

농업용 관정의 기계적 처리 이후 성능 개선 효과의 정량적 평가 사례

송성호* · 이병선 · 안중기

한국농어촌공사 농어촌연구원

Quantitative Evaluation for Improvement Effects of Performance After Mechanical Rehabilitation Treatments on Agricultural Groundwater Well

Sung-Ho Song* · Byung-Sun Lee · Jung-Gi An

Rural Research Institute, KRC

ABSTRACT

Step-drawdown pumping tests for identifying the improvement of groundwater well performance after rehabilitation treatments were conducted in three longstanding wells. Three selective mechanical treatment methods including power bubble, high-voltage electric pulse, and air surging were applied to these wells and the applicability of these methods to secure additional groundwater resources were evaluated quantitatively. Commonly, drawdown at final stage of step-drawdown pumping tests after rehabilitation decreased by as much as 0.61~0.70 meters compared to those before rehabilitation. In addition, final specific drawdown values of three wells increased from 9% to 14% after rehabilitation. Formation loss coefficient and well loss coefficient decreased to 6.1% and 60.6%, respectively, indicating some clogging materials by precipitation/corrosion/microbe within pores of aquifer materials, gravel packs, and screens were effectively removed by applied methods. Decrease of formation loss coefficient was higher in the well applied by the power bubble method meanwhile high-voltage electric pulse method demonstrated the higher decrease of well loss coefficient. Additionally secured groundwater amounts after rehabilitation ranged from 23.3 to 32.1 m³/day, which account for 8~16% of initially developed pumping rates of the wells. From the results of this study, the effective selection of rehabilitation treatments considering aquifer characteristics are expected to contribute to secure groundwater resources for irrigation as well as to plan systematic management program for groundwater resources in rural area.

Key words : Rehabilitation, Step-drawdown pumping test, Specific drawdown, Formation loss, Well loss

1. 서 론

일반적으로 농업용 지하수의 경우 농작물의 계절적인 수요량 변화로 인한 불규칙적인 이용 패턴으로, 관정을 이용하는 농업인의 경우에는 안정적인 유지·관리에 대한 필요성이 높다. 특히 지방자치단체나 한국농어촌공사에서 운영하는 농업용 공공관정의 경우에는, 용수의 안정적 공급을 위한 체계적인 관리 방안 수립이 필수적이다. 이와 관련하여 지하수법 제9조에서는 취수량 150 m³/일 이상의 농업용 관정은 매5년 주기로 사후관리를 통한 점검정비를 시행하도록 규정하고 있다. 이때의 사후관리에는 지하수 이용시설의 청소, 검사 및 정비 등의 공정이 포함되며, 세

부적으로는 공내 세척, 부식된 관정 시설물의 교체, 전기 시설 정비 및 양수장 건물의 누수 보강 등의 작업에 대한 내용들이 있다.

그러나 지하수 관정의 규모, 용도, 토출량 및 효율저하 원인 등 사후관리를 위한 기초적인 기능진단 방법에 대한 규정이 없기 때문에, 국내에서는 대부분의 경우에는 관정에 대한 기초조사 없이 관정 내부 전체 구간에 대하여 에어써징(air surging)을 이용한 공내세척 방법이 적용되고 있다(KRC, 1997; K-water, 2011). 특히 공내 세척 등 사후관리 이후의 양수량 증가 및 수질 개선 등 관정 성능 개선에 대한 정량적인 평가 기준 및 절차 부재로, 효율적인 공내 세척 방법이나 효과 등에 대한 체계적인 검

*Corresponding author : shsong@ekr.or.kr

Received : 2016. 6. 10 Reviewed : 2016. 6. 23 Accepted : 2016. 6. 24

Discussion until : 2016. 10. 31

토가 필요한 실정이다.

일반적으로 지하수 관정의 성능은 관정 개발 후 시간 경과에 따라 감소되며, 일정 시점을 경과하면 급격하게 감소하는 특징이 있다. 그러나 급격한 감소 시기는 대수층의 물리적 특성, 지하수 수질, 관정 내 스크린의 폐색, 관정 사용의 방식 등에 따라 다르다. 이러한 성능 저하에 큰 원인으로는 관정 내 케이싱과 스크린에서 발생하는 부식(corrosion)과 피막 발생에 따른 충전(incrustation)이 대표적이다(KRC, 1997; Houben and Treskatis, 2007). 따라서 관정에 대한 적절한 유지/관리는 관정 수명을 연장시킬 수 있는데, 이를 위한 방법으로는 물리적인 처리와 화학적인 처리 방법이 있다. 이러한 유지/관리를 통한 관정의 성능 회복을 정량적으로 평가하기 위해서는, 해당 관정에 대하여 공내 세척 등 유지/관리 전후에 단계양수시험(step-drawdown pumping test)을 통한 다양한 해석 결과를 이용한다(Driscoll, 1986; Houben and Treskatis, 2007).

