

충적층 양수정에서 우물개량을 통한 우물효율의 개선

김규범* · 김병우 · 김성윤

한국수자원공사 K-water연구원 지질지하수연구팀

Improvement of Well Efficiency through Well Development in a Pumping Well

Gyoo-Bum Kim* · Byung-Woo Kim · Sung-Yun Kim

K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT

Drilling at unconsolidated layer can make the aquifer disturbed and reduce a productivity of groundwater well. Surge block and air surging were applied to a pumping well located in Jeungsan-ri, Changnyung-gun, to improve a well efficiency by removing clogging and fine-grained slime. Two experimental log-linear equations, $y_1 = -0.1769 \ln(x_1) + 0.4960$ and $y_2 = -84.3358 \ln(x_2) + 512.8162$, were proposed in this site, in which x_1 and x_2 are the number of surging event, y_1 is the amount of slime, and y_2 is a recovery time of groundwater level after air surging. Well loss exponent (P) decreased after surging, from 3.422 to 1.439, and the groundwater inflow from aquifer happened in all directions around a well with gradually increasing the homogeneity in a local aquifer's hydraulic property. It was revealed that long-term well development should be done in the pumping well which is located in unconsolidated sediments to increase a well productivity.

Key words : Well development, Well efficiency, Clogging, Slime, Unconsolidated layer

1. 서 론

우물 시추와 같은 기계적인 굴착 작업은 우물 주변 대수층에 굴착으로 인한 교란 등을 발생시켜 대수층 고유의 양수능력을 감소시킬 수 있다. 충적층 우물에서의 우물개량은 손상된 대수층을 재생시키고 우물 효율을 회복시킬 뿐 아니라, 우물 주변 대수층의 수리적 특성을 시추 전보다 개선시킴으로써 우물 주변의 대수층을 개량하는 것이다 (Wendling et al., 1997). 우물개량의 효과는 비양수량의 효율 증가 및 양수된 물에 함유된 세립 모래의 감소 등으로 설명할 수 있다(Zdenek and Alfred, 1980; McDonald, 1980; Driscoll, 1986; Wendling et al., 1997). 따라서 스크린 주변 대수층의 투수성 증가, 우물 유효반경의 증가 그리고 개량에 의한 토양 조성의 변화 등은 우물개량의 결과로서 우물의 기능을 향상시킬 수 있다. 우물개량은 양수관정 주변에 교란된 세립질 모래의 제거를 통해 우물효율을 높이거나 노후화된 양수관정의 효

율을 다시 높일 수 있는 우물 재생 방법이다. 우물 개량 방법중 에어서징(Air surging) 방법은 우물개량 및 우물 재생에 있어서 작업방법이 단순하고, 저비용으로 시행 가능한 방법이면서 우물효율 개선은 높은 편이다. 서지블록(Surge block)은 양수관정 내에서 블록을 상·하로 움직여 스크린 인근의 여재 및 충적층에서 시추 시 교란된 지층과 폐쇄에 의한 막힘, 브리징(Bridging), 퇴적물(Deposition) 등을 제거하는 방법이다.

현재 불균질 매질층에서 우물 설계 및 개량에 대한 방법 및 방법론적인 참고문헌은 다소 발간되고 있으나 우물 개량과 관련한 연구사례는 매우 미미하다. Driscoll(1986), Roscoe Moss Company(1990), Houben and Treskatis (2007) 및 Sterrett(2007) 등은 우물설계 및 우물개량 공법 등을 소개한 바 있으며, Hix(1993)는 관측용 우물을 개선하기 위하여 우물개량 방법(서징, 양수, 공기주입 양수 및 과잉양수, 세척 및 분사, 진공양수 그리고 기계적 펄스 양수 등)의 유효성에 관한 연구를 수행하였다.

*Corresponding author : gbkim@kwater.or.kr

원고접수일 : 2009. 10. 20 심사일 : 2009. 10. 21 게재승인일 : 2009. 11. 23

질의 및 토의 : 2010. 4. 30 까지

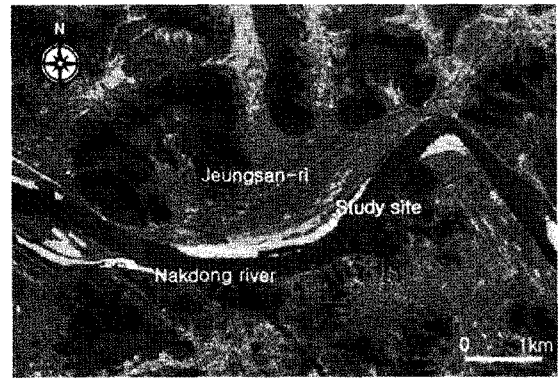
Wendling et al.(1997)은 미고결층에서의 서징 및 개량 효과를 정량적으로 평가한 바 있으며, Davis(2003)는 층적우물에서 양수량을 극대화하기 위하여 대수층 분석 및 우물개량 공법에 관하여 연구하였다. 또한, Rosberg and Bjelm(2009)는 물분사(Hydrojetting) 이전과 이후의 양수 시험 해석결과를 비교·분석하여 물분사가 효과적인 청소 방법임을 증명한 바 있다. 이와 같이 우물개량과 관련하여 개량 방법 및 방법론을 수록한 문헌이 일부 발견되어 있으나, 실제 효과 등에 대한 연구논문은 상당히 적은 편이다. 특히, 국내의 경우는 연구사례가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 우물개량 방법으로서 서징블록(Surge block)의 횡수에 따른 슬라임의 양 및 에어서징(Air surging) 직후의 수위회복 과정을 활용하여 우물개량 특성을 분석하고, 우물개량 이전과 이후의 우물 효율 및 수리 특성을 비교 분석함으로써 우물개량 효과를 정량적으로 분석하는데 목적을 두었다.

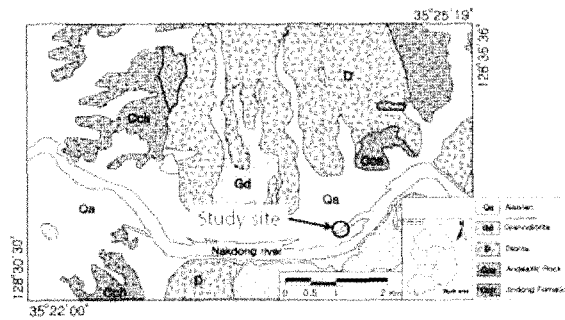
2. 연구 지역

본 연구 지역은 행정구역상으로 경상남도 창원군 길곡면 증산리 인근의 낙동강 분류 하상 퇴적층이 해당되며, 낙동강을 경계로 북측은 창원군, 남측은 창원시와 함안군이 위치한다. 연구지역내 분포하는 전체 층적층은 동서 방향으로 약 4 km, 남북 방향으로 약 2km의 크기로 발달하고 있으며, 제외지에는 연장 약 3 km, 폭 약 150~200 m의 하상퇴적층이 분포한다. 수계 형태는 동서 방향의 낙동강에 길곡천, 마천천 및 온정천이 북측으로부터 유입되고 있으며, 길곡천으로부터 흘러나온 퇴적물은 큰 산상지를 형성하여 현재의 증산리 지역을 발달시켰다 (Fig. 1(a)).

