

최소하천유출량을 고려한 지하수 개발가능량 산정방안

정일문 · 이정우*

한국건설기술연구원 수자원연구실

A Method of Estimating the Volume of Exploitable Groundwater Considering Minimum Desirable Streamflow

Il-Moon Chung and Jeongwoo Lee*

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

안전채수량 개념은 지하수 양수와 함양과의 균형에 초점을 맞춘 방법으로 자연적으로 배출되는 지하수 유출량에 대해서는 고려하지 못한다. 또한 하천과 연결된 충적대수층은 물공급과 수질면에서 상호 연결되어 있기에 별도로 이해하거나 관리할 수 없다. 따라서 미국 캔자스의 일부 지역에서는 기존의 안전채수량을 재평가하여 자연 지하수 배출량과 하천-대수층 상호작용을 고려한 수정된 안전채수량 개념을 제시하였고, 기저유량의 일부분을 포함시키기 위해 최소하천유출량(MDS) 개념을 도입하였다. 본 연구에서는 수정된 안전채수량 개념을 우리나라에 맞게 적용하기 위해 하천유출과 연계한 개발가능량 산정방법을 제시하였다. 이를 위해 유출수문곡선으로부터 기저유출량을 분리하여 유행곡선으로 표시한 후, 결정된 최소하천유출량에 해당하는 양을 누적기저유출량에서 빼제함으로써 개발가능량을 결정한다. 이 방법을 SWAT-K모형을 이용하여 통합모델링이 수행된 바 있는 무심천 유역에 대해 적용한 바, 연평균 개발가능량은 약 86 mm로 산정되었고, 각 소유역별로도 하천과 연계한 지하수 개발가능량을 구할 수 있었다.

주요어 : 안전채수량, 지하수 개발가능량, 최소하천유출량

The concept of safe yield places an emphasis on balancing groundwater withdrawal with groundwater recharge but ignores naturally occurring groundwater discharge. Because streams and their alluvial aquifers are closely linked in terms of water supply and water quality, to be properly understood and managed they must be considered together. Therefore, some districts in Kansas have reevaluated their safe-yield policies to account for natural groundwater discharge and stream-aquifer interactions by amending their safe-yield regulations to include a portion of baseflow as the minimum desirable streamflow (MDS). This study proposes a modified safe-yield policy in which the drought flow is chosen as the MDS. Baseflow separation was conducted from streamflow hydrograph and the results are presented as a flow-duration curve. The exploitable groundwater can be determined by subtracting MDS from the cumulative baseflow. This method was tested in the Musimcheon watershed, which was validated for streamflow using the SWAT-K model. The annually averaged exploitable groundwater in the whole watershed was estimated to be 86 mm. The exploitable groundwater amounts were also estimated for each subwatershed in the Musimcheon watershed.

Key words : Safe yield, Exploitable groundwater, Minimum Desirable Streamflow (MDS)

*Corresponding author: ljw2961@kict.re.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.

서론

미국에서는 과잉개발로부터 지하수를 보호하기 위해 ‘안전채수량’ 개념을 바탕으로 한 규제와 법률을 집행해 왔다. 안전채수량은 통상 연간 지하수 양수량과 연간 함양량간의 장기적인 균형의 달성과 유지라는 측면에서 정의된다(Sophocleous, 1997). 따라서 안전채수량 개념은 물사용자로 하여금 강수와 지표수 침윤(surface-water seepage)같은 자연적인 함양을 통해 보충되는 지하수량만큼을 양수할 수 있도록 허용했다. 그러나 자연적인 혹은 평형조건하에서 대수층으로의 함양은 장기적인 관점에서는 하천, 샘 혹은 습지로 방출되는 수량과 같다. 결과적으로 양수량이 함양량과 같다고 하면, 하천, 습지 그리고 샘은 언젠가는 마르게 되며, 과잉양수가 진행되면 대수층마저 고갈될 가능성이 높다. 안전 채수량은 자연상태의 지하수량과 수질에 영향을 주지 않으면서 대수층으로부터 경제적, 합법적으로 채수를 할 수 있는 양으로 정의될 수 있으며 또한 안전 채수량의 정의를 지표수와 지하수가 상호 연관된 종합적인 수문시스템의 개념으로 인식하게 되었다(Fetter, 1994).