KRC(1997)는 농업용 공공관정의 성능 저하 원인 규명을 위해, 에어써징 전후 단계양수시험을 해석 결과를 제시한 바 있다. 이 결과 우물효율 증가는 개발연도가 오래된 관정일수록 우물효율 개선정도가 큰 것으로 나타났으며, 적절한 소독 및 공내 세척을 하는 경우 우물효율은 약 1~5배, 양수량은 약 4~10% 증가하는 것으로 밝혀졌다. 특히 우물효율의 증가는 개발 이후 약 10년 이상 경과된 관정들에서는 효과가 더 큰 것으로 나타남에 따라, 기존 관정들의 효율 증대를 목적으로 소독 및 공내 세척을 하는 경우는 약 10년 이상 경과된 관정을 대상으로 하는 것이 효과적인 것으로 제시하였다.

본 연구에서는 기계적 처리 방법(mechanical rehabilitation method) 중 기존의 에어써징 기술과 더불어 파워 버블(power bubble)과 고전압 펄스 방전 방식(high-voltage electric pulse) 등 3개 공내 세척 공법을 유사한 조건의 농업용 공공관정에 적용하여, 단계양수시험을 활용한 공내 세척 전후의 관정 성능 개선을 정량적으로 비교/평가하였다. 정량적 평가에 이용된 인자는 단계양수시험 자료를 이용한 우물 및 대수층 수두손실 계수 변화와 공내 세척 이후의 양수량 증가분 계산 방법을 제안하여 결과를 제시하였다.

2. 관정의 성능

지하수 관정은 지속적인 관리를 하지 않으면 준공 이후 어느 시점 경과 이후부터 성능이 급격하게 저하되는데, 일정 시간 간격으로 적절한 처리를 하는 경우 성능을 개선

시킬 수 있다(Fig. 1). 그러나 개발 당시의 성능으로 회복되는 것은 어려우며, 다음 단계의 처리에 필요한 시간도 점차 줄어들게 된다($T_1 > T_2 > T_3 > T_4$). 특히 주변 대수층의 종류나 물리적 환경, 지하수의 화학적 특성, 양수 환경, 영향반경 내 오염원의 존재 여부, 관정의 용도 등이 서로 다르기 때문에 급격한 성능 감소 시기도 조금씩 다르게 나타날 수 있다.

이러한 관정의 성능 저하에 따른 적절한 유지/관리가 필요한 주기는 최초 개발당시 양수량 대비 75% 이하로 양수량이 감소되는 시기로, 수중모터펌프 성능 저하와 지하수위 하강 등의 외부적인 문제를 제외하면 미국에서의 설계 및 개발 기준에 따른 생활용 지하수 관정이 위치한 대수층 종류별로 2~15년까지 다양하다(Gass et al., 1980; Driscoll, 1986)(Table 1).

2.1. 관정 성능 저하 원인

일반적으로 관정의 효율 저하의 대표적인 원인은 부식과 충전이지만, 지표 오염원으로 인한 질산염 오염이나 과다 양수로 인한 지반침하 등의 부차적인 문제들도 나타난다(Houben and Treskatis, 2007).

관정 내의 부식의 원인 중 수리적인 특성에 의해 발생하는 부식(hydraulic corrosion)은 지하수 내에 포함된 미립자들이 강한 유속에 의해 발생하는 난류로 인해 스크린의 부식이 가속화되어 나타난다. 이에 비해 화학적 부식(chemical corrosion)은 지하수에 의해 금속이 산화되는 경우, 또는 수화작용(hydration)에 의해 스크린의 부식 또는 충전 현상을 발생시키는 경우이다. 이밖에 생물학적 부식(biological corrosion)은 미생물의 축매작용이나 산소공급을 원활하게 하는 조건을 제공하여 부식을 촉진시키는 경우이다.

관정 내의 충전은 부식에 의한 이물질, 침전된 광물, 사질 또는 점토질 입자, 미생물 등이 관정 내부나 스크린에

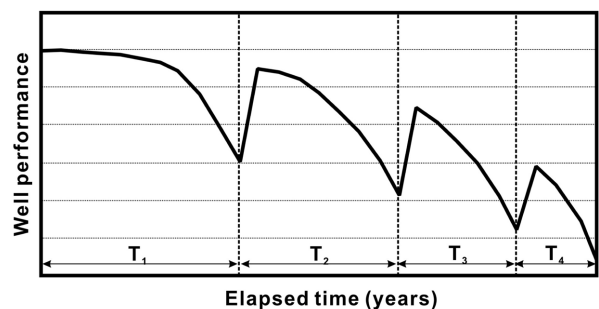


Fig. 1. Conceptual diagram for the trend of well performance degradation over time.

