

미고결대수층에서 우물 굴착 및 개량에 의한 대수층의 수리특성 변화

김병우¹ · 김규범^{2*} · 김건영¹

¹한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부, ²한국수자원공사 K-water연구원

Change of Hydraulic Characteristics due to Well Drilling and Well Development in an Unconsolidated Aquifer

Byung-Woo Kim¹, Gyoo-Bum Kim^{2*}, and Geon-Young Kim¹

¹Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

²K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

미고결대수층에서 우물 굴착 시 대수층 교란이 수리특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 우물굴착 이후의 우물개량 공법인 서지블록과 에어서징을 실시하였다. 그리고 우물 굴착 및 개량의 대수층 변화를 비교·분석하기, 위하여 단계 및 장기 양수시험을 수행하였다. 그 결과 우물 굴착 및 개량 이후의 단계양수시험에서 동일 양수율 700 m³/day에 대한 수위강하와 비교하였을 때 수위강하는 각각 26.01 m, 21.62 m로 4.39 m정도 감소되었다. 이때 우물특성을 파악하기 위한 우물 굴착 및 개량 이후의 스킨계수는 7.92에서 5.04로 감소되어 우물상태가 개선된 것으로 나타났다. 우물 굴착 및 개량 이후의 장기양수시험에서 양수정을 중심으로 주변 MW-2, 3, 4호정의 투수량계수 범위는 각각 $1.684 \times 10^{-3} \sim 4.490 \times 10^{-3}$ m²/sec, $4.002 \times 10^{-3} \sim 4.939 \times 10^{-3}$ m²/sec 범위로 우물개량 이후의 수리전도도 값이 조금 증가되었으며, MW-1호정은 1.018×10^{-2} m²/sec에서 6.988×10^{-3} m²/sec로 감소되었다. 이는 저장하는 동안 대수층의 공기 차단 및 폐색의 잠재적인 요인으로 인하여 MW-1호정 주변 대수층의 투수성이 미세하게 감소되는 효과로 나타났다. 따라서 미고결대수층에서 우물 굴착 시 미세입자가 양수정 주변의 수리특성에 영향을 미칠 수 있음을 반드시 유의해야 한다.

주요어: 미고결대수층, 우물굴착, 우물개량, 양수시험, 투수량계수, 수리특성

To investigate the effect of aquifer disturbance on hydraulic properties while well drilling at unconsolidated aquifer, the following tests were conducted: the surge block and air-surgings methods, which are well development methods used after well drilling; and step-drawdown tests and constant-rate pumping tests, which are used to assess changes in the aquifer after well drilling and development. The result of step-drawdown tests indicated that draw-down for a pumping-rate of 700 m³/day was 21.62 m after well development, decreasing 4.39 m from 26.01 m after well drilling. The skin factor used to identify the well properties decreased from 7.92 after well drilling to 5.04 after well development, respectively, which shows the improvement of well. Constant-rate pumping tests revealed a small increase in aquifer transmissivity after well development at MW-2, -3, and -4, centering around pumping well, from $1.684 \times 10^{-3} \sim 4.490 \times 10^{-3}$ m²/sec to $4.002 \times 10^{-3} \sim 4.939 \times 10^{-3}$ m²/sec. MW-1, however, showed decline in hydraulic conductivity from 1.018×10^{-2} m²/sec to 6.988×10^{-3} m²/sec, which was caused by a small decrease of aquifer permeability around monitoring well MW-1 due to latent factor of air interception and clogging in aquifer during surging. This finding indicates that fine particles have an effect on hydraulic properties at unconsolidated aquifers during well drilling; therefore, we consider that well drilling and development have an effect on hydraulic properties.

Key words: unconsolidated aquifer, well drilling, well development, pumping tests, aquifer transmissivity, hydraulic property

*Corresponding author: gbkim@kwater.or.kr

서 론

미고결대수층으로부터 우물굴착은 그 구성물질에 교란을 발생시킬 수 있으며 대수층의 투수성과 저유성의 감소로 인한 양수능력의 감소가 예상되어, 잠재적인 우물 효율의 감소로 나타난다. 미고결층에서의 우물개량은 손상된 대수층을 재생시키고 우물효율을 회복시킬 뿐 아니라, 우물 주변의 대수층은 수리특성을 시추 전보다 훨씬 더 개선시킴으로써 우물주변 대수층을 개량하는 것이다(Wendling et al., 1997). 따라서 스크린 주변 대수층의 투수성 증가, 우물유효 반경의 증가 그리고 개량에 의한 대수층 및 여재의 변화 등은 우물개량의 결과로서 우물 기능을 향상시킬 수 있다. 양수정의 효율을 다시 높일 수 있는 우물개량 방법 중 가장 일반적인 방법은 서지블록(surge block)과 에어서징(air-surgings)이다. 서지블록은 양수정 내에서 프런지나 블록을 상·하로 움직여 스크린 인근의 여재 및 충전층에서 시추 시 교란된 지층과 폐색(clogging)에 의한 막힘(strain), 브리징(bridging), 퇴적/침전(deposition/precipitation) 등을 제거하는 방법이다. 여기서 에어서징은 서지블록에 의해 공내에 쌓인 슬라임을 압축된 공기압을 이용하여 우물 밖으로 배출할 뿐만 아니라 서지블록과 같은 기능을 하며, 우물개량 및 우물재생에 있어서 단순하고, 저비용으로 시행 가능한 방법이면서 우물효율 개선이 높은 편이다.

현재 불균질매질층에서 우물 스크린의 우물효율 및 설계 그리고 우물개량에 대한 방법론적인 문헌은 다소 발견되고 있으나 우물개량, 굴착시 우물효율 및 수리특성 분석과 관련한 연구사례는 매우 미미한 실정이다. 국외의 경우 Clark and Turner (1983)은 우물스크린의 우물효율에 관한 실내시험을 하였으며, Hix (1993)는 양수, 서징, 공기주입 양수 및 과잉양수, 세척 및 분사, 진공양수 그리고 기계적 펄스양수(pulse pumping test) 등을 이용한 관측공 개선을 위하여 우물개량 방법의 유효성에 관하여 연구하였다. Wendling et al. (1997)은 미고결층에서의 서징 및 개량 효과를 정량적으로 평가한 바 있으며, Davis (2003)는 미고결대수층에서 양수량을 극대화하기 위하여 대수층 분석 및 우물개량 공법에 관하여 연구하였다. 또한, Rosberg and Bjelm (2009)는 물분사(hydrojetting) 전후의 양수시험 해석결과를 비교·분석하여 물분사가 효과적인 청소 방법임을 증명하였다. 이와 같이 우물설계 및 개량방법 그리고 방법론 등을 수록한 문헌들은 다소 발견되어 있다(Driscoll, 1986; Roscoe Moss Company, 1990; Houben and Treskatis,

2007; Sterrett, 2007). 그러나 우물개량시 현장시험으로부터 수리특성, 우물 효율 및 개량 등에 대한 연구논문은 매우 적은 편이다. 특히, 국내의 경우는 서징 방법을 이용한 철/망간 저감 효과와 우물개량을 통한 우물효율 개선에 관한 연구사례가 있다(김규범 외, 2009; 김규범 외, 2010).

