

동해안 지역 폭설의 수문학적 거동 분석

김남원* · 정일문**

Kim, Nam-Won*, Chung, Il-Moon**

Analysis on the Hydrologic Behavior of Heavy Snowfall in East Coast Region

ABSTRACT

In order to investigate hydrological behavior of the east coast snowfall in February 2014, this study analyzed the changes of the hydrological components due to the snowmelt in the Ssangcheon watershed nearby Sokcho city. The temporal changes of hydrological components through snowfall and snowmelt processes were simulated using SWAT-MODFLOW. As a result of the analysis, snow accumulated until February is fully melted from the late March, 2014, and the stream discharge of April is more than doubled compared to the case of not considering snowmelt. The soil moisture also increased by up to 21 % due to the melting and the groundwater level rose by about 40 cm until the end of April. Thus, the heavy snowfall in February 2014 is considered to play an important role in securing water resources in this region.

Key words : Heavy snowfall, SWAT-MODFLOW, Snowmelt, Hydrologic components

초록

본 연구에서는 2014년 2월 동해안 폭설의 수문학적 거동을 검토하기 위해 속초 인근 쌍천 유역을 대상으로 융설로 인한 수문성분의 변화를 분석하였다. 적설과 융설과정을 통한 수문성분의 시간적 변화를 SWAT-MODFLOW를 이용하여 모의하였다. 분석결과 2월까지 쌓인 눈은 2014년 3월 하순 시점부터 본격적으로 녹아내려 4월의 하천유출량은 융설을 고려하지 않은 경우에 비해 두 배 이상 늘어나는 것으로 분석되었다. 또한 토양수분 역시 융설로 인해 최대 21 % 증가하며 지하수위는 4월말까지 약 40 cm 상승하는 것으로 나타나 2014년 2월의 폭설은 이 지역 수자원 확보에 중요한 역할을 한 것으로 평가된다.

검색어 : 폭설, SWAT-MODFLOW, 융설, 수문성분

1. 서론

우리나라 대표적인 관광지인 동해안 지역은 상습적인 물 부족을 겪는 곳으로 봄철에 빈번한 가뭄이 발생한다(Fig. 1). 특히 속초시는 가뭄이 극심했던 1995년 12월을 비롯해 1996년 2월과 6월, 2001년 6월, 2006년 2월, 2011년 1월, 2015년 6월 등 모두 7회에 걸쳐 제한급수를 시행한 바 있다(Choi, 2018). 이와 같은 물부족의 해결방안으로 Kim et al.(2004)은 속초시의 쌍천 지하댐과 학사평 저수지의 연계를 통한 수자원의 효율적 방안을 제시한 바 있다.

* 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원, 공학박사
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · nwkim@kict.re.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원, 공학박사
(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · imchung@kict.re.kr)

Received February 20, 2019/ revised March 6, 2019/ accepted March 8, 2019

한편, 이 지역에는 2014년 2월 속초기상관측소 기준 129 mm의 적설량을 기록한 엄청난 폭설이 속초, 강릉, 삼척에 고르게 내린 바 있다. 24절기 중 우수(雨水)는 비가 내리고 짝이 트는 시점으로 양력 2월 18일 경이다. 그런데 2014년 2월 17일 까지 동해안 속초에는 비 대신 엄청난 눈(적설심 141 mm)이 왔고, 내린 눈은 오랜 기간 쌓였다가 시간이 지남에 따라 서서히 녹아 내렸다. 폭설은 통상적으로 교통체증과 각종 사고를 일으키는 수재해 관점에서 주목되는 경향이 있다. 하지만, 본 연구에서는 동해안의 폭설이 융설을 통해 수자원으로 공급되는 유익한 현상으로서의 수문학적 과정을 살펴보고자 한다. 수문학적으로 볼 때, 눈은 어느 일정기간 강우량을 지상에 가두는 일종의 저수지 역할을 한다. 어느 정도 쌓였다가 온도가 내려가면 계속 얼어있고, 온도가 올라가면 그때부터 서서히 녹아내린다. 이로 인해 하천에 유량을 증가시키고, 토양의 수분함량을 높이고, 지하수위를 상승시킨다. 따라서 이 눈의 크기와 더불어 눈이 내린 시기도 매우 중요하다. 눈이 녹아서 발생하는 수문학적인 거동은, 물을 이용하는 인간은 물론 주변 생명체에 미치는 역할이 크다고 할 수 있다.