Table 1. Prevalent problems and maintenance frequency for each aquifer type(after Gass et al., 1980; Driscoll, 1986)

Aquifer type	Prevalent problems	Maintenance frequency (years)
Alluvium	Particle intrusion/iron precipitation/incrustation of screen/biofouling/casing failure	2~5
Sandstone	Fissure plugging/casing failure/sand intrusion/corrosion	6~10
Limestone	Fissure plugging by carbonate scale	6~12
Basalt	Fissure and vesicle plugging/scale deposition	6~12
Sandstone/shale	Low initial yield/plugging of aquifer/fissure plugging/casing failure	4~7
Metamorphic	Low initial yield/fissure plugging/mineralization of fissures	12~15
Consolidated sedimentary	Fissure plugging by iron and minerals/low to medium initial yield	6~8
Semiconsolidated/ consolidated sedimentary	Clay, silt, sand intrusion/incrustation of screen/fissure plugging of limestone/ biofouling/iron precipitation	5~8

발생하는 경우를 말한다. 일반적으로 발생하는 관정 내의 충전현상은 침전반응과 산화-환원반응으로 구분되는데, 침전반응은 지하수의 농도, 온도, 압력에 의해 영향을 받는다. 그러나 관정 내의 온도와 압력의 변화는 크지 않아 침전반응은 대부분 지하수 내 이온 농도의 영향을 받는데, 생성물의 전위가 반응물의 전위에 비해 낮기 때문에 탄산칼슘(CaCO₃)과 같이 지하수 내에서의 충전현상은 오랜 시간 동안 평형을 이루어 나타난다.

2.2. 적용 방법

2.2.1. 파워 버블

파워 버블 방법은 관정 내의 지하수위 하부 구간에 대하여 고압의 질소 가스를 순간적으로 분사할 때 발생된 펄스 에너지(pulse energy)를 활용하여, 스크린 간격 또는 스크린과 공벽 사이의 여재 등에 흡착된 광물질이나 주변 대수층 내에 형성된 생물막 또는 침전 광물질을 제거하는 기술이다. 이 기술은 우물 수두손실율과 함께 대수층 수두손실율을 동시에 감소시키기 위하여, 관정 내의 스크린 구간에 대하여 집중적으로 질소 가스를 분사시키는 방식을 이용한다. 이때 발생하는 질소 가스의 에너지는 최대 3,000 psi(210 kgf/cm²)까지 가능하지만, 농업용 관정에 설치된 스크린 재질이 PVC로 과다한 압력이 작용하는 경우 파손의 위험이 있어서 현장에서는 약 500 psi의 에너지를 이용한다. 이 방법에 의해 제거된 광물질, 세립질 모래 또는 점토 등은 별도의 인양 펌프 내에 질소 가스를 분사시켜 지상으로 연결된 관을 이용하여 배출시킨다.

2.2.2. 고전압 펄스 방전

지하수 관정 내에 위치한 장비 내부 전극에 순간적인 고전압 전기 에너지를 주입하여 펄스를 방전하게 되면, 방전된 펄스에 의해 전극 사이의 물이 순간적으로 고온, 고

압의 플라즈마 상태로 팽창하게 된다. 이때 발생된 수중 충격파를 이용하여 스크린 간격 내에 충전되는 침전 광물질 등을 제거하는 기술이 고전압 펄스 방전법이다(Chung et al., 2013). 이때 비압축성인 물로 인해 수중 충격파가 발생되며, 공내 스크린의 재질에 따라 전기 에너지 조절을 통한 수중 충격압의 크기를 조절한다. 본 연구에서는 전압과 전류를 각각 18 kV와 5 kA로 적용하였다.

2.2.3. 에어서징

에어서징은 공내에 압축공기를 주입하여 이물질들을 배출시키는 방식으로, 브러쉬 방법과 함께 가장 많이 사용하는 방법이다(K-Water, 2011). 이 시험방법은 일반적으로 관정 바닥 근처에 설치된 관에 연결된 공기압축기(air compressor)로 부터 고압의 압축공기를 발생시키는데, 이때 발생하는 최대 에너지는 350 psi(25 kgf/cm²)로 현장에서 사용하기 간편한 반면, 대기 중으로 온실가스 등 오염물질(CO₂, CO, SOx)을 배출시키는 단점이 있다.

2.3. 관정 성능 개선 평가 방법

2.3.1. 수두손실

일반적으로 지하수 관정에서 양수하면 동시에 수위강하가 발생한다. 이때 대수층 내에서 유동하는 지하수와 대수층 구성 물질 사이에서 발생하는 마찰력에 의해 발생하는 대수층 수두손실(formation loss)과 지하수가 관정으로 유입되는 과정에서 스크린에 의한 저항 또는 난류에 의해 발생하는 우물 수두손실(well loss)이 복합적으로 작용한다. 우물 수두손실은 지하수가 관정으로 유입되는 과정에서 스크린에 의한 저항 또는 난류에 의해 발생됨에 따라 양수량에 의해 결정되지만, 대수층 수두손실은 양수량과 더불어 양수시간의 영향을 받는다.

