



Office



Research



Farming



International

대용량 지하수 이용시설 효율성 증대 방안 연구(1차년도)

A Study on Increasing Efficiency of
Large-scale Groundwater Facilities(1)



농림축산식품부



한국농어촌공사

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “대용량 지하수 이용시설 효율성 증대방안 연구”
과제의 1차년도 보고서로 제출합니다.

2015년 12월 24일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

연구책임자 : 홍순욱

연구원 : 송성호

안중기

김진성

박종환

공동연구기관 : (사)한국지하수토양환경학회

연구책임자 : 함세영

연구원 : 김형수

김무진

전향탁

이상용

오윤영

요 약 문

1. 연구과제명 : 대용량 지하수 이용시설 효율성 증대방안 연구

2. 연구기간 : 2015년 3월 ~ 2015년 12월

3. 연구 배경 및 목적

3.1 연구 배경 및 필요성

- 최근 기후변화에 따른 가뭄발생 빈도 증가로 인하여, 지속가능하고 다량취수가 가능한 대용량 지하수 이용시설 확보 및 안정적인 유지관리 필요성이 증가하고 있음
- 과거에는 주곡 위주의 논농사가 주를 이루었으나, 근래에는 농어촌 소득향상을 위한 특용작물을 포함한 시설농업 단지 증가로 인한 농업용수 사용량도 점차 증가하고 있는 추세임.
- 지하수개발 밀집지역에서 무분별한 개발에 따른 지하수위 강하, 민원발생 및 신규개발 제한 등으로 문제점이 발생되고 있어, 지하수 사용 자제와 더불어 용수 부족 해결을 위하여 대용량 지하수 이용시설에 대한 효율성 증대 기술 개발 필요성이 제시되었음
- 암반관정(약 150 m³/일)에 비하여 방사상 집수정은 대용량(2,000 m³/일)의 지하수 확보가 가능하므로 지표수 급수 불리지역에 대규모 청정용수 공급 가능함.
- 근래 소비자들의 친환경 농산물 선호 추세로 인하여 우수한 품질의 농산물이 소비자에게 신뢰를 심어주듯이 청정용수로 재배한 작물은 높은 가격과 많은 수요를 창출할 가능성이 큼.
- 현재 한국농어촌공사에는 방사상 집수정 98개소가 있으나 지속적인 유지관리 기술 부재로 이용률이 저하되고 있어 지속적인 유지관리 방안이 절실한 실정임.

- 방사상 집수정 구조물 1개소 설치비용은 약 6억원이므로, 집수정을 활용하면서 수평취수관 등의 부대시설을 보완하여 효율성을 높인다면 신규대체시설 건설비용을 절감할 수 있으며, 사용기한을 연장할 수 있음.
- 농업용 지하댐 5개소는 '80년대 초반 시공되어 효율성이 저하된 상태이며, 이와 연계되어 개발된 대부분의 방사상 집수정은 노후화 및 공막힘 현상 등으로 양수량이 저하된 상태임.
- 물은 인간이 생활하는데 없어서는 안 될 중요한 요소이며 매우 유용한 자원이므로 지속가능한 지하수자원의 안정적인 공급 확대를 통한 물 부족 해소를 위하여 장기적인 연구개발과 지속적인 수자원확보정책의 추진이 시급함.

3.2 연구 목적

- 본 연구의 목적은 대용량 지하수 시설로 이용되고 있는 방사상 집수정의 효율성 증대방안과 시설물의 점검·관리 및 수량·수질 유지관리 방안을 정립하는데 있음

4. 연구 내용 및 결과

4.1 연구 내용

- 본 연구는 방사상 집수정, 지하댐, 집수암거 등의 대용량 지하수 이용시설의 효율성 증대 및 유지관리방안을 수립하는 것이 목적이다.
- 이를 위해 1단계에서는 기존자료, 사례 분석 및 수량·수질 악화시설에 대한 조사 및 문제점 분석 후 방사상 집수정 효율성 저하 유형을 분류하고 효율성 증대방안을 수립하고자 한다.
- 2단계에서는 지하댐 내구성 변화 분석, 대용량 지하수 이용시설의 배치 기술 및 최적 설치방안을 도출하고 이러한 연구결과를 바탕으로 대용량지하수를 지속적으로 사용하기 위한 유지관리방안을 수립할 계획이다.

4.2 연구 결과

- 대용량 지하수 이용시설인 농업용 방사상 집수정의 일반적인 제원은 내경 3.5 m, 심도 10 m 이내, 수평집수관은 구경 65 mm의 PVC 자재를 30 m 이내로 시공되었으며, 집수정마다 수평집수관은 9~28개로 다양하다.
- 하천과 인접한 지역에서는 65 mm의 수평집수관 이외에도 500~800 mm 구경의 집수암거가 설치되어 있는 시설도 발견되었다.
- 시설물 안전진단, 설문조사, 집수정 개발이용 특성 및 일부시설 현장 확인에 의한 방사상 집수정 효율저하 유형은 충적층 지하수위 하강에 따른 채수량 감소, 수평취수정 공막힘에 의한 채수량감소, 지반침하, 주변농경지 사금 또는 골재 채취후 수량감소, 사이편식 집수정 진공배관 노후로 집수가 잘 되지 않는 경우로 분류된다.
- 방사상 집수정 수평집수관 취수기능저하 주원인은 지표에서 미립자의 유입, 물-암석 반응으로 인한 광물의 침전 등이 있으며, 그 이외에도 수중 펌프의 산화 및 부식, 생물학적 과정인 박테리아에 의한 파이프에 침전물 축적 등이 있다.
- 우물효율 개선을 위한 재생기법은 크게 물리적 처리와 화학적 처리로 구분할 수 있다. 물리적 처리방법은 브러싱, 서지블럭 소제와 같은 기계적 방법과, 고압유체분사와 같은 수리학적 방법, 폭약, 고압가스, 고압펄스방전, 초음파와 같은 충격식 방법, 열처리 등이 있다. 화학적 처리방법에는 산처리 방법, 유기용제에 의한 봉쇄, 항균제 처리 등이 있으며, 현장의 상황과 효율성 향상을 위해 다양한 방법을 병행하는 혼합처리방법을 사용하기도 한다.
- 서징에 의한 수평집수관 폐색제거 효과 분석을 위한 현장실증시험 실시결과 폐색물질 제거로 수평집수관에서 집수정으로 유입되는 지하수의 흐름이 개선되어 비양수량이 67% 증가하고, 양수가능시간이 3배 이상 증가하는 것을 확인하였다.
- 서징 시에는 청수 및 에어가 수평집수관에 평행한 방향으로 분사되며, 고압세척은 고압수 회전분사장치를 이용하여 수평집수관에 직각 방향으로 고압수가 분사되므로 서징에 비하여 수평집수관 막힘물질 제거 효율이 높은 것으로 판단된다. 따라서, 서징 작업 시 청수 및 에어가 방사상 집수정의 수평집수관 벽면에 전달될 수 있도록, 선단 장치를 제작하여 이용한다면 서징효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

- 해외에서의 서징방법에 따른 취수량 증가 사례는 에어서징과 과잉 양수를 통하여 수위강하와 취수량 증가가 3배 이상 일어난 사례와 Sonar jet을 이용하여 회복 기술을 실시한 경우 2배 정도 취수량이 증가한 사례가 보고된 바 있다. 국내의 경우 에어서징 및 고압 충격공법을 창원대산 정수장 1단계 강변여과수 관정을 대상으로 적용한 결과 브러싱 및 에어서징으로 평균 취수량 증가율이 14.8%, 고압충격공법으로는 217.5%의 증가사례가 있었다.
- 서징방법의 소요 비용에 따른 경제적인 회복 기술을 확인하기 위하여 Helweg et al.,(1983)의 관정의 단위주기 당 운용비용에 대한 경험식을 이용하여 한국농어촌공사의 공주 집수정의 에어서징 전, 후를 비교하였다. 산정 결과 일 평균 8시간 양수와 농업용 요금 감을 적용하였을 경우, 에어서징 전 소요비용이 41,001원, 서징 후 31,185원으로 산정되었다. 한편, 고압충격과 에어서징의 회복 기술 적용에 따른 증가 취수량 및 소요비용을 비교한 결과, 고압충격 공법이 비용 대비 취수량 증가율이 높게 나왔다. 그러나 고압충격 공법을 국내 방사상 집수관의 PVC 수평정에 적용할 경우 스크린 파손에 주의하여야 한다.
- 방사상 집수정의 회복 기술 실시 시기를 판단하기 위하여 우선적으로 우물 효율의 저하를 평가해야 한다. 우물 효율 저하 평가방법으로 공내 TV검층, 포화지수도, 화학 분석, 양수시험 등을 이용하며, 일반적으로 기존 취수량 보다 25% 감소 시 회복 기술을 적용해야 한다.
- 방사상 집수정의 수평공의 취수량 회복 기술 적용은 사전 조사, 현장 조사, 회복 기술 실시, 사후관리의 순서로 진행이 되며, 사전 조사에서는 집수정의 수위강하 확인, 배출 지하수 수질, 공내 TV검층, 양수를 통한 취수량 감소 확인을 통하여 회복 기술 실시 여부를 판단한다. 현장 조사에서 사전 조사를 기본으로 하여 수평정 제원, 대상지역의 지질, 공막힘 물질 분석 등을 통한 수평공에 적합한 회복 기술을 선택한다.
- 이후, 현장 조사 결과를 바탕으로 해당 방사상 집수정 수평공에 맞는 회복 기술을 적용하는데 필요하다면 하나 이상의 회복 기술을 적용할 수 있다. 마지막으로 사후관리에서는 회복 기술 실시 이후 결과 확인 및 방사상 집수정의 취수량 확인을 통해, 공막힘 현상 예방과 차후에 있을 회복 기술 실시를 위한 기초자료로 활용이 가능하게 된다.

5. 기대효과 및 실용화 방안

5.1 기대효과

- 시설노후화로 취수량이 현저하게 감소되어 효율이 저하된 방사상 집수정의 기능 회복 및 장기적인 유지관리방안 기술을 확보하여 시설물 관리에 기여
- 지층조건 및 경계 조건별 수평형 집수정에 대한 객관적인 취수량 산정 해석해 도출 시, 수치적 방법을 활용한 평가 이전에 현장에서 적용할 수 있는 개략 평가 기술 확보 가능
- 국내의 지질 및 수리·수문특성에 적합한 최적의 설계방안을 제시함으로써 향후 효율적이고, 지속가능한 수자원의 개발 및 운영계획에 도움을 줄 수 있음
- 대용량 지하수시설 신규 개발 시 막대한 소요비용이 소요되나, 노후된 대용량 지하수 시설의 효율을 증대시킴으로서 신규개발에 소요되는 비용 절감
- 대용량 지하수 시설의 지속가능한 사용으로 무분별한 지하수 신규개발을 억제하고 지하수를 집중적으로 관리함으로써 지하수 수량·수질관리에 기여

5.2 실용화 방안

- 시설농업단지 지하수함양사업 등과 연계하여 지하수 함양을 위한 청정용수원 확보 및 관리에 활용.
- 시설노후로 취수량이 감소한 방사상 집수정의 취수기능 회복 및 관리방안을 제시하여 가뭄에 대비한 안정적인 농촌용수 확보
- 방사상 집수정 수명 추정 및 재개발, 재시공 시기 결정 등의 의사 결정에 활용

Summary

1. Title : A study on increasing efficiency of Large-scale groundwater facilities(1)

2. Period : March 2015 – December 2015

3. Background and Objectives

3.1 Background and Necessity

- Necessity of securing sustainable large amount of groundwater and maintaining facilities due to the increase of drought according to climate change
- Increasing trend of agricultural water usage according to the steady rise of farming industry using green house in recent year
- Groundwater level drops, complaints occur and cause problems such as limited new development, and increase efficiency required for large underground facilities for water shortage resolved
- Rock groundwater facilities (150m³/day) compared to the horizontal radial collector well is large (2,000m³/day) groundwater is possible because it is possible to secure a large supply of clean water to the local groundwater supply disadvantages.
- Consumers prefer eco-friendly farm products and good quality of agricultural products are grown to the consumer because clean water for crops planted in confidence that could create more demand and higher prices.
- Korea Rural Community Corporation has a horizontal radial

collector well 98 facilities, there is lack of management skills utilization lowers ongoing maintenance plan to establish is required

- Since the horizontal radial collector well construction in one place installation costs are approximately six billion, if utilizing the sump and complemented by facilities such as a horizontal water intake pipe increase the efficiency and to reduce the new replacement facility construction costs, to extend the expiry can
- The agricultural groundwater dam five places built in the early 1980s, This efficiency is degraded condition, horizontal radial collector well is aging, pumping amount is being reduced to a blockage such as clogging.
- Sustainable development of groundwater resources in long-term studies to solve the water shortage through a stable supply and sustainable water resources policy implementation is urgency.

3.2 Objectives of the study

- The purpose of this study is to improve the efficiency of large underground facilities of radial collector well, check and manage the facility and has to establish a maintenance plan

4. Contents and Results

4.1 Contents of the study

- This research aims to develop a management plan for a large increase efficiency and maintain groundwater catchment facilities such as horizontal radial collector well, groundwater dam, culverts.
- In the first stage classification efficiency degradation types and to develop ways to increase efficiency
- In the second phase plans to draw underground-water-dam

durable change analysis, deployment of large underground facilities and the best installation techniques and develop a maintenance plan for ways to continue to use large amounts of groundwater on the basis of these findings.

4.2 Results of the study

- Large underground facilities of the general specifications of the agricultural horizontal radial collector well has an inner diameter 3.5 m, depth 10 m within a horizontal tube was constructed of PVC material with a diameter of 65 mm depth within 30 m, the number of horizontal tubes each radial collector well are various pieces 9–28.
- In areas adjacent to rivers 500~800 mm diameter culverts were also found in the horizontal radial collector wells are installed.
- Efficiency degradation types are as follows, reduction of the quantity of alluvium groundwater down, quantity decreased by clogging, ground subsidence, after collecting gold dust or aggregate quantity reduction, old vacuum tube of siphon radial collector well.
- The main reason of radial collector well pipe water intake depression is the influx of particles from the surface, the precipitation of minerals due to water–rock interaction, and in addition to oxidation and corrosion and sediment accumulation in the pipe due to the biological processes of bacteria in the water pump and so on.
- Rehabilitation technique for improving well efficiency is largely classified into physical processes and chemical treatment. Physical processing method brushing, cleaning with mechanical means, such as a surge block, hydraulic methods such as high pressure fluid jets, wide, high–pressure gas, high–pressure pulse discharge, impact method, a heat treatment such as

ultrasound. Chemical treatment method, acid treatment method, blocked with an organic solvent, and the antimicrobial treatment, one might use the method of mixing processes in parallel a number of methods to improve the efficiency of on-site situation.

- Empirical results for the horizontal collector pipe field test conducted by the surging water pipe clogging removal effectiveness analysis, the flow of groundwater flowing into the radial collector well is improved increase specific capacity of 67% and the pumping time is more than three times.
- In the surging method fresh water and air is injected in a direction parallel to the horizontal collector pipe, high pressure cleaning, so the high pressure can not jet in a direction perpendicular to the horizontal collector pipe removal horizontal collector pipe plugging material than the surging using a high-pressure rotary injector efficiency is determined to be high. Thus, the fresh water and air surging during operation to be transmitted to the water tube wall in the radial horizontal collector pipe, and, if used in making the front end device is determined to be able to increase the efficiency of surging.
- In foreign, through air-surging and amniotic fluid, the amount of pumping was more than tripled increased, Sonar jet has a two-fold increase in water withdrawal practices were identified by performing recovery techniques using, in the case of domestic air surging, and the result of applying a high pressure shock , the process to target brushing and average water withdrawal rate is Air surging 14.8%, a high-pressure shock method as was the increase in cases of 217.5%.
- In order to make a cost-effective recovery technique in accordance with the cost of the surging method, Helweg et al., (1983) using the empirical formula for the running costs per unit period of the wells, Korea Rural Community Corporation were

compared before and after the surging of the collector well. When calculating the agricultural electricity bill for pumping an average of 8 hours, Electric charges before 41,001, after surging been estimated at 31,185. On the other hand, the result of the cost comparing about a high-pressure shocks and air surging technology, water withdrawal and recovery, high-pressure shock method is cost growth came out higher water withdrawals, However, if you apply a high-pressure shock method in the domestic PVC horizontal tube of radial collector well it must be careful to screen breakage.

- Radial collector well recovery technique must first evaluate a decrease in the efficiency of the well to determine the effective time. Well decrease in efficiency evaluation method TV logs, saturation index, chemical analysis, and the use of pumping tests, etc., typically, a 25% reduction shall be applied during recovery technology than the existing water withdrawals.
- Rehabilitation technology of the radial collector horizontal tube is apply in order feasibility study, site investigation, recovery technology implementation, follow-up. In the pre-investigation, It determines whether recovery techniques performed through check collector well water level drops, the discharge groundwater quality, TV logs, pumping test. In the field survey selects a recovery technique suitable for a horizontal tube well through the specifications of collector horizontal tube, geology of the target area, hole blocking material analysis.
- Then, the field survey on the basis of, if necessary for the application of technology for the recovery radial collector well can be applied to one or more recovery technique

5. The expected effect and practical uses

5.1 Expected effect

- Radial collector well functional recovery and contribute to the long-term maintenance
- By providing an optimal design scheme for domestic geological and hydrological characteristics, it can help in the planning of effective, sustainable water resources development and management.
- If the new development a large groundwater facility requires a lot of money, it can save costs for development, increasing the efficiency of aging facilities.
- Sustainable use of large groundwater facilities, inhibit ground water development and can contribute to groundwater quantity, quality management by centrally managing groundwater

5.2 Practical use

- It can be utilized in the acquisition and management of clean water for groundwater recharge
- Contribute to ensuring a stable rural water against drought by presenting the rehabilitation technology of the radial collector well and management plans
- Utilized in decision-making, such as radial collector well life time estimation and redevelopment decision

목 차

제1장 서론	1
1.1. 연구배경 및 목적	3
1.2 연구내용	4
1.3 연구방법	6
1.4 기대효과 및 활용방안	7
제2장 기존시설 설계방식 및 시설관리상 문제점	9
2.1 기존시설 설계 방식	11
2.2 시설관리상의 문제점 분석	21
제3장 공막힘 원인 및 우물 재질별 취수기능 회복기술	29
3.1 기계적 원인	38
3.2 물리적 원인	39
3.3 화학적 원인	43
3.4 생물학적 과정	47
3.5 우물 재질별 취수기능 회복기술 비교 평가	57
제4장 취수기능 회복기술 비교 평가	61
4.1 물리적 처리	65
4.2 화학적 처리	81
4.3 혼합처리방법	83
4.4 국내에 적합한 회복기술	83
제5장 대용량 방사상 집수정 우물효율 개선방안 실증시험	85
5.1 서징 및 고압세척시 수리특성 비교	87
5.2 시험 전·후 수질 분석 및 수평집수관 TV검층	92

제6장 방사상 집수정 우물 재개발 방안	99
6.1 서징방법별 취수량 증가 및 소요 비용 분석	101
6.2 우물 효율 저하 판단 및 재개발 시점의 판단	106
제7장 개선된 방사상 집수정 설계 방안	115
7.1 강변여과와 하상여과의 비교	117
7.2 방사상 집수정 설계	130
7.3 기존 방사상 집수정 시설개선 방안	147
7.4 암반층 방사상 집수정 개발	176
제8장 결 론	189
참고문헌	194

표 목차

(표 2-1) 농업기반시설관리시스템(RIMS) 방사상 집수정 등록현황	18
(표 2-2) 공사관리 방사상 집수정 경과 연수	19
(표 2-3) 방사상 집수정 설계 및 시공 추이 변화	20
(표 2-4) 2015년 상반기 방사상 집수정 안전점검 상태평가 종합	21
(표 2-5) 2015상반기 방사상 집수정 집수상태에 대한 점검결과	22
(표 2-6) 2015년 상반기 집수정 유공관 집수상태에 대한 점검결과	22
(표 2-7) 집수정 및 유공관 집수상태 D등급/E등급 시설	23
(표 2-8) 방사상 집수정 설치지역의 표토 토성	25
(표 3-1) 미생물 검사에 사용한 BART의 종류	54
(표 3-2) BART 시약의 반응 및 미생물 활성	55
(표 3-3) 우물 자재의 유형에 따른 물리적 재개발 기술의 적용 가능성의 예	59
(표 4-1) 염소계 소독제의 농도와 염소량	82
(표 4-2) 차아염소산소다(NaOCl) 용액의 혼합비율	82
(표 5-1) 공주시사 지하3집수정 서징 전·후 비양수량 비교	87
(표 5-2) 방사상 집수정의 표토토성과 양수량	89
(표 5-3) 공주시사 지하2집수정 서징 전·후 비양수량 비교	90
(표 5-4) 방사상 집수정 서징 전·후 지하수 수질검사 결과	93
(표 5-5) 방사상 집수정 양·음이온 분석 결과	95
(표 5-6) 방사상 집수정 서징전·후 파이퍼 다이어그램 수질 유형	96
(표 5-7) 파이퍼 다이어그램 상의 영역별 수질 유형	97
(표 6-1) 창녕군 길곡면 방사상 집수정 체원	104
(표 6-2) 상업용관에 대한 조도값	106
(표 7-1) 미국 방사상 집수정 현황	135
(표 7-2) Parameters of Petrovic Formula	143
(표 7-3) 공주집수정 에어 서징 전, 후 양수시험 결과	164
(표 7-4) 방사형 집수정의 사후관리 비용	176

그림 목차

<그림 2-1> 사이펀식 집수정 설치 단면도	16
<그림 2-2> 보조관정 및 사이펀관 배치 평면도	17
<그림 2-3> 공사관리 방사상 집수정 RIMS 등록현황	19
<그림 2-4> 집수정 관리업무 담당기간	24
<그림 2-5> 최초 관리시점 대비 취수량 감소 현황	24
<그림 2-6> 집수정 사용여부	24
<그림 2-7> 집수정 시설보강 필요성	24
<그림 2-8> 집수정 가동시간/하천과의 이격거리	25
<그림 3-1> 관정에서의 공막힘(clogging) 현상 과정	31
<그림 3-2> 모래내 틈새 크기에 대한 지하수 수송 물질의 크기	34
<그림 3-3> 지하수 유속에 따른 지표하부 입자의 이동	35
<그림 3-4> 여재와 지층 내 알갱이 크기의 비에 따른 투과성과 입자이동	37
<그림 3-5> 여재 초기상태와 plugging으로 이어지는 입자들의 진입	38
<그림 3-6> 미고결 퇴적층에서의 물의 이동	40
<그림 3-7> (a)시추공 벽에 존재하는 굴착 이수의 낮은 투과성 잔존물, (b)미세 입자들의 outer colmation	41
<그림 3-8> 우물의 여재층에 나타난 현상	41
<그림 3-9> Gravel pack을 통과하는 동안의 입자들의 bridging과 straining 현상	42
<그림 3-10> Noord Bergum 지역의 우물 50A에서의 수위 변화	43
<그림 3-11> 우물내 생물막 생성 과정 개념도	48
<그림 3-12> 우물내 생물막 형성 및 광물질 침전으로 인한 흐름 방해 개념도	48
<그림 3-13> 슬라임 형성 박테리아 주요 발생 구간	50
<그림 3-14> Iron Related Bacteria(IRB)의 배양 사례	56
<그림 3-15> Slime Forming Bacteria(SLYM)의 배양 사례	57
<그림 4-1> 해외의 방사상 집수정 수평집수관 취수기능회복기술의 예	64

<그림 4-2> 우물 세척용 브러시	66
<그림 4-3> 서지블럭 모식도	67
<그림 4-4> 수평정 청소용 고압 제팅 장비(미국 CWD), 고압 제트 시스템의 예 여재 재배열	69
<그림 4-5> 주파원 에서 자극에 따른 본체의 공명 진동의 진폭	70
<그림 4-6> 한 면에서의 종파의 굴절과 반사 및 매질에서의 전단파의 발생	72
<그림 4-7> 이산화탄소의 상평형 관계	77
<그림 4-8> 냉동 이산화탄소에 의한 우물 복구	79
<그림 4-9> 냉동 이산화탄소 기법을 이용한 우물 복구 전후의 물의 화학적 성질 변화 ...	80
<그림 4-10> 국내 수평정 공막힘 원인	84
<그림 5-1> 공주3집수정 서징 전·후 수위강하 및 회복수위	88
<그림 5-2> 공주2집수정 양수시 지하수 수위 변화	91
<그림 5-3> 서징 및 고압세척 장비	91
<그림 5-4> 공주지사 지하2집수정 수평집수관 TV검층	92
<그림 5-5> 방사상 집수정 지하수 Piper Diagram	95
<그림 5-6> Piper Diagram을 이용한 유형분류	96
<그림 5-7> 파이퍼 다이어그램 상의 영역별 수질 유형	97
<그림 6-1> 해외 서징방법에 따른 취수량 증가 사례	101
<그림 6-2> 고압가스충격을 이용한 수량변화	102
<그림 6-3> 수평집수관 취수기능 회복기술 실시 flowchart	114
<그림 7-1> 강변여과 시 여과거리에 따른 수질지표의 전형적인 변화	118
<그림 7-2> 수위저하에 따른 산출유량 특성	120
<그림 7-3> 경북지역 집수매거 매설깊이 현황	124
<그림 7-4> 형산강 하천수질개선 예측도	129
<그림 7-5> Collector well 평면 및 단면 설계 도면	131
<그림 7-6> 미국 오하이오 Great Miami 강변의 방사상 집수정 시설 현황 사진	133
<그림 7-7> 이안 지하댐 수평 정호 배치도	136
<그림 7-8> 이안 지하댐 우물통 단면도	137
<그림 7-9> 창원시 방사상 집수정	138

<그림 7-10> 김해시 방사상 집수정	138
<그림 7-11> 울산시 방사상 집수정	139
<그림 7-12> 해외 대구경 수평공 설치를 위한 작업 절차 전경	140
<그림 7-13> 특정 방향 및 다단 심도 수평 정호 배치 방식	140
<그림 7-14> 개별 수평 정호 관리를 위한 우물통 접근 공간 확보 방안 사례	141
<그림 7-15> Conditions for Determination of the Optimal Yield	143
<그림 7-16> 해외의 방사상 집수정 설계의 예시	145
<그림 7-17> 국내 방사상 집수정 설계 예시	146
<그림 7-18> 한국농어촌공사 방사상 집수정 개략도 : 공주 집수정2번	147
<그림 7-19> 방사상 집수정 수평집수관 65mm PVC 스트레나	148
<그림 7-20> 방사상 집수정 수평집수관 현황	149
<그림 7-21> 수평집수관 주변 미립자의 이동에 의한 막힘현상	150
<그림 7-22> 수평집수관 주변 미립자의 이동에 의한 막힘현상 및 제거방법	150
<그림 7-23> 한국농어촌공사 방사상 집수정 우물재개발 현장	157
<그림 7-24> 공주 집수정2번 1단5번 수평집수관 공내영상촬영 결과	159
<그림 7-25> 공주 집수정2번 1단6번 수평집수관 공내영상촬영 결과	159
<그림 7-26> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린	160
<그림 7-27> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 제작도면	161
<그림 7-28> 공주 집수정2번 우물재개발용 워터젯팅 및 작동사진	161
<그림 7-29> 공주 집수정2번 우물재개발용 충격발생기 및 작동사진	162
<그림 7-30> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 설치 개략도	162
<그림 7-31> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 설치 현황	163
<그림 7-32> 공주 집수정2번 에어써징전 양수시험	165
<그림 7-33> 공주 집수정2번 에어써징후 양수시험	166
<그림 7-34> 공주 집수정2번 우물재개발후 양수시험	166
<그림 7-35> 권선형 스크린 상세도	168
<그림 7-36> 권선형 스크린 일반도	169
<그림 7-37> 충격파의 전달	169

<그림 7-38> 충격파의 수중전달	170
<그림 7-39> 권선형 스크린 외형도	171
<그림 7-40> 원형 단면을 가지는 실린더형 압력용기	171
<그림 7-41> 실린더형 압력용기에 작용하는 압력과 응력의 관계	172
<그림 7-42> 권선형 스크린(200mm) Pilot 폭약시험	174
<그림 7-43> 권선형 스크린(200mm) Pilot 폭약시험 결과	174
<그림 7-44> 독일 TLM의 충격발생기	175
<그림 7-45> 물리탐사	177
<그림 7-46> 시추조사	177
<그림 7-47> 작업장크레인 설치	179
<그림 7-48> 화약고 설치	179
<그림 7-49> 현장 투입장비	179
<그림 7-50> 지표면 터파기	180
<그림 7-51> 슈 설치 전경	180
<그림 7-52> 내부 거푸집 설치	181
<그림 7-53> 철근가공 조립	181
<그림 7-54> 외부거푸집 설치	181
<그림 7-55> 콘크리트 타설	181
<그림 7-56> 우물통 형성	181
<그림 7-57> 우물통 침하	181
<그림 7-58> 토사층 터파기(인력)	182
<그림 7-59> 토사층 터파기(크랩셀)	182
<그림 7-60> 우물통 내부 착암	183
<그림 7-61> 발파용 화약	183
<그림 7-62> 수평착정공사	184
<그림 7-63> 로드 및 함마비트	184
<그림 7-64> 우물자재 설치	184
<그림 7-65> 우물자재 선단부	184

<그림 7-66> 공별 취수량 확인	184
<그림 7-67> 수평공 밸브설치	184
<그림 7-68> 우물통 청소	185
<그림 7-69> 중간작업대	185
<그림 7-70> 사다리 설치	185
<그림 7-71> 슬라브 설치 완료	185
<그림 7-72> 양수시험	186
<그림 7-73> 터파기, 모래부설 및 다짐	186
<그림 7-74> 관로 및 전선관 매설	186
<그림 7-75> 수중모터 설치	187
<그림 7-76> 내부배관 설치	187
<그림 7-77> 동력설비설치 완료	187
<그림 7-78> 웬스설치 및 자갈깔기	187

제 1 장

서 론

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

1.1.1 연구의 배경 및 필요성

최근 기후변화에 따른 가뭄발생 빈도 증가로 인하여, 지속가능하고 다량취수가 가능한 대용량 지하수 이용시설 확보 및 안정적인 유지관리 필요성이 증가하고 있다.

또한 과거에는 주곡 위주의 논농사가 주를 이루었으나, 근래에는 농어촌 소득향상을 위하여 다양한 방법이 지속적으로 시도되어 특용작물 재배를 포함한 시설농업 단지가 증가하면서 농업용수 사용량도 점차 증가하고 있는 추세이다. 근래 소비자들의 친환경 농산물 선호 추세로 인하여 우수한 품질의 농산물이 소비자에게 신뢰를 심어주듯이 청정용수로 재배한 작물은 높은 가격과 많은 수요를 창출할 가능성이 크다.

특히, 각종 오염원으로 인하여 총 수자원 이용량의 약 58%에 해당하는 하천수의 수질이 점점 악화되고 있어 지하수의 개발 및 이용량이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 지하수개발 밀집지역에서 무분별한 개발에 따른 지하수위 강하, 민원발생 및 신규개발 제한 등으로 문제점이 발생되고 있다. 따라서, 지하수 사용 자제와 더불어 용수 부족 해결을 위하여 대용량 지하수 이용시설에 대한 효율성 증대에 대한 필요성이 제기 되고 있다.

일반적으로 암반관정(약 150 m³/일)에 비하여 방사상 집수정은 대용량(2,000 m³/일)의 지하수 확보가 가능하므로 지표수 급수 불리지역에 대규모 청정용수 공급 가능하다.

현재 한국농어촌공사에는 방사상 집수정 98개소가 있으나 지속적인 유지관리 기술 부재로 이용률이 저하되고 있어 지속적인 유지관리 방안이 절실한 실정이다. 방사상 집수정 구조물 1개소 설치비용은 약 6억원이므로, 집수정을 활용하면서 수평착정공 등의 부대시설을 보완하여 효율성을 높인다면 신규대체시설 건설비용을 절감할 수 있으며, 사용기한을 연장할 수 있다.

국내 지하댐 6개 중 5개는 농업용으로 '80년대 초, 중반 시공되어 효율성이 저하된 상태이며, 이와 연계되어 개발된 방사상 집수정은 노후화, 공막힘 현상 등으로 양수량이 저하된 상태이다.

결과적으로 물은 인간이 생활하는데 없어서는 안 될 중요한 요소이며 매우

유용한 자원이므로 지속가능한 지하수자원의 안정적인 공급 확대를 통한 물 부족 해소를 위하여 장기적인 연구개발과 지속적인 수자원확보정책의 추진이 시급하다.

1.1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 대용량 지하수 시설로 이용되고 있는 방사상 집수정의 효율성 증대방안과 시설물의 점검·관리 및 수량·수질 유지관리 방안을 정립하는데 있다.

1.2 연구 내용

본 연구는 방사상 집수정, 지하댐, 집수암거 등의 대용량 지하수 이용시설의 효율성 증대 및 유지·관리 방안을 수립하는 것이 목적이다.

이를 위해 1단계에서는 기존자료, 사례 분석 및 수량·수질 악화시설에 대한 조사 및 문제점 분석 후 방사상 집수정 효율성 저하 유형을 분류하고 효율성 증대방안을 수립하고자 한다.

2단계에서는 지하댐 내구성 변화 분석, 대용량 지하수 이용시설의 배치 기술 및 최적 설치방안을 도출하고 이러한 연구결과를 바탕으로 대용량지하수를 지속적으로 사용하기 위한 유지·관리 방안을 수립할 계획이다.

구 분	연구목표	연구내용 및 범위
1단계 (2015년)	기존 설계방식 및 시설관리상의 문제점 분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 시설관리 방식 조사 및 문제점 분석 ○ 국내외 설계보고서, 시공사례 분석을 통한 문제점 분석 ○ 수량·수질 악화시설에 대한 조사 및 문제점 분석
	대용량 방사상 집수정 효율성 증대 방안 연구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 방사상 집수정 효율성 저하 유형 분류 ○ 방사상 집수정 효율성 증대 기법 개발
2단계	대용량 지하수 이용시설 최적 설치 방안 제시	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지하담 물막이벽 내구성 변화 분석 ○ 집수정 및 지하담 최적 공간 배치 기술 연구 ○ 수리지질학적 자료 및 수치모델링에 의한 최적 설치 방안 도출
	대용량 지하수 시설물 유지 관리 방안 연구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시설물(수평정, 집수우물통, 펌프 등)에 대한 관리 방안 제시 ○ 지속적인 관리를 통한 수질 및 수량 유지 방안 연구 ○ 양수량 저하 및 수질 악화의 유형 분류 및 해결방안 도출

※ 2단계는 1단계 종료 후 계속과제 선정 시 추진 계획임

1.3 연구방법

1.3.1 기존설계방식 및 시설관리상의 문제점 분석

한국농어촌공사 지사에서 시설 관리를 담당하고 있는 방사상 집수정 시설 관리자를 대상으로 온라인조사(전자우편)와 전화조사로 설문조사 자료를 수집하였고, 일부시설은 개별 면접조사로 자료를 보완하여 집수정 현황과악 및 문제점 분석을 실시하였다.

농업기반시설관리시스템(RIMS)을 통하여 방사상 집수정 98개소에 대한 시설물 등록 현황을 파악 하였고, 방사상 집수정별 한전고객번호를 이용하여 연간 집수정 가동시간을 산정하였다.

설문조사 및 현황조사 결과를 바탕으로 방사상 집수정 이용현황과 문제점 분석을 실시하였다.

1.3.2 방사상 집수정 효율성 증대방안 연구

방사상 집수정 개발후 수평집수관 막힘 현상으로 취수량 감소, 수질불량 등으로 효율이 저하되는 문제점이 발생하고 있다.

수평집수관 막힘 현상과 관련된 자료들은 물리적 화학적 및 생물학적 기작과 밀접한 관련이 있으나, 현재 국내에서는 방사상 집수정 수평집수관의 막힘 현상의 기작에 대한 연구와 이로 인한 지하수 채수량 감소, 지하수 수질 불량 등에 대한 연구가 부족한 실정이다.

따라서, 수평집수관 취수기능 회복 기법을 비교 평가하여, 농업용 방사상 집수정에 적합한 취수기능 회복기술과 경제적인 유지관리방안을 제시하고자 하였다.

연구내용은 크게 3개 분야로 계획하였다.

1) 방사상 집수정 수평집수관 취수기능 회복기술 비교 평가

- 해외 선진국에서 적용하고 있는 방사상 집수정 수평집수관 취수기능 회복기술 비교 평가(수리학적방법, 열처리방법, 충격식방법 등)
- 원인 및 우물 재질별 취수기능 회복기술 비교 평가

2) 방사상 집수정의 경제적인 서징방안 제시

- 강변여과사이트 및 방사상 집수정에서의 서징방법별 취수량 증가 및 소요비용 비교 분석

- 방사상 집수정 수평집수관 재서정 시점 판단 방안 제시
- 3) 해외사례를 기초로 개선된 방사상 집수정 설계방안 제시
 - 해외의 방사상 집수정 시공사례를 기초로 효율성증대를 위한 개선된 방사상 집수정 설계방안 제시

1.4 기대효과 및 활용방안

1.4.1 기술적 측면

- 시설노후화로 취수량이 현저하게 감소되어 효율이 저하된 방사상 집수정의 기능 회복 및 장기적인 유지관리방안 기술을 확보하여 시설물 관리에 기여
- 지층조건 및 경계 조건별 수평형 집수정에 대한 객관적인 취수량 산정 해석해 도출 시, 수치적 방법을 활용한 평가 이전에 현장에서 적용할 수 있는 개략 평가 기술 확보 가능
- 국내의 지질 및 수리·수문특성에 적합한 최적의 설계방안을 제시함으로써 향후 효율적이고, 지속가능한 수자원의 개발 및 운영계획에 도움을 줄 수 있음

1.4.2 경제·산업적 측면

- 대용량 지하수시설 신규 개발 시 막대한 소요비용이 소요되나, 노후된 대용량 지하수 시설의 효율을 증대시킴으로서 신규개발에 소요되는 비용 절감
- 대용량 지하수 시설의 지속가능한 사용으로 무분별한 지하수 신규개발을 억제하고 지하수를 집중적으로 관리함으로써 지하수 수량·수질 관리에 기여

1.4.3 활용분야 및 활용방안

- 시설농업단지 지하수함양사업 등과 연계하여 지하수 함양을 위한 청정용수원 확보 및 관리에 활용
- 시설노후로 취수량이 감소한 방사상 집수정의 취수기능 회복 및 관리방안을 제시하여 가뭄에 대비한 안정적인 농촌용수 확보
- 우물 수명 추정 및 재개발, 재시공 시기 결정 등의 의사 결정에 활용

제 **2** 장

**기존 시설 설계방식 및
시설관리상의 문제점 분석**

제2장 기존 시설 설계방식 및 시설관리상의 문제점 분석

2.1 기존 시설 설계방식

국내에서는 1970년대 초부터 외국의 레이니 집수정을 약간 변형시켜서 만주식 또는 특수집수정이라 하여 대용량 지하수(1일 2,000톤이상)을 이용하는 산업체 등에서 많이 개발한 바 있다(한정상, 1982)

일반적으로 가뭄이 발생하면 지하수 함양량이 부족한 상태가 되어 지하수 수위가 수 m씩 낮아지며, 특히 지하수 이용이 많은 지역의 경우에는 수위강하가 더 크게 나타난다. 이러한 가뭄에 대비하여 지하수 저류량을 증대시키는 방안으로 지하댐이 유효하다는 것은 오래전부터 논의되었으며, 우리나라에서는 1983년 처음으로 경북 상주시 이안면에서 농업용수 개발을 위한 지하댐 시범사업을 시행한 바 있다. 그러나 지하댐에 대한 이해 부족으로 이 사업은 널리 보급되지 못하였으며 그 대신 지하댐 없이 지하수 다량 취수 시설인 방사상 집수정 개발이 많이 보급되어 있다(농어촌진흥공사, 1996). 이러한 지하댐의 효과에 대하여는 지하수문 해석의 복잡성으로 수리적 이론 정립이 부족한 현실이다. 이러한 이유로 5개 지구의 지하댐 개발사업 이후, 대수층에 풍부한 수량이 저류되어 있고 이를 양수하는 기간에 계속 보충하는 넓은 유역을 가진 지역에서는 지하댐이 없는 상태에서 방사상 집수정을 시공하여 왔다.

2.1.1 방사상 집수정 설계 내용

가. 우물통 설계

방사상 집수정은 대수층 하단까지 우물통을 설치한 후 우물통 속에 수평착정기를 장치하여 수평집수관을 20~30m씩 방사상으로 설치하므로써 대수층 안에 저류된 지하수를 중앙의 우물통 안으로 집수하는 시설이다. 그러므로 방사상 집수정 설계는 우선 우물통 설계를 하여야 한다.

철근 콘크리트 우물통의 구조는 통상 외경 4.0m 내경 3.5m의 원통형 철근 콘크리트 구조로서 하단은 외경 4.10m인 췌기형 철판 구조물인 선단 장치가 있고 그위에 원통형 거푸집과 철근을 조립한 후 콘크리트를 타설한다. 1회 타설량은 원통 높이 2~3m를 기준으로 하고 우물의 계획심도를 감안하여 몇회로 나누어 하며, 콘크리트가 양생된 후 거푸집을 철거하고 우물통속

을 인력 또는 기계장치로 터파기하여 우물통 철근콘크리트의 자중으로 가라앉게 한다. 우물통이 지하수면 아래로 잠입한 상태에서 작업하여야 하므로 물푸기 작업을 병행하여야 하는데 물푸기량의 계산은 자유면 대수층의 양수량 공식을 적용하여 산출할 수 있다. 즉,

$$Q = \pi \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{2.030 \log R / r_0}$$

여기서 K : 투수계수

H : 자연수두 h_0 : 양수수두

R : 영향반경 r_0 : 우물통 반경

물푸기 소요일수를 산출하여 물푸기량을 계상한다. 우물통은 대수층 하단까지 침하시키고 필요하면 풍화대나 기반암 부위까지 내릴 수 있다. 우물통 침하가 완료되면 우물바닥은 수중 콘크리트 또는 급결액을 사용하여 바닥 콘크리트를 시공하도록 하였다.

나. 채수가능량 산정

방사상 집수정 채수가능량은 자유면대수층에 대한 Thiem의 평형공식을 적용하여 산정할 수가 있다. 즉, 수평집수관의 평균 길이를 반경으로 하는 대구경 수직 우물에 해당하는 채수량으로 추정할 수 있는데 다만 집수효율을 감안하여 안전율을 적용하고 대구경 우물의 채수량 산정공식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{2.3 \log R / r} (1 - \alpha)$$

여기서 Q : 집수정 채수량 K : 대수층 투수계수

H : 집수정 자연수두 h : 집수정 양수수두

R : 집수정 영향반경 r : 집수관 평균길이(집수반경)

α : 채수량 안전율

집수정 영향반경 R은 자유면지하수에서 통상 500m를 적용하고 있으며, 안전율은 조사 설계자에 따라서 0~0.5범위에서 적용되었다.

다. 수평천공 설계

수평착정기를 우물통 바닥 상판에 설치하고 우물통 내부에서 360°로 회전 하면서 방사상(radial)으로 필요한 공수를 수평천공하는데 천공구경이나 길이(천공심도)는 장비에 따라 다를 수 있다.

- 1) 수평 천공구경 : 일반적으로 $\phi 110\text{mm}$ 적용
- 2) 수평집수관 자재 구경 : 일반적으로 $\phi 65\text{mm}$ 적용
- 3) 공당 산출량 : 관수로 유량공식인 Manning 공식을 적용하여 산출함. 즉,

$$q=AV, V=\frac{1}{n}R^{2/3}\times I^{1/2}$$

여기서 A : 집수관 단면적(πr^2) V : 관내 평균유속

n : 조도계수(PVC 경우 0.013적용)

R = D/4 :경심 (D는 관경)

I : 동수기울기 = $\frac{\text{자연수두} - \text{양수수두}}{\text{영향반경}}$ (영향반경 500m적용)

4) 공수 산정 및 천공길이

수평 천공의 개소수와 수평 천공 심도를 결정하기 위하여 Petrovic 경험 공식을 이용하였는데 이 공식을 소개하면 다음과 같다.

Petrovic 경험공식

하천에서 어느 정도 거리에 떨어져 있는 위치의 방사상 집수정의 경우 집수정의 양수량을 다음 공식으로 제시하였다. 즉,

$$Q = \frac{L \cdot m \cdot K \cdot H \cdot \sqrt{A - B \times h / H - 1}}{C}$$

여기서 Q : 총 양수량

m : 수평 착정 공수

A. B. C :Petrovic의 상수

K : 대수층 투수계수(m/s)

L : 수평 착정 길이

H : 갈수기 대수층 두께

h : 안정수위시 대수층 두께

이고 Petrovic의 상수는,

수평 측정 공수	A	B	C
4	4	3	5.25
8	3	2.9	7.31
12	4.068	3.068	10.00
16	3.718	2.718	11.2

로 제시하였다. 여기서 계획양수량 Q와 대수층에 관련된 K,H,h를 대입하고 Petrovic의 상수 A·B·C 를 적용하면 미정수는 수평 천공수 m와 천공길이 L만 남는다. 그러므로 두가지중 어느 것이든 결정할 수만 있다면 나머지도 구해진다.

수평 천공수를 정하기 위하여 Manning공식을 이용한 공당채수량을 먼저 구하고 계획 양수량과 비교하여 다음과 같이 필요 공수를 산정한다.

$$m = \frac{\text{물리면적} \times \text{단위용수량}}{\text{공당채수량}} \times (1 + \delta)$$

여기서 m는 수평 천공수이고 δ 은 현지여건에 따라 적용하는 여유율이다. 수평 천공의 길이는 앞의 Petrovic 경험공식을 다시 써서

$$L = \frac{Q \cdot C}{m \cdot K \cdot H \sqrt{A - Bh/H - 1}} (1 + B)$$

로 계산할 수 있는데 여기서 B는 유입안전율로서 이안지구의 경우 δ 를 0.35, B를 2.5로 적용하였다. 이안지구 이외의 다른 지구 설계에서는 Petrovic 경험공식의 복잡성과 Petrovic상수의 모호성을 극복하기 위하여 위의 식과 비슷한 새로운 경험공식을 유도하여 사용하였는데 그 내용은 다음 공식과 같다. 즉,

$$L = \frac{q}{\pi \cdot r \cdot n \cdot K \cdot H} (1 + \beta)$$

여기서 q :공당취수량, r :집수관 자재반경, n :자재 개공율, K,Hβ는 수평 천공 길이 산정식에서와 같다.

그러나 어떤 공식을 사용하더라도 불확실한 대수층의 상태를 보완하기 위하여는 안전율을 지나치게 잡아 설계하는 경향이 생기게 마련인데 취수가능량 산정시의 안전율 α, 천공길이 산출시의 유입안전율β, 천공공수 산정시의 여유율 δ가 서로 중복되게 계상되면 결국 전체적인 과다설계가 될 가능성이 크다고 하겠다.

한편 물막이벽 설치지구가 아닌 하천 인근에 설치하는 방사상 집수정지구에서는 집수정 취수량은 하천 유로까지의 거리와 밀접한 관계가 있으므로 Milojevic 경험공식을 적용하기도 하였는데 그 내용은 다음과 같다 (Milojevic : ASCE, Hyd. Div. vol.89, No 6, 1963 참조)

$$\frac{Q}{KH(H-h)} = \left(\frac{t}{L}\right)^{0.10} \times \left(\frac{D}{L}\right)^{0.15} \times [4.13N^{0.1415} - 1.22\left(\frac{T}{L}\right)] \left(\frac{1}{\log \frac{2d}{L}}\right) A$$

$$A = 0.914 + 0.0183 - 0.348\left(\frac{T}{L}\right)^{2/3}$$

단, D : 수평집수관 관경

t : 불투수층으로부터 수평집수관 높이

L : 수평집수관 길이 N : 수평집수관 공수

d : 집수정에서 하천유로까지 거리

T : 대수층 두께

K: 대수층 투수계수

H-h : 집수정 수위강하량

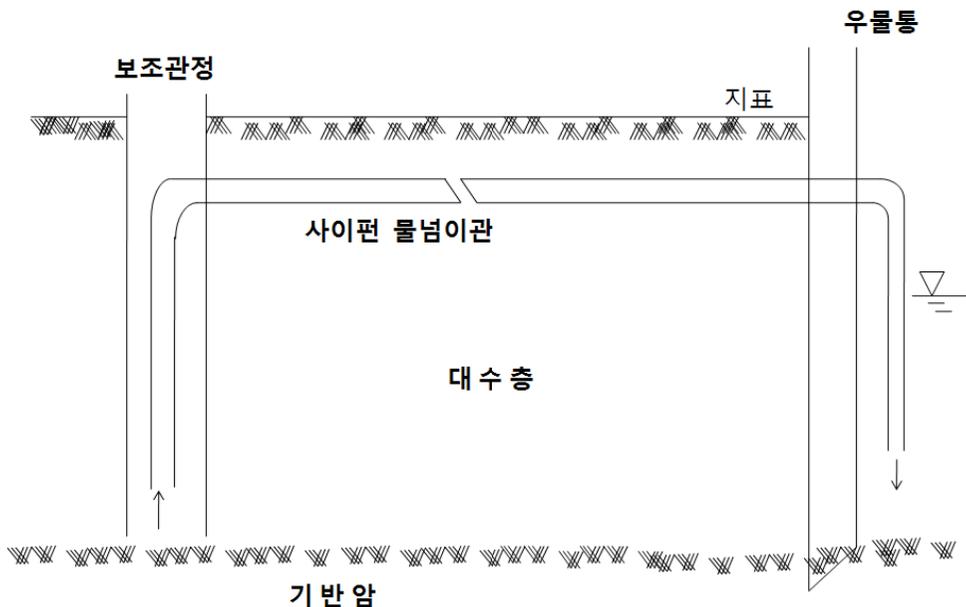
Q : 집수정 채수량

여기서 마지막 항은 하천까지 거리에 따른 보정항으로 d =5L 일 경우 1.0이 되고, d>5L 이면 1.0보 적고, d <5L 이면 1.0보 큰 값은 갖는다. 식에서 A는 공수와 길이에 따른 값으로 0.9~1.2범위 이다.

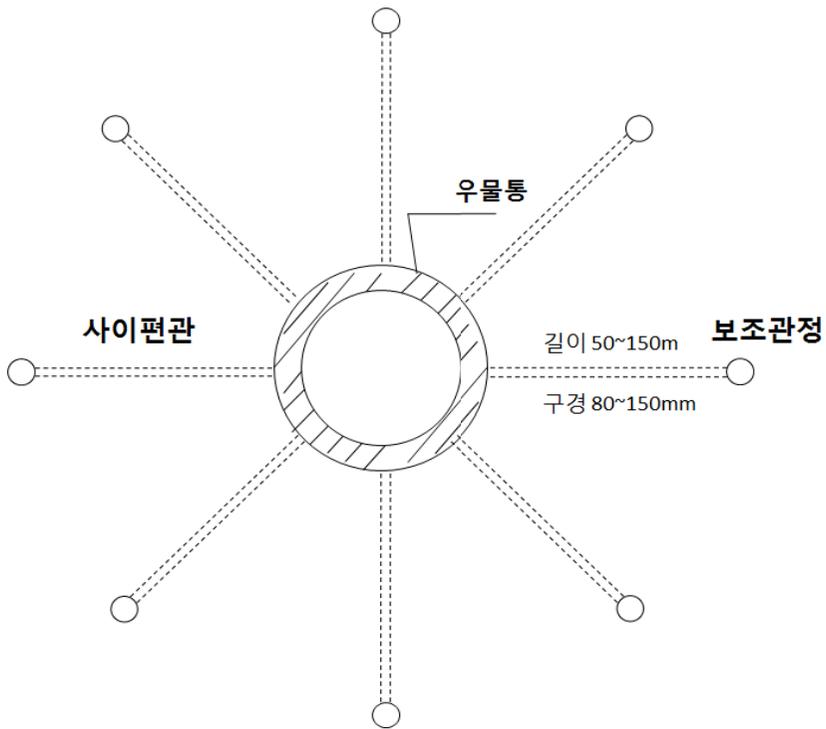
라. 사이펀식 방사상 집수정

방사상 집수정을 개발할 때의 문제점은 수평천공 길이가 착정장비의 능력에 의해 제한된다는 점과 수평천공 후 유공집수관을 박아 놓더라도 세사유입을 방지할 수 없다는 것이 가장 큰 문제점으로 대두되었다. 실제로 방사상 집수정 개발지구에서 이용을 계속할 때에 세사유입에 의거 집수정 주위가 함몰된 사례가 있었으므로 이를 극복할 수 있는 새로운 공법이 연구되었는데 그것은 수평착정 대신 수직착정공에서 사이펀(siphon) 방식으로 집수하는 공법이다.

이 공법은 농어촌진흥공사 지하수개발팀이 자체 개발한 것으로 당초에는 채수량 부족 관정의 집수량 증대방안으로 소구경의 보조관정을 주 관정 주위에 굴착하고 보조관정에서 사이펀관을 주 관정으로 연결하여 양수시험을 시행한 결과 보조관정의 지하수가 주 관정 안으로 물넘이가 이루어져 양수량 증가 효과를 얻었으므로 여러개의 집단 보조우물을 사이펀관으로 우물통에 집수하는 사이펀식 방사상 집수정으로 발전시킨 것이다. (그림 2-1, 2-2 참조)



<그림 2-1> 사이펀식 집수정 설치 단면도



<그림 2-2> 보조관정 및 사이편관 배치 평면도

사이편식 방사상 집수정에 있어서도 집수정 채수가능량 산정은 앞 절에서의 식과 같이 할 수 있으며 다만 집수반경을 임의로 조정하여 설계할 수 있는 것이 특징이라고 할 수 있다. 수평착정식 집수정에서는 수평착정기의 작업능력에 따라 수평집수관의 길이가 결정되지만 사이편식 집수정에 있어서는 보조관정의 거리를 100m이상 확장하여도 사이편관 설치가 가능하므로 수평착정식보다 훨씬 많은 량의 지하수를 채수할 수 있었다. 또한 보조관정 우물 자재 설치시 gravel packing을 충분히 함으로서 세사 유입을 방지할 수 있었다.

