



우리나라의 1996-2015년 지하수 및 댐저수량 변동 비교 연구

이호건^{1,2} · 전우현^{1,2} · 윤상웅^{1,2} · 권기덕^{1,2} · 이진용^{1,2,*}

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

요 약

이 연구에서는 우리나라의 지하수와 지표수의 장기기간(1996~2015) 변동을 비교·분석 하였다. 이를 위해 우리나라의 지하수위, 댐저수량 및 강수량 자료와 미국에서 제공하는 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)와 Global Land Assimilation System (GLDAS) 자료를 수집하였다. 연구결과 1996~2015년 동안 우리나라의 연강수량은 948~1,857 mm/yr의 변동범위를 보였고 약 4.4년 주기로 가뭄이 발생하였다. 지하수위 이상편차(anomaly)와 댐 수위 이상편차의 중앙값은 각각 -0.4~+0.4, -4.0~+4.0 m 변동을 보였다. 강수량과 지하수위 및 댐 수위는 특히 1996, 2001, 2008, 2014, 2015년에 감소하였다. 또한 2014, 2015년에는 GRACE의 총물저장량(Total Water Storage Anomaly, TWSA)과 GLDAS의 지표총수분량(Total Water Content Anomaly, TWCA)도 감소하여 우리나라의 극심한 수문학적 가뭄을 지시하였다.

주요어: 지하수, 댐, 강수량, 가뭄, GRACE, GLDAS

Ho Geon Lee, Woo-Hyun Jeon, Sang Woong Yun, Kideok D. Kwon and Jin-Yong Lee, 2017, Comparative study of variation of groundwater and dam storage from 1996-2015 in Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 5, p. 715-726

ABSTRACT: This study was conducted to compare the variation of the groundwater and surface water in Korea. For this purpose, we collected hydrological data including groundwater level, dam water level and its storage, precipitation for the period of 1996~2015, GRACE and GLDAS data for 2002~2015, and 2001~2014, respectively. The annual precipitation ranged between 948 and 1,857 mm/yr and showed a drought cycle with about 4.4 year period. The median values of groundwater levels and dam water levels anomalies are -0.4~+0.4 m and -4.0~+4.0 m, respectively. Precipitation, groundwater level, and dam water level were decreased especially in 1996, 2001, 2008, 2014, and 2015. Also, GRACE TWSA and GLDAS TWCA were decreased which indicates the extreme hydrological drought of Korea in 2014 and 2015.

Key words: groundwater, dam storage, precipitation, drought, GRACE, GLDAS

(Ho Geon Lee, Woo-Hyun Jeon, Sang Woong Yun, Kideok D. Kwon and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

1. 서 론

우리의 대부분 활동에는 항상 에너지를 필요로 한다. 에너지원 중 석유, 천연가스, 셰일가스 등은 지하에 매장되어 있는 것으로 고갈우려가 있어 최근에는 태양, 수력, 조력 등 천연에너지 자원에 대한 관심이 높아지고 있다(Jo *et al.*, 2009). 천연에너지 자원 중 수자원은 우리의 활동뿐만 아니라 생물학적으로

매우 중요한 자원이다(Ryu, 2011; USEPA, 2015). 지구 수자원은 약 14억 km³이며 이 중 담수는 2.5%로 0.35억 km³에 불과하다(White, 2010). 담수 중에서 실제 우리가 사용할 수 있는 수자원은 강수, 하천, 지하수 등으로 0.3%인 42만 km³이다(White, 2010). 이용가능한 수자원은 자연적 한계 및 인구증가로 인하여 수요와 중요성이 높아지고 있다(KAIA, 2015). 우리나라뿐만 아니라 미국, 유럽 등 여러 국가에서 수자

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

원을 확보하고 체계적으로 관리하기 위해 많은 연구가 발이 이루어지고 있다(KAIA, 2015; USEPA, 2015).

한편 최근 기후변화로 인해 전 세계적으로 홍수, 가뭄, 엘니노 등 이상기후와 많은 자연재해가 발생하고 있다(USGCRP, 2016). 이중 가뭄으로 인한 피해는 세계적으로 1951~2010년 동안 증가하는 경향을 보이며 특히 우리나라가 속한 동아시아의 가뭄빈도가 크게 증가하였다(Spinoni *et al.*, 2014). 미국 캘리포니아 주는 가뭄으로 인해 큰 피해를 입었으며 가뭄 관측 시스템을 구축하고 있다(Lee and Kwon, 2015). 2009년 중국에서도 가뭄으로 인해 약 57억 달러의 큰 경제적 피해가 발생하였다(Heo, 2011). 우리나라도 2015년 가뭄으로 인해 농가피해액은 최대 310억 원 이상이며 피해 면적은 약 3,000 ha가 발생했다(Chae *et al.*, 2016). 이처럼 가뭄은 막대한 경제적, 생물학적 등으로 큰 피해를 입히며 다양한 형태로 발생한다. 따라서 가뭄을 대비하기 위해서는 지표수와 강수뿐만 아니라 지하수를 포함한 모든 수자원에 대해 정확한 관측을 통한 체계적인 관리 및 정책이 필요하다(Lee, 2015).

한편 미국은 수량 및 수질 관리를 통해 안정적으로 수자원을 확보하는 정책을 실시하고 있다. 미국농무성(USDA), 미국지질조사국(USGS), 미국해양기후국(NOAA) 등 여러 기관에서 기상관측, 지표수(댐) 및 하천 관측, 지하수 관측정, GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성 및 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 등 여러 방법을 통해 미국뿐만 아니라 지구전체의 수자원을 관측 및 예측을 수행하고 있다. GRACE 위성과 GLDAS 방법을 이용해 지표수뿐만 아니라 지구내부의 지하수, 토양수분 등 직접적으로 양을 측정하기 어려운 수자원에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Rodell *et al.*, 2007; Fang *et al.*, 2009; Castle *et al.*, 2014; Whisnant *et al.*, 2015; Gleeson *et al.*, 2016). 우리나라의 경우 지질구조가 복잡하여 대수층 구조를 파악하기 어렵고 지표 아래 수자원 양에 대한 연구가 부족한 실정이다.

