

지하수 부존량 평가와 관리에 대한 소고

이병선¹ · 박종환¹ · 명우호¹ · 손주형² · 이상화³ · 심규성² · 송성호^{1*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²한국농어촌공사 경남지역본부

³한국농어촌공사 경기지역본부

A Note on Estimating and Managing Groundwater Reserves

Byung Sun Lee¹ · Jong Hwan Park¹ · WooHo Myoung¹ · JooHyong Son²
Sanghaw Lee³ · Gyuseong Shim² · Sung-Ho Song^{1*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Gyeongnam Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation

³Gyeonggi Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

This study was conducted to estimate groundwater reserves within a designated depth. Three methods were applied to one representative county in southern Gyeongsang province, South Korea, to estimate the groundwater reserves in the aquifers. Estimated amounts of groundwater reserves in the region ranged from $20.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ to $68.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ (average $37.9 \times 10^9 \text{ m}^3$). Groundwater recharge obtained with a recharge ratio of 16.6% was $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$. Exploitable groundwater with an assumption of decadal-cycle minimal rainfall of 977.0 mm/year was approximated as 72% ($0.8 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$) of the total replenished water by recharge. The volume of recharge and exploitable water accounted for only 1.1% and 0.8% of groundwater reserves, respectively, which indicates substantial capacity of the reservoir to supply groundwater in an event of unexpected droughts. Nonetheless, each groundwater well should strictly comply with its allocated pumping rate to avoid alluvial groundwater depletion.

Key words : Groundwater reserves, Recharge amounts, Exploitable groundwater, Droughts, Depletion

1. 서 언

지하수 부존량이란 지각에 포함된 지하수의 총량으로서, 상세하게는 천부 수m 심도부터, 깊게는 심부 수km 심도 까지 1차 공극(지층 형성과 동시에 생성된 미고결 퇴적물의 공극, 화산암의 기공 및 주상절리 등)과 2차 공극(지층 형성 후에 생성된 단층, 절리 등 단열구조, 탄산염암의 용해 공동 등)을 채우고 있는 지하수의 수량으로 정의된다(MOCT, 2007). 그러나 지각의 두께가 모든 지점마다 다르고, 심부에서의 2차 공극 발달 여부도 공간적으로 차이가 크며, 또한 대륙지각 심부(13~18 km 심도 이하) 취성-연성 변환영역(brittle-ductile transition zone)에서는 공극을 확인하기도 어려우므로, 지각 전체에 부존된 지하수 부

존량을 추정하기는 사실상 불가능하다. 이러한 한계로 인하여 지하수관리기본계획(MOLIT, 2017)에는 국내 8개 수문지질단위(미고결 쇄설성 퇴적층, 다공질 화산암, 반고결 쇄설성 퇴적암, 비다공질 화산암, 관입화성암, 쇄설성 퇴적암, 탄산염암(석회암), 변성암)의 지하수 부존 ‘특성(characteristics)’에 대해서만 기술되어 있고, 지하수 ‘부존량(reserves)’에 대해서는 언급하지 않고 있다. 최근 대부분의 지역지하수관리계획에서도 마찬가지로 해당지역의 지하수는 3개 수문지질단위(미고결 쇄설성 퇴적층, 다공질 화산암, 반고결 쇄설성 퇴적암)의 경우 주로 1차 공극에 부존하여 지하수 산출성이 좋은 특성을 보이고, 나머지 5개 수문지질단위(비다공질 화산암, 관입화성암, 쇄설성 퇴적암, 탄산염암(석회암), 변성암)의 경우 주로 2차 공

*Corresponding author : shsong@ekr.or.kr

Received : 2018. 10. 29 Reviewed : 2018. 11. 14 Accepted : 2018. 11. 23

Discussion until : 2019. 2. 28

극에 지하수가 부존하여 지하수 산출성이 상대적으로 좋지 않은 특성을 보이는 것으로 정리하고 있다.

지하수 함양량이란 지표에 도달한 강우 중 토양을 침투하여 대수층(포화대)까지 내려가 지하수를 이루는 강수의 양으로 정의된다. 우리나라의 경우, 전국적으로 1년 동안 발생한 강수 중 평균 14.9%가 지표면을 침투하여 대수층을 충전하는 것으로 보고된다(MOLIT, 2017). 지하수 개발 가능량은 지하수 장해가 발생되지 않도록 지하수 함양량 이내의 수량으로 산출되도록 제안되었고, 통계적으로는 10년 빈도 가뭄 시 대수층에 충전된 지하수 함양량으로 정의된다(MOLIT, 2017). 결과적으로 지하수 부존량은 대수층 공극에 저유된 지하수 부피의 개념이 지하수가 함양된 연대기적 시간(또는 기간)보다 더 우세하게 고려되는데 반해, 지하수 함양량 및 개발 가능량은 1년이라는 특정한 기간 동안 발생한 강수량에 의해 충전된 지하수로 정리된다.