이 공법으로 시공한 지구의 예를 들면 경기도 평택시 신호지구, 이천군 주미지구, 안성군 고안지구와 전북 김제시 대송지구 등이 있는데 사이편 집수만으로 집수정을 개발한 지구도 있고 수평착정과 사이편 보조관정개발을 병행한 지구도 있다. 사이편식 집수정은 보조관정 개발이 간단하고 사이편관 연결도 지상에서 손쉽게 시공되므로 수평착정식 방사상 집수정에 비하여 공사비가 훨씬 저렴한 장점도 있었다.

2.1.1 농업용 방사상 집수정 개발 현황

지금까지 개발된 농업용 방사상 집수정 중 한국농어촌공사에서 하고 있는 시설은 98개이며 일반적인 제원은 내경 3.5 m, 심도 10 m 이내, 수평집수관은 구경 65 mm의 PVC 자재를 30 m 이내로 설치하여 시공되었으며, 집수정마다 수평집수관은 9~28개로 다양하다. 하천과 인접한 지역에서는 65 mm의 수평집수관 이외에도 500~800 mm 구경의 집수암거가 설치되어 있는 시설도 있다.

방사상 집수정 개발 시 문제점은 수평정 착정깊이가 착정장비의 능력에 의해 제한된다는 점과 수평정 착정 후 유공집수관을 설치하더라도 세사유입을 방지할 수 없다는 것이다. 이를 극복하기 위하여 '88년도에 처음으로 사이편식 집수정 개발을 시도하였다. 이러한 시설은 개발 당시 수평착정식보다 훨씬 많은 양의 지하수를 채수할 수 있었으나, 25년 이상 경과된 현재는 사이편관이 노후하여 거의 사용하지 못하고 있다.

농업기반시설관리시스템(RIMS) 집수정, 양수장, 집수암거 등으로 등록되어 있는 방사상 집수정은 지자체 7개, 한국농어촌공사 98개로 총 105개이다(표 2-1).

(표 2-1) 농업기반시설관리시스템(RIMS) 방사상 집수정 등록현황

구분	공사관리						지자체	합계
	집수정	양수장	집수암거	집수정 및 양수장	암거 및 양수장	소계	집수정	
경기	6	8	1	4	3	22	-	22
강원	1	-	-	8	-	9	-	9
충북	-	3	-	-	2	5	-	5
충남	-	9	-	11	-	20	-	20
전북	19	-	1	-	-	20	2	22
전남	-	-	-	-	-	-	-	-
경북	2	2	4	-	3	11	1	12
경남	1	8	-	-	-	9	4	13
제주	-	-	-	-	-	-	-	-
울산	2	-	-	-	-	2	-	2
합계	31	30	6	23	8	98	7	105

공사관리 집수정은 개발 후 20년 이상 경과된 시설이 전체시설의 83%인 81개소이며, 그중 7개소는 30년을 초과하였다(표 2-2).

(표 2-2) 공사관리 방사상 집수정 경과 연수



지역별로는 경기도가 22개소로 가장 많고 충남과 경북이 각각 20개소이며, 전남과 제주도에에는 등록된 방사상 집수정 시설이 없다. 농업기반관리시스템(RIMS)에 등록된 공사관리 시설 중 집수정으로 등록된 시설이 31개소, 양수장으로 등록된 시설이 30개소, 집수정과 양수정으로 중복 등록된 시설이 23개소이며, 일부시설은 집수암거로 등록되어 있다(그림2-3).



<그림 2-3> 공사관리 방사상 집수정 RIMS 등록현황

통계자료로 집계된 실적은 없으나 집수정 개발업체 시공실적을 참고하면 농업용 방사상 집수정 이외에도 134개소의 타용도 방사상 집수정이 있으며, 용도별로는 상수도용 47개소, 하천유지용수 18개소, 생활용수 7개소, 공업용수 51개소, 골프장용수 11개소가 개발되어 있다.

2.1.2 방사상 집수정 설계 및 시공 추이 변화

농업용 방사상 집수정은 90년대 이전의 설계 및 시공방식으로 개발되었으며, 최근에는 수평착정장비의 발전으로 방사상 집수정 수평집수관 설치를 위한 우물자재 구경 및 설치심도가 구경 150 mm이상, 심도 50 m이상으로 증가하였다.

수평취수관의 우물자재는 과거에는 PVC 자재를 사용하였으나, 최근에는 PVC와, STS Wire Screen 자재를 사용하고 있다(표 2-3).

2000년 중반기 이후 소요자재(우물자재) 및 집수정의 구경, 심도, 수평집수관 구경, 착정길이 등이 갈수록 커지는 추세이다.

또한, 강원도 영월군에서는 기반암 상부를 화약으로 발파하여 깊이 20 ~ 30 m까지 집수 우물통을 시공하고, 기반암 상부에 설치한 수평집수관에서 암반지하수를 취수하여 상수도로 활용하는 사례도 있다.

(표 2-3) 방사상 집수정 설계 및 시공 추이 변화

구 분	90년대 이전	'90년대 이후 ~2006년	2006년~현재
케이싱관경(mm)	114 이내	114~324	324~559
우물자재관경(mm)	65~80 이내	80~200 이내	150~448.5
우물자재재질	PVC	PVC 또는 STS Wire Screen	STS Wire Screen
우물자재 Slot Size(mm)	1~2	0.5~2	0.5~2
여재팩적용(모래, 활성탄등)	X	X	O
집수정내경(M)	3.5 이내	4~6	6~8
집수정심도(M)	10 이내	15 이내	45 이내
수평착정길이(M)	30 이내	30~60	50~100
1일 채수가능량(ton/일)	1,500~5,000	3,000~ 10,000	8,000~ 45,000
소요공사비(억원)	5~6	10~20	25~30

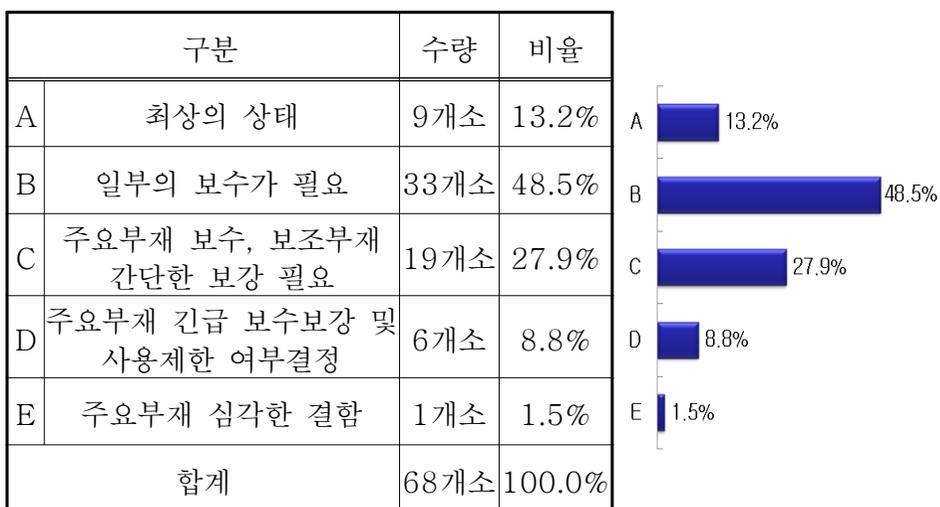
2.2 시설관리상의 문제점 분석

2.2.1 2015년 상반기 안전점검에 따른 시설물 상태평가 결과

한국농어촌공사에서 관리하고 있는 98개 시설 중 집수정 또는 집수암거로 등록되어있는 방사상 집수정 68개소에 대한 2015년 상반기 안점점검 결과는 다음과 같다.

- 상태평가 종합(건물, 집수정, 유공관, 제수장치, 양수기, 전기, 기타)
 - 종합평가결과 A등급에 해당하는 시설이 9개소(13.2%), B등급이 33개소(48.5%), C등급이 19개소(27.9%)이었으며, 긴급보수보강이 필요한 C등급이 6개소(8.8%), 주요부재 심각한 결함이 있는 E등급이 1개소(1.5%)로 평가 되었다(표 2-4).

(표 2-4) 2015년 상반기 방사상 집수정 안전점검 상태평가 종합

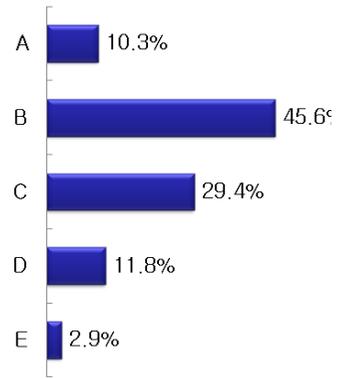


※ 시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행령 11조의 5(안전등급기준)

- 방사상 집수정 및 유공관의 집수상태에 대한 평가결과 긴급 보수 보강 및 사용제한 여부 결정이 필요한 D등급이하의 시설이 10개소(14.7%)로 조사되었다(표 2-5, 표 2-6).

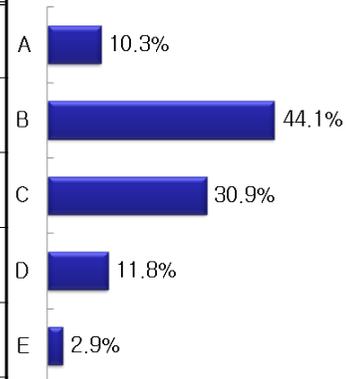
(표 2-5) 2015상반기 방사상 접수정 접수상태에 대한 점검결과

구분		수량	비율
A	최상의 상태	7개소	10.3%
B	일부의 보수가 필요	31개소	45.6%
C	주요부재 보수, 보조부재 간단한 보강 필요	20개소	29.4%
D	주요부재 긴급 보수보강 및 사용제한 여부결정	8개소	11.8%
E	주요부재 심각한 결함	2개소	2.9%
합계		68개소	100.0%



(표 2-6) 2015년 상반기 접수정 유공관 접수상태에 대한 점검결과

구분		수량	비율
A	최상의 상태	7개소	10.3%
B	일부의 보수가 필요	30개소	44.1%
C	주요부재 보수, 보조부재 간단한 보강 필요	21개소	30.9%
D	주요부재 긴급 보수보강 및 사용제한 여부결정	8개소	11.8%
E	주요부재 심각한 결함	2개소	2.9%
합계		68개소	100.0%



- 집수정 또는 집수암거로 등록되어 있는 방사상 집수정 68개소에 대한 2015년 상반기 안점점검 결과 집수정 및 유공관 집수상태가 D등급/E등급에 해당하는 시설은 (표 2-7)과 같다.

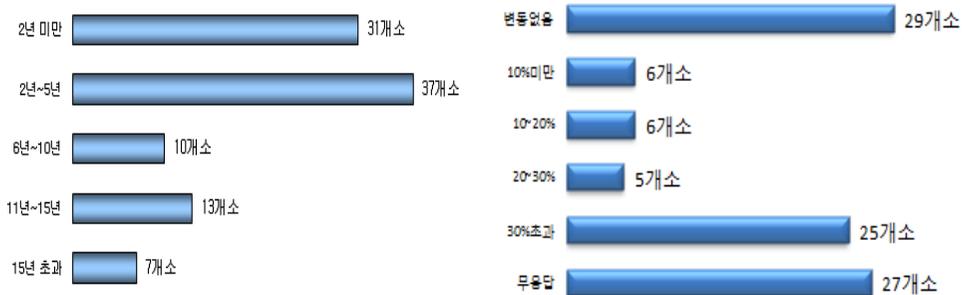
(표 2-7) 집수정 및 유공관 집수상태 D등급/E등급 시설

시설명	위치			방사상 집수정		유공관	종합 평가	점검결과 문제 점
	시도	시군	읍면	구조물	집수상태	집수상태		
백사방	경기	이천	백사	B	D	D	B	용수량 부족
부발(방)	경기	이천	부발	B	D	D	B	용수량 부족
용풍2	경기	이천	장호원	C	D	D	C	
분죽방사상	경기	이천	설성	D	D	D	D	
성덕1	강원	강릉		D	E	E	E	자연수위 감소로 집수정용량 부족 토사유입, 유 공관 매설부근 침하발생
성덕2	강원	강릉		D	E	E	D	자연수위 감소 로 집수정 유 량부족
성덕3	강원	강릉		C	D	D	D	유공관 및 진 공배관 노후, 자연수위 감소 로 집수정 유 량부족
모산1	충남	아산	배방	D	D	D	D	
모산3	충남	아산	배방	D	D	D	D	
성계	전북	김제	봉남	D	D	D	D	

2.2.2 시설관리자 설문조사

설문조사는 해당지사 시설물 관리자를 대상으로 전자우편을 이용한 온라인 조사를 실시하였다.

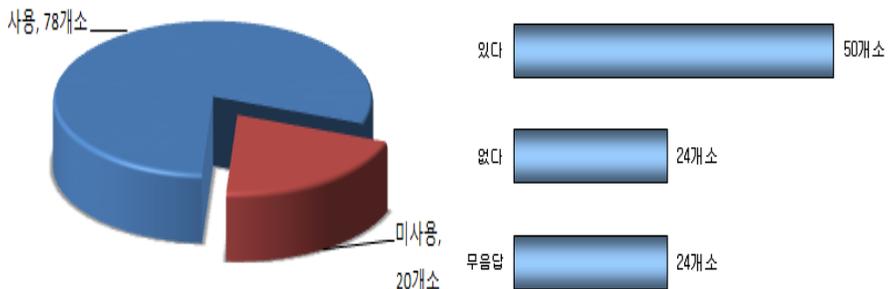
집수정 관리업무 담당기간이 5년 미만인 담당자가 68개소로 약 70%정도이며, 최초 관리업무를 담당한 시점에 대비하여 취수량이 30%이상 감소하였다고 응답한 시설이 25개소였다(그림 2-4, 그림 2-5).



<그림 2-4> 집수정 관리업무 담당기간 <그림 2-5> 최초 관리시점 대비 취수량 감소 현황

최근 2년간 집수정 사용여부에 대해서는 98개소중 20개가 미사용으로 응답하였으며, 미사용 사유로는 수량부족 9개소, 주수원공으로 해당구역 급수 6개소, 대체시설 확보 5개소로 응답하였다(그림 2-6).

집수정 시설보강 필요성에 대하여는 50개소가 시설보강이 필요하다고 응답하였다(그림 2-7).



<그림 2-4> 집수정 관리업무 담당기간 <그림 2-5> 최초 관리시점 대비 취수량 감소 현황

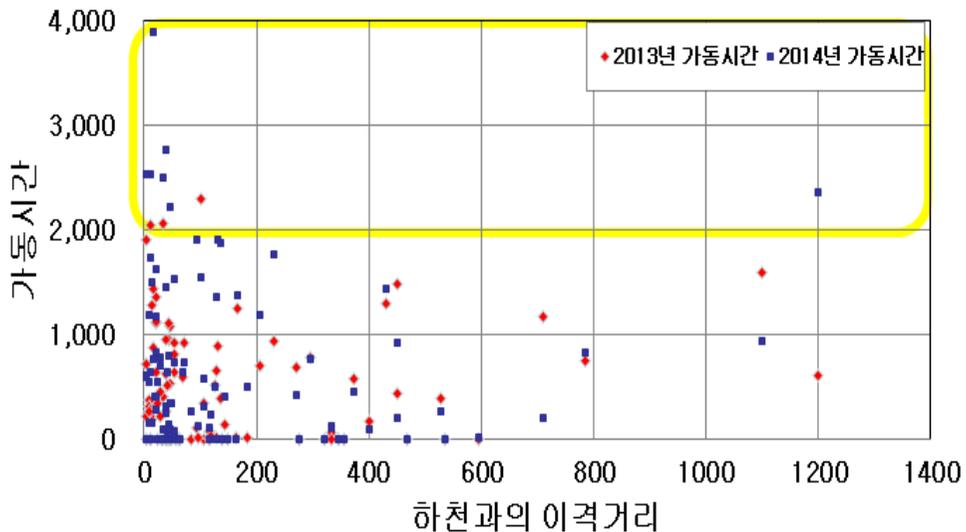
2.2.3 집수정 개발·이용 특성 분석

방사상 집수정이 설치된 지역의 표토토성은 양질사토 (loamy sand) 2개소, 사양토 (sandy loam) 50개소, 양토 (loam) 17개소, 미사질양토 (silt loam) 26개소, 미사질식양토 (silt clay loam) 3개소이다(표 2-3). 미사질식양토 지역에 설치된 방사상 집수정 1개소는 지반침하로 인하여 사용하지 않고 있다.

(표 2-8) 방사상 집수정 설치지역의 표토 토성

양질사토 Loamy sand	사양토 Sandy loam	양토 Loam	미사질양토 Silt loam	미사질식양토 Silt clay loam	계
2	50	17	26	3	98

방사상 집수정 설치지점과 하천 경계로부터의 거리는 50 m 이내가 46개소, 50~150 m가 26개소이며, 1 km 이상 떨어진 집수정도 2개소 있다(그림 2-8).



<그림 2-8> 집수정 가동시간/하천과의 이격거리

농업용 방사상 집수정의 사용 시기는 5~9월이며, 2013년과 2014년의 연간 가동시간을 분석한 결과 100시간미만 가동한 시설이 각각 37개소와 30개소이며, 100시간 이상과 1,000시간미만 가동한 시설이 각각 45개소, 2,000시간 이상 가동한 시설이 각각 3개소와 7개소로 나타났다.

이 중 특히 2,000시간 이용한 시설은 당해 연도 가뭄지역에 위치하는 시설들로서, 가뭄 시 지표수가 부족한 지역의 농업용수 공급을 위하여 급수기 동안 지속적으로 가동한 것으로 판단된다(그림 2-6).

2.2.4 방사상 집수정 효율저하 및 미사용 유형

시설물 안전진단, 설문조사, 집수정 개발이용 특성 및 일부시설 현장 확인에 의한 방사상 집수정 효율저하 유형은 다음과 같다(그림2-9).

- 층적층 지하수위 하강에 따른 채수량 감소
- 수평취수정 공막힘에 의한 채수량감소
- 지반침하
- 주변농경지 사금 또는 골재 채취후 수량감소
- 사이편식 집수정의 진공배관 노후로 집수가 잘 되지 않는 경우

또한, 방사상 집수정이 개발된 이후 『지표수 보강개발사업』을 시행하면서 사업구역으로 편입되어 대체시설이 설치되면서 사용하지 않는 시설도 있었다.



[지반침하]



공사명	대용량 지하수 이용시설 효율성 증대방안 연구
공 종	시설관리자 청문조사 및 현장답사
위 치	홍진지사 성곡
내 용	집수정 현장조사
일 자	2015.04.23

[주변 농경지 사금채취후 수량감소]



[사이편식 집수정(진공배관 노후)]

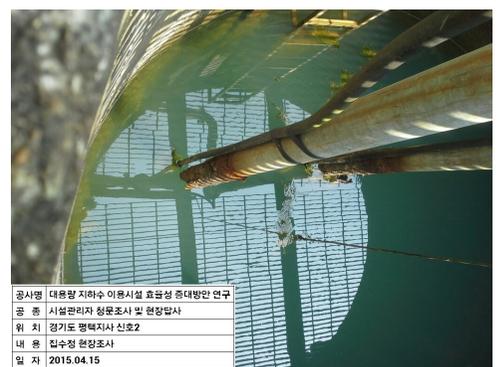


[대체시설 설치후 미사용]



공사명	대용량 지하수 이용시설 효율성 증대방안 연구
공 종	시설관리자 청문조사 및 현장답사
위 치	홍진지사 대송
내 용	집수정 현장조사
일 자	2015.04.23

[사이편식 집수정(진공배관 노후)]



공사명	대용량 지하수 이용시설 효율성 증대방안 연구
공 종	시설관리자 청문조사 및 현장답사
위 치	강기도 병택지사 신호2
내 용	집수정 현장조사
일 자	2015.04.15

[대체시설 설치후 미사용]

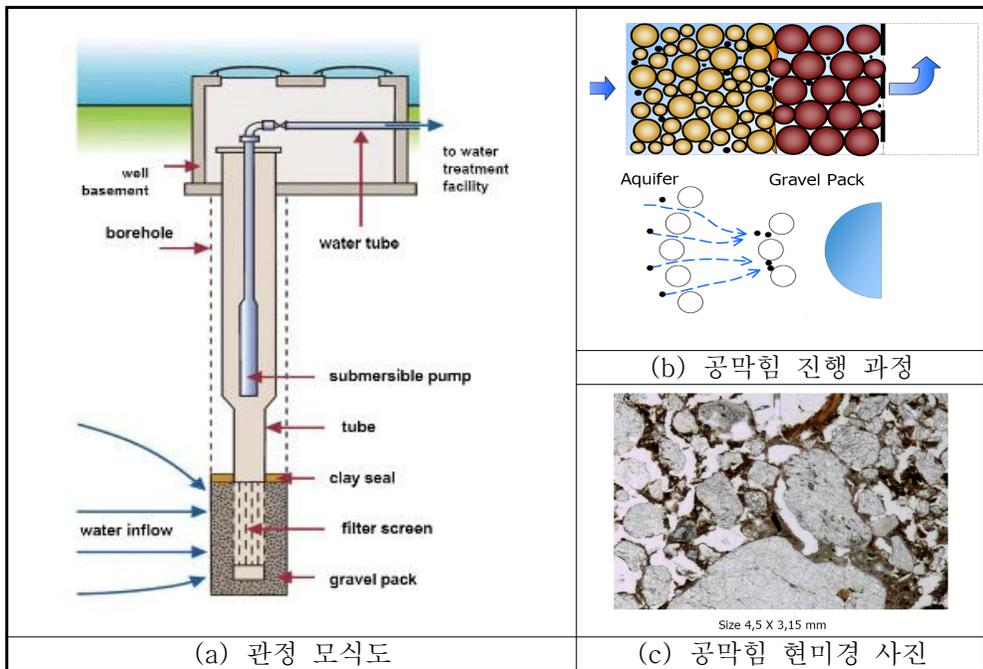
<그림 2-9> 방사상 집수정 미사용 사례

제 **3** 장

**공막힘 원인 및 우물 재질별
취수기능 회복기술**

제3장 공막힘 원인 및 우물 제질별 취수기능 회복기술

방사상 집수정 개발 후 수평집수관의 막힘 현상으로 인해 취수량감소, 수질불량 등으로 효율이 저하되는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 현상들은 관정의 개발 이후의 적절한 관리를 하지 않아 공막힘 현상(clogging)에 의한 수량감소와 수질악화로 인해 관정 효율이 떨어지고, 폐공 처리되고 있어 막대한 경제적 손실이 발생하고 있다.



<그림 3-1> 관정에서의 공막힘(clogging) 현상 과정 (Zwart et al., 2008)

관정의 공막힘 현상으로 인한 지하수 관정의 효율 저하 원인은 크게 기계적인 공막힘(mechanical or well bore clogging)과 화학적인 공막힘(chemical or screen slot clogging)으로 구분할 수 있다(Beek et al., 2009; Beek, 2012)(그림 3-1).

국내 지하수 관정의 공막힘 현상에 관한 연구로는 “지하수 관정의 적정관리를 위한 사후관리 방안에 관한 연구(한국농어촌공사, 1997)”를 시작으로 “21세기 프런티어사업(국토해양부, 한국수자원공사, 2011)”과 “GAIA 사

업(환경부, 부산대학교 산학협력단, 2012)” 이 수행되었고, 관정 막힘 현상의 원인 규명과 관정 세척장비의 국산화 등의 성과를 이루었으나, 층적층의 수평집수관에서의 공막힘 현상과 처리에 관한 구체적인 연구는 수행된바 없고, 일부 현장에서 기존의 수직정에서 사용하던 기술과 해외의 기술을 응용하여 시험적으로 운용되고 있으며, 사용 현재 해결해야 할 과제가 많은 상태이다.

국내 방사상 집수정의 역사는 한국농어촌공사가 1980년대 초반 이후부터 건설한 방사상 집수정으로 98개소이며, 이 방사상 집수정들에 관한 유지관리는 현재 사후관리를 통한 제원확인과 시설물 정비 및 써징 등을 실시하고 있다. 현재 실시하고 있는 사후관리에서 수평공들의 회복 방법은 일괄적으로 써징에 의한 오염물질의 제거가 사용되어지고 있다.

일반적으로 방사상 집수정에 사용되는 유지관리 방법은 청수 및 에어를 수평공에 주입하여 수평공 내의 이물질을 제거하는 고압 유체 분사 공법을 주로 사용하는데 이 공법은 수평정 내에 잔존하는 이물질의 양이 많을 때 유리하다. 이 공법의 단점은 고압으로 인한 관정 내부의 스크린 재질에 따라 파손 될 위험이 크고, 또한 압력이 낮을 경우 오염물질의 제거가 쉽지 않으며, 견고하게 부착된 스케일 등의 오염물질을 떼어내는데 많은 시간이 소모된다. 그러나 국내에서 방사상 집수정 유지관리에 대한 상세한 연구는 미흡한 편이며, 최근 몇 년간 강변여과수 개발지역에 설치된 방사상 집수정에 대한 몇몇 연구가 있을 따름이다.

효율적인 관정내 이물질 제거 및 사후관리를 위해서는 방사상 집수정 주변 대수층 확인, 수평공 재질, 오염물질 등을 확인하여 적합한 관정 회복 방법을 적용하여야 할 것이다.

지하수 관정은 영구적인 시설물이 아니고, 지하수와 접하고 있는 상태에서 관정 시설이 유지 및 관리되고 있다. 지하수는 양수와 양수중단에 의해서 지하수위의 상승과 하강을 반복하면서 주변의 우물 자재와 지속적인 반응을 나타낼 수 있다. 우물 내에 저장되어 있는 상태에서 지하수내에 포함되어 있는 다양한 화합물은 우물 자재와 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 반응을 통한 부식을 일으킬 수 있다.

우물 자재의 부식작용은 화학적 반응이나 생물학적 반응에 의하여 나타날 수 있으며, 철과 망간의 산화물은 화학적 반응의 흔한 결과이다. 이외에도 탄산염, 황화물, 수산화알루미늄 피복 등이 발생할 수 있으며, 생물학적인 막힘도 스크린 주변에 나타날 수 있다. 우물 노후화는 화학적 및 생물학적 반응

에 의하여 가속화되나, 대부분의 우물 폐쇄는 물리적인 파손이나 스크린의 막힘 등에 의하여 발생한다. 물리적인 우물 노후화의 원인으로는 우물 주변의 입자들이 스크린 주변으로 모여 부착되는 경우가 흔히 나타나며, 우물 내 모래의 유입, 식물 뿌리에 의한 구조물 파손, 외부 충격에 의한 파손 등에 의하여 발생한다(국토해양부, 한국수자원공사, 2011).

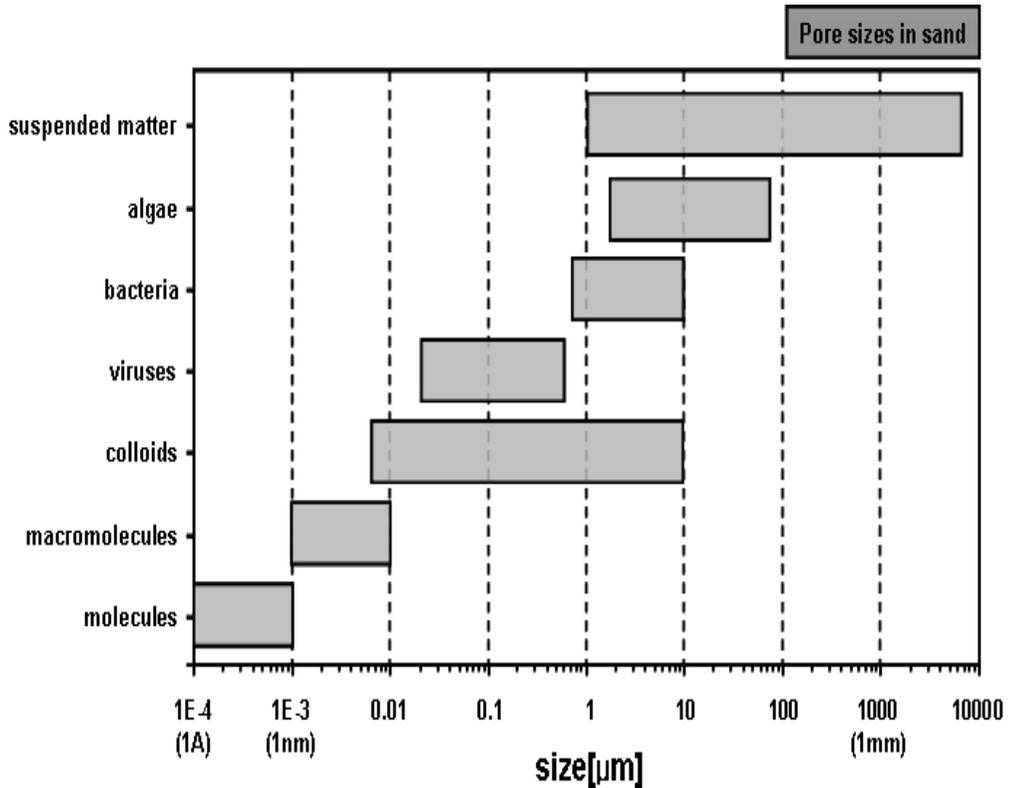
공막힘 원인은 기계적 과정, 물리적 과정, 화학적 과정, 생물학적 원인으로 나누어지는데 기계적인 원인은 우물 케이싱, 수중펌프의 산화 및 침식, 물리적 과정인 지표에서 미립자의 유입과 기계적인 축적, 화학적 과정은 우물 케이싱 스크린, 수중 모터의 산화 및 부식, 물-암석 반응으로 인한 광물의 침전, 생물학적 과정은 박테리아에 의한 파이프에 침전물 축적 등을 포함한다(Smith, 1995; 환경부, 부산대학교 산학협력단, 2012).

지하수내 다양한 입자들의 이동은 지하수 우물 노후화의 직접적인 원인으로 작용하게 된다. 지하수 유동은 부유 물질 뿐만 아니라 용존 물질까지 운반한다. 용존 성분은 지하수가 흘러가는 곳으로 움직이는 반면, 부유 입자의 이동은 입자의 크기와 공극(pore spaces/pore necks)의 너비와 상관관계를 가지고, 때로는 부유 입자와 광물 간의 정전기적 상호작용에도 좌우된다. <그림 3-2>은 입자 크기에 따른 지하수 내 이동에 대해 설명해준다.

부유성 고형물은 종종 탁도(turbidity)를 높이지만, 침전작용에 의해 제거될 수 있다. 그러나 콜로이드는 작은 입자 크기와 그로 인한 낮은 침강 속도(10-2m/s 이하)때문에 침전작용으로 제거될 수 없다. 보통 지표수에는 106/cm³ 정도까지의 콜로이드 물질이 함유되어 있을 수 있다.

콜로이드는 다음과 같은 물질들, 또는 그 조합물질을 포함한다.

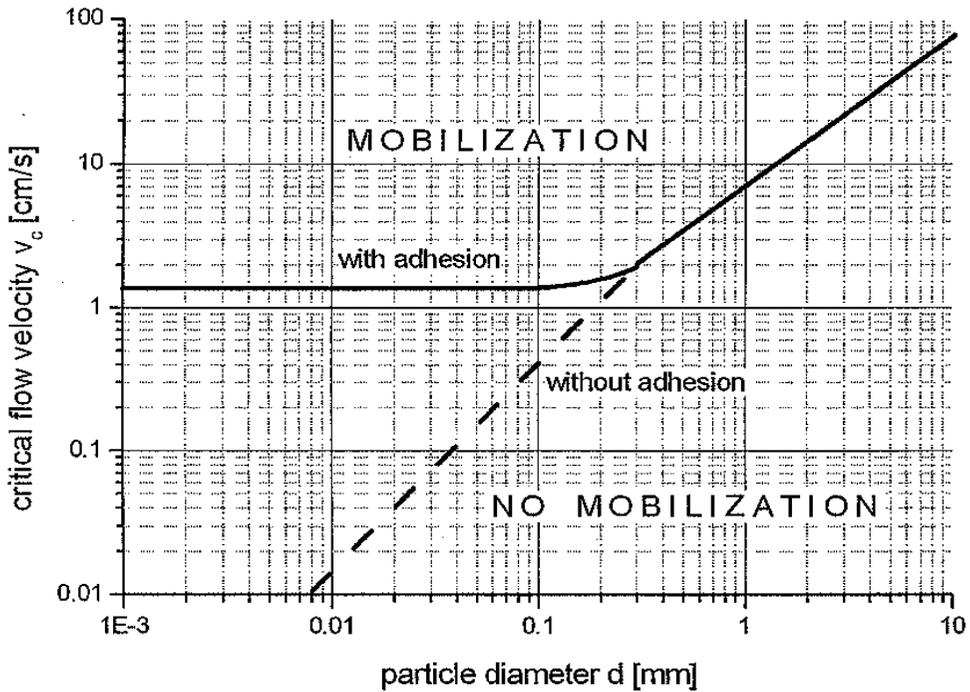
- ◎ 규산염(silicate) 입자들: 점토, 고중합(高重合) 이산화규소
- ◎ 탄산염 (e.g., 탄산칼슘)
- ◎ 부식물질: 고분자 휴믹산(humic acids), 생물학적 폐기물
- ◎ 철(III)과 망간(III, IV) 산화물
- ◎ 수산화알루미늄
- ◎ 황화물과 다유화물(polysulfides) (무산소 산화 환원 반응)
- ◎ 미생물들: 박테리아, 바이러스, 균



<그림 3-2> 모래내 틈새 크기에 대한 지하수 수송 물질의 크기(Houben and Treskatis, 2007)

콜로이드는 암석의 풍화작용이나 부식작용 같은, 대수층에서의 물리적, 화학적 과정들을 통해 계속적으로 생성된다. 동시에, 그것들은 또한 지표면의 부착, 물리적인 여과작용과 응고작용에 의해 계속적으로 제거된다. 콜로이드의 정전기적 상호작용은 주로 그 주변에 존재하는 전하량과 상관관계가 있다. 더 큰 입자로의 응고작용은 예를 들어 이온 함유 정도가 높은 물에 의해 촉진된다. 넓은 표면적 때문에 많은 무규산염(nonsilicate) 콜로이드들은 화학적으로 매우 활발하다. 따라서 이러한 콜로이드 입자들을 지표 밑에서 중금속, 방사성 핵종 및 미생물을 운반하는 가장 중요한 매개체로 역할을 수행한다.

<그림 3-3>은 여과의 기초적인 과정들을 보여준다. 좌측의 두 가지 과정은 물리적 특성에 의한 입자 이동을 보여주는데, 여기에서는 오직 입자의 결정체 크기와 매질의 틈새(pore) 크기에 의해 결정된다.



<그림 3-3> 지하수 유속에 따른 지표하부 입자의 이동(Muckenthaler, 1989)

여과 매커니즘의 표면 여과(surface filtration) 혹은 cake 여과(cake filtration)가 가장 초기적인 사항이다. Cake 여과의 경우 구성매질의 공극보다 크기가 큰 입자들을 포함하는 용액이 투과성 매질로 주입되었을 때 발생한다. 이 때, 공극들이 너무 작아 입자들이 통과하지 못하고 즉시 표면에 침전(deposit)된다. 입자들은 filter cake라 불리는 층을 형성하면서 투과성 매질 위에 축적되고, 두꺼운 filter cake가 형성되면 투과성 매질의 투과성이 매우 감소해, 불투과성 filter cake가 기존에 투과되었던 작은 입자들을 흡착시켜 통과하지 못하게 한다.

부유 입자의 평균 크기가 매질의 결정체(혹은 pore neck)의 평균 크기보다 작으면 입자 부유액은 매질로 들어가거나 매질을 통과할 것이다. 결정체와 입자의 크기 분포에 따라, 입자들이 통과하기에는 너무 크기 때문에 입자들이 클수록 결과적으로 더 작은 공극의 좁은 부분에 모아질 것이다. 이 매커니즘은 거르기(straining) 혹은 크기 차단(size exclusion)이다. 유체 역학의 bridging은 각 입자들이 틈새를 통과하기에 충분히 작은 거르기(straining)의 한 특별한 타입이다. 두 개 혹은 그 이상의 입자들이 같은 순

간에 공극의 입구부에 도착할 때만 그것들이 입자 bridge를 형성하고 틈새를 막는다. 그 결과, 다른 작은 입자들이 bridge에 축적될 수 있고 틈새들은 완전히 막힐 수 있다. Bridging은 높은 유동 속도에 의해 촉진되는데, 이는 높은 유동 속도가 여러 입자들이 동시에 공극 입구부에 모여들 수 있도록 하기 때문이다.

투과성 매질의 틈새보다 매우 작은 입자들은 매질과 입자 사이의 인력이 척력보다 우세할 때에만 유지된다. 매질과 입자의 지름뿐 아니라 이 과정들은 매질, 입자, 그 주변 물의 물리적, 화학적 특성에 의해서도 강하게 영향을 받는다. 입자와 매질 사이의 접촉 관계는 다음에 의해 영향을 받는다.

- ◎ Stokes의 법칙에 기술된 중력에 의한 침강(gravitational settling) (큰 입자의 경우)
- ◎ 브라운 운동(확산 작용), 매우 작은 입자들의 경우
- ◎ 단순 충돌(차단-interception), 매질 결정체에 대한 입자 크기의 비율에 따라
- ◎ 표면의 전하량과 반데르발스의 힘(쌍극자-쌍극자 인력)에 의해 발생하는 입자와 매질 사이의 정전기적 인력

입자들 틈 사이의 간격과, 움직이는 입자와 여재 매질의 결정체 크기는 어떤 입자들이 얼마나 많이 여재를 통과할 것인지를 결정하는 주요 매개변수이다.

만약 너무 많은 결정체들이 통과하면 우물은 마모와 퇴적을 겪을 것이다. 또한 너무 많은 결정체들을 집적시키면 수리전도도가 감소하며 틈새들이 막힐 것이다. 그러므로 여재는 아래 두 가지 반대되는 요구조건을 충족시켜야 한다.

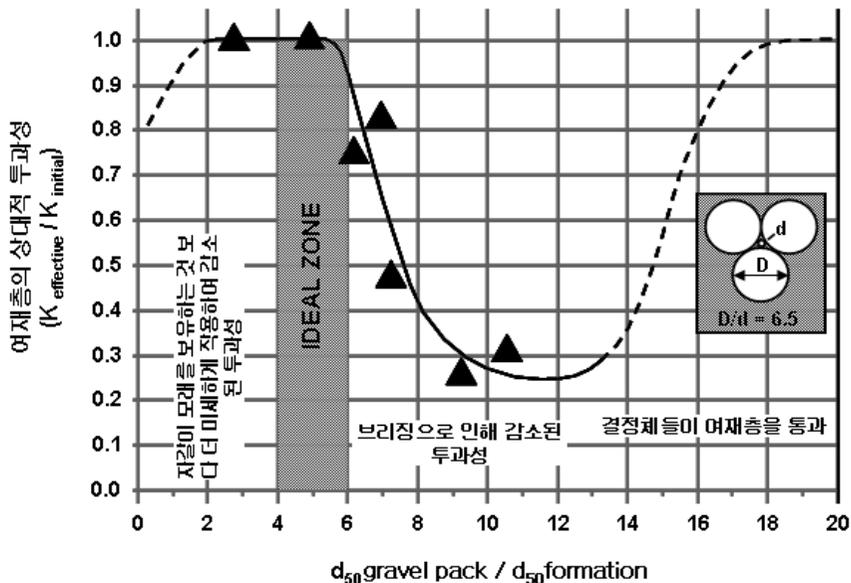
- ◎ 형성 입자들(formation particles)을 저지할 만큼 치밀해야 한다.
- ◎ 오직 낮은 수두 손실을 유발하면서도 여전히 여과를 허용할 만큼 거칠어야 한다.

이러한 이유로 필터의 선택은 언제나 2가지 요인의 절충점에서 이루어진다. 만약 우리가 기하학적 관점에서 균일한 구로 구성된 가상의 자갈층전체(gravel pack) 사이의 공극(pore spaces)을 생각해 본다면, 우리는 충전

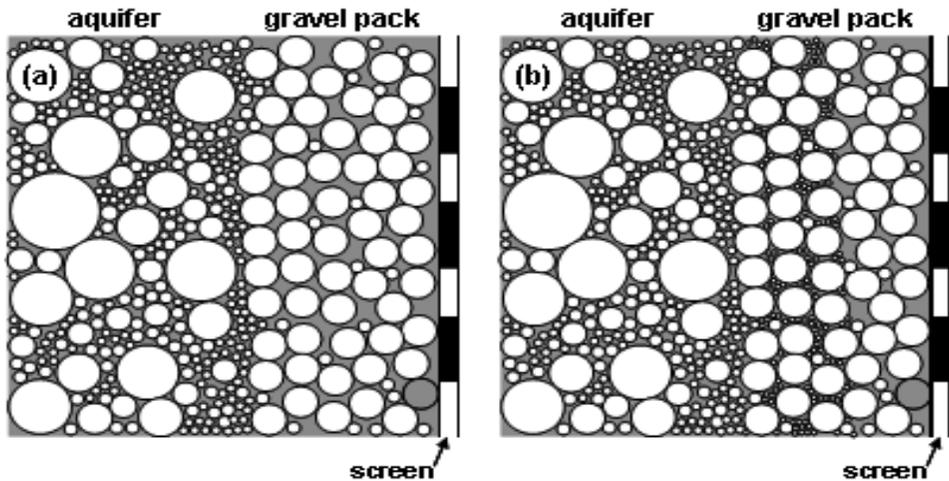
(packing)이 여과에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 쉽게 알 수 있다. 입방 충전(cubic packing)은 매우 성기고(loose) 미고결 퇴적물에서 예상할 수 있으며, 매우 높은 투과성과 큰 틈새 크기를 나타낸다. 틈새들을 작은 입자들로 채우게 되면 공극율이 48%에서 12.5%로 급격한 감소하고 투수계수가 감소된다<그림 3-4>.

이상의 기하학적인 고려사항들은 현실의 퇴적 환경과는 상당히 다르다. 현실에서 입자들은 구형이 아니며, 크기는 균일하지 않는 경향이 있다. Saucier(1974)는 입자의 여과 특성이, gravel pack의 입도곡선(d_{50})의 50%의 알갱이 크기와 입자들의 알갱이 크기를 비교함으로써 가늠될 수 있다는 사실을 발견했다. <그림 3-5>는 4개의 영역을 나타내는데, 첫 번째 구역(왼쪽)에서 gravel pack은 filter cake처럼 너무 미세하여 모든 입자들을 걸러낼 것이며 좁은 틈새를 빠져나오면서 에너지의 낭비가 발생할 것이다. 그 비가 6보다 크면 입자들이 gravel pack으로 들어가서 틈새에 박히기 때문에 투과성은 감소될 것이다. 비율이 약 12 보다 크면 모래 알갱이들은 필터를 거쳐 모래 유입을 유발할 것이다.

궁극적으로 비율 4 내지 6 사이의 범위인 경우 과도한 투과성의 감소와 입자들의 진입 효율성 사이에서 좋은 절충안으로 나타난다.



<그림 3-4> 여재와 지층 내 알갱이 크기의 비에 따른 투과성과 입자이동(Saucier, 1974)



<그림 3-5> 여재 초기상태(a)와 plugging으로 이어지는 입자들의 진입(Houben and Treskatis, 2007)

3.1. 기계적 원인

3.1.1 우물 케이싱, 수중펌프의 산화 및 침식

우물 케이싱, 수중펌프의 산화 및 침식은 마모(abrasion)와 같은 의미를 가진다. 마모는 유동체에 부유해 움직이는 고체 입자들의 물리적인 작용에 의해 고형물의 표면에서 물질이 사라지는 것을 의미한다. 수중모터펌프, 스크린 및 관 등은 지하수에 부유하는 고체 입자들의 충격 작용을 받는 우물 구성부품들로서, 장기간 운영 시 노후화 현상으로 나타날 수 있다. 힘은 질량과 가속도의 곱으로, 높은 유속에서 밀집한 입자들은 주변 표면에 큰 힘을 미친다. 입자의 다음과 같은 특징이 마모에 영향을 미친다.

- ◎ 입자의 질량
- ◎ 이동 속도(가속도)
- ◎ 입자의 모양(뾰족한 모서리는 힘이 작은 면적을 통해 전도되기 때문에 둥근 알갱이보다 더 많은 손상을 초래한다).
- ◎ 단위시간 당 입자의 수
- ◎ 입자와 표면 간의 경도(hardness) 차이

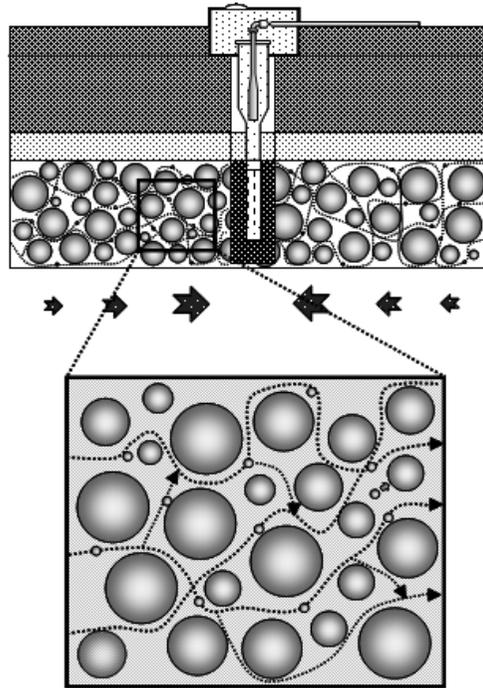
일반적으로 마모의 주원인으로 석영(SiO_2) 모래알갱이 있다. 석영은 높은 경도 때문에(모스 경도계에서 7) 낮은 경도의 모든 물질에 손상을 줄 수 있다. 우물 자재에 사용되는 강철이 5.0과 8.5 사이의 다양한 경도를 갖는 반면, 구리는 경도 2.5-3.0으로서 훨씬 마모 손상을 받기 쉽다. 낮은 경도의 다른 물질들은 석재, 폴리염화비닐(PVC), 나무재질의 우물자재들로서, 부식의 가능성이 높은 특성을 갖는다. 특히, 스크린 슬롯과 스크린 슬롯의 연결부는 마모 손상을 입기가 쉽다. 스크린의 넓어진 틈이나 무너진 연결부 등은 여재 물질의 침입을 용이하게 하고, 이는 잠재적으로 펌프와 전체 우물의 구조에 손상을 미친다. 하지만 마모 작용은 피막(incrustations)과 미생물 침전(biofilms)의 부착을 방지하는 긍정적인 측면도 있다.

우물 가동 시 펌프와 수직관을 작동시키거나 멈출 때, 혹은 복구 장비 등이 우물내로 이동될 때 등이 영향을 미치는 시기이다. 손상된 피복(coatings), 구멍, 새는 틈(leaks)은 이러한 장비의 부주의한 취급으로 발생한다.

3.2 물리적 원인

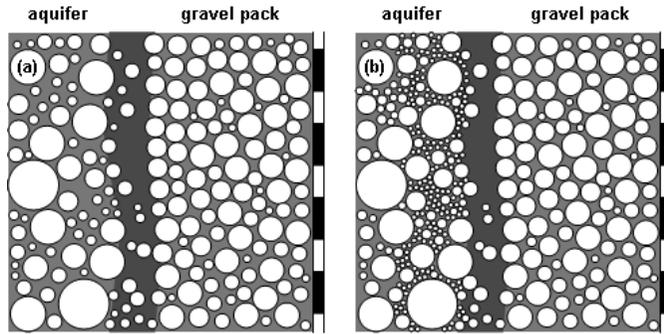
3.2.1 지표에서 미립자의 유입

여재충전(gravel pack)이 이상적으로 설계되었다 하더라도 물리적인 우물 막힘은 발생할 수 있다. 물리적인 막힘은 매질 내 입자의 이동과 정체와 관련되어 있다. 양수로 인한 급격히 증가한 유속으로 인하여, 입자들은 우물 쪽으로 이동되고 수송된다. 물이 우물 쪽으로 가까이 갈수록 그 속도가 더욱 빨라지며 더 많은 입자들이 이동된다. 우물 근처에서 증가된 유속과 다량의 입자는 공벽 주변의 틈새들을 막게 된다<그림 3-6>. 이 과정은 두 단계로 구성되는데, 첫 번째 단계는 우물을 시추하는 동안에 발생하고 두 번째 단계는 완성 후에 양수할 때 나타난다.



<그림 3-6> 미고결 퇴적층에서의 물의 이동(KIWA, 2004)

대부분의 우물은 굴착 이수(drilling mud)를 이용해 시추된다. 이 진흙은 매우 고운 팽창성 점토(벤토나이트)나 유기적 물질(carboxymethylcellulose, CMC 등)로 구성된다. 담수가 진흙 대신 사용될 때도 점토와 세립질 입자들이 굴착유체(drilling fluid)에 의하여 부유할 것이다. 많은 경우에 굴착유체의 잔여물들이 시추공 벽에 달라붙어 수mm에서 수cm의 두께로 남아 있다<그림 3-7(a)>. 형성된 피막의 낮은 투과성은 흐름을 감소시키고 우물 주위의 수리전도도를 저하시킨다. 시추 동안에는 투과성 감소 작용은 순환 손실을 낮게 하기 때문에 긍정적인 작용을 한다. 그러나 이러한 bentonite cake이 우물 시공과 유로형성 과정 동안에 제거되지 않으면 궁극적으로는 우물 산출성을 떨어뜨리게 된다. 아울러 대수층 모암으로부터 수송된 미세분이 통과할 수 없을 것이며, 이들의 축적은 투과성을 더욱 더 감소시킨다<그림 3-7(b)>. 이 과정은 “outer colmation”이라 불리며, 표면 여과(surface filtration)의 대표적인 사례다.



<그림 3-7> (a)시추공 벽에 존재하는 굴착 이수의 낮은 투과성 잔존물, (b)미세 입자들의 outer colmatation (Houben and Treskatis, 2007)

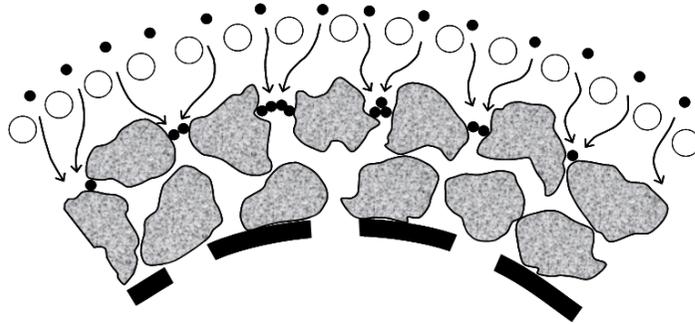
우물 굴착 후 굴착 이수를 완전히 제거하지 않은 사례로서 filter cakes의 잔여물이 시공 현장에서 종종 발견된다<그림 3-8>. 독일 Bavaria 지역에서 시추 동안에 벤토나이트나 CMC가 첨가되지 않았음에도 불구하고 이전의 시추공 벽에 있던 진흙은 여재층 주변에 얇은 점토질층의 형태로 나타난다. 여재층은 산화철에 의해 피복되어 있는 상태이다.



<그림 3-8> 우물의 여재층에 나타난 현상 (독일의 Wackersdorf 갈탄 노천굴 광산, 사진: E&M Bohr Gesellschaft mbH, Hof/Saale, 독일.)

입자 틈새의 막힘은 bridging에 의하여 나타난다. Bridging은 각 입자들의 크기가 필터를 통과할 만큼 충분히 작은 경우에도 막힘이 발생함을 보여준다. Bridging은 여러 개의 입자들이 동시에 틈새의 병목 부분에 도착하면서

나타나는데, 틈새의 나머지는 깨끗한 반면에 밀집한 부분에는 막힘이 나타난다<그림 3-9>.



<그림 3-9> Gravel pack을 통과하는 동안의 입자들의 bridging과 straining 현상 (Houben and Treskatis, 2007)

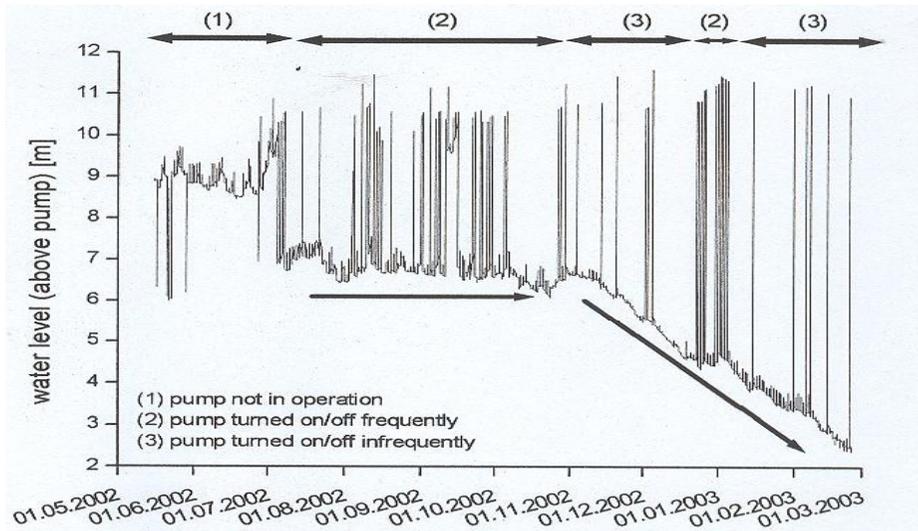
Bridging은 높은 유속에 의해 촉진되고 동시에 틈새 목으로 들어가려는 입자들의 수를 증가시키게 된다. Bridging은 매질과 입자들의 알갱이와 틈새 크기에 의해서만 좌우되는 것이 아니라 단위 시간당 입자들의 농도에 의해서도 좌우된다.

네덜란드의 Technical University of Delft에서 연구한 바에 따르면 Bridging 현상의 발생 요인은 다음과 같다.

