

지하수 상수원 활용의 타당성 고찰을 위한 상수도 취수원의 특성 비교 연구

차은지 · 현윤정*

한국환경정책평가연구원

A Comparison Study of Various Water Sources for Feasibility of Expanding the use of Groundwater in Public Water Supply of South Korea

Eun-Jee Cha · Yunjung Hyun*

Korea Environment Institute

ABSTRACT

As water sources become more vulnerable to the effects of climate change such as drought and contamination, the diversification of water sources is important for securing water supply. This study examines the properties of five water sources for public supply, including river and river-bed water, dams, reservoirs, and groundwater, while ensuring that the quantities available from such sources are stable and the water itself is safe for use. This study also analyzes the power, chemical, repair and maintenance, and labor costs associated with each water source. The results demonstrate that groundwater has high potential as a water source because it is readily available (about 12.89 billion m³/yr), but only a small portion of it is currently used. Analyses indicated that groundwater is the most efficient source of water to meet water demand below 1,000,000 m³/yr, which covers 62.5% of water supply facilities. With the implementation of groundwater dams, groundwater can become cost-efficient even for larger water demand. Additionally, the water source protection areas are the smallest for groundwater among the five water sources. In conclusion, the use of groundwater as an alternative water source is feasible because it is readily available, safe, cost-efficient, and requires the lowest amount of environmental regulations for the diversification of water supply sources.

Key words : Groundwater, Public water supply, Diversification of water sources, Water security, Cost-efficient

1. 서 론

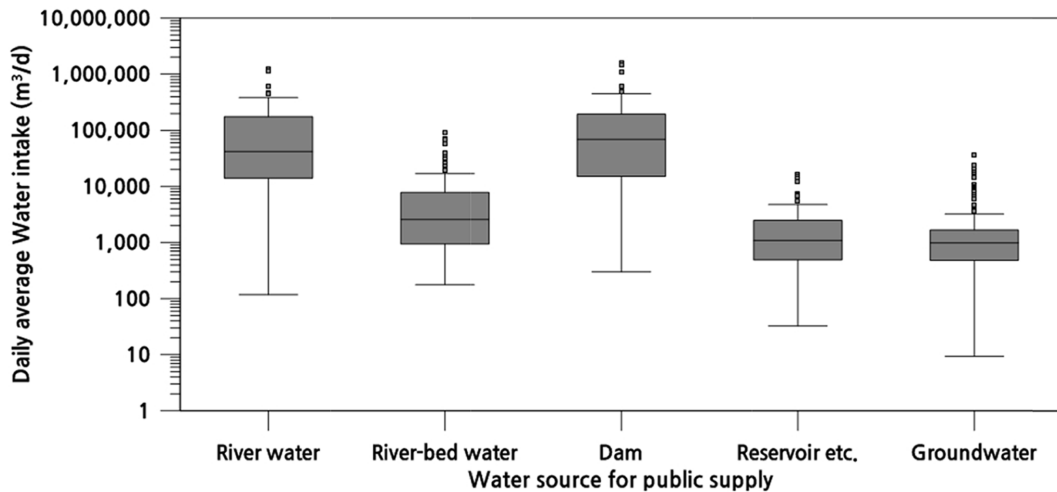
우리나라는 지난 20여 년 동안 지방·광역상수도 인프라 확충정책을 적극적으로 추진하여 1990년 78.4%였던 상수도 보급률이 2015년 기준 97.3%에 이르게 되었다(MOE, 2017b). 그러나, 높은 상수도 보급률에도 불구하고 최근에는 극심한 가뭄으로 인해 상수도 보급지역에서조차도 제한급수를 실시하는 등 안정적인 물 공급에 지장을 주는 사례가 발생하였다. 국토교통부의 지방·광역상수도 용수수급 전망 분석에 따르면, 총량적으로는 2025년 기준 4,235천 m³/일의 여유량이 발생하는 반면, 지역적으로는 전국 74개 지자체에서 총 2,237천 m³/일의 부족량이 발생한다(MOLIT, 2015). 지역별 용수 부족지역을 보면, 생

활용수 부족 지자체는 60개, 공업용수 부족 지역은 32개이며, 생활용수와 공업용수 모두 부족한 지역은 18개 지역이다. 용수 부족 지역은 대부분 광역상수도에 의한 생활용수, 공업용수를 공급받는 지역으로 충청남북도와 경상남·북도, 전라남·북도에서 나타난다. 일부 지방상수도에 의한 용수 부족 지역을 제외하고는, 대부분의 광역상수도 공급지역에서 용수 부족을 전망하고 있다. 이렇듯 지방·광역상수도 보급에도 불구하고 지역간 용수수급 불균형으로 인한 물 부족이 전망되는 미래를 대비하기 위하여 지역맞춤형 상수원을 찾고 이를 활용하기 위한 상수원 다변화의 필요성이 제기되고 있다. 이 외에도 녹조 발생 등으로 상수원 수질이 위협을 받으면서 국민들이 수도물의 수질 안전성에 대한 우려가 확산되고 무엇보다도 지역

*Corresponding author : yjhyun@kei.re.kr

Received : 2017. 8. 16 Reviewed : 2017. 8. 20 Accepted : 2017. 8. 22

Discussion until : 2017. 10. 31



Source: Ministry of Environment, 2017, 2015 Waterworks Statistics

Fig. 1. Daily average water intake from various water sources for public supply.

개발의 요구가 높아짐에 따라 상수원 다변화의 요구가 커지고 있다.

『수도법』 제3조 2항에 따르면 ‘상수원’이란 음용·공업용 등으로 제공하기 위하여 취수시설을 설치한 지역의 하천·호소·지하수·해수 등을 말한다. 이같은 상수원은 취수시설에 따라 하천수, 복류수, 댐, 지하수, 저수지, 강변여과수, 해수 등 다양한 종류의 상수도 취수원이 된다. 한편, 환경부에서 매년 집계하여 발표하는 『상수도 통계』에서는 상수도 취수원 종류를 하천표류수, 하천복류수(강변여과수 포함), 댐, 지하수, 기타 저수지 로 구분하고 있다. 취수원별 일평균 취수량 자료를 살펴보면, 2015년 기준 댐 > 하천표류수 > 하천복류수 > 기타저수지 > 지하수 순으로 댐에서 가장 많은 양의 물을 취수하여 사용하고 있고 지하수의 취수량은 가장 적은 것으로 집계되었다(Fig. 1). 이처럼 우리나라 상수원은 지형적 조건과 하천, 저수지 등 수계발달의 정도에 따라 다양한 취수원을 활용하고 있지만, 주로 공급의 용이성과 운영의 편의성을 고려하여 광역화가 가능한 지표수 위주의 취수원(예를 들어 댐, 하천표류수, 하천복류수 등)을 개발, 운영해왔고, 일부 지자체에 한해 지하수를 상수도 취수원으로 활용하고 있어, 전반적인 지하수 상수원 활용 정도는 현저히 낮은 편이다.

