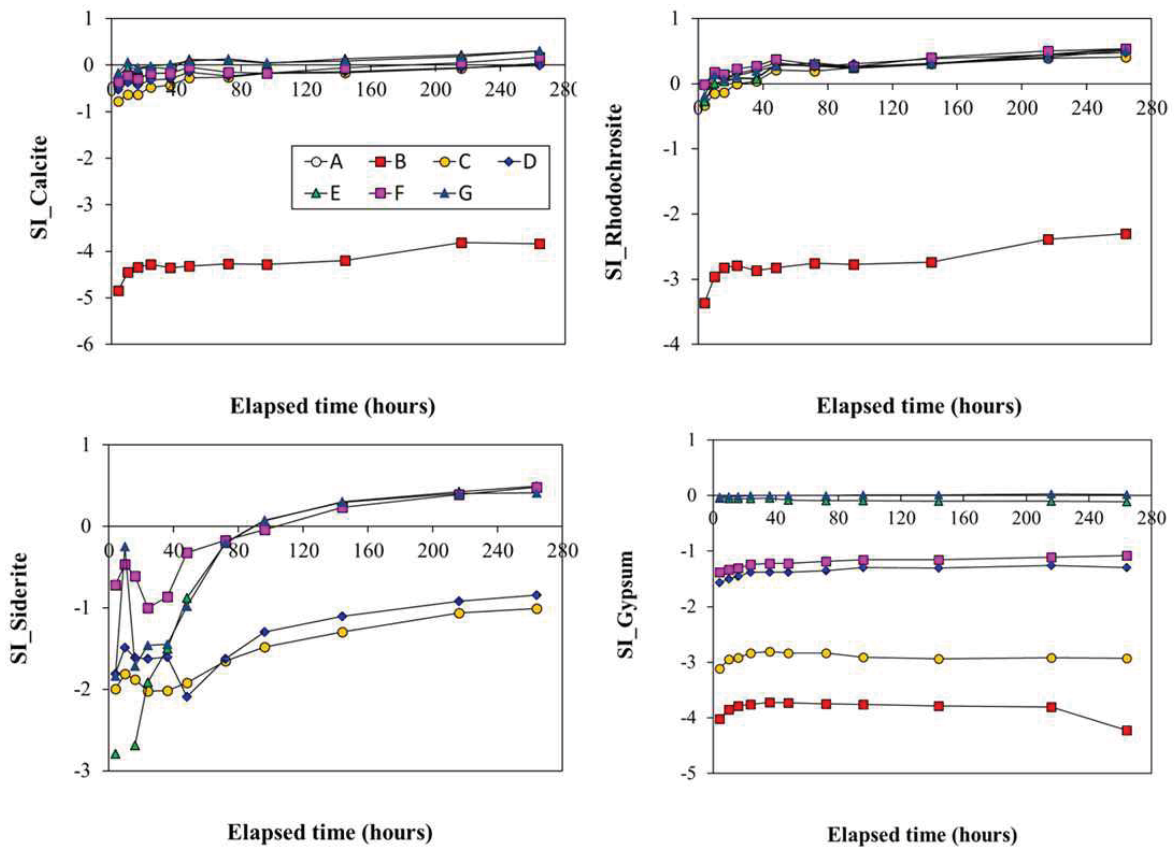


그림 2-40. 모래를 포함하지 않은 반응조에서 시간에 따른 광물포화지수 변화

## (6) 결론

모래를 채운컬럼 실험에서와 마찬가지로 황산염의 존재 유무가 철, 망간의 농도를 크게 좌우하지는 못하는 것으로 보인다. 황산염의 공급은 오히려 악취발생 및 발색으로 인하여 수질이 악화될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 실험이 비교적 짧은 시간동안 이루어졌기 때문에 장기간 대수층 채류에 따른 영향은 판단할 수가 없었다.



## 다. 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 개발 및 시험

### (1) 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 개발

#### (가) 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 구상

강우 시 시설 내 유입되는 비점오염원(토사 및 협잡물)에 의한 여재 막힘 현상을 최소화하기 위한 방안을 강구하여 저영향개발(LID) 시설을 구상하고자 하였으며, 자연유하 방식으로 지하수를 함양할 수 있도록 총 6가지 설계를 구상하였다.

시설 구상은 지하 구조물의 형태로 낙하 및 추락사고 등의 안전사고 예방을 위한 상부 개폐식 형태로 설계하였다.

각각의 시설은 장방형 구조물로 설계하였으며, 설치 장소에 따라 구조물을 변경하여 설치할 수 있도록 구상하였다.

#### ① 스크린 교체형 지하수 함양장치(하향류)

비점오염원의 특성상 강우 시 많은 토사 및 협잡물을 함유하고 있으며, 이를 줄이기 위한 방안으로 1차적으로 침사지에서 토사를 침강시키고 교체형 스크린을 두어 부유성 물질의 여재 침투를 방지하기 위해 고안하였다.

유입수는 침사지 상부에서 유입되어 침사지를 거쳐 토사 및 입자성 물질을 침강시킨 후 여재부로 넘어간다. 이때 스크린으로 부유성 물질을 제거하도록 하고, 이 스크린은 교체가 가능하도록 고안하였다.

스크린은 공극이 다양한 망을 여러겹 사용하거나, 철판, 플라스틱 등을 타공한 형태의 것을 사용한다. 또한 스크린의 교체가 용이하도록 상부에 이송장치를 연결할 수 있도록 하였다.

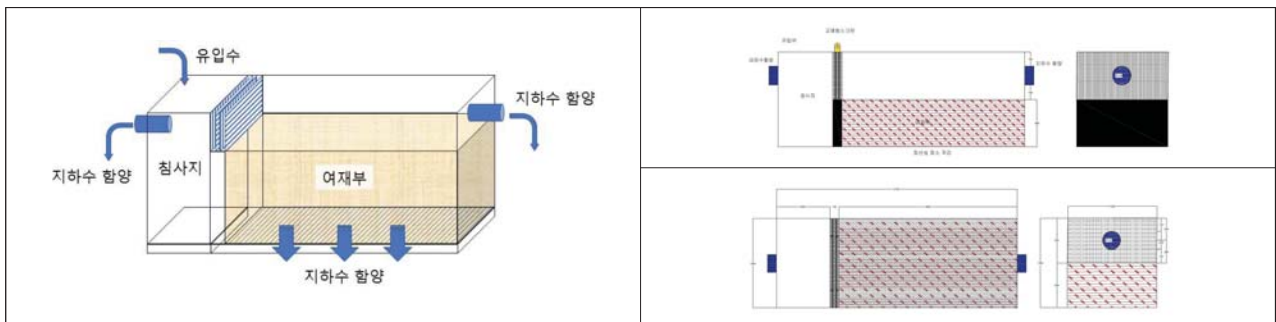


그림 3-1. 스크린 교체형 지하수 함양장치 구상(안)



② 여재 스크린 교체형 지하수 함양장치(하향류)

“스크린 교체형 지하수 함양장치”와 유사한 구조로 설계하였으며 1차적으로 침사지에서 토사를 침강시키고 이후 수류흐름에 따라 미처리된 입자성 물질을 제거하는 스크린을 여재부 상부에 설치한 형태이다.

이러한 여재부를 벨브를 통해 유입수로를 결정하고 교차 운영하는 방식으로 유지관리가 교대로 가능하도록 하였다. 여재부는 6개로 나누어 상부의 스크린 교체 및 유지관리를 용이하도록 하였다.

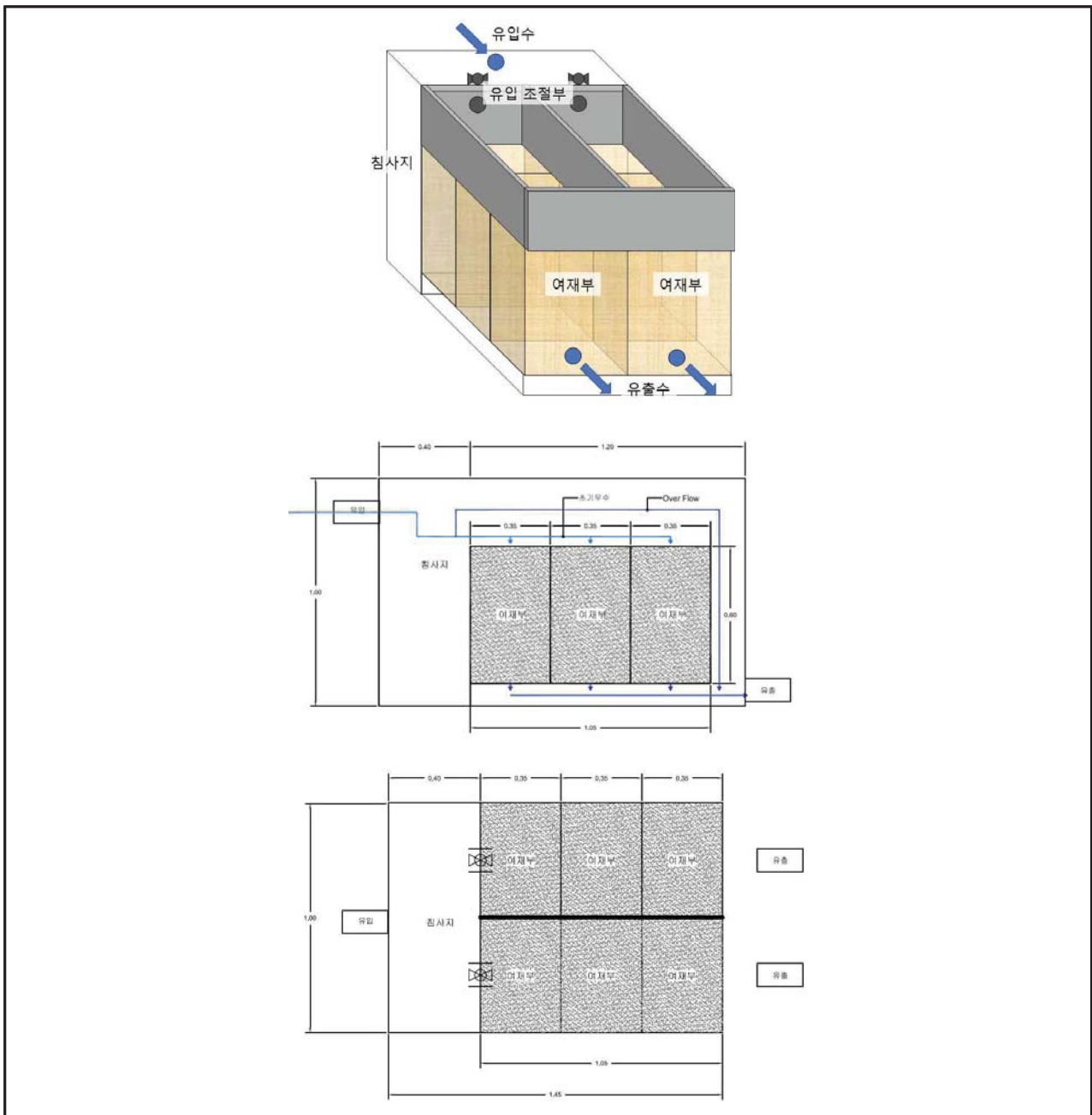


그림 3-2. 여재 스크린 교체형 지하수 함양장치 구상(안)

③ 토사유입방지장치 형 지하수 함양장치(하향류)

기존 합류식하수관거 개량화에 사용되는 토사유입방지장치를 적용하여 토사를 1차적으로 제거하고 수류흐름은 격벽을 통해 최대한 길게 가져가는 형식으로 구상하였다.

이때 여재 부 상단에는 스크린을 두어 여재 부에서 여과되는 형태로 부유성 물질이 제거되는 방식으로 고안하였다. 또한 지하수 함양을 위한 스크린을 3방향으로 두어 막힘 현상 발생 시에도 원활한 지하수 함양을 할 수 있도록 하였다.

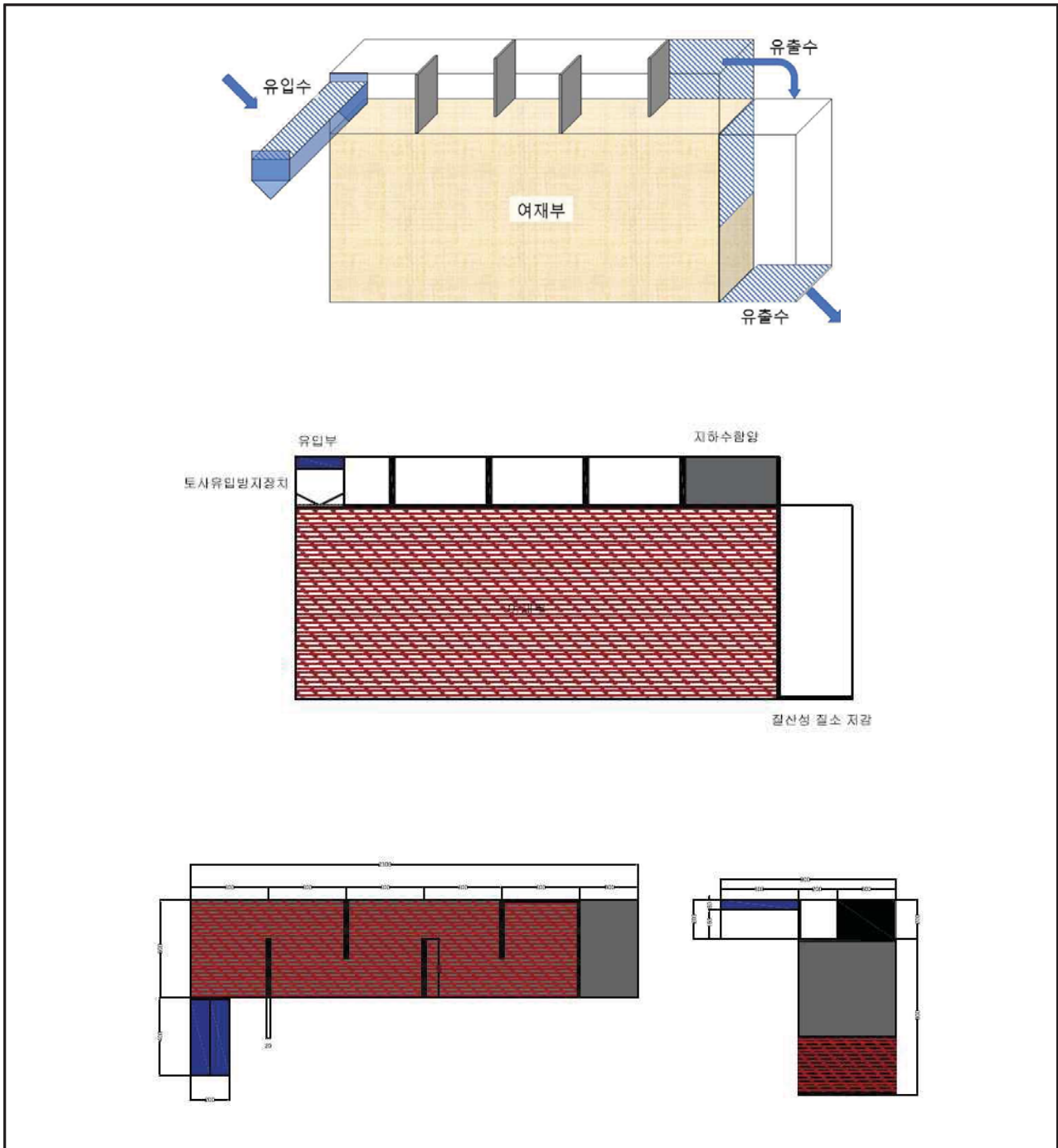


그림 3-3. 토사유입방지장치 형 지하수 함양장치 구상(안)

④ 상향류식 지하수 함양장치(상향류)

유입된 우수의 흐름방향을 상향류로 고안함으로써 여재부에서의 체류시간을 향상하였다. 여재부의 폐쇄를 최소화하기 위하여 강우 시 장치내로 유입되는 토사 및 혐잡물을 침사지에서 침강 후 상향류의 흐름으로 여재부를 통과하도록 하였다.

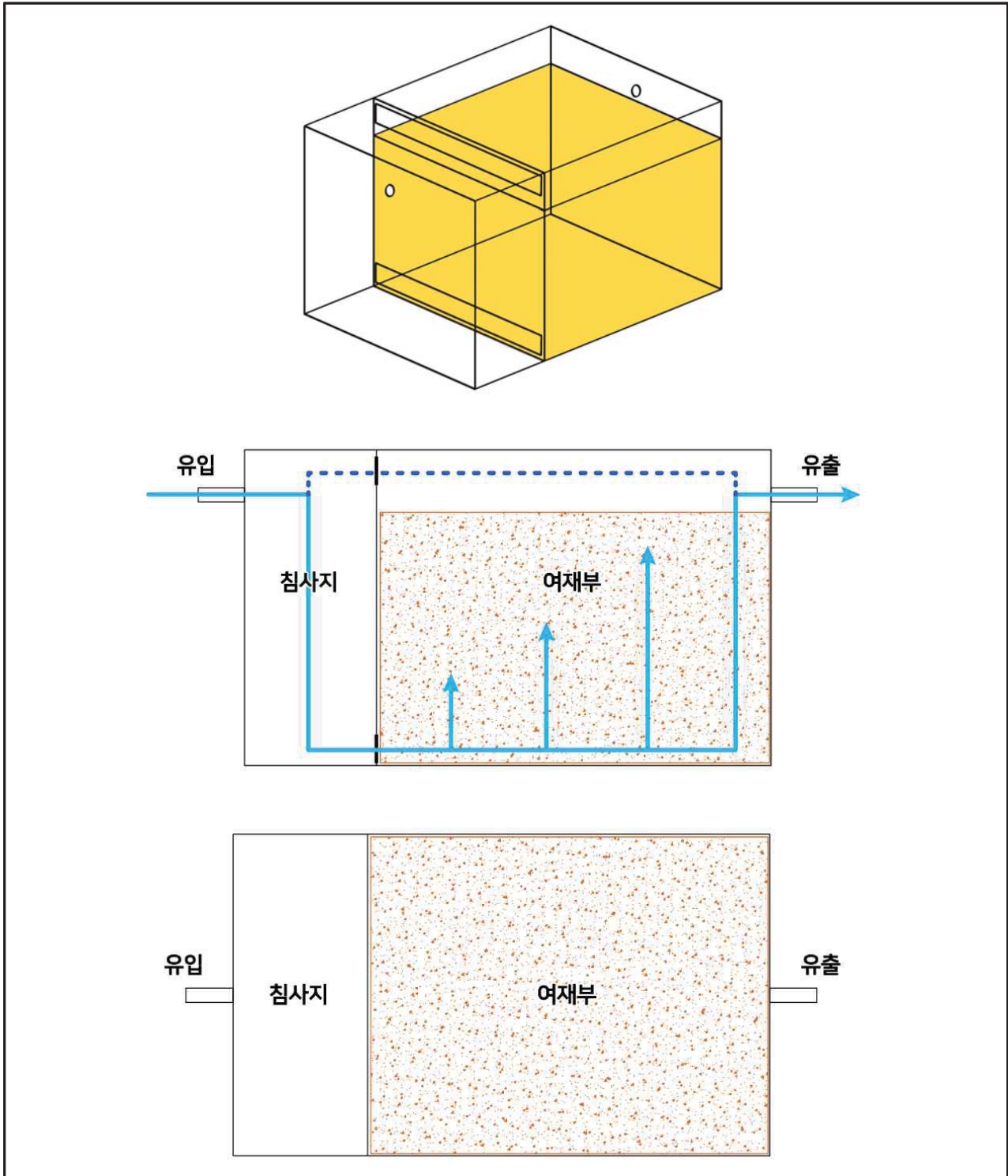


그림 3-4. 상향류식 지하수 함양장치 구성(안)

⑤ 상향류식 모래여과형 지하수 함양장치(상향류)

유입된 우수의 흐름방향을 상향류로 고안함으로써 여재부에서의 체류시간을 향상하였다.

여재부의 폐쇄를 최소화하기 위하여 강우 시 장치내로 유입되는 토사 및 협잡물을 침사지에서 침강 후 후단에 설치된 모래여과 공정을 통해 침강되지 않은 토사 및 부유물질 등을 제거 후 유량조정조로 유입되어 상향류의 흐름으로 여재부를 통과하도록 하였다.

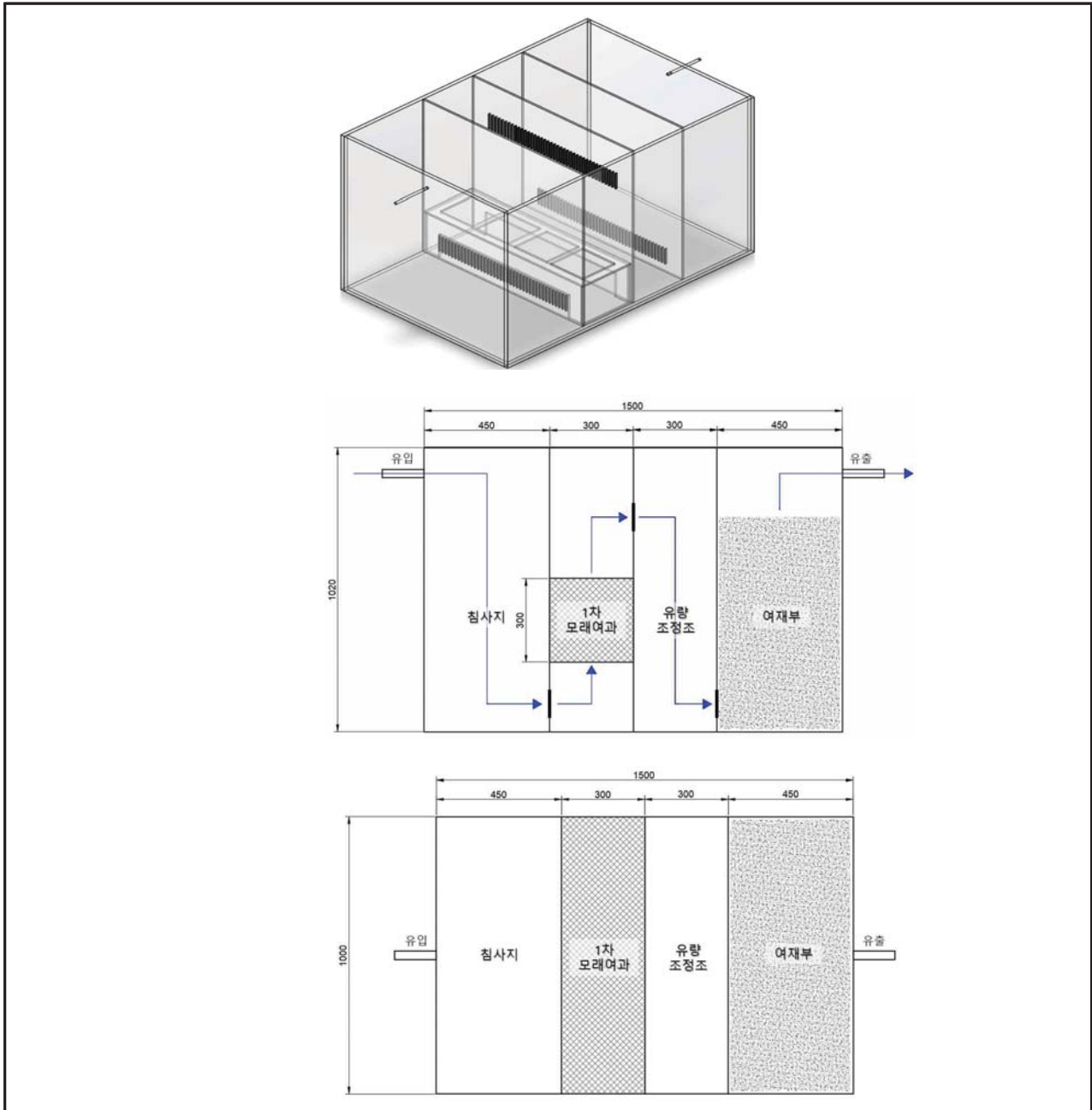


그림 3-5. 상향류식 모래여과형 지하수 함양장치 구성(안)

⑥ 유량조절이 가능한 자연형 지하수 함양장치(하향류)

기존 자연형시설의 형태로 유입된 우수는 여재부를 통과하여 지하로 함양될 수 있도록 구상하였다.

시설 전단으로 유량조절조를 배치하여 다량의 우수가 단기간에 시설로 유입되어 시설용량을 초과하지 않도록 하고, 유량조절조 후단의 유량분배조를 배치해 시설로 유입된 우수가 여재부로 유입 시 균등하게 분포될 수 있도록 고안하였다.

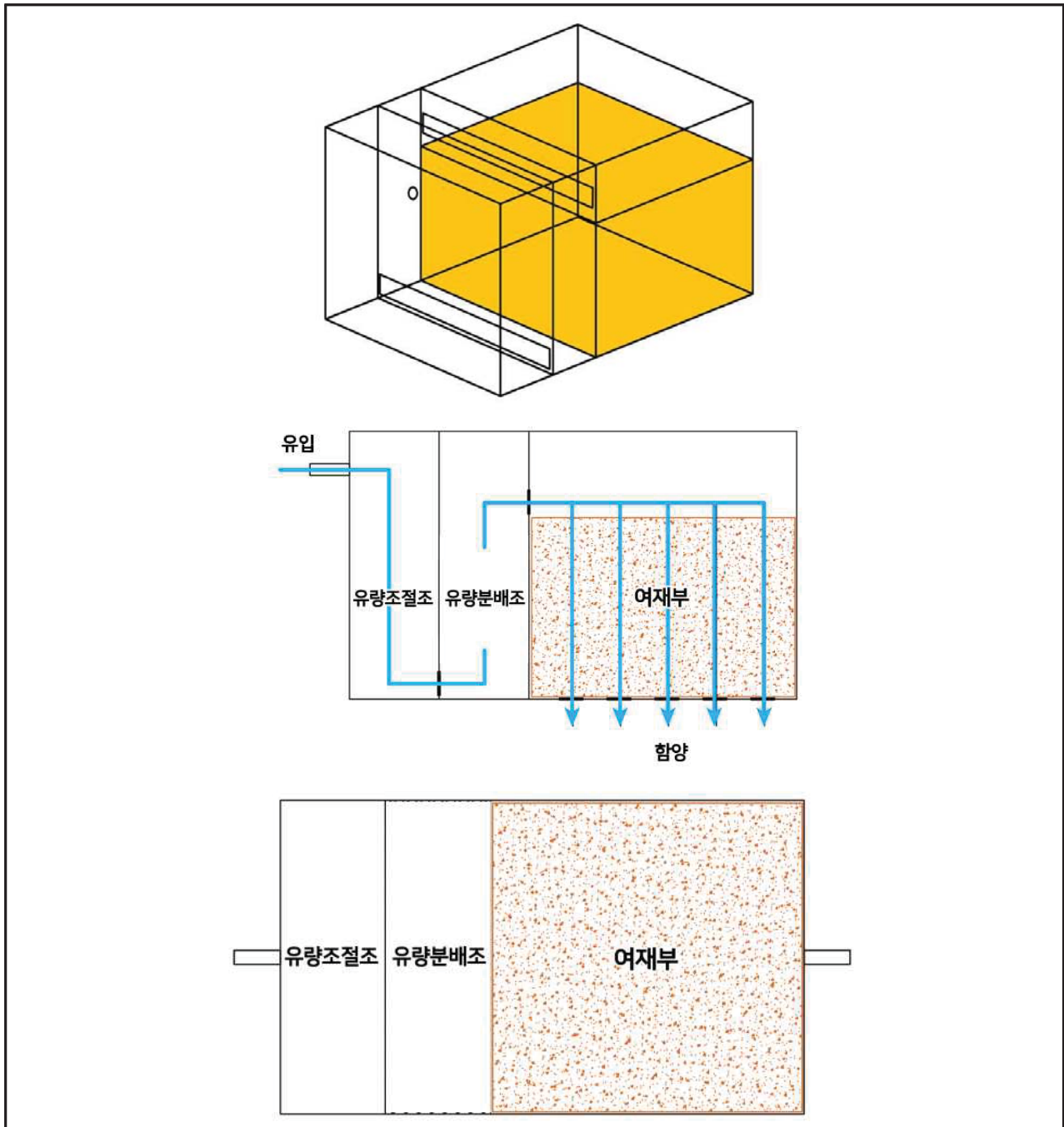


그림 3-6. 유량조절이 가능한 자연형 지하수 함양장치 구상(안)



## (나) 저영향개발(LID) 시설 선정 및 파일럿 규모 시설 제작

### ① 저영향개발(LID) 시설 선정

위에서 제시한 6가지 구상(안) 중 시설 규모에 따라 가장 적합한 시설을 선정하였으며, 시설의 규모는 소규모 및 대규모로 구분하였다.

- 소규모 시설의 경우 설치 시 면적대비 체류시간을 최대화할 수 있는 시설로, 현장 설치 여건에 따라 시설의 형태를 자유롭게 변형할 수 있도록 설계되어진 “상향류식 모래여과형 지하수 함양장치”로 시설하우스 등 소규모 지역에 적용하고자 한다.
- 대규모 시설의 경우 많은 시설농가가 밀집되어 있으며, 비교적 넓은 공여지가 있는 지역에 적용할 수 있고, 지하수 함양량 조절이 가능하도록 구상되어진 “유량조절이 가능한 자연형 지하수 함양장치”로 설계하여 지하수 부족문제를 해결하는 한 방안으로 적용하고자 한다 (대규모 시설의 설치에 본 보고서 「제7장 현장규모 저영향개발(LID) 시설 설치」 편 수록).

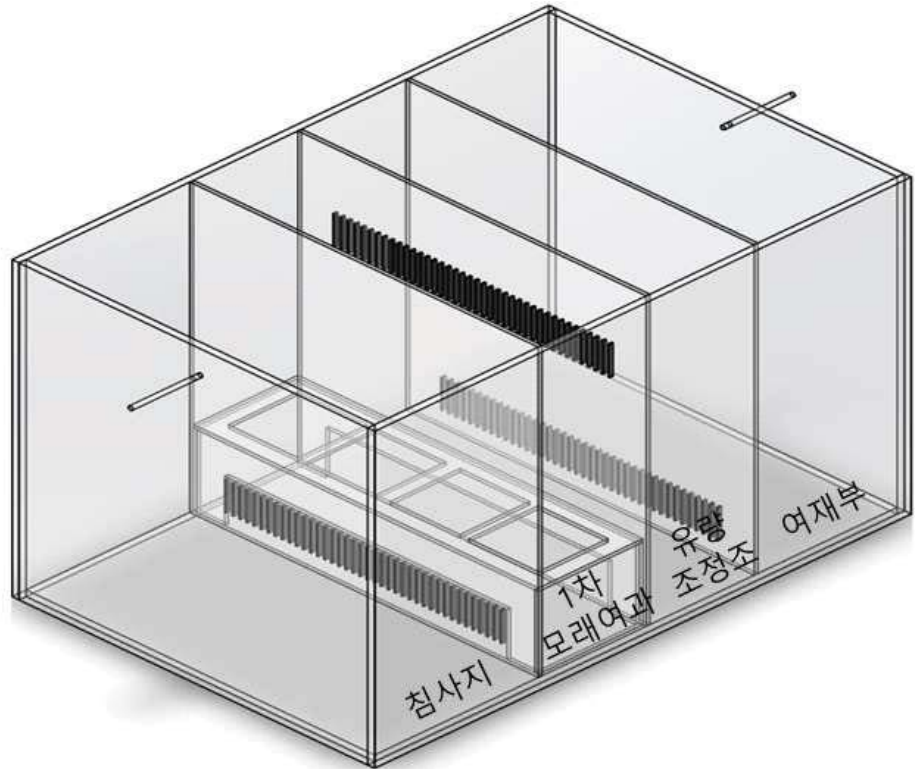
### ② 저영향개발(LID) 시설 파일럿 규모 시설 제작

소규모 시설의 시설 구상(안)으로 “상향류식 모래여과형 지하수 함양장치”를 최종 설계로 채택하였으며, 세부 설계내용은 다음과 같다.

- 유입된 우수의 흐름은 “유입 → 침사지 → 1차 모래여과 → 유량조정조 → 여재부 → 지하수 함양”으로 1차 모래여과 및 여재부의 흐름방향을 상향류로 설계하여 하향류 시설과 비교하여 긴 체류시간을 통해 처리효과를 향상시킨다.
- 유입된 우수는 시설 전단의 침사지 및 1차 모래여과를 통해 유입된 토사 및 협잡물을 제거하고, 여재부를 통과하면서 지하수 수질을 향상 후 지하로 함양시킨다.

최종 채택된 설계를 바탕으로 파일럿 규모(1m<sup>3</sup>) 장치(이하 GNS\_TANK)를 제작하였으며, 제작된 장치의 세부제원 및 관련도면을 아래와 같다.

개념도



장치사진



그림 3-7. GNS\_TANK 개념도 및 장치사진

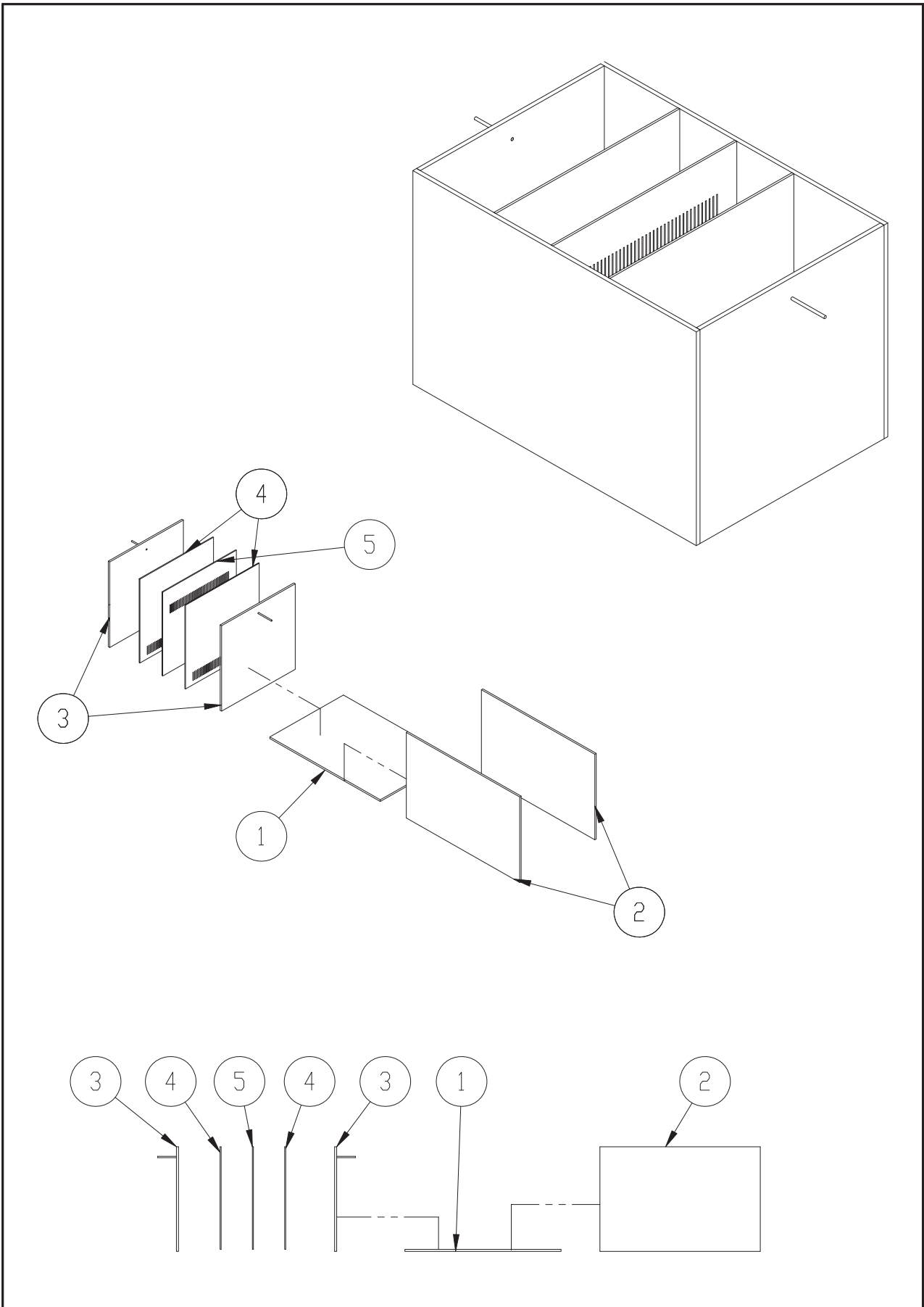


그림 3-8. GNS\_TANK - 분해도

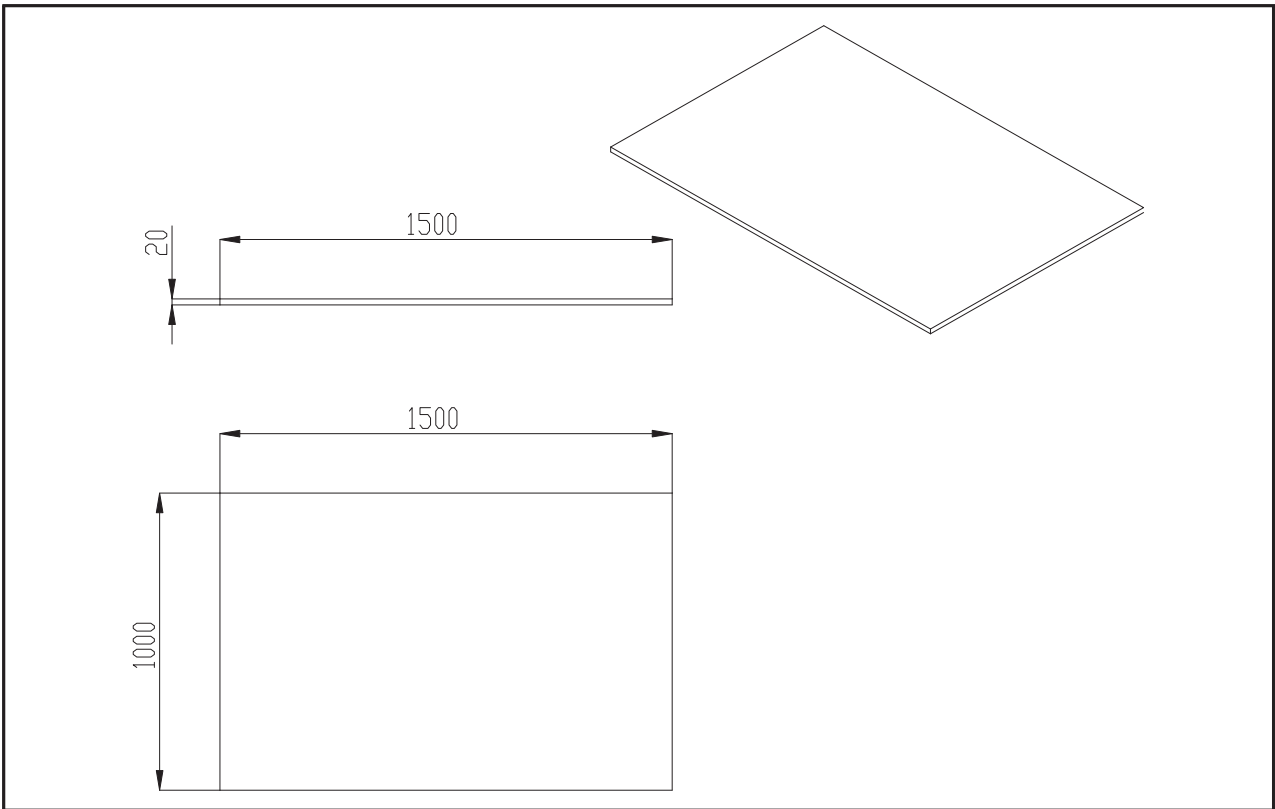


그림 3-9. GNS\_TANK - 하단부

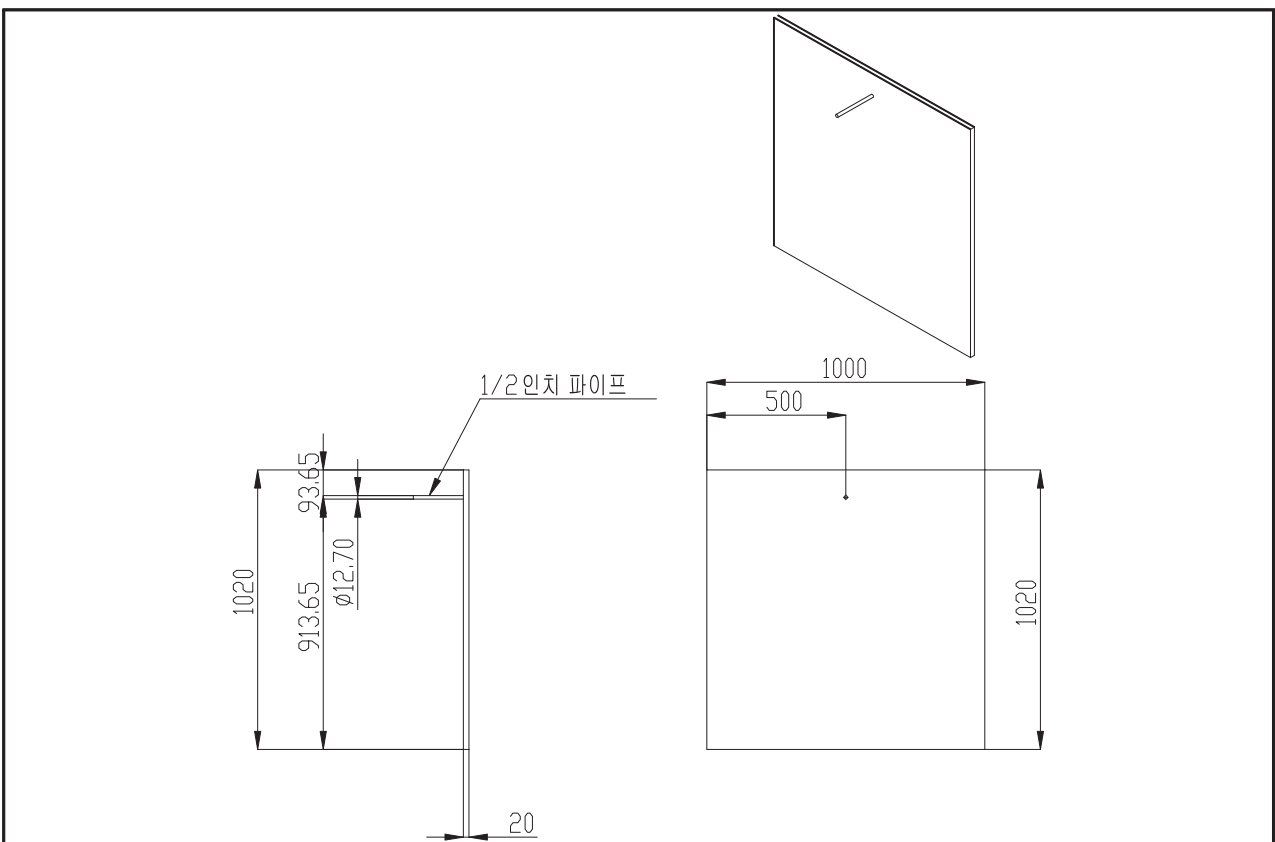


그림 3-10. GNS\_TANK - 측면

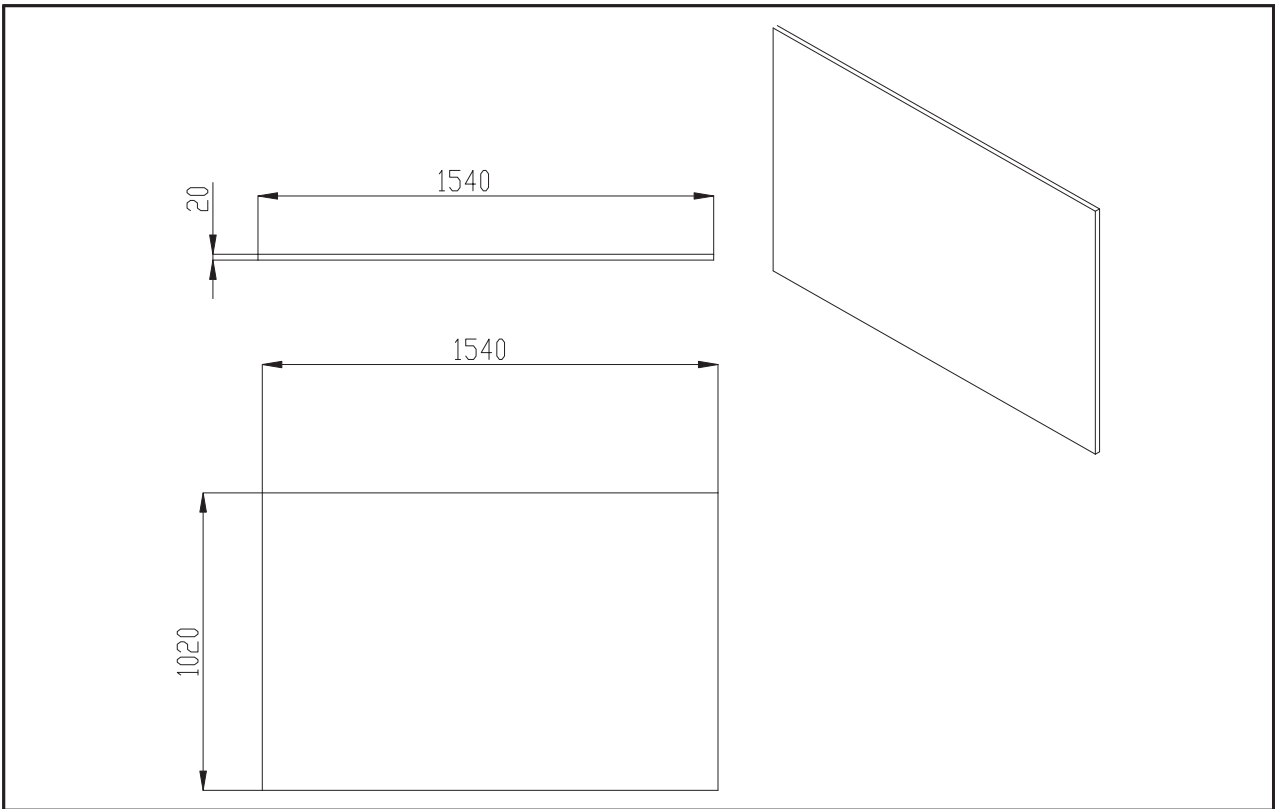


그림 3-11. GNS\_TANK - 정면

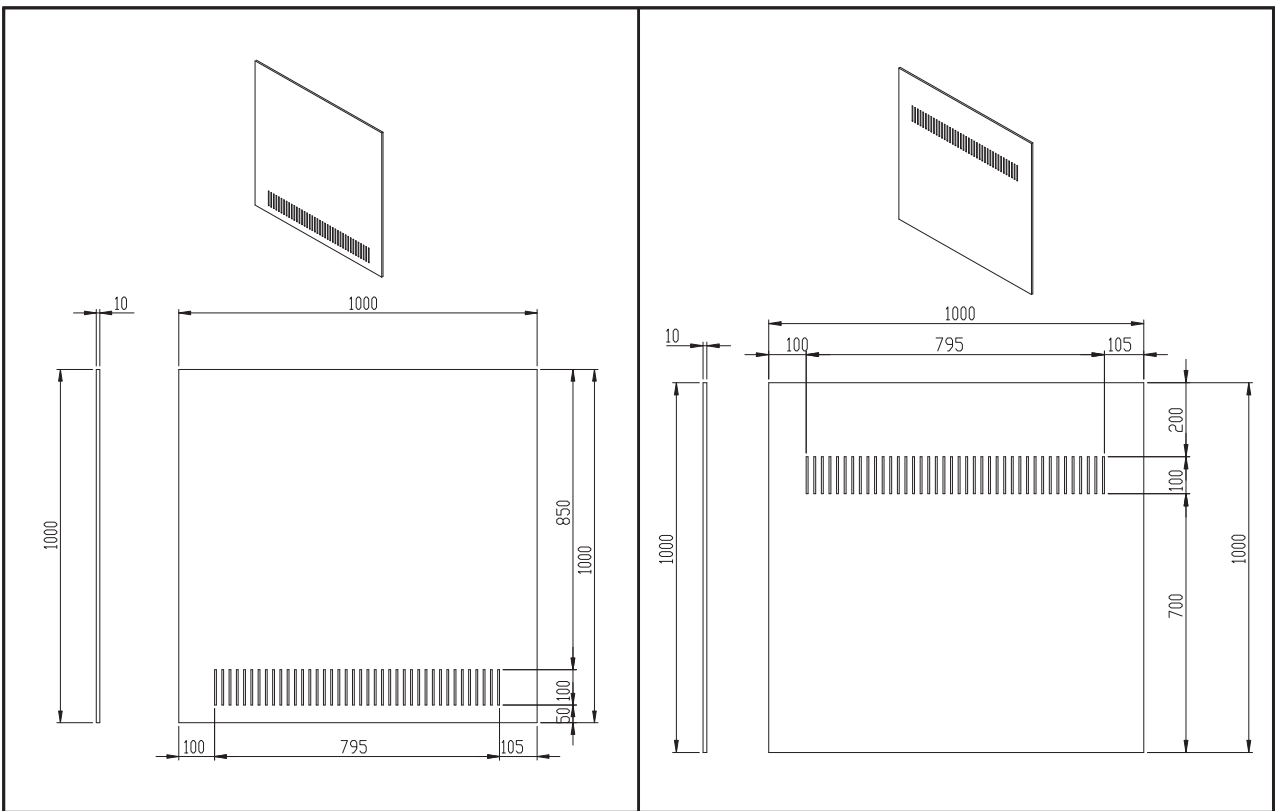


그림 3-12. GNS\_TANK - 중간 스크린



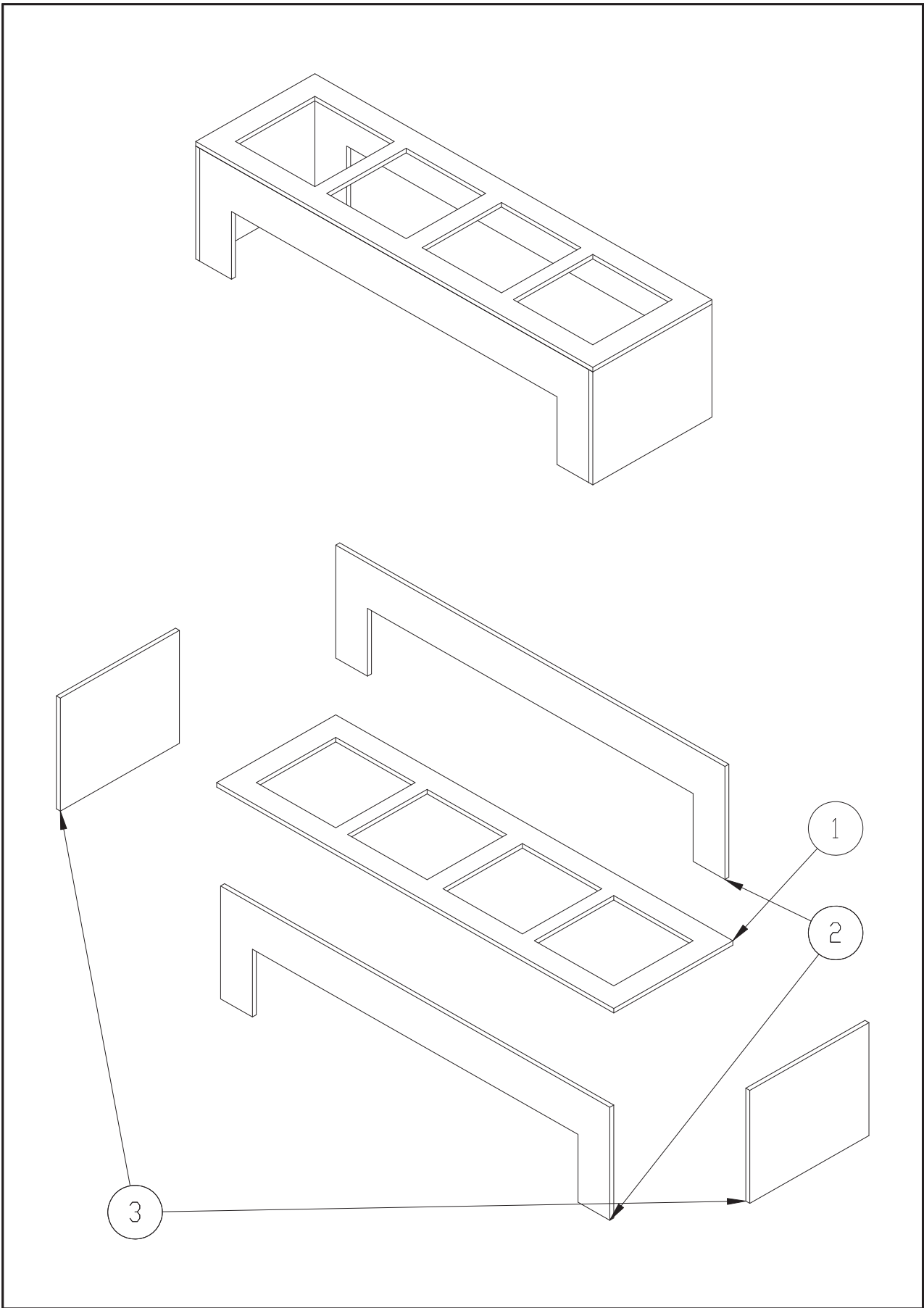


그림 3-13. GNS\_TANK - 지지대 분해도

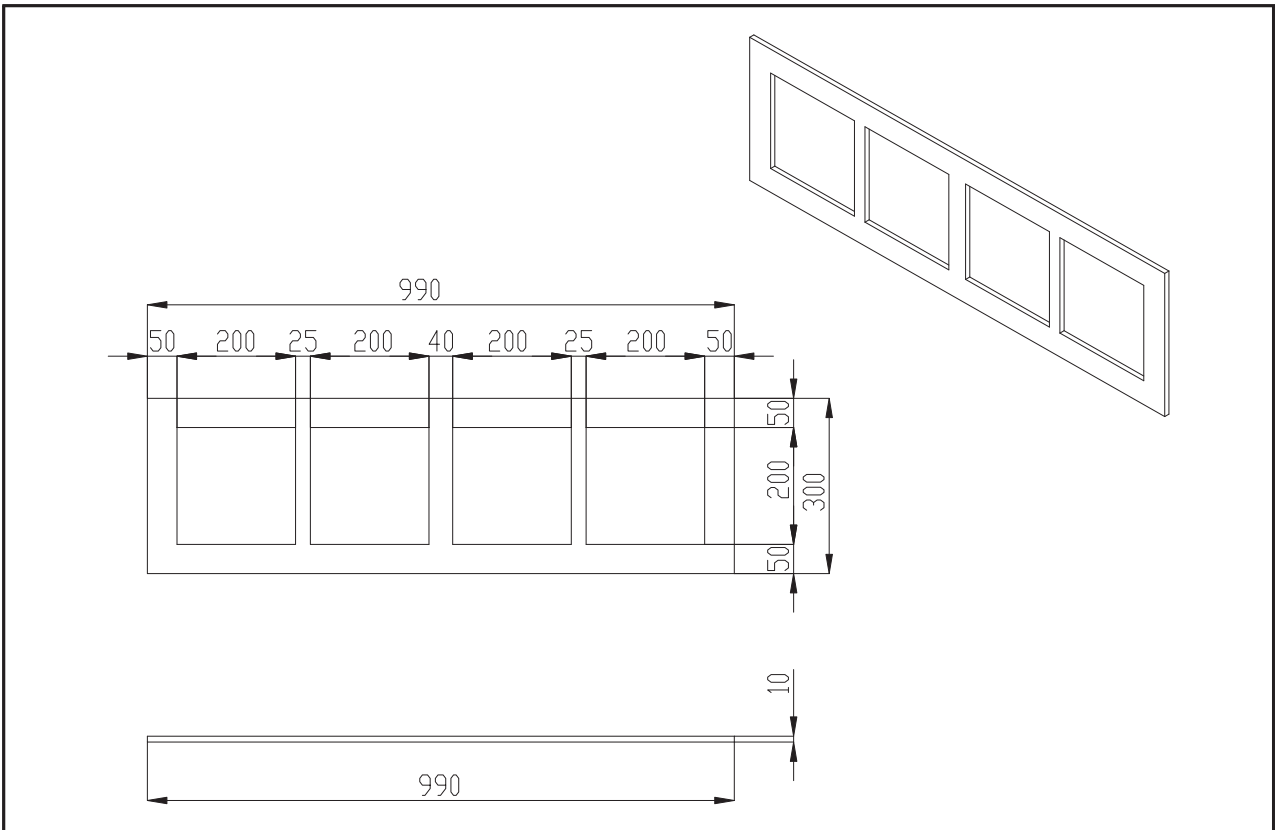


그림 3-14. GNS\_TANK - 지지대 상부

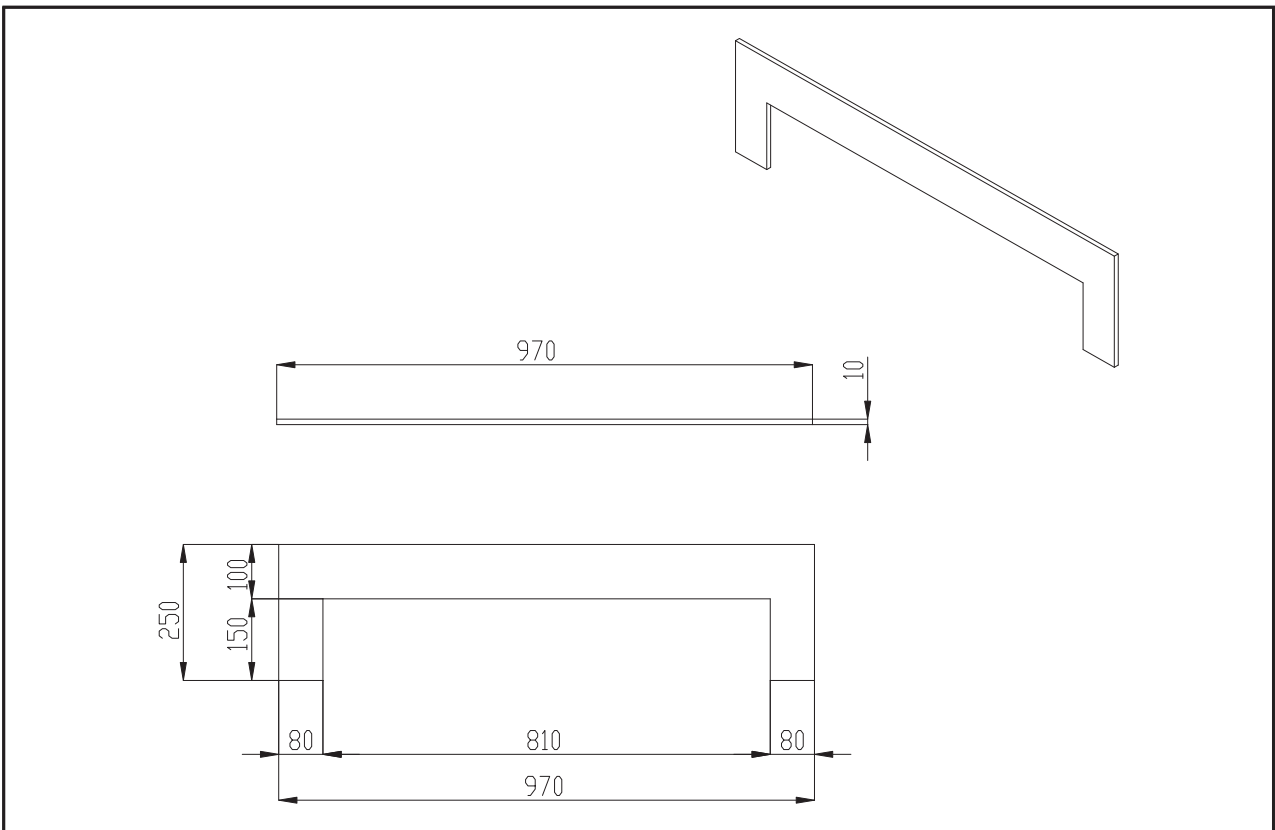


그림 3-15. GNS\_TANK - 지지대 정면

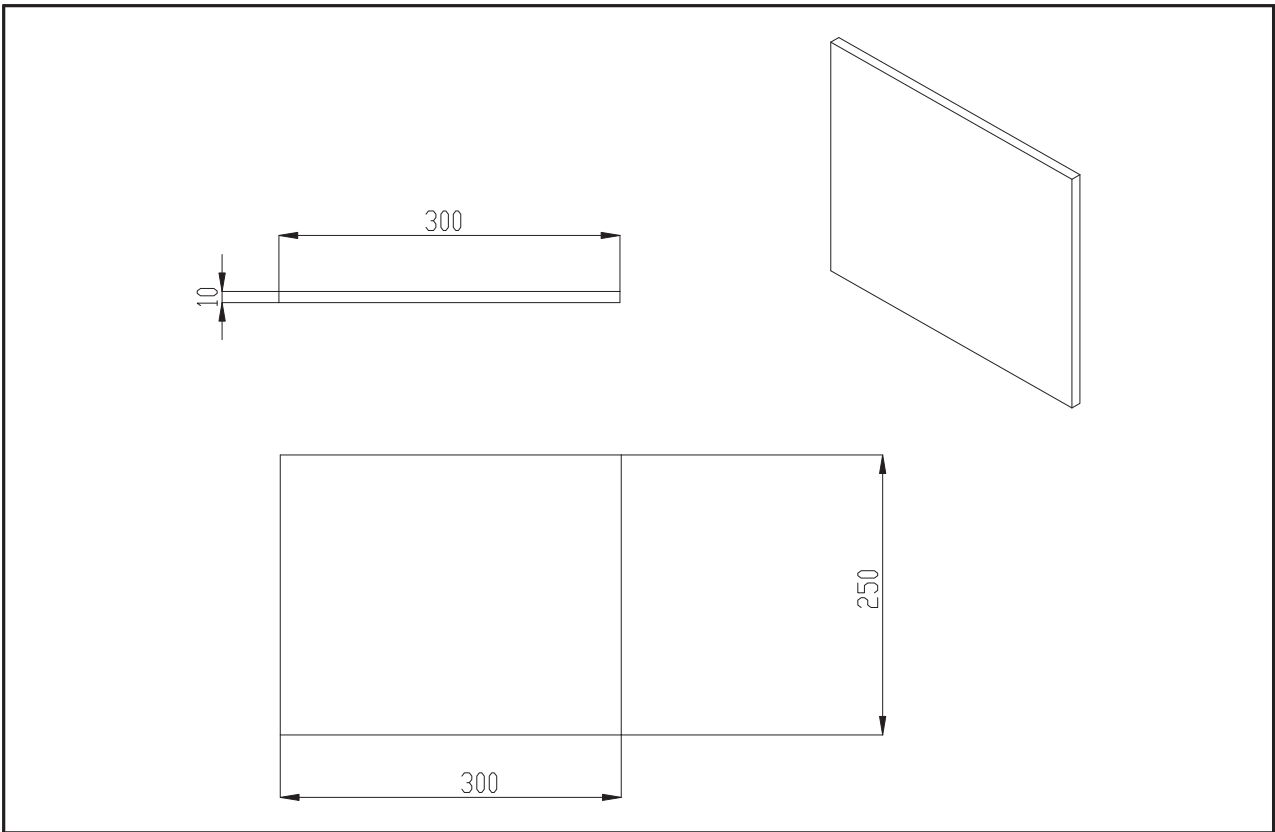


그림 3-16. GNS\_TANK - 지지대 측면

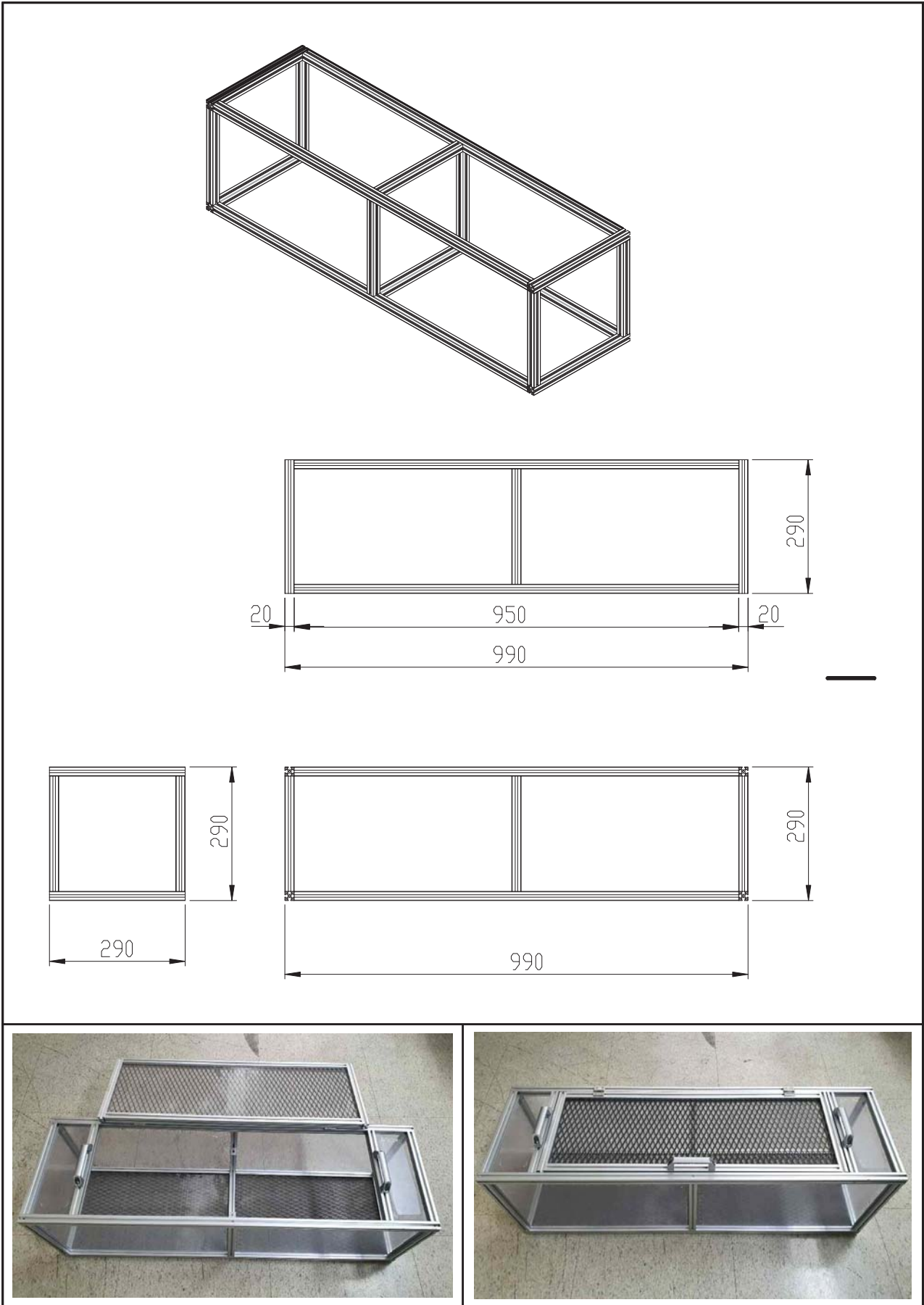


그림 3-17. GNS\_TANK - 모래여과 케이스

## (다) 파일럿 규모 저영향개발(LID) 시설 평가실험

### ① 부유물질 제거 실험




#### ㉠ 실험개요

소규모 시설 운영 시 농수로를 통해 유입되는 원수는 GNS\_TANK를 통과 후 다시 지하로 함양시킬 계획으로, 유입되는 부유물질(토사 및 협잡물)을 제거해야 할 필요가 있다. 부유물질의 제거는 GNS\_TANK전단의 침사지와 모래여과조를 통해 제거할 계획으로 시설물의 부유물질 제거효율을 관찰하기 위하여 부유물질 제거실험을 진행하였다.

- 평가실험은 유입부에 흙을 적치 한 후 물을 주입하여 자연스럽게 부유물질을 포함한 토사가 장치로 흘러 들어갈 수 있도록 계획하여 진행하였으며, 유량을 다르게 하여 2회 진행하였다.
- 시료채취 및 시료채취 간격은 유입부에서의 유입수를 1분 간격으로 5회 채취하였고, 침사지 후단에서 유출되는 유출수를 30초 간격으로 10회(10분 경과 후 1회 채취), 모래여과조 후단에서 모래여과조를 통과한 후 5분과 10분경과 후 채취하였다. 시료는 유량에 따라 1~2L 채취하였으며, 채취시간 당 2개의 시료를 채취하였다.
- 채취한 시료는 수질오염공정시험기준에 따라 실내실험을 시행하여 각 구간의 부유물질량을 분석하여 부유물질 제거 능력을 평가하였다.



표 3-1. 부유물질 분석절차 및 결과보고

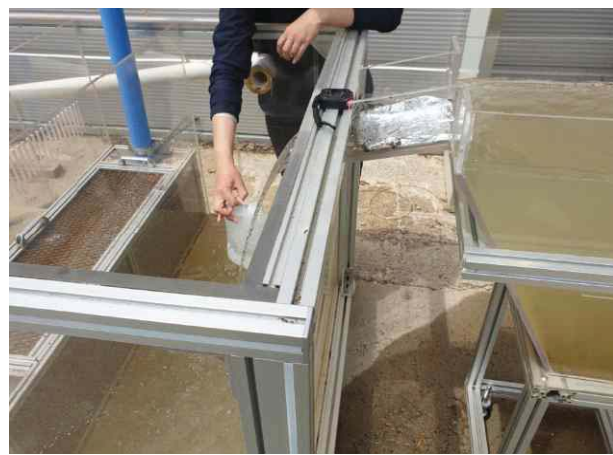
<p>분석절차</p>	<p>① 유리섬유여과지 (GF/C)를 여과장치에 부착하여 미리 정제수 20mL 씩으로 3회 흡입 여과하여 씻은 다음 시계접시 또는 알루미늄 호일 접시 위에 놓고 105~110℃의 건조기 안에서 2시간 건조시켜 데시케이터에 넣어 방치하고 냉각한 다음 항량하여 무게를 정밀히 달고, 여과장치에 부착</p> <p>② 시료 적당량(건조 후 부유물질로써 2mg 이상)을 여과장치에 주입하면서 흡입 여과</p> <p>③ 시료 용기 및 여과장치의 기벽에 붙어있는 부착물질을 소량의 정제수로 유리섬유여과지에 씻어 내린 다음 즉시 여지상의 잔류물을 정제수 10mL씩 3회 씻어주고 약 3분 동안 계속하여 흡입 여과</p> <p>④ 유리섬유여과지를 핀셋으로 주의하면서 여과장치에서 고집어내어 시계접시 또는 알루미늄 호일 접시 위에 놓고 105~110℃의 건조기 안에서 2시간 건조시켜 데시케이터에 넣어 방치하고 냉각한 다음 항량으로 하여 무게를 정밀히 측정</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>저울</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>건조기</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>여과장치</p> </div> </div>
<p>결과보고</p>	<p>· 여과 전후의 유리섬유여지 무게의 차를 구하여 부유물질의 양으로 함.</p> $\text{부유물질 (mg/L)} = (b - a) \times \frac{1,000}{V}$ <p>여기서, <math>a</math> : 시료 여과 전의 유리섬유여지 무게(mg)  <math>b</math> : 시료 여과 후의 유리섬유여지 무게(mg)  <math>V</math> : 시료의 양(mL)</p>



토사유입구(준비단계)



토사(부유물질) 유입



시료채취(침사지 후단)



종료 후 탁도 육안 관찰



시료 건조



GF/C 여지 무게 측정3

그림 3-18. GNS\_TANK 부유물질 제거실험

㉔ 부유물질양 산정

표 3-2. 1차 실험 결과

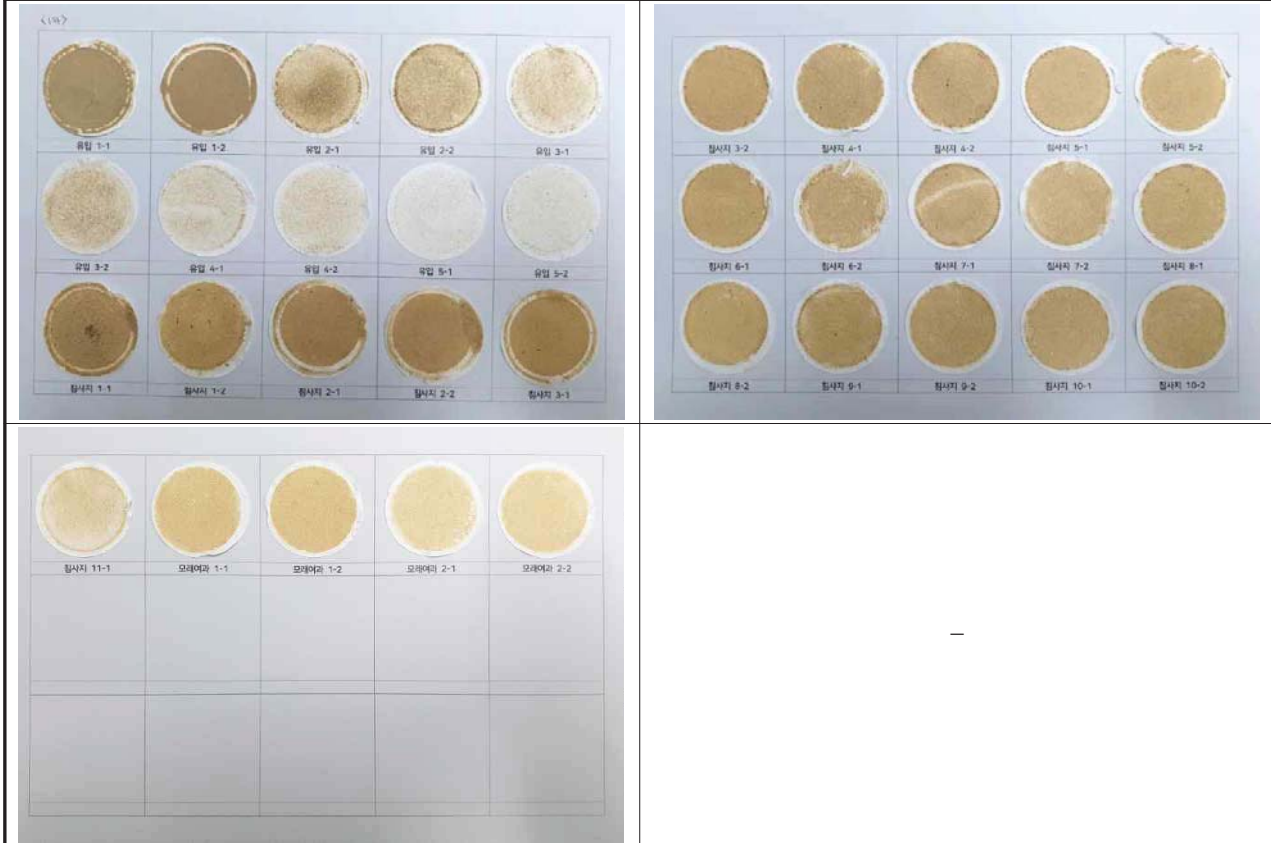
시료채취 일자	2021년 05월 06일						
실내실험 일자	2021년 05월 07일						
유 량	1.44m <sup>3</sup> /hr						
구 분	채취시간 (경과시간)	시료명	유리섬유여지무게(mg)		시료의 양 (V, mL)	부유물질 (mg/L)	
			여과전(a)	여과후(b)			
유입수 (침사지 전단)	0~1분	유입 1-1	93.5	218.6	100	1,251.00	
		유입 1-2	91.5	171.5	50	1,600.00	
	1~2분	유입 2-1	91.9	135.3	50	868.00	
		유입 2-2	91.5	133.2	50	834.00	
	2~3분	유입 3-1	93.9	114.4	100	205.00	
		유입 3-2	93.7	115.6	100	219.00	
	3~4분	유입 4-1	93.0	102.4	100	94.00	
		유입 4-2	91.3	102.0	100	107.00	
	4~5분	유입 5-1	92.6	97.4	200	24.00	
		유입 5-2	92.5	98.8	200	31.50	
	침사지 유출수 (침사지 후단)	6분 30초	침사지 1-1	91.7	156.9	300	217.33
			침사지 1-2	94.1	118.2	200	120.50
		7분 00초	침사지 2-1	92.9	130.4	200	187.50
			침사지 2-2	92.8	130.2	200	187.00
7분 30초		침사지 3-1	93.5	124.7	200	156.00	
		침사지 3-2	91.6	125.0	200	167.00	
8분 00초		침사지 4-1	92.4	123.7	200	156.50	
		침사지 4-2	92.0	122.3	200	151.50	
8분 30초		침사지 5-1	91.6	119.2	200	138.00	
		침사지 5-2	92.2	120.6	200	142.00	
9분 00초		침사지 6-1	92.8	118.9	200	130.50	
		침사지 6-2	94.1	115.2	200	105.50	
9분 30초		침사지 7-1	92.5	115.3	200	114.00	
		침사지 7-2	91.1	107.0	200	79.50	
10분 00초		침사지 8-1	92.0	114.6	200	113.00	
		침사지 8-2	91.7	112.2	200	102.50	
10분 30초		침사지 9-1	92.1	111.9	200	99.00	
		침사지 9-2	91.7	112.8	200	105.50	
11분 00초		침사지 10-1	91.9	111.0	200	95.50	
		침사지 10-2	93.1	110.9	200	89.00	
16분 30초	침사지 11-1	92.7	100.5	200	39.00		
모래여과조 통과	5분 경과 (27:45)	모래여과 1-1	93.1	103.7	500	21.20	
		모래여과 1-2	92.1	102.2	500	20.20	
	10분 경과 (32:45)	모래여과 2-1	93.0	99.6	500	13.20	
		모래여과 2-2	91.9	98.6	500	13.40	

표 3-3. 2차 실험 결과

시료채취 일자	2021년 05월 06일					
실내실험 일자	2021년 05월 10일					
유 량	0.72m <sup>3</sup> /hr					
구 분	채취시간 (경과시간)	시료명	유리섬유여지무게(mg)		시료의 양 (V, mL)	부유물질 (mg/L)
			여과전(a)	여과후(b)		
유입수 (침사지 전단)	0~1분	유입 1-1	270.7	315.7	20	2,250.00
		유입 1-2	275.1	330.5	20	2,770.00
	1~2분	유입 2-1	269.1	292.1	30	766.67
		유입 2-2	251.3	286.3	50	700.00
	2~3분	유입 3-1	265.6	309.2	50	872.00
		유입 3-2	257.6	290.2	50	652.00
	3~4분	유입 4-1	277.1	285.9	50	176.00
		유입 4-2	270.6	292.2	100	216.00
4~5분	유입 5-1	282.1	303.6	100	215.00	
	유입 5-2	280.1	319.3	200	196.00	
침사지 유출수 (침사지 후단)	14분30초	침사지 1-1	287.4	310.2	200	114.00
		침사지 1-2	290.3	312.9	200	113.00
	15분 00초	침사지 2-1	275.6	295.8	200	101.00
		침사지 2-2	284.4	304.9	200	102.50
	15분30초	침사지 3-1	278.1	308.9	300	102.67
		침사지 3-2	258.9	289.1	300	100.67
	16분00초	침사지 4-1	280.9	310.2	300	97.67
		침사지 4-2	255.4	284.4	300	96.67
	16분30초	침사지 5-1	228.7	257.7	300	96.67
		침사지 5-2	249.2	277.3	300	93.67
	17분00초	침사지 6-1	244.5	272.4	300	93.00
		침사지 6-2	257.4	283.8	300	88.00
	17분30초	침사지 7-1	253.0	272.5	300	65.00
		침사지 7-2	229.4	256.2	300	89.33
	18분00초	침사지 8-1	247.8	268.6	300	69.33
		침사지 8-2	263.1	287.5	300	81.33
	18분30초	침사지 9-1	230.9	249.4	300	61.67
		침사지 9-2	227.6	248.4	300	69.33
19분00초	침사지 10-1	269.8	288.8	300	63.33	
	침사지 10-2	231.2	253.2	300	73.33	
24분30초 (10분경과)	침사지 11-1	231.6	244.6	300	43.33	
	침사지 11-2	231.3	243.7	300	41.33	
모래여과조 통과	5분 경과 (55:30)	모래여과 1-1	230.2	239.3	500	18.20
		모래여과 1-2	259.0	269.5	500	21.00
	10분 경과 (60:30)	모래여과 2-1	231.4	237.6	500	12.40
		모래여과 2-2	258.1	267.1	500	18.00
	15분 경과 (65:30)	모래여과 3-1	231.0	235.8	500	9.60
	모래여과 3-2	228.2	233.9	500	11.40	



### 1차 실험



### 2차 실험

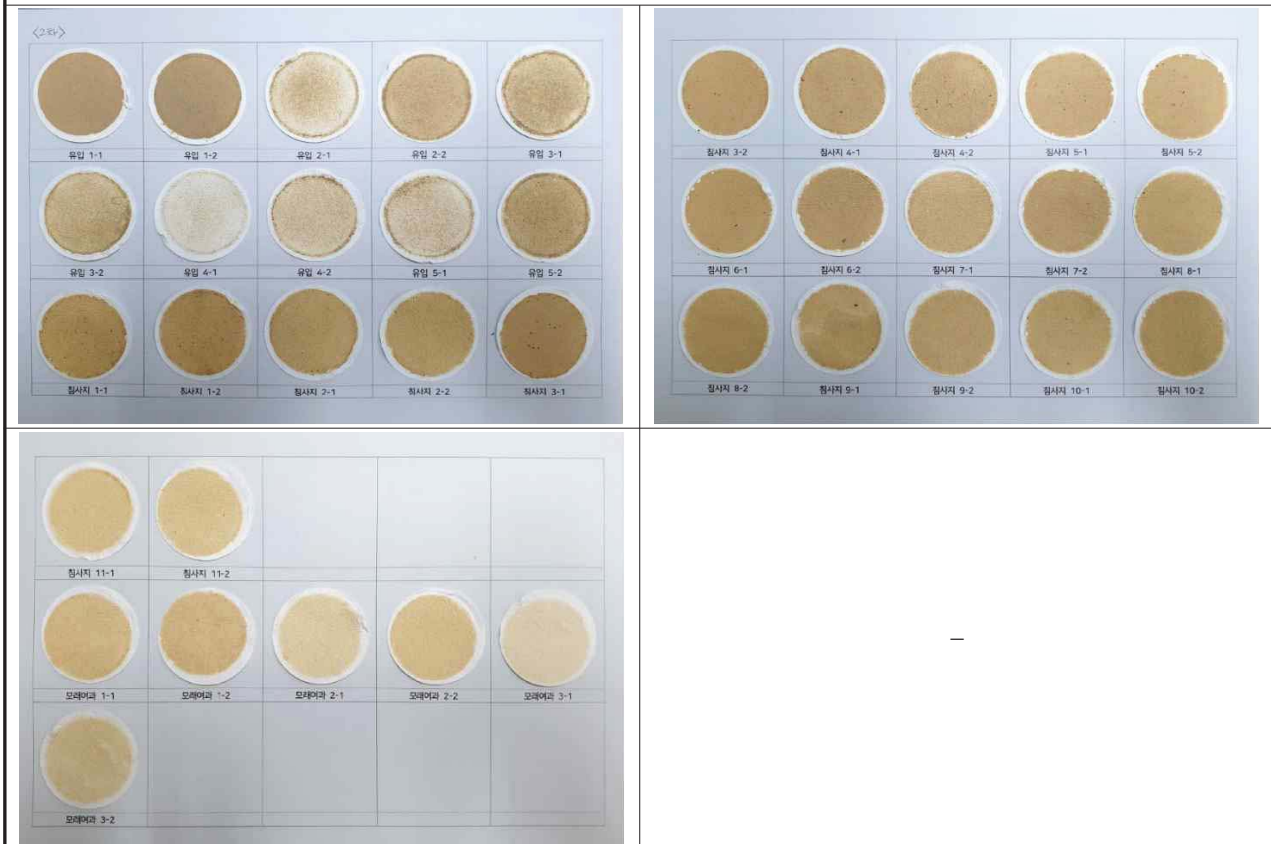


그림 3-19. 실험결과(유리섬유여지)

㉔ 실험결과 분석

GNS\_TANK의 부유물질 제거 효과를 확인하기 위해 시행한 실험에서 장치 내 부유물질 제거율은 1차, 2차 각각 96.8%와 98.3%로 분석되었으며, 유량이 작은 2차 실험에서 더 많은 부유물질이 제거된 것이 확인되었다.

