보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( )

기술촉진연구사업 제3차년도 최종보고서

R&D /19CTAP-C130215-03

IT 기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발 최종보고서

2020. 02.

주관연구기관 / (주)인텔리지오
공동연구기관 / 대전대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

'IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발'(연구개발 기간 : 2017. 04. 01~ 2019. 12. 31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. .

주관연구기관명 : (주)인텔리지오 김 규 상 (인)
공동연구기관명 : 대전대학교 산학협력단 황 석 연 (인)



주관연구기관책임자: 이 치 형
공동연구기관책임자: 김 규 범

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C130215-03	해당 단계 연구 기간	2017.04.01.~ 2019.12.31.	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	사회이슈해결사업			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발			
연구책임자	이 치 형	해당단계 참여연구원 수	총: 20명 내부: 20명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:210,000천원 민간: 70,000천원 계:280,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 27명 내부: 27명 외부: 명	총 연구비	정부:600,000천원 민간:200,000천원 계:800,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)인텔리지오 연구개발부			참여기업명 대전대학교 산학협력단	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급[일반] 본 과제는 IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영시스템을 개발하여 공공에 널리 보급함이 목표이므로 공공적 성격이 강함. 따라서 보안등급은 공개 가능한 일반등급으로 분류함

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호	4	2				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약	보고서 면수
○ 모델링 활용 취수량 유지조건 검토 및 조건별 배후지 영향범위 검토 ○ 방사형집수정 성능평가 및 최적의 운영방안 도출, 적용성 검토 수행 ○ 수평집수관별 하천수 유입비율 및 체류시간 분석 수행 ○ 취수방식에 따른 원수 수질변화 모니터링 및 분석, 계절적 영향 검토 ○ 지층특성을 고려한 방사형집수정 취수량 평가 및 감소원인 연구 ○ 인공신경망 기반의 지하수위 및 취수량 예측프로그램 개발	199

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	대체수자원으로서 대용량 강변여과수 개발시 취수량 감소를 억제하면서(90% 이상 유지) 배후지 영향을 최소화하고 최적의 수질 확보를 위한 IT 기반의 수평집수관별 취수 운영·제어 시스템 개발 • 계측 및 IT 연계 집수정 통합 운영·제어 시스템 개발 - 적용 Site 조사 및 분석 - IT 기반 자동운영 시스템 개발 - 취수에 따른 원수수질 변화 및 배후지 지하수위 영향 평가 및 예측 - 최적 운영방안 도출 및 취수량 배분 시스템 개발		
연구개발성과	• 취수량 90% 이상 유지가능한 배후지 영향 최소화 운영제어 시스템 개발 • 운용효과 평가 프로그램 및 집수정 운영관리지침 개발		
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 선진국 수준의 강변여과수 유지관리기술 확보 • 취수원 개발시 배후지 민원 해소 • 강변여과 사업의 적극 추진 가능		
핵심어 (5개 이내)	방사형집수정	수평집수관 개별 제어시스템	배후지 저영향

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Development of IT-based RBF management system in order to minimize the pumping effect on the riverside and pumping rate reduction at the collector well • Development of IT-based and monitoring-based RBF management system - Test site survey and operation data analysis - Development of IT-based automatic operation system - Assessment of water quality change at the collector well after a long-term pumping - Evaluation of groundwater level change at the riversides due to an operation of a collector well - Design of optimum operation process and development of automatic water distribution system		
Results	• Development of management system which minimize the effect on the riversides and pumping quantity reduction • Development of the program for evaluating the effect and publishment of the guideline for optimum management		
Expected Contribution	• Secure optimum maintenance techniques • Resolve public grievance caused by the RBF system development • Activate the RBF project in this country with proving the effectiveness		
Keywords	Radial collector well	Individual control system of laterals	Low impact on hinterland

<목 차>

제 출 문 ····· i
요 약 서 ····· ii
목 차 ····· iv
표 목 차 ····· viii
그림목차 ····· x

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1
제 1 절 연구개발의 목적 ····· 1
1. 연구 배경 ····· 1
2. 연구 목적 ····· 3

제 2 절 연구개발의 필요성 ····· 4
1. 과학 · 기술적 측면 ····· 4
2. 경제 · 산업적 측면 ····· 4
3. 사회 · 문화적 측면 ····· 5

제 3 절 연구 범위 및 주요 연구 내용 ····· 6
1. 연구 조직도 ····· 6
2. 최종 연구 목표 ····· 7
가. 최종목표 ····· 7
나. 최종목표 설정근거 ····· 7
3. 연차별 연구 내용 및 목표 ····· 7
가. 1차년도 ····· 8
나. 2차년도 ····· 8
다. 3차년도 ····· 9
4. 연구 추진 체계 ····· 9

제 2 장 국내 · 외 기술 개발현황 ····· 10
제 1 절 국내 기술 및 산업 동향 ····· 10
1. 수변평가 계측 기술 분야 ····· 10
2. 간접취수 시공기술 분야 ····· 11
3. 연구개발 실적 및 기술 특허 동향 ····· 12

제 2 절 국외 기술 및 산업 동향 ····· 14
1. 지하수 계측평가 기술 및 지하수-지표수 연계 통합 물수지 해석 ····· 14
2. 간접취수 시공기술 분야 ····· 15
3. 연구개발 실적 및 기술 특허 동향 ····· 16

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 18
제 1 절. 현장지역 지하수 영향평가 ····· 18
1. Test bed 특성분석 ····· 18
가. 조사현황 ····· 18
나. 심도별 지층분류 ····· 19
다. 현장투수시험 결과 ····· 20
라. 수평집수관 위치 상세분석 ····· 21
마. 수평집수관 입도분석자료 활용 ····· 21
2. 수치모델링을 활용한 장기운영 분석 ····· 26
가. 개요 ····· 26
나. 광역모델 구축 ····· 27
다. 상세모델 구현 ····· 31
3. 취수시설 개발가능량 및 영향거리 분석 ····· 36
가. 개요 ····· 36
나. 취수시설 운영조건 ····· 37
다. 수평집수관 제어시 취수량 분석 ····· 38
라. 배후지 지하수위강하 영향거리 ····· 39
4. 검토결과 요약 ····· 43

제 2 절. 배후지 영향 최소화 방안 연구 ····· 44
1. 관측망 설계 ····· 44
가. 지하수 관측정 설치 ····· 44
나. 관측정 시설 기준 ····· 53
다. 관측 장비 ····· 57
라. 관측망 구축 ····· 60
2. 장기운영에 따른 배후지 영향 평가 ····· 61
가. 운영현황 ····· 61
나. 방사형집수정 성능평가 ····· 62
다. 배후지 영향 평가 ····· 63
라. 배후지 관측망 수위관측 결과 ····· 65
마. 현장운영결과 요약 ····· 67
3. 집수정 취수에 따른 지하수위 변화 특성 ····· 68
가. 연구지역 ····· 68
나. 집수정 취수량에 따른 지하수위의 공간적 분포 ····· 69
다. 방사형 집수정 취수시 지하수위 변화 특성 ····· 70
라. 방사형 집수정 취수 중단시 지하수위 변화 특성 ····· 76
마. 방사형 집수정 취수 및 중단시 지하수위 변화 비교 ····· 77

4. IT를 활용한 최적의 운영방법 적용 ····· 78
가. 통신망 인프라 구조 ····· 78
나. 유무선 통합 원격 제어망 ····· 79
다. 이동통신망을 이용한 원격 제어망 ····· 81
라. IoT망을 이용한 원격 제어망 ····· 82
마. Low Power RF를 이용한 원격 제어망 ····· 84
바. 적용성 검토결과 ····· 85
사. 운영시스템 구축 ····· 86

제 3 절. 방사형집수정 운영에 따른 수질변화 분석 ····· 89
1. 수질항목 선정 ····· 89
가. 원수의 수질검사 기준(상수원관리 규칙 제25조 제1항) ····· 89
나. 먹는물 수질기준(46개항목) ····· 89
다. 수평집수관별 유입비율 분석을 위한 항목 선정 ····· 89
2. 혼합비율 및 평균체류시간 산정 ····· 89
가. 서론 ····· 89
나. 분석방법 ····· 92
다. 분석결과 ····· 98
라. 고찰 및 결론 ····· 103
3. 취수방식에 따른 수질개선 효과 평가 ····· 104
가. 실험방법 ····· 104
나. 원수 생활환경기준 검토 ····· 106
다. 염소요구량 검토 ····· 113
4. 집수정 취수에 따른 지하수 온도 분포 ····· 116
가. 지하수 수온 관측 현황 ····· 116
나. 집수정 취수와 지하수 온도 시계열 분포 ····· 116
5. 집수정 취수시에 따른 지하수질 변화 ····· 119
가. 연구방법 ····· 119
나. 수질 특성 변화 ····· 120
6. 집수정 취수중단에 따른 지하수질 변화 ····· 129
가. 연구방법 ····· 129
나. 수질 특성 변화 ····· 129

제 4 절. 방사형 집수정 취수량 감소 특성 평가 ····· 139
1. 취수량 추정 및 변동 분석 ····· 139
가. 유효반경을 사용하는 방법의 경우 ····· 139
나. 경험적 방법을 이용하는 경우 ····· 139
2. 연구지역 적용 추정식의 개발 ····· 140

가. 연구지역 적용 추정식의 개발 ····· 140
나. 유효반경의 적정성에 대한 검토 ····· 140
다. 수리전도도의 적정성에 대한 검토 ····· 143
라. 취수량 감소 특성 ····· 146
마. 수평정의 입자 및 수리 특성 ····· 147
바. 수평정의 설계와 시공 요인 검토 ····· 148

제 5 절. 취수량 평가 프로그램 개발 및 평가 ····· 151
1. 수치모델과 인공신경망 모델을 융합한 적정 취수량 결정 기법 검토 ····· 151
가. 프로그램 개발 배경 ····· 151
나. 수치 모델 분석 ····· 151
다. 인공신경망 모델 구축 ····· 153
라. 인공신경망 프로그램 초안 개발 ····· 154
마. 배후지 수위 영향 최소화 취수량 결정 방안 ····· 155
바. 모델의 검증 ····· 157
사. 인공신경망 모델의 적용성 ····· 158
2. 현장 실증 자료 기반의 MLPRegressor를 이용한 인공신경망 모델 개발 ····· 160
3. 배후지 최고 지하수위 유지 조건 분석 ····· 164
4. 최고 지하수위 유지조건의 실제 운영 결과 비교 ····· 165
가. OW1의 지하수위를 가장 높게 유지하면서 취수하고자 하는 경우 ····· 165
나. OW7의 지하수위를 가장 높게 유지하면서 취수하고자 하는 경우 ····· 166
5. 일반사용자용 인공신경망 프로그램의 개발 ····· 167
가. 프로그램 개발 환경 ····· 167
나. 프로그램 구동을 위한 자료준비 ····· 168
다. 프로그램 설치 ····· 168
라. 프로그램 사용법 ····· 170

제 4 장 연구목표 달성 및 효과 ····· 190
제 1 절 양적성과 달성 ····· 191
제 2 절 질적성과 달성 ····· 193

제 5 장 연구개발성과의 활용 ····· 194

제 6 장 참고문헌 ····· 198

<표 차례>

표 1. 연구 조직도 ····· 6
표 2. 시추조사 결과 ····· 19
표 3. 현장투수시험 결과 ····· 20
표 4. 수평집수관 입도분석 결과를 이용한 수리전도도 산출 ····· 22
표 5. 광역모델 함양량 ····· 28
표 6. 광역모델 수리전도도 구역화 ····· 28
표 7. 상세모델 함양량 ····· 31
표 8. 상세모델 수리전도도 구역화 ····· 32
표 9. 모델보정에 따른 실측 지하수위와 계산된 지하수위 ····· 34
표 10. 모델보정에 따른 수평집수관별 실측 유량과 계산 유량 ····· 35
표 11. 취수시설 제어시스템 비교 ····· 36
표 12. 4,000㎥/day 운영시 수평집수관 제어에 따른 취수량변화 ····· 38
표 13. 5,000㎥/day 운영시 수평집수관 제어에 따른 취수량변화 ····· 38
표 14. 6,000㎥/day 운영시 수평집수관 제어에 따른 취수량변화 ····· 39
표 15. 취수량(4,000㎥/day) 제어조건별 영향거리 비교(수위강하 0.2m 기준) ··· 40
표 16. 취수량(5,000㎥/day) 제어조건별 영향거리 비교(수위강하 0.2m 기준) ··· 41
표 17. 취수량(6,000㎥/day) 제어조건별 영향거리 비교(수위강하 0.2m 기준) ··· 42
표 18. 지하수 관측의 목적 ····· 45
표 19. 지하수 관측 유형별 활용 특성 ····· 46
표 20. 지하수 관측망 설계시 고려해야할 요소들 ····· 47
표 21. 유럽 9개국의 지하수 수위 및 수질 관측망의 분포 밀도 ····· 49
표 22. 유럽의 특수 목적용 지하수 관측망의 밀도 ····· 49
표 23. 국내외 자동수위 계측장비 현황 ····· 57
표 24. 자동수위 계측장비의 측정 원리별 특징 ····· 58
표 25. MK-15CTD의 측정 항목별 센서 사양 ····· 58
표 26. WM4100-S의 측정 항목별 센서 사양 ····· 59
표 27. EB-5000의 측정 항목별 센서 사양 ····· 59
표 28. 방사형집수정 관측망 구축 현황 ····· 60
표 29. 배후지 영향 평가를 위한 운영 일정 ····· 61
표 30. 갈수기 취수량 조건 4,000㎥/일의 수평집수관 제어 현황 ····· 63
표 31. 갈수기 취수량 조건 5,000㎥/일의 수평집수관 제어 현황 ····· 64
표 32. 각 관측공에서 측정 및 계산된 지하수위 변화 ····· 73
표 33. 평균 대수층 두께 및 추정된 수리전도도 ····· 74
표 34. 블록별 주요 기능 ····· 82
표 35. 지하수, 하천수, 여과수에서 측정된 Si와 라돈 농도 ····· 98
표 36. 강변여과수의 두 end member의 주요 인자 측정 농도 ····· 98
표 37. 집수정 강변여과수에 대한 추적자별 하천수 기여비율 산정 결과 ····· 99

표 38. 집수정 강변여과수에 대한 하천수 기여 평균비율 산정 결과 ····· 99
표 39. 하천수와 여과수의 물 안정동위원소 조성 ····· 100
표 40. Exponential model에 의한 여과수내 하천수 기여분의 평균체류시간 ····· 102
표 41. 원수 수질현황(2017) ····· 107
표 42. 원수 수질현황(2018) ····· 107
표 43. 원수 수질현황(2019) ····· 107
표 44. 원수의 수소이온농도(pH) 측정결과(2017~2019) ····· 108
표 45. 원수의 생물화학적산소요구량(BOD) 측정결과(2017~2019) ····· 108
표 46. 원수의 부유물질량(SS) 측정결과(2017~2019) ····· 109
표 47. 원수의 용존산소량(DO) 측정결과(2017~2019) ····· 110
표 48. 원수의 총 대장균군 측정결과(2017~2019) ····· 110
표 49. 원수의 분원성대장균군 측정결과(2017~2019) ····· 111
표 50. 원수의 먹는 물 분석 결과 ····· 115
표 51. 염소요구량 검토 ····· 115
표 52. 현장 수질 분석 결과 ····· 120
표 53. 이온분석결과 ····· 122
표 54. 철, 망간 분석 값 ····· 128
표 55. 현장 수질 분석 결과 ····· 129
표 56. 이온분석결과 ····· 131
표 57. 철, 망간 분석 값 ····· 137
표 58. 유효반경 산정 방법 ····· 139
표 59. 각 추정식에서 제안한 유효반경 계산식을 적용한 결과 ····· 140
표 60. 각각의 수리전도도를 적용하여 추정된 산출량 ····· 141
표 61. 입도분석결과 및 양수시험 결과로 추정된 수평정의 수리전도도 ····· 145
표 62. 각 수평정별 양수시간 ····· 146
표 63. 각 수평정의 평균 입경 크기(이상값 제외) ····· 147
표 64. 입자 기반 추정 수리전도도와 양수시험 자료 기반 수리전도도 ····· 150
표 65. 10가지 경우에 대한 수평정별 취수량 조건 ····· 152
표 66. 10가지 경우에 대한 관측정의 지하수위 예측 결과 ····· 153
표 67. 고수위 및 저수위의 운영조건 제안 ····· 156
표 68. 모델 개발 결과 ····· 157
표 69. 각 모델에 의한 수위 예측 결과 ····· 157
표 70. 인공신경망 모델 개발을 위한 강변여과수 취수 조건 및 지하수 관측정의 지하수위 ·· 163
표 71. 4,000 ㎥/d의 취수시 OW-1의 지하수위 최적화 결과 ····· 164
표 72. OW-1의 실제 4,000 ㎥/d의 취수시 지하수위 비교 ····· 165
표 73. OW-7의 실제 4,000 ㎥/d의 취수시 지하수위 비교 ····· 166
표 74. 연구개발내용 및 달성도 ····· 190
표 75. 양적 성과 달성 ····· 191
표 76. 질적 성과 달성 ····· 193

<그림 차례>

그림 1. 강변여과수 모식도 ····· 1
그림 2. 국내외 개발사례 ····· 2
그림 3. 대용량 취수시설 민원사항 ····· 2
그림 4. 강변여과수 수량 및 수질관련 문제사항(2017, KBS) ····· 5
그림 5. 연구 추진 체계 ····· 9
그림 6. 연구지역 위치도 ····· 18
그림 7. 연구부지 인근 시추조사 위치 ····· 19
그림 8. Test bed 지층 단면도 및 조사위치 ····· 21
그림 9. 수평집수관 입도분석 위치 및 수리전도도 분포도 ····· 21
그림 10. 광역모델 격자망 구성 및 경계조건 ····· 27
그림 11. 광역모델 수리전도도 설정 ····· 29
그림 12. 광역모델 지하수위 및 지하수 유동방향 ····· 30
그림 13. 상세모델 격자망 구성 및 경계조건 ····· 31
그림 14. 상세모델 수리전도도 설정 ····· 33
그림 15. 보정된 모델의 지하수위와 관측 지하수위 비교 ····· 34
그림 16. 모델보정에 사용된 관측공 위치도 ····· 35
그림 17. 수평집수관 배치형태 및 배후지 ····· 37
그림 18. 방사형집수정 취수량(4,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도 ····· 40
그림 19. 방사형집수정 취수량(5,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도 ····· 41
그림 20. 방사형집수정 취수량(6,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도 ····· 43
그림 21. 고도별 관측정의 설치 개념 ····· 47
그림 22. 수계 분지내 지하수 관측정 설치 위치 ····· 48
그림 23. 오염원 유입방지 그라우팅 및 상부보호시설의 사례 ····· 55
그림 24. 방사형집수정 관측망 구축 위치도 ····· 60
그림 25. 대용량 취수시설의 취수량 측정결과 ····· 61
그림 26. 방사형 집수정의 개발유량 평가 ····· 62
그림 27. 갈수기 취수량 조건 4,000㎥/일의 수평집수관 제어 결과 ····· 63
그림 28. 갈수기 취수량 조건 5,000㎥/일의 수평집수관 제어 결과 ····· 64
그림 29. 갈수기 취수량 조건 4,000㎥/일의 지하수위 변화 ····· 65
그림 30. 갈수기 취수량 조건 5,000㎥/일의 지하수위 변화 ····· 66
그림 31. 연구지역 위치도 및 관측현황 ····· 68
그림 32. 집수정 취수 조건에 따른 배후지 지하수위 분포 ····· 69
그림 33. 방사형집수정 취수시 주변지역 지하수위 변화 ····· 70
그림 34. Mirror well 개념도 ····· 71
그림 35. k 값 변화에 따른 실측 및 계산된 지하수위 변화 ····· 73
그림 36. 입도분석 자료로부터 추정한 수리전도도 분포도 ····· 74

그림 37. 수리전도도 및 대수층의 두께 변화에 따른 지하수위 변화 ····· 75
그림 38. 방사형 집수정 취수 중단 후 지하수위 변화(4000 ㎥/d 취수 중단 후) 76
그림 39. 방사형 집수정 취수 및 중단시 지하수위 변화 ····· 77
그림 40. 통신망 인프라 구조 ····· 78
그림 41. 유무선 통합 원격 제어용 Gateway 동작 절차 ····· 80
그림 42. 백홀 변경 절차 ····· 80
그림 43. Gateway 블록도 ····· 81
그림 44. IoT망을 이용한 유무선 통합 원격 제어망 구성도 ····· 83
그림 45. LoRa Base Station 기본 블록도 ····· 83
그림 46. IoT용 Gateway 블록도 ····· 84
그림 47. Low Power RF 솔루션을 이용한 망 구성도 ····· 84
그림 48. Low Power RF의 적용 가능 거리 Simulation 결과 ····· 85
그림 49. Common Platform Gateway 블록도 ····· 86
그림 50. 연구지역 운영시스템 구축 ····· 86
그림 51. 자동 수위관측 전송 화면 ····· 87
그림 52. 펌프 운영화면 ····· 88
그림 53. 수평집수관 유량 및 밸브 ····· 88
그림 54. 네덜란드 연구사례: 연구지역 위치도와 강변 집수정 위치도 ····· 91
그림 55. 네덜란드 연구사례: 수리적 특성과 집수관정에서의 농도 ····· 91
그림 56. 안성천 강변여과 지역 시료채취 위치도 ····· 93
그림 57. 하천수와 여과수내 물 안정동위원소 조성의 시기적 변동 ····· 101
그림 58. 강변여과수 취수시설 ····· 105
그림 59. 취수방식에 따른 원수 수질비교 ····· 105
그림 60. 원수의 수소이온농도(pH) 측정결과(2017~2019) ····· 108
그림 61. 원수의 생물화학적산소요구량(BOD) 측정결과(2017~2019) ····· 109
그림 62. 원수의 부유물질량(SS) 측정결과(2017~2019) ····· 109
그림 63. 원수의 용존산소량(DO) 측정결과(2017~2019) ····· 110
그림 64. 원수의 총 대장균군 측정결과(2017~2019) ····· 111
그림 65. 원수의 분원성대장균군 측정결과(2017~2019) ····· 111
그림 66. 하천의 생활환경기준 ····· 112
그림 67. 망간 처리 개념도 ····· 114
그림 68. 원수의 암모니아성질소 측정결과(2017~2019) ····· 115
그림 69. 방사형집수정 취수시 관측공의 심도별 지하수온 변화 ····· 116
그림 70. 안성천 연구지역 관측공 위치도 ····· 119
그림 71. 집수정 취수시에 따른 현장 간이수질 분석 결과 ····· 123
그림 72. 하천 인근에 위치한 관측공의 유형을 파악하기 위한 Piper diagram ····· 126
그림 73. 제방 인근 관측공들의 유형을 파악하기 위한 Piper diagrams ····· 127
그림 74. 관정별 Fe2+, Mn2+ 분포도 ····· 128

그림 75. 집수정 취수중단에 따른 현장 간이수질 분석 결과 ····· 133
그림 76. 하천 인근에 위치한 관측공의 유형을 파악하기 위한 Piper diagrams ····· 135
그림 77. 제방 인근 관측공들의 유형을 파악하기 위한 Piper diagrams ····· 136
그림 78. 관정별 Fe^{2+}, Mn^{2+} 분포도 ····· 138
그림 79. 각 수리전도도 값을 적용하여 추정한 산출량 ····· 141
그림 80. 산출량과 수평정 개수, 하천과의 이격거리 상관관계 ····· 142
그림 81. Babac 추정식들에 대한 상관관계 ····· 143
그림 82. 안성천 입도 분석에 의한 추정 수리전도도의 히스토그램 ····· 143
그림 83. 로그 변환된 수리전도도 분포(쌍봉형태) ····· 144
그림 84. 로그 변환된 값이 0보다 작은 경우와 큰 경우의 히스토그램 ····· 144
그림 85. 수직정 양수시험 자료를 활용한 수리전도도도 분포도 ····· 145
그림 86. 각 수평정별 양수에 따른 취수량 변화 ····· 147
그림 87. 각 수평정에서 추정된 수리전도도에 대한 박스도표 ····· 148
그림 88. 물리적 특성과 취수량 감소 속도 비교 ····· 149
그림 89. 연구지역 수리전도도 분포 ····· 152
그림 90. 다층퍼셉트론 인공신경망 모델 개념 ····· 153
그림 91. 원자료와 예측자료의 상관관계(좌:OW-7, 우:OB-11) ····· 154
그림 92. 신경망 수위 예측 프로그램 v1.0 실행화면 ····· 154
그림 93. 신경망 수위 예측 프로그램 v1.0 일부 내용 ····· 155
그림 94. 52가지의 취수조건에 따른 2개 관측정 지하수위 예측 ····· 156
그림 95. 취수 조건에 따른 지하수위 변화 ····· 158
그림 96. 입출력 인자간의 상관관계 분포 ····· 159
그림 97. 연구지역의 방사형 집수정 구조 및 지하수 관측정 현황 ····· 160
그림 98. OW1의 지하수위가 가장 높을 때 예측 지하수위와 실제 지하수위의 관계 ····· 165
그림 99. OW7의 지하수위가 가장 높을 때 예측 지하수위와 실제 지하수위의 관계 ····· 166

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

1. 연구 배경

20세기 고속성장의 원동력이었던 산업화는 21세기 이후 기후변화를 불러와 수자원의 양/질 변화를 가져왔고, 물 부족 문제와 도시화와 이상기온으로 인한 가뭄 및 하천 고갈이 빈번하게 예상되는 시기에 취수원 부족이 사회적 이슈로 대두되고 있다. 국내의 경우 90%이상의 상수원을 지표수에 의존하고 있으며, 약 40%가 호소를 수원으로 이용하고 있어 지표수의 의존도가 높은 실정이다. 지표수는 가뭄 등 이상기후 발생 시 수량과 수질에 문제가 발생할 수 있으며, 사실상 대부분의 호소는 부영양화에 따른 조류발생 문제를 잠재적으로 갖고 있어 정도의 차이는 있으나 호소를 수원으로 하는 모든 정수시설이 맛과 냄새, 조류독성에 대한 위험을 내포하고 있다고 할 수 있다.

지표수의 의존도가 높은 국내 실정에서 직접취수에 대한 문제점을 해결하고 취수원의 다변화 정책에 부응하기 위해 2000년대 초에 간접취수 방안이 도입되었다.

수변지역의 간접취수 방식인 강변여과수는 하천수가 강변에 분포하고 있는 충적층을 통과하면서 불순물과 미생물이 자연여과된 물로서 대용량의 깨끗한 물을 안정적으로 취수할 수 있는 친환경적 대체수원이다. 또한 이러한 취수 과정을 통해 강변여과수는 수질이 양호하여 정수공정이 단순하고 경제적이고 환경친화적인 시설유지가 가능하다.

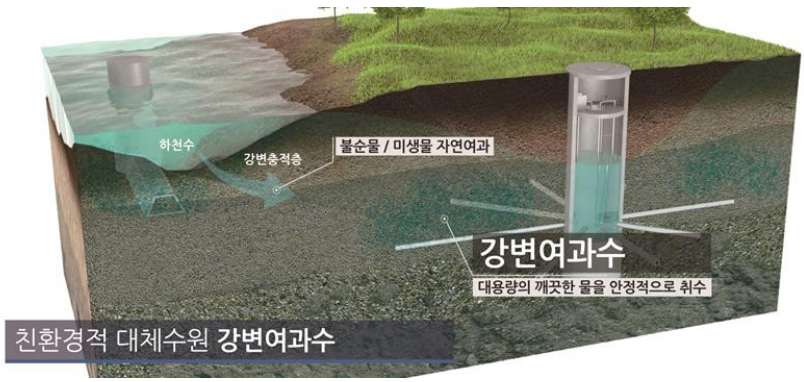


그림 1. 강변여과수 모식도

이러한 장점으로 유럽과 미국 등의 선진국에서는 오래전부터 강변여과수와 같은 간접취수 개발을 통해 상수원수를 공급하고 있다. 국내에서도 낙동강 창원, 갑천, 탄천 등에 간접취수원이 개발되었으며 김해시, 의령군, 창녕군 등의 취수원개발사업과 지자체의 생태하천조성사업에도 강변여과수를 도입하였다.

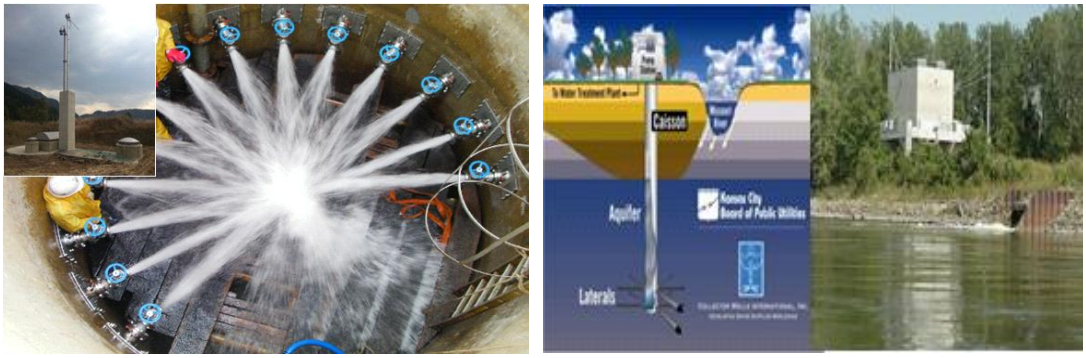


그림 2. 국내외 개발사례

대용량 간접취수의 방식의 대표적인 형태는 방사형 집수정으로, 국내에서도 강변여과수는 물론 대용량 취수방식에 가장 많이 적용되고 있는 취수방식이다. 이와 같은 대용량 취수시설을 장기 운영할 때 발생하는 가장 빈번하고 큰 문제는 배후지의 지하수위 하강에 따른 지반침하나 지하수량 감소 영향 등으로 인한 민원이 계속 발생된다는 점으로, 특히 가뭄으로 인한 취수원 부족시에는 계속적인 사회적으로 이슈가 될 것으로 예상된다.



그림 3. 대용량 취수시설 민원사항

현재 국내에서는 지하수법에 의해 지하수를 생활용수 목적으로 100톤/일 이상 개발하고자 할 때 실시설계시 지하수 취수에 따른 주변 영향을 평가하도록 고시되어 있고, 또한 하천법에 의해 하천 인근에서 지하수를 취수할 경우 그에 따른 하천수의 영향을 평가하도록 고시되어 있다. 그러나 강변여과수 취수시 배후지 지하수위에 대한 영향평가는 법적으로 명시되지 않았으며, 다만 취수시설 설계시 목표취수량으로 취수시설을 운영할 경우 배후지의 영향에 대해 이론·경험식이나 수치모델링을 통해 평가하고 있는 실정으로 개발 후 취수시에 실질적인 영향 및 민원을 고려하여 효율적으로 운용하고 대처할 수 있는 기술적 기반은 마련되지 못한 실정이다. 이러한 이유로 대용량의 취수시설 구축이 계획되면 배후지 영향을 우려한 인근

주민들의 민원이 계속 발생하고 있다.

이와 같은 사회적 이슈에 대한 문제해결을 위해서는 현재의 취수시스템으로는 취수량을 감소시켜 배후지 영향을 줄이는 방법이외는 없다. 그러나 취수량을 감소하는 방안은 실제 취수량에 비해 부적절하게 개발된 시설투자비로 인한 손실과 취수량 규모에 비해 과다한 취수시설을 운영해야 하는 비효율적 운영으로 인한 경제적인 손실을 초래할 수밖에 없다. 또한 부족한 취수량을 메우기 위해 새로운 수원 개발을 위한 비용을 추가로 소비해야 하므로 현실적인 해결책이 되지는 않는다. 그러므로, 근본적인 해결책 마련을 위해서는 개발된 전체 시설물을 활용하면서 취수량의 감소 및 배후지의 지하수위 저하량을 최소화하여 배후지에 미치는 악영향을 방지할 수 있는 운영시스템과 이를 뒷받침할 수 있는 요소기술 개발이 필요하다.

2. 연구 목적

본 연구는 방사형집수정의 수평집수관별로 취수량 조절 분배를 통해 배후지 영향을 최소화하는 시스템으로 총취수량의 감소가 거의 없이 수평집수관별 유입량을 조절할 수 있는 운영 시스템을 개발하는 것이 목적이다. 대용량 취수시설 운영에 따른 배후지 영향이 최소화되는 최적 운영방안을 도출하기 위해서는 배후지에 관측공을 설치하고 관측자료와 취수자료 등을 연계 평가하는 것이 필요하며, 배후지 영향을 최소화하기위한 통합 시스템을 정밀하고 효율적으로 운영하기 위해서는 IT 기반의 취수시설 운영시스템이 개발되어야한다.

구 분		기존 취수시설	연구 취수시설
개 요		단순 펌프조절장치	IT기반의 통합운영 시스템
수평 집수관	제어	제어 불가	원격제어 가능
	밸브	없음	취수량 조절밸브 설치
	유량계	없음	개별 집수관 유량계 설치
지하수위 강하 영향거리		원형으로 제어(방향별 제어 불가) 	집수관 방향별로 제어 가능 
특징		수평집수관별 취수량제어가 불가하여 지하수위 강하 영향반경을 감소 시 동시에 취수량이 감소가 매우 큼	수평집수관별로 취수량제어가 가능하여 지하수위 영향거리를 부분적으로 제어하고 취수량 감소가 최소화 됨

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 과학 · 기술적 측면

그 동안 국내에서는 강변여과수에 대한 조사, 설계 및 시공 기술을 중심으로 기술 개발이 이루어졌으며(수변지하수활용고도화연구단 등), 어느 정도 세계 수준에 근접한 기술이 확보되었다. 반면에, 강변여과 시설의 장기 운영과정에서 발생되는 배후지 수위 및 수질 변화, 집수정 시설의 변형 등에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않아 강변여과 시설의 효율적 운영 기준이 마련되어 있지 않다.

본 연구는 현재 설계 또는 운영 계획인 강변여과 시설의 시공시 배후지 주민이 우려하는(현재 부산경남권 강변여과수 개발 공사에서 유사한 민원이 발생) 지하수 고갈 및 오염 확산 문제를 해소하기 위한 기술로서, 실제 강변여과 시설의 수평집수관별 운영 체계(유량 조정 등)를 조정 또는 변형함으로써 발생되는 배후지의 수위 및 수질 변화를 분석하여 궁극적으로는 주변의 계측 자료에 기반한 배후지 영향 최소화에 적합한 취수 및 운영 방식을 도출하는 연구이다.

IT를 기반으로 하는 상수도 관련 연구는 정수 및 관로 분야에서는 활발히 진행되어 왔으나 강변여과수를 활용한 IT 활용 연구는 『수변지하수활용고도화연구단』에서 수행한 것이 유일하다. 연구단에서 수행한 연구는 배후지 관측 자료를 송수신하고 도식화하여 현황 파악 및 시설관리 수준의 시스템에 머무르고 있으며, 위에서 언급한 강변여과 장기 운영 과정에서의 우려되는 배후지 민원의 해결에 필요한 연구는 수행되지 못하였다.

기술적인 측면에서 취수시설의 최적화 운영기술은 국내 최초로 개발되는 기술로 소규모 단일 취수시설 뿐 아니라 다수의 대규모 취수시설에서도 확장 적용이 가능한 효율적인 기술이다.

2. 경제 · 산업적 측면

개발된 기술은 대용량 취수원 개발시 발생되는 문제 해결을 위한 요소기술로써 기본적으로 대용량 취수원인 강변여과수와 같은 방식이 적극 활용될 경우 경제적 파급효과가 크다.

본 연구에서는 강변여과수와 같은 방식이 적극 활용될 수 있도록 기존 문제 사항으로 대두되던 장기운영에 따른 취수량 저하 문제, 장기적인 수질변화 모니터링 결과 부제 문제 해결을 위한 분석을 추가적으로 수행하였다. 수행결과를 바탕으로 관련 기관 및 담당자들의 인식전환을 위한 홍보가 지속된다면 경제적 파급효과를 극대화 있을 것으로 판단된다.


뉴스광장 1부

수백억 돈 들인 '강변여과수' 5곳 중 3곳 무용지물

입력 2017.06.19 (06:52) 수정 2017.06.19 (07:10)

KBS1

〈녹취〉 창원시 대산정수장 직원 : "(한 번도 공급된 적이 없습니까?) 수질이 안 맞는 것을 가동할 수 없잖아요. 최고 중요한 것이 수질이니까."

이곳에서 100여 미터 떨어진 또 다른 취수정도 사정은 마찬가지입니다.

지난 2013년에 준공된 이 취수정도 한번도 가동되지 않은 채 이렇게 방치되고 있습니다.

창원시가 736억 원을 들여 지난 2013년에 준공한 강변 여과수 취수정은 모두 5곳.

이 가운데 3곳은 설계와 달리 취수량이 부족하거나 중금속이 검출되면서 사용을 하지 않고 있습니다.

그림 4. 강변여과수 수량 및 수질관련 문제사항(2017, KBS)

3. 사회 · 문화적 측면

21세기 주요 선진국들은 자국의 이익을 추구하는 무분별한 산업경제의 활성화를 지양하고,「기후변화」와 「저탄소 녹색성장」이라는 패러다임 아래 경제와 환경이 조화를 이루는 성장을 위해 노력을 기울이고 있다. 이러한 국제적, 사회적 정세변화에 능동적으로 대처하기 위해 수자원 분야에서도 기존에 댐, 저수지 건설정책을 탈피하고 기후변화 대응, 하천환경 친수공간의 정비, 유역단위 통합 물 관리, 청정 수자원의 지속적/안정적 공급체계 구축의 정책방향을 내세워 효율적인 수자원 확보와 공급대책을 추진하고 있다.

점차 이상기후 및 가뭄 등으로 인해 수질이 깨끗하고 안정적 공급이 가능할 것으로 기대되는 대체수원으로서 간접취수원의 개발이 예상되며, 대용량 취수에 따른 영향으로 인해 발생될 불안감을 해소하고, 불필요한 갈등을 사전에 방지함으로 지속적인 간접취수 개발을 가능하게 하고 사회적 갈등해소 비용을 절감하는 효과가 기대된다.

본 연구과제를 통해 개발된 『IT 기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발』을 통해 가뭄 등 이상기후에 대비한 지하의 수자원을 대용량으로 개발할 수 있으며, 대용량 취수로 인한 배후지 지하수 고갈 및 지반함몰 등의 사회적 문제에 효과적으로 대응할 수 있다.

정책적인 측면에서 현재 운영 중이거나 향후 건설 예정인 대용량 취수시설 운영방법에 대한 가이드라인 제정이 가능하다.

제 3 절 연구 범위 및 주요 연구 내용

1. 연구 조직도

표 1. 연구 조직도

연구개발과제	
과제명	IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	1	18	27
대 학	1	9	
국공립(연)			
출 연 (연)			
기 타			

주 관 연 구 기 관	공 동 연 구 기 관
(주)인텔리지오	대전대학교 산학협력단
참 여 연 구 원	**참 여 연 구 원**
주관연구책임자 (이치형)외 17명	공동연구책임자 김규범외 8명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**
- 배후지 관측망을 포함한 IT기반 취수시설 운영시스템 개발 - 취수시설의 운영 결과와 배후지 영향의 상관성 분석 - 배후지 지하수위 목표치 이내로 유지되는 최적 운영방안 도출 - 최적 운영방안을 IT와 접목하여 저영향 양수 조절 시스템 개발 - 장기 운영을 통해 시스템을 검증하고 운영 매뉴얼 작성 - 지하수 수질분석을 통해 장기 운영에 따른 수질변화 분석 - 강변 여과수의 수질개선 효과 분석	- 수평집수관의 취수량 평가 알고리즘 개발 - 수평집수관의 취수량 예측 프로그램 개발 - 프로그램의 확장성 및 적용성 평가

2. 최종 연구 목표

가. 최종목표

본 연구개발과제의 최종목표는 강변여과수 개발시 취수량 감소를 억제하면서(90% 이상 유지) 배후지 영향을 최소화할 수 있도록 계측과 연계한 IT 기술을 활용한 수평집수관별 취수 운영 · 제어 시스템을 개발하는 것이다.

나. 최종목표 설정근거

이상기온 및 가뭄에 따른 조류발생 및 강우량 감소 등으로 지표수 직접취수 방식에 의한 수자원 공급의 한계가 대두되어, 가까운 미래에 발생할 기상재해에 대처할 수 있는 다양한 대체 수자원의 개발이 절실하게 되었다.

21세기 프론티어연구개발사업에서는 강변여과, 지하댐, 인공함양, 간이상수도 등 대체수자원과 관련된 분야별 기술들이 개발되었으나, 지하수 유역 개념의 통합 이용 관리 기술은 다루지 못하였다. 또한, 현재 국내에서 운전되고 있는 강변여과 시설의 경우 운영관리에 대한 기준과 원칙이 마련되어 있지 않아 장기 운영에 따른 취수량 감소나 수중 장치 및 부속물의 손상 등이 발생되고 있다.

수변지하수활용 고도화 연구단에서 대용량의 간접 취수를 위해 지반 조사와 취수시설의 설계 및 시공 등에 대한 현장 기술을 개발하여 선진국 수준의 취수량 확보 기술을 개발하여 취수량확보에 대한 우려는 어느 정도 극복하였다. 그러나 대용량 취수에 따른 배후지의 지하수위 저하로 인해 발생하는 부수적인 영향에 대해서는 수치모델링을 활용한 예측 수준의 분석이 수행되었을 뿐 장기간 운영을 통한 영향평가 및 운영관리 기술 확보는 수행되지 못하였다.

최근 대규모 강변여과 시설 개발시 배후지의 지하수위 강하 등에 대한 민원이 제기되는 등 국책사업의 추진에 지장을 받고 있어 배후지 영향을 최소화할 수 있는 운영관리 기술의 확보가 시급하다.

따라서 본 과제에서는 대용량 간접취수시 취수가능량의 90% 이내로 취수량이 유지되면서 배후지 영향을 최소화할 수 있는 대용량 간접취수시설 운영시스템의 최적 운영 방안 마련을 위해 IT를 기반으로 하는 양수조절 시스템을 도입하고, 장기적인 취수시설 운영에 따른 배후지 영향을 평가하여 최적의 운영기술을 개발 및 검증함으로써 향후 기술을 확보하고자 한다.

3. 연차별 연구 내용 및 목표

본 연구의 최종 목표를 효과적으로 달성하기 위하여 연구 개발이 수행되는 3년 동안의 각 연차별 연구 목표 및 연구내용을 설정하였다.

수행기간 동안 관측망을 포함한 IT 연계 집수정 통합 운영 · 제어 시스템 개발을 위해 취수시설의 운영 결과와 배후지 영향의 상관성을 분석하고, 배후지 지하수위가 목표치 이내로 유지되는 최적 운영방안을 도출한다. 최적 운영방안을 IT와 접목하여 시스템에 적용하고 장기운영을 통해 프로그램을 검증하고 일반사용자용 프로

그램 매뉴얼을 작성한다.

가. 1차년도

❑ Test Bed 특성 조사/분석
- Test Bed 부지특성 자료 분석
- 배후지 관측망 설계를 위한 추가 정밀조사

❑ 배후지 관측망 설계/구축
- 기존 정밀 수치모델링 결과 분석 및 영향 범위 예측
- 배후지 관측망 설계
- 배후지 관측정 구축

❑ Test Bed 인허가
- 기존 인허가 사항 검토
- 배후지 관측망 고려 Test Bed 인허가 변경

❑ 운영 체계 Design
- 기존 IT 기반 운영시스템 분석 및 보완
- 배후지 관측망을 포함한 IT 기반 취수시설 Case별 운영 계획 수립

❑ 수평집수관 취수량 평가 이론 정립
- 기존 이론식 조사 및 분석

❑ 취수량 평가 알고리즘 개발
- 수평집수관별 취수량 평가 알고리즘 개발

나. 2차년도

❑ 취수시설 운영 및 배후지 영향 예측
- 운영 계획에 따라 취수시설 장기 운영
- Case별 취수시설 운영 결과에 따른 배후지 영향 평가

❑ 최적 운영방안 도출
- 취수시설의 Case별 운영 결과와 배후지 영향의 상관성 분석
- 배후지 지하수위 강하량이 목표치 이내로 유지되는 최적 운영방안 도출

❑ IT 기반 자동운영기술 개발
- 개발된 최적 운영방안을 취수시설 자동 운영시스템에 적용
- IT를 기반으로 배후지 지하수위 강하량에 따라 취수시설을 자동으로 조절하는 시스템 개발

❑ 취수량 평가 프로그램 초안 개발 및 현장 확인
- 수평집수관 취수량 산정 알고리즘 개발
- 현장 실제 취수량과의 비교 분석을 통한 알고리즘 보완

다. 3차년도

❑ 운영시스템 장기 운영

- IT 기반 자동운영시스템으로 취수시설 장기 운영

❑ 운영시스템 검증

- 취수시설의 목표취수량과 배후지 지하수위 강하량 모니터링
- 배후지 지하수위를 목표치 이내로 유지하며, 취수시설이 목표한 취수량이 확보되는지 검증

❑ 수평집수관별 취수조건에 따른 배후지 수위 예측 프로그램 개발

- 프로그램 개발 및 등록
- 집수정 통합운영 제어시스템과 연계 적용

❑ 일반사용자용 프로그램 매뉴얼 작성

- 프로그램 개발환경 설명
- 프로그램 구동을 위한 입력 자료 준비
- 프로그램 설치 방법 및 사용법 설명

4. 연구 추진 체계

배후지 영향최소화를 위해 아래와 같이 연차별 연구를 수행하였다. 최종목표 달성을 위해 지하수 모델 및 인공신경망 모델을 통해 최적의 운영방안을 도출하는 프로그램을 개발하였다. 개발된 기술의 활용성을 높이고자 기존 대두되는 방사형집수정의 장기운영에 따른 수량감소 및 수질변화 부분에 대한 추가 연구를 수행하여 제반자료를 확보하는데 기여하였다.

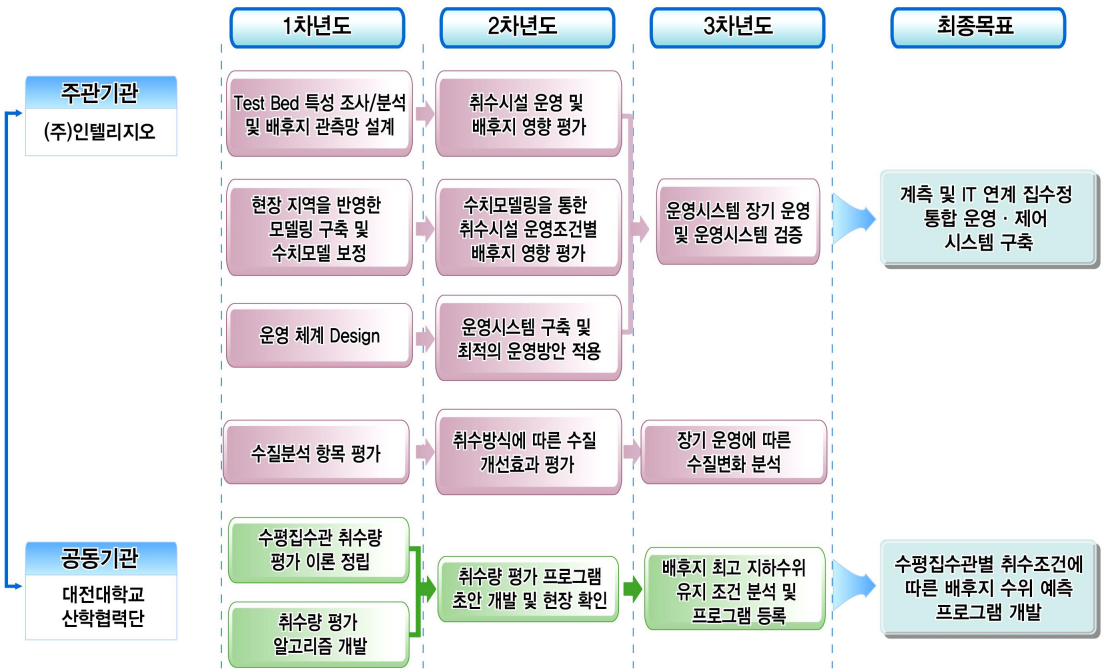


그림 5. 연구 추진 체계

제 2 장 국내·외 기술 개발현황

제 1 절 국내 기술 및 산업 동향

1. 수변평가 계측 기술 분야

❑ 지하수 관련분야의 연구는 21C 프론티어 연구개발 사업, 수생태사업단 연구, 심부 지열 에너지 개발사업 등 다양하게 추진되어 지하수 자원의 확보, 강변여과수 분석기법 개발, 지열 개발 가능성 평가 등에 대한 분야에 비교적 적극적으로 대응하고 있으나, 가뭄위기, 하천 건천화 및 지하수위 저하 등 수변지역 지하수-지표수 현황 연구에 대한 상호연계가 부족하여 국가차원의 통합적인 대응 능력은 부족한 상황이다.

❑ 한국지질자원연구원, K-water연구원, 한국건설기술연구원, 강원대학교, 경북대학교 등에서 함양량 평가 관련 연구를 수행해오고 있으나, 지하수 허가기준량 평가 관련해서는 지하수 영향 평가 등에서 산정되나 뚜렷한 원칙이나 연구 결과 없다.

- 국내에서는 1980년대에 기저유출법과 물수지 분석법이 주로 이용되었으나 자연 유량 측정의 어려움과 증발산량의 불확실성 등으로 제한점이 있다. (구민호·이대하, 2002; 김규범, 2010).
- 이후 사용된 지하수위 강하곡선법은 모델 인자 결정의 주관성으로 인한 제한점이 있다. (김규범 외, 2004).
- 유역규모 물수지 및 지하수 유동 모델링을 활용한 지하수 함양량 산정 방법은 시·공간적인 분표 및 변화를 알아낼 수 있는 장점이 있지만 각 입력 요소들에 대한 방대하고 정확한 자료 확보에 대한 제한점이 있다.
- 지하수위 변동법은 최근 많이 사용되고 있지만 정확한 비산출율, 감쇠곡선의 예측, 유효지하수위 변동폭 등의 산정에 개선할 점이 있다.(Healy, 2010).

❑ 기후변화 및 하천의 수문환경 변화에 따른 지하수위 상승의 취약성이 증대하고 있으며 이에 따라 수변지역의 수리지질 및 지표침투능 평가가 매우 중요한 관건이 된다. 현재 기후변화와 하천고갈 및 지하수위 강하 등을 해결하기 위한 관련 기술은 일부 개발되었으나 구체적인 현장 적용 연구는 선진국에 비해 매우 미흡한 수준이다.

❑ 대하천의 수문변화에 따라서 수변지역의 지하수자원의 경제산업적 중요성이 증대할 것으로 보인다. 본 연구과제와 관련하여 수변지역의 수리지질 및 지표침투능 평가로 지하수위 상승의 취약성을 저감시키고 지하수자원 이용량을 증대시킬 수 있고, 대하천 정비 사업을 통한 국내 수자원 및 수문환경의 변화가 예상되며 이와 연관되어 효율적이고 체계적인 지하수 개발 이용 및 보전관리가 필요하다.

❑ 지하수 계측장비 부분에 있어서 Physical 및 Mechanical Sensor에 있어서의 국내 Interface기술은 상당한 수준에 올라와 있으며 기반기술을 연구 개발하는 기업도 늘어나고 있는 실정이다.

❑ SMART 기법을 활용과 관련하여 국내에서는 대학, 연구기관을 중심으로 이루어지던 관련 연구가 2000년대 후반부터 기업들이 관심을 갖기 시작하여 2008년 이후 시장선점을 위한 관련 특허 등록이 많아지면서 지하수 관리기법에 적용하여 응용할 수 있는 시장이 점점 확대되고 있다.

2. 간접취수 시공기술 분야

❑ 수변지역의 지하수 개발은 지표수의 오염에 대한 취약성을 극복하고 대처할 수 있는 방안으로 선진국에서는 오래전부터 지표수를 대체할 수 있는 수자원으로 개발이 활발히 이루어져 지속적으로 사용되어 왔으며, 최근 들어 국내에서도 강변여과수 개발과 같이 수변지역 지하수에 국민적 관심과 상수원수로서의 가치가 높아지고 있는 실정이다.

❑ 지표수 수질과 수돗물에 대한 일반 국민들의 인식이 좋지 않은 상황에서 각 지자체가 추진하고 있는 강변여과수 등을 활용한 간접취수 방식이 큰 호응을 받고 있는 실정이며, 지속적으로 관련 시장이 확대될 전망이다. 국내 간접취수 공법은 경기도 가평, 경남 함안, 이룡, 창원대산(1단계) 지역에 시범 적용되고 있으며, 현재 김해생림, 창원대산(2단계), 의령, 함안 등에 건설이 추진되고 있다. 또한 한국수자원공사에서 ‘부산경남권 광역상수도 사업’에서 간접취수 방식을 적용하는 사업을 추진 중에 있다.

❑ 지난 10여 년간 수변지역 지하수에 대한 학문적인 연구와 기초적인 현장적용 연구를 실시하였으며, 학문적인 분야는 선진국 수준까지 도달할 수 있었다. 그러나 현장중심의 연구는 미흡했으며, 현재 현장에서는 수변 지하수 개발을 사업화 및 상용화의 노력을 꾀하고 있으나, 관련 분야의 현장기술 개발이 미

흡하여 많은 시행착오를 거듭하면서 국고의 낭비와 끊임없는 민원문제가 발생하고 있다.

❑ 현장의 기술적인 문제점을 해결하고 보다 효율적인 기술 적용을 위해 앞으로의 연구 방향은 수변지하수 개발에 대한 현장중심의 기술 개발과 사업화 및 융복합 기술개발이 절실히 요구되고 있는 실정이며, 선진국의 경우 수변 지하수 개발을 저비용, 고효율인 대용량 취수시설 규모가 5만~15만톤/일으로 평균 10만톤/일로 개발하여 양질의 상수 원수를 소비자에게 공급하고 있으나, 국내의 경우 대용량 취수시설이 평균 1만 5천톤/일 규모로서 선진국 수준의 15% 미치지 못하고 있으며, 이 또한 고비용, 저효율의 취수시설로 선진국에 비해 관련 기술 및 경험이 매우 뒤쳐져 있는 실정이다.

3. 연구개발 실적 및 기술 특허 동향

❑ 서울대학교는 범용 다차원 수리동역학적 분산 수치모델 COFAT3D를 개발하여 전북 부안지역, 부산 수영구 지역 해수침투 저감을 위한 최적 양수량 산정을 위한 수리동역학적 분산 수치 모델링을 수행하였다.

❑ 중소기업기술혁신지원사업의 일환으로 강변여과수 원수내 철/망간 현장지중처리 기술 개발(2011)에서 지오그린21은 산화수를 260㎥/day의 유량으로 주입하였을 경우 주변 관측정에서 용존 철의 농도는 먹는물 기준치 이하로 저감되었고, 망간의 경우도 먹는물 기준치 이하 또는 1㎎/L 이하로 저감된다는 것을 연구한 바 있다.

❑ K-Water 연구원에서 프론티어사업의 일환으로 대수층의 대체수자원을 활용하여 연간 8만톤의 수도공급 시설을 통해 수자원을 확보하였으며, 방사형 특수집수정의 설계/시공 관련 자료 확보 및 검토하였다.

❑ 국내 대용량 지하수자원 확보 기술에 대한 특허건수 총 127건으로 나타났다. 대용량 지하수 개발 기술에 비해 지하수오염방지 기술 위주로 기술이 개발되고 있으며, 국내에 간접취수 개발 기업체 현황도 소수의 몇몇 기업들만 기술을 보유하고 있는 실정이다. 따라서 이를 종합해 볼 때, 국내의 대용량 간접취수 개발 기술은 초보적인 단계에 머물고 있다.

❑ 대용량 지하수자원 확보 기술의 연도별 특허건수를 분석한 결과 전체적인 동향을 살펴보면, 대용량 지하수 개발 및 인공함양 기술은 1980년대 후반까지는 특허출원 활동이 저조하였으나 1990년대 초반부터 점진적인 증가세를 보이고 있으며, 지하수 오염 방지 및 저감 기술은 1970년대 후반까지는 미미한 특허출원 활동이 이루어졌으나 1980년대의 완만한 증가세를 거쳐 1990년대 들어 활발한 특허출원의 증가세를 보이고 있다.

❑ 국외의 경우 간접취수 기술의 안정화 단계에 돌입하여 기술개발 건수가 감소하는 추세이며, 한국의 경우 현재 간접취수분야의 발전기로서 지속적인 증가추세에 있으며, 대용량 지하수 개발 및 인공함양기술과 지하수 오염 방지 및 저감 기술모두 1998년부터 급격히 증가세를 보이고 있다. 1980년대 중반이후 지하수 인공함양기술에 대한 특허가 출원되었고 1990년대 이후 지하수오염방지 및 저감기술을 중심으로 특허가 출원되었다.

❑ 전체적으로 일본, 한국에서 집중적으로 연구개발이 활발하고 수변지하수 대용량 간접취수 시공기술 선진화 분야의 기술은 특허 자체로 출원되기는 쉽지 않은 기술로 현재까지 관련 특허를 많이 보유하지 않은 것으로 조사되어진 바, 앞으로 이에 대한 꾸준한 연구 개발 및 특허 출원과 권리 확보가 필요할 것으로 판단된다.

제 2 절 국외 기술 및 산업 동향

1. 지하수 계측평가 기술 및 지하수-지표수 연계 통합 물수지 해석

❑ 영국의 경우 얕은 성토지역 및 백악층 지역에서의 지하수 지표출현에 의한 지하수 홍수에 대한 연구가 많이 수행되고 있으나 강우 및 지하수위 상승 등의 제한된 자료로 원인 분석에만 집중해 왔고, 미국의 경우 기후변화에 따른 지하수 취약성 증대와 지속적인 지하수위 하강에 따른 지하수 부존에 의해 직접 또는 간접적인 인공지하수 확보에 초점을 두고 있으며, 유럽의 경우 하천변에서 지하수 개발은 활발하나 지하수 오염에 중점을 두어 강변여과에 초점을 두어 지하수를 관리하고 있다. 이와 같이 지하수 활용 및 관리에 대한 연구는 국외에서 활발히 수행되고 있으나 하천변 충적층 지질특성 및 지하수위변동에 의한 홍수와 같은 자연재해 관련 연구는 전무하다.

❑ 미국 HydroGeologic(www.hgl.com)에서 개발된 MODHMS 통합모형은 지하수 해석 모형인 MODFLOW에 기초한 모형으로 차단, 증발산, 지표유출 등의 지표수수문성분과 우수관거, 호수, 저수지, 수공구조물 등에대한 흐름해석을 할 수 있다. 또한 지하수 해석은 3차원 비포화-포화 흐름 해석이 가능하고, 밀도변화나 암반의 균열을 고려하여 지하수 유동을 해석할 수 있다. MOD-HMS 통합모형은 여러 형태의 지표수와 지하수 경계조건 및 지표수-지하수 상호작용 등을 처리할 수 있다. 따라서 MOD-HMS 통합모형은 물수지 분석, 장단기 유출해석, 습지의 관리 등 수자원의 다양한 분야에 적용할 수 있다 (국토해양부와 한국건설교통기술평가원, 2007).

❑ 미국의 SDI Envirionmental Service는 미국 환경청(Johanson 등, 1984)이 개발한 집중형 유출모형인 HSPF(Hydrologic Simulation Program Fortran)와 지하수 해석 모형인 MODFLOW을 통합하여 ISGW(Integrated Surface and Groundwater Model) 모형을 개발하였다(SDI, 1997). HSPF 지표수 유출모형으로부터 산정된 함양량이 지하수 모형의 상부 유입 경계조건으로 설정되며, 지표수와 지하수유출량을 합하여 총 유출량이 계산된다. ISGW 모형은 Florida 주의 물 공급기관인 Tempa Bay Water에서 지하수 개발에 따른 장기간의 수문순환계를 분석하고, 신규 수자원 개발에 따른 환경영향을 최소화하는 방안 수립에 적용되었다 (국토해양부와 한국건설교통기술평가원, 2007).

❑ Downer와 Howington(2001)은 미국방성에서 개발한 지표수와 지하수의 상호작용을 고려하는 GSSHA 모형을 소개하였다. GSSHA 모형은 물리적, 분포형 지표수 해석 모형인 CASC2D 모형에 지하수 해석을 추가한 모형으로 침투, 차단, 증발산, 하도추적 등의 지표수 해석과 토양 및 지하수 흐름 해석을 수행할 수

있다. GSSHA 모형은 소규모 유역에서 6개월 동안 관측된 유출량 및 지하수위를 이용하여 보정되고 검증되었다 (국토해양부와 한국건설교통기술평가원, 2007).

❑ 미국 남 플로리다 물관리 사무소는 자치권역의 물관리모형인 SFWMM(South Florida Water Management Model)을 개발하여 사용해 오고 있으며, 이를 개선하기 위해 지표수와 지하수의 상호관계를 분석하여 모형에 반영하였다. Lal 등(1998)은 음해적 유한체적법을 이용한 2차원 지표수 및 지하수 유출모형 HSE (Hydrologic Simulaion Engine)을 개발하였다(국토해양부와 한국건설교통기술평가원, 2007)

2. 간접취수 시공기술 분야

❑ USGS의 2007년도 연구전략 수립 보고서에 따르면, 미국은 수자원 통합 관리를 위한 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 과거에는 하천 인근에서의 지하수-지표수의 상호작용 평가, 단기간의 수문 순환 평가 및 지하수 양수에 의한 하천 영향 등이 핵심 관심사항이었으나, 최근에는 하천과 멀리 떨어져 있는 지하수를 포함한 큰 규모의 수문 순환 평가, 장기간의 물 변동 및 생태계를 고려한 통합 수자원 등이 주요 관심사로 대두되고 있다. 또한 기후변화에 따른 지하수 취약성 증대와 지속적인 지하수 수위 하강에 따른 지하수 자원의 부족을 해결하기 위한 방안으로 간접 및 직접 인공함양에 의한 확보방안이 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 미국의 경우 간접취수를 위해 대용량 방사형집수정을 이용하는 사례가 대부분이다. 특히 캔사스주 BPU(Board Public Utilities), 신시내티 볼튼정수장이 대표적인 사례이며, BPU에서 현재 운영 중인 방사형집수정은 세계에서 가장 큰 규모이며, 집수정당 7개의 수평정호가 2단으로 설치되어 최대 70MGD(약 147,200톤/일)을 취수하고 있다.

❑ 유럽에서는 수변지역 지하수 개발이 활발하며, 특히 라인강, 도나우강 및 엘베강 등이 1800년대 말부터 활발히 이루어져 왔다. 간접취수를 이용하는 대표적인 나라는 독일을 들 수 있으며, 독일 외에도 오스트리아, 스위스, 프랑스, 네덜란드 등이 있다. 1870년 시작된 뒤셀도르프(Dŭsseldorf)시 정수장은 라인강 오염으로 더욱 많은 간접취수가 이루어지고 있으며, 비텐(Witten)시 정수장은 인공함양(90%)와 강변여과(10%)의 조합을 통하여 100,000명에 물을 공급하고 있다. 드레스덴(Dresden)시의 Hosterwitz 정수장과 같은 경우에도 최초 원수의 취수는 엘베강의 직접취수와 강변여과 방식에 의한 취수가 함께 수행되며, 취수된 물은 응집 침전 및 급속여과를 거쳐서 일차 처리된 후 인공함양지에서 지하로 함양시킨 후 취수하여 사용하고 있다. 오스트리아 비엔나

의 다뉴브강변에는 하류의 Freudenau 수력발전소 건설에 따른 상승된 지하수량을 적극적으로 활용하기 위하여 강변여과수 개발용 관정 약 30개소를 설치 운영 중에 있다.

❑ 독일, 네덜란드 등 서유럽 국가들은 100여 년 전부터 강변여과수를 이용한 간접취수 방식을 채택하고 있다. 이들 국가는 유해물질로부터 오염된 상수원수가 정수장에 유입되기 이전단계에서 수질을 대폭 개선시키고, 수질오염사고에 대비할 수 있도록 인공함양을 이용한 간접취수방식을 사용하고 있다.

❑ 유럽의 강변여과수 현장 처리기술 개발은 활발하고, 실제 강변여과수 이용지역에 적용하여 사용 중에 있다. 독일 WasserbandStrausberg-Erkner 사(Eggersdorf 정수장)에서는 15개의 수직정으로 운영되는 취수시설로 약 9mg/L의 산화수를 반복적으로 주입/양수하여 지하수를 산화상태로 유지하여 3,000톤 주입으로 약 6배인 18,000톤까지 목표 수질 지하수 확보를 하고 있다.

❑ 독일 ARCADIS 사(Boker Heide 지역)에서는 4개의 수평정군으로 운영하여 저류조에서 폭기시킨 물을 반복 주입하여 지하수를 산화 상태로 유지하고 개별 정호당 80~120톤/시간까지 취수 가능, 현재공급용량 5,000톤/일이다.

❑ 미국 켄터키(Kentucky)주 루이빌(Louisville) 지역에 타당성 조사용으로 1999년 설치된 강변여과 시설은 시설용량 76,000㎥/day이며, 취수 형식은 수평집수정이고 현재 급수량은 57,000㎥/day이다. 집수정 내부에는 2대의 펌프를 설치/운영하고 있으며 1대는 고정속 펌프(Fixed speed pump)이고, 다른 1대는 가변속 펌프(Variable Frequency Drive Pump)이다. 집수정 1기당 취수 능력 범위는 38,000∽87,000㎥/day이다.

3. 연구개발 실적 및 기술 특허 동향

❑ 뉴질랜드의 Wellington Regional Council (WRC)에서는 관개용 지하수 관정이 Papawai 하천에 미치는 영향을 평가하였다 (WRC, 1999). 지하수 수질, 동위원소, 지하수 유출수문곡선을 분석한 결과 대수층으로의 함양은 강우에 의한 자연 지하수 함양과 하천으로부터 대수층으로 유입되는 유도 함양 두 가지가 복합적으로 발생하는 지역으로 확인되었고 채수 허가량 양수로 인해서 1995년과 1996년 관개기간동안 약 18%의 하천유량 감소가 발생한 것으로 보고되었다.

❑ 호주의 Environment Canterbury 주에서는 지하수 양수가 하천에 미치는 영향 평가를 위한 가이드라인 기술보고서(Environment Canterbury, 2000)를 발행하였는데, 이 보고서에서 상기 지역에 대해 해석적인 방법으로 하천수 감소량을 산정하였다. 이 보고서에서는 지하수 양수로 인한 하천에 미치는 단기간 영향은 크지 않을 수 있으며, 따라서 장기간 영향을 평가해야 한다고 강조하고 있다.

❑ Nyholm 등 (2001)은 덴마크의 Halla A 하천 인근에서 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 현장 계측과 수치해석 모델링을 병용하여 추정하였다. 지하수 양수정, 하천유량 관측지점, 지하수위를 관측하기 위한 피에조미터등을 설치하여 지하수위 변화를 계측하였고, 이러한 지하수위 관측 자료는 3차원 지하수 유동 모형인 MODFLOW의 매개변수 검정에 활용되었다. 모델링 결과를 이용하여 지하수위 저하량, 수두경사, 하천수량의 감소량 등을 평가하였다.

❑ 국내외 대용량 지하수자원 확보 기술에 대한 특허건수 총 1,413건으로 일본 특허가 507건으로 전체특허의 46%를 차지하며, 미국특허가 355건(32%), 유럽 특허가 124건(11%) 한국특허가 127건(11%)으로 나타났다. 일본 및 미국, 유럽의 경우 간접취수 기술의 안정화 단계에 돌입하여 기술개발 건수가 감소하는 추세이다.

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 현장지역 지하수 영향평가

1. Test bed 특성분석

Test bed는 안성천 유역으로 행정구역상 안성시, 평택시, 천안시가 인접한 지역이다. 실증시험시설은 제외지에 방사형집수정이 설치되어 있으며, 제내지에 시설운영 및 관측을 위한 통합운영센터가 위치한다. 인접한 시설로는 유천정수장이 있으며, 해당시설은 복류수 취수원수로 활용한다. 규모는 15,000㎥/day이며, 평택시 상수원으로 활용된다.



그림 6. 연구지역 위치도

가. 조사현황

본 지역에 실시된 기존 시추조사 및 투수시험 자료를 수집·분석하여 현장지역 모델링 구현에 활용될 수 있도록 하였다.

지층분포 특성과 미고결층의 지반특성 파악을 목적으로 방사형집수정 주변에 총 14개소의 시추조사 자료 수집을 실시하였다. 하천 건너편 1개소(OW-14), 집수정 인근 150m이내 10개소(OW-1, OW-2, OW-3, OW-4, OW-5, OW-6, OW-7, OW-8, OW-11, OW-13) 상류지역 3개소(OW-9, OW-10, OW-12)의 시추조사는 굴진심도는 12~20m의 분포를 보이며, 수평집수관 설계 위치를 고려하여 실시하였다.

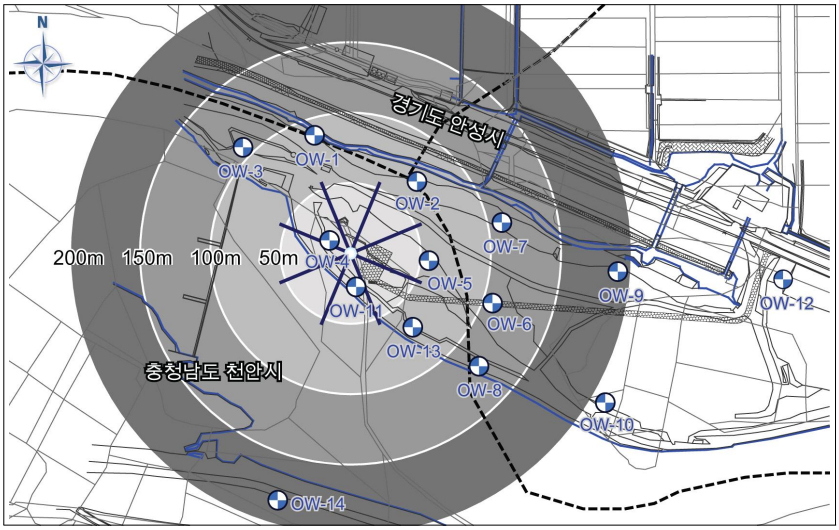


그림 7. 연구부지 인근 시추조사 위치

나. 심도별 지층분류

시추조사 결과 주지표로부터 매립층, 충적층, 풍화토, 풍화암, 기반암의 층서로 분포하며, 세립~조립 모래층(SP)이 1.0~8.0m 두께로 평균 5.6m로 분포한다. 점토(CL) 및 실트(ML) 층이 1.0~3.0m 두께로 모래층 내 분포하며, 풍화대는 GL.(-) 6.0~10.5m 하부에 분포한다.

전체적인 충적층 두께는 우물통 위치에서 가장 높고, 동쪽으로 갈수록 얕아지는 경향을 보인다.

표 2. 시추조사 결과

시추공	CL	ML	SM	SP	WS	WR	SR
OW-1	-	-	-	0.0~8.0	8.0~14.0	14.0~15.0	-
OW-2	-	-	-	0.0~7.0	7.0~15.0	15.0~16.0	-
OW-3	-	-	-	0.0~8.0	8.0~20.0	-	-
OW-4	-	-	0.0~2.0	2.0~6.0	6.0~13.0	-	13.0~13.8
OW-5	-	2.0~3.0	-	0.0~2.0 3.0~6.0	6.0~20.0	-	-
OW-6	-	2.0~5.0	0.0~2.0	5.0~6.0	6.0~17.0	17.0~18.0	-
OW-7	-	1.0~2.0	-	0.0~1.0 2.0~7.0	7.0~17.0	17.0~18.0	-
OW-8	-	3.0~4.0	7.0~8.0	0.0~3.0 4.0~7.0	8.0~16.0	16.0~	-
OW-9	2.0~4.0	-	0.0~2.0	4.0~8.0	8.0~11.5	11.5~13.2	-
OW-10	3.0~5.0	0.0~3.0	-	5.0~9.5	9.5~14.0	14.0~15.0	-
OW-11	-	1.5~3.0	-	0.0~1.5 3.0~7.5	7.5~17.0	17.0~18.0	-
OW-12	0.0~3.0	-	-	3.0~8.5	8.5~10.5	-	10.5~12.0
OW-13	-	3.0~4.0	-	0.0~3.0 4.0~8.0	8.0~15.0	15.0~16.0	-
OW-14	-	0.0~3.5	-	3.5~10.5	10.5~19.0	19.0~20.0	-

다. 현장투수시험 결과

현장에서 시추조사와 병행하여 지층에 분포하고 있는 지반의 투수성을 파악하기 위해 시추공 내에서 Falling Head Method를 적용하여 현장 투수시험을 실시하였다. 시험구간까지 굴착하고 투수시험 대상층 상부까지 Casing을 설치한 후에 주수하여 수위변화를 측정하였으며, 다음 식을 활용하여 투수계수를 산정하였다.

$$K = \frac{R^2}{2Lt} \cdot Log(\frac{L}{R}) \cdot Log(\frac{H_1}{H_2})$$

산정결과 충적층의 투수계수는 1.79×10^{-4}~2.36×10^{-2}cm/s(평균 6.07×10^{-3} cm/s), 모래섞인 자갈층의 투수계수는 2.05×10^{-4}~2.08^{-2}cm/s(평균 6.07×10^{-3} cm/s), 풍화토의 투수계수는 1.22×10^{-3}~6.36×10^{-3} cm/s(평균 2.97×10^{-3}cm/s)으로 투수계수가 지층별 뚜렷하게 구분이 되지는 않으나 모델링구현 등의 참고자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

표 3. 현장투수시험 결과

공번	시험구간(m)	지층	N치(회/cm)	투수계수(cm/sec)	비고
OW-1	1.5~2.0	모래층	3/30	1.23×10^{-3}	
	4.0~4.5	모래층	13/30	1.21×10^{-3}	
OW-2	6.0~6.5	자갈섞인 모래층	21/30	1.63×10^{-2}	
OW-3	3.5~4.0	모래층	3/30	4.84×10^{-3}	
	6.5~7.0	자갈섞인 모래층	18/30	9.30×10^{-3}	
OW-4	5.5~6.0	자갈섞인 모래층	14/30	1.04×10^{-3}	
	11.5~12.0	풍화토	50/22	3.51×10^{-3}	
OW-5	2.5~3.0	모래층	6/30	2.36×10^{-2}	
	5.5~6.0	모래섞인 자갈층	19/30	3.77×10^{-3}	
OW-6	2.5~3.0	점토섞인 실트	4/30	9.68×10^{-4}	
	5.5~6.0	자갈섞인 모래층	18/30	1.75×10^{-2}	
OW-7	2.0~2.5	실트섞인 점토	5/30	3.78×10^{-3}	
	4.0~4.5	모래층	4/30	2.81×10^{-3}	
	8.0~8.5	풍화토	9/30	1.22×10^{-3}	
OW-8	3.0~3.5	실트섞인 점토	2/30	1.79×10^{-4}	
	6.0~6.5	모래층	14/30	3.79×10^{-4}	
OW-9	5.0~5.5	자갈섞인 모래층	9/30	1.93×10^{-2}	
	7.0~7.5	자갈섞인 모래층	15/30	2.08×10^{-2}	
OW-10	2.0~2.5	실트질점토	2/30	1.85×10^{-3}	
	5.0~5.5	자갈섞인 모래층	8/30	7.09×10^{-3}	
	9.0~9.5	풍화토	49/30	6.36×10^{-3}	
OW-11	4.0~4.5	자갈섞인 모래층	Soil-sampler	2.05×10^{-4}	
	7.0~7.5	자갈섞인 모래층	Soil-sampler	2.44×10^{-3}	
OW-12	3.0~3.5	자갈섞인 모래층	11/30	4.71×10^{-4}	
	5.0~5.5	자갈섞인 모래층	9/30	1.60×10^{-2}	
OW-13	3.0~3.5	실트질점토	8/30	3.75×10^{-4}	
	8.0~8.5	풍화토	16/30	1.32×10^{-3}	
OW-14	4.0~4.5	모래층	4/30	5.33×10^{-3}	
	9.0~9.5	자갈섞인 모래층	24/30	2.96×10^{-3}	

라. 수평집수관 위치 상세분석

방사형집수정 부지에 대한 광역적 조사를 바탕으로 방사형집수정 위치와 수평집수관 설계위치 결정하기 위해 수평집수관 설계위치에서 한 지점씩 선정하여 지층분포 검토하였다. 지층분포를 검토한 결과 수두차이를 최대한 크게 하면서 투수성이 비교적 양호한 자갈섞인 모래층을 대상으로 수평집수관 심도를 EL.-1.5m로 결정하였다.

수평집수관의 경우 최초 8개를 동일 길이로 계획하였으나 지층분포 및 구간별 토질조건을 반영하여 수평집수관의 길이를 30~70m 까지 다양하게 설계하여 목표수량 달성하였다. 그 과정에서 수평집수관 7개로 설계변경이 발생되었다.

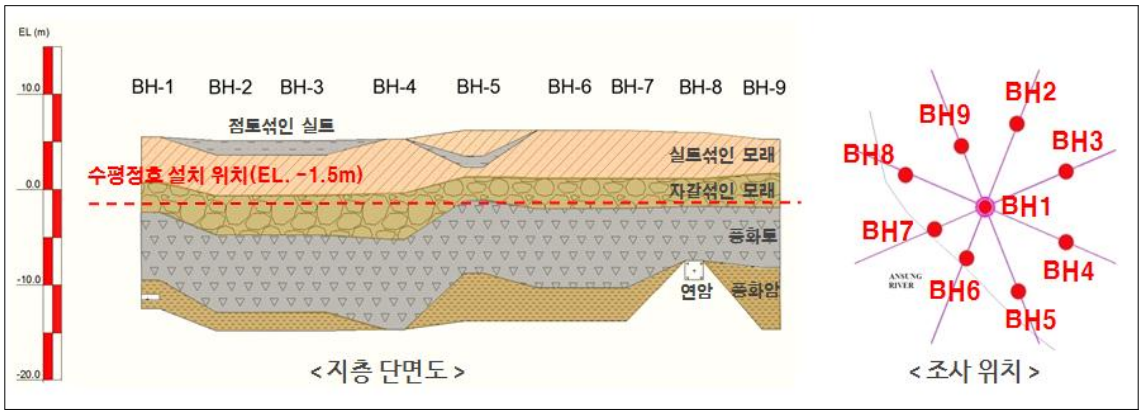


그림 8. Test bed 지층 단면도 및 조사위치

마. 수평집수관 입도분석자료 활용

수평집수관 굴착 시 2m 간격으로 채취하여 입도분석한 자료로 여러 산출식(SLICHTER, BEYER SAUERBREI, KRUEGERR, KOZENY, ZUNKER, USBR)을 활용하여 수리전도도를 산출하였다.

산출된 결과, 연구부지는 주로 SM, SP의 토질로 구성되어 평균 7.08×10^{-3}cm/s의 수리전도도를 보인다. 분석한 결과를 바탕으로 수리전도도 분포도를 작성하고, 작성된 수리전도도 분포도는 현장지역을 모사하는데 활용하였다.