일반적으로 효율이 최대인 피압대수층내에 위치한 관정

에서 양수에 의해 수위강하가 발생하는 경우 수위강하량은 식 (1)과 같다(Cooper and Jacob, 1946).

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{(2.25Tt)}{r^2 S} \quad (1)$$

여기서, s 는 수위강하량[L], Q 는 양수량[L³/T], T 는 대수층의 투수계수[L²/T], t 는 양수시간[T], r 는 양수정으로부터의 거리[L], S 는 대수층의 저류계수이다. 식 (1)은 케이싱 내부에서의 수위강하를 나타낼 때는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$s_w = BQ \quad (2)$$

여기서, s_w 는 수위강하량[L], BQ 는 대수층 수두손실로 대수층 내에서 정류에 의한 수두손실이다. 그러나 지하수의 흐름이 스크린을 통과하면서 난류가 발생하는 경우에는 식 (2)를 이용하여 정확한 수위강하를 계산할 수 없기 때문에, Rorabaugh(1953)는 피압대수층내의 수위강하는 스크린, 공벽 및 케이싱 내에서 일어나는 우물손실의 합으로 정의하였으며, 난류인 경우 수위강하량을 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$s_w = BQ + CQ^m \quad (3)$$

여기서 m 은 난류의 정도를 나타내는 지수로 Rorabaugh (1953)는 m 을 2.43~2.82 범위로 제시한 바 있으며, Jacob (1947)은 $m=2$ 로 정의하고 수위강하량을 층류(laminar flow)에 의한 대수층 수두손실(BQ)과 난류(turbulent flow)에 의한 우물 수두손실(CQ^2)의 합으로 제시하였다.

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (4)$$

여기서 B 는 대수층 수두손실 계수(formation loss coefficient), C 는 우물 수두손실 계수(well loss coefficient)이다(Todd, 1980).

2.3.2. 단계양수시험

우물손실과 대수층 손실은 단계적으로 양수량을 증가시키면서 관정의 수위강하를 측정하는 단계양수시험 결과를

이용하여 평가되는데, 양수에 의해 대수층으로부터 직접 유입되는 층류와 우물자재와 공벽 사이에 있는 충전용 자갈을 통과한 난류에 의해 발생하는 수두손실(head loss)을 산출하는데 이용된다(Cooper and Jacob, 1946). 일반적으로 단계양수시험은 일정한 시간간격으로 양수량을 증가시켜가며 관정의 수위강하량을 측정하여 관정의 효율과 대수층의 생산성을 평가한다(Kruseman and de Ridder, 1991).

단계양수시험을 이용하여 지하수 관정 자체의 능력을 평가하는 대표적인 방법은 관정의 비수위강하량(specific drawdown, s_w/Q)을 이용하여 우물 및 주변 대수층의 수두손실율을 산출한 후 비교하는 것이다. 관정의 비수위강하량은 양수량에 대하여 양수하는 동안에 발생하는 수위강하의 비로, 식 (4)를 식 (5)로 정리하여 시험결과를 그래프에 도시한 후 Bierschenk(1963)이 제시한 방법으로 우물 수두손실 계수(C)와 대수층 수두손실 계수(B)를 구할 수 있다.

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ \quad (5)$$

본 연구에서는 공내 세척 전후의 수위강하량 변화값(Δs_w)과 공내 세척 이후의 비양수량(specific yield, Q_a/s_{wa}) 자료를 기초로 공내 세척 전후의 각 관정에 대한 개발 가능량의 증가량(ΔQ)을 정량적으로 평가하기 위하여, 식 (6)과 같은 계산방식을 제시하였다.

$$\Delta Q = \Delta s_w \frac{Q_a}{s_{wa}} \quad (6)$$

3. 현장시험 결과

사용 중인 3개소 농업용 관정들을 대상으로, 3개 공내 세척 공법(파워 버블, 고전압 펄스 방전 및 에어서징) 실시 전후에 단계양수시험을 실시하였다(Table 2). 각 관정은 2001년에 개발된 암반관정으로, 개발 심도와 토출량은 각각 100 m와 200~300 m³/일이다. 3곳의 관정 개발과정은 직경 250 mm의 철재 외부케이싱을 설치한 후, 100 m 심도까지 착정 후 직경 200 mm의 PVC 재질의 우물자재(유공관과 무공관)를 설치하는 과정으로 진행되었다.

