

[기술보고]

지하수 관측정의 시설개선에 따른 수질변화와 유지관리에 대한 연구

김정우¹ · 서용교² · 김락현^{2*} · 천정용¹

¹지오그린21

²한국환경공단 토양지하수처

[Technical Report]

The Importance of Monitoring Wells Maintenance in Improving Groundwater Quality

Jeong-Woo Kim¹, Yongkyo Seo², Rak-Hyeon Kim^{2*}, and Jeong-Yong Cheon¹

¹GeoGreen21 Co., Ltd, Seoul, Korea

²Department of Soil & Groundwater, Korea Environment Corporation, Incheon, Korea

Received 19 May 2014; received in revised form 19 June 2014; accepted 23 June 2014

중장기적으로 운영하는 지하수 관측정은 설치도 중요하지만 그 성능 유지를 위한 관측정 시설 관리 또한 중요하다. 따라서 본 조사는 관측정 내부에 이물질이 많이 형성되고 오래된 관측정 시설을 대상으로 실시하였다. 조사대상 관측정들은 장비(펌프) 세척, 시료채취 튜브 교체, 관측정 청소로 구분하여 시설을 개선하였다. 주 양/음이온과 중금속 농도의 변화를 검토한 결과, 마그네슘, 망간, 아연 항목이 증가하는 경향으로 나타났다. 이것은 관측정 내부에 흡착요인으로 작용하던 이물질(탄산칼슘이나 점토물질)이 시설개선 과정을 통해 제거되었기 때문이다. 따라서, 중장기적으로 운영이 계획된 관측정은 1년마다 시설 및 내부 점검을 실시하고 이상현상 발생시 조치를 취하되, 최소 약 4~5년마다 수행하는 것이 추천된다.

주요어 : 관측정, 펌프 세척, 튜브 교체, 관측정 청소, 시설개선

Groundwater monitoring wells are important to maintain their performance for long term monitoring. The monitoring wells with extensive internal incrustation by clay adsorption were selected for this study. The performance of these monitoring wells was improved by pump washing, tube replacements for dedicated samplers, and well surging. After each improvement, the Mg, Mn, and Zn concentrations were increased. The results show that under these conditions, the monitoring wells must be carefully inspected at least once a year. Even in the case of no abnormal phenomenon like as internal incrustation, the monitoring wells need to be serviced at least once every four to five years to guarantee that they are effectively monitoring groundwater quality.

Key words : monitoring well, pump washing, tube replacements, well surging, improvement

*Corresponding author: acezeta@korea.com

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

환경부에서 지하수 오염을 사전에 예방하여 국민의 건강과 재산을 보호하기 위해서 지하수 수질을 지속적이고 체계적으로 측정 및 관리할 목적으로 지하수수질 측정망을 운영하고 있다(MoE, 2007; Park et al., 2007). 그리고 국토해양부에서는 1995년부터 국가지하수관측망을 설치하여 지하수 보전을 위해 지하수위, 수온 및 전기전도도의 자료를 자동측정 수집하고 있다(MCT and Kwater, 2004; MCT and Kwater, 2005; MCT and Kwater, 2006 Kim and Yum, 2007). 이렇게 지하수 관리를 위해서 해마다 지하수 관측정을 설치하고 측정하는 것도 중요하지만, 정확한 수질 및 수위를 측정하기 위해서 관측정 관리 또한 중요하다(U.S. EPA, 1988; U.S. EPA, 1991). 일반적으로 지하수내 양이온과 음이온간의 반응침전, 수산화물 침전, 탄산염이나 가용성 광물의 반응 등과 같은 화학적 반응 등의 원인으로 피막현상(chemical incrustation or biofouling)이 발생할 수 있다(Lee et al., 2005; Jo et al., 2010). 그리고 미세입자들이 측정망 관측정 내부로 유입되어 스크린 주변 또는 관측정 바닥에서 퇴적물 형태로 형성되면서 관측정의 기능이 약화될 수 있다.

화학적 피막현상은 주로 탄산염(carbonate), 특히 탄산칼슘(CaCO_3)의 침전에 의해서 주로 발생하고, 칼슘 외 철 또는 망간에 의해서 발생한다(Driscoll, 1986; Appelo and Postma, 1993). 일반적으로 탄산칼슘의 용해는 지하수내 용존된 이산화탄소의 농도에 따라 변화하며, 용존 이산화탄소의 농도는 압력에 비례한다. 대수층내 있는 지하수가 관측정 내부로 유입되면서 감압현상이 발생하면 이산화탄소는 대기중으로 방출된다. 따라서 이산화탄소의 농도가 낮아지면서 탄산칼슘이 침전하게 된다. 이렇게 발생한 침전물은 주로 스크린 주변이나 펌프, 튜브 등에 붙게 된다. 그리고 지하수내 용존된 철과 망간도, pH가 낮으면 철과 망간이 이온형태로 존재하지만 지하수가 관측정으로 유입되면서 감압 또는 화학적 평형이 교란되면서 수산화물 형태로 침전이 발생하게 된다(Driscoll, 1986; Appelo and Postma, 1993). 철 또는 망간 수산화물 침전은 주로 탄산칼슘과 함께 나타나며, Fe^{2+} 가 있는 경우 붉은 갈색(reddish brown), Fe^{3+} 가 있는 경우 검정색(black), Mn^{2+} 이 있을 경우 검정 또는 어두운 갈색(black or dark brown)이 나타나는 것으로 알려져 있다(Driscoll, 1986; Charette and Sholkovitz, 2002).

화학적 반응에 의해 철 또는 망간 수산화물과 함께 있는 탄산칼슘이 관측정 내부 바닥이나 스크린, 펌프 및 기타 장비에 흡착되어 있다면 양이온이나 중금속이 탄산칼슘에 흡착되어 정확한 농도관측이 어렵다. 실제로 탄산칼슘은 중금속으로 오염된 물을 처리하는데 흡착제로 많이 활용되고 있다(Kim et al., 2008). 그리고 탄산칼슘에 중금속의 흡착성능에 대한 연구가 최근에 많이 진행되고 있다(Ahmad et al., 2012; Ma et al., 2012; Mustafa et al., 2013).

그리고 지하수내 용존된 양이온이나 중금속의 정확한 관측을 방해하는 요소는 대수층내 점토성분 미세입자의 유입에 의해서도 나타날 수 있다. 특히 충적 대수층이 발달한 지역에서 대수층 매질의 입도분포가 점토입자를 많이 포함하고 있을 가능성이 높으므로 이러한 현상이 더 많이 나타날 것이다. 점토는 산소와 규소가 층상구조로 형성되어 있기 때문에 그 표면이 음전하를 띄게 된다(Yong and Warkentin, 1966; Appelo and Postma, 1993). 따라서 점토성분의 미세입자가 관측정 내부에 들어와서 스크린 및 기타 장비 표면에 흡착된다면 양전하를 가진 양이온이나 중금속이 미세입자 표면에 흡착될 수도 있다.

