

실측 자료에 기반한 우리나라 지하수의 용도별 이용량 추정 방법

김지욱¹ · 전형필² · 이찬진¹ · 김남주³ · 김규범^{4*}

¹한국수자원공사 지하수지반사업팀, ²국토해양부 수자원정책과,

³(주)지오엔지니어링, ⁴한국수자원공사 K-water연구원

Groundwater-use Estimation Method Based on Field Monitoring Data in South Korea

Ji-Wook Kim¹, Hyung-Pil Jun², Chan-Jin Lee¹, Nam-Ju Kim³, and Gyoobum Kim^{4*}

¹Groundwater & Geotechnics Team, Korea Water Resources Corporation

²Dept. of Water Resources Policy, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

³Geo Engineering Co. Ltd.

⁴K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

근래 들어 환경에 대한 관심이 높아지면서 지표수 개발 여건은 불리해지고 있으며, 또한 양질의 수자원에 대한 욕구는 점차 증가함에 따라 정부는 지하수 개발 정책을 도모하게 되었다. 이와 같은 개발 정책을 추진하기 위해서는 보다 정확한 지하수 개발가능량과 지하수 이용량 파악이 중요하다. 본 연구에서는 양질의 지하수 이용량 자료를 확보하기 위해 전국(5개 도의 32개 시군)을 대상으로 수년간 모니터링을 실시하고, 통계분석을 통해 합리적인 지하수 이용량 산정방법을 제시하였다. 생활용 지하수의 경우 전국을 도시지역, 도농복합지역, 농촌지역으로 구분하고, 지하수 용도를 가정용, 공동주택용, 간이상수도용, 학교용, 일반용 등 5가지로 분류하였다. 농업용 지하수의 경우 전국을 강수량에 따라 평균 강수량지역, 평균 강수량 미만지역, 평균 강수량 초과지역으로 구분하고, 지하수 용도를 전작용, 답작용, 원예용, 축산용-육우, 축산용-양돈, 축산용-양계로 분류하였다. 이로부터 모니터링 자료에 대한 군집분석과 회귀분석을 통해 지역별-용도별 지하수 이용량 추정식을 제시하였다. 향후 본 연구에서 제시한 기준을 적용하여 국가 지하수 이용량 통계의 신뢰도가 크게 향상될 것으로 기대된다.

주요어 : 지하수 이용량, 모니터링, 군집분석, 회귀분석

With increasing interest in environmental issues and the quality of surface water becoming inadequate for water supply, the Korean government has launched a groundwater development policy to satisfy the demand for clean water. To drive this policy effectively, it is essential to guarantee the accuracy of sustainable groundwater yield and groundwater use amount. In this study, groundwater use was monitored over several years at various locations in Korea (32 cities/counties in 5 provinces) to obtain accurate groundwater use data. Statistical analysis of the results was performed as a method for estimating rational groundwater use. For the case of groundwater use for living purposes, we classified the cities/counties into three regional types (urban, rural, and urban-rural complex) and divided the groundwater facilities into five types (domestic use, apartment housing, small-scale water supply, schools, and businesses) according to use. For the case of agricultural use, we defined three regional types based on rainfall intensity (average rainfall, below-average rainfall, and above-average rainfall) and the facilities into six types (rice farming, dry-field farming, floriculture, livestock-cows, livestock-pigs, and livestock-chickens). Finally, we developed groundwater-use estimation equations for each region and use type, using cluster analysis and regression model analysis of the monitoring data. The results will enhance the reliability of national groundwater statistics.

Key words : Groundwater use, Monitoring, Cluster analysis, Regression analysis

*Corresponding author: gbkim@kwater.or.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

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.

서 론

전 세계적으로 인구증가와 산업화로 인해 물 사용량은 점차 증가하고 있으며, 안정적인 수자원 확보를 위한 국가간 정치적, 기술적 경쟁도 치열해 지고 있다. 수자원으로서 지하수는 지표수에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 일반적으로 지하수는 지표수에 비해 수질이 양호하며, 오염에 덜 취약하다. 또한, 연중 유량의 변화가 적고 넓은 지역에 비교적 균등하게 분포하고 있어 지표수가 발달하지 않은 지역에서는 유일한 수자원 역할을 하고 있다. 또한, 지표수의 개발에는 일시에 막대한 재정적 투자가 필요한 반면 지하수는 용수가 필요한 지역에서 비교적 적은 비용으로 수원확보가 가능하기 때문에 물 수요 증가에 대처하기 위해 지하수 이용은 점진적으로 증가하고 있는 추세이다(Zecster and Everett, 2006). 우리나라는 연간 약 255억 m³의 물을 사용하고 있으며(MLTM, 2011), 지하수는 연간 39.1억 m³을 사용하여(MLTM and K-water, 2012) 전체 물 이용량의 약 15.3%를 차지하고 있다. 특히, 지하수 이용량은 꾸준히 증가하여 본격적인 통계가 집계되기 시작한 1994년 이후 1.5배 증가하였으며, 생활용과 농업용 지하수 이용량의 증가가 주된 요인인 것으로 분석되었다(Kim, 2012). 한편, 외국의 사례를 보면, OECD 가입 국가들의 경우에도 지하수 이용량은 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다. 전체 물 이용량 중 지하수가 차지하는 비율은 북미 국가들은 24%, 유럽은 21%에 이르며, OECD 전체 국가들의 평균은 22%로 보고된 바 있다(OECD, 2008). 특히, 음용수에 있어서는 지하수가 차지하는 비율이 더 높아 유럽 75%, 미국 51%, 아시아 32%, 중남미 29% 수준인 것으로 보고되었다(KEI, 2007).

