

지하수수질측정망 자료를 이용한 유역단위 지하수 수질등급 평가

김정직¹ · 현윤정^{1*}

¹한국환경연구원 물국토연구본부

Assessment of Groundwater Quality on a Watershed Scale by Using Groundwater Quality Monitoring Data

Jeong Jik Kim¹ · Yunjung Hyun^{1*}

¹Water and Land Research Group, Korea Environment Institute, Sejong 30147, South Korea

ABSTRACT

In Korea, groundwater quality is monitored through National Groundwater Quality Monitoring Network (NGQMN) administered by Ministry of Environment. For a given contaminant, compliance to groundwater quality standards is assessed on an annual basis by monitoring the number of incidents that concentration exceeds the regulatory limit. However, this approach provides only a fractional information about groundwater quality degradation, and more crucial information such as location and severity of the contamination cannot be obtained. For better groundwater quality management on a watershed, a more spatially informative and intuitive method is required. This study presents two statistical methods to convert point-wise monitoring data into information on groundwater quality status of a watershed by using a proposed grading scale. The proposed grading system is based on readily available reference standards that classify the water quality into 4 grades. The methods were evaluated with NO_3^- , Cl^- , and total coliform data in Geum River basin. The analyses revealed that groundwater in most watersheds of Geum River basin is good for domestic or/and drinking with no treatment. But, there was notable quality degradation in Bunam seawall and So-oak downstream standard watersheds contaminated by NO_3^- and Cl^- , respectively.

Key words : groundwater quality monitoring network, grading system, watershed scale, statistical method, Geum-river basin

1. 서 론

기후변화 영향으로 강수패턴 변화에 의한 홍수나 가뭄 규모 및 빈도의 증가, 하천 건천화 등 환경 변화가 발생하고 있으며 이용 가능한 지표수 양의 감소 및 수질오염 증가 현상이 동반되고 있다. 또한 도시와 산업발달에 따른 인구, 용수 수요 및 불투수 면적 증가로 물순환 체계가 악화되어 지표수 수량 및 수질저하도 발생하고 있어 수자원 관리의 중요성이 높아지고 있다. 이에 수질 및 수량 확보가 양호한 지하수로 비상용수 확보 및 안정적 물

공급을 위한 개발 및 이용이 증가하고 그 중요성과 활용 가치가 부각되고 있는 추세이다(Cha and Seo, 2020). 이러한 지하수를 지속적으로 이용하기 위해서는 체계적인 방법으로 지하수 수질을 평가하고 관리할 필요가 있다(Park et al., 2007).

우리나라는 지하수 수질관리를 위해 1999년 이후부터 지하수수질측정망을 설치·운영하며 모니터링을 수행하고 있으며 매년 측정망 및 용도별 수질기준 초과율 분석을 통해 수질을 평가하고 있다(Yoon et al., 2012). 또한, 개별 관정 및 지하수 이용·개발시설의 정기적인 수질검사를 동반한 수질기준 적합 및 부적합 여부 판단을 통해 지하수수질을 평가·관리하고 있다. 2016년에서 2018년까지의 지하수수질측정망 운영결과에 따르면 우리나라 지하수는 주로 일반오염물질인 수소이온농도, 총대장균군, 염소이온 및 질산성질소에서 초과율이 높은 것으로 분석되었다(MOE and NIMR, 2019).

주저자: 김정직, 연구원

*교신저자: 현윤정, 연구위원

Email: yjhyun@kei.re.kr

Received : 2021.12.15 Reviewed : 2021.12.16

Accepted : 2021.12.20 Discussion until : 2022.02.28

한편, 2018년 제정된 「물관리기본법」에서는 물관리 기본원칙으로 ‘유역 관리’를 규정하였다. 지표수의 경우 과거부터 유역 단위에서 수량 및 수질을 평가·관리해 왔으나, 지하수는 관측망이나 수질측정망을 유역단위로 설치하고 있음에도, 매년 조사결과는 지자체별로 측정망 관정단위 자료의 분석을 통해 현황을 보고하고 있다(Hyun et al., 2020). 그러나, 물관리 기본원칙에 따라 앞으로의 지하수 관리는 지표수와 마찬가지로 유역단위로 관리하는 체계로 전환이 필요하다. 게다가 지표수와 연계한 통합관리 차원에서도 유역단위로 지하수의 상태를 정량적으로 평가하여 관리 대책 수립 및 시행될 수 있는 체계를 마련해야 한다. 유럽의 경우 지하수 관리에 있어서 물환경과 관련된 모든 요소를 통합관리하도록 물관리지침(Water Framework Directive, WFD)을 수립하여 지표수 및 지하수의 생태·화학적 및 정량적 상태 등을 고려하여 유역의 좋은 상태 달성을 위해 지하수의 수량과 수질을 평가 및 관리하고 있다(European Commission, 2019). 또한 WFD 기반의 물관리지침들 중 지하수 지침(Groundwater Directive, GWD)을 수립하여 유역의 지하수체에 대한 지하수의 수질 상태를 평가하기 위한 기준과 통계 및 추세분석, 대표 수질 오염물질 지정 및 관리 등 체계적인 절차를 마련하여 평가 및 관리하고 있다(European Commission, 2009).

다수의 연구에서 지하수수질측정망 자료를 이용하여 우리나라의 지하수 수질현황을 평가한 바 있다. Yoon et al. (2012)과 Seo et al.(2020)은 측정망의 수질기준 초과 횟수, 평균농도 및 경향성 분석을 통해 측정망 관정에서의 지하수 오염 등급을 정량화하여 지하수 수질 등급을 평가하였으며 Lee et al.(2013, 2014)와 An et al.(2015)는 지하수 수질측정망 자료의 추세분석과 문턱값 산정을 통해 지하수 수질을 ‘ 좋음 ’과 ‘ 나쁨 ’으로 분류하여 관정에서의 수질을 평가하였다. Jung and Song(2013)은 환경부에서 정한 지하수 오염평가 시 수질기준 초과율로 오염 등급을 구분하여 평가하는 방법을 합평균 내 단위유역에 적용하였으며 이를 통해 지하수수질의 등급화 및 관리 등급 분류의 필요성을 언급하였다. 그러나, 대부분의 연구에서는 지하수수질측정망 자료를 관정단위로 분석하고 관정별 수질기준 초과율, 수질 추세 자료에 근거하여 수질현황을 평가하였고, 유역별로 설치 운영중인 지하수수질측정망을 이용하여 유역단위의 지하수 수질 상태를 평가한 연구는 미흡하다. 이에 본 연구에서는 지하수의 먹는물 및 생활용수 수질기준을 고려한 지하수 수질 상태의 등급기준을 마련하고, 이를 통계적 방법을 이용하여 유역단위의 지하

