

## 가뭄 수요대응 단기간 허용 가능한 최대 취수량 평가

이병선<sup>1,\*</sup> · 명우호<sup>1</sup> · 이규상<sup>1</sup> · 송성호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원

<sup>2</sup>한국농어촌공사 제주지역본부

## Evaluation on Maximum Irrigation Amounts of Groundwater Keeping up with a Demand During Short-term Drought

Byung Sun Lee<sup>1,\*</sup> · WooHo Myoung<sup>1</sup> · GYUSANG Lee<sup>1</sup> · Sung-Ho Song<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

<sup>2</sup>Jeju Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation

### ABSTRACT

Groundwater is considered to be the best water resource to solve water shortage problems during drought periods. Even though excessive pumping (overdraft) during short-period may give an unprofitable effect on groundwater hydrology, it has a primary role to solve a lack of water resources and to maintain incomes of farmers. This study evaluated maximum irrigation amounts of groundwater to each local-government and province during drought periods. Maximum irrigation amounts of groundwater were evaluated using cumulative groundwater usage data of each local-government during normal and drought years. Maximum irrigation amounts of groundwater during drought periods would be roughly identified as approximately 1.3 times more than the exploitable amounts of groundwater resources for each local-government. Drawdown-limitation depth on groundwater levels at each monitoring well was determined by transforming the maximum irrigating amounts into degree of change on levels. Universal limitation depth of drawdown on groundwater levels was evaluated to be approximately three times of annual fluctuating range on groundwater levels for each monitoring well. Systematic response on groundwater demands with abiding by drawdown-limitation depth can attain an optimal irrigation of groundwater resources during short-term drought.

**Key words :** Drought, Groundwater, Maximum irrigation amounts, Drawdown-limitation

### 1. 서 언

가뭄은 강수의 부족이 장기화되어 수자원의 고갈, 이에 따른 동식물의 생육 저해와 인간의 사회경제적 활동에 손실을 유발하는 비정상적인 기상현상을 일컫는다. 가뭄은 정의에 따라 크게 기상학적, 농업적, 수문학적 및 사회경제적 가뭄으로 분류되고, 가뭄 기간이 길어질수록 기상학적 가뭄은 농업적 가뭄을, 농업적 가뭄은 수문학적 가뭄을, 최종적으로 수문학적 가뭄은 사회경제적 가뭄을 유도

하는 것으로 알려져 있다(Wilhite and Glantz, 1985). 상세하게는, 기상학적 가뭄은 예년에 비해 강수일수가 감소하여 기상학적 수자원이 계절적 평균치에 미달할 경우, 농업적 가뭄은 강수량 부족이 토양유효수분을 감소시켜 농작물 생장에 피해를 줄 경우, 수문학적 가뭄은 강수량의 부족이 댐, 저수지, 하천수, 지하수 등 가용 수자원의 부족을 유발하는 경우, 그리고 사회경제적 가뭄은 강수량 부족이 물에 의존하는 각종 경제적 요소(수력발전, 농축수산물, 먹는샘물 등)의 수요와 공급에 차질을 유발하여 인간의 경제활동에 타격을 입히는 경우를 일컫는다.

이 가운데 농업적 가뭄은 농작물 생장 저해 뿐 아니라, 작황의 감소, 농가소득 불안정과 민심 불안 초래, 농산물 수급 불균형에 따른 가격 불안정(폭등) 유발 등 농림식품 산업 전반에 연쇄적인 타격을 입힐 수 있다. 농업적 가뭄은 벼의 생육관점에서 볼 때 크게 이앙지연형 가뭄(4-6월,

주저자: 이병선, 과장

공동저자: 명우호, 대리; 이규상, 부장; 송성호, 부장

\*교신저자: 이병선, 과장

E-mail: byungsun94@ekr.or.kr

Received : 2021. 01. 03 Reviewed : 2021. 01. 06

Accepted : 2021. 02. 22 Discussion until : 2021. 04. 30

모판을 형성하고 논에 이양하는 시기의 가뭄)과 생장지연형 가뭄(7~8월, 벼가 생장하고 벼꽃을 피울 시기의 가뭄)으로 구분된다(KRC, 2012). 우리나라의 농업적 가뭄은 기후특성상 봄철 이양지연형 가뭄이 주를 이루며, 강우가 집중되는 여름철에는 생장지연형 가뭄이 거의 발생하지 않는 편이다. 우리나라 가뭄은 규모의 차이는 있지만 2000년 이후 발생 주기가 짧아져 2008년 이후에는 거의 매년 발생하고 있으며, 2013~2018년까지 5년에 걸친 장기 가뭄은 전국적인 피해를 초래하였다(MOE and NDIAS, 2018).

가뭄이 심화되어 저수지, 하천수 등 지표수 자원이 고갈될 위기에 처하면, 일반적으로 가뭄대책비가 투입되어 신규 지하수 관정 개발과 저수지·하천 바닥의 퇴적토를 준설하여 추가 용수를 확보하는 편이다. 일례로, 2012년 전국적인 가뭄이 발생했을 때에는 총 1,046억원의 가뭄대책비(농식품부 595억원, 행정안전부 26억원, 지자체 392억원 및 한국농어촌공사 32억원)가 농업용수 및 생활용수 확보를 위해 투입되었다. 이 가운데, 상세기록이 남아 있는 농식품부 긴급자금 595억원은 농업용수 확보재원으로 신규 농어업용 관정개발 등 신규 수원공 확보에 253억원, 저수지 및 하천 바닥 준설에 342억원이 각각 투입된 바 있다(KRC, 2012). 긴급 지하수 관정 개발이나 하천·저수지 바닥 준설은 가뭄 원인의 제거, 사전 대응 방안 등 원론적인 가뭄 대처 방안이 아니고, 가뭄 발생 시기의 물 부족 문제를 해당 시기에 완화·해소하는 방법이기 때문에 가뭄 대처의 대표성이 부족한 한계가 있다. 그러나 지형적으로 물리면적이 좁고, 수원공 시설 설치가 어려운 농어촌 지역에는 대규모 가뭄 대책사업(저수지 독높이기 사업, 집수정·지하댐 등 대용량 지하수 개발사업 등)이 불가능하기 때문에, 결국 신규 관정 개발과 준설은 가뭄에 대처하는 가장 현실적인 대안이 되기도 한다.

이처럼 지하수는 준설과 더불어 가뭄 발생 시 용수 공급 문제를 적시에 해결하고, 작물피해를 최소화하며, 농민의 소중한 재산을 재해로부터 보전하는 주요 수자원의 역할을 한다. 그러나 지하수 개발·이용 관련하여, 그동안 우리나라에서는 지하수관리기본계획에서 지자체별로 지정한 ‘지하수 개발가능량’ 이내로 지하수를 이용할 것을 권고해 왔고(MOLIT, 2017), 대부분의 지자체에서는 이를 준수하며 지하수 관정에 대한 허가·신고 업무를 수행해 왔다. 이 때문에, 물 부족이 심화된 가뭄 시기에도 해당구역 내의 지하수 개발가능량을 초과해서 이용할 수가 없는 한계가 있었다. 지하수 개발가능량은 평상 시 모든 지하수 이용자가 준수해야 할 지하수 이용에 관한 명료한 기

준임에는 분명하다. 다만, 극심 가뭄이 발생하여 가용 수 자원이 부족한 특정 기간에는, 일시적으로 지하수 개발가능량을 상회할 수도 있는, 허용 가능한 최대 취수량을 예외적으로 지정하여 용수 부족 문제를 해결할 필요도 있다(KRC, 2017).

