

## 지리정보시스템을 이용한 우리나라 인공함양 개발 유망지역 분석

서정아<sup>1</sup> · 김용철<sup>1\*</sup> · 김진삼<sup>2</sup> · 김용제<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원

<sup>2</sup>GSI Water Solution, Inc.

## Site Prioritization for Artificial Recharge in Korea using GIS Mapping

Jeong-A Seo<sup>1</sup> · Yongcheol Kim<sup>1\*</sup> · Jin-Sam Kim<sup>2</sup> · Yong-Je Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

<sup>2</sup>GSI Water Solution, Inc.

### ABSTRACT

It is getting difficult to manage water resources in South Korea because more than half of annual precipitation is concentrated in the summer season and its intensity is increasing due to global warming and climate change. Artificial recharge schemes such as well recharge of surface water and roof-top rainwater harvesting can be a useful method to manage water resources in Korea. In this study, potential artificial recharge site is evaluated using geographic information system with hydrogeological and social factors. The hydrogeological factors include annual precipitation, geological classification based on geological map, specific capacity and depth to water level of national groundwater monitoring wells. These factors were selected to evaluate potential artificial recharge site because annual precipitation is closely related to source water availability for artificial recharge, geological features and specific capacity are related to injection capacity and depth to water is related to storage capacity of the subsurface medium. In addition to those hydrogeological factors, social aspect was taken into consideration by selecting the areas that is not serviced by national water works and have been suffered from drought. These factors are graded into five rates and integrated together in the GIS system resulting in spatial distribution of artificial recharge potential. Cheongsong, Yeongdeok in Gyeongsangbuk-do and Hadong in Gyeongsangnam-do, and Suncheon in Jeollanam-do were proven as favorable areas for applying artificial recharge schemes. Although the potential map for artificial recharge in South Korea developed in this study need to be improved by using other scientific factors such as evaporation and topographical features, and other social factors such as water-curtain cultivation area, hot spring resorts and industrial area where groundwater level is severely lowered, it can be used in a rough site-selection, preliminary and/or feasibility study for artificial recharge.

**Key words :** Artificial recharge, Site prioritization, Geographic information systems

### 1. 서 론

근래에 나타나고 있는 이상기후 및 지구 온난화 현상 등의 기후변화는 과학 분야의 주요 이슈일 뿐만 아니라 최근에는 사회, 정치, 경제 분야에 아우르는 화두가 되고 있다. 중요한 점은 이러한 지구환경변화에 의해 가장 큰 영향을 받는 부분이 인간에게 없어서는 안 될 물 환경이라는 점이다. 지구환경변화에 의한 강우패턴의 변화는 전 지구적으로 강수분포의 공간적/시간적 불균질성을 극대화

하는 방향으로 가고 있음은 과학적 자료로 뒷받침되고 있고, 언론과 인터넷을 통해 지구 곳곳에서 일어나는 현상들이 목격되고 있다. 지표수에 의존도가 높은 우리나라의 수자원공급 시스템은 이러한 지구환경변화에 의한 강우분포의 시간적/공간적 불균질성에 매우 취약한 단점을 갖고 있다. 따라서, 앞으로는 기후변화에 따른 변동성이 상대적으로 작은 지하수 자원 및 지하공간을 활용한 인공함양과 같은 수자원 공급 방안이 기후변화에 민감한 지표수를 주로 이용하는 중앙집중적 수자원공급시스템의 보조수단으

\*Corresponding author : yckim@kigam.re.kr

원고접수일 : 2011. 10. 20 심사일 : 2011. 11. 12 게재승인일 : 2011. 11. 15

질의 및 토의 : 2012. 2. 29 까지

로서 그 중요성이 커질 것이다(김용철 · 김용제, 2010).

지하수 인공함양 기술은 강수, 지하수 및 하수처리수 등 이용되지 않고 있는 잠재 수자원을 관정, 인공적 함양분지 및 습지, 수로, 지하댐, 우수 침투시설 등 인위적인 시설을 이용하거나 지표조건을 변경하여 강제로 지하공간에 저장하고, 불포화대 및 충적층의 자연 정화능력을 이용하여 양질의 수자원을 확보하는 기술을 말한다(김형수, 2003; 김용철 외, 2008). 인공함양은 강우빈도가 특정 기간에 집중되어 있는 한국에서는 이상적인 보조 수자원 확보 방법 중 하나로 사용되어질 수 있으며, 수자원 관리 면에서는 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 기후의 이상변화에 대처하기 위한 유용한 방법이기도 하다. 인공함양은 수요와 공급이 일정하지 않고 불균형이 심한 지역에 적용하여 급수시설의 저장용량을 최대화 해줌으로써 하루 단위, 계절적, 연도별 수급의 불균형에 의한 부족분을 채워 줄 수 있다. 또한 대수층의 물리화학적/생물학적 자정작용을 활용한 인공함양 기법을 통해 상수도 정수처리장에 보내는 원수의 수질을 개선할 수도 있다. 또한 기후변화에 의한 자연함양량 감소 및 과잉 양수에 의해 저하된 지하수위를 복원할 수 있으며, 생태학적 측면에서는 풍수기에 대수층에 저장된 지하수가 천천히 하류 하천에 물을 공급하면서 갈수기 하천의 건천화를 예방하는 등 다양한 용도로 활용될 수 있다(김용철 · 김용제, 2010).

인공함양 연구에 있어서 수십년에서 백년 이상의 역사를 갖는 미국, 호주, 독일, 네덜란드, 프랑스, 일본 등은 각 나라의 특성에 맞게 대수층 저장회수(ASR; Aquifer Recharge and Recovery), 함양분지, 지표침투, 강변여과, 빗물수확 등 다양한 방식 기술을 개발하여 적용해오고 있다(Murray et al., 2005). 그동안 우리나라에서는 인공함양에 대한 연구는 1990년대 후반부터 빗물수확, 강변여과, 지하댐의 타당성연구 및 실증연구 사례가 있으며, 정호주입식 인공함양은 제주도 한천변의 홍수저감용 저류지와 연계한 불포화대 정호주입식 인공함양 사례가 있다(김형수, 2003, 김용철 · 김용제, 2010).

영국은 1980년대 후반부터 ASR관련 프로젝트가 꾸준히 증가했으나 많은 프로젝트를 실제 적용함에 있어 여러 가지 기술적 불확실성이 불거지면서 이에 대해 체계적으로 이해하고, 이를 바탕으로 타당성 연구, 실증연구, 시설 확장의 단계적 개발을 가능하게 하기 위해 1998년부터 3년간 영국 전체 지질에 대한 조사가 이루어졌다(Gale, et al., 2002). 이에 반해 우리나라는 전국규모에서 수리지질학적인 특성과 사회적 수요를 반영하여 인공함양 유망지를 통합적으로 분석한 사례가 없었다.

본 연구의 목적은 인공함양을 통한 수자원 확보 및 관리가 필요하다고 예상되는 필요지역과 수리지질학적인 측면에서 정호주입식 인공함양이 적용 가능한 지역을 지리정보시스템(GIS)을 사용하여 각각 분석평가 한 후 중첩하여 최종적으로 전국 규모의 ‘인공함양 개발 유망지도’를 제작하는데 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 인공함양 가능지역 및 필요지역 선정

인공함양은 해당지역의 지질 및 수리지질 특성과 같은 과학적인 요인에 따라 제한 될 수 있으며 사회경제적 요인에 의해 필요지역이 차별화 될 수 있다. 따라서 이러한 다양한 요인을 고려하여 인공함양 가능지역과 인공함양 필요지역을 각각 파악한 후 이들 지역을 통합적으로 분석하고자 하였다.

먼저 인공함양 가능지역을 파악하기 위해서 지질도, 양수시험 자료, 지하수위 및 수질, 함양수원의 위치 등 관련 수문 및 수리지질 자료를 과학적 요인으로 선정하였다. 본 연구에서는 수치지질도, 국가지하수관측망 자료, 지하수 관측연보, 기상연보 등의 자료를 이용하여 비양수량, 지하수 면까지의 깊이, 강수량, 지질의 네 가지 제한요인을 도출한 후 인공함양 가능지역을 분석하였다. 산발적으로 존재하는 다양한 함양수원을 대한민국 전역을 대상으로 하는 광역적 분석에 모두 반영하기 어려워 모든 수원의 근원인 강수자료를 대표값으로 이용하였다. 인공함양 가능지역은 다음에 언급될 인공함양 필요지역과는 달리 동일 지역이라 하더라도 충적층과 암반층에 따라서 명확히 다른 지질 및 수리지질 특성을 보이게 되므로 이에 따라 인공함양 가능지역을 충적층과 암반층으로 구분하여 분석하였다.

