

# 지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용 - (II) 적용

## Effective Use of Water Resources Through Conjunctive Use - (II) Application

김수민\* / 이상일\*\* / 김병찬\*\*\*

Kim, Su Min / Lee, Sang Il / Kim, Byeong Chan

### Abstract

Conjunctive use of surface and ground water has drawn much attention as a promising means to solve water shortage problems. Characterized by its maximum utilization of regional resources and environmental friendliness, conjunctive use is expected to contribute to the integrated water resources management in the coming era. This paper examines the applicability of the methodology for conjunctive use developed in the companion paper (this issue). The method consists of the entire process of conjunctive use, including site assessment using analytic hierarchy process, management scenario development based on drought analysis, and evaluation of benefits obtained. Sokcho City was chosen as the study area, and the application of derived operation scenarios for surface and subsurface reservoirs revealed that water of 4.9~7.4 million cubic meters a year can be attainable additionally. The developed methodology enables one to devise management schemes and to quantify their effectiveness, which makes the method useful for water resources planners as well as practitioners.

**keyword** : conjunctive use, AHP, underground dam, drought index, reservoir simulation

### 요 지

물 부족을 해결하기 위한 방안으로 지표수-지하수 연계이용에 관한 연구가 최근 국내에서도 관심을 끌고 있다. 지역 여건을 최대한 활용하면서 동시에 친환경적인 지표수와 지하수 연계이용은 통합적인 수자원 관리에 기여하는 바가 클 것으로 예측된다. 본 연구에서는 선행 논문에서 개발된 방법론 즉, 지표수-지하수 연계이용이 시행되어야 할 지역의 선정, 가뭄분석을 통한 물 공급 시나리오 도출, 연계이용 결과 얻어지는 추가 수자원확보량 산정까지 전과정의 현장적용성을 검토하였다. 적지분석을 통해 속초시가 대상지역으로 선정되었고, 도출된 운영 시나리오를 적용한 결과, 가뭄빈도에 따라 약 490만~740만  $m^3/year$ 의 수자원이 추가적으로 확보되는 것으로 산정되었다. 개발된 방법론은 지표수-지하수 연계이용의 방안과 효과를 정량적으로 제시할 수 있으며, 물관리 계획수립시 유용한 판단도구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 지표수-지하수 연계이용, 계층분석과정, 지하댐, 가뭄지수, 저수지 모의

\* 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 공학석사, 현 한국종합기술개발공사 수자원부  
M.S., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

\*\* 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea  
Corresponding author (E-mail: islee@dgu.ac.kr)

\*\*\* 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 Post-Doc.  
Post-Doc., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

## 1. 서론

사회가 발전하면서 용수수요는 급증하고, 빈번한 가뭄은 물부족 현상을 야기시켜 추가 수자원의 확보가 현안으로 대두되고 있다. 전통적인 수자원 확보는 댐에 의해 수행되어 왔으나, 사회적 저항의 증가로 댐 건설이 어려워짐에 따라 수자원 개발의 다변화를 모색하게 되었다. 지표수를 대체 또는 보조할 수 있는 수자원 확보 방안으로 지하수 개발, 인공강우, 해수의 담수화 등이 있으며, 가장 현실적이며 친환경적이고 기존 수자원 시설과 연계할 수 있는 대안으로 지표수와 연계한 지하수의 합리적인 개발과 이용이 거론된다.

외국에서는 다양한 형태로 지표수와 지하수를 연계한 사례를 다수 찾을 수 있으나(Muhammad와 Richard, 1995; Fredericks 등, 1998; Emch와 Yeh, 1998) 국내에서는 제한적인 보고만 있을 뿐, 실제로 운영되고 있는 사례가 없고 관련 연구도 최적화 측면에만 국한되어 있다(이재웅 등, 2000). 그러나 지표수-지하수 연계이용은 적합한 지역의 선정부터 연계유형의 결정, 합리적 운영, 그리고 그 효과의 평가에 이르기까지 다양한 측면의 검토와 관련 기술이 필요한 것이 사실이다.

