

ORIGINAL ARTICLE

수리지질학적 과학수사 기법에 의한 도로 터널이 지하수 변화에 미치는 영향

윤설민¹⁾ · 함세영^{2),3)*}

¹⁾한국건설기술연구원 수자원하천연구본부, ²⁾부산대학교 지질환경과학과, ³⁾㈜지오사이언스

Influence of Road Tunnel on Groundwater Change Determined Using Forensic Hydrogeological Technique

Sul-Min Yun¹⁾, Se-Yeong Hamm^{2),3)*}

¹⁾Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

²⁾Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

³⁾Geoscience Co., Busan 48058, Korea

Abstract

Scientific forensic techniques are used to verify environmental impact of groundwater pollution, surface water pollution, air pollution, noise, and vibration according to residents' complaints in connection with construction and civil engineering works. In this study, we investigated the contamination of groundwater and the lowering of the groundwater level in an area surrounding a tunnel excavation site for the Andong-Yeongdeok national road, using a forensic hydrogeological technique. We reviewed the groundwater level and water quality of well GW1 in the area surrounding the tunnel excavation site as well as tunnel construction information and then we analyzed the correlations among the obtained data. Before tunnel excavation, the water level of well GW1 was lower than the tunnel elevation. Considering the relationship between the precipitation, tunnel discharge, tunnel depth, and groundwater level of well GW1, the groundwater flowed from the tunnel to well GW1. Moreover, the tunnel discharge and groundwater levels were not related to each other. The pH of well GW1 was 8.4 before tunnel excavation. During excavation, the pH declined to 8.1-8.2 at the beginning, and increased to 8.8 at the end of the excavation. The fluorine concentration in well GW1 was 2.49 mg/L, 1.91-3.22 mg/L, and 1.7-2.67 mg/L, respectively, before, during, and after the excavation. The sulfate ion concentration was very high, over 2,000 mg/L, before and during the excavation; after the excavation, it was between 200 and 323 mg/L. Turbidity was 1.47, 10.5, and 4.51 NTU before, during, and after tunnel excavation, respectively. Therefore, the excavation of this tunnel is not related to the groundwater quality of well GW1.

Key words : Forensic hydrogeological technique, Hydrogeology, Groundwater level, Groundwater quality, Road tunnel

Received 15 March, 2024; Revised 16 April, 2024;

Accepted 22 April, 2024

*Corresponding author : Se-Yeong Hamm, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea.

Phone : +82-51-510-2161

E-mail : hsy@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

1. 서론

과학수사는 어떤 사실의 근원과 원인을 밝히는 것이며(Ramirez and Herrera, 2016), 과학수사학적 수문학은 Woodhousd(2007)에 의해서 도입되었다. 그 후 Witte et al.(2018)은 과학수사학적 방법을 이용하여 네덜란드 Noord Brabant 지역의 지하수위 하강 원인을 밝혀냈다. 최근 우리나라에서도 건설, 토목 공사 등과 관련하여 지하수 오염, 지표수 오염, 대기 오염, 소음, 진동과 같은 여러 환경분야에서 많은 민원이 제기되고 있다. Sutliff-Johansson et al.(2020)은 과학수사 기법을 적용하여 스웨덴 북부지역 Skellefteå,의 Rönnskär Cu-Pb-Zn 제련소 주변에 위치하는 4개의 지하수 감시공과 6개 폐석장에서 확인된 중금속 오염의 오염원을 분석하였다. 이를 위하여 요소추출 분석과 다변량 통계기법을 적용하였다.

도시화·산업화에 따라 환경오염은 확대되고 있으며 환경훼손은 점점 심각해지고 있다. 이와 관련하여 최근 들어서 국내에서는 환경오염으로 인한 피해자와 가해자 사이의 다툼으로 인한 분쟁 사례가 늘어나고 있다. 환경분쟁조정법에서는 대기, 수질, 토양, 해양 오염과 악취, 소음·진동, 자연생태계 파괴, 일조·통풍방해, 조망저해, 인공조명에 의한 빛 공해, 진동으로 인한 지반침하 등 환경오염으로 인한 건강상, 재산상의 피해와 하수처리장, 쓰레기처리시설 등의 설치 및 관리와 관련된 환경분쟁을 다루고 있다. 환경분쟁조정법(법률 제307 8호, 1977년 12월 31일 제정)은 환경분쟁조정위원회의 설치를 규정하고 있으며, 환경분쟁조정위원회에서는 환경분쟁을 조정하기 위해서 노력하고 있다. 이에 따라 분쟁조정제도는 행정기관으로 하여금 객관적인 입장에서 피해자와 가해자 간의 환경분쟁을 조정하도록 하고 있다.