이상과 같이 국내 지하수 이용현황과 해외 사례를 비교해 볼 때 우리나라는 외국에 비해 지하수의 활용이 다소 저조한 것을 알 수 있으며, 이는 1960년대 이후 급속한 경제개발 과정에서 대량의 용수확보를 위해 지표수 개발 위주의 정책을 추진하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 2000년대 이후 환경에 대한 관심이 높아지면서 지표수 개발여건은 점차 불리해지고 있으며, 반면에 양질의 수자원에 대한 관심은 높아져 지하수 이용은 꾸준히 증가되어 왔으며, 이와 같은 경향은 향후 지속될 것으로 예상된다. 이에 정부에서도 지하수 정책의 변화를 주어 지금까지 추진해온 보전·관리 위주에서 지속가능한 지하수 활용으로 전환하게 되었으며(MLTM, 2012), 이에 따라 향후 지하수개발 분야의 사

업이 본격적으로 추진될 것으로 전망된다.

지하수는 유용한 수자원인 것은 분명하지만 부존특성 상 철저한 조사를 통해 확보한 자료를 토대로 합리적인 계획을 수립하여 추진하여야 지속가능한 이용이 될 수 있으며, 이 때 가장 중요한 자료가 지하수 개발가능량과 지하수 이용량에 대한 자료이다. 지하수 개발가능량은 국토교통부에서 1996년 ‘지하수관리 기본계획’을 최초로 수립하면서 제시한 바 있으며, 이후 5년마다 기본계획을 보완, 재수립하는 과정에서 국내 여러 전문가의 의견을 수렴하고 최신 기법을 적용하여 연간 128.9억 m³으로 산정한 바 있다. 지하수 이용량의 경우 지하수법 제17조 및 같은법 시행령 제28조의 규정에 따라 매년 각 지방자치단체에서 관할지역에 대한 ‘지하수 이용실태조사’를 실시하고, 이를 국토교통부에 보고하고 있으며, 한국수자원공사에서는 이와 같이 조사, 보고된 자료를 취합하여 매년 ‘지하수 조사연보’를 발간함으로써 우리나라의 공식적인 지하수 이용량 통계를 제공하고 있다.

국토교통부에서 제시하고 있는 규정에 의하면 지하수 이용량은 유량계, 시간계 등을 통해 취수량을 직접 조사하여야 하며, 직접 조사가 곤란한 경우에는 하수도 사용료 부과자료, 전력 사용량 자료, 지하수 이용부담금 부과 자료 등을 활용하여 산정하도록 되어 있으나(MOCT, 2006), 현실적으로 시·군별로 평균 6,000개에 달하는 지하수 시설을 매년 직접 조사하는 것은 불가능하다. 특히, 국내 지하수 시설(약 145만개)의 70% 넘게 차지하는 구경 50 mm 이하 소형시설(약 104만공)은 대부분 유량계, 시간계 등이 설치되어 있지 않으며, 이용량을 산정할 수 있는 자료도 확보하기 쉽지 않은 현실이다. 실제로 전국 시·군·구를 대상으로 지하수 이용량 산정 방법에 대한 설문조사 결과 조사대상 지자체의 59.3%가 지하수 개발·이용 허가 또는 신고서 제출한 취수계획량을 사용하거나, 타 시군의 이용량 산정기준을 그대로 적용하고 있는 것으로 나타났다(MLTM and K-water, 2011). 이와 같은 지하수 이용량 조사체계와 현실적인 조사 여건을 감안할 때 지하수 이용량을 직접 조사할 수 없는 시설에 대하여는 합리적인 이용량 추정방법을 마련함으로써 이용량 통계의 신뢰도를 높이는 것이 필요하다고 할 수 있다.

국내에서 지하수 이용량과 관련된 연구는 많이 이루어지지 않았다. Woo et al. (1994)는 전국을 생활형, 공업형, 농업형 지역으로 구분하고 t-test를 통해 지하수 이용량에 영향을 미치는 인자를 도출한 후 다중 회귀분석을 통해 생공형 지역과 농업형 지역의 지하수 이용량을

추정하는 관계식을 도출한 바 있다. 그러나 이 방법은 개별 지하수 시설의 이용량을 추정하는 것이 아니라 해당 지역 전체의 지하수 이용량을 추정하는 방법이며, 또한 지하수 이용량 추정에 필요한 영향인자로 많은 자료를 확보하여야 하는 불편함이 있어 지자체의 지하수 이용량조사에 적용하기 곤란하다. 한편, Park et al. (2004)는 제주도내 44개 농업용 관정을 대상으로 1년간 이용량 모니터링을 실시하여 계절별 지하수 이용특성을 분석하고 모터펌프 가동시간에 대한 모니터링을 통해 비교적 정확한 양수량을 산정할 수 있음을 입증한 바 있다.

지하수 이용량은 사용 용도와 지역 특성 뿐만 아니라 상수도 보급률, 관정의 시설제원, 생활양식, 농업용의 경우 재배작물의 종류, 농지의 면적 등 수많은 요인에 의해 차이가 발생하기 때문에 획일적으로 특정 기준에 따라 이용량을 산정할 경우 필연적으로 차이가 발생할 수밖에 없으나 현실적으로 모든 지하수 이용량을 직접 측정할 수 없는 상황인 경우 보다 합리적인 기준을 제시하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 표본시설에 대한 실측자료를 바탕으로 하여 직접 이용량 측정이 어려운 경우에 적용할 수 있는 합리적인 이용량 추정기법을 개발, 제시함으로써 국가 지하수 이용량 통계의 신뢰도를 제고하고 궁극적으로 지하수 활용사업의 성공적인 수행을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

지하수 이용량 모니터링

표본 설계

합리적인 지하수 이용량 산정기준을 마련하기 위해 전국을 대상으로 연차별로 2006년부터 2012년까지 총 7,693개 지하수 시설을 표본으로 선정하여 지하수 이용량을 모니터링 하였다(Table 1).

