

제주도의 오염 방지 시공이 부실한 지하수 관정에 대한 구간 차폐 공법의 적용과 평가

김미진¹ · 강봉래¹ · 조희남² · 최성욱² · 양원석³ · 박원배^{1,*}

¹제주연구원

²지앤지테크놀로지

³제주도청 물정책과

Application and Assesment of Regrouting Method for Improperly Constructed Wells in Jeju Island

Mijin Kim¹ · BongRae Kang¹ · Heuy Nam Cho² · Sung Ouk Choi² · Wonbae Park^{1,*}

¹Jeju Research Institute

²G&G Technology Co., Ltd.

³Jeju Provincial Government Department of Water Policy

ABSTRACT

About 90% of groundwater wells in Jeju Island are reported to be under the threat of contamination by infiltration of the surface pollutants. Most of those wells have improperly grouted annulus which is an empty space between the well and the inner casing. As a remedy to this problem, some of the wells were re-grouted by filling the annulus with cement without lifting an inner casing. In order to evaluate whether this method is appropriate for the geological structure of Jeju Island, two wells (W1 and W2) were selected and this method was applied. The water holding capacity did not decrease while the nitrate levels decreased from 16.8 and 20.2 to 6.8 and 13.8 mg/L in W1 and W2, respectively. The higher nitrate level in W2 is deemed to be influenced by the livestock farms located in the upper area of the well. In addition, transmissivity of the vadose zone was higher in W2 than W1, potentially facilitating the transport of nitrate to the groundwater. The overall result of this study suggests re-grouting of wells for the purpose of protecting water quality of groundwater should take into account geological structure of vadose zone as well as appropriate source control of the contaminants.

Key words : Groundwater well regrouting, Prevention of groundwater pollution, Improving groundwater quality

1. 서 론

제주도는 여러 번에 걸친 화산활동으로 인해 용암류층과 화산쇄설암 퇴적층이 겹겹이 쌓여 만들어졌다(Won et al., 2006). 이에 따라 클린커와 절리 등이 발달되어 있고

용암동굴이나 스코리아층 등이 형성되어 투수가 용이하다. 토양 또한 북부와 서부 일부 지역을 제외하면 화산재와 화산암이 모재가 된 화산회토로 투수속도가 매우 빠르며(JSSGP, 2018; Koh et al., 2017) 전체적으로 토양의 깊이가 평균 0.5~1 m로 얇은 편이다. 토양심도가 얕아질수록 지표오염물질의 확산이 빠르게 일어날 수 있어 이러한 지질 및 토양 특성은 제주도 지하수가 오염에 매우 취약하다는 것을 보여준다(Oh et al., 2006; Woo et al., 2001). 그러나 지표수를 이용하기 힘든 자연환경 때문에 전체 수자원 중 지하수 의존도가 97%에 이른다(JSSGP, 2018).

지하수 관정의 구조는 Fig. 1과 같이 되어 있는데 관정 벽과 내부 케이싱 사이에 애널러스(Annulus)라고 불리는 공간이 있어 비가 왔을 때 생활하수나 동물 분뇨 등

주저자: 김미진, 제주연구원 위촉연구원

공동저자: 강봉래, 제주연구원 위촉연구위원, 조희남, 지앤지테크놀로지 대표이사, 최성욱, 지앤지테크놀로지 부장, 양원석, 제주특별자치도 물정책과 주무관

*교신저자 : 박원배, 제주연구원 선임연구위원

E-mail: gwaterpark@jri.re.kr

Received : 2020. 5. 22 Reviewed : 2020. 6. 1 Accepted : 2020. 9. 15
Discussion until : 2020. 12. 31

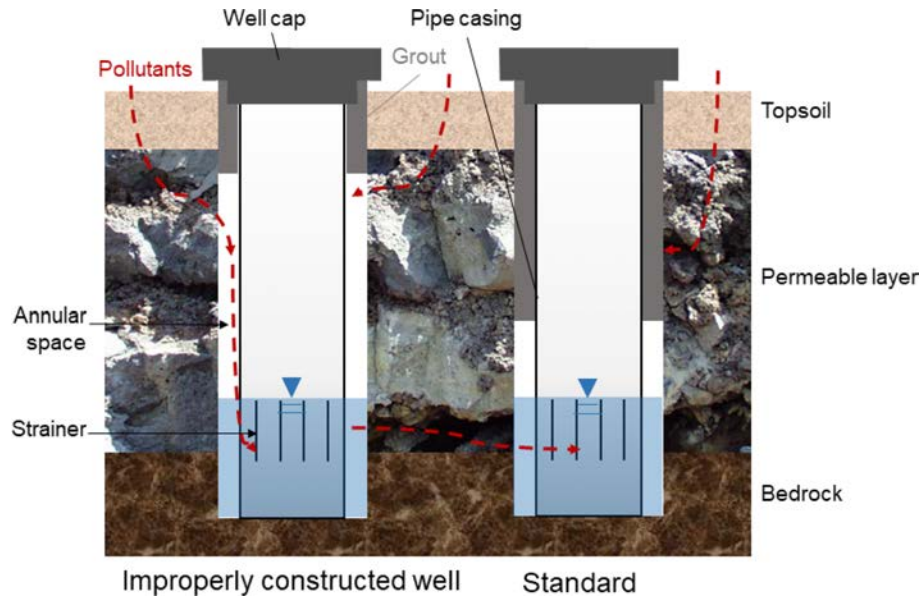


Fig. 1. Schematic diagram of groundwater well in Jeju island.