미국 캔자스에서는 안전채수량 정책 이후 고갈된 하천문제를 해결하기 위해 수정된 안전채수량 정책을 도입하였다(Sophocleous, 1998). 하천과 충전대수층이 밀접하게 연계되어 있다는 것은 별도로 관리되어서는 안 된다는 것을 뜻한다. 따라서 캔자스의 일부 지하수 관리 지역에서는 하천-대수층의 상호작용과 연계됨으로 인해

평상시 하천으로의 최소하천유출량(Minimum Desirable Streamflows:MDS)을 결정하고, 추가로 기저유출량을 반영한 수정된 안전채수량 정책을 제시하였다(Sophocleous, 2012). 다시 말해서 자연적으로 하천으로 배출되는 지하수량의 일부를 이미 할당된 지하수 산출량으로 가감하여 그만큼의 양을 공제한 상태에서 안전채수량을 설정하였다. 즉, 하천으로 자연스럽게 배출되는 일부 유출량을 사전에 보전하는 개념이라고 할 수 있다.

우리나라 지하수 관리 기본계획(MOCT, 2007) 및 지하수 기초조사 등의 지하수 관련 계획 수립 시 필수 조건인 지하수 개발가능량은 통상 10년 빈도 갈수시의 지하수 연 함양량을 적용하고 있다(Chung and Kim, 2011). 따라서 본 연구에서는 선진국에서 고려하는 하천 유량과 연계한 지하수 개발가능량의 방법론을 국내유역에 시험적으로 적용, 그 결과를 평가하고자 한다.

모형의 구축 및 개요

하천유출량과 연계한 적정 개발가능량 산정 기법을 시험적용하기 위해 Kim et al. (2008)이 통합수문모델링을 수행한 바 있는 무심천 유역을 선정하였다. 무심천 유역은 동고서지형으로 유역면적이 약 198 km², 유로연장이 약 35 km이며, SWAT-K모형의 구동을 위해서 전체 유역을 34개의 소유역으로 구분하였다. 지표수 및 지하수 관측소의 위치도를 Fig. 1에 도시하였다.

모형의 입력자료인 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대

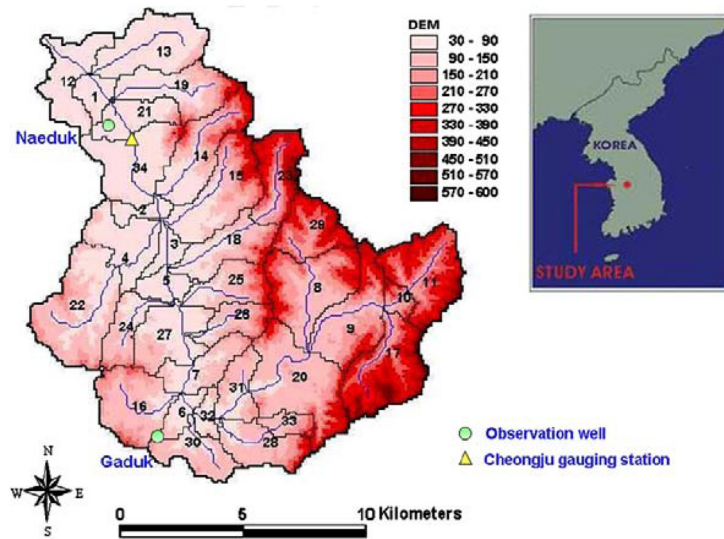


Fig. 1. DEM showing the locations of subbasins, stream networks, and measuring stations in the Musimcheon watershed (Kim et al., 2008).

