

강원도의 지하수 현황: 가뭄대비 과제와 전망

이진용[‡] · 권기덕
강원대학교 지질학과

요 약

최근 발생한 우리나라 중부지방 및 강원도의 가뭄으로 큰 고통을 겪고 있다. 기후변화와 관련하여 이런 가뭄은 더욱 빈발하며 강도도 더 세질 것으로 전망하고 있다. 가뭄저감대책으로 중앙과 지방정부는 다양한 방안을 내놓고 있으며 지하수 신규개발, 지하댐, 인공함양 등도 제시되고 있다. 일반론으로서 이들의 적용성과 효과는 타당하지만 보다 효과적이고 장기적인 대책이 되기 위해서는 강원도와 같이 지질학적, 수리지질학 및 지리적 특성이 다른 곳은 지역에 특화된 검토가 필요하다. 또 지하수자원의 지속적 이용과 관리를 위한 상시 예산과 지방정부차원의 전담조직도 필요하다. 미증유의 대가뭄을 겪고 있는 미국 캘리포니아는 주 역사상 처음으로 지속가능지하수관리법의 제정을 통해 지방정부에게 지하수관리 예산과 권한을 부여하고 또 전담조직을 신설토록 하였다. 한편 기후변화시대에 지속가능사회를 위해서는 추가적인 수자원의 확보도 중요하지만 국민들의 물에 대한 인식전환을 통해 물절약을 생활화하도록 하는 것이 보다 중요하다.

주요어: 지하수, 기후변화, 가뭄, 지하댐, 인공함양, 강원도

Jin-Yong Lee and Kideok Kwon, 2015, Groundwater resources in Gangwon Province: Tasks and perspectives responding to droughts. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 6, p. 585-595

ABSTRACT: Korea is suffering from a severe drought in its central region, particularly in Gangwon Province. Global climate change will cause more frequent and worse drought conditions. Accordingly, the national government has proposed new water management plans that include the construction of subsurface dams and artificial recharge systems, as measures to prepare for and mitigate the depletion of water resources. We discuss whether the technology implementation meets the unique geology, hydrogeology, and geography of Gangwon Province. For the management plans to be sustainable in the long term, local governments must possess the authority to run permanent organizations dedicated to groundwater resources management, rather than temporary organizations formed only for drought seasons. Recently, the State of California, USA which is experiencing an unprecedented drought enacted landmark legislation called the Sustainable Groundwater Management Act. This legislation gives budget and management authority related to the water resources to local governments with the role of the State being limited. While government-level measures are imperative to secure water resources, the role of household practice to conserve water becomes more paramount in a sustainable society with the climate ever changing.

Key words: groundwater, changing climate, drought, underground dam, artificial recharge, Gangwon Province

(Jin-Yong Lee and Kideok D. Kwon, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

1. 서 론

지하수는 일반적으로 재생가능한 자원으로 인식되며 수자원의 최후의 보루로 여겨진다(Lee, 2015a). 우리가 잘 인식하지 못하고 있으나 인류가 사용하는 자연자원 중에서 석유, 석탄보다도 가장 많이 소모하

고 있는 것이 바로 지하수이다. 2001년 기준으로 전 세계적으로 연간 600-700 km³의 지하수를 이용(양수)하고 있으며 경제적 가치로 환산하면 약 300억 유로(€)를 넘는 것으로 추정하고 있다(Struckmeier et al., 2005). 그러나 이 지하수 자원은 항상 지속가능하지는 않으며 인류가 어떻게 사용하느냐에 따라

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

그 지속성이 결정된다(Lee, 2015b). 21세기 들어 지하수 자원은 기후변화(주로 강수량과 패턴의 변화)에 따른 지하수 함양의 변화, 도시와 산업발전에 따른 과거에 없었던 다양한 오염의 발생, 또 해수면 상승(해수침투)에 따른 해안지역 지하수의 감소 등의 위협에 직면해 있다(Lee, 2015a).

전 세계 지하수 사용의 대부분과 그리고 최근의 증가분은 흔히 세계적 농업국가로 알려진 인도, 중국, 미국, 파키스탄, 이란, 방글라데시 등이 주도하고 있다(Lee, 2015a; NGWA, 2015). 이들 나라들의 지하수 용도를 살펴보면 거의 대부분 식량생산을 위한 관개용수로 이용하고 있다(Wang *et al.*, 2012). 예를 들어 인도는 89%, 중국은 54%, 미국은 71%, 그리고 파키스탄은 94%의 관개용수를 지하수에 의존하고 있다(NGWA, 2015). 한편 우리나라의 경우 지하수 이용의 49%가 관개용수이다. 그러므로 과도한 사용(exploitation) 혹은 기후변화 등으로 소중한 지하수 자원의 확보에 문제가 발생한다면 이는 곧 인류의 식량자원에 치명적 위기를 초래하게 될 것이 자명하다. 이와 같은 우려는 이미 최근의 미항공우주국(NASA)의 연구를 통해 극명하게 부각되고 있다. Richey *et al.* (2015)과 Famiglietti (2014)는 이미 전 세계 대규모 주요대수층 13개는 돌이킬 수 없는 고갈 직전에 직면하였다고 경고하였다. 이에는 미국의 중앙대평원(네바다, 캔자스, 텍사스), 캘리포니아, 중국 남부, 인도 북부, 사우디아라비아 등이 해당되며 이들이 주요 농업지대라는 것이 우리에게 시사하는 바가 크다.

한편 미국해양대기청(NOAA)에 의하면 현재 점증하는 기후변화의 영향으로 21세기 말에는 전세계의 강수량이 크게 재편될 것으로 전망하고 있다. 고위도 지방(캐나다, 영국 북부, 시베리아, 일본 북부 등)은 지금보다 연간 5-20 인치의 강수가 더 발생할 것으로 예측하고 있으며 반대로 중저위도 지방은 상대적으로 강수량이 감소할 것으로 보고 있다(NOAA, 2015). 물론 이러한 전망은 기후모델에 따라 달라질 수 있으며 또 지구적 규모 예측이므로 구체적이고 국지적인 예측은 틀릴 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 일반적으로 동의하는 부분은 바로 지금과는 다른 강수량상을 보일 것이고 또 그 지역적 편차와 계절적 편차가 더욱 커질 것이라는 전망이다(Lee *et al.*, 2012). 이런 강수의 편차와 극심한 변동성(폭우,

가뭄)은 지하수를 비롯한 수자원의 확보와 관리를 더욱 어렵게 할 것이다.