터널굴착은 많은 환경적 영향(터널 내 유출수 발생, 지하수위 고갈, 지반 침하, 터널 내 대기질 저하 및 환기로 인한 외부 영향, 터널 내 차량 통행으로 소음과 진동의 영향, 터널 상부의 식생에 미치는 영향 등)을 유발할 수 있다(Jeon et al., 2018). 터널 굴착에 따른 유출량 조사 및 해석과 관련하여, Chiocchini and Castaldi(2011)는 지질 및 수리지질 조사, 시추, 지구물리, 암반역학, 미고생물학적 분석을 통하여 이태리의 Santa Croce, Moro, Cintoni, S. Giovanni, Diavolo 터널의 수리지질학적 특성을 규명하였다. Moon and Fernandez(2010)은 이론식에 근거하여 터널 굴착에 따른 지하수위 하강과 암

반의 투수율 감소를 고려한 지하수 유출량을 산정하였으며 이를 실제 유출량과 비교하였다. Lee et al.(2001)은 영천도수로 터널 굴착에 따른 터널 내 지하수 유출량을 측정하고, 지하수 유출량과 단열의 관련성을 확인하였으며 이를 지하수 모델링으로 모사하였다. Cheong et al.(2015)은 부산시 금정터널 주변의 장기적인 지하수위 모니터링과 터널 내 지하수유출량에 따른 기저유출량 변화를 평가하고 이를 지하수 모델링을 이용하여 모사하였다. 또한 Jeon et al.(2018)은 울산-포항 복선전철 공사 지역의 터널 굴착과 관련하여 야외조사, 수질분석, 추적자시험, 지하수 모델링을 통하여 터널 굴착에 의한 저수지 및 계곡수 고갈의 관계를 밝혔다.

국내에서 Park and Kim(2018)은 해안매립지역의 석유계 탄화수소 오염을 지하수 조사와 모델링 그리고 토양분석의 과학수사 기법으로 규명하기도 하였지만, 여전히 수리지질학적 과학수사 기법에 의한 지하수 연구 사례는 거의 없다. 본 연구에서는 안동-영덕 국도건설공사에 따른 터널 공사로 인한 주변지역의 지하수 오염 및 지하수위 하강의 관련성을 수리지질학적 과학수사 기법으로 고찰하였다. 이를 위하여 주변지역 지하수공의 지하수위 및 수질, 수문, 터널 공사 자료를 검토하고 이들의 상관관계를 분석하였다.

2. 연구지역

연구지역(경북 청송군 진보면 괴정리 00휴게소)의 지하수공(GW1)은 2017년 3월 9일에 굴착되었으며, 공 심도는 400 m(지표 해발고도는 333.79 m)이다. 지하수는 음용가능한 생활용수로 사용되었으며(Fig. 1), 추정 양수량은 32 m³/day이다. GW1 공은 펜션건물 바로 뒤에 위치하고 있으며, 황장재 터널과 GW1 공 간의 거리는 약 126.7 m이다(Fig. 1). 00휴게소 건물 부지에는 GW2 공(100 m 심도, 1992년~2017년)과 GW3 공(심도 250 m, 2010년~2021년 5월)을 사용하였으나, 현재는 상태이다. 또한 주변에는 마을 지하수공, CSW750 공(Ministry of Environment, 2019)이 위치하고 있다(Fig. 1). 황장재 터널 굴착 전 GW1 공의 최초 지하수위는 터널의 해발고도 보다 낮았다.

연구지역의 지질은 중생대 백악기 낙동층군에 속하는 적색사암으로 이루어져 있으며(Lee and Hong, 1973), 안동-영덕 국도건설공사 지반조사 보고서의 주장도에 의하면 사암과 셰일이 나타난다. 황장재 터널 동

