



Evaluation of water supply capacity using groundwater abstraction contributing to streamflow

Chung, Il-Moon^{a*} · Kim, Nam Won^a · Lee, Jeongwoo^a · Chang, Sun Woo^a

^aHydrological Sciences and Engineering Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Paper number: 17-091

Received: 25 October 2017; Revised: 6 November 2017; Accepted: 6 November 2017

Abstract

In the present study, an integrated SWAT-MODFLOW model was implemented to analyze the method of supplying groundwater abstraction contributing to Musimcheon stream. Various simulations of supply of groundwater to streamflow with current and maximum groundwater abstraction have been explored for 5 years (2011-2015). In 2015, when the severe drought happened, the monthly discharge change rate due to groundwater supply was ranged from 23% in current abstraction to 68% in maximum abstraction. In terms of annual groundwater recharge, these quantities could be applicable recharges ranged from 75 mm (6.2% of annual mean precipitation) to 290 mm (24% of annual mean precipitation) which could be stable annual supply. Since surface water is vulnerable to drought, the water supply using groundwater could be an effective alternative for stream deficiency.

Keywords: SWAT-MODFLOW, Groundwater abstraction, Streamflow deficiency

하천유량에 기여하는 지하수 양수량의 물공급 능력 평가

정일문^{a*} · 김남원^a · 이정우^a · 장선우^a

^a한국건설기술연구원 수자원하천연구소

요 지

본 연구에서는 무심천 유역을 대상으로 지표수-지하수 통합해석 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 수량이 부족한 하천으로 지하수를 이용한 물공급 방안을 모색하였다. 2011년부터 2015년까지 다양한 모의실험을 수행한 결과 극한가뭄이 도래했던 2015년에 지하수 공급에 의한 월 유출량의 변화는 현 양수시 23%, 최대 양수시에는 68.3%의 증가를 나타냈다. 이를 연간 지하수 함양량으로 산정할 경우 현 이용량을 적용하면 연평균 강수량의 6.2%인 75 mm, 최대 이용량 적용시 연평균 강수량의 24%인 290 mm에 해당하여 연간 안정적인 공급이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구는 가뭄에 취약한 지표수자원과 달리 지하수는 하천수 부족시 물공급의 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: SWAT-MODFLOW, 지하수 양수, 하천수 부족

1. 서 론

지구온난화로 인해 기온이 상승하고 강수량의 상당 부분이 증발산량으로 다량 손실되고 있으며, 지역별로 강수량이 크게 감소한 곳들이 점점 늘어날 것으로 전망되고 있다(Won

and Chung, 2016). 2014년부터 시작된 가뭄이 2015년에 극심한 가뭄으로 이어지면서 전국 강수량이 900.2 mm밖에 오지 않아 우리나라 전체 다목적댐중 절반이 넘는 9곳에서 용수비축을 위해 하천유지용수 및 환경개선용수 감축을 포함한 방류량을 축소 운영하였다(Kim et al., 2016). 일례로 무심천에서는 대청댐에서 공급되는 하천유지용수가 감량되었는데 이러한 공급의 감량은 수질악화와 각종 어류의 서식환경에도 악영향을 미칠 수 있다.

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0334
E-mail: imchung@kict.re.kr (I.-M. Chung)