우리나라도 기상청, 수자원공사, 농어촌공사, 환경부 등 여러 기관에서 강수량, 댐저수량 및 저수위, 지하수위, 수질현황 등을 관측하고 있다(Lee and Kwon, 2016). 하지만 우리나라 전체 지하수와 지표수를 비교한 연구와 GRACE, GLDAS 이용한 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 수집한 자료(강수

량, 댐 수위 및 저수량, 지하수위, GRACE, GLDAS)를 통해 가뭄 주기를 추정하고 강수량에 따른 지하수와 지표수 변동을 시계열적으로 비교·분석하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역은 섬을 제외한 우리나라 전역으로 중국과 일본 사이에 위치하며 면적은 약 99,720 km²이다. 우리나라는 중위도 지역(126~130°E, 33~38°N)에 위치하여 온대성 기후에 속하고 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 1981~2010년 연평균기온은 12.5°C, 연강수량은 1,350 mm이며 여름(6~8월)에 연강수량의 50~60%의 강수가 발생한다(Lee and Lee, 2000; KMA, 2011). 지형은 동쪽이 주로 높은 산간지대이며 복잡한 형태이다. 지표수는 동쪽의 산간지대를 중심으로부터 외곽으로 유출되는 형태의 수계가 형성되어 있다(Tak *et al.*, 2013; NGIC, 2016). 권역별 수계는 중부지역에 한강권역과 금강권역 수계가 있으며 남부지역에 동강, 섬진강 및 영산강권역으로 구분할 수 있다(Ministry of Land, 2015). 이 연구에서는 전국의 기상관측소 45개, 댐 28개, 국가지하수관측소의 암반 관측정 309개와 층적관측정 123개 그리고 GRACE 17개 구역, GLDAS 8개 구역 자료를 이용하였다(그림 1). GLDAS 8개의 구역은 GRACE 17개 구역 속에 포함되며 일치한다.

2.2 강수량, 댐 및 지하수 자료

표 1은 연도별 기상관측소, 댐, 국가지하수관측소의 개수변화를 나타낸다. 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)의 기상관측소 개수 및 월강수량을 자료를 수집하였다(KMA, 2016). 기상관측소는 1996년 71개에서 점진적으로 추가 설치되어 2015년에는 91개가 설치되었다. 이 연구에서는 전국에 고르게 분포하고 연구기간동안 연속적으로 측정된 기상관측소 45개를 선정하여 1996~2015년 월강수량 자료를 수집하였다(그림 1). 각 관측소의 월강수량 자료를 이용해 연강수량을 계산하였다. 또한 1996~2015년 각 기상관측소의 월강수량과 연강수량의 산술평균(arithmetic mean)을 기준으로 이상편차를 계산하였으며 이는 기준이 되는 산술평균값과 관측값의 차이를 나타내는 것이다.

한국수자원공사(K-water)로부터 댐 개수, 월평균 댐 수위 및 저수량 자료를 수집하였다(K-water, 2016). 우리나라 지표의 유효저수용량(effective storage capacity)은 13,934 Mm³이며 다목적 및 용수댐의 유효저수용량은 9,782 Mm³ (70.2%)이다(K-water, 2017). 따라서 본 연구에서 댐저수량은 지표수를 대표하는 수량으로 설정하였다. 수자원공사에서 관리하는 댐은 1996년 20개에서 2015년에는 48개가 설치되었다. 48개

의 댐 중 10년 미만 관측된 댐과 작은 규모 댐(보)을 제외하였다. 댐 28개를 선정하였으며 경상도에 가장 많은 댐이 위치한다(그림 1). 1996~2015년 각 댐의 수위 산술평균을 기준으로 각 이상편차를 계산하였다. 전체 댐 수위를 나타낼 때 산술평균을 이용할 경우 지역별 고도 차이로 인한 지나치게 크거나 작은 값들의 영향과 일부 결측으로 인한 영향을 배제해야 한다. 따라서 이 영향을 배제하기 위해 중앙값(median)