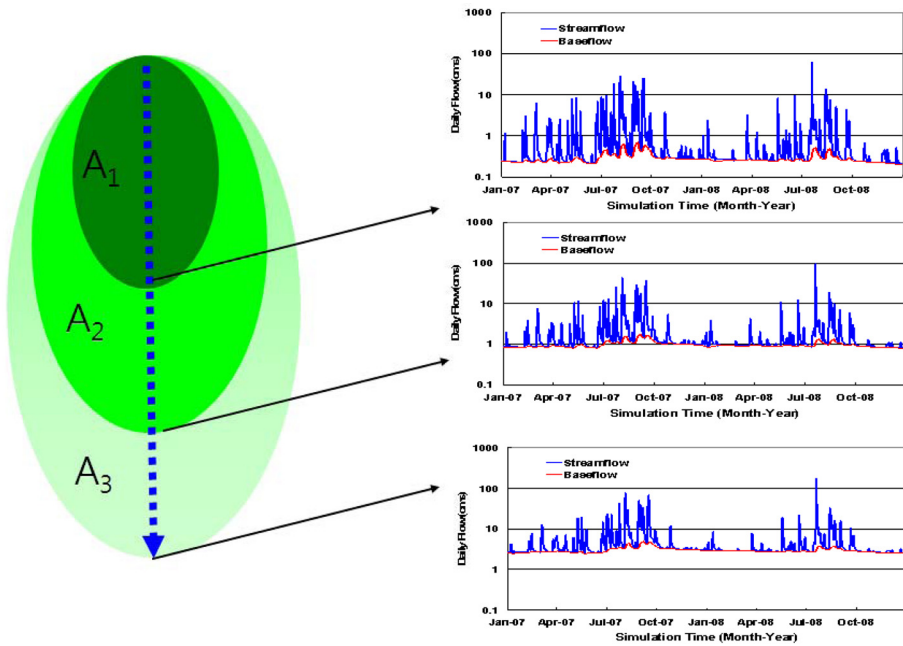


Fig. 2. Procedure for baseflow separation.

습도 등의 기상자료는 무심천 유역 내에 위치한 청주기 상대의 자료를 이용하였고, 수문자료로서 하천유출량 자료는 청주수위표의 자료를 이용하였다. 토지이용도와 토양통 자료를 활용하여 HRU분포도를 작성하였다(Kim et al., 2008). 관측 유출량과 계산 유출량의 적합도인 결정계수는 0.75로 유출해석 관점에서는 비교적 양호하게 나타났다. 본 연구에서는 소유역별로 하천유출량을 계산하고, 기저유출 분리법을 이용하여 소유역별 기저유출량을 산정한 후, 이를 유향곡선에 도시하여 기저유출량의 범위 내에서 최소하천유출량에 해당하는 부분을 도시하고 그 차이를 지하수 개발가능량으로 평가하는 방법을 적용하였다.

지표수와 연계한 개발가능량 산정 시나리오

하천에 일정량의 기저유출량을 보장하면서 지하수를 이용하는 방안은 다음과 같다. Fig. 2는 지표수와 연계한 개발가능량 산정 개념도를 나타낸 것으로 먼저 SWAT-K 모델을 이용하여 소유역별로 자연유출량을 산정하고, 유출수문곡선으로부터 기저유출을 분리한다(Fig 2). 다음으로 일 단위 기저유출량에 확률값을 부여하여 기저유출량 유향곡선을 작성한 후, 평상시 하천에 보내주어야 하는 최소하천유출량을 판단해야 한다. 이와 같은

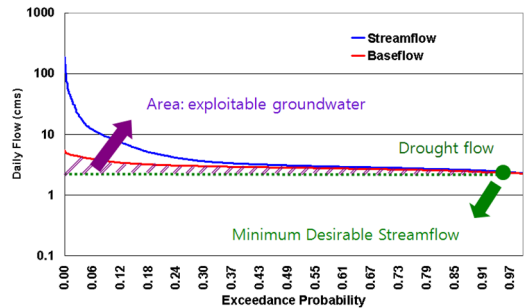


Fig. 3. Exploitable GW abstract calculated by subtracting MDS from the cumulative baseflow.