본 연구의 목적은 상수도 취수원 별 특성 비교분석을 통해 상수원 다변화 관점에서 지하수 활용의 타당성을 고찰하기 위한 것으로 취수원 별 수량과 수질에 대한 특성을 평가하고 수도시설 운영비용과 상수도보호구역의 지정

규모를 비교 분석하여 시사점을 도출하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 상수도 취수원 별 특성을 분석하기 위하여 환경부의 『상수도 통계』의 분류체계를 따라 상수도 취수원을 하천표류수, 하천복류수, 댐, 지하수, 기타저수지 등 5가지 종류로 분류하였다. 선행 연구 및 문헌조사를 통해 각 취수원의 수량 및 수질 특성을 정리, 비교하였고, 취수원별 수도시설 운영비용과 상수도보호구역 지정 현황은 K-water와 161개 지자체를 포함하는 전국 162개 수도사업자에 대해 2011년에서부터 2015년까지의 『상수도 통계』 자료를 활용하여 비교, 분석하였다. 수도시설 운영비용을 취수원별로 서로 비교, 분석하기 위해서 본 연구에서는 수도사업자 중에서 두 종류 이상의 취수원을 혼용하여 사용하는 경우(예를 들어, 하천복류수와 지하수)를 분석 대상에서 제외하고 한 종류의 취수원만을 사용하는 수도사업자(지자체 및 한국수자원공사)의 재정지출자료를 이용하여 연구를 수행하였다. 수도시설 운영 실태는 수량 및 수질확보 및 시설 유지관리 관점에서 관련 비용 자료를 분석하였다. 수량과 수질 확보 및 공급 측면에서는 소모 전력량을 이용하였고, 수질의 안전성 확보를 위한 수처리약품비용을, 유지관리의 경제성은 동력비와 수선유지비를 이용하여 평가하였다(Table 1). 유지관리 관점에서 시설 주변의 환경규제 실태는 상수도보호구역 지정현황 자료를 이용하여 분석하였다.

Table 1. Data used for property analysis of water sources for public supply

Purpose		Data	
Quantity stability		Power cost	Chemical cost
Quality safety		Labor cost	
Maintenance efficiency		Repair maintenance cost	Water source protection area

Table 2. Amount* available from each water source for each return period of drought (unit: $10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$) (MOLIT, 2011)

Return period for drought	Total	Han river watershed	Nakdong river watershed	Geum river watershed	Seomjin river watershed	Yeongsan river watershed
5 years	50,817	20,158	13,610	9,056	4,337	3,656
10 years	43,170	17,376	12,069	7,510	3,747	2,469
20 years	39,155	15,483	11,100	7,288	2,930	2,353
Maximum period for past years	33,676	14,400	8,733	5,577	2,808	2,158

* Jeju island and Uilleung island are excluded.

3. 상수도 취수원의 수량 및 수질 특성 분석

본 연구에서는 상수도, 수자원, 하천, 지하수 이용과 관련된 다양한 문헌 조사 등을 토대로 상수도 취수원 별 수량 및 수질 특성을 파악하였다.

3.1. 하천표류수

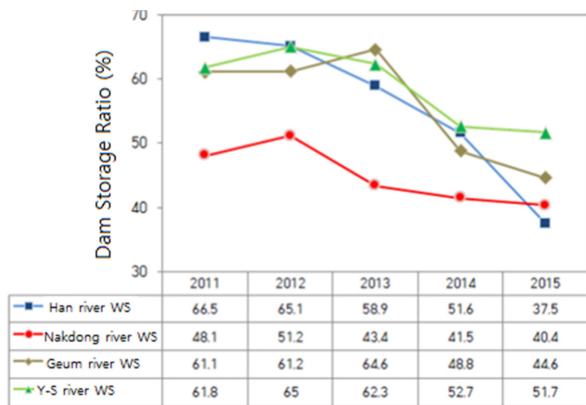
하천표류수는 하천이나 계곡에 흐르는 물로서 댐이나 제방 등에 의하여 흐름의 장애를 받지 않는 물이다(MOE, 2016b). 2015년 기준 우리나라 지방상수도의 전체 취수원 중 64.9%의 취수비율을 차지하는 등 하천표류수는 지방상수도의 주요 취수원으로 활용되고 있다. 일반적으로 하천표류수는 중하류의 하천에서는 대량 취수가 가능하여 안정적인 수량을 제공해주는 유용한 수원인 것으로 알려져 있다(MOE, 2010). 국토해양부(2011)의 수자원장기종합계획에 따르면 이용가능한 하천수량은 약 753억 $\text{m}^3/\text{년}$ 이다. 가뭄에 따른 이용가능한 하천수 총량을 예측해보면 과거 최대가뭄빈도의 경우 평년 대비 45% 수준인 337억 $\text{m}^3/\text{년}$ 으로 심각하게 줄어드는 것으로 나타났다(Table 2). 즉, 하천수량의 변화는 곧 하천표류수는 기후변화에 민감한 취수원임을 알 수 있다. 하천수는 하천표류수와 댐, 하천복류수, 기타 저수지의 수원으로 이용가능한 총 하천수량에서 댐과 기타 저수지의 물공급 계획(가능)량을 제외한 나머지로 하천표류수와 하천복류수의 물공급 가능량을 산출할 수 있다. 연구 결과, 하천표류수와 하천복류수의 물공급 가능량은 약 566억 $\text{m}^3/\text{년}$ 으로 계산되었다.