한편, 융설기간 동안 발생한 실제 융설량은 잠재융설량과 적설면적(areal snow coverage)으로 산정되며(Shook and Gray, 1997), 융설은 상대적으로 기온이 높은 저지대부터 발생하므로 표고가 높은 곳으로부터 낮은 곳으로 적설면적이 감소함에 따라 적설의 면적감소곡선(areal depletion curve)의 형태는 각 지역마다 다르다(Hartman et al., 1999). Kim et al.(2006)은 충주댐 유역의 융설영향을 평가하기 위해 적설-융설루틴이 개발된 SWAT모형(Fontaine et al., 2002)의 융설모듈을 활용하였다. 이들은 융설을 고려한 유출해석 결과가 실측치와 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였고 겨울철 융설효과가 3,4월 유출량에 많은 영향을 미친다는 것을 확인하였다. Yang et al.(2006)은 쌍천 유역에서 융설효과에 따른 강수량과 지하수위의 상관관계를 분석하였고 이를 지하댐 운영지표로 사용하도록 제시하였다. Lee et al.(2003)은 북한강 상류의

소양강댐과 남한강 상류의 충주댐 유역에 총괄형 모형을 적용하여 적설과 융설효과를 분석한 바 있다. Bae and Oh(1998)는 내린천 유역에 대해 미 기상청의 융설모형을 적용하여 그 영향을 정성적으로 파악한 바 있다. Kim et al.(2011)은 쌍천유역의 지하댐 효과를 정량적으로 파악하기 위해 지표수-지하수 통합해석 모형인 SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008)을 이용하여 지하댐 건설 전후의 유황변화를 분석하였고, 지하댐으로 갈수기에 가용 용수공급이 가능할 것으로 예측하였다. Jeong et al.(2005)은 속초 쌍천유역에서 SWAT모형의 기본값을 이용한 적설-융설효과를 분석하여 융설 유무에 따른 모의를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 속초 쌍천유역을 대상으로 지표수-지하수 통합해석 모형인 SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008)를 이용하여 2014년 폭설이 수문학적 거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 Kim et al.(2006)이 제시한 SWAT 모형의 융설 매개변수 산정방식을 활용하였으며, 쌍천유역의 통합모델링 관련 변수는 Kim et al.(2011)이 수행했던 기존 모델링 자료를 활용하였다.

2. 연구 방법

2.1 SWAT-MODFLOW 모형

본 연구에서 사용한 SWAT-MODFLOW모형은 미 농무성에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형(Neitsch et al., 2001)과 3차원 지하수 유동해석 프로그램인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)를 결합한 모형으로 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 유역내에서 지표수 수문과정에 의한 지하수 함양량과 대수층 내에서의 지하수 흐름을 산정하는 기능을 가지고 있으며 국내의 다양한 적용을 수행한 바 있다(Kim et al., 2008; Chung et al., 2011).

