

기술자료

부산지역 재난 대비 음용 지하수의 수질 특성 평가

이유정[†] · 박승우 · 황진하 · 김해진 · 김소윤 · 김지원 · 유숙진 · 정재은

부산광역시보건환경연구원 물환경연구부

Evaluation of Groundwater Quality for Drinking in Response to an Emergency in Busan

You-Jung Lee[†], Seung-Woo Park, Jin-Ha Hwang, Hae-Jin Kim, So-Yoon Kim, Ji-Won Kim, Suk-Jin Ryu, and Jae-Eun Jung

Department of Water Environmental Research, Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan, 46616, Korea

Received August 26, 2024 / Revised September 30, 2024 / Accepted December 07, 2024

This study aims to assess the water quality of 343 groundwater samples used for drinking in emergency situations in the Busan region, focusing on physicochemical and biological contaminants, as well as radon and uranium. The proportion of groundwater facilities exceeding the Korean drinking water quality standard was 18.4% (63 sites). Microbial indicators such as total coliforms, total colony counts, and fecal coliforms, were detected at a high rate of 90%. To reduce microbial contamination, the management of the groundwater facilities should focus on disinfection and cleaning. The concentrations of radon and uranium were found to range from ND to 138 Bq/L and ND to 22 µg/L, respectively, with little correlation between these natural radioactive materials ($r = 0.105$). Hardness showed the highest positive correlation with chloride and sulfate ions, and this is considered to be an effect of topography rather than external water pollution. Monitoring data on hardness, chloride ion, nitrate as nitrogen, radon and uranium from groundwater were visualized on the Busan map to illustrate the distribution of major contaminants. These findings provide valuable information for developing groundwater monitoring policies.

Key words: groundwater for drinking, water quality exceeding rate, total coliforms, radon, visualization

1. 서 론

우리나라 전체 수자원 사용량의 약 3%를 차지하는 지하수는 지하의 지층이나 암석 사이의 빈틈에 존재하는 물로서 오염에 취약한 지표수에 비해 안정적이고 재생가능한 자원이다¹⁾. 주변 지질 환경의 특성과 연관된 지하수 수질은 토양의 물리화학적 성질, 지하수 순환 형태 등의 수리수문 환경, 토지이용 현황, 연안 지역의 해수 침입 등 여러가지 요인으로부터 영향을 받고 있다²⁾. 또한 대수층을 통과하면서 오염물질이 자연 정화되고 지층 내의 물질과 반응하여 다양한 무기물질을 함유하게 된다. 그러나 도시화와 산업화에 따라 과잉 채수로 인한 수위 저하와 고갈, 수질 오염 관리의 어려움 뿐 아니라 최근 기후변화

에 의한 강수량 패턴 변화, 물순환과 유출량의 변화로 지하수 수질에 대한 우려가 증가하고 있다^{3,4,5,6)}.

지하수 중 재난 대비용으로 지정되는 민방위 비상급수는 전쟁 및 상수도 체계의 마비 등 비상 사태 발생으로 상수도 공급이 어려울 때 최소의 음용수 및 생활용수를 주민에게 공급하기 위한 것으로 평상시에도 지역 주민의 편의를 위해 개방되고 있다⁷⁾. 안전하고 안정되게 공급하기 위한 음용 민방위비상급수는 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙에서 정하고 있는 46 항목에 대하여 매년 1회 이상 및 일반세균, 총대장균군 등 6항목에 대해서는 매년 분기마다 1회 이상 수질검사를 실시하고 있다⁸⁾. 또한, 주변 암석과 지하수의 상호작용에 의해 존재하게 되는 자연방사성물질 중 라돈은 일정 함량 이상 장기간 복

[†]To whom correspondence should be addressed.

용할 경우 위압 발생 가능성이 높고 우라늄은 장기간 흡입할 경우 만성 신장질환을 유발할 수 있다고 보고되는 바, 지하수 중 라돈과 우라늄의 분포 현황에 대해 연1회 이상 모니터링하고 있다^{7,9)}. 이와 관련한 선행 연구를 고찰하면 서울특별시, 경상남북도, 충청남도, 경상남도 서부, 전라남도, 광주광역시 및 경기도 남부 등 우리나라 여러 지역에서 지하수의 이용 현황과 수질 조사결과 등 지하수의 수질 관리에 대한 연구가 활발히 보고되고 있으나 부산 지역의 음용 지하수 수질 특성을 보고한 연구 자료는 미비한 실정이다^{2,5,6,9,10,11,12,13,14,15,16)}.

재난 대비 지하수는 대체 용수로서 수질오염을 사전에 예방하고 상시 수질을 안정적이고 안전하게 유지하여 가뭄 등 재난이 발생하였을 때 무단수로 시민들에게 불편 없이 제공하기 위하여 지속적인 지하수 수질 관리가 필요하다. 이에 본 연구는 부산지역 내 재난 대비 음용 지하수 수질에 대해 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙에 준한 물리화학적 및 생물학적 46 항목에 대한 수질 특성을 조사하였으며 토양 환경에 따른 자연방사성물질 중 라돈과 우라늄 검출 특성도 함께 파악하고자 하였다. 이를 바탕으로 주변환경과 지질 등에 영향을 주고받는 지하수 수질 현황을 시각적으로 표출하여 지하수 자원의 관리의 기초 자료를 제공하며 시민들의 건강 증진에 이바지하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 기간

본 연구에서는 부산지역의 음용수로 사용가능한 재난 대비 지하수로 지정된 민방위비상급수시설 343개소를 조사대상으로 지하수 수질을 조사하였다. 부산지역의 민방위비상급수시설은 16개 구·군 거주 인구수에 따라 해운대구 50개소, 금정구 47개소, 강서구4개소, 중구 2개소 등으로 구역별 시설 수 차이가 있으며(2023년 12월 기준, Fig. 1) 정부지원금으로 설치된 시설(정부지원 지하수 시설), 지방자치단체가 설치한 시설(지자체 지하수 시설) 및 민간과 공공기관 소유로 유사시 비상급수로 전환가능한 시설(공공용 지하수 시설) 중 민방위 비상급수시설의 66.8%에 해당되는 229개소는 공공용 지하수 시설이 지정되어 이용되고 있는 실정이다. 이는 조 등(2019)이 연구한 2018년 경기도의 민방위 비상급수시설 중 65.8%가 공공용 지하수 시설인 것으로 부산과 경기도 등 민방위비상급수시설 관리 현황이 유사할 것으로 유추할 수 있었다¹⁶⁾.