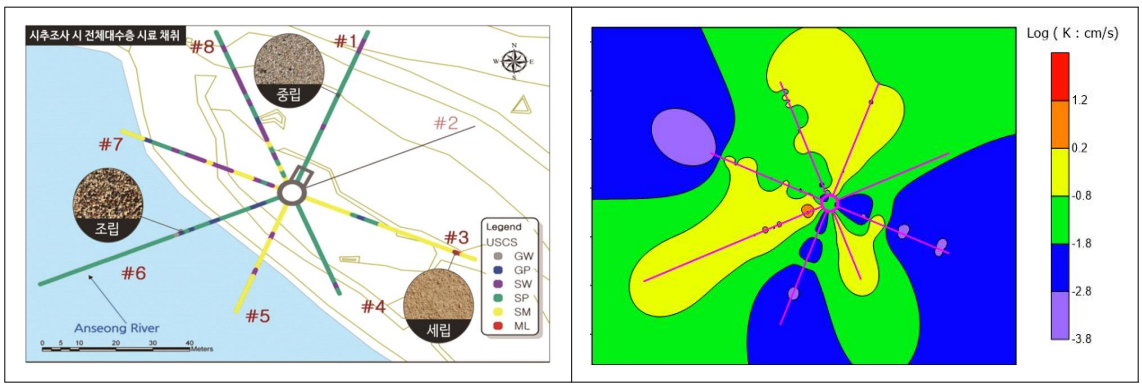


그림 9. 수평집수관 입도분석 위치 및 수리전도도 분포도

표 4. 수평집수관 입도분석 결과를 이용한 수리전도도 산출

구분	USCS	SLICHTER	BEYER	SAUERBREI	KRUEGERR	KOZENY	ZUNKER	USBR	geomean
#1-15	SP	4.16E-04	2.44E-03	7.65E-04	7.29E-03	1.02E-02	6.46E-03	1.69E-03	2.51E-03
#1-30	SP	5.44E-04	2.98E-03	1.19E-03	1.32E-02	1.79E-02	1.15E-02	2.76E-03	3.93E-03
#1-45	SP	3.50E-04	2.08E-03	5.90E-04	5.50E-03	7.65E-03	4.86E-03	1.26E-03	1.96E-03
#1-60	SP	1.81E-04	6.33E-04	3.48E-04	5.80E-03	7.53E-03	4.91E-03	6.67E-04	1.28E-03
#1-75	SP	2.00E-04	1.08E-03	4.65E-04	5.94E-03	7.89E-03	5.09E-03	1.02E-03	1.58E-03
#1-90	SP	3.20E-04	1.92E-03	5.34E-04	4.66E-03	6.58E-03	4.16E-03	1.12E-03	1.73E-03
#1-105	SP	4.58E-04	2.49E-03	9.54E-04	1.14E-02	1.55E-02	9.93E-03	2.23E-03	3.30E-03
#1-120	SP	1.32E-04	8.27E-04	2.16E-04	1.48E-03	2.12E-03	1.33E-03	3.75E-04	6.24E-04
#1-135	SP	8.96E-04	4.70E-03	1.78E-03	2.38E-02	3.24E-02	2.07E-02	4.46E-03	6.58E-03
#1-150	SP	3.36E-04	1.92E-03	6.18E-04	6.61E-03	9.13E-03	5.81E-03	1.36E-03	2.12E-03
#1-165	SP	3.48E-04	1.96E-03	6.64E-04	7.77E-03	1.05E-02	6.76E-03	1.49E-03	2.33E-03
#1-180	SP	4.01E-04	1.93E-03	9.65E-04	1.62E-02	2.11E-02	1.37E-02	2.37E-03	3.63E-03
#1-195	SW	9.16E-05	4.04E-04	3.07E-04	6.48E-03	7.72E-03	5.17E-03	7.36E-04	1.12E-03
#1-210	SP	1.39E-04	7.73E-04	2.84E-04	3.21E-03	4.41E-03	2.81E-03	5.52E-04	9.44E-04
#1-225	SP	3.11E-04	1.87E-03	4.83E-04	4.25E-03	6.01E-03	3.80E-03	9.66E-04	1.60E-03
#1-240	SP	4.69E-04	2.71E-03	8.97E-04	8.70E-03	1.22E-02	7.72E-03	2.02E-03	2.94E-03
#1-255	SP	4.29E-04	2.49E-03	8.41E-04	8.25E-03	1.15E-02	7.28E-03	1.89E-03	2.74E-03
#1-270	SP	3.93E-04	2.34E-03	7.05E-04	6.58E-03	9.01E-03	5.76E-03	1.54E-03	2.30E-03
#1-285	SP	3.43E-04	1.81E-03	7.81E-04	1.02E-02	1.37E-02	8.79E-03	1.84E-03	2.72E-03
#1-300	SP	3.87E-04	2.20E-03	7.30E-04	8.35E-03	1.14E-02	7.29E-03	1.64E-03	2.55E-03
#1-315	SP	6.24E-04	3.50E-03	1.41E-03	1.33E-02	1.86E-02	1.18E-02	3.28E-03	4.35E-03
#1-330	SP	4.55E-04	2.15E-03	1.23E-03	2.07E-02	2.69E-02	1.75E-02	3.21E-03	4.50E-03
#1-345	SP	2.55E-04	1.40E-03	5.12E-04	6.22E-03	8.47E-03	5.42E-03	1.12E-03	1.79E-03
#1-360	SP	3.29E-04	1.53E-03	8.23E-04	1.42E-02	1.83E-02	1.19E-02	2.02E-03	3.07E-03
#1-375	SP	9.47E-04	5.06E-03	2.03E-03	2.66E-02	3.58E-02	2.30E-02	5.50E-03	7.36E-03
#1-390	SP	3.40E-04	1.87E-03	6.67E-04	8.43E-03	1.13E-02	7.28E-03	1.51E-03	2.39E-03
#1-405	SP	7.25E-04	3.93E-03	1.65E-03	1.87E-02	2.56E-02	1.63E-02	4.07E-03	5.48E-03
#1-420	SP	1.87E-03	1.06E-02	4.45E-03	4.45E-02	6.14E-02	3.91E-02	1.31E-02	1.43E-02
#1-435	SP	1.32E-03	7.21E-03	2.44E-03	3.18E-02	4.30E-02	2.76E-02	6.77E-03	9.28E-03
#1-450	SW	2.06E-04	1.07E-03	5.52E-04	7.33E-03	9.72E-03	6.28E-03	1.29E-03	1.84E-03
#1-465	SW	1.89E-04	9.41E-04	5.18E-04	8.19E-03	1.06E-02	6.88E-03	1.26E-03	1.83E-03
#1-480	SW	2.06E-04	1.07E-03	4.71E-04	6.53E-03	8.71E-03	5.61E-03	1.06E-03	1.66E-03
#1-495	SP	2.25E-04	1.29E-03	5.43E-04	5.18E-03	7.11E-03	4.54E-03	1.22E-03	1.64E-03
#1-510	SW	4.21E-05	1.96E-04	1.68E-04	2.81E-03	3.50E-03	2.31E-03	3.48E-04	5.25E-04
#3-02	SM	6.58E-07	2.03E-06	2.46E-06	1.20E-04	1.02E-04	7.68E-05	3.90E-06	1.03E-05
#3-04	SM	1.64E-07	4.06E-07	2.21E-06	6.96E-05	5.97E-05	4.45E-05	2.86E-06	5.00E-06
#3-06	SM	6.58E-07	1.87E-06	2.37E-06	1.12E-04	9.91E-05	7.35E-05	3.50E-06	9.74E-06
#3-08	SM	1.64E-07	3.15E-07	1.12E-06	6.03E-05	4.49E-05	3.54E-05	1.65E-06	3.68E-06
#3-10	SM	1.48E-06	4.75E-06	6.68E-06	2.80E-04	2.49E-04	1.85E-04	1.19E-05	2.56E-05
#3-12	SM	1.64E-07	4.68E-07	9.53E-07	3.14E-05	3.15E-05	2.23E-05	1.04E-06	2.89E-06
#3-14	SC	1.05E-07	2.94E-07	5.54E-07	2.02E-05	1.96E-05	1.41E-05	5.90E-07	1.78E-06
#3-16	SP	9.47E-05	4.42E-04	3.18E-04	5.55E-03	6.94E-03	4.57E-03	7.24E-04	1.08E-03
#3-18	GP	1.00E-03	4.82E-03	2.41E-03	4.41E-02	5.59E-02	3.67E-02	7.28E-03	9.62E-03
#3-20	SP	5.34E-04	2.77E-03	1.37E-03	1.72E-02	2.32E-02	1.49E-02	3.39E-03	4.56E-03
#3-22	SP	1.58E-04	7.30E-04	3.83E-04	6.62E-03	8.58E-03	5.58E-03	8.03E-04	1.41E-03
#3-24	SM	3.70E-07	1.44E-06	1.30E-06	3.16E-05	3.71E-05	2.50E-05	1.34E-06	4.30E-06
#3-26	SM	1.64E-07	4.33E-07	2.15E-06	6.21E-05	5.58E-05	4.10E-05	2.64E-06	4.78E-06
#3-28	SM	4.21E-07	1.36E-06	1.31E-06	5.12E-05	5.12E-05	3.64E-05	1.59E-06	5.28E-06
#3-30	SM	8.06E-08	2.51E-07	2.46E-07	9.79E-06	9.77E-06	6.95E-06	2.32E-07	9.63E-07

표 4. 수평집수관 입도분석 결과를 이용한 수리전도도 산출(계속)

구분	USGS	SLICHTER	BEYER	SAUERBREI	KRUEGERR	KOZENY	ZUNKER	USBR	geomean
#3-32	SM	1.38E-06	6.34E-06	2.69E-06	6.67E-05	7.86E-05	5.29E-05	3.28E-06	1.11E-05
#3-34	SM	6.58E-07	2.73E-06	2.08E-06	5.18E-05	6.01E-05	4.06E-05	2.41E-06	7.33E-06
#3-36	SM	4.11E-06	1.87E-05	1.41E-05	2.66E-04	3.27E-04	2.17E-04	2.02E-05	4.57E-05
#3-38	SM	1.64E-07	5.34E-07	9.08E-07	2.43E-05	2.66E-05	1.83E-05	9.03E-07	2.62E-06
#3-40	SM	2.63E-06	1.12E-05	5.85E-06	1.64E-04	1.87E-04	1.27E-04	8.10E-06	2.46E-05
#3-42	SM	6.58E-07	2.11E-06	3.73E-06	1.09E-04	1.15E-04	7.98E-05	4.78E-06	1.14E-05
#3-44	SM	6.58E-07	2.39E-06	2.08E-06	6.16E-05	6.90E-05	4.71E-05	2.41E-06	7.68E-06
#3-46	ML	1.05E-07	4.52E-07	2.65E-07	5.86E-06	7.20E-06	4.77E-06	2.06E-07	9.11E-07
#3-48	SM	1.48E-06	6.52E-06	3.53E-06	7.61E-05	9.45E-05	6.24E-05	4.10E-06	1.30E-05
#3-50	SM	1.48E-06	7.38E-06	3.53E-06	5.84E-05	7.49E-05	4.89E-05	4.10E-06	1.19E-05
#4-15	SP	3.73E-04	2.25E-03	6.36E-04	5.40E-03	7.61E-03	4.82E-03	1.37E-03	2.04E-03
#4-30	SP	3.73E-04	2.25E-03	6.36E-04	5.40E-03	7.61E-03	4.82E-03	1.37E-03	2.04E-03
#4-45	SP	3.73E-04	2.25E-03	6.36E-04	5.40E-03	7.61E-03	4.82E-03	1.37E-03	2.04E-03
#4-60	SP	3.73E-04	2.25E-03	6.36E-04	5.40E-03	7.61E-03	4.82E-03	1.37E-03	2.04E-03
#4-75	SP	3.73E-04	2.25E-03	6.36E-04	5.40E-03	7.61E-03	4.82E-03	1.37E-03	2.04E-03
#4-90	SP	3.73E-04	2.25E-03	6.36E-04	5.40E-03	7.61E-03	4.82E-03	1.37E-03	2.04E-03
#4-105	SP	2.66E-04	1.53E-03	4.56E-04	5.02E-03	6.70E-03	4.33E-03	9.16E-04	1.58E-03
#4-120	SP	2.66E-04	1.53E-03	4.56E-04	5.02E-03	6.70E-03	4.33E-03	9.16E-04	1.58E-03
#4-135	SP	4.31E-04	2.15E-03	9.34E-04	1.47E-02	1.94E-02	1.26E-02	2.27E-03	3.55E-03
#4-150	SP	2.66E-04	1.37E-03	5.86E-04	8.53E-03	1.13E-02	7.29E-03	1.35E-03	2.14E-03
#4-165	SP	2.00E-04	1.03E-03	4.62E-04	6.64E-03	8.82E-03	5.69E-03	1.02E-03	1.64E-03
#4-180	SP	2.00E-04	1.03E-03	4.62E-04	6.64E-03	8.82E-03	5.69E-03	1.02E-03	1.64E-03
#4-195	SP	2.00E-04	1.03E-03	4.62E-04	6.64E-03	8.82E-03	5.69E-03	1.02E-03	1.64E-03
#4-210	SP	6.14E-04	3.28E-03	1.37E-03	1.56E-02	2.14E-02	1.37E-02	3.25E-03	4.56E-03
#4-225	SP	6.14E-04	3.28E-03	1.37E-03	1.56E-02	2.14E-02	1.37E-02	3.25E-03	4.56E-03
#4-240	SP	6.14E-04	3.28E-03	1.37E-03	1.56E-02	2.14E-02	1.37E-02	3.25E-03	4.56E-03
#4-255	SP	6.14E-04	3.28E-03	1.37E-03	1.56E-02	2.14E-02	1.37E-02	3.25E-03	4.56E-03
#4-270	SP	6.14E-04	3.28E-03	1.37E-03	1.56E-02	2.14E-02	1.37E-02	3.25E-03	4.56E-03
#4-285	SW	3.65E-04	1.84E-03	8.95E-04	1.41E-02	1.84E-02	1.19E-02	2.28E-03	3.30E-03
#4-300	SP	3.65E-04	1.84E-03	8.95E-04	1.41E-02	1.84E-02	1.19E-02	2.28E-03	3.30E-03
#5-02	SM	6.58E-07	1.88E-06	4.69E-06	2.23E-04	1.66E-04	1.32E-04	9.25E-06	1.59E-05
#5-04	SM	6.58E-07	2.17E-06	4.12E-06	1.41E-04	1.31E-04	9.55E-05	6.37E-06	1.31E-05
#5-06	SM	1.48E-06	5.19E-06	3.97E-06	1.51E-04	1.53E-04	1.08E-04	5.75E-06	1.72E-05
#5-08	SM	1.48E-06	5.04E-06	6.26E-06	2.20E-04	2.18E-04	1.56E-04	9.82E-06	2.30E-05
#5-10	SM	6.58E-07	2.08E-06	4.12E-06	1.45E-04	1.34E-04	9.79E-05	6.37E-06	1.32E-05
#5-12	SW-SM	4.21E-05	2.13E-04	1.54E-04	1.91E-03	2.52E-03	1.63E-03	2.94E-04	4.40E-04
#5-14	SM	6.58E-07	1.81E-06	2.62E-06	1.54E-04	1.15E-04	9.14E-05	4.68E-06	1.13E-05
#5-16	SM	6.58E-07	1.73E-06	4.48E-06	2.13E-04	1.66E-04	1.29E-04	8.14E-06	1.52E-05
#5-18	SM	6.58E-07	1.74E-06	4.54E-06	2.18E-04	1.67E-04	1.31E-04	8.42E-06	1.54E-05
#5-20	SM	6.58E-07	1.72E-06	2.58E-06	1.52E-04	1.15E-04	9.08E-05	4.49E-06	1.11E-05
#5-22	SM	6.58E-07	1.67E-06	4.43E-06	2.14E-04	1.67E-04	1.29E-04	7.85E-06	1.51E-05
#5-24	SW-SM	1.03E-04	5.20E-04	3.10E-04	4.52E-03	5.85E-03	3.81E-03	6.71E-04	1.02E-03
#5-26	SM	6.58E-07	1.67E-06	4.18E-06	1.80E-04	1.55E-04	1.16E-04	6.68E-06	1.39E-05
#5-28	SM	1.64E-07	3.15E-07	2.26E-06	8.36E-05	6.65E-05	5.08E-05	3.08E-06	5.19E-06
#5-30	SM	1.48E-06	4.30E-06	6.43E-06	2.77E-04	2.53E-04	1.86E-04	1.06E-05	2.47E-05
#5-32	SM	1.48E-06	4.59E-06	9.65E-06	3.75E-04	3.25E-04	2.43E-04	1.82E-05	3.21E-05
#5-34	SM	1.64E-07	5.90E-07	9.08E-07	2.18E-05	2.43E-05	1.66E-05	9.03E-07	2.55E-06
#5-36	SM	1.64E-07	5.40E-07	9.53E-07	2.86E-05	2.94E-05	2.07E-05	1.04E-06	2.85E-06
#6-15	SP	2.91E-04	1.48E-03	6.46E-04	1.02E-02	1.34E-02	8.66E-03	1.53E-03	2.43E-03

표 4. 수평집수관 입도분석 결과를 이용한 수리전도도 산출(계속)

구분	USGS	SLICHTER	BEYER	SAUERBREI	KRUEGERR	KOZENY	ZUNKER	USBR	geomean
#6-30	SP	5.18E-04	2.89E-03	1.26E-03	1.19E-02	1.66E-02	1.06E-02	2.98E-03	3.82E-03
#6-45	SP	9.57E-04	4.92E-03	1.89E-03	2.59E-02	3.52E-02	2.25E-02	4.83E-03	7.07E-03
#6-60	GP	1.53E-03	6.52E-03	3.84E-03	8.82E-02	1.08E-01	7.15E-02	1.29E-02	1.65E-02
#6-75	GP	1.56E-02	7.58E-02	5.49E-02	8.47E-01	1.08E+00	7.07E-01	2.69E-01	1.96E-01
#6-90	GP	2.25E-03	1.11E-02	5.02E-03	8.84E-02	1.14E-01	7.43E-02	1.68E-02	2.06E-02
#6-105	SP	2.17E-04	1.23E-03	4.23E-04	4.62E-03	6.31E-03	4.03E-03	9.02E-04	1.43E-03
#6-120	SP	1.38E-03	7.60E-03	2.63E-03	3.00E-02	4.15E-02	2.64E-02	7.09E-03	9.39E-03
#6-135	SP	4.38E-04	1.93E-03	8.94E-04	1.61E-02	2.09E-02	1.36E-02	2.18E-03	3.58E-03
#6-150	SP	6.24E-04	3.19E-03	1.22E-03	1.68E-02	2.26E-02	1.46E-02	2.92E-03	4.53E-03
#6-165	SP	1.03E-03	6.61E-03	1.58E-03	9.02E-03	1.31E-02	8.19E-03	3.49E-03	4.48E-03
#6-180	SP	4.52E-04	2.70E-03	9.49E-04	7.37E-03	1.04E-02	6.59E-03	2.11E-03	2.76E-03
#6-195	GP	7.72E-04	3.24E-03	2.15E-03	5.15E-02	6.14E-02	4.11E-02	6.84E-03	9.00E-03
#6-210	GP	2.42E-03	1.20E-02	6.14E-03	9.15E-02	1.21E-01	7.82E-02	2.02E-02	2.27E-02
#6-225	SP	1.16E-05	3.65E-05	4.05E-05	3.26E-03	1.75E-03	1.63E-03	1.63E-04	2.21E-04
#6-240	SP	3.29E-04	1.78E-03	5.80E-04	7.57E-03	1.03E-02	6.59E-03	1.26E-03	2.16E-03
#6-255	SP	2.50E-03	1.43E-02	5.77E-03	5.37E-02	7.51E-02	4.76E-02	1.70E-02	1.82E-02
#6-270	GP	1.44E-03	9.00E-03	3.03E-03	4.96E-02	5.67E-02	3.87E-02	9.17E-03	1.22E-02
#6-285	SP	6.61E-04	3.61E-03	1.50E-03	1.61E-02	2.18E-02	1.40E-02	3.53E-03	4.84E-03
#6-300	GP	3.59E-04	1.38E-03	7.38E-04	1.87E-02	2.28E-02	1.51E-02	1.85E-03	3.31E-03
#6-315	GW	1.11E-03	5.30E-03	3.06E-03	5.81E-02	7.21E-02	4.76E-02	1.01E-02	1.20E-02
#6-330	SP	3.50E-04	1.76E-03	6.03E-04	9.25E-03	1.25E-02	8.00E-03	1.32E-03	2.40E-03
#6-345	SP	3.59E-04	1.72E-03	6.21E-04	1.01E-02	1.34E-02	8.65E-03	1.36E-03	2.50E-03
#6-360	SP	1.68E-04	8.89E-04	3.56E-04	4.72E-03	6.37E-03	4.09E-03	7.17E-04	1.25E-03
#6-375	SP	4.14E-04	2.38E-03	7.64E-04	7.91E-03	1.10E-02	6.98E-03	1.71E-03	2.59E-03
#6-390	SP	3.20E-04	1.80E-03	5.37E-04	6.22E-03	8.60E-03	5.47E-03	1.13E-03	1.94E-03
#6-405	SP	4.58E-04	2.60E-03	9.42E-04	9.43E-03	1.32E-02	8.35E-03	2.15E-03	3.06E-03
#6-420	SP	4.43E-04	1.72E-03	9.39E-04	1.90E-02	2.42E-02	1.58E-02	2.31E-03	3.83E-03
#6-435	SP	3.46E-04	2.00E-03	5.81E-04	6.69E-03	8.98E-03	5.78E-03	1.24E-03	2.09E-03
#6-450	SP	4.08E-04	2.19E-03	8.38E-04	1.06E-02	1.44E-02	9.21E-03	1.95E-03	2.97E-03
#6-465	SP	8.29E-04	5.27E-03	1.45E-03	8.63E-03	1.24E-02	7.78E-03	3.14E-03	4.01E-03
#6-480	SP	4.97E-04	2.96E-03	9.01E-04	7.81E-03	1.10E-02	6.97E-03	2.00E-03	2.87E-03
#6-495	SP	3.96E-04	2.07E-03	8.15E-04	1.12E-02	1.51E-02	9.68E-03	1.91E-03	2.98E-03
#6-510	SP	3.56E-04	1.93E-03	6.36E-04	8.51E-03	1.14E-02	7.35E-03	1.41E-03	2.39E-03
#6-525	SP	3.93E-04	2.36E-03	6.71E-04	5.84E-03	8.22E-03	5.21E-03	1.45E-03	2.17E-03
#6-540	SP	3.77E-04	2.25E-03	6.58E-04	6.00E-03	8.36E-03	5.31E-03	1.43E-03	2.15E-03
#6-555	SP	3.13E-04	1.85E-03	4.29E-04	4.07E-03	5.59E-03	3.57E-03	7.93E-04	1.49E-03
#6-570	SP	2.76E-04	1.03E-03	8.66E-04	2.09E-02	2.50E-02	1.67E-02	2.33E-03	3.38E-03
#6-585	SP	4.10E-04	2.40E-03	7.80E-04	7.22E-03	1.01E-02	6.40E-03	1.73E-03	2.51E-03
#6-600	SP	3.51E-04	2.16E-03	5.55E-04	4.32E-03	6.18E-03	3.89E-03	1.15E-03	1.75E-03
#6-615	SP	1.91E-04	1.06E-03	3.96E-04	4.45E-03	6.07E-03	3.89E-03	7.92E-04	1.31E-03
#6-630	SP	8.86E-04	5.17E-03	1.67E-03	1.47E-02	2.08E-02	1.31E-02	3.99E-03	5.33E-03
#6-645	SP	4.00E-04	2.40E-03	6.65E-04	5.78E-03	8.15E-03	5.16E-03	1.43E-03	2.16E-03
#6-660	SP	3.36E-03	2.11E-02	7.22E-03	3.91E-02	5.67E-02	3.55E-02	1.99E-02	1.87E-02
#6-675	SP	2.14E-04	1.22E-03	4.25E-04	4.41E-03	6.11E-03	3.89E-03	8.65E-04	1.39E-03
#6-690	SP	2.43E-04	1.49E-03	3.91E-04	2.83E-03	4.07E-03	2.56E-03	7.20E-04	1.17E-03
#6-705	SP	6.59E-04	4.16E-03	1.25E-03	7.23E-03	1.05E-02	6.56E-03	2.68E-03	3.33E-03
#7-02	SM	7.96E-07	2.23E-06	5.54E-06	2.38E-04	1.95E-04	1.49E-04	9.95E-06	1.83E-05
#7-04	SW-SM	1.24E-05	5.14E-05	5.45E-05	1.37E-03	1.49E-03	1.03E-03	1.12E-04	1.88E-04
#7-06	SP	1.75E-04	9.46E-04	4.29E-04	4.97E-03	6.76E-03	4.33E-03	9.06E-04	1.38E-03

표 4. 수평집수관 입도분석 결과를 이용한 수리전도도 산출(계속)

구분	USGS	SLICHTER	BEYER	SAUERBREI	KRUEGERR	KOZENY	ZUNKER	USBR	geomean
#7-08	SW-SM	7.32E-05	3.65E-04	2.32E-04	3.24E-03	4.25E-03	2.75E-03	4.62E-04	7.28E-04
#7-10	SM	9.47E-07	2.66E-06	8.48E-06	3.30E-04	2.70E-04	2.05E-04	1.59E-05	2.51E-05
#7-12	SM	2.76E-06	7.85E-06	3.32E-05	1.09E-03	9.11E-04	6.87E-04	7.14E-05	8.61E-05
#7-14	SM	4.97E-06	1.90E-05	2.50E-05	7.25E-04	7.37E-04	5.21E-04	4.83E-05	8.49E-05
#7-16	SW	4.21E-04	2.09E-03	1.26E-03	1.74E-02	2.32E-02	1.50E-02	3.19E-03	4.16E-03
#7-18	SW-SM	1.27E-05	4.40E-05	6.06E-05	1.88E-03	1.94E-03	1.37E-03	1.27E-04	2.15E-04
#7-20	SW	1.19E-04	6.18E-04	2.91E-04	3.96E-03	5.28E-03	3.40E-03	5.88E-04	9.84E-04
#7-22	SM	8.70E-07	2.41E-06	6.72E-06	2.74E-04	2.27E-04	1.72E-04	1.20E-05	2.10E-05
#7-24	SW-SM	5.57E-05	2.74E-04	2.66E-04	3.34E-03	4.30E-03	2.80E-03	5.53E-04	7.09E-04
#7-26	SW-SM	5.57E-05	2.77E-04	1.84E-04	2.56E-03	3.34E-03	2.17E-03	3.59E-04	5.67E-04
#7-28	SW-SM	8.55E-05	4.33E-04	2.82E-04	3.69E-03	4.87E-03	3.15E-03	5.80E-04	8.58E-04
#7-30	SP	2.12E-04	1.12E-03	5.14E-04	6.90E-03	9.14E-03	5.90E-03	1.14E-03	1.76E-03
#7-32	SW	1.87E-04	9.62E-04	4.60E-04	6.72E-03	8.78E-03	5.70E-03	1.01E-03	1.61E-03
#7-34	SP	1.38E-04	7.28E-04	3.48E-04	4.51E-03	6.04E-03	3.89E-03	7.32E-04	1.15E-03
#7-36	SP-SM	3.22E-05	1.40E-04	2.09E-04	3.53E-03	4.16E-03	2.80E-03	4.55E-04	5.62E-04
#7-38	SP	1.28E-04	6.71E-04	3.36E-04	4.54E-03	5.90E-03	3.84E-03	6.90E-04	1.11E-03
#7-40	GP	6.25E-05	1.17E-04	2.80E-04	1.19E-02	1.14E-02	8.20E-03	7.27E-04	1.07E-03
#7-42	SM	1.68E-06	5.43E-06	1.68E-05	4.97E-04	4.49E-04	3.30E-04	3.16E-05	4.47E-05
#7-44	SM	7.25E-07	3.01E-06	3.12E-06	6.78E-05	7.92E-05	5.33E-05	3.76E-06	9.57E-06
#7-46	SM	4.11E-08	1.38E-07	1.95E-07	6.09E-06	6.31E-06	4.43E-06	1.70E-07	6.12E-07
#8-02	SM	6.58E-07	1.92E-06	3.97E-06	1.41E-04	1.34E-04	9.69E-05	5.75E-06	1.27E-05
#8-04	SP	6.53E-04	3.88E-03	1.42E-03	1.08E-02	1.53E-02	9.68E-03	3.17E-03	4.06E-03
#8-06	SM	6.58E-07	1.87E-06	2.54E-06	1.37E-04	1.09E-04	8.44E-05	4.29E-06	1.08E-05
#8-08	SP-SM	4.11E-06	1.38E-05	6.14E-05	1.36E-03	1.27E-03	9.24E-04	1.26E-04	1.32E-04
#8-10	SW-SM	5.94E-05	2.89E-04	2.74E-04	3.56E-03	4.58E-03	2.99E-03	5.68E-04	7.47E-04
#8-12	SP-SM	5.92E-06	2.05E-05	5.25E-05	1.66E-03	1.45E-03	1.08E-03	1.27E-04	1.55E-04
#8-14	SM	5.92E-06	2.02E-05	3.71E-05	1.23E-03	1.15E-03	8.37E-04	7.97E-05	1.23E-04
#8-16	SW-SM	1.33E-05	5.21E-05	8.60E-05	2.10E-03	2.20E-03	1.54E-03	1.84E-04	2.59E-04
#8-18	SW-SM	3.22E-05	1.58E-04	1.53E-04	1.84E-03	2.40E-03	1.56E-03	2.85E-04	3.96E-04
#8-20	SW-SM	2.37E-05	1.02E-04	1.41E-04	2.62E-03	3.04E-03	2.05E-03	2.95E-04	4.00E-04
#8-22	GP	5.34E-04	2.27E-03	1.43E-03	2.97E-02	3.72E-02	2.45E-02	3.97E-03	5.66E-03
#8-24	SP	7.96E-05	3.97E-04	1.99E-04	2.97E-03	3.89E-03	2.52E-03	3.79E-04	6.83E-04
#8-26	SP	3.33E-04	1.74E-03	5.74E-04	8.31E-03	1.12E-02	7.18E-03	1.25E-03	2.23E-03
#8-28	SW	7.96E-05	3.86E-04	2.19E-04	3.58E-03	4.63E-03	3.01E-03	4.47E-04	7.63E-04
#8-30	SP	7.96E-05	3.63E-04	2.37E-04	4.42E-03	5.55E-03	3.65E-03	5.02E-04	8.45E-04
#8-32	SW	3.22E-05	1.47E-04	9.27E-05	2.05E-03	2.41E-03	1.62E-03	1.91E-04	3.52E-04
#8-34	SW-SM	1.05E-05	4.37E-05	6.03E-05	1.27E-03	1.42E-03	9.71E-04	1.20E-04	1.79E-04
#8-36	SW-SM	1.64E-05	5.57E-05	1.51E-04	3.20E-03	3.45E-03	2.39E-03	3.14E-04	3.80E-04
#8-38	SW-SM	1.33E-05	5.23E-05	5.96E-05	1.47E-03	1.64E-03	1.12E-03	1.16E-04	2.00E-04
#8-40	SP	2.37E-04	1.21E-03	4.91E-04	7.11E-03	9.55E-03	6.14E-03	1.05E-03	1.80E-03
#8-42	SP-SM	2.78E-05	1.05E-04	1.29E-04	2.95E-03	3.42E-03	2.31E-03	2.63E-04	4.20E-04
#8-44	SP	3.04E-04	1.72E-03	5.32E-04	6.24E-03	8.50E-03	5.44E-03	1.15E-03	1.91E-03
#8-46	SW-SM	2.37E-05	1.09E-04	7.36E-05	1.46E-03	1.76E-03	1.17E-03	1.41E-04	2.60E-04
#8-48	SP	2.63E-04	1.16E-03	5.50E-04	1.08E-02	1.39E-02	9.04E-03	1.27E-03	2.25E-03
#8-50	SP	2.01E-04	9.12E-04	4.63E-04	8.19E-03	1.07E-02	6.93E-03	1.02E-03	1.76E-03

2. 수치모델링을 활용한 장기운영 분석

가. 개요

(1) 배경 및 목적

대용량 취수시설인 방사형집수정의 경우 일반적으로 수평집수관을 6개에서 10개정도 설치하므로 각 수평집수관의 취수 영향범위가 중첩되어 수평집수관의 최대성능에 비해 70%이하로 취수되는 경우가 대부분인 것으로 알려져 있다. 이로 인해 중첩효과를 보이는 수평집수관에서는 일부 수평집수관을 차단하여도 주변 수평집수관의 취수효율이 증대되어 전체 취수량의 감소는 거의 나타나지 않는 경우가 있다. 이런 원리를 이용하면 대용량의 방사형집수정 취수시 지하수위 강하량이 매우 커 배후지까지 영향이 미치는 경우에 배후지 방향의 수평집수관 취수를 중단하여 배후지로의 지하수위강하 영향범위는 감소시키고 전체 취수량은 감소 없이 취수할 수 있다.

본 연구지역에 설치된 방사형집수정은 수직집수정의 특정 깊이에서 지중으로 수평방향으로 30m에서 70m의 길이로 7개소가 설치되었다. 이 취수시설을 이용하여 수평집수관 제어에 따른 영향거리 감소와 동시에 취수량 변화를 분석하고자 한다. 방사형 집수정에서 취수에 따른 주변지역 지하수 수위변화는 각 수평집수관에서의 취수량에 따라 다양한 변화 양상을 보인다. 따라서, 주변지역 및 배후지의 지하수위 변화평가를 위해서는 수평집수관별 취수량을 다양하게 변화시키며 장기운영에 따른 관측 자료를 통한 분석이 필요하다. 그러나, 장기적 운영에 기초해야하는 실증시험에서는 수평집수관별 취수량을 고려한 수십 가지 경우의 검증이 시간적, 경제적 측면에서 현실적으로 어려운 점이 존재한다.

따라서, 이러한 실증시험의 시간적 경제적인 한계를 극복하기 위하여 다양한 경우에 대한 장기 운영을 실증시험에 앞서 수치모델링에 의해 수행하고 운영에 따른 취수량 및 주변 지하수위 변화를 분석·예측함으로써, 효율적인 연구를 수행하기 위한 실증시험의 수행 범위 및 목표를 설정하는데 목적이 있다.

(2) 분석 내용 및 활용

분석내용은 수치모델 구축을 기반으로 수평집수관별 취수량에 따른 취수시설의 개발가능량 변화와 이에 따른 지하수위 변화 및 영향거리 분석을 통해 배후지 영향을 최소로 하는 최적 개발가능량이며, 또한 최적 운영시스템 개발을 위한 기초자료로 활용하였다.

- ❑ 수치모델 구축 및 타당성 검증
  - 현장특성을 반영한 모델 구축 및 취수에 따른 모델타당성 검증
- ❑ 취수시설의 개발가능량 분석
  - 수평집수관별 취수량 및 실증시험시설 총 개발가능량 분석
- ❑ 배후지 지하수위 강하영향 분석
  - 수평집수관별 취수량 및 배후지 지하수위 변화 및 지하수위 강하 영향거리 분석
- ❑ 취수량 운영·제어 시스템개발을 위한 기초자료로 활용
  - 수평집수관별 취수량에 따른 지하수위변화 기초자료 제공

(3) 활용 프로그램

수치모델링을 위해 사용한 전산프로그램은 국제적으로 공인된 지하수 전문 프로그램인 Visual MODFLOW(Ver. 3.0)을 이용하였다. MODFLOW는 주로 토사와 같은 다공질 매체내의 흐름이나 이와 유사한 흐름을 지니는 지하수유동을 분석할 때 이용되는 분석모델로 연속체 모형을 가정한 전산해석프로그램 중 가장 보편적으로 쓰이고 있는 프로그램이다. MODFLOW에서 채택하고 있는 유한차분법은 지배식의 모든 편미분 방정식을 유한 차분을 근사적으로 표현하고 있으며, 수식전개 과정이 간단·명료하고 여러 층의 경계조건을 비교적 정확히 표현할 수 있는 장점이 있다.

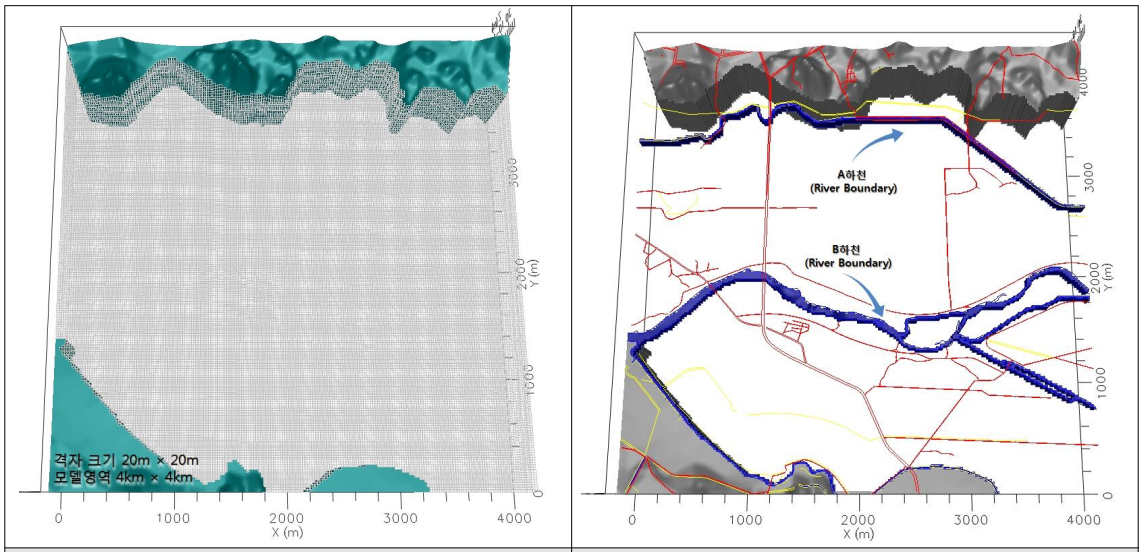
나. 광역모델 구축

(1) 모델설정

(가) 광역모델 격자망구성 및 경계조건

광역모델영역은 4㎞×4㎞로 주 산계 및 하천을 포함하고 방사형집수정이 설치된 연구부지가 영역에 포함될 수 있도록 하였다. 모델의 격자 크기는 전반적인 지하수 흐름 파악이 가능하도록 20m×20m로 설정하였다.

안성천 및 지류에 River boundary를 적용하였다. 하천수위는 GL.(-)3m로 설정하였으며, A하천은 EL. 4.2~7.3m, B하천은 EL. 2.8~5.9m의 수위조건을 설정하였다.



격자망 구성 | 경계조건

그림 10. 광역모델 격자망 구성 및 경계조건

(나) 광역모델 함양량

강우가 지상에 도달한 후 지표면을 통하여 포화대에 이르는 양은 극히 일부이다. 수문학적인 물수지 분석방법은 분석대상 수역내의 강우량과 지하함양량, 증발산량, 지표유출량 간에 수문평형이 유지되며 다음식으로 표현된다.

$$R = P - ET - S \pm W$$

여기서 R은 지하함양량, P는 강우량, ET는 증발산량, S는 지표유출량, W는 타수역으로부터 유입 및 유출된 양을 의미한다.

함양경계조건은 평택시(진위면사무소) 관측소의 10년간 강우관측자료(2008년~2017년)의 연평균 강우량 1,268㎜과 지하수관리 기본계획보고서(건설교통부, 2007) 안성천 권역의 지하수 함양률 13.54%를 적용하여 172㎜/yr로 산정하여 적용하였다.

표 5. 광역모델 함양량

평균강우량(㎜/year)	지하수 함양률(%)	지하수 함양량(㎜/year)
1,268	13.54	172

(다) 수리전도도

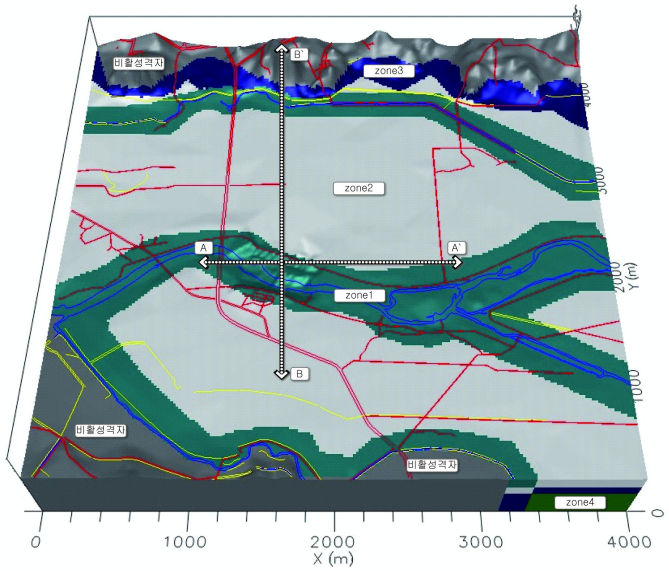
연구부지는 상부로부터 충적층-풍화토-풍화암-연암 순으로 분포한다. 시추조사결과 충적층의 평균 두께는 7.6m로 상부로부터 0~4m의 심도는 투수성이 낮은 실트와 점토가 우세한 실트질 모래층이며, 4~6m 심도는 투수성이 좋은 자갈섞인 모래층이 1~4m 내외의 두께로 분포한다. 충적층 하부는 풍화암으로 구성되어 있다.

지층별 투수계수는 기존 양수시험 및 투수시험결과를 활용하여 지층별 수리전도도를 설정하였다.

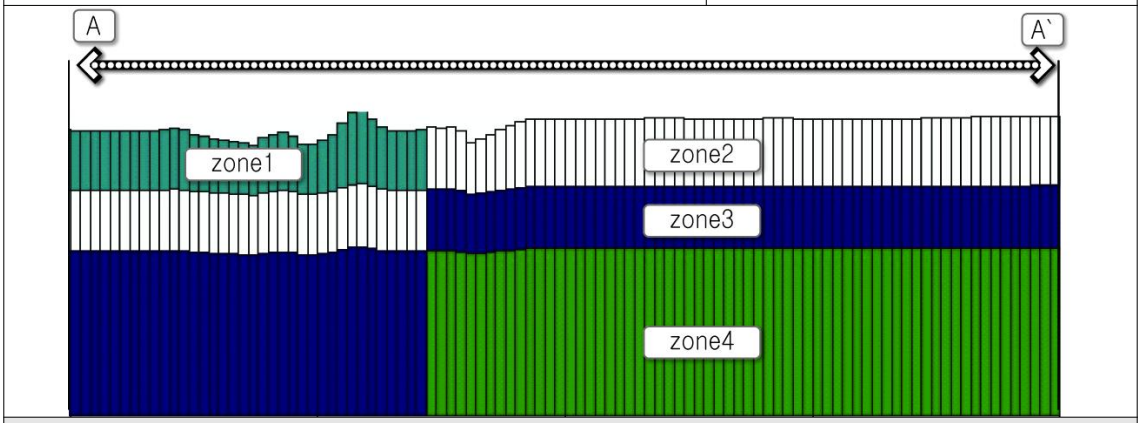
충적층에 경우 하천 인근의 하상충적층은 투수성이 비교적 높음을 반영하여 차등적용 하였다. 하상충적층에 수리전도도는 4.82×10^{-2}cm/sec, 일반충적층 6.07×10^{-3}cm/sec, 풍화암 7.00×10^{-4}cm/sec, 연암 3.60×10^{-5}cm/sec에 수리전도도를 적용하였다.

표 6. 광역모델 수리전도도 구역화

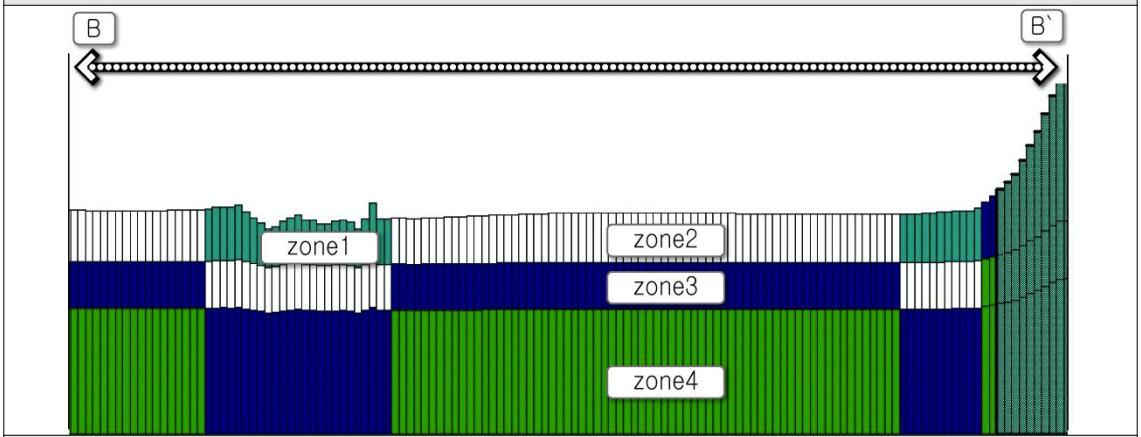
구 분			수리전도도(cm/sec)
하상충적층	Zone 1	1층	4.82×10^{-2}
	Zone 2	2층	6.07×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
하상주변충적층	Zone 2	1층	6.07×10^{-3}
	Zone 3	2층	7.00×10^{-4}
	Zone 4	3층	3.60×10^{-5}
산지	Zone 3	1층	7.00×10^{-4}
	Zone 4	2층	3.60×10^{-5}
		3층	3.60×10^{-5}



층적층
6.07 × 10^{-3}cm/sec
하상충적층
4.82 × 10^{-2}cm/sec
풍화암
7.00 × 10^{-4}cm/sec
연암
3.60 × 10^{-5}cm/sec



수리전도도 분포 단면(행 A - A')



수리전도도 분포 단면(열 B - B')

그림 11. 광역모델 수리전도도 설정

(2) 지하수 유동 분석

연구지역의 광역 모델 구축을 통하여 광역적인 지하수 흐름을 파악한 결과 지하수위는 3.5~8.0m의 수위분포를 보이며, 지하수의 흐름은 북동쪽에서 남서쪽으로 흘러 안성천으로 유입되는 형태의 유선망을 나타내고 있다.

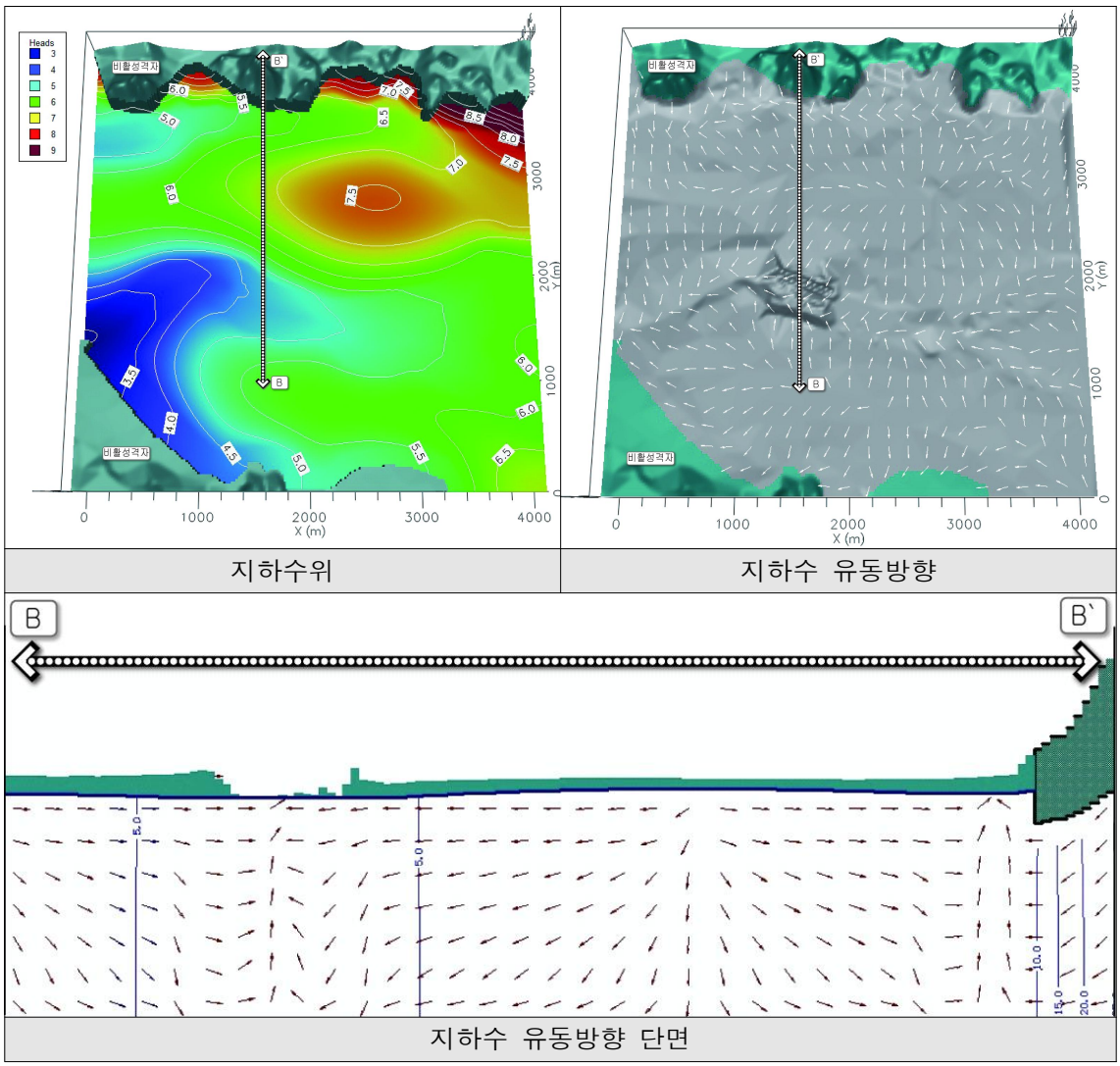


그림 12. 광역모델 지하수위 및 지하수 유동방향

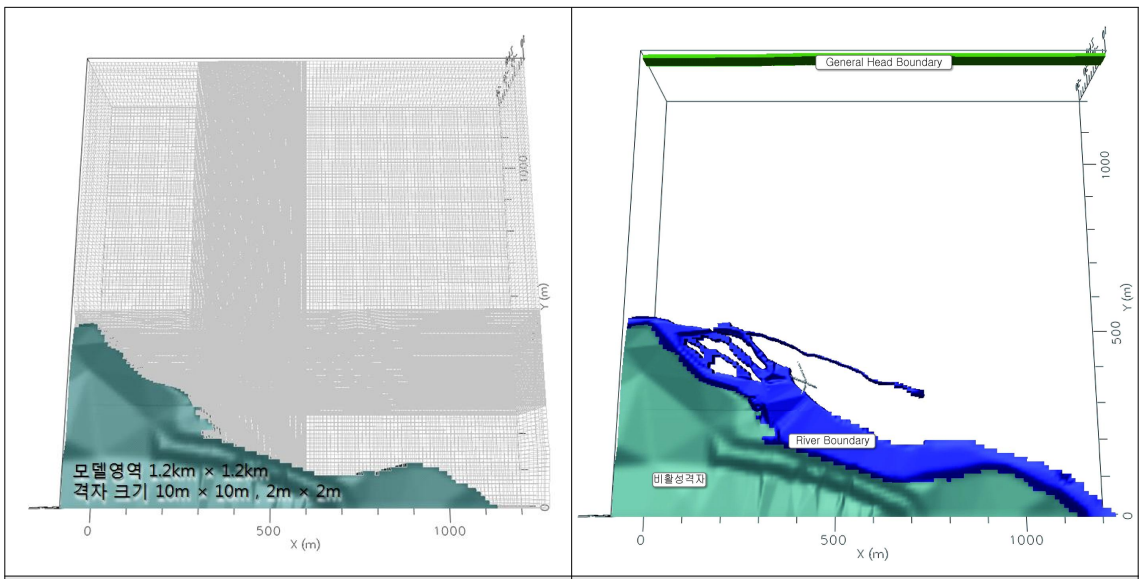
다. 상세모델 구현

광역모델을 통해 구현된 지하수위 분포를 반영하여 상세모델을 구현하였다. 상세모델에는 수평집수관 굴착시 확보한 입도분석결과를 통해 산출된 수리전도도를 구역화하여 반영하였다.

(1) 모델설정

(가) 격자망구성 및 경계조건

모델영역은 1.2㎞×1.2㎞로 방사형집수정 및 배후지 영향범위가 표현될 수 있도록 하였다. 격자 크기는 10m×10m로 설정하고, 방사형집수정 내 수평집수관 모사를 위해 방사형집수정 인근 셀은 2m×2m로 세분하였다.



격자망 구성 | 경계조건

그림 13. 상세모델 격자망 구성 및 경계조건

(나) 함양량

함양경계조건은 광역모델과 동일한 함양량을 적용하였다. 평택시(진위면사무소) 관측소의 10년간 강우관측자료(2008~2017년)의 연평균 강우량 1,268㎜를 이용하였다. 함양률은 지하수관리 기본계획보고서(건설교통부, 2007) 안성천 권역 지하수 함양률 13.54%을 기준으로 172㎜/yr의 함양량을 적용하였다.

표 7. 상세모델 함양량

평균강우량(㎜/year)	지하수 함양률(%)	지하수 함양량(㎜/year)
1,268	13.54	172

(다) 수리전도도

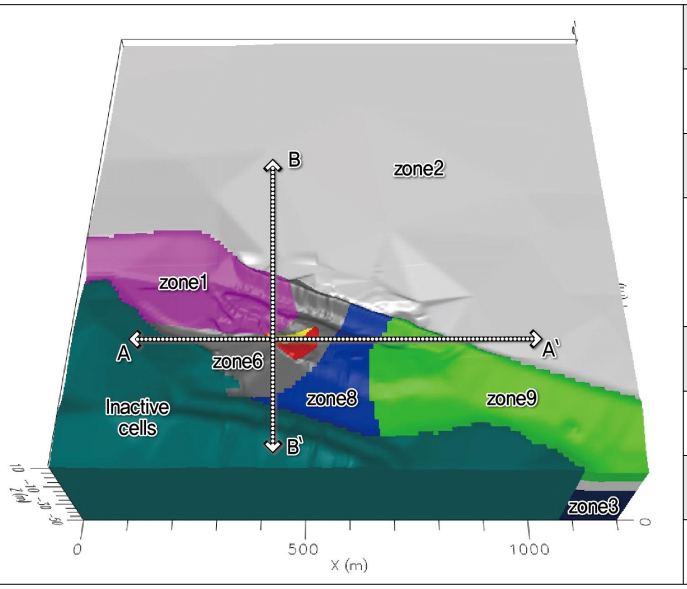
연구부지는 상부로부터 충적층-풍화토-풍화암-연암 순으로 분포한다. 시추조사결과 충적층의 평균 두께는 7.6m로 상부로부터 0~4m의 심도는 투수성이 낮은 실트와 점토가 우세한 실트질 모래층이며, 4~6m 심도는 투수성이 좋은 자갈섞인 모래층이 1~4m 내외의 두께로 분포한다. 충적층 하부는 풍화암으로 구성되어 있다.

지층별 투수계수는 기존 양수시험 및 투수시험결과를 활용하여 지층별 수리전도도를 설정하였다. 하상충적층의 경우 모델보정시 입도분석자료로 산정한 수리전도도 및 토질별 수리전도도를 바탕으로 수리전도도 구역화를 실시하였다.

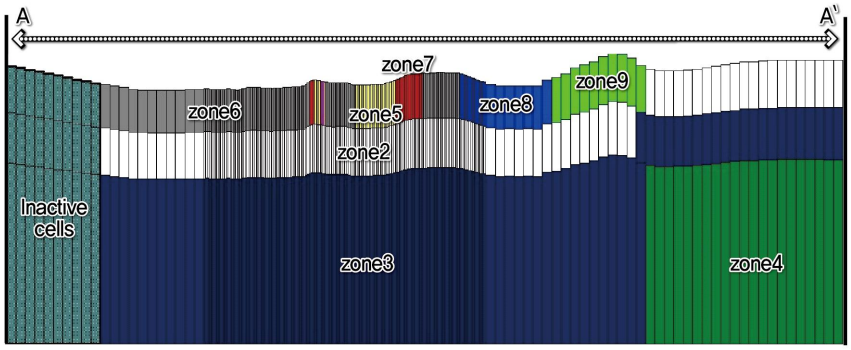
하상충적층의 수리전도도는 9.00×10^{-2}~1.00×10^{-3}cm/sec, 충적층 9.90×10^{-3} m/sec, 풍화암 7.00×10^{-4}cm/sec, 연암 3.60×10^{-5}cm/sec로 적용하였다.

표 8. 상세모델 수리전도도 구역화

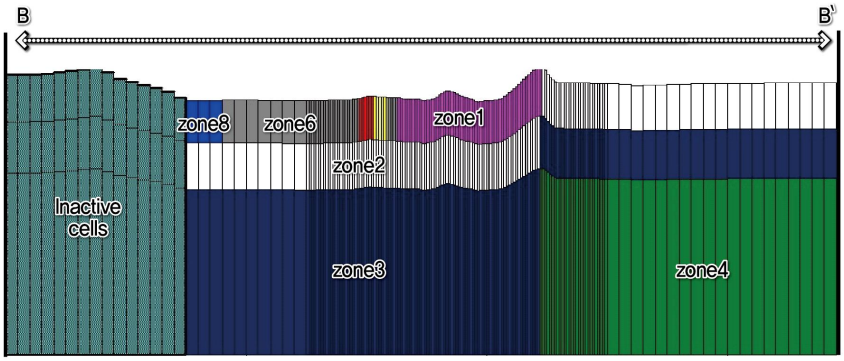
구 분			수리전도도(cm/sec)
하상충적층1	Zone 1	1층	4.82×10^{-2}
	Zone 2	2층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
하상충적층2	Zone 5	1층	9.00×10^{-2}
	Zone 2	2층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
하상충적층3	Zone 6	1층	3.00×10^{-2}
	Zone 2	2층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
하상충적층4	Zone 7	1층	1.00×10^{-3}
	Zone 2	2층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
하상충적층5	Zone 8	1층	7.00×10^{-3}
	Zone 2	2층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
하상충적층6	Zone 9	1층	5.00×10^{-3}
	Zone 2	2층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	3층	7.00×10^{-4}
충적층	Zone 2	1층	9.90×10^{-3}
	Zone 3	2층	7.00×10^{-5}
	Zone 4	3층	3.60×10^{-5}



층적층
9.90 × 10^{-3}cm/sec
하상충적층
9.00 × 10^{-2}cm/sec ~ 1.00 × 10^{-3}cm/sec
풍화암
7.00 × 10^{-4}cm/sec
연암
3.60 × 10^{-5}cm/sec



수리전도도 분포 단면(행 A - A')



수리전도도 분포 단면(열 B - B')

그림 14. 상세모델 수리전도도 설정

(2) 모델보정 및 타당성 검증

모델보정은 연구지역에 분포하는 11개의 관측정을 대상으로 측정된 지하수위 자료와 계산된 수위를 비교하여 수행하였다. 특히, 본 연구에서는 모델보정 시 매질의 수리전도도를 변수로 하여 실시하였으며 수리전도도는 현장시험 결과 값의 범위 내에서 적용하였다.

보정결과 RMSE(Root Mean Square Error)은 0.24m 이며 Normalized RMSE는 7.52%로 산정되었으며 모델구축은 적절한 것으로 판단된다.

추가적으로 수평집수관의 측정된 유량자료와 계산된 유량에 대한 보정을 통해 모델의 신뢰성을 높이고자 하였다. 토질별 수리전도도를 바탕으로 하상충적층을 구역화를 통해 모델 보정을 실시하였다. 실시결과 수평집수관별 유량은 2~68㎥/day에 오차를 보였으며 오차율은 0.57~8.02%로 계산되었다.

구축된 모델은 수위 및 유량검토 결과 현장여건을 잘 반영한 적절한 모델로 판단된다.

표 9. 모델보정에 따른 실측 지하수위와 계산된 지하수위

구 분		OW-1	OW-2	OW-5	OW-7	OW-8	OW-11	OW-13	IW-3	OB-1	OB-2	AN-1
전수두 (m)	측정값	3.29	3.23	3.93	3.79	4.83	4.24	4.81	2.82	5.92	6.03	4.60
	모사결과	3.33	3.36	3.39	4.12	4.67	3.97	4.57	2.62	5.84	6.06	4.45

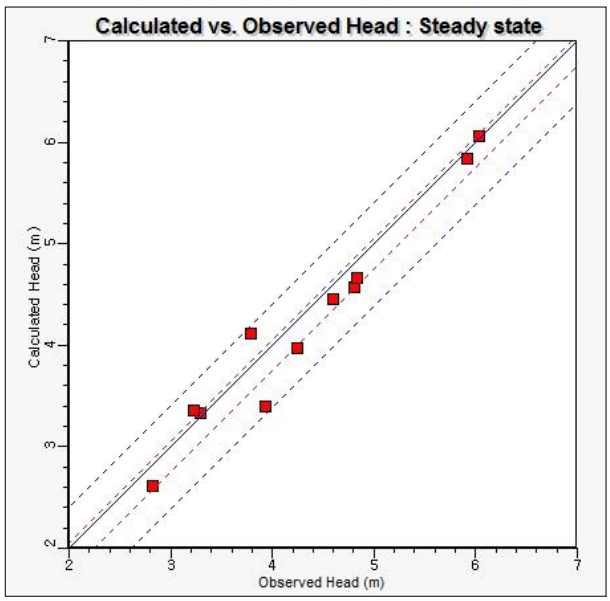


그림 15. 보정된 모델의 지하수위와 관측 지하수위 비교



그림 16. 모델보정에 사용된 관측공 위치도

표 10. 모델보정에 따른 수평집수관별 실측 유량과 계산 유량

수평집수관	관측자료(㎥/day)	모사결과(㎥/day)	오차(㎥/day)	오차율(%)
#3	700	702	2	0.57
#5	660	666	6	1.81
#7	1,250	1,254	4	0.64
#8	1,390	1,446	56	8.02
합계	4,000	4,068	68	3.38

3. 취수시설 개발가능량 및 영향거리 분석

가. 개요

(1) 분석 목적

강변여과수 개발시 배후지 지하수위 강하 영향거리를 축소시키면서 동시에 취수량 감소를 최소화 하는 운영조건 분석을 위해 상세모델을 활용한 수치모델링에 의해 다양한 조건하의 취수시설 개발가능량과 이에 따른 배후지 지하수위강하 영향거리를 분석하였다. 분석 결과는 최적의 취수시설운영 및 제어 시스템개발 활용에 목적이 있다.

(2) 취수시설 제어시스템 비교

실증시험시설의 연구취수시설은 기존의 취수시설과 비교해 취수펌프와 수평집수관이 원격으로 제어가 가능하며, 수평집수관별로 취수량제어가 가능하며 유량과 수질을 측정할 수 있다.

표 11. 취수시설 제어시스템 비교

구 분		기존 취수시설	연구 취수시설
개 요		단순 펌프조절장치	IT기반의 통합운영 시스템
수평 집수관	제어	제어 불가	원격제어 가능
	밸브	없음	취수량 조절밸브 설치
	유량계	없음	개별 집수관 유량계 설치
	수질측정	없음	시료 채취 및 자동 수질측정 가능
취수 펌프	제어	수동 제어	수동/자동 및 원격제어
	유량계	있음	있음
지하수위 강하 영향거리		원형으로 제어(방향별 제어 불가) 	집수관 방향별로 제어 가능 
특징		수평집수관별 취수량제어가 불가하여 지하수위 강하 영향반경을 감소 시 동시에 취수량이 감소가 매우 큼	수평집수관별로 취수량제어가 가능하여 지하수위 영향거리를 부분적으로 제어하고 취수량 감소가 최소화 됨

나. 취수시설 운영조건

실증시험시설 부지에 설치된 취수시설은 방사형집수정으로 운영은 배후지의 지하수위강하 영향과 동시에 취수량 변화를 검토하기 위한 운영방식으로 3차원 지하수 모델링에 의해 모사하고 예측하였다.

연구지역에 설치된 방사형집수정의 수평집수관은 7개(#1, #3~#8)이나 실질적으로 배후지 영향범위 제어를 위한 주요 수평집수관은 배후지 방향으로 설치된 3개의 #8(A방향), #1(B방향), #3(C방향 우측)이다.

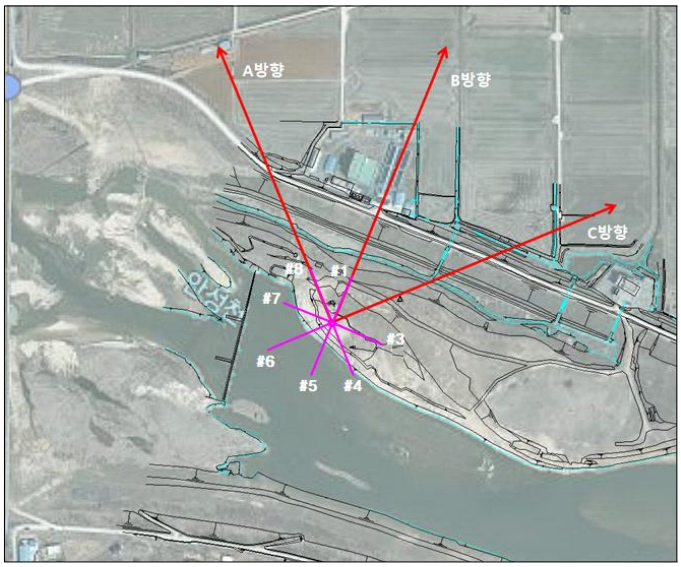


그림 17. 수평집수관 배치형태 및 배후지

따라서, 방사형집수정의 취수량 제어를 위한 수평집수관 운영조건은 취수량 감소를 최소화하기 위하여 상술한 3개의 수평집수관에 대하여 하나씩 밸브를 잠그고, 나머지 수평집수관은 모두 개방하여 취수하는 조건으로 모사하여 수위안정시 취수량 및 지하수위 강하영향거리를 분석하였다. 이때 방사형집수정의 총 취수량은 갈수기 취수량인 4,000㎥/일부터 1,000㎥/일씩 증가시켜 5,000㎥/일과 6,000㎥/일까지 세 가지 경우로 모사하였다.

(1) 취수량(Q) 제어 : 3개 조건

- ❑ Case1 : 4,000㎥/일(정유량 운영)
- ❑ Case2 : 5,000㎥/일(정유량 운영)
- ❑ Case3 : 약 6,000㎥/일(정수위 운영)

(2) 수평집수관(H) 제어 : 4개 조건

- ❑ Case1 : 모든 수평집수관 개방
- ❑ Case2 : 배후지방향 #1 수평집수관 제외한 모든 수평집수관 개방
- ❑ Case3 : 배후지방향 #3 수평집수관 제외한 모든 수평집수관 개방
- ❑ Case4 : 배후지방향 #8 수평집수관 닫음, 잔여 수평집수관 모두 개방

다. 수평집수관 제어시 취수량 분석

(1) 취수량 4,000㎥/일(정유량 운영)

수평집수관 #1, #3, #8의 수평집수관을 각각 폐쇄하는 세가지 경우 폐쇄한 주변 수평집수관의 취수량이 증대하여 모두 개방하는 경우의 취수량과 비교하여 감소량은 1%미만으로 거의 감소가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 취수량 4,000㎥/일 경우는 배후지의 지하수위강하 영향이 발생할 경우 수평집수관 제어에 의해 영향범위를 조절하더라도 취수량 감소는 매우 적을 것으로 판단된다.

표 12. 4,000㎥/day 운영시 수평집수관 제어에 따른 취수량변화 (단위 : ㎥/day)

수평집수관	취수량 (Q, ㎥/day)			
	모두 개방	#1 폐쇄	#3 폐쇄	#8 폐쇄
#1	638	0	689	807
#3	301	367	0	364
#4	292	341	330	339
#5	331	379	353	385
#6	1,193	1,383	1,266	1,422
#7	578	685	617	720
#8	713	877	761	0
합계	4,046	4,032	4,016	4,037

(2) 취수량 5,000㎥/일(정유량 운영)

취수량이 5,000㎥/일 경우의 분석결과도 전체취수량의 감소는 1% 미만으로 4,000㎥/일 취수할 경우와 유사한 결과를 보인다.

표 13. 5,000㎥/day 운영시 수평집수관 제어에 따른 취수량변화 (단위 : ㎥/day)

수평집수관	취수량 (Q, ㎥/day)			
	모두 개방	#1 폐쇄	#3 폐쇄	#8 폐쇄
#1	772	0	840	994
#3	361	444	0	433
#4	326	381	381	374
#5	410	464	441	471
#6	1,573	1,793	1,674	1,847
#7	712	838	762	895
#8	871	1,086	931	0
합계	5,025	5,006	5,029	5,014

(3) 취수량 6,000㎥/일(정수위 운영)

취수량 6,000㎥/day일 경우 일부 수평집수관을 차단하는 경우는 취수량 감소는 상술한 두가지 경우에 비해서는 상대적으로 많으나 감소량 2%~7%로 10% 이내로 나타났다.

#1 수평집수관을 닫은 경우의 취수량 감소는 364㎥/day로 전체운영 대비 5.94% 감소하였으며, #3 수평집수관을 폐쇄한 경우의 유량감소는 134㎥/day, 감소율 2.19%, #8 수평집수관을 닫은 경우의 유량감소는 438㎥/day, 감소율 7.15%로 나타났다.

취수량 6,000㎥/day일 경우가 4,000㎥/day와 5,000㎥/day 취수하는 경우에 비해 취수량 감소가 상대적으로 많은 것은 여러 가지 복합적인 원인이 있겠지만 단순하게는 방사형집수정의 취수량이 최대취수량에 가까워질수록 한 개의 수평집수관을 폐쇄하더라도 주변 수평집수관의 취수효율 증대가 상대적으로 줄어들기 때문일 것으로 판단된다.

표 14. 6,000㎥/day 운영시 수평집수관 제어에 따른 취수량변화 (단위 : ㎥/day)

수평집수관	취수량 (Q, ㎥/day)			
	모두 개방	#1 폐쇄	#3 폐쇄	#8 폐쇄
#1	900	0	967	1,117
#3	421	501	0	474
#4	345	400	421	386
#5	509	533	532	533
#6	2,076	2,141	2,117	2,167
#7	851	944	885	1,011
#8	1,024	1,243	1,070	0
합계	6,126	5,762	5,992	5,688
감소유량/감소율(전체운영 대비)		364 / 5.94%	134 / 2.19%	438 / 7.15%

라. 배후지 지하수위강하 영향거리

취수시설의 배후지 영향거리 검토는 취수시설 운영조건에서 설명한 것과 같이 배후지에 주요 시설물이 위치한 주요 방향을 설정하였다. 또한 주요 방향에 위치한 수평집수관을 제어하였을 경우 영향거리에 나타나는 변화를 분석하였다. 이때 영향범위 판단기준은 수위강하량 0.2m를 기준으로 하였다.

(1) 취수량 4,000㎥/일(정유량 운영)

방사형집수정 취수량을 4,000㎥/day 규모로 고정시킨 상태에서 배후지 측 수평집수관을 제어하는 4가지 경우를 모사하여 수위강하량 분포를 분석하였다.

방사형집수정에 수평집수관을 모두 개방한 상태에서 운영한 경우 A방향의 영향거리는 153m, B방향 252m, C방향 172m로 분석되었다. #1 수평집수관을 폐쇄한 경우

전체운영 대비 25~62m, #3 수평집수관을 폐쇄한 경우 2~25m, #8 수평집수관을 폐쇄한 경우 19~31m의 영향거리가 감소하는 것으로 분석되었다.

표 15. 취수량(4,000㎥/day) 제어조건별 영향거리 비교(수위강하 0.2m 기준) (단위 : m)

구 분	영향거리(감소거리/감소율)			
	모두 개방시	#1 폐쇄	#3 폐쇄	#8 폐쇄
A방향	153	128(25/16.3%)	151(2/1.3%)	122(31/20.3%)
B방향	252	202(50/19.8%)	249(3/1.2%)	227(25/9.9%)
C방향	172	110(62/36.0%)	147(25/14.5%)	153(19/11.0%)

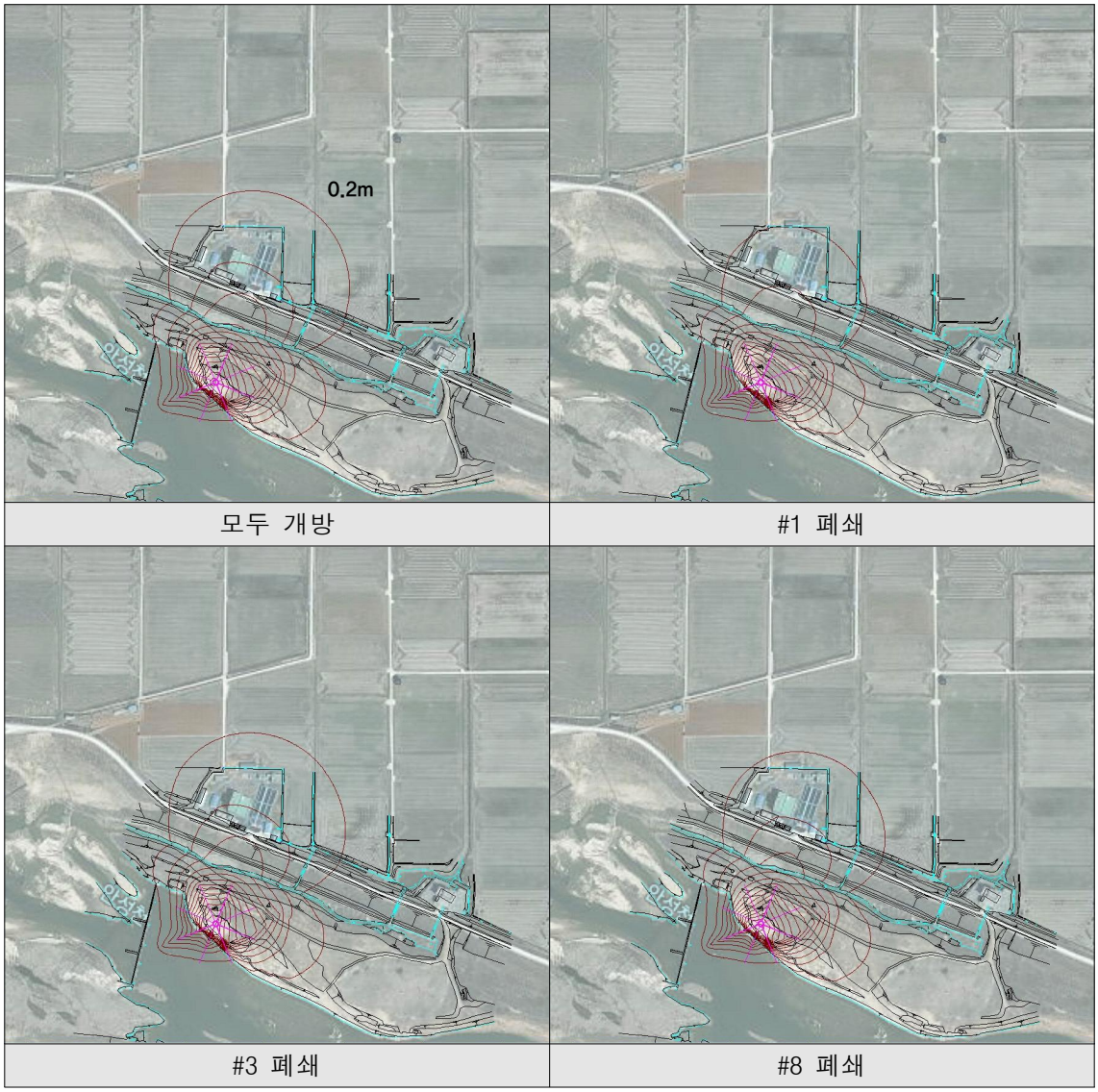


그림 18. 방사형집수정 취수량(4,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도

(2) 취수량 5,000㎥/일(정유량 운영)

방사형집수정의 경우 개발가능량 이내의 운영을 실시할 경우, 일부 수평집수관을 차단하여도 주변 수평집수관의 취수효율이 증대되어 일정 개발량을 지속적으로 개발할 수 있다. 단, 집수정내 유지수위는 변동이 있을 수 있으므로 운영시 주의가 필요하다.

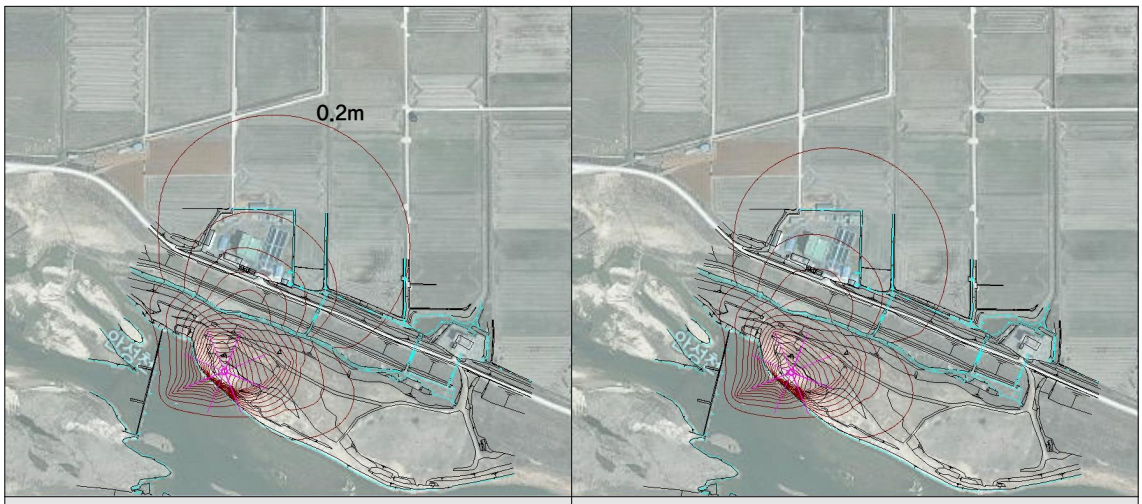
본 모델에서는 취수량이 개략적으로 5,000㎥/day가 되도록 설정하였으며, 수평집수관의 취수량을 조절함에 따른 배후지 영향범위 변화를 예측하였다.

방사형집수정에 수평집수관을 모두 개방한 상태에서 운영한 경우 A방향의 영향거리는 206m, B방향 323m, C방향 228m로 분석되었다. #1 수평집수관을 폐쇄한 경우 전체운영 대비 24~41m, #3 수평집수관을 폐쇄한 경우 -10~3m, #8 수평집수관을 폐쇄한 경우 18~35m의 영향거리가 감소하는 것으로 분석되었다.

#3 수평집수관의 경우 유량이 다소 작은 수평집수관이며, 배후지 방향보다 하천방향으로 설치되어 있는 수평집수관으로 영향거리 감소율은 낮다. 하지만 전체 취수량 유지를 위해 인접한 #1수평집수관의 유량이 집중되면서 배후지 B방향의 영향거리가 증가하는 효과가 나타났다. 이처럼 배후지 영향거리와 관계가 낮은 수평집수관의 운영을 차단하는 것은 오히려 배후지 영향거리를 증가하는 효과가 나타날 수 있다. 따라서 배후지 영향거리를 감소시키기 위한 차별운영을 실시할 경우 현장조건을 잘 반영한 모델을 활용하여 여러 상황에 대한 시뮬레이션을 통해 운영방안이 도출하여야 한다.

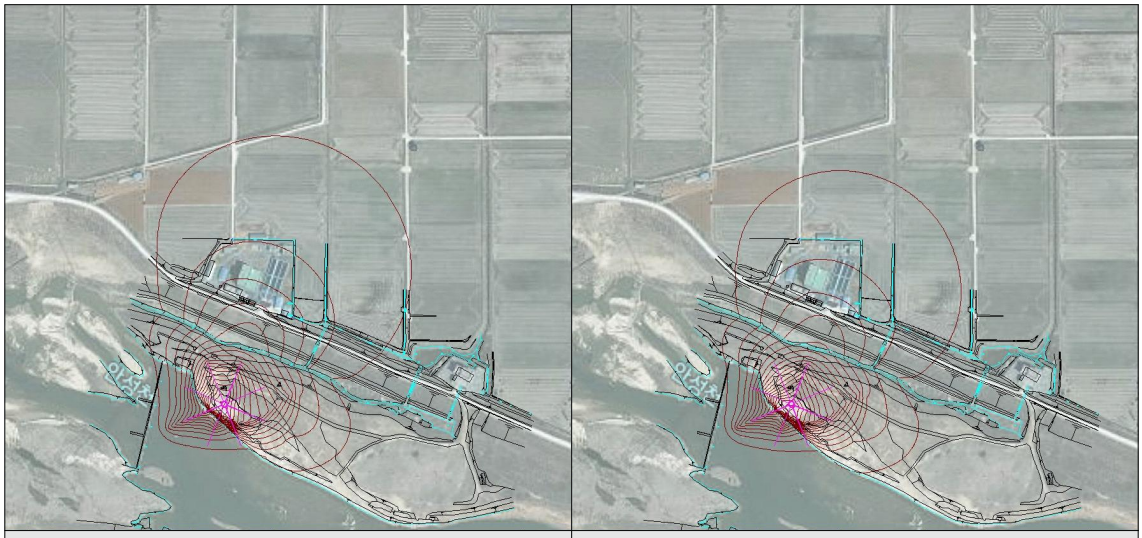
표 16. 취수량(5,000㎥/day) 제어조건별 영향거리 비교(수위강하 0.2m 기준) (단위 : m)

구 분	영향거리(감소거리/감소율)			
	모두 개방시	#1 폐쇄	#3 폐쇄	#8 폐쇄
A방향	206	182(24/18.4%)	206(0/0.0%)	171(35/17.0%)
B방향	323	281(42/13.0%)	333(-10/-3.1%)	292(31/9.6%)
C방향	228	187(41/18.0%)	225(3/1.3%)	210(18/7.9%)



모두 개방 | #1 폐쇄

그림 19. 방사형집수정 취수량(5,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도



#3 폐쇄	#8 폐쇄

그림 19. 방사형집수정 취수량(5,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도(계속)

(3) 취수량 6,000㎥/일(정수위 운영)

방사형집수정에 수평집수관은 EL(-)1.5m에 위치하고 있으며, 권장 운영수위는 수평집수관이 공기중에 노출되지 않는 심도인 EL(-)1.0m이다. 따라서 권장 운영수위 조건에서 상기 제시한 운영방식으로 모사를 실시하였다.

방사형집수정에 수평집수관을 모두 개방한 상태에서 운영한 경우 A방향의 영향거리는 272m, B방향 410m, C방향 300m로 분석되었다. #1 수평집수관을 폐쇄한 경우 전체운영 대비 50~83m, #3 수평집수관을 폐쇄한 경우 9~12m, #8 수평집수관을 폐쇄한 경우 48~70m의 영향거리가 감소하는 것으로 나타났다.

#3 수평집수관의 경우 유량이 다소 작은 수평집수관이며, 배후지 방향보다 하천방향으로 설치되어 있는 수평집수관으로 배후지 영향거리 감소율이 떨어지고, 주요 배후지 방향으로 설치된 #1, #8수평집수관을 제어할 경우 14.0~25.6%의 배후지 영향거리 감소효과를 볼 수 있는 것으로 확인되었다.

표 17. 취수량(6,000㎥/day) 제어조건별 영향거리 비교(수위강하 0.2m 기준) (단위 : m)

구 분	영향거리(감소거리/감소율)			
	모두 개방시	#1 폐쇄	#3 폐쇄	#8 폐쇄
A방향	272	222(50/18.4%)	263(9/3.2%)	202(70/25.6%)
B방향	410	327(83/20.2%)	398(12/2.9%)	353(57/14.0%)
C방향	300	245(55/18.3%)	288(12/3.8%)	252(48/16.2%)

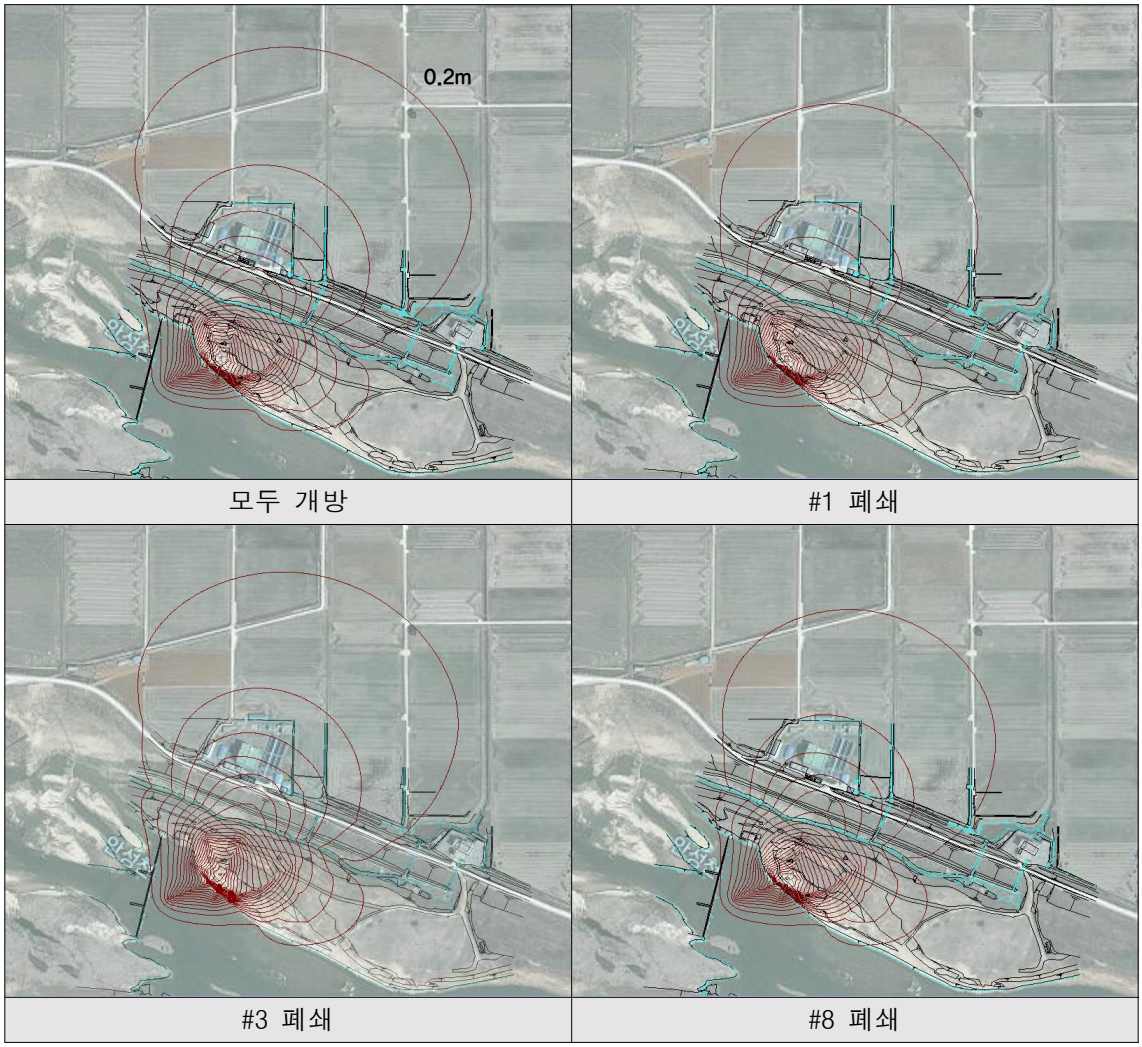


그림 20. 방사형집수정 취수량(6,000㎥/day) 제어조건별 수위강하 분포도

4. 검토결과 요약

방사형집수정은 수평집수관의 취수구역이 중첩되어 일부 수평집수관을 차단 또는 유량을 감소시켜도 주변 수평집수관의 취수효율이 증대되어 유량감소는 작게 나타난다. 또한 이 과정에서 각 조건에 따른 수위강하 형태 및 영향거리가 다르게 나타난다.

배후지 영향범위는 대체로 하천방향의 수평집수관에 취수량이 많고 배후지 방향의 취수량이 적은 경우 영향거리가 짧아지는 추세이나, 이는 대수층의 수리전도도의 분포 등 보다 복잡한 요인에 의하여 결정되는 것으로 보인다.

수평집수관의 취수량 및 배후지 지하수위 예측결과는 인공신경망의 비교 검증자료로 활용되며, 검증된 인공신경망 모델을 활용하여 배후지 영향을 최소화하는 최적의 운영방안을 도출하는데 활용하였다.

제 2 절. 배후지 영향 최소화 방안 연구

1. 관측망 설계

가. 지하수 관측정 설치

(1) 개요

지하수 관측이란 지하수를 과다 개발 및 오염 발생 등으로부터 보호하기 위해 관측정호를 설치, 정기적인 관측을 실시하는 것으로서, 이 용어는 수리지질학자, 엔지니어, 환경공학자 및 온천전문가 등에 의하여 보편적으로 사용되고 있다.

지하수 수질을 악화시키고 수량을 감소시키는 등 제반 위해활동에 대한 법적 규제가 과거로부터 실시되어 왔는데, 세계적으로 1970년대 중엽 이후 장래의 발생 가능한 수원고갈 현상으로부터 지하수를 보호하기 위한 노력이 있어 왔으며 최근에는 지하수의 양 및 질의 보호를 위한 다양한 법적 규제가 실시되고 있다. 일반적으로 지하수자원을 개발, 이용하기 위해서는 대수층에 대한 수위측정, 수질검사 및 대수층 시험 등의 방법이 사용되고 있으나, 최근 세계 여러나라에서는 수질환경 오염 및 자원고갈 현상의 증가에 따라 지하수 모니터링의 필요성이 의무화되고 있다.

이는 지하수의 고갈 및 오염증가 현상이 신규 지하수 개발지역에서 빈번하게 일어나고 있으므로 인해 개발자 및 정부 관리자들의 관심이 증가되고 있음을 말해주며 또한, 앞으로 다가올 미래에 있어 지하수자원의 감소 및 오염증가에 대비하여 어떤 대책이 필요하며, 현재 지하수의 오염상태가 어디까지 진행될 것인가 등에 대한 우려와 관심의 표현이라 할 수 있다.

(2) 관측 목적

지하수위 상승 및 하강, 수질오염 등 지하수 장해로부터 지하수를 보전·관리하고 대책을 수립하기 위하여 정기적 및 장기적으로 지하수위와 수질 등의 지하수 특성 변화를 관찰하여 측정하는 것을 지하수 관측이라 한다.

지하수는 지표하의 충적층과 암반의 지층구조내에서 매우 천천히 유동하므로 수위 상승, 하강 및 수질오염 발생에 대한 인지가 늦게 될 경우 원상회복이 불가능할 수도 있고, 지하수 장해를 인지한 이후의 대처과정에서도 기존의 관측자료가 없거나 부족할 경우에는 원인 분석과 대책 수립이 지연될 수 있다. 따라서, 지하수와 관련된 시설(강변여과 취수시설, 지표 오염원, 집수매거 시설, 간이상수도 시설, 먹는 샘물 취수정 주변 등)의 관리에 있어서 관측정을 설치하고 정기적으로 지하수의 부존 및 유동특성, 배경수질 등의 지하수 관측을 수행하는 것은 시설의 관리와 지하수의 지속적인 활용을 위하여 기본적이며 필수적인 요소라고 할 수 있다.

방사형집수정 운영에 따른 주변 수위변화 분석을 통해 배후지영향을 평가하여 그 영향을 최소화하는 최적의 운영방안을 도출하는데 목적이있다.

(가) 일반적인 지하수 관측의 목적

지하수 관측은 다양한 목적에 따라 세분화 되어 사용용도 및 분석 방향 등이 상이하다.

표 18. 지하수 관측의 목적

목 적	정보 생성
추세성의 파악	자연적 원인으로부터 발생한 지하수 수질 혹은 양 변화의 경향, 확산된 오염원의 경향, 수리 수문 영역에서의 변화 등을 관측함
지하수에대한 기준점 역할로서의 관측	미래의 인간 활동에 의하여 나타날 수 있는 지하수 수위 및 수질 변화에 대하여 기준이 되는 배경 정보를 제공함
지하수에 대한 공간적 분포 특성 파악	대수층 내 지하수 수위 및 수질의 3차원적 분포를 파악하도록 함
조기 경보 기능 수행	수위 강하 또는 확산된 오염원 영향의 함양 지대에서 조기 경보 제공함

(나) 지하수 관측목적의 유형별 특성

관측의 목적에따라 지하수의 상태에 대한 관측이 있을 수 있으며, 특정 경우에 있어서 법률의 올바른 이행의 감시 확인을 위한 관측이 있고, 가뭄 등과 같은 조기 경보 등의 구체적이고 다양한 활용이 가능하다.

그러므로 지하수 관측의 목적은 관측망의 계획 입안 단계에서부터 설치 목적 및 활용 계획을 명확히 하여야 한다. 물론 운영 과정에서 불가피하게 활용 분야의 변경 등이 초래될 수 있으나 이를 최소화함으로써 데이터의 효용성을 높여야 한다. 관측목적의 유형별 특성을 기술하면 다음과 같다.

① 기준 및 참고용 관측(Basic/Reference Monitoring)

기준 및 참고용 모니터링은 지하수의 상태를 평가하기 위한 모니터링을 의미한다. 이와 같은 관측망은 배경 수위에 해당하는 정보를 취득하는 것으로서 추후 또는 발생 가능한 인위적인 영향을 평가하기 위한 기준이 될 수 있다. 이 관측망은 통계적인 기법을 활용하여 장기간 동안에 발생하는 토지이용, 양수의 변화 등의 기록이 함께 분석 평가될 필요가 있다. 관측의 범위는 국가(National), 광역(Regional) 및 지역(Local) 등이 해당될 수 있으며, 국가 또는 국제적 기준에 의하여 관리될 수 있다. 현재 국토해양부에서 운영하는 국가지하수관측망은 여기에 해당한다. 국가지하수관측망의 수위 및 수질 자료는 기준 데이터로서의 역할을 하며, 장기간 관측된 자료를 활용하여 오염 복원의 목표나 수위 회복의 목표 등으로 활용될 수도 있다.

② 기능과 용도 관련 관측

본 관측망은 지하수의 이용과 관련된 제도의 효율적 시행을 위하여 사용된다. 즉, 지하수 법령에 근거하여 지하수를 이용하는지 등을 관측하기 위하여 운영되는 관측정으로서 관측 결과에 따라 적절한 대책과 조치가 수반되는 경우이다. 국내의 경우 먹는샘물 취수정 주변에 설치되어 있는 먹는 샘물 관측정이 여기에 해당한다.

③ 특수 목적을 위한 관측

다양한 지하수 자원의 관리를 위하여 특수 목적의 관측이 필요시 된다. 예를 들면, 지하수 특별 보호 구역의 지정, 개선 및 평가, 지하수 복원 정책의 실행과 평가, 지표수와 지하수의 연결에 대한 조사 분석, 오염물질의 이동을 예측하기 위한 모델링, 오염 복원 등 오염 조절을 위한 대책 마련 등이 해당 된다.

④ 조기 경보와 감시 목적의 관측

이 관측망은 인간의 토지 이용(오염, 수질악화, 유류 유출 등)에서 발생되는 다양한 위해 요소를 감시하고 사전에 경보하기 위한 목적의 관측망을 말한다. 예를 들면, 지하수 수질 악화의 실제적인 근원을 밝히기 위해, 돌발적인 액체 유출이 식수 공급에 영향을 미치는지, 어디에 영향을 미치는지에 관한 정보 수집을 목적으로 한다. 조기 경보에 사용되는 관측공은 신규 굴착공을 사용하게 되며 감시를 위한 관측공은 기존 이용공을 사용할 수 있다. 가뭄 예보용 지하수 관측망은 이 경우에 해당이 되며, 본 연구에서 지하수 변화에 대하여 감시 및 조기경보의 기능을 포함하고 있다.

표 19. 지하수 관측 유형별 활용 특성

지하수 관측 유형	자료 취득과 활용 분야
기준/참고용 관측정 (Basic/Reference)	- 자연 발생적이 현상에 대한 관측 - 지하수 변화 동향(Natural, 오염확산, Hydraulic regime)에 대한 관측 - 기준점(Background levels)으로서의 역할 - 공간적 분포 특성 파악을 위한 관측 - 기타 참고 자료로서의 활용
기능/용도 관련 관측정 및 특수 목적용 관측정	- 관측 인근 지역의 지하수 수질 기준 충족 여부에 대한 관측 - 지하수의 기준 및 한계점의 관측 - 지하수 오염에 따른 건강 위험성에 대한 관측 - 환경적 위험성에 대한 관측 - 다양한 지하수 수위 및 수질 예측 - 각종 오염 복구 대책 등 조치 결과의 유효성에 대한 관측
조기 경보와 감시용 관측정	- 수위 및 수질 조기 경보 시스템으로서의 관측 - 지하수위 및 수질의 동향 파악을 위한 관측 - 위험 요소의 인지를 위한 관측 - 각종 대책의 유효성에 대한 검증용으로서의 관측 - 지하수 개발, 오염 등에 따른 영향 여부 파악

(3) 관측망 계획시 고려사항

지하수 관측망의 기술적인 목적이 정의가 되면 구체적인 설치 운영 계획이 수립되어야 한다. 구체적인 설치 계획에는 관측목적에 따른 관측지점에 대한 사항, 관측하고자 하는 항목, 관측주기와 시료채취 기준 등을 제시하여야 한다.

표 20. 지하수 관측망 설계시 고려해야할 요소들

관측목적에 따른 관측지점 결정		지하수위 등 관측 항목 결정	시료채취 및 측정주기 결정
지점의 특성	관측 밀도		
수리지질학적 요인	수리지질학적 복잡성	물 이용	수리지질학 (체류 시간 고려)
	지질학 특성 (대수층 분포)	수질 쟁점들	수문학 (계절적 영향 고려)
	토지 이용	법정 요구사항들	-
	통계적 고려사항들	-	통계적 고려사항들
예산	예산	예산	예산

(가) 관측망의 밀도 결정

지하수 관측망의 밀도는 관측의 목적에 따라 결정되어지며, 기본적으로 대수층의 수문지질학적 및 지화학적 특성을 고려하여야 한다.

일반적으로 관측정의 설치는 수계의 발달 상태, 대수층의 발달, 지하수의 국부적인 충진 양상, 그리고 지하수위 및 수위 등고선에 영향을 줄 수 있는 기타 요소들이 존재하는 경우에 각각 관측정을 설치하며, 특히 지하수 흐름의 예측을 위해서는 하천과 수직 방향으로 최소 3개의 관측정이 요구된다.

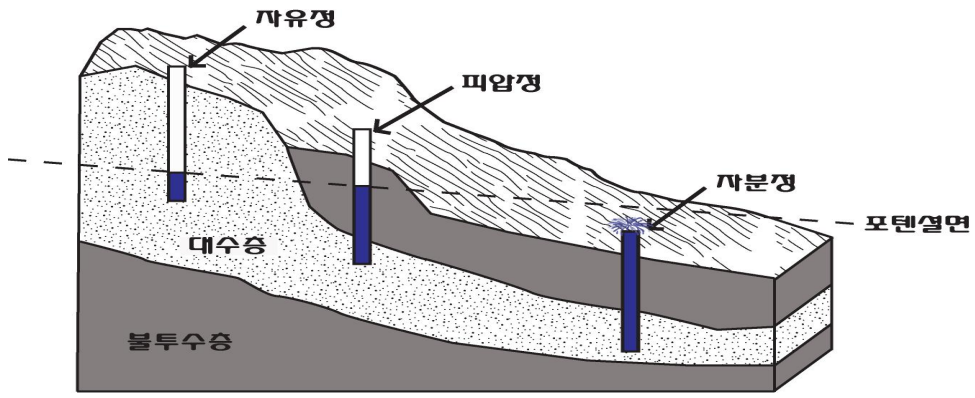


그림 21. 고도별 관측정의 설치 개념

또한, 기상요소를 고려하여 우기와 갈수기의 수계 및 지하수 충진상태를 고려하여 관측정 갯수의 조정이 가능하며, 대규모의 분지내에서 지하수의 유동방향을 측

정하기 위해서 6-9개의 관측정 설치를 필요로 하는데, 이는 수계발달 형태에 따라 충진지역, 집수지역, 배출지역 등으로 구분하여 각 구역내에 지하수 관측정을 설치한다(US EPA, 1986). 유역 내의 완만한 수리경사를 갖고 피압대수층이 존재하는 지역의 경우에는 각 대수층의 수리특성 파악을 위해 다심도 관측정을 설치하는 것이 보편적이다.

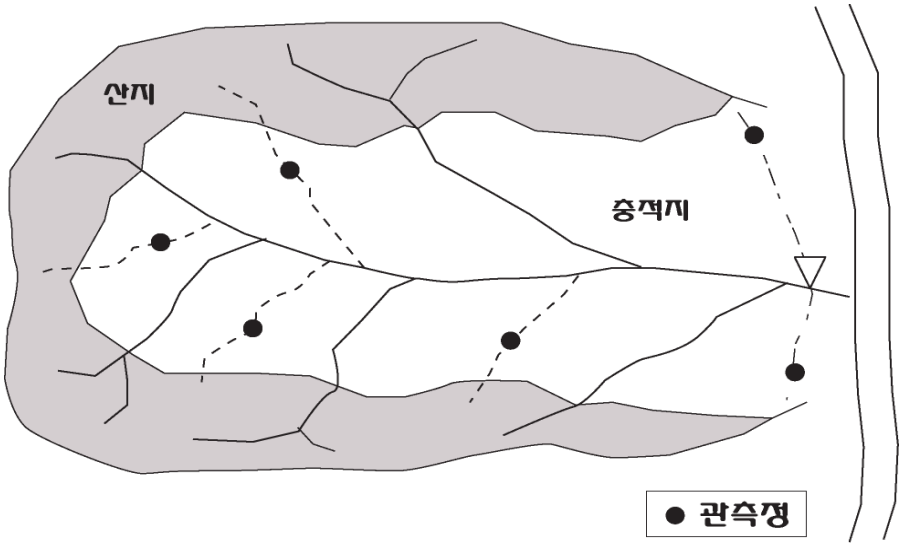


그림 22. 수계 분지내 지하수 관측정 설치 위치

만약, 앞서 기술한 일반적인 상황보다 대수층의 수문지질학적 특성이 매우 복잡 다양한 지역의 경우에는 보다 많은 개수의 지하수 관측정이 필요하다. 또한, 관측지역이 복잡한 오염원을 보유하고 있거나 지하수 이용 시스템이 매우 다양한 경우에도 지하수 관측정의 개수는 증가되어야 한다. 따라서, 대수층이 가지고 있는 특성의 다양성, 오염과 같은 관측 지점의 취약성, 지하수 개발 현황, 물 사용과 토지 사용 현황, 그리고 지하수를 이용하는 이용자의 특성 등이 반영되어 결정되는 것이 바람직하다.

아래 표는 현재 유럽의 각 국에서 설치 운영 중인 기준 및 참고용에 해당하는 관측정에 대한 것으로서, 지하수 수위 및 수질의 관측 밀도를 정리한 것이다. 국가에 따라서 지하수 수위 관측정과 수질 관측정의 밀도가 다르게 나타나는데, 이는 국가별로 지하수 관리에 대한 개념의 차이 및 중요도의 차이 등에 의한 것이다. 광역적인 기준 관측정의 경우에는, 9개 유럽의 국가중에서 가장 관측 밀도가 낮은 곳은 핀란드로서 100 ㎢당 0.02개소에 불과하며, 가장 조밀한 지역은 벨기에의 플랑드르 주로서 1.61개소에 이른다. 이와 같이, 관측망 밀도에서의 차이는 국가의 크기, 인구 밀도, 오염 특성과 지하수 시스템의 취약성 차이, 지하수 개발의 강도와 관련된 이해 충돌 정도, 그리고 환경 보호 정책의 강도 등에 의하여 나타난다.

표 21. 유럽 9개국의 지하수 수위 및 수질 관측망의 분포 밀도

국 가	평균 지하수 수위 관측망 밀도 (N/100 ㎢)	평균 지하수 수질 관측망 밀도 (N/100 ㎢)
스웨덴	0.11	0.04
핀란드	0.02	0.02
덴마크	0.15	0.26
영국/웨일스	-	0.40
네덜란드	10.7	1.07
벨기에/플랑드르주	1.61	1.61
독일/바바리아주	1.00	0.47
독일/New states	-	0.33
헝가리	2.27	0.55
스페인	1.95	0.22

이에 반해 특수목적으로 설치된 관측망은 상황이 다르다. 유럽 내 여러 국가에서 하천을 이용한 수력발전용 보를 건설하고 운영함에 따라 주변지역의 지하수위 및 수질 관리를 위해 구역을 설정하고 관측을 실시하는 경우, 그 밀도는 최대 8.8개소/㎢으로 관측지점 수의 차이를 보인다.

표 22. 유럽의 특수 목적용 지하수 관측망의 밀도

국 가	관측 목적	관측망 밀도(개소/㎢)
오스트리아	비엔나 다뉴브강 Freudenau 발전소 상류의 지하수 관측	8.8
	Inn강 Langkampen 소수력 발전소 상류의 지하수 관측	3.6
슬로바키아	다뉴브강에 설치된 Gabcikovo 보 상류의 지하수 관측	2.1

(나) 관측정 위치 결정

지하수 관측정의 위치는 일반적으로 대수층의 특성을 대표하고, 해석적인 규모를 고려할 때 수리수문학적으로 공간적 의미가 있는 범위에 속해야 한다.

지하수 관측 지점의 설정시 수행해야할 사항들은 다음과 같다.

① 지하수계를 전체적으로 묘사하여 주요 대수층의 수리경사도, 지질조건, 지질구조 등 기하학적 구조와 분포 등을 검토해야한다.
② 지하수의 흐름 상태, 토양 구성과 지질학을 토대로 하는 취약성을 평가해야한다.
③ 지하수계가 받을 수 있는 위협적 요인에 대하여 평가해야한다.

④ 지하수의 이용이 활발한 농업지역 및 특수목적 지역 등을 검토해야한다.
⑤ 산성화, 염류 축적, 오염물질 등 대수층에 직접 영향을 미칠 수 있는 요인을 확인하고 확인할 필요가 있는 지역을 평가해야한다.