인공함양 필요지역으로는 현재 상수도 공급이 원활하지 않은 지역, 자연재해에 의해 상습적으로 물 공급 시스템에 영향을 받는 지역(홍수, 가뭄, 한파 등), 연 평균 물 사용량에 비해 특히 물 사용량이 높은 기간이 존재하는 지역(온천, 관광지 등), 과거 지하수위에 비해 현재 지하수위 강하가 심한 지역(농경지, 과수원, 공단 지역 등) 등으로 예상할 수 있으나 관련 지역들에 대한 자료가 명확하지 않고 자료획득에 어려움이 있어 자료 획득이 가능했던 상수도 미급수 지역과 상습 가뭄재해 지역만을 제한 요인으로 하여 분석을 시도하였다.

### 2.2. 지리정보시스템 개요

지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)은 공간상 위치를 점유하는 지리자료(Geographic data)와

이에 관련된 속성자료(Attribute data)를 통합하여 처리하는 정보시스템으로서(김계현, 1998), 다양한 형태의 지리 정보를 효율적으로 수집, 저장, 갱신, 처리, 분석, 출력하기 위해 이용되는 하드웨어, 소프트웨어, 지리자료, 인적 자원의 총체적 조직체라고 정의할 수 있다. GIS는 대상의 단순한 표현뿐만 아니라 자원의 관리와 계획, 운영에 대한 결정을 가능하도록 해주는 일종의 계획 관리 도구로서의 의미를 지니고 있다. 또한, GIS가 공간적 위치 관계를 갖는 지리자료를 중심으로 한다는 점에서 속성자료만 관리하는 일반적 데이터베이스 관리시스템과 구별된다.

최근 들어, GIS는 세계 각국의 정부기관, 기업체 정보 산업계 등에서 큰 관심을 보이는 분야가 되었다. 자료의 양이 방대해지고 종류가 다양해짐에 따라 전통적인 자료 관리방법이나 기술로는 감당할 수 없게 되었다. 정부와 기업계의 입장에서 볼 때, GIS를 통해 정부나 기업의 기구는 각각 담당하는 지역의 각종현황을 정확히 파악함으로써 당면한 제반 문제들을 해결할 수 있고, 업무수행의 효율성을 제고시킬 수 있다. 또한, GIS는 급속히 발전하는 고도의 과학기술분야로서 유용성이 매우 높기 때문에 학술적으로도 급속한 진보를 보이고 있다. GIS는 지리학, 지질학, 자원공학, 해양학, 조경학, 토목공학, 경영학과 등과 같은 공간정보와 관련된 여러 학문분야에서 매우 효율적인 연구도구로 활용되고 있다.

GIS를 이용하여 인공함양 가능지역을 평가하기 위하여 공간, 시간 및 입력인자들이 지하수 함양에 미치는 중요도에 따라 입력인자별로 가중치를 부여하였으며, 입력인자의 값을 5등급으로 구분하였다. 인공함양 필요 지역과 인공함양 가능성이 높은 지역의 자료들을 통합한 후, 중첩시켜 최종적으로 인공함양 개발 유망지역 도면을 완성하였다.

### 3. 자료 처리 및 결과 분석

#### 3.1. 인공함양 가능지역

지하수의 인공함양은 자연함양 과정과 같이 해당 지역

의 수문특성, 토양특성, 지하지질 등의 요인들에 의하여 영향을 받는다. 인공함양에 영향을 미치는 요인들은 비양수량, 지하수면까지의 깊이(DTW), 강수량, 지질 등이 있으며(Table 1), 이 요인들이 인공함양에 미치는 영향은 각기 다르다. 비양수량, 지하수면까지의 깊이, 강수량, 지질 등 각각 요인의 값에 따른 인공함양 가능성의 정도를 Table 2에 나타내었다. 예를 들어, 강수량은 인공함양에 필요한 물을 공급해 주는 직접적인 요인으로 동일 조건하에서 강수량이 크면 함양량이 크고, 강수량이 작으면 함양량은 작게 나타난다. 지하수면까지의 깊이는 지표면에서 지하수면까지의 깊이를 나타내는 값으로, 이 값이 크게 나타날수록 인공함양으로 저장할 수 있는 물의 양이 많아진다. 이처럼 인공함양은 다양한 요인에 의해 좌우되며, 각 요인들이 인공함양에 미치는 영향도 다르다. 각 요인들의 자료처리와 분석은 아래와 같다.

**Table 1.** Influencing factors on artificial recharge potential

Influencing factor	Influencing element
Rainfall	Rainfall ratio
Geology	Rock type
Specific capacity	Fault and pore
Depth to water (DTW)	Depth from the surface

#### 3.1.1. 비양수량 (Specific capacity)

양수량과 수위 강하의 비로 정의되는 비양수량( $Q/S_w$ )은 대수층의 투수량계수와 높은 상관성을 보이는 수리상수로 알려져 있으며, 둘 사이의 관계식은 투수량계수를 산정하는데 널리 이용된다(Razack and Huntley, 1991; Huntley et al., 1992). 국내에서는 최병수(1999)와 우윤정 외(2003)가 제주도의 양수시험 자료를 분석하여 경험식을 제시한 바 있다. 또한, 전선금 외(2005)가 국가지하수 관측망(National Groundwater Monitoring Wells; NGMWs)의 314개 관정에 대한 양수시험 자료를 회귀 분석법을 이용하여 국내 암반 및 충적대수층이 나타내는 비양수량

**Table 2.** Artificial recharge potential and corresponding classification of specific capacity, DTW and Rainfall

Artificial recharge potential	Classification	Specific capacity ( $m^3/d \cdot m$ )		DTWL (m)	Rainfall (mm)
		deep	shallow		
Very low	V	< 2	< 5	< 3	1126.76 - 1205.98
Low	IV	2 - 8	5 - 15	3 - 6	1205.99 - 1334.92
Moderate	III	8 - 15	15 - 30	6 - 9	1334.93 - 1452.08
High	II	15 - 50	30 - 100	9 - 12	1452.09 - 1676.29
Very high	I	> 50	> 100	> 12	1676.30 - 2176.60

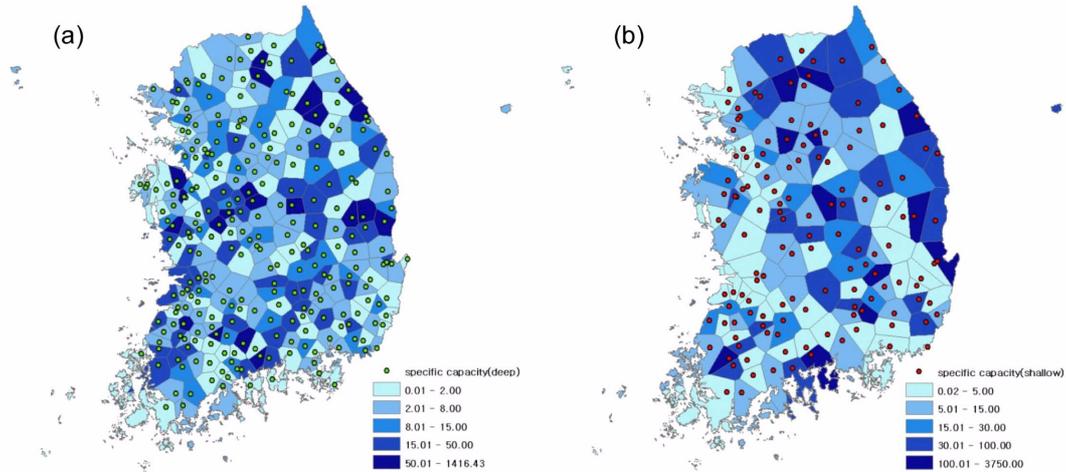


Fig. 1. Specific capacity of (a) fractured aquifer and (b) alluvial aquifer at the National Groundwater Monitoring Wells (NGMWs).