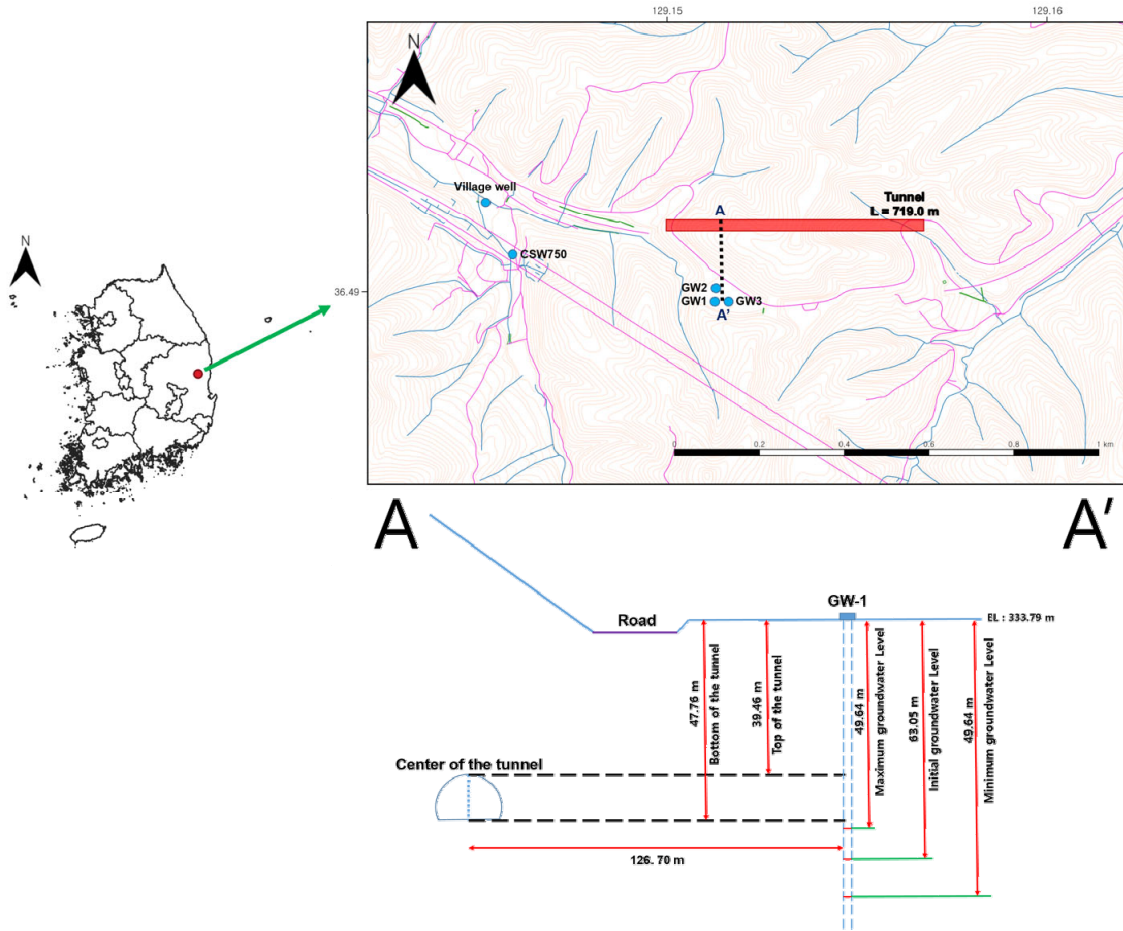


Fig. 1. Location of the study area with GW1 well and tunnel.

측 입구의 지질 역시 해당 연구지역의 지질과 같으며, 수조의 단층이 확인된다.

3. 연구결과

안동-영덕 국도건설공사에 따른 터널 공사로 인한 주변지역의 지하수 오염 및 지하수위 하강의 관련성을 분석하기 위해서 GW1공의 터널 굴착에 따른 지하수위 변동과 지하수 수질 변화를 검토하였다. GW1 공의 지하수위 변동 원인을 규명하기 위해서는 강수량 및 터널 배출수와 GW1 공의 지하수위의 인과관계를 검토하였다. 또한 터널 굴착에 따른 GW1 공의 지하수 수질 변화 원인을 파악하였다.

3.1. GW1 공 지하수위 변동

황장재 터널 바닥 심도는 해발 286.03 m이고, GW1 공의 최고 수위는 해발 280.77 m이다. 따라서 지하수위는 터널 바닥 심도보다 낮다. 따라서, 황장재 터널과 GW1 공의 지하수위의 관계로 볼 때, 굴착 이전에 지하수 흐름은 터널 쪽에서 GW1 공 방향으로 일어나고 있었다. GW1 공의 지하수위는 굴착 중단기간을 포함하는 황장재 터널의 전체 굴착공사 기간(2018.12.17. ~ 2019.12.31, 굴착 중단 기간 포함)에 최대 23.33 m 하강하였으며(Fig 2, Table 1), 지하수위 하강은 갈수기와 겹쳐 나타났다. 강수량은 2018년에 1139.7 mm, 2019년에 983.3 mm로 2018년의 강수량이 더 많다(Fig. 2). 또한, 2018년 11월 강수량이 33 mm, 2019