이와 같이 극한 가뭄으로 인해 하천에 필요유량이 부족할 경우의 대안으로 지하수를 이용한 하천수의 공급방안도 고려할 필요가 있다. 지표수와 지하수는 연결된 수자원이며 지표수-지하수 상호작용은 연속적으로 이루어지기 때문에 지속적인 모니터링과 동적인 분석을 통해 통합관리될 수 있기 때문이다. 가뭄과 홍수에 취약한 지표수자원과 달리 지하수는 대규모 저류가 가능하여 물공급의 완충역할이 가능하다. 또한 평상시 하천수량의 일부를 취수하여 대수층에 함양시키게 되면 보다 장기적인 활용이 가능하며 건기에 높아진 지하수위가 하천으로의 물공급을 지원하는 상호 이익을 도모할 수 있다. 따라서 수자원의 효율적 관리와 지하수의 지속적인 유지를 위해서는 지하수-지표수 상호작용의 기본 원리를 이해하고 지형, 기후 및 지질특성을 고려한 지역적인 지하수-지표수 연계 특성 연구가 필요하다(Moon *et al.*, 2016). 이와 관련한 기존 연구사례로 Kim *et al.* (2013)은 지표수-지하수 통합수문해석 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 죽산천 유역에 대해 지하수 양수 및 농업용 저수지가 하천유량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Lee *et al.* (2015)은 죽산천 주변 지역에 대해 지하수 양수에 따른 하천수 감소 영향을 공간적으로 분석하였는데 하천과 관경간 이격거리가 100 m 이내, 수리확산 계수와 하천바닥층 수리전도성이 큰 경우에 양수량 대비 하천수 감소율이 큰 것으로 분석되었다. Chung and Chang (2016)은 SWAT-K (Kim *et al.*, 2009) 모형을 이용하여 청원군 수막재배 소유역에 대해 다년간의 장기적인 수문성분 평가를 수행하고 수막재배로 인해 발생가능한 수문성분 요소의 불균형을 진단하였다. Wu *et al.* (2015)은 하천에서 이득하천과 손실하천이 강우사상에 따라 변갈아가며 나타나는 현상을 확인하였으며, 하천수와 지하수의 상호작용이 하천유량에 중요한 인자임을 강조하였다. Krause *et al.* (2007)은 독일의 북동부 저지대 하천을 대상으로 지하수가 하천에 기여하는 양을 정량적으로 분석했는데 지하수-지표수 교환량의 계절적인 변동과 물수지에 있어서 시공적인 변동요소들과 하천 유출이 소유역에서 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. Rassam (2013)은 지표수-지하수 상호작용 모델링의 일반적인 절차 및 유역에서 강우유출모형과 하천운영계획 모형과의 연계방안을 제안하였다.

본 연구에서는 무심천 유역을 대상으로 지하수의 이용이 하천유량에 미치는 영향을 파악하기 위해 양수된 지하수가 하천으로 공급될 때의 효과를 정량화하는 통합 수문모의를 수행하였다. 이를 위해 공간적으로 분포된 지하수 양수량 해석과 하천으로의 물이동 해석이 가능한 지표수-지하수 통합 수문모형인 SWAT-MODFLOW (Kim *et al.*, 2008)을 이용

하였다. 무심천은 충청북도 청주시를 관통하는 하천으로 주하도의 길이는 약 34.50 km, 유역면적은 약 198 km²이다. 청주시 상당구 낭성면 남부 산지에서 발원하여 남서쪽으로 흐르다가 가덕면 서부에서 북서쪽으로 방향을 바꾸어, 청주시가지로 유입된 후 시가지 중심부를 지나 미호천에 합류한다 (Cheongju city, 2017).

2. SWAT-MODFLOW 모형의 구축

본 연구에서 사용한 SWAT-MODFLOW 모형(Kim *et al.*, 2008)은 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)모형(Arnold and Fohrer, 2005)의 지하수 부분을 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)로 대체시키고 지표수 수문성분과 지하수 유동을 연계시킨 유역단위의 지표수-지하수 통합모형이다(Fig. 1). SWAT의 기본 연산단위인 HRU (Hydrologic Response Unit)와 MODFLOW의 이산화된 셀의 공간적 위치가 서로 연결되었으며, 따라서 SWAT의 HRU 단위의 함양량이 해당위치의 MODFLOW 셀에 자동 입력된다. 또한 MODFLOW에서 셀 단위로 입력한 지하수 양수량은 그 셀이 위치한 SWAT의 HRU 또는 기타 목적지로 보내지며, 셀 단위로 계산된 하천수-지하수 교환량은 하도구간별로 합산되어 SWAT의 하도추적 모듈로 전달된다 (Kim *et al.*, 2008).

전술한 바와 같이 무심천 유역의 면적은 198 km²이고, ArcView를 이용한 전처리 작업을 수행하였다. 모형의 구축은 수치표고모형을 가공하여 100 m 격자로 구성하였으며, 지형고도를 반영하여 총 34개의 소유역으로 구분하였다(Fig. 2). 또한 Chung and Chang (2016)에서 소개된 바와 같이 2009년도의 환경부 토지피복도를 이용하여 토지이용도를 작성하고, 농업과학원의 토양통자료를 이용하여 토양분포도를 작성하

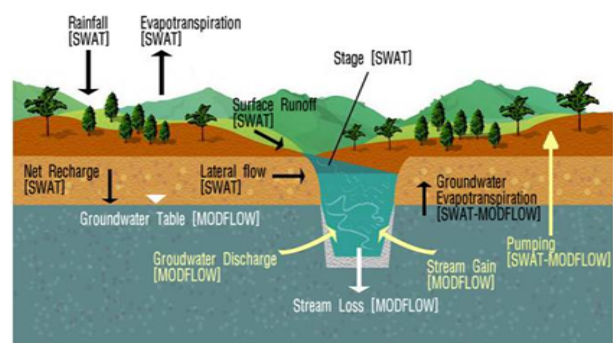


Fig. 1. Schematic diagram of the integrated SWAT-MODFLOW model (Kim *et al.*, 2008)