모니터링 대상 표본 집단은 각 지역별로 지하수 용도

에 따라 구분하여 설정하였다. 지하수 용도는 크게 생활용과 농업용으로 구분하고, 공업용과 온천용, 먹는샘물 등 기타용의 경우 대부분 대규모 시설로서 유량계 등을 통해 지하수 이용량을 직접 확인할 수 있기 때문에 모니터링 대상에서 제외하였다. 생활용은 ‘지하수 업무수행지침’(MOCT, 2006)에서 제시한 분류 기준에 따라 가정용, 일반용, 공동주택용, 마을상수도용, 학교용으로 분류하였다. 이 중 가정용은 상수도 급수지역과 미급수지역으로 세분하고, 영업용은 양수능력에 따라 30 m³/일 미만, 30~100 m³/일, 100~150 m³/일, 150 m³/일 초과로 세분하였다. 농업용은 전작용, 답작용, 원예용, 축산용으로 분류하고 축산용은 육우용, 양돈용, 양계용으로 세분하였다.

표본의 크기는 중심극한정리(central limit theorem)에 따라 각 집단별로 30개 이상이 되도록 하였다. 중심극한정리란 표본분포의 평균은 모집단의 평균이고, 표본분포의 분산은 모집단의 분산을 표본의 크기로 나눈 것과 같으며, 표본의 크기가 충분히 크면(n > 30) 모집단으로부터 추출된 표본 평균의 분포는 모집단의 분포와 상관 없이 정규분포가 된다는 이론이다. 중심극한정리에 의하면 모집단의 분포모양에 관계없이 평균 μ , 분산 σ^2 인 모집단에서 크기가 n 인 모든 가능한 표본을 뽑는다면 표본 평균들의 분포는 n을 증가시킬수록 정규분포에 접근하게 되어 식 (1)과 같은 관계가 성립한다(Park and Yoon, 2002).

$$\mu_{\bar{x}} = \mu, \quad \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1}$$

모니터링 조사

모니터링 대상시설은 지하수 기초조사자료와 전국 관공서의 행정업무를 통합관리하는 새울행정시스템상의 지하수 개발 인허가 자료를 수집하여 시설물의 위치, 용

Table 1. Overview of the groundwater-use monitoring project.

| | District | Number of monitoring well | Period of project |
|----------------|---|---------------------------|-------------------|
| Total | | 7,693 | |
| Gyeonggi-Do | Anseong-Si, Yeosu-Gun, Yongin-Si, Icheon-Si | 621 | 2006.6~2007.11 |
| Chungcheong-Do | Seosan-Si, Asan-Si, Hongseong-Gun, Cheongwon-Gun, Cheongju-Si, Chungju-Si | 1,590 | 2008.4~2009.12 |
| Gyungsang-Do | Hapcheon-Gun, Gimhae-Si, Hadong-Gun, Milyang-Si, Sangju-Si, Andong-Si, Euisong-Gun, Gunwi-Gun, Gyungju-Si | 2,044 | 2010.7~2012.5 |
| Jeolla-Do | Damyang-Gun, Naju-Si, Yeosu-Si, Mokpo-Si, Jeongeup-Si, Namwon-Si, Jangsu-Gun, Imsil-Gun, Jeonju-Si | 2,034 | 2010.7~2012.5 |
| Gangwon-Do | Chuncheon-Si, Wonju-Si, Gangreung-Si, Hoingseong-Gun | 1,404 | 2011.6~2012.12 |

도, 관정 제원 등을 바탕으로 1차적으로 후보시설을 선정하였다. 이후 직접 현장을 방문하여 후보시설의 제원, 유량계 설치 및 작동 여부를 확인하였으며, 펌프용량, 양수능력, 상수도 급수여부, 급수기구, 급수인구, 급수지역 면적, 재배작물, 가축 사육종, 가축 사육두수 등 지하수 이용량에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대한 조사를 수행하였다.

모니터링 대상시설은 이용량을 측정할 수 있는 유량계가 설치된 시설을 우선적으로 선정하였으며, 유량계가 설치되어 있지 않은 경우에는 별도로 시간계를 설치하였다. 시간계는 펌프의 작동시간을 측정하는 장치로서 측정된 시간을 유량으로 환산하기 위해 모니터링 조사에 앞서 별도로 펌프 가동시간당 양수량을 측정하였다. 한편, 농촌에 설치된 지하수 시설은 농업용과 생활용을 겸용하여 사용하는 경우가 많으므로 독립적인 용도로 사용되는 시설을 선별하여 모니터링 대상시설로 선정하였다.

현장 모니터링 조사는 지역별로 최소 1년 이상 실시하였으며, 월 1회 현장을 방문하여 유량계 혹은 시간계의 수치를 확인하였다. 한편, 현장조사 결과 확보된 자료중 관측은 하였으나 이용량이 없는 경우, 유량계 고장

등의 사유로 지속적인 관측이 이루어지지 않은 경우, 가정용, 공동주택용, 마을상수도용 중에서 연속적으로 5회 이상 이용량이 없는 경우 등은 대상자료에서 제외하였다. 이와 같은 방법으로 총 7,693개 지하수 시설로부터 이용량 모니터링 자료를 확보하였다(Table 2).

자료선별(Data cleaning)

전국을 대상으로 확보한 이용량 모니터링 자료 중에는 자료수집 상의 오류, 일상적인 지하수 이용이라고 판단하기 어려운 비정상적인 이용량 자료들이 포함될 수 있으며, 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위해 이와 같은 이상값들을 제거하는 자료선별 과정을 거쳤다. 자료선별은 다음과 같이 3단계에 걸쳐 실시하였다.