- ◎ 입자의 농도
- ◎ 유속
- ◎ 입자 크기와 대수층 알갱이 크기 사이의 비(가로 세로의 비-aspect ratio)
- ◎ 입자의 특성; 모양, 표면 전하, 거친 정도
- ◎ 흐름의 형태; 방사상 혹은 선형의 흐름

우물의 작동 및 우물내 유속이 어떤 영향을 미치는지 연구한 바에 따르면, 정적인 수위와 동적인(작동하고 있는) 수위 사이의 차이는 우물 노후의 정도를 추정할 수 있게 한다. 펌프가 자주 On/off 되는 경우에는 이 시간 동안에 우물의 산출량은 거의 감소하지 않았다<그림 3-10, 2단계>. 펌프의 작동이 빈번하지 않을 때<그림 3-10, 1단계와 3단계> 우물은 막히기 시작했다. 펌프가 켜지면 물의 가속도 및 복합적으로 형성된 층의 파괴가 Bridges의 일

부를 깨뜨리고 시추공 벽으로부터 입자들을 제거하게 된다. 실질적으로 유동률과 펌프 작동 빈도는 물리적인 막힘 현상을 통제하는데 이용될 수 있으므로, 우물 작동을 위해 신중한 설계가 요구된다.



<그림 3-10> Noord Bergum(Friesland, 네덜란드) 지역의 우물 50A에서의 수위 변화

3.3 화학적 원인

3.3.1 우물 케이싱 스크린, 수중 모터의 산화 및 부식

지하수에 의한 금속의 산화작용은 스트레나의 부식이나 충전현상을 유도하며 궁극적으로는 관정의 구조적 파괴를 일으킨다(Roscoe Moss Company, 1990). 지하수관정에서 사용되는 케이싱이나 스트레나 자재인 금속은 용해된 산소, 염소 및 황산염이 전자수용체(electron acceptor)로 작용하는 지하수속에서 열역학적으로 불안정하다. 금속에서 전자를 방출하는 산화작용과 방출되는 전자를 흡수하는 환원작용이 수반되어야만 금속의 부식작용은 일어난다. 그런데 전자는 금속 내부를 자유롭게 이동하기 때문에 상기 상호작용이 같은 장소에서 발생되지 않아도 부식작용은 일어날 수 있다. 이런 산화-환원과 같은 전기화학작용이 초기에 일어난 후 금속의 용해도, 지하수 조성 성분, 용해속도에 영향을 미치는 지하수의 물리적, 화학적 조건에 따라 부식

의 정도가 진행된다. 따라서 관정의 부식은 금속 표면의 화학적 작용뿐만 아니라 부식지점(anode와 cathode) 사이에 전기화학작용이 동반되어야 하며, 산화-환원작용이 동시에 진행되어야만 일어난다. 부식작용은 전자의 이동과 밀접한 관련이 있기 때문에 용해된 이온의 농도가 높을수록 쉽고 빠르게 일어난다. 부식작용에 필수적인 전해질(electrolytic solution)은 용해된 산소와 같은 반응 화학종(reacting species)을 부식장소로 이동시키고, 부식 생성물인 Fe 이온을 부식장소로부터 외곽으로 이동시키며, Cl⁻와 SO₄²⁻는 부식을 촉진시키지만 Ca²⁺, HCO₃⁻는 효과적인 막을 형성하기 때문에 부식작용을 지연시킨다. 예를 들면, 연성의 약알칼리 지하수 성분은 부식을 쉽게 발생시키지만, 경성의 알칼리 지하수는 금속표면을 보호하게 된다. 따라서 부식과 관련된 지하수에 용해된 이온특성은 경도, 알칼리도, 전기전도도로 대변할 수 있으며 관정부식과 관련된 지하수 수질의 중요한 요인들은 다음과 같다.

가. 산화-환원전위

부식작용의 발생요인 중 하나는 금속들 간의 표면이나 같은 금속의 다른 부위에 존재하는 표준 산화-환원 전위의 차이이다. 다른 두 종류의 금속을 같은 전해질에 넣었을 때 높은 표준 전위를 갖는 금속에서는 환원작용이 일어나는 반면, 낮은 전위를 갖는 금속에서는 산화작용이 일어난다. 표준 산화-환원 전위에 대한 전기화학 계열(electrochemical series)은 25℃ 1기압 환경에서 열역학적 가역반응에 근거하여 결정된다. 실험실에서 산화작용을 하는 전위를 갖는 금속에 환원작용을 하는 금속을 첨가할 경우 반대방향의 전기화학작용이 일어나는 한 쌍의 전위 크기를 정하게 된다. 이때, 계열의 일부 금속들은 지하수의 물리적, 화학적 특성에 의하여 변화될 수 있다.

나. 금속표면의 불균질성

일반적으로 같은 금속 내에서도 위치에 따라 구조적인 불균질성을 갖고 있기 때문에 부식작용이 일어나는데, 접촉부, 용접부, Torch-cut slot 등은 다른 곳보다 2~3배의 빠른 부식율을 보인다. 우물자재 용접부의 금속과 용접부 이외의 금속 같은 구조적인 차이는 용접부를 서서히 식힘으로써 완화시킬 수 있고, 따라서 불균질성에 의한 부식을 줄일 수 있다.

다. 수질의 영향

부식율에 관련된 중요 화학적 특성은 용존 가스와 용해된 이온의 특성이 다. 용존 가스에는 산소, 이산화탄소, 황화수소 등이 있다. 관정 부식에 있어서 가장 중요한 것은 용존산소의 양이며, 금속표면에 공급되는 산소의 양은 이산화탄소와 황화수소에 의해 증가한다. 용존산소는 전자의 수용체 역할을 하며, 용존산소의 양이 증가하면 금속표면으로 이동하는 산소도 증가한다. 용존 산소량은 대기압에 비례하고, 지하수의 온도에 반비례하는데 용존산소량이 20~25 mg/l 까지 증가할 때는 부식율도 증가하지만, 이보다 많은 용존 산소가 존재하면 반대로 부식율은 감소한다. 같은 금속의 다른 표면부위에 존재하는 용존산소의 농도 차는 차별 산소부식(differential oxygen corrosion)을 일으키게 된다. 이러한 산소에 의한 부식은 두 종류의 금속표면, 유기질 착화지점, 작은 틈새 등에서 발생되며, 높은 산소의 농도를 감소시키는 방향으로 화학작용이 일어난다. 이산화탄소는 부식작용에 직접적으로 관여하지 않지만 지하수에 작용하여 탄산을 형성하여 낮은 pH 상태를 유도하게 된다. 낮은 pH에서 부식과 관련하여 수소이온은 전자수용체의 역할을 하며, 탄산칼슘의 용해도를 증가시켜 표면에 형성된 막을 용해시키는 역할을 한다. 지하수의 약산성을 유도하는 것은 황화수소도 있지만, 황이온은 금속표면에 용해되지 않는 검은 황화철의 막을 형성하기 때문에 부식의 요인이 되지 않는다. 이러한 환경은 일반적으로 산소가 결핍된 환경을 이루고 있다. 하지만 황화수소를 포함한 지하수에는 부식보다는 황화수소와 철상에 존재하는 전위차에 의해서 국부적인 수소 점(hydrogen pitting)을 형성하게 된다. 지하수에 함유되어 있는 HCO_3^- 는 pH의 변화에 대한 완충효과가 있으며, 칼슘이온과 작용하여 탄산칼슘 막을 형성한다.

라. 관정부식의 일반적인 특징

관정에서 부식이 발생하는 구간은 일반적으로 4개의 구간 - 외부 노출구간, 정수두위 상부구간, 양수위와 정수두 사이의 구간(splash zone), 양수지점 하부구간 - 으로 구분된다(Roscoe Moss Company, 1990). 이중 부식작용은 splash zone에서 매우 심하게 일어나고 그 다음으로는 양수지점 하부구간에서 심하게 발생한다.

각 구간의 특징을 살펴보면 아래와 같다.

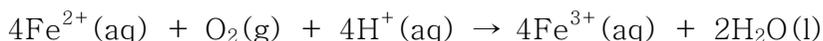
- ① 외부노출 구간은 지하수면의 상부구간에서 관정의 일부가 대기 중에

노출된 부분으로 관정의 케이싱 표면에 대기와의 온도차에 의해 수증기의 쉽게 응축되고, 대기 중의 산소와 약간의 이산화탄소가 응축된 수막을 뚫고 쉽게 금속표면까지 침투 하면서 부식이 발생한다. 이 구간의 수증기 수질은 염도가 적고 산소가 풍부하기 때문에 균질한 부식 형태를 보이며 하부의 부식에 비하면 약한 정도를 나타낸다.

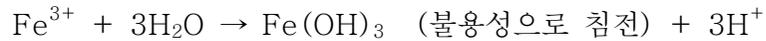
- ② 케이싱의 상부구간은 차별적인 산소부식 또는 전기부식(galvanic corrosion)이 주요 요인이다. 산소부식은 시멘트의 사용으로 감소시킬 수 있으며, 전기부식은 유전체커플링(dielectric coupling)으로 방지될 수 있다.
- ③ 가장 심한 부식이 일어나는 정수두위와 양수위 사이의 구간은 산소이온이 농도차에 의한 결과로 해석되고 있다. 또한 반복적인 습윤-건조(wet-dry) 과정이 부식을 가속시키는 역할을 하고 있으며, 증발에 의한 높은 TDS도 심한 부식을 일으키는 데 기여하고 있다. 양수가 시작되면 지하수위는 안정수위까지 강하되면서 케이싱 표면은 젖은 상태로 남게 된다. 공기 중의 산소는 수면막을 뚫고 금속표면까지 침투하게 되며, 이는 양수위 상부의 산소가 많은 부분과 양수위 하부의 산소가 적은 부분 사이에 산소 차동 셀(oxygen differential cell)을 형성하게 된다. 양수 중단 후 수위는 다시 상승하면서 반복적인 습윤-건조(wet-dry), 고-저 산소 수준(high-low oxygen levels)에 의해서 관정의 표면을 부식시키게 된다. 항상 지하수 속에 잠겨있는 양수위 하부구간의 부식은 낮은 산소의 용해도, 높은 이산화탄소와 황화수소의 농도, 금속 환원 미생물의 성장 등 여러 가지 복합적인 과정으로 설명되고 있다.

3.3.2 물-암석 반응으로 인한 광물의 침전

화학적으로는 함양우물의 막힘현상이 스크린이나 케이싱 천공(perforation), 층면, 또는 대수층 자체에서 화학반응에 의한 클로킹 물질이 생성될 수 있다. 지질학적으로는 철, 망간 이온이 환원환경에서 대수층 상부로 이동하여 산소가 희박한 환경에서는 불용성금속산화물이나 관정외부에 침전될 수 있으며, 철의 경우 중성에서 산화작용이 빠르게 진행된다.



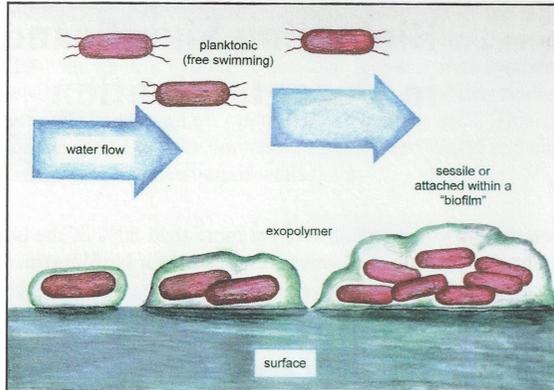
3가철은 물과 반응하여 다음과 같이 불용성의 수산화철을 형성한다.



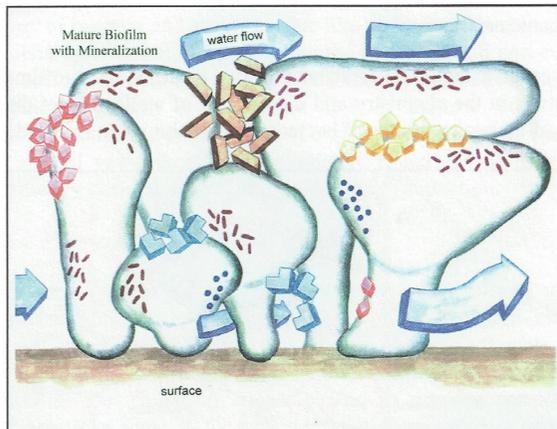
이러한 반응은 망간에서도 일어나는데 철과 마찬가지로 다양한 불용성의 침전물을 형성한다. 본 지역의 지하수에서는 망간산화물의 형성은 미약하며, 주로 철수산화물이 주요 클로킹 물질로 작용한다. 지질학적인 현상에 의한 망간산화물의 형성은 잘 인지되지 않는다. 망간산화물의 경우 주변 대수층의 특성에 크게 영향을 받는데 수리화학적, 미생물학적 요인이 중요한 요소이다. 용해도 감소에 의한 과포화, 부식, 두 금속 간에 형성되는 갈바니 전지 (galvanic cell), 과포화, 핵생성(nucleation), 접촉시간이 충분해야 한다. 특히 지하수 공에 설치된 수증 모터가 작동되면 기포, 진동, 교반, 전자 및 자력장등이 발생되고, 수증모터의 용접지점, 내부응력이나 갈라진 틈 등이 핵생성 장소가 된다(Cowan and Weintritt, 1976). 지하수 수위의 하강과 상승의 반복으로 공기의 유입과 배출이 반복적으로 일어나 Fe 이온이 산화될 수 있는 시간이 충분하다. 지하수 수위의 하강과 상승의 반복으로 대기 중의 산소가 반복적으로 유입되면 *Leptothrix ochracea*와 *Gallionella ferruginea*와 같은 철박테리아가 서식할 수 있는 환경이 되면서 또한 스케일이 쉽게 형성된다.

3.4 생물학적 과정

우물 내 온도 및 양분 조건 등의 조건이 박테리아군의 성장에 최적의 조건을 제공하여 공극 틈이나 우물 스크린에 미생물 활동이 활발하여 지고 점차 성장하면서 그 부산물이나 미생물군이 지하수 흐름을 방해하는 막힘 물질로 작용하는 경우와<그림 3-11>, 우물 최초 설치 혹은 개발시 사용된 점성축진재가 적절하게 공 외로 배출되어 남아 영양염류로 남게 되어 박테리아 군이 생성되어 막힘 물질로 발전하는 경우, 최초 생성된 생물막 등에 유기화합물질 혹은 무기화합물질 (주로 광물질) 등이 흡착되어 성장하여 지하수의 유로를 방해하는 경우 등이<그림 3-12> 있다.



<그림 3-11> 우물내 생물막 생성 과정 개념도 (Schnieders, 2003)



<그림 3-12> 우물내 생물막 형성 및 광물질 침전으로 인한 흐름 방해 개념도 (Schnieders, 2003)

3.4.1 박테리아에 의한 파이프에 침전물 축적

가. 박테리아에 의한 클로깅 형성

지하수공의 유지, 관리에서 중요한 문제는 철박테리아의 생장과 집적에 관한 것이다. 철박테리아는 펌프, 우물스크린, 및 주변 대수층에서 서식하는데, 이들은 흔히 끈적거리는 젤라틴 같은 갈색덩어리를 형성한다. 따라서 적절한 조치를 취하지 않는다면 단기간에 우물의 효율이 상당히 감소할 수 있다. 철

박테리아와 같은 미생물은 철재배관을 사용하는 지하수공에서 흔한 데, 이들은 철을 산화시키는 역할을 하기 때문에 철수산화물/산화물로 된 클로킹 물질의 형성에 중요한 역할을 한다.

우물관정에 영향을 주는 철박테리아의 종류는 다양하다. 철을 산화시키는 대표적인 박테리아로는 *Gallionea ferruginea*, *Leptothrix ochracea*, *Toxothrix sp.* 등이 있는데, 이들은 중성환경인 경우 적갈색의 미생물매트(mat)에서 잘 서식한다. 박테리아는 일반적으로 기다란 실타래 같은 유기체로서 점액을 분비한다. 점액은 박테리아가 기질(substrate)에 점착할 수 있게 하며, 보호덮개를 형성한다. 새로운 박테리아는 오래 된 박테리아의 상부에서 성장하여 층상의 구조를 형성한다.

이 때문에 갈색의 젤라틴 같은 박테리아 성장물질은 커다란 덩어리가 되어 우물 스크린 입구와 펌프 흡입구를 막는다. 일반적으로 박테리아는 효소를 생성함으로써 성장하는데 지하수내에서 철을 포함하는 화학반응을 촉진시킨다. 화학반응의 산물로 소량의 에너지가 방출되는데 이를 박테리아가 사용하여 성장하고, 증식하게 된다. 화학반응은 수용액에서 2가철이 3가철로 산화작용을 수반한다. 일반적으로 박테리아가 성장하는 데 필요한 환경적인 요소들은 용존 2가철의 기원, 산소, 적절한 pH 등이다.

2가철은 일반적으로 산소가 결핍된 혐기성 환경에서 생성되는데 세립질의 물질이나 심부대수층에서 흔하다. 지하수 관정이 착정되면, 고농도 산소의 호기성 환경인 관정스크린과 펌프 토출구 주변은 심부의 저농도 산소인 혐기성 대수층환경으로 둘러싸인다.

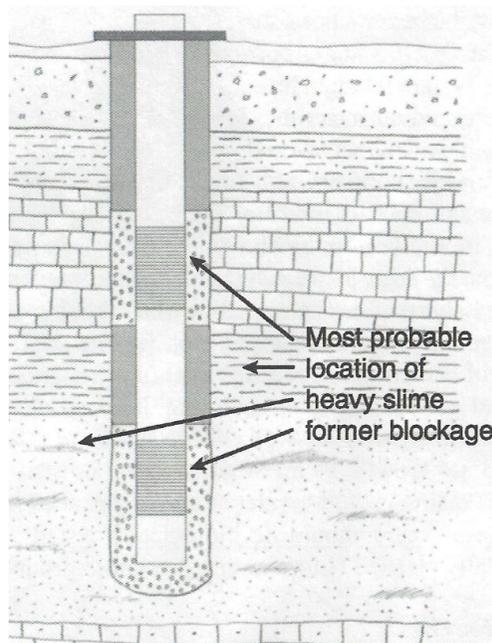
이 때문에 호기성 철산화박테리아가 생존할 수 있는 좋은 환경이 형성된다. 관정과 인접한 혐기성 지역은 박테리아에 에너지 공급원으로 작용하는 2가철 이온을 생성하여 공급한다. 관정스크린과 펌프지역 내에서 산소가 공급된 환경은 박테리아가 성장하고 재생하기 위하여 이용하는 2가철이 효소적으로 촉매화된 산화작용을 일으키게 한다. 철의 산화작용으로 얻는 에너지는 매우 작기 때문에 2가철을 전자공여체(electron doner)로 사용하거나, 전체 에너지로 사용해서 성장하는 것은 수 ppm 수준의 저농도에서는 불가능하므로 부수적인 기작이 존재할 수밖에 없다.

3가철의 침전은 다량의 외피형성이나 부식문제가 심각해지기 이전에 생물오손(biofouling)의 시작단계를 지시하는데, 3가철의 침전집적, 흡착이온, 세포와 그 잔해에서 유기물 등은 생물막을 형성하여 부식을 악화시키고 수질을

저하시킨다. 금속이나 콘크리트 구조물에서 생물막의 내부는 쉽게 무산소 환경이 되므로 부식작용, 공막힘 문제 등을 일으키는 환경이 된다(Tuhela et al., 1997).

Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 가로 산화되어 생기는 에너지를 대사작용으로 사용하는 박테리아는 산소와 Fe^{2+} 간 전자이동에 관여하기 때문에 관정 또는 그 인근의 대수층이 점차 막히게 된다. 이러한 생물학적 침전물의 축적은 대부분의 공에서 겪게 되는 문제이다. 철박테리아는 펌프, 우물스크린, 및 주변 대수층에서 서식하는데, 이들은 흔히 끈적거리고 젤 같은 갈색덩어리를 형성한다. 따라서 적절한 조치를 취하지 않는다면 단기간에 우물의 효율이 상당히 감소할 수 있다.

또한, 박테리아계에서 가장 큰 그룹에 속하는 슬라임 형성 그룹의 박테리아들은 우물 충전재와 우물에 접한 대수층에 막힘을 발생시키는 것으로 알려져 있다<그림 3-13>. 호기성, 혐기성 환경 모두에서 발생하며, 유량, 영양염류, 산소 등의 증가에 따라 함께 증가하는 경향을 보인다. 이들 그룹은 염소 소독 이후에도 다시 재성장하며, 상대적으로 밀도가 높고 부피가 큰 생물막을 만들어 낸다. 이들 그룹의 대표적인 멤버는 Pseudomonas, Flavobacter, Acinetobacter, Aeromonas 등이 있다.



<그림 3-13> 슬라임 형성 박테리아 주요 발생 구간 (Schnieders, 2003)

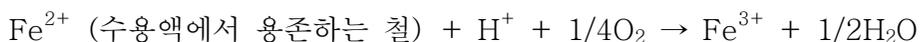
혐기성 박테리아 그룹 (anaerobes)은 산소가 없는 조건에서도 살아 갈 수 있는 그룹이다. 이 들 그룹은 주로 깊은 우물이나 산소 공급이 되지 않는 충전재 등에서 나타나므로 이번 연구 대상인 한국농어촌공사 방사상 집수정의 우물 재개발 시에는 상대적으로 중요하지 않는 그룹에 속한다고 볼 수 있다. 주로 황 환원 박테리아 (sulfate-reducing bacteria)와 대장균류 (coliforms)가 여기에 속한다.

나. 박테리아에 의한 클로킹 기작

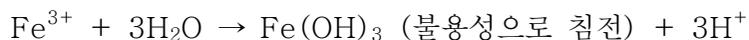
박테리아는 다음과 같은 기작을 통하여 양수펌프 흡입구, 스크린 튜브, 관정 인접한 대수층의 공극을 막는다.

- ① 박테리아 덩어리 자체
- ② 생물학적 작용에 의한 불용성 철, 망간 수산화물의 형성
- ③ 세립질 퇴적물이 박테리아의 끈적거리는 점액질 껍질에 침착

대부분의 철산화박테리아는 절대호산성생물(acidophile)인데 중성의 pH에서는 2가철은 급속하게 산화하여 3가철이 되고 무산소 환경에서만 안정하기 때문이다. 화학반응의 산물로 소량의 에너지가 방출되는데 이를 박테리아가 사용하여 성장하고, 증식하게 된다. 화학반응은 수용액에서 2가철이 3가철로 산화작용을 수반한다. 철박테리아가 2가철을 3가철로 전이하는 반응은 다음과 같다.



3가철은 물과 반응하여 다음과 같이 불용성의 수산화철을 형성한다.



이러한 반응은 마그네슘에서도 일어나는데 불용성의 침전물을 형성한다. 일반적으로 박테리아가 성장하는 데 필요한 환경적인 요소들은 용존 2가철의 기원, 산소, 적절한 pH 등이다.

다. 철산화박테리아

① 갈리오넬라(*Gallionella ferruginea*)

*Gallionella*는 본 조사 지하수에서도 쉽게 관찰된다.

*Gallionella ferruginea*는 박테리아 내부에서 생성된 후 외부로 분비된 생체고분자막 줄기가 나선형으로 뒤틀린 형태가 특징적인데, 이는 성장하는 동안에 신장되어 뒤틀린 덩어리 또는 나선형의 줄기매트(stalk mat)를 분비한다(Ghiorse, 1984). 이 박테리아종은 지하수 외에도 다양한 수계환경에서 쉽게 관찰되지만, 특히 약산성~중성 pH, 산화환원전위 200~300mV 조건에서 CO₂가 충분하면 잘 생존한다. *Gallionella ferruginea*의 생육에 가장 중요한 환경은 산소가 충분히 존재하는 상태에서 2가철 이온의 안정성이다(Hanert, 1992). *Gallionella*는 화학무기영양균으로서 용해된 2가철을 3가철 산화물로 산화시켜 에너지를 얻는데, 2가철은 호기성 물에서는 부족하므로 호기성인 *Gallionella*는 일반적으로 호기성과 혐기성 물이 혼합되는 곳에서 서식한다. 이런 조건은 혐기성 대수층으로부터 배출되는 하상(streambed)에서 흔하다. 혐기성 대수층을 사용하는 관정도 이런 호기-혐기 경계면이 된다. 관정에서 *Gallionella*의 성장은 이것이 생성하는 3가철 수산화물이 관정을 막기 때문에 심각한 문제가 된다(Chapelle, 2001).

② 렙토틱릭스(*Leptothrix*)

*Leptothrix ochracea*는 중성영역(neutrophilic)의 pH 조건과 산소부분압력이 비교적 낮고 Fe²⁺ 함량이 비교적 높은 지하수에서 잘 서식하며(James and Ferris, 2004), Fe 산화뿐만 아니라 Mn도 산화시킨다.

Leptothrix 종이 Fe²⁺ 이온의 산화에너지를 활용하는 점에 있어서는 화학무기영양체이만 단순한 유기물을 이용하여 탄소를 합성하는 점에서는 종속영양체에 해당된다. *Leptothrix* 종이 Fe²⁺ 이온의 산화에너지를 이용하고 나면, 산화된 Fe³⁺ 이온은 물과 가수분해 되어 철수산화물로 침전된다. 이 철수산화물은 박테리아 세포 표면에 쌓이게 되어 대사작용을 수행할 세포 표면적이 줄어들게 만든다(Emerson, 2000).

*Leptothrix*종은 자신의 세포 외부에 점액질을 분비시켜 Fe³⁺ 이온이 점액질 표면에 침전되도록 한다(Cullimore, 2008). 박테리아 세포 표면과 협막사이가 점액질로 되어 있기 때문에 박테리아는 협막을 쉽게 탈출하여 생존하게 된다. 협막을 벗어난 박테리아는 다시 세포 표면에 점액질을 분비하고

Fe²⁺ 이온을 활용하면서 새로운 제2의 협막을 생성한다.

철수산화물의 협막은 박테리아 자신을 원생동물과 같은 천적으로부터 보호해 주는 보호막으로 또는 박테리아에게 치명적인 자외선을 차단하는 보호막이 되기도 한다(Hallberg and Ferris, 2004; Cullimore, 2000).

그러나 생존하기 위해서 박테리아는 새로운 Fe²⁺ 이온과 CO₂가 필요하다. 따라서 박테리아는 점액질의 협막을 벗어나 Fe²⁺ 이온과 CO₂를 활용하고 또 다시 새로운 협막을 생성한다. 편모가 달린 약 1 μ m 크기의 *Leptothrix* 종은 철수산화물의 협막 안에서 생존하면서 계속하여 새로운 협막을 생성한다.

*Leptothrix ochracea*는 Eh 165 mV, DO 0.2 mg/l, 용존 Fe²⁺가 3 mg/L로 용해되어 있는 지하수 환경에서도 성장에 제한을 잘 받지 않는다. 이에 반해, *Gallionella ferruginea*는 Eh가 최소한 250 mV 이상, 용존산소가 6. mg/L 이상인 환경에서만 성장가능한데(James and Ferris, 2004), 그 이유는 *Gallionella ferruginea*가 Mn을 산화시키지 못하기 때문이다(Katsoyiannis and Zouboulis, 2004). 대부분 지하수에서 *Leptothrix ochracea*의 개체수가 *Gallionella ferruginea* 보다 많이 관찰되는데, 그 이유는 *Leptothrix ochracea*는 무기독립영양생물로 성장할 수 있을 뿐만 아니라 혼합영양미생물체 혹은 유기영양생물체로도 성장할 수 있기 때문이다.

③ 곰팡이 균사

침상결정도로 이루어진 침철석의 포도송이구조와 이들을 서로 연결하고 있는 구조들은 *Pedomicrobium*에 의해서 형성된 균사(mycelium)(Ghiorse, 1984), *Alternaria*나 *Cladosporium*와 같은 곰팡이 균사, 혹은 *Gallionella*가 세포외벽에 배설시킨 hydrosol의 Fe³⁺나 젤(gel) 상태의 Fe³⁺에 해당된다(Che et al., 2006). Fe²⁺로부터 산화된 Fe³⁺을 *Gallionella*가 자신의 세포속에 농축시키고, hydrosol의 Fe³⁺을 세포외벽으로 배설시키고, 배설로 인해 세포외벽에 퇴적된 hydrosol의 Fe³⁺은 gel 상태로 변화하고 결국 gel 상태의 Fe³⁺은 결정도가 미약한 침철석으로 변화하며, 박테리아가 죽은 후 나선형 형태의 구조는 침철석으로 유지된다(Che et al., 2006).

라. 생물군 판별

재개발 처리 대상에 대한 생물군 판별은 관정에서 채취된 물시료에 대한 간단한 실험을 통해 확인 가능하다. 이러한 실험은 현재 상용화되어 판매되

는 간단한 실험 기구인 BART(biological activity reaction test)가 활용 가능하다. 생물 활동도 시험을 실시하여 생물장애의 정도, 미묘한 미생물의 활동성 또는 건강상의 위험을 결정하는데 이용하는가를 결정하는 것은 우물 관리에 매우 중요한 요소이다. 현재 BART 장비는 키트 형태로 개발되어 공급되고 있다(Cullimore, 2000). 생물활동도 시험에 활용되는 BART 키트의 종류와 활성반응 정도에 대한 정보는 (표 3-1),(표 3-2)에, 그리고 간단한 실험 사례는 <그림 3-14>,<그림 3-15>에 나타내었다.

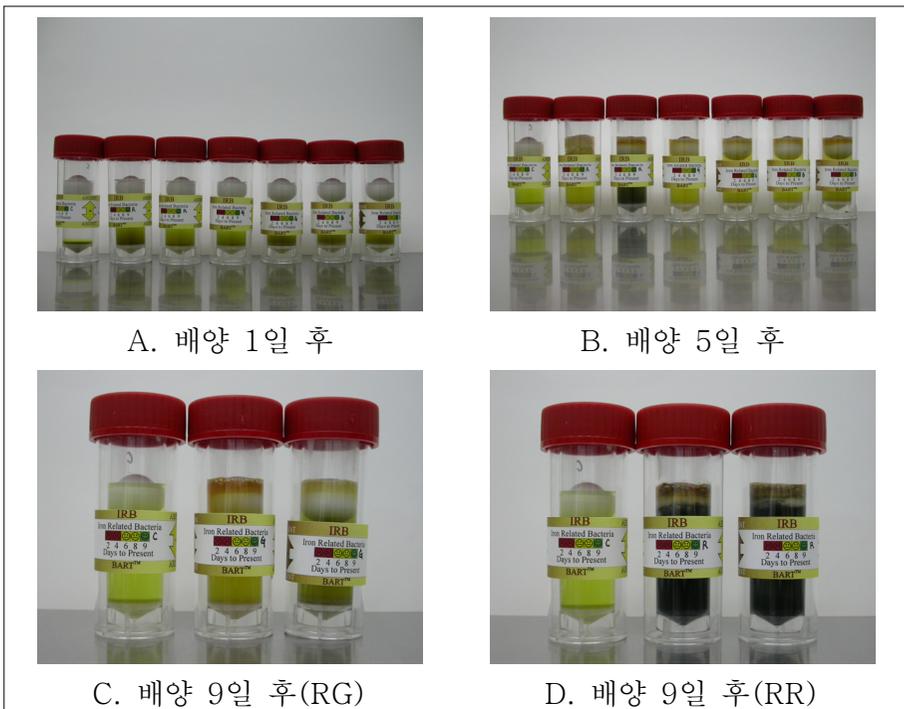
(표 3-1) 미생물 검사에 사용한 BART의 종류

검사 종류	표기	배양일
Iron Related Bacteria	IRB	8
Sulfate Reducing Bacteria	SRB	8
Slime Forming Bacteria	SLYM	8
Heterotrophic Aerobic Bacteria	HAB	4
Denitryfying Bacteria	DN	3
Nitrifying Bacteria	N	5
Fluorescing Bacteria	FLOR	8
Micro-Algae	ALGE	24

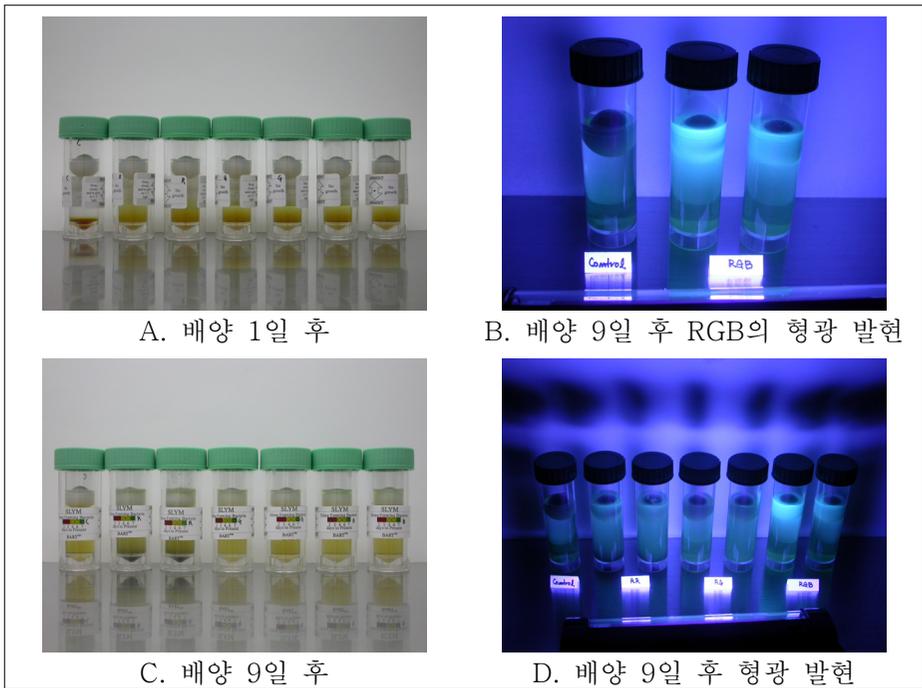
(표 3-2) BART 시약의 반응 및 미생물 활성

검사 종류	반응 표기	반응 양상	비 고
Iron Related Bacteria	BC	Brown Cloudy	IRB
	BG	Brown Gel	IRB
	BL	Blackened Liquid	Pseudomonads & Enterics
	BR	Brwon Ring	IRB
	CL	Cloudy Growth	Heterotrophic Bacteria
	FO	Foam	Anaerobic bacteria
	GC	Green Cloudy	Pseudomonads
	RC	Red Cloudy	Enteric Bacteria
Sulfate Reducing Bacteria	BB	Blackened Base	Slime bacterial and SRB consortium
	BT	Blackening around Ball	Aerobic slime bacterial and SRB consortium
	BA	Blackening All in Base and Ball	Complex bacteria and SRB consortium
	CL	Cloudy Growth	Anaerobic bacteria
Slime Forming Bacteria	DS	Dense Slime	Dense slime bacteria
	SR	Slime Ring around Ball	Dense slime bacteria
	CP	Cloudy Plates layering	Slime forming bacteria
	CL	Cloudy Growth	Slime forming bacteria
	BL	Blackened Liquid	Pseudomonads & Enterics
	TH	Thread-Like Strands	Tight slime bacteria
	PB	Pale Blue Glow in U.V. Light	Fluorescing Pseudomonads
Heterotrophic Aerobic Bacteria	UP	Blue Bleaching Up from Bottom	Aerobic Bacteria
	DO	Blue Bleaching Down from Top	Anaerobic Bacteria

검사 종류	반응 표기	반응 양상	비 고
Denitrifying Bacteria	FO	Foam around Ball	Denitrifying Bacteria
Fluorescing Bacteria	PB	Pale Blue	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	GY	Greenish-Yellow	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
	CL	Cloudiness	Non-fluorescing <i>pseudomonas</i>



<그림 3-14> Iron Related Bacteria(IRB)의 배양 사례



<그림 3-14> Slime Forming Bacteria(SLYM)의 배양 사례

3.5 우물 재질별 취수기능 회복기술

관정의 회복 기술은 관정 및 스크린의 재질에 따라 그 구조적 강도와 변형력이 다르므로, 특히 물리적 취수회복기술을 적용하는 경우 관정 재질별(예, 스테인리스, 철, 플라스틱 또는 나공상태) 최적의 효율성을 갖는 회복기술을 적용하여야 한다.

물리적 취수기능 회복기술의 경우 우물 자재에 일정 수준의 압력을 가하므로, 때때로 고압의 충격은 재질의 손상과 스크린의 파손을 일으킬 수 있으며, 특히 나공의 경우 공을 폐쇄해야 하는 결과를 유발할 수도 있다. 또한, 화학적 취수기능 회복기술의 경우 적용 시 용제의 특성에 따라 관정 및 스크린의 재질과의 반응 특성도 고려해야 한다.

(표 3-3)에서 우물 자재(스크린)에 따른 회복기술의 적용 가능성을 분류하였다. 권선형 스크린과 일반 스크린, 금속 스크린의 경우제트주사를 제외한 모든 회복 기술에서 적용 가능하고 유용함을 보여주고 있고, 그 외의 튜브, PVC 스크린, 세라믹, 합판 등은 몇 가지 회복기술은 가능하지만 회복 기술

적용 시 스크린에 가해지는 압력이나 외부의 충격으로 변형이 일어날 수 있어 부적합한 것으로 나타났다. 이러한 점에서 보면 스크린의 강도가 높을수록 적용 가능한 회복기술이 증가하는 것을 알수 가 있다. 또한, 스크린 외부의 여재 부분에서도 단일여재가 채워진 관정에서 가장 많고 유용하게 회복기술이 가능하며, 나공 상태에서 회복기술의 사용은 상당한 주의를 기울여야 하는 것으로 확인된다.

현재 한국농어촌공사의 방사상 집수정 수평집수관의 스크린의 경우 대부분이 PVC이다. 이는 브러싱과 과잉양수, 서지블럭, CO₂주입, 압축공기, 초음파와 같은 회복기술이 적용 가능하는 것으로 판단되며, 관정 외부의 여재는 없는 나공 형태의 관정으로 브러시, 워터제팅, 압축공기를 이용한 회복 기술이 적용 가능한 것으로 판단된다.

(표 3-3) 우물 자재의 유형에 따른 물리적 재개발 기술의 적용
가능성의 예(한국수자원공사, 2010)

우물 자재	브러싱	파잉 양수	서지 블럭	CO ₂ 주입	에어 제팅	워터 제팅	제트 주사	밀폐 양수	압축 공기	폭파법	초음파
튜브	++					++				-	
권선형 스크린	++	++	+	++	++	++		++	++	++	++
일반 스크린	++	++	++	++	++	++		++	++	++	++
PVC 스크린	++	++	++	++	+	+		+	++	-	++
금속 스크린	++	++	++	++	+	++		++	++	++	++
세라믹	++	++	++	+	++	+		+	+	-	++
합판	++	++	++	-	+	+		+	+	-	++
여재팩	++	+	-	-	-	+		-	+	+	++
나공	++			-		++			+	-	
단일 여재		++	++	++	++	++	+	++	++	++	++
이중 여재		++	++	+	-	+	-	+	+	+	++
깊이별 분류 여재		++	++	+	+	+	-	+	+	+	++
피조 미터	++	+	+	++		++			++	-	

Key: ++ = 완전히 적용 가능하고 유용함; + = 적용 가능하고 부분적으로 유용함, 잠재적인 손상 가능성
체크가 요구됨; - = 적용 불가능함, 권고되지 않음; 없음 = 적용이 유용하지 않거나 불가능함.

제 **4** 장

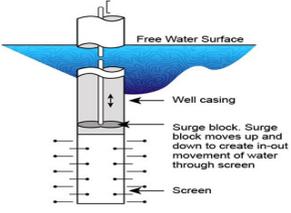
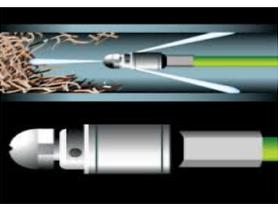
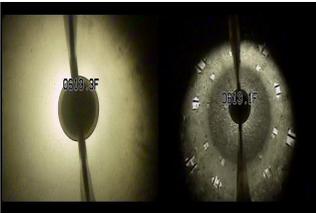
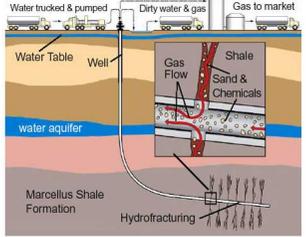
취수기능 회복기술 비교 평가

제4장 취수기능 회복기술 비교 평가

취수정 장애(well problem)를 극복하기 위한 취수정 재생기법(well rehabilitation method)은 크게 물리적 처리(mechanical treatment)와 화학적 처리(chemical treatment)로 구분할 수 있다. 물리적 처리방법은 브러싱(brushing), 서지블럭 소제(surge block swabbing)와 같은 기계적 방법(mechanical method)과, 고압유체분사(high pressured fluid jetting)와 같은 수리학적 방법(hydraulic method), 폭발(explosive), 고압가스(high pressured gas), 고압플스방전(sparking), 초음파(sonar jet)와 같은 충격식 방법(impulse method), 열처리(heating) 등이 있으며 이들은 주로 air lifting 과 병행된다. 화학적 처리방법에는 산처리 방법(acid treatment), 유기용제에 의한 봉쇄(sequestering), 항균제 처리(antibacterial agent) 등이 있으며, 현장의 상황과 효율성 향상을 위해 다양한 방법을 병행하는 혼합처리방법(blended method)을 사용하기도 한다<그림 4-1>.

우물 재생(well rehabilitation)은 관정의 노후화 또는 폐색 등에 의해 저하된 관정의 효율성을 증대시키는 공정이며, 우물개발(well development)은 시공과정에서 교란된 대수층 주변의 미립자를 제거하여 투수성을 증대시키기 위한 공정이다. 특히, 수평집수관의 경우 설비의 특성상 우물 개발 및 재생기법을 현장에서 적용하는 경우 동일한 공법임에도 고정식과 이동식의 적용방식에 따라 그 효과는 매우 다르게 나타날 수 있다.

이장에서는 해외 선진국에서 적용되고 있는 취수회복기능 기술에 대한 주요 공법의 특징과 장·단점의 비교평가를 통하여 국내의 현실과 현장조건에 맞는 최적의 취수기능 회복기술을 확인하고자 한다.

 <p>① brushing</p>	 <p>② surge block swabbing</p>	
(a) 기계적 방법 (mechanical treatment)		
		
① 고압유체분사 (high pressured fluid jetting)		
(b) 수리학적 방법 (hydraulic methods)		
 <p>① sonar jet</p>	 <p>② high pressure gas</p>	 <p>③ impulse</p>
(c) 충격식 방법 (impulse methods)		
 <p>① antinacterial agent</p>	 <p>② acid treatment</p>	
(d) 화학적 방법 (chemical methods)		

<그림 4-1> 해외의 방사상 집수정 수평집수관 취수기능회복기술의 예 (McLaughlan, 1996; Houben and Treskati, 2007)

4.1 물리적 처리

물리적 회복기술의 목적은 양수율이 떨어진 관정의 모든 퇴적물을 제거하는 것이며, 퇴적물들이 위치하는 곳을(우물의 내부, 스크린 슬롯, 우물 스크린의 외부, 여재) 청소하는 것이다. 물리적 처리방법에는 브러싱, 서지블럭 소제와 같은 기계적 방법과, 고압 유체분사와 같은 수리학적 방법, 폭약, 고압가스, 고압펄스방전, 초음파와 같은 충격식 방, 열처리등이 있으며 이들은 주로 air lifting과 병행된다.

4.1.1 기계적 방법

가. 브러싱

다양한 물리적 화학적 재개발 기술의 적용에 앞서 가장 보편적으로 사용하는 방법이 브러시를 활용한 외피 제거이다<그림 4-2>. 부분적으로 굳어진 피막은 솔질에 의해 제거가능하다. 브러싱은 저렴하고 간단하나 사용 범위가 우물 내부로 제한되어 있다. 브러싱은 종종 다른 회복기술의 전처리로 사용되고 있다. 브러시의 직경 및 재료는 케이싱/스크린의 크기와 재질에 따라 선택되어야 한다. 플라스틱으로 코팅된 철을 브러싱할 때에는 주의를 하여야 한다. 금속 브러쉬는 코팅에 손상을 주어 잘 사용되지 않으며, 플라스틱 재질의 브러시가 일반적으로 사용되고 있다. 침전물은 스크린 슬롯의 방향에 따라 브러시의 수직 및 회전 운동으로 제거된다.

브러싱의 일반적인 문제점은 경우에 따라 산출성을 떨어뜨릴 수 있는 점이다. 브러시에서 제거된 침전물이 스크린 슬롯에 달라질 수 있고, 이것이 투과성을 감소 시킬수 있다.

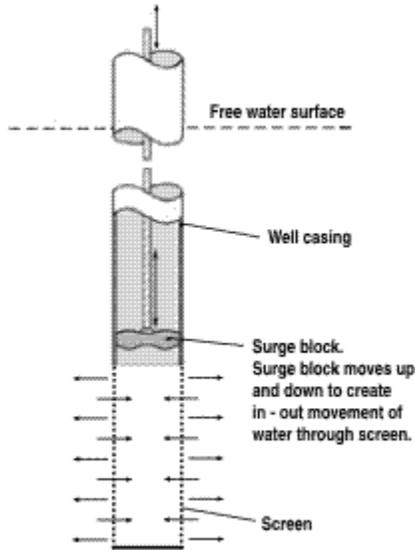


<그림 4-2> 우물 세척용 브러시(NGWA Expo, 2000)

나. 서지블럭 소재

서지블럭은 관정 회복에 사용되고 있을 뿐만 아니라 우물개발에도 사용되는 쉽고 저렴한 방법이다<그림 4-3>. 서지블럭의 설치는 매우 간단하다. 일반적으로 내부 우물 직경 안에 느슨하게 맞춘 패커 디스크를 위아래로 이동시키면서 스크린 상부에서 하부로 내려가면서 진행된다. 이때 지하수는 스크린을 통하여 우물 외곽으로 이동하게 되며, 상승하는 동안에 물과 느슨해진 고형물질을 우물 주변부로부터 빨아들인다. 이렇게 순환과정을 통한 세척 및 역세척 작용이 형성하게 된다. 분리된 물질은 우물 바닥에 침전되어 쌓이게 되며 서징이 완료된 후에 제거한다. 서지블럭의 일반적인 단점은 샘플을 제거되는 재료의 양만을 측정가능하기 때문에 공정의 제어가 불가능하다. 제거량이 매우 높을 경우 카메라 검층을 통한 원인을 찾아보아야 한다(예, 스크린 슬롯의 연결부 파쇄). 또한, 순간 충격에 의한 서징은 우물에 물리적 손상을 일으킬 가능성이 있으므로 가급적 천천히 진행해야 한다.

서징작업은 일반적으로 스크린 상부에서 하부로 작용하는데 우물 케이싱과 스크린으로 과도한 압력이 전달되면 손상될 위험이 있어 느리게 작업을 실시하는 것이 좋다. 서징에 의한 우물 외곽부로의 영향 범위는 가해진 에너지의 제한된 양 때문에 한계가 있다. 과도한 서징이나 부적절한 적용은 우물 주변의 여재층 변형을 초래하여 산출량 감소나 모래 유입이 발생할 수 있으므로 유의해야한다



<그림 4-3> 서지블럭 모식도(Water spouts, 2002)

4.1.2 수리학적 방법

지층 내의 공극으로 물을 흘려 보내어 공극사이의 불필요한 매질을 제거하는 과정을 suffosion이라 한다. 이는 우물 내의 세립 모래를 제거하거나 피막을 제거할 때 이 수리학적 원리를 이용하여 처리할 때 이 방법이 적용된다. 흐르는 물에 의해 생성된 힘은 입자를 붙들고 있는 힘을 초과하여야 작용이 되며, 물이 통과하면서 입자에 부력과 양력을 제공하게 된다. 이 과정을 통하여 입자의 재배열과 상호 정전기적 인력 작용 등에 의하여 분리되고 제거될 수 있다(국토해양부, 한국수자원공사, 2011).

가. 고압유체분사

고압유체 분사는 얇지만 빠른 흐름의 워터 제트의 침식효과에 의해 침전물을 제거하는 방법이다<그림 4-4>. 물은 우물 내부나 외부에서 노즐을 통하여 이동한다. 스크린 바깥쪽이나 공벽에 미치는 압력은 에너지의 분산과 감소 때문에 상당히 낮다. 따라서 청소하는 노즐과 대상 물체 표면과의 거리는 짧아야 하며, 노즐로부터의 거리가 증가하면서 압력이 감소한다(Fountain and Howsam, 1990). Fountain and Howsam(1990)은 노즐의 구경과 거리에 대한 관계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{P_x}{P_0 = 332} \cdot \left(\frac{D_0}{x}\right)^{2.64} \cdot [\exp^{-y^2/2 \cdot (0.05 \cdot x^2)}]^2$$

여기서, P_x = 거리 x 에서의 압력, L , P_0 = 노즐 출구에서의 압력, F/L^2
 D_0 = 노즐 직경, L , x =노즐로부터 축방향 거리(제트 흐름의 방향), L
 y = 노즐 중심선으로부터의 방사상 방향의 거리(회전 대칭을 가정,
 $y=z$), L

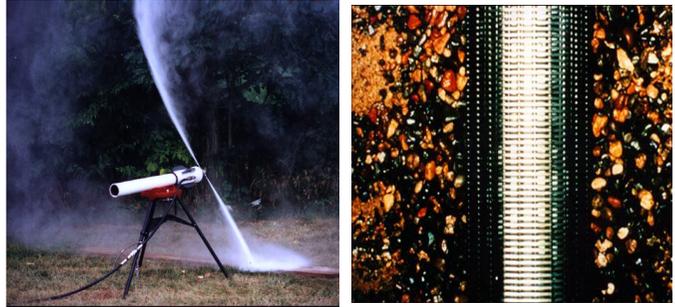
일반적으로 저압의 jetting과 고압의 jetting 방식으로 구분되는데, 전자는 저압[5 bar (73 psi)이하]와 높은 유량(수십 내지 수백 m^3/h)에 적용되고, 후자는 고압[10 bar (145 psi)이상]과 낮은 유량[20 m^3/h 이하]에 적용된다. 고압 시스템은 50~500 bar(725~7,250 psi)의 넓은 범위에서 조정 가능한 매우 높은 압력을 수반한다(Schultes and Moses, 2002). 일반적인 주입 속도는 10 m^3/h 이하의 범위를 가지며, 노즐의 경우 2개에서 3개가 가장 일반적인 구성이다<그림 4-4>. 매우 큰 유량을 갖는 water jet은 스크린의 작은 부분에 매우 높은 압력을 발생시키는데, 이 경우 고압의 유량이 스크린 슬롯 연결부와 코팅된 면과 같이 약한 지점에 장기간 작용될 경우 재질의 손상을 가져올 수 있으므로 유의해야 한다. 일반적으로 플라스틱관의 경우 200bar(2,900psi)가 초과하지 않도록 한다. 고압에 해당하는 550bar(8,000psi) 정도까지는 강철 우물 배관에 손상을 일으키지 않는 것으로 연구되었다(Fountain and Howsam, 1990). 스크린 슬롯의 설계와 기하학적 모양은 jetting 재개발 방법의 효율성을 결정하는 요인이 된다. 권선형 스크린(wire-wound screen)과 같이 높은 개구율과 연속 슬롯을 가진 스크린들은 제트 분사에 약하다.

스크린 표면에 부딪치는 고압 제트에 의해 발생하는 잠재적인 손상은 고정 노즐의 사용에서 나타날 수 있다. 노즐을 회전시킴으로 이와 같은 문제점을 완화시킬수 있는데 water jet의 반동이나 전기에 의한 회전을 발생시킬 수 있다. 유압은 피막을 분해시키고 여재로부터 입자들을 침식시키는 작용을 한다. 노즐의 회전과 수압의 반복적인 증가 감소는 주변에 진동을 야기하고 자갈 알갱이들은 회전을 시작하고 피막을 벗기도록 작용할 것이다.

낮은 강도(얇은 강판, 석재, 적층 목재, PVC 등)를 지닌 케이싱 및 스크린 재질로 구성된 우물 자재의 경우, 고압 제트로 시행하지 말고 압력을 감소시

켜 사용하여야 한다. 우물 케이싱과 스크린의 내부에 작용하는 국지적인 상승된 압력은 표면에 손상을 입힐 수 있다.

또한, 높은 유속에서 상당한 부피의 물을 주입하게 되면 스크린 주변의 여재들의 재분배, 구조의 재배치, 그리고 여재의 압밀 작용을 유도하게 되므로 주의하여야 한다<그림 4-4>.



<그림 4-4> 수평정 청소용 고압 제팅 장비(미국 CWI), 고압 제트 시스템의 예, 여재 재배열

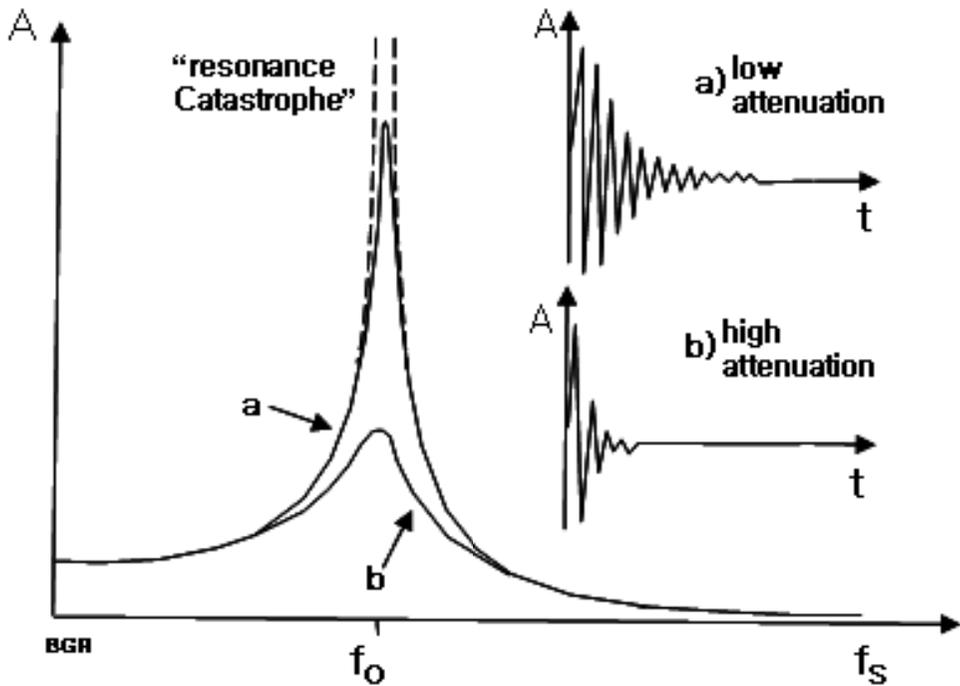
4.1.3 충격식 방법

충격법은 케이싱, 스크린, 필터팩의 고착화된 충전물질에 영향을 주어 이를 분해하고 제거하여 관정회복을 가능하게 하여 주는 원리이다. 펄스에 의해 생성되는 효과는 다음과 같다.