일시적인 과잉양수는 광역적인 지하수 수문순환에 장애를 유발할 수 있고, 지하수계가 원래의 상태를 회복하는데에 다소간의 시간이 필요할 수도 있다. 그러나 사회적으로 합의된 “허용 가능한 과잉양수 범위” 내에서 취수가 이루어진다면, 가뭄 시기 동안의 과잉양수는 단기간에 가장 효과적인 수단일 수 있다(U.S. ACE, 1993; DWFGI, 2018). 결과적으로, 농작물 피해 예방과 농어민의 소득 보전을 위해, 일반 국민이 납득할 수 있는 「가뭄 시기 일시적인 최대 취수량(이하 최대 취수량)」을 사전에 정의하여 지자체 책임 하에(또는 지하수조사전문기관 위탁책임 하에) 특정 가뭄 시기에 최대 취수량을 관리할 수 있다면, 농업가뭄 극복과 농가소득 보전에 도움이 될 수 있다.

이 연구는 미국 캘리포니아 주 오렌지 카운티의 지하수 관리방법(OCWD, 2015)을 벤치마킹하여 국내사정에 적합한 가뭄 시 지하수 최대 취수량을 산정하였다. 이를 위해 지자체별 농어업용 공공관정의 통계자료를 토대로 평상시와 가뭄 시에 지하수 이용특성을 분석하고, 이를 기초로 농업적 가뭄 발생 시 지자체별로 농지에 공급 가능한 최대 취수량을 분석하였다. 그리고 지하수 관측공 별 지하수위 저하 한계치를 설정하여, 가뭄 발생 시 지자체마다 지정된 최대 취수량을 넘지 않도록, 그리하여 대수층의 고갈을 최대한 방지할 수 있도록 지하수 보전관리에 대한 안전장치를 마련해 두고자 하였다.

## 2. 오렌지 카운티의 지하수 최대 취수량 산정

미국 캘리포니아주 주는 2012~2016년 기간 동안 이례적으로 적게는 20년, 많게는 1,200년 주기의 장기 가뭄이 발생하였다(Lund et al., 2018). 이 기간 동안 캘리포니아주 용수공급량은 물 수요량의 5~65%(평균 37%)에 그쳐, 평년(2011년 및 2017년, 물 수요량의 약 80~85% 용수공급)에 비해 막대한 양의 물 부족을 초래하였다. 물 부족은 산림의 고사, 농작물 재배 불능, 수생생물의 멸종위기, 먹는 물 부족, 부족한 물 수입에 따른 경제적 손실, 수력발전의 저해 등 여러 사회경제적 요소의 손실을 유발하였다. 농업 부문만을 살펴보면, 2014년에 캘리포니아주에서는 약 1,619 km<sup>2</sup> 면적의 농지가 경작 불가능한 상태에 이르러 미국 식량 안보에 커다란 위협이 되었고(Walton,

2014), 주 정부 차원에서 지하수를 비롯한 수자원 관리에 좀 더 현명한 해결책을 마련하도록 요구되었다. 그리하여 2014년에 캘리포니아 주 정부에서는 지속가능한 지하수 관리법(SGMA; Sustainable Groundwater Management Act)을 제정하였고, 이 법을 기반으로 캘리포니아 주 내 모든 카운티(시·군)는 각기 자체적으로 지속가능한 지하수 관리 방안을 마련하여 운영하게끔 법제화하였다.

캘리포니아 주 오렌지 카운티는 남부 캘리포니아 로스 엔젤레스 시 인근에 위치한다. 오렌지 카운티 수도사업소(OCWD; Orange county water district, 이하 OCWD)에서는 물 수요량의 약 75%를 관정에서 양수하여 공급하고, 나머지 25% 이상의 수량은 수자원이 풍부한 남부 캘리포니아 수도사업소(MWD; Metropolitan Water District of Southern California)로부터 수입하여 공급한다. 이 가운데 지하수관정 양수의 경우, OCWD는 카운티 내 19개 상수도 사업자들로 하여금 관정으로부터 지하수를 양수하여 판매토록 허가권을 부여하고, 상수도 사업자들은 오렌지 카운티 중북부 지역(971 km<sup>2</sup>) 약 240만명의 주민에게 물을 공급한다.

OCWD는 지하수 관리법(SGMA)을 준수하며, 동시에 부정적 영향을 주지 않는 최대 허용가능한 대수층 저장량 변화 폭에서 하한 경계 값을 설정하기 위하여, 지하수 수

위 관측자료와 모델링 기법을 이용, 구역 내 최대 허용 가능한 지하수 이용의 최대 하한값을 약 6.2억 m<sup>3</sup>(5.0×10<sup>6</sup> acre-feet, OCWD 구역 내 지하수 부존량 814억 m<sup>3</sup>(OCWD, 2015) 중 약 0.8%에 해당)으로 산정하였다(Fig. 1). 이러한 지속가능한 지하수 이용량은 세부적으로 크게 3개 범위로 구분되는데, (i) 평년 강우가 내렸을 때의 함양량에 해당하는 수량 약 1.2억 m<sup>3</sup>(1.0×10<sup>6</sup> acre-feet), (ii) 3년의 연속가뭄이 발생했을 때 예외적으로 대수층 부존량으로부터 양수·이용 가능한 수량 약 4억 m<sup>3</sup>(3.18×10<sup>6</sup> acre-feet), (iii) OCWD 인근에 위치한 남부 캘리포니아 수도사업소(MWD; Metropolitan Water District of Southern California)에서 최대로 수입가능한 수량 약 1억 m<sup>3</sup>(0.82×10<sup>6</sup> acre-feet) 이다. 이 가운데 특이한 점은 (ii) 항목으로서, 가뭄과 같은 특정한 물 부족 시기에는 짧은 기간 동안 지하수 함양량을 초과하는 수량(약 4억 m<sup>3</sup>; 3.18×10<sup>6</sup> acre-feet)을 대수층에 기 부존된 부존량으로부터 양수·이용 할 수 있도록 법제화 한 점이다. 이에 따라, 풍수기에는 평년 함양량(약 1.2억 m<sup>3</sup>; 1.0×10<sup>6</sup> acre-feet)에 해당하는 지하수를 양수하여 물 수요량에 대응(optimal target in Fig. 1)하고, 일부 부족수량을 MWD로부터 수입하여 대응할 것을 권고한다. 그러나, 가뭄이 들어 지하수위가 낮아지면 깊은 심도에 부존된 지하수를 양수하여

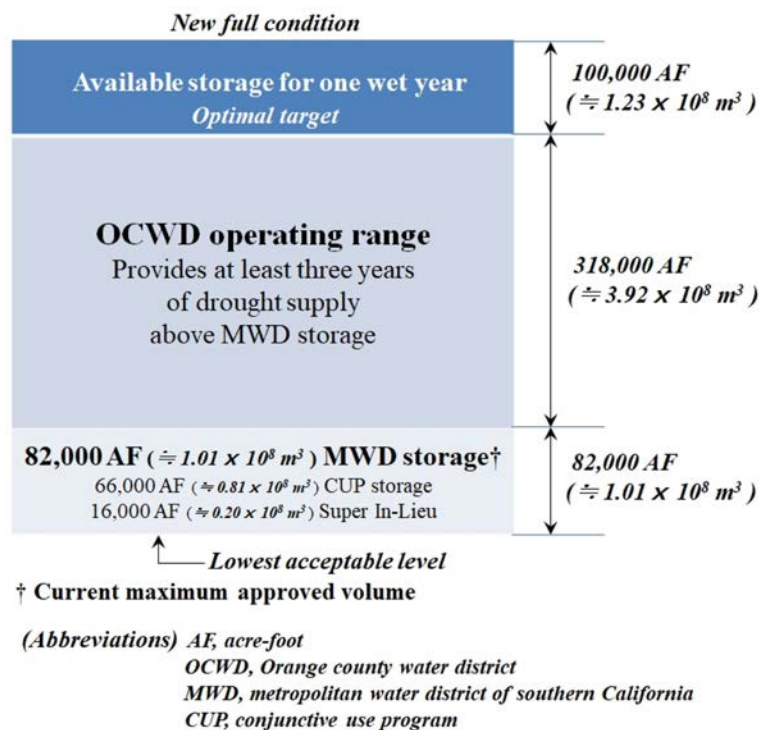


Fig. 1. Strategic basin operating levels and an optimal target of Orange county water district, California, USA (referred from OCWD, 2015)

