



A proposal of unit watershed for water management based on the interaction of surface water and groundwater

Kim, Gyo-Bum^{a*} · Hwang, Chan-Ik^b

^aProfessor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University, Daejeon, Korea

^bResearcher, Industry-Academic Cooperation Foundation, Daejeon University, Daejeon, Korea

Paper number: 20-043

Received: 1 May 2020; Revised: 6 August 2020; Accepted: 6 August 2020

Abstract

In South Korea, 850 standard watersheds and 7,807 KRF catchment areas have been used as basic maps for water resources policy establishment, however it becomes necessary to set up new standard maps with a more appropriate scale for the integrated managements of surface water-groundwater as well as water quantity-quality in the era of integrated water management. Since groundwater has a slow flow velocity and also has 3-D flow properties compared to surface water, the sub-catchment size is more effective than the regional watershed for the evaluation of surface water-groundwater interaction. The KRF catchment area, which has averagely a smaller area than the standard watershed, is similar to the sub-catchment area that generally includes the first-order or second-order tributaries. Some KRF catchment areas, which are based on the surface reach, are too small or large in a wide plain or high mountain area. Therefore, it is necessary to revise the existing KRF area if being used as a unit area for integrated management of surface-water and groundwater. A unit watershed with a KRF area of about 5 to 15 km² can be effective as a basic unit for water management of local government considering a tributary composition and the location of groundwater wells, and as well it can be used as a basic tool for water demand-supply evaluation, hydrological observation system establishment, judgment of groundwater permission through a total quantity management system, pollution assessment, and prioritizing water policy, and etc.

Keywords: Surface water, Groundwater, Integrated management, KRF catchment area, Unit watershed

지표수-지하수 연계 기반의 통합수자원 관리를 위한 단위유역 제안

김규범^{a*} · 황찬익^b

^a대전대학교 건설안전방재공학과 교수, ^b대전대학교 산학협력단 연구원

요 지

현재 우리나라는 수자원단위지도의 표준유역(850개) 및 KRF의 집수구역(7,807개) 등의 기존 도면이 수자원 정책 수립의 기본 도면으로 활용되고 있으나, 물관리 일원화 시점에 맞추어 지표수-지하수의 연계 관리 및 수량-수질 통합관리를 위해서는 보다 적절한 규모의 표준 도면 설정이 필요해 보인다. 지표수에 비하여 지하수는 느린 이동 속도를 보이고 3차원 흐름 특성을 갖고 있으므로 지표수-지하수 연계 평가를 위해서는 광역적 규모의 유역보다는 준 유역 규모가 보다 효과적인데, 표준유역보다 평균 면적이 작은 KRF 집수구역은 1차 또는 2차 지류를 포함하는 준 유역 규모에 해당한다. 그러나, KRF는 지표수 수계를 기준으로 구역을 구분하였기 때문에 넓은 평지 또는 높은 산악지역에서는 지나치게 작거나 큰 면적을 갖고 있다. 따라서, 지표수-지하수 연계 통합 관리에 적합한 단위 유역은 기존 KRF 집수구역을 수정하여 설정하는 것이 필요하다. 이로부터 설정될 개소 당 약 5 ~ 15 km² 면적의 단위 유역은 지류의 구성과 관정의 위치를 고려할 때 지방자치단체의 수자원 관리의 기본 단위가 될 수 있으며, 물 수요-공급 평가, 수문 계측 시스템의 배치, 지하수 허가 총량 기준, 오염의 평가, 정책의 우선 순위 결정 등 실질적인 수자원 통합관리의 기본 수단으로 활용 가능할 것이다.

핵심용어: 지표수, 지하수, 통합 관리, KRF 집수구역, 단위 유역

*Corresponding Author. Tel: +82-42-280-4574
E-mail: geowater@dju.kr (G.-B. Kim)

1. 서론

우리나라의 국가물관리위원회에서는 유역 중심의 물관리 시스템 도입을 추진하여, 물의 적정 배분, 이동 및 분쟁 등을 관리해 나가며 궁극적으로는 통합 관리에 기반한 체계적인 수량 및 수질관리를 도모하고 있다. 이와 같은 국가의 수자원 정책의 성공 여부는 각 개별 수자원의 체계적인 관리 뿐 아니라 수자원간의 연계 이용 관리를 포함한 유역 관리의 성패 여부에 달려 있다. 이를 위해서는 현행 제도와 지방자치단체의 시스템이 유역 관리를 수행하기에 적절한지 평가되어야 할 뿐 아니라, 역으로 지방자치단체의 기존 시스템 하에서 실천 가능하도록 유역관리와 관련된 기술적 사항이 마련되어야 한다. 현재 지방자치단체의 수자원 관리는 대부분 시설 관리 중심으로 수행되고 있으나, 지표수-지하수 연계 기반의 수문학적 유역 관리를 위해서는 수량 및 수질의 평가 관리가 효율적으로 수행될 수 있는 평가 단위 마련이 필요하다.

미국의 지표수 유역은 규모와 성격에 따라 4 단계로 나누어져 코드로 정의되는데, 최하부 단위인 cataloging unit은 “watersheds”로 불리며 총 2,264개로 구성되어 있다(Seaber *et al.*, 1987; www.usgs.gov). 한편 주 단위에서는 이를 토대로 세분화된 유역 관리 개념을 도입하고 있으며, 미국의 Massachusetts 주에서는 수자원 계획 수립을 위하여 27개의 주요 유역 및 하부의 지류 유역을 구분하여 정책을 추진하고 있다(Simcox, 1992). 각 유역에 대하여 일반적인 설명뿐만 아니라 하천의 흐름, 대수층의 수량, 수원지의 발생, 수자원의 사용 및 수질 등을 종합적으로 평가하여 활용하고 있다. 우리나라의 지표수 유역은 국가의 수자원 개발, 계획 및 관리 업무의 효율적 추진을 위하여 자료의 수집, 분석, 공유 등의 목적으로 수자원단위지도로 표현되는데, 대권역 21개, 중권역 117개, 표준유역 850개로 구성되어 있다(www.wamis.go.kr). 또한, 수질 관리를 위한 표준공간자료로서는 전국을 KRF (Korean reach file)에 의한 7,807개의 집수구역으로 구분하여 활용하고 있다(Lee *et al.*, 2011; www.moe.go.kr).