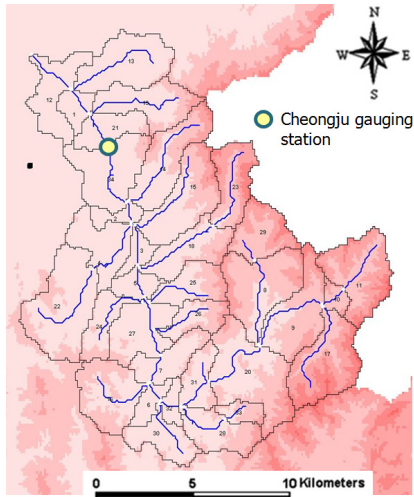


Fig. 2. Watershed subdivision in Musim watershed

였다. 이 두 도면의 특성을 혼합하면 하나의 수문응답단위 (Hydrologic Response Unit)가 결정되며, 그에 따라 토지이용과 토양성분이 함께 고려된 수문성분이 결정된다(Fig. 3). 입력자료로서 기온, 풍속, 일사량, 강수량 등의 기상자료는 청주기상대 자료를 이용하였고, 하천유출량 자료는 청주수위표 지점의 관측유량 자료를 이용하였으며 2001년부터 2015년까지의 수문자료를 활용하여 모형을 구축하였다(Chung and Chang, 2016). 지하수 유동해석을 위해서 격자크기를 100 m로 하여 MODFLOW의 셀을 생성하였고, 경계조건으로 상부에 함양량, 하천셀에 시간중속수두, 유역외는 무흐름 조건을 부여하였다. SWAT으로부터 모의된 일별 함양량과 하천수위는 자동입력되며 양수된 지하수는 하천으로 이동시키는 물이동 옵션을 활용하였다(Lee *et al.*, 2015). 대상지역의 수리지질은 1개의 충적층 및 2개의 투수성 암반층으로 단순