1차 실험에서 유입수 내 부유물질은 평균 523.35mg/L로 침사지를 거치면서 평균 128.40 mg/L로 감소되어 75.5%의 제거율을 보이며, 침사지유출수가 모래여과조를 통과하면서 평균 17.00mg/L로 감소되어 86.8%의 제거율을 보였다.

2차 실험에서 유입수 내 부유물질은 평균 881.37mg/L로 침사지를 거치면서 평균 84.40 mg/L로 감소되어 90.4%의 제거율을 보이며, 침사지유출수가 모래여과조를 통과하면서 평균 15.10mg/L로 감소되어 82.1%의 제거율을 보였다.

1차 유입 유속 1.44m<sup>3</sup>/hr, 2차 유입 유속을 0.72m<sup>3</sup>/hr로 실험한 결과 장치 내 부유물질 제거율은 유량(유속)의 영향을 받는 것으로 판단되며, 유량(유속)이 낮을수록 침사지 내 체류시간이 증가함에 따라 제거율이 높은 것을 확인하였다.

다음 <표 3-4>의 부유물질 제거율 검토 결과 GNS\_TANK 전단의 침전조 및 모래여과 공정은 부유물질 등에 의한 여재부 공극 폐색을 상당 부분 방지하여 여재 수명을 늘리며 유지관리를 용이하게 할 것으로 사료 된다.

표 3-4. GNS\_TANK 부유물질 제거율

구 분	유 입		침사지		모래여과		전체 제거율 (%)
	유입유량 (m <sup>3</sup> /hr)	유입수평균 (mg/L)	침사지유출수 (mg/L)	제거율 (%)	모래여과조 통과 (mg/L)	제거율 (%)	
1차	1.44	523.35	128.40	75.5	17.00	86.8	96.8
2차	0.72	881.37	84.40	90.4	15.10	82.1	98.3



그림 3-20. 부유물질 변화 추이



## (2) 파일럿규모 저영향개발(LID) 시설 현장 적용

### (가) 현장 선정

파일럿규모의 저영향개발(LID) 시설의 경우 시설하우스 등 소규모 지역에 적용하고자 설계한 시설로 현장조사를 통하여 적합한 부지를 선정하였으며, 수막재배 후 버려지는 물을 재활용 할 수 있도록 GNS\_TANK 설치 예정지점 인근으로 퇴수로가 설치된 지점을 선정하였다.



그림 3-21. 저영향개발(LID) 시설 설치 지점

### (나) 현장 시설 설치

파일럿규모의 저영향개발(LID) 시설의 설치는 2021년 11월 20일 진행되었으며, 설치지점 터파기 후 GNS\_TANK를 안착시킨 후 퇴수로로부터 배관을 연결하여 유입로를 설치, 퇴수로에 유량계를 설치하여 재사용되는 수량을 확인하고자 하였다. 또한 시설 인근 지하수 흐름방향으로 재사용관정을 설치하여 함양된 지하수를 사용할 수 있도록 하였다.



그림 3-22. 파일럿규모 저영향개발(LID) 시설 설치

(다) 현장 시험 방법

파일럿규모의 저영향개발(LID) 시설은 소규모 지역의 지하수 재이용을 목적으로 설치하였으며, 시설의 효율을 확인하기 위하여 유량계를 통한 지하수 함양량 확인 및 GNS\_TANK 통과 전후의 수질을 분석하여 오염물질 제거효과를 관찰하였다.

(라) 현장 시험 결과

① 유량확인

파일럿규모의 저영향개발(LID) 시설을 통한 지하수(퇴수) 재이용량 확인을 위하여 시설 후 단으로 유량계(수도미터)를 설치하여 유량을 관찰하였다. 1차 유량 확인은 2022년 2월 14일로 GNS\_TANK 가동 시작 이후 60일이 경과하였으며, 표시 유량은 420m³으로 일일 유량은 7.0m³/일로 조사되었다. 이후 2차 유량 확인은 54일이 경과한 이후 2022년 4월 8일 확인값으로 표시 유량은 563m³, 해당기간 2.6m³/일의 지하수가 재함양 된 것을 확인하였다.

표 3-5. 시설 유량 확인

구 분	확인일	경과일	표시유량	일일유량
1차	2022.02.14.	60일(가동~1차)	420m³	7.0m³/일
2차	2022.04.08.	54일(1차~2차)	563m³	2.6m³/일

주) 시설 설치일 : 2021년 11월 20일, 시설 가동(시작)일 : 2021년 12월 16일

② 지하수 수질분석

GNS\_TANK의 수질분석은 2022년 4월 8일에 시료채취를 통해 진행하였으며, 당시 여재부 설치 전으로 1차 모래여과통과 전후의 수질을 분석하였다. 수질분석은 지하수수질기준(농업용수) 15개 항목에 대하여 실시하였으며, 분석결과 모래여과 전단(W-1)시료에서 염소이온 12.8mg/L, 질산성질소 53.6mg/L로 조사되어 질산성질소의 수질기준(20mg/L)이 초과하는 것으로 확인되었다. 그러나 모래여과 후단(W-2)에서 염소이온 3.7mg/L, 질산성질소 12.8mg/L로 조사되어 수질기준에 만족하는 값을 보였다.

표 3-6. 지하수 수질분석

구분	수소이온농도	염소이온(mg/L)	질산성질소(mg/L)	비고
W-1	6.4	12.8	53.6	기준초과
W-2	6.8	3.7	12.8	

주) 카드뮴, 비소, 시안, 수은 등 12개 항목 불검출

(3) 결론

시설이 설치된 지점의 시설하우스의 면적은 약 800m<sup>2</sup>으로 수막재배용수 사용량은 약 33.6m<sup>3</sup>/일(420m<sup>3</sup>/ha·day 적용)로 계산되었으며, 해당 용수는 수막재배용으로 사용 후 퇴수로를 통해 방류되고 일부 용수가 GNS\_TANK로 유입되어 지하로 함양되었다. 수막재배가 이루어지는 겨울철 GNS\_TANK를 통한 지하수 함양량은 7.0m<sup>3</sup>/일로 수막재배용수의 약 20.8%를 대체할 수 있는 것으로 확인되었다. 이는 퇴수로 벽면을 관통하는 배관으로 유입되는 유량으로 한정된 값으로, 퇴수를 차집하여 시설내로 직접 주입 하게 되면 더 많은 유량이 지하로 함양될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 유입유량과 더불어 주입 지점의 투수성에 큰 영향을 받으므로 적절한 조사가 필요하다.

또한 모래여과만을 통해 수질이 향상된 것을 확인한 바, 여재부 충전을 통해 GNS\_TANK의 정화효율을 더 향상시켜 양질의 지하수를 재함양 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 3-7. 파일럿규모 저영향개발(LID) 시설 효율

구분	수량	용수사용량	함양량	함양률
수막재배용 시설하우스	1동, 800m <sup>2</sup>	33.6m <sup>3</sup> /일	7.0m <sup>3</sup> /일	20.8%

주) 시설하우스 물사용량 원단위는 420m<sup>3</sup>/ha·day를 적용



## 라. 연구지역 선정 및 용수공급 현황 조사

### (1) 연구지역 개요

농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발 시설의 현장시험부지 선정을 위하여 전국 시설 농업단지에 대하여 사전 현장조사를 실시하였고, 수막재배단지가 넓게 분포하고, 겨울철 지하수 이용량이 많은 경상남도 하동군 옥종면 북방리 지역을 연구지역으로 선정하였다. 본 연구지역은 매년 겨울철마다 지하수 수위 하강으로 가용 지하수 부족현상을 겪고 있으며, 이에 따라 농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 지하수 인공함양 및 수질개선을 실시하고자 하였다.

#### (가) 연구지역 지형

연구지역인 북방리 시설농업지역은 행정구역상으로는 경상남도 하동군 옥종면 북방리에 위치하며 고도가 60m 안팎인 평야지역이다(그림 4-1, 4-2). 연구지역은 지방하천인 덕천강에 의해 형성된 충적평야로 인근의 진주시 수곡면 원외지구와 함께 대규모 시설재배 단지의 일원이다. 대표 작물은 딸기이며, 겨울철 하우스시설의 보온을 목적으로 수막시설을 설치하여 지하수를 열원으로 사용 중에 있다. 연구지역 총면적은 117.2 ha 이며, 이 가운데 일반 농경지 및 기타용지(농로, 수로 등)가 49.2 ha, 비닐하우스 시설의 면적은 68 ha에 해당한다. 비닐하우스 면적 가운데 금번 연구에서 수막 관정 비율인 60.3%를 적용하면 수막재배 비닐하우스 시설은 41 ha로 추정(북방들 전체면적의 약 35%)된다(표 4-1).

표 4-1. 연구지역 재배시설 면적

(단위: 개소)

총면적 (ha)	일반 농지 및 기타 (ha)	비닐하우스 (ha)			비고
		소계	수막재배 비닐하우스	일반 비닐하우스	
117.2	49.2	68	41	27	35%

#### (나) 연구지역 지질

연구지역 지질은 시대미상의 호상편마암과 백악기 경상계 낙동층군 원지층, 이를 부정합으로 피복하고 있는 제4기 충적층으로 구분된다(그림 5-3).



비닐하우스 사진

항공사진

그림 4-1. 연구지역(북방들) 사진

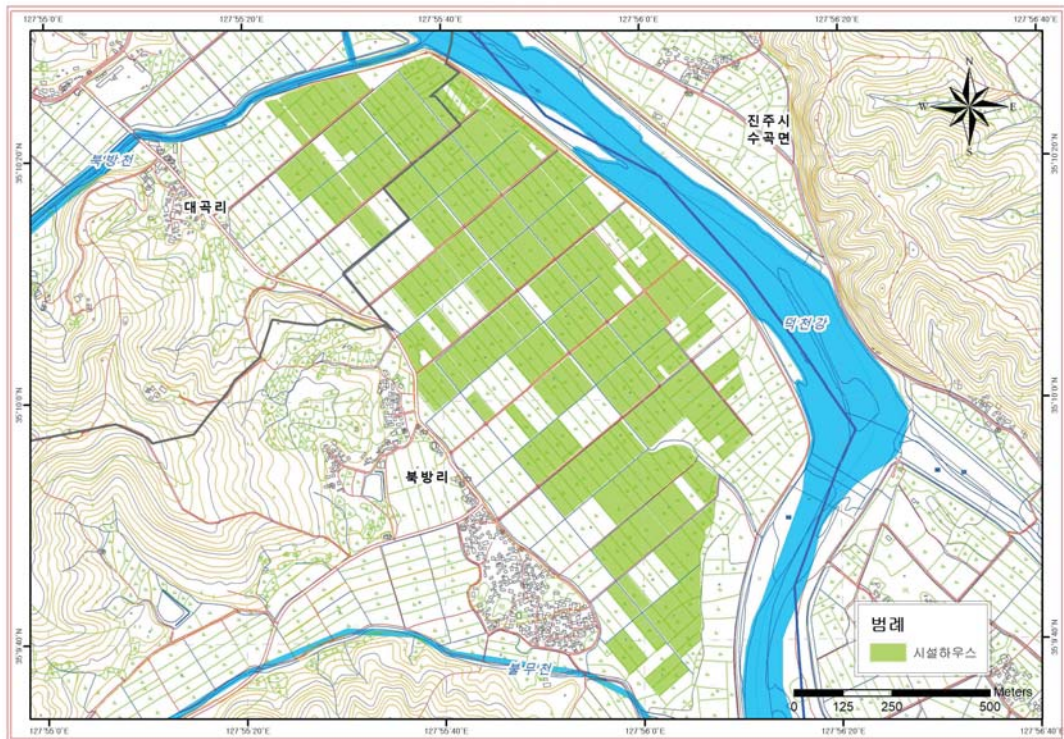


그림 4-2. 연구지역(북방지구) 지형도

신생대 제4기 총적층 ( $Q_a$ )  
 ~부정합~  
 중생대 백악기 퇴적암류(경상계 낙동층군 원지층) ( $K_{nw}$ )  
 ~부정합~  
 시대미상 호상편마암 ( $gn_{me}$ )

그림 4-3. 연구지역 지질계통도

### ① 호상편마암

호상편마암의 엽상구조는 흑운모 편마암 및 우백 화강편마암과 일치하며, 곳에 따라 우백 화강편마암으로 점이하며, 본 암체 내에서도 국부적으로 우백 화강편마암의 소암체를 볼 수 있다(그림 4-4). 호상편마암은 대체로 호상구조를 나타내고 보통 중립질이며 치밀한 암상을 보인다. 유색광물로는 세립의 흑운모가 있고 보통 소량의 자류석을 함유한다. 현미경관찰에 의하면 본 암은 주로 미사장석, 석영, 사장석 및 흑운모로 구성되어 있고 자류석 및 자철석이 소량 함유된다. 대체로 화강암질 조직을 보여주며 입자들은 모두 자형을 띤다. 미사장석은 가장 많이 함유되어 있는 광물로서 그리디론 쌍정을 보여주며, 작고 둥근 석영의 잔류물을 포함한다. 석영은 대개 둥근 형태를 이루고 있으며 파상소광을 보인다. 석영입자들은 보통 다른광물 입자 사이에 존재하지만 때로는 미사장석, 사장석, 자류석등의 입자 가운데 포함된다. 사장석은 석영 및 미사장석에 의하여 소량 함유되어 있으며, 알바이트 쌍정을 보여주고 미사장석에 의하여 교대된 조직을 드물게 보인다. 흑운모는 미세한 입자로 되어 있으며 때로는 큰 사장석 입자주변에 미세한 석영 및 사장석 입자가 밀집된다.

### ② 백악기 퇴적암류 (경상계 낙동층군)

백악기 퇴적암류(경상계 낙동층군 원지층)는 편마암과 편암으로 되어 있는 변성암류를 부정합으로 덮고 있다(그림 4-4). 원지층의 기저부는 함력 조립질 사암으로 되어 있으며 최대 1 m까지의 자갈(礫)을 함유하기도 하나 5cm 내외의 길(徑)을 가진 것이 태반이다. 전혀 자갈(礫)을 포함치 않고 조립질 사암으로 변하는 곳, 자갈(礫)이 50%에 달하며 역암으로 변한 곳이 간혹 있다. 기저부의 자갈(礫)은 유백색 규암, 회색 규암, 유백색 맥석영, 우백 화강편마암, 화강암질 편마암 등을 주로하며 흑색의 황반암, 세립질 복운모 등의 자갈(礫)을 간혹 함유한다. 원지층의 층서는 밑으로부터 위로 기저의 함력 사암층 6m, 조립 아르코오즈 사암 약 100m, 회색 중립 사암 50m, 회색 세립질 사암 200m 및 회색세일 350m로 되어 있다. 사암 중에는 회색세일이 간간히 개재되어 호층을 이루는데 조립질인 부분에서는 세일의 층후가 사암층의 두께(厚)보다 작으며 세립질 사암 중의 세일층의 두께는 증가하여 사암층 보다 두껍다. 세립질 사암층 중에는 세일의 개재가 거의 없으며 상부로 향하여 세일로 점이한다. 세일층 상위에는 두께 약 0.3m 내외의 함회색 석회암층이 덮여 있는데 이는 전지역을 통하여 거의 같은 두께를 유지하면서 연속된다.



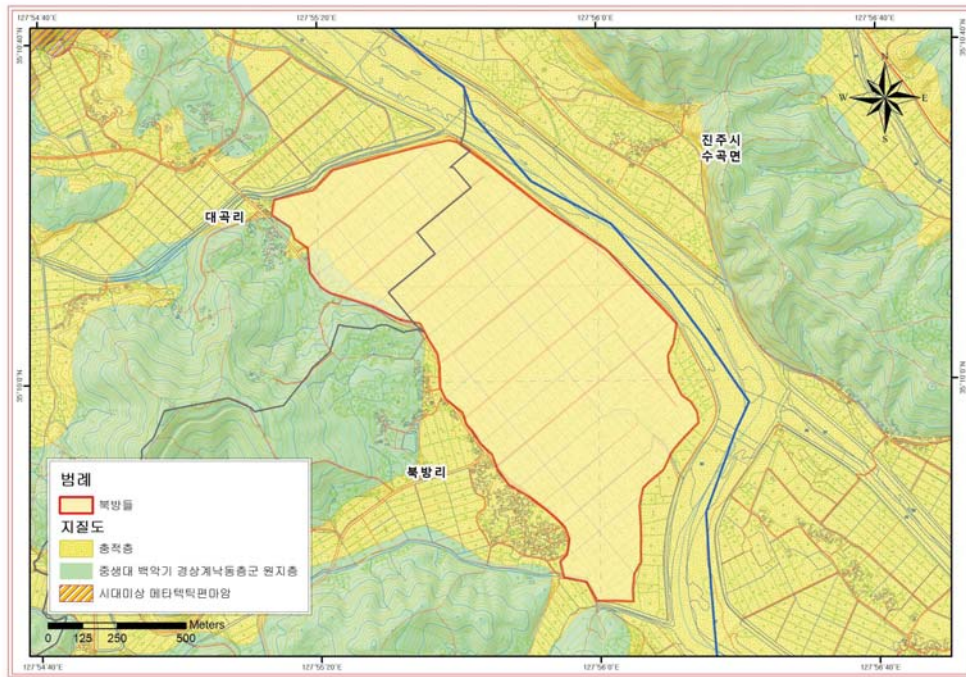


그림 4-4. 연구지역 지질도 (출처 : 한국지질자원연구원 지질정보서비스)

#### (다) 연구지역 기상

기상청 진주관측소의 1991년 1월 부터 2020년 12월까지 총 30년간의 강수량 자료를 분석한 결과, 진주시의 연평균 강수량은 1,517.8 mm/년으로 분석되었다(그림 4-5). 연간 최소 강수량은 2017년 766.7 mm/년, 연간 최대 강수량은 2003년 2,151.2 mm/년으로 나타난다. 금회 사업지구인 하동군 옥종면 북방리는 지방하천인 덕천강에 의해 형성된 충적평야 농경지역임. 하절기에는 북태평양 고기압 세력과 오츠크 해양에 중심을 둔 해양성 한 대 고기압 세력으로 인해 장마전선이 형성되어 7~8월에 집중호우(6~8월 강수량 합 783.3 mm/3개월, 연평균 강수량의 51%)를 동반한 태풍이 잦고 겨울에는 북서계절풍이 발달하여 추운 날씨가 계속된다. 매년 동절기(12~2월)에 겨울철 하우스 시설의 수막재배로 인해 강수량이 부족하게 나타났으며, 동절기 강수량은 연평균 강수량(1,517.8 mm/년)의 약 5%(74.4 mm/2개월) 수준에 불과하다. 특히, 2014년 1~2월 기간, 강수량의 급격한 감소(기간 중 강수량 약 23 mm/2개월)는 겨울철 하우스 시설의 보온을 목적으로 수막시설을 설치하여 지하수를 열원으로 사용하는데 많은 애로사항을 초래하였다. 기온자료는 하동군 통계연보(2020)의 자료를 이용하였으며, 연도별 평균기온은 거의 일정하나 약간의 상승의 양상을 보인다(그림 4-6).

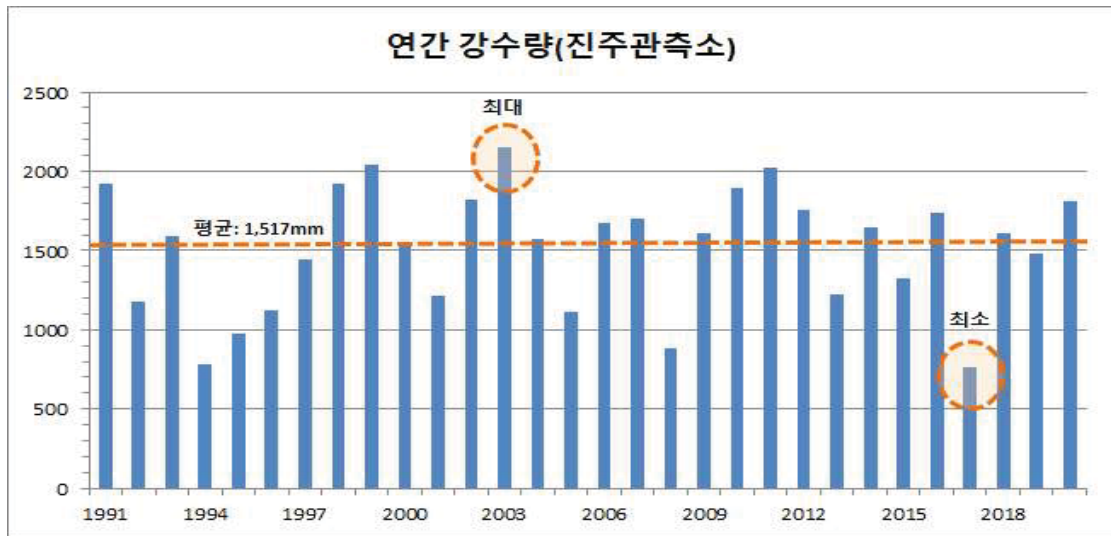


그림 4-5. 진주관측소 연간 강수량 (단위 mm/년)

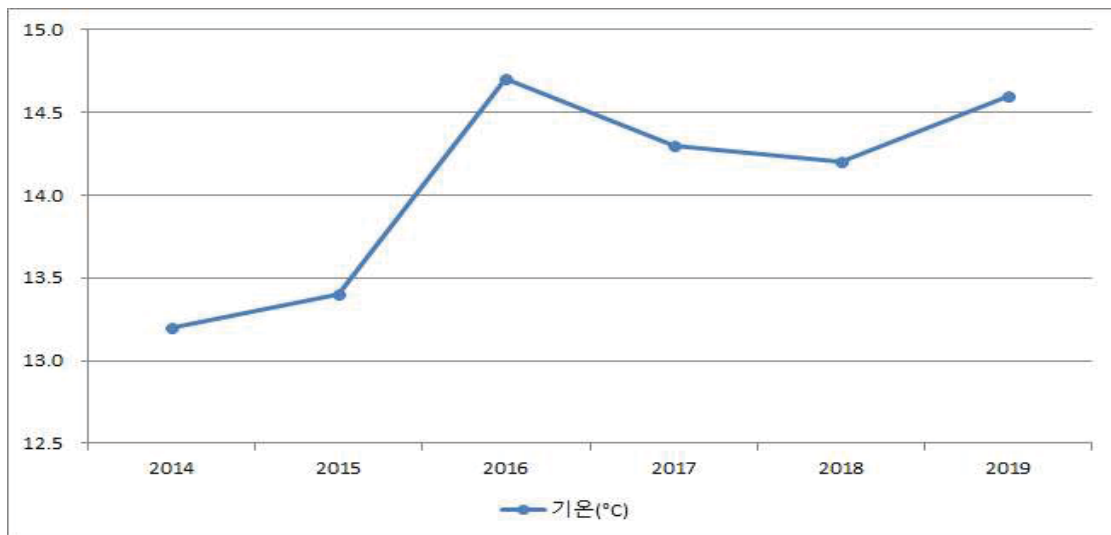


그림 4-6. 진주관측소 연간 기온(단위 °C)

## (2) 기후변화 시나리오

### (가) 대표농도경로 시나리오

국가 간 기후변화 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)에서 2013년 제5차 평가보고서 발표 당시 전 지구 기온은 산업화 이전과 비교했을 때 100년 동안 0.78°C가 상승하였으며 최근 발표된 IPCC 제6차 평가보고서에 따르면 약 10년 사이에 0.31°C가 올라 총 1.09°C가 상승했다는 결과가 나온다. IPCC는 5차 보고서를 통해 새로운 온실가스 농도 전망기법으로 대표농도경로(Representative Concentration Pathways; RCP)를 사용하였으며 기상청과 국립기상연구소는 이를 기초로 2100년까지의 한반도 지역 기후변화 예측자료를 생산하였고, 특히 남한 지역을 대상으로 1 km 공간해상도의 상세 지역기후 예측자료(월별, 일별 강수량 및 기온)를 산출하였다. RCP 시나리오는 미래 기후예측을 위한 필수 입력조건인 대기 중 온실가스 농도의 미래 변화를 추정하여 미래 기후를 전망함. 본 예측모델은 크게 4가지 기후변화 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5)를 제시하였다(표 4-2, 그림 4-7). RCP 2.6는 인간활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우를 토대로 작성된 시나리오로서, 20세기말 대기중 이산화탄소 농도를 392 ppm으로 할 경우, 2100년에 420 ppm으로 미량 증가함을 전망하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 경우를 토대로 한 시나리오이며, 대기 중 이산화탄소 농도가 2100년에 541 ppm에 도달하는 것을 전망하였다. RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 어느정도 실현된 경우를 의미하며, 대기 중 이산화탄소 농도가 2100년에 670 ppm에 도달하는 것을 전망하였다. RCP 8.5는 온실가스를 완화하기 위한 노력없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출하여, 2100년에 대기 중 이산화탄소 농도가 940 ppm에 도달하는 것을 전망하였다.

표 4-2. 시나리오별 대기 중 이산화탄소 농도 예측

시나리오	2100년 농도	경로형태
RCP 8.5	940 ppm	상승
RCP 6.0	670 ppm	안정
RCP 4.5	540 ppm	안정
RCP 2.6	420 ppm	상승 후 감소

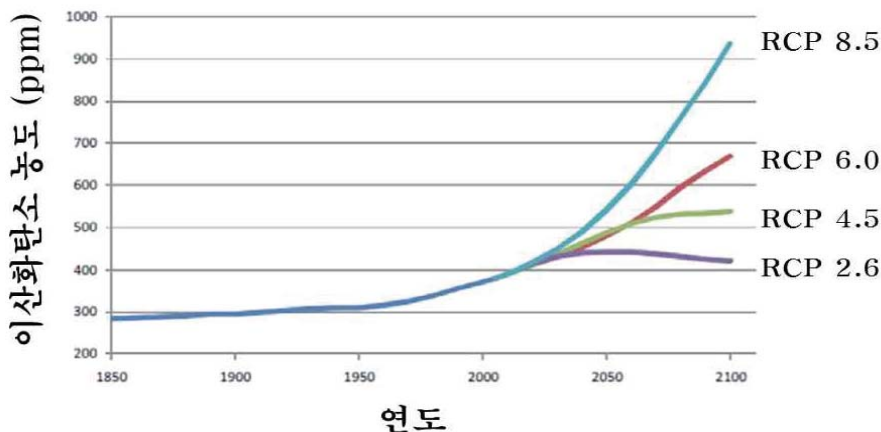


그림 4-7. RCP 시나리오별 이산화탄소 농도 예측

## (나) 한반도 기후변화 시나리오

기상청(2012)에서는 이 가운데 2가지 시나리오(RCP 4.5(중배출) 및 8.5(고배출))를 기준으로 미래 한반도 기후변화를 예측하였고, 각 시나리오별 1 km 공간해상도의 미래 강수량 및 기온 자료를 일반인에게 공개하였다. 이에 따르면, 미래 기후변화로 인해 강수량의 증가가 예측되며, 강수의 강도 또한 증가할 것으로 예상된다. 그러나 연강수일수는 오히려 감소되어 높은 강도의 우기 사이에 길고 혹독한 건기가 빈발할 것으로 예상되며, 기온의 증가로 인해 증발산량 또한 증가할 것으로 전망하였다(이진영, 2012). 강수량의 경우, 현재 한반도의 연평균(1981~2010년) 강수량 1,308 mm 대비, RCP 4.5 시나리오에서는 2100년 1,564 mm, RCP 8.5 시나리오에서는 1,549 mm 로 증가할 것으로 전망하였다. 연평균 기온은, 현재 한반도의 연평균(1981~2010년) 기온 11.0 °C 대비, 2100년에는 RCP 4.5 시나리오 기준 2.8 °C, RCP 8.5 시나리오 기준 5.3 °C 증가할 것으로 전망하였다. 2100년에는 아열대 기후구가 한반도 이남지역으로 북상할 것으로 전망하였다. RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 따른 1 km 해상도 자료는 모두 기상청 기후변화정보센터(Climatic Change Information Center; CCIC) 홈페이지에서 내려받아 사용 가능하다.

## (다) 가뭄지수

가뭄지수는 가뭄정도를 평가하기 위해서 사용자가 이해하기 쉽도록 소수점 한자리 숫자로 표시된 객관적인 수치이다. 가뭄지수의 종류는 용수공급가뭄지수(WADI, water supply drought index), 표준강수지수(SPI, standardized precipitation index), 파머가뭄지수(PDSI, Palmer drought severity index), 작물수분지수(CMI, crop moisture index), 정상강수백분율(PN, percentile of normal precipitation) 등이 존재한다. PDSI는 세계적으로 널리 사용되는 가뭄지수로서, 대상지점의 실제 수분공급이 기후적으로 필요한 수분공급 보다 적은 기간이 지속되는 현상을 가뭄으로 정의한다. 즉, 수요-공급 개념을 바탕으로 수분부족량과 수분부족 기간의 함수로 나타낸 것이다(Palmer, 1965)(표 4-3).

SPI는 강수량의 부족에 의해 가뭄이 시작된다는 것에 착안하여 개발된 것으로, 특정한 기간(1, 3, 6, 9, 12개월)을 설정하고 기간별 강수 부족량을 산출하여 용수공급원에 미치는 영향을 분석한다(Mckee et al., 1993)(표 4-4). 단기간(주, 월)의 시간단위는 농업적 관심에 사용될 수 있고, 장기간(년)의 시간단위는 수자원공급관리 등에 사용될 수 있다. 본 과업에서는 상기 두 가지 가뭄지수를 이용하여 하동군 북방지구의 가뭄을 예측하였다.

### ① 파머가뭄지수(PDSI)

PDSI는 강수량, 기온 및 일조시간 등의 자료를 활용해서 월 열지수법(Thornthwaite and Mather, 1955)으로 잠재증발산량을 추정 후, 대상지역의 실제 강수량과 필요한 강수량의 차에 대한 계산을 통해, 실제 수분공급이 기후적으로 필요한 수분공급보다 많고 적음의 기준으로 가뭄상태를 평가한다(강부식, 2008; 기상청, <http://kma.go.kr>). PDSI는 단기간의 습윤상태에 영향을 받지 않아 장기간의 가뭄정도를 정량적으로 분석하는데, 시간 척도가 9~12개월로 고정되어 있어(Guttman, 1998) 다양한 시간 척도의 가뭄 영향 분석이 불가능한 단점이 존재한다(이진영, 2012).

표 4-3. 파머가뭄지수(PDSI)에 따른 가뭄상태

파머가뭄지수	상태
4.0 이상	극한습윤 (Extremely wet)
3.0 ~ 4.0	심한습윤 (Very wet)
2.0 ~ 3.0	보통습윤 (Moderately wet)
1.0 ~ 2.0	약한습윤 (Slightly wet)
-1.0 ~ 1.0	정상상태 (Near normal)
-2.0 ~ -1.0	약한가뭄 (Mild drought)
-3.0 ~ -2.0	보통가뭄 (Moderate drought)
-4.0 ~ -3.0	심한가뭄 (Severe drought)
-4.0 이하	극한가뭄 (Extreme drought)

② 표준강수지수(SPI)

SPI는 강수의 부족이 지하수, 저수지 저수량, 토양수분, 적설 및 하천 유량에 다른 영향을 미친다는데 착안하고, PDSI보다 습윤과 건조의 표현방법을 향상시키기 위하여 개발되었다. 일반적으로 토양 내의 수분함량은 강수에 즉각적으로 반응하는 반면 지표수 및 지하수는 상대적으로 장기간의 강수에 영향을 받는다. SPI는 강수량만을 입력자료로 사용하며, 강수의 확률분포를 정규화하여 표준화된 값을 제공하는 장점과 다양한 시간 간격에 따른 종류별 수자원의 이용가능성에 대한 가뭄의 영향을 반영할 수 있는 장점이 존재한다(McKee et al., 1993). SPI는 오로지 강수량만이 입력인자로 사용되기 때문에 증발산량의 영향을 해석하지 못하며, 통계분석상 30년 이상의 자료가 요구되는 단점이 존재한다(이진영, 2012).

표 4-4. 표준강수지수(SPI)에 따른 가뭄상태

표준강수지수	상태
2.0 이상	극한습윤 (Extremely wet)
1.5 ~ 2.0	심한습윤 (Very wet)
1.0 ~ 1.5	보통습윤 (Moderately wet)
-1.0 ~ 1.0	정상상태 (Near normal)
-1.5 ~ -1.0	보통가뭄 (Moderate drought)
-2.0 ~ -1.5	심한가뭄 (Severe drought)
-2.0 이하	극한가뭄 (Extreme drought)



표 4-5. SPI와 PDSI 가뭄지수 비교

구분	가뭄지수		비고
매우 가뭄	SPI	<-1.5	작물손실, 광범위한 물부족, 제한급수 고려 필요
	PDSI	<-3.0	
가뭄	SPI	-1.5 ~ -1.0	작물에 다소 피해 발생, 물 부족 시작, 자발적 절수 요구
	PDSI	-3.0 ~ -0.5	
정상	SPI	-1.0 ~ 1.0	식물생장에 충분한 강수량
	PDSI	-0.5 ~ 0.5	
습윤	SPI	>1.0	충분한 강수로 가뭄상황 없음
	PDSI	>0.5	

③ 가뭄예측 및 감시

기상학적 가뭄 예측을 위해, CCIC에서 제공하는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 대한 2000~2100년 월별 및 일별 기상자료(강수량, 기온)를 기상청 홈페이지에서 내려받아 활용할 수 있다. 월별 기상자료를 이용하여 PDSI와 SPI를 하동군 옥종면 북방리로 적용하여 미래가뭄 여부를 판단하였다. 기상학적 가뭄예측은 특정한 시기를 정하여서도 판단이 가능하도록 하였으며, 본 과업 지역인 하동군 옥종면 북방리 지역처럼 수막재배로 인하여 겨울철 지하수 이용이 많은 지역은 주로 겨울철(12~2월)에 대하여 가뭄여부를 검토하였다.

④ 가뭄예측 결과

북방지구는 비닐하우스와 벼농사, 우렁이 양식을 하고 있으며 비닐하우스는 대부분 수막하우스로 주재배 작물로는 딸기 등이 있다. 북방 지구는 시설원예 농업 수막재배 중심이기에 해석기간을 2011년~2051년의 12월~2월 기간만을 대상으로 10년 단위로 가뭄지수를 산정하였다. 대표농도경로(RCP) 시나리오 RCP 4.5(중배출)와 RCP 8.5(고배출) 기준으로 산정된 미래 한반도 기후변화 예측자료(1km 공간해상도의 강수량과 기온자료)를 활용하여 파머가뭄지수(PDSI)와 SPI 3개월 기간 해석을 통한 표준강수지수(SPI)를 산정하였으며, 가뭄산정 결과의 신뢰도를 높이기 위해 PDSI와 SPI3이 공통으로 가뭄 및 극심가뭄으로 나타나는 개월수만 재고려하였다. 가뭄산정결과 RCP4.5 시나리오에 의한 가뭄예측은 2031~2041년에 7회가 산정되어 다른 10년단위보다 많은 빈도수를 보이며, RCP8.5 시나리오에 의한 가뭄예측은 2031~2041년에 가뭄11회로 높은 빈도수가 나타나고 있으며, 특히 2022~2031년에 극심가뭄 1회가 분석되었다(표 4-6, 그림 4-8).

표 4-6. 가뭄지수 산정을 통한 가뭄예측 (정상은 정상 혹은 습윤이 공통적으로 산출된 경우)

구분	RCP 4.5 시나리오 가뭄예측(개월)			RCP 8.5 시나리오 가뭄예측(개월)		
	정상	가뭄	극심가뭄	정상	가뭄	극심가뭄
계	57	18	-	55	24	1
2011-2021	17	4	-	14	3	-
2022-2031	13	2	-	16	7	1
2031-2041	12	7	-	9	11	-
2041-2051	15	5	-	16	3	-

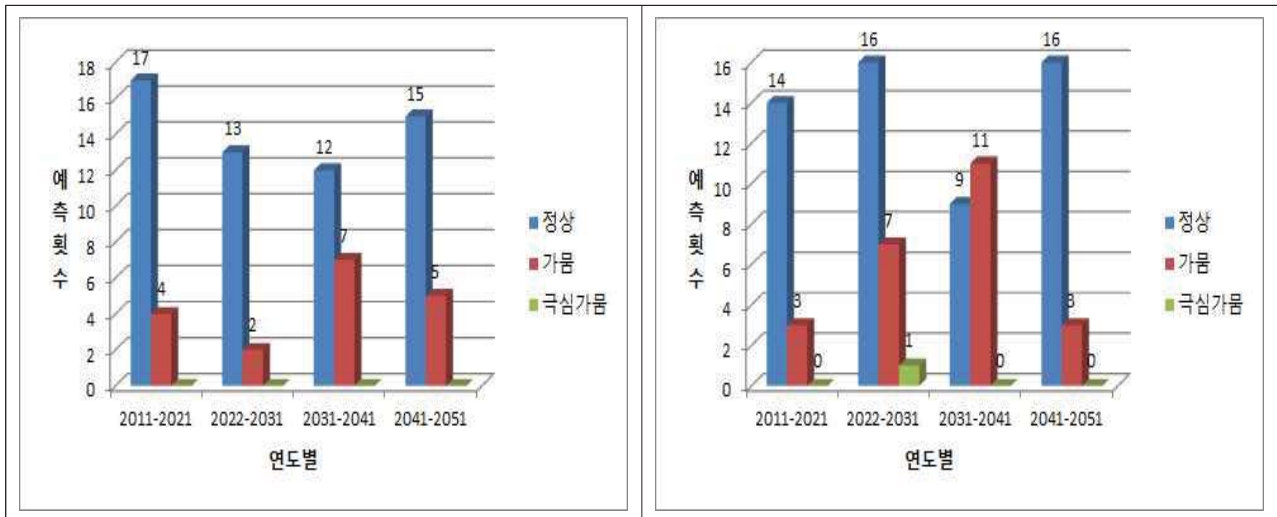


그림 4-8. 가뭄예측 (좌 : RCP 4.5결과, 우: RCP 8.5결과)

약 10년 단위 가뭄발생예측 빈도(개월)를 앞서 살펴보았다면, 가뭄발생이 12~2월 강우부족에 따른 수막재배에 대한 해당여부를 확인하기 위하여 기간별 지속성을 검토하였다(표 4-7). RCP4.5 시나리오에 대한 파머가뭄지수(PDSI)와 표준강수지수(SPI, 3개월)산정 결과를 비교분석하여 두 지수 모두 가뭄 혹은 극심가뭄인 월을 구분하고 시기의 연속성을 고려한 결과 심각단계의 가뭄대비 기간은 2017~18년, 2040~41년으로 12~2월 간 모두 가뭄으로 나타났으며, 경계단계의 가뭄대비 기간으로는 2023년~24년, 2033년~34년, 2045~46년, 2032년으로 12~2월 중 2개월이 가뭄으로 나타났고 관심 및 주의단계로는 2016년 2월, 2023년 1월, 2032년 2월, 2039년 12월, 2042년 1월로 분석되었다.

RCP8.5 시나리오에 대한 파머가뭄지수(PDSI)와 표준강수지수(SPI, 3개월)산정 결과를 비교 분석하여 두 지수 모두 가뭄 혹은 극심가뭄인 월을 구분하고 시기의 연속성을 고려한 결과 심각단계의 가뭄대비 기간은 2030년~31년, 2035년~36년, 2040년~41년으로 12~2월간 모두 가뭄으로 나타났으며, 경계단계의 가뭄대비 기간으로는 2018~19년, 2023년~24년, 2026~27년, 2032년~33년으로 4~6월 중 2개월이 가뭄으로 나타났고 관심 및 주의단계로는 2017년 2월, 2030년 2월, 2034년 2월, 2050년 1월로 분석되었다.

표 4-7. 북방지구 용수구역 가뭄예측

연도	월	RCP4.5		RCP8.5		연도	월	RCP4.5		RCP8.5	
		PDSI	SPI	PDSI	SPI			PDSI	SPI	PDSI	SPI
2011	12	-0.27	-0.08	-3.95	-0.44	2024	12	2	1.52	-0.7	0.35
2012	1	-0.27	-0.69	-3.6	0.14	2025	1	1.67	0.8	-0.68	0.05
2012	2	-0.15	0.02	-3.37	-0.95	2025	2	1.31	-0.48	-0.87	-0.47
2012	12	0.78	1.9	-0.25	-0.78	2025	12	-0.76	-0.13	-0.17	0.31
2013	1	-0.1	1.16	-0.36	-0.78	2026	1	-0.69	0.04	-0.21	0.55
2013	2	0.1	0.68	-0.45	-0.78	2026	2	-0.48	0.36	-0.31	-0.25
2013	12	0.95	0.06	-0.29	-0.6	2026	12	-1.56	-0.51	-0.55	-1.12
2014	1	0.8	0.43	-0.22	-0.66	2027	1	-0.97	0.58	-0.41	-0.1
2014	2	0.68	-0.32	-0.37	-0.68	2027	2	-0.82	1.32	-0.63	-1.12
2014	12	-0.06	0.38	-1.57	-0.38	2027	12	0.69	0.37	0.31	1.03
2015	1	0	0.13	-1.51	-0.49	2028	1	0.68	1	0.19	0.31
2015	2	-0.15	0.12	-1.3	-0.28	2028	2	-0.21	0.99	0.32	0.12
2015	12	-1.25	0.44	0.16	0.36	2028	12	-0.13	-0.27	0.41	0.42
2016	1	-1.25	0.03	0.29	1.04	2029	1	-0.22	-0.55	0.37	0.68
2016	2	-1.26	-1.33	-0.24	0	2029	2	-0.05	0.66	-0.31	0.46
2016	12	-2	-0.4	-0.44	-1.07	2029	12	0.18	-1.98	-2.1	0.01
2017	1	-1.72	-0.08	-0.46	-2.15	2030	1	0.02	-2.3	-1.97	-0.66
2017	2	-1.52	0.42	-0.68	-1.82	2030	2	0.31	-0.08	-2	-1.01
2017	12	-0.64	-1.12	-0.17	0.19	2030	12	-1.4	0.57	-3.04	-1.67
2018	1	-0.73	-1.76	-0.28	-0.84	2031	1	-1.41	0.58	-2.82	-1.75
2018	2	-0.83	-2.44	-0.43	-1.56	2031	2	-1.28	0.51	-2.67	-1.19
2018	12	0.3	0.06	-0.51	-0.95	2031	12	-1.63	0.59	-0.13	1.14
2019	1	0.42	1	-0.59	-1.87	2032	1	-1.55	-0.03	-0.14	0.01
2019	2	0.28	0.97	-0.77	-1.65	2032	2	-1.55	-1.38	-0.2	-0.02
2019	12	-0.03	-1	-2.77	1.1	2032	12	2.38	1.74	-3.06	-0.96
2020	1	-0.03	-0.24	-2.34	1.23	2033	1	2.09	0.72	-2.76	-1.32
2020	2	0.14	0.48	-2.37	0.65	2033	2	1.69	-0.53	-2.69	-1.32
2020	12	-2.55	-0.63	-0.3	0.5	2033	12	-1.93	-1.91	-1.3	0.51
2021	1	-1.97	0.9	-0.29	-0.05	2034	1	-1.88	-1.43	-1.29	-0.21
2021	2	-1.74	0.57	-0.14	0.22	2034	2	-1.79	-0.84	-1.42	-1.03
2021	12	-3.05	0.37	0.45	1.27	2034	12	-1.79	0.55	0.22	0.8
2022	1	-2.89	0.39	0.47	1.01	2035	1	-1.65	0.23	-0.12	-0.24
2022	2	-2.81	-0.15	0.31	0.75	2035	2	-1.4	-0.14	-0.13	-0.15
2022	12	-1.18	-0.59	1.01	1.98	2035	12	-2.4	0.85	-1.1	-1.71
2023	1	-1.21	-3.09	1.05	2.28	2036	1	-2.23	1.14	-1.1	-1.7
2023	2	0.1	-0.88	0.6	0.96	2036	2	-1.92	0.34	-1.27	-2.61
2023	12	-0.46	0.38	-0.45	-1.61	2036	12	0.9	0.88	6.18	2.44
2024	1	-0.53	-1.94	-0.52	-2.27	2037	1	0.67	0.49	5.46	1.4
2024	2	-0.54	-1.12	-0.62	-1.41	2037	2	1.33	1.85	5.07	1.41

※ PDSI와 SPI 가뭄지수

PDSI<-3, SPI<-1.5 : 극심가뭄(적색표기)

-3.0≤PDSI≤-0.5, -1.5≤SPI≤-1.0 : 가뭄(파랑색표기)

표 4-7. 계속

연도	월	RCP4.5		RCP8.5		연도	월	RCP4.5		RCP8.5	
		PDSI	SPI	PDSI	SPI			PDSI	SPI	PDSI	SPI
2037	12	-0.42	-0.23	-2.65	-0.22	2044	12	-0.14	0.76	-1.3	1.2
2038	1	-0.2	0.2	-2.49	0.05	2045	1	-0.26	0.1	-1.27	1.02
2038	2	-0.22	0.77	-2.12	0.19	2045	2	-0.038	-1.25	-0.87	0.28
2038	12	1.04	1.65	-3.32	0.03	2045	12	-2.83	-0.59	0.95	1.8
2039	1	0.83	0.6	-2.79	1.03	2046	1	-2.66	-2	1.03	2.28
2039	2	0.84	0.14	-2.65	-0.22	2046	2	-2.55	-2.11	0.63	1.91
2039	12	-0.86	-1.02	-2.36	-0.11	2046	12	-2.4	1.26	3.36	-0.74
2040	1	-0.73	-0.67	-2.25	-0.45	2047	1	-1.91	1.35	2.97	-0.53
2040	2	-0.71	-0.29	-1.83	0.37	2047	2	-1.72	1.21	2.48	-1.04
2040	12	-1.96	-2.02	-4.25	-1.09	2047	12	1.15	2.46	2.31	-0.57
2041	1	-1.91	-1.57	-3.91	-1.11	2048	1	1.05	2.16	2.17	-0.01
2041	2	-1.9	-1.04	-3.63	-1.09	2048	2	0.99	1.56	1.94	0.36
2041	12	-0.5	0.17	-2.94	0.11	2048	12	5.06	-0.84	-2.29	-0.23
2042	1	-0.54	-1.11	-2.61	0.15	2049	1	4.42	-0.87	-1.92	0.5
2042	2	-0.41	-0.59	-2.43	-0.49	2049	2	4.11	0.41	-1.51	1.26
2042	12	-2.3	-0.93	-0.24	0.42	2049	12	-1.35	-0.16	-2	-0.64
2043	1	-2.01	0.01	-0.32	0.48	2050	1	-1.29	0.05	-1.93	-1.28
2043	2	-1.8	-0.21	-0.4	-1.48	2050	2	-1.18	0.02	-1.7	-0.33
2043	12	0.56	1.05	-0.08	1.26	2050	12	0.8	0.2	-0.04	0.79
2044	1	0.59	1.07	-0.2	-0.07	2051	1	1.31	1.33	-0.13	0.94
2044	2	0.65	1.69	-0.2	-0.6	2051	2	-0.22	1.34	-0.16	-0.4

※ PDSI와 SPI 가뭄지수

PDSI<-3, SPI<-1.5 : 극심가뭄(적색표기)

-3.0≤PDSI≤-0.5, -1.5≤SPI≤-1.0 : 가뭄(파랑색표기)

### (3) 관정 현황 조사

#### (가) 용도별 관정 현황

지하수 관정은 비닐하우스를 하는 곳에 많이 밀집되어 있으며 절반 이상이 심도 6~30m 층적 관정으로 흡입모터를 설치하여 사용 중이며, 그 외 암반관정은 수중모터펌프에 모래여과기를 설치하여 사용 중이다. 청문조사 결과, 하천 부근의 시설재배단지는 층적관정 시설로 수막재배가 가능한 곳이 있는 반면 내륙으로 갈 수록 암반관정의 사용 비율이 높다. 금번 조사에서는 북방들 내 폭이 가장 넓은 구간에 위치하는 관정을 대상으로 선정하였고, 신규시설을 포함한 전체관정의 조사가 아니었으므로 북방들 내 전체관정 개소수와는 차이가 있다. 총 126공이 조사되었으며 신규 개발과 원상복구가 빈번하게 일어나는 지역적 특성상 신규시설이 75%가 넘는 것으로 조사되었다 (그림 4-9). 조사된 관정은 모두 농업용이며 세부 용도별로 원예용이 전체의 90% 이상 차지한다 (표 4-8).

표 4-8. 용도별 관정 현황

(단위: 개소)

계	원예용	양어장용	기타
126	119 (94.4%)	6 (4.8%)	1 (0.8%)

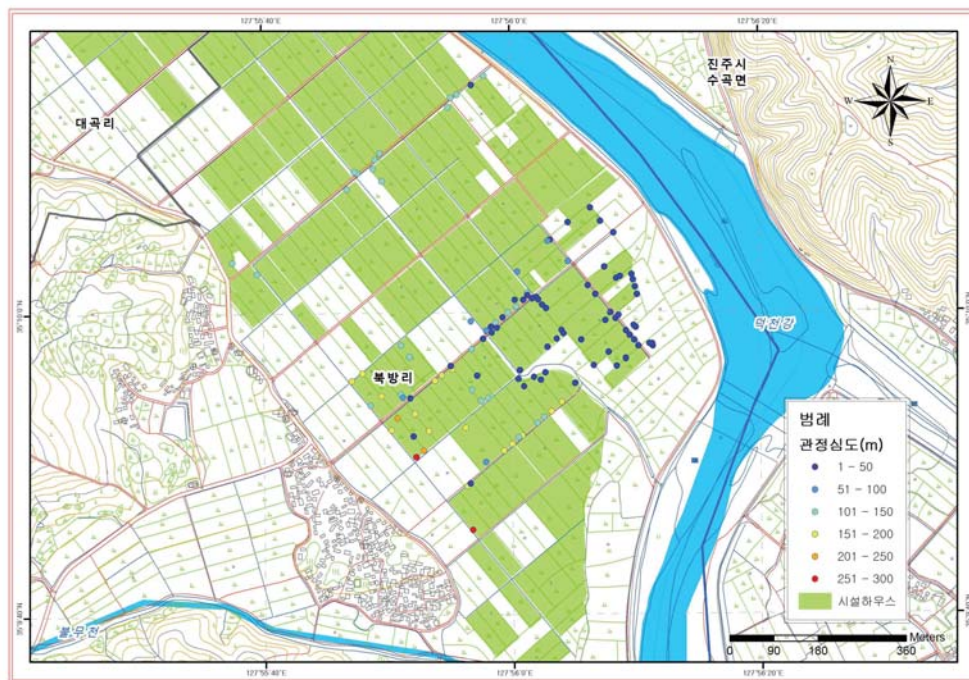


그림 4-9. 조사 대상 관정 (전체 관정 중 일부)



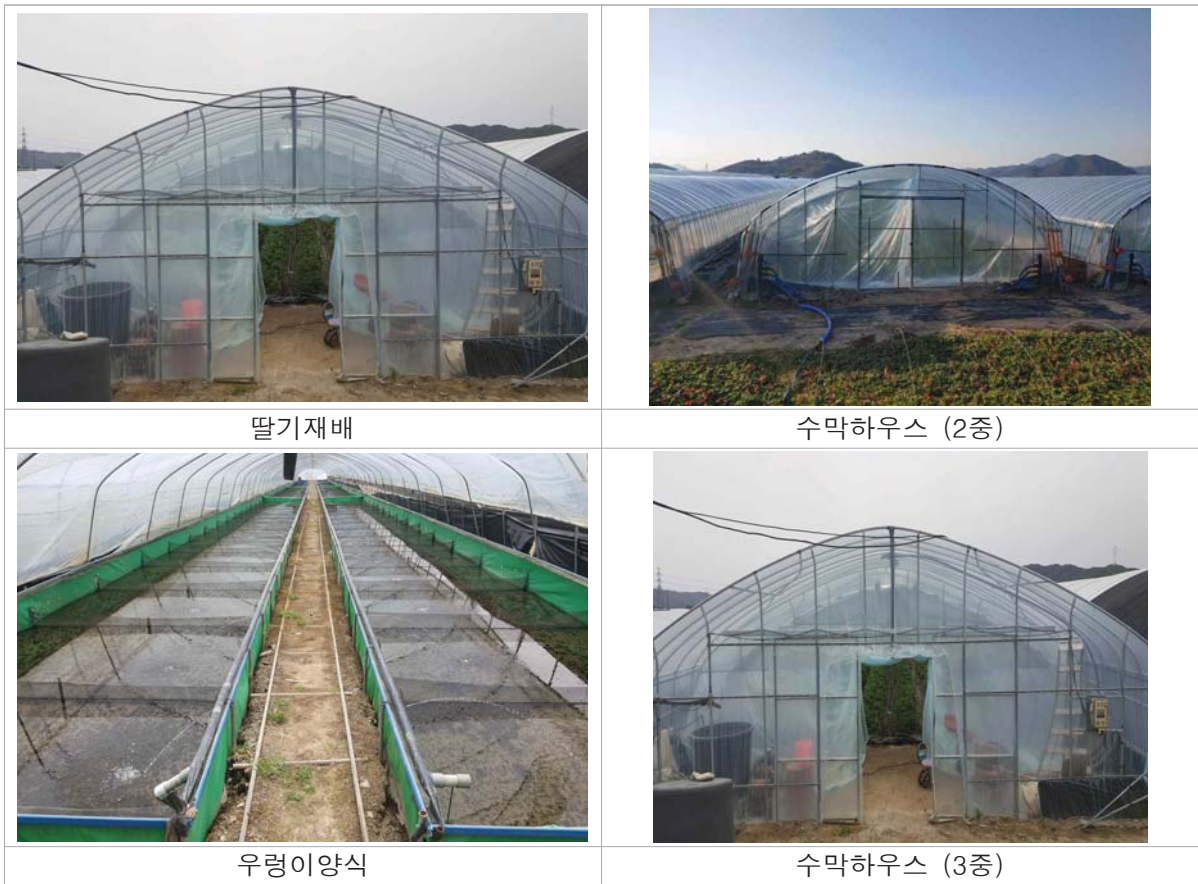


그림 4-10. 용도별 비닐하우스 전경

(나) 수막재배용 관정 현황

지하수 관정은 조사된 126개소 관정 중 수막재배 전용 관정은 76개소(60.3%)이며, 그렇지 않은 나머지 관정은 일반 농업용 관정이다(50공; 39.7%).

표 4-9. 수막재배용 관정 현황

(단위: 개소)

계	수막재배용	일반 농업용	기타
126	76 (60.3%)	50 (39.7%)	- (-%)

(다) 구경별 관정 현황

구경별 현황을 살펴보면 지름 150 mm의 관정이 61공(48.4%)으로 다수를 차지한다.

표 4-10. 구경별 현황

(단위: 개소)

계	30-50 mm	51-100 mm	125 mm	150 mm
126	51 (40.5%)	13 (10.3%)	1 (0.8%)	61 (48.4%)

(라) 심도별 관정 현황

심도별 현황을 살펴보면 50 m 이하의 심도 관정이 65공(51.6%)으로 다수를 차지하며, 덕천

강에서 멀어질수록 관정의 심도가 증가한다.

표 4-11. 심도별 현황

(단위: 개소)

계	심도(m)					
	50이하	51-100	101-150	151-200	201-250	251-300
126	65 (51.6%)	7 (5.6%)	34 (27.0%)	16 (12.7%)	2 (1.6%)	2 (1.6%)

(마) 기타

대부분 관정이 비닐하우스와 농로 사이의 좁은 토지 위에 설치되어 있어서, 상부보호공 등 관정 보호시설을 설치할 공간이 협소하다. 상부보호공을 설치한다 해도 농기계와의 충돌 등으로 제거 하는 실정이고, 모래가 섞여 나와 유량계 고장이 빈번하여 대부분의 관정시설에서 유량계도 부재한 실정이다.



그림 4-11. 연구지역 관정 외관

#### (4) 수막재배 용수량

##### (가) 수막재배 시설 지하수 이용량 분석

지하수를 이용한 수막재배는 겨울철에 온실이나 비닐하우스에 지하수를 살수하여 보온 또는 약간의 가온효과를 얻는 방식이다. 국내 적용 중인 대부분의 수막재배 방법은 한번 수막재배에 사용한 지하수를 수로를 통해 버리는 비순환식이 대부분이기 때문에 겨울철 지하수 이용량이 높은 편이다. 지하수 이용량 산정은 일반적으로 유량계, 전력소모량 등을 이용하여 추정하지만, 본 연구지역 관정은 대부분 유량계가 부재하고, 전력은 지하수 양수 목적 외로 사용되는 경우가 대부분 이어서 작물재배면적에 의한 지하수 이용량을 추정한다. 이봉주 등(2015)은 수막재배 단지의 지하수 이용량 추정 시 실측데이터를 기반으로 재배면적 1 ha 당 420 m<sup>3</sup>/day의 지하수 이용량을 제시하였고, 이를 연구지역 수막재배 면적(41 ha)의 지하수 이용량 추정에 적용하였다. 이 결과, 연구지역 겨울철 수막재배를 위해 양수·이용되는 지하수량은 17,220 m<sup>3</sup>/day 이며 수막재배기간을 11월 말부터 3월 초까지 약 100일 정도로 하면 약 1,722,000 m<sup>3</sup>/100-day의 지하수가 수막재배에 이용되는 것으로 추정하였다(표 4-12). 그 동안 보고된 유사면적 시설재배단지의 수막재배 지하수 이용량은 약 21,280~30,400 m<sup>3</sup>/day 으로 금번 연구 결과와 유사하였다(표 4-13).

표 4-12. 수막재배 시설 겨울철 지하수 추정 이용량

수막재배 시설 면적 (ha)	단위 이용량 (m <sup>3</sup> /day)	총 이용량 (m <sup>3</sup> /100-day)
41	17,220	1,722,000

표 4-13. 타 시설재배단지 수막재배 지하수 추정 이용량

수막재배 지하수 추정 이용량 (m <sup>3</sup> /day)				
진주월아지구 인공함양보고서 (2010)	진주시 농촌지하수관리사업 (2006)	윤육 외 (2012)	이봉주 외 (2015)	비교 (평균)
30,400	25,232	22,800	21,280	24,928

##### (나) 수막재배 관개용수 수요량 산정

지하수를 이용한 작물별 실제 관개용수 수요량을 산정하기 위해 먼저 북방지구 내 작물별 재배면적과 재배기간, 작물계수(crop coefficient), 잠재증발산량(potential evapotranspiration), 토지피복도 등의 자료를 활용하였다. 잠재증발산량(ET<sub>0</sub>)은 「진주」 기상관측소의 관측 이래 최근까지 (1970~2017) 일별 기후자료(평균기온, 평균풍속, 평균습도, 일조시간)를 FAO Penman-Monteith 식을 이용하여 계산하였다. 이 후, 북방지구에서 재배되는 작물(딸기)의 작물계수를 곱하고 재배면적으로 환산하여 작물증발산량을 계산하였으며, 이는 실제 작물이 필요로 하는 관개용수 수요량과 같다고 추정하였다. 작물계수는 작물의 증산과 토양의 증발을 복합적으로 포함한 개념으로 생육초기, 신장기, 중기, 후기 등 생육기간동안의 증발산량 차이를 기준작물 잔디(작물계수 1.0)와 비교하여 비율로 나타낸 값으로, 북방지구에서 재배하는 딸기의 작물계수는 미국 논문(Hanson, 2004)에서 제시한 작물계수를 활용하였다.



$$\text{작물 물 필요량(mm/day)} = \text{잠재증발산량} \times \text{작물계수}(K_c)$$

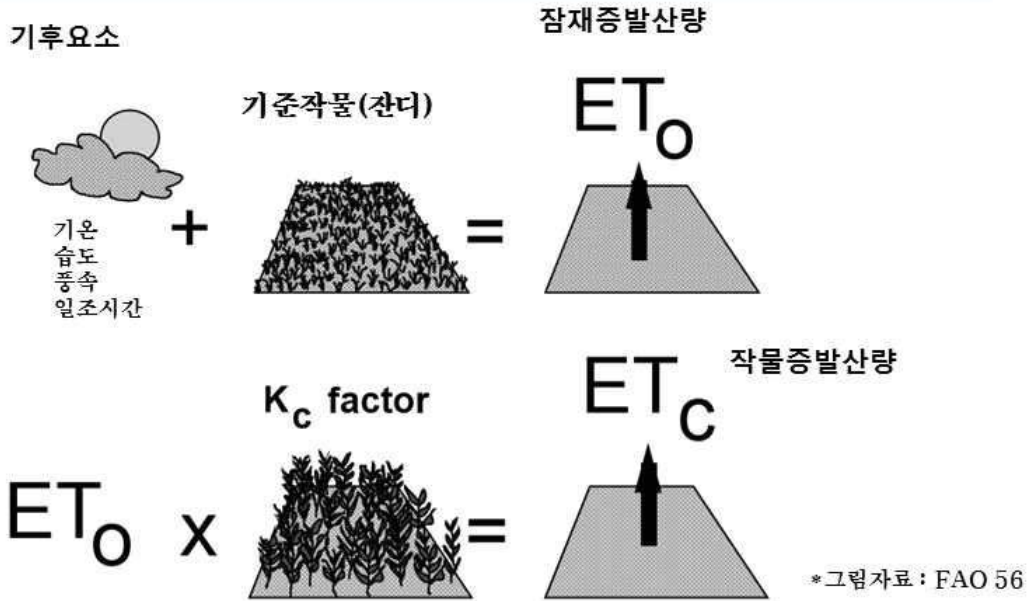


그림 4-12. 밭작물 수요량 분석 방법

표 4-14. 연구지역(TB) 밭작물 증발산량 산정에 이용된 작물계수

구분	1월 초순	1월 하순	2월 초순	2월 하순	3월 초순	3월 하순	4월 초순	4월 하순	5월 초순	5월 하순	6월 초순	6월 하순	7월 초순	7월 하순
딸기	0.15	0.21	0.30	0.41	0.52	0.60	0.64	0.66	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70

표 4-15. 연구지역(TB) 작물 증발산량 산정 결과

수요량(m³)	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	평균
딸기	21,400	27,700	29,700	13,600	37,900	12,800	5,000	32,200	58,724	88,216	32,724

최근 10년간 각 연도마다 딸기의 재배면적, 재배기간을 고려하고, 이 후 작물계수 값을 잠재 증발산량에 곱하여 작물 증발산량을 산정하였다. 이 결과, 밭작물 수요량(작물 증발산량)은 연도 별로 살펴보면 21.4천 m³/년(2008), 27.7천 m³/년(2009), 29.7천 m³/년(2010), 13.6천 m³/년(2011), 37.9천 m³/년(2012), 12.8천 m³/년(2013), 5.0천 m³/년(2014), 32.2천 m³/년(2015), 15.6천 m³/년(2016), 69.9천 m³/년(2017)으로 평균 32,724m³/년(90m³/일)로 산출되었다.

#### (다) 추가 지하수 필요수량 산출

##### ① 강우에 의한 지하수 함양량 산출

지하수관리기본계획(국토교통부, 2017)에서는 경상남도 지역을 편입하는 유역 6개 대권역과 20개 중권역을 기준유역으로 지하수위 수문곡선 분석방법으로 관측소별 지하수 함양을 산정하였다. 본 연구지역은 대권역 낙동강, 중권역 남강댐 유역에 속하며 적용 함양계수는 0.123(12.3%) 이

며, 지하수 함양량과 지하수 개발가능량은 아래의 식에 의해 산정하였다.

$$\text{지하수 함양량} = \text{지하수 함양계수} \times \text{강수량} \times \text{소유역 면적}$$

$$\text{지하수 개발가능량} = \text{지하수 함양계수} \times 10\text{년빈도 가뭄 시 강수량} \times \text{소유역 면적}$$

본 연구지역의 유역 면적은 총 117.2 ha 이지만 비닐하우스 총 면적(68 ha)를 불투수면으로 가정하면, 실제로 지하수 함양이 발생하는 면적은 약 49.2 ha (492,000m<sup>2</sup>)에 해당한다. 강수량은 인근 진주기상대의 최근 30년간의 평균 강수량(1,523.9 mm/yr)을 적용하였으며, 이 결과 산정된 연구지역 지하수 함양량은 92,345 m<sup>3</sup>/yr (253 m<sup>3</sup>/day)로 산출되었다. 진주기상대의 10년빈도 가뭄시 강수량(1,024.3 mm/yr) 자료를 이용하여, 수문순환계가 파괴되지 않고 지하수 장해를 일으키지 않는 범위 내에서 지속적으로 대수층으로부터 양수할 수 있는 지하수 개발가능량을 분석한 결과 61,984 m<sup>3</sup>/yr (170 m<sup>3</sup>/day)로 산출되었다.

### ② 하천으로부터 유도 함양량

연구지역 함양량은 강우 함양량 외에도 덕천강으로부터 유도함양되는 수량을 포함한다. 덕천강에서 유입되는 유도함양량은 Darcy 식에 의해 산출한다.

$$Q = K \times A \times \frac{dh}{dl}$$

연구지역 충적층의 평균 수리전도도(13.2 m/day, 2014년 밀양들보고서), 주 대수층인 사력층의 두께(7.3 m)와 제방의 길이(3,000 m), 수리경사(갈수기 6.9/500)를 이용하여 하천제방을 통해 유입된 유도함양량을 분석한 결과 약 3,989 m<sup>3</sup>/day로 산출되었다.

### ③ 내륙으로부터 지하수 유입량

연구지역에는 남서쪽 내륙으로부터 지하수가 유입되며 Darcy 식에 의해 산출한다. 연구지역 충적층의 평균 수리전도도(13.2 m/day, 2014년 밀양들보고서), 주 대수층인 사력층의 두께(7.3 m)와 외곽 길이(2,300 m), 수리경사(갈수기 6.9/500)를 이용하여 하천제방을 통해 유입된 유도함양량을 분석한 결과 약 3,058 m<sup>3</sup>/day로 산출되었다.



표 4-16. 진주기상대 월별 강수량 (www.kma.go.kr)

(단위 : mm)

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계
1991	47.6	44.8	125.2	157.6	64.4	237.5	535.4	403.4	244.2	0.3	15.7	44.8	1920.9
1992	20.5	28.6	82.3	165.5	132.6	47.3	182.7	175.4	247.4	16.8	20.4	53.9	1173.4
1993	36	68.8	65.2	22.8	160.6	236.2	204.5	600.8	31.8	50.4	84.4	33.9	1595.4
1994	26.8	32.7	41.3	116.3	171	43.1	43.6	154.2	11.6	90.2	43.3	10.8	784.9
1995	34.9	25.4	71.5	132.5	116.7	83.7	210.2	191.2	57.9	46.8	4.2	-	975
1996	27	4.7	152.8	84.3	69.9	299.6	176.6	123.1	49.3	36.8	75.8	22.9	1122.8
1997	11.6	11.2	48.7	95.7	168.4	233.2	387.3	231.7	13.9	1.2	171.6	70.3	1444.8
1998	47.3	46.3	66.6	187.4	168.7	333	199.7	511.5	275.2	69.6	16.3	1	1922.6
1999	32	31	156.4	95.6	174.2	197	466.9	438.5	345.2	92.8	15.4	-	2045
2000	24.2	0.2	23	50	68.7	123.6	379.7	484.7	316.1	26.1	50.1	0.5	1546.9
2001	58.9	80	15.5	48.5	41.8	323.5	266.6	137.1	107.3	82.6	11	43.5	1216.3
2002	55.1	8.6	100.7	152.1	150.6	81.7	300	760.1	116.5	52.1	7	32.6	1817.1
2003	30.4	57.5	58	235.5	293	259.6	481	343	321.1	10	53.6	8.5	2151.2
2004	0.1	78	42.6	129.8	161.5	243	229.5	348.5	213.6	12.2	85.1	31.1	1575
2005	11.7	43.6	85	102.2	90.9	113.5	273.6	297.3	54.8	9	31.5	0.6	1113.7
2006	28	30.8	14	140	284.5	268.6	630.9	106.6	99.5	39.5	20.1	11.5	1674
2007	2.8	60.7	96.7	35.8	97.9	54.5	245.7	506.5	471.4	96.5	-	32.5	1701
2008	46.1	9	36.3	68.5	108.5	337.6	93.6	100.4	36.2	35.2	11.3	2.9	885.6
2009	11.5	67.2	69.9	130.2	142.5	177.6	734.6	128.2	39.5	45	34.2	28.5	1608.9
2010	27.5	157.5	130.4	183.4	205.1	53.9	418.5	377.1	247	68.3	4.5	22.8	1896
2011	-	87.6	28.3	149.5	198.6	239.5	626.3	368.3	61.3	101.3	162.2	3.5	2026.4
2012	9.8	14.3	133.5	175	47.5	50.1	306.1	378.6	446.3	45	58.5	88.2	1752.9
2013	21.4	82.5	62	79.9	249.5	101	247.5	162	70.2	79.6	64.1	1.6	1221.3
2014	7.1	16.2	113.5	123.2	91.2	143.6	186.3	580.6	129.3	164.5	78.1	11.3	1644.9
2015	29.8	41.1	94.5	225.9	127.7	95.9	221.1	118.3	136.1	70	110.4	49.1	1319.9
2016	35.4	76.4	121	299.7	153.9	113.8	161	74.8	407.5	170.1	37	84	1734.6
2017	8.1	37.8	31.4	94.9	43.8	52	96	166.4	116.6	105.7	-	14	766.7
2018	29.9	30.8	179.2	127.8	94.3	207.7	240.8	212.7	201.6	224.1	27.5	29	1605.4
2019	13.5	43.5	42	114.6	132.3	243.7	234	65.4	352.2	177.4	21.5	41.5	1481.6
2020	105.7	46.1	41.1	67.9	110.1	234.2	587.5	356.7	200	28.6	25.6	9.2	1812.7
평균	29.0	45.4	77.6	126.4	137.3	174.3	312.2	296.8	180.7	68.3	47.9	28.0	1523.9
최대	105.7	157.5	179.2	299.7	293	337.6	734.6	760.1	471.4	224.1	171.6	88.2	3822.7
최소	0.1	0.2	14	22.8	41.8	43.1	43.6	65.4	11.6	0.3	4.2	0.5	247.6

④ 수막재배용 추가 지하수 필요수량 산정

연구지역 수막재배에 필요한 지하수 이용량은 약 17,220 m<sup>3</sup>/day, 일 평균 관개용수(딸기) 수요량 90 m<sup>3</sup>/day 임에 비하여 연구지역 지하수 함양량은 약 7,300 m<sup>3</sup>/day (강우 253 m<sup>3</sup>/day, 하천 3,989 m<sup>3</sup>/day, 내륙 3,058 m<sup>3</sup>/day)이므로 약 10,010 m<sup>3</sup>/day 과부족이 발생하였다. 향후 가뭄지수 분석 결과 2051년 까지 가뭄으로 인한 겨울철 지하수 부족 현상이 나타날 것으로 판단되는 기간이 증가함에 따라 지하수 인공함양사업을 통한 향후 가뭄에 대한 대비가 필요하다.

⑤ 기타

향후 지하수 유동모델링을 수행하여 지하수 수위변동 기반 정확한 지하수 함양량 및 과부족량 산정이 필요하다.

표 4-17. 수막재배 용도 지하수 과부족량 산출

(단위 : m<sup>3</sup>/day)

수막용수량 (m <sup>3</sup> /day)	밭(딸기) 수요량 (m <sup>3</sup> /day)	실이용가능량 (m <sup>3</sup> /day)				과부족량 (m <sup>3</sup> /day)
		소계	강우 함양량	하천 유도함양량	내륙 유입량	
17,220	90	7,300	253	3,989	3,058	10,010

(5) 지하수 수질분석

(가) 1차 시료 분석

2020년 5월에 연구지역의 지하수 및 지표수의 수질분석을 위해 등분포에 의한 지하수시설 (층적, 암반) 시료 7개, 양배수장 하천수 시료 2개, 덕천강 시료 1개 등 총 10개 지점의 수질 시료를 채수하였다. 채수된 시료는 농업용수 기준으로 수질검사 공인분석기관에 의뢰하여 농업용수 기준 14개 항목 분석을 실시하였고, 이 결과 모든 시료는 농업용수로 적합하였다.



그림 4-13. 연구지역 수질시료 채수



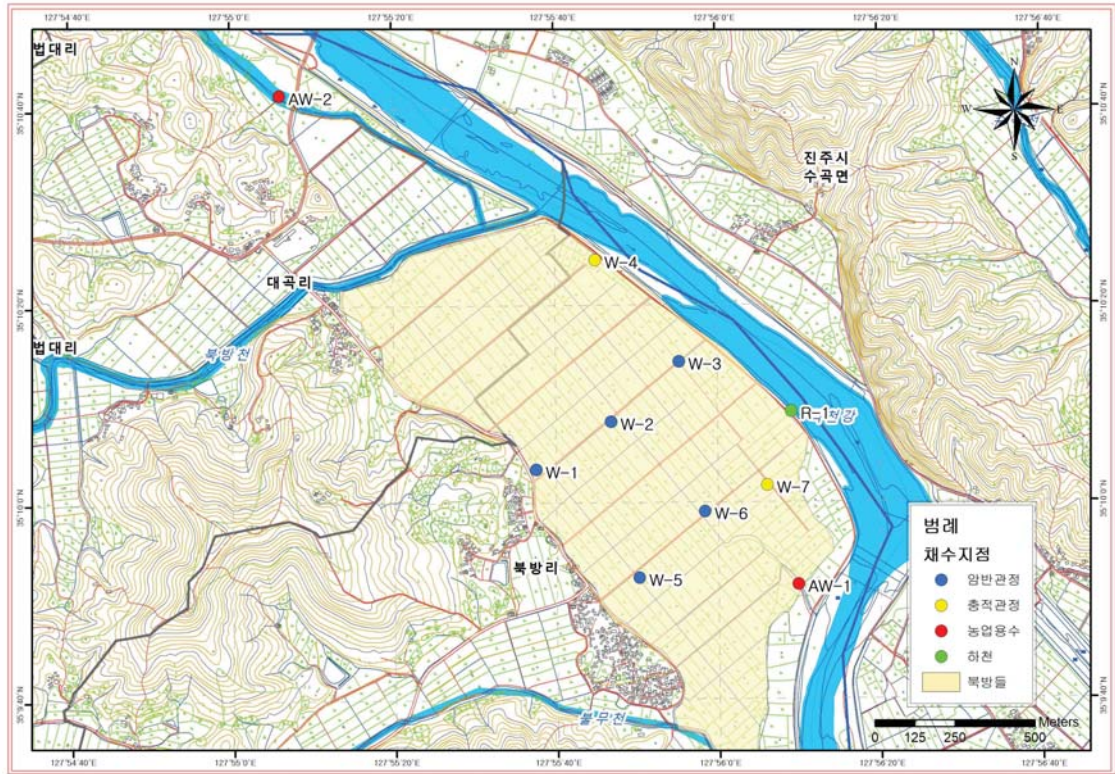


그림 4-14. 연구지역 수질시료 채수 지점도 (1차, 2020.05)

표 4-18. 농업용수 수질기준 시료분석 결과 (1차, 2020.05)

검사항목	기준치	지하수							하천수		덕천강
		W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W-6	W-7	AW-1	AW-2	
수소이온농도	5.80 ~8.50	7.1	7.5	8.1	7.8	8	7.8	7.1	7.7	7.4	7.6
질산성질소	20.0mg/l 이하	4.7	2.1	9.4	2	1.6	9.3	2.5	1.1	0.8	0.9
염소이온	250mg/l 이하	3.8	6.6	8.1	3.8	6.4	7.8	3.9	2.7	2.2	2.6
카드뮴	0.01mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
비소	0.05mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
시안	0.01mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
수은	0.001mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
다이아지논	0.02mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
파라티온	0.06mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
페놀	0.005mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
납	0.1mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
크롬	0.05mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
트리클로로에틸렌	0.03mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
1,1,1-트리클로로에탄	0.3mg/l 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
기준초과항목		없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음

## (나) 2차 시료 분석

### ① 시료채수

- 2차 시료채수 : 2020년 10월
- 시료개수 : 20개 시료 (지하수 19개 시료, 용배수로 하천수 1개 시료)
- 분석항목
  - 음이온 : Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>, Br
  - 양이온 : Na, K, Ca, Mg
  - 금속 : Fe, Mn, Al, Pb, Zn
  - 동위원소 : 질소동위원소 <sup>15</sup>N
  - 농업용수 수질기준 14개 항목 : Cd 등 14개 항목

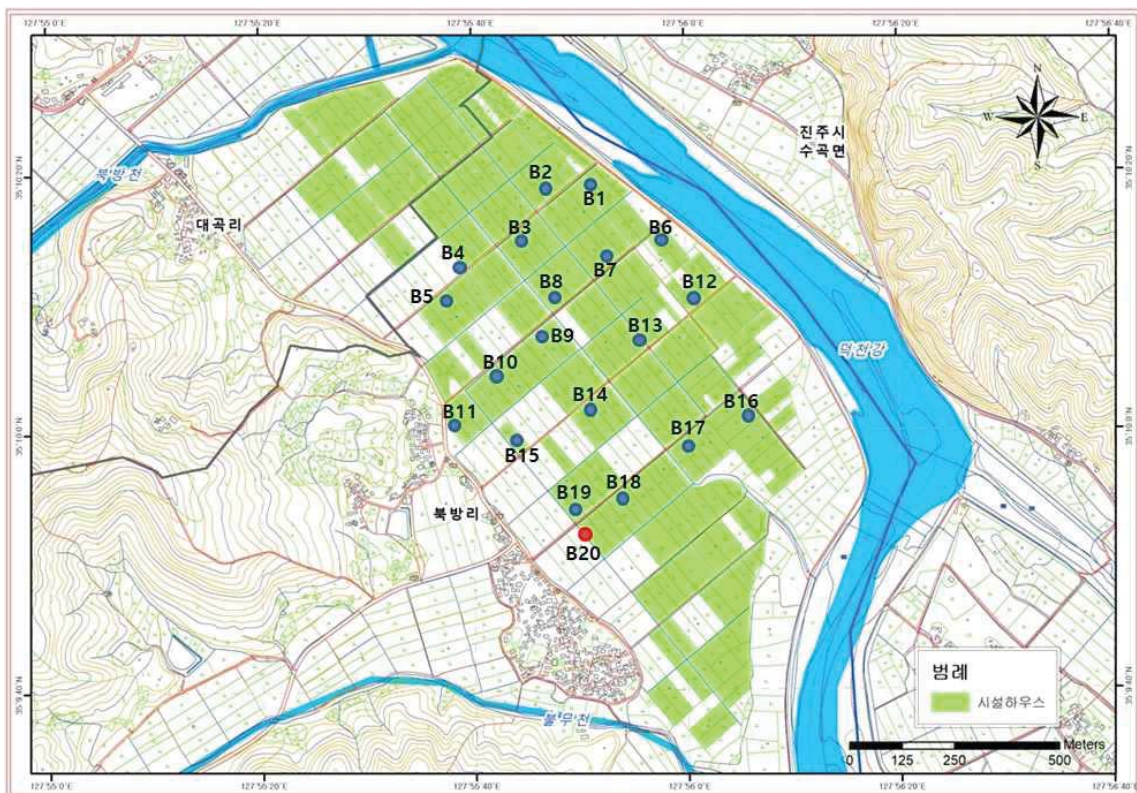


그림 4-15. 연구지역 수질시료 채수 지점도 (2차, 2020.10)

### ② 분석방법

- 현장수리물리특성(pH, EC, 수온)
  - 현장에서 직접 측정
  - 측정장비 : Thermo ORION Star Series A-329
- 전처리
  - 0.20 $\mu$ m 여과지로 시료채수 즉시 여과하여 부유물 제거, 미생물 영향 제거
  - 음이온 및 중탄산 : 공기가 안들어가도록 현장에서 밀폐 후 4℃이하 냉장보관
  - 양이온 및 중금속 : 농축질산을 2-3방울 떨어뜨려 pH 2 이하로 보관
  - 동위원소 및 농업용수 수질시료 : 냉장보관
- 분석장비
  - 음이온 : IC (Dionex, ICS-1100 Automated Dual Column IC)



- 중탄산( $\text{HCO}_3$ ) : 0.01N HCl을 이용하여 적정
- 양이온 및 금속 : ICP-OES (Perkin-Elmer, Optima 8300DV)

### ③ 수질시료의 현장수리물리특성

20개 관정에서 관측한 천부 지하수의 시기별 수질화학 분석 결과, 전하균형 범위가  $\pm 5\%$  이내로 나타나 분석의 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다. 전해질 내 용존 이온세기를 나타내는 전기전도도(EC; Electrical Conductivity)의 경우 북방들 중심축을 기준으로 하천방향과 내륙방향의 시료의 측정값의 차이가 크게 나타난다(그림 4-16). 북방들 중심축 기준 덕천강 방향 천부 충전관정 지하수 시료는 용존이온의 세기가 상대적으로 큰 278~490  $\mu\text{s}/\text{cm}$  범위의 (평균 398  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) 전기전도도를 보인다. 북방들 중심축 기준 내륙 방향 충전관정 지하수 시료는 용존이온의 세기가 상대적으로 적은 100~453  $\mu\text{s}/\text{cm}$  범위의 (평균 232  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) 전기전도도를 보인다. 용존 이온의 총 함량(TDS)을 지시하는 전기전도도가 하천변에 크게 나타나는 이유는 충전층 내로 많은 염류가 유입됨을 지시하며, 이는 농업활동으로 인한 침출수가 유입된 것으로 판단된다. 반면 내륙방향 전기전도도가 작게 나타나는 이유는 관정의 심도가 상대적으로 깊어, 전기전도도가 낮은 암반지하수 유입 영향으로 판단된다.