이상일 등(2004)은 지표수-지하수 연계이용의 전 과정을 체계적으로 계획·분석할 수 있는 방법론을 수립하여 제시한 바 있다. 즉, 적지분석, 연계유형의 결정 및 운영 시나리오 도출, 운영과 그 효과 분석에 이르기까지 일관된 절차를 체계적으로 제시함으로써 다양한 지역에서 적용 가능할 수 있는 틀을 구축하였다.

본 연구는 '지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용 - (I) 방법론'에 대한 후속 연구로서, 개발된 방법론을 현장에 적용하고 그 적용성을 검증하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 적지분석

지표수-지하수 연계이용에 적합한 지역을 선정하는 것은 최대한 객관적이고 정량화된 방법에 의거하는 것이 바람직하다. 선행 논문에서 제시된 계층분석과정은 지표수-지하수 연계이용에 관련된 인자를 바탕으로 정량적 분석을 통해 후보지역의 적합도를 판단한다. 본 연구에서는 중소규모 지상댐의 용수공급 부족에 기인한 상습적인 물부족으로 어려움을 겪고 있는 지역 5곳(강원 동해, 강원 속초, 충남 장항, 경북 의성, 전남 영광)을 대상으로 적지분석을 수행하였다.

동해시는 1994년~95년에 걸쳐 시전역에 격일제급수를 시행하는 등 물부족 피해가 발생하였다. 1994년의 경우, 정상시 달방댐의 급수량은 45,000m<sup>3</sup>/day이었으나

가뭄이 계속되면서 이 기간 동안의 급수량이 32,000 m<sup>3</sup>/day으로 감소하였다. 속초시에서는 쌍천 지하댐 개발전인 1995년 동절기 가뭄으로 야간제한급수를 실시하였다. 속초시의 정상급수량은 33,000m<sup>3</sup>/day이었으나, 가뭄이 계속되면서 급수량은 27,000m<sup>3</sup>/day로 급감하였다. 장항읍은 1995년 가뭄으로 3개월 가량 제한급수를 시행하였고, 피해인원은 17,335명으로 집계되었다. 의성읍은 1994년 7월부터 이듬해 4월까지 하루 14시간씩 제한급수를 실시했는데 정상시 급수량은 6,000m<sup>3</sup>/day, 가뭄시에는 5,000m<sup>3</sup>/day으로 감소하였다. 영광읍도 1995년 4월 12일~22일 제한급수를 실시했으며, 일부 지역에서는 격일제급수를 실시하였다. 가뭄시 급수량은 정상시보다 40%가 감소하였다(건설교통부·한국수자원공사, 1998; 2001; 2002).

지표수-지하수 연계이용을 위한 입지선정기준은 크게 자연·생활·경제조건으로 구분하였고, 이들을 4단계(Level 1~4)의 속성으로 세분화하였다(표 1 참조).

표 1에서 괄호안의 숫자는 상대적 중요도로서, 이를 산정하기 위해 요소들간의 선호도를 계량화된 수치로 표현하기 위한 척도, 즉 Saaty가 제안한 쌍대비교(pair-wise comparison)를 사용하였다(Saaty, 1999). 쌍대비교시 요소들간의 척도가 논리적 일관성이 있는지를 판단하는 일관성비율(CR)은 모든 항목들이 기준치 내에 존재하여 상대적 중요도의 산정은 신뢰할 수 있는 것으로 판단되었다. 표 2에는 표 1의 'Level 3' 요소에 대한 후보지역의 입지선정인자들이 수록되어 있고, 이를 바탕으로 표 1의 상대적 중요도를 선택하여 적합도를 산정한다.