기존 지질 도폭(김남장 · 이홍규, 1964)에 의하면 연구 대상 층적층의 기반암은 백악기 경상계 신라통의 진동층에 해당되는데, 진동층은 주로 회색, 암회색, 암갈색의 세 일, 일부 처어트질 암석 및 암회색의 아코스 사암질이 협재하는 형태를 갖는다(Fig. 1(b)). 본 층은 층리의 발달이 우세하고 풍화에 약하여 낮은 구릉지 및 평지를 이룬다. 한편, 연구지역의 층적층은 모래와 자갈층이 주를 이루는데, 우물 설치시 수행된 시추자료에 따르면 상부로부터 약 23 m 구간에는 실트질 모래층, 그 하부에는 약 10 m 두께의 모래질 자갈층이 존재한다. 모래 및 자갈층 사이에는 실트, 점토 또는 실트질 모래가 미약하게 협재되어 있는 것이 특징이다.



(a) Location of study area



(b) Geologic map

Fig. 1. Location and geology of study area.

3. 우물설계 및 개량

3.1. 스크린 및 우물 폐색

우물설계의 목적은 우물을 설치할 해당 수리지질조건과 수질에 가장 적절한 재료와 재원을 결정하여 우물의 효율 및 수명을 연장시키고 저비용으로 우물을 설치하는데 있다(한정상, 1998). 미고결층에서 굴착된 우물은 굴착구간 내 유공관으로서 스크린이나 스트레너를 설치하며 생산정(Production well)으로서의 기능을 보장하게 한다. 우물 내의 스크린은 대수층의 층서, 구성물질, 층후 및 수위강하량에 따라 결정되는데, 투수성이 가장 양호한 구간의 하단부에 스크린을 설치한다. 그리고 우물손실을 줄이고 적은 동력으로 많은 수량을 양수할 수 있도록 스크린의 모양(Shape), 슬롯 크기(Slot size), 스크린의 길이 등을 결정한다(Driscoll, 1986). 스크린 모양은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 다양한 모양으로 설계 제작되는데, 특히 Fig. 2(a)와 같이 와이어 랩 스크린(Wire wrap screen)의 경우는 큰 개구면적(Opening area)과 v-모양 슬롯(Slot)으로 우물효율을 극대화한다.

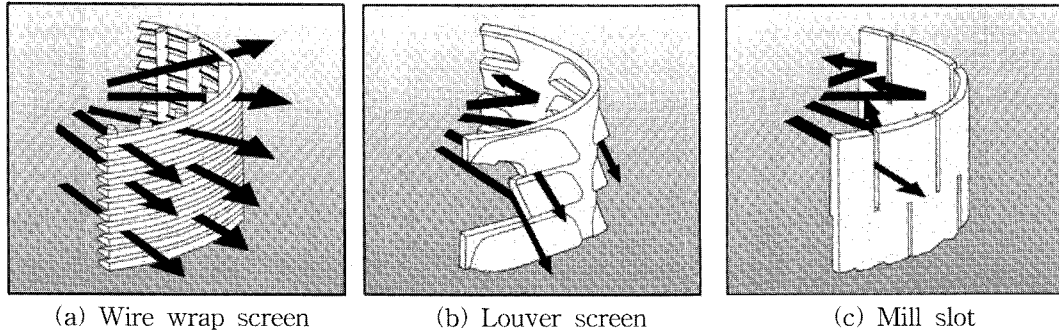


Fig. 2. Three types of well screen. (a) Wire Wrap screen; 30 to 50% open area, (b) Louver screen; 8 to 50% open area, (c) Mill slot; 2 to 3% open area (Sterrett, 2007).

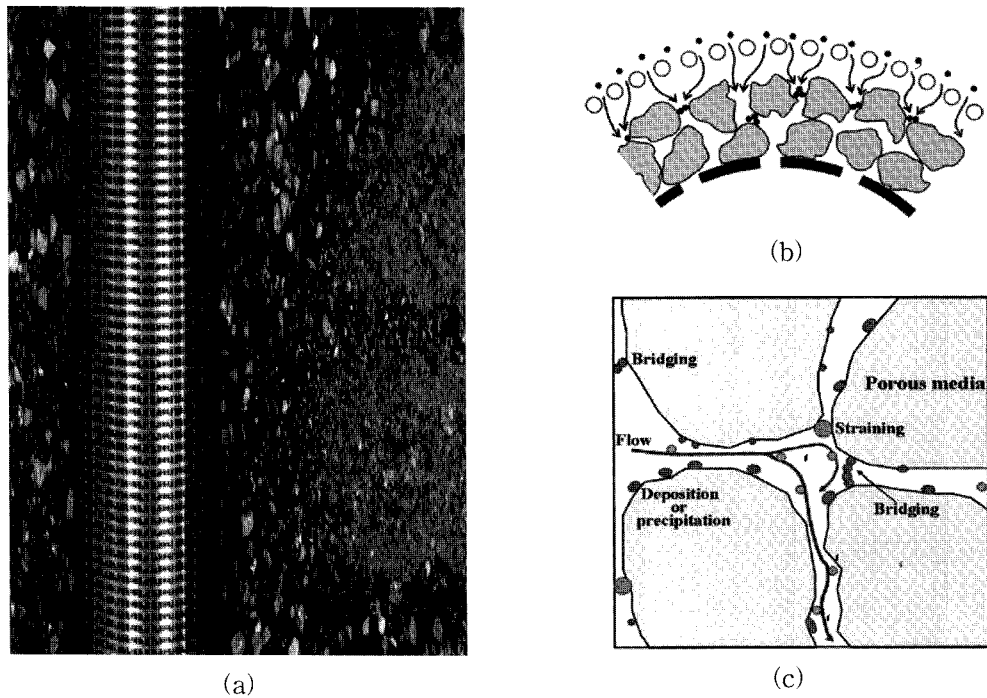


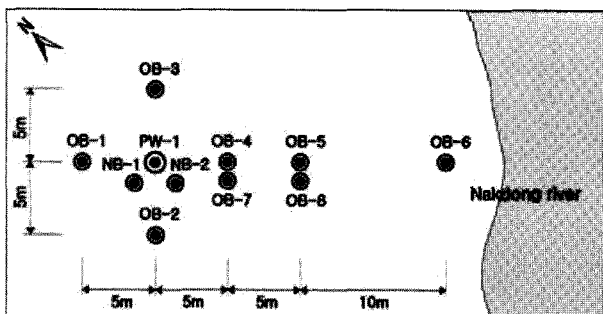
Fig. 3. Schematic representation of mechanical clogging in pumping well; (a) Gravel pack and porous media around a wire wrap screen (Sterrett, 2007), (b) Bridging and straining of particles (black) during passage through a gravel pack near well screen (Houben and Treskatis, 2007), and (c) Deposition, bridging and straining of particle/slime in porous media (modified from Sterrett, 2007).