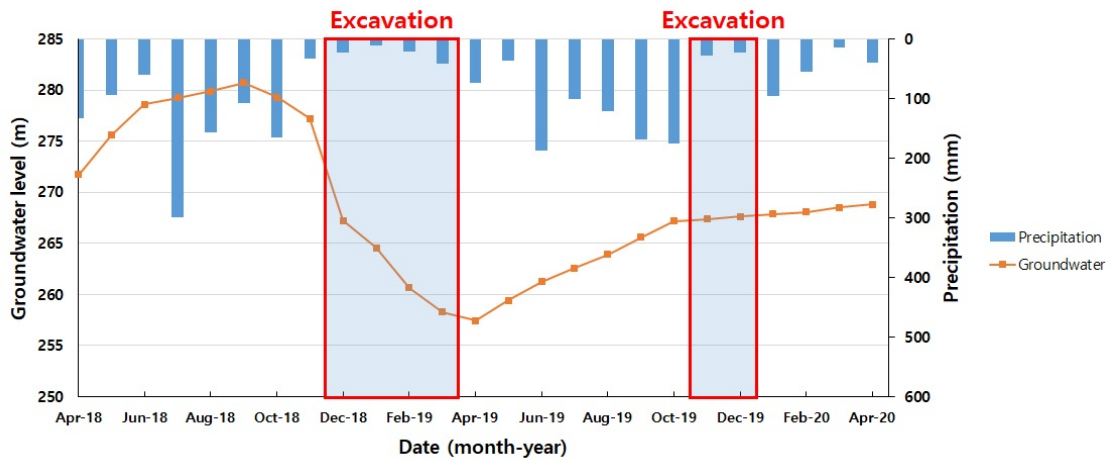


Fig. 2. Precipitation vs. groundwater level change in relation to tunnel excavation.

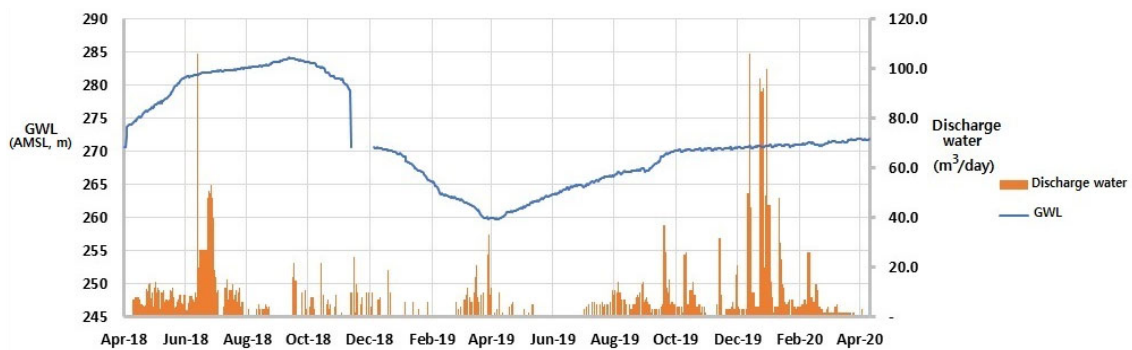


Fig. 3. Relationship between tunnel discharge and groundwater level (GWL) of the GW1 well.

년 1월 강수량은 10.5 mm이다. 2018년 7월과 2019년 7월의 강수량은 각각 299.7 mm, 100.2 mm로서 2018년 7월 강수량이 약 3배 정도이다.

황장재 터널 굴착시에 터널 배출수가 발생하였으며, 배출수량은 0.9 m³/일~106 m³/일 로서 큰 변화를 보인다. 그러나 일 배출수량과 GW1 공의 일 지하수위는 관련성을 보이지 않는다(Fig. 3). 한편, 월 강수량과 월 평균 지하수위는 양의 상관성을 보인다(Fig. 2). 강수량, 터널 배출수, 터널 심도와 GW1 공의 지하수위 하강 관계로 볼 때, 배출수량과 지하수위는 상관성을 보이지 않으며, 지하수위 변화는 강수량 변화에 의해서 지배되고 있다고 판단된다.

일반적으로 지하수 흐름은 지표 고도가 높은 지역에

서 낮은 지역으로 일어난다. GW1 공은 황장재 터널이 위치한 남쪽의 산지와 북쪽에 위치한 산지의 중간에 위치하고 있다. 따라서 지하수 흐름은 황장재 터널로부터 GW1 공 방향으로 일어나고 있다.

3.2. 지하수 수질

본 연구에서는 황장재 터널 굴착과 인과관계를 파악하기 위하여, 먹는물 기준의 부적합 판정 항목들인 비소, 불소, 붕소, 황산이온, 총대장균군, 일반세균, 분원성대장균 그리고 pH, 탁도를 중심으로 00휴게소 부지 내의 GW1 공 지하수 수질 변화를 검토하였다. GW1 공 지하수는 2016년 12월 21일 수질분석에서 4개 항목(비소, 불소, 붕소, 황산이온)에서 먹는물 기준의 부적합 판정을

Table 1. Monthly average groundwater levels in relation to tunnel excavation

Date	Monthly average groundwater level (AMSL, meters)	Tunnel excavation status
April 2018	271.77	Before excavation
May 2018	275.61	
June 2018	278.62	
July 2018	279.26	
August 2018	279.92	
September 2018	280.77	
October 2018	279.32	
November 2018	277.26	
December 2018	267.23	
January 2019	264.57	
February 2019	260.68	
March 2019	258.28	
April 2019	257.44	Excavation temporary shutdown
May 2019	259.43	
June 2019	261.26	
July 2019	262.57	
August 2019	263.92	
September 2019	265.60	
October 2019	267.22	
November 2019	267.41	Excavation (Dec. 2019)
December 2019	267.66	
January 2020	267.90	After the excavation
February 2020	268.10	
March 2020	268.55	
April 2020	268.83	