최근에 지속되고 있는 미국 캘리포니아와 우리나라(주로 중부, 강원도 지역)의 극심한 가뭄은 우리로 하여금 기후변화시대의 물관리 중요성과 수자원에서 지하수의 역할을 다시 한번 생각하게 하는 계기가 되었다. 미중유의 가뭄을 겪고 있는 캘리포니아는 농민과 시민들의 거센 반발에도 불구하고 지하수에 대한 공수개념을 포괄하는 지속가능 지하수관리법(Sustainable Groundwater Management Act)을 제정하고 강제절수를 시행하고 있다. 산불 등을 포함한 악화일로의 가뭄영향을 조금이라도 줄여보고자 잔디 물주기 금지, 물 낭비자에게 벌금부과, 해수욕 후 샤워금지, 심지어 최근 로스엔젤레스에서는 물 과다소비 시민의 명단을 공개하는 모욕처방을 내놓기도 하였다.

우리나라 중부지방과 강원도의 가뭄도 이에 못지 않다. 중앙정부와 각 지방자치단체에서는 가뭄극복을 위한 다양한 조치 등을 마련하여 시행하고 있다. 각종 언론매체나 학자들 사이에서는 4대강 물(보 등)의 이용, 소규모 댐의 건설, 하천과 저수지의 준설, 또 지하수 분야에서는 긴급 지하수관정의 굴착, 지하댐, 인공함양 등이 제기되는 여러 방법 중의 일부이다(Byun, 2015). 그러나 이런 여러 방법 등의 일부는 일반론으로 구체적 각론에서는 각 지역이 처한 현실을 제대로 반영하지 못하고 있다는 문제 제기도 있다. 또한 중장기적 상시대책을 마련하지 못하고 임시방편으로는 향후 빈발한 가뭄에 대한 대책으로 효과적이지 못하다는 지적도 있다(Lee, 2015b).

본 논문에서는 미국 캘리포니아에서 발생하고 있는 가뭄의 현황과 이와 관련한 지하수 관련 조치들을 살펴보았다. 또한 국내 사례로 강원도의 지하수 현황과 가뭄대책으로 제시되는 여러 가지 방법에 대한 적용가능성을 검토하였다. 이를 통해 보다 효과적이고 장기적인 기후변화 및 가뭄 대책이 수립되는데 일조하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 캘리포니아의 대가뭄과 지하수

캘리포니아는 미국 서부해안에 위치하며 미국에서 가장 인구가 많은 주이다. 또 캘리포니아주는 최

근 50년 이상 농업의 경제수입 측면에서 제1의 주 (state)로 농업용수를 가장 많이 소비하고 있으며 미국 전체 관개용수의 1/4 이상을 사용하고 있다(Paggi, 2011). 평소에는 주에서 사용하는 물의 약 30%가 지하수로 공급되지만 가뭄 때에는 60% 이상(75% 까지)으로 의존율이 증가한다(Carle, 2004). 1900년대 이후 캘리포니아는 기후변화 등으로 9번의 큰 가뭄을 겪었으나 2012년에 시작되어 지금까지 지속되고 있는 이번 가뭄이 과거 1,200년 내 가장 극심한 것으로 알려진다(LA Times, 2014). 작년 10월의 경우 주 전체의 약 60% 지역이 극심한 가뭄(D3: Extreme Drought)보다 더 심각한 예외적 가뭄(D4: Exceptional Drought) 단계로 분류되었다. 그 사이 일부지역에는 상당량의 비가 왔음에도 불구하고 1년이 경과한 지금도 D4단계의 가뭄이 46% 지역에 이르며 거의 주 전체(92.27%)가 심각한 가뭄(D2: Severe Drought)에 처해있다(그림 1; The National Drought Mitigation

Center, 2015).

캘리포니아 전역의 주요 호수와 댐의 저수량을 살펴보면(2015년 11월 3일 기준) 총 저수량(total capacity)의 7-36% (평균 23.1%)만 남아있으며 과거 평균 저수량 대비 15-87% (평균 39.1%)가 저장되어 있다(DWR, 2015). 대표적인 농업지역인 산호아킨 밸리(San Joaquin Valley)의 엑스치구어(Exchequer) 저수지의 경우 총저수량의 단 7%, 평균저수량의 단 15%만이 남아있어 가뭄의 영향을 극명하게 보여준다(DWR, 2015). 문제는 이런 가뭄 상태가 조만간 해소될 것으로 전망되지 않고 있어 주 전체에 심각한 불안과 경제적 타격을 야기하고 있다.

한편 이와 같은 대가뭄은 연관된 여러 가지 악영향을 낳고 있는데 평상시(2001-2011년)와 비교하여 2012-2015년의 수력발전(hydroelectric power generation)은 거의 절반에 불과하다(U.S.EIA, 2015). 또한 가뭄으로 마른 대지로 인해 주 전역에 걸쳐 다수의 대규모

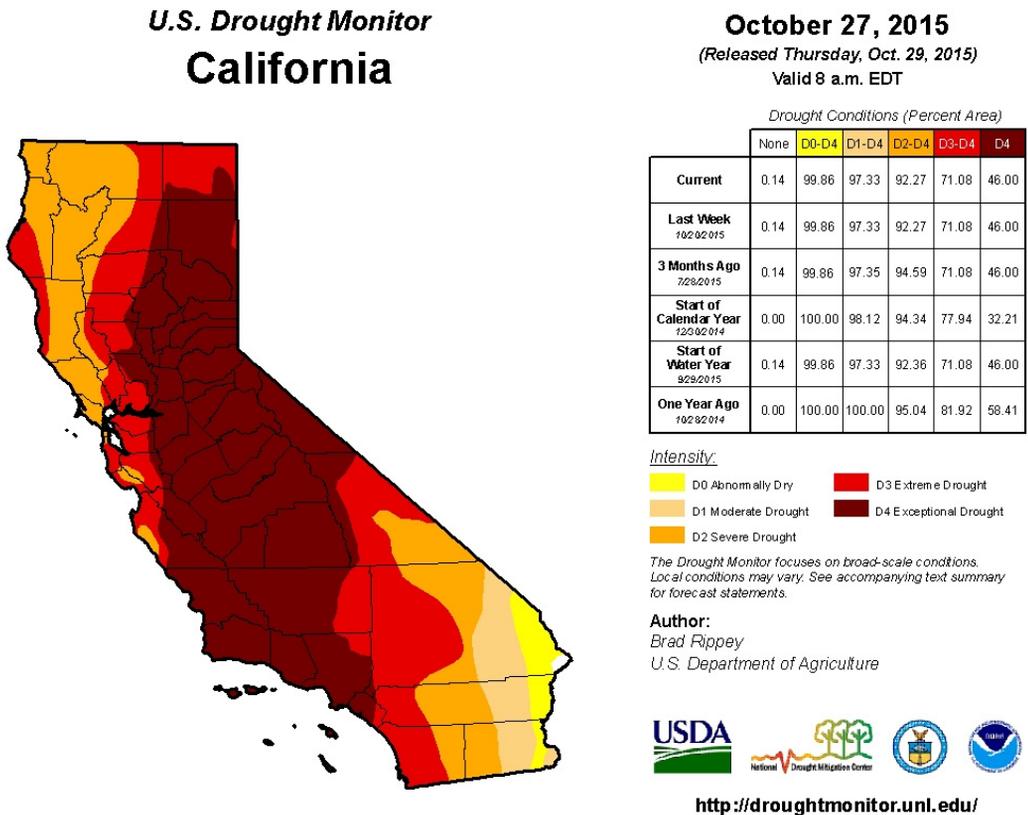


Fig. 1. Drought level of California as of October 27, 2015 (source: <http://droughtmonitor.unl.edu/>).