위의 모든 항목이 체계적으로 검토되는 것은 많은 시간과 예산이 필요하므로 지역적 특성을 고려하여 반드시 필요한 최소한의 항목에 대한 검토가 이루어져야 한다.지하수 관측망은 설치는 설치공사뿐만 아니라 사후 운영 관리에도 막대한 예산이 필요하므로 사전 검토가 필요하다. 일반적으로 충분한 예산이 있다면 관측 전용 관측망은 설치하는 것이 바람직할 수 있으나 관측의 목적을 고려하여 기존 사용공을 활용하는 방안도 유용하다. 즉, 지하수 수위 관측의 경우 관측 지점 주변에서 이루어지는 인위적인 작용(양수 등)이 영향을 미치지 않을 것이라고 본다면 기존 우물이나 시추공을 사용할 수 있으며, 지하수 수질 관측망의 경우에는 특히 지하수 샘플링이 목적이라면 우물이나 샘 등의 모니터링 장소를 활용할 수도 있다.

지하수 관측정의 설계자는 관측정의 위치, 스크린의 심도 등을 결정하기에 앞서 관측대상 지점의 특성을 파악하고 관측지점에 대한 개략적인 수리지질학적 모델을 실시하고 지하수 유선망을 작성하며 폐기물 처리장 등과 같이 특정 오염원이 있는 경우에는 오염원의 경계와 범위를 정확히 파악하여야 한다.

관측지점의 설정을 위해서 파악해야 하는 기본적인 사항은 다음과 같다.

① 분포 암석 특성
- 관측 대상 지점에 분포하는 지층을 파악
② 수문지질단위의 파악
③ 수리지질 특성의 파악
- 수리전도도, 공극율, 수리전도도, 비산출량 등
④ 대수층의 특성
- 대수층의 경계, 형태, 포화 및 비포화 상태 여부 등

지하수 관측정의 설치시 고려해야할 세부 조건은 수리경사도, 지질조건, 지질구조 조건, 지하수내 용해성분의 밀도 및 용해성 조건 등이 있으며 세부적으로는 다음과 같다.

① 수리경사도
- 지하수의 흐름은 수직방향뿐 아니라 수평방향으로 발생하는데, 일반적으로 지질 모델 및 유선망 분석은 최상위 대수층을 정의하게 되며, 상대적인 지하수의 흐름방향을 결정한다. 오염원 주변의 관측 정호의 분포 개수는 3개 이상을 필요로 하며 미국 폐기물 매립장의 경우 상위지역에 최소한 1개, 하위지역에 3개 이상의 관측정 설치를 권장한다. 단순히 1개

의 대수층으로 구성된 경우로서 경사도가 완만한 경우에는 상위지역으로 지하수 흐름이 발생할 수 있는 점을 고려해야 하며 경사도가 급한 경우에는 역방향의 흐름이 거의 없음을 염두에 두어야 한다. 경사도가 급한 지역은 완만한 지역보다 관측정이 좁게 설정되어야 한다. 지층이 피압, 자유면 대수층 등 다양하게 구성된 경우에는 지하수 흐름은 자유면 대수층 뿐 아니라 피압층에서도 발생한다. 그러나, 피압층에서의 수평 흐름은 거의 무시할 수 있으므로 대수층에서의 유동망은 대수층의 경계부와 매우 평행하게 나타난다. 자유면 대수층과 피압층의 경계면에서는 유선만의 굴절이 발생하므로 다양한 심도의 관측정 설치가 요구된다.

② 지질조건

- 하나의 대수층이 존재하는 경우에는 관측 지점을 선정하기 위하여 대수층의 형태, 두께, 수리전도도, Flow net, 오염물질의 이동 경로 등을 파악하여야 하며, 다수의 대수층이 존재하는 경우에는 각각의 대수층을 대상으로 piezometer를 설치하여 관측하고 각 대수층의 수리전도도를 각각 구하여야 하며 대수층별 지하수 흐름을 이해하여야 한다.

③ 지질구조

- 지질구조는 여러가지 측면에서 지하수의 흐름을 결정하게 되는데, 1차구조인 층리, 사층리 등과 2차구조인 파쇄대를 따라서 투수성이 양호한 특성을 보이게 되며, 단층의 경우에는 단층 채움 물질의 특성에 의하여 투수성이 결정된다. 지하수 관측의 설계에 있어서 지질구조의 검토 사항들은 다음과 같다. 기존자료 및 항공사진을 이용하여 지표상에 나타나지 않는 지질구조를 파악하고, 시추를 시행하기에 앞서 지하수의 용천, 식생변화, 하천 배열, 지표지질 등을 규명하며, 이를 토대로 개념적인 지질 모델을 작성하고 지질구조, 지하수위 및 각 지층 단위의 경사도를 평가하기 위한 시추를 실시하며, 개념적인 지질 모델을 재실시하여 각 층의 검층 결과 및 지하수위 결과를 조정하며, 최종적으로 Flow net을 작성한 개념적 수리지질 모형을 결정하고 지질구조도 및 지하수위 등고선도를 작성함으로써 관측 대상 지점을 결정한다. 특히, 파쇄대가 발달한 경우에는 추가적으로 다음 사항들에 대한 고려가 요구된다. 야외조사 성과, 항공사진 및 노두의 지질구조 특성을 토대로 파쇄대의 패턴을 결정하고, RQD, 시추코아의 파쇄대 방향, 세부적인 검층 등을 포함하는 시추계획을 결정한다. 시추공에 대한 다양한 지구물리 검층을 실시한다. 즉, Caliper log, Flow log 및 온도 검층 등을 실시한다. 시추조사 및 지질조가 결과 파악된 각각의 파쇄대내의 수리특성을 규명하기 위한 다수의 관측장비를 설치하며, 절리 패턴 및 파쇄대와 관련된 지하수위 및 경사도를 측정하고 최종적으로 개념적인 지질 모델을 완성한다.

④ 오염원 밀도 및 용해성 조건

- 지하수 수질의 관측을 위해서 요구되고 검토되는 조건으로서 지하수 수

질 관측정 설치에 앞서 오염물질의 농도에 대한 사전 검토가 요구된다.

(다) 관측 항목의 결정

관측 항목의 결정은 지하수 관리의 목적에 따라 결정되어야 한다. 즉, 지하수계를 이용하는 목적과 조건이 무엇인지 고려하고, 지하수계가 노출되어 있는 주변 환경적 위험 요소들이 무엇인지 파악하며, 현재 발생된 문제가 무엇인가를 고려하여 관측 대상을 정하게 된다. 이와 같은 관측 항목의 결정을 위한 정량적 근거를 제시하기 위하여 다음과 같은 항목을 포함하여 대상 지역에 대한 조사를 실시하여야 한다.

기준 관측정의 기능을 파악하기 위한 대수층의 양적, 질적 특성을 조사하고 법령의 효율적 집행을 감시하기 위한 관측정이라면 현장에서 사용하고 있는 실제 지하수의 기능, 이용현황, 수질의 조건 등을 조사하여 물의 용도가 생태적 기능용, 식수 목적용, 농업과 공업용 등인지를 파악해야한다. 예·경보용 지하수 관측정이라면 토지 이용에 반영된 농업, 공업, 폐허, 군사지역 등의 지하수계가 노출되어 있는 위험적 요소에 대한 조사를 수행한다. 특수 목적용 관측정이라면 산성화, 건조, 양분, 염류 축적, 오염 등에 대한 현재 지하수계에 나타난 문제점을 정확히 파악해야 한다.

(라) 관측 빈도와 샘플링의 결정

지하수 수위의 관측 빈도는 지하수 변동 특성에 따라 다르며, 수문지질학적 상황(대수층의 유형과 깊이), 수문학적 환경과 인간의 영향(지하수 추출, 유도된 인공함양, 관개로부터의 회귀수, 지표수 수위 조절 영향 등)에 의해 결정된다.

수위 관측 빈도를 결정하는데 고려해야 할 사항들은 다음과 같다. 관측 빈도는 지하수위의 변동 경향을 찾을 수 있는 주기를 가져야 하며 장기적 변화와 추세를 관측할 경우에는 상대적으로 낮은 빈도의 관측 주기로 충분하나, 계절적 변동이나 단기간의 변동을 파악하기 위해서는 더 높은 빈도로 설정한다.

일반적인 지하수 수위 관측은 시간 단위에서부터 수개월에 한 번 정도의 주기로 이루어지고 있는데, 국내의 국가지하수관측정의 경우에는 매시간 마다 지하수 수위가 측정되고 있다. 우리나라는 계절적 변화가 뚜렷하므로 계절 변화의 특성이 관측에 반영되어야 하며, 용수 이용 특성을 고려한다면 봄철 농번기의 과다한 농업용수 사용과 하절기 물사용의 증가, 동절기 비닐하우스 경작에 의한 용수량 증가 등이 함께 고려되어야 한다.

(마) 기타 관측망 설치 및 운영의 기본 원칙

지하수 관측망을 설치하고 운영하기 위해서는 다음과 같은 기본 원칙을 따르는 것이 필요하다.

① 관측 목적을 명확히 정의하고 관측 프로그램이 이를 만족시키도록 구성되어야 한다.

② 시간적, 공간적으로 지하수가 변동되는 것을 고려하여 관측 지역 대수층의

유형과 특성 등이 완전히 파악되어야 한다. 이를 위하여 예비 조사를 실시하여 다음과 같은 필요한 정보를 수집한다. 수문지질도를 사용하여 대수층의 분포를 파악하고 대수층 상하에 놓인 지질 계통의 분포를 파악한다. 대상 지역의 오염취약성과 지하수 수질변화 자료를 분석한다. 수문지질학적 시추공 자료를 이용하여 수문지질학적 매개 변수를 이해하고, 기존의 모니터링 우물과 지하수 이용특성에 대한 구체적인 정보(위치, 이용, 특성 등)를 파악한다. 지하수의 연령과 근원 등에 관련된 동위원소 데이터를 분석한다.

③ 필요시 기존 관정을 활용하여 관측하며, 관측 목적에 적합한 관정이나 우물을 선정한다.

④ 관측 항목, 관측 유형, 위치 측량 및 관측 주기 등은 관측의 목적에 부합하도록 선정되어야 한다.

⑤ 관측된 데이터의 분석 및 분석 주체(기관 등)은 최선의 결과를 얻어낼 수 있도록 결정되어야 한다.

⑥ 관측 데이터의 생성, 전송 및 분석 진행과정 등이 완벽하게 정립되어 데이터의 생성에서부터 활용까지 체계화되어야 한다.

⑦ 지하수와 지표수는 연계된 단일 수자원으로서 지하수 관측은 지표수 관측과 연계되어 설계되고 분석되어야 한다.

⑧ 취득된 데이터의 정확성은 지속적으로 검토·확인되어야 한다. 전문가의 능력을 활용하여 관련 자료의 분석이 이루어지고 데이터의 정도를 높이기 위한 후속조치들이 병행되어야 한다. 이 과정을 거친 자료들이 의사결정자에게 전달이 되어 보다 체계적이고 합리적인 정책 입안 및 집행이 이루어지도록 한다.

⑨ 지하수위, 수질 등 관측 자료가 자연적인 지하수 유동 체계에 의하여 변화되는 것이라고 인식될 경우에는 관측 시스템 전반을 재평가하여 보다 효율적인 관측 시스템으로 발전시켜 나가야 한다.

나. 관측정 시설 기준

(1) 관측정 굴착 기준

지하수 관측정 설계시 일반적으로 지질 등의 기존자료 검토, 대수층 깊이,두께 등의 수리특성, 지하수의 분포 및 유동방향, 수직상의 수리경사, 하천유입 및 해수의 영향, 인근의 양수활동 등 주변여건, 기존 주변 우물의 활용 가능성을 검토한다.

(가) 공경

관측 기기의 설치가 가능하고 물시료의 채취가 가능한 규모로 한다. 대수층의 특성 파악을 위하여 양수시험이 필요한 지점에서는 관측정의 공경이 최소한 4인치(100 ㎜) 이상이 되어야 하며, 수위하강을 관측하기 위한 관측공 내지는 충적층 내 지하수의 변화를 파악하기 위하여 설치되는 관측공의 케이싱 구경은 75 ㎜(NX) 이

상이면 무방하다. 국가 지하수 관측정의 경우에는 300 ㎜로 굴착하고 있으나, 대상 지역의 분포 지질 등을 고려하여 적절한 굴착방법을 선택하되, 최근 굴착 기술 및 관측 장비의 발달 등을 고려하여 보다 소구경으로 굴착하여도 충분하다. 굴착된 관측공내에는 케이싱을 주입하는데, 이 케이싱의 구경은 관측 장비의 삽입과 지하수의 샘플링이 가능하여야 하고 향후 유지관리 측면에서 충분한 공경이 확보되어야 한다. 이를 위해 케이싱의 구경은 75 ㎜를 권장한다.

(나) 심도

관측정의 심도는 관측의 목적에 의하여 결정한다. 충적층만을 대상으로 관측한다면, 관측정은 지하수면의 변화 심도보다 낮게 설치하고 풍화대를 완전히 관통하는 깊이로서 약 20-40 m정도로 한다. 반면에 암반을 관측 대상으로 한다면 관측 대상 지역의 지하수 이용상태, 오염의 분포 범위 등을 고려하여 심도를 결정하는 것이 바람직하다.

(다)케이싱 및 스크린의 설치

충적층 지하수의 관측정의 보호벽(케이싱)은 지표의 미고결 퇴적물이 여러 가지의 주변환경의 물리적 성질의 변화로 인하여 압축/팽창됨에 따라서 관측공이 파괴되는 것을 방지하기 위하여 설치되는 것이다. 그러므로, 철저한 케이싱 설치작업이 수행되어야 하며, 동시에 케이싱과 시추공 사이의 공벽을 통하여 지표의 물이 관측정 내로 스며들지 않도록 철저히 차단시켜 시공하여야 한다. 암반 지하수의 수리특성을 관측하기 위한 심부 관측정에서는 상부 충적층과 풍화대를 관통해서 암반 대수층의 상부까지 케이싱을 설치하여 케이싱이 완전히 암반에 정착되도록 설치하여야 한다. 동시에 암반내에서도 지하수의 수위 및 수질 변화를 관측하고자 하는 심도 내지는 함수대(Water bearing zone)의 심도에만 일정한 간격의 스크린을 설치한 후 나머지 관측공과 공벽 사이의 공간은 벤토나이트와 시멘트 등의 철저한 막음장치를 설치하여야 한다. 일반적으로 케이싱의 재질은 PVC, 철제, 스테인레스 스틸 등이 모두 가능하며, 염분 부식 등의 가능성이 존재하는 지역은 PVC를 권장한다.

(라) 그라우팅 깊이

관측공 상부 일부 구간에는 지표로부터의 오염물의 유입이나 공벽 외부를 통한 지표수의 공내 유입을 차단하기 위하여 그라우팅을 실시한다. 이와 같은 관측공 상부 외부의 그라우팅의 깊이는 충적 관측정의 경우 최소 5 m 이상, 암반 관측정의 경우에는 암반 상단까지 실시하되 현장 여건 및 시공 능력 등을 고려하여 결정한다.

(마) 상부보호 설비

그라우팅과 아울러, 상부로부터의 오염을 근원적으로 차단, 외부로부터의 충격이나 도난 등으로부터 보호하기 위해서 호우기시 침수에도 안전한 밀폐형 상부 보호 설비

를 마련하고, 미관을 고려한 보호용 Fence를 설치한다. 또한 상부보호 시설 및 Fence 구조는 관측정 및 관측장비의 점검, 지하수 시료채취 등이 가능하도록 설치한다.

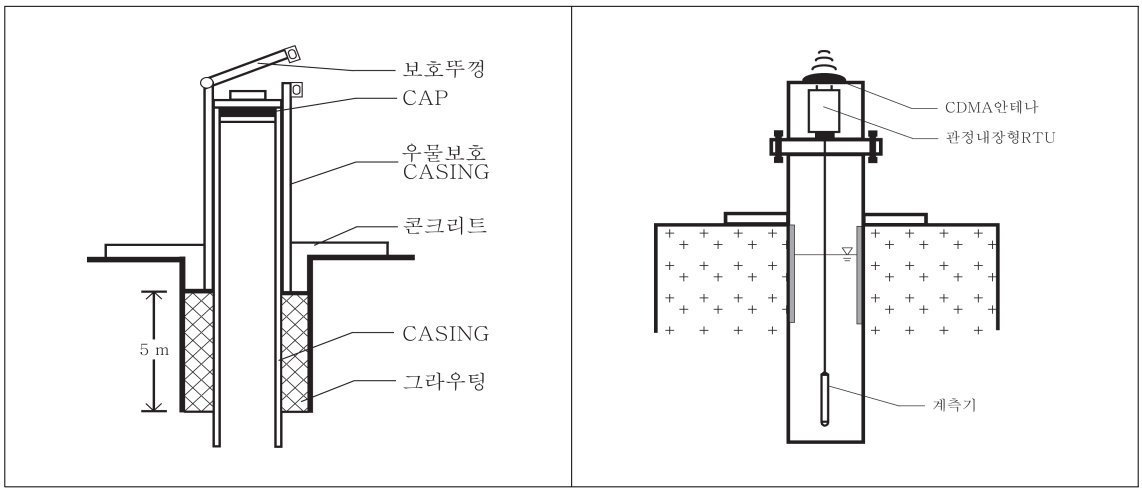


그림 23. 오염원 유입방지 그라우팅 및 상부보호시설의 사례

(바) 기타

스크린의 길이 및 충진력 등 기타 관측공 내부 시설에 대한 제원은 지역별 수리특성 및 충적층 또는 암반의 수력학적 특성을 토대로 설치 여부와 방법을 결정한다. 본 시설은 지하수 관측을 목적으로 설치하는 것이므로 일반 양수정에서 적용하는 설계 방법에 의한 스크린의 개공율이나 슬롯 크기를 적용하기 보다는 관측 특성에 맞도록 필요구간에 대한 스크린 설치 및 미세립자의 유입이 발생하지 않는 크기의 슬롯 결정 등이 필요하다.

(2) 관측정 설계 기록사항

지하수 관측정 설계 내역으로서 다음 사항들은 반드시 별도 Database로 기록 관리되어야 한다.

- 관측정의 구경 : 관측정의 구경은 지하수위의 변화 뿐 아니라 지하수 시료의 채취가 가능하게끔 적정 규모로 결정된다.
- 보호 케이싱의 해발 고도
- 우물 케이싱의 해발 고도
- 지표면 해발고도 : 정확한 측량을 통한 관측지점의 위치 파악
- 케이싱 재질 및 구경
- 스크린 길이
- 스크린 Slot의 크기
- 케이싱 길이
- 시추 심도
- 필터 Pack의 길이
- 필터 Pack에 관한 기타 사항
- 벤토나이트 Seal에 대한 사항

- 지표 콘크리트에 대한 사항
- 보호 케이싱의 총 길이 및 매립 깊이
- 보호 케이싱의 재질 및 구경
- 관측정 진입로에 대한 사항
- 시건장치 및 보호 장치에 대한 사항
- 오염 지하수 관측정인 경우에는 오염현황과 오염원에 대한 사항
- 이상 현장 시설 상황과 병행하여 다음의 수리지질학적 특성에 대한 사항을 기록으로 관리하여야 한다.
  - 시추주상도, 지표지질, 지형도, 수계 분포도, 토지이용도, 충진 양상
  - 대수층의 특성, 깊이, 두께, 폭 등
  - 수위 분포
  - 예상 지하수 흐름 방향
  - 수직상의 수리 경사
  - 주변의 양수, 하천 유입, 해수영향 등에 의한 지하수 변화폭 예상
  - 기존 주변 우물 상황 등

(3) 기존 우물을 활용하는 경우

전 절에서 제시한 약 900개소의 지하수 관측정을 신규로 굴착하는 것은 예산이나 설치 지점 등을 고려할 때 어려움이 있다. 따라서, 전체 관측정의 절반 정도는 기존 우물을 사용하여 수동 관측하는 방식을 채택하는 것도 필요하다. 신규 관측정에서 측정된 자동 관측 자료와 기존 우물에서 측정하는 수동 계측 자료의 적절한 조합 분석을 통하여 대상 지역의 지하수 특성 변화를 평가할 수 있다.

기존 우물을 지하수 관측정으로 지정하여 활용하는 방법으로서, 필요한 안내판이나 상부 보호설비 등을 추가로 설치할 수 있으며 정기적인 수동 측정을 실시하도록 한다. 기존 우물을 지하수 관측정으로 지정할 때는 자동 관측정 배치 계획을 고려하여 배치밀도가 낮은 지점의 우물을 선택하도록 한다. 아울러 지하수위의 측정은 인위적인 영향이 최소가 되는 시기를 선택하여 측정한다. 즉, 지하수 양수가 이루어지거나 함양 작용 등이 있는 경우를 제외하고 지하수위가 안정을 유지하는 시점에 측정하도록 한다. 예를 들면, 농번기의 지하수 이용 시기에는 기존 우물의 수위가 매우 낮아질 수 있으므로 수위가 회복되는 시점에 측정하도록 한다.

또한, 기존 우물은 지표면 상부로 노출된 구간이 있으며 지하수위의 측정 기준점은 지표면 상부 노출 부위의 최상부가 되므로 지표면에서 이 지점까지의 높이(Stick up)를 반드시 측정해 두어야 한다. 즉, Stick up 높이를 지하수위 측정값에서 뺀 후의 값을 지표면에서부터의 지하수위 심도로 최종 결정하는 등 주의를 기울여야 한다.

다. 관측 장비

(1) 관측 장비 개요

매일 일정한 시간에 관측하여 그 변화를 분석해야 하는 수위관측의 경우에는 인력을 사용하여 전 관측공에서 이와 같은 작업을 하기는 거의 불가능하다. 따라서, 지하수의 수위변화를 자동으로 관측할 수 있는 자동 관측 장비가 개발되어 사용되고 있다.

표 23. 국내외 자동수위 계측장비 현황

모델명	제 품	측정원리	측정항목	특징	제조사
Orpheus Mini		압력식	수위 수온	- 22 mm X 195 mm - 대기압 자동보정 - IrDA방식의 방수인터페이스	OTT (독일)
CBS		기포식	수위	- 관정 외부에 센서 설치 - 기포관 유지관리비용 소요 - 별도의 데이터로거 필요	
Talimedes		부자식	수위	- 관정 외부에 센서 설치 - 부자의 직접계측으로 정확 - 100 mm이상 공경 필요	
Diver		압력식	수위 수온	- 초소형 18 mm X 90 mm - IrDA(적외선) 통신 - 대기압 보정 요함	Eijekelkamp (네델란드)
e-water L		압력식	수위	- 대기압 자동보정	
CTD Diver		압력식	수위 수온 EC	- 오염관측 용이(세라믹재질) - 대기압 보정 요함	
Level Scout		압력식	수위 수온	- 19 mm X 316 mm - 대기압 자동보정 - RS485 통신	YSI (미국)
MS5		압력식	수위 수온 EC	- 44 mm X 749 mm - pH,DO등 별도센서 부착가능	Hydrolab (미국)
CTD350		압력식	수위 수온 EC	- 47 mm X 437 mm - 대기압 자동보정 - RS232 통신	Greenspan (호주)
WaterMade 4100		압력식	수위 수온 EC	- 43 mm X 450 mm - 별도의 데이터로거 필요	바이텍코리아 (한국)
MK-15CTD		압력식	수위 수온 EC	- 19 mm X 228 mm - 대기압 보정 or 절대압 방식	하이드로넷 (한국)

표 24. 자동수위 계측장비의 측정 원리별 특징

구분	측정 원리	특징
부자식	- 부자를 수면에 띄워 수위의 변화에 따라 강선으로 연결된 부자의 상승·하강으로 측정	- 관측정 외부에 센서 설치 - 관측정의 10 cm 이상의 공경 필요
기포식	- 수면 아래로 설치한 튜브로 공기를 배출시 걸리는 압력을 이용하여 수위측정	- 관측정 외부에 센서 설치 - 별도 장비(외부 전원 및 데이터 로거)로 인한 설치공간 확보 필요
압력식	- 수압의 변화(수위변화)를 감압 센서에 의해 전기신호로 변환 수심을 측정	- 수중에 센서 설치 - 소형 장비 - 기종에 따라 수위와 EC 동시관측 가능
음파식	- 음파를 수면에 발사하여 반사된 초음파의 도달시간을 수위로 변환하는 방식	- 관측정 외부에 센서 설치 - 대심도 우물의 수위측정 가능 - 상대적으로 낮은 정확도

지하수 수위 관측장비는 압력식, 부자식, 음파식 등 다양하나 보편적으로 가격, 설치 사용의 편의성, 유지관리의 용이 등으로 압력식이 가장 많이 사용하고 있으며 국내외 시판되는 제품들 또한 압력식이 주를 이룬다.

(2) 국내 장비 현황

(가) 장비명 MK-15CTD

수위(Level), 수온(Temp), 전기전도도(EC) 등을 측정하는 3항목 계측 장치로서 21mm의 작은 외경으로서 현장 적용성이 우수하다. 센서를 싸고 있는 재질은 STS316L로서 충격에 견딜 수 있는 구조로 되어 있으며, 최대 수압 100psig까지 측정 가능하다. 계측기의 전원은 9~13.8V DC를 S-CAP으로 부터 공급받아 사용하며, 소비전류는 동작시 25mA, 대기시 0.05mA 정도이다.

표 25. MK-15CTD의 측정 항목별 센서 사양

구 분	수위	수온	전기전도도
측정범위	0~70m	0℃ ~ 50℃	0~60,000㎲/cm
정확도	±0.1% FSR	±0.1℃	±1% FSR
해상도	1mm	0.01℃	1㎲/cm
기 타	Gage Type	Thermistor	Graphite 4 cell

(나) 장비명 WM4100-S

수위(Level), 수온(Temp), 전기전도도(EC) 3항목을 계측할 수 있는 일체형 센서로서 크기는 43mm(외경)*450(길이)mm이다. 센서 하우징의 재질은 SUS316L로서 부식

이 되지 않으며, IP68등급의 방수구조를 가진다. 입력 전원은 DC12V이며, WM4100-D(데이터 로거)로부터 전원을 공급받아 구동된다. 소비전류는 동작시 60mA, 대기시 0mA이다.

표 26. WM4100-S의 측정 항목별 센서 사양

구 분	수위	수온	전기전도도
측정범위	0~70m	0℃ ~ 50℃	0~99,999㎲/cm
정확도	±0.25% FS	±0.1℃	±3% FSR
해상도	1cm	0.01℃	1㎲/cm
기 타	Gage Type	Thermistor	2-electrode cells

(다) 장비명 EB-5000

수위(Level), 수온(Temp) 측정하는 2항목 계측 장치로서 Ø19 X 160mm의 작은 크기로 현장 적용성이 우수하다. 센서는 stainless steel 싸고 있으며 충격에 견딜 수 있는 원형 막대 구조로 되어 있다. 최대 측정 범위는 700kpa까지 이며 계측기의 전원은 9V DC를 CR1000으로부터 공급받아 사용한다.

표 27. EB-5000의 측정 항목별 센서 사양

구 분	수위	수온
측정범위	0~70m	-20℃ ~ 80℃
정확도	±0.1% full scale	±0.1℃
해상도	1mm	0.01℃
기 타	50 micrin(필트)	Thermistor

라. 관측망 구축

방사형집수정 운영에 따른 주변 수위변화 분석을 위해 아래와 같이 집수정을 중심으로 제외지, 제내지, 하천으로 구분하여 관측망을 구축하였다. 재외지의 경우 상시 하천범람 우려 지역으로 접근에 불편함이 있어 실시간 수위 관측이 가능한 제품을 활용하였다. 제내지 관측정의 경우 신규 굴착을 통해 관측망을 구축하려 계획하였으나 제방 및 배수장의 배수로 문제, 농수로로 인한 지표수 유입 및 협조문제로 인하여 기존 사용관정을 관측망에 포함하였다. 사용관정의 경우 수위변화가 집수정 운영에 의한 효과와 취수에 따른 효과가 중첩되어 나타날 수 있으나 전체적인 수위변화 추세는 파악이 가능하며 참고자료로 활용되기에 충분하다고 판단된다.

하천 관측공의 경우 폭우로 인한 장비유실에 대비하여 보 끝단에 비교적 유속이 완만하며 수위측정이 용이한 위치를 선점하여 수위계측기를 설치하였다.

표 28. 방사형집수정 관측망 구축 현황

구 분	공 번	집수정 이격거리(m)	비고
제외지	OW-1	86	
	OW-2	69	
	OW-7	111	
	OW-8	121	
	OB-12	218	
제내지	OB-4	418	사용관정
	OB-8	470	사용관정
	OB-9	300	
	OB-10	206	사용관정
	OB-11	212	
하 천	AN	125	



그림 24. 방사형집수정 관측망 구축 위치도

2. 장기운영에 따른 배후지 영향 평가

가. 운영현황

대용량 취수시설의 성능평가 및 운영에 따른 배후지 영향을 평가하기 위한 시설 운영을 진행하였으며, 배후지 방향의 수평집수관의 경우 수평집수관 유량계 설치를 통해 운영조건에 따른 영향을 파악하고자 하였다.

(1) 운영 목적

- 장기운영에 의한 방사형집수정 성능평가
- 수평집수관 제어취수에 의한 배후지 영향평가

(2) 장기운영 성능평가

- 2017년 1월~2018년 6월, 집수정 설계수위(EL-1m)로 정수위 운영
- 2018년 12월~2019년 10월, 집수정 설계수위(EL-1m)로 정수위 운영

(3) 수평집수관 제어취수에 의한 배후지 영향 평가

- 2차년도 : 2018년 7월~11월, 취수량 4,000㎥/일로 정유량 운영
- 3차년도 : 2019년 5월~6월, 취수량 5,000㎥/일로 정유량 운영

표 29. 배후지 영향 평가를 위한 운영 일정

구 분	2017년				2018년				2019년			
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
① 집수정 성능평가	■	■	■		■	■			■	■		■
② 수평집수관 설치				#1			#3,8					
③ 배후지 영향평가							■	■		■	■	

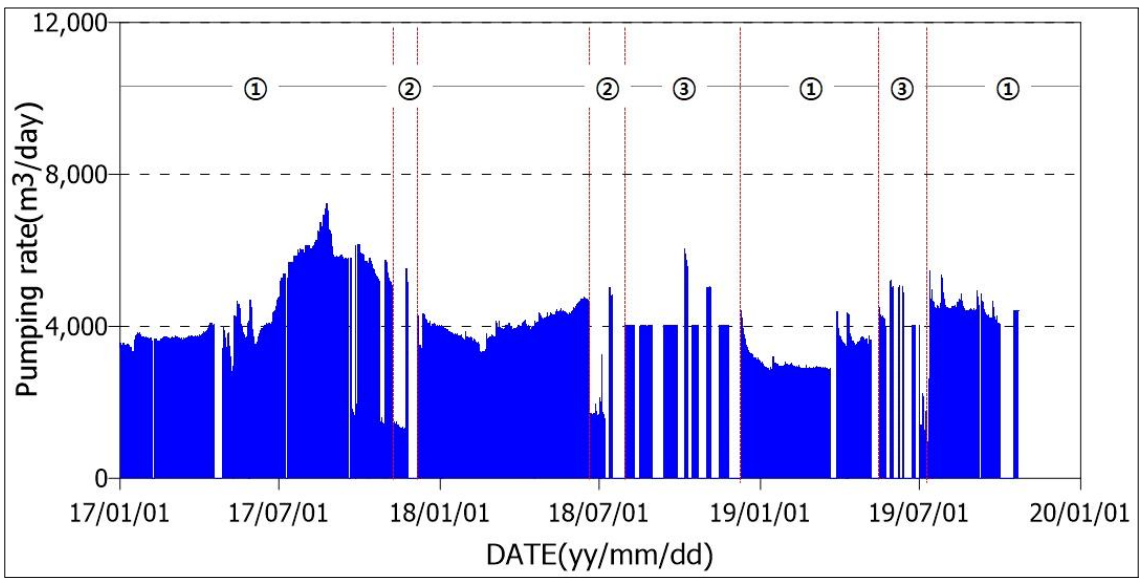


그림 25. 대용량 취수시설의 취수량 측정결과

나. 방사형집수정 성능평가

기존의 방사형집수정은 시설규모 및 대수층 조건에 비해 취수량이 적고, 수년간 장기 운영시 수평집수관의 폐색 등으로 인한 취수량 감소 정도가 30%이상으로 매우 커 심각한 문제로 작용하고 있다. 이는 방사형집수정에 설치된 수평집수관의 폐색으로 인한 유량감소가 가장 큰 문제로 알려져 있다.

본 연구 지역에 연구·개발된 방사형집수정은 초기 취수량이 개선됨은 물론 장기운영에 따른 취수량 감소를 최소화시킨 기술로 이에 대한 성능검증 단계에 있으며, 장기 운영에 의한 성능 검증은 2016년 4월부터 2019년 10월까지 3년 6개월간 측정하여 계절적 변동량 및 연간 감소량 분석가능한 자료를 취득하고 있다.

2018년 기준 현재 년간 평균 취수량은 5,000㎥/일이고 계절적 변동량은 약 2,000㎥/일(6,000~3,800㎥/일)이다. 또한 장기 운영에 따른 감소량은 갈수기 기준 취수량이 2017년과 2018년 모두 3,800㎥/일로 2018년까지 감소량이 거의 없는 상태이다.

하지만 2019년의 개발유량을 보면 갈수기에 3,000㎥/일까지 유량감소가 나타나며 평수기 유량도 시설개발 초기에 비해 작다. 본 시설의 경우 기술개발을 목표로 기존기술과 개선기술이 같이 적용되어, 기존기술이 적용된 부분에서 유량감소가 나타난 것으로 예상된다.

시설의 성능 저하로 요구수량을 충족하지 못하는 경우, 유지관리 공법(수평집수관 촬영 및 청소)을 적용하여 성능개선을 하여야 한다. 시설운영에 의한 유량감소에 대한 부분은 기술적인 개선을 통해 일부 해결되었지만 2~3년 정도의 주기로 유지관리를 실시하는 것을 권장한다. 또한 국내의 경우 계절적인 요소에 대한 변수가 존재하기 때문에 장기운영 자료를 확보하여 분석이 이루어져야 될 것으로 판단된다.

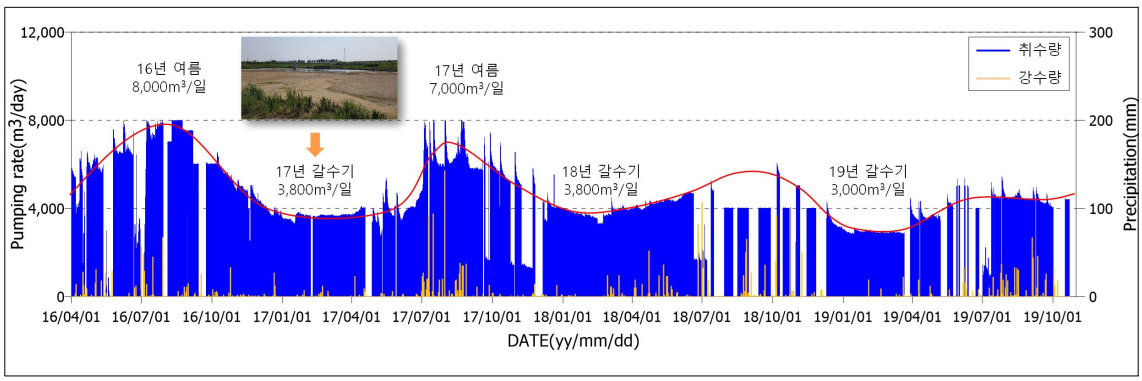


그림 26. 방사형 집수정의 개발유량 평가

- 연구목적에 의한 일시 운영정지는 존재하나 장기운영상태 유지(2년간)
- 평균 취수량 약 5,000㎥/일 (최대:8,000㎥/일, 최소:3,800㎥/일)
- 장기운영결과 갈수기(17~18년) 최소 취수량 3,800㎥/일으로 취수량 감소 없음
- 하천바닥이 드러난 극한 가뭄시(17년)에도 3,800㎥/일 취수가능
- 2019년 취수량 감소 : 평수기 4,000㎥/일, 갈수기 3,000㎥/일

다. 배후지 영향 평가

배후지 영향 평가는 2차년도와 3차년도에 취수량조건을 달리하여 실시하였다. 2차년도는 갈수기 취수가능량 4,000㎥/일 규모로 진행하였고, 3차년도는 5,000㎥/일 규모로 평가를 수행하였다.

(1) 취수량 조건: 4,000㎥/일

취수량은 방사형집수정의 수평집수관 제어에 의한 배후지 영향범위의 변화를 평가하기 위하여 갈수기 취수가능량 4,000㎥/일로 우선 운영하고 시설 및 주변 지하수위를 관측하였으며, 배후지 영향평가를 위한 시험시설 운영은 지하수모델링에 의해 검토가 완료된 시기인 2018년 7월부터 수행하였다.

이때, 수평집수관 취수량 제어를 위하여 모두 개방, #1 폐쇄, #3 폐쇄, #8폐쇄 4가지 경우에 대하여 운영하였으며, 모두 수평집수관을 모두 개방한 경우를 시작으로 취수는 최소 7일 이상, 주변 지하수위 안정시까지 운영하였다. 다음 단계 수평집수관 제어를 위한 운영전에 주변 지하수위를 정상상태로 회복될때까지 자연 회복시켰다. 상술한 운영방법으로 마지막 까지 반복 수행하였다.

표 30. 갈수기 취수량 조건 4,000㎥/일의 수평집수관 제어 현황

구분	①	②	③	④
수평집수관	전체 개방	#1 닫음, 잔여 개방	#3 닫음, 잔여 개방	#8 닫음, 잔여 개방
양수방법	정유량	정유량	정유량	정유량
운영일수	12일 운영 5일 회복	14일 운영 13일 회복	16일 운영 8일 회복	8일 운영 8일 회복
취수량 (㎥/일)	4,000	4,000	4,000	4,000
비고		정전에 의한 운영중단		회복기간 중 현장점검 일시적(2~3h)

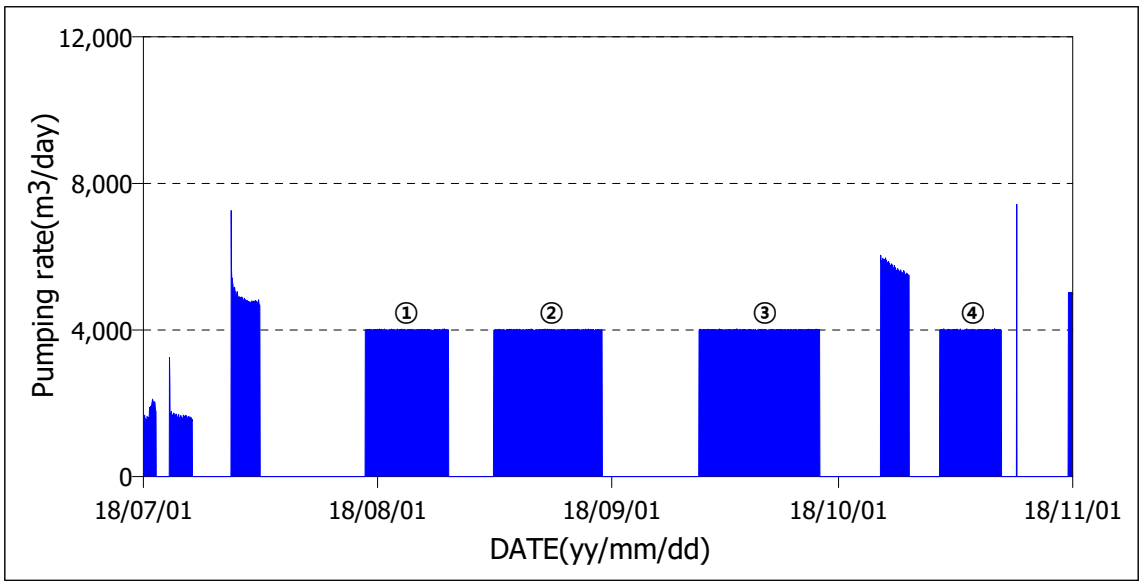


그림 27. 갈수기 취수량 조건 4,000㎥/일의 수평집수관 제어 결과

(2) 취수량 조건: 5,000㎥/일

취수량은 방사형집수정의 수평집수관 제어에 의한 배후지 영향범위의 변화를 평가하기 위하여 취수량을 5,000㎥/일로 고정하고 시설 및 주변 지하수위를 관측하였다.

이때, 수평집수관 취수량 제어를 위하여 모두 개방, #1 폐쇄, #3 폐쇄, #8폐쇄 4가지 경우에 대하여 운영하였으며, 24시간 운영 48시간 회복을 기준으로 각각의 Case에 따른 배후지 수위변화를 모니터링 하였다.

표 31. 갈수기 취수량 조건 5,000㎥/일의 수평집수관 제어 현황

구분	①	②	③	④
수평집수관	#3 닫음, 잔여 개방	#8 닫음, 잔여 개방	#1 닫음, 잔여 개방	전체 개방
양수방법	정유량	정유량	정유량	정유량
운영시간	24h 운영 48h 회복	24h 운영 48h 회복	24h 운영 48h 회복	24h 운영 48h 회복
취수량 (㎥/일)	5,000	5,000	5,000	5,000
비고				

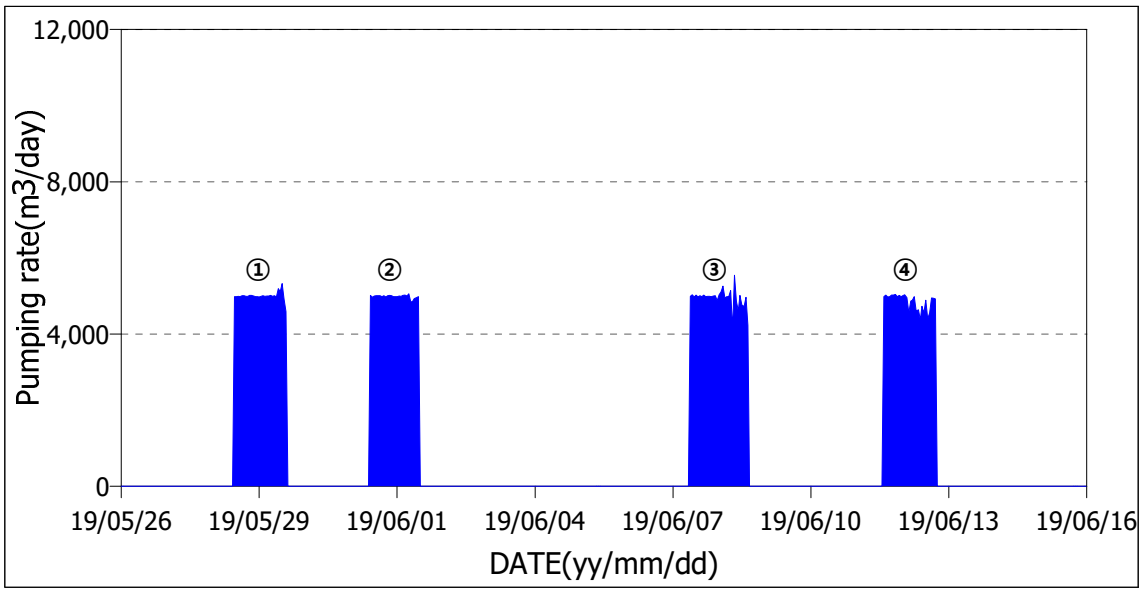


그림 28. 갈수기 취수량 조건 5,000㎥/일의 수평집수관 제어 결과

방사형집수정의 경우 대용량 취수시설로 충분한 운영기간을 확보하여야 배후지의 영향을 가시적으로 확인할 수 있으나, 본 시설은 2015년 시공 및 설계기술 개발을 목적으로 시공된 구조물로 개선기술이 아닌 기존기술이 적용 되어 있다. 이러한 이유로 시설물의 설계유량인 5,000㎥/일 개발에 어려움이 발생하였다.

따라서 5,000㎥/일 규모의 영향평가는 충분한 운영기간을 확보하지 못하였다. 하지만 인접관측정의 경우 시설운영에 따른 효과가 수시간 이내에 나타나므로 이때 나타나는 수위변화량에 초점을 두고 시험을 진행하였다.

라. 배후지 관측망 수위관측 결과

(1) 취수량 조건: 4,000㎥/일

- 집수정 중앙에서 이격거리 100m 이내, 수평집수관 끝단으로 부터는 50m이내에 위치한 관측정 OW-1, OW-2의 경우 취수시 즉각적인 수위변화가 관측됨
- 집수정 중앙에서 이격거리 150m 이내, 수평집수관 끝단으로부터 100m 이내에 위치한 관측정 OW-7, OW-8은 운영 3일후 작은 변화가 관측됨
- 전체적으로 제외지의 관측정은 집수정 운영에 의한 효과 보다 하천수위 변동에 의한 수위변화가 상대적으로 두드러지게 나타남
- 집수정 중앙에서 이격거리 200m, 수평집수관 끝단에서 150m 이상 이격되어 설치된 관측정은 방사형집수정 운영에 의한 효과를 확인할 수 있을 만큼 수위변화가 두드러지게 나타나지 않았으며 강우에 의한 수위변화 만이 확인됨
- 전체 취수량 4,000㎥/일로 운영시 배후지 영향범위는 150m미만으로 지하수모델링시 예측된 배후지방향 영향거리 153m~252m 보다 작음

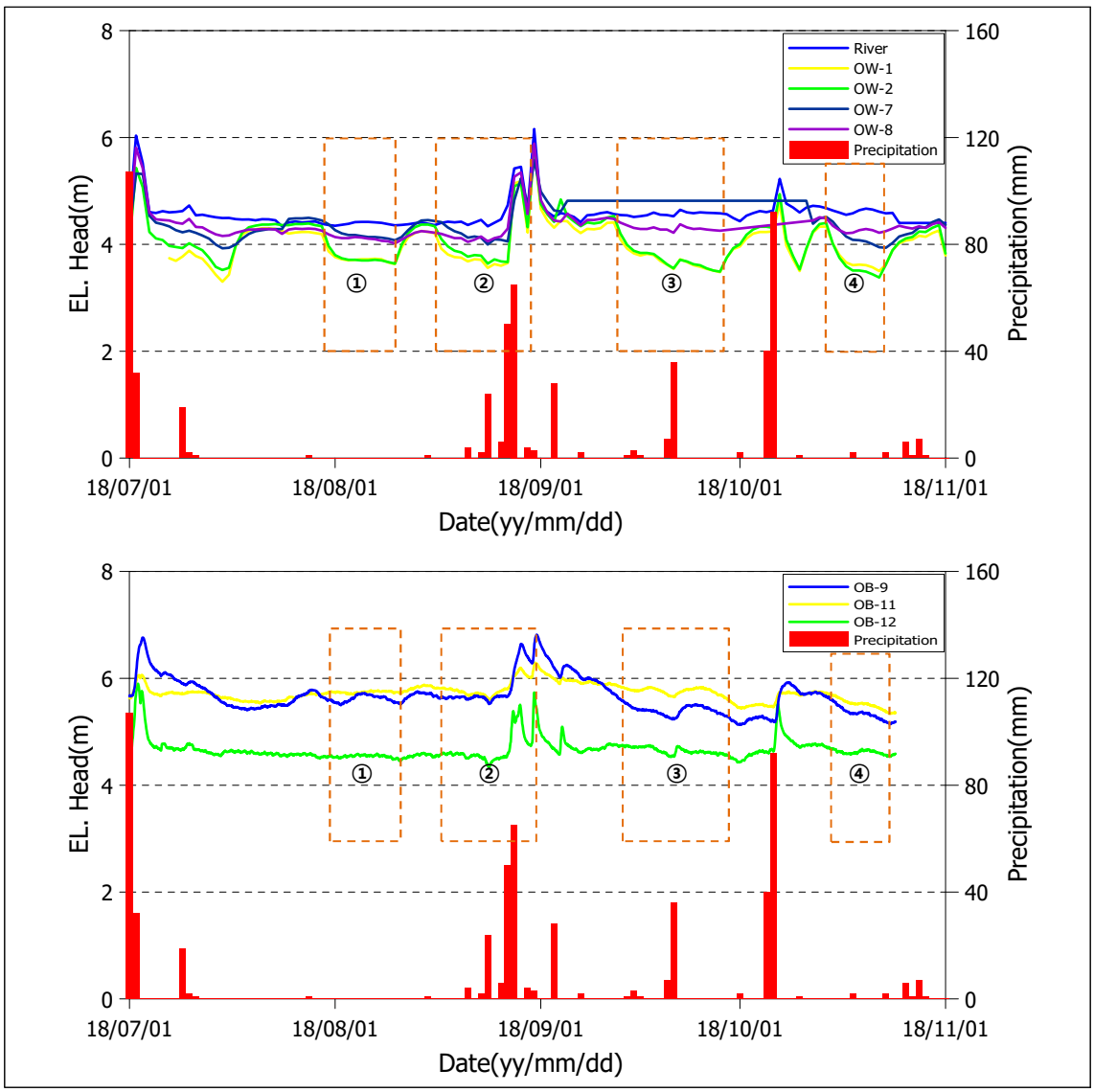


그림 29. 갈수기 취수량 조건 4,000㎥/일의 지하수위 변화

(2) 취수량 조건: 5,000㎥/일

- 집수정 중앙에서 이격거리 100m 이내, 수평집수관 끝단으로 부터는 50m이내에 위치한 관측정 OW-1, OW-2의 경우 취수시 즉각적인 수위변화가 관측됨
- 집수정 중앙에서 이격거리 150m 이내, 수평집수관 끝단으로부터 100m 이내에 위치한 관측정 OW-7, OW-8은 충분한 운영시간을 확보하지 못하여 집수정 운영에 따른 수위변화 파악이 어려움
- OW-1, OW-2 관측정의 수위변화 폭은 0.4~0.7m 내외로 나타났으며 집수정 운영을 장기로 하였을 경우 보다 큰 수위강하가 예상됨

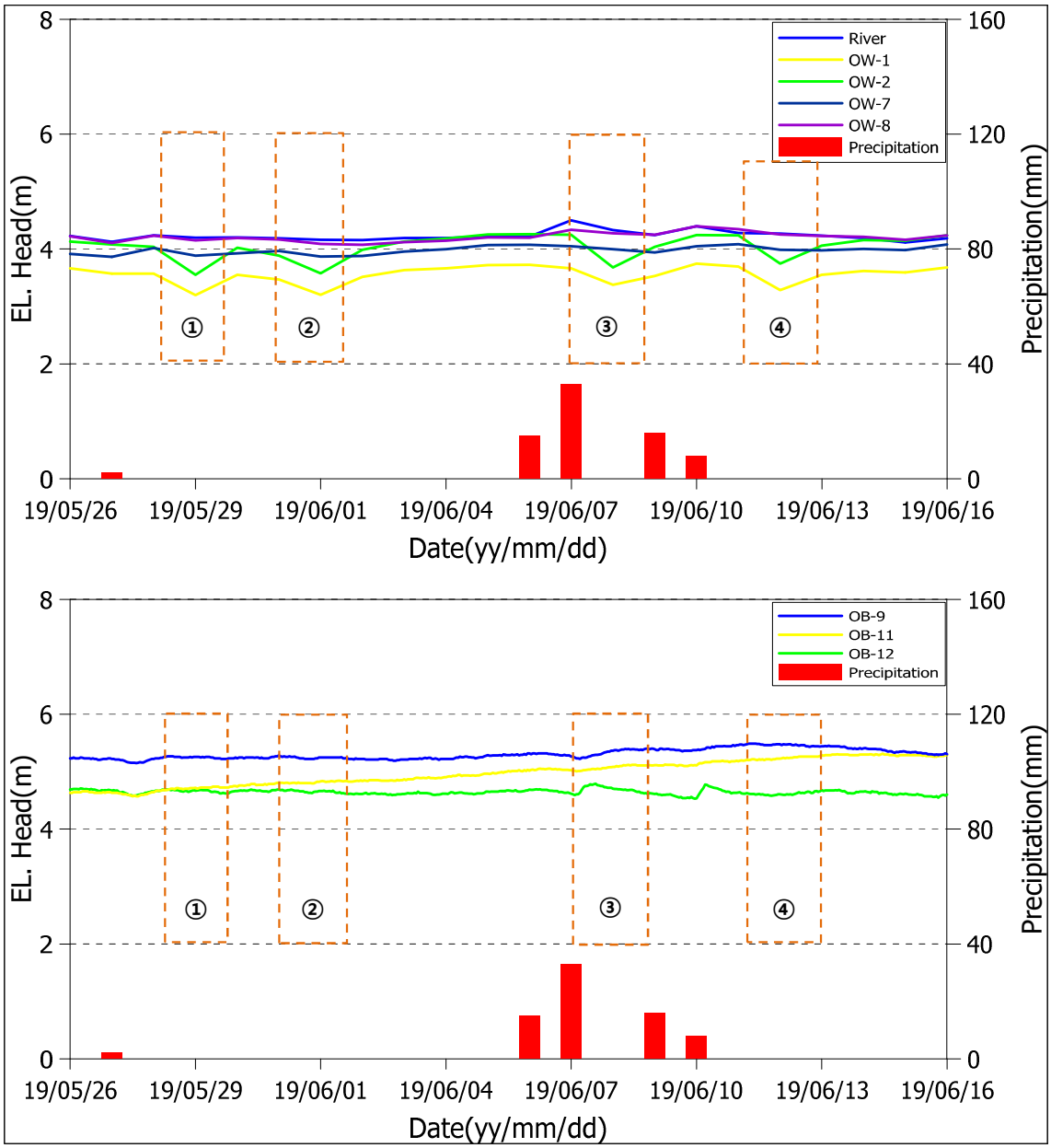


그림 30. 갈수기 취수량 조건 5,000㎥/일의 지하수위 변화

마. 현장운영결과 요약

○ 방사형집수정 성능평가 목적으로 주로 운영이 이루어 졌으며, 2018년 8월 이후는 배후지 영향평가를 위하여 배후지 주요 방향에 위치하는 수평집수관을 차별운영함

○ 방사형집수정 성능평가 결과 계절적 요인에 따른 풍수기에 개발가능량의 증가가 집중되나 평균 5,000㎥/일의 취수가 가능하며 2018년까지는 장기운영에 따른 유량감소는 발견되지 않음

○ 하지만 2019년의 개발유량을 보면 갈수기에 3,000㎥/일까지 유량감소가 나타나며 평수기 유량도 시설개발 초기에 비해 작다. 본 시설의 경우 기술개발을 목표로 기존기술과 개선기술이 같이 적용되어, 기존기술이 적용된 부분에서 유량감소가 나타난 것으로 예상됨

○ 관측망을 구축하여 집수정 운영에 따른 수위변화를 모니터링 한 결과 4,000㎥/일 규모로 시설을 운영할 경우 영향거리는 200m내에서 형성되는 것으로 분석됨

○ 운영조건에 따른 관측망의 수위변화 모니터링 자료를 활용하여 인공신경망 모델을 구축·보완, 구축된 인공신경망 모델을 통해 최적의 취수방안을 도출함

3. 집수정 취수에 따른 지하수위 변화 특성

가. 연구지역

본 연구지역은 경기도 안성시 공도읍 중복리 안성천 지역으로 서쪽으로 경기도 평택시 유천동과 남쪽으로 천안시 서북구 성환읍 안궁리 사이에 위치함. 기반암은 선캠브리아기 흑운모 편마암으로서 쥬라기 흑운모 화강암이 관입하고 있고 상부에 신생대 제 4기 충적층이 분포하고 있음. 상부 충적층의 두께는 약 6.0 ~ 9.9 m 정도로 하부로부터 풍화토, 자갈질 모래, 실트질 모래, 점토질 실트로 구성되어 있다.

방사형 집수정 취수시 지하수위 변화 및 지하수질 변화를 분석하기 위하여 집수정 주변의 6개 지하수 관측공(제외지: OW-1, OW-7, OW-8, OW-13, OW-15, 제내지: OB-11)을 이용하였다.

대용량의 방사형 집수정 취수시 주변지역의 지하수위가 과다하게 하강하는 등 환경적인 변화가 나타날 수 있고, 장기간 운영시 광물질의 침전, 클로깅, 시설의 노후화 등의 영향으로 취수량 변화가 나타날 수 있음에 따라 본 연구에서는 방사형 집수정 취수 및 중단시 지하수위 및 지하수질 변화를 분석하였다.

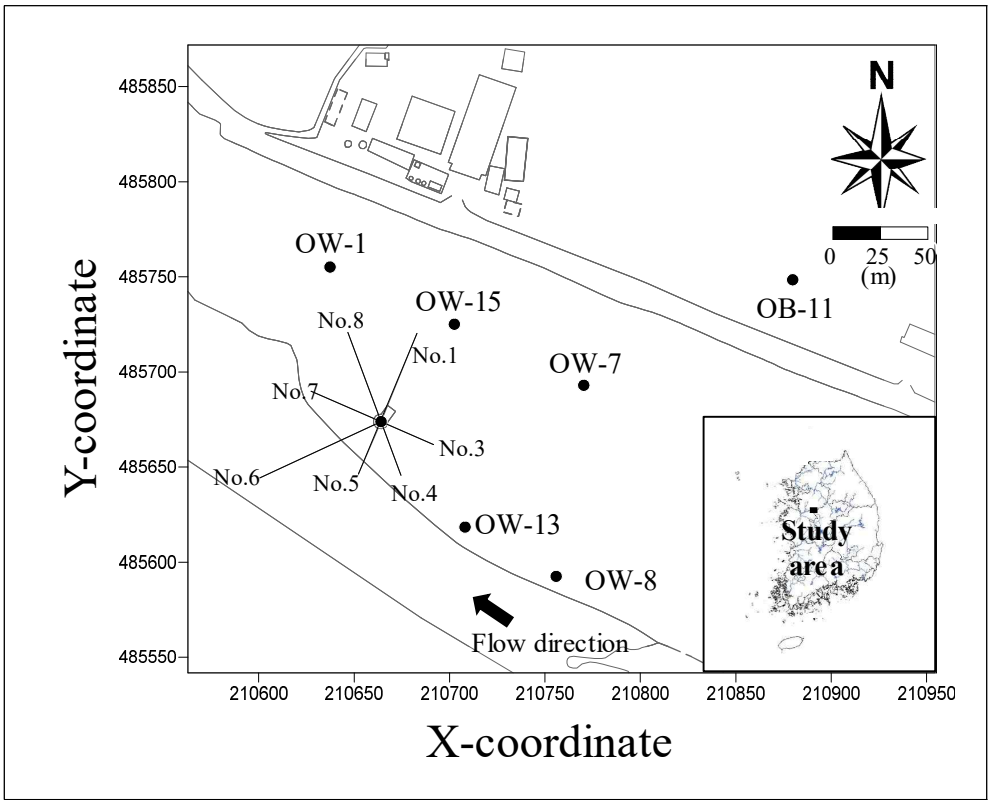


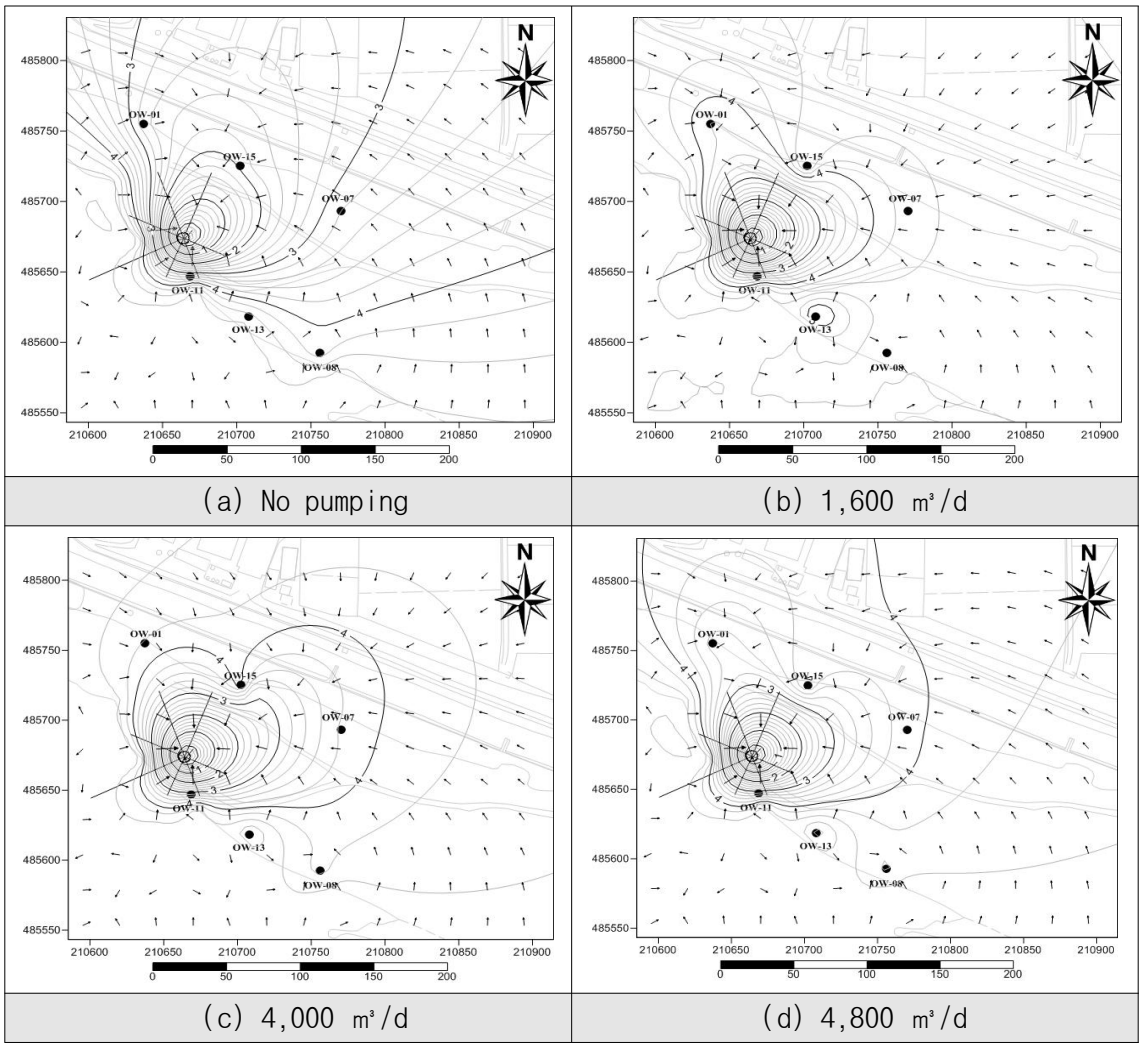
그림 31. 연구지역 위치도 및 관측현황

나. 집수정 취수량에 따른 지하수위의 공간적 분포

취수하지 않은 경우와 비교하여 취수시 배후지의 지하수위 강하가 공간적으로 방향에 차이가 발생하면서 나타나며, OW7 및 OW8은 OW2, OW13, OW15에 비하여 수평정으로부터 원거리에 위치하여 교차상관계수도 비교적 낮고 lag time이 긴 특성을 보인다.

특히, OW8 및 OW13의 교차상관계수가 낮은 점은 안성천에 접하여 관측정이 위치한 관계로 하천수위의 직접적 영향을 받음을 알 수 있으며, 이는 위의 ANN 모델에서도 언급하였듯이 하천과 인접한 부분은 집수정의 취수시 하천수위 유입이 지하수위에 영향을 미치기 때문이다. 취수 조건별로 배후지의 지하수위 분포를 보면, 집수정에서 OW15 방향으로의 지하수위 강하가 크게 발생함을 알 수 있다.

이와 같은 지하수위 분포를 검토한 후, 상기 ANN 모델과의 융합을 통하여 배후지 지하수위가 가장 낮을 가능성이 있는 지역을 기준 수위 지점으로 설정하여 ANN 모델에 의한 지하수위 예측을 실시할 수 있으며 이를 통하여 배후지 지하수위 강하를 최소화할 수 있는 취수 조건을 도출할 수 있다.



(a) No pumping | (b) 1,600 ㎥/d

(c) 4,000 ㎥/d | (d) 4,800 ㎥/d

그림 32. 집수정 취수 조건에 따른 배후지 지하수위 분포

다. 방사형 집수정 취수시 지하수위 변화 특성(4000 ㎥/d 취수)

방사형집수정의 취수 개시 후 1시간 30분 경과 후부터 47시간 02분 까지 지하수위 측정이 이루어졌는데, 각 관측공의 방향별로 시간에 따른 지하수위 변화 차이를 보면 다음과 같다.

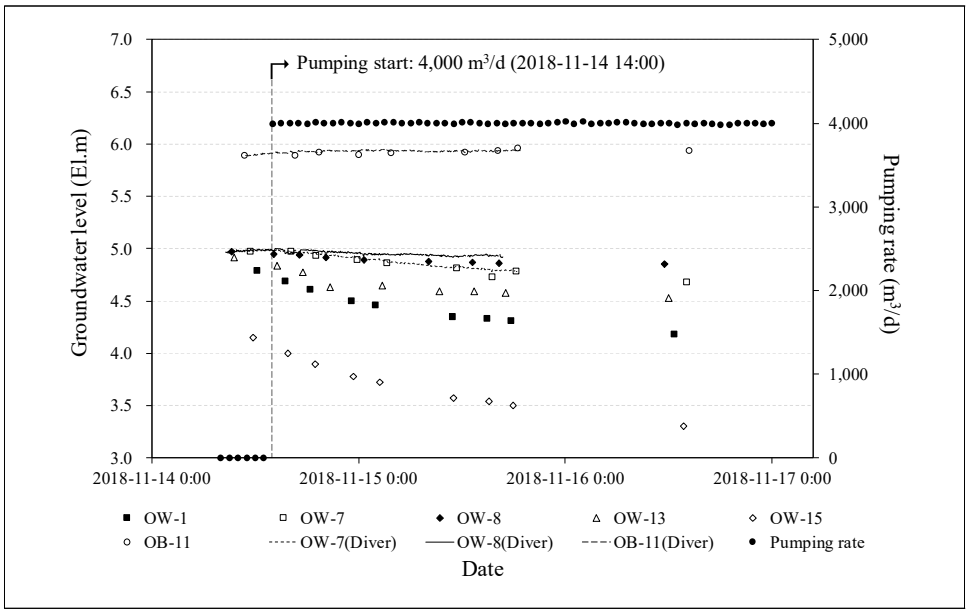


그림 33. 방사형집수정 취수시 주변지역 지하수위 변화

측정 종료 시점에서의 지하수위를 보면, OW-15 관측공에서 약 0.85 m의 가장 큰 지하수위 하강을 보였으며, OW-1 관측공에서 약 0.61 m, OW-13 관측공에서 약 0.39 m, OW-7 관측공에서 0.29 m, OW-8 관측공에서 약 0.12 m의 순으로 나타났으며, 제내지에 위치한 OB-11 관측공에서는 변화가 거의 없는 것으로 나타난다. 이와 같은 현상은 집수정으로부터의 거리가 멀수록 지하수위 강하가 작게 나타나는 기본적인 특성을 의미한다.

동북동 방향에 위치한 OW-7 관측공에서 약 1일 경과 후 지하수위 변화가 거의 없어지고 강하량도 상대적으로 작은 것은 해당 방향으로 수평집수관이 설치되어 있지 않은 것이 기여하는 것으로 보인다. 반면에, OW-1 및 OW-15 관측공에서는 취수 이후 약 47시간 경과 시에도 지하수위 하강이 계속되는데, 이는 OW-1 관측공과 OW-15 관측공 방향으로 인접된 수평집수정의 영향으로 보인다.

OW-8 관측공과 OW-13 관측공의 경우, 관측공이 하천에 인접한 위치에 있어 취수시 하천수의 유입으로 인하여 제방방향의 OW-1, OW-7, OW-15 관측공보다 지하수위 강하량이 적은 것으로 나타나는 것으로 보이며, OW-8 관측공의 자동 지하수위 측정 자료를 보면, 양수 초기 수 시간 동안 지하수위가 상하 수 ㎝ 간격으로 2회 정도 변동하는 특성이 나타났는데 이는 하천과 접하는 지역으로서 이방성 대수층 특성에 의한 지표수와 지하수의 유출입 및 안정화 과정으로 보이며, 이후 약 10시간 경과

시점에는 수위 변화가 거의 발생되지 않고 안정화되었음을 알 수 있다.

한편, 가장 원거리에 위치한 OB-11 관측공의 경우는 방사형 집수정 취수에도 지하수위가 하강하지 않는 것으로 나타난다. 또한, 방향별 수위 강하 특성과 대수층의 물리적 특성과의 관계를 파악하기 위하여 14개소의 양수시험과 96개의 입도분석(수직정 8 개 및 수평정 88 개 시료 이용)에서 각각 도출된 수리전도도를 이용하여 양수시 각 관측지점에서의 지하수위를 추정하였다.

본 연구에서는 추정된 지하수위와 실제 지하수위의 차이에 대하여 대수층의 특성 및 수문학적 상호작용의 관점에서 접근해 보았다.

$$Q = \frac{2\pi KHS}{\ln \frac{R}{l}} \qquad (1)$$

Wegenstein(1954)과 Babac(1965)은 방사형 집수정을 수직정으로 고려한 취수량 평가식을 위와 같이 제시한 바 있으며, mirror well 개념을 이용하여 방사형집수정 취수시 각 관측 지점에서의 지하수위를 추정해 보았으며 실제 현장에서 측정된 지하수위와의 차이점 및 그 원인에 대하여 검토하였다.

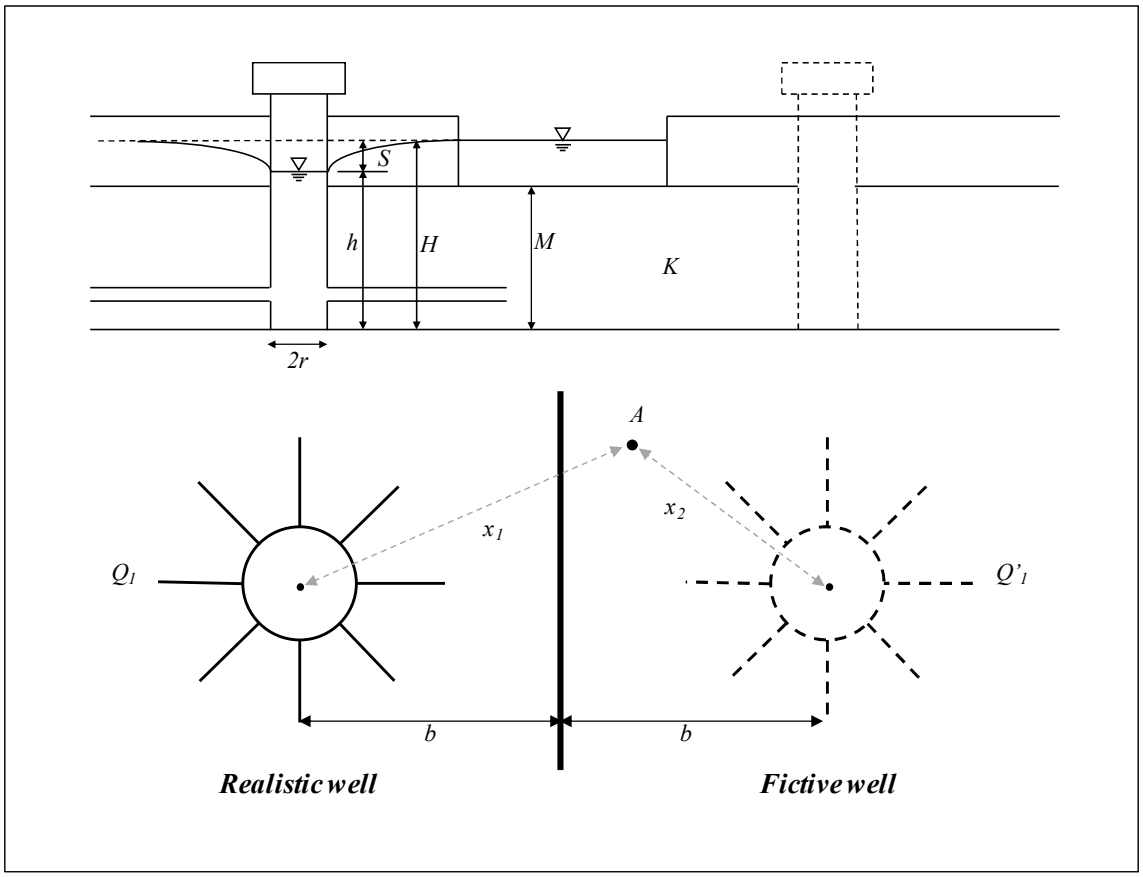


그림 34. Mirror well 개념도

여기에서, $S = H - z = (H - y_1) + (H - y_2)$이며, 실제 및 가상의 방사형 집수정에서의 취수량(Q_1 및 $-Q_1$)은,

$$Q = \frac{2\pi KM(H - y_1)}{\ln \frac{R}{x_1}} \qquad (2), \quad -Q_1' = \frac{2\pi KM(H - y_2)}{\ln \frac{R}{x_2}} \qquad (3)$$

이며, 이 때 지하수위 강하량은 아래와 같다.

$$S = H - z = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\ln \frac{R}{x_1} - \ln \frac{R}{x_2}\right) = \frac{Q}{2\pi KM} ln \frac{x_2}{x_1} \qquad (4)$$

여기에서, Q는 취수량 (L^3T^{-1}), K는 수리전도도 (LT^{-1}), l은 수평정의 평균길이 (L), M은 대수층의 두께 (L), H는 초기수위 (L), z는 취수 후 관측정 지하수위 (L), S는 수위 변화량 (L), y_1은 실제 방사형 집수정의 수위강하량 (L), y_2는 가상의 방사형 집수정의 수위강하량 (L), b는 하천중심선으로부터의 거리 (L), A는 임의의 지점, x_1은 실제 관정과의 거리 (L), x_2는 가상의 관정과의 거리 (L)를 말함. 우물의 영향반경인 R은 경험식으로서 $R = 3000 s_w K^{0.5}$ 및 $R = 575 s_w (MK)^{0.5}$의 방법의 평균값을 적용하였는데, s_w는 수위강하량 (L)을 말한다. (Chertousov, 1949; 1962).

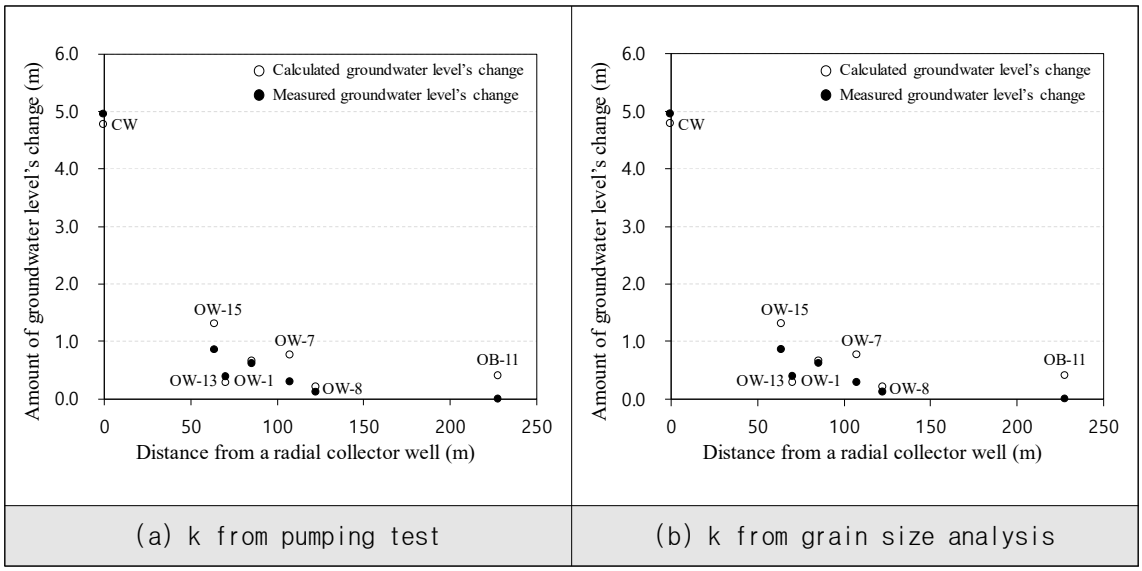
상기 식에서 수리전도도는 14개 양수시험자료의 평균값인 41.6 m/d, 96개 입도분석 자료로부터 추정된 42.5 m/d, 대수층의 두께는 시추자료로부터 5.91 m, 우물의 영향반경은 241.5 m를 적용하여 각 관측 지점의 지하수위를 예측해 보았다(표 32, 그림 35). 지하수 관측정의 위치, 방향에 따라서 계산된 지하수위와 실측된 지하수위의 편차가 다양하게 나타났는데, 2가지 방법으로 산정된 수리전도도의 값에 따른 지하수위 강하량의 차이는 크지 않은 것으로 계산되었으며, 수리전도도가 작은 경우의 지하수위 강하량이 약간 더 큰 것으로 분석되었다.

방사형집수정을 중심으로 각 관측정의 방향별로 계산된 지하수위 강하량과 실제 지하수위 강하량의 차이는 다양한 원인에 의하여 나타날 수 있다. OW-7, OW-15 및 OB-11은 계산된 지하수위 강하량이 실측값보다 비교적 큰 반면에, OW-13 지점은 계산된 지하수위 강하량이 약간 작은 것으로 나타난다.

OB-7 방향으로는 수평집수관이 설치되어 있지 않아 해당 방향에 위치하거나 인접한 3개 관측공(OW-7, OW-15 및 OB-11)의 지하수위 강하가 작게 발생된 것으로 보이며, OW-13은 하천과 직접 인접하고 있기 때문에 방사형 집수정에서의 양수와 동시에 하천에서의 유입이 발생하여 실제 지하수위가 계산값 보다 높은 것으로 보인다.

표 32. 각 관측공에서 측정 및 계산된 지하수위 변화

Contents		Collector Well	OW-1	OW-7	OW-8	OB-11	OW-13	OW-15
Distance	x_1	-	85.8	107.9	122.6	228.2	70.6	64.2
	x_2	42.3	110.8	145.1	132.8	267.1	78.9	106.1
Measured groundwater level change (m)		4.95	0.61	0.29	0.12	0.00	0.39	0.85
Calculated groundwater level change (m)	k from pumping test(41.6 m/d)	4.78	0.66	0.77	0.21	0.41	0.29	1.30
	k from grain size analysis (42.5 m/d)	4.70	0.65	0.75	0.20	0.40	0.28	1.27



(a) k from pumping test (b) k from grain size analysis

그림 35. k 값 변화에 따른 실측 및 계산된 지하수위 변화

방사형집수정의 양수시 지하수 관측정까지의 방사상의 물의 흐름이 존재한다고 가정하고, 방사형집수정에서부터 지하수 관측정 사이의 평균 수리전도도와 대수층의 평균 두께를 산정하였다.

수평집수관의 굴착시 평균 2 m 간격으로 채취된 토양입자에 대한 입도분석 자료로부터 추정한 수리전도도를 이용하여 연구지역내 수리전도도의 분포도를 작성하였으며, 이로부터 관측정 방향에 대한 로그 변환된 수리전도도로부터 평균 값 및 관측정 지점과 방사형집수정 지점의 대수층의 두께로부터 평균 대수층의 두께를 산정하였다.

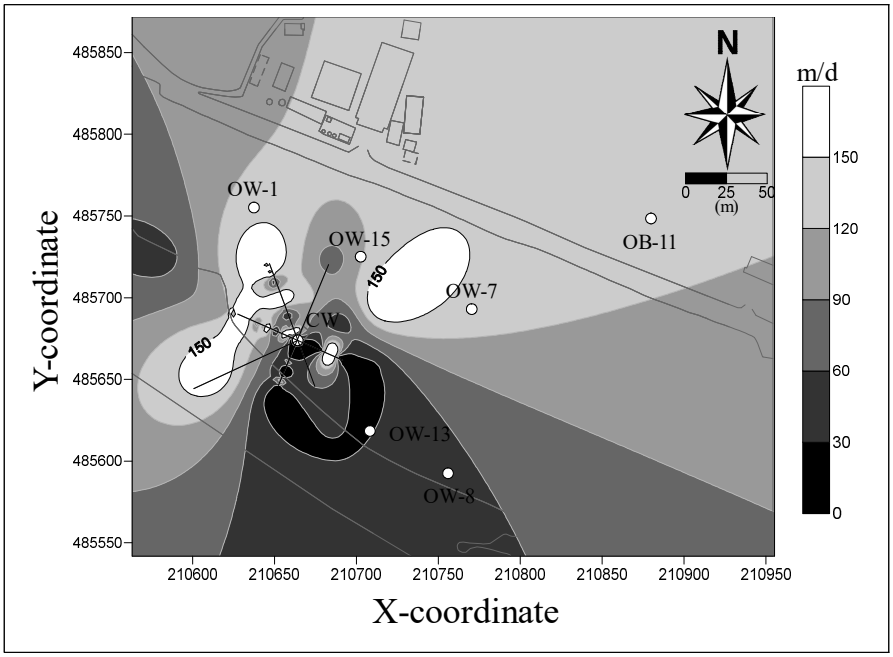


그림 36. 입도분석 자료로부터 추정한 수리전도도 분포도

표 33. 평균 대수층 두께 및 추정된 수리전도도

Direction	Average aquifer thickness (m)	Estimated average hydraulic conductivity (m/d)
OW-1	5.96	117.89
OW-7	6.00	91.58
OW-8	5.97	35.45
OW-13	6.00	32.49
OW-15	5.68	84.68

대수층의 수리전도도와 두께의 곱으로 나타내는 투수량계수는 수리전도도 및 대수충의 두께와 비례하며, 투수량계수가 클수록 대수층을 통해 유동하는 유체의 양은 많아지므로 양수시 지하수위 강하가 작게 나타나는 특성(Han, 2015)이 있음에 따라, OW-13 관측공 방향은 수리전도도가 작아 수위강하가 크게 나타나야 하지만 하천과 접하는 지역으로서 양수시 하천수의 유입에 의하여 수위 강하가 적은 것으로 보인다.

OW-7 및 OW-15 관측공 방향은 수리전도도가 큰 편으로서 지하수위 강하가 작은 특성을 갖고 있을 뿐 아니라, OW-7 방향으로의 수평집수관이 설치되어 있지 않기 때문에 지하수위 강하량이 계산값과 가장 큰 차이를 나타내는 요인으로 작용함.

OB-11 관측공의 실제 지하수위 강하량이 계산된 강하량보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 OB-11 인근에 위치한 농업용 양배수장 및 배수로에서의 인위적인 수위 조절에 의한 영향으로 판단된다.

대수층의 비균질성이 존재하는 지역에서 수리전도도와 대수층 두께의 이방성이

지하수위 강하에 어느 정도의 영향을 미치는지 검토하기 위하여, 본 연구지역에서 출현 가능한 방향별 수리전도도의 범위 (32.49 ~ 117.89 m/d) 및 대수층 두께의 범위 (5.68 ~ 6.00 m) 값을 이용하여 수위 강하량의 민감도를 검토해 보았다.

수리전도도가 낮아짐에 따라서 각 방향에서의 지하수위 강하량이 급격히 증가하는 경향을 보이나, 대수층의 두께의 변화에 대해서는 지하수위 강하량이 상대적으로 민감하지 않은 것으로 나타난다.

OW-1, OW-7 및 OW-13 관측정 방향에서의 수리전도도 값에 따른 수위강하량을 계산한 결과 약 0.27 ~ 0.71 m 변화가 나타났고, 방향별 대수층의 두께에 따른 수위강하량을 계산한 결과 약 0.02 ~ 0.04 m 변화가 있는 것으로 계산되었다.

본 연구지역에서 출현 가능한 수리전도도의 범위 및 대수층의 두께 분포 특성을 고려해 볼 때, 양수시 지하수위 강하에 영향을 미치는 민감 요인은 모래자갈층 두께의 공간적인 급변 현상보다는 수리전도도의 차이임을 보여주는 것으로 나타난다.

이와 같은 수리전도도의 민감성은 현장 조사시 수리전도도의 분포에 대한 정확한 파악이 취수량 결정 및 배후지의 지하수위 예측에 중요함을 보여주고 있다.

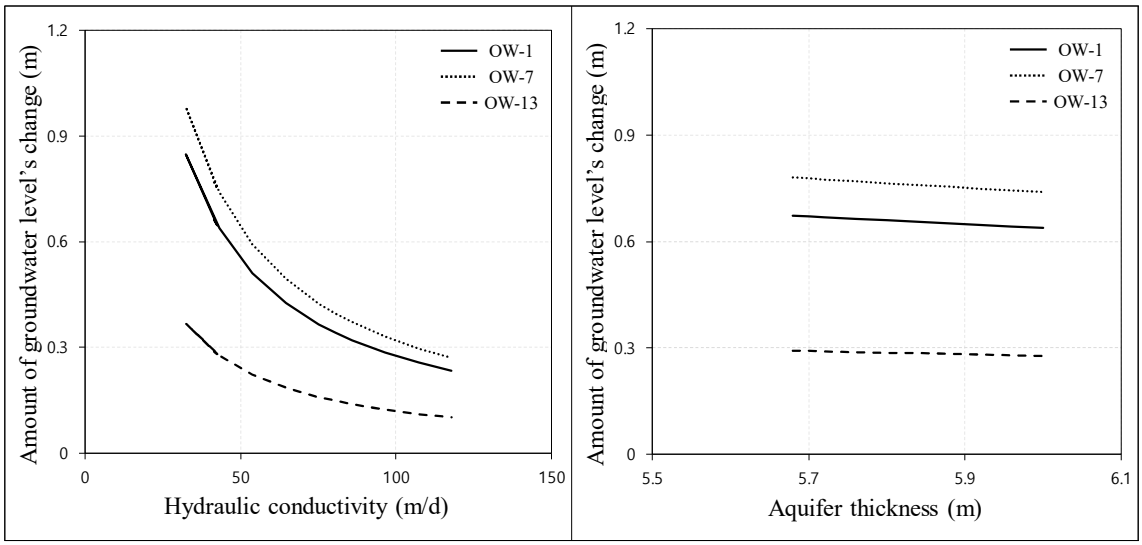


그림 37. 수리전도도 및 대수층의 두께 변화에 따른 지하수위 변화

연구지역에서 실시한 방사형 집수정의 양수시 배후지의 지하수위는 방향별도 동일하게 강하되지 않고 차이를 보이는 것으로 나타난다. 수 십 m 길이의 수평집수관이 방사상으로 설치되는 집수정의 경우에, 방향별 수평집수관의 설치 여부가 그 방향으로의 지하수위 강하에 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

방사형집수정에서 원거리에 위치한 관측정에서의 수위 변화는 집수정에서의 취수에 의한 영향 뿐 아니라 관측정 주변에 존재하는 수로, 배수구와 같은 수리적인 특성 변화에 의해서 지배를 받는 것으로 나타난다.

방사형집수정에서의 취수는 주변지역의 지하수위에 영향을 미치게 되는데, 대수층이 균질 등방성이라는 가정 하에 적용된 mirror well 개념을 이용한 지하수위 예측은 실제 지하수위와 미세한 차이를 보이는 것으로 나타났으나, 대수층의 균질성

여부에 따라서 그 적용성이 평가될 수 있는 것으로 보인다.

방사형집수정을 큰 규모의 수직정으로 고려하여 추정한 배후지의 지하수위는 물의 흐름 구간상에 존재하는 수리전도도 및 대수층의 두께에 의하여 영향을 받는 것으로 나타난다. 특히, 본 연구지역에서 출현 가능한 수리전도도의 범위와 대수층 두께의 범위를 적용하여 배후지 지하수위 강하량을 평가해 보면, 배후지에서의 지하수위의 변화는 해당 측정 지점 주변의 대수층의 두께 보다는 수리전도도의 이방성에 의한 영향을 크게 받는 것으로 나타난다.

방사형집수정에 의한 강변여과수 개발은 일반 관정과 달리 대용량 취수로 이루어지게 되므로 배후 지역에서의 지하수위 변화가 크게 나타날 수 있다. 따라서, 배후지역에서의 지하수위 변화는 수리전도도 및 대수층의 두께 등에 의하여 영향을 받으므로 방사형집수정 굴착 주변 뿐 아니라 물의 흐름상에 위치하는 구간 전반에 대한 수리전도도 및 대수층의 분포에 대한 정밀한 사전 조사가 필요함을 보여준다.

방사형집수정의 조사 및 설계 단계에서 충분한 물량의 시추조사 및 대수성 실험 등을 통하여 수리전도도 및 대수층의 분포에 대한 평가가 선행된다면 배후지역에서의 지하수 고갈 등 민원 문제에 대해서도 보다 능동적으로 대처가 가능할 것으로 보인다.

라. 방사형 집수정 취수 중단시 지하수위 변화 특성(4000 ㎥/d 취수 후 중단)

방사형집수정 방식의 강변여과수의 양수 중단 이후에 주변지역 지하수 관측정의 지하수위 회복 특성을 분석함으로써 지하수위 변화와 대수층 특성의 관계를 파악하고자하며 양수조건 4000 ㎥/d의 방사형 집수정 운영을 2019년 6월 26일 14:00 양수 중단 후 48시간 경과 후까지 집수정 주변 6개(제외지: 5개소, 제내지 1개소) 관측공에서 지하수위 측정하였다.

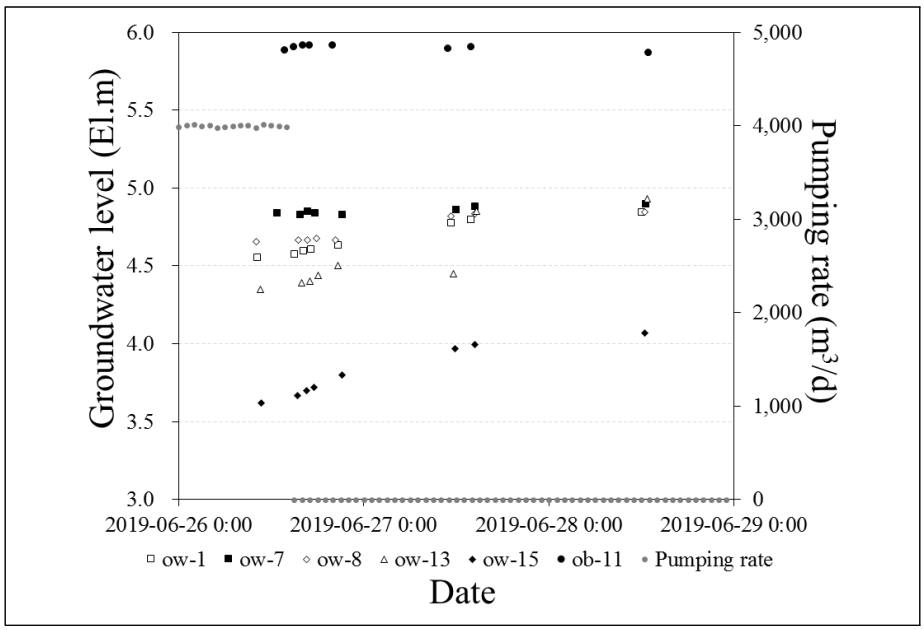


그림 38. 방사형 집수정 취수 중단 후 지하수위 변화(4000 ㎥/d 취수 중단 후)

방사형 집수정 취수 및 중단시 제외지 5개 관측공(OW-1, OW-15, OW-17, OW-13, OW-8)에서 지하수위 변화가 나타난다. 하천방향의 OW-13 관측공의 수위강하가 제방방향 OW-15 관측공보다 적은 것은 OW-13 관측공 방향으로 하천수가 유입원수로 지속 공급되는 것으로 보이고 북측(OW-1, OW-15, OW-7)의 수위강하가 동남쪽(OW-13, OW-8)보다 큰 것으로 나타난다.

연구지역의 수평정과 수직정의 입도분석결과를 이용하여 수리전도도를 추정한 결과 서쪽, 서북쪽 방향으로 수리전도도가 크고 동남쪽 방향으로 수리전도도가 낮으며 제방방향의 OW-1, OW-7, OW-15에서 약 0.29 ~ 0.85 m 의 수위 하강이 나타났으며, 하천방향의 관측공인 OW-8, OW-13에서 약 0.12 ~ 0.39 m 수위 하강이 나타난다.