지하수 부존량 산출은 그 동안 국내외적으로 소수의 연구자(기관)에서만 연구되어 왔다. 그러나 이들 연구도 각각의 총 공극에 부존된 지하수 부존량을 산출한 것이 아니라, 지표로부터 ‘지정된 심도’까지 저장된 지하수 부존량을 총량적인 의미에서 평가하고 있다. 국내에서는 서울특별시 지하수관리계획에 의거하여, 서울특별시 지질분포를 기준으로 심도 100 m 및 200 m까지 지하수 부존량을 산출한 바 있다(RDC, 1996). 즉, 서울특별시 평균 총적 대수층 심도 내의 1차 공극에 부존된 총적층 지하수의 수량과, 풍화대 하부 지정심도(100 m 및 200 m) 내의 2차 공극에 부존된 암반층 지하수의 수량을 합산하여 지하수 부존량을 산출하였다. Song et al.(2015)은 북한의 지하수 부존량 산출을 목적으로, 각 수문지질단위별 면적, 대수층 두께 및 저류계수를 활용하여 지하수 부존량을 산출한 바 있다. 국외에서는 최근 Gleeson et al.(2016)이 지구의 대

륙지각 약 2 km 심도까지의 공극율을 통계적으로 산출하고, 이러한 공극에 충전된 지하수 수량을 지하수 부존량으로 계산한 바 있다. 이를 근거로 전지구적으로 총 지하수 부존량을 약 $2.23 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 으로 산출하였고, 이 중 인류가 쉽게 이용 가능한 50년 미만의 지하수량(현생 지하수(modern groundwater) 부존량)을 총지하수 부존량의 약 5.6%($0.13 \times 10^{16} \text{ m}^3$)로 제시한 바 있다.

이 연구에서는 경상남도 양산시에 대하여, 선행 3가지 연구방법(Gleeson et al., 2016; RDC, 1996; Song et al., 2015)을 이용하여 지하수 부존량을 산출하였다. 또한 양산시의 지하수 함양량 및 개발 가능량을 계산하여 지하수 부존량과 비교하였고, 관측공에서 나타난 지하수위 하강이 지하수 부존량, 함양량 및 개발 가능량의 감소에 미치는 의미를 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 지하수 부존량 산출 방법

2.1.1. 지정심도에 따른 지하수 부존량 산출

RDC(1996)에서는 서울특별시의 지하수 부존량 산출을 위해, 지하 심도 100 m 및 200 m까지 특정심도를 지정하여 해당 심도까지의 부존량을 산정한 바 있다(Fig. 1). 지정심도 결정에 따른 지하수 부존량 산출방법은 아래와 같다.

(1) 총적층 지하수 부존량은 (식 (1))을 이용하여 산출한다.

$$\text{총적층 지하수 부존량} = \text{총적층 부피} \times \text{총적층 공극률} \quad (1)$$

여기에서, 총적층 부피 = 면적 × 총적층 평균 두께
 총적층 평균두께 = 총적층 평균 심도 - 지하수 평균심도

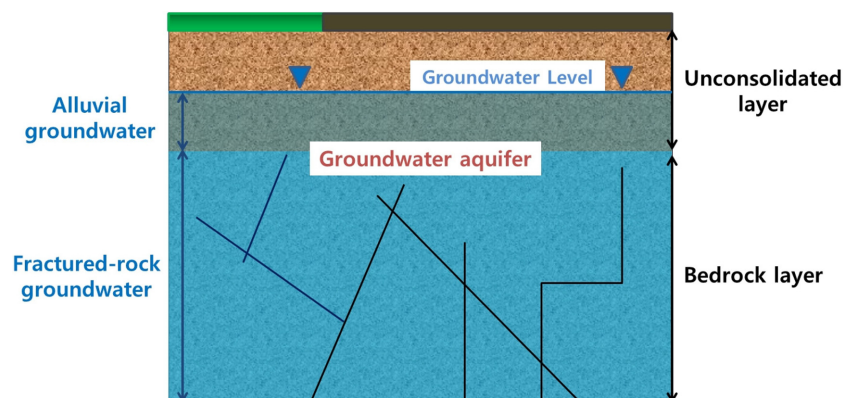


Fig. 1. Simplified cross-section of groundwater bearing aquifer.

(2) 암반층 지하수 부존량은 (식 (2))를 이용하여 산출한다.

$$\text{암반층 지하수 부존량} = \text{지정된 심도} \times \Sigma(\text{각 암종별 면적} \times \text{공극률}) \quad (2)$$

(3) 각 부존량을 합산하여 지정심도 결정에 따른 지하수 부존량을 산출한다.

$$\text{지하수 부존량} = \text{충적지하수 부존량} + \text{암반지하수 부존량} \quad (3)$$

이 방법은 계산이 단순한 반면, 지표에 분포된 암종의 분포와 지표에서 측정된 공극률이 지하의 지정심도까지 동일하다는 가정 하에 계산됨에 따라 실제 지하수 부존량과는 차이가 있다.

2.1.2. 수문지질단위 분류를 이용한 지하수 부존량 산출

Song et al.(2015)은 북한의 지하수 부존량 산출을 목적으로 남한에서 사용하는 8개의 수문지질단위를 북한에 적용하여, 면적, 대수층 두께 및 저류계수를 활용한 지하수 부존량을 산출하였다. RDC(1996)는 암종별(즉, 화강암, 편마암, 사암 등 암종) 공극률과 임의의 지정심도(100 m, 200 m 등)를 이용하여 지하수 부존량을 산출한 반면, Song et al.(2015)은 수문지질단위(비다공질 화산암, 신기 퇴적암, 고기 퇴적암, 관입 화성암 등)의 저류계수와 북한에서 발간된 문헌을 기초로 한 대수층 두께를 이용하여 지하수 부존량을 산출한 점이 다르다. 수문지질단위 분류를 이용한 지하수 부존량 산출방법은 아래와 같다.

- (1) 충적층과 수문지질단위를 구분한다.
- (2) 해당구역 충적층과 수문지질단위별 대수층 두께를 산출(분석)한다.
- (3) 수문지질단위별 지하수 부존량은 (식 4)를 이용하여 산출한다.

$$\text{지하수 부존량} = \Sigma(\text{각 수문지질단위 면적} \times \text{대수층 두께} \times \text{저류계수}) \quad (4)$$

이 방법은 대수층 심도, 저류계수 등 수리지질학적 개념을 포함하기 때문에, RDC(1996)의 지정심도에 따른 부존량 산출 방법에 비해 과학적이다. 그러나 동일 수문지질조건의 대수층 두께가 각 지점마다 동일하지 않다는 한계가 있다.