모 화재가 끊이지 않고 발생하고 있으며 현재 진행 중인 대규모 화재만도 7건에 이른다(CAL FIRE, 2015). AghaKouchak *et al.* (2015)에 의하면 이번 가뭄으로 캘리포니아주에서 고사한 나무만도 1천 2백만 그루가 넘는다고 한다. 그 결과 캘리포니아의 옐로스톤, 포도 농장 등이 거의 초토화되었다. 흥미로운 것은 이번 대가뭄이 흔히 인위적인 지구온난화의 영향으로 인식하지만 오히려 자연적인 기후변화가 대부분의 원인이며 인위적 온난화의 영향은 8-27%에 불과하다고 한다(Williams *et al.*, 2015). 물론 이 정도의 인위적 온난화 영향만으로도 파괴적인 결과를 초래할 수 있다는 것은 자명하다.

캘리포니아주는 1920-2013년 사이에 중앙밸리(산호아킨 밸리와 새크라멘토밸리)로부터 41조 갤런의 지하수를 추출하여 사용하였고 이는 전세계 모든 사람이 30년간 먹는 물에 해당하는 양이다(DWR, 2014). 이와 같은 과도한 지하수개발로 인하여 주 전역에 걸쳐 지반침하가 발생하고 있으며 특히 산호아킨 지역의 경우 1925-1977년 사이에 약 30피트(9.1 m)의 지반침하가 발생하였다(Galloway *et al.*, 1999). 적정한 지하수 개발의 경우 함양량과 균형을 이루어 다시 채워지므로 지하수 고갈이 발생하지 않으나 캘리포니아의 경우 돌이킬 수 없는 지경으로 심각한 지하수 고갈이 진행되고 있다. 2003-2006년 사이에는 연간 0.5 km³으로 발생하던 지하수 고갈이 최근 2006-2010년에는 연간 23.9 km³의 속도로 급격한 고갈이 발생하였다(Famiglietti *et al.*, 2011; Famiglietti, 2014). 설상가상으로 최근의 대가뭄으로 지하수 고갈이 파괴적 단계에 까지 도달하여 이 가뭄 끝나더라도 지하수량은 계속 감소할 것으로 예측하고 있다(Parker, 2015).

캘리포니아 주정부는 이번 가뭄으로 167년 주역 사상 최초로 강제절수를 명령하고 화장실 변기, 수도꼭지 규제기준도 강화하고 찬연잔디를 인조잔디로 교체시 보조금을 제공하고 또 물 낭비에는 벌금을 부과하는 등 가뭄극복을 위한 온갖 수단과 방법을 다하고 있다. 그러나 아이러니하게도 캘리포니아 주는 가뭄 시 용수의 60% 이상을 지하수에 의존하고 있음에도 불구하고 이번 가뭄 이전에는 지하수를 공공재(public good)로 인식하지도 않았고 특별한 관리도 하지 않았다. 그러나 미증유의 가뭄에 직면하여 브라운 주지사는 농민들의 극렬한 반대에도 불

구하고 2014년 9월 16일 캘리포니아 역사상 처음으로 지속가능 지하수관리법(Sustainable Groundwater Management Act)에 서명하였다(State of California, 2015). 이 법은 지방정부로 하여금 지하수관리부서(Groundwater Sustainability Agencies)를 신설하여 지하수 보전을 위한 계획을 수립하고 지하수 저장을 촉진하며 함양에 저해되는 악영향을 규제토록 하는 등의 각종 권한과 기술적, 재정적 지원을 규정하고 있다(Christian-Smith and Abhold, 2015; State of California, 2015).

이번 가뭄을 계기로 캘리포니아 정부와 주민은 지하수가 더 이상 공짜의 사적 재산이 아닌 비싼 공공의 재산이라는 것을 인식하였다. 지하수 없이는 엄청난 부와 풍요를 누리던 농업도 캘리포니아에서 불가능하다는 것을 알게 되었다. 그러나 수십 년간 공짜로 이용하던 소위 자유재였던 지하수의 성격변화에 대하여 관련 공무원과 주민들(특히 농민들)이 어떻게 적응해 나가고 또 어떤 보전노력을 할 것인지가 캘리포니아 지하수 자원의 지속가능성을 결정하는 중요한 포인트가 될 것으로 보인다.

2.2 강원도의 가뭄과 지하수

2.2.1 기온과 강수량 변화

최근 우리나라의 경우에도 중부지역과 강원도에 극심한 가뭄으로 큰 고통을 받고 있다. 2014년부터 시작된 이번 가뭄은 일년 넘게 진정의 기미를 보이지 않으며 강원도의 경우 평년대비 52% 정도의 강수량만 있어 1973년 관측 이래 최악의 가뭄을 기록하고 있다(KMA, 2015a). 또 내년 장마 이전에 이 가뭄이 해소되지 않을 것으로 예상하고 있다(Byun, 2015). 이로 인해 소양강댐, 화천댐의 저수량이 평년(과거 12년)에 비해 약 60% 정도에 불과하며 농어촌공사가 관리하는 저수지의 저수량도 이와 크게 다르지 않다(Jeon, 2015).

한편 강원도의 연평균 기온은 관측을 시작한 1970년대 이후 지속적으로 증가하여왔다(그림 2). 선형회귀분석에서 모두 양의 기울기로 최소 0.0023°C/yr(철원), 최고 0.056°C/yr(영월), 그리고 평균 0.032°C/yr의 온도상승 속도를 보였다. 특히 고도가 높아 다른 지역보다 현저히 기온이 낮은 대관령의 경우에도 연 0.034°C의 지속적인 기온상승(그림 2의 회귀선 참조)을 보여 강원도 전역에서 뚜렷한 온난화의

영향을 보여준다(Cheon *et al.*, 2014). 기온상승 경향의 통계적 유의성을 알아보기 위하여 Mann-Kendall 경향분석(Hammer, 2015)을 실시한 결과도 99% 신뢰수준에서 7지역(64%: 속초, 대관령, 춘천, 강릉, 원주, 영월, 홍천)에서 강한 증가 경향성을 보였다. 이러한 온난화(기온상승)가 강수의 변동과 직접적 연관성을 가질 것으로 사료된다.