2.2. 연구방법

연구대상 음용 지하수의 수질분석 항목은 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제2조에 따라 총대장균군 등 미생물, 질산성질소 등 건강상 유해 영향 무기물질,

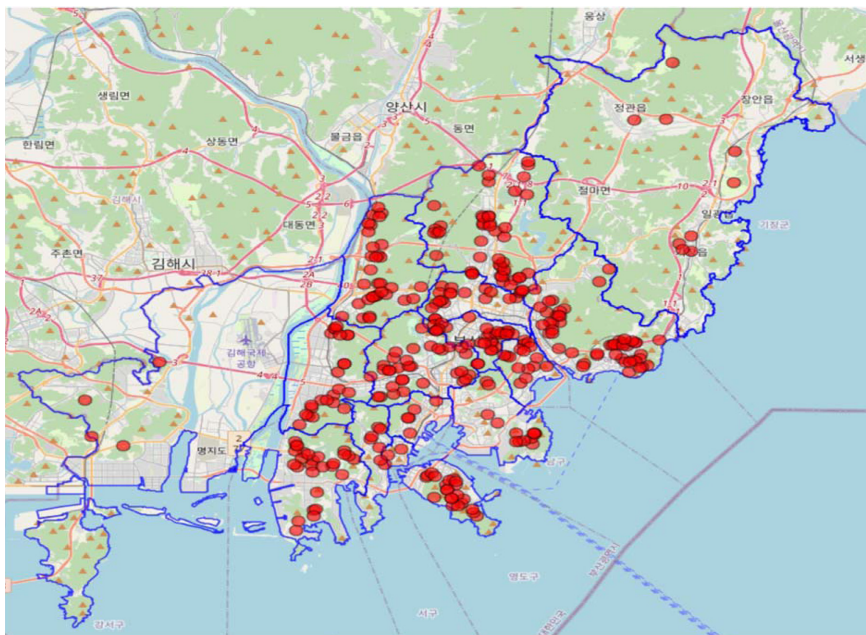


Fig. 1. A map of the study area showing the location of 343 sampling sites (red circles) in the Busan area. Blue outlines indicate the district boundaries in Busan. This map is based on GoogleMaps and is used with authorization.

Table 1. Analytical methods and instruments used for drinking water quality parameters based on the Korean standard method for drinking water quality examination

Parameters	Standard method and analytical instrument for drinking water quality	
Hardness	EDTA Titrimetric method	-
Consumption of KMnO_4	Consumption of KMnO_4 -Acid	-
Odor, Taste	-	-
Color	Visual comparison method	·0.45 μm filtration
pH	pH-electrometric method	·Model: TOA HM-42X
Turbidity	-	·Model: HACH TL2350
Anionic surfactants, Phenol, Cyanide	Continuous flow analysis	·Model: Alliance FUTURA3 ·0.45 μm filtration
NH_3 -N	Ion Chromatography	·Model: Dionex ICS-3000 ·Eluent: 30mM Methansulfonic acid ·Flow rate: 1.0 mL/min
F^- , NO_3^- -N, Cl^- , SO_4^{2-}	Ion Chromatography	·Model: Thermo US/ICS-6000 ·Eluent: 1mM NaHCO_3 +3.5mM Na_2CO_3 ·Flow rate: 1.2 ml/min
Cu, Pb, Mn, B, As, Se, Hg, Zn, Al, Fe, Cd, Cr, U	ICP-MS	·Model: Agilent 7900a ·Carrier gas: 0.7 L/min ·Nebulizer pump: 0.1 rps
	SPME	·Model: COMBIPAL
Diazinon, Parathion, Fenitrothion	SPME-GC	·Model: Agilent 7890A ·Column: Ulltra-2 (25 m \times 0.32 mm \times 0.17 μm) ·Carrier gas: N_2 (1.0 mL/min) ·Oven Temp: 150°C(5min) \rightarrow 10°C/min \rightarrow 250°C(2min) ·Split ratio: 10:1
Carbaryl	HPLC	·Model: WATERS UPLC ·Eluent: 40% Acetonitrile ·Flow rate: 0.25mL/min
	P&T	·Model: Tekmar Lumin
1,2-dibromo-3-chloropropane, TCE, PCE, 1,1,1-TCE, benzene, Dichloromethane, Toluene, 1,1-dichloroethylene, Ethylbenzene, Xylene, Carbon tetrachloride	P&T-GC/MS	·Model: Agilent GC/MSD 5977/7890B ·GC Column: HP-VOC (60 m \times 0.32 mm \times 1.8 μm) ·Carrier gas: He(1.0mL/min) ·Ionization mode: EI Positive ·Oven Temp: 35°C(7min) \rightarrow 5°C/min \rightarrow 50°C(0min) \rightarrow 10°C/min \rightarrow 150°C(6min) \rightarrow 60°C/min \rightarrow 220°C(5min) \rightarrow 80°C/min \rightarrow 250°C(1min) ·Split ratio: 20:1
	P&T	·Model: Teledyne Tekmar AquaTek
1,4-Dioxane	P&T-GC/MS	·Model: Agilent GC7890A ·GC Column: DB-624(60 m \times 0.25 mm \times 1.4 μm) ·Carrier gas: N_2 (1.0mL/min) ·Ionization mode: EI Positive ·Oven Temp: 35°C(7min) \rightarrow 5°C/min \rightarrow 50°C(0min) \rightarrow 10°C/min \rightarrow 150°C(6min) \rightarrow 60°C/min \rightarrow 220°C(5min) \rightarrow 80°C/min \rightarrow 250°C(1min) ·Split ratio: 20:1
Total coliforms	Multiple tube fermentation method	·1st: (35.0 \pm 0.5)°C, (48 \pm 3)h ·2nd: (35.0 \pm 0.5)°C, (48 \pm 3)h
Fecal coliforms		·1st: (35.0 \pm 0.5)°C, (48 \pm 3)h ·2nd: (44.5 \pm 0.2)°C, (24 \pm 2)h
Total colony count in 35°C	Pour plate method	·(35.0 \pm 0.5)°C, (48 \pm 2)h
Radon	LSC	·Model: Quantulus GCT 6220 ·Counting times: 3600s ·Coincidence times: 18ns ·Activity type: Alpha (250~750)

TCE (trichloroethylene) 등 건강상 유해 영향 유기물질, 탁도 등 심미적 영향 물질과 우라늄 등 총 47항목을 먹는물수질공정시험기준(2022)¹⁷⁾에 따라 분석하였다. 라돈은 먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시 별표3¹⁸⁾에 준하여 액체섬광계수기 (Quantulus GCT 6220)을 이용한 분석을 수행하였다. Table 1은 음용 지하수의 수질항목을 분석하기 위하여 사용된 분석기기와 분석조건을 자세히 기술하였다.