약 3년간의 가뭄 기간 동안 약 4억  $m^3$ 까지 양수·이용할 수 있도록 하였다. 그럼에도 불구하고 가뭄 해갈이 안되어 물 수급에 문제가 생기면 남부 캘리포니아 수도사업소(MWD)로부터 최대 수량(약 1억  $m^3$ )까지 수입하여 공급하는 전략을 세웠다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 농어업용 공공관정 지하수 이용량 분석

그 동안 국내에서는 강수량을 기준으로 지하수 개발가능량을 논의했고, 이를 토대로 지하수 이용량을 관리해 왔다. 그러나 최근 기후변화에 따른 연간 강수량의 변화, 강수의 지역 편차 심화, 강수의 여름철 집중 현상 심화 등에 의해 강수량의 불확실성은 날로 커져가고 있다. 또한 실질적인 농업적 가뭄 해소를 위해서는 강수량에 근거한 개발가능량을 기준으로 공급을 논하기 보다는, (기설 및 신규) 관정의 실제 이용량을 기준으로 최대 양수하여 농지에 공급할 수 있는 공급수량이 더 중요할 수도 있다.

농어업용 공공관정의 지하수 이용량 분석을 위하여, 한국농어촌공사에서 관리 중인 전국 총 1,555개소(2019.12 현재)의 농어업용 공공관정 중, 2010~2018년(9개년)동안 전기요금 납부 기록이 누적된 1,380개소 공공관정을 대상으로 각 관정의 연도별 지하수 전력사용량을 합산하였다. 분석에 이용된 1,380개 농어업용 관정은 암반관정 1,192개소(약86%), 충적관정 188개소(약14%)이며, 암반관정은 수중모터펌프를 이용하여, 충적관정은 지상모터펌프를 이용하여 지하수를 양수한다. 각 관정의 전력사용량은 전기요금으로 청구된다. 전력사용량은 크게 펌프(수중모터펌프 또는 지상모터펌프)의 전력사용량과 관정 양수장속 조명(전등)의 전력사용량으로 구분할 수 있다. 전등은 수중모터펌프에 비해 매우 적은 전력을 소모하기 때문에, 이 연구에서는 관정의 전력사용량이 관정에 설치된 수중모터펌프의 전력사용량과 동일하다고 가정하였다. 관정별 연간 지하수 이용량은 각 관정의 연간 전력사용량(kW)과 수중모터용량(kW)의 비율에 양수능력을 곱하여 산출하였다(MOLIT, 2015). 이 후, 각 시군구에 속한 농어업용 공공관정들의 이용량을 합산하여 시군구별 연간 지하수 이용량을 산출하였다. 유사한 방법으로, 내륙지역 8개 농어촌 광역지자체(경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남; 이하 광역지자체)의 연간이용량은 해당 광역지자체에 속한 시군구별 연간 농어업용 공공관정들의 지하수 이용량을 합산하여 산출하였다.

한국농어촌공사 관리 농어업용 공공관정 1,380개소의

평상 시 지하수 이용량과 가뭄 발생 시 지하수 이용량을 비교 분석하기 위해, 우선 농어촌지역 8개 광역지자체(특 광역시 제외)의 2010~2018년(9개년) 간 가뭄 발생 연도를 구분하였다. 가뭄발생 연도의 구분은 한국농어촌공사 가뭄백서(KRC, 2012)와 국가가뭄정보센터(MOE and NDIAS, 2018)에서 전국 167개 시군구에 대하여 표준강수지수(SPI; Standardized precipitation index, McKee et al., 1993)를 이용하여 지속기간 3개월(SPI3) 및 6개월(SPI6)에 대해 분석한 결과를 인용하였다. 표준강수지수는 일반적으로 가뭄분석에 많이 활용되는 가뭄지수로, 특정한 기간에 대한 계산단위를 3, 6, 9, 12개월 등과 같이 설정하고, 기간단위별로 강수 부족량을 계산하여 가뭄을 판단하는 지수이다. 이 후, 농어촌지역 8개 광역시도별, 시군구별로 농어업용 공공관정의 평년 지하수 이용량 평균, 가뭄 발생 연도의 이용량 평균값을 계산하였고, 이렇게 계산된 2가지 평균값의 비율을 8개 광역시도별, 시군구별로 비교하였다.

#### 3.2. 가뭄 시 최대 취수량 및 지하수위 저하한계치 설정

이 연구에서는 OCWD(2015)의 개념을 벤치마킹하여 가뭄 시 지하수 최대 취수량을 산출하였다. OCWD의 가뭄 발생 시 최대 취수량은 (i) 평년 지하수 함양량, (ii) 3년의 연속가뭄 시 대수층에서 꺼낼 수 있는 지하수 부존량, (iii) 타 유역으로부터 지하수 수입량의 합으로 계산할 수 있다. 이 때, (i)에 대한 (ii)와 (iii)의 비율은 약 3.2배, 0.8배에 해당한다. 국내의 경우, 경기, 강원은 2014~2018년 기간 동안 예외적으로 4년간의 연속가뭄이 발생하였지만, 다른 광역시도에서는 3년 이상의 연속가뭄이 발생하지 않았다. 또한, 우리나라에서는 지하수법에 의거 OCWD의 (iii)처럼 물 권리(water right) 임차 및 임대 불가능하기 때문에 광역시도간 물의 수입, 수출이 발생하지 않는다. 이러한 국내 사정을 고려하여 우선 2010~2018년(9개년) 기간 중 평년 지하수 이용량 평균, 가뭄발생 연도의 지하수 이용량 평균을 산출하였다. 이 후, (a) 평년에 이용가능한 지하수 수량(즉, OCWD의 (i)에 해당, 평년 시 1년 평균 지하수 이용량), (b) 약 4년의 가뭄 발생 시 대수층으로부터 꺼내어 쓸 수 있는 지하수 부존량(즉, OCWD의 (ii)와 (iii)의 합에 해당, 가뭄 시 1년 평균 이용량의 4배)으로 구분, (a)에 대한 (b)의 비율을 약 4.0배로 설정하여 가뭄 발생 시 최대 취수량을 산출하였다. 평년에 이용가능한 지하수 수량은 지하수조사연보(MOE and K-water, 2019)에 기록된 시군구별 지하수 허가신고량의 총합으로 설정하였다. 지하수조사연보

의 허가신고량은 지하수 실제 이용량과 다소 차이가 있을 수 있다. 그러나, 밝혀지지 않은 미등록 관정 개소수, 허가관정 용량 임에도 불구하고 영향조사를 면제받고자 신고관정으로 축소 신고한 관정 개소수, 겨울철 시설재배단지 수막재배 지하수 과다이용 관정 개소수 등 여러 비계량적인 요인을 고려하였을 때, 이 연구에서는 명시적으로 확인가능한 지하수조사연보의 허가신고량을 각 지자체의 지하수 이용량으로 설정하였다.