본 연구는 우물 굴착 시 대수층 교란이 수리특성에 영향을 미칠 수 있으므로 우물 굴착 및 개량 이후의 수리특성 변화에 관하여 분석하였다. 우물 굴착 및 개량 이후의 수리특성을 비교 분석함으로써 우물 굴착 시 우물효율 및 수리특성에 미치는 효과를 정량적으로 분석하는데 목적을 두었다.

연구 지역

본 연구 지역은 경상남도 창원군 길곡면 증산리에 해당되며, 낙동강을 경계로 남측에 창원시와 함안군이 위치한다. 충전층은 동서 방향으로 약 4 km, 남북 방향으로 약 2 km의 크기로 분포하며, 수계는 동서 방향의 낙동강에 길곡천, 마천천 및 온정천이 북측에서 남측으로 유입되는 형상이다(김남장과 이홍규, 1964). 충전층의 기반암은 Fig. 1에서 보는바와 같이 백악기 경상계 신라통의 진동층으로 추정되며, 진동층은 주로 회색, 암회색, 암갈색의 셰일, 일부 처어트질 암석 및 암회색의 아코스 사암질이 협재하는 형태를 갖는다(김남장과 이홍규, 1964).

현장 우물 설치시 수행된 시추조사자료에 따르면, 상부로부터 약 23 m 구간에는 실트질모래층이 존재하고, 그 하부에는 약 10 m 두께의 모래자갈층이 존재하며, 그 하부에는 풍화대가 존재한다. 전체적으로 모래층 사이에는 실트, 점토 또는 실트질모래 등의 세립질 입자가 부분적으로 협재되어 있다(김병우와 김규범, 2009).

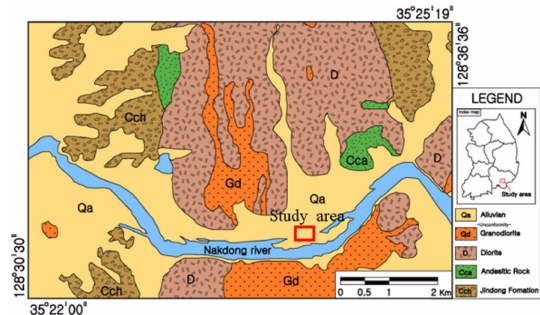


Fig. 1. Location and geology of the study area (Kim and Kim, 2009).

우물굴착 및 설계

양수정의 굴착

미고결층에서의 시추와 착정(well drilling)은 가능하지만 굴착 이후의 시추공 및 착정공의 안정성은 확보하기 어렵다. 미고결퇴적물, 토양, 풍화되거나 분해된 암석에서의 시추는 매질의 압편 크기에 영향을 받는데, 표석(boulder)은 굴착시 부서지지 않고 주변 지층으로 밀려나가는 등 일정 크기의 압편은 굴착시 굴착기의 작동을 멈추게 하는 요인이 되기도 한다. 자갈과 작은 크기의 미고결 물질들은 파내거나 씻어 내거나 휘젓는 등의 공법 적용은 가능하나 굴착 후 공의 안정성을 확보하기 어렵다(Chugh, 1985).

시추와 착정은 굴착의 목적에 따라 구분이 되는데 시추공은 지층의 상태를 파악하거나 양수정에서 양수시험시에 관측공 또는 관정내 실험 등을 목적으로 이루어진다. 그러나 착정은 굴착 이후의 우물개발을 전제로 하여 굴착되나 정밀한 지질 상태를 파악하기는 어렵다. 이러한 착정은 시추와는 달리 굴착된 대수층에서의 지하수 수량을 확보하기 위한 목적으로 “양수정(pumping well) 또는 취수정(production well)”이란 용어를 사용한다.

이와 같이 양수정의 굴착 방법으로는 암석을 분쇄하는 굴착방법과 미고결퇴적층을 교반시켜 굴착하는 방법으로 구분된다. 굴착기법에 따라 회전식 방법(rotary method), 수리충격식 방법(hydraulic percussion method), 회전 충격식 방법(rotary percussion method), 수압식 방법(jetting method), 오거 방법(auger method) 등이 있다.

본 연구지역에서는 양수정 굴착시 공기압축 충격식 바버드릴 공법(barber drill method)을 적용하였으며, Fig. 2와 같이 바버드릴 선단에 T-4 머드드릴(hammer drill)을 이용하여 굵은 자갈로 구성된 미고결층을 천공 및 슬라임을 제거하기 위해 압축공기를 사용하는 공법



Fig. 2. Hammer drill used for sinking a pumping well (fore-end of barber drill).

이다. 특히 바버드릴의 경우 강변 주변 대수층의 자갈층(호박돌층), 연암층 그리고 암반층 등의 천공에 있어 시간적으로 매우 효율적이다. 그러나 자갈층 상부의 실트질모래층에서의 시추시 우물주변 지층교란이 발생하고 우물시공 후 재생기간이 반드시 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 강변 주변의 미고결 퇴적층에서 바버드릴 공법이 적용된 우물착공으로부터 우물 굴착 및 개량 이후의 수리특성 및 우물효율을 비교·분석하기 위하여 단계 및 장기 양수시험이 수행되었다.

우물 설치 및 양수시험

연구지역의 간접취수 방식인 강변여과수 개발시 우물 개발은 대수성시험에 의한 적정양수량, 대수층의 수리전도도, 투수량계수, 저유계수 등의 수리특성을 산출하여 간접취수 개발시 적정 개발규모에 필요한 제반 기초자료를 이용하기 위해 수행되었다.