- ◎ 케이싱/스크린, 필터 팩과 퇴적물들의 상대적인 퇴적속도 차이에 의한 탄성특성 발생
- ◎ 울림(resonance)효과
- ◎ 침전물의 액화, 예를 들어, 산화 철/망간 젤, 세균성 점성 물질 등

울림효과는 자동차를 운전하는 사람들에게는 익숙한 현상으로 예를 들어 처음 시동을 건 후, 자동차 모터에 의해 발생된 진동이 점차 차체 전체로 전달되어 가는 현상을 말한다. 물리학적으로 보면 고유진동수를 가진 물체가 진동 후 진동이 전달되는 것을 의미한다. 이 진동수는 공명 진동의 진폭이 최대에 이르게 되고 몸체 전체의 질량에 영향을 주게 된다. 자동차 앞 사물함이 달그락 거리는 이유는 이와 같기 때문이다. 이와 같이 물체의 고유진동

수 f_0 의 특정 진동수에서는 들뜬 상태가 유지되고 본체가 진동하기 시작한다. 이 진동수에서 공명 진동의 진폭은 갑자기 최고치에 도달한다(“resonance catastrophe,” <그림 4-5>). 이는 주로 본체의 질량과 상관관계가 있는데, 가벼운 부분들은 훨씬 더 쉽게 진동할 것이다.



<그림 4-5> 주파원 f_s 에서 자극에 따른 본체의 공명 진동의 진폭 A (Houben and Treskatis, 2007)

요변성(thixotropy)은 진동하거나 진동이 멈춘 뒤의 상태가 고체 상태에서 액체 상태로 바뀌는 것을 의미한다. 가정에서 흔히 볼 수 있는 요변성의 예는 케첩을 들 수 있는데 케첩을 충분히 흔들지 않을 때 케첩이 고체상태가 되어있어 흘러나오지 않지만 충분히 흔들면 액체상태가 되어 흘러나오는 것을 잘 알고 있다. 철, 망간 산화물, 젤 또는 미생물의 부산물 등은 실제로 요변성 상태인데 진동이 전달되면 액체 상태로 변화 될 수 있다.

몇몇의 기술들이 펄스효과를 이용하여 관정회복기술로 사용되고 있다. 물은 비압축성의 성질을 가지고 있으므로 받은 충격을 그대로 전달하는 성질을 가진다. 짧은 펄스는 폭발에 의해서 발생할 수 있고, 초음파에 의해서는 긴

펄스를 가진 파가 생성될 수 있다. 폭발에 의한 진동수는 보통 20~40Hz 정도이고 초음파에 의한 진동수는 20,000~25,000Hz 정도이다.

소리와 같은 에너지가 물체를 통해 전달될 때 거리에 따라 강도가 감소하게 된다. 이상적인 물질에서는 음압(音壓)은 파동의 공간 확산에 의해서만 감소하지만 자연 상태에서는 산란과 흡수라는 두 가지 성질 때문에 더 많은 소리의 약화 효과가 발생하게 된다. 이 두 가지 요인이 결합하여 발생하는 낮춤효과를 감쇠(attenuation)라고 부른다. 그래서 우리가 발생시키는 펄스가 목표물에 100% 모두 전달되는 것이 아닌 것을 알 수 있다. 감쇠의 과정을 살펴보면 다음과 같다

- ◎ 접촉면에서의 반사(물/스크린)
- ◎ 접촉면에서의 굴절(물/스크린)
- ◎ 흡수와 같은 다른 에너지 타입(소리, 온도, 운동, 다른 파동형태)으로의 변형
- ◎ 진동면의 파괴

먼저 공간적 확산에 대해 생각해 보면 펄스형태로 방출된 에너지는 일반적으로 한 점이나 퍼져가는 구형의 형태로 나타난다. 그래서 가해진 압력 P에서 구 A의 표면으로 확장된다. 이 표면 A는 한 점으로부터 거리가 멀어질수록 넓어지며 힘과 구의 표면과의 비율 I는 감소한다. 구의 표면 $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ 이기 때문에 강도는 반경에 따라 급격하게 감소한다.

$$I = \frac{\text{power}}{\text{area}} = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

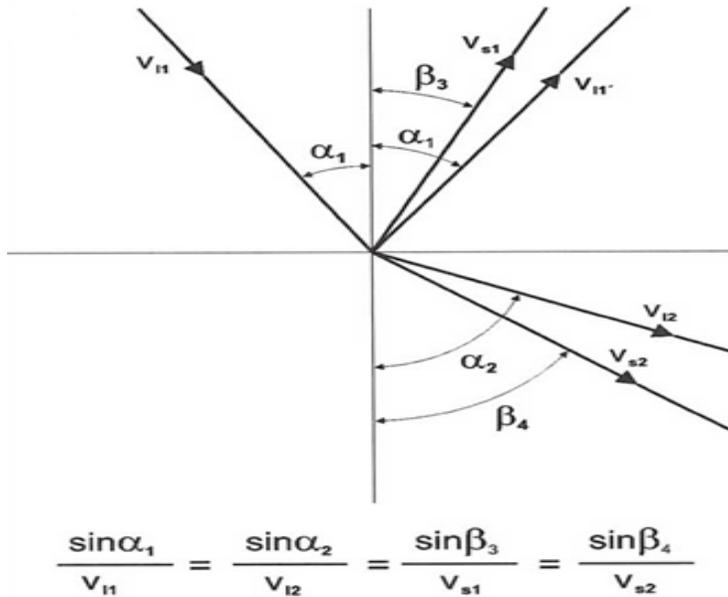
에너지의 원통형 분산으로 나타나는 line source는 면적은 $A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$ 로 나타난다. 음 표면에서 음파가 반사하는 현상은 음파가 자갈 팩이나 스크린으로 진행되는 것을 방해하게 하기도 한다. 반사의 효과는 지반의 기하학적인 상황과 접촉면의 구성 요소 및 매질의 밀도에 영향을 받게 된다. 접촉면은 물, 스크린, 자갈(gravel) 사이가 될 수 있으며 스크린의 슬롯, 자갈 팩의 기하학적인 상황은 평가하기 불가능하기 때문에 여기서는 접촉면의 밀도의 차이만을 고려하여 생각해 보기로 한다. 반사되는 R의

상대적인 값은 아래 식에 의해서 계산된다.

$$R = \left(\frac{\rho_{water} - \rho_{solid}}{\rho_{water} + \rho_{solid}} \right)^2$$

ρ : 물질의 밀도, M/L³

음파가 서로 다른 굴절률을 가지는 두 물질 사이의 접점을 지날 때 반사와 굴절 파장이 모두 일어난다<그림 4-6>. 이 현상은 물 표면과 같이 접점 너머로 보이는 물체가 왜곡되어 나타나도록 한다. 접점에서의 굴절은 두 물질 내의 음파 간에 서로 다른 속도의 결과로서 일어난다. 물질에서 소리의 속도는 물질의 물리적 특성(탄성률; 밀도)에 따라 결정되며, 굴절은 파장의 에너지 소실을 유발한다.



<그림 4-6> 한 면에서의 종파의 굴절과 반사 및 매질에서의 전단파의 발생

(V11=매질1에서의 종파의 속도, V12=매질2에서의 종파의 속도, Vs1=매질 1에서의 전단파의 속도, Vs2=매질2에서의 전단파의 속도) (Houben and Treskatis, 2007)

지표 밑의 암반과 같은 고체 물질을 통과하는 한 파장 에너지의 일부는 열, 소리, 혹은 물질 내의 입자 이동 등으로 전환된다. 파장 에너지의 이러한 전환은 파동에서 에너지의 손실을 가져온다. 감쇠는 일반적으로 소리 진동수의 제곱에 비례한다. 소리의 흡수는 증가하는 진동수에 따라 증가하기 때문에 초음파 소리는 가청음보다 더 높은 감쇠를 겪는다.

소리가 고체매질에서 이동할 때 파 에너지는 다른 형태로 바뀔 수 있다. 종파는 접촉면에서 비정상적인 각을 가지고 서로 다른 음향 임피던스의 매질 사이를 부딪쳐 전혀 다른 방향의 입자 움직임을 발생시키게 된다. 이로 인해 전단파가 발생되게 된다. 결과적으로 모든 것이 반사되고, 굴절되고, 변환된 파는 각각 상호작용을 하게 한다. 접촉면에서 생성과 파괴의 작용이 둘 다 발생되게 되며 상호작용에 의해 파는 진폭에 더해지거나 감소되게 된다. 한 점에서의 진폭은 여러 개별파의 진폭의 합이다. In Phase에서 두 파는 서로의 진폭의 합으로 나타나고 Out of phase에서는 두 파 진폭의 차로 나타난다. 고체 물질을 통해 이동하는 파의 에너지의 부분은 열, 소리 혹은 입자 이동의 형태로 전환되기도 하는데 파 에너지의 변환은 전체 에너지가 줄어드는 것으로 나타난다.

이상 충격법에 적용되는 요소 기술들을 개략적으로 검토해 보았으나, 충격 방식은 나름대로의 제약점을 갖고 있다.

- ◎ 약하고 손상 부위가 존재하는 케이싱 또는 기 손상된 스크린은 충격에 노출될 경우 파손이 쉽게 나타남
- ◎ 충격으로 인한 여재층의 재배치와 압축은 수리전도도의 감소와 우물 annular seal의 파손을 야기할 수 있음

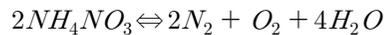
기 파손된 우물 자재의 존재 여부가 충격식 방법의 적용 이전에 파악되어야 한다. 특히, 케이싱이나 스크린의 연결 부위는 부식이나 충격에 약하므로 유의하여야 한다. 또한, 충격 기술을 적용하기 이전에 우물 내부는 브러시 방법 등으로 물리적인 세척이 수행되어야 하며, 충격 방식의 적용 이후에는 느슨해진 피막을 제거하기 위해 구간별 양수를 통하여 사후 처리하여야 한다 (국토해양부, 한국수자원공사, 2011).

가. 폭약

대수층의 케이싱을 관통하고 자극하는 폭발물의 사용은 석유 업계에서 잘

알려진 방법이다. 폭약의 양은 일반적으로 10~100 kg의 범위이지만 결과는 다소 불안정하다. 우물 회복기술에서의 폭약의 사용은 1950년대 초 미국에서 먼저 시험을 시작해 유럽에서는 베를린 급수시설에서 1990년대에 이 방법을 확립하는데 주도적인 역할을 했다(Rübesme, 1996; Steuβloff and Wicklein, 1999; Steuβloff and Steinbrecher, 2001). 화약은 일반적으로 몇 그램에서 약 100 g의 TNT 당량 범위를 보여준다. 이 범위는 우물을 활성화시키기에 충분하며 주변 건물 등의 손상을 야기시킬 정도는 아니다. 질산염암모늄 (NH₄NO₃)와 같은 무기적 폭발물, 그리고 트리니트로톨루엔 (TNT, C₇H₅N₃O₆)과 같은 (니트로의) 유기적 폭발물이 모두 사용된다. 주요 반응 생성물은 높은 압력을 유발하는 기체이며, 폭발 이후에 이들은 기체 방울이 되어 대기 속으로 소실된다.

질산암모늄 반응은 다음과 같이 일어난다.



니트로 유기 폭발물의 반응 생성물 또한, 이산화탄소, 일산화탄소, 질소 및 산화 질소 산소를 소량 포함한다. 회복기술 사용 후 양수를 통하여 관정 내부에 생성되어진 가스는 반드시 제거해야 한다.(Rübesame, 1996).

폭발에 의해 발생한 높은 가속 작용은 피막을 이탈시키는 작용을 한다. 게다가, 고 압축의 기체 방울은 통과하는 구간내의 여재층을 씻어내는 작용을 한다. 압축과 감압의 반복 작용은 진동을 유발한다. 우물 내부에서 상승한 기체 방울은 여재층으로부터 느슨해진 물질을 제거함과 함께 약한 피스톤 효과를 수반한다. 팽창한 공기 방울은 화학적 복구 물질을 도입하는 데 활용될 수 있다.

대부분의 폭과 공법은 처리 공정이 복잡하며, 매회 이탈된 피막과 화학적 잔류물을 제거하기 위하여 양수작업이 수행되어야 한다. 폭발물은 보통 방사상의 확산을 돕고 스크린의 손상을 방지하기 위해 centralizer 사이에 고정된 폴발선(line charges)에 설치된다. 펌발선을 활용하면 전체 스크린 구간 또는 그 이상의 영역을 한 번에 처리할 수 있도록 한다. 이 폭발선에는 m당 5~25 g 사이의 폭발물을 설치한다.

폭발물은 부스러지기 쉽거나 이미 손상된 케이싱과 스크린을 더욱 악화시킬 가능성을 갖고 있다. 따라서 PVC, 세라믹, 석재, 목재로 만들어진 우물에

서는 적용이 불가능하다.

폭발물을 다루고 사용하는 것은 대부분의 나라에서 엄격한 법적 규제를 받는다. 특수 훈련과 해당 자격증을 보유하고 있어야 하며, 폭발물을 다루기 전에 반드시 신고하여야 한다.

나. 고압가스

압축 유체의 급격한 방출로 압력 펄스를 생성하는데 사용이 가능하다. 장비(air guns)는 원래 해외 석유 탐사를 위해 개발되었지만, 현재 관정 회복 기술을 위해 사용 중이다. 압축된 매체는 일반적으로 공기 또는 질소 등이다. 충격의 강도는 압력을 조절하여 선택 가능하며, 일반적으로 폭발보다 약간 작은 형태이다. 세척 효과가 작지만 취성 케이싱과 스크린에도 사용 가능하다는 장점이 있다.

다. 고압펄스방전

폭발은 또한 관정내부에서 적절한 가스 혼합물의 연소에 의해 생성 할 수 있다. 이러한 방법은 러시아에서 개발되었지만 중부 유럽에서 일부 응용 프로그램을 발견하였다. 현재, 직류 전류에 의해 수소 가스와 산소 가스를 이용한 물의 전해 분해를 이용하고 있다. 전기 분해에 필요한 시간은 폭발의 원하는 크기에 따라 달라지며 약 20~60초 정도이다. 가스는 수집 점화 플러그에 의해 점화되며, 물에 폭발적인 역반응을 일으킨다. 이 폭발과 증기 거품 이후 -0.6~13 bar 정도의 단명 압력 펄스를 생성한다.

라. 초음파

인간의 들을 수 있는 범위를 넘어서는 주파수를 초음파라고 한다. 초음파의 강도는 $5\sim 10\text{ W/cm}^2$ 이며, 비교로 근거리 대포소리가 $10\sim 3\text{ W/cm}^2$, 일반적 스피커 소리가 10^{-9} W/cm^2 이다. 따라서 초음파는 가청음보다 뛰어난 기계적인 효과를 가지고 있다.

일상생활에서 물질 세척시 초음파가 유용하게 사용되고 있는데, 물질 표면에서의 자극과 작은 진공 거품의 형성을 통하여 가능하다. 이후 연속하여 국부적으로 약 10,000 K와 10,000 bar(145,000 psi)의 온도와 압력이 나타나며, 이와 같은 물리적 압력은 부착 물질의 이탈을 유발한다.

우물 복구에 초음파를 사용하고자 하는 발상은 1960년대 초부터 알려져

왔으나 1990년대에 실제 적용되기 시작하였다. 우물 복구에 사용되는 초음파의 주파수는 20에서 25 kHz의 범위이다. 일부 기기는 약 $6.8\text{W}/\text{cm}^2$ 의 강도로 방사상으로 방출하도록 구성된 것도 있다. 이 음원들은 약 0.3~1.2 m의 길이로 구성되며, 느슨해진 피막의 제거는 양수에 의하여 이루어진다. 구간당 초음파의 노출은 10~15분의 범위이다.

여러 실험 결과, 우물에서 초음파의 효과는 수압에 큰 영향을 받음을 보여주었다. 즉, 압력의 증가(=물의 깊이)와 탁도의 증가가 영향을 미친다. 0에서 16bar로 증가하면 초음파의 효과가 10배 정도 증가되었다(Wilken & Bott 2002). 20m 보다 얇은 구간, 즉 2 bar (29 psi) 이하에서는 탁도의 양은 효과에 큰 영향을 주지 못하였다. 따라서, 초음파는 얇은 구간보다는 깊은 우물의 복구를 위해 훨씬 더 유용하게 사용될 수 있다. 반면에, 다른 연구에서는 5bar를 넘어가는 압력하에서는 진공 기포의 형성이 감소하기 때문에 처리 효율이 감소한 것으로 나타나기도 하였다(Kiwa, 2004). 압력의 증가는 진공 현상의 감소를 야기하기 때문에, 다음과 같은 요인이 추가로 고려되어야 한다.

- ◎ 진동하는 알갱이들에 의한 마모
- ◎ 형성된 매질의 압력
- ◎ 요변성(thixotropic) 물질의 액상화

초음파 투사 중에 작용하는 강한 힘들은 미생물의 세포벽을 분리시킬 수 있으므로 초음파는 살균 효과를 가진다.

초음파의 강한 파장은 고밀도의 매질을 투과하지 못하고 강철과 같은 경우 반사 작용이 나타나므로 강철 스크린 배면에 대한 처리 효율성은 낮다. 또 다른 한계점은, 고체 물질을 통해 이동하는 파장의 흡수력은 파장의 진동수에 달려 있는데, 파장의 진동수가 높을수록 흡수가 높아진다. 따라서 초음파 파장은 낮은 진동수의 충격파보다 훨씬 더 많은 감쇠를 겪게 된다.

이상 한계점을 고려했을 때 초음파를 활용한 우물 재개발은 다음과 같은 환경 하에서 이루어져야 한다.

- ◎ 적당히 깊은 우물 (20~50 m의 수두가 유지되어야 함)
- ◎ 우물과 시추공의 구경이 작아야 함
- ◎ PVC와 같이 저밀도 자재에 유리함

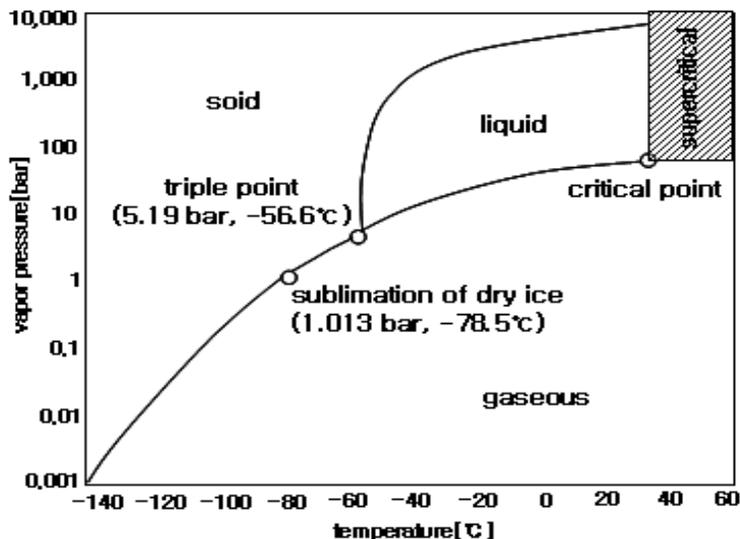
◎ 권선형 스크린과 같은 개공율이 큰 경우에 적합

실제 독일에서 우물 복구에 초음파를 적용한 결과 효율에 대한 명쾌한 결과를 얻지 못하였다. 일부 우물들은 성공적으로 복원되었으나, 일부 우물은 산출량이 회복되지 못하였다.

4.1.4 열처리

가. 이산화탄소 냉동법

이산화탄소의 상전이는 온도와 압력의 함수로 표현된다<그림 4-7>. 낮은 온도와 높은 압력은 이산화탄소를 액화시키게 되며, CO₂를 우물 복구에 적용하는 가장 간단한 방법은 고체 CO₂(드라이아이스) 덩어리를 지하수 우물 내에 투입하는 것이다. 그러나 이는 엄청난 부피 팽창으로 격렬한 반응과 함께 기체로의 빠른 전환을 가져온다. 질식성의 가스/물 혼합물의 갑작스런 폭발의 위험이 있으므로 사용을 불가능하게 한다.



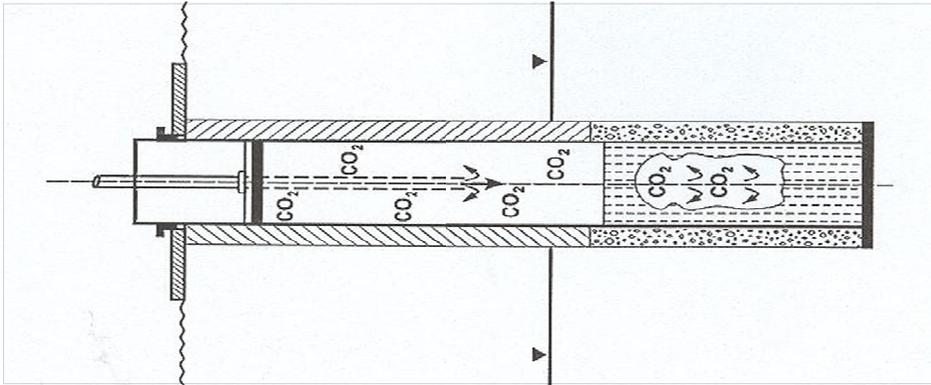
<그림 4-7> 이산화탄소의 상평형 관계(Houben and Treskatis, 2007)

이산화탄소를 이용한 피막 제거의 효과는 주로 물리적, 열적 발생 능력에

기인할 수 있다. 그러므로 이 방식은 화학 약품을 이용함에도 불구하고 물리적 방식의 범주에 고려된다. 모든 물질은 팽창하거나 수축함으로써 온도 변화에 반응하며, 고체를 갈라지게 하고 피막을 표층으로부터 분리시킬 수 있는 물리적 압력을 야기한다. 대부분의 고체는 낮은 온도에서 수축하지만 물은 팽창하게 된다. 매우 차가운 상태에서 광물 입자의 수축은 매우 조금 발생하지만, 공극을 둘러싸는 물은 액체에서 고체(얼음)로 전환될 때 약 9.1vol% 만큼 팽창한다. 이산화탄소는 물에 용해될 때 약간의 H⁺ 이온들을 배출하는 약산성이다.

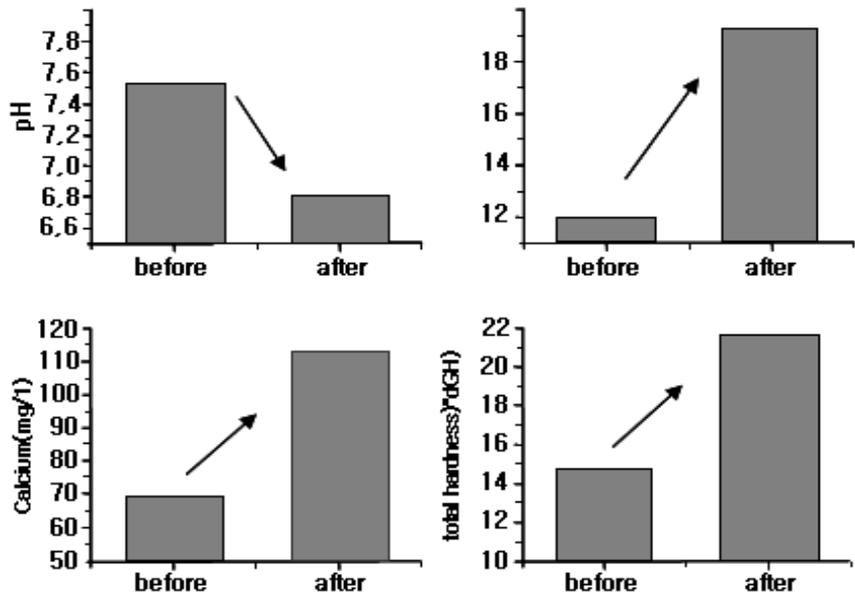


이산화탄소 냉동법의 실제 과정은 여러 단계로 나누어진다(<그림 4-8>). 패커의 설치를 통하여 우물을 고립시킨 후 우물 내부의 물은 이산화탄소 기체의 주입에 의해 배출시킨다. 우물 내부의 물을 동결시키기 위해서는 엄청난 양의 에너지가 필요하며 이 경우 우물을 심하게 손상시키게 되므로 물을 완전히 배출시켜야 한다. 다음으로, >12 bar (174 psi)와 -40 °C 사이의 조건하에서 액체 이산화탄소를 주입하게 되는데 이는 교반에 의하여 기체로 전환된다. 이러한 변환은 570배까지 부피 증가를 초래하며 궁극적으로 피막을 완화시킬 수 있는 물리적인 압력을 생성한다. 기체상으로 주변 대수층으로 침투가 상당히 발생할 수 있는데 20m 이상의 범위까지도 해당이 된다. 낮은 온도는 여재층의 공극에 남아있는 물을 동결시키고 팽창하게 한다. 이와 같은 과정은 여러 번 반복되어 이루어지며 패커를 이용하여 구간별로 진행된다. 우물 직경, 스크린의 길이 및 반복 횟수 등에 따라 CO₂의 양을 결정하는데 보편적으로 한 탱크 정도의 물량이 필요하다.



<그림 4-8> 냉동 이산화탄소에 의한 우물 복구(Houben and Treskatis, 2007)

주입된 CO_2 일부는 지하수에 용해되므로 지하수 수질에 영향을 미치게 된다. 위의 방정식에 의하면, 탄산염의 용해가 촉진되는 동시에 pH는 낮아지게 된다. Juttner and Ries (2001)은 본 방법의 적용시 물의 화학적 성질에 변화가 나타남을 규명하였다(<그림 3-9>). 이산화탄소 주입 전후 pH가 7.52에서 6.80로 변하고 칼슘이 69에서 113 mg/liter로 증가하고 총 경도가 14.7에서 21.7 dGH로 증가하며, 탄산염 경도가 12.0에서 19.2 dGH로 증가한다는 사실을 알아냈다(dGH = German Hardness, 1 dH = 10 mg/liter CaO, 1 American Hardness = 1 mg/liter CaCO_3). 높아진 탄산염 용해 때문에 전기전도도는 556에서 722 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 상승했다. 이와같은 변화가 얼마나 지속되는지는 규명하지 못하였으나, 이산화탄소의 주입이 살균 작용을 한다는 긍정적 측면도 존재한다.



<그림 4-9> 냉동 이산화탄소 기법을 이용한 우물 복구 전후의 물의 화학적 성질 변화(Jüttner and Ries, 2002)

이산화탄소를 다루는 작업상의 안전이 문제로 대두된다. 동상을 예방하기 위해 냉동 CO₂와 직접 접촉하지 말아야 하며, 질식성이 있는 CO₂ 기체는 우물 주변에 배치하지 말아야 한다. 전문화된 장비, 우물 보호시설의 강제 환기, 가스 검출기, 방호복 그리고 특별 훈련 등이 필수적으로 요구된다.

나. 고온 수증기법

고온 수증기법은 우물 재개발의 가장 오래된 방식 중 하나이다. 1990년대 초에 뜨거운 증기를 활용한 우물 청소 기술이 독일에서 개발된 바 있다. 주입된 증기의 상승이 물기둥의 중력을 초과할 때 우물은 끓어오르고 간헐 온천처럼 분출할 것이다. 우물 내부 끓는 물은 열 팽창과 간헐온천과 유사한 물 분출 동안의 강력한 침식 작용 2가지 효과가 있다.

뜨거운 물과 증기는 또한 살균 효과를 가지고 있으므로 철 관련 박테리아와 같은 노후화 관련 박테리아들은 제거될 수 있다. 그러나, 열을 이용한 방식은 다음과 같은 일반적인 단점이 있다. 우선, 극도로 높은 에너지를 소모하며, 안전에 문제가 있고(뜨거운 물의 분출로 인한 안전사고), 열은 우물의 상부 자재뿐 아니라 케이싱과 스크린 자재에도 부정적 영향을 미칠 수 있으

며, 생물성 매질은 응고를 일으키고 이는 또다른 공 막힘 현상을 불러 올 수 있다. 게다가, 비용 측면에서 단점이 존재하는데, 1 liter (혹은 1 kg)의 물의 온도를 1 °C 올리기 위해서는 4.2 kJ의 에너지를 투자해야 하는데 에너지 효율성이 매우 낮아 이 방식은 유럽에서는 거의 사용되지 않고 북미 지역에서 제한적으로 사용되고 있다.

4.2 화학적 처리

화학적 처리란 우물과 그 부대시설(pump, 압상 pipe 등)에 생존하고 있는 각종 바이러스나 박테리아(bacteria) 들을 살균하여 생물막 형성을 억제하고 이와 수반된 광물질 생성 등도 최소화하여 우물의 효율을 높이는 방법이라 할 수 있다. 또한 우물 설치 지점의 흙 속에는 보통 인체에 해롭지 않은 세균이 서식하기도 하고 질병을 일으키는 나쁜 세균이 서식하기도 한다. 이러한 세균을 처리함으로써 이용할 지하수의 수질을 개선하는 것도 화학적 처리의 또 다른 목적으로 볼 수 있다.

생물학적 막힘 현상은 화학적 처리 방식으로 재개발될 수 있는 대표적인 장애에 해당된다. 그러나 생물학적 막힘 현상을 야기하는 박테리아는 수천 종에 달하는 것으로 알려져 있으며 이러한 생물군에 따라 적절한 화학 처리 재가 요구된다.

4.2.1 산처리 방법

대표적 화학적 우물 처리는 주로 염소를 활용하는 방식이며, 주로 농도가 높은 염소수로 CaHCl, NaOCl 등을 물에 용해하여 활용하고 있다. 이들 활용에 대한 사항은 다음과 같이 정리된다.

CaHCl은 흰색의 고체로서 Pat-Tabs, HTH-Tablets 및 Chlor-Tabs 등의 이름으로 시판되고 있다. 70 % 농도의 염소성분을 함유한 CaHCl 0.45 kg을 물에 용해시키면 이는 동일량의 물에 10.3 kg의 염소가스를 용해시켰을 때와 동일한 살균력을 가진다. 우물 및 우물설치재료를 살균소독하는 데는 50 내지 200 mg/l의 염소용해액을 쓴다. (표 4-1)은 여러 가지 농도의 용액 380 l을 제조하는데 소요되는 70 % 염소를 가진 CaHCl의 양을 나타낸 표이다.

(표 4-1) 염소계 소독제의 농도와 염소량

염소계의 농도(mg/ℓ)	염소량	건조염소량
50	22.7g(0.05Lb)	31.8g(0.07Lb)
100	45.5g(0.10Lb)	63.6g(0.14Lb)
150	68.2g(0.15Lb)	91g(0.20Lb)
200	91g(0.20Lb)	136.3g(0.30Lb)
300	159g(0.35Lb)	227.2g(0.50Lb)

차아염소산소다(NaOCl)는 매우 불안정한 화합물로서 물에 용해시켜서 판매되고 있다. 이 용액은 가장 잘 보관된 상태에서도 6개월 후면 그 강도가 절반으로 저감된다. 최대 20%의 염소가 용해되어 있는 용액을 제조하기도 하지만 통상 6%의 농도를 가진 것이 가장 보편적이다. <표 4-2>는 우물 및 펌프소독용으로 쓰이는 여러 가지 농도를 가진 NaOCl 용액 380ℓ를 제조하는데 소요되는 표백제 양을 나타낸 것이다. 우물 및 파이프를 살균 소독하는 데는 100 mg/ℓ 농도의 용액을 사용한다. 이와 같은 농도의 염소용액을 우물 내에 계속 공급시키자면 이보다 약간 높은 농도를 가진 용액을 우물 내로 투입시켜야 한다.

(표 4-2) 차아염소산소다(NaOCl) 용액의 혼합비율

염소의 농도(mg/ℓ)	염소량(kg)		
	5%	7%	10%
50	0.2	0.14	0.1
100	0.36	0.27	0.18
150	0.59	0.41	0.28
200	0.73	0.56	0.36
300	1.1	0.77	0.55
400	1.5	1.0	0.73

4.2.2 향균제 처리

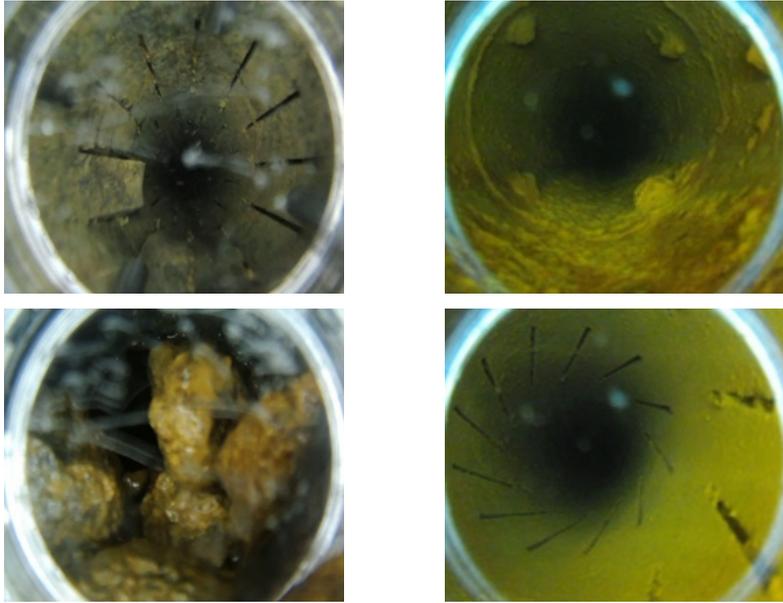
가장 넓은 정의의 향균제는 세균의 성장과 번식을 방해하는 약이다. 표면을 소독하고 잠재적으로 유해한 세균을 제거 하는데 사용되는 향균제는 현재 가장 일반적으로 기재되어 있다. 향균제는 잔류물 생산의 속도에 따라 두 그룹으로 나눌 수 있다. 첫 번째 그룹은 활성 잔류물을 남기지 않고 급속하게 작용한다. 이 유형의 예로는 알코올, 염소, 과산화수소 및 알데히드 류이다. 제2그룹은 소독을 통해(잔류물을 생산하는) 장시간 작용이 된다. 이 그룹의 예로는 트리클로산 , 트리클로 카르반 및 염화 벤잘 코늄이 있다.

4.3 혼합처리방법

방사상 집수정의 수평집수관의 공막힘의 원인이 한 가지가 아니라 두 가지 이상 복합적으로 나타나게 되면, 일반적으로 하나의 회복기술로 관정을 회복시키지 못한다. 이러한 경우, 공막힘 원인을 확실히 파악하여, 우선적으로 처리해야할 회복기술을 선택하여 관정의 공막힘을 처리해야 한다. 기본적인 혼합처리 방법에는 브러싱을 통한 관정의 표면의 입자들 제거 후 스크린 슬롯에 붙어 있는 미세 입자들을 충격식이나 에어브러싱을 통하여 제거하는 방법을 들 수가 있다.

4.4 국내에 적합한 회복기술

국내의 방사상 집수정의 공막힘 원인으로는 관정 내부로의 모래 또는 자갈의 유입으로 인한 스크린 폐색과, 노후화된 스크린과 케이싱의 마모 및 손상 등으로 조사되었다<그림 4-10>.



<그림 4-10> 국내 수평정 공막힘 원인(상주 이안 지하댐)

이러한 공막힘을 제거하기 위한 회복기술 중 국내에서 적합한 회복기술을 확인하면, 한국농어촌공사의 방사상 집수정의 스크린 재질은 대다수가 PVC 로써, 이러한 재질에 적합한 회복 기술을 살펴보면 브러싱, 과잉 양수, CO₂ 주입, 서지블럭, 압축공기, 초음파, 충격발생 법이 있으며, 수평정의 외부 여재는 존재하지 않아 과잉양수, 서지블럭, 초음파는 적용이 불가능할 것으로 판단된다. 또한, 현재 방사상 집수정의 설치시기가 오래되어 내부 스크린인 PVC의 상태를 확인하여 파손에 대한 부분도 고려해야 할 것이다.

제 **5** 장

**대용량 방사상 집수정 취수기능
회복기술 실증시험**

제5장 대용량 방사상 집수정 취수기능 회복기술 실증시험

5.1 서징 및 고압세척시 수리특성 평가

5.1.1 공주 지하3집수정 서징 결과

서징에 의한 수평집수관 폐색제거 효과 분석을 위한 현장실증시험은 상주지사 집수정 2개소, 공주지사 집수정 2개소에 대하여 실시하였다.

상주지사 집수정 2개소와 공주지사 지하3집수정에서는 서징만 실시하였고, 공주지사 지하2집수정에서는 서징과 고압세척을 실시하였다.

공주지사 지하3집수정 서징작업은 11월5일 ~ 11월 6일에 실시하였으며, 집수정 심도는 9.27m, 펌프설치 심도는 8.8m이며 표토의 토성은 미사질 양토(silt loam)이다. 서징 결과 폐색물질 제거로 수평집수관에서 집수정으로 유입되는 지하수의 흐름이 개선되어 비양수량이 67% 증가하고, 양수가능시간이 3배 이상 증가하는 것을 확인하였다(표 5-1) <그림5-1>.

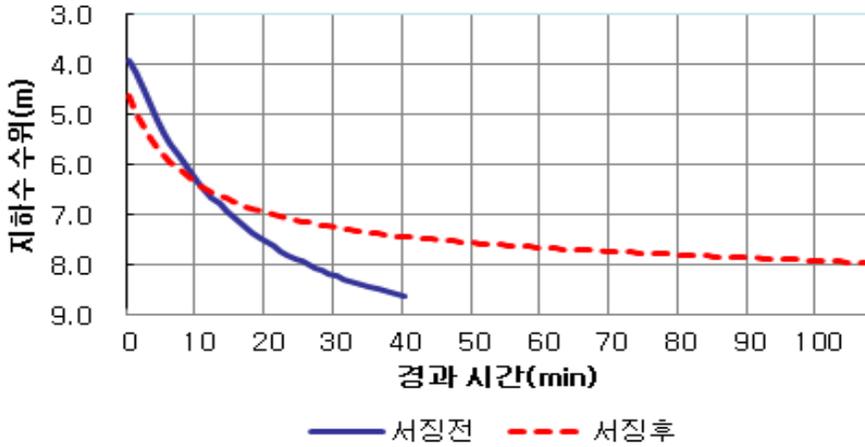
(표 5-1) 공주지사 지하3집수정 서징 전·후 비양수량 비교

구분 (일자)	지하수 수위(m)		수위강하량 (m)	양수량 (m ³ /일)	비양수량 (m ³ /일/m)	비고
	양수 시작	양수 종료				
서징전 (09. 23)	3.90	8.62	4.72	6,216	1,317	
서징후 (11. 10)	4.61	7.96	3.35	6,216	1,856	141%

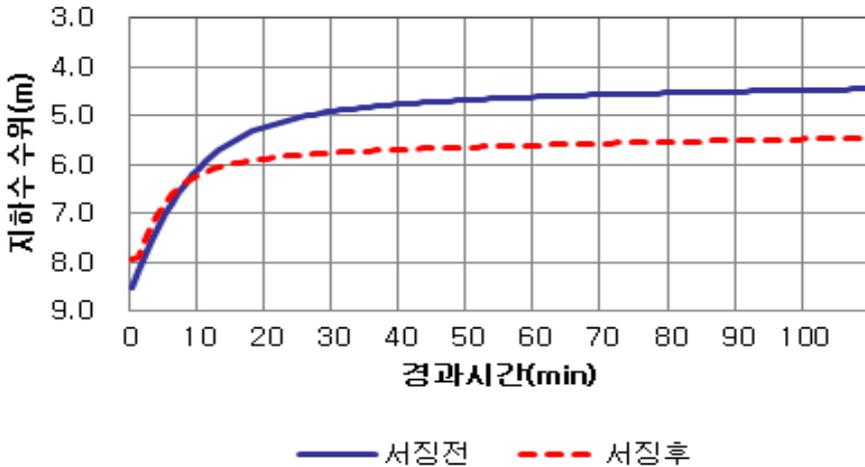
40분 양수시 비양수량 비교

구분	수위강하량 (m/40분)	양수량 (m ³ /40분)	비양수량 (m ³ /40분/m)	비고
서징전	4.72	173	36.65	
서징후	2.82	173	61.35	167%

[양수시 수위강하]



[회복수위]



<그림 5-1> 공주3집수정 서징 전·후 수위강하 및 회복수위

2013년에 실시한 관정외 지하수이용시설의 공주시사 지하3집수정 양수량 1,300톤/일 고려 시, 서징에 의한 수평집수관 개선효과가 지속된다면, 1일 양수시간이 5시간에서 15시간으로 증가하므로 2,600톤의 추가양수량 확보가 가능할 수 있다.

2013년 한국농어촌공사에서 실시한 관정의 지하수시설물 이용실태자료에서 양수량 자료가 있는 88개 집수정에 근거한 표토토성과 양수량 집계표는 (표 5-2)과 같다.

(표 5-2) 방사상 집수정의 표토토성과 양수량

구분	합계	1000톤 이하	1,001톤~ 2,000톤	2,001톤~ 3,000톤	3,001톤~ 5,000톤	5,001톤~ 10,000톤	10,001 톤~ 25,000톤
양질사토	1	-	-	-	1	-	-
사양토	44	14	5	3	8	10	4
양토	16	3	2	3	1	4	3
미사질양토	24	4	2	5	6	6	1
미사질식양토	3	-	-	-	3	-	-
합계	88	21	9	11	19	20	8

주) 양수량은 2013년 『관정의 지하수시설물 이용실태보고서』 자료 이용

(표 5-2)에서 3000톤/일 이하의 집수정 41개소를 재개발 하여 개소당 1,000톤/일의 양수량이 증가할 경우, 우물재개발에 따른 추가양수량 확보를 평가하면, 123천만원으로 연간 1,500만톤의 용수를 추가로 확보할 수 있을 것이다.

- 재개발 대상 : 3,000톤이하 41개소
 - 소요비용 : 123천만원=41개소×3천만원(집수정 개발비의 1/20)
 - 용수추가확보 : 4.1만톤/일 = 41개소 × 1천톤/일
 \approx 1,500만톤/년(백운저수지 저류량의 약11배)
- ※ 방사상 집수정 설치지역의 부지특성(Site specific)에 대한 추가 연구필요

5.1.2 공주 지하2집수정 서징 및 고압세척

지하2집수정의 서징전과 서징후 및 고압세척후의 시간경과에 따른 수위강하는 <그림 5-2>와 같다. 서징 작업 및 고압세척후 펌프설치지점까지 수위강하 시간이 서징전에 비하여 2배 이상 증가한 것을 확인할 수 있다.

또한, 동일한 양수량으로 펌핑 한 80분 이후의 수위강하곡선을 비교하면 고압세척이 서징에 비하여 비양수량이 증가한 것을 확인할 수 있다.

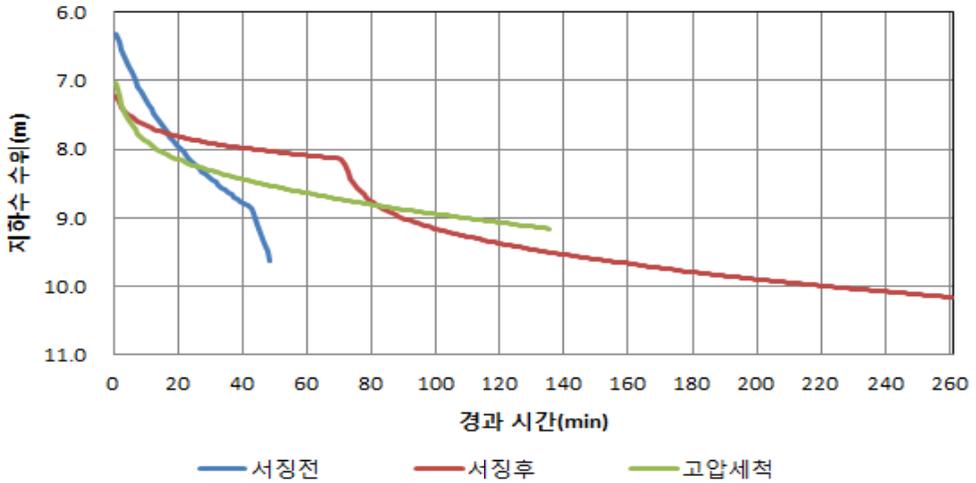
(표 5-3) 공주시사 지하2집수정 서징 전·후 비양수량 비교

구분 (일자)	지하수 수위 (m)		수위 강하량 (m)	양수량 (m ³ /일)	비양수량 (m ³ /일/m)	비고
	양수시 작	양수종 료				
서징전 (11. 06)	6.32	9.63	3.31	3,120	943	
고압세척후 (11. 11)	7.05	9.16	2.11	3,120	1,479	157%

40분 양수시 비양수량 비교

구분	수위강하량 (m/40분)	양수량 (m ³ /40분)	비양수량 (m ³ /40분/m)	비고
서징전	2.48	87	35.08	
고압세척후	1.40	87	62.14	177%

[양수시 수위강하]



<그림 5-2> 공주2집수정 양수시 지하수 수위 변화

서징시에는 청수 및 에어가 수평집수관에 평행한 방향으로 분사되며, 고압 세척은 고압수 회전분사장치를 이용하여 수평집수관에 직각방향으로 고압수가 분사되므로 서징에 비하여 수평집수관 막힘물질 제거 효율이 높은 것으로 판단된다<그림 5-3>.

따라서, 서징 작업 시 청수 및 에어가 방사상 집수정의 수평집수관 벽면에 전달될 수 있도록, 선단 장치를 제작하여 이용한다면 서징효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.



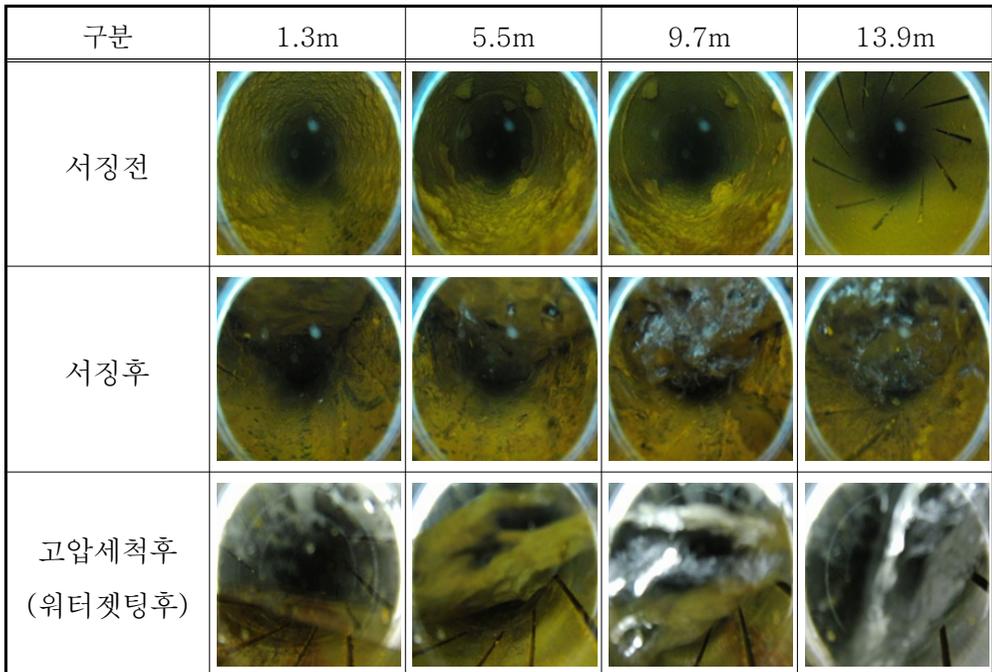
<그림 5-3> 서징 및 고압세척 장비

5.2 TV검층 및 수질분석

<그림 5-4>는 지하2집수정 수평집수관 TV검층 자료로 집수정에 부근인 1.3m, 5.5m 구간이 집수정 안쪽인 13.9m보다 clogging이 심한 것을 육안으로 확인할 수 있다.

이는 물에 용해되어 있던 2가철(Fe^{2+})이 산소와 반응하여 3가철이(Fe^{3+})로 되고 3가철이 물과 반응하여 불용성의 수산화철을 형성하여 침전되기 때문이며 이러한 반응은 망간에서도 일어난다.

상주집수정과 공주집수정 수질검사결과 clogging이 심했던 공주집수정에서는 철과 망간이 생활용수 기준 이상으로 검출되었으나, 수평집수관의 clogging이 거의 없었던 상주집수정에서는 철과 망간이 불검출 또는 미량으로 검출되었다.



<그림 5-4> 공주지사 지하2집수정 수평집수관 TV검층

(표 5-4) 방사상 집수정 서징 전·후 지하수 수질검사 결과

[검사기관 : 위엔라이프(주), 우성생명과학원(주)]

검 사 항 목	검 사 기 준	상주 교촌		상주 지산1		상주 양범2	
		서징전	서징후	서징전	서징후	서징전	서징후
일반세균	100CFU/ml	600	33	97	28	2,500	59
총대장균군	불검출/100ml	검출	불검출	불검출	불검출	검출	불검출
분원성대장균/대장균	불검출/100ml	검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
암모니아성질소(NH ₃ -N)	0.5mg/ℓ 이하	0.01	불검출	0.04	불검출	불검출	불검출
과망간산칼륨소비량 (Consumption of KMnO ₄)	10mg/ℓ 이하	0.6	0.9	1.3	0.3	0.3	0.3
색도(Color)	5도이하	1	1	1.0	불검출	불검출	불검출
철(Fe)	0.3mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
망간(Mn)	0.3mg/ℓ 이하	0.07	0.001 ₂	불검출	불검출	불검출	불검출
탁도(Turbidity)	1NTU이하	0.25	0.82	0.28	0.2	0.08	0.07
수소이온농도(pH)	6.-8.5	6.6	6.8	6.6	6.8	6.7	6.6
질산성질소(NO ₃ ⁻ N)	20mg/ℓ 이하	1.6	3.0	1.7	1.8	2.4	2.6
염소이온(Cl)	250mg/ℓ 이하	20	16.5	6	11.6	8.3	8.1
카드뮴(Cd)	0.01mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
비소(As)	0.05mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
시안(CN)	0.01mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
수은(Hg)	0.001mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
유기인	0.0005mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
페놀(Phenol)	0.005mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
납(Pb)	0.05mg/ℓ 이하	불검출	0.002	불검출	불검출	불검출	불검출
6가크롬(Cr+6)	0.05mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
트리클로로에틸렌 (TCE)	0.03mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
테트라클로로에틸렌 (PCE)	0.01mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
1.1.1-트리클로로에탄 (1.1.1-Trichloroethane)	0.3mg/ℓ 이하	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출

(표 5-4) 방사상 집수정 서징 전·후 지하수 수질검사 결과(계속)

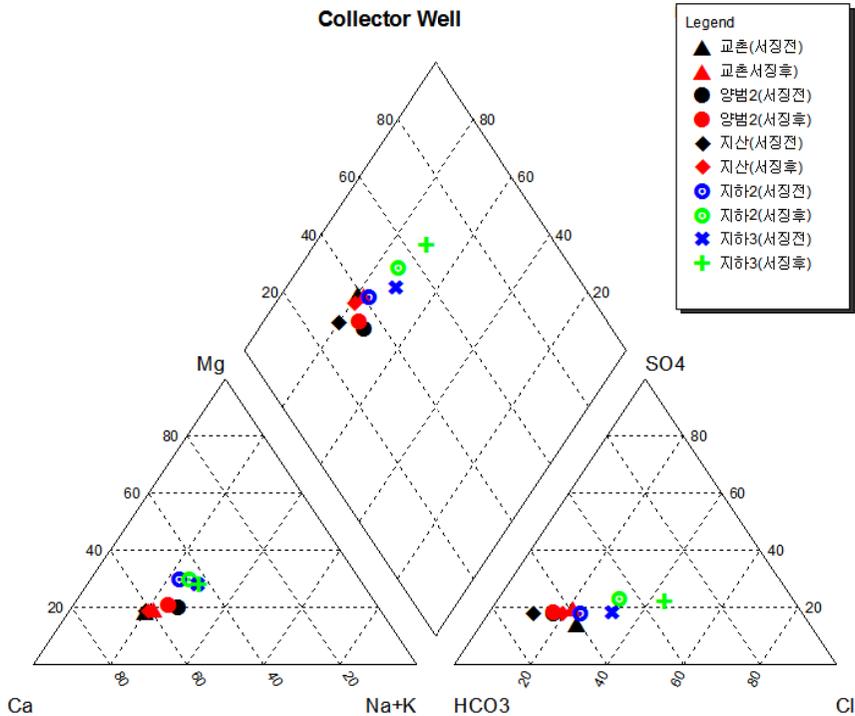
[검사기관 : 위엔라이프(주), (주)우솔환경연구원]

검 사 항 목	검 사 기 준	공주 지하2			공주 지하3		비고
		서징전	서징중	서징후	서징전	서징후	
일반세균	100CFU/ml	72	-	0	15,000	0	생활수 기준
총대장균군	불검출/100ml	검출	-	불검출	불검출	불검출	
분원성대장균/대장균	불검출/100ml	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
암모니아성질소(NH ₃ -N)	0.5mg/ℓ 이하	0.07	-	0.06	0.01	불검출	
과망간산칼륨소비량 (Consumption of KMnO ₄)	10mg/ℓ 이하	0.6	-	6.0	0.9	1.9	
색도(Color)	5도이하	10.0	-	3.0	1.0	1.0	
철(Fe)	0.3mg/ℓ 이하	0.06	13.88	5.72	불검출	0.10	
망간(Mn)	0.3mg/ℓ 이하	0.621	2.556	1.351	0.274	0.405	
탁도(Turbidity)	1NTU이하	6.88	32.2	6.28	0.23	1.17	
수소이온농도(pH)	6..-8.5	6.3	-	6.5	6.7	7.9	
질산성질소(NO ₃ -N)	20mg/ℓ 이하	0.3	-	7.2	0.6	1.6	
염소이온(Cl)	250mg/ℓ 이하	16	-	53.7	20	24.6	
카드뮴(Cd)	0.01mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
비소(As)	0.05mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
시안(CN)	0.01mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
수은(Hg)	0.001mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
유기인	0.0005mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
페놀(Phenol)	0.005mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
납(Pb)	0.05mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
6가크롬(Cr+6)	0.05mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
트리클로로에틸렌(TCE)	0.03mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
테트라클로로에틸렌(PCE)	0.01mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	
1.1.1-트리클로로에탄 (1.1.1-Trichloroethane)	0.3mg/ℓ 이하	불검출	-	불검출	불검출	불검출	

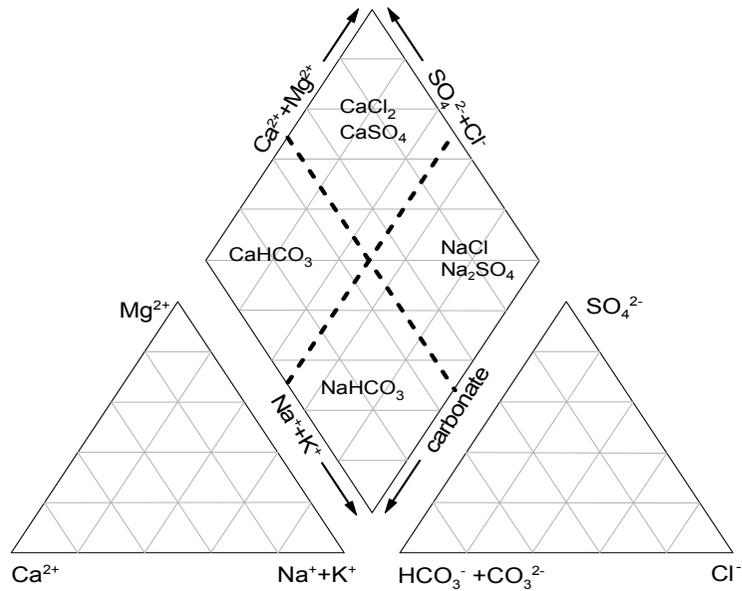
(표 5-5) 방사상 집수정 양·음이온 분석 결과

[검사기관 : 고려대학교 전략광물자원연구센터, 단위 : mg/L]

검 사 항 목	상주 교촌		상주 지산		상주 양범2		공주 지하2		공주 지하3	
	서징전	서징후	서징전	서징후	서징전	서징후	서징전	서징후	서징전	서징후
Na^+	11.84	12.29	7.22	8.54	8.81	8.31	12.01	11.64	14.52	14.47
K^+	4.18	4.38	2.93	3.07	2.49	2.64	1.53	1.45	1.99	1.70
Ca^{2+}	38.16	34.70	24.19	26.76	17.11	18.96	22.85	18.65	20.64	19.72
Mg^{2+}	6.73	6.78	4.32	4.92	3.88	4.28	8.66	7.52	8.07	7.68
Cl^-	24.4	18.64	6.8	12.99	8.44	8.21	19.2	21.19	25.4	34.5
HCO_3^-	100.7	88.45	70.2	73.20	54.90	54.90	79.3	51.6	67.1	45.8
SO_4^{2-}	17.9	22.45	13.6	15.94	11.54	11.81	18.7	20.4	19.2	22.8
NO_3^-	11.0	14.39	11.4	8.33	10.29	11.20	2.2	3.8	4.4	7.5



<그림 5-5> 방사상 집수정 지하수 Piper Diagram

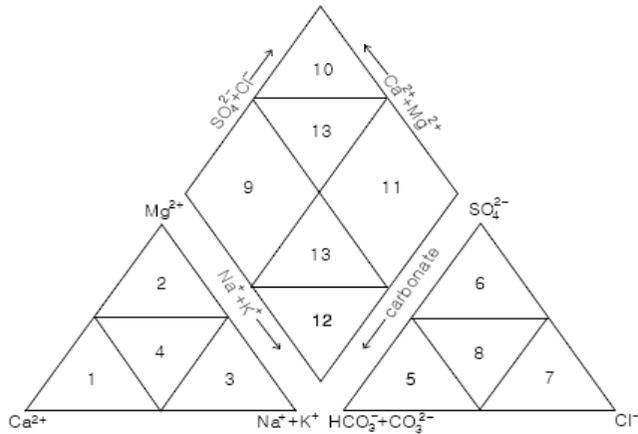


<그림 5-6> Piper Diagram을 이용한 유형분류

파이퍼 다이어그램은 용존 성분 양이온인 Ca-Mg-(Na+K) 간의 상대적 당량비를 백분율로 계산하여 하나의 삼각 다이어그램에 표시하고, 음이온인 (CO₃ + HCO₃)-SO₄-Cl 간의 당량비를 백분율로 계산하여 다른 삼각 다이어그램에 표시한 다음, 이 두 삼각 다이어그램을 나란히 놓아 공통으로 도시되는 다이아몬드 모양의 다이어그램 가운데 놓아 지하수의 수질을 표시하는 그림이다(Piper, 1944).