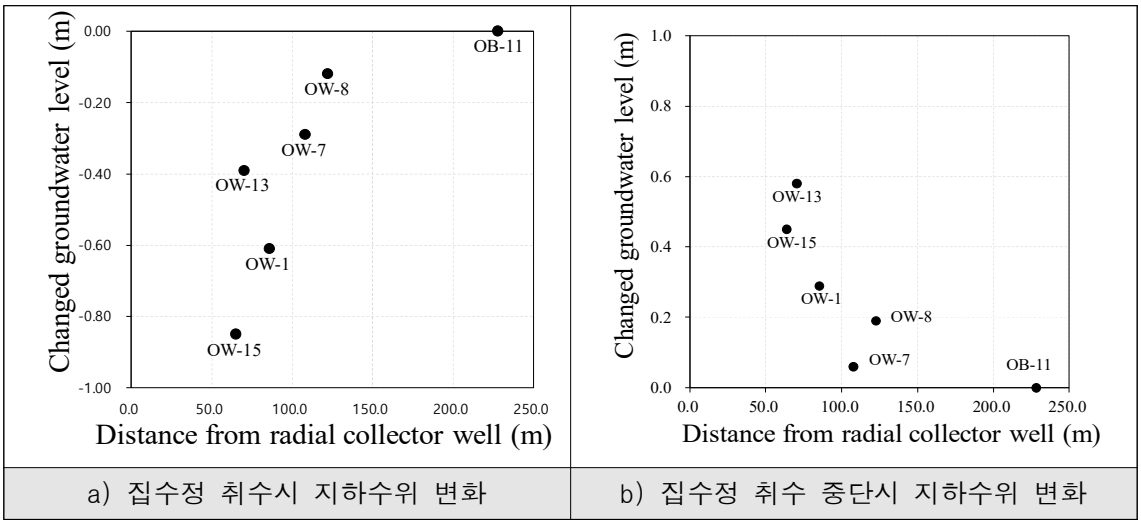
취수 중단 시 제방방향의 관측공인 OW-1, OW-7, OW-15에서 약 0.06 ~ 0.45 m 의 수위 회복이 나타났으며, 하천방향의 관측공인 OW-8, OW-13에서 약 0.19 ~ 0.58 m 수위 회복이 나타난다.

마. 방사형 집수정 취수 및 중단시 지하수위 변화 비교(4000 ㎥/d)

취수 및 취수 중단시 수위변화가 다른 것으로 나타나는데 이는 2019년 6월 26일 강우의 영향으로 인하여 하천수위가 상승해 초기 지하수위가 상승해 있는 것으로 보인다.

연구지역의 입도분석결과로 추정한 수리전도도 분포도를 보면 제방방향의 OW-1, OW-7, OW-15 관측공이 수리전도도가 높고, 하천방향의 OW-8, OW-13 관측공이 수리전도도가 낮은 것으로 나타나는데, 하천에 인접한 관측공은 하천수의 유입으로 인하여 취수시 수위강하가 적게 나타나고 수위 회복이 더 큰 것으로 나타난다.

제내지 관측공인 OB-11 관측공은 인근에 설치되어 있는 농업용 배수장의 인위적인 수위 조절의 영향으로 방사형 집수정 취수 및 중단에도 지하수위 변화가 없는 것으로 나타난다.



a) 집수정 취수시 지하수위 변화 | b) 집수정 취수 중단시 지하수위 변화

그림 39. 방사형 집수정 취수 및 중단시 지하수위 변화

4. IT를 활용한 최적의 운영방법 적용

집수정 운영 조건에 따른 배후지 수위변화 모니터링 체계를 구축하고, 구축된 관측망을 활용하여 배후지 수위자료를 확보하였다. 확보된 수위자료를 바탕으로 인공신경망 모델을 구축하여 최적운영방안(제5절 3.배후지 최고 지하수위 유지 조건 분석)을 도출하였고 도출된 결과를 바탕으로 실증시험시설을 운영하여 운영 효율을 높이고자 하였다.

가. 통신망 인프라 구조

집수정 및 관측정 원격제어 통신망 이프라 구조를 검토하고, IT를 접목한 통합운영시스템을 활용하여 안정인 자료확보 체계를 구축하고자 하였다.

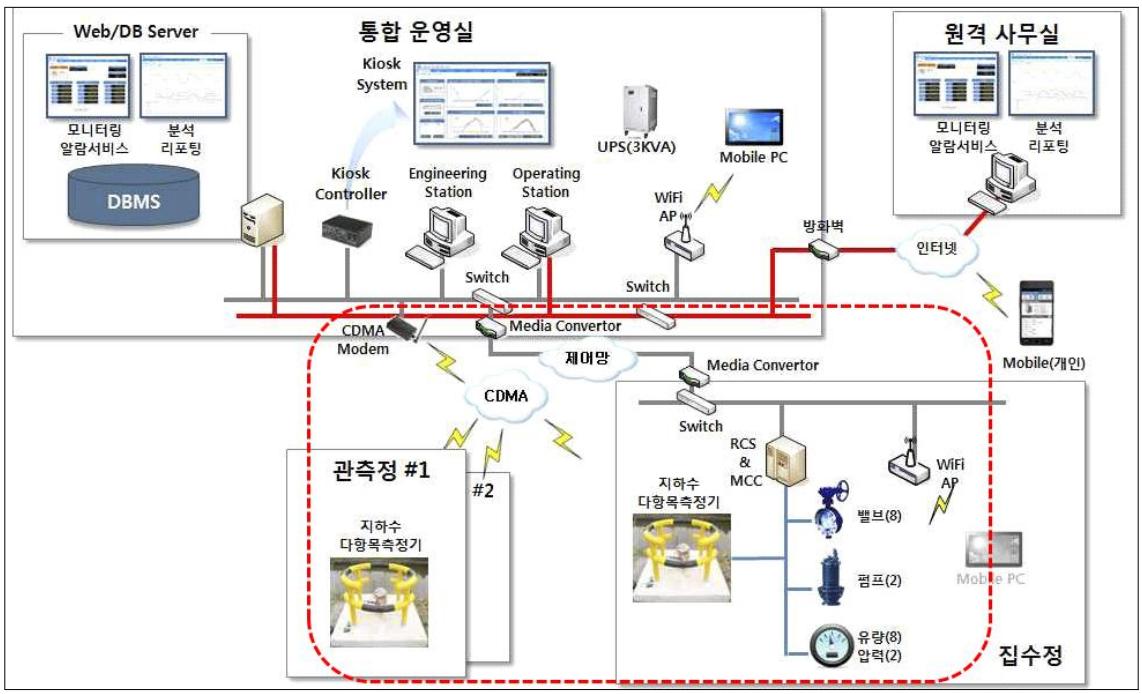


그림 40. 통신망 인프라 구조

(1) 데이터 형태

집수정 및 관측정 원격제어 통신망의 데이터는 실시간 대용량의 데이터는 아니며, 저속, 소용량의 데이터이다. 중요한 것은 안정적으로 통신이 지속되어야 하며, 문제 발생 시 백업망이 있으면 백업망으로 절체되거나, 백업망이 없는 경우, 문제가 해결될 때 까지 일정기간의 수집된 데이터를 저장하는 것이다. 또한 망운용자에게 문제 발생 상황을 알려 대응하도록 하는 것이 필요하다.

(2) 통신망 설계

집수정 및 관측정 원격제어용 통신망 인프라는 다음과 같이 설계되어 있다. 관측정 원격제어용 통신망은 CDMA 데이터 모뎀과 Gateway 장비를 이용하여 수집한 데이터를 서버로 전달하고, 필요 시 서버로부터 제어를 받는다. 집수정 원격제어용 통신망은 서버와 RCS&MCC간은 광케이블을 통해 이더넷 통신으로 되어 있으며, RCS&MCC와 각종 센서등은 PLC 기반으로 되어 있다.

관측정은 여러곳에 분산되어 있어 유선망 구축이 쉽지 않아 무선망을 이용하여 필요한 데이터를 수집한다. 수집된 데이터는 서버를 통해 공유된다. 무선 데이터 모뎀은 현재 CDMA를 사용하고 있으나 향후 본 과제를 사업화 한다면 무선 데이터 모뎀은 LTE 모뎀이나 최근 이슈화 되고 있는 IoT등을 고려하여 변경 검토하는 것이 필요하다.

나. 유무선 통합 원격 제어망

유무선 통합 원격제어망은 망을 이중화하여 데이터 손실 및 안정성을 향상 시키는 것이다. 이렇게 망을 이중으로 구성하면 비용 상승이 클것으로 생각하나 꼭 그렇지는 않다. 이런 망에 사용 가능하도록 설계된 Gateway를 이용하면 최소 비용으로 망 안정성을 향상 시킬 수 있다. 망 이중화는 유선망 설계 시 이중으로 라인을 포설하는 방법도 있으나 문제 발생 시 모두 사용하지 못할 수 있다. 본 과제 특성상 이런 방식 보다는 유선과 무선을 함께 사용하는 구조로 설계하는 것이 유리하다. 비용이 문제가 되면 간단히 무선 데이터 모뎀을 이용하여 망을 구축할 수도 있다.

본 자료에서는 유선과 무선을 통합하여 서비스가 가능한 Gateway를 기준으로 원격 제어망을 구성하는 것에 대해 검토한다. 이 장치의 기본 동작은 유선 또는 무선 중 하나를 기본망으로 사용하고, 문제 발생 시 백업망으로 자동으로 절체되는 구조이다. 통신망을 이중으로 설계하는 경우 백업망 동작 시에는 관련 내용을 운용자에게 전달하여 빠른 조치가 되도록 하는 것이 필요하다.

유무선 통합 원격 제어망은 이동 통신 사업자망을 이용하는 방법과 최근 이슈가 되고 있는 IoT망을 이용하는 방법 등이 있다. 이동 통신 사업자망을 이용하는 것은 검증된 망을 이용할 수 있어 좋으며, 대부분 지역에서 이용이 가능하다. 경우에 따라서는 통신 사업자의 협조가 필요할 수 있으며, 데이터 통신 사용료를 계속 지불해야 하는 부분이 있다. 그래도 안정적인 망 구성과 서비스가 가능하여 현재까지는 가장 적절할 솔루션이다. 최근에 이슈화 되는 IoT는 데이터 속도가 빠르지 않은 본 과제 특성상 적합한 솔루션이나 아직까지 상용화 하기에는 여러 가지 어려움이 있다. IoT 솔루션을 이용하면 필요에 따라 독자적인 망 구축이 가능하고, 서비스에 맞도록 Customize할 수 있으나 그 외 운용, 유지보수 등 여러 가지 면에서 검토되어할 사항이 많다. 그러나 본 과제에는 솔루션 특성상 단말의 동작 시간이 중요한 사항이므로 IoT를 이용한 솔루션에 대해 지속적으로 적용 검토가 필요하다. 이동통신사업자들이 점차 IoT망을 구축하려고 하고 있어 2017년부터는 IoT를 이용한 솔

루션 사용이 가능할 것으로 예상된다. 다음은 유무선 통합 원격제어용 Gateway의 동작 절차를 간단히 도식화한 것이다.

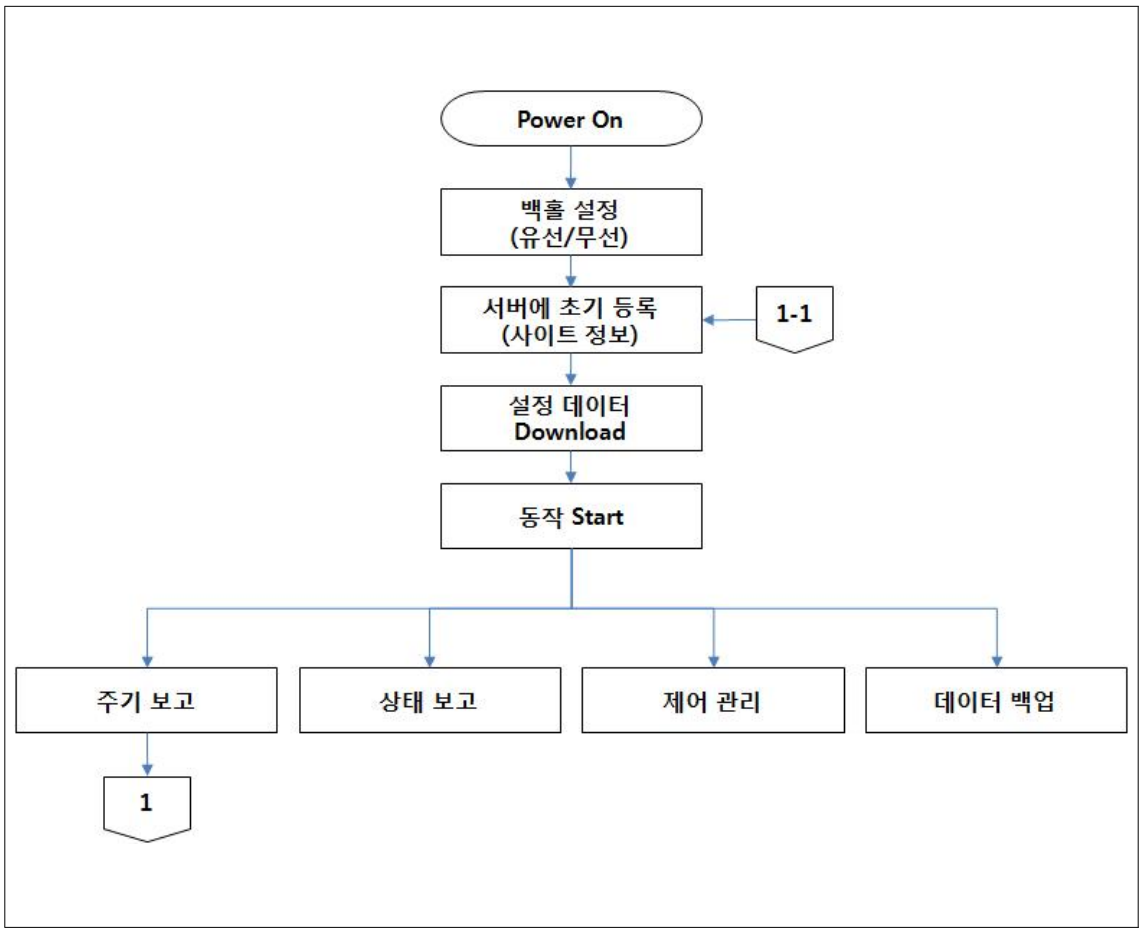


그림 41. 유무선 통합 원격 제어용 Gateway 동작 절차

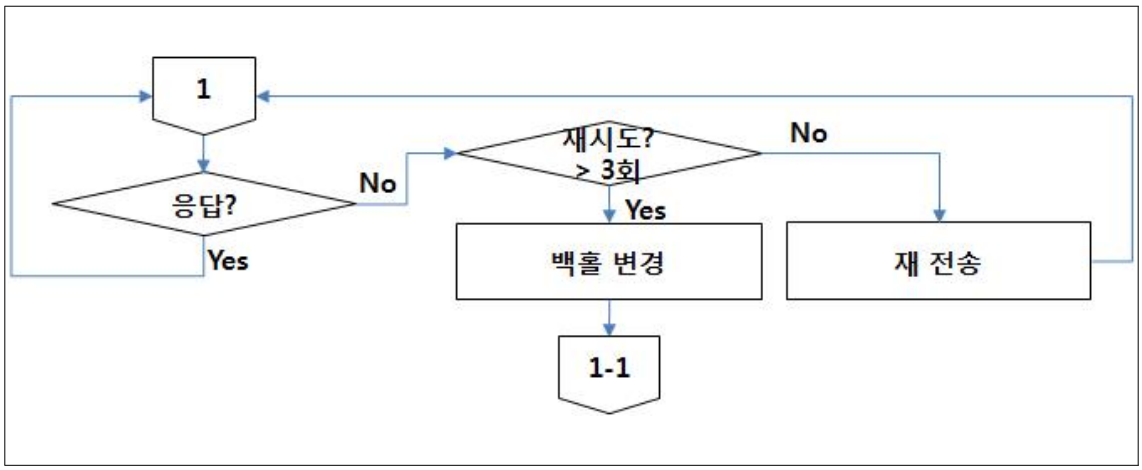


그림 42. 백홀 변경 절차

다. 이동통신망을 이용한 원격 제어망

이동 통신망을 이용한 유무선 통합 원격제어망은 별도의 Gateway 장비를 통해 구현이 가능하다. 이 장비는 유선 또는 무선망 중 하나를 기본 백홀로 사용하며, 설치환경 및 운용 시나리오에 따라 변경이 가능하다. 또한 무선망에 사용하는 데이터 모뎀은 망진화에 따라 업그레이드가 가능하도록 모듈 형태를 사용하면 향후 망 업그레이드 비용을 낮출 수 있다. 무선망은 서비스를 제공하는 이동통신망 사업자의 협력이 필요할 수도 있으므로 망구축전에 서비스 등 여러 가지를 검토하여 준비하여야 한다. 무선데이타 모뎀은 이동통신사업자의 인증 받은 제품을 선택하여 사용해야 한다.

(1)블록도

유무선 통합 원격제어 기능을 제공하는 Gateway는 다양한 환경에 사용이 가능하도록 Common Platform에 각종 모듈을 추가하는 구조로 되어 있다. Common Platform에는 Main Processor와 Memory, 이더넷 회로를 구현하며, 데이터 모뎀, WiFi/Zigbee 모듈, PLC, I/O 제어부는 인터페이스 콘넥터만 구현한다. 무선망 변경으로 데이터 모뎀을 교체는 경우, 해당 모듈을 교체하고, 소프트웨어를 업그레이드하면 바로 사용이 가능하다. 이러한 모듈 형태의 Common Platform 구조는 제품 단가 상승 요인이 된다. 그러나 고장 부분 최소화, 유지보수 용이성, 제품 확장성을 고려하면 제품 가격이 높다고 할 수 없다. 다양한 환경에서 사용하도록 하기 위해서는 하드웨어 변경 부분을 최소화하여 해당 부분을 교체하도록 하는 것이 좋다. Gateway 내부 블록은 다음과 같다.

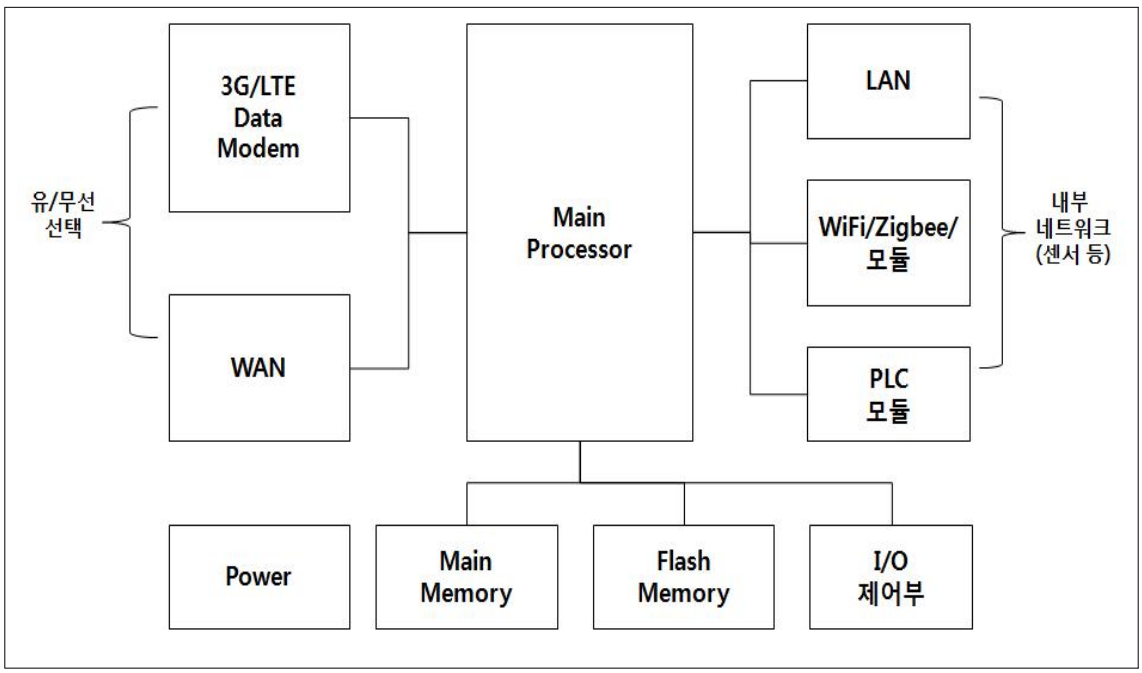


그림 43. Gateway 블록도

(2)블록별 주요 기능

Gateway는 Dual Core CPU를 Main Processor로 사용한다. 그리고 PCIe와 같은 오픈 인터페이스를 제공하여 새로운 기능의 모듈 추가가 용이하도록 하고 있다. 블록별 주요 기능은 다음과 같다.

표 34. 블록별 주요 기능

구성	주요 기능
Main Processor	- 백홀 설정 기능 - 데이터 모뎀 연동 기능 - 이더넷 연동 기능 - 내부 통신 기능(LAN, WiFi) - I/O 제어부 연동(UART, GPIO) - 수집 데이터 저장 기능
3G/LTE Data Modem	- 무선 백홀 기능 - 데이터 통신 기능
WAN	- 유선 백홀 기능 - 이더넷 통신 기능
Main Memory	- 소프트웨어 구동 - 데이터 처리
Flash Memory	- 운용 프로그램 저장 - 수집 데이터 저장
I/O 제어부	- UART 통신 - GPIO
LAN	- DHCP 기능 - PC 연동
WiFi/Zigbee	- Smart Device 연동 - 센서 연동
PLC	- 센서 연동

(3)운용

원격에서 PC나 스마트 디바이스를 이용하여 상태 확인 및 제어가 가능하며, 집수정이나 관측정 사이트에서는 LAN 또는 와이파이를 이용하여 확인 및 제어가 가능하다. 그리고 백홀 이상 시 수집된 데이터를 현장에서 백업할 수도 있다.

라. IoT망을 이용한 원격 제어망

IoT망을 이용하면 이동통신망에 비해 넓은 커버리지를 구축할 수 있으며, 독자적인 망 구축이 가능하다. 그러나 망 유지보수 및 운영을 위해서는 전문 인력이 필요하다. 망 구성은 이동통신망과 비슷하며, 독자망 구축시와 이동통신 사업자 망을 이용하는 경우 구성이 다르다. 아래 망 구성은 독자망 구축 시 구성도이다.

IoT를 이용하며 기본적으로 Power Saving Mode로 동작하여 단말의 동작 시간을 크게 증가시킬 수 있다. 기존 이동통신 단말을 사용하는 것에 비해 배터리로 장시간 동작이 가능하다. 관측정의 경우 IoT 솔루션을 이용하는 것이 각종 센서와 관측정 사이트 특성을 고려할 때 매우 유리하다.

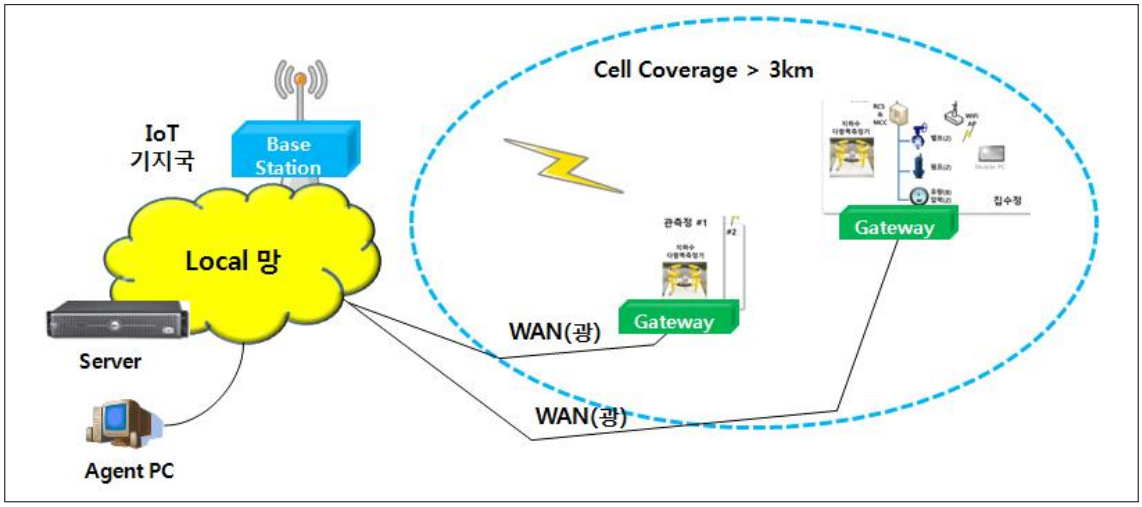


그림 44. IoT망을 이용한 유무선 통합 원격 제어망 구성도

(1)IoT 기지국 블록도

IoT 기지국 내부 구성은 다음과 같다. 최근에 이슈화되고 있는 LoRa 기지국 기본 블록 구성도이다.

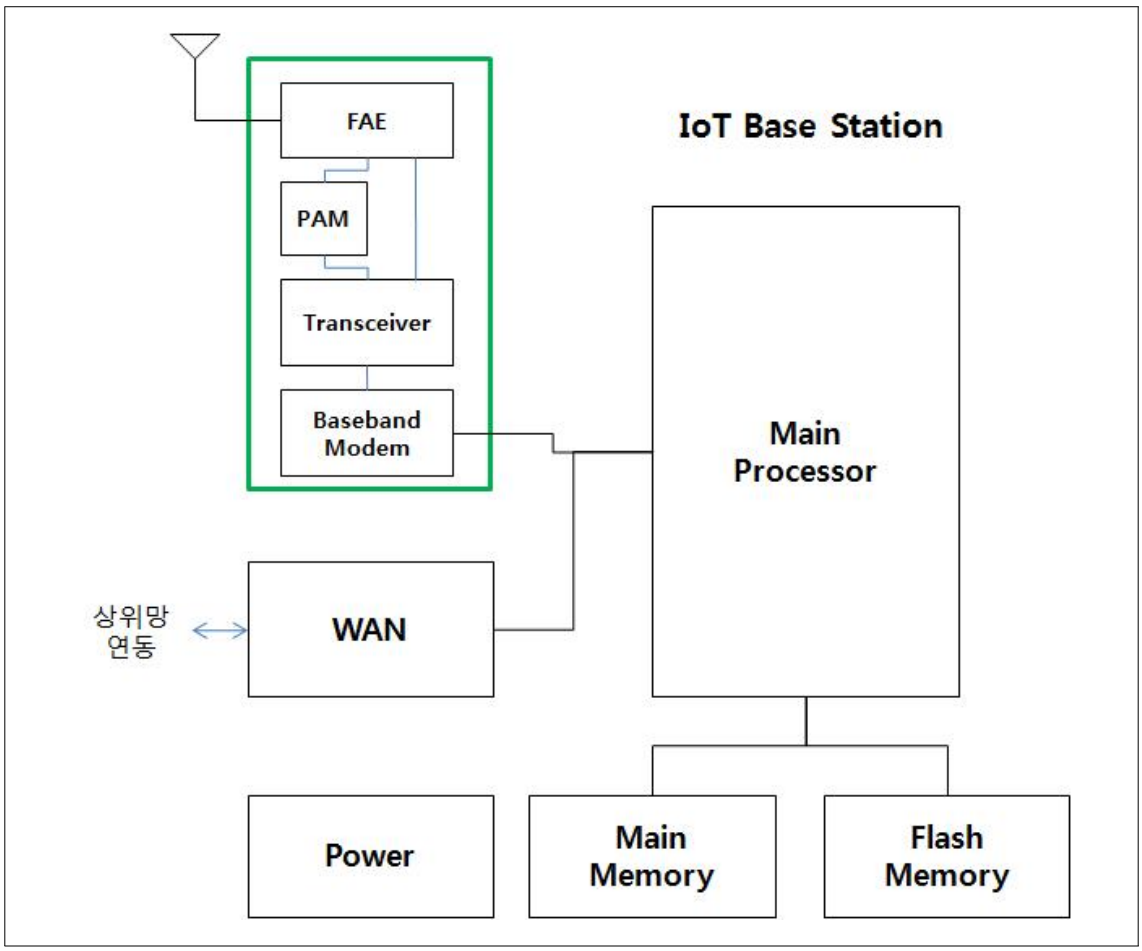


그림 45. LoRa Base Station 기본 블록도

(2)IoT Gateway 블록도

IoT용 Gateway는 Common Platform에 무선 데이터 모뎀부를 IoT 단말로 대체하면 구현이 가능하다. IoT 단말은 SPI 인터페이스를 사용함으로 Common Platform 설계 시 SPI 인터페이스를 추가해 놓아야 한다. Common Platform은 Mini PCIe 2개, USB 1개, UART 2개, SPI 1개, I2C 1개, MII 인터페이스 2개를 제공한다. Main Memory는 DDR3 128MB로 설계하고, NAND는 128MB로 하여 프로그램 데이터와 수집된 데이터 백업 시 사용한다.

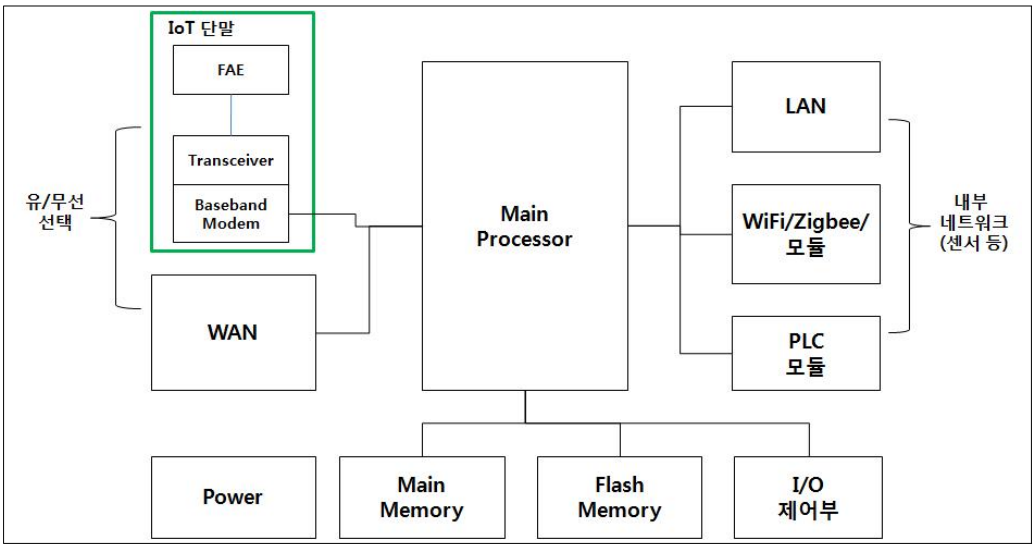


그림 46. IoT용 Gateway 블록도

마. Low Power RF를 이용한 원격 제어망

Low Power RF를 솔루션은 서버에서 Gateway를 거치지 않고 바로 끝에 있는 센서나 주변 기기를 제어하는 방안이다. 기본통신은 서버 - Gateway - 센서/주변기기 순으로 동작하나 서버와 Gateway간 또는 Gateway와 센서/주변기기간 통신이 안되는 경우 서버에서 직접 센서/주변기기 상태를 수집하고 필요 시 제어를 수행한다. 망 구성은 다음과 같다.

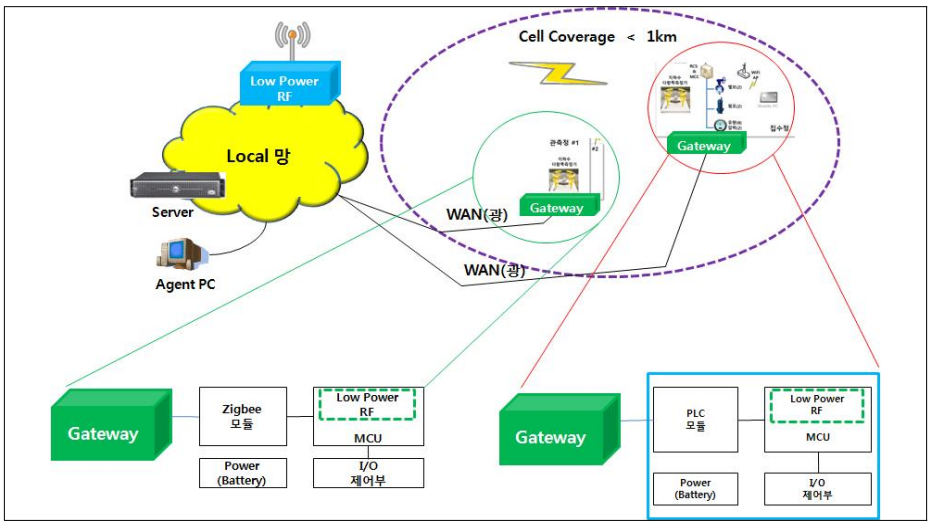


그림 47. Low Power RF 솔루션을 이용한 망 구성도

이 방안은 서버쪽에도 Low Power RF Master를 설치해야 한다. Master를 통해 사이트에 있는 Slave를 제어하여 통신한다. Slave는 각각 설정된 ID를 갖고 Broadcasting 되는 메시지에서 Slave는 설정된 ID에 대해서만 동작한다. 소출력으로 대략적인 Simulation을 해보면 LOS 환경에서 500m 이내에 사용이 가능할 것으로 예상된다.

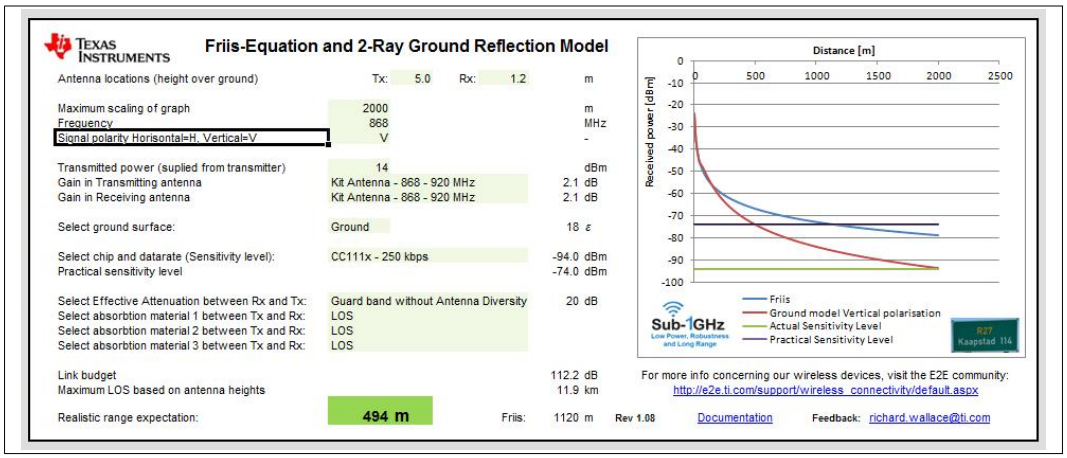


그림 48. Low Power RF의 적용 가능 거리 Simulation 결과

바. 적용성 검토결과

집수정 및 관측정 원격제어 통신망 인프라는 백홀이 단중화 되어 있어 장애 시 대책이 필요하다. 백홀 이중화는 여러 방안이 있을 수 있으나 유무선 네트워크 통합 기능을 제공하는 Common Platform Gateway를 제안한다. Common Platform Gateway는 망 안정성 향상 및 망 진화에 대응이 용이하며, 다양한 설치 환경에 사용이 가능하다. 비용 상승이 크지 않아 적용 시 부담이 적다. 향후 IoT 적용 시에도 사용이 가능하다.

현재와 같은 이동통신용 데이터 모뎀을 사용해서는 저전력 통신 구현에 한계가 있다. 또한 사용중인 CDMA는 3G나 LTE 로 변경이 되어야 한다. 저전력 통신을 위해서는 PSM(Power Saving Mode)를 기본을 하는 IoT나 Low Power RF(Radio Frequency)와 같은 솔루션 적용이 필요하며, 해당 솔루션은 MCU(Micro Controller Unit)가 내장되어 있어 구성이 간단하다. 또한 소모전력도 작아 동일 배터리로 기존 데이터 모뎀 대비 5~10배 이상 사용이 가능하다. 최근 이동 통신사업자들이 IoT 망 구축을 적극적으로 검토하고 있어 2017년에는 실제 적용이 가능할 것으로 예상된다. 본 과제 사업화를 위해서는 이동통신 데이터 모뎀 변경 검토가 선행되어야 한다.

통신 인프라 안정성을 위해 백홀 이중화 외에 현재 PLC 통신으로 센서 및 주변기기 데이터를 수집하고 제어하는 부분에 저전력 IoT 솔루션이나 Low Power RF 솔루션을 추가하여 PLC 통신 이상 시 대책으로 사용하는 것을 제안한다. PLC 통신 시 사용하던 콘트롤러를 MCU가 내장된 저전력 RF 칩으로 변경하면 소비전력과 통신 인프라 안정성 향상을 동시에 확보할 수 있다.

PLC 통신은 전원선만 포설하면 되기 때문에 공사면에서는 단순해지나 별도의 PLC 모뎀을 사용하기 때문에 고장 요소가 추가되고, 보드 사이즈나 비용이 상승 될 수

있다. PLC는 모터등과 같은 노이즈 발생 시 통신 장애가 발생할 수 있다. 별도의 케이블 포선(1pair)이 필요하지만 RS-485와 같은 통신 방식을 사용하면 멀티 제어가 가능하고, 근거리 센서/주변기기와 보다 안정적으로 통신이 가능하다. 또한 회로 구성이 간단하여 콘트롤 보드의 사이즈를 최소화 할 수 있어 제어부 소형화가 가능하다.

Common Platform Gateway는 기능별로 회로를 모듈화 하여 고장 시 해당 부분을 Isolation 하기 좋으며, 유지보수가 용이하다. 또한 망 업그레이드가 쉽고 필요에 따라 유무선을 선택 사용할 수 있어 다양한 설치환경에 적용이 가능하다.

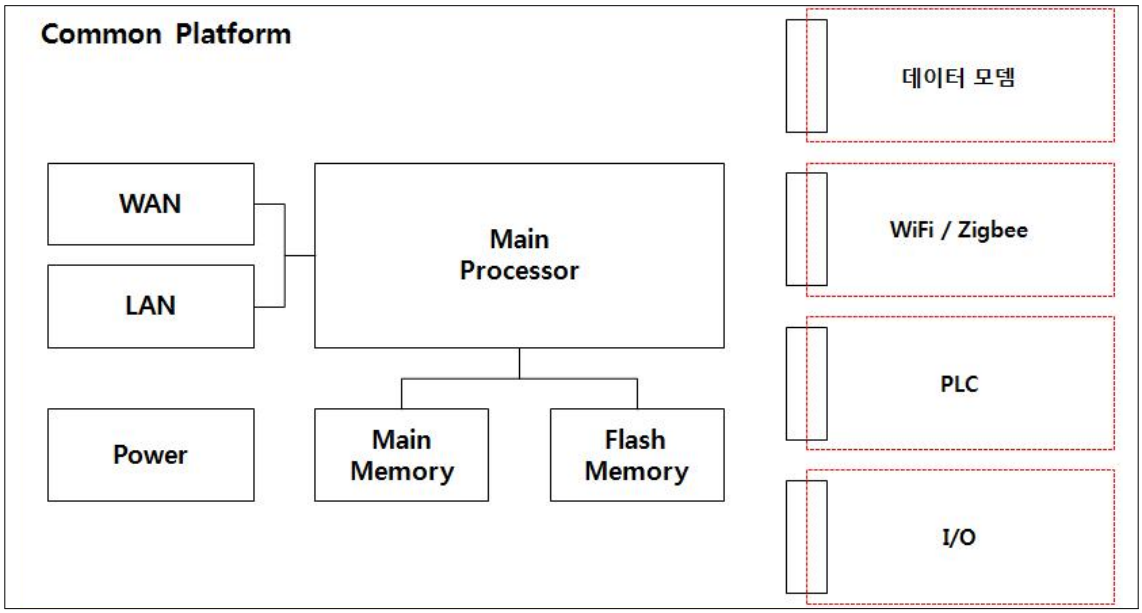


그림 49. Common Platform Gateway 블록도

사. 운영시스템 구축

연구지역에 구축한 시스템은 집수정 운영, 제어 및 원격관리가 가능하며, 관측자료 저장 및 분석기능을 제공한다. 배후지 영향 최소화를 위해 적용된 요소는 아래와 같다.



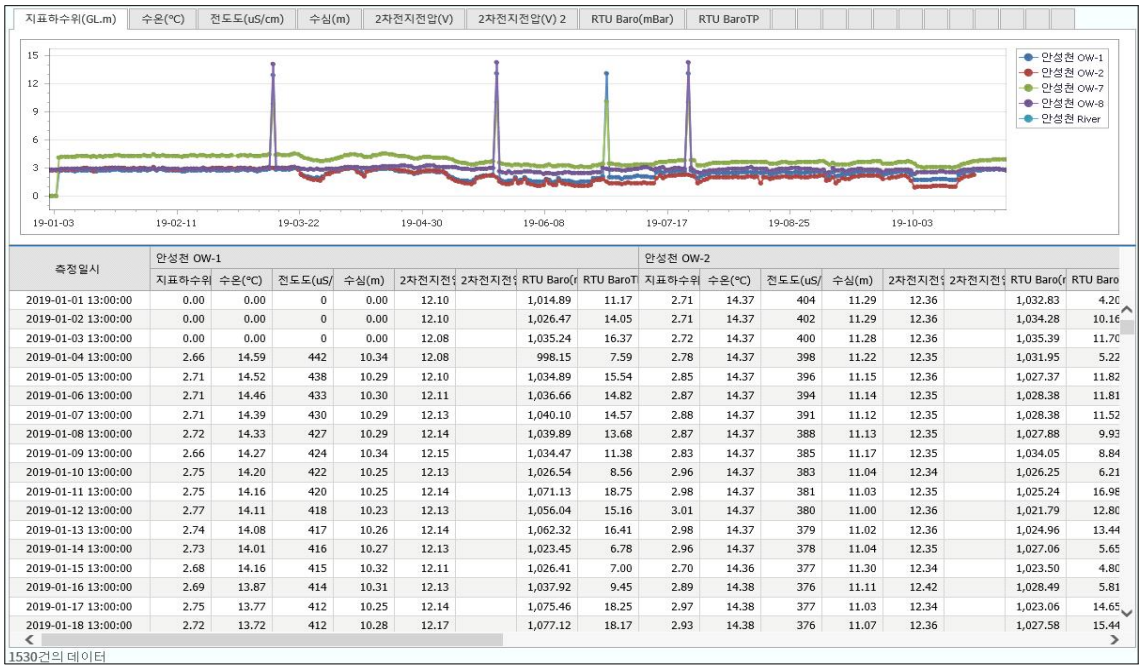
(a)자동 수위관측공 - 배후지 수위 자동관측 - 실시간 자료전송	(b)수평집수관 유량계 - 수평집수관 유량계측 - 운영시스템 유량출력	(c)볼밸브 - 0~100% 개도율 제어가능 - 수평집수관 유입유량 조절

그림 50. 연구지역 운영시스템 구축

(1)자동 수위관측공

배후지 영향평가를 위하여 제내지 및 제외지에 관측망을 구축하였다. 제내지의 경우 접근이 용이하며 집수정과 거리가 300m 이상 이격되어 주기적으로 데이터 수집을 통해 분석에 활용할 수 있다. 제외지의 경우 강우에 의한 잦은 침수 지역으로 식생 및 해충으로 인해 접근이 용이하지 못하다. 제외지 관측정은 집수정과 인접하여 시설운영에 따른 수위변화가 잘 관측되어 실시간으로 자료를 확보하고 분석하여 운영조건을 조절하여야만 배후지의 영향을 최소화 할 수 있다.

본 연구지역에 설치된 자동 수위관측공은 태양열을 활용하여 전력을 확보하고 모뎀을 통해 데이터를 전송하는 방식을 갖추고 있다. 이를 활용하여 관측된 수위자료를 바탕으로 수평집수관 운영방식을 조절할 수 있다.



측정일시	안성천 OW-1								안성천 OW-2							
	지표하수위	수온(℃)	전도도(uS/	수심(m)	2차전지전	2차전지전	RTU Baro(	RTU BaroT	지표하수위	수온(℃)	전도도(uS/	수심(m)	2차전지전	2차전지전	RTU Baro(	RTU Baro
2019-01-01 13:00:00	0.00	0.00	0	0.00	12.10		1,014.89	11.17	2.71	14.37	404	11.29	12.36		1,032.83	4.20
2019-01-02 13:00:00	0.00	0.00	0	0.00	12.10		1,026.47	14.05	2.71	14.37	402	11.29	12.36		1,034.28	10.16
2019-01-03 13:00:00	0.00	0.00	0	0.00	12.08		1,035.24	16.37	2.72	14.37	400	11.28	12.36		1,035.39	11.70
2019-01-04 13:00:00	2.66	14.59	442	10.34	12.08		998.15	7.59	2.78	14.37	398	11.22	12.35		1,031.95	5.22
2019-01-05 13:00:00	2.71	14.52	438	10.29	12.10		1,034.89	15.54	2.85	14.37	396	11.15	12.36		1,027.37	11.82
2019-01-06 13:00:00	2.71	14.46	433	10.30	12.11		1,036.66	14.82	2.87	14.37	394	11.14	12.35		1,028.38	11.81
2019-01-07 13:00:00	2.71	14.39	430	10.29	12.13		1,040.10	14.57	2.88	14.37	391	11.12	12.35		1,028.38	11.52
2019-01-08 13:00:00	2.72	14.33	427	10.29	12.14		1,039.89	13.68	2.87	14.37	388	11.13	12.35		1,027.88	9.93
2019-01-09 13:00:00	2.66	14.27	424	10.34	12.15		1,034.47	11.38	2.83	14.37	385	11.17	12.35		1,034.05	8.84
2019-01-10 13:00:00	2.75	14.20	422	10.25	12.13		1,026.54	8.56	2.96	14.37	383	11.04	12.34		1,026.25	6.21
2019-01-11 13:00:00	2.75	14.16	420	10.25	12.14		1,071.13	18.75	2.98	14.37	381	11.03	12.35		1,025.24	16.98
2019-01-12 13:00:00	2.77	14.11	418	10.23	12.13		1,056.04	15.16	3.01	14.37	380	11.00	12.36		1,021.79	12.80
2019-01-13 13:00:00	2.74	14.08	417	10.26	12.14		1,062.32	16.41	2.98	14.37	379	11.02	12.36		1,024.96	13.44
2019-01-14 13:00:00	2.73	14.01	416	10.27	12.13		1,023.45	6.78	2.96	14.37	378	11.04	12.35		1,027.06	5.65
2019-01-15 13:00:00	2.68	14.16	415	10.32	12.11		1,026.41	7.00	2.70	14.36	377	11.30	12.34		1,023.50	4.80
2019-01-16 13:00:00	2.69	13.87	414	10.31	12.13		1,037.92	9.45	2.89	14.38	376	11.11	12.42		1,028.49	5.81
2019-01-17 13:00:00	2.75	13.77	412	10.25	12.14		1,075.46	18.25	2.97	14.38	377	11.03	12.34		1,023.06	14.65
2019-01-18 13:00:00	2.72	13.72	412	10.28	12.17		1,077.12	18.17	2.93	14.38	376	11.07	12.36		1,027.58	15.44

그림 51. 자동 수위관측 전송 화면

(2)수평집수관 유량계

집수정에 설치된 각각의 수평집수관에서 유입되는 유량을 계측하는 장비이다. 방사형집수정의 경우 방향별 지질조건에 따라 유입되는 양이 상이하게 나타나고, 배후지 수위강하에 미치는 정도도 각각 다르게 나타난다. 따라서 수평집수관 개별의 유량을 계측하고 그에 따른 수위변화 조건에 대한 분석을 수행하여 주변 지하수 이용관정의 영향을 최소화 할 수 있다.

현장에 적용된 수평집수관 유량계는 삽입식 유량계와 전자식 유량계가 있다. 삽입식 유량계의 경우 수평집수관의 유량이 충분히 확보가 될 경우 계측값의 신뢰도가 높고, 유량이 적을 경우에는 신뢰도가 매우 떨어진다. 또한 데이터 송수신 과정에서 발생하는 노이즈에 의해 본 현장지역에는 적용성이 떨어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제내지 방향에 위치하는 수평집수관의 경우 전자식 유량계를 설치하여 기존 문제를 해결하였다.

(3)볼밸브

집수정 운영 조건에 따른 배후지 수위영향 최소화를 위한 결과를 적용하기 위해서는 수평집수관의 유량을 조절하여야 한다. 유량을 조절하기 위해서는 밸브를 ON/OFF하는 것이 아니라 개도율을 조절하여 유량을 조절하여야 한다. 볼밸브는 개도율을 0~100%로 조절이 가능하다. 따라서 수평집수관 각각의 유량을 조절할 수 있다. 이를 본 연구지역에 적용하여 배후지 영향 최소화 시나리오를 적용하는데 활용하였다.

(4)시스템 구성



그림 52. 펌프 운영화면

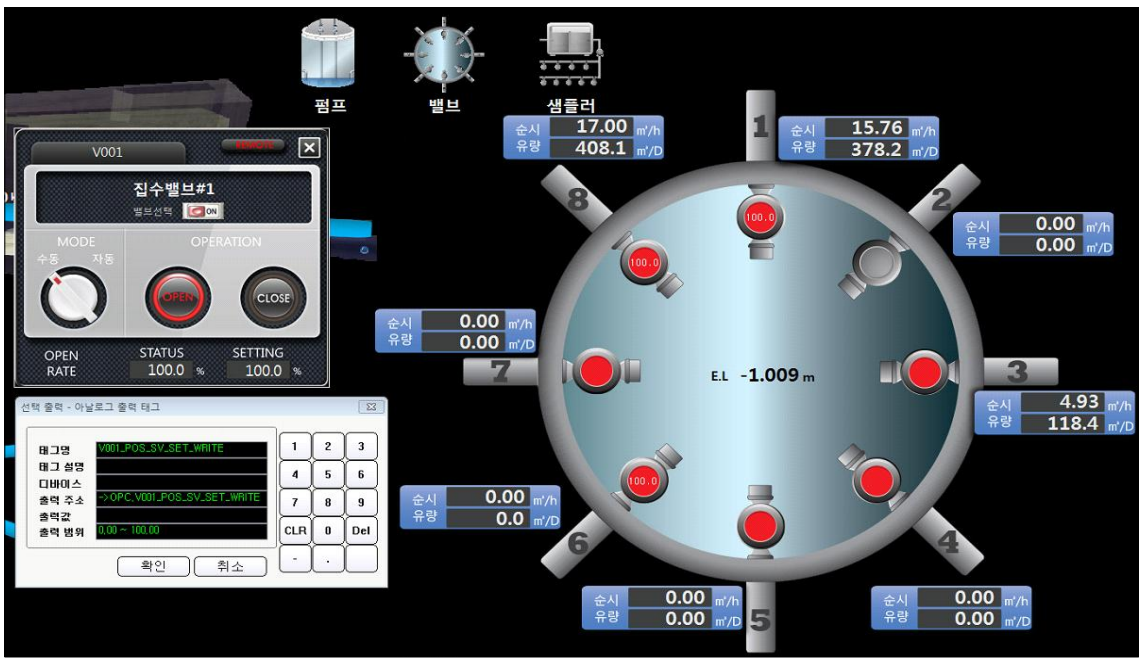


그림 53. 수평집수관 유량 및 밸브

제 3 절. 방사형집수정 운영에 따른 수질변화 분석

1. 수질항목 선정

수질분석항목은 원수의 수질을 판단하기 위해 상수원관리규칙 제25조 제1항에 제시된 강변여과수 월 분석항목을 선정하였으며, 상수원으로 활용가능성을 판단하기 위해 분기 1회 먹는물 분석을 실시하였다. 또한 수평집수관별 유입비율을 판단할 수 있는 화학적 및 동위원소 인자를 선별하여 분석을 수행하였다. 수평집수관별 유입비율을 바탕으로 배후지 영향을 고려한 수평집수관 운영에 활용될 수 있다. 따라서 수평집수관별 유입비율 분석을 우선적으로 실시하였다.

가. 원수의 수질검사 기준(상수원관리 규칙 제25조 제1항)

pH, BOD, SS, DO, 대장균군(총 대장균군, 분원성 대장균군)을 하천수, 강변여과수 매월 측정항목으로 선정하여 매월 1회 시료를 채취하여 선정된 수질항목 분석을 실시하여 자료 축척하였다. 이는 인근 취수원(복류수)과 강변여과수 비교분석에 활용되었다.

나. 먹는물 수질기준(46개항목)

상수원으로 활용가능성 판단을 목적으로 분기별 먹는물 수질분석 수행하였다.

다. 수평집수관별 유입비율 분석을 위한 항목 선정

Radon, Si 및 물 안정동위원소 항목 분석을통해 유입비율 및 체류시간을 분석하여 배후지 영향을 고려한 집수정 운영시 활용될 수 있다. 체류시간 분석을 통해 적정 여과거리의 충족 유무를 판단하였으며 전문가 활용을 통해 신뢰성을 확보하였다. 유입비율의 경우 최종연구 목표 달성을 위해 필요한 자료로 판단되어 우선적으로 실시하였다.

2. 혼합비율 및 평균체류시간 산정

가. 서론

강변여과는 하천변 대수층에 대형 관정을 설치하여 양수를 함으로써 하천수 유입을 유도하고 하천수가 관정에 도달하는 과정에서 충적대수층의 여과작용을 통해 박테리아 등의 미생물 오염물과 여러 무기, 유기성분이 자연적으로 저감되는 과정을 활용한 상수원수 확보방법이다 (Hiscock and Grischek, 2002; Tufenkji et al., 2002). 이 방법은 일반적인 지표수 정수처리과정의 상당부분을 대수층내 처리로 대체할수 있어 하천수 오염이 상대적으로 심한 독일, 네덜란드, 스위스, 프랑스 등의 유럽지역에서 수십년전부터 널리 활용되어 오고 있다 (Kuehn and Mueller, 2000). 국내에도 안정적 상수원수 확보차원에서 강변여과에 대한 관심이 높아져 주요 대상지에 대한 평가와 연구가 이루어지고 있으나 현재까지 실제 강변여과시설 운영은

창원 대산 정수장 등 몇몇 사례에 그치고 있고, 전체 상수원수중 강변여과수가 차지하는 비중은 미미한 실정이다 (공민근, 윤성용, 2001; 함세영 외, 2002; 이상일, 이상신, 2008).

기존 유럽의 경우를 보면 강변여과 관정으로 유입되는 물의 상당부분은 하천수이고 지하수의 비중은 상대적으로 작다. 이 경우에 강변여과시설 운영에 따라 주변 지하수가 영향을 받는 부분은 큰 문제가 아니라고 할 수 있다. 그러나 국내의 경우는 하상퇴적물과 충적대수층의 투수성이 상당히 불균질하여 위치에 따라 하천수와 지하수의 비중은 상당한 편차를 보일 수 있다. 만약 강변여과수내의 지하수의 비중이 커지게 되면 하천변 대수층의 지하수 유동에 영향을 줄수 있고, 기존 지하수 이용자와 갈등을 유발할 수 있다. 또한, 물의 공급량 측면에서 하천수 유입이 감소하면 대용량을 지속적으로 공급하기 어려워진다. 따라서 강변여과수에 지하수의 비중이 어느 정도 인가는 중요한 문제라고 할 수 있다.

강변여과수내의 하천수와 지하수의 비중을 산정하는 방법은 크게 지하수 유동수치모사를 이용한 방법과 수리지구화학적 인자나 동위원소를 이용하는 방법이 있을 수 있다. 일반적으로 지하수 유동수치모사는 대수층의 수평적, 수직적 분포와 수리지질학적 물성을 고려하여 적절한 모형을 구축하고, 투수계수, 저류계수, 함양량, 기저유출량, 측정된 지하수위 등의 자료를 토대로 모형을 보정하고 검증하여 해당 지역의 지하수 유동 모형이 확립되는 과정이 선행되어야 한다 (Ray et al., 2002; Wiese and Nutzmann, 2009). 이와 같이 확립된 수치모형을 토대로 강변여과 관정으로 유입되는 물의 근원을 파악하여 하천수와 지하수의 비중을 평가할 수 있다.

또 다른 방법은 강변여과수를 하천수와 지하수의 혼합체로 보고, 각 대상에 대해 측정된 수리지구화학적 인자나 동위원소 (환경추적자라고도 함) 중 하천수와 지하수의 특성을 잘 대변하는 인자를 선정하면, 이성분 혼합모형 (Binary Mixing Model)을 이용하여 강변여과수내의 하천수와 지하수의 혼합비를 산정할 수 있다 (Crandall et al., 1999; Kalbus et al., 2006). 이번 연구에서는 이 방법을 이용하여 대상 지역 강변여과수에서 하천수와 지하수의 혼합특성을 평가하고자 한다.

기존에 강변여과수에 대한 혼합비 산정 사례를 보면 네덜란드의 Nieuwe Maas 강변에서 지하수 수치 모형과 추적자를 사용한 연구가 있다 (de Vet et al., 2010). 이 연구에서는 강변관정에서 채수되는 물을 강변여과수(river bank filtrate)와 polder water라는 지하수의 두 가지 근원에서 공급되는 것으로 가정하였다. polder water는 천부지하수와 점토질층에 설치된 수로에서 채수되는 물이다. 집수관정은 강과 수직방향으로 500 - 1000 m 떨어져 있고 지하수 수치모사에서 평균적으로 하천수가 70%이고, 지하수가 30%를 차지하는 것으로 나타났다. 강변여과수내에서 하천수가 차지하는 비율은 하천과의 거리에 크게 영향을 받는데, 하천에서 약 800m까지는 하천수가 85%를 차지하며 이후로는 하천수 비율이 급격히 낮아져 1500m 이상에서는 40%이하이다. 이러한 수치 모사 결과는 sulfate에 대해 모사된 농도와 측정된 농도를 비교할 때 하천에서 800m까지는 잘 일치하였으나, 800m이상의 거리에서는 상당한 차이가 발생하였다. 800m이상 떨어진 지역에서 sulfate 농도가 맞지 않

는 것은 이 지역의 지하수에서 메탄, 암모늄, 철 등이 고농도로 검출되는 등 강한 혐기환경으로 인해 sulfate가 환원되었기 때문으로 추정된다.

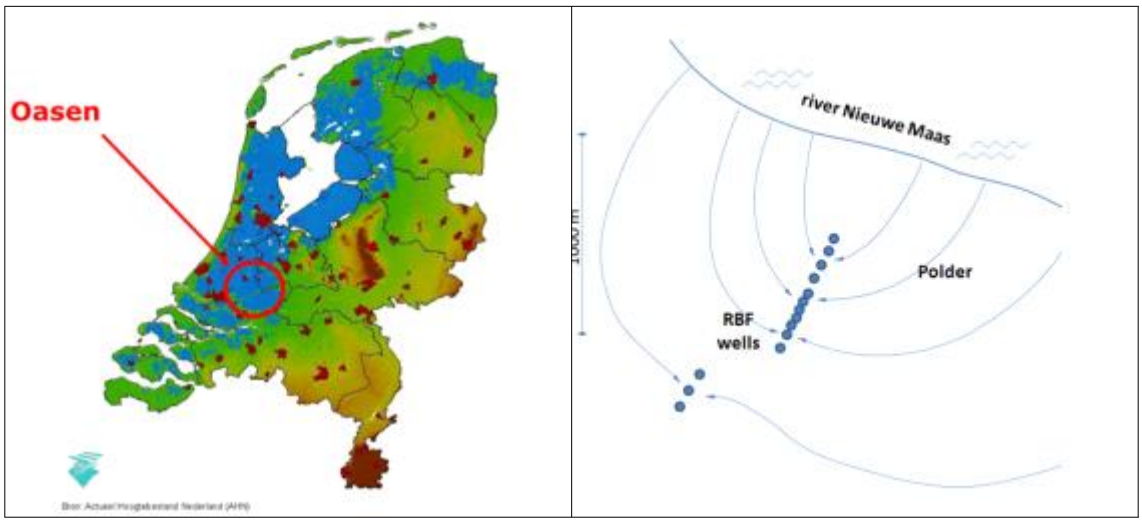


그림 54. 네덜란드 연구사례: 연구지역 위치도와 강변 집수정 위치도

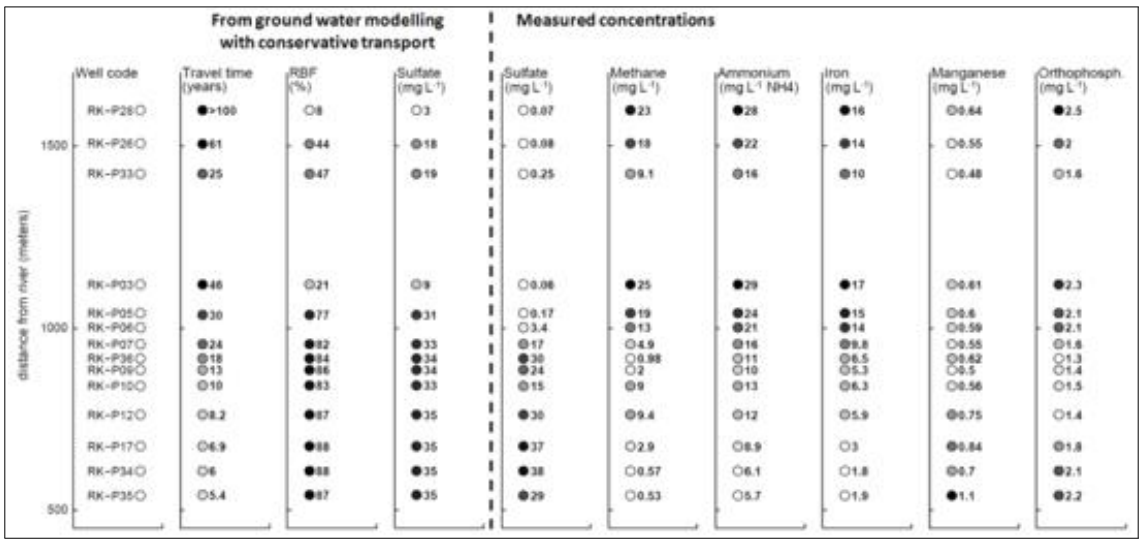


그림 55. 네덜란드 연구사례: 수리적 특성과 집수관정에서의 농도

강변여과수에 관한 또 다른 논점은 하천수가 집수정에 도달하는데 소요되는 시간, 즉 하천수의 대수층내 평균체류시간이다. 전술한 바와 같이 강변여과수는 하천수가 지하수보다 비중이 월등이 크므로 하천수의 수질특성이 여과수의 수질을 좌우하게 된다. 만약 하천수의 수질이 일시적으로 변동하거나 오염 사고 등이 발생하게 되면 평균체류시간에 따라 여과수도 영향을 받게 된다. 기존 강변여과정 운영 사례에서 하천에 유입된 오염물질의 최대 농도를 감소시키고 집수정에 도달하는 것을 지연시키는 잠재력이 있음을 제시되었다. 특히 시설에서의 유실(spill)이나 테러 등으로 일시적으로 지표수에 오염물질이 유입되는 경우 등의 긴급상황 대처에서 적절한 대응시간과 최대 농도를 감소시킨다는 점은 강변여과가 직접 취수에 비해 장점을 가지게 한다.

따라서 여과수에 기여하는 하천수의 대수층내 평균체류시간은 이러한 하천오염에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 집수정 운영계획에서 중요한 인자라고 할수 있다. 대수층내 평균체류시간은 지하수 유동모형과 환경추적자 조사를 통해 추정할 수 있다. 국내에서는 현재까지 강변여과수에 대한 평균체류시간 산정이 이뤄진 경우가 없다. 최근 국외사례를 보면, Kármán et al. (2014)은 헝가리 부다페스트 인근 다뉴브강의 하중도인 Szentendre Island에 위치한 집수정에서 1년간 1일 - 1주일간격으로 조사된 산소동위원소 시계열자료를 dispersion model을 이용하여 해석하여 고수위때 6-8일, 저수위때 12-14일의 평균체류시간을 산정하였다. 이 집수정에서는 조사기간동안 평균적으로 3,040 ㎥/day을 양수하였으며 여과수에서 하천수의 비율은 저수위때 60%, 고수위때 95%로 비교적 큰 변동을 보였다.

나. 분석방법

(1) 기본정보

조사 시기에 집수정의 일양수량은 2016년에는 4637±2500 ㎥/day였고, 2017년에는 4252±1762 ㎥/day로 양수량의 변동이 평균대비 54%와 41%로 비교적 크다. 이러한 양수량의 변동은 여과수의 하천수와 지하수 혼합비와 하천수 기여분의 대수층내 평균체류시간를 추정할때 시기별로 결과가 달라지는 원인이 될수 있다. 안성천의 수위는 3.5 - 4.5 m 범위로 변동폭이 크지 않아 하천수위가 주변 대수층에 미치는 시기적인 영향은 크지 않다고 볼 수 있다. 그러나 이에 대한 정량적 평가는 하상퇴적물과 대수층의 수리적 특성을 고려하여 실시하여야 한다.

(2) 물 시료 채취

조사 대상 지역에서 하천수, 해당 지역을 대변하는 지하수, 강변여과수를 채취하고 주요 성분과 물 안정동위원소에 대해 분석을 실시하였다. 물시료는 온도, pH, EC의 현장수질항목이 안정되는 것을 확인한후 채취를 실시하였다. 물 시료는 0.45μm 공극을 가진 막필터를 이용하여 여과하여 HDPE 시료병에 채수하였으며, 양이온 분석용 시료는 농질산으로 pH < 2가 되도록 산처리하였다. 라돈 분석용 시료는 와류나 기포의 발생, 공기중 장시간 노출 등을 방지하여 용존 라돈의 손실이 발생하지 않도록 하여 수용액 시료 8 ml를 전처리 없이 곧바로 라돈 추출섬광용액 12 ml이 담긴 바이알에 채취하였다.

혼합비 산정을 위한 시료채취는 2017년 6월과 10월의 2회에 걸쳐 실시되었으며, 하천수(AN)는 집수정 인근 하천에서 채수하였으며 집수정에서는 혼합수(OWO)와 7개의 수평정(#1, #3, #4, #5, #6, #7, #8)에 대해 채수하였다. 지하수는 하천에서 200 m ~ 500 m 떨어진 충적관정 5개소 (OB3, OB4, OB5, OB6, OB7)에 대해 조사를 실시하였다. 평균체류시간 산정을 위한 시기적 시료채취는 2016년 9월부터 2017년 10월까지 하천수(AN), 강변여과수는 집수정에서 혼합수(OWO)와 3개의 수평정(#1, #3, #6)에 대해 2주간격으로 14회 및 마지막 10월 1회 포함하여 총 15회 조사하였고, 지하수는 충적관정 5개소 (OB3, OB4, OB5, OB6, OB7)에 대해 2016년 11월, 2017년 6월, 10월의 3회에 걸쳐 조사를 실시하였다.



그림 56. 안성천 강변여과 지역 시료채취 위치도

(2) 수리지구화학인자와 동위원소 분석

(가) 주요 성분 분석

Ca, Mg, Na, K, Si는 유도결합플라즈마 원자발광광도계 (Inductively-Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry; Optima 7300 DV ICP-OES Spectrometer, Perkin Elmer)을 이용하여 측정하였다. 표준시료 조제와 시료희석은 2% HNO_3을 사용하여 실시하였다. 분석용액 주입은 1.5 mL/min로 하였으며, 플라즈마 형성을 위한 아르곤기체는 액체아르곤으로부터 100 psi 압력에서 15 L/min로 공급하였다. 분석오차는 상대표준편차로서 3%이내이다.

(나) 물안정동위원소 분석

물 안정동위원소조성 분석은 동위원소비 적외선분광 분석법(Isotope Ratio Infrared Spectroscopy; IRIS) 기반의 Picarro사의 2세대 모델 L2120-i을 사용하여 실시하였다. 이 장비는 크게 자동시료분배장치(Auto sampler : PAL HTC 9-LEAP; CTC Analytics), 분석기(analyzer), 증발장치(vaporizer), 진공펌프(vacuum pump), 결과출력장치(display device)의 비교적 단순한 구성을 가진다. 기화된 시료를 광학 공동으로 이동시키는 운송 가스(carrier gas)로는 질소(purity 5.0=99.999%)가 이용되고, 물 시료 자동 주입을 위해 자동시료분배장치가 연동되어 있다. 분석의 순서는 우선 시료의 보정을 위해 분석할 시료의 앞과 뒤에 표준시료를 배치한 후 이를 자동시료분배장치를 이용해 증발장치에 일정량(1.6~2.0㎕ = H_2O concentration in cavity, 16,000~25000 ppm) 투입시키게 된다. 더 자세한 분석방법은 정윤영 외 (2013)에 제시되어 있다.

(3) 지하수 라돈(222Rn) 분석

222Rn의 계측은 222Rn과 그의 알파선 딸핵종과의 방사평형을 위해 3 시간 이상 방치한 후 계측하였다. 222Rn 분석계측효율을 구하기 위하여 226Ra 표준용액(200dpm/ml) 8ml를 측정용기에 취하고 섬광액 12 ml와 잘 혼합한 후 시간별로 222Rn를 계측하였다. 계측효율은 α와 β선의 총 피크영역 또는 α 선만의 피크영역에서의 총계수율로부터 각 영역에서의 백그라운드 계수 율을 빼서 얻은 순수 계수 율로부터 구하며, 그 식은 다음과 같다.

$$.E = \frac{R^* - R_0}{A_s(1-\exp^{\lambda^{\triangle T}}) \times 60}$$

E = 계측효율 , λ = 222Rn 붕괴상수 (0.182/일)

△T = 채취 시부터 측정시간까지의 경과시간(일)

A_s = 226Ra 표준선원의 방사능(Bq)

R* = α-선의 총 피크영역 계수율 (cpm)

R_0 = α-선의 총 피크영역 에서의 백그라운드 계수율 (cpm)

(4) 혼합비 산정을 위한 환경추적자 선정

강변여과수내 혼합비 산정을 위한 환경추적자는 크게 반응성과 변동성 측면에서 고려하였다. 반응성 측면에서 보면, 강변여과 관정으로 하천수가 지하수가 유입될 때 대수층 환경에 따라 다양한 지구화학적, 생지구화학적 반응이 일어나게 된다 (Bourg and Bertin, 1993; Farnsworth and Hering, 2011). 따라서 이러한 화학반응의 영향을 받는 성분들은 강변여과수내 혼합비 산정에 활용하기 어렵다. 산화-환원 과정을 포함한 생지구화학적 반응의 영향을 크게 받는 NO_3, Fe, Mn 등이 대표적인 성분들이고, SO_4, HCO_3 등도 환경에 따라 영향을 받을 수 있다. 주요 양이온은 상대적으로 생지구화학적 반응의 영향은 거의 없으나 이온교환이나 물-암석 반응에 따른 용해-침전에 의해 농도가 변할수 있다. 양이온 중에서는 Na < Mg < Ca < K 등의 순으로 반응의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 이에 비해 Cl, F 등의 음이온은 반응의 영향을 가장 적게 받는다. 또한 Si의 경우는 물속에서 $H_4SiO_4^0$ 형태의 무전하 용존성분 존재하여 다양한 화학반응에 잘 참여하지 않고, 대수층내에서 물-암석 반응에 의해 농도가 증가하기는 하나 그 속도가 매우 느리기 때문에 국지적 규모에서는 유동경로에 따른 농도변화가 크지 않다. 따라서 반응성 측면에서는 Cl, Si 등이 가장 적절한 추적자라고 할 수 있다 (Ward et al., 1999). 한편, 물 안정동위원소는 화학성분과 달리 상온에서는 화학반응의 영향을 거의 받지 않고 물 분자 자체에 포함되어 있으므로 가장 이상적인 추적자라고 할 수 있다 (Koh et al., 2010). 라돈의 경우에도 비반응성이며 하천수와 지하수간의 농도 차이가 커서 대수층으로의 지표수 유입 특성 평가나 두 수체간의 혼합비 산정에 유용한 추적자이다 (Hoehn and Von Gunten, 1989).

변동성 측면에서는 강변여과수의 주요 근원으로 설정한 하천수와 지하수에서 해당 환경추적자의 시간적, 공간적 농도 변화가 작을수록 혼합비 산정에 유리하다. 그러나 실제로는 하천수와 지하수는 여러 환경추적자의 농도가 상당한 변동성을 가질 수 있다. 하천수의 경우는 강수 등의 영향을 크게 받아 시간적 변동성이 클 수 있고, 지하수의 경우는 대수층 구간에 따른 공간적 변동성이 클 수 있다. 이번 연구에서는 시기적, 비용적인 제한으로 하천수와 지하수의 변동성에 대해서는 충분히 고려되지 못하였다.

각 지역에 대해 강변여과수내의 하천수와 지하수의 혼합비를 산정을 위해서는 1) 추적자 선정, 2) 하천수 end member 결정, 3) 지하수 end member 결정의 세 항목을 잘 고려하여야 한다. 이번 연구에서는 조사 지역에 대한 기존 연구 결과를 고려하여 반응성이 거의 없어 보존성 추적자로 볼수 있는 Si와 라돈을 혼합비 산정을 위한 추적자로 선정하였다. 하천수 end member는 조사시기의 하천수 조성을 이용하였다. 지하수 end member는 대상지역의 지하수 자료가 많을 경우에는 집수정 인근의 대수층을 가장 잘 나타낼 수 있는 지하수를 선별하여 평균하여 사용하는 것이 좋다. 이번 연구에서는 제한된 시료결과만 있으므로 주어진 지하수 시료의 조성이 집수정 인근 대수층을 나타낸다고 가정하고 end member로 활용하였다. 지하수 시료가 2개인 경우는 지하수시료의 평균과 각 개별시료를 end member로 설정하였다.

(5) 강변여과수내 혼합비 계산

혼합비는 다음과 같은 이성분 혼합 모형을 이용하여 계산하였다. 여기서 f_a는 end member a의 혼합비, f_b는 end member b의 혼합비를 의미하며, 각 측정인자에 대해 Cm은 시료의 측정값, C_a는 end member a의 측정값, C_b는 end member b의 측정값을 의미한다.

$$f_a + f_b = 1\,,\; f_b = 1 - f_a$$

$$C_m = f_a C_a + f_b C_b = f_a C_a + (1 - f_a) C_b$$

$$f_a = \frac{C_m - C_b}{C_a - C_b}$$

혼합비에 대한 불확실성은 하천수와 지하수의 각 인자간의 공분산(covariance)은 0이라고 가정하고 표준적인 오차확산 (error propagation) 기법으로 다음과 같이 계산하였다. U(x)는 측정값 x의 불확실성, 즉 오차를 의미한다. 각 측정값의 불확실성은 분석시의 전형적인 오차 (상대오차로 5%이내)를 적용하였고, end member의 불확실성은 조사된 시료의 표준편차로 추정하였다.

$$U(f_a) = \sqrt{\left[\frac{C_b - C_m}{(C_b - C_a)^2} U(C_a)\right]^2 + \left[\frac{C_m - C_a}{(C_b - C_a)^2} U(C_b)\right]^2 + \left[\frac{-1}{(C_b - C_a)} U(C_m)\right]^2}$$

$$U(f_b) = U(f_a)$$

(6) 강변여과수내 평균 체류시간 산정

대수층 내의 지하수의 평균 체류시간은 연구 목적와 지하수의 연령에 따라 다양한 연대측정 방법으로 추정된다. 지하수 연대 측정을 위한 환경 추적자로는 산소/수소 안정동위원소($\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$), 삼중수소/헬륨산소($^{3}H/^{3}He$), ^{14}C, U-Th 붕괴계열 동위원소, CFCs, SF_6 등이 있다. 지하 환경에서 추적자는 매질의 특성에 따라 분산(dispersion)과 혼합(mixing)에 의해 초기의 입력농도가 변화하게 된다. 특정지점에서 추적자 농도의 시간적 변화는 추적자가 통과하는 매질을 1-2개의 매개변수로 나타낼수 있는 시스템으로 가정하고 다음과 같이 수학적으로 가중 함수를 이용한 convolution integral로 표현할 수 있다.

정상류상태 조건에서 보존성 추적자의 input과 output 농도는 다음과 같은 convolution integral로 나타낼 수 있다.

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{inp}(t-t')g(t')dt'$$

g(t) = 유동 모형의 가중함수 (연령 분포 함수)

$C_{inp}(t)$ = input의 추적자 농도

$C_{out}(t)$ = output의 추적자 농도

가중함수(weighting function)는 사용되는 모형에 따라 다르게 표현되는데, 지하환경에서는 대표적으로 다음 두가지 함수가 많이 이용된다.

a) exponential model

: $g(t) = T^{-1} \times \exp(-t/T)$

b) dispersive model

: $g(t) = (4\pi \times D/vx \times t/T)^{-1/2} \times t^{-1} \times \exp[-(1-t/T)^2 \times (4D/vx \times t/T)^{-1}]$

여기서 T, D, v, x는 각각 평균체류시간, 확산계수(dispersion coefficient), 평균 유속, 시스템의 길이를 나타낸다.

이번 연구에서 하천수가 집수정까지 도달하는 평균체류시간을 산정하기 위해 추적자는 물 안정동위원소를 사용하였고 가중함수는 자료의 부족으로 2개 이상의 인자를 사용하는 모형의 적용은 적절하지 않다고 판단되어 평균체류시간(T) 1개의 인자를 사용하는 Exponential model을 사용하였다.

하천이나 호수 등 지표수의 물 안정동위원소는 기온, 강수량, 증발량 등 기상조건과 물 공급원의 특성 등에 따라 계절적인 변화를 보이게 되는데 사인함수(sinusoidal function)로 근사할수 있는 경우가 많다. 이 지표수가 유입되어 형성되는 여과수의 물 안정동위원소 조성 역시 이와 유사한 변동 특성을 보이게 되는데, 이때 사인함수의 진폭(amplitude)과 위상차(phase shift)는 지하환경에서의 체류시간에 의해 원래의 지표수 특성과 달라지게 된다. 지표수와 여과수에서 이러한 물 안정동위원소의 시기적 변동성의 차이를 이용하여 지하수의 평균체류시간을 산정할 수 있다. 진폭의 경우, 상대적으로 더 큰 진폭을 보이는 지하수가 작은 진폭

을 보이는 지하수보다 짧은 체류시간을 가진다고 볼 수 있다.

이 경우에, C_{output}와 C_{input}은 각각 아래와 같이 표현된다.

$$C_{output}(t) = B\sin(\omega t+\alpha)$$
$$C_{input}(t) = A\sin(\omega t),\ \omega = 2\pi\ per\ 1\ year$$

여기서 A와 B는 각각 강수(+지하수)와 지하수 사인함수의 진폭, α는 강수의 함수와 지하수의 함수의 위상차를 의미한다.

위의 식들을 이용하여 exponential model과 dispersive model에서 산정되는 평균체류시간은 아래와 같다.

a) exponential model 사용시, $T = \omega^{-1}(f^{-2}-1)^{1/2}$

b) dispersive model 사용시, $T = \omega^{-1}(\frac{-\ln f}{D/vx})^{1/2}$

이 때, D/vx의 값이 크다면, 체류시간 산정에는 적당하지 않다는 것을 주의해야 한다.

강변여과수는 이성분혼합모형으로 가정할 때 하천수와 지하수의 혼합으로 볼수 있다. 취수되는 여과수(out)는 하천수(inp1)에서 유래되는 요소(out1)와 지하수(inp2)에서 유래되는 요소(out2)의 혼합체이며, 여과수내 추적자의 농도는 이 두 요소의 상대적인 혼합비에 의해 결정되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{out}(t) = pC_{out1}(t)+(1-p)C_{out2}(t)$$
p = 여과수에서 하천수가 차지하는 비율

여과수에서 하천수가 차지하는 비율은 별도의 조사를 통해 라돈, Si 등으로 구한 값을 사용하였다.

조사 지역은 하천변의 배출지역이므로 지하수의 연령은 5년이상으로 안정동위원소는 일정한 값을 가진다고 볼수 있다. 따라서 하천수와 지하수의 혼합체에서 하천수가 취수정까지 도달하는 데 소요되는 평균체류시간을 구하기 위해서는 여과수에 대한 지하수의 기여분에 대해 보정하여 하천수만의 기여분, 즉 out1에서의 추적자 농도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{out1}(t) = \frac{C_{out}(t)-(1-p)C_{out2}}{p}$$

따라서, 위 식을 이용하여 하천수 기여분(out1)내 추적자 농도 진폭을 여과수(out)내 추적자 농도 진폭으로부터 구할 수 있다.

다. 분석결과

(1) 강변여과수내 혼합비

조사된 물시료의 Si 농도와 라돈 농도는 다음과 같다.

표 35. 지하수, 하천수, 여과수에서 측정된 Si와 라돈 농도

시료	채취일	라돈 (Bq/L)	오차 (Bq/L)	Si (mg/L)	채취일	라돈 (Bq/L)	오차 (Bq/L)	Si (mg/L)
AN	2017-06-22	0.4	0.0	1.3	2017-10-19	1.5	0.0	2.6
OW0	2017-06-22	14.0	0.3	4.7	2017-10-19	12.7	0.3	4.7
#1	2017-06-22	19.8	0.4	7.3	2017-10-19	22.9	0.5	9.5
#3	2017-06-22	27.7	0.6	8.7	2017-10-19	28.8	0.6	8.6
#4	2017-06-22	16.3	0.3	4.3	2017-10-19	11.7	0.2	3.5
#5	2017-06-22	21.8	0.5	5.8	2017-10-19	17.2	0.4	4.3
#6	2017-06-22	11.7	0.2	3.5	2017-10-19	8.9	0.2	3.3
#7	2017-06-22	16.6	0.3	4.3	2017-10-19	16.8	0.4	5.4
#8	2017-06-22	19.8	0.4	4.7	2017-10-19	13.1	0.3	4.5
OB3	2017-06-22	56.0	1.2	22.3	2017-10-19	48.0	1.0	21.8
OB4	2017-06-22	47.8	1.0	20.1	2017-10-19	35.6	0.7	19.2
OB5	2017-06-22	43.1	0.9	18.9	2017-10-19	53.4	1.1	18.9
OB6	2017-06-22	70.9	1.5	22.0	2017-10-19	77.4	1.6	21.7
OB7	2017-06-22	77.6	1.6	17.4	2017-10-19	50.2	1.1	15.9

강변여과수에 기여하는 두 end member로 산정한 하천수와 충적지하수의 각 인자들의 측정 농도의 평균과 표준편차는 다음과 같다.

표 36. 강변여과수의 두 end member의 주요 인자 측정 농도

적용	하천			충적 지하수		
추적자	시료수	평균	표준편차	시료수	평균	표준편차
Radon (Bq/L)	4	0.83	0.45	15	58.6	14.9
Si (mg/L)	12	2.3	1.4	18	19.5	1.8

하천수의 end member 조성은 동일지점에서 채취된 하천수 시료에서 측정된 농도의 평균으로 하였으며, 충적 지하수 end member 조성은 측정된 5개 관정 자료 모두의 평균으로 추정하였다. 위와 같이 선정한 하천수와 충적 지하수의 두 end member의 각 인자에 근거하여 집수정의 각 수평정에 대해 혼합비율을 산정한 결과와 요약표는 다음과 같다.

표 37. 집수정 강변여과수에 대한 추적자별 하천수 기여비율 산정 결과

수평정 번호	적용 추적자	추적자별 하천수 기여비율				오차범위내 일치여부
		비율	오차	하한	상한	
OWO	Radon	0.79	0.04	0.76	0.83	Yes
	Si	0.86	0.01	0.85	0.87	
#1	Radon	0.68	0.06	0.62	0.74	Yes
	Si	0.71	0.09	0.62	0.80	
#3	Radon	0.55	0.03	0.51	0.58	No
	Si	0.73	0.06	0.67	0.80	
#4	Radon	0.77	0.06	0.72	0.83	No
	Si	0.91	0.03	0.88	0.94	
#5	Radon	0.68	0.06	0.62	0.73	No
	Si	0.84	0.06	0.78	0.91	
#6	Radon	0.84	0.03	0.81	0.87	Yes
	Si	0.91	0.04	0.87	0.95	
#7	Radon	0.72	0.00	0.72	0.73	No
	Si	0.85	0.05	0.81	0.90	
#8	Radon	0.73	0.08	0.65	0.81	No
	Si	0.87	0.01	0.86	0.88	

표 38. 집수정 강변여과수에 대한 하천수 기여 평균비율(2개추적자) 산정 결과

수평정번호	하천수 기여 평균비율			
	비율	오차	하한	상한
OWO	0.83	0.02	0.81	0.84
#1	0.69	0.05	0.64	0.75
#3	0.64	0.04	0.61	0.68
#4	0.84	0.03	0.81	0.87
#5	0.76	0.04	0.72	0.80
#6	0.88	0.03	0.85	0.90
#7	0.79	0.02	0.77	0.81
#8	0.80	0.04	0.76	0.84

Radon과 Si에 의해 추정된 혼합비율은 0.1이내의 오차범위로 비교적 신뢰성있게 산정되었으며, OWO, #1, #6은 두 추적자에 의한 혼합비율이 오차범위내에서 일치하였다. 이러한 결과는 radon과 Si가 거의 완전히 독립적인 거동을 보이는 인자이며, 이성분 모형의 한계, end member의 불확실성 등을 고려할 때 의미있는 결과로 판단된다.

그러나, 나머지 5개 수평집수관에서는 두 추적자에 근거한 혼합비율이 오차범위내에서 일치하지 않았다. 이것은 end member로 추정한 지하수내의 라돈과 Si 농도가 공간적으로 일치하지 않았기 때문으로 추정된다. 즉, 라돈과 Si 조성 면에서 지하수는 동일한 end member 라기 보다는 최소 2개 이상의 서로 다른 지하수로 볼 필요가 있음을 시사한다. 이번 연구에서는 이러한 한계를 인정한다는 조건하에 두 추적자에서 얻어진 결과를 평균하여 최종적인 혼합비로 결정하였다.

Radon과 Si에 근거해 산정한 집수정에서 채수된 강변여과수에 대한 하천수의 기여비율은 0.88 ~ 0.64의 범위를 보이며, 전체여과수인 OW0는 0.83으로 산정되었다. 이로부터 조사지역의 하천변 집수정은 대부분의 물의 공급이 하천으로부터 이뤄지고 있음을 알 수 있다. 그러나 배후 지하수의 유입도 무시할 수준은 아닌 것으로 나타나 집수정 운영시 주변지역 지하수계에 대한 영향에 고려도 필요한 것으로 판단된다. 지점별로 하천수 기여비율은 #6 > #4 > OW0 > #8 > #7 > #5 > #1 > #3의 순이다. 이것은 한 집수정에서 각 수평정의 연장방향에 따라 하천수의 기여비율이 상이하며, 최대 23%까지 차이가 날수 있음을 보여준다. 수평집수정간의 이러한 차이는 하천변 퇴적층의 수리지질학적 특성과 하천과의 거리, 하천에 대한 집수정의 각도 등의 차이에 의해 발생한 것으로 추정된다. #6의 하천 기여율이 가장 높은 것은 이 집수정의 위치가 하천 중심부에 가장 가까운 하상 바닥 아래에 위치하여 하천수가 집수정으로 쉽게 유입될 수 있기 때문으로 보인다. 반면, #1과 #3은 가장 낮은 하천 기여비율, 즉 지하수의 기여비율이 가장 높다. #1은 하천과 수직으로 내륙방향으로 설치되어 있고, #3은 하천과 평행하게 위치해서 하천과의 거리는 #3이 #1보다 가까운 반면, 하천수 기여율은 #1이 더 크다. 이와 같은 결과는 지하수의 유동 방향과 하천변 충적층내 투수성의 불균질성에 의해 하천수의 집수정으로의 유입이 좌우되기 때문으로 추정된다.

(2) 강변여과수내 평균 체류시간

(가) 안정동위원소 시간적 변동 특성

하천수와 여과수에 대해 측정된 물 안정동위원소 결과는 다음과 같다.

표 39. 하천수와 여과수의 물 안정동위원소 조성

시료채취일	$\delta^{18}O$ (‰)					$\delta^{2}H$ (‰)				
	AN	OW-0	OW-1	OW-3	OW-6	AN	OW-0	OW-1	OW-3	OW-6
2016-09-06	-7.0	-6.8	-6.5	-6.5	-7.2	-50.1	-48.5	-45.5	-46.4	-50.6
2016-09-23	-7.4	-6.7	-6.5	-7.0	-7.1	-54.4	-48.6	-45.4	-48.6	-49.9
2016-10-12	-8.0	-7.7	-6.5	-7.0	-8.0	-57.3	-54.6	-46.6	-49.6	-57.3
2016-10-25	-7.3	-7.2	-6.5	-7.1	-7.2	-49.9	-50.5	-46.2	-50.7	-50.8
2016-11-08	-7.2	-7.1	-6.4	-6.9	-7.0	-50.3	-49.8	-45.2	-50.4	-51.1
2016-11-22	-7.0	-7.0	-6.3	-7.0	-7.2	-50.0	-48.9	-44.6	-49.1	-50.2
2016-12-06	-6.9	-6.2	-6.7	-7.0	-7.1	-49.7	-44.6	-49.3	-50.3	-50.1
2016-12-20	-6.9	-6.3	-6.7	-7.3	-7.0	-49.3	-45.0	-48.5	-50.0	-49.3
2017-01-23	-7.3	-7.2	-6.4	-7.0	-7.3	-51.2	-49.3	-45.0	-48.5	-50.9
2017-02-24	-6.3	-6.9	-6.5	-7.1	-6.7	-39.4	-45.9	-43.9	-48.2	-44.7
2017-03-30	-7.0	-7.0	-6.4	-6.9	-7.1	-49.2	-48.8	-45.6	-48.5	-49.8
2017-04-21	-6.1	-6.5	-6.4	-6.9	-6.3	-42.6	-45.9	-45.7	-47.6	-45.4
2017-05-29	-3.7	-5.4	-4.6	-6.1	-5.2	-33.6	-40.7	-37.5	-43.8	-40.4
2017-06-22	-4.2	-4.5	-4.6	-5.5	-4.5	-37.7	-37.8	-37.7	-41.7	-38.4
2017-10-19	-7.0	-6.9	-6.1	-7.0	-7.2	-50.0	-49.1	-43.6	-48.2	-50.1

하천수의 물 안정동위원소 조성은 시기적으로 10월중순에 가장 가볍고, 5월말에 가장 무거운데, 이는 5월에 수계가 증발의 영향을 가장 크게 받았기 때문으로 보인다. 여과수의 물 안정동위원소 조성은 대체로 하천수와 유사하나 하천수에 비해 변동폭이 작고 위상차를 보여주어 혼합에 의해 시기적 변동이 영향을 받았음을 잘 보여준다.

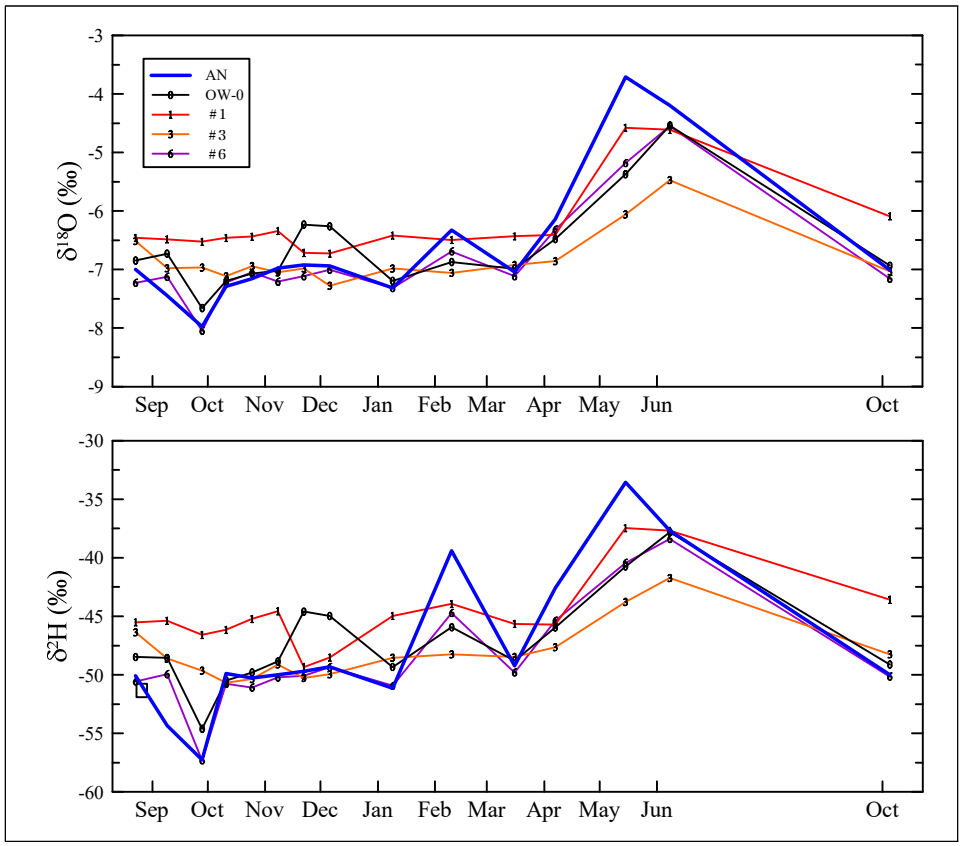


그림 57. 하천수와 여과수내 물 안정동위원소 조성의 시기적 변동

(나) 평균체류시간 산정

여과수내 하천수의 대수층내 체류시간을 산정하기 위해 물 안정동위원소 조성에 대해 하천수를 input으로 하고 여과수내 하천수 기여분을 output으로 하고 1년의 주기를 가진다는 가정하에 두 요소에서 물 안정동위원소 조성의 진폭 감소를 이용하였다. 진폭은 조사 결과가 sine 곡선을 이루는 경우에는 curve fitting을 통해 구할 수 있다. 이번 조사에서 하천수는 여름시기에는 sine 곡선에 근접하는 시기적 변동을 보이나 다른 시기는 sine 곡선에 비해서는 작은 변동을 보여주어 전체적으로 sine 곡선과는 다소 다른 변동을 보인다. 따라서 진폭은 curve fitting보다는 측정자료의 (최대 - 최소)/2로서 산정하였다. 또한 충분한 시기적 조사 자료의 부족으로 혼합모형은 평균체류시간의 단일 인자를 가지는 exponential model을 적용하였다. 이와 같은 가정하에 물 안정동위원소 조성의 시간적 변동을 exponential model로 해석하여 결정된 평균체류시간은 다음과 같다.