Fig. 3. Process of making HRU distribution map using land use map and soil map

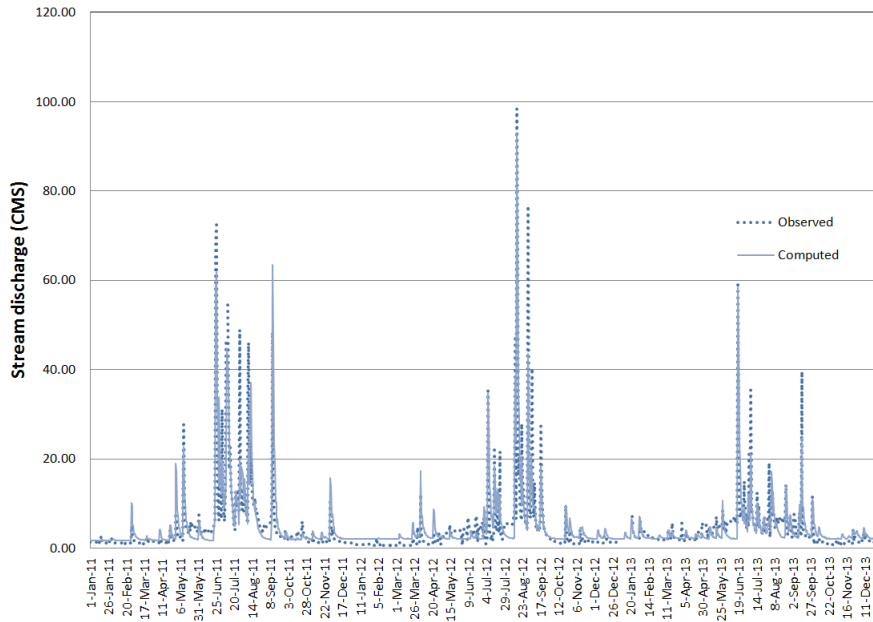


Fig. 4. Comparison of observed and simulated daily discharge

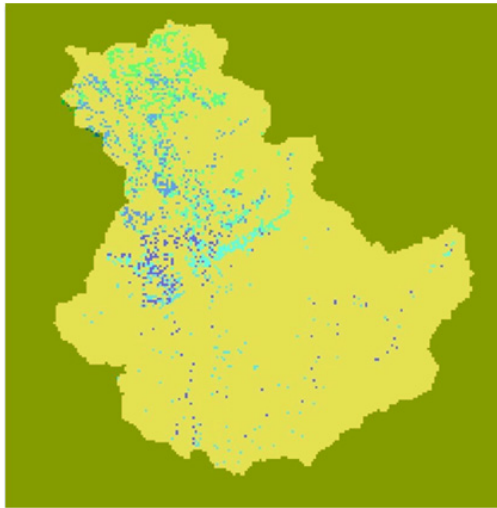


Fig. 5. Distributed pumping wells in Musim watershed

화하였으며, 총적층의 경우에는 자유면대수층으로 암반층은 피압/자유면대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 일 유출량에 대한 검보정 결과는 Fig. 4와 같다. 관측치와 계산치의 적합도인 $R^2 = 0.78$ 로 양호한 결과를 나타냈다.

본 연구에서는 무심천 유역에서 지하수를 양수하였을 때 변화하는 지하수위와 하천수위의 차이에 따라 하천으로 유입되는 지하수 유출량의 변화를 고려하였다. 먼저 사용된 지하수가 전량 소모되었다고 가정한 경우에 대해 모의실험을 수행하였다. 현재 무심천 유역내에 포함된 MODFLOW (McDornald and Harbaugh, 1988)모형의 셀(Cell)에서 지하수 양수정이 포함된 2,122개의 셀은 Fig. 5와 같다. 이와 같이 분포하는 지

하수의 양수는 현 상태 이용량과 최대 이용량을 고려하였으며 각각의 경우에 대한 하천유량의 변화를 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 양수량의 증가에 따라 하천 유량의 감소는 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

3. 지하수에 의한 하천으로의 물공급의 정량적 분석

하천수와 지하수는 상호 연계되어 있고 총적하천 주변의 지하수는 특히 하천수와 활발한 교류를 통해 하천변의 물환경을 조성한다. 대부분의 관정은 하천주변에 위치하고 있으므로 지하수 양수가 하천수에 미치는 영향에 대한 평가는 매우 중요하다. 2015년 극한 가뭄시 무심천에서는 생공용수 확보를 위해 하천 유지용수의 제한 공급이 이뤄진 바 있는데 실제로 일부 구간에서는 Fig. 7과 같이 하천 바닥을 드러내기도 하므로(Chungcheong daily, 2015) 극한 가뭄시 하천생태계의 유지를 위한 최소한의 유량공급을 고려해야 할 필요가 있다. 따라서 현재의 지하수 이용을 순 소모량으로 가정한 경우와 사용된 지하수가 전량 하천으로 회귀된다는 가정하에 하천으로 기여되는 양의 정량적 분석을 시도하였다.

먼저 2011년부터 2015년까지 현재의 양수량을 기준으로 양수된 지하수가 전량 하천으로 유입되는 경우에 대한 월별 유출고 분석을 수행하여 Fig. 8에 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 지하수가 유입된 경우 하천의 월 유출량이 증가하는 것을 볼 수 있으며 그 양은 최소 5.58 mm에서 7.0 mm로 나타났고 평균 6.28 mm인 것으로 나타났다.

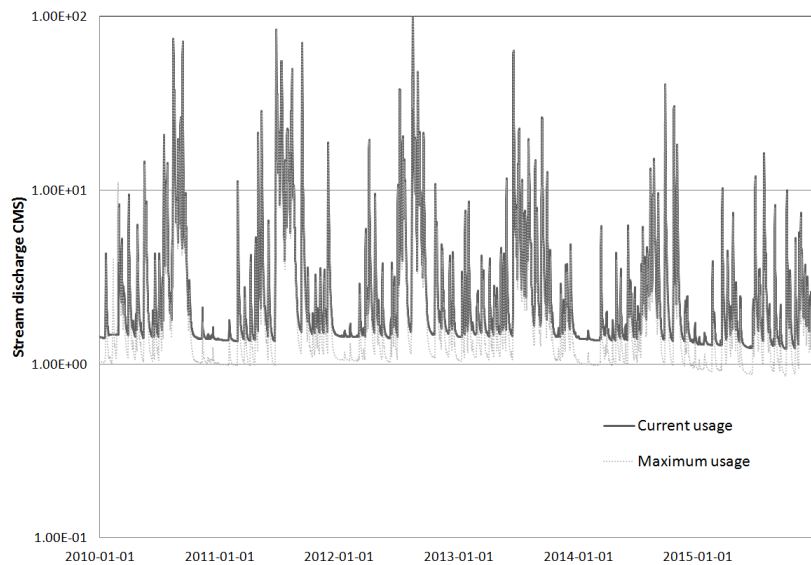


Fig. 6. Variation of stream discharge according to the amount of pumping rates



Fig. 7. Depletion of water in Musimcheon stream (Chungcheong daily, 2015)