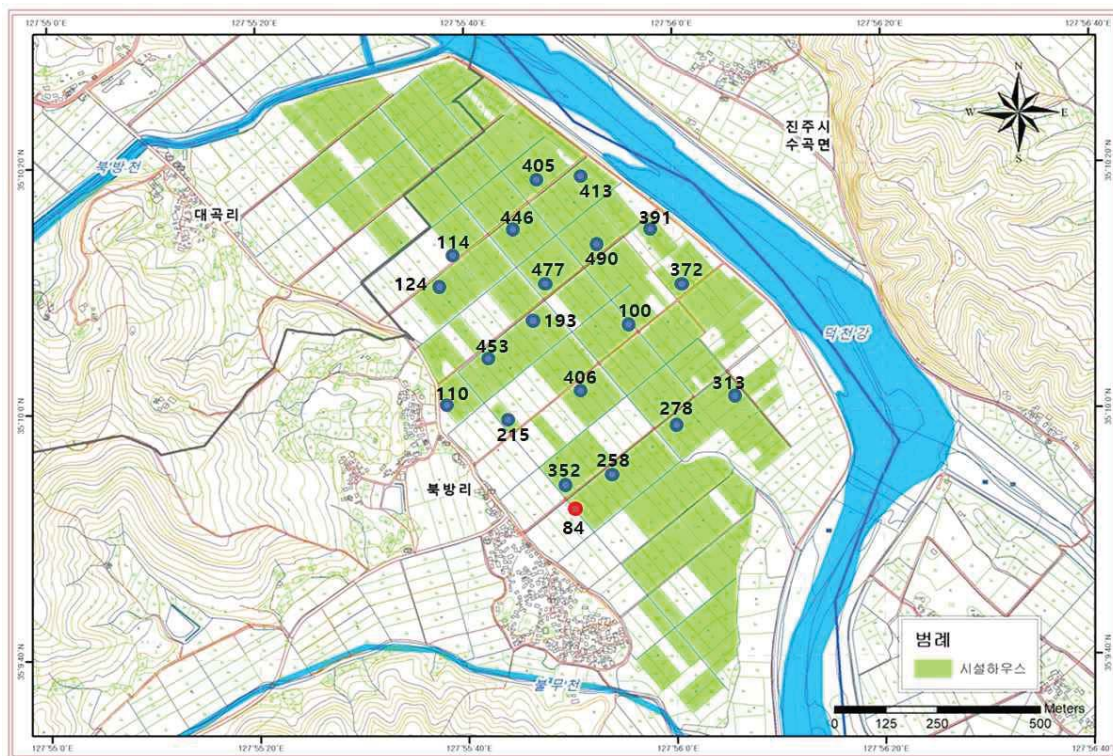


그림 4-16. 연구지역 수질시료 전기전도도( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 분포 (2차, 2020.10)

pH도 마찬가지로 북방들 중심축을 기준으로 하천방향과 내륙방향의 시료의 측정값의 차이가 나타난다(그림 4-17). 북방들 중심축 기준 덕천강 방향 천부 충전관정 지하수 시료는 pH 6.17~8.96 범위 (평균 7.21)이다. 북방들 중심축 기준 덕천강 방향 천부 충전관정 지하수 시료는 pH 5.87~8.02 범위 (평균 6.77)로서 하천변에 비해 약간 낮은 수치를 보인다. 천부 지하수의 pH는 매질의 성분과 지표에서 유입된 물질의 성분 따라 값이 변할 수 있는데(Bass-Becking et al., 1960), B20(용배수로 하천수) 시료의 pH가 7.62임을 살펴볼 때, 약알칼리성의 하천수의 유입을 많이 받는 하천변 지하수 시료와 그렇지 않은 내륙 지하수 시료의 차이 때문으로 추정된다.

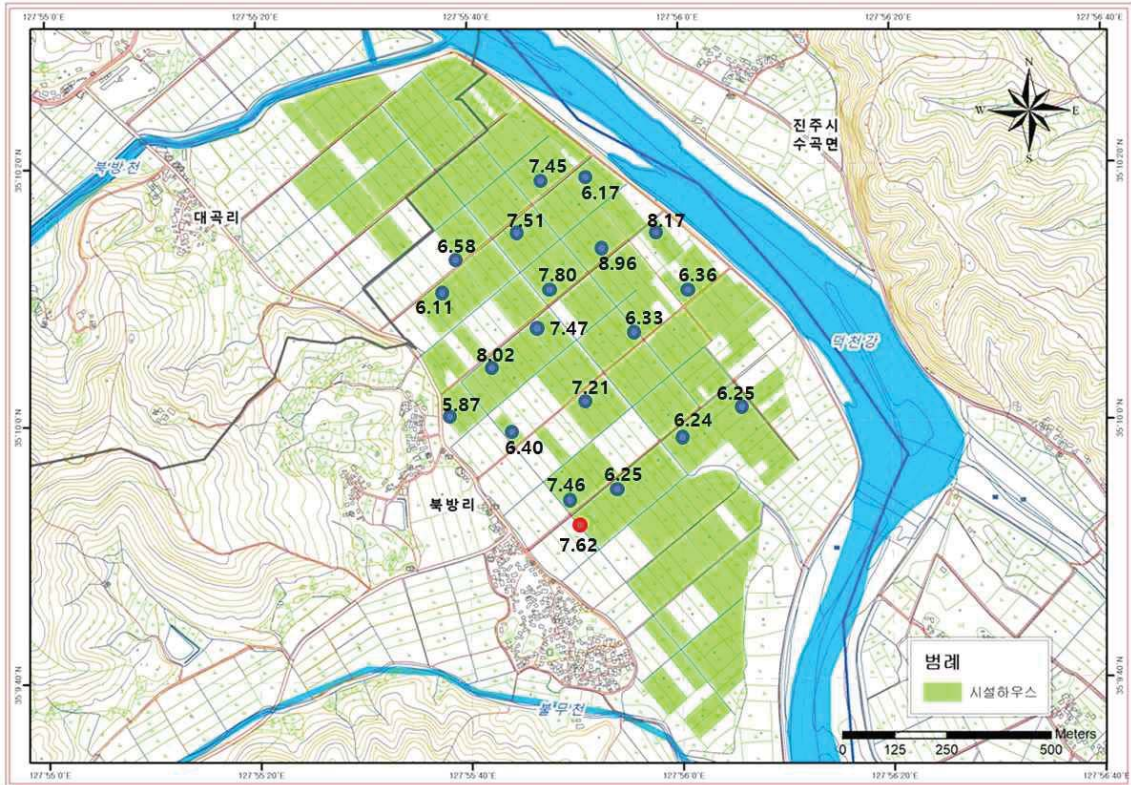


그림 4-17. 연구지역 수질시료 수소이온농도(pH) 분포 (2020.10)

수온은 하천변 지하수 시료 18.5~20.7℃(평균 19.5℃), 내륙방향 지하수 시료 17.4~21.6℃(평균 19.2℃) 로 여름철의 외부 기온의 영향을 받은 층적층 지하수 시료를 반영한다(그림 4-18). 천부 지하수 수온이 초가을 외부 기온보다 높아 오히려 늦여름 기온의 영향을 받은 것으로 보이는 보이는 현상은 흔하게 나타나는 현상이다. 국가 지하수 관측망의 경우, 층적층 지하수의 수온과 기온의 최고값을 나타내는 기간이 최고 6개월 차이가 나는 관정의 수가 가장 많았고 층적층 지하수의 수온의 변화가 주기적 특성을 나타내는 것이 보고 된 바 있다(Lee and Hahn, 2006). 이러한 지하수 수온의 주기적 변화를 지표 기온의 전달이 대류나 분산된 열전달(dispersive heat transport) 보다는 전도에 의한 것임을 지시하는 것으로 해석(Lee and Hahn, 2006)된다.



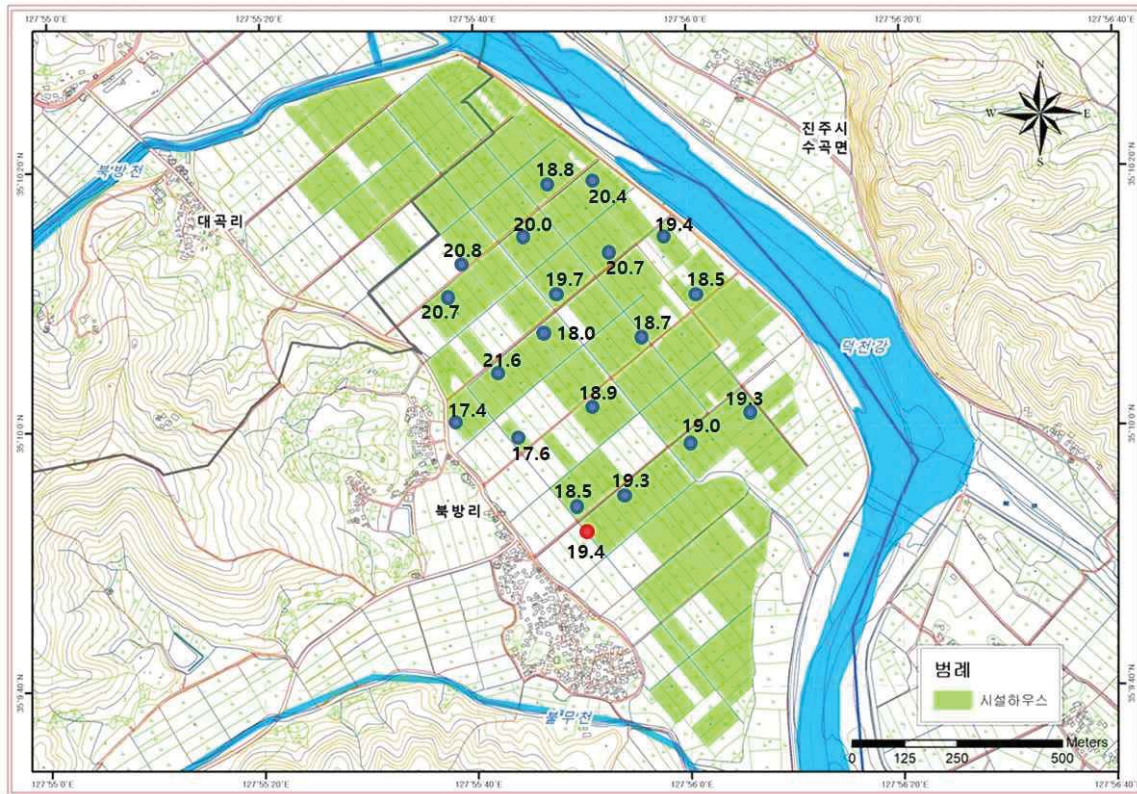


그림 4-18. 연구지역 수질시료 수온(°C) 분포 (2020.10)

#### ④ 배경수질 변화

실내에서 분석한 수질자료를 Piper diagram으로 도시한 결과, 크게 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형 10개 시료 (지하수 9, 하천수 1), Na-HCO<sub>3</sub> 유형 4개 시료, (Ca, Na)-HCO<sub>3</sub> 유형 4개 시료, (Ca, Na)-(HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>) 유형 1개 시료 및 (Ca, Na)-(HCO<sub>3</sub>, Cl) 유형 1개 시료로 구분된다(표 4-19). 현장 수리물리특성(EC, pH, 수온) 결과와 유사하게, 북방들 중심축 기준 덕천강 방향 시료와 내륙방향 시료의 수질유형이 구분되어진다. 하천변에 위치한 관정들은 설치 심도가 내륙방향보다 상대적으로 천부이기 때문에 지표기원 염류의 영향을 상대적으로 많이 받아, Na-HCO<sub>3</sub> 유형 4개 시료, (Ca, Na)-HCO<sub>3</sub> 유형 2개 시료, (Ca, Na)-(HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>) 유형 1개 시료가 나타났고, 일반적인 수질을 보이는 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형 시료는 총 9개 시료 중 2개에 불과하다(그림 4-19). 내륙방향에 위치한 관정들은 설치 심도가 상대적으로 심부이기 때문에 지표기원 염류의 영향을 상대적으로 적게 받아, (Ca, Na)-HCO<sub>3</sub> 유형 2개 시료, (Ca, Na)-(HCO<sub>3</sub>, Cl) 유형 1개 시료가 나타났고, 일반적인 수질을 보이는 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형 시료는 총 10개 시료 중 7개에 해당한다.

표 4-19. 수질이화학 분석 결과 (2차, 2020.10)

(단위 : mg/L)

시료명	pH	수온(°C)	EC(μS/cm)	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	F	CO <sub>3</sub>	Br	Fe	Mn	Al	Pb	Zn
B1	6.17	20.4	413	18.83	7.59	36.81	8.05	12.16	21.35	74.83	72.44		0.00	n.d.	0.03	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
B2	7.45	18.8	405	24.01	1.83	44.31	3.39	9.62	64.05	79.82	40.35		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.27
B3	7.51	20.0	446	49.52	2.52	28.15	4.23	10.36	97.60	93.38	17.18		0.00	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
B4	6.58	20.8	114	4.29	1.95	12.19	2.00	3.99	27.45	9.73	10.54		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B5	6.11	20.7	124	3.26	1.20	13.61	2.56	6.49	27.45	12.91	7.87		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.01
B6	8.17	19.4	391	46.70	1.56	23.15	1.78	6.08	94.55	69.88	17.78		0.00	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
B7	8.96	20.7	490	83.93	1.32	9.16	1.20	17.37	109.81	77.93		8.51	3.00	0.41	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
B8	7.80	19.7	477	42.71	1.98	40.31	6.58	7.05	131.15	89.30	6.49		0.00	n.d.	n.d.	0.02	n.d.	n.d.	n.d.
B9	7.47	18.0	193	9.63	2.70	19.08	3.25	6.28	61.00	24.86	4.75	0.23	0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B10	8.02	21.6	453	24.31	1.87	51.55	8.21	7.98	118.95	88.82	9.91		0.00	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
B11	5.87	17.4	110	10.14	2.50	15.15	4.07	19.57	15.25	12.25	33.91		0.00	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.04
B12	6.36	18.5	372	18.44	5.04	33.07	6.48	8.44	21.35	53.06	79.46		0.00	n.d.	0.02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B13	6.33	18.7	100	10.27	2.04	25.87	4.56	7.37	45.75	42.58	23.82		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B14	7.21	18.9	406	17.59	2.06	50.02	7.67	7.95	125.05	59.17	8.07		0.00	n.d.	n.d.	0.04	n.d.	n.d.	n.d.
B15	6.40	17.6	215	7.90	1.90	24.57	3.93	9.63	57.95	18.33	17.29		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B16	6.25	19.3	313	10.53	5.15	31.91	6.44	6.75	30.50	54.66	53.93		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B17	6.24	19.0	278	9.73	3.83	29.82	5.81	7.40	48.80	47.95	27.55		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B18	6.25	19.3	258	13.10	1.76	23.71	5.37	12.37	54.90	21.81	37.06		0.00	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
B19	7.46	18.5	352	15.80	1.80	39.90	6.28	8.20	118.95	34.01	9.08		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B20(하천수)	7.62	19.4	84	3.03	1.84	8.60	1.51	3.25	24.40	4.46	5.09		0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

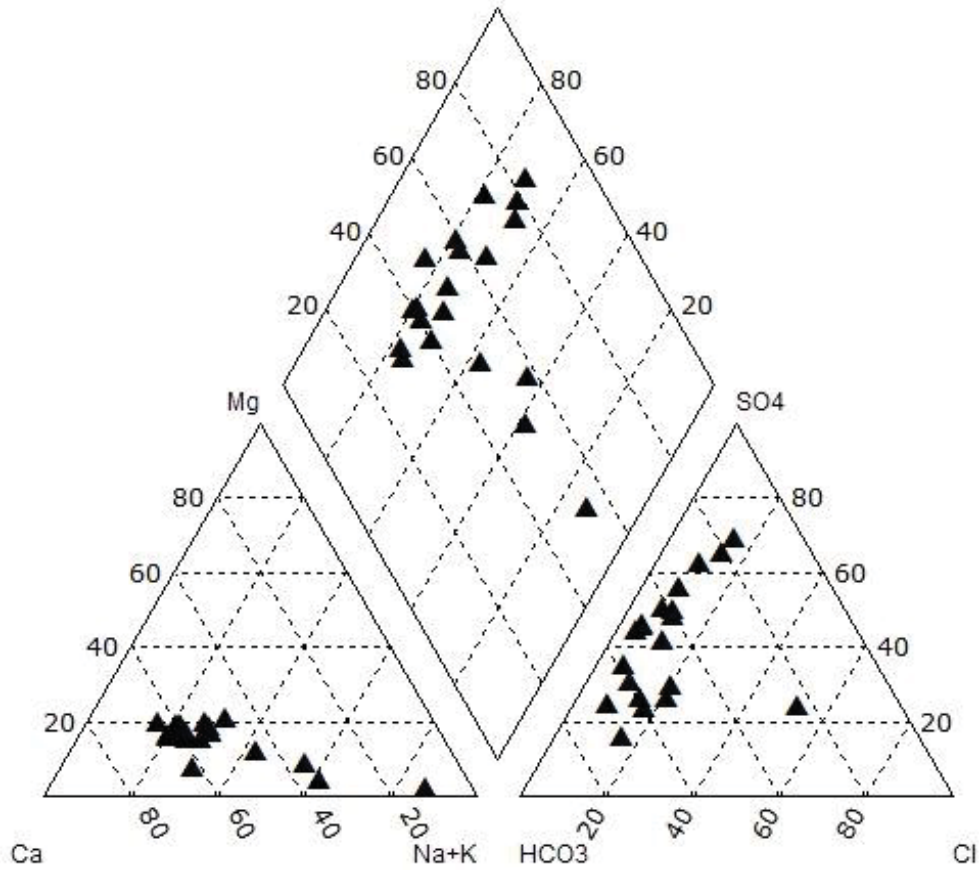


그림 4-19. 연구지역 배경수질 (2020.10)

⑤ 질산염의 오염

질산염( $\text{NO}_3$ )은 대부분 지표기원의 오염물질로, 유아에게 청색증을 발생시킨다. 질산염( $\text{NO}_3$ )의 먹는물 수질기준은 62 mg/L (질산성질소 환산 시 10 mg-N/L)로, 연구지역에서는 20개 시료 중 3개 시료(B1, B12, B16)에서 먹는물 수질 기준을 초과하였다(그림 4-20). 먹는물 수질 기준을 초과하지 않았지만 상대적으로 질산염이 과다 부하된 3개 시료(B2, B11, B18)이다. 질산염 과다 시료는 현장 수리물리특성, 배경수질과 유사하게 하천변 시료에서 과다하게 부하되는데, 이는 하천변 관정 심도가 얕아서 지표기원 오염물질의 유입이 상대적으로 쉽고, 지하수를 지속적으로 양수-지표배수-양수-지표배수에 따라 오염물질이 천부대수층으로 쉽게 유입된 원인으로 판단된다.



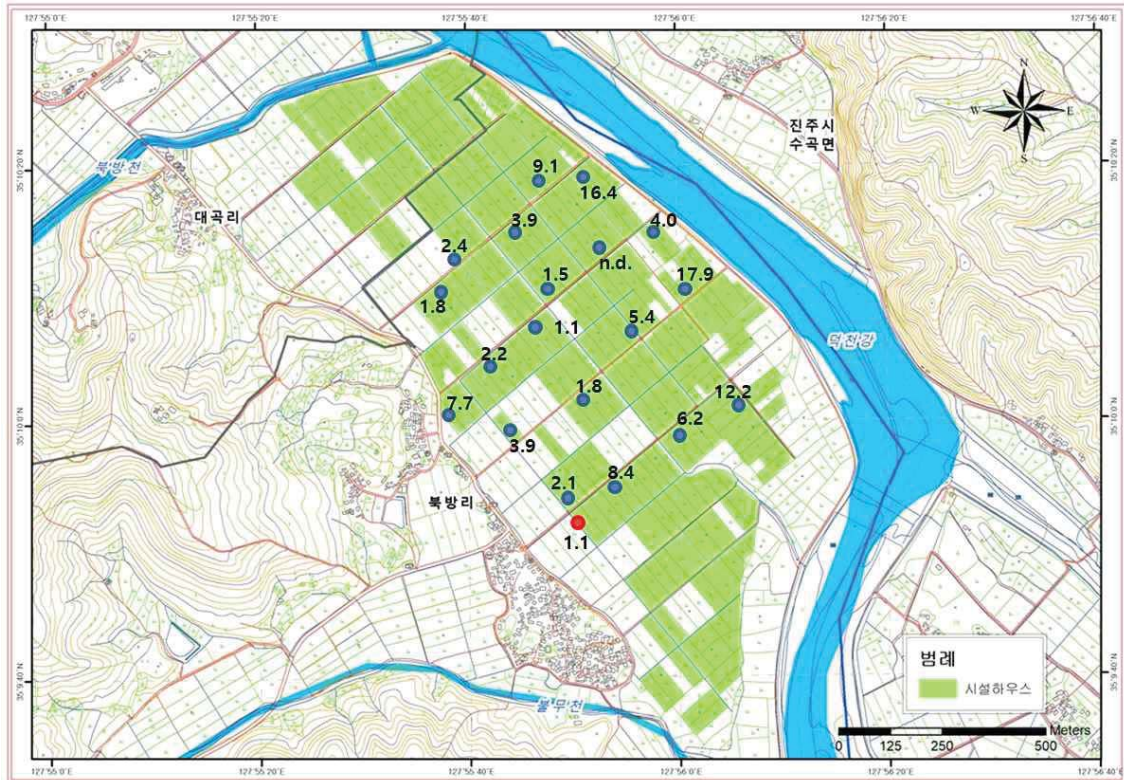
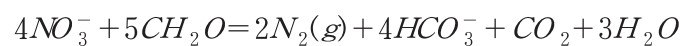


그림 4-20. 연구지역 질산성질소 농도(mg-N/L) 분포 (2020.10)

염류에 직접적으로 기인하지 않는  $\text{HCO}_3^-$  성분은 질산염 농도와 일반적으로 반비례한다(그림 4-21).  $\text{HCO}_3^-$  이온의 경우, 해수의 영향을 받지 않은 일반 지하수에서 대체로 우세한 성분이나(Jeen et al., 2001), 질산염과 중탄산이 반비례를 보이는 것은 일반적인 지하수 수온(15 °C 내외)보다 높은 지하수에서, 수온의 영향으로 층적 대수층 내 탈질 미생물이 활발한 작용에 따른 탈질반응의 결과이다. 미생물에 의한 탈질 작용과  $\text{HCO}_3^-$  이온생성에 관한 반응식은 아래와 같다.



결과적으로  $\text{HCO}_3^-$ 의 증가의 원인이 탈질 미생물의 활동도의 증가현상과 잘 부합한다. 지하수 수온이 낮아지는 겨울철에는 미생물의 활성도가 감소되어 탈질화 작용이 감소되므로 질산염 농도 겨울철 모니터링이 필요하다.

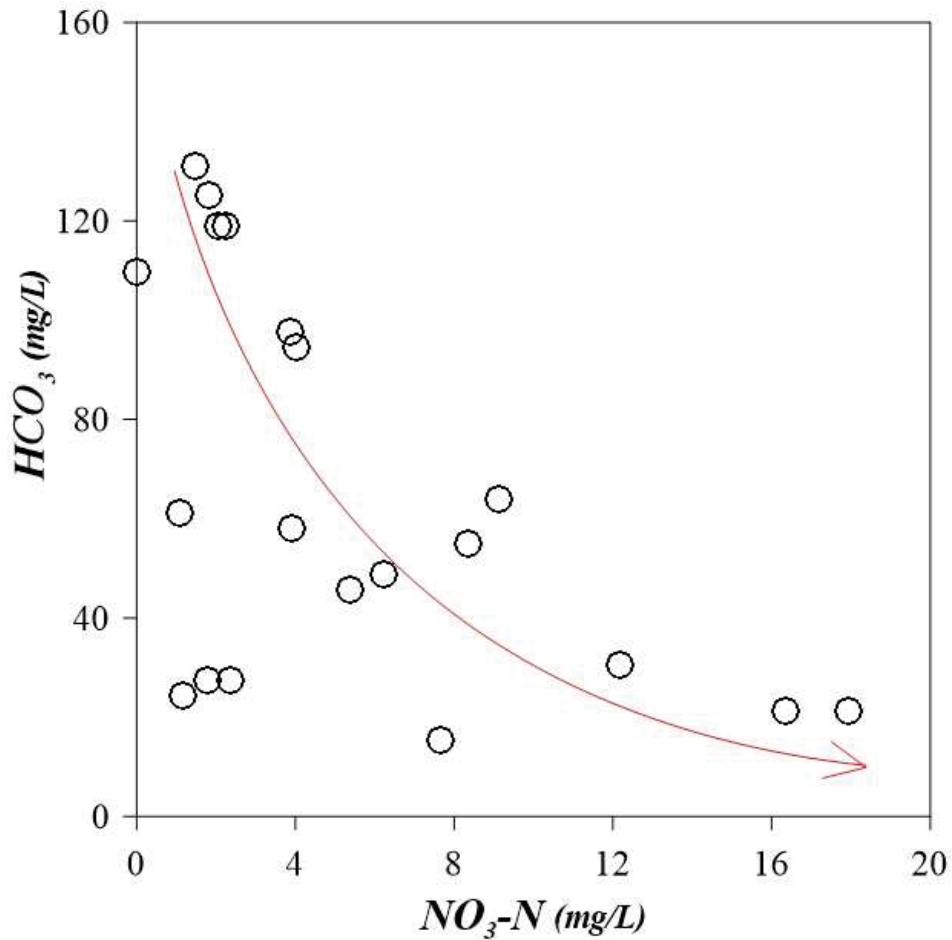


그림 4-21. 수질시료의 질산성질소-중탄산 상관관계 (2020.10)

⑥ 농업용수 수질 분석 결과

수질이화학 분석 시료와 별도로, 채수된 시료는 농업용수 기준으로 수질검사 공인분석기관에 의뢰하여 농업용수 기준 14개 항목 분석을 실시하였다(표 4-20). 농업용수는 먹는물에 비해 수질기준이 다소 완화되어 있기 때문에, 농업용수 질산성질소 기준(20 mg/L)을 초과하는 시료는 없다. 다만, 비소가 2개 인접 시료(B6, B7)에서 초과하였는데, 이에 대한 원인은 불분명하고, 향후 재검사를 통해 검출의 재연성을 확인할 필요가 있다. 농약성분(다이아지논, 파라티온) 분석 결과, 모든 시료에서 유기인계 농약성분이 불검출로 나타나 농약 등에 대한 관리가 잘 이루어짐을 보인다.

표 4-20. 농업용수 수질시료 분석 결과 (2차, 2020.10)

(단위 : mg/L)

항목	농업용수 수질기준	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20
수소이온농도	5.80 ~8.50	6.2	7.4	7.5	6.6	6.2	7.9	8.4	7.9	7.4	7.9	6	6.4	6.4	7.4	6.6	6.4	6.5	7.3	6.5	7.1
질산성질소	20.0mg/ℓ 이하	16.9	8.2	3.6	2.4	1.4	2.5	불검출	0.2	0.6	0.9	7.7	18.5	5.7	1.0	3.9	11.2	6.5	0.9	8.3	1.2
염소이온	250mg/ℓ 이하	13	11.6	10.3	4.2	7.1	8.0	19.2	8.8	6.8	9.5	21.6	10.9	8.1	9.5	10.8	8.7	8.3	9.9	13.4	3.6
카드뮴	0.01mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
비스	0.05mg/ℓ 이하	불검출	불검출	0.016	불검출	불검출	0.052	0.052	0.009	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
다이아지논	0.02mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
페놀	0.005mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
납	0.1mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
크롬	0.05mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	0.0003	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
1,1-트리클로로에탄	0.3mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
기준초과항목		적합	적합	적합	적합	적합	부적합 (비소)	부적합 (비소)	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합	적합

⑦ 질소동위원소를 이용한 질산성질소 오염의 원인 분석

채수한 시료에 대해 질산성질소와 질소동위원소( $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ )의 상관관계를 분석한 결과, 질산성질소 먹는물 수질기기준을 초과한 시료(B1, B12, B16) 및 질산성질소 부하량이 높은 시료(B2, B11)는 주로 가벼운 동위원소 조성으로서 -1.68~1.367‰ 범위를 보이며, 주로 화학비료 기원의 질소를 보이는 쪽에 도시된다. 이는 지하수 시료가 시설재배에 기인한 비료성분의 질소에 영향을 받고 있는 것을 제시한다. 따라서 지하수의  $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 영향력을 갖는 시설재배를 위한 외부 비료기원 질소의 대수층 유입을 농어촌형 저영향개발 시설을 이용하여 대수층 유입 이전에 제거할 필요가 있다.

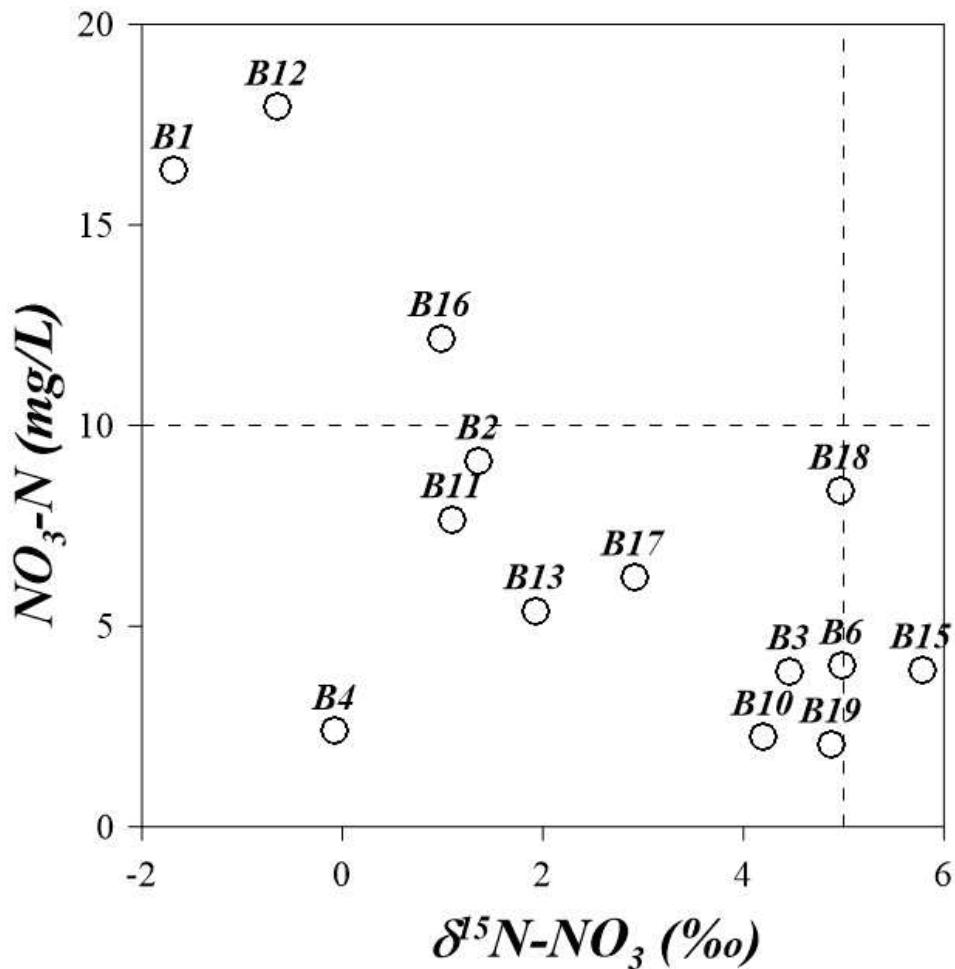


그림 4-22. 수질시료의 질산성질소-질소동위원소 상관관계 (2020.10)

⑧ 관개용수로서 지하수와 하천수 적합성 분석

연구지역의 농촌용수를 관개용수로 사용했을 때 토양구조에 위해성을 가할 수 있는지를 평가하고자, SAR(Sodium Adsorption ratio)-전기전도도(Conductivity) 분석을 실시한 결과(Richards, 1969), B7 시료를 제외한 대부분의 시료는 낮은 염도(salinity)와 낮은 SAR 영역에 도시되었다. 따라서, 현재까지 북방들 연구지역의 지하수는 농업용 관개용수로 사용할 때, 알칼리도와 염도 위해가 없는 것으로 나타났다.

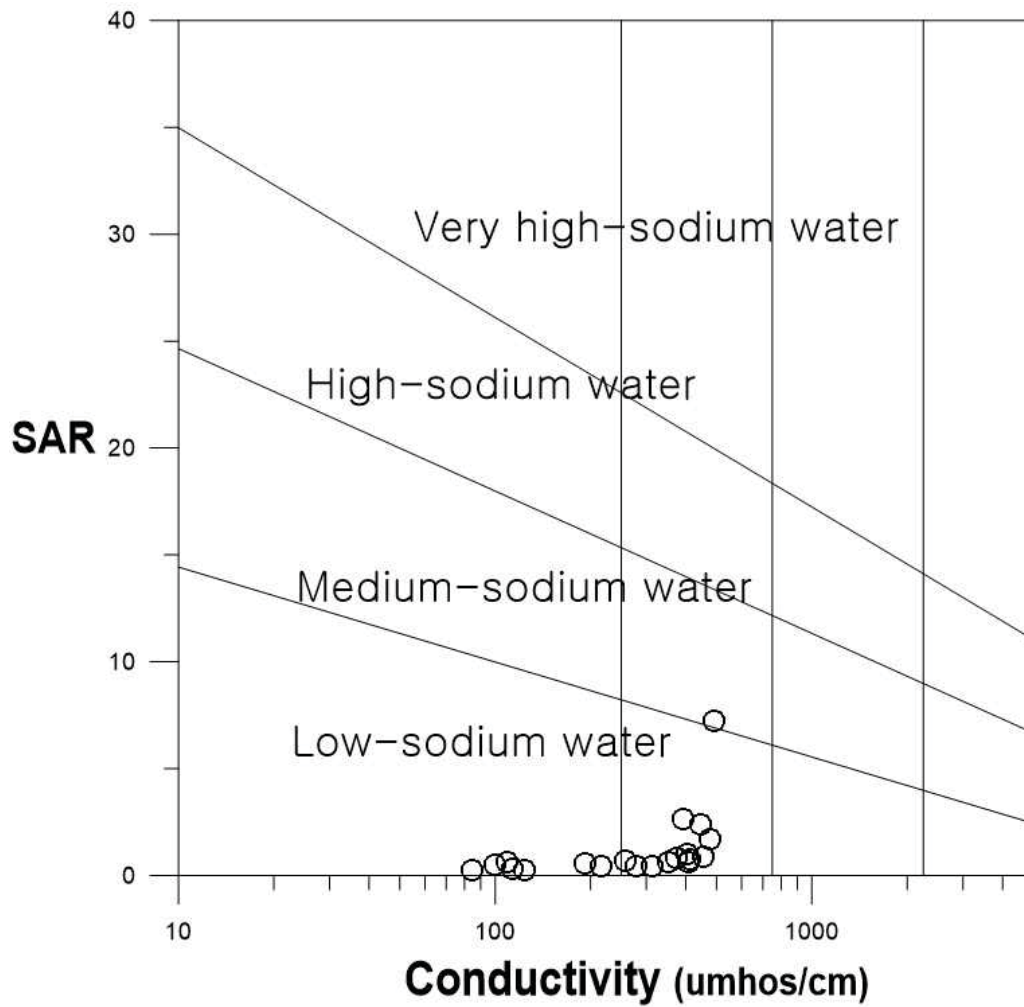


그림 4-23. 수질시료의 SAR-전기전도도 상관관계 (2020.10)



## (6) 현장시험 부지 지하수 수위 변동 분석

현장시험 부지의 지하수 용도는 작물 재배 용수와 겨울철 비닐하우스 수막에 필요한 용수로 구분된다. 특히 겨울철에는 수막용수 공급을 위한 집중적인 양수로 인하여, 지하수가 과잉양수 되는 실정이고, 이에 따라 하천수의 유도함양을 기대할 수 없는 지점에서는 지하수가 고갈되어 이용이 어려운 실정이다. 현장시험 부지 내에는 지난 2021년 1월부터 관측이 시작된 「하동7」 농어촌 지하수 관측공이 소재한다(그림 4-24).

「하동7」 농어촌지하수 관측공의 지하수 수위는 관측 이래 동절기(수막재배 기간 11월 하순부터 이듬해 3월 중순까지)마다 반복적으로 약 66 m 이상 주기적으로 하강한다(그림 4-25). 여기서, 66 m 하강이란 「하동7」 농어촌지하수 관측공의 센서심도 위치이고, 동절기에 전기전도도가 미계측되는 것으로 살펴볼 때(그림 4-26), 실제로는 센서심도보다 더 깊은 심도까지 지하수 수위가 하강하는 것으로 추정된다. 이처럼 현장시험 부지의 동절기 지하수 부족 및 고갈 문제는 매우 심각한 실정이며, 이에 따라 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 적용 등 추가 지하수 확보를 위한 기술 적용이 절실한 실정이다.



그림 4-24. 「하동7」 농어촌지하수 관측공의 북방지구 내 위치

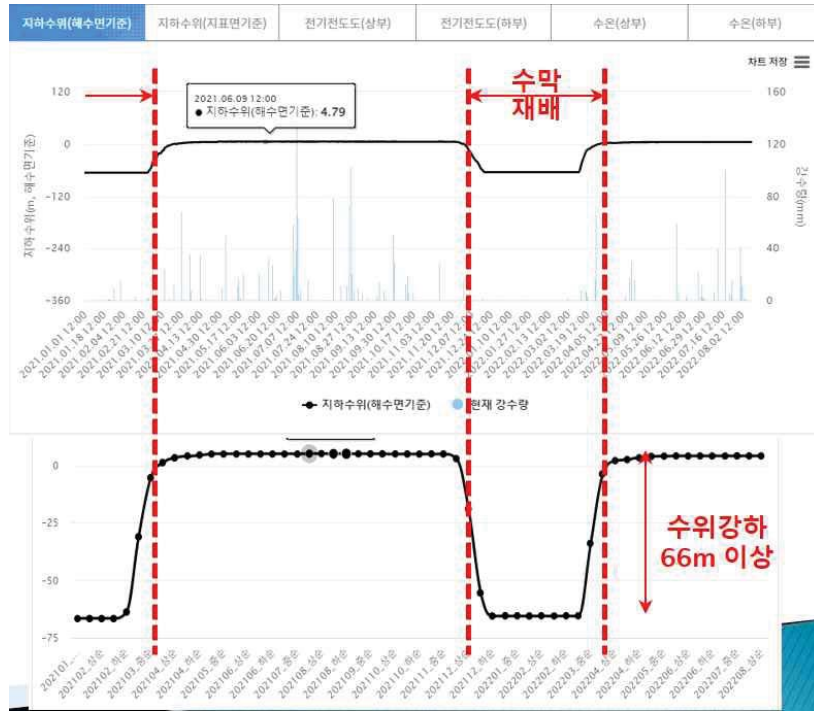


그림 4-25. 「하동7」 관측공의 동절기 지하수 수위 강하



그림 4-26. 「하동7」 관측공의 동절기 전기전도도 미계측 기간

## 마. 현장시험부지 지반 조사

### (1) 조사 개요

#### (가) 조사목적

현장규모 저영향개발(LID) 시설의 설치를 위하여 현장시험부지 내 지층의 분포상태와 지반 특성을 파악하고, 설계 및 공사 시행에 필요한 지반 공학적 기초자료 수집에 그 목적이 있다.

#### (나) 조사항목

조사의 목적을 수행하기 위하여 조사지역을 대상으로 현장조사, 현장시험을 실시하고 시추 조사를 통해 채취된 불교란시료를 대상으로 실내시험을 실시하였다.

표 5-1. 현장시험부지 지반조사 조사항목

구 분		단위	수량	비 고	
1차년도 (2020)	현장조사	핸드오거보링	공	4	· 지층구성 및 구조물 지지층 파악
		지하수위측정	개소	2	· 기존 시추조사공 지하수위 측정
	현장시험	지하수 유향·유속시험	회	7	· 공 내 지하수의 유동방향 및 유동속도 파악
2차년도 (2021)	현장조사	시 추 조 사	공	5	· 지층구성 및 구조물 지지층 파악
		지하수위측정	개소	5	· 안정지하수위 측정
	현장시험	표준관입시험	회	40	· 토사의 상대밀도 및 연경도 파악
		현장투수시험	회	6	· 토사지층의 투수계수 산정
	실내시험	토질기본물성 및 역학	식	1	· 토사지층의 기본물성값 산정

(다) 조사기간

현장시험부지 내 지반조사는 1차년도(2020년) 및 2차년도(2021년)에 시행하였으며, 조사기간은 1차년도 2020년 10월 12일 ~ 2020년 10월 31일, 2차년도 2021년 5월 20일 ~ 2021년 7월 16일에 진행하였다.

표 5-2. 현장시험부지 지반조사 조사기간

구 분		기 간	비 고
1차년도 (2020)	조사위치협의 및 현장조사	2020년 10월 12일 ~ 2020년 10월 31일	
2차년도 (2021)	조사위치협의 및 현장조사	2021년 5월 20일 ~ 2021년 6월 10일	
	실내시험	2021년 6월 11일 ~ 2021년 6월 25일	
	성과분석 및 보고서 작성	2021년 6월 11일 ~ 2021년 7월 16일	

(라) 조사장비

현장시험부지 내 지반조사 시 사용한 장비는 아래와 같다.

표 5-3. 현장시험부지 지반조사 조사장비

구 분	장비명	수 량	비 고
현장조사	핸드오거보링	Edelman 분리형오거	1 Set
	시 추 조 사	POWER 4500SD	1조
	지하수위측정	전동식 수위계	1조
현장시험	지하수 유량·유속시험	GFD-4 Model(Alec Electronics社, 일본)	1 Set
	표준관입시험	Split Spoon Sampler	1조

핸드오거	시추조사	지하수위계	지하수 유량·유속	표준관입시험 (모식도)
				

(마) 조사지점 선정

조사위치 선정은 조사지역 현황을 고려하여 도상에서 조사위치 확인 후, 현장답사 및 지장물 확인을 통해 지반조사 위치를 선정하였다.

표 5-4. 기존 관정 위치 측량(지하수 유향·유속시험)

시 추 공 번	좌 표		지반고 EL.(+)m	지하수위 (GL.-)
	X 좌표	Y 좌표		
BH-1	284988.6630	286485.0649	53.5776	-
BH-2	284638.8685	286203.3346	53.0603	2.7
BH-3	284810.2571	286338.2161	52.9507	3.6

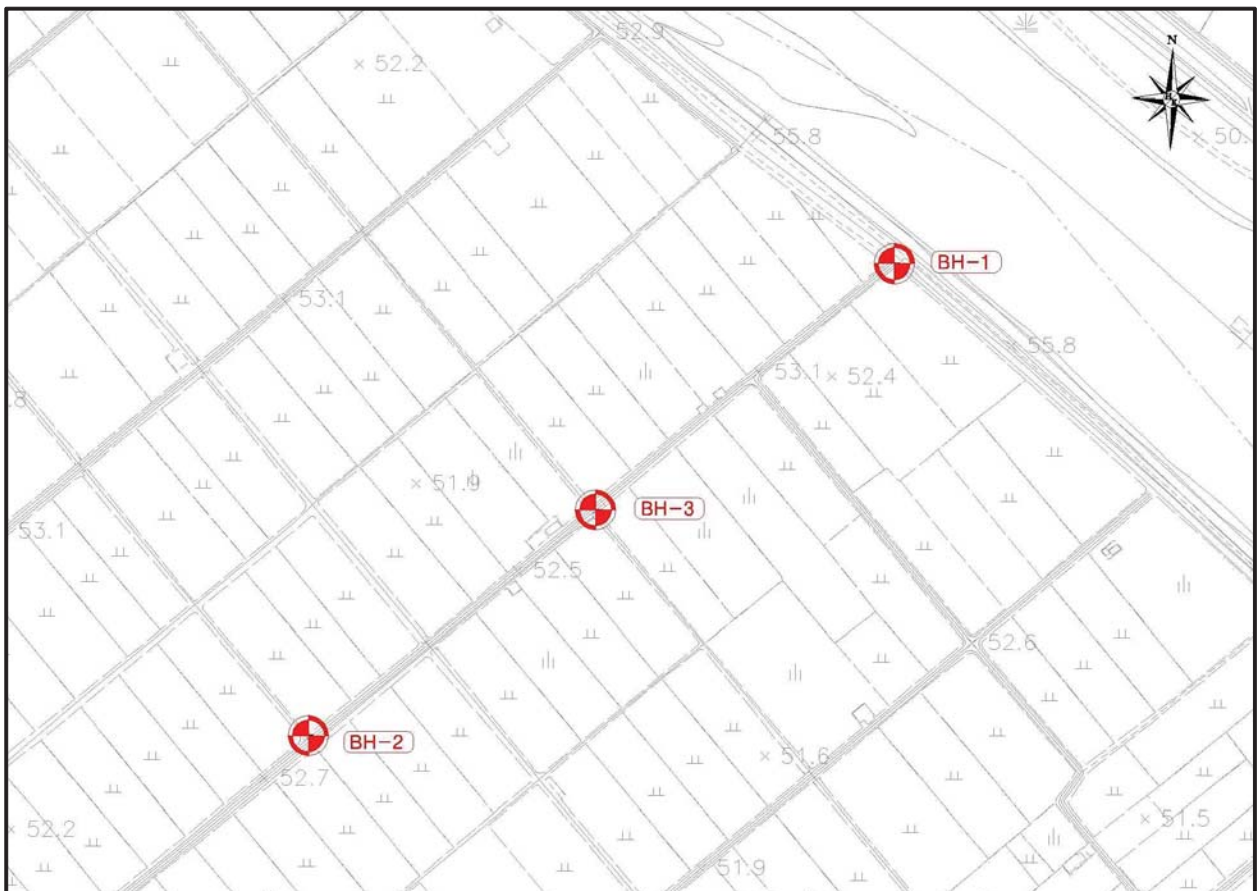


그림 5-1. 지하수 유향·유속 조사 위치도



표 5-5. 핸드오거 표토지점 위치 측량

시 추 공 번	좌 표		지반고 EL.(+)m	지하수위 (GL.-)
	X 좌표	Y 좌표		
HAB-1	284790.8419	285654.8373	52.07	
HAB-2	284784.2143	285662.5171	52.10	
HAB-3	284791.9860	285668.3782	52.05	
HAB-4	284798.5273	285660.7710	52.01	

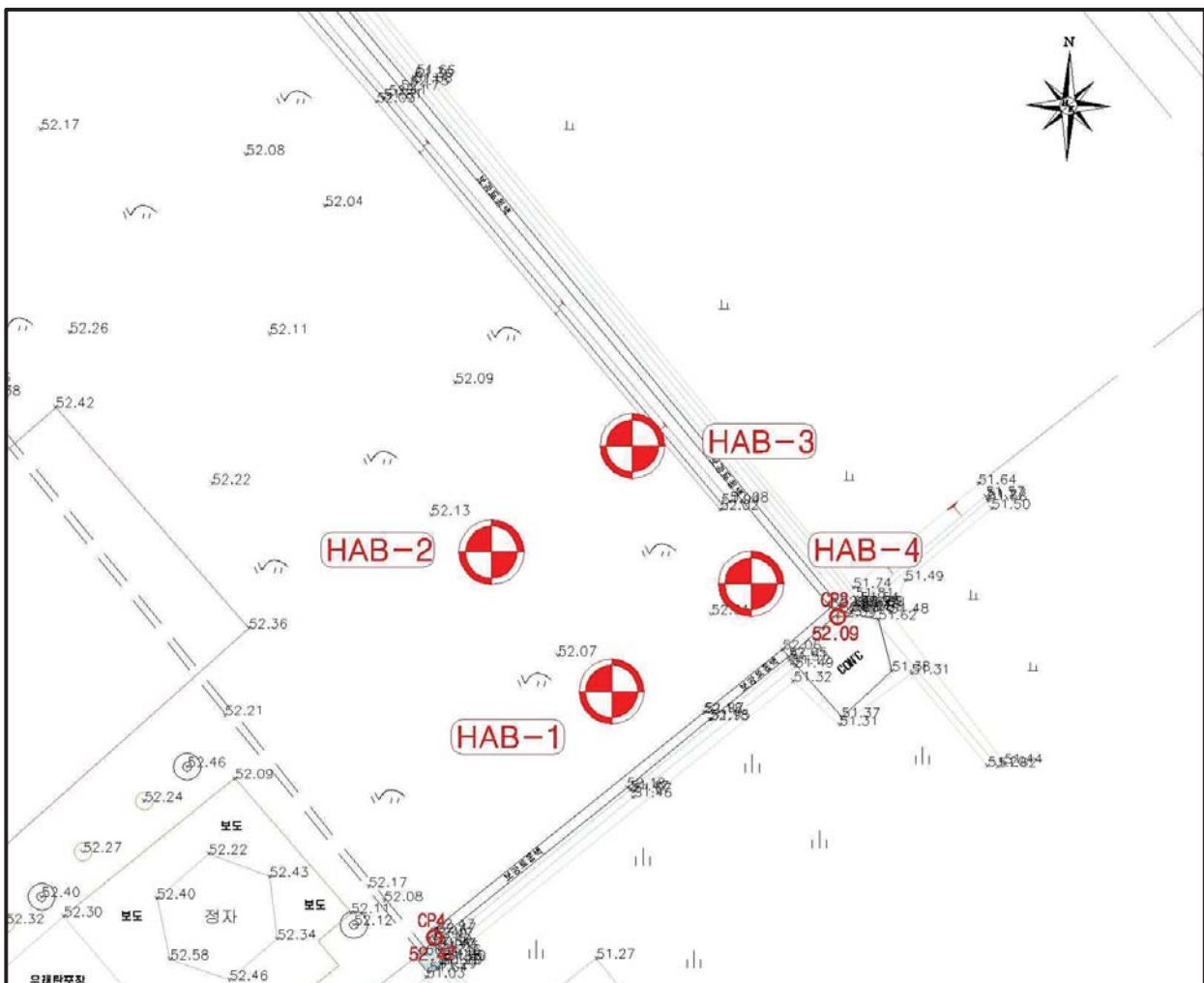


그림 5-2. 핸드오거보링 조사 위치도

표 5-6. 시추조사 위치

시추공번	좌표		지반고 EL.(+)m	지하수위 (GL.-)
	X 좌표	Y 좌표		
BH-1	285661.30	284791.05	52.10	1.60
BH-2	285665.97	284787.28	52.13	1.33
BH-3	285655.72	284782.70	52.07	1.29
BH-4	285670.63	284783.50	52.17	1.36
BH-5	285665.65	284786.89	52.13	1.35

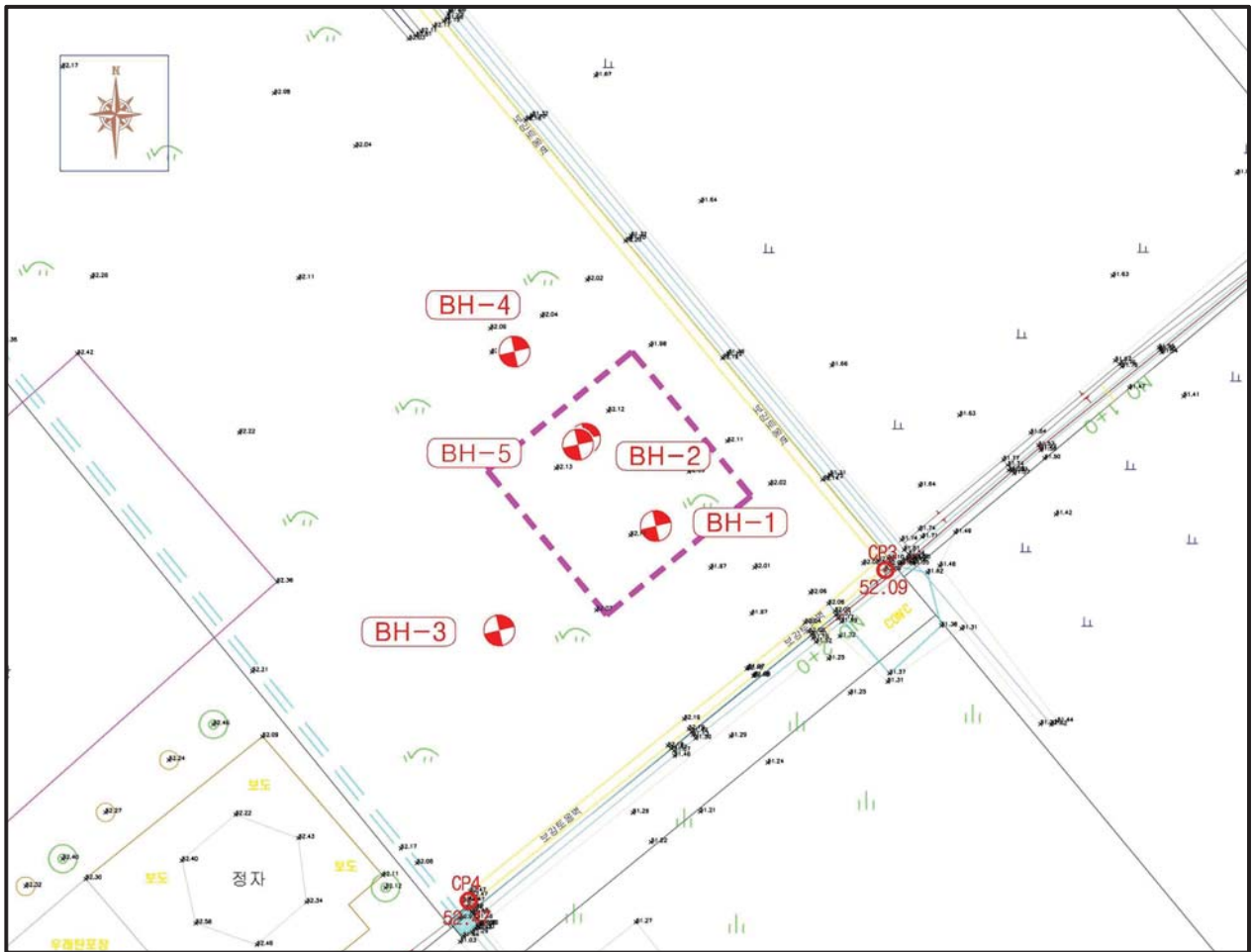
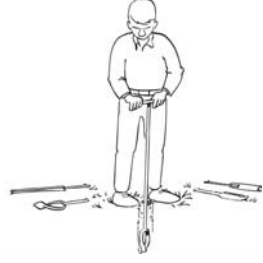


그림 5-3. 시추조사 위치도

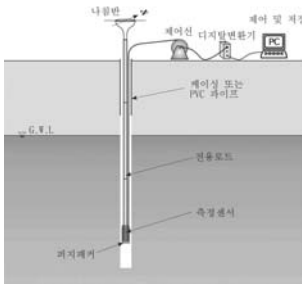
## (2) 조사 방법

### (가) 현장시험

#### ① 핸드오거보링

<p>목 적</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 핸드오거보링조사는 연약하거나, 중간 정도의 밀도를 갖는 세립토, 점착성을 가지는 습윤한 사질토 등 주로 지하수위 위의 자갈을 포함하지 않은 미고결된 토사지반에 적용되며, 대표적인 시료를 연속으로 채취하여 토층 구성을 알기 위한 목적으로 시행함.</li> </ul>	
<p>원 리</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 나사 송곳식 또는 이완식의 오거를 회전시키면서 지반 굴착             <ul style="list-style-type: none"> <li>➔ 흙의 색조, 밀도, 토질분류 및 함수상태 등을 핸드오거 주상도에 작성</li> </ul> </li> <li>· 굴착과 동시에 교란시료를 채취하여 지층을 확인하고 채취된 시료에 대하여 토성확인</li> </ul>	 <p style="text-align: center;">모식도</p>

② 지하수 유향유속 시험

<p>목 적</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 선택적 지하수의 유동경로 역할을 하는 불연속면 분포구간에 대한 국지적인 지하수 유동속도와 유동방향을 직접 측정함으로써 그 결과를 지하공간 설계시 배수계획 및 용수처리 검토에 활용</li> <li>· 수직 수평적인 지하수의 속도와 방향을 파악하여 설계 및 시공의 기초자료로 활용</li> </ul> <table border="1" data-bbox="392 483 1401 680"> <thead> <tr> <th>공 번</th> <th>심도 (GL.-m)</th> <th>대상지층</th> <th>공 번</th> <th>심도 (GL.-m)</th> <th>대상지층</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">BH-2</td> <td>6.0</td> <td>퇴적토층</td> <td rowspan="4">BH-3</td> <td>5.0</td> <td>퇴적토층</td> </tr> <tr> <td>8.0</td> <td>풍화토층</td> <td>7.5</td> <td>풍화토층</td> </tr> <tr> <td>10.5</td> <td>풍화암층</td> <td rowspan="2">10.0</td> <td rowspan="2">연 암 층</td> </tr> <tr> <td>12.0</td> <td>연 암 층</td> </tr> </tbody> </table>		공 번	심도 (GL.-m)	대상지층	공 번	심도 (GL.-m)	대상지층	BH-2	6.0	퇴적토층	BH-3	5.0	퇴적토층	8.0	풍화토층	7.5	풍화토층	10.5	풍화암층	10.0	연 암 층	12.0	연 암 층
공 번	심도 (GL.-m)	대상지층	공 번	심도 (GL.-m)	대상지층																			
BH-2	6.0	퇴적토층	BH-3	5.0	퇴적토층																			
	8.0	풍화토층		7.5	풍화토층																			
	10.5	풍화암층		10.0	연 암 층																			
	12.0	연 암 층																						
<p>원 리 및 방 법</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시추공내 지하수 측정지점에서 30초간 가열된 heat pulse가 자연적인 지하수의 유동에 따라서 이동되는 것을 4 방향의 heat sensor에서 감지하여 지하수의 유동속도와 방향을 해석</li> <li>· 측정에 사용된 2차원 유향유속계는 1차원 유속계와는 달리 남-북 방향과 동-서 방향의 변화를 관측한다. 따라서 검침은 초기단계의 reference temperature를 읽은 후, 열원으로부터 발산된 열입자의 이동상태를 동서남북 4 방향의 센서에서 감지하여 이들의 유동속도와 방향을 계산</li> </ul>																							
<p>모 식 도 및 전 경</p>																								
	<p>지하수 유향·유속시험 모식도</p>	<p>지하수 유향·유속시험 전경</p>																						

③ 시추조사

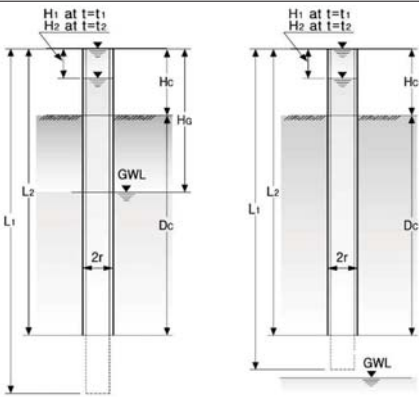

<p>목 적</p>	<p>· 시추조사는 지표에서 지하 깊은 곳을 직접 눈으로 볼 수 없으므로 시험공을 굴진하여 지반의 성상을 조사하고, 시료의 채취 및 각종 원위치시험을 시행하여 설계에 필요한 제반 자료를 제공하는데 그 목적이 있음.</p>									
<p>원 리 및 방 법</p>	<p>· 시추조사는 회전수세식(Rotary Wash Type) 시추기를 이용하여 표준관입시험과 병행하는 방법으로 실시하였으며, 시추 후 형성된 시추공은 각종 원위치 시험에 이용함. 굴진은 NX(<math>\phi</math>76mm) 구경으로 실시하였으며 공벽 붕괴가 없는 견고한 지층까지 Casing을 삽입하는 Casing방식을 채택</p> <p>· 시추조사는 저수지 제방구간에 대하여 지반의 수직적 분포특성 즉, 지층의 성층상태와 각 지층의 지반 공학적 특성, 도로횡단 지점의 분포상태 등을 파악하기 위하여 원지반 확인을 원칙으로 함. 또한 시추작업과 병행하여 지층의 상대밀도와 구성성분을 파악하기 위하여 1.0m 간격으로 표준관입시험을 한국산업규격(KS F 2307)에 의거 연속성 있게 실시하였으며 조사의 정확성을 위해 지표면으로부터 공벽 붕괴가 예상되는 지층까지는 Casing을 삽입하고 천공을 함. 풍화토층을 포함한 토사층은 S.P.T Sampler에 의하여 시료를 채취하였으며 시추 주상도에 기재</p>									
<p>모식도 및 전 경</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">시추모식도</th> <th style="width: 50%;">시추전경</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="text-align: center;">  </td> </tr> </table>	시추모식도	시추전경							
시추모식도	시추전경									
										
<p>결과활용</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">구 분</th> <th colspan="2" style="width: 90%;">활 용 방 안</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>시추 조사</td> <td>· 지층분포상태 파악 및 시료 채취 · 채취시료를 대상으로 실내시험 실시</td> <td>· 시추공을 이용한 각종 현장시험 실시</td> </tr> <tr> <td>지반 설계</td> <td>· 암반분류의 기본자료로 활용 · 구조물계획 및 토공계획 수립에 활용</td> <td>· 지층단면도 작성의 기본자료로 활용</td> </tr> </tbody> </table>	구 분	활 용 방 안		시추 조사	· 지층분포상태 파악 및 시료 채취 · 채취시료를 대상으로 실내시험 실시	· 시추공을 이용한 각종 현장시험 실시	지반 설계	· 암반분류의 기본자료로 활용 · 구조물계획 및 토공계획 수립에 활용	· 지층단면도 작성의 기본자료로 활용
구 분	활 용 방 안									
시추 조사	· 지층분포상태 파악 및 시료 채취 · 채취시료를 대상으로 실내시험 실시	· 시추공을 이용한 각종 현장시험 실시								
지반 설계	· 암반분류의 기본자료로 활용 · 구조물계획 및 토공계획 수립에 활용	· 지층단면도 작성의 기본자료로 활용								



④ 표준관입시험 조사 방법

<p>목 적</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시추조사와 병행하여 지층의 상대밀도(Relative Density), 연경도(Consistency)와 구성성분을 파악하며, 고란시로 채취를 통한 시료의 육안 판별 및 실내 물성시험을 위한 시료 확보에 그 목적이 있음.</li> </ul>									
<p>원 리 및 방 법</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 표준관입시험에 의한 N값은 중량 63.5±0.5kgf 해머를 76±1cm 높이에서 자유낙하시켜 표준외경 51±1.0mm의 Split Spoon Sampler가 30cm 관입하는데 소요되는 타격횟수를 말하며, 매 15cm씩, 총 45cm에 관입에 대한 관입저항치를 구하고, 그 중 2, 3번째 관입저항치를 합하여 기록. 만약 지층이 매우 조밀하여 타격을 50회 이상 타격을 가하여도 30cm 관입이 불가능한 지층에서는 50회 타격에 의한 관입량을 측정하여 주상도에 기록</li> </ul>									
<p>모 식 도 및 전 경</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">표준관입시험 모식도</th> <th style="width: 50%;">표준관입시험 전경</th> </tr> <tr> <td data-bbox="400 685 903 1144"> </td> <td data-bbox="903 685 1406 1144"> </td> </tr> </table>	표준관입시험 모식도	표준관입시험 전경							
표준관입시험 모식도	표준관입시험 전경									
<p>결과활용</p>	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">구 분</th> <th style="width: 70%;">판정 및 추정사항</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">조사결과로 파악할 수 있는 사항</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 지반내 토층분포 및 토질의 종류 (풍화토 및 풍화암의 구분)</li> <li>· 연약층의 유무(압밀침하층의 두께)</li> <li>· 지지층 분포심도</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">N값으로 추정할 수 있는 사항</td> <td style="text-align: center;">사질토</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 상대밀도(Dr), 내부마찰각(<math>\phi</math>)</li> <li>· 기초지반의 탄성침하</li> <li>· 기초지반의 허용지지력</li> <li>· 액상화 가능성 파악</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">점성토</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 일축압축강도(<math>q_u</math>), 비배수점착력(Cu)</li> <li>· 기초지반의 허용지지력</li> <li>· 연·경 정도</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	구 분	판정 및 추정사항	조사결과로 파악할 수 있는 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지반내 토층분포 및 토질의 종류 (풍화토 및 풍화암의 구분)</li> <li>· 연약층의 유무(압밀침하층의 두께)</li> <li>· 지지층 분포심도</li> </ul>	N값으로 추정할 수 있는 사항	사질토	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상대밀도(Dr), 내부마찰각(<math>\phi</math>)</li> <li>· 기초지반의 탄성침하</li> <li>· 기초지반의 허용지지력</li> <li>· 액상화 가능성 파악</li> </ul>	점성토	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 일축압축강도(<math>q_u</math>), 비배수점착력(Cu)</li> <li>· 기초지반의 허용지지력</li> <li>· 연·경 정도</li> </ul>
구 분	판정 및 추정사항									
조사결과로 파악할 수 있는 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지반내 토층분포 및 토질의 종류 (풍화토 및 풍화암의 구분)</li> <li>· 연약층의 유무(압밀침하층의 두께)</li> <li>· 지지층 분포심도</li> </ul>									
N값으로 추정할 수 있는 사항	사질토	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상대밀도(Dr), 내부마찰각(<math>\phi</math>)</li> <li>· 기초지반의 탄성침하</li> <li>· 기초지반의 허용지지력</li> <li>· 액상화 가능성 파악</li> </ul>								
	점성토	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 일축압축강도(<math>q_u</math>), 비배수점착력(Cu)</li> <li>· 기초지반의 허용지지력</li> <li>· 연·경 정도</li> </ul>								

⑤ 현장투수시험

<p>목 적</p>	<p>· 조사지역 내 분포하는 투수성을 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 현장투수 시험을 실시한다. 현장투수시험은 풍화대층을 대상으로 4회 실시</p>	
<p>원 리 및 방 법</p>	<p>· 본 시험은 지반의 투수성을 파악하기 위하여 풍화대층을 대상으로 변수위시험법 중 수위강하법(Falling Head Test)으로 실시한다.</p> $K = \frac{r^2}{2 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \times \ln\left(\frac{L}{r}\right) \times \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$ <p>여기서,      K            : 투수계수(cm/sec)                   r            : 시추공반경(cm)                   L            : 시험구간(cm)                   t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>     : 임의의 시간(sec)                   H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>    : 임의의 시간 t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>에서의 수두(cm)</p>	
<p>모 식 도 및 전 경</p>	<p style="text-align: center;">투수시험 모식도</p> 	<p style="text-align: center;">투수시험 전경</p>  <p>공 중 농림부산출물 이용한농촌형 지명황개말(LID) 시설개발 지반조사 공 번 BH-01 공 중 투수시험 날 짜 2021.05.</p>
<p>결과활용</p>	<p style="text-align: center;">구 분</p> <p style="text-align: center;">조사결과로 파악할 수 있는 사항</p>	<p style="text-align: center;">판정 및 추정사항</p> <p>· 조사지역 내 투수계수를 산정하여 지반 해석시 침투자료로 활용 · 조사지역내의 침투유량 산정</p>

(나) 실내시험

① 토질시험

시추조사와 병행하여 실시한 표준관입시험에서 채취된 호트러진 시료 중 각 지층의 대표적인 시료를 선정하여 흙의 물리적 특성을 파악하기 위하여 기본물성시험을 실시하였다.

구 분		규 정	비고
토질시험	함 수 비	KS F 2306	
	비 중	KS F 2308	
	액성한계	KS F 2304	
	소성한계	KS F 2304	
	체 분 석	KS F 2309	
	입도분석	KS F 2302	

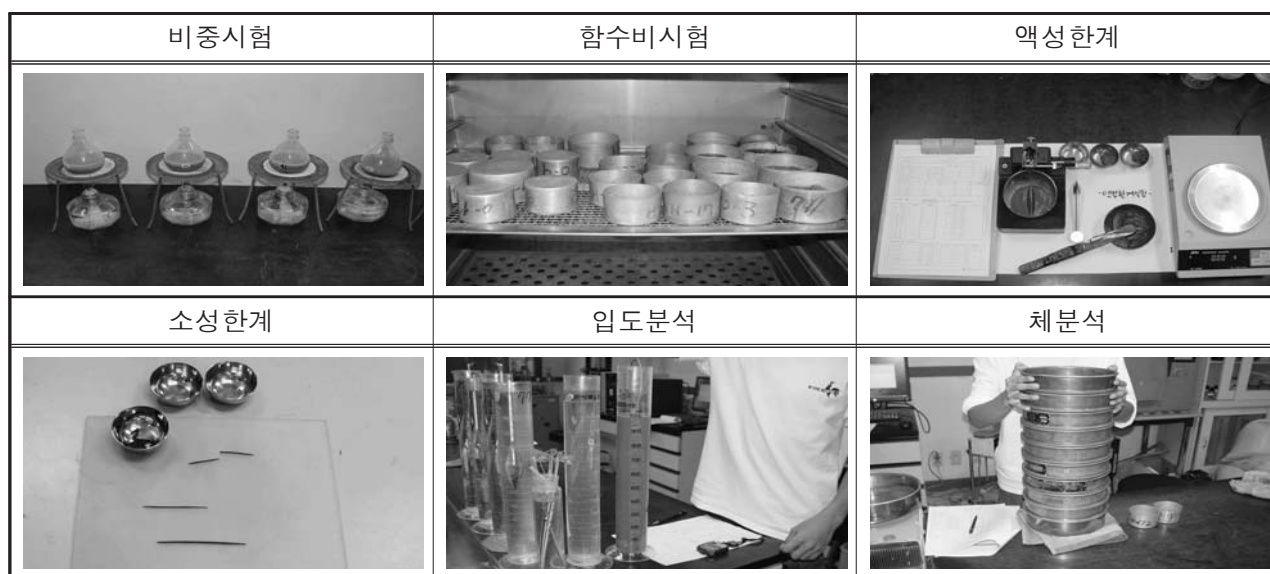


그림 5-4. 토질시험 시험장비

② 역학시험

시추조사 시 채취한 시료에 대하여 흙의 투수특성을 파악하기 위하여 시험을 실시하였다.

구 분		규 정	비고
역학시험	흙의 투수시험	KS F 2322	

### (3) 조사 결과

#### (가) 지형 및 지질

##### ① 지형 특성

사업구간은 행정구역상 경남 하동군 옥종면 북방리 255-2번지 일원으로 북동측에 위치한 덕천강을 경계로 진주시와 접하였다.

사업구간은 하동군의 동측에 위치하고, 지형상으로는 서측은 옥산(▲614m), 백마산(▲193m), 고성산(▲185m) 등이 위치하며 서부지역은 높고 동쪽 경계를 이루는 덕천강 주변 유역은 낮은 평야 지형을 이루고 있다.

##### ② 지질 특성

본 조사지역의 지질은 기존자료(한국지질도<진교도폭>, 1:50,000)를 활용하였다.

선캠브리아기의 결정편암류와 화강편마암류, 중생대 낙동통의 지층 및 이들 제 지층군을 관입한 백악기의 화강암 및 반려암으로 구성되어 있다.

사업구간 인근에 주로 분포하는 퇴적암은 중생대 쥐라기에 퇴적된 경상계 하부층과 하천 유로를 따라 발달한 제4기의 충적층이 분포하고 있다.

퇴적암은 쥐라기에 퇴적된 경상계의 최하부층인 낙동통에 해당하는 지층으로서 현장시험부지 서측 및 남측부에 분포하며, 역암 내지 함력 조립사암과 사암, 세일로 구성되어 있다.

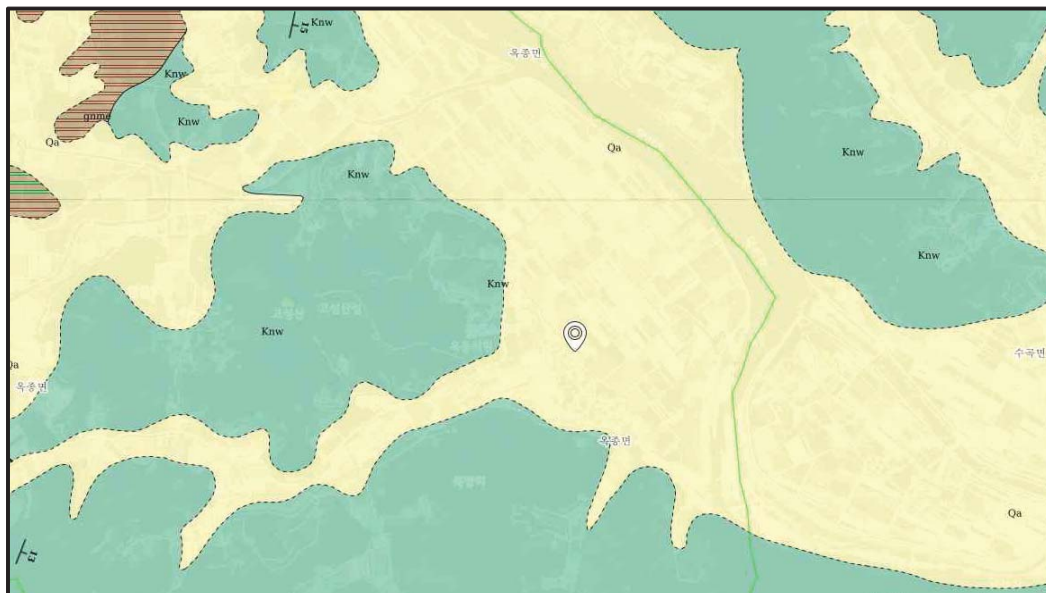
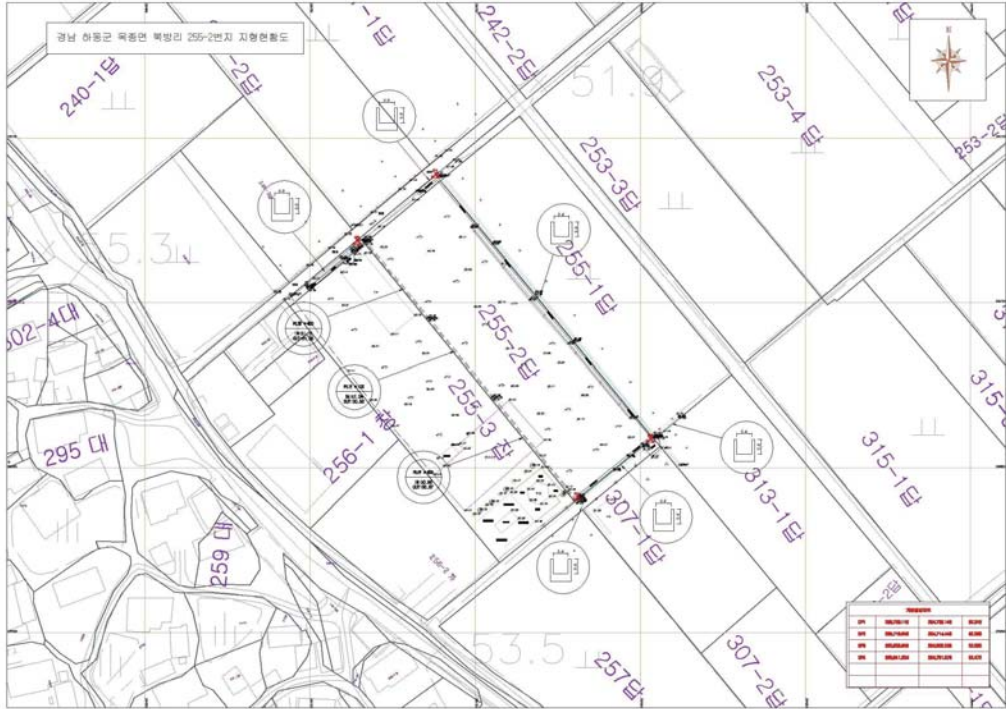


그림 5-5. 현장시험부지 인근 지질도

(나) 측량조사 결과

개 요	<ul style="list-style-type: none"> <li>모든 지형과 지물이 여실히 나타날 수 있도록 국토지리정보원의 공공측량 작업계획서에 의거하여 현지조사 측량을 실시</li> </ul>																																	
기준점측량	<ul style="list-style-type: none"> <li>기준점 측량은 현장시험부지 인근에 설치되어 있는 국토지리정보원의 통합기준점 성과로, 평면기준점 4개소를 설치하여 측량</li> </ul> <table border="1" data-bbox="392 465 1402 752"> <thead> <tr> <th rowspan="2">상시 기준점</th> <th rowspan="2">위 치</th> <th colspan="2">좌 표</th> <th rowspan="2">지반고 EL.(+)m</th> <th rowspan="2">비고</th> </tr> <tr> <th>X 좌표</th> <th>Y 좌표</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP-1</td> <td rowspan="4">경상남도 하동군 옥종면 북방리 255-2번지</td> <td>284738.146</td> <td>285739.118</td> <td>52.316</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CP-2</td> <td>284714.448</td> <td>285718.846</td> <td>52.289</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CP-3</td> <td>284803.299</td> <td>285658.948</td> <td>52.085</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CP-4</td> <td>284781.076</td> <td>285641.264</td> <td>52.472</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					상시 기준점	위 치	좌 표		지반고 EL.(+)m	비고	X 좌표	Y 좌표	CP-1	경상남도 하동군 옥종면 북방리 255-2번지	284738.146	285739.118	52.316		CP-2	284714.448	285718.846	52.289		CP-3	284803.299	285658.948	52.085		CP-4	284781.076	285641.264	52.472	
상시 기준점	위 치	좌 표		지반고 EL.(+)m	비고																													
		X 좌표	Y 좌표																															
CP-1	경상남도 하동군 옥종면 북방리 255-2번지	284738.146	285739.118	52.316																														
CP-2		284714.448	285718.846	52.289																														
CP-3		284803.299	285658.948	52.085																														
CP-4		284781.076	285641.264	52.472																														
지형현황측량																																		





(다) 핸드오거보링 결과

조사결과	구 분	지 층	심도(GL.-m)	두께(m)	구 성 상 태	습윤정도
	HAB-1	매립층	0.0 ~ 1.0	1.0	자갈섞인 실트질 모래	건조
	HAB-2	매립층	0.0 ~ 1.2	1.2	자갈섞인 실트질 모래	건조
	HAB-3	매립층	0.0 ~ 1.5	1.5	자갈섞인 실트질 모래	건조
	HAB-4	매립층	0.0 ~ 1.0	1.0	자갈섞인 실트질 모래	건조

지층개요	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 매립층 : 본 층은 인위적으로 매립된 지층으로 지표로부터 1.0 ~ 1.5m의 층후로 분포함.</li> <li>· 구성성분은 자갈섞인 실트질 모래로 구성, 색조는 갈색을 띄며, 함수상태는 건조한 상태를 보임.</li> </ul>
------	--

조사사진	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개벌(LID) 시설개발 지반조사 공 번 HAB-1 공 종 핸드오거보링 날 짜 2020.10.31</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개벌(LID) 시설개발 지반조사 공 번 HAB-2 공 종 핸드오거보링 날 짜 2020.10.31</p>
	HAB-1	HAB-2
	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개벌(LID) 시설개발 지반조사 공 번 HAB-3 공 종 핸드오거보링 날 짜 2020.10.31</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개벌(LID) 시설개발 지반조사 공 번 HAB-4 공 종 핸드오거보링 날 짜 2020.10.31</p>
	HAB-3	HAB-4

### 핸드오거보링 주 상 도

사업명 : 농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사  
 조사일 : 2020년 11월 31일

X = 285654.8373 Y = 284790.8419  
 시험번호 HAB-1

규격	주상도	심도	시료	지층 설명	함수비 (%)	건조단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	비고
	●●●●●●●●●●	0.0 1.0		* 매립층 0.0 ~ 1.0m - 자갈섞인 실트질 모래 - 갈색 - 건조			0.0 1.0
		2.0 3.0 4.0		- 자갈로인해 심도 1.00m 에서 종료 -			2.0 3.0 4.0

HAB-1

### 핸드오거보링 주 상 도

사업명 : 농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사  
 조사일 : 2020년 11월 31일

X = 285662.5171 Y = 284784.2143  
 시험번호 HAB-2

규격	주상도	심도	시료	지층 설명	함수비 (%)	건조단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	비고
	●●●●●●●●●●	0.0 1.0 1.2		* 매립층 0.0 ~ 1.2m - 자갈섞인 실트질 모래 - 갈색 - 건조			0.0 1.0
		2.0 3.0 4.0		- 자갈로인해 심도 1.20m 에서 종료 -			2.0 3.0 4.0

HAB-2

그림 5-6. 핸드오거보링 주상도



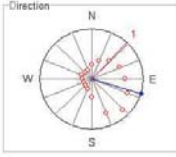
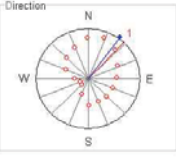
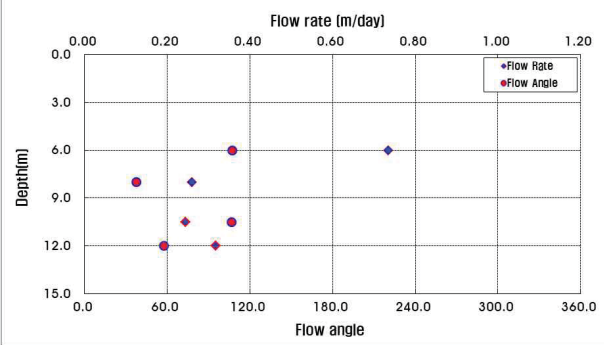
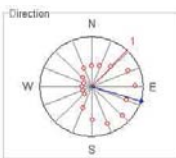
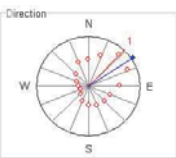


(라) 지하수 유량·유속시험 결과

① BH-2 조사결과

BH-2 시험공에서는 총 4개의 심도에서 지하수 유량 및 유속을 측정하였으며, 측정결과 지하수의 유동방향은 시추공을 중심으로 NE~E방향(37.7~107.1°)으로 거동하는 양상을 보임.