연구지역 지하수 내 라돈과 우라늄의 상관 관계를 평가하기 위하여 이용된 소프트웨어는 SPSS (ver. 20 for windows)로 Pearson 상관계수를 이용하여 두 성분 간의 상관관계를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재난 대비 지하수 시설별 수질조사 결과

먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 별표1에 따라 2023년 연구 지역 내 재난 대비 지하수 시설 343개소

에 대하여 구·군별 먹는물 수질기준 초과 시설을 살펴보면, Fig. 2(A)에서와 같이 중구와 강서구를 제외한 14개 구·군의 63개소에서 수질개선이 필요한 것으로 조사되었다. 서울시의 음용 관정에 대해 2002년에 조사한 382개소 중 181개소 (47.4%)와 2005년에서 2010년까지 서부경남 8개 시군의 마을상수도 6,569건 중 1,338건으로 20.4%가 음용으로 부적합하였으며 전남지역의 비상급수의 기준 초과율은 2011년 24.8%, 2012년 22.1%, 2013년 20.9%, 2014년 32.2%, 2015년 20.7%로 조사되었고 경기 남부의 경우 2015년부터 2017년 동안 총 1,076지점 중 394지점이 부적합하여 36.6%의 부적합율이 보고된 것으로^{10,12,14,16)} 지하수 시설과 조사건수 등 결과 해석에서 차이가 있었으나 부산 지역 재난 대비 지하수의 수질기준 초과율이 18.4%로 다른 지역 지하수 수질보다 양호한 것으로 판단할 수 있었다. 한편, 부산지역 구·군의 재난 대비 지하수 시설수별 수질기준 초과율이 0.0%~35.6%로 구·군별 차이가 큰 것으로 조사되었다. 또한, 지하수 시설 종류별 수질기준 초과 시설수는 정부지원 5개소, 지자

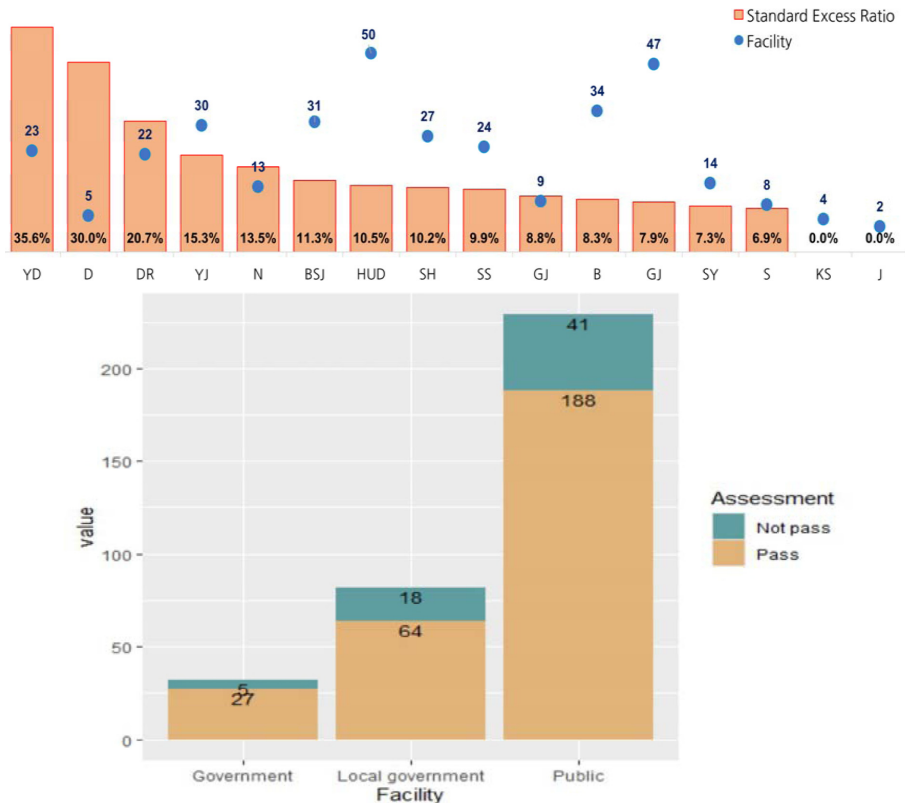


Fig. 2. (A) Standard excess ratio (%) of drinking water quality and the number of groundwater facilities for emergency use across 16 districts in Busan. (B) Assessment of water quality standards for groundwater facilities supported by the government, local government, and public institutions.

체 18개소, 공공용 41개소였으며 공공용 지하수 시설의 수질기준 초과 시설수가 많았으나 지자체 지하수 시설의 초과 비율이 22.0%로 조사되어 지자체 지하수시설과 공공용 지하수시설의 수질관리가 집중되어야 할 것으로 판단되었다(Fig. 2(B)).

3.2. 생물학적 및 물리화학적 지하수 수질 조사 결과

연구대상 지하수의 미생물학적 및 물리·화학적 수질을 조사하고 지하수 오염을 평가한 결과, Fig. 3과 같이 총대장균군, 중온 일반세균, 분원성대장균군, 탁도, 질산성 질소 및 황산이온이 먹는물 수질기준을 초과하였다. 이 중 총대장균군, 중온 일반세균 및 분원성 대장균군 등 수질 오염 지표세균이 90%를 차지하여 재난 대비 지하수 오염은 미생물 오염이 주요 원인이었다. 이는 다른 지역 지하수에 대해 조사한 박 등(2016), 조 등(2019), 윤 등(2020)의 연구결과와 유사한 것으로 지하수는 일반적으로 미생물 오염이 쉽게 일어나며 지하수 수질관리 중 미생물 오염 관리가 중요한 것으로 판단할 수 있었다^{9,14,16}. 박 등(2012, 2014, 2015)이 연구한 서부경남 지역 지하수의 음용수 수질기준 초과 정도는 총대장균군 780건, 탁도 265건, 알루미늄 174건, 일반세균 131건, 질산성 질소 94건 등으로 총대장균군을 제외한 수질기준 초과항목 양상이 다르게 조사되었다. 이러한 차이는 지역의 지질 특성, 지하수공의 깊이, 지하수 사용량 및 농경지, 축사, 산업단지 및 주택 등 주변 오염원의 분포와 오염물질 유입 정도 등 환경적 요인에 의해 영향을 받는 것으로 판단되었다. 부산지역은 대부분 도심지 산업단지, 상업지역과 주