- (1단계) 월별로 측정된 이용량 자료를 토대로 이용기간 동안의 일평균 이용량을 산정하였다.
- (2단계) 용도별로 지하수 이용량에 영향을 미치는 인자를 기준단위로 설정하고, 이를 토대로 단위 일평균이용량을 산정하였다. 기준단위로 사용한 영향인자는 생활용은 급수인구, 일반용과 농업용은 양수능력으로 하였다.
- (3단계) 상자도식(Box-plot)을 통해 단위 일평균이용

Table 2. Number of monitoring wells classified by province and water-use category.

| Water-use category | | Province | | | | | | | Total | |
|--------------------|---|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-------|----------|
| | | Gyung-gi | Chung-buk | Chung-nam | Jeon-buk | Jeon-nam | Gyung-buk | Gyung-nam | | Gang-won |
| Living | Domestic (supplied public water) | - | 106 | 96 | 132 | 135 | 135 | 126 | 172 | 902 |
| | Domestic (not-supplied public water) | 181 | 99 | 100 | 136 | 131 | 126 | 125 | 187 | 1,085 |
| | Apartment house | 31 | 32 | 33 | 13 | 21 | 39 | 45 | 30 | 244 |
| | Small scale water supply | 34 | 48 | 49 | 67 | 61 | 67 | 70 | 77 | 473 |
| | School | 31 | 37 | 35 | 61 | 64 | 56 | 62 | 79 | 425 |
| | Business(PC less than 30 m ³ /day) | 39 | 34 | 33 | 71 | 67 | 68 | 68 | 126 | 506 |
| | Business (PC 30~100 m ³ /day) | 109 | 71 | 67 | 68 | 69 | 61 | 69 | 91 | 605 |
| | Business (PC 100~150 m ³ /day) | 19 | 33 | 35 | 63 | 68 | 58 | 70 | 66 | 412 |
| | Business (PC over 150 m ³ /day) | 21 | 37 | 32 | 62 | 65 | 49 | 70 | 65 | 401 |
| Sum | 465 | 497 | 481 | 673 | 681 | 659 | 705 | 893 | 5,054 | |
| Agriculture | Rice farming | - | 96 | 98 | 132 | 133 | 135 | 128 | 172 | 894 |
| | Dry-field farming | 36 | 96 | 97 | 133 | 140 | 136 | 140 | 171 | 949 |
| | Floriculture | 60 | 34 | 32 | 70 | 72 | 70 | 71 | 100 | 509 |
| | Livestock (cow) | 30 | 32 | 32 | - | - | - | - | 65 | 159 |
| | Livestock (pig) | 30 | 32 | 32 | - | - | - | - | 2 | 96 |
| | Livestock (chicken) | - | 25 | 7 | - | - | - | - | 1 | 33 |
| Sum | 156 | 315 | 297 | 335 | 345 | 341 | 339 | 511 | 2,639 | |
| Total | 621 | 812 | 778 | 1,008 | 1,026 | 1,000 | 1,044 | 1,404 | 7,693 | |

PC: Pumping Capacity

Table 3. Variables used in the cluster analysis.

| Water-use category | | Variables |
|--------------------|--------------------------|---|
| Living | Domestic | Average daily use, Number of people per household, Number of household |
| | Apartment house | Average daily use, Number of people per household, Number of household |
| | Small scale water Supply | Average daily use, Number of people per household, Number of household |
| | School | Average daily use, Number of people per household |
| | Business | Average daily use, Hole diameter, Well depth, Pipe diameter, Pumping capacity, Pump capacity, Business area |
| Agriculture | Rice farming | Average daily use, Hole diameter, Well depth, Pipe diameter, Pumping capacity, Pump capacity, Farming area |
| | Dry-field farming | Average daily use, Hole diameter, Well depth, Pipe diameter, Pumping capacity, Pump capacity, Farming area |
| | Floriculture | Average daily use, Hole diameter, Pipe diameter, Pumping capacity, Pump capacity, Farming area |
| | Livestock | Average daily use, Hole diameter, Pipe diameter, Pumping capacity, Pump capacity, No. of breded animal |

량 산술평균의 $\pm 1.5\sigma$ (여기서 σ 는 표준편차)를 벗어나는 자료는 이상값(outlier)으로 제거하였다. 이상과 같은 자료선별(data cleaning) 과정을 거쳐 모니터링을 실시한 총 7,693개 지하수 시설 자료 중에서 6,664개 시설의 자료가 선별되었다.

모니터링 결과

군집분석

지하수 이용량 모니터링을 실시한 지하수 시설 중 이상값을 제외하고 선별된 6,664개 지하수 시설을 대상으로 지하수 이용특성에 따라 군집을 설정하고 이를 토대로 각 군집별로 지하수 이용량 산정기준을 제시하기 위해 군집분석을 실시하였다. 군집분석(cluster analysis)은 각 개체의 유사성을 측정하여 유사성이 높은 집단을 분류하고 같은 군집에 속하는 개체들의 유사성과 다른 군집의 개체 간의 상이성을 규명하는 다변량 통계분석 방법으로 대상을 분류하는 명확한 기준이 존재하지 않거나 기준이 밝혀지지 않은 상태에서 다양한 특성을 지닌 자료들을 분류하는데 사용된다. 군집분석에 사용되는 자료는 등간척도 또는 비율척도로 측정된 거리값이다. 거리의 종류는 여러 가지가 있으나 가장 일반적으로 사용되는 것이 유클리디안 거리(euclidean distance)이다. 유클리디안 거리는 두 지점간의 거리를 계산할 때 직각삼각형의 원리를 이용하는 것으로 다음과 같이 계산한다(식 (2)).

$$Euclidean\ distance\ (d_{ij}) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

대표적인 군집분석의 종류는 1) 계층적 군집분석, 2) K-means 군집분석, 3) Fuzzy 군집분석, 4) EM 알고리즘 등이 있으며, 본 연구에서는 비계층적 군집화 방법(nonhierarchical clustering method) 중의 하나인 K-means 군집분석을 이용하여 각 유형별 변수들의 대표값을 구하고 군집의 경계를 구분하였다. K-means 군집분석은 개체를 대상으로 K개의 군집으로 구분한 뒤 군집 내 각 변수의 중심점을 계산하고 이 중심점과 개체간의 거리를 반복적으로 계산하여 최단거리를 찾아내는 방법으로 이러한 과정은 모든 개체들이 최종적으로 군집화 될 때까지 반복하게 된다.