예를 들면, 속초시의 적합도 산정 과정은 다음과 같다.

$$SI = 0.300 \times [0.600 \times (0.271 \times 0.724 + 0.423 \times 0.643 + 0.144 \times 0.261) + 0.400 \times (0.600 \times 0.653 + 0.400 \times 0.653)] \dots \text{자연조건} \\ + 0.400 \times [0.550 \times (0.539 \times 0.234 + 0.297 \times 0.206 + 0.164 \times 0.106) + 0.450 \times (0.127 \times 0.587 + 0.288 \times 0.075 + 0.447 \times 0.227 + 0.138 \times 0.070)] \dots \text{생활조건} \\ + 0.300 \times [1.000 \times (0.142 \times 0.557 + 0.525 \times 0.737 + 0.334 \times 0.581)] \dots \text{경제조건} \\ = 0.469$$

각 후보지역별 적합도를 산정한 결과, 강원 속초(0.469), 충남 장항(0.408), 경북 의성(0.389), 강원 동해(0.352), 전남 영광(0.344) 순으로 나타나 계층분석과정을 통한 적지선정에서 속초시가 지표수-지하수 연계이용을 하기에 가장 유리한 것으로 분석되었다.

표 1. 적지분석을 위한 계층도 및 상대적 중요도

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
자연조건 (0.300)	지 질 (0.600)	투수계수 (0.271)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>10^{-8} \sim 10^{-6}</math> cm/sec (0.083)</li> <li>• <math>10^{-6} \sim 10^{-3}</math> cm/sec (0.193)</li> <li>• <math>10^{-3} \sim 10^2</math> cm/sec (0.724)</li> </ul>
		지하수함양량 (0.423)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30,000 m<sup>3</sup>/day 이상 (0.643)</li> <li>• 15,000~30,000 m<sup>3</sup>/day (0.283)</li> <li>• 0~15,000 m<sup>3</sup>/day (0.074)</li> </ul>
		대수층 두께 (0.144)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10m 이상 (0.633)</li> <li>• 5~10m (0.261)</li> <li>• 5m 이하 (0.106)</li> </ul>
		적정개발량 (0.162)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10,000m<sup>3</sup>/day 이하 (0.111)</li> <li>• 10,000~20,000m<sup>3</sup>/day (0.222)</li> <li>• 20,000m<sup>3</sup>/day 이상 (0.667)</li> </ul>
	수 질 (0.400)	지하수 수질 (0.600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1급수 (0.653)</li> <li>• 2급수 (0.251)</li> <li>• 3급수 이상 (0.096)</li> </ul>
		지표수 수질 (0.400)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1급수 (0.653)</li> <li>• 2급수 (0.251)</li> <li>• 3급수 이상 (0.096)</li> </ul>
생활조건 (0.400)	물부족 (0.550)	2011년 수요기준 용수부족률 (0.539)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -20~-40% (0.688)</li> <li>• 0~-20% (0.234)</li> <li>• 확보지역 (0.078)</li> </ul>
		가뭄 피해 (0.297)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 격일제급수 (0.715)</li> <li>• 제한급수 (0.206)</li> <li>• 피해없음 (0.079)</li> </ul>
		연평균강수량 (0.164)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,000mm/year 이하 (0.633)</li> <li>• 1,000~1,200mm/year (0.261)</li> <li>• 1,200~1,400mm/year (0.106)</li> </ul>
	시급성 (0.450)	개발필요량 (0.127)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5,000m<sup>3</sup>/day 이하 (0.089)</li> <li>• 5,000~10,000m<sup>3</sup>/day (0.324)</li> <li>• 10,000m<sup>3</sup>/day 이상 (0.587)</li> </ul>
		지하수 이용비율 (0.288)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20% 이하 (0.075)</li> <li>• 20~40% (0.246)</li> <li>• 40% 이상 (0.679)</li> </ul>
		1인당 급수량 (0.447)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 300 l/day 이하 (0.702)</li> <li>• 300~400 l/day (0.227)</li> <li>• 400 l/day 이상 (0.072)</li> </ul>
		생활용수 보급률 (0.138)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 70% 이하 (0.723)</li> <li>• 70~90% (0.206)</li> <li>• 90% 이상 (0.070)</li> </ul>
경계조건 (0.300)	위치 (1.000)	지형조건 (0.142)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부적합 (0.123)</li> <li>• 비교적 양호 (0.320)</li> <li>• 양호 (0.557)</li> </ul>
		기존시설 연계성 (0.525)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5km 이상 (0.077)</li> <li>• 3~5km (0.186)</li> <li>• 3km 이하 (0.737)</li> </ul>
		접근편리성 (0.334)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존도로 옆 (0.581)</li> <li>• 기존도로 근접 (0.309)</li> <li>• 도로 신설 (0.110)</li> </ul>