한편, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 2013년부터는 강수량이 감소하여 2015년에는 유출고가 가장 낮은 것으로 나타났는데 이와 같은 가뭄시에는 지하수를 이용한 물공급의 중요성이 더욱 커질 것으로 예상된다. Fig. 9에는 현 상태의 월유출량 대비 물공급으로 인한 유출량의 변화율을 도시하였는데 그 비율은 평균 최소 2.5%에서 최대 34.2%로 나타났으며 특히 강수량이 부족했던 2015년에는 평균 23%(최소 13%에서 최대 32%)의 증가를 나타냈다.

다음은 2011년부터 2015년까지 최대 양수량을 이용할 경우의 하천유출량과 그 최대 양수량을 전량 하천으로 유입되는 경우에 대한 월별 유출고 분석을 수행하여 Fig. 10에 도시하였다.

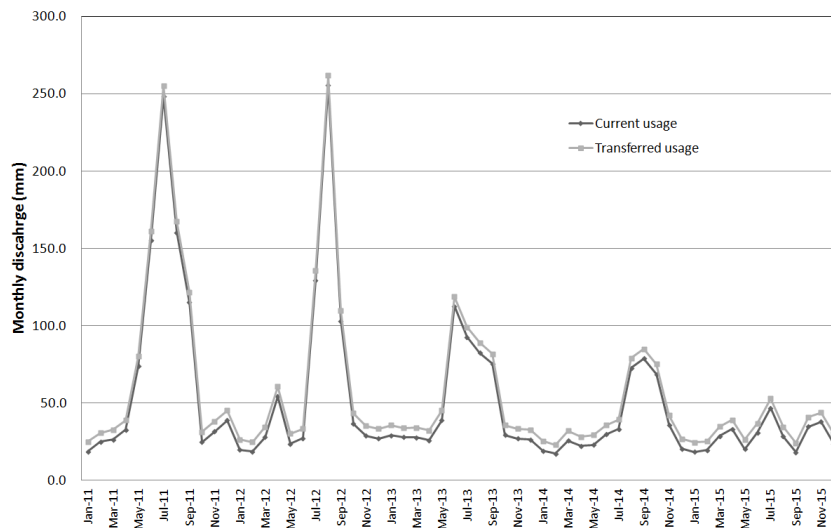


Fig. 8. Variation of monthly stream discharge according to the water transfer of current usage

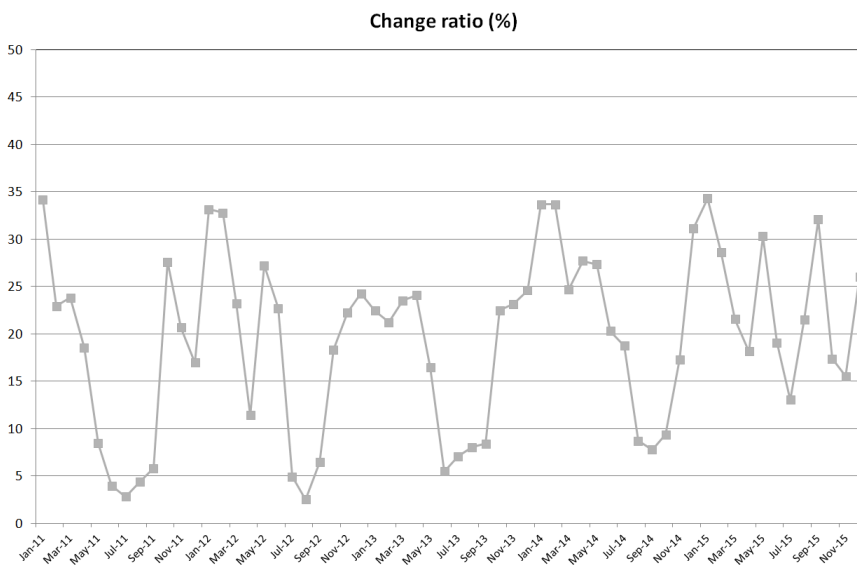


Fig. 9. Change ratio of monthly stream discharge according to the water transfer of current usage