표 40. Exponential model에 의한 여과수내 하천수 기여분의 평균체류시간

구 분	OW-O			#1		
	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	평균	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	평균
여과수 진폭(‰)	1.6	8.4	-	1.1	5.9	-
하천수 비율	0.83	0.83	-	0.69	0.69	-
하천수 기여분 진폭(‰)	1.9	10.2	-	1.5	8.6	-
평균체류시간(년)	0.083	0.095	0.089	0.151	0.152	0.152
평균체류시간(일)	30	35	32	55	56	55

구 분	#3			#6		
	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	평균	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	평균
여과수 진폭(‰)	0.9	4.5	-	1.7	9.5	-
하천수 비율	0.64	0.64	-	0.88	0.88	-
하천수 기여분 진폭(‰)	1.4	7.0	-	2.0	10.8	-
평균체류시간(년)	0.181	0.219	0.200	0.060	0.072	0.066
평균체류시간(일)	66	80	73	22	26	24

여과수내 하천수 기여분의 대수층내 평균체류시간은 24일 ~ 73일의 범위를 보여주고 있는데 #6 < OW0 < #1 < #3의 순으로 길어지고 있고, 집수정 혼합수의 평균체류시간은 32일로 산정되었다. #6의 체류시간이 가장 짧은 것은 수평집수관이 하상 직하부에 위치하여 하천수가 이동하는 경로가 가장 짧기 때문으로 추정된다. 반면, #3의 체류시간은 가장 긴데, 이는 하천수가 긴 경로를 통해 유입되기 때문인 것으로 추정된다. #1과 #3의 체류시간을 비교하면 하천과의 단순거리는 #1이 #3보다 멀지만 체류시간은 #3이 더 길다. 이것은 위치상의 거리보다는 지하수와 하천수의 실제 유동방향과 경로가 체류시간에 미치는 영향이 더 컸기 때문으로 보인다.

집수정에 대해 산정된 평균체류시간은 하천수에 오염물질이 유입되었을 때 집수정에 평균적으로 1 ~ 2개월이 지난 후에 도달할 수 있음을 의미하며 그 기간 동안 오염물질은 혼합과 분산에 의해 여과수내 오염물질의 최대 농도는 하천수에 비해 크게 감소할 수 있다. 이러한 결과는 하천의 수질오염이 집수정의 여과수 수질에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 집수정 운영 계획을 수립할 때 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이번 연구 결과는 시계열 자료의 input과 output이 가정에 맞는 곡선에 부합하지 못했고, 자료의 부족으로 단일 인자 모형을 사용하여 실제 현장의 하천변 지하수 유동 체계를 반영하지 못했다는 점에서 예비적인 결과로 활용해야 함을 밝혀둔다. 향후 이러한 제한점을 극복하기 위해서는 1년 이상의 최소 2주 간격의 추가 조사를 통해 시계열 자료의 주기성을 확인하고 자료가 적절하다면 이중 인자 모형을 사용하여 현장 조건을 반영할 수 있는 평균체류시간과 혼합 또는 분산 특성에 대한 인자를 추정할 필요가 있다.

라. 고찰 및 결론

강변여과수를 하천수와 지하수의 이성분 혼합체라고 가정하고 조사지역에 대한 기존 연구에서 적용성이 높은 것으로 판단된 라돈과 Si를 이용하여 집수정의 합류 여과수와 7개의 수평집수관에서 채수한 여과수에 대해 혼합비를 산정하였다. 혼합비 산정 결과 수평집수관 여과수내 하천수 기여율은 0.88 ~ 0.64의 범위이며, 모든 수평집수관의 합류 여과수인 OWO는 0.83으로 산정되었다. 이러한 결과는 조사지역의 하천변 집수정의 여과수는 상당부분 하천으로부터 공급되고 있음을 보여주나 배후 지하수의 유입도 무시할 수준은 아닌 것으로 나타나 집수정 운영시 주변지역 지하수계에 대한 영향에 고려도 필요한 것으로 판단된다. 수평집수관의 하천수 기여비율은 #6 > #4 > OWO > #8 > #7 > #5 > #1 > #3의 순으로 하천과의 거리, 수평집수관의 방향, 집수관으로의 물의 유동경로 등에 따라 차이를 보이는 것으로 추정된다. 이번 연구에서 두 추적자에 의한 하천 기여율 산정결과는 합류 여과수와 2개의 수평집수관 여과수에 대해서는 오차범위내에서 일치하나, 5개의 수평집수관 여과수에서는 일치하지 않아 여과수가 하천수와 지하수의 이성분 혼합체라는 가정이 적절하지 않을 수 있음을 보여주었다. 이것은 지하수가 최소한 2개 이상의 서로 구분될 수 있는 요소로 구성되어 있음을 보여주는 것으로 향후 지하수에 대한 추가조사를 통해 지하수를 세분화하여 여과수의 혼합특성을 파악할 필요가 있다.

여과수 중 하천수 기여 부분이 하천에서 집수시설에 도달하는 과정에서 지중의 평균체류시간은 1년 동안 조사된 물 안정동위원소의 시기적인 변동을 sine 곡선을 가지는 input과 exponential model을 적용하여 산정하였다. 하천수 기여 부분의 평균체류시간은 24일 ~ 73일의 범위를 보여주고 집수정 혼합여과수인 OWO의 평균체류시간은 32일로 산정되었다. 수평집수관의 평균체류시간은 #6 < OWO < #1 < #3의 순으로 길어지고 있는데 하천수 기여비율과 유사하게 하천과의 거리, 수평집수관의 방향, 집수관으로의 물의 유동경로 등이 주요한 영향인자로 추정되었다.

이번 연구에서 제시된 여과수의 하천수와 지하수의 혼합비는 강변여과수에 기여하는 하천수와 지하수의 화학성분과 동위원소 조성의 시간적, 공간적 변동성에 대한 조사가 충실히 이루어지지 못한 상황에서 도출되었으므로 반드시 예비적 결과로 활용하여야 함을 밝혀둔다. 강변여과수의 신뢰성 있는 혼합비 평가를 위해서는 주요 환경추적자에 대해 조사지역에서 하천수와 지하수에 대한 시간적, 공간적 농도 자료를 조사하여 특성을 평가하는 것이 필요하다. 시간적 범위는 1년을 기준으로 하천수에 대해서는 최소 매월 조사가 필요하며, 지하수는 최소 반기별 (풍수기, 갈수기 등 고려) 조사가 필요하고, 공간적 범위에서 지하수는 지역별, 대수층 또는 심도별로 대표성이 있는 지점에 대한 조사가 필요하다. 또한 여과수내 하천수의 대수층내 평균체류시간은 물 안정동위원소 시계열자료에서 후반기의 약 3개월간 자료가 미비하였고, 자료간의 시기적 간격이 넓어 exponential model보다 우수한 이중인자 모형을 적용하지 못한 제한점이 있어 예비 자료로 활용해야 한다. 추후 신뢰

성 있는 평균체류시간 산정을 위해서는 추가적으로 최소 1년간 2주이내의 시간간격으로 조사가 진행되어야 하며, 자료 해석에서도 평균체류시간 외에 추가적인 수리학적 인자를 가지는 이중 인자 모형을 적용하는 등 조사 지역의 수리적 특성을 반영하는 모형으로부터 평균체류시간을 산정할 것을 권장한다.

3. 취수방식에 따른 수질개선 효과 평가

우리나라는 과거 2~3 년 주기로 나타나던 가뭄이 최근 10 년 동안 거의매년 나타나고 있다. 이로 인한 수질악화로 양질의 수자원 확보에 어려움을 겪고 있다. 특히 2014~2015 년까지 지속된 가뭄으로 인하여 심각한 물 부족 사태가 발생할 위험에 노출되기도 하였다. 지표수를 직접 취수하는 취수 방식은 이러한 문제에 취약하며, 특히 가뭄으로 취수 원수의 수질이 급격하게 변하는 사례가 발생 되었다. 2016 년 여름 보령 댐의 용수고갈 방지를 위해 금강 백제보 하류 물을 직접 보령 댐에 공급하는 도수로를 설치하여 용수를 공급하였지만 수질이 좋지 않아 문제가 되었다. 취수원 이전으로 이로 인해 많은 전문가들이 대체 수자원 확보에 대한 필요성을 제기해왔다. 정수처리 원수로 양질의 수자원 확보가 어려워짐에 따라 간접취수 방안을 이용하여 충적층의 투수성 및 정화능력을 이용하면 양질의 수자원을 확보가 가능하다. 특히, 간접취수에서 다양한 흡착 및 생물학적 분해기작을 이용하여 미량오염물질에 대한 저감 효과 등 정수처리 공정에서 유기물 부하를 줄이고 비용효율을 높일 수 있다. 특히 간접취수방식의 대표적인 강변여과의 경우 화학약품 (응집제) 처리 없이 오염물질을 제거 할 수 있는 친환경적인 취수 방법으로 알려져 있다. 기존 다수 연구결과에 따르면 강변여과수가 기존 지표수와 비교하여 상대적으로 수질이 매우 우수한 것으로 보고되었다.

본 연구에서는 안성시 안성천에 설치되어 있는 복류수, 강변여과수, 하천수의 원수 수질 분석 비교를 통하여, 취수방식에 따른 수질 차이를 비교평가 하고자 하였다.

가. 실험방법

(1)시료채취 및 방법

안성천과 인근 강변여과 시설에서의 강변여과수와 기존 안성천에서 취수하고 있는 유천 정수장에서의 복류수, 하천수 총 3개의 시료를 채취하여 분석하였다. 강변여과 시설의 경우 연평균 5,000㎥/day을 취수하고 있으며, 하천으로부터 23m 떨어진 곳에 취수정을 설치하여 운영하고 있다. 모든 시료는 당일 채취하여 당일 분석기관에 시료접수를 완료하였으며, 시료채취 후 육안으로 시료의 색도를 관찰하였다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 지하수, 강변여과수, 복류수, 하천수 순으로 색도가 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 지하수의 경우는 유량문제로 대체 원수로 활용하기에 어려움이 있어 분석에는 제외하였다.



그림 58. 강변여과수 취수시설



그림 59. 취수방식에 따른 원수 수질비교

(2)분석항목

광역 및 지방상수도로 활용하는 원수가 하천수, 복류수, 강변여과수의 경우 매월 1회 이상 수소이온 농도(pH), 생물학적 산소요구량(BOD), 부유물질량(SS), 용존산소량(DO), 대장균군(총 대장균, 분원성 대장균군)에 대한 검사를 수행하도록 규정하고 있다.

상기 상수원관리규칙에서 규정하는 원수의 월 측정항목을 분석항목으로 설정하였으며, 추가적으로 염소요구량이 높은 암모니아성질소와 강변여과수의 문제시 되는 항목인 철, 망간 분석을 수행하였다.

나. 원수 생활환경기준 검토

강변여과수의 수질평가 및 복류수 대체 수원으로의 타당성을 입증하기 위해 2017년 1월부터 현재까지 매월 원수의 수질검사를 실시하였다.

2017년도 강변여과수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.08, 생물화학적산소요구량(BOD) 2.09, 부유물질량(SS) 6.93, 용존산소량(DO) 8.76, 총대장균군 11, 분원성대장균군 2로 하천의 생활환경기준 중 “약간 좋음(Ⅱ)”에 해당하며, 복류수 원수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.72, 생물화학적산소요구량(BOD) 7.71, 부유물질량(SS) 20.20, 용존산소량(DO) 10.41, 총대장균군 5,280, 분원성대장균군 2,467로 하천의 생활환경기준 중 “보통(Ⅲ)”을 초과한 수질등급에 해당된다. 하천수 원수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.77, 생물화학적산소요구량(BOD) 6.50, 부유물질량(SS) 71.29, 용존산소량(DO) 7.63, 총대장균군 3,910, 분원성대장균군 1,177로 하천의 생활환경기준 중 “보통(Ⅲ)”에 해당된다.

2018년도 강변여과수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.20, 생물화학적산소요구량(BOD) 3.05, 부유물질량(SS) 8.35, 용존산소량(DO) 7.86, 총대장균군 1,154, 분원성대장균군 49로 하천의 생활환경기준 중 “약간 좋음(Ⅱ)”에 해당하며, 복류수 원수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.75, 생물화학적산소요구량(BOD) 2.08, 부유물질량(SS) 18.04, 용존산소량(DO) 9.15, 총대장균군 4,173, 분원성대장균군 928로 하천의 생활환경기준 중 “보통(Ⅲ)”에 해당된다. 하천수 원수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.44, 생물화학적산소요구량(BOD) 7.47, 부유물질량(SS) 121.97, 용존산소량(DO) 8.16, 총대장균군 145,421, 분원성대장균군 616로 하천의 생활환경기준 중 “보통(Ⅲ)”에 해당된다.

2019년도 강변여과수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 6.87, 생물화학적산소요구량(BOD) 1.23, 부유물질량(SS) 8.44, 용존산소량(DO) 7.69, 총대장균군 1,875, 분원성대장균군 2로 하천의 생활환경기준 중 “약간 좋음(Ⅱ)”에 해당하며, 복류수 원수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.21, 생물화학적산소요구량(BOD) 1.86, 부유물질량(SS) 14.09, 용존산소량(DO) 7.64, 총대장균군 8,024, 분원성대장균군 377로 하천의 생활환경기준 중 “보통(Ⅲ)”에 해당된다. 하천수 원수의 평균 수질은 수소이온농도(pH) 7.52, 생물화학적산소요구량(BOD) 16.69, 부유물질량(SS) 331.60, 용존산소량(DO) 7.34, 총대장균군 5,609,139, 분원성대장균군 671로 하천의 생활환경기준 중 “보통(Ⅲ)”에 해당된다.

복류수의 경우 지자체가 제공하는 정보를 활용하여 분석기관 및 채취시기에 차이는 있으나 전체적으로 강변여과수의 수질이 우수한 것으로 나타난다. 강변여과수는 “약간 좋음(Ⅱ)”의 수질을 보이며, 복류수와 하천수는 “보통(Ⅲ)”수준 이하의 수질등급에 해당하여 정수처리 시 약품투입량 및 슬러지 발생량에 큰 차이가 나타날 것으로 판단된다.

표 41. 원수 수질현황(2017)

구분	단위	하천수			복류수			강변여과수		
		평균	최고	최저	평균	최고	최저	평균	최고	최저
수소이온농도(pH)	-	7.77	10.00	7.20	7.72	8.54	7.26	7.08	7.90	6.80
생물학적 산소요구량(BOD)	㎎/ℓ	6.50	13.10	0.80	7.71	18.80	1.70	2.09	4.20	0.80
부유물질(SS)	㎎/ℓ	71.29	475.00	2.00	20.20	57.00	3.70	6.93	49.60	1.00
용존산소(DO)	㎎/ℓ	7.63	10.60	0.00	10.41	12.31	7.98	8.76	11.20	5.80
총 대장균군	군수/100㎖	3,910	14,000	0	5,280	35,000	7	11	27	0
분원성 대장균	군수/100㎖	1,177	7,900	0	2,467	21,000	0	2	14	0
암모니아성 질소(NH_3-N)	㎎/ℓ	-	-	-	-	-	-	0.16	0.19	0.13

표 42. 원수 수질현황(2018)

구분	단위	하천수			복류수			강변여과수		
		평균	최고	최저	평균	최고	최저	평균	최고	최저
수소이온농도(pH)	-	7.44	7.90	7.00	7.75	8.54	7.10	7.20	7.60	6.80
생물학적 산소요구량(BOD)	㎎/ℓ	7.47	17.10	0.70	2.08	4.90	0.60	3.05	8.10	0.80
부유물질(SS)	㎎/ℓ	121.97	495.00	1.60	18.04	68.00	1.40	8.35	26.00	0.40
용존산소(DO)	㎎/ℓ	8.16	10.00	5.30	9.15	11.70	6.30	7.86	9.10	5.50
총 대장균군	군수/100㎖	143,375	950,000	8	4,173	17,000	280	1,154	7,000	0
분원성 대장균	군수/100㎖	616	3,200	0	928	3,300	120	49	460	0
암모니아성 질소(NH_3-N)	㎎/ℓ	1.14	2.28	0.00	0.61	1.21	0.00	0.34	1.02	0.00

표 43. 원수 수질현황(2019)

구분	단위	하천수			복류수			강변여과수		
		평균	최고	최저	평균	최고	최저	평균	최고	최저
수소이온농도(pH)	-	7.52	10.10	6.90	7.21	7.90	6.90	6.87	7.10	6.60
생물학적 산소요구량(BOD)	㎎/ℓ	16.69	80.60	3.00	1.86	3.80	0.50	1.23	2.00	0.60
부유물질(SS)	㎎/ℓ	331.60	990.00	26.40	14.09	52.40	1.20	8.44	56.00	0.80
용존산소(DO)	㎎/ℓ	7.34	12.20	1.70	7.64	10.00	6.00	7.69	9.90	6.00
총 대장균군	군수/100㎖	5,609,139	56,000,000	990	8,024	24,000	920	1,875	7,800	2
분원성 대장균	군수/100㎖	671	2,500	48	377	1,600	0	2	13	0
암모니아성 질소(NH_3-N)	㎎/ℓ	1.89	6.59	0.00	0.91	2.75	0.00	0.49	0.82	0.00

표 44. 원수의 수소이온농도(pH) 측정결과(2017~2019)

구분 \ 월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'17	하천	7.50	7.20	7.40	7.60	10.00	7.50	7.60	7.80	8.20	7.80	7.30	7.30
	복류	7.26	7.45	7.47	7.91	7.60	-	7.70	8.54	7.88	7.62	7.58	7.88
	여과	6.80	6.90	7.00	6.90	7.00	7.00	7.90	7.60	6.90	7.10	6.80	7.10
'18	하천	7.60	7.50	7.00	7.50	7.90	-	7.30	7.30	7.90	7.3	7.2	7.3
	복류	7.29	7.58	7.62	7.69	7.75	8.20	7.80	8.50	8.50	7.2	7.8	7.1
	여과	6.80	6.80	7.60	7.40	7.50	-	7.20	7.20	7.60	7.1	7.0	7.0
'19	하천	7.3	7.1	6.9	6.9	7.3	7.9	7.4	7.0	7.3	10.1	-	-
	복류	7.2	7.1	7.0	-	7.3	7.9	7.1	7.2	6.9	7.2	-	-
	여과	6.8	6.8	6.9	6.8	7.1	6.8	6.9	6.9	6.6	7.1	-	-

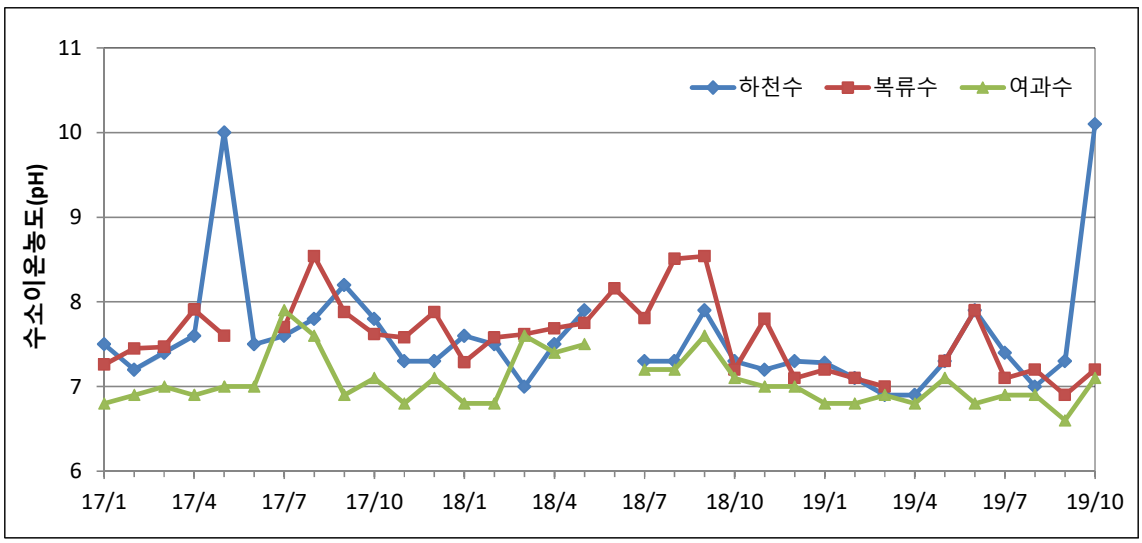


그림 60. 원수의 수소이온농도(pH) 측정결과(2017~2019)

표 45. 원수의 생물화학적산소요구량(BOD) 측정결과(2017~2019) (단위 : ㎎/ℓ)

구분 \ 월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'17	하천	9.50	11.50	8.50	13.10	6.90	8.50	11.20	0.80	4.90	1.50	0.80	0.80
	복류	4.00	11.30	5.50	16.90	18.80	-	6.00	6.40	6.40	5.20	2.60	1.70
	여과	0.90	4.20	3.10	2.40	2.10	3.20	2.20	0.80	1.70	0.80	1.80	1.90
'18	하천	1.80	2.00	0.70	13.70	6.60	-	3.30	12.20	4.90	10.6	17.1	9.3
	복류	2.60	1.80	1.30	0.90	1.60	1.50	0.60	3.50	1.80	4.9	1.4	3.1
	여과	0.90	0.80	2.90	4.20	8.10	-	2.50	4.10	2.30	4.4	1.0	2.3
'19	하천	18.5	15.8	8.1	9.4	10.9	7.5	5.6	80.6	3.0	7.5	-	-
	복류	1.1	1.5	3.8	-	3.6	2.0	0.8	2.7	0.5	0.7	-	-
	여과	0.9	1.2	1.1	1.9	1.1	2.0	0.6	1.6	1.1	0.8	-	-

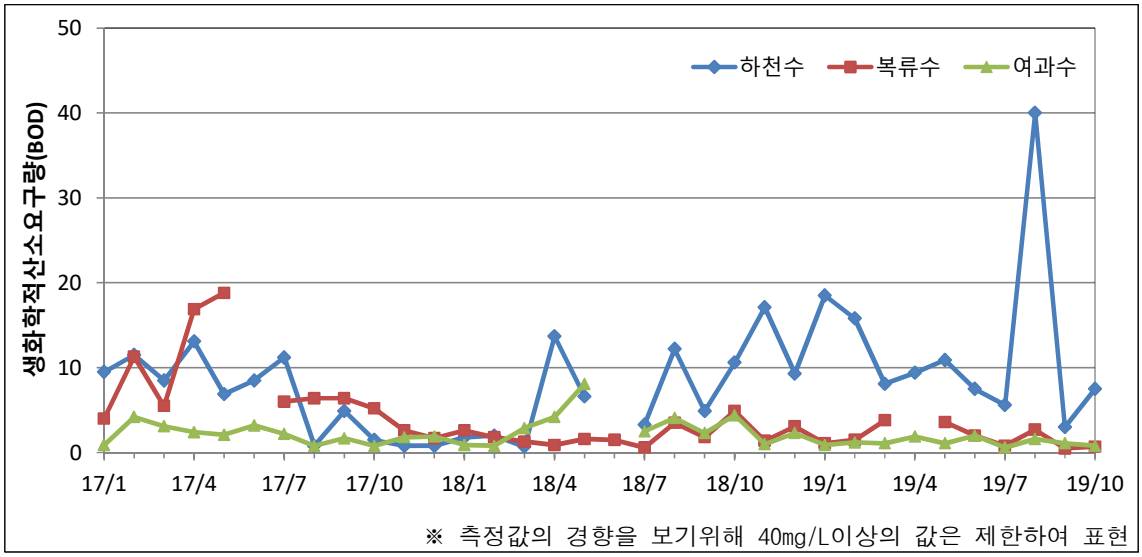


그림 61. 원수의 생물화학적산소요구량(BOD) 측정결과(2017~2019)

표 46. 원수의 부유물질량(SS) 측정결과(2017~2019) (단위 : mg/ℓ)

구분 \ 월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'17	하천	4.40	10.80	21.00	73.00	43.30	66.00	19.00	475.00	119.00	19.00	2.00	3.00
	복류	4.70	21.50	12.20	28.50	57.00	-	41.50	21.60	12.00	15.20	4.30	3.70
	여과	2.80	2.80	6.00	4.40	2.00	4.40	4.00	49.60	2.00	3.00	1.20	1.00
'18	하천	4.00	19.00	1.60	121.00	16.00	-	28.40	82.00	38.20	46.5	490.0	495.0
	복류	5.30	5.30	10.00	49.00	34.50	21.00	9.50	68.00	5.00	4.5	3.0	1.4
	여과	1.60	2.70	26.00	2.70	7.20	-	26.00	4.40	0.40	12.3	8.0	0.6
'19	하천	276.0	97.0	822.0	990.0	350.0	26.4	36.6	227.0	50.0	441.0	-	-
	복류	4.0	6.2	6.0	-	11.7	52.4	3.6	7.3	1.2	34.4	-	-
	여과	1.6	1.2	0.8	56.0	1.6	11.2	3.0	3.6	2.6	2.8	-	-

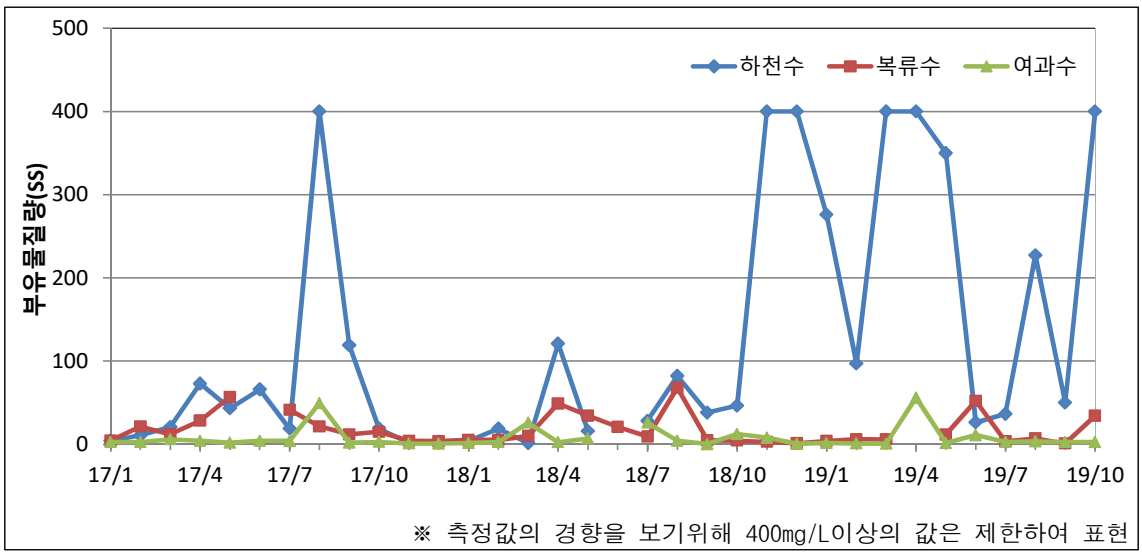


그림 62. 원수의 부유물질량(SS) 측정결과(2017~2019)

표 47. 원수의 용존산소량(DO) 측정결과(2017~2019) (단위 : mg/ℓ)

구분 \ 월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'17	하천	8.70	8.10	9.60	4.90	0.00	6.70	5.40	9.00	9.20	9.80	9.50	10.60
	복류	10.34	11.66	10.82	12.31	10.20	-	11.90	8.51	7.98	9.15	9.84	11.82
	여과	9.40	8.80	5.80	8.20	8.20	7.30	6.70	9.00	11.20	10.00	9.80	10.70
'18	하천	10.00	9.60	6.90	9.50	9.30	-	7.70	5.30	8.20	8.3	6.4	8.6
	복류	11.70	11.52	11.04	10.20	6.80	9.80	7.50	8.30	9.50	8.8	8.4	6.3
	여과	8.80	8.20	8.90	5.50	9.10	-	7.50	7.10	8.30	8.8	7.9	6.4
'19	하천	9.0	9.4	4.2	4.8	8.9	6.6	7.8	1.7	8.8	12.2	-	-
	복류	10.0	10.0	7.5	-	6.0	6.3	6.8	8.3	6.0	7.9	-	-
	여과	9.8	9.9	7.8	7.6	6.0	7.2	7.7	8.2	6.5	6.2	-	-

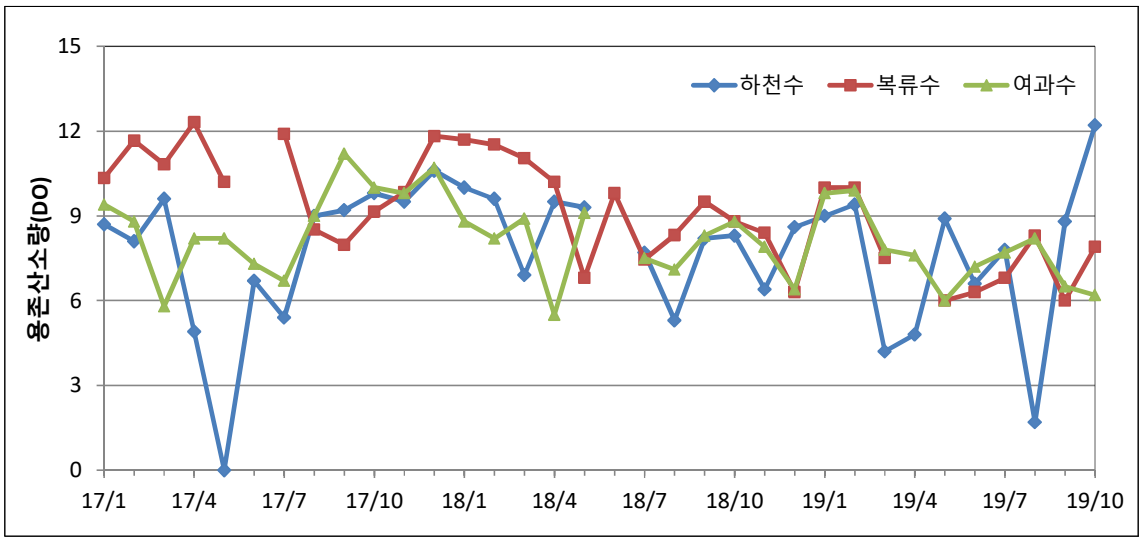


그림 63. 원수의 용존산소량(DO) 측정결과(2017~2019)

표 48. 원수의 총 대장균군 측정결과(2017~2019) (단위 : 군수/100㎖)

구분 \ 월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'17	하천	검출	9,400	260	0	8	2,400	240	11,000	14,000	2,400	1,700	1,600
	복류	5,200	540	7	180	1,100	-	35,000	9,400	255	3,600	2,000	800
	여과	검출	27	0	23	17	0	22	2	2	0	0	23
'18	하천	1,600	2,200	8	2,000	2,500	-	80,000	333,000	180,000	950,000	5,000	5,800
	복류	1,200	17,000	11,000	5,400	600	280	520	280	600	7,500	4,100	1,600
	여과	2	8	2,400	27	0	-	2,300	61	880	7,000	2	13
'19	하천	990	13,000	4,800	56,000,000	7,000	8,000	1,300	50,000	1,100	5,200	-	-
	복류	9,600	24,000	920	-	6,700	6,400	1,100	14,000	1,800	7,700	-	-
	여과	2	260	7,800	33	21	7,000	1,700	1,600	17	320	-	-

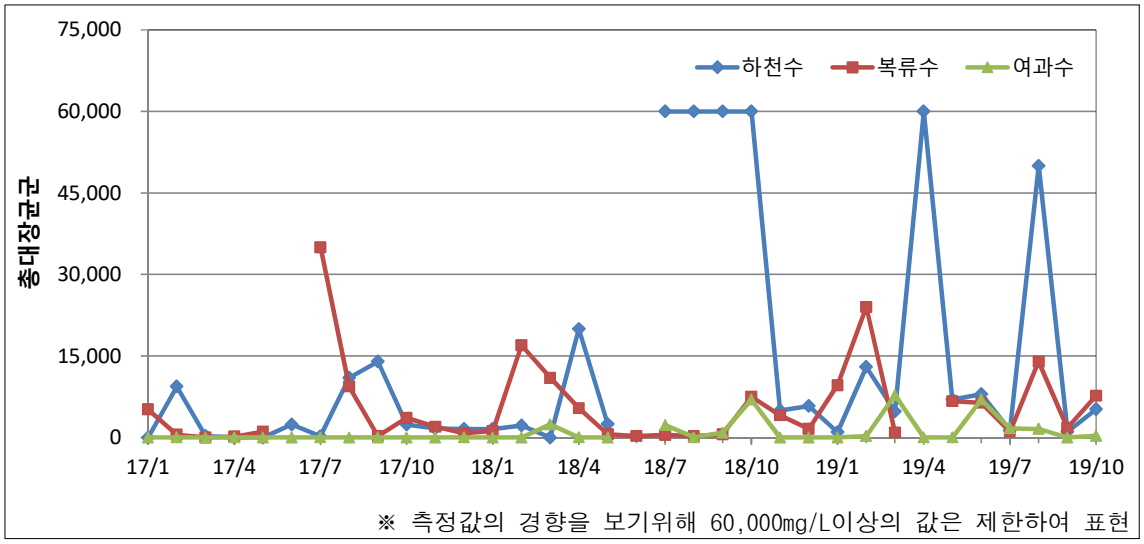


그림 64. 원수의 총 대장균군 측정결과(2017~2019)

표 49. 원수의 분원성대장균군 측정결과(2017~2019) (단위 : 군수/100㎖)

구분 \ 월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'17	하천	검출	79	2	47	0	0	240	7,900	3,100	1,300	41	240
	복류	170	19	0	15	470	-	21,000	2,400	0	1,550	1,300	210
	여과	검출	4.5	0	14	0	0	0	2	0	0	0	2
'18	하천	350	170	2	58	540	-	3,200	0	330	1,000	340	790
	복류	570	1,300	3,300	850	400	240	260	180	120	2,000	310	1,600
	여과	0	0	22	0	0	-	460	0	6	53	0	0
'19	하천	860	240	48	2,500	50	240	82	2,200	220	270	-	-
	복류	1,600	670	0		69	38	26	91	230	670	-	-
	여과	0	0	0	0	0	13	2	0	0	0	-	-

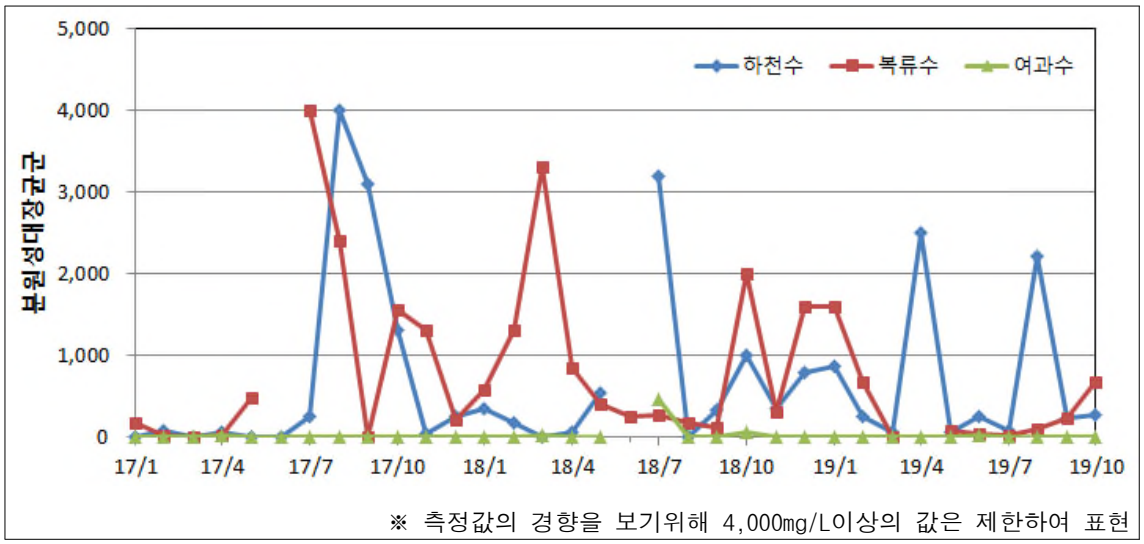


그림 65. 원수의 분원성대장균군 측정결과(2017~2019)

등급	상태 (캐릭터)	기준								
		수소 이온 농도 (pH)	생물 화학적 산소 요구량 (BOD) (mg/L)	화학적 산소 요구량 (COD) (mg/L)	총유기탄소량 (TOC) (mg/L)	부유 물질량 (SS) (mg/L)	용존 산소량 (DO) (mg/L)	총인 (T-P) (mg/L)	대장균군 (군수/100mL)	
									총 대장균군	분원성 대장균군
매우 좋음	Ia	6.5~8.5	1 이하	2 이하	2 이하	25 이하	7.5 이상	0.02 이하	50 이하	10 이하
좋음	Ib	6.5~8.5	2 이하	4 이하	3 이하	25 이하	5.0 이상	0.04 이하	500 이하	100 이하
약간 좋음	II	6.5~8.5	3 이하	5 이하	4 이하	25 이하	5.0 이상	0.1 이하	1,000 이하	200 이하
보통	III	6.5~8.5	5 이하	7 이하	5 이하	25 이하	5.0 이상	0.2 이하	5000 이하	1,000 이하
약간 나쁨	IV	6.0~8.5	8 이하	9 이하	6 이하	100 이하	2.0 이상	0.3 이하		
나쁨	V	6.0~8.5	10 이하	11 이하	8 이하	쓰레기 등이 떠있지 않을 것	2.0 이상	0.5 이하		
매우 나쁨	VI		10 초과	11 초과	8 초과		2.0 미만	0.5 초과		

※ 등급별 수질 및 수생태계 상태

- 매우 좋음 : 용존산소가 풍부하고 오염물질이 없는 청정상태의 생태계로 여과 · 살균 등 간단한 정수처리 후 생활용수로 사용할 수 있음
- 좋　　음 : 용존산소가 많은 편이고 오염물질이 거의 없는 청정상태에 근접한 생태계로 여과 · 침전 · 살균 등 일반적인 정수처리 후 생활용수로 사용할 수 있음
- 약간 좋음 : 약간의 오염물질은 있으나 용존산소가 많은 상태의 다소 좋은 생태계로 여과 · 침전 · 살균 등 일반적인 정수처리 후 생활용소 또는 수영용수로 사용할 수 있음
- 보　　통 : 보통의 오염물질로 인하여 용존산소가 소모되는 일반 생태계로 여과, 침전, 활성탄 투입, 살균 등 고도의 정수처리 후 생활용수로 이용하거나 일반적 정수처리 후 공업용수로 사용할 수 있음
- 약간 나쁨 : 상당량의 옹염물질로 인하여 용존산소가 소모되는 생태계로 농업용수로 사용하거나 여과, 침전, 활성탄 투입, 살균 등 고도의 정수처리 후 공업용수로 사용할 수 있음
- 나　　쁨 : 다량의 오염물질로 인하여 용존산소가 소모되는 생태계로 산책 등 국민의 일상생활에 불쾌감을 주지 않으며, 활성탄 투입, 역삽투압 공법 등 특수한 정수처리 후 공업용수로 사용될 수 있음
- 매우 나쁨 : 용존산소가 거의 없는 오염된 물로 물고기가 살기 어려움

그림 66. 하천의 생활환경기준

다. 염소요구량 검토

여과전에 염소를 주입하는 것을 전 염소처리라하며, 보통 침전 전의 원수에 주입한다. 일반적인 소독을 목적으로 염소를 주입하는 것을 후 염소처리라 한다.

전 염소처리는 원수가 오염되어 세균, 암모니아성질소와 각종의 유기물을 포함하고 있어 침전, 여과의 정수방법만으로는 제거되지 않을 경우나 철, 망간을 제거할 목적으로 쓰인다.

본 연구지역에 위치한 유천정수장의 경우 전 염소처리가 필수적인 단계로 수행중에 있으며 이 과정에서 다량의 염소를 투입하고 있다. 염소투입량 저감을 위해서는 원수의 수질이 중요하며, 원수의 수질중 염소요구량이 큰 암모니아의 수치에 대해 민감도가 가장 높다. 이를 비교하기 위해 항목별 수질측정값에 대한 염소요구량을 적용하여 수원에 따른 염소투입량을 비교하였다.

(1)암모니아성 질소

암모니아성 질소는 주로 비료나 분료의 유입에 의한 것으로 TOC의 농도도 높아진다. 암모니아성 질소는 pH를 11까지 올린 후 탈기에 의한 방법이 있으나 정수에서는 사용하기 어렵다. 유량이 적은 경우에는 이온교환법이 좋으나 연중 짧은 기간 동안에만 암모니아성 질소가 유입되기 때문에 적절하지 못하다. 생물학적으로 여과지에서 제거할 수 있으나 주로 겨울에 검출이 많이 되어 수온이 낮기 때문에 질산화가 일어나지 못 한다. 따라서 가장 좋은 방법은 염소에 의한 제거이다.

$$2NH_3 + 3Cl_2 \Leftrightarrow N_2 + 6HCl$$(Break Point 주입 암모니아 제거)

위 식으로부터 암모니아의 완전분해에 요하는 이론 염소량은 암모니아 1mg/L당 7.6mg/L 이다. 실제로 물에서는 오염이 격심하지 않은 한도에서 미량의 질산생성과 다른 염소소비물질의 관계도 있으므로 필요량은 8~10mg/L로 하는 것이 좋다.

연구지역에 위치한 유천정수장의 경우는 암모니아성 질소 1mg/L당 10mg/L의 염소를 투입하고 있다. 염소 과다 투입시 THE 등과 같은 염소소독부산물 생성이 증가할 수 있으며, 주입점 부근은 염소가스가 발생하므로 지속적인 점검이 필요하다. 또한 콘크리트나 배관은 염소로 부식되므로 충분히 부식방지처리를 하며 정기적으로 점검이 필요하다.

(2)철의 제거

수중에 용존하고 있는 철은 지하수에서 많이 볼 수 있으며 주로 중탄산철 $[Fe(HCO_3)_2]$의 형식으로 존재하고, 휴민질과 결합하여 콜로이드성 철로 되어 있을 때도 있다. 이와 같은 철을 제거하는 방식으로서는 폭기, 전염소처리, pH값 조절 등의 방법이 있다.

전염소 처리에 의하면 철은 쉽게 산화되므로 pH값을 특히 높힐 필요가 없고 이론상은 가용성의 제1철이온을 불용성의 제2철로 하기 위하여는 철 1mg/L에 대하여 염

소 0.64㎎/L이 필요한 것으로 되어 있으나 실제로는 수중의 환원성 물질과 유기물질에 의하여도 소비되므로 이론치 이상이 필요하므로 유리잔류염소가 검출되는 정도로 주입한다.

(3)망간의 제거

망간제거에는 산화제에 의한 방법, 접촉산화에 의한 방법, 이온교환법, 또는 박테리아를 이용하는 방법으로 크게 구분할 수 있다. 기존 정수장에 주로 산화제로 염소를 사용하고 있으며 가격이 저렴하다. 하지만 산화에 소요되는 시간이 길고 THM등의 부산물 생성으로 사용에 제한이 따르며 산화된 고형물은 응집침전에 의한 제거율이 낮아 여과지 사용시간이 줄어드는 등의 단점이 있다. 또한 정수 공정에서 계속 일정한 잔류염소를 유지하지 않을 경우 침전지에 퇴적된 슬러지에서 망간이 용출되는 문제가 발생될 수 있으며 THM 발생저감을 위해 염소를 응집-침전후에 투입하는 중염소처리를 고려하여야 한다.

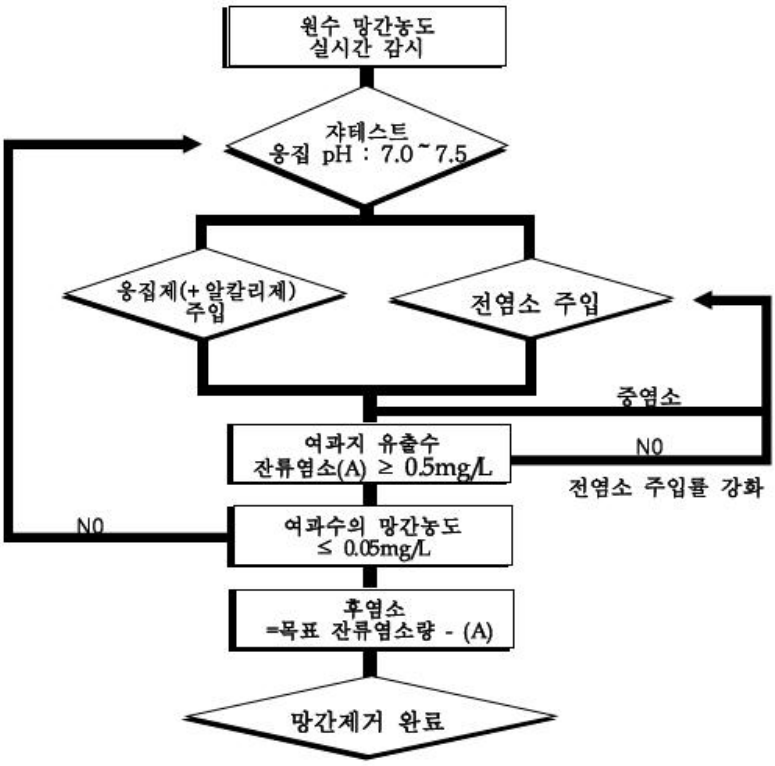


그림 67. 망간 처리 개념도

망간은 상기 프로세스에 맞춰 정수처리를 진행하며, 이때 투입되는 염소는 망간 1㎎/L에 대하여 염소 1.3㎎/L가 필요하다.

(4)수원별 염소요구량

염소요구량의 경우 철, 망간 보다 암모니아에 대한 요구량이 약10배 정도 높다. 강변여과수는 철, 망간에 대한 문제가 존재하지만 암모니아성 질소가 일시적으로 기준치를 초과하는 경우도 있으나 평균적으로 수질기준을 만족하고 있다.

표 50. 원수의 먹는 물 분석 결과 (단위 : ㎎/ℓ)

구분 / 년/월	철(Fe)			망간(Mn)			암모니아성질소(NH3-N)		
	하천	복류	여과	하천	복류	여과	하천	복류	여과
2017/11	-	-	0.13	-	-	0.14	-	-	0.501
2017/12	-	-	0.19	-	-	0.11	-	-	0.609
2018/03	-	-	1.02	-	-	0.17	-	-	0.284
2018/07	-	-	0.03	-	-	0.14	-	-	0.378
2018/09	-	-	0.91	-	-	0.21	-	-	0.838
2018/12	2.28	1.21	0.32	0.00	0.17	0.15	0.000	0.043	0.963
2019/01	3.00	2.20	0.19	0.00	0.00	0.09	0.000	0.006	0.565
2019/03	1.04	0.87	0.82	0.00	0.00	0.00	0.004	0.018	0.190
2019/04	6.59	-	0.63	0.18	-	0.00	0.443	-	0.529
2019/05	0.51	0.75	0.70	0.12	0.12	0.26	0.187	0.338	0.523
2019/07	0.38	0.4	0.54	0.00	0.00	0.00	0.005	0.004	0.285
2019/08	3.40	0.15	0.60	0.27	0.00	0.00	0.232	0.096	0.714
2019/09	0.19	0.12	0.43	0.00	0.00	0.06	0.006	0.029	0.504

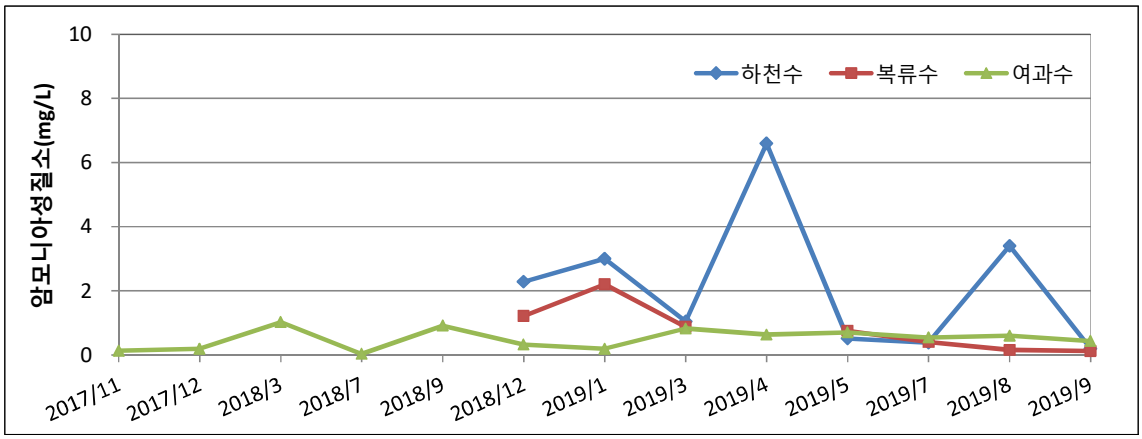


그림 68. 원수의 암모니아성질소 측정결과(2017~2019)

복류수를 원수로 활용 할 경우 1㎎/ℓ를 정수처리하기 위해 3.1㎎/ℓ의 염소 투입이 요구되지만 강변여과수를 활용 할 경우 1㎎/ℓ를 처리하기 위해 0.3㎎/ℓ의 염소만 투입하여도 된다. 따라서 원수를 강변여과수로 대체 할 경우 정수비 절감 등 부가이익이 창출될 것으로 판단된다.

표 51. 염소요구량 검토 (단위 : ㎎/ℓ)

구분	수질기준	염소요구량	복류수			강변여과수		
			평균값	초과치	요구량	평균값	초과치	요구량
철	0.3	0.64	0.04	-	-	0.10	-	-
망간	0.3	1.3	0.08	-	-	0.53	0.23	0.3
암모니아성질소	0.5	7.6~10.0	0.81	0.31	3.1	0.50	-	-

4. 집수정 취수에 따른 지하수 온도 분포

가. 지하수 수온 관측 현황

배후지 지하수 관측정 및 집수정내에 심도별로 온도 센서를 설치하여 취수시의 온도 변화를 파악하였으며, 이를 활용하여 취수시 배후지 수위 강하에 대한 진단을 온도 데이터를 활용할 수 있는 방안을 검토하였다.

❑ 심도별 온도 센서 설치 현황

- 집수정 3심도, OW1 5심도, OW7 3심도, OW8 5심도,OW11 3심도, OW13 4심도, OW15 3심도, OB11 3심도

나. 집수정 취수와 지하수 온도 시계열 분포

하천과 지하수의 상호작용에 의하여 거리 및 심도에 따른 시차를 갖고 지하수 온도가 반응하는 것으로 나타난다.

지표 부근의 온도는 대기 온도와 밀접한 관련을 갖고 있으며, 심부의 온도는 지표 부근의 온도에 비하여 지연된 온도 변화 특성을 갖고 있다.

지하수의 온도 변화는 대기의 온도 변화 폭에 비하여 상대적으로 작은 특성을 갖고 있으며 양수에 따른 지하수 온도 변화가 부분적으로 발생하고 있다. 수평정의 취수에 따른 인접 관측공에서의 온도 변화가 보다 민감하게 나타나고 있다.

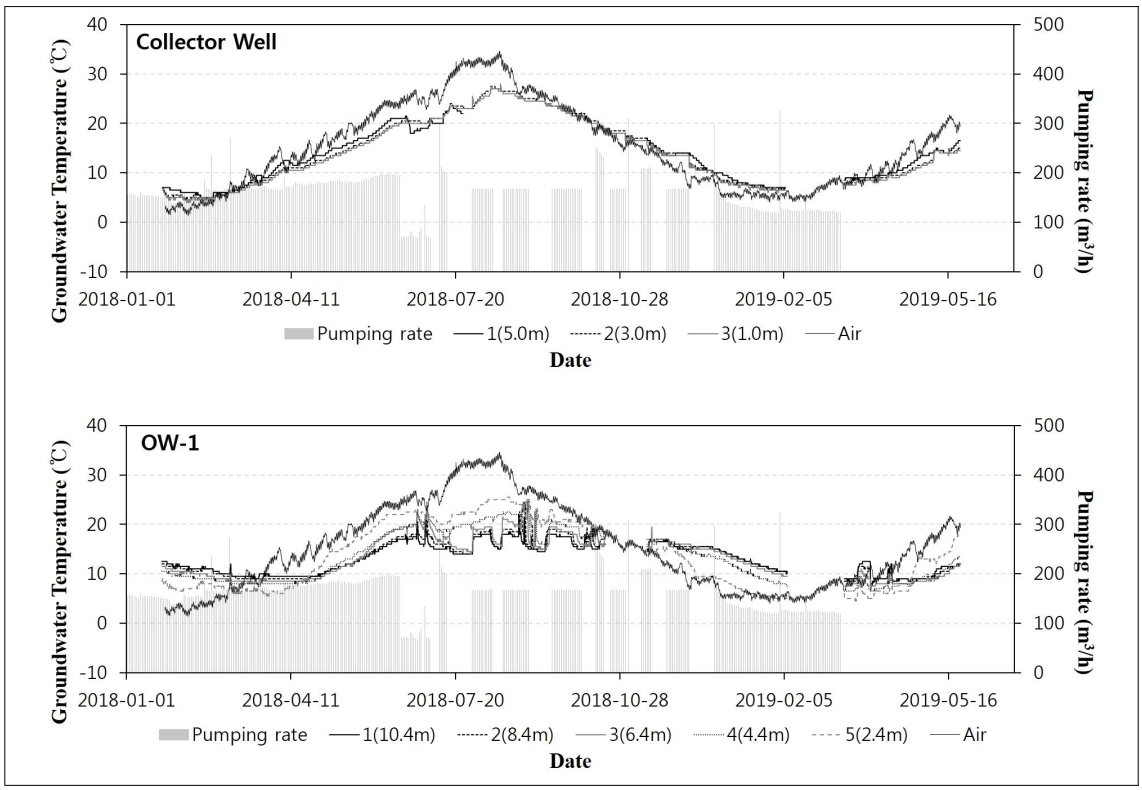


그림 69. 방사형집수정 취수시 관측공의 심도별 지하수온 변화

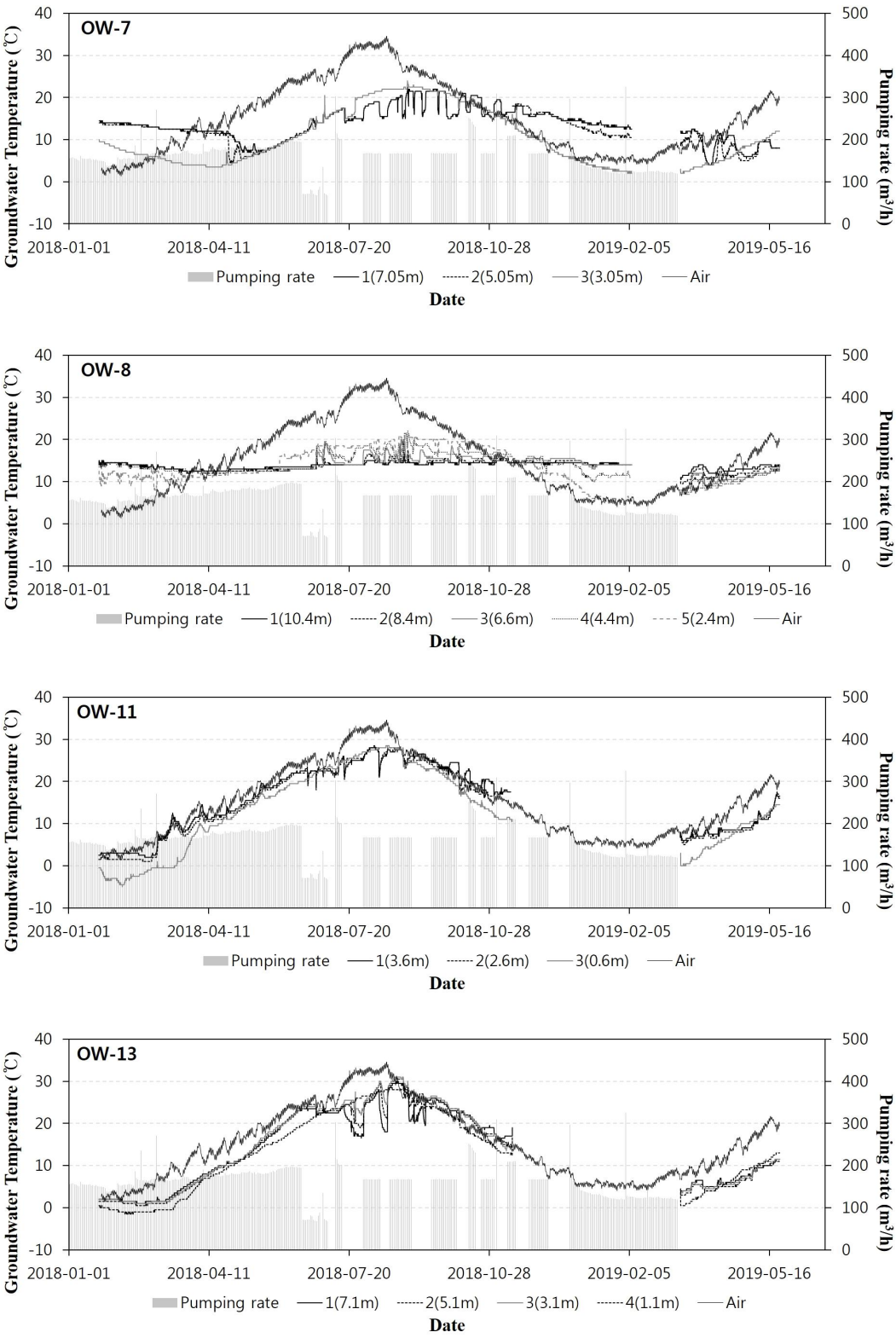


그림 69. 방사형집수정 취수시 관측공의 심도별 지하수온 변화(계속)

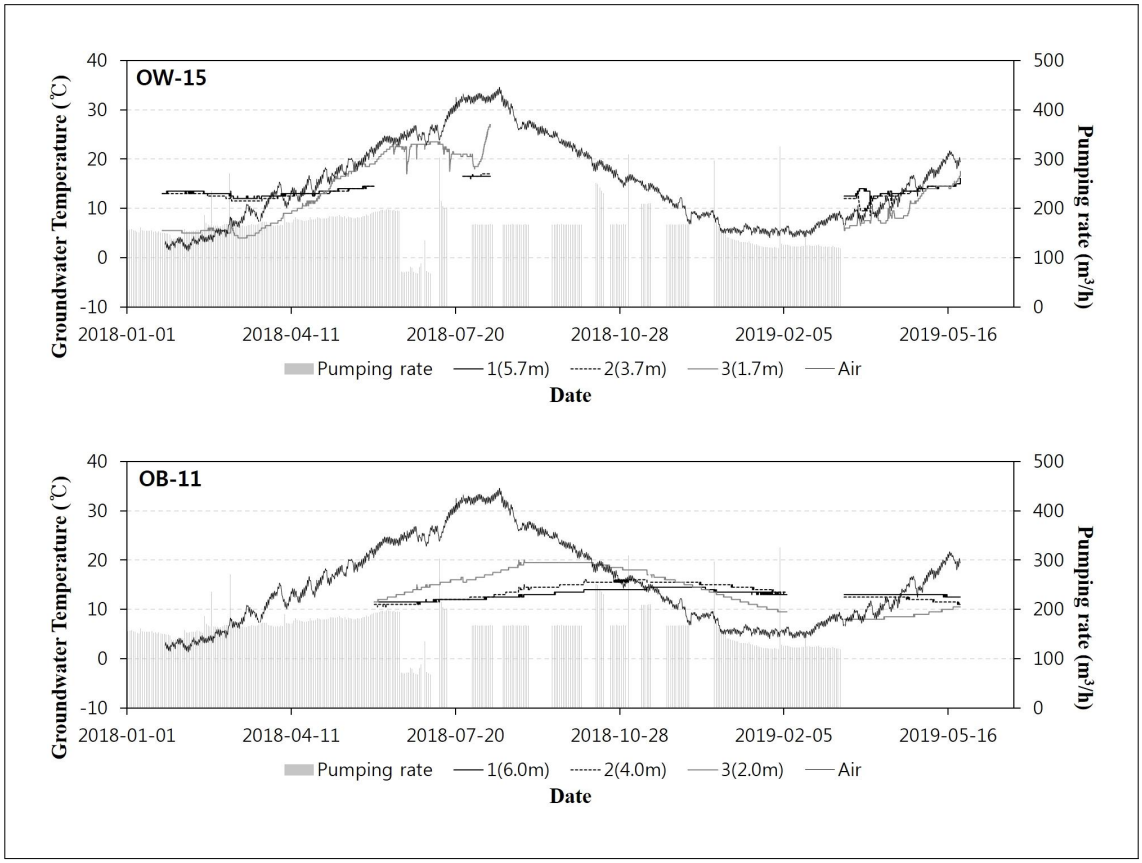


그림 69. 방사형집수정 취수시 관측공의 심도별 지하수온 변화(계속)

상기는 취수 조건을 달리할 경우 각 관측정에 측정된 심도별 지하수 온도의 변화를 도시한 것으로 지하수의 온도는 전반적으로 대기 온도의 상승에 따라 완만한 상승을 보이고 있다.

집수정내의 깊은 심도의 지하수 온도는 취수가 중단되면서 낮아지는 경향을 보이는데 이는 취수 중단으로 주변 지하수가 유입된 현상이다.

OW1의 경우 취수를 중단하게 되면 6 m 하부의 깊은 지하수는 온도가 하강하고, 상부는 상승하는 경향을 보이는데 이는 상승은 대기 온도의 영향 범위에 해당한다.

하천에 인접한 OW-8은 깊은 구간은 일정한 지하수의 온도를 보이는 반면에, 상부는 대기 및 지표수의 영향으로 변화하는 특성을 나타낸다.

OW15는 취수량 감소하는 직후 지하수 온도가 감소하는 경향을 나타낸다.

전반적으로 근거리에 위치한 관측정은 7월 15일 취수 중단 이후 지하수 온도가 급격히 변화하는 양상을 보인다.

취수정에서 다소 원거리에 위치한 OW-7 및 OB-8은 취수에 의한 지하수 수온 변화는 미미하며 대기온도 상승에 의한 완만한 지속 상승 특성을 보인다.

이상과 같이 지하수의 온도는 집수정 취수시 지하수, 지표수의 혼합 및 유입 정도에 따라 변화하게 되는데, 집수정으로부터의 거리, 방향(대수층의 수리성을 반영)에 따라 차이를 보이게 된다.

5. 집수정 취수시에 따른 지하수질 변화

가. 연구방법

집수정 취수시에 따른 지하수질 변화 (2018.11.14. ~ 16)를 분석하였다. 집수정 운영 가동 취수량은 4,000 ㎥/d로 2018.11.14. 14:00 ~ 11.16 00:00동안 지속적으로 양수하였다. 시료 채취는 집수정(CW), 하천(AN), 지하수 관측공 6개소에서 실시하였으며 시료채취는 횟수는 취수 개시 이후 47시간 동안 총 9번 채취하였다.(취수전, 취수 직후, 3시간, 6시간, 9시간, 18시간, 21시간, 24시간, 45시간)

현장 간이수질 측정은 휴대용수질측정기 HQ-40D(Hach)를 활용하여 온도, pH(수소이온농도), EC(전기전도도), ORP(산화환원전위), DO(용존산소) 측정하였으며, 양이온 4개 항목 Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, 음이온 4개 항목 Cl^{-},SO_4^{2-},NO_3^{-},HCO_3^{-} 분석은기관에 의뢰하여 수행하였다. 철/망간은 DR-1900(Hach) 분광광도계를 이용하여 현장 분석을 수행하였다.

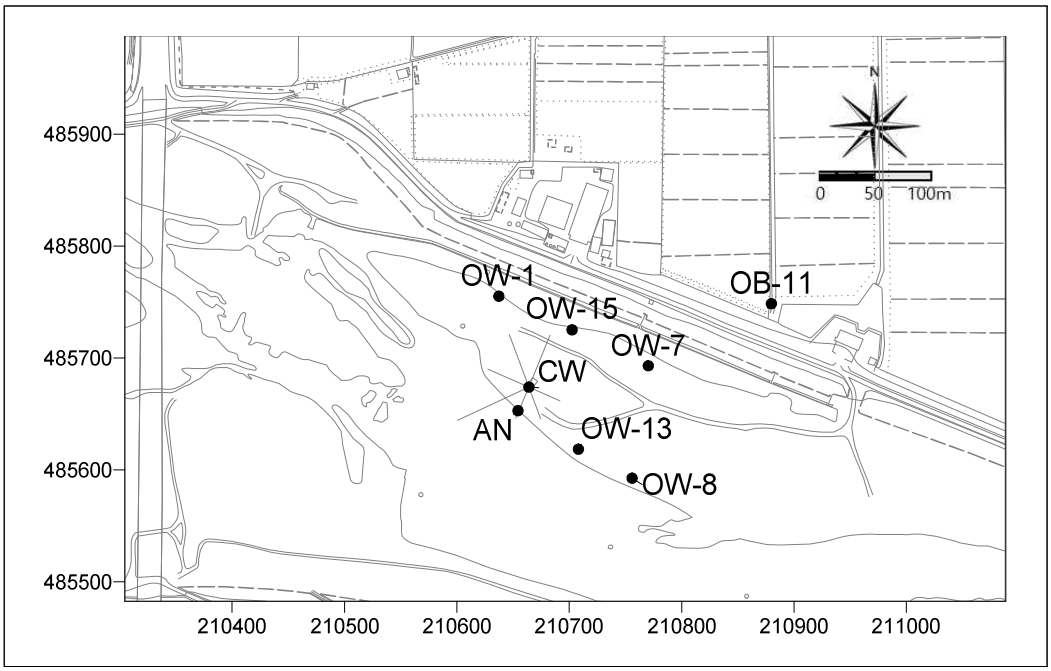


그림 70. 안성천 연구지역 관측공 위치도

나. 수질 특성 변화

(1) 수질 분석 결과

표 52. 현장 수질 분석 결과

구분	채취일자	온도 (℃)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	Fe^{2+} (mg/L)	Fe^{T} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)
OW-8-1	2018.11.14. 09:12	14.4	6.97	-287.1	527	2.22	-73.7	3.95	6.80	0.912
OW-8-2	2018.11.14. 14:08	16.4	7.04	-311.4	505	2.10	-99.4	6.90	9.30	1.228
OW-8-3	2018.11.14. 17:01	14.5	7.00	-322.4	505	2.05	-109.0	3.90	8.65	0.908
OW-8-4	2018.11.14. 20:06	13.2	7.05	-322.2	521	1.94	-107.9	2.80	7.00	1.064
OW-8-5	2018.11.15. 00:33	12.4	6.96	-329.7	511	2.56	-114.9	2.55	10.00	1.080
OW-8-6	2018.11.15. 08:04	13.6	7.01	-327.9	497	1.70	-113.9	-	-	-
OW-8-7	2018.11.15. 13:08	16.5	6.89	-339.0	496	1.84	-127.0	-	-	-
OW-8-8	2018.11.15. 16:15	15.0	6.97	-335.9	501	2.29	-122.9	-	-	-
OW-8-9	2018.11.16. 11:28	14.8	7.04	-323.4	461	2.71	-110.3	2.89	8.63	1.080
OW-13-1	2018.11.14. 09:33	14.3	7.00	-122.79	504.0	1.91	90.7	0.00	0.03	0.157
OW-13-2	2018.11.14. 14:28	16.0	6.98	-121.60	486.0	2.19	90.7	0.01	0.09	0.130
OW-13-3	2018.11.14. 17:27	13.3	6.94	-173.59	492.0	2.17	40.6	0.00	0.48	0.133
OW-13-4	2018.11.14. 20:36	12.8	7.00	-194.34	487.0	2.21	20.2	0.03	0.09	0.128
OW-13-5	2018.11.15. 02:42	12.0	6.95	-194.70	499.0	1.79	20.4	0.04	0.07	0.135
OW-13-6	2018.11.15. 09:17	13.3	7.08	-140.79	483.0	1.74	73.4	-	-	-
OW-13-7	2018.11.15. 13:25	15.4	6.77	-140.92	450.0	1.99	71.8	-	-	-
OW-13-8	2018.11.15. 17:02	14.0	6.85	-170.20	478.0	1.81	43.5	-	-	-
OW-13-9	2018.11.16. 11:51	14.4	6.99	-169.32	444.0	2.57	44.1	0.02	-0.05	0.145
AN-1	2018.11.14. 09:54	9.4	7.58	-113.52	431.0	7.81	103.4	0.00	0.17	0.068
AN-2	2018.11.14. 14:56	14.9	7.48	-90.57	446.0	11.32	122.5	0.01	0.05	0.052
AN-3	2018.11.14. 17:48	11.7	7.43	-144.41	454.0	9.23	70.9	0.00	0.03	0.036
AN-4	2018.11.14. 21:02	10.6	7.16	-180.58	422.0	8.79	35.5	0.01	0.04	0.051
AN-5	2018.11.15. 01:09	8.8	7.35	-182.14	427.0	7.28	35.2	0.01	0.16	0.045
AN-6	2018.11.15. 09:56	9.8	7.11	-125.64	421.0	7.60	91.0	-	-	-
AN-7	2018.11.15. 13:49	14.1	7.12	-97.03	424.0	9.97	116.6	-	-	-
AN-8	2018.11.15. 16:33	12.3	7.18	-148.79	436.0	10.76	66.1	-	-	-
AN-9	2018.11.16. 12:11	12.1	7.32	-154.63	425.0	9.17	60.4	0.01	0.03	0.070
CW-1	2018.11.14. 10:05	16.4	7.03	-76.72	554.0	2.15	135.3	0.01	0.01	0.982
CW-2	2018.11.14. 15:12	17.9	6.90	-57.57	484.0	1.94	153.4	0.00	0.11	0.108
CW-3	2018.11.14. 18:02	12.4	6.84	-149.52	499.0	1.84	65.3	0.27	0.33	1.166
CW-4	2018.11.14. 21:35	14.0	6.84	-151.40	492.0	2.15	62.3	0.44	0.58	1.342
CW-5	2018.11.15. 01:53	14.2	6.77	-191.36	489.0	1.94	22.2	0.57	0.74	1.507
CW-6	2018.11.15. 10:23	15.7	6.56	-189.81	478.0	2.17	22.7	-	-	-
CW-7	2018.11.15. 14:03	16.7	6.65	-188.81	473.0	2.26	23.0	-	-	-
CW-8	2018.11.15. 16:59	15.1	6.72	-188.73	491.0	2.18	24.2	-	-	-

표 52. 현장 수질 분석 결과(계속)

구분	채취일자	온도 (℃)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	Fe^{2+} (mg/L)	Fe^{T} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)
CW-9	2018.11.16. 13:00	15.9	6.79	-196.97	450.0	3.13	15.4	0.98	0.92	1.553
OW-1-1	2018.11.14. 12:12	17.0	6.84	-248.20	566.0	1.31	-36.6	0.70	8.10	4.220
OW-1-2	2018.11.14. 15:30	17.3	6.68	-282.49	549.0	1.42	-71.1	4.75	7.00	3.550
OW-1-3	2018.11.14. 18:17	15.4	6.75	-282.12	547.0	1.54	-69.4	4.45	7.50	4.210
OW-1-4	2018.11.14. 23:09	13.8	6.83	-277.44	579.0	1.69	-63.6	2.35	2.60	4.030
OW-1-5	2018.11.15. 01:51	12.3	6.77	-269.69	578.0	1.87	-54.8	3.85	5.20	4.030
OW-1-6	2018.11.15. 10:53	16.8	6.54	-286.14	556.0	1.66	-74.4	-	-	-
OW-1-7	2018.11.15. 14:53	17.0	6.74	-287.60	543.0	1.63	-76.0	-	-	-
OW-1-8	2018.11.15. 17:36	14.4	6.71	-271.12	570.0	1.86	-57.7	-	-	-
OW-1-9	2018.11.16. 12:33	16.9	6.81	-281.87	515.0	2.24	-70.2	6.25	7.30	4.540
OW-15-1	2018.11.14. 11:44	16.1	6.18	-200.93	495.0	2.17	11.3	14.90	28.70	2.360
OW-15-2	2018.11.14. 15:48	15.8	6.10	-182.24	493.0	1.98	30.2	11.20	17.50	3.110
OW-15-3	2018.11.14. 18:54	13.9	5.99	-202.07	452.0	1.67	11.7	16.60	22.20	2.830
OW-15-4	2018.11.14. 23:24	13.5	6.11	-211.55	444.0	1.51	2.5	19.50	25.10	1.840
OW-15-5	2018.11.15. 02:21	11.2	5.77	-212.96	458.0	2.26	2.7	17.30	23.10	1.770
OW-15-6	2018.11.15. 10:56	15.0	5.75	-214.00	438.0	1.54	-1.0	-	-	-
OW-15-7	2018.11.15. 15:08	15.0	5.75	-214.00	438.0	1.54	-1.0	-	-	-
OW-15-8	2018.11.15. 17:53	13.4	5.79	-207.32	452.0	1.73	6.8	-	-	-
OW-15-9	2018.11.16. 13:39	15.6	6.02	-201.18	415.0	3.11	11.4	11.80	22.00	2.810
OW-7-1	2018.11.14. 11:30	18.6	6.31	-76.78	302.0	1.91	133.7	0.11	0.36	0.212
OW-7-2	2018.11.14. 16:08	17.4	6.25	-92.82	290.0	1.67	118.5	0.05	0.77	0.171
OW-7-3	2018.11.14. 19:02	15.6	6.22	-122.28	297.0	1.84	90.3	0.04	0.06	0.107
OW-7-4	2018.11.14. 23:48	15.0	6.28	-136.00	276.0	2.56	77.0	0.05	0.07	0.084
OW-7-5	2018.11.15. 03:17	14.8	5.99	-141.34	269.0	2.82	71.8	0.08	0.12	0.077
OW-7-6	2018.11.15. 11:31	18.1	5.87	-88.73	263.0	3.09	122.1	-	-	-
OW-7-7	2018.11.15. 15:28	18.2	6.00	-89.86	260.0	3.57	120.9	-	-	-
OW-7-8	2018.11.15. 18:10	15.2	5.91	-115.36	258.0	3.75	97.5	-	-	-
OW-7-9	2018.11.16. 14:02	18.4	6.05	-75.32	258.0	4.33	135.3	0.35	0.02	0.049
OB-11-1	2018.11.14. 10:45	15.8	5.95	-198.84	319.0	1.27	13.6	5.13	5.72	0.498
OB-11-2	2018.11.14. 16:36	15.0	5.95	-215.80	313.0	1.05	-2.8	7.40	9.90	0.110
OB-11-3	2018.11.14. 19:25	13.7	5.93	-218.31	334.0	1.44	-4.4	8.35	1.40	0.514
OB-11-4	2018.11.15. 00:00	12.7	5.99	-219.21	327.0	1.55	-4.6	8.05	9.20	0.504
OB-11-5	2018.11.15. 03:44	12.5	5.60	-215.95	336.0	1.78	-1.2	8.25	9.35	0.538
OB-11-6	2018.11.15. 12:20	16.5	5.68	-226.25	312.0	1.65	-14.3	-	-	-
OB-11-7	2018.11.15. 16:08	15.5	5.89	-207.15	312.0	1.53	5.5	-	-	-
OB-11-8	2018.11.15. 18:30	13.2	5.94	-212.26	327.0	2.09	2.0	-	-	-
OB-11-9	2018.11.16. 14:17	16.5	6.05	-193.75	320.0	2.45	18.20	6.60	8.00	4.590

표 53. 이온분석결과

구분	채취일자	Concentration(㎎/L)							
		Na	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	$SO4^{2-}$	NO^{3-}	HCO^{3-}
OW-8-1	2018.11.14. 09:12	49.195	8.560	34.893	8.959	54.084	56.034	1.681	115.33
OW-8-2	2018.11.14. 14:08	50.693	9.213	36.073	9.166	55.393	55.586	2.272	112.89
OW-8-3	2018.11.14. 17:01	49.925	11.933	34.932	8.978	57.990	56.525	5.376	114.41
OW-8-4	2018.11.14. 20:06	48.340	8.917	35.641	8.928	53.899	56.89	0.854	115.94
OW-8-5	2018.11.15. 00:33	48.807	8.968	35.728	9.052	54.962	55.359	-	122.04
OW-8-6	2018.11.15. 08:04	49.066	8.953	35.488	8.954	55.885	54.603	6.280	129.67
OW-8-7	2018.11.15. 13:08	50.258	9.173	35.994	9.042	55.686	56.177	1.979	125.09
OW-8-8	2018.11.15. 16:15	49.507	9.301	36.075	9.045	55.604	56.479	0.848	126.62
OW-8-9	2018.11.16. 11:28	50.047	9.668	35.704	8.938	55.185	53.187	1.817	123.57
OW-13-1	2018.11.14. 09:33	46.351	8.600	38.753	9.469	56.58	53.409	0.139	102.21
OW-13-2	2018.11.14. 14:28	46.809	8.917	38.838	9.419	57.305	56.27	0.110	102.21
OW-13-3	2018.11.14. 17:27	47.140	12.834	39.502	9.529	59.999	59.813	-	97.63
OW-13-4	2018.11.14. 20:36	47.758	8.894	38.863	9.406	54.934	55.818	12.662	97.63
OW-13-5	2018.11.15. 02:42	49.663	8.993	39.402	9.672	58.904	57.456	3.050	97.63
OW-13-6	2018.11.15. 09:17	48.477	9.030	40.166	9.861	73.957	59.363	48.701	93.06
OW-13-7	2018.11.15. 13:25	47.547	8.909	39.275	9.484	57.811	59.106	1.227	102.21
OW-13-8	2018.11.15. 17:02	48.412	8.918	40.289	9.746	59.205	60.738	4.175	99.16
OW-13-9	2018.11.16. 11:51	47.698	9.027	39.958	9.778	56.795	62.563	3.224	97.63
AN-1	2018.11.14. 09:54	41.260	11.635	36.052	8.693	47.941	37.838	19.279	103.73
AN-2	2018.11.14. 14:56	42.592	16.205	35.198	8.567	52.676	41.504	12.183	99.16
AN-3	2018.11.14. 17:48	42.031	15.074	34.857	8.445	50.096	39.323	12.528	96.11
AN-4	2018.11.14. 21:02	39.930	10.820	34.196	8.391	46.365	37.154	12.275	99.16
AN-5	2018.11.15. 01:09	39.737	10.915	34.422	8.392	46.209	37.487	10.954	99.16
AN-6	2018.11.15. 09:56	39.656	11.265	35.443	8.649	47.414	43.795	13.818	96.11
AN-7	2018.11.15. 13:49	42.242	11.710	34.944	8.637	49.598	39.109	16.313	93.06
AN-8	2018.11.15. 16:33	43.302	11.210	35.472	8.572	50.526	39.132	18.622	94.58
AN-9	2018.11.16. 12:11	46.410	12.338	36.026	8.792	52.409	43.047	22.600	102.21
CW-1	2018.11.14. 10:05	46.067	23.852	43.182	10.250	63.712	49.425	2.730	129.67
CW-2	2018.11.14. 15:12	45.995	15.533	41.208	10.253	59.250	51.781	0.417	115.94
CW-3	2018.11.14. 18:02	45.529	13.454	40.440	10.380	72.812	53.797	1.612	114.41
CW-4	2018.11.14. 21:35	44.809	9.979	40.163	10.412	54.660	50.086	0.571	115.94
CW-5	2018.11.15. 01:53	44.156	9.933	40.284	10.568	55.479	50.207	1.187	117.46
CW-6	2018.11.15. 10:23	44.007	9.773	39.690	10.519	54.388	51.536	13.683	115.94
CW-7	2018.11.15. 14:03	43.953	10.134	40.214	10.515	55.268	50.104	1.941	115.94
CW-8	2018.11.15. 16:59	45.019	10.088	40.728	10.694	56.738	51.642	1.345	114.41
CW-9	2018.11.16. 13:00	44.250	9.909	40.472	10.764	54.324	52.514	1.042	120.51
OW-1-1	2018.11.14. 12:12	45.593	12.174	48.685	12.379	56.759	45.851	1.308	172.38
OW-1-2	2018.11.14. 15:30	45.609	13.451	49.628	12.551	58.295	45.775	-	180.01
OW-1-3	2018.11.14. 18:17	44.357	11.498	47.393	12.066	55.233	46.980	6.776	169.33
OW-1-4	2018.11.14. 23:09	45.710	11.871	48.856	12.554	56.386	47.793	0.558	187.64
OW-1-5	2018.11.15. 01:51	45.262	11.740	48.431	12.334	54.561	49.232	0.011	175.43
OW-1-6	2018.11.15. 10:53	44.821	11.857	48.685	12.533	55.642	49.713	-	176.96
OW-1-7	2018.11.15. 14:53	44.373	11.912	47.529	12.146	54.394	46.150	7.677	176.96
OW-1-8	2018.11.15. 17:36	46.640	11.881	47.984	12.358	54.993	51.412	0.436	176.96
OW-1-9	2018.11.16. 12:33	45.466	12.407	48.218	12.407	56.041	50.926	1.194	176.96
OW-15-1	2018.11.14. 11:44	28.847	1.977	30.110	13.943	46.371	42.935	-	134.24
OW-15-2	2018.11.14. 15:48	34.427	3.023	31.952	13.653	52.384	59.615	0.328	109.84
OW-15-3	2018.11.14. 18:54	31.876	2.240	28.879	12.715	52.299	55.507	6.553	112.89

표 53. 이온분석결과(계속)

구분	채취일자	Concentration(mg/L)							
		Na	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	$SO4^{2-}$	NO^{3-}	HCO^{3-}
OW-15-4	2018.11.14. 23:24	31.176	1.769	26.154	12.765	51.516	50.129	0.245	103.73
OW-15-5	2018.11.15. 02:21	31.788	1.837	25.927	12.445	53.561	54.310	0.762	102.21
OW-15-6	2018.11.15. 10:56	33.292	1.889	26.131	12.458	55.896	57.176	1.469	86.95
OW-15-7	2018.11.15. 15:08	33.216	1.866	25.963	12.565	56.544	58.963	-	86.95
OW-15-8	2018.11.15. 17:53	33.593	1.943	25.906	12.418	54.867	57.101	0.268	91.53
OW-15-9	2018.11.16. 13:39	33.093	2.013	25.528	12.243	56.834	56.339	5.091	96.11
OW-7-1	2018.11.14. 11:30	25.395	3.693	22.809	7.750	35.088	24.635	-	85.43
OW-7-2	2018.11.14. 16:08	24.821	3.567	23.410	7.593	34.435	24.073	0.211	83.90
OW-7-3	2018.11.14. 19:02	25.097	3.699	23.159	7.671	35.592	24.553	0.245	76.28
OW-7-4	2018.11.14. 23:48	25.050	3.743	22.792	7.537	35.800	24.480	0.301	74.75
OW-7-5	2018.11.15. 03:17	24.672	3.766	21.909	7.249	36.200	24.559	0.305	77.80
OW-7-6	2018.11.15. 11:31	22.235	3.781	20.541	6.682	35.788	23.234	0.205	65.60
OW-7-7	2018.11.15. 15:28	20.865	3.824	19.791	6.463	36.861	21.535	0.245	53.39
OW-7-8	2018.11.15. 18:10	21.046	3.842	19.904	6.495	38.327	21.515	1.140	51.87
OW-7-9	2018.11.16. 14:02	23.023	4.262	20.180	6.924	45.749	24.653	0.847	45.77
OB-11-1	2018.11.14. 10:45	25.518	9.446	15.369	11.370	48.445	35.927	2.005	65.60
OB-11-2	2018.11.14. 16:36	25.691	0.919	15.937	10.672	41.908	32.727	1.425	64.07
OB-11-3	2018.11.14. 19:25	26.623	0.917	16.240	11.466	44.597	31.729	0.906	65.60
OB-11-4	2018.11.15. 00:00	26.411	0.954	17.090	11.378	44.716	32.637	1.642	65.60
OB-11-5	2018.11.15. 03:44	26.950	0.980	16.988	11.428	44.943	34.083	0.692	67.12
OB-11-6	2018.11.15. 12:20	27.126	0.958	17.208	11.276	45.652	35.315	15.655	64.07
OB-11-7	2018.11.15. 16:08	27.172	0.934	17.222	11.384	46.181	35.689	1.067	65.60
OB-11-8	2018.11.15. 18:30	26.905	1.009	17.207	11.340	46.283	33.216	0.205	64.07
OB-11-9	2018.11.16. 14:17	26.193	1.025	16.245	11.505	45.326	31.972	7.278	59.49

(2) 현장 간이 수질 측정 결과

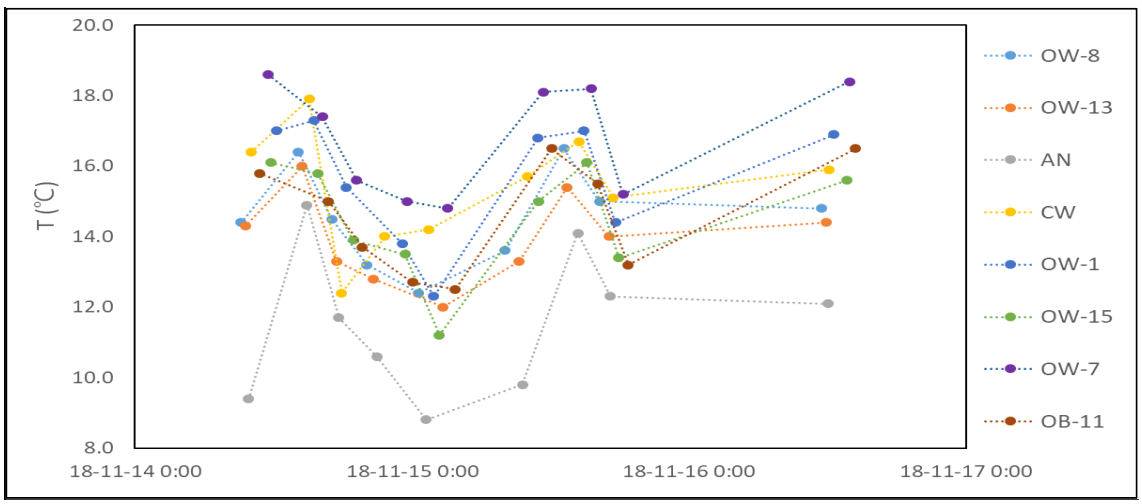
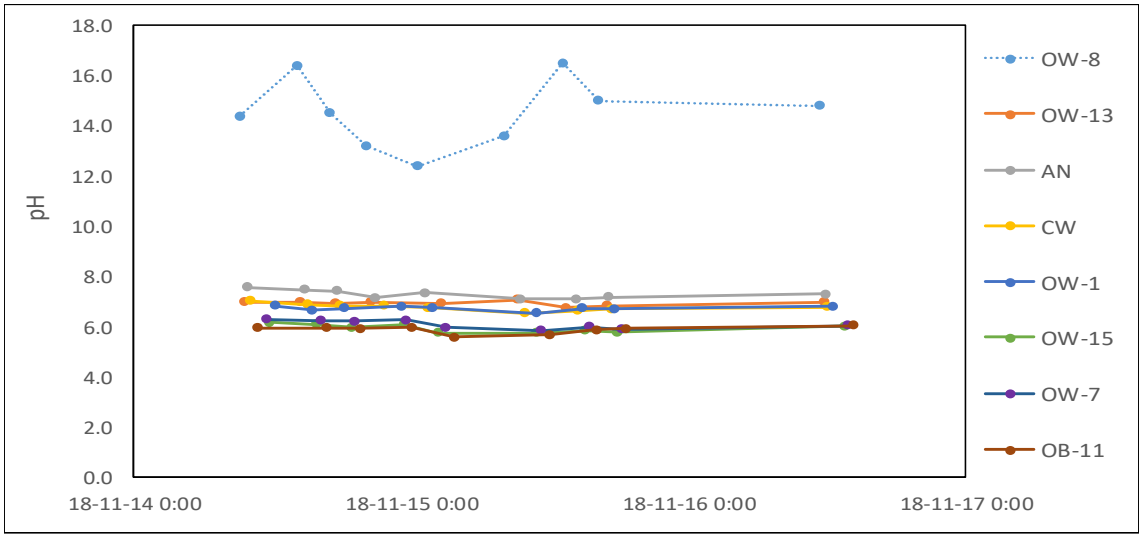
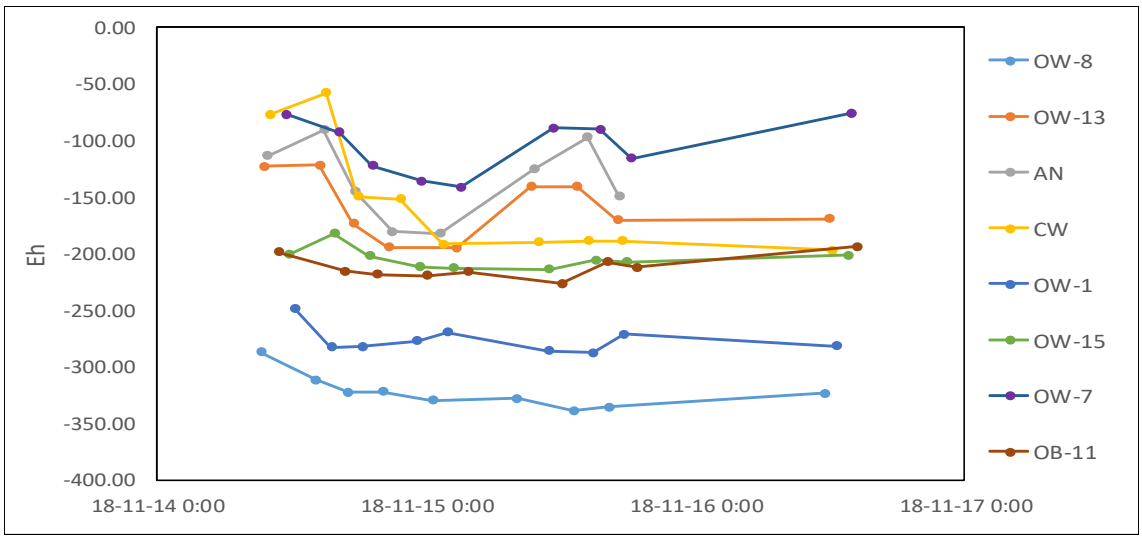


그림 71. 집수정 취수시에 따른 현장 간이수질 분석 결과





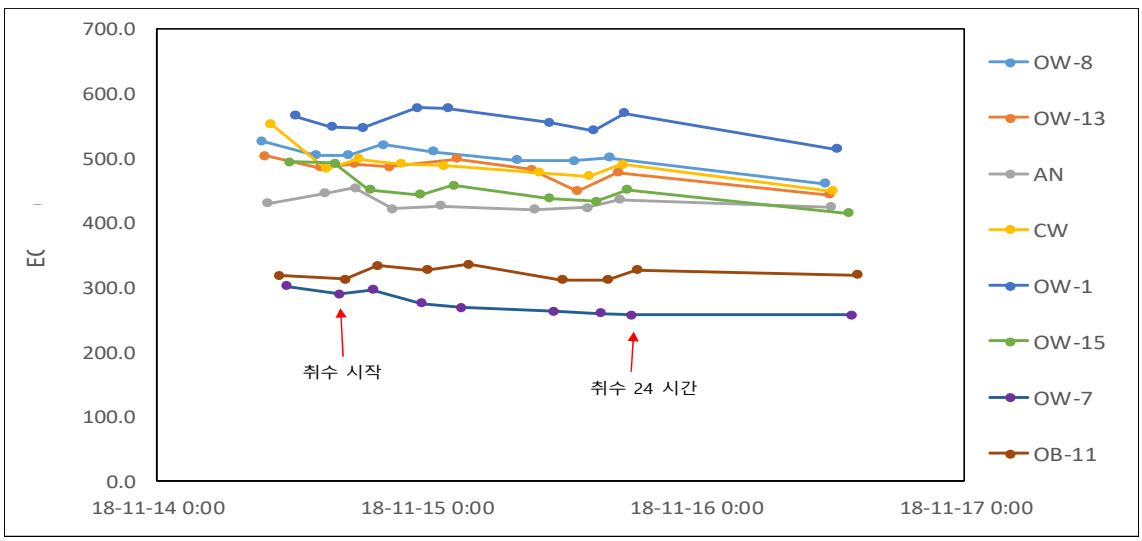


그림 **71**. 집수정 취수시에 따른 현장 간이수질 분석 결과(계속)

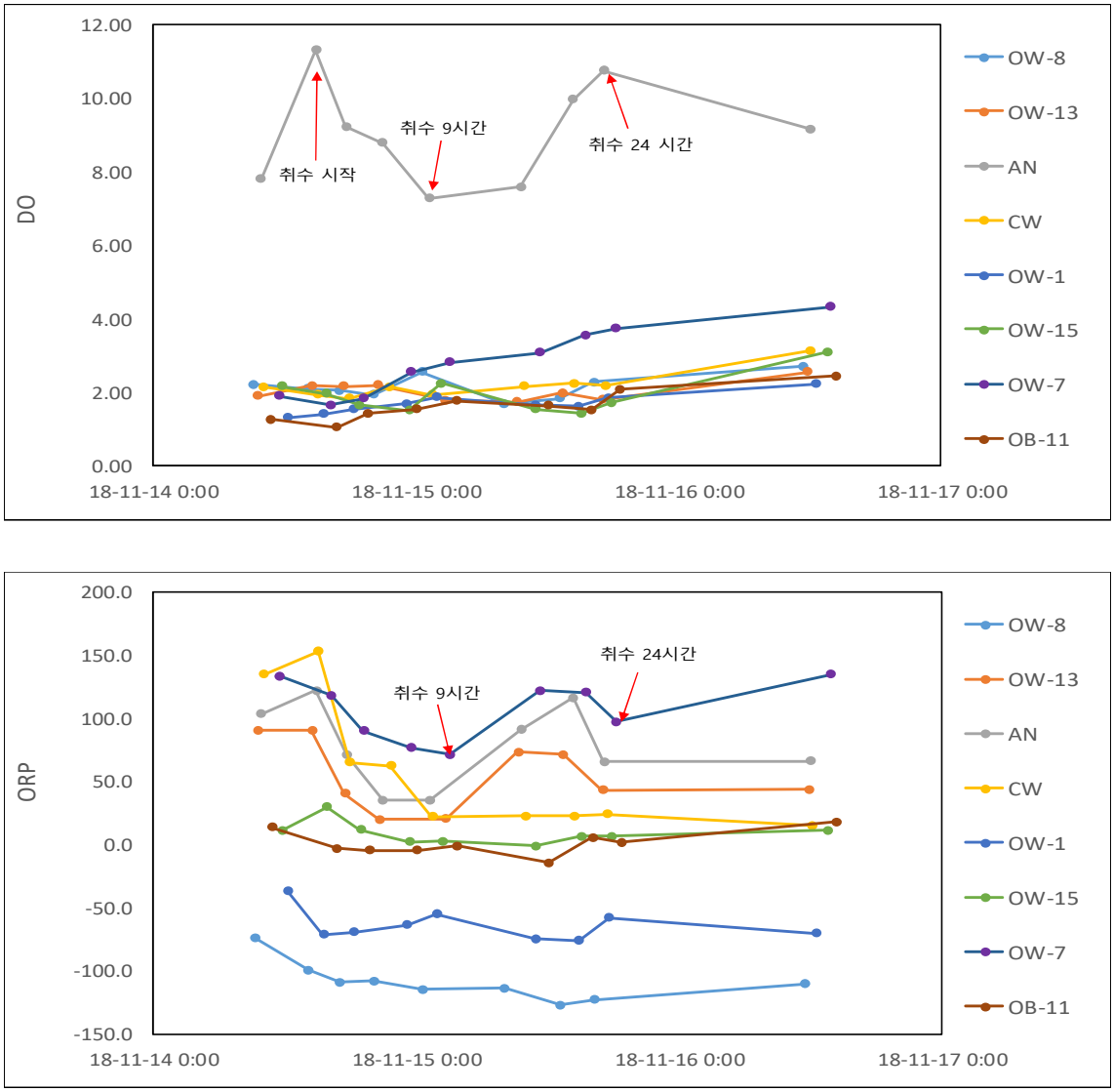


그림 **71**. 집수정 취수시에 따른 현장 간이수질 분석 결과(계속)

온도의 변화는 측정 시간에 의한 대기 온도의 영향으로 낮과 밤의 온도 차이를 보인다. 하천의 온도가 제일 낮으며, 이는 계절의 영향의 차이로 보인다. 집수정 취수 18시간 이후 부터는 모든 관측공에서 pH의 값이 상승했으며 하천 인근 지하수 관측공이 제방 인근 관측공 보다 pH 결과 값이 크다.