군집분석에 사용된 변수는 생활용은 급수인구와 급수 가구, 농업용은 굴착구경, 토출관직경, 양수능력, 펌프용량, 몽리면적 등이며, 세부용도별로 추가적인 변수를 사용하였다(Table 3). 군집분석 결과 모든 용도에서 2-5개의 군집으로 분류되었으나, 2개 군집으로 분류할 수 있는 간이상수도용을 제외하면 각 군집별로 추정식을 도출하는데 필요한 표본수가 너무 적거나 추정식에 포함되는 인자가 각 군집별로 달라지는 등 문제점이 노출되어 단일 군집으로 분류하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 한편, 군집분석 결과를 토대로 각 용도별로 영향인자에 따른 지하수 이용량 추정식을 도출하였다(Table 4). 한편, 분석 결과 나타난 용도별 영향인자는 생활용 중 상수도 급수지역의 가정용과 학교용은 급수인구이며, 상수도 미급수지역의 가정용과 공동주택용, 간이상수도용은 급수가구 및 급수인구로 나타났다. 일반용의 경우 영향인자가 매우 다양하게 나타났는데 양수능력 30 m³/일 미만은 양수능력, 30~100 m³/일은 토출관직경, 100~150 m³/일은 토출관직경 및 시설면적, 150 m³/일 초과는 굴

Table 4. Equation of groundwater use estimation derived from cluster analysis.

| | Water-use category | Equations |
|-------------|---|---|
| Living | Domestic (supplied public water) | $0.445 + (0.124 \times PUW)$ |
| | Domestic (not-supplied public water) | $-0.170 + (1.878 \times NOH) + (0.529 \times PUW)$ |
| | Apartment house | $8.192 + (-0.010 \times NOH) + (0.001 \times PUW)$ |
| | Small scale water supply (group 1) | $18.105 + (1.075 \times NOH) + (-0.441 \times PUW)$ |
| | Small scale water supply (group 2) | $20.215 + (0.332 \times NOH) + (-0.070 \times PUW)$ |
| | School | $9.257 + (0.001 \times PUW)$ |
| | Business (PC less than 30 m ³ /day) | $0.291 + (0.182 \times PC)$ |
| | Business (PC 30~100 m ³ /day) | $8.540 + (-0.197 \times PD)$ |
| | Business (PC 100~150 m ³ /day) | $0.361 + (0.160 \times PD) + (3.321 \times A)$ |
| | Business (PC more than 150 m ³ /day) | $-0.035 + (0.004 \times HD) + (0.175 \times PD)$ |
| Agriculture | Rice farming | $-1.674 + (0.183 \times HD)$ |
| | Dry-field farming | $-1.293 + (2.031 \times PC1)$ |
| | Floriculture | $1.647 + (0.026 \times HD)$ |
| | Livestock | - |

PUW: Population Using Water, NOH: Number of Household, PC: Pumping Capacity, PC1: Pump Capacity, PD: Pipe Diameter, HD: Hole Diameter, A: Area

착구경 및 토출관직경으로 나타났다. 한편 농업용의 경우 각 세부용도별 영향인자는 전작용과 원예용은 굴착구경, 답작용은 펌프용량으로 나타났다.

이용량 추정식 개발

군집분석에서 나타난 문제점을 해결하기 위해 지하수 이용량에 영향을 줄 것으로 예상되는 인자를 발굴하여 이를 토대로 인위적으로 전국 시군을 그룹화하고 각 그룹별로 회귀분석을 통해 가정용 지하수 이용량 추정식을 도출하였다.

생활용의 경우 지하수 이용량은 상수도 공급여부와 같은 주거지역의 여건과 생활양식에 의해 주로 차이가 발생하며, 이는 결국 도시화 정도와 관련되어 있을 것으로 예상된다. 따라서, 생활용 지하수는 지방자치법에서 규정한 지역구분을 적용하여 도시지역, 도농복합지역, 농촌지역 등 3개 지역으로 구분하였다. 도시지역은 시·구·동으로 구성되며, 서울특별시와 6개 광역시를 포함한 32개 시 지역이 해당된다. 도농복합지역은 시·구·동과 군·읍·면·리가 혼합된 지역으로 강원도 강릉시 등 51개 시 지역이 해당된다. 농촌지역은 군·읍·면·리로 구성된 지역으로 전국 88개 군지역이 해당된다.

농업용의 경우 지하수는 주로 작물의 재배에 사용되므로 강수량이 많은 지역의 경우 지하수 이용량이 적을 것이고, 반대로 강수량이 적은 지역의 경우 지하수를 보다 많이 사용할 것으로 추측할 수 있다. 따라서 농업용 지하수 이용량 산정을 위해 전국을 30년 강수량 자료를

기준으로 평균 강수량 지역(1,251~1,450 mm), 평균 강수량 미만지역(1,251 mm 미만), 평균 강수량 초과지역(1,450 mm 초과) 등 3개 지역으로 구분하였다. 평균 강수량 지역은 100개 시·군이며, 평균 강수량 미만지역은 22개, 평균 강수량 초과지역은 36개이다.

이와 같이 구분되어진 군집별로 회귀분석(regression analysis)을 실시하였다. 회귀분석은 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 파악하는 분석방법으로 산출된 영향력을 통해 예측할 수 있는 분석이다. 회귀분석을 통해 회귀계수(regression coefficient)가 도출되는데, 회귀계수에는 비표준 회귀계수와 표준 회귀계수가 있다. 비표준 회귀계수(unstandardized regression coefficient)는 독립변수의 원 값(여기서는 급수인구, 양수능력, 가축사육두수 등)을 가지고 종속변수의 값(여기서는 지하수 이용량)을 예측하고자 하는 경우에 사용되며, 표준 회귀계수(standardized regression coefficient)는 개별 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력의 크기를 분석하거나 독립변수 간의 영향력의 크기를 분석하거나 독립변수 간의 영향력 비교에 사용된다. 따라서 본 연구에서는 비표준 회귀계수를 이용하여 지하수 이용량 추정식을 도출하였다.