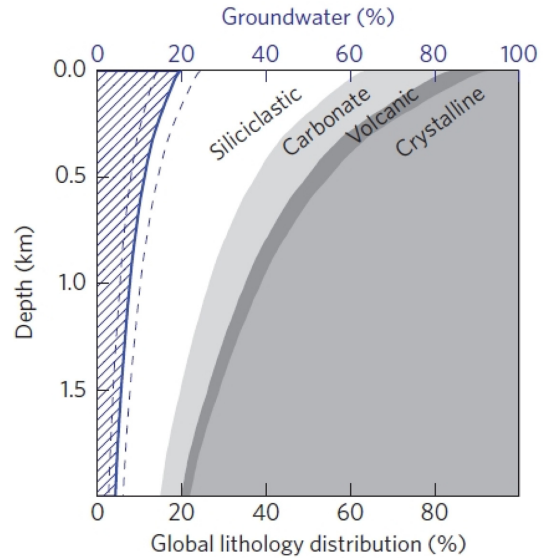


Fig. 2. The global distribution of lithology with depth and the global average porosity with depth that is filled with groundwater (in oblique lines) (Gleeson et al., 2016).

2.1.3. 현생 지하수 부존량 산출

Gleeson et al.(2016)은 지하수의 연령은 수개월부터 수백만년까지 다양하며, 오래된 연령(100년 미만 ~ 수백만년 연령)의 지하수의 경우 기수 내지 염수, 그리고 저품위의 수질을 보유한다고 제시하였다. 반면, 최근 연령(수개월 ~ 100년 미만 연령 중 일부)의 지하수는 수문순환과 밀접하게 관련됨에 따라, 재이용이 용이하고 생지구화학적 순환(biogeochemical cycles)에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 이들은 지각을 이루는 암석의 심도별 공극률 분석을 기반(Fig. 2)으로, 대륙지각 약 2 km 심도까지의 전지구적 총지하수 부존량을 산출하였고, 이 가운데 쉽게 이용 가능한 지하수량(현생 지하수 부존량(modern groundwater reserves))을 추가적으로 산출하였다. 이때 지구의 대륙지각 약 2 km 심도까지의 총지하수 부존량은 약 $2.23 \times 10^{16} \text{ m}^3$ (공극률의 불확실성을 고려할 경우 $1.60 \sim 3.0 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 범위)라고 하였으며, 이는 모든 지하수를 양수하여 지각 위에 평평하게 적치했을 경우 전지구 대륙지각을 약 180 m로 균일하게 덮을 정도의 부피라고 제시하였다. 또한 대륙지각 2 km 심도 이내에 부존된 지하수 가운데, 비교적 최근에 함양이 되었고 전지구적 수문순환에 민감한 50년 미만의 현생 지하수 부존량은 총지하수 부존량(2 km 심도 이내)의 약 6%(1.5~5.6% 범위) 미만이고, 그 수량은 $0.13 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ($0.01 \sim 0.50 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 범위, 단, 1~17%의 불확실성을 고려할 경우)이며, 이는 전지구 대륙지각을 약 3 m 정도 균일하게 덮을 정도의 부피라고 하였

다. 오래된 연령의 지하수와 현생 지하수를 모두 포함하는 총지하수 부존량은 저품위 및 고염도의 지하수를 모두 포함하는 수량인 반면, 현생 지하수 부존량은 데 50년 이하 연령의, 쉽게 이용가능한 지하수 수량이며 지각 하부 수백 m 이내에 부존한다고 하였다.

Gleeson et al.(2016)의 전지구적 지하수 부존량 산출방법과 현생 지하수 부존량 산출방법을 관심 유역에 적용하여 지하수 부존량을 산출하는 방법은 아래와 같다.

- (1) 해당유역 지표근처 공극률을 산정(측정)한다.
- (2) 해당유역 지정심도(2 km)까지 공극률을 (식 (5))를 이용하여 산출한다.

$$n = n_0 e^{-\beta z} \quad (5)$$

n : 공극률
 n_0 : 지표근처 공극률
 β : 0.0005(m⁻¹)
 z : 지정심도(m)

- (3) 지정심도까지의 공극율과 유역면적을 곱하여 총지하수 부존량을 산출한다(식 (6)).

$$\text{총지하수 부존량} = \text{공극률} \times \text{유역면적} \quad (6)$$

- (4) 현생 지하수 부존량은 총지하수 부존량의 6% 미만 (약 1.5~5.6% 범위)으로 산정하고, 이를 해당유역의 지하수 부존량으로 판단한다(식 (7)).

$$\text{현생 지하수 부존량} = \text{총지하수 부존량} \times 6\% \text{ 미만} \quad (7)$$

이 방법은 과학적인 분석에 기초한다는 장점이 있다. 그러나 전지구적 지하수 부존량 산출을 위해 결정된 수식은 국내 소규모 유역에 일괄적용 시에는 해당유역의 고유한 대수층 특성을 반영하기 어렵기 때문에, 해당유역의 실제 지하수 부존량과 차이가 발생하는 단점이 있다.