한편, 하천표류수의 수질은 상수원 수질을 보호하기 위한 각종 규제에도 불구하고 수량이 풍부한 중하류지역에

서는 여전히 오염물질의 누적, 조류발생 등으로 지속적인 위협을 받고 있다. 이렇게 오염된 하천표류수를 취수하여 깨끗하고 안전한 수돗물 생산을 위해서는 정수기술의 고도화가 필요하다. 정부와 지자체는 막대한 예산을 투입하여 고도정수처리시설을 갖추도록 하였으나, 깨끗하고 안전한 양질의 물에 대한 요구를 충족하기에는 미흡한 실정이며 보다 깨끗한 취수원으로서의 대체를 요구하기도 한다. 고도정수처리한 수돗물이라고 할지라도 여전히 수질에 대한 불신이 남아있기 때문에 음용수로 먹는샘물을 구매하거나 별도의 개인용 정수장치를 처리하여 소비하는 수요자가 늘어나고 있는데, 이는 하천표류수 취수원의 수질에 대한 우려가 투영된 결과라고 볼 수 있다.

3.2. 댐

2015년 기준 우리나라 광역상수도의 취수원 중 91.2%의 압도적인 취수비율을 차지하는 등 댐은 우리나라 광역상수도의 대표 취수원이다. 댐은 하천이나 계곡에 흐르는 물이 댐이나 제방 등구조물에 의해 흐름을 막아 가두어 둔 물이다. 물을 저류함으로써 일시에 다량의 취수가 가능하고, 다목적 댐에서는 자체전력생산이 가능하여 유지관리에 활용하는 등 다양한 장점이 있다. 2010년 기준 댐에서의 물공급 가능량은 총 158억 $\text{m}^3/\text{년}$ 이다(MOLIT, 2011). 그러나 최근 장기적인 가뭄과 일시적인 홍수 등의 기후변화로 인해 2011년부터 2015년까지 4대강 수계의 댐 저수율 평균값의 변화는 한강 수계와 낙동강 수계에서 각각 37.5%, 40.4%로 최저관리 저수율(40%)에 근접하는 추세이다(Fig. 2). 댐 계획저수량의 감소는 취수량 확보의 어려움으로 이어지고 급기야 수돗물 사용의 제한으로까지



source: MOE (2016c)

WS: Watershed; Y-S river: Yeongsan & Seomjin river

Fig. 2. Changes in dam storage ratios for four major river watersheds.

이어지는 사례가 발생하는 등 안정적인 취수량 확보가 어려운 경우가 발생할 수 있다. 댐의 경우도 하천표류수와 마찬가지로 수질오염의 우려가 높은 편이다. 게다가 물이 막아두어 정체되어 있기 때문에 조류발생 및 부영양화 등의 문제가 발생할 수 있다.

3.3. 하천 복류수

하천복류수는 하천, 호소나 이에 준하는 수역의 바다면 아래나 옆면의 사력층 등의 속을 흐르는 물이다. 본 연구에서는 강변여과수를 하천복류수에 포함한 통계자료를 활용하였기에 강변여과수도 하천복류수로 간주하였다. 하천복류수는 하천 주변에서 취수하기 때문에 하천표류수의 수량에 따라 취수가능량이 달라진다. 반면, 하천복류수는 침강, 여과, 침투 등의 자연여과를 이용하기 때문에, 지표수 내의 부유물질과 미생물, 조류 등의 제거를 통해 하천표류수보다 비교적 양호한 수질을 확보할 수 있다. 이는 정수공정에서 간소화가 가능하고, 하천표류수 대비 정수약품 사용량의 저감으로 비용을 절감할 수 있다. 예를 들어, 낙동강 하천표류수를 이용하는 칠서정수장의 정수공정은 취수장 → 전오존접촉지 → 침사지 → 혼화지 → 응집침전지 → 급속여과지 → 후오존접촉지 → 입상활성탄여과지 → 정수지 → 약품투입기 → 분말활성탄투입기 → 탈수처리시설 → 배수지 → 급수 순으로 일련의 복잡한 고도정수처리방식을 취한다. 반면, 하천복류수를 이용하는 교동정수장은 취수장 → 착수정 → 약품투입실 → 혼화지 → 응집지 → 침전지 → 여과지 → 정수지 → 염소투입실 → 배수지 → 급수 순의 일반정수처리방식(오존접촉지, 활성탄여과지 등의 공정 제외)을 취한다. 그러나

자연여과가 충분히 이뤄지지 않는 지역의 경우 취수량이 증가할수록 탁도, 망간, 철 등의 증가로 별도의 수처리 비용이 발생할 수 있는 단점도 존재한다. 그럼에도 불구하고 하천표류수나 댐에 비해 정수과정이 대체로 간소한 편이다.

3.4. 지하수

지하수는 지표 아래에서 흐르는 물로서 물리적, 수문학적 정의에 의하면 하천복류수와 강변여과수도 지하수에 포함되나 본 논문에서는 환경부의 상수도 취수원 분류체계에 따라 하천복류수와 강변여과수는 지하수에서 제외한다. 우리나라의 지하수 개발가능량은 128.9억 m³/년으로 댐 물공급 가능량 대비 약 84%에 해당되는 상당히 많은 양을 보유하고 있다(MOLIT, 2012). 지하수는 지역마다 지형 및 지질조건에 영향으로 부존량의 차이가 있고, 이로 인해 개발이용가능량의 지역별 편차가 발생한다(MOLIT, 2012). 그러나, 일정규모의 수량이 확보된다면 가뭄에 의한 수량 변동의 영향이 적고, 가뭄, 홍수 시 시설 운영 관리가 용이하다. 한편, 우리나라의 경우에는 지하수 취수시설로 관정을 주로 이용하기 때문에 단기간 내 대량 취수가 어렵기 때문에 주로 마을상수도와 같은 소규모 지역에서 주요 상수원으로서 활용하고 있다. 2015년 기준 마을상수도의 91% 이상이 지하수를 취수원으로 활용하고 있는데(MOE, 2017a), 이는 우리나라 지하수 개발가능량 대비 2.3%에 해당되는 매우 작은 수치로 지하수 활용률은 다른 취수원에 비해 현저히 낮은 편이다.