ORP는 집수정 취수 이후 OW-7, 하천(AN), OW-13, CW을 제외한 관측공에서 감소하거나 변화가 없음을 확인, 하천 근처 관정에서 변화되는 경향을 보인다. CW 와 AN, OW-8, OW-13은 취수 영향으로 지하수의 흐름이 빨라지고 지표의 공기 유입이 상대적으로 용이한 것으로 보인다. 집수정 취수 18시간 이후부터는 DO의 결과값이 상승하며 현장 수질 분석 결과 하천 인근 관정들은 온도도 낮고, pH,ORP 분석 결과가 높다.

취수이후에는 감소하는 경향을 보이다 취수 9시간 째 들어서면서 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 취수 직후 지하수의 유입으로 감소하는 경향을 그리고, 하천수가 유입이 되면서 다시 증가는 것으로 보인다.

(3) 주요 이온 변동 특성

각 지점별 주요 양이온 농도 분포를 보면, 관측공 OW-8와 하천은 Na^{+} > Ca^{2+} > K > Mg^{2+} 순으로 분포가 되어 있음, 그외 관측공 OW-1, OW-7, OW-15, OB-11의 양이온 농도 분포를 보면 Na^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K 순으로 되어 있다.

각 지점별 주요 음이온 농도 분포를 보면, 관측공 OW-8, OW-15 에서는 HCO_3^{-} > $SO4^{2-}$ > Cl^{-} > NO^{3-} 순으로 분포하며, 그외 관측공 OW-1, OW-7. OW-13, OB-11에서는 $HCO3^{-}$ > Cl^{-} > $SO4^{2-}$ > NO^{3-} 순으로 분포한다.

인근 관측정에서 NO_3^{-} 값이 증가하는 경향을 보이며 이는 인위적인 오염지표인 NO_3^{-} 의 증가는 하천 유입을 알 수 있다. 제방 근처의 일부 관측정에서는 Cl^{-} + SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} + HCO_3^{-} 의 증가와 감소의 변화를 보이며 이는 지하수 성분이 유입되다 하천수가 유입된 것으로 보인다.

(4) 이온 분석 결과 수리화학적 유형

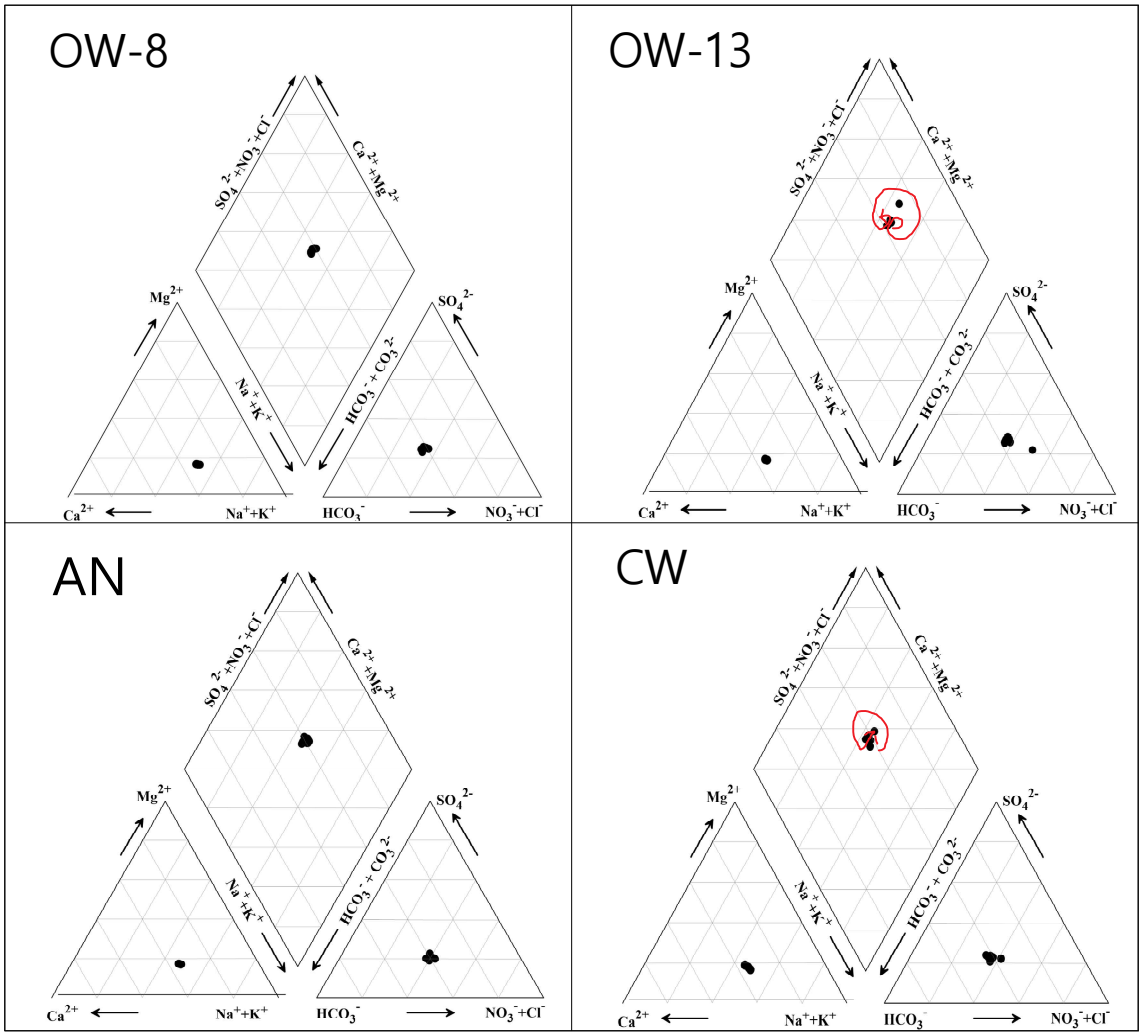


그림 72. 하천 인근에 위치한 관측공의 유형을 파악하기 위한 Piper diagram

하천 인근 관측공(OW-8, OW-13)의 수질 특성은 Ca-SO_4 Type을 보이며, 이는 AN의 유형인 a-SO_4 Type 과 같다. 관정 OW-13은 취수 중단 3시간에 NO_3^-, Cl^- 증가하지만 다시 감소, 이는 하천수의 유입이 된 것으로 보인다. 인위적인 오염 지표인 NO_3^- 증가는 하천수의 영향을 직접 받고 있음을 알 수 있다.

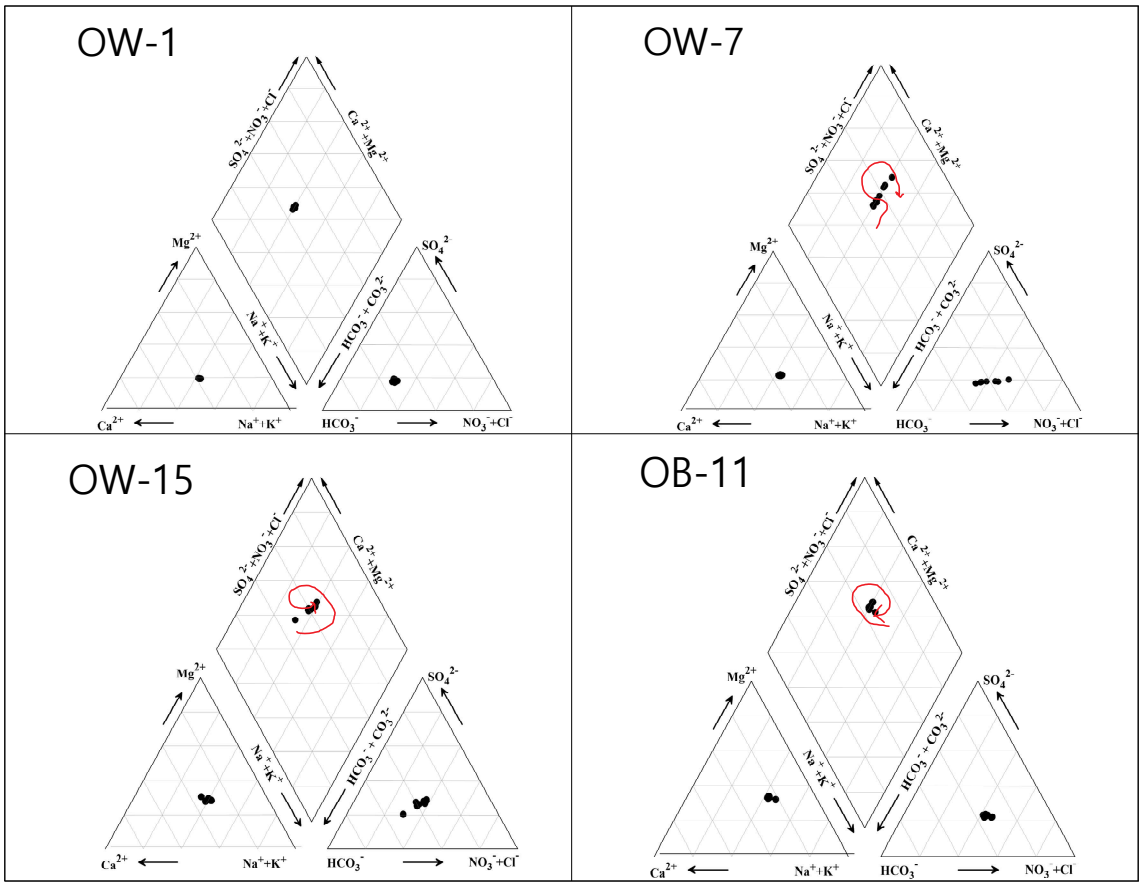


그림 73. 제방 인근 관측공들의 유형을 파악하기 위한 Piper diagrams

제방 근처의 관정 OW-1은 Ca-HCO_3 Type 이며, OW-15, OW-7, OB-11은 Ca-SO_4 Type 이다. 실험이 진행됨에 따라서 OW-15의 경우 Cl^-, SO_4^{2-} 농도가 늘어났다가 다시 감소하며, Ca^+ 와 HCO^{3-}도 증가와 감소의 변화가 보인다. 이는 지하수 성분이 유입이 되다 하천수가 유입이 되었다는 것으로 판단 되며 OW-7 관정에서도 유사한 경향성을 보인다.

(5) 철/망간 분석 결과

Fe^{2+} 는 취수 시간이 늘어남에 따라 농도가 증가하는 관측공으로 OW-13, OW-15, OB-11이 있으며, 농도가 감소하는 관측공으로는 OW-1, OW-8이 있다. OW-13과 AN의 Fe^{2+} 농도는 미미한 경향을 보인다. Mn^{2+} 는 취수 시간이 늘어남에 따라 농도가 증가하는 관측공으로는 OW-1과 OB-11이 있으며, 농도가 감소하는 관측공으로는 OW-7, OW-8, OW-13, OW-15 가 있다. 하천 근처 관측공 OW-13은 Fe^{2+} 농도 증가가 완만히 나타나며, Mn^{2+} 의 경우 변화가 없다.

표 54. 철, 망간 분석 값

Sample Name	측정일시	Fe^{2+} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)	Sample Name	측정일시	Fe^{2+} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)
OW-8-1	2018-11-14 14:08	6.90	1.23	OW-1-1	2018-11-14 15:30	4.75	3.55
OW-8-2	2018-11-14 17:01	3.90	0.91	OW-1-2	2018-11-14 18:17	4.45	4.21
OW-8-3	2018-11-14 20:06	2.80	1.06	OW-1-3	2018-11-14 23:09	2.35	4.03
OW-13-1	2018-11-14 14:28	0.01	0.13	OW-15-1	2018-11-14 15:30	11.2	3.11
OW-13-2	2018-11-14 17:27	0.00	0.13	OW-15-2	2018-11-14 18:17	16.6	2.83
OW-13-3	2018-11-14 20:36	0.03	0.13	OW-15-3	2018-11-14 23:09	19.5	1.84
AN-1	2018-11-14 14:52	0.01	0.05	OW-7-1	2018-11-14 16:13	0.05	0.17
AN-2	2018-11-14 17:38	0.00	0.04	OW-7-2	2018-11-14 19:11	0.04	0.11
AN-3	2018-11-14 20:56	0.01	0.05	OW-7-3	2018-11-14 23:34	0.05	0.08
CW-1	2018-11-14 15:04	0.00	1.11	OB-11-1	2018-11-14 16:45	7.40	0.11
CW-2	2018-11-14 17:54	0.27	1.17	OB-11-2	2018-11-14 19:40	8.35	0.51
CW-3	2018-11-14 21:38	0.44	1.24	OB-11-3	2018-11-15 00:03	8.05	0.50

*CW의 장기 취수 전 초기 Fe^{2+} 은 1.20 mg/L, Mn^{2+} 은 0.86 mg/L

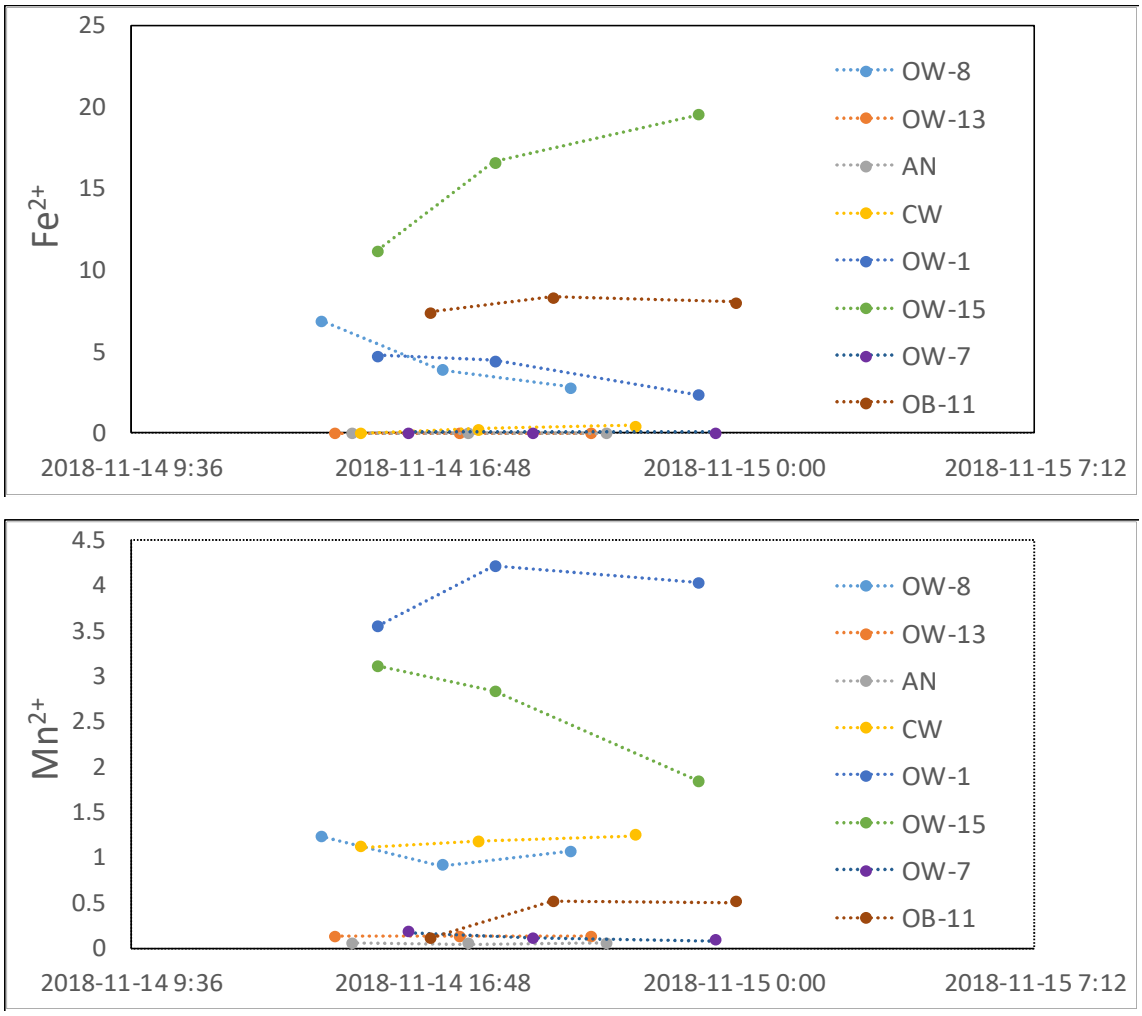


그림 74. 관정별 Fe^{2+}, Mn^{2+} 분포도

6. 집수정 취수중단에 따른 지하수질 변화

가. 연구방법

집수정 취수 중단에 따른 지하수질 변화 (2019.06.26.~28)를 분석하였다. 집수정 운영 가동 취수량은 4,000 ㎥/d로 2019.06.26.14:00 이전까지 지속적으로 양수하였으며 2019.06.26 14:00 부터 취수 중단 하였다. 시료 채취는 집수정(CW), 하천(AN), 지하수 관측공 6개소에서 실시하였으며, 시료채취는 취수 중단 후 40시간 동안 총 8번 채취하였다.(취수 중, 취수 중단 후 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 21시간, 24시간, 40시간)

현장 간이수질 측정은 휴대용수질측정기 HQ-40D(Hach)를 활용하여 온도, pH(수소이온농도), EC(전기전도도), ORP(산화환원전위), DO(용존산소) 측정하였으며, 양이온 4개 항목 Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, 음이온 4개 항목 Cl^{-},$SO4^{2-}$,NO^{3-},HCO^{3-} 분석은 기관에 의뢰하여 수행하였다. 철/망간은 DR-1900(Hach) 분광광도계를 이용하여 현장 분석을 수행 하였다.

나. 수질 특성 변화

(1) 수질 분석 결과

표 55. 현장 수질 분석 결과

구분	채취일자	온도 (℃)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	Fe^{2+} (mg/L)	Fe^{T} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)
OW-8-1	19-06-26 10:05	15.5	7.03	-152.75	549.0	1.68	59.9	1.44	1.44	1.10
OW-8-2	19-06-26 15:32	16.6	7.03	-186.08	540.0	2.15	25.8	1.24	4.80	1.10
OW-8-3	19-06-26 16:43	16.5	6.91	-175.45	534.0	2.76	36.5	2.84	3.52	1.10
OW-8-4	19-06-26 17:53	16.7	6.79	-206.81	513.0	2.87	5.0	0.96	1.36	0.96
OW-8-5	19-06-26 20:22	17.2	6.83	-224.26	507.0	2.92	-12.8	1.12	1.16	1.06
OW-8-6	19-06-27 11:22	17.1	6.81	-183.33	518.0	2.54	28.2	1.12	1.2	0.85
OW-8-7	19-06-27 14:24	17.1	6.82	-197.13	518.0	3.08	14.4	-	-	-
OW-8-8	19-06-28 12:28	17.9	6.79	-217.47	528.0	2.82	-6.5	1.36	1.98	-
OW-13-1	19-06-26 10:36	17.0	7.02	-75.50	497.0	3.65	136.1	0.06	0.05	0.15
OW-13-2	19-06-26 16:01	17.3	7.29	-64.39	506.0	3.82	147.0	0.12	0.21	0.29
OW-13-3	19-06-26 17:00	17.6	6.72	-61.48	421.0	6.65	149.7	0.02	0.05	0.03
OW-13-4	19-06-26 18:09	17.1	6.83	-53.13	472.0	3.91	158.4	0.07	0.18	0.01
OW-13-5	19-06-26 20:39	18.5	6.84	-49.35	476.0	3.92	161.2	0.05	0.10	0.21
OW-13-6	19-06-27 11:37	19.1	6.86	-138.23	489.0	2.51	71.9	0.02	0.05	0.14
OW-13-7	19-06-27 14:41	19.7	6.99	-152.21	510.0	2.61	57.5			
OW-13-8	19-06-28 12:45	19.8	6.71	-58.44	476.0	3.65	151.2	0.01	0.03	-
AN-1	19-06-26 13:50	23.5	8.98	-95.95	508.0	13.16	111.1	0.00	0.04	0.38
AN-2	19-06-26 15:16	24.8	9.23	-164.54	481.0	12.14	41.6	0.03	0.09	0.09
AN-3	19-06-26 16:20	25.7	9.23	-148.41	486.0	13.51	57.1	0.05	0.07	0.11
AN-4	19-06-26 17:39	25.4	9.17	-171.72	478.0	13.31	34.0	0.00	0.05	0.26
AN-5	19-06-26 20:01	23.5	9.09	-156.85	474.0	10.72	50.2	0.02	0.07	0.06

표 55. 현장 수질 분석 결과(계속)

구분	채취일자	온도 (℃)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	Fe^{2+} (mg/L)	Fe^{T} (mg/L)	Mn^{2+} (mg/L)
AN-6	19-06-27 11:00	28.3	8.71	-52.29	536.0	10.31	151.4	0.05	0.11	-
AN-7	19-06-27 14:00	27.3	9.21	-138.69	523.0	11.69	65.7	-	-	-
AN-8	19-06-28 12:15	27.6	7.84	-110.58	506.0	8.35	93.6	0.03	0.08	-
CW-1	19-06-26 13:58	21.2	7.23	-175.96	480.0	3.07	32.7	0.59	0.63	0.68
CW-2	19-06-26 15:00	19.9	6.86	-139.77	486.0	2.78	69.8	0.71	0.81	0.66
CW-3	19-06-26 16:09	20.6	7.17	-173.98	488.0	2.99	35.1	0.57	0.73	1.23
CW-4	19-06-26 17:20	21.1	6.95	-180.33	488.0	3.27	28.4	0.54	0.67	0.11
CW-5	19-06-26 20:01	20.4	6.83	-188.62	463.0	2.60	20.6	0.54	0.89	0.98
CW-6	19-06-27 11:00	21.4	6.85	-121.12	475.0	3.67	87.4	0.08	0.13	0.55
CW-7	19-06-27 14:08	21.7	6.85	-99.91	457.0	2.40	108.4	-	-	-
CW-8	19-06-28 12:00	22.5	6.89	4.25	387.0	2.25	212.0	0.02	0.04	-
OW-1-1	19-06-26 10:20	21.1	7.00	-267.83	528.0	1.42	-59.1	3.16	8.01	2.07
OW-1-2	19-06-26 15:06	20.8	6.90	-270.14	530.0	1.74	-61.2	5.52	7.07	2.02
OW-1-3	19-06-26 16:16	21.1	6.92	-260.53	528.0	2.27	-51.8	5.00	7.02	1.94
OW-1-4	19-06-26 17:18	20.9	6.92	-269.47	526.0	2.50	-60.6	3.56	6.84	1.85
OW-1-5	19-06-26 20:48	21.8	6.96	-259.64	506.0	3.32	-51.4	3.24	4.50	1.32
OW-1-6	19-06-27 11:24	20.8	6.92	-253.64	540.0	2.41	-44.7	4.6	3.51	1.75
OW-1-7	19-06-27 14:03	21.3	7.14	-270.79	576.0	2.45	-62.2	-	-	-
OW-1-8	19-06-28 12:05	21.7	6.88	-180.01	522.0	2.00	28.3	3.76	6.12	-
OW-15-1	19-06-26 10:45	18.4	5.95	-131.12	479.0	2.17	79.5	11.04	18.36	1.63
OW-15-2	19-06-26 15:25	18.6	6.28	-155.38	488.0	2.19	55.1	13.92	19.35	1.87
OW-15-3	19-06-26 16:36	18.8	6.33	-160.04	480.0	3.25	50.3	16.32	18.54	1.56
OW-15-4	19-06-26 17:32	18.8	6.07	-177.84	457.0	3.04	32.5	14.88	19.26	1.40
OW-15-5	19-06-26 21:12	18.6	6.13	-177.48	459.0	3.75	33.0	16.08	20.25	1.50
OW-15-6	19-06-27 11:49	19.0	6.01	-167.60	457.0	2.06	42.6	8.32	19.53	1.58
OW-15-7	19-06-27 14:26	19.6	6.30	-166.58	472.0	1.28	43.2	-	-	-
OW-15-8	19-06-28 12:24	20.7	6.03	-151.51	475.0	1.40	57.5	6.16	19.62	-
OW-7-1	19-06-26 12:53	16.7	6.38	17.09	470.0	6.81	228.9	0.00	0.00	1.03
OW-7-2	19-06-26 15:52	15.5	6.28	-48.75	450.0	6.08	163.9	0.03	0.11	1.36
OW-7-3	19-06-26 16:53	15.4	6.23	-47.22	444.0	6.61	165.5	0.01	0.03	-
OW-7-4	19-06-26 17:46	16.1	6.21	-72.93	436.0	6.25	139.3	0.16	0.29	1.28
OW-7-5	19-06-26 21:21	15.0	6.24	-59.80	445.0	6.57	153.2	0.02	0.05	1.24
OW-7-6	19-06-27 12:06	15.0	6.28	-52.70	428.0	6.20	160.3	0.03	0.05	1.15
OW-7-7	19-06-27 14:35	17.3	6.17	-54.59	431.0	6.04	156.8	-	-	-
OW-7-8	19-06-28 12:41	16.4	6.15	-56.12	419.0	6.12	155.9	0.02	0.06	15.30
OB-11-1	19-06-26 13:48	14.6	6.31	-176.28	340.0	1.11	37.0	4.52	5.40	1.62
OB-11-2	19-06-26 15:01	14.7	6.01	-68.81	307.0	2.81	144.4	0.68	0.72	0.98
OB-11-3	19-06-26 16:11	15.6	6.04	-64.48	289.0	3.73	148.1	0.68	1.35	0.97
OB-11-4	19-06-26 17:02	15.7	6.01	-91.21	291.0	3.96	121.3	1.44	1.89	0.99
OB-11-5	19-06-26 20:02	15.3	6.17	-120.19	323.0	3.93	92.6	2.11	2.43	1.13
OB-11-6	19-06-27 11:01	16.5	6.12	-65.45	296.0	2.93	146.5	0.34	1.71	1.04
OB-11-7	19-06-27 14:01	14.8	6.21	-70.24	301.0	3.68	142.9	-	-	-

표 56. 이온분석결과

구분	채취일자	Concentration(㎎/L)							
		Na	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	$SO4^{2-}$	NO^{3-}	HCO^{3-}
OW-8-1	19-06-26 10:05	50.75	16.30	40.63	9.53	12.04	55.11	37.68	1.33
OW-8-2	19-06-26 15:32	50.50	14.92	41.94	9.84	12.16	52.44	37.19	0.76
OW-8-3	19-06-26 16:43	48.80	14.24	40.94	9.73	12.92	53.17	38.90	1.12
OW-8-4	19-06-26 17:53	49.51	14.21	40.89	9.57	12.11	52.21	36.90	1.36
OW-8-5	19-06-26 20:22	49.55	14.80	42.00	9.83	12.02	51.82	37.45	0.52
OW-8-6	19-06-27 11:22	49.79	14.57	41.55	9.75	12.33	52.01	37.19	1.91
OW-8-7	19-06-27 14:24	-	-	-	-	-	-	-	-
OW-8-8	19-06-28 12:28	50.82	14.70	41.92	9.83	13.17	57.30	28.59	0.00
OW-13-1	19-06-26 10:36	49.12	12.07	32.20	7.32	12.22	53.91	48.82	9.17
OW-13-2	19-06-26 16:01	51.06	13.29	33.72	7.66	12.09	56.10	48.64	8.85
OW-13-3	19-06-26 17:00	43.59	9.59	29.65	6.80	12.19	51.01	48.81	6.59
OW-13-4	19-06-26 18:09	49.98	13.34	32.54	7.36	12.00	54.07	48.55	9.61
OW-13-5	19-06-26 20:39	59.69	14.45	38.61	7.95	12.83	55.18	49.94	7.34
OW-13-6	19-06-27 11:37	50.83	14.18	34.76	7.86	12.45	57.98	46.24	2.67
OW-13-7	19-06-27 14:41	-	-	-	-	-	-	-	-
OW-13-8	19-06-28 12:45	48.34	14.21	34.31	7.69	13.36	55.30	41.46	0.00
AN-1	19-06-26 13:50	48.99	13.95	32.77	8.37	0.83	58.72	36.11	1.28
AN-2	19-06-26 15:16	50.32	13.07	33.42	8.51	0.12	57.89	36.41	2.77
AN-3	19-06-26 16:20	-	-	-	-	-	-	-	-
AN-4	19-06-26 17:39	-	-	-	-	-	-	-	-
AN-5	19-06-26 20:01	-	-	-	-	-	-	-	-
AN-6	19-06-27 11:00	-	-	-	-	-	-	-	-
AN-7	19-06-27 14:00	-	-	-	-	-	-	-	-
AN-8	19-06-28 12:15	46.51	15.31	35.60	10.08	1.99	58.97	39.53	0.98
CW-1	19-06-26 13:58	45.18	13.49	32.61	7.95	11.88	58.22	86.25	c
CW-2	19-06-26 15:00	45.26	14.22	32.66	8.01	12.02	56.06	38.50	0.67
CW-3	19-06-26 16:09	44.78	13.62	32.53	7.91	11.73	55.91	36.81	0.88
CW-4	19-06-26 17:20	44.70	13.71	32.67	7.92	11.70	56.57	36.97	1.60
CW-5	19-06-26 20:01	44.95	13.56	33.10	7.99	11.68	56.63	36.72	1.12
CW-6	19-06-27 11:00	44.73	14.23	32.92	7.84	11.57	56.47	36.94	0.73
CW-7	19-06-27 14:08	-	-	-	-	-	-	-	-
CW-8	19-06-28 12:00	45.55	13.96	33.36	7.86	11.44	56.65	36.76	0.71
OW-1-1	19-06-26 10:20	49.98	12.95	37.52	9.26	13.97	60.18	21.04	0.75
OW-1-2	19-06-26 15:06	48.90	13.18	37.76	9.37	13.21	59.35	20.88	0.64
OW-1-3	19-06-26 16:16	49.15	13.07	38.14	9.44	13.46	60.87	22.30	0.83
OW-1-4	19-06-26 17:18	48.59	13.10	37.75	9.35	13.22	59.88	20.60	0.54
OW-1-5	19-06-26 20:48	48.19	13.86	38.53	9.52	11.77	58.30	17.60	0.00
OW-1-6	19-06-27 11:24	50.31	13.33	39.67	9.80	13.47	61.03	22.46	0.00
OW-1-7	19-06-27 14:03	-	-	-	-	-	-	-	-
OW-1-8	19-06-28 12:05	48.48	13.27	37.58	9.29	12.65	60.25	24.89	0.62
OW-15-1	19-06-26 10:45	40.60	7.95	26.45	11.65	32.02	66.54	55.19	0.83
OW-15-2	19-06-26 15:25	40.41	3.16	26.18	11.58	31.98	63.70	54.53	0.50
OW-15-3	19-06-26 16:36	40.32	2.50	26.03	11.47	33.61	63.12	53.83	0.97
OW-15-4	19-06-26 17:32	39.37	2.29	25.89	11.44	32.43	61.13	52.06	0.59
OW-15-5	19-06-26 21:12	39.56	2.34	25.79	11.41	32.06	62.16	54.30	1.20
OW-15-6	19-06-27 11:49	39.50	2.17	25.90	11.44	32.49	60.54	53.32	0.73
OW-15-7	19-06-27 14:26	-	-	-	-	-	-	-	-
OW-15-8	19-06-28 12:24	38.66	2.25	25.89	11.38	34.61	59.58	54.54	0.00

표 56. 이온분석결과(계속)

구분	채취일자	Concentration(mg/L)							
		Na	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	$SO4^{2-}$	NO^{3-}	HCO^{3-}
OW-7-1	19-06-26 12:53	41.47	5.43	31.66	9.79	15.15	69.81	40.18	2.63
OW-7-2	19-06-26 15:52	42.68	5.86	32.19	9.88	16.45	70.55	41.71	1.33
OW-7-3	19-06-26 16:53	44.00	7.44	32.53	9.64	11.98	67.51	39.41	1.12
OW-7-4	19-06-26 17:46	41.23	5.59	31.65	9.66	16.28	69.07	40.94	1.27
OW-7-5	19-06-26 21:21	42.18	5.63	31.64	9.72	15.85	70.42	40.29	1.38
OW-7-6	19-06-27 12:06	39.10	5.42	29.79	9.06	15.86	66.29	38.53	1.24
OW-7-7	19-06-27 14:35	-	-	-	-	-	-	-	-
OW-7-8	19-06-28 12:41	39.17	5.43	29.55	8.98	16.50	66.16	38.58	1.40
OB-11-1	19-06-26 13:48	24.59	1.27	26.45	8.91	31.51	42.08	47.23	0.00
OB-11-2	19-06-26 15:01	23.48	1.04	19.04	11.59	36.61	37.95	57.36	0.59
OB-11-3	19-06-26 16:11	23.60	1.10	19.16	11.43	36.14	38.06	56.25	0.59
OB-11-4	19-06-26 17:02	23.45	1.06	20.26	11.04	35.50	39.17	54.14	0.53
OB-11-5	19-06-26 20:02	23.69	1.07	20.87	10.83	35.15	39.84	54.02	0.56
OB-11-6	19-06-27 11:01	23.68	0.94	19.72	10.98	34.55	40.74	52.56	0.38
OB-11-7	19-06-27 14:01	-	-	-	-	-	-	-	-
OB-11-8	19-06-28 12:57	24.80	1.14	23.52	9.28	31.81	43.43	46.73	0.15

2) 현장 간이 수질 측정 결과

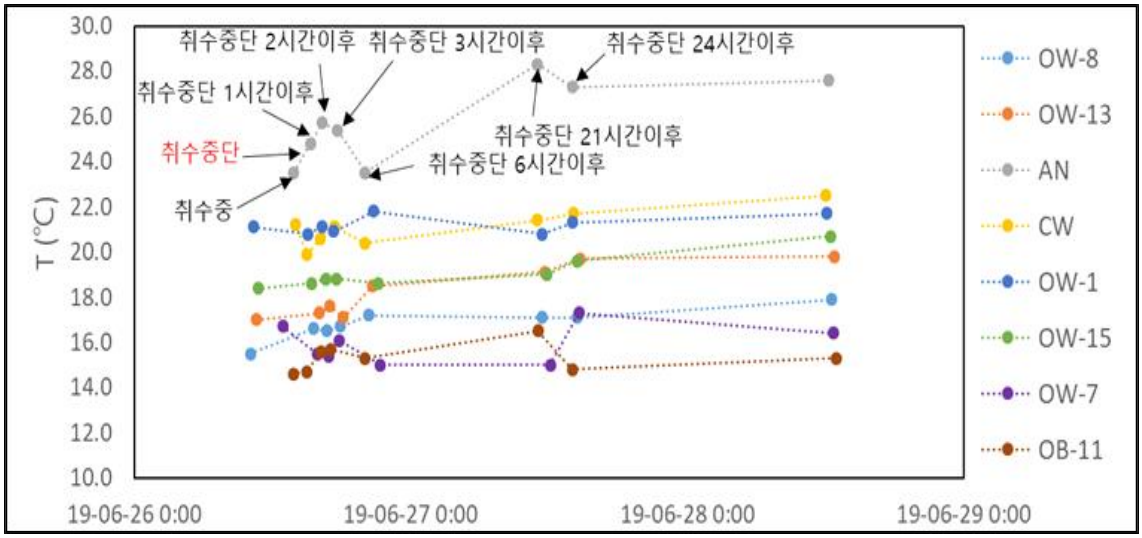
온도의 변화는 계절상의 대기 온도의 영향으로 낮과 밤의 온도 차이가 크지 않으며 하천의 온도가 제일 높으며 이는 계절의 영향으로 보인다

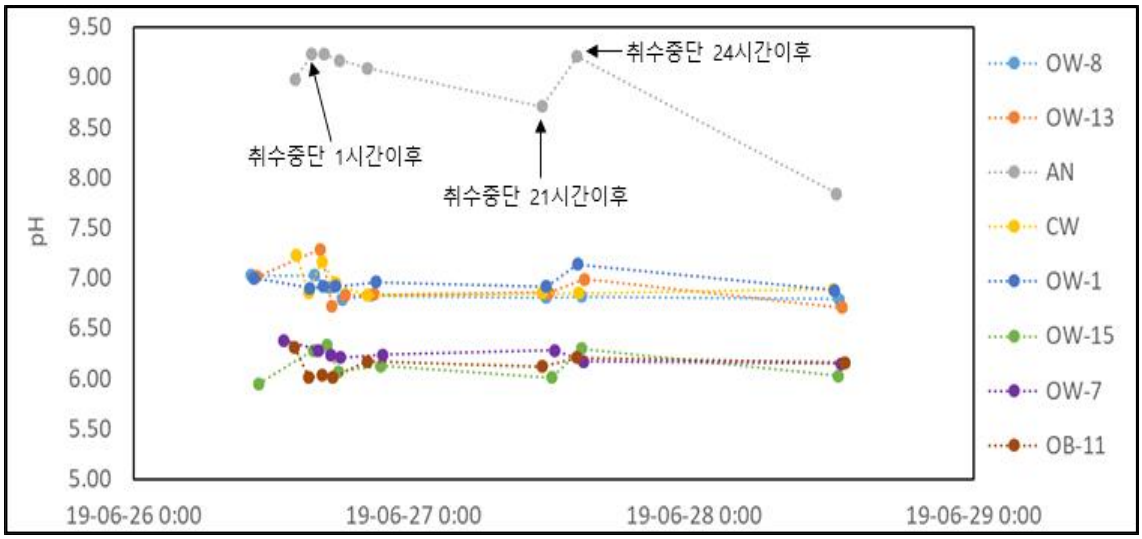
pH 분석결과 취수 중단 1시간 이후를 살펴보면, OW-8는 취수 중과 중단 1시간 이후 변화가 없었으며, OW-13, OW-15는 상승, OW-1, OW-1, OB-11, CW 는 감소하는 경향이 나타난다. 취수 중단 21시간 이후부터는 OW-7을 제외한 모든 관측공에서 pH 값이 높아지며, 그후 24시간 이후부터는 AN, CW, 모든 관측공에서 pH가 감소한다. 하천 인근 지하수 관측공이 제방 인근 관측공보다 pH 결과값이 크다.

EC는 취수 중 일때 보다 취수 중단 1시간 이후 OW-1, OW-13, OW-15 관측공에서 상승, OW-7, OW-8, OB-11, CW, AN에서 감소하였다. 하천에 가까운 관측공 OW-8, OW-1, OW-13에서 EC값이 높으며, 제외지에 있는 OB-11에서 낮은 EC값을 보인다.

DO는 취수 중 일때 보다 취수 중단 1시간 이후 OW-1, OW-8, OW-13, OW-15, OB-11에서 결과값이 상승하였으며, AN, CW, OW-7에서 감소하였다. 40시간 이후 하천에서 DO 결과값이 가장 높으며, OW-15에서 낮은 결과값을 보인다.

ORP는 취수 중 일때 보다 취수 중단 1시간 이후 OW-13, OB-11, CW에서 결과값이 상승하였으며, OW-1. OW-7, OW-8. OW-15, AN에서 결과값이 감소하였다. 24시간에서 40시간 이후에는 OW-7, OW-8, OB-11 관측공에서 ORP 결과값이 감소하였다.





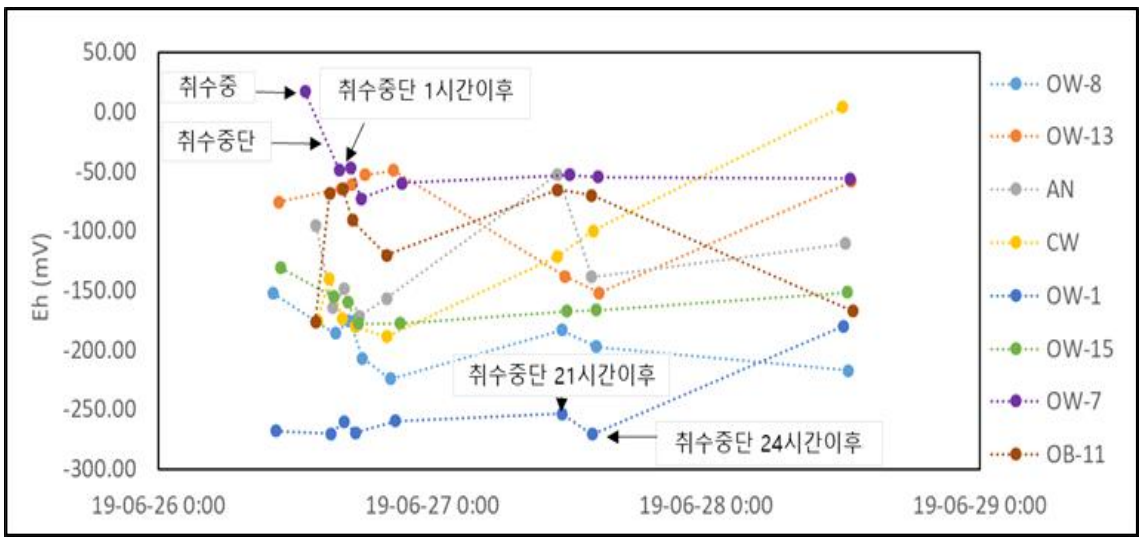
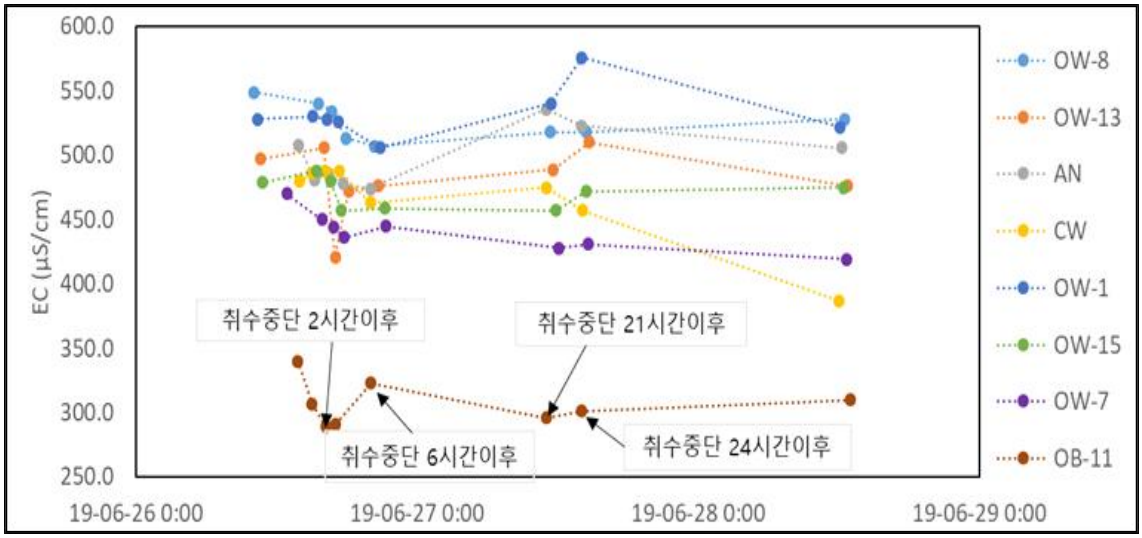
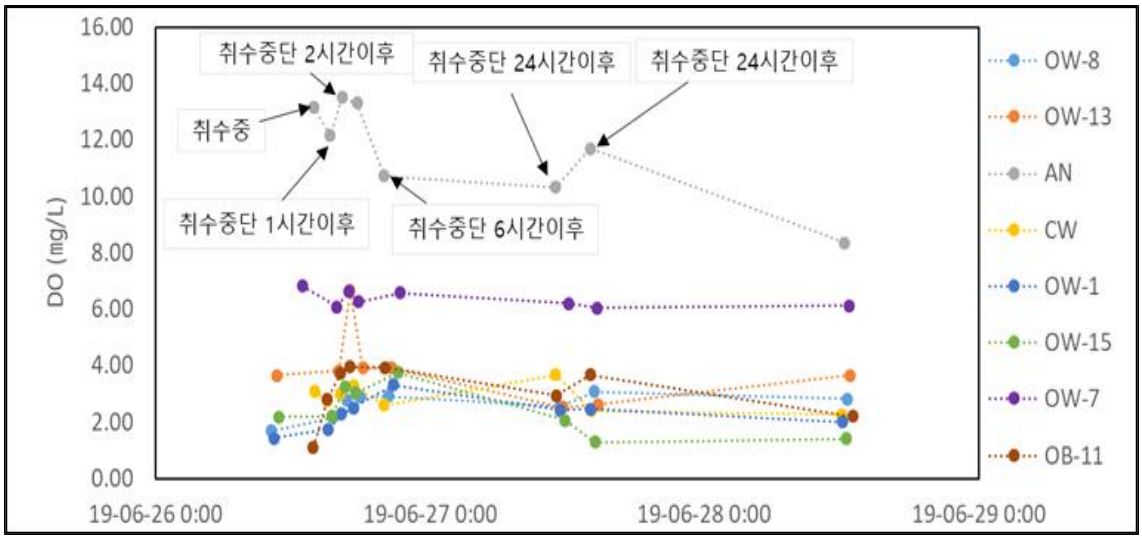


그림 75. 집수정 취수중단에 따른 현장 간이수질 분석 결과





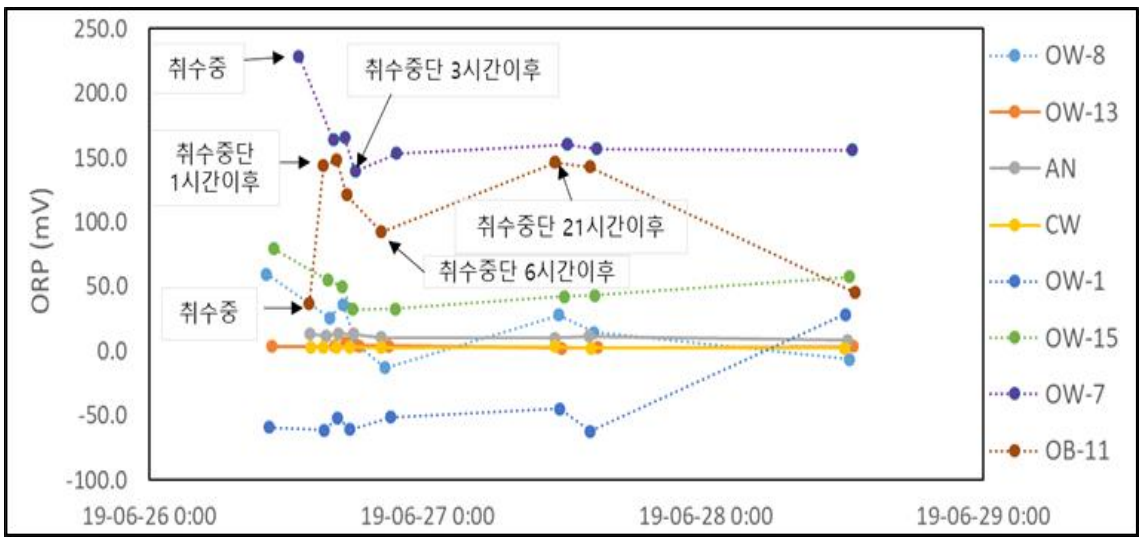


그림 75. 집수정 취수중단에 따른 현장 간이수질 분석 결과(계속)

(3) 주요 이온 변동 특성

각 지점별 주요 양이온 농도 분포를 보면, 관측공 OW-8, OW-13, CW, OW-1에서 $Na^+ > Ca^{2+} > K > SiO_2 > Mg^{2+}$ 순으로 분포가 되어 있으며, 하천은 양이온 농도 분포가 $Na^+ > Ca^{2+} > K > Mg^{2+} > SiO_2$ 순으로 되어 있으며, 그외 제방 근처 관측공 OW-7, OW-15의 양이온 농도 분포를 보면 $Na^+ > Ca^{2+} > SiO_2 > Mg^{2+} > K$ 순으로 되어 있으며, 제외지 관측공 OB-11 양이온 농도 분포는 $SiO_2 > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K$ 순으로 분포를 보인다.

하천 근처 관측공인 OW-8, OW-13과 OW-1 에서 양이온 K 분석 값이 제방 근처 관측공 OW-7, OW-15의 양이온 K 분석 값보다 크다는 것을 알수 있다. 각 지점별 주요 음이온 농도 분포를 보면, 제외지 OB-11을 제외한 모든 관측공 OW-1, OW-7, OW-8, OW-13, OW-15, CW, AN 에서 $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ 순으로 분포하며, 제외지 OB-11은 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^- > NO_3^-$ 순으로 분포한다. 하천 근처 관측공인 OW-8, OW-13과 OW-1 에서 음이온 HCO_3^- 분석 값이 제방 근처 관측공 OW-7, OW-15의 음이온 HCO_3^- 분석 값보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 음이온 Cl^- 분석값은 제방 근처 관측공 OW-7, OW-15이 하천 근처 관측공 분석값 보다 크다.

(4) 이온 분석 결과 수리화학적 유형

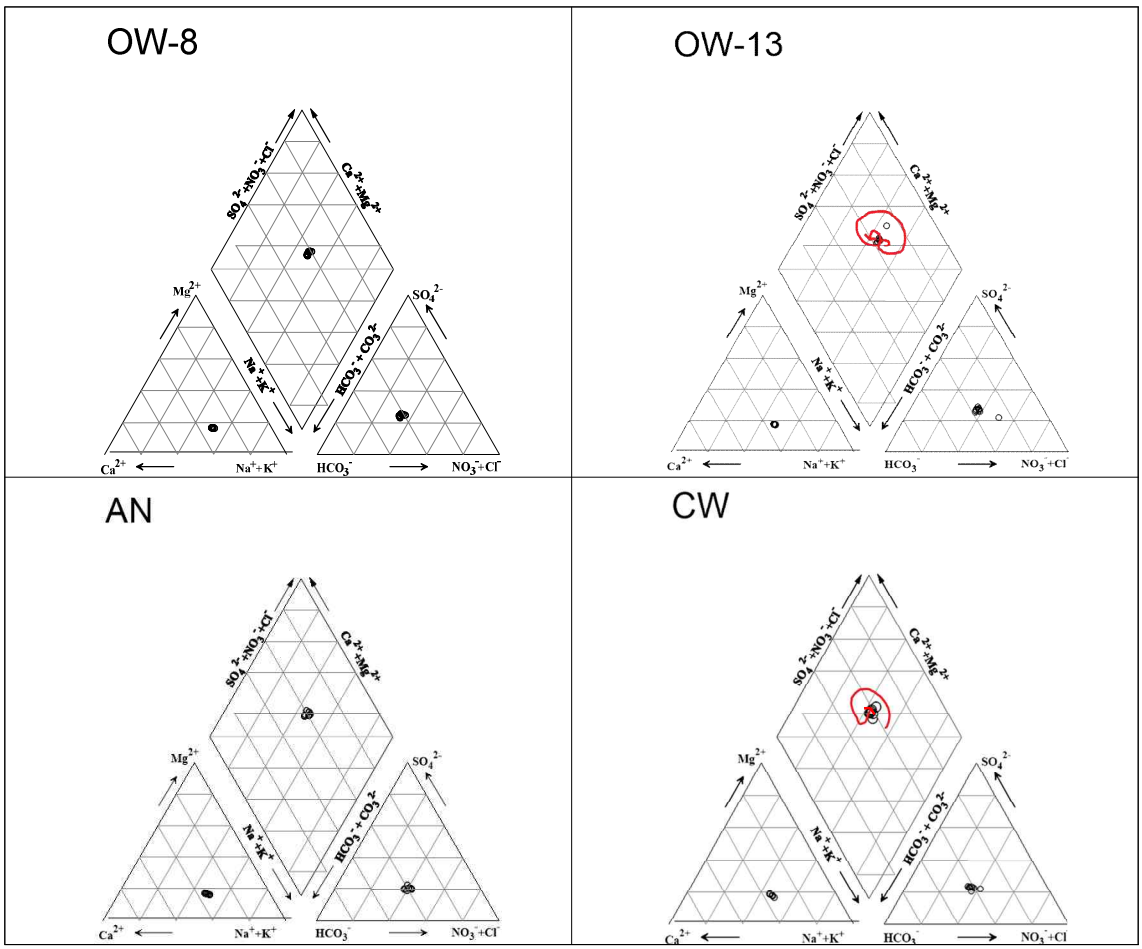


그림 76. 하천 인근에 위치한 관측공의 유형을 파악하기 위한 Piper diagrams

하천 인근 관측공(OW-8, OW-13)의 수질 특성은 Ca-SO_4 Type을 보이며, 이는 AN의 유형인 Ca-SO_4 Type 과 같다. 관정 OW-13은 취수 중단 3시간에 NO_3^-, Cl^- 증가하지만 다시 감소하며, 이는 하천수의 유입이 된 것으로 보인다. 인위적인 오염 지표인 NO_3^- 증가는 하천수의 영향을 직접 받고 있음을 알 수 있다.

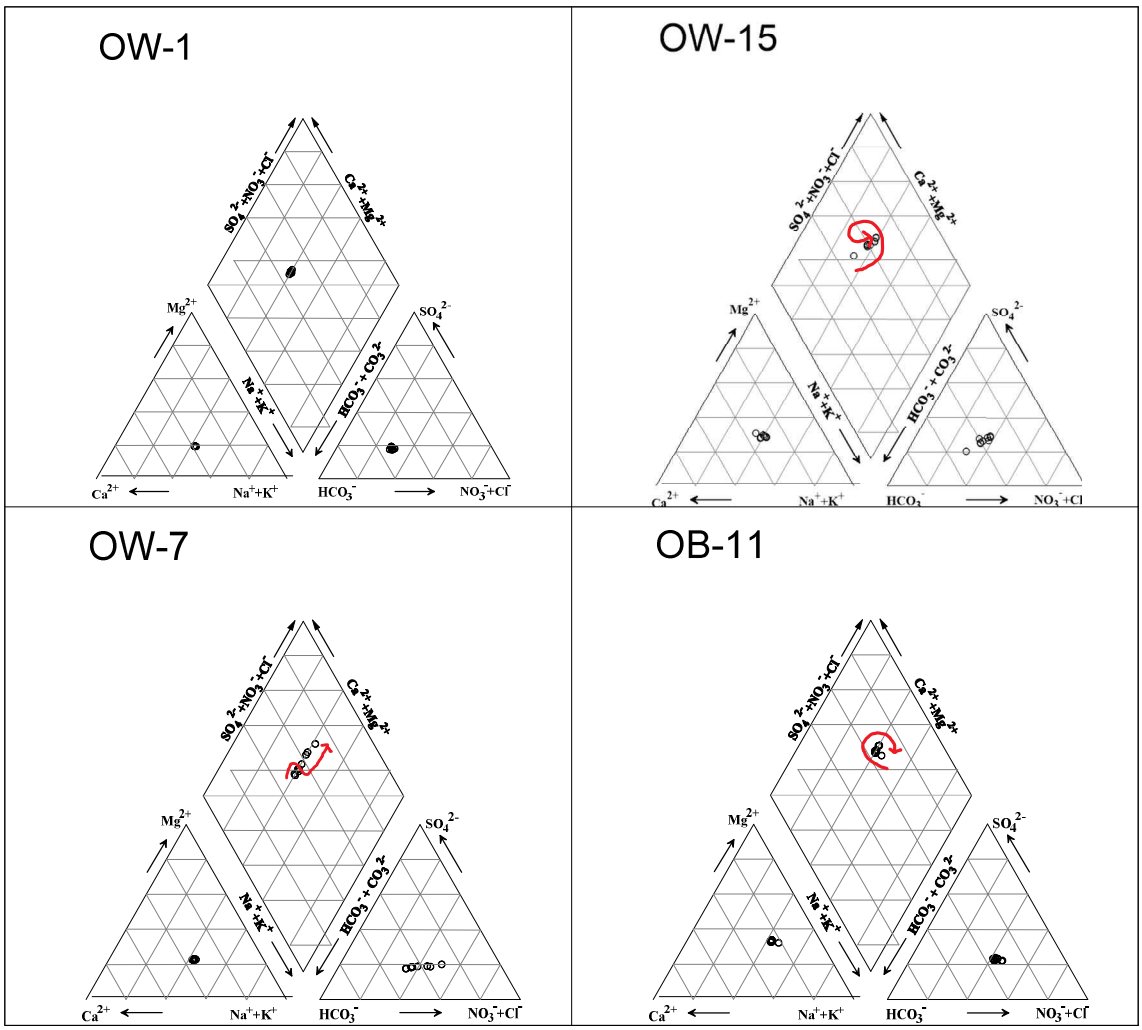


그림 77. 제방 인근 관측공들의 유형을 파악하기 위한 Piper diagrams

제방 근처의 관정 OW-1은 Ca-HCO_3 Type 이며, OW-15, OW-7, OB-11은 Ca-SO_4 Type 이다. 실험이 진행됨에 따라 OW-15의 경우 Cl^-, SO_4^{2-} 농도가 감소하다 취수중단 6시간이후 증가, 다시 감소하는 경향을 보이며, Ca^+와 HCO_3^-도 감소와 증가의 변화가 보인다. 이는 하천수의 유입이 되다 지하수의 유입으로 판단된다.

(5) 철/망간 분석 결과

표 57. 철, 망간 분석 값

Sample Name	측정일시	Fe^{2+} (㎎/L)	Mn^{2+} (㎎/L)	Sample Name	측정일시	Fe^{2+} (㎎/L)	Mn^{2+} (㎎/L)
OW-8-1	2019-06-26 11:58	1.44	1.10	OW-1-1	2019-06-26 11:49	3.16	2.07
OW-8-2	2019-06-26 15:39	1.24	1.10	OW-1-2	2019-06-26 15:13	5.52	2.02
OW-8-3	2019-06-26 17:10	2.84	1.10	OW-1-3	2019-06-26 16:37	5.00	1.94
OW-8-4	2019-06-26 18:40	0.96	0.96	OW-1-4	2019-06-26 18:00	3.56	1.85
OW-8-5	2019-06-26 20:30	1.12	1.06	OW-1-5	2019-06-26 21:02	3.24	1.32
OW-8-6	2019-06-27 11:41	1.12	0.85	OW-1-6	2019-06-27 11:52	4.60	1.75
OW-8-8	2019-06-28 13:18	1.36		OW-1-8	2019-06-28 12:32	3.76	
OW-13-1	2019-06-26 12:10	0.06	0.15	OW-15-1	2019-06-26 11:22	11.04	1.63
OW-13-2	2019-06-26 16:03	0.12	0.29	OW-15-2	2019-06-26 15:43	13.92	1.87
OW-13-3	2019-06-26 17:27	0.02	0.03	OW-15-3	2019-06-26 16:43	16.32	1.56
OW-13-4	2019-06-26 18:20	0.07	0.01	OW-15-4	2019-06-26 18:02	14.88	1.40
OW-13-5	2019-06-26 20:45	0.05	0.21	OW-15-5	2019-06-26 21:22	16.08	1.50
OW-13-6	2019-06-27 12:00	0.02	0.14	OW-15-6	2019-06-27 12:15	8.32	1.58
OW-13-8	2019-06-28 13:37	0.01		OW-15-8	2019-06-28 12:59	6.16	
AN-1	2019-06-26 14:10	0.00	0.38	OW-7-1	2019-06-26 12:40	0.00	1.03
AN-2	2019-06-26 15:30	0.03	0.09	OW-7-2	2019-06-26 16:09	0.03	1.36
AN-3	2019-06-26 16:48	0.05	0.11	OW-7-3	2019-06-26 17:09	0.01	0.75
AN-4	2019-06-26 18:41	0.00	0.26	OW-7-4	2019-06-26 18:24	0.16	1.28
AN-5	2019-06-26 20:16	0.02	0.06	OW-7-5	2019-06-26 21:30	0.02	1.24
AN-6	2019-06-27 12:10	0.05		OW-7-6	2019-06-27 12:30	0.03	1.15
AN-8	2019-06-28 12:47	0.03		OW-7-8	2019-06-28 13:50	0.02	
CW-1	2019-06-26 14:39	0.59	0.68	OB-11-1	2019-06-26 13:00	4.52	1.62
CW-2	2019-06-26 15:02	0.71	0.66	OB-11-2	2019-06-26 14:55	0.68	0.98
CW-3	2019-06-26 16:21	0.57	1.23	OB-11-3	2019-06-26 16:18	0.68	0.97
CW-4	2019-06-26 17:50	0.54	0.11	OB-11-4	2019-06-26 17:40	1.44	0.99
CW-5	2019-06-26 20:05	0.54	0.98	OB-11-5	2019-06-26 19:51	2.11	1.13
CW-6	2019-06-27 11:50	0.08	0.55	OB-11-6	2019-06-27 11:20	0.34	1.04
CW-8	2019-06-28 12:17	0.02		OB-11-8	2019-06-28 13:28	3.40	

*CW의 장기 취수 전 초기 Fe^{2+} 은 1.20 mg/L, Mn^{2+} 은 0.86 mg/L 임

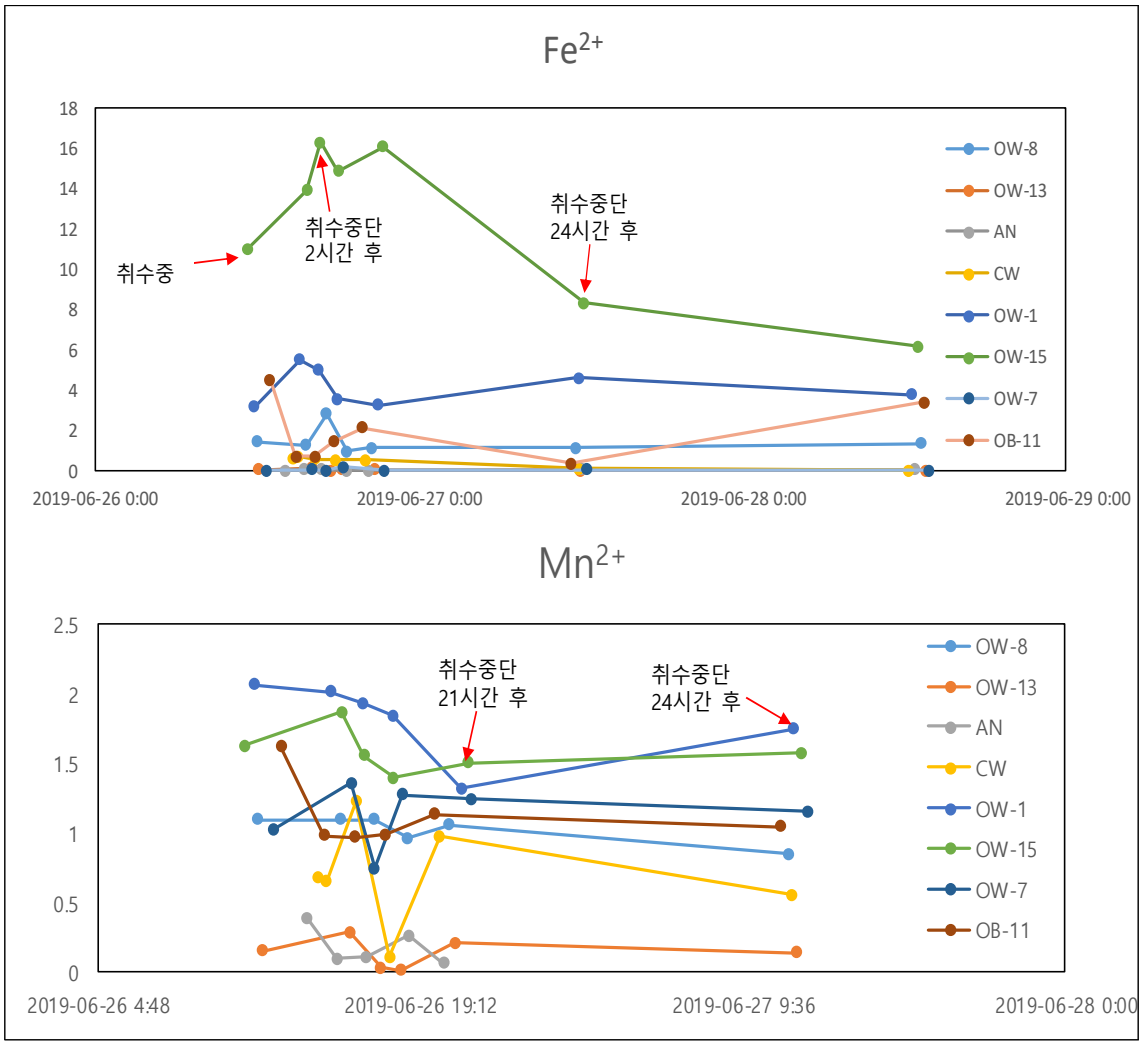


그림 78. 관정별 Fe^{2+}, Mn^{2+} 분포도

Fe^{2+} 는 취수 중 일때 보다 취수 중단 후 농도가 증가하는 경향을 보이며, 다만, 제외지 OB-11에서만 Fe^{2+} 의 농도가 감소한다.

취수 중단 24시간 이후부터는 OW-8과 제외지 OB-11을 제외한 나머지 관측공에서 Fe^{2+} 의 농도가 감소하였고, OW-8, OB-11에서는 Fe^{2+} 의 농도가 증가한다.

제방 근처 관측공 OW-15, OW-7 와 제외지 OB-11 관측공에서 Fe^{2+} 의 농도가 하천 근처 관측공에 비해 높은 것을 알 수 있다.

Mn^{2+} 은 취수 중 일 때 보다 취수 중단 1시간 이후 OW-13, OW-15, OW-7 관측공에서 농도가 증가한다.

취수 중단 21시간 이후에는 제방 근처 관측공인 OW-1, OW-15에서 Mn^{2+} 의 농도가 증가하였으며, 그외 하천 근처 관측공인 OW-8, OW-13 에서는 Mn^{2+} 의 농도가 감소가 크게 나타난다.

제 4 절. 방사형 집수정 취수량 감소 특성 평가

1. 취수량 추정 및 변동 분석

기존 강변여과수 취수량을 추정하는 방법은 주로 경험식을 사용하게 되는데, 추정식으로 사용되는 경험식들의 한계점을 검토함으로써 연구지역(안성천유역)에서 적용가능한 취수량 추정식을 도출하는 기초자료로 활용

경험적 방법에 의한 취수량 산정식은 크게 2가지 유형으로 개발되었으며, 유효반경 방법을 사용하는 경우, 경험적 방법을 사용하는 경우로 구분

가. 유효반경을 사용하는 방법의 경우

방사상 집수정과 수직정이 동일한 수리지질학적 조건하에 있다고 가정한 상태에서 유효 반경을 고려하여 수직정에 의한 초기 취수량을 결정

표 58. 유효반경 산정 방법

유효반경		특이점
Wegenstein	$\frac{R_e}{L}=1$	현장에서 수평정의 운영 과정에서 얻어지는 정보의 특성 및 시설의 복잡성을 고려할 때 실제 적용에는 한계가 존재
Nering	$R_e=\frac{2}{3}\cdot\sum\frac{L}{n}$	
Citrini	$\frac{R_o}{L}=\sqrt[n]{0.25}$	유효반경 고려시 수평정의 상호 간섭 효과에 대하여 검토, 물의 흐름이 수평정을 갖는 우물로 공간적으로 발생하기 때문에 근 사치로서의 의미가 있음

나. 경험적 방법을 이용하는 경우

양수 및 계측 자료에 기반한 취수량 비교 분석이나 물리적 모델을 활용한 연구에 기반하고 있음

Abweser, Mukherjee 등이 현장 중심의 연구를 수행하여 산출량과 매질의 관계 등을 검토하였으나, 보편적인 경우에 해당되지 않아 검증에 한계를 갖고 있음

Ikonomov와 Varga는 수직 임계 속도를 활용하여 수평정의 유입 능력을 평가하였으며, $V_{\max}=65\sqrt[3]{K}$의 관계를 도출. 그러나, 이 식은 초기 산출량과 수리적 특성의 상관관계를 보여주기 보다는 수평정의 유입 능력을 설명하는 지시자로서의 역할에 불과

Kordas 방법은 하천 수로의 직하부에 설치된 방사형 집수정으로서 지하수의 함양 유입이 방사상으로 균일하게 이루어져야 한다는 가정이 존재하며, 다수의 수평정($8\leq n\leq 16$)인 경우에는 적용에 한계를 갖고 있음

Milojevic 방법은 우물통 주변에 수평정이 일부만 설치되거나 하천 바닥을 완전 관통하지 않는 우물통의 경우와 같이 당초 적용 조건에 맞지 않는 유형의 경우에는

산출량에 비례상수를 곱하여 산출량을 추정토록 제시하고 있어 원 추정식의 적용 조건을 벗어하는 경우 등에 대해서는 적용에 한계를 갖게 됨

Razumov 방법은 다양한 인자를 고려하여 매우 복잡한 추정식 개발되었으나, 현장 데이터 취득의 한계점 등이 존재하여 실제 현장 적용 사례가 거의 없고 적용성에도 한계를 보임

2. 연구지역 적용 추정식의 개발

가. 연구지역 적용 추정식의 개발

Thiem의 이론식에 기반한 추정식과 경험방법에 기반한 추정식을 비교할 때 경험식의 경우 위에서 보는 바와 같이 다양한 한계점을 내포하고 있음. 국내에서 경험식에 의한 추정이 일반적으로 이루어지나 본 연구에서는 Thiem의 이론식을 토대로 보다 일반화할 수 있는 추정식 개발을 수행

연구지역에 적절한 취수량 추정식을 도출하기 위하여 기존 추정식의 변형된 형태를 도출하는 것을 목적으로 다양한 접근을 시도하였음.

- ❑ 수평집수정의 취수량을 단일 대형수직정의 수리적 특성으로 환산하는 단순화된 취수량 산정법의 적용을 위해서 유효반경의 적정성을 검토
- ❑ 국내의 경우 하천퇴적층의 분포가 균질하지 않고 3차원적으로 상이하기 때문에 경험식 적용시 수리전도도의 대표성에 한계를 보이므로 수리전도도의 합리적 추정을 위한 접근 방법을 검토

나. 유효반경의 적정성에 대한 검토

안성천 유역에 기 시공된 수평집수정을 대상으로 다양한 방법을 적용한 유효반경을 도출, 실제 집수정의 산출량과 추정된 산출량의 관계를 검토

각 추정식에서 제안한 유효반경 계산식을 활용하여 각 수평정의 유효반경을 계산하였음

계산된 유효반경을 적용하여 산출량 추정식으로 계산한 결과 Hantus, Babac의 제안이 상대적으로 적합하며 나머지는 과다 산정되는 것으로 나타났음

표 59. 각 추정식에서 제안한 유효반경 계산식을 적용한 결과

well_no.	m)					
	Wagenstein	Nering	Citrini	Gilibov	Hantus	Babac
#1	50.00	33.33	41.02	41.72	17.29	15.30
#3	30.00	20.00	24.61	24.41	9.92	12.95
#4	30.00	20.00	24.61	24.41	9.92	12.95
#5	30.00	20.00	24.61	24.41	9.92	12.95
#6	70.00	46.67	57.42	53.51	24.53	16.90
#7	40.00	26.67	32.81	33.06	13.60	14.25
#8	50.00	33.33	41.02	41.72	17.29	15.30

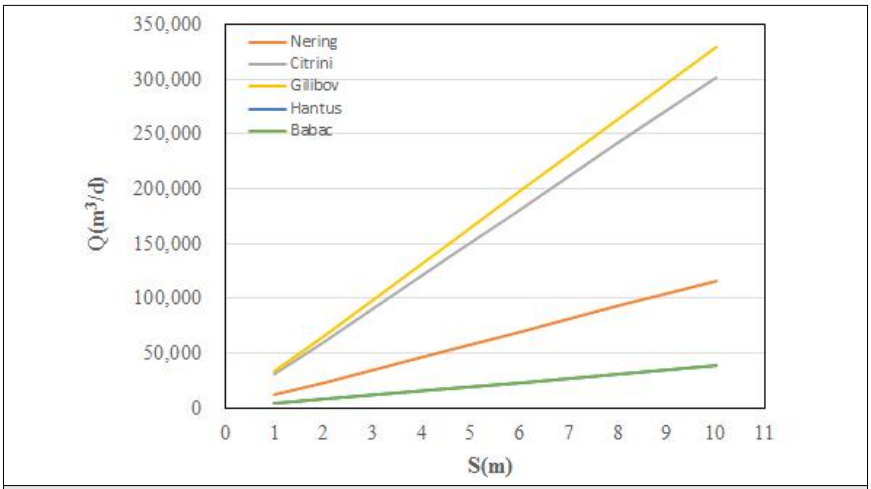
계산된 유효반경을 토대로 각각의 수리전도도(입도분석 산술평균, 입도분석 GEOMEAN 평균)를 적용하여 산출량을 추정

조사단계 시추자료에서 획득한 입도 분석 결과로 추정한 수리전도도를 적용하여 취수량을 추정했을 때, 입도분석 GEOMEAN 평균값을 사용하는 것이 적합(실제 초기 취수량은 6,124㎥/d로 산정)

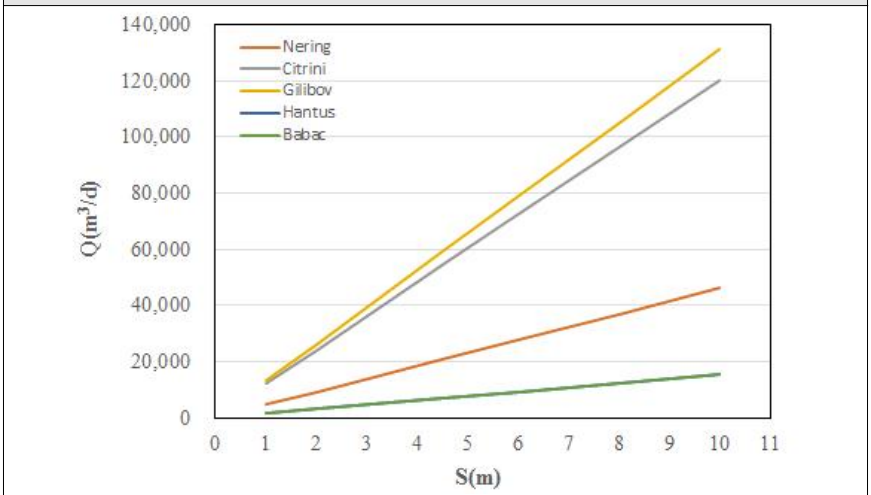
표 60. 각각의 수리전도도를 적용하여 추정된 산출량

K(m/s)	Q(㎥/d)				
	Nering	Citrini	Gilibov	Hantus	Babac
0.001194209[1)]	52,022	135,638	147,883	17,430	17,336
0.000476323[2)]	20,750	54,101	58,985	6,952	6,914

▸ 1) : 입도분석 산술평균
▸ 2) : 입도분석 GEOMEAN 평균



a) 입도분석 산술평균에 의한 수리전도도 적용 산출량



b) 입도분석 GEOMEAN 평균에 의한 수리전도도 적용 산출량

그림 79. 각 수리전도도 값을 적용하여 추정한 산출량

본 연구결과를 토대로 2차년도에는 타지역에 확대 적용하여 추정식에 대한 검증 계획임

한편, 14개 지점에서의 양수시험결과에 의해 계산된 수리전도도를 적용했을 경우 추정된 산출량은 6,256㎥/d(Babac)로 확인되었음. 실제 설계단계에서 집수정당 2~5개의 양수시험만 수행되는 점을 고려할 때 양수시험에 의한 k 값의 적용에도 한계가 존재함

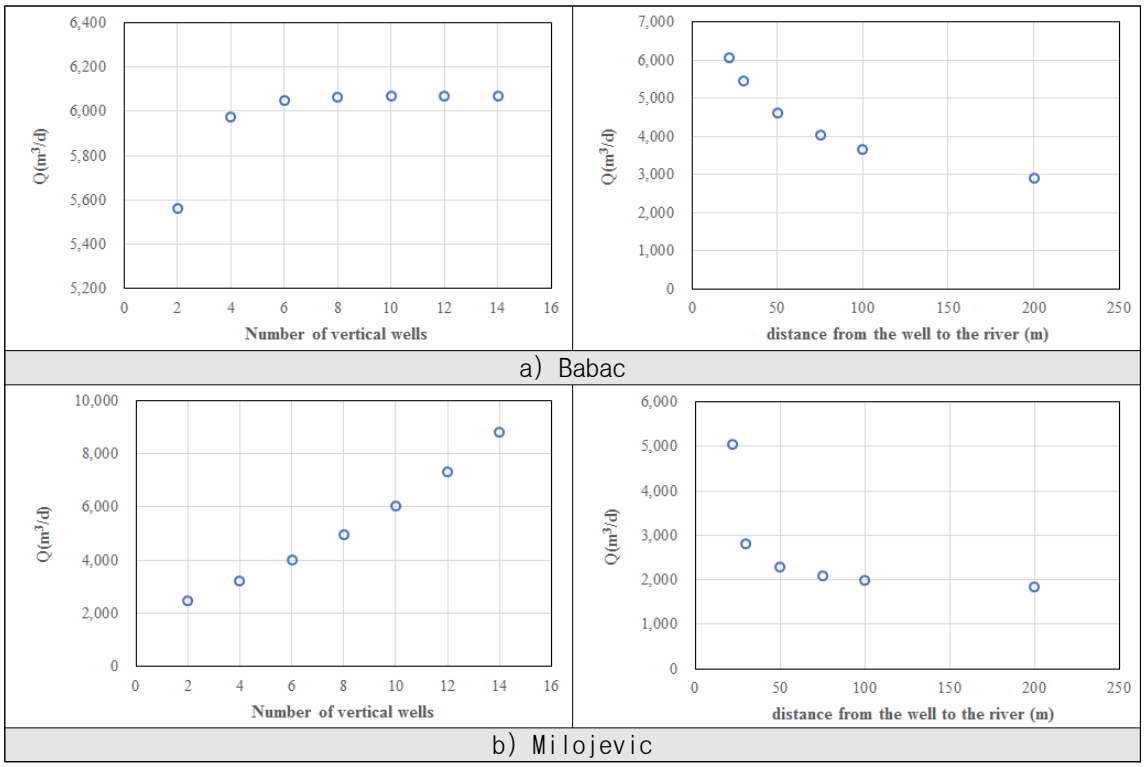


그림 80. 산출량과 수평정 개수, 하천과의 이격거리 상관관계

Babac의 추정식으로 계산된 산출량에서 수평정 개수가 일정 수량 이상에서는 완만한 증가를 보이고 있어, 수평정간의 간섭현상을 고려할 때 Babac의 추정식이 적합한 것으로 나타남

Milojevic의 추정식은 수평정 개수에 따른 증가는 경향을 보이는데, 식을 적용하는 조건 중에 하천과의 이격거리와 수평정 거리에 대한 조건($\frac{b}{L}=0.513$, $1.5 \leq \frac{b}{L} \leq 8$)에 부합하지 않는 것으로 나타남. 추정식을 적용하는데 한계점이 있는 것으로 나타남

아래와 같이, Babac이 제시한 2개의 추정식간의 대한 상관관계를 살펴보면, 하천과의 이격 거리는 두 추정식이 거의 동일한 값을 보여 모두 적용 가능하나, 수평정 개수에 대해서는 두 방법이 동일한 결과를 제시하지 않는데, 경험에 기반하여 만들어진 X축에 적용된 추정식은 적용 조건의 한계점($\frac{b}{L}=0.467$, $2 \leq \frac{b}{L} \leq 10$)이 존재하여 실제 적용에는 한계가 있음.

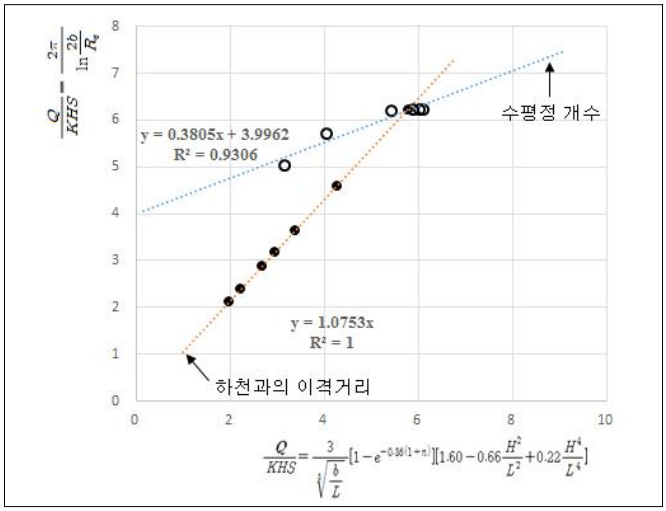


그림 81. Babac 추정식들에 대한 상관관계

다. 수리전도도의 적정성에 대한 검토

집수정의 취수량 추정을 위해서 가장 중요한 인자는 대수층의 수리전도도가 해당

실제 조사 및 설계 단계에서 대수층의 수리전도도는 불과 몇 개소의 시추, 착정을 통하여 추정하고 있어, 대수층의 수리적 대표성을 충실히 반영하는데 한계점을 갖고 있음

국내 하천변 대수층의 수리전도도 특성을 이해하고 대푯값을 추출하는 방안을 검토함으로써 취수량 추정의 정확도를 높이는 것이 요구됨

안성천 연구지역의 경우 수평집수정의 입도 분석 자료를 토대로 추정한 수리전도도는 skewness되어 분포

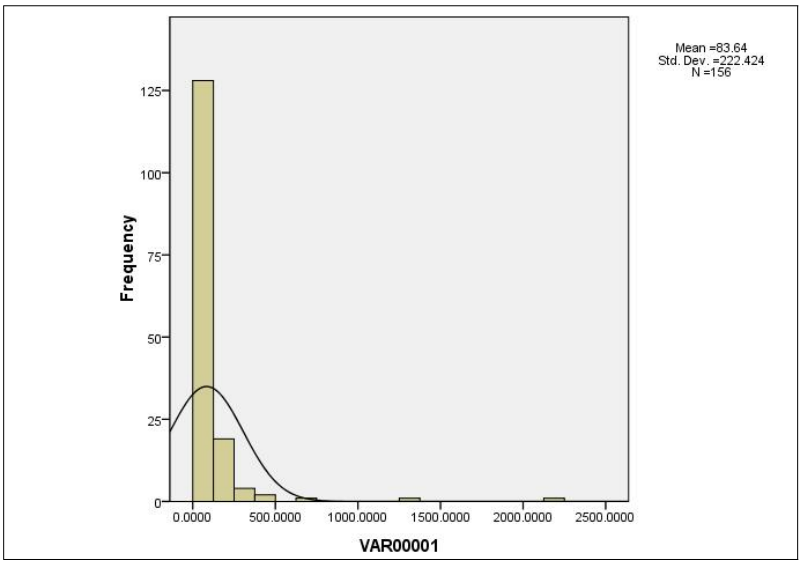


그림 82. 안성천 입도 분석에 의한 추정 수리전도도의 히스토그램

집수정의 취수량 평가에 필수적인 평균 수리전도도를 추정하기 위하여 자연로그 변환를 실시한 결과 쌍봉(bimodal) 모양의 분포를 보임

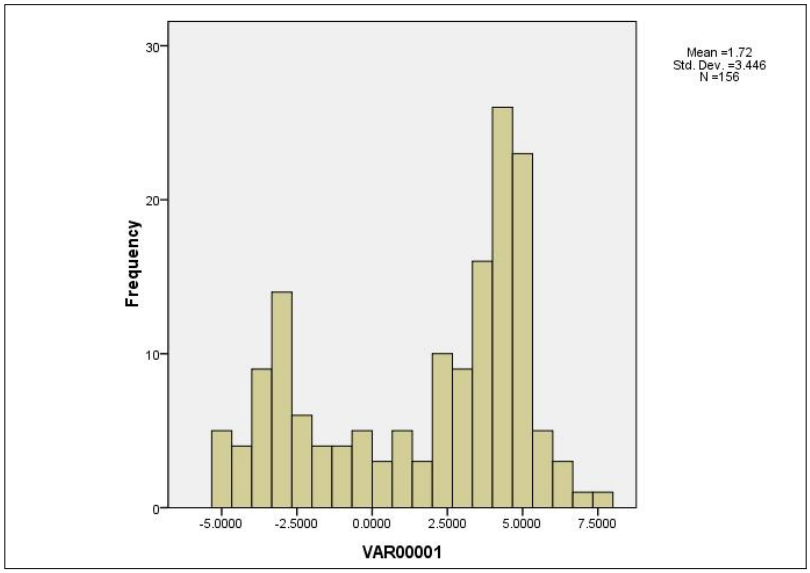


그림 83. 로그 변환된 수리전도도 분포(쌍봉형태)

연구지역에서도 2가지 그룹의 로그변환 수리전도도 분포가 존재

히스토그램에서 보듯이 통계적으로 2개 그룹의 데이터가 존재하고 있으나 공간적으로 2개 그룹으로 분류되는지 확인이 필요하며, 실제 공간적으로도 2개 그룹으로 분류가 된다면 취수량 산정시 각 그룹별로 각기 다른 수리전도도를 적용하여 취수량 추정을 실시해야 할 것임

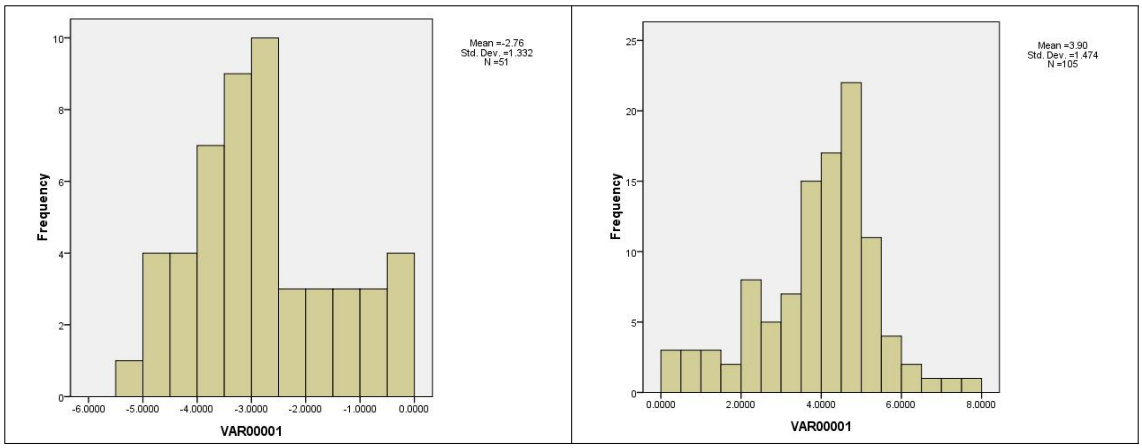


그림 84. 로그 변환된 값이 0보다 작은 경우와 큰 경우의 히스토그램

총 156개의 시료에 대하여 입도분석을 실시하고 수리전도도를 추정하였으며, 14개의 수직정이 굴착된 하부의 수평정 구간에 대한 입도분석 및 수리전도도 추정값을 별도로 추출하여 비교

입도 분석에 의하여 추정한 수리전도도 총 156개에 대한 산술평균은 83.64 m/d이며, 기하평균은 5.60 m/d로 나타남

표 61. 입도분석결과 및 양수시험 결과로 추정된 수평정의 수리전도도 (단위 : m/d)

Well_no	k	Well_no	k	Well_no	k	Well_no	k	Well_no	k	Well_no	k
#1-4	114.58	#3-02	0.03	#4-6	102.41	#5-02	0.05	#6-4	173.44	#7-02	0.06
#1-6	12.97	#3-04	0.02	#4-8	102.65	#5-04	0.03	#6-6	141.36	#7-04	1.07
#1-8	45.14	#3-06	0.03	#4-10	76.83	#5-06	0.07	#6-8	2222.38	#7-06	39.40
#1-10	104.28	#3-08	0.02	#4-12	92.71	#5-08	0.11	#6-10	60.14	#7-08	11.69
#1-14	176.85	#3-10	0.07	#4-14	68.68	#5-10	0.07	#6-12	334.38	#7-10	0.07
#1-16	92.41	#3-12	0.01	#4-16	36.52	#5-12	7.21	#6-14	44.69	#7-12	0.19
#1-18	55.52	#3-14	0.01	#4-18	47.90	#5-14	0.03	#6-16	436.73	#7-14	0.38
#1-20	9.31	#3-16	11.09	#4-20	194.98	#5-16	0.05	#6-18	150.99	#7-16	65.35
#1-24	138.20	#3-18	137.05	#4-22	75.61	#5-18	0.04	#6-20	69.22	#7-18	0.90
#1-26	128.73	#3-20	100.82	#4-24	120.42	#5-20	0.03	#6-22	0.81	#7-20	22.49
#1-28	69.80	#3-22	18.31								
		#3-24	0.03								
		#3-26	0.02								
Mean	86.16	Mean	20.58	Mean	91.87	Mean	0.77	Mean	363.41	Mean	14.16
Stdev	52.98	Stdev	44.63	Stdev	44.35	Stdev	2.26	Stdev	667.01	Stdev	22.27
Geo_mean	63.97	Geo_mean	0.22	Geo_mean	83.24	Geo_mean	0.08	Geo_mean	106.08	Geo_mean	1.67
IW-4	55.64	IW-1	28.43			IW-2	32.83			IW-3	39.66
OW-13	46.40	OW-1	55.38			OW-6	22.38			OW-9	34.21
OW-14	45.10	OW-3	55.04			OW-8	9.16			OW-11	38.26
Mean	49.05	Mean	46.28			Mean	21.46			Mean	37.38

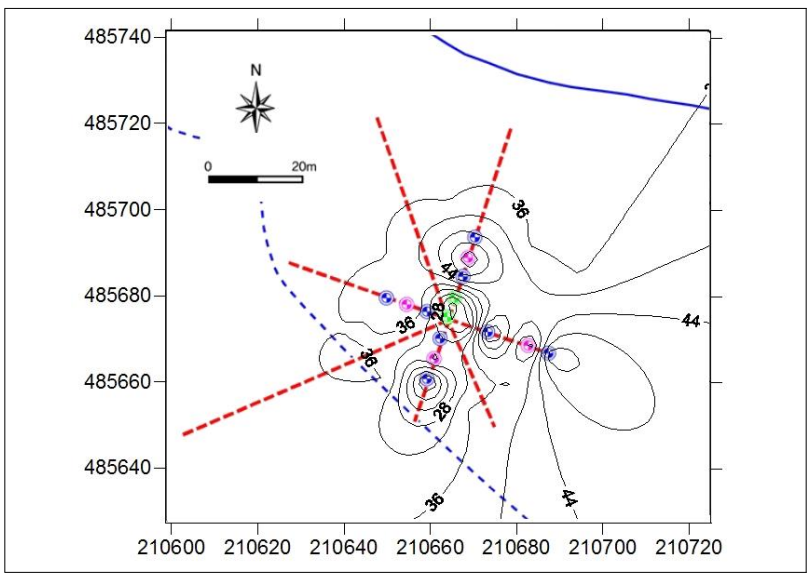


그림 85. 수직정 양수시험 자료를 활용한 수리전도도도 분포도(단위 : m/d)

향후 2차년도에는 수리전도도의 분포 형태가 쌍봉인 경우 적정 수리전도도의 결정 방안에 대하여 추가로 검토할 예정임

본 연구를 통하여 Babac의 식을 아래와 같이 수정 제안함

$$Q_i = \frac{2\pi \cdot k_{geomean} \cdot H \cdot S}{\ln\frac{2b}{R_e}} \quad , \quad R_e = \exp\left(\ln(2b) - \frac{2\pi\sqrt[3]{\frac{b}{L}}}{3\left[1-10^{-0.36(1+n)}\right]\left[1.598-0.66\frac{H^2}{L^2}+0.222\frac{H^4}{L^4}\right]}\right)$$

$k_{geomean}$은 시추공에서 취득된 입자 입도분석으로부터 추정한 수리전도도의 기하평균을 의미함.