2.2. 지하수 함양량 및 개발 가능량 산출 방법

지하수 함양이란 강수가 지하수면에 도달하여 대수층의 저류량을 증가시키는 수직적인 물의 흐름으로 정의되며, 강수의 지표 침투, 비포화대 내 배수와 포화대 내 재분포 또는 누적 과정을 통해 발생한다. 이러한 일련의 물리적 과정은 비포화대에서의 물의 흐름을 통하여 지표면에 가해진 수리적 스트레스를 해소하고 평형상태로 되돌아가려는 자연 현상으로 이해될 수 있다(Koo and Lee, 2002). 지표에 도달한 강수 중, 토양을 침투하여 대수층(포화대)

까지 내려가 지하수를 이루는 강수의 양을 지하수 함양량이라고 한다. 지하수 함양량은 (식 (8))로 결정된다(MOLIT, 2017).

$$\text{지하수 함양량} = \text{강수량} \times \text{함양률} \times \text{해당지역 면적} \quad (8)$$

지하수 개발 가능량은 물이 강수, 지표수, 지하수, 증발산 등의 형태로 끊임없이 자연계에서 순환하는 물순환 체계가 파괴되지 않는 범위 내에서 개발할 수 있는 양으로 정의된다. 수치적으로는 10년 빈도 가뭄 시 지하수 함양량을 지하수 개발 가능량으로 정의된 바 있고(식 (9)), 이때 10년 빈도 가뭄 시 강수량은 전체 도수가 정규분포를 이루었을 때, 하위 10%에 들어갈 확률(p = 0.1, z = -1.28)의 강수량을 의미한다(MOLIT, 2017).

$$\text{지하수 개발 가능량} = 10\text{년 빈도 가뭄 시 강수량} \times \text{함양률} \times \text{해당지역 면적} \quad (9)$$

국내에서는 1990년대 이후 여러 연구진에 의하여 지하수 함양률 산출방법이 제시되었다. 이들은 크게 물수지 분석법(An et al., 2006, 2008), 토양수분수지법(MOLIT et al., 2006, 2007; MOLIT et al., 2007), NRCS-CN 방법(Choi and Woo, 2007; Park et al., 1999), 지하수위 강하곡선법(Choi and An, 1998; Kim et al., 2004), 지하수위 변동법(Cho and Park, 2008; Koo and Lee, 2002; Moon and Woo, 2001; Yun et al., 2013) 등으로 분류된다. 본 연구에서는 양산시 지하수관리계획(Yangsan, 2018)에서 제시된 지하수 함양률, 함양량 및 개발 가능량을 지하수 부존량과 비교하였다.

3. 연구지역

연구대상지역인 양산시는 경상남도 서부에 위치하며, 인구는 345,055명(2016.06 현재)이며 면적은 약 485.4 km²이다. 양산시의 농경지 및 임야 면적은 감소추세인 반면 대지와 기타용지 면적은 늘어나는 추세이지만, 토지이용 현황에 의하면 농경지 비율은 49.2%로 여전히 농업지역의 비율이 높은 편이다(www.yangsan.go.kr).

양산시의 지질은 중생대 백악기말 화성암 계열 지반으로 대보조산운동에 의해 형성된 화강암류와 안산암류 및 변질대가 발달하고, 그 위를 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있다(GSK, 1964). 서쪽으로 유문암질 라필리움회암이 각력암과 층회암을 협재하여 넓은 지역으로 나타나고, 암층으로 유천층군은 주산안산암질암류, 운문사 유문암질암류 및 후기 관입 화성암류인 불국사 관입암류에 속하는

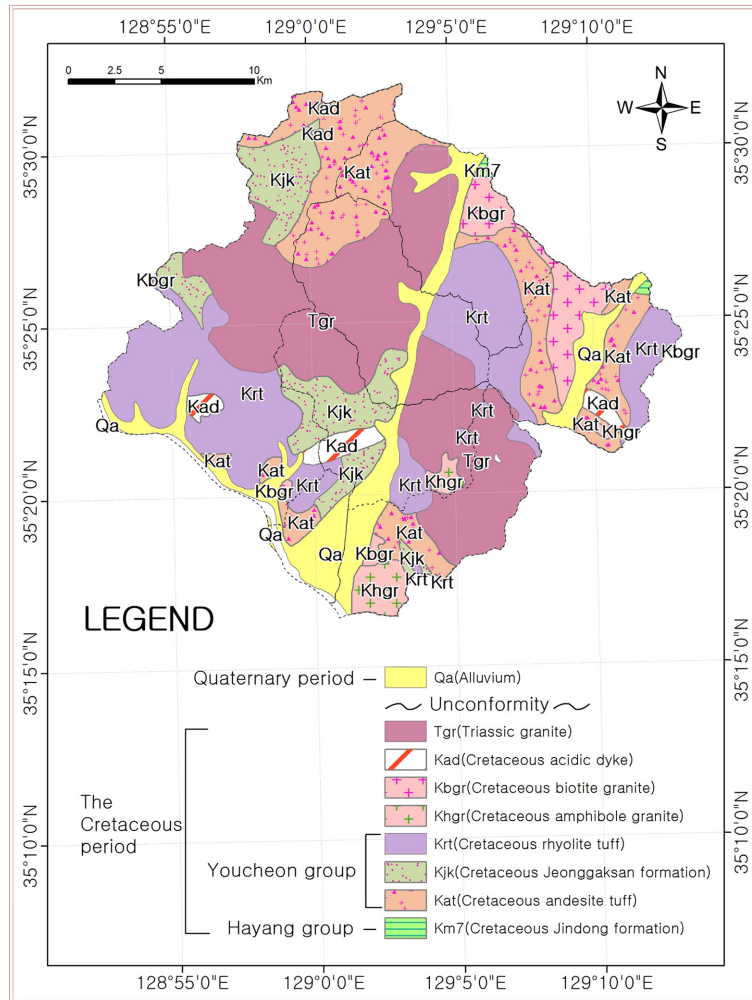


Fig. 3. Geology of Yangsan county (modified after GSK, 1964).