연구지역에 개발된 관정으로는 공기압축식 바버드릴(T-4 hammer)로 굴착된 1개의 양수정(PW-1)과 회전식 방법식으로 굴착된 10개의 관측정(MW-1~8, NB-1, 2)들이 있다. 양수정 및 관측정은 양수정을 중심으로 NB-1, 2호정은 이격거리 2m, MW-1, 2, 3, 4, 7호정은 5m, MW-5, 8호정은 10m, MW-6호정은 20m에 위치해 있

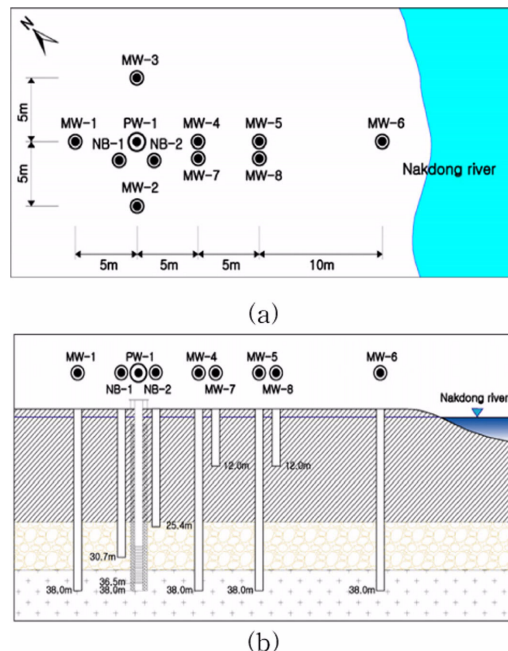


Fig. 3. Design of wells : (a) location of wells, and (b) cross-section of pumping well and monitoring wells (Kim and Kim, 2009).

다(Fig. 3(a)).

양수정과 MW-1~6호정은 지표면하 심도 38 m까지 굴착되었다. 양수정은 지표면하 심도 28.5 m까지는 케이싱이 설치되었으며, 모래자갈로 구성된 그 이하 심도 5.08 m 구간은 부분관통(partial screen) 되어있다. MW-1~6호정은 38 m 심도로 굴착되어 대수층 구간에 걸쳐 스크린이 완전 관통되어 있으며, NB-1호정의 심도 30.7 m로 모래자갈층의 7.23 m, NB-2호정은 심도 25.4 m로 모래자갈층의 1.93 m 구간에 관통되어 있다. 하상퇴적층의 상부 구간 수리특성을 확인하기 위한 2개 관측정(MW-7, 8)은 지표면하 12 m까지 완전 관통되어 있다. 양수정은 구경 400 mm 굴착에 250 mm 케이싱을 설치하였으며, 관측정의 직경은 55 mm (HX 크기)로 설치되었다.

바버드릴 공법 이후 양수정 주변의 교란된 대수층을 재생하기 위하여 서지블록과 에어서징을 실시하였으며, 서징에 대한 수리특성을 분석하기 위하여 단계 및 장기 양수시험이 각각 수행되었다. 이때 우물굴착 이후에 실시된 단계양수시험은 양수율 400 m³/day을 1단계로 100 m³/day씩 증가시켜 700 m³/day까지 총 4단계로 실시하였으며, 적정양수율은 500 m³/day으로 산정되었다. 장기양수시험은 적정양수율을 16시간 동안 적용하여 각 관측정에서의 지하수위를 측정하였다. 그리고 우물개량 이후에 실시된 단계양수시험은 양수율 500 m³/day을 1단계로 100 m³/day씩 증가시켜 900 m³/day까지 총 5단계로 실시하였으며, 적정양수율은 800 m³/day으로 산정되었다. 장기양수시험은 적정양수율을 26시간 동안 적용하여 각 관측정에서의 지하수위를 측정하였다.

양수시험 시 우물 굴착 및 개량 이후의 PW-1호정의 최대 수위강하량은 각각 16.05 m, 24.76 m, 북서방향의 MW-1호정은 0.31 m, 0.63 m, 남서방향의 MW-2호정은 0.67 m, 1.11 m, 북동방향의 MW-3호정은 0.77 m, 0.90 m, 남동방향의 MW-4호정은 1.40 m, 1.01 m MW-5호정은 0.49 m, 0.57 m, MW-6호정은 0.14 m, 0.29 m, MW-7호정은 0.11 m, 0.26 m, MW-8호정은 0.10 m, 0.27 m로 관측되었다. 양수정 인근에 위치한 NB-1호정은 3.01 m, NB-2호정은 0.23 m로 우물개량 이후에 양수시험에서 관측되었다.

시험방법 및 이론

스크린 주변의 수리환경

미고결대수층에서 공기 압축식 바버드릴을 이용한 우물굴착은 우물주변 대수층(실트질모래층)이 교란되어 우

물효율 및 투수성은 저하하게 된다. 우물효율을 개선하기 위한 우물개량은 양수정 주변의 공극과 수리전도도 구간을 개선하기 위한 것으로 양수정의 효율을 향상시키는데 목적을 두고 있다. 일반적으로 다공성매질 대수층에서 지하수의 자연 흐름속도는 약 1 m/day로 낮은 편이며, 지하수유동은 층류흐름(laminar flow)로 나타난다. 지하수가 양수정에 가까워짐에 따라 점점 더 대수층의 작은 영향추(cone of depression) 부분을 통해 지하수가 유동하게 되고, 일정한 우물의 유출을 통해 속도가 증가하여 유동하게 된다. 양수정으로부터 1 m 부근의 지하수 유속은 100 m 부근 지하수보다 100배 정도 빠른 흐름을 보이며, 수리전도도는 증가한 에너지 손실로 인하여 난류흐름(turbulent flow) 만큼 충분히 증가될 수 있다(Houben and Treskatis, 2007). 이는 특정한 입자의 배출 또는 막힘 현상에 의한 대수층 교란이 우물로부터 수위강하가 효과적으로 증가하게 되는데 이를 우물수두손실이라고 한다. 이와 같이 투수성 및 우물효율이 감소할 경우 서지블록과 공기압축식 에어서징을 이용하여 문제점을 해결할 수 있다.

양수시험

미고결대수층으로부터 우물 굴착 및 개량 이후의 우물효율에 관한 분석은 단계양수시험으로부터 최적의 우물상수(대수층수두손실계수(B), 우물수두손실계수(C) 및 우물수두손실지수(P))를 산정하기 위하여 비선형 최소제곱법(Labadie-Helweg's least-squares method)을 적용하였다(Labadie and Helweg, 1975). 비선형 최소제곱법은 우물상수 B, C 및 P를 산정하기 위한 수치해석 방법으로서, 오차(E(P))가 최소가 되는 최적의 우물상수들을 산정하기 위한 기법이다(정상용 외, 2009).