거지역으로 토지이용형태가 구성되어지므로, 농경지, 축사에 의한 오염 원인보다 일부 재난 대비 지하수 시설들은 20년 이상 사용되어지면서 관 부식, 저장조의 균열 등 시설의 노후화 및 시설 방치 등의 관리 소홀로 쉽게 오염에 노출되어 미생물 오염에 더욱 취약할 수 있을 것으로 사료되었다.

지하수 시설에서 총대장균군은 55.3%가 부적합하여 인간 또는 온혈동물 등의 분변 오염된 것으로 알려져 있으나¹⁹ 물환경, 토양 등 자연환경에서 흔하게 발견되는 세균인 *Klebsiella*속, *Citrobacter*속 등이 포함될 가능성도 있기에 총대장균군의 검출만으로 지하수의 미생물 오염 관리 중 분변오염원 위주의 수질관리에 한계가 있을 것으로 판단되었다. 24.1%로 기준초과한 중온 일반세균은 검출되더라도 인체에는 큰 영향이 없으며 인간이나 온혈동물의 분변 오염과 관계없이 물 속에 존재하는 세균을 평가할 때 이용되는 수질항목으로 100 CFU/mL을 초과하는 경우 병원균이 존재할 가능성도 있다고 보고되고 있다¹⁹. 인간이나 다른 포유동물, 조류의 분변에 존재하여 분변으로 오염되지 않은 물이나 토양에서는 거의 발견되지 않는 분원성대장균군은 분변오염의 직접적인 지표세균이기 때문에¹⁹ 먹는물 수질기준 초과시설의 10.3% 검출율로 조사된 시설에 대해서는 분변오염원을 우선 관리할 필요가 있다고 판단되었다.

탁도, 질산성 질소, 황산이온은 수질기준 초과 원인의 10%를 차지하였으며 박 등(2016)이 연구한 전남 지역의 비상급수 수질기준 초과항목과 유사하였다¹⁴. 그러나, 전남지역 비상급수의 탁도와 질산성 질소의 주요 오염 원인이 농업활동에 의한 것인 반면¹⁴, 정(2003)이 연구한 대전 지역의 민방위 비상급수용 지하수 내 질소 및 황 동위원소 분석으로 지하수 오염원을 추정한 결과로 유추해보았을 때²⁰ 부산지역 또한 구도심의 정화조와 지하에 매설된 낡은 하수관 등에서 발생하는 오수와 신도시의 하수관거에서 유출되는 생활 하수가 지하로 유출되고 토양과 풍화암층을 거쳐 암반까지 유입되어 지하수를 오염시킬 수 있는 것으로 추측되었다.

3.3. 지하수 내 자연방사성물질 분포

Fig. 4는 지하수 내 자연방사성물질 중 라돈의 함량과 검출빈도, 우라늄의 검출 농도와 검출빈도를 조사한 결과이다. 재난 대비 음용 지하수의 라돈 함량은 ND(불검출)~138 Bq/L (평균 21.8 Bq/L)이었으며 이 중 먹는물 수질 감시항목 운영 등에 관한 고시에 따른 먹는물 수질감시 기준 148 Bq/L를 초과한 지점은 없었다. 우라늄의 농도

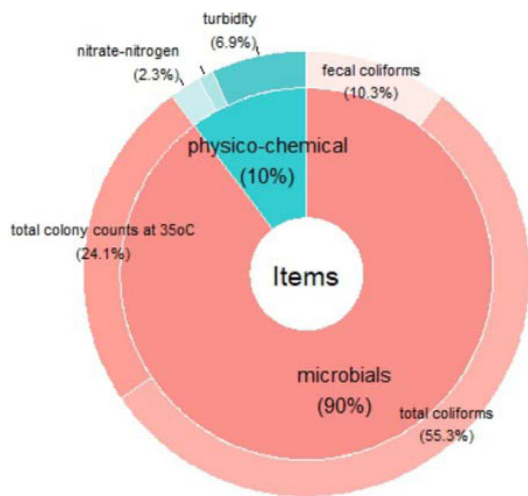


Fig. 3. Items exceeding the drinking water quality standards for groundwater used in emergencies.