수자원단위지도의 표준유역의 평균 면적은 약 120 km²로서 매우 넓으며, 유역 내에는 다차원의 지류 하천이 포함되어 있어, 넓은 지역내 지하수 유동과 오염을 특성화하는 것은 어려울 뿐 아니라, 산지 분수령을 통과하는 광역적 지하수 흐름이 존재하므로 통합 수자원 관리를 위한 기본 지도로는 불합리하다. 단일 분지 내에서 지표수는 강우 이후 수 시간 내지 수 일 이내에 유역의 출구로 배출되는 특성이 있으나, 지하수는 수 개월 내지 수 년이 경과한 이후에 배출되므로 유역 규모가 클수록 지표수와 지하수의 연계 분석은 어려워진다. 지하수의 흐름은 지표수와 달리 이동 속도가 매우 느려 단기간에

원거리 유동이 발생되지 않으며, 대부분은 수 백 m의 근거리 흐름 및 얇은 심도의 순환 흐름으로 나타난다. 따라서, 수자원의 연계 분석 및 관리를 위해서는 각 수자원의 관리 대상 및 규모 등을 아우르는 일관성 있는 기준이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 GIS 기법을 활용하여 지표수 유역 구분과 지하수 시설 특성 등을 분석하고 기존의 표준유역이나 KRF 집수구역 등이 지표수-지하수의 연계 관리 및 통합 수자원 정책에 효율적인지 검토하였으며, 이를 토대로 KRF를 보완한 단위 유역의 필요성을 제시하는데 연구 목적을 두었다

2. 지하수-지표수 상호작용 규모

지표수와 지하수의 상호작용에 대한 평가는 점 규모(Point scale), 국지적 규모(Local scale), 준유역 규모(Sub-catchment scale), 광역적 규모(Regional scale)로 나누어 언급할 수 있다. 점 규모는 가장 작은 공간적 범위로서 하천 주변에서 이루어지는 지표수와 지하수의 상호 작용 과정에 대한 연구가 주 대상이다. 국지적 규모는 하나의 하천과 주변 대수층의 상호 작용을 연구하는 규모이며, 준유역 규모는 소규모 분지내에서의 통합적인 수자원 평가가 가능한 규모이며, 광역적 규모는 103 ~ 105 km² 정도의 유역에 대한 종합적인 평가를 의미한다(Fig. 1; Barthel and Banzhaf, 2015).

점 규모(Point scale)의 특성은 지표수와 지하수의 상호 관계부분에서의 공극내의 물리-생물-화학적 과정에 대한 분석을 수행하는 것이다. 이 규모에서는 지표수-지하수 상호작용 이해를 위하여 물의 이화학적 특성, 동위원소의 변화, 미세 구조내에서의 흐름 특성 등의 원리를 활용하는데, 매질의 조사, 공극의 평가, 대수층과 하천의 연결성, 수두 구배의 평가 등을 다루는 학술적 접근에 효율적이며 정책적인 활용도는 낮은 편이다.

국지적 규모(Local scale)에서는, 층적 분지와 인근 지층 및 연결된 하천 단면을 포함하는 범위를 말한다. 이 규모에서는 하천과 주변 대수층에 설치된 관측 자료를 토대로 유입 유출에 따른 수위의 변화 과정을 분석하여 지표수-지하수의 유동 및 연계 특성을 설명하는 규모이다. 국지적 규모에서는 영역 외부로부터의 물의 유출입 등이 존재하므로 지하수 및 지표수에 대한 물수지를 계산하는 것은 불가능하다. 이 규모에서는 주로 층적층 단면상에서의 변화 과정, 인근 대수층과의 유출입 교환 작용, 지표면의 물의 흐름, 불포화 구역에서의 물의 이동 등이 하천과 지하수의 상호 교환 과정에 포함되어 함께 분석된다.

준 유역 규모(Sub-catchment scale)는 하천 내 일정 지점으로 배수되어 모이는 상류 유역을 포함하는 영역이다. 이 범위

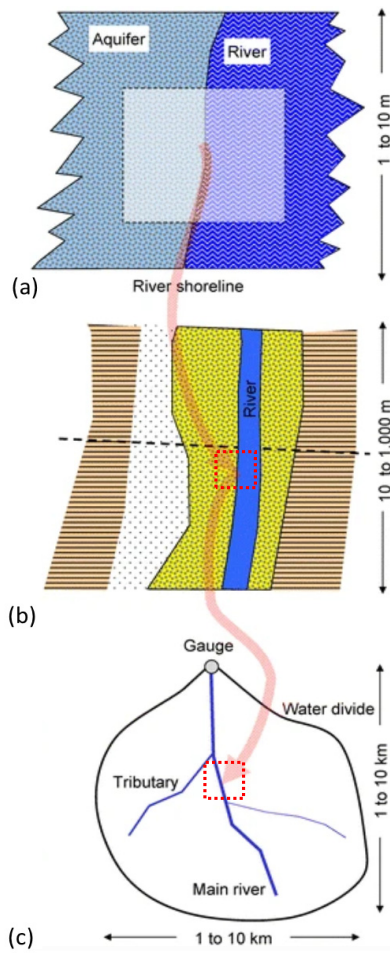


Fig. 1. Plan view of schematic representation for different scale surface water-groundwater interaction (Barthel and Banzhaf, 2015).

에서는 유역에 대한 물수지 계산이 가능하며, 배출수의 정량적 평가를 위하여 집수 출구에서의 수문인자 측정도 가능하다. 지하수 관점에서 보면 유역의 분수령을 드러내는 부분적인 유입 유출이 발생할 수 있다는 점에 유의하여야 하나, 일반적인 수문학적 응용에서는 이 집수 과정이 밀폐된 시스템이라는 가정에 기반하므로 지표수-지하수의 통합 평가가 가능하다. 이 규모에서는 하천 외부의 지하수 함양, 유동 뿐 아니라 하천 구간내의 유량에 대한 이해도 요구된다. 지하수 흐름은 지층의 분포, 지질 구조의 영향, 수평 수직 수리특성의 차이, 표고의 영향 등과 같은 다양한 인자에 의해 보다 체계적으로 평가될 수 있고 지표수와의 유입 유출 등 연계성을 보다 합리적으로 설명 가능하다. 또한, 인위적인 작용(수리구조물, 지하수 및 지표수 취수량 등)에 대한 수문학적 변화도 분석할 수 있으므로 실질적인 수자원 관리 체계에 기여하는 인자를 추출할 수 있다.