장기양수시험은 양수정(PW-1)을 비롯하여 10개의 관측정(MW-1~8, NB-1, 2)에서 실시되었으며, 완전관통 관측정(MW-1~6), 부분관통 관측정(NB-1) 그리고 저심도 완전관통 관측정(MW-7, 8, NB-2)으로 분류하여 해석하였다. 그러나 우물 굴착 및 개량 이후 수리특성은 양수정을 중심으로 반경 5 m 주변의 동일 심도와 완전관통 관측정 MW-1, 2, 3, 4호정을 대상으로 분석하였다.

이때 단계양수시험(2009년 5월 19일) 이후부터 장기 양수시험(2009년 5월 25-26일까지)의 총강우량 91 mm는 한시적으로 내린 5월 21일의 게릴라성 집중호우인 것으로 나타났다. 특히 연구지역의 하상퇴적층은 투수성이 높은 미고결대수층으로 구성되어 있다. 지표면 부근에는 집중호우시 범람에 의해 얇게 형성된 모래질점토

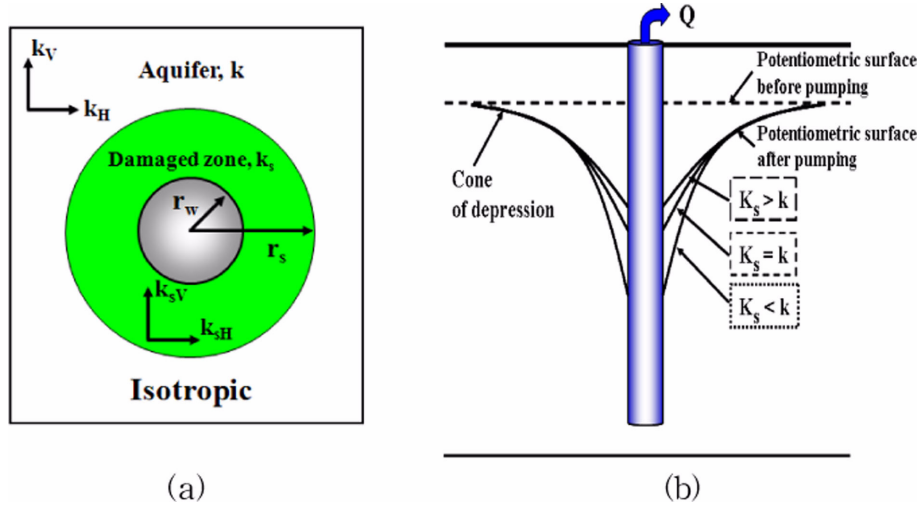


Fig. 4. Vertical section of a pumped well showing aquifer damage and permeability; (a) damage zone by well drilling (Furui, 2004), and (b) vertical section showing drawdown for selected hydraulic conductivity relations (Charles et al., 1994).

로 덮여있어 게릴라성 집중호우시에는 지표수가 지표로 유출되며, 이때 지하수 수질은 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.

스킨계수 및 유효우물반경

일련의 시추과정에서 원인이 된 대수층수두손실은 시추완료 직후의 양수량을 크게 감소시킬 수 있다. 또한 저류흐름(reservoir flow) 항에 있어서 대수층수두손실은 Fig. 4에서 보는바와 같이 양수정 주변의 감소된 투수계수의 한정된 영역으로 모델화 할 수 있다(Furui, 2004). 이러한 스킨계수(skin factor, s)는 정류와 부정류 상태의 스킨계수로 표현될 수 있다. 양수시 우물주변에서의 수리전도도가 당초 k에서 k_s로 변동되었을 때 우물주위에 스킨이라 불리는 공벽이 생기고 우물안의 수위강하는 k_s=k 일때에 비하여 크거나 작을 수 있다. 이와 같이 스킨계수(s_f)는 평균 반경(r_bar)항을 유도하여 등가등방성 체계(equivalent isotropic system)의 식 (1)로 유도할 수 있다. 이러한 효과를 설명하기 위하여 Hawkins (1956)와 Earllougher (1977)은 식 (2)와 같이 무차원의 스킨계수로 표현된다.

$$s_f = \int_1^{\bar{r}_w} k_s^{-1} \bar{r}_D^{-1} d\bar{r}_D - \int_1^{\bar{r}_w} \bar{r}_D^{-1} d\bar{r}_D$$

$$= (k_s^{-1} - 1) \ln(\bar{r}_D / \bar{r}_{Dw}) \tag{1}$$

$$s = (k/k_s - 1) \ln(r_s/r_w) \tag{2}$$

여기서, r_s는 스킨영역의 반경, r_bar_s는 스킨영역의 평균 반경, r_w는 양수정의 반경, r_bar_w는 양수정의 평균 반경, r_bar_D는 무차원인 평균 반경, r_bar_{Ds}는 스킨영역의 무차원인 평균 반경, r_bar_{Dw}는 양수정의 무차원인 평균 반경, r_bar_s는 무차원인 스킨영역의 평균 반경, k_s는 스킨영역의 수리전도도이다.

s는 무차원인 스킨계수를 산정하기 위해서 Novakowski (1990)와 Kroening et al. (1996)은 정상류 평형상태의 수위강하를 이용하였으며, 우물수두손실 항의 식 (4)를 식 (3)에 적용하여 식 (5)로 표현하였다.

$$s_w = s_a + s_f = BQ + CQ^2 \tag{3}$$

$$s_f = \frac{sQ}{2\pi T} \tag{4}$$

$$\frac{sQ}{2\pi T} = s_w - \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.246Tt}{r_w^2 S}$$

$$s = \frac{\Delta s_w}{Q/2\pi T} - \frac{1}{2} \ln \frac{2.246Tt}{(r_w)^2 S} \tag{5}$$

그 반면, 우물수두손실과 스킨관계는 부정류 상태의 Theis (1935) 해법을 이용하였다. 그리고 스킨계수는 양수정으로부터 부정류 상태에서의 수위강하에 관한 식 (6)을 식 (3)에 적용하여 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$s_f = \frac{sQ}{4\pi T} \tag{6}$$

Table 1. Skin factor according the condition of the skin zone and well development (Kroening et al., 1996).

Sign of skin factor	Condition of skin zone (hydraulic conductivity)	Condition of well development (skin factor)
-	$k_s > k_a$	-
0(Zero)	$k_s = k_a$	0 : Good
+	$k_s < k_a$ (Damaged well)	1~5 : Moderate
		6~20 : Poor
		>20 : Very poor

Remark) k_a : aquifer hydraulic conductivity, k_s : hydraulic conductivity of skin zone

$$s = \frac{\Delta s_w}{Q/(4\pi T)} - \ln \frac{2.246Tt}{(r_w)^2 S} \quad (7)$$

여기서 s 는 스킨계수, $s_a = BQ$ 는 대수층 수두손실항, $s_f = CQ^2$ 는 우물 수두손실항, Δs_w 는 $\log(t) = 0$ 의 수위강하량, s_w 는 총수위 강하량, S 는 저류계수, r_w 는 양수정 반경이다.