한편, 지하수 상수원은 조류 발생에 대한 우려가 거의 없고, 수질이 양호하여 정수공정이 간소하다. 예를 들어, 경상남도 의령군 서동정수장에서는 지하수를 취수한 뒤 급속여과지와 NaOCl 약품투입기를 이용한 간단한 정수과정만을 거쳐 급수를 하고 있다. 이렇듯 지하수는 수질적인 측면에서는 가장 깨끗하고 안전한 취수원이라고 할 수 있다.

3.5. 기타저수지

기타저수지는 소하천의 최상류지역이나 계곡에 흐르는 물을 댐이나 제방 등을 쌓아 가두어 놓은 물로서 만수위 구역의 물(자연적으로 형성된 호소의 물 포함)을 말하는데, 이는 댐의 특성과도 유사하다. 국토해양부(2011)의 수자원장기종합계획에 따르면 기타저수지를 이용한 물공급 가능량은 약 29억 m³/년이다. 하천표류수나 댐에 비해 조사 평가가 쉽고, 오염물질의 확산이 적으며, 유지관리가 복잡하지 않은 반면, 수질오염 가능성, 정체현상에 따른

부영양화와 조류에 의한 녹조 발생 등 탁도, 색도, 냄새 등을 유발하는 등 수질 저하가 종종 문제가 되고 있다. 그 밖에도 토사유입으로 인한 저수지 용적 감소로 수량의 안정성에 영향을 미칠 수 있다.

4. 상수도 취수원의 수도시설 운영비용 분석

본 연구에서는 앞서 살펴 본 상수도 취수원 자체의 특성 외에 취수원을 이용하는 과정, 즉 취수 → 정수 → 배·급수에 이르기 까지 수도시설 운영에 소요되는 비용들을 비교 분석하여 상수도 취수원 활용에 있어서 장단점을 평가하였다. 본 연구에서 분석한 비용자료는 환경부의 상수도통계에 있는 2011년에서부터 2015년까지의 자료 중에서 수도시설(취수장, 정수장, 가압장 등) 운영에 필요한 동력비와 정수처리 약품비, 시설 수선유지비, 그리고 인건비다.

4.1. 수도시설 동력비

동력비는 상수도 운영 시설인 취수장, 정수장, 가압장 등 모든 시설에 사용된 전력사용에 대한 실비를 나타내는 것으로, 상수원 유형에 따라 다르게 구성되는 취수장, 정

수장, 가압장 등 모든 상수도 시스템의 전력사용량을 반영한다. 취수원 간 수도시설 동력비를 비교하여 보면, 연간 총 취수량에 관계없이 원수 1 m³당 소요되는 동력비를 계산해보면, 기타저수지(674원) > 하천표류수(653원) > 하천복류수(423원) > 댐(365원) > 지하수(317원) 순으로, 기타저수지의 동력비가 가장 많이 들고 지하수가 가장 적은 동력비가 드는 것으로 나타났다(Table 3). 한편, 연간 총 취수량에 따라 취수원의 동력비가 영향을 받는 것으로 분석되었다(Fig. 3). 연간 총 취수량이 1,000,000 m³ 미만으로 취수하는 경우, 1 m³당 동력비는 댐 > 하천표류수 > 하천복류수 > 기타저수지 > 지하수 순으로, 댐의 동력비가 가장 많이 들고, 지하수의 동력비가 가장 적은 것으로 나타났다. 반면, 연간 총 취수량이 1,000,000 m³ 이상에서 10,000,000 m³ 미만인 경우에는 1톤당 동력비는 지하수 > 기타저수지 > 하천복류수 > 하천표류수 > 댐 순으로, 지하수가 가장 많이 들고, 댐이 가장 적게 드는 것으로 나타났다. 10,000,000 m³ 이상일 때는 하천복류수의 동력비가 가장 적은 것으로 나타났다.

4.2. 정수처리 약품비

상수도 취수원의 원수 수질은 정수공정에 직접적으로

Table 3. Comparisons of power costs (avg.) of water sources for public supply according to the volume of the water supply intake (unit: won/m³·yr)

Water source for public supply	Total annual volume of water intake A (m ³ /yr)				Total
	A < 1,000,000 (A < 2,740 m ³ /d)	1,000,000 ≤ A < 10,000,000	10,000,000 ≤ A < 100,000,000	100,000,000 ≤ A < 10,000,000,000	
River water	9,459	254	48	65	653
River-bed water	2,088	173	78	-	423
Dam	2,089	88	53	-	365
Reservoir et al.	1,541	486	-	-	674
Groundwater	315	323	-	-	317

- Not applicable

Text bold: water supply source of the lowest cost

Source: Ministry of Environment, 2013~2017, 2011~2015 Waterworks Statistics.

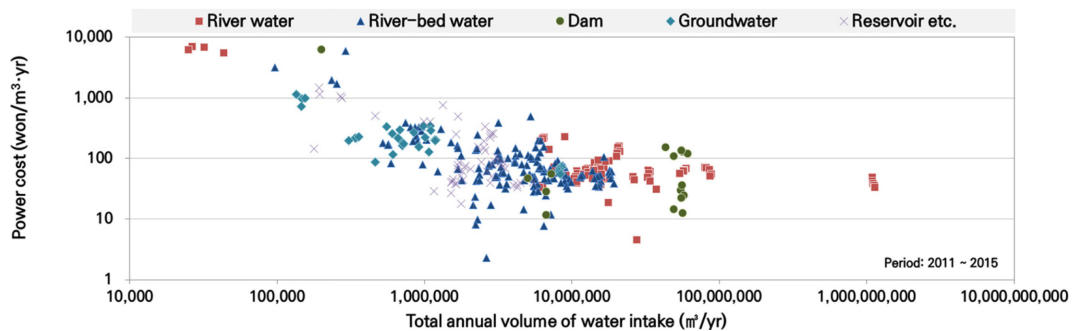


Fig. 3. Distribution of power costs per cubic meter per year of each water source for public supply.