수 수질을 평가하는 평가방법을 제안하였다. 또한 금강유역을 대상으로 지하수수질측정망 자료를 이용하여 표준유역별 지하수 수질 상태를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 지하수수질측정망 자료

2020년 12월 지하수법의 개정으로 지하수수질측정망은 지하수위를 관측하는 지하수 관측망과 통합되어 ‘지하수 측정망’으로 개칭되면서 지하수위와 수질의 현황과 변동 실태를 통합적으로 감시하는 측정망으로 개편되었다. 2020년까지 우리나라는 「지하수법」 제18조(수질오염의 측정) 및 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제9조(수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획의 수립·고시)를 근거로 전국 지하수 수질현황 및 변동 실태 파악을 목적으로 하는 지하수수질측정망을 구축 및 운영하였다. 2020년까지의 지하수수질측정망은 국가 및 지역지하수수질측정망으로 구분되며 국가지하수수질측정망은 유역과 지질을 고려한 수질 특성 파악과 산업단지, 폐광산지역 및 가축매몰지등 대규모 오염원으로부터 오염 확산을 감시한다(KEC, 2017). 지역지하수수질측정망은 지하수오염감시 및 수질현황 파악을 위해 지방자치단체 관할 지역에서 운영한다. 국가지하수수질측정망에서는 기본항목 15개와 지하수 수질기준 항목 및 오염원별 측정항목을 연 4회 측정하고있다. 기본항목은 현장측정 6개 항목인 수위, 온도, 수소이온농도, 용존산소, 산화이온전위 및 전기전도도와 주 양·음이온 9개 항목인 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , NO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} 로 구성되어 있다. 지하수 수질 기준 항목에는 일반오염물질인 수소이온농도, 총대장균군, 질산성질소 및 염소이온과 특정유해물질인 카드뮴, 비소, 이안, 수은, 다이아지논, 파라티온, 페놀, 납, 크롬, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 항목이 있다. 오염원별 측정 항목으로는 암모니아성질소, 구리, 아연, 알루미늄, 철, 망간, 셀레늄 및 붕소 항목으로 분류된다. 2018년 지하수수질측정망 결과에 따르면, 우리나라의 지하수 수질기준 초과율은 수소이온농도가 42%로 가장 크고 총대장균군이 21.3%, 염소이온 12.2% 및 질산성질소 10.7%로 주로 일반오염물질에 의한 수질저하가 일어나고 있는 것으로 파악되었다(MOE and NIER, 2019).

본 연구에서는 유역단위 지하수수질 상태 평가를 수행하기 위하여 2017년 기준 국가지하수수질측정망과 지역지하수 수질측정망 자료 중 질산성질소, 염소이온 및 총

Table. 1. Water quality standard for drinking and domestic water of groundwater

	Item	Drinking water	Domestic water
General contamination substances	pH	5.8~8.5	5.8~8.5
	Total coliform	N.D/100 mL	≤5,000 MPN/100 mL
	NO ₃ -N	≤10 mg/L	≤20 mg/L
	Cl ⁻	≤250 mg/L	≤250 mg/L
Specific hazardous substances	Cd	≤0.005 mg/L	≤0.01 mg/L
	As	≤0.01 mg/L	≤0.05 mg/L
	CN	≤0.01 mg/L	≤0.01 mg/L
	Hg	≤0.001 mg/L	≤0.001 mg/L
	Diazinon	≤0.02 mg/L	-
	Parathion	≤0.06 mg/L	-
	Phenol	≤0.005 mg/L	≤0.005 mg/L
	Pb	≤0.01 mg/L	≤0.1 mg/L
	Cr	≤0.05 mg/L	-
	TCE	≤0.03 mg/L	≤0.03 mg/L
	PCE	≤0.01 mg/L	≤0.01 mg/L
	1,1,1-TCE	≤0.1 mg/L	≤0.15 mg/L
	Benzene	≤0.01 mg/L	≤0.015 mg/L
	Toluene	≤0.7 mg/L	≤1 mg/L
	Ethylbenzene	≤0.3 mg/L	≤0.45 mg/L
	Xylene	≤0.5 mg/L	≤0.75 mg/L

대장균군의 반기 및 분기별 측정자료를 이용하였다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 지하수 수질등급 분류기준

본 연구에서는 지하수의 먹는물 및 생활용수 수질기준 (Table 1)을 적용하여 일반오염물질과 특정유해물질의 수질기준 초과 여부에 따라 즉시 음용수로 이용할 수 있거나 정수처리 후 음용수나 생활용수 이용 가능 여부 등을 고려하여 4개의 등급으로 분류하였다(Fig. 1). 1등급(G1)은 먹는물 수질기준을 만족하는 청정 상태로 별도의 처리 없이 음용수로 이용할 수 있는 수질 상태이며, 2등급(G2)은 생활용수 기준을 만족하여 미약한 수질 저하가 있으나 청정 상태에 근접하여 생활용수 사용에 적합하며 별도의 정수처리 후 음용수로 사용할 수 있는 수질 상태로 정의하였다. 3등급(G3)의 경우는 특정유해물질에 대한 생활용수 수질기준은 만족하나 일반오염물질의 경우 수질 저하가 발생하여 생활용수 수질기준을 만족하지 못해 별도의 정수처리 후 생활용수로 사용할 수 있는 수질 상태이다. 4등급(G4)의 경우 상당량의 특정유해물질로 오염되어 생활용수 수질기준을 초과한 상태로 고도의 정수처리나 정화 후 생활용수로 사용할 수 있는 수질 상태로 정의하였다.