과 같은 오염물질이 유입될 수 있다(Yang et al., 2007; Oh and Hyun, 1997). 이를 방지하기 위해 2002년에 「제주국제자유도시특별법 시행조례」를 개정하여 30 m 까지 케이싱구경보다 넓게 굴착하여 그라우팅 한 후 다시 케이싱구경으로 개발심도까지 굴착하는 채움그라우팅을 실시하도록 하였다. 하지만 2018년 기준 제주도 전체 4,757 중 2,809개공(60%)은 1993년 이전에 개발되어 노후화된 상태이며, 4,261개공(90%)는 2002년 이전에 개발되어 그라우팅이 부실한 상태이다. Yang et al.(2014)에 따르면 15년 이상 경과된 노후화된 관정에서 총대장균군의 검출이 증가하는 경향을 보였다. 그라우팅이 깊지 않은 관정으로 유입된 오염물질은 지하수 흐름을 통해 대수층으로 확산될 수 있다는 우려도 제기 되어(JSSGP, 2019; Koh, 2017) 그라우팅이 부실한 지하수 관정에 대한 후속 조치가 필요한 상황이다.

오염방지 그라우팅이 불량한 지하수 관정의 수질을 개선하기 위해 기존에 수행했던 공법은 펌프와 케이싱 등의 내부자재를 인양해야하기 때문에 시공 기간이 오래 소요되고 지출 경비도 과다하다(JSSGP, 2019). 이러한 단점을 보완하기 위해 2014년 환경부의 토양·지하수 오염방지기술개발사업의 일환으로 내부케이싱이 설치된 상태에서 그라우팅액을 애플러스로 주입하는 구간 차폐 공법이 개발되었다(Cho et al., 2019; Cho et al., 2017; Ministry of Environment, 2014). 3개공을 굴착하여 현장실증을 진행한 결과 탁도가 감소하여 천부지하수 유입에 의한 오염에 대해 차폐 효과가 있음을 보였다. 본 연구에서 이 공

법을 제주도의 그라우팅이 부실한 두 관정에 대해 적용하고 그 효과를 평가하고자 하였다. 또한 본 공법을 제주도에 적용하기 위해서 고려해야하는 사항이 무엇인지 고찰하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상 관정

본 공법을 적용할 연구 대상 관정을 선정할 때 다음과 같은 기준을 고려하였다. 첫 번째로 가축분뇨 무단 방류 사례가 있었던 한림읍 상명리의 하류에 위치한 관정을 후보로 하였다. 두 번째로 이 중 2002년 이전에 개발되어 그라우팅 시설이 부실할 것으로 예상되는 관정을 선정하고자 하였다. 세 번째로 과거 수질검사 결과에서 질산성 질소 농도가 높아 수질 개선 공법을 적용할 필요가 있는 관정을 선택하였다(Table 1). 제주도 지하수의 경우 인위적인 오염을 받지 않을 때 질산성질소가 2~3 mg/L 이하의 값을 보인다(Kim et al., 2018). 그에 반해 W1과 W2의 최근 3년간의 질산성질소 농도는 그보다 5배 이상 높은 값을 보여 인위적인 오염이 이루어지고 있다고 판단할 수 있다. 대상 관정의 기본적인 사양은 Table 2와 같다. 두 관정 모두 1996년에 개발되어 20년 이상 시간이 지났으며 그라우팅 깊이도 W1과 W2가 각각 5 m와 6 m로 깊지 않다. 두 관정의 위치는 Fig. 2에 나타내었으며 주변 토양이 대부분 농업용지이며 특히 W2 관정에서 남동쪽 방향으로 측사가 매우 밀집되어 있어 지하수 흐름에

Table 1. Nitrate nitrogen concentrations of W1 and W2 before regrouting

Sampling Date (yyyy-mm-dd)	W1 (NO ₃ -N mg/L)	Sampling Date (yyyy-mm-dd)	W2 (NO ₃ -N mg/L)
2016-04-20	11.3	2016-04-26	16.1
2017-05-08	9.0	2017-04-27	14.6
2017-10-31	20.8	2017-10-25	15.8
2018-04-10	16.3	2018-04-17	14.9
2018-09-11	16.6	2018-10-01	17.4

Table 2. Initial specifications of regrouting wells

Category	W1	W2
Location	Josu-ri, Hangeong-myeon	Myeongwol-ri, Hallim-eup
Development Year	1996	1996
Altitude (m)	68	126
Total Depth of Well (m)	160	137
Static Water Level (TOC) (m)	41.5	116.0
Rest Water Level (TOC) (m)	49.0	120.0
Grouting Depth (m)	5	6
Pumping Capacity (m ³ /d)	1,000	800