생활용 지하수

생활용 지하수는 가정용, 공동주택용, 간이상수도용, 학교용, 일반용으로 용도를 세분하고, 각각의 세부용도마다 도시지역, 도농복합지역, 농촌지역으로 구분하여 회귀분석을 실시하였다(Table 5). 다만, 가정용, 공동주택

Table 5. Result of regression analysis of average daily groundwater use for living purposes.

| Classification | Model | UC | | SC | t | p-value | R | R ² | F |
|---|------------|--------|-----------|-------|--------|---------|-------|----------------|---------|
| | | B | Std.Error | Beta | | | | | |
| Domestic (Complex area) | (Constant) | 0.173 | 0.031 | | 5.532 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.210 | 0.007 | 0.672 | 28.063 | 0.000 | 0.672 | 0.452 | 787.537 |
| Domestic (Rural area) | (Constant) | 0.265 | 0.050 | | 5.316 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.181 | 0.017 | 0.385 | 10.452 | 0.000 | 0.385 | 0.149 | 109.247 |
| Apartment house (Complex area) | (Constant) | 7.130 | 1.045 | | 6.824 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.001 | 0.003 | 0.048 | 0.524 | 0.601 | 0.048 | 0.002 | 0.006 |
| Apartment house (Rural area) | (Constant) | 7.287 | 1.619 | | 4.501 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.001 | 0.005 | 0.015 | 0.106 | 0.916 | 0.015 | 0.000 | 0.011 |
| Small scale water supply (Complex area) | (Constant) | 6.463 | 2.282 | | 2.833 | 0.005 | | | |
| | PUW | 0.178 | 0.024 | 0.463 | 7.360 | 0.000 | 0.463 | 0.214 | 54.172 |
| Small scale water supply (Rural area) | (Constant) | 11.726 | 2.261 | | 5.187 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.025 | 0.022 | 0.089 | 1.116 | 0.266 | 0.089 | 0.008 | 1.246 |
| School (Complex area) | (Constant) | 7.986 | 1.315 | | 6.071 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.005 | 0.002 | 0.291 | 2.487 | 0.015 | 0.291 | 0.084 | 6.183 |
| School (Rural area) | (Constant) | 11.687 | 1.906 | | 6.132 | 0.000 | | | |
| | PUW | 0.007 | 0.006 | 0.169 | 1.187 | 0.241 | 0.169 | 0.029 | 1.408 |
| Business (Urban area) | (Constant) | 2.119 | 2.594 | | 0.817 | 0.416 | | | |
| | PC | 0.021 | 0.020 | 0.117 | 1.075 | 0.285 | 0.117 | 0.014 | 1.156 |
| Business (Complex area) | (Constant) | 3.154 | 0.318 | | 9.932 | 0.000 | | | |
| | PC | 0.023 | 0.003 | 0.249 | 7.873 | 0.000 | 0.249 | 0.062 | 61.983 |
| Business (Rural area) | (Constant) | 3.521 | 0.447 | | 7.883 | 0.000 | | | |
| | PC | 0.011 | 0.005 | 0.103 | 2.174 | 0.030 | 0.103 | 0.011 | 4.727 |

UC: Unstandardized Coefficients, SC: Standardized Coefficients
 PUW: Population Using Water, PC: Pumping Capacity

Table 6. Equation of groundwater use for living purposes estimation derived from regression analysis.

| Classification | Urban area | Urban-rural complex area | Rural area |
|--------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|
| Domestic | 0.173 + (PUW×0.210) | 0.173 + (PUW×0.210) | 0.265 + (PUW×0.181) |
| Apartment house | 7.130 + (PUW×0.001) | 7.130 + (PUW×0.001) | 7.287 + (PUW×0.001) |
| Small scale water supply | 6.463 + (PUW×0.178) | 6.463 + (PUW×0.178) | 11.726 + (PUW×0.025) |
| School | 7.986 + (PUW×0.005) | 7.986 + (PUW×0.005) | 7.986 + (PUW×0.005) |
| Business | 2.119 + (PC×0.021) | 3.154 + (PC×0.023) | 3.521 + (PC×0.011) |

PUW: Population Using Water, PC: Pumping Capacity

용, 간이상수도용, 학교용의 경우 도시지역은 표본 수가 너무 적어 별도의 회귀분석을 실시하지 않고 도농복합 지역의 결과를 준용하였다. 회귀분석을 실시함에 있어 종속변수는 모든 용도에서 일평균 이용량으로 하였으며, 독립변수는 가정용, 공동주택용, 간이상수도용, 학교용의 경우 급수인구로 하고, 일반용의 경우 양수능력으로 하였다. 회귀분석을 통해 도출된 이용량 추정식은 Table 6 과 같다.

본 연구에서 제시한 식에 따라 지하수 일사용량을 추정해 보면, 가정용의 경우 4인 가족을 기준으로 하면 도

시지역과 도농복합지역은 1.013 m³/일, 농촌지역은 0.989 m³/일을 사용하는 것으로 나타났다. 일반용의 경우 양수능력 100 m³/일을 기준으로 하면 도시지역은 4.219 m³/일, 도농복합지역은 5.454 m³/일, 농촌지역은 4.621 m³/일을 사용하는 것으로 나타났다. 학교용의 경우 학생수 100인을 기준으로 하면 도시지역과 도농복합 지역은 8.486 m³/일, 농촌 지역은 12.387 m³/일을 사용하는 것으로 나타났다. 공동주택용의 경우 급수인구 100 인을 기준으로 하면, 도시지역과 도농복합지역은 7.230 m³/일, 농촌지역은 7.387 m³/일으로 큰 차이가 없

Table 7. Result of regression analysis of average daily groundwater use for agriculture.