2.2.2. 유역단위 지하수 수질평가 방법

본 연구에서는 유역단위의 지하수수질 상태 평가를 위해 우선 표준유역별로 지하수수질측정망 자료를 수집하여 평가가능 여부에 대해 사전검토를 실시하였다. 그리고, 표준유역 내 측정망 자료를 기반으로 오염물질별로 유역단위 수질상태를 등급화하여 평가한 후, 이를 종합하여 오염물질별 등급 중 최저등급으로 부여함으로써 표준유역의 지하수수질 상태를 평가하였다. 유역단위 지하수수질 상태 평가 절차는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 평가 결과에 따라 수질의 검토가 필요하다고 판단되는 표준유역에 대해서는 추가자료를 확보하여 심층 분석을 실시하였다.

표준유역 내 관정단위 지하수수질측정망 자료로부터 지하수 오염물질별 유역단위 지하수 수질을 평가하기 위하여 두 가지 통계학적 방법을 이용하였다. 첫 번째 방법은 유역 내 측정망자료를 이용하여 해당 오염 물질의 평균 농도를 산정하고 그에 따른 지하수 상태의 등급을 부여하는 방법이다. 두 번째는 유역 내 측정망 지점별 수질등급 중 최저등급으로 유역의 수질 등급을 부여하는 방법이다.

[방법 1] 유역의 평균농도 기반 등급부여

평균 농도 기반의 지하수 수질 상태 평가 방안에서는 표준유역 내 평가하고자 하는 오염물질에 대해서 수질측

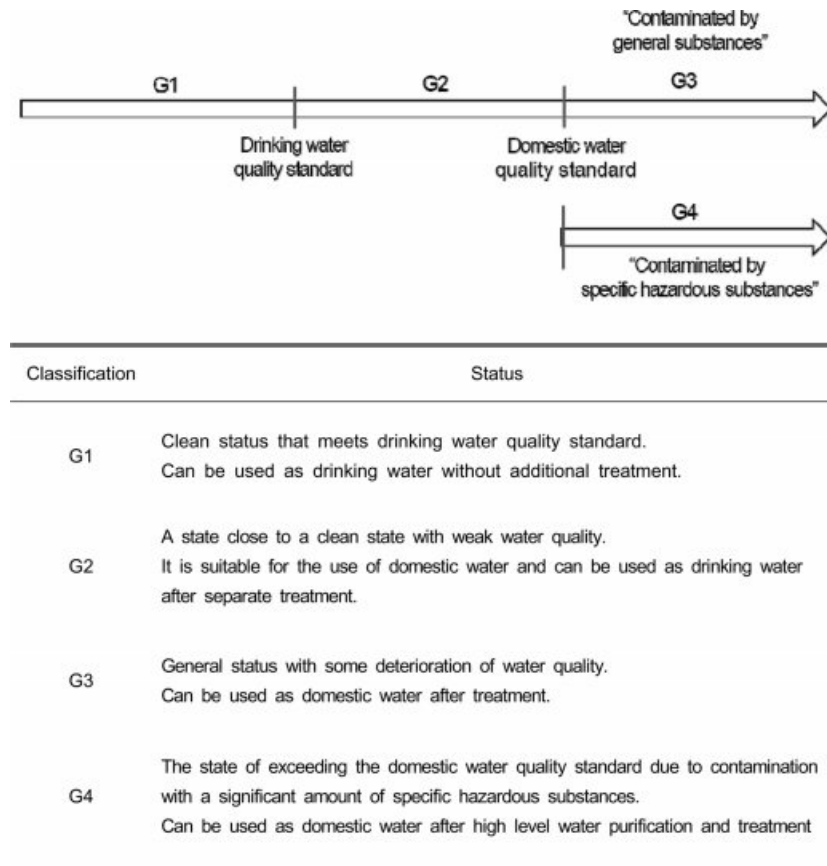


Fig. 1. Classification of Groundwater by drinking and domestic quality standards.

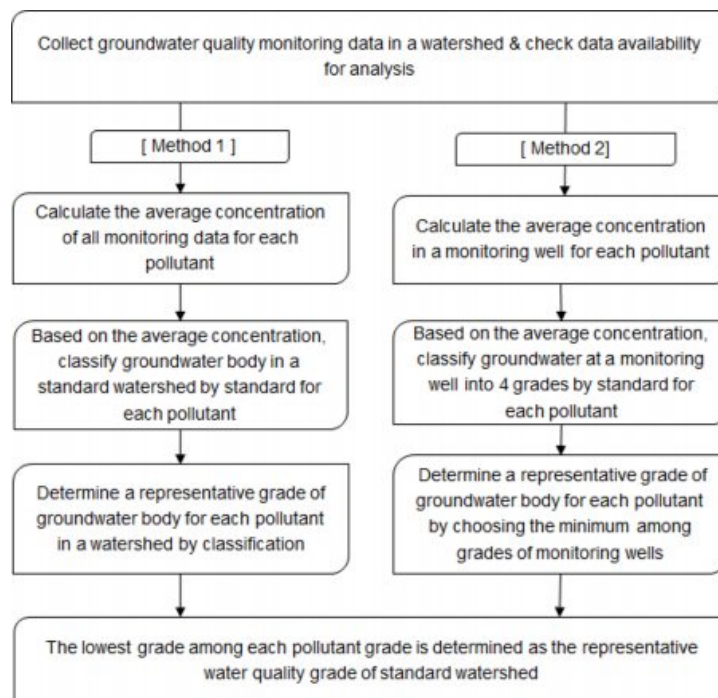


Fig. 2. Evaluation method of groundwater quality in the standard watershed.

정망자료들의 평균을 해당 오염물질의 표준구역 대푯값으로 산정한다. 2.2.1에서 기술한 수질 등급 분류기준에 따라 수질 대푯값에 해당되는 수질 상태 등급을 부여하여 이를 해당 오염물질에 대한 표준구역의 수질 상태로 평가하는 것이다. 수질 등급을 선정하기 위한 과정을 나타낸 식은 다음과 같다.

$$G_i = \text{grade}(\bar{x}_i) \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{i,j}}{N} \quad (2)$$

식 (1)에서 G_i 는 표준구역 i 의 수질 등급, \bar{x}_i 는 표준구역 i 의 오염물질 x 의 평균 농도이며 식 (2)에서 $x_{i,j}$ 는 표준구역 i 내 오염물질 x 의 j 번째 농도, N 은 표준구역 i 내 오염물질 x 의 총 자료수이다.