Table 1. Hydrogeology of Yangsan county (GSK, 1964)

Hydrogeologic units	Area (km ²)	
	Subtotal (km ²) (%)	Geologic units / Area (km ²) (%)
Unconsolidated cataclastic sediments	55.0 (11%)	Alluvium / 55.0 (11%)
Nonporous volcanic rocks	195.2 (40%)	Andesite / 87.2 (18%)
		Rhyolite / Rhyolitic tuff / 108.0 (22%)
		Silicic dike / 9.8 (2%)
		Granite / 142.1 (29%)
Igneous intrusives	184.3 (38%)	Biotite granite / 32.4 (7%)
		Sindong formation / 1.0 (<1%)
Cataclastic sedimentary rocks	46.6 (10%)	Jeonggaksan formation / 45.6 (9%)
Others	4.4 (1%)	Streams and others / 4.4 (1%)
Total	485.4 (100%)	

흑운모 화강암, 각섬석 화강암, 빈암, 산성암맥 등으로 구성된다(Fig. 3). 수문지질단위로는 대부분 비다공질화산암(50%), 관입화성암(38%), 미고결 쇄설성 퇴적물(11%) 등

으로 구분된다(Table 1). 양산시의 경우 충적층 지하수는 하천인근의 미고결 쇄설성 퇴적층에서 지하수 개발·이용이 가능한 반면, 암반층 지하수는 관입화성암의 풍화대

및 개별 암석의 접촉부에서 지하수 개발·이용을 기대할 수 있다.

양산시에는 2016년 12월 현재, 총 3,908개소의 관정에서 총 11,328천 m³/년의 지하수를 이용(생활용 관정 2,862개소에서 7,445천 m³/년, 농어업용 관정 791개소에서 2,246천 m³/년, 공업용 관정 255개소에서 1,638천 m³/년) 중이다. 양산시 총 3,908개소 중 심도가 확인된 3,410개소 관정 중, 충적층 관정(110개소)의 평균심도는 16.9 m, 암반층 관정(3,300개소)의 평균심도는 122.7 m이다. 양산시 지하수위 심도(depth)는 평균 9.2 m(2017년 2월과 10월에 조사된 489개소 관정 조사결과)로 나타났다(Yangsan, 2018).

4. 연구결과

양산시 지하수 부존량 계산을 위해 전술한 3개의 방법(지정심도에 따른 부존량 산출 방법, 수문지질단위 분류를 이용한 지하수 부존량 산출방법 및 현생 지하수 부존량 산출방법)을 적용하고 결과를 비교하였다. 이 후, 양산시 지하수 함양량 및 개발 가능량을 산출하여 지하수 부존량과 비교하였다.

4.1. 양산시 지하수 부존량 산출

지정심도에 따른 부존량 산출을 위해, 양산시 지질을 구성하는 암종(Table 1)의 면적은 ArcGIS 10.3을 이용하여 계산된 면적을 적용하였다. 각 암종에 적용된 공극률은 Freeze and Cherry(1979) 및 Domenico and Schwartz(1998)에 기록된 각 암종별 평균값을 참고(충적층 40%, 결정질암 2.5~5.0%, 퇴적암 17.5%)하였다. 양산시 지하수위 심도는 양산시 지역지하수관리계획(Yangsan, 2018)에서 조사된 489개소 관정의 평균 지하수위 심도(9.2 m)를 적용하였다. 489개소 중 충적관정 개소수는 3개소로, 충적층 지하수 부존량 산출을 위해 489개소의 심도(9.2 m)

를 (식 (1))에 일괄 적용하는 것은 다소 무리가 있다. 그러나 충적관측공과 암반관측공이 동시에 위치하는 국가지하수관측망 154개소의 수위 분석 결과 두 종류 관측공 수위는 유사한 결과를 보여(Song, 2018), 이를 기초로 평균 지하수위(9.2 m)를 (식 (1))에 적용하였다. 충적층의 평균심도는 양산시 충적관정 110개소의 평균심도(16.9 m)를 적용하였다. 적용된 충적관정의 평균심도가 양산시 충적층의 실제 평균심도를 의미하는 것은 아니지만, 양산시에서 수집된 시추자료 개수의 부족으로 양산시 실제 충적층 두께를 통계적으로 산출해내기 어려웠기 때문에, 110개소 충적관정의 평균심도는 양산시 충적관정 이용자가 일반적으로 개발·이용하는 체감심도(또는 대표심도)로 고려하여 이를 충적층 평균심도로 설정하였다. 마찬가지로, 암반관정의 심도(122.7 m)는 양산시 암반관정 3,300개소의 평균심도로서, 해당 심도는 양산시 암반관정 이용자가 일반적으로 개발·이용하는 체감심도로 고려하여 이를 양산시 암반층 평균심도로 설정하였다. 이 결과, 심도 122.7 m까지 저장된 양산시 총지하수 부존량은 약 20.2억 m³(충적층 지하수 약 1.7억 m³, 암반층 지하수 약 18.5억 m³)으로 산출되었다(Table 2).

수문지질단위 분류를 이용한 지하수 부존량 산출을 위해, 양산시 수문지질단위별 면적은 (Table 1)을 기준으로 하였고, 각 수문지질단위별 저류계수는 지하수관리기본계획(MOCT, 2007)에 기재된 각 수문지질단위별 평균값(미고결성 퇴적물 2.4, 비다공질 화산암 0.39, 백악기 산성 관입화성암 1.03, 백악기 쇄설성 퇴적암 0.49)을 참고하였다. 또한 충적대수층과 암반대수층의 심도는 양산시 충적관정 및 암반관정의 평균심도(각 16.9 m 및 122.7 m)를 적용하였다. 이 결과, 심도 122.7 m까지 저장된 양산시 총지하수 부존량은 약 24.9억 m³으로 산출되었다(Table 2).