지하수의 유동 속도는 0.017~0.051cm/min의 범위를 보이며, 이를 cm/sec로 환산하면  $2.83 \times 10^{-4} \sim 8.50 \times 10^{-4}$ cm/sec의 범위로 나타남.

표 5-7. BH-2 조사결과

측정심도(G.L.-)											
심도별 측정결과				BH-2 측정결과							
 6.0m		 8.0m									
 10.5m		 12.0m									
측정공	지층명	측정심도 (G.L.-m)	유량 (MN)					유속 (m/day)	유속 (cm/min)	유속 (cm/sec)	주흐름 방향
BH-2	퇴적토층	6.0	107.1					0.7344	0.051	$8.50 \times 10^{-4}$	E
	풍화토층	8.0	37.7	0.2592	0.018	$3.00 \times 10^{-4}$	NE				
	풍화암층	10.5	106.7	0.2448	0.017	$2.83 \times 10^{-4}$	E				
	연암층	12.0	57.4	0.3168	0.022	$3.67 \times 10^{-4}$	NE				
측정사진											
											
원경				근경							

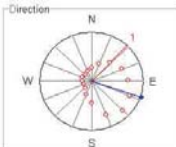
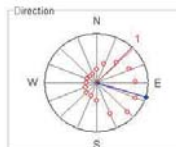
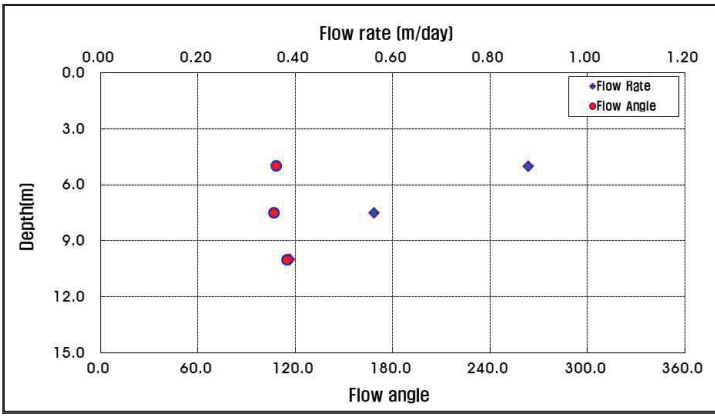
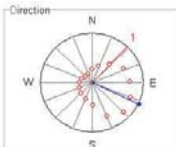




② BH-3 조사결과

BH-3 시험공에서는 총 3개의 심도에서 지하수 유향 및 유속을 측정한 결과 지하수의 유동 방향은 시추공을 중심으로 E~SE방향(107.0~115.0°)으로 거동하는 양상을 보인다.

지하수의 유동 속도는 0.027~0.061cm/min의 범위를 보이며, 이를 cm/sec로 환산하면  $4.50 \times 10^{-4} \sim 1.02 \times 10^{-3}$ cm/sec의 범위로 함양시설 설치에 좋은 조건을 가지고 있는 것으로 사료 된다.

표 5-8. BH-3 조사결과

측정심도(G.L.-)							
심도별 측정결과			BH-3 측정결과				
 5.0m		 7.5m					
 10.0m		-					
측정공	지층명	측정심도 (G.L.-m)	유향 (MN)				
BH-3	퇴적토층	5.0	108.3	0.8784	0.061	$1.02 \times 10^{-3}$	E
	풍화토층	7.5	107.0	0.5616	0.039	$6.50 \times 10^{-4}$	E
	연암층	10.0	115.0	0.3888	0.027	$4.50 \times 10^{-4}$	SE
측정사진							
							
<p>용역명 농업부산물을 이용한 농촌형 지형형개벌(LID) 시설개발 지반조사</p> <p>시험명 지하수유향·유속 측정(FM)</p> <p>공번 BH-3</p> <p>일자 2020.10.</p>				<p>용역명 농업부산물을 이용한 농촌형 지형형개벌(LID) 시설개발 지반조사</p> <p>시험명 지하수유향·유속 측정(FM)</p> <p>공번 BH-3</p> <p>일자 2020.10.</p>			
원경				근경			



③ 지하수 유향·유속 결과 분석

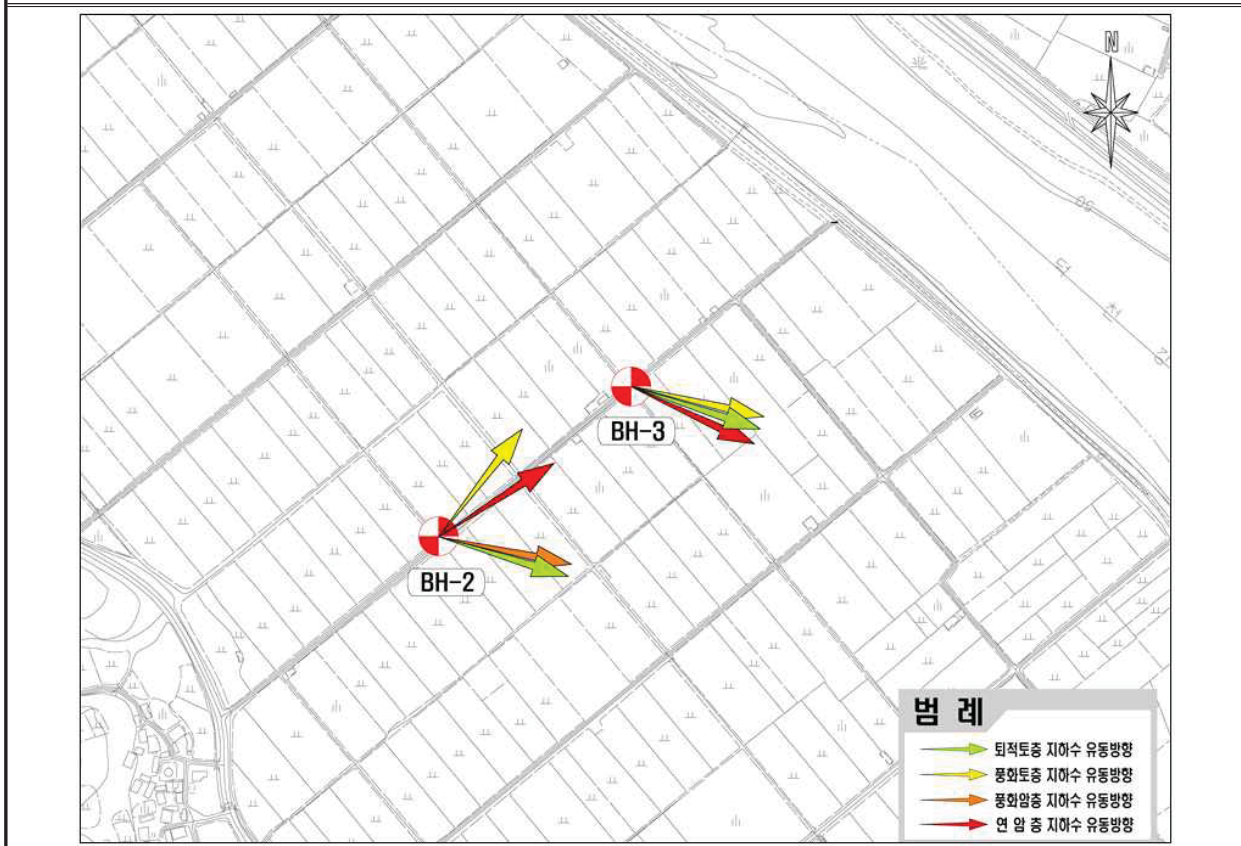
BH-2, 3 시험공에서 각 지층별 총 7개의 심도에서 지하수 유향 및 유속을 측정한 결과 지하수의 유동 방향은 NE방향(37.7°) ~ SE방향(115.0°)으로 거동하는 양상을 보이며 E 방향이 우세하게 나타났다.

심도 증가와 지하수의 유동 속도는 상관관계가 미미하며, 지하수의 유동 속도는 0.017~0.061cm/min의 범위를 보이며, 이를 cm/sec로 환산하면  $2.83 \times 10^{-4} \sim 1.02 \times 10^{-3}$  cm/sec의 범위를 보여 함양 시설 적용이 좋을 것으로 판단된다.

표 5-9. 지하수 유향·유속 결과 분석

측정공	지층명	심도 (G.L.)	유향 (MN)	유속 (cm/sec)	측정결과
BH-2	퇴적토층	6.0	107.1	$8.50 \times 10^{-4}$	
	풍화토층	8.0	37.7	$3.00 \times 10^{-4}$	
	풍화암층	10.5	106.7	$2.83 \times 10^{-4}$	
	연암층	12.0	57.4	$3.68 \times 10^{-4}$	
BH-3	퇴적토층	5.0	108.3	$1.02 \times 10^{-3}$	
	풍화토층	7.5	107.0	$6.50 \times 10^{-4}$	
	연암층	10.0	115.0	$4.50 \times 10^{-4}$	

지하수 유동방향



(마) 시추조사 결과

현장시험부지 내 실시한 5개소의 시추조사 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 매립층의 경우 인위적으로 매립된 지층으로 지표로부터 3.4~4.5m의 층후로 분포. 구성성분은 잡석섞인 실트질 모래로 구성되어 있으며, 색조는 갈색을 보임. 표준관입시험결과 N값은 13/30~50/20(횃수/cm)으로 보통조밀~매우조밀한 상대밀도를 나타내며 부분적으로 분포하는 자갈의 영향으로 큰편차를 보임.
- 퇴적모래층의 경우 BH-1 시추공에서만 분포한다. 분포심도는 지표하(GL.-m) 4.0m에서 0.5m의 층후로 분포하며, 구성성분은 자갈섞인 세립~중립질 모래로 구성됨. 표준관입시험결과 N값은 11/30(횃수/cm)으로 보통조밀한 상대밀도를 나타냄.
- 퇴적자갈층의 경우 BH-1 시추공을 제외한 모든 시추공에서 분포. 분포심도는 지표하(GL.-m) 3.4~4.5m에서 0.6~1.5m의 층후로 분포하며, 구성성분은 모래섞인 자갈 및 전석으로 구성되어 있으며, 부분적으로 Core가 형성. 표준관입시험결과 N값은 23/30 ~29/30(횃수/cm)으로 보통조밀한 상대밀도를 나타냄.
- 풍화토의 경우 풍화대의 상부 풍화대층으로 BH-2 시추공을 제외한 모든 시추공에서 분포. 분포심도는 지표하(GL.-m) 4.4~6.0m에서 0.5~3.0m의 층후로 분포하며, 구성성분은 암편섞인 실트질 모래로 구성됨. 표준관입시험결과 N값은 29/30~50/18(횃수/cm)로 보통조밀~매우조밀한 상대밀도를 보임.
- 풍화암의 경우 풍화대의 하부지층으로 BH-2 시추공을 제외한 모든 시추공에서 분포. 분포심도는 지표하(GL.-m) 4.5~6.0m에서 1.5m이상의 층후로 분포하며, 구성성분은 굴진시 암편섞인 모래로 분해되며 부분적으로 Core가 형성. 표준관입시험 결과 N값은 50/10~50/2(횃수/cm)로 매우조밀한 상대밀도를 보임.

표 5-10. 시추조사 결과

공 번	지층분포상태(m)					굴착 심도 (m)	SPT (회)	비고
	매립층	퇴적층		풍화토	풍화암			
		모래	자갈					
BH-1	4.0	0.5	-	1.5	2.0 이상	8.0	5	
BH-2	4.0	-	1.0 이상	-	-	5.0	3	
BH-3	3.4	-	0.6	0.5	1.5 이상	6.0	4	
BH-4	3.5	-	1.5	3.0	4.0 이상	12.0	12	
BH-5	4.5	-	1.5	1.0	2.0 이상	9.0	9	

표 5-11. 지층개황

구 분	심도 (GL.-m)	두께(m)	구 성 상 태	N값(횃수/cm) (TCR%/RQD%)
매립층	0.0	3.4~4.5	잡석섞인 실트질 모래	13/30~50/20
퇴적층	모래	4.0	자갈섞인 세립~중립질 모래	11/30
	자갈	3.4~4.5	모래섞인 자갈, 전석	23/30~29/30 (50%/0%)
풍화토	4.4~6.0	0.5~3.0	암편섞인 실트질 모래	29/30~50/18
풍화암	4.5~6.0	1.5 이상	굴진시 암편섞인 모래로 분해 부분적 Core 형성	50/10~50/2 (40~60/0)

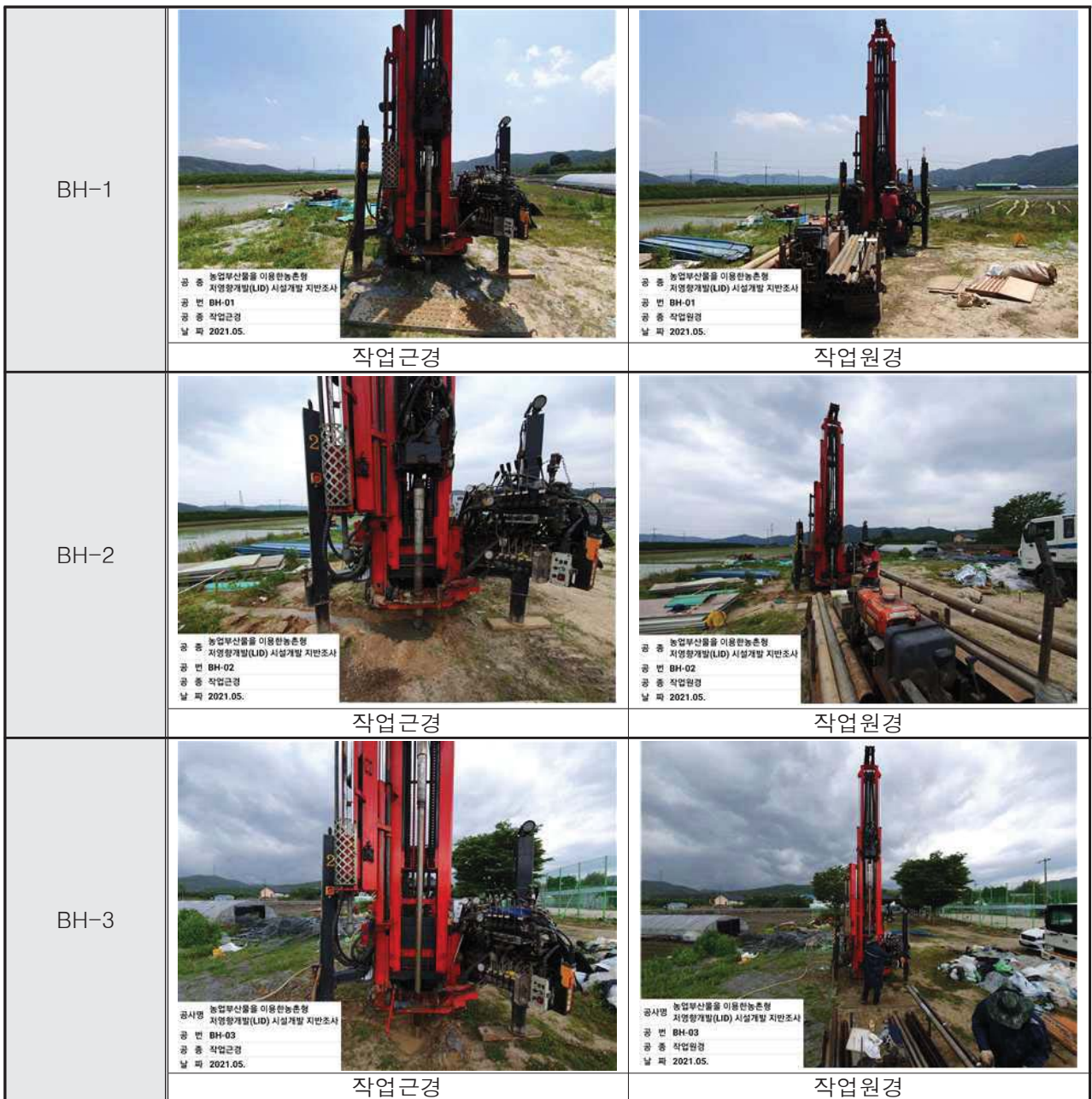


그림 5-7. 시추조사 전경



BH-4	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지형상계탈(LID) 시설개발 지반조사 공 번 BH-04 공 종 작업근경 날 짜 2021.06.</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지형상계탈(LID) 시설개발 지반조사 공 번 BH-04 공 종 작업원경 날 짜 2021.06.</p>
	작업근경	작업원경
BH-5	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지형상계탈(LID) 시설개발 지반조사 공 번 BH-05 공 종 작업근경 날 짜 2021.06.</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지형상계탈(LID) 시설개발 지반조사 공 번 BH-05 공 종 작업원경 날 짜 2021.06.</p>
	작업근경	작업원경

그림 5-7. 계 속






지점	폐공전	폐공중	폐공후
BH-1	 <p>공사명 농업부산물물 이용관능촌형 지명(행정(리)사) 시설개발 지원조사 공 번 BH-01 공 종 채굴전 날 짜 2021.05.</p>	 <p>공사명 농업부산물물 이용관능촌형 지명(행정(리)사) 시설개발 지원조사 공 번 BH-01 공 종 채굴중(모래주입) 날 짜 2021.05.</p>	 <p>공사명 농업부산물물 이용관능촌형 지명(행정(리)사) 시설개발 지원조사 공 번 BH-01 공 종 채굴후 날 짜 2021.05.</p>
BH-2	 <p>공사명 농업부산물물 이용관능촌형 지명(행정(리)사) 시설개발 지원조사 공 번 BH-02 공 종 채굴전 날 짜 2021.05.</p>	 <p>공사명 농업부산물물 이용관능촌형 지명(행정(리)사) 시설개발 지원조사 공 번 BH-02 공 종 채굴중(모래주입) 날 짜 2021.05.</p>	
BH-3			
BH-4			
BH-5	 <p>공사명 농업부산물물 이용관능촌형 지명(행정(리)사) 시설개발 지원조사 공 번 BH-5 공 종 채굴전 날 짜 2021.06.</p>		

그림 5-8. 폐공사진첩



# 시추주상도

## BOREHOLE LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공사명 PROJECT	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사			공 번 HOLE No.	BH-1
위치 LOCATION	경남 하동군 옥종면 북방리 일원	좌 표 COORDINATES	X : 285661.30 Y : 284791.05	지반표고 ELEVATION	EL(+) 52.10 M
날 짜 DATE	2021년 5월 28일 ~ 5월 28일	공 경 HOLE DIA.	NX	지하수위 GROUND WATER	GL(-) 1.60 M
시 추 기 D R I L L	SD-4000	시 추 자 D R I L L E R	김수호	작 성 자 APPROVED BY	문제덕

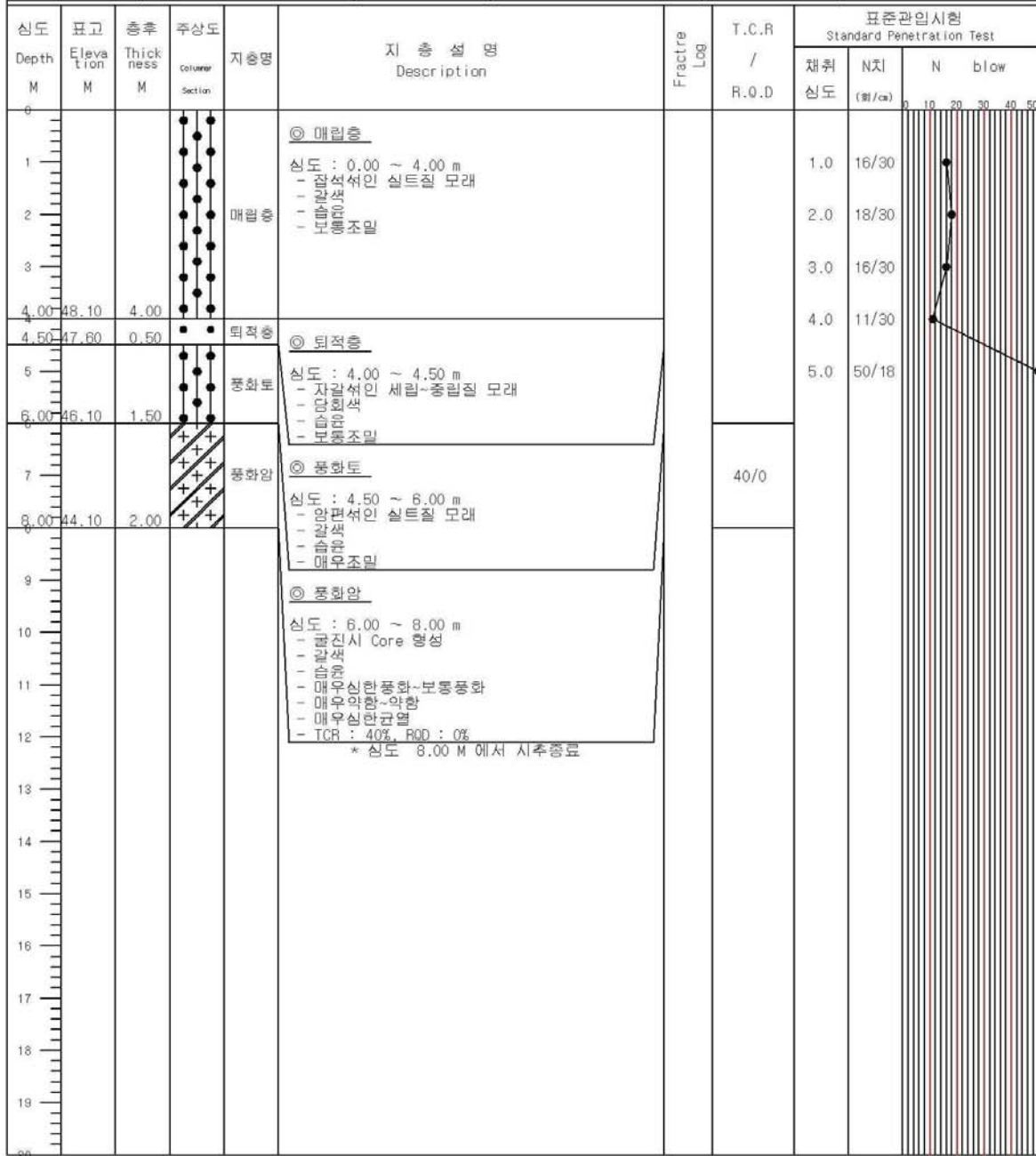


그림 5-9. 시추주상도



# 시추주상도

## BOREHOLE LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공사명 PROJECT	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사			공번 HOLE No.	BH-3
위치 LOCATION	경남 하동군 옥종면 북방리 일원	좌표 COORDINATES	X : 285655.72 Y : 284782.70	지반표고 ELEVATION	EL(+) 52.07 M
날짜 DATE	2021년5월28일 ~ 5월28일	공경 HOLE DIA.	NX	지하수위 GROUND WATER	GL(-) 1.29 M
시추기 DRILL	SD-4000	시추자 DRILLER	김수호	작성자 APPROVED BY	문제덕

심도 Depth M	표고 Elevation M	층후 Thick- ness M	주상도 Column Section	지층명	지층 설명 Description	Fracture Log	T.C.R / R.O.D	표준관입시험 Standard Penetration Test					
								채취 심도	N치 (회/㎝)	N blow			
0					◎ 매립층 심도 : 0.00 ~ 3.40 m - 매립층 - 석회암 - 모래 - 점토 - 부유물 - 자갈우세구간 없음			1.0	18/30	●			
3.40	48.67	3.40		매립층				2.0	34/30	●			
4.00	48.07	0.60		퇴적층	◎ 퇴적층 심도 : 3.40 ~ 4.00 m - 모래 - 자갈			3.0	50/20	●			
4.50	47.57	0.50		풍화암	◎ 풍화암 심도 : 4.00 ~ 4.50 m - 풍화암 - 석회암		62/0	4.0	48/30	●			
6.00	46.07	1.50		풍화암	◎ 풍화암 심도 : 4.50 ~ 6.00 m - 풍화암 - 석회암 - 모래 - 점토 - 부유물 - 자갈 - TCR : 62%, ROD : 0% * 심도 6.00 M 에서 시추종료								
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													

그림 5-9. 계속

# 시추주상도

## BOREHOLE LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공사명 PROJECT	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사			공번 HOLE No.	BH-4
위치 LOCATION	경남 하동군 옥종면 북방리 일원	좌표 COORDINATES	X : 285670.63 Y : 284783.50	지반표고 ELEVATION	EL(+) 52.17 M
날짜 DATE	2021년 6월 10일 ~ 6월 10일	공경 HOLE DIA.	NX	지하수위 GROUND WATER	GL(-) 1.36 M
시추기 DRILL	SD-4000	시추자 DRILLER	김수호	작성자 APPROVED BY	문제덕

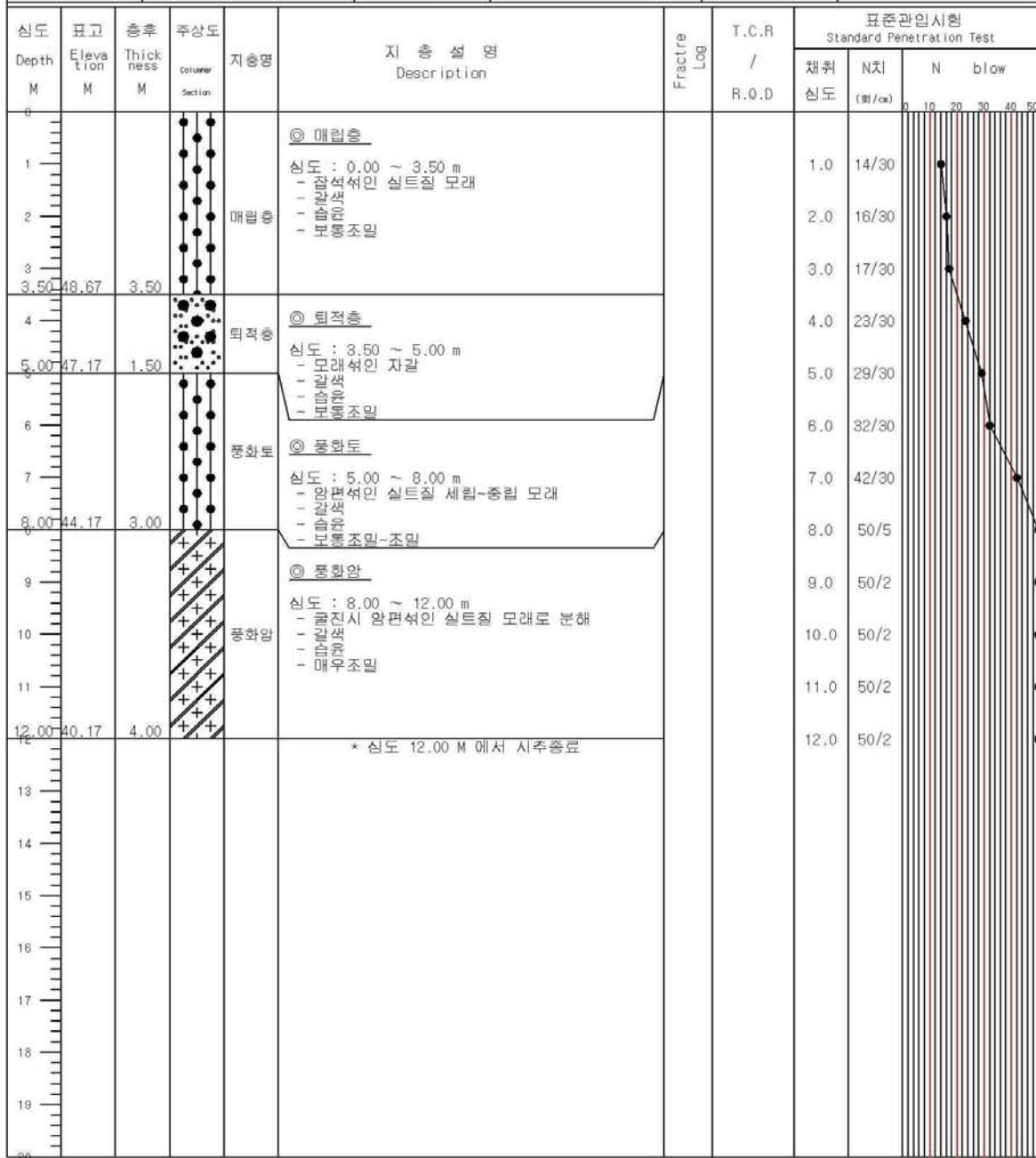


그림 5-9. 계속

# 시추주상도

## BOREHOLE LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공사명 PROJECT	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사			공 번 HOLE No.	BH-5
위 치 LOCATION	경남 하동군 옥종면 북방리 일원	좌 표 COORDINATES	X : 285665.65 Y : 284786.89	지반표고 ELEVATION	EL(+) 52.13 M
날 짜 DATE	2021년6월10일 ~ 6월10일	공 경 HOLE DIA.	NX	지하수위 GROUND WATER	GL(-) 1.35 M
시 추 기 D R I L L	SD-4000	시 추 자 D R I L L E R	김수호	작 성 자 APPROVED BY	문제덕

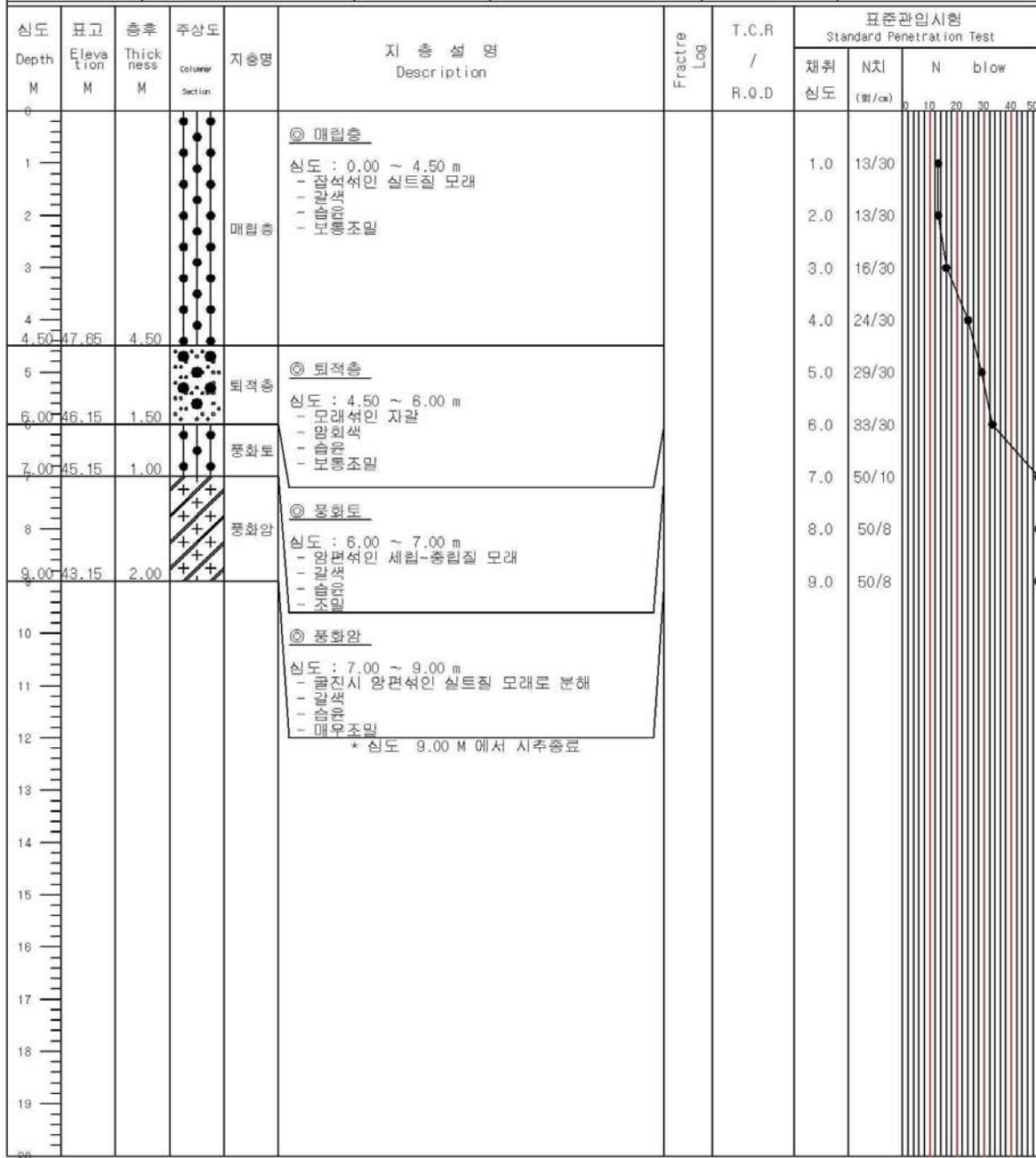
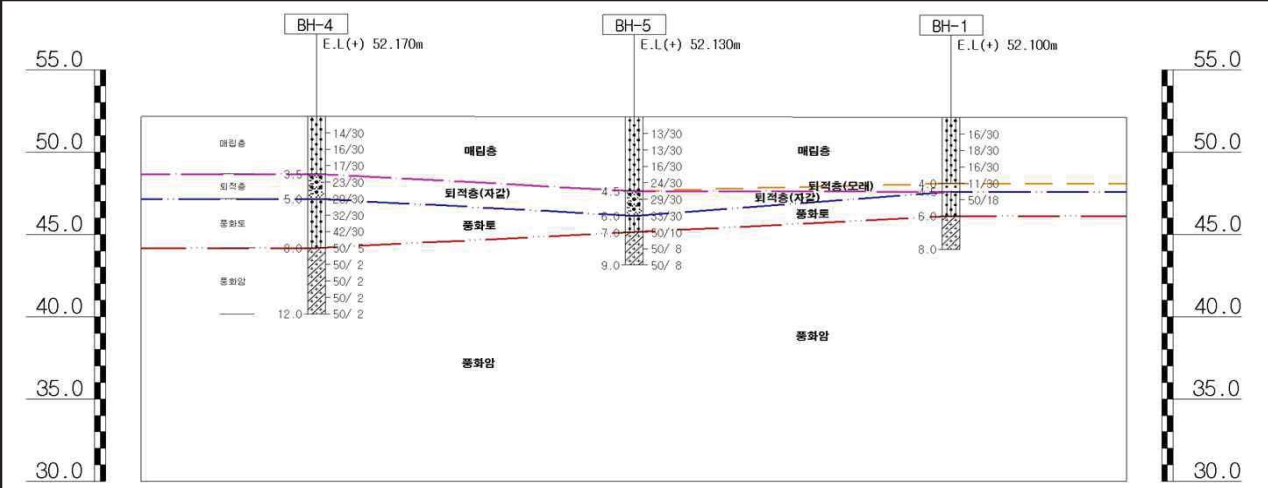
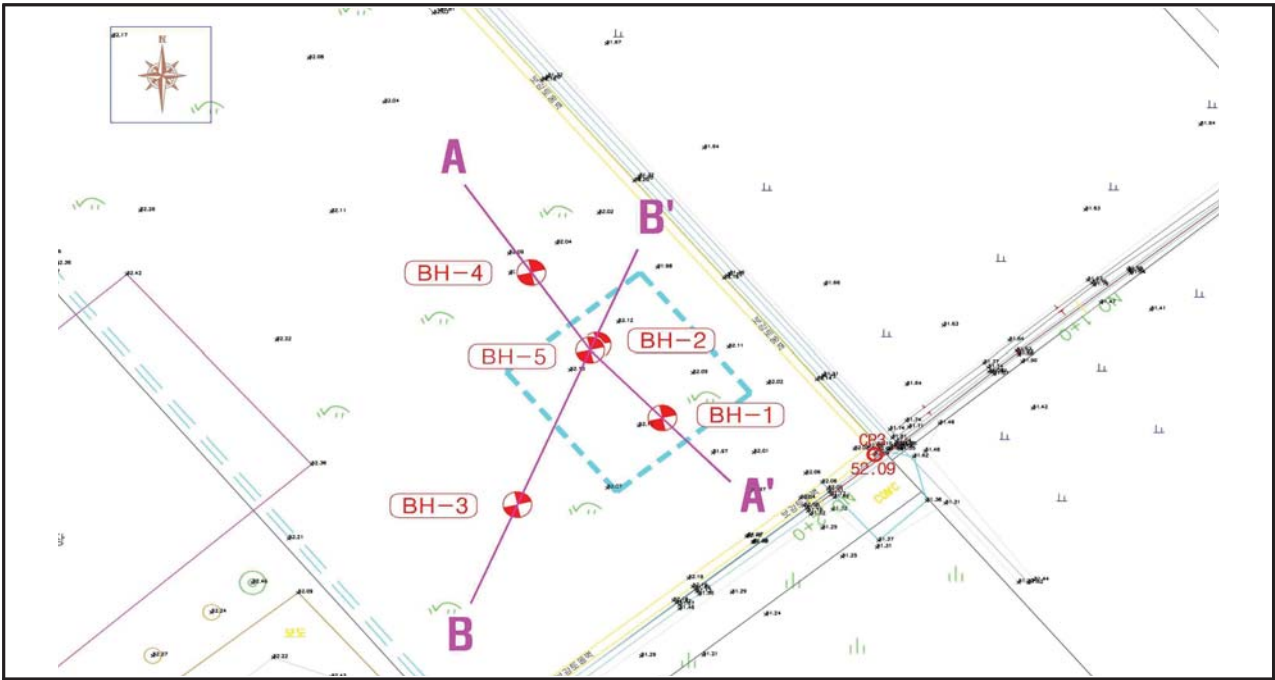
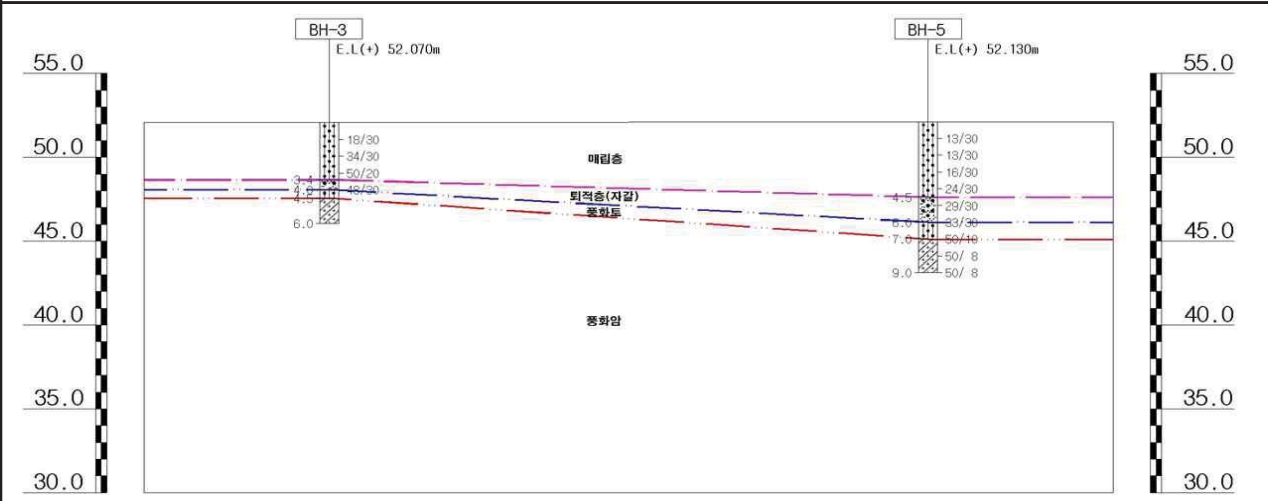


그림 5-9. 계 속





지층단면도(A-A')



지층단면도(B-B')

그림 5-10. 지층단면도

(바) 지하수위 측정 결과

지하수위는 향후 계절, 환경 및 주위여건의 변화에 따라 다소의 변동이 예상되며, 지하수위가 상승하면 지반의 자립성이 현저히 약화되고, 지하수의 용출이 있을 경우는 굴착법면의 붕괴 유발 및 지지력을 감소시킬 수 있으므로 시공 시 이점에 유의하여 적절한 대책을 강구해야 할 것으로 판단된다. 시추조사 완료 후 측정된 각 공별 공내 지하수위는 다음과 같이 1.29~1.60m로 조사되었다.

표 5-12. 지하수위 측정 결과

구 분 공 번	지반고 EL.(+)m	지하수위		지 층
		GL.(-)m	EL.(+)m	
BH-1	52.10	1.60	50.50	매립층
BH-2	52.13	1.33	50.80	매립층
BH-3	52.07	1.29	50.78	매립층
BH-4	52.17	1.36	50.81	매립층
BH-5	52.13	1.35	50.78	매립층

주) 상기 조사결과는 굴진 후 시추공 내에서 지하수위를 측정한 것으로 계절변화, 강우정도, 주변 오수·우수 유출 등과 같은 요인으로 인하여 변화될 수 있음.

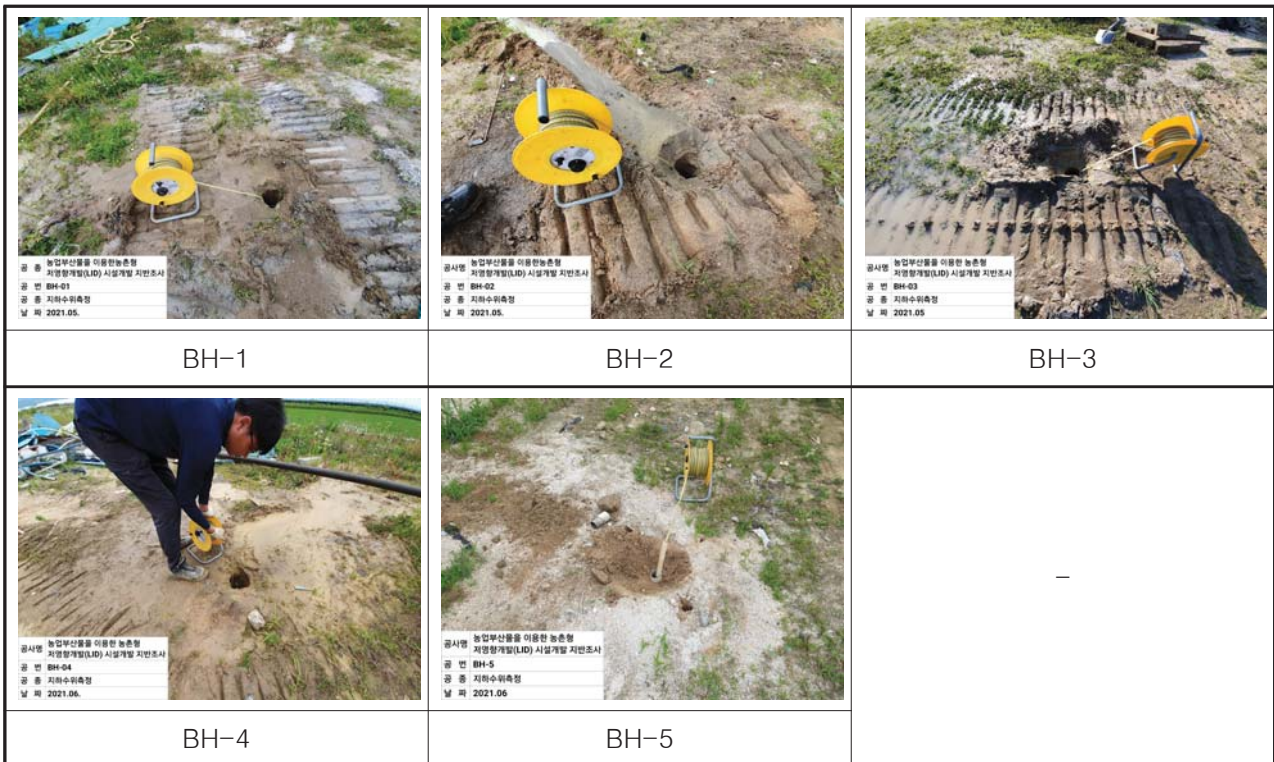


그림 5-11. 지하수위 측정

(사) 표준관입시험 결과

원위치에 있는 흙의 연경도 및 상대밀도를 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 표준관입 시험을 시행하였다. 지층분포는 매립층(모래), 퇴적층(모래, 자갈), 풍화토, 풍화암의 층서를 보이며, 조사지역 내 표준관입저항값(N값)은 매립층의 경우 13/30~50/20으로 보통느슨~매우조밀한 상대밀도를 보이고, 퇴적모래층 11/30, 퇴적자갈층 23/30~29/30으로 보통조밀~매우조밀한 상대밀도 보이고 있다. 또한 풍화토의 표준관입저항값(N값)의 경우 29/30~50/18로 조사되어 상대밀도는 보통조밀~매우조밀로 나타났으며, 풍화암의 경우 50/10~50/2로 매우조밀한 상태를 보이는 것으로 조사되었다.

표 5-13. 표준관입시험 결과

지층분포	상대밀도	N값	N값 분포	
매립층	보통느슨~매우조밀	13/30~50/20		
퇴적층	모래	보통조밀		11/30
	자갈	보통조밀~매우조밀		23/30~29/30
풍화토	보통조밀~매우조밀	29/30~50/18		
풍화암	매우조밀	50/10~50/2		

주) 표준관입시험 값은 토층의 포화도 및 유기물함량, 모래, 자갈의 함량에 따라서 약간의 차이를 보임.



그림 5-12. 표준관입시험 전경



<p>BH-3</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지명왕게말(LID) 시설개발 지원조사 공 번 BH-03 공 종 표준관입시험 날 짜 2021.05.</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지명왕게말(LID) 시설개발 지원조사 공 번 BH-03 공 종 표준관입시험시료 날 짜 2021.05.</p>
	<p>표준관입시험 전경</p>	<p>표준관입시험 시료</p>
<p>BH-4</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지명왕게말(LID) 시설개발 지원조사 공 번 BH-04 공 종 표준관입시험 날 짜 2021.06.</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지명왕게말(LID) 시설개발 지원조사 공 번 BH-04 공 종 표준관입시험시료 날 짜 2021.06.</p>
	<p>표준관입시험 전경</p>	<p>표준관입시험 시료</p>
<p>BH-5</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지명왕게말(LID) 시설개발 지원조사 공 번 BH-05 공 종 표준관입시험 날 짜 2021.06.</p>	 <p>공사명 농업부산물을 이용한 농촌형 지명왕게말(LID) 시설개발 지원조사 공 번 BH-05 공 종 표준관입시험시료 날 짜 2021.06.</p>
	<p>표준관입시험 전경</p>	<p>표준관입시험 시료</p>

그림 5-12. 계속

(아) 현장투수시험 결과

조사지역 내 분포하는 지층의 투수계수를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 현장투수시험 결과 조사지역 내 투수계수는 BH-1번 지점 풍화암층(암편석인 실트질 모래)에서 3.81E-04 cm/sec로 가장 작은 값을 보이고, BH-3번 지점 퇴적층(모래섞인 자갈)에서 5.99E-03 cm/sec로 가장 큰 값을 보임.
- 함양시설의 주 타겟층은 모래섞인 자갈로 구성된 퇴적층으로 퇴적층의 투수계수는 4.52E-03 ~ 5.99E-03cm/sec로 조사됨.

표 5-14. 현장투수시험 결과

공 번	시험심도(m)	시험지층	지층구성	투수계수(cm/sec)	비고(N값)
BH-1	6.0 ~ 8.0	풍화암층	암편석인 실트질 모래	3.81E-04	≒ 50/1
BH-3	3.4 ~ 4.0	퇴적층	모래섞인 자갈	5.99E-03	≒ 50/20
BH-4	4.0 ~ 5.0	퇴적층	모래섞인 자갈	4.52E-03	≒ 23/30
	6.0 ~ 7.0	풍화토	암편석인 실트질 모래	6.86E-04	≒ 32/30
BH-5	5.0 ~ 6.0	퇴적층	모래섞인 자갈	4.76E-03	≒ 29/30
	6.5 ~ 7.0	풍화암	암편석인 모래	6.78E-04	≒ 33/30

주) BH-2번 지점의 경우 5.0m 구간 조사 시 전반적으로 core가 형성되어 조사를 중지하였으며, 현장 투수시험은 진행하지 않음.

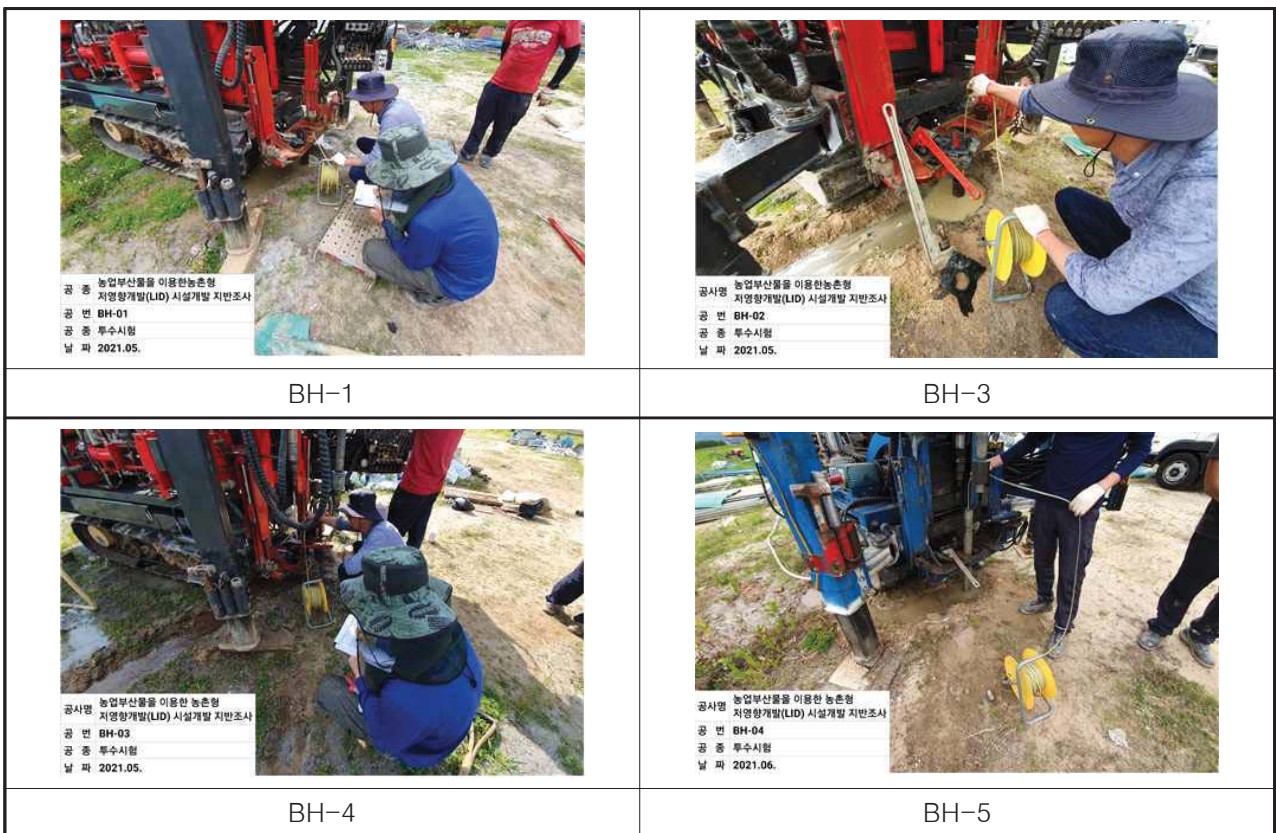


그림 5-13. 현장투수시험 전경



### FIELD PERMEABILITY TEST RESULT

PROJECT	<b>농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사</b>				
HOLE NO.	BH-1	DEPTH(m)	6.0 ~ 8.0m	G.W.L.	1.60m
DATE	2021-05-28	STRATUM	<b>풍화암</b>	CASING D.	7.6cm
TESTED BY	-	SOIL TYPE	골전사 암편석인 실트질 모래로 분해	HOLE D.	8.0cm
CHECKED BY	-	N VALUE	<b>Core 시료</b>	케이싱높이	0.2m

경과시간 (sec)	수위 (GL.-cm)	시간차 (sec)	수위차 (cm)	Q (cm <sup>3</sup> )	H (cm)	Tu (cm)	k (cm/sec)
0	0.0	0	0	0	180	-440	
10	10.0	10	10	454	170	-440	8.16E-04
20	27.0	10	17	771	153	-440	1.50E-03
30	28.0	10	1	45	152	-440	9.36E-05
60	35.0	30	7	318	145	-440	2.24E-04
90	42.0	30	7	318	138	-440	2.35E-04
120	48.0	30	6	272	132	-440	2.12E-04
150	54.0	30	6	272	126	-440	2.21E-04
180	59.0	30	5	227	121	-440	1.93E-04
240	67.0	60	8	363	113	-440	1.63E-04
300	74.0	60	7	318	106	-440	1.52E-04

k = **3.81E-04**

**적용 공식 CASE 4**

**[시험구간이 지하수위면 상부에 위치하는 경우]**

■ CASE 1 :  $T_u \geq 3L$

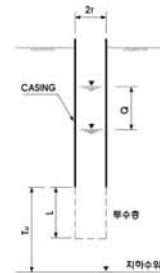
$$k(\text{cm/sec}) = \frac{Q}{2\pi L^2} \left[ 2.3 \log_{10} \left\{ \frac{L}{r} + \sqrt{1 + \left( \frac{L}{r} \right)^2} \right\} - 1 \right]$$

■ CASE 2 :  $T_u < L$

$$k(\text{cm/sec}) = \frac{2.3Q \log_{10}(L/r)}{\pi T_u (2L - T_u)}$$

■ CASE 3 :  $L \leq T_u < 3L$

$$k(\text{cm/sec}) = \frac{6.9Q \log_{10}(L/r)}{\pi L (L + 2T_u)}$$



**[시험구간이 지하수위면 하부에 위치하는 경우]**

■ CASE 4

$$k(\text{cm/sec}) = \frac{5.29r^2}{2L(t_2 - t_1)} \log_{10} \left( \frac{L}{r} \right) \log_{10} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)$$



$T_u$ : 시험구간에서 지하수위까지 거리(cm)	$r$ : CASING 반경(cm)
$L$ : 시험구간(cm)	$Q$ : 주입유량(cm <sup>3</sup> /sec)
$t_1, t_2$ : 경과시간(sec)	$H_1, H_2$ : 수두차(cm)

그림 5-14. 현장투수시험 결과













(자) 토질시험 결과

시추조사 시 채취된 시료에 대하여 비중, 함수비, 액·소성한계, 입도분석시험 등을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- BH-4지점(시험구간 4.0~5.0m)의 경우 비중 2.66, 함수비 16.2%로 분석되었으며, 통일분류에 의한 흙의 분류는 SP(입도분포 불량한 모래)로 나타남.
- BH-5지점(시험구간 6.0~7.0m)의 경우 비중 2.76, 함수비 7.0%로 분석되었으며, 통일분류에 의한 흙의 분류는 SM(실트질 모래)로 나타남.

표 5-15. 실내 토질시험 결과

공 번	시험구간 (GL. -m)	비중 (Gs)	함수비 (%)	Atterberg Limits		Grain Size Distribution (%)					통일 분류
				LL (%)	PI	NO.4	NO.10	NO.40	NO.200	0.002mm	
BH-4	4.0~5.0	2.66	16.2	N.P	N.P	83.7	69.9	8.3	1.9	-	SP
BH-5	6.0~7.0	2.76	7.0	N.P	N.P	61.3	42.6	26.3	15.3	1.8	SM

(차) 실내투수시험 결과

조사지역의 분포하는 토층의 역학 특성을 파악하기 위하여 시추조사 시 채취한 시료를 대상으로 실내투수시험을 실시함. 시험결과 투수계수는 BH-4(퇴적층)에서 2.15E-03 cm/sec, BH-5(풍화토)에서 1.19E-03cm/sec로 나타났다.

표 5-16. 실내투수시험 결과

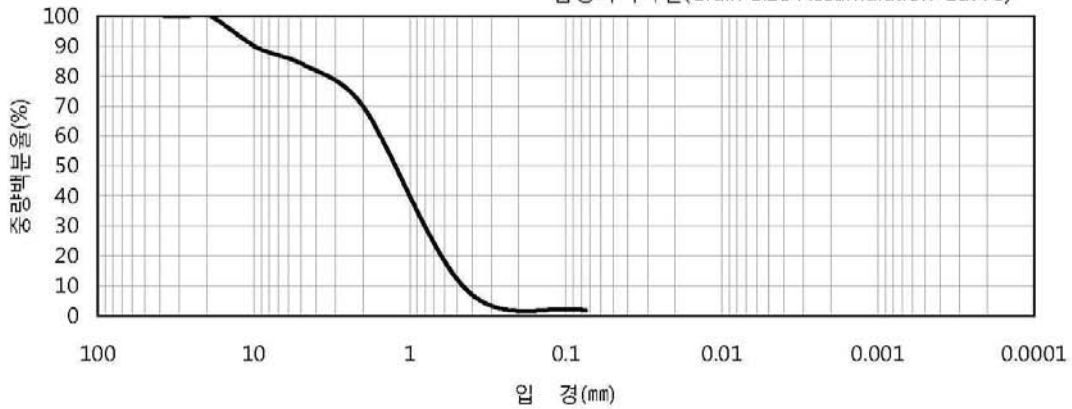
공번	시험심도(m)	시험지층	지층구성	투수계수(cm/sec)	통일분류
BH-4	4.0 ~5.0	퇴적층	모래섞인 자갈	2.15E-03	SP
BH-5	6.0~7.0	풍화토	암편섞인 모래	1.19E-03	SM

## 시험·검사 결과

공 사 명	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사		
접 수 번 호	GMTG-21-0619		
접 수 일 자	2021년 6월		
시 료 번 호	BH-04	,	4.0~5.0 m
시 험 종 목	토사물성	시 험 규 격	KSF 2308,KSF 2306,KSF 2303,KSF 2502,KSF 2302

## 시험 결과

입경가적곡선(Grain Size Accumuiation Curve)



Gravel	Sand	Silt	Clay	Colloids
4.75mm이상	4.75mm~0.074mm	0.074mm~0.005mm	0.005mm~0.001mm	0.001mm이하

01. 비 중	2.66	06. 최대 입경	19.0 mm	11. 곡 률 계 수	0.9
02. 자연 함수비	16.2 %	07. 60% 입경	1.542 mm	12. 4.75mm 통과량	83.7 %
03. 액 성 한 계	N.P %	08. 30% 입경	0.811 mm	13. 2.00mm 통과량	69.9 %
04. 소 성 한 계	N.P %	09. 10% 입경	0.467 mm	14. 0.08mm 통과량	1.9 %
05. 소 성 지 수	N.P	10. 균 등 계 수	3.3	15. 통 일 분 류	SP

2021년 6월

지엠티지



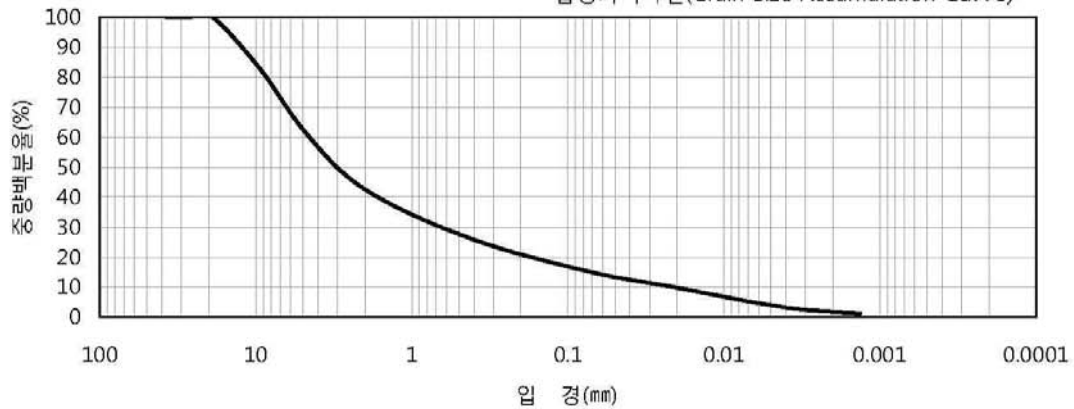
그림 5-15. 물성시험 성적서

## 시험·검사 결과

공사명	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사		
접수번호	GMTG-21-0619		
접수일자	2021년 6월		
시료번호	BH-05	6.0~7.0	m
시험종목	토사물성	시험규격	KSF 2308, KSF 2306, KSF 2303, KSF 2502, KSF 2302

## 시험결과

입경가적곡선(Grain Size Accumuiation Curve)



Gravel	Sand	Silt	Clay	Colloids
4.75mm이상	4.75mm~0.074mm	0.074mm~0.005mm	0.005mm~0.001mm	0.001mm이하

01. 비 중	2.76	06. 최대 입경	19.0 mm	11. 곡률 계수	4.2
02. 자연 함수비	7.0 %	07. 60% 입경	4.592 mm	12. 4.75mm 통과량	61.3 %
03. 액성한계	N.P %	08. 30% 입경	0.644 mm	13. 2.00mm 통과량	42.6 %
04. 소성한계	N.P %	09. 10% 입경	0.022 mm	14. 0.08mm 통과량	15.3 %
05. 소성지수	N.P	10. 균등 계수	213.3	15. 통일 분류	SM

2021년 6월

지엠티지



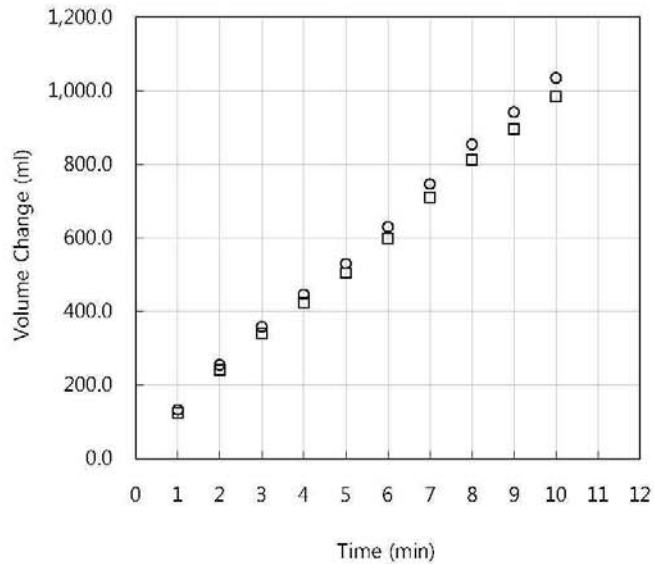
그림 5-15. 계속

## 시험·검사 결과

공 사 명	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사		
문 서 번 호	GMTG-21-0619		
시 행 일 자	2021년 6월		
시 험 번 호	BH-04	,	4.0~5.0 m
시 험 종 목	실내투수시험	시 험 방 법	KS F 2322

### 시험 결과

구 분	1	2	3
포화시간 (min)	1440	1440	1440
측정시간 (min)	10.0	10.0	10.0
유량 (m <sup>3</sup> )	1035.0	984.0	1082.4
변수위압력 (kPa)	10	10	10
투수계수 (cm/sec)	2.15E-03	2.05E-03	2.25E-03
$\ast k = \frac{100 \times q \times L}{(60 \times A) \times (102 \times dP)}$			



시료의 직경, (d)	100.0	<i>mm</i>	시료의 높이, (h)	100.0	<i>mm</i>
습윤단위중량, (γ <sub>w</sub> )	17.05	<i>kN/ m<sup>3</sup></i>	건조단위중량, (γ <sub>d</sub> )	14.67	<i>kN/ m<sup>3</sup></i>
함수비, (w)	16.2	%	비중, (G <sub>s</sub> )	2.74	

투수계수 : 2.15E-03 (cm/sec)

2021년 6월

지엠티지



그림 5-16. 실내투수시험 성적서

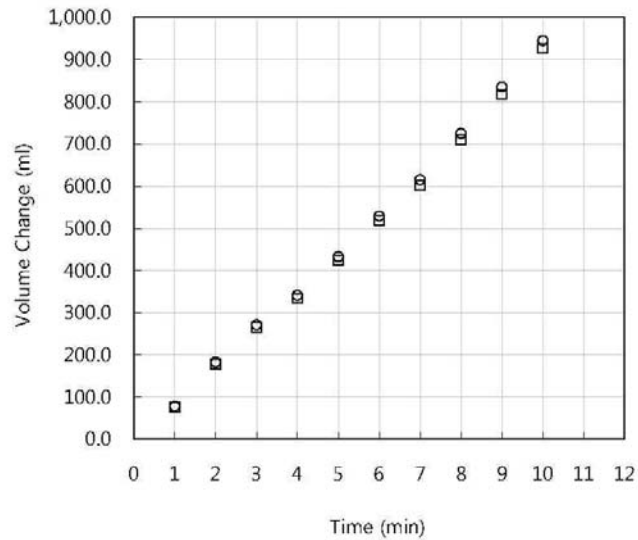


## 시험·검사 결과

공사명	농업부산물을 이용한 농촌형 저영양개발(LID) 시설개발 지반조사		
문서번호	GMTG-21-0619		
시행일자	2021년 6월		
시험번호	BH-05	6.0~7.0	m
시험종목	실내투수시험	시험방법	KS F 2322

### 시험결과

구분	1	2	3
포화시간 (min)	1440	1440	1440
측정시간 (min)	10.0	10.0	10.0
유량 (m <sup>2</sup> )	945.0	926.0	894.2
변수위압력 (kPa)	10	10	10
투수계수 (cm/sec)	1.97E-03	1.93E-03	1.86E-03
$\ast k = \frac{100 \times q \times L}{(60 \times A) \times (102 \times dP)}$			



시료의 직경, (d)	100.0	mm	시료의 높이, (h)	100.0	mm
습윤단위중량, ( $\gamma_v$ )	18.19	kN/ m <sup>3</sup>	건조단위중량, ( $\gamma_d$ )	17.01	kN/ m <sup>3</sup>
함수비, (w)	7.0	%	비중, (Gs)	2.74	

투수계수 : 1.92E-03 (cm/sec)

2021년 6월

지엠티지



그림 5-16. 계속

#### (4) 결론

현장규모 저영향개발(LID) 시설의 설치를 위한 지반조사 결과 대상지역의 지층 분포상태와 지반특성을 파악하여 설계에 반영하였다. BH-4, BH-5지점의 경우 시설 설치 예정지에 위치하고 있어 해당 지점의 조사자료를 활용하였다.

지반조사 결과 대상부지 내 자갈층은 지표 하 3.4~4.5m 부터 분포하고 있는 것으로 확인되었고, BH-4번 지점에서 3.5~5.0m, BH-5번 지점에서 4.5~6.0m 에 분포한다. 해당지점의 투수시험 결과 현장투수시험에서 BH-4 지점 4.52E-03 cm/sec, BH-5 지점 4.76E-3 cm/sec의 투수계수를 보였고, 실내투수시험 결과 각각 2.15E-03 cm/sec, 1.19E-03 cm/sec의 투수계수로 조사되어 양호한 투수성을 확인하였다.

위와같은 조사결과를 활용하여 지하수 함양의 목적에 부합할 수 있도록 투수성이 좋은 지층에 대하여 함양시설의 주타겟층으로 설정하였다.

## 바. 현장규모 저영향개발(LID) 시설 설치

### (1) 현장답사

현장시험부지 특성에 맞는 저영향개발(LID) 시설 설계를 위하여 현장답사 및 측량을 진행하였다.

- 현장시험부지는 경남 하동군 옥종면 북방리 255-2번지 일원으로 부지 북쪽에서 동쪽으로 약 600m 이격하여 덕천강이 흐르고 있으며, 부지 인근으로 시설농가(딸기)들이 밀집하여 위치하고 있다.
- 현장시험부지 일대에 위치한 시설농가에서의 많은 지하수 사용량에 따라 겨울철 지하수 부족이 심각한 실정이며, 이를 해결하기 위해 지하수 함양량을 늘릴 수 있도록 함양시설로서의 기능을 발휘할 수 있도록 시설형태는 자연형시설로 계획을 변경하였다.
- 현장시험부지는 해당 관청 관용지로서 현재 시설 농가들과 주민들의 편의 시설 및 딸기 체험장과 주차장 등으로 사용되고 있는 부지 중 10m × 10m로 선정하였다.
- 부지 인근에 위치한 농수로를 통해 덕천강 하천수가 지속적으로 유입되는 것을 확인하였으며, 농수로를 통해 시설 내 용수를 공급 할 계획이다.



그림 6-1. 현장시험부지 위치도



그림 6-2. 현장답사(2021.02.25)

(2) 현장시험부지 측량

(가) 조사 개요

현장시험부지 내 시설 설계를 위해 필요한 자료를 얻기 위하여 모든 지형과 지물이 여실히 나타날 수 있도록 국토지리정보원의 공공측량 작업계획서에 의거 2021년 3월 26일 현지조사 측량을 실시하였다.

(나) 지형현황측량

① 기준점 측량

현장시험부지 인근에 설치되어 있는 국토지리정보원의 통합기준점 성과로, 평면기준점 4개소를 설치하여 측량하였으며, 기준점 성과는 다음과 같다.

표 6-1. 기준점 측량 성과

상시기준점	위 치	좌 표		표 고 (EL.m)
		X	Y	
CP. 1	경남 하동군 옥중면 북방리	285739.1183	284738.1464	5.455
CP. 2		285718.8461	284714.4481	5.755
CP. 3		285641.2636	284781.0758	
CP. 4		285658.9479	284803.2990	



## ② 지형현황측량

지형 현황측량은 상세현황이 필요한 구간은 상세측량을 실시하여 선형이 명확히 나오도록 하였으며, 지물 및 지모의 형상, 평면 위치와 고저 등이 나타날 수 있도록 1/1,000 축척으로 작성. 또한 CP, T.B.M 점 등의 위치를 평면도에 수록하였다.

### (다) 제방법선 측량

#### ① 중심선 측량

중심선 측량은 도상작업에 의해 기 선정된 선형을 현지에 부합하도록 측량(setting)을 실시하였으며, 측점의 간격은 10m로 하였고 구조물 및 지형의 변화지점에는 추가 항목을 설치하였다.

#### ② 종단 측량

기 설치된 중심선을 따라 TBM이나 표석, 또는 도근점의 수준성과를 이용하여 종단측량을 실시하였고, 구조물지점(배수문, 배수통관) 등을 실측하여 종단도상에 기록하였으며, 종단도의 축척은 H=1/1,000, V=1/100으로 작성하였다.

#### ③ 횡단 측량

횡단측량은 현장시험부지의 직각 방향으로 설계에 지장이 없도록 폭 넓게 실시하되, 측량방법은 스타디아 및 수준측량을 이용하여 횡단측량을 실시. 횡단도의 축척은 H=1/100, V=1/100으로 작성하였다.

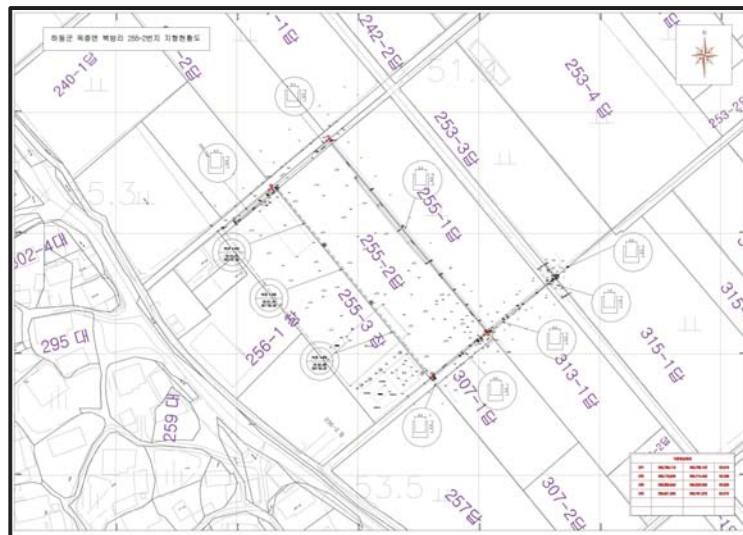


그림 6-3. 측량성과



### (3) 현장규모 저영향개발(LID) 시설 설계

#### (가) 부지 조성 계획

##### ① 시설 위치 선정

시설 부지 면적은 10m × 10m로 계획하였으며, 지반조사 결과 퇴적층의 분포가 확인된 BH-4, BH-5 지점을 기준으로 하고, 인접하여 위치한 옹벽의 붕괴를 방지하기 위하여 옹벽으로부터 약 3m의 이격거리를 두어 지점을 선정하였다.

##### ② 시설 설계

현장규모 저영향개발(LID) 시설의 설계는 시설구상 단계에서 구상된 “유량조절이 가능한 자연형 지하수 함양장치”를 바탕으로 설계하였으며, 현장여건(용수로로부터 직접 용수를 공급받아 시설로 유입)에 맞춰 설계를 실시하였다.

##### ㉠ 유입부

- 유입부는 주용수로에서 함양시설로 수로를 연결하여 직접 주입하는 것으로 계획하고, 수로에 유량조절밸브와 유량계를 설치, 부지 주변으로 배수로를 설치하여 외부로부터 유입되는 우수를 배제하였다.
- 시설 유입부로 웨어형태의 유입시설을 설치하여 시설내로 물이 균등하게 유입 될 수 있도록 설계하였다.
- 취수구는 물 흐름방향의 반대로 설치하고, 유입부에 박스형태의 스크린 시설을 설치하여 협잡물 유입을 방지하였다.

##### ㉡ 함양시설

- 함양시설은 GNS\_TANK와 유입수로를 제외하고 7m × 7m로 계획하였으며, 4개의 블록으로 구성하였다.
- 함양시설은 여재부-함양부(자갈층, 샤프트)로 구성하였으며, 여재부 하단의 자갈층 및 돌망태층 제외하고, 여재부와 함양부 사이 거적을 설치하여 토사유출을 방지하고 수처리부와 함양부를 구분하였다.
- 여재부는 “모래+우드칩+석회석”로 구성하였으며, 함양부의 구성은 사방댐 채움 구성을 참고하여 잔자갈, 중간자갈, 굵은자갈을 배치하였다.
- 여재부 상단의 거적이 물에 의해 부유하는 것을 방지하기 위하여, 거적 위로 자갈을 도포하였다.
- 외부 지하수 침투를 방지하기 위하여 시설 벽면은 차수벽으로 설치하였다.
- 시설 내부 관측공의 설치는 오염물질 저감효과를 관찰하기 위한 것으로 흐름방향을 고려하여 심도별(여재부, 함양부 자갈층, 함양부 샤프트 각 1공, 2블록)로 6개를 설치, 외부 관측공을 추가로 설치하였다.