이러한 현상은 지하수 개발용 관정뿐만 아니라 관측정에서도 발생할 수 있으며, 관측정에서 발생하면 관측 결과에 대표성이 부족할 수 있다(Driscoll, 1986). 따라서 지하수 관측정도 내부 우물자체 및 고정설치 장비에 대한 정기적인 유지 관리 계획이 필요하다(U.S. EPA, 1988). 본 논문에서는 화학적 피막현상과 점토광물 미세입자 유입에 의해 발생하는 지하수 수질변화에 대하여 연구하였다. 그리고 수질변화 결과를 토대로 중장기적으로 운영하는 관측정에 대한 관리방안을 사례검토와 함께 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

연구 방법

개요

본 연구를 위해서 우리나라에서 중장기적으로 운영중인 환경부에서 설치한 지하수수질측정망 관측정들의 현황을 검토하였다. 여러 관측정 중에서 설치 후 약 4~5년이 지나고, 시료채취 장비 및 내부 케이싱에 이물질이 많이 형성된 측정망 관측정 10개를 연구대상으로 선정하였다. 각 측정망 관측정의 위치와 제원은 각각 Fig. 1과 Table 1과 같다.

연구대상 측정망 관측정들은 모두 중장기적으로 운영

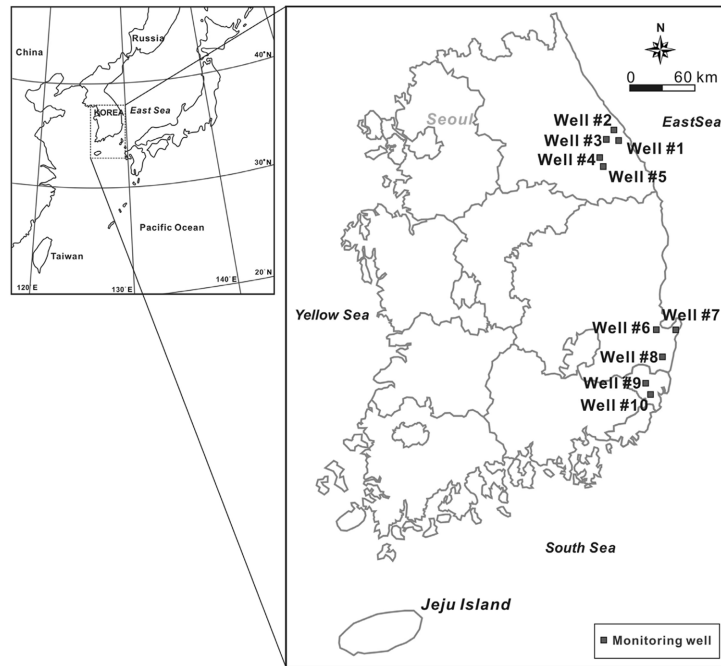


Fig. 1. Location map of the study area, showing the locations of monitoring wells.

Table 1. Summary of the physical parameters of and information on monitoring wells, including: (a) depth below the ground surface, (b) monitored data after well completion, (c) depth to water, and (d) low flow sampler (double valve pump).

Well	Well depth (BGS ^a , m)	Year of install.	Groundwater ^b level (DTW ^c , m)	Screen			Annular space		Dedicated equip.	
				Start/end (BGS, m)	Diameter (mm)	Material	Sealing	Filter pack	Sampler	Material/ Accessories
Well1	30	2007	12.82	21/30	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well2	30	2007	2.51	21/30	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well3	30	2007	3.57	21/30	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well4	34	2007	4.15	19/34	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well5	30	2007	5.10	15/30	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well6	30	2008	3.38	27/30	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well7	10	2008	4.61	7/10	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	-	12.7 mm Tube
Well8	80	2008	8.00	50/80	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well9	25	2008	5.51	20.5/25	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector
Well10	30	2008	6.03	21/30	100	PVC	Bentonite	Gravel and sand	DVP ^d	PE/6.35 mm Tube/ Connector

a: Below ground surface; b: Monitored data after well completion; c: Depth to water; d: Low flow sampler (double valve pump).

하기 위해서 100 mm의 내부 케이싱을 우물자재로 사용하고 있다. 측정망 관측정 설치방법은 국제적으로 표준화된 방법들을 적용하였다(Nielsen, 2006). 연구대상 관측정은 200~300 mm 구경으로 공압 타격 방식(air percussion)으로 목표심도까지 착정한 다음 내부케이싱이 설치되었다. 내부 케이싱은 관측대상 대수층 구간에만 유공관을 설치한 다음 유공관 주변에는 필터팩이 설치되었고, 무공관 주변에는 벤토나이트로 차수되었다. 관측정 설치가 완료된 다음 에어써징 및 양수(ASTM D5521-94; Driscoll, 1986; U.S. EPA, 1991; Nielsen, 2006)를 실시하여 설치과정에서 발생한 관측정 내부의 이물질을 제거하였다. 청소방법은 공기관을 측정망 내부에 넣고 상부에는 밀폐캡을 씌운 다음, 압축공기를 불어넣어서 물과 공기를 지상으로 뽑아 올리는 방법을 적용하였다. 지하수위 상부에서 시작해서 관측정 시설물 바닥으로 내리는 과정을 반복 진행하였다. 그리고 이번 연구대상 관측정 내부에는 지하수 시료간 교차오염 방지와 채취한 지하수 시료의 품질을 확보하기 위해서 고정식 시료채취가 설치되어 있다. Well 7 관측정과 같이 심도가 얇은 관측정의 경우 정량이송펌프(peristaltic pump)를 활용하여 채수될 수 있도록 구경 12.7 mm 튜브가 설치가 되어있다. 심도가 깊은 관측정의 경우는 저속양수펌프(low flow sampler) 및 구경 6.35 mm 튜브가 연결되어 있다. 고정식 관측장비의 운영방법은 Fig. 2와 같다.

그림에서 제시된 바와 같이 연구대상 관측정들은 정확한 지하수 수질측정값을 확보 또는 모니터링 하기 위해서 관측정 설치과정과 운영방법에서 일반적인 시설물보다 선도적인 방법이 적용되었다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 약 5년간 운영되면서 관측정 내부 케이싱 및 시료채취 장비에 이물질이 발생함에 따라 수질 이상값 또는 펌프 성능저하 등의 현상이 발생하여 그 정확성이 우려된다. 따라서 관측정 내부 케이싱의 청소, 측정장비의 청소 및 교체 등의 방법을 통해 수질변화를 측정하였다. 그리고 관측정 유지운영 관리에 적합한 주

기와 방법을 제시하기 위하여 해외 관련 사례를 조사하였다.

