

제주도 관정 공벽 내 오염물질 유입 구간 탐지 및 차단 사례

송성호^{1*} · 황보동준² · 김진성³ · 양원석⁴

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²한국농어촌공사 제주지역본부

³한국농어촌공사 경북지역본부

⁴제주특별자치도 물정책과

Case for Detection and Prevention of Inflow Section for Contaminant through Annular Space in Borehole, Jeju Island

Sung-Ho Song^{1*} · Dongjun Hwangbo² · Jin-Sung Kim³ · Won-Seok Yang⁴

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Jeju Headquarter, Korea Rural Community Corporation

³Gyungbuk Headquarter, Korea Rural Community Corporation

⁴Water Policy Division, Jeju Special Self-Governing Province

ABSTRACT

Most wells developed in Jeju island before the enactment of the Groundwater Management Ordinance in 2002 are vulnerable to aquifer contamination due to inflow of upper groundwater having the high concentration of nitrate nitrogen, likely due to incomplete grouting in upper section of the wells. Although these wells require entire reinstallation, it is often necessary to rehabilitate the existing wells due to various constraints. Therefore, to identified the inflow section of contaminants, the thermal level sensor (TLS) technique was firstly applied for three wells, which enables to monitor temperature variations in every 50 cm depth. Then, the grouting material was injected to the upper section to prevent the inflow of upper contaminated groundwater into the entire aquifer. By applying TLS technique, it was found that the temperature deviations in the upper groundwater inflow section decreased sharply. Moreover, both the change in the concentration of nitrate nitrogen in the rainy/dry seasons and the average concentrations were found to decrease rapidly after grouting material injection. Consequently, the application of TLS proposed in the study turned out to be appropriate to prevent aquifer contamination.

Key words : Aquifer contamination, Nitrate nitrogen, Thermal level sensor (TLS), Grouting material injection, Jeju Island

1. 서 론

지하수 오염은 지표에 분포하는 오염물질이 대수층으로 유입됨에 따라 발생한다. 그러나 오염물질에 의한 대수층

내 지하수 오염 양상은 시·공간적으로 다양하므로, 관정 내 지하수에 대한 오염원 분석 및 오염물질 유입 경로를 예측하는 것은 어렵다. 따라서 관정 개발 이전에 수리지 질학적 특성을 고려한 오염방지 대책을 수립하여, 관정 내 부를 통한 대수층 오염을 사전에 차단하는 것이 필요하다.

일반적으로 관정의 성능은 개발 후 시간경과에 따라 감소되는데, 대수층의 물리적 특성, 지하수 수질, 관정 내 스크린의 폐색, 관정 사용의 방식 등에 따라 경과 시간이 다르다(Gass et al., 1980; KRC, 1997; Song et al., 2016). 관정의 성능 저하 원인은 주로 부식과 충전이지만, 지표 오염원으로 인한 질산염 오염 등으로부터 발생되기도 한다(Houben and Treskatis, 2007).

주저자: 송성호, 한국농어촌공사 농어촌연구원 소장
공저자: 황보동준, 한국농어촌공사 제주지역본부 대리
김진성, 한국농어촌공사 경북지역본부 차장
양원석, 제주특별자치도 물정책과 주무관

*교신저자: 송성호, 한국농어촌공사 농어촌연구원 소장
Email: shsong@ekr.or.kr

Received : 2022. 05. 24 Reviewed : 2022. 05. 26

Accepted : 2022. 06. 10 Discussion until : 2022. 08. 31

이와 관련하여 지하수법에 의한 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙(환경부령) 제2조에서는 “지표하부 보호벽(케이싱)의 하단부는 지표 이하 3 m 이상의 깊이까지 설치하며, 암반층을 굴착(땅파기)하는 경우에는 암반(연암층)선 아래로 1 m 이상 깊게 설치”를 규정하고 있다. 또한 “케이싱 외부 그라우팅의 두께는 5 cm 이상의 치수용 재료를 사용하되, 케이싱 하부로 누출되지 않도록 케이싱의 하단부에서부터 채워 올려야 한다”라고 명시되어 있다.

대수층이 투수성 암반으로 구성되어 있는 제주특별자치도의 경우 지하수 관리 조례 시행규칙 제4조에 따른 지하수 개발·이용시설의 설치기준에, “굴착공사 시 지표면 아래 50 m까지 케이싱 구경보다 14 cm 이상의 넓은 구경으로 굴착한 후, 시멘트 몰탈 등의 그라우트 재료로 되메움(채움 그라우팅) 시공을 하고 최소 48시간 이상 양생시킨 후 케이싱 구경으로 굴착”토록 명시되어 있다. 이때 최하부 지층이 스토리아층, 클린커층, 토사층 등 연약지반에 해당하는 경우에는 치밀·견고한 암반층 구간까지 굴착한 후 채움 그라우팅을 하도록 규정되어 있다. 또한 지하수위가 지표면 아래 40 m 이내 깊이에 형성되어 있는 경우 지하수위 하부 10 m까지 채움 그라우팅 시공을 하여야 한다.

그러나 2002년 제주특별자치도 지하수 관리 조례 제정 이전에 개발된 관정의 경우에는 관정 내 상부 채움 그라우팅 미시공 및 우물자재 불량 시공 등의 문제점이 제기되었다(Kim et al., 2020). 이에 따라 관정 공벽을 통하여 투수성이 높은 상위 대수층의 지하수 유입으로 인한 질산성질소(nitrate nitrogen, $\text{NO}_3\text{-N}$) 오염 취약성이 매우 높다(Koh et al., 2016). 과거 제주도에 개발된 관정에는 내부에 우물자재가 설치되어 있어, CCTV를 이용한 육안으로 오염물질이 유입되는 구간을 육안으로 확인하는 것은 불가능하다.