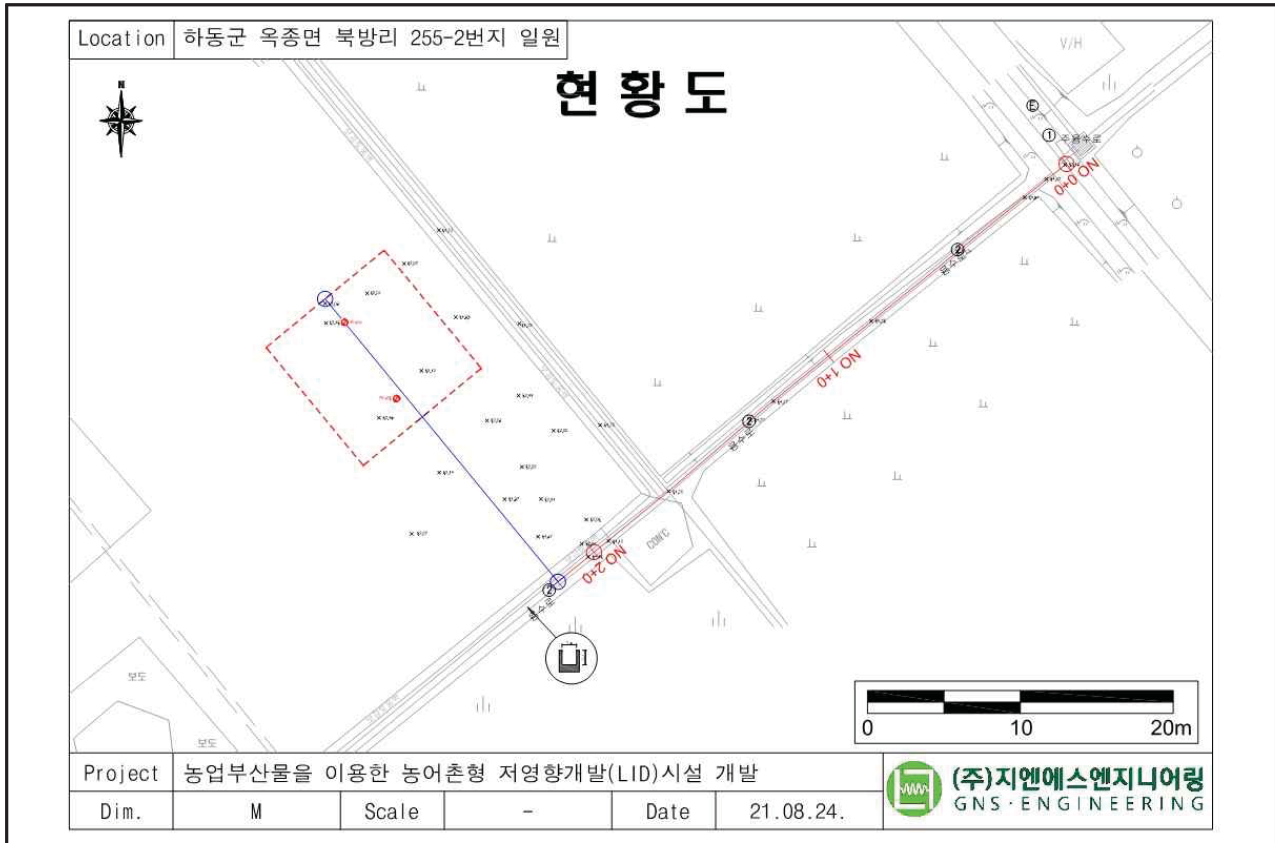


그림 6-4. 실증부지 현황도



그림 6-5. 시설배치도

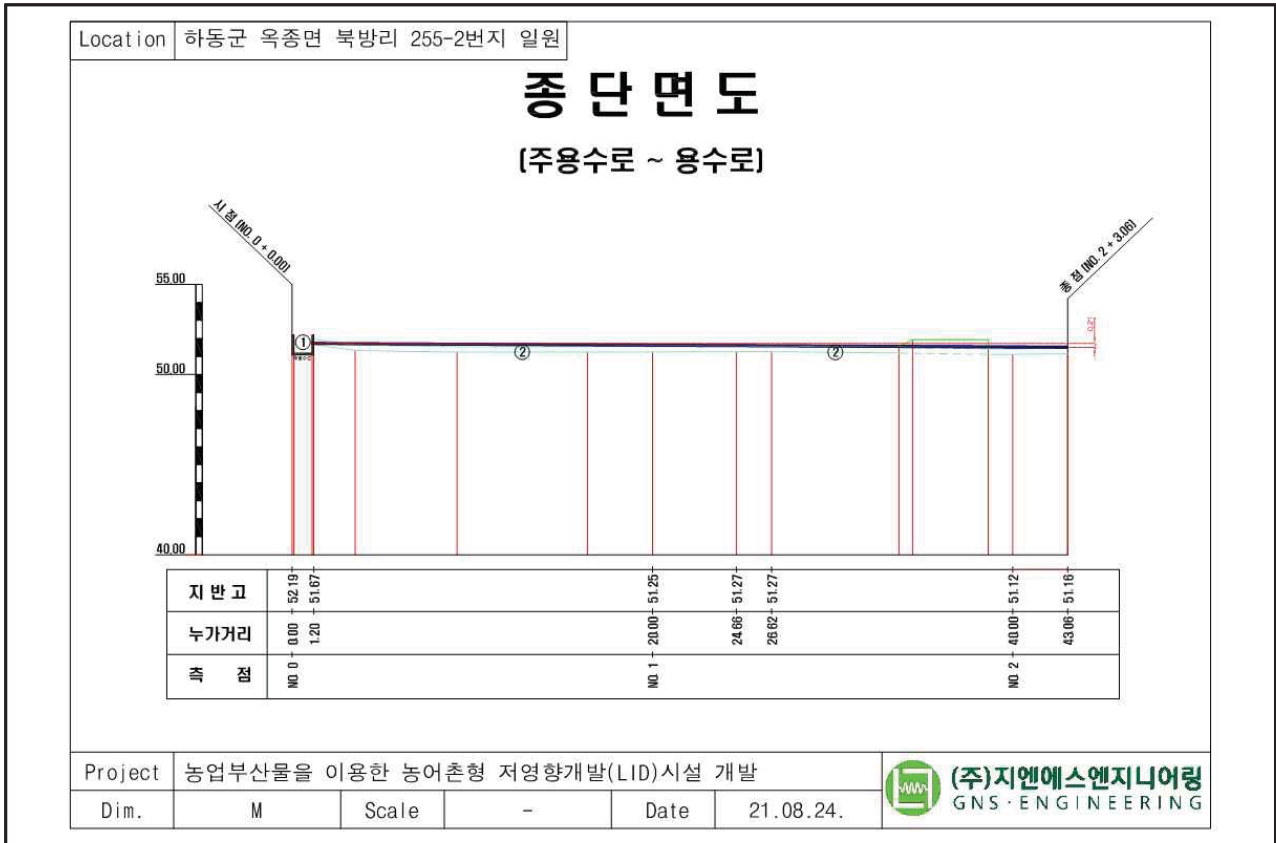


그림 6-6. 종단면도(주용수로 ~ 용수로)

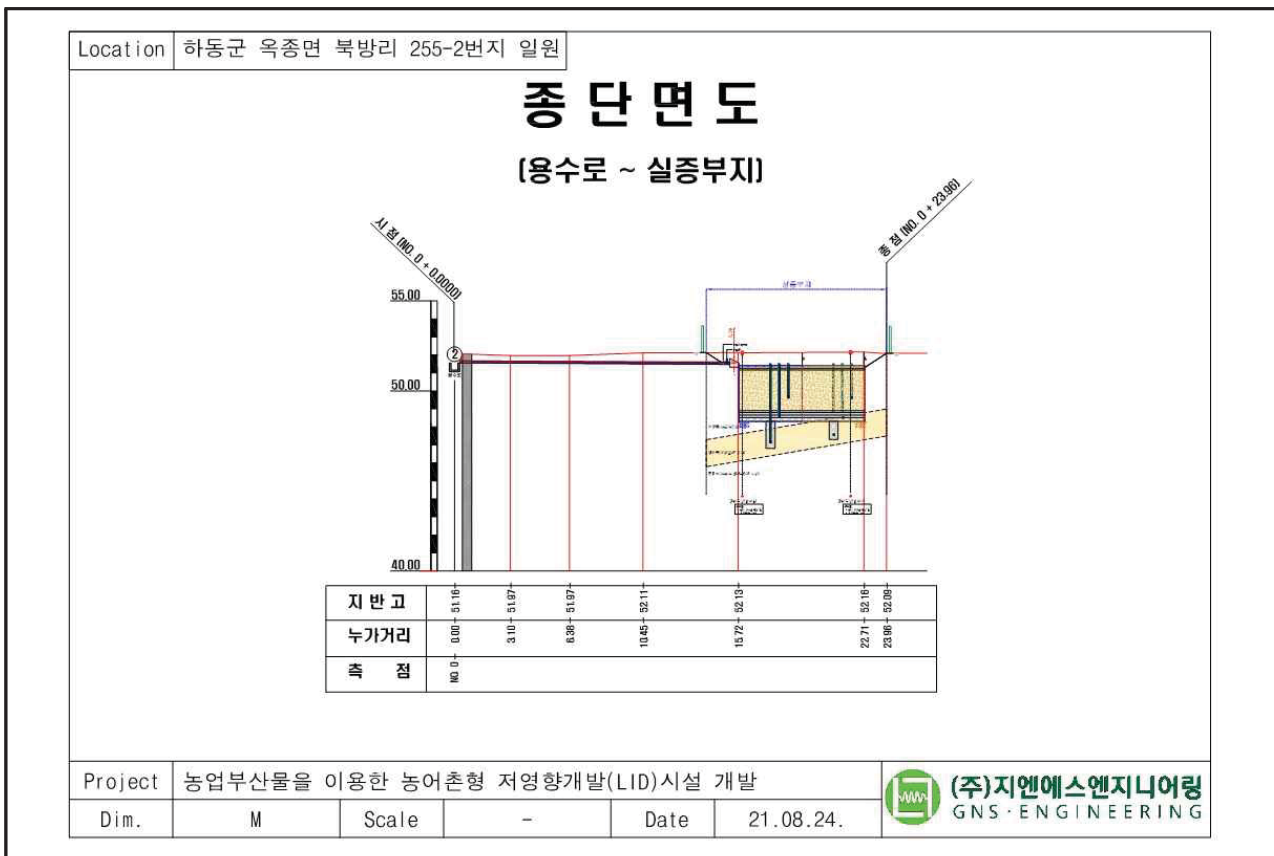
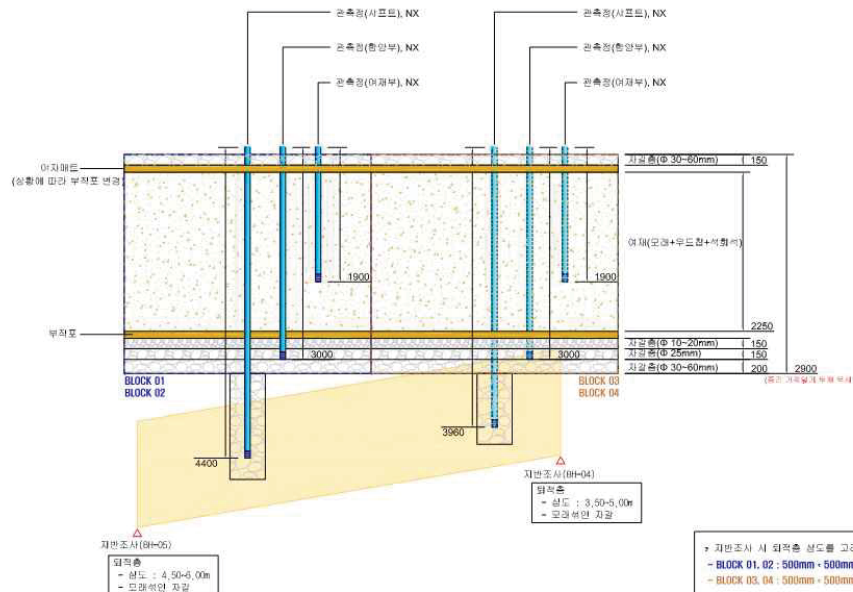


그림 6-7. 종단면도(용수로 ~ 실증부지)

Location | 하동군 옥종면 북방리 255-2번지 일원

## 시설 상세도



Project | 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID)시설 개발

Dim. | mm | Scale | - | Date | 21.08.24.

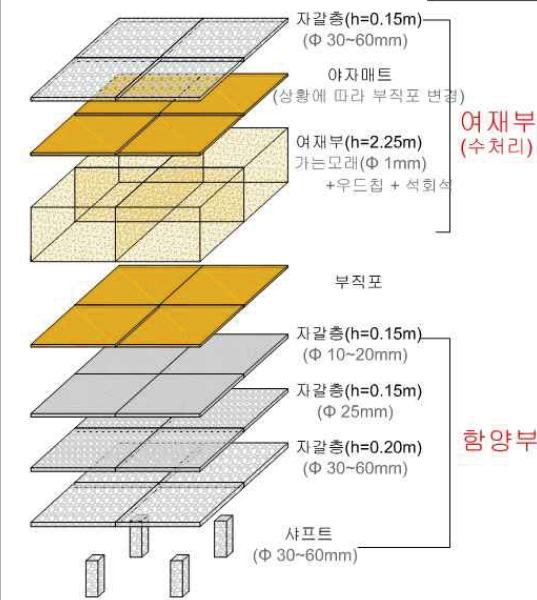


그림 6-8. 시설상세도

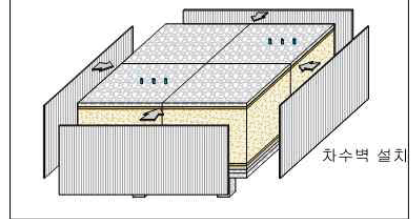
Location | 하동군 옥종면 북방리 255-2번지 일원

## 시설 구성

향양시설 구성

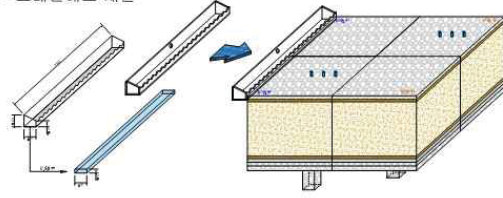


차수벽 설치  
- 외부 지하수 유입 및 시설 붕괴 방지



유입시설

- 유입수의 고른 배분 및 일정한 부산물 제거
- 스테인레스 재질



Project | 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID)시설 개발

Dim. | mm | Scale | - | Date | 21.08.24.



그림 6-9. 시설구성도



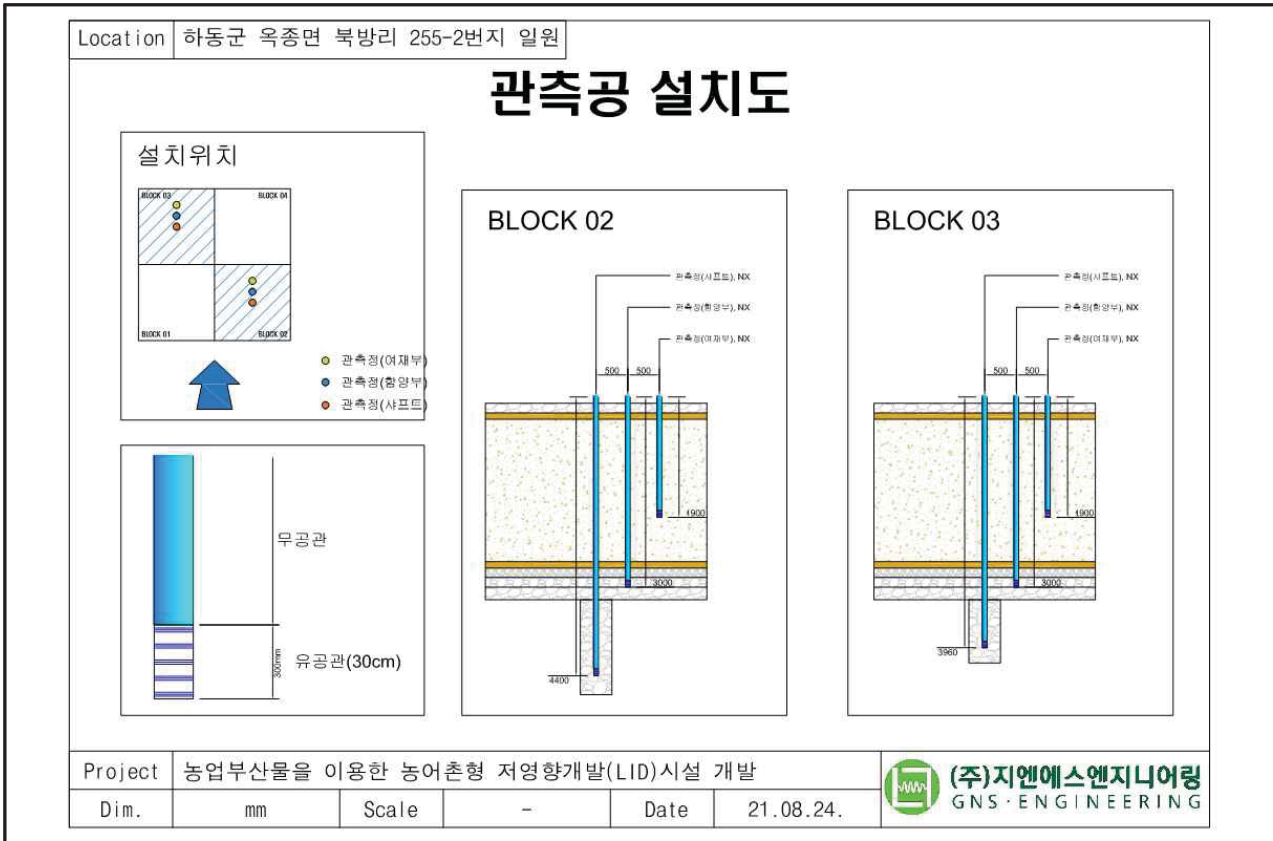


그림 6-10. 관측공 설치도

(나) 시설 통과시간(체류시간) 산정

① 여재부 제원(용량산정)

여재부의 높이는 2.25m(2,250mm)로 적용하였으며, 여재부 용량 산정을 위한 모래의 공극률은 다음 「표 7-2. 각종지질매체의 공극율(Domenico and Schwartz, 1990)」에 제시된 거친모래(Sand, coarse)의 공극률(%) 범위 중 최대값인 46%를 적용하였다.

표 6-2. 각종지질매체의 공극율(Domenico and Schwartz, 1990)

Material	Porosity (%)
<i>Sedimentary</i>	
Gravel, coarse	24 ~ 36
Gravel, fine	25 ~ 38
Sand, coarse	31 ~ 46
Sand, fine	26 ~ 53
Silt	34 ~ 61
Clay	34 ~ 60

주) 거친모래(coarse sand) : 입径의 크기가 0.50~1.00mm(미농무부법), 0.20~2.00mm(국제 토양학회법)인 모래

시설의 계획 면적은 가로, 세로 각각 7.0m로 49.0㎡을 적용하였으며, 위에 제시한 공극률



(46%)를 고려하여 여재부의 용량을 산정하였다. 여재부 용량은 다음과 같이 산정하였으며, 산정결과 50.7m³로 산정되었다.

**<여재부 용량 산정>**

---


$$\begin{aligned} \text{여재부 용량}(V, \text{ m}^3) &= \text{시설면적}(\text{m}^2) \times \text{높이}(\text{m}) \times \text{공극률}(\%) \\ &= 49.0\text{m}^2 \times 2.25\text{m} \times 46\% \\ &= 50.7\text{m}^3 \end{aligned}$$


---

② 시설 통과시간

㉠ 수직방향 등가투수계수 산정

수직방향 등가투수계수의 산정은 시설 각 층의 투수계수를 참고하여 다음과 같이 산정하였으며, 산정결과 시설 내 수직방향 등가투수계수는  $1.27 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$ 로 산정되었다.

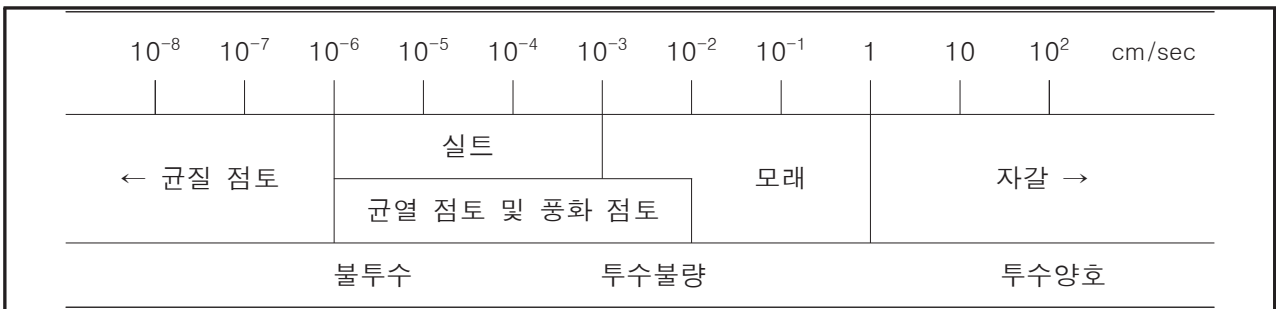


그림 6-11. 흙의 입경에 따른 투수계수 범위

표 6-3. 시설 층별 투수계수

층 별	두께(cm)	투수계수(cm/sec)	비고
자갈층	15	1	잔자갈
여재층	225	$10^{-2}$	가는모래
자갈층	잔자갈	1	잔자갈
	중간자갈	10	중간자갈
	굵은자갈	$10^2$	굵은자갈
합계	290		

**<수직방향 등가투수계수 산정>**

수직방향 등가투수계수( $K_v$ , cm/sec)

$$K_v(\text{cm/sec}) = H / (H_1/k_1 + H_2/k_2 + H_3/k_3 + \dots + H_n/k_n)$$

여기서,  $k_n$  : n층의 투수계수       $H_n$  : n층의 두께

$$\begin{aligned} K_v(\text{cm/sec}) &= 290 / (15/1 + 225/10^{-2} + 25/10^{-1} + 15/1 + 15/10 + 20/10^2) \\ &= 0.0127\text{cm/sec} \\ &= 1.27 \times 10^{-2}\text{cm/sec} \end{aligned}$$


---

주) 표층 및 중간의 거적덮기의 경우 산정에서 제외함.

㉔ 시설 통과시간 산정

시설 통과시간은 상기 산정된 수직방향의 투수계수를 이용하여 산정하였으며, 시설의 높이는 여재부 2.25m를 포함한 총 2.9m(290cm)를 적용함. 산정결과 유체가 시설을 통과하는데 소요되는 시간은 6.34hr로 산정되었다.

<시설 통과시간 산정>

---

시설 통과시간(T, hr)

$$T(hr) = H \div Kv \div 3,600$$

여기서,  $H$  : 시설의 총 높이       $Kv$  : 수직방향 등가투수계수

$$\begin{aligned} T(hr) &= 290(cm) \div \{1.27 \times 10^{-2}(cm/sec)\} \div 3,600(sec/hr) \\ &= 6.34(hr) \end{aligned}$$

---

주) 표층 및 중간의 거적덮기의 경우 산정에서 제외함.

#### (4) 현장규모 저영향개발(LID) 시설 시공

##### (가) 시공 일정

현장규모 저영향개발(LID) 시설의 시공은 1차 2021년 9월 28일에 현장정리 및 레벨링 작업을 진행하였으며, 2021년 10월 5일 관로터파기를 시작으로 본격적인 공사에 착공하였다. 그러나 함양시설 시공 과정에서 지하수 수위가 상승함에 따라 안전상의 문제로 작업을 중단하였다. 2021년 10월 8일 되메우기 및 원상복구를 완료하였으며, 약해진 지반을 고려하여 약 3주의 휴식기를 갖은 후 2021년 11월 2일 프레임제작을 시작으로 하여 2021년 11월 25일 시설 시공을 완료하였다.

##### (나) 시공 방법의 보완











1차 시공 시 지하수위 상승에 따른 문제를 보완하기 위하여 시공방법을 보완하였다. 현장규모 시설 시공 시 지중의 지하수를 최대한 배제하기 위하여 양수기를 추가배치하고, 지상에서 각관을 이용한 프레임 제작 후 방수합판을 덧대어 차수벽을 제작 후 크레인을 이용하여 매립하는 방법으로 시공하였다.



그림 6-12. 시공 방법의 보완

(다) 현장규모 저영향개발(LID) 시설 시공

① 1차 시공(2021년 9월 28일 ~ 2021년 10월 8일)

		
현장정리	기초레벨링	경계설정
		
골재 하역	골재 하역	레벨 및 기초작업
		
터파기(수로)	터파기(함양시설)	골재투입
		
지하수위 상승에 따른 양수	원상복구	원상복구



② 2차 시공(2021년 11월 2일 ~ 2021년 11월 25일)

		
<p>기초레벨링</p>	<p>현장다짐 확인</p>	<p>구조물 기초(제단)</p>
		
<p>구조물 기초(평탄화)</p>	<p>구조물 제작(프레임)</p>	<p>구조물 제작(녹방지)</p>
		
<p>구조물 제작(방수합판 설치)</p>	<p>구조물 제작(웨어 설치)</p>	<p>구조물 제작(지지대 설치)</p>
		
<p>구조물 제작(상부 보강)</p>	<p>구조물 제작(웨어 합판 보강)</p>	<p>구조물 제작(보강작업)</p>





기초 터파기



터파기(함양시설)



관측공 설치(샤프트)



골재투입(자갈)



골재투입(자갈)



관측공 설치(자갈층)



골재투입(자갈)



부직포 설치



모래투입



구조물 설치(크레인 연결)



구조물 설치(이동)















구조물 설치(안착)



		
구조물 설치(안착)	구조물 내부 여재 체움(모래)	구조물 내부 여재 체움(우드칩)
		
구조물 내부 여재 체움(석회석)	여재 혼합	관측공 설치(여재부)
		
구조물 보강	부직포 설치	자갈 포설
		
내부 평탄화	유입관로 연결(유입부 설치)	유입관로 연결(수로 연결)



		
<p>유입관로 연결(옹벽철거)</p>	<p>유입관로 연결(수로관 매설)</p>	<p>유입관로 연결(박스 제작)</p>
		
<p>유입관로 연결(옹벽 재설치)</p>	<p>유입관로 연결(옹벽 재설치)</p>	<p>유입관로 연결(밸브 및 유량계)</p>
		
<p>구조물 보강(외부 지지대)</p>	<p>구조물 보강(외부 지지대)</p>	<p>구조물 보강(내부 지지대)</p>
		
<p>구조물 보강(외부 지지대 고정)</p>	<p>구조물 보강(외부 마감재 부착)</p>	<p>구조물 보강(외부 마감 공사)</p>





③ 시설 개선(운영시)

㉓ 유입부 개선

현장규모 저영향개발(LID) 시설 운영시 주수로관 내 부유물질에 의한 유입구 폐쇄로 주입수량이 감소하는 문제를 해결하기 위하여 원통형 구조물을 제작, 단면적을 넓혀 수로 내 부유물질로 인한 유입수량 감소를 최소화 하였다. 구조물은 분리가 가능하도록 제작하여 유지관리가 용이하도록 하였다.



그림 6-13. 유입부 개선

㉔ 시설 외부 배수로

강우 시 시설(하우스) 내부와 외부에서 토사 유실 발생 및 시설 침수를 방지하기 위하여 시설 외부로 배수로를 설치하여 농수로로 직접 배출하도록 하였다. 배수로 제작은 400mm 주름관을 2등분 하여 설치하고 위로 자갈을 도포하였다.



그림 6-14. 배수로 설치



㉔ 시설 내부 개선 공사

외부로부터 유입되는 유입수의 pH 조절 및 오염물질 제거율 개선을 위하여 석회석 1톤, 목재펠릿 1톤을 여재부에 추가하여 혼합하였다. 또한, 운전과정에서 부직포의 투수성이 떨어지는 문제가 발생하여 투수성 확보를 위한 매트 교체를 시행하였으며, 투수성이 좋은 야자매트로 변경하여 시공하였다.

시설 내 유입수의 정확한 유량 확인을 위하여 시설 유입배관 말단부로 역사이편 형태의 관을 설치하여 유량계 설치위치 통과 시 만관으로 유량을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 시설 내 유입수가 과도하게 유입되어 범람하지 않도록 말단부로 볼 밸브를 설치하여 일정 수위가 되면 유입을 차단시킬 수 있도록 개선하였다.



그림 6-15. 시설 내부 개선

㉕ 오염수 분배시설 설치

오염 정화 시험을 위하여 오염수 저장탱크를 설치하였으며, 오염수 주입 시 시설 내부에 균일하게 흠뿌려질 수 있도록 배관을 설치하였다. 배관설치는 시설 내부 지지대를 따라 고정시켰으며, 동일한 간격으로 구멍을 뚫어 오염수가 시설로 유입되도록 하였다.

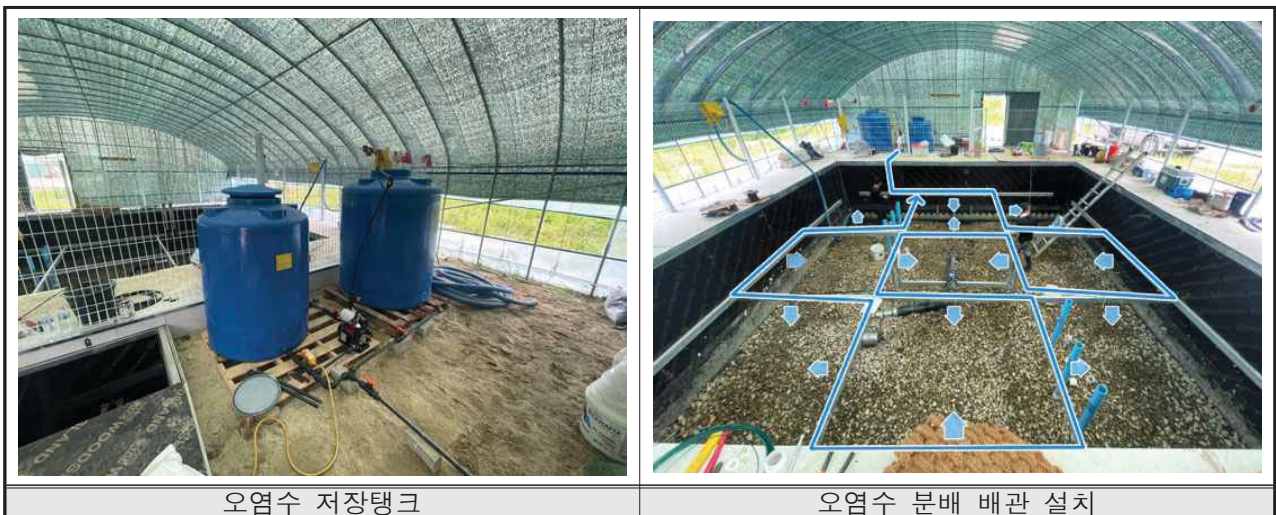


그림 6-16. 오염수 분배시설 설치

## (5) 결론

현장규모 저영향개발(LID) 시설의 시공은 2021년 10월 진행된 1차 시공 시 지하수위의 영향으로 공사를 완료하지 못하여 시공방법의 변경을 거쳐 2021년 11월 시공을 완료하였다. 차수벽의 형태가 변경되면서 시공방법과 외관이 본 계획과 차이점이 있으나 시설 내부(여재부, 함양부)의 구성은 변화가 없도록 시공하였다. 또한 운전과정에서 발생하는 문제점을 보완하여 시설물의 원활한 운영 및 관리가 수월할 수 있도록 개선하였다.

현장규모의 저영향개발(LID) 시설의 시공과 관련하여 금회 설치 공사 및 개선 공사를 통해 수집된 여러 인자들을 설계 단계에 반영시켜 추후 시공비 절감을 통하여 해당 시설의 경제성을 확보 할 계획이다.

## 사. 현장규모 저영향개발(LID) 현장시험 연구

### (1) 용배수로 용수 함양 및 배출시험

동절기 수막재배 이용 후 배출되는 용수를 재활용하기 위한 방법으로, 용배수로의 용수를 차집하여 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부로 함양하고자 하였다. 이로써 동절기 추가 지하수를 확보하고, 북방지구 내 지하수의 원활한 순환을 도모하고자 하였다. 함양시험은 총 4회에 걸쳐 실시하였다. 그리고, 인공함양 된 지하수를 재양수 이용하였을 경우, 대수층의 지하수 수위변화가 어떻게 변화하는지를 살펴보기 위해 주입시험을 1회 실시하였다.

#### (가) 함양시험 (1차)

2022.02월, 최적의 함양수량 도출을 위하여, 실증시험 부지의 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 1일 주입량 약 120 m<sup>3</sup>/day 으로 함양시험(1차)을 실시하였다. 1차 함양시험 기간동안 연구 부지의 지하수 수위는 지표로부터 약 37 m 심도에 위치하여 충적대수층 내부는 대부분 지하수가 고갈된 상태였다(그림 7-1).

시험 결과, 상대적으로 주입수는 상대적으로 함양이 잘 안되었는데, 이는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설의 설계와 관련이 있는 것으로 추정되었다. 농어촌형 저영향개발(LID) 시설의 단면도를 살펴보면, 시설은 크게 여재부(수처리)와 함양부로 구분된다(그림 7-2). 이 가운데 여재부는, 질산성질소 오염물질에 대하여 미생물학적 탈질 시간(수처리 시간)을 충분히 부여하기 위하여, 함양속도를 늦추고자 야자매트를 상·하로 설치하였다. 그런데, 야자매트는 함양속도를 늦추는 것 뿐만 아니라, 함양량을 조절하는 역할까지 하여, 생각보다 많지 않은 양의 수량(약 120 m<sup>3</sup>/day)만이 충적대수층에 충전되는 것으로 나타났다.

1차 함양시험에서는 자동수위계측기 등 장비가 갖춰지지 않은 상태에서 용수의 함양을 시도하여 계측자료가 부족하다. 다만, 용수의 인공함양으로 인해, W-1, W-2 및 W-4 관측공의 수위가 약 3~4 m 이상 증가되었고, 6번 관측공의 경우 약 2 m 증가되었다(표 7-1). 이 외, W-3, W-5 및 W-7 관측공의 경우 지하수 수위 증가량이 1 m 이내로 나타났다. 결과적으로 주입에 따른 지하수 수위의 증가는 주로 덕천강 방향으로 발생함을 알 수 있었다. 다만, 1차 함양시험은 본 시험이라기 보다는 현장에 설치한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설의 시운전의 성격이 강하였으므로, 향후 추가적인 정량화 된 연구가 요구되었다.

Location | 하동군 옥종면 북방리 255-2번지 일원

## 시설 상세도

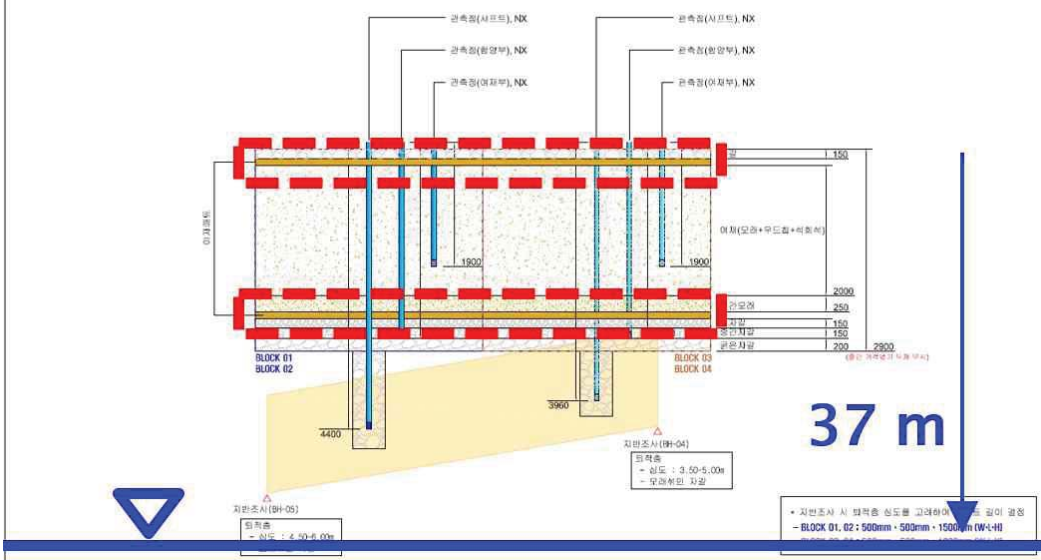


그림 7-1. 1차 함양시험 시 지하수 수위 심도 (37 m)

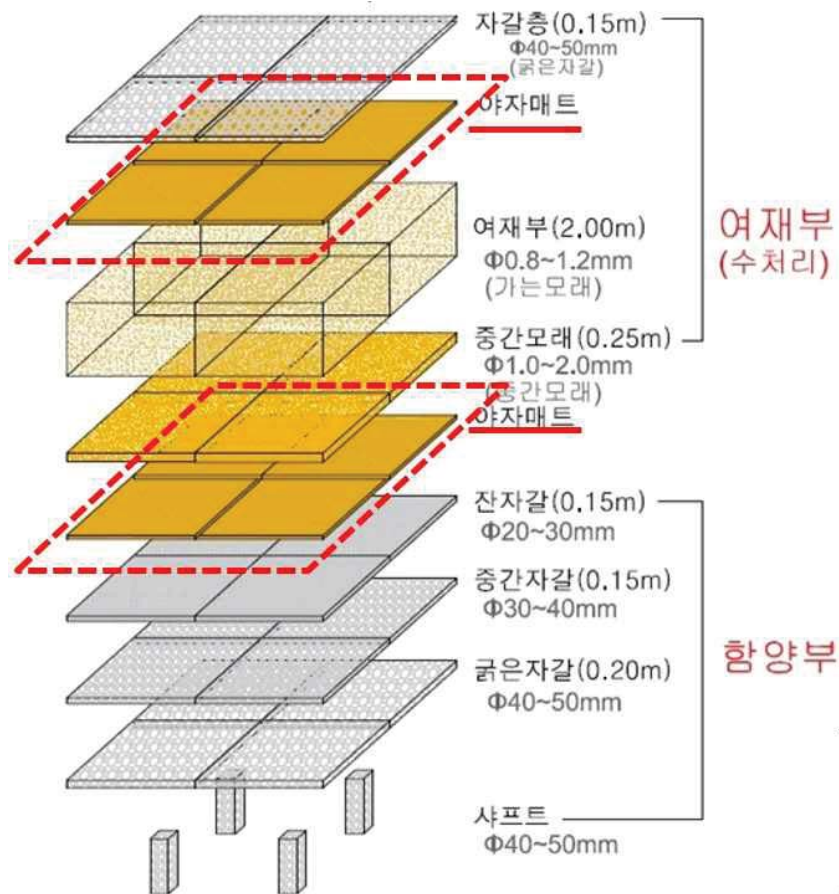


그림 7-2. 여재부 상·하 야자매트의 위치



표 7-1. 1차 함양시험 중 외부 관측공 수위의 변화

외부관측공	주입 중 수심 (m)			주입 종료 시 수심(m)
	02/25(금) 15:10	02/25(금) 16:00	02/25(금) 16:25	03/01(화) 15:30
W-1	5.28	5.26	4.98	7.36
W-2	5.82	5.79	5.24	8.13
W-3	7.50	7.50	7.49	7.18
W-4	6.87	6.86	4.40	8.61
W-5	5.35	5.32	5.13	5.93
W-6	6.51	6.50	4.65	6.60
W-7	6.98	6.98	6.40	6.45

(나) 함양시험 (2차)

① 연구방법

2022.04월, 최적의 함양수량 도출을 위하여, 실증시험 부지의 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 1일 주입량 약 80 m<sup>3</sup>/day 및 약 100 m<sup>3</sup>/day 으로 함양시험(2차)을 실시하였다. 2차 함양시험 기간동안 연구부지의 지하수 수위는 지표로부터 약 4~5 m 심도에 위치하여 충적대수층 내부는 일부 지하수가 채워진 상태였다(그림 7-3).

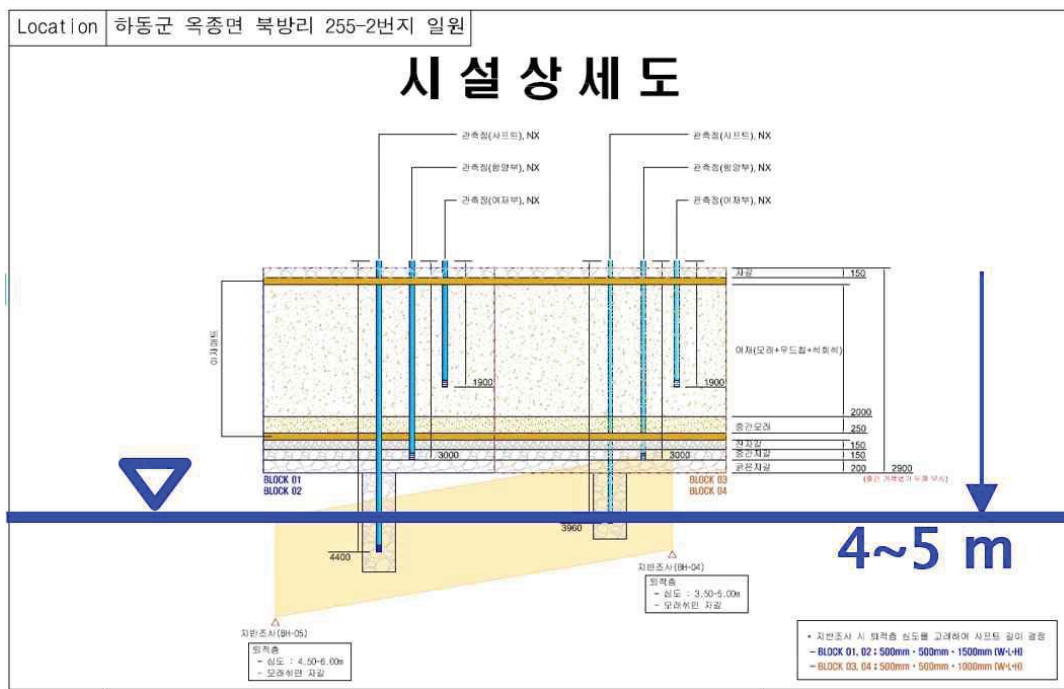


그림 7-3. 2차 함양시험 시 지하수 수위 심도 (4~5 m)

함양시험(2차)은 약 80 m<sup>3</sup>/day 및 약 100 m<sup>3</sup>/day 의 주입량을 각각 24시간 동안 연속 주입 함과 동시에, 각 관측공에서의 지하수위 변동 및 추가 지하수 확보량을 분석하였다. 또한 실증시험 기간 동안 각 관측공의 지하수위 변동자료를 이용하여 충적대수층의 투수량 계수



(transmissivity, T), 저류계수(storativity, S)를 산출하였다. 이를 위하여 자유면대수층에 대한 Theis(1935)의 부정류 양수해석 방법을 적용하였으며, 이 때 양수량(Q)을 주입량으로, 수위 강하량(s)을 수위 상승량으로 고려하였다.

인공함양된 물이 층적대수층 내 이방성에 의해 이동되는 방향을 살펴보기 위하여, 투수량 계수를 이용한 이방성 타원체를 제시한 TENSOR2D(Malisa and Randolph, 1987) 프로그램을 이용하였다. 그리고 인공함양 실증시험으로 산출한 투수량계수 값과 TENSOR2D 모델에서 산출한 각 관측공의 방향투수량계수( $T_d$ ) 값을 비교하여 이방성 타원체 해석의 타당성을 확인하였다. 아래 <식 1>에서  $\xi$ 와  $\eta$ 는 각각 x, y 좌표축에서  $\theta$  각도만큼 기울어진 이방성 타원체의 좌표축이고,  $\sqrt{T_{\xi\xi}}$  및  $\sqrt{T_{\eta\eta}}$ 는 이방성 타원체의 최대 및 최소 축의 길이이며,  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{xy}$ 는 x, y 좌표축에서 x 방향, y 방향, x-y의 대각선 방향의 투수량계수이다.

$$\frac{\xi^2}{(\sqrt{T_{\xi\xi}})^2} + \frac{\eta^2}{(\sqrt{T_{\eta\eta}})^2} = 1 \quad (\text{식 1})$$

$$\text{여기에서, } T_{\xi\xi} = \frac{1}{2} \left\{ (T_{xx} + T_{yy}) + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2} \right\} \quad (\text{식 2})$$

$$T_{\eta\eta} = \frac{1}{2} \left\{ (T_{xx} + T_{yy}) - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2} \right\} \quad (\text{식 3})$$

그리고, x, y 좌표축과 이방성 타원체  $\xi$ ,  $\eta$  좌표축의 각도( $\theta$ )는 아래의 (식 4)와 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{T_{\xi\xi} - T_{xx}}{T_{xy}} \quad (\text{식 4})$$

대수층의 이방성은 (식 2)와 (식 3)의 관계로부터 (식 5)와 같이 산정되고, 특정한 관측공에서의 방향 투수량계수( $T_d$ ; directional transmissivity at the observation well) 값은 (식 6)과 같다. u는 Theis 우물함수의 상수, t는 시간, r은 관측공과 주입공 사이의 거리이다.

$$\text{Anisotropyratio} = \frac{T_{\xi\xi}}{T_{\eta\eta}} \quad (\text{식 5})$$

$$T_d = \frac{Sr^2}{4ut} \quad (\text{식 6})$$

## ② 연구결과

### ㉠ 지하수 수위의 증가

2차 함양시험 결과, 상대적으로 주입수는 함양이 수월하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다(그림 7-4, 7-5). 2차 시험의 주입수량 80 m<sup>3</sup>/day은 최대 주입수량(120 m<sup>3</sup>/day)의 약 2/3 수준이고, 100 m<sup>3</sup>/day은 최대 주입수량의 약 5/6 수준이어서 상대적으로 함양은 수월하게 발생하였다. 다만, 2차 함양시험의 지하수 수심(4~5 m)이 1차 함양시험처럼 지하 깊은 곳(37 m)에 위치하였다면, 좀 더 수월한 함양이 일어났을 것으로 추정된다.



그림 7-4. 2차 함양시험 80 m<sup>3</sup>/day 주입 시 현황



그림 7-5. 2차 함양시험 100 m<sup>3</sup>/day 주입 시 현황



- W-1 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 60 cm의 수위 증가를 보였고, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 40 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 1 m의 수위 증가를 보였다.
- W-2 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 70 cm의 수위 증가를 보였고, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 30 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 1 m의 수위 증가를 보였다.
- W-3 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 20 cm의 수위 증가를 보였고 이 후 평형을 이루었으며, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 30 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 50 cm의 수위 증가를 보였다.
- W-4 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 90 cm의 수위 증가를 보였고, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 25 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 1.15 m의 수위 증가를 보였다.
- W-5 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 60 cm의 수위 증가를 보였고, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 40 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 1 m의 수위 증가를 보였다.
- W-6 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 60 cm의 수위 증가를 보였고, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 30 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 90 cm의 수위 증가를 보였다.
- W-7 외부관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 50 cm의 수위 증가를 보였고, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 약 35 cm의 수위 증가를 보여, 총 약 85 cm의 수위 증가를 보였다.

종합하면, 2차 함양시험에 따른 수위 증가량은 W-4 > W-1, 2, 5 > W-6 > W-7 > W-3 순으로 증가되었다. 즉, 시설에 가까운 외부 관측공일수록 수위 증가가 많고, 거리가 멀수록 확산에 의해 수위증가가 적다. 그리고, 대부분의 외부 관측공에서는 시험기간동안 평형을 이루지 못했으나, W-3 외부관측공에서는 80 m<sup>3</sup>/day 주입 시 지하수 수위의 평형을 이루었다. 공간적으로 해석하면, 시설 내부에서 가장 높은 1.5 m의 수위증가를 보였고, 시설 외부로 갈수록 지하수 수위 증가량이 점차 감소되어, W-3 외부관측공 설치 위치 쪽에 지하수 안정수위가 형성됨을 알 수 있다.

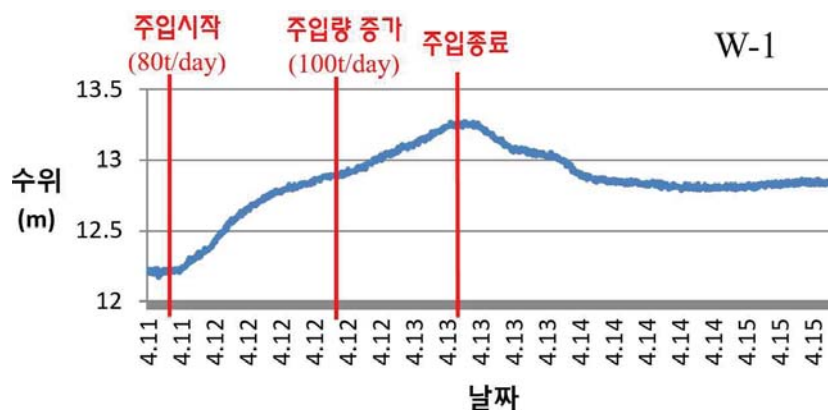


그림 7-8. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-1의 수위변화





그림 7-9. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-2의 수위변화

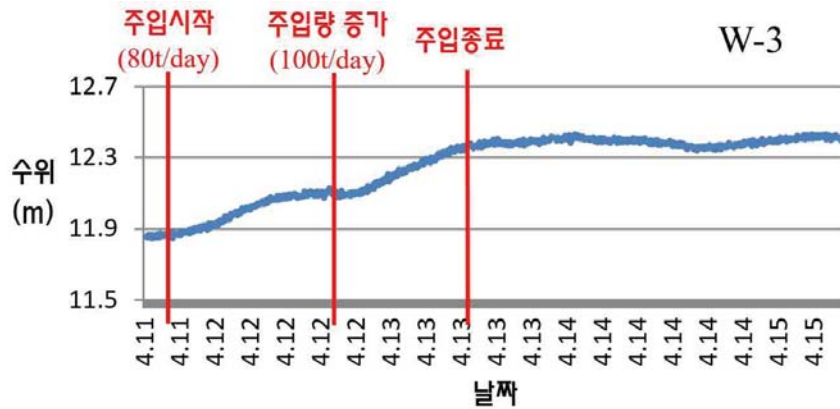


그림 7-10. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-3의 수위변화



그림 7-11. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-4의 수위변화





그림 7-12. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-5의 수위변화

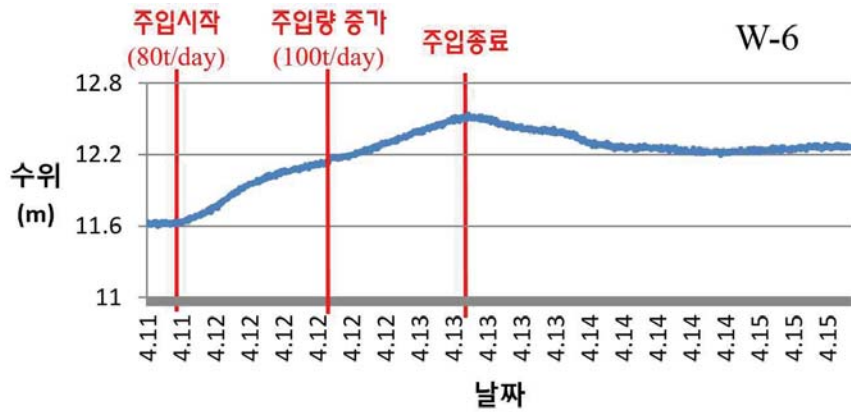


그림 7-13. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-6의 수위변화

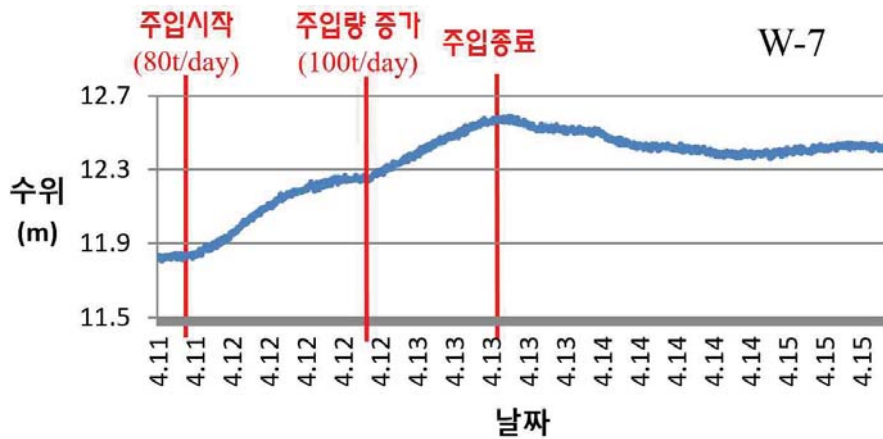


그림 7-14. 2차 함양시험 시 외부관측공 W-7의 수위변화

㉔ 수리상수 산출

함양시험(2차)에 의한 수리상수 해석은 자유면대수층에 대한 Theis (1935) 방법을 이용하여 해석하였다(표 7-2, 그림 7-15~7-16). 연구부지 충전대수층의 수리전도도는 평균  $2.62 \times 10^{-3}$  cm/sec, 평균 저유계수는 0.12, 저영향개발(LID) 시험시설 내부 채움재의 수리전도도는 평균  $1.16 \times 10^{-2}$  cm/sec, 저유계수는 0.19로 나타나, 내부 채움재의 수리전도도가 충전대수층에 비해 약 10배 이상 크게 산출되었다. 내부 채움재의 함양 속도는 1일 약 2.7 m로서, 1 pore volume 충전 시 약 1일의 시간이 소요되는 것으로 분석 되었다.

표 7-2. 2차 함양시험으로 산출한 충전대수층 수리상수

구분	W-1		W-2		W-3		W-4		W-5	
	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S
80 m <sup>3</sup> /d 주입	$3.37 \times 10^{-3}$	0.136	$2.77 \times 10^{-3}$	0.173	$4.38 \times 10^{-3}$	0.0157	$2.49 \times 10^{-3}$	0.0658	$3.23 \times 10^{-3}$	0.159
100 m <sup>3</sup> /d 주입	$1.97 \times 10^{-3}$	0.236	$1.92 \times 10^{-3}$	0.265	$1.67 \times 10^{-3}$	0.0202	$2.86 \times 10^{-3}$	0.140	$2.29 \times 10^{-3}$	0.252

구분	W-6		W-7		LID-2		LID-3	
	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S
80 m <sup>3</sup> /d 주입	$3.05 \times 10^{-3}$	0.0435	$2.91 \times 10^{-3}$	0.0247	$1.49 \times 10^{-2}$	0.156	$5.04 \times 10^{-3}$	0.161
100 m <sup>3</sup> /d 주입	$1.84 \times 10^{-3}$	0.0639	$1.93 \times 10^{-3}$	0.0388	$1.88 \times 10^{-2}$	0.194	$7.47 \times 10^{-3}$	0.246

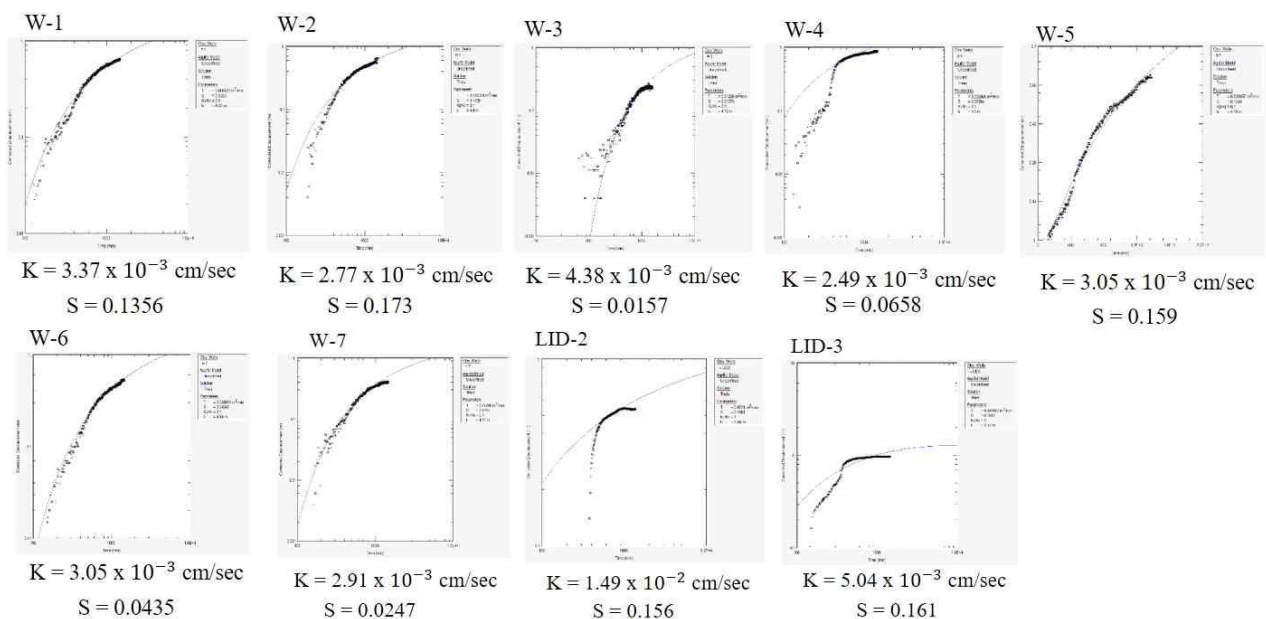


그림 7-15. Theis (1935) 방법을 이용한 2차 함양시험 80 m<sup>3</sup>/d 주입 시 충전 수리상수 산출

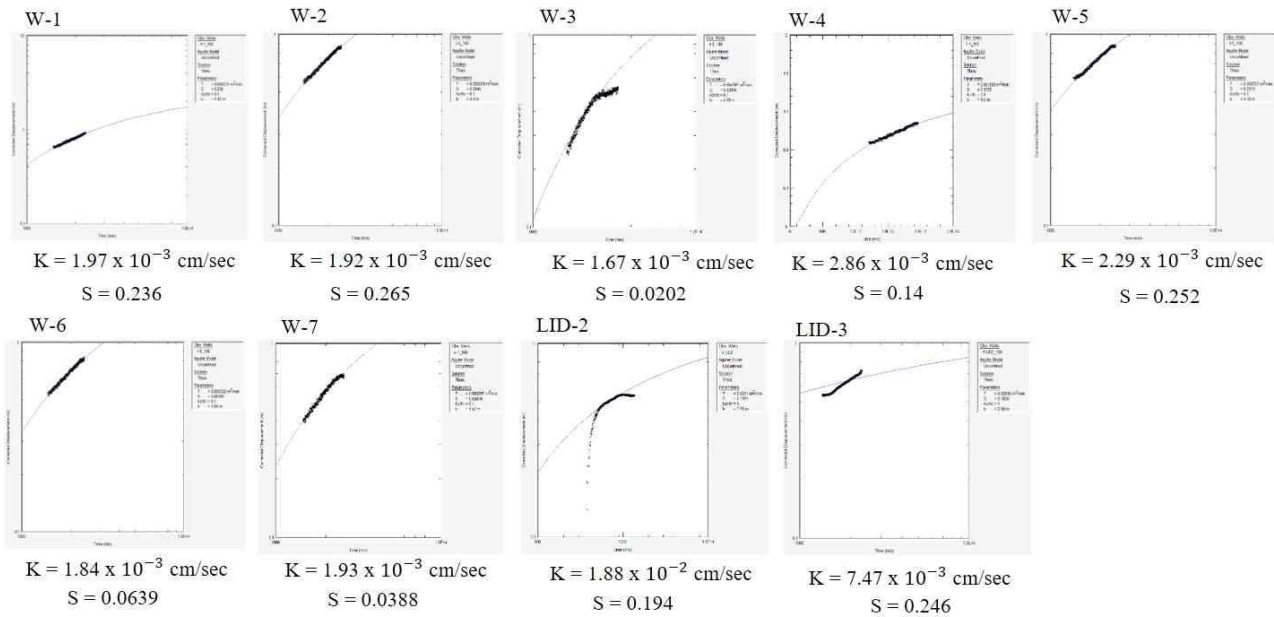


그림 7-16. Theis (1935) 방법을 이용한 2차 함양시험 100 m<sup>3</sup>/d 주입 시 총적 수리상수 산출

함양시험 이전 자연수위는 대부분 지표 하 4~5 m 심도로, 투수성이 높은 모래자갈/굵은 자갈층 구간에 위치하였다. 함양시험 시 관측공 8개소에서 측정된 공내 누적 수위 증가는 0.5 ~ 1.15 m 범위로 이 역시 투수성이 높은 모래자갈/굵은자갈층 구간에서 증가하였다. 결과적으로 변동된 지하수량은 투수성이 높은 모래자갈/굵은자갈층에서 빠르게 완충되고 주변으로 이동하는 것으로 나타나, 수리전도도와 저류계수가 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다.

#### ㉔ 총적대수층 불균질성 및 이방성 분석

연구지역 총적 대수층에 주입된 지하수가 실제로 동심원상으로 균등하게 분산되는지 어떤지에 대한 확인이 필요하다. 함양시험(2차) 결과를 이용하여 대수층의 불균질성과 이방성을 분석하였다. 그런데, 이방성 분석은 일반적으로 x-y 축 설정 시 정북방향 설정이 효과적이지만, 이 연구에서는 저영향개발(LID) 시설을 x-y 축으로 설정하여 이방성 분석을 실시하였다. 이는 주입수가 총적대수층에서 동심원 상으로 균등하게 분산되는지 어떤지에 대한 확인을 하기 위해서는, x-y 축 보다는 저영향개발(LID) 시설 방향을 따라 이방성 분석을 실시하는 것이 대수층 이방성을 확인하는 데에 더 효과적이기 때문이었다.

우선 이 연구지역 총적 지하수 대수층의 불균질성을 분석하였다. 연구지역 총적 대수층의 시추 주상도를 살펴보면(그림 5-10), 최상위 매립층(점토/실트층)의 층후는 시추지점에서 3.4~4.5 m 로 차이가 있고, 총적층 지하수가 부존된 지층(모래자갈/굵은자갈층)의 층후는 지점마다 차이가 있어 0.5~1.5 m 범위, 풍화토의 경우 0.5 ~ 3.0 m 범위로 지점마다 차이를 보였다. 지점별 포화대 두께의 차이는 불균질성을 유발하고, 이에 따라 각 지점별 투수량계수 값의 차이를 발생시킨다. 연구지역 8개소 관측공의 수위 변동자료를 이용하여 투수량계수 텐서와 대수층 저류계수의 이방성을 분석하였다. TENSOR2D 모델에서 산출한 각 관측공의 방향투수량계수( $T_d$ ) 평균 값( $3.4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )과 현장시험(순간수위 변화시험 및 장기 인공함양 시험)에서 산출한 투수량계수 평균 값( $1.3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )이 유사하고, 모델에서 산출한 저류계수(0.09)와 현장시험(장기 인공함양 시험)에서 산출한 평균 값(0.12)이 유사함에 따라 이방성 타원체 분석은 비교적 타당한 것으로 판단된다.

연구지역 대수층 이방성 타원체는 x-y 좌표계로부터 최대 투수량계수 축이 반시계방향으로 약 136° 기울어져 나타나며, 최대 투수량계수( $T_{\xi\xi}$ ) 값과 최소 투수량계수( $T_{\eta\eta}$ ) 값은 각각 37  $\text{cm}^2/\text{sec}$ , 4  $\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 분석되었다. 또한 대수층의 이방성(최대 투수량계수( $T_{\xi\xi}$ )와 최소 투수량계수( $T_{\eta\eta}$ )의 비율)은 8.4 : 1로 나타남에 따라, 연구지역 대수층 이방성 타원체는 덕천강 방향으로 좀더 발달한 것으로 판단된다(그림 8-17~8.18). 결과적으로, 저영향개발(LID) 시설로부터 주입된 지하수는 덕천강 방향으로 우세하게 이동한다. 덕천강 방향에 밀집한 시설재배 농가가 상대적으로 함양시험에 의한 추가 지하수 확보 이득이 높은 것으로 분석되었다. 이에 따라 북방지구 저영향개발(LID) 시설 실시계획 시에는, 기 조사된 시설재배 비닐하우스의 작물별·계절별 물수요량, 관정 밀도, 각종 물 관련 민원과 더불어, 대수층의 이방성에 대한 정보와 이방성 타원체의 축 방향(136°)을 고려할 필요가 있다.

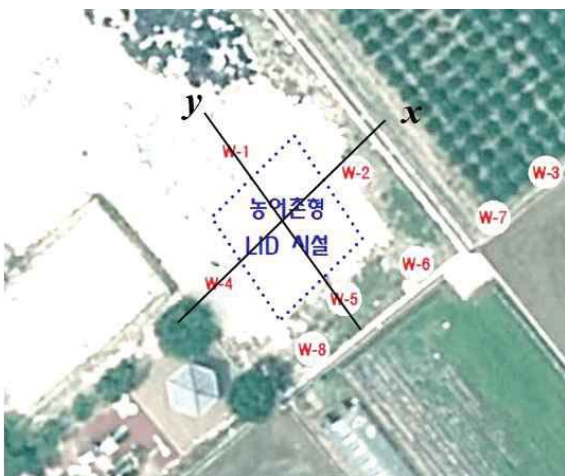


그림 7-17. 이방성 타원체 해석을 위한 x-y 축 설정

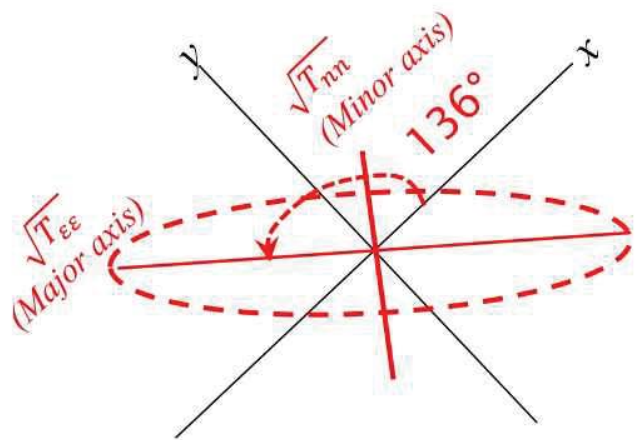


그림 7-18. 현장시험 지구 이방성 타원체 분석 결과

### (다) 함양시험 (3차)

#### ① 연구방법

2022.12월, 장기간에 걸친 함양 효과를 살펴보기 위하여, 실증시험 부지의 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 1일 주입량 약 80  $\text{m}^3/\text{day}$ 으로 하여 약 8일간 함양시험(3차)을 실시하였다. 3차 함양시험 기간동안 연구부지의 지하수 수위는 1차 시험과 유사하게 지표로부터 약 37 m 심도에 위치하여 충적대수층 내부는 지하수가 없는 상태였다.

함양시험(3차)은 약 80  $\text{m}^3/\text{day}$ 의 주입량을 연속 주입함과 동시에, 각 관측공에서의 지하수 위 변동 및 추가 지하수 확보량을 분석하였다. 그런데, 2022년 12월은 수도작(논 농업) 기준 비영농기이기 때문에, 주입수원이 되는 용배수로에는 주변 양배수장에서 인위적으로 흘려주는 용수원은 존재하지 않는다. 다만, 야간에 수막형성을 위해 양수이용한 지하수가 용배수로로 배출되어 야간 및 오전에만 용배수로에 물이 유입된다. 이에 따라, 무동력 자연함양 형식의 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에는 1일 약 12시간 정도만 함양이 발생하게 되었다.





그림 7-19. 3차 함양시험 80 m<sup>3</sup>/d 주입 시 현황

## ② 연구결과

3차 함양시험 결과, 장기적으로 주입수는 함양이 수월하게 이루어졌음을 확인하였다(그림 7-19). 3차 함양시험의 주입수량 80 m<sup>3</sup>/day은 최대 주입수량(120 m<sup>3</sup>/day)의 약 2/3 수준이며, 야간에만 함양이 일어났으므로, 상대적으로 함양은 수월하게 발생하였다.

<그림 8-20>과 <그림 8-21>은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 후 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공 1개소(관측공명 LID-3)와 외부 관측공들의 수위변화를 보여준다. 상세하게는, <그림 8-20>은 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공 1개소(관측공명 LID-3)와 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 가깝게 설치된 5개 관측공(1, 2, 4, 5 및 6번 관측공)의 지하수 수위 변화를 보여준다. 반면 <그림 8-21>은 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공 1개소(관측공명 LID-3)와 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 상대적으로 멀리 설치된 2개 관측공(3 및 7번 관측공)의 지하수 수위 변화를 보여준다.

<그림 8-20>과 <그림 8-21>에서 공통적으로 12시간 주기로 모든 관측공에서 매일매일 지하수위의 높낮이가 크게 변하는 것은 전술한 바와 같이 야간에만 용배수로에 물이 채워지기 때문에, 이에 따라 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 하부로 야간에만 물의 주입이 이루어지기 때문이다. 그리고 7개 관측공 공통적으로 주입 시작 후 약 3~4시간 이 후부터 수위 상승이 발생하였다.

관측공의 수위 변동을 살펴보면, LID-3번 관측공의 경우, 80 m<sup>3</sup>/day 주입 후 평균 126 cm 및 최대 151 cm의 지하수 수위 상승이 발생하였고, 약 1일 경과 후 주입과 배출의 평형을 이루었으며, 이 후 3차시험 종료 시까지 수위의 변동없이 꾸준히 주입이 되었다. 농어촌형 저영향개발(LID) 시설과 근거리 관측공인 1번 관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 평균 17 cm 및 최대 27 cm



의 수위 증가를, 2번 관측공은 평균 40 cm 및 최대 64 cm, 4번 관측공은 평균 8 cm 및 최대 12 cm, 5번 관측공은 평균 32 cm 및 최대 50 cm, 그리고 6번 관측공은 평균 21 cm 및 최대 37 cm의 지하수 수위 증가를 보였다. 반면 원거리 관측공인 3번 관측공은 80 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 평균 56 cm 및 최대 100 cm, 그리고 7번 관측공은 평균 47 cm 및 최대 82 cm의 지하수 수위 증가를 보였다.

농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 가깝게 설치된 관측공 5개소(1, 2, 4, 5 및 6번 관측공)는 3차 시험기간동안 평균 약 8~40 cm 내외의 증가를 보였다(그림 8-20). 이는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 주입된 주입수가 하부 대수층으로 빠르게 충전되는 것을 의미한다. 반면, 농어촌형 저영향개발(LID) 시설과 상대적으로 멀리 떨어진 관측공 2개소(3 및 7번 관측공)는 3차 시험기간동안 평균 47~56 cm의 상대적으로 높은 수위 변동을 보였다(그림 8-21). 이는 3번 관측공 및 7번 관측공 위치까지 이동해 간 주입수가 이들 2개소 관측공 하부의 대수층으로 유입이 더디게 일어나기 때문으로 추정된다. 또는 3번 관측공 및 7번 관측공 하부 대수층은 농어촌형 저영향개발(LID) 시설과 근거리의 위치한 5개 관측공의 대수층과는 전적으로 동일하지 않아, 또 다른 유로에서 이동해 오는 지하수의 영향을 받아 지하수 수위가 변동할 수도 있다.

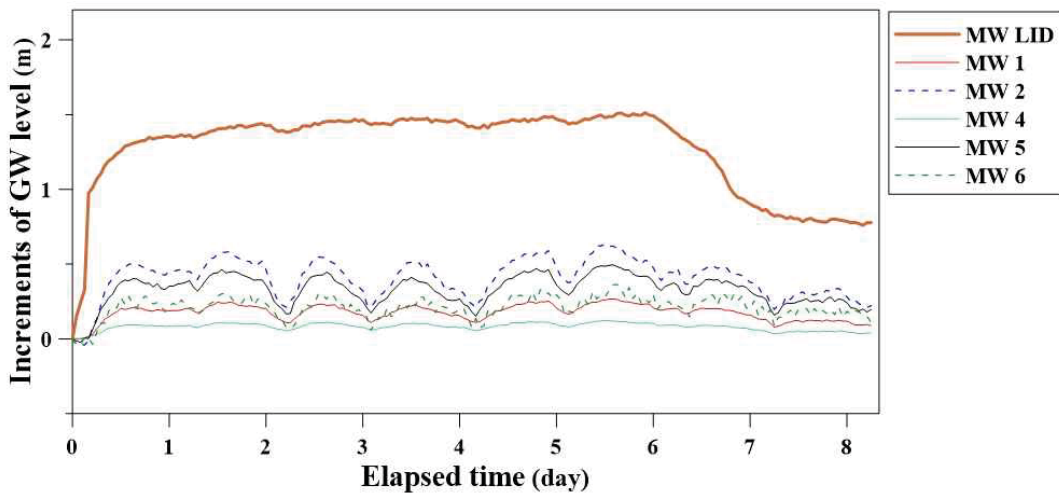


그림 7-20. 3차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 근거리 관측공 5개소의 수위변화

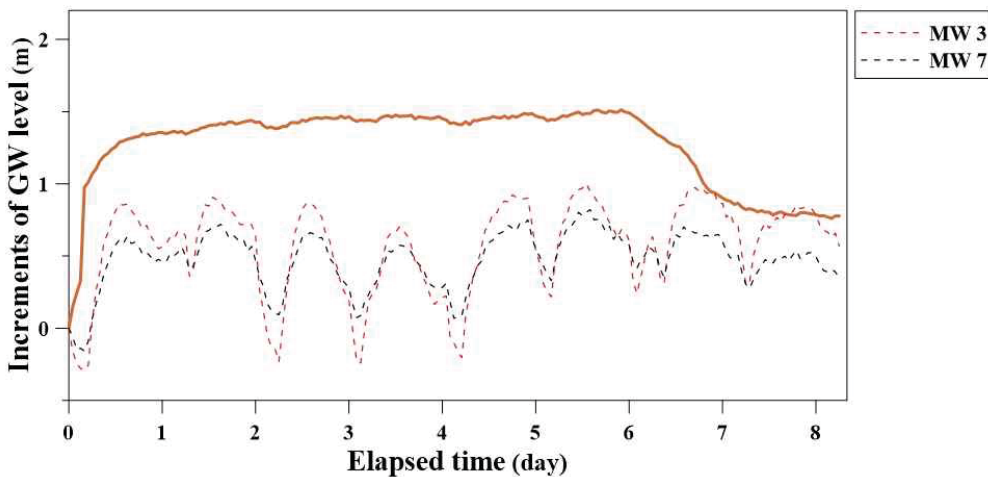


그림 7-21. 3차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 원거리 관측공 2개소의 수위변화

## (라) 함양시험 (4차)

### ① 연구방법

2022.12월, 장기간에 걸친 함양 효과를 살펴보기 위하여, 실증시험 부지의 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 1일 주입량 약 100 m<sup>3</sup>/day 으로 약 16일간 함양시험(4차)을 실시하였다. 4차 함양시험 기간동안 연구부지의 지하수 수위는 3차 시험과 유사하게 지표로부터 약 37 m 심도에 위치하여 충적대수층 내부는 지하수가 없는 상태였다.

함양시험(4차)은 약 100 m<sup>3</sup>/day 의 주입량을 연속 주입함과 동시에, 각 관측공에서의 지하수위 변동 및 추가 지하수 확보량을 분석하였다. 3차 함양시험과 마찬가지로, 2022년 12월은 수도작(논 농업) 기준 비영농기이기 때문에, 주입수원이 되는 용배수로에는 주변 양배수장에서 인위적으로 흘러주는 용수원은 존재하지 않고, 야간에 수막형성을 위해 양수이용한 지하수가 용배수로로 배출되어 야간 및 오전에만 용배수로에 물이 유입된다. 이에 따라, 무동력 자연함양 형식의 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에는 1일 약 12시간 정도만 함양이 발생하게 되었다.



그림 7-22. 4차 함양시험 100 m<sup>3</sup>/d 주입 시 현황

### ② 연구결과

4차 함양시험 결과, 장기적으로 주입수는 함양이 수월하게 이루어졌음을 확인하였다(그림 7-22). 4차 시험의 주입수량 100 m<sup>3</sup>/day은 최대 주입수량의 약 5/6 수준이며, 야간에만 함양이 일어났으므로, 상대적으로 함양은 수월하게 발생하였다.

<그림 7-23>과 <그림 7-24>는 100 m<sup>3</sup>/day 주입 후 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공 1개소(관측공명 LID-3)와 외부 관측공들의 수위변화를 보여준다. 상세하게는, <그림 7-23>은 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공 1개소(관측공명 LID-3)와 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 가깝게 설치된 5개 관측공(1, 2, 4, 5 및 6번 관측공)의 지하수 수위 변화를 보여준다. 반면 <그림 7-24>는 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 내부 관측공 1개소(관측공명 LID-3)와 농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 상대적으로 멀리 설치된 2개 관측공(3 및 7번 관측공)의 지하수 수위 변화를 보여준다.

<그림 7-23>과 <그림 7-24>에서 공통적으로 12시간 주기로 모든 관측공에서 매일매일 지하수위의 높낮이가 크게 변하는 것은 전술한 바와 같이 야간에만 용배수로에 물이 채워지기 때문에, 이에 따라 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 하루로 야간에만 물의 주입이 이루어지기 때문이다. 그리고 7개 관측공 공통적으로 주입 시작 후 약 3~4시간 이 후부터 수위 상승이 발생하였다.

관측공의 수위 변동을 살펴보면, LID-3번 관측공의 경우, 100 m<sup>3</sup>/day 주입 후 평균 141 cm 및 최대 207 cm의 지하수 수위 상승이 발생하였고, 약 1일 경과 후 주입과 배출의 평형을 이루었으며, 이 후 3차시험 종료 시까지 수위의 변동없이 꾸준히 주입이 되었다. 농어촌형 저영향개발(LID) 시설과 근거리 관측공인 1번 관측공은 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 평균 65 cm 및 최대 81 cm의 수위 증가를, 2번 관측공은 평균 93 cm 및 최대 165 cm, 4번 관측공은 평균 25 cm 및 최대 42 cm, 5번 관측공은 평균 30 cm 및 최대 55 cm, 그리고 6번 관측공은 최대 8 cm의 지하수 수위 증가를 보였다. 반면 원거리 관측공인 3번 관측공은 100 m<sup>3</sup>/day 주입 기간 동안 최대 11 cm, 그리고 7번 관측공은 최대 10 cm의 지하수 수위 증가를 보였다.

농어촌형 저영향개발(LID) 시설에 가깝게 설치된 관측공 5개소(1, 2, 4, 5 및 6번 관측공)는 6번 관측공을 제외하면 3차 시험기간동안 평균 약 25~93 cm 내외의 증가를 보였다(그림 7-20). 반면, 농어촌형 저영향개발(LID) 시설과 상대적으로 멀리 떨어진 관측공 2개소(3 및 7번 관측공)는 3차 시험기간동안 최대 10~11 cm의 상대적으로 낮은 수위 변동을 보였다(그림 7-21). 이는 지난 3차 현장시험에 비해 상대적으로 많은(약 20 m<sup>3</sup>/day) 양의 주입수가 주입되어 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 주변에 주입수량의 누적으로 수위가 상대적으로 높게 형성된 결과로 추정된다.

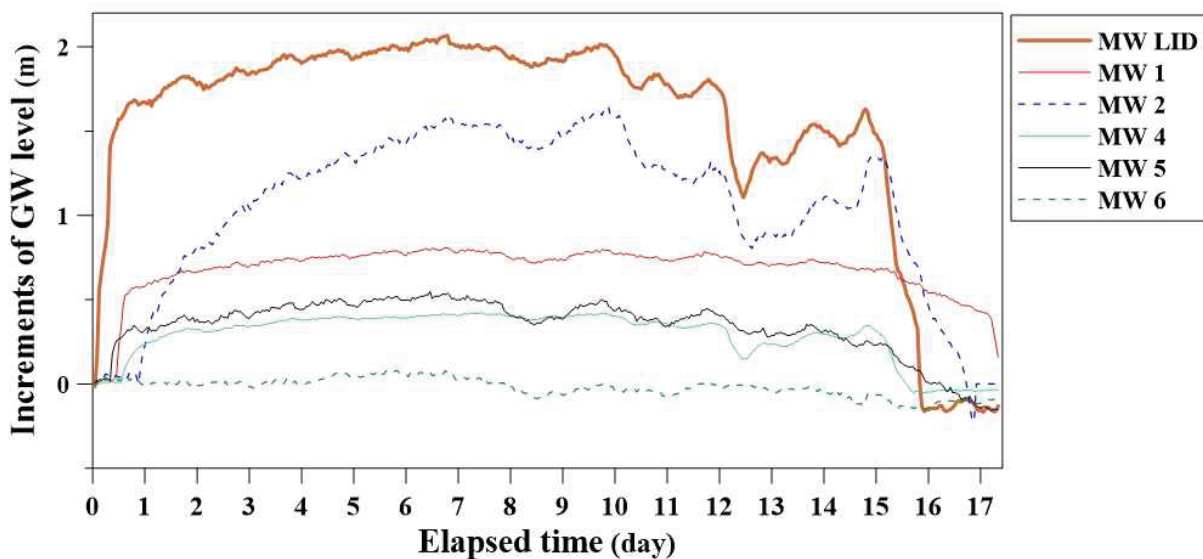


그림 7-23. 4차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 근거리 관측공 5개소의 수위변화

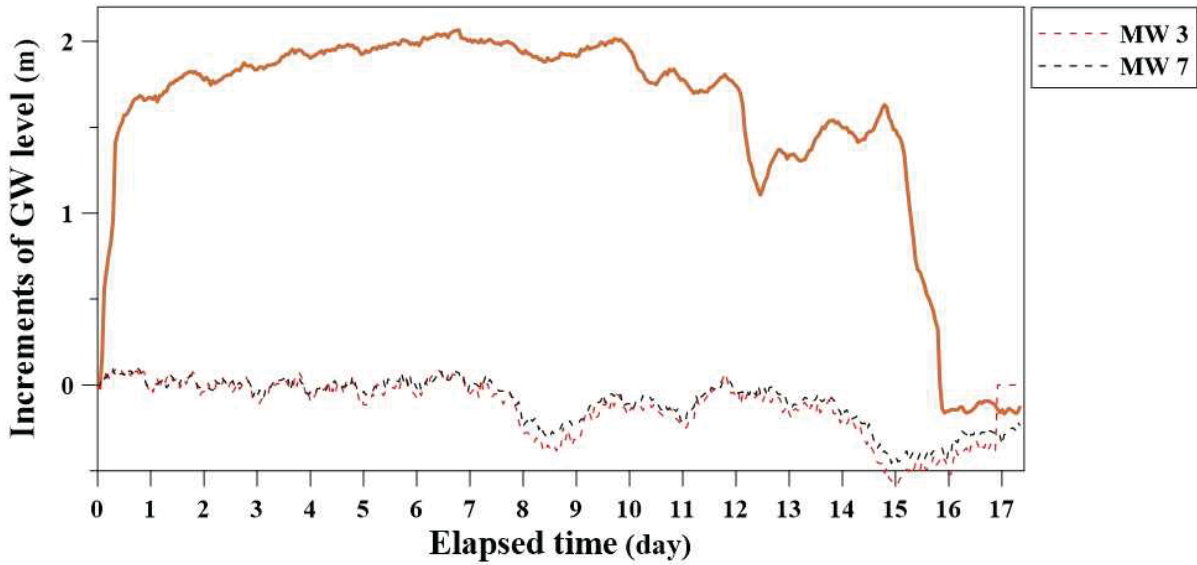


그림 7-24. 4차 함양시험 시 내부관측공 LID-3과 원거리 관측공 2개소의 수위변화

(마) 배출시험 (양수시험)

① 연구방법

2022.05월, 동절기 함양된 지하수를 이용목적으로 양수 시 충전대수층의 지하수 수위 변화 모의를 위해 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 주변 암반관정에서 1일 토출량 약 20~40 m<sup>3</sup>/day으로 양수시험을 실시하였다. 양수시험 중 연구부지의 지하수 수위는 지표로부터 약 1~2 m 심도에 위치하여 저영향개발(LID) 시설 내부는 일부분 지하수가 채워진 상태였다(그림 7-25).