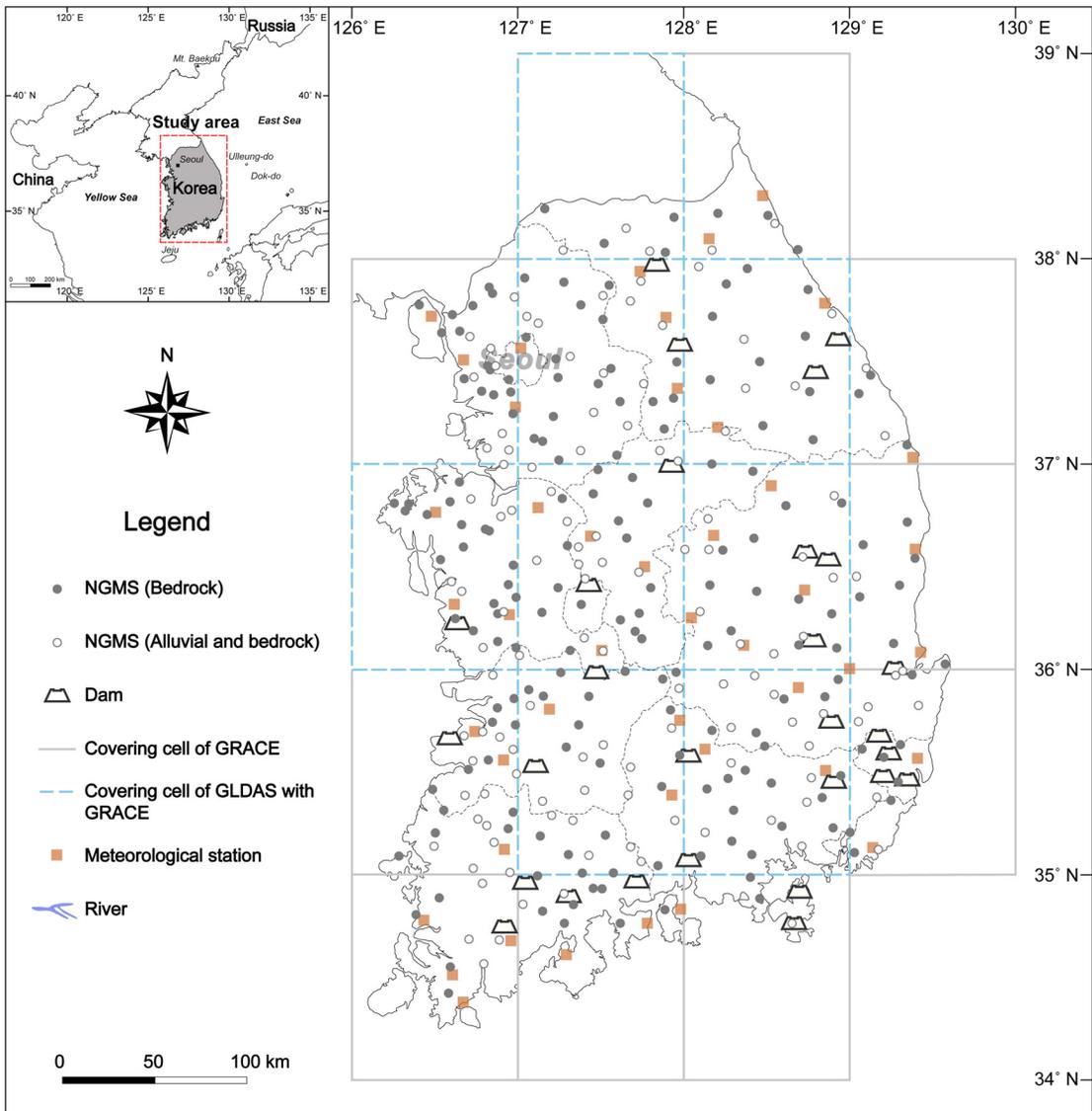


Fig. 1. Location of the monitoring wells, dams, meteorological stations, GRACE, and GLDAS data used for this study in Korea. The gray boxes represent the 1x1 degree grid used for GRACE. The blue boxes represent the 1x1 degree grid used for GLDAS with GRACE.

Table 1. Progress of number of meteorological stations, dams, and national groundwater monitoring stations (NGMS) used in this study.

Year	Meteorological station	Dam	NGMS
1996	71	20	15
1997	72	21	52
1998	72	22	97
1999	72	22	134
2000	72	24	154
2001	73	26	169
2002	76	26	202
2003	76	26	236
2004	76	26	266
2005	76	28	293
2006	76	29	320
2007	76	30	320
2008	78	30	320
2009	83	30	327
2010	85	31	335
2011	90	31	348
2012	91	48	361
2013	91	48	347
2014	91	48	386
2015	91	48	402
Used	45	28	309

을 이용해 계산하였다.

국토해양부와 한국수자원공사가 운영하는 국가 지하수관측소의 자료를 수집하였다(NGIC, 2016). 국가지하수관측소는 1996년 15개에서 2015년에는 402개로 급격히 증가하였다. 이 중 235개는 암반관측정만 설치되어 있으며 167개는 암반관측정과 충적관측정이 설치되어있다. 본 연구에서는 관측기간이 10년 이상인 암반관측정 309개, 충적관측정 123개의 월평균 지하수위 자료를 수집하였다(그림 1). 연구기간 동안의 각 관측소의 지하수위 산술평균을 기준으로 이상편차(anomaly)를 계산하였다. 전체 지하수위는 댐 수위와 마찬가지로 지역별 고도 차이와 일부 결측으로 인한 영향을 배제하기 위해 중앙값을 이용해 계산하였다.

2.3 GRACE위성을 이용한 총물저장량(TWS)

GRACE는 미항공우주국(NASA)과 독일항공우

주센터(DLR)가 공동으로 제작 및 관리하는 쌍둥이 인공위성이다. 2002년 4월부터 현재까지 두 개의 쌍둥이 위성이 약 220 km 간격을 두고 공전하면서 지구 전체의 중력장 분포를 관측하고 있다(Tapley *et al.*, 2004). 이 중력장 자료는 식(1)과 같이 등가수분두께(Equivalent Water Thickness, EWT)의 형태로 도출된다. 여기서 a 는 지구의 반지름, ρ_E 는 지구의 평균 밀도, l 과 m 은 구면조화함수(spherical harmonics)의 매개변수, k_l 은 Love number, \tilde{P}_{lm} 은 정규화와 관련된 르장드르 다항식(Legendre polynomial), θ 와 ϕ 는 위도와 경도이며 ΔC_{lm} 와 ΔS_{lm} 는 무차원의 누적 계수로 구형고조파계수와 평균치를 나타낸 잔여중력이다(Swenson and Wahr, 2002).

$$EWT = a \frac{\rho_E}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{(2l+1)}{(1+k_l)} \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)] \quad (1)$$

도출된 결과는 해당지역의 지하수량변화(groundwater storage variation, ΔGW), 지표수량변화(surface water storage variation, ΔSW), 토양수분당량(soil moisture equivalent, ΔSM), 적설상당물량(snow water equivalent, ΔSWE) 포함해 등가수분두께로 표현된 총물저장량(Total Water Storage, TWS)을 계산할 수 있으며 관계식은 식(2)와 같다(Rodell *et al.*, 2007; Landerer and Swenson, 2012; Swenson, 2012).

$$\Delta TWS = \Delta GW + \Delta SW + \Delta SM + \Delta SWE \quad (2)$$

텍사스대학교우주연구센터(CSR), 제트추진연구소(JPL), 독일포츠담지구과학연구소(GFZ)에서 제공하는 Release 5.0의 2004~2009년을 기준으로 계산된 총물저장량변화(Total Water Storage Anomaly, TWSA) 자료를 수집하였다. 이 연구에서는 2002년 4월부터 2015년 12월까지의 산술평균을 기준으로 수정하여 이용하였다(GRACE Tellus, 2017). 수정된 자료의 오류를 최소화하기 위해 세 기관의 산술평균(ensemble solution) 자료를 이용하고 누락된 기간은 선형보간법(linear interpolation)으로 보완하였다(Swenson and Wahr, 2006; Sakumura *et al.*, 2014). 연구에 사용된 자료의 공간해상도는 위도 및 경도 상에서 $1^\circ \times 1^\circ$ 이며 월 단위 자료로 연구지역에 포함되는 17개 구역($126^\circ E \sim 130^\circ E$, $34^\circ N \sim 39^\circ N$)의 165개월 자료(2002.04~2015.12)를 이용하였다(그림 1).