| Classification | Model | UC | | SC | t | p-value | R | R ² | F |
|-------------------------|------------|-------|-----------|-------|-------|---------|-------|----------------|--------|
| | | B | Std.Error | Beta | | | | | |
| Rice farming (BAR) | (Constant) | 6.964 | 1.177 | | 5.918 | 0.000 | | | |
| | PC | 0.013 | 0.011 | 0.072 | 1.204 | 0.230 | 0.072 | 0.005 | 1.450 |
| Rice farming (AR) | (Constant) | 5.660 | 0.953 | | 5.937 | 0.000 | | | |
| | PC | 0.014 | 0.014 | 0.044 | 0.997 | 0.319 | 0.044 | 0.002 | 0.994 |
| Rice farming (AAR) | (Constant) | 4.338 | 1.611 | | 2.693 | 0.008 | | | |
| | PC | 0.041 | 0.023 | 0.136 | 1.785 | 0.076 | 0.136 | 0.018 | 3.188 |
| Dry-field farming (BAR) | (Constant) | 2.089 | 1.097 | | 1.904 | 0.058 | | | |
| | PC | 0.043 | 0.009 | 0.310 | 4.746 | 0.000 | 0.310 | 0.096 | 22.529 |
| Dry-field farming (AR) | (Constant) | 1.980 | 0.682 | | 2.902 | 0.004 | | | |
| | PC | 0.044 | 0.009 | 0.246 | 5.050 | 0.000 | 0.246 | 0.061 | 25.501 |
| Dry-field farming (AAR) | (Constant) | 0.203 | 0.700 | | 0.290 | 0.772 | | | |
| | PC | 0.047 | 0.011 | 0.361 | 4.153 | 0.000 | 0.361 | 0.130 | 17.244 |
| Floriculture | (Constant) | 2.789 | 0.441 | | 6.318 | 0.000 | | | |
| | PC | 0.011 | 0.007 | 0.141 | 1.663 | 0.099 | 0.141 | 0.020 | 2.765 |
| Livestock (cow) | (Constant) | 3.480 | 0.442 | | 7.879 | 0.000 | | | |
| | NBA | 0.009 | 0.002 | 0.367 | 4.268 | 0.000 | 0.367 | 0.135 | 18.214 |
| Livestock (pig) | (Constant) | 4.719 | 0.917 | | 5.144 | 0.000 | | | |
| | NBA | 0.001 | 0.001 | 0.097 | 0.755 | 0.453 | 0.097 | 0.009 | 0.161 |
| Livestock (chicken) | (Constant) | 5.492 | 1.887 | | 2.910 | 0.008 | | | |
| | NBA | 0.041 | 0.052 | 0.160 | 0.793 | 0.435 | 0.160 | 0.026 | 0.629 |

UC: Unstandardized coefficients, SC: Standardized coefficients

BAR: Below Average Raunfall Region, AR: Average Raunfall Region,

AAR: Above Average Raunfall Region,

PC: Pumping Capacity, NBA: Number of Breeded Animal

Table 8. Equation of agricultural groundwater use estimation derived from regression analysis.

| Classification | Below average rainfall region | Average rainfall region | Above average rainfall region |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Rice farming | $6.964 + (PC \times 0.013)$ | $5.660 + (PC \times 0.014)$ | $4.338 + (PC \times 0.041)$ |
| Dry-field farming | $2.089 + (PC \times 0.043)$ | $1.980 + (PC \times 0.044)$ | $0.203 + (PC \times 0.047)$ |
| Floriculture | $2.789 + (PC \times 0.011)$ | | |
| Livestock (cow) | $3.480 + (NBA \times 0.009)$ | | |
| Livestock (pig) | $4.719 + (NBA \times 0.001)$ | | |
| Livestock (chicken) | $5.492 + (NBA(1,000) \times 0.041)$ | | |

PC: Pumping Capacity, NBA: Number of Breeded Animal

는 것으로 나타났다. 마을상수도용의 경우 급수인구 100 인을 기준으로 보면 도시지역과 도농복합지역은 24.263 m³/일, 농촌지역은 14.226 m³/일을 사용하는 것으로 나타났다.

농업용 지하수

농업용 지하수는 전작용, 답작용, 원예용, 축산용(육우용, 양돈용, 양계용)으로 용도를 세분하고, 각각의 세부 용도마다 평균 강수량 지역, 평균 강수량 미만지역, 평균 강수량 초과지역으로 구분하여 회귀분석을 실시하였

다(Table 7). 다만, 원예용의 경우 대부분 비닐하우스에서 재배가 이루어짐에 따라 강수에 영향을 받지 않을 것으로 판단하여 강수량에 따른 지역구분을 하지 않았으며, 축산용은 사육종에 따라 육우용, 양돈용, 양계용으로 세분함에 따라 각 사육종별 표본 수가 너무 적어 강수량에 따른 지역구분을 하지 않고 분석하였다. 회귀분석을 실시함에 있어 종속변수는 모든 용도에서 일평균 이용량으로 하였으며, 독립변수는 전작용, 답작용, 원예용은 양수능력, 축산용은 사육두수로 하였다. 회귀분석을 통해 도출된 이용량 추정식은 Table 8과 같다.

본 연구에서 제시한 식에 따라 지하수 일사용량을 추정해 보면, 전작용의 경우 양수능력 50 m³/일을 기준으로 하면 평균강수 미만지역은 7.614 m³/일, 평균강수 지역은 6.360 m³/일, 평균강수 초과지역은 6.388 m³/일인 것으로 나타났다. 답작용의 경우 양수능력 50 m³/일을 기준으로 하면 평균강수 미만지역은 4.239 m³/일, 평균강수 지역은 4.180 m³/일, 평균강수 초과지역은 2.553 m³/일인 것으로 나타났다. 원예용의 경우 양수능력 50 m³/일을 기준으로 하면 3.339 m³/일을 사용하는 것으로 나타났다. 축산용의 경우 육우용은 50두 기준으로 3.930 m³/일, 양돈용은 500두 기준으로 5.219 m³/일, 양계용은 10,000두 기준으로 5.902 m³/일을 사용하는 것으로 나타났다.