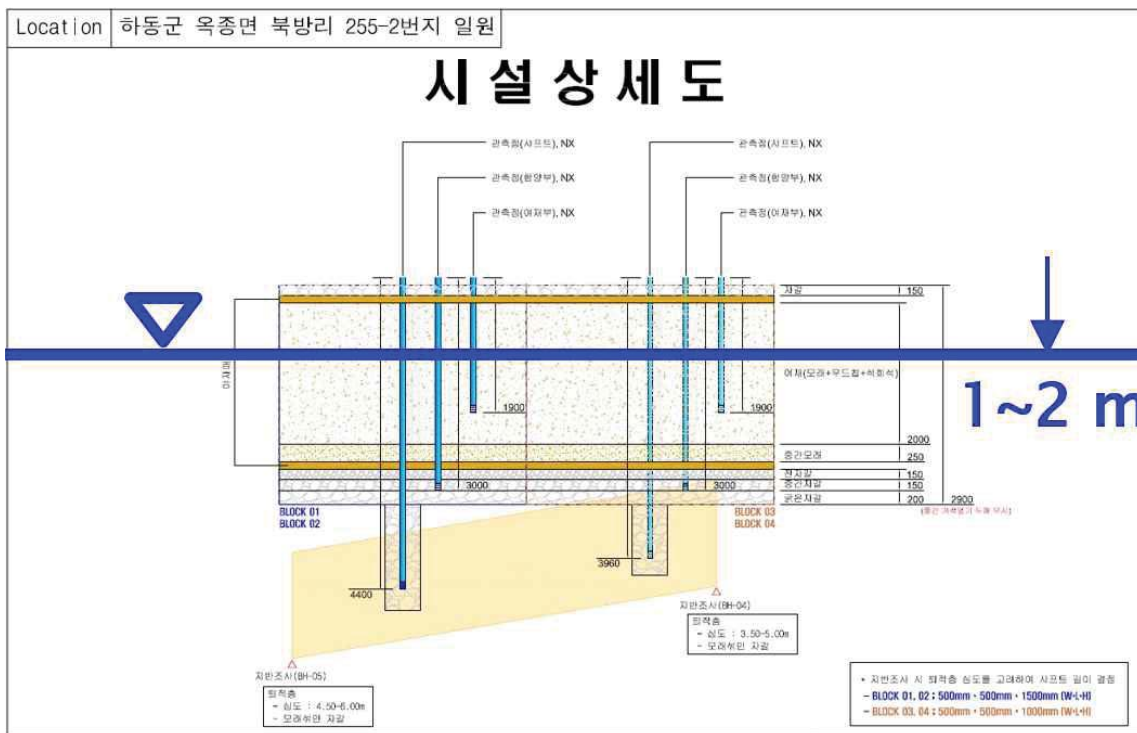


그림 7-25. 양수시험 시 지하수 수위 심도 (1~2 m)

연구부지의 수리지질학적 특성을 파악할 수 있는 양수시험은 어떤 기간 동안 우물에서 지하수를 양수하면서 대수층의 수두변화(지하수위 변화)를 관측하는 시험이다. 특히 양수시험을 통해 연구부지 대수층의 투수량계수(transmissivity : 특정 밀도와 점성도의 물이 단위 수리경사 하에서 단위 넓이의 대수층 또는 피압층을 통해 전달되는 정도를 나타내는 것으로, 액체, 다공질 매체, 그리고 두께의 함수임)와 저류계수(storativity : 단위 수두 변화당 대수층의 단위 단면적당 저장소로 유입 또는 유출되는 대수층 물의 체적으로써 비저류계수와 대수층 두께의 곱과 같음), 그리고 비산출율(specific yield : 암석 또는 토양의 체적에 대한 중력배수에 의해 암석 또는 토양이 산출할 수 있는 물의 체적 비)을 구할 수 있다. 게다가 계산된 투수량계수를 이용해 수리전도도(hydraulic conductivity)를 계산할 수 있다.

## ② 연구결과

### ㉠ 지하수 수위의 하강

배출시험(양수시험) 결과, 상대적으로 암반관정의 토출량이 적어(약 20~40 m<sup>3</sup>/day) 양수 개시 1일 경과 후, 외부관측공 7개소와 내부관측공 1개소의 지하수 수위는 전반적으로 0.1~0.2 m 강하에 그쳤다(그림 7-26~7-27). 특징적으로, W-5 관측공만 약 0.2 m의 지하수 수위 강하를 보였고, 이를 제외한 나머지 대부분의 관측공에서는 약 0.1 m 내외의 수위 강하를 보였다. 금번 배출시험에 따른 지하수 양수에 의한 지하수위 강하폭이 크지 않음에 따라, 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 적용 후 인공 함양된 지하수를 양수 시, 상대적으로 심도가 낮은 관정에서도 양수이용이 가능함을 알 수 있었다.





그림 7-26. 배출시험 시 양수관정(암반관측공) 위치

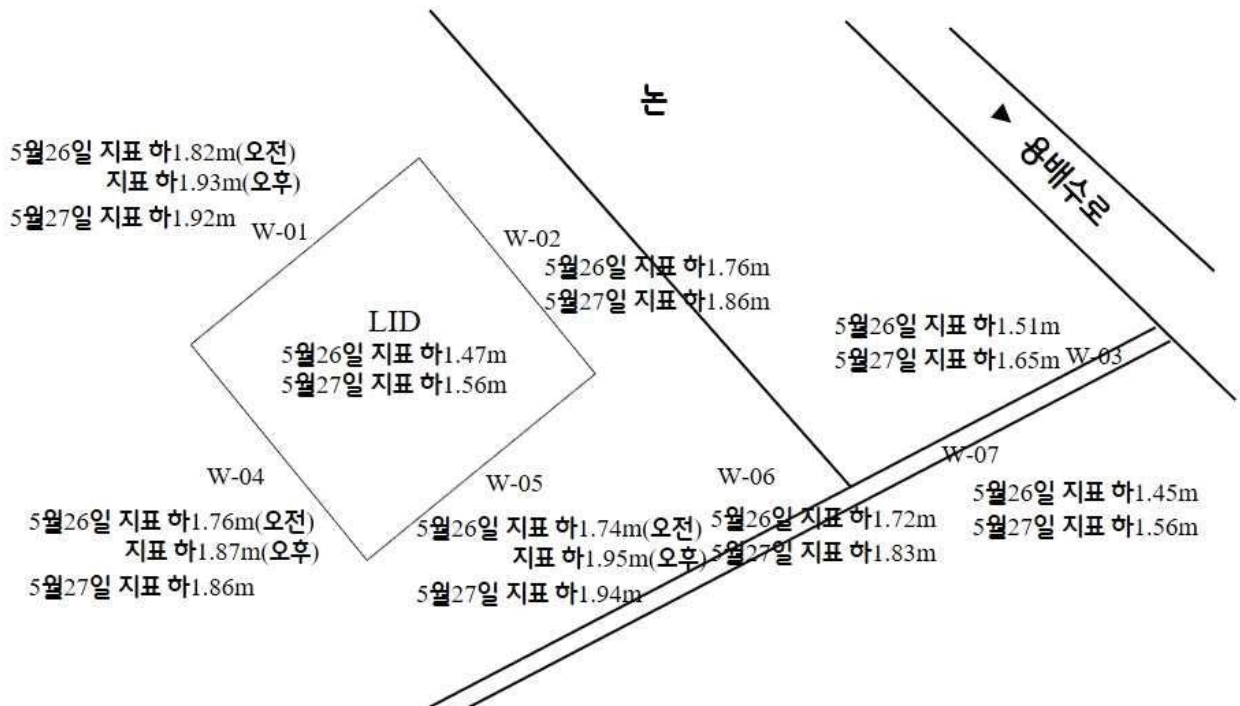


그림 7-27. 배출시험 시 총적관측공에서의 지하수 수위 강하

④ 수리상수 산출

배출시험(양수시험)에 의한 수리상수 해석은 암반관정에서 지하수를 양수함에 따라, 암반 대수층에 대한 Cooper-Jacop (1946) 방법을 이용하여 해석하였다(표 7-3, 그림 7-28~7-29). 배출시험(양수시험)에 의한 연구부지 암반대수층의 수리전도도는 평균  $8.39 \times 10^{-4}$  cm/sec, 평균 저유계수는 0.00013로 산출되었다. 저유계수의 크기가 매우 작아, 지하수의 산출이 적었던 것으로 분석된다.

표 7-3. 배출시험(양수시험)으로 산출한 암반대수층 수리상수

구분	W-1		W-2		W-3		W-4		W-5	
	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S
20 m <sup>3</sup> /d 양수	$6.94 \times 10^{-4}$	0.000045 3	$8.92 \times 10^{-4}$	0.000054 8	$3.25 \times 10^{-4}$	0.000018	$7.93 \times 10^{-4}$	0.000141	$8.17 \times 10^{-4}$	0.000202
40 m <sup>3</sup> /d 양수	$1.07 \times 10^{-3}$	0.000096	$8.99 \times 10^{-4}$	0.000149	$8.46 \times 10^{-4}$	0.000037 7	$1.21 \times 10^{-3}$	0.000146	$1.05 \times 10^{-3}$	0.000385
구분	W-6		W-7							
	K (cm/sec)	S	K (cm/sec)	S						
20 m <sup>3</sup> /d 양수	$7.14 \times 10^{-4}$	0.000083 5	$4.98 \times 10^{-4}$	0.000083						
40 m <sup>3</sup> /d 양수	$1.04 \times 10^{-3}$	0.000156	$8.96 \times 10^{-4}$	0.000181						

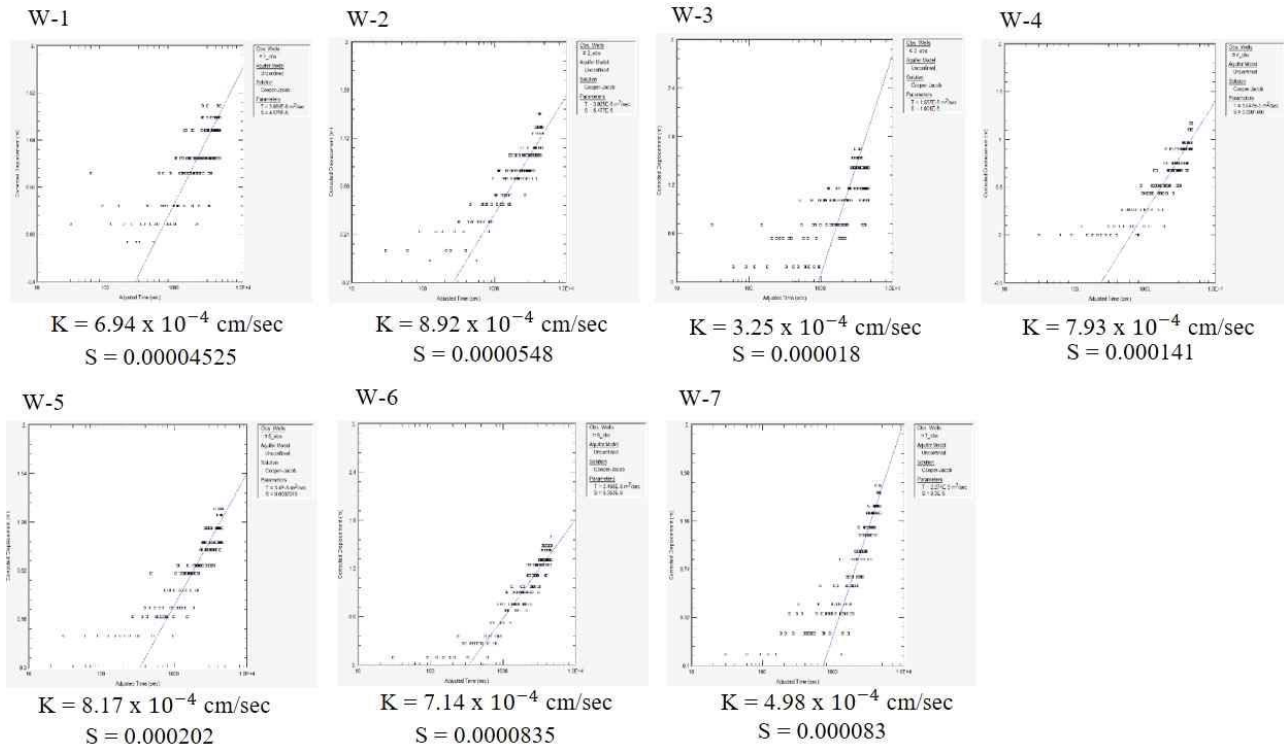


그림 7-28. Cooper-Jacop (1946) 방법을 이용한 20 m<sup>3</sup>/d 양수시험 시 암반 수리상수 산출

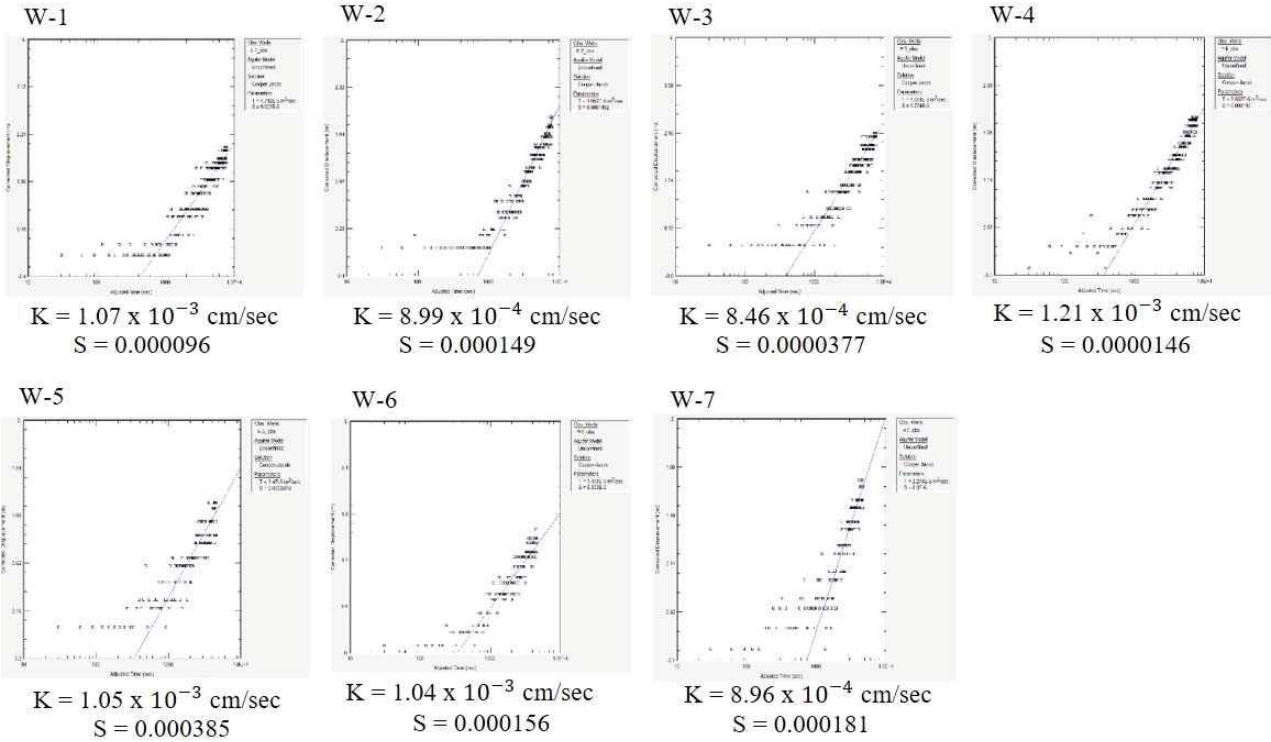


그림 7-29. Cooper-Jacob (1946) 방법을 이용한 40 m<sup>3</sup>/d 양수시험 시 암반 수리상수 산출

## (2) 지하수 오염물질 탈질 시험

### (가) 배경농도 조사 및 오염수(KNO<sub>3</sub>/KBr용액) 주입시험

현장시험지구의 배경농도 조사는 용배수로 함양 및 배출 시험이 이루어진 시기에 총 3회 (1차: 2022년 04월, 2차: 2022년 05월, 3차: 2022년 07월) 수행하였다. 1차 조사에서는 시설주변에 설치된 층적관측공 7개소(W-1~7) 및 용배수로의 배출수(IW)를 대상으로 시료채취하여 분석하였다 (그림 7-30). 2차 조사는 층적관측공 7개소(W-1~7)와 용배수로의 배출수(IW) 그리고 시설주변의 지하수관정 3개소(GW1~3)를 대상으로 수행하였다. 3차 조사는 농어촌형 저영향개발(LID)시설 내부에 설치된 층적관측공 6개소(LID1~6)를 대상으로 수행하였다.

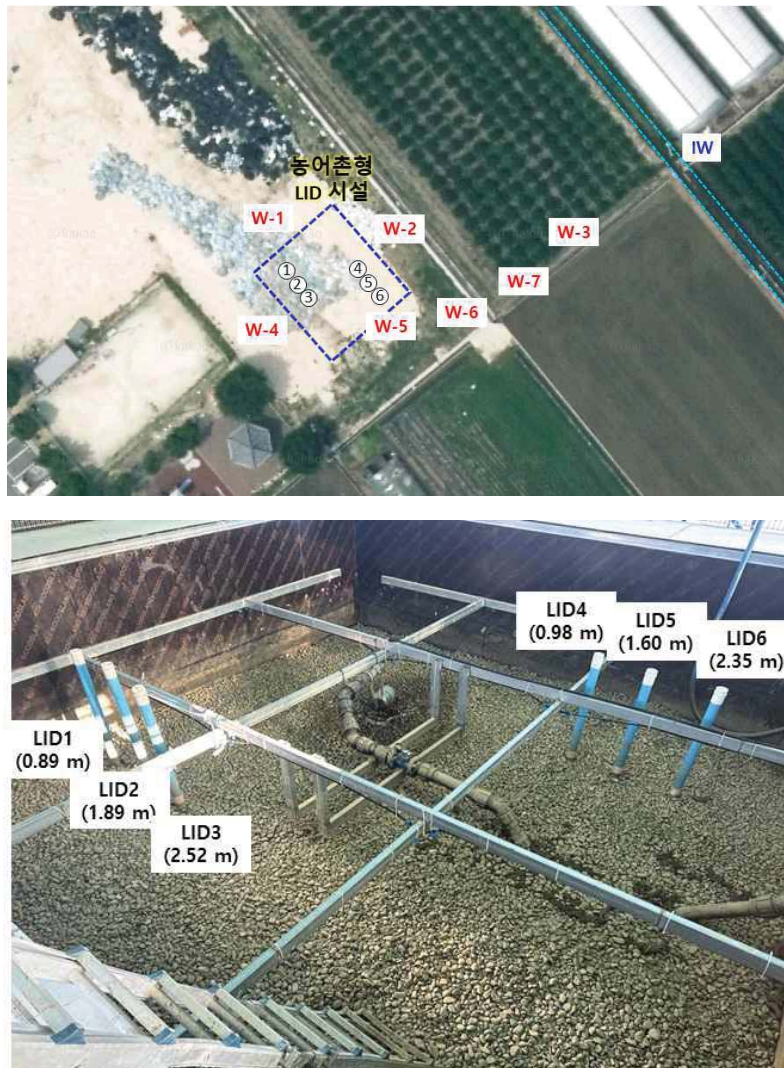


그림 7-30. 침투시설 내외부 수질조사 수행지점(상)과 침투시설(LID pond)내 관측지점사진(하).  
LID관정에 쓰여진 숫자는 관정의 심도

오염수 주입시험은 2022년 12월 19일에서 12월 29일까지 11일에 걸쳐 수행되었다. 본 실험은 12월 20일 NO<sub>3</sub>를 포함한 물을 저영향개발(LID) 시설에 주입하고, 시설주변에 설치된 층적관



측공 7개소(W-1~7)와 저영향개발(LID) 시설 내부에 설치된 관측공 6개소(LID1~6)에서(그림 7-30)의 수질변화를 관찰하는 방법으로 수행되었다. 주입수는 용배수로(IW)에서 채수된 물에 KNO<sub>3</sub>와 KBr을 녹여 각각 약 500ppm이 되도록 500 kg을 준비하였으며, 이를 저영향개발(LID) 시설의 내부에 주입하여 시설 내에 고여있던 상층수(pond수)와 혼합되어 매질을 침투하도록 하였다. KNO<sub>3</sub>/KBr용액을 pond수와 혼합한 직후의 pond수 농도는 각각 18.2 mg-N/L, 14.5 mg-Br/L이었다. 여기에서 Br은 보존성이 있으므로, 주입수의 움직임을 추적하는 추적자로 사용하였다.

실험도중 추가적인 물의 유입이 없었기 때문에 저영향개발(LID) pond의 수위는 지속적으로 감소하였으며, 실험 시작 약 12시간이 지난 후부터는 pond가 바닥을 드러내기 시작하였다. 침투속도는 하루에 약 1.0 pore volume이다.

본 연구에서는 총 113개의 수질시료가 채수되었으며, pH, EC, DO, 수온, Eh, DOC, alkalinity, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Br<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe, Mn 등 총 19개 항목에 대하여 분석을 수행하였다. pH, EC, DO, 수온, Eh 등은 표준용액으로 보정된 계측기를 이용하여 현장에서 분석을 수행하였다. Alkalinity는 현장에서 실험실로 돌아오자마자 Gran titration법으로 분석하였다. 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)과 음이온(F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 산처리하지 않은 여과시료(0.45 μm)를 이용하여 이온크로마토그래프(Dionex DX500)를 이용하여 분석하였다(표 7-4). Fe, Mn은 유도결합플라즈마발광분석기(ICP-OES)을 이용하여 분석하였다(그림 7-31). DOC는 시료를 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과한 후 TOC analyzer(GE Analytical Instruments, Sievers InnovOx TOC)를 이용하여 분석하였다.

표 7-4. 지하수 수질분석 항목 및 수량

구분	분석항목	분석방법 및 기준
현장측정	pH, EC, Eh, DO, 온도	Thermo scientific
Alkalinity	알칼리도(Alkalinity)	Gran titration법
양이온	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ion chromatography (Dionex DX500)
음이온	F <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ion chromatography (Dionex DX500)
금속원소	Fe, Mn	ICP-OES(Perkinelmer 4300DV)
유기물	DOC	GE Analytical Instruments, Sievers InnovOx TOC



유도결합플라즈마  
방출분광분석기(ICP-OES)



원자흡수분광광도계(AAS)



이온크로마토그래프(IC)

그림 7-31. 실험실 수질분석 장비 사진



## (나) 연구 결과

주입실험기간 동안 각 관정에서 모니터링된 주요 수질항목의 변화추이는 <그림 7-32 ~ 그림 7-35>와 같다. 본 실험을 통하여 관찰된 수질변화 특징은 다음과 같다.

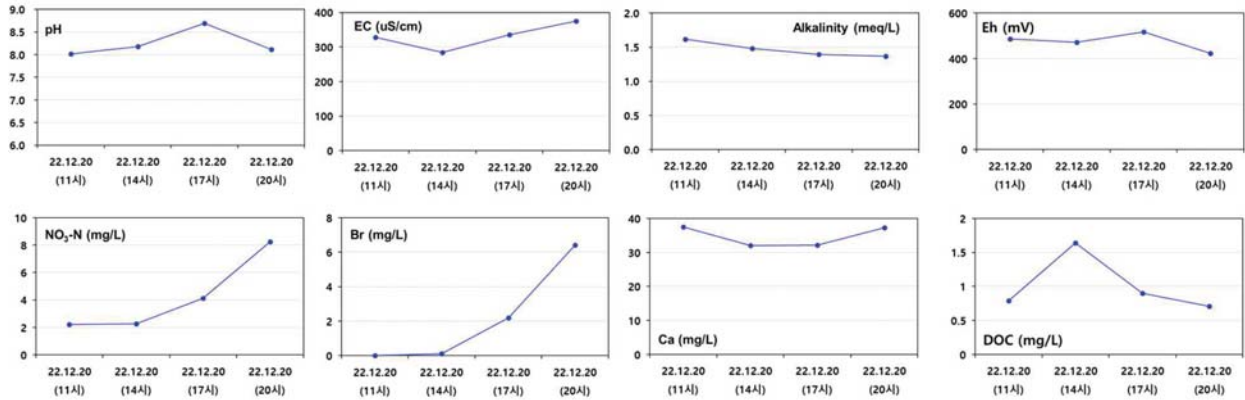
### ① LID 1-3 우물 등지

보존성 추적자로 주입된 Br<sup>-</sup>의 농도는 LID 1에서 가장 먼저 증가되어 가장 높은 농도에 이르렀다(그림 7-32). 반면, LID 3에서의 Br<sup>-</sup> 농도증가가 LID 2에서의 농도증가에 비하여 현격하게 나타났다. 이러한 상황은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도에서도 비슷하게 나타났다. 이처럼, 심도가 깊은 LID 3의 농도증가가 LID 2보다 현격한 것은 관측공의 casing을 따라 곧바로 유입되는 물이 있음을 지시한다. 본 우물등지에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 변화양상이 Br<sup>-</sup>와 비슷하게 나타난 것은 탈질에 의한 NO<sub>3</sub>-N농도 제거가 현격하지는 않음을 지시한다. 모든 관정에서 Eh는 400 mv이상의 값을 보였으며, 이는 침투 시설 공극수들이 산화상태에 있음을 지시한다. 바로 이러한 이유로 침투매질 속에서의 탈질이 빠르게 나타나지는 않은 것으로 보인다. 각 관정에서 채수된 시료의 DOC농도는 1.0 mg/L내외로 낮았으며, 바로 이러한 이유로 비교적 높은 Eh값을 보인 것으로 판단된다.

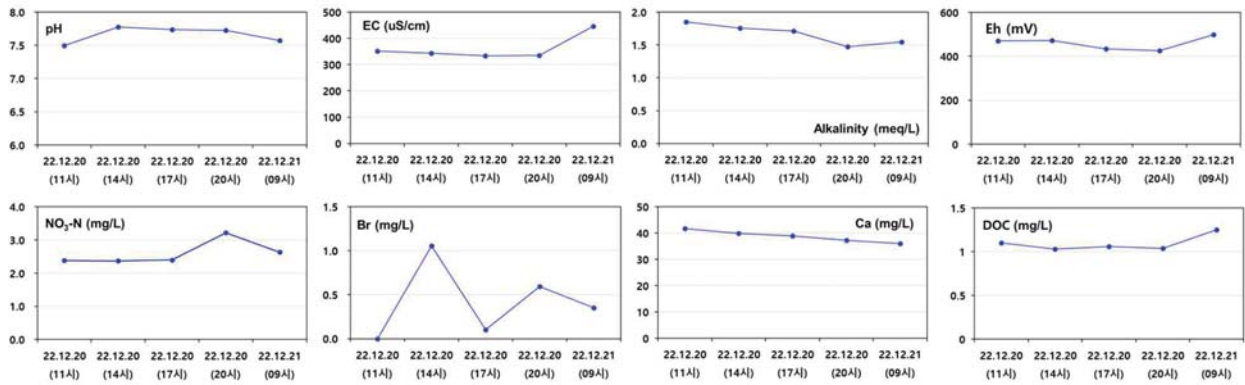
### ② LID 4-6 우물 등지

본 우물등지에서 관찰된 Br<sup>-</sup>값은 같은 시점에서 관찰된 농도를 볼 때, 큰 차이가 없었다(그림 7-33). 심도가 가장 깊은 LID 6에서는 4 ppm근처까지 증가되었다가 줄어드는 양상을 보였다. 각 화학종들의 수질 변화양상은 LID 1-3 우물 등지에서와 전체적으로 유사하였으나, LID 6의 DOC는 다른 관정들과 달리 5 mg/L의 값을 보인 것을 보면, 비록 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>농도의 저감이 뚜렷하지는 못했지만 점차 뚜렷한 탈질이 나타날 것으로 판단된다.

### LD 1



### LD 2



### LD 3

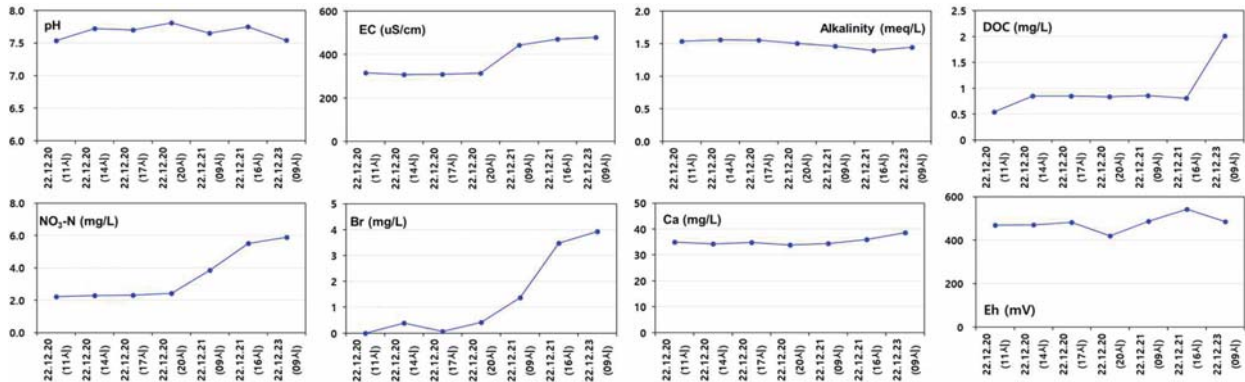
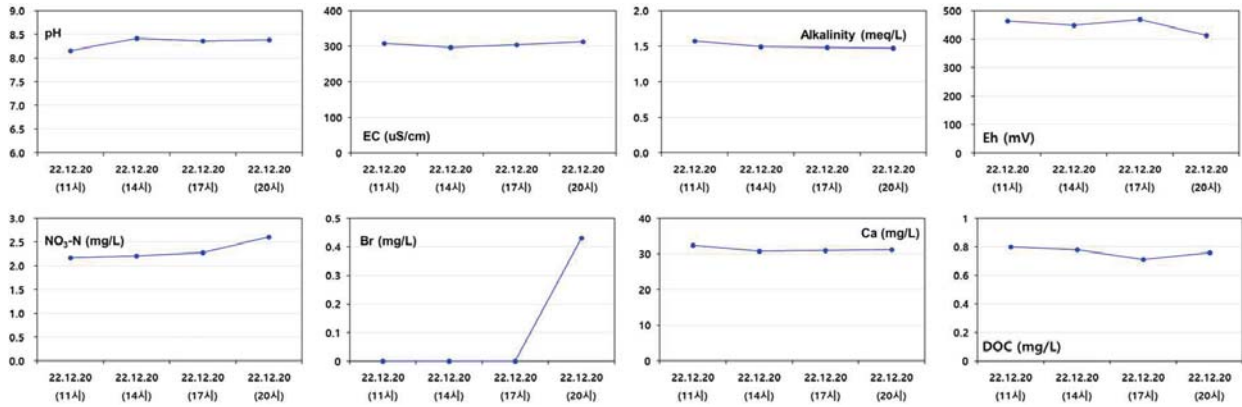
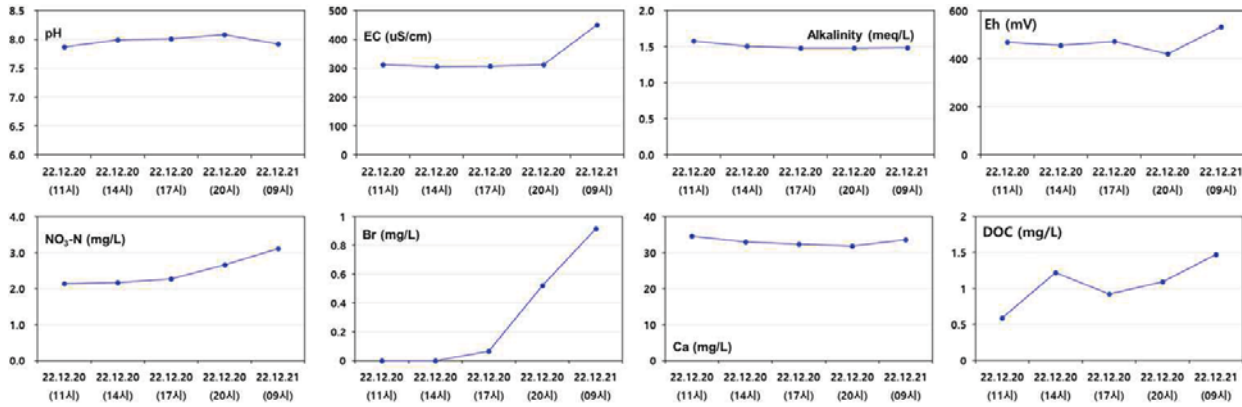


그림 7-32. 저영양개발(LID) 시설 내부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(LID1-3)

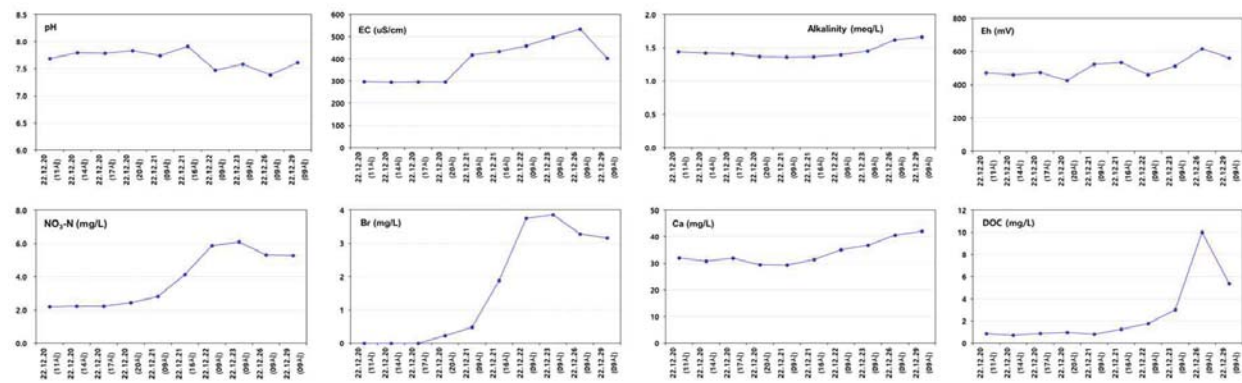
### LID 4



### LID 5



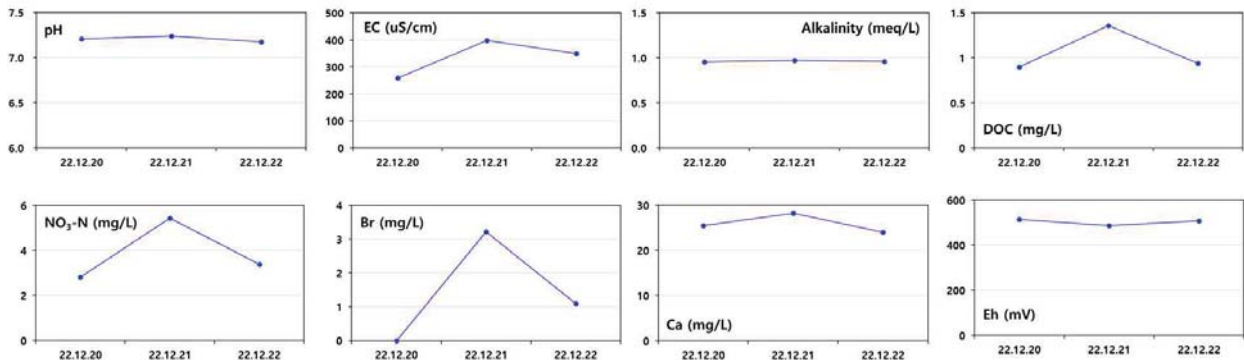
### LID 6



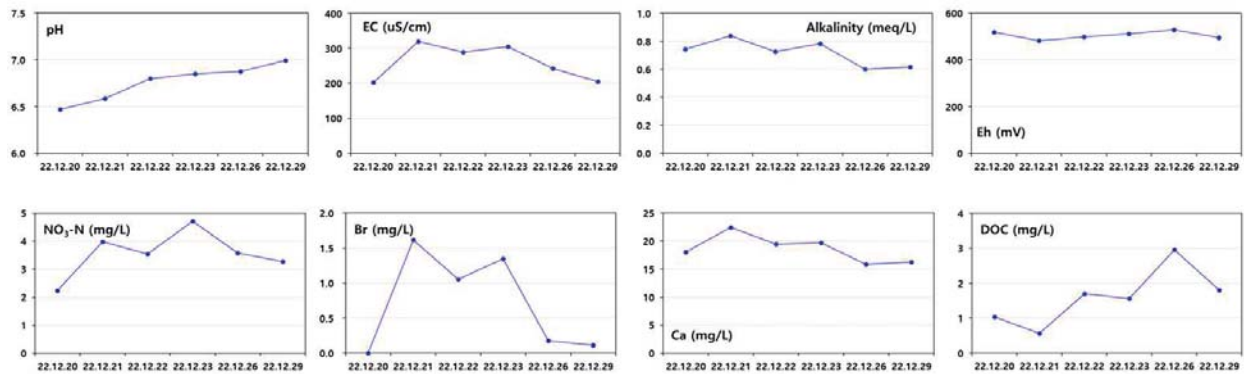
③ 외부관측공 (W 1-7)

저영향개발(LID) 시설에서 가까운 W-1, 2, 4에서는 자연상에서 흔하지 않는 1.0 mg/L이상의 Br농도가 관찰되었으며, 이로부터 판단할 때, KNO<sub>3</sub>/KBr용액 주입에 따른 영향을 어느정도 받은 것으로 판단된다. 이러한 양상을 W-1과 W-4관정에서 특히 현격하게 나타냈다. 이들 관정에서는 NO<sub>3</sub>의 변화양상이 Br의 변화양상과 다소 비슷하였다. 이들 관측공들도 높은 Eh값을 보이고, 비교적 낮은 DOC값을 보이는 것을 보면, 해당 대수층이 여전히 산화환경에 있음을 지시한다. 이것이 NO<sub>3</sub> 탈질이 뚜렷하지 않은 이유라고 할 수 있다.

W-1



W-2



W-3

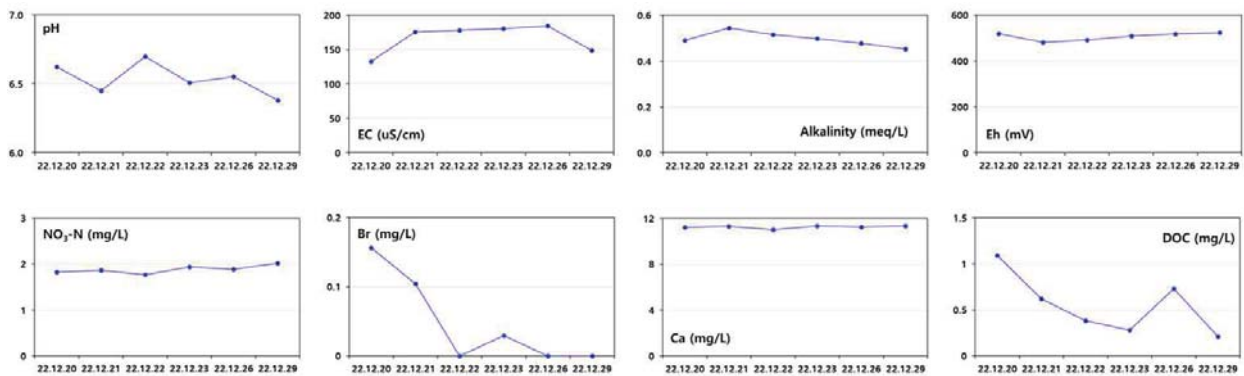
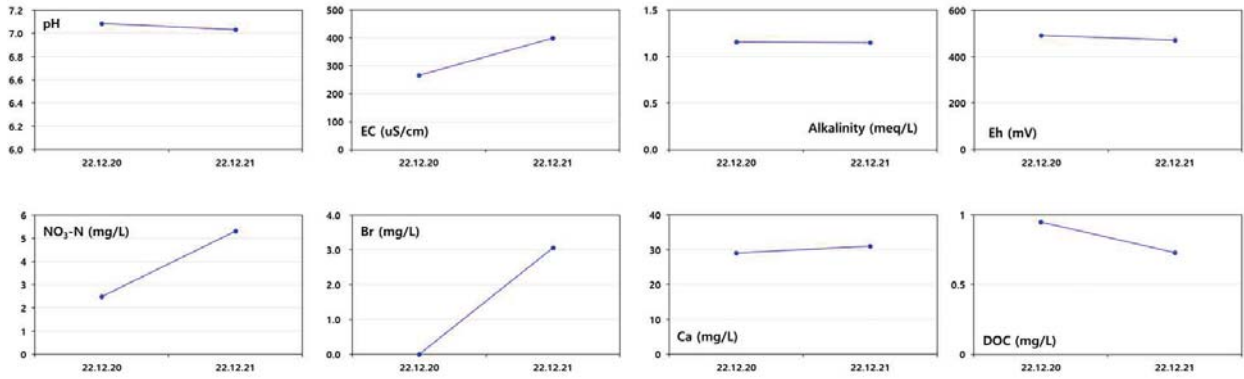
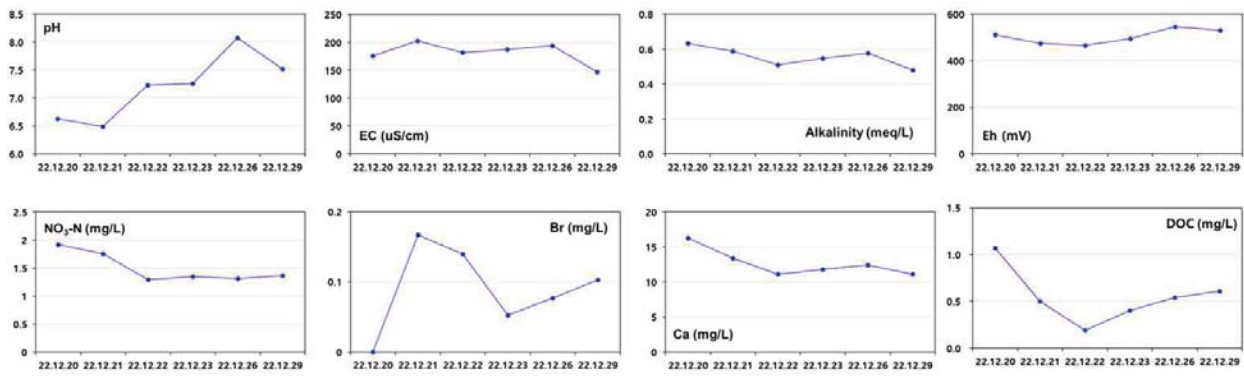


그림 7-34. 저영향개발(LID) 시설 외부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(W-1, 2, 3)

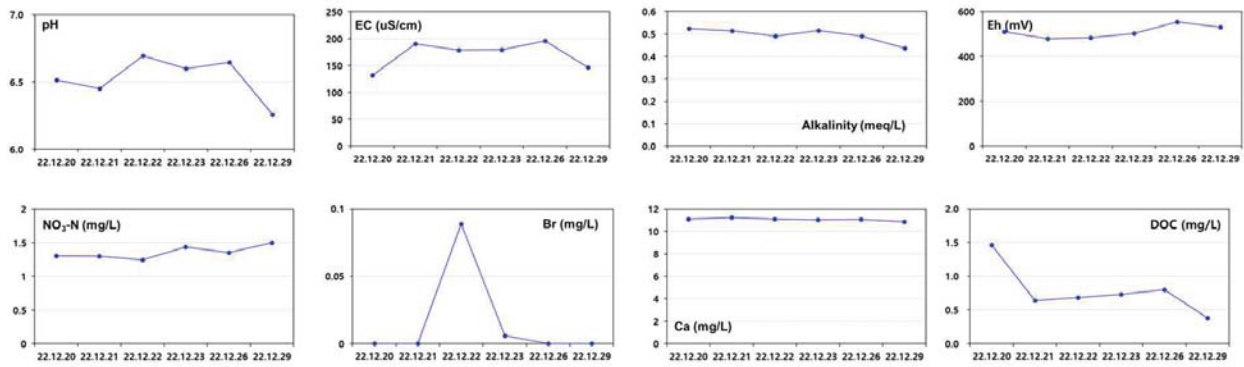
### W-4



### W-5



### W-6



### W-7

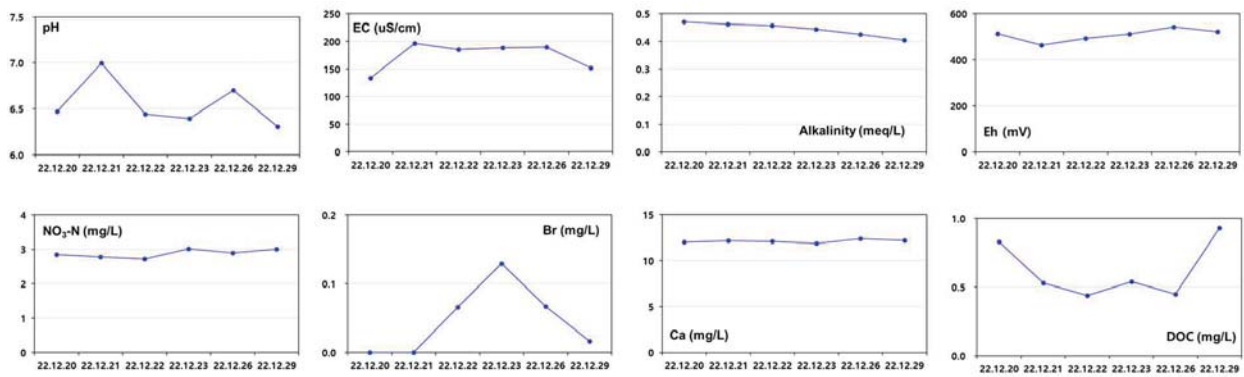


그림 7-35. 저영향개발(LID) 시설 외부 관측공에서의 주요 수질항목 변화(W-4, 5, 6, 7)



### (3) 결론

농어촌형 저영향개발(LID) 시설은 물 부족 시설재배지역에 대한 주요한 추가 지하수 확보 기술로, 기술 적용 시 부가가치가 높은 농산물의 지속적 생산·판매를 가능케 하여 농가소득 증대에 기여한다. 농어촌형 저영향개발(LID) 적용 시 중요하게 고려되어야 하는 점은 대수층의 수리지질학적 특성(투수성, 저류성 등)으로, 주입수 저장과 대수층 조건 변화에 따른 최적의 주입방법과 함께 심도, 규격 등을 결정해야 한다.

이 연구에서는 분지형 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용하여 최적 주입량(120 m<sup>3</sup>/day)으로 장기 실증시험을 실시하고 층적대수층의 수리지질학적 특성(수리전도도 평균  $2.62 \times 10^{-3}$  cm/sec, 저류계수 평균 0.12), 불균질성과 주된 이송방향(이방성 비율 8.4 : 1)을 분석하였다. 이 결과 연구지역의 층적대수층은 외부 주입수를 거의 덕천강 방향으로 주로 분산시키며 주입된 수량에 대한 완충능력은 우수한 것으로 분석되었다. 그럼에도 불구하고 향후 본 사업 시행 시에는 주입효율 증대를 위해 하부 야자매트의 제거, 주입관로의 확장, 주입면적의 확대 등 추가 고려할 필요가 있다.

본 실험을 통하여 침투되는 물의 탈질 효율을 증대시키기 위해서는 침투매질을 환원환경으로 만들어주어야 함을 알 수 있었다. 이처럼 탈질에 적합한 환경이 조성되지 않은 이유는 (1) 침투속도가 빨라서 산소가 왕성하게 공급되었거나, (2) 공급되는 산소를 모두 흡수하여 환원환경을 조성할 수 있을 만큼의 유기물의 분해가 왕성하지 때문으로 판단된다. 침투속도를 줄이면 탈질율을 증대시킬 수 있을 것이나, 이는 침투효율이 높아야 하는 LID시설의 목적에는 역행하는 바, 현재보다는 충분히 많은 양의 유기물을 포함시켜야 할 것으로 판단된다. 사실 기후여건으로 인하여 시설을 설치한 후 수 개월이 지난 다음에 본 실험이 이루어짐으로 침투매질에 포함된 우드칩에서 쉽게 분해되는 부분은 이미 분해가 이루어진 상태에서 본 실험이 진행되었던 것도 한 원인으로 판단된다. 따라서, 탈질효과를 보기 위해서는 현재보다는 충분히 많은 양의 유기물을 이용하여 매질을 만들어야 할 것으로 판단된다.

## 아. 농어촌형 저영향개발(LID) 시설을 이용한 지하수 관리 방안

### (1) 농어촌형 저영향개발(LID)을 이용한 지하수 관리방안

최근 지구온난화에 따른 기후위기는 가뭄에 따른 지표수 자원의 감소를 유발하였고, 광역 상수도가 생활용수로 보급되는 지역일지라도, 농업용수의 경우에는 광역상수원 사용이 불가능하기 때문에, 지표수를 대신할 수 있는 상수원으로서 지하수의 확보가 절실히 요구된다. 그러나 아무리 지하수가 양적으로 풍부할지라도 특정오염물질로 오염되어 인체에 위해를 끼칠 수 있다면, 이러한 오염지하수는 사용 불가능한 자원으로 남게 되어 세심한 주의와 관심이 필요하다. 이에 본 연구에서는 시설원예밀집 지역에 대항려 추가 지하수를 확보하고, 특히 농어촌지역 지하수의 주 오염원인 질산성질소를 효과적으로 제거하며 오염 확산 방지가 가능한 저비용 고효율의 농어촌형 저영향개발 기술을 이용한 지하수 관리방안을 제시하고자 한다.

농어촌형 저영향개발 시설은 지하수 인공함양과 오염지하수 수질정화를 동시에 달성할 수 있는 기술로서, 최근 농가소득 증대를 위해 확대 중인 시설농업지역 등 상습물부족 지역, 오염지하수 관리 필요 지역 등에 즉시 적용 가능하며, 공적자원인 지하수를 건전하고 지속적으로 농어업 용수로 활용 가능하다. 특히, 농어촌지역 지하수 수질위해(특히, 질산성질소 위해)를 최소화하는 저영향개발 기술은 청정한 빗물함양 및 안심하고 재이용할 수 있는 지하수 수질 확보가 가능하여 안전농산물 생산에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고, 지표기원 비점오염원과 지하수의 상이한 수질 특성 조건 하에서의 일종의 수처리 기법인 농업부산물 정화 여재가 부착된 저영향개발 시설 기술을 확보함으로써 농어촌 지하수의 안정적 수질 확보에 기여할 것으로 기대된다. 특히, 비교적 저비용의 친환경 시설을 적용하여, 현장에서 즉시 이용 가능한 지하수 자원 확보, 오염수 유입에 대응 가능한 기술 확보 등 지하수 환경보전, 지하수의 중요성 인식 및 지하수 활용 산업 확장이 기대된다.

#### (가) 기술 적용 범위

농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 지하수 인공함양 및 질산성질소 오염정화 기술은 국내 농촌지역 하천변에 위치한 시설원예단지에서 추가 지하수 확보 및 질산성질소 오염지하수의 정화 및 확산방지를 위해 활용할 수 있다. 구체적으로, 물부족 시설원예단지에 대하여, 기존에는 관정 주입형 지하수 인공함양 사업 등이 주를 이루었다면, 무동력 분지형 지하수 인공함양을 시도하여 최저금액으로 추가 지하수 확보를 할 수 있다. 다만, 이 경우 최적 함양분지를 상류부에 확보할 수 있어야 하고, 이에 대한 비용 역시 소요된다. 그리고 화학비료에 기원한 질산성질소 배출원인 시설원예단지에 농어촌형 저영향개발 시설을 설치하여 질산성질소 오염지하수를 정화하며 동시에 오염확산방지를 도모할 수 있다.

그러나, 본 기술은 용배수로 유입수 등 상시 공급수원이 부족한 지역에 대해서는 적용에 한계가 있으며, 공급수원이 부족한 지역에는 다른 기술이 적용되어야 할 것이다.

## (나) 기술 적용 방법

본 기술은 우선 대상 부지의 경쟁적 지하수 관정 개발에 의한 물 부족 여부, 질산성질소 오염 여부에 따라 그 적용 방법을 달리한다. 즉, 본 과제의 연구지역처럼 수막재배 등을 위해 지하수 부족이 심화되어 있고, 현재 질산성질소의 뚜렷한 오염이 나타나지 않는 잠재오염 지역과, 물 부족은 심화되어 있지만 질산성질소로 이미 오염된 지역에 대하여 적용 방법을 달리하며, 세부 순서는 다음과 같다. 특히, 농어촌형 저영향개발 시설 설치 시, 지하수 유동방향에 대한 조사가 미흡하여 지하수 유로가 아닌 곳에 설치되었을 경우에는 인공함양 및 오염확산방지 효과를 기대하기 힘들기 때문에, 농어촌형 저영향개발 시설의 현장 설치에 앞서 정밀한 환경수리지질학적 조사가 요구된다.

- ① 용수가 부족하고 질산성질소 오염이 뚜렷하지 않은 지역
  - ㉠ 대상 지역 물부족 현황 조사 및 오염 영향인자 조사
    - 대상지역 지하수 이용현황(이용량, 관정수) 파악
    - 질산성질소 오염유발 가능 시설(잠재 점오염원) 현황 조사
    - 물 부족 수량 조사, 물 부족 시 지표로부터 지하수 수심 조사
    - 지하수 대수층 이방성 조사, 지하수 인공함양 시 지하수 이동방향 조사
    - 잠재 점오염원과 취수 대상 관정간의 거리와 오염농도 분석
  - ㉡ 농어촌형 저영향개발 시설 설치, 관측공 설치 및 모니터링
    - 물 부족 대상지역 상류부에 농어촌형 저영향개발 설치 (물 부족 수량에 대응 규모)
    - 농어촌형 저영향개발 시설 설치 경계부에 관측공 설치
    - 토착 탈질미생물 조사, 미존재시 외부 탈질미생물 주입 모색
    - 지하수 인공함양 및 관측공을 이용한 정기적인 질산성질소 제거 모니터링
- ② 용수가 부족하고 질산성질소 오염발생 지역
  - ㉠ 대상 지역 물부족 현황 조사 및 오염 영향인자 조사
    - 대상지역 지하수 이용현황(이용량, 관정수) 파악
    - 질산성질소 오염유발 가능 시설(잠재 점오염원) 현황 조사
    - 물 부족 수량 조사, 물 부족 시 지표로부터 지하수 수심 조사
    - 지하수 대수층 이방성 조사, 지하수 인공함양 시 지하수 이동방향 조사
    - 농어촌형 저영향개발 시설 타당성 검토 및 위해성 평가
  - ㉡ 농어촌형 저영향개발 시설 설치, 관측공 설치 및 토양시료 분석
    - 물 부족 대상지역 상류부에 농어촌형 저영향개발 설치 (물 부족 수량에 대응 규모)
    - 농어촌형 저영향개발 시설 설치 경계부에 관측공 설치
    - 관측공 굴착자료를 이용한 대수층 층상구조 파악
    - 지하수 유동경로·속도 및 수리물리특성 확인을 위한 수리시험
    - 수질시료 채수·분석으로 지하수 오염은 규모 파악

- 토양시료 채취, 토양 물리특성 분석
- 토착 탈질미생물 조사 및 분리, 미존재시 외부 탈질미생물 주입 모색
- 최적 인공함양 주입량 결정
- 지하수 인공함양 및 질산성질소 제거 및 오염확산 방지 모니터링

**(다) 기술 활용계획(안)**

본 연구에서 개발된 기술이 적용 가능한 사업으로는 농림축산식품부의 「지하수자원 관리 사업」 과 이로 인해 파생된 순환형 지하수 개발사업 등이 있다. 지하수자원 관리사업은 농어촌지하수의 체계적인 보전·관리를 통하여 청정하고 안전한 지하수자원의 지속가능한 개발·이용을 도모하고자 한국농어촌공사에서 대행하는 사업으로서, 본 연구의 결과는 농어촌지역의 안정적인 지하수 수량 확보와 오염지하수 수질개선 및 정화방안 구축을 위한 기술 자료로 활용될 수 있다. 또한, 본 연구 결과는 시도 지자체의 농어촌 지역 지하수 물자립 및 지하수 보전 정책 수립에 활용 가능할 것으로 기대된다. 그리고 본 연구의 실내 및 현장 실험에서 도출된 추가 지하수 확보 및 질산성질소 제거에 대한 정보는 향후 개별 시설원예단지의 추가 지하수 확보와 질산성질소 농도에 정화효율을 예측하는 데에 좋은 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**(라) LCC (Life Cycle Cost) 분석**

본 시설의 정화여재는 배치실험을 기반으로 투수성과 수질정화능이 우수하며, 교환주기가 상대적으로 긴 우드칩과 석회석을 선정하여 여재의 교환주기를 15년 이상으로 설계하였다. 여재부의 혼합비율은 우드칩을 기준으로 “모래 : 우드칩 : 석회석 = 30 : 1 : 0.2”이며, 해당 단가는 실증부지 시공 기준(여재부 용량 50.7m³)으로 비교하였다.

**표 8-1. LCC (Life Cycle Cost) 분석**

구 분		단 가 (2021년 기준)	용 량 (실증부지 기준, m³)	소요금액	비 고
재료비	모 래	7.76 만원/m³	48.75	378.3 만원	견적가
	우드 칩	6.6 만원/m³	1.625	10.7 만원	견적가
	석 회 석	1.3 만원/톤	0.325	1 만원 미만	견적가
	야자 매트	상부 0.94 만원/m²*	49m²	46 만원	견적가
	하부 0.94 만원/m²*	49m²	46 만원	견적가	
시공비	장비비	100 만원/일	3일	300 만원	
	운반비	2만원/m³	48.75	97.5 만원	
	인건비	25 만원/인·일	3인 × 5일	375 만원	
유지관리비		15만원/인·회	2인 × 60회	900 만원	분기별(15년)
합 계				약 2,154.5만원	

\* 2.0m×10.0m 규격 제품 가격 188,000원

위와 같이 시설 설치 시 여재부 소요금액은 약 2,154.5 만원으로 산정되었으며, 상부 야자매트의 경우 주기적으로 교체하는 것으로 계획하였으며, 교체주기는 현장여건 및 관리에 따라 달라질 수 있으나 3년 주기로 계획하였다. 따라서 교환주기(15년 기준) 별 소요금액은 시공시 2,154.5 만원과 상부 야자매트 교환(4회) 184 만원으로 총 2,338.5 만원으로 산정되며, 연간비용으로 환산 시 155.9 만원(월 약 13 만원)으로 경제성이 우수한 것으로 판단되며, 기타 비용(시설보수 비용)은 추가로 발생 될 수 있다.



## (2) 제언 : 포스트 코로나 시대의 농어촌지하수 관리방안

### (가) 서언

코로나바이러스감염증-19(약칭 코로나-19)란 2019년말에 발견된 ‘제2형 중증 급성 호흡기 증후군 코로나 바이러스’에 의해 사람이나 동물에서 발생하는 호흡기 질환이다(KDCA, 2022). 코로나-19는 주로 호흡기를 통해 전염되므로, 올바른 실내외 마스크 착용, 사회적 거리두기, 올바른 손씻기, 주기적인 실내공기 환기 등 다양한 예방 활동을 필요로 한다(KDCA, 2022). 코로나-19에 감염되면 고열과 기침, 호흡곤란 등이 발생하고, 심각한 경우 폐포가 손상되어 호흡 부전으로 사망에 이르기도 한다(DE, 2022). 코로나-19에 의한 감염 확산을 저지하기 위해 다양한 종류의 백신과 치료제가 개발되었으나, 시간이 지나면서 증상과 감염율이 다른 다양한 변이종(알파, 베타, 감마, 델타, 오미크론 변이 등)이 발생하여 감염병 종식은 느린 편이다.

포스트 코로나(post COVID-19) 시대란, 코로나-19 대규모 확산이 종료되거나 코로나-19가 풍토병처럼 전환되었을 때 경제와 생활에 다가올 변화 및 시기를 일컫는다(KDCA, 2022). 일반적으로 바이러스는 생존을 위해 전파력은 강해지지만 독성이 약해지는 특성을 가지고 있다(DE, 2022). 2022년 6월 현재 코로나-19도 전파력이 강하지만 독성이 약한 오미크론 변이가 우세종으로 자리 잡고 있으며, 정부에서는 코로나-19를 계절독감처럼 풍토병처럼 관리하고자 하는 코로나 엔데믹(endemic) 국가 선언을 준비 중에 있다(YNA, 2022).

세계 각국은 가까운 미래에 코로나-19로부터 회복될 것으로 전망되지만, 신종 전염병의 위험은 지속될 것으로 판단된다. 이 원고에서는 코로나-19로 인해 발생했던 농식품 분야의 문제점들과 이로 인한 뉴노멀 트렌드를 분석하여, 포스트 코로나 시대 농어촌지하수 관리 전략을 제시하였다.

### (나) 코로나-19에 의한 농식품 분야의 피해

코로나-19의 확산은 우리나라를 비롯한 세계 모든 국가의 정치, 경제, 산업 전반에 악 영향을 미쳤다. 이중 농식품 분야는 수요와 공급의 탄력성이 매우 중요한데, 수요 측면의 불확실성과 관련된 저소득 국가형 피해와 공급 측면의 불확실성 관련된 고소득 국가의 피해로 구분될 수 있다(Ihm, 2020).

#### ① 저소득 국가 농식품 분야의 피해

저소득 국가의 농식품 분야의 피해는, 국경봉쇄(이동제한)에 따른 소득감소, 휴교령에 따른 아동의 영양 저하, 그리고 무역 유통망 붕괴에 따른 식량위기 등 수요 측면의 위협이 주요한 결과로 나타났다. 특히 2020년 초반 코로나-19 확산 방지를 위한 국경봉쇄 및 직장폐쇄의 영향은, 아프리카, 동남아시아, 남미 출신 이주노동자들의 이동제한, 이들의 실직에 따른 소득감소로 이어졌다. 따라서 본국으로의 송금액이 전년 동기 대비 약 20% 감소하였으며, 특히 아프리카 송금액은 23%까지 감소하였다(Shin, 2021; WB, 2021). 이러한 해외 송금액의 감소는 저소득 국가 국민의 소득감소를 유발하고, 이는 식료품 지출 감소와 함께 약 2천6백만명의 아동이 영양부족에 시달리는 결과를 낳았다(USAID, 2021a). 이에 따라 전세계 기아 인구는 2020년 약 1.24억명에서 2021년 1.63억명으로 증가되었다(USAID, 2021a).

또한 코로나-19 확산 방지를 위한 휴교령과 이에 따른 학교 급식 중단은 급식 아동수의 급감으로 이어졌다. 유엔세계식량계획(WFP, world food programme)에 따르면 2018년 전세계 61개국 약 16.4백만명의 아동에게 학교 급식을 지원하였으나, 휴교령으로 인하여 2020년에는 24개국 7.4백만

명의 아동에게만 급식을 지원하였다(GRI, 2020). 또한 사하라사막 남부 아프리카에서는 약 9,500만명의 극빈곤층 인구가 추가됨에 따라, 식량위기가 심화될 것으로 예상되었다(Shin, 2021).

## ② 고소득 국가 농식품 분야의 피해

미국, 유럽연합, 극동 아시아(한국, 일본) 등 고소득 국가의 경우, 이동제한에 의한 외국인 이주노동자의 부족과 이에 따른 농산물 수확 불능, 사회적 거리두기에 따른 외식소비 위축, 무역유통망 붕괴에 따른 농산물의 판매 부진 등으로 농식품 공급 측면의 피해가 나타났다.

### ㉠ 미국

미국의 경우 코로나-19 확산 방지를 위한 이동제한으로 바이오에탄올의 원료인 옥수수 가격이 약 10% 하락하였으며, 상점폐쇄로 인한 의류 소비량 저하로 면화 가격이 약 18% 하락하였다(Yoo and Kim, 2021). 또한 코로나-19에 대한 소비심리 불안정에 따른 농식품 분야의 전반적인 판매 부진으로, 2020년 상반기 약 7%의 농가소득이 감소되었다. 특히 외식 수요의 감소와 공공조달 농식품 수요의 급감은 농가소득 감소로 이어졌다.

육류 가공업 분야에서도 사회적 거리두기 시행, 확진자 발생 시 공장 가동 중단 등으로 육가공품 생산의 차질(소 -13%, 돼지 -29%)이 나타났다(GRI, 2020). 축산 분야의 경우 외국인 이주노동자에 대한 별도 숙박시설 운영으로 인한 경영주의 소득 감소와 함께, 수확과정을 대부분 인력에 의존하는 과일과 채소 생산 농가에서는 이주노동자 감소로 생산의 어려움을 겪기도 하였다(Yoo and Kim, 2021).

### ㉡ 유럽

유럽의 경우 미국에 비해 상대적으로 농산물 생산, 식품 가격, 무역 수준이 안정적으로 농업 생산액은 약 1.4%의 감소에 그쳤으나, 농가소득은 약 7.9%가 감소되었다(KREI, 2021; Meuwissen et al., 2021). 외국인 이주노동자 부족은 미국과 마찬가지로 주로 과일과 채소 농가의 농산물 수확에 영향을 주었다. 특히 2020년 봄 독일에서는 약 3만 명의 동구권 유럽 노동자의 부족으로 아스파라거스가 현장에서 썩는 사태가 발생하였다(Ihm, 2020). 이 시기 유럽연합(EU)의 포도주 생산액은 약 5%, 포도주 수출은 2%, 설탕 수출은 44% 감소되었으며, 장식용 식물은 1차 감염 시기에 약 41.2억 유로의 손실이 발생하였다(KREI, 2021).

또한 봉쇄 조치로 인하여 2020년 3~5월 외식소비가 급감한 반면, 가정 조리식품에 대한 소매 수요는 전년 동기 대비 약 15~20% 높게 나타났다(Song, 2020). 또한 유럽의 코로나-19는 농식품 소비패턴의 변화를 유발하여, 유기농 식품 선호, 배달음식 일상화, 식품의 원산지 표시 증가 등 안전 농산물 소비를 선호하는 방향으로 전환되었다(KREI, 2020).

### ㉢ 극동 아시아 (한국, 일본)

우리나라의 경우 사회적 거리두기 및 영업시간 단축으로 외식소비 감소가 발생되어, 외식업체의 농산물 구매량이 감소되었다(GRI, 2020). 또한 휴교에 따른 학교급식 중단으로 친환경농산물 생산농가의 손해가 발생되었으며, 전세계 무역유통망 붕괴로 인하여 가공식품 및 사료 재료의 가격 상승(밀 1.2%, 옥수수 3.3%, 콩 25.4% 등)이 발생하였다.

일본의 경우 코로나-19로 인하여 2020년 외식비 지출이 최대 65.7%까지 감소되었다(Lee, 2020). 외식수요 감소는 채소, 축산물 판매량 감소로 이어져, 외식 채소(방풍나물, 백합뿌리, 꽃상

추, 허브 등)와 외식 축산물(닭다리, 와규 쇠고기)의 가격이 하락되었다. 또한 휴교령에 따른 학생 급식 감소로 인하여, 우유 등 유제품 소비가 감소되었다. 반면 코로나-19는 소매시장의 구매를 증가시켜, 가정식 조리 농산물(배추, 피망, 양상추, 버섯 등)과 가정식 요리재료(계란, 돼지고기)의 가격은 상승하였다. 2020년 4월의 채소 및 해조류는 전년대비 10%, 우유 및 계란류는 18.5%, 육류는 19.7% 등 지출액이 증가하였다. 그러나 전반적인 식품지출액 합계는 전년 대비 약 6.6% 감소하였다.

### ③ 농식품 분야의 코로나-19 극복을 위한 노력

고소득 국가들은 농식품 분야 경기 회복을 위해 막대한 기금을 농가 안정자금으로 투입하였고, 이에 따라 2020년 하반기 이후로 대부분 완만한 회복세를 보였다. 미국의 경우 2020년에 코로나-19의 대유행과 무역갈등의 여파로 약 465억 달러의 농가 직불금이 지급되었으나, 경기가 회복된 2021년에는 예년 수준인 약 115억 달러가 지급되었다(Kim, 2021). 유럽의 경우 2020년 7월 유럽연합 집행위원회에서 유럽농업농촌개발기금을 예년에 비해 약 75억 유로 이상 증액하여, 농식품 분야의 경제 회복을 지원하였다(Cho, 2020). 일본의 경우에는 농림수산 부문 대책으로 2020년도 보정예산에 1차 5,448억엔, 2차 658억엔을 각각 추가하였다(NEWMA, 2021). 또한 농식품 공급망을 개선하여 농산물 직판매를 유도하였으며, 자국민 노동력 확보, 지역생산작물의 지역소비 유도 등으로 농식품 분야 활성화를 지원하였다(Lee, 2020).

우리나라는 2020년 3월 농업인 600억원, 어업인 300억원 등 재해대책 경영자금을 지원하였으며(KPC, 2021), 온라인 식품(곡물, 포장식품, 과일, 유제품 등) 판매 활성화로 코로나-19 발생 이전보다 약 3배 이상의 매출이 발생하였다. 또한 학교급식을 대체할 수 있도록 지자체별 가정급식 꾸러미 배달을 통하여, 친환경 생산농가의 소득보전을 위해 노력한 바 있다(GRI, 2020).

## (다) 코로나-19 시기 물 관리

### ① 수질관리(WASH 및 agri-WASH)

WASH (water security, sanitation and hygiene)는 「물 안보, 공중 위생 및 개인 위생」을 의미하는 용어로, 코로나-19와 각종 감염병 예방을 위해 중요하게 거론된 물 관리(수질관리) 방법이다(EC, 2021; USAID, 2021b). WASH 프로그램은 주로 물 관련 공공 인프라와 서비스가 부족한 아프리카와 아시아의 저소득 국가를 대상으로 하며, 올바른 손씻기, 개인의 위생관리, 공공 위생관리, 물관련 인프라(공공 상수도, 하수관망) 확대, 병입수 보급을 주요 내용으로 한다.

WASH는 코로나-19를 비롯한 각종 오염원(바이러스, 미생물, 화학물질, 하폐수 등)으로부터 위해를 사전에 차단하므로, WASH의 실천은 저소득국가의 감염병 회복 원동력으로 고려되었다. WASH 실천의 사례로 인도에서는 코로나-19 발생 이후 손 세정, 병입수 보급 등에 관심이 많아졌고, 지속가능개발목표(SDGs, sustainable development goals)를 수립하여 2030년까지 안전하고 깨끗한 수질의 먹는 물 공급을 목표로 실천 중에 있다(Balamurugan et al., 2021).

농업용수 부문의 수질관리는 WASH를 응용한 agri-WASH (agricultural water supply, sanitation and hygiene)가 대두되었고, 이는 「농업용수 공급, 공중 위생 및 개인 위생」을 의미한다(FAO, 2021). agri-WASH 프로그램은 농작물의 파종, 수확 및 판매에 이르기까지 청정용수를 사용하여 위생적 농산물 생산 및 유통 관리를 도모한다. 특히 병원균과 중금속 등에 오염된 관개용수는 생육 과정에서 농산물에 위해를 미칠 수 있기 때문에, 농민에게 오염되지 않은 청정용수를 공급하여 청

정 농작물을 생산토록 요청한다. 이와 함께 농업 부문 종사자(농민, 이주노동자, 농산물 소매업자 등)는 농업생산 활동 시 개인의 위생수칙을 준수하여야 한다. 또한 축산업이나 양식업에서는 작업장에서 발생하는 분뇨와 하폐수를 적절히 처리하고, 가능한 경우 재생자원으로 활용을 통한 병원균 감소 및 항원환경을 조성하여야 한다. 최종적으로는 수확된 과일이나 도축된 육류를 청정용수로 세척하고, 보관과 유통 과정 중 식품안전관리 제규정을 준수하여야 한다.

## ② 수량관리

코로나-19 대유행이 각국의 관개용수 수량 공급에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 많지 않지만, 인도에서는 코로나-19 대유행이 관개용수 이용량 감소로 이어졌다(Balamurugan et al., 2021). 인도에서는 이동제한과 직장폐쇄로 노동인력이 귀향(최대 23%)하여, 농촌지역의 노동력 부족 및 농경활동 중단으로 관개용수 이용량이 감소되었다. 따라서 채소, 과일, 기름(팜유) 등의 생산량이 약 10% 감소되었다.

특히 관개용수의 약 67%를 지하수로 공급하기 때문에, 농업활동의 중단으로 인한 야무나 강(Yamuna river)의 유출량이 약 10배 증가(300 → 3,000 ft<sup>3</sup>/sec)된 것으로 분석되었다. 또한 갠지스 강(Ganges river) 오염 부하량의 약 10%를 차지하는 주변 공장의 단기간 폐쇄로 인하여, 갠지스 강의 수질이 개선(DO 증가, BOD 감소, 질소 감소)되었던 것으로 나타났다.

## (라) 포스트 코로나 시대 뉴노멀 트렌드

뉴노멀(New-normal)이란 새롭게 보편화 된 사회·문화·경제적 표준을 의미한다. 뉴노멀은 2007년 세계 금융 위기에 의해 약 5년간 지속된 저성장 시대의 새로운 경제적 표준이란 의미로 사용되었으나, 최근에는 코로나-19 이후 새롭게 변화된 경제·사회·문화적 표준으로 의미가 확장되었다(DE, 2022). 코로나-19 대유행에 의한 글로벌 경기침체는 전세계 대부분의 국가들에 마이너스 성장을 경험하게 했다. 따라서 각 국은 뉴노멀 시대의 새로운 성장 동력인 비대면 서비스 산업과 4차 산업혁명기술 기술을 활용한 성장전략을 수립하여 포스트 코로나 시대의 경제와 산업의 활로를 모색 중이다.

포스트 코로나 시대의 뉴노멀 트렌드는 주로 탈세계화, 효율성보다는 회복탄력성(resilience), 비대면 디지털 전환, 소득수준 및 건강관심도에 따른 소비행태 변화, 높아진 신뢰의 중요성 등 이전과는 다른 사회·문화·경제적 표준이 정착될 것으로 전망된다(AP, 2020). 특히 코로나-19 이후 보호무역 심화로 글로벌 공급망보다 지역 공급망의 비중이 높아지고, 글로벌 경기침체 경험으로 효율성보다는 회복탄력성을 목표로 모든 부문에서 디지털 전환이 빠르게 진행될 것으로 기대된다.

국내 농업 부문에서는 뉴노멀 전략으로, 식량안보(food security) 증대, 농업부문 회복력 제고, 디지털화, 농업·농촌의 포용성 제고, 해외 온라인 수출 지원 등 다양한 방안을 모색하고 있다(MAFRA, 2020). 특히 밀 등 국내 소비량이 많은 식량작물의 생산능력을 높이고, 글로벌 식량안보를 위한 유엔세계식량계획에 재정 지원을 하였다. 또한 공익형 직불제를 통한 농식품 산업의 회복력을 높이고, 농식품 생산·유통의 디지털 전환을 추진하여 해외 구매자에 대한 온라인 농식품 수출을 지원하였다(MAFRA, 2021). 더불어 로컬 푸드 판매 확산, 귀농(귀촌) 활성화, 살기 좋은 농촌 공간 조성, 농어촌 취약계층에 대한 사회안전망 강화 등 농업·농촌의 포용성 제고를 위한 뉴노멀 전략이 제시되고 있다.

국내 물 관리 분야에서도 그린뉴딜, 디지털뉴딜 등 물관리 패러다임 전환을 통한 포스트 코



로나 시대 뉴노멀 전략이 제시되었다(Park and Ahn, 2020). 실제로 현재 추진 중인 국가물관리 일원화 추진 과정에서 코로나-19 이후 그린뉴딜과 디지털뉴딜 관련 부분을 추가하여 진행하고 있다. 그린뉴딜은 유역통합 물관리, 물이용 서비스 격차 해소, 국민 참여 및 소통강화 등 물 관련 생활환경 개선 및 물 부족 문제를 해결하고자 하는 전략이다. 반면 디지털뉴딜은 물 순환 전 과정의 디지털화, 체계적 빅데이터 관리, 스마트워터시티 표준 플랫폼 구축·확산 등 예방적 물 관리 체계를 구축하고자 하는 전략이다.

## (마) 포스트 코로나 시대 지하수 관리 방안

### ① 코로나-19 바이러스의 지하수 내 기작

코로나-19 바이러스(제2형 중증 급성 호흡기 증후군 코로나 바이러스, severe acute respiratory syndrome-coronavirus-2; 이하 SARS-CoV-2)의 지하수 내 기작은 통상적인 바이러스의 기작과 유사하여, 지하수를 매개체로 한 코로나-19의 전파 가능성은 낮은 것으로 추정된다(Alley and Job, 2020). SARS-CoV-2의 크기는 0.02~0.30  $\mu\text{m}$ 로 대수층에 유입되는 경우 토양입자에 흡착(부착) 또는 토양공극에 의한 여과작용으로, 원거리 관정에서 지하수를 양수하는 경우 지하수 내에서 제거되는 것으로 제시되었다. 또한 대수층 매질에서 여과되지 않고 이동할 경우에도, 느린 지하수 이동 시간에 따른 전염력 감소로 음용 시에도 건강에 위해성은 거의 없는 것으로 제시되었다.

SARS-CoV-2는 감염 후 3일 이내에 환자의 대변으로 배출되어 감염지역의 하·폐수에서 RNA가 발견되며, RNA 농도를 기초로 감염자 수까지 추정이 가능한 것으로 알려져 있다(Mallapaty, 2020). 이에 따라 SARS-CoV-2를 함유한 하·폐수에 의한 수인성 질병과 하·폐수의 증발에 따른 감염 우려가 제기되었으며(Bogler et al., 2020), 지하수 오염 우려도 제기된 바 있다(Huo et al., 2021).

그러나 SARS-CoV-2는 호흡기 바이러스로, 분변에서 발견된 SARS-CoV-2에 의한 분변-호흡기 간 전파는 낮은 편에 속하는 것으로 알려져 있다(Alley and Job, 2020). 또한 SARS-CoV-2와 유사한 사스 및 메르스 바이러스는 하·폐수에서 2~3일내에 99.9% 사멸되는 것으로 알려져, 하·폐수에 의한 SARS-CoV-2의 호흡기 전파는 극히 적은 것으로 추정된다(Alley and Job, 2020).

### ② 포스트 코로나 시대의 지하수 관리 방안

그 동안 국내 농어촌지하수는 농어촌정비법과 지하수법의 제반 규정을 준수하며, 수질관리, 수량관리, 관리시스템 구축 등 크게 3가지 주제를 중심으로 관리되어 왔다. 그러나 코로나-19 이후 각종 감염병 예방에 대한 사회적 관심 증가, 인적이 붐비지 않는 한적한 위락 공간에 대한 선호, 디지털 비대면 기술 활용에 대한 수요의 증가로, 농어촌지하수 분야도 이러한 시대적 배경에 따라 뉴노멀에 적용이 가능한 관리 방안이 필요하다.

이 연구에서는 포스트 코로나 시대 농어촌지하수 관리의 뉴노멀 전략으로 G-WASH\_AD(groundwater supply, sanitation, and hygiene with attraction and digitization)를 제안한다. G-WASH\_AD는 예방적 지하수 관리, 위락형 지하수 관리, 디지털 지하수 관리로 구분되며, 각각은 수질관리, 수량관리, 관리시스템의 하위 메뉴로 포함시킬 수 있다.

### ㉠ 예방적 지하수 관리

농어촌지역은 도시지역과는 달리 관정 이용에 따른 지하수 음용이 빈번하고, 이에 따라 수인성 질병에 쉽게 노출될 가능성이 있다. 지하수 내의 SARS-CoV-2에 의한 질병 발생은 희박한 편



으로 알려졌지만(Alley and Job, 2020), SARS-CoV-2 외에도 지하수 수인성 미생물에 의한 위하는 예방적 관리가 필수적이다. 지하수의 수인성 식중독 바이러스는 노로바이러스, 로타바이러스, 아스트로바이러스, 장관아데노바이러스, A형 간염바이러스, E형 간염바이러스 및 사포바이러스 등 7종이 대표적이고, 수인성 원충으로는 설사 및 복통 등을 일으키는 작은와포자충, 람블편모충, 이질아메바 등 3종이 대표적이다(NIFDS, 2017). 이들 미생물은 대부분 분변과 하폐수에 기원하며, 오염방지 시설이 취약한 관정으로 유입되거나, 천부 대수층 직접 침투로 지하수 수질을 오염시켜 질병을 유발한다.

포스트 코로나 시대에는 지하수의 수인성 미생물을 비롯하여 지표기원 무기오염물질(질산염 등)에 의한 수질오염을 사전에 예방하기 위해 무엇보다도 관정 시설물에 대한 선량한 관리가 우선적으로 요구된다(Lee et al., 2016; Song et al., 2016). 관정 이용자는 관정 시설물을 상시 선량하게 관리할 필요가 있고, 특히, 지하수법 제9조의5(지하수개발·이용시설의 사후관리)와 관련된 관정 사후관리 시, 관정재생(청소, 시설 검사 및 정비 등) 작업과 더불어 관정 소독, 관정 내부 이물질 배출, 관정 상부보호공 개선·밀폐 등으로 수인성 미생물과 무기오염물질의 관정 내부 유입을 사전에 차단할 필요가 있다.

신규 관정 개발 이용과 관련하여, 관정 개발대상지 주변에 수인성 질병 오염원이 소재하는 경우, 관정 설치 시 관정과 오염원과의 적정 거리 유지가 필요하다. 미국에서는 오염물질의 관정 내부 유입을 사전에 예방하기 위해 관정과 하수관은 적정 거리를 유지하도록 권고하고 있다(USEPA, 2022). 이때 적정한 거리는 각 주정부마다 약간의 차이는 있지만, 미네소타 주의 경우 일반적인 관정은 15 m, 오염에 취약한 관정은 30 m 이상 적정 거리를 이격하도록 권고한다(MPCA, 2022).