라. 취수량 감소 특성

각 수평정의 취수량 평가 및 변화 비교를 위하여 유사한 설계 조건인 prepack 스크린을 설치한 1번, 4번, 6번 및 7번 수평정을 대상으로 장기 양수 및 취수량 비교분석 실시

각 수평정마다 토출부에 개폐장치 및 유량계를 부착, 수평정 양수시 타 수평정은 모두 밀폐함으로써 해당 수평정에서의 취수량만을 산정토록 하였음

표 62. 각 수평정별 양수시간

Well_no.	#1	#4	#6	#7
양수시간	18~19시간	8~26시간	8~14시간	19~24시간

각 수평정별 일정기간 동안 장기 양수를 실시한 결과 대부분 취수량 감소 발생

1번 수평정에서의 취수량은 2016년 1월 9일에는 3,072㎥/d이었으나 3월 6일에는 2,376 ㎥/d로 약 696 ㎥/d이 감소

6번 수평정은 2016년 1월 11일에 3,072 ㎥/d에서 2월 26일에는 1,812 ㎥/d까지 감소하여 1,260 ㎥/d의 차이를 보임

7번 수평정은 2016년 3월 5일에 1,501 ㎥/d에서 3월 9일에 711 ㎥/d로 단기간 내에 급격한 감소를 보임

반면에, 4번 수평정에서는 2016년 1월 10일 1,985 ㎥/d이었으나 2월 및 3월 양수시에도 큰 변화 없이 유지

각 수평정에서의 취수량의 감소 기울기를 보면, 1번 수평정은 12.4 ㎥/d.d, 4번 수평정은 2.3 ㎥/d.d, 6번 수평정은 24.4 ㎥/d.d, 7번 수평정은 187.3 ㎥/d.d로 나타남

본 양수가 이루어진 기간(1월부터 3월초)은 지하수 사용이 거의 없는 기간으로 주변 양수에 의한 인위적인 영향은 없는 것으로 파악

하천 수위는 보가 설치 운영되고 있어 일정하게 유지 , 2월과 3월의 양수시 하천에 인접한 7번 수평정에서 급격한 취수량 감소 발생한 반면, 하천에 유사하게 인접한 4번 수평정에서는 거의 변화가 없는 점을 고려할 때 갈수기의 하천 유량이 각 수평정별 취수량 변화에 미치는 영향은 미미한 것으로 보임

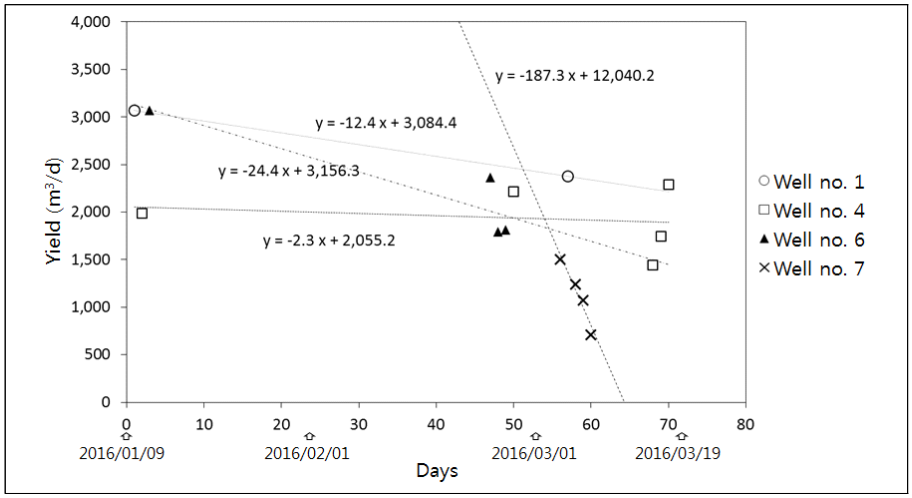


그림 86. 각 수평정별 양수에 따른 취수량 변화

마. 수평정의 입자 및 수리 특성

수평집수정 시공 과정에서 수평방향 2m 심도마다 충적층 시료를 채취하여 입도분석(골재의 입도분석시험 규격) 실시

수평집수관 4공(#1, #4, #6, #7)에서 총 86개 시료채취, 입도분포곡선을 이용하여 충적층 시료에 대한 균등계수(coefficient of uniformity, Cu)와 곡률계수(coefficient of curvature, Cc)를 산출

수리전도도는 매질의 공극률과 입경간의 관계로부터 추정

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2$$

공극률은 균등계수를 이용하여 다음과 같이 표현

$$n = 0.255(1 + 0.83^{C_u})$$

4개 수평정의 입도 분포 특성에서 구간별 분포 입도가 불균질하여 입경의 이상값을 제외한 평균값은 아래의 표에 제시

표 63. 각 수평정의 평균 입경 크기(이상값 제외) (단위 : mm)

Well	#1	#4	#6	#7
d10	0.49	0.46	0.57	0.19
d15	0.64	0.59	0.72	0.31
d20	-	-	-	0.43
d30	1.1	1.02	1.22	0.65
d40	1.45	1.37	1.58	0.92
d50	1.96	1.85	2.14	1.23
d60	2.85	2.51	3.12	1.68
d70	4.08	3.56	4.33	2.56
d85	7.74	7.14	7.94	5.88
Cu	5.31	5.36	5.4	15.17
Cc	1.02	0.93	0.97	1.45

각 수평정의 깊이별로 균등계수의 이상값을 제외한 평균을 구하면 1번, 4번 및 6번 수평정은 각각 5.31, 5.36, 5.40으로 유사하며 이상값 미제거시의 6.51, 5.42, 7.02와 큰 차이를 보이지 않는 반면에, 7번 수평정은 15.17과 20.47로서 큰 차이가 존재

즉, 7번 수평정의 경우에는 매우 큰 이상값이 존재할 뿐 아니라 이상값을 제외한 값의 경우에도 매우 불균질한 입도 분포 특성을 갖고 있음

수리전도도는 positive skewness 분포를 보이기 때문에 산술평균은 과다 산정될 우려가 있어 기하평균을 평균값으로 사용

각 수평정의 입도로부터 추정한 평균 수리전도도를 보면, 1번 수평정은 81.83 m/d, 4번 수평정은 80.35 m/d, 6번 수평정은 114.06 m/d, 7번 수평정은 3.63 m/d를 보여 7번 수평정 주변의 수리전도도가 상대적으로 낮음

1번, 4번 및 6번 수평정의 경우에는 중앙값을 중심으로 상하값이 상대적으로 균등한 수준으로 분포하는 반면에 7번 수평정은 중앙값이 매우 낮은 범위에 위치하고 있어 수리전도도 분포가 치우치고 있음

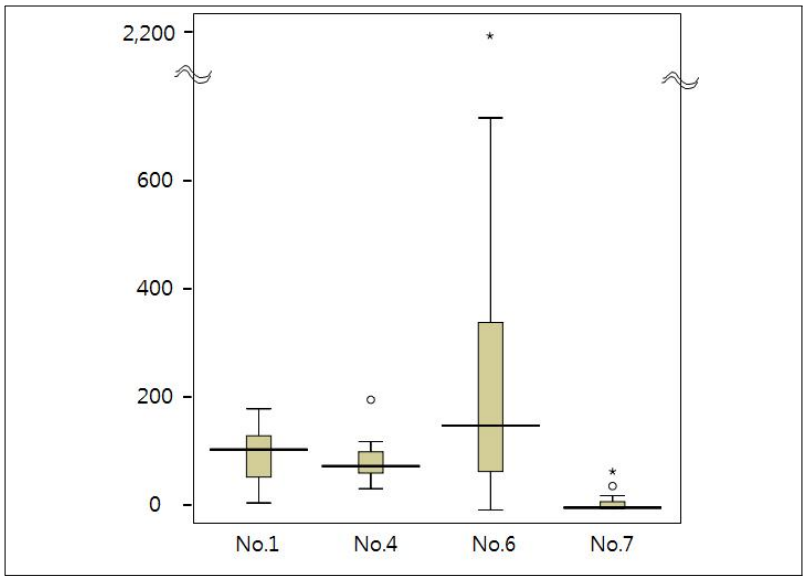


그림 87. 각 수평정에서 추정된 수리전도도에 대한 박스도표

바. 수평정의 설계와 시공 요인 검토

본 연구 지역의 수평집수정이 위치하는 심도에서의 d50은 약 0.25~2 mm로서 세립질 내지 중립질 모래

일반적으로 대수층내 입자의 크기가 4배 이상 차이가 존재하는 경우에는 구간별로 설계를 차별화하도록 제안

여재 크기의 적정성은 여재의 d50은 대수층 d50의 중앙값의 5배 정도로 선정하고 균등계수가 2 미만이 되도록 하여야 하며, 이를 토대로 최종 결정된 여재는 7번 공은 전체적으로 세립질이며 multi-prepack이 설치된 점을 고려하여 D50=2.5 mm, Cu=2.0인 여재를 적용하였으며, 나머지 3개 공은 입자의 분포를 고려하여 여재 B (D50=7.0

mm, Cu=1.8)와 여재 C(D50=3.5 mm, Cu=1.65)를 지층 특성을 고려하여 적용

각 수평정의 구간별로 설계 내역을 토대로 선정된 여재가 적합한지 NAVFAC의 설계 매뉴얼에서 제시된 대수층과 여재의 입자 관계로 부터 수두 손실 및 입자 유실에 대한 검토를 실시

각 수평정 구간의 물리적 특성(균등계수, 공극률, 수리전도도 및 하천과의 이격거리 등)과 취수량 감소 속도의 비교를 통해 취수량 감소 원인에 대하여 검토

수리전도도에 영향을 미칠 수 있는 균등계수, 공극률 등은 취수량 감소 속도와 상당한 관계를 보이는 것으로 나타났으며, 특히 균등계수의 표준편차가 취수량의 감소 속도와 밀접하게 관련

균등계수를 제외한 나머지 인자들은 산출량의 감소와 상대적으로 미미한 상관성 또는 상관성이 없는 것으로 보임

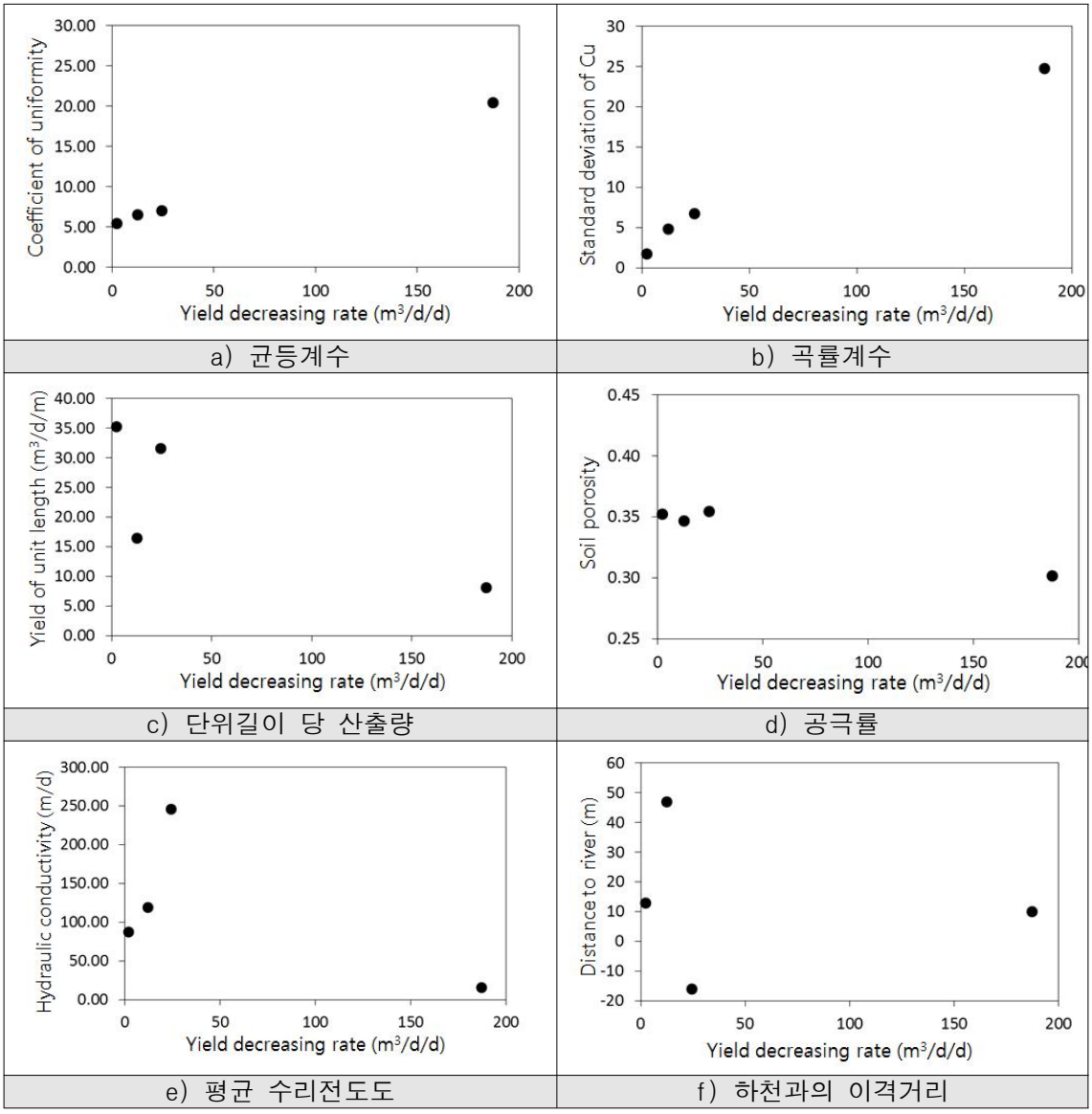


그림 88. 물리적 특성과 취수량 감소 속도 비교

수평정 심도에서의 입자에 기반한 추정 수리전도도와 수평정 상부의 전반적인 대수층의 수리전도도의 비교를 위하여 수직정에서 실시한 양수시험 자료로부터 산정된 수리전도도를 검토

수직정에서 실시한 양수시험 결과는 해당 영향권내 대수층의 평균적인 수리전도도를 보여주는 것으로 간주, 현장 수직정은 집수정을 중심으로 약 25 m 이내에 방사상으로 굴착되었으므로 각 수평정의 약 25 m 깊이까지의 추정 수리전도도 자료를 비교 대상으로 고려

1번과 4번 수평정은 입도분석에 의한 수리전도도 추정값이 상부 대수층의 평균 수리전도도 보다 약 2배 정도 높게 나타났고, 6번 수평정의 경우에는 약 3.5배의 높게 나타남, 6번 수평정의 경우에는 수평정 주변에서의 입도가 크기 때문에 크리깅으로 추정된 상부 지층의 평균 수리전도도보다 훨씬 높게 나타남, 7번 수평정 구간의 추정 수리전도도는 상부 대수층보다 매우 낮은 것으로 나타났으며, 입도분석에 의한 수리전도도가 과다 추정될 수 있다는 가정을 적용한다면 7번 수평정 외부의 실제 수리전도도는 추정된 값보다 더 낮을 수 있음을 고려해야 함. 이와 같은 7번 수평정의 낮은 수리전도도는 양수시험에 의한 수리전도도 및 타 수리전도도와 달라 불균질성을 잘 보여주고 있어 수평정을 통한 물의 유입경로 주변의 불균질성이 취수량 감소 및 낮은 산출성 등에도 영향을 미치는 것으로 보임

표 64. 입자 기반 추정 수리전도도와 양수시험 자료 기반 수리전도도 (단위 : m/d)

Method	Estimated from pumping test (kriging analysis)	Estimated from grain size analysis
No. 1	36.73	63.96
No. 4	33.05	83.24
No. 6	30.42	106.08
No. 7	33.99	1.67
Average	34.52	42.54

국내에서 강변여과수 개발 후 취수량 감소에 대한 우려가 대두되고 있는 시점에서 안성천에 설치된 연구용 강변여과수 시설을 대상으로 대수층의 입자 특성 및 수질 특성이 취수량 감소에 어떻게 영향을 미칠 수 있는지에 대하여 평가

본 연구에서는 입자의 불균질성 및 세립질의 분포와 철과 망간 이온의 고농도에 의한 공극 막힘 가능성 등이 취수량 감소 원인으로 추정

강변여과수의 설계 단계에서의 조사는 수직정의 양수시험 및 입도분석 자료 등을 토대로 취수가능량 평가

본 연구결과와 같이 지층 내에서의 입자의 불균질성이 취수량 감소에 영향을 미칠 수 있으므로 지층의 불균질성을 규명하는 것이 매우 중요

특히, 세립질 입자가 불균질하게 분포하는 경우에는 철과 망간 산화물에 의한 clogging의 가능성에 대하여 사전 진단 필요, 향후 연구에서는 장기 운영과정을 통하여 초기 취수량의 변화를 파악하고 주변지역의 영향 등을 고려한 특성을 분석하고자 함

제 5 절. 취수량 평가 프로그램 개발 및 평가

1. 수치모델과 인공신경망 모델을 융합한 적정 취수량 결정 기법 검토

가. 프로그램 개발 배경

최근 한국수자원공사에서 시행하고 있는 부산 경남권 물 문제 해결을 위하여 낙동강 지역에서 강변여과수 개발을 추진중에 있으나, 배후 지역에서의 지하수위 강하에 대한 우려 및 민원이 제기되어 사업 추진이 원활하지 못한 실정이다. 따라서, 배후지의 수위를 최대로 유지하면서 적정량의 강변여과수를 취수할 수 있는 방안을 고안하는 것이 필요하다.

현재까지 방사형 집수정의 개발에 따른 지하수위 강하의 평가는 Modflow 등의 수치모델을 활용하여 취수량 평가와 병행하여 수행되어 왔다. 그러나, 수치모델의 경우에는 현장의 수리적 특성을 완벽하게 반영하지 못하는 한계점이 있으며, 수치모델 구축에 장기간이 소요되고 최적의 취수량을 결정하는데도 매우 많은 반복 수행이 요구되고 있어 현실적이지 못한 방법에 해당한다.

따라서, 최근에 각광받고 있는 인공신경망을 활용한 지하수위의 변화 및 분포 예측 기술이 개발되고 있어 이를 활용한 지하수위 예측 기법이 가능하게 되었다. 인공신경망에 대한 연구는 많은 연구자들이 수행하여 왔으며 (Daliakopoulos et al., 2005; Adamowski and Chan, 2011; Devarajan and Sindhu, 2015; Kisi et al., 2017), 강변여과수의 수질 개선 및 오염원 저감 효과에 대한 평가 연구 (Sahoo et al., 2005), 강변의 지하수 함양시 장기간의 지하수위 변화를 예측하는 연구 (Shamsuddin etal., 2017) 등이 수행된 바 있다. 그러나, 국내에서는 아직까지 이와 같은 연구 및 기법 개발이 미미한 실정으로서 본 연구에서 관련 기술을 개발, 제공하고자 한다.

따라서, 수학적 연산을 활용하지 않는 인공신경망을 활용하여 배후지 지하수위를 예측하고, 배후지의 지하수위 강하를 최소화할 수 있도록 각 수평정의 취수량을 결정하는 프로그램을 개발하였으며, 사용자 매뉴얼을 작성, 제공하고자 한다.

나. 수치 모델 분석

방사형 집수정의 수평정별 취수량 조건을 적용하여 배후지의 지하수위를 예측하기 위하여 Modflow를 활용한 지하수 모델링 수행

모델의 Layer 설정: 지층의 수직 분포는 3개의 layer로 구성하였는데 하부로부터 연암, 풍화암, 충적층 등이며, 하상 구간의 충적층은 9.00×10^{-2} ~1.00×10^{-3} cm/sec, 주변의 충적층은 9.90×10^{-3} cm/sec, 풍화암은 7.00×10^{-4} cm/sec, 연암은 3.60×10^{-5} cm/sec를 적용

모델 영역 : 방사형 집수정이 포함되도록 1.2 × 1.2 ㎞로 설정하였으며, 전반적인 격자 크기는 10 × 10 m, 방사형 집수정 인근은 2 × 2 m로 조밀하게 구성

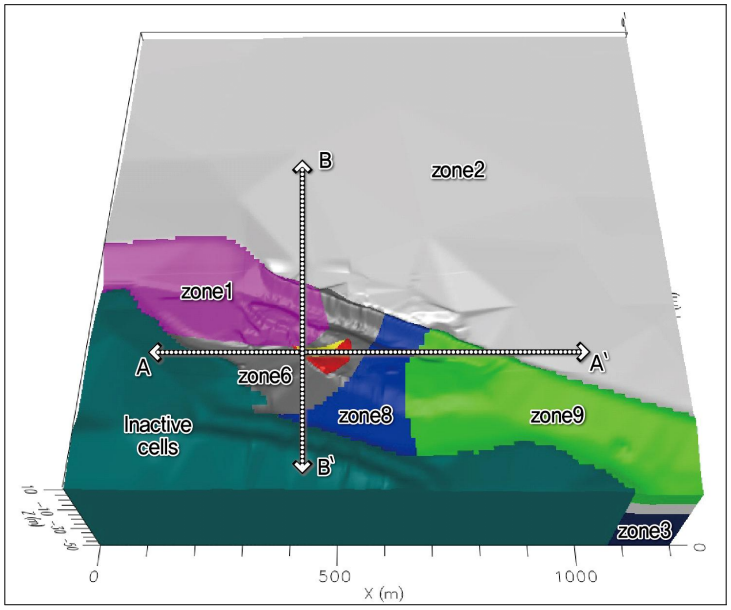


그림 89. 연구지역 수리전도도 분포

구축된 정류 모델을 활용하여 수평정별 취수량에 변화를 주면서 부정류 모델을 수행. 모델상의 총 취수량은 개략적으로 4,000 ㎥ /d 및 5,000 ㎥ /d이 되도록 설정하였으며, 수평정의 취수량을 조절함에 따른 주변 지하수 관측정의 지하수위를 예측하였음.

총 취수량 4,000 ㎥ /d 및 5,000 ㎥ /d에 대하여 각각 5가지 경우를 가정하였음. 각 조건에 대한 지하수위 예측 결과, 제내지에서는 지하수위 평균이 4.2 ~ 6.0 El.m, 제외지에서는 3.2 ~ 4.6 El.m의 범위를 나타내고 있어 취수에 의한 지하수위 강하를 분석하였음.

총 10가지 경우에 대한 수평정의 취수 조건과 각 취수시의 배후지 지하수위 예측 결과는 아래의 표와 같다.

표 65. 10가지 경우에 대한 수평정별 취수량 조건

Case	Total pumping rate (㎥/d)	Simulation condition (㎥/d)						
		HW-1	HW-3	HW-4	HW-5	HW-6	HW-7	HW-8
1	4,045.1	637.9	301.2	292.2	330.5	1,192.8	577.8	712.7
2	4,031.6	0.0	366.9	341.2	378.7	1,382.8	684.9	877.1
3	4,019.7	683.2	340.3	0.0	355.4	1,266.7	616.3	757.8
4	4,037.8	816.5	389.1	355.7	452.2	300.9	792.9	930.3
5	4,020.6	715.9	330.4	314.9	356.3	1,298.4	643.7	361.1
6	5,011.2	381.6	401.6	353.5	437.6	1,685.2	775.1	976.7
7	5,010.1	1,029.2	504.3	406.3	693.1	0.0	1,157.9	1,219.4
8	5,021.4	979.2	470.8	391.1	607.1	399.9	1,031.6	1,141.7
9	5,002.2	843.9	396.9	349.7	466.7	1,176.7	807.6	960.7
10	5,014.3	994.5	432.7	374.4	471.4	1,846.5	894.8	0.0

표 66. 10가지 경우에 대한 관측정의 지하수위 예측 결과

Case	Estimated groundwater level (El.m)										
	AN-1	OW-1	OW-2	OW-7	OW-8	OB-4	OB-8	OB-9	OB-10	OB-11	OB-12
1	4.4447	3.5495	3.4399	4.1547	4.6808	6.0358	5.6653	4.9936	4.6907	4.3123	4.6664
2	4.4430	3.6814	3.6533	4.2066	4.6946	6.0590	5.6764	5.0212	4.7552	4.3968	4.6800
3	4.4445	3.5484	3.4744	4.1693	4.6873	6.0359	5.6653	4.9928	4.6921	4.3224	4.6701
4	4.4493	3.2876	3.1353	4.0549	4.6498	5.9969	5.6440	4.9464	4.5890	4.1818	4.6396
5	4.4440	3.6402	3.4765	4.1603	4.6808	6.0356	5.6639	5.0001	4.7101	4.3312	4.6666
6	4.4345	3.3048	3.2141	4.0699	4.6492	6.0031	5.6476	4.9525	4.6072	4.2119	4.6414
7	4.4453	2.6771	2.4691	3.7857	4.5764	5.8925	5.5845	4.8266	4.3376	3.8551	4.5732
8	4.4436	2.8401	2.6495	3.8711	4.5972	5.9457	5.6182	4.8761	4.4279	3.9643	4.5938
9	4.4390	3.1074	2.9477	3.9879	4.6270	5.9860	5.6406	4.9249	4.5304	4.1030	4.6204
10	4.4325	3.4558	3.1672	4.0580	4.6439	6.0174	5.6553	4.9711	4.6311	4.2118	4.6373
Ave.	4.4420	3.3092	3.1627	4.0518	4.6487	6.0008	5.6461	4.9505	4.5971	4.1891	4.6389

다. 인공신경망 모델 구축

인공신경망은 입력층(Input layer), 은닉층(Hidden layer) 및 출력층(Output layer)으로 구성되며, 각 층간의 뉴런의 연결강도를 최적의 상태로 적응하는 과정을 말함

출력 뉴런에 의하여 절단되는 은닉층의 출력은 아래 식과 같이 각 시냅스의 가중치 (w_{ij})와 노드의 입력자료 (x_j)에 의하여 결정됨

$$t_j = g(\sum w_{ij} x_i)$$

출력층에서 출력값 (y_k)는 시냅스의 가중치와 은닉층 및 출력층에서의 활성화 함수 (g 및 $\bar{g}$)에 의하여 결정됨

$$y_k = \bar{g}\left(\sum_{j=0}^{n} w_{kj} \cdot g\sum_{i=0}^{m} w_{ij} x_i\right)$$

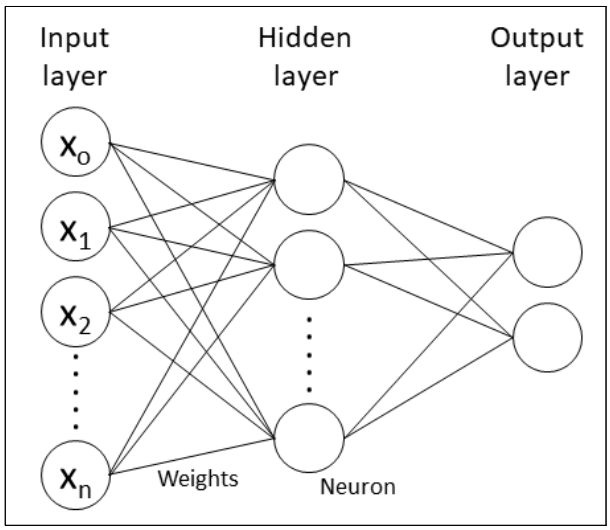


그림 90. 다층퍼셉트론 인공신경망 모델 개념

본 연구에서는 역전파알고리즘을 이용하는 다층 퍼셉트론(Multilayer perceptron) 신경망 네트워크 기법을 적용하였으며, 입력변수로서 각 수평정별 취수량 및 총취수량을 사용하고 출력변수는 지하수 관측정의 지하수위를 적용, 7개 취수정의 양수 조건을 입력조건, 배후지 관측정인 OW-7 및 OB-11의 지하수위를 출력조건으로 설정

❑ 모델 구축 결과

- 모델의 은닉층은 1개로 설정하고 은닉층의 활성화 함수는 쌍곡탄젠트 함수를 적용, 은닉층의 노드는 6개, 출력층의 노드는 2개
- 10개 모든 자료에 대한 실제값과 예측값의 Pearson 상관계수는 0.01 유의수준하에서 OW-7은 0.997, OB-11은 0.993으로 매우 높아 본 모델을 채택

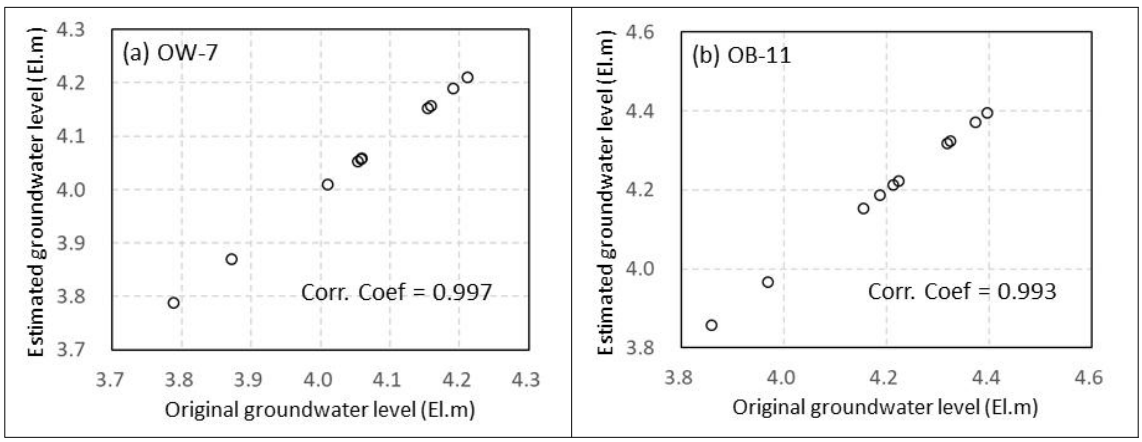


그림 91. 원자료와 예측자료의 상관관계(좌:OW-7, 우:OB-11)

라. 인공신경망 프로그램 초안 개발

Python 프로그램 언어와 인공신경망 Tensorflow 기능을 이용하여 수평정별 양수조건을 고려한 배후지 지하수위 예측 프로그램 초안 개발 (신경망 수위 예측 프로그램 v1.0)

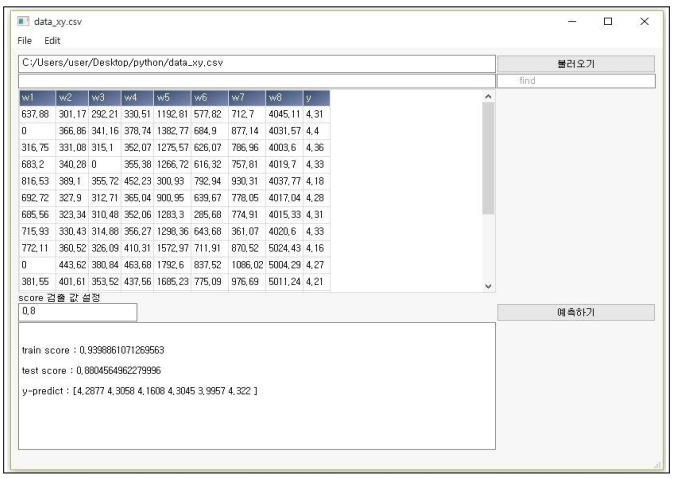


그림 92. 신경망 수위 예측 프로그램 v1.0 실행화면

CSV 형태의 수평정별 취수량 및 지하수위 데이터 활용, 예측 결과의 정확도를 평가할 수 있는 Score 값 검출 기능 부여 (상관계수 0.95 수준 분석 등의 조건을 사용자가 직접 입력)

예측하기 클릭을 통하여 결과 도출, 훈련자료 및 검증 자료의 정확도 출력 및 예측 자료 출력

다음 절에서 보다 범용으로 사용할 수 있도록 사용자 GUI 등 기능을 개선한 프로그램을 추가로 설명하고자 함

```
.......
 # ====================================
 #          버튼 누를시 - 실제 계산 부분
 # ====================================
  def conten(self):
   # 텍스트로 받은 숫자를 정수로 변환
     num = self.textedit1.toPlainText()
     s = num
     n = float(s)
   # 데이터 정규화
     from sklearn.preprocessing import StandardScaler
     scaler = StandardScaler()
     scaler.fit(x_data)
     x_data_scaled = scaler.transform(x_data)
     for i in range(0, 100):  # i의 변수 선언 0으로 시작하여 100회를 수행
         x_train, x_test, y_train, y_test = model_selection.train_test_split(x_data_scaled, y_data, test_size=0.33)
    # estimator가 많으면 많은 변수 활용, random_state가 일정해야 결과도 동일하게 추출됨
     estimator = RandomForestRegressor(n_estimators=100, criterion='mse', max_depth=None, min_samples_split=2,
                     min_samples_leaf=1, min_weight_fraction_leaf=0.0, max_features='auto',
                     max_leaf_nodes=None, min_impurity_decrease=0.0, min_impurity_split=None,
                     bootstrap=True, oob_score=False, n_jobs=1, random_state=None, verbose=0,
                     warm_start=False)
         estimator.fit(x_train, y_train.values.ravel())
         global y_predict, score0, score1, sum
         y_predict = estimator.predict(x_train)
         score0 = metrics.r2_score(y_train, y_predict)
         y_predict = estimator.predict(x_test)
         score1 = metrics.r2_score(y_test, y_predict)
.......
```

그림 93. 신경망 수위 예측 프로그램 v1.0 일부 내용

마. 배후지 수위 영향 최소화 취수량 결정 방안

상기 인공신경망 모델을 활용하여 OW-7 및 OB-11의 지하수위가 높게 유지할 수 있는 경우를 도출할 수 있는 지를 평가하기 위하여 Case별 분석 수행

❑ 모델 수행 조건

- 각 수평정별 취수 조건을 0 ㎥/d에서부터 최대 취수량까지 무작위 값을 부여하여 입력 자료를 생성하였으며 방사형 집수정의 총취수량이 동일하게 4,000 ㎥/d이 되도록 조정하여 최종적으로 임의의 52가지의 수평정 취수 조건에 대하여 2개 지점의 지하수위를 예측

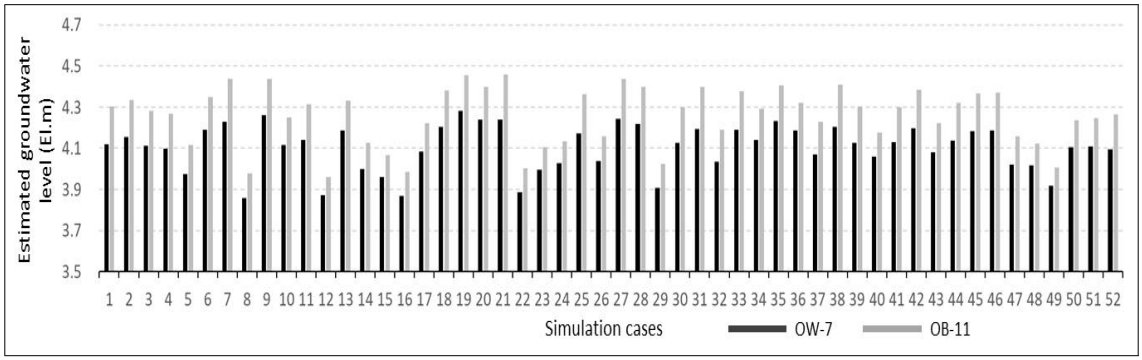


그림 94. 52가지의 취수조건에 따른 2개 관측정 지하수위 예측

❑ 배후지 고수위 및 저수위 결과에 대한 해석

- 2개 관측정의 지하수위가 높은 경우(Case 9, 19, 21)와 낮은 경우(Case 8, 16, 22)를 비교
- 하천 유로 방향으로 굴착되어 있는 HW-6 수평정의 취수량이 2개 관측정의 지하수위에 가장 큰 영향을 미침
- 즉, 총량이 일정하다면, 하천 방향으로 굴착되어 있는 수평정에서의 취수 비율이 높은 경우에 주변 2개 관측 지점의 지하수위는 높게 형성되어 지하수위 강하가 상대적으로 적음을 보여줌
- 또한, HW-6 수평정의 취수량의 변화 폭이 상대적으로 크기 때문에 지하수위 변화의 폭도 크게 나타남
- 2개 관측정 지하수위가 낮은 경우는 제방측으로 굴착된 HW-1, HW-3 및 HW-8의 취수 총량이 많은 경우에 나타나는 현상으로 보이나, 이는 대수층의 수리전도도의 분포 등 보다 복잡한 요인에 의하여 결정되는 것으로 보임
- 결론적으로 연구지역 방사형 집수정을 52가지 경우의 수 중에서 운영 방법을 결정한다면, OW-7 수위를 가장 높게 유지하기 위해서는 19번의 취수 조건, OB-11 수위를 가장 높게 유지하기 위해서는 21번의 취수 조건임

표 67. 고수위 및 저수위의 운영조건 제안

Contents	Case No.	HW-1	HW-3	HW-4	HW-5	HW-6	HW-7	HW-8	OW-7	OB-11
Average of 52 cases	-	440.4	297.1	291.3	455.1	1104.0	629.1	783.2	-	-
High level cases	9	390.5	225.3	371.6	79.8	1,385.7	1,065.1	482.2	4.2623	4.4373
	19	372.7	386.6	449.4	162.3	1,002.4	457.9	1,168.8	4.2827	4.4543
	21	239.7	403.9	141.9	113.9	1,343.6	913.2	843.8	4.2395	4.4580
Low level cases	8	485.7	455.5	186.6	792.7	477.3	654.1	948.2	3.8560	3.9766
	16	758.0	161.9	154.6	668.8	685.5	1,271.1	300.2	3.8682	3.9855
	22	408.2	256.5	159.0	735.5	657.3	704.2	1,079.3	3.8871	4.0022

바. 모델의 검증

상기 모델은 10가지의 모사 조건 데이터를 토대로 배후지 수위 최적화를 위한 인공신경망 모델을 개발하였음.

모사 조건의 수를 줄일 경우의 ANN 모델의 적용성을 평가하기 위하여 다음 3가지 추가 조건에 대하여 모델을 개발

- Case 1: 상기 10가지 조건중 5번 제외한 9가지 활용
- Case 2: 5번 및 16번을 제외한 8가지 경우를 활용한 모델
- Case 3: 2, 5, 13, 14, 16번 등을 제외한 5가지 활용

표 68. 모델 개발 결과

Case	Hidden layer			Output layer		SSE	Pearson corr. coef.	
	No. of layer	Activation function	No. of node	Activation function	No. of node		OW-7	OB-11
1	1	Hyperbolic tangent function	6	Identity function	2	0.006	0.997	0.996
2	1	Hyperbolic tangent function	6	Identity function	2	0.004	0.995	0.998
3	1	Hyperbolic tangent function	6	Identity function	2	0.025	0.896	0.897

표 69. 각 모델에 의한 수위 예측 결과

Case	Wells	Average level (El.m)	Standard deviation(m)
Original model	OW-7	4.10	0.11
	OB-11	4.26	0.14
Case 1	OW-7	4.12	0.11
	OB-11	4.27	0.13
Case 2	OW-7	4.13	0.07
	OB-11	4.29	0.09
Case 3	OW-7	4.16	0.02
	OB-11	4.32	0.03

Case 1, Case 2는 당초 모델과 유사한 지하수위 값을 도출, 52가지 경우에 대하여 3가지 모델에 의한 결과를 도출한 결과, 당초 모델과 Case 3의 결과는 다소 차이가 존재함

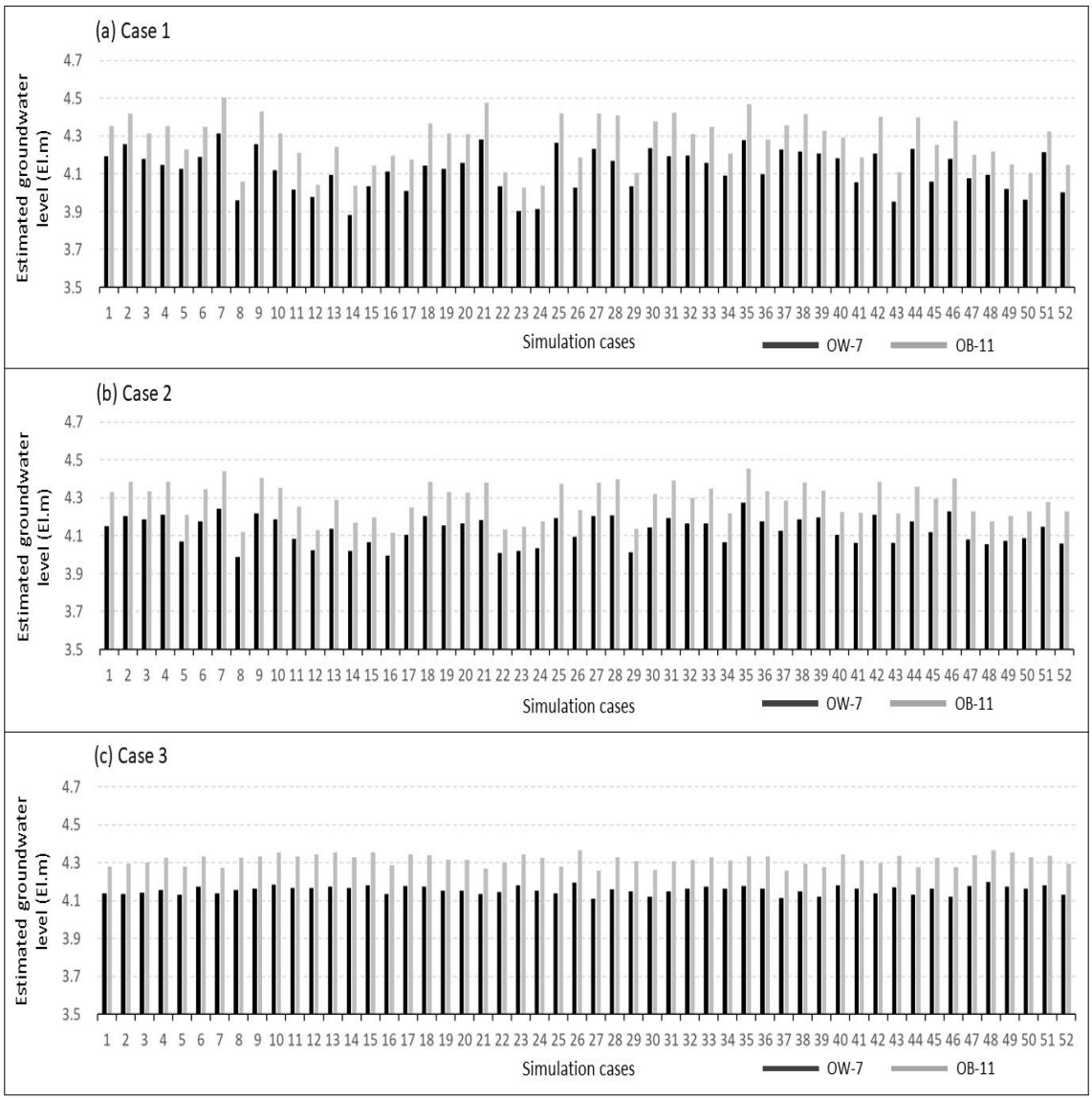


그림 95. 취수 조건에 따른 지하수위 변화

사. 인공신경망 모델의 적용성

수평정별 취수량 및 총 취수량과 두 지점의 지하수위 관계(특히, HW-6, HW-8 및 총취수량과 OW-7 및 OB-11과의 상관성)를 보면, 각 인자간 선형 관계가 약하여 다중선형회귀 분석에 의해서는 지하수위에 대한 모든 수평정의 영향 모형을 구축할 수 없음

따라서, 인공신경망이 보다 다양한 인자에 의하여 비선형적 영향을 받게되는 경우에 적합한 모델로 평가되었으며, 본 연구에서와 같이 다수의 수평정의 취수 조건

에 의하여 영향을 받는 배후지의 지하수위 최적 조건 도출에 적합한 모형으로 평가됨

다수의 입력변수와 종속변수가 선형 관계를 보이지 않는 경우에는 회귀모델에 의한 모델 구축이 어려우므로 인공신경망을 활용한 모델 개발이 적합함

강변여과수 개발과 같이 대수층의 수리전도도가 공간적으로 다양하고, 수평정의 취수량이 각기 다른 조건을 갖는 경우에는 수평정별 취수량과 주변의 지하수위로부터 인공신경망 모델을 구축한다면, 현장에서 발생되는 취수에 의한 지하수위 강하 등 다양한 문제점을 진단할 수 있음

다층퍼셉트론의 인공신경망을 활용하여 방사형집수정의 취수시 주변지역 지하수위를 예측한 결과, 일정 수량의 훈련 자료를 확보하고 있다면 적용성 높은 인공신경망 모델 개발이 가능함

향후 실제 현장에서의 운영 자료 및 지하수위 자료를 확보하여 수치모델과 비교하고 인공신경망 모델을 적용한다면 배후지의 지하수위 강하 또는 고갈을 억제할 수 있는 수평정별 취수 조건을 결정할 수 있음

따라서, 본 신경망 수위예측 프로그램 (v1.0)을 일반화하여 사용할 수 있도록 기능을 개선하고, 사용자 편의성을 고려한 GUI를 개발함

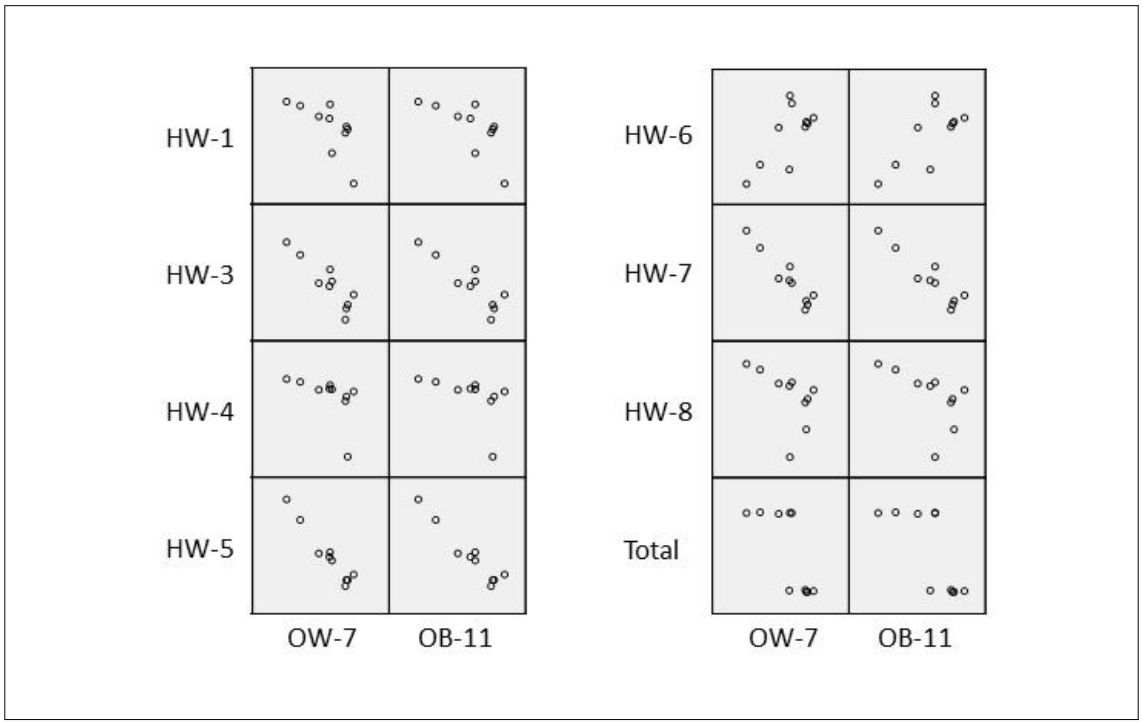


그림 96. 입출력 인자간의 상관관계 분포

2. 현장 실증 자료 기반의 MLPRegressor를 이용한 인공신경망 모델 개발

상기에서 검토된 인공신경망 모델을 기초로 실제 현장에서의 취수 조건을 추출하고 실제 취수 조건에 부합하는 적정 배후지 수위를 결정할 수 있는 일반 사용자용 모델을 개발하였음

인공신경망 모델의 구축을 위하여 사용된 훈련 및 검증 자료는 실제 현장에서 다양한 양수조건으로 수행한 각 수평정별 취수량 및 그 때의 배후지 지하수 관측정에서의 지하수위를 사용하였음.

상기 수치모델 결과를 활용한 인공신경망 모델 예측과 달리 실제 현장에서는 수평정의 취수 조건에 따라 다양한 형태의 수평집수정 운영이 이루어질 수 있음. 연구 대상으로 사용된 안성천의 강변여과 시설도 일부 수평정의 경우 취수량 조절이 불가하고 일부 수평정 만이 조절 가능한 상태로 확인이 되었음에 따라, 실제 현장의 이와 같은 수평정 조절 운영 여부를 고려한다면 수치모델의 결과보다는 실제 운영 자료를 활용한 모델 개발 및 배후지 수위 예측이 바람직한 것으로 보임.

모델 입력용으로 사용된 현장 실측 데이터 현황은 아래 표와 같음. 표에서 보는 바와 같이 2018년 8월부터 2019년 5월까지 총 취수량은 2800 ㎥/d에서 4900 ㎥/d까지 변화를 주면서 각 case별로 수평정의 취수량을 조절하면서 평균적으로 수일 이상의 양수를 실시하였을 때 배후지에 위치한 OW1 및 OW7 관측정에서의 지하수위를 측정하여 모델 입력 자료로 활용하였음. 실제 현장에서 조절 가능한 수평취수정은 W1, W3 및 W8 공으로서 이들 수평정의 취수량을 조정하면서 현장 실증을 수행하였음.

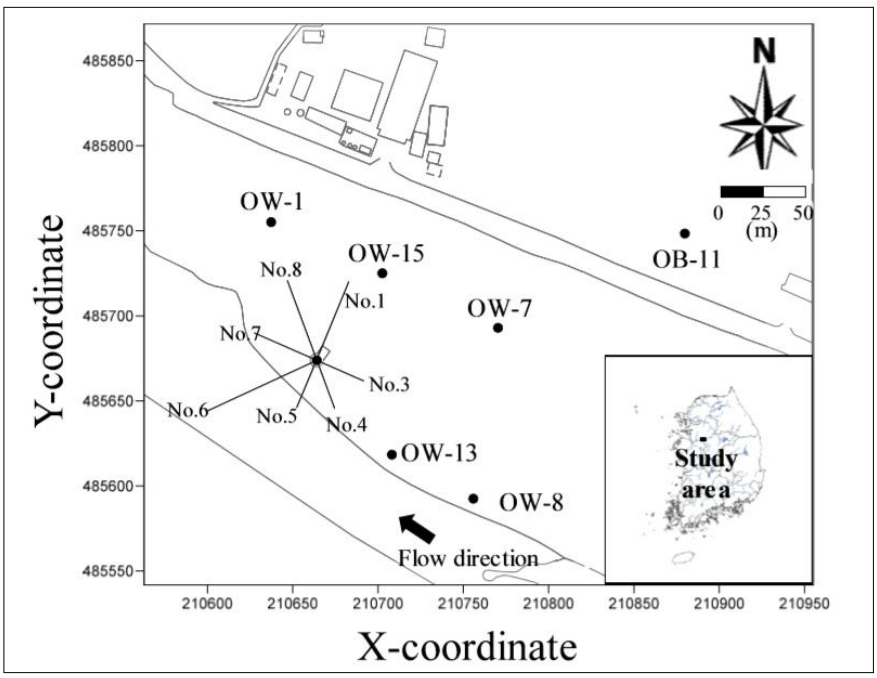


그림 97. 연구지역의 방사형 집수정 구조 및 지하수 관측정 현황

인공신경망 모델의 개발을 위하여 사용된 코드는 Open source library인 Tensorflow를 기반으로 하였으며 MLPRegressor(Multilayer perceptron regressor) 명령어를 활용하여 구성하였음.

[Multilayer Perceptron: MLP]

- Rumelhart 등은 1980년대 후반에 출판된 "Parallel Distributed Processing"란 저서를 통해 역전파(Backpropagation) 알고리즘을 발전시켰으며, 은닉층을 가진 다층 퍼셉트론에 역전파 학습 알고리즘을 사용함으로써 선형 분리 문제뿐만 아니라 다양한 비선형의 문제를 해결.

- Multilayer perceptron은 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 은닉층이 존재하는 신경망의 계층구조를 말함.

- 각 네트워크는 입력층, 은닉층, 출력층 방향으로 연결되어 있으며, 각 층내의 연결과 출력층에서 입력층으로의 직접적인 연결은 존재하지 않는 전방향(feedforward) 네트워크임.

- 출력 뉴런에 의하여 절단되는 은닉층의 출력은 아래 식과 같이 각 시냅스의 가중치 (w_{ij})와 노드의 입력자료 (x_j)에 의하여 결정.

$$t_j = g(\sum w_{ij} x_i) \qquad (1)$$

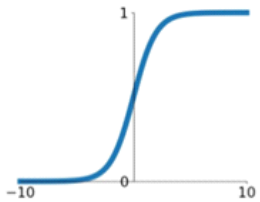
- 또한, 출력층에서 출력값 (y_k)는 시냅스의 가중치와 은닉층 및 출력층에서의 활성화 함수 (g 및 $\bar{g}$)에 의하여 결정.

$$y_k = \bar{g}\left(\sum_{j=0}^{n} w_{kj} \cdot g\sum_{i=0}^{m} w_{ij} x_i\right) \qquad (2)$$

- 활성화 함수는 입력값이 0차원이며, 출력값이 0차원인 이전 층(layer)들에서 출력된 결과물을 전체 층(layer)의 출력값 혹은 다음 층(layer)의 입력값의 형태로 변환시켜주는 함수를 말하는데, 선형 함수 보다는 비선형 함수를 섞었을 때 정확도가 높아지는 특성이 있음. 활성화함수의 특성은 아래와 같음

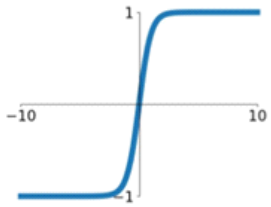
[Multilayer Perceptron: MLP]

$$s(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$$



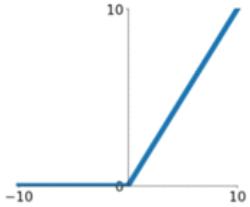
Sigmoid 함수

$$\tanh z = \frac{\sinh z}{\cosh z} = \frac{e^{2z}-1}{e^{2z}+1}$$



Hyperbolic tangent 함수

$$f(z) = \max(0, z)$$



relu 함수

[MLPRegressor]

- MLPRegressor는 scikit-learn의 인공신경망 알고리즘으로서 MLP를 활용한 회귀모형을 구축하는 것이며 아래와 같은 알고리즘으로 구성되어 있어 최적화 모델을 통한 최적 모형을 도출하여 예측 등에 사용됨

- MLPRegressor의 적용 방법

MLPRegressor(hidden_layer_sizes=(100), activation='relu', solver='adam', alpha=0.0001, batch_size='auto', learning_rate='constant', learning_rate_init=0.001, power_t=0.5, max_iter=200, shuffle=True, random_state=None, tol=0.0001, verbose=False, warm_start=False, momentum=0.9, nesterovs_momentum=True, early_stopping=False, validation_fraction=0.1, beta_1=0.9, beta_2=0.999, epsilon=1e-08, n_iter_no_change=10)

- MLPRegressor는 손실함수(Loss function)를 최소화할 수 있도록 시간단위별로 반복계산하는 방식을 적용하고 있으며 최종적으로 최적화된 모형을 도출함

상기 MLPRegrressor 기반으로 인공신경망 모델의 개발을 위하여 사용된 입력 변수는 각 수평정의 취수량이며 출력 변수는 OW1 또는 OW7 관측정의 지하수위를 사용하였음 (표 70). 모델 적용의 다양성을 확보하기 위하여 다양한 총 취수량 조건을 사용하여 모델을 개발하였으며, 현장에서 수행된 방사형집수정의 총 취수량을 2800 ㎥/d에서 4900 ㎥/d까지 변화시켜 가면서 그때 나타나는 배후지에서의 지하수위를 측정하여 입력 자료로 활용하였음.

표 70. 인공신경망 모델 개발을 위한 강변여과수 취수 조건 및 지하수 관측정의 지하수위

Cases	W1	W3	W8	Wo	Qtot	OW1	OW7
1	396.48	157.44	535.68	3819.84	4909.44	3.59	4.11
2	354.00	144.48	521.28	3708.24	4728	3.43	4.00
3	359.76	147.60	529.68	3724.32	4761.36	3.30	3.93
4	338.88	108.00	449.52	3106.08	4002.48	4.19	4.45
5	325.68	94.80	431.52	3133.92	3985.92	3.87	4.38
6	0.00	128.64	508.80	3367.2	4004.64	4.21	4.44
7	0.00	126.72	520.08	3348.24	3995.04	3.92	4.42
8	0.00	125.28	510.48	3352.32	3988.08	3.81	4.32
9	0.00	129.12	512.64	3351.84	3993.6	3.76	4.25
10	0.00	137.52	529.20	3300.96	3967.68	3.75	4.21
11	385.20	0.00	483.60	3126.24	3995.04	4.41	4.82
12	375.36	0.00	482.16	3143.28	4000.8	4.09	4.82
13	392.40	0.00	482.16	3131.04	4005.6	3.92	4.82
14	405.84	0.00	487.92	3114.72	4008.48	3.83	4.82
15	389.04	0.00	484.32	3140.4	4013.76	3.79	4.82
16	445.20	185.28	0.00	3378.96	4009.44	4.33	4.52
17	422.88	177.60	0.00	3386.88	3987.36	4.01	4.43
18	413.76	162.48	0.00	3432.24	4008.48	3.80	4.28
19	436.08	179.04	0.00	3374.64	3989.76	3.66	4.15
20	413.04	178.08	0.00	3409.2	4000.32	3.61	4.09
21	777.84	195.84	497.28	2526.24	3997.2	2.94	3.45
22	966.24	185.52	492.72	2379.84	4024.32	2.91	3.41
23	1087.20	205.68	516.72	2208	4017.6	2.93	3.41
24	947.28	192.24	411.60	2454.96	4006.08	2.81	3.31
25	734.40	202.32	468.24	2592.24	3997.2	2.83	3.29
26	447.84	157.44	362.16	1882.08	2849.52	2.64	3.01
27	466.80	157.92	358.08	1910.4	2893.2	2.62	2.98
28	480.72	123.60	329.52	1973.76	2907.6	2.62	2.98
29	494.64	143.04	343.20	1846.56	2827.44	2.68	3.03
30	466.80	158.64	361.20	1892.16	2878.8	2.66	3.01
31	305.52	145.20	354.00	2049.12	2853.84	2.75	3.07
32	320.88	162.48	366.72	2010.48	2860.56	2.72	3.04
33	295.68	137.04	339.36	2130.96	2903.04	2.67	2.98
34	318.24	158.64	361.20	1993.92	2832	2.67	3.00
35	302.16	141.60	377.00	2020.36	2841.12	2.66	2.98
36	283.20	140.88	352.80	2109.6	2886.48	2.60	2.95
37	287.28	142.32	343.68	2063.28	2836.56	2.56	2.90
38	295.68	157.44	354.72	1945.68	2753.52	2.55	2.89
39	283.92	141.12	339.12	2069.28	2833.44	2.63	2.97
40	300.48	141.84	346.80	2042.16	2831.28	2.55	2.89
41	287.00	154.32	131.04	2873.56	3445.92	2.65	2.91
42	307.68	160.08	366.72	2679.6	3514.08	2.75	3.00
43	293.04	147.84	356.16	2609.76	3406.8	2.79	3.05
44	316.80	163.20	373.68	2778.72	3632.4	2.80	3.05
45	317.52	162.00	27.36	3138.24	3645.12	2.84	3.11

▶ Wo : pumping rate at the other horizontal wells, Qtot: total pumping rate

3. 배후지 최고 지하수위 유지 조건 분석

연구지역의 지하수 관측정은 제방 방향으로는 OW-1 및 OW-7가 위치하고 있으며, 이들 관측정에서 지하수위 강하가 최소가 되는 (배후지 영향이 가장 작은) 수평정의 취수조건을 결정하고자 하였으며, 상기 MLPRegressor를 이용한 인공신경망 모델을 이용하여 수립된 모델을 활용하여 다양한 취수 조건을 구현하였음.

총 취수량은 약 4,000 ㎥/d로 고정한 후 각 수평정에서의 취수 조건을 달리할 경우, OW-1 및 OW-7에서의 지하수위를 평가하였음. 4,000 ㎥/d의 취수에 해당하는 각 수평정별 취수량 조건을 대상으로 지하수위를 예측해 보았음

표 71. 4,000 ㎥/d의 취수시 OW-1의 지하수위 최적화 결과

Cases	W1	W3	W8	Wo	Qtot	Estimated OW1	Remarks
1	320	162	385	3075	3942	3.421	
2	391	187	490	2911	3979	2.885	
3	0	148	526	3311	3985	3.666	
4	395	0	478	3114	3986	4.101	○
5	316	98	427	3145	3987	4.029	
6	342	113	449	3083	3987	4.014	
7	0	153	527	3311	3991	3.623	
8	430	196	0	3365	3991	3.549	
9	426	0	497	3070	3993	4.06	
10	419	0	495	3080	3994	4.061	
11	329	96	438	3132	3996	4.038	
12	396	0	487	3113	3996	4.096	
13	0	146	525	3325	3996	3.692	
14	0	115	500	3382	3997	3.895	
15	0	137	517	3343	3997	3.794	
16	0	174	547	3277	3997	3.41	
17	341	124	452	3080	3997	3.805	
18	404	0	488	3106	3998	4.088	
19	0	130	515	3354	3999	3.819	
20	396	0	486	3117	3999	4.098	
21	436	184	0	3382	4002	3.792	
22	0	130	519	3353	4002	3.816	
23	319	101	434	3148	4002	4.022	
24	400	0	469	3135	4004	4.111	○
25	398	0	472	3135	4005	4.112	○
26	0	177	544	3285	4006	3.395	
27	335	113	450	3108	4006	4.013	
28	384	0	482	3141	4008	4.116	○
29	401	175	0	3432	4008	3.879	
30	399	191	486	2933	4008	2.88	
31	343	113	455	3098	4009	4.004	
32	399	0	491	3123	4014	4.097	
33	372	169	462	3012	4015	3.31	
34	328	102	441	3145	4016	4.022	
35	399	194	497	2927	4018	2.88	
36	341	106	446	3127	4020	4.039	
37	407	200	506	2913	4026	2.871	
38	396	0	492	3144	4033	4.107	○
39	353	169	415	3145	4083	3.604	

상기 예측 결과 총 취수량 약 4,000 ㎥/d을 유지하면서 OW1 관측공의 지하수위를 가장 높게 유지하기 위한 취수 조건은 4, 24, 25, 28 및 38의 경우에 해당함. 이들 조건의 경우에 OW1의 지하수위는 4.1 El.m를 초과하고 있어 가장 양호한 것으로 평가되었으며, 이 때의 각 수평정의 취수조건을 보면, W1 수평정이 약 400 ㎥/d, W3 수평정은 취수하지 않으며, W8 수평정은 약 460~480 ㎥/d 및 기타 4개 수평정의 총합은 3110~3140 ㎥/d 정도임.

4. 최고 지하수위 유지조건의 실제 운영 결과 비교

가. OW1의 지하수위를 가장 높게 유지하면서 취수하고자 하는 경우

위에서 제시한 조건을 대상으로 실제 양수 시의 지하수위를 비교해 보았다. 현장에서 실시한 다양한 양수조건(8가지 양수조건)을 대상으로 실제 지하수위와 상기 모델에 의한 추정 지하수위를 비교함.

아래 표에서 보는 바와 같이, W1을 가능한 최대한 양수하고, W3를 최소한 양수하는 경우가 OW1의 지하수위가 높게 나타난 것으로 관측되었으며, 반면에, W1을 최대한 양수하더라도 W3에서 양수가 이루어진다면 지하수위는 낮아짐을 볼 수 있음.

표 72. OW-1의 실제 4,000 ㎥/d의 취수시 지하수위 비교

Case	Date	W1	W3	W8	Wo	Qtot	Actual OW1	Estimated OW1
1	2018.09.17	396	0	492	3144	4033	3.821	4.107
2	2018.09.20	398	0	472	3135	4005	3.621	4.112
3	2018.09.21	400	0	469	3135	4004	3.541	4.111
4	2018.09.23	384	0	482	3141	4008	3.671	4.116
5	2018.09.26	395	0	478	3114	3986	3.541	4.101
6	2018.11.17	399	191	486	2933	4008	3.244	2.88
7	2018.11.20	407	200	506	2913	4026	3.018	2.871
8	2019.05.18	353	169	415	3145	4083	3.325	3.604

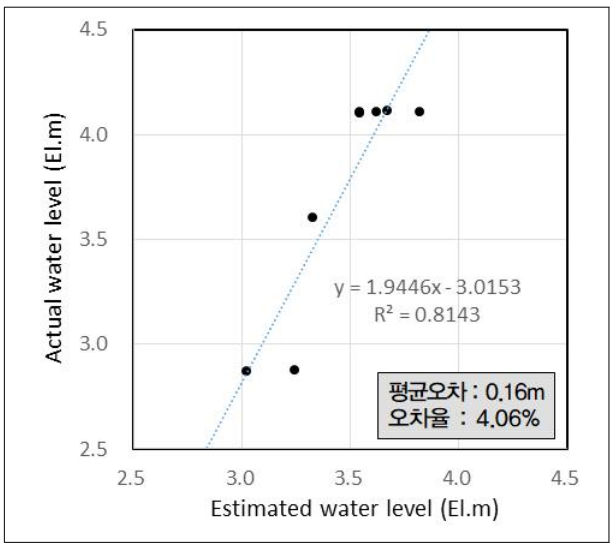


그림 98. OW1의 지하수위가 가장 높을 때 예측 지하수위와 실제 지하수위의 관계

나. OW7의 지하수위를 가장 높게 유지하면서 취수하고자 하는 경우

위에서 제시한 조건을 대상으로 실제 양수 시의 지하수위를 비교해 보았음. 현장에서 실시한 다양한 양수조건(8가지 양수조건)을 대상으로 실제 지하수위와 상기 모델에 의한 추정 지하수위를 비교함.

아래 표에서 보는 바와 같이, 실제 양수에 의하면, W3을 양수하지 않고 W1, W8 및 기타 수평정에서 최대 양수하는 경우에 OW7의 지하수위는 가장 높게 나타난 것으로 관측되었다. 반면에, W3에서 양수하는 경우에는 W8에서 양수하지 않는 경우에 지하수위가 더 높게 나타났다.

표 73. OW-7의 실제 4,000 ㎥/d의 취수시 지하수위 비교

Case	Date	W1	W3	W8	Wo	Qtot	Actual OW7	Estimated OW7
1	2018.08.09	329	96	438	3132	3996	4.106	4.498
2	2018.08.21	0	130	519	3353	4002	4.126	4.318
3	2018.09.17	396	0	492	3144	4033	4.816	4.826
4	2018.09.18	426	0	497	3070	3993	4.816	4.800
5	2018.10.19	436	184	0	3382	4002	4.076	4.245
6	2018.10.20	401	175	0	3432	4008	4.056	4.386
7	2018.11.18	372	169	462	3012	4015	3.629	3.823
8	2018.11.19	399	194	497	2927	4018	3.566	3.593

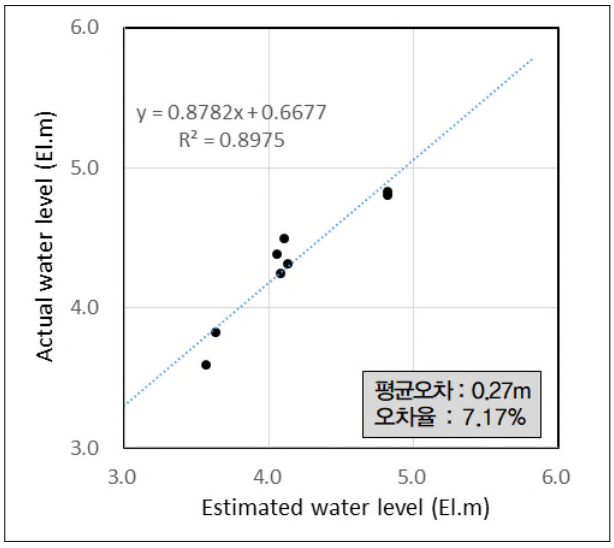


그림 99. OW7의 지하수위가 가장 높을 때 예측 지하수위와 실제 지하수위의 관계

5. 일반사용자용 인공신경망 프로그램의 개발

가. 프로그램 개발 환경

프로그램의 개발 툴인 통합환경 프로그램은 Pycham version 2018.2.1.을 이용하였으며, 개발언어는 파이썬 및 tensorflow 등이다. 개발을 위하여 사용된 코드는 Open source library인 Tensorflow 기반이며 MLPRegressor(Multilayer perceptron regressor) 명령어를 활용하여 구성하였다.

Rumelhart 등은 1980년대 후반에 출판된 "Parallel Distributed Processing"란 저서를 통해 역전파(Backpropagation) 알고리즘을 발전시켰으며, 은닉층을 가진 다층 퍼셉트론에 역전파 학습 알고리즘을 사용함으로써 선형 분리 문제 뿐만 아니라 다양한 비선형의 문제를 해결한 바 있다.

Multilayer perceptron은 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 은닉층이 존재하는 신경망의 계층구조를 말하며, 각 네트워크는 입력층, 은닉층, 출력층 방향으로 연결되어 있으며, 각 층내의 연결과 출력층에서 입력층으로의 직접적인 연결은 존재하지 않는 전방향(feedforward) 네트워크에 해당한다.

출력 뉴런에 의하여 절단되는 은닉층의 출력은 아래 식과 같이 각 시냅스의 가중치 (w_{ij})와 노드의 입력자료 (x_j)에 의하여 결정된다.

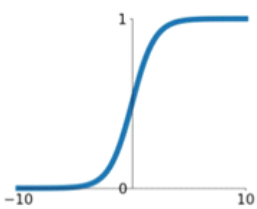
$$t_j = g(\sum w_{ij} x_i)$$

또한, 출력층에서 출력값 (y_k)는 시냅스의 가중치와 은닉층 및 출력층에서의 활성화 함수 (g 및 $\bar{g}$)에 의하여 결정된다.

$$y_k = \bar{g}\left(\sum_{j=0}^{n} w_{kj} \cdot g\sum_{i=0}^{m} w_{ij} x_i\right)$$

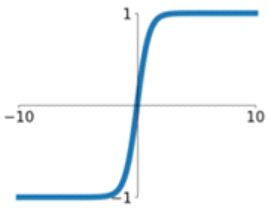
활성화 함수는 입력값이 0차원이며, 출력값이 0차원인 이전 층(layer)들에서 출력된 결과물을 전체 층(layer)의 출력값 혹은 다음 층(layer)의 입력값의 형태로 변환시켜주는 함수를 말하는데, 선형 함수 보다는 비선형 함수를 섞었을 때 정확도가 높아지는 특성이 있음. 활성화함수의 특성은 아래와 같다.

$$s(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$$



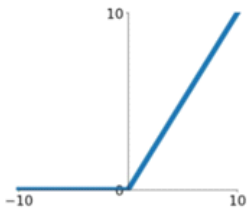
Sigmoid 함수

$$\tanh z = \frac{\sinh z}{\cosh z} = \frac{e^{2z}-1}{e^{2z}+1}$$



Hyperbolic tangent 함수

$$f(z) = \max(0, z)$$



relu 함수

나. 프로그램 구동을 위한 자료 준비

본 프로그램은 방사형 집수정의 수평정별 취수량의 조건을 달리하였을 때 배후지의 특정 지점에서의 지하수위가 가장 높게 유지되는지를 모사하기 위하여 개발된 것이다. 본 모델을 구동하기 위해서는 인공신경망의 훈련 및 검증에 필요한 사전 데이터가 요구된다.

방사형 집수정의 수평정별 취수량과 이 때의 배후지에서의 지하수위값을 파악하는 방법은 아래와 같이 여러가지 방법이 존재할 수 있다.

첫째, 방사형 집수정 및 대수층의 특성을 정확히 파악하여 Modflow 등 수치모델을 구축하여 수십회 정도의 조건을 수행해 보는 방법이다. 이와 같이 다양한 수평정별 취수량 조건이 적용되었을 때 배후지 지점에서의 지하수위가 어떻게 예측되는지 수치모델로 모사하며, 이 모사에 사용된 수평정별 취수량과 지하수위를 인공신경망의 모델 구축 자료로 활용하는 것이다.

둘째, 방사형 집수정을 설치한 이후에는 수평정별 취수량을 파악할 수 있는 유량계를 설치하고, 각 수평정에서의 유량을 측정하고 이 때의 배후지에서의 지하수위를 조사하는 방법이다. 이 경우에도 인공신경망 모델의 구축을 위하여 필요한 다수의 조건별 취수에 따른 지하수위 조사 자료가 필요하게 된다.

이상에서 보는 바와 같이, 인공신경망 기법의 핵심은 훈련자료와 검증자료를 확보하는 것이다. 훈련자료와 검증자료가 충분히 많이 존재한다면 보다 신뢰성 높은 지하수위 예측이 가능할 것이다.

다. 프로그램 설치

(1) 설치용 파일 확인

프로그램 파일은 실행 파일과 데이터 파일로 구분이 된다. 실행 파일은 Riverbank-Groundwater_Level.exe이며, 데이터 파일은 앞 절에서와 같은 방법으로 확보된 자료로서 csv 형태를 갖는다. 아울러, 데이터 파일은 아래와 같은 형태로서 수평정별 취수량과 지하수위 변수를 가져야 한다.

[데이터 파일의 사례]

HW1	HW2	HW3	HW4	HW5	HW6	Groundwater level
150	200	325	50	0	444	6.53
200	100	450	150	111	20	6.80
320	500	50	0	116	250	7.02
....	....	....	....	....	....	....

(2) 복사 및 실행 파일 확인

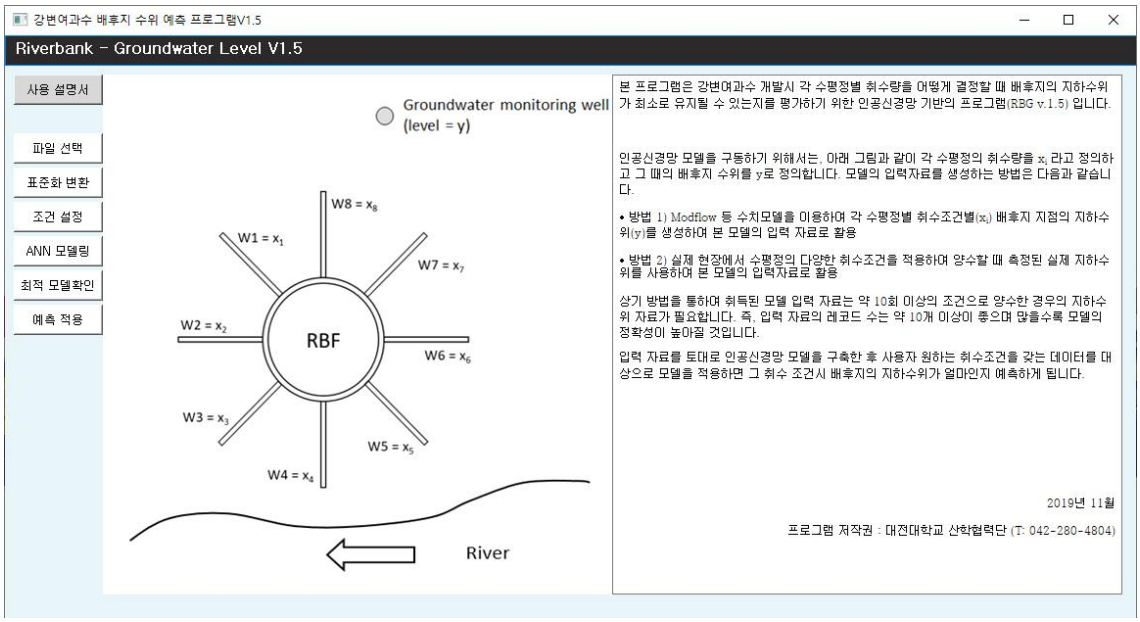
아래 그림에서 보는 바와 같이 Riverbank-Groundwater_Level.exe가 설치되었는지 확인한다.



이름	수정한 날짜	유형	크기
test_data	2019-12-16 오후 12:31	파일 폴더	
UI	2019-12-16 오전 10:43	파일 폴더	
ddq	2019-09-20 오후 1:15	JPG 파일	49KB
mm	2019-09-20 오후 1:31	JPG 파일	9KB
py22-main	2019-12-16 오전 9:47	Python File	66KB
py22-main.spec	2019-12-16 오전 9:54	SPEC 파일	1KB
qt.conf	2019-12-13 오전 10:09	CONF 파일	1KB
Riverbank - Groundwater_Level	2019-12-16 오전 9:58	응용 프로그램	123,595KB
RiverBank	2019-12-04 오전 11:16	PNG 파일	43KB
sq	2019-09-20 오후 1:19	JPG 파일	101KB

(3) 초기 실행 화면

실행파일 실행시 아래와 같은 프로그램 초기 화면이 나타난다.



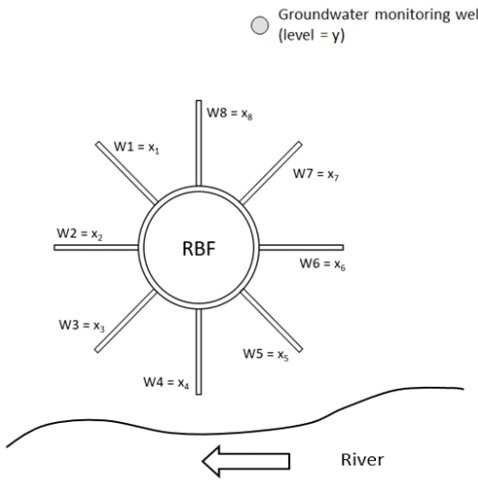
라. 프로그램 사용법

(1) 기본 사용 설명서

❑ 본 프로그램은 강변여과수 개발시 각 수평정별 취수량에 따른 배후지의 지하수위 강하를 최소화로 유지할 수 있는지를 평가하기 위한 인공신경망 기반의 프로그램이다.

❑ 인공신경망 모델을 구동하기 위해서는, 아래 그림과 같이 각 수평정의 취수량을 x_i 라고 정의하고 그 때의 배후지 수위를 y로 정의합니다. 모델의 입력자료를 생성하는 방법은 다음과 같다.

· 방법 1) Modflow 등 수치모델을 이용하여 각 수평정별 취수조건별(x_i) 배후지 지점의 지하수위(y)를 생성하여 본 모델의 입력 자료로 활용
· 방법 2) 실제 현장에서 수평정의 다양한 취수조건을 적용하여 양수할 때 측정된 실제 지하수위를 사용하여 본 모델의 입력 자료로 활용



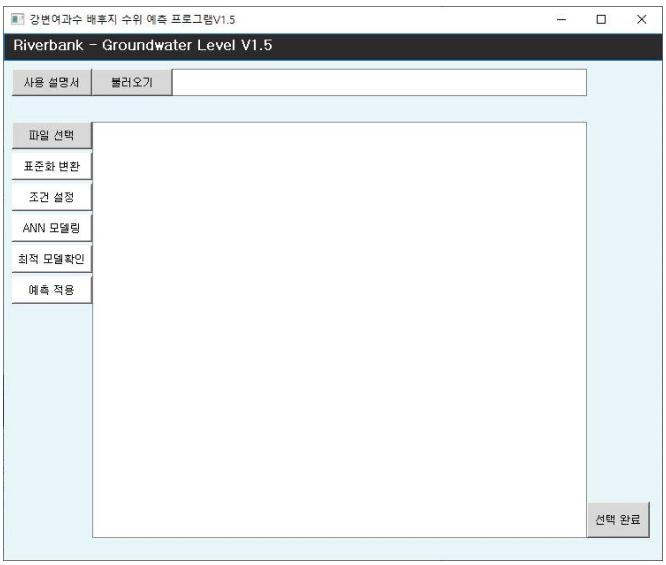
❑ 상기 방법을 통하여 약 10회 이상의 조건으로 양수한 경우의 지하수위 자료가 필요하며, 훈련자료와 검증자료가 많을수록 좋은 모델이 형성될 수 있다.

❑ 이들 입력 자료(훈련 및 검증 자료)를 토대로 인공신경망 모델을 구축한 후 사용자 원하는 취수조건을 갖는 데이터를 대상으로 모델을 적용하면 그 취수조건시 배후지의 지하수위를 예측할 수 있다.

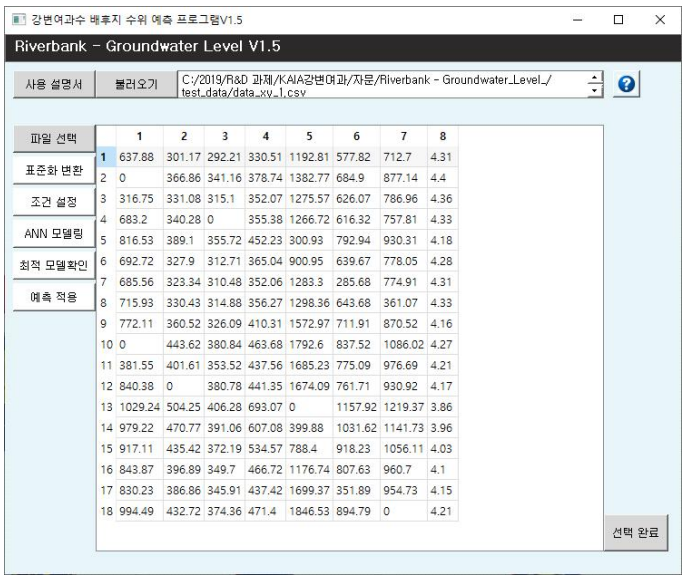
(2) 파일 선택

❑ 인공신경망 모델을 작성하기 위한 훈련 및 검증용 자료를 호출한다.

❑ 프로그램에서 아래의 파일 선택 메뉴를 선택하면 화면이 좌측 탭에 회색으로 활성화된다.



❑ 데이터 파일(CSV) 불러오기 버튼을 클릭하여 모델 구축에 필요한 자료를 불러온다 (불러오기).



	1	2	3	4	5	6	7	8
1	637.88	301.17	292.21	330.51	1192.81	577.82	712.7	4.31
2	0	366.86	341.16	378.74	1382.77	684.9	877.14	4.4
3	316.75	331.08	315.1	352.07	1275.57	626.07	786.96	4.36
4	683.2	340.28	0	355.38	1266.72	616.32	757.81	4.33
5	816.53	389.1	355.72	452.23	300.93	792.94	930.31	4.18
6	692.72	327.9	312.71	365.04	900.95	639.67	778.05	4.28
7	685.56	323.34	310.48	352.06	1283.3	285.68	774.91	4.31
8	715.93	330.43	314.88	356.27	1298.36	643.68	361.07	4.33
9	772.11	360.52	326.09	410.31	1572.97	711.91	870.52	4.16
10	0	443.62	380.84	463.68	1792.6	837.52	1086.02	4.27
11	381.55	401.61	353.52	437.56	1685.23	775.09	976.69	4.21
12	840.38	0	380.78	441.35	1674.09	761.71	930.92	4.17
13	1029.24	504.25	406.28	693.07	0	1157.92	1219.37	3.86
14	979.22	470.77	391.06	607.08	399.88	1031.62	1141.73	3.96
15	917.11	435.42	372.19	534.57	788.4	918.23	1056.11	4.03
16	843.87	396.89	349.7	466.72	1176.74	807.63	960.7	4.1
17	830.23	386.86	345.91	437.42	1699.37	351.89	954.73	4.15
18	994.49	432.72	374.36	471.4	1846.53	894.79	0	4.21

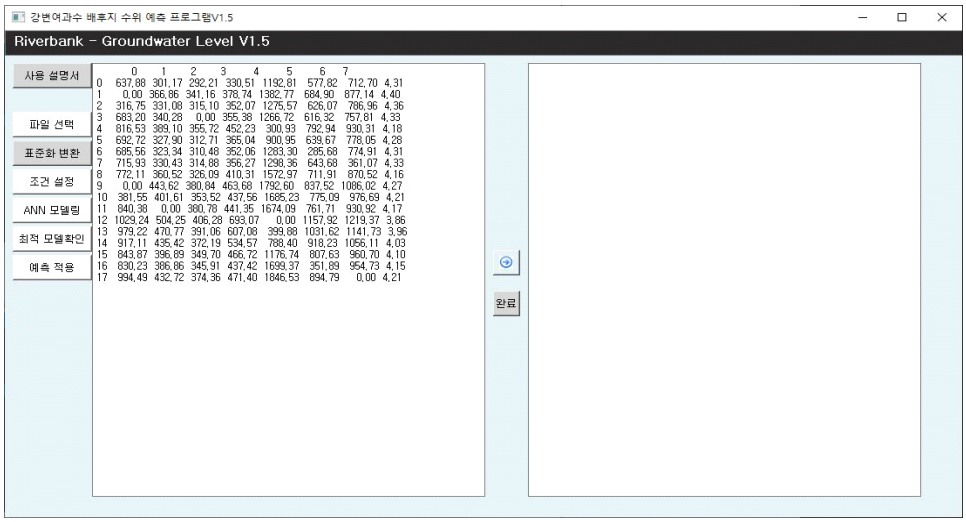
❑ 선택 완료 버튼을 클릭한다 (선택 완료).

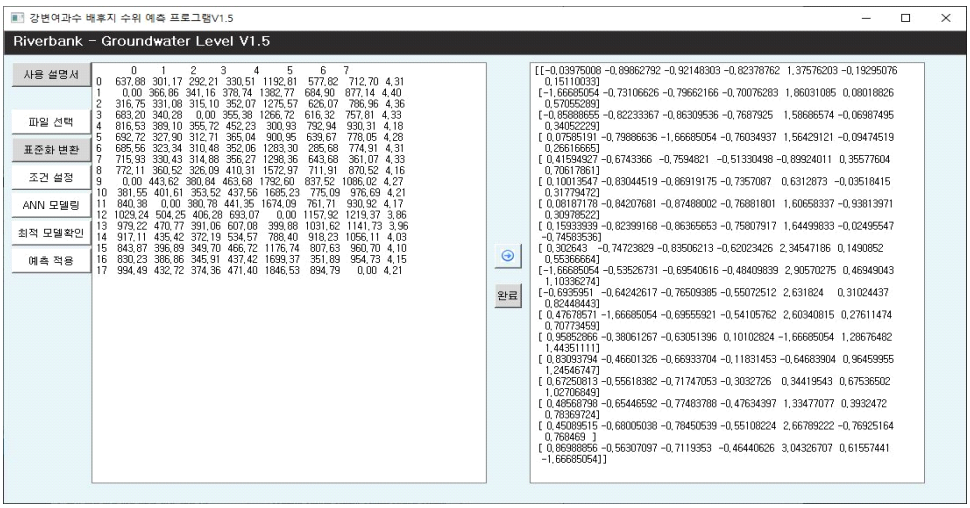
(3) 표준화 변환

❑ 입력변수인 각 수평정별 취수량의 평균 및 분산을 일정한 값으로 만들기 위하여 표준화를 실시한다.

- 표준화 변환 : $\frac{(X-X_{mean})}{X_{stdev}}$

❑ 아래 그림에서 좌측박스는 선택된 데이터를 출력한 것이다. 화살표 버튼()을 클릭하여 실행하면 우측 화면에 표준화된 값이 출력된다.





❑ 표준화 변환 후 데이터를 확인한 다음에 완료 버튼을 클릭한다 (완료).

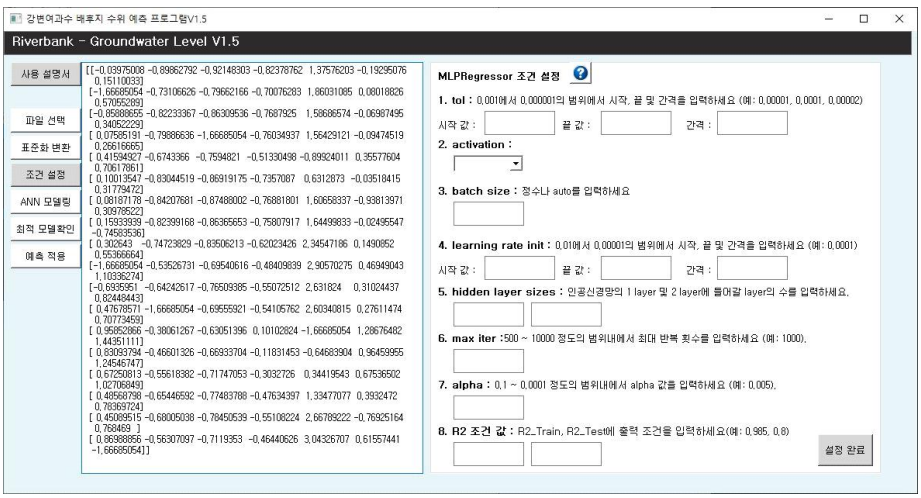
(4) 조건설정

❑ 조건 설정에서는 인공신경망 모델을 구축하기 위하여 MLPRegressor의 적용 조건을 부여하는 것이다.