TOC : from top of casing

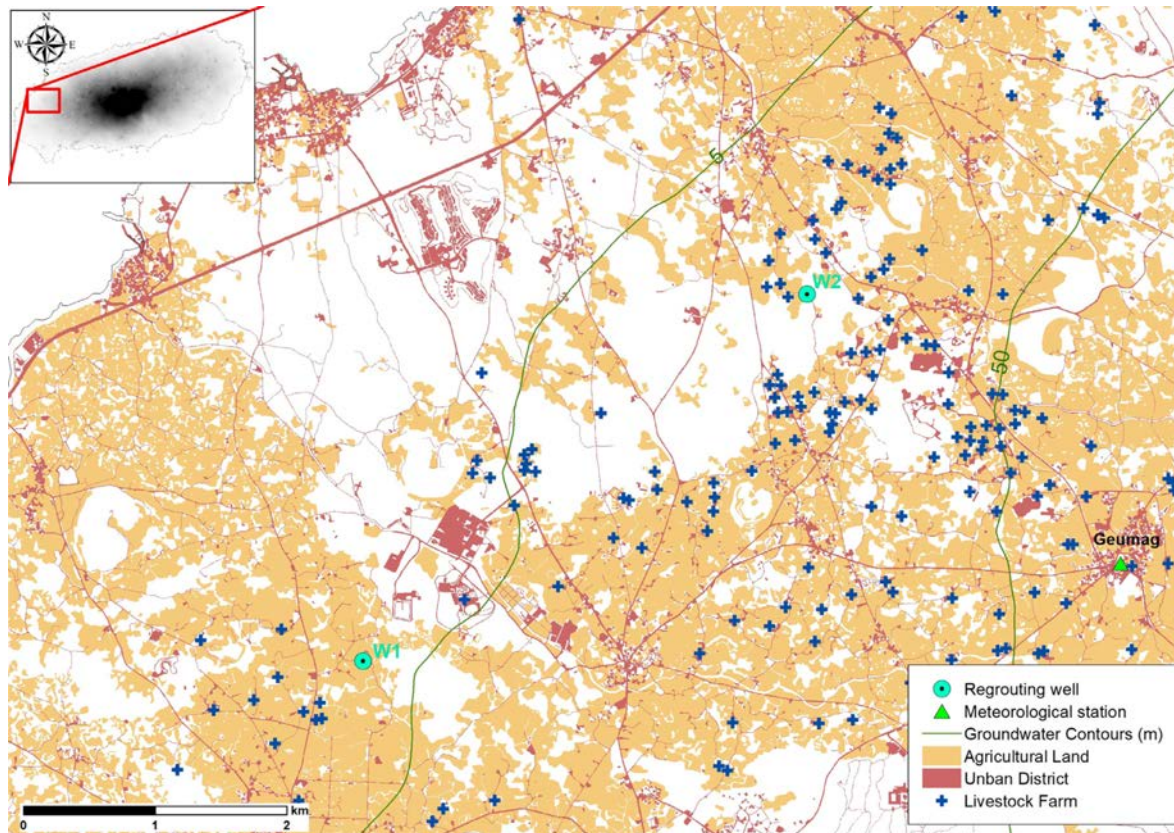


Fig. 2. Location of regrouting wells and adjacent pollution sources.

따라 오염원이 흘러 들어올 수 있는 위험성이 크다.

2.2. 차폐 위치 선정

차폐할 위치를 선정할 때에는 지질주상도를 참고하여

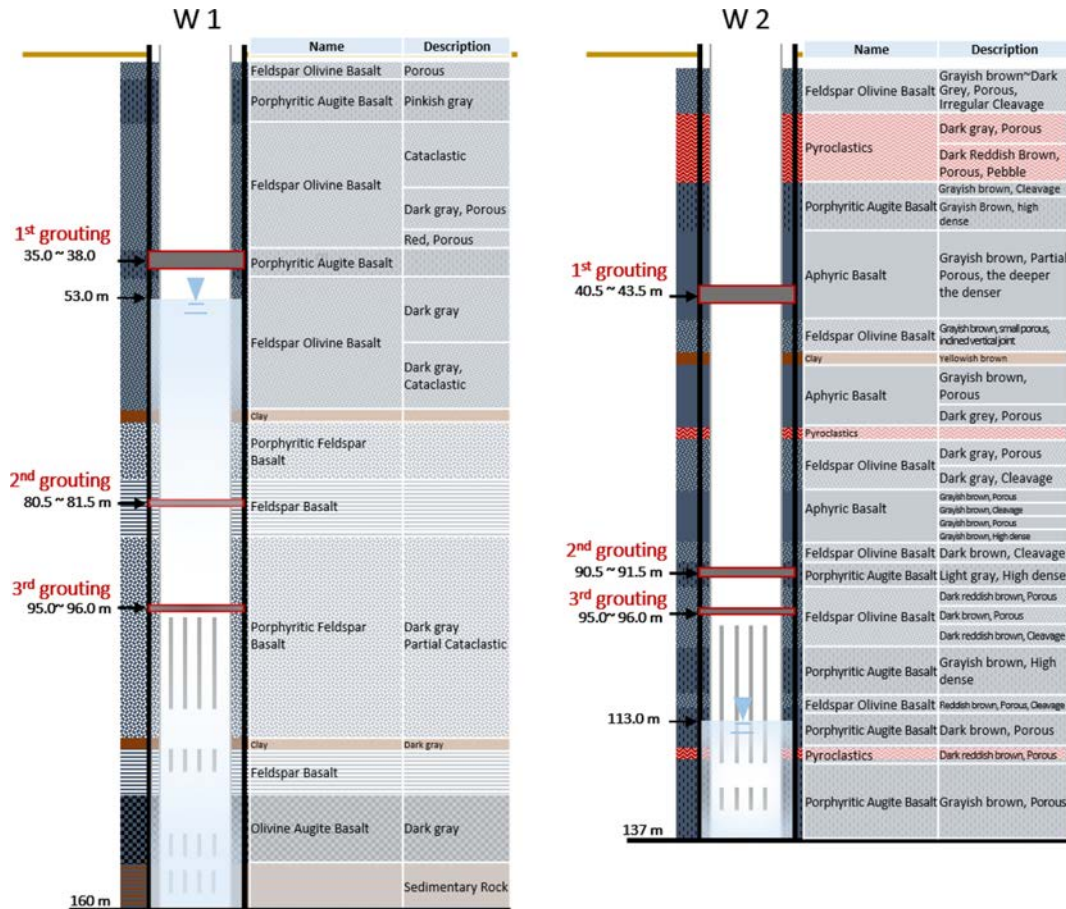


Fig. 3. Geologic columnar section of regrouting wells.