따라서 우물자재 인양없이 공벽을 통한 오염물질의 유입구간의 정확한 파악 기술 적용으로, 상위지하수가 유입되는 구간에 대한 오염경로 차단이 필수적이다. 이를 위하여 축산폐수 및 비료/농약의 과다한 사용으로 질산성질소 농도가 높게 나타나는 제주시 환경면을 중심으로 오염원 하류지역에 위치한 3개 관정을 대상으로 원위치 오염

물질 유입 경로 탐지 및 차단 공법을 적용하여 현장 적용성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상

제주도는 수평적으로 투수성과 불투수성 지층이 불규칙적으로 분포하며, 해발고도가 상승함에 따라 지하수위 심도가 깊어지는 특징이 있다(Park et al., 2011). 따라서 지층 상부에 투수성 지층구조가 발달하는 경우 질산성질소에 오염된 상위지하수 유입으로 지하수가 오염될 가능성이 높다(JSSGP and JRI, 2019; JSSGP and KRC-J, 2020; Song et al., 2021). 또한 강수량의 계절적 변동에 수반된 질산성질소 농도 변화가 심하다. 제주도의 전체 16개 유역에 대한 질산성질소 오염 상황을 분석한 결과, 전체 평균값은 4.0 mg/L로 오염 정도가 상대적으로 낮은 반면 최대값은 33.1 mg/L로 나타났다(Song et al., 2021). 이러한 최대값은 강수량이 증가되는 경우 일시적으로 오염 물질이 관정 내부로 유입되어 나타난 것으로 판단된다.

이러한 상황을 고려하여 연구대상 관정 선정은 Song et al.(2021)이 제시한 제주도 내 관정별 오염 진행 여부와 오염경로 등을 고려한 질산성질소 오염도 평가 기준(WELCUP)을 기초하여 선정하였다. WELCUP 기준은 유역(W), 해발고도(E), 토지이용(L), 관정별 오염 현황(C), 지하수 이용량(U), 시료 채취 시기(P)로, 지하수 내 질산성질소 오염도가 상대적으로 높은 관정 파악이 가능하다.

대상 관정은 WELCUP 평가 결과를 토대로 축산폐수 및 비료/농약의 과다한 사용으로 질산성질소 농도가 높게 나타나며 상위지하수가 발달하는 제주시 환경면과 애월읍을 중심으로, 오염원 하류지역에 위치한 3곳의 관정을 대상으로 선정하였다(Table 1; Fig. 1). 여기서 제시된 지하수 내 질산성질소 농도는 제주대학교 생명과학기술혁신센터에 의뢰하여 공정시험법에 의해 분석된 결과를 주로 이용하였으며, 추가로 미국 Hach사의 분광광도계인 DR-1900를 이용하여 결과를 보완하였다.

Table 1. Target wells for prevention construction to improve groundwater quality

| Well | Elevation (m, amsl) | Depth (m) | Groundwater level (m, amsl) | Prevention section | Starting year |
|------|------------------------|--------------|--------------------------------|---|------------------|
| A | 73.0 | 125.0 | 58.5 | 49~54 m | 1974 |
| B | 152.9 | 180.0 | 134.5 | 93~96 m, 103~106 m, 112~115 m, 116~119 m, 121~124 m, 126~129 m | 1996 |
| C | 76.1 | 160.0 | 59.5 | 22~25 m, 47~50 m, 55~58 m | 2001 |

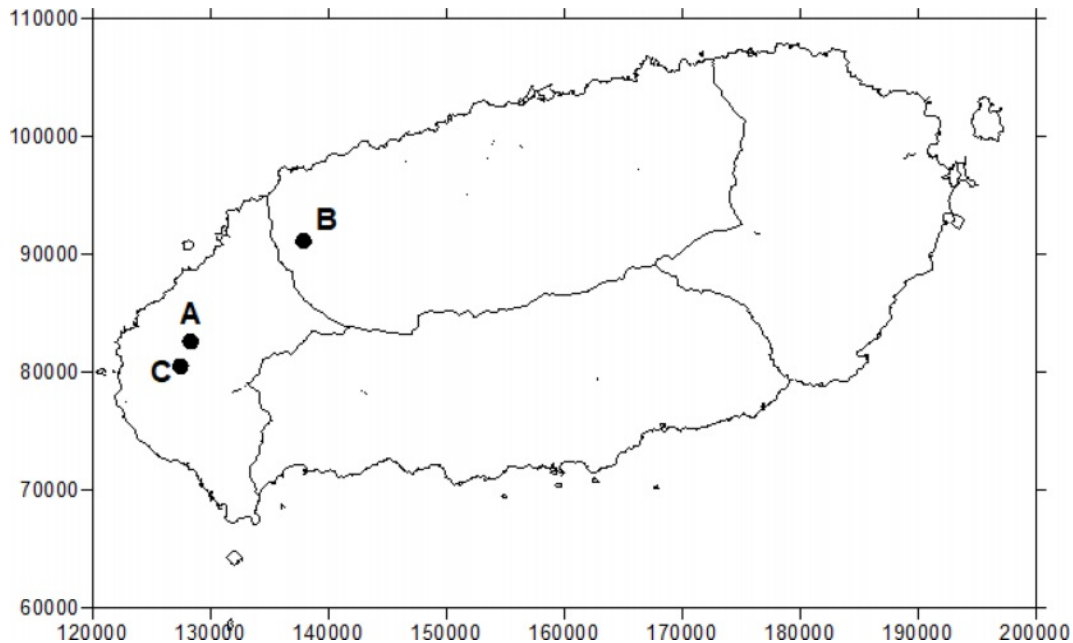


Fig. 1. Location map of target wells. X and Y axis indicate TM coordinate.

2.2. 관정 내부 심도별 온도 모니터링

지하수 관정 내에 우물자재가 설치된 경우 외부 공벽을 통한 지하수 유입량 또는 수질 변화를 정량적으로 평가하는 것은 어렵다. 특히 강수량 변화에 따라 대수층을 통한 지하수 유입량이 변화하기 때문에, 일정 시간의 측정값으로 전체적인 변화 양상을 해석하는 것은 불가능하다. 그러나 지하수가 암반의 절리면을 포함한 대수층을 따라 관정 내부로 유입되는 과정에서 온도차가 발생된다. 따라서 실제 시추공 내에서 온도 분포를 정밀하게 모니터링 하는 경우, 케이싱 또는 우물자재 바깥 부분과 공벽 사이의 지하수 유입 구간을 찾는 것이 가능하다.