- 이용자를 위해 ? 아이콘을 누를시 사용방법에 대한 메시지 박스 출력.

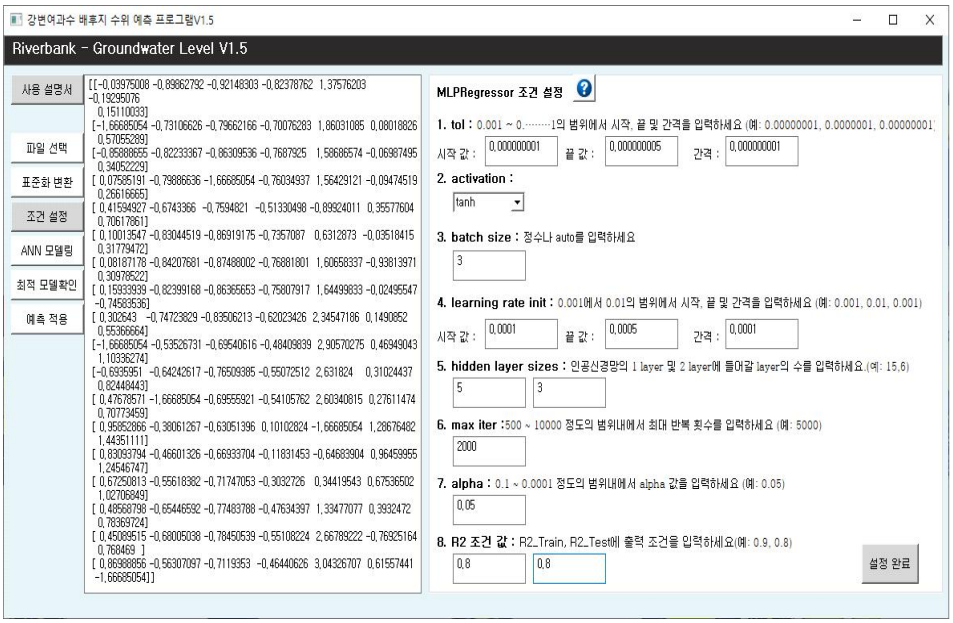
❑ MLPRegressor에는 Tol, Activation function, Batch size, learning rate, Hidden layer size, Iteration condition, Alpha 등의 조건을 부여하여야 한다.

- Tol: 0.001 ~ 0.00000000001 사이의 값을 입력하되 본 프로그램의 특성상 반복 수행을 해야하므로 시작값과 끝값 및 간격을 각각 설정한다.
- Activation function: 활성화 함수는 tanh, relu, logistic, identity 중에서 하나를 선택한다.
- Batch size: Auto 또는 정수값을 입력한다.
- Learning rate init: 0.01 ~ 0.0001 사이의 값을 입력하되 시작값과 끝값 및 간격을 각각 설정한다.
- Hidden layer size: 본 모델에서는 2 layer를 기본으로 하고 있다. 1 layer와 2 layer에서의 hidden layer의 수를 정수로 각각 입력한다.
- Max iter: 최대 반복 횟수를 설정한다.
- Alpha: 0.1 ~ 0.0001의 범위에서 alpha 값을 입력한다.



❑ 일반적으로 본 모델은 Tol에 민감하지 않으며, Learning rate에 민감한 편이다. Batch size는 auto로 설정하는 경우가 많으며, Hidden layer 수가 많다고 하여 모델이 잘 만들어지는 것은 아니다.

❑ 마지막 입력항인 R2 조건값은 반복적으로 수행한 상기 모델중에서 R2값이 일정 범위를 넘는 경우에 대해서만 출력하도록 설정하였다. 따라서, 0.85 또는 0.92 등으로 입력하면 해당 범위를 넘는 양호한 모델들만 출력이 된다.



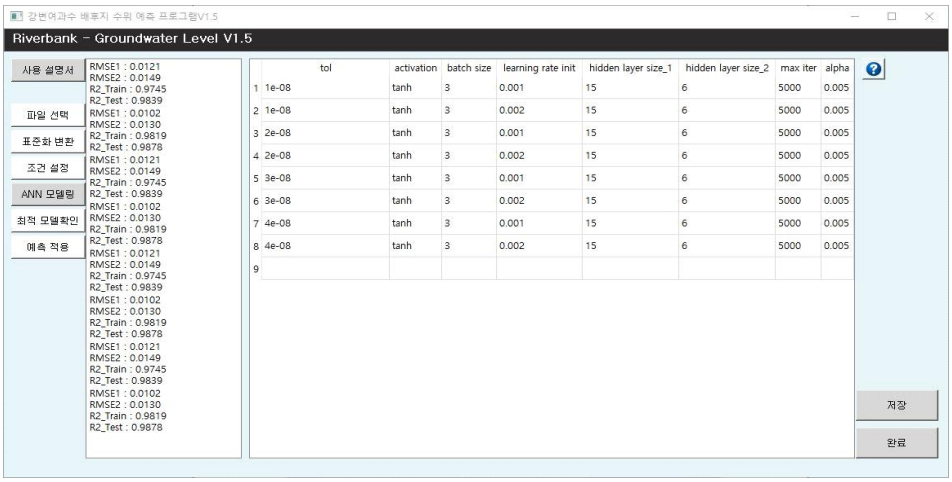
❑ 조건설정 입력 후 설정 완료 버튼을 클릭한다. 설정조건, 컴퓨터 환경에 따라 오래 걸릴 수 있다.

- 설정 완료 버튼을 눌러 다음 페이지로 넘어가기(설정 완료)

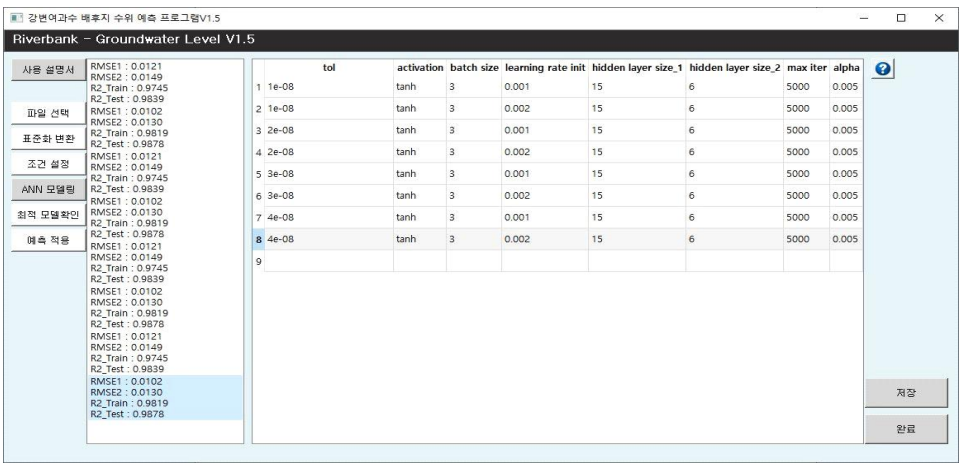
(5) ANN모델링 : 데이터 출력

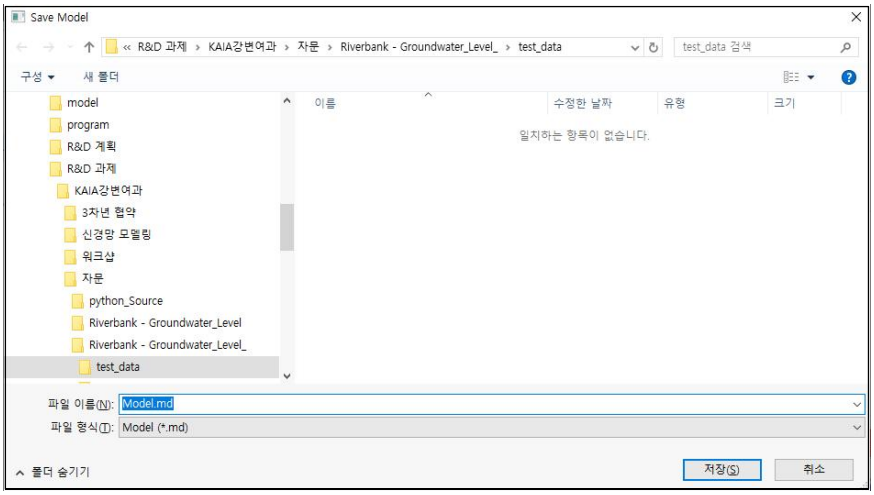
❑ 아래와 같이 입력 조건에 해당되는 결과가 출력된다. 좌측은 각 모델별로 훈련자료와 검증자료에 대한 RMSE 및 R2를 출력한 것이며, 우측은 각 입력 조건이 출력된다.

- 설정 조건과 최종 최적화 값 출력



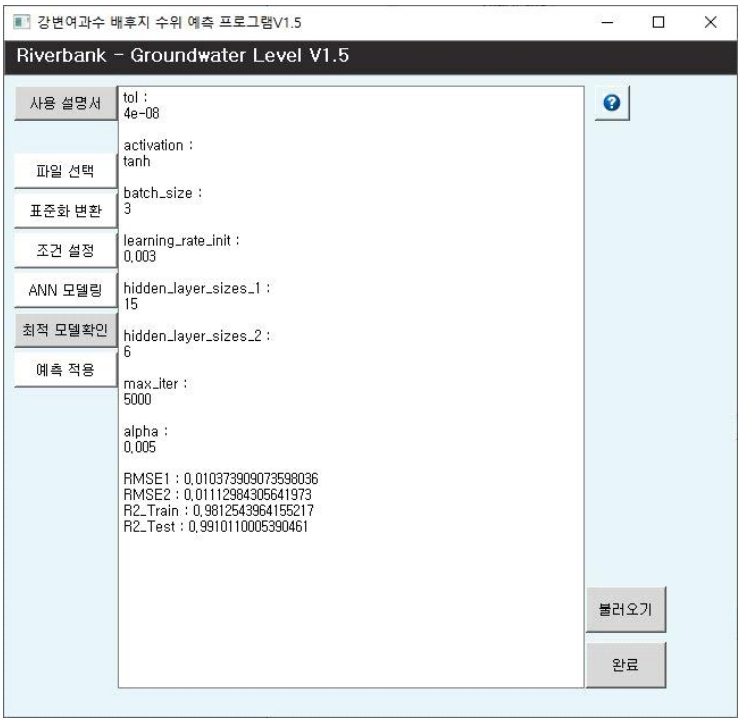
❑ 좌측 화면에서 가장 R2가 큰 모델을 최종 모델로 선택하게 되면 우측에서 해당 입력 조건이 동시에 선택이 된다. 이 때 저장(저장)을 클릭하면 원하는 폴더에 모델의 조건이 저장된다 (저장 파일의 확장자는 .md 입니다). 추후에 이 저장된 모델을 호출하여 예측에 사용할 수도 있다.

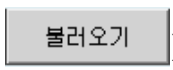




(6) 최적 모델 확인

❑ 위에서 선택한 모델의 조건값과 통계량을 확인할 수 있다.



❑ 또한, 기 저장해 둔 모델(*.md)을 불러올 수 있다 (

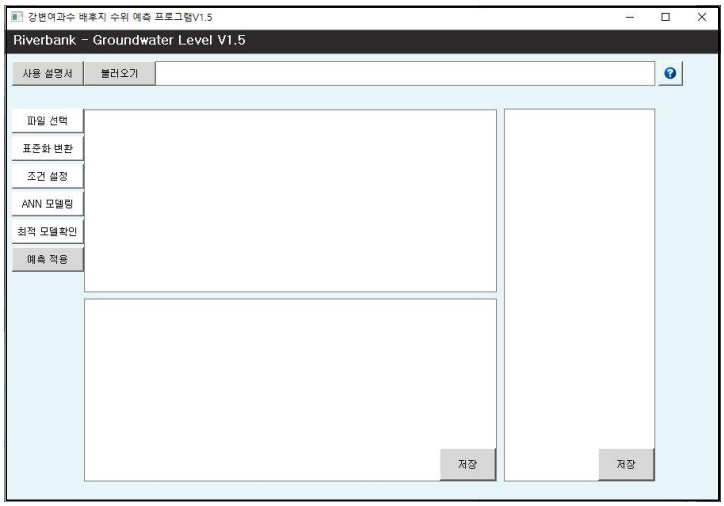
).

❑ 완료 버튼을 클릭하여 다음 페이지의 예측 과정으로 넘어간다(

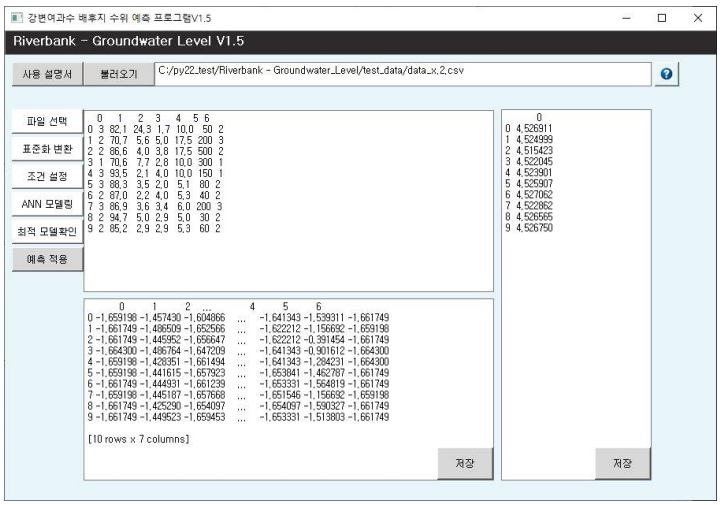
).

(7) 예측 적용

❑ 불러오기 버튼을 이용하여 예측하고자 하는 X_i 값을 가져온다. 이 때 데이터의 형태는 CSV이며, Y 값이 없는 상태의 X_i 값으로 구성되어 있어야한다. 이 때 유의할 점은 처음 모델을 구축할 당시의 X_i 값의 필드 갯수와 동일한 필드 갯수를 가져야만 한다 (불러오기).



❑ X_i 값을 불러오게 되면 자동으로 표준화 변환값과 Y 값이 출력된다. 이와 같이 출력된 Y 값 중에서 가장 큰 값을 선택하면 배후지 지하수위가 가장 높게 유지되는 조건에 해당한다. X_i 값의 레코드 수가 많을 수록 정확한 결과를 얻을 수 있다.



❑ 저장버튼 클릭으로 CSV파일로 해당 출력된 값을 저장 한다(저장).

첨부) 프로그램 소스 코드

```
#!/usr/bin/python3
# -*- coding:utf-8 -*-
import csv, codecs
import os

from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets, QtPrintSupport
from PyQt5.QtGui import QImage, QPainter
from PyQt5.QtCore import QFile


class MyWindow(QtWidgets.QWidget):
    def __init__(self, fileName, parent=None):
        super(MyWindow, self).__init__(parent)
        self.fileName = ""
        self.fname = "Liste"
        self.model = QtGui.QStandardItemModel(self)

        self.tableView = QtWidgets.QTableView(self)
        self.tableView.setStyleSheet(stylesheet(self))
        self.tableView.setModel(self.model)
        self.tableView.horizontalHeader().setStretchLastSection(True)
        self.tableView.setShowGrid(True)
        self.tableView.setGeometry(10, 50, 780, 645)
        self.model.dataChanged.connect(self.finishedEdit)

        self.pushButtonLoad = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButtonLoad.setText("Load CSV")
        self.pushButtonLoad.clicked.connect(self.loadCsv)
        self.pushButtonLoad.setFixedWidth(80)
        self.pushButtonLoad.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushButtonWrite = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButtonWrite.setText("Save CSV")
        self.pushButtonWrite.clicked.connect(self.writeCsv)
        self.pushButtonWrite.setFixedWidth(80)
        self.pushButtonWrite.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushButtonPreview = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButtonPreview.setText("Print Preview")
        self.pushButtonPreview.clicked.connect(self.handlePreview)
        self.pushButtonPreview.setFixedWidth(80)
        self.pushButtonPreview.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushButtonPrint = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButtonPrint.setText("Print")
        self.pushButtonPrint.clicked.connect(self.handlePrint)
        self.pushButtonPrint.setFixedWidth(80)
        self.pushButtonPrint.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushAddRow = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushAddRow.setText("add Row")
        self.pushAddRow.clicked.connect(self.addRow)
        self.pushAddRow.setFixedWidth(80)
        self.pushAddRow.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushDeleteRow = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushDeleteRow.setText("delete Row")
        self.pushDeleteRow.clicked.connect(self.removeRow)
        self.pushDeleteRow.setFixedWidth(80)
        self.pushDeleteRow.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushAddColumn = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushAddColumn.setText("add Column")
        self.pushAddColumn.clicked.connect(self.addColumn)
        self.pushAddColumn.setFixedWidth(80)
        self.pushAddColumn.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushDeleteColumn = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushDeleteColumn.setText("delete Column")
        self.pushDeleteColumn.clicked.connect(self.removeColumn)
        self.pushDeleteColumn.setFixedWidth(86)
        self.pushDeleteColumn.setStyleSheet(stylesheet(self))

        self.pushClear = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushClear.setText("Clear")
        self.pushClear.clicked.connect(self.clearList)
        self.pushClear.setFixedWidth(60)
        self.pushClear.setStyleSheet(stylesheet(self))

        grid = QtWidgets.QGridLayout()
        grid.setSpacing(10)
        grid.addWidget(self.pushButtonLoad, 0, 0)
        grid.addWidget(self.pushButtonWrite, 0, 1)
        grid.addWidget(self.pushAddRow, 0, 2)
        grid.addWidget(self.pushDeleteRow, 0, 3)
        grid.addWidget(self.pushAddColumn, 0, 4)
        grid.addWidget(self.pushDeleteColumn, 0, 5)
        grid.addWidget(self.pushClear, 0, 6)
        grid.addWidget(self.pushButtonPreview, 0, 7)
        grid.addWidget(self.pushButtonPrint, 0, 8, 1, 1,
QtCore.Qt.AlignRight)
        grid.addWidget(self.tableView, 1, 0, 1, 9)
        self.setLayout(grid)

        item = QtGui.QStandardItem()
        self.model.appendRow(item)
        self.model.setData(self.model.index(0, 0), "", 0)
        self.tableView.resizeColumnsToContents()

    def loadCsv(self, fileName):
        fileName, _ = QtWidgets.QFileDialog.getOpenFileName(self,
"Open CSV",

(QtCore.QDir.homePath()), "CSV (*.csv *.tsv)")

        if fileName:
            print(fileName)
            ff = open(fileName, 'r')
            mytext = ff.read()
            #               print(mytext)
            ff.close()
            f = open(fileName, 'r')
            with f:
                self.fname                                          =
os.path.splitext(str(fileName))[0].split("/")[-1]
                self.setWindowTitle(self.fname)
                if mytext.count(';') <= mytext.count('\t'):
                    reader = csv.reader(f, delimiter='\t')
                    self.model.clear()
                    for row in reader:
                        items = [QtGui.QStandardItem(field) for field in
row]
                        self.model.appendRow(items)
                    self.tableView.resizeColumnsToContents()
                else:
                    reader = csv.reader(f, delimiter=';')
                    self.model.clear()
                    for row in reader:
                        items = [QtGui.QStandardItem(field) for field in
row]
                        self.model.appendRow(items)
                    self.tableView.resizeColumnsToContents()
```

```
        def writeCsv(self, fileName):
            # find empty cells
            for row in range(self.model.rowCount()):
                for column in range(self.model.columnCount()):
                    myitem = self.model.item(row, column)
                    if myitem is None:
                        item = QtGui.QStandardItem("")
                        self.model.setItem(row, column, item)
            fileName, _ = QtWidgets.QFileDialog.getSaveFileName(self, "Save
File",

(QtCore.QDir.homePath() + "/" + self.fname + ".csv"),
                                                                "CSV Files
(*.csv)")
            if fileName:
                print(fileName)
                f = open(fileName, 'w')
                with f:
                    writer = csv.writer(f, delimiter='₩t')
                    for rowNumber in range(self.model.rowCount()):
                        fields =
[self.model.data(self.model.index(rowNumber, columnNumber),
                                                QtCore.Qt.DisplayRole)
                                for columnNumber in
range(self.model.columnCount())]
                        writer.writerow(fields)
                    self.fname =
os.path.splitext(str(fileName))[0].split("/")[-1]
                    self.setWindowTitle(self.fname)

        def handlePrint(self):
            dialog = QtPrintSupport.QPrintDialog()
            if dialog.exec_() == QtWidgets.QDialog.Accepted:
                self.handlePaintRequest(dialog.printer())

        def handlePreview(self):
            dialog = QtPrintSupport.QPrintPreviewDialog()
            dialog.setFixedSize(1000, 700)
            dialog.paintRequested.connect(self.handlePaintRequest)
            dialog.exec_()

        def handlePaintRequest(self, printer):
            # find empty cells
            for row in range(self.model.rowCount()):
                for column in range(self.model.columnCount()):
                    myitem = self.model.item(row, column)
                    if myitem is None:
                        item = QtGui.QStandardItem("")
                        self.model.setItem(row, column, item)
            printer.setDocName(self.fname)
            document = QtGui.QTextDocument()
            cursor = QtGui.QTextCursor(document)
            model = self.tableView.model()
            table = cursor.insertTable(model.rowCount(),
model.columnCount())
            for row in range(table.rows()):
                for column in range(table.columns()):
                    cursor.insertText(model.item(row, column).text())
                    cursor.movePosition(QtGui.QTextCursor.NextCell)
            document.print_(printer)

        def removeRow(self):
            model = self.model
            indices = self.tableView.selectionModel().selectedRows()
            for index in sorted(indices):
                model.removeRow(index.row())

        def addRow(self):
            item = QtGui.QStandardItem("")
            self.model.appendRow(item)

        def clearList(self):
            self.model.clear()

        def removeColumn(self):
            model = self.model
            indices = self.tableView.selectionModel().selectedColumns()
            for index in sorted(indices):
                model.removeColumn(index.column())

        def addColumn(self):
            count = self.model.columnCount()
            print(count)
            self.model.setColumnCount(count + 1)
            self.model.setData(self.model.index(0, count), "", 0)
            self.tableView.resizeColumnsToContents()

        def finishedEdit(self):
            self.tableView.resizeColumnsToContents()

        def contextMenuEvent(self, event):
            self.menu = QtWidgets.QMenu(self)
            # copy
            copyAction = QtWidgets.QAction('Copy', self)
            copyAction.triggered.connect(lambda: self.copyByContext(event))
            # paste
            pasteAction = QtWidgets.QAction('Paste', self)
            pasteAction.triggered.connect(lambda: self.pasteByContext(event))
            # cut
            cutAction = QtWidgets.QAction('Cut', self)
            cutAction.triggered.connect(lambda: self.cutByContext(event))
            # delete selected Row
            removeAction = QtWidgets.QAction('delete Row', self)
            removeAction.triggered.connect(lambda:
self.deleteRowByContext(event))
            # add Row after
            addAction = QtWidgets.QAction('insert new Row after', self)
            addAction.triggered.connect(lambda:
self.addRowByContext(event))
            # add Row before
            addAction2 = QtWidgets.QAction('insert new Row before', self)
            addAction2.triggered.connect(lambda:
self.addRowByContext2(event))
            # add Column before
            addColumnBeforeAction = QtWidgets.QAction('insert new Column
before', self)
            addColumnBeforeAction.triggered.connect(lambda:
self.addColumnBeforeByContext(event))
            # add Column after
            addColumnAfterAction = QtWidgets.QAction('insert new Column
after', self)
            addColumnAfterAction.triggered.connect(lambda:
self.addColumnAfterByContext(event))
            # delete Column
            deleteColumnAction = QtWidgets.QAction('delete Column', self)
            deleteColumnAction.triggered.connect(lambda:
self.deleteColumnByContext(event))
            # add other required actions
            self.menu.addAction(copyAction)
            self.menu.addAction(pasteAction)
            self.menu.addAction(cutAction)
            self.menu.addSeparator()
            self.menu.addAction(addAction)
            self.menu.addAction(addAction2)
            self.menu.addSeparator()
            self.menu.addAction(addColumnBeforeAction)
            self.menu.addAction(addColumnAfterAction)
            self.menu.addSeparator()
            self.menu.addAction(removeAction)
            self.menu.addAction(deleteColumnAction)
            self.menu.popup(QtGui.QCursor.pos())

        def deleteRowByContext(self, event):
            for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
                row = i.row()
                self.model.removeRow(row)
                print("Row " + str(row) + " deleted")
                self.tableView.selectRow(row)
```

```
    def addRowByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            row = i.row() + 1
            self.model.insertRow(row)
            print("Row at " + str(row) + " inserted")
            self.tableView.selectRow(row)

    def addRowByContext2(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            row = i.row()
            self.model.insertRow(row)
            print("Row at " + str(row) + " inserted")
            self.tableView.selectRow(row)

    def addColumnBeforeByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            col = i.column()
            self.model.insertColumn(col)
            print("Column at " + str(col) + " inserted")

    def addColumnAfterByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            col = i.column() + 1
            self.model.insertColumn(col)
            print("Column at " + str(col) + " inserted")

    def deleteColumnByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            col = i.column()
            self.model.removeColumn(col)
            print("Column at " + str(col) + " removed")

    def copyByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            row = i.row()
            col = i.column()
            myitem = self.model.item(row, col)
            if myitem is not None:
                clip = QtWidgets.QApplication.clipboard()
                clip.setText(myitem.text())

    def pasteByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            row = i.row()
            col = i.column()
            myitem = self.model.item(row, col)
            clip = QtWidgets.QApplication.clipboard()
            myitem.setText(clip.text())

    def cutByContext(self, event):
        for i in self.tableView.selectionModel().selection().indexes():
            row = i.row()
            col = i.column()
            myitem = self.model.item(row, col)
            if myitem is not None:
                clip = QtWidgets.QApplication.clipboard()
                clip.setText(myitem.text())
                myitem.setText("")
def stylesheet(self):
    return """
        QTableView
        {
border: 1px solid grey;
border-radius: 0px;
font-size: 12px;
        background-color: #f8f8f8;
selection-color: white;
selection-background-color: #00ED56;
        }
    QTableView QTableCornerButton::section {
        background: #D6D1D1;
        border: 1px outset black;
    }

    QPushButton
    {
    font-size: 11px;
    border: 1px inset grey;
    height: 24px;
    width: 80px;
    color: black;
    background-color: #e8e8e8;
    background-position: bottom-left;
    }

    QPushButton::hover
    {
    border: 2px inset goldenrod;
    font-weight: bold;
    color: #e8e8e8;
    background-color: green;
    }
    """

    if __name__ == "__main__":
        import sys

        app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
        app.setApplicationName('MyWindow')
        main = MyWindow('')
        main.setMinimumSize(820, 300)
        main.setGeometry(0, 0, 820, 700)
        main.setWindowTitle("CSV Viewer")
        main.show()
    sys.exit(app.exec_())


    # !/usr/bin/python3
    # -*- coding: utf-8 -*-
    import csv
    import os
    from PyQt5.QtGui import QKeySequence, QIcon, QTextCursor, QCursor,
QDropEvent, QTextDocument, ₩
        QTextTableFormat, QColor
    from PyQt5.QtCore import QFile, QSettings, Qt, QFileInfo, QDir,
QMetaObject
    from PyQt5.QtWidgets import (QAction, QLineEdit, QMessageBox,
QAbstractItemView, QTableWidget, QTableWidgetItem, QGridLayout,
QFileDialog, QMenu, QInputDialog)
    from PyQt5 import QtWidgets, QtPrintSupport
    from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QWidget, QMainWindow,
QLabel


    import pandas as pd
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    import seaborn as sns
    import tensorflow as tf
    from scipy import stats
    from sklearn import model_selection
    from sklearn import metrics
    from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
    from sklearn.metrics import mean_squared_error
    from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets
```

```
    class TableWidgetDragRows(QTableWidget):  #     설정
        def __init__(self, *args, **kwargs):
            super().__init__(*args, **kwargs)

            # 실햄 품의 자동설정
            self.setDragEnabled(True)
            self.setAcceptDrops(True)
            self.viewport().setAcceptDrops(True)
            self.setDragDropOverwriteMode(False)
            self.setDropIndicatorShown(True)

            self.setSelectionMode(QAbstractItemView.ExtendedSelection)
            self.setSelectionBehavior(QAbstractItemView.SelectItems)
            self.setDragDropMode(QAbstractItemView.InternalMove)

        def dropEvent(self, event: QDropEvent):  # drop 이벤트 설정 , 크롤 설정

            if not event.isAccepted() and event.source() == self:
                drop_row = self.drop_on(event)

                rows = sorted(set(item.row() for item in self.selectedItems()))
                rows_to_move = [
                    [QTableWidgetItem(self.item(row_index,     column_index)) for column_index in range(self.columnCount())]
                    for row_index in rows]
                for row_index in reversed(rows):
                    self.removeRow(row_index)
                    if row_index < drop_row:
                        drop_row -= 1

                for row_index, data in enumerate(rows_to_move):
                    row_index += drop_row
                    self.insertRow(row_index)
                    for column_index, column_data in enumerate(data):
                        self.setItem(row_index, column_index, column_data)
                event.accept()
                for row_index in range(len(rows_to_move)):
                    self.item(drop_row + row_index, 0).setSelected(True)
                    self.item(drop_row + row_index, 1).setSelected(True)
            super().dropEvent(event)

        #  스크롤 설정
        def drop_on(self, event):
            index = self.indexAt(event.pos())
            if not index.isValid():
                return self.rowCount()
            return index.row() + 1 if self.is_below(event.pos(), index) else index.row()

        def is_below(self, pos, index):
            rect = self.visualRect(index)
            margin = 2
            if pos.y() - rect.top() < margin:
                return False
            elif rect.bottom() - pos.y() < margin:
                return True
            # noinspection PyTypeChecker
            return rect.contains(pos, True) and not (
                    int(self.model().flags(index))    &    Qt.ItemIsDropEnabled) and pos.y() >= rect.center().y()
    class MyWindow(QMainWindow):  # 품을 실제 디스플레이 해주는 설정들
        def __init__(self, aPath, parent=None):
            super(MyWindow, self).__init__(parent)
            #          QIcon.setThemeName('gnome')
            QMetaObject.connectSlotsByName(self)
            self.delimit = '₩t'
            self.mycolumn = 0
            self.MaxRecentFiles = 5
            self.windowList = []
            self.recentFileActs = []
            self.settings = QSettings('Axel Schneider', 'CSVEditor')
            self.setAttribute(Qt.WA_DeleteOnClose)
            self.isChanged = False
            self.fileName = ""
            self.fname = "Liste"
            self.mytext = ""
            self.colored = False
            self.copiedRow = []
            self.copiedColumn = []

            _translate = QtCore.QCoreApplication.translate

            self.textBrowser = QtWidgets.QTextBrowser(self)
            self.textBrowser.setGeometry(QtCore.QRect(0, 0, 121, 41))
            self.textBrowser.setStyleSheet("background-color:    rgb(8,    143,    255);")
            self.textBrowser.setObjectName("textBrowser")
            self.textBrowser.setHtml(_translate("MainWindow",
                                                "<!DOCTYPE HTML PUBLIC ₩"-//W3C//DTD HTML 4.0//EN₩" ₩"http://www.w3.org/TR/REC-html40/strict.dtd₩">₩n"
                                                "<html><head><meta name=₩"qrichtext₩" content=₩"1₩" /><style type=₩"text/css₩">₩n"
                                                "p,    li    {    white-space:    pre-wrap;    }₩n"
                                                "</style></head><body style=₩"    font-family:₩'Gulim₩';    font-size:9pt;    font-weight:400;    font-style:normal;₩">₩n"
                                                "<p    align=₩"center₩"    style=₩"    margin-top:0px;    margin-bottom:0px;    margin-left:0px;    margin-right:0px;    -qt-block-indent:0;    text-indent:0px;₩"><span    style=₩"    font-size:16pt;    font-weight:600;    color:#ffffff;₩">AR-ANN</span></p></body></html>"))

            self.textBrowser_2 = QtWidgets.QTextBrowser(self)
            self.textBrowser_2.setGeometry(QtCore.QRect(120, 0, 611, 41))
            self.textBrowser_2.setStyleSheet("background-color:    rgb(43,    41,    41);")
            self.textBrowser_2.setObjectName("textBrowser_2")
            self.textBrowser_2.setHtml(_translate("MWindow",
                                                  "<!DOCTYPE HTML PUBLIC ₩"-//W3C//DTD HTML 4.0//EN₩" ₩"http://www.w3.org/TR/REC-html40/strict.dtd₩">₩n"
                                                  "<html><head><meta name=₩"qrichtext₩" content=₩"1₩" /><style type=₩"text/css₩">₩n"
                                                  "p,    li    {    white-space:    pre-wrap;    }₩n"
                                                  "</style></head><body style=₩"    font-family:₩'Gulim₩';    font-size:9pt;    font-weight:400;    font-style:normal;₩">₩n"
                                                  "<p    style=₩"    margin-top:0px;    margin-bottom:0px;    margin-left:0px;    margin-right:0px;    -qt-block-indent:0;    text-indent:0px;₩"><span    style=₩"    font-size:20pt;    font-weight:600;    color:#ffffff;₩">    Well    level    </span><span    style=₩"    font-size:10pt;    font-weight:600;    color:#ffffff;₩">V1.0</span></p></body></html>"))

            self.stackedWidget = QtWidgets.QStackedWidget(self)
            self.stackedWidget.setGeometry(QtCore.QRect(120,    40,    611,    461))
            self.stackedWidget.setObjectName("stackedWidget")

            self.page = QtWidgets.QWidget()
            self.page.setObjectName("page")

            # 불러오기 버튼 pushload
            self.pushload = QtWidgets.QPushButton(self.page)
            self.pushload.setGeometry(QtCore.QRect(0,    0,    81,    31))
            self.pushload.setStyleSheet("background-color:    rgb(8,    143,    255);")
            self.pushload.setObjectName("pushButton")
            self.pushload.setText(_translate("MainWindow", "불러오기"))
            self.pushload.clicked.connect(self.loadCsv)
```

```
        self.pushButton_2 = QtWidgets.QPushButton(self.page)
        self.pushButton_2.setGeometry(QtCore.QRect(540, 0, 31, 31))
        self.pushButton_2.setText("")
        self.pushButton_2.setObjectName("pushButton_2")

        self.pushButton_4 = QtWidgets.QPushButton(self.page)
        self.pushButton_4.setGeometry(QtCore.QRect(540, 350, 71, 41))
        self.pushButton_4.setStyleSheet("background-color: rgb(8, 143,
255);")
        self.pushButton_4.setObjectName("pushButton_4")
        self.pushButton_4.setWhatsThis(_translate("MainWindow",
"<html><head/><body><p>       완료<br/></p></body></html>"))
        self.pushButton_4.setText(_translate("MainWindow", "전체 선택"))

        self.pushButton_3 = QtWidgets.QPushButton(self.page)
        self.pushButton_3.setGeometry(QtCore.QRect(540, 420, 71, 41))
        self.pushButton_3.setStyleSheet("background-color: rgb(8, 143,
255);")
        self.pushButton_3.setObjectName("pushButton_3")
        self.pushButton_3.setWhatsThis(_translate("MainWindow",
"<html><head/><body><p>선택 완료<br/></p></body></html>"))
        self.pushButton_3.setText(_translate("MainWindow", "선택 완료"))

        self.tableView = QtWidgets.QTableView(self.page)
        self.tableView.setGeometry(QtCore.QRect(0, 30, 541, 431))
        self.tableView.setStyleSheet("background-color: rgb(255, 255,
255);")
        self.tableView.setObjectName("tableView")
        self.setDragEnabled(True)
        self.setAcceptDrops(True)
        self.viewport().setAcceptDrops(True)
        self.setDragDropOverwriteMode(False)
        self.setDropIndicatorShown(True)

        self.setSelectionMode(QAbstractItemView.ExtendedSelection)
        self.setSelectionBehavior(QAbstractItemView.SelectItems)
        self.setDragDropMode(QAbstractItemView.InternalMove)

        self.textEdit = QtWidgets.QTextEdit(self.page)
        self.textEdit.setGeometry(QtCore.QRect(80, 0, 461, 31))
        self.textEdit.setStyleSheet("background-color: rgb(255, 255,
255);")
        self.textEdit.setObjectName("textEdit")

        self.stackedWidget.addWidget(self.page)
        self.page_2 = QtWidgets.QWidget()
        self.page_2.setObjectName("page_2")

        self.pushButton_8 = QtWidgets.QPushButton(self.page_2)
        self.pushButton_8.setGeometry(QtCore.QRect(290, 200, 31, 31))
        self.pushButton_8.setText("")
        self.pushButton_8.setObjectName("pushButton_8")

        self.pushButton_13 = QtWidgets.QPushButton(self.page_2)
        self.pushButton_13.setGeometry(QtCore.QRect(290, 260, 31, 31))
        self.pushButton_13.setText("")
        self.pushButton_13.setObjectName("pushButton_13")

        self.tableView_2 = QtWidgets.QTableView(self.page_2)
        self.tableView_2.setGeometry(QtCore.QRect(0, 0, 281, 461))
        self.tableView_2.setStyleSheet("background-color: rgb(255, 255,
255);")
        self.tableView_2.setObjectName("tableView_2")

        self.tableView_3 = QtWidgets.QTableView(self.page_2)
        self.tableView_3.setGeometry(QtCore.QRect(330, 0, 281, 461))
        self.tableView_3.setStyleSheet("background-color: rgb(255, 255,
255);")
        self.tableView_3.setObjectName("tableView_3")

        self.stackedWidget.addWidget(self.page_2)
        self.page_3 = QtWidgets.QWidget()
        self.page_3.setObjectName("page_3")

        self.textBrowser_3 = QtWidgets.QTextBrowser(self.page_3)
        self.textBrowser_3.setGeometry(QtCore.QRect(290, 0, 321, 461))

        self.textBrowser_3.setStyleSheet("background-color: rgb(255, 255,
255);")
        self.textBrowser_3.setObjectName("textBrowser_3")
        self.textBrowser_3.setHtml(_translate("MainWindow",
                                              "<!DOCTYPE HTML
PUBLIC ₩"-//W3C//DTD HTML 4.0//EN₩"
₩"http://www.w3.org/TR/REC-html40/strict.dtd₩">₩n"
                                              "<html><head><meta
name=₩"qrichtext₩" content=₩"1₩" /><style type=₩"text/css₩">₩n"
                                              "p, li { white-space:
pre-wrap; }₩n"

"</style></head><body style=₩" font-family:₩'Gulim₩'; font-size:9pt;
font-weight:400; font-style:normal;₩">₩n"
                                              "<p align=₩"justify₩"
style=₩" margin-top:0px; margin-bottom:0px; margin-left:0px;
margin-right:0px; -qt-block-indent:0; text-indent:0px;₩"><span style=₩"
font-weight:600;₩">MLPRegressor 조건 설정</span></p>₩n"
                                              "<p align=₩"justify₩"
style=₩"-qt-paragraph-type:empty; margin-top:0px; margin-bottom:0px;
margin-left:0px; margin-right:0px; -qt-block-indent:0;
text-indent:0px;₩"><br /></p></body></html>"))

        self.pushButton_12 = QtWidgets.QPushButton(self.page_3)
        self.pushButton_12.setGeometry(QtCore.QRect(480, 30, 75, 23))
        self.pushButton_12.setObjectName("pushButton_12")
        self.pushButton_12.setText(_translate("MainWindow",
"PushButton"))

        self.tableView_4 = QtWidgets.QTableView(self.page_3)
        self.tableView_4.setGeometry(QtCore.QRect(0, 0, 281, 461))
        self.tableView_4.setStyleSheet("background-color: rgb(255, 255,
255);")
        self.tableView_4.setObjectName("tableView_4")

        self.stackedWidget.addWidget(self.page_3)
        self.page_4 = QtWidgets.QWidget()
        self.page_4.setObjectName("page_4")

        self.stackedWidget.addWidget(self.page_4)
        self.page_5 = QtWidgets.QWidget()
        self.page_5.setObjectName("page_5")

        self.stackedWidget.addWidget(self.page_5)
        self.page_6 = QtWidgets.QWidget()
        self.page_6.setObjectName("page_6")
        self.stackedWidget.addWidget(self.page_6)

        self.textBrowser_4 = QtWidgets.QTextBrowser(self)
        self.textBrowser_4.setGeometry(QtCore.QRect(0, 40, 121, 461))
        self.textBrowser_4.setStyleSheet("background-color: rgb(43, 41,
41);")
        self.textBrowser_4.setObjectName("textBrowser_4")

        self.pushButton_6 = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButton_6.setGeometry(QtCore.QRect(0, 80, 121, 31))
        self.pushButton_6.setStyleSheet("background-color: rgb(8, 143,
255);")
        self.pushButton_6.setObjectName("pushButton_6")
        self.pushButton_6.setText(_translate("MainWindow", "       파
일 선택"))
```

```
        self.pushButton_5 = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButton_5.setGeometry(QtCore.QRect(0, 150, 121, 31))
        self.pushButton_5.setStyleSheet("background-color:  rgb(43,  41,
41);")
        self.pushButton_5.setObjectName("pushButton_5")
        self.pushButton_5.setText(_translate("MainWindow", "
변환"))

        self.pushButton_10 = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButton_10.setGeometry(QtCore.QRect(0, 220, 121, 31))
        self.pushButton_10.setStyleSheet("background-color:  rgb(43,  41,
41);")
        self.pushButton_10.setObjectName("pushButton_10")
        self.pushButton_10.setText(_translate("MainWindow", "          조건
설정"))

        self.pushButton_7 = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButton_7.setGeometry(QtCore.QRect(0, 290, 121, 31))
        self.pushButton_7.setStyleSheet("background-color:  rgb(43,  41,
41);")
        self.pushButton_7.setObjectName("pushButton_7")
        self.pushButton_7.setText(_translate("MainWindow", "          ANN
모델링"))

        self.pushButton_9 = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButton_9.setGeometry(QtCore.QRect(0, 360, 121, 31))
        self.pushButton_9.setStyleSheet("background-color:  rgb(43,  41,
41);")
        self.pushButton_9.setObjectName("pushButton_9")
        self.pushButton_9.setText(_translate("MainWindow", "     최적 모델
확인"))

        self.pushButton_11 = QtWidgets.QPushButton(self)
        self.pushButton_11.setGeometry(QtCore.QRect(0, 430, 121, 31))
        self.pushButton_11.setStyleSheet("background-color:  rgb(43,  41,
41);")
        self.pushButton_11.setObjectName("pushButton_11")
        self.pushButton_11.setText(_translate("MainWindow", "          예측
적용"))
        self.isChanged = False
        self.readSettings()

        if len(sys.argv) > 1:
            self.fileName = sys.argv[1]
            self.loadCsvOnOpen(self.fileName)
            self.msg(self.fileName + "loaded")
        else:
            self.msg("Ready")
            self.isChanged = False

    # 예측하기 버튼 누를시 - 실제 계산 부분
    def conten(self):

        # 텍스트로 받은 숫자를 정수로 변환
        num = self.textedit1.toPlainText()
        s = num
        n = float(s)

        for i in range(0, 1000):  # i의 변수 선언 0으로 시작하여 100회를
수행

            #학습용 데이터와 검증용 데이터를 분리한다.
            x_train,          x_test,          y_train,          y_test          =
model_selection.train_test_split(x_data, y_data, test_size=0.33)

            #분리한 데이터를 표준화 변환
            x_train1 = (x_train - x_train.mean()) / x_train.std()

            x_test1 = (x_test - x_test.mean()) / x_test.std()

            # estimator가 많으면 많은 변수 활용, random_state가 일정해
야 결과도 동일하게 추출됨
            # 글로벌 변수 추가
            global  estimator

            estimator      =      RandomForestRegressor(n_estimators=100,
criterion='mse', max_depth=None, min_samples_split=2,
                                                  min_samples_leaf=1,
min_weight_fraction_leaf=0.0, max_features='auto',
                                                  max_leaf_nodes=None,
min_impurity_decrease=0.0, min_impurity_split=None,
                                                  bootstrap=True,
oob_score=False, n_jobs=1, random_state=None, verbose=0,
                                                  warm_start=False)

            estimator.fit(x_train1, y_train.values.ravel())

            # 예측 계산 대입
            y_predict = estimator.predict(x_train1)
            score0 = metrics.r2_score(y_train, y_predict)

            mse1 = mean_squared_error(y_train, y_predict)

            y_predict = estimator.predict(x_test1)
            score1 = metrics.r2_score(y_test, y_predict)

            mse2 = mean_squared_error(y_test, y_predict)

            # 입력받은 검출 n 이상이 되면 break
            if score0 > n:

                # 문자열 변환 및 출력 첫단은 setText 추가는 append
                p1 = y_test
                p2 = str(p1)

                y1 = x_test
                y2 = str(y1)

                self.textedit2.append(' 선택된 y_test 데이터   ₩n' + p2)
                self.textedit2.append('')
                self.textedit2.append(' 선택된 w_data 데이터   ₩n' + y2)

                v1 = y_predict
                v2 = str(v1)
                self.textedit2.append('')
                self.textedit2.append('y-predict : ' + v2)
                self.textedit2.append('')

                a1 = score0
                a2 = str(a1)

                self.textedit2.append('train R2 : ' + a2)

                a3 = mse1
                a4 = str(a3)

                self.textedit2.append('train mse : ' + a4)

                c1 = score1
                c2 = str(c1)
                self.textedit2.append('')
                self.textedit2.append('test R2: ' + c2)

                c3 = mse2
                c4 = str(c3)
                self.textedit2.append('test mse: ' + c4)


                break

    #적용할 파일 불러오기 버튼 클릭시
    def loadta(self):
```

```
            #           파일이 열려있는지 확인
            if self.isChanged == True:
                quit_msg = "<b>The Document was changed.<br>Do you want to save changes?</ b>"
                reply = QMessageBox.question(self, 'Save Confirmation', quit_msg, QMessageBox.Yes, QMessageBox.No)
                if reply == QMessageBox.Yes:
                    self.saveOnQuit()

            # csv 파일만 불러오기 창에 표시
            fileName1, _ = QFileDialog.getOpenFileName(self, "Open CSV", (QDir.homePath() + "/Dokumente/CSV"), "CSV (*.csv *.tsv *.txt)")

            self.textedit3.setText(fileName1)  # 파일 네임 출력

            if fileName1:
                self.loadCsvOnOpen(fileName1)

            x_dat = pd.read_csv(fileName1, names=['w1', 'w2', 'w3', 'w4', 'w5', 'w6', 'w7','w8'])

            # 학습용 데이터와 검증용 데이터를 분리한다.
            x_train, x_test, = model_selection.train_test_split(x_dat, test_size=0.33)

            # 분리한 데이터를 정규화 시킨다.
            x_dat_scaled = (x_test - x_test.mean())/ x_test.std()

            # 예측 데이터 적용
            y_pre = estimator.predict(x_test)

            # 정수를 문자열로 변환
            s1 = x_test
            s2 = str(s1)
            s3 = x_dat_scaled
            s4 = str(s3)
            s5 = y_pre
            s6 = str(s5)

            # 출력 첫단은 setText 추가는 append
            self.textedit4.setText(s2)
            self.textedit4.append('')
            self.textedit4.append(s4)
            self.textedit4.append('')
            self.textedit4.append(s6)

        # tableview 변경
        def changeSelection(self):

self.tableView.setSelectionMode(QAbstractItemView.ExtendedSelection)

        # tableview 검색 데이터 호출
        def updateCell(self):
            if self.tableView.selectionModel().hasSelection():
                row = self.selectedRow()
                column = self.selectedColumn()
                newtext = QTableWidgetItem(self.editLine.text())
                self.tableView.setItem(row, column, newtext)


        # tableview의 선택된 정보를 가져온다.
        def getItem(self):
            item = self.tableView.selectedItems()[0]
            row = self.selectedRow()
            column = self.selectedColumn()
            if not item == None:
                name = item.text()
            else:
                name = ""
            self.msg("'" + name + "' on Row " + str(row + 1) + " Column " + str(column + 1))
            self.editLine.setText(name)

        # tableview 선택된 행
        def selectedRow(self):
            if self.tableView.selectionModel().hasSelection():
                row = self.tableView.selectionModel().selectedIndexes()[0].row()
                return int(row)

        # tableview 선택된 열
        def selectedColumn(self):
            column = self.tableView.selectionModel().selectedIndexes()[0].column()
            return int(column)

        # 찾는 숫자 입력받음
        def findText(self):
            self.findTableItems()
            self.changeSelection()

        # tableview의 찾는 숫자를 찾는다.
        def findTableItems(self):
            #
self.tableView.setSelectionMode(QAbstractItemView.MultiSelection)
            findText = self.findBar.text()
            self.tableView.clearSelection()
            #           if findText.isnumeric():
            #                       items = self.tableView.findItems(findText, Qt.MatchExactly)
            #           else:
            items = self.tableView.findItems(findText, Qt.MatchContains)
            if items:
                self.colored = True
                self.makeAllWhite()
                for item in items:
                    item.setBackground(Qt.yellow)
                self.colored = True
                self.isChanged = False

        # 찾은 데이터를 표시
        def findThis(self):
            #
self.tableView.setSelectionMode(QAbstractItemView.MultiSelection)
            self.tableView.clearSelection()
            items = self.tableView.findItems(self.mytext, Qt.MatchContains)
            if items:
                self.colored = True
                self.makeAllWhite()
                for item in items:
                    item.setBackground(Qt.yellow)
                    item.setForeground(Qt.blue)
                self.colored = True
                self.isChanged = False

        def msgbox(self, message):
            QMessageBox.warning(self, "Message", message)

        # 메뉴바
        def createMenuBar(self):
            # File 메뉴바
            bar = self.menuBar()
            self.filemenu = bar.addMenu("File")
            self.separatorAct = self.filemenu.addSeparator()

            self.filemenu.addAction(QIcon.fromTheme("document-open"), "Open", self.loadCsv, QKeySequence.Open)
            self.filemenu.addAction(QIcon.fromTheme("document-save"), "Save", self.saveOnQuit, QKeySequence.Save)

            self.filemenu.addSeparator()

self.filemenu.addAction(QIcon.fromTheme("document-print-preview"),     "Print Preview", self.handlePreview,
                                    "Shift+Ctrl+P")
```

```
            self.filemenu.addSeparator()
            for i in range(self.MaxRecentFiles):
                self.filemenu.addAction(self.recentFileActs[i])
            self.updateRecentFileActions()
            self.filemenu.addSeparator()
            self.clearRecentAct = QAction("clear Recent Files List", self,
triggered=self.clearRecentFiles)
            self.clearRecentAct.setIcon(QIcon.fromTheme("edit-clear"))
            self.filemenu.addAction(self.clearRecentAct)
            self.filemenu.addSeparator()
            self.filemenu.addAction(QIcon.fromTheme("application-exit"),
"Exit", self.handleQuit, QKeySequence.Quit)

            # Edit
            self.editmenu = bar.addMenu("Edit")

            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-copy"),      "copy
Cell", self.copyByContext, QKeySequence.Copy)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-paste"),     "paste
Cell", self.pasteByContext, QKeySequence.Paste)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-cut"),  "cut  Cell",
self.cutByContext, QKeySequence.Cut)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-delete"),    "delete
Cell", self.deleteCell, QKeySequence.Delete)
            self.editmenu.addSeparator()
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-copy"),      "copy
Row", self.copyRow)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-paste"),     "paste
Row", self.pasteRow)
            self.editmenu.addSeparator()
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-copy"),      "copy
Column", self.copyColumn)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-paste"),     "paste
Column", self.pasteColumn)
            self.editmenu.addSeparator()
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("add"), "add Column",
self.addColumn)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-delete"), "remove
Column", self.removeColumn)
            self.editmenu.addSeparator()
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit"), "headers add",
self.setHeadersToFirstRow)
            self.editmenu.addSeparator()
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-clear"),     "clear
List", self.clearList)
            self.editmenu.addSeparator()

self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("pane-show-symbolic"),     "toggle
horizontal Headers",
                                    self.toggleHorizHeaders)
            self.editmenu.addAction(QIcon.fromTheme("pane-hide-symbolic"),
"toggle vertical Headers",
                                    self.toggleVertHeaders)

            self.editmenu.addAction(self.whiteAction)

        # tableview row, col의 데이터 호출
        def deleteCell(self):
            row = self.selectedRow()
            col = self.selectedColumn()
            self.tableView.takeItem(row, col)

        def toggleHorizHeaders(self):
            if self.tableView.horizontalHeader().isVisible():
                self.tableView.horizontalHeader().setVisible(False)
            else:
                self.tableView.horizontalHeader().setVisible(True)

        def toggleVertHeaders(self):
            if self.tableView.verticalHeader().isVisible():
                self.tableView.verticalHeader().setVisible(False)
            else:
                self.tableView.verticalHeader().setVisible(True)
```

```
        # 메뉴바 셋팅
        def createActions(self):
            # all items white BG
            self.whiteAction                                                =
QAction(QIcon.fromTheme("pane-hide-symbolic"),     "all     items     white
background", self)
            self.whiteAction.triggered.connect(lambda: self.makeAllWhite())
            for i in range(self.MaxRecentFiles):
                self.recentFileActs.append(
                    QAction(self, visible=False,
                            triggered=self.openRecentFile))

        # 새로 오픈할때 저장 할것인지 묻는 메세지 박스
        def openRecentFile(self):
            action = self.sender()
            if action:
                if self.isChanged == True:
                    quit_msg = "<b>The Document was changed.<br>Do
you want to save changes?</ b>"
                    reply = QMessageBox.question(self, 'Save Confirmation',
                                                 q u i t _ m s g ,
QMessageBox.Yes, QMessageBox.No)
                    if reply == QMessageBox.Yes:
                        self.saveOnQuit()
                file = action.data()
                if QFile.exists(file):
                    self.loadCsvOnOpen(file)
                else:
                    self.msg("File not exists")

        # 종료
        def handleQuit(self):
            quit()

        # csv 파일의 내용을 정렬 및 출력
        def loadCsvOnOpen(self, fileName):
            if fileName:
                f = open(fileName, 'r', encoding='utf-8')
                mystring = f.read()

                # csv 파일 특성상 ,를 구분하여 데이터를 재정렬
                if mystring.count(",") > mystring.count('₩t'):
                    if mystring.count(",") > mystring.count(';'):
                        self.delimit = ","
                    elif mystring.count(";") > mystring.count(','):
                        self.delimit = ";"
                    else:
                        self.delimit = "₩t"
                elif mystring.count(";") > mystring.count('₩t'):
                    self.delimit = ';'
                else:
                    self.delimit = "₩t"

                f.close()
                f = open(fileName, 'r', encoding='utf-8')  # r = 읽기 설정
utf-8 출력 설정
                self.tableView.setRowCount(0)
                self.tableView.setColumnCount(0)

                for rowdata in csv.reader(f, delimiter=self.delimit):
                    row = self.tableView.rowCount()
                    self.tableView.insertRow(row)
                    if len(rowdata) == 0:
                        self.tableView.setColumnCount(len(rowdata) + 1)
                    else:
                        self.tableView.setColumnCount(len(rowdata))
                    for column, data in enumerate(rowdata):
                        item = QTableWidgetItem(data)
                        self.tableView.setItem(row, column, item)
```

```
            self.tableView.selectRow(0)
            self.isChanged = False
            self.setCurrentFile(fileName)
            self.tableView.resizeColumnsToContents()
            self.tableView.resizeRowsToContents()
            self.msg(fileName + " loaded")

        # csv       불러오기
        def loadCsv(self):

            # 기존에 파일이 열려있는지 확인
            if self.isChanged == True:
                quit_msg = "<b>The Document was changed.<br>Do you
want to save changes?</ b>"
                reply = QMessageBox.question(self, 'Save Confirmation',
                                             quit_msg,    QMessageBox.Yes,
QMessageBox.No)
                if reply == QMessageBox.Yes:
                    self.saveOnQuit()

            # csv 파일만 불러오기 창에 표시
            fileName, _ = QFileDialog.getOpenFileName(self, "Open CSV",
                                                      (QDir.homePath()    +
"/Dokumente/CSV"), "CSV (*.csv *.tsv *.txt)")
            self.textedit.setText(fileName)# 파일 네임 출력

            if fileName:
                self.loadCsvOnOpen(fileName)
            datarows = fileName.count
            print(datarows)

            # 가져온 데이터에 헤더를 추가
            data = pd.read_csv(fileName, names=['w1', 'w2', 'w3', 'w4',
'w5', 'w6', 'w7','w8', 'y'])

            #코드 전체 변수 설정
            global x_data, y_data

            # 파일의 행의 w1, w2, w3, w4, w5, w6, w7, w8를 x_data로 설
정
            x_data = data[["w1", "w2", "w3", "w4", "w5", "w6", "w7", "w8"]]
            y_data = data[["y"]]  # y행을 y_data로 설정

        # csv 파일 저장
        def writeCsv(self):
            path, _ = QFileDialog.getSaveFileName(self, 'Save File',
QDir.homePath() + "/export.csv",
                                                  "CSV Files(*.csv *.txt)")
            if path:
                with open(path, 'w') as stream:

                    writer = csv.writer(stream, delimiter=self.delimit)
                    for row in range(self.tableView.rowCount()):

                        for column in range(self.tableView.columnCount()):
                            item = self.tableView.item(row, column)
                            if item is not None:
                                rowdata.append(item.text())
                            else:
                                rowdata.append('')
                        writer.writerow(rowdata)
                self.isChanged = False
                self.setCurrentFile(path)
        # 출력 미리보기 기능 - 출력기능 포함
        def handlePreview(self):
            if self.tableView.rowCount() == 0:
                self.msg("no rows")
            else:
                dialog = QtPrintSupport.QPrintPreviewDialog()
                dialog.setFixedSize(1000, 700)
                dialog.paintRequested.connect(self.handlePaintRequest)
                dialog.exec_()
                self.msg("Print Preview closed")

        # 출력 의뢰 - 출력기능 호출
        def handlePaintRequest(self, printer):
            printer.setDocName(self.fname)
            document = QTextDocument()
            cursor = QTextCursor(document)
            model = self.tableView.model()
            tableFormat = QTextTableFormat()
            tableFormat.setBorder(0.2)
            tableFormat.setBorderStyle(3)
            tableFormat.setCellSpacing(0);
            tableFormat.setTopMargin(0);
            tableFormat.setCellPadding(4)
            table      =      cursor.insertTable(model.rowCount()      +      1,
model.columnCount(), tableFormat)
            model = self.tableView.model()
            ### get headers
            myheaders = []
            for i in range(0, model.columnCount()):
                myheader = model.headerData(i, Qt.Horizontal)
                cursor.insertText(str(myheader))
                cursor.movePosition(QTextCursor.NextCell)
            ### get cells
            for row in range(0, model.rowCount()):
                for col in range(0, model.columnCount()):
                    index = model.index(row, col)
                    cursor.insertText(str(index.data()))
                    cursor.movePosition(QTextCursor.NextCell)
            document.print_(printer)

        #  load 데이터 리스트를 제거
        def clearList(self):
            self.tableView.clear()
            self.isChanged = True

        # 백그라운드 하얀색
        def makeAllWhite(self):
            if self.colored == True:
                for row in range(self.tableView.rowCount()):
                    for column in range(self.tableView.columnCount()):
                        item = self.tableView.item(row, column)
                        if item is not None:
                            item.setForeground(Qt.black)
                            item.setBackground(QColor("#fbfbfb"))
            self.colored = False

        def finishedEdit(self):
            self.isChanged = True

        # 메뉴바 이벤트
        def contextMenuEvent(self, event):
            self.menu = QMenu(self)
            if self.tableView.selectionModel().hasSelection():
                # copy
                copyAction = QAction(QIcon.fromTheme("edit-copy"), 'Copy
Cell', self)
                copyAction.triggered.connect(lambda: self.copyByContext())
                # paste
                pasteAction = QAction(QIcon.fromTheme("edit-paste"), 'Paste
Cell', self)
                pasteAction.triggered.connect(lambda: self.pasteByContext())
                # cut
                cutAction = QAction(QIcon.fromTheme("edit-cut"), 'Cut Cell',
self)
                cutAction.triggered.connect(lambda: self.cutByContext())
                # delete selected Row
                removeAction    =    QAction(QIcon.fromTheme("edit-delete"),
'delete Row', self)
                removeAction.triggered.connect(lambda:
self.deleteRowByContext(event))
```

```
                # replace all
                row = self.selectedRow()
                col = self.selectedColumn()
                myitem = self.tableView.item(row, col)
                if myitem is not None:
                    self.mytext = myitem.text()
                replaceThisAction                                    =
QAction(QIcon.fromTheme("edit-find-and-replace"),
                                                "replace all occurrences of '" +
self.mytext + "'", self)
                replaceThisAction.triggered.connect(lambda:
self.replaceThis())
                # find all
                findThisAction = QAction(QIcon.fromTheme("edit-find"), "find
all rows contains '" + self.mytext + "'", self)
                findThisAction.triggered.connect(lambda: self.findThis())
                ###
                self.menu.addAction(copyAction)
                self.menu.addAction(pasteAction)
                self.menu.addAction(cutAction)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-delete"),
"delete", self.deleteCell, QKeySequence.Delete)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-copy"),      "copy
Row", self.copyRow)
                self.menu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-paste"),     "paste
Row", self.pasteRow)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-copy"),      "copy
Column", self.copyColumn)
                self.menu.addAction(QIcon.fromTheme("edit-paste"),     "paste
Column", self.pasteColumn)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(addAction)
                self.menu.addAction(addAction2)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(addColumnBeforeAction)
                self.menu.addAction(addColumnAfterAction)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(removeAction)
                self.menu.addAction(deleteColumnAction)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(replaceThisAction)
                self.menu.addAction(findThisAction)
                self.menu.addSeparator()
                self.menu.addAction(self.whiteAction)
                self.menu.popup(QCursor.pos())
        #          값으로 교체
        def replaceThis(self):
            row = self.selectedRow()
            col = self.selectedColumn()
            myitem = self.tableView.item(row, col)
            if myitem is not None:
                mytext = myitem.text()
                dlg = QInputDialog()
                newtext, ok = dlg.getText(self, "Replace all", "replace all
<b>" + mytext + " </b> with:", QLineEdit.Normal,
                                          "", Qt.Dialog)
                if ok:
                    items = self.tableView.findItems(mytext, Qt.MatchExactly)
                    if items:
                        for item in items:
                            newItem = QTableWidgetItem(newtext)
                            self.tableView.setItem(item.row(),    item.column(),
newItem)
        # 선택된 데이터 복사하기
        def copyByContext(self):
            row = self.selectedRow()
            col = self.selectedColumn()
            myitem = self.tableView.item(row, col)
            if myitem is not None:
                clip = QApplication.clipboard()
                clip.setText(myitem.text())

        # 선택된 데이터 붙여넣기
        def pasteByContext(self):
            row = self.selectedRow()
            col = self.selectedColumn()
            clip = QApplication.clipboard()
            newItem = QTableWidgetItem(clip.text())
            self.tableView.setItem(row, col, newItem)
            self.tableView.resizeColumnsToContents()
            self.isChanged = True

        # 선택된 데이터 잘라내기
        def cutByContext(self):
            row = self.selectedRow()
            col = self.selectedColumn()
            myitem = self.tableView.item(row, col)
            if myitem is not None:
                clip = QApplication.clipboard()
                clip.setText(myitem.text())
                newItem = QTableWidgetItem("")
                self.tableView.setItem(row, col, newItem)
                self.isChanged = True

        # 닫기 이벤트 메세지박스 출력
        def closeEvent(self, event):
            if self.isChanged == True:
                quit_msg = "<b>The document was changed.<br>Do you
want to save the changes?</ b>"
                reply = QMessageBox.question(self, 'Save Confirmation',
                                             quit_msg,    QMessageBox.Yes,
QMessageBox.No)
                if reply == QMessageBox.Yes:
                    event.accept()
                    self.saveOnQuit()
            self.saveSettings()

        # load 셋팅
        def readSettings(self):

            if self.settings.contains("geometry"):
                self.setGeometry(self.settings.value('geometry'))
            if self.settings.contains("horHeader"):
                if self.settings.value('horHeader') == "true":
                    self.tableView.horizontalHeader().setVisible(True)
                else:
                    self.tableView.horizontalHeader().setVisible(False)
            if self.settings.contains("vertHeader"):
                if self.settings.value('vertHeader') == "true":
                    self.tableView.verticalHeader().setVisible(True)
                else:
                    self.tableView.verticalHeader().setVisible(False)

        # save 셋팅
        def saveSettings(self):

            self.settings.setValue('geometry', self.geometry())
            self.settings.setValue('horHeader',
self.tableView.horizontalHeader().isVisible())
            self.settings.setValue('vertHeader',
self.tableView.verticalHeader().isVisible())

        # 빠져나갈때 저장
        def saveOnQuit(self):
            if self.fileName == "":
                self.writeCsv()
            else:
                path = self.fileName
                with open(path, 'w') as stream:
```

```
                writer = csv.writer(stream, delimiter=self.delimit)
                for row in range(self.tableView.rowCount()):
                    rowdata = []
                    for column in range(self.tableView.columnCount()):
                        item = self.tableView.item(row, column)
                        if item is not None:
                            rowdata.append(item.text())
                        else:
                            rowdata.append('')
                    writer.writerow(rowdata)
            self.isChanged = False

        #         현재 파일
        def setCurrentFile(self, fileName):
            self.fileName = fileName
            self.fname = os.path.splitext(str(fileName))[0].split("/")[-1]
            if self.fileName:
                self.setWindowTitle(self.strippedName(self.fileName) + "[*]")
            else:
                self.setWindowTitle("no File")

            files = self.settings.value('recentFileList', [])

            try:
                files.remove(fileName)
            except ValueError:
                pass

            files.insert(0, fileName)
            del files[self.MaxRecentFiles:]

            self.settings.setValue('recentFileList', files)

            for widget in QApplication.topLevelWidgets():
                if isinstance(widget, MyWindow):
                    widget.updateRecentFileActions()

        # 최근 오픈된 파일 목록
        def updateRecentFileActions(self):

            files = self.settings.value('recentFileList', [])
            numRecentFiles = min(len(files), self.MaxRecentFiles)

            for i in range(numRecentFiles):
                text = "&%d %s" % (i + 1, self.strippedName(files[i]))
                self.recentFileActs[i].setText(text)
                self.recentFileActs[i].setData(files[i])
                self.recentFileActs[i].setVisible(True)

self.recentFileActs[i].setIcon(QIcon.fromTheme("gnome-mime-text-x"))

            for j in range(numRecentFiles, self.MaxRecentFiles):
                self.recentFileActs[j].setVisible(False)

            self.separatorAct.setVisible((numRecentFiles > 0))

        # 파일 리스트 지움
        def clearRecentFiles(self, fileName):
            #         self.settings.clear()
            mf = []
            self.settings.setValue('recentFileList', mf)
            self.updateRecentFileActions()


        # 파일 네임 셋팅
        def strippedName(self, fullFileName):
            return QFileInfo(fullFileName).fileName()
        # 메세지 박스
        def msg(self, message):
            self.statusBar().showMessage(message)
```

```
        # 헤더 추가
        def setHeadersToFirstRow(self):
            self.tableView.insertRow(0)
            for column in range(self.tableView.columnCount()):
                newItem                                                    =
QTableWidgetItem(self.tableView.horizontalHeaderItem(column))
                ind = QTableWidgetItem(str(column + 1))
                self.tableView.setHorizontalHeaderItem(column, ind)
                self.tableView.setItem(0, column, newItem)

        # 열 삭제
        def removeColumn(self):
            self.tableView.removeColumn(self.selectedColumn())
            self.isChanged = True

        # 열 추가
        def addColumn(self):
            count = self.tableView.columnCount()
            self.tableView.setColumnCount(count + 1)
            self.tableView.resizeColumnsToContents()
            self.isChanged = True
            if self.tableView.rowCount() == 0:
                self.addRow()
                self.tableView.selectRow(0)

        # tableView 선택 행 데이터 복사
        def copyRow(self):
            row = self.selectedRow()
            for column in range(self.tableView.columnCount()):
                if not self.tableView.item(row, column) == None:
                    self.copiedRow.append(self.tableView.item(row,
column).text())

        # tableView 선택 행 데이터 복사
        def pasteRow(self):
            row = self.selectedRow()
            for column in range(self.tableView.columnCount()):
                newItem = QTableWidgetItem(self.copiedRow[column])
                self.tableView.setItem(row, column, newItem)

        # tableView 선택 열 데이터 복사
        def copyColumn(self):
            column = self.selectedColumn()
            for row in range(self.tableView.rowCount()):
                self.copiedColumn.append(self.tableView.item(row,
column).text())

        # tableView 선택 열 데이터 붙여넣기
        def pasteColumn(self):
            column = self.selectedColumn()
            for row in range(self.tableView.rowCount()):
                newItem = QTableWidgetItem(self.copiedColumn[row])
                self.tableView.setItem(row, column, newItem)
                self.tableView.resizeColumnsToContents()

    # 스타일 시트 설정
    def stylesheet(self):
        return """
            QTableWidget
            {
                border: 0.5px solid lightgrey;
                border-radius: 0px;
                font-family: Noto Sans;
                font-size: 9pt;
                background-color: #fbfbfb;
                selection-color: #ffffff
            }
            QTableWidget::item:hover
            {
                color: black;
                background: qlineargradient(x1:0, y1:0, x2:1, y2:1, stop:0
#cfbb72, stop:1 #d3d7cf);
            }
```

```
            QTableWidget::item:selected
            {
                color: #F4F4F4;
                background: qlineargradient(x1:0, y1:0, x1:2, y1:2, stop:0
#bfc3fb, stop:1 #324864);
            }
            QStatusBar
            {
                font-size: 7pt;
                color: #717171
            }
            QLineEdit
            {
               color: #484848;
                background-color: #fbfbfb;
            }
        """

    if __name__ == "__main__":
        import sys

        app = QApplication(sys.argv)
        app.setApplicationName('MyWindow')
        main = MyWindow('')
        main.resize(734, 543)
        main.setStyleSheet("background-color: rgb(225, 238, 242);")
        main.setWindowTitle("CSV Viewer")
        main.show()

    sys.exit(app.exec_())
```

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발 핵심적인 목표는 배후지 지하수 이용 장애가 없도록 하면서 대용량 취수시설의 취수량 감소를 억제하는 것이다. 현실적으로 현장지역에 발생가능한 모든 현상에 대하여 실험을 하고 그 결과를 바탕으로 최적의 운영방법을 찾는 것은 물리적으로 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 인공신경망을 활용하여 최적의 운영방법을 찾는 방법을 고안하였다.

본 연구에서 개발한 핵심기술은 운영조건에 따른 배후지 수위변화를 학습하여 최적의 운영방안을 도출하는 기술이다. 본 기술은 IT기반의 관측체계 구축과 수평집수관의 제어 기능을 갖춘 시설에 효과적이며, 시설이 갖춰지지 않은 시설이라도 자료를 수집하여 학습시켜 배후지 영향 최소화를 위한 운영방안을 도출 할 수 있다.

해당기술은 배후지 영향으로 인해 지하수 이용 장애가 발생하는 지역에 적용시 효과적일 것으로 판단된다.

표 74. 연구개발내용 및 달성도

연구개발 목표	세부 연구개발내용	달성도(%)
취수량 감소 억제(90%)이상	·기존자료 수집 및 분석을 통한 부지특성 파악 ·광역분석을 통한 수치모델링 기반 구축 ·모델링 활용 취수량 유지조건 검토 ·모델링 활용 조건별 배후지 영향범위 검토 ·현장계측 자료와 비교를 통한 시스템 검증	100
배후지 영향 최소화	·관측정 설치방안 조사 및 분석을 통한 관측망 설계 및 구축 ·방사형집수정 성능평가 및 배후지 영향분석 수행 ·최적의 운영방안 도출 및 적용성 검토수행	100
수평집수정 운영에 따른 수질변화 분석	·연구방법에 따른 수질항목 선정 ·수평집수관별 유입비율 및 체류시간 분석 ·취수방식에 따른 수질변화 모니터링 및 분석 ·장기모니터링을 통한 계절적 변화검토	100
국내 지질여건을 고려한 강변여과수 취수량 추정 프로그램 개발	·지층특성을 고려한 방사형집수정 취수량 평가 및 감소원인 연구 ·인공신경망 기반의 프로그램 초안 개발, 논문 및 학술발표 진행 ·취수량평가 프로그램 적용성 검토 및 프로그램 등록 완료	100

제 1 절 양적성과 달성

IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발 중 양적 성과 지표 달성 현황은 아래 표와 같다. 양적 성과 지표 모두 목표 이상 성과달성 하였으며, 개발 기술 보급화에 중점을 두어 특허등록 및 S/W 개발에 집중하였다. 개발된 특허는 “더블 T자형 연결관을 이용한 수평집수관 유량계측 및 유지관리를 위한 배관구조 및 그 시공방법”과 “IT기반의 지하수 수질관리를 위한 수질측정 시스템 및 그 통신방법”이 있다. 이 기술은 기본적인 배후지 영향 최소화를 위한 시스템 적용시 기본적으로 적용되어야 하는 기술로 활용도가 높으며 개발된 S/W와 연계운용시 효율을 극대화 할 수 있다.

연구과제를 수행하면서 개발된 요소 기술 및 대용량 간접취수 시설에 대한 홍보 및 전시를 목표와 관계없이 적극적으로 수행하여, 개발된 기술을 보급화 하고자 노력하였다. 그 결과 홍보/전시에 경우 달성률 250%로 초과 달성되었다.

또한 학술적 성과 달성을 위해 현장자료 수집 및 대외활동을 적극적으로 수행하여 국내학술발표 800%, 국내 학술지 논문 게재 133%로 목표 이상 성과달성 하였다.

표 75. 양적 성과 달성

구분	성과목표	양적 성과 지표	목표(건수)	달성(건수)	달성률(%)
총괄	IT기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발	국내 특허 출원	2	2	100%
		국내 특허 등록	1	2	200%
		국내 학술지 논문 게재	3	4	133%
		국내학술발표	1	8	800%
		연구성과 홍보/전시	2	5	250%
		지침/매뉴얼/기술보고서	1	1	100%
		기타 지식재산권(S/W)	1	1	100%
		비용절감	0	1	-

○ 비용절감

- 지하수 이용장애 극복을 위해 사용하는 일반적인 방법은 수직정을 활용한 인공함양 기법을 주로 사용하나 부지확보, 주입정 및 관로시공, 주입용수 확보에 어려움이 존재함
- 본 연구과제 수행지역 또한 배후지 지하수 이용시설이 있어 이에 대응하기 위한 방안으로 인공신경망을 활용하는 기법을 적용하여 문제를 해소함
- 해당기술은 실측자료에 의한 학습으로 최적의 솔루션을 제공하는 시스템으로 자료확보를 위한 관측공, 유량계, 밸브 등 기초 설비가 필요함
- 초기설치 비용과 유지관리 비용을 포함할 경우 약 9,852만원에 비용절감 효과가 기대됨

- 해당검토는 기본적으로 설치되는 공통설비의 비용은 배제하였으며, 유지관리 비용의 경우 1년 기준으로 검토한 결과로 장기적 활용시 경제적 효과가 증대됨

구 분		기존기술	R&D 개발기술	비 고
초기설치비용	주입정	8,400 만원	-	영향방향 200m 구간, 주입효과 중첩고려 50m 간격 배치
	주입관로	2,983 만원	-	관로연장 500m 기준, 주철관 절단 및 조인트관 접합 포함
	관측정	-	3,230 만원	지하수위 관측용 충적관정 10m 기준, 10개소 설치
	유량계	-	3,010 만원	수평집수관 개별 유량측정용
	밸브	-	3,707 만원	수평집수관 개별 제어용
유지관리비용	주입용수 조달비용	6,716 만원	-	주입량 2,000m^3/d 규모, 공업용수 단가 92원/m^3 적용
	유지보수	2,000 만원	300 만원	주입량 감소에 따른 공내청소 비용 / 유량계 검보정비용
계		**20,099 만원**	**10,247 만원**	**9,852 만원 비용절감 효과**

제 2 절 질적성과 달성

IT 기반의 배후지 영향 최소화 간접취수 운영 시스템 개발을 위해 3차년간 단계적 질적성과 지표를 가지고 연구를 수행하여 소프트웨어 개발을 완료하였으며, 이는 최종연구목표에 부합하는 결과이다. 단계적 질적성과 지표 및 달성치는 아래와 같다.

표 76. 질적 성과 달성

핵심연구성과 (Level1)		질적 성과 지표	목표치	달성치	측정방법
1	취수량 감소 억제 (90% 이상 유지)	Test Bed 특성분석	부지특성 파악	부지특성 파악	부지특성 파악
		수치모델링 구축	수치모델링 기반구축	기반구축 완료	수치모델링 기반 구축 여부
		취수시설 분석	취수량 90%이상 유지	시나리오별 유량 분석	수치모델링 분석
		배후지 시설분석	배후지 영향 유무	시나리오별 영향거리 분석	수치모델링 분석
		장기운영시스템 평가	오차10% 이내	7.17%	현장계측 자료와 비교
2	배후지 영향 최소화	관측망 시스템 구축	관측정 설치	설치완료	현장측정 자료
		장기운영에 따른 배후지 자료 확보	장기 현장자료 확보	배후지 관측자료 확보	취수량 및 수위자료
		최적운영방안 도출	자동운영 기술 개발	자동운영 기술개발	실증시험
3	수평집수정 운영에 따른 수질 변화 분석	수질항목 선정 및 평가	수질분석 자료 확보	항목선정 및 자료확보	현장측정 자료
		취수방식에 따른 수질개선 효과 평가	수질분석 자료 확보	자료확보 및 평가완료	현장측정 자료
		장기운영에 따른 수질변화 분석	수질분석 자료 확보	자료확보 및 장기변화분석	현장측정 자료
4	국내 지질 여건을 고려한 강변여과수 취수량 추정 프로그램 개발	수평집수관의 취수량 평가 및 알고리즘 개발	알고리즘 개발	알고리즘 개발	개발유무
		프로그램 초안 개발	프로그램 개발	초안 개발	개발유무
		취수량평가 프로그램 개발	평가 및 등록	S/W등록	개발유무

제 5 장 연구개발성과의 활용계획

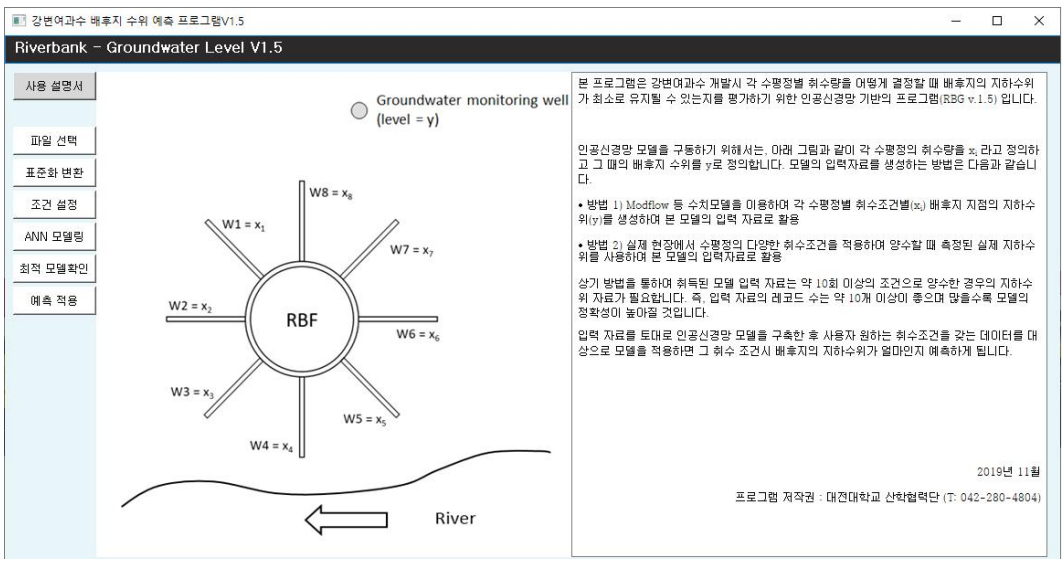
○ 연구개발성과의 활용방안

- 향후 한국수자원공사, 지자체 등 강변여과수 사업을 추진하는 사업에 대하여 사전에 배후지의 수위 강하를 최소화할 수 있는 취수 방법을 제시하는 용도로 활용하고자함

- 연구기간 중 경기도청 민방위팀, 용인시 환경과 수도팀 등 연구 개발 성과에 기대치가 높으며, 해당기술을 활용한 용수공급 체계 구축을 계획하고 있는 단계로 지속적인 홍보를 통해 기술을 활용하고자 함

- 해외의 경우, 강변여과수 개발로 인한 민원 해소와 같은 문제점 및 과제가 거의 없는 상태로서 국내에 한정된 문제점을 해결하기 위한 기술에 해당됨. 따라서 해외에서는 본 연구와 같은 기법 개발이 전무한 상태로 향후 외국에서의 유사 문제시 해결 방안으로 제공 가능함

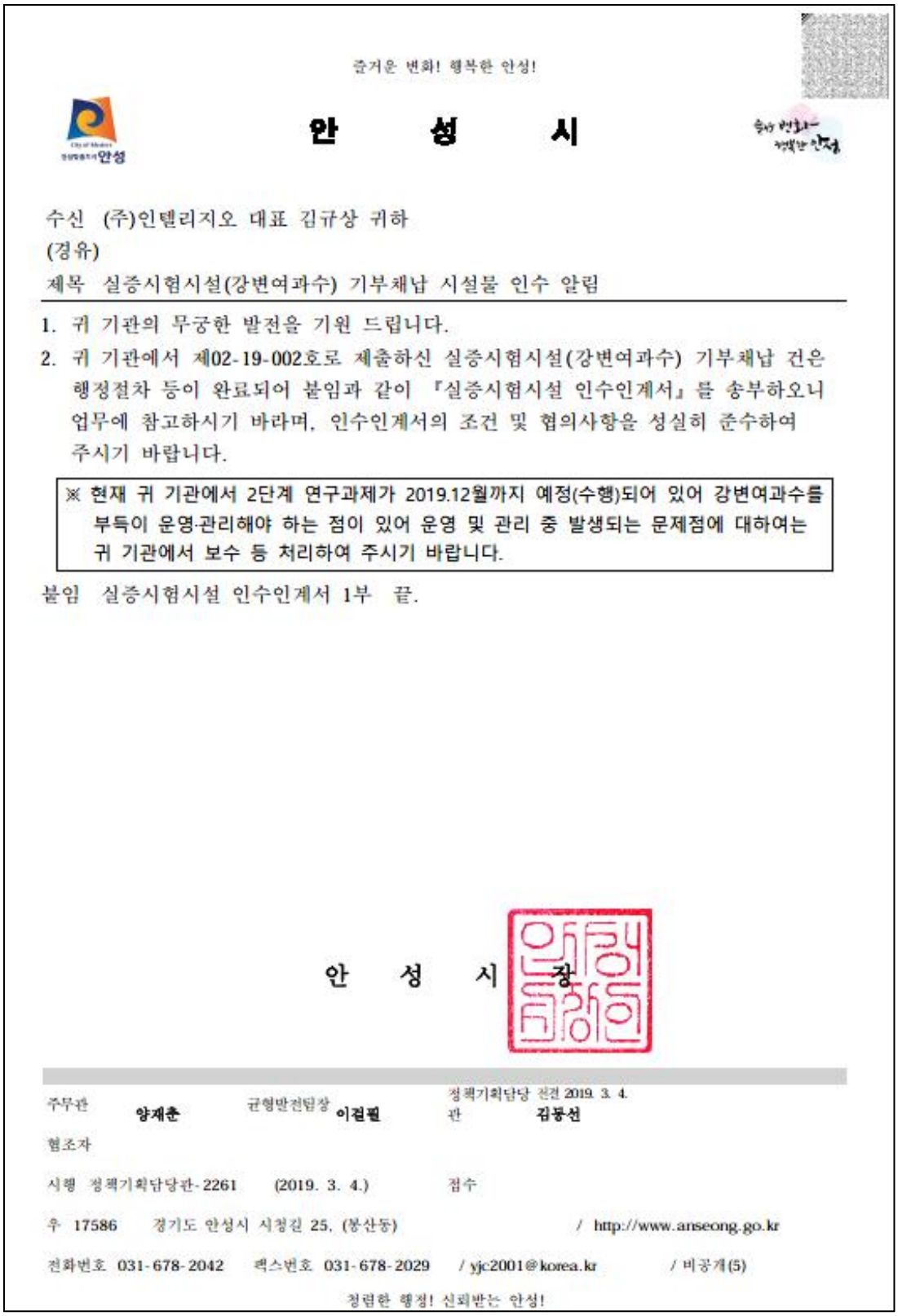
- 일반사용자용 인공신경망 프로그램에 경우 매뉴얼 작성을 통해 공공의 목적으로 활용될 수 있도록 보완하여 활용도를 높이고자 함



- 실증시험시설은 지자체에 이관하여 공공의 목적으로 활용하며, 이관 후에도 현장조건 변화에 따른 최적의 운영방안을 제시하는데 활용가능

- 2020년 상반기 관련 기관인 수자원공사 등을 대상으로 프로그램 및 매뉴얼 제공 예정이며, 학회 및 학술지 등에 프로그램 효과에 대한 홍보계획

- 실증시험시설(강변여과수) 안성시 인수 알림



즐거운 변화! 행복한 안성!

안 성 시

수신 (주)인텔리지오 대표 김규상 귀하
(경유)
제목 실증시험시설(강변여과수) 기부채납 시설물 인수 알림

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원 드립니다.
2. 귀 기관에서 제02-19-002호로 제출하신 실증시험시설(강변여과수) 기부채납 건은 행정절차 등이 완료되어 붙임과 같이 『실증시험시설 인수인계서』를 송부하오니 업무에 참고하시기 바라며, 인수인계서의 조건 및 협의사항을 성실히 준수하여 주시기 바랍니다.

※ 현재 귀 기관에서 2단계 연구과제가 2019.12월까지 예정(수행)되어 있어 강변여과수를 부득이 운영·관리해야 하는 점이 있어 운영 및 관리 중 발생되는 문제점에 대하여는 귀 기관에서 보수 등 처리하여 주시기 바랍니다.

붙임 실증시험시설 인수인계서 1부 끝.

안 성 시 장

주무관 양재춘 균형발전팀장 이걸필 정책기획담당 관 김동선 전결 2019. 3. 4.
협조자
시행 정책기획담당관-2261 (2019. 3. 4.) 접수
우 17586 경기도 안성시 시청길 25, (봉산동) / http://www.anseong.go.kr
전화번호 031-678-2042 팩스번호 031-678-2029 / yjc2001@korea.kr / 비공개(5)

정렬한 행정! 신뢰받는 안성!

○ 연구개발성과 활용처 상세검토

- **대용량 간접취수원으로 강변여과수를 활용하는 지역**에 우선적용 가능하며, 이에 해당하는 현장 중 **창녕 강변여과수 현장**의 경우 50만톤 취수원 확보를 위한 사업 추진 중 **배후지 지하수위 강하로 인한 민원 발생**으로 사업진행에 어려움을 겪고 있음.

창녕 강변여과수 1공구

6000억 강변여과수사업, 5년 끌다 좌초

정부·부산시 추진 광역상수도

국제신문 김화영 기자 hongdam@kookje.co.kr | 입력 : 2017-03-29 00:02:10 | 본지 1면 글자 크기



- 창녕 주민 "작물 피해" 반발
- 협약 맺고도 공정률 10%미만

- 내년 부산 물공급 계획 무산
- 남강물도 경남 반대로 답보



- 배후지 수위저하 문제 발생으로 주민 반발이 극심
- 취수원 50만톤 확보를 목표로 하였으나 반발로 인해 추가 시공에 어려움 발생
- 배후지 영향 최소화 기술 적용을 통해 민원지역 영향감소 효과를 기대할 수 있음

- **강변여과수 개발지와 배후지 지하수 사용처 인접지역(소하천 인근)** 적용가능

청미천 유역

한천 유역

진위천 유역

- 용인시 대용량 취수원 개발을 위해 청미천 외 2개 유역을 대상으로 후보지 검토를 수행 - 해당 후보지의 경우 배후지에 농업용 및 생활용 관정이 밀집하여 있음 - 위 후보지와 같은 지점에 대용량 취수원을 개발하게 될 경우 배후지 민원이 우려되며 정량적인 평가가 필요함 - 따라서 위 예시와 같은 지점(소하천 인근)에 대용량 취수원을 개발하게 될 경우 본 연구에서 개발한 배후지 영향 최소화 기술 적용이 가능 - 현재 용인시의 경우 해당 후보지에 대한 검토를 수행하고 있으며, 최종 후보지 발표시 결정된 후보지를 대상으로 연구기술 적용성 검토 수행할 예정임

제 6 장 참고 문헌

Bourg, A. C., & Bertin, C. (1993). Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer. Environmental science & technology, 27(4), 661-666.

Clark, I.D. and Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 328 p.

Crandall, C. A., Katz, B. G., & Hirten, J. J. (1999). Hydrochemical evidence for mixing of river water and groundwater during high-flow conditions, lower Suwannee River basin, Florida, USA. Hydrogeology Journal, 7(5), 454-467.

de Vet, W. W. J. M., van Genuchten, C. C. A., van Loosdrecht, M. C. M., & van Dijk, J. C. (2010). Water quality and treatment of river bank filtrate. Drinking Water Engineering and Science, 3(1), 79-90.

Farnsworth, C. E., & Hering, J. G. (2011). Inorganic geochemistry and redox dynamics in bank filtration settings. Environmental science & technology, 45(12), 5079-5087.

Hiscock, K. M., & Grischek, T. (2002). Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. Journal of Hydrology, 266(3), 139-144.

Hoehn, E., & Von Gunten, H. R. (1989). Radon in groundwater: A tool to assess infiltration from surface waters to aquifers. Water Resources Research, 25(8), 1795-1803.

Kalbus, E., Reinstorf, F., & Schirmer, M. (2006). Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 10(6), 873-887.

Kármán, K., Maloszewski, P., Deák, J., Fórizs, I., & Szabó, C. (2014). Transit time determination for a riverbank filtration system using oxygen isotope data and the lumped-parameter model. Hydrological Sciences Journal, 59(6), 1109-1116.

Koh, D-C, Mayer, B, Lee, K-S, Ko, K-S, 2010. Land-use controls on sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area revealed by multiple environmental tracers. Journal of Contaminant Hydrology, 118(1-2), 62-78.

Kuehn, W., & Mueller, U. (2000). Riverbank filtration: an overview. American Water Works Association. Journal, 92(12), 60.

Maloszewski, P.,Rauert, W., Stichler, W. and Herrman, A. (1983) Application for flow models in an alpine catchment area using tritium and deute-

rium data. Journal of Hydrology, 66, 319-330.
Ray, C., Soong, T. W., Lian, Y. Q., & Roadcap, G. S. (2002). Effect of flood-induced chemical load on filtrate quality at bank filtration sites. Journal of Hydrology, 266(3), 235-258.
Stichler, W., Maoszewski, P., & Moser, H. (1986). Modelling of river water infiltration using oxygen-18 data. Journal of Hydrology, 83(3-4), 355-365.
Tufenkji, N., Ryan, J. N., & Elimelech, M. (2002). Peer reviewed: The promise of bank filtration. Environmental science & technology, 36(21), 422A-428A.
Ward, J. V., Malard, F., Tockner, K., & Uehlinger, U. (1999). Influence of ground water on surface water conditions in a glacial flood plain of the Swiss Alps. Hydrological Processes, 13(3), 277-293.
Wiese, B., & Nutzmann, G. (2009). Transient leakance and infiltration characteristics during lake bank filtration. Ground Water, 47(1), 57-68.
공민근, & 윤성용. (2001). 새로운 취수방법으로서의 강변여과수 개발. 한국수자원학회지 물과미래, 34(2), 78-84.
이광식, 이창복, 1999. 남한 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성. 지질학회지 35(1), 73-84.
이상일, 이상신 (2008). 한강에서의 강변여과수 개발을 위한적지선정 및 개발가능량 산정 (Ⅰ). 한국수자원학회논문집 41, 825-834.
정윤영, 고동찬, 이정훈, 고경석, 2013. 동위원소비 적외선 분광법(IRIS)을 이용한 물 안정동위원소 분석. 자원환경지질 46(6), 495-508.
함세영, 정재열, 류상민, 김무진, & 김형수. (2002). 창원시 대산면 강변여과수 취수지역의 수리지질 특성. 지질학회지, 38(4), 595-610.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.