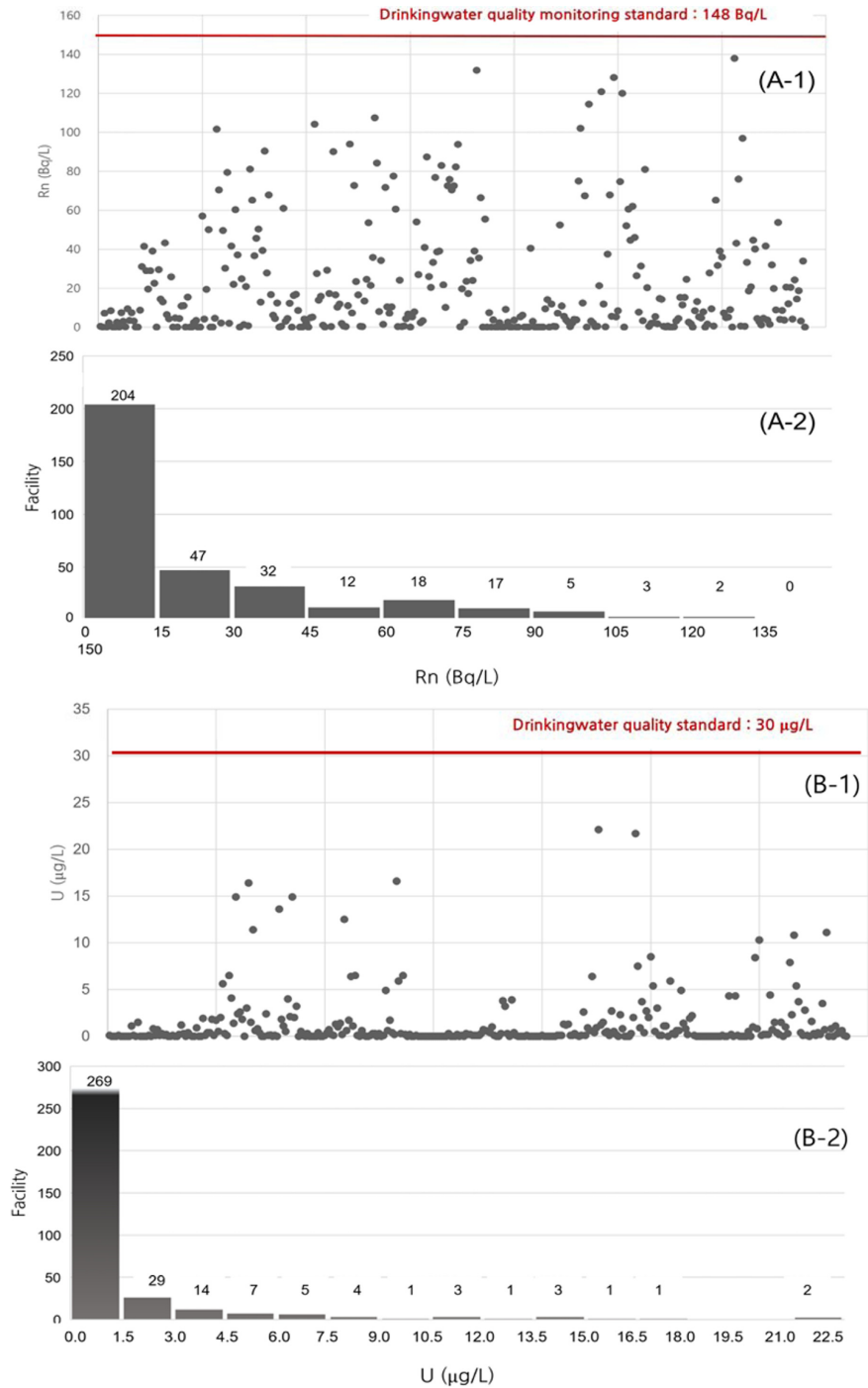


Fig. 4. Concentration of natural radioactive materials (scatter dot) in groundwater for emergency use and their frequency (bar graph). (A) Radon concentration and frequency and (B) Uranium concentration and frequency.

범위는 ND~22 µg/L로 평균 1.4 µg/L이었으며 먹는물 수질기준인 30 µg/L을 초과한 지점은 없었다. 음용 지하수 내 자연방사성물질 빈도 분포에서, 라돈은 20 Bq/L 이하

함량의 조사 지점이 222개소로 65%를 차지하였고 우라늄은 5 µg/L 이하로 검출된 지점이 314개소인 92%로 분포되었다. 2018년 국립환경과학원이 조사한 우리나라 지

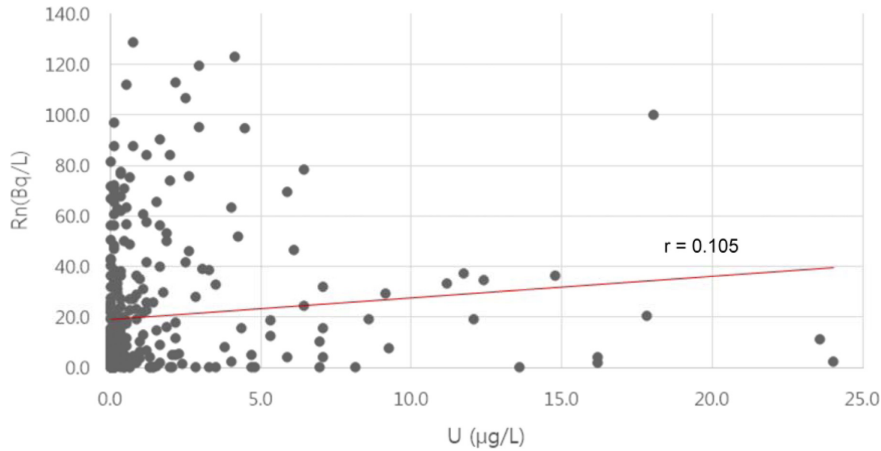


Fig. 5. Radon-Uranium scatter plot showing the correlation coefficient ($r = 0.105$) between the two natural radioactive materials.

하수 중 라돈의 함량은 0.46~720 Bq/L이었고 우라늄의 농도 범위는 ND~186.2 µg/L로 먹는물 수질기준을 초과하는 지점도 10개소라고 보고하여 부산지역 연구대상 지하수 중 자연방사성물질이 다른 지역에 비해 비교적 낮게 검출되고 있는 것으로 조사되었다²¹⁾. 지하수 중 자연방사성물질의 분포는 암석, 지질과 물의 지화학적 반응에 의한 밀접한 상관성으로 주로 중생대 주라기 화강암과 선캄브리아기 변성암 지대에서 높게 검출되는 것으로 보고되고 있는 바²¹⁾, 중생대 백악기 퇴적암류를 기반으로 안산암, 불국사 화강암류와 제4기 퇴적암층이 형성된 부산지역 지질의 특성상 지하수 내 자연방사성물질이 낮은 함량으로 분포되는 것으로 판단할 수 있었다.

지하수 내 검출된 라돈과 우라늄의 상관 관계를 파악하기 위하여 Pearson 상관계수를 이용하여 두 성분 간의 상관관계를 분석한 결과는 유의확률 0.052에서 $r = 0.105$ 로 라돈과 우라늄의 함량 간 상관성이 거의 없는 것으로 알 수 있었다. 부산지역 재난 대비 음용지하수 내 라돈-우라늄 상관성 연구결과는 국립환경과학원의 조사연구(2018)와 윤 등(2018)의 라돈-우라늄 상관성 분석 결과와 유사한 것으로, 반감기가 3.82일인 라돈은 지하수에 잘 용해되나 단거리 이동만 가능하지만 우라늄은 지하수 환경에 따라 근원암으로부터 원거리 이동이 가능한 특성 차이에서 두 성분 간 상관성이 낮은 것으로 판단할 수 있었다(Fig. 5).

3.4. 재난 대비 음용 지하수의 수질 상관성 분석을 통한 수질현황 평가

부산지역 재난 대비 음용 지하수의 분석 결과를 수질

항목간 상호 관련성을 평가하고 주요 수질 항목의 분포를 부산광역시 지도에 격자로 적용하여 시각화로 나타내 고자 하였다.