과 투수량계수와와의 경험식을 제시하였다. 국가지하수 관측망을 이용해 제시한 경험식에서 알 수 있듯이, 비양수량이 크면 투수량계수가 크게 나타나 좋은 대수층을 가지므로, 비양수량에 단층과 절리 등의 영향이 포함되어 있다고 전제하였다.

본 연구에서는 한국수자원공사에서 제공하는 국가지하수 관측망의 암반층 자료 269개 지점과 충적층 137개 지점의 장기양수시험 자료의 수위강하 자료와 양수량 자료를 이용하여 비양수량을 계산하였다. 비양수량 각 값들의 분포가 고르지 않기에 값 차이가 큰 곳을 분기점으로 정한 뒤, 데이터의 군집 패턴에 따라 분류되고 일반적인 상황에 적당한 내추럴 브레이크(ESRI Korea, 2008) 방법을 사용하여 5개의 등급으로 나누어 공간분포도로 나타내었다(Fig. 1). Table 2의 V등급은 비양수량이 작아 인공함양 가능성이 작으며, I등급은 비양수량이 크며 인공함양 가능성이 매우 높음을 보여준다. Fig. 1a는 국가지하수 관측망의 암반대수층의 비양수량을 도시한 그림으로, 0.01~1,416.43의 범위를 가진다. Fig. 1b는 충적대수층의 비양수량을 도시한 그림으로 0.016~3,750 범위의 값을 가진다. 비양수량은 강원도 춘천, 화천, 인제, 평창, 강릉 및 경상북도 영주, 청송, 영덕, 울진 등 일부지역에서 큰 값을 나타내며 암반층에서 보다 충적층에서 전체적으로 큰 값을 나타낸다. 이는 비양수량만을 고려했을 때 암반층보다 충적층에서 인공함양능력이 더 높음을 의미한다.

3.1.2. 지하수면까지의 깊이 (Depth To Water)

지표면에서 지하수면까지의 깊이가 깊을수록 인공함양시킬 수 있는 지하수의 저장 공간이 크게 되므로 인공함

양에 더욱 유리하다. 따라서 지하수면까지의 깊이는 인공함양 가능성 평가에 중요한 인자로 평가된다.

본 연구에서는 지하수면까지의 깊이를 알기 위해 국가지하수 관측망 관리시스템(www.gims.go.kr)에서 제공하는 관측망의 제원 및 지하수 수위자료를 획득하였다. 대상 관측소는 암반 지하수 관측정 316개와 충적층 지하수 관측정 157개를 합하여 총 473개 관측소이다. 국가 지하수 관측망 관리시스템에서 제공하는 관측정제원표를 이용하여 관측소의 표고, 정호심도, 위치에 대한 제원을 확보하였으며, 국토해양부와 한국수자원공사에서 발간하는 지하수 관측연보(1996~2008)의 월평균 지하수위 자료를 이용하여 연평균 지하수위 자료를 획득하였다. 인공함양 가능성 평가의 주요 자료인 지하수면까지의 깊이는 표고와 연평균 지하수위를 이용하여 계산하였다. 계산된 지하수면까지의 깊이는 관측정제원표에 기록된 지하수면까지의 깊이 자료와 다른 값을 보인다. 이는 관측정제원표에 기록된 지하수면까지의 깊이는 최초 관측공 굴착 시 어떤 채수나 시험 없이 측정된 자연수위로서 안정된 지하수위로 보기 어렵기 때문에 다소 차이가 나는 것으로 판단된다.

국가지하수망의 암반층과 충적층 지하수면까지의 깊이를 산출한 결과, 암반관정의 지표로부터 지하수면까지의 깊이는 0.76 m~252.71 m의 범위를 가지며, 충적관정은 1.39 m~31.77 m의 범위를 가진다(Table 3). 암반층과 충적층의 지하수면까지의 깊이(DTW)를 데이터의 군집 패턴에 따라 분류되는 내추럴 브레이크(ESRI Korea, 2008) 방법을 사용하여 5개의 등급으로 나누었다. 지하수면까지의 깊이가 깊은 곳은 인공함양가능성이 매우 높은 등급으로 나타났으며, 지하수면까지의 깊이가 낮은 곳은 인공함

양가능성이 매우 낮은 등급으로 나타내었다(Table 2). 암반층과 충적층 모두 지하수면까지의 깊이가 3~6 m 구간인 곳이 가장 많았으며, 충적층의 경우 지하수면의 깊이가 깊은 곳은 극히 드물었다(Fig. 2). 충적층은 암반층에 비해 비양수량이 크기 때문에 인공함양 능력이 높은 반면 지하수면까지의 깊이가 낮아 인공함양으로 저장할 수 있는 공간이 작아 인공함양 능력이 낮다.

국가 지하수 관측망 관리시스템에서 획득한 좌표 값을 이용하여 암반층 국가지하수 관측망 316개와 충적층 국가지하수 관측망 157개를 도시한 후(Fig. 3), 인근 지역의 값들을 나타내기 위해서 티센망도(Thiessen polygon method)를 연구 지역에 적용하였다. 각 관측지점을 연결하여 티센 삼각형을 만든 후, 두 점의 수직이등분선으로 만든 중심선을 연결하여 티센 다각형망을 만든다(Casaer et al., 1999). 여러 개의 티센 다각형망으로 이루어진 것을 티센망도라고 하며, 중심 값은 티센 다각형망의 대표 값을 나타낸다. Fig. 3은 티센망을 적용한 국가지하수관측망의 지하수면까지의 깊이를 5개의 등급으로 구분한 것이며, 각 값들은 티센 다각형망의 대표 값을 나타낸다. 제주도는 충적층 국가 지하수 관측망 자료가 없기 때문에 Fig. 3b에서와 같이 영역에서 제외하였다. 지하수면까지의

깊이를 도시한 결과 국가지하수 관측망의 암반층 지하수면까지의 깊이는 지역적 편차가 크을 알 수 있다. 특히, 제주도에서 제일 크게 나타나며 강원도와 경상남도 지역에서도 비교적 큰 값을 보인다. 충적층 지하수면까지의 깊이는 강원도 정선, 경상북도 달산, 경상남도 밀양, 충청남도 부여 등 일부지역에서 큰 값을 보이며, 전체적으로 지하수면까지의 깊이가 고르게 분포되어 있다.

3.1.3. 강수량

우리나라 연평균강수량은 1,245 mm로 세계 평균 880 mm의 1.4배이지만, 높은 인구밀도로 인해 1인당 강수량은 연간 2,591 mm로 세계평균인 19,635 mm의 1/8에 불과하다(국토해양부, 2008). 또한 우리나라는 세계적인 기후변화 영향으로 집중호우와 가뭄의 극값이 커지고 있고, 여름철에 연중 강수량의 상당량이 집중되기 때문에 수자원확보에 불리한 조건을 갖고 있다. 인공함양용 원수는 주로 하천수, 빗물 등 강수에 기인한 것들이므로, 강수량은 인공함양을 평가하는 주요인자다. 여름철 우기에 남아도는 강수를 주로 인공함양에 사용하므로 이 기간의 강수량을 기준으로 분석해야 하지만, 여름철 강수량과 연평균 강수량이 비례하므로 상대적인 평가를 위해서 연평균 강수량을 분석에 이용하였다.