표 2. 후보지역의 입지선정인자

입지선정인자	강원 동해	강원 속초	충남 장항	경북 의성	전남 영광
투수계수(day)	양호	양호	보통 이하	양호	양호
지하수함양량(m <sup>3</sup> /day)	13,552	32,936	5,000	20,000	3,100
대수층두께(m)	> 9.5	> 7~8	< 5~6	< 5~6	> 7~8
적정개발량(m <sup>3</sup> /day)	20,000	32,500	4,200	14,400	800
지하수 수질	생활용수	생활용수	농업용수	농업용수	공업용수
지표수 수질	1등급	1등급	1등급	1등급	4등급
2011년 수요기준 용수부족률(%)	0~10	0~10	-20~-30	-30~-40	-30~-40
가뭄피해	격일제급수	제한급수	제한급수	제한급수	제한급수
연평균강수량 (mm/year)	1,241.2	1,346.9	1,209.0	986.6	1,225.8
개발필요량(m <sup>3</sup> /day)	15,000	14,000	4,100	1,000	3,600
지하수이용비율(%)	23.8	16.7	35.6	12.6	43.1
1인당급수량(ℓ/day)	401	370	349	270	247
생활용수보급율(%)	93.0	98.0	90.2	74.6	74.8
지형조건	관로시설용이	관로시설용이	관로신설용이	관로신설용이	기존관로이용
기존시설 연계	5~6km	2.5km	1.5km	3.5km	2.2km
접근편리성	도로 옆	도로 옆	도로 근접	도로 근접	도로 근접

### 3. 연구대상지역

#### 3.1 위치 및 물공급 현황

강원도 면적의 0.6%에 해당하는 속초시는 총면적 102.25km<sup>2</sup> 중 53.2%가 설악산 국립공원에 속해 있으며, 75.83%가 임야지역에 해당하여 수자원을 획득하기에 좋은 조건을 가지고 있다(속초시 홈페이지, 2004). 그러나 하천의 길이가 짧고 경사가 급하여 강우의 대부분이 바다로 유출되고 있어 강우를 효율적으로 활용하기에는 어려운 실정이다.

속초의 주요 하천은 쌍천과 청초천이다(그림 1 참조). 쌍천은 건천으로 홍수기를 제외하고는 하천수를 직접 취수하여 이용하기가 매우 어렵다. 또한 청초천은 청초호와 좌우로 생성된 소야평야에 용수를 공급할 수 있는 근원이 되지만, 그 양이 미미하여 유동인구가 상주인구의 약 100배 정도에 해당(표 3 참조)하는 속초시에 원활한 물공급을 하기에는 어려운 여건을 갖고 있다. 물부족이 심각한 속초시는 이를 해결하기 위한 방안으로 쌍천 지하댐 건설을 추진하여 1998년부터 완공함으로써 안정적인 수자원을 확보할 수 있게 되었다.

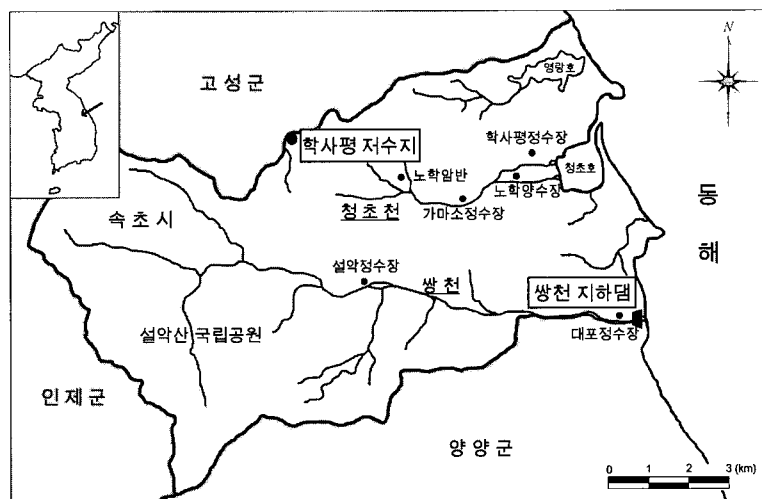


그림 1. 연구대상지역(강원 속초)