우물 굴착경과 스크린 사이에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 여재(Filter gravel)를 충전하여 양수로 인한 스크린과 스크린 인근에 분포된 대수층의 공극 내의 피각현상(Incrustation), 시추에 의한 지층 교란 및 폐색 등을 방지한다. 폐색은 모래층의 콜로이드의 여과에 의한 기계-물리적 폐색(Mechanical-physical clogging)과 광물 및 박테리아 물질의 성장 침전에 의한 화학적 폐색(Chemical clogging)으로 나타난다. 전형적인 폐색은 관정의 스크린, 여재 또는 다공질매질이 막히는 것으로서 미세입자들이 여재 및 모래층을 관통하는 동안 브리징(Bridging)이나 당

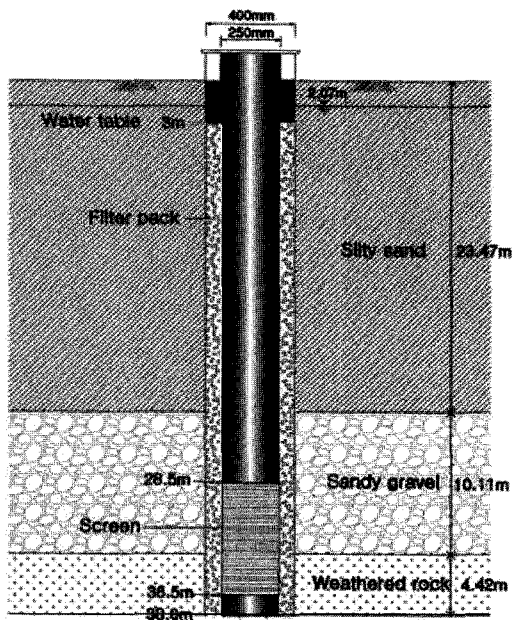
김(Straining)을 유발하여 나타나며 우물효율이 크게 감소하게 된다.

3.2. 우물 개량

양수정은 굴착 직후에 우물효율 및 투수성을 증대시키기 위하여 개량 작업을 수행하여, 대수층에 분포된 물속의 부유입자 및 미세입자를 제거하게 된다. 이때 시추 작업으로 인한 니수 격막(Mud cake), 슬라임(Slime), 암편 및 입자와 공벽에 붙어 있는 이물질들을 제거하게 된다. 일반적으로 스크린 부근에는 조립질 물질, 지층쪽으로는



(a) Distribution of pumping well(PW1) and monitoring wells



(b) Structure of the pumping well

Fig. 4. Distribution of the pumping and monitoring wells and a structure of pumping well.

세립질 물질로 구성되어 여재를 분급하여 스크린과 대수층 간의 수리 연결성을 최적화하는 역할을 한다. 이러한 우물 개량은 일반적으로 과잉양수, 역세척, 서징, 분사 등으로 나눌 수 있다.

과잉양수란 지층의 통수 능력을 현저하게 초과하는 양수율로 채수하여 이물질들을 제거하며, 서지블록은 케이싱에 꼭 맞는 블록을 스크린 구간에서 상하로 움직여 주변의 미립자를 우물내로 유도시키고 공저에 퇴적된 슬라임을 제거하기 위하여 배일러(Bailer)를 사용하기도 한다. 서징(Surging)은 스크린이나 흡으로 유출입되는 물내의 점토나 세립질 모래를 지표 밖으로 배출시키며 이와 같은 작업은 물이 맑아지고 미립자의 배출이 최소화될 때까지 반복한다.

Table 1. Structure and composition of the pumping well

Contents	Pumping well
Depth	38 m
Outer diameter	400 mm
Inner diameter	250 mm
Interval of screen	GL -28.5 ~ -36.5 (Screen length : 8 m)
Screen type	Wire wrap screen (V-shape)
Slot size	1.2 mm
Filter pack size	2.0 mm
Thickness of filter pack	75 mm
Type of aquifer	- Upper aquifer: silty sand - Lower aquifer: sandy gravel

4. 현장 설치 및 시험 방법

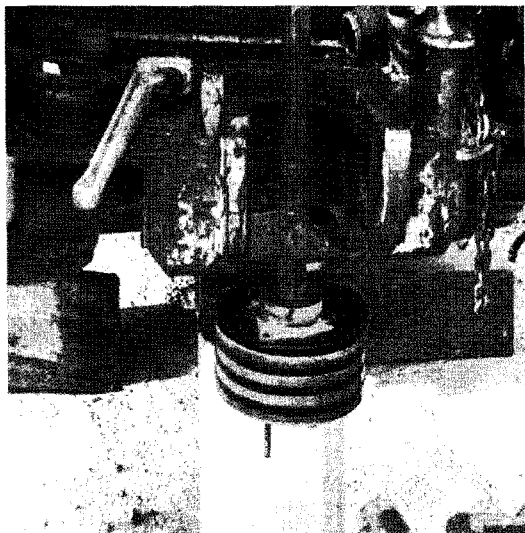
4.1. 연구지역의 우물 설치

연구를 위하여 1개의 양수정(PW-1)과 10개의 관측정(OB-1~8, NB-1, 2)이 굴착 이용되었으며, 양수정을 중심으로 NB-1, 2호공은 이격거리 2m, OB-1, 2, 3, 4, 7호공은 5m, OB-5, 8호공은 10m, OB-6공은 하천 방향으로 20m에 위치해 있다(Fig. 4(a)). 양수정과 OB-1~6호공은 미고결 충적층을 관통하여 풍화대까지 지표면하 심도 38m까지 굴착되었다. 양수정은 심도 28.5m까지는 케이싱이 설치되었으며 하부 모래질 자갈층의 하단부 5.08m 구간에 스크린이 위치하여 부분관통 되었다(Fig. 4(b)). OB-1~6호공은 대수층 구간에 걸쳐 스크린이 완전 관통되어 있으며, NB-1호공의 심도는 30.7m로 모래자갈층의 7.23m 구간, NB-1호공은 1.93m 구간이 관통되어 있다. 상부 충적층의 수리특성 여부를 확인하기 위하여 2개 관측정(OB-7, 8)은 지표하 12m까지 완전 관통되어 있다.

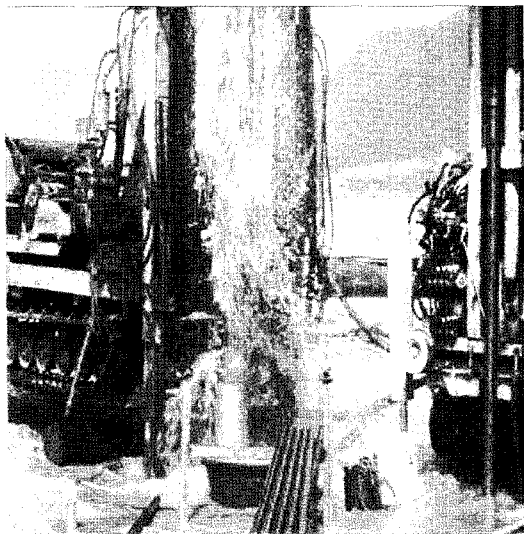
연구에 사용된 양수정은 내경 250mm로서 지표하 28.5m에 와이어 랩 스크린(Wire rap screen)이 8m 구간에 걸쳐 설치되었으며, 슬롯의 크기와 충전력의 크기는 현장에서 채취된 충적층의 입도 분석을 통하여 결정되었다(Table 1). 한편, 와이어 랩 스크린은 입도가 불량한 세립질을 함유한 지층의 유실을 최소화할 수 있도록 고안된 스크린으로서, 개구면적이 크고 v-모양 슬롯을 가지고 있어 산출량을 충분히 확보할 수 있는 장점이 있다.