광역적 규모(Regional scale)에서는 기후, 지형, 지질, 지표 피복, 생물학적 요인 등이 모두 고려되는 지역으로서 각 요소

들이 연계 평가된다. 이들은 우리나라의 수자원 정책 수립시 고려되는 요소와 유사하며 각 유역의 특성을 진단하는데 활용된다. 이 규모 내의 수문 관측 체계(지하수위, 하천수위, 강우 관측 등)는 특정 지역(인구 밀집 지역, 농경 집중 지역 등)에 집중되어 있고 각 관측 지점의 공간적 분포, 시간적 간격 및 관측 항목 등이 균등하지 않을 뿐 아니라, 운영 기관, 목표 및 관측기간 등이 다양하다는 이유로 관측 자료는 통일성을 갖지 못하여 유역별 분석의 균질성이 확보되지 않는다 (Zhou and Li, 2011; Candela *et al.*, 2014). 하부 규모와의 차이점은 유역 내에서 지형, 지형 경사, 기후 조건, 지질 단위 등에 대한 이방성이 크게 증가하며, 사회 경제적인 요인이 무시되지 못하게 되어 상대적으로 평가의 불확실성이 높아진다.

이상과 같은 규모적 관점에서 보면, 지표수-지하수 연계성을 고려한 유역의 특성을 잘 평가할 수 있고, 유역 외부와 독립된 분석이 가능하며, 지하수 관정과 같은 작은 규모의 인위적 인자에 대한 총량적 관리가 가능한 준 유역 규모가 우리나라 지하수법상 현행 지하수 관리 제도 및 지자체의 시스템을 활용하면서도 통합 수자원 관리를 효과적으로 수행할 수 있는 적절한 개념으로 보인다. 이와 같은 준 유역 규모에서는 지하수의 유동이 대부분 유역 내 하천으로 모이게 되는 만큼 유역 단위의 지표수-지하수 연계 평가 및 통합 수량·수질 관리의 정확도를 제고할 수 있다.

3. 기존 유역의 분류

우리나라 수자원단위지도의 표준유역은 주요 하천을 중심으로 물의 이동 관점에서 설정된 것인 반면에, KRF의 집수구역은 지표수 기반의 하천의 수리·수문학적 특성 정보를 기초로 수질 관리를 목적으로 구성되어 있다. 표준유역의 설정 기준은 하천 합류점, 주요 수자원시설물 및 통제 지점 등을 사용하며 지표 분수령을 경계로 하며 최소 면적이 약 40 km² 이상 되도록 정의하고 있다 (www.wamis.go.kr). KRF는 선형 자료인 Reach(하천)와 점형 도형자료를 기반으로 구축되었으며 각 Reach를 포함하는 집수구역을 정의하여 하천으로부터 유입되는 오염원과 하천 수질 측정망의 관계를 파악할 수 있도록 하였다 (Lee *et al.*, 2011). KRF 집수구역의 면적 분포를 보면, 4 km² 이내인 경우가 31.5%, 8 km² 이하는 54.0%, 12 km² 이하는 67.5% 정도이며, 30 km² 초과인 경우도 10.3%에 이르고 있다 (Fig. 2). 일반적으로 12 km² 면적을 초과하는 경우는 3차 또는 4차 지류 하천을 포함하고 있어 최종 유역 출구부에서 나타나는 오염원의 해석이나 유량의 평가 등에 대한 지하수의 기여를 파악하기 어려운 문제를 갖고 있다.

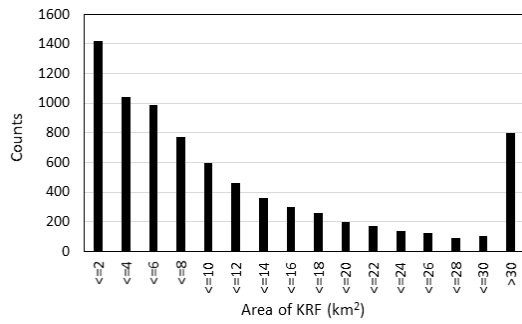


Fig. 2. Distribution of the number of KRF catchment area based on the area size

4. 표준유역과 KRF 집수구역의 특성

표준유역과 KRF 집수구역의 특성을 진단하고자 천안시 지역을 대상으로 유역의 특성, 지하수 관리 측면의 효과, 오염 원 및 수질 관리의 효율성 등을 검토하였다.

4.1 유역과 하천 차수

산지 및 평야지대가 공존하는 천안시 지역을 대상으로 GIS 기법을 활용하여 표준유역과 KRF 집수구역의 특성을 검토하였다. 북서부 지역은 평야 및 구릉성 지역, 동부와 남부는 산악지역으로 구성되어 있다. 천안시에 해당되는 표준유역은 11 개로서 평균 면적은 약 57.80 km², KRF 집수구역은 59 개로서 평균 면적 약 10.77 km²이다(Fig. 3, Table 1). 북서부 평야지대의 표준유역은 3차 이상의 지류가 다수 포함되어 있음을 알 수 있는데, 이와 같은 고차원의 하천이 유역내에 포함되면 유역내 수계 및 지질의 다양성, 계층의 불균질성, 인문사회적 요인의 불확실성 증가 및 심부 지하수의 유역내 흐름 등 다양한 요인으로 통합 물수지 평가를 어렵게 한다. 한편, KRF

집수구역은 유역 면적이 상대적으로 작고 지하수의 흐름이 대부분 하천으로 집중되는 규모이므로 지표수-지하수 연계 해석에 보다 용이하다. 남부의 산악지역도 KRF는 표준유역에 비하여 작고 대부분 낮은 차수(1차 또는 2차)의 지류가 포함되어 있어 지표수-지하수 연계 관점에서의 관리 유역으로 보다 적합한 것으로 보인다.

4.2 지하수 이용 및 관리 적합성

이상과 같이, KRF 집수구역이 지표수와 지하수의 연계 및 통합수자원 관점에서는 적절한 크기로 보이나, 실제 지하수 관리 측면에서는 일부 문제점을 보인다. 2018년말 우리나라의 지하수 개발이용시설은 전국에 1,657.8천 개소, 1 km² 당 16.5개이며, 약 60%의 산악지역을 제외한다면 1 km² 당 41.3 개의 높은 밀도를 보이고 있어, 약 160 m 간격 당 1개 정도의 관정이 개발되어 있다(MOLIT, 2017). 이와 같은 다수 관정의 개별 이용관리 상태를 파악하고, 총량 관점에서의 지하수 인허가를 수행하고, 지하수의 오염원 및 오염상태 평가 및 사후정화 등의 지하수 수질 업무를 수행하기에는 현행 지방자치단체의 지하수 조직 및 행정 체계로는 한계가 있다. 또한, 해당 유역내에서 지하수 개발가능량의 범위 내에서 안정적으로 취수할 수 있는 조건을 유지하면서 신규 관정 허가 여부를 결정하는 것은 지하수의 수량 및 수질 관리를 위해서 가장 기본이 되는 업무이다. 그러나, 개별 관정 단위의 지하수 수량 및 수질 행정관리가 현실적으로 거의 어려운 만큼, 보다 효율적인 지하수 관리 체계로서 단일 유역내 총량적 관점의 지하수 수량 및 수질 관리 체계의 도입을 위한 단위유역 설정이 필요하다.