기상청(www.kma.go.kr)에서 운영하고 있는 전국의 유인관측소와 무인관측소에서 관측한 자료를 이용한 통계 간행물인 기상연보로 부터 관측지점의 위치자료(Fig. 4)를 획득하였으며, 총 68개 관측지점에서의 월 평년값의 평균을 이용하여 평년강수량(mm)을 구하였다. 각 지점의 30년(1971~2000)동안 평년강수량을 티센망도를 이용하여 나타낸 후, 연구영역에 적용하였다. 티센망의 중심 값은 강

Table 3. The statistical analysis of the DTW of NGMW data

	Deep DTW(m)	Shallow DTW(m)
data No.	316	157
Max.	252.71	31.77
Min.	0.76	1.39
Ave.	8.73	5.34
Median	4.77	4.49
Var.	419.15	12.97

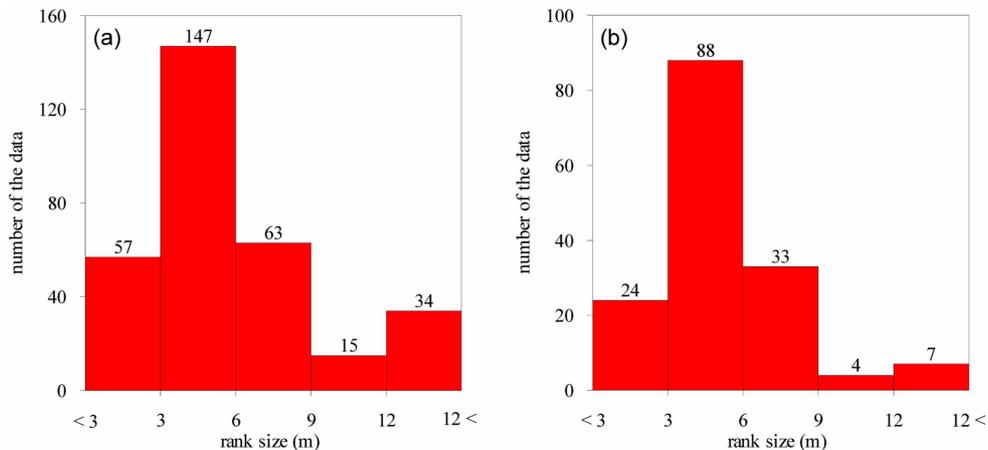


Fig. 2. Histogram of the depth to water at the NGMWs: (a) fractured aquifer, (b) alluvial aquifer.

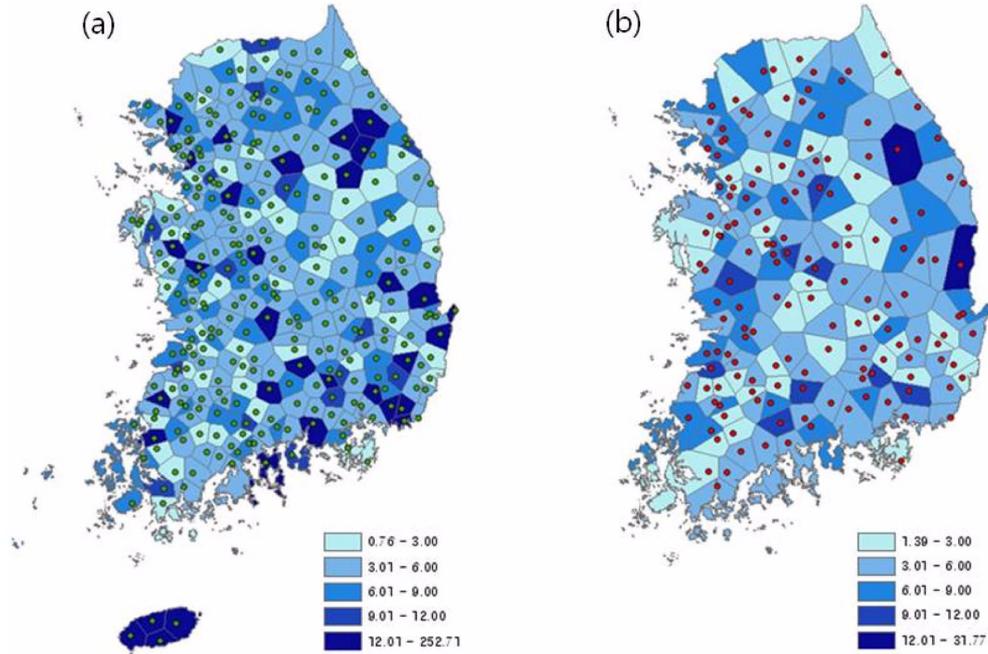


Fig. 3. Distribution of depth to water calculated by Thiessen polygon method: (a) fractured aquifer, (b) alluvial aquifer.

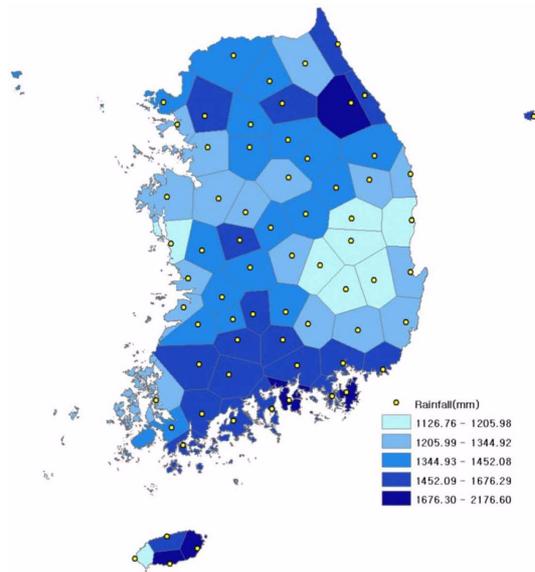


Fig. 4. Location of rain gauge station and distribution of annual precipitation calculated by the Thiessen polygon method.

수량 대표 값으로 이들은 1126.76~2176.60 mm 사이의 값을 가진다. 강수량의 분포가 고르지 않기에 값이 크게 차이가 나는 곳을 뽑아 분기점으로 사용하여, 데이터의 군집 패턴에 따라 분류되는 내추럴 브레이크 방법을 사용하여 강수량을 5개의 등급으로 나누었다(Table 2). I등급은 강수량이 많아 인공함양 가능성이 높은 지역을, V등급은

강수량이 적어 인공함양 가능성이 매우 낮은 지역을 나타낸다. Fig. 4는 강수량의 지역별 분포를 도시한 결과로 지역적 편차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 제주도 서귀포는 강수량이 많은 반면, 고산지역은 강수량이 적어 강수량의 지역적 편차가 크게 나타남을 잘 보여준다. 또한, 강수량은 제주도, 전라도 및 강원도 일부 지역에서 큰 값을 보이며, 경상북도에서 제일 작은 값을 보인다.

### 3.1.4. 지질

지질도는 암석, 단층, 습곡, 주향, 경사, 지질 단면 등과 같은 각종 지질자료를 포괄하는 것으로서 지질도에 포함된 각종 정보는 현재 자원개발, 환경오염 및 지질재해 등 다양한 용도로 활용되고 있다(이사로 외, 1999). 본 연구에서는 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)에서 제작한 25만 수치지질도를 이용하였으며, 지질도에 포함된 자료 중 암석자료를 사용하여, 암석이 갖는 대표 투수성을 자료처리에 활용하였다. 25만 지질도는 강릉지질도, 광주지질도, 대전지질도, 목포지질도, 부산지질도, 서울지질도, 안동지질도, 속초지질도, 여수지질도, 남천점지질도, 백아도지질도, 진남포지질도, 제주지질도 등 13개의 지질도로 나누어져 있다. 각 지역의 지질도를 남한 전체의 지질도로 통합하였으며, 통합된 지질도는 약 백여개의 다양한 암석의 분포를 나타낸다. 각

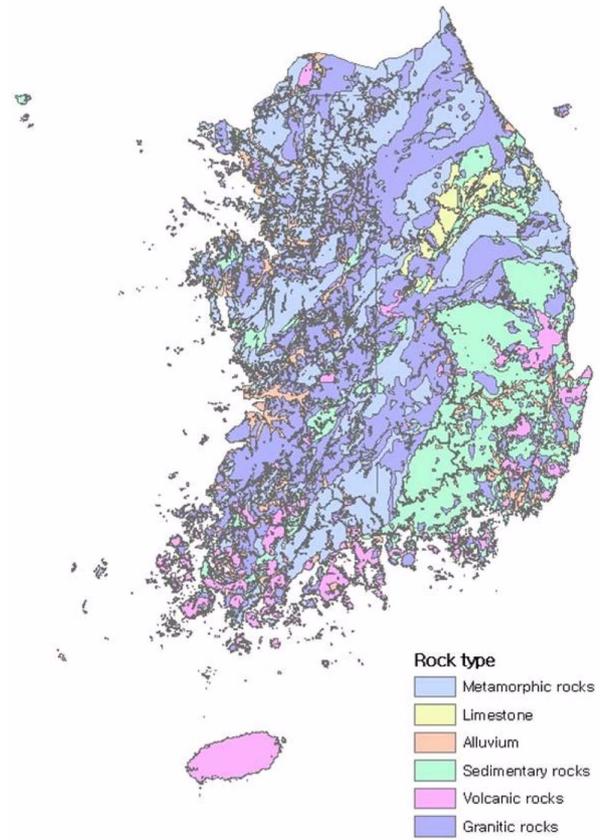
**Table 4.** Artificial recharge potential and its corresponding classification of rock type of South Korea

Artificial recharge potential	Classification	Rock type	Subdivided rock type
Very low	V	Granitic rocks	gabbro, hornblende, diorite, syenite etc.
		Metamorphic rocks	quartzites, gneiss, phyllite etc.
Low	IV	Volcanic rocks	basalt, andesite, basalt cinder cone etc.
Moderate	III	Sedimentary rocks	Yeonyil-group, Pyeongahn-group, sedimentary rock, sandstone, mudstone, conglomerate etc.
High	II	Limestone	limestone, Limestone-group, Joseon-supergroup etc.
Very high	I	Alluvium	Soil, sand, gravel, alluvium, landfill etc.