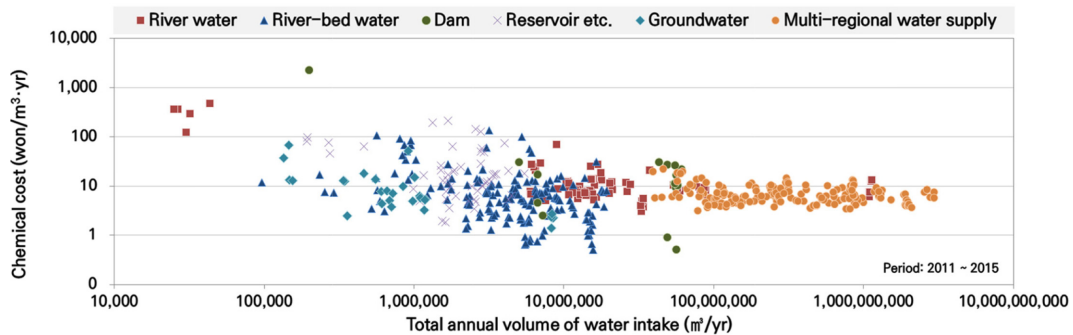


Fig. 4. Distribution of chemical costs per cubic meter per year of each water source for public supply.

Table 4. Comparison of the chemical costs (avg.) of water sources for public supply according to the volume of the water supply intake (unit: won/m³·yr)

Water source for public supply	Total annual volume of water intake A (m ³ /yr)				All
	A < 1,000,000 (A < 2,740 /d)	1,000,000 ≤ A < 10,000,000	10,000,000 ≤ A < 100,000,000	100,000,000 ≤ A < 10,000,000,000	
River water	325	19	10	10	32
River-bed water	34	10	5	-	12
Dam	2212	14	15	-	152
Reservoir etc.	27	31	-	-	30
Groundwater	16	5	-	-	12
Multi-regional WS	-	7	10	7	7

- Not applicable

Text bold: water supply source of the lowest cost

Source: Ministry of Environment, 2013~2017, 2011~2015 Waterworks Statistics.

관여하는 중요한 요인이다. 수도사업자의 세출항목 중 약품비는 통상 응집제, 소독제 등의 약품구입비를 말하는데, 정수과정(일반정수처리, 고도정수처리)에 따라 다양한 약품이 사용된다. 고도정수처리는 응집과 침전, 소독에 사용되는 응집제와 소독제 이외의 공정(생물학적 처리, 활성탄 처리, 오존처리, 정수용 막여과, 고도산화처리 등)이 추가됨에 따라 오존, BAC, GAC, 활성탄 등의 약품이 추가적으로 사용된다.

연간 총 취수량에 따른 1 m³당 소요 약품비(원)를 취수원 유형별로 도시화한 결과, 취수량이 많을수록 원수 1 m³당 소요되는 약품비는 절감되는 반비례 특성을 나타내며, 광역상수도 등 대용량의 취수를 하여 정수할 때 원수처리에 소요되는 약품비가 상대적으로 작은 것으로 나타났다(Fig. 4). 연간 총 취수량에 관계없이 취수원별로 원수 1 m³당 소요되는 정수처리 약품비를 비교하여 보면, 댐(151.8원) > 하천표류수(31.8원) > 기타저수지(29.7원) > 하천복류수(12.2원) > 지하수(11.5원) > 광역상수도(7.1원) 순이며, 지하수와 광역상수도가 가장 적은 것으로 나타났다(Table 4). 이는 지하수는 원수수질이 타 수원에 비해

양호하기 때문에 나타나는 특성에 해당하고, 광역상수도의 경우에는 원수수질이 양호해서가 아니라, 대용량 취수에 의한 약품비 절감 효과에 의한 결과라고 할 수 있다. 취수규모에 따른 분포를 보면, 취수규모가 1,000,000 m³ 미만일 경우, 댐 상수원이, 1,000,000 m³ 이상 10,000,000 m³ 미만일 경우, 기타저수지 수원에서 약품비가 가장 많이 소요되어, 원수의 수질이 상대적으로 좋지 않아 많은 약품 처리가 필요한 것으로 볼 수 있다. 반면, 주로 소규모로 개발 이용하고 있는 지하수는 10,000,000 m³ 미만으로 취수할 경우, 약품비가 가장 저렴한 것으로 분석되었다.

4.3. 수선유지비

수도시설의 수선유지비는 연간 총 취수량이 증가할수록 대체로 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 5). 연간 총 취수량이 1,000,000 m³ 미만인 경우, 취수원이 하천표류수인 경우 톤당 9,489원으로 가장 많은 비용이 소요되며, 지하수는 1톤당 315원으로 가장 저렴한 것으로 나타났다. 반면, 연간 총 취수량이 1,000,000 m³ 이상이면서 10,000,000 m³ 미만의 지하체의 경우, 댐의 수선유지비가 가장 적은 것

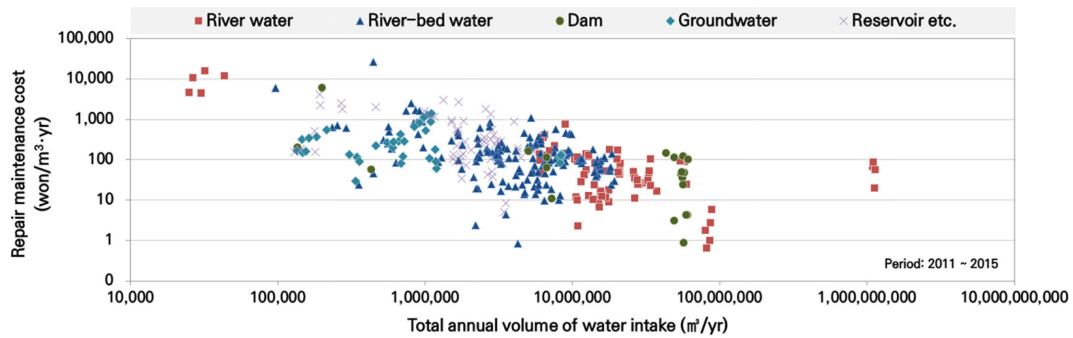


Fig. 5. Distribution of the repair maintenance costs per cubic meter per year of each water source for public supply.

Table 5. Comparison of the repair maintenance costs (avg.) of water sources for public supply according to the volume of the water supply intake (unit: won/m³·yr)

Water source for public supply	Total annual volume of water intake A (m ³ /yr)				Total
	A < 1,000,000 (A < 2,740 /d)	1,000,000 ≤ A < 10,000,000	10,000,000 ≤ A < 100,000,000	100,000,000 ≤ A < 10,000,000,000	
River water	5,072	70	57	40	341
River-bed water	698	73	39	-	153
Dam	6,111	35	71	-	440
Reservoir etc.	410	125	-	-	192
Groundwater	305	159	-	-	256

- Not applicable

Text bold: water supply source of the lowest cost

Source: Ministry of Environment, 2013~2017, 2011~2015 Waterworks Statistics.