일반적으로 물리검층에서 사용되는 온도검층(temperature logging)은 단일 온도 센서를 이용하여 이동식 방법으로 적용하므로, 특정 심도를 통한 지하수 유입 구간을 확인하기 어렵다. 따라서 특정심도를 대상으로 온도 변화를 파악하기 위해서는 동시간(synchronized) 심도별 온도 측정 방식이 필요하다. 이를 위하여 하나의 케이블에 일정간격의 고정밀 온도센서를 설치하여, 동시에 관정 내부 전체 구간에 대한 온도를 측정할 수 있는 심도별 온도 센서(TLS, thermal level sensor)를 이용한 모니터링이 필수적이다(Fig. 2). TLS 모니터링 장치에는 반도체 온도 센서를 이용하는데, 센서의 온도 분해능(resolution)과 정확도(accuracy)는 각각 0.0625°C 와 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이다.

이 연구에서는 공벽에 50 cm 간격으로 설치된 각 온도

센서에서 측정된 온도 변화를 분석하였는데, 특정 심도의 공벽을 통해 상대적으로 온도가 높은 지하수가 유입되는 경우 공벽의 주변 온도에 비해 높게 측정된다(Fig. 2(a)). 따라서 연속된 두 센서의 측정 온도 편차(residual)를 계산하게 되면, 해당심도에서 주변에 비해 높은 편차가 나타나면 이 구간을 상위지하수 유입 구간으로 해석이 가능하다. 이 후 상위지하수 유입 구간에 그라우트재를 이용한 차단공법을 적용하는 경우, 동일한 방식으로 그라우트재의 수화열에 의해 온도가 상승하는 구간의 확인이 가능하다(Fig. 2(b)).

이러한 특성을 이용한 방법으로 취수정 주변 관측정 내에 설치된 심도별 온도 및 압력 센서로 부터 장기간 모니터링을 통하여, 오염물질 유입 구간이나 클로깅(clogging) 발생 구간을 찾아내는 접근 방식도 제시된 바 있다(Drusova et al., 2020).

이 연구에서는 케이싱 바깥쪽 공벽을 통한 상위 지하수의 유입구간 및 유입경로 탐지를 목적으로, TLS 모니터링을 실시하였다. 특히 모니터링 결과 검증을 위하여 온도 이상구간에 대해 케이싱을 천공(boring)하여 지하수가 유입되는지 공벽 TV검층 방법을 이용하여 확인하였다.

2.3. 오염경로 차단 공법

지하수 오염 방지의 일차적인 목표는 지표 또는 천부 대수층을 통한 오염물질 유입을 차단하는 것이다. 그러나

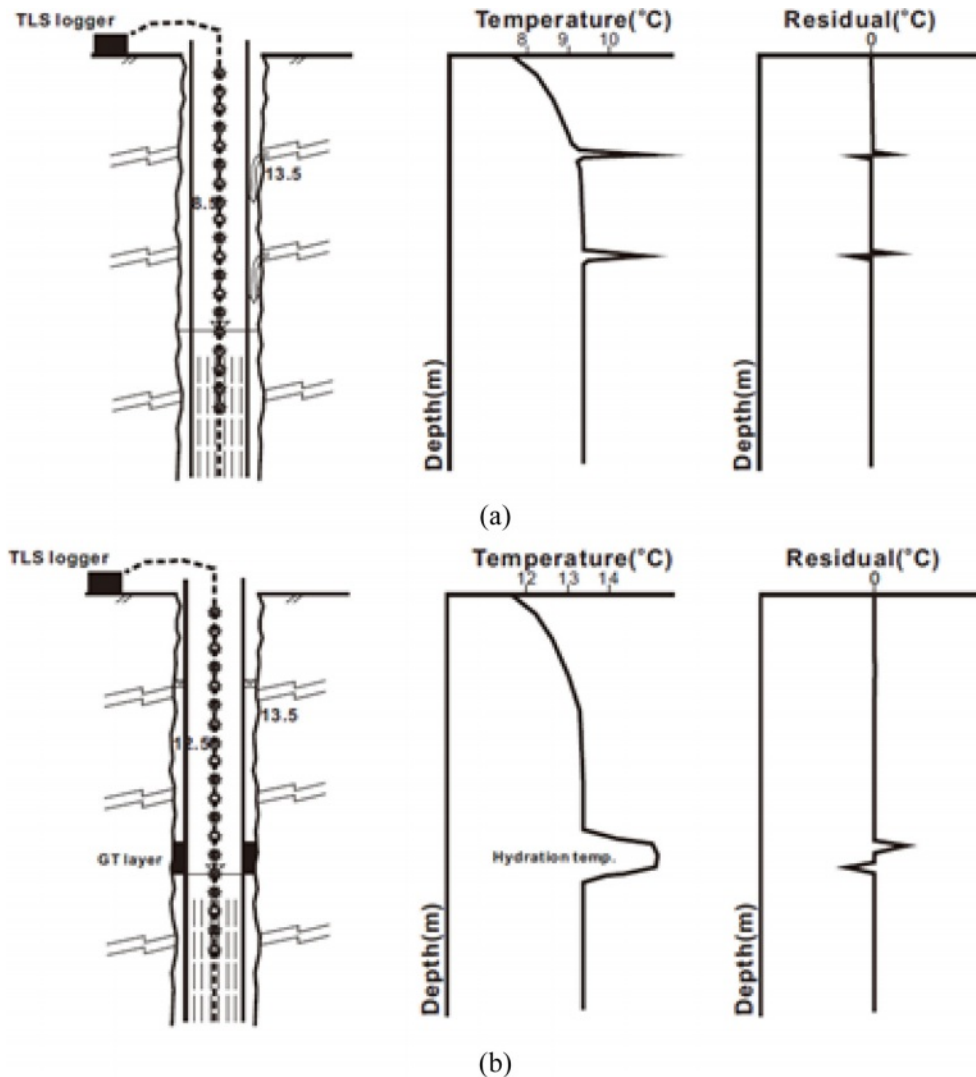


Fig. 2. Conceptual diagram of TLS (thermal level sensor) measurement before (a) and after (b) prevention construction for delineating groundwater inflow section.

오염물질이 관정 내로 유입되는 경우에는, 관정 내부로부터 주변 대수층으로 이동하여 주변 지하수 수질에 악영향을 미치게 된다(Houben and Treskatis, 2007).