그림 3은 1970년부터 2014년까지 강원도 11개 지역의 강수량을 보여준다. 단속회귀분석에서는 대관령과 홍천을 제외하고는 모두 양의 기울기(2.66-12.38 mm/yr, 평균 5.81 mm/yr)를 보여 해당기간 동안 강수량이 조금씩이나마 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 통계적 유의성에서 보았을 때는 철원의 강수량만이 95% 신뢰수준에서 증가경향성이 명확히 있는 것으로 평가되었다. 흥미로운 것은 1988년 이후부터 연강수량의 변동성(inter-annual variability)이 대폭 증가한 점이다. 예를 들어 대관령 지

역의 경우 1991년은 2,461.5 mm, 1995년은 1,337.8 mm, 1998년은 2,998.3 mm, 2011년은 1,551.7 mm, 2002년은 2,697.6 mm, 2008년은 1,128.6 mm, 2011년은 1,762.1 mm, 2013년은 1,052.3 mm 등 몇 년 사이에 거의 1,000 mm 이상의 강수량 차이를 보이며 이러한 급격한 강수량 변동성이 점점 강화된다는 점이다.

이는 우리나라 전체의 기후변화 추세 분석과 잘 통하고 있다. 기상청(KMA, 2015b)의 지난 약 100년간(1912-2008)에 대한 분석에 따르면 우리나라 평균 기온 상승률은 0.017°C/yr이고 전반적으로 강수량이 증가하지만 그 변동성이 매우 커졌다는 것이다. 청정지역인 강원도의 경우 기후변화의 영향이 더 뚜렷하여 기온상승률이 다른 어떤 지역보다 크며 강수량의 변동성도 훨씬 더 커져 집중강우가 증가하고 강설이 줄어드는 경향을 보이고 있다(Lee *et al.*, 2012; KMA, 2015b). 그런데 이러한 강수량 변동성의 증가, 집중호우 및 강설 감소는 수자원 이용과 관리 측면에서는 매우 불리한 상황이며 지하수 함양에도 매우 큰 악영향을 미친다(Lee, 2015b).

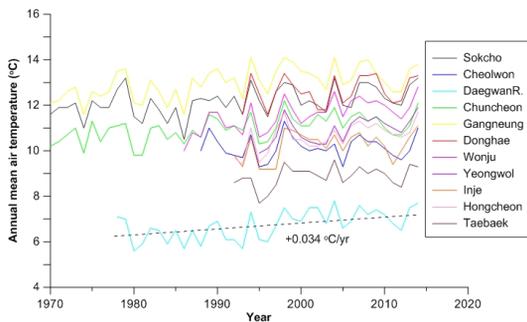


Fig. 2. Changes of annual mean air temperatures in major localities in Gangwon Province. The dotted line represents a linear regression result of temperature in the Daegwanryeong area. Data are from KMA (2015a).

2.2.2 지하수 현황

강원도의 경우 1996년(정부 지하수통계 시작연도)에 지하수관정이 36,924개소로 집계되었다(그림 4). 그러나 이런 지하수 관정 수는 해가 가면서 지속적으로 증가하여 2013년에는 100,111개소 이르렀다. 이는 평균적으로 연간 3,717개소의 지하수 관정이 신규로 개발되었음을 의미한다. 2013년 기준으로 지자체별로 보면 원주시(23,135개소: 23.1%)에 가장

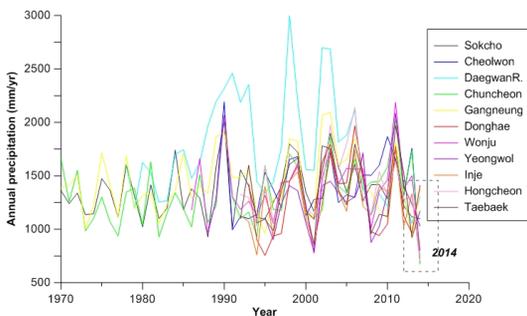


Fig. 3. Annual precipitation in major localities in Gangwon Province for 1970-2014. Data are from KMA (2015a).

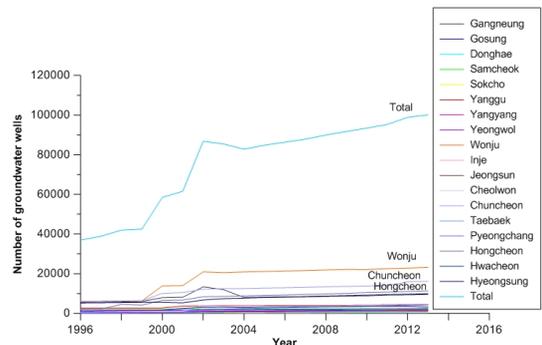


Fig. 4. Number of groundwater wells for 1996-2013 in Gangwon Province. Data are from NGIC (2015).

많은 지하수 관정이 개발되었으며 춘천시(16,142개소: 16.1%), 홍천군(11,364개소: 11.4%) 순이다. 태백시는 지하수 관정수가 가장 적은 249개소로 전체의 0.2%에 불과하다. 단위면적당(km²) 개발 관정수는 도 평균은 5.94개소이며 원주시가 가장 많은 26.5개소, 춘천시 14.5개소 그리고 횡성군이 9.9개소 순이다. 태백시는 관정 개수와 더불어 개발밀도도 가장 적은 km²당 0.8개소이다.

한편 지하수 이용량을 살펴보면 1996년에 연간 1.01억 m³이었던 것이 2005년에는 2.15억 m³으로 급증하였고 그리고 2013년에는 2.18억 m³에 육박하였다(그림 5). 이는 평균적으로 연간 6,848 m³의 증가율을 의미한다. 지자체별로 보면 지하수 관정수와 유사하게 원주시가 가장 많이 이용하며(2013년 기준, 49.9백만 m³, 22.9%), 다음이 춘천시(33.5백만 m³, 15.4%) 그리고 삼척시(22.2백만 m³, 10.2%) 순

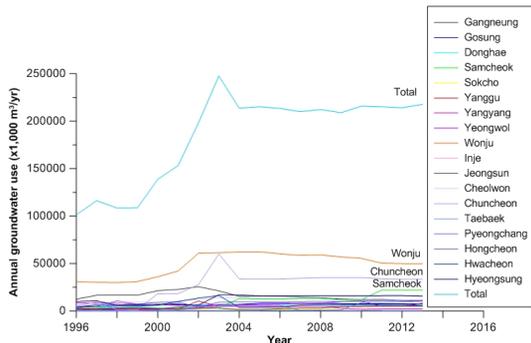


Fig. 5. Annual groundwater use for 1996-2013 in Gangwon Province. Data are from NGIC (2015).