4.2. 서지블록(Surge block)

굴착 후에는 우물의 산출성에 영향을 줄 수 있는 양수정의 공벽과 외부에 존재하는 슬라임과 미세 입자를 제거하기 위하여 서지블록이 실시되었으며 공저에 침전



(a) Surge block



(b) Air surging

Fig. 5. Well development using surging methods.

된 슬라임을 제거하기 위하여 에어 서징이 실시되었다 (Fig. 5).

서지블록은 우물 케이싱 구경과 거의 비슷한 크기의 서지블록(3-Rubber disk surge block)을 회전식 장비에 있는 단단한 드릴축 또는 충격식 장비에 고정하여 상하 왕복 운동을 시키는 것으로서 블록을 자연 낙하시키는 윈치 모드(Winch mode)와 유압을 이용한 압력모드(Pressure mode)를 각각 적용하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 블록에 있는 여러 구멍과 밸브는 서징 시 한정된 압력을 유지시키고 패커에 있는 퇴적물을 파악할 수 있게 한다 (Houben and Treskatis, 2007). 블록이 상·하 방향으로

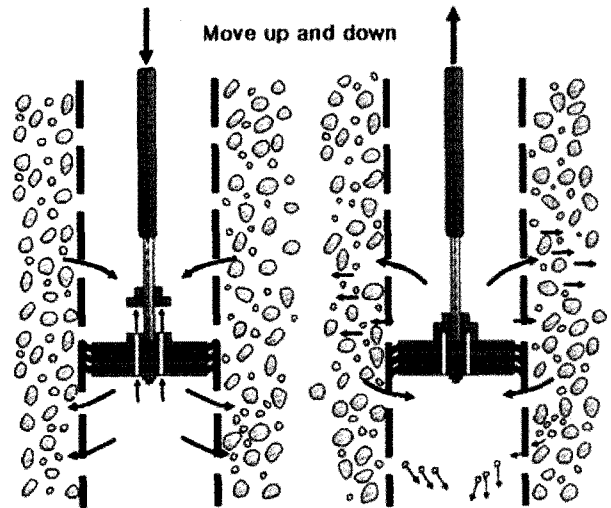


Fig. 6. Well development using a surge block (Houben and Treskatis, 2007).

주기적으로 이동하는데, 블록이 내려갔을 때 물은 스크린을 통해 배출되고 블록이 올라갔을 때 스크린을 통해 다시 들어온다. 케이싱 주변 근거리의 미립자부터 추출하고 충진력에 손상을 최소화 하고자 느린 속도에서 빠른 속도로 블록의 상하 이동 속도를 증가시키도록 단계적으로 실시하였으며 회당 블록의 작동 시간은 60분~100분 정도 연속으로 실시하였다. 특히, 토양공극이 막히거나 투수성이 불량한 스크린에서 강제적으로 흡입(Suction)을 할 경우 스크린을 붕괴시키거나 변형시켜 손상을 입힐 수 있으므로 주의를 필요로 한다.

4.3. 에어서징(Air surging)

에어서징은 관정 내에 쌓인 슬라임을 외부로 배출시킬 때 관정의 손상이 크지 않기 때문에 일반적으로 많이 사용하는 방법이다. 콤프레샤에서 공급된 공기압은 공기 주입구를 통하여 우물내로 투입이 된다. 이 때 공기 주입구 총길이의 50% 이상이 수중에 위치하게 되며, 콤프레샤를 짧은 간격으로 on/off함으로써 서징을 유발시킨다. 양수관의 차단 밸브 또는 파이프 시스템 내에 압력을 축적함으로써 서징이 발생되는데, 수직관에 공기압을 주입하여 우물 내에서 물이 팔팔 솟아져 나올 때 까지 계속하다가 차단 밸브를 잠그면 압력이 축적되며 스크린을 통해 물이 들어오게 된다. 다시 차단 밸브를 갑자기 열면 압력이 해방되고 스크린을 통해 순간적인 양수가 이루어진다. 이러한 에어서징은 서지블록으로 관정 주변의 슬라임을 1차적으로 제거한 후 관정 내에 쌓인 슬라임을 배출하기 위하여 실시하고 대수층으로부터 우물내로의 지하수 유입을

원활하게 하는 작업이다. 현장에서는 서지 블록이 실시된 이후에 슬라임 잔존물을 배출하기 위하여 약 1시간에 걸쳐 에어서징을 실시하였다.

4.4. 양수시험

양수정에서의 양수시험은 우물 개량 효과를 파악하기 위하여 본격적인 우물개량 작업이 실시되기 이전과 이후 (2회)에 각각 수행되었다 (Table 2). 현장에서 실시된 양수시험은 단계양수시험, 장기양수시험 및 회복 시험 등으로서, 서징 이전에 실시된 단계양수시험에서는 1~4단계까지 400 m³/day부터 매 단계마다 100 m³/day의 양수량을 증가시켜 700 m³/day까지 실시되었으며, 서징 후에 실시된 단계양수시험에서는 우물 개량의 영향을 고려하여 1~5 단계까지 500 m³/day부터 매 단계마다 100 m³/day의 양수량을 증가시켜 900 m³/day까지 실시되었다.

4.5. 우물상수 선정

다공질매질에서 우물개량 이전과 이후의 단계양수시험 자료로부터 최적의 우물상수(대수층손실상수(B), 우물손실상수(C) 및 우물손실지수(P))를 선정하기 위하여 선형 모

델의 직선법(Jacob's straight-line method)과 비선형 모델의 최소제곱을 적용한 회귀분석 방법(Labadie-Helweg's least-squares method)을 이용하였으며, 이때 비선형 모델은 FASTEP 프로그램을 이용하였다(Labadie and Helweg, 1975; Jacob, 1947). 비선형의 최소제곱법은 우물상수 B, C 및 P를 선정하기 위하여 최소제곱법을 이용한 수치해석 방법으로서, 오차(E(P))가 최소가 되는 B, C 및 P값을 선정한다(Table 3).