이 연구에서는 관정 내 원위치 오염물질 유입 구간 차단 공법을 이용하였으며, 공내 우물자재에 주입공 천공 후 우물자재와 공벽 사이를 그라우트재로 채우는 순서로 진행하였다(Cho et al., 2019). 이 연구에서 이용된 그라우트재는 일반포틀랜드 시멘트에 급결성 혼화제를 첨가한 초속경 시멘트(제품명: Denka Super Cement S-5)로, 물과 배합비는 1:1로 설정하였다. 전체 공정은 시공 전 수질시료 채수, 공내 TV검층, TLS 모니터링 및 물리검층, 실리콘 및 그라우트재 주입, 공내 TV검층, TLS 모니터링 및 물리검층, 시공 후 수질시료 채수의 순서로 진행되었

다(Fig. 3).

대상 관정이 선정되면 일차적으로 배경 질산성질소 농도 분석을 위한 수질시료를 채취 및 관정 내부 수중모터 펌프를 인양한 후 TV검층을 실시하여 공 내부의 상황을 파악한다. 이후 24시간 이상의 TLS 모니터링 결과와 기존 주상도를 비교하여 오염된 상위지하수 유입 가능 구간을 선정한다. 이때 TLS값을 대상으로 상·하부 센서에서 측정된 온도값의 편차를 계산하여 온도차이가 크게 발생하는 구간을 선정한 후, 천공을 실시하여 상위지하수 유입 여부를 확인한다.

관정에 대한 오염물질 유입 경로의 차단 공법은 유입이 의심되는 구간의 상부와 하부 약 3 m 지점의 치밀한 암반이 위치한 부분에 2층의 방사상으로 각 4공을 천공한다.

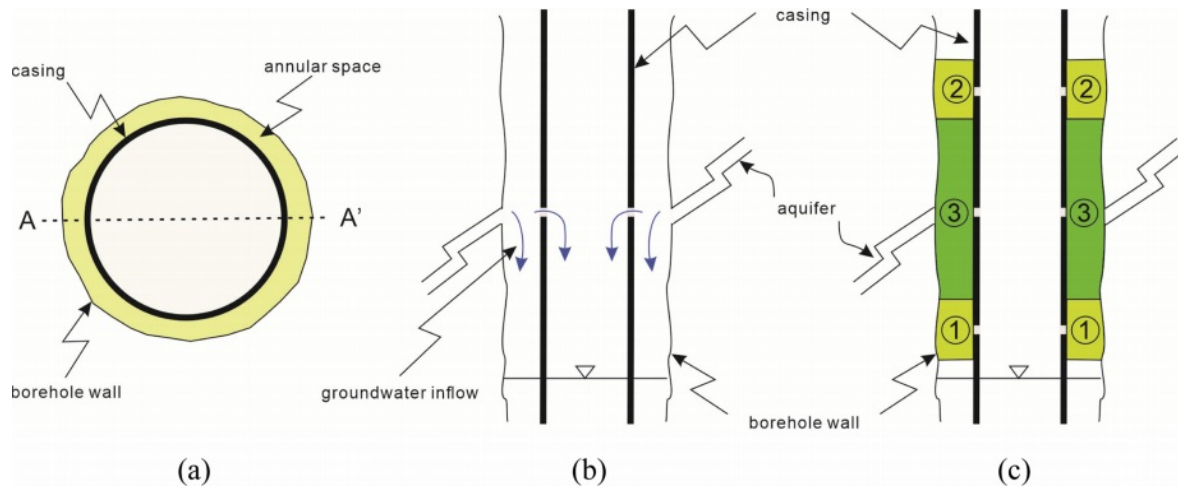


Fig. 3. Conceptual diagram of preventing construction using grouting material. (a) plan view of annular space inside borehole, (b) section view along AA' line of groundwater inflow through hole from annular space, and (c) procedure of prevention construction indicating silicon injection through lower hole ① and upper hole ②, and grout material injection through center hole.

Table 2. Variation of nitrate nitrogen concentration for A well before and after the prevention construction

| Before the prevention construction | | After the prevention construction | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Date (yyyy-mm-dd) | Nitrate nitrogen concentration (mg/L) | Date (yyyy-mm-dd) | Nitrate nitrogen concentration (mg/L) |
| 2017-05-08 | 3.1 | 2021-02-23 | 5.3 |
| 2017-10-27 | 2.5 | 2021-03-25 | 5.2 |
| 2018-04-10 | 2.4 | 2021-04-28 | 4.6 |
| 2018-09-11 | 16.6 | 2021-06-24 | 3.9 |
| 2019-04-01 | 2.1 | 2021-07-30 | 4.5 |
| 2019-09-25 | 16.7 | 2021-08-26 | 4.6 |
| 2020-04-20 | 16.4 | 2021-10-26 | 3.9 |
| 2020-07-28 | 15.8 | 2021-11-24 | 4.7 |
| 2021-01-28 | 16.4 | 2021-12-21 | 7.4 |
| Average | 10.2 | | 4.9 |

상부와 하부 각 8공을 대상으로 실리콘을 주입한 후, 유입 경로를 대상으로 설치된 천공을 대상으로 그라우트재를 주입한다.

유입경로 차단 작업과 TV검층 종료 후 TLS 모니터링을 실시하여, 동일한 구간에 대하여 차단 이후 TLS 모니터링의 온도 편차 상쇄 여부를 확인한다. 이때 주입에 이용된 실리콘 및 그라우트재는 수질에 영향을 미치지 않는 제품을 사용한다.

3. 연구결과

3.1. A 관정

이 관정은 제주시 한경면의 해발고도 73.0 m 지점에 위치하며, 풍수기와 갈수기 질산성질소 농도값이 각각 상승

및 하강하는 것(전체 평균값 10.2 mg/L)으로 나타났다. 특히 2019년에는 차이가 최대 14.6 mg/L로 나타났다(Table 2). 오염원으로는 해당 관정 인근 반경 0.5 km 내에 개인 하수처리시설 4곳이 분포하고 있다.