음용 지하수의 수질항목 간의 상관성을 평가하기 위하여 연구대상 중 10개소 이상에서 세균과 라돈, 우라늄 항목을 제외한 정량한계 이상의 결과로 조사된 14개 항목별 인자 사이의 상관관계를 SPSS(ver.25)를 이용하여 분석한 결과를 Table 2와 같이 나타냈다. 0.01 유의수준에서 경도는 염소이온과 0.641, 황산이온과 0.650으로 높은 상관관계를 나타냈다. 이는 김 등(2004), 김 등(2006), 조 등(2019)의 연구결과와 유사한 것으로^{10,16,23)} 연구지역의 지하수 경도는 경도의 주요양이온 짝인 음이온 성분인 염소이온과 황산이온이 반영된 결과라고 판단되었다. 부산지역 지하수의 염소이온과 질산성질소의 상관계수는 0.164, 탁도와 철의 상관계수는 0.139로 낮은 상관성으로 평가되었으나 조 등(2019)이 연구한 경기 남부지역의 지하수에서는 염소이온과 질산성질소의 상관계수가 0.454, 탁도와 철의 상관계수는 0.807로 아주 높은 상관성을 나타내어 수질항목간 상호 관련성이 지역별 차이가 있음을 알 수 있었다¹⁶⁾. 김 등(2006)도 광주지역 지하수의 염소이온과 질산성질소의 상관계수가 0.55로 높은 상관성을 보고하여 본 연구결과와 다른 것으로 이는 부산지역 지하수의 질산 이온, 염소이온의 분포는 폐수나 외부 오염원에 의한 것이 아닌 지형적 환경의 영향을 받는 것으로 판단하였다²³⁾.

연구 대상의 음용 지하수 수질항목 분포를 시각적으로 나타내기 위하여 수질 항목 간의 상관성을 평가한 결과를 이용하여 주요 지하수 수질인자로 경도, 염소이온과 세

Table 2. Correlation coefficients (r) of groundwater water quality parameters in this study

	F	NO ₃ -N	B	Phenols	Hardne _{ss}	KMnO ₄	Cu	Zn	Cl	Fe	Mn	Turbidity	SO ₄ ²⁻	Al
F	1.00													
NO ₃ -N	-0.05	1.00												
B	.119*	0.01	1.00											
Phenols	-0.04	-0.08	-.274**	1.00										
Hardness	-0.05	.174**	0.09	-0.07	1.00									
KMnO ₄	-.145**	-0.09	.175**	0.08	0.02	1.00								
Cu	-0.05	0.01	0.00	-0.01	-0.08	.137*	1.00							
Zn	-0.04	.107*	-0.07	-0.08	0.00	-0.01	.221**	1.00						
Cl	-0.04	.164**	.177**	-.118*	.641**	.113*	-0.05	0.00	1.00					
Fe	.132*	-.194**	0.09	.112*	-.150**	.313**	.245**	-0.04	-.152**	1.00				
Mn	0.05	-.179**	0.04	-0.01	.161**	0.02	-0.03	0.01	0.09	0.09	1.00			
Turbidity	-0.03	-0.04	0.08	-0.05	0.03	.170**	-0.01	0.06	0.01	.139*	0.10	1.00		
SO ₄ ²⁻	0.09	-0.03	.289**	-0.07	.650**	0.10	-0.03	-0.03	.349**	0.03	.235**	0.03	1.00	
Al	-0.06	-.150**	0.09	0.00	-.254**	.463**	0.03	-0.08	-.154**	.446**	-0.05	.266**	-.125*	1.00

*상관관계가 0.05 수준에서 유의합니다.

**상관관계가 0.01 수준에서 유의합니다

균을 제외한 기준초과된 수질 항목인 질산성질소, 지질적 영향을 받는 라돈과 우라늄을 선정하였다. 부산광역시를 1 km × 1 km 격자 체계(domain 4)에 적용하여 연구 대상 지하수 시설 소재지에 대한 수질항목별 결과를 입력하여 지도 상에 표출하였다(Fig. 6). Fig. 6(A)와 (B)는 높은 상관관계로 평가된 경도와 염소이온의 분포도로 지하수 시설들이 해수의 영향을 받을 수 있는 지역에 주로 분포하고 있음을 볼 수 있었다. Fig. 6(C)에서 나타난 질산성질소 분포는 염소이온과 상관성은 낮으나 부산지역의 도심

지 내 지하수 시설에서 높은 농도로 검출되는 것으로 하수, 오수의 지하수 오염과 관련한 것으로 판단되었다. 김 등(2011)의 연구결과에서 부산지역의 일부이기는 하나 해안을 둘러싼 지형적 특성을 고려하여 해수의 영향을 받고 있는 지하수에서 염소이온이 우세하며 생활하수 등으로 오염된 지하수의 경우에는 질산성질소, 암모니아성질소 등이 많이 조사되었다고 한 바 본 연구와 유사한 결과를 유추하는 것으로 판단할 수 있었다²⁴⁾. Fig. 6(D)와 (E)는 자연방사성물질인 라돈과 우라늄의 분포를 나타냈

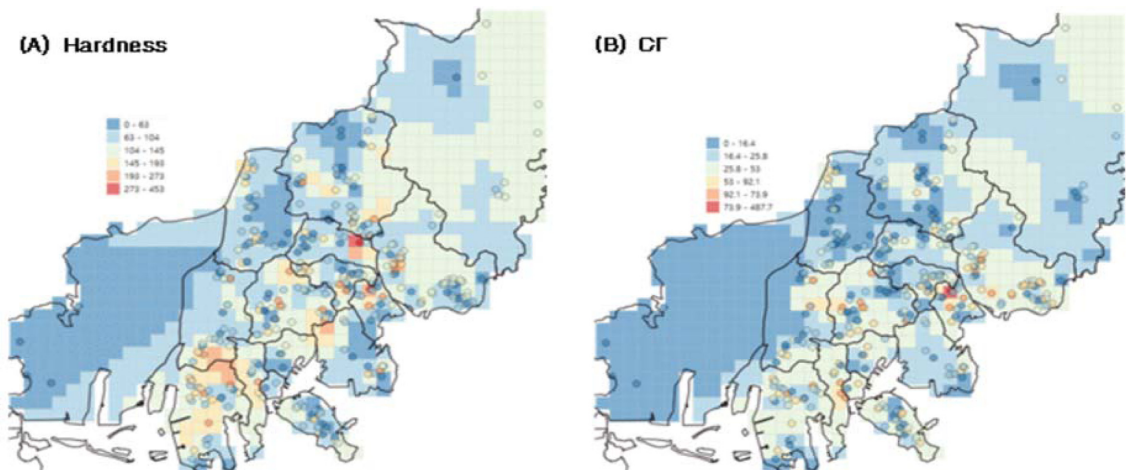


Fig. 6. Visualization of monitoring data for five drinking water quality parameters on a map of Busan (1 km × 1 km grid, domain 4). (A) Hardness, (B) Chloride ion, (C) Nitrate as Nitrogen, (D) Radon and (E) Uranium.