(표 5-6)방사상 집수정 서징전·후 파이퍼 다이어그램 상의 영역별 수질 유형

공번	서징전	서징후
지하2	Ca-HCO ₃	Ca-Cl ₂
지하3	Ca-(HCO ₃ , Cl)	Ca-Cl ₂
교촌	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
지산	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
양범	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃



<그림 5-7> 파이퍼 다이어그램 상의 영역별 수질 유형

파이퍼 다이어그램에 의한 지하수질 분류는 지하수의 조성이 이 파이퍼 다이어그램상에 어느 영역에 도시되느냐에 따라 하는 것이다. <표 3-36>은 파이퍼 다이어그램 상에 그려진 여러 영역에 대한 지하수 유형을 정리한 것이다. 파이퍼 다이어그램은 달리 힐-파이퍼 다이어그램(Hill Piper Diagram)이라고도 불리며, 여기에 염도 그림을 붙인 변형된 파이퍼 다이어그램도 간혹 이용된다.

(표 5-7) 파이퍼 다이어그램 상의 영역별 수질 유형

영역	지하수 유형	영역	지하수 유형
1	Ca type	2	Mg type
3	Na-K type	4	우세한 양이온 없음
5	CO3 type	6	SO4 type
7		8	우세한 음이온 없음
9	탄산염경도(carbonate hardness) > 50% 알칼리 토금속 및 약산 우세	10	비탄산경도(noncarbonate hardness) > 50%
11	비탄산염기도(noncarbonate alkalinity) > 50% 알칼리 금속 및 강산 우세	12	탄산염기도(carbonate alkalinity) > 50%
13	우세한 양이온-음이온 없음		

제 **6** 장

**방사상 집수정의 경제적인
우물 개발**

제6장 방사상 집수정의 경제적인 우물 개발

6.1 서징방법별 취수량 증가 및 소요 비용 분석

일반적으로 지하수 관정의 재생비용(rehabilitation cost)은 관정의 최초 설치 비용의 10~20% 정도에 해당하나, 주기적인 청소 및 재생에도 불구하고 그 효율성이 유지되는 기간은 점점 줄어드는 경향을 보이고 있다(Houben and Treskatis, 2007). 서징 및 기타 관정 재생방법이 관정의 노후화 및 clogging 현상 자체를 막을 수는 없으며 관정의 효율적 사용시간을 증가시켜 주는 것이다. 결론적으로, 방사상 집수정의 이용 목적 및 이용 필요성에 따라 각기 다른 서징방법들의 비용대 효용의 관계를 고려한 분석을 실시하여 최적의 서징방안을 선택하는 것이 중요하다.

6.1.1 서징방법별 취수량 증가 분석

해외에서의 서징방법에 따른 취수량 증가 사례를 살펴보면, 에어서징과 과잉 양수를 실시하여 수위강하와 취수량이 3배 증가하였다(subsurfacetech, 2008) <그림 6-1>. Sonar jet을 이용하여 회복을 실시한 경우 취수량의 증가가 2배 일어나는 것이 확인되었다(Utility service, 1999) <그림 6-1>.

Pre-Redevelopment			
Discharge Rate (gpm)	Pumping Level (Ft. bg.)	Drawdown (ft.)	Specific Capacity (gpm/ft)
150	55.8	46.5	3.23
Post-Redevelopment			
Discharge Rate (gpm)	Pumping Level (Ft. bg.)	Drawdown (ft.)	Specific Capacity (gpm/ft)
153	19.15	15.15	10.09
250	31.7	27.7	9.02
350	51.45	47.45	7.37

(a) 에어서징 및 과잉 양수

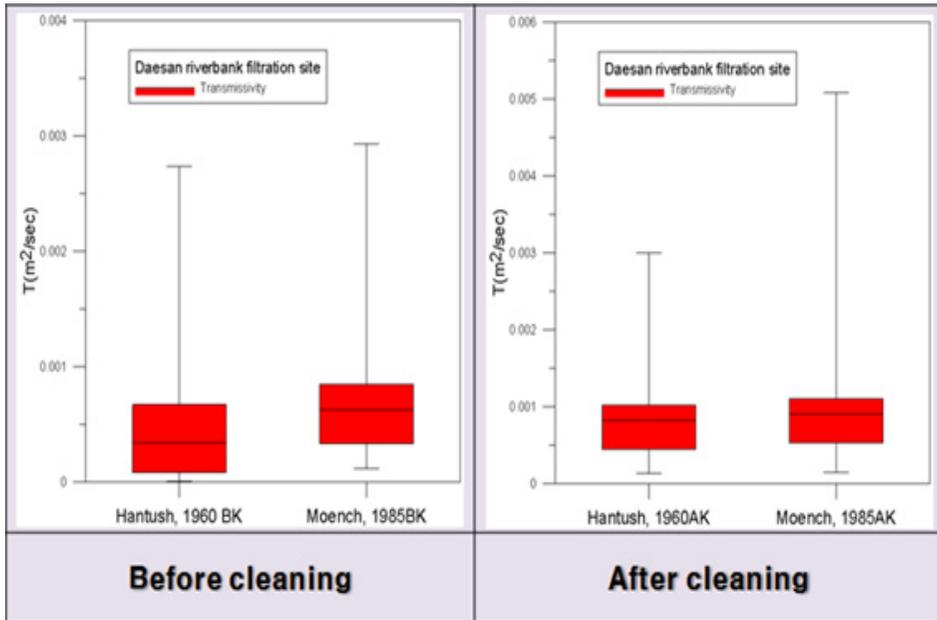
Pre-Treatment	Discharge Rate (gpm)	Specific Capacity (gpm/ft)
	160	6.2
	270	5.7
	310	5.5
Post-Treatment	Discharge Rate (gpm)	Specific Capacity (gpm/ft)
	160	13.1
	275	14.2
	307	13.2
	405	11.7

(b) Sonar jet

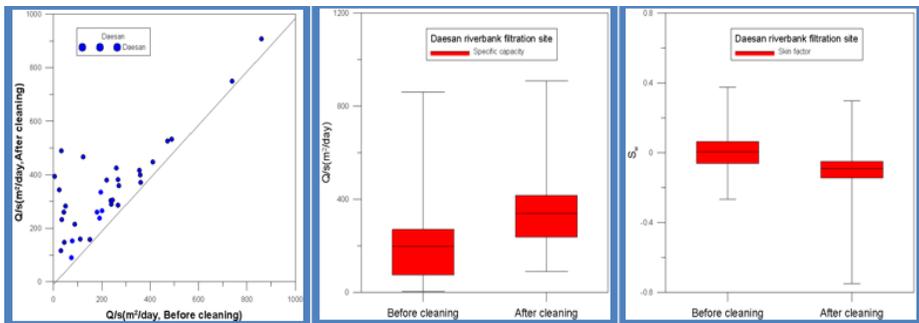
<그림 6-1> 해외 서징방법에 따른 취수량 증가 사례

국내에서의 서징방법에 따른 취수량 증가 사례는 에어서징 및 고압 충격공법을 적용하여 창원대산정수장 1단계 강변여과수 관정을 대상으로 실시하였

고, 브러싱 및 에어서징을 한 관정에서는 양수량 평균 증가율이 14.8%, 고압충격공법을 실시하여 217.5%의 증가사례를 보였다(환경부, 부산대학교 산학협력단, 2012)<그림 6-2>.



(a) 투수량계수



(b) 양수량

(c) 비양수량

(d) 스킨계수

<그림 6-2> 고압가스충격을 이용한 수량변화(환경부, 부산대학교 산학협력단, 2012)

창원2단계 강변여과수 사업 우물 개발과 김해강변여과수 사업 8호정에서는

압축공기폭발(bore-blast) 공법을 사용하여 약 10%의 증가율을 보였다. 이는, 장기 취수에 따른 폐색등에 의하여 취수효율이 저하가 된 상태가 아니기 때문에 증가율이 크지 않은 것으로 나타났다(한국수자원공사, 2013).

국내외의 서징 방법별 취수량 증가를 확인하였다. 취수량 증가의 기대가 가장 높은 회복기술은 고압충격공법을 활용한 방법으로 이를 활용하여 차후에 있을 공막힘 관정의 회복 기술을 실시하는 것이 좋다고 판단되나, 현재 한국농어촌공사의 방사상 집수정의 스크린 재질은 PVC로 회복 기술을 실시할 때, 권선형 스크린을 사용하여, 스크린의 파손을 주의하여야 한다.

5.1.2 서징방법별 소요 비용 분석

서징방법 별 소요되는 비용을 확인하여 경제적인 회복 기술을 적용하여야 한다. Helweg et al. (1983)은 관정의 단위주기(년)당 운용비용에 관한 경험식을 아래와 같이 제시하였다.

$$C = \frac{(Q)(s + SWL + h)(0.746)(T)(K)}{3956 \times e}$$

여기서 C 는 단위주기당 비용(\$), Q 는 단위분당 유출량(L/s×15.85 =gpm), s 는 수위강하 (m), SWL은 지표로부터 정수압 수위면 까지의 거리 (m), h 는 수두(m), T는 양수시간(hr), K 는 단위킬로와트당 전기료(\$/Kwh), e 는 펌프와 모터의 oval efficiency, 0.746 은 마력(horse power)의 Kwh (킬로와트시)로의 변환상수, 3,956 은(gpm×m)의 마력(horse power)으로의 변환상수(Smith and Comeskey, 2009)

위식을 이용하여 공주 집수정의 서징 전, 후 관정의 단위주기당 운용비용을 산정하여 보면, 일 평균 8시간 양수와 농업용 요금 값을 적용하고, 동일한 양의 지하수를 사용하였을 때의 서징 전 소요비용은 41,001원, 서징 후 31,185원으로 산정되었다. 이는 운용비용에 관한 식에서 조건이 동일한 관정에서 회복기술을 사용하여 수위강하가 작게 일어나면 그에 따라 소요비용이 작게 나오는 것을 알 수 있다.

국내 창녕군 길곡면에서 실시한 방사상 집수정 1개소(수평집수관 100m x 8공)(표 6-1)에 대한 에어서징과 고압충격법에 대한 비용을 분석하면, 에어서징의 경우 총 비용 86,258,000원이며, 고압충격법의 경우 128,385,000원으로

에어서징의 비용이 고압충격법 비용의 2/3가량이지만 앞에서 언급한바 회복 기술에 따른 취수량의 증가와 비용을 종합적으로 비교하면 에어서징보다 고압충격법이 더 효율적이다.

(표 6-1) 창녕군 길곡면 방사상 집수정 제원

우물통(수직정)		수평 취수관			
심도	직경	개수	길이	구경	설치심도
45m	6m	8개	80m	300mm	25.5m~ 26.5m

또한, 수평관 내의 유량을 산정하기 위해 흐르는 물과 관벽체와의 마찰에 의해 유발되는 손실은 관로 내에서 발생하는 손실의 대부분을 차지하는데, 이 수두손실을 계산하기 위하여 일반적으로 사용 되는 수식은 다음과 같다.

Hazen-Williams식 $V = 0.35464 CD^{0.63} I^{0.54}$

Manning $V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$

여기에서 C, n은 마찰계수 또는 조도계수라하며, I는 동수경사, D는 관내경, L은 관길이, R은 동수반경으로 통수 단면적을 물이 차있는 변의 길이(윤변)로 나눈 값이며 관수로에서의 동수반경은 D/4이다.

이들 식의 비교를 위하여 손실수두와 유량의 항으로 바꾸어 보면 다음 식과 같다.

Hazen-Williams식 $h_f = 10.666 \frac{L}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.85}$

Manning $h_f = 10.3 \frac{L(nQ)^2}{D^{5.33}}$

Hazen-Williams식은 송배수관로 시스템에서 유체에 대한 마찰손실의 조사분석을 통해 개발된 경험공식이다. 이것은 적당히 매끈한 관(ex 주철관)에는 잘 맞으나 거친 관, 관경이 작은 관 또는 층류에 대해서는 정확성이 떨어진다. 각 변수를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V &= 0.35464 CD^{0.63} I^{0.54} \\
 Q &= 0.27853 CD^{2.63} I^{0.54} \\
 D &= 1.6258 C^{-0.38} Q^{0.38} I^{-0.205} \\
 I &= \frac{h_L}{L} = 10.666 C^{-1.85} D^{-4.87} Q^{1.85}
 \end{aligned}$$

또한, Manning 공식은 잘 알려진 개수로 흐름 공식을 관수로 흐름에 적용한 것이다. 이 공식은 단지 거친 관로의 흐름에 대해서만 사용해야 한다. 유량을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{h_f D^{5.83}}{10.3L}}}{n}$$

그리고 기본적으로 조도에 대한 값들은 일반적인 상업용 관에 대해서 값이 정해져 있다(표 6-3).

Manning식에서 Darcy식과 똑같은 형태로 조정할 수 있다. 결과의 f표현은 이들 식을 확실하게 적용하고자 하는 곳에서의 상황을 이끌어 내기 위하여 Darcy의 값과 비교하여 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Manning} \qquad f = 124.5(nD^{-1/6})^2$$

(표 6-2) 상업용관에 대한 조도 값(한국수자원공사, 2005)

관 재료	C (Hazen-Williams)	n (Manning)
리베트 강(Riveted steel)	110	0.013-0.017
콘크리트	120-140	0.011-0.014
주철(Cast iron)		
- 새로운(new)	130	0.013
- 오래된(old)	100	0.015-0.035
아연(Galvanized iron)	-	0.016
아스팔트 도장 철(Asphalted iron)	-	0.013
용접된 강(Welded steel)	120	0.012
석면시멘트(Asbestos cement)	140	0.011
구리(Copper), 알루미늄관	150	0.010
PVC, 플라스틱	150	0.009

회복기술 뿐 아니라 집수정의 시설을 개선하여 취수량 증대를 확인하기 위하여 방사상 집수정의 수평집수관의 구경 확대를 통한 수량 확보와 그에 대응하는 비용도 확인하였다. 우선 수량을 확인하기 위하여 Hazen-Williams 와 Manning식을 이용하여 관경 65 mm와 150 mm에서의 유량 차이를 확인해보았다. 산정결과, Hazen-Williams식은 1.53배, Manning식의 경우 2.06배의 유량차이를 보였다. 그리고 현재 시공되어지는 관경 65 mm와 150 mm의 수평공 30 m 설치 시 소요되는 비용을 확인한 결과, 3,400만원(m당 116만원)과 6,160만원(m당 205만원)의 비용이 들어 증가되는 유량에 비해 소요되는 비용이 큰 것으로 나타났다.

6.2 우물 효율 저하 판단 및 재개발 시점의 판단

6.2.1 우물 효율 저하 판단

방사상 집수정 수평집수관의 재서징 시점을 판단하기 위해 우선적으로 우물 효율의 저하를 판단해야 한다. 이러한 방법으로 공내 카메라 검증, 양수시

험을 통한 배출량 확인, 피막 시료의 채취 및 분석, 포화 지수의 계산 등으로 판단할 수 있다.

가. 공내 카메라 검층

우물 내부의 시각적인 검사를 통하여 우물 내부의 구조적인 상태와 침전물 양 등을 평가하게 된다. 수중촬영이 가능한 공내 카메라는 1950년대의 흑백 사진기에서부터 발전해 왔다. 최근의 공내 카메라는 우물내의 아래 방향과 측면을 모두 볼 수 있도록 개발되었으며 360° 회전이 가능하다. 영상 촬영을 위해서는 공내에 광원이 존재하여야 하므로, 카메라 안에 광원이 내장되어 있다. 지하수가 혼탁한 경우에는 사진의 질을 떨어뜨리므로 촬영 전후 몇 시간 동안은 우물 사용을 금하는 것이 바람직하다. 그러나, 경우에 따라서는 가벼운 피막 입자들의 발생이 영상도를 떨어뜨리므로 사전에 양수를 하여 피막 입자를 제거한 뒤에 검층을 실시하기도 한다. 공내 카메라 검층 시 공내 부식의 징후, 물리적인 손상 정도, 케이싱의 연결 상태, 우물 바닥의 침전량, 피막의 양과 종류, 피막 물질의 공간적 분포 등과 같은 것을 확인하여야 한다. 카메라 영상은 현장 TV 스크린을 통하여 직접 볼 수 있으며, VHS 테이프나 DVD에 저장하게 된다. 영상 뿐 아니라, 촬영 깊이와 수온 등과 같은 추가적인 정보들도 저장되거나 영상으로 보여준다. 카메라, winch, 전자장치, 스크린, 저장 매체 등으로 구성되는데 일반적으로 조사차량에 세팅되어 이동 설치된다. 최근의 카메라 장비는 최대 길이 1,200m 정도까지 촬영이 가능하다. 그러나, 공내 카메라의 촬영 범위는 우물 내부에 국한되는 것이며, 우물 외부의 상황에 대해서는 영상을 제공하지 않는다. 그러나 우물 내부에서 촬영된 피막의 분포를 토대로 스크린 배면의 상태를 추정할 수 있게 한다. 그러므로 카메라 검사의 결과는 복구 계획에 있어 유용한 도구다. 특히, 우물 외부 및 주변의 상태에 관한 추가적인 정보가 필요하다면 지구물리학적 검층 방법을 사용할 수 있다. 우물 내부가 매우 노후화 되어 있다면 부식, 천공, 손상과 같은 결점들이 안 보일 수도 있다. 따라서, 우물 재개발 이후에도 공내 카메라 검사를 실시한다면 회복 상태에 대한 좋은 판단을 할 수 있다.

나. 단계 양수 시험

단계양수시험은 우물의 수리적인 산출량을 평가하는 가장 보편적 기술로서, 장기간 사용한 우물에서의 산출능력에 변화가 있는지를 판단하게 한다.

최소한 두 단계 이상의 양수량(셋 내지 다섯 단계를 주로 사용)으로 양수가 이루어진다. 각 단계마다 수위가 일정해질 때까지 시험이 이루어져야 한다. 일반적으로 하나의 양수 단계의 지속 시간은 1 시간에서 24 시간 사이이다.

독일의 기준(DVGW W 111)에 따르면 각 양수단계마다 측정 간격은 다음과 같다.

- ◎ 10분까지의 양수 시간: 1분마다
- ◎ 60분까지의 양수 시간: 5분마다
- ◎ 3시간까지의 양수 시간: 10분마다
- ◎ 5시간까지의 양수 시간: 30분마다
- ◎ 5시간 이상의 양수 시간: 60분마다
- ◎ 회복시에는 양수시간의 약 2/3 정도로서 안정화될 때까지 수행

각 단계에서의 수위 강하량(s_n)과 당시의 양수량(Q_n)으로부터 비산출량(Q_s)을 계산할 수 있다.

$$Q_s = \frac{Q_n}{s_n}$$

비산출량(Q_s)과 성능곡선의 관계로부터 우물의 수리적 능력을 평가한다. 성능곡선은 양수량(x축)에 대한 각 양수 단계의 최종 수위저하(y축)를 도시함으로써 얻어진다. 최종 수위저하에 관한 데이터는 일반적으로 1차 함수를 이용해 연결된다.

$$s = BQ$$

여기에서, s 는 단계 n 에서 정류상태의 수위 강하[L], Q 는 단계 n 에서의 양수량[L³/T], B 는 대수층 수두손실 상수[T/L²], BQ 는 대수층 수두 손실 [L]이다.

과다한 양수시 물의 격한 흐름은 상기 선형 방정식의 변화를 가져온다. Jacob은 수위강하는 대수층 수두 손실로 발생한 일차 선형 흐름 성분(first-order laminar flow component)과 우물 수두 손실로 발생한 이차

난류 성분(second-order turbulent component)으로 구성되어 있다고 밝힌 바 있다.

$$s = BQ + CQ^2$$

C 는 우물 수두 손실 상수 $[T^2/L^5]$

CQ^2 은 난류시 우물 손실 $[L]$ 이다.

우물의 산출능력은 비산출량으로 평가되며, 수위저하에 대한 유출량으로 간단히 정의된다. 즉, 단위는 $m^3/h \cdot m$ 혹은 m^3/h 이다. 이 비산출량 자료는 재개발 전후 및 타 우물과의 상대 비교에 사용될 수 있다. 만약에, 우물의 기존 비산출량은 $1m^3/h \cdot m$ 이며 재개발 이후에는 $2m^3/h \cdot m$ 으로 2배 증가하여 100%의 증가를 보였다 하더라도, 최초 우물 굴착시 산출량이 $10m^3/h \cdot m$ 이라면, 재개발 이후에도 단 20%의 비산출량을 얻을 수 있었음을 알게 한다. 이와 같은 경우, 우물의 계속 사용 여부를 판단해야할 필요가 있게 된다.

우물의 성능은 “wire-to-water 비율”을 이용해서도 계산될 수 있다 (Driscoll 1989). 이 값은 수중펌프의 에너지 소모량을 양수량과 압력수두의 함수로 표현된다.

$$WW = \frac{Q \cdot h \cdot 0.65}{3.965 \cdot P_f}$$

여기에서, WW 는 wire to water ratio이며, Q 는 양수량(liter/min), P_f 는 에너지 소모량(kW), h 는 총 압력 수두(m)이다.

총 압력은 우물 내부의 관에서의 모든 압력 손실을 포함한다. 펌프의 유출 에너지 수요와 그 영향요소를 고려하면 위 식은 주어진 압력수두를 극복하기 위한 에너지 수요를 산정하는 데 사용될 수도 있다.

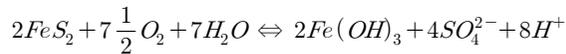
펌프의 압력수두와 양수 비용의 변화 정도는 우물 비산출량의 경우와 유사하게 우물 노후화의 지표로 사용될 수 있다. 같은 양의 물을 양수할 때 수두와 에너지 수요의 증가는 노후화로 인한 영향으로 판단할 수 있는 것이다.

우물과 펌프 노후화의 또 다른 간단한 인지 방법은 펌프모터에서의 온도를 측정하는 것이다. 펌프 주위에 형성된 피막은 흐르는 물의 냉각 효과를 감소시키며 효과적인 보온재로 작용하므로 주변의 온도를 측정하여 노후화를 예상할 수 있다.

다. 피막 시료의 채취 및 분석

우물내에 존재하는 피막의 종류를 파악할 수 있다면 이를 제거하기 위한 방법론을 개발하기 용이하다. 피막의 시료 채취에는 특정한 규정이 없으며, 많은 경우에 시료는 수중펌프와 우물로부터 채취되는데 주변의 gravel pack 내에 존재하는 것과 같은 물질임이 경험적으로 알려져 있다. 일반적으로 펌프에 있는 피막은 자주 벗겨짐으로 인하여 gravel pack에 있는 것보다 나중에 형성된 것으로 이해될 수 있다. 물리적인 재개발 동안에 추가적인 시료 채취가 가능하다.

일부 피막 물질은 pyrites(FeS_2)와 같은 황화물처럼 대기 중 산소와의 접촉에 의해 변형을 받을 수 있는 물질도 포함된다. 이 경우 생성된 물질은 다른 타입의 피막을 가장하며 원래의 것과는 다르게 된다.



즉, 이 과정 중 생산된 산은 탄산칼슘을 용해시키고 결국 석고를 형성시킬 것이다. 그러므로 샘플들은 밀폐 유리나 비닐봉지로 빨리 옮겨진 후 어둡고 차가운 장소에 저장되어야 한다. 피막의 화학적 분석은 다음의 항목들을 포함해야만 한다.: 철, 망간, 칼슘, 마그네슘, 실리콘, 황, 유기탄소, 무기탄소 등. X-ray diffraction (XRD)과 infrared spectroscopy (IR) 등의 분석 기술이 사용된다.

미생물학적 조사를 위한 샘플들은 건조시켜서는 안되며 어두운 곳에서 차갑게 보관되어야 한다. Scanning electron microscope (SEM) 조사에 사용되도록 샘플들은 자연 건조하여 사용한다.

라. 포화 지수의 계산

자연 상태의 지하수의 지구화학적 특성은 피막형성 가능성을 설명해 준다. 철을 제거한 후 병물을 제공하는 경우는 원천적으로 산화침전물이 생기기 쉬운 지하수일 것이며, 석회암 대수층에 위치한 우물의 경우는 탄산염 침전물이 우물 노후화의 주요 원인이 될 것이다. 황화물 피막은 급격한 환원환경에 놓인 지하수에서 발견되고 종종 “썩은 계란” 냄새를 풍긴다. 알루미늄 침

전물은 낮은 pH하에서 형성된 지하수다. 물의 광물에 대한 포화도의 계산은 침전과 용해 작용을 예견하기에 좋은 방법이다.

광물 A, 용해 물질 C와 D, 그리고 그것들의 화학량적 계수 a, c, d로 구성된 용해 반응에 대하여, 다음과 같이 표현할 수 있다:



이 반응에서 우리는 평형 상수 K로 질량 작용의 법칙을 정의할 수 있다.

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a}$$

상수 K는 평형상태에 있는 이온들의 활동을 나타낸다. 정의에 의하면 고체 상에서의 활동도는 1이다. Ion activity product(IAP)는 용액내에서의 실제 이온 활동도를 나타낸다.

$$IAP = [C][D]$$

광물상에 대한 시스템의 포화 상태 Ω 는 간단하게 측정된 이온 밀도(IAP)와 평형 상수의 비다.

$$\Omega = \frac{IAP}{K}$$

계산의 편의를 위하여 포화도 SI를 이용한다.

$$SI = \log(\Omega)$$

SI는 다음과 같이 해석된다.

SI=0 : 평형, 광물은 용해되지도 침전되지도 않음

SI<0 : 불포화, 광물이 용해될 수 있음

SI>0 : 과포화, 광물이 침전됨

SI는 실제 반응 과정이 아니라 반응이 진행될 방향의 표시일 뿐이다. 과포화 용액은 침전 과정이 운동으로 억제될 때 과포화 광물의 침전 없이 계속 안정할 수 있다. 포화 지수 계산에 불확실적 인자가 존재할 수 있으므로

+0.2까지의 값들과 -0.2와 같이 낮은 값들은 실질적으로 평형상태라고 고려된다.

6.2.2 재개발 시점의 판단

지하수 재개발 및 복구의 시점을 결정하는 것은 쉽지 않다. 새로운 우물 개발을 위하여 막대한 예산을 투자하는 것이 바람직한지, 재개발에 투자해야 하는지 바람직한 지에 대한 결론을 내리는 것은 쉽지 않다.

역사적으로 다양한 노후화에 대한 검토 결과, 공내 카메라를 통하여 노후화가 나타나지 않으면서 산출량이 지속적으로 유지되는 25년 이상된 우물들의 특징은 다음과 같다. 비록 지하수내에는 철이 풍부하지만 우물 설비의 완벽 시공으로 깊은 대수층에서 산소로부터 격리되어 있다. 이와 같은 경우 우물에 치명적인 화학적 반응은 나타나지 않게 된다. 이 우물은 재개발의 필요성을 느끼지 못하게 되며, 우물의 노후화는 케이싱의 수명이나 스크린 자재의 수명에 의하여 결정될 것이다. 반면에 지하수가 공기와 쉽게 접촉하고 산화작용이 활발한 경우 시공후 수년내에 재개발하고나 폐쇄해야하는 경우가 많이 존재한다. 이러한 우물의 문제점은 다음과 같은 것들이 있다.

- ◎ 피막을 형성하는 화학 성분들의 고농도화
- ◎ 과포화를 야기하는 각기 다른 지구화학적 구역으로부터의 물의 혼합
- ◎ 높은 pH 값 (산화침전물)
- ◎ 높은 경도 (무기침전물)
- ◎ 우물 내부나 스크린을 통한 산소의 유입 (지나친 수위저하 시)
- ◎ 박테리아의 성장을 촉진시키는 높은 영양분 공급
- ◎ 높은 유속이나 격렬한 흐름
- ◎ 대수층과 gravel pack의 낮은 투과성
- ◎ 균등하지 않은 알갱이 사이즈 분포 등

이와 같은 불리한 조건이 어떻게 어느 정도 대수층 내에서 발생하는지를 파악하는 것이 우물의 노후화를 인지하고 재개발 여부를 판단하는 단초가 된다. 보다 구체적이고 확실한 방법으로는 우물 산출량을 지속적으로 모니터링 함으로써 우물의 변화를 인지하는 것이다. 이를 위해서는 다음과 같은 조건이 요구된다.

- ◎ 건설 직후의 단계양수시험과 우물 비산출량(Q/s)의 측정(기준 산출량 = 100%)
- ◎ 정기적인 짧은 양수시험(일 년에 한 두번), 우물 비산출량의 변화율 파악
- ◎ 시간에 따른 우물 산출량의 추이 도식화 등

우물 산출량의 급격한 변화시에는 공내 카메라 또는 borehole geophysical logging을 통한 자세한 조사를 수행해야 한다. 그러나, 복구에 필요한 산출량의 감소량에 대한 기준을 정하는 것은 어렵다. 독일의 경우에는 원래 산출량으로부터 약 20%의 감소는 일반적인 기술 적용과 예산 추가 투입으로 해결할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나 그 이상의 산출량 감소시에는 물리적, 화학적 복합 방식과 같이 복잡하고 비싼 복구 비용을 필요로 한다. 우물 산출량이 당초 산출량의 50% 미만으로 감소한 이후에 재개발을 결정한 경우에는 종종 불가능한 경우가 발생하기도 한다. 만약 피막현상이 불용성 상태로 재결정화되었다면 몇 퍼센트 이상의 산출량 복구는 실질적으로 불가능하고 우물은 폐쇄시켜야 할 것이다.

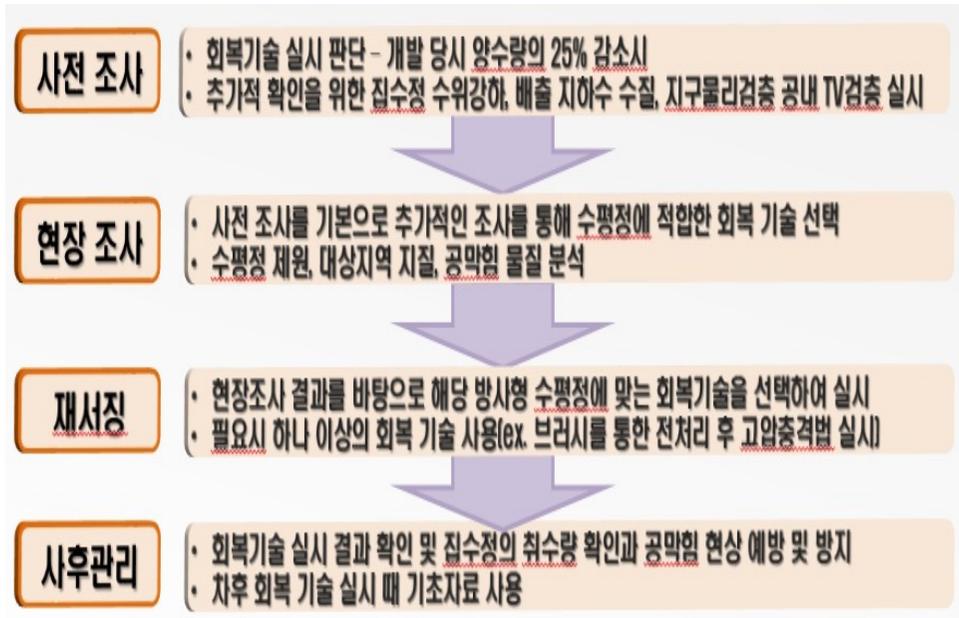
우물의 재시공은 다음과 같은 경우에는 피할 수 없게 된다.

- ◎ 우물의 안전한 작동을 위협하는 케이싱 또는 스크린의 구조적 손상이 발견된 경우
- ◎ 반복되는 복구에 의해서도 우물 산출량이 크게 증가하지 않는 경우

반복적인 우물 재개발을 통하여 산출량을 원래 값의 50% 이상으로 향상시키지 못하면 피막현상에서 결정화가 진행되었다고 추정해야 하며, 이 경우 재개발은 일시적인 수량 증가만을 가져올 것이다.

이상의 방사상 집수정의 회복기술 실시 진행 방향을 살펴 보면 사전 조사, 현장 조사, 회복 기술 실시, 사후관리의 순서로 진행이 되며 사전 조사에서는 집수정의 수위강하 확인, 배출 지하수 수질, 공내 TV검층, 양수를 통한 취수량 감소 확인을 통하여 회복 기술 실시 여부를 판단하며, 현장 조사에서 사전 조사를 기본으로 하여 수평정 제원, 대상지역의 지질, 공막힘 물질 분석등을 통한 수평공에 적합한 회복 기술을 선택한다. 이후, 현장 조사 결과를 바탕으로 해당 방사상 집수정 수평공에 맞는 회복 기술을 실시하는데 필요하다면 하나 이상의 회복 기술을 사용하여야 한다. 마지막으로 사후관리에서 회복 기술 실시 이후 결과 확인 및 집수정의 취수량 확인과 공막힘 현상 예방

과 차후에 있을 회복 기술 실시에 기초자료를 사용하게 된다<그림 6-3>.



<그림 6-3> 수평집수관 취수기능 회복기술 실시 flowchart

제 **7** 장

**개선된 방사상 집수정 설계
방안**

제7장 개선된 방사상 집수정 설계 방안

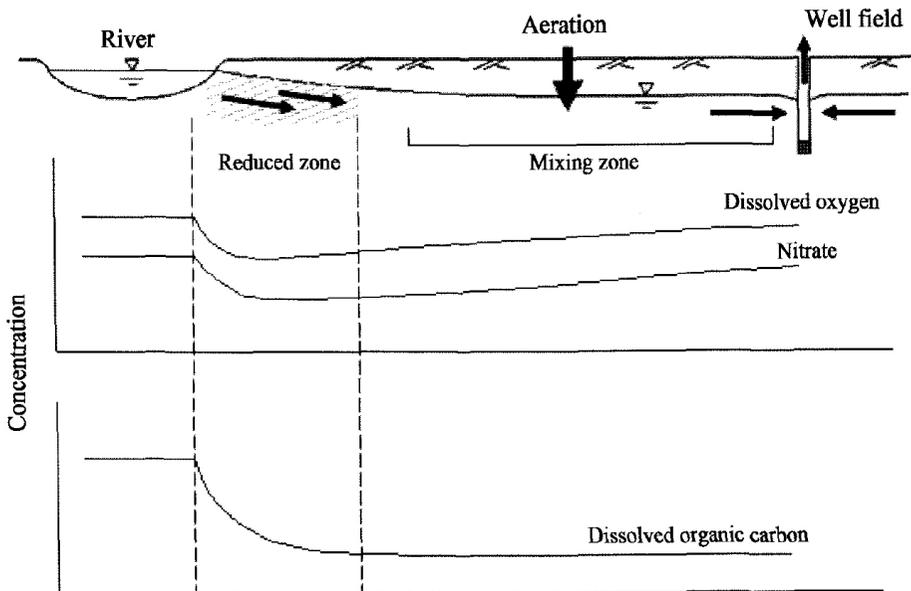
7.1 강변여과와 하상여과의 비교

7.1.1 강변여과와 하상여과

우리나라는 상수원수의 많은 부분을 하천수로부터 얻고 있으며, 이 하천수에서 상수를 얻기 위해서 고도처리공정 또는 간접취수법을 이용하고 있다(창원시, 2003; 김해시, 2005). 일반적으로 간접취수법에서 많이 쓰이는 방법은 RBF(riverbank/bed filtration)이며, 이러한 방법은 하천수와 연결된 대수층에 우물을 설치한 뒤 양수하여 대수층을 통해 하천수가 이동하면서 수질을 증가시킨다. 이러한 방법은 강변여과와 하상여과로 크게 나눌수 있다. 강변여과의 경우 수직정을 하천에서 멀리 떨어진 위치에 설치하여 하천수를 여과하여 양수하는 방법이다. 이 방법은 유럽에서 약 150년 전부터 상수생산 방법으로 많이 사용되어 왔으며, 미국에서도 가끔 사용되다가 90년대 후반 이후 지하수 고갈에 대한 우려로 활발히 건설되고 있다(Schubert, 1997; Hunt, 2002). 하상여과의 경우 하천수 아래의 하상퇴적층에 적당한 깊이에서 수평 집수관을 설치하고 이들을 집수정에 연결하여 이로부터 여과수를 양수하는 방법이다. 이는 New Mexico주의 Albuquerque시 등 미국에서도 일부 사용하고 있으며 우리나라에서도 하천 복류수라는 이름으로 상수생산용으로 널리 이용되어 왔고, 울산광역시 태화강, 대구광역시 신천, 대전광역시 갑천 등에 개량된 형태로 건천화 하천의 유지수량 확보나 하천수질개선에 그 도입이 검토되거나 시행되고 있다. 강변여과나 하상여과는 모두 대수층 구성 물질이 가지는 오염정화기능을 이용하는 방법으로 서로 유사한 점이 많지만 수리학 및 수질학적으로 몇 가지의 차이점도 있으며, 이들 공법의 특성에 대한 정확한 이해를 바탕으로 각 현장의 조건에 맞는 방법 또는 설치형태를 결정하는 것이 중요하다(김승현, 2007).

7.1.2 유럽의 강변여과

유럽의 강변여과는 여러 나라에서 지역에 따라 서로 다른 형태로 운영되고 있다. 대수층과 하천수와 연결되어 있는 하천변에서 일정 거리 이상(약 80m) 이격된 지점에서 수직정으로 양수하여 대수층이 가지는 자연저감효과에 의해 만들어진 여과수를 양수하는 방법이 강변여과이다(Tufenkji, 2002). 대수층의 자연저감효과는 크게 세가지 기작으로 나눌 수 있는데 이는 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 기작이며, 물리적, 화학적 기작의 경우 주로 오염물의 이동 지연이며 생물학적 기작의 경우 미생물 반응을 통한 유기오염물을 영구히 제거하는 방법이다. 이 때, 미생물반응은 하천수가 대수층에 체류하는 시간이 오래되면 하천수에 포함된 오염물은 더 많이 분해될 수 있다. 하천수의 대수층 체류시간에 대한 독일정부 권장치는 50일이며, 대부분의 취수장에서 실제로는 25~35일로 운영한다(Schubert, 1997).



<그림 7-1> 강변여과시 여과거리에 따른 수질지표의 전형적인 변화(Tufenkji et al., 2002)

<그림 7-1>은 강변여과 시 여과거리에 따른 수질의 전형적인 변화를 나타낸 그림이다. 유기오염물의 경우 대수층에 유입되자마자 급속히 분해되기 시작하며, 이동거리가 증가함에 따라 지수함수적인 농도분포 형태로 분해속

도가 감소된다. 용존산소의 농도의 경우 대수층에 유입된 초기는 유기오염물의 활발한 분해와 더불어 급속히 감소하나, 대기 중 존재하는 산소의 유입으로 다시 증가하는 경향을 보인다. 질산성질소의 농도 역시 유기물의 급속한 분해에 의해 발생하는 산소농도 저하에 의해 일시 감소하지만, 유기물 분해에 의한 암모니아성 질소의 발생과 산소 유입에 따른 호기환경의 회복으로 다시 증가한다. 유럽형의 강변여과는 집수정이 강변과 멀리 떨어져 있어도 자연저감효과를 가진 정화수를 필요한 수량에 맞추어 충분히 얻을 수 있다 (Lindner, 1999).

7.1.3 유럽과 우리나라의 환경차이와 RBF

대수층의 자연정화력을 이용하는 강변여과는 기후, 지질, 그리고 사회환경 등의 영향에 크게 영향을 받는데, 강변여과를 특히 많이 사용하는 유럽은 우리나라와 상당한 차이를 보인다. 따라서 유럽형 강변여과의 경우 진화된 RBF의 형태로 이해되어야 한다(김승현, 2007).

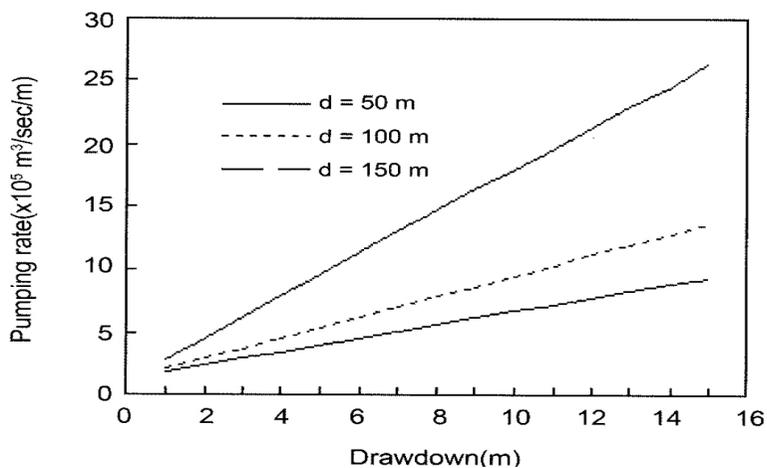
유럽형 강변여과의 대표적인 독일의 경우 북위 약 50° 부근의 비교적 고위도 지역으로 지표 지층은 빙적으로 구성되어 있고 그 두께는 15~30m에 이른다(Schubert, 2002). 비교적 평평한 지형을 이루는데 이는 빙하시대를 거치면서 산은 깎여 평지나 구릉을 형성하였기 때문이다. 이에 반해 우리나라는 북위 약 35° 부근에 위치하며, 기반암 위의 지표 지층은 충적으로 구성되어 있고 얇은 곳에서는 2~3m부터 깊은 곳은 약 30m의 두께를 가지고 있다. 우리나라는 지표면의 경우 산지면적이 국토의 2/3에 달하여 경사가 급하므로 강우의 지면체류시간이 짧고 기반암은 화강암 계통이 많으며, 화강암들은 조적이 치밀하여 산지에서의 지하수 함양에 불리한 특징을 가지고 있다. 그리고, 우리나라는 하천에서 산까지의 거리 즉 분수계까지의 거리도 매우 가까워 자연지하수량이 빈약하다. 또한, 우리나라의 자유면 대수층의 경우 대부분 충적층인 경우가 많아 투수계수는 작고 유기물 함량이 비교적 높은 특징을 가진 세립질 토양이 많다.

기후를 살펴보면 독일의 경우 북서쪽의 해양성기후에서 남동쪽으로 갈수록 대륙성기후의 특성이 짙어진다. 그리고 연평균 강수량이 약 700mm이지만 연중 골고루 분포한다. 우리나라의 경우 대륙동안기후로 연평균 강수량이 1,300mm 가까이 내리지만 장마철과 태풍 등의 짧은 기간에 집중되고 나머지 기간은 갈수기로 이어진다. 또한, 독일의 경우 대부분의 도시들이 해안에

서 100km 이상 멀리 떨어진 내륙에 발달해 있으나 우리나라는 바다에서 멀지 않은 지역에 대부분의 인구가 집중되어 있는 차이도 있다(김승현, 2007).

지질 및 기후의 차이점들은 자연조건에 크게 의존하는 RBF의 적절한 형태에도 필연적으로 영향을 주게 되며, 이중 가장 큰 요소는 투수계수라 할 수 있다. 독일을 포함한 유럽의 경우 지층의 투수계수는 대부분 0.1cm/sec 이상으로 높은 지역은 10cm/sec에 달한다(Laszlo, 2004). 이와 대조적으로 우리나라의 자유면 대수층의 투수계수는 0.001~ 0.1cm/sec 근처의 낮은 값이 대부분이어서 유럽의 약 1/100에 불과하다(환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996).

강변여과 관정에 대한 일반적인 산출유량은 대수층의 두께와 투수계수, 양수정과 수변까지의 거리, 양수정에서의 수위저하, 그리고 자연지하수량 등에 의해 결정된다. 이러한 요인들 중 인위적으로 조절하기 쉬운 것은 양수정의 위치와 수위저하이므로 이러한 두 인자가 양수정의 산출유량에 주는 영향은 <그림 7-2>와 같이 양수정의 수위저하에 따라 산출유량은 거의 선형적으로 증가하지만 양수정의 위치가 수변에서 멀어질수록 산출유량은 급속히 감소한다. 이로부터 유럽에서와 같이 지층의 투수계수가 큰 경우에는 양수정을 수변에서 상당한 거리에 설치해도 충분한 유량을 얻을 수 있지만 우리나라의 경우 투수계수가 작기 때문에 많은 산출유량을 얻기 위해서는 양수정이 하천에 접근해야 함을 알 수 있다(김승현 외, 1998).



<그림 7-2> 수위저하에 따른 산출유량 특성 (김승현 외, 1998)

대수층을 지나면서 자연저감되는 하천수와 자연적인 지하수와 혼합되는 강변여과수는 하천수와 지하수의 함유율의 경우 지역과 운영방법에 따라 달라진다. 독일의 경우 자연지하수의 비율은 보통 약 30% 정도이고 높은 곳은 40%에 이른다(Lindner, 1999). 이러한 비율은 강변여과가 하천수 못지않게 자연지하수를 사용하여 양수정이 하천에서 멀어져도 풍부한 양질의 강변여과수를 얻을 수 있기 때문이다.

유럽에서 자연지하수가 풍부한 이유는 여러 가지가 있는데, 첫 번째로 지형이 완만한 구릉과 평원이 주를 이루어 기울기가 완만하여 강수가 지면체류 시간이 길어져 토양침투에 유리하기 때문이고, 두 번째로 강에서 분수계까지의 거리가 멀고 지표층의 투수계수가 매우 높아 강우에 의해 함유되는 지하수량이 많기 때문이며, 마지막으로 강우량이 많지는 않지만 연중 골고루 내려 지하로 침투되는 비율이 높기 때문이다. 이러한 이유로 유럽의 경우 자연지하수가 풍부하며, 인구증가와 산업의 발달로 인한 증가된 물 수요를 감당하기 위해 일부 강변여과수를 이용하지만 여전히 지하수 사용량이 강변여과수에 비해 많아서 전체 상수 중 지하수가 차지하는 비중은 64%이고 강변여과수는 16%이다(김승현, 2007).

이와 반대로 우리나라의 경우 지하수 함양에 불리한 자연조건으로 자연지하수량이 많지 않고, <그림 7-2>에서 알 수 있듯이 양수정이 하천에서 멀어질수록 여과된 하천수의 양수정 유입량도 감소한다. 따라서 우리나라의 RBF는 유럽의 강변여과와 같은 자연지하수에 크게 의존하지 않는 하천유입수의 비율을 늘려 유량을 확보하며, 이러한 이유로 양수정을 하천에 근접시켜 여과하는 방식이 적당할 것이다.

유럽의 강변여과의 경우 하천수가 대수층에 유입되어 상당한 거리를 통과하여 양수정에 도달하기까지 여러 가지 반응이 발생한다. 이러한 반응 중 미생물에 의한 생분해 반응의 경우 여과수의 수질에 장기적으로 결정적인 역할을 한다. 유기오염물인 전자공여체가 포함된 하천수는 대수층에 유입되어 농도가 급격히 감소하다 대수층을 따라 이동하면서 점차 완만히 감소하여 일정거리 이후에는 거의 감소하지 않는 특징을 보인다. 그리고 전자수용체인 산소의 경우 전자공여체의 농도변화에 대응하여 감소하다가 일정거리 이후에는 다시 증가하여 대수층을 산화환경으로 유지한다. 대수층이 산화환경으로 유지되는 경우 미생물에 의한 생분해가 촉진되어 여과수의 수질이 매우 양호하게 된다(Domenico and Schwartz, 1990).

유럽 강변여과의 매우 중요한 특징인 산화환경으로 유지되는 대수층의 원인으로 강수형태, 지층조건, 지하수량 등이 복합적으로 작용하고 있다. 유럽의 지형과 기후는 앞서 확인한 바와 같이 풍부한 지하수량을 만들며 지하수위의 경우 지표 하 2~3m에 있을 정도로 높다고 한다. 지표면에서 지하수면까지의 거리가 짧고 지층의 투과율이 높아 대기 중의 산소가 대수층까지 침투하기 쉽다. 또한, 대기 중 산소가 지하로 침투하기 쉬운 발농사 위주의 경작형태도 포함한다. 우리나라보다 상대적으로 적은 양이지만 연중 골고루 내리는 강우도 높은 농도의 산소를 포함하고 있어서 이의 지하침투에 의해 많은 양의 산소를 대수층에 공급해 주고 있다. 또한, 강우가 시작할 때 강우의 토양침투에 의해 토양가스를 대기 중으로 배출하고 강우가 그치고 토양 중 잉여수의 배수가 완료될 때 토양 속으로 대기를 다시 흡입하는 토양호흡작용이 발생하므로(김재원 외, 2003), 유럽의 강수형태는 많은 양의 산소를 대수층에 공급하는 특징이 있어 유럽형의 강변여과에 유리하게 작용한다.

이와 반대로 우리나라의 경우 지하수위가 지표 하 4~5m이상으로 유럽보다 상대적으로 깊으며(예, 낙동강 중류), 지층은 투수성이 낮으며, 강우가 짧은 기간에 집중되어 대기로부터 많은 양의 산소가 지층으로 공급되기를 기대하기 어렵다. 그리고, 평지의 경작형태는 주로 논농사이고 논 바닥에는 환원층이 형성되어(Miller and Donahue, 1990) 논 농사철에는 대기 중의 산소가 지하수에 도달할 수 없다. 이러한 요소들은 우리나라에서 강변여과를 시도할 경우 대수층을 산화상태로 유지하기 어려움을 나타낸다.