5. 우물 개량 효과 해석

5.1. 슬라임의 양과 지하수위 회복시간

양수정 주변의 대수층을 개선하고 우물 효율을 증가시키기 위하여 서지블록에 의한 우물개량 작업을 4월 23일부터 5월 8일까지 총 16회 실시하였으며, 서지블록 작업 이후에 실시한 에어서징은 총 11회 수행되었다. Table 4는 서지블록 과정에서 발생된 슬라임의 양과 에어서징 이후 측정된 지하수위 회복시간을 수록한 것이다. 초기 서지블록 작업시의 슬라임의 양은 약 0.517이었으며, 6회 서지블록 이후 실시한 에어서징 직후의 지하수위 회복시간은 359초이었으나, 마지막 16회차에는 0.014, 272초로서 각각 37배 및 1.3배가 감소되는 변화를 가져왔다. 한편, 9회에서 12회차 사이에 슬라임의 양과 지하수위 회복시간이 일부 증가하는 현상이 나타났는데, 이는 양수정에서 서지블록이 수행되는 과정에 NB-1호공과 NB-2호공의 시추 작업이 이루어져 대수층의 부분적인 교란현상이 발생한데 기인한다.

전체적으로 Fig. 7에서 보는 바와 같이 서지블록의 횡수와 슬라임의 양 및 지하수위 회복시간은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 두 인자간의 상관관계를 경험식으로 나타내면 식 (1), (2)와 같다.

$$y_1 = -0.1769 \ln(x_1) + 0.4960 \tag{1}$$

Table 2. Condition of step-drawdown pumping test before and after surging

Contents	Step-drawdown test	
	Before surging	After surging
Test date	Mar. 26, 2009	May 19~20, 2009
Elapsed time	Step 4 × 1 hour	Step 5 × 2 hour
	(1 hour per step) = 4 hour	(2 hour per step) = 10 hour
Pumping rate	400~700 m ³ /day	500~900 m ³ /day
Depth of submersible pump	GL.-26.50 m	GL.-32.00 m
Pumping capacity	7.5 Hp	15 Hp

Table 3. Determination of well parameters (B, C and P) using Jacob's straight-line method and Labadie-Helweg's least-squares method

Method	Model	Function	Solution	Well parameters
Jacob	Linear	$s_w = BQ + CQ^2$	$E(P) = \text{Min}_{B,C} \sum_{i=1}^N [s_i - (BQ_i + CQ_i^2)]^2 = 0$	B, C
Labadie-Helweg (Least square error)	Nonlinear	$s_w = BQ + CQ^P$	$\frac{\partial E(P)}{\partial B} = \sum_{i=1}^N [s_i - (BQ_i + CQ_i^P)]Q_i = 0$	B, C, P
			$\frac{\partial E(P)}{\partial C} = \sum_{i=1}^N [s_i - (BQ_i + CQ_i^P)]P C Q_i^{P-1} = 0$	

Table 4. Volume of slime and groundwater level recovery time after surge block and air surging in a pumping well

Event	Date (mm-dd)	Total work time (min)	Surge block mode	Surge block		Air-surging	Remark
				Slime thickness (cm)	Slime volume (m ³)	Water level Recovery time (sec)	
1	04-23	84.51	W	263.5	0.517	-	
2	04-24	84.51	W/P	177.6	0.349	-	
3	04-24	84.51	W/P	180.5	0.354	-	NB-1(D.B)
4	04-26	84.51	W/P	154.9	0.304	-	
5	04-26	84.51	W/P	121.1	0.238	-	
6	04-27	76.34	W	65.8	0.129	359	
7	04-28	76.34	W	28.6	0.056	343	
8	04-28	76.34	W	15.8	0.031	305	NB-1(D.C)
9	04-29	116.34	W	33.5	0.066	343	NB-2(D.B)
10	04-29	116.34	W	41.0	0.071	343	
11	04-29	100.00	W	0.0	0.000	328	NB-2(D.C)
12	04-30	76.34	W	77.5	0.152	330	
13	05-06	76.34	W	55.0	0.108	291	
14	05-06	76.34	W	33.0	0.065	267	
15	05-07	76.34	W	22.5	0.044	277	
16	05-08	76.34	W	7.0	0.014	272	

Remark) W: Winch, P: Pressure, D.B: Drilling beginning, D.C: Drilling completion

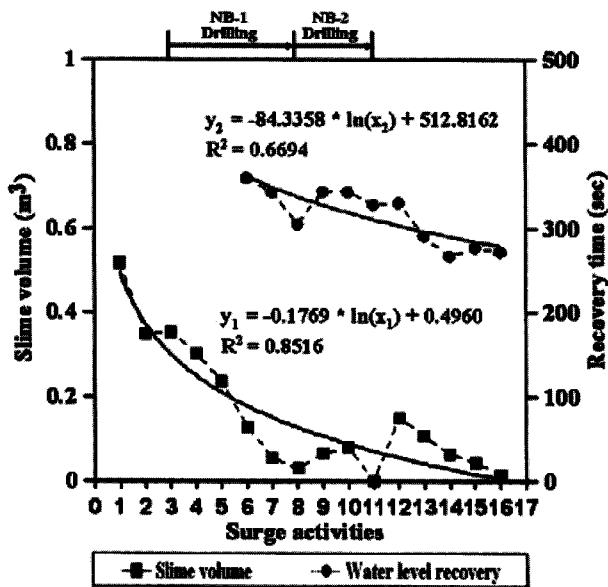


Fig. 7. Relationship between recovery time of groundwater level and volume of slime during well development in a pumping well.

여기에서, x_1 은 서지블록의 횟수, y_1 는 슬라임의 양이다. 또한,

$$y_2 = -84.3358 \ln(x_2) + 512.8162 \quad (2)$$

로서, x_2 은 서지블록의 횟수, y_2 는 에어서징후 지하수위 회복 시간이다.

5.2. 우물효율의 변화

단계양수시험에서의 수위강하는 대수층손실과 우물손실의 합으로 표현되며, 우물손실은 굴착 공법, 케이싱 및 스크린, 시추시 공벽의 변형, 매질 특성 등의 다양하고 복잡한 요인에 의해서 영향을 받는다. 본 지역에서의 단계양수시험은 우물 개량 이전과 이후에 각각 수행되었는데 우물 개량 이전에는 급격한 지하수위 강하로 인하여 4단계, 우물 개량 이후에는 5단계로 시험이 실시되었다. 실트 질모래층과 모래질 자갈층으로 구성된 조립질의 대수층에 설치된 양수정(PW-1)에서의 단계양수시험 자료를 활용하여 Jacob의 선형 방법과 Labadie-Helweg의 비선형 방법으로 대수층손실상수(B), 우물손실상수(C) 및 우물손실지수(P)를 산정하여 Table 5에 수록하였다.