**Table 5.** Weights on the factors influencing on artificial recharge potential

Factors	Weights (%)
Specific capacity	40
Depth to water	30
Rainfall	20
Geology	10

각의 암석을 대표할 수 있도록 우리나라(남한) 국토의 암석을 크게 화강암, 현무암, 석회암 이외의 퇴적암, 변성암, 석회암, 충적층 등 6개의 암석으로 구분하였다(Fig. 5, Table 4). Table 4를 이용하여 세분화된 암석을 투수성이 높은 암석에서 투수성이 낮은 암석까지 5개의 대표 암석으로 나누었다. 대표 암석의 투수성은 국지적이 아닌 광역적인 영역에 적용하기 때문에 불확실성이 크다. 예를 들어, 일반 석회암의 경우는 충적층 보다 작은 수리전도도를 가지는 반면 카르스트 지형의 수리전도도는 충적층 보다 크게 나타남을 알 수 있다(Patrick, 1990). 그러나 카르스트지형이 석회암 분포 지역 내에 차지하는 면적이 넓지 않기 때문에 카르스트 지형이 있는 수리전도도를 전체에 적용하게 될 경우 불확실성이 크게 된다. 또한, 변성암과 화성암의 경우에는 단층과 절리의 발달 여부에 따라 수리전도도가 10만배정도 차이가 난다. 이처럼 단층과 절리의 발달 정도, 카르스트지형의 유무, 공동의 유무 등에 따라 암석의 수리전도도 값에 대한 불확실성이 크게 나타난다. 본 연구에서는 비양수량에 단층과 절리의 영향이 반영되었다고 가정하였기에 화성암과 변성암의 수리전도도에 단층과 절리의 영향이 반영되지 않는 수리전도도를 이용하기로 하였다. 수리전도도가 낮은 값을 보이는 화강암과 변성암을 하나의 등급으로 통합하여, 화강암 · 변성암 - 퇴적암 - 석회암 - 충적층 - 화산암의 순으로 구분하였다. 화산암은 투수성이 좋아 지하수 함양에 가장 중요한 역할을 하는 암석이며, 화강암 · 변성암으로 갈수록 투수



**Fig. 5.** Classified geological map of South Korea based on the classification of Table 4.

성이 작아지고 지하수 함양에 기여하는 정도도 작아진다. 화산암 자체는 투수성이 결정질암 다음으로 낮지만, 우리나라의 화산암 지역은 클링커 및 용암류 경계와 같은 투수층이 잘 발달한 지역이 많아 이를 반영하여 1등급을 부여하였다. 구분한 암석을 공간분포도로 도시한 결과(Fig. 5), 변성암과 화강암은 한반도 북부와 중부 지역에 넓게 분포하고 석회암은 강원도 영월, 충북 단양의 일부지역에 국한된다. 또한, 화산암은 제주도 와 해안가에 분포하며 퇴적암은 주로 경상남도 와 경상북도 지방에 분포함을 알 수 있다.

3.1.5. 결과 분석

앞에서 언급한대로 지하수 인공함양에 영향을 미치는 네 개의 요인(비양수량, 지하수면까지의 깊이, 강수량, 지질)을 도출하였고 요인을 각각 5개의 등급으로 분류하였다. 가중치는 지하수 함양에 주요한 영향을 미치는 자료일수록 큰 값을 부여하였으며, 비양수량 40%, 지하수면까지의 깊이 30%, 강수량 20%, 지질 10%를 주었다(Table 5). 각 자료의 등급에 따라 다양한 범위의 값을 부여하였다. 즉, 완전한 지하수 함양을 100%라고 했을 때, I 등급(100~80%), II 등급(80~60%), III 등급(60~40%), IV 등급(40~20%), V 등급(20~0%)으로 분류하였다. I 등급부터 V등급까지 각각의 평균 함양율인 90, 70, 50, 30, 10%를 이용하여(Kamaleshwar et al., 2010; Mashael Al Saud, 2010). 가중치와 자료등급의 함양율을 곱하여 인공함양의 효율을 구하였다(식 1). 예를 들어, II등급 강수량 자료가 가지는 지하수함양의 효율(E)은  $70 \times 20 / 100 = 14$ 의 값을 가진다(Table 6).

$$\text{지하수 함양의 효율}(E) = \text{자료 등급} \times \text{가중치} \quad (1)$$

앞서 언급한 비양수량, 지하수면까지의 깊이, 강수량, 지질 등 인공함양에 영향을 미치는 자료들을 중첩하여 지하수 함양의 효율 값을 산정한 후 인공함양가능 정도를 도시하였다(Fig. 6). Fig. 6a는 암반층에 대한 인공함양 가능성을 도시한 그림으로 강원도와 전라남도 및 경상남도 일부지역에서 크게 나타난다. Fig. 6b는 지질자료를 제외한 후 충적층에 대한 인공함양 가능성을 도시한 그림이며, 암반층과 비슷한 양상을 보이거나 영역이 더 넓음을 알 수 있다. 또한 충적층 인공함양가능성이 제주도에서 낮은 값

을 보이는데 이것은 제주도에 대한 충적층 국가지하수 관측망 자료의 부재로 인하여 지하수면까지의 깊이, 비양수량 등의 자료 값이 입력되지 않았기 때문이다.

3.2. 인공함양 필요지역

인공함양이 필요하다고 예상되는 지역에는 현재 물 공급이 원활하지 않은 지역, 자연재해에 의해 상습적으로 물 공급 시스템에 영향을 받는 지역 등으로 요약하여 설명하였다.

인공함양 가능지역은 수리지질 및 수문학적 특성에 기반하여 함양능력을 평가했지만, 최종적으로 인공함양 개발 유망지역을 평가하기 위해서는 인공함양 기술을 적용하여 추가적인 수자원을 확보할 필요가 있는 지역을 조사할 필요가 있다.

3.2.1. 상습 가뭄 재해 지역

상습 가뭄 재해 지역을 평가하기 위하여 소방방재청에서 제공하는 상습가뭄재해지역 현황 자료를 이용하였다. 총 122개소의 생활용수와 농업용수에 대한 자료를 24개소에 대한 시군구 자료로 나타내었다(Table 7). 상습가뭄해제 지역, 미해제 지역, 그리고 해제 지역과 미해제 지역이 함께 공존하고 있는 지역을 Table 7의 비고란에 표시하였다. 각 관측지점의 수요량, 공급량 및 부족량 자료를 이용하여 생활용수는 인구자료, 농업용수는 면적자료로 면적(인구) 대비 부족량을 구하였으며, 상수도 보급으로 인한 상습 가뭄 해제지역은 0.5, 미해제 지역은 1의 가중치를 부여하여 가중 표준 부족량을 구하였다.