2.4 GLDAS를 이용한 지표총수분량(TWC)

GLDAS는 미항공우주국의 고다드우주비행센터(GSFC), 미국해양대기청(NOAA), 미국의 국립환경예측센터(NCEP)에서 공동 개발되었다(Rodell *et al.*, 2004). 위성 및 관측 자료를 기초로 한 시뮬레이션 자료로 Community Land Model, Mosaic, Noah, Variable Infiltration Capacity 지표모델이 있다. 지표모델에 따라 시간, 공간적인 규모 등이 다르게 적용된다. 최적의 결과를 위해 주로 지표 실측값을 입력하여 계산되어진다. 토양수분, 적설량, 일부 식생수(canopy water) 등을 포함한 지표총수분량(Total Water Content, TWC)으로 계산되며 식(3)과 같이 표현된다(Rodell *et al.*, 2004; Fang *et al.*, 2009).

$$\Delta TWC = \Delta SM + \Delta SWE \quad (3)$$

지표총수분량은 지표의 수자원 변화를 표현한 자료로 대부분 토양수분에 의한 영향이 가장 많이 받는다. 이 연구에서는 Goddard Space Flight Center DISC에서 제공하는 Noah 2.7.1을 이용하였다. 이 자료는 수문학적 에너지와 관측 자료를 통해 토양수분, 적설량, 일부 식생수를 포함한 결과가 도출된다(Chen *et al.*, 1996). 2001년 1월부터 2014년 12월까지 168개월의 자료를 수집하였다. 수집한 자료는 2003년 1월부터 2007년 12월까지 산술평균을 기준으로 계산된 월 단위 지표총수분량변화(Total Water Content Anomaly, TWCA)이다. 본 연구에서는 수집한 자료의 산술평균 기준을 2002년 1월부터 2014년 1월로 수정하고 2003년의 지표총수분량변화는 2001년과 정확히 일치하여 오류로 판단하고 제외하였다(GRACE Tellus, 2017). 위도 및 경도 상에서 공간해상도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 이며 연구지역에 해당하는 여덟 구역($126^\circ E \sim 129^\circ E$, $35^\circ N \sim 39^\circ N$)을 이용하였다(그림 1).

3. 결과 및 토론

3.1 강수량 변동

그림 2는 1996년에서 2015년까지 월강수량과 연강수량을 표현한 것이다. 연구기간동안 연강수량의 55.2% (748 mm)가 6~8월에 집중되는 것으로 나타났다. 평균 연강수량은 1,350 mm/yr으로 기상청에서 제공하는 자료와 일치한다. 최대 연강수량은 2003년(1,857 mm/yr), 최소 연강수량은 2015년(948 mm/yr)에 발생하였다. 2003년에 비해 2015년 연강수량은 909 mm/yr 적게 발생하여 약 2배 차이난다. 평균 연강수량에 비해 강수량이 적었던 해는 1996년(1,064 mm/yr), 2001년(1,002 mm/yr), 2005년(1,286 mm/yr), 2008년(989 mm/yr), 2009년(1,199 mm/yr), 2013~2015년(1,164, 1,174, 948 mm/yr)이며 3~5년으로 반복되어 나타난다. 2013~2015년은 3년 동안 지속적으로 평균 연강수량에 보다 낮은 연강수량을 보이고 있다. 또한 그래프에는 포함되어 있지 않지만 2016년 연강수량은 1,272 mm/yr로 현재까지 적은 강수량을 보이고 있다. 평균 연강수량에 비해 강수가 크게 많았던 시기는 1998년(1,729 mm/yr), 2003년(1,857 mm/yr), 2011년(1,623 mm/yr)으로 나타났으며 스펙트럼분석(spectral analysis) 결과 약 4.4년의 주기를 보인다.

우리나라의 강수는 여름에 집중되어 있으며 약 3~5년마다 기상가뭄이 발생하는 것으로 나타나고 특히 2013~2015년은 역대 가장 가뭄이 심한 기간으로 강수가 지속적으로 감소하고 있다(Lee and Kwon, 2015).

3.2 댐저수량 변동

그림 3은 댐 28개를 선정하여 연구기간동안 댐저

수량 변화를 나타낸 것이다. 댐저수량은 강수량과 마찬가지로 계절적인 변화를 보인다. 하지만 댐의 월 저수량은 4~5월에 1,764 Mm³ (13.3%)로 비교적 적었으며 9~10월에 2,845 Mm³ (21.4%)로 비교적 높게 나타났다. 댐은 운영계획에 따라 홍수기와 갈수기의 피해를 방지하기 위해 인위적으로 저수량이 조절되어 월강수량과 상이한 결과를 보인다(An, 2008). 연구기간동안 평균 저수량은 6,403 Mm³이며 최대

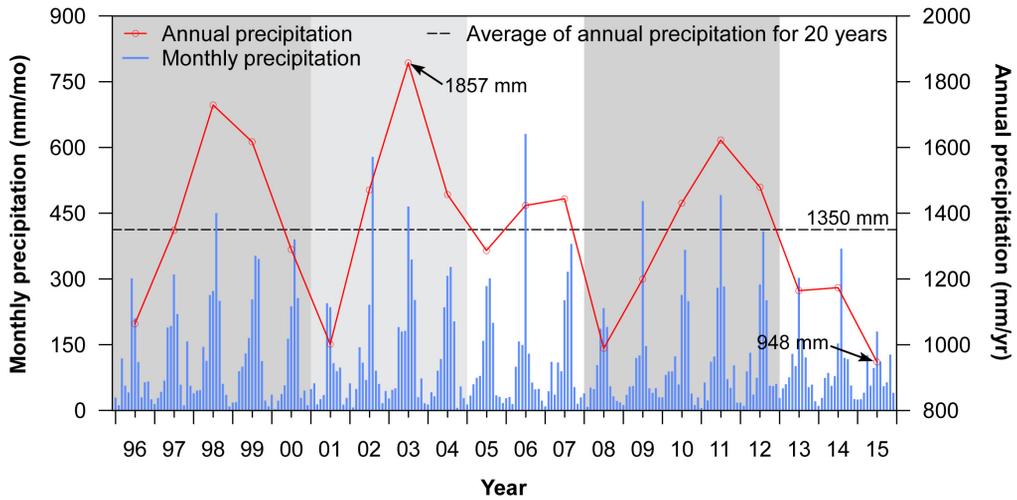


Fig. 2. Monthly precipitation with annual precipitation for 1996~2015 in Korea. The dark gray, gray, and white colors represent the 5, 4 and 3 year cycles, respectively. Precipitation data were used from 45 meteorological stations of KMA (www.kma.go.kr).