Table 2. Specification of agricultural wells treated by mechanical rehabilitation method

Well	Depth (m)	Diameter (mm)		Pumping rate (m ³ /day)	Mechanical rehabilitation method
		Steel outer casing	Well screen		
GA1	100	250	200	300	Power bubble
IP9	100	250	200	250	High-voltage pulsed discharge
JY1	100	250	200	200	Air surging

3개 농업용 공공관정의 단계양수시험 결과를 상호간 비교하는 것이 적합한지를 판단하기 위하여, 16시간 동안의 장기양수시험을 공통적으로 실시하여 투수량계수와 저류계수를 산출하였다. 양수시험 자료는 Theis 방법(1935)과 Cooper-Jacob 방법(1946)으로 해석한 후 산술평균값을 계산하였다. 저류계수의 경우에는 단공양수시험의 한계에도 불구하고 Choi(2007)가 제안한 시간-수위강하량 자료로부터 저류계수를 산정하는 회귀공식을 활용하여 평가하였다 (Table 3).

해석 결과 3개 관정의 투수량 계수와 저류계수는 각각 1.36~1.68, 0.00039~0.00073으로 큰 차이가 없고, 관정별 개발 경과년도가 유사함에 따라 단계양수시험 결과를 비교하는데 적합한 조건으로 판단된다.

3.1. 단계양수시험

3개 농업용 공공관정에 대하여, 3개 공내 세척 공법 적용 전·후 단계양수시험 결과를 비교하고 각 단계별 비수위강하량을 산출하였다(Table 4, Fig. 2). 일반적으로 단계양수시험에서의 단계별 양수량은 해당 관정에서 일정한

계 사용하는 양수량(regular pumping rate)의 1/3, 2/3 및 3/3 단계로 진행하지만(Houben and Treskatis, 2007), 본 연구에서는 각 단계별로 파쇄암반대수층의 대수층 수두손실을 변화 발생 가능성을 고려하여 각각 5 단계로, 각 단계별 120분간 시험하였다. 단계양수시험은 수중모터펌프로부터 토출량을 일정하기 위해 30~60 Hz 대역의 주파수 변조기(frequency modulator)를 이용하였다. 단계별 양수량 증가분은 각 관정별 토출량을 고려하여 GA1과 IP9 관정은 각각 평균 50 m³/일, JY1 관정은 평균 40 m³/일로 증가시키며 시험을 진행하였다.

3곳의 관정에 대한 단계양수시험 결과 공내 세척 공법 이후 단계가 증가함에 따라 수위강하량의 감소폭과 비수위강하량의 차이가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 파쇄버블 방법이 적용된 GA1 관정의 수위강하는 공내세척 이후 0.07~0.70 m 만큼 감소하였으며, 비수위강하량은 0.00137~0.00271 일/m² 만큼 증가하였다. 고전압 펄스 방전 방법이 적용된 IP9 관정에서의 수위강하는 공내세척 이후 0.08~0.64 m 만큼 감소하였고, 비수위강하량은 0.00059~0.00270 일/m² 만큼 증가되었다. 에어서징 방법

Table 3. Results of transmissivity and storage coefficient estimated by long-term pumping tests for each well

Well	Transmissivity (cm ² /sec)			Storage coefficient
	Theis	Cooper-Jacob	Average	
GA1	1.66	1.26	1.45	0.00039
IP9	1.79	1.58	1.68	0.00073
JY1	1.45	1.27	1.36	0.00053

Table 4. Summary of step-drawdown pumping test results for three wells before and after rehabilitation

Well	Step	Time (min)	Pumping rate (Q, m ³ /day)		Drawdown (s _w , m)			Specific drawdown (s _w /Q, day/m ²)		
			Before	After	Before	After	Difference	Before	After	Difference
GA1	1	120	99	103	1.74	1.67	0.07	0.01758	0.01621	0.00137
	2	120	152	149	3.19	2.89	0.30	0.02101	0.01942	0.00159
	3	120	199	195	4.66	4.11	0.55	0.02344	0.02108	0.00236
	4	120	251	253	6.63	6.21	0.42	0.02642	0.02456	0.00186
	5	120	301	305	8.96	8.26	0.70	0.02978	0.02707	0.00271
IP9	1	120	54	51	0.90	0.82	0.08	0.01667	0.01608	0.00059
	2	120	103	101	1.81	1.67	0.14	0.01757	0.01653	0.00104
	3	120	148	148	2.71	2.48	0.23	0.01831	0.01676	0.00155
	4	120	196	199	3.73	3.41	0.32	0.01903	0.01714	0.00189
	5	120	250	252	5.04	4.40	0.64	0.02016	0.01746	0.00270
JY1	1	120	38	38	0.60	0.57	0.03	0.01579	0.01500	0.00079
	2	120	81	83	1.42	1.32	0.10	0.01753	0.01590	0.00163
	3	120	122	121	2.31	2.01	0.30	0.01893	0.01661	0.00232
	4	120	162	164	3.28	2.87	0.41	0.02025	0.01750	0.00275
	5	120	201	200	4.29	3.68	0.61	0.02134	0.01840	0.00294