표 3. 속초시 현황(2001년 기준)

면적(km <sup>2</sup> )	102.25		가온(°C)	최고	33.7
인구(명)	상주	90,201		최저	-10.9
	유동	9,106,433		평균	12.1
최심신 적설(cm)	32.8		강수량(mm)	1,346.9	

주) 속초통계연보, 2001

그러나 표 4에서 보듯이 쌍천 지하댐에의 의존률이 84%로 지나치게 높은 편으로, 그만큼 물공급 위험에 노출되어 있다고 볼 수 있다. 고성군과의 경계에 위치한 학사평 저수지는 좋은 수질에도 불구하고 농업용 저수지로만 활용되고 있다. 현재 유역내에는 어떠한 형태의 지표수-지하수 연계이용은 없으며, 그 가능성과 효과를 확인하려는 것이 본 연구의 목적 중 하나이다.

### 3.2 기상현황

표 5는 속초시의 1973년부터 2002년까지 30년간의 기상자료를 바탕으로 한 월·연평균 기상현황이다. 이 지역에서는 가뭄과 홍수가 주기적으로 발생하며, 시간이 경과될수록 편차가 갈수록 커지는 것을 알 수 있다(그림 2 참조).

지구온난화의 영향으로 한반도에서는 연평균 강수량이 대략 10%정도 증감하는 것으로 알려져 있다. 그 효과는 연중 균등하게 나타나는 것이 아니라 월별로 상이하게 나타나고 있으며, 대체적으로 강우가 많은 월에는 더 많이, 강우가 적은 월에는 더 적게 내리는 경향이 있다. 무강우 일수를 중심으로 속초시 과거 가뭄에 대하여 조사한 결과는 표 6과 같다.

표 6은 1968년~2002년까지 순위별 무강우 지속일수와 실제체감 무강우 지속일수를 나타낸 것이다. 두 가지 순위가 서로 다른 이유는 무강우 지속일수 사이에 강우가 발생하더라도 이전의 가뭄 해갈에 충분하지 못한 경우, 사람들은 가뭄이 계속된다고 느끼기 때문이다. 1995년 9월부터 113일간 지속된 가뭄은 쌍천 지하댐의 개발을 촉발하는 계기가 되었다.

표 4. 속초시 물공급 현황(2003년 기준)

취수정	수원형태	시설용량(m <sup>3</sup> /day)	1일 평균취수량(m <sup>3</sup> /day)	총취수량(m <sup>3</sup> /day)	공급비율(%)	정수장/양수장	비고
도문1	하천복류수	15,000	6,534	30,289	84.0	대포정수장	쌍천
도문2	하천복류수	10,000	1,054				
쌍천	하천복류수	16,000	22,701				
설악	하천표류수	4,000	1,810	1,810	5.0	설악정수장	청초천
학사평	하천표류수	8,000	2,947	2,947	8.0	학사평정수장	
노학	지하수	4,000	675	675	2.0	노학양수장	
가마소	하천복류수	5,000	238	238	0.7	가마소정수장	
노학암반	지하수	3,000	99	99	0.3	노학암반	
계		65,000	36,059	36,061	100.0	-	