지하수위 저하 한계치란 대수층에서 가뭄 시 지하수 최대 취수량을 모두 양수·이용했을 때 관측되는, 관측공에서 측정된 지하수위 저하의 한계이다. 지하수위 저하 한계치는 관정의 수리적 특성(투수량계수 내지 수리전도도 등)을 이용하여 산출하는 것이 가장 과학적이고 합리적이다. 그런데 이 연구와 같이 전국을 대상으로 분석하는 경우에는 다수 관정의 수리적 특성을 전 국토에 가급적 균등하게 확보하여야 하나, 수리적 특성(수리전도도, 저유계수 등)이 기재된 관정별 지하수영향조사서를 전국적으로 체계적으로 수집하기가 어려운 경우가 많아 자료 축적에 한계가 있다. 다만, 이 연구는 단기 극심가뭄에 대하여 관정으로부터 취수량, 지하수 필요농도에 대한 가뭄시기 최대 공급량을 염두에 두고 연구를 수행하였고, 우물수리학에서 취수량(양수량)과 투수량계수(또는 수리전도도)는 비례관계가 있기 때문에, 이 연구에서는 <Eq. 1>을 이용하여 취수량을 이용한 지하수위 저하 한계치를 계산하였다.

지하수위 저하 한계치

$$= \text{가뭄 시 최대 취수량} \div (\text{면적} \times \text{공극율}) \quad (1)$$

그런데 각 관측공이 소재한 대수층의 저유계수값(공극율)은 다르기 때문에, 만약 유사한 최대 취수량을 지닌 2개의 지자체가 있다고 하더라도 지하수위 저하 한계치는 차이를 보일 수 있다. <Eq. 1>에서 지자체별 면적은 국가표준지도에서 산출하였다. 저유계수는 지하수관리기본계획(MOCT, 2007)에서 제시한 8개 수문지질단위별 공극율을 범위를 기초로 하여 수문지질단위별 저유계수(공극율)(미고결 쇄설성 퇴적층 0.19 내외, 다공질 화산암 0.04 내외, 반고결 쇄설성 퇴적암 0.02 내외, 비다공질 화산암 0.03 내외, 관입화성암 0.04 내외, 쇄설성 퇴적암 0.04 내외, 탄산염암 0.03 내외, 변성암 0.01 내외)를 적용하였다. 이 후, 각 지자체마다 수문지질단위별 면적을 산출하고, 해당 수문지질단위에 저유계수를 적용하고 이를 종합하여 각 지자체별 지하수 대수층의 저유계수를 산출하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. 평년 및 가뭄 시 지하수 이용 특성

2010~2018년 기간 동안 표준강수지수 분석에 따른 8개 농어촌 광역시도(제주 및 특광역시 제외)의 가뭄 분석 결과는 <Table 1>과 같다(KRC, 2012; MOE and NDIAC, 2018). 2010년과 2011년에는 전국적으로 평년 수준의 강

**Table 1.** Annual drought occurrence on agricultural provinces by applying SPI (standardized precipitation index) (modified after KRC (2012) and MOE and NDIAC (2018))

Province	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Gyeonggi	SPI3		Drought		Drought	Drought	Drought	Drought	
	SPI6		Drought		Drought	Drought	Drought	Drought	
Gangwon	SPI3				Drought	Drought	Drought	Drought	
	SPI6				Drought	Drought	Drought	Drought	
Chungbuk	SPI3				Drought	Drought		Drought	
	SPI6				Drought	Drought		Drought	
Chungnam	SPI3		Drought		Drought	Drought		Drought	
	SPI6		Drought		Drought	Drought		Drought	
Jeonbuk	SPI3		Drought		Drought	Drought		Drought	
	SPI6		Drought		Drought	Drought		Drought	
Jeonnam	SPI3				Drought			Drought	
	SPI6							Drought	
Gyeongbuk	SPI3				Drought	Drought		Drought	
	SPI6				Drought	Drought		Drought	
Gyeongnam	SPI3				Drought			Drought	
	SPI6							Drought	

수량을 유지하다가, 2012년 이래로 강수 총량의 부족 또는 강수의 여름철 집중에 따라 가뭄이 빈번하게 발생되었고, 이러한 현상은 2017년까지 지속되었다. 상세하게는, 2012년 경기, 충남, 전북에, 2014년에는 전국적으로 가뭄이 발생하였다. 또한 2015년에는 전남과 경남 등 남부 지방을 제외한 나머지 지역에 전국적으로 가뭄이 발생하였고, 2016년에는 경기, 강원 등 중부지방에 국한되어 가뭄이 발생하였다. 그리고 2017년에 다시 한 번 전국적으로 가뭄이 발생한 후 2018년에는 평년 수준을 회복하였다. 이 연구에서는 <Table 1>을 기초로 각 광역시도별로 상이한 평년과 가뭄발생 연도를 구분하였다. 더불어, 2017년 3월 이 후부터 국립농업과학원에서 제공 중인, 영농기간(3월~10월)에 대해 토양수분지수(SMI, soil moisture index)를 이용하여 농업가뭄을 분석한 결과(NAS, 2021)를 상기한 SPI 분석 결과와 비교하였다. 토양수분지수(SMI)는 국내 어디서나 재배 가능한 대표작물인 콩을 대상으로 토양의 유효수분함량과 지속기간(45% 이상, 15~45% 10일 미만, 15~45% 10일 이상, 15% 미만)을 기준으로 구분하여, 정상, 가뭄 주의, 가뭄 심함, 가뭄 매우 심함으로 구분하는 농업가뭄지수이다. SMI 분석 결과 2017년 5월 말부터 6월 말까지 전국적으로 농업가뭄이 발생하여 이앙기 농업용수 공급 문제가 발생하였으며, 이러한 결과는 SPI 분석 결과(Table 1)와 일치하였다.

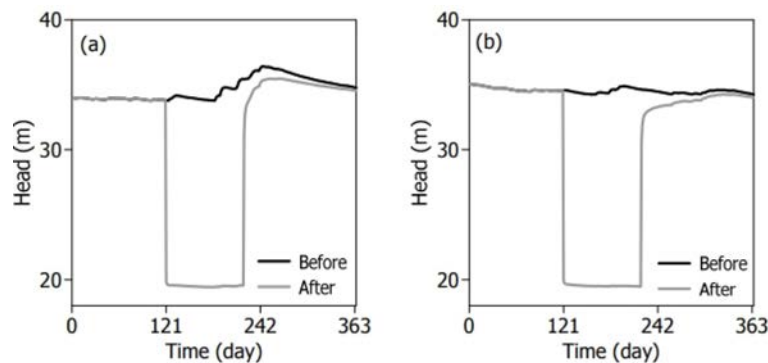
한국농어촌공사에서 관리하는 1,380개소 농어업용 공공관정이 설치된 광역시도 및 시군구에 대하여, 평년과 가뭄발생 연도의 지하수 이용량 비율을 산출하였다. 지하수 이용량은 한국농어촌공사에서 취합하여 정리한 농어업용 공공관정의 전력사용량을 환산하여 산출하였다(Table 2). 이 결과, 가뭄발생 시에는 하천수, 저수지, 취입보 등 지표수의 부족으로 지하수 이용량이 평년에 비해 약 1.3배(1.1~1.5배 범위) 내외로 증가하는 것을 알 수 있었다.