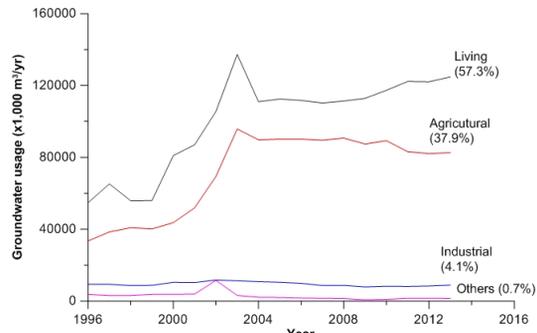


Fig. 6. Groundwater usage for 1996-2013 in Gangwon Province. The value in parenthesis represent the amount of groundwater used only in the year 2013. Data are from NGIC (2015).

이다. 이용량에 있어서도 역시 태백시(57만 m³, 0.3%)가 가장 적은 것으로 나타났다. 흥미로운 것은 2003년 이후 지하수이용량은 증가세가 극히 미미한 반면 지하수관정의 수는 꾸준히 증가하였다(그림 4). 관정수는 크게 늘어나는데 이용 지하수량은 크게 늘지 않는다는 얘기로 소형 개인관정 위주의 난개발이 의심되는 상황이기도 한다(Lee, 2015b). 이와 같은 난개발을 규제·관리하지 않는다면 귀중한 지하수 자원의 비효율적 이용과 지하수 오염을 초래할 가능성이 크다.

그림 6은 강원도 지하수의 용도별 이용현황을 보여준다. 전 기간에 걸쳐 지하수 용도는 생활용, 농업용, 공업용 그리고 기타 순으로 나타났다. 2003년까지 생활용과 농업용 지하수 이용이 급격하게 증가하였으나 이후에는 생활용은 완만한 증가세를 유지하고 있으나 농업용은 정체를 보이고 있다. 2013년을 기준으로 보면 생활용이 57.3%, 농업용이 37.9%, 공업용이 4.1% 그리고 나머지 0.7%가 기타용도이다. 그러므로 지하수 확보가 어려울 경우 생활과 농업활동에 치명적인 영향을 줄 것으로 사료된다.

상기와 같은 지하수 개발이용은 주변 지하수위에도 영향을 준다. 그림 7은 국토교통부(한국수자원공사)가 운영하는 강원도의 국가지하수관측망 월평균 지하수위(1996-2015년 8월) 자료에 대한 선형회귀 분석 결과를 보여준다. 소수의 지역을 제외하고는

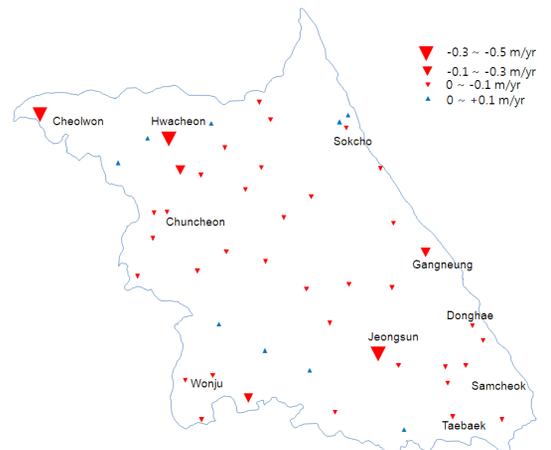


Fig. 7. Changes in the average of groundwater level per year (1996-2015) in Gangwon Province. The water level data are from National Groundwater Monitoring Stations (NGIC, 2015).

Table 1. Summary of some technical countermeasures proposed by national and local governments to mitigate severe droughts (sources are not specified).

Province	Countermeasures (short- and long-term)
General	① Replacing leaking old waterworks pipes ② Constructing new small and medium dams ③ Excavating bottoms of rivers, streams and reservoirs ④ Implementing artificial and managed aquifer recharges ⑤ Constructing underground dams ⑥ Developing new groundwater wells ⑦ Implementing integrated water management system
Chungnam	① Limiting living water supply ② Replacing leaking old waterworks pipes ③ Constructing aqueducts to reservoirs/dams of 4 Rivers ④ Developing alternatives for living/agricultural water ⑤ Repairing local rivers ⑥ Saving water in homes
Gangwon	① Limiting living water supply ② Developing new groundwater wells ③ Providing drinking water to suffering homes ④ Excavating bottoms of reservoirs, rivers and streams ⑤ Developing alternatives for local waterworks water ⑥ Constructing new reservoirs and dams ⑦ Reuse of used waters

강원도 전역에서 지하수위의 유의한 하강경향이 나타났다. 최근 진행중인 가뭄이 일부 영향을 미쳤을 것으로 예상하나 이를 제외하더라도 수위의 하강경향은 뚜렷하다. 특히 철원, 화천, 정선, 강릉에서는 큰 폭의 지하수위 하강이 나타난다. 이는 국가지하수관측망 주변의 지하수 이용행위가 직접적인 영향을 주지만 강원도 전역에 걸친 전반적인 지하수 이용과 무관치 않다. 그러므로 기후변화에 따라 지하수함양에 어려움이 발생한다면 지하수위 하강은 가속화될 수 있다(Jang *et al.*, 2015).

2.3 대응책과 적응성 기초검토

앞서 언급한 바와 같이 이번 중부지역과 강원도 지역에서 진행중인 대가뭄을 극복하기 위하여 중앙정부와 해당 지자체는 각종 대책 및 토론회를 통해 동원가능한 다양한 단기 및 중장기 대책을 내놓고 있다(표 1). 이런 기술적 대책으로 4대강 보의 이용(수로건설), 중소규모 댐과 저수지의 건설, 하천바닥의 준설, 유수율을 높이기 위한 노후 상수도관의 정비(교체), 물통합관리시스템의 구축 혹은 물관리 일원화, 신규 지하수관정의 개발, 지하수 인공함양, 지하(수)댐 등이 제시되고 있다(Hankyung, 2015). 이

외에도 긴급조치로 제한급수, 극한 물부족 지역에 대한 식수공급 등이 실시되고 있으며 사회적으로는 가정과 일상생활에서 물절약 운동을 홍보하고 있다(KTV, 2015).