절리나 파쇄대가 발달되어 오염원이 유입될 가능성이 높은 구간 밑을 차폐하고자 하였다. 그리고 치밀질 암반이 분포하는 구간에서 그라우팅 효과가 가장 좋을 것으로 판단하여 다음과 같이 선정하였다(Fig. 3). W1관정은 첫 번째 그라우팅 구간으로 지표 하 35.0~38.0 m를 선정하고 두 번째로 지표 하 80.5~81.5 m를 세 번째로 지표 하 95.0~96.0 m를 선정하였다. W2관정의 첫 번째 그라우팅 구간은 지표 하 40.5~43.5 m이며 두 번째는 지표 하 90.5~91.5 m이고 세 번째는 지표 하 95.0~96.0 m 구간이다.

2.3. 구간 차폐 공법

구간 차폐 공법은 내부 케이싱이 설치된 상태에서 그라우팅 공사를 할 수 있는 방법이며 충청남도과 전라남도, 제주도 등의 지역에서 오염된 지하수를 대상으로 적용한 사례가 5건 있다(Cho et al., 2019). 공법을 적용한 순서는 Fig. 4에 나타냈으며 세부 과정은 다음과 같다. 대상 관정을 선택한 이후 지하수 수질을 검사하고 수중모터펌

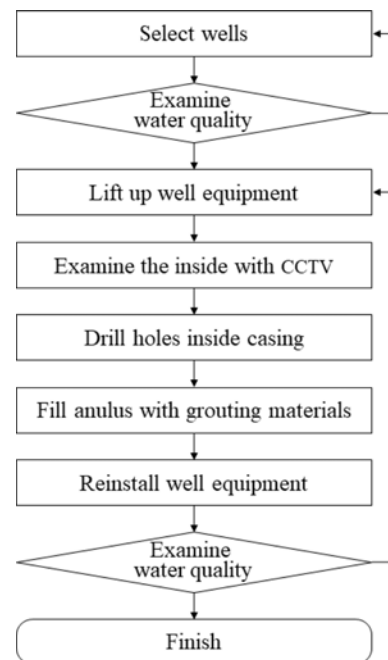


Fig. 4. Flowchart of regrouting procedure.

Table 3. Water level of W1 and W2 in relation to regrouting

Time	W1		W2	
	Static Water Level (TOC)	Rest Water Level (TOC)	Static Water Level (TOC)	Rest Water Level (TOC)
At Development	41.5 m	49.0 m	117.0 m	120.0 m
Before Regrouting	53.0 m	-	113.0 m	-
After Regrouting	59.7 m	68.0 m	116.7 m	116.7 m

프를 포함한 자재를 인양하였다. 케이싱의 파손 상태나 유공관 위치 등을 파악하기 위해 케이싱 내부를 CCTV로 촬영하였다. 차폐할 위치에 홀컷팅장비를 이용하여 케이싱을 천공하였으며 구멍을 통해 실리콘을 주입하고 24시간동안 굳히고 나서 실리콘차폐구간 위로 재천공하여 속경성 시멘트를 주입하였다. 양생이 완료되면 인양했던 우물자재들을 다시 설치하고 지하수 수질 및 수위 변동 특성을 검사하여 그라우팅 효과를 검증하였다.

2.4. 구간 차폐 공법의 효과 검증

구간 차폐 공법의 효과를 검증하기 위해 시공 후 수질 검사를 수행하였다. 질산성질소 농도는 이온크로마토그래피(Metrohm, 882 compact IC plus)를 이용하여 분석하였다. 또한 차폐공법 수행 전후 양수량 변화를 확인하기 위해 40 HP의 모터펌프와 100 mm 토출관을 사용하여 1시간 이상 양수하였으며 안정수위와 양수에 따른 수위강하량 등을 확인하였다. 양수시험 자료는 AQTESOLV (HydroSOLVE, Inc.)에서 Jacob-cooper 방법을 이용하여 산정하였다. 이때 대수층두께는 관정바닥에서부터 자연수위까지의 높이로 계산하였다. 질산성질소 농도와 강수량의 상관관계를 파악하기 위해 강수량자료를 참고할 때에는 W1 관정에서 약 5.8 km, W2관정에서 약 3.1 km 떨어져 있는 금악방재기상관측소의 강수량자료를 사용하였다(KMA open data source).