미고결층에서 두 모델로 산정된 결과와 비교할 때 우물 개량 이전의 선형 모델을 통해 산정된 수위강하는 실제 값보다 낮게 나타났고, 우물개량 이후에 산정된 수위강하는 약간 높게 나타났다. 즉, 선형 모델의 경우 양수량(Q)에 따른 비수위강하량(s_w/Q)에 대한 직선의 기울기는 통계적 관계(Statistical relation)를 가지게 된다(정상용 외, 2009). 따라서 비수위강하량이 직선의 기울기에 영향을 미치게 되는데, 이때 통계적 관계에서 얻어진 값은 함수적 관계(Functional relation)의 비선형 모델과 비교할 때 우물 개량 이전에는 과소평가되며 이후에는 약간 과대평가 된

Table 5. Comparison of well parameters (B, C, P) estimated before and after surging by Jacob's and Labadie-Helweg's methods

Before surging			Jacob's Equation (P = 2.0)			Labadie-Helweg's Equation (P = 3.422)		
Step No.	Q (m ³ /day)	s_w (m)	BQ ($B = 2.253 \times 10^{-2}$)	CQ^2 ($C = 1.244 \times 10^{-5}$)	s_w (m)	BQ ($B = 2.920 \times 10^{-2}$)	CQ^P ($= 6.356 \times 10^{-10}$)	s_w (m)
1	400	12.10	9.01	1.99	11.00	11.68	0.51	12.19
2	500	15.89	11.27	3.11	14.38	14.60	1.09	15.69
3	600	19.42	13.52	4.48	18.00	17.52	2.04	19.56
4	700	23.94	15.77	6.10	21.87	20.44	3.46	23.90
After surging			Jacob's Equation (P = 2.0)			Labadie-Helweg's Equation (P = 1.439)		
Step No.	Q (m ³ /day)	s_w (m)	BQ ($B = 2.060 \times 10^{-2}$)	CQ^2 ($C = 1.004 \times 10^{-5}$)	s_w (m)	BQ ($B = 1.191 \times 10^{-2}$)	CQ^P ($C = 8.880 \times 10^{-4}$)	s_w (m)
1	500	12.70	10.30	2.51	12.81	5.96	6.80	12.75
2	600	16.10	12.36	3.61	15.97	7.15	8.83	15.98
3	700	19.44	14.42	4.92	19.34	8.34	11.03	19.37
4	800	22.68	16.48	6.43	22.91	9.53	13.36	22.89
5	900	26.64	18.54	8.13	26.67	10.72	15.83	26.55

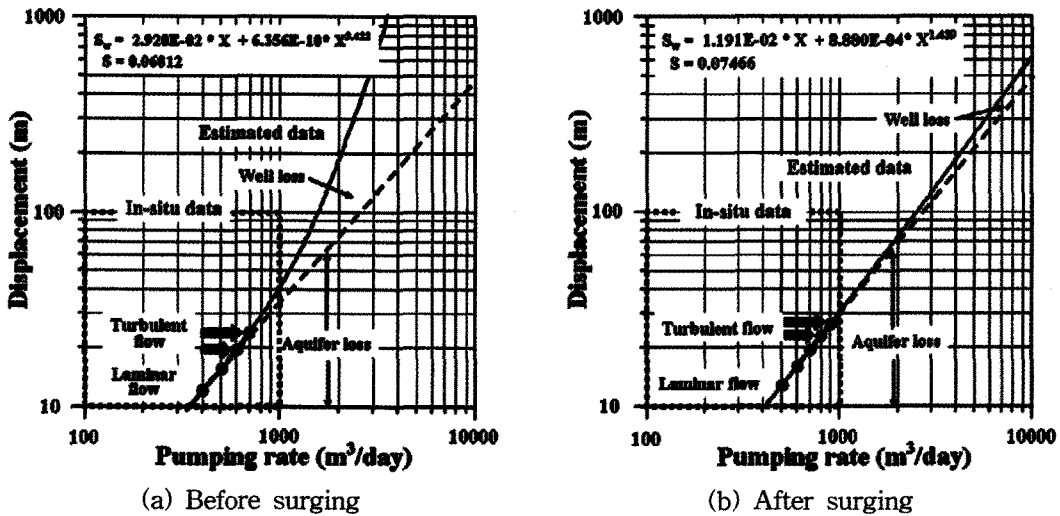


Fig. 8. Analysis of aquifer loss and well loss from step-drawdown tests before and after surging.

다. 따라서 단계양수시험 해석시 선형 모델은 오차를 가지므로 비선형 모델을 통해 산정된 우물개량 이전과 이후의 결과를 비교하였다. 이때 단계양수시험에서 대수층 손실상수(B)는 2.920×10^{-2} , 1.191×10^{-2} , 우물손실상수(C)는 6.356×10^{-10} 및 8.880×10^{-4} , 우물손실지수(P)는 3.422 및 1.439로 산정되어 각각 1.4백만배 및 0.42배의 변화를 가져왔다. 우물개량 이전에는 우물 주변 대수층의 투수성이 안정화되지 않아 양수 말기에 수위강하가 지수적으로 증가하게 되며, 이때 급격한 수위강하에 의해 유입된 물량은 우물손실상수(C)에 매우 작게 영향을 미치게 된다 (Fig. 8(a)). 그리고 우물개량 이후에는 양수정 주변의 양

호한 공극과 투수성의 발달로 난류흐름이 크게 감소하기 때문에 많은 양의 지하수가 스크린을 통과하게 될 때 스크린의 마찰손실이 크게 발생하고, 이때 우물손실상수(C)는 우물개량 이전보다 매우 높게 나타난다(Fig. 8(b)).

한편, 양수정에서 양수시 수위강하는 식 $s_w = BQ + CQ^P$ 와 같이 대수층손실과 우물손실로 구분되는데, 이때 층적층에서의 우물손실은 양수정 부근에서 난류에 의한 영향으로 나타난다. 이러한 층류(Laminar flow)와 난류(Turbulent flow)의 해석은 레이놀즈 수($Re = (\rho V D) / \mu$)와 관련되며 우물손실에서 우물손실지수(P) 값이 크면 다공질매질의 투수성이 다소 낮아지므로 양수율 증가에 따라

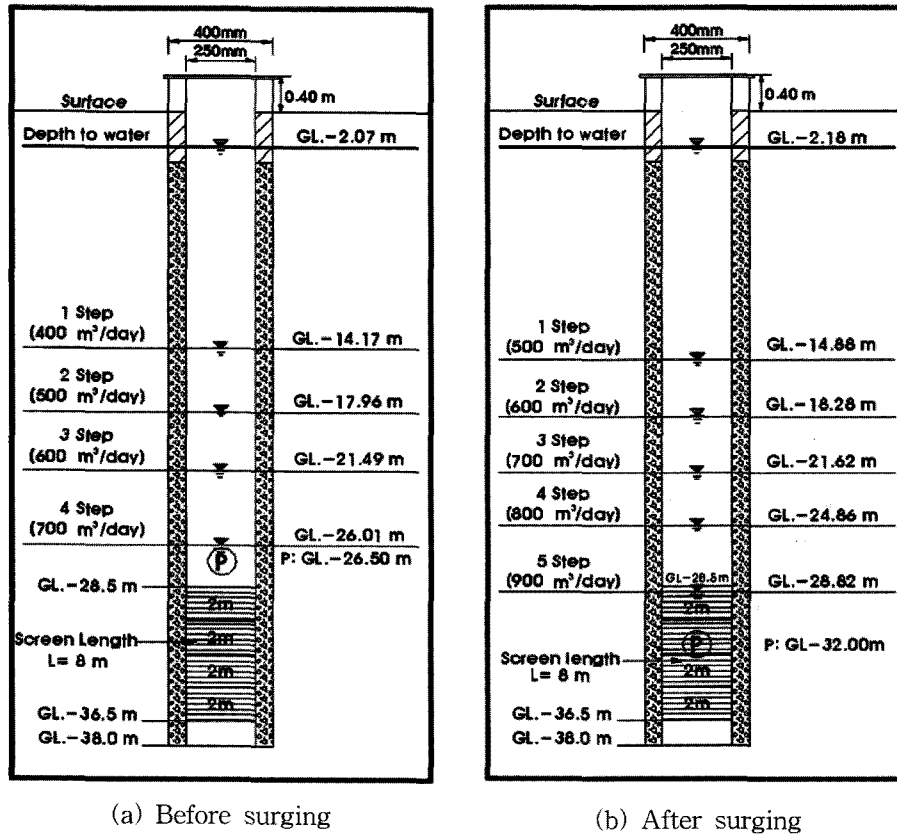


Fig. 9. Water level drawdown before and after the surging at a pumping well.