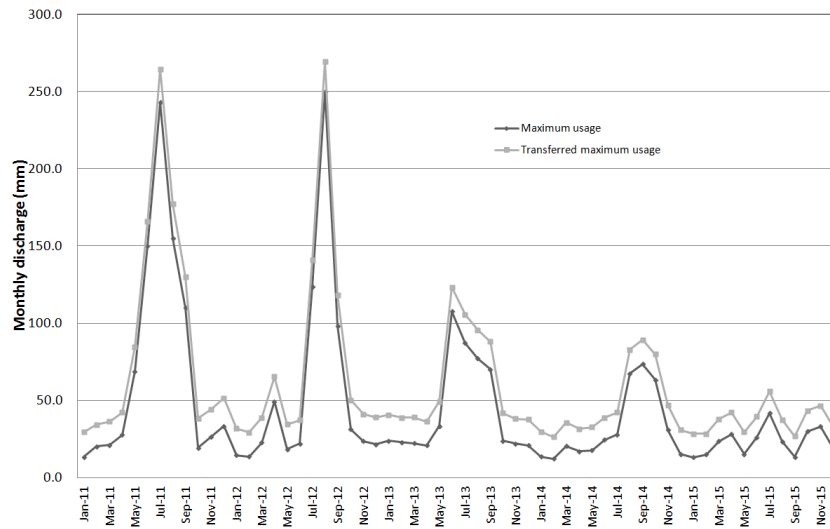


Fig. 10. Variation of monthly stream discharge according to the water transfer of maximum usage

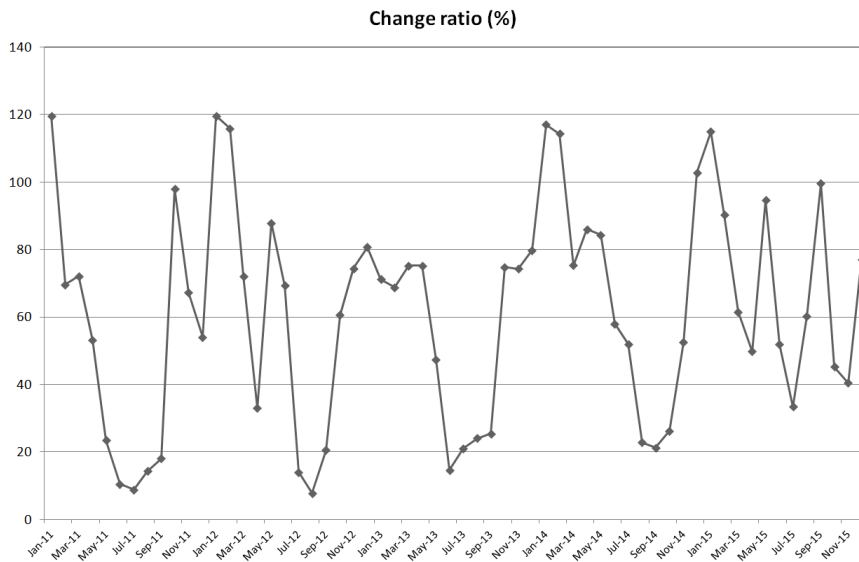


Fig. 11. Change ratio of monthly stream discharge according to the water transfer of maximum usage