3. 결 과

3.1. 구간 차폐 공법 시공 후 수위변동 특성

본 공법의 시공에 따른 수량변화를 확인하기 위해 시공 전·후의 수위와 양수량을 확인하였다(Table 3). W1관정의 경우 개발 당시 자연수위는 41.5 m이며 안정수위는 49.0 m이다. 그라우팅 전 자연수위는 53.0 m이며 3차 그라우팅 이후 자연수위는 59.7 m로 시공 전·후 자연수위가 6.7 m 정도 감소하였고 안정수위는 68.0 m로 개발당시보다 19.0 m 정도 감소하였다. 하지만 개발당시 자연수위와 안정수위의 차이는 7.5 m이며 그라우팅 후 자연수위와 안

Table 4. Transmissivity of W1 and W2

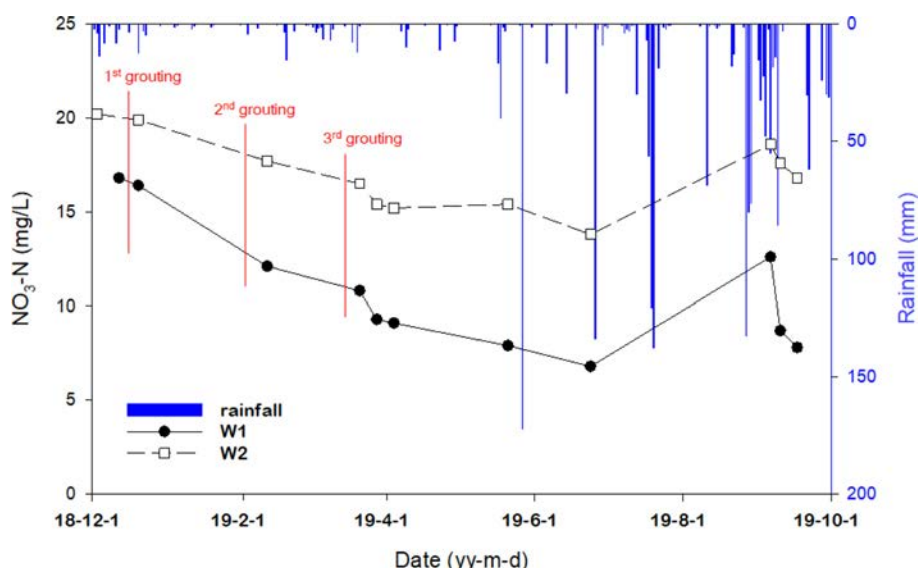
Category	W1	W2
Transmissivity (m ² /day)	130.5	14,730.0
Saturated Thickness (m)	118.5	21.0

정수위의 차이는 8.3 m로 차이가 거의 없다. 양수능력은 1,329 m³/d로 개발당시 제시된 양수능력인 1,000 m³/d과 비슷하여 그라우팅 후에도 수량이 충분한 것으로 판단된다. W2관정의 경우 개발 당시 자연수위는 117.0 m이며 안정수위는 120.0 m이다. 그라우팅 전 자연수위는 113.0 m이며 3차 그라우팅 이후 자연수위는 116.7 m로 시공 전·후 수위 차가 3.7 m 정도로 다소 감소하였다. 안정수위는 116.7 m로 양수에 따른 수위강하가 거의 없는 것으로 파악되었으며 양수능력은 840 m³/d로 개발당시인 800 m³/d과 비슷한 수준이다. W1관정의 경우 2차 그라우팅부터 자연수위 하단에서 시공하였고 W2관정은 자연수위 상단에 화산쇄설암층과 절리가 발달된 층 등이 많아 1~3차 모두 자연수위 상단에서 시공하였다. W1과 W2의 시공 전·후 수위 차이가 각각 6.7 m와 3.8 m로 약간의 차이가 있는데 W1의 경우 자연수위 하단을 차폐하였기 때문에 대수층 일부의 흐름을 방해하게 되어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다. 하지만 W1관정도 양수량은 줄어들지 않았으며 수질이 개선되는 효과가 있었기 때문에 그라우팅을 하는 것이 낫다고 판단된다.

두 관정의 양수시험 결과로 투수량계수를 분석하였다(Table 4). W1의 투수량계수는 130.5 m²/day이며 W2의 투수량계수는 14,730 m²/day으로 매우 크다. 제주도의 평균 투수량계수는 17,573 m²/day이며 그라우팅관정이 위치한 서부지역은 평균 13,141 m²/day이다(Jeu Provincial Government, 2003). Kim (2011)은 제주도 서부지역의 투수량계수가 최소 17 m²/day에서 최대 24,150 m²/day의 값을 보이며 그 편차가 매우 크다고 보고하였다. 서로 인접한 두 관정이지만 W1은 굉장히 낮은 값을 보이며 W2는 평균과 근사한 값을 보이는데 지역별 편차가 큰 제주도의 지질 특성을 반영한다고 볼 수 있다. 또한 W1과 W2의 대수층두께를 비교해보면 W1은 118.5 m이고 W2

Table 5. Nitrate nitrogen concentrations of W1 and W2 after regrouting

Sampling Date (yyyy-mm-dd)	W1 (NO ₃ -N mg/L)	Sampling Date (yyyy-mm-dd)	W2 (NO ₃ -N mg/L)	Remarks
2018-12-12	16.8	2018-12-03	20.2	Before regrouting
2018-12-20	16.4	2018-12-20	19.9	1 st regrouting
2019-02-11	12.1	2019-02-11	17.7	2 nd regrouting
2019-03-21	10.8	2019-03-21	16.5	3 rd regrouting
2019-03-28	9.3	2019-03-28	15.4	
2019-04-04	9.1	2019-04-04	15.2	
2019-05-21	7.9	2019-05-21	15.4	59 mm rainfall
2019-06-24	6.8	2019-06-24	13.8	
2019-09-06	12.6	2019-09-06	18.6	over 360 mm rainfall
2019-09-10	8.7	2019-09-10	17.6	
2019-09-17	7.8	2019-09-17	16.8	

**Fig. 5.** Nitrate nitrogen variation of two wells according to regrouting application.

는 21.0 m이다. 투수량계수가 수리전도도와 대수층두께의 곱이라는 점을 감안하였을 때 W1은 W2에 비해 수리전도도가 매우 낮음을 알 수 있다.