한편 반복되는 가뭄때 마다 가장 먼저 행해지는 임시처방 저감대책의 하나가 바로 지하수관정의 신규개발이다. 그런데 이같은 지하수개발은 철저히 계획되거나 체계적이지 않아 실제로 어느 정도 효과가 있는지도 의문이다. 알려진 바로는 2014-2015년 동안 가뭄대책으로 강원도에 약 4,000여개소의 지하수관정을 개발하였다고 한다. 그러나 실제로 이들이 어디에 얼마정도의 용수를 감당하고 있는지 그 효과에 대해서는 회의적이다. 주변의 지하수개발 여력이 얼마나 되는지 또 상당량의 지하수를 공급할 수 있는 수리지질학적 조건을 갖추고 있는지에 대한 정밀한 조사나 판단 없이 급조된 지하수개발은 적절한 효과를 보지도 못하면서 사후 방지될 경우 지하수 자원의 오염유발 가능성만 키울 우려도 있다.

표 2는 강원도 지역의 지하수 개발가능량과 2013년 이용량을 보여준다(Gangwon Province, 2015). 지역별로 보면 개발가능량 대비 지하수이용율은 태백이 1.7%로 가장 낮고 원주시가 45.1%로 가장 높은 것

Table 2. Estimated amount of groundwater that is available for use (capacity) and actual water use of the year 2013 in Gangwon Province (Gangwon Province, 2015).

City/county	Capacity (Mm ³ /yr)	Use (Mm ³ /yr)	Ratio (%)	City/county	Capacity (Mm ³ /yr)	Use (Mm ³ /yr)	Ratio (%)
Total	2,227.54	217.8	9.8				
Wonju	110.629	49.9	45.1	Yeongwol	135.917	8.3	6.1
Chuncheon	137.528	33.5	24.3	Gangneung	179.628	10.8	6.0
Donghae	32.662	6.7	20.4	Hwacheon	104.094	5.7	5.5
Cheolwon	97.138	15.5	16	Pyeongchang	193.939	10.3	5.3
Sokcho	16.218	2.3	13.9	Hongcheon	237.228	11.3	4.8
Samcheok	167.016	22.2	13.3	Jeongsun	156.25	5.3	3.4
Hyeongsung	129.233	15.7	12.2	Yangyang	96.959	2.3	2.4
Gosung	112.92	7.6	6.7	Inje	204.56	4.8	2.3
Yanggu	82.318	5.1	6.2	Taebaek	33.302	0.6	1.7

으로 나타났다. 강원도 전체적으로 보면 9.8%로 표면적으로는 지하수 개발 여력이 매우 큰 것으로 볼 수 있다. 그러나 지하수 개발가능량 계산의 실제적 내용(단순 면적이 개발가능량 계산에 크게 영향을 미침)과 강원도의 대수층의 발달양상 등을 고려하면 이와 같은 낙관적 해석은 합리적이지 않다. 강원도는 일부 평야지역을 제외하고는 대수층의 발달이 제한적이며 수평적 연장도 매우 불량하다. 그러므로 미국 대평원의 오갈라라대수층(Ogallala Aquifer) 같은 대규모 대수층은 기대하기 힘들다. 그러므로 표와 같은 단순 개발가능량 계산은 실제적으로 무의미하며 국지적으로 정밀하게 조사된 수리지질특성을 기반으로 한 국지적 개발가능량 계산만이 현지에서 실제적으로 유용하게 활용될 수 있다. 특히 반복되는 가뭄우심지역에 대해서는 평상시 세밀한 수리지질조사를 통해 지하수 산출능력이 우수한 지점을 파악하고 양수에 따른 영향평가도 면밀히 한 후 가뭄 대비 지하수관정을 미리 확보해 놓는 것이 중요하다.

지하댐(underground or groundwater dam)은 지하에 불투수벽을 설치하여 자연적 흐름을 막아 지하수를 저장·확보하는 구조물을 말하며 일반적으로 장벽은 지하 1 m에서 불투수 암반선까지 설치한다(Telmer and Best, 2004; Onder and Yilmaz, 2005). 지하댐의 입지 적합성은 매우 다양한 지질, 수리지질, 대수층 특성에 따라 결정되지만 흔히 공극율이 크고 투

수성이 좋은 해안대수층에서 무위로 바다로 나가는 지하수를 저장 활용하는데 많이 이용된다(Onder and Yilmaz, 2005). 지하댐은 소규모로 마을 단위 정도에서도 활용이 쉽고 설치비용도 저렴하여 이란, 브라질, 모로코, 알제리아, 일본 등 다수의 국가에서 실용적으로 설치·운영되고 있다(Kim, 2005; Ouerdachi *et al.*, 2012; Ghodrati and Ghazaryan, 2013; Sehat *et al.*, 2013).

우리나라에서도 일찍이 이와 같은 지하댐이 기술적으로 고려되었고 설치·운영되고 있는 곳도 다수 있다(Kim, 2005; Myeong *et al.*, 2014). 우리나라에서 지하댐의 설치를 고려중이거나 운영 중인 곳을 보면 일부 내륙에 있기는 하지만 대부분 동해쪽의 경우 해안지역, 서해쪽의 경우 평야지역이다(Kim, 2005). 이는 기본적으로 지하댐의 입지조건인 큰 공극율과 투수계수를 보이는 충적층지역, 유역면적이 큰 계곡지역, 분지지형이 발달한 지역 등에 적합한 곳이라고 할 수 있다. 문제는 이런 지하댐이 강원도 지역에 적합한가 하는 부분이다. 강원도 동해안 지역의 경우 자연히 바다로 버려지는 지하수를 이용한다는 측면에서 기본적으로 지하댐의 적용성을 고려할 수 있다. 또한 영서지역의 경우 넓은 집수구역을 갖춘 충적대수층에 대한 적용도 가능성이 있어 보인다.

그러나 가뭄으로 어려움을 겪는 대부분의 강원지역은 중산간 농업지역으로 이런 지역은 저수지 등의

지표수 저장시설도 부족한 상황이다(Jeon, 2015). 또 이런 지역은 충적층의 발달도 미약하고 비교적 넓은 집수구역을 갖추고 있지도 않다. 이럴 경우 지하댐의 다른 종류인 모래저장댐(sand storage dam)을 고려할 수 있으나(Ghodrati and Ghazaryan, 2013), 상류부에 설치한 지하댐으로 인한 갈수기 하천 유지용수의 부족을 초래할 수도 있다(Lee, 2015b). 그러므로 강원도 중산간 지역에 대한 지하댐 적용성 여부는 정밀한 수리지질학적 검토가 선행되어야 한다.