[방법 2] 측정지점별 등급 기반 최저등급 부여

수질측정지점별 등급 중 최저등급으로 지하수 수질상태를 평가하는 방안에서는 표준구역 내 평가하려는 오염물질에 대해 측정지점별로 오염물질 평균농도를 산정하여 수질등급을 부여한 후, 측정지점별 등급 중 가장 낮은 등급을 해당 오염물질에 대한 표준구역의 대표 등급으로 선정한다. 측정망별 최저 등급을 이용한 표준구역의 수질 등급 선정 과정은 아래 식과 같다.

$$G_i = \text{Min}(g_{i,1}, \dots, g_{i,n}) \quad (3)$$

식 (3)에서 G_i 는 표준구역 i 의 수질 등급, $\text{Min}(g_{i,j})$ 는 $g_{i,j}$ 중 최저치, $g_{i,j}$ 는 표준구역 i 내 j 지점에서의 오염물질 x 의 평균 농도의 수질등급, n 은 표준구역 i 내 측정망의 총 지점 수이다. 오염물질 x 의 평균 농도, $\bar{x}_{i,j}$ 는 식(4)에 따라 산정한다.

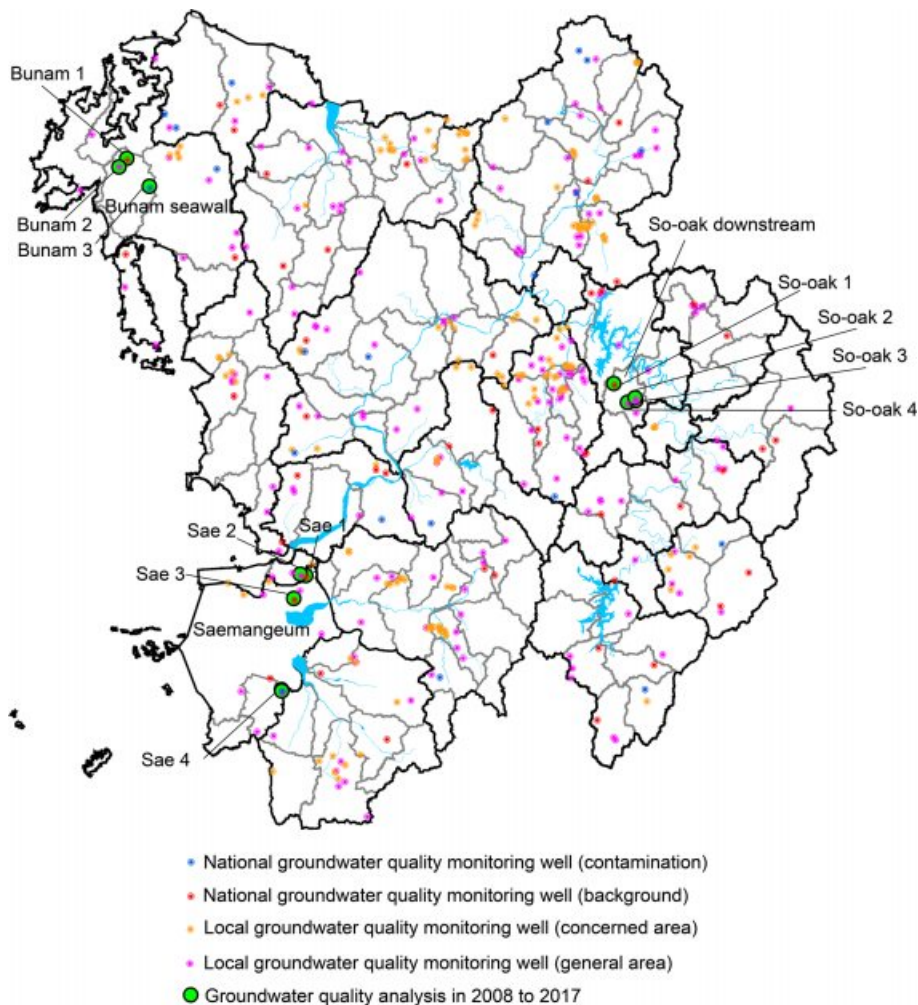


Fig. 3. Distribution map of groundwater quality monitoring wells in the Geum river basin.

$$\overline{x_{i,j}} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{i,j,k}}{m} \quad (4)$$

식 (4)에서 m 은 j 지점에서 오염물질 x 의 총 자료 개수이다.

3. 결 과

3.1. 분석 예시 – 금강유역

본 연구에서는 분석 예시로 금강유역을 대상으로 표준유역 단위의 지하수수질 평가하였다. 금강유역은 전체 유역면적 17,925 km²로 금강, 삼교천, 금강서해, 만경·동진 4개의 대권역 내 21개 중권역, 137개 표준유역으로 구분되어 있다(Fig. 3). 금강유역에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2018년 기준 총 419개소로 국가지하수수질측정망 90개소 및 지역지하수수질측정망 329개소가 위치하고 있다. 토양지하수정보시스템(Soil Groundwater Information System, SGIS)에서 제공하는 자료를 활용하여 2017년 기준 총 282개소의 국가지하수수질측정망과 지역지하수수질측정망 대상으로 질산성질소, 염소이온 및 총대장균군의 반기 및 분기별 측정자료를 분석에 이용하였다. 수질저하가 발생한 일부 표준유역을 대상으로 한 심층 분석에서는 2008-2017년까지 수집된 자료를 통해 연도별 오염물질의 평균 농도 분포에 대한 분석을 수행하였다.

3.2. 오염물질별 유역단위 수질 등급 평가

금강유역의 지하수수질을 표준유역 단위로 앞서 기술한 두 가지 방법, [방법 1]과 [방법 2]를 적용, 등급화하여 질산성질소, 염소이온, 및 총대장균군에 대한 수질 상태를 평가하였다.