본 연구를 수행하기 위해서 각 관측정 내부 조사를 통해 설치이후 발생한 문제점을 파악하여 적절한 조치를 취하였다(Table 2). 각 관측정별로 조치 전후에 시료

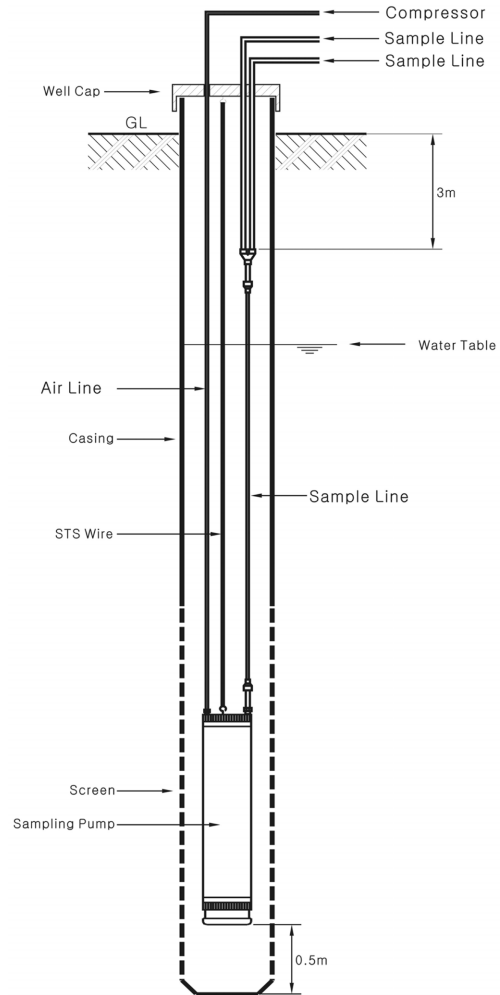


Fig. 2. Schematic illustration of the dedicated sampler (low flow sampler) in the monitoring well.

Table 2. Summary of the classification of abnormal phenomena and selected methods for making improvements to the monitoring wells.

Well number	Abnormal phenomenon	Improvements
Well 1, Well 2, Well 5, Well 10, Well 9	Absorption of clay material in or on pump	Pump washing
Well 3, Well 5, Well 6	Absorption of clay material in or on tubes	Pump tube replacement
Well 7, Well 4, Well 8	Absorption of clay material on well bottom & on inner casing	Well surging

를 분석하여 그 효과를 검토하였다. 각 관측정에서 발생한 현상에 대한 개선한 세부적인 방법은 각각 구분하여 아래에 설명하였다.

시료채취 펌프/튜브 점검 및 수질분석

Fig. 2와 같이 깊은 심도의 수질변화를 측정대상 관측정에 설치된 고정식 저속양수펌프는 부식에 강한 스테인리스스틸 재질로 크기가 직경 50 mm, 길이 700 mm이다. 장기간 관측정내에 설치되어 있었기 때문에 점토 광물 및 침전 이물질의 발생으로 펌프에 흡착하고, 변색되었다. 그리고 연구대상 관측정에 설치된 펌프에 연결된 시료채취 튜브는 외경 6.35 mm PE재질로 구성되어 있다. 튜브 역시 펌프와 마찬가지로 장기간 관측정 내부에 설치되어 있는 동안 지하수 용존 물질, 점토 물질 등이 내부로 유입된 물질에 의해 흡착 또는 변색되면 시료채취시 영향을 줄 수 있다.

펌프 및 튜브에 이물질이 흡착될 경우 흡착된 이물질에 의해 시료채취 과정에서 주 양·음이온 및 주요 중금속의 흡착, 탈착이 발생할 수 있으며 이로 인하여 수질결과에 농도 감소, 증가 등 부정확성을 초래할 수 있다. 특히, 표면에 부착된 점토 등 음(-)전하를 가진 이물질이 흡착되어 있다면 양(+)전하를 가진 주요 양이온이나 중금속의 흡착이 증가될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이물질 제거 전·후 수질변화를 측정하여 시료채취 펌프의 정기적인 인양 및 세척 또는 튜브 교체에 대한 필요성을 검토하였다. 펌프 인양 및 펌프 분해 후 고압세척기 및 깨끗한 솔을 활용하여 펌프에 흡착된 이물질 등을 세척하였다. 세척 완료 후 펌프를 재설치 및 정상가동 여부를 확인하였다. 펌프 세척에 활용된 고압세척기는 최대압력 135 bar, 토출량 5 L/min으로 펌프에 흡착된 이물질 세척이 가능하였다. 고압세척시 발생하는 세척액은 별도로 준비한 폐수통에 회수하여 세척에 따른 2차 오염을 방지하였다. 수질분석 항목은 현장분석과 실내분석으로 구분하여 분석하였고, 주로 주 양·음이온 및 중금속을 대상으로 분석하였다(Table 3).

관측정내 퇴적물 제거 및 수질분석

관측정 바다에 침전된 퇴적물 및 내부 케이싱 내부에 흡착된 이물질은 지하수 수질과 관측장비에 영향을 줄 수 있다(ASTM D5521-94; Driscoll, 1986; U.S. EPA, 1991; Nielsen, 2006.). 설치후 오랜 시간이 지나거나 설치지점의 토성이 점토질 성분이 우세한 경우 측정망 내부에 상당량의 점토물질이 퇴적될 수도 있다. 따라서 이러한 퇴적물 및 내부 케이싱에 흡착된 이물질을 제거하기 위해 관정청소(well surging)를 하고 수질변화를 측정하였다. 관정청소는 이러한 점토물질 및 침전 이물질의 제거와 관측정 주변에 설치된 필터팩 입자들을 재배열하여 투수성을 원상회복시키는 것이 주요 목적이다. 연구대상 관측정은 퇴적물의 두께가 1 m 이상 되는 지점을 선정하였다. 관정청소의 방법은 에어써징과 기계써징을 병행하였다. 에어써징(air surging)은 공내에 고압분사기를 삽입하고 물과 공기압을 이용하여 공벽 청소 및 공저에 쌓여있던 퇴적물과 함께 지하수를 관정 밖으로 배출하는 방법이다. 기계써징(brush surging)은 착정장비 로드(rod)에 브러쉬(brush)를 부착하여 관정 내부로 삽입, 상하 왕복 이동하면서 관정 내벽을 브러쉬로 세척하여 공벽의 이물질을 제거하는 방법이다.

연구결과

펌프세척 전·후 수질변화

펌프세척 후 수질변화를 관측한 관측정은 Well 1, 2, 5, 9, 10으로 그 분석 결과는 Table 4와 같다. 펌프청소 조치 전후의 수질유형의 변화와 수질농도의 변화를 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 수질유형은 펌프청소 전·후의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 4와 같이 수질농도의 변화를 살펴보면 마그네슘, 망간, 아연 등 일부 주 양이온 및 중금속 항목의 농도가 펌프세척한 다음 농도가 증가하였다. 펌프세척 과정을 통해 흡착원인을 제거함으로써 일부 양이온 또는 중금속의 농도가 증가한 것으로 판단된다.