지하수 인공함양(artificial recharge or managed aquifer recharge)은 또 다른 대안으로 대두된다. 인공함양은 우리나라에서도 제주도의 실용적 적용을 통해 잘 알려져 있다(e.g., Kim *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2011; Moon *et al.*, 2012). 최근에는 수막재배 지역에서 순환식 인공함양 등 여러 변형되고 향상된 기술의 적용도 증가하고 있다(Energy Daily, 2015). 지표투과 방식의 인공함양의 경우 기본적으로 지표의 투수성이 큰 경우에 유리하고 그렇지 못한 경우는 강제 함양정을 이용하기도 한다. 어떤 경우든 유효한 적용이 되기 위해서는 지하에 적절한 공극을 가진 물그릇(대수층)이 있어야 한다. Kim *et al.* (2005)과 Park *et al.* (2015)은 국내 단열암반대수층에서 인공함양의 가능성을 제시하였다. 그러므로 적절한 유효공극율과 투수성을 갖춘 경우 강원도 중산간지역 암반대수층에서도 인공함양의 적용이 가능할 것으로 보이며 함양정과 함양연못(pond)의 부지로 유희농경지를 이용하는 것도 효과적일 것으로 사료된다(Lee, 2015b). 결국 이 경우에도 해당 지역의 국지적인 수리지질이 적용성 판단에 매우 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

3. 결론

위에서 우리는 최근 미국 캘리포니아와 강원도의 가뭄과 지하수현황에 대하여 살펴보았다. 캘리포니아의 미중유의 대가뭄은 공공재로서의 지하수의 위상을 재인식하는 계기가 되었고 지속가능한 지하수 자원의 이용을 위해 지속가능 지하수관리법을 제정하고 각 지방정부에 지하수 자원의 관리와 보전을 담당하는 전담 지하수조직을 신설토록 하는 긍정적인 조치도 있었다. 우리나라 중부지방과 강원도의 경우에도 극심한 가뭄에 대하여 중앙정부와 각 지방

정부는 나름 단기적, 중장기적 처방을 내놓고 있다. 일반론으로서 이전에 생각한 여러 가지 저감방안들과 더불어 최근에 이슈가 된 4대강 물의 이용도 거론되고 있다.

흔히 긴급 저감방안으로서 시행되는 지하수관정의 신규개발과 더불어 지하댐과 인공함양에 대한 논의도 있다. 그러나 급조된 지하수 개발의 경우 그 효과와 사후 관리측면에서 문제를 야기할 수 있다. 그러므로 기후변화로 빈발하는 가뭄에 대비하기 위해서는 가뭄우심지역에 대한 선제적인 국지적 지하수정밀조사를 수행하고 이에 기반한 실제적 지하수 이용성 평가가 이루어져야 그 효과를 극대화할 수 있다. 지하댐과 인공함양의 경우에도 단순 논의를 떠나 구체적으로 수리지질학적 검토를 할 필요가 있다. 특히 강원도는 다른 가뭄지역과 달리 중산간 농업지역이 가뭄의 주요 피해 대상으로 지리적, 지질학적, 수리지질학적 조건이 매우 상이하다. 그러므로 지역에 특화된 가뭄대응 방안이 고려되어야 한다.

가뭄은 수년을 두고 거의 반복적으로 발생함에도 불구하고 정부의 대응은 여전히 초보적이며 천편일률적으로 과거의 것을 답습하고 있다. 어려움이 있을 때마다 급조하여 무계획적으로 지하수관정을 개발하고 하천을 준설한다고 부산을 떠다. 중앙과 지방정부의 예산도 여러 부처에서 중구난방으로 집행되어 비용대비 효과도 크지 않다. 무엇보다 향후 점증하는 기후변화에 따라 가뭄의 빈도와 강도는 더 커질 것이라는 것이 관련 전문가들의 공통된 인식이다. 이렇다면 급조된 방안이 아니라 가뭄 대비를 위한 상시적인 예산과 조직이 필요하다. 지하수는 가뭄에 대비한 훌륭한 극복대안이다. 강수에만 의존하는 취약성이 큰 지표수 위주의 정책에서 벗어나 캘리포니아의 사례처럼 지방정부 차원에서도 지하수 관리를 위한 독립된 예산과 전담조직이 필요하다.

한편 상기와 같은 기술적, 행정적 대책도 중요하지만 궁극적으로는 국민들의 물에 대한 인식이 매우 중요하다. 물 확보도 중요하지만 물 절약이 더 중요하다. 물을 물쓰듯 하는 생활습관을 버리고 일상생활에서 물절약을 생활화하여야 한다. 이를 위해 물값의 현실화도 필요하다. 이런 변화만이 기후변화 시대에 우리 사회의 미래와 인류의 생존을 담보할 수 있다.

사 사

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2015R1A4A1041105) 또한 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음 (관리번호-520150429). 세심한 심사의견을 주신 여인옥 교수님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