최소하천유출량의 결정은 지역특성과 물수요에 따라 달라질 수 있으며 본 연구에서는 최소하천유출량을 갈수량으로 정하는 방안을 검토하였다. 이와 같은 식으로 결정된 기저유출량을 제외 한 나머지 부분을 이용 가능량으로 결정하는 방법이 지표수와 연계한 개발가능량 시나리오라고 할 수 있다(Fig 3). 안전채수량 기법은 연합양량 이내에서 지하수 개발가능량을 설정하는 개념으로 기저유출량 전량을 개발가능량으로 사용하게 되면 질량보존측면에서 연 기저유출량이 0이 되는 개념으로 하천으로의 배출을 고려하지 못한다. 그에 비해 본 연구에서 제안한 방법은 기저유출량 중 일정량을 하천으로 내보내는 개념이기 때문에 하천 유출과 연계된 지하수를

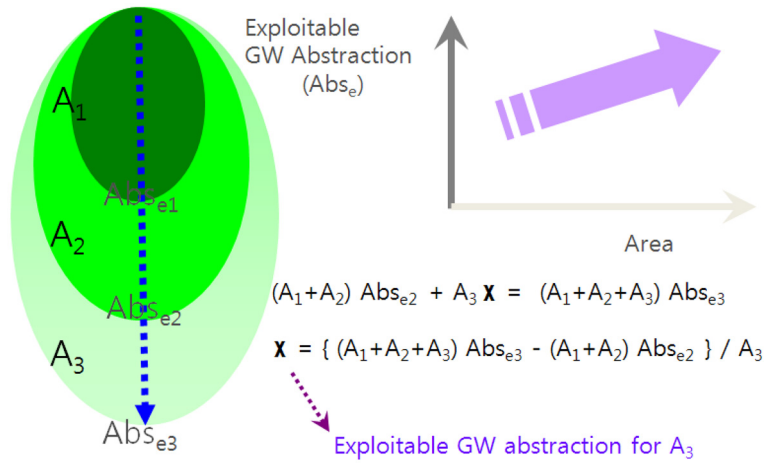


Fig. 4. Method of calculating the ideal abstraction rate of exploitable groundwater.

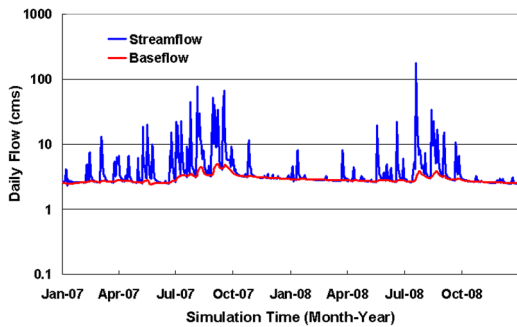


Fig. 5. Baseflow separation for the Musimcheon watershed.

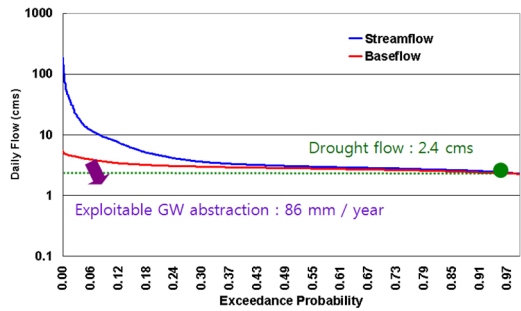


Fig. 6. Flow-duration curve for baseflow and calculation of ideal abstraction rate of exploitable groundwater.