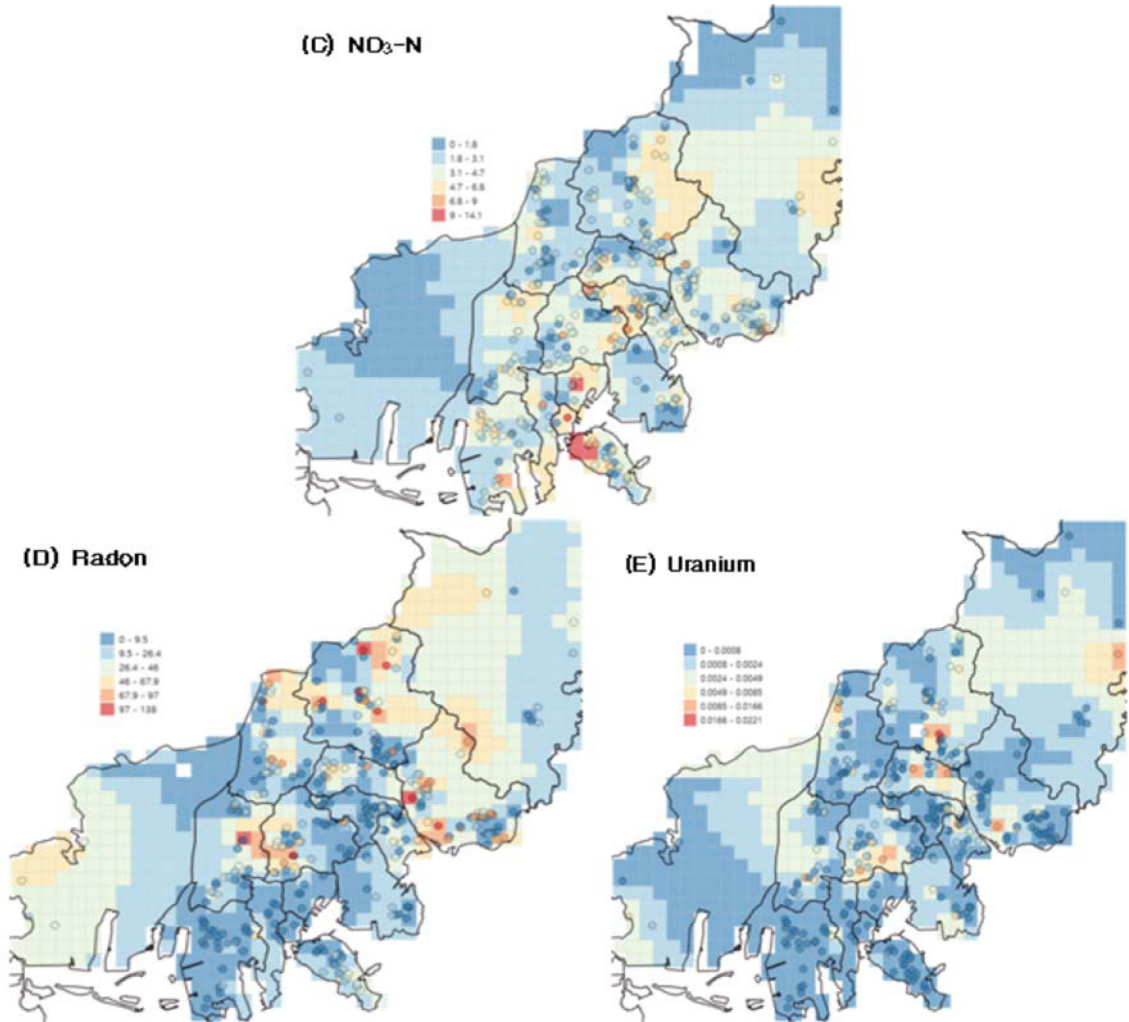


Fig. 6. Continued.

다. 부산지역 중 화강반암, 유문반암, 흑운모 화강암이 분포하는 북부 전반과 북동부의 화강암 지대 내 지하수의 라돈과 우라늄 농도가 부산지역의 남부보다 비교적 높은 함량으로 분포하고 있음을 시각적으로 표출되어 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 부산지역의 재난 대비 음용 지하수 시설을 대상으로 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙과 먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시에 준하여 물리·화학적 및 생물학적 수질항목과 자연방사성물질인 라돈, 우라늄 분포를 조사하고 지하수 수질 특성을 평가하여 다

음과 같은 결과를 얻었다.

연구대상 지하수시설 343개소 중 18.4%에 해당하는 63개소에서 먹는물 수질기준을 초과하였으며 각 구·군의 지하수 시설수별 수질기준 초과 비율이 0.0~35.6%로 구·군별 차이가 컸다. 또한, 지하수 시설 종류별 수질기준 초과 비율에서는 지자체 지하수 시설 18개소가 22.0%로 높게 조사되었으나 229개소가 지정된 공공용 지하수 시설의 수질기준 초과 시설수가 41개소로 수질기준 초과 시설수에서 높게 조사되었다. 지하수의 물리·화학적 및 생물학적 수질 조사결과에서 수질기준 초과 원인으로 총대장균군 등 지표세균이 90%를 차지하여 지하수의 수질관리는 미생물 오염관리가 우선 필요한 것으로 판단되었다. 이로서 적극적인 수질개선을 위해서는 각 구·군의 지하수

공 관리와 지하수 시설 주변 관리를 위해 지속적인 소독과 청소가 요구된다.