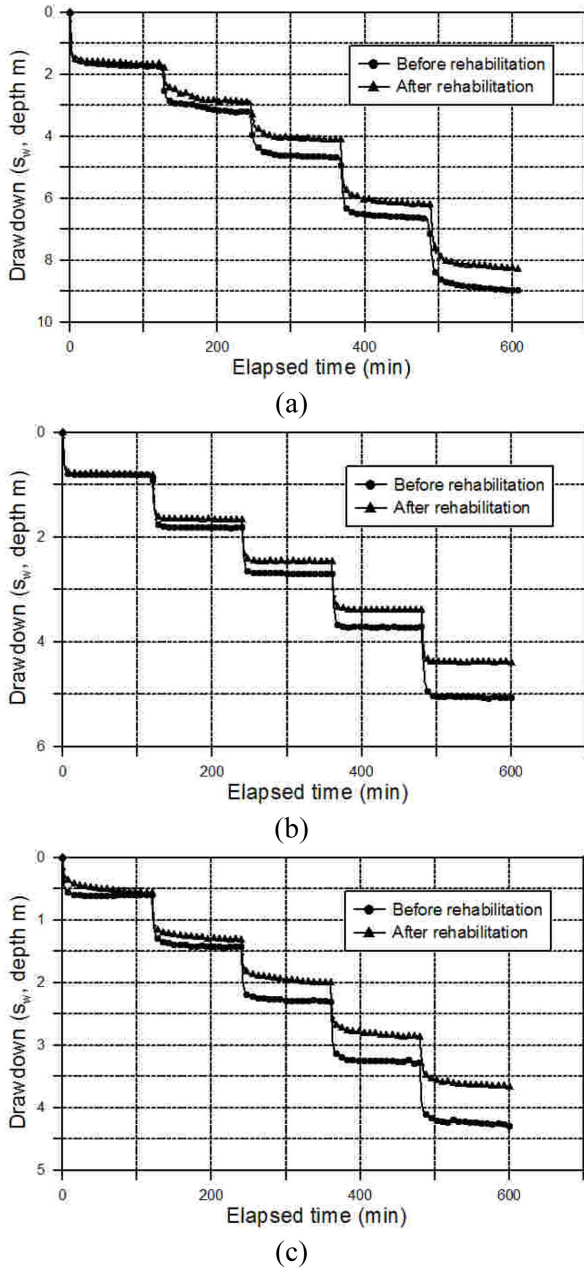


Fig. 2. Step-drawdown pumping test result before and after mechanical rehabilitation method using (a) power bubble in GA1 well, (b) high-voltage pulsed discharge in IP9 well, and (c) air surging in JY1 well.

이 적용된 JY1 관정의 수위강하는 공내세척 이후 0.03~0.61 m 만큼 감소하였으며, 비수위강하량은 0.00079~0.00294 일/m² 만큼 증가되는 것으로 나타났다.