양수정 주변 영역의 스킨계수는 대수층 특성을 가지는 것이 아니라 물리적으로 바뀌게 되는 스킨영역(여재 영역)을 포함한 우물손상 영역으로부터 나타난다 (Kroening et al., 1996). 따라서 Kroening et al. (1996)이 제시한 스킨계수와 유효우물반경에 따른 우물특성을 Table 1과 같이 해석할 수 있으며, 단계양수시험에서 Jacob (1947)에 의해 제시된 대수층수두손실계수(B)를 이용한 유효우물반경(r_e)은 식 (8)로 표현할 수 있다 (Kasnow, 1996).

$$r_e = \sqrt{\frac{0.3Tt_{step}}{10^{0.00387BS}}} \quad (8)$$

여기서 t_{step} 은 단계별 양수시간이며, 양수정의 적합한 개발은 $r_e > r_w$ 가 될 때를 의미한다.

분석결과

과잉양수에 의한 우물개량

압축분사 방식의 바버드릴(굴착공법)로 굴착한 양수정은 지층 교란 및 폐색으로 미세입자들이 여재 및 모래층을 관통하는 동안 물리적 작용으로 인하여 당김, 퇴적, 브리징을 유발시켜 우물효율을 떨어뜨릴 수 있다(김규범 외, 2010). 따라서 서징 이전에 이물질 및 슬라임으로 교란된 지층을 개선시키기 위하여 지층의 통수능력을 현저하게 초과하는 양수율 700 m³/day을 60분에 걸쳐서

1.5 kg/m³ 정도의 슬라임을 배출하였으며, 180분 경과함에 따라 0.1 kg/m³ 정도의 슬라임이 미량으로 배출되었다(2009년 4월 24일). 스크린으로 유출입되는 점토나 세립질 모래를 지표 밖으로 배출시킨다. 이러한 일련의 작업은 물이 맑아지고 미립자의 배출이 최소화될 때까지 반복하였으나 우물산출량은 증가하지 않았다. 따라서 우물개량 공법인 서지블록과 에어서징을 실시하였으며, 우물 굴착 및 개량 이후에 대한 효과를 비교분석하기 위하여 단계 및 장기 양수시험을 수행하였다.

서징 및 단계양수시험

양수정 주변의 대수층을 개선하기 위하여 서지블록과 에어서징이 실시되었으며, 2009년 4월 23일부터 5월 8일에 걸쳐 서지블록은 16회, 에어서징은 11회 실시되었다. 김규범 외(2010)에 의하면 서지블록의 횡수와 슬라임의 양과 지하수위회복 시간에 대한 경험식을 각각 $y_1 = -0.1769 \ln(x_1) + 0.4960$, $y_2 = -84.3358 \ln(x_2) + 512.8162$ 으로 나타내었다. 여기서, x_1 는 서지블록의 횡수, y_1 는 슬라임의 양, x_2 는 에어서징의 횡수, y_2 는 에어서징후의 지하수위 회복 시간이다. 이와 같이 지속적인 우물개량 작업은 대수층의 지하수 유입범위를 넓히는 효과를 가져 올뿐만 아니라 교란된 대수층을 상당히 회복시킬 수 있는 방법으로 나타났다.

바버드릴 공법에 의한 산출량 저하의 여러 가지 원인을 정량적으로 검토하기 위하여 단계양수시험이 실시되었으며, 양수율에 대한 수위강하를 Fig. 5에 도시하였다.

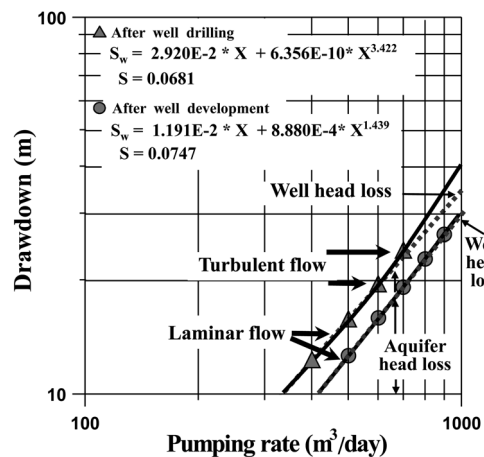


Fig. 5. Analysis of aquifer loss and well loss from step-drawdown tests after well drilling and development.

양수정(PW-1)은 실트질모래층과 모래자갈층으로 구성된 조립질의 대수층으로 양수시 수위강하는 그때 양수량에 따라 달라질 수 있으며, 우물수두손실 또한 다르게 나타난다. 우물 굴착 및 개량 이후에 실시된 단계양수시험으로부터 비선형 방법을 이용한 우물상수 C 값은 각각 6.356×10^{-10} , 8.880×10^{-4} 로, P 값은 각각 3.422 1.439로 나타났다. 우물굴착 이후의 단계양수시험시 실트질모래층로부터 우물굴착으로 인한 대수층 교란은 양수 말에 수위강하가 지수적으로 증가하게 된다. 그리고 우물개량 이후에는 양수정 주변의 양호한 공극과 투수성 발달로 인하여 난류흐름이 크게 감소하게 되고, 많은 양의 지하수가 스크린으로 유입하게 될 때 스크린의 마찰손실이 크게 발생하게 된다. 이때 우물수두손실 상수는 우물개량 이전 보다 높게 나타난다.

따라서 조립질 대수층에 위치한 양수정에서의 급격한 수위강하는 굴착시 지층의 교란, 지질특성 그리고 물리-화학적 폐색 등으로 대수층수두손실과 우물수두손실에 의한 수두손실이 발생한 것을 의미 한다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 우물굴착 이후에 실시된 양수량 증가에 따른 단계별 수위강하에서는 지표하 26.01 m에 이르기 까지 최대 $700 \text{ m}^3/\text{day}$ 에 이르렀으며, 우물개량 이후에는 지표하 28.82 m에 이르기까지 최대 $900 \text{ m}^3/\text{day}$ 으로 우물 굴착 및 개량 이후를 비교할 때 양수율이 약 $200 \text{ m}^3/\text{day}$ 가 증가하였다. 우물 굴착 및 개량 이후의 양수율 $700 \text{ m}^3/\text{day}$ 과 비교하였을 때 무려 4.39 m의 수위강하의 차이를 보였으며, 우물개량 이후에 양호한 투수성과 공극의 발달로 인한 양수정 주변 대수층에서의 우물효율이 매우 크게 증가한 것으로 나타났다.