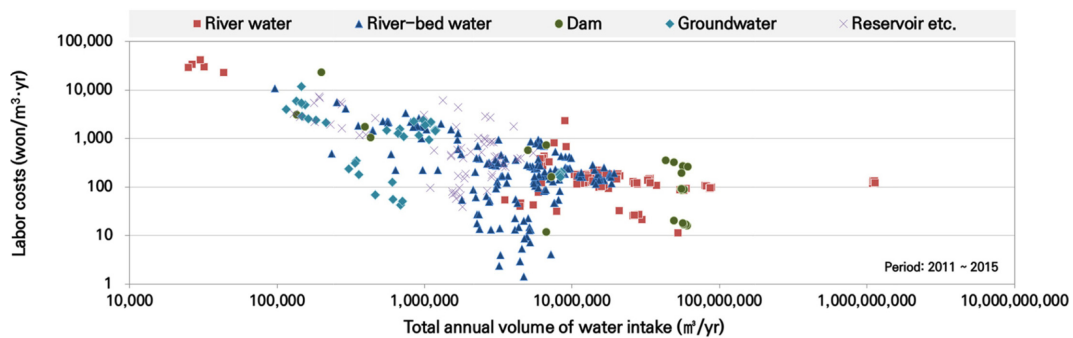


Fig. 6. Distribution of labor costs per cubic meter per year of each water source for public supply.

으로 나타났다. 취수규모가 10,000,000 m³ 이상일 때는 하천복류수가 가장 적은 수선비를 나타내는 것으로 분석되었다.

4.4. 인건비

수도시설을 운영하기 위해서는 취·정수시설운영, 중앙관리, 관로의 유지·보수 등 수돗물 생산을 위한 운영과 중앙관리, 상수도 검침 등을 위한 고정적인 노동의 투입을 필요로 한다. 즉, 수도 사업에서의 인건비는 행정직, 기

술직, 기능직, 재무회계, 기타(상수도 검침원 등)의 직원의 인력운영비를 나타낸다. 수돗물 생산량(취수량)의 증가는 운영관리와 경영에 필요한 인력의 효율성의 증가로 수돗물 생산량 단위당 고정 노동투입량의 감소와 수돗물의 평균생산비용의 감소를 야기할 것이다(Park, 2005). Fig. 6에서와 같이, 1 m³의 취수량 당 인건비는 수도운영에 있어, 연간 총 취수량이 높을수록 낮아지는 경향을 보인다. 한편, 취수규모를 구분했을 때 취수원별 인건비를 분석한 결과는 연간 총 취수량이 1,000,000 m³ 미만일 때, 지하

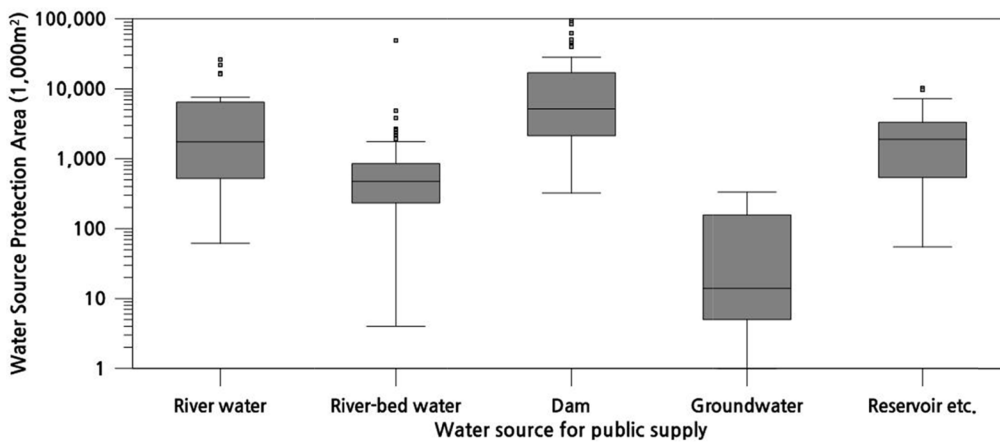
Table 6. Comparisons of labor costs (avg.) of water sources for public supply according to the volume of water supply intake (unit: won/m³·yr)

Water source for public supply	Total annual volume of water intake A (m ³ /yr)				Total
	A < 1,000,000 (A < 2,740 /d)	1,000,000 ≤ A < 10,000,000	10,000,000 ≤ A < 100,000,000	100,000,000 ≤ A < 10,000,000,000	
River water	31,437	382	130	125	1,919
River-bed water	2,339	270	167	-	543
Dam	7,269	362	130	-	1,470
Reservoir etc.	3,589	768	-	-	1,426
Groundwater	2,309	1,035	-	-	1,907

- Not applicable

Text bold: water source of the lowest cost

Source: Ministry of Environment, 2013~2017, 2011~2015 Waterworks Statistics.



* WPA (No.): Total(297)=River water(22)+River-bed water(147)+Dam(45)+Groundwater(12)+Reservoir etc. (65)+Unknown(15)-overlap(9)

Source: 1. Ministry of Environment, 2016a, 2014 Waterworks Statistics

2. Ministry of Environment, 2015b, "Status of Water Source Protection Area(2014)"

(http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=6693)

Fig. 7. Water Source Protection Area (WSPA) for water sources for public supply.

수 취수원이 1 m³당 가장 저렴한 인건비를 나타내지만, 연간 총 취수량이 1,000,000 m³(일 2,740 m³) 이상일 때는 타 수원으로 운영하는데 비해 고비용이 발생하는 것으로 파악되었다.