난류구간이 확장된다. 또한, 우물손실지수(P) 값이 작으면 다공질매질의 투수성이 커지며 양수정 주변으로 유입되는 물량도 증가하게 된다(Table 5 참조). 이론적으로 양수율과 수위강하는 층류 조건에서는 선형으로 비례하는 반면에, 각 단계별 양수율로 지하수를 채수하면 양수정을 중심으로 유입된 지하수 유속은 빨라지게 된다. 이때 레이놀즈 수가 증가 되어 나타난 난류는 급격한 수위강하를 발생시키고 층류 조건의 선형에서 벗어나게 된다(Fig. 8(a)).

본 연구지역 조립질의 미고결층에 위치한 양수정에서 우물 개량 이전의 양수시험시 급격한 수위강하는 지질 매질의 특성, 인근에서의 시추작업에 의한 지층의 교란 및 물리-화학적 폐색 등에 의하여 나타나는데, 대수층손실과 우물손실에 의한 수두손실에 기인한 것임을 의미한다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 우물개량 이전에 실시된 양수량 증가에 따른 3단계 및 마지막 단계의 수위강하에서는 지하수위가 각각 지표하 21.49 m, 26.01 m에 이르기까지 시험 양수량이 각각 600 m³/day, 700 m³/day에 불과하였으나, 우물개량 이후에는 지표하 21.62 m, 28.82 m에 이르기까지 각각 700 m³/day, 900 m³/day로 양수를 하여 양

수율이 각각 100 m³/day, 200 m³/day(우물개량전 대비 각각 16.7%, 28.6%) 증가되었다. 동일 양수율 700 m³/day를 기준으로 수위 강하량을 비교하면, 우물 개량 이후에 4.39 m 정도 수위강하가 덜 발생하였으며 우물 주변 대수층의 공극과 투수성이 크게 개선되어 우물효율이 증가하였다.

5.3. 수위 분포의 변화

우물개량에 따른 우물효율을 평가하기 위하여 서징 직후에 지하수위(해수면 기준)를 측정하고 Golf software사의 Surfer 프로그램을 이용하여 수위 등치선도를 작성하였다(Fig. 10). NB-1 및 NB-2호공을 굴착하기 이전인 4월 27일경에는 OB-4와 OB-5호공 사이의 이방성을 제외하고 비교적 각 방향으로 균등하게 수위강하가 발생하였으며 양수정 주변의 수위강하가 깊고 넓게 분포하였다. 또한 NB-1호공 굴착 완료 시점인 4월 28일경에는 시추작업 영향으로 OB-3, 4, 6호공 주변의 수위강하가 미미하게 발생하였다. 한편, Fig. 10(c)에서 보듯이 우물개량이 1주일 이상 지속되면서 양수정 주변에서의 수위강하 폭이 감

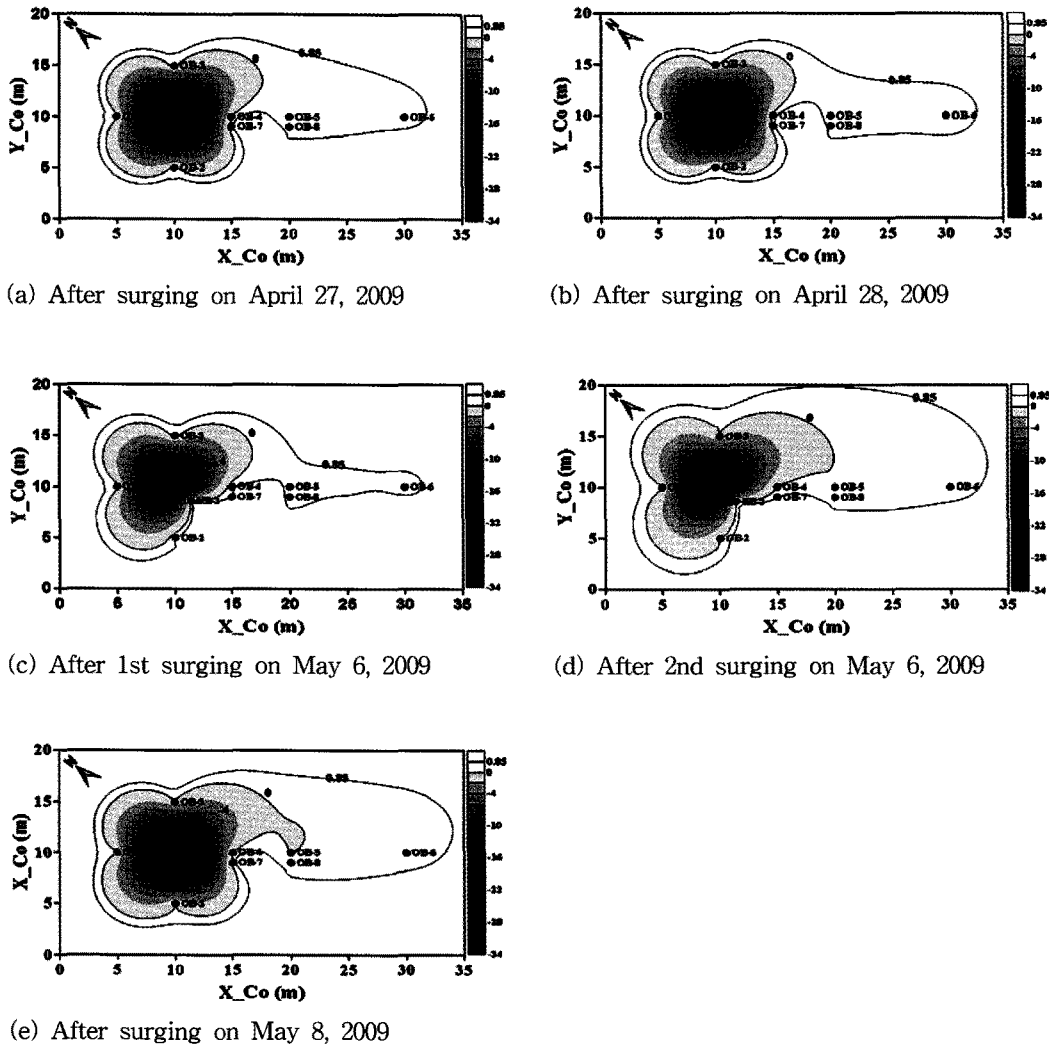


Fig. 10. Isopleth of water level drawdown after surging.