단계양수시험으로부터 스킨계수 및 유효우물 반경

우물 굴착 및 개량 이후의 우물특성은 Kroening et al. (1996)이 제시한 스킨계수와 스킨영역의 유효우물 반경으로부터 분석 될 수 있다.

이러한 수킨 영역은 고유의 대수층 성질이 아니라 물리적 외압에 의해 바뀌게 되는 영역이기 때문이다. 우물 굴착 이후의 스킨계수 산정은 시추시 교란된 대수층으로부터의 난류흐름이 크게 나타나기 때문에 부정류 조건으로 해석하였다. 우물개량 이후에는 등방 및 균질에 가까운 층류흐름의 특성을 보여 정류 조건으로 해석하였다. 스킨계수를 산정하기 위한 입력변수는 단계양수시험으로부터의 양수율(Q), 수위자료, 그리고 양수정에서의 수위강하량 자료에 의해 구해진 T와 S 값을 적용하였다.

Table 2. Values of skin factor (s) and effective well radius (r_{we}) estimated after well drilling and development

Parameters	After well drilling	After well development
(Skin factor)	7.92	5.46
r_e (Effective well radius, m)	0.101 ($r_e < r_w$)	0.203 ($r_e > r_w$)
Well condition	Poor	Moderate

그 결과 우물 굴착 및 개량 이후의 스킨계수와 스킨 영역의 유효우물반경을 Table 2에 정리하였다. 우물굴착시 우물공(wellbore) 주변 여재의 스킨계수는 7.92로 양수정의 상태가 불량한 것으로 나타났으며, 우물개량 이후의 스킨계수 값은 5.46으로 양수정의 상태가 불량에서 보통으로 개선된 것으로 나타났다. 우물개량 이후의 스킨계수는 우물굴착 이후 보다 약 31.06%로 개선된 효과를 보였다. 또한 유효우물반경에서 양수정의 적합한 개발은 유효우물반경이 우물반경보다 클때를 의미하는데, 우물 굴착 및 개량 이후에는 각각 0.101 m, 0.203 m로 산정되었다. 우물굴착 이후의 주변 대수층의 수리전도도는 공주변 보다 다소 높기 때문에 유효우물반경은 매우 미미한 것으로 나타났다.

따라서 우물개량 이후의 양수정 주변의 여재가 크게 개선되었음이 확인되었으나, 보다 지속적인 개량을 통해서 양질의 우물로 개선되어야 할 것으로 판단된다.

장기양수시험

우물굴착 이후의 양수시험은 양수정(PW-1)을 중심으로 8개의 관측정에서 실시되었으며, 우물개량 이후에는 2개지점이 추가되어 관측정 10개의 관측정에서 양수시험이 수행되었다. 그러나 우물 굴착 및 개량 이후의 수리특성을 분석하기 위하여 동일 대수층 심도의 관측정(MW-1~6)을 대상으로 자유면 경계조건을 고려한 Neuman (1974) 해를 적용하여 산정하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 우물굴착 이후 장기양수시험에서의 투수량계수(T)는 $1.166 \times 10^{-3} \sim 2.319 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$, 수리전도도(K)는 $3.700 \times 10^{-5} \sim 7.380 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$, 저류계수(S)는 $8.060 \times 10^{-4} \sim 2.409 \times 10^{-2}$ 로, 우물개량 이후의 투수량계수(T)는 $1.310 \times 10^{-3} \sim 8.978 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$, 수리전도도(K)는 $4.000 \times 10^{-5} \sim 2.786 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$, 저류계수는 $8.392 \times 10^{-3} \sim 5.388 \times 10^{-2}$ 의 범위를 보였다. 그 결과 우물개량 이후의 수리특성이 증가한 것으로 나타났으며, 양수정을 중심으로 이격거리 5m에 위치한 관측정(MW-1, 2, 3, 4)까지 대수층이 개선된 것으로 나타났다.

Table 3. Hydraulic parameters (K, T, S) from the constant-rate pumping tests after well drilling and development.

Classification	After well drilling (Thickness of aquifer: 31.45 m)			After well development ^{*)} (Thickness of aquifer: 32.22 m)			Screen	Aquifer
	T(m ² /s)	K(m/s)	S	T(m ² /s)	K(m/s)	S		
PW-1	1.166×10 ⁻³	3.700×10 ⁻⁵	2.409×10 ⁻²	1.310×10 ⁻³	4.000×10 ⁻⁵	1.974×10 ⁻²	P	Unconfined
MW-1	1.018×10 ⁻²	3.240×10 ⁻⁴	2.139×10 ⁻³	6.988×10 ⁻³	2.169×10 ⁻⁴	1.926×10 ⁻²	F	
MW-2	3.886×10 ⁻³	1.240×10 ⁻⁴	4.245×10 ⁻³	4.939×10 ⁻³	1.533×10 ⁻⁴	1.840×10 ⁻²	F	
MW-3	4.490×10 ⁻³	1.430×10 ⁻⁴	8.06×10 ⁻⁴	4.882×10 ⁻³	1.515×10 ⁻⁴	1.092×10 ⁻²	F	
MW-4	1.684×10 ⁻³	5.200×10 ⁻⁵	2.405×10 ⁻³	4.022×10 ⁻³	1.248×10 ⁻⁴	8.390×10 ⁻³	F	
MW-5	1.277×10 ⁻²	4.060×10 ⁻⁴	1.788×10 ⁻²	6.239×10 ⁻³	1.937×10 ⁻⁴	8.202×10 ⁻³	F	
MW-6	2.319×10 ⁻²	7.380×10 ⁻⁴	2.822×10 ⁻³	8.978×10 ⁻³	2.786×10 ⁻⁴	5.388×10 ⁻²	F	

Remark) F: fully penetrating well, P: partially penetrating well, *): cited in Kim and Kim, 2009

이를 통해 우물굴착 이후의 시험으로 얻은 수리특성은 투수량계수(T)와 수리전도도(K) 값이 증가되거나 감소가 발생하는 가능성이 있다. 그러므로 미고결대수층으로부터 신뢰성 있는 수리상수 산정을 위해서는 우물굴착 이후에 개발관정의 환경에 적합한 서징이 장기적으로 실시되어야 한다.