5. 상수도 취수원의 상수도보호구역 규모 분석

본 연구에서는 상수도 취수원을 보호하기 위한 상수도 보호구역의 지정 현황을 살펴보고, 그 규모를 비교, 분석하였다. 2014년 말 기준 전국 상수원보호구역은 총 297 개소(해당 취수장 295개소)의 면적 분포를 분석한 결과 (Fig. 7), 상수도보호구역 지정 수는 하천복류수가 147개

소로 가장 많았고 기타저수지(65개소) > 댐(45개소) > 하천 복류수(22개소) > 지하수(12개소)의 순으로 나타났다. 그 외 여러 개의 취수원을 사용하여 중복으로 상수도보호구역 지정받은 곳도 15개소인 것으로 분석되었다. 상수도 보호구역의 총 면적으로 비교하면, 댐이 가장 넓은 면적 (749,585,000 m², 64%)의 상수원보호구역을 가지고 있고 지하수는 상수도보호구역 면적이 972,000 m²로 상수도 취수원 중 가장 작은 면적을 차지하고 있다. 개소 당 평균 면적을 비교한 결과, 댐이 16,657 m²로 가장 넓고 하천복류수 (5,340 m²) > 기타저수지 (2,328 m²) > 하천복류수 (1,016 m²) > 지하수(81 m²)의 순으로 지하수의 보호구역 면적이 타 취수원에 비해 매우 작은 것으로 분석되었다.

6. 종합분석 및 시사점

다섯 가지 상수도 취수원의 수량, 수질 특성 및 수도시설의 운영비용, 상수도 보호구역 지정현황을 비교, 분석한 연구결과를 종합정리하고 이를 통해 도출된 시사점을 정리하면 다음과 같다.

1. 우리나라 수자원 장기종합계획에 따르면, 하천수를 이용한 물공급 가능량은 약 753억 m^3 /년으로 이 중 댐에 의한 물공급 가능량이 158억 m^3 /년이고 기타 저수지에 의한 물공급 가능량은 29억 m^3 /년이고, 나머진 약 566억 m^3 /년이 하천표류수와 하천복류수로 이용가능한 양인 것으로 분석되었다. 그러나, 하천수량은 기후변화에 매우 민감하여 가뭄 발생 시 평년 대비 최대 45% 수준으로 감소될 수 있어서 하천표류수와 복류수, 댐, 기타 저수지는 기후변화, 특히 가뭄에 취약한 취수원이라고 할 수 있다. 반면 기후변화에 덜 민감한 지하수의 경우에는 전국 총 개발가능량이 128.9억 m^3 /년으로, 광역상수도의 주요 취수원인 댐 물공급 가능량 대비 약 84%에 해당된다. 그럼에도 불구하고 2015년 기준 지하수 상수원 활용률은 개발가능량 대비 2.3%에 불과하는 것으로 분석되어, 앞으로 활용가능한 수량이 충분한 것으로 분석되었다.

2. 상수도 취수원의 수질 특성을 비교해 본 결과, 지표에 노출되어 있는 하천표류수와 댐, 기타 저수지의 경우 오염물질 부하가 많고 녹조 발생 등의 수질오염 가능성이 매우 높다. 반면, 지하수는 수질적인 측면에서는 가장 깨끗하고 안전한 취수원이다. 한편, 하천표류수, 댐, 기타 저수지 등의 취수원의 경우 오염된 취수원의 원수를 고도정수처리기술을 이용하여 깨끗한 수돗물을 공급할 수 있는데, 정수처리 약품비가 원수 1 m^3 /당 댐의 경우 151.8원으로 지하수(11.5원) 대비 13.2배이고, 하천표류수의 경우

31.8원으로 지하수 대비 약 2.8배로 훨씬 많은 비용이 정수처리과정에서 소요되는 것으로 나타났다.

3. 수도시설 유지관리 측면에서 각 취수원 별로 동력비와 약품비, 수선유지비, 인건비를 합계하여 비교, 분석해 보았다. 연간 총 취수량에 따라 가용한 자료가 없는 구간이 존재하여 모든 취수원에 해당 자료가 있는 취수량 구간에 대해서만 분석을 실시하였다. 연구 결과, 연간 총 취수량이 1,000,000 m^3 미만인 경우, 수도시설 유지관리 총비용은 하천표류수 > 댐 > 기타 저수지 > 하천복류수 > 지하수 순으로 산출되었다. 수도시설 유지관리 총비용은 지하수가 연간 1톤당 2,945원으로 가장 적게 드는 것을 알 수 있었다(Table 7). 반면, 가장 많은 유지관리 비용이 드는 취수원은 하천표류수로 총 비용이 약 46,293원으로 지하수 대비 약 16배 정도의 비용이 드는 것으로 분석되었다. 이 경우, 전체 비용 중 인건비가 가장 큰 비중을 차지하였고 동력비와 수선유지비가 중요한 비중을 차지하는 것을 알 수 있다. 반면, 연간 총 취수량이 1,000,000 m^3 이상이면 1,000,000 m^3 미만의 경우, 지하수 > 하천표류수 > 기타 저수지 > 댐 > 하천복류수의 순으로 총 유지관리비가 많이 드는 것으로 계산되었다(Table 8). 이 경우 지하수는 총 비용이 약 1,522원으로 가장 저렴한 댐 대비 약 3배의 비용을 지출하는 것으로 분석되었고 총 비용 중 인건비가 압도적인 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

4. 상수도 취수원의 수질을 보호하기 위한 목적으로 지정된 상수도보호구역의 현황을 취수원 간 비교한 결과, 상수도보호구역의 면적이 가장 작은 취수원은 지하수인 것으로 나타났다. 댐이나 하천표류수, 기타저수지, 하천복류수의 경우 상수도보호구역의 면적은 지하수 대비 약 34배에서 370배 정도로 매우 큰 것으로 분석되었다.

Table 7. Comparison of the running & maintenance costs (avg.) of water sources for public supply in the case of A < 1,000,000 m^3 /yr (unit: won/ m^3 ·yr)

Water source for public supply	Cost				
	Power	Chemical	Repair maintenance	Labor	Total
River water	9,459	325	5,072	31,437	46,293
River-bed water	2,088	34	698	2,339	5,159
Dam	2,089	2212	6,111	7,269	17,681
Reservoir etc.	1,541	27	410	3,589	5,567
Groundwater	315	16	305	2,309	2,945

- Not applicable

Text bold: water source of the lowest cost

Source: Ministry of Environment, 2013~2017, 2011~2015 Waterworks Statistics.