천안시의 지하수 관정 분포를 KRF 집수구역과 함께 도시한 결과, 동부 및 남부의 산지 지역은 관정의 분포가 KRF 집수구역의 중심부인 하천 주변에 주로 분포하나, 평지의 북부지

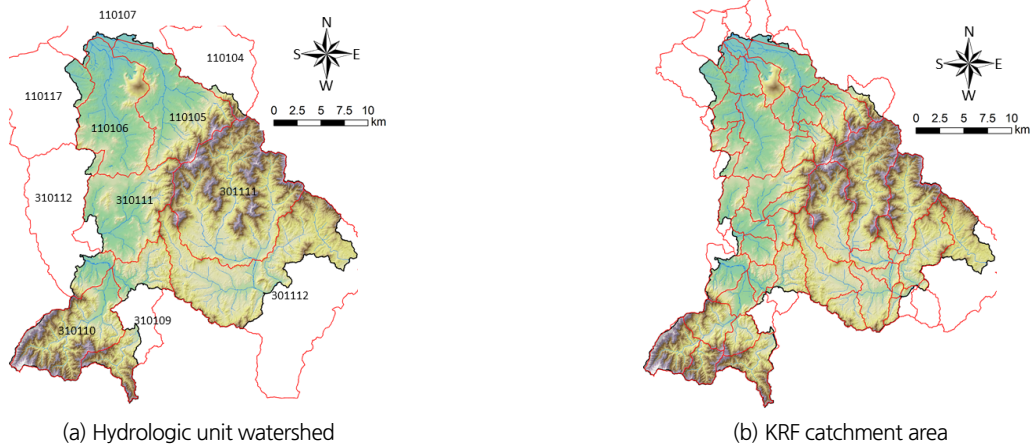


Fig. 3. Distribution of hydrologic unit watershed and KRF (Korea reach file) catchment area in Cheonan city

Table 1. Area of hydrologic unit watershed and KRF chatchment area in Cheonan city(unit: km²)

Hydrologic unit watershed								
No.	ID	Area (km ²)	No.	ID	Area (km ²)	No.	ID	Area (km ²)
1	110117	7.67	5	110107	4.09	9	310112	15.38
2	110104	3.80	6	310109	42.97	10	301111	145.95
3	110105	80.02	7	310110	69.77	11	301112	118.13
4	110106	80.34	8	310111	67.63	Aver.		57.80
KRF chatchment area								
No.	ID	Area (km ²)	No.	ID	Area (km ²)	No.	ID	Area (km ²)
1	30111201	4.82	21	11010702	0.41	41	31011101	21.12
2	11010401	3.70	22	11010707	1.47	42	31011105	9.11
3	11010505	1.82	23	11010706	1.50	43	31011209	2.45
4	11010503	3.93	24	11010708	0.71	44	31011201	12.79
5	11010501	11.02	25	11011701	0.11	45	30111101	57.06
6	11010508	7.57	26	11011708	7.54	46	30111103	9.64
7	11010507	6.07	27	31010905	8.04	47	30111106	1.78
8	11010506	9.14	28	31010903	0.82	48	30111105	5.62
9	11010509	0.41	29	31010904	15.32	49	30111104	33.79
10	11010510	19.76	30	31010901	18.74	50	30111102	38.07
11	11010502	11.60	31	31011003	17.42	51	30111203	9.83
12	11010504	8.70	32	31011002	11.56	52	30111204	17.39
13	11010605	10.93	33	31011004	11.02	53	30111207	0.85
14	11010606	9.40	34	31011005	10.00	54	30111205	1.50
15	11010604	8.21	35	31011001	19.78	55	30111202	30.38
16	11010602	4.93	36	31011103	8.29	56	30111209	0.81
17	11010607	3.28	37	31011104	9.02	57	30111206	2.88
18	11010608	3.23	38	31011106	1.40	58	30111210	23.54
19	11010601	36.00	39	31011107	10.30	59	30111208	26.13
20	11010603	4.36	40	31011102	8.40	Aver.		10.77

역은 유역 내에 골고루 높은 밀도로 분포하고 있다(Fig. 4). 평지의 다양한 깊이의 관정들은 양수시 발생하는 수두구배에 의하여 하천 방향으로의 정상적인 지하수 흐름을 방해하여 정확한 수문 평가를 어렵게 한다. 또한, 평지에 위치한 인접 유역에서의 과다 양수는 물수지 분석을 불확실하게 하며 유역 단위의 수자원 평가에 영향을 미친다. 지표수-지하수 연계 기반의 유역 관리를 위해서는 지하수의 자연적 흐름과 인위적 영향에 대한 분석이 단위 유역 내에서 독립적으로 평가 가능해야 한다. 따라서, 평지의 경우에는 일정수두경계인 하천을 단위 유역 경계면으로 설정하는 방안도 검토가 필요하며 이와 같은 점을 고려할 때 KRF의 일부 유역은 통합 수자원관리에 부적합한 것으로 보인다.