본 연구지역인 쌍천유역은 설악산 국립공원 북동부에 위치하며 (Fig. 3), 연평균 강수량은 1,310 mm이며, 지하수 함양률은 평균 22 % 정도이나 유역경사가 급해 호우시 하천유출이 대부분 발생하



Fig. 1. Winter Drought of Sokcho (Choi, 2018)

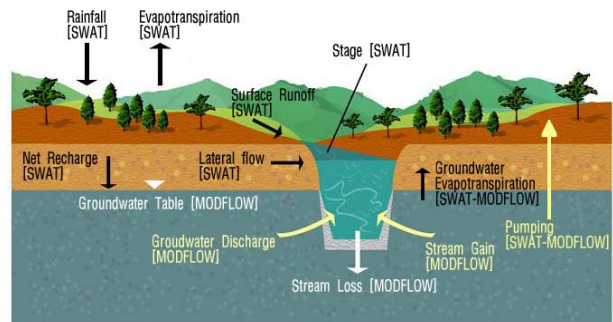


Fig. 2. Schematic Diagram of SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008)

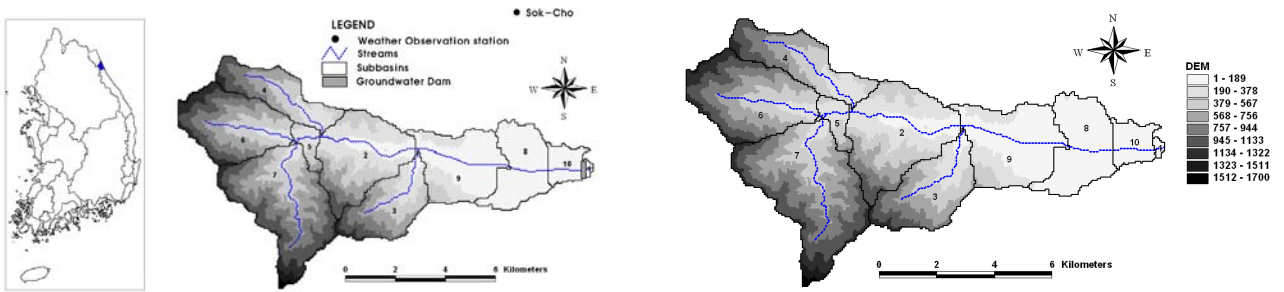


Fig. 3. Ssangcheon Watershed (Kim et al., 2011)

며 평상시에는 건천형태로 유지되고 있다(Kim et al., 2011). 쌍천 지하담은 생활용수 공급을 위해 만들어졌으며 속초 생활용수 공급에 매우 큰 역할을 하고 있다(Park et al., 2006).

SWAT-MODFLOW 모형의 구동을 위해 수치표고모델(Digital Elevation Model; DEM), 토지피복도, 토양도 등의 데이터가 필요하며 본 연구에서는 60 m 공간 해상도를 가지는 DEM, 중분류(1:25,000)토지이용도, 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다. 쌍천유역에는 산림지역이 약 87.3 %, 농경지가 5.6 % 내외로 분포하고 있으며 23개의 토양통이 분포하고 있는 것으로 나타났다(Kim et al., 2011).

쌍천유역에 대한 수문학적 매개변수의 검보정은 기수행된 연구(Kim et al., 2011)에서 밝힌 바 있는데, 유량은 기존의 유일한 관측값으로 알려진 설악교 부근의 실측유량을 기본으로 하였으며 실측치와 관측치의 상관성(R^2)은 0.65로 비교적 양호한 결과를 나타냈다. MODFLOW 모형의 경우는 DEM 사이즈와 같은 60 m로 총 277 × 154개의 격자망을 생성하였고 한 개의 총적층 및 한 개의 투수성 압반층으로 단순화하였으며, 각 층의 수리전도도는 총적층의 경우 2.4 m/day, 압반층은 0.076 m/day로 설정하였다.

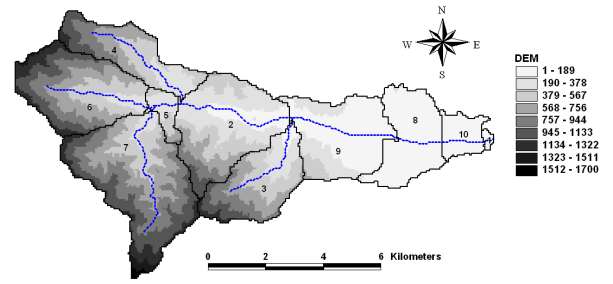
2.2 용설 효과의 모의방법

SWAT 모형에서 용설량(M_A)은 Eq. (1)과 같이 적설온도(T_{SN})와 일최대 기온(T_{BMX})의 평균값과 용설이 발생하는 임계온도(T_M)의 차이의 선형함수로 산정된다.