정기 수질 검사 관련하여 관정 주변에 수인성 미생물 관련 오염원이 가까운 거리에 소재하는 경우, 분변에 의한 직접적인 오염을 지시하는 분원성 대장균군 확인을 통한 지하수 수인성 미생물의 위해 여부를 평가하여야 한다. 또한 실시간 유전자 증폭(real-time PCR) 진단키트를 이용하여 상기한 지하수의 수인성 바이러스 7종과 원충 3종의 검출 여부를 현장에서 확인할 수도 있다(NIFDS, 2017). 더불어 오염에 취약한 일부 농어촌지역 음용수 관정의 경우에는 자외선 소독 장치, 염소 소독 장치 등을 설치하고, 물 끓여먹기 캠페인 등으로 수인성 질병을 일으키는 미생물을 사멸시킬 필요가 있다. 이러한 농어촌 생활용 지하수 수질에 대한 예방적 관리 전략은 동일 대수층의 관개용 지하수의 수질 보전으로 연결되며, 이는 농경지에 청정 지하수를 공급하여 청정 농산물을 재배할 수 있는 포스트 코로나 시대 농업용수 관리 전략(agri-WASH)도 동시에 충족시킬 수 있다.

#### ㉔ 위락형 지하수 관리

코로나-19 발생 이후 비대면·저밀도 농어촌 공간에 대한 선호도가 높아졌고, 더불어 도시민의 귀농·귀촌 의향도 약 6.8% 이상 증가된 41.4%로 나타났다(MAFRA, 2021). 결국 포스트 코로나 시대의 농어촌은 1차 산업 중심지의 역할과 더불어, 도시민에게 여유롭고 한적한 공간을 제공하는 매력적인 관광지가 될 수 있다. 포스트 코로나 시대의 농어촌지하수는 고유 용도(음용수, 생활용수, 관개용수 등) 외에도, 농어촌의 오래된 가옥, 농경문화, 지역특산물처럼 농어촌의 위락형 관광자원으로 활용될 수 있다.

해외에서 농어촌지하수가 위락형 관광자원으로 활용되는 가장 좋은 예는 프랑스 루르드 샘물과 예비앙 생수가 대표적이다. 루르드 샘물은 19세기 중반의 성모마리아 발현 전설 이후 연간

관광객 약 500만명이 찾는 명소가 되었다(Wikipedia, 2022b). 또한 에비앙 생수는 귀족이 마시는 물이라는 브랜드 가치로, 제조사인 다논 그룹은 연매출 2조원의 수익을 달성하고 있고 에비앙 지역은 지하수 관광휴양 단지로 활용되고 있다(Wikipedia, 2022a).

프랑스의 루르드 샘물과 에비앙 생수의 사례와 마찬가지로, 국내 농어촌지하수를 해당 지역의 자연 및 역사 문화유산, 설화 등과 연결하여 각기 특색있는 ‘명품지하수’로 지정하는 방안을 제시한다. 이 경우 위탁형 지하수 관리가 가능하여 명품지하수 체험 관광, 명품지하수로 재배한 작물의 품격 제고, 지역농산물 판매 증대 등을 도모할 수 있을 것이다. 국내 위탁형 지하수 관리의 대표적인 사례로, 청주시에서 계획 중인 초정 탄산지하수를 이용한 초정치유마을조성 관광사업이 있다(KRC, 2021a). 현재까지 초정탄산수는 음료 생산에 주로 이용되어 왔는데, 청주시에서는 초정 탄산수와 함께하는 휴식 공간, 초정탄산수를 이용한 건강 관리(테라피와 힐링), 초정탄산수를 이용한 숙박시설 운영 등, 지하수자원을 관광사업과 연결하여 지역개발 활성화를 모색하고 있다. 이외에도, 전남 구례 당물샘은 지리산 약수가 한데 모여서 생긴 국내 최고의 지하수라는 설화로 인근 쌍산재 방문 관광객이 함께 찾는 명소가 되었다. 최근에 개발된 전북 순창 강천음용수는 항산화 효과가 있는 791 m 심도 암반지하수라는 입소문으로 관광버스 단위로 관광객이 모여들어 지하수를 채수하여, 순창군에서는 강천음용수 수원공 주변에 힐링스파시설을 운영하여 지하수를 이용한 지역관광사업을 육성할 예정이다(KRC, 2021b).

이처럼 농어촌지하수에 명품지하수 지위를 부여하여 위탁형 지하수 관리가 시행된다면, 농어촌지하수는 관개용수 공급 목적과 더불어 지역문화관광 활성화와 지역민의 수입 확대에 연계가 가능하다. 이로써 포스트 코로나 시대의 한적한 농어촌 관광 활성화, 농어촌지하수 사업 활성화를 동시에 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

#### ㉔ 디지털 지하수 관리

포스트 코로나 시대에는 플랫폼 기술을 이용한 생산자와 소비자의 직거래 연결, 농업생산성 증진과 식량손실·폐기 최소화를 위한 농업분야 디지털 유통망 투자 등이 촉구된다(MAFRA, 2021). 이를 위해 한국농수산식품유통공사에서는 농산물 산지 온라인경매 플랫폼과 연계한 휴대전화 앱, 영상 스트리밍 등을 활용하여, 온라인으로 농산물을 경매하는 직거래 유통모델을 개발하였다. 또한 한국수자원공사에서는 수돗물 공급 전과정에 AHCT 등 기술을 접목하여 수량·수질 등을 실시간 관리하는 국가상수도 스마트 관리체계 구축을 추진 중이다(IT, 2020).

농어촌지하수 부문에서도 포스트 코로나 시대의 정부 뉴딜정책에 부합하는 디지털 지하수 관리가 필요하다. 이와 관련하여 미국 캘리포니아주에서는 가뭄 수요대응 블록체인 기법을 이용하여 지하수 잉여지역에서 부족지역으로 지하수 이용에 대한 권리(또는 지하수 신용권, groundwater credits)를 매매할 수 있는 플랫폼을 개발·운영 중이다(IBM, 2019). 또한 프랑스, 남아프리카공화국, 오스트리아 등에서는 지하수 관측공의 상시 자동관측자료(pH, EC, DO, ORP, 수온 등)와 기존의 수질분석자료(TN, TP, BOD, SAR, algae blooms)를 조합하여 해당 관측공 설치 지점의 지하수 환경상태를 관측하는 가상센서(virtual sensor)를 개발하여 정보를 제공하고 있다(Paepae et al., 2021). 특히 남아프리카공화국에서는 사물인터넷 기술을 이용한 지하수 지속가능성 평가 시스템을 운영하여, 최종적으로 이용자에게 계속 이용, 이용량 규제, 지하수 이용 과징금 부과 등을 알리는 기술을 실용화 하고 있다(Kabuya et al., 2022).

국내에서는 방사상 집수정(RCW, radial collector well) 시설물에 대한 증강현실을 도입하여 관정시설물 관리를 시행하는 연구가 진행되었다(Shin et al., 2016). 이를 통하여 방사상 집수정의

재원 정보와 주변 관측공의 관측 정보를 증강현실로 만들고, 관측공의 수위 및 수질자료를 관리하는 시스템을 통하여 관리자의 접근이 용이하지 않은 지하수 시설물에 대하여 증강현실을 이용한 관리가 가능하게 하였다. 또한 소유역 내의 다수의 관정을 이용한 관정연계이용(WNS; well-network system) 기술을 이용하여, 유역 전체 지하수의 최적 배분에 대한 연구가 진행 중이다(KIGAM et al., 2021). 이 외에도 작물의 수분특성에 따라 설정 값에 맞춰 관정에서 자동으로 지하수를 관수하는 ICT 기반 지능형 지하수 공급 시스템도 연구 중이다(KRC, 2021b).

이처럼 농어촌지하수 시설물과 관측자료 관리에 4차 산업혁명 기술을 접목하여 디지털 지하수 관리를 실시한다면, 농어촌지하수도 포스트 코로나 대응 디지털 뉴딜 정책에 부합하며, 농어촌 지역 지하수의 신속하고 과학적인 관리, 농어촌지역 지하수 공급 안전망을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

## (바) 결 언

전세계적인 코로나-19의 확산은 글로벌 정치, 경제, 산업 전반에 커다란 타격을 입혔다. 이를 극복하기 위하여 새롭게 변화된 경제·사회·문화적 표준(뉴노멀) 및 실천방안을 마련하여 추진 중이다. 뉴노멀 전략의 세부 내용은 감염병 예방 활동 강화, 비대면 서비스 확대, 보호무역 및 식량안보 증대, 4차 산업혁명기술 기술을 활용한 성장전략 강화 등이며, 국내 농어업 분야에서도 뉴노멀 전략에 기반하여 성장전략을 모색 중이다.

농어촌지하수 부문도 포스트 코로나 시대의 뉴노멀 전략을 수립해야 하는 시점에 이르렀으며, 이 연구에서는 G-WASH\_AD(예방적 지하수 관리, 위락형 지하수 관리, 디지털 지하수 관리)를 농어촌지하수 관리 뉴노멀 전략으로 제안하였다. 수인성 질병 예방을 위한 예방적 지하수 관리는 농어촌의 수질 안전망 구축에 기여할 수 있고, 나아가 농어민의 생활환경에 대한 청정지하수 환경 가치를 창출할 수 있다. 농어촌지하수 명품화를 기반으로 한 위락형 지하수 관리는 농어민과 함께하는 지역개발사업의 동력을 제공하여, 지하수를 매개체로 한 농어촌관광 활성화, 로컬푸드 판매 촉진 등 농어촌지역의 매출 증대를 도모할 수 있다. 4차산업혁명 기술을 이용한 디지털 지하수 관리는 편리하고 신속한, 그리고 최적화된 지하수관리를 유도할 수 있으며, 나아가 정책입안자를 위한 지하수 정보를 산출하여 농어촌지하수 관리의 선순환을 이룰 수 있다.

코로나-19는 우리 사회의 근간을 흔드는 위협이자 위기였고, 이를 대처하고 극복하는 과정 중에 많은 손실과 피해가 있었다. 그러나 코로나-19 이후 농어촌지하수 부문도 새로운 뉴노멀 전략을 세워 적극적으로 실천할 수 있다면, 다가오는 포스트 코로나 시대의 새로운 성장동력을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.



### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 가. 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

○ 연구성과 실용화를 위한 MOU 체결

- 일시 및 장소 : 2021.05.07.(금) 15:00~16:00, 하동군청 회의실
- 협약 명 : 지하수 인공함양 기술개발 업무협약(MOU) 체결
- 서명자 : 김인식 사장(한국농어촌공사), 윤상기 군수(하동군), 정명화 조합장(육종농협)
- 참석자 : 공사, 하동군청 및 육종농협 직원 약 20여명

○ 협력 내용

- 한국농어촌공사 : 지하수 인공함양 기술 개발 및 사업화 공동 추진  
 연구원 : 하동군 시설농업지역 대상 인공함양 기술 개발  
 경남본부 : 하동군 상습 가뭄지역 인공함양 사업화 추진
- 하동군청 : 지하수 인공함양 사업화 추진, 공유지(시험포) 제공
- 육종농협 : 시설재배 농가 지하수 인공함양 실증 참여 협조  
 재원 : (1안)행안부 재해위험지역 정비 사업비, (2안)농식품부 지표수보강개발 사업비

	
<p style="text-align: center;">행사 개최</p>	<p style="text-align: center;">양해각서 서명</p>
	
<p style="text-align: center;">기념촬영 (서명자)</p>	<p style="text-align: center;">기념촬영 (단체사진)</p>

## (2) 정량적 연구개발성과

< 정량적 연구개발성과표(예시) >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계 (2020)	2단계 (2021)	3단계 (2022)	계	가중치 (%)	
전담기관 등록·기탁 지표 <sup>1)</sup>	특허출원	목표(단계별)		1	1	2	25	
		실적(누적)		2		2	25	
	특허등록	목표(단계별)			1	1	20	
		실적(누적)			0.5	0.5	10	
	논문게재 (SCI)	목표(단계별)			1	1	5	
		실적(누적)				-	-	
	논문게재 (비SCI)	목표(단계별)		1	1	2		
		실적(누적)		1	2	3		
	학술발표	목표(단계별)	1	3	3	7	5	
		실적(누적)	4	7	12	23	5	
	연구개발과제 특성 반영 지표 <sup>2)</sup>	제품화	목표(단계별)			1	1	30
			실적(누적)			2	2	30
인력양성		목표(단계별)			1	1	5	
		실적(누적)			1	1	5	
정책활용		목표(단계별)			1	1	5	
		실적(누적)			1	1	5	
홍보전시		목표(단계별)		1	1	2	5	
		실적(누적)		2	2	4	5	
계		목표(단계별)	1	7	11	18	100	
		실적(누적)	4	12	20.5	37.5	95	

## (3) 세부 정량적 연구개발성과

### [과학적 성과]

#### □ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	지하수 함양시설 또는 LID시설에 서의 질산성질 소 오염방지 를 위한 농업부산 물의 탈질효율 실험연구	지하수도 양환경	이진원	26(6)	대한민국	한국지하수 토양환경학 회	비SCIE	2021. 12.31.	1598-6438	100%
2	제주도 관정 공벽 내 오염물질 유입 구간 탐지 및 차단 사례	지하수도 양환경	송성호	27(3)	대한민국	한국지하수 토양환경학 회	비SCIE	2022. 06.30.	1598-6438	50%
3	포스트 코로나 시대 농어촌지 하수 관리 방안	지하수도 양환경	이병선	27(4)	대한민국	한국지하수 토양환경학 회	비SCIE	2021. 12.31.	1598-6438	100%



□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	GSA 2020 connects online	이병선	2020.10.28.	온라인	미국
2	GSA 2020 connects online	서효경	2020.10.28.	온라인	미국
3	2020 한국농공학회 추계학술발표회	이규상	2020.10.16.	온라인	한국
4	2020 한국농공학회 추계학술발표회	정찬덕	2020.10.16.	온라인	한국
5	2021 대한지질공학회 춘계학술대회	이병선	2021.04.08.	제주 캠퍼트리 호텔 앤 리조트	한국
6	2021 대한지질공학회 춘계학술대회	서상진	2021.04.08.	제주 캠퍼트리 호텔 앤 리조트	한국
7	2021 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회	이병선	2021.04.22.	The-K 경주호텔	한국
8	2021 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회	서상진	2021.04.22.	The-K 경주호텔	한국
9	2021 춘계 지질과학기술 공동학술대회	이병선	2021.06.23.	경주화백컨벤션뷰로	한국
10	2021 춘계 지질과학기술 공동학술대회	서상진	2021.06.23.	경주화백컨벤션뷰로	한국
11	2021 추계지질과학연합학술대회	이병선	2021.10.28.	라마다 제주 호텔	한국
12	GSA 2022 connects	이진원	2022.10.12	덴버	미국
13	24 <sup>th</sup> ICID Congress	정찬덕	2022.10.04.	애들레이드	호주
14	ICES	Thanh Huy Phung	2022.10.24.	호치민	베트남
15	2022 한국지하수토양환경학회 추계학술대회	Thanh Huy Phung	2022.10.13.	서울대학교	한국
16	2022 한국농공학회 학술발표회	이병선	2022.10.13.	대구 인터볼고 호텔	한국
17	2022 한국농공학회 학술발표회	이병선	2022.10.14.	대구 인터볼고 호텔	한국
18	2022 대한지질공학회 추계학술대회	이병선	2022.11.10.	경주 The-K 호텔	한국
19	2022 추계지질과학연합학술대회	이병선	2022.10.25.	창원컨벤션센터	한국
20	2022 추계지질과학연합학술대회	이병선	2022.10.26.	창원컨벤션센터	한국
21	2022 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회	서상진	2022.04.27.	제주 부영호텔	한국
22	2022 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회	이병선	2022.04.27.	제주 부영호텔	한국
23	2022 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회	이진원	2022.04.27.	제주 부영호텔	한국

□ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

□ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호
2022	지침서 (농어촌형 저영향개발(LID) 현장운영지침서)	2022.12.30.	

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	지하수함양을 위한 모래여과를 포함하는 상향류식 저영향개발(LID) 정화시스템	한국	(주)엔에스엔지 니어링, 한국농어 촌공사	2021. 04.13	10-2021 -004752 5				100%	활용	
2	탈질 효율이 향상된 물 침투 시설	한국	군산대학 교, 한국농어 촌공사	2021.03 .12	11-2021 -029241 049		1차 보정의견 서 제출 (2022. 12.27)		50%	활용	

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	농어촌형 저영향개발(LID) 시설 현장운영지침서	2022.12.30.	(주)엔에스엔지 니어링	2023.02.03.	제C-2023-009 134호	(주)엔에스엔지 니어링	100%

□ 신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 <sup>1)</sup>	인증여부 <sup>2)</sup>	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 <sup>3)</sup>	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 <sup>1)</sup>	표준명	표준기구명 <sup>2)</sup>	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 <sup>3)</sup>	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	농어촌형 저영향개발 시설 (분지형)	2022.01.	(주)지엔에스엔 지니어링	하동	지하수 확보	1년		
2	비닐하우스 단동형 저영향개발 시설	2022.01	(주)지엔에스엔 지니어링	하동	지하수 확보	1년		

기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

사업화 현황

번호	사업화 방식 <sup>1)</sup>	사업화 형태 <sup>2)</sup>	지역 <sup>3)</sup>	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과		제품화 1건			
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	2.5년			
	소요예산(천원)	70,000 ~ 100,000 천원/m <sup>3</sup>			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
		-	490,000	840,000	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
			국내	12%	17%
국외			-	0.1%	
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		빗물이용장치를 연계한 LID시설 개발			
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
		-	490,000	756,000	
	수출	-	-	84,000	

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분		고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

□ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	순환성 지하수자원 확보 사업에 활용	한국농어촌공사 (환경지질처)	2023	활용 예정

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	학위취득	2022	1					1					1	

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비



국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	학술대회 (홍보부스운영)	2021년 (사)한국지하수토양환경 학회 춘계학술대회	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID)시설 개발 홍보	2021.04.22. ~2021.04.23
2	MOU체결 (뉴스기사 홍보)	뉴스1 등 30개 언론매체	농어촌공사, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	2021.05.10.~
3	학술대회 (홍보부스운영)	2022년 (사)한국지하수토양환경 학회 춘계학술대회	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID)시설 개발 홍보	2022.04.27 ~2022.04.29
4	학술대회 (홍보부스운영)	2022년 (사)한국지하수토양환경 학회 추계학술대회	농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID)시설 개발 홍보	2022.10.13 ~2022.10.14

포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

---



---

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

---



---

지하수 함양시설 또는 LID시설에서의 질산성질소 오염방지를 위한 농업부산물의 탈질효율 실험연구

이진원<sup>1</sup>, Phung Thanh Huy<sup>2</sup>, 이병선<sup>2</sup>, 김강주<sup>1\*</sup>, 이규상<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>농촌대학교 환경공학과  
<sup>2</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원

An Experimental Study on Denitrification Efficiency of Agricultural Byproducts for Prevention of Nitrate Contamination from LID or Groundwater Recharge Facilities

Jinwon Lee<sup>1</sup>, Thanh Huy Phung<sup>2</sup>, Byungsoon Lee<sup>2</sup>, Kangjoo Kim<sup>1\*</sup>, Gyoungsang Lee<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kunsan National University  
<sup>2</sup>Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute

ABSTRACT

Facilities for low impact development (LID) or groundwater recharge have the high potential spreading groundwater nitrate contamination because of the rapid infiltration. This study was initiated to remove nitrate from the waters using agricultural byproducts as organic sources for denitrification during infiltration. As the first step of this purpose, we experimentally tested the denitrification efficiency of a organic materials (pine tree woodchips, cherry leaves, rice straw, and rice hulls) and tried to identify the key factors controlling the efficiency. For this study, we precisely investigated the change of chemical reactions during the experiment by analyzing various geochemical parameters. The result shows that the denitrification efficiency is not simply linked to the availability of the easily decomposable contents in the organic matter. It is found that avoiding the severe pH decrease due to the CO<sub>2</sub> generation is the essence to derive the efficient denitrifying conditions when organic matters were used.

Key words : denitrification, groundwater, nitrate, organic matter, agricultural byproducts, carbon dioxide

1. 서 론

2020 지하수속성정보(MOE, 2020)에 의하면, 2019년 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N)는 지하수 수질 항목 중 pH, 총대장균군, 염소이온을 제외하고 가장 흔하게 관측되는 수질부적합 항목이다. 우리나라의 질산성질소에 의한 지하수오염은 농어촌지역에서 더 심각하게 나타나고 있다(Kim and

Woo, 2003; Lee et al., 2008; Jeon et al., 2011). 유아 및 소아의 경우, 위액의 pH가 중성(7)에 가깝기 때문에 질산성질소 농도가 높은 물을 섭취할 경우, 질산성질소가 쉽게 아질산성질소로 환원된다. 아질산성질소는 발암성이 의심되는 물질로 알려져 있으며(Guadagnini and Tonelli, 2013), 핵모글로빈의 산소 운반작용을 방해하여 청색증(blue baby syndrome or methemoglobinemia)을 유발시킴으로써, 심한 경우에는 사망에 이를 수도 있는 것으로 알려져 있다(Comby, 1945; Guadagnini and Tonelli, 2013). 고농도의 질산성질소 지하수는 가족의 혼신율을 저하시키거나(Chandler, 1989) 화전과 해수의 총질소 농도를 높여 부영양화를 일으키기도 한다(Fennessy and Cronk, 1997). 이와 같은 위해성으로 인하여 우리나라는 질산성질소의 먹는물수질기준을 10 mg-N/L 이하로, 생활용지하수 수질 기준은 20 mg-N/L 이하로 제한하고 있다.

주최자: 이진원, 농촌대학교 환경공학과, 박사과정학생  
공저자: 공원환, 농촌대학교 환경공학과, 박사과정학생  
이병선, 한국농어촌공사 농어촌연구원  
이규상, 한국농어촌공사 농어촌연구원  
\*교신저자: 김강주, 농촌대학교 환경공학과, 교수  
Email: kangjoo@kunsan.ac.kr  
Received : 2021.11.28 Reviewed : 2021.12.06  
Accepted : 2021.12.13 Discussion until : 2022.02.28

82

92

이진원 · Phung Thanh Huy · 이병선 · 김강주 · 이규상

치게 낮아지는 것을 막아줄 수 있었고, 이때 질산성질소의 탈질이 완료된 수 있었다.  
항목을 이용한 실험(TE)에서는 유기물의 분해가 실험 C, D에서 만큼 발생하지는 않았지만, 바로 이 때문에 항지 자체에서 발생한 알칼리(토)극속 양이온이 pH를 완충시켜 주는 역할을 적절하게 해줄 수 있게 된 것으로 보인다. 실제로 실험 E가 반응기간 동안 가장 높은 pH를 보였다(Fig. 6). 그러나, 실험 D와 E도 반응 후반부에는 지속적인 유기물 분해로 인하여 낮아진 pH 값을 보였다. 이로 인하여 질산성질소가 남아있었다면 이들의 탈질효율은 pH가 높았던 초기에 비하여 크게 저하되었을 것으로 예상된다. 우드칩을 이용한 실험에서는 유기물의 분해가 왕성하지 못하여 가장 적은 양의 CO<sub>2</sub>가 발생하였으나, 알칼리(토)극속의 용출도 매우 미미하여 매우 낮은 pH를 보였다. 이로 인하여 매우 느린 탈질효율을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 농업부산물을 재료들의 탈질 효율을 실험을 통하여 평가하였다. 본 연구를 통하여 각 유기물 분해에도 불구하고 CO<sub>2</sub>로 인한 pH 저하를 효율적으로 막아주는 것이 매우 중요함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 가장 높은 알칼리(토)극속양을 가진 뽕나무잎은 반응실험에서도 가장 왕성하게 분해되었으나, 이로 인하여 많은 CO<sub>2</sub>가 발생된 반면, 알칼리(토)극속의 용출은 자그마한 pH 저하를 억제할 수 있을 만큼 많지도 않았으므로, 상당히 높은 탈질속도를 보였다. 반면, 낱물은 가장 빠른 탈질속도를 보였는데, 이는 반송 초탄두피 자체에서 알칼리(토)극속이온들이 왕성하게 용출됨으로써, 왕성한 유기물 분해에도 불구하고 pH가 지나치게 낮아지는 것을 막아줄 수 있었음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들은 유기물 분해에도 충분한 탈질효율은 유기물 분해로 발생하는 CO<sub>2</sub>로 인한 pH 저하가 탈질효율을 좌우하는 인자임을 시사한다. 아울러, CO<sub>2</sub> 발생으로 인한 지나친 pH 저하를 막아줄 수 있도록 처리해 줄 수 있다면 작은 양의 유기물을 분해함으로써 충분히 빠른 탈질효율을 얻어 낼 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 농민속산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개방(LID)

J. Soil Groundwater Environ. Vol. 26(6), p. 82-94, 2021

제주도 관정 공벽 내 오염물질 유입 구간 탐지 및 차단 사례

송성호<sup>1\*</sup>, 황보동준<sup>2</sup>, 김진성<sup>3</sup>, 양원석<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원  
<sup>2</sup>한국농어촌공사 제주지역본부  
<sup>3</sup>한국농어촌공사 경북지역본부  
<sup>4</sup>제주특별자치도 물정책과

Case for Detection and Prevention of Inflow Section for Contaminant through Annular Space in Borehole, Jeju Island

Sung-Ho Song<sup>1\*</sup>, Dongjun Hwangbo<sup>2</sup>, Jin-Seong Kim<sup>3</sup>, Won-Seok Yang<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation  
<sup>2</sup>Jeju Headquarter, Korea Rural Community Corporation  
<sup>3</sup>Gyeongbuk Headquarter, Korea Rural Community Corporation  
<sup>4</sup>Water Policy Division, Jeju Special Self-Governing Province

ABSTRACT

Most wells developed in Jeju island before the enactment of the Groundwater Management Ordinance in 2002 are vulnerable to aquifer contamination due to inflow of upper groundwater having the high concentration of nitrate nitrogen, likely due to incomplete grouting in upper section of the wells. Although these wells require entire reinstallation, it is often necessary to rehabilitate the existing wells due to various constraints. Therefore, to identify the inflow section of contaminants, the thermal level sensor (TLS) technique was firstly applied for three wells, which enables to monitor temperature variations in every 50 cm depth. Then, the grouting material was injected to the upper section to prevent the inflow of upper contaminated groundwater into the entire aquifer. By applying TLS technique, it was found that the temperature deviations in the upper groundwater inflow section decreased sharply. Moreover, both the change in the concentration of nitrate nitrogen in the rainy/dry seasons and the average concentrations were found to decrease rapidly after grouting material injection. Consequently, the application of TLS proposed in the study turned out to be appropriate to prevent aquifer contamination.

Key words : Aquifer contamination, Nitrate nitrogen, Thermal level sensor (TLS), Grouting material injection, Jeju Island

1. 서 론

지하수 오염은 지표에 분포하는 오염물질이 대수층으로 유입됨에 따라 발생한다. 그러나 오염물질에 의한 대수층

내 지하수 오염 양상은 시간공간적으로 다양하므로, 관정 내 지하수에 대한 오염원 분석 및 오염물질 유입 경로를 예측하는 것은 어렵다. 따라서 관정 개발 이전에 수리지질학적 특성을 고려한 오염방지 대책을 수립하여, 관정 내부를 통한 대수층 오염을 사전에 차단하는 것이 필요하다. 일반적으로 관정의 성능은 개발 후 시간경과에 따라 감소되는데, 대수층의 물리적 특성, 지하수 수질, 관정 내 스크린의 폐쇄, 관정 사용의 방식 등에 따라 경과 시간이 다르다(Gass et al., 1980; KRC, 1997; Song et al., 2016). 관정의 성능 저하 원인은 주로 부식과 충전이지만, 지표 오염원으로 인한 질산염 오염 등으로부터 발생하기도 한다(Houben and Treskatis, 2007).

주최자: 송성호, 한국농어촌공사 농어촌연구원 소장  
공저자: 황보동준, 한국농어촌공사 제주지역본부 대리  
김진성, 한국농어촌공사 경북지역본부 과장  
양원석, 제주특별자치도 물정책과 주무관  
\*교신저자: 송성호, 한국농어촌공사 농어촌연구원 소장  
Email: shsong@krkrk.kr  
Received : 2022.05.24 Reviewed : 2022.05.26  
Accepted : 2022.06.10 Discussion until : 2022.08.31

10

송성호 · 황보동준 · 김진성 · 양원석

4. 결 론

제주특별자치도에서는 2002년 지하수 관리 조례 제정으로 지표 하부 50 m까지 계층 그라우팅을 강제화하여, 상부지하수로부터 발생 가능한 대수층 오염 가능성을 원천적으로 차단하고 있다.

그러나 조례 개정 이전에 개발된 관정의 경우 상부 계층 그라우팅 미시공으로 인하여, 지표 및 상부 오염원에 의한 지하수 오염 취약성은 여전히 상존하고 있다. 특히 일부지역에서는 관정 공벽을 통한 오일된 상부지하수의 대수층 유입으로 인하여, 질산성질소 농도 최대값이 30 mg/L 이상으로 상승하며 갈수가 질산성질소 농도 변화 또한 매우 크게 나타나고 있다. 이러한 경우 관정 폐공 이후 재개발이 필요하지만, 신규 개발에 따른 다양한 제약 조건으로 인하여 기존 관정에 대한 시설 개선 방법 적용이 필요하다.

이 연구에서는 3개 관정을 대상으로 우물자체 내에 TLS 모니터링 장치를 설치하여, 공벽을 통한 오염물질의 유입구간을 파악하는 기술을 이용하였다. 이를 통하여 오염물질 유입 구간을 확인한 후, 그라우팅재를 주입하여 상부지하수의 대수층 유입을 차단하였다. 특히 그라우팅재 주입 이후 동일구간에 대하여 TLS 장치를 이용하여 오염물질 유입구간의 차단 효과를 검증하였다.

오염물질 유입 구간 차단 방법 적용 전후에 실시한 TLS 기법 적용 결과, 차단 방법 적용 이전 오염물질 유입 구간의 매우 큰 온도 편차가 적용 이후 일정하게 낮아짐에 따라 상부지하수의 유입 구간에 대한 지수가 성공한 것으로 판단된다. 또한 차단 공벽 이전에는 상부지하수 유입의 영향으로 갈수가 갈수기의 질산성질소 농도 변화가 크게 나타났지만, 공벽 적용 이후에는 농도 변화폭이 감소하며 갈수광파의 상관관계 또한 나타나지 않았다. 결과적으로 TLS 모니터링을 이용한 오염 물질 유입 구간의 탐지 기술은 원위적 차단 공법인, 제주도 지하수의 수질 개선에 효과적인 방법으로 판단된다.

사 사

이 연구는 제주특별자치도 물정책과 농민속산식품부 농업기반 및 재해대응 과제(농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개방 시설 개발)의 지원으로 이루어졌습니다.

J. Soil Groundwater Environ. Vol. 27(3), p. 1-10, 2022

References

기술 개발(과제번호: 320052-3) 과제의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

Appelo, C.A.J. and Postma, D., 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.  
Cameron, S.G. and Schipper, L.A., 2010. Nitrate removal and hydraulic performance of organic carbon for use in denitrification beds. *Ecol. Eng.*, 36(11), 1588-1595.  
Carmichael, P.A., 1994. Using Wood Chips as a Source of Organic Carbon in Denitrification: A Column Experiment and Field study Implementing the Furnel and gate Design. MS Thesis. Dept. of Earth Sci., University of Waterloo.  
Chandler, J., 1989. Nitrate in water. *Water Well Jour.*, 43, 45-47.  
Class, G. and Kutner, H.J., 1983. Physiology and kinetics of anaerobic denitrification by *Thiobacillus denitrificans*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 22, 283-288.  
Comby, H.H., 1945. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. *JAMA*, 129(2), 112-116.  
Dever, J.L., 1997. The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.  
Fennessy, M.S. and Cronk, K.K., 1997. The effectiveness and restoration potential of riparian ecotones for the management of nonpoint source pollution, particularly nitrate. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 27, 285-317.  
Gautam, R.K., Navarata, D., Muthukumar, S., Singh, A., Islamuddin, and More, N., 2021. Humic Substances: Its Toxicology, Chemistry and Biology Associated with Soil, Plants and Environment. In: A. Mekan (Ed.), Humic Substances.  
Gibert, O., Pomiery, S., Rowe, L., and Kalin, R.M., 2008. Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). *Bioresour. Technol.*, 99(16), 7587-7596.  
Greenan, C.M., Moorman, T.B., Parkin T.B., Kaspar, T.C., and Jaynes, D.B., 2009. Denitrification in wood chip bioreactors at different water flows. *J. Environ. Qual.*, 38(4), 1664-1671.  
Guadagnini, L. and Tonelli, D., 2013. Carbon electrodes unmodified and decorated with silver nanoparticles for the determination of nitrite, nitrate and iodate. *Sens. Actuators B Chem.*, 188, 806-814.  
Ha, Q.K., Choi, S.H., Phan, N.L., Kim, K., Phan, C.N., Nguyen, V.K., and Ko, K.S., 2019. Occurrence of metal-rich groundwater around the Mekong Delta (Vietnam): A phenomenon linked to well installation. *Sci. Total Environ.*, 654, 1100-1109.

References

Cho, H.N., Choi, S.O., Park, J.O., Bae, S.D., Lee, B.Y., and Choi, S.L., 2019. A study on grouting technology using expansion double packers for sectional blocking between groundwater borehole and inner casing. *J. Soil Groundwater Environ.*, 24(1), 35-42 (in Korean with English abstract).  
Drausva, S., Wagterveld, R.M., Koestman, K.J., and Offerhaus, H.L., 2020. Temperature and consolidation sensing near drinking water wells using fiber bragg grating sensors. *Water*, 12(12), 3572.  
Gass, T.E., Bennett, T.W., Miller, J., and Miller, R., 1980. Manual of Water Well Maintenance and Rehabilitation Technology. National Water Well Association, Dublin.  
Houben, G. and Treskatis, C., 2007. Water Well: Rehabilitation and Reconstruction. McGraw-Hill, N.Y.  
JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) and JRI (Jeju Research Institute), 2019. Research report on improvement of groundwater quality and prevention of groundwater contamination.  
JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) and KRC-J (Jeju Headquarter, Korea Rural Community Corporation), 2020. Report for establishment of groundwater quality measurement network and operation plan.  
Kim, M., Kang, B.R., Cho, H.N., Choi, S.O., Yang, W.S., and Park, W., 2020. Application and assessment of regrouting method for improperly constructed wells in Jeju Island. *J. Soil Groundwater Environ.*, 25(3), 43-51 (in Korean with English abstract).  
Koh, E.H., Lee, E.H., and Lee, K.K., 2016. Impact of leaky wells on nitrate cross-contamination in layered aquifer system: Methodology for and demonstration of quantitative assessment and prediction. *J. Hydro.*, 541, 1133-1144.  
KRC (Korea Rural Community Corporation), 1997. A Study of Appropriate Post Management Methods for Tube Wells.  
Park, W.B., Kim, G.P., Lee, J.H., Moon, D.C., Kim, S.J., Koh, G.W., Pang, S.J., and Pang, I.C., 2011. Variation of groundwater level and recharge volume in Jeju Island. *J. Environ. Sci.*, 29(7), 857-872 (in Korean with English abstract).  
Song, S.H., Hwangbo, D.J., Jang, K.Y., Kim, J.S., Seo, S.K., and Yang, W.S., 2021. Evaluation of nitrate nitrogen contamination degree in groundwater wells, Jeju Island. *J. Soil Groundwater Environ.*, 26(4), 8-19 (in Korean with English abstract).  
Song, S.H., Lee, B.S., and An, J.G., 2016. Quantitative evaluation for improvement effects of performance after mechanical rehabilitation treatments on agricultural groundwater well. *J. Soil Groundwater Environ.*, 21(4), 42-49 (in Korean with English abstract).



## 포스트 코로나 시대 농어촌지하수 관리 방안

이병선 · 서상진 · 이규상 · 윤석환 · 송성호\*  
한국농어촌공사 농어촌연구원

### Management Plan for Rural Groundwater Resources in the Era of Post COVID-19

Byung Sun Lee · Sangjin Seo · Gyu-sang Lee · Seok-Hwan Yoon · Sung-Ho Song\*  
Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

#### ABSTRACT

This study was conducted to supplement new-normal strategies on management plans of rural groundwater resources in the era of Post COVID-19. Global outbreak of COVID-19 has damaged across all areas including public policy, economics, industrial services, and others without exception, which has resulted in establishing new-normal strategies in order to restore balance and functions as for these areas. The new-normal ones were represented as enhancing preventative management on infectious diseases, expanding non face-to-face services, enhancing protective trades and food securities, and preparing growth policies on public services using the 4<sup>th</sup> industrial revolution techniques. In this study, G-WASH\_AD (Groundwater supply, sanitation, and hygiene with attraction and digitization) was suggested to be new-normal strategies on rural groundwater resources. The G-WASH\_AD was consisted of three detailed action plans: a preventative plan on waterborne-diseases of groundwater (PP), a groundwater-tourism plan with rural heritage (GP), and an application plan of the 4<sup>th</sup> industrial revolution techniques to groundwater facilities and its data (P4). The PP can contribute to protect human health from waterborne-diseases and minimize hazardous effects on crop cultivation. The GP accompanied with high-quality groundwater resources is able to strengthen rural tourism, to promote marketing activities on local agricultural products, and to increase household incomes of rural communities. The P4 can reinforce fast, comfortable, and scientific management on groundwater facilities and its data, creating a virtuous cycle between innovative management on groundwater and growth of technology related to it. Results of the G-WASH\_AD strategies can encourage a green growth engine in field of rural groundwater management keeping up with Post COVID-19.

**Key words :** Post COVID-19, Groundwater, Waterborne-diseases, Groundwater-tourism, 4<sup>th</sup> industrial revolution technique

#### 1. 서 언

코로나바이러스감염증-19(이하 코로나-19)란 2019년말 에 발견된 '제2형 중증 급성 호흡기 증후군' 코로나 바이

주자: 이병선, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 책임연구원  
공저자: 서상진, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 선임연구원  
이규상, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 연구위원  
윤석환, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 전문위원  
\*교신저자: 송성호, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 미래농어촌 연구소장  
Email: shsong@ckr.or.kr

Received: 2022. 06. 16 Reviewed: 2022. 07. 15  
Accepted: 2022. 08. 10 Discussion until: 2022. 10. 31

러스에 의해 사람이나 동물에서 발생하는 호흡기 질환이다(KDCA, 2022). 코로나-19는 주로 호흡기를 통해 전염 되므로, 올바른 손씻기 마스크 착용, 사회적 거리두기, 올바른 손씻기, 주기적인 실내공기 환기 등 다양한 예방 활동을 필요로 한다(KDCA, 2022). 코로나-19에 감염되면 고열과 기침, 호흡곤란 등이 발생하고, 심각한 경우 폐포가 손상되어 호흡 부전으로 사망에 이르게도 한다(IDE, 2022). 코로나-19에 의한 감염 확산을 저지하기 위해 다양한 종류의 백신과 치료제가 개발되었으나, 시간이 지나면서 증상과 감염율이 다른 다양한 변이종(델타, 베타, 감마, 델타, 오미كرون 변이 등)이 발생하여 감염병 증상은 느린 편이다.

G-WASH\_AD(예방적 지하수 관리, 위력형 지하수 관리, 디지털 지하수 관리)를 농어촌지하수 관리 뉴노멀 전략으로 제안하였다. 수인성 질병 예방을 위한 예방적 지하수 관리는 농어촌의 수질 안전망 구축에 기여할 수 있고, 나아가 농어촌의 생활환경에 대한 청정지하수 환경 가치를 창출할 수 있다. 농어촌지하수 명품화를 기반으로 한 위력형 지하수 관리는 농어촌과 함께하는 지역개발사업의 동력을 제공하여, 지하수를 대개제로 한 농어촌관광 활성화, 로컬푸드 판매 촉진 등 농어촌지역의 매출 증대를 도모할 수 있다. 4차산업혁명 기술을 이용한 디지털 지하수 관리는 편리하고 신속한, 그리고 최적화된 지하수관리를 유도할 수 있으며, 나아가 정책입안자를 위한 지하수 정보를 산출하여 농어촌지하수 관리의 선순환을 이룰 수 있다.

코로나-19는 우리 사회의 기반을 흔드는 위협이 되고 있고, 이를 대처하고 극복하는 과정 중에 많은 손실과 피해가 있었다. 그러나 코로나-19 이후 농어촌지하수 부문도 새로운 뉴노멀 전략을 세워 적극적으로 실천할 수 있다면, 다가오는 포스트 코로나 시대의 새로운 성장동력을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사 사

이 원고는 농림축산식품부 농업기반 및 재해예방 기술 개발사업 「농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 시설 개발」 과제 연구비 지원에 의해 이루어졌다.

#### References

Alley, W.M. and Job, C.A., 2020. Groundwater, well, and coronavirus, The aquifer (a publication of the groundwater foundation), Spring/Summer 2020, 1-5.  
AP (Alix Partners), 2020. Seven years of change in seven months: COVID-19 through the lens of disruption, 16p.  
Balaraman M, Kasiviswanathan K.S., Ilampooranan I., and Sundharajan B.-S., 2021. COVID-19 lockdown disruptions on water resources, wastewater, and agriculture in India. *Front. Water* 3:603531. doi: 10.3389/frwa.2021.603531.  
Bogler, A., Paskman, A., Farnan, A., Gross, A., Kadhmaso, A., Ronen, A., Dugat, C., Hill, C., Vaizel-Ohayon, D., Momenoth, E., Bortazzo, E., Wells, G., Kiperwas, H.R., Horn, H., Negev, I., Zuckler, L., Bar-Or, I., Morgan-Gilad, J., Balcazar, J.L., Bibby, K., Elmehelch, M., Weisbrod, N., Nir, O., Saad, O., Gillor, O., Alvarez, P.J., Cramer, S., Arnon, S., Walker, S., Yaron, S., Nguyen, T.H., Berchenko, Y., Hu, Y.L., Ronen, Z., and Bar-Zeev, E., 2020. Rethinking wastewater risks and monitoring in light

of the COVID-19 pandemic, *Nature Sustain.*, 3, 981-990.  
Cho, K.S., 2020. Change from COVID-19 crisis to sustainable economy, Nara economy, KDI (Korea development institute) reports 357, 64-66.  
DE (Daam encyclopedia), 2022. <https://100.daam.net/encyclopedia/view/47XXXXXb1134> [accessed 22.03.24].  
EC (European Commission), 2021. COVID-19: an opportunity to promote water, sanitation and hygiene in Africa, [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/covid-19-and-water-sanitation-and-hygiene-africa-2021-06-16\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/covid-19-and-water-sanitation-and-hygiene-africa-2021-06-16_en) [accessed 22.03.27].  
FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2021. Water quality and food safety & COVID-19, <https://www.fao.org/land-water/overview/covid19/quality/safety/en/> [accessed 22.03.20].  
GRI (Gyeonggi Research Institute), 2020. Agriculture in the era of post-COVID19: What we prepare to the era?, Issue and analysis, GRI reports No. 415.  
Huo, C., Dar, A.A., Nawaz, A., Hameed, J., Albarshar, G., Pan, B., and Wang, C., 2021. Groundwater contamination with the treat of COVID-19: Insights into CSR theory of Carroll's pyramid, *J. King Saud Univ - Sci.*, 33(2), <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101295>.  
IBM, 2019. State of California tackles drought with IoT & blockchain, <https://newsroom.ibm.com/2019-02-08-State-of-California-Tackles-Drought-with-IoT-Blockchain>.  
Ihm, S.S., 2020. Effect of COVID-19 on global agri-food system, Global agriculture, KREI (Korea rural economies institute) reports 236, 73-92.  
IT (Interagency taskforce), 2020. A plan enhancing a role of public agencies to support Korean new deals, IT report 20-2 (2020.08.20), 16p.  
Kabuya, A.K., Alowo, R., and Nkionjera, G.K., 2022. Apps for smart groundwater monitoring and assessments: A case study of Regdeso catchment in Kimbansoko, *Appl. Sci.*, 12(7), 3243. <https://doi.org/10.3390/app12073243>.  
KDCA (Korea Disease Control and Prevention Agency), 2022. <https://msvkdca.go.kr/msv/> [accessed 22.03.15].  
KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), KRC (Korea Rural Community Corporation), KML (Kookmin University), and GeoGreen21, 2021. An annual report on development of the well network system technique keeping up with drought. A research group on optimal groundwater uses against water demands during drought periods, Ministry of Environment, 429p.  
Kim, B.Y., 2021. USDA agricultural projection to 2030, Global agriculture, KREI (Korea rural economies institute) reports 242, 3-14.

□ 학술발표 23건



Please note: All live events are scheduled for Eastern Time (America/New York) via the virtual conference platform.  
You can change time zone using the link in the navigation panel on the left.

All Oral presentations listed on this agenda are only accessible via the virtual conference platform.

## 125-7 - ESTABLISHMENT OF OPTIMAL MANAGEMENT PLANS ON AGRICULTURAL GROUNDWATER

 Thursday, 29 October 2020  
 12:00 AM - 12:10 AM  
 GSA e-Attend Platform - Meeting Rooms

**Abstract**

This study was conducted to establish a conservative management plan on groundwater resources for one representative rural area in South Korea. In order to designate the groundwater-quantity management zone, firstly, the exploitable groundwater amounts of the area were estimated using a local recharge rate (16.95 %) with a precipitation (1,454 mm year<sup>-1</sup>). The exploitable groundwater amounts were estimated to be 1.64 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> year<sup>-1</sup>. From the local groundwater statistics, secondary, the usage amounts of groundwater in this area was identified to be 2.63 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> year<sup>-1</sup>, which is accounted for 16.10 % of the groundwater exploitable ones. The rate between the groundwater exploitable- and usage amounts appears to be relatively small. Nonetheless, usage amounts in six administrative towns (33%) among 18 ones in the study area revealed relatively high, where required an optimal groundwater-quantity management plan. In addition, nitrate-nitrogen concentrations causing a blue-blood syndrome for infant were analyzed from groundwater samples in 181 wells over the study area. Average nitrate-nitrogen concentration was identified to be 6.67 mg-N L<sup>-1</sup>, which was twice higher than the national average one (3.3 mg-N L<sup>-1</sup>). Approximate 6% of the samples exceeded the agricultural groundwater-quality guideline for nitrate-nitrogen (20 mg-N L<sup>-1</sup>). In order to designate the groundwater-quality management zone, four indicators including average nitrate-nitrogen concentration, pollutants, DRASTIC index, and pollutant loads: twelve administrative towns (67%) among 18 ones including the zones exceeding nitrate-nitrogen concentrations of 20 mg-N L<sup>-1</sup> revealed required an optimal groundwater-quality management plan. As a result, a permissive pumping rate of each groundwater well should be mandatorily kept. In addition, monitoring for groundwater-quality should be consistently conducted on the groundwater-quality management zone.

This study was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Agricultural Facilities and Disaster Management Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (grant number 320052-3)

Geological Society of America Abstracts with Programs, Vol 52, No. 6, 2020  
doi: 10.1130/abs/2020AM-353127  
© Copyright 2020 The Geological Society of America (GSA), all rights reserved.

**Author**

 **Seo Hyokyoung**

Ask a question or comment on this session (not intended for technical support questions).

Have a question or comment? Enter it here.

**Epouser Link**

EPoster

**View Related**

**Session**

125: T172: Groundwater Availability and Sustainability Studies: Advances, Methods and Approaches II  
**Zhilin Guo**, Department of Environmental Science and Engineering, shenzhen, China, **Graham Fogg**, Univ California - Davis Dept Land, Air & Water Resources, Davis, CA, **Jesse Dickinson**, Tucson, AZ and **Chunmiao Zheng**, Department of Geological Sciences, University of Alabama, Tuscaloosa, AL

 Wednesday, 28 October 2020  
 11:00 PM - 1:00 AM  
 GSA e-Attend Platform - Meeting Rooms

Topical Sessions >

Technical Programs

**Similar**

ASSESSMENT OF FLOATING GARDENS TO IMPROVE THE WATER QUALITY OF THE CHICAGO RIVER  
**HEATH, Abigail A.**, Department of Geography, Geology, and the Environment, Illinois State University, Felmley Hall 206, Campus Box 4400, Normal, IL 61790, **PETERSON, Eric W.**, Geography, Geology, and the Environment, Illinois State University, Felmley Hall Annex F5A 439, Normal, IL 61761, **SPOONER, Emmett A.**, Department of Geography, Geology, and the



Please note: All live events are scheduled for Eastern Time (America/New York) via the virtual conference platform.  
You can change time zone using the link in the navigation panel on the left.

All Oral presentations listed on this agenda are only accessible via the virtual conference platform.

## 125-1 - A FEASIBILITY TEST ON AN ARTIFICIAL RECHARGE SYSTEM FOR ONE REPRESENTATIVE GREENHOUSE COMPLEX ZONE

 Wednesday, 28 October 2020  
 11:00 PM - 11:10 PM  
 GSA e-Attend Platform - Meeting Rooms

**Abstract**

This study was conducted to examine an artificial recharge system which was considered to be an alternative for securing additional groundwater resources to one high-density greenhouse complex zone. An injection well with a depth of 14.0 m was placed in an alluvial plain of the zone. Eight monitoring wells were placed in a shape of dual circles around the injection well. Aquifer tests demonstrated hydraulic conductivities ranging in 1.5 x 10<sup>-3</sup> - 2.4 x 10<sup>-2</sup> cm sec<sup>-1</sup> and storage coefficients ranging in 0.07 - 0.10, indicating characteristics of a relatively high-permeable layer. A step injection test resulted in a specific groundwater-level rising (S<sub>1</sub>Q<sub>1</sub><sup>-1</sup>) values ranging of 0.013 - 0.018 day m<sup>-2</sup> and 64 - 92% of injection efficiencies. Results of a constant-rate injection test with an optimal injection rate of 100 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> explained an enormous storage capacity of the alluvial aquifer during ten experimental days. During the constant-rate injection test, most of hydro-physical properties including pH, EC, and temperature was stable in dual monitoring wells whereas dissolved oxygen (DO) value slightly increased due to an injection of surface water with high DO concentrations. For drawing a detailed design on an artificial recharge, the high permeable layer should be isolated by dual packers and suitable pressure should be applied to the injection well in order to store water. An anisotropy ratio of the alluvial aquifer was evaluated to be approximately 1.25 : 1 with an anisotropy angle of 71 degrees.

This study was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Agricultural Facilities and Disaster Management Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (grant number 320052-3).

Geological Society of America Abstracts with Programs, Vol 52, No. 6, 2020  
doi: 10.1130/abs/2020AM-349044  
© Copyright 2020 The Geological Society of America (GSA), all rights reserved.

**Authors**

 **Byung Sun Lee**  
Rural Research Institute  
 **Wocho Myoung**  
Rural Research Institute  
 **Gyusang Lee**  
Rural Research Institute

Ask a question or comment on this session (not intended for technical support questions).

Have a question or comment? Enter it here.

**Epouser Link**

EPoster

**View Related**

**Session**

125: T172: Groundwater Availability and Sustainability Studies: Advances, Methods and Approaches II  
**Zhilin Guo**, Department of Environmental Science and Engineering, shenzhen, China, **Graham Fogg**, Univ California - Davis Dept Land, Air & Water Resources, Davis, CA, **Jesse Dickinson**, Tucson, AZ and **Chunmiao Zheng**, Department of Geological Sciences, University of Alabama, Tuscaloosa, AL

 Wednesday, 28 October 2020  
 11:00 PM - 1:00 AM  
 GSA e-Attend Platform - Meeting Rooms

Topical Sessions >

Technical Programs

**Similar**



The 2020 Korean Society of Agricultural Engineer Annual Conference

# 한국농공학회 2020 KSAE 학술발표회 10.16

온라인 개최



주최 [사]한국농공학회

후원 한국과학기술단체총연합회, 농식품생명과학협회, 쌍용건설(주), 아이에스테크놀로지(주), 경북대학교, 계룡건설산업(주), 현대건설(주), 금호건설, 에스케이건설(주), 대우건설, (주)이엠연구소, (주)이도, 유역통합관리연구원



한국농공학회 학술발표회 285

## 통합물관리와 농업용 지하수의 역할 Integrated Water Management and the Role of Groundwater for Agricultural and Fishing Area

서상기\*, 전병철\*\*, 이규상\*\*\*, 이병선\*\*\*\*  
Sangkee Seo, Byoungchil Jeon, Gyu-Sang Lee, Byung Sun Lee

### 요지

통합물관리 정책이 실행되면서, 물관리는 유역단위로 수질과 수량을 통합 관리하고, 물 순환 과정에서 물에 영향을 주는 사항을 종합적으로 고려해서 관리하게 된다. 현재의 논의에서는 물관리 일원화에 정부조직 차원의 대상에 농업용수는 계량화가 어렵고 정확한 통계가 없으며 관리 또한 어려워 제외되어 있다. 그러나, 국가 수자원 이용량 중 농업용수가 차지하는 비중(41%)을 고려할 때 농업용수를 제외하고 통합물관리의 최종 목표를 달성하기가 어렵다. 같은 맥락으로 지표수와 지하수를 분리해서 관리하는 것 또한 지표수와 지표수의 상호 작용을 고려할 때 완전한 관리에 어려움이 있을 것이다. 일례로, 미국 전역 54개 하천의 지하수 유입량은 하천 유량의 14~90%(Winter et al., 1998), 지표수의 질산성질소 부하 기여율은 37%이상으로 보고된 바 있다(Dubrovsky et al., 2010). 국내의 경우, 4대강 하천유량의 약 62~80%는 지표수의 기저유출에 기인하고(Lee et al., 2017), 국내 254개 하천관측망 자료 분석 결과 약 28~89%(Jung et al., 2016)에 이르며, 농업유역에서 기저유출에 의한 질산성질소 부하량은 22~41%에 이른다고(Kim et al., 2015). 결과적으로 유역기반의 물관리를 종합적으로 이루기 위해서는 통합물관리 정책에 농업용수의 편입, 지표수와 지하수를 통합하여 관리하는 정책이 필요하다. 향후 농업용수가 포함된 통합물관리 정책이 본격적으로 시행되면, 기존의 지표수 공급에서 소외된 농업용수지역의 4개월 용수수량 평가, 작물 생육단계에 따른 작부체계를 이용한 필요수량의 정량적 평가 기반 하천변 시설재배단지 용수수량 평가, 농지이용화에 따른 논 관개기간이외에 용수수량 평가가 이루어져야 한다. 그리고 농업 작물별로 구성된 작물반을 포함한 편입된 민간인 기반 물 사용자협회를 구성하여 수요자 중심의 지하수 공급체계를 구축하는 방안은 적극적으로 검토할 필요가 있다. 또한 질산성질소 등 지하수 오염에 따른 하천수의 수질에 대한 평가 체계를 구축할 필요가 있다. 이에 농업축산식품부와 환경농어촌공사는 2001년부터 시행 중인 농업용수 대상 지하수자원관리사업을 통합물관리 정책과 지하수-지표수 연계관리에 발맞추어 사업을 고도화하고, 농업용 지하수시정을 현행화 하며, 농업용수 관측망을 이용한 다양한 해석(농업기반 분석, 농업용수 공급가능량 산정 등)으로 미래 지하수 총량 변화를 평가할 계획이다. 또한 지하수 수량, 수질의 과학을 위한 농업용 공공관정 이용량 모니터링을 통한 실이용량 분석, IoT 기반 관정자동 및 제어, 모니터링 등 SMART 관리 시스템을 구축하여 농업용수지역의 지하수 수량과 수질을 동시에 관리하여 국가 차원의 통합물관리 계획에 기여하고자 한다.

핵심용어 : 통합물관리, 지하수자원, 연계관리, 물 사용자 협회, 물 복지

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업수산물 이용한 농업환경 저영향개발(LID) 기술 개발」과제의 연구에 의해 이루어졌습니다.

\* 정회원 - 한국농어촌공사 지하수지질팀 차장 · E-mail : skseo@kca.or.kr  
\*\* 정회원 - 한국농어촌공사 지하수지질팀 차장 · E-mail : bjeon@kca.or.kr  
\*\*\* 정회원 - 한국농어촌공사 농어촌연구실 수질연구실 · E-mail : leegs@kca.or.kr  
\*\*\*\* 정회원 - 한국농어촌공사 농어촌연구실 수질연구실 · E-mail : byungsun94@kca.or.kr

The 2020 Korean Society of Agricultural Engineer Annual Conference

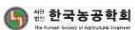
# 한국농공학회 2020 KSAE 학술발표회 10.16

온라인 개최



주최 [사]한국농공학회

후원 한국과학기술단체총연합회, 농식품생명과학협회, 쌍용건설(주), 아이에스테크놀로지(주), 경북대학교, 계룡건설산업(주), 현대건설(주), 금호건설, 에스케이건설(주), 대우건설, (주)이엠연구소, (주)이도, 유역통합관리연구원



한국농공학회 학술발표회 280

## 보 개방에 따른 하천변 지하수 이용 실태 Current Status of Groundwater use Around the River by Weir Opening

정현덕\*, 이규상\*\*, 이병선\*\*\*  
Chan-Duck Jeong, Gyu-Sang Lee, Byung Sun Lee

### 요지

2011년 4대강 보 설치 후 9년이 지난 이 시점에 자연환경과 생태복원 등의 목적으로 다시 보를 개방하는 목소리가 환경단체 등 여러 곳에서 나오고 있다. 당시 보 설치로 높아진 하천수위로 인해 하천변 농경지의 지하수위도 동반 상승하여 농작물 피해를 방지하기 위해 낮게는 30 cm, 높게는 1 m 내외의 폭도 작업을 진행하였다. 그러나 높았던 보를 다시 개방하게 되면 낮아진 하천수위와 지하수위도 인해 하천변 농경지에 자라는 농작물에 미치는 영향을 생각하지 않을 수 없다. 환경부는 하천수의 수질오염 방지를 위해 2017년 11월부터 단계적으로 보를 부분적 또는 완전 개방하였다. 환경부 산하 물환경정보시스템(http://water.nier.go.kr)에서 제공하는 보 개방현황(2017.6~2020.6)을 보면, 보의 효율적인 운영을 위해 설정된 관리수위와 하천수위를 1.0~9.9 m 이내로 설정하여 하천수위를 관리하고자 하였으나, 실제로는 강우 및 보 개방으로 관리수위보다 높아지거나 최저수위도 낮아져 수위차가 작게는 2.26m, 크게는 45.96 m 까지 차이로 보이는 것으로 나타났다. 수계별로 보면 한강 2.26~6.71 m, 금강 5.54~12.81 m, 낙동강 0.63~45.96 m, 영산강 7.69~29.93 m이다. 이렇게 하천수위가 변화하면서 하천변 농경지의 지하수위에도 영향을 끼쳐 하천에서 가까운 지역은 지하수 확보가 수월하여 시설재배단지가 밀집되어 있으며, 이를 활용해 4개월 지하수를 양수하여 작물을 재배하고 있다. 하천에서 멀리 떨어진 지역은 영향을 받지 않는 지하수 확보가 어려운 지하수보다는 지표수를 이용하여 논이나 밭에서 논지작물을 재배하고 있어 그 만큼 하천보다 더 적게 지하수를 사용하고 있는 것으로 나타났다. 또한 과거 바다였으나 보가 바다와 인접한 지역에서의 보 개방은 하천수위 하강에 따른 대기압 감소로 하천수의 염분농도 상승을 초래해 하천변 지하수 이용 농가의 염해피해가 예상된다. 이에 농가에서는 염분관정을 개발하기 시작하면서 하천변 지하수위는 점차 낮아지고 있으며, 염해피해가 우려되는 지역은 반대로 그나마 염분농도가 낮은 총축출 지하수를 개발하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서 보를 개방할 경우 하천변 시설재배단지나 농경지는 그만큼 하천수위 하강에 따른 지하수위도 동반 저하되거나 염분농도 상승 등 보 개방의 영향을 더 많이 받는 지역에 대해서는 지하수 인공함양, 대체용수 개발, 집수정 개발 등 하천 주변 지하수 사용 농가에 대한 지하수 공공대책이 우선적으로 마련되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 보 개방, 지하수, 이용실태, 인공함양, 대체용수, 집수정

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업수산물 이용한 농업환경 저영향개발(LID) 기술 개발」과제의 연구에 의해 이루어졌습니다.

\* 정회원 - 한국농어촌공사 농어촌연구실 책임연구원, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation · E-mail : duckian\_get@kca.or.kr  
\*\* 정회원 - 한국농어촌공사 농어촌연구실 수질연구실 · E-mail : leegs@kca.or.kr  
\*\*\* 정회원 - 한국농어촌공사 농어촌연구실 수질연구실 · E-mail : byungsun94@kca.or.kr



# 2021 (사)대한지질공학회 정기총회 및 춘계학술대회

THE KOREAN SOCIETY OF ENGINEERING GEOLOGY



2021.  
4.8.(목)~9.(금)  
제주 캠퍼트리 호텔 앤 리조트

주최 주관 (사)대한지질공학회

후 원 제주컨벤션뷰로, FIT시행연구원, 국가활성인증연구원, (주)동해이엔지, (주)산하이엔씨, 씨엔에치아이엔씨㈜, (주)에스이엔지, (주)인텔리시오, (주)시오그린21, (주)시오에이엔지, 코팅(주), (주)원세치반연지나미엔경, 제주특별자치도 개발공사, (주)엘케이개발, 코리아엔지니어링



## 유리탄산 수질모델링을 이용한 현장 분석 방안

이병선<sup>1</sup>, 신현정<sup>1</sup>, 서상진<sup>1</sup>, 정연우<sup>2</sup>, 이규선<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원 byungun94@kafrc.or.kr

<sup>2</sup>한국농어촌공사 중북지역본부

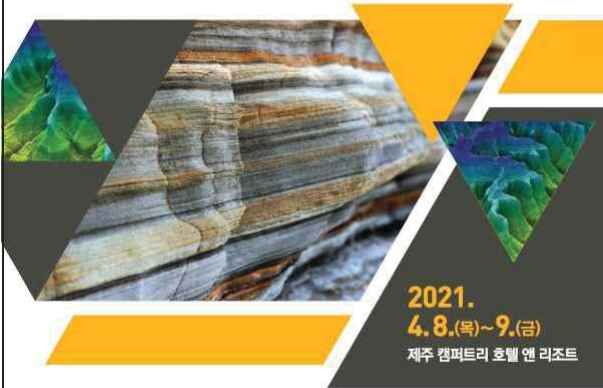
유리탄산은 물 속에 용해된 CO<sub>2</sub>(aq) 및 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>의 합을 의미한다. 서상진 CO<sub>2</sub>(aq)가 대부분으로, 유리탄산의 농도를 정확하게 분석하기 위해서는 신속한 현장 측정으로 오차를 최소화해야 한다. 유리탄산 농도는 핵의 밀도와 골의 탄산염 밀도의 모델링을 통해 분석할 수 있다. 핵의 밀적 적용 시 가장 중요한 것은 현장 pH 측정, 중탄산(HCO<sub>3</sub>) 농도 분석이다. 핵의 밀적 적용 모델링 결과, 이산화탄소 분압(Pco<sub>2</sub>)이 2 atm (즉, 30 psi)으로 일정할 때, 수온 10℃에서 유리탄산의 용해도는 약 4.723 mg/L에 비해, 20℃에서는 3.446 mg/L로 감소되어, 현장 수온 측정의 정밀함을 요구한다. 탄산염 밀적의 모델링 결과, 중탄산(HCO<sub>3</sub>) 농도가 100 mg/L로 일정할 때, pH 4.5에서 유리탄산 용해도는 약 6,000 mg/L에 비해, pH 5.5에서 600 mg/L로 급격히 감소되어, 정확한 현장 pH 측정이 요구된다. 또한 pH가 5.0으로 일정할 때, 중탄산(HCO<sub>3</sub>) 농도 100 mg/L에서 유리탄산 용해도는 약 1,897 mg/L에 비해, 중탄산(HCO<sub>3</sub>) 농도 150 mg/L에서는 2,846 mg/L로 증가하여, 현장 중탄산 분석의 신속성과 정확성을 요구한다. 종합하면, 지하수 중 유리탄산은 낮은 수온, 높은 이산화탄소 분압(Pco<sub>2</sub>), 낮은 중탄산(HCO<sub>3</sub>) 농도에서 가장 많이 산출되는데, 현실한 4개 항목은 모두 현장 분석의 장벽으로서, 숙련된 연구자의 정교한 현장 측정기술이 필요하다. 2017년에 보고된 조정광천수 권역 방산지에 대한 검토 결과, 역류된 탄산수 발생 관정의 수온(17-19℃)이 일반 관정(17-23℃)보다 약 2-3℃ 낮게 측정되었으며, pH의 경우 탄산 발생 관정(4.9-5.5)이 일반 관정(6.0-7.5)보다 약 1-2 낮게 측정되었다. 그리고, 탄산 발생 관정의 중탄산 농도(150-1,200 μS/cm)가 일반 관정(30-40 μS/cm 내외)보다 높게 측정되어 현실한 내용을 뒷받침 하였다. 다만, 전기전도도(EC)는 탄산 발생 관정과 일반 관정의 차이가 없는 것으로 분석되었다.

### 사 사

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업부산물들을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 기술 개발」 과제에 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

# 2021 (사)대한지질공학회 정기총회 및 춘계학술대회

THE KOREAN SOCIETY OF ENGINEERING GEOLOGY



2021.  
4.8.(목)~9.(금)  
제주 캠퍼트리 호텔 앤 리조트

주최 주관 (사)대한지질공학회

후 원 제주컨벤션뷰로, FIT시행연구원, 국가활성인증연구원, (주)동해이엔지, (주)산하이엔씨, 씨엔에치아이엔씨㈜, (주)에스이엔지, (주)인텔리시오, (주)시오그린21, (주)시오에이엔지, 코팅(주), (주)원세치반연지나미엔경, 제주특별자치도 개발공사, (주)엘케이개발, 코리아엔지니어링



## 창원시 창진지구 지하수자원 관리지역 분석

서상진<sup>1</sup>, 추연우<sup>2</sup>, 백미경<sup>1</sup>, 이병선<sup>1</sup>, 이규선<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원 sangjin221@kafrc.or.kr

<sup>2</sup>한국농어촌공사 경남지역본부

이 연구는 창원시 소재 농업농수구역에 농업용 지하수의 이용현황 및 수질조사용 심정기 수위조사용, 수질관리 필요지역을 선정하고 향후 농업농수구역 지하수의 적정한 보전 관리 대책수립 및 지속가능한 이용을 도모하기 위해 수행되었다. 연구지역은 창원시 구산면, 진동면, 진북면, 진전면 4개 면을 포함하는 용수구역(창진지구)이다. 창진지구의 지하수개발 현황은 행정지구에서 총 1,520공 중 생활용이 961공(약 64%), 농업용이 514공(약 34%), 공업용이 42공(약 2%)로 정밀조사 연구필도가 가장 낮은 지역이나 장의상수도 보급률이 상대적으로 낮아 농업용수와 생활용수의 비중이 비교적 큰 편이다. 창진지구의 지하수 이용량은 2,759천m<sup>3</sup>/년, 개발가능량은 34,195천m<sup>3</sup>으로 분석되었고 개발가능량 대비 이용량은 8.1%로 지하수조사연보에 따른 전국평균(31.8%)보다 낮은 값을 보였다. 개발가능량 대비 이용량, 단위면적당 이용량 및 강수량 3가지 지표를 적용하여 수량관리 필요지역 선정결과, 진동면에 사동리, 진전면에 양촌리 등 수량관리 필요지역으로 선정되었다. 지하수 수질 분석을 위하여 수질요청이 취약하다고 판단되는 지역의 농업용 관정 41점에 대한 생활용수(20항목) 수질검사 결과, 질산성질소와 염소이온을 초과한 2공을 제외하고는 적합으로 판정되었다. 질산성질소 평균, 요염화물 성분, 염소이온 수질기준 10mg/L를 초과하는 공이 4공, 농업용수 수질기준 20mg/L를 초과하는 공이 1공으로 확인되었고, 질소농도 분석을 통하여 질소 오염원 대부분 농경활동에 의한 수오염원으로 확인 되었다. 질산성질소 평균, 요염화물 성분, 염소이온 및 단위면적당 요염부하량 4가지 지표를 적용한 수질관리 필요지역 분석결과 진동면에 진동리, 진전면에 이평리를 수질관리 필요지역으로 선정하였다. 수량관리 필요지역의 지하수 위수량 조경 및 감시가 필요하여 수질관리 필요지역은 수질관리 등 대책마련이 필요하다.

### 사 사

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업부산물들을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 기술 개발」 과제에 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

ISSN 2289-0378

## 2021 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 및 정기총회

2021. 4. 22(목) - 23(금) | The-K호텔 경주

Proceedings

**주최** (사)한국지하수토양환경학회  
**후원** 환경부 | 한국과학기술단체총연합회 | 대일이앤씨 | 동명엔터프라이즈 | 드림바이오스  
서울대학교 농생명과학공학기술원 | 신대양 | 씨엔에치아이엔씨 | 이룸다온환경건설  
에나스환경건설 | 에이치플러스에코 | 에코필 | 오디컴 | 자연과학 | 지앤에스엔지니어링  
지오그린 | 도양오염조사기관협의회 | 티에스케이로퍼레이션 | 포스코건설  
한국수자원공사 | 한국지하수지열협회 | 한국철도공사 | 한국토양환경시험연구원  
한국토양지하수보전협회 | 한국환경공단 | 한국환경복원기술원  
한국환경산업연구원 | 한서엔지니어링 | 현대건설  
환경기술정책연구원

Korean Society  
Soil and  
Groundwater  
Environment

KoSSGE  
한국지하수토양환경학회

KoSSGE 춘계학술대회  
2021년 4월 22일-23일 The-K호텔 경주

### 물 부족 시설원예지역 수질분석 기반 지열장개별 설치 타당성 연구 Feasibility study for equipping LID facilities to greenhouse facilities zones experiencing a lack of groundwater resources from water quality data

이병진\*, 서상진, 서효경, 이규상  
Byung Sun Lee, Sangjin Seo, Hyokyoung Seo, Gyu Sang Lee  
한국농어촌공사 농어촌연구원  
\*e-mail : byungsun94@ekr.or.kr

**요약문**  
우리나라의 시설원예농업 규모는 전체 농지면적의 약 5%에 해당하지만, 농업생산성은 전체 농업의 약 11%에 해당하여 사시사철 고소득 작물 생산을 위한 주요 역할을 한다. 그러나 대부분의 시설원예단지에는 겨울철 수막체배를 위해 막대한 양의 지하수를 양수 이용하여 지하수 고갈 우려가 있다. 또한 양수할 확보를 위해 작물 농가마다 신규관정 개발을 경제적으로 시도하여 관정 개발 심도는 깊어지는 실정이다. 이 연구에서는 경장남도 OO지구에 위치한 시설원예단지를 대상으로 원부관정과 일반관정의 수질 비교 분석으로 농어촌형 지열장 개발 시설의 설치 타당성을 분석하였다. OO지구는 내륙적인 말기생산단지로서 OO하천 주변 비닐하우스에서는 하천수의 유도할양 등으로 인해 지하수 수량부족 문제가 해소되지만, 하천에서 멀어질수록 심부에 부존된 지하수를 양수하지 않는 한 대일 약 6,000 m<sup>3</sup>/d의 지하수 수량 부족이 발생한다. 하천 주변 원부지하수 수질은 약알칼리성 하천수의 유도할양으로 상대적으로 pH가 높고, 총질층의 영향으로 전기전도도가 상대적으로 높으며, 작물재배에 사용된 지하수가 많은 심도에서 순환되어 재사용됨에 따라 지하수 수온이 높고, 먹은물 수질기준 이상의 질산성질소 모델이 발생한다. 질소농도원소 분석결과 양액제초에 사용되는 질산, 토양개량을 위한 질소비료 영향이 큰 것으로 분석되었다. 반면, 내륙의 일반지하수는 중성범위의 pH, 낮은 전기전도도, 낮은 수온 및 먹은물 수질기준 이하 질산성질소 농도를 보여준다. 이에 따라, OO지구 원부대수층에 향해 내지 비프기원 질소의 대수층 유입을 사전에 차단할 수 있는 농어촌형 지열장개별 시설을 설치하여 원부대수층의 지하수 수질오염을 방지하고 일반대수층으로 유입을 사전에 차단하여, OO지구 지하수 부족 추가 확보 및 수질 개선을 동시에 확보할 필요가 있다.

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업부산물용 이용한 농어촌형 지열장개별(LID) 기술 개발」 과제에 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

**Key words** : 시설원예농업, 수막체배, 원부지하수, 지열장개별

**저자정보**  
주최자: 이병진, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 과장  
공저자: 서상진, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 대리  
서효경, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 대리  
이규상, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 부장  
교신저자: 이병진, 한국농어촌공사, 과장

- 147 -

ISSN 2289-0378

## 2021 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 및 정기총회

2021. 4. 22(목) - 23(금) | The-K호텔 경주

Proceedings

**주최** (사)한국지하수토양환경학회  
**후원** 환경부 | 한국과학기술단체총연합회 | 대일이앤씨 | 동명엔터프라이즈 | 드림바이오스  
서울대학교 농생명과학공학기술원 | 신대양 | 씨엔에치아이엔씨 | 이룸다온환경건설  
에나스환경건설 | 에이치플러스에코 | 에코필 | 오디컴 | 자연과학 | 지앤에스엔지니어링  
지오그린 | 도양오염조사기관협의회 | 티에스케이로퍼레이션 | 포스코건설  
한국수자원공사 | 한국지하수지열협회 | 한국철도공사 | 한국토양환경시험연구원  
한국토양지하수보전협회 | 한국환경공단 | 한국환경복원기술원  
한국환경산업연구원 | 한서엔지니어링 | 현대건설  
환경기술정책연구원

Korean Society  
Soil and  
Groundwater  
Environment

KoSSGE  
한국지하수토양환경학회

KoSSGE 춘계학술대회  
2021년 4월 22일-23일 The-K호텔 경주

### 울산광역시 울청 농어촌용수구역 지하수자원 보전·관리 방안 연구 Optimal management on rural groundwater resources of Ulsung agricultural watershed, Ulsan metropolitan city

신상진\*, 추연우<sup>2</sup>, 백미경<sup>2</sup>, 이병진<sup>1</sup>, 이규상<sup>1</sup>  
Sangjin Seo<sup>1</sup>, Yeonwoo Choo<sup>2</sup>, Mikyung Bae<sup>2</sup>, Byung Sun Lee<sup>1</sup>, Gyu Sang Lee<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원  
<sup>2</sup>한국농어촌공사 경남지역본부  
\*e-mail : sangjin2218@ekr.or.kr

**요약문**  
이 연구는 울산광역시 울주군 소계 농어촌용수구역에 농업용 지하수의 이용현황 및 수질오염을 실시하여 지하수 수량, 수질관리 필요지역을 선정하고 향후 농촌지하수 자원의 적절한 보전·관리 대책 수립 및 지속가능한 이용을 도모하기 위해 수행되었다. 연구지역은 울산광역시 울주군 온천읍, 울양읍, 장항읍, 서천면, 울주면 5개 읍·면을 포함하는 용수구역(울청지구)이다. 울청지구의 지하수개별 현황은 행정구역에서 총 1,002구 중 생활용이 1,111구(약 88%), 농업용이 741구(약 30%), 공업용이 601구(약 20%)로 생활용, 농업용이 높은 비율(약 97%)을 차지한다. 지하수 함양량은 50,009천m<sup>3</sup>/년, 지하수 이용량은 5,521천m<sup>3</sup>/년, 개발가능량은 23,292m<sup>3</sup>/년으로 분석되었고 개발가능량 대비 이용량은 16.3%로 지하수조사연도에 따른 질적변동(0.26%)보다 낮은 값을 보인다. 수질관리 필요지역 분석결과, 편집면도와 단원면적당 이용량이 높은 울주면과 단원면 등 4개 면을 수질관리 필요지역으로 선정하였다. 지하수 수질 분석을 위한 146점의 질산성질소 시료 분석결과, 먹은물 수질기준 10mg/L를 초과하는 곳이 7곳, 농업용수 수질기준 20mg/L를 초과하는 곳이 3곳으로 확인되었고 인근·이거된 측사 시설을 기준으로 단위면적당 오염부하량은 40.5kg/ha·m<sup>2</sup>으로 나타났다. 지하수 오염위험성 평가를 위한 DRASTIC INDEX 평가 결과 1344점, 연구 지역 및 도시지역 등 인재를 고려한 오염원 분포도는 전체 평균 17.2개소/km<sup>2</sup>으로 나타났다. 수질관리 필요지역 분석결과 수질에 악영향을 미친다. 장항읍에 삼거리, 서천면에 위양리를 수질관리 필요지역으로 선정하였다. 수양면과 서천면은 지하수 취수용 조경 및 감시가 필요하며 수질관리 필요지역은 오염원 관리 등 대책 마련이 필요하다.

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업부산물용 이용한 농어촌형 지열장개별(LID) 기술 개발」 과제에 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

**Key words** : 개발가능량 대비 이용량, 단위면적당 오염부하량, DRASTIC INDEX, 오염원 분포도

**저자정보**  
주최자: 서상진, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 대리  
공저자: 추연우, 한국농어촌공사 경남지역본부, 주임  
백미경, 한국농어촌공사 경남지역본부, 주임  
이병진, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 과장  
이규상, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 부장  
교신저자: 서상진, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 대리

- 253 -









**24<sup>th</sup> International Congress on Irrigation and Drainage**  
 3-10 October 2022, Adelaide, Australia

**Innovation and Research in Agriculture Water Management to Achieve Sustainable Development Goals**  
 Innovation et Recherche Dans la Gestion de l'eau Agricole pour Atteindre les Objectifs de Développement Durable

Transactions  
 Question 62 and 63, Special Session

INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE  
 COMMISSION INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE

ICID-CIID

**AN ADVANCED TOOL TO DETERMINE AGRICULTURE GROUNDWATER USAGE FOR IRRIGATION TO GREENHOUSE FACILITIES**

UN OUTIL AVANCÉ POUR DÉTERMINER L'UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES AGRICOLES POUR L'IRRIGATION DES SERRES

Chan-Duck Jeong<sup>1</sup>, Sung-Ho Song<sup>2</sup>, Sang-Gee Seo<sup>3</sup>,  
 Byung Sun Lee<sup>1</sup>, and Gyu Sang Lee<sup>3</sup>

**ABSTRACT**

With the development of agricultural technology, it is possible to cultivate crops in winter at the greenhouse facility cultivation complex, and as the crop cultivation period has increased, the use of groundwater has increased. When calculating the amount of groundwater used, the utilization period should be increased according to the cultivation period. As a result, the groundwater use calculated by the conventional method is applied to the annual use period of 270 days for the whole action and 180 days for the answer action, so the value less than the actual groundwater use for the year is inevitably calculated. Therefore, it is necessary to estimate the irrigation water demand for each crop in consideration of the cultivation period when the groundwater use is calculated in the facility cultivation complex that grows the four-season crops. The purpose of this study was to calculate monthly cultivation crops and cultivation periods through Gwangju Meteorological Agency's climate data in Korea, land cover map, field survey, and residents' survey to estimate the irrigation water demand by crops in the area around Yeongsan River where facility cultivation complex is concentrated. Based on the results of the calculation of crop evaporation (irrigation water demand) using the crop coefficients presented by the Rural Development Administration and FAO, it was analysed that irrigation water used is 2,114×1000 m<sup>3</sup>/year for rice, 3,353×1,000 m<sup>3</sup>/year for field crops, and 6,649×1,000 m<sup>3</sup>/year for water dropwort. As a result, water dropwort uses irrigation water twice more than field crops. In addition, except for rice, which mainly uses surface water, the difference in usage amount occurred more than twice as compared to the groundwater use calculated by the existing groundwater use method. Therefore, if the facility cultivation complex that grows four seasons of crops water demand calculation method is applied to the irrigation water required by the crops rather than the conventional groundwater usage calculation method, it will not only calculate the exact amount of water but also establish proper water supply measures and facility maintenance.

**Keywords :** Groundwater usage, Irrigation; Greenhouse facilities.

**RESUME**

Avec le développement de la technologie agricole, il est possible de produire des cultures en hiver dans le complexe de culture en serres, et à mesure que la période de culture a augmenté, l'utilisation des eaux souterraines a augmenté. Lors du calcul de la quantité d'eau souterraine utilisée, la période d'utilisation doit être augmentée en fonction de la période de culture. En conséquence, l'utilisation des eaux souterraines calculée par la méthode conventionnelle est appliquée à la période d'utilisation annuelle de 270 jours pour l'ensemble de l'action et de 180 jours pour l'action de réponse, de sorte que la valeur inférieure à l'utilisation réelle des

<sup>1</sup> Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation (KRC)  
<sup>2</sup> Jeju Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation (KRC)  
<sup>3</sup> \*Corresponding author: duckiangel@ekr.or.kr

**Applying mass-balance approaches for <sup>14</sup>C dating of groundwaters in Tra Vinh Province, Southern Vietnam**

Thanh Huy Phung<sup>1</sup>, Quang Khai Ha<sup>2,3</sup>, Nam Long Phan<sup>4</sup>, Jinwon Lee<sup>1</sup>, Mai Nhu Hoang<sup>1</sup>, Kangjoo Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Engineering, Kunsan Nation University, South Korea

<sup>2</sup> Faculty of Environment and Natural Resources, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Viet Nam

<sup>3</sup> Vietnam National University Ho Chi Minh City, Thu Duc District, Ho Chi Minh City, Viet Nam

<sup>4</sup> Faculty of Geology and Mineral, Ho Chi Minh University of Natural Resources and Environment, Ho Chi Minh City, Vietnam

\*Email: kangjoo@kunsan.ac.kr

**Abstract:**

Groundwater age is crucial information for understanding the groundwater system. Among various environmental tracers, <sup>14</sup>C has been widely used to date old groundwaters with ages up to 40,000 years because of its relatively long half-life (5,730 ± 40 years). In Southern Vietnam, several studies have attempted to estimate groundwater ages using the <sup>14</sup>C dating method. However, those are based on 'single-sample-based models (SSB models)' which only consider processes affecting <sup>14</sup>C and δ<sup>13</sup>C values, such as dissolution of soil gas and carbonate minerals in the unsaturated zone, carbon isotopic exchange between dissolved inorganic carbon (DIC) and soil gas and between DIC and carbonates after the recharge. However, carbon isotope of groundwater can also be affected by many other geochemical processes.