Table 3. Analyzed chemical and physical items of the monitoring wells.

Lab/Field	Analysis items	
Lab. analysis	Major ion	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻ , HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻
	Heavy metal	Pb, Cu, Zn, Fe, Mn, Al
	etc.	Turbidity, NH ₄ -N
Field analysis	pH, EC, DO, Eh, Temp.	

Table 4. Groundwater quality results before and after various improvements to the wells.

Well No.	Improvements		DTW (m)	pH	EC (S/cm)	DO (mg/L)	Eh (mV)	Temp. (°C)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)
1	Before	Pump washing	12.8	6.30	979	5.99	400.1	15.6	12.6	1.8	96.4	49.5
1	After	Pump washing	12.4	5.92	1,008	5.58	360.9	13.8	12.5	1.5	91.4	60.1
2	Before	Pump washing	2.0	7.59	2,936	0.57	128.5	17.1	468.8	12.3	5.1	28.8
2	After	Pump washing	2.3	7.37	3,410	0.7	118.1	16.1	518.0	11.1	10.5	31.8
3	Before	Tube replacement	3.5	6.78	221.3	0.15	6.1	17.4	15.1	1.6	1.7	3.8
3	After	Tube replacement	3.5	6.55	224.0	0.13	110.3	15.1	18.9	1.4	1.9	4.5
4	Before	Well surging	3.7	8.44	876	0.1	-110.5	16.2	142.0	5.8	2.3	2.5
4	After	Well surging	4.0	7.55	662	3.3	251.8	14.0	85.7	5.9	28.5	12.0
5	Before	Pump washing Tube replacement	4.9	7.01	427	3.33	243.7	18.2	8.2	6.9	57.0	9.3
5	After	Pump washing Tube replacement	5.1	6.89	436	5.29	226.4	14.7	11.5	5.8	48.3	11.8
6	Before	Tube replacement	4.1	7.94	2,860	0.09	25.0	16.4	364.8	52.0	49.9	49.1
6	After	Tube replacement	4.0	8.05	3,800	0.09	38.6	15.5	546.2	51.2	43.7	65.1
7	Before	Well surging	4.4	6.41	410	4.64	388.5	20.0	20.6	4.8	22.5	8.3
7	After	Well surging	4.5	7.06	350	6.16	380.5	19.9	20.3	3.8	20.5	9.4
8	Before	Well surging	5.7	7.76	422	0.7	116.5	24.2	54.8	2.7	8.0	3.8
8	After	Well surging	6.9	8.22	415	2.03	426.6	12.6	63.9	2.2	10.2	3.7
9	Before	Pump washing	5.2	5.58	712	2.22	403.6	16.9	41.1	7.2	23.4	21.4
9	After	Pump washing	5.2	6.21	708	2.82	422.0	16.3	39.6	7.6	23.6	24.7
10	Before	Pump washing	6.1	6.89	656	0.35	331.0	16.3	17.7	1.2	57.2	26.8
10	After	Pump washing	6.2	7.46	666	0.26	241.3	16.0	19.1	1.3	46.8	30.6

Well No.	Improvements		Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Al (mg/L)	Turbidity (NTU)
1	Before	Pump washing	7.9	461.9	30.0	0.0	2.5	0.098	0	0	0	0.29
1	After	Pump washing	7.9	480.5	36.0	0.0	2.4	0.111	0	0	0.1	9.65
2	Before	Pump washing	735.8	107.5	108.0	0.0	0.0	0.011	0	0.47	0	0.94
2	After	Pump washing	815.1	116.6	108.0	0.0	1.4	0.107	0.36	0.72	0.07	0.95
3	Before	Tube replacement	27.4	0.0	38.0	0.0	0.0	0.028	5.88	0.74	0.02	60.8
3	After	Tube replacement	27.7	0.0	48.0	0.0	0.8	0.039	10.52	1.17	0.06	61.8
4	Before	Well surging	32.5	1.5	319.0	0.0	0.8	0.008	0.012	0.01	0	0.33
4	After	Well surging	23.6	16.8	266.0	0.0	17.3	0.661	0	0.18	0.04	10.7
5	Before	Pump washing Tube replacement	12.6	33.2	169.0	0.0	16.0	1.41	0	0.21	0	10.4
5	After	Pump washing Tube replacement	12.3	32.4	150.0	0.0	19.6	1.784	0	0.36	0	0.77
6	Before	Tube replacement	569.3	9.5	486.0	0.0	2.3	0	0.06	0.14	0	0.89
6	After	Tube replacement	800.2	3.4	607.0	0.0	1.6	0	0	0.14	0	0.94
7	Before	Well surging	30.5	46.8	60.0	0.0	3.2	0	0	0	0	0.39
7	After	Well surging	22.7	43.2	54.0	0.0	7.3	0	0	0	0	5.01
8	Before	Well surging	5.7	6.7	186.0	0.0	1.9	0.445	0	0.1	0.04	101
8	After	Well surging	5.2	6.4	188.0	0.0	1.5	0.611	0.29	0.16	0.32	217
9	Before	Pump washing	88.9	76.7	37.0	0.0	39.9	0.076	0	0.05	0	0.27
9	After	Pump washing	88.7	71.4	49.0	0.0	37.3	0.21	0	0.05	0	0.96
10	Before	Pump washing	45.4	7.2	239.0	0.0	3.3	0	0	0.2	0	0.3
10	After	Pump washing	41.5	5.2	245.0	0.0	2.1	0	0	0.1	0	0.95

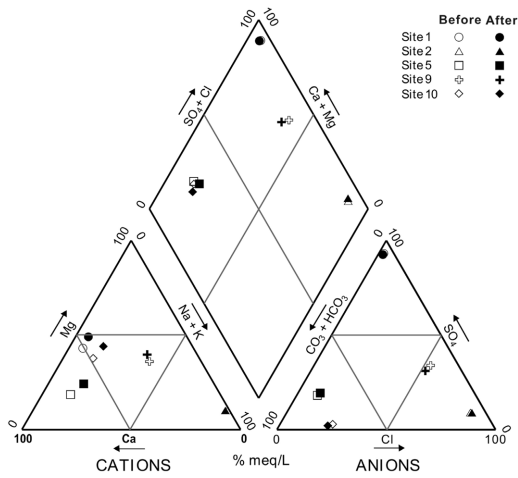


Fig. 3. Piper diagram of variations in groundwater quality before and after pump washing.

펌프 튜브교체 전·후 수질변화

튜브교체 후 수질변화를 관측한 관측정은 Well 3, 5, 6으로 그 분석 결과는 Table 4와 같다. 시설개선 조치 전후의 수질유형의 변화와 수질농도의 변화를 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 튜브교체 전·후에 수질유형 변화는 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 6과 같이 수질농도 변화를 살펴보면 나트륨, 마그네슘, 망간, 아연 등 일부 주양이온 및 중금속 항목의 농도가 튜브를 교체한 다음에 농도가 증가하였다.