3.2.1. 질산성 질소

지하수수질자료의 사전검토에서 137개 표준유역 중 44개 표준유역은 측정망이 설치되어 있지 않거나 평가 기준년도 측정자료의 부재 또는 자료오류로 인하여 평가불가로 처리하고 나머지 93개 표준유역에 대해서 수질 상태를 평가하였다. 먼저 [방법 1]을 적용하여 수질 등급을 평가한 결과, 1등급인 표준유역이 87개, 2등급인 표준유역은 6개로 평가되었다(Fig. 4a). 반면에 측정망별 평균값에 등급을 평가한 후 유역 내 측정망 중 가장 낮은 등급으로 해당 유역의 수질을 평가하는 [방법 2]를 적용한 결과, 1등급인 표준유역이 83개, 2등급이 9개, 그리고 3등급이 1개 표준유역인 것으로 나타났다(Fig. 4b)). [방법 1] 적용결과와 비교하면, 1등급 표준유역이 4개 감소하였으며, 2등급이 3개, 3등급이 1개 증가하여 [방법 2]를 적용했을 때 유역의 지하수수질이 더 저하된 것으로 평가되었다.

[방법 2]를 적용하여 지하수 수질이 3등급으로 평가된 부남방조제 표준유역에 대해 과거 10년(2008년~2017년) 간의 측정망 자료를 이용하여 지하수 수질의 변화 특성에 대해 추가 분석을 수행하였다(Fig. 5). 부남방조제 표준유역에는 3개의 지하수수질측정망이 있는데, 2017년에는

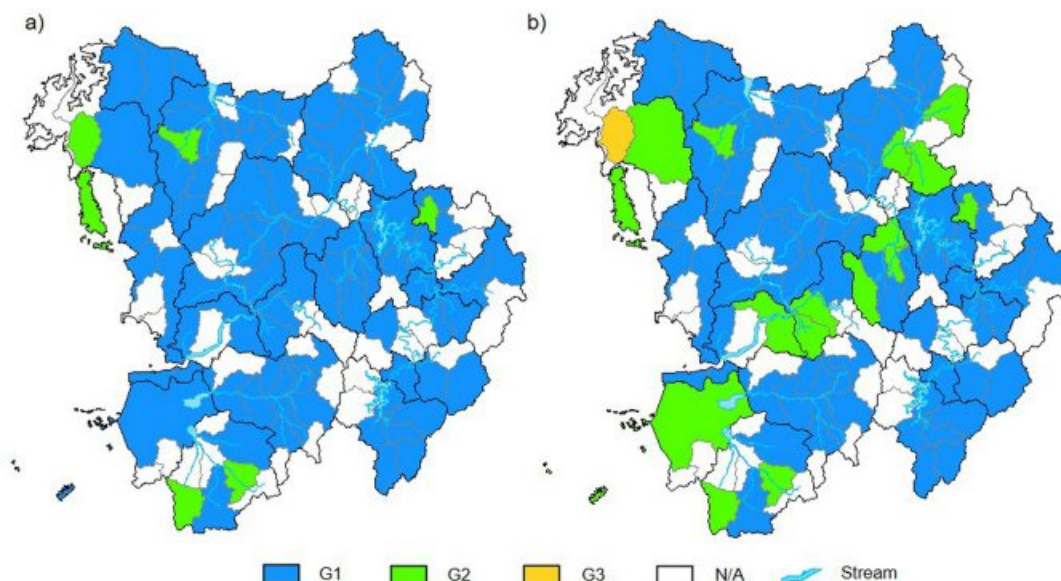


Fig. 4. The result of assessment for nitrate nitrogen in the Guem-river basin; a) result of method 1, b) result of method 2.

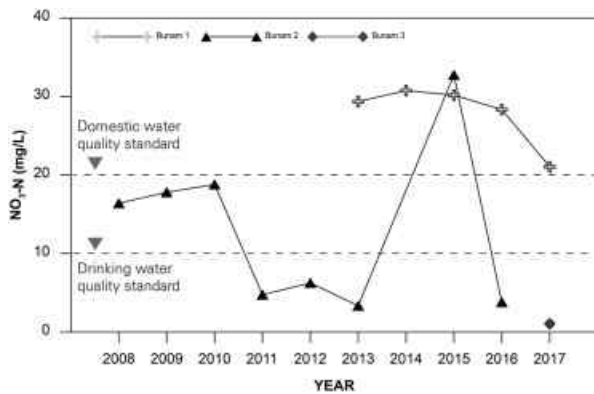


Fig. 5. Average concentration of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) by year of the groundwater quality monitoring well in the Bunam-seawall standard watershed.

Bunam 2의 자료가 부재하여 Bunam 1과 Bunam 3에서의 자료로 지하수 수질을 평가하였다. Bunam 1에서 질산성질소 평균 농도는 약 21.0 mg/L로 생활용수 수질기준을 초과하였으나, Bunam 3에서 약 2.0 mg/L로 먹는물 수질기준을 만족하여 두 지점의 평균으로 등급을 부여하는 [방법 1]을 적용하면 2등급으로 평가되나, [방법 2]를 적용하였을 때는 3등급으로 평가되었다. 한편, Bunam 1에서 2013~2017년 동안의 수질자료를 보면 지속적으로 생활용수 수질기준을 초과하는 것으로 볼 때 부남방조제 표준유역은 3등급으로 평가된 것이 적절하다고 볼 수 있다.