3.2. 수두 손실 및 추가 확보 양수량 평가

3가지 공내 세척 방법을 각각 적용한 관정별로 계산된 공내 세척 이후의 우물 수두손실 계수(C)는 11~61% 감

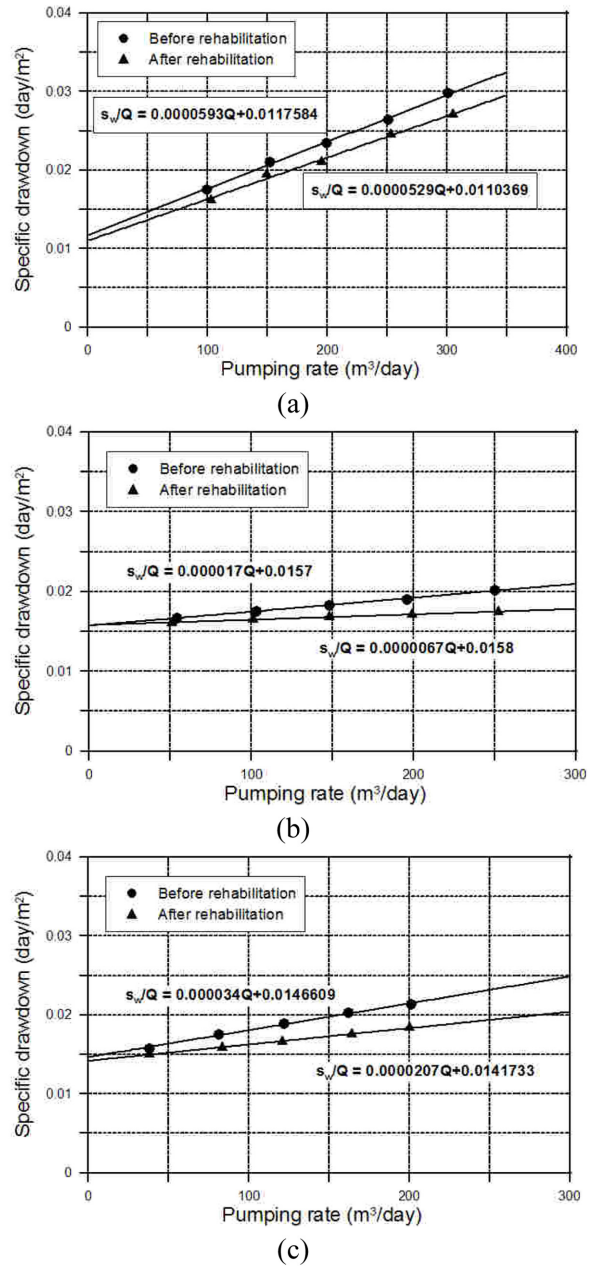


Fig. 3. Specific drawdown variation with pumping rate before and after mechanical rehabilitation method using (a) power bubble in GA1 well, (b) high-voltage pulsed discharge in IP9 well, and (c) air surging in JY1 well.

소한 것으로 나타난 반면, 대수층 수두손실 계수(B)는 파워 버블을 이용한 방법이 6.1%로 다른 두 가지 방법에 비해 상대적으로 감소폭이 큰 것으로 밝혀졌다(Fig. 3, Table 5). 이는 파워 버블 방법이 스크린 구간에 대해 약 30 cm 간격으로 약 5회 이상 200~300 psi의 강한 압력으로 버블을 지속적으로 발생시킴에 따라, 우물자재와 공벽 사이의 여재와 함께 주변 대수층에 대한 세척 영향이 다

Table 5. Estimation results of B and C before and after mechanical rehabilitation method

Well	Formation loss coefficient (B, day/m ²)			Well loss coefficient (C, day ² /m ⁵)		
	Before	After	Variation ratio (%)	Before	After	Variation ratio (%)
GA1	0.0117584	0.0110369	6.1	0.0000593	0.0000529	10.8
IP9	0.0157000	0.0158000	-0.6	0.0000170	0.0000067	60.6
JY1	0.0146609	0.0141733	3.3	0.0000340	0.0000207	39.1

Table 6. Estimation of additional secure pumping rate for each well

Well	Q_a (m ³ /day)	s_{wa} (m)	Δs_w (m)	ΔQ ($=\Delta s_w \cdot Q_a / s_w$) (m ³ /day)	Increasing ratio (%)
GA1	305	8.26	0.63	23.3	7.6
IP9	252	4.40	0.56	32.1	12.7
JY1	200	3.68	0.58	31.5	15.8

른 두 가지 방법에 비해 상대적으로 크게 미침에 따른 결과로 판단된다. 고전압 펄스 방전 방법은 우물 수두손실 계수 감소가 가장 큰 반면에 대수층 수두손실 계수 변화가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 수층 충격파로 인한 스크린 구간의 세척효과가 극대화되는데 비해 여재 및 대수층 구간에 대한 세척 효과가 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다. 에어서징 방법의 경우에는 우물 수두손실 계수와 대수층 수두손실 계수 모두에서 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 본 방법은 공저에 설치된 압축 공기 발생 장치로부터 분사되는 압력을 특정한 스크린 구간에 효과적으로 전달하기 어려웠던 단점이 있다.

그러나 이들 관정별로 적용된 3가지 공내 세척 방법의 정량적인 결과는 본 연구에 활용된 관정별 대수층 특성 차이가 고려되지 않았기 때문에, 전체 관정에 적용시키기에는 한계가 있다. 따라서 관련된 추가적인 연구 개발이 필요할 것으로 판단된다.

앞서 제시된 실험 결과를 이용하여 식 (6)에서 제시한 비와 같이 3가지 방법의 공내 세척 전후의 수위강하량 변화값과 공내 세척 이후의 비양수량을 곱하여 공내 세척 이후의 각 관정별 개발 가능량의 증가분을 계산하였다 (Table 6). 이를 통하여 계산된 추가 확보 양수량은 각각 파워 버블 방법을 적용한 GA1 관정은 23.3 m³/일, 고전압 펄스 방전 방법을 적용한 IP9 관정은 32.1 m³/일, 에어서징 방법을 적용한 JY1 관정은 31.5 m³/일로 나타났다. 관정 토출량 대비 증가 비율은 각각 7.6%, 12.7%, 15.8%로, 토출량이 가장 많은(300 m³/일) GA1 관정의 증가 비율이 가장 적은(7.6%) 반면 토출량이 가장 적은(200 m³/일) JY1 관정의 증가 비율이 가장 큰(15.8%) 것으로 나타났다. 이러한 경향으로 부터 양수량이 상대적으로 적은 관정에 대한 처리 방법 적용 및 성능 개선 효과가 상대적으로 큰 것으로 판단된다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 대수층 특성이 유사하고 개발된 시점이 비슷한 3개소 농업용 지하수 공공관정에 대하여 기계적 처리 방법(파워 버블, 고전압 펄스 방전, 에어서징)을 각각 적용한 후, 단계양수시험 자료를 활용하여 처리 전후의 단계별 비수위강하량 변화, 우물/대수층 수두손실 계수 변화 및 추가 확보 양수량 등 관정 성능 개선 효과를 정량적으로 평가하였다.