현생 지하수 부존량 산출을 위해 우선 양산시 총지하수 부존량을 산출하였다. 이 때 공극률을 0.2, β 값을 0.0005로 적용하여 양산시 2 km 심도까지 총지하수 부존량을 산

Table 2. A comparison of presumed groundwater reserves based on three selective methods

Methods	Presumed groundwater reserves (10 ⁹ m ³)	Remarks
KRC (1996)	20.2	A method for presuming groundwater reserves with designating an average developed depth (a depth of 122.7 m) of a bedrock-aquifer in Yangsan county
Song et al. (2015)	24.9	A method for presuming groundwater reserves with considering hydrogeologic units with an designated aquifer depth (122.7 m) in Yangsan county
Gleeson et al. (2016)	68.7	A simplified method for calculating 'the modern groundwater reserves' in Yangsan county
Results	20.2~68.7 (average 37.9)	

출한 결과, 양산시 총지하수 부존량은 약 1,227억 m³으로 추정되었다. 이 후, 현생 지하수 부존량을 총지하수 부존량의 약 5.6%로 고려(Gleeson et al., 2016)하여 산출한 결과, 양산시 현생 지하수 부존량은 약 68.7억 m³으로 산출되었다(Table 2).

4.2. 양산시 지하수 함양률 및 개발 가능량 산출

양산시 지하수 함양률 산정을 위하여 5가지 방법(물수지 분석법, 토양수분수지법, NRCS-CN법, 지하수위 강하곡선법, 지하수위 분석법)이 적용되었고, 이 결과 함양률은 11.1~21.6% 범위(물수지분석법 21.6%, NRCS-CN법 18.5%, 토양수분수지법 18.3%, 지하수위 분석법 13.2%, 지하수위 강하곡선법 11.1%)로 나타났다(Yangsan, 2018). 이 연구에서는 5개 함양률 분석의 평균값(16.6%)으로 양산시 지하수 함양률을 적용하였는데, 해당값은 경상남도 지하수관리계획(Gyeongsangnamdo, 2015)에서 제시된 양산시 함양률(14.5%), 지하수관리기본계획 수정계획(MOLIT, 2017)에서 제시된 우리나라 평균 함양률(14.9%)과 유사하였고, 우리나라 일반적인 평균 함양률 범위(15~20%)(Choi and Ahn, 1998)에도 포함되었다.

양산시 함양률(16.6%)과 양산시 면적평균 강수량 1,358.8 mm/년(Yangsan, 2018)을 (식 (8))에 적용하여 양산시 지하수 함양량을 산출하였다. 이 결과 양산시 지하수 함양량은 약 1.1억 m³/년으로 나타났다. 양산시 지하수 개발 가능량 산출을 위하여 양산시 10년 빈도 가뭄 시 강수량(977.0 mm/년; Yangsan, 2018)을 (식 (9))에 적용한 결과, 양산시 지하수 개발 가능량은 약 0.8억 m³/년으로 산출되었는데 이는 양산시 지하수 함양량의 약 72%에 해당된다.

5. 토 의

5.1. 지하수 부존량 산출 결과 비교

양산시 지하수 부존량 산출을 위하여 상기한 3가지 산출방법을 적용한 결과는 (Table 3)과 같다. 지정심도 적용에 따른 지하수 부존량(약 20.2억 m³)과 수문지질분류 적용에 따른 부존량(약 24.9억 m³)의 값은 유사하게 산출되

었으나, 현생 지하수 부존량(약 68.7억 m³)은 상기 두 가지 방법의 산출량(약 20.2~24.9억 m³)과 비교할 때 약 2.8~3.4배 큰 것으로 나타났다.

현생 지하수 부존량(약 68.7억 m³)을 지정심도에 따른 지하수 부존량 방법과 단순 비교했을 때, 현생 지하수 부존량 약 68.7억 m³은 지정심도 약 330 m까지 부존된 지하수량(약 68.2억 m³)과 유사한 수량이다. 만약 현생 지하수 부존량 약 68.2억 m³을 상시 사용가능한 고품질 지하수(Gleeson et al., 2016)라고 가정하면, 양산시 청정지하수 개발심도는 평균 약 330 m 내외로 정의할 수 있다. 비록 3가지 방법의 결과는 다소 차이를 보이지만, 이러한 차이는 각 산출 공식의 차이에 단순히 기인한 결과이기 때문에, 양산시 지하수 부존량은 약 20.2~68.7억 m³(평균 약 37.9억 m³) 범위로 평가할 수 있다(Table 2).

5.2. 대수층의 내한능력

양산시 지하수 대수층에서 가뭄 시 공급 가능한 지하수량(내한능력)을 평가하기 위하여, 양산시 지하수 부존량, 함양량, 개발 가능량을 비교하였다. 지하수 부존량은 수십~수백년에 걸친 기간 동안에 걸친 수문순환에 의해 지중에 저장된 지하수량인 반면, 지하수 함양량은 1년 동안 저장된 수량이고, 개발 가능량은 물순환 체계를 파괴하지 않는 범위 내에서 1년이라는 기간 동안 이용하도록 허가된 지극히 제한된 수량이다. 이 때문에, 지하수 부존량을 함양량 및 개발 가능량과 수평적으로 비교하는 것을 다소 무리가 있다. 그럼에도 불구하고 대수층 저장에 소요된 시간개념을 배제한 상태에서 양산시 지하수 부존량, 함양량, 개발 가능량을 비교할 수 있다면, 지하수 함양량은 부존량의 약 1.6~5.5%, 개발 가능량은 1.2~4.0% 수준으로 계산된다(Table 3). 이러한 결과를 기초로, 양산시에서 가뭄에 따른 긴급관정을 개발하는 경우, 양산시 지하수 대수층은 지하수 개발 가능량(1.2~4.0%)을 훨씬 상회하는 약 96% 이상의 지하수를 개발할 수 있는 잠재력(내한능력)이 충분하다고 평가 가능하다. 최근 Kim et al.(2017)은 지하수 모델링 결과를 토대로 극심한 가뭄이 발생한 경우 지하수 개발 가능량을 상회하는 지하수를 과잉 양수하는 경우에도, 대수층은 막대한 지하수 부존량을 지니고