3.2.2. 염소이온

자료 사전검토에서 염소이온의 경우 질산성질소와 마찬가지로 44개 표준유역은 측정망이 평가불가인 것으로 나타났다. [방법 1]을 적용하여 염소이온에 대한 수질 등급을 평가한 결과, 총 93개의 표준유역 중에서 1등급인 표준유역이 92개, 2등급이 0개, 3등급이 1개인 것으로 평가되었다(Fig. 6a). [방법 2]의 경우 1등급 91개, 2등급 0개, 3등급 2개로 평가되었다(Fig. 6b). 본 연구에서는 현행 지하수의 용도별 수질기준에 기반하여 등급기준을 삼았기 때문에, 먹는물 기준과 생활용수 수질기준이 250 mg/L로 동일한 염소이온의 경우 1등급과 2등급의 구분이 불가능한 것으로 나타났다. 이처럼 용도별 수질 기준이 같은 오염물질들에 유역단위로 오염물질별 수질 등급을 평가할 경우, 현행 수질기준의 적용성 여부에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[방법 2]에서 3등급으로 평가된 소옥천 하류 표준유역과 새만금 방조제 표준유역에 대한 지하수 수질 특성을 자세하게 살펴보았다. 우선 대청댐 유역 내 위치한 소옥천 하류 표준유역은 [방법 1]에서는 1등급으로 평가된 표준유역이다. 여기에는 2017년 기준 4개소에서 수질 측정이 이루어졌다. 이 중 So-oak 2는 2010년과 2012년을 제외하고 매년 100 mg/L 이상 농도를 보이고 있으며 2015년부터 지속적으로 수질기준을 초과하고 있다. 반면, So-oak 2를 제외한 측정망에서는 먹는물 및 생활용수 수질기준인 250 mg/L를 초과하지 않았으며 비교적 낮은 농

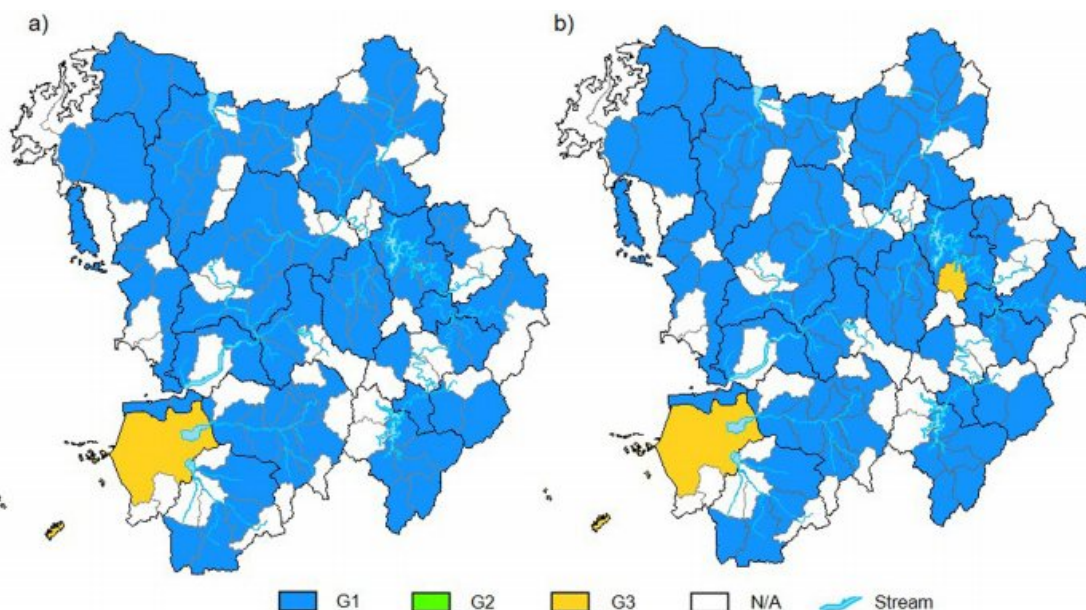


Fig. 6. The result of assessment for Chloride ion (Cl^-) in the Guem-river watershed; a) result of method 1, b) result of method 2.

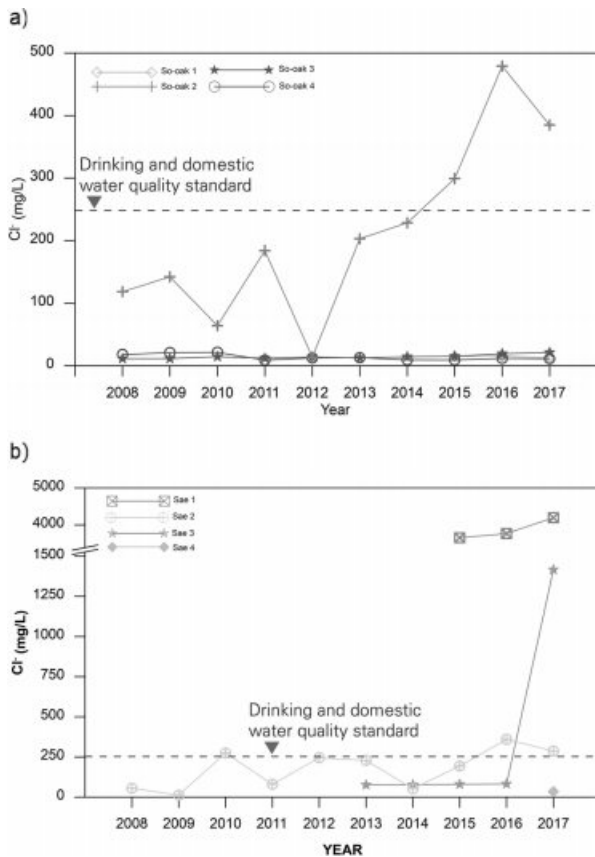


Fig. 7. a) Average concentration of Chloride ion (Cl^-) by year of the groundwater quality monitoring well in the So-oak downstream standard watershed, b) Average concentration of Chloride ion (Cl^-) by year of the groundwater quality monitoring well in the Saemangeum-seawall standard watershed.

도를 유지하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 7a). 이는 So-oak 2 주변에 지하수 수질저하의 원인이 있을 가능성이 있으므로 표준유역 내 오염원이 될 수 있는 곳을 파악하고 추후 관리 및 예방에 대한 대책수립 등 관리와 주의가 필요한 유역으로 판단할 수 있다.

새만금방조제 표준유역은 두 가지 방법에서 모두 3등급으로 평가되었다. 이 유역의 지하수 수질자료 검토 결과, Sae 1, Sae 2 및 Sae 4 측정망에서 2017년에 먹는물 수질기준을 초과한 것으로 나타났다(Fig. 7b) 특히, Sae 1에서 2015년부터 1400 mg/L 이상 매우 높은 농도를 보이며 Sae 4도 2017년 급격히 염소이온 농도가 증가한 것으로 나타났다. 염소이온 농도의 높은 수치 또는 급격한 증가는 해안 가까이 위치한 표준유역의 위치 등을 고려했을 때 해수 유입의 영향이 있을 것으로 사료되나, 정확한 원인 판단을 위해서는 추가적인 지하수 조사가 필요할 것이다.