한편, 천안시의 KRF 집수구역별 지하수 관정 개수를 보면, 집수구역 당 최소 3개에서 최대 6,434개로서 평균 약 1,352개

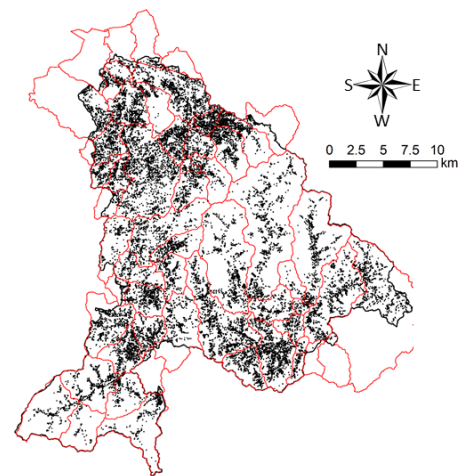
**Fig. 4.** Distribution of groundwater wells (black dots) and KRF catchment area (red line) in Cheonan city

Table 2. Number of wells for each KRF chatchment are in Cheonan city

KRF chatchment area								
No.	ID	No. of wells	No.	ID	No. of wells	No.	ID	No. of wells
1	30111201	783	21	11010702	22	41	31011101	1,675
2	11010401	263	22	11010707	189	42	31011105	1,951
3	11010505	463	23	11010706	160	43	31011209	265
4	11010503	1,816	24	11010708	64	44	31011201	1,592
5	11010501	2,457	25	11011701	25	45	30111101	3,486
6	11010508	2,354	26	11011708	1,291	46	30111103	1,264
7	11010507	1,043	27	31010905	1,544	47	30111106	280
8	11010506	953	28	31010903	134	48	30111105	189
9	11010509	113	29	31010904	1,111	49	30111104	1,932
10	11010510	3,924	30	31010901	1,089	50	30111102	2,582
11	11010502	2,390	31	31011003	1,589	51	30111203	1,498
12	11010504	1,508	32	31011002	261	52	30111204	3,988
13	11010605	3,201	33	31011004	825	53	30111207	3
14	11010606	780	34	31011005	1,870	54	30111205	162
15	11010604	1,984	35	31011001	720	55	30111202	5,093
16	11010602	1,208	36	31011103	950	56	30111209	33
17	11010607	277	37	31011104	966	57	30111206	356
18	11010608	611	38	31011106	176	58	30111210	2,416
19	11010601	6,434	39	31011107	566	59	30111208	2,860
20	11010603	717	40	31011102	1,286	Aver.		1,352

정도이다 (Table 2). 집수구역이 통합 수자원 관리의 단위 유역으로 활용되기 위해서는 물순환 시스템내에서 수요와 공급에 대한 평가가 가능한 규모이어야 한다. 지하수 이용에 대한 총량 평가는 지하수 이용이 하천에 미치는 수문학적 영향뿐 아니라 물 수요 공급의 평가를 위해서도 매우 중요하다. 기존에 개별 관정의 지하수 이용량을 추정하는 방법(회귀 분석, 회귀나무 분석 등)이 제시된 바 있으며, 총량적 관점에서 오차가 거의 발생되지 않기 위해서는 세부용도별로 약 150공의 관정이 유역내에 필요한 것으로 분석된 바 있다(MOE, 2019; Kim *et al.*, 2019; Kim and Hwang, 2019). 일반적으로 가정용, 일반용, 전작용 및 답작용이 대부분을 차지하므로 유역내에 약 600공의 관정이 위치한다면 상당히 신뢰성 있는 이용량 추정이 가능함을 의미한다. 따라서, 통합수자원 관리를 위한 지하수 이용량에 대한 정확한 산정을 위해서는 일정 개수 이상의 관정이 포함되는 유역이 단위 유역 규모로 결정되어야 한다. 현행 KRF 집수구역의 평균적인 면적은 물의 수요-공급과 연계된 수자원 평가 및 지하수 관점의 총량 관리를 위한 적정 규모로 고려된다. 그러나, 천안시의 일부 KRF 집수구역과 같이 관정이 수십 개 미만으로 분포하는 등 지나치게 작은 규모로 설정된 유역에 대해서는 조정이 필요해 보인다.

4.3 오염원 및 수질 관리

유역내 통합 수자원 관리의 일부인 오염원 및 수질 관리는 오염원, 지표수내 확산 및 지하수내 확산 등에 대한 평가에 의하여 이루어진다. 수질 관리의 핵심은 오염이 발생하였을 경우 오염의 확산 경로, 오염원, 오염 종류 등을 파악하여 관리하는 것으로서, 지표수를 통한 확산과 지하수를 통한 확산에 큰 차이가 존재한다. 유역 면적이 클 경우 다수의 오염원이 존재할 수 있는데 이 경우 지표수를 통하여 빠른 확산 및 혼합이 발생한다면 오염원의 출처를 규명하는 것이 어려워 수질 관리가 효율적이지 못하다. 또한, 큰 유역내에서 지하수를 통한 느린 오염 확산의 경우에는 일부에서만 오염이 존재하므로 별도의 국지적 관리 대상을 설정해야 하는 문제점이 발생하여 정책의 효율성이 낮아질 수 있다. 기존 연구에 의하면, 충청남도 부여의 작은 농촌지역에서 상류에서 시작된 오염원이 하류로 이동하면서 불규칙적으로 분포하는 오염원에 의하여 지하수의 오염 농도가 축적, 증가되는 것으로 분석된 바 있으며 (Yang *et al.*, 2015), 도시지역과 농촌지역의 토지이용 특성이 지하수의 수질에 영향을 미치는 것으로 연구되는(Choi *et al.*, 1999; Yu *et al.*, 2010; Jeon *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014) 등 지하수의 수질은 국지적 오염원 특성에 의하여 지배를 받게

된다. 따라서, 오염원, 지하수의 오염 과정, 상태 및 하천수의 수질과의 관계 등을 평가하기 위해서는 비교적 작은 규모의 유역 설정이 필요하다. KRF 집수구역의 대부분은 1차 또는 2차 지류를 포함하는 유역으로서 지표수뿐 아니라 지하수를 통한 오염 경로도 명확히 분석할 수 있으므로, 집수구역 자체를 오염원 및 수질 관리의 기준 단위로 설정하는 것이 가능하다. 아울러, 이 규모는 지방자치단체에서 오염 관리를 위한 정책 및 관리의 실행 계획 수립에도 효과적일 수 있다.

5. 지표수-지하수 통합 단위유역으로서 KRF 검토

KRF 집수구역 크기의 특성을 파악하고자 충청남도 전역을 대상으로 지형 및 하천의 통계적 특성을 추출해 보았다. 수치지형도에서 충청남도 전역을 500 m 간격으로 설정한 32,787개의 포인트에서 최인근 실폭하천까지의 거리를 산정한 후 가능한 유역 규모를 통계적으로 평가해 보았다. 실폭하천은 약 6 m 이상의 폭을 갖는 하천으로서 갈수기에도 일정 유량이 흐르고 있어 지하수-지표수 상호 작용을 평가하는데 기본이 되는 하천 규모로 판단된다. 이와 같은 하천은 동절기에도 산악지역에서 흘러나오는 기저유출에 의하여 일정 수준의 유량이 존재하는데, 기저유출은 광역적인 규모보다는 준 유역 규모 내에서 주로 발생하여 하천으로 배출된다(Gleeson and Manning, 2008). 따라서 실폭하천을 기준으로 설정된 유역은 지하수 관리 뿐 아니라 지표수-지하수 연계 평가에 효과적인 기준으로 고려된다. 동절기 유출이 지속 발생하는 하천은 광역적 규모의 영향 인자인 기후변화에 덜 민감한 것으로 알려져 있어, 실폭하천이 기준이 되는 준 규모 유역에서의 지표수-지하수 연계 평가 결과는 광역적인 유역의 수문 평가에도 활용 가능하다.