우리나라는 충적토로 구성된 강변대수층으로 이러한 충적토는 세립질이 많아 그 비표면적이 크고 유기물함량도 비교적 높은 특징이 있다(김승현 외, 1998). 이러한 충적토는 토양으로부터 유기물의 용출이 쉽게 발생되며, 하천수에 포함된 유기오염물 이외에도 대수층에 전자공여체가 공급됨을 의미한다. 그러나 앞서 언급한대로 대기로부터 산소공급이 충분하지 않기 때문에 산소가 고갈된 이후에는 미생물반응에 필요한 전자수용체로 질산성질소가 사용되고 이후 망간, 철 등이 차례로 사용된다. 보통의 우리나라 조건에서는 하천수가 대수층에 5일 이상 체류하는 경우 하천수에 포함되어 유입된 산소와 질산성질소가 완전히 소모되어 망간과 철이 용출된다고 하였다. 이와 같이 유럽과는 대조적으로 우리나라에서는 양수정의 위치가 하천에서 멀어질 경우 강변여과수에 망간과 철이 포함되어 강변여과수질이 악화될 가능성이 커질 수 있다. 이들 오염물의 농도가 높을 경우에는 후처리가 필요하므로 RBF의

설비에 필요한 많은 비용에 대한 정당성을 상실할 것이다(김승현, 2007).

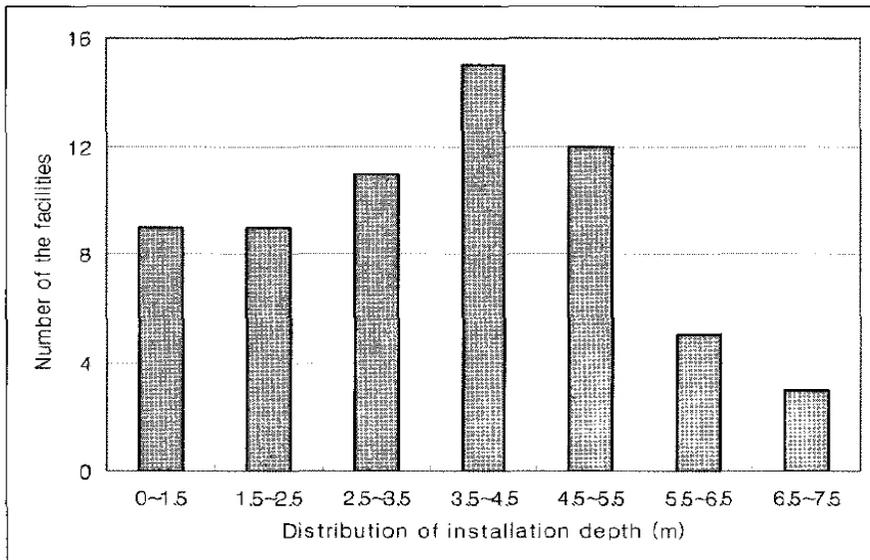
우리나라의 자유면 대수층은 세립질의 충적토로 구성되어 있어서 그 투수 계수가 유럽에 비해 약 1/100에 불과하다. 수리전도도 k (darcy)와 평균입경 d (cm)의 관계식은 $k = Cd^2$ 로 사용할 수 있으며, 여기서 C 는 상수이다. 따라서 우리나라 대수층의 평균입경은 유럽보다 약 1/10 작은 편이라 볼 수 있다. 그리고, 강변여과와 하상여과의 오염물 제거는 주로 미생물반응이며 물리적인 포획과 화학적인 흡착 등도 오염물의 제거에 기여한다. 토양미생물은 주로 토양표면에 부착서식하면서 생물막을 형성하므로 생물막이 충분히 얇은 경우 미생물 반응의 활성도는 대략 대수층 토양의 비표면적에 비례한다고 볼 수 있다. 토양이 완전한 구형일 때 비표면적 S (1/cm)는 $s = \frac{6}{d}$ 이므로 우리나라 대수층의 비표면적은 유럽의 약 10배에 이르며, 따라서 미생물반응에 의한 오염제거능력도 유럽의 약 10배에 이른다고 볼 수 있다. 이상의 단순계산에 의하면 우리나라의 RBF에서는 강과 양수정 사이의 거리가 유럽의 1/10만 되어도 유럽의 RBF에서 얻는 오염정화도를 얻을 수 있음을 의미한다. 이 계산은 여과수의 대수층 체류시간, 토양중의 단회로 형성 등 비표면적 이외의 요소들의 영향은 모두 무시한 것이고, 또한 <그림 5-1>에서 알 수 있듯이 유럽의 경우 강에서 양수정에 이르기까지 모든 지점에서 활발한 오염 제거활동이 발생하는 것이 아니어서 실제로 우리나라의 RBF 설계에 이 계산치를 직접 적용하기는 어렵지만, 우리나라의 경우 RBF의 소요 여과거리가 유럽에서보다 크게 작아도 됨을 시사한다(김승현, 2007).

7.1.4 우리나라의 복류수

하천 복류수 취수설비는 하상여과의 원시적인 형태로 지방상수도의 많은 부분을 담당하고 있고, 이미 오랜 전부터 우리나라에서 사용되어 왔다. 경상북도와 강원도의 경우 상수원의 50% 이상, 그리고 충청북도의 경우 상수원의 80% 이상을 담당하는 등 복류수는 현재에도 상수원의 많은 부분을 담당하고 있다(환경부, 2006). 복류수가 우리나라에 처음 도입된 것은 1910년대이다. 초기 복류수는 하천에 대형우물(pit well)만을 설치하여 작은 용량으로 사용하다가 60년대 초반 들어 상수의 수요 증가와 집수매거 제작기술의 발달로 집수매거가 연결된 대형우물로 변형되어 사용되었고 이후 현재와 같은 형태로 진화하였다(대구광역시, 2006).

복류수 취수설비는 직경 0.6~1.3m의 콘크리트 유공관을 수십~수백m 길

이로 설치하여 집수정에 연결한 후 유공관에 스며드는 여과된 하천수를 집수정으로 모아서 양수한다. 경북지역 20개 지자체의 64개 취수장의 자료를 조사한 결과 콘크리트 유공관의 매설깊이는 2~7m이고, 그 깊이분포는 <그림 7-3>에 나타내었으며(경상북도, 2007), 상수도시설기준인 5m와는 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 복류수의 오염제거율은 보통 하천표류수의 수질이 나쁠 경우에 극대화되며, 각 항목별 최대 제거율은 BOD 75%, NH₄-N 80%, 총인 90%, 그리고 부유물질은 95%에 이르지만, 보통의 경우에는 각 오염물질의 제거율이 이보다 상당히 낮은 상태에서 운영되고 있다. 그러나 보통 하천 표류수의 수질이 양호할 때 오염제거율이 낮으므로 복류수의 수질에는 문제가 없다고 하며, 유공관의 매설깊이에 따른 오염제거율을 분석한 결과 현재의 복류수 설비방법인 상수도시설기준을 적용하여도 매설깊이가 약 6m이면 대부분의 우리나라 하천조건에서는 생산되는 복류수의 수질이 양호하다(김승현, 2007).



<그림 7-3> 경북지역 집수매거 매설깊이 현황(경상북도, 2007)

기존의 하천복류수 취수설비는 수리학적으로 산출효율이 매우 낮은 우물이라 할 수 있다. 대수층과 집수관 사이의 접촉면적은 우물의 산출효율을 지배하는 중요한 인자이며, 이는 집수관의 개공율에 의해 결정된다. 사용 시 개공

율이 25% 이하에서는 우물의 산출효율이 감소하며, 15% 이하에서는 효율이 크게 감소하므로 그 사용에 주의해야 한다. 하지만 상수도시설기준에 의하면 콘크리트 집수매거의 개공율은 1% 미만으로 나타나 산출효율이 매우 낮은 우물로 파악된다. 우리나라의 경우 산이 많고 복류수 취수를 위한 입지조건이 좋은 지역이 많지 않아 좁은 지역에서 많은 양의 여과수 또는 복류수를 생산하는 것이 유리하므로 고효율의 수평집수관을 사용하는 것이 바람직하다 할 것이다.

하천복류수 취수설비인 콘크리트 유공관을 이용하는 경우 수질학적으로도 효율이 매우 낮다고 할 수 있다. 상수도시설기준에 의하면 집수매거의 집수구멍은 직경 1~2cm이고 집수매거의 이음은 수구-삽구식이어서 특별한 이음장치가 없으며, 집수매거에 모래의 유입을 방지하기 위하여 자갈, 잔자갈, 굵은 모래를 각각 50cm 두께로 채운 후 되메우기를 한다. 그러나 자갈~굵은 모래는 오염물에 대한 여과기능이 매우 열등하여 집수매거의 유효여과거리를 크게 감소시키는 단점이 있고, 수구-삽구식의 집수매거 이음매는 단회로를 형성하여 평균유효여과거리를 더욱 크게 감소시키는 단점이 있다. 4m의 매설깊이<그림 7-3>에서 여과효율이 저조한 굵은 입자층 1.5m를 제외하면 유효여과거리는 2.5m에 불과하고 이음매에서의 단회로를 고려하면 평균유효여과거리는 2m에도 미치지 못하는 낮은 여과능력을 가지는 우물이 된다. 이와 같이 복류수의 취수설비가 낮은 여과능력을 가짐에도 불구하고 오염제거에 상당한 효능을 발휘하고 있으며, 그 단점을 보완하여 평균유효여과거리를 2배 또는 4m 이상으로 증가시킬 경우 그 오염제거능력이 크게 향상될 수 있음을 확인할 수 있다(경상북도, 2007).

7.1.5 국내에 적합한 하상여과

우리나라와 유럽의 RBF에 대한 여러 조건을 비교해 본 결과 우리나라의 RBF의 경우 유럽에 비해 여과거리가 짧은 것이 유리하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 국내 복류수 취수설비에 대한 분석에서 평균유효 여과거리 4m 정도만 확보해도 여과수의 충분한 수질 향상이 이루어지는 것을 확인 하였다. 그리고, 우리나라의 조건에서 대수층 토양에 하천수를 통과시킨 실험과 이를 수학적 모델을 이용하여 해석한 결과가 보고된 바 있으며(성치돈 외, 2003), 일반적인 양수유량에서 대수층을 약 4m 통과하게 되면 유기오염물의 대부분이 제거된다. 우리나라의 조건에 맞는 하상여과의 칼럼실험을 통하

여 유기오염물과 질소의 동시제거에 관한 연구가 보고된 바 있는데(안규홍 외, 2005), 여기서 생분해 가능한 유기오염물의 경우 칼럼통과를 약 1m 정도 진행하면 대부분 제거되었고 유기오염물의 제거에 따라 용존산소와 질산성산소가 소모됨도 확인하였다. 이러한 결과를 종합하면 효율적인 우리나라의 RBF 여과거리는 4~5m 정도임을 알 수 있다. 이와 같이 소요여과거리가 짧은 경우 RBF에서 집수정은 수직정 사용이 적합하지 않으므로 하상의 적당한 깊이에 수평으로 집수관을 설치하여야 한다. 수직정의 경우 하천에서 양수정으로 직선으로 이동하는 유선의 경로 이외에도 먼 거리를 통해서 접근하는 경로가 있으며 이때 여과수가 대수층에 오래 체류하여 발생하는 부작용이 예상되기 때문이다.

하상여과에 사용되는 수평집수관의 산출율은 크게 3가지 요소에 의해 결정되며, 이들은 대수층의 투수능, 대수층과 집수관 사이의 접촉면, 그리고 수평집수관의 축방향 통수능 등으로 결정된다(Mohammed and Rushton, 2006). 수평집수관 설계 시 산출유량은 이들 중 가장 작은 용량에 의해 크게 영향을 받으므로 이들의 균형을 고려하여야 한다. 대수층의 투수능은 대수층의 두께, 투수계수, 하천으로부터의 거리 등에 따라 달라지고 이러한 특성 중 하상여과의 경우, 투수계수에 의한 영향이 매우 크다. 대수층과 집수관 사이의 접촉면은 집수관의 개공율과 연관되어 있으며, 여과수가 집수관의 개공눈(slot)을 통과하는 유속을 결정하는데, 집수관 통과 시 발생하는 저항을 무시될 수 있는 조건에는 개공율이 25% 이상이거나 개공눈 통과유속이 30.48 cm/min 이하가 있다. 이러한 저항을 없애기 위한 높은 개공율 또는 낮은 통과유속을 얻기 위해서는 기존의 복류수 취수에 사용하던 콘크리트 유공관으로는 구조적 안정이 떨어지기 때문에 개공율 증가가 어려우며 대수층의 투수능력보다 낮은 산출유량을 얻게 되므로 설계 시 고효율의 집수관을 사용하여야 한다. 유럽의 강변여과에서는 수평집수관의 길이를 길게 하지 않는데 이는 수평집수관의 축방향 통수능(직경)이 대수층의 투수능력에 비해 작을 경우에는 집수관의 축방향 흐름에서 발생하는 저항 때문에 집수정에서 먼 부분의 집수관에서는 여과수가 적게 유입되어 우물의 효율이 떨어지기 때문이다.

위에서 언급한 수평집수관의 유량산출을 결정하는 인자들에 대한 조사에 의해 우리나라의 하상여과에 적합한 집수관 형태를 예상할 수 있다. 우리나라

라의 지층의 투수계수는 유럽에 비해 상대적으로 높지 않으므로 같은 직경의 수평집수관을 유럽에서보다 상당히 길게 설치해도 집수관 전체를 통하여 여과수가 비교적 균등하게 유입된다. 미국의 경우 투수계수가 우리나라와 유럽의 중간 정도로 집수관 전체에 골고루 여과수가 유입한다는 가정(Laszlo, 2004) 하에 유도된 Hantush(Hantush, 1964)의 공식을 사용하여 수평집수관을 설계해 왔다. 위의 미국의 사례를 비추어 보면 우리나라와 같은 대수층의 투수계수가 낮은 경우 직경이 충분하다면 다소 긴 수평집수관을 사용해도 여과수가 집수관 전체에 걸쳐 골고루 유입할 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 대수층과 집수관 사이의 접촉면을 확보하기 위해서는 고효율 집수관을 사용해야 하며, 상업용 집수관은 개공율이 보통 25% 이상이고 그 직경은 10~30cm 정도이다.

유럽과 미국의 지표층은 모래질이어서 수평집수관 설치 시 유압식 추진법을 주로 사용하지만 우리나라의 경우 전석 등의 암석이 포함된 지표층이 많아 유압식 보다는 회전식 추진법이 많이 사용되고 있다. 회전식 추진법은 시공기간이 짧은 장점도 있지만 수평집수관의 최대 직경이 20cm 정도로 유압식보다 더 작은 단점이 있다. 수평집수관의 직경은 지질조건과 시공방법에 의해 제한되기 때문에 집수관의 축방향 통수능력에 따라 제한되며, 집수관 끝 부분에서의 낮은 여과수 유입율을 방지하기 위해서는 수평집수관의 길이도 더불어서 제한되어야 한다. 수평집수관의 적정 길이는 대수층의 투수계수와 설계유량, 집수관의 직경 및 개공율, 하천수의 수질과 여과수의 목표수질 등에 따라 달라지게 되는데, 이때 집수관의 직경이 작아지면 수평집수관의 길이는 짧아져야 한다. 복류수의 경우 직경이 1m에 달하는 큰 유공관이 사용되는데 수평집수관의 길이는 수백m 이상 사용할 수 있지만 직경이 20cm 정도로 제한되는 경우 적정 최대 길이는 약 60m에 불과하다(경산시, 2006). 위와 같은 수평집수관 설계 시 고려할 원리와 콘크리트 유공관을 이용한 기존의 복류수 취수설비의 문제점을 고려하여 우리나라에 적합한 하상여과 형태는 원통형 집수정에 여러 개의 수평집수관을 1단 또는 여러 단으로 부채살 형태로 연결한 방사상 집수정(radial collector well)이나 평행한 여러 개의 수평집수관을 도수관로로 연결한 E자 형태의 매거형 수평정(infiltration gallery)이 적당하다. E자 형태의 매거형 수평정 사용시 평행한 수평집수관을 연결하는 도수관은 그 직경이 충분하여 축방향 흐름에 대한 저항을 최소로 해야 한다(김승현, 2007).

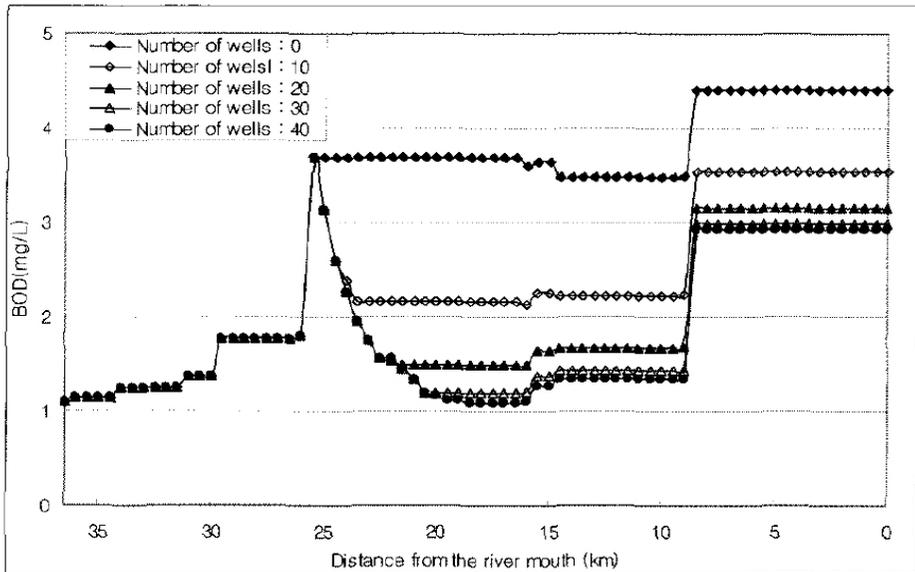
방사상 집수정의 경우 수평집수관이 양수정 부근에 집중되어 있으며, 수평 집수관에서의 축방향 흐름에 의한 수두손실도 있기 때문에 양수정에서의 수위저하가 양수정의 먼 곳까지 그대로 전달되지 않아서 집수정으로부터 먼 곳에 비해 하상의 단위면적당 여과수 유입율이 높다. 여과수 유입율이 높으면 여과수의 대수층 체류시간이 짧아지므로 하천수에 포함된 오염물이 충분히 제거되지 않아 여과수의 수질이 개선되지 않을 수 있다. 방사상 집수정의 여과두개의 경우 투수계수와 여과수의 대수층 체류시간에 따라 차이는 있지만 약 4m 이상 충분히 확보될 수 있는 경우에 적당할 것으로 판단된다. 이보다 작은 여과두개를 가지는 경우에는 여과수의 집중유입을 방지할 수 있는 E자형의 매거형 수평정이 적당하다 할 것이다.

7.1.6 하상여과의 적용범위

짧은 여과거리를 이용하는 하상여과의 경우 하천수가 20~30시간 정도 대수층에 체류하여 강변여과보다 비교적 체류시간이 짧다. 이러한 짧은 체류시간으로 인해 충격부하에 대한 저항능력이 작아져 수질이 강변여과만큼 안정적이라 할 수는 없다. 하지만 다량의 오염물질에 대한 제거능력은 높고 강변여과와 달리 산출유량이 높으며 망간과 철이 여과수에 함유되지 않는 장점이 있으며, 표류수에 비해서는 수질의 안정성도 크므로 이를 상수원으로 사용할 경우 상당한 이점이 있다. 또한, 여과수를 상수원수로 사용하지 않고 건천화 하천의 유지용수로 활용할 수도 있다(성치돈 외, 2003).

오염된 하천에서도 하상여과를 이용하여 정화를 시킬 수 있다. 우리나라 하천은 유럽에 비해 짧은 홍수기를 제외하면 유량이 많지 않아서 하천수의 직접처리 가능성이 매우 크기 때문이다. 일반적으로 국내 대하천의 지천은 평균유량이 보통 $10\text{m}^3/\text{sec}$ 이하로 많지 않고 오염도도 높지 않아 적절한 공법을 적용할 경우 수질관리가 어렵지 않을 것으로 예상되며, 지천과 대하천 유입 지점에 하상여과 설비를 설치하여 운용하면 대하천에 유입되는 지천의 수질이 개선되어 대하천의 수질을 상승시키는 효과를 볼 수 있다. 우리나라의 하천 조건에 맞는 하상여과 관정은 보통 $10,000\sim 15,000\text{ m}^3/\text{day}$ 의 용량으로 건설 및 운영이 가능하며, BOD의 하천수질이 5 mg/L 일 때 여과수는 1mg/L 이하의 양호한 수질을 얻을 수 있다. 양수율 $10,000\text{ m}^3/\text{day}$ 로 BOD 4 mg/L 를 제거하는 경우 여과정 1공에서 40 kg/day 의 오염제거율을 얻을 수 있으며, 이는 매우 우수한 오염삭감 능력으로 특히 비점오염

삭감능력이라고 할 수 있다. 그리고 양수율을 낮추어 여과수의 대수층 체류 시간을 증가시킬 경우 대수층의 토양입자에서 용출된 유기물을 이용하여 탈질효과를 유도할 수 있으므로 유기오염물과 질소를 동시에 제거할 수도 있어 더욱 효과적인 하천수질 개선방안이 될 수 있다(김승현, 정장식, 1999).



<그림 7-4> 형산강 하천수질개선 예측도(경상북도, 2007)

다수의 하상여과 관정을 일정한 간격을 유지하여 오염도가 높고 유량이 낮은 하천에 설치할 경우 효과적인 하천수질 개선을 확인할 수 있으며, <그림 7-4>가 그 예이다. <그림 7-4>는 경주에서 포항으로 흐르는 형산강의 경주구간에 하상여과정을 다수 운영하는 경우 하천수질이 개선되는 정도를 예측하여 나타낸 것이다(경상북도, 2007).

형산강 유역의 이 구간은 하상의 층적층 두께가 충분히 두꺼워 하상여과 관정의 설치가 가능한 것으로 판단된다. 하천 상류인 경주지역에서 오염된 지천들의 유입으로 유량과 오염도가 점차 증가하다가 하구로부터 25km 지점인 경주하수종말처리장에서 방류수가 유입되어 유량이 크게 증가하여 148,000 m³/day에 달하고 오염도는 3.7mg-BOD/L로 증가된다. 이 지점으로부터 하류방향으로 용량 10,000 m³/day의 하상여과 관정을 10, 20, 30, 그리고 40공 운영할 경우 형산강의 수질이 개선되는 정도가 <그림

7-4>에 계산되어 있다. 이 계산에서 여과된 하천수의 수질은 1mg-BOD/L로 가정하였으며, 계산은 QUAL2E의 프로그램을 이용하였으며, 하천 표류수의 자정작용은 무시하였다. <그림 5-4>에서 하상여과를 도입하지 않은 경우에는 하천의 오염도가 3.7mg-BOD/L로 그대로 있지만 여과정을 10, 20, 30, 그리고 40공 운영할 때는 하천수의 오염도가 2.2, 1.5, 1.2, 그리고 1.1mg-BOD/L로 개선됨을 알 수 있다. 이 때 하천수질은 하상여과 관정의 운영공수에 비례하여 개선되지 않는 것을 확인 하였다. 이는 여과정을 적정 관정을 설치하는 경우에는 그 오염제거능이 크지만 하천의 수변을 따라 다수의 하상여과정을 운영할 경우 하류로 갈수록 하천수질이 개선되어 각 여과정에서의 오염제거량이 점차 감소하는 것으로 판단된다. <그림 7-4>에서 8km지점에서의 갑작스런 오염도 증가는 포항하수종말처리장의 방류수가 유입되기 때문이다(김승현, 2007).

하상여과는 유량이 많지 않고 오염도가 높지 않은 하천에서 하천수질을 효과적으로 개선이 가능한 것을 확인하였다. 하지만 오염도가 높은 하천의 경우 혐기환경의 조성으로 인한 하상에 폐색을 일으킬 수 있으므로 하상여과 도입은 하천수질과 연관하여 제한요소가 될 수가 있다. 그러나 하천의 유량이 큰 경우, 수질개선을 위해 하상여과정의 설치 공수를 늘리기만 하면 되므로 하천수질 개선을 위한 하상여과정의 설치를 낙동강이나 영산강 등의 대하천까지 확장할 수 있는 가능성은 크다고 할 수 있다.

국내의 자연조건과 사회적인 조건들을 검토한 결과 강변여과는 국내보다는 유럽의 조건에 적합한 RBF의 형태이며, 국내에서는 하상여과가 보다 적합한 형태로 확인 되었다. 하상여과의 한 형태로 우리나라에서 널리 사용되는 복류수는 수리학 및 수질학적으로 큰 단점을 가지고 있어서 작은 직경의 고효율 집수관을 이용한 개선이 필요하며, 방사상 집수정이나 E자형의 매거형 수평정이 하상여과 관정의 적당한 형태이다. 하상여과는 양질의 상수원 확보뿐 아니라 낮은 농도로 오염된 하천의 수질을 개선하는 방안으로도 활용될 수 있다.

7.2 방사상 집수정 설계

해외의 방사상 집수정은 주로 강변여과 방식을 이용한 대용량 취수 등에 활용되어 왔으며, 최초의 수평정은 1920년대에 유정에서 많은 양의 원유를

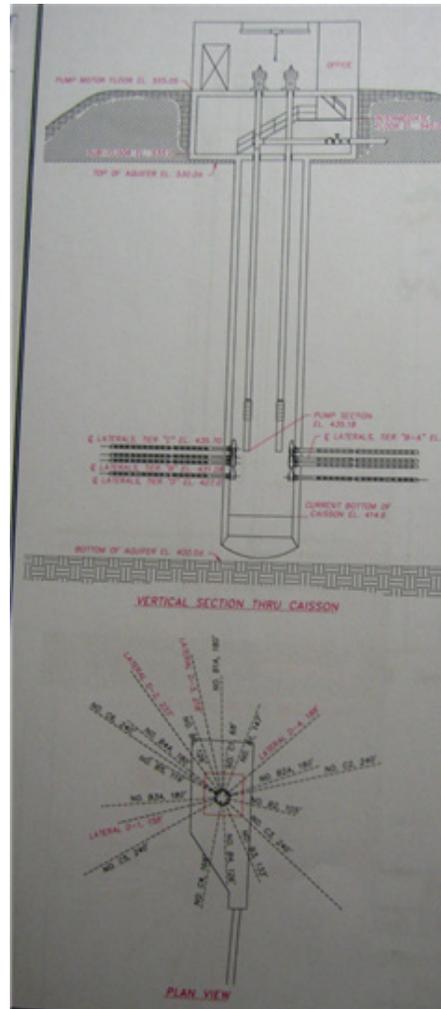
생산하기 위해 텍사스에서 개발된 이후, 방사상 유정개발은 오하이오주의 말타에서 1927년에 최초로 이루어진 것으로 알려져 있다. 이후 지하수 취수를 위한 최초의 방사상 집수정은 1933년 영국 런던에서, 미국의 경우는 오하이오 칸톤에서 1936년에 처음으로 방사상 집수정이 설치된 것으로 알려져 있다. 독일의 경우, 라인강에서 강변 여과 방식 취수를 위해서 수직정과 방사상 집수정이 함께 활용되고 있으나, 방사상 집수정에 대한 정확한 재원은 취수량 정도를 제외하고는 상세히 보고된 자료를 확보하기 어려운 실정이다.

미국에서 방사상 집수정 설치를 위한 주요 고려 설계 인자는

- ① 우선적으로 9m 이상 두께를 갖는 모래자갈층
- ② 강변여과 취수가 목적인 경우, 하천 바닥의 투수성 확보 여부
- ③ 1,200 m³/day 이상의 투수량 계수
- ④ 스크린 지하수 유입 속도 1cm/sec 이하 유지
- ⑤ 동절기 결빙 발생 가능성
- ⑥ 홍수시의 대책 수립 가능여부

미국 오하이오 Great Miami 강변의 방사상 집수정 시설에 대한 집수정 설계도면 자료는 <그림 7-5>에 주어져 있으며, 유지 관리가 수행되는 기간 동안에 감소된 취수량을 확보하기 위하여 최초 집수정 설치 이후 꾸준히 추가 수평 정호 설치가 되어져 오고 있음을 알 수 있다.

미국 오하이오 Great Miami 강변의 방사상 집수정 시설의 경우, 주목할 만한 사항은 과거 슬롯 방식 스크린을 와이어랩 방식 스크린으로 교체하였으



<그림 7-5> Collector well 평면 및 단면 설계 도면

며, 막힘 현상 등에 의해 주하수 유입량이 크게 떨어진 수평 정호는, 새로운 수평 정호를 설치한 후, 폐쇄하였다(현장 관련 현황<그림 7-6>).

기본적으로 해외 방사상 집수정의 경우는 수평 정호에 개별적으로 개폐용 밸브가 설치되어 있어, 유지 관리를 위해 필요시 밸브 조작을 통해 집수정 내로 지하수 유입을 차단하거나 공급하고 있다.

해외 방사상 집수정 설치공사는 크게 우물통(혹은 수직 shaft) 설치 공사와 수평정 설치 공사로 구분되어, 우물통 설치 공사는 최초 우물통의 최하단부의 슈(shoe) 제작 후, 철근 조립, 거푸집 조립, 콘크리트 타설 및 우물통 내부 굴착과 침설의 과정을 반복적으로 시행하면서 목표 심도까지 우물통을 내리게 된다. 이 때, 침설을 촉진하기 위해 별도의 점토류 주입과 강제적으로 상단부에서 가압을 통한 잭킹(jacking) 등이 활용된다.

	
<p>방사상 집수정 펌프</p>	<p>대수층 구성 물질 표본</p>
	
<p>방사상 집수정 배관 시설</p>	<p>방사상 집수정 내부</p>
	
<p>수평정 스크린(교체 전, 후)</p>	<p>외부전경 (500년빈도 홍수선)</p>

<그림 7-6> 미국 오하이오 Great Miami 강변의 방사상 집수정 시설 현황 사진

특히 우물통 침설과정에서 수평정이 설치될 위치에 미리 철근 등이 배제된 구멍 (port hole)을 만들어 수평정호 설치시 지지 역할과 우물통 손상을 최소화 하는 방식이 활용된다. 수평 정호 설치 공사는 굴착 방식에 따라, 드릴링 방식, 추진 굴착 방식 및 고압 제트 워터 방식으로 구별되지만, 상황에 따라 이들 방식들이 적절히 혼합된 방식으로 실제 작업이 이루어지기도 한다. 대구경 수평 정호의 경우는 스크린과 여재 설치가 수반되며, 이를 위하여 외부 케이싱이 굴착시 함께 우선적으로 설치되며, 스크린 설치와 여재가 설치된 후 외부 케이싱을 인발하여 수평정호로 지하수가 통수되게 하는 방식이 활용된다.

7.2.1 미국형 강변여과(하상여과) 방식

7.1의 강변여과와 하상여과의 비교에서 미국형 강변여과방식인 하상여과방식이 우리나라에 더 적합함을 알 수 있다. 미국은 투수계수가 우리의 수배~10배 정도로 크지만 유럽보다는 작아 강에서 멀리 떨어진 곳에 양수정을 설치하면 유럽만큼 많은 물을 얻을 수 없다. 또한, 대수층 입자가 작아 그 비표면적이 크므로 오염처리능력도 커서 여과거리가 유럽만큼 크지 않아도 양질의 여과수를 얻을 수 있다. 따라서 여과거리가 15~20m 정도 되는 집수정을 사용하는 소위 하상여과 방식을 택하고 있으며, 이를 미국형 강변여과방식이라 한다. 켄터키주 루이빌시의 경우 상류에 신시내티 등의 큰 도시가 있고, 대규모의 농업지대를 통과하면서 농약이 많이 유입되며, 하류에 보가 있어서 여름에는 조류가 번창하는 등 낙동강과 유사한 조건을 가지고 있을 뿐 아니라 강에는 많은 바지선들이 왕래하여 오염사고가 1~2년 한번씩은 일어나는 오히오 강변에서 경변여과를 통해 상수원수를 얻고 있으며, 여과수질은 만족스럽다고 하지만 후처리를 통해 더욱 깨끗한 상수를 생산하고 있다.

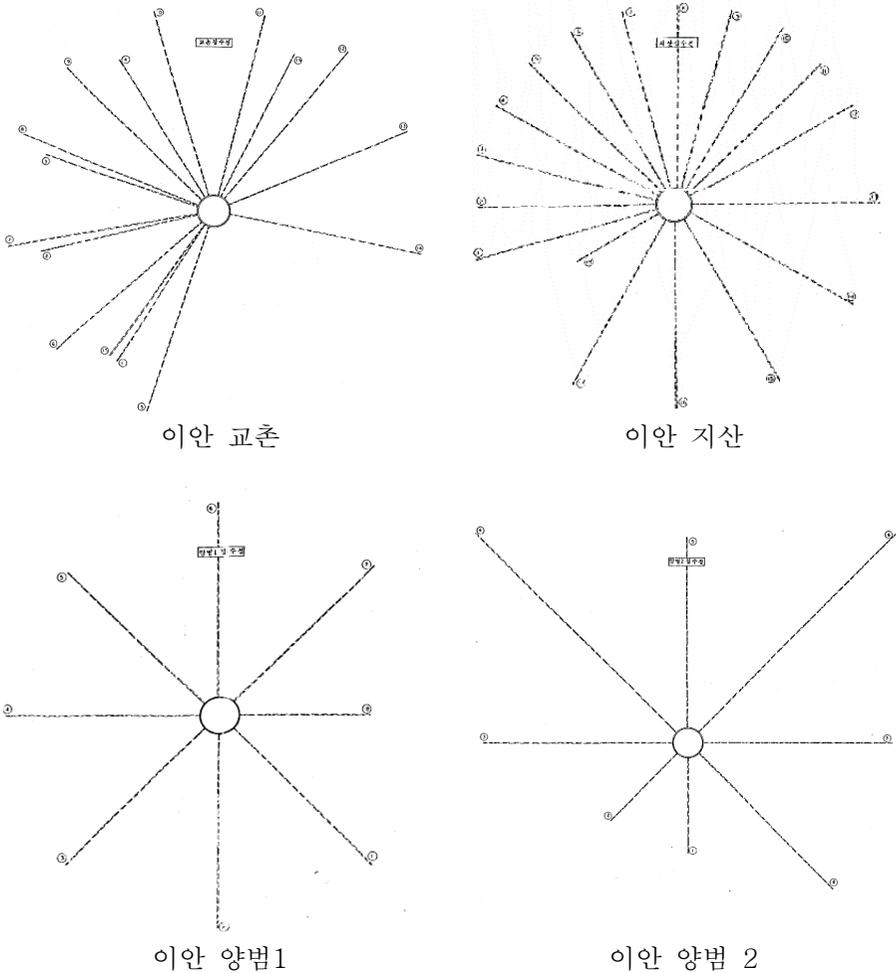
7.2.2 미국 방사상 집수정 현황

(표 7-1) 미국 방사상 집수정 현황

장 소	설치 년도	설계 용량 (m ³ /s)	집수정 개 수	우물통 직 경 (m)	심도(m)		수평집수관		집수정 당 수 평 집수관 길이(m)	예 비 집수정 종 류
					방사상 집수정	수 평 집수관	개수	직경 (cm)		
보드맨(Boardman), 오리건(Oregon)주	1976, 2002	0.39 0.66	2	4 4.9	15	13	14	20 25	244	없음
캐스퍼(Casper), 와이오밍(Wyoming)주	1958	0.09	3	4	10.7	8.6	9	25	274	수직정
시더 래피즈(Cedar Rapids), 아이오와(Iowa)주	1995 2002	0.3 0.44 0.44 0.37	4	4 4 4.9 4.9	21.3	20 평균	5	30 평균	251	수직정
에반스빌(Evansville), 인디애나(Indiana)주	1978	0.4	1	4	24.4	22.3	8	30	488	Intake
인디펜던스(Independence), 미주리(Missouri)주	1990	0.44	1	4	38	36	8	25	488	수직정
잭슨빌(Jacksonville), 일리노이(Illinois)주	1955	0.2	1	4	27.4	25.6	7	30	357	수직정
칼라마(Kalama), 워싱턴(Washington)주	1975	0.1	1	4	12	10	3	25	98	없음
캔자스시티(Kansas City), 캔자스(Kansas)주	1997	1.1~ 1.75	1	6	37	34.5	14	30	747	없음
케너윅(Kennewick), 워싱턴(Washington)주	1957	0.13 평균	5	4	13.7	12 평균	8	25	91	없음
레이크HAVASU 시티 (Lake Havasu City), 애리조나(Arizona)주	2000	1.1	1	4.9	32	29	14	30	537	수직정
링컨(Lincoln), 네브래스카(Nebraska)주	1994	1.5~ 1.75	2	4	23 평균	21 평균	14	30	381	수직정
루이빌(Louisville), 켄터키(Kentucky)주	1999	0.88	1	4.9	30	28.5	7	30	488	Intake
만카토(Mankato), 미네소타(Minnesota)주	1970	0.22	1	4	17.5	16	9	30	300	수직정
퍼스앰보이(Perth Amboy), 뉴저지(New Jersey)주	1985	0.26	1	4	24.4	22	5	25	250	Well Points
수폴즈(Sioux Falls), 사우스다코타(South Dakota)주	1956 1999	0.09 평균	14	3~4	16.8 평균	14.6 평균	3	20 평균	99	수직정
소노마카운티(Sonoma County), 캘리포니아(California)주	1957 1975 1982	총 3.72	5	4	34 평균	31 평균	41	20 25	331	수직정
세인트헬렌스(St. Helens), 오리건(Oregon)주	1955 1969 1999	0.13 0.13 0.22	3	4 4 4.9	27.5 29 19	25.3 27 17	34	9 25	247	수직정
테러호트(Terre Haute), 인디애나(Indiana)주	1991	0.44	1	4	22.9	20.7	8	30	366	없음

7.2.3 국내 방사상 집수정 현황

국내 강변여과수 실규모 설비는 초 방사상 집수정은 1981년도 한해 대책의 일환인 지하댐 사업의 취수 시설로 설치된 것으로 알려져 있다. 이안 지하댐의 경우 방사상 집수정이 4개소로 우물통의 내경은 3.5m, 외경은 4.0m이며, 우물통 심도는 약 7.5m이며, 방사상 집수정의 수평 정호 개수는 최소 6개에서 20개, 4인치 수평 착정기 Top-MB형을 활용하여 2.5인치 pvc에 슬롯을 만드는 방식의 스크린(스트레너)이 설치되었다.

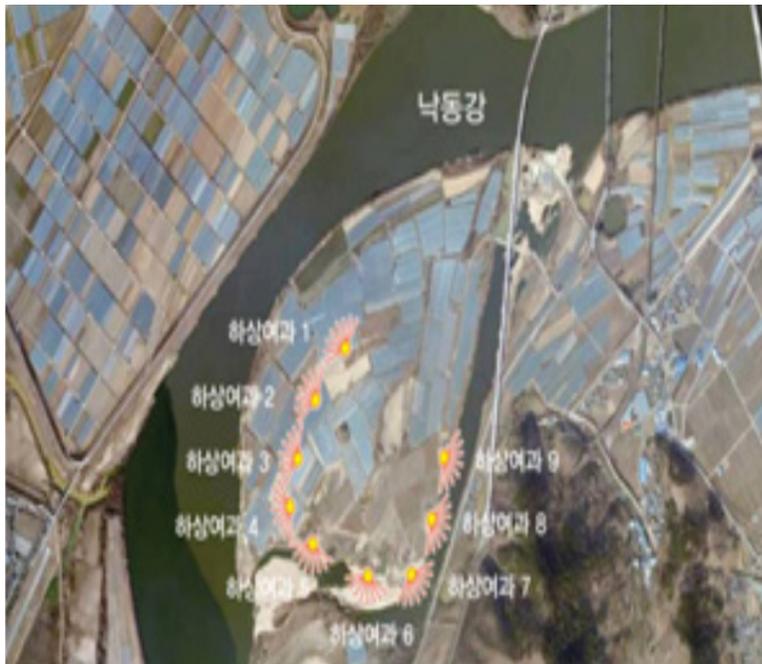


<그림 7-7> 이안 지하댐 수평 정호 배치도

그후, 2000년대 초반 창원시 등에서 도입하여 운영중이고 <그림 7-9>, 김해시에서도 2013년에 공사를 마친 상태다<그림 7-10>. 창원시는 하루 산출유량 12만톤 규모이고 김해시는 13만톤을 확보하였다. 이들 설비는 모두 유럽형 강변여과방식을 채택하였다.



<그림 7-9> 창원시 방사상 집수정



<그림 7-10> 김해시 방사상 집수정

한편, 이 기간 동안 미국형 강변여과방식도 도입되어 울산 태화강에서 7만톤 규모<그림 7-11>, 서울 홍제천에서 6만톤 규모로 설치되었으며, 주로 건천의 유지용수 확보에 활용되었다. 이후 경남부산권 광역상수도 사업의 일환으로 한국수자원공사에서 창녕군에 68만톤 규모의 강변여과수 개발 사업이 진행되고 있으며, 여기에는 미국형 강변여과방식이 채택되었다.



<그림 7-11> 울산시 방사상 집수정

7.2.4 방사상 집수정 설계

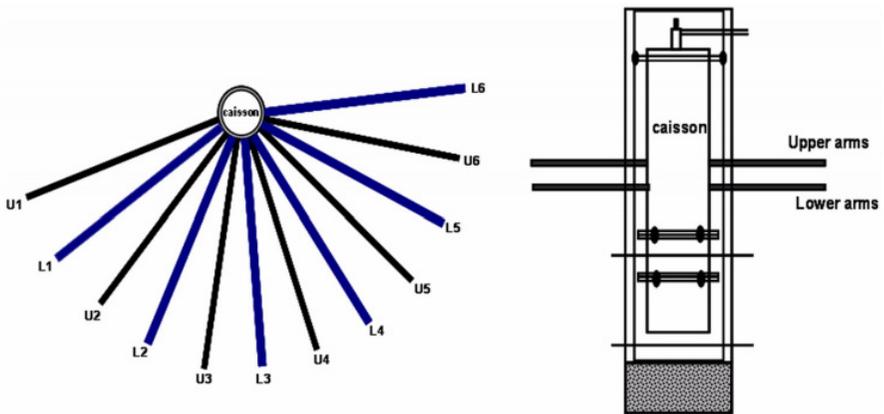
가. 방사상 집수정 설계

대상지역의 지질 및 대수층 특성을 파악하고, 강우 및 수리·수문특성을 고려하며, 운용목적에 따라 지속가능하고 안정적인 수량의 확보와 유지·관리의 경제성을 충족시킬 수 있도록 수행되어야 한다. 우선적으로 이미 설치된 방사상 집수정을 활용할 경우, 기존의 수평 정호의 산출 능력은 이미 30년 이상 활용으로 최초에 비해 현저히 줄었을 가능성이 높다. 실제 미국의 경우도 1950년대에 설치된 방사상 집수정의 수평 정호는 완전히 폐쇄하고 별도의 수평 정호를 우물통 내에서 재시공한 사례가 있듯이, 별도의 수평 착

정을 수행하여 용수를 확보할 필요성이 있다. 현재 우물통의 내경은 3.5m로 8인치 내외의 수평공을 설치하기 위한 장치 진입은 문제가 없을 것으로 판단된다. 따라서, 기존의 스트레너 방식 수평공을, 와이어 랩 방식 수평공으로 전면 교체하여 집수성의 효율을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 실제 이러한 개선 방식이 활용되는 해외의 작업 과정은 다음 <그림 7-12>와 같다.



<그림 7-12> 해외 대구경 수평공 설치를 위한 작업 절차 전경

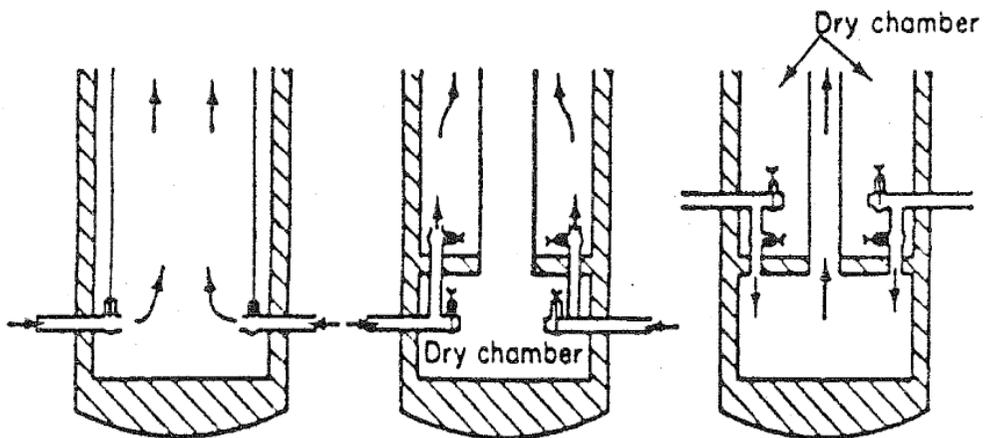


<그림 7-13> 특정 방향 및 다단 심도 수평 정호 배치 방식

동일한 수평공의 길이와 지층 분포를 가정할 때, 하천과 지형 경사를 고려한 상대적인 수평공의 배치는 집수정으로 유입되는 지하수의 양을 조정할 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 보다 개선된 방사상 집수정의 효율을 확보하기 위해서는 수평공의 기하학적인 배치가 고려되어야 한다. 실제 하천 방

향으로 수평정을 집중시키는 부채형 수평정호 배치와 더불어 복수의 심도에 대한 수평정 설치 등을 통한 방사상 집수정 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다(<그림 7-13>).

그러나 이러한 배치 방식은 지층이 모든 방향으로 균질하다고 가정한 경우에 해당되므로, 실제 대수성이 양호한 지층이 하천 방향이 아닌 배후 방향 등으로 발달한 경우는 대수층 분포를 고려하여 수평 정호를 배치 설치하여야 할 것이다. 실제 가장 효율적인 수평 정호 배치 방식은 충분한 지질 조사가 수행된 자료를 바탕으로 수치 계산 등을 통해 평가가 이루어 져야 한다. 우물통 방식을 활용한 방사상 집수정의 경우, 개별적인 수평 정호에 대한 조작에 한계가 있다. 따라서 정기적인 유지 관리 등을 목적으로 우물통 내부를 물이 차지 않게 하는 방식이 이미 해외에서는 고안된 바 있다(그림 7-14). 이러한 방식은 개별 수평 정호의 막힘 등에 대하여 즉각적인 조치가 가능하고 집수정을 통한 오염을 최소화 할 수 있으므로 향후 방사상 집수정 설치 시에 고려할 수 있을 것이다.



<그림 7-14> 개별 수평 정호 관리를 위한 우물통 접근 공간 확보 방안 사례

대규모 용수 공급이 필요한 경우, 한 지역에서 다수의 방사상 집수정을 설치한다면, 이들 방사상 집수정을 연계하는 방식의 용수 개발이 가능하다. 실제 미국 루이스빌에서는 방사상 집수정의 하부를 터널로 연계하여 집수정으로 유입되는 물을 하부 터널을 통해 이송하여 활용하는 방식이 적용되고 있다. 실제 대규모 물리 면적을 갖는 지역에서 대하여 농업 용수를 공급하여야

할 때, 기존의 소규모 농업용 댐 등의 설치가 곤란하다면, 하천변을 따라 다수의 방사상 집수정을 설치하고 이를 연계하여 공급하는 방식이 가능하다.

나. 방사상 집수정 설계시 고려사항

- ◎ 유역의 지질·수리·수문 특성
- ◎ 최소한의 수위강하를 통한 목표수량의 확보 가능성
- ◎ 양수량에 적합한 케이싱 재질 및 크기
- ◎ 최적 스크린 규모
- ◎ 여재의 투입여부
- ◎ 관정개발 및 시험의 용이성
- ◎ 해당지역의 법 및 규제 등
- ◎ 오염방지
- ◎ 모래유입방지
- ◎ 최소한 25년 이상의 설계수명
- ◎ 운용비용 최소화
- ◎ 운영 및 유지보수의 용이성

다. 방사상 집수정 설계시 경험식을 이용한 산출량 선정

방사상 집수정에서 산출량을 예측할 경우 일반적으로 대응 수직정의 효율 경은 특수집수정의 수평 집수관 길이의 75%로 취하는 것이 통례이며 대수층의 두께, 수평집수관의 본 수, 설치위치 및 길이, 지하수의 강하 정도 등에 따라 산출량이 결정되어 진다. 특수 집수정에서 개략적인 산출량 산정법은 수평집수관의 개수와 수평천공 심도를 결정하기 위해 기존의 시행된 방사상 집수정 설계에 대해 한국농어촌공사에서 검토 및 실행한 결과에 의하면 Petrovic 경험식, Milojevic 경험식을 주로 사용하는 것으로 알려져 있다 (한정상, 2000)

방사상 집수정의 강변여과수 취수가능량을 평가하는 방법에는 모델링에 의한 예측 방법과 경험식에 의한 산출방법이 주로 사용되고 있다. 그 중에서 경험식에 의한 산출 방법으로는 Petrovic(Petrovic, 1956) 경험식과 Milojevic(Milojevic, 1963) 경험식이 주로 사용되는 것으로 알려져 있다

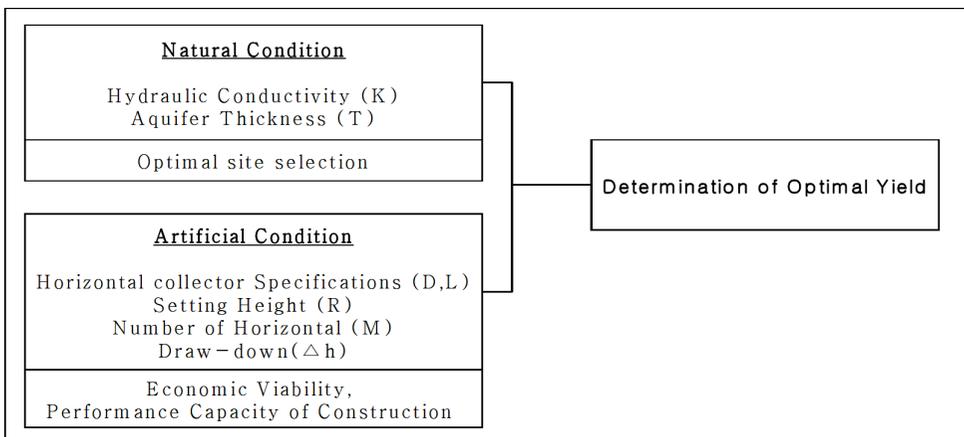
(한정상, 1998). 일반적으로 Petrovic 경험식은 상수가 너무 많을 뿐 아니라 하천과의 이격거리, 스크린 구경 등을 고려하지 않는 단점이 있고, Milojevic 경험식은 집수관의 설치 심도를 역으로 계산하는 것에는 문제가 있지만 하천 이격 거리와 같은 방사상 집수정의 설치 위치에 대한 정보가 반영되므로(한정상, 1998;정지훈 외, 2004) 방사상 집수정에서의 강변여과수 취수량 산정에 Milojevic 경험식을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

◎ Petrovic 경험식

Petrovic 경험식은 하천에서 어느 정도 거리에 떨어져 있는 지점에서 방사상 집수정을 설치하였을 때 예상되는 산출량 산정에 사용되어 진다.