3.2.3. 총대장균군

금강유역의 총대장균군에 대한 지하수 수질은 46개의 평가불가인 표준유역을 제외하고 총 91개소의 자료를 이용하여 평가하였다. 총대장균군의 경우, [방법 1]과 [방법 2] 모두 동일한 분석결과를 보였고, 1등급인 표준유역이 23개, 2등급이 68개 인 것으로 평가되었다(Fig. 8). 총대장균군의 경우, 대부분이 1등급이었던 질산성질소와 염소이온의 수질평가 결과와는 달리, 1등급보다 2등급이 더 많은 것으로 평가되었다. 이는 먹는물 및 생활용수 수질

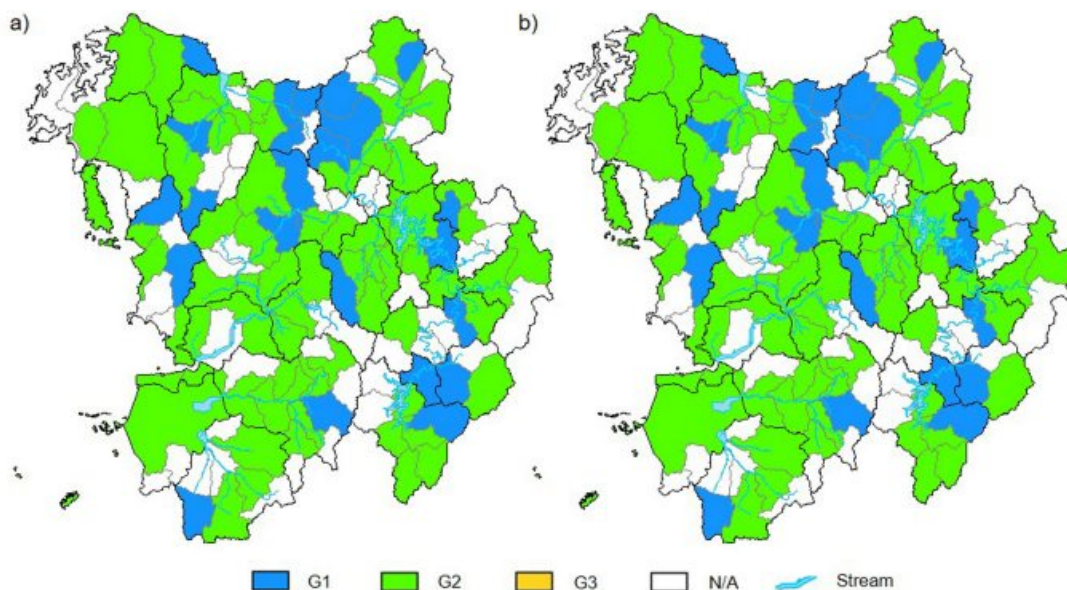


Fig. 8. The result of assessment for Total coliform in the Guem-river watershed; a) result of method 1, b) result of method 2.

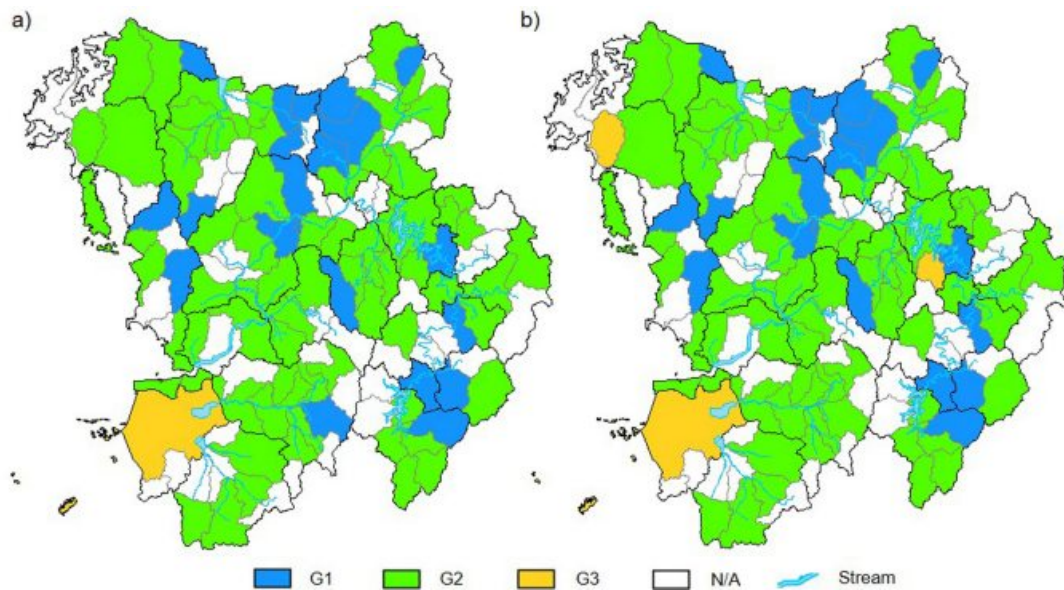


Fig. 9. The result of comprehensive assessment for groundwater quality in the Guem-river watershed; a) result of method 1, b) result of method 2.

기준이 각각 불검출 및 5000 MPN/100 ml로 먹는물 기준이 매우 엄격한 데 반해 생활용수 기준의 범위는 매우 넓기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 유역단위 지하수 수질 종합평가

본 연구에서는 유역 내 오염물질별 수질 등급 평가 결과 중 최저등급을 유역단위 지하수체의 수질로 평가하는 방법을 적용하여 해당유역 지하수체의 수질에 대한 종합 평가를 수행하였다. 평가 결과, 금강유역의 대부분의 표준유역은 지하수 수질 상태가 2등급인 것으로 나타났다(Fig. 9). [방법 2]를 이용하면, [방법 1] 대비 1등급과 2등급 표준유역이 각각 1개씩 감소하고 3등급 표준유역이 2개로 증가하여 1등급은 19개, 2등급은 69개, 3등급이 2개로 평가되었고, 이 때 부남방조제 및 소옥천 하류 표준유역이 3등급으로 평가되었다.