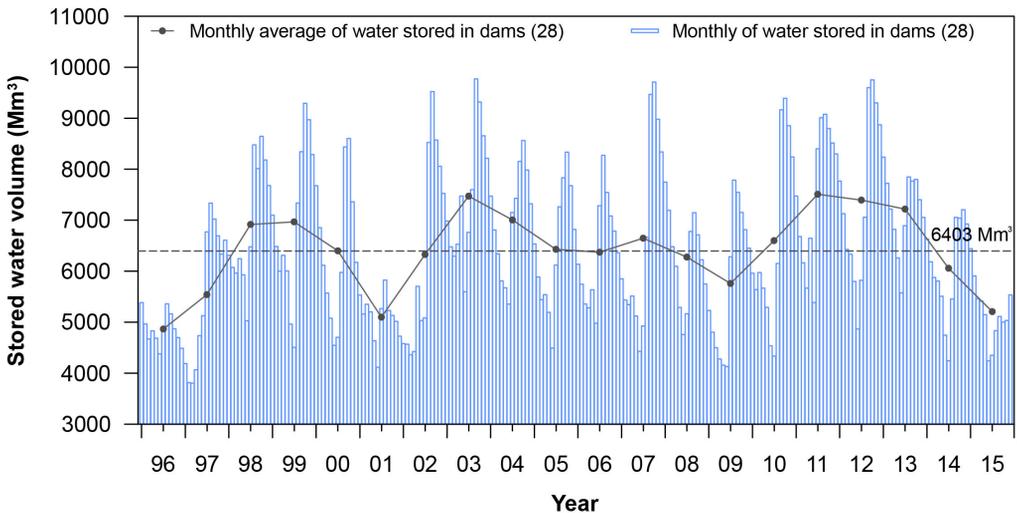


Fig. 3. Stored water of dam for 1996~2015 in Korea. The black line and blue bar chart represent the monthly average and monthly of water volume in 28 dams, respectively. Data are from K-water (www.kwater.or.kr).

월평균 저수량은 2011년(7,509 Mm³), 최소 월평균 저수량은 1996년(4,865 Mm³)에 나타났다. 1996년 평균 저수량은 2011년 평균 저수량 보다 2,644 Mm³ 적어 약 1.5배의 차이를 보인다. 댐은 매년 총 저수량이 증가하여 1996년에 최소 월평균 저수량을 나타냈다. 전체평균에 비해 평균 저수량이 적었던 연도는 1996, 2001, 2006, 2008, 2009, 2014, 2015년이며 크게 많았던 시기는 1998, 1999, 2003, 2011년으로 나타나 강수량과 유사한 변동을 보인다. 강수량과 댐저수량의 연단위자료를 이용한 선형회귀분석결과(linear regression) 높은 상관관계($r=0.75$ at $p<0.001$)로 유사한 변동을 보이는 것으로 나타났다. 댐은 인위적인 시설로 월강수량이 적거나 많았던 시기와 다소 차이가 있기 때문에 통계적으로 유의한 값은 도출되지 않는다.

3.3 댐 수위 변동

그림 4는 연구기간동안 28개 댐의 연평균수위(102.1 m, amsl)와 연강수량의 산술평균(1,350 mm)을 기준으로 각 댐의 이상편차의 중앙값과 연강수량의 이상편차를 나타냈다. 댐 수위는 ±4.0 m 이내 범위에서 변화하며 2007년에 2.3 m 감소하였고 1998년에는 3.9 m 증가했다. 연강수량이 크게 적었던 1996, 2001, 2005, 2014, 2015년에 댐 수위 이상편차의 중앙값은 각각 -0.6, -1.4, -0.5, -1.3, -1.3 m로 나타나 감소하는

것을 보인다. 강수량이 많았던 1998, 1999, 2003, 2011년 댐 수위 이상편차의 중앙값은 각각 3.9, 2.3, 2.3, 2.2 m로 나타나 증가하는 것을 보인다. 댐저수량과 저수위의 선형회귀분석결과 높은 상관관계($r=0.88$ at $p<0.001$)를 보이지만 공간적인 단위의 차이로 완전히 일치하지는 않는 것으로 판단된다. 연강수량과 댐 수위도 높은 상관관계($r=0.74$ at $p<0.001$)로 유사한 변동이 나타났다(표 2). 하지만 댐저수량과 마찬가지로 인위적인 요인이 크게 작용하여 월강수량과는 통계적으로 유의한 값이 도출되지 않았다.

3.4 지하수위 변동

그림 5는 충전관측정과 암반관측정의 이상편차의 중앙값을 나타냈다. 그림 5a는 123개 충전관측정의 평균지하수위(45.3 m, amsl)를 기준으로 이상편차의 중앙값을 나타냈다. 충전관측정의 지하수위는 ±0.4 m 이내 범위에서 변동하는 것으로 나타났다. 이상편차의 중앙값이 가장 낮았던 시기는 1996년으로 0.3 m 감소했고 가장 높았던 시기는 1998년으로 0.2 m 증가한 것으로 나타났다. 평균지하수위보다 지하수위가 낮았던 시기는 1996, 1997, 2001, 2005, 2006, 2008, 2009, 2014, 2015년으로 강수량이 적었던 시기와 높은 상관관계($r=0.76$ at $p<0.001$)로 유사한 변동을 보인다. 또한 연단위 자료를 이용한 선형회귀분석결과 댐 수위와 지하수위 높은 상관관계($r=0.77$ at

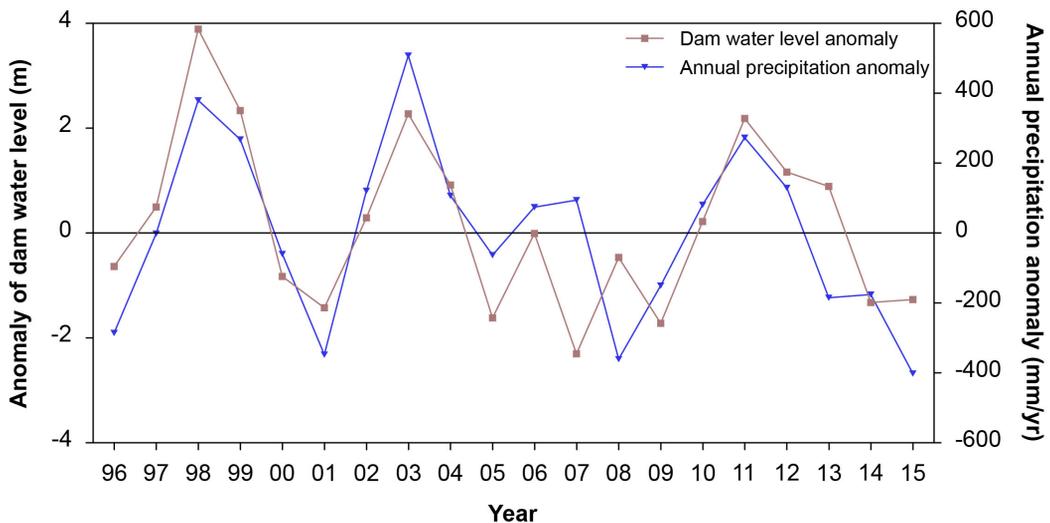


Fig. 4. Annual anomalies (deviation from the annual average of the study period) of the water level for dams with annual precipitation anomaly, from 1996~2015. Water level data were used from 28 dams.