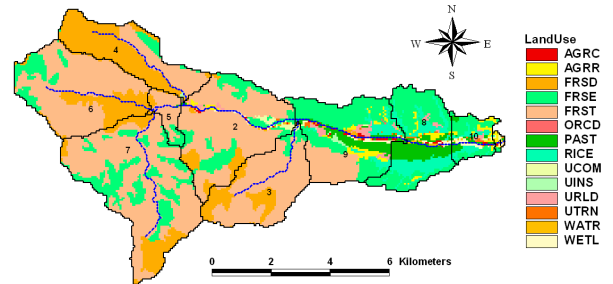
$$M_A = \alpha \left(\frac{T_{SN} + T_{BMX}}{2} - T_M \right) \cdot COV \quad (1)$$

여기서, α 는 용해율로서 하지와 동지때 발생하는 최대용해율 α_{MX} 와 최소용해율 α_{MN} 의 함수로 계산되고, COV는 HRU 면적 중 눈으로 덮인 면적의 비이며, 적설온도(T_{SN})는 Eq. (2)와 같이 산정된다.

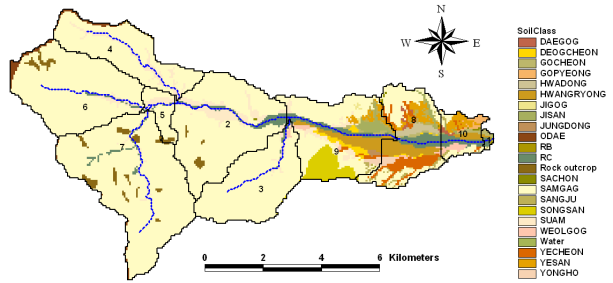
$$T_{SN2} = T_{SN1} (1.0 - \beta) + T_B \cdot \beta \quad (2)$$



(a) DEM



(b) Land Use Class



(c) Soil Class

Fig. 4. Maps of (a) DEM, (b) Land use, (c) Soil of the Study Area (Kim et al., 2011)

여기서, T_{SN2} 는 현재의 적설온도($^{\circ}C$), T_{SN1} 는 초기 적설온도($^{\circ}C$), β 는 적설온도와 기온에 관계된 지체계수를 나타낸다. β 의 범위는 당일의 적설온도가 전날의 적설온도와 기온 중 영향을 받는 정도에 따라 0~1의 값을 가진다(Neitsch et al., 2001).

본 연구에서는 표고에 따른 강수와 온도에 따른 변화를 고려하기 위해 유역의 표고밴드를 9개로 설정하였고, 각 표고밴드와 해당하는 소유역 면적비를 결정하였다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 설악산에 가까운 소유역 2~7번의 경우 El. 945 m 이상의 높은 고도 비율이 상대적으로 높았으며(15~47 %) 기타 소유역의 경우는 해안에서 가까운 저지대로 용설의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 이와 같이 배분된 소유역의 면적비는 다시 HRU (Hydrologic Response Unit)별로 구분되어 SWAT 모형에서 용설이 적용된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 용설은 HRU 루프내에서 계산되며

표고밴드에 따라 융설계수와 적설면적 비율에 따라 계산이 수행되어 유역추적(Watershed routing) 루틴안에서 소유역별, 일별로 계산된다. 여기에 표고에 따른 온도변화율(lapse rate)은 Kim et al.(2006)이 제시한 우리나라 기상관측소 위치표고와 연평균 기온 자료를 활용한 상관식인 Eq. (3)의 값을 이용하였다.

$$T = -0.00623 Z + 12.46459 \quad (3)$$

여기서, T는 연평균 기온(°C), Z는 관측소 표고(EL. m)를 나타낸다.