받은 바 있으며, 그 이후 2017년, 2019년, 2021년, 2022년에 총 9회의 부적합 판정을 받았다(Fig. 4, Table 2).

pH 변화를 보면, 굴착공사 이전에는 8.4이고, 굴착공사 중에는 초기에는 8.1, 8.2로서 오히려 굴착공사 이전보다 떨어졌다가, 굴착공사 후기에 8.8로 높아졌으나 이후 다시 8.4로 낮아졌다(Fig. 4). 공사 완료 2년 후인 2021년 8월 18일에는 pH가 8.8로 다시 상승하기도 하였다(Table 2). 시멘트 경화체의 알칼리이온 침출성능 및 침출속도 연구에 의하면, 물-시멘트 비에 따른 시멘트 경화체 수조 내 용액의 pH는 초기에 급격하게 pH 9 정도까지 증가된 후 완만하게 증가하다가 다시 급격하게 증가하여 pH 12 정도에 이른다(Shim et al., 2014). 따라서, 본 연구에서 굴착공사 후기에 pH가 8.8로 증가했다가 떨어진 것은 굴착공사시 시멘트의 영

향으로 보기 어렵다.

비소 농도는 굴착 전, 중, 후에 먹는물 기준(0.01 mg/L)을 초과하고 있으며, 굴착공사 기간 동안에는 2019년 1월 9일과 2019년 1월 21일 0.014 mg/L, 2019년 2월 13일 0.053 mg/L이다(Fig. 4). 굴착 이전에 0.076 mg/L, 그리고 굴착 중단 후 0.024~0.098 mg/L로 분석되었으며 굴착 이전 보다 굴착공사 중에 비소 농도가 낮아졌다. 또한, 굴착 완료 이후에는 오히려 비소 농도가 0.098 mg/L 로서 더 높아지기도 하였다. 따라서 터널 굴착이 비소 농도 증가를 야기했을 가능성을 제기하기는 어렵다. 한편, 불소 농도는 굴착공사 중에 1.91~3.22 mg/L, 굴착 이전에 2.49 mg/L, 그리고 굴착 중단 후 1.7~2.67 mg/L이다(Fig. 4). 마찬가지로 불소 농도와 굴착의 인과 관계를 찾기 힘들다.

Table 2. Water quality items of the GW1 well comparing to the drinking water standard

Date	Item	Drinking water standard	Water quality of the GW1 well	Unit
2016-12-21	Fluoride (F)	≤ 1.5	2.49	mg/L
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.076	mg/L
	Boron (B)	≤ 1.0	1.55	mg/L
	Sulfate (SO ₄)	≤ 200	2098	mg/L
2019-01-09	Fluoride (F)	≤ 1.5	3.22	mg/L
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.014	mg/L
	Boron (B)	≤ 1.0	2.43	mg/L
	Turbidity	≤ 1	1.47	NTU
	Sulfate (SO ₄)	≤ 200	2884	mg/L
2019-01-21	Total coliform bacteria	N.D.	Detected	/100mL
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.014	mg/L
	Turbidity	≤ 1	10.50	NTU
	Aluminum (Al)	≤ 0.2	0.52	mg/L
2019-02-13	Fluoride (F)	≤ 1.5	1.91	mg/L
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.053	mg/L
	pH	5.8 ~ 8.5	8.8	-
	Turbidity	≤ 1	4.51	NTU
	Aluminum (Al)	≤ 0.2	0.26	mg/L
2019-04-09	Total coliform bacteria	N.D.	Detected	/100mL
	Fecal coliform bacteria	N.D.	Detected	/100mL
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.043	mg/L
	Iron (Fe)	≤ 0.3	0.45	mg/L
2021-02-16	General bacteria	≤ 100	190	CFU/mL
	Total coliform bacteria	N.D.	Detected	/100mL
	Fluoride (F)	≤ 1.5	1.70	mg/L
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.043	mg/L
	Turbidity	≤ 1	1.56	NTU
2021-08-18	General bacteria	≤ 100	130	CFU/mL
	Total coliform bacteria	N.D.	Detected	/100mL
	Fecal coliform bacteria	N.D.	Detected	/100mL
	Fluoride (F)	≤ 1.5	2.67	mg/L
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.098	mg/L
	pH	5.8 ~ 8.5	8.8	-
	Turbidity	≤ 1	2.20	NTU
2022-04-18	Sulfate (SO ₄)	≤ 200	323	mg/L
	pH	5.8 ~ 8.5	8.64	-
	Arsenic (As)	≤ 0.01	0.024	mg/L