Table 2. Results of linear regression for the comparison of Precipitation, groundwater level, dam water level, dam water storage, GRACE, and GLDAS.

Data set	^a n	p	r	r ²
Groundwater level in alluvial aquifer and Precipitation	240	0.000	0.760	0.578
	20	0.000	0.758	0.575
Groundwater level in alluvial aquifer and Dam water level	240	0.000	0.503	0.253
	20	0.000	0.767	0.588
Groundwater level in alluvial aquifer and GRACE	165	0.782	0.022	0.000
	14	0.491	0.201	0.040
Groundwater level in alluvial aquifer and GLDAS	168	0.000	0.710	0.504
	14	0.117	0.438	0.192
Groundwater level in alluvial aquifer and Groundwater level in bedrock aquifer	240	0.000	0.947	0.897
	20	0.000	0.954	0.910
Groundwater level in bedrock aquifer and Precipitation	240	0.000	0.727	0.529
	20	0.000	0.837	0.701
Groundwater level in bedrock aquifer and Dam water level	240	0.000	0.525	0.276
	20	0.000	0.797	0.635
Groundwater level in bedrock aquifer and GRACE	165	0.449	0.059	0.003
	14	0.243	0.334	0.112
Groundwater level in bedrock aquifer and GLDAS	168	0.000	0.744	0.554
	14	0.048	0.537	0.288
Precipitation and Dam water level	240	0.054	0.124	0.015
	20	0.000	0.740	0.548
Precipitation and Dam water storage	240	0.327	0.063	0.004
	20	0.000	0.752	0.566
Dam water level and Dam water storage	240	0.000	0.879	0.773
	20	0.000	0.760	0.578

^aNumber of data.

$p < 0.001$)로 유사한 변동을 보인다(표 2).

그림 5b는 309개 암반관측정의 평균지하수위(48.0 m, amsl)를 기준으로 이상편차의 중앙값을 나타냈다. 암반관측정의 지하수위는 총적관측정의 지하수위와 마찬가지로 ± 0.4 m 이내 범위에서 변동하는 것을 보인다. 이상편차의 중앙값이 가장 낮았던 시기는 1996년으로 0.4 m 감소했고 가장 높았던 시기는 1998년 0.3 m 증가한 것으로 나타났다. 평균지하수위에 비해 지하수위가 낮았던 시기는 1996, 2001, 2002, 2008, 2009, 2014, 2015년으로 선형회귀분석 결과 강수량과 높은 상관관계($r=0.73$ at $p < 0.001$)로 유사한 변동을 보인다. 총적관측정과 마찬가지로 연 단위 자료를 이용하였을 때 댐 수위와도 높은 상관관계($r=0.80$ at $p < 0.001$)로 유사한 변동을 나타냈다.

또한 총적관측정과 암반관측정은 높은 상관관계($r=0.95$ at $p < 0.001$)를 나타낸다(표 2). 총적관측정과 암반관측정의 관계는 Lee *et al.* (2006)과 Park *et al.* (2011)과 유사한 결과를 나타낸다. 따라서 우리나라의 총적대수층과 암반대수층은 수리적으로 연결되어 있으며 지표수와의 큰 시간(년) 단위에서는 유사한 변동을 보이는 것으로 판단된다.

3.5 총물저장량(TWS) 및 지표총수분량(TWC) 변동

그림 6은 2001~2015년의 연평균 총물저장량과 지표총수분량을 지하수위이상편차 중앙값과 함께 나타냈다. 총물저장량은 2002~2015년에 해당하며 최대값은 2010년에 6.8 mm, 최소값은 2013년에 -7.5 mm 으로 나타났다. 총적관측정과 암반관측정의 지

하수위는 2010~2013년 양의 값을 보여 증가하며 2014년과 2015년에 음의 값을 보여 감소하는 것으로 나타났다. 총물저장량은 강수량이 많았던 2011, 2012년과 강수량이 적었던 2013~2015년 모두 지속적으로 음의 값을 보여 감소하는 것으로 나타났다. 2008~2009년 지하수위는 크게 감소한 것을 나타내지만 총물저장량은 비교적 작은 폭으로 감소한 것을 나타낸다. 이는 총물저장량이 해역을 포함하며 지하수, 지표수 등을 모두 포함하기 때문으로 추정된다.

지표충수분량은 2001~2014년에 해당하며 최대 값은 2010년에 25.2 mm, 최소값은 2008년에 -31.6

mm으로 나타났다. 선형회귀분석결과 지표충수분량은 총적관측정($r=0.71$ at $p<0.001$)과 암반관측정($r=0.74$ at $p<0.001$)의 지하수위변동과 높은 상관관계를 보인다(표 2). 지표충수분량은 실측자료로부터 시뮬레이션을 통해 도출된 결과이며 해역을 포함하지 않기 때문에 총물저장량에 비해 통계적으로 유의한 결과가 도출된 것으로 판단된다. 총물저장량과 지표충수분량은 지하수 및 지표수와 유사한 변동시기를 보인다. 따라서 도출된 결과와 지하수, 지표수 등 관측 자료를 이용한 보정을 통해 정량적인 변화량을 추정할 수 있을 것이다(Sakumura *et al.*, 2014).