관측정 청소 전·후 수질변화

본 연구대상 관측정은 증장기적으로 운영하는 것으로 계획된 관측정 중에서 설치년도가 오래되고, 공내 침전물의 퇴적두께가 1m 이상 되는 관측정을 선정하였다. Well 4, 7, 8를 대상으로 관정청소를 수행한 다음, 관측정내 퇴적물 및 내부 케이싱 벽면에 붙은 이물질을 제

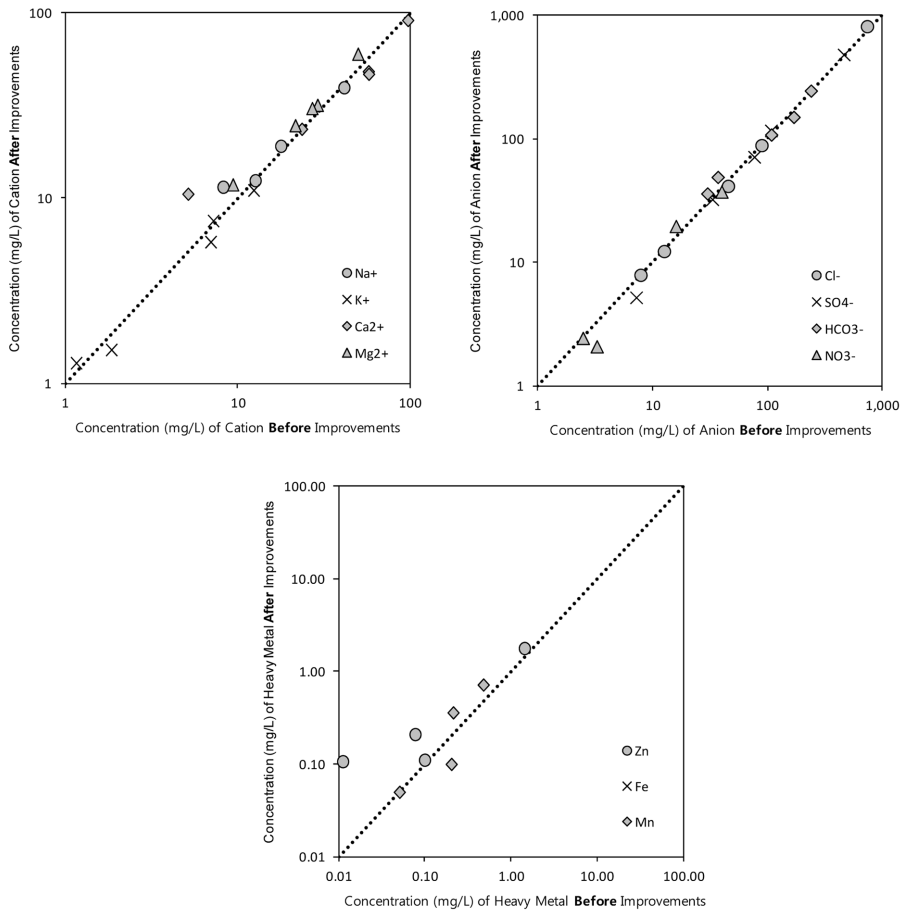


Fig. 4. Concentration changes in the chemical components before and after pump washing.

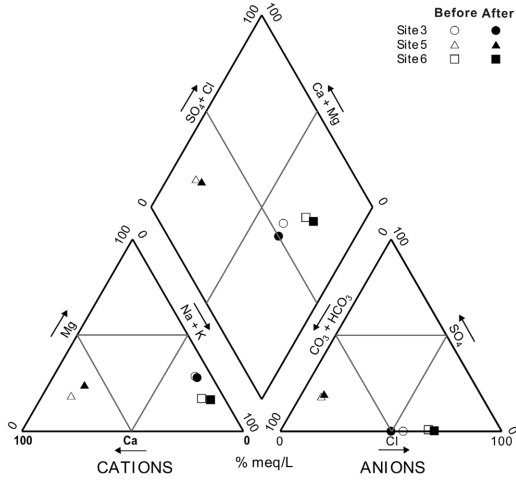


Fig. 5. Piper diagram of variations in groundwater quality before and after tube replacement.

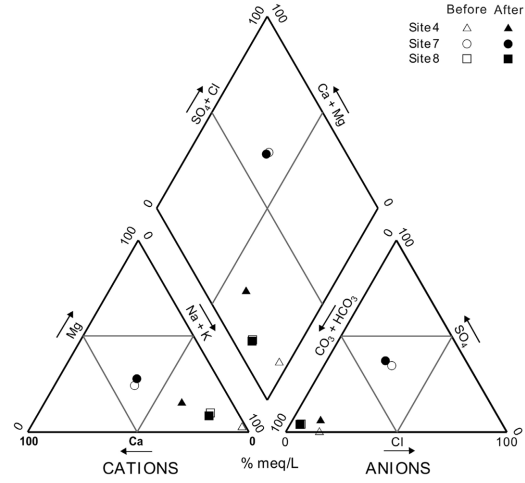


Fig. 7. Piper diagram of variations in groundwater quality before and after well surging.

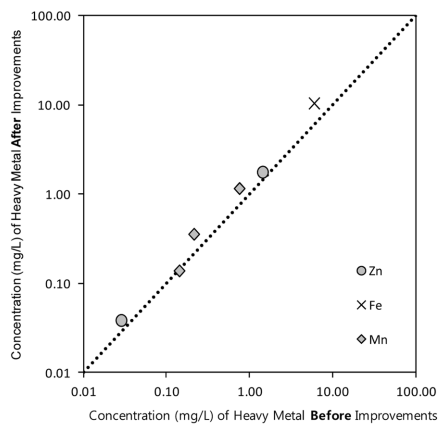
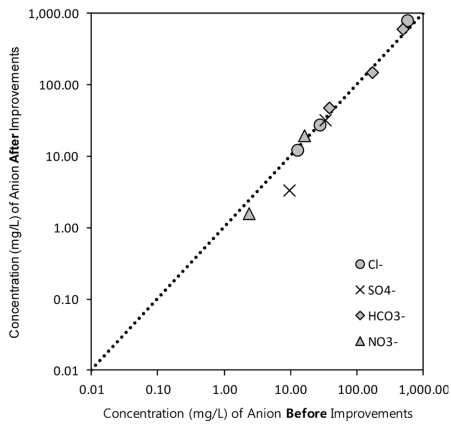
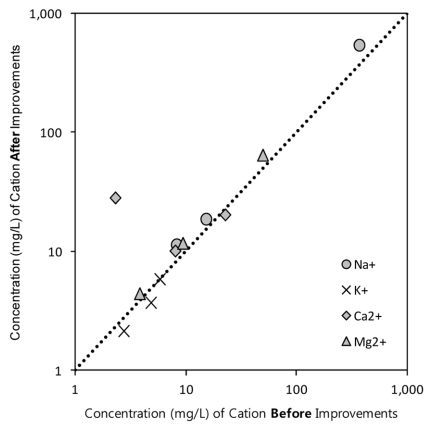


Fig. 6. Concentration changes in the chemical components before and after tube replacement.