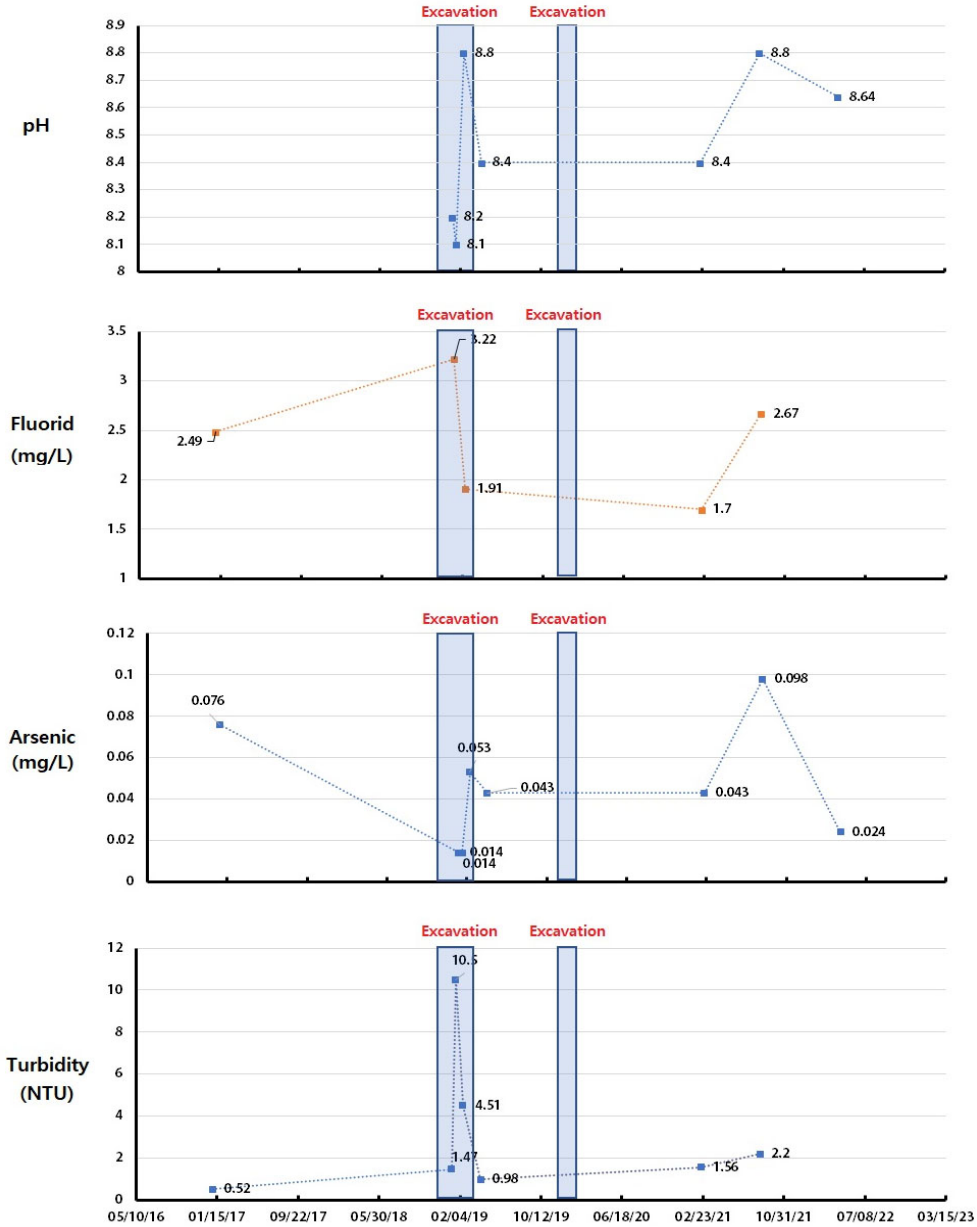


Fig. 4. Change of GW1 groundwater quality in relation to tunnel excavation.

탁도는 굴착공사 중에 1.47 NTU 에서 급격하게 증가하였다가(10.5 NTU), 그 후에는 4.51 NTU로 감소하는 경향성을 보였다. 굴착 이전에는 0.52 NTU, 그리고 굴착 중단 이후 0.98~2.20 NTU였다. 굴착 기간 중의 탁도 변화를 보면, 10.5 NTU 이후에 지속적으로 떨어

어지고 있으며, 굴착 중단 직후(2019. 4. 9)에는 0.98 NTU 까지 떨어졌다(Fig. 4). 지하수 탁도 상승은 터널 굴착 진동으로 인해서 지하수공 주변의 단열대로부터 세립자의 유입으로 인한 부유물 상승, 터널로부터의 탁수 유입, 지하수공 사용시 주변 암층의 세립자의 유입