지하수의 자연방사성물질 함량 분포 조사결과에서 라돈은 ND~138 Bq/L, 우라늄은 ND~22 µg/L로 조사되었다. 라돈과 우라늄 함량은 전국에 비해 낮은 수준으로 분포되어 있었으나 두 항목 간의 $r=0.105$ 로 상관성이 거의 없는 것으로 평가되어 지하수시설 관리를 위해 라돈과 우라늄 함량 각각에 대한 지속적인 모니터링을 해야 할 것으로 판단되었다.

재난 대비 지하수 중 주요 14개 항목에 대한 상관관계 분석결과에서 경도와 염소이온, 황산이온이 높은 상관성을 나타냈으며 그 외의 항목 간의 상관성은 뚜렷하게 나타나지 않는 부산지역 지하수 수질 특성을 평가할 수 있었다. 또한, 연구 대상 343개소의 지하수 수질항목 중 경도, 염소이온, 질산성질소, 라돈과 우라늄 농도 분포를 부산광역시 지도로 옮겨 시각화하였다. 그 결과 부산광역시의 해수 영향을 받을 수 있는 지역을 중심으로 경도와 염소이온 농도가 높게 분포됨을 확인할 수 있었으며 질산성 질소는 도심지의 하수, 오수에 의한 오염 가능성을 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다. 또한, 라돈과 우라늄은 부산지역 북부 전반과 북동부에서 남부보다 비교적 높은 함량으로 분포하고 있음을 시각적으로 확인할 수 있었다. 이 주요 수질 항목의 상관성 분석 평가결과와 시각화된 분포도를 활용할 경우 지하수 시설 관리 대책을 세우는 방향성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

기후변화 대응에 취약한 구조인 도시환경에서 가뭄과 홍수가 반복적으로 증가하고 자연 재난의 강도가 더욱 심화될 것으로 전망되고 있어 안정적인 안전한 대체용수의 필요성이 증대되고 있다. 지하수는 한번 오염된 경우 유입된 오염물질이 멀리 이동하고 지하대수층 내에서 장기간 잔존하여 지표수에 비해 희석 또는 자정이 어려운 특성이 있으므로 무엇보다 일차적으로 오염이 되지 않도록 세심한 주의를 기울여야 하며 이를 위해 지하수 보전 및 관리가 철저히 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 2024-01-03-001)을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. 국토해양부, “수자원장기종합계획(2011~2020)”, 2011, 7-18.

2. 김남진, 윤성택, 김형수, 정경문, 김규범, “지구통계 기법을 활용한 울진 지역 천부 지하수의 수질 및 수리 지구 화학특성 해석”, *자원환경지질*, 2001, 34(2), 175-192.
3. 안재현, 유철상, 윤용남, “GMC 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석”, *한국수자원학회논문집*, 2001, 34(4), 335-345.
4. 이대웅, 정재원, 홍승진, 한대진, 주홍준, 김형수, “기후변화를 고려한 안성천 유역의 미래 물 부족량 평가”, *한국습지학회지*, 2017, 19(3), 345-352.
5. 이정민, 주진철, 윤여진, 정용길, “석문 저류지의 수량 및 수질확보를 통한 물순환 체계 구축 연구”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 2016, 16(4), 329-337.
6. 김일환, 이재범, 양성석, “엔트로피 방법을 이용한 낙동강 상류 지역의 지하수자원 관리 취약시기 평가방법 개발”, *한국수자원학회논문집*, 2018, 51(9), 761-768.
7. 행정안전부, “2022년 민방위 업무 지침”, 2022, 273-334.
8. 환경부, “먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙”, 2023, 제1061호.
9. 윤선진, 정명상, 송해중, 나은경, 김나영, 김경아, 권순복, 이인숙, 김재식, “충남 지역 지하수 수질특성 연구”, *환경분석과 독성보건*, 2020, 23(4), 222-232.
10. 김익수, 이재영, 최상일, “서울지역의 지하수 수질특성에 관한 연구”, *지하수토양환경*, 2004, 9(2), 54-63.
11. 박현진, 김경미, “서부경남지역 소규모 급수시설의 정수 수질특성 조사에 관한 연구”, *대한환경공학회지*, 2012, 34(7), 454-458.
12. 박현진, 정윤희, “서부경남지역 음용 지하수의 수질특성에 관한 고찰”, *대한환경공학회지*, 2014, 36(3), 192-197.
13. 박현진, 박지연, “서부경남지역 음용 지하수 관리 실태 및 지역적 특성에 관한 비교 고찰”, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 2015, 31(2), 103-109.
14. 박철웅, 김양기, 박송인, “전남의 비상급수 수질특성 및 효율적 관리방안”, *한국환경기술학회지*, 2016, 17(3), 240-248.
15. 장서은, 이대행, 김종민, 김하람, 정숙경, 배석진, 조영관, “통계적 기법을 이용한 광주지역 민방위비상급수용 지하수 수질 오염도 분석 및 시각화 연구”, *분석과학*, 2018, 31(3), 122-133.
16. 조덕희, 서인숙, 권상조, 김창규, 이현경, 김태화, “경기 남부지역 민방위 비상급수의 수질특성”, *한국환경분석학회지*, 2019, 22(1), 33-39.
17. 국립환경과학원, 먹는물수질공정시험기준, 2022, 제2022-36호.
18. 환경부, “먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시”, 2022, 제2022-3호.
19. 이윤국, 윤상훈, 조광운, 위환, 김난희, 강영주, 김은선,

- 서광엽, “광주광역시 비지정약수터 수질특성”, *한국환경 분석학회지*, **2013**, 16(2), 152-162.
20. 정찬호, “대전지역 민방위 비상급수용 지하수에 대한 수리화학과 질소 및 황 동위원소 연구”, *지질공학회지*, **2003**, 13(2), 239-256.
21. 국립환경과학원, “지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사연구(2018)”, **2018**.
22. 윤옥, 김문수, 정도환, 황재홍, 조병욱, “대전 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량: 다른 화강암지역과의 비교”, *지질공학회지*, **2018**, 28(4), 631-643.
23. 김연희, 고영춘, 문용운, 박종태, 김동수, “광주지역 비상급수 항목별 상관성 및 수질특성 연구”, *한국환경분석학회지*, **2006**, 9(3), 185-190.
24. 김태형, 정상용, “다변량 분석을 이용한 부산 수영구 지하수 오염특성 평가”, *지질학회지*, **2011**, 47(1), 45-58.