충청남도 전역내 각 포인트에서 추출한 인근 하천까지의 거리 분포를 보면, 실폭하천은 전체의 95%가 포인트로부터 1.1 km 이내에 위치하며 500 m 이상 떨어진 경우는 약 45%를 차지한다. 반면에, 실선하천까지의 거리는 대부분이 500 m 이내로 나타났다(Fig. 5, Table 3). 특정 지점에서 실폭하천까지의 거리가 500 m 이상 및 이하인 경우의 비율을 보면 각각 절반 정도 차지하고 있는데, 500 m 이내인 경우는 하천이 밀집된 지역으로서 일반적으로 평지나 구릉지가 주로 해당되며, 500 m 이상인 경우는 주로 산악지역이다. 즉, 평지나 구릉지 등에서 실폭 하천을 중심으로 유역을 구분할 경우, 임의 지점에서 하천까지 거리가 수 백 m 이내로서 이 하천을 포함하는 유역은 2~3 km² 이내의 지나치게 작은 영역이 된다. 또한, 산악 지역의 경우는 인근 하천까지 수 km 이상 떨어진 경우가 존재하므로 유역 면적은 수 십 km² 이상이 될 가능성이 크다. 또한,

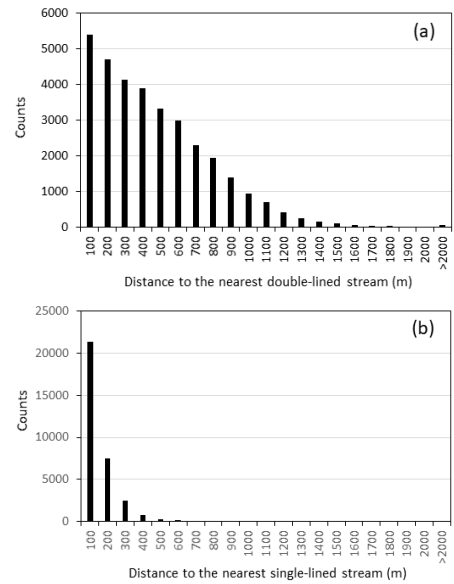


Fig. 5. Histograms of the distance to (a) the nearest double-lined stream and (b) the nearest single-lined stream from grid points in Chungcheongnamdo province

Table 3. Distance to the double-lined and single-lined streams from grid points

Distance to the double-lined stream (m)	Number of grid point	Distance to the single-lined stream (m)	number of grid point
< 100	5,389	< 100	21,285
100 - 200	4,693	100 - 200	7,470
200 - 300	4,131	200 - 300	2,532
300 - 400	3,893	300 - 400	802
400 - 500	3,312	400 - 500	296
500 - 600	2,982	500 - 600	141
600 - 700	2,289	600 - 700	89
700 - 800	1,943	700 - 800	56
800 - 900	1,399	800 - 900	38
900 - 1000	943	900 - 1000	15
1,000 - 1100	696	1,000 - 1100	12
1,100 - 1200	419	1,100 - 1200	10
1,200 - 1300	240	1,200 - 1300	8
1,300 - 1400	161	1,300 - 1400	5
1,400 - 1500	99	1,400 - 1500	6
1,500 - 1600	55	1,500 - 1600	2
1,600 - 1700	37	1,600 - 1700	0
1,700 - 1800	32	1,700 - 1800	3
1,800 - 1900	15	1,800 - 1900	0
1,900 - 2000	7	1,900 - 2000	1
> 2,000	52	> 2,000	16
Total	32,787	Total	32,787

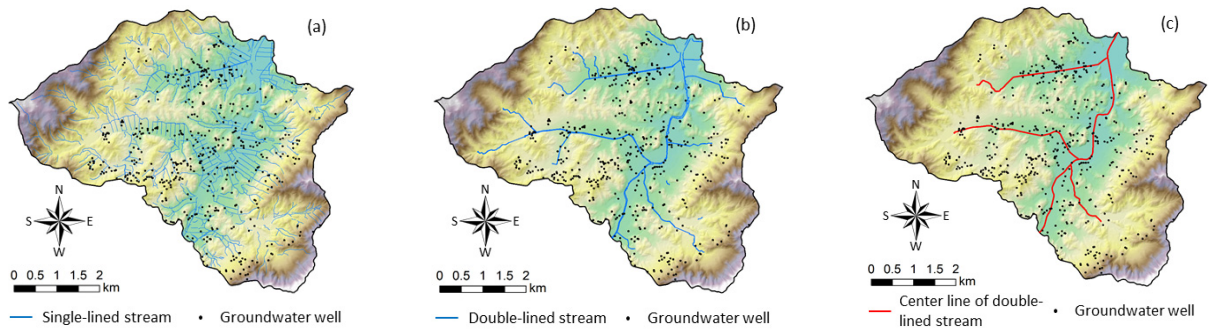


Fig. 6. Distribution of streams and groundwater wells in a KRF catchment area, Cheongyang-gun

실선 하천까지의 거리는 더욱 가깝기 때문에 실선하천을 기준으로 유역을 구분하는 것은 지나치게 작은 면적으로 분류되므로 수자원 관리의 효율성을 떨어뜨리게 된다. 따라서, 실폭 하천 기준으로 단위 유역을 분류하는 것이 준유역 규모(Sub-catchment scale)의 의미를 포함할 수 있을 것으로 보인다.