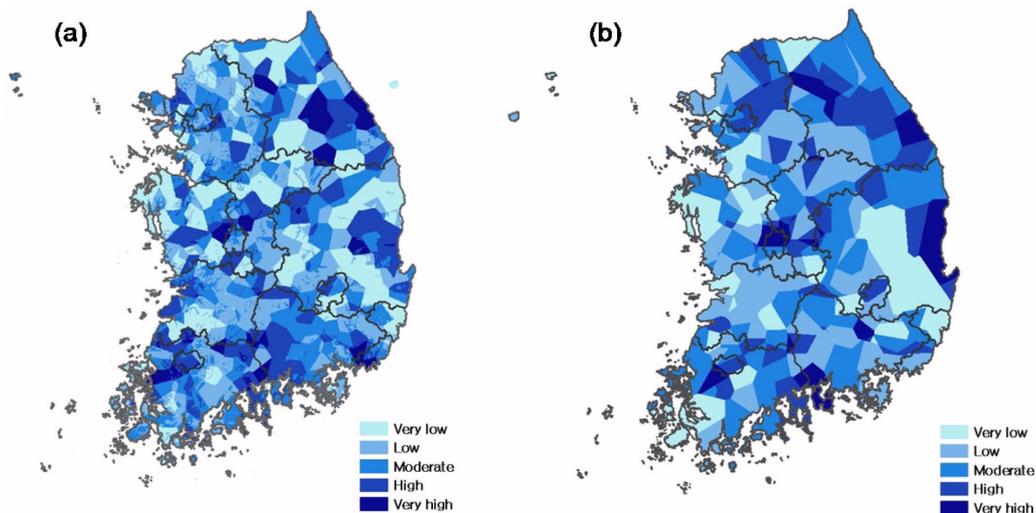


Fig. 6. Distribution map of artificial recharge potential in (a) fractured aquifer and (b) alluvial aquifer.

**Table 6.** Artificial recharge potential calculated by multiplying each factors by different weights

		← High Artificial recharge potential Low →				
Factor	Class	I	II	III	IV	V
Specific capacity	Weights (%)			40		
	Rates	90	70	50	30	10
	<b>Effectiveness</b>	<b>36</b>	<b>28</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>4</b>
DTWL	Weights (%)			30		
	Rates	90	70	50	30	10
	<b>Effectiveness</b>	<b>27</b>	<b>21</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>3</b>
Rainfall	Weights (%)			20		
	Rates	90	70	50	30	10
	<b>Effectiveness</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>2</b>
Rock type	Weights (%)			10		
	Rates	90	70	50	30	10
	<b>Effectiveness</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

**Table 7.** Water shortage for agricultural use and domestic use in the habitual drought areas (data obtained by personal contact with National Emergency Management Agency)

Province	si, gun, gu	Area(ha)/ population (person)	Volume of water (m <sup>3</sup> /day)			WNWS <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /(d · km <sup>2</sup> ) <sup>(2)</sup> or m <sup>3</sup> / (d · person) <sup>(3)</sup> )	Status
			Demand	Supply	Shortage		
Gyeongsangbuk-do	Yeongyang	570	2060	1500	560	0.71	clear-unclear
	Yeosu	12.2	361	150	211	8.74	clear
Gyeonggi-do	Gimpo	263	5030	2450	2580	9.83	unclear
	Anseong	97	5075	3383	1692	9.95	clear
	Hapcheon	7	42	17	25	1.85	clear
Gyeongsangnam-do	Uiryeong	38.5	83.5	10	73.5	1.91	unclear
	Namhae	237	2370	1150	1220	4.25	clear-unclear
	Hadong	69	875	260	615	6.48	clear-unclear
Gyeongsangbuk-do	Yeongdeok	340.3	15431	9051	6380	11.06	clear
	Cheongsong <sup>(4)</sup>	5/175	500/175	200/70	300/105	30.3 <sup>(6)</sup>	clear
Incheon	Ongjin <sup>(5)</sup>	-/262	506	91	415	0.99	clear
	Wando	60	220	109	111	0.86	clear
	Jindo	85	450	250	200	1.58	clear
	Muan	766.7	5250	2000	3250	2.19	clear
Jeollanam-do	Hwasun	152.1	2307	1137	1170	5.60	clear
	Yeosu	118	3872	2418	1454	7.62	clear
	Gwangyang	6.5	180	80	100	7.69	clear
	Suncheon	24	1210	250	960	20.00	clear
	Hampyeong	10	500	80	420	21.00	clear
	Jeongeup	21	200	100	100	4.76	unclear
	Namwon	478	23900	18950	4950	6.43	clear-unclear
Jeollabuk-do	Muju	118.5	1550	131.5	1418.5	11.56	clear-unclear
	Jinan	15	750	300	450	15.00	clear
	Imsil	155	22050	7410	14640	47.10	clear

(1) WNWS= Weighted Normalized Water Shortage

(2) Water shortage in agricultural use at the habitual drought area

(3) Water shortage in domestic use at the habitual drought area

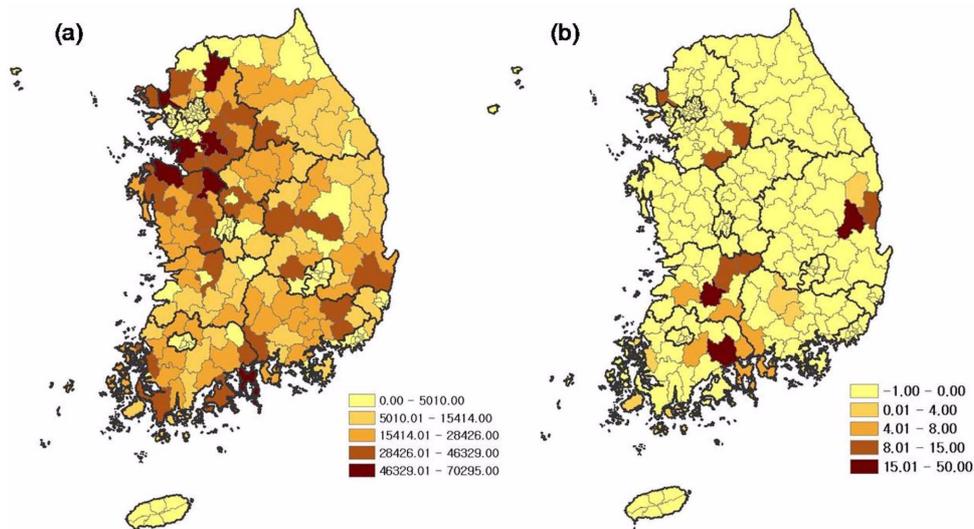
(4) Water shortage area for both agricultural use and domestic use

(5) Water shortage area only for domestic use

(6) Sum of weighted normalized water shortage for both agricultural use and domestic use

**Table 8.** Classification on the necessity of artificial recharge on the factors of the unsupplied population and the water shortage at the habitual drought area

Necessity for artificial recharge	Classification	Weighted normalized water shortage (m <sup>3</sup> /(d · km <sup>2</sup> ) or m <sup>3</sup> /(d · person))	Unsupplied population (person)
Very low	V	< 5,010	< 0
Low	IV	5,010 - 15,414	0 - 4
Moderate	III	15,414 - 28,426	4 - 8
High	II	28,426 - 46,329	8 - 15
Very high	I	46,329 - 70,295	15 - 50



**Fig. 7.** Distribution map of artificial recharge necessity on the respect of (a) the population unsupplied from national water works and (b) the habitual drought area.

$$\begin{aligned} &\text{가중 표준 부족량 (Weighted(Normalized) water shortage)} \\ &= \text{부족량/면적 or 인구} \times \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha = 1$  이면 미해제 지역,  
 $\alpha = 0.5$  이면 해제 지역

이 값은 0.71~47.1의 범위를 갖으며, 이를 5개의 등급으로 나누었다(Table 8). 식 (2)를 이용하여 산출한 부족량/면적 값이 큰 곳은 가뭄으로 인한 피해가 많아 인공함양 필요성이 매우 큰 I등급으로, 부족량/면적 값이 작은 곳은 가뭄피해가 적어 인공함양 필요성이 낮은 V등급으로 나타내었다. 이 값을 GIS프로그램을 이용하여 입력한 후 등급별로 구분하여 도시하였으며(Fig. 7a), 상습가뭄해제지역에 속하는 않는 곳은 임의로 -1값을 부여하였다. 이 값은 인공함양 필요성이 가장 낮은 영역에 포함된다. 가뭄재해는 전라도, 경상북도, 경기도 일부 지역에 나타나며 특히, 전라북도 임실군, 전라남도 순천시, 경상북도 청송군에서 가뭄으로 인한 피해가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2.2. 물 공급이 원활하지 않은 지역

물 공급이 원활하지 않은 지역을 파악하기 위해 가뭄에 취약한 상수도 공급지역의 말단, 광역 상수도 미보급 지역을 대상으로 하여 환경부에서 발간된 2008년 상수도 통계(상)를 참고하였다(환경부, 2009). 186개의 시군구 단위로 정리된 미급수 현황자료를 GIS 자료 분석을 위해 입력하였으며, 광주광역시와 대전광역시의 기타지역은 자료의 불확실성으로 인해 자료에서 제외하였다. 0~70,295(명)의 미급수 인구를 5개 등급으로 나누어 분류하였다(Table 8). 미급수 인구가 적어 인공함양의 필요성이 작은 지역을 V등급으로, 미급수 인구가 많아 인공함양 필요성이 큰 지역을 I등급으로 나타내었다. Fig. 7b는 GIS 프로그램을 이용하여 미 급수현황 자료를 입력한 후 도시한 그림으로, 경기도와 충청남도 지역에 물 공급이 원활하지 않은 지역이 많이 분포하며, 경상도 일부지역과 전라도 일부지역에서 물 공급이 원활하지 않음을 알 수 있다.