In this study, we geochemically and isotopically investigated 16 groundwater samples (80 to 352 m in depth) collected from unconsolidated sedimentary aquifers in Tra Vinh Province, Southern Vietnam. Mineral weathering (silicates and carbonates), carbon isotopic exchange between DIC and carbonates, cation exchange, oxidation of organic matter, and mixing between fresh water and seawater were identified as the major processes controlling the carbon isotope composition. We applied a mass balance technique to correct for the effects of those processes by utilizing NETPATH (Plummer et al., 1994).

Our mass balance results show groundwater ages ranging from 7,000 to 22,500 years, which are generally younger than those obtained from SSB models by about 10% on average. The difference may explain the uncertainties associated with the geochemical processes affecting <sup>14</sup>C and δ<sup>13</sup>C values after the recharge. In any case, the dating results reflect that the groundwaters in Southern Vietnam are not a renewable water source. Special management strategies are required to ensure sustainable use.

This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through 'Development of a low impact development facility customized in rural area using agricultural byproducts' Program (or Project), funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (grant number 320052-3)

**Keywords:** groundwater age, <sup>14</sup>C dating, Southern Vietnam, NETPATH



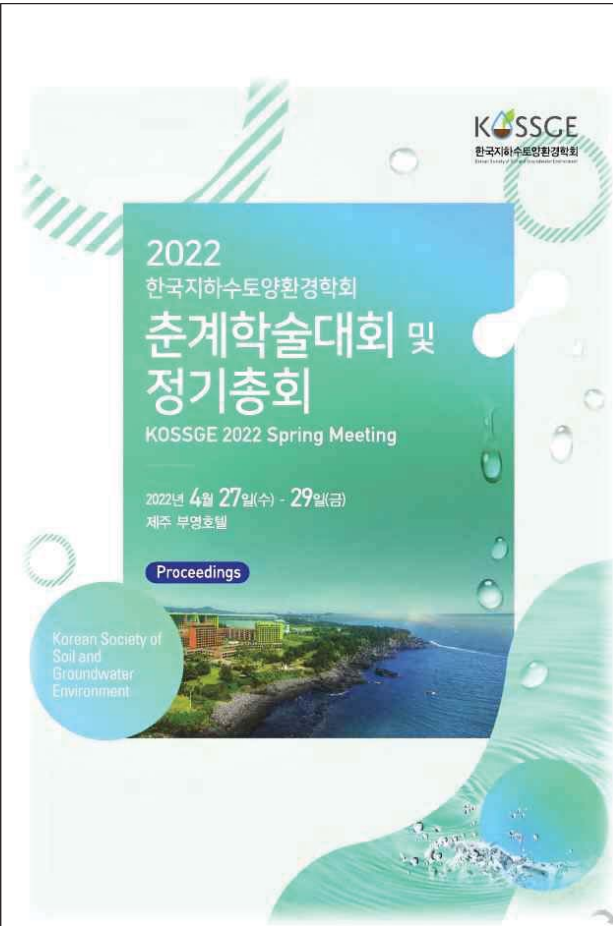












KoSSGE 춘계학술대회  
2022년 04월 27일-29일 제주 부영호텔

**청정 지하수 함양을 위한 농이촌형 저영양개발 시설 개발**  
Development of an agricultural LID(Low Impact Development) system for pure groundwater

서상진<sup>1</sup>, 이병선<sup>1</sup>, 이규상<sup>1</sup>, 김강주<sup>2</sup>, 손봉호<sup>3</sup>  
Seo Sangjin<sup>1</sup>, Lee Byungseon<sup>1</sup>, Lee Gyu-sang<sup>1</sup>, Kim Kangju<sup>2</sup>, Sohn Bongho<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>한국농어촌공사, <sup>2</sup>군산대학교, <sup>3</sup>리얼에스앤지이엔지  
e-mail : sangjin2218@ekr.or.kr

**요 약 문**

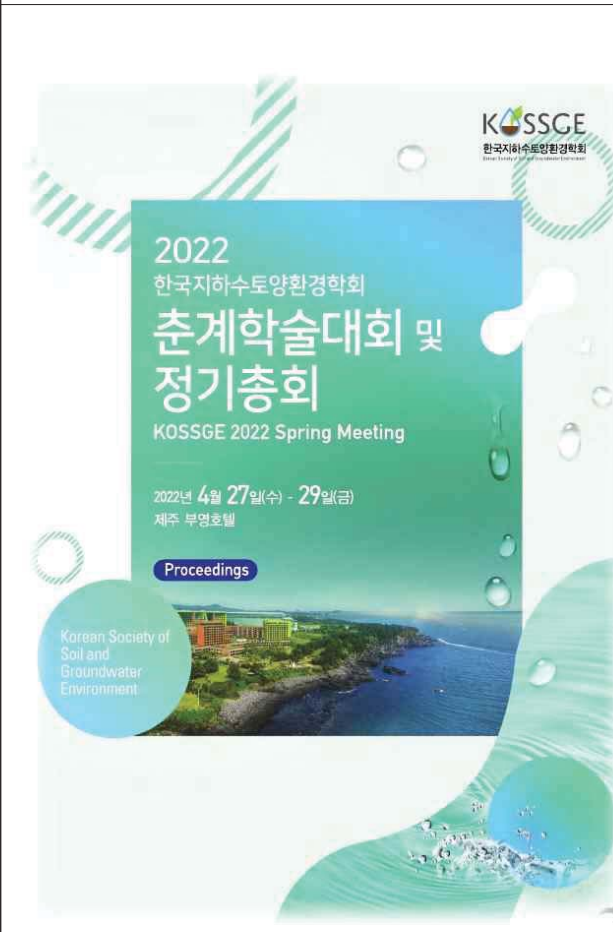
경상남도 하동군에 위치한 시골원예단지에서 발생하는 상습적 저농도 염분농도 문제를 해결하고자 농이촌형 저영양개발(LID) 시설을 개발하였다. 하천 인근에 위치한 비닐하우스에서는 하천수의 유입함양으로 인해 지하수 수질부족 문제가 발생하지만 하천에서 멀리 떨어진 지하수 수질 부족 문제가 발생한다. 특히 겨울철 수확물 수확 시 무분별한 지하수 이용으로 지하수의 과잉을 초래하고 이에 따라 하우스 주변들이 더 깊은 심도에 경제적으로 견딜 수 있는 지하수를 이용함으로써 겨울철 상시 물 부족 현상이 나타나고 있다. 뿐만 아니라 양액제조에 사용되는 질산, 도량제염을 위한 질소 비료의 영향으로 질산성질소 오염에 따른 수질 문제가 발생하고 있다. 농이촌형 저영양개발(LID) 시설은 겨울철 수확물 수확 후 비닐하우스 등을 주입하는 자연형 시설로 지하수의 수위 상승효과를 도모함과 동시에 투수성이 높은 모래사상, 석회, 우드칩을 사용하여 수질 개선 효과를 실험 할 예정이며, 시설 내부 여러물질의 탈질작용으로 청정 지하수를 인공함양 시설 예정이다. 지하수 인공함양 시 지하수의 수위 증진을 위하여 여과부, 함양부에 중성 관측관을 설치하였고, 시설물 인근으로 중성 관측관을 설치하여 인공함양 시 수위 및 수질을 모니터링 할 예정이다. 농이촌형 저영양개발(LID) 시설의 운영에 따른 인공함양 및 질산성 질소 저감 평가도 하동군 뿐만 아니라 전국에 염분농도 문제를 겪고 있는 시골원예단지에 해당 기술을 적용하여 염분농도 문제를 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 「농업부산물들을 이용한 농이촌형 저영양개발(LID) 기술 개발」 과제의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

**Key words :** 농이촌형 저영양개발(LID) 시설, 인공함양, 질산성질소, 관측관

**저자정보**

주최자: 서상진, 한국농어촌공사, 대리  
공저자: 이병선, 한국농어촌공사, 과장  
이규상, 한국농어촌공사, 부장  
김강주, 군산대학교, 교수  
손봉호, 리얼에스앤지이엔지, 연구소장  
교신저자: 서상진, 한국농어촌공사, 대리



KoSSGE 춘계학술대회  
2022년 04월 27일-29일 제주 부영호텔

**모래여과 하천수의 농업생산 기여도 평가 연구**  
Contribution of sand-filtered stream water to agricultural productivity

이병선<sup>1</sup>, 서상진<sup>1</sup>, 이규상<sup>1</sup>, 송성호<sup>2</sup>, 강정호<sup>2</sup>, 이정호<sup>2</sup>, 김현도<sup>2</sup>  
Byung Sun Lee<sup>1</sup>, Sangjin Seo<sup>1</sup>, Gyu Sang Lee<sup>1</sup>, Sung-Ho Song<sup>2</sup>, Jumsong Kang<sup>2</sup>,  
Jeongeun Lee<sup>2</sup>, Hyundo Kim<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>한국농어촌공사 농이촌연구원, <sup>2</sup>부산대학교 원예생명과학과  
e-mail : byungsun94@ekr.or.kr

**요 약 문**

이 연구는 모래여과 하천수의 공급에 의한 재배작물 생산량의 변화, 농기소득 변화, 그리고 영농면적 증가 여부를 경제적으로 분석하고자 수행되었다. 농업경제 분석 결과, 모래여과 하천수 공급 후 공급수량이 풍부해지고 양분과 함께 따라 기존에 재배면적이 없던 밭기의 재배면적이 크게 증가하였다. 단위면적당 생산량은 대부분의 작물들이 유사하거나 약간 감소한 반면, 파프리카와 딸기 등 고소득 작물의 생산량은 증가하는 경향을 보였다. 단위면적당 작물별 농기소득은 매년 감소하는 경향이 없으나 밭기 작물에서는 증가하였다. 이는 모래여과 하천수가 기존 재배면적에 비해 풍부한 수량을 공급함에 따라, 물은 밭이 소비하는 고소득 작물인 딸기도 전량되어 농기소득을 증대시킨 원인으로 분석된다. 주면에 대한 설문조사 결과, 노동력 절감 효과와 노동력 부담이 작아 분석, 유수율 분석, 기질질 균형에 따른 시설관리비 절감 및 기질질 시설 수명연장을 위한 콘크리트, 파스텔 염분도 기질 양수량이 아닌 환수관(장)에 직접 설치된 배의 생산량, 직렬을 이용하는 밭면, 관수여과, 살해술을 이용한 수질개선, 수변공간 및 여과공간에 대한 확보 및 관개저장용역, 그리고 습도와 온도 조건에 대한 대응 등이 추가로 연구될 수 있다면, 더욱 풍부한 해석이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응 기술개발사업 「농업부산물들을 이용한 농이촌형 저영양개발(LID) 시설 개발」 과제의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

**Key words :** 모래여과, 하천수, 고소득 작물, 농기 소득

**저자정보**

주최자: 이병선, 한국농어촌공사 농이촌연구원, 과장  
공저자: 서상진, 한국농어촌공사 농이촌연구원, 대리  
이규상, 한국농어촌공사 농이촌연구원, 부장  
송성호, 부산대학교 원예생명과학과, 교수  
강정호, 부산대학교 원예생명과학과, 교수  
이정호, 부산대학교 원예생명과학과, 연구원  
김현도, 부산대학교 원예생명과학과, 연구원  
교신저자: 이병선, 한국농어촌공사 농이촌연구원, 과장



KOSSGE 춘계학술대회

2022년 04월 27일 - 29일 제주 부영호텔

**소나무집, 빛나뭇잎, 벚꽃 분해에 따른 EEMs 분석결과와 수질변화의 상관성**  
**Correlation between EEM results and water chemistry change during the decomposition of woodchips, cherry leaves, and rice straws**

이진원<sup>1</sup>, Phung Thanh Huy<sup>1</sup>, 고경석<sup>2</sup>, 이병선<sup>3</sup>, 이규상<sup>4</sup>, 김강주<sup>5</sup>  
 Lee Jinwon<sup>1</sup>, Phung Thanh Huy<sup>1</sup>, Ko Kyungseok<sup>2</sup>, Lee Byungseon<sup>3</sup>, Lee Gyu-sang<sup>4</sup>, Kim Kangjoon<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>군산대학교, <sup>2</sup>한국지하수토양환경학회, <sup>3</sup>한국농어촌공사  
 \*e-mail : kangjoo@kunsan.ac.kr

**요약문**

본 연구에서는 유기물질을 이용하여 질산성질소를 탈질시키는 과정에 따른 유기물의 상질변화를 수질 변화와 관련하여 관찰하였다. 유기물 재료로는 소나무집, 빛나뭇잎, 벚꽃을 이용하였으며, 각 반응조에 이들을 50 g 넣고 KNO<sub>3</sub> 용액 1.5 L(DO mg-N/L)의 반응시켜 시간에 따른 수질 변화를 관찰하였다. 수질분석을 위하여 60 mL의 시료를 채취하였으며, pH, Electrical conductivity(EC), Bv, Dissolved oxygen(DO), alkalinity, 주요 음이온(Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 주요 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), Dissolved Organic Carbon(DOC), Dissolved inorganic Carbon(DIC), pCO<sub>2</sub> 등의 항목에 대하여 분석을 수행하였다. 또한, 용출된 유기물의 종류를 관찰하기 위하여 용출유기물의 질량특성을 이용하는 질량 3차원 Excitation/Emission mapping(3D-EEMs) 분석을 수행하였다.

연구결과, 탈질속도는 NO<sub>3</sub>-N이 99% 제거되는 데 걸린 시간을 기준으로 벚꽃(0.25 hr) > 빛나뭇잎(72 hr) > 소나무집(216 hr) 순으로 빠르게 관찰되었다. 탈질속도는 pH와 밀접한 연관이 있으며, 적합한 pH 조건은 7.5~8.5로 알려져 있다. 벚꽃의 경우 탈질리(%)급속의 용출이 많아 반응시간 0.25~10 hr까지 상대적으로 높은 pH(4.0~6.3)을 유지하였기 때문에 빠른 탈질속도를 보였다. 반면, 소나무집과 빛나뭇잎의 경우에는 반응초반(0~10 hr)부터 0.2 이하의 낮은 pH 값을 보였고, 10시간 이후에도 pH가 4.4~6.0으로 유지되어 탈질에 적합한 pH 조건보다는 낮게 관찰되었다. 특히, 빛나뭇잎의 경우 반응 초기에 매우 높은 DOC 함유농도(236 mg/L)를 보인 후 급격히 감소되는 양상을 보였으며, DIC의 농도도 반응초기(0.25~16 hr)에 벚꽃이나 소나무집 보다 높게 관찰되었다. 즉, 초반에 발생한 유기물 분해가 있었으나 이로 인해 발생한 CO<sub>2</sub>가 물의 pH를 지나치게 낮춤으로써 탈질에는 표지적이지 못하였던 것이다. 질량 EEM 분석을 통해 난분해성 물질인 편백계(halvic-like)와 휴믹계(humic-like), 상대적으로 미생물의 활용도가 높은 것으로 알려진 단백질계인 트립토판계(tryptophan-like), 티로신계(tyrosine-like)를 관찰 하였다. 이들의 농도변화를 DIC, DOC의 변화양상과 비교한 결과, 반응초기의 유기물 분해는 대부분 비질량성 유기물에 의한 것으로 확인되었다.

본 실험의 결과를 종합할 때, 탈질반응은 질량성유기물의 종류나 분해된 유기물의 양보다는 탈질에 적합한 pH 조건이 조성되는 것과 더 관련이 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 EEM분석결과 자체는 용출된 유기물의 종류이나 분해된 유기물의 종류, 그리고 반응기간 중에 일어난 화학반응에 대한 정보를 제공하지 못하는 한계가 있으나, DOC, DEK, 주요 양이온, 주요 음이온 등을 포함한 지구화학적 분석을 통하여 이를 극복할 수 있었다.

**Key words** : 유기물, 탈질, DOC, 질량분석, 용량분석

이 연구는 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응기술개발 사업 '농업부산물용 이용된 농어촌형 저장장제형(LID) 기술 개발(과제번호 320052-3)' 과제의 연구에 지원에 의해 이루어졌습니다.



□ 보고서 원문

보고서 원문 : 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 현장운영지침서 ((주)지엔에스엔지니어링)



□ 특허출원 2건

특허출원 : 지하수함양을 위한 모래여과를 포함하는 상향류식 저영향개발(LID) 정화시스템 (10-2021-0047525)

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2021.04.13  
 특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(EP21025)  
 출원번호 10-2021-0047525 (접수번호 1-1-2021-0427029-89)  
 (DAS접근코드C1B1)  
 출원인명칭 주식회사 지엔에스엔지니어링(1-2013-047056-1) 외 1명  
 대리인성명 엄명용(9-2007-000121-0)  
 발명자성명 손봉호 황기섭 최희경 이병선 서상진 이규상  
 발명의명칭 지하수함양을 위한 모래여과를 포함하는 상향류식 저영향개발(LID) 정화시스템

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 이용하여 특허로 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다.  
 2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 은행 또는 우체국에 납부하여야 합니다.  
 ※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호  
 3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
 4. 기타 심사 절차(제도)에 관한 사항은 특허청 홈페이지를 참고하시거나 특허고객상담센터(☎ 1544-8080)에 문의하여 주시기 바랍니다.  
 ※ 심사제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-지식재산제도

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

- 【과제고유번호】 1545022110
- 【과제번호】 320052031SB010
- 【부처명】 농림축산식품부
- 【과제관리(전문)기관명】 농림식품기술기획평가원
- 【연구사업명】 농업기반및재해대응기술개발(R&D)
- 【연구과제명】 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 개발
- 【기여율】 1/1
- 【과제수행기관명】 한국농어촌공사 농어촌연구원
- 【연구기간】 2020.04.29 ~ 2022.12.31
- 【취지】 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 엄명용 (서명 또는 인)

관인생략

## 출원번호통지서

출원일자 2021.03.12  
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(CDP20210015)  
출원번호 10-2021-0032462 (접수번호 1-1-2021-0292410-49)  
(DAS접근코드35FC)  
출원인명칭 군산대학교산학협력단(2-2004-004440-9) 외 2명  
대리인성명 특허법인 천지(9-2008-100061-9)  
발명자성명 김강주 이진원 풍탄휘 이병선 김현중  
발명의명칭 탈질 효율이 향상된 물 침투 시설

## 특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 이용하여 특허로 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다.  
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 은행 또는 우체국에 납부하여야 합니다.  
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호  
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 (특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서)를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
4. 기타 심사 절차(제도)에 관한 사항은 특허청 홈페이지를 참고하시거나 특허고객상담센터(☎ 1544-8080)에 문의하여 주시기 바랍니다.  
※ 심사제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-지식재산제도>

### 【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 1545022110  
【과제번호】 320052-3  
【부처명】 농림축산식품부  
【과제관리(전문)기관명】 농림식품기술기획평가원  
【연구사업명】 농업기반 및 재해대응기술개발사업  
【연구과제명】 농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 시설 개발  
【기여율】 5/10  
【과제수행기관명】 한국농어촌공사 농어촌연구원  
【연구기간】 2020.04.29 ~ 2022.12.31

제출 일자 : 2022-12-27 10-2021-0032462

**【서지사항】**

- |                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| <b>【서류명】</b>      | 보정서             |
| <b>【보정구분】</b>     | 명세서등 보정         |
| <b>【제출처】</b>      | 특허청장            |
| <b>【제출인】</b>      |                 |
| <b>【명칭】</b>       | 군산대학교산학협력단      |
| <b>【특허고객번호】</b>   | 2-2004-004440-9 |
| <b>【사건과의 관계】</b>  | 출원인             |
| <b>【제출인】</b>      |                 |
| <b>【명칭】</b>       | 한국농어촌공사         |
| <b>【특허고객번호】</b>   | 3-2000-003153-9 |
| <b>【사건과의 관계】</b>  | 출원인             |
| <b>【제출인】</b>      |                 |
| <b>【명칭】</b>       | 재단법인 환경기술원      |
| <b>【특허고객번호】</b>   | 1-2017-059965-0 |
| <b>【사건과의 관계】</b>  | 출원인             |
| <b>【대리인】</b>      |                 |
| <b>【명칭】</b>       | 특허법인 천지         |
| <b>【대리인번호】</b>    | 9-2008-100061-9 |
| <b>【지정된변리사】</b>   | 박형달             |
| <b>【포괄위임등록번호】</b> | 2009-014567-0   |
| <b>【사건의 표시】</b>   |                 |



□ 저작권 1건

저작권 : 농어촌형 저영향개발(LID) 시설 현장운영지침서 (C-2023-009134)



## □ 시제품 제작 2건

### 시제품 1 : 농어촌형 저영향개발 시설 (분지형)

#### ○ 기술의 정의

- 본 기술은 대부분 소각되거나 퇴비로 사용되는 농업부산물을 친환경 수질개선 여재로 개발하여 지하수 최대 오염물질인 질산성질소를 제거하는 기술
- 지하수 부족지역(시설재배지역 등) 용배수로 배출수(질산성질소 오염수)를 농어촌형 LID 시설을 이용하여 지층 내부로 인공함양, 추가 지하수 확보 및 배수 개선
- 농어촌형 LID에 의한 지하수 부족지역 비점오염원 저감 및 추가 지하수량 확보

#### ○ 농어촌형 저영향개발 시설 (분지형)



<하동군 북방지구 농어촌형 저영향개발 시험시설>



<북방지구 농어촌형 저영향개발 주입수 시험 주입>

## 시제품 2 : 비닐하우스 단동형 농어촌형 저영향개발 시설

### ○ 기술의 정의

- 본 기술은 비닐하우스 단동에서 사용 후 배출되는 수막용수를 차집하여 지하수 대수층으로 재주입하는 기술
- 소규모 단동형 농어촌형 LID에 의한 원위치 추가 지하수량 확보



<단동형 농어촌형 저영향개발 시설>



<북방지구 단동형 농어촌형 저영향개발 설치>



□ 정책활용 1건

양식	정책건의/시행	* 정부시책, 법령개정, 매뉴얼(지침), 시스템 반영 등	
과제명	농업부산물물 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 기술 개발		
건의명	농어촌형 저영양개발(LID) 기술의 현업부서 시행 사업 반영 건의		
주관부처 (담당자)	한국농어촌공사 환경지질서 (송양권 차장)	건의일자 (제출일)	2022년 12월 28일
시책명	순환형 지하수자원 확보시설 사업	시행일 (시행예정일)	2023년 1월 1일
주요내용 요약	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농업생산기반 정비계획(2022-2031) 계획 중, 농업용수 분야의 지하수관리 사업으로 향후 순환형 지하수자원 확보사업을 신규사업으로 계획 및 2023년부터 추진 예정</li> <li>○ 이 가운데 금번 과제에서 개발한 농어촌형 저영양개발(LID) 기술은 시설제단단지 대상 지하수 인공함양 사업에 대응하므로, 한국농어촌공사 환경지질서에서는 농어촌형 저영양개발(LID) 기술을 순환형 지하수자원 확보사업의 일환으로 추진 예정(협의 완료)</li> <li>○ 2022.12. 현재 본 연구과제 대상지(하동)을 비롯한 전국단위 대상지 조사 중</li> </ul>		
기대효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 과제에서 개발된 농어촌형 저영양개발(LID) 기술의 현장 실용화(사업화)</li> <li>○ 물 부족 시설원예단지 추가 지하수 확보 및 주입수 수질개선</li> <li>○ 배수개선 사업, 농지관리기금 사업 등과 협의에 의거 연계 가능</li> </ul>		
증빙자료 1 (하단별첨)	* 제출 공문 및 건의내용		
증빙자료 2 (하단별첨)	* 정부시책 및 법령(개정) 결과물 등		

**“행복한 농어촌, 함께하는 KRC”**

### 한국농어촌공사

수신자 환경지질서장 (경유) 지하수사업부팀

제목 국가R&D(농업기반 및 재해대응기술개발사업) 연구성과 활용 요청

1. 관련 : 연구비 레스마트-58(2022.02.16.)호.

2. 농어촌연구원에서 농림식품기술기획평가원으로부터 위탁하여 수행중인 국가R&D 과제의 연구성과를 공표 지하수사업에 활용하여 주시기 바랍니다.

가. 과 제 명 : 농업부산물물 이용한 농어촌형 저영양개발(LID) 기술 개발  
나. 연구기간 : 2020.04.29. ~ 2022.12.31.

다. 주관연구기관 : 한국농어촌공사 농어촌연구원  
(공동연구기관 : 군산대학교 산학협력단, ㈜지엔에스엔지니어링)

라. 주요기술 : 물부족 시설원예단지에 인공함양을 통한 추가 지하수 확보가 가능하고, 질산성질소 등 오염물질 정화가 가능한 농어촌형 저영양개발 기술

붙임 기술소개 1부. 끝.

**한국농어촌공사 농어촌연구원**

---

담당자 이명진 수장기기반연구부팀 이규선 미래농어촌연구1228조 조영호 농어촌연구원, 권재민

참조자

시행 연구비 레스마트-1462 ( 2022.12.28. ) 접수 ( )  
 우 88327 전라남도 나주시 그린로 20 / http://www.ekr.or.kr  
 전화 061-338-5244 /전송 061-338-5219 / byungsun94@ekr.or.kr / 공개

**“농어민과 함께 농어촌을 위해!”**

**“행복한 농어촌, 함께하는 KRC”**

### 한국농어촌공사

수신자 한국농어촌공사 농어촌연구원 (경유) 스마트기반연구부팀

제목 농업기반 및 재해대응기술개발사업 R&D과제 연구성과 활용(예정) 알림

1. 관련 : 연구비 레스마트-1462(2022.12.28.)호.

2. 농어촌연구원에서 농림식품기술기획평가원으로부터 위탁하여 수행 중인 국가 R&D과제의 연구성과를 공표 순환형 지하수자원 확보시설 사업에 향후 활용예정임을 알려드립니다.

붙임 연구성과 활용(안) 1부(별송). 끝.

**환경지질서장**

---

담당자 김영민 지하수사업부팀 권병철 환경지질서장 권길 1228조 노경환

참조자

시행 환경지질서지하수-2776 ( 2022.12.29. ) 접수 ( )  
 우 88327 전라남도 나주시 그린로 200(빛가람동) / http://www.ekr.or.kr  
 전화 061-338-5799 /전송 061-338-5819 / yjopen@ekr.or.kr / 공개

**“농어민과 함께 농어촌을 위해!”**



순환형 수자원 확보를 위한

## KRC 지하수댐 중장기계획

2022. 12.



한국농어촌공사  
환경지질처

### 3-3. 사업 추진 및 투자계획

#### [ 지하수 개발(지하수함양, 지하수댐) 신규 추진 ]

- 국가 차원의 용수 개발 지원은 토질 수해구역으로 하는 지표수 위주, 발 용수 및 지하수는 지자체 농업인이 소규모 관정 위주로 개발
  - 집단화된 시설단지 등에 대한 대규모 지원이 불가하여 발 농업 경쟁력 확보에 한계
  - 현지 여건상 지표수 개발이 어려운 지역은 가뭄 해소에 어려움

- 지하수 용수원 개발을 위해 도상 검토 및 현장 조사 등을 거쳐 지하수함양 24지구('15), 지하수댐 70지구('17) 사업 후보지 도출
- 진주 단목지구 지하수함양 시범사업 완료('20), 농촌용수관리 내역사업(시설농업 단지 지하수함양)으로 추진된 점을 감안, 동일 세부사업에 내역사업 신설 추진
  - ※ 단목지구는 '21년도 시설 사용 후 지하수위가 높아지고, 농업인 만족도 상승
- "21년 농어촌용수 공급부족현황 실태조사 결과" 영농기간 중 농어촌용수 공급 부족지역은 8개 도, 52개 시·군, 206개 지역으로 조사됨

구분	계	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	
부족 지역	시·군	52	2	5	1	6	12	14	4	8
	지구	206	16	17	1	19	44	72	17	20
대책 요구	관정	152	16	12	1	-	39	55	14	15
	양수장	30	-	7	-	4	4	11	3	1
	저류지	12	-	-	-	-	-	12	-	-
	저수지준설	27	-	1	-	15	4	3	-	4

※ 시·군은 용수확보대책으로 신속 공급이 가능한 관정개발 요구가 많음

- (신규) 물 부족지역 지하수 개발(91지구, 7,146억원)
  - 지하수함양 후보지(21지구, 810억원) 및 지하수댐 후보지(70지구, 6,336억원)에 대한 사업 추진 타당성 검토(논범용화, 발기반 용수 등 사업과 연계 추진)
  - 우선순위를 정하여 지하수함양 또는 지하수댐 사업을 단계적으로 확대 추진

□ 전문인력 양성 1건



박계 551 호

## 학 위 기

이 진 원

위 사람은 본 대학교 대학원 토목환경공학부의 전 과정을 이수하고 소정의 시험과 논문심사에 합격하여 공학박사의 자격을 갖추었으므로 대학원위원회의 심의를 거쳐 이를 인정함

2022년 2월 18일

군산대학교 대학원장 공학박사 이 진 원

위 인정에 의하여 공학박사 학위를 수여함

2022년 2월 18일

군산대학교 총장 직무대리 공학박사 김 동

학위수여번호 : 군산대2021(박)15

博 士 學 位 論 文

침투·함양시설에 의한  
지하수의 질산성질소  
오염취약성 개선연구

群山大學校 大學院  
環境工學部 環境工學 專攻  
李 貞 媛

指導教授 金 綱 柱

2022 年 02 月

李貞媛의 工學 博士學位  
請求論文을 認准함

2021 年 11 月

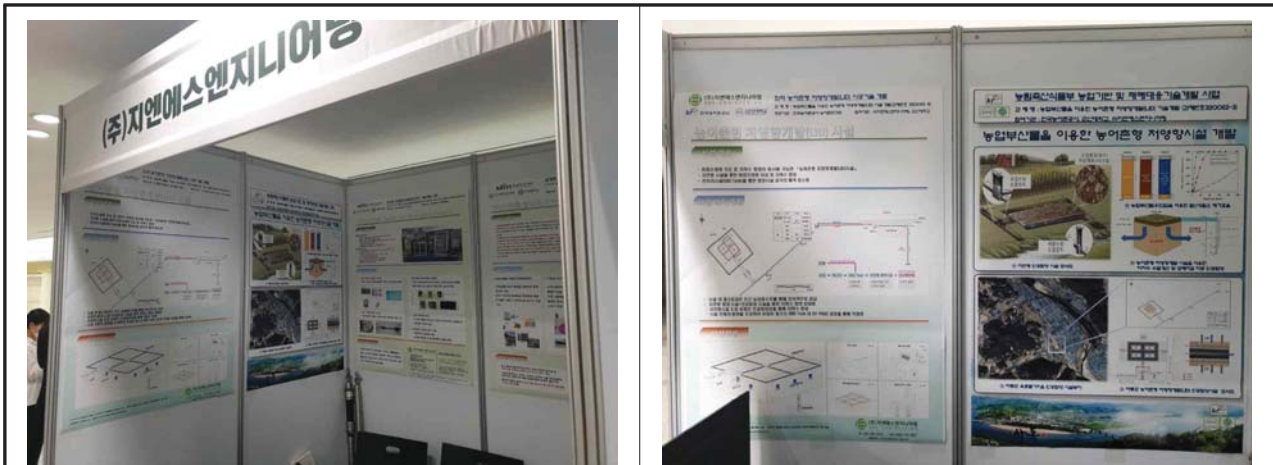
學位論文審査委員會

審査委員長  
審査委員  
審査委員  
審査委員  
審査委員

群山大學校 大學院

□ 홍보(전시) 3건

홍보 1 : 2021년 (사)한국지하수토양환경학회 춘계 학술대회 홍보부스 전시



2021년 (사)한국지하수토양환경학회 춘계 학술대회 (2021.04.22~2021.04.23)

홍보 2 : 2022년 (사)한국지하수토양환경학회 춘계 학술대회 홍보부스 전시



2022년 (사)한국지하수토양환경학회 춘계 학술대회 (2022.04.27~2022.04.29)

홍보 3 : 2022년 (사)한국지하수토양환경학회 추계 학술대회 홍보부스 전시

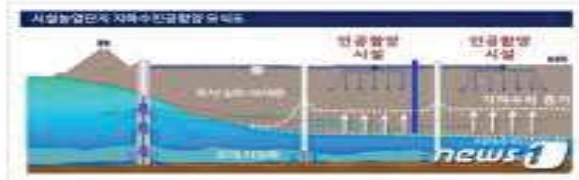


2022년 (사)한국지하수토양환경학회 추계 학술대회 (2022.10.13~2022.10.14)

## 지하수 부족 시달리는 시설농업지역 걱정 덜었다

〔나주=뉴스1〕 박영래 기자

한국농어촌공사, 맞춤형 인공함양 기술 개발 본격화



맞춤형 인공함양 기술 © News1

〔나주=뉴스1〕 박영래 기자 = 지하수 부족에 시달리는 시설농업지역의 물부족 문제가 해소될 전망이다.

한국농어촌공사(사장 김인식)는 7일 경남 하동군, 옥종농협과 시설농업지역 안정적 지하수 확보를 위한 업무협약을 체결했다.

이번 협약으로 지하수를 주된 수원공으로 사용하는 하동군 북방리 시설농업지역에 대한 맞춤형 인공함양 기술 개발로 겨울철 상승적인 물 부족 문제를 해소할 수 있을 것으로 기대된다.

인공함양 기술은 강수나 지표수, 재이용수 등을 인위적으로 땅속에 침투시켜 지하수 수량을 증대하는 기술이다.

북방리 지역의 겨울철 부족수량은 하루 6000톤이며 첫 시범연구사업으로 말기재배 시설농가에 최소한의 설치비용으로 최대한의 지하수 확보가 가능하도록 자연형 인공함양 시설을 설치해 운영할 예정이다.

보통 시설농가에서는 겨울철 비닐하우스 내부 온도 유지를 위해 경유보일러보다 비용이 적게 드는 수막가온법을 선호한다.

수막가온법은 밤 사이 실내 온도를 높이기 위해 비닐하우스 지붕 사이로 지하수를 뿌려 수막을 만들어 낮 동안 비닐하우스 안에 갇힌 열의 유흡을 막는 방법이다.



맞춤형 인공함양 기술 © News1

해당지역은 농지면적에 비해 관정 숫자가 많고, 개별 농가에서는 수막가온을 위해 지하수를 경쟁적으로 양수하면서 상승적인 지하수 부족을 겪고 있다. 이로 인해 부족한 재배용수는 퇴수를 재이용하면서 수질오염에 대한 우려도 있는 상황이다.

이번에 적용되는 자연형 인공함양 기술은 수막재배를 위해 사용된 지하수를 인공함양 분지(또는 침투도랑)로 유도해 나무껍질층을 통과시켜 오염물질(질산성질소)을 저감하고 맑은 물만 지표 하부로 주입시키는 방식으로 친환경적이라는 장점이 있다.

협약에 따라 한국농어촌공사는 자연형 인공함양 기술 개발과 실시설계를 지원하고, 하동군은 관련 국책사업 추진 및 홍보를 추진하며, 옥종농협은 농가의 사업 참여에 협조하는 등 각 기관의 긴밀한 협업을 통해 농어촌 그린뉴딜을 실현할 예정이다.

김인식 사장은 "이번 협약이 국내 시설농업의 경쟁력 확대를 위한 안정적 지하수 활용과 농어촌 그린 뉴딜의 성공적 사례가 되기를 바란다"며 "농가가 겪고 있는 어려움을 해소하고 농어촌의 지속가능한 발전을 위해 더욱 협력하겠다"고 말했다.



# 농어촌공사, 하동군 북방리 지하수 늘린다...인공함양 기술 개발

김덕준 기자 casiopea@busan.com

입력 : 2021-05-07 [16:26:51] 수정 : 2021-05-07 [16:26:51] 게재 : 2021-05-07 [16:27:00]



왼쪽부터 윤상기 하동군수, 김인식 농어촌공사 사장, 정명화 옥종농협조합장. 농어촌공사 제공

지하수 부족에 시달리는 경남 하동군 북방리 시설농업지역에 인공함양 기술을 적용해 지하수를 늘리는 사업이 시작된다. 인공함양이란 강수, 지표수 및 재이용수 등을 인위적으로 땅속에 침투시켜 지하수 수량을 늘리는 기술을 말한다.

한국농어촌공사는 하동군청, 옥종농협과 함께 7일 하동군청 회의실에서 이같은 내용을 담은 업무협약을 체결했다고 밝혔다.

하동군 북방리 시설농업지역은 지하수를 주로 사용한다. 그런데 북방리의 시설농가들은 겨울철에 하루 2만 1000톤의 물이 필요한데 6000톤 가량이 부족한 실정이다.

보통 시설농가에서는 겨울철 비닐하우스 내부 온도 유지를 위해 경유보일러보다 비용이 적게 드는 수막가온법을 선호한다.

수막가온법이란 밤 사이 실내 온도를 높이기 위해 비닐하우스 지붕 사이로 지하수를 부려 수막을 만들어 낮 동안 비닐하우스 안에 갇힌 열의 유흡을 막는 방법이다.

그런데 북방리 지역은 농지에 비해 관정이 얕고 농가에서는 수막가온을 위해 지하수를 경쟁적으로 끌어올리다보니 상습적인 지하수 부족을 겪고 있다.

농어촌공사는 이를 해결하기 위한 첫 시범연구사업으로 하동군 말기 시설농가 지역에 자연형 인공함양 시설을 설치해 운영할 예정이다.

이번에 적용되는 기술은 수막재배를 위해 사용된 지하수를 인공함양 분지로 유도해 나무껍질층을 통과시켜 오염물질을 걸인 뒤 맑은 물만 지하로 주입시키는 방식이다.

김인식 농어촌공사 사장은 "이번 기술을 통해 국내 시설농가가 안정적으로 지하수를 쓸 수 있고 한국형 뉴딜사업의 성공 사례로 자리매김하기를 기대한다고 말했다.

김덕준 기자 casiopea@busan.com

농어촌공, 하동군 시설농업지역에 지하수 인공함양 기술 지원

[전대용]



한국농어촌공사가 하동군청, 옥종농협과 7일 하동군청 회의실에서 '시설농업지역 안정적 지하수 확보를 위한 업무협약'을 체결하고 기념촬영을 하고 있다. (제공: 한국농어촌공사) ©천지일보 2021.5.7

딸기 농가 상승 불부족 해소

시설농업 안정적 지하수 확보

[천지일보=전대용 기자] 지하수 부족에 시달리는 하동군 북방리 시설농업지역에 대한 '맞춤형 인공함양 기술 개발'이 본격화될 예정이다.

인공함양이란 강수, 지표수 및 재이용수 등을 인위적으로 땅속에 침투시켜 지하수 수량을 증대하는 기술을 말한다.

한국농어촌공사는 하동군청, 옥종농협과 7일 하동군청 회의실에서 '시설농업지역 안정적 지하수 확보를 위한 업무협약'을 체결했다.

이번 협약으로 지하수를 주된 수원공으로 사용하는 하동군 북방리 시설농업지역에 대한 맞춤형 인공함양 기술 개발로 겨울철 상승적인 물 부족 문제를 해소할 수 있을 것으로 기대된다.

협약에 따른 첫 시범연구사업으로 하동군 딸기재배 시설농가에 최소한의 설치비용으로 최대의 지하수 확보가 가능하도록 자연형 인공함양 시설을 설치해 운영할 예정이다.

보통 시설농가에서는 겨울철 비닐하우스 내부 온도 유지를 위하여 경유 보일러보다 비용이 적게 드는 수막가온법을 선호한다.

해당지역은 농지면적에 비해 관정 개소수가 많고 개별 농가에서는 수막가온을 위해 지하수를 경쟁적으로 양수하다 보니 상승적인 지하수 부족을 겪고 있다. 이로 인해 부족한 재배용수는 퇴수를 재이용해 수질오염에 대한 우려도 있는 상황이다.

수막가온법은 밤 사이 실내 온도를 높이기 위해 비닐하우스 지붕 사이로 지하수를 부려 수막을 만들어 낮 동안 비닐하우스 안에 갇힌 열의 유출을 막는 방법이다.

이번에 적용되는 자연형 인공함양 기술은 수막재배를 위해 사용된 지하수를 인공함양 분지(또는 침투도랑)로 유도해 나무 겹질층을 통과시켜 오염물질(질산성질소)을 저감하고 맑은 물만 지표 하부로 주입시키는 방식으로 친환경적이라는 장점이 있다.

협약에 따라 한국농어촌공사는 자연형 인공함양 기술 개발 및 실시설계를 지원하고 하동군은 관련 국책사업 추진 및 홍보를 추진한다. 또 옥종농협은 농가의 사업 참여에 협조하는 등 각 기관의 긴밀한 협업을 통해 농어촌 그린뉴딜을 실현할 예정이다.

김인식 사장은 "이번 협약이 국내 시설농업의 경쟁력 확대를 위한 안정적 지하수 활용과 농어촌 그린뉴딜의 성공적 사례가 되기를 바란다"며 "농가가 겪고 있는 어려움을 해소하고 농어촌의 지속가능한 발전을 위해 더 깊이 협력하겠다"고 말했다.

저작권자 © 천지일보 - 새 시대 희망언론 무단전재 및 재배포 금지

전대용 기자

# 동일기사 매체리스트

2021년 05월 10일 (월)

순서	제 목	매체
1	하동에서 안정적 지하수 공급 위한 MOU 체결	서경방송
2	지하수 부족 시달리는 시설농업지역 걱정 덜었다	뉴스1
3	농어촌공, 하동군 시설농업지역에 지하수 인공함양 기술 지원	천지일보
4	한국농어촌공사, 경남 하동군, 옥종농협 딸기 수막재배용 지하수 확보 MOU 체결	농민신문
5	농어촌공사, 하동군 북방리 지하수 늘린다...인공함양 기술 개발	부산일보
6	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	한국농촌경제신문
7	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	월간친환경
8	농어촌공사, '지하수 부족 해결' 인공함양 기술 개발 박차	머니S
9	농어촌공, 시설농업지역 지하수 확보 기술 지원	무등일보
10	농어촌공사, 시설농업 지하수 확보 기술 지원	전남매일
11	농어촌공사, 친환경 인공함양 기술로 농가 물 부족 해결 지원	신아일보
12	지하수 부족 시달리는 시설농업지역 걱정 덜었다	머니투데이
13	농어촌공사, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	데일리한국
14	농어촌공사, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	중소기업신문
15	농어촌공사, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	일간투데이
16	농어촌공사, 물 부족 시설농지에 지하수 확보 기술 지원	토요경제
17	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	충청뉴스
18	한국농어촌공사, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	스마트에프엔
19	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	지방자치일보
20	한국농어촌공사, "시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술" 지원	빛가람뉴스
21	농어촌공사, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	로이슈
22	농어촌공사, 시설농업지역 안정적 지하수 확보 기술 지원	빅데이터뉴스
23	농어촌공-하동군-옥종농협, '시설농업지역 안정적 지하수 확보 위한 업무협약' 체결	내외뉴스통신
24	농어촌공-하동군-옥종농협, '시설농업지역 안정적 지하수 확보 위한 업무협약' 체결	뉴스깜
25	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	뉴스워커



26	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	G밸리
27	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 확보 기술 지원	브레이크뉴스
28	농어촌공, 시설농업지역에 안정적 지하수 환경확보 기술 지원	데일리환경
29	농어촌공, 시설농업지역 안정적 지하수 확보 기술 지원	빅데이터뉴스
30	농어촌공, 시설농업지역 안정적 지하수 확보기술 지원	여성소비자신문



## 나. 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 배치실험 기반 최종정화여재 선정	○ 투수성과 수질정화능이 우수하며, 교환주기가 상대적으로 긴 우드칩과 석회석을 최종정화여재로 선정	○ 100%
○ 최종 정화여재를 이용한 컬럼실험	○ 우드칩, 석회석을 이용한 컬럼실험 시 유기물 EEM 분석(용존 DOC 농도를 분석)으로, 유기물의 기원(humic, fulvic 및 단백질)을 밝히고, 미생물의 활성도와 탈질과의 상관성을 분석하여 최종정화여재(특히, 석회석)의 효과 확인	○ 100%
○ 컬럼실험 기반 최종 탈질효율 산출	○ 탈질효율 증대를 위해, 외부 자연물질( $\text{CaSO}_4$ , $\text{K}_2\text{SO}_4$ , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )을 추가 주입하여 최종탈질효율 산출	○ 100%
○ TB 농어촌형 저영향개발 시설 시험시공	○ 실내 컬럼실험 결과와 현장투수시험 결과를 토대로 경상남도 하동군 북방리 시설재배단지 일부에 길이×너비×심도 = 7m × 7m × 4 m의 농어촌형 저영향개발 시설 시험시공	○ 100%
○ 정화여재 주입용량 및 교환주기 산출	○ 투수성 정화여재(모래, 우드칩, 석회석) 주입용량은 실내 컬럼 주입용량 비율을 준용하였고, 정화여재의 교환주기는 15년 이상으로 설계	○ 100%
○ 최적 농어촌형 저영향개발 시설 시공기술 개발	○ 저영향개발 시설은 크게 함양시설, 관로, 물막이벽, 투수성 여재, 관측공 등으로 구성되어 있으며, 현장 지반의 특성에 최적화 할 수 있도록 시공기술 개발	○ 100%
○ TB 저영향개발 시설 정화효율 산출	○ 하동군 북방리 저영향개발 시설 질산성질소 오염수에 대한 정화효율 산출	○ 100%
○ TB 저영향개발 시설 추가 지하수 산출 모의	○ 하동군 북방리 저영향개발 시설 시공 전, 함양시설의 주입관로 밸브 조절로 하루 최소 120 $\text{m}^3$ 의 추가 지하수를 확보, 주변 관정에서 채수하여 이용할 수 있도록 산출 모의	○ 100%
○ TB 물수급 상황 고려 저영향개발 시설규모 산정	○ 하동군 북방리에 대해 현시점으로부터 2100년까지 기후변화 시나리오를 분석(월별 강수량, 지하수 함양량을 분석)하고, 월별 재배작물(딸기)의 지하수 수요량을 분석하였으며, 인공함양 대상 지층 구조를 면밀히 분석하여 저영향개발 시설의 규모 산정	○ 100%



## 4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

### 가. 농어촌형 저영향개발(LID) 대외기여도

#### (1) 대외기여도

본 연구는 시설원예지역을 대상으로, 농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 추가 지하수 확보와 질산성질소 오염지하수의 현장처리기술 개발에 관한 것으로서, 상대적으로 풍부한 수량 확보 및 높은 질산성질소 오염 지하수 정화효율을 보이며, 또한 농어촌형 저영향개발 기술을 도입함에 따라 기존 관정형 주입기술에 비해 시공 상의 간편 및 손쉬운 관리를 도모할 수 있음을 보였다. 이 결과, 현장 적용 시 농어촌형 저영향개발 시설에 대한 간단하고 주기적인 관리만 이루어진다면 반영구적인 운영이 가능하여 비용경제적인 측면에서 어떠한 관련 추가 지하수 확보 기술보다도 경쟁력이 있는 기술을 개발한 것으로 사료된다.

또한 기존의 연구들은 전통적인 폐수처리 공정에서 하수의 질소성분을 제거하기 위한 반응기형 지중 외 처리공정인 반면, 본 연구의 농어촌형 저영향개발 기술에 의한 탈질 기술은 원위치 지중 처리공정이다. 더불어, 석회석을 이용하여 탈질에 유리한 중성범위의 pH를 끊임없이 조절하고 이를 통해 질산성질소를 최적으로 제거하고자 노력한 연구는 드물었다. 따라서, 본 연구에서 수행한 농어촌형 저영향개발 공법을 하천변 시설원예단지에 배수개선 및 지하수 수질개선 기술로 적용할 수 있다면 안정된 지하수 자원을 확보할 수 있을 것이고, 오염설계에도 유용한 자료를 제공할 것이라 기대된다.

본 연구에서 개발된 농어촌형 저영향개발 시설을 이용한 질산성질소 정화 기술은 전국 농촌에 산재한 질산성질소 오염 지하수에 적용 시 지하수 수질개선을 도모하고 지하수 자원의 재활용을 유도할 수 있다. 그리하여 지하수 복원·재활용에 따른 대체공 개발을 억제함으로써 추가 지하수 개발에 소요되는 예산을 절감할 수 있고, 지하수자원의 효과적인 관리를 도모할 수 있으며, 또한 생태계 복원에 기여할 수 있다. 또한 본 기술은 함양분지형 지하수 인공함양과 배수개선형 인공함양을 공동으로 기본 개념으로 하므로, 현장에 적용 시 운용비와 인건비를 최소화 시킬 수 있고 질산성질소로 오염된 유입수의 정화비용을 절감할 수 있는 장점을 지닌다. 특히 지하수 수계 상류부가 질산성질소로 오염된 경우에 농어촌형 저영향개발 시설을 적용할 경우, 상류부 오염지하수가 하류부로 확산되는 것을 방지할 수 있으므로 하류지역의 지하수의 수질 보전에 기여할 수 있다.

마지막으로, 본 기술을 국내외 학술대회 및 기술지에 보고 및 보급함으로써, 농어촌지역 추가 지하수 확보에 따른 물 자립, 오염지하수 정화사업 활성화를 모색할 수 있으며, 또한 외국기술 대체 및 수출이 가능하므로 향후 관련 시장에서의 경쟁력 확보에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

연구개발성과의 관련 분야에 대한 경제적·사회적 파급효과뿐만 아니라  
**연구개발성과에 대한 기술 기여도 및 산정근거\***를 포함하여 작성

\* 기술기여도 산정 가이드라인 참고

- 혁신법 시행('21.1.) 이후 협약과제 또는 혁신법 시행 이전 협약과제 중 경상기술료 납부 희망 과제 단, 혁신법 시행('21.1.) 이전 협약과제 중 정액기술료 납부를 희망하는 경우 기술기여도 작성 불필요

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
농업부산물을 이용한 농어촌형 저영양개발 (LID) 시설 개발	최적 농어촌형 저영양개발 시설 시공기술 개발	(주)지엔에스엔지니어링	중소기업 (영리)	424.75	208	48.97	신규 기술개발	주1)	48.97
<b>계</b>				<b>424.75</b>	<b>208</b>	<b>48.97</b>	-	-	-

주1) 기술기여도 산정(기술료 제도 매뉴얼(농림식품기술기획평가원) 참고)

- ① 연구개발성과의 실시로 제품의 매출액이 발생(신규 제품)하였거나 증가(기존 제품 개선 등)한 경우
  - i) 제품A2의 매출액 산정이 가능한 경우

- 기술기여도 : 제품A2에 대한 총 연구개발비와 정부지원연구개발 등을 감안

$$\text{기술 기여도} = \frac{\text{정부지원 연구개발비}^*}{\text{총 연구개발비}^{**}}$$

\* 정부지원 연구개발비 : 국가연구개발사업 해당과제의 총 사업비 중 정부 지원분  
 \*\* 총 연구개발비 : 국가연구개발사업 해당과제의  $\Sigma$ (정부지원 연구개발비 + 민간현금 + 민간현물)

$$\text{기술 기여도}(\%) = \frac{208,000,000}{424,750,000} = 48.97\%$$


(소숫점 이하 셋째자리에서 반올림)



## 나. 사업화 추진 계획


### (1) 사업화 대상

농어촌형 저영향개발(LID) 시설은 지하수 부족지역 인공함양과 수질개선에 대한 기술로서, 주로 시설재배지역을 사업대상지로 하며, 일부 말단부 농지, 지하수 수질개선이 필요한 지역을 사업화 대상지로 한다.(※현재 하동군 북방지구를 목적 사업지로 추진 중)



**순환형 수자원 확보를 위한  
KRC 지하수댐 증장기계획**

2022. 12.



62 KRC 지역수질 증장기계획

3-3. 사업 추진 및 투자계획

**[ 지하수 개발(지하수함양, 지하수댐) 신규 추진 ]**

- 국가 지원의 용수 개발 지원은 논을 수혜구역으로 하는 지표수 위주로, 밭 용수 및 지하수는 지자체 농업인이 소규모 관정 위주로 개발
  - 집단화된 시설단지 등에 대한 대규모 지원이 불가하여 밭 농업 경쟁력 확보에 한계
  - 현지 여건상 지표수 개발이 어려운 지역은 가뭄 해소에 어려움

○ 지하수 용수원 개발을 위해 도상 검토 및 현장 조사 등을 거쳐 지하수함양 24지구('15), 지하수댐 70지구('17) 사업 후보지 도출

- 진주 단목지구 지하수함양 시범사업 완료('20), 농촌용수관리 내역사업(시설농업 단지 지하수함양)으로 추진된 점을 감안, 동일 세부사업에 내역사업 신설 추진
  - ※ 단목지구는 '21년도 시설 사용 후 지하수위가 높아지고, 농업인 만족도 상승
- "21년 농어촌용수 공급부족현황 실태조사 결과" 영농기간 중 농어촌용수 공급 부족지역은 8개 도, 52개 시·군, 206개 지역으로 조사됨

구분	계	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	
부족 지역	시군	52	2	5	1	6	12	14	4	8
	지구	206	16	17	1	19	44	72	17	20
대책 요구	관정	152	16	12	1	-	39	55	14	15
	양수장	30	-	7	-	4	4	11	3	1
	저류지	12	-	-	-	-	-	12	-	-
저수지건설	27	-	1	-	15	4	3	-	4	

※ 시·군은 용수확보대책으로 신속 공급이 가능한 관정개발 요구가 많음

○ (신규) 물 부족지역 지하수 개발(91지구, 7,146억원)

- 지하수함양 후보지(21지구, 810억원) 및 지하수댐 후보지(70지구, 6,336억원)에 대한 사업 추진 타당성 검토(논범용화, 발기반 용수 등 사업과 연계 추진)
- 우선순위를 정하여 지하수함양 또는 지하수댐 사업을 단계적으로 확대 추진

### (2) 경제적 목표(하동군 북방지구 함양시설 설치를 통한 설정)

구분	하동군 북방지구	매뉴얼 수립을 통한 경제성 향상	
시설 설치 규모	- 시설 면적 : 10m * 10m - 함양시설 용량 : 약 120m <sup>3</sup> (여재부 및 함양부)	- 시설 용량의 매뉴얼화	
설치제원	- 수로관 - 유량조절밸브 - 유량계 - 유량분배조 - 함양시설 박스 (철제프레임 제작) - 여재	- 지하수 존재 (콘크리트 타설공법)	- 지하수 비존재 (철제프레임 공법)
		- 수로관 - 유량조절밸브 - 유량계 - 유량분배조 - 함양시설 - 여재	- 수로관 - 유량조절밸브 - 유량계 - 유량분배조 - 함양시설 박스 - 여재
공사시간	약 8주	약 4주	
시공비용	70 ~ 100 만원/m <sup>3</sup>	40 ~ 60만원/m <sup>3</sup>	
경제적 목표	- 사전조사를 통한 시공방법의 선정 - 시설 용량의 규격화 및 시설 요소기술 정립 및 운전조건을 수립 ⇒ 매뉴얼 수립을 통한 공기단축으로 비용절감 효과를 유도		

### (3) 추정 매출액

참여기업(㈜지엔에스) 1개 기관과 기술실시 계약을 실시하고, 농어촌형 저영향개발시설 실용화에 따른 매출액을 최소규모로 추정 시 매출액 : 140백만원/년(2023년)~ 840백만원/년(2027년)으로 추정된다.

표 11-1. 사업화 대상 분석참여기업의 매출 예상액

(단위 : 백만원)

사업화 성과	세부 성과지표	(2022)년 (개발종료 해당년)	(2023)년 (개발종료 후 1년)	(2024)년 (개발종료 후 2년)	(2025)년 (개발종료 후 3년)	(2026)년 (개발종료 후 4년)	(2027)년 (개발종료 후 5년)
기업 전체 성장	예상 총매출액(A)	3,000	3,300	3,630	3,990	4,390	4,830
개발 기술의 사업화 성장 효과	예상 연구개발결과물 매출액(B)	-	140	280	490	560	840
	연구개발결과물 제품 점유비율(C, %) (C=B/A)		4%	8%	12%	13%	17%

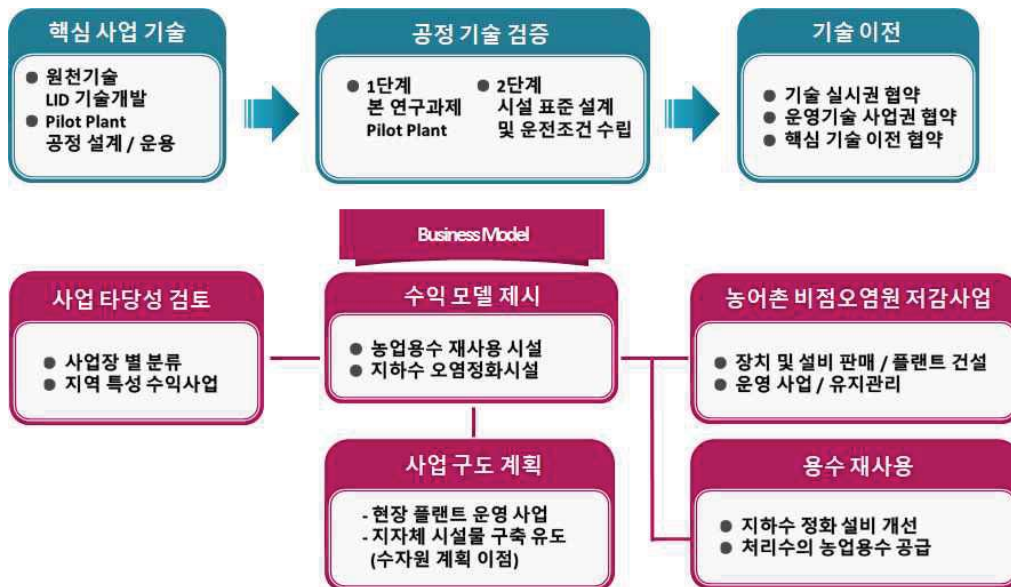


그림 11-1. 사업화 과정

### 다. 해외시장 진출 기회 가능성 증대

- 국내 수처리시스템 수출이 이루어지고 있는 중국, 동남아 등 이벤트(박람회) 참여 인지도 확보 노력
- 자국 환경부 품질기준에 미치지 못하고 있어 정부지원 및 민간수요 지속 발생국가 시장 진

출 교두보 확보

- 베트남 농업재배 시 사용 되는 농업용수(2015년, 103.78km³/yr → 2030년 125.50km³/yr)로서, 사용 후 방류수에 대한 농어촌형 저영향개발(LID) 시스템 적용 시, 기술 수출 및 해외시장 매출액 확보



그림 11-2. 해외 사업화(안)

구분	구체적인 내용
형태/규모	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 상용화 형태 : 농어촌형 저영향 침투형 시설</li> <li>○ 수요처 : 농지 중 질산성 질소 오염지역 및 지하수 함양 시설 미비 지역에 직접 적용, 조달청을 통한 관공서 등</li> <li>○ 시설 단가 : 적용시설 단위 용량 적용 60 ~ 100 만원/m³</li> <li>○ 시설 단가 : 적용시설 단위 용량 적용 1,000 ~ 1,500 만원/1 m³</li> <li>○ 개발 투입인력 및 기간               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개발투입인원 : 연구인력 4명, 현장인력 4명</li> <li>- 개발기간 : ~ 31개월(2020년 ~ )</li> </ul> </li> </ul>
상용화 능력 및 자원보유	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수자원 및 지질/지하수개발 전문기업</li> <li>○ 본사 연구소 및 현장에서 개발 및 상품화 모색</li> <li>○ 강변여과수 개발 등 대체 수자원 개발 기술 보유</li> <li>○ 지하수 오염정화기관으로 지하수오염물 제거 기술 보유</li> </ul>
상용화 계획 및 일정	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농촌형 저영향 침투형 시설 요소기술 표준화 : 2023년</li> <li>○ 단가 절감 및 상품화 : 2023년</li> <li>○ 판매 개시 : 2024년</li> </ul>





## 5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

### 가. 연구개발 결과의 활용 방안

농어촌형 저영향개발 시설은 지하수 인공함양과 오염지하수 수질정화를 동시에 달성할 수 있는 기술로서, 최근 농가소득 증대를 위해 확대 중인 시설농업지역 등 상습물부족 지역, 오염지하수 관리 필요 지역 등에 즉시 적용 가능하여, 공적자원인 지하수를 건전하고 지속적으로 농어업 용수로 활용 가능하다. 특히, 농어촌지역 지하수 수질위해(특히, 질산성질소 위해)를 최소화하는 저영향개발 기술은 청정한 빗물함양 및 안심하고 재이용할 수 있는 지하수 수질 확보가 가능하여 안전농산물 생산에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그리고 지표기원 비점오염원과 지하수의 상이한 수질 특성 조건 하에서의 일종의 수처리 기법인 농업부산물 정화 여재가 부착된 저영향개발 시설 기술을 확보함으로써 농어촌 지하수의 안정적 수질 확보에 기여할 것으로 기대된다. 또한 비교적 저비용의 친환경 시설을 적용하여, 현장에서 즉시 이용 가능한 지하수 자원 확보, 오염수 유입에 대응 가능한 기술 확보 등 지하수 환경 보전, 지하수의 중요성 인식 및 지하수 활용 산업 확장 기대된다. 세부적인 내용은 아래와 같다.

- 농어촌지역 지자체로 하여금 시설물 구축을 유도하고 이에 따른 수자원 계획(농어업 용수 저장 및 활용)에 활용
  - 지역 여건에 최적화한 농어촌형 저영향개발 시설 설치 유도로, 농어업 용수 수요 대응 사전 추가지하수 확보 방안 수립
  - 가뭄 예방 및 발생 지역에서의 용수확보 사업에 적용
  - 지자체, 관공서 및 수자원 설계사 운영 지침으로 활용
- 농어촌지역 비점오염원(질산염) 저감 효과와 추가 지하수 확보 동시 추진
  - 농어촌에 특화된 저영향개발 시설을 활용한 신속한 용수 확보
  - 퇴비사용 내지 소각처리되는 농업부산물의 활용성 제고 및 고부가가치 창출
  - 농어촌형 저영향개발 시설 운영시 사전 수처리 효율성을 제고함으로써 총량적인 지하수 수질·수량 관리에 있어 비용 절감 기여

향후 하동군 저영향개발 시설 현장 실험 결과를 토대로, 농림축산식품부, 하동군청 실무담당자와 협의 하에 하동 북방리 시설재배단지에 대한 실사업 추진 계획(농식품부 지표수보강개발사업 또는 행안부 재해위험지역 정비 사업비 등)이다.

< 연구개발성과 활용계획표(예시) >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
국외논문	SCIE		1	1		
	비SCIE					
국내논문	SCIE		1	1		
	비SCIE					
특허출원	국내					
	국외					
특허등록	국내	1	1			
	국외					
인력양성	학사					
	석사		1			
	박사					
사업화	시제품개발					
	상품출시					
	기술이전	1				
	공정개발					
	매출액(단위 : 천원)	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
	기술료(단위 : 천원)	1,469	1,469	1,469	1,469	1,469
비임상시험 실시						
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상				
		2상				
		3상				
	의료기기					
진료지침개발						
신의료기술개발						
성과홍보						
포상 및 수상실적						
정성적 성과 주요 내용						

※ 정부납부기술료(직접실시)

- (납부기준) 매출액(제품군A2) × 기술기여도 × 기술료율 × 감면율 = 정부납부기술료

매출액 (천원)	기술기여도 (%)	기술료율 (%)	감면율 (%)	납부 기술료 (천원)
300,000	48.97	5	80	1,469

※ 기술료납부 상한 : 정부지원연구개발비의 10% 이하

## 나. 기대성과

### (1) 기술적 측면

- 농어촌지역 지하수 수질위해(특히, 질산성질소 위해)를 최소화하는 저영향개발기술 개발로, 청정한 빗물함양 및 안심하고 재이용할 수 있는 지하수 수질 확보
- 농업부산물을 재이용한 수질 교란물질 제거로, 고품질의 지하저장수 확보 및 청정한 대수층 환경 확보
- 지표기원 비점오염원과 지하수의 상이한 수질 특성 조건하에서의 일종의 수처리 기법인 농업부산물 정화 여재가 부착된 저영향개발 시설 기술을 확보함으로써 농어촌 지하수의 안정적 수질 확보에 기여할 것으로 기대됨
- 지하수 수질위해를 최소화할 수 있는 <저영향개발(LID) 현장운영지침서>가 발간되고 배포돼 산업체 뿐만아니라 지자체 지원사업에서도 활용할 수 있을 것으로 기대됨
- 퇴비나 소각되는 농업부산물을 재활용할 수 있는 기술로 산업체(농산물 여재의 생산 및 판매)와 농식품부 정책지원 사업으로 활용될 수 있을 것으로 기대됨
- 본 연구의 실용화, 산업화를 위해서는 더 많은 투자와 연구가 요구됨

### (2) 경제·사회적 측면

- 비교적 저비용의 친환경적 시설으로서 새로운 정책으로 구현이 가능하고 정화 효율 감소 등 문제 발생 시 현장에서 신속히 대응할 수 있는 기술로서 해당 분야의 새로운 산업으로 정착이 기대됨
- 기존 비점오염원 관리 방안을 개선함으로써 체계적인 비점오염원 관리 정책 대응이 가능하고 시설을 활용해 건설 인프라 구축비용 절감효과 기대
- 농어촌형 저영향개발 시설의 활용성 제고로 신산업 분야 창출 및 환경 보전에 기여, 지하수의 중요성 인식 및 지하수 활용 산업 기대
- 전문인력(석박사) 창출에 기여

### (3) 환경적 측면

- 지하저류시설물 설치 등 신규수자원개발 타당성 근거 자료로 활용이 가능하고 기존 시설의 보완과 연계를 통해 대규모 투자 없이 신규수자원 확보 가능
- 농어촌형 저영향개발 시설을 활용함으로써 공적인 자원인 지하수를 건전하고 지속적으로 농어업 용수로 활용하는 것의 조기 정착이 기대됨
- 친환경 농업부산물을 이용한 정화여재 실험자료는 향후 인용도와 효용성이 크다고 사료됨
- 농업부산물을 재활용 할 수 있는 기술을 개발함으로써 부가가치 산업 및 안정적인 물공급을 이룰 수 있을 것으로 판단됨

## 다. 파급효과

- 국내의 경우, 지자체 물순환체계 개선사업과 맞물려 저영향개발기술 사업화가 이미 진행

중에 있으며, 국민의 환경에 대한 관심과 쾌적한 생활에 대한 욕구 고조로 시장은 꾸준히 확장될 전망

- 물부족 농어촌지역에 적용하여 추가수자원 확보 및 기술 실용화
- 산업체 활용
  - 농업부산물 여재의 생산 및 판매
- 영농활용
  - 농업부산물 여재를 이용한 수질위해 저감 효과 및 이용방법
- 정책제안
  - 비점오염원 저감을 위한 분지형 저영향개발(LID) 시설 지원사업(농식품부 지하수자원 관리 사업, 지자체 지원사업)
  - 단동형 비닐온실용 지하수 안정적 확보를 위한 소규모 저영향개발 시설 지원사업(농식품부 또는 지자체)
- 본 기술이 완성된다면 지하수 관리를 실시함으로써 안정적인 물 공급이 가능할 것으로 판단되기 때문에 산업체 활용 가능성이 높을 것으로 사료됨

#### 라. 향후 연구를 위한 제언

본 연구에서 개발된 농어촌형 저영향개발 기술은 국내에 하천변에 산재한 시설원예단지에 범용적으로 적용할 수 있는 기술로 자체 평가되지만, 농어촌형 저영향개발 시설의 유효 영향범위, 질산성질소 정화 메커니즘에 대한 미생물학적인 정량화는 수행되지 않았으므로, 향후 이에 대한 추가 연구를 통해 수치적이고 정량적인 정화 모델을 구축할 필요가 있다. 그리하여 국내 물 부족 농촌의 추가 지하수 확보와 질산성질소 오염지하수에 범용적으로 적용할 수 있는 관정형 당밀 반응벽체 기술로 한 단계 더 업데이트 시킬 필요가 있다.



## 참고문헌

- Alley, W.M. and Job, C.A., 2020, Groundwater, well, and coronavirus, The aquifer (a publication of the groundwater foundation), Spring/Summer 2020, 1-5.
- AP (Alix Partners), 2020, Seven years of change in seven months: COVID-19 through the lens of disruption, 16p.
- Balamurugan M, Kasiviswanathan K.S., Ilampooranan I. and Soundharajan B.-S., 2021, COVID-19 lockdown disruptions on water resources, wastewater, and agriculture in India, *Front. Water* 3:603531. doi: 10.3389/frwa.2021.603531.
- Bierschenk, W.H., 1963, Determination well efficiency by multiple step-drawdown tests, *Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, 64, 493-507.
- Bogler, A., Packman, A., Furman, A., Gross, A., Kushmaro, A., Ronen, A., Dagot, C., Hill, C., Vaizel-Ohayon, D., Morgenroth, E., Bertuzzo, E., Wells, G., Kiperwas, H.R., Horn, H., Negev, I., Zucker, I., Bar-Or, I., Morgan-Gilad, J., Balcazar, J.L., Bibby, K., Elimelech, M., Weisbrod, N., Nir, O., Sued, O., Gillor, O., Alvarez, P.J., Cramer, S., Arnon, S., Walker, S., Yaron, S., Nguyen, T.H., Berchenko, Y., Hu, Y.L, Ronen, Z., and Bar-Zeev, E., 2020, Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic, *Nature Sustain.*, 3, 981-990.
- Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resour. Reser.*, 12(3), 423-428.
- Cho, K.S., 2020, Change from COVID-19 crisis to sustainable economy, Nara economy, KDI (Korea development institute) reports 357, 64-66.
- Chung, I.-M. and Patrick, L., 2020, A catchment management experiences of the Evian natural mineral water (NMW) source site, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 53 (S-1), 827-832.
- Cooper, H.H.Jr. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 27(4), 526-534.
- DE (Daum encyclopedia), 2022, <https://100.daum.net/encyclopedia/view/47XXXXXb1134> [accessed 22.03.24].
- EC (European Commission), 2021, COVID-19: an opportunity to promote water, sanitation and hygiene in Africa, [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/covid-19-and-water-sanitation-and-hygiene-africa-2021-06-16\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/covid-19-and-water-sanitation-and-hygiene-africa-2021-06-16_en) [accessed 22.03.27].
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2021, Water quality and food safety & COVID-19, <https://www.fao.org/land-water/overview/covid19/qualitysafety/en/> [accessed 22.03.20].
- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology 4<sup>th</sup> Ed, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- GRI (Gyeonggi Research Institute), 2020, Agriculture in the era of post-COVID19: What we prepare to the era?, Issue and analysis, GRI reports No. 415.
- Hernández M., Camprovín P., Bernat X., Massana J., and Castelló J., 2015, ASR en Barcelona: Nuevo régimen de operación para hacer frente a nuevos escenarios [ASR in Barcelona: New operating

- regime to deal with new scenarios]. IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos, Cordoba, October 2015.
- Huo, C., Dar, A.A., Nawaz, A., Hameed, J., Albarshar, G., Pan, B., and Wang, C., 2021, Groundwater contamination with the treat of COVID-19: Insights into CSR theory of Carroll's pyramid, *J. King Saud Univ. - Sci.*, 33 (2), <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101295>.
- IBM, 2019, State of California tackles drought with IoT & blockchain, <https://newsroom.ibm.com/2019-02-08-State-of-California-Tackles-Drought-with-IoT-Blockchain>.
- Ihm, S.S., 2020, Effect of COVID-19 on global agri-food system, Global agriculture, KREI (Korea rural economics institute) reports 236, 73-92.
- IT (Interagency taskforce), 2020, A plan enhancing a role of public agencies to support Korean new deals, IT report 20-2 (2020.08.20.), 16p.
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 112, 1047-1064.
- Kabuya, A.K., Alowo, R., and Nkhonjera, G.K., 2022, Apps for smart groundwater monitoring and assessments: A case study of Regideso catchment in Kimbanseke, *Appl. Sci.*, 12(7), 3243, <https://doi.org/10.3390/app12073243>.
- KDCA (Korea Disease Control and Prevention Agency), 2022, <https://ncv.kdca.go.kr/ncov/> [accessed 22.03.15].
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2011, Application of analysis technique and modeling for coupled groundwater-surface water flow system, KIGAM, 491 p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), KRC (Korea Rural Community Corporation), KMU (Kookmin University), and GeoGreen21, 2021, An annual report on development of the well network system technique keeping up with drought, A research group on optimal groundwater uses against water demands during drought periods, Ministry of Environment, 429p.
- Kim, B.Y., 2021, USDA agricultural projection to 2030, Global agriculute, KREI (Korea rural economics institute) reports 242, 3-14.
- Kim, H.S., Bary, J., and Elton, L., 2003, Groundwater securing and supplying techniques using the aquifer storage and recovery (ASR) - Case study on actual groundwater supply using the ASR, Oregon state, USA, Proceedings of the Korean society of soil and groundwater environment 2003 fall meeting, Jeju.
- KOSIS (Korean Statistics Information Service), 2019, <https://kosis.kr/> [accessed 2019.08.16]
- KPC (Korea Policy Curation), 2021, Economic countermeasures against COVID-19, <https://korea.kr/special/policyCurationView.do?newsid=148872965> [accessed 22.05.11].
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2014, A study on the supply plan of clean groundwater and groundwater heat for facilities in agricultural complex, KRC, Naju, 221 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2017, A report on the artificial recharge and recovery to Danmok greenhouse facilities zone, Jinju, Gyongsangnamdo, Korea, KRC, Naju, 164 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2021a, An interim report on current status for the Chojung natural mineral water conservation project, KRC report, 48p.

- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2021b, Securing groundwater resources holding specific functions on crop properties and its application to agricultural activities, KRC report, 72p.
- KREI (Korea Rural Economic Institute), 2019, Agriculture outlook 2019 Korea, 834 p.
- KREI (Korea Rural Economics Institute), 2020, A brief on global agriculture, KREI reports Global agriculture, 235, 161-170.
- KREI (Korea Rural Economics Institute), 2021, Information on global agriculture, Global agriculture, KREI reports 242, 133-150.
- Lee, B.S., Song, S.-H., Park, J.K., Won, Y.C., and Kim, W., 2016, Establishment of an optimal rehabilitation process for agricultural public wells by applying standardized diagnostic functions, *J. Soil Groundw. Environ.*, 21(4), 1-9.
- Lee, H., Koo, M., and Oh, S., 2019, Modeling stream-aquifer interactions under seasonal groundwater pumping and managed aquifer recharge, *Groundwater*, 57(2). 216-225.
- Lee, Y.K., 2020, Effect of COVID-19 on Japanese food industry and its prospect, Global agriculture, KREI (Korea rural economics institute) reports 238, 93-113.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs) and KRC (Korea Rural Community Corporation), 2015, A report on feasibility for an artificial recharge and recovery to greenhouse facilities zones, MAFRA and KRC, Sejong, 268 p.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs) and KRC (Korea Rural Community Corporation), 2018, A annual report on the rural groundwater management network system, Korea, MAFRA and KRC, Sejong, 173 p.
- MAFRA (Ministry of Agriculture and Food and Rural Affairs), 2020, Discussion on increasing resilience of agri-food industry against COVID-19, MAFRA newrelease, 2020.10.28.
- MAFRA (Ministry of Agriculture and Food and Rural Affairs), 2021, Increase of tolerance on agriculture and rural community during the era of post-COVID-19, MAFRA newrelease, <https://www.mafra.go.kr/2021plan/2690/subview.do>, [accessed 22.04.22].
- Malisa, M.L. and Randolph, R.B., 1987, Methods and computer program documentation for determining anisotropic transmissivity tensor components of two-dimensional ground-water flow: U.S. Geological Survey Open-File Report 86-227, 64 p.
- Maliva, R.G., Guo, W., and Missimer, T.M., 2006, Aquifer storage and recovery: Recent hydrogeological advances and system performance. *Water Environ. Res.*, 78(13), 2428 - 2435.
- Mallapaty, S., 2020, How sewage could reveal true scale of coronavirus outbreak, Nature, <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00973-x> [accessed 22.04.14].
- MLTMA (Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs) and K-water, 2009, A practical guide on developing groundwater well and its operating facilities, MLTMA and K-water, Gwacheon, 191 p.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transportation), 2017, The national groundwater management plan 2nd Ed. (2017~2026), MOLIT, Sejong, 168 p.
- Moon, S.H., Kim, Y., Jeong, Y.Y., and Hwang, J., 2016, Groundwater-stream water interaction induced by water curtain cultivation activity in Sangdae-ri area of Cheong-ju, Korea, *Econ. Environ. Geol.*, 49(2), 105-120.

- MPCA (Minnesota Pollution Control Agency), 2022, Stormwater infiltration and setback (separation) distances,  
[https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Stormwater\\_infiltration\\_and\\_setback\\_%28separation%29\\_distances](https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Stormwater_infiltration_and_setback_%28separation%29_distances) [accessed 22.04.04].
- MSIT (Ministry of Science and ICT) and KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2013, Development of intergrated core technologies in aquifer recharge system for groundwater sustainability, MSIT and KIGAM, Sejong, 261 p.
- MST (Ministry of Science and Technology) and K-water, 2004, Sustatinable groundwater development and artificial recharge, MST and K-water, Gwacheon, 850 p.
- NEWMA (New Marketing and Agri-food Institute), 2021, Strategies of Japanese agricultural industry against COVID-19, New marketing fokus, NEWMA reports 2021.05.17., 57-76.
- NIFDS (National Institute of Food and Drug Safety Evaluation), 2017, Research on the distribution of noroviruses and parasites in underground water, NIFDS report, 162p.
- Paepae, T., Bokoro, P.N., and Kyamakya, K., 2021, From fully physical to virtual sensing for water quality assessment: A comprehensive review of the relevant state-of-the-art, *Sensors*, 21, 6971, <https://doi.org/10.3390/s21216971>.
- Park, G.H. and Ahn, C.H., 2020, Post-COVID-19 periods, approaches to green and digital new deals in field of water management, *Seoul water*, 13, <https://arisu.seoul.go.kr> > seoulWater > html > sub1-1, [accessed 22.04.05].
- Rao, R. and Giridhar, MVSS., 2014, Rooftop rainwater harvesting for recharging shallow groundwater, *J. Geol. Geosci.*, 3(6), 1-6.
- Shin, J., Sung, M., and Lee, M., 2016, Development of monitoring solution for riverside groundwater facilities using an augmented reality, *J. Geol. Soc. Korea.*, 52(4), 501-510.
- Shin, K.S., 2021, A prospect of food system after COVID-19 pandemic, *Global agriculture*, KREI (Korea rural economics institute) reports 242, 65-77.
- Song, J.H., 2021, Main research trends with related to global agriculture, *Global agriculture*, KREI (Korea rural economics institute) reports 247, 77-103.
- Song, S.-H., Lee, B.S., and An, J.G., 2016, Quantitative evaluation for improvement effects of performance after mechanical rehabilitation treatments in agricultural groundwater well, *J. Soil Groundw. Environ.*, 21(4), 42-49.
- Stuyfzand, P.J., 2016, Histry of managed aquifer recharge in the Netherlands, Proceedings of IAH (International Association of Hydrogeologists) 43<sup>rd</sup> congress, Montpellier, France.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage, *Trans. Amer. Geophy. Union*, 16, 518-524..
- USAID (United State Agency for International Development), 2021a, Responding to COVID-19's impact on resilience and food security,  
<https://www.usaid.gov/who-we-are/organization/bureaus/bureau-resilience-and-food-security/responding-to-covid-19-impact-on-resilience-and-food-security> [accessed 22.03.24].
- USAID (United State Agency for International Development), 2021b, Water for the world's response to COVID-19, <https://www.usaid.gov/water-and-sanitation/documents/water-world's-response-covid-19>



[accessed 22.03.17].

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2022, Septic systems and drinking water, <https://epa.gov/septic/septic-systems-and-drinking-water#tableseptics> [accessed 22.03.17].

WB (The World Bank), 2021, Food security and COVID-19, <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/brief/food-security-and-covid-19> [accessed 22.03.16].

Wikipedia, 2022a, <https://en.wikipedia.org/wiki/evian> [accessed 22.05.06].

Wikipedia, 2022b, [https://en.wikipedia.org/wiki/Lourdes\\_appaitions](https://en.wikipedia.org/wiki/Lourdes_appaitions) [accessed 22.05.06].

YNA (Yonhap news), 2022, <https://yna.co.kr/view/AKR20220331095551009> [accessed 22.04.10].

Yoo, C.H. and Kim, Y.J., 2021, Trends in field of US agri-foods against COVID-19, Global agriculture, KREI (Korea rural economics institute) reports 242, 87-101



## 뒷면지

### 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업기반 및 재해대응기술개발 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농업기반 및 재해대응기술개발 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.