3.2. 구간 차폐 공법 시공 후 수질변화

3차에 걸친 그라우팅에 따른 수질의 변화를 Fig. 5와 Table 5에 나타냈다. W1 관정의 그라우팅 전 질산성질소 농도는 16.8 mg/L 였는데 1차 그라우팅 이후 16.4 mg/L로 거의 감소하지 않았다. 하지만 2차 그라우팅 이후 12.1 mg/L로 크게 감소하였으며 3차 그라우팅 이후에는 10.8 mg/L까지 감소하였다. 수질 개선 효과를 검증하기 위해 3주간 추가 검사를 시행하였으며 최종적으로 9.1 mg/L로 감소하였다. W2 관정의 그라우팅 전 질산성질소 농

도는 20.2 mg/L로 농업용 지하수 수질기준을 초과하는 높은 수치를 보였다. 1차 그라우팅 이후 질산성질소 농도 값인 19.9 mg/L는 오차범위 이내로 변동이 없는 수준이다. 2차 그라우팅 이후 17.7 mg/L로 10% 이상 감소하였으며 3차 그라우팅 이후 16.5 mg/L까지 감소하였다. 수질 개선 효과를 검증하기 위해 3주간 추가 검사를 시행하였으며 최종적으로 15.2 mg/L로 감소하였음을 확인하였다.

그라우팅 이후 강수에 의한 영향을 파악하기 위해 Fig. 5에 질산성질소 농도와 함께 강수량 자료를 나타내었다. 그라우팅 작업을 시작했던 2018년 12월부터 3차 그라우팅까지 작업이 끝났던 2019년 4월까지 50 mm/일 이상 큰 비가 내린 적이 없었다. 하지만 2019년 5월 17일부터 19일까지 총 59 mm가 내린 이후에도 W1의 질산성질소

농도가 7.9 mg/L로 3차 그라우팅 이후보다 더욱 감소하였음을 확인하였다. W2의 질산성질소 농도도 15.4 mg/L로 3차 그라우팅 이후와 비슷한 결과를 보였다. 강우 시 비포화대에 있는 오염물질이 빗물과 함께 지하수공내로 직접 유입되는 것을 효과적으로 차폐한 것으로 판단할 수 있다.

장기적인 수질 모니터링을 위해 2019년 8월에 연속적으로 많은 양의 강수(360 mm 이상)가 내린 이후 수질 검사를 시행하였다. 두 관정 모두 2019년 6월 마지막에 시행하였을 때보다 질산성질소 농도가 상승하였는데 W1과 W2가 각각 12.6 mg/L와 18.6 mg/L의 값을 보였다. 하지만 시간이 흐르면서 다시 감소하는 추세가 나타나 집중호우 이전의 값과 비슷하게 회복되어 W1의 경우 최종적으로 6.8 mg/L로 60%의 수질 개선 효과가 나타났고 W2의 경우 최종적으로 13.8 mg/L로 32%의 수질개선 효과가 나타났다.

강우에 의해 질산성질소 농도가 상승한 것은 상류에서 강우에 의해 축적된 오염물질이 지하수로 유입되어 하류까지 영향을 준 것으로 판단된다. 절리가 발달한 제주도 지질특성 상 지하수의 수직흐름이 빨라 축적된 오염물질이 집중호우에 의해 용출 될 수 있는데 이러한 지하수 거동이 나타난 것으로 보인다. 비교적 먼 거리의 상류 지역에서 매우 많은 강수에 의해 침투된 오염물질에 의한 수질의 영향을 배제한다면 구간 차폐 공법에 의한 수질 개선 효과가 있다고 할 수 있다. 이렇게 상류에서 오염물질이 유입되면 하류의 심부지하수까지 영향을 줄 수 있기 때문에 상류에서부터 오염물질이 유입되지 않도록 관리해야 할 필요가 있다.

4. 고 찰

두 관정간의 수질개선 효과가 차이를 보이는 것은 W2의 상류인 남동방향에 가축분뇨 배출시설과 같은 오염원이 매우 밀집되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 절리와 균열이 발달한 제주도의 독특한 지질특성에 의해 지하수 수직 흐름이 빨라 축적된 오염물질이 집중호우에 의해 용탈될 수 있는데 W2는 그 영향을 더 많이 받았을 것으로 판단된다. 또한 W2의 수리전도도가 W1에 비해 높기 때문에 상류 지하수가 오염되었을 때 더 크게 영향을 받을 수 있다. 대수층 두께가 얇아 같은 양의 물을 양수하더라도 대수층에서 흐르는 물의 속도가 빨라지기 때문에 암석 틈에 퇴적된 물질들이 빠른 속도로 유입될 수 있다. 이는 W1에 비해 W2의 대수층에서 오염물질이 더욱 빠르게 이

동할 수 있음을 시사한다. 이처럼 비포화대로부터 유입되는 오염물질은 차폐되어도 독특한 대수층 특성에 따라 상류에서 흘러온 오염된 지하수의 영향을 크게 받으므로, 구간 차폐 공법을 확대 적용하고 지표오염물질의 관리를 함께 병행하여야 장기적으로 수질개선 효과가 나타날 것으로 판단된다.