주) 속초시 홈페이지, 2004

표 5. 속초시 월평균 기상현황(1973~2002년)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연평균
기온(°C)	-0.3	1.1	5.4	11.4	16.0	19.0	22.8	23.6	19.8	14.8	8.4	2.8	12.1
강수량(mm)	50.2	53.3	53.2	71.1	86.9	126.1	213.4	280.0	207.0	88.9	71.0	45.9	1,346.9
강수일(일)	5.1	6.4	8.1	7.2	9.0	10.6	14.5	14.5	9.7	6.8	7.0	4.7	102.5
증발량(mm)	67.2	65.8	92.6	132.1	151.5	123.3	120.4	115.0	100.0	95.6	77.6	72.2	1,213.2

주) 기상청 홈페이지, 2004

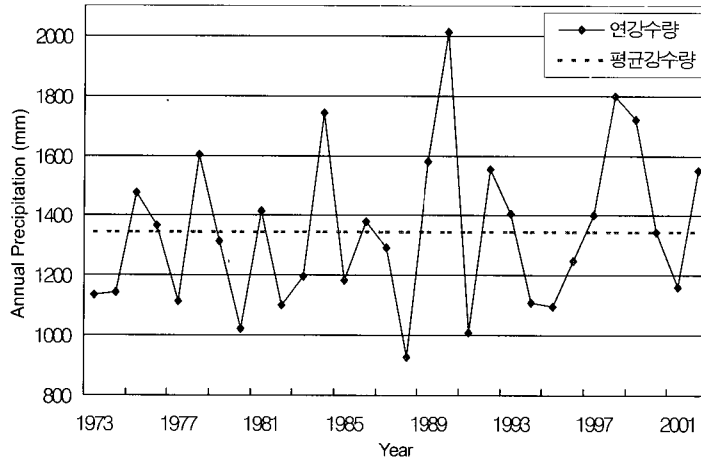


그림 2. 속초시 연도별 강수량 변화

표 6. 순위별 무강우 및 실제체감 무강우 지속일수

순위	무강우 지속일수(1.0mm 미만)		순위	실제체감 무강우 지속일수(1.0mm 미만)		
	발생 년/월/일	일수		발생 년/월/일	일수	발생강우량(mm)
1	1968/01/01 ~ 1968/02/13	44	1	1995/09/25 ~ 1996/01/13	113	4.2(11월 07일)
2	1973/11/17 ~ 1973/12/27	41	2	1968/01/01 ~ 1968/03/24	83	3.3(02월 24일)
2	1981/11/18 ~ 1981/12/28	41	3	1994/02/13 ~ 1994/04/11	61	1.2(03월 24일)
4	1986/10/23 ~ 1986/11/23	32	4	2001/04/12 ~ 2001/06/10	60	2.5(05월 09일)

주) 속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서, 1998.

#### 4. 가뭄해석 및 필요용수량 추정

속초시의 가뭄 분석 및 용수량 산정을 하기 위하여 여러 가뭄지수 중 방법이 비교적 간단하며 제약조건이 적은 SPI를 선택하였다. PDSI와 SWSI는 여러 항목과 장기간의 자료를 요하는데 반해 우리나라의 많은 지역과 마찬가지로 속초시는 그러한 자료가 축적되어 있지 않기 때문이다.

속초시의 30년간 기상자료(1973~2002년)를 이용해 단기간 SPI를 반영하는 3-SPI(강수량을 3개월 이동평균한 누가강수시계열)와 장기간 SPI를 반영하는 10-SPI(10개월 이동평균)를 계산하여 그림 3에 나타내었다.

3-SPI는 10-SPI보다 '0'을 중심으로 빈번히 진동하고 있으며, 가뭄의 주기가 짧은 경향을 보이고 있다. 이것은 3-SPI는 단기간의 강수량을 반영하기 때문에 약간의 강수부족이 곧 가뭄으로 표현되지만, 10-SPI는 장기간 누적되는 강수량을 반영하므로 약간의 강수부족이 발생하더라도 큰 영향을 주지 못하는 것에 기인한다. 즉, 장기간 SPI일수록 가뭄의 빈도는 줄어드나 지속기간이 길어지는 것이다.