3.2.3 결과분석

인공함양이 필요하다고 예상되는 지역은 현재 물 공급이 원활하지 않은 지역, 자연재해에 의해 상습적으로 물 공급 시스템에 영향을 받는 지역 등이다. 분석 자료들을 GIS프로그램을 이용하여 입력한 후, 각각의 자료를 통합하고, 중첩하여 지하수 인공함양가능성이 높은 지역을 나타내는 도면을 도시하였다. 자료 값에 따라 인공함양의 필요성이 높은 곳을 I등급으로 필요성이 낮은 곳을 V등급으로 하여 I, II, III, IV, V의 다섯 범위의 등급으로 나누었다. 인공함양 필요지역은 인공함양 가능지역과 달리

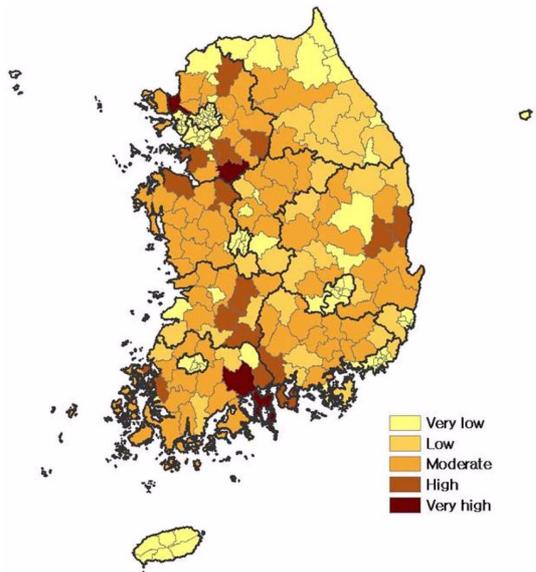


Fig. 8. Distribution map of artificial recharge necessity resulting from overlaying the factors of the unsupplied population and the habitual drought area.

상대적 가중치를 부여하지 않았으며, 각 요소에 대해 I등급부터 V등급까지 각각 5에서 1까지의 값을 입력하였다. Fig. 8은 상습가뭄재해지역과 미급수 지역을 중첩하여 인공함양 필요지역을 도시한 그림이다. 인공함양 필요성은 경기도와 전라도 일부 지역에서 매우 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 경기도와 전라도 일부지역은 물 공급이 원활하지 않거나 상습적인 가뭄 피해를 받고 있으며 결과적으로 인공함양 개발 필요성이 높음을 시사한다.

3.4. 인공함양 개발유망지역

비양수량, 지하수면까지의 깊이, 강수량, 지질 등의 주요 요인에 따라 상대적 가중치 부여하여 분석한 인공함양 가능지역과, 상수도 미급수지역과 상습가뭄재해지역에 대한 자료에 가중치를 부여하지 않고 산술적으로 분석한 인공함양 필요지역을 중첩하여 ‘인공함양 개발 유망지역’으로 도시하였다(Fig. 9). 인공함양 개발 유망지역을 도시하기 위하여 각 인공함양 가능지역과 인공함양 필요지역을 매우 낮음부터 매우 높음까지의 다섯 단계에 대하여 각각 1에서 5까지의 점수를 부여한 후 합산하였다. 이 값들은 2~10의 범위를 가지며, 이 값들을 세 단계의 등급으로 나누어 Fig. 9에 나타내었다. 제주도의 경우 인공함양 가능 지역 분석 시에 사용된 국가 지하수 관측망 자료 등의 미흡으로 인하여 분석에서 제외하였다. Fig. 9b는 충적층에 대한 인공함양 개발 유망지역을 나타내며, 공간분포도에 지질도 자료를 반영하지 않았다. 암반층과 충적층 모두 전체적으로 경상남도와 경기도, 전라남도가 인공함양 개발 가능성이 높게 나타났다. 특히, 암반층의 경우 경북 청송, 영덕, 강원도 평창, 강릉, 경남 산청, 하동, 전남 남

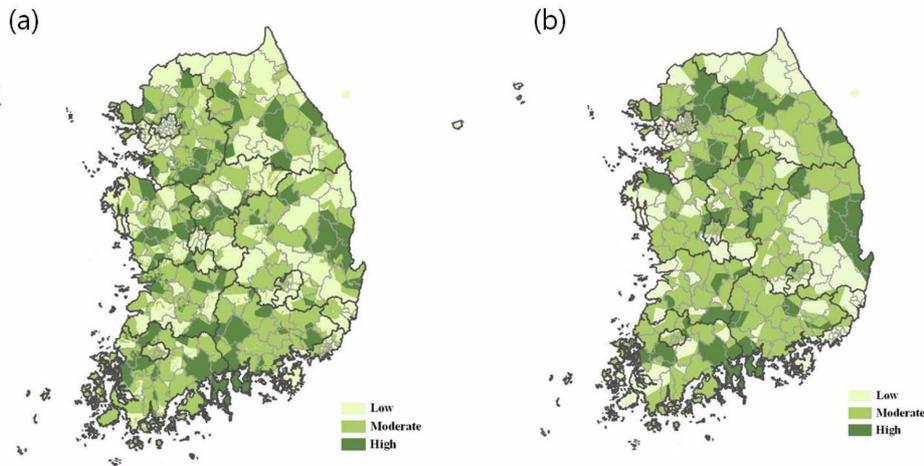


Fig. 9. Final distribution map of the area feasible to application of artificial recharge obtained by overlaying the potential map and necessity map: (a) fractured aquifer and (b) alluvial aquifer.

원, 순천 등은 인공함양 개발 가능성이 매우 높게 나타났으며, 충적층은 전남 순천, 광양일부 지역과 경북 영덕, 청송, 경기도 가평, 남양주, 경남 하동 등에서 인공함양 개발 가능성이 매우 높게 나타났다.

### 3.5. 토의

본 연구는 정호주입식 인공함양을 대상으로 분석한 것이며, 함양분지, 지하댐, 강변여과 등의 다른 인공함양 방법에는 불포화대 침투율, 지형구배, 하상 침투속도 등의 각각의 기술에 맞는 인지를 추가로 분석해야 할 것이다. 또한, 인공함양의 여러 목적 중 수질개선이 아닌 수자원 저장 및 확보에 초점을 두고 분석하였으며, 수질개선 목적의 경우 환경부에서 운영하는 전국 지하수 수질 관측망 자료도 활용해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 인공함양 개발 유망지역은 전국규모에서 정량적으로 평가한 시도이며, 실제 특정 시군구 규모에서의 인공함양 가능성 여부 및 인공함양을 통해 가능한 수자원확보량은 국지적인 수리지질학적인 불균질성에 대한 상세한 조사와 작은 규모에서 확보하기 쉬운 다양한 사회지리적 정보를 통합하여 제시해야 할 것이다. 다만, 작은 규모에서도 본 연구에서 제시한 평가방법은 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

우리나라는 여름철에 연중 강수량이 집중되기 때문에 수자원 확보에 불리한 조건을 갖고 있다. 강우가 특정 기간에 집중되는 우리나라의 기후 특성상 지하수 인공함양은 심화되는 기후변화에 대응하여 보조수자원을 확보할 수 있는 유용한 방법 중 하나이다.