소되고, 4월 29일경에는 NB-2호공의 굴착으로 인하여 OB-2, NB-2, OB-5호공 주변의 이방성이 다시 증가되었으나, 계속되는 우물개량으로 지하수위 강하 영향권이 OB-1, 2, 3, 4호공 주변으로 점차 균등해졌고 특히 양수정 주변에서는 시추공 굴착 이전 수준 보다 수위강하 폭과 이방성이 다소 개선되었으며 지하수의 유입범위가 증가하였다 (Fig. 10(e)). 이와 같이 장기적인 우물개량 작업은 대수층의 지하수 유입범위를 넓히는 효과를 가져왔으며, 양수정 인근지점에서의 시추작업으로 인한 대수층의 교란도 상당히 회복시킬 수 있는 것으로 나타났다.

6. 결론 및 토의

층적층 우물은 굴착과정에 우물 주변의 미고결층에 교

란을 가져오고 이러한 교란은 대수층 고유의 수리성을 다소 저하시켜 우물의 신출성을 떨어뜨리게 된다. 따라서, 적절한 우물개량 공법을 활용하여 우물 주변 대수층의 투수성을 증가시키고 대수층내 폐색을 해소하며 화학적 과정에 의하여 산화물을 제거시키는 것이 필요하다. 즉, 우물 굴착이 완료된 이후 우물 주변과 대수층 간의 수리연결성을 최적화하고 우물의 기능을 향상시키기 위하여 우물 개량을 실시한다. 본 연구에서는 서지블록과 에어서징을 병행 활용한 우물 개량기술을 적용하였으며 우물개량 전후의 우물효율 및 수리특성 변화를 비교 평가하였다.

1. 서지블록에 의한 우물 개량이 수행되는 동안 발생된 슬라임의 양과 에어서징 직후 수위 회복시간을 분석한 결과, 서지블록 횡수(x_1)와 슬라임 양(y_1) 사이에는 $y_1 = -0.1769 \ln(x_1) + 0.4960$, 서지블록 횡수(x_2)와 에어서징 후 지

하수위 회복 속도(y_2)는 $y_2 = -84.3358 \ln(x_2) + 512.8162$ 의 경험식이 도출되었다. 본 경험식은 연구지역의 우물 조건과 대수층 조건에 한정되는 것이나, 장기간의 우물개량은 슬라임의 양과 지하수위의 회복 속도 등에 변화를 가져옴을 보여준다. 아울러, 본 연구지역에서 충적층 우물을 설치할 때는 수시간 단위로 구성된 최소 16회 이상의 서징 작업이 이루어져야 슬라임을 충분히 제거할 수 있는 것으로 평가된다.

2. 우물개량 이전과 이후에 단계양수시험을 실시하였으며, 우물개량 이후의 우물손실상수(C)는 우물개량 이전의 손실상수 보다 매우 크게 증가하였으나 우물손실지수(P)는 각각 1.439 및 3.422로서 2배 이상 감소한 것으로 나타났다. 이는 양수관정 주변에서 대수층이 개선되면서 다량의 물이 스크린을 통하여 유입되고 이 때 스크린의 마찰손실이 증가하고 대수층에서의 난류흐름이 감소하여 발생한 현상이다.

3. 또한, 에어서징 직후에 측정한 지하수위 자료를 활용하여 등치선도를 작도한 결과, 서징 횟수가 증가될수록 주변 지층의 이방성이 제거되고 수리변화 영역이 균질하게 확대됨을 알 수 있었다.

이와 같이, 대수층내에 포함된 미립질 슬라임은 우물과 대수층간의 물의 소통에 영향을 주어 우물의 산출성을 떨어뜨리고 수명을 단축시키므로, 보다 고효율의 우물 설치를 위해서는 서징을 통하여 양수정 주변의 수리특성을 굴착 전보다 개선시킬 필요가 있다. 우리나라는 1960~1970년대에 충적층 개발이 활발하여 미고결층내에서의 우물 개발 기술을 충분히 보유하고 있었으나, 최근에는 암반 지하수의 개발 욕구 증대 및 심부 굴착 기술의 개발로 인하여 충적층 우물 개발 기술이 발전하지 못하고 있다. 이와 같은 시점에 본 연구는 최근에 활발히 이루어지는 강변여과수 개발 사업에서 충적층 우물의 안정적 설치를 위해서 요구되는 우물개량의 방법론, 적용성 및 중요성을 보여준 사례이다. 앞으로 강변여과수 등 충적층 우물의 산출성 증대 및 수명 연장을 위하여 체계적인 우물 개발 기술이 적극 활용되고 정착되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지

속적인 확보기술개발사업단의 연구지원(과제번호:3-4-3)에 의해 수행되었으며, 연구지원 기관 및 시려깊은 의견을 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김남장, 이규홍, 1964, 한국지질도 영산도폭(1:50,000), 국립지질조사소.
- 정상용, 김병우, 김규범, 권해우, 2009, 단계양수시험 해석시 우물상수 산정 방법이 우물효율에 미치는 영향, 대한지질공학회, 19(1), 71-79.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, 서울, 1071p.
- Davis, R., 2003, Aquifer analysis and proper well development to maximize pumping capacity in alluvial wells, *Water Well Journal*, 57(2), 34-37.
- Driscoll, F.G., 1986, Groundwater and Wells, 2nd Edition, Johnson Division, St. Paul, MN., 1108p.
- Hix, G.L., 1993, Monitoring well development : Tools and techniques, *Water Well Journal*, 47(6), 52-57.
- Houben, G. and Treskatis, C., 2007, Water Well; Rehabilitation and Reconstruction, McGraw-Hill Companies, Inc., 391 p.
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Transactions of ASCE*, 112, 1047-1070.
- Labadie, J.W. and Helweg, O.J., 1975, Step-drawdown test analysis by computer, *Ground Water*, 13(5), 438-444.
- McDonald, D., 1980, Well development is the critical link, *Irrigation Age*, 54-55.
- Rosberg, J.E. and Bjelm, L., 2009, Well development by jetting using coiled tubing and simultaneous pumping. *Ground Water*, doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00588.x. 1-6.
- Roscoe Moss Company, 1990, Handbook of Ground Water Development, John Wiley and Sons, New York, 512 p.
- Sterrett, R.J., 2007, Groundwater and Wells, 3rd Edition, Johnson Screens, New Brighton, Minnesota, 812 p.
- Wendling, G., Chapuis, R.P., and Gill, D.E., 1997, Quantifying the effects of well development in unconsolidated material, *Ground Water*, 35, 387-399.
- Zdenek, F.F. and Alfred, R.E., 1980, Correct methods are essential to well development, *Johnson Driller's Journal*. 1-6.