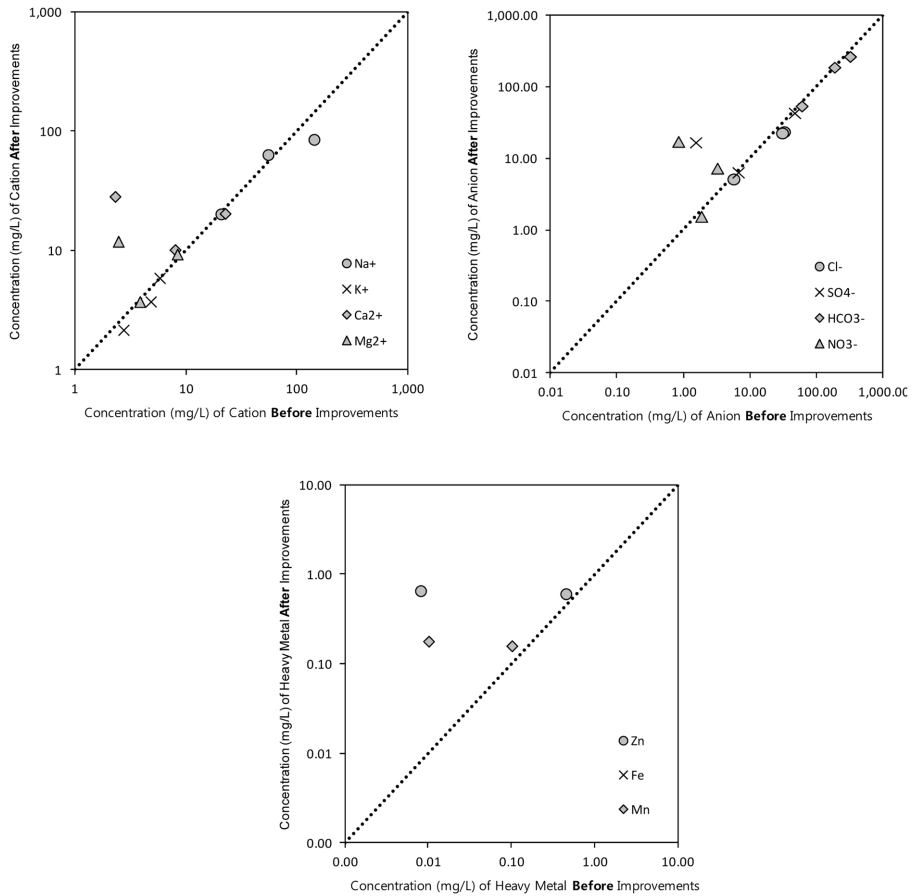


Fig. 8. Concentration changes in the chemical components before and after well surging.

거하고 투수성을 원상회복시켰다. 관정청소 후 수질분석 결과는 Table 4와 같다. 관정청소 전·후의 수질유형 변화와 수질농도 변화를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 펌프청소와 튜브교체 경우와 같이 수질유형의 변화는 나타나지 않았다. 그리고, 수질농도 변화도 펌프청소와 튜브교체 경우처럼 나트륨, 마그네슘, 망간, 아연 등 일부 주양이온 및 중금속 항목의 농도가 증가하였다. 이것 역시 관측정 내부를 청소함으로써 흡착요인이 제거되었을 것으로 판단된다.

고찰

중장기적으로 운영하는 관측정을 대상으로 시료채취용 펌프 세척(5개소), 펌프 튜브 교체(3개소) 및 관측정 내부 청소(3개소)를 수행하고 수질변화를 관측하였다. 일

부 양이온과 중금속 항목이 농도가 증가하는 추세로 나타났다. 이러한 현상은 흡착요인을 제거하였기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 펌프, 튜브 및 스크린에 흡착된 이물질의 주성분이 철 또는 망간의 수산화물을 동반한 탄산칼슘 또는 점토광물이라면, 지하수내 중금속의 흡착이 발생할 수 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 탄산칼슘은 물속에 중금속을 제거하는데 흡착제로 사용된다. 그리고 점토물질은 음(-)전하를 띠기 때문에 양이온들을 잘 흡착하는 것으로 알려졌다(Um et al., 2002).

양이온 교환능력, 전하량 및 수소이온농도 등 조건에 다소 차이가 있지만 대체로 점토물질들은 높은 중금속 흡착효율을 보이는 것으로 알려져 있다(Moon et al., 2005). 시설개선을 통해 흡착원인을 제거함으로써 일부 양이온 또는 중금속의 농도가 증가한 것으로 판단된다.

그러나 농도의 변화는 일시적인 농도변화일 수도 있

Table 5. Frequency of concentration trends for each chemical component after pump washing.

Cation	Increase	Decrease	Coincident	N.M. ^a	Heavy metal	Increase	Decrease	Coincident	N.M.	Anion	Increase	Decrease	Coincident	N.M.
Na ⁺	3	2	0	0	Zn	4	0	0	1	Cl ⁻	2	3	0	0
K ⁺	2	3	0	0	Fe	1	0	4	0	SO ₄ ²⁻	2	3	0	0
Ca ²⁺	2	3	0	0	Mn	2	1	2	0	HCO ₃ ⁻	3	1	0	1
Mg ²⁺	5	0	0	0	Al	2	0	3	0	NO ₃ ⁻	2	3	0	0
sum	12	8	0	0	sum	9	1	9	1	sum	9	10	0	1

a: Not monitored

Table 6. Frequency of concentration trends for each chemical component after tube replacement.

Cation	Increase	Decrease	Coincident	N.M.	Heavy metal	Increase	Decrease	Coincident	N.M.	Anion	Increase	Decrease	Coincident	N.M.
Na ⁺	3	0	0	0	Zn	2	0	0	1	Cl ⁻	2	1	0	0
K ⁺	0	3	0	0	Fe	1	1	1	0	SO ₄ ²⁻	0	2	1	0
Ca ²⁺	1	2	0	0	Mn	2	0	1	0	HCO ₃ ⁻	2	1	0	0
Mg ²⁺	3	0	0	0	Al	1	0	2	0	NO ₃ ⁻	2	1	0	0
sum	7	5	0	0	sum	6	1	4	1	sum	6	5	1	0

a: Not monitored

Table 7. Frequency of concentration trends for each chemical component after well surging.