오염 경로 차단 공법 시공 이전에 실시한 TLS 모니터링 결과 심도 10~45 m 범위에서 온도 편차가 최대 0.5°C로 나타나는데, 이 구간은 주상도의 현무암 지층 내에 협재된 화산쇄설층 구간과 일치된다. 따라서 이러한 온도 편차 발생은 이 구간을 통한 상위지하수 유입의 영향으로 판단된다(Fig. 4). 또한 유입구간 확인을 위한 천공 및 TV검층으로 상위지하수 유입 구간 하부인 49~54 m 구간을 시공구간으로 선정하여, 실리콘과 그라우트재를 각각 주입하였다. 시공 이후 TLS 모니터링을 실시한 결과 앞서 제시한 시공구간에서의 온도 편차는 0.1°C 이하로

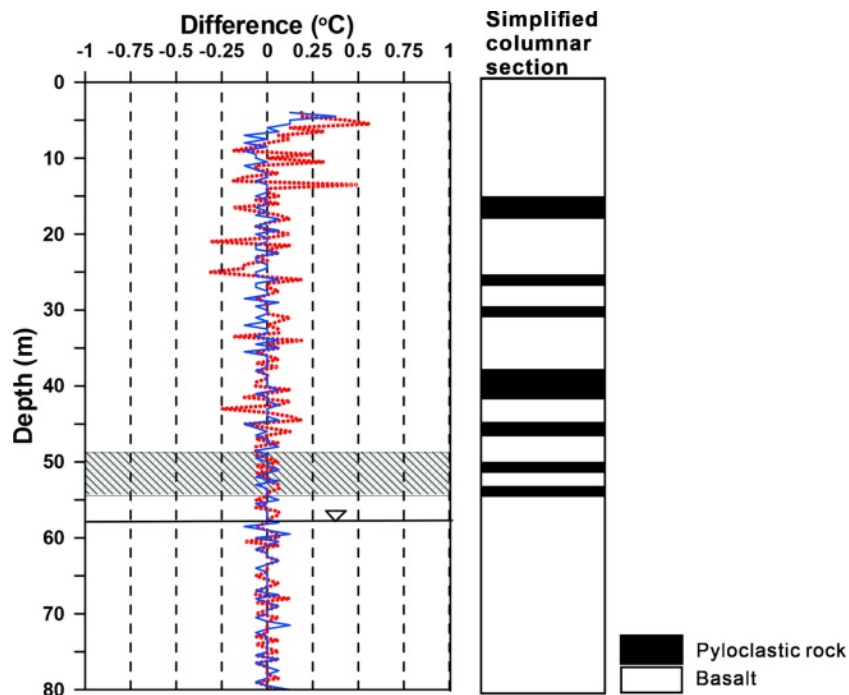


Fig. 4. TLS monitoring results with simplified columnar section for A well before (dotted line) and after (solid line) the prevention construction. Hatched box in temperature profile indicates the region of grout injection.

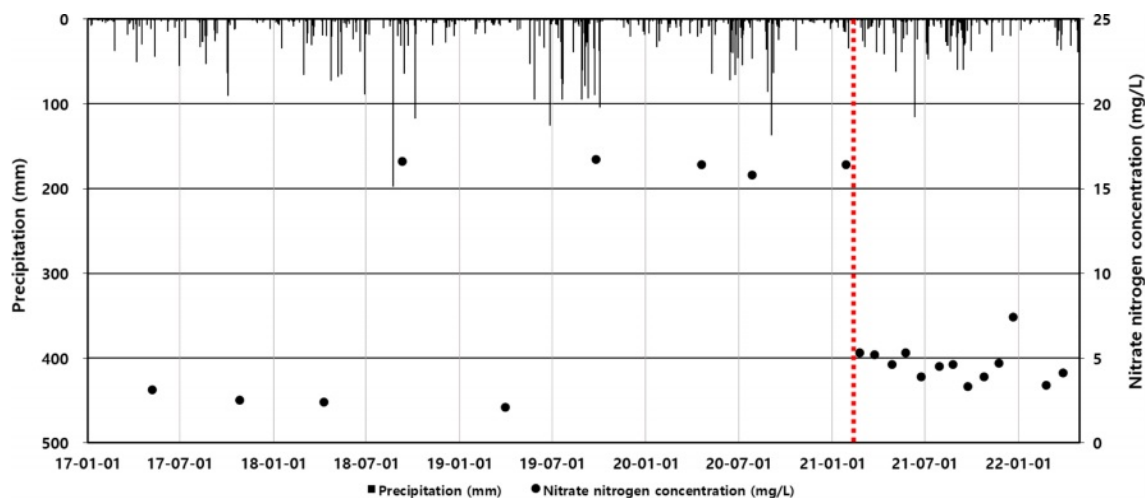


Fig. 5. Variation of nitrate nitrogen concentration for A well before and after the prevention construction. Dotted line indicates the day of prevention construction.

감소됨에 따라, 상위지하수의 유입 구간에 대한 치수가 성공한 것으로 판단된다.

오염물질 유입경로에 대한 차단 공법 적용 이후 약 1년 간 실시한 수질분석 결과 풍수기와 갈수기 관계없이 질산성질소 농도가 연중 3.9~7.4 mg/L(전체 평균값 4.9 mg/L)로 일정한 것으로 나타났다. 특히 최대값인 7.4 mg/L의

경우 차단 공법 직전인 1년 전 겨울철의 값인 16.4 mg/L에 비해 약 55% 이상 감소되는 것으로 나타났다(Fig. 5). 결과적으로 차단 공법 적용 이후 질산성질소 농도가 5.3 mg/L로 크게 감소하였으며, 질산성질소 농도와 강수량과 상관관계가 없는 것으로 나타남에 따라 이 기술 적용에 따른 수질개선 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

3.2. B 관정

이 관정은 제주시 애월읍의 해발고도 152.9 m 지점에 위치하며, 풍수기와 갈수기의 질산성질소 농도값이 각각 상승 및 하강하는 것(전체 평균값 8.5 mg/L)으로 나타났다. 특히 2018년에는 차이가 최대 15.7 mg/L로 나타났다 (Table 3). 오염원으로는 해당 관정 인근 반경 0.5 km 내에 개인하수처리시설 4개소, 축산폐수시설 1개소 및 액비 살포지역이 위치하고 있다.

오염 경로 차단 공법 시공 이전에 실시한 TLS 모니터링 결과 심도 105~130 m 범위에서 온도 편차가 최대

2.1°C로 나타나는데, 이 구간은 주상도의 화산쇄설층 구간과 일치된다. 따라서 이러한 온도 편차 발생은 이 구간을 통한 지하수의 유입에 따른 영향으로 판단된다(Fig. 6). 또한 유입구간 확인을 위한 천공 및 TV검층으로 115.5 m 및 123.5 m에서 지하수 유입이 관찰되었다. 따라서 전체 25 m 구간 중 6개의 시공구간을 선정하여, 실리콘과 그라우트재를 각각 주입하였다. 시공 후 TLS 모니터링을 실시한 결과 앞서 제시한 시공구간에서의 온도 편차는 0.1°C 이하로 크게 감소함에 따라, 상위지하수의 유입 구간에 대한 차수가 성공한 한 것으로 판단된다.