수리특성

불균질미고결층으로부터 우물굴착은 우물 주변의 자연적인 대수층에 교란을 크게 발생시켜 지하수의 산출성을 저하시킬 뿐만 아니라 대수층내 폐색 및 미세입자에 의한 막힘으로 인한 투수성 저하도 발생하게 된다. 이때 양수시험시 수리특성에 미치는 영향이 있음에도 불구하고 미고결층에서 우물굴착에 따른 우물개량은 충분히 고려되지 않았다. 따라서 우물 굴착 및 개량 이후의 수리특성을 분석하기 위하여 장기양수시험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 6에서 보는바와 같이 양수정을 중심으로부터 이격거리 5 m에 위치한 MW-1~4호정 주변의 변화양상을 분석하였다.

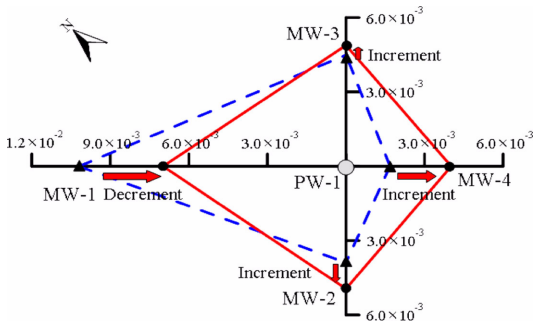


Fig. 6. Aquifer transmissivities (m²/sec) within 5 m of a pumping well (▲: after well drilling, ●: after well development).

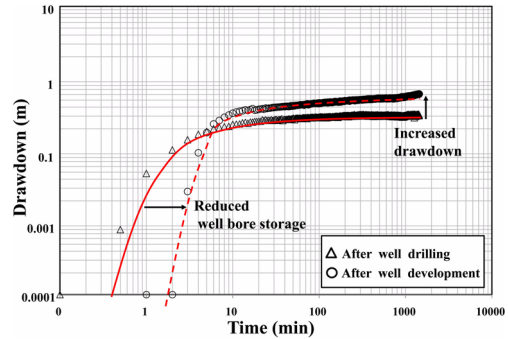


Fig. 7. Drawdown after well drilling and well development at MW-1.

우물 굴착 및 개량 이후 관측정의 투수량계수는 Fig. 6과 같이 MW-1호정(NW)은 감소, MW-4호정(SE), MW-2호정(SW) 그리고 MW-3호정(NE)은 증가되었다. 관측정 MW-2, 3, 4호정은 우물굴착 이후의 불균질 이방성 대수층이 등방성에 가깝게 개선되었다. 특히, MW-1호정은 에어서징에서 에어를 순간적으로 주입할 때 양수정 내에 있는 슬라임을 제거시키기도 하지만, Fig. 7에서 보는바와 같이 대수층의 공기 차단 및 미세입자의 폐색의 잠재적인 위험으로 나타나 우물저장효과는 약간 감소되고, 수위강하도 증가되었다. 그러나 우물개량이

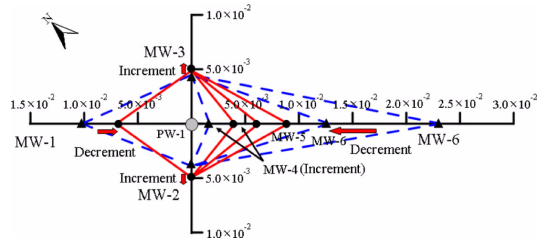


Fig. 8. Aquifer transmissivities (m²/sec) of pumping and monitoring wells (▲: after well drilling, ●: after well development).

후 양수정을 중심으로부터 이격거리 5 m 내의 투수량 계수의 영향범위는 불균질 이방의 타원형에서 균질 등방의 원형에 가깝게 개선된 것으로 나타났다.

이와 같이 우물굴착 이후 양수정 주변의 교란된 대수층은 불균질 이방성에서 우물개량이 7일 이상 지속되면서 양수정 주변의 투수량계수는 비교적 각 방향으로 균등한 범위로 다소 개선되었다. 또한 양수정을 중심으로 주변 대수층의 교란도 상당히 회복시킬 수 있으며, 장기적인 우물개량 작업은 대수층의 불균질 이방성에서 균질 등방에 가까운 효과를 가져왔다.

서지의 이상적 효과

서지블록과 에어서지에 의한 우물개량은 양수정 기능을 향상시킬 수 있지만 그 효과는 양수정 주변에 국한적으로 나타나기 때문에 대수층으로부터 추가적인 지하수원을 생산하기 어렵다. 특히 서지블록은 우물 케이싱에 정확히 맞는 크기로 된 몇 개의 유연한 디스크(disc)로 구성되어 있으며, 회전식 장비에서 단단한 드릴 축 또는 충격식 장비에 고정시켜 사용한다. 이러한 블록은 우물 케이싱 내부의 지하수위 아래로 설치된 스크린에서 Stroke을 위아래로 주기적으로 이동한다. 물은 Stroke이 내려갔을 때 스크린을 통해 통과되고 Stroke가 올라갔을 때 스크린을 통해 뒤로 당겨진다. 이때 블록으로 인한 강압적 수압은 대수층으로 확장되기 때문에 수압이 스크린을 통해 안전하게 움직일 수 있도록 서서히 작동한다. 그 반면 에어서지는 양수정내에 쌓인 슬라임을 콤프레사 에어 25 kg/cm²를 순간 주입하여 양수내에 있는 슬라임을 제거시키기도 하지만, 대수층의 공기 차단 및 미세입자의 폐색(clogging)의 잠재적인 위험으로 나타난다. 이때 양수정으로부터 약 10 m, 20 m 이상 떨어진 관측정 MW-5, 6호정의 투수량계수는 Fig. 8에서 보는바와 같이 감소되는 효과가 나타나기도 한다. 따라서 서지블록과 에어서지의 적절한 서지 주기와 방법을 개발 한다면 양수정으로부터 이격거리 10 m 이내 대수층의 수리특성은 보다 확연히 개선될 것으로 판단된다.

결론 및 토의

미고결대수층에서 우물굴착은 양수시험시 수리특성에 미치는 영향이 있음에도 불구하고 우물굴착에 따른 우물개량은 충분히 고려되지 않았다. 따라서 양수정에서 대수층내 폐색 및 미세입자 제거를 통해 우물효율 및 수리특성을 높이기 위하여 서지블록과 에어서지 방법을

적용하였으며, 우물 굴착 및 개량 이후의 단계 및 장기 양수시험을 실시하여 우물효율 및 수리특성을 정량적으로 분석하였다.