Table 8. Comparison of the running & maintenance costs (avg.) of water sources for public supply in the case of 1,000,000 m³/yr ≤ A < 10,000,000 m³/yr (unit: won/m³·yr)

Water source for public supply	Cost				
	Power	Chemical	Repair maintenance	Labor	Total
River water	254	19	70	382	725
River-bed water	173	10	73	270	526
Dam	88	14	35	362	499
Reservoir etc.	486	31	125	768	1,410
Groundwater	323	5	159	1,035	1,522

- Not applicable

Text bold: water source of the lowest cost

Source: Ministry of Environment, 2013~2017, 2011~2015 Waterworks Statistics.

7. 결론 및 토의

일반적으로 지하수는 비교적 안정적인 수량과 수질 확보가 가능하고 하천수에 비해 수질이 양호하여 정수공정이 간단하고 정수비용이 없거나 최소인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 국토교통부와 환경부의 상수도 관련 자료를 분석하여 상수도 취수원 별로 수량 및 수질의 특성을 객관적인 자료 분석을 통해 취수원으로 활용 시 장단점을 비교하여 지하수는 수량 및 수질적인 측면에서 외부 위협요소로부터 안전하고 안정적인 취수원임을 알 수 있었다. 또한, 시설 유지관리 비용적인 측면에서도 연 1,000,000 m³ 미만의 취수량의 경우 전반적으로 지하수가 유용한 수원임을 확인하였다. 지하수 취수원의 경우 취수량이 많아질 경우 시설유지관리 비용이 많은 것으로 산정되어 상대적으로 비효율적인 수원으로 분석되었으나, 국내 총 592개의 취수시설 중 62.5%인 370개소가 연 1,000,000 m³ 미만의 취수규모로 운영되고 있는 상황을 고려한다면, 현재 취수시설 운영체계에서도 대체수원으로서 지하수 활용의 경제적 가치가 충분하다는 것을 알 수 있다.

한편, 지하수의 취수량이 많아질 경우 경제적으로 비효율적인 시설유지관리 비용을 분석해보면, 인건비가 차지하는 비중이 압도적으로 많고, 동력비와 수선유지비용도 높은 것으로 나타났다. 이는 현재 지하수 취수가 여러 개의 소규모 관정을 기반으로 이루어지고 있고 지하수담 등의 대규모 지하수자원 확보시설을 이용하고 있지 않기 때문이라고 할 수 있다. 상수원의 취수에 필요한 동력만 봤을 때, 지하수 관정은 시간당 적정취수량의 한계가 있기 때문에, 여러 관정의 동시적인 운영 등으로 펌프대수, 취수장 가동일수 등의 차이로 인해 전력사용량과 인건비, 수선유지비 등이 높게 나타날 수 있다. 만약 하천수와 마찬가지로 지하수도 댐을 이용하여 다량의 지하수를 확보하

고 이를 공급하는 방식으로 지하수 취수원을 활용한다면 인건비를 절감하여 시설 유지관리를 위한 총비용을 절감할 수 있을 것이다.

앞서 서론에서 기술했듯이 상수원 다변화는 향후 우리나라 물이용 정책의 큰 방향이라고 할 수 있다. 상수원 다변화에 대한 요구는 지역 간의 물 수급 불균형을 해결하기 위한 것이기도 하지만, 현재 「수도법」에 의해 지정되어 있는 상수원보호구역에 대한 규제 완화에 대한 요구를 충족하기 위한 방편이기도 하다. 현행 「수도법」에서는 안전한 물 공급을 위해 취수원 인근지역의 보호를 목적으로 상수원보호구역을 지정하고 신축, 재배, 굴착 등의 각종 행위규제를 시행하고 있다. 특히 최근 들어 상수원보호구역의 토지이용규제에 대한 민원이 증가하고 있으나, 난분해성 오염물질 증가와 오염원처리의 한계 등으로 상수원보호구역의 중요성이 더욱 강조되고 있어(MOE, 2015b) 지역주민들과의 갈등이 심화되고 있는 실정이다. 이처럼 상수도 보호구역과 관련된 다양한 갈등을 완화하기 위한 방안으로 상수도보호구역의 규모가 가장 작은 지하수 취수원을 대체수원으로 활용한다면 물 안보 확보와 함께 주민들의 개발 요구를 충족시킬 수 있는 상수원 다변화를 꾀할 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구는 상수원 다변화 관점에서 잠재적 대체수원으로 지하수 활용의 타당성을 살펴보기 위한 것으로 향후 대체수원 개발이나 상수도 보급률 증진을 위한 상수도 확충 시 신규 취수원 선택에 있어, 의사결정의 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 환경부의 연구용역 과제 「상수원으로서 지하수 이용방안 마련을 위한 연구」와 한국환경정책·평

가연구원의 협동연구사업 「농촌지역 환경복지 증진을 위한 가축매몰지 피해관리방안 연구」의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ministry of Environment (MOE), 2010, Waterworks facility standard.
- Ministry of Environment (MOE), 2013, 2011 Waterworks Statistics.
- Ministry of Environment (MOE), 2014, 2012 Waterworks Statistics.
- Ministry of Environment (MOE), 2015a, 2013 Waterworks Statistics.
- Ministry of Environment (MOE), 2015b, "Status of Water Source Protection Area(2014)", www.me.go.kr [accessed 17.08.03]
- Ministry of Environment (MOE), 2016a, 2014 Waterworks Statistics.
- Ministry of Environment (MOE), 2016b, Enforcement Rule for Water Sources Management, Article 3.
- Ministry of Environment (MOE), 2016c, 2025 National Waterworks Master Plan.
- Ministry of Environment (MOE), 2017a, 2015 Waterworks Statistics.
- Ministry of Environment (MOE), 2017b, 2017 White Paper of Environment.
- Ministry of Government Legislation, 「Water Works Act」, Article 3, paragraph (2), www.law.go.kr [accessed 17.08.18]
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2011, Water Resources Long-Term Master Plan for Basic Plan (2012-2021).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2012, Groundwater Management Basic Plan (2012-2021).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2015, 2025 Basic Plan of Waterworks Maintenance.
- Park, S., 2005, A Quantitative analysis of economies of scale in the water industry in Korea, *Korean Journal of Industrial Organization*, **13**(2), 1-19.