Cation	Increase	Decrease	Coincident	N.M.	Heavy metal	Increase	Decrease	Coincident	N.M.	Anion	Increase	Decrease	Coincident	N.M.
Na ⁺	1	2	0	0	Zn	2	0	0	1	Cl ⁻	0	3	0	0
K ⁺	1	2	0	0	Fe	1	0	2	0	SO ₄ ²⁻	1	2	0	0
Ca ²⁺	2	1	0	0	Mn	2	0	1	0	HCO ₃ ⁻	1	2	0	0
Mg ²⁺	2	1	0	0	Al	2	0	1	0	NO ₃ ⁻	2	1	0	0
sum	6	6	0	0	sum	7	0	4	1	sum	4	8	0	0

a: Not monitored

고, 지하수 환경의 변화 또는 계절적 변화 등 자연적으로 변화하는 특성일 수 있다. 따라서, 전체적으로 항목별로 농도의 증가여부를 검토하였다. 시설개선 내용별로 양이온, 중금속, 음이온으로 구분한 다음 시설개선 전과 비교해서 농도의 증가, 감소, 일치 발생회수를 검토하였다. 그 결과는 Table 5, 6, 7과 같다.

Table 5, 6, 7를 검토한 결과, 수질변화는 주양이온과 중금속 항목에서 4분기의 농도가 3분기보다 증가한 회수가 많은 것으로 나타났다. 주음이온에서는 증가/감소 회수가 같은 수준으로 나타났기 때문에 증가 경향이나 감소경향을 판단할 수가 없었다. 주양이온과 중금속 중에서도 증가 경향 회수가 많이 나타난 항목은 마그네슘, 아연, 망간이고, 그 평균 농도변화도 확연히 구분된다 (Fig. 9).

Fig. 10은 양이온이나 중금속의 흡착요인을 제거하여 농도가 높게 검출되는 개념도를 도시한 것이다. 이 항목들은 시설개선 전에는 관측정 내부의 펌프, 튜브 및 스크린 벽면에 붙어있는 점토광물이나 탄산칼슘에 잘 흡착되어 정확한 농도 관측이 되지 않는 것으로 판단된다. 그러나 일부 양이온 및 중금속에 변동이 없거나 미량으로 감소하는 현상도 있었다. 본 연구가 1차레만 수질분석이 되어 이러한 현상으로 설명하는데 한계가 있다. 따라서 향후 여러 관측정을 대상으로 추가적인 수질분석과 함께 증장기적 모니터링 자료를 토대로 자료검토가 필요하다.

증장기적으로 운영하는 관측정의 경우 적절한 유지관리가 필요하다. 국내 관련 법령 및 지하수 관련 보고서와 해외사례(U.S. EPA, 1988)를 검토하여 증장기적으로

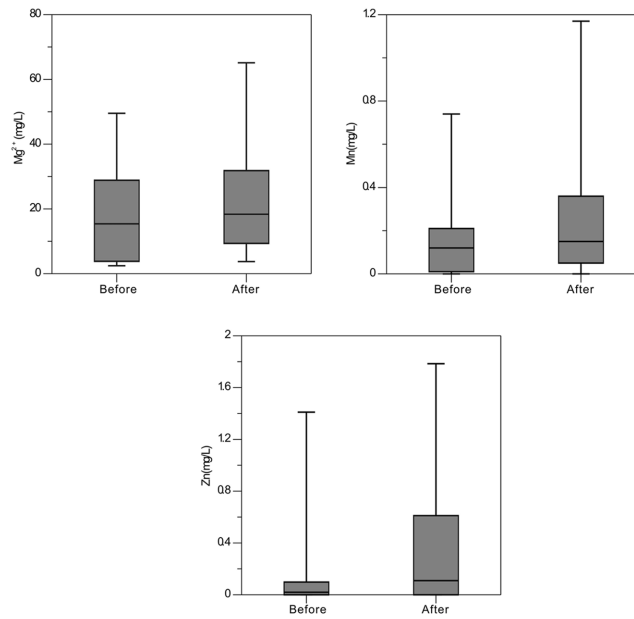


Fig. 9. Average concentration change of chemical components (Mg, Mn, and Zn) before and after various improvements to the wells.

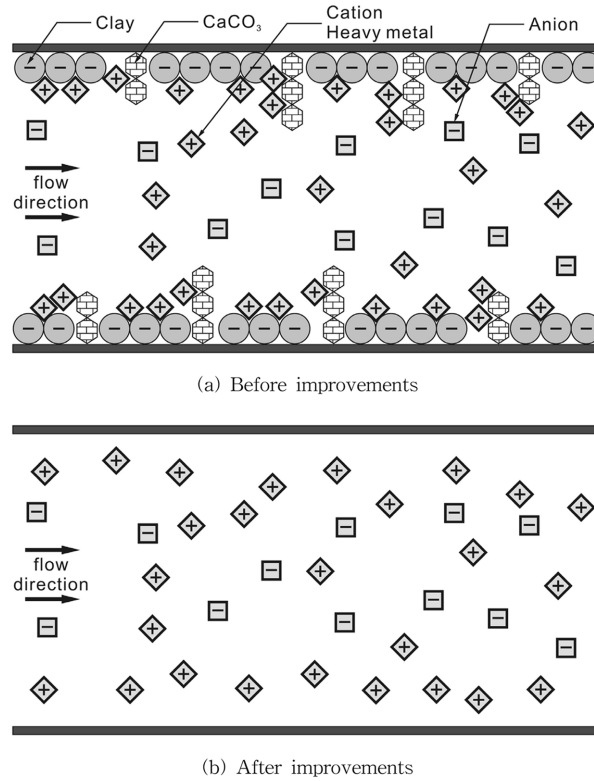


Fig. 10. Schematic illustrations showing the reaction model before and after various improvements to the wells.

운영시 유지관리 방안을 아래와 같이 제시하였다. 단, 여기서 제시하는 점검후 조치를 취하는 주기는 절대적인 값이 아니라 이번 연구대상 관측정들의 설치년도를 고려하여 제시하는 주기임을 밝힌다.

시료채취 펌프 또는 장비 점검은 1년마다 시행하고 점검시 이물질 흡착 및 변색 등 이상이 발생되면 세척을 실시하여야 한다. 본 연구에서 시료채취펌프에 물질이 부착되거나 변색이 되었던 지점은 모두 설치이후 4~5년이 경과한 지점이다. 따라서 4~5년에 1회씩 수행하는 것을 바람직한 것으로 판단된다. 시료채취 튜브 등 소모품들은 최소한 1년마다 점검하고, 점검시 이물질 흡착 및 변색 등 이상이 발생되면 교체하도록 한다. 시료채취 튜브의 유지 방안은 시료채취 펌프의 유지방안과 거의 내용이 일치한다. 이것은 시료채취펌프 및 튜브에 부착된 이물질 발생요인이 유사하고, 이것이 야기시키는 수질결과도 거의 동일하기 때문이다. 1년에 한 번씩 시료채취펌프 인양시 관측정 심도를 측정한다. 시료채취장비 인양시 실시하는 이유는 정확한 심도를 측정하기 위해서 관측정 내부에 설치된 시료채취장비 제거가 필수이기 때문이다. 관측정 청소는 퇴적물이 1m 이상 발생되면 실시하되, 4~5년에 1회씩 수행하는 것을 바람직한 것으로 판단된다.