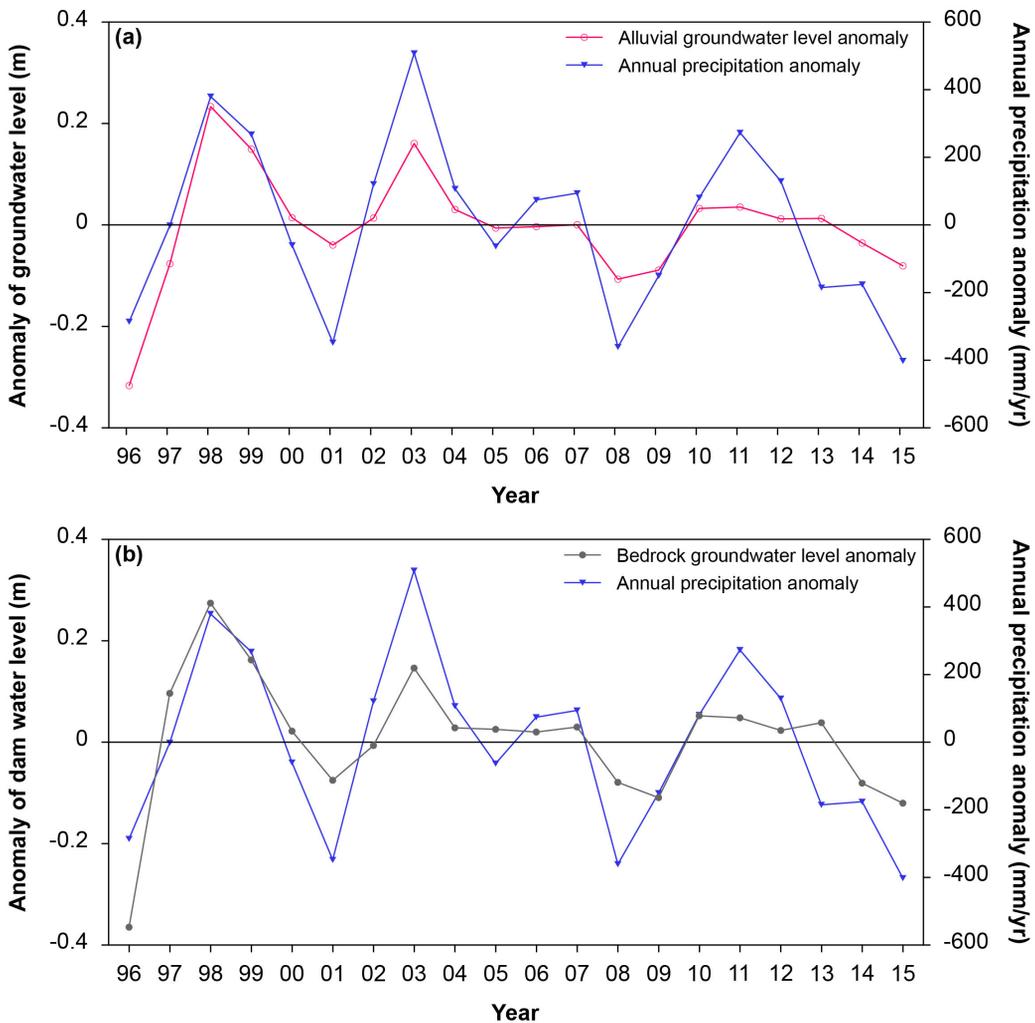


Fig. 5. Annual anomalies (deviation from the annual average of the study period) of the groundwater level for (a) alluvial NGMS (123) and (b) bedrock NGMS (309) with annual precipitation anomaly, from 1996~2015. Groundwater data are from National Groundwater Information Center (www.gims.go.kr).

4. 결론

본 연구에서는 우리나라의 강수량, 댐 수위, 지하수위 그리고 총물저장량과 지표총수분량 변동을 비교·분석하였다. 우리나라의 강수량과 댐저수량은 뚜렷한 계절적 변화를 보인다. 2013~2015년에 연강수량이 크게 감소한 것을 보인다. 최근 2016년 연강수량은 1,272 mm/yr로 평균 연강수량(1,350 mm/yr)에 보다 낮지만 2015년에 비해 증가하는 것을 보여 연구기간동안 연강수량은 약 4.4년의 주기를 보였다. 연구기간동안 댐저수량 및 수위는 1996, 2001, 2008, 2014, 2015년에 감소하여 강수량과 유사한 변동을 보인다. 또한 댐은 저장할 수 있는 저수량이 매년 증가했음에도 불구하고 2015년 댐저수량은 평균 저수량에 비해 작은 값을 보여 2015년이 가장 극심한 가뭄을 지시한다.

지하수위와 댐 수위를 비교·분석한 결과 강수에 댐 수위가 더 큰 폭으로 변화하는 것을 보인다. 지하수위는 댐 수위에 비해 작은 변동 범위를 보였지만, 댐과 유사한 시기(1996, 2001, 2008, 2014, 2015년)에 큰 지연시간(lag time) 없이 변동하는 것을 보였다. 이는 수집한 자료가 월단위이기 때문에 작은 규모의 지연시간까지는 확인하기 어려운 것으로 추정

된다. 더 작은 시간규모의 자료를 이용해 분석할 경우 댐 수위와 지하수위의 정량적인 지연시간을 판단할 수 있을 것이다.

총물저장량과 지표총수분량은 지하수, 지표수, 강수량과 유사하게 변동하는 경향을 보이고 2014년과 2015년에 음의 값을 보여 이 시기가 가장 극심한 수문학적 가뭄인 것으로 지시하였다. 총물저장량은 지하수, 지표수 등을 모두 포함하고 있으며 해역을 포함한 자료이기 때문에 지하수위 및 댐 수위와 직접적인 비교는 어렵지만 유사한 시기에 변동하였다. 따라서 총물저장량에 포함된 지하수량변화, 지표수량변화 등 요소를 분리하고 지역적으로 더 높은 해상도의 자료를 이용하면 정량적인 비교를 할 수 있을 것으로 추정된다. 지표총수분량은 지하수위 및 댐 수위와 비교적 높은 상관관계를 보여 토양수분과 적설량을 추정하는 연구에 기여할 수 있을 것이다. 또한 관측 자료와 함께 인공위성 및 시뮬레이션 자료는 수자원 평가 및 관련연구에 기여하여 연구효율을 높일 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재