이와 같이 KRF 집수구역이 준유역 규모로서 의미를 갖는 지 파악하기 위하여 청양군의 KRF 집수구역(ID: 31010405)을 사례를 대상으로 하천의 의미를 분석하였다(Fig. 6). 본 집수구역은 면적이 31.01 km²로서 상당히 큰 편이며, 집수구역 내에는 수많은 실선하천이 존재하고 일부 실폭하천이 분포한다. 실선하천을 토대로 단위유역을 설정하기에는 지나치게 조밀한 분포로 인하여 유역 구성이 무의미해진다(Fig. 6(a)). 본 집수구역내에는 몇 개의 실폭 하천이 존재하는데, 실폭 하천을 이용한 유역 분류가 유역면적이나 지표수-지하수 연계 관점을 고려할 때 적당한 것으로 보이나, 본 집수구역의 경우 면적이 넓어서 지형 분수령이 유역 내에 포함되고 일부 3차 지류가 포함되는 등 수문 성분 분리 및 통합 평가에 효과적이지 않다(Fig. 6(b)). 한편, 실폭하천의 중심선의 교점(하천이 만나는 곳)을 활용한 유역 분류를 고려할 수 있는데, 본 집수구역은 지표수-지하수 통합 관리에 유용한 적정 규모인 수 km² 이내 면적을 갖는 3~4개 유역으로 재분류가 가능해 보인다(Fig. 6(c)). 또한, 이와 같은 재분류의 경우에 지하수 관정이 대부분 독립된 유역내 하천 인근에 분포하게 되어 지하수 수량 및 수질 관리 측면에서도 효율적이다. 따라서, 다수 지류를 포함하는 큰 면적의 KRF 집수구역에 대해서는 실폭하천의 중심선을 활용한 추가적인 분류 방안을 고려할 필요가 있다.

6. 통합 수자원 단위 유역 제언

우리나라의 지하수 관리는 1994년 제정된 지하수법에 근거하여 개별 지하수 시설물의 관리에 초점이 맞추어져 왔

며, 관정 이용 목적의 부합성을 고려한 수질 관리가 병행되어 왔다. 특히, 지표수와 지하수의 통합 관리의 필요성이 대두되는 현 시점에서 시설물 기준의 지하수 관리 체계에서 벗어나 수리학적 및 이화학적 관점에서의 지하수 관리가 가능하도록 기술적 기준이 필요하다. 즉, 지하수는 광역적 및 국지적 흐름을 기반으로 지표수와 연계하여 이동하며, 이와 같은 이동 경로 상에서 취수가 이루어지고 수질 변화와 오염 확산이 나타나며 궁극적으로 하천으로 유입되므로 지표수-지하수의 연계 평가 관리를 위한 기준이 요구된다. 대부분의 지하수의 흐름은 하천과 연계되어 단일 유역 내에서 발생하게 되는데, 단일 유역이 3차 이상의 하천 지류를 포함하는 경우에는 지하수 흐름 및 오염 평가와 연계하여 하천에서의 특성을 이해하기에는 지나치게 큰 범위가 되며, 지표수와 지하수를 연계한 수자원 관리에는 적절하지 않아 보인다.

KRF 집수구역은 평균적인 크기와 포함되는 지류의 차수를 고려하면 지표수 관리 뿐 아니라 지하수 관리에도 적합한 준유역 규모로 고려된다. 평균 크기의 KRF 집수구역에서는 유역내 수문학적 평가를 위하여 고려되는 하천 유량, 지하수 함양량 및 개발가능량, 지하수 이용량 등의 정밀한 산정이 가능하며, 상호작용 평가를 위한 관측 조사 및 수치 모델 등도 보다 효과적으로 수행될 수 있다. 하천 유량은 소하천 관련 설계나 계획 수립시 보편적 적용되는 비유량법을 활용할 수 있고, 지하수 함양량 및 개발가능량은 WTF, SWAT-Modflow, 인공신경망 기법 등을 활용하여 정밀하게 산정 가능하며, 지하수 이용량은 현장 실측 자료를 토대로 회귀나무 분석과 같은 Big data 기반의 최신 방법으로 산정할 수 있기 때문에 KRF의 평균적인 집수구역 규모는 통합 수자원 관리에 효과적인 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2006; Noh *et al.*, 2018; Kim and Jung, 2019; Kim *et al.*, 2019). 또한, 이 규모의 유역은 관측 시스템의 설치 및 배치가 복잡하지 않고 단순화된 수치모델에 의해서도 물수지 평가가 가능하므로 기술적 분석 뿐 아니라 행정적 관리에도 효율적이다.

한편, 지방자치단체의 수자원 관리 체계를 고려할 때 개별 시설 중심의 관리 뿐 아니라 준 유역 단위의 정책 순위 결정 등 보다 합리적인 관리 시스템 도입이 필요하며, 이를 위해서는 지방자치단체별로 1개당 5 ~ 15 km² 정도의 면적을 갖는 약 50개 정도의 단위 유역(보완된 KRF 집수구역)이 적정해 보인다. 즉, 이 규모에서는 개별 시설물 또는 개별 오염원에 대한 관리도 용이할 뿐 아니라 유역 개념의 총량 평가도 가능하게 된다. 예를 들면, 단위 유역에 대하여 수요-공급 평가를 통한 수자원 이용 정책의 우선 순위 결정, 오염원과 오염 확산 상태의 단위유역별 평가, 수질 관리 정책의 지역별 우선 순위 결정, 지하수 신규 관정 개발시 유역내 개발가능 총량 관점에서 허가 여부 평가, 각 단위유역별로 수자원 확보 방안 수립, 각 유역내 계측 시스템의 합리적 배치 및 활용 등 실질적인 수자원 통합관리의 기본 수단으로 활용될 수 있다.

이상을 종합해 보면, 현재 운영중인 KRF 집수구역이 지표수와 지하수의 통합 관리를 위하여 효과적인 단위 유역이 될 수 있으나, 지나치게 작은 면적을 갖는 경우, 큰 면적을 갖는 경우 및 평지의 관정 밀집이 큰 경우 등에 대해서는 재조정하는 방안이 필요하며, 이를 활용한다면 통합 수자원의 기술적 평가 및 행정적 실행이 보다 효과적으로 가능할 것이다.

7. 결론

지표수와 지하수의 연계 관리를 위해서는 두 수문 인자의 유동 특성을 이해하는 것이 선행되어야 한다. 지표수는 단 몇 일 이내에 배출되는 특성을 보이는 반면, 지하수는 수 개월 ~ 수 년이 경과하여 배출되는 등 시간 개념에 큰 차이가 존재한다. 또한, 지표수는 선형 흐름을 보이지만 지표면의 특성이 반영된 유역 면적에 대한 수문 인자인 반면에, 지하수는 3차원 흐름을 토대로 점 단위의 관정이 주요 영향 인자로 작용한다. 이와 같이 시간과 공간적 특성이 다양한 지표수와 지하수의 통합 관리를 위해서는 수문인자의 시간에 따른 변화 특성이 고려된 물수지 평가, 유역내 지형 및 지층 특성이 반영된 유동 평가, 계측 시스템의 활용성, 신뢰성이 확보되는 인위적 영향 인자의 도출, 수질 오염 확산 과정의 차별성 등이 종합적으로 고려될 수 있는 단위 유역 마련이 필요하다.