요약 및 결론

지하수 관측정 설치이후 수년간 방치할 경우 정확한 수질 관측이 어렵다. 관측정 내부에 발생하는 화학적 침전 및 점토 광물의 유입으로 인해 발생하는 지하수 수질변화에 대하여 연구하고 그 결과를 토대로 중장기적 관리방안을 검토하였다. 설치년도가 오래되고 관측정 내부에 이물질이 많이 형성된 관측정 10개를 연구대상으로 선정하였다. 10개의 관측정을 시료채취 장비(펌프) 세척, 시료채취 튜브 교체, 관측정 내부청소로 분류해서 각 조치 전·후의 주양음이온과 중금속 농도의 변화를 검토하였다. 그 결과 시설개선 후에 마그네슘, 아연, 망간 항목이 증가하는 경향으로 나타났다. 이것은 관측정 설치후 시간이 경과하면서 탄산칼슘과 같이 지하수내 용존된 탄산염의 침전이나, 점토광물에 의해 이물질이 관측정 내부에 생성될 수 있다. 세척, 교체, 관측정 청소를 통해 양이온이나 중금속이 잘 흡착할 수 있는 환경적 요인을 제거하면 양이온, 중금속의 농도가 증가하였다. 따라서, 중장기적으로 운영이 계획된 지하수수질측정망 관측정의 경우는 매년 수질측정을 실시하고 있으므로 이

들 수질결과를 토대로 정기적으로 관측정 시설 및 내부 점검을 실시하고 이상 현상이 발생시 시설개선 조치를 취하는 것이 추천되며, 본 조사결과에 따라 가능하다면 최소 약 4~5년마다 수행하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다. 또한 향후에 이러한 지하수수질측정망 관측정에 대하여 지속적으로 수질측정과 모니터링을 통해 관측정 시설개선에 따른 수질변화와 유지관리에 대한 특성을 좀 더 명확하게 파악할 필요가 있다.

References

- Ahmad, K., Bhatti, I. A., Muneer, M., Iqbal, M., and Iqbal, Z., 2012, Removal of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Cd, Cu and Fe) in aqueous media by calcium carbonate as an adsorbent, *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 2, 48-53.
- Appelo, C. A. J. and Postma, D., 1993, *Geochemistry, groundwater and pollution*, Brookfield, 536p.
- ASTM D5521-94; standard guide for development of ground-water monitoring well in granular aquifer.
- Charette, M. A. and Sholkovitz, E. R., 2002, Oxidative precipitation of groundwater-derived ferrous iron in the subterranean estuary of a coastal bay, *Geophysical research letters*, 29, 85-1~4.
- Driscoll, F. G., 1986, *Groundwater and wells*, Johnson Screens, 1089p.
- Jo, Y. J., Lee, J. Y., Choi, M. J., and Cho, B. W., 2010, Characteristics of seepage water and groundwater in Incheon coastal LPG storage cavern, *Journal of Engineering Geology*, 20, 1, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Kim, G. B. and Yum, B. W., 2007, Classification and characterization for water level time series of shallow wells at the national groundwater monitoring stations, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 12, 5, 87-97 (in Korean with English abstract).
- Kim, T. Y., Kim, M. S., Min, B. J., Park, K. M., Cho, S. Y., and Kim, S. J., 2008, Removal of heavy metal ions from aqueous solution using oyster shell, *Journal of Advanced Engineering and Technology*, 1, 2, 395-400 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. S., Chon, H. T., Lee, J. U., Chun, G. T., Je, H. K., Oh, S. J., and Lee, K. J., 2005, Study on hydrogeochemical and microbiological characteristics for stable maintenance of hydrocarbon storage cavern site in Korea, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, 42(4), 354-370 (in Korean with English abstract).
- Ma, X., Li, L., Yang, L., Su, C., Wang, K., Yuan, S. and Zhou, J., 2012, Adsorption of heavy metal ions using hierarchical CaCO₃-maltosemeso/macroporous hybrid materials: Adsorption isotherms and kinetic studies, *Journal of Hazardous Materials*, 209-210, 467-477.
- MCT and K water, 2004, *Groundwater in Korea 2004*, 869p (in Korean).
- MCT and K water, 2005, *Groundwater in Korea 2005*,

- 955p (in Korean).
 MCT and K water, 2006, Groundwater in Korea 2006, 1024p (in Korean).
 MoE, 2007, Groundwater quality monitoring plan in Korea 2007, 171p (in Korean).
 Moon, J. H., Choi, C. H., Ryu, B. R., and Kim, C. G., 2005, Adsorption of anionic species on clay minerals, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 27, 10, 1058-1067 (in Korean with English abstract).
 Mustafa, S., Irshad, M., Waseem, M., Shah, K. H., Rashid, U., and Rehman, W., 2013, Adsorption of heavy metal ions in ternary systems onto Fe(OH)₃, Korean Journal of Chemical Engineering, 30, 2235-2240.
 Nielsen, D. M., 2006, Practice Handbook of Environmental site characterization and ground-water monitoring, CRC, 1328p.
 Park, J. K., Kim, R. H., Lee, J. Y., Choi, D. H., and Kim, T. D., 2007, Evaluation of status of groundwater quality monitoring network of Korea : implication for improvement, Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment, 12, 6, 92-99 (in Korean with English abstract).
 Um, T. H., Kim, Y. T., Lee, K. G., Kim, Y. J., Kang, S. G., and Kim, J. H., 2002, Properties of heavy metal adsorption of clay minerals, Journal of the Korean Ceramic Society, 39, 7, 663-668 (in Korean with English abstract).
 U.S. EPA, 1988, Operation and maintenance inspection guide : RCRA groundwater monitoring systems.
 U.S. EPA, 1991, Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells, EPA160014-891034.
 Yong, R. N. and Warkentin., B. P., 1966, Introduction of Soil Behavior, Macmillan, New York.

김정우

지오그린21

152-719 서울특별시 구로구 디지털로 33길 55 이앤씨벤처드림타워2차 901호

Tel: 02) 6330-2500

E-mail: wjd99@hanmail.net

서용교

한국환경공단 토양지하수처 지하수관리팀

404-708 인천광역시 서구 경서동 종합환경연구단지

Tel: 032) 590-3870

E-mail: yong2299@hanmail.net

김락현

한국환경공단 토양지하수처 지하수관리팀

404-708 인천광역시 서구 경서동 종합환경연구단지

Tel: 032) 590-3871

E-mail: acezeta@korea.com

천정용

지오그린21

152-719 서울특별시 구로구 디지털로 33길 55 이앤씨벤처드림타워2차 901호

Tel: 02) 6330-2500

E-mail: cildon@daum.net