4. 토의 및 결론

매년 발간하는 지하수조사연보에서는 우리나라 지하수 수질현황에 대해 지자체별 수질기준 초과율, 용도별 이용 적합 및 부적합 비율 등의 통계자료를 제공한다. 이 통계 자료는 지하수체의 수질보다는 관정 또는 관정(점)단위의 지하수의 용도별 효용성 현황을 지시하는 자료라고 할 수 있다. 따라서, 용도별 수질기준 초과율은 유역(면)단위 지하수체의 수질에 대한 직관적인 정보를 제공하는 데에 한

계가 있다. 본 연구에서는 국가 물관리가 유역단위로 전환되는 시점에서 유역단위 지하수 수질을 직관적이고 가시적으로 평가하는 방법을 제안하고 이를 질산성질소, 염소이온, 총대장균군 수질자료에 적용하여 금강유역의 지하수 수질을 평가하였다. 평가 결과, 일부 표준유역에서는 오염물질별 평균 농도를 이용한 [방법 1]이 [방법 2]보다 지하수 수질을 더 좋게 평가하였다. 수질평가 결과가 다르게 나타난 표준유역을 대상으로 추가분석을 실시한 결과, [방법 1]을 적용하여 유역단위 지하수체의 수질을 평가하면 유역 내 수질이 많이 저하된 지점의 농도값이 주변에 수질이 양호한 측정지점의 농도값에 의해 상쇄되는 효과가 있어 지하수 수질 관리의 사각지대가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 관정단위의 지하수측정망 자료를 이용하여 유역단위 지하수체의 수질에 대한 정보로 전환할 경우 평균보다는 최저등급에 기반하여 수질을 1차적으로 평가하고, 필요 시 추가적인 분석 또는 조사를 통해 지하수체의 상세한 수질현황을 파악하여 수질관리계획을 수립하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 한편, 제한된 수의 측정망 자료를 이용하여 유역단위의 대푯값을 산정하는 방법은 통계적인 한계가 있을 수 있다. 따라서, 본 방법의 신뢰도와 실효성을 제고하기 위해서는 유역단위 지하수 관리를 기반으로 한 지하수수질측정망의 체계적인 확대가 필요하다.

마지막으로 본 연구에서 제안한 유역단위 지하수 수질 평가방법은 지하수 이용, 하천 수질, 해수 침투, 지하수

오염원 분포 등 지하수 수질에 영향을 미치는 다양한 물순환 요소들을 고려하지 않고 있다. 그러나 현재 가용한 지하수수질측정망 자료를 기반으로 유역단위의 지하수 수질을 평가하여 유역 내 지하수 수질에 대한 직관적이고 가시적인 정보를 제공한다는 점에서 향후 지하수 수질관리 및 정책 수립에 매우 유용할 것으로 판단된다. 향후 지하수 수질에 대한 통계적 경향성 및 검정 분석 등에 대한 심층 평가와 물순환 관련 요소에 대한 단계별 평가 등에 대한 추가연구를 통해 보다 나은 평가 방법 및 체계를 마련할 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 한국환경연구원에서 환경부의 수탁과제로 수행한 「지하수 수질 최적관리를 위한 정책 발전방향 연구」(2017-084)와 「지하수 유역관리 기반마련 연구」(2019-081)의 연구결과를 기초로 작성되었습니다.

References

- An, H., Jeon, S.W., Lee, S.J., Hyun, Y., Yoon, H., and Kim, R.H., 2015, Suggestion of a groundwater quality management framework using threshold values and trend analysis, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, **20**(7), 112-120.
- Cha, S. and Seo, Y.G., 2020, Groundwater quality in gyeongnam region using groundwater quality monitoring data: Characteristics according to depth and geological features by background water quality exclusive monitoring Network, *Clean Technology*, **26**(1), 39-54.
- European Commission, 2009, Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Guidance Document No.18. Guidance on Groundwater Status and Trend Assessment, p.1-82.
- European Commission, 2019, Fitness Check of the Water Framework Directive and the Floods Directive, p. 2
- Hyun, Y., Moon, H., Chung, W.H., Kim, G.H., Lee, M.H., Cha, E.J., Jeong, A., Kim, J.J., and Kim J.Y., 2020, A Study on the Foundation for Groundwater Watershed Management, Ministry of Environment.
- Jung, C.D. and Song, I.S., 2013, Field applications on groundwater management scheme of subwatershed unit in Hampyeong-Gun, *Economic and Environmental Geology*, **46**(6), 545-559.
- Korea Environment Corporation(KEC), 2017, 2017 Groundwater Quality Management Report, Ministry of Environment (MOE).
- Lee, S.J., Hyun, Y., Park, J.G., Kim, Y.S., Ha, J., Lee, J.Y., and Lee, H.J., 2013, A Study on the Determination of Background Levels in Groundwater and Improvement of Groundwater Quality Standards (I), National Institute of Environmental Research.
- Lee, S.J., Hyun, Y., Park, J.G., Kim, Y.S., Ha, J., Lee, J.Y., and Lee, H.J., 2014, A Study on the Determination of Background Levels in Groundwater and Improvement of Groundwater Quality Standards (II), National Institute of Environmental Research.
- Ministry of Environment(MOE) and National Institute of Environmental Research(NIER), 2019, 2018 Groundwater quality monitoring report.
- 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: Implications for improvement, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, **12**(6), 92-99.
- Seo, I., Choi, Y., Kim, T., Guen, S., Song, J., Lee, H., Jung, S., Kim, C., Yoon, H., and Kim, T., 2020, Water quality characteristics of the gyeonggi-do groundwater quality monitoring network, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, **23**(3), 141-154.
- Yoon, H., Bae, G.O., and Lee, K.K., 2012, Quantification and evaluation of groundwater quality grade by using statistical approaches, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, **17**(1), 22-32.