또한 표고밴드 내 소유역 HRU의 온도는 해당 밴드의 온도(T_B)와 같다고 가정하여 밴드의 중심표고(Z_B)와 관측소 표고(Z_s) 차에 대한 온도변화율인 Eq. (4)를 적용했다.

$$T_B = T_{ST} + (Z_B - Z_s) dT/dZ \quad (4)$$

여기서, T_{ST} 는 관측소 온도이다.

또한 SWAT모형에서는 강우/강설 임계온도(T_S), 융설 발생 임계온도(T_M), 잠재 융설량 산정을 위한 연중 최대, 최소 융해율(α_{MX} , α_{MN}), 적설온도 지체계수(β), 적설면적 감소곡선 산정을 위한 100 % 적설피복 물당량에 대한 50 % 적설피복 물당량비(COV_{50}/COV_{100}), 100 % 적설피복 최소 물당량(MNCOV₁₀₀)이 필요하며 이에 대한 값은 Kim et al.(2006)이 제시한 값을 사용하여 Table 1에 제시하였다.

3. 모형의 적용

본 연구에서는 2014년 2월에 내린 적설량의 자료를 기반으로 당해연도 5월까지의 수문학적 과정을 파악하였다. 기상청 보도자료(KMA, 2014)에 따른 2월 6일부터 2월 14일까지 9일간 속초지점에 내린 최심신적설량(最深新積雪量)은 다음 Table 2와 같다. 최심신적설은 00시를 일개로 하여 24시간 동안에 새로 내려 쌓인 눈이 제일 깊었을 때의 깊이를 의미한다.

다음 Fig. 6은 속초 지점의 2014년 2월 신적설 합계를 나타낸 그림으로 1980년 이후 최대 신적설량을 기록하였다.

융설분석의 비교평가를 위해서 몇 가지 가정을 바탕으로 2014년 폭설에 대한 융설의 수문학적 거동을 검토하였다. 눈이 즉시 비처럼 녹아서 하천으로 흘러가는 경우(시나리오 1)와 적설과 융설과정을 거쳐서 유역내에서 거동하는 경우(시나리오 2)를 비교하였다.

Fig. 7은 융설에 따른 유역출구에서의 하천수의 거동을 표현한 것이다. 눈이 곧바로 녹아서 강수량으로 변할 경우의 유출량을

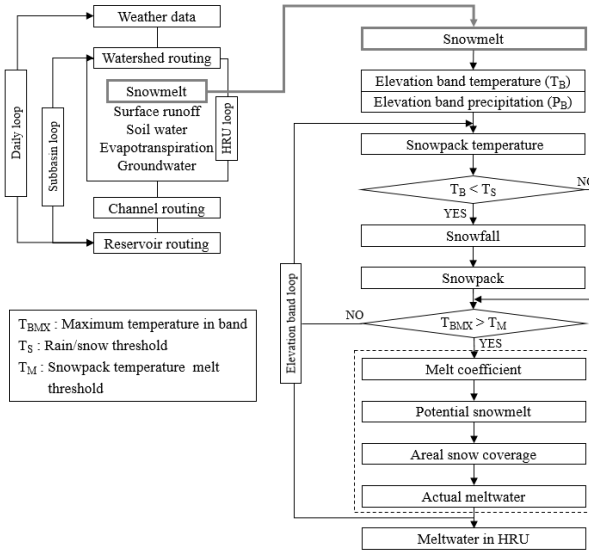


Fig. 5. Flow Diagram of the SWAT Snowmelt Model (Kim et al., 2006)

Table 1. Input Parameters Used for Final Simulation (Kim et al., 2006)