비수위강하량은 세가지 방법 공통적으로 단계가 증가함에 따라 증가하였으며, 마지막 단계에서는 공내 세척 이전에 비해 0.0027~0.0029 일/m²으로 약 9~14% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 부터 3개소 공공관정 모두에서 세척 효과가 나타난 것으로 판단된다.

세척 효과를 정량적으로 판단할 수 있는 인자로 대수층 수두손실 계수를 계산한 결과 파워 버블 방법을 적용한 관정에서 감소 효과가 가장 뚜렷했으며, 전압 펄스 방전 방법을 이용한 관정에서 가장 작은 것으로 나타났다. 그러나 우물 수두손실 계수는 고전압 펄스 방전 방법을 이용한 관정에서 가장 큰 반면 파워 버블 방법을 적용한 관정에서 상대적으로 작은 결과가 나타났다. 이는 파워 버블 세척 방식이 스크린 외곽의 여재와 대수층 구간까지 효과가 나타났기 때문이고, 고전압 펄스 방전의 경우 스크린 구간에 대한 수층 충격파 발생으로 인한 세척 효과가 극대화되기 때문으로 해석된다.

공내 세척 전후의 수위강하량 변화값과 공내 세척 이후의 비양수량 자료를 이용한 결과, 추가 확보 양수량은 전체 토출량 대비 8~16%로 나타났으며, 양수량이 상대적으로 적은 관정에서 처리 효과가 상대적으로 큰 것으로 평가된다.

현행 지하수법에는 사후관리 이후의 지하수 수량 증가

및 수질 개선 등 우물개선에 대한 정량적인 평가 기준 및 절차가 없기 때문에, 사후관리 작업에 대한 개선 효과를 판단할 수 없다. 따라서 본 연구에서 제시한 단계양수 시험 결과를 참고하는 경우, 사후관리에 따른 우물 성능의 개선 및 추가 지하수 확보 수량을 정량적으로 계산할 수 있다. 이러한 결과를 이용하면 추가로 확보된 지하수 수량을 체계적으로 배분하여 최적의 농업정책 마련이 가능하며, 국내에서 활용되는 사후관리 공법의 맞춤형 적용에 참고가 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(과제번호 114049-2)에 의해 이루어졌으며, 심사과정에서 유익한 의견 제시를 통해 본 논문의 수준을 높여주신 익명의 심사위원님들께 진심으로 감사드립니다.

References

- Bierschenk, W.H., 1963, Determination well efficiency by multiple step-drawdown tests, *Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, **64**, 493-507.
- Choi, B.S., 2007, A method for storativity compensation in single well test analysis, *J. Soil Groundw Environ.* (In Korean), **12**(3), 36-43.
- Chung, K.J., Lee, S.G., Dang, J.J., Choi, G.H., Hwang, Y.S., Kim, C.Y., and Park, Y.J., 2013, Feasibility study for the cleaning of well screens using high-voltage pulsed discharge, *J. Eng. Geol.* (In Korean), **23**(1), 29-36.
- Cooper, H.H.Jr. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **27**(4), 526-534.
- Driscoll, F.G., 1986, *Groundwater and Wells*, 2nd Edition, Johnson Division, St. Paul, Minnesota. 1089 p.
- Gass, T.E., Bennett, T.W., Miller, J., and Miller, R., 1980, *Manual of Water Well Maintenance and Rehabilitation Technology*; National Water Well Association, Dublin, Ohio, 247 p.
- Houben, G. and Treskatis, C., 2007, *Water Well: Rehabilitation and Reconstruction*, McGraw- Hill, N.Y. 391 p.
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Trans. Amer. Soc. Civil Engrgs.*, **112**, 1047-1064.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 1997, *A Study of Appropriate Post Management Methods for Tube Wells*, 358 p.
- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., 1991, *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, 2nd Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands. 200 p.
- K-water, 2011, *Establishment of Sustainable Groundwater Development System and Its Merchandising*, Sustainable Water Resources Research Center of 21st Century Frontier Research Program (code number 3-4-3), 1054 p.
- Rorabaugh, M.J., 1953, Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well, *Proc. Amer. Soc. Civil Engrgs.*, **79**, p. 23.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **16**, 518-524.
- Todd, D.K., 1980, *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, N.Y. 535 p.