Table 3. A rate of groundwater recharge amounts and exploitable amounts compared with groundwater reserves in Yangsan city

County	Groundwater reserves (10 ⁹ m ³)	Groundwater recharge amounts (10 ⁹ m ³ /yr)	Groundwater exploitable amounts (10 ⁹ m ³ /yr)
Yangsan	20.2~68.7	1.1 (1.6~5.5% of groundwater reserves)	0.8 (1.2~4.0% of groundwater reserves)

Table 4. A change of groundwater reserves in accordance with a long-term fluctuation of groundwater level

Years	2014	2015	2016	2017	Remark
Groundwater level (m)	2.97	2.41	2.15	1.71	Above sea level
Decreased level (m)	-	-0.56	-0.82	-1.26	Yangsan 1 monitoring station
Decreased amounts (10^3 m^3)	-	~ -12,166	~ -17,815	~ -27,374	
Changes of groundwater reserves					
Decreasing rates compared with total groundwater reserves (%)	-	~ -0.6	~ -0.9	~ -1.4	-
Decreasing rates compared with alluvial groundwater reserves (%)	-	~ -7	~ -11	-16	

있기 때문에, 양수 초기 급격한 지하수 수위 저하를 제외하면 대수층의 지하수 공급능력은 꾸준히 유지됨을 보고한 바 있다. 그러나 이 경우는 대수층의 막대한 부존량을 근거로 특정시기 가뭄에 내한능력이 충분하다는 가정을 근거로 제시한 것이고, 특히 심부지하수의 경우 함양되는 시간은 상당히 오래 걸릴 수 있으므로, 극심 가뭄 기간을 제외하고는 지하수 이용량을 (식 (9))로 산출된 ‘지하수 개발 가능량’ 이내로 준수하여 지속가능한 지하수 이용을 도모해야 한다.

5.3. 건전한 총적층 지하수 수량 관리

2013년에 설치되었고, 2014년부터 관측이 시작된 「양산1」 농어촌지하수 관측공의 최근 4년간(2014~2017)의 지하수위 분석 결과 지속적으로 감소추세가 나타났다. 이러한 지하수위의 저하가 양산시 전지역에서 동일한 규모로 발생한다면, 양산시 지하수량은 약 -27,374 ~ -12,166 천 m^3 의 감소를 보이는 것으로 판단할 수 있다(Table 4).

이는 양산시 지하수 부존량을 기준으로 약 -1.4 ~ -0.6%의 감소이지만, 암반층 지하수를 제외한 총적층 지하수 부존량을 기준으로 판단하는 경우 약 -16 ~ -7%의 감소를 의미한다. 그런데 총적층 지하수는 농민이 주로 이용하는 소형 천부지하수 관정의 주된 수원으로, 약 -16 ~ -7%의 감소는 가용 지하수량의 커다란 손실로 평가될 수 있다.

결과적으로 기후변화에 따른 강수량 변화와 총적층 지하수량 감소를 대비하기 위해서는, 총적층 지하수 부존량의 상시 확보를 위해 관정별 허가·신고량 이내로 이용함과 동시에 기설관정에 대한 사후관리를 주기적으로 시행하여 기설관정의 재생이용 및 신규관정 개발의 억제 정책이 요구된다. 또한 지하댐, 모래저장댐, 인공함양 및 관정연계이용 등 사전 총적층지하수 확보기술을 상습가뭄 지역에 적용하여 가뭄대비 상시 총적층 지하수 자원을 확보할 필요도 있다.

6. 결 언

지하수 부존량은 심부지질 정보에 대한 불확실성 때문에 일반적으로 특정한 지정심도까지 부존된 지하수 포화량으로 산출한다. 이 연구에서는 양산시를 대상으로 지하수 부존량을 산출하였고, 암반관정 평균심도인 약 122.7 m 까지 약 20.4~68.7억 m^3 의 지하수 부존량을 산출하였다. 또한 양산시 지하수 함양률(약 16.6%)을 적용하여 지하수 함양량(약 1.1억 $\text{m}^3/\text{년}$)과 지하수 개발 가능량(약 0.8억 $\text{m}^3/\text{년}$)을 산출하였다. 지하수 부존량, 함양량 및 개발 가능량을 비교한 결과, 지하수 함양량은 부존량의 약 1.6~5.5%, 개발 가능량은 1.2~4.0% 수준으로 나타나, 지하수 대수층은 가뭄대응 내한능력이 충분한 것으로 나타났다. 그러나 가뭄에 따른 지하수위의 감소는 총적층 지하수량의 감소에 직접적인 영향을 끼칠 수 있으므로, 지하수 이용량을 지하수 개발 가능량 이내로 이용하도록 규제함과 동시에 관정 소유주는 허가·신고량을 준수하는 상시 지하수량 관리가 필요하다. 이와 더불어 상습가뭄지역에는 가뭄대응 지하수자원 확보전략으로 지하댐, 모래저장댐, 인공함양 및 관정연계이용 등의 기술을 확산하여 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 원고는 환경부 수요대응형 물공급서비스사업(공고-제06호)에 의해 이루어진 것임.