Input parameter	Value
Rain/snow threshold (T_S)	0.0 °C
Snowpack temperature melt threshold (T_M)	0.0 °C
Maximum melt coefficient (α_{MX})	6.0 mm/day/°C
Minimum melt coefficient (α_{MN})	2.0 mm/day/°C
Snowpack temperature lag factor (β)	0.5
Areal snow coverage threshold (COV50/COV100)	0.5
Areal snow coverage threshold (MNCOV100)	50.0 mm

Table 2. Maximum Depth of Snowfall in Feb. 2014

location	Maximum Depth of Snowfall (cm) in Feb. 2014									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Sum
Sokcho	-	11.1	15.5	41.7	27.8	8.3	-	20.2	4.8	129.4

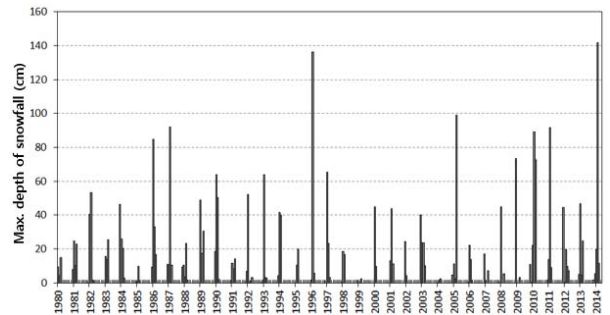


Fig. 6. Monthly Maximum Depth of Snowfall in Sokcho (1980~2014)