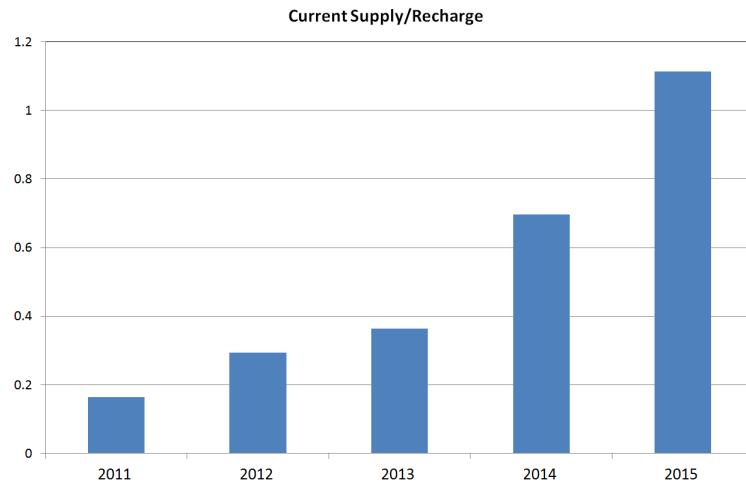
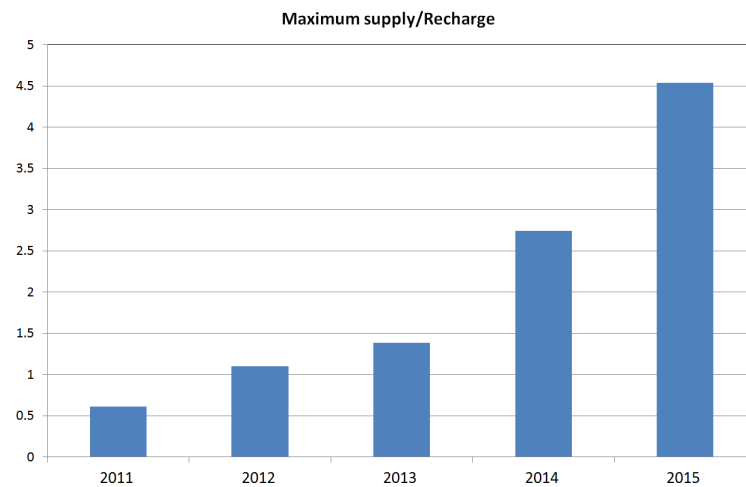
그림에서 보는 바와 같이 지하수가 유입된 경우 하천의 월 유출량이 증가하는 것을 볼 수 있으며 그 양은 최소 13.3 mm에서 22.2 mm로 나타났고 평균 16.2 mm인 것으로 나타났다. 특히 2015년에는 그 변화폭이 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 11에는 최대양수시의 월유출량 대비 물공급으로 인한 유출량의 변화율을 도시하였는데 그 비율은 평균 최소 7.8%에서 최대 120%까지 나타났다. 가뭄이 심했던 2015년에는 평균 68.3%(최소 33.4%에서 최대 99.6%)의 증가를 나타냈다. 실제로 가뭄시에 지하수 양수량은 더욱 증가하는 것을 감안하면 증대된 양수로 인해 유량이 더욱 줄어든 하천으로 지하수가 공급되는 것은 아주 유용한 방안이라고 판단된다.

4. 연간 지하수 함양량과의 비교

무심천 유역에서 2011년부터 5년간 강수량은 지속적으로 감소하였는데 2011년 1805.54 mm에서 2015년에는 757.88 mm로 41.9%에 해당하는 감소세를 보였고 그에 따라 지하수 함양량도 감소하여 2011년 468.05 mm에 달하는 함양량이 2015년에는 3.5%에 해당하는 64.7 mm로 심각하게 감소한 것을 볼 수 있다(Table 1). 반면 양수된 지하수가 하천으로 유출될 경우는 그 양이 일정하게 하천으로 공급됨에 따라 현 이용량을 적용하면 연평균 75 mm, 최대 이용량 적용시 연평균 290 mm까지 공급이 가능한 것으로 나타났다. 공급량 대비 연

Table 1. Annual recharge and possible groundwater supply (Unit: mm)

Year	Precipitation	Recharge	Current supply	Maximum supply
2011	1805.54	468.05	77.25	287.24
2012	1387.55	262.47	76.95	288.70
2013	1240.06	210.05	76.35	290.74
2014	913.67	106.59	74.33	292.04
2015	757.88	64.72	72.05	293.70

**Fig. 12.** Ratio of current supply to annual recharge**Fig. 13.** Ratio of maximum supply to annual recharge

간함양량의 비율을 살펴보면 2011년 16%에서 2015년 111%으로 증가하는 것을 알 수 있으며(Fig. 12), 최대 공급시에는 2011년 61.3%에서 2015년에는 453%로 크게 나타나(Fig. 13) 자연 지하수 공급량에 비해 그 효과가 매우 클 것으로 판단되었다.