우물굴착시 바버드릴에 의한 우물효율의 감소 원인을 우물 굴착 및 개량 이후의 단계 및 장기 양수시험으로부터 비교·분석하였다. 그 결과 우물 굴착 및 개량 이후의 단계양수시험에서는 최대 양수율이 700 m³/day에서 900 m³/day로 증가되었다. 이때 우물특성을 파악하기 위한 우물 굴착 및 개량 이후의 스킨계수는 7.92에서 5.04로 감소되어 우물상태가 불량에서 보통으로 개선된 것으로 나타났다.

장기양수시험으로부터 양수정을 중심으로 이격거리 5 m에 위치한 관측정(MW-1, 2, 3, 4)의 수리특성 변화는 불균질 이방에서 등방에 가깝게 개선되었다. 그 반면에 양수정을 중심으로 이격거리 5 m에 위치한 MW-1호정과 이격거리 10 m, 20 m에 위치한 MW-5호정, MW-6호정의 투수량계수는 감소되었다. 이는 에어서지에서 에어가 순간 주입될 때 양수정 내에 있는 슬라임을 제거시키기도 하지만, 대수층의 공기 차단 및 미세입자의 폐색의 잠재적인 요인으로 나타나 대수층의 수리특성에 미세하게 감소되는 효과인 것으로 나타났다.

따라서 양수정 주변의 대수층은 불균질 이방성에서 균질등방에 가깝게 개선된 것으로 분석된다. 또한 시추 작업으로 인한 인근지점에서의 대수층 교란(불균질성)도 상당히 회복시킬 수 있는 것으로 나타났다. 장기적인 우물개량 작업은 대수층의 불균질 이방성에서 균질 등방성 범위를 넓히는 효과를 가져올 뿐만 아니라 우물효율 및 수질도 충분히 개선될 것으로 판단된다.

본 연구지역은 낙동강 주변의 시험 규모 및 운영에 있어서 장기적인 시간과 비용이 크게 발생하게 되어 현장시험에 대한 한계성을 단점으로 드러내고 있다. 그러나 향후 연구 목적에 부합하는 현장의 규모와 크기, 시간과 비용 등과 같은 설계를 실시하여 장기적인 우물개량 시험과 자료의 정밀성을 높이기 위한 반복시험이 실시되어야 한다. 또한 미고결대수층 주변에서의 양수시험시 강수 및 수문방류와 관련한 문제점과 영향성은 크게 나타나지 않았으나, 양수시험시 강우 및 수문방류 그리고 조석간만에 의한 수위변화가 양수시험 해석시 미칠 수 있는 영향성을 고려한 연구가 수행되어야 할 것이다.

지금까지 관정 개발 후 우물개량의 중요성이 간과되어 취수정으로서의 효용성이 전반적으로 떨어지는 문제점이 있어왔으며, 이를 개선하기 위한 제도 장치 마련이 시급히 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 201017102002D). 또한, 일부 교육과학기술부 원자력연구개발사업의 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김규범, 김병우, 김성윤, 2010, 충적층 양수정에서 우물 개량을 통한 우물효율의 개선, 지하수토양환경학회지, 15(1), 39-49.
- 김규범, 김병우, 신선호, 박준형, 2009, 강변여과수 개발 지역 우물 개량시 철망간 저감 효과, 지질공학회지, 19(3), 389-400.
- 김남장, 이규홍, 1964, 한국지질도 영산도폭(1:50,000), 국립지질조사소. 1p.
- 김병우, 김규범, 2009, 미고결퇴적층내 양수시험시 관측 정 설계가 추정 수리상수에 미치는 영향 분석, 지질학회지, 45(6), 787-797.
- 정상용, 김병우, 김규범, 권해우, 2009, 단계양수시험해석 시 우물상수 산정 방법이 우물효율에 미치는 영향, 지질공학회지, 19(1), 71-79.
- Charles A., Kaehler C.A. and Hsieh P.A., 1994, Hydraulic properties of a fractured-rock aquifer, Lee valley, San Diego County, California, prepared in cooperation with San Diego county Department of Planning and Land Use, U.S. Geological survey water-supply paper 2394. 26-32.
- Chugh, C.P., 1985, *Manual of Drilling Technology*, A.A. Balkema, 567p.
- Clark, L., and Turner, P.A., 1983, Experiments to Assess the Hydraulic Efficiency, *Ground Water*, 12(3), 270-281.
- 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.
- Earlougher, R. C., Jr., 1977, *Advances in Well Test Analysis*, Monograph Series, 5, 264p.
- Furui, K., 2004, A comprehensive skin factor model for well completions based on finite element simulations, Ph.D. thesis, University of Texas at Austin, 169p.
- Hawkins, M. F., Jr., 1956, A note on the Skin Effect, *Trans., AIME* 207, 356-357.
- 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., 391p.
- Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Transactions, ASCE*, 112, 1047-1070.
- Kasnow, M.C., 1996, *Production Well Analysis: New Methods and a computer program in well hydraulics*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 355p.
- Kroening, D.E., Snipes, D.S., Brame, S.E., Hodges, R.A., Price, V. and Temples, T.J., 1996, The rehabilitation of monitoring wells clogged by calcite precipitation and drilling mud, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 16(2), 114-123.
- Labadie, J.W. and Helweg, O.J., 1975, Step-drawdown test analysis by computer, *Ground Water*, 13(5), 438-444.
- Neuman, S.P., 1974, Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resources Research*, 10(2), 303-312.
- Novakowski, K.S., 1990, Analysis of aquifer tests conducted in fractured rock: A review of the physical background and the design of a computer program for generating type curves, *Ground water* 28(1), 99-105.
- 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, 512p.
- Sterrett, R.J., 2007, *Groundwater and Wells*, 3rd Edition, Johnson Screens, New Brighton, Minnesota, 812p.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol.16, 519-524.
- Wendling, G., Chapuis, R.P. and Gill, D.E., 1997, Quantifying the effects of well development in unconsolidated material, *Ground Water*, 35, 387-399.

2012년 1월 25일 원고접수

2012년 3월 2일 수정일자

2012년 3월 5일 게재확정

김병우

한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
Tel: 042-868-8290
Fax: 042-868-2064
E-mail: bwkim@kaeri.re.kr

김건영

한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
Tel: 042-868-8197
Fax: 042-868-2064
E-mail: kimgy@kaeri.re.kr

김규범

한국수자원공사 K-water연구원
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1
Tel: 042-870-7640
Fax: 042-870-7629
E-mail: gbkim@kwater.or.kr