Table 3. Variation of nitrate nitrogen concentration for B well before and after the prevention construction

| Before the prevention construction | | After the prevention construction | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Date (yyyy-mm-dd) | Nitrate nitrogen concentration (mg/L) | Date (yyyy-mm-dd) | Nitrate nitrogen concentration (mg/L) |
| 2017-04-19 | 2.3 | 2020-12-29 | 6.5 |
| 2017-10-17 | 13.8 | 2021-01-28 | 3.9 |
| 2018-05-04 | 2.6 | 2021-03-25 | 5.2 |
| 2018-10-17 | 18.3 | 2021-05-25 | 2.8 |
| 2019-04-09 | 2.1 | 2021-07-30 | 2.5 |
| 2019-10-11 | 12.5 | 2021-09-24 | 3.3 |
| 2020-05-08 | 2.0 | 2021-10-26 | 3.4 |
| 2020-08-18 | 15.6 | 2021-11-24 | 3.6 |
| 2020-11-30 | 7.0 | 2021-12-21 | 3.2 |
| Average | 8.5 | Average | 3.8 |

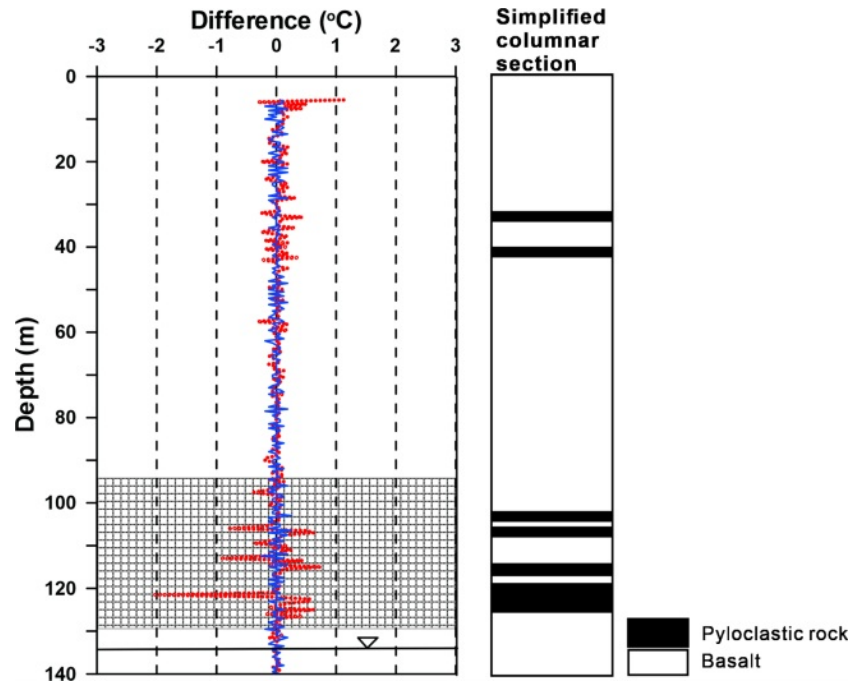


Fig. 6. TLS monitoring results with simplified columnar section for B well before (dotted line) and after (solid line) the prevention construction. Hatched box in temperature profile indicates the region of grout injection.

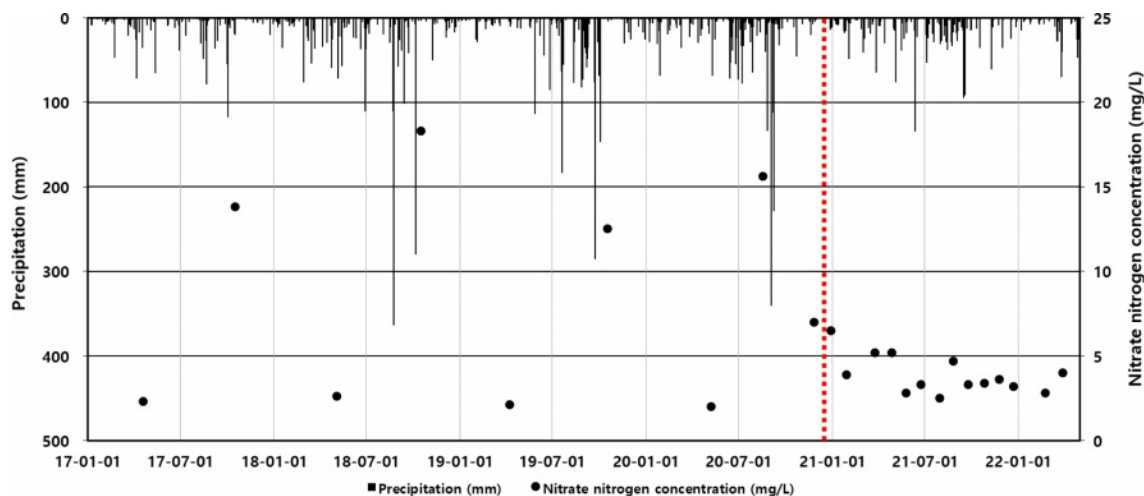


Fig. 7. Variation of nitrate nitrogen concentration for B well before and after the prevention construction. Dotted line indicates the day of prevention construction.