본 연구에서는 지하수 인공함양에 영향을 주는 주요 요인들을 결정하고 GIS프로그램을 이용하여 한국 내에서 인공함양 개발가능성 지역을 분석하였다. 물 공급이 원활하지 않은 지역, 상습적인 자연재해로 물 공급에 영향을 받는 지역 등 인공함양 필요지역과 비양수량, 지하수면까지의 깊이, 강수량, 지질 등의 요소들을 사용하여 인공함양의 가능지역의 자료들을 통합한 후, 중첩시켜 최종적으로 “인공함양 개발 유망지역”을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 암석, 강수량, 비양수량, 지하수면까지의 깊이 자료를 이용하여 인공함양 가능성이 높은 지역을 평가하여 공간 분포도를 제시하였다. 비양수량은 강원도 춘천, 화천, 인제, 평창, 강릉 및 경상북도 영주, 청송, 영덕, 울진 등

일부지역에서 큰 값을 나타내며, 암반층에서 보다 충적층에서 전체적으로 큰 값을 보인다. 강수량의 지역별 공간 분포는 지역적 편차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 제주도 서귀포는 강수량이 많고, 고산지역은 강수량이 적게 나타난다. 암반층 지하수면까지의 깊이는 강수량의 공간분포도와 같이 지역적 편차가 크게 나타난다. 특히, 제주도에서 지역적 편차가 매우 크며, 강원도와 경상남도 지역에서도 비교적 큰 값을 보인다. 충적층 지하수면까지의 깊이는 강원도 정선, 경상북도 달산, 경상남도 밀양, 충청남도 부여 등 일부지역에서 큰 값을 보이며, 전체적으로 지하수면까지의 깊이가 고르게 분포되어 있다.

2. 미급수 지역과 상습기름재해지역의 자료를 이용하여 인공함양 필요지역의 공간 분포도를 제시하였다. 경기도와 충청남도 지역에 물 공급이 원활하지 않은 지역이 많이 분포하며, 경상도 일부지역과 전라도 일부지역에서 물 공급이 원활하지 않음을 알 수 있다. 기름재해는 전라도, 경상북도, 경기도 일부 지역에 나타나며, 특히 전라북도 임실군, 전라남도 순천시, 경상북도 청송군에서 기름으로 인한 피해가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

3. 인공함양에 영향을 미치는 지질, 지하수면까지의 깊이, 비양수량, 강수량 등의 자료를 통합한 후 중첩하여 나타낸 결과 국가지하수 관측망 암반층과 충적층의 인공함양 가능성은 강원도와 전라남도 및 경상남도 일부 지역에서 크게 나타나며, 상수도 공급이 원활하지 않은 지역, 상습기름재해 지역 등 인공함양이 필요하다고 생각되는 지역의 자료를 통합한 후 중첩하여 나타낸 결과 인공함양 필요성은 경기도와 전라도 일부 지역에서 매우 크게 나타난다. 인공함양 가능지역과 인공함양 필요지역의 자료를 중첩하여 중첩한 후 “인공함양 개발 유망지역”을 도시한 결과 전체적으로 경상남도와 경기도 전라남도가 인공함양이 양호한 지역으로 나타났으며 특히, 경북 청송, 영덕, 경남 하동, 전남 순천 등은 인공함양 가능지로 매우 타당한 것으로 나타났다.

4. 개발된 평가기술은 추후 대체 수자원 확보 및 이상 기후 현상에 대처 등의 목적으로 인공함양 개발 유망지역 평가 및 선정 시 중요한 참고자료가 될 것으로 기대된다. 인공함양 개발유망지역 선정에 GIS 기술을 사용함으로써 작업 완료 후에도 계속해서 변화 또는 수집되는 자료를 용이하게 업데이트 할 수 있으며 인공함양의 필요성과 가능성 변화에 탄력적으로 대처할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 부분적으로 21세기 프론티어 연구 개발 사업

인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-3)과 한국지질자원연구원 주요사업의 연구비지원(과제코드 GP2009-009-01)에 의해 수행 되었습니다. 국가지하수관측망의 수위 및 양수시험 자료를 제공해주신 한국수자원공사 조사기획처의 관계자분께 심심한 감사의 뜻을 전합니다.

## 참 고 문 헌

- 국토해양부, 한국수자원공사, 1999~2008, 지하수 관측연보.
- 김계현, 1998, GIS 개론, 대영사, p. 426.
- 김용철, 김용제, 2010, 대수층 함양관리 기술 동향, 지질학회지, **46**(5), p.521-533.
- 김용철, 김용제, 문덕철, 강봉래, 고기원, 박기화, 2008, 제주친화형 대수층 인공함양 기술, 제 7회 제주지하수 학술세미나 자료집.
- 김형수, 2003, 한국에서의 인공함양 적용 사례 및 개발 방안, “지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발” 연구성과 발표 및 지하수 인공함양 국제 심포지엄 자료집. p. 1-30.
- 소방방재청, 상습가뭄해제지역현황 (personal contact).
- 우윤정, 함세영, 정재열, 이상선, 정차연, 박윤석, 김봉상, 2003, 양수 시험 분석에 의한 제주도 화산암 대수층의 수리적 특성, 2003년 한국지하수도양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, 한국지하수도양환경학회, p. 292-295.
- 이사로, 최휘찬, 민경덕, 1999, GIS를 이용한 지질도 데이터베이스 구축에 관한 연구, 한국GIS학회지, **7**(1), 147-153.
- 전선금, 구민호, 김용제, 강인옥, 2005, 국가지하수 관측망의 양수 시험 자료를 이용한 국내 대수층 특성의 통계적 분석, 지하수도양환경, **10**(6), 32-44.
- 최병수, 1999, 제주도 지하수의 우물 비양수량 자료를 이용한 대수층상수 결정방법, 지하수환경, **6**(4), 180-187.
- 국토해양부, 한국수자원공사, 2008, 물과미래, 제16회 세계 물의 날 자료. p. 202.
- 환경부, 2009, 2008 상수도연보(상).
- Dillon, P., 2005, Future management of aquifer recharge, Hydrogeology journal, Vol. 13, No. 1, pp.
- ESRI Korea, 2008, ArcGIS Desktop II: Tools and Functionality, p. 5-8.
- Huntley, D., Nommensen, R., and Steffey, D., 1992, The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifers, Ground Water, **30**(3), 396.
- Casaer, J., Hermy, M., Coppin, P., and Verhagen. R., 1999, Analyzing sapce use patterns by Thiessen polygon and triangulated irregular network interpolation: a non parametric method for processing telemetric animal fixes. International journal of Geographical Information Science **13**(5), 499-511.
- Gale, I.N., Williams, A.T., Gaus, I., and Jones, H.K., 2002, ASR-UK: Elucidating the hydrogeological issues associated with aquifer storage and recovery in the UK. UK Water Industry Research Limited, BGS Report No. CR/02/156/N, p. 45.
- Kamaleshwar Pratap, K. V. Ravindran and B. Prabakaran, 2010, Groundwater Prospect Zoning Using Remote Sensing and Geographical Information System: A Case Study in Dala-Renukoot Area, Sonbhadra District, Uttar Pradesh, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, **28**(4), 249-264.
- Mashaal Al Saud, 2010, Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques, Hydrogeology, **18**(6), 1481-1495.
- Murray, R., Tredoux, G., Ravenscroft, P., and Botha, F., 2007, Artificial recharge strategy: ver. 1.3. Department of Water Affairs and Forestry, Rep. of S. Africa, p. 194.
- National Research Council, 1994, Groundwater recharge using waters of impaired water quality, National Academy Press, Washington, DC.
- Patrick A., Franklin W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons, Inc, Canada.
- Pyne, R.D.G., 2005, Aquifer storage recovery: A guide to groundwater recharge through wells, ASR Systems LLC, Florida, USA. ISBN 0-9774337-090000.
- Razack, M. and Huntley, D., 1991, Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer, Ground Water, **29**(6), 856-861.
- Vishnu P. Pandey, 2010, Estimation of Groundwater Storage Potential of Kathmandu Valley Aquifers Using GIS Technique, ground water summit.
- Environmental Modeling Systems, Incorporated:www.ems-i.com, 2011.1.21
- ESRI:www.esri.com, 2011.1.21
- GIS DEVELOPMENT : www.gisdevelopment.net, 2011.2.21
- Integarated Ground Water Information Service:www.gims.go.kr/monitor, 2011.1.21
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources:www.kigam.re.kr, 2011.1.21
- Korea Meteorological Administration:www.kma.go.kr/weather/observation/data\_monthly.js, 2011.1.21
- Peace River Manasota Regional Water Supply Authority: www.regionalwater.org, 2011.3.16
- Water Management Information System:www.wamis.go.kr, 2011. 1.21