## 4.2. 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량 분석

4.2.1. 대표 시군구별 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량  
전국 167개 시군구 가운데 한국농어촌공사 관할 농어업용 공공관정이 설치된 100개 시군구에 대하여, 각 시군구 소재 공공관정의 전력사용량과 지하수조사연보(MOE and K-water, 2019)의 허가신고량을 기준으로 가뭄 시 지하수 최대 취수량을 분석하였다. 일례로, 충남 홍성군을 들어 설명하면, 홍성군 소재 농어업용 공공관정의 전력사용량 분석 결과, 홍성군은 가뭄발생 연도에는 평년에 비해 약 1.1 배수량의 지하수를 이용한다. 그런데 지하수조사연보의 홍성군 연간 지하수 이용량은 17,703천  $m^3/yr$ 에 해당한다. 이에 따라, (i) 평년이용량은 17,703천  $m^3/yr$  ( $17,703\text{천 } m^3/yr \times 1.0 \times 1\text{년}$ ), (ii) 4년의 연속 가뭄 시 이용량은 77,277천  $m^3/yr$  ( $17,703\text{천 } m^3/yr \times 1.1 \times 4\text{년}$ )에 해당하여, 결과적으로 홍성군 가뭄 시 지하수 최대 취수량은 94,980천  $m^3/yr$ 에 해당한다. 이는 홍성군 지하수 개발가능량(33,704천  $m^3/yr$ ; MOLIT, 2017)의 약 2.8배 수준이다. 그러나, 이는 홍성군 지하수 관정의 평균 개발심도(지표 하 96 m 심도)까지 부존된 지하수 부존량(897,630천  $m^3/yr$ )의 약 11%에 불과하므로(Lee et al., 2018) 일시적인 과잉양수에 따른 대수층 완전고갈의 우려는 적다. 가뭄 시 지하수 과잉양수 관련, Kim et al.(2017)은 극심 가뭄 발생 시 일시적으로 지하수 개발가능량을 상회하는 지하수를 과잉 양수하여 공급하는 경우에도, 대수층은 막대한 지하수 부존량을 지니고 있기 때문에, 양수 초기 급격한 지하수 수위 저하를 제외하면 대수층의 지하수 공급 능력은 꾸준히 유지됨을 지하수 모델링을 이용하여 보고한 바 있다. 상세하게는, 충남 소재 OO 유역( $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ )에 대하여 가뭄 시기 일시적(약 100일)으로 공급할 수 있는 최대 취수량을 지하수 유동모델(MODFLOW)을 이용하여 평가한 바 있다. 이 결과, 대수층의 지하수 공급 능력은 평년(2010년)과 가뭄 시기(2015년)에 거의 동일함

**Table 2.** Multiple-number of ratio on groundwater usage for each province during drought periods against normal ones

Province	Multiple-number of ratio on groundwater usage during drought periods	Drought occurring year
Gyeonggi	1.3 times	2012, 2014~2017
Gangwon	1.5 times	2014~2017
Chungbuk	1.3 times	2014, 2015, 2017
Chungnam	1.1 times	2012, 2014, 2015, 2017
Jeonbuk	1.1 times	2012, 2014, 2015, 2017
Jeonnam	1.1 times	2014, 2017
Gyeongbuk	1.3 times	2014, 2015, 2017
Gyeongnam	1.4 times	2014, 2017
Average	1.3 times	



**Fig. 2.** Comparison on change of groundwater heads due to overdraft during (a) a normal year (i.e. 2010 calendar year) and (b) a drought one (2015) (referred from KRC, 2017).

**Table 3.** Evaluated maximum irrigation amounts of groundwater for some selected local-government during drought periods

Province	Local-government	Groundwater exploitable amounts ( $10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ ) (A)	Maximum irrigation amounts ( $10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ ) (B)	B/A <sup>†</sup>
Gyeonggi	Anseong	82,865	196,630	2.4
Gangwon	Wonju	132,201	252,180	1.9
Chungbuk	Yeongdong	76,902	123,126	1.6
Chungnam	Asan	60,011	153,962	2.6
Jeonbuk	Namwon	110,282	138,030	1.3
Jeonnam	Jangheung	83,099	94,526	1.1
Gyeongbuk	Chilgok	49,043	97,672	2.0
Gyeongnam	Jinju	94,757	214,747	2.3
Total		689,160	1,270,873	1.9

<sup>†</sup>B/A: A ratio of maximum irrigation amounts to groundwater exploitable one for some selective local-government during drought periods

을 보였고, 지하수 대수층은 장기 가뭄이 지속되어도 평년과 비슷한 양의 지하수 공급능력이 있음을 보였으며, 양수 중단 후 지하수위가 빠른 속도로 회복되어 지하수계에 큰 영향이 없음을 보인 바 있다(Fig. 2; KRC, 2017).

광역시도별 대표적인 시군구에 대하여 동일한 방법으로 산출한 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량은 <Table 3>과 같다. 시군구마다 다소 차이는 있지만, 가뭄 시 지하수 최대 취수량은 지하수 개발가능량의 약 1.9배(1.1~2.6배 범위) 내외로 산출되었다. 그런데, 여기에서 약 1.9배의 의미는 평년에 비해 가뭄발생 시 개발·이용 가능한 지하수량이 풍부해졌다는 의미가 아니다. 오히려 가뭄이 발생했을 때에는 이미 강수량에 해당하는 지하수량은 지하수위 저하 내지 이용량 증가에 의해 이미 많이 소실되었으므로, 좀 더 깊은 심도에 부존된 지하수를 최선을 다해 탐사하고 최적 위치를 개발하여 가뭄을 극복할 수 있는 지하수 수량을 찾아내어야 하는 노력을 의미한다(OCWD, 2015). 즉, 가뭄이라는 짧은 기간 동안에는 지하수 수문순환에 약

간의 악영향을 미치고 대수층이 자연 상태로 회복하는 데에 좀 더 시간이 걸릴지라도, 수문순환에 참여하는 지하수 수량 외에 대수층에 부존된 지하수를 일시적으로 과잉양수·이용하여, 단기간의 농업가뭄을 해소하고자 하는 의도가 있다. 또한 장기간의 과잉양수는 대수층 고갈, 지반 침하, 해안변 해수침투 증가 등 다양한 지하수 재해의 원인이 되므로, 가뭄이라는 짧은 기간 동안에만 일시적 과잉양수·이용을 허가하려는 의도 역시 담겨져 있다.

#### 4.2.2. 광역시도별 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량

농어촌지역 8개 광역시도별 평년 및 가뭄 발생 시 지하수 이용량 비율을 이용하여 광역시도별 가뭄 시 지하수 최대 취수량을 산출하였다(Table 4). 광역시도마다 다소 차이는 있지만, 지하수관리기본계획(MOLIT, 2017)에서 제시한 지하수 개발가능량과 비교 분석한 결과, 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량은 지하수 개발가능량의 약 1.3배(0.6~2.0배 범위) 내외로 산출되었다. 이는 앞선 대표 시



**Table 4.** Evaluated maximum irrigation amounts of groundwater for agricultural provinces during drought periods

Province	Groundwater exploitable amounts (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /yr) (A)	Maximum irrigation amounts (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /yr) (B)	B/A <sup>†</sup>
Gyeonggi	1,325,656	2,458,459	1.9
Gangwon	2,263,659	1,323,192	0.6
Chungbuk	893,670	1,598,136	1.8
Chungnam	1,006,130	1,984,906	2.0
Jeonbuk	1,008,125	1,278,102	1.3
Jeonnam	1,523,180	1,964,729	1.3
Gyeongbuk	2,196,457	2,290,404	1.0
Gyeongnam	1,342,939	1,849,602	1.4
Total	11,559,816	15,533,334	1.3