구간 차폐 공법은 투수성 지질구조가 발달된 제주도의 지질환경에서도 수질개선 효과를 보이는 것으로 판단된다. 다만 지하수 관정을 통해 오염물질이 유입되는 것을 방지하기 위한 목적으로 본 공법을 확대 적용하기 위해서는 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다. 첫째로 공법을 적용할 관정을 선정할 때에는 지하수 오염원이 밀집하는 상류지역을 우선적으로 하고 하류지역으로 확대해야 할 필요가 있다. 특히 농경지나 가축분뇨배출시설과 같은 지하수 오염원이 상류에 분포하고 있는 지역의 지하수 관정을 우선 적용하여야 할 것이다. 둘째로 주상도만을 가지고 오염물질이 유입되는 구간을 알 수 없기 때문에 이를 파악할 수 있는 방법이 강구되어야 한다. 최근 관정벽의 균열이나 절리 등을 파악하고자 초음파 등을 이용하는 물리검층 기기가 개발되고 있으며 케이싱의 온도를 수직검층하여 지하지질을 파악하려는 연구들이 이루어지고 있다 (Hwang et al., 2007). 아직 케이싱이 설치된 상태에서 관정벽에 있는 균열이나 절리 등을 파악할 수 있는 적절한 방법은 없지만 추후에 적절한 방법들이 개발되어 적용된다면 더욱 효과적으로 차폐 위치를 선정할 수 있을 것이다. 마지막으로 지표와 가까운 천부에서부터 오염원이 유입될 것으로 예상되는 곳을 단계적으로 그라우팅할 필요가 있다. 하단에서부터 차폐할 경우 오염물질 유입이 없는 대수층까지 막아 산출량이 감소할 수 있기 때문이다.

W1과 W2 사이의 거리는 4.3 km 정도로 가까운 편이지만 제주도는 인접한 관정거리도 서로 다른 지하수 유동 특성을 보여준다. Hyun et al.(2017)은 서로 인근한 지하수 관정일지라도 강우에 따라 서로 다른 오염 반응 양상을 보일 수 있음을 밝혔다. 이에 따라 상류에서 하류로 유동하는 수평적 흐름과 천부에서 심부로 유동하는 수직적 흐름을 연구할 필요성을 제기한다. Jeon et al.(2005)은 국가지하수 관측망의 양수시험 자료를 이용하여 국내 대수층 특성을 구분하였고 83.7%가 천부와 심부의 수리적 연결성이 양호한 암반 대수층에 속한다는 것을 밝혔다. 하지만 여기에 제주도 양수시험 자료는 포함되지 않았으며 아직까지 제주도의 수직적 지하수 흐름에 관한 연구는 미흡하다. 제주도는 절리와 습곡 등의 발달로 천부와 심부의 연결성이 매우 양호할 것으로 보이며 오염물질이 확

산될 수 있는 주요한 통로가 될 수 있기 때문에 이에 관한 자세한 연구가 시급하다.

마지막으로 구간차폐 공법은 지하수의 오염이 확산되는 것을 방지하는 효과는 있지만 지하수체가 오염되었을 경우 효과를 기대할 수 없다. 그러므로 지하수 수질 보전을 위해서 가장 우선적인 것은 오염원 관리이다. 일본은 질 산성질소에 의한 지하수 오염을 방지하기 위해 가축분뇨 적정처리와 화학비료 시비기준을 농업인에게 교육하고 있다(JSSGP, 2019). 또한 유럽에서는 질산염 지침(Nitrates Directive)을 만들어 질산염 취약지역(NVZ; Nitrate Vulnerable Zone) 지정, 농업 관행 개선 등을 제정하고 관리하고 있다. 제주도의 지하수 수질을 보전하기 위해서도 화학비료, 가축분뇨 등의 오염원을 저감할 수 있는 관리방안을 마련하는 것이 필요하다.

5. 결 론

투수성 지질구조가 발달된 제주도에서 오염방지 그라우팅이 부실한 지하수 관정은 오염물질이 지하수로 유입될 수 있는 위험성이 있다. 그라우팅을 다시하기 위해 기존에 활용되었던 방식은 케이싱을 인양해야하기 때문에 시간과 비용이 많이 소모되었다. 이에 케이싱 내부에 구멍을 천공하여 그라우팅 재료를 주입하는 구간 차폐 공법이 제시되었으며 본 연구는 제주도에서 적용하였을 때 효과를 확인하였다. 가축분뇨 무단 방류 지역 하류에 위치한 두 개소의 관정을 선정하여 구간 차폐 공법을 적용한 결과 W1 관정의 질산성질소 농도가 16.8 mg/L에서 6.8 mg/L로 감소하였으며 W2 관정의 경우 20.2 mg/L에서 13.8 mg/L로 감소된 것으로 분석되었다. 두 관정간의 수질개선 효과가 차이를 보이는 까닭은 비포화대로부터 유입되는 오염물질은 차폐가 되더라도 W2의 상류에 가축분뇨 배출시설과 같은 오염원이 매우 밀집되어 오염된 지하수가 흘러들어왔기 때문인 것으로 판단된다. 또한 W2의 수리전도도가 높아 암석 틈에 퇴적된 물질들이 빠른 속도로 유입되는 영향도 있을 것으로 판단된다.