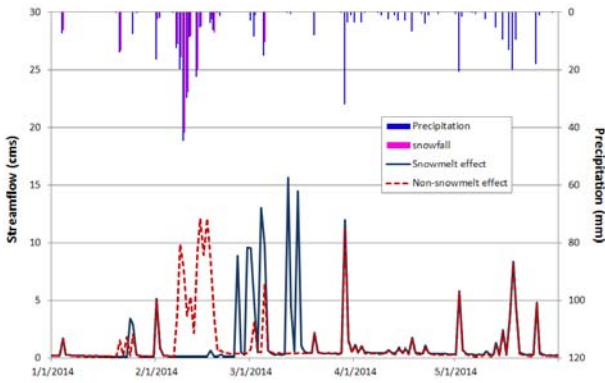


Fig. 7. Behaviour of Stream Flow According to Snowmelt

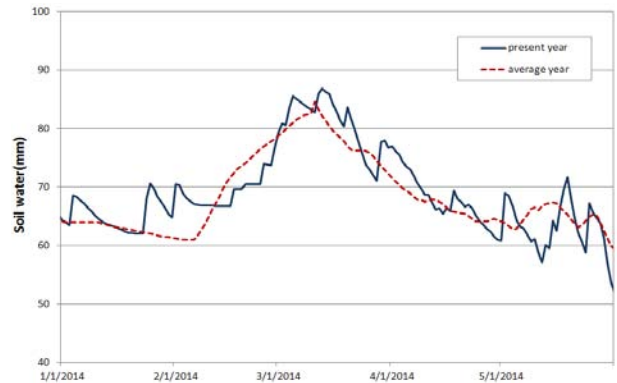


Fig. 9. Variations of Soil Moisture in Year 2014 and Annual Average

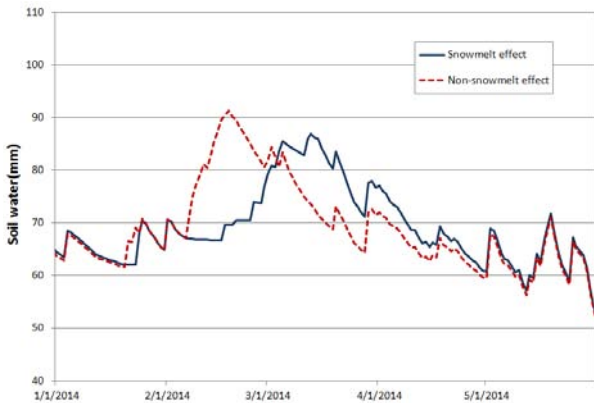


Fig. 8. Behaviour of Soil Moisture According to Snowmelt

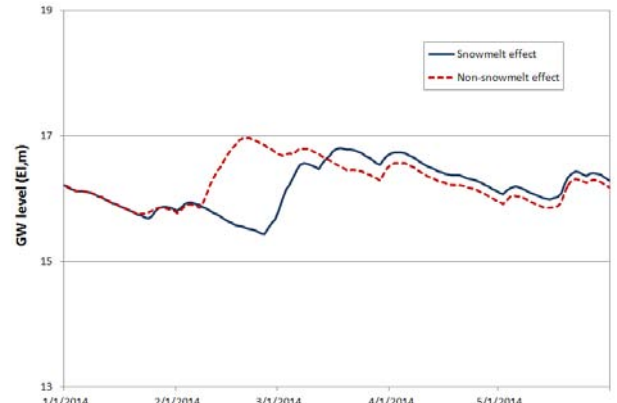


Fig. 10. Behaviour of Groundwater According to Snowmelt

빨간 점선으로 용설을 고려한 경우의 유출량을 파란 실선으로 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 용설을 고려하지 않은 경우에는 하천유출이 동시에 발생하고 그 발생기작도 여름철과 동일한 형태로 나타남을 알 수 있다. 이에 반해, 2월 중순까지 내린 눈이 4월 초까지도 적설상태로 유지되면서 용설의 영향은 4월 초까지 유출에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 저수량의 경우는 미미하지만 5월 말 까지도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

한편, 토양수분은 식생에 큰 영향을 미치며, 밭작물 등 농업환경에 영향을 미치는 물론, 수문학적으로 중간유출 및 하천유출거동에 지대한 영향을 미치기 때문에 토양수분의 정량적 거동을 파악하는 것은 매우 중요하다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 토양수분은 적설 이후 오랜 지체시간을 거쳐 용설을 통해 그 양이 최대 약 21 % 증가되며 5월 중순까지 그 영향이 지속되는 것으로 나타났다.

2014년 봄의 수문학적 거동은 매우 이례적이므로 2014년의 수문성분과 2014년 이전 30년간의 수문성분해석을 통해 얻어진 수문성분과의 비교를 수행하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 2014년의 토양수분은 예년에 비해 3월 이후 약 10 mm 큰 값을 유지하는 것으로 나타나 용설의 영향력을 확인 할 수 있었다.

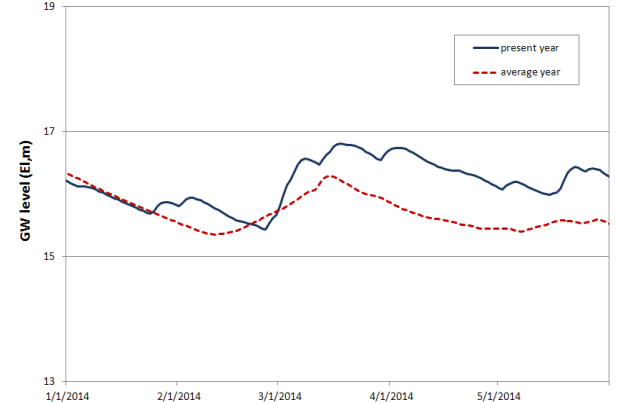


Fig. 11. Variations of Groundwater Level in Year 2014 and Annual Average

다음 Fig. 10은 지하수위의 변화이다. 전술한 하천수 및 토양수분 거동에 비해 지하수의 거동은 가장 오래 지속되는 것을 알 수 있다. 정량적으로는 4월말까지 약 40 cm, 5월말 약 10 cm 정도의 지하수위 상승이 일어나는 것으로 파악되었다.