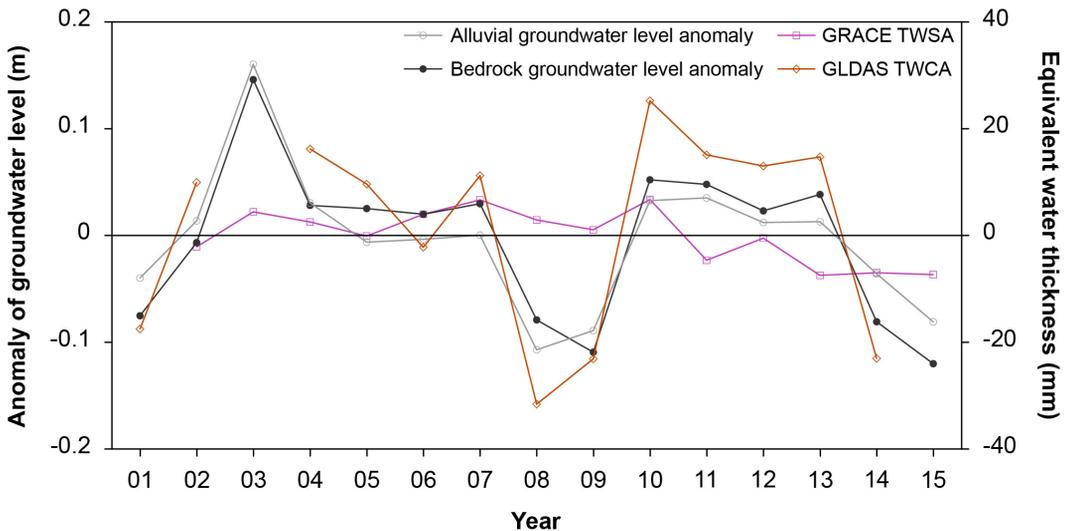


Fig. 6. Annual anomalies of the total water storage (TWSA) and total water content (TWCA) for the study area with annual of the groundwater level anomalies, from 2001~2015. GRACE and GLDAS data were used from 17 and 8 covering cells of satellite.

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2015R1A4A1041105). 본 논문이 보다 개선될 수 있도록 건설적인 조언과 비판을 해주신 익명의 심사위원님들께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- An, C.J., 2008, Reservoir operation plan for drought preparedness. *Journal of the Korea Water Resources Association*, 41, 66-73 (in Korean).
- Castle, S.L., Thomas, B.F., Reager, J.T., Rodell, M., Swenson, S.C. and Famiglietti, J.S., 2014, Groundwater depletion during drought threatens future water security. *Geophysical Research Letters*, 41, 5904-5911.
- Chae, G.S., Kim, H.S., Lim, Y.A. and Kim, B.Y., 2016, Measurement of agriculture damage for drought. *Korea Rural Economic Institute (KREI)*, 16, 54-58 (in Korean).
- Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H., Koren, V., Duan, Y., Ek, M. and Betts, A., 1996, Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101, 7251-7268.
- Fang, H., Beaudoin, H.K., Teng, W.L. and Vollmer, B.E., 2009, Global Land Data Assimilation System (GLDAS) products, Service and Application from NASA Hydrology Data and Information Service Center (HDISC). *Proceeding of ASPRS 2009 Annual Conference*, April 28-May 2, 20090005038.
- Gleeson, T., Befus, K.M., Jasechoko, S., Lujendijk, E. and Cardenas, M.B., 2016, The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9, 161-170.
- Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Tellus, 2017, <https://grace.jpl.nasa.gov> (June 10, 2017).
- Heo, B.Y., 2011, Natural disaster data book 2009: Impact of natural hazards. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 11, 78-83 (in Korean).
- Jo, Y.J., Lee, J.Y., Lim, S.Y. and Hong, G.P., 2009, A review on potential effects of installation and operation of ground source heat pumps on soil and groundwater environment. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14, 22-31 (in Korean with English abstract).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA), 2015, Ministry of land infrastructure, and transport R&D: Water resources. 11-BE552989-000002-11 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2011, Climatological normals of Korea. 665 p (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2016, <http://www.kma.go.kr> (April 20, 2016).
- Korea Water Resources Corporation (K-water), 2016, <http://www.kwater.or.kr> (May 12, 2016).
- Korea Water Resource Corporation (K-water), 2017, MyWater. <http://www.water.or.kr> (June 1, 2017).
- Landerer, F.W. and Swenson, S.C., 2012, Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, 48, 11, doi:10.1029/2011WR011453.
- Lee, J.Y., 2015, Challenges of groundwater as resources in the near future. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 1-9.
- Lee, J.Y. and Kwon, K., 2015, Groundwater resources in Gangwon Province: Task and perspectives responding to droughts. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 585-595 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Kwon, K., 2016, Current status of groundwater monitoring networks in Korea. *Water*, 8, 168, doi:10.3390/W8040168.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic times series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 229, 190-201.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Lee, J.M., Ahn, K.H., Won, J.H., Moon, S.H. and Cho, M., 2006, Parametric and Non-parametric Trend Analysis of Groundwater Data Obtained from National Groundwater Monitoring Stations. *Journal of Soil & Groundwater Environment*, 11, 56-67 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Land, 2015, Korea list of rivers in 2014. 28-29 (in Korean).
- National Groundwater Information Center (NGIC), 2016, <http://www.gims.go.kr> (May 22, 2016).
- Park, Y.C., Jo, Y.U. and Lee, J.Y., 2011, Trends of groundwater data from the Korean National Groundwater Monitoring Stations: indication of any change? *Geosciences Journal*, 15, 105-114, doi:10.1007/S12303-011-0006-Z.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D. and Toll, D., 2004, The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 381-394.
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J.S., Nigro, J. and Wilson, C.R., 2007, Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15, 159-166.
- Ryu, Y.C., 2011, River & Culture: Water and Health. *Korea River Association*, 7, 60-64 (in Korean).
- Sakumura, C., Bettadpur, S. and Bruinsma, S., 2014, Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE

- time-variable gravity field models. *Geophysical Research Letters*, 41, 1389-1397.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P. and Vogt, J., 2014, World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34, 2792-2804.
- Swenson, S.C., 2012, GRACE monthly land water mass grid NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. PO.DAAC. CA, USA, <http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005> (March 2, 2017).
- Swenson, S.C. and Wahr, J., 2002, Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *Journal of Geophysical Research*, 107, doi:10.1029/2001JB000576.
- Swenson, S.C. and Wahr, J., 2006, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2005GL025285.
- Tak, H.M., Kim, S.H. and Son, I., 2013, A study on distributions and spatial properties of geomorphological mountain area. *Journal of Korean Geographical Society*, 48, 1-18 (in Korean with English abstract).
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F. and Wakins, M.M., 2004, GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305, 503-505.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2015, Safe and Sustainable Water Resource: Strategic Research Action Plan 2016-2019. 44 p.
- USGCRP (United State Global Change Research Program), 2016, The Impact of Climate Change on Human Health in the United States. 332 p.
- Whisnant, J.A., Hansen, C.V. and Eslick, P.J., 2015, Groundwater-level and storage-volume changes in the Equus Beds Aquifer near Wichita, Kansas, predevelopment through January 2015. *United State Geological Survey (USGS)*, 2015-5121, 27 p.
- White, W.R., 2010, World water: Resources, Usage and the role of man-made reservoirs. *Foundation for water research*, 60 p.

Received : May 28, 2017

Revised : July 4, 2017

Accepted : July 4, 2017