<sup>†</sup>B/A: A ratio of maximum irrigation amounts to groundwater exploitable one for each agricultural province during drought periods

군구별 최대 취수량 비율(약 1.9배, Table 4)에 비해 작은 값이다. <Table 4>는 전국을 대상으로 하고 있으므로, 산지와 구릉을 많이 포함하거나, 지표수에 의한 농업용 관개시설이 잘되어 있거나, 상수도 보급률이 높아 지하수 이용량이 낮은 시군구를 모두 포함하기 때문에, <Table 3>에 비해 상대적으로 그 비율이 적게 산출된 것으로 추정된다. 강원도의 경우, 넓은 면적(16,875 km<sup>2</sup>, 남한 면적의 약 16.8%)에 비해 적은 인구(약 156만명, 남한 인구의 약 3%)(GSI, 2021)가 소량의 지하수(186,144천 m<sup>3</sup>/yr, 8개 농어촌 광역시도 이용량의 약 7.5%)를 이용한다(MOE and K-water, 2019). 결과적으로 소량의 허가신고량을 기준으로 가뭄 시 지하수 최대 취수량을 산정하다보니, 면적 비율과 지하수 함양율을 이용하여 계산된 강원도 전체 지하수 개발가능량보다 적게 산출된 한계가 있다. 강원도는 해발 1,000 m 이상의 험준한 산지가 많고, 상대적으로 농경지가 협소(1,578 km<sup>2</sup>, 강원도 면적의 약 9.4%)하여(GSI, 2021), 이에 따라 지형적으로도 지하수를 개발·이용할 수 있는 지역이 지극히 제한적이다. 다만 원주(농경지 면적비율 13.5%; GSI, 2021), 횡성(농경지 면적비율 13.4%; GSI, 2021) 등 농지가 상대적으로 넓은 영서지방은 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량이 지하수 개발가능량의 각 1.9, 2.7배로 산출되기 때문에, 강원도 산지 일부를 제외하면 이 연구에서 적용한 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량은 비교적 타당한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 향후 용수구역 단위, 소유역 단위 가뭄 발생 시 최대 취수량 산출 시에는, 지하수 추가 개발이 가능한 평지(농지) 면적, 지하수 개발이 험난한 산지 지역 등을 구분하여 적용하는 방안 등 세부적인 변형 적용이 필요할 것으로 생각된다.

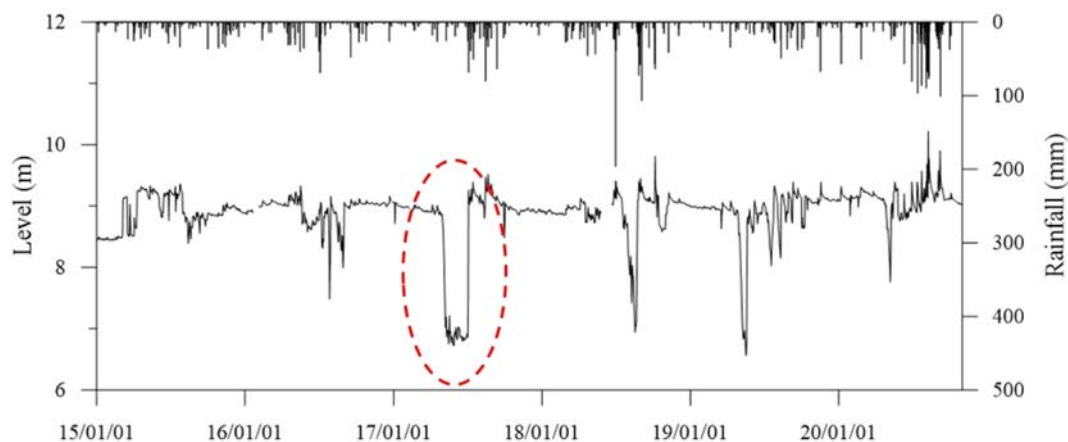
### 4.3. 지하수위 저하 한계치 설정

지하수위는 대수층에 포화된 지하수가 대기압과 평형을 이루고 있는 지점으로, 지하수위의 변화는 강수, 조석, 양수·이용, 지하수와 연결된 주변 하천수의 수위 변화 등 여러 가지 요인에 의해 발생한다.

가뭄 시 지하수 최대 취수량을 이용한 시군구별 지하수위 저하 한계치 설정에 대하여, 홍성군을 예로 들어 설명하면, 앞서 계산된 홍성군의 가뭄 시 최대 취수량은 약 94,980천 m<sup>3</sup>/yr이고, 면적은 446 km<sup>2</sup>(HS, 2021), 공극율은 수문지질도 기반 약 3%로 산출되었다. <Eq. 1>을 이용하여 산출한 홍성군의 지하수위 저하 한계치는 약 7.33 m로서, 2017년 가뭄 시 농어촌지하수 홍성2 관측공의 지하수위 하강 폭(약 3 m 내외; Fig. 3)보다 다소 여유로운 것으로 분석되었다. 이는 가뭄 발생 시 일시적으로 지하수 개발·이용 측면에서 홍성군은 약 2배 이상의 추가 지하수 개발·이용의 여력이 있음을 보여준다.

지하수위 저하 한계치를 대표적인 시군구별, 광역시도별로 확장하여 해석한 결과는 각 <Table 5>, <Table 6>과 같다. 여기서 C는 지하채 소재 농어촌지하수 관측공의 지하수위 저하 한계치를 나타낸다. D는 농어촌지하수 관측공의 연간 누적 관측자료 중, 표준강수지수(SPI) 대응 75~100%(습윤) 구간의 평균(average)값과 0~5.4%(극심가뭄)의 구간의 평균값의 차이를 나타낸다(Fig. 4). <Fig. 4>의 그래프는 관측공 개발 이래 일별로 관측된 지하수위를 과거 10일간의 이동 평균값으로 환산하고, 이를 매년 매 관측일마다 누적자료로 도시한 것으로, 미국 지질조사소에서 각종 수문자료(지하수위, 하천수위, 강수량)를 이용하여 제공하는 가뭄 정보(USGS, 2021)를 벤치마킹하였다. 그래프의 누적 구간은 표준강수지수(SPI) 대응 0~5.4%(극심가뭄), ~12.95%(심각가뭄), ~24.2%(보통가뭄),





**Fig. 3.** Long-term change on levels of one rural groundwater monitoring well (Hongseong II) : Dotted circle represents for drawdown of groundwater levels during drought periods of 2017 calendar year.