이용하는 방법이라 할 수 있다.

방법의 적용

Fig. 4는 상기의 방법을 적용하여 소유역별 개발가능량을 산정하는 절차를 나타낸 것으로 원하는 소유역의 개발가능량은 그 소유역 출구까지 면적에 해당하는 개발가능량에서 그 소유역 이전까지 면적에 해당하는 개발가능량을 감하여 결정하게 된다.

Fig. 5는 SWAT-K를 이용하여 자연유출량을 산정한 후 기저유출분리 소프트웨어인 BFLOW 모형(Arnold et al., 1995)을 이용하여 기저유출성분을 분리한 것이다. 분리된 기저유출수문곡선을 이용하여 Fig. 6과 같이 기저유량 유흡곡선을 작성하고, 하천유출량에 대한 유흡곡선으로부터 산정한 갈수량 2.4 cms를 기준으로 그 이하의 양을 누적하면 개발가능량이 약 86 mm/year가 된다. 참

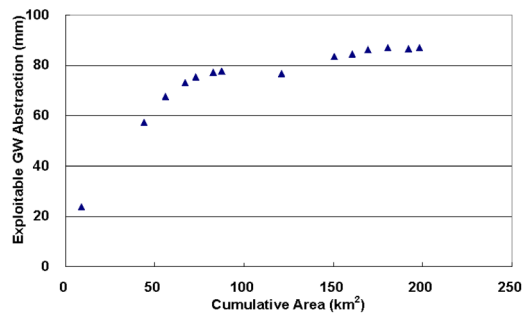


Fig. 7. Exploitable groundwater abstraction according to the cumulative watershed area.

고로 갈수량은 유흡곡선상에서 연중 355일 이상 하천에서 지속가능한 양이다. 현재 고시된 무심천 유역의 개발가능량은 134.5 mm로서 본 연구에서 제시한 개발가능량인 86 mm은 총 개발가능량의 64%에 해당한다. 기존

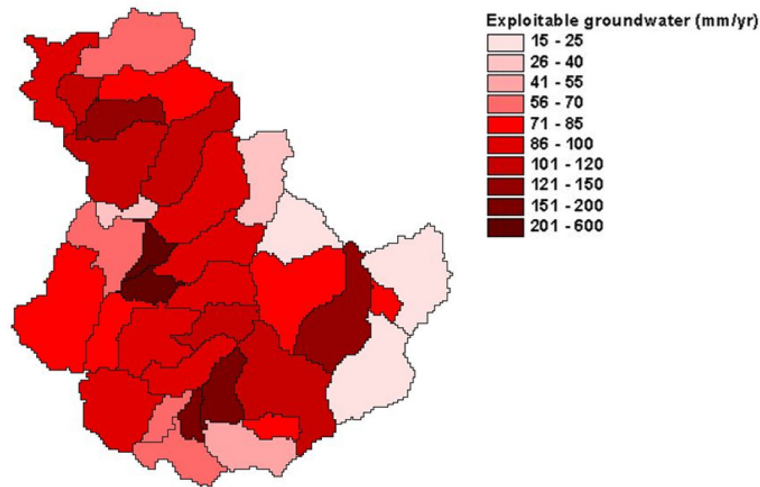


Fig. 8. Exploitable groundwater abstraction for each subwatershed in the Musimcheon watershed.

연구(Chung et al., 2011)를 통해 밝힌 바와 같이 현재 무심천 유역의 연 지하수 이용량은 약 100 mm/year이며, 현 양수량 사용시의 누적 지하수 저류량은 큰 변동이 없어 본 연구에서 제시하는 개발가능량은 유역내 지하수의 고갈에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 무심천 본류에 대해서 상류로부터 하류로 내려오면서 상기의 방법으로 개발가능량을 산정하여 나타낸 것이다. 즉, 면적과 개발가능량과의 관계를 살펴보기 위해 Fig. 4의 방법론을 본류만을 기준으로 적용하면 14개의 누가면적별 개발가능량이 결정된다. 그림에 나타난 바와 같이 면적이 증가함에 따라 일정한 값에 접근해가고 있는 특징을 보이고 있다. 그러나 이 값은 면적 대비 개발가능량으로써 일부 합류구간(누적면적 120 km² 부근)에서는 다소 감소하는 특성도 나타났다.