5. 결론 및 추후과제

본 연구에서는 무심천 유역을 대상으로 지표수-지하수 통합 해석 모형을 기반으로 지하수를 이용한 하천으로의 물공급 방안을 살펴보았다. 극한 가뭄으로 인해 하천에 필요유량이 부족할 경우의 대안으로 지하수를 이용한 하천수의 공급방안의 도

입이 필요하다. 가뭄과 홍수에 취약한 지표수자원과 달리 지하수는 대규모 저류가 가능하여 물공급의 완충역할이 가능한 것을 본 연구에서 실증하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 2011년부터 2015년까지 모의실험을 수행한 결과 현 양수량을 하천으로 공급하는 경우 월유출량 대비 물공급으로 인한 유출량의 변화율은 최소 2.5%에서 최대 34.2%로 나타났다. 특히 강수량이 부족했던 2015년에는 평균 23%(최소 13%에서 최대 32%)의 증가를 나타냈다. 최대양수시의 월유출량 대비 물공급으로 인한 유출량의 변화율은 최소 7.8%에서 최대 120%까지 나타났으며 2015년에는 평균 68.3%(최소 33.4%에서 최대 99.6%)의 증가를 나타냈다.
- 2) 무심천 유역에서 2011년부터 5년간 강수량은 지속적으로 감소하였으며 그에 따라 지하수 함양량도 감소하여 2011년 468.05 mm에 달하는 함양량이 2015년에는 3.5%에 해당하는 64.7 mm로 심각하게 감소한 것을 볼 수 있다. 반면 양수된 지하수가 하천으로 유출될 경우는 그 양이 일정하게 하천으로 공급됨에 따라 현 이용량을 적용하면 연평균 75 mm, 최대 이용량 적용시 연평균 290 mm까지 공급이 가능한 것으로 나타났다.
- 3) 지표수와 지하수의 연계운영은 전 세계적으로 활발하게 진행되는 반면 국내에서는 아직까지 본격적인 도입이 미미한 실정이므로 보다 지속가능한 수자원 이용을 위해서는 적극적이고 창의적인 연계방안의 실천이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에서는 양수된 지하수량의 전량 이동을 고려하였으나 실제로는 양수된 지하수의 실제 회귀수량에 대한 평가와 회귀되는 시간 등에 대해서는 후속 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 제주권 건설교통기술 지역거점센터의 “해수침투 취약성 평가기술 및 담-염수 경계예측기술 개발(과제번호: 17RDRP-B076272-04)”에 의해 수행되었습니다.

References

- Arnold, J. G., and Fohrer, N. (2005). “SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling.” *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Chung, I. M., and Chang, S. W. (2016). “Analysis and evaluation of hydrological components in a water curtain cultivation site.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 9, pp. 731-740 (in Korean with English abstract).
- Chungcheong daily (2015). <http://m.ccdailynews.com/news/articleView.html?idxno=825676>.
- Kim, H. S., Kim, H. S., Jeon, G. I., and Kang, S. W. (2016). “Evaluation of drought (2014-2015).” *Magazine of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 6, pp. 61-75. (in Korean).
- Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C., Lee, J., and Lee, J. E. (2009). “Development and applications of SWAT-K (Korea).” In: *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications* (Eds. J. Arnold et al.), Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G. (2008). “Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
- Kim, N. W., Lee, J., Chung, I. M., and Lee, M. H. (2013). “Combined effects of groundwater abstraction and irrigation reservoir on streamflow.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 7, pp. 719-733 (in Korean with English abstract).
- Krause, S., Bronstert, A., and Zehe, E. (2007). “Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain implications for the river discharge dynamics and riparian water balance.” *Journal of Hydrology* Vol. 347, No. 34, pp. 404-417.
- Lee, J., Kim, N. W., Chung, I. M., and Cha, J. H. (2015). “Assessment of effects of groundwater pumping from deep aquifer on streamflow depletion.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 48, No. 9, pp. 769-779. (in Korean with English abstract)
- McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, 528.
- Moon S., Kim, Y., Jeong, Y., and Hwang, J., 2016. “Groundwater-stream water interaction induced by water curtain cultivation activity in Sangdae-ri area of Cheongju, Korea.” *Economic and Environmental Geology*, Vol. 49, No. 2, pp.105-120 (in Korean with English abstract).
- Rassam, D. W. (2011) “A conceptual framework for incorporating surfacegroundwater interactions into a river operation planning model.” *Environmental Modelling and Software*, Vol. 26, pp. 1554-1567
- Won, K. J., and Chung, E. S. (2016). “Drought analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological, agricultural and hydrological drought indices.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 6, pp. 509-518 (in Korean with English abstract).
- Wu, G., Shu, L. C., Lu, X., Chen, X., Zhang, X., Appiah-Adjei, E. K., and Zhu, J. (2015). “Variations of streambed vertical hydraulic conductivity before and after a flood season.” *Hydrogeology Journal*, Vol. 23, No. 7, pp. 1603-1615.