**Table 5.** Evaluated drawdown limitation of groundwater levels for some selected local-government during drought periods

Province	Local-government	Drawdown limitation of groundwater levels (m) (C)	Groundwater levels (m)		C/D <sup>†</sup>	C/E <sup>‡</sup>
			Difference between average groundwater level value ranged in percentile 75~100% and it in 0~5.4% (D)	Difference between median groundwater level value ranged in percentile 75~100% and it in 0~5.4% (E)		
Gyeonggi	Anseong	6.01	0.99	1.02	6.1	5.9
Gangwon	Wonju	9.02	1.81	1.45	5.0	6.2
Chungbuk	Yeongdong	5.38	2.25	2.31	2.4	2.3
Chungnam	Asan	5.14	1.82	1.68	2.8	3.1
Jeonbuk	Namwon	3.98	1.49	1.42	2.7	2.8
Jeonnam	Jangheung	3.93	0.75	0.86	2.0	2.5
Gyeongbuk	Chilgok	4.49	0.81	0.58	5.5	7.8
Gyeongnam	Jinju	6.66	4.90	3.67	1.4	1.8
Average		5.58	1.85	1.62	3.5	4.1

<sup>\*</sup>C/D: Multiple-number of ratio on drawdown-limitation depth of groundwater levels against a difference between an annual average value of groundwater levels ranging in percentile 75~100% and it in 0~5.4%

<sup>‡</sup>C/E: Multiple-number of ratio on drawdown-limitation depth of groundwater levels against a difference between an annual median value of groundwater levels ranging in percentile 75~100% and it in 0~5.4%

~75.0%(정상), ~100%(습윤) 구간으로 구분하여 도식화하였다. E는 75~100%(습윤) 구간의 중앙(median)값과 0~5.4%(극심가뭄) 구간의 중앙값의 차이를 나타낸다. C/D는 지하수위 저하 한계치가 관측공의 지하수위 변동 폭(D)에 비해 얼마만큼 아래 심도에 위치하는지를, C/E는 지하수위 저하 한계치가 중앙값(median)으로 계산된 변동 폭(E)에 비해 얼마만큼 아래 심도에 위치하는지를 비교하여 보여준 값이다.

대표적인 시군구에 위치한 농어촌지하수 관측공의 가뭄 발생 시 지하수위 저하 한계치는(Table 5), 평년지하수 변

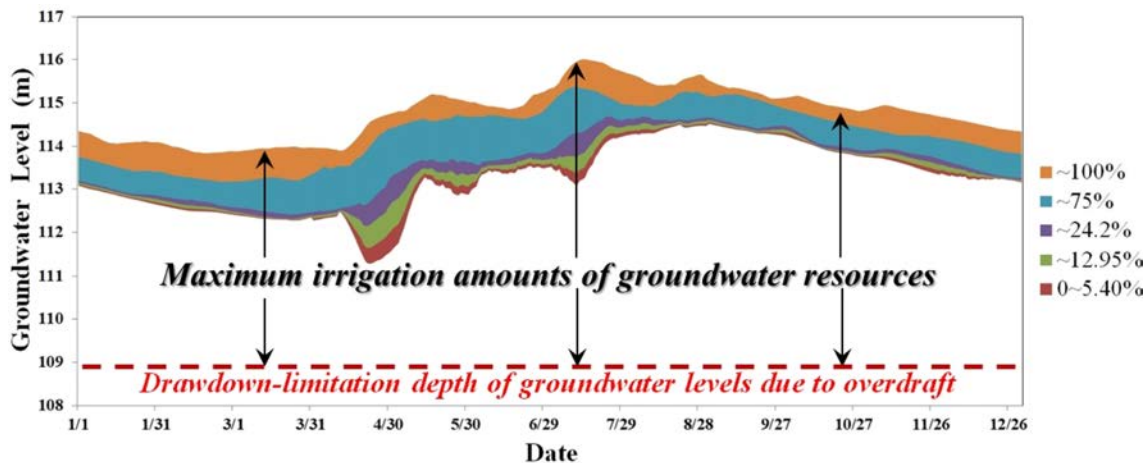
동 폭의 평균값 기준 약 3.5배(1.4~6.1배 범위) 심도, 중앙값 기준 약 4.1배(1.8~6.2배 범위) 심도까지 하강할 때까지 일시적으로 과잉 양수·이용할 수 있음을 보여준다. 시군구마다 지하수위 변동폭의 차이가 보이는 이유는, 관측공별로 누적된 고유 지하수위 변동 폭의 차이에 기인한다. 즉, 농어촌지하수관측망시스템(KRC, 2021)에서 공개 중인 관측공 지하수위를 이용한 순별 가뭄분석 자료를 살펴보면 관측공 설치연도가 오래되고 누적된 자료가 많은 지하수 관측공은 설치 이래로 주기적인, 그리고 다양한 지하수위 변동을 경험하였으므로 변동폭의 편차가 안정되게

**Table 6.** Evaluated drawdown limitation of groundwater levels for agricultural provinces during drought periods

Province	Drawdown limitation of groundwater levels (m) (C)	Groundwater levels (m)		C/D <sup>†</sup>	C/E <sup>‡</sup>
		Difference between average	Difference between median groundwater		
		groundwater level value ranged in	level value ranged in percentile		
		percentile 75~100% and it in 0~5.4%	75~100% and it in 0~5.4%		
		(D)	(E)		
Gyeonggi	4.38	0.94	0.89	4.7	5.0
Gangwon	2.28	1.54	1.42	1.5	1.6
Chungbuk	5.85	1.17	1.11	5.0	5.3
Chungnam	6.11	0.89	0.79	6.9	7.8
Jeonbuk	2.67	0.84	0.80	3.2	3.4
Jeonnam	4.24	1.20	1.13	3.6	3.8
Gyeongbuk	2.76	2.11	2.05	1.3	1.4
Gyeongnam	3.97	2.66	2.39	1.5	1.7
Average	4.03	1.42	1.32	2.8	3.1

<sup>\*</sup>C/D: Multiple-number of ratio on drawdown-limitation depth of groundwater levels against a difference between an annual average value of groundwater levels ranging in percentile 75~100% and it in 0~5.4%

<sup>‡</sup>C/E: Multiple-number of ratio on drawdown-limitation depth of groundwater levels against a difference between an annual median value of groundwater levels ranging in percentile 75~100% and it in 0~5.4%



**Fig. 4.** Maximum irrigation amounts of groundwater resources during short-term drought periods by applying drawdown-limitation depth: The dotted line represents for drawdown-limitation depth which was evaluated to be approximately three times of annual change on groundwater levels.

나타나는 편이고, 설치연도가 상대적으로 오래되지 않은 관측공은 그렇지 않은 편이다. 이에 따라, 이 연구의 결과를 적용하여 범용적인 값을 확보하기 위해서는 가급적이면 관측연도가 오래된, 최소 5년 이상 관측자료가 누적되어 관측공 설치 대수층의 특성을 대변할 수 있는 자료를 활용하는 것이 합리적이며, 관측기간이 짧은 관측공은 오류를 발생할 여지가 있으므로 분석에서 제외할 필요가 있다(KRC, 2020). 광역시도별로 위치한 농어촌지하수 관측공을 종합하여 8개 광역시도별 가뭄 발생 시 지하수위 저하 한계치는, 평년지하수 변동 폭의 평균값 기준 약 2.8

배(1.3~6.9배 범위) 심도, 중앙값 기준 약 3.1배(1.4~7.8배 범위) 심도까지 하강할 때까지 일시적으로 지하수를 과잉양수·이용할 수 있음을 보여준다(Table 6).