Table 3. Comparison of groundwater quality items between GW1 and village well

Item	GW1	Village well	△
pH	8.64	9.33	-0.69
Electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2,816	898	1918
Nitrate nitrogen (mg/L)	0.2	0.7	-0.5
Chloride (mg/L)	27.6	21.7	5.9
Arsenic (mg/L)	0.029	0.057	-0.028

Table 4. Water quality of total coliforms, arsenic, and turbidity in nearby domestic and agricultural groundwater wells (Ministry of Environment, 2019)

Well no.	CSW750	CSW751	CSW753	CSW754
Use	Agricultural	Domestic	Agricultural	Domestic
Total coliforms	99	0	6	22
Arsenic (mg/L)	N.D.	0.006	N.D.	N.D.
Turbidity (NTU)	3.2	0.53	1.87	0.36

등의 원인으로 발생할 수 있다. 연구지역에서는 터널 굴착 기간 중에 탁도의 급상승과 급하강은 황장재 터널 굴착으로부터 유래하는 지하수 때문이기 보다는 황장재 터널 굴착 진동에 의해서 GW1 공 바로 주변의 세립자로부터 유래하는 매우 일시적인 현상이라고 판단된다. 참고로, 탁도는 CSW751(00휴게소 부지내 지하수공)에서 0.53 NTU이고, 괴정리 지하수공에서는 0.36 ~ 3.2 NTU로 넓은 범위를 보인다. 이러한 탁도 경향성은 연구지역이 중생대 경상누층군에 속하는 퇴적암지역으로서, 화강암지역 보다는 탁도가 높은 지역이기 때문이기도 하다.

황산이온은 굴착 전(2016년), 굴착 중(2019년 1월 9일)에 모두 2,000 mg/L를 넘는 매우 높은 값을 보였다. 2019년 1월 9일 이후부터 2021년 2월 16일까지는 200 mg/L 이하였고 2021년에는 323 mg/L이다. 따라서 공사 기간 중 높은 황산이온 농도와 굴착 간의 인과 관계 역시 찾아내기 어렵다고 판단된다.

총대장균군, 일반세균, 분원성대장균군은 2019년부터 검출되기 시작하였다. 지하수 내 대장균군, 일반세균 등의 검출은 지하수공 주변의 분뇨처리시설, 퇴비, 화장실 등에서 유래한다. GW1 지하수공 주변에는 화장실이 위치하고 있으며, 터널 굴착 진동에 의해서 틈이 발생하면 화장실에서 유래하는 대장균군, 일반세균 등이 지하수공으로 유입될 수 있는 환경이다. 따라서

화장실 등 주변으로부터의 대장균군, 일반세균 유입에 대해서 보다 상세한 조사가 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 터널 굴착공사는 세균 발생 원인을 제거하지 않는다. 참고로 2014년에 GW2 공의 지하수는 수질 검사에서 먹는물 적합 판정을 받았고, GW3 공은 2019년 2월 13일에 부적합, 2019년 4월 9일에 적합, 2021년 2월 16일에 부적합 판정을 받았다.

GW1 공(굴착심도 400 m)으로부터 북서쪽으로 약 540 m에 위치한 마을 지하수공(지표 해발고도 약 285 m, 굴착심도 100 m)의 지하수 수질 분석 결과를 보면, 두 지하수공의 지하수 수질 분석 결과는 모두 pH와 비소 항목에서 부적합 판정을 받았다. 전기전도도와 염소이온 농도는 GW1 지하수공에서 더 높고, pH, 질산성 질소, 비소는 마을 지하수공에서 더 높게 나타났다 (Table 3).

한편, 2019년도 청송 지하수 기초조사 보고서 (Ministry of Environment, 2019)에서 괴정리 182 (CSW750), 206 (CSW751), 434-1 (CSW753), 514 (CSW754)의 수질 분석 결과는 Table 4와 같다. CSW751은 신청인 부지의 지하수이다. 이때 비소는 CSW751 지하수에서만 검출되었고, 그 외 다른 지하수에서는 검출되지 않았다. 한편, 탁도는 CSW751에서 0.53 NTU였고, 그 외 지하수공에서는 0.36~3.2 NTU로 넓은 농도 범위를 보였다.

4. 결 론

강수량, 터널 배출수, 터널 심도와 00휴게소 GW1 공의 지하수위 하강의 관계로 볼 때, 지하수 흐름은 황장재 터널로부터 GW1 공 방향으로 일어나고 있으며, 배출수량과 지하수위는 상관성을 보이지 않는다. 또한, 월강수량과 월평균 지하수위는 양의 상관성을 보인다. 따라서, 지하수위 하강은 강수량 변화에 의해서 지배되고 있다고 판단된다.

pH 변화를 보면, 굴착공사 이전에는 8.4이고, 굴착공사 중에는 초기에는 8.1, 8.2로서 오히려 굴착공사 이전보다 낮아졌으며, 굴착공사 후기에 8.8로서 높아졌다가 굴착공사 이후에는 다시 8.4로 낮아진다. 굴착공사 후기에 pH가 8.8로 증가했다가 낮아진 것은 굴착공사 시 시멘트의 영향으로 보기 어렵다.