Table 4. Variation of nitrate nitrogen concentration for C well before and after the prevention construction

| Before the prevention construction | | After the prevention construction | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Date (yyyy-mm-dd) | Nitrate nitrogen concentration (mg/L) | Date (yyyy-mm-dd) | Nitrate nitrogen concentration (mg/L) |
| 2017-05-10 | 3.7 | 2021-02-10 | 2.2 |
| 2017-11-03 | 8.1 | 2021-03-25 | 2.3 |
| 2018-04-10 | 13.7 | 2021-05-25 | 2.3 |
| 2018-09-07 | 18.1 | 2021-06-24 | 1.9 |
| 2019-03-29 | 1.7 | 2021-07-30 | 2.0 |
| 2019-09-25 | 12.0 | 2021-08-26 | 4.1 |
| 2020-04-16 | 7.5 | 2021-10-26 | 2.0 |
| 2020-07-22 | 11.8 | 2021-11-24 | 2.0 |
| 2021-02-04 | 23.0 | 2021-12-21 | 2.0 |
| Average | 11.1 | | 2.3 |

오염물질 유입경로에 대한 차단 공법 적용 이후 약 1년 간 실시한 수질분석 결과 풍수기와 갈수기 관계없이 질산성질소 농도가 연중 2.5~6.5 mg/L(전체 평균값 3.8 mg/L)로 일정한 것으로 나타났다. 특히 최대값인 6.5 mg/L의 경우 차단 공정 직후인 겨울철의 값으로 1년 경과 후에 3.2 mg/L로 약 50% 이상 감소되는 것으로 나타났다(Fig. 7).

결과적으로 차단 공법 시공 이전 기간 동안에는 강수량 변동에 따른 질산성질소 농도 변화가 나타나며, 강수량이 증가되는 기간에 질산성질소 농도 증가는 오염물질이 상 위지하수와 함께 관정으로 유입되어 나타난 것으로 판단 된다. 또한 공법 적용 이후의 질산성질소 농도는 전체적으로 감소한 가운데 강수량과의 상관관계는 나타나지 않았다. 또한, 시공 전과 비교하여 최고, 최저값의 차이가 거의 없는 것으로 분석되어 그라우팅 시공에 따른 수질개선 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

3.3. C 관정

이 관정은 제주시 한경면의 해발고도 76.1 m 지점에 위치하며, 풍수기와 갈수기 질산성질소 농도값이 각각 상승 및 하강하는 것(전체 평균값 11.1 mg/L)으로 나타났다(Table 4). 오염원으로는 해당 관정 인근 반경 0.5 km 이내에 축산폐수배출시설 1곳과 개인하수처리시설 3곳이 위치하고 있다.

오염 경로 차단 공법 시공 이전에 실시한 TLS 모니터링 결과 심도 23~28 m와 48~50 m 범위의 온도 편차가 최대 1.3°C로 나타나는데, 이 구간은 주상도에 기재된 화산쇄설층 및 다공질 파쇄대 구간과 일치된다. 따라서 이러한 온도 편차 발생은 이 구간을 통한 지하수의 유입에 따른 영향으로 판단된다(Fig. 8). 또한 유입구간 확인을 위한 천공 및 TV검층으로 상위지하수 유입 구간 상하부를 시공구간으로 선정하여, 실리콘과 그라우트재를 각각

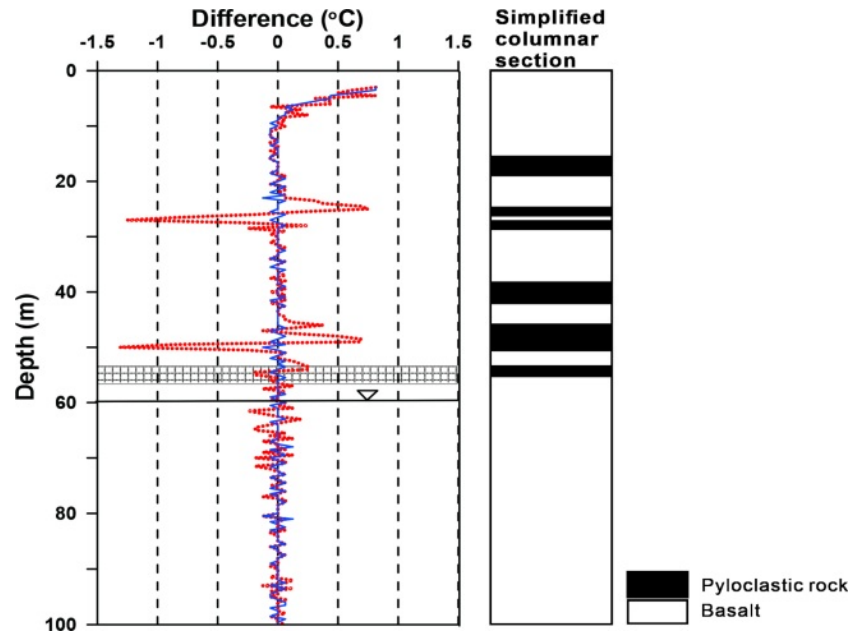


Fig. 8. TLS monitoring results with simplified columnar section for C well before (dotted line) and after (solid line) the prevention construction. Hatched box in temperature profile indicates the region of grout injection.

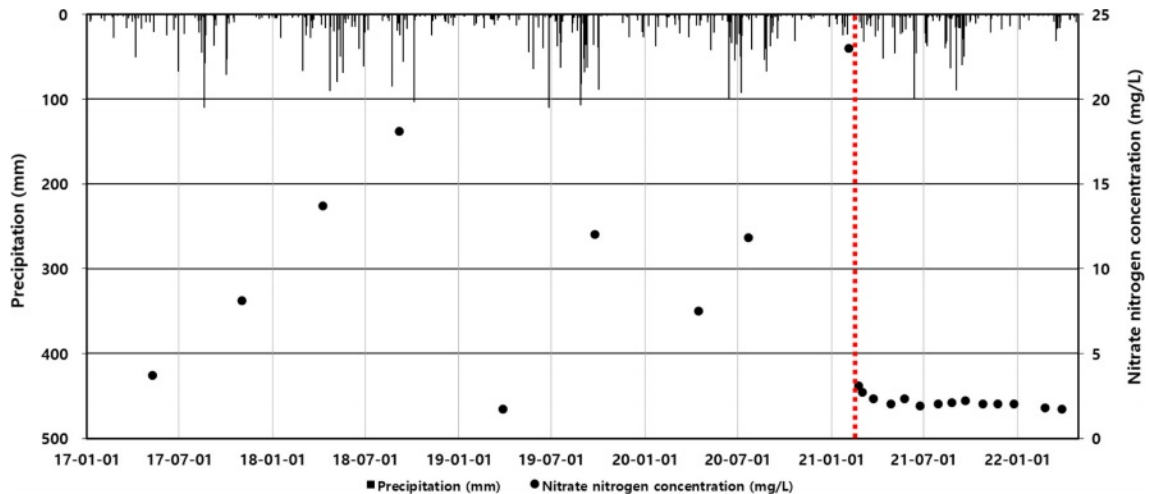


Fig. 9. Variation of nitrate nitrogen concentration for C well before and after the prevention construction. Dotted line indicates the day of prevention construction.