그런데, 지하수는 지표수와 마찬가지로 유한자원이기 때문에 무제한 개발하여 이용하기가 불가능하다. 결국 가뭄 시 지하수 최대 취수량에 대한 관리적인 측면에서도 일시적 과잉양수를 조절할 수 있는 범용적 기준이 분명히 필요하고, 따라서 전국 단위 지하수 관측공의 범용적인 지하수위 저하 한계치를 지정할 필요가 있다. 이 연구에서는 <Table 6>의 평균 값(2.8배), 중앙 값(3.1배)을 기준으로

로 하여, 가뭄 발생 시 과잉양수에 의한 범용적인 지하수 위 저하 한계치를 관측공 평년 지하수위 변동폭의 약 3.0 배 심도로 지정하였다. 이에 따라, 가뭄이라는 짧은 기간 동안에는 관측공의 지하수위가 이 심도까지 하강할 때까지 지하수 이용을 허용할 수 있도록 제안하였다(Fig. 4). 다만, 육지와 해안의 지하수 사용패턴이 다르고, 연약지반에서는 지하수 과잉양수에 대한 지반침하의 우려, 해안면에서는 해수침투 등의 우려가 있으므로 이들 지역에는 적용을 유의 또는 보류할 필요가 있다. 그런데, 동일한 강수량에서도 대수층을 구성물질의 차이로 인해 관측공 소재 지별로 지하수위 변동 특성이 상이하게 나타난다. 가장 흔한 예로, 점토층과 모래자갈층에 동일한 규격의 관정을 설치하고 동일한 강수 조건을 부여할 경우에, 강수에 따른 지하수위 변동 폭은 점토층에서 크게 나타난다. 향후 용수구역 단위, 소유역 단위에서 부지특이적인 지하수위 저하 한계치를 산출할 경우에는, 이 연구에서 제시한 방법을 이용하여 가뭄이라는 짧은 기간동안 해당 소유역의 지하수위 저하 한계치를 산정하고 허용가능한 양수량을 별도로 지정할 필요가 있다.

## 5. 결 언

가뭄 발생 시 지하수자원은 가뭄을 극복할 수 있는 가장 유용한 도구가 될 수 있으며, 일시적인 과잉양수는 비록 지하수 수문순환에 약간의 지체를 유발할 지라도, 이용 목적 상 가뭄을 해결하고 농어민의 농가소득을 보전하는 유용한 역할을 한다. 최근 기후변화로 인해 기상이변이 빈번해지고 강수량의 편차가 불규칙해지기 때문에 농업가뭄 대응 지하수 이용 측면에서는 기존의 지하수 개발가능량과는 달리 실제 설치된 관정 중심, 관정의 취수량 중심의 적절한 기준이 필요한 시점에 이르렀다.

이 연구에서는 전국 광역시도 및 농어촌지역 약 100개 시군구를 대상으로 가뭄 발생 시 지하수 최대 취수량을 산정하였으며, 이 결과 가뭄 발생 기간 동안에는 기존 지하수 개발가능량의 약 1.3배 수준까지 취수할 수 있음을 제시하였다. 그리고 과잉양수 역시 적절한 방법을 통해 모니터링하고 규제할 필요가 있기 때문에, 지하수 관측공을 이용한 지하수위 저하 한계치를 산출하였으며, 이 결과 지하수위 저하한계치는 평년 지하수위 변동폭의 약 3.0배 심도까지로 제한하였다. 다만, 가뭄을 제외한 평년에는 지하수 이용량을 국가에서 지정한 지하수 개발가능량 이내로 이용하도록 규제함과 동시에 관정 소유주는 허가·신고량을 준수하는 상시 지하수량 관리가 분명히 필요하다. 또

한 상습가뭄지역에는 가뭄대응 지하수자원 확보전략으로 이 연구에서 제안한 지하수 최대 취수량과는 별도로, 지하수 확보 시설물(지하댐, 모래저장댐, 인공함양 및 관정 연계이용 등)을 적용하여 추가 지하수자원을 확보할 필요가 있다.

이 연구는 지하수 허가신고이용량에 기반한 농어촌 광역시도 단위, 시군구 단위 연구결과로서, 향후 소유역 단위, 관측공 미설치 지역 등에 대한 해석방법을 개발하여 범용성을 확보할 필요가 있다. 나아가 이미 허가신고이용량이 지하수개발가능량에 근접해 있는 일부 시군구에 대해서는 이 연구의 방법 적용 시 지하수 고갈의 우려도 있다. 이에 따라 향후 여러 전문가의 의견을 청취하여 좀 더 합리적으로 가뭄 수요대응 지하수를 취수·이용할 수 있는 기준을 세심하게 만들 수 있다면, 용수구역, 소유역 등 작은 유역에 대해서도 좀 더 세부적이고 실질적인 기준 마련을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 원고는 환경부 수요대응형 물공급서비스 연구사업 「상시 가뭄지역의 지하수 최적 공급관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well Network 기술 개발」 과제의 연구비 지원에 의해 이루어졌다.

## References

- DWFGI (Daugherty Water for Food Global Institute at the University of Nebraska), 2018, The future of groundwater in California: Lessons in sustainable management from across the west, DWFGI, NE, USA, 120 p.
- GSI (Gangwon Statistical Information), 2021, [http://stat.gwd.go.kr/sub/sub03\\_10.asp](http://stat.gwd.go.kr/sub/sub03_10.asp) [accessed 21.02.04]
- HS (Hongseong county), 2021, <http://hongseong.go.kr> [accessed 21.02.04]
- Kim, W.G., Kim, J.Y., Lee, H.S., Lee, H.J., Koo, M.H., and Song, S.H., 2017, Agricultural drought assessment based on groundwater supply capacity (in Korean), Proceedings of 2017 fall KoSSGE meeting, Korean society of soil and groundwater environment, Jeju, Korea, 139 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2012, A white paper on the drought 2012 (in Korean), KRC, Uiwang, 1,500 p.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2017, Development of assessment technology for agricultural drought using the analysis of real-time groundwater data (in Korean), KRC,

Naju, 206 p.

KRC (Korea Rural Community Corporation), 2020, Development of a smart platform system to appraise change of agricultural groundwater reserves, KRC, Naju, 210 p.

KRC (Korea Rural Community Corporation), 2021, <https://groundwater.or.kr/mw/main.do> [accessed 21.02.04]

Lee, B.S., Park, J.H., Myoung, W., Son, J., Lee, S., Shim, G., and Song, S.-H., 2018, A note on estimating and managing groundwater reserves (in Korean), *J. Soil Groundw. Environ.*, **23**(6), 28-36.

Lund, J., Medellin-Azuara, J., Durand, J., and Stone, K., 2018, Lesson from California's 2012-2016 drought, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **144**(10), 1-13.

McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration time scales, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California, 179-184.

MOCT (Ministry of construction and transportation), 2007, The national groundwater management plan (2007-2016) (in Korean), MOCT, Gwachon, 337 p.

MOE (Ministry of Environment) and K-water, 2019, 2019 groundwater annual report (in Korean), MOE and K-water, Sejong, 372 p.

MOE (Ministry of Environment) and NDIAC (National drought information-analysis center), 2018, 2013~2018 sustainable drought analysis & assessment report (in Korean), MOE and

NDIAC, Sejong, 127 p.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transportation), 2015, A guide book on groundwater practical affairs (2015) (in Korean), MOLIT, Sejong, 360 p.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transportation), 2017, The national groundwater management plan 2nd Ed. (2017~2026) (in Korean), MOLIT, Sejong, 168 p.

NAS (National Institute of Agricultural Sciences), 2021, [soil.rda.go.kr](http://soil.rda.go.kr) [accessed 21.02.04]

OCWD (Orange county water district), 2015, Orange county water district groundwater management plan 2015 update, OWCD, CA, USA, 395 p.

U.S. ACE (United States Army Corps of Engineers), 1993, Lessons learned from the California drought (1987-1992), IWR report 93-NDS-5, U.S. ACE, VA, USA, 207 p.

USGS (United States Geological Survey), 2021, <http://pa.water.usgs.gov/apps/drought/> [accessed 21.02.04]

Walton, B., 2014, California, Texas, and the southwestern U.S. face a critical year for water supplies: 2014 preview, Part I, <http://www.circleofblue.org/2014/world/2014-preview-california-texas-southwest-face-critical-year-water-supplies> [accessed 20.01.01.]

Wilhite, D.A. and Glantz, M.H., 1985, Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water Intern.* **10**(3), 111-120.