(표 7-2) Parameters of Petrovic Formula(Petrovic 경험식 변수값)

Number of Horizontal Screen	A	B	C
4	4	3	5.25
8	3	2.9	7.31
12	4.068	3.068	10.00
16	3.718	2.718	11.2



<그림 7-15> Conditions for Determination of the Optimal Yield(적정 양수량 선정 조건)

$$Q = \frac{L \times m \times k \times H \sqrt{A - B \times h / H - 1}}{C}$$

Q : 총 취수량(m³/일), m : 수평집수관의 수(개), A, B, C: Petrovic의 상수(표 7-2. 참조), k : 대수층의 수리전도도(m/일), L : 수평 집수관의 본당 길이(m)

H : 갈수기 때 대수층의 두께(m), h : 안정수위시 대수층 두께(m)

◎ Milojevic 경험식

하천 인근에 설치한 방사상 집수정은 하천 유로까지의 거리와 밀접한 관계가 있다.

$$\frac{Q}{kT(H-h)} = \left(\frac{t}{L}\right)^{0.10} \times \left(\frac{D}{L}\right)^{0.15} \times \left[4.13m^{0.1415} - 1.22\left(\frac{T}{L}\right)\right] \left(\frac{1}{\log \frac{2r}{L}}\right)^A$$

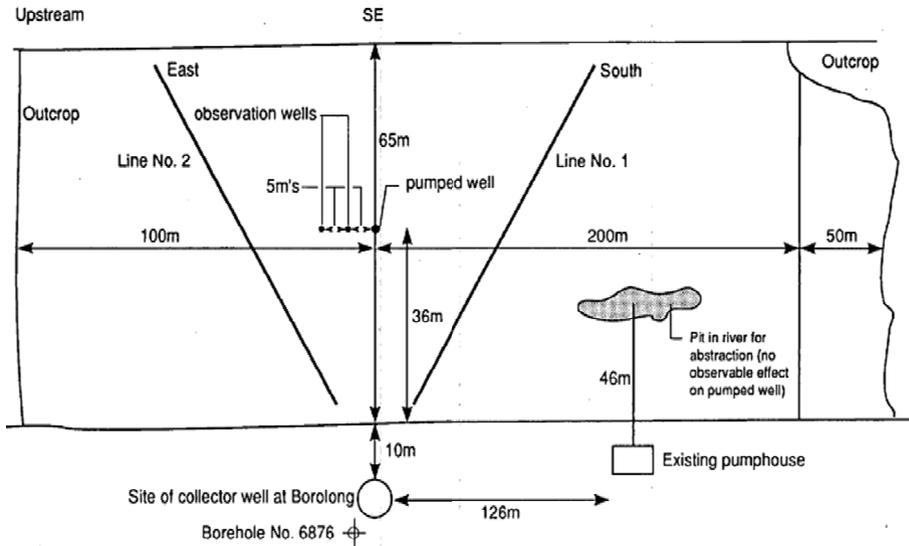
$$A = 0.914 + 0.0813m - 0.348\left(\frac{T}{L}\right)^{\frac{2}{3}}$$

D : 수평집수관 관경, t : 불투수층으로부터 수평집수관 높이, L : 수평 집수관 길이

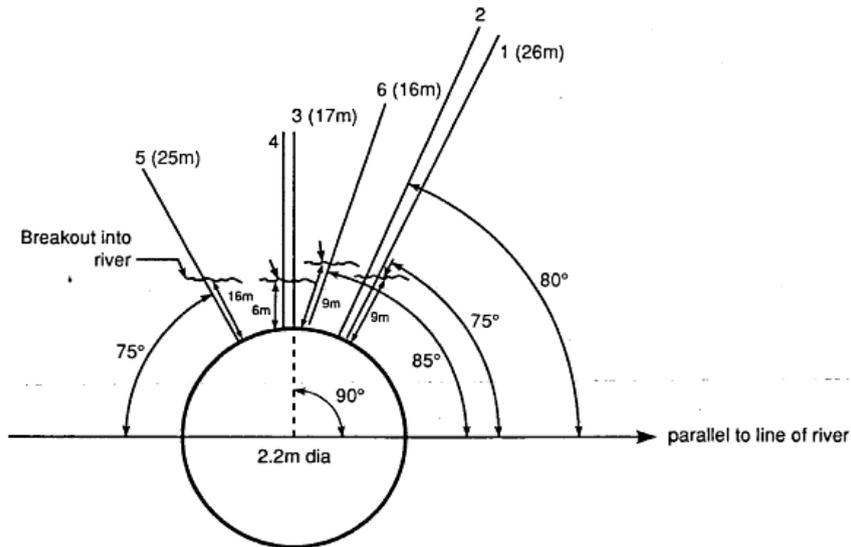
m : 수평집수관 개수, r : 집수정에서 하천유로까지의 거리, T : 대수층 두께

k : 대수층 수리전도도, H-h : 집수정의 수위강하량, Q : 집수정의 채수량

라. 방사상 집수정 설계 예시(해외)



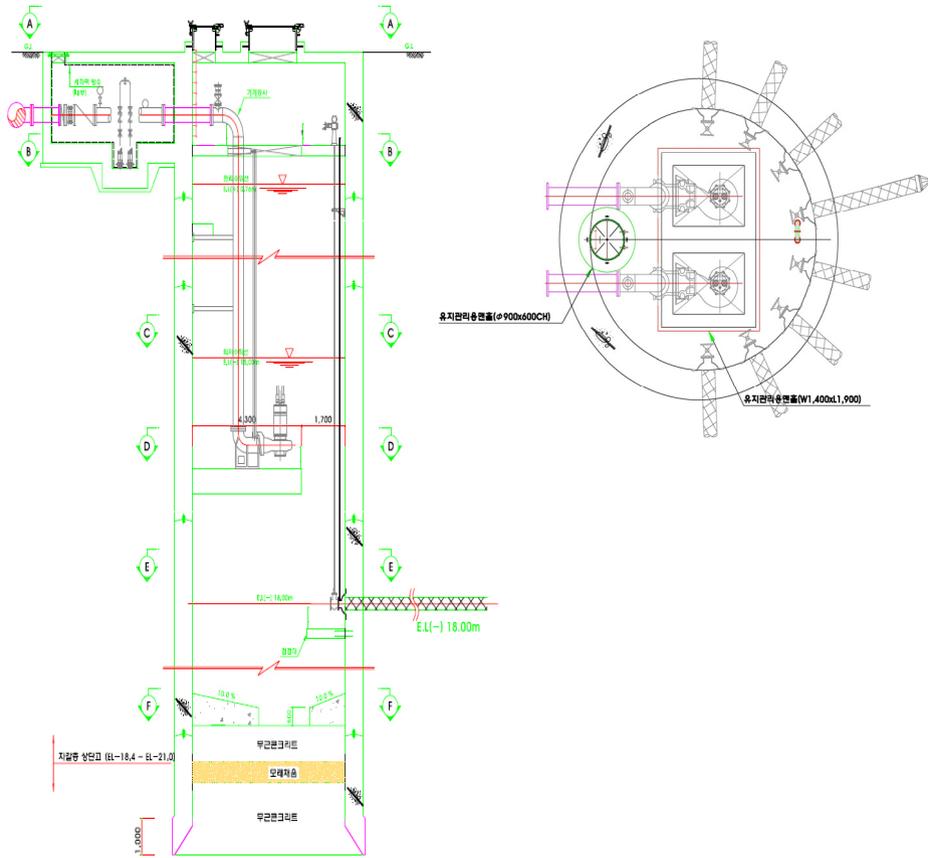
(a) Sketch map of collector well site and works at Borolong



(b) Laterals drilled at Borolong

<그림 7-16> 해외의 방사상 집수정 설계의 예시(BGS, 1992)

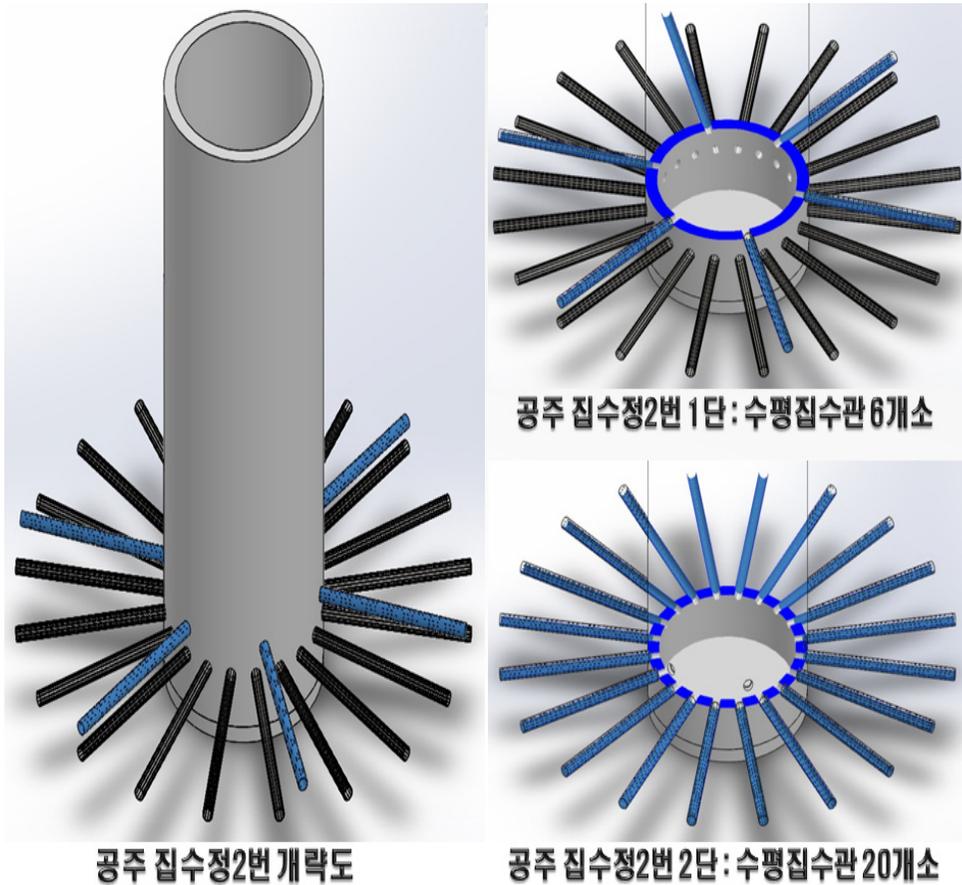
마. 방사상 집수정 설계 예시(국내)



<그림 7-17> 국내 방사상 집수정 설계 예시

7.3 기존 방사상 집수정 시설개선 방안

7.3.1 기존 농업용 방사상 집수정 현황

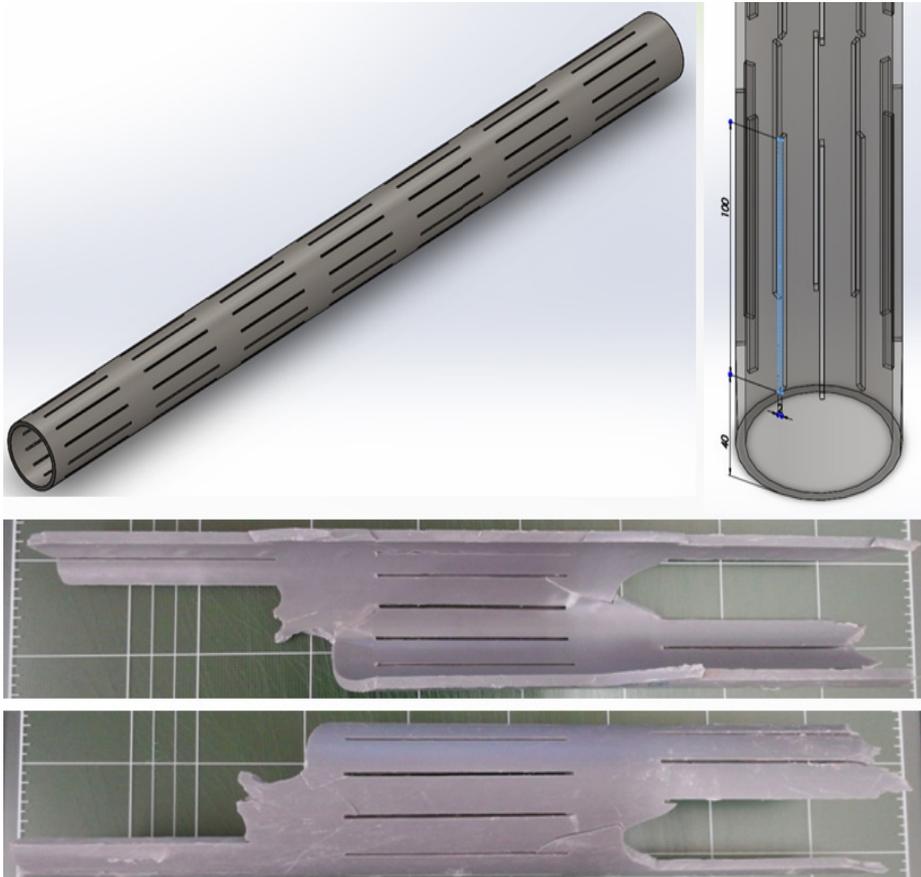


<그림 7-18> 한국농어촌공사 방사상 집수정 개략도 : 공주 집수정2번

기존 농업용 방사상 집수정의 개략도는 <그림 7-18>과 같으며 1단~3단의 수평집수관 다수가 설치되어 있다. 우물통의 내경은 보통 3.5m로 되어 있으며 깊이는 10~12m 사이가 대부분이며 취수관은 직경 150mm이며 수중펌프 또는 지상 펌프가 연결되어 있으며 양수량에 따라 보통 30HP의 펌프가 1~2대 설치되어 있다.

우물자재는 집수정 현장에 따라 틀리나 보통 65 mm PVC 스트레나가 설

치되어 있으며 <그림 7-19>과 같다. 개공눈인 슬롯(slot)의 길이는 대략 100 mm이고 두께는 2 mm이며 30° 간격으로 총 12개의 슬롯이 개공되어 있으며 슬롯간의 간격은 대략 40 mm이며 개공율은 PVC 스트레나 연결부 위(소켓)를 감안하면 8%미만이다.



<그림 7-19> 방사상 집수정 수평집수관 65mm PVC 스트레나 : 상주시 이안지하댐

대부분의 기존 농업용 방사상 집수정은 장기 가동에 따른 노후화(20년 이상)로 수평집수관 상당 부분이 변형 또는 파손되었을 것으로 예상되며, 또한 수평집수관 스트레나 벽면 및 슬롯(slot)을 포함하여 주변 충적층까지 막힘 현상(clogging)이 상당부분 진행되어 최초 개발시와 비교하여 양수량 및 수질의 저하가 추정된다.

<그림 7-20>은 경상북도 상주시 이안지하댐에 위치한 방사상 집수정의 공내영상촬영 결과이며 그림과 같이 PVC 스트레나의 변형 및 파손으로 공내로 자갈 및 이물질이 유입되어 막혀있음을 확인할 수 있다. 특히 공주 집수정의 경우 수평집수관 스트레나 벽면 및 슬롯(slot)을 포함하여 주변 충전층까지 막힘현상이 상당부분 진행되었음을 확인할 수 있다.



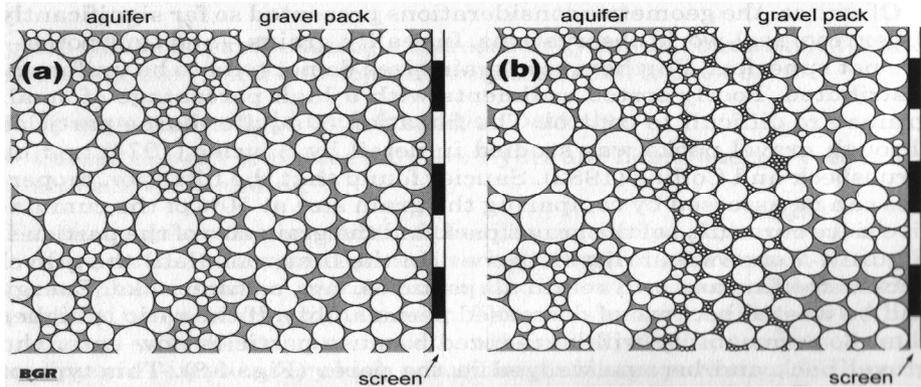
<그림 7-20> 방사상 집수정 수평집수관 현황 : 상주시 이안지하댐

7.3.2 기존 농업용 방사상 집수정의 유지관리

가. 기존 농업용 방사상 집수정 현실태 및 문제점

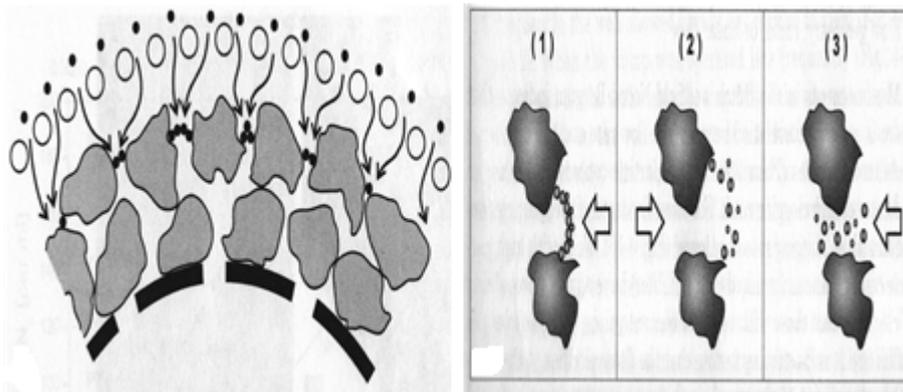
- ◎ 상주, 공주 방사상 집수정 : 수평집수관 재질이 PVC(65mm)로 제작
- ◎ 장기 가동에 따른 노후화(20년 이상)로 수평집수관 상당 부분이 변형 및 파손 발생
- ◎ 공주 집수정의 경우 수평집수관 주변 충전층의 막힘현상이 상당부분 진행

나. 방사상 집수정의 수평집수관 막힘현상 원인 및 제거 방법



<그림 7-21> 수평집수관 주변 미립자의 이동에 의한 막힘현상(Houben and Treskatis, 2007)

방사상 집수정의 막힘현상은 대부분 미립자의 이동에 의한 것으로 추정되며 <그림 7-21>과 같이 개발 당시의 수평집수관의 공극사이로 미립자가 쌓여서 투수율이 감소되는 것으로 예상된다.



<그림 7-22> 수평집수관 주변 미립자의 이동에 의한 막힘현상 및 제거방법(Houben and Treskatis, 2007)

<그림 7-22>과 같이 공극사이의 미립자의 쌓임은 시간이 경과함에 따라

굳어져서 딱딱하게 되어 투수율의 감소현상이 증대되어 지며 이러한 막힘현상은 집수관의 반경방향으로 점점 확대되어진다. 따라서 최초 개발당시의 비양수량의 25% 감소한 시점에서 적절한 우물재개발 작업이 시행되어야 하며 비양수량이 50% 이하로 떨어진 경우 집수관의 반경방향으로 미립자 쌓임의 누적이 확대되어 우물재개발 비용이 급증하게 되며 그 효율성도 떨어지게 된다.

다. 방사상 집수정의 유지관리 내용

◎ 취수시설 모니터링(well monitoring)

- 방사상 수평집수정의 유지관리에 가장 중요한 분야는 주변 대수층의 지하수 거동 모니터링과 양수효율을 점검하는 것이다. 이러한 기록들은 향후 우물 청소/재개발 시기를 결정짓는 중요한 요인이 된다.

◎ 우물개발(well development)

- 우물개발은 최초 수평정호의 시공이 끝나고, 스트레나 주변 여채층의 원활한 지하수 흐름을 위해 지하수 유로를 인위적으로 확장시키는 공정을 말한다. 특히 수평정호 주변의 점토나 모래를 털어내고 스트레나 주변에 조립질 모래 또는 자갈을 분포시켜 자연적으로 여채층을 형성함으로써 지하수의 흐름을 좋게 한다.

◎ 우물청소(well cleaning)

- 우물청소는 정호 내부의 케이싱과 스트레나 구간을 세척하는 것을 말하며, 신규정호나 노후화 정호의 스크린 내부 이물질 제거하는 공정을 말한다.

◎ 우물재개발(well redevelopment)

- 우물재개발은 장기간의 취수로 인해 수평정호의 스트레나 슬롯과 여채층 사이에 막힘 현상이 발생하여 양수효율이 떨어질 경우 정상적인 양수효율 회복을 위한 우물개발을 말한다.

◎ 우물개보수(well repair)

- 방사상 수평집수정의 취수시설이 장기간 사용으로 노후화되어 새롭게 개보수하는 작업을 말한다. 개보수 작업에는 우물통 내/외부의 관로 및 밸브 등과 같은 부대시설의 보수 및 교체와 수평정호의 추가 시공 등을 말한다.

라. 방사상 집수정의 우물개발·청소·재개발 공법

(Ranney Collector Wells - Well and Pump Services / Well Rehabilitation외)

◎ 에어써징(air surging)

- 수평집수관 내부로 플라스틱 파이프를 삽입하여 관내부로 저압 및 고유량의 압축공기와 물을 혼합하여 분사함으로써 수평집수관 내부의 이물질을 불어내는 방식으로 우물청소(Well Cleaning)의 한 형태이다.

◎ 고압세척공법(water jet method)

- 노즐을 통하여 회전 분사되는 고압수를 이용하여 막힌 스크린 표면을 뚫어주는 검증된 방법이다.

◎ 고압충격발생공법(bore blast method)

- 관정을 회복(rehabilitation)시키는 장치로 최대 3500[psi]의 압력에 의한 충격파를 생성시켜 스트레나 및 여재층 주위의 막힘현상을 제거하는 방법이다. 압력원으로 압축된 유체(공기 또는 질소)를 사용하며 작업자의 우물통 내부 시공이 가능하다.

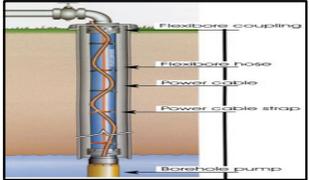
◎ 폭약공법(sonar jet method)

- 줄 형태의 폭약인 도폭선(detonating cord)을 스트레나에 설치하여 폭발에 의한 충격에 의하여 스크린 및 여재층 주위의 막힘물질을 제거하는 방법이다.

◎ 펄스방전공법(high-voltage pulsed discharge method)

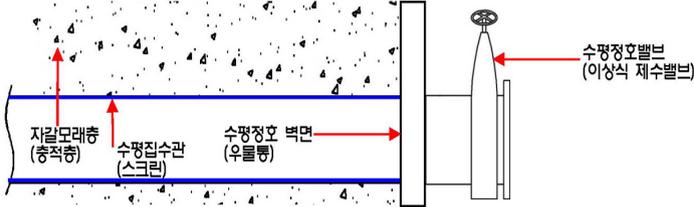
- 수중에 삽입된 전극에 순간적으로 고전압의 전기에너지를 주입하여 이때 전극 사이에서 발생하는 고온, 고압의 플라즈마의 팽창력에 의하여 발생하는 수중 충격파를 이용하여 스크린 내부를 청소하는 방법이다. 압력원으로 고전압을 사용하기 때문에 작업자의 우물통 내부 작업이 불가능하며 잠부수의 장비삽입공정 후 시공해야 한다.

마. 고압충격발생공법을 이용한 방사상 집수정 우물재개발 시공과정

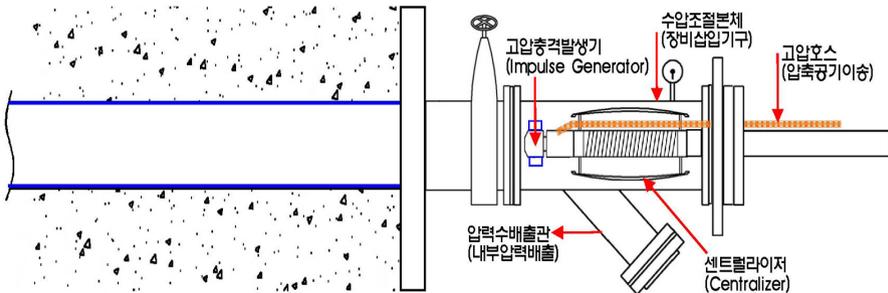
<p>1) 시 공 전 양수시험</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 취수정 주변 수리지질 특성 평가 및 해석 - 방사상 집수정 부지내의 수리지질학적 특성평가 - 기술에 따라 고압충격발생공법 시공압력 산출 - 수평정호내 취수펌프 사용 	
<p>2) 수평정호 유입수 제거작업</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 수평정호내 취수펌프 및 배출펌프를 사용하여 수평정호 내부 유입수를 바닥까지 제거 	
<p>3) 시공전후 수평집수관별 유량측정</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 수평집수관별 시공전 유량측정 - 시공전 대용량 양수시험 결과와 연계하여 고압충격발생공법 시공압력 최종 결정 - 고압충격발생공법 시공전후 효율자료로 활용 	
<p>4) 시 공 전 공내촬영</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 수평집수관별 유공관 막힘상태 조사 - 고압충격발생공법 시공전후 비교용 자료로 활용 	
<p>5) 고압충격 발생공법 시 공</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 선행 작업으로 필요시 워터젯팅 작업을 수행 - 고압충격발생기에 의한 스테레나 및 주변대수층 막힘 현상 제거 	

바. 방사상 집수정의 고압충격발생공법 공정 개략도

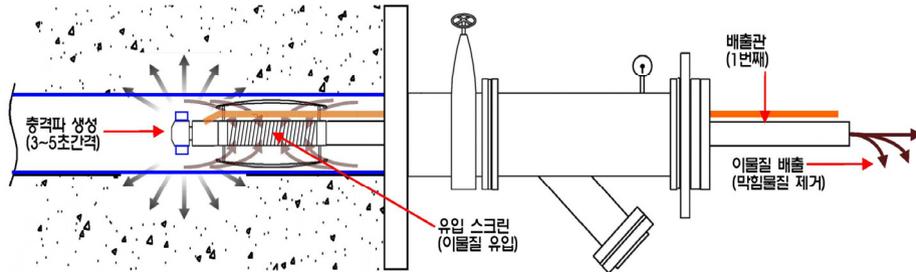
1) 수평정호밸브 닫힌 상태로 초기 기본시설 상태



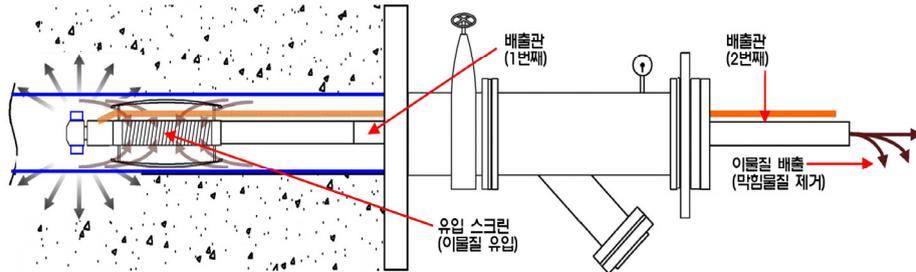
2) 고압충격발생기 설치단계로 수압조절본체 내부에 고압충격발생기를 삽입후 수평정호밸브와 결합



3) 수평정호밸브를 열고 배출관(3m 롯데형식) 결합후 고압충격발생기를 안으로 삽입후 작동



4) 배출관(3m 롯데형식) 결합작업을 계속 반복함으로 수평집수관 내부까지 충격공법 시공



사. 방사상 집수정의 고압충격발생공법 사용장비

장 비 명	형식 및 규격	수량	단위	비 고
수동수위측정기	RWL-100M	1	대	Yamayo Japan
자동수위측정기	Mini-Diver DI-510-100M	2	대	Eijkelkamp Netherlands
유량계	D200MM, D400MM	1	대	300Ton/Hour Korea
카고크레인	15TON	1	대	Soosan Korea
공내영상촬영장치	200M	1	대	Doobae Korea
고압컴프레서	330BAR 200LPM	1	SET	Bauer Germany
고압충격발생기	220BAR 350CC	1	SET	Impulse Tech Korea
자동권취기	5000PSI 300M	1	SET	Parker Germany
고압세척기	400BAR 20LPM	1	SET	Bertolini Italy
자동회전분사노즐	350BAR 40LPM SW35	1	SET	PA Italy
발전기	150kW SDG150	1	대	AIRMAN Japan
이물질배출장치	Dewatering DW Series	1	SET	Grundfos Denmark
해석프로그램	AQTESOLV Ver 3.01	1	SET	HydroSOLVE, Inc. USA



< 고압컴프레서 및 고압충격발생기 구성품 및 시험설치 사진 >



< 고압충격발생기 및 고압세척기 시공 사진 >

7.3.3 고압충격발생공법을 적용한 방사상 집수정 우물재개발 시공

가. 우물재개발 시공개요

한국농어촌공사 공주지사에서 관리하는 2015년 사후관리 대상 집수정 2개소 중에서 초기 개발 당시보다 취수량이 급감한 지하3 집수정을 고압충격 발생공법을 적용한 우물재개발 시공대상으로 선정하였다(그림 7-23).



<그림 7-23> 한국농어촌공사 방사상 집수정 우물재개발 현장

공주 방사상 집수정 지하2번의 우물재개발 방법으로는 수평집수관의 채질과 크기 및 공내촬영결과를 바탕으로 한 집수관의 내부 이물질 쌓임 및 변형, 파손을 고려할 때 고압수분사와 고압충격발생 방식의 혼합이 적절할 것으로 판단하였다.

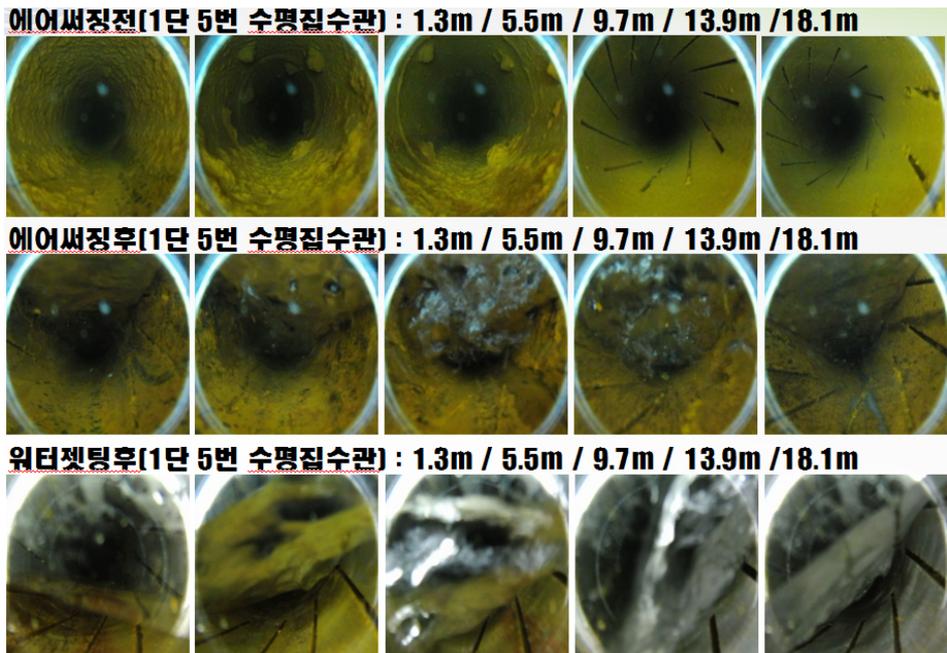
기존 에어써징 방법만으로 스트레나 주변의 충적층 막힘현상 해소에 다소 한계가 예상되며 폭약공법에 의한 방법은 폭발물 및 유독물로 분류되는 폭약 특성상 환경오염 및 취급 관리상의 어려움으로 현실적 사용이 제한되기 때문이다. 기존의 에어써징과의 효과를 비교하기 위하여 에어써징 후 본 우물재개발 방법을 시공하였으며 우물재개발 작업방안은 다음과 같다.

- ◎ 수평집수관 공내영상촬영 : 스트레나 청소상태, 변형 및 파손 확인(시공전후로 촬영)
- ◎ 권선형 스크린 삽입전 고압수분사로 기존 PVC 스트레나(65mm) 표면 이물질 제거
- ◎ 일정한 압력 이상의 힘이 수평집수관(PVC)에 가해질 때 재질의 노후화로 인한 부식으로 집수관의 변형 및 파손이 예상되기 때문에 권선형 스트레나(50~60mm)를 삽입하여 집수관 주위의 층적층의 막힘현상이 해소될 수 있도록 시공
- ◎ 스트레나 주변에 막혀있는 미립자들이 빠져나와 자연적으로 여재층이 형성될 수 있도록 청수가 나올 때까지 고압충격발생 방식으로 시공
- ◎ 스트레나 주변의 미립자들의 막힘현상이 누적되지 않도록 집수정의 비양수량의 감소현상을 주기적으로 모니터링하여 적절한 시기에 우물재개발 작업의 효과가 지속될 수 있도록 집수정의 유지관리가 필요함

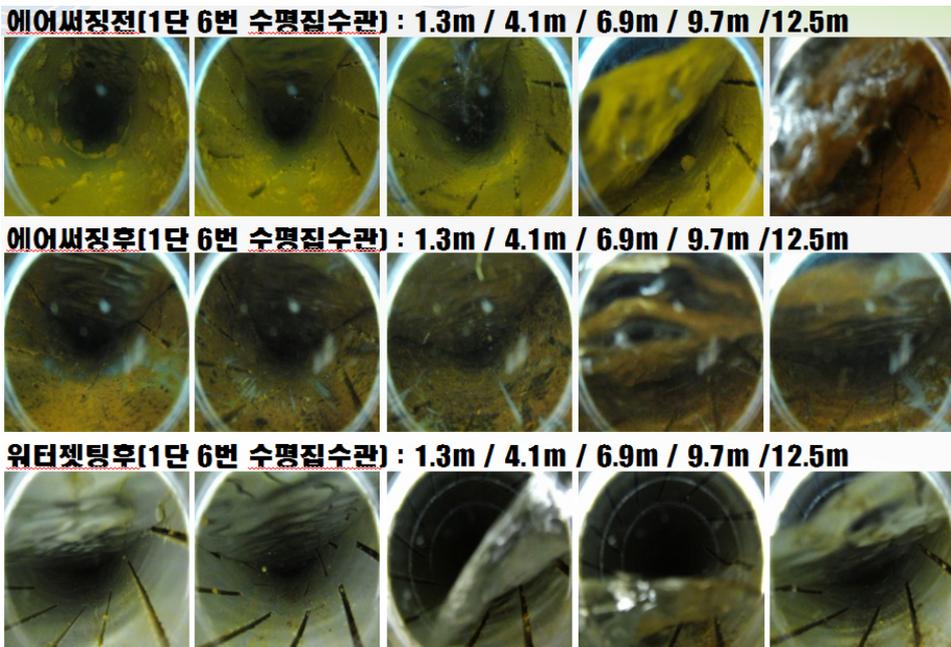
나. 우물재개발 공내촬영 결과

<그림 7-24>는 공주 집수정2번 1단 5번 수평집수관의 에어써징 전후 및 우물재개발 시공 중 워터젯팅 시공후의 공내영상촬영 결과이다. 에어써징 전 미립자등에 의한 이물질이 수평집수관 슬롯을 포함하여 내부에 쌓여 있음을 볼 수 있으며 수평집수관 후반부에 비하여 전반부에 이물질이 많이 쌓여 있음을 확인할 수 있다.

이는 수평집수관이 우물통에 가까울수록 유속이 빨라지며 유속의 높을수록 막힘현상 발생빈도가 높아지기 때문에 기인한 것이라 판단된다. <그림 7-24>에서 볼 수 있듯이 에어써징은 우물청소 단계로 집수관의 내부를 청소하는 수준에 머물며 우물재개발과 같이 집수관 주변의 막힘현상에는 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 에어써징 후에도 수평집수관에 쌓여있는 슬롯의 이물질들이 워터젯팅후에는 깨끗하게 제거되었음을 확인할 수 있다.



<그림 7-24> 공주 집수정2번 1단5번 수평집수관 공내영상촬영 결과



<그림 7-25> 공주 집수정2번 1단6번 수평집수관 공내영상촬영 결과

<그림 7-25>는 공주 집수정2번 1단 6번 수평집수관의 에어써징 전후 및 우물재개발 시공중 워터젯팅 시공후의 공내영상촬영 결과이다. 1단 5번과 동일하게 에어써징 후에도 수평집수관에 쌓여있는 슬롯의 이물질들이 워터젯팅 후에는 깨끗하게 제거되었음을 확인할 수 있다.

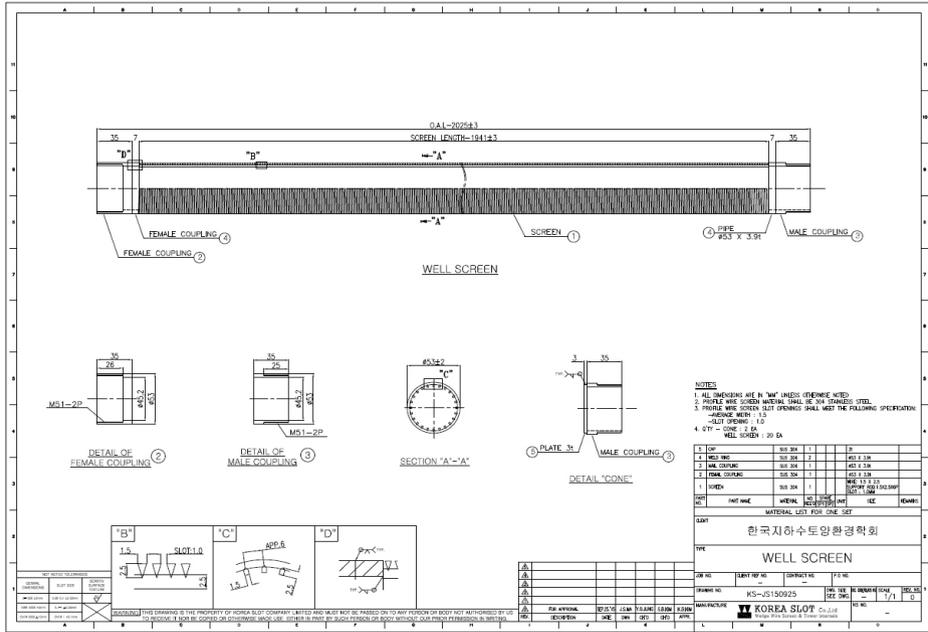
다. 공주 집수정 2번 우물재개발용 우물자재 및 장비현황

<그림 7-26>은 공주 집수정2번 우물재개발용 우물자재인 권선형 스크린 현장사진이며 <그림 7-27>은 원선형 스크린 제작도면이다.

재질은 STS304이며 슬롯간격은 1 mm이며 외경 53 mm이고 길이는 2,000 mm이다. 공주 집수정2번에 적용하기 위하여 총 20본(40m)이 제작되었으며 스크린 양단 끝은 암수나사로 되어 있어 서로 조립 및 분해가 가능하다.



<그림 7-26> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린



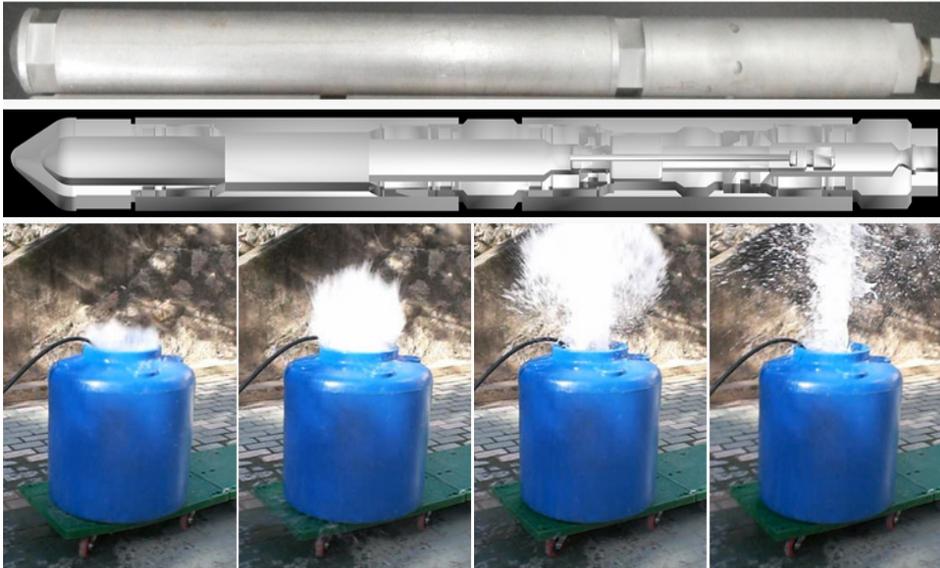
<그림 7-27> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 제작도면

<그림 7-28>은 워터젯팅, 고압수 회전 분사장치로 직경 60mm이며 회전 속도는 최대 2000rpm이며 분사되는 젯팅압력은 최대 400kgf/cm²이다.



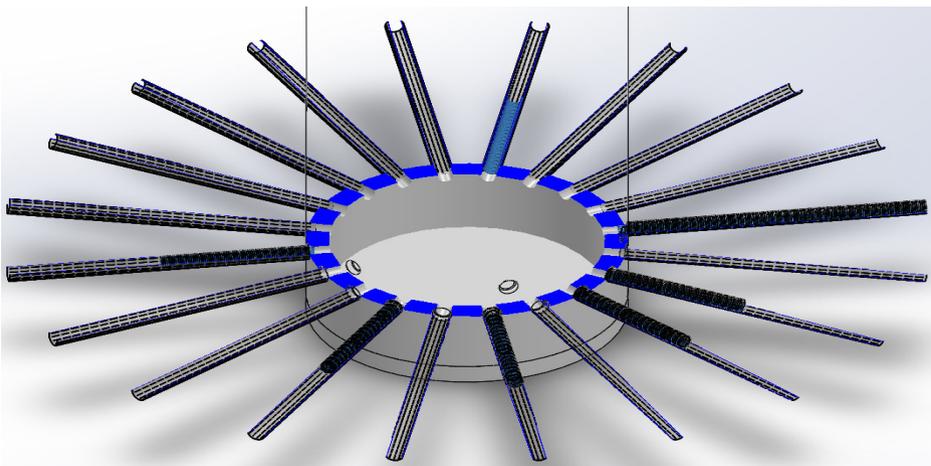
<그림 7-28> 공주 집수정2번 우물재개발용 워터젯팅 및 작동사진

<그림 7-29>는 우물재개발 주장비인 고압충격발생기로 직경 40 mm이고 충전체적은 300 cm³이며 사용유체로 압축공기가 사용되며 충격압력은 최대 330 kgf/cm²이다.

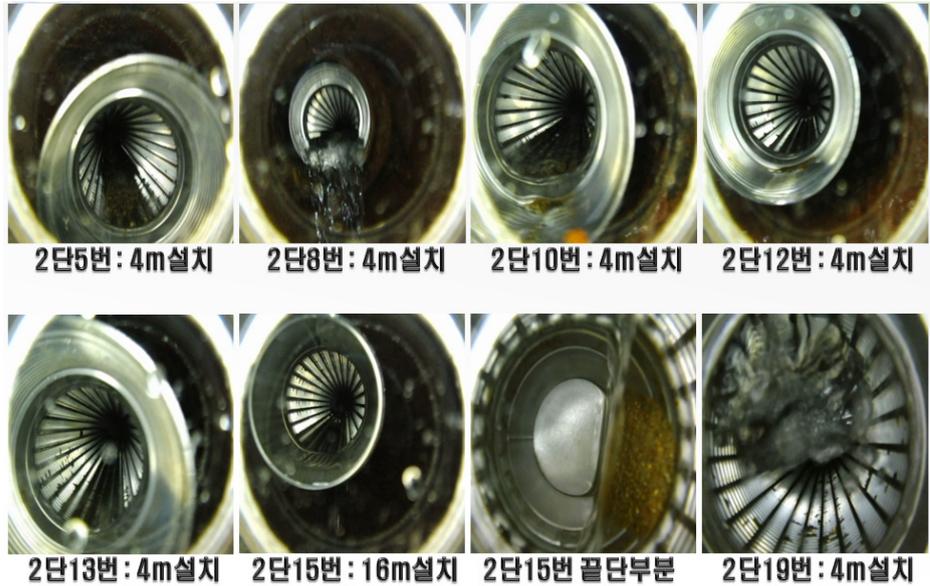


<그림 7-29> 공주 집수정2번 우물재개발용 충격발생기 및 작동사진

라. 공주 집수정 2번 우물재개발용 권선형 스크린 설치 현황



<그림 7-30> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 설치 개략도



<그림 7-31> 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 설치 현황

<그림 7-30>은 공주 집수정2번 우물재개발용 권선형 스크린 설치 개략도이며 <그림 7-31>은 설치된 사진으로 최초 2단 15번 PVC 수평집수관 내부로 16m의 권선형 스크린이 삽입되었고 이후 2단 5번, 8번, 10번, 12번, 13번, 19번에 각각 4m의 권선형 스크린이 삽입되었다. 최초 수평집수관 2개에 한하여 우물재개발이 계획되었으나 우물재개발 효과를 극대화하기 위하여 최대한 방사상으로 나머지 집수정에 대하여 각각 4m의 권선형 스크린이 삽입되었다. 권선형 스크린 삽입과정에서 기존 집수정에 설치된 펌프(2대)로 인한 입구막음 및 수평집수관의 노후화로 인한 변형 및 파손이 발생한 수평집수관은 권선형 스크린 삽입이 불가능하였다. 공내영상촬영과 집수관 유동 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 수평집수관의 전반부(입구부분)에 막힘현상이 많이 발생하였을 것으로 예상하여 4m의 권선형 스크린을 최대한 방사상으로 삽입하여 충격에 의한 우물재개발을 시행하였다.

마. 공주 집수정 2번 수평집수관 형상에 따른 유동 시뮬레이션

나비에-스토크스의 운동방정식(Navier-Stokes' equation of motion)을 이용하여 공주 집수정 2번 수평집수관내에 흐르는 물을 뉴턴 유동을 하는 점성 유체로 가정하여 시뮬레이션 하였다. PVC 수평집수관 2m 기준으로 4

L/sec의 유량의 유동 유속 흐름을 시뮬레이션한 결과, 우물 통에 가까울수록 유속이 빨라지며 통상적으로 유속이 높을수록 막힘현상 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. PVC 수평집수관 1m 기준으로 시뮬레이션한 결과에서도 동일하게 우물 통에 가까울수록 유속이 빨라지고 있다.

바. 공주 집수정 2번 에어써징 및 우물재개발 결과 비교

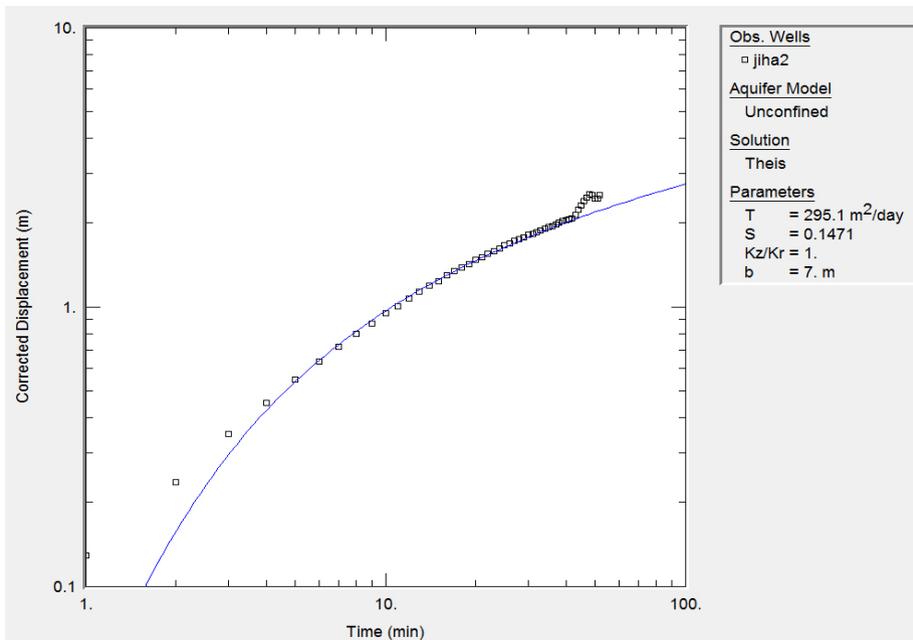
공주 집수정 2번의 양수시험 데이터는 AQTESOLV 4.5 프로그램으로 해석하였으며 Match Automatic 기능을 사용하여 그래프를 피팅하였다. <그림 5-32>는 공주 집수정2번 에어써징전 양수시험 결과이며 배수펌프1과 배수펌프2 총 2대의 펌프로 가동하였으며 양수량은 3,120 m³/day이고 가동시간은 52분이며 수위강하량은 3.28m이고 투수량계수 T=295.1 m²/day이다. <그림 5-33>는 공주 집수정2번 에어써징후 양수시험 결과이다. 최초 배수펌프1을 가동하였으며 양수량은 1512 m³/day이고 70분후에 배수펌프2를 추가 가동하였으며 총 양수량은 2688m³/day이고 총 가동시간은 261분이며 수위강하량은 2.94m이고 투수량계수 T=409.6 m²/day이다. <그림 5-34>은 공주 집수정2번 우물재개발후 양수시험 결과이다. 최초 배수펌프1과 배수펌프2 총 2대의 펌프로 가동하였으며 양수량은 2688 m³/day이고 53분후에 배수펌프3를 추가 가동하였으며 총 양수량은 4632 m³/day이고 총 가동시간은 157분이며 수위강하량은 4.24 m이고 투수량계수 T=656.4 m²/day이다. 이상을 정리하면 <표 7-3>과 같다.

(표 7-3) 공주집수정 에어 서징 전, 후 양수시험 결과

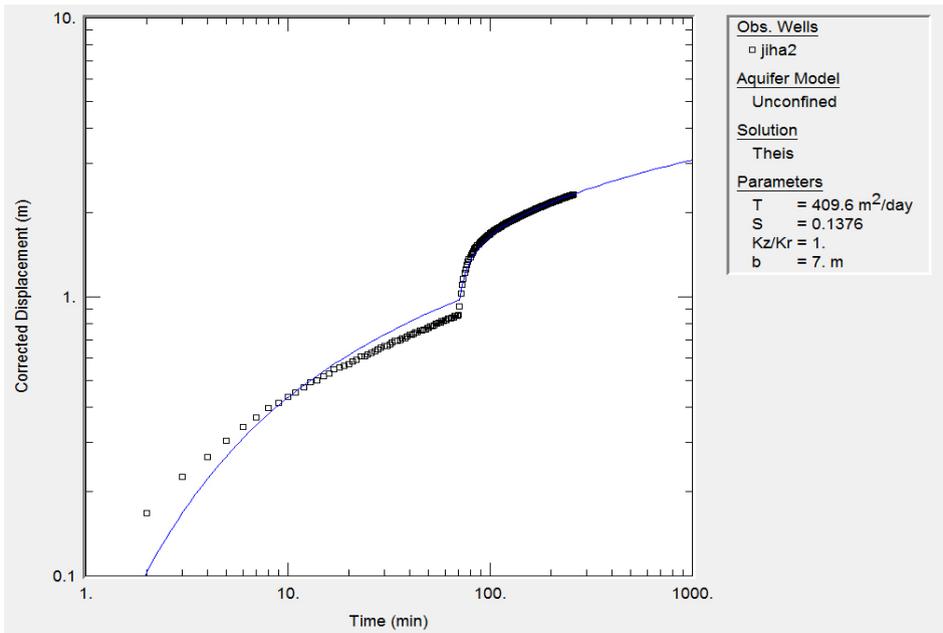
구 분	양수량 (m ³ /day)	가동시간 (min)	수위강하량 (m)	투수량계수 (m ² /day)	증감 (%)
에어써징전	3120	52	3.28	295.1	-
에어써징후	2688	261	2.94	409.6	38.8
우물재개발후	4632	157	4.24	656.4	60.3

에어써징의 효과는 투수량계수가 38.8% 증대되는 효과가 있으며 우물재개발 효과는 투수량계수가 에어써징 후 기준으로 60.3% 추가로 증대되는

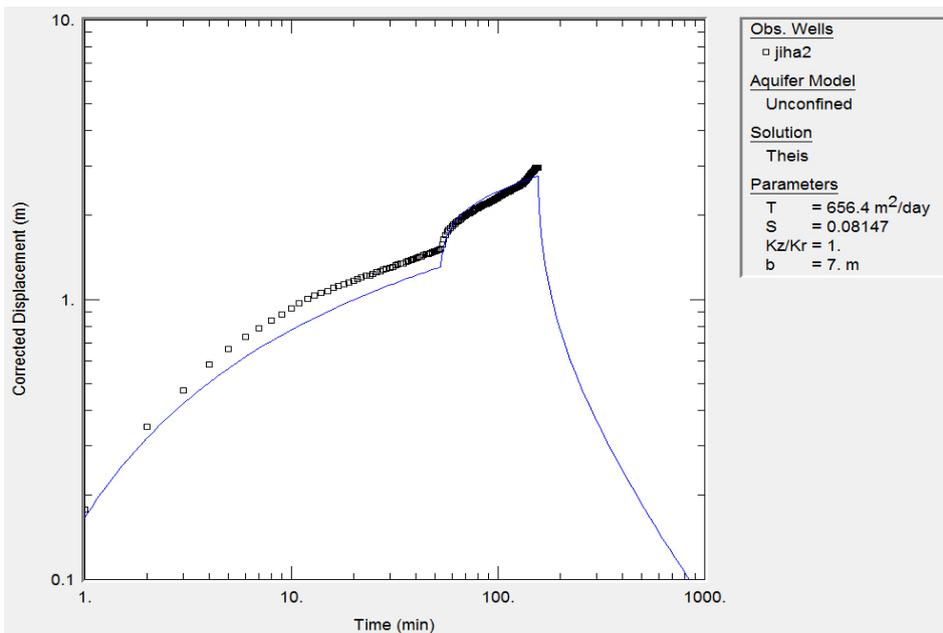
효과가 있으며 에어써징전인 초기상태 기준으로 122.4% 증대되는 효과가 있었다. 공주 집수정2번 수평집수관은 1단에 6개소 2단에 20개소로 개소당 평균 집수관의 길이를 20m로 가정하였을 때 총 수평집수관의 길이는 520m이며 우물재개발을 위하여 권선형 스크린의 총 삽입길이는 40m임을 감안하면 총 집수관 길이의 대략 8% 구간만 충격식 방법으로 우물재개발하였을 뿐인데 투수량계수가 60.3%(122.4%) 증대되는 큰 효과가 있는 것으로 나타났다으며 PVC 수평집수관 전구간에 대하여 충격식 방법으로 우물재개발을 시공하면 초기 개발당시의 취수량 이상으로 회복할 가능성이 크다고 판단된다.