Fig. 8은 본 연구에서 제시한 방법에 따라 소유역별 개발가능량을 산정하여 공간적으로 도시한 것으로 지역별로 적정 개발가능량 값이 상이한 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 유역전체평균값과 소유역별 값이 상호 다르게 나타나며 본 제안 방법을 이용하면 어떤 유역이든 유출량을 구할 수 있는 지역에 대해서 적용이 가능하며 지역의 하천특성에 맞게 적절한 개발가능량 값을 설정하는 것이 가능해질 것으로 기대한다.

토론 및 결론

본 연구에서는 기존의 안전채수량 기반의 지하수 개발가능량 산정방법을 수정하여 최소 하천유출량을 고려

한 소유역별 지하수 개발가능량 산정 방법을 제안하였다. 무심천 유역을 대상으로 이 방법을 시험적용하였으며, 갈수량에 해당하는 2.4 m³/sec를 최소하천유출량으로 결정하여 적용한 결과 86 mm/year의 개발가능량이 산정되었다. 이 값은 기존 고시된 최대 개발가능량의 64%이며, 현재 이용량의 86%에 해당하는 값이다. 향후 이 방법을 적용하면 소유역별로 하천의 건천화를 방지하는 지하수 개발가능량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 이 방법은 모델링 결과에 기반하므로 수문성분의 개별적 오차가 상호간의 결과에 영향을 줄 수 있으므로 정확한 자료획득과 모델링이 중요하다. 또한 개발가능량의 경우 자연조건이외에도 인위적인 의사결정 과정이 필요하므로 지역사회 거버넌스의 의견이 반영되어 최종결정되는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 물관리연구사업 “수변충적층 지하수위 복원기술(11기술혁신C05-2)” 및 “유역단위 최적지하수 개발가능량 산정연구”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiah, R., and Bernhardt, G., 1995, Automated baseflow separation and recession analysis techniques, *Ground Water*, 33, 1010-1018.

- Chung, I. M. and Kim, N. W., 2011, Method of advancing groundwater management in Korea. Magazine of Korea Water Resources Association, 44(2), 10-14.
- Chung, I. M., Lee, J., and Kim, N. W., 2011, Estimating exploitable groundwater amount in Musimcheon watershed by using an integrated surface water-groundwater model. Economic and Environmental Geology, 44(5), 433-442.
- Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, Prentice Hall.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G., 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, J. of Hydrology, 356, 1-16.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT), 2007, Report on the Basic Groundwater Management and Planning.
- Sophocleous, M. A., 1997, Managing water resources system - Why "safe yield" is not sustainable, Ground Water, 35(4), 561.
- Sophocleous, M. A., 1998, On the elusive concept of safe yield and the response of interconnected stream-aquifer systems to development; in, Perspectives on Sustainable Development of Water Resources in Kansas, M. A. Sophocleous, ed.: Kansas Geological Survey, Bulletin 239, 6-85.
- Sophocleous, M. A., 2012, The evolution of groundwater management paradigms in Kansas and possible new steps towards water sustainability, J. of Hydrology, 414-415, 550-559.

정일문

한국건설기술연구원 수자원연구실
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0334
Fax: 031-910-0251
E-mail: imchung@kict.re.kr

이정우

한국건설기술연구원 수자원연구실
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0529
Fax: 031-910-0251
E-mail: ljw2961@kict.re.kr

원고접수일: 2013년 9월 12일

수정본채택: 2013년 10월 23일

게재확정일: 2013년 10월 26일