결론 및 토의

본 연구에서는 전국을 대상으로 2006년부터 2012년 까지 7년에 걸쳐 총 7,693개의 지하수 시설을 대상으로 실시한 지하수 이용량 모니터링 자료를 가지고, 자료선별(data cleaning) 과정과 통계분석을 통해 지하수 이용량을 추정하는 방법을 제시하였다. 군집분석 결과 모든 용도에서 2~5개의 군집으로 분류되기는 하지만, 군집별로 표본수의 차이가 너무 커서 일부 군집에서는 추정식을 도출하는데 필요한 표본수가 너무 적거나 각 군집별로 추정식에 포함되는 인자가 서로 달라지는 등 문제점이 나타났다. 따라서, 지하수 이용량에 차이가 있을 것으로 예상되는 인자를 선정하고 이를 기준으로 전국을 군집화하였다. 즉, 생활용 지하수의 경우 도시 형태에 따라 전국을 도시지역, 도농복합지역, 농촌지역으로 구분하였으며, 농업용 지하수의 경우 강수량에 따라 평균 강수량지역(1,251~1,450 mm), 평균 강수량 미만지역(1,251 mm 미만), 평균 강수량 초과지역(1,450 mm 초과)으로 구분하였다. 또한, 지하수 용도는 생활용의 경우 가정용, 공동주택용, 간이상수도용, 학교용, 일반용으로 세분화되었으며, 농업용의 경우 전작용, 답작용, 원예용, 축산용(육우용, 양돈용, 양계용)으로 세분화하였다. 이상과 같이 분류한 지역마다 각 세부용도별로 회귀분석을 통해 지역별-용도별 지하수 이용량 산정기준을 제시하였으며, 향후 본 연구에서 제시한 기준을 지자체에서 실시하는 지하수 이용실태조사에 적용하면 국가 지하수 이용량 통계의 신뢰도가 크게 향상될 것으로 기대된다. 다만, 전국을 군집화하는데 사용된 도시화 정도, 평균 강수량 등의 인자는 유동적이므로 변동 상황에 따라 주기적인 군

집의 조정이 필요할 것으로 보이며, 또한, 회귀분석 결과에서 보듯이 군집분석의 문제를 해결하기 위해 인위적으로 전국을 그룹화함에 따라 결정계수(R²)가 매우 낮게 나타났는데, 이는 향후 지역별, 세부용도별로 대표적인 시설을 지정하고 지속적인 모니터링을 실시함으로써 양질의 자료를 확보하고 최적의 통계기법 적용을 통해 계속적으로 개선해야할 과제로 판단된다. 아울러, 조사 기간 동안에 나타나는 강수량의 변동 등과 같이 지하수 이용 패턴에 영향을 미칠 수 있는 요인들에 대한 정밀 분석 등도 추후 연구 대상이 될 것으로 본다.

사 사

본 연구는 국토교통부 예산으로 한국수자원공사가 대행하여 시행하는 '지하수조사 및 관리사업'의 일환으로 수행되었습니다.

References

Kim, J. W., 2012, Characteristics of water level change from National Groundwater Monitoring Network, Korea: Geostatistical interpretation and the implications for groundwater management, Ph. D. Thesis, Korea University, 3p (in Korean).
 Korea Environmental Institute (KEDI), 2007, Policies for the Rational Utilization and Management of Groundwater Resources, Seoul, 90p (in Korean).
 Ministry of Construction and Transportation (MOCT), 2006, Guideline for Groundwater Administrative Service, Seoul, 4-9 (in Korean).
 Ministry of Land, Transport and Maritime (MLTM), 2011, National Water Resources Plan, Seoul, 18p (in Korean).
 Ministry of Land, Transport and Maritime (MLTM), 2012, Master Plan for Groundwater, 4p (in Korean).
 Ministry of Land, Transport and Maritime (MLTM) and Korea Water Resources Corporation (K-water), 2011, Analysis of Groundwater Use Survey, 34p (in Korean).
 Ministry of Land, Transport and Maritime (MLTM) and Korea Water Resources Corporation (K-water), 2012, Groundwater Annual Report, 9p (in Korean).
 OECD, 2008, OECD Environmental Data: Compendium 2006-2008, 8-9.
 Park, J. S. and Yoon, Y. S., 2002, Science of Statistics, Dasan Press, 201p (in Korean).
 Park, W. B., Koh, G. W., Kim, B. S., Moon, D. C., and Yang, S. K., 2004, Estimation of agricultural groundwater withdrawal and characteristics of groundwater use in Jeju island, Proceedings of KoSSGE 2004 Spring Conference, 110-113 (in Korean).
 Woo, N. C., Joe, M. J., and Kim, N. J., 1994, Development of a predictive model for groundwater use,

The Journal of Engineering Geology, 4(3), 297-309
(in Korean).

Zecster, I. S. and Everett, L. G., 2006, Ground Water Resources of the World and Their Use, NGWA Press, OH, USA, 13p.

원고접수일: 2013년 11월 12일

수정본채택: 2013년 12월 12일

게재확정일: 2013년 12월 13일

김지옥

한국수자원공사 지하수지반사업팀
306-711 대전광역시 대덕구 신탄진로 200
Tel: 042-629-4155
E-mail: ddochi@kwater.or.kr

전형필

국토교통부 수자원정책과
339-012 세종특별자치시 도움6로 11
Tel: 044-201-3591
E-mail: kevin294@yahoo.co.kr

이찬진

한국수자원공사 지하수지반사업팀
306-711 대전광역시 대덕구 신탄진로 200
Tel: 042-629-4150
E-mail: gmdwt@kwater.or.kr

김남주

(주)지오엔지니어링
765-736 경기도 하남시 조정대로 150
아이테크빌딩 639호
Tel: 031-790-0850
E-mail: deposits@chol.com

김규범

한국수자원공사 K-water연구원
수변지하수활용고도화연구단
305-730 대전광역시 유성구 유성대로 1689번길
125(전민동)
Tel: 042-870-7640
E-mail: gbkim@kwater.or.kr