<그림 7-32> 공주 집수정2번 에어써징전 양수시험



<그림 7-33> 공주 집수정2번 에어써징후 양수시험



<그림 7-34> 공주 집수정2번 우물재개발후 양수시험

7.3.4 기존 농업용 방사상 집수정의 시설 개선

가. 구경 확대를 통한 방사상 집수정의 시설 개선

- ◎ 기설치된 수평집수관의 관경확대를 통한 수량 확보 검토
- ◎ 수평집수관 내부의 유량추정공식을 사용하여 유량 산정

- Hazen-Williams식 : $Q = 0.27853 CD^{0.63} I^{0.54}$

- Manning식 : $Q = \frac{\sqrt{\frac{h_f D^{5.83}}{10.3L}}}{n}$

여기서 C, n은 마찰계수, I는 동수경사, D는 관내경, L은 관길이, Hf는 손실수두

- Hazen-Williams식에서 관경 65mm에서 유량과 관경 200mm에서의 유량의 차이는 2.03배, Manning식에서의 유량 차이는 2.6배로 계산되어짐
- ◎ 기존 집수정에 수평집수관 관경 65mm 30m를 추가 시추시 3,400만원 가량 소요(m당 116만원)
- ◎ 기존 집수정에 수평집수관 관경 150mm 30m를 추가 시추시 6,160만원 가량 소요(m당 205만원)
- ◎ 기존 운영중인 방사상 집수정은 개발당시 취수량을 맞추기 위해서 설계된 수평집수관외 추가로 시추한 수평집수관이 상당수 있을 것으로 보임 (공주 집수정2번 : 설계 수평집수관 18개소 -> 설치된 수평집수관 26개소)
- ◎ 좁은 우물통 반경에 방사상으로 많은 수의 취수관이 시추된 관계로 시설개선을 위한 추가 수평집수관 시추 시 우물통의 구조안전성 및 수평집수관별 취수량의 상호작용 등을 고려해야 될 것으로 판단됨

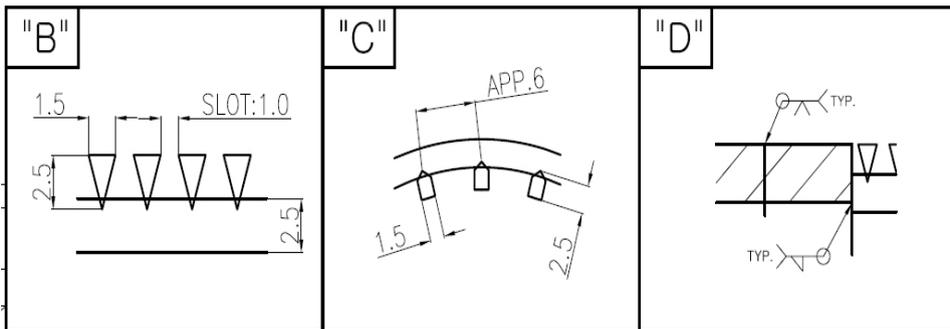
나. 권선형 스크린 삽입을 통한 방사상 집수정의 시설 개선

- ◎ 권선형 스크린 삽입을 통한 우물자재 시설 보완

- 농업용 방사상 집수정의 수평집수관 대부분이 20년이상 시설노후화로 인하여 상당부분이 변형 및 파손되어 모래 및 자갈등이 유입됨
- 공내영상촬영 결과 끝단이 오픈된 집수관이 상당수 존재하며 에어써징 작업후 자갈 등이 유입되어 집수관을 막는 현상이 수차례 관찰됨
- 에어써징, 고압충격등 고압의 압축공기등으로 사후관리시 집수관의 파손이 예상
- PVC 스크린 대비 10배 이상의 강도와 5배이상의 개공율을 가진 반영구적인 수명과 내구성이 뛰어난 스텐레스 재질의 권선형 스크린 삽입을 통한 시설 개선이 필요함
- 기존 설치된 PVC 스크린 : 인장강도 40.7N/mm² 개공률 8%이하
- STS304 스텐레스 권선형 스크린 : 인장강도 517.02N/mm², 개공률 40%

◎ 고압충격발생공법 적용시 스크린 강도 검토

- 권선형 스크린 상세



<그림 7-35> 권선형 스크린 상세도

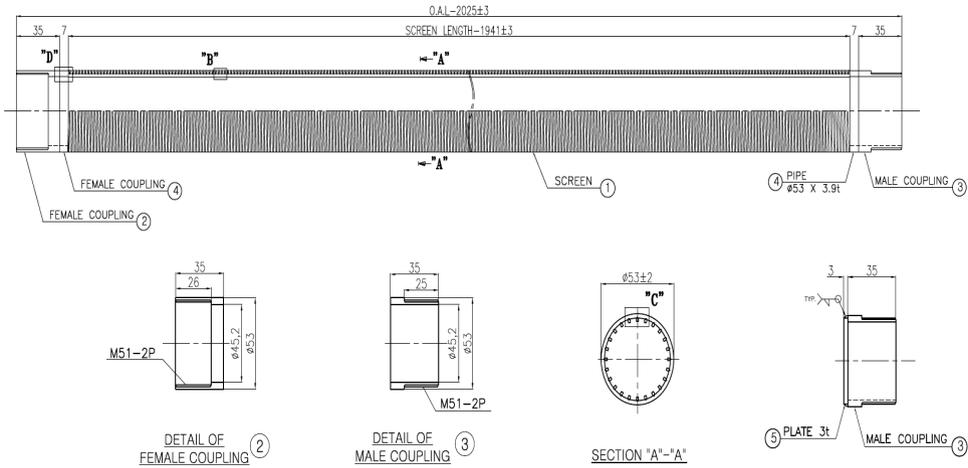
Wedge Wire Screen 재질 : STS 304

Profile Wire : 1.5 Width × 2.5 Height 역삼각 구조

Support Rod : 1.5 Width × 2.5 Height 오각 구조

개공률 : 40%

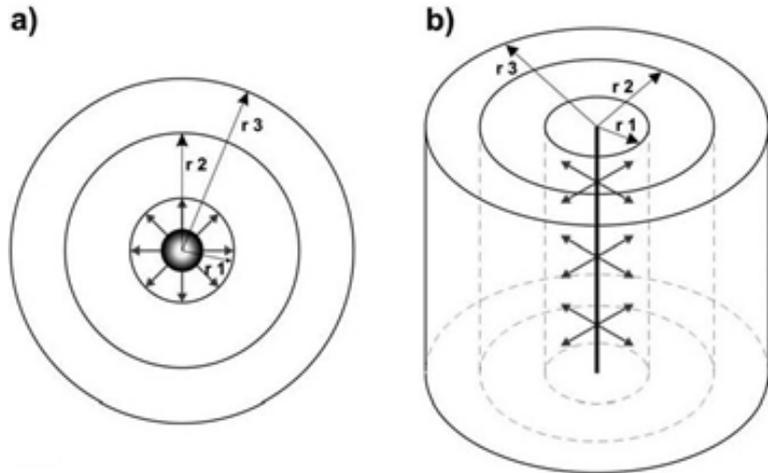
- 권선형 스크린 제원



커플링 외경 / 내경 / 길이 : 53mm / 45.2mm / 35mm

<그림 7-36> 권선형 스크린 일반도

- 충격파의 전달



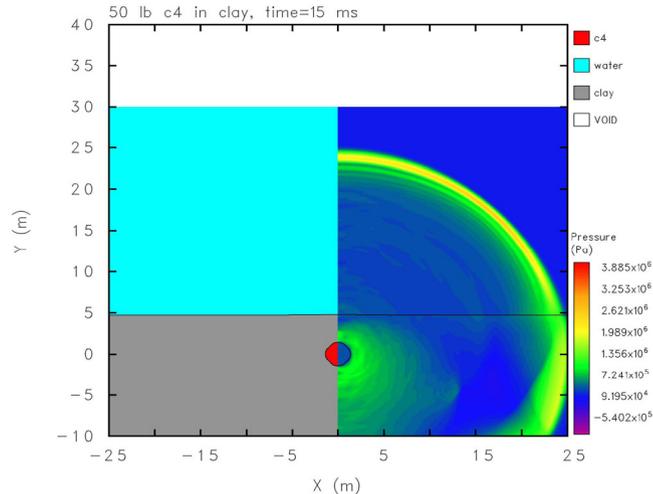
<그림 7-37> 충격파의 전달(Houben and Treskatis, 2007)

파동(wave)의 전달과정에서 강도(I)는 에너지(P)에 비례하며 작용하는

표면적(A)에 반비례하여 통상 충격(impulse) 에너지원이 점원(point source)이기 때문에 충격강도는 $I = \frac{power}{area} = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$ 로 표현할 수 있으며 도폭선과 같이 에너지원이 선원일 경우 <그림 7-37(b)>와 같이 나타낼 수 있으며 실제 수평집수관에서 스크린과 주변 여재층 내에서의 파동에너지는 열(heat)과 음파와 입자들의 움직임(particle movement)으로 변환되어 진다.

- 충격파의 수중전달(shock wave propagation)

고폭약(C4)이 수중에서 폭발했을 때의 시뮬레이션 결과는 다음과 같으며 통상 수중 폭발시 3000℃이상의 온도와 200kbar 이상의 압력이 발생됨



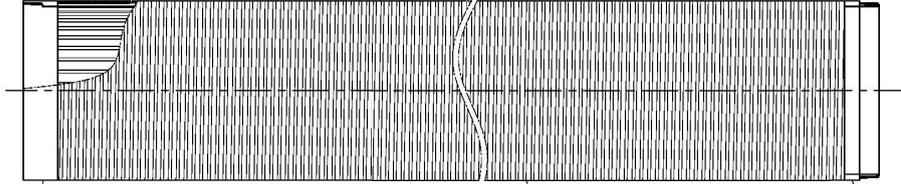
<그림 7-38> 충격파의 수중전달(Peter T. Dzwilewski and Gregg Fenton, 2003)

- 스크린 재질에 따른 우물재개발 공법별 적용 결과

우물재개발 공법별 적용가능한 스크린 재질은 2장에서 언급한 (표 3-3)과 같다. 시설개선용으로 수평집수정에 사용될 스크린은 STS 304이상의 스텐레스 재질의 권선형 스크린으로 서지블록을 제외한 모든 공법에 대해서 완전 적용가능하며 효과적인 ++등급에 있다. 특별히 고압충격발생공법보다 수십배 이상의 높은 압력의 충격파를 발생하는 폭약공법에서도 권선형 스크린은 ++등급에 있으며 경험적으로 고압충격발생공법의 외국사례 및 200공

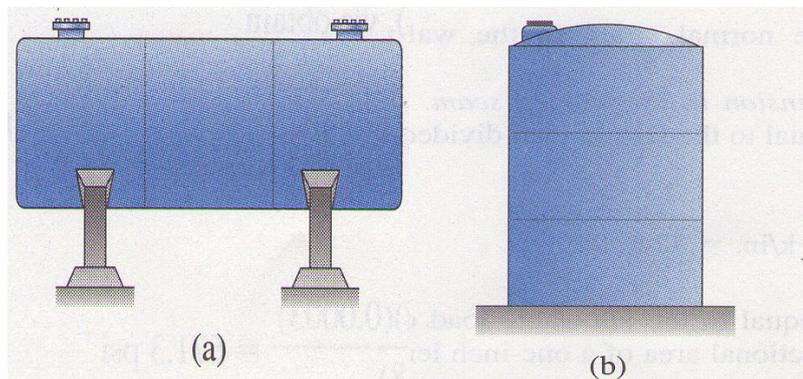
이상의 국내 시공결과(2011~2015년 함안 및 창원 강변여과수)에서도 스크린의 변형은 발견되지 않았다.

- 스크린 강도 검토 : 인장강도 기준



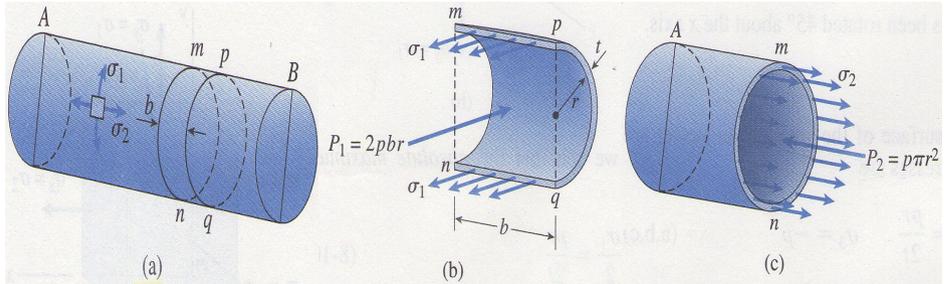
<그림 7-39> 권선형 스크린 외형도

상기 구조의 스크린에서 충격파가 생성되어 전달될 때 wedge wire screen의 profile wire(역삼각형)에 대한 단면 2차 모멘트를 환산하여 스크린두께로 산정하여 충격강도를 계산하였다. Profile Wire의 제원이 모래층 기준 W1.5mm × H2.5mm일 때의 환산두께는 1.60mm이며 자갈층 기준 W3.0mm × H4.6mm일 때의 환산두께는 2.90mm이다. 충격파의 에너지원인 압축공기의 체적이 300cm³이며 최대압력이 200kg/cm²일 때 충격파가 스크린면을 지날 때 스크린에 가해지는 스크린면에 발생하는 응력은 실린더형 압력용기에 가해지는 것과 같다.



<그림 7-40> 원형 단면을 가지는 실린더형 압력용기(Gere & Timoshenko, 1997)

<그림 7-40>과 같이 실린더형 압력용기에 작용하는 압력과 응력의 관계는 <그림 7-41>과 같다.



<그림 7-41> 실린더형 압력용기에 작용하는 압력과 응력의 관계(Gere & Timoshenko, 1997)

<그림 7-41 (b)>에서 $\sum F = \sigma_1(2bt) - 2pbr = 0$ 식이 성립하며 <그림 7-41 (c)>에서 $\sum F = \sigma_2(2\pi rt) - p\pi r^2 = 0$ 식이 성립한다. 두 식을 정리하면 실린더형 압력용기의 두께는 $t = \frac{pr}{\sigma_1}$, $t = \frac{pr}{2\sigma_2}$ 로 정리되며 압력용기에 작용하는 응력을 재료의 허용응력으로 두면 <그림 7-41 (b)>에서 받는 응력이 크므로 다음과 같이 두께를 정할 수 있다. 스크린 내부압력 $p=2.0\text{kg/mm}^2$, 스크린 내부반경 $r=26.5\text{mm}$, STS 304 재료의 인장강도 $\sigma=52.70\text{kg/mm}^2$ 일 때 두께 $t = \frac{2.0 \times 26.5}{52.70} = 1.005\text{mm}$ 이는 profile wire 제원의 환산두께 1.60mm 미만이므로 스크린 두께는 적절하다(Gere & Timoshenko, 1997). 동일한 방법으로 기존 농어촌공사 방사상 집수정 PVC 스크린에 적용하여 계산하면 실제 VG1의 65A규격 PVC 스크린은 외경 76mm 두께 4.5mm이며 PVC 재료의 인장강도 $\sigma=4.149\text{kg/mm}^2$ 이므로 스크린 내부압력 $p=2.0\text{kg/mm}^2$, 스크린 내부 반경 $r=38\text{mm}$ 을 대입하면 $t = \frac{2.0 \times 38}{4.149} = 18.32\text{mm}$ 이므로 PVC 스크린의 두께가 최소 18.32mm 이상이어야 200kg/cm²의 충격과 압력에서 견딜 수 있으며 역으로 계산하면 고압충격발생공법으로 49.13kg/cm² 이하의 압력으로 시공해야 기존에 설치된 PVC 스크린이 견딜 수 있으나 시공압력이 작을 경우 스크린 주변의

막힘현상을 충분히 제거 할 수 있는 충격과가 전달되지 않는 문제점이 발생하게 된다.

- 스크린 강도 검토 : Impact Resistance(Charpy V-notch) 기준

샤르피 충격시험(Room Temperature 23℃)에서 STS304 이상의 스텐레스 재질은 일반적으로 88~134J의 에너지를 흡수하며(ASTM A240, ASME SA-240외) 경질 PVC 재질은 일반적으로 0.2~0.5J의 에너지를 흡수하는 것으로 알려져 있으며 저속 충격시 PVC/MBS재료의 파괴특성에 관한연구에 따르면 0.579J의 에너지를 흡수한다.(최영식 외, 2002) 충격과의 에너지원인 압축공기의 체적이 300cm³이며 최대압력이 200kg/cm²일 때 충격과가 가지는 에너지는 대략 4.5kJ이며 1.0g의 TNT 폭발력과 같다. 총 에너지 4500J을 가지는 충격과는 방사상으로 에너지가 퍼지며 스텐레스 스크린 Profile Wire의 제원이 모래층 기준 W1.5mm×H2.5mm 일때의 환산 두께 1.60mm을 기준으로 계산하였을 때 반경 26.5mm에서 가장 큰 충격을 받는 Profile Wire의 에너지는

$$\frac{2 \times \pi \times 26.5 \times 2.5}{4 \times \pi \times 26.5^2} \times 4500 = 212.3J \text{이며}$$

샤르피 충격에너지는 단위면적 1cm²당의 에너지이므로 환산하면

$$\frac{212.3}{2 \times \pi \times 2.65 \times 0.16} = 79.69J/cm^2 \text{이다.}$$

동일한 방법과 기준으로 외경 76mm, 두께 4.5mm의 VG1 65A 규격의 경질 PVC 스크린에 대하여 적용하면 스크린 반경에서 가장 큰 충격을 받는 면의 에너지는

$$\frac{2 \times \pi \times 38 \times 2.5}{4 \times \pi \times 38^2} \times 4500 = 148.0J \text{이며}$$

샤르피 충격에너지는 단위면적 1cm²당의 에너지이므로 환산하면

$$\frac{148.0}{2 \times \pi \times 3.8 \times 0.45} = 13.77J/cm^2 \text{이다.}$$

이상과 같은 계산결과에서 STS304 이상의 스텐레스 재질의 권선형 스크린은 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 충격과가 가지는 에너지를 잘 흡수하지만 PVC 재질의 스크린은 충격흡수에너지 범위를 수십배 초과하는 취성이 높은 재질이라고 할 수 있다. 실제 200mm 권선형 스크린 Pilot 폭약 시험에서 스크린 주위에서 측정된 압력은 5000psi로 고압충격발생기로 발생하는 최대압력의 약 16배에 해당하는 값으로 이는 충격에 뛰어난 오스테나이트계 스텐레스 스틸 (Austenitic Stainless Steels) STS304, STS316(L) 재질의 스크린이 도폭선과 같은 폭약공법에 의한 충격 후에도 스크린에 변형이 생기지 않는 이유이다.



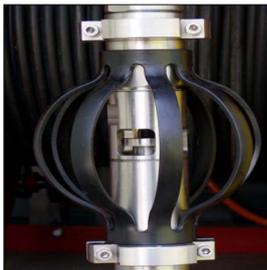
<그림 7-42> 권선형 스크린(200mm) Pilot 폭약시험



<그림 7-43> 권선형 스크린(200mm) Pilot 폭약시험 결과

다음은 독일 TLM의 충격발생기 제원이며 5kJ의 충격에너지는 집수정 주변 5m의 영향반경을 가진다.

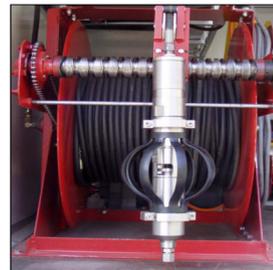
Characteristics	GI	GII	GIII
Area of application	Wells and development bores, measuring points	Wells and development bores, injection wells	Wells and development bores, injection wells
Well diameter Operating depth	> 50 mm down to 500 m	> 100 mm down to 2000 m	> 75 mm down to 500 m
Pulse generator length Pulse generator diameter Weight Working pressure (adjustable)	310 mm 40 mm 1,0kg 1-4 MPa	570 mm 70 mm 8,0 kg 1-10 MPa	570 mm 60 mm 4,1 kg 1-10 MPa
Pulse release Pulse sequences Design	Automatic adjustable stainless steel acid resistant	Automatic adjustable stainless steel acid resistant	Automatic adjustable stainless steel acid resistant
Energy deposit	Approx. 5 kJ conform to 1,2 g TNT	Approx. 25 kJ conform to 6-7 g TNT	Approx. 12,5 kJ conform to 3-4 g TNT
Effective depth around the wells	Approx. 5 m	Approx. 25 m	Approx. 12 m



GII with hole centering device



Effect of a pulse



GII with electric hose reel

<그림 7-44> 독일 TLM의 충격발생기(독일 tlm-gmbh)

◎ 권선형 스크린 삽입을 통한 방사상 집수정의 시설 개선비용

- 한국농어촌공사에서 기존에 실시하고 있는 에어써징을 포함한 방사형 집수정의 사후관리비용(2015년 공주 방사형 집수정 에어써징 사후관리용역 기준)은 (표 7-4)와 같음
- 한국농어촌공사의 노후화된 방사형 집수정의 시설 개선 방안으로 비용 대비 효율면에서 가장 경제적인 방법은 기존의 수평집수관에 권선형

스크린 삽입을 통하여 우물재개발을 하는 것으로 판단되며 우물재개발 방법으로 고압충격방식이 가장 효과가 뛰어나

- 워터젯팅의 경우 권선형 스크린의 설치는 필요 없으나 현 시설의 수평 집수관 상당부분이 노후화로 인한 변형 및 파손이 발생되었기 때문에 장기적인 관점에서 권선형 스크린 설치를 통하여 시설수명을 연장할 필요가 있음
- 권선형 스크린의 설치비용은 m당 대략 10만원 수준이며 재질의 수명이 반영구적임

(표 7-4) 방사형 집수정의 사후관리 비용

구 분	에어써징 (기존방법)	워터젯팅	고압충격	고압충격 (최초시공)
수평집수관 200m 기준	2,500만원	3,100만원	3,900만원	5,900만원

7.4 암반층 방사상 집수정 개발

7.4.1 방사상 집수정 시공순서 및 공종 설명

가. 시공순서

- 1) 기본조사
- 2) 실시설계
- 3) 공정계획 수립 및 작업준비
- 4) 토목공사(터파기 및 우물통 설치)
- 5) 수평착정 및 집수관 설치
- 6) 기타공사
- 7) 양수시험 및 수질검사
- 8) 이용시설 및 급수배관 설치
- 9) 웬스 및 옥외 시설물 설치
- 10) 시설물 준공

나. 세부내용

(1) 기본조사

사업계획 수립시 수원공을 방사상 집수정으로 추진하기로 결정한 후 기본 조사를 실시하게 된다. 기본조사는 해당지역에 대한 광역적인 지표지질조사 및 물리탐사를 실시하고 적당한 후보지를 결정한 후 시추조사를 실시한다. 시추조사를 통하여 지질상태를 파악한 후, 양수시험등 제시험을 실시하여 개발가능량을 산출한다<그림 7-45><그림 7-46>.



<그림 7-45> 물리탐사



<그림 7-46> 시추조사

(2) 실시설계

기본조사에서 취득된 자료를 바탕으로 집수정의 개소수와 수평착정공수, 우물통의 깊이, 수중모터펌프의 용량 산출 등 집수정 시공에 필요한 설계서를 작성한다. 농업용 집수정 설계에 필요한 제 계산 순서는 다음과 같다.

(가) 수혜면적 산출

(나) 수원공 계획 : 우물통 심도, 수평착정 또는 사이폰 개수 검토

(다) 단위용수량 계산

(라) 지하수 수지분석

1) 소요수량 검토 : 단위 용수량을 기준으로 설정

2) 집수정 취수 가능량 검토 : 수평취수관 길이에 해당하는 반경을 갖는 대구경 우물을 가정, 집수량을 산출 Thiem의 평형공식을 이용

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{2.3 \log R/r}$$

여기서, K : 투수계수, H : 자유지하수면 수두, h : 양수시 수두,
r : 우물반경, R : 영향반경

(마) 수평착정 공수결정

1) 공당토출량 (Hazen-william 공식)

$$q = 0.27853 C D^{2.63} I^{0.54}$$

여기서, q : 공당토출량, C : 유속계수, D : 수평집수관경,
I : 동수구배

2) 수평착정 공수결정

$$N = Q / 8 (1 + \alpha) \quad \text{여기서, } \alpha : \text{여유율}$$

(바) 싸이폰관 검토

$$Q = \pi D^2 / 4 \sqrt{2gh / (1 + f_i + f_b + f L/D)}$$

여기서, Q : 싸이폰관 유량, L : 파이프 길이, D : 관경,
H : 수두차, g : 중력가속도, f_i : 유입손실계수,
 f_b : 곡관손실계수, f : 관마찰 손실계수

(사) 우물통 설계 : 토사 단위중량 등 7개 항목의 조건을 이용하여 콘크리트 구조물설계

(아) 기계 및 전기공사 설계 : 수중모터펌프 및 급수배관과 전기배전반 설계

(자) 건축설계 : 양수장을 건축할 경우 설계

(3) 공정계획수립 및 작업준비

설계서의 승인 절차가 완료되어 사업시행 인가가 나면, 집수정 공사를 착수하게 된다.

시공 시 우선 작업장은 철근 및 레미콘 타설을 위한 공간 및 터파기시 배출되는 토사 및 암석을 적재할 수 있는 충분한 공간을 확보할 수 있도록 하고, 터파기시 발생하는 지하수를 적절히 배출시킬 수 있는 배수구의 설치 등

시공위치에 대한 부지정리를 해야 할 것이다<그림 7-47>.

그리고, 공사현장이 비교적 안전하지 못하므로 울타리를 쳐서 작업장을 외부와 차단시켜야 하며, 안내 표지판 및 경고 표지판을 설치하여 외부인의 출입을 차단해야 한다. 또한, 화약을 사용할 경우 미리 화약 임시저장고를 설치하여 안전상 조치를 하여야 한다<그림 7-48>.

작업 시작전에 장비 및 자재의 반입 및 공정계획을 면밀히 분석하고, 주변 민원의 발생요인 파악 등 사전준비 작업을 한다. 보통 집수정 공사는 3개월에서 6개월 또는 그 이상 장기간에 걸쳐 한 장소에서 시행되는 공사이므로 사전에 철저한 준비를 해야 시공중 혼란을 막을 수 있다.

집수정공사에 투입되는 장비는 토목공사에 필요한 장비가 먼저 투입된다. 대략적인 투입장비는 각 장비에 전기를 공급하기 위한 대용량 발전기와 터파기 작업 도중 발생하는 지하수를 배출하기 위한 수중모터펌프가 우선적으로 배치되어야 한다. 그리고, 터파기시 발생된 토사 및 암석을 지하로 부터 배출시키기 위한 크레인 및 부수 자재를 설치하여야 한다<그림 7-49>.



<그림 7-47> 작업장크레인 설치



<그림 7-48> 화약고 설치



<그림 7-49> 현장 투입장비



(4) 토목공사 (터파기와 우물통 설치)

작업준비가 완료되면 토목공사를 시작한다. 우선 우물통 설치를 위하여 터파기공사를 실시해야 하는데, 미고결층 터파기와 암반층 터파기로 구분하여 시행한다.

(가) 우물통 설치

우물통 설치는 우선 일정 심도까지 백호우를 이용하여 터파기를 한 후 슈(Shoe)를 설치한다. 슈는 약 0.9m정도의 원형 철제 구조물로 터파기 후 우물통이 일정하게 하강할 수 있게 해주며, 슈 위에 우물통의 설치를 용이하게 해주고, 구조물이 안정적으로 유지될 수 있도록 한다<그림 7-50><그림 7-51>.

슈의 설치가 끝나면, 그 위에 거푸집을 설치하고 철근조립 및 레미콘 타설을 시행하여 우물통을 만들게 된다. 이 우물통은 터파기를 하면 자중으로 하강하게 된다. 터파기에 의하여 일정 심도 만큼 우물통이 하강하면 다시 거푸집을 설치하고 철근조립 및 레미콘 타설을 반복하여 시행하게 된다<그림 7-52><그림 7-53><그림 7-54><그림 7-55><그림 7-56><그림 7-57>.

현장에서는 보통 ‘한 스팬(1 span)’ 이라는 용어를 사용하는데, 한 스팬은 우물통을 만들기 위한 거푸집의 높이가 약 2.5m정도 되므로, 1회 콘크리트 타설로 2.5m정도의 우물통이 형성되어 나간다는 의미이다. 따라서 터파기와 우물통형성은 약 2.5m 간격으로 반복시행 된다. 그리고, 특별한 경우로써, 암반의 암질이 절리의 발달 등으로 불규칙할 경우에는 수중콘크리트를 이용하여 암반자체에 콘크리트 벽체를 만들기도 한다.



<그림 7-50> 지표면 터파기



<그림 7-51> 슈 설치 전경



<그림 7-52> 내부 거푸집 설치



<그림 7-53> 철근가공 조립



<그림 7-54> 외부거푸집 설치



<그림 7-55> 콘크리트 타설



<그림 7-56> 우물통 형성



<그림 7-57> 우물통 침하

(나) 미고결층 터파기

우물통을 형성해 나가는 과정에서의 미고결층 터파기는 주로 핸드프레카를 이용하여 굴착한다. 이때 발생된 토사는 배출통에 퍼 담고, 크레인을 이용하여 외부로 배출한다. 터파기시 크랩셀이라는 장비를 사용하기도 하는데, 일반

적으로 크레인 및 배출통을 많이 이용한다. 작업기간은 2.5m 터파기 하는데 보통 3~4일 정도 소요된다<그림 7-57><그림 7-58>.



<그림 7-58> 토사층 터파기(인력)



<그림 7-59> 토사층 터파기(크랩셀)

(다) 암반층 터파기

암반층 터파기는 주로 폭약을 이용하여 발파한후, 인부가 내려가 깨진 암석을 외부로 배출하는데, 안전사고의 위험성이 가장 큰 부분이다. 폭약의 설치 및 발파에는 반드시 발파주임을 선정하고, 폭약설치후 주변부에 큰 충격이나 전기 충격이 화약에 도달되지 않도록 각별히 주의해야 한다<그림 7-60><그림 7-61>.

화약의 반입은 화약사용 허가를 먼저 받은후, 지정된 화약상에서 화약을 수령하고, 경찰서의 확인을 받아 현장으로 운반한다. 사용하고 남은 화약은 반납하거나 현장의 임시저장고에 저장한다. 하지만, 당일 수령한 화약은 당일에 모두 사용할 수 있도록 화약을 수령해야 안전 할 것이다. 작업기간은 0.5m~1m 터파기 하는데, 발파 및 대기에 1일~2일 정도 소요되고, 터파기에 3~4일정도 소요된다.



<그림 7-60> 우물통 내부 착압



<그림 7-61> 발파용 화약

(5) 수평착정 및 집수관설치

수평착정공사는 우물통이 계획심도까지 설치되거나 우물통 공사가 완료되었을 때, 적당한 위치를 선정하여 실시하게 된다. 이때 우물통 바닥에서 수평착정 작업을 하지 않을 경우에는 비계를 설치하거나 상부에서 와이어를 이용하여 작업대를 매단 후 작업하게 되는데, 이때도 안전에 주의해야 한다.

수평착정시 장비는 수평착정기를 사용한다<그림 7-62>. 이러한 수평착정기를 이용하여 토사층에 수평착정 할 경우에, 수평착정공이 붕괴되는 경우가 있는데, 이를 방지하기 위하여 수평착정시 케이싱을 삽입하여 우물자재설치 후 케이싱을 제거하는 방법인 쉴드(shield) 보링법을 많이 사용한다. 쉴드 보링법은 케이싱에 크라운 비트를 달고, 룯드에 트리콘 비트를 달아 동시 굴착하며 케이싱을 삽입하는 방법이다. 암반층의 경우에는 함마 타격으로 수평착정공을 형성한 후 우물자재를 설치한다<그림 7-63>. 이 수평착정 작업시 한가지 주의해야 할 점은 모든 수평공에서 똑같은 수량이 확보될 수도 있지만, 일반적인 경우 각 수평공의 수량은 차이가 많을 수 있다. 그렇기 때문에 이 공정에서 검토를 게을리 하면, 작업후 양수량이 확보되지 않을 수 있으므로, 수평착정 작업시 수량이 많이 확보되는 곳을 잘 검토해서 공 배치 및 착정 길이를 조정해야 할 것이다. 수평착정공은 대략 $\phi 110\text{mm}$ 정도의 구경으로 굴착하고, 우물자재는 $\phi 65\text{mm}$ 의 스트레나를 삽입한다<그림 7-64>. 또한 우물통내부가 협소하기 때문에 수평착정시 대략 1m 정도의 룯드를 연결하여 사용하며<그림 7-63>, 집수관 설치를 위한 스트레나도 1m 정도의 자재를 소켓으로 연결하여 삽입한다<그림 7-65>.

수평착정 및 우물자재 설치가 끝나면, 각 수평 착정공에 밸브를 설치한 후

밸브를 조작하여 각 수평공에 대한 양수량을 측정하고 검토해야 한다<그림 7-66><그림 7-67>.



<그림 7-62> 수평착정공사



<그림 7-63> 로드 및 함마비트



<그림 7-64> 우물자재 설치



<그림 7-65> 우물자재 선단부



<그림 7-66> 공별 취수량 확인



<그림 7-67> 수평공 밸브설치

(6) 기타공사

수평착정공사가 완료되고 수평착정공의 양수량 확인이 끝난 후 우물통에 대한 청소작업을 실시하여 우물통 벽체에 묻은 이 물질을 제거하고, 우물통 바닥에 침전되어 있는 토사 및 암석 파편을 제거하여 우물통의 상태가 최적화 될 수 있도록 해야 한다<그림 7-68>.

우물통 상부에서 약 2m정도의 위치에 수중모터 거치 및 집수정의 내부 점검시 사용할 수 있도록 중간작업대를 설치한다. 이 중간작업대는 콘크리트 구조물로 만들 수도 있지만, 철근으로 지지보를 만들고 그 위에 스테인레스 스틸로 바닥을 덮어 만들기도 한다. 향후 집수정의 보수를 고려한다면 스테인레스로 만들어 놓는 것이 좋을 것이다. 또한, 중간 작업대에서 측면으로 구멍을 만들어 배관 및 전선을 외부로 연결 할 수 있게 해주어야 한다<그림 7-69>. 또한, 우물통 바닥으로 내려 갈 수 있는 사다리를 설치한다<그림 7-70>.

끝으로, 우물통의 상부에 덮개 슬라브를 설치하고 환기구 및 출입구를 만들어 우물통을 완성한다<그림 7-71>.



<그림 7-68> 우물통 청소



<그림 7-69> 중간작업대



<그림 7-70> 사다리 설치



<그림 7-71> 슬라브 설치 완료

(7) 양수시험

수평착정공사가 완료되면 양수시험을 실시하게 되는데, 수평착정공 각각에 대하여 간이양수시험을 실시하고, 집수관에 모인 지하수에 대하여 대용량의 수중모터 펌프를 이용하여 총 양수량을 측정한다. 양수량 측정은 V-노치를 이용하기도 하지만, 보통 유량계를 많이 이용한다. 양수시험이 완료되면 수질 검사를 실시한다<그림 7-72>.



<그림 7-72> 양수시험

(8) 이용시설 설치공사

우물통의 설치 및 수평착정 공사가 완료되면, 집수정에서 외부로 물을 공급할 수 있도록 송수관로를 설치한다, 송수관로 설치시 바닥에 모래를 부설하고 잘 다짐을 실시해 준다<그림 7-73><그림 7-74>. 그리고, 수중모터 펌프<그림 7-75> 및 내부배관<그림 7-76>과 전기배전반<그림 7-77>을 설치한다. 또한, 집수정 외부에는 헨스를 설치하고, 집수정과 헨스사이의 공간에는 자갈을 깔아서 잡초의 생육을 억제하고, 먼지 등이 날리지 않도록 한다<그림 7-78>.



<그림 7-73> 터파기, 모래부설 및 다짐



<그림 7-74> 관로 및 전선관 매설



<그림 7-75> 수중모터 설치



<그림 7-76> 내부배관 설치



<그림 7-77> 동력설비설치 완료



<그림 7-78> 펜스설치 및 자갈깔기

(9) 완 료

집수정이 완료되면 준공절차를 거쳐, 시설물 관리자에게 인계한다.

7.4.2 집수정 개발시 문제점 및 주의 사항

가. 부지선정 및 개발계획수립

방사상 집수정에서 첫째로 중요한 것은 부지선정이라고 할 수 있겠다. 왜냐하면 일단 부지가 선정되고 터파기 및 우물통 설치를 시작하면 일반지하수 공사처럼 폐공이 발생하여도 다시 위치를 옮겨서 시공하기가 어렵기 때문이다. 따라서, 계획단계에서 제반여건을 철저히 검토하여야 할 것이다.

나. 시공시 안전조치

(1) 지하 터파기시 공벽 붕괴

집수정의 터파기는 지하에 인부가 내려가 작업하기 때문에 시간이 많이 소

요되고 어려운데, 불규칙한 지층을 만날 경우 공벽 붕괴도 발생될 수도 있다. 그렇기 때문에 신속한 탈출 장비와 감시자의 배치는 최우선적으로 고려되어야 한다.

(2) 환기조치

지표로부터의 심도가 저심도 일 경우에는 자연적인 환기가 이루어지지만, 심도가 깊어지면 환기에 문제가 발생할 수 있기 때문에 인위적인 환기 장치를 이용하여 작업자에게 신선한 공기를 항상 공급해 주어야 한다.

(3) 발파시 안전조치

암반 터파기시 화약을 사용해서 작업을 해야 할 경우가 있는데, 집수정 공사에서 가장 유의해야 할 부분이다. 화약의 반입, 운반 및 설치, 발파의 전 과정을 꼼꼼히 점검하여 안전사고가 없도록 조심해야 한다. 화약의 반입은 각 지역의 화약저장고에서 인수하고, 경찰서에서 이에 대한 확인을 받고 반입하는데, 화약주입의 선임 등 안전조치를 철저히 이행하여 불이익을 받지 않도록 해야 한다.

다. 민원의 발생과 해결

집수정 공사에서의 민원은 작업과정에서 발생하는 소음, 먼지 등이 있는데, 특히 소음은 발파시 발생하는 소음과 수평 착정시 사용하는 공기압축기에서 발생하는 소음이 가장 일반적이다. 또한, 수평착정시 집수관의 길이가 30~70m정도 되므로 주변 경작지의 소형관정 등에 영향을 미쳐 민원이 야기되기도 한다. 그렇기 때문에 공사착수 전 주변의 주민들과 공사에 대하여 충분한 협의 및 설명을 해야 한다.

제 **8** 장

결 론

제8장 결 론

본 연구는 대용량지하수(2,000톤/일) 취수시설로 이용되는 방사상 집수정의 설계방식 및 문제점 파악과 더불어 기존 방사상 집수정 우물효율 개선방안을 제시하여, 향후 신규 방사상 집수정 건설 시 고려해야할 개선된 설계방안에 관한 연구를 수행하였다.

해외에서 방사상 집수정은 주로 강변여과 방식을 이용한 대용량 취수 등에 활용되어 왔으며, 최초의 수평정은 1920년대에 유정에서 많은 원유를 생산하기 위해 텍사스에서 개발된 이후, 방사상 유정개발은 오하이오주의 말타에서 1927년에 최초로 이루어진 것으로 알려져 있다.

국내에서 방사상 집수정은 1981년도 한해 대책의 일환으로 한국농어촌공사에서 지하댐 사업의 취수 시설로 최초로 설치하였으며, 2000년대 초반 창원시, 2013년 김해시에서 수돗물 생산을 위하여 설치·운영 중인 방사상 집수정은 유럽형 강변여과방식을 채택하였다. 이 기간 동안 미국형 강변여과방식도 도입되어 울산 태화강, 서울 홍제천 등에서도 방사상 집수정을 설치하여 건천의 유지용수 확보에 활용하고 있다.

지금까지의 조사 결과 농업용 방사상 집수정의 일반적인 제원은 내경 3.5 m, 심도 10 m 이내, 수평집수관은 구경 65 mm의 PVC 자재를 30 m 이내로 시공되었으며, 집수정마다 수평집수관은 9~28개로 다양하였다. 또한 하천과 인접한 지역에서는 65 mm의 수평집수관 이외에도 500~800 mm 구경의 집수암거가 설치되어 있는 시설도 발견되었다.

시설물 안전진단, 설문조사, 집수정 개발이용 특성 및 일부시설 현장 확인에 의한 방사상 집수정 효율저하 유형은 층적층 지하수위 하강에 따른 채수량 감소, 수평취수정 공막힘에 의한 채수량 감소, 지반침하, 주변농경지 사금 또는 골재 채취후 수량감소, 사이편식 집수정 진공배관 노후로 집수가 잘 되지 않는 경우로 분류되었다.

방사상 집수정 수평집수관 취수기능저하 주원인은 지표에서 미립자의 유입, 물-암석 반응으로 인한 광물의 침전 등이 있으며, 그 이외에도 수중펌프의 산화 및 부식, 생물학적 과정인 박테리아에 의한 파이프에 침전물 축적 등이 있다.

우물효율 개선을 위한 재생기법은 크게 물리적 처리와 화학적 처리로 구분할 수 있다. 물리적 처리방법은 브러싱, 서지블럭 소제와 같은 기계적 방법

과, 고압유체분사와 같은 수리학적 방법, 폭약, 고압가스, 고압펄스방전, 초음파와 같은 충격식 방법, 열처리 등이 있다. 화학적 처리방법에는 산처리 방법, 유기용제에 의한 봉쇄, 향균제 처리 등이 있으며, 현장의 상황과 효율성 향상을 위해 다양한 방법을 병행하는 혼합처리방법을 사용하기도 한다.

서징에 의한 수평집수관 폐색제거 효과 분석을 위한 현장실증시험 실시결과 폐색물질 제거로 수평집수관에서 집수정으로 유입되는 지하수의 흐름이 개선되어 비양수량이 67% 증가하고, 양수가능시간이 3배 이상 증가하는 것을 확인하였다. 또한 공주시사 지하2 집수정에서 고압충격공법을 적용한 결과, 에어써징 전인 초기상태 기준으로 122.4% 증대되는 효과가 있었다.

서징 시에는 청수 및 에어가 수평집수관에 평행한 방향으로 분사되며, 고압세척은 고압수 회전분사장치를 이용하여 수평집수관에 직각방향으로 고압수가 분사되므로 서징에 비하여 수평집수관 막힘물질 제거 효율이 높은 것으로 판단된다. 따라서, 서징 작업 시 청수 및 에어가 방사상 집수정의 수평집수관 벽면에 전달될 수 있도록, 선단 장치를 제작하여 이용한다면 서징효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

해외에서의 서징방법에 따른 취수량 증가 사례는 에어서징과 과잉 양수를 통하여 수위강하와 취수량 증가가 3배 이상 일어난 사례와 Sonar jet을 이용하여 회복 기술을 실시한 경우 2배 정도 취수량이 증가한 사례가 확인되었으며, 국내의 경우 에어서징 및 고압 충격공법을 창원대산 정수장 1단계 강변여과수 관정을 대상으로 적용한 결과 브러싱 및 에어서징으로 평균 취수량 증가율이 14.8%, 고압충격공법으로는 217.5%의 증가사례가 있었다.

서징방법의 소요 비용에 따른 경제적인 회복 기술을 확인하기 위하여 Helweg et al.(1983)의 관정의 단위주기 당 운용비용에 대한 경험식을 이용하여 한국농어촌공사의 공주 집수정의 에어서징 전, 후를 비교하였다. 산정결과 1일 8시간 양수한 경우 농업용(갑)요금을 적용하였을 경우, 에어서징 전 소요비용이 41,001원, 서징 후 31,185원으로 산정되어 서징후 운용비용이 약24% 절감됨을 알 수 있었다. 한편, 고압충격과 에어서징의 회복 기술 적용에 따른 증가 취수량 및 소요비용을 비교한 결과, 고압충격 공법이 비용 대비 취수량 증가율이 높게 나왔다. 그러나 고압충격 공법을 국내 방사상 집수관의 PVC 수평정에 적용할 경우 스크린 파손에 주의하여야 한다.

방사상 집수정의 회복 기술 실시 시기를 판단하기 위하여 우선적으로 우물 효율의 저하를 평가해야 한다. 우물 효율 저하 평가방법으로 공내 TV검층,

포화지수도, 화학 분석, 양수시험 등을 이용하며, 일반적으로 기존 취수량 보다 25% 감소 시 회복 기술을 적용해야 한다.

방사상 집수정의 수평공의 취수량 회복 기술 적용은 사전 조사, 현장 조사, 회복 기술 실시, 사후관리의 순서로 진행이 되며, 사전 조사에서는 집수정의 수위강하 확인, 배출 지하수 수질, 공내 TV검층, 양수를 통한 취수량 감소 확인을 통하여 회복 기술 실시 여부를 판단한다. 현장 조사에서 사전 조사를 기본으로 하여 수평정 제원, 대상지역의 지질, 공막힘 물질 분석 등을 통한 수평공에 적합한 회복 기술을 선택한다. 이후, 현장 조사 결과를 바탕으로 해당 방사상 집수정 수평공에 맞는 회복 기술을 적용하는데 필요하다면 하나 이상의 회복 기술을 적용할 수 있다. 마지막으로 사후관리에서는 회복 기술 실시 이후 결과 확인 및 집수정의 취수량 확인을 통해, 공막힘 현상 예방과 차후에 있을 회복 기술 실시를 위한 기초자료로 활용이 가능하게 된다.

방사상 집수정 설계 시 고려해야할 사항으로 유역의 지질, 수리 및 수문 특성, 최소한의 수위강하를 통한 목표수량의 확보 가능성, 양수량에 적합한 케이싱 재질 및 크기 최적 스크린 규모, 여재의 투입여부, 관정개발 및 시험의 용이성, 해당지역의 법 및 규제, 오염방지, 모래유입방지, 최소 25년 이상의 설계수명, 운용비용의 최소화, 운영 및 유지보수의 용이성이 있다.

참고문헌

- 국토해양부, 한국수자원공사, 2011, 지하수 우물 재개발 및 관리 기술, 97p.
- 경산시, 2006, 경산시 금호강 하상여과공법 적용을 위한 예비 타당성조사 학술
용역 보고서.
- 경상북도, 2007, 하상여과를 이요한 오염부하량 저감방안에 대한 학술연구 용
역보고서.
- 김재원, 김승현, 공인철, 백성욱, 2003, 오염지하수로부터 휘발성 유기화합물의
지표면 도달현상 연구-모델의 해석, 검증 및 적용, 대한토목학회지,
23(5B), 455-461.
- 김승현, 2007, 우리나라에서의 강변여과와 하상여과의 비교, 대한환경공학회지,
29(3), 1154-1162.
- 김승현, 권오역, 공인철, 김익재, 이철희, 박영규, 1998, 강둑여과지에서 지하수
함양율과 질소비료에 의한 지하수 오염량 산정연구, 대한환경공학회지,
20(12), 1689-1703.
- 김승현, 정장식, 1999, 하상여과를 이용한 금호강 수질개선연구, 환경연구(영남
대학교 환경문제연구소 논문집), 18(2), 73-86.
- 김해시, 2005, 강변여과수 개발사업 기본 및 실시설계 보고서.
- 농어촌진흥공사, 1996, 소유역지하담 개발에 관한 기술개발 연구.
- 대구광역시, 1006, 상수도사업 100년.
- 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, 2003, 하상여과를 이용한 하천수질
개선연구-모델전개 및 모델매개변수 결정, 대한환경공학회지 25(4),
486-494.
- 안규홍, 손동빈, 김승현, 2005, 하상여과 모형에서 유기물과 질소의 제거, 대한
환경공학회지, 27(5), 525-534.
- 정지훈, 박재현, 박창근, 양정석, 정교철, 최용선, 부성안, 2004, 방사상 집수정
에 의한 강변여과수 산출량 산정에 관한 연구, 지질공학회지, 14(4),
417-427.
- 창원시, 2003, 방사상 집수정에 의한 강변여과수 개발타당성 조사 및
pilot-plant 조사연구 보고서.

- 최영식, 박명균, 박세만, 2002, 저속 충격시 PVC/MBS재료의 파괴특성에 관한 연구, 한국정밀공학회 2002년도 추계학술대회논문집, 837-840.
- 최인규, 2003, 방사상 집수정의 이해, 농업기반공사.
- 한국농어촌공사, 1997, 관정의 적정관리를 위한 사후관리 방안에 관한 연구, 1997, 275p.
- 한국농어촌공사, 2014, 내수면연구소 양어용수 방사상 집수정 설치공사 준공 보고서
- 한정상, 1982, 지하수학 개론, 박영사.
- 한정상, 2000, 지하수환경과 오염, 박영사.
- 환경부, 2006, 상수도통계.
- 한국수자원공사, 2005, 실무자를 위한 관망해석 매뉴얼.
- 한국수자원공사, 2010, 지하수 우물 재개발 및 관리 기술.
- 환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996, 부산경남지역 복류수 및 강변여과수개발 타당성조사 보고서.
- 환경부, 부산대학교 산학협력단, 2012, 막힘 관정의 오염물질 확인 및 공막힘 제거기술 개발, 251p.
- Chapelle, F.H., 2001, "ground-water microbiology and geochemistry," John Wiley & Sons, Inc, 477p.
- Che, Y., Huang, W., Liu, D., Chen, J. and Sun, Z., 2006, "Micro-goethite in percolated water from Fushui reservoir in Hubei province, China," Materials Science and Engineering C, 26, 606- 609.
- Cowan, J.C. and Weintritt, D.J., 1976, Water-formed scale deposits, Gulf Publishing Company, 596p.
- Cullimore, R., 2000, Microbiology of Well Biofouling. Lewis Publishers, 435p.
- Cullimore, D. R., 2008, Practical Manual of Groundwater Microbiology, CRC Press, 379p.
- De Zwart A.H., Currie P.K., de Boer J., Vafaie Naeini A., Schotting R.J., 2008, Experimental and Theoretical Investigation of Clogging Processes Near Production Wells Using X Ray Tomography. Society

- of Petroleum Engineers.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Emerson, D., 2000, Microbial oxidation of Fe(II) and Mn(II) at circumneutral pH. In Lovley, D.R.(ed.) Environmental microbe-metal interactions, ASM Press, 31-52 pp.
- Fountain, J. & Howsam, P., 1990, The use of high pressure water jetting as a rehabilitation technique. In: Howsam, P.(ed.), Water Wells-Monitoring, Maintenance, Rehabilitation. Proc. Int. Ground water Eng. Conf., Cranfield, pp. 180-194. London: Spon/ Chapman.
- Ghiorse, W.C., 1984, Biology of iron-and manganese depositing bacteria, Annual Review of Microbiology, 38, 515-550.
- Hallberg, R. and Ferris, F.G., 2004, Biomineralization by Gallionella. *Gemicrobiology Journal*, 21, 325-330.
- Hantush, M. S., 1964, Hydraulics of Wells, *Advances in Hydrosience*, Academic Press, Inc., New York, 4, 281-431
- Houben, G. & Treskatis, C., 2007, *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*, McGraw-Hill Companies, inc., 391p.
- Hunt, H., 2002, American Experience in Installing Horizontal Collector Wells, *Riverbank Filtration, Improving Source Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 29-34.
- James M. Gere, Stephen P. Timoshenko, 1997, *Mechanics of materials*, PWS Pub Co., 912p.
- James, R.E. and Ferris, F.G., 2004, Evidence for microbial-mediated iron oxidation at a neutrophilic groundwater spring, *Chemical Geology*, 212. 301-311.
- Juttner, R. and Ries, T., 2001, Umweltgerechte Brunnensanierung mit Kohlendioxid, *bbr* 52(7), 38-42

- Katsoyiannis, I.A. and Zouboulis, A.I., 2004, "Biological treatment of Mn (II) and Fe (II) containing groundwater: kinetic considerations and product characterization," *Water Research*, 38, 1922–1932.
- KIWA, 2004, Putregeneratie met Ultrasoon–Stand van zaken 2004 en achtergrond–informatie, BTO 2004.009. Nieuwegein, The Netherlands: KIWA Water Research.
- Laszlo, F., 2004, Experience with Riverbank Filtration in Europe, 강변/하상여과에 관한 제1차 국제워크샵 발표자료, 한국과학기술연구원 금수강산 21 사업단, 서울, 18–34.
- Lindner, K., 1999, Modeling bank filtration and research on drinking water relevant substances, 제21차 국제환경문제심포지엄 논문집, 영남대학교 부설 환경문제연구소, 경산, 41–55.
- Miller, R.W. and Donahue, R.L., 1990, *Soils, an introduction to soils and plant growth*, 6th ed., Prentice–Hall International, Inc.
- Milojevic. M., 1963, Radial collector wells adjacent to river banks, *J. Hydraul. Div. ASCE* 89, 133–151.
- McLaughlan, R. G., 1996, *Water Well Deterioration–Diagnosis and Control*. Technology Transfer Publication 1/96. Sydney: UTS–NCGM.
- Muckenthaler, P., 1989, Eranzende Modellvorstellungen fur Erosions–und Suffosion–skriterien. *Wasserversorgung TH Darmstadt*.
- Peter T. Dzwilewski and Gregg Fenton, 2003, Shock Wave/Sound Propagation Modeling Results for Calculating Marine Protected Species Impact Zones During Explosive Removal of Offshore Structures, U.S. Department of the Interior minerals Management Service, 34p.
- Petrovic, S., 1956, *Snabdevanje naselja vodom*, Water Supplies, Beograd, Serbia.
- Roscoe Moss Company, 1990, *Handbook of Ground Water Development*, John Wiley and Sons, New York, NY.

- Rübesme, K., 1996, Schonender Einsatz von Sprengstoffen zur Brunnenregenerierung. *bbr* 47(3), 18–24.
- Sacier, R. J., 1974, Considerations in gravel pack design. *J. Petroleum Technol*, 205–212.
- Schnieders, J. H., 2003, Chemical Cleaning Desinfection and Decontamination of Water Wells Published by Johnson Screens.
- Schubert, J., 1997, Experience with bank filtration for the public water supply in Dusseldorf, Germany, *개교50주년기념 국제환경문제 심포지엄 논문집*, 영남대학교 부설 환경문제연구소, 경산, 123–160.
- Schubert, J., 2002, German experience with riverbank filtration systems, *Riverbank Filtration, Improving Source–Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B.(Eds.), *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 35–48.
- Schultes, A. C. and Moses, G., 2002, Well rehabilitation is under pressure. *Water Well J.* 56(6), 18–20.
- Smith, S. A., 1995, *Monitoring and Remediation Wells–Problem Prevention, Maintenance, and Rehabilitation*. BocaRaton, FL: Lewis.
- Steuβloff, S. and Wicklein, A., 1999, Entwicklung des Sprengschockens bei Vertikal–und Horizontalfilterbrunnen, *bbr* 50(2), 18–24.
- Steuβloff, S. and Steinbrecher, A., 2001, Langzeiterfahrung mit Impulsverfahren, *bbr* 52(10), 20–27.
- Stuart A. Smith and Allen E. Comeskey, *sustainable wells*, 2009, CRC Press 296p.
- Tufenkji, N., Ryan, J.N. and Elimelech, M., *Bank Filtration*, 2002, A simple technology may inexpensively clean up poor–quality raw surface water, *Environ. Sci. Technol.*, 36(21), 423–428.
- Tuhela, L., Carlson, L., and Tuovinen, O. H., 1997, Biogeochemical transformations of Fe and Mn in oxic groundwater and well– water environments. *J. Environ. Sci. Health A*, 32(2), 407–426.

Van Beek, K., 2012, Cause and prevention of abstraction well clogging: diagnosing potential supply problems, article from H2O 2012.

van Beek, C.G.E.M., Breedveld, R.J.M., Huhász-Holterman, M., Oosterhof, A. and Stuyfzand, P.J., 2009, Cause and prevention of well bore clogging by particles. *Hydrogeology Journal*, 17, 1877–1886.

Wilken, R. D. & Bott, W., 2002, Well regeneration by powerful ultrasound. In: Neis, U.(ed.), *Ultrasound in Environmental Engineering II*. TU Hamburg–Harburg Rep. Sanitary Eng., 35, pp. 159–172, Hamburg: TU–HH.

www.subsurfacetech.com

www.tlm-gmbh.de

www.utilityservice.com

참여연구원

목 차	소 속	성 명
제1장 서론	농어촌연구원	홍순욱 김진성
제2장 기존시설 설계방식 및 시설관 리상 문제점 분석	농어촌연구원	홍순욱
제3장 공 막힘 원인 및 우물 재질 별 취수기능 회복기술	(사)한국지하수토양환경학회	김형수 오윤영
제4장 취수기능 회복기술 비교평가	(사)한국지하수토양환경학회	김형수 오윤영
제5장 대용량 방사상 집수정 우물효 율 개선방안 실증시험	농어촌연구원	홍순욱 안중기 박종환
제6장 방사상 집수정의 경제적인 서 징 방안	(사)한국지하수토양환경학회	김무진 전항탁
제7장 개선된 방사상 집수정 설계 방안	(사)한국지하수토양환경학회 농어촌연구원	함세영 이상용 홍순욱
제8장 결론	농어촌연구원	홍순욱 송성호

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

■ 발 행 처

연구과제명 : 대용량 지하수 이용시설 효율성 증대방안 연구	
발 행 일	2015. 12
발 행 인	이 용 직
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 870
	전 화 031 - 400 - 1700
	FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	