- AghaKouchak, A., Feldman, D., Hoerling, M., Huxman, T. and Lund, J., 2015, Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature*, 524, 409-411.
- Byun, H.R., 2015, Drought in 2016: perspective and measures. *Chuncheon International Water Forum*, Chuncheon, October 20, 9-21 (in Korean).
- CAL FIRE, 2015, California Statewide Fire Map. <http://www.fire.ca.gov/general/firemaps> (November 5, 2015).
- Carle, D., 2004, *Introduction to Water in California*. University of California Press, Berkeley, 60 p.
- Cheon, J.Y., Ham, B.S., Lee, J.Y., Park, Y. and Lee, K.K., 2014, Soil temperatures in four metropolitan cities of Korea from 1960 to 2010: implications for climate change and urban heat. *Environmental Earth Sciences*, 71, 5215-5230.
- Christian-Smith, J. and Abhold, K., 2015, *Measuring What Matters: Setting Measurable Objectives to Achieve Sustainable Groundwater Management in California*. Union of Concerned Scientists, Cambridge, MA, 38 p.
- Department of Water Resources (DWR), 2014, Summary of Recent, Historical, and Estimated Potential for Future Land Subsidence in California. DWR, CA, 23 p.
- Department of Water Resources (DWR), 2015, Conditions for selected reservoirs. <http://cdec.water.ca.gov/cdecapp/resapp/getGraphsMain.action> (November 5, 2015).
- Energy Daily, 2015, KIGAM: developing water curtain cultivation using groundwater artificial recharge. <http://www.energydaily.co.kr/news> (March 19, 2015).
- Famiglietti, J.S., 2014, The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4, 945-948.
- Famiglietti, J.S., Lo, M., Bethune, J., Anderson, K.J., Syed, T.H., Swenson, S.C., de Linage, C.R. and Rodell, M., 2011, Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 38, DOI:10.1029/2010GL046442.
- Galloway, D., Jones, D.R. and Ingebritsen, S.E., 1999, *Land Subsidence in the United States*. U.S. Geological Survey, Denver, 177 p.
- Gangwon Province, 2015, Provincial Basic Groundwater Management Plan (draft). Korea Groundwater and Geothermal Energy Association, Seoul, 32 p (in Korean).
- Ghodrati, M. and Ghazaryan, S., 2013, Agriculture water supply in semi-arid zone by underground dams. *European Journal of Experimental Biology*, 3(3), 706-711.
- Hammer, Ø., 2015, *PAST: PAleontological STatistics*. Version 3.09, University of Oslo, 244 p.
- Hankyung, 2015, Three water policies missing: incoming 'drought disaster' next year. <http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php> (November 7, 2015).
- Jang, S., Hamm, S.Y., Yoon, H., Kim, G.B. and Park, J.H., 2015, Predicting long-term change of groundwater level with regional climate model in South Korea. *Geosciences Journal*, 19(3), 503-513.
- Jeon, M.S., 2015, Countermeasures to drought in Gangwon Province. *Chuncheon International Water Forum*, Chuncheon, October 20, 23-39 (in Korean).
- Kim, H., Kim, M. and Suk, H., 2005, Assessment of storage property of fractured rock aquifer by the artificial recharge method. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41(3), 415-426 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.J., 2005, Development strategy and perspective of underground dam. *Technical Bulletin of Yooshin*, 12, 99-112 (in Korean).
- Kim, Y., Koo, M., Lee, K., Ko, K. and Barry, J.M., 2008, Application of analysis and modeling for surface water-ground water system: preliminary study of artificial recharge in Jeju Island, Korea. *AGU Fall Meeting*, #H31C-0880.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2015a, Recent status of precipitation and its perspective. October 6, 2015 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2015b, Climate change trend. http://web.kma.go.kr/4rivers/sub_02_01.jsp (November 6, 2015) (in Korean).
- KTV, 2015, Drought in mid area: government exerting every measure. http://www.ktv.go.kr/ktv_contents.jsp?cid=513899 (November 4, 2015).
- LA Times, 2014, California drought most severe in 1,200 years, study says. December 5, 2014, LA Times.
- Lee, J.Y., 2015a, Challenges of groundwater as resources in the near future. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20(2), 1-9.
- Lee, J.Y., 2015b, Status and perspectives of groundwater resources of Gangwon Province in the era of climate

- change. Chuncheon Global Water Forum, Chuncheon, September 17-18, p. 219-236 (in Korean).
- Lee, J.Y., Jeon, W.H., Park, Y. and Lim, H.G., 2012, Status and prospect of groundwater resources in Pyeongchang, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48(5), 435-444 (in Korean with English abstract).
- Moon, S.H., Lee, J.Y., Lee, B.J., Park, K.H. and Jo, Y.J., 2012, Quality of harvested rainwater in artificial recharge site on Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology*, 414-415, 268-277.
- Myeong, W.H., Park, K.Y., Seo, J.J. and Choi, G.J., 2014, Securing groundwater resources using underground dam: focus on underground dam for agriculture in Korea. *Proceeding of KSEG 2014 Fall Conference*, November 27-28, 109-110 (in Korean).
- National Groundwater Association (NGWA), 2015, Facts About Global Groundwater Usage. Westerville, Ohio, 2 p.
- National Groundwater Information Center (NGIC), 2015, Groundwater statistics. <http://www.gims.go.kr> (September 1, 2015).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2015, Changes in precipitation by end of 21st century. <http://www.noaa.gov> (August 14, 2015).
- Oh, S.H., Kim, Y. and Koo, M.H., 2011, Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea. *Journal of Soil & Groundwater Environment*, 16(6), 34-45 (in Korean with English abstract).
- Onder, H. and Yilmaz, M., 2005, Underground dams. *European Water*, 11/12, 35-45.
- Ouerdachi, L., Boutaghane, H., Hafsi, R., Tayeb, T.B. and Bouzahar, F., 2012, Modeling of underground dams: Application to planning in the semi arid areas (Biskra, Algeria). *Energy Procedia*, 18, 426-437.
- Paggi, M., 2011, California Agriculture's Role in the Economy and Water Use Characteristics. Center for Irrigation Technology, Fresno, CA, 18 p.
- Park, D., Koo, M.H. and Kim, Y., 2015, Hydro-thermal numerical simulation for an artificial recharge test in a fractured rock aquifer. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20(1), 65-75 (in Korean with English abstract).
- Parker, T.K., 2015, Capitalizing on crisis to change to sustainable groundwater management in California. 2015 NGWA Groundwater Summit (Abstract), San Antonio, TX, March 16-18, 148 p.
- Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.H., Famiglietti, J.S., Swenson, S. and Rodell, M., 2015, Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. *Water Resources Research*, 51(7), 5198-5216.
- Sehat, M., Kamanbedast, A.A. and Asadilour, M., 2013, Zonning underground dams using GIS in Halayjan valley, Izeh-Iran. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(S), 3752-3756.
- State of California, 2015, Legislation: Sustainable Groundwater Management Act (SGMA). <http://groundwater.ca.gov/legislation.cfm> (November 5, 2015).
- Struckmeier, W., Rubin, Y. and Jones, J.A.A., 2005, Groundwater-Reservoir for a Thirsty Planet? Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, The Netherlands, 16 p.
- Telmer, K. and Best, M., 2004, Underground dams: a practical solution for the water needs of small communities in semi-arid regions. *TERRAE*, 1(1), 63-65.
- The National Drought Mitigation Center, 2015, U.S. Drought Monitor, California. <http://droughtmonitor.unl.edu/Home/StateDroughtMonitor.aspx?CA> (November 4, 2015).
- U.S. Energy Information Administration (EIA), 2015, Electric Power Monthly with Data for August 2015. U.S.DOE, Washington, D.C., 225 p.
- Wang, J., Rothausen, S.G.S.A., Conway, D., Zhang, L., Xiong, W., Holman, I.P. and Li, Y., 2012, China's water-energy nexus: greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture. *Environmental Research Letters*, 7, 014035.
- Williams, A.P., Seager, R., Abatzoglou, J.T., Cook, B.I., Smerdon, J.E. and Cook, E.R., 2015, Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012-2014. *Geophysical Research Letters*, 42(16), 6819-6828.

Received : November 10, 2015

Revised : December 2, 2015

Accepted : December 2, 2015