현재 국가에서 제시된 표준유역은 지나치게 넓은 면적(평균 120 km²)으로 인하여 여러 차수의 하천 수계를 포함하므로, 유역내에서의 지표수-지하수 상호 작용이 복잡하게 형성된다. 즉, 다수의 지하수 관정은 지하수 및 지표수의 흐름에 영향을 미치고, 유역의 복잡성으로 인하여 수질오염 원인 규

명과 과정에 대한 해석이 어렵다. 따라서, 보다 작은 규모의 유역 설정을 통하여 지표수-지하수의 연계 해석을 단순화하고 통합 수자원 관리가 가능토록 준유역 규모(Sub-catchment area)인 KRF 집수구역의 활용성을 제안하였다. KRF의 집수구역 평균 면적은 표준유역의 약 19%에 해당하며 대부분이 1차 또는 2차의 지류 하천을 포함하고 있다. 그러나, 현재 KRF 집수구역 중 관정이 많은 일부 평야 지대 및 면적이 큰 산악 지역은 통합 수자원관리에 적합하지 않은 규모로 보이므로 재평가를 통한 조정이 필요해 보인다. 그럼에도 불구하고, KRF 집수구역은 현행 수자원 관리 정책이 갖고 있는 시설물 중심의 행정관리 체계를 벗어나 물 수요공급 분석 및 수문학적 물수지 분석의 기초가 되는 단위유역이 될 수 있으며, 유역의 수량 및 수질 총량 관리로 전환할 수 있는 좋은 수단이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부(한국환경산업기술원)의 수요대응형 물공급 서비스사업 과제(상시 가뭄지역의 지하수 최적공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well network 기술 개발, #146523)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Barthel, R., and Banzhaf, S. (2015). "Groundwater and surface water interaction at the regional-scale – A review with focus on regional integrated models." *Water Resources Management*, Vol. 30, pp. 1-32.
- Candela, L., Elorza, F.J., Tamoh, K., Jiménez-Martínez, J., and Aureli, A. (2014). "Groundwater modelling with limited data sets: The Chari-Logone area (Lake Chad Basin, Chad)." *Hydrological Processes*, Vol. 28, No. 11, pp. 3714-3727.
- Choi, J.D., Lee, C.M., and Choi, Y.H. (1999). "Effect of land use on the water quality of small agricultural watersheds in Kangwon-do." *Journal of Environmental Research*, Vol. 16, pp. 511-520.
- Gleeson, T., and Manning, A.H. (2008). "Regional groundwater flow in mountainous terrain: Three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls." *Water Resources Research*, Vol. 44, W10403, doi:10.1029/2008WR006848.
- Jeon, S.R., Park, S.J., Kim, H.S., Jung, S.K., Lee, Y.U., and Chung, J.I. (2011). "Hydrogeochemical characteristics and estimation of nitrate contamination sources of groundwater in the Sunchang area, Korea." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 47, No. 2, pp. 185-197.

- Kim, G.B., and Hwang, C.I. (2019). "Application of regression tree model for the estimation of groundwater use at the agricultural (dry-field farming and rice farming) purpose wells." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 29, No. 4, pp. 417-425.
- Kim, G.B., Hwang, C.I., Shin H.J., and Choi, M.R. (2019). "Applicability of groundwater recharge rate estimation method based on artificial neural networks in unmeasured areas." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 55, No. 6, pp. 693-701.
- Kim, G.B., Kim, J.W., and Shin, H.J. (2019). "Estimation of groundwater usage for the living (domestic and business) purpose wells by using a regression tree method." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 55, No. 6, pp. 683-691.
- Kim, H.K., Park, S.H., Kim, M.S., Kim, H.J., Lee, M.K., Lee, G.M., Kim, S.H., Yang, J.H., and Kim, T.S. (2014). "Contamination characteristics of agricultural groundwater around livestock burial areas in Korea." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 24, No. 2, pp. 237-246.
- Kim, K.H., and Jung, Y. (2019). "Estimating regional maximum floods using a runoff data spatial extension method in ungauged watersheds." *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 3, pp. 217-227.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Won, Y.S. (2006). "An integrated surface water – groundwater modeling by using fully combined SWAT-MODFLOW model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5B, pp. 481-488.
- Lee, H., Kim, K., Kang, T., Lee, S., Shin, C., Shin, G., Sin Y., Nam, G., and Kwon, M. (2011). "A study on standardization and construction of Korea reach file in three major river basins." *National Institute of Environmental Research*, NEIR No. NIER-RP2011-1366, p. 35.
- Ministry of Environment (MOE) (2019). *Manual of groundwater affairs*. p. 344.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2017). *Revised plan of national groundwater management*, p. 185.
- Noh, D.N., Park, H.J., Cheong, J.Y., and Hamm, S.Y. (2018). "Groundwater recharge analysis and comparison using hybrid water-table fluctuation method and groundwater modeling : a case of Gangcheon basin in Yeosu city." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 54, No. 2, pp. 169-181.
- Seaber, P.R., Kapinos, F.P., and Knapp, G.L. (1987). *Hydrologic unit maps*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2294, p. 63.
- Simcox, A.C. (1992). *Water resources of Massachusetts*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4144, U.S. Geological Survey, Boston, U.S., p. 94.
- Yang, J.H., Kim, H.K., Kim, M.S., Lee, M.K., Shin, I.K., Park, S.H., Kim, H.S., Ju, B.K., Kim, D.S., and Kim, T.S. (2015). "Evaluation of groundwater quality deterioration using the hydrogeochemical characteristics of shallow portable groundwater in an agricultural area" *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, No. 4, pp. 533-545.
- Yu, H.S., Kang, D.H., Kwon, B.H., Go, D.H., and Hwang, J.H. (2010). "Investigation for NO₃-N contaminated sources of groundwater in the Hapcheon-Gun." *Proceedings of Korean Society of Engineering Geology Conference 2010*, KSEG, pp. 391-392.
- Zhou, Y., and Li, W. (2011). "A review of regional groundwater flow modeling." *Geoscience Frontiers*, Vol. 2, No. 2, pp. 205-214.