또한 예년에 비해 2014년 봄의 지하수위는 용설에 의한 지하수 함양으로 인해 4월에서 5월에 걸쳐 예년에 비해 약 1 m 전후의 지하수위를 상승시킨 것으로 나타났다(Fig. 11). 이와 같은 지하수위 상승은 이 지역에 위치한 지하댐의 효과를 지속시키는 데도 큰 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서 분석한 적설과 용설의 과정을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 용설을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 3월 중순이후의 하천 유출량의 차이는 큰 것으로 나타났고, 그 기간 역시 모내기철인 5월 중순까지 지속될 것으로 분석되었다.
- (2) 2014년의 토양수분은 용설에 의해 3월부터 5월초까지도 지속적으로 증가하는 것으로 나타났고 이는 예년과 비교해도 10 mm 이상 증가된 양으로 분석되었다.
- (3) 2014년의 지하수위는 용설에 의한 지하수 함양의 증가 영향으로 4월말에서 5월말까지 약 10-40 cm 증가되는 양상을 보였으며 예년과 비교할 때는 같은 기간에 약 1 m의 지하수위를 상승시킬 수 있는 것으로 분석되었다.
- (4) 결론적으로 2014년 2월의 폭설은 겨울과 봄가뭄이 심각한 영동지역에 수자원으로서의 충분한 가치를 입증한 것으로 판단되며 일종의 자연 저수지 역할을 한 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급 서비스사업(#146515)의 지원을 받아 연구되었습니다. 또한 본 논문작성에 많은 도움을 준 (주)핵코리아 이병주 박사께 감사드립니다.

References

Bae, D. and Oh, J. (1998). "A fundamental study on the snowmelt effects for long-term runoff analysis." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 31, No. 6, pp. 833-844 (in Korean).
 Choi, S. (2018). *Winter drought in Sokcho*, Kyunghyang daily, Available at: http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201802041513001&code=620110 (Accessed: February 17, 2019).
 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, Vol. 44, No. 5, pp. 433-442 (in Korean).
 Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S., Arnold, J. G. and Hotchkiss, R. H. (2002). "Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT)." *Journal of Hydrology*, Vol. 262, pp. 209-223.
 Hartman, M. D., Baron, J. S., Lammers, R. B., Cline, D. W., Band, L. E., Liston, G. E. and Tague, C. (1999). "Simulations of snow distribution and hydrology in a mountain basin." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 1587-1603.
 Jeong, J. U., Kim, D. G., Park, J. H. and Park, C. K. (2005). "Runoff simulation take into consideration of snow pack and snow melt." *Proc. of the KSCE Conf.*, KSCE, pp. 1291-1294 (in Korean).
 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, B. J. and Lee, J. E. (2006). "An evaluation of snowmelt effects using SWAT in Chungju dam basin." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 39, No. 10, pp. 833-844 (in Korean).
 Kim, N. W., Na, H. and Chung, I. M. (2011). "Integrated surface-groundwater hydrologic analysis for evaluating effectiveness of groundwater dam in Ssangcheon watershed." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 44, No. 6, pp. 525-532 (in Korean).
 Kim, S., Lee, S. and Kim, B. (2004). "Effective use of water resources through conjunctive use - (II) application." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 37, No. 10, pp. 799-812 (in Korean).
 Korea Meteorological Administration (KMA) (2014). *Data of daily climate characteristics* (in Korean).
 Lee, S. H., Ahn, T. J., Yoon, B. and Shim, M. P. (2003). "A tank model application to soyanggang dam and chungju dam with snow accumulation and snow melt." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 851-861 (in Korean).
 McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model*. U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, p. 528.
 Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation*.
 Park, C., Jeong, G., Park, J. and Boo, S. (2006). "The function of groundwater dam and role." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 5, pp. 40-53 (in Korean).
 Shook, K. and Gray, D. M. (1997). "Synthesizing shallow seasonal snow cover." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 419-426.
 Yang, J., Lim, C. H., Park, J. and Park, C. K. (2006). "The correlation between groundwater level and GOI with snowmelt effect in Ssangchun watershed." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 121-126 (in Korean).