주입하였다. 시공 이후 TLS 모니터링을 실시한 결과 앞서 제시한 시공구간에서의 온도 편차는 0.1°C 이하로 감소됨에 따라, 상위지하수의 유입 구간에 대한 차단이 성공한 것으로 판단된다.

오염물질 유입경로에 대한 차단 공법 적용 이후 약 1년간 실시한 수질분석 결과 풍수기와 갈수기 관계없이 질산성질소 농도가 연중 $1.9\sim 4.1\text{ mg/L}$ (전체 평균값 2.3 mg/L)

로 일정한 것으로 나타났다. 특히 최대값인 4.1 mg/L 의 경우 차단 공정 이전의 비슷한 시기의 12.0 mg/L 에 비해 약 66% 이상 감소되는 것으로 나타났다(Fig. 9).

결과적으로 차단 공법 적용 이후 질산성질소 농도가 2.2 mg/L 로 크게 감소하였으며, 질산성질소 농도와 강수량과 상관관계가 없는 것으로 나타남에 따라 수질개선 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결 론

제주특별자치도에서는 2002년 지하수 관리 조례 제정으로 지표 하부 50 m까지 채움 그라우팅을 법제화하여, 상위지하수로부터 발생 가능한 대수층 오염 가능성을 원천적으로 차단하고 있다.

그러나 조례 개정 이전에 개발된 관정의 경우 상부 채움 그라우팅 미시공으로 인하여, 지표 및 상부 오염원에 의한 지하수 오염 취약성은 여전히 상존하고 있다. 특히 일부지역에서는 관정 공벽을 통한 오염된 상위지하수의 대수층 유입으로 인하여, 질산성질소 농도 최대값이 30 mg/L 이상으로 풍수기와 갈수기 질산성질소 농도 변화 또한 매우 크게 나타나고 있다. 이러한 경우 관정 폐공 이후 재개발이 필요하지만, 신규 개발에 따른 다양한 제약 조건으로 인하여 기존 관정에 대한 시설 개선 방법 적용이 필요하다.

이 연구에서는 3개 관정을 대상으로 우물자재 내에 TLS 모니터링 장치를 설치하여, 공벽을 통한 오염물질의 유입구간을 파악하는 기술을 이용하였다. 이를 통하여 오염물질 유입 구간을 확인한 후, 그라우트재를 주입하여 상위지하수의 대수층 유입을 차단하였다. 특히 그라우트재 주입 이후 동일구간에 대하여 TLS 장치를 이용하여 오염물질 유입구간의 차단 효과를 검증하였다.

오염물질 유입 구간 차단 방법 적용 전후에 실시한 TLS 기법 적용 결과, 차단 방법 적용 이전 오염물질 유입 구간의 매우 큰 온도 편차가 적용 이후 일정하게 나타남에 따라 상위지하수의 유입 구간에 대한 추사가 성공한 한 것으로 판단된다. 또한 차단 공법 시공 이전에는 상위지하수 유입의 영향으로 풍수기와 갈수기의 질산성질소 농도 변화가 크게 나타났지만, 공법 적용 이후에는 농도 변화폭이 감소하며 강수량과의 상관관계 또한 나타나지 않았다. 결과적으로 TLS 모니터링을 이용한 오염물질 유입 구간의 탐지 기술 및 원위치 차단 공법은, 제주도 지하수의 수질 개선에 효과적인 방법으로 판단된다.

사 사

이 연구는 제주특별자치도 물정책과와 농림축산식품부 농업기반 및 재해대응 과제(농업부산물 이용 농어촌형 저영향개발 시설 개발)의 지원으로 이루어졌습니다.

References

- Cho, H.N., Choi, S.O., Park, J.O., Bae, S.D., Lee, B.Y., and Choi, S.I., 2019, A study on grouting technology using expansion double packers for sectional blocking between groundwater borehole and inner casing, *J. Soil Groundw. Environ.*, **24**(1), 35-42 (in Korean with English abstract).
- Drusova, S., Wagterveld, R.M., Keesman, K.J., and Offerhaus, H.L., 2020, Temperature and consolidation sensing near drinking water wells using fiber bragg grating sensors, *Water*, **12**(12), 3572.
- 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.
- Houben, G. and Treskatis, C., 2007, Water Well: Rehabilitation and Reconstruction, McGraw-Hill, N.Y.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) and JRI (Jeju Research Institute), 2019, Research report on improvement of groundwater quality and prevention of groundwater contamination.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) and KRC-J (Jeju Headquarter, Korea Rural Community Corporation), 2020, Report for establishment of groundwater quality measurement network and operation plan.
- Kim, M., Kang, B.R., Cho, H.N., Choi, S.O., Yang, W.S., and Park, W., 2020, Application and assessment of regrouting method for improperly constructed wells in Jeju Island, *J. Soil Groundw. Environ.*, **25**(3), 43-51 (in Korean with English abstract).
- Koh, E.H., Lee, E.H., and Lee, K.K., 2016, Impact of leaky wells on nitrate cross-contamination in layered aquifer system: Methodology for and demonstration of quantitative assessment and prediction, *J. Hydro.*, **541**, 1133-1144.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 1997, A Study of Appropriate Post Management Methods for Tube Wells.
- Park, W.B., Kim, G.P., Lee, J.H., Moon, D.C., Kim, S.J., Koh, G.W., Pang, S.J., and Pang, I.C., 2011, Variation of groundwater level and recharge volume in Jeju Island, *J. Environ. Sci.*, **20**(7), 857-872 (in Korean with English abstract).
- Song, S.H., Hwangbo, D.J., Jang, K.Y., Kim, J.S., Seo, S.K., and Yang, W.S., 2021, Evaluation of nitrate nitrogen contamination degree in groundwater wells, Jeju Island, *J. Soil Groundw. Environ.*, **26**(4), 8-19 (in Korean with English abstract).
- Song, S.H., Lee, B.S., and An, J.G., 2016, Quantitative evaluation for improvement effects of performance after mechanical rehabilitation treatments on agricultural groundwater well, *J. Soil Groundw. Environ.*, **21**(4), 42-49 (in Korean with English abstract).