비소 농도는 굴착 전, 중, 후에 먹는물 기준(0.01 mg/L)을 초과하고 있으며, 굴착공사 기간 동안에는 2019년 1월 9일과 2019년 1월 21일 0.014 mg/L, 2019년 2월 13일 0.053 mg/L였다. 굴착 이전에 0.076 mg/L, 굴착 중단 후 0.024~0.098 mg/L였다. 따라서 굴착 이전 보다 굴착공사 중에 비소 농도가 낮아졌고, 굴착 중단 이후에는 오히려 비소 농도가 0.098 mg/L로서 더 높아지기도 하였다. 불소 농도는 굴착공사 중에 1.91~3.22 mg/L, 굴착 이전에 2.49 mg/L, 굴착 중단 후 1.7~2.67 mg/L였다. 황산이온은 굴착 전(2016년), 굴착 중(2019년 1월 9일)에 모두 2,000 mg/L를 넘는 매우 높은 값을 보였다. 2019년 1월 9일 이후부터 2021년 2월 16일까지는 200 mg/L 이하였으며, 2021년에는 323 mg/L였다. 그러므로, GW1 지하수공의 수질과 황장재 터널 굴착의 인과 관계가 있다고 보기 힘들다.

황장재 터널 굴착공사 중의 탁도 증가를 판단해 보면, 터널 굴착 기간 중의 탁도 상승은 터널로부터의 유입수 때문이라기보다는 터널 굴착에 의한 진동 때문에 GW1 공 바로 주변의 단열대로부터 세립자의 유입 때문으로 보인다.

- itoring, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 1691-1703.
- Chiocchini, U., Castaldi, F., 2011, The impact of groundwater on the excavation of tunnels in two different hydrogeological settings in central Italy, *Hydrogeol. J.*, 19, 651-669.
- Jeon, H. T., Hamm, S. Y., Lee, C. M., Lim, W. R., Yun, S. M., Park, H. J., 2018, Analyzing the change of surface water and groundwater systems caused by tunnel construction in northern Ulsan City, *The J. Eng. Geol.*, 28, 81-99.
- Lee, B. D., Hamm, S. Y., Lee, C. O., Cho, B. W., Sung, I. H., 2001, Relation of groundwater flow rate and fracture system associated with waterway tunnel excavation *The J. Eng. Geol.*, 11, 327-337.
- Lee, H. G., Hong, S. H., 1973, Geological report of the Cheongsong sheet (1: 50,000), Geological and Mineral Institute of Korea, 23.
- Ministry of Environment, K-water, 2019, Report on groundwater basic survey of Cheongsong area, 11-1480000-001615-01.
- Moon, J., Fernandez, G., 2010, Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass, *Eng. Geol.*, 110, 33-42.
- Park, J. J., Kim, H. J., 2018, Use of a forensic geochemical technique and a hydrogeological assessment to determine the source of petroleum hydrocarbon contamination at a foreshore site in Korea, *Environ. Earth Sci.*, 77, 742.
- Ramirez, A. I., Herrera, A., 2016, Forensic Hydrology, <http://dx.doi.org/10.5772/64616>.
- Shim, H. B., Hwang, J. P., Ann, K. Y., 2014, Leaching capacity and rate of alkali ions from hardened cement paste, *J. the Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 18, 111-118.
- Sutliff-Johansson, S., Pontér, S., Mäki, A., Engström, E., Rodushkin, I., Peltola, P., Widerlund, A., 2020, Groundwater environmental forensic investigation combining multivariate statistical techniques and screening analyses, *Environ. Forensics*, 1-15.
- Witte, J. P. M., Zaadnoordijk, W. J., Buyse, J. J., 2019, Forensic hydrology reveals why groundwater tables in the Province of Noord Brabant (The Netherlands) dropped more than expected, *Water*, 11, 478.
- Woodhous, B., 2007, From the publisher, *Southwest Hydrol.*, 6, 4.

REFERENCES

- Cheong, J. Y., Hamm, S. Y., Yu, I. R., Whang, H. S., Kim S. H., Kim, M. S., 2015, Analysis of groundwater discharge into the Geumjeong tunnel and baseflow using groundwater modeling and long-term mon-

- Post Doctor. Sul-Min Yun
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
ehdls91@kict.re.kr
- Professor Emeritus. Se-Yeong Hamm
Pusan National University
hsy@pusan.ac.kr