결론적으로 구간 차폐 공법은 제주도의 지질 구조에서도 효과가 있었지만 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다. 첫째로 지하수 오염원이 밀집해서 분포하는 하류지역보다는 상류지역을 우선적으로 시행해야 한다. 둘째로 주상도만을 가지고 오염물질이 유입되는 구간을 알 수 없기 때문에 관정벽에 있는 균열이나 절리 등을 파악할 수 있고 비포화대로부터 물이 흘러들어오는 위치를 파악할 수 있는 방법이 강구되어야 한다. 셋째로 천부에서부터 단

계적으로 그라우팅하여 산출량을 충분히 확보해야 할 필요가 있다. 마지막으로 지하수 오염을 예방하기 위해 오염원을 저감하기 위한 관리방안을 마련해야 한다. 이런 방법들을 고려하여 구간 차폐 공법을 확대한다면 그 효과가 더 증가할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 제주특별자치도가 출연하고 제주연구원에서 위탁시행한 ‘지하수 수질개선 및 오염방지 방안 연구’과제의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Cho, H.N., Cho, S.B., Choi, S.O., Jung, C.Y., Kim, K.N., Kim, J.S., Kang, H.C., and Park, S.J., 2017, A Case Study of Groundwater Quality Improvement using In-situ Casing Hole-Cutting Method, *Proceeding of KSEG*, Hiddenbay Hotel, Yeosu, S. Korea, 67p.
- 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 Groundwater Environ.*, **24**(1), 35-42.
- Hwang, S., Park, I.H., and Song, Y., 2007, Interpretation of Geophysical Well Logs from Deep Geothermal Borehole in Pohang, *Mulli-Tamsa*, **10**(4), 332-344.
- Hyun, I.-H., Seo, B.-W., Kim, T.-H., Song, B.-H., Kang, S.-K., Kim, S.-J., Yun, S.-T., and Oh, S.-S., 2017, Tracking Sources of Nitrated in Groundwater Around Livestock Manure Spill Area, *Report of JIHE*, **28**, 111-124.
- Jeju Provincial Government, Korea Water Resources Corporation, 2003, *Comprehensive Investigation of Hydrogeology and Groundwater Resources on Jeju Island(III)*, 175p.
- Jeon, S.-K., Koo, M.-H., Kim, Y.J., and Kang, I.-O., 2005, Statistical Analysis of Aquifer Characteristics Using Pumping Test Data of National Groundwater Monitoring Wells for Korea, *J. Soil Groundwater Environ.*, **10**(6), 32-44.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2018, *Water resources management comprehensive plan(2018-2022)*, 21-25, 31-32, 129p.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2019, *Study on Groundwater waterquality Improvement and Pollution Control*, 43-45, 285p., 309-312, 339-340.
- Kim, B.-S., 2011, A study on Hydrogeological Characteristics of

- Volcanic Rocks in Jeju Island (Doctoral dissertation, Pusan National University, S. Korea), 128-129.
- Kim, H.-R., Oh, J.S., Do, H.-K., Lee, K.-J., Hyun, I.-H., Oh, S.-S., Kam, S.-K., and Yun, S.-T., 2018, Spatial-temporal Variations of Nitrate Levels in Groundwater of Jeju Island, Korea: Evaluation of Long-term (1993-2015) Monitoring Data, *Econ. Environ. Geol.*, **51**(1), 15-26.
- KMA open data source, 2019, Data of Automatic Weather System, <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAwsRltmList.do?pgmNo=56>, [Accessed 2020.01.13.]
- Koh, G.-W., Park, J.-B., and Mun, D.C., 2017, *Geology and Groundwater of Jeju-do, a Volcanic Island*, 40p.
- Koh, E.-H., 2017, Quantitative evaluation of factors controlling groundwater contamination in Jeju Island (Doctoral dissertation, Seoul National University, S. Korea), 55p.
- Ministry of Environment, 2014, *Development of Groundwater Contamination Survey Instruments and Pollution Prevention Measures*, 33-97.
- Oh, T.G., Kim, Y.J., Kim, K.S., and Kim, S.R., 2006, Nitrate and Chloride Characteristics in the Groundwater in Jeju Area, *J. Environ. Research*, **3**, 1-14.
- Oh, Y.-K. and Hyun, I.-H., 1997, Estimation of Nitrate-nitrogen Contamination Sources in Cheju Island Groundwater using $\delta^{15}\text{N}$ Values. *J. Korea Society of Groundwater Environ.*, **4**(1), 1-4.
- Won, J.-H., Lee, J.-Y., Kim, J.-W., and Koh, G.-W., 2006, Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea, *Hydrogeol. J.*, **14**, 532-547.
- Woo, N.-C., Kim, H.-D., Lee, K.-S., Park, W.-B., Koh, G.-W., and Moon, Y.-S., 2001, Interpretation of Groundwater System and Contamination by Water-Quality Monitoring in the Daejung Watershed, Jeju Island, *Econ. Environ. Geol.*, **34**(5), 485-498.
- Yang, C.-S., Hyun, I.-H., Hyun, S.-S., Yang, M.-Y., and Jwa, W.-H., 2014, Study on Jeju Groundwater Contamination by tracing Total Coliforms to its Source, *Report of JIHE*, **25**, 13-43.
- Yang, S.-K. and Han, S.-C., 2007, Improvement Method for Preventing Groundwater Pollution in Jeju Island, *J. of the Environ. Sci.*, **16**(6), 735-743.