References

- An, J.G., Lee, Y.D., and Hwang, J.H., 2006, Estimation of the spatial distribution of groundwater recharge by grid-based soil water balance method, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(1), 65-76.
- An, J.H., Hamm, S.Y., Lee, J.H., Kim, N.H., Yang, D.B., and

- Hwang, J.G., 2008, Estimation of groundwater recharge in Jung-gwae-Boeun area in Ulsan city using the water balance and hydrogeological analysis, *Econ. Environ. Geol.*, **41**(4), 427-442.
- Cho, J.W. and Park, E., 2008, A study on delineation of groundwater recharge rate using water-table fluctuation and unsaturated zone soil water content model, *J. Soil Groundw. Environ.*, **13**(1), 67-76.
- Choi, B.S. and Ahn, J.G., 1998, A study on the estimation of regional groundwater recharge ratio, *J. Korean Soc. Groundw. Environ.*, **5**(2), 57-65.
- Choi, I.H. and Woo, N.C., 2007, Limits of the NRCS-CN method to assess groundwater recharge, *J. Soil Groundw. Environ.*, **12**(5), 1-6.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1998. Physical and chemical hydrogeology (2nd Ed.), John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gleeson, T., Befus, K.M., Jasechko, S., Lujendijk, E., and Cardeanas, M.B., 2016, The global volume and distribution of modern groundwater, *Nature Geosci.*, **9**, 161-167.
- GSK (Geological survey of Korea), 1964, Explanatory text of the geological map of Yangsan sheet (geological atlas of Korea, scale 1:50,000), Geological survey of Korea.
- Gyeongsangnamdo, 2015, The regional groundwater management plan on Gyeongsangnamdo, Gyeongsangnamdo.
- Kim, G.B., Yi, M.J., Kim, J.W., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004, Evaluation of estimating groundwater recharge using waterlevel data obtained from the national groundwater monitoring stations, *J. Engineer. Geol.*, **14**(3), 313-323.
- Kim, W.G., Kim, J.Y., Lee, H.S., Lee, H.J., Koo, M.H., and Song, S.H., 2017, Agricultural drought assessment based on groundwater supply capacity, *Proceedings of 2017 fall KoSSGE meeting*, Korean society of soil and groundwater environment, Jeju, Korea, 139 p.
- Koo, M.H. and Lee, D.H., 2002, A numerical analysis of the water level fluctuation method for quantifying groundwater recharge, *J. Geol. Soc. Korea*, **38**(3), 407-420.
- MOCT (Ministry of construction and transportation), 2007, The national groundwater management plan (2007~2016), Ministry of construction and transportation, Gwachon, 337 p.
- MOLIT (Ministry of land, infrastructure, and transportation), 2007, Report on the basic groundwater investigation - Seosan region, Ministry of land, infrastructure, and transportation, Gwachon, 171 p.
- MOLIT (Ministry of land, infrastructure, and transportation), 2017, The national groundwater management plan 2nd Ed. (2017~2026), Ministry of land, infrastructure, and transportation, Gwachon, 168 p.
- MOLIT (Ministry of land, infrastructure, and transportation), K-water, and KiGAM (Korea institute of geoscience and mineral resources), 2007, Report on the basic groundwater investigation - Boeun region, Ministry of land, infrastructure, and transportation, K-water, and Korea institute of geoscience and mineral resources, Gwachon, 148 p.
- MOLIT (Ministry of land, infrastructure, and transportation), K-water, and KRC (Korea rural community corporation), 2006, Report on the basic groundwater investigation - Yeon-gi region, Ministry of land, infrastructure, and transportation, K-water, and Korea rural community corporation, Gwachon, 209 p.
- MOLIT (Ministry of land, infrastructure, and transportation), K-water, and KRC (Korea rural community corporation), 2007, Report on the basic groundwater investigation - Anseong region, Ministry of land, infrastructure, and transportation, K-water, and Korea rural community corporation, Gwachon, 172 p.
- Moon, S.K. and Woo, N.C., 2001, Estimation of groundwater recharge ratio using cumulative precipitation and water-level change, *J. Soil Groundw. Environ.*, **6**(1), 33-43.
- Park, J.S., Kim, K.H., Jeon, M.W., and Kim, J.S., 1999, Estimation methods of groundwater recharge rate in small basin, *J. Korean Soc. Groundw. Environ.*, **6**(2), 76-86.
- RDC (Rural development corporation), 1996, Groundwater management plan on Seoul metropolitan city, Seoul metropolitan city, Seoul, 1751 p.
- Song, S.H., 2018, Assessment of drought effects on groundwater system in rural area using standardized groundwater level index (SGI), *J. Soil Groundw. Environ.*, **23**(3), 1-9.
- Song, S.H., Park, J., and An, J.G., 2015, Estimation of the available amount of groundwater using classifications of land forms and hydrogeological units in N. Korea, *J. Soil Groundw. Environ.*, **20**(7), 23-33.
- Yangsan, 2018, Local groundwater management plan on Yangsan county, Yangsan county. (in press)
- Yun, S.W., Kim, Y.S., Kim, D.H., Kim, H.C., Shin, M.C., Park, J.Y., Kim, H., and Lee, J.Y., 2013, Comparative study on water-level fluctuation and recharge characteristics in groundwater of urban and rural areas in Gangwon province, *J. Geol. Soc. Korea*, **49**(4), 503-516.