속초시 가뭄분석 결과, 3-SPI 경우 약한가뭄(-1.0)은 매년 발생하고 보통가뭄(-1.5)은 3년마다, 심한가뭄(-2.0이상)은 8년마다 발생하는 것으로 나타났다. 이에 비해서 10-SPI에 따르면 약한가뭄(-1.0)은 3년마다, 보통가뭄(-1.5)는 6년마다, 심한가뭄(-2.0이상)은 10년마다 발생하는 것으로 산정되었다. 종합적으로 판단할 때, 속초에서는 심한가뭄이 약 10년 빈도로 발생함을 알 수 있다. 건설교통부(2001)에서 발표한 수자원장기종합계획(Water Vision 2020)에 의하면 수자원 계획의 목표수준이 30년에 1회 발생가뭄에 대비하는 것으로 되어 있고, 이보다 더 심각한 가뭄 발생 가능성을 배제할 수 없어 50년 빈도 가뭄에 대해서도 고려해 볼 필요가 있다. 이같은 이유로 본 연구에서는 속초시의 10년, 30년, 50년 가뭄 빈도에 기초한 물공급 시나리오를 수립하였다.

속초시의 총인구는 과거 10년간 꾸준히 증가하였으며(표 7 참조), 2000년의 상수도 보급률은 98%에 달한다. 장래에도 속초시는 98%의 보급률을 유지한다고 보았으며, 1인 1일 평균급수량은 400ℓ로 가정하였다.

과거 20년 동안의 인구자료를 바탕으로 등차급수법, 등비급수법, 지수곡선법, 논리곡선법, 최소자승법 등 5

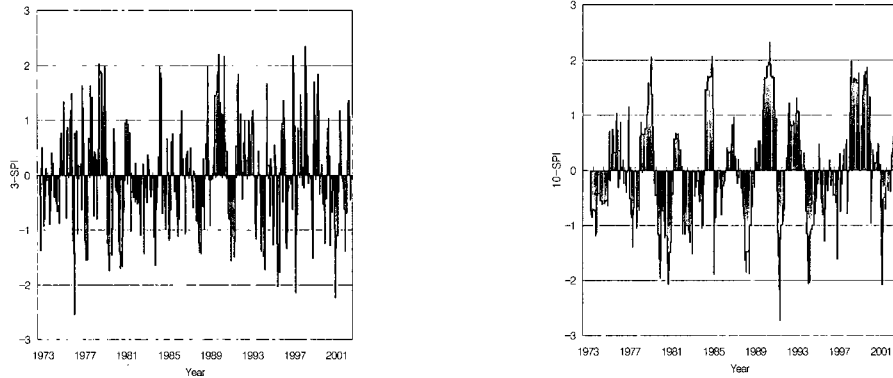


그림 3. 속초시 가뭄지수 (3-SPI, 10-SPI)

표 7. 과거 10년간의 속초시 상수도 급수 현황

연도	총인구 (명)	급수인구 (명)	보급률 (%)	시설용량 (m <sup>3</sup> /day)	급수량 (m <sup>3</sup> /day)	1인1일당 평균급수량(ℓ)
1991	74,905	69,776	96.6	30,000	22,251	319
1992	74,798	72,189	97.8	40,000	28,042	374
1993	76,646	74,966	97.8	40,000	28,042	374
1994	78,622	77,050	98.0	40,000	32,701	424
1995	80,709	79,498	98.5	41,000	34,578	435
1996	82,568	81,329	98.5	41,000	34,013	418
1997	85,427	83,930	98.2	46,000	34,500	423
1998	87,070	85,328	98.0	49,000	36,468	427
1999	88,914	86,988	98.0	49,000	35,518	408
2000	90,201	88,396	98.0	49,000	32,671	370

주) 속초통계연보, 2001

가지 방법으로 장래 인구를 추정하였으며, 1인 1일당 평균급수량 및 보급률을 바탕으로 2010년의 필요급수량을 산정하였다. 2010년 필요급수량은 약 39,000m<sup>3</sup>/day로 예측되었다. 상수도 계획이 15~20년 후의 미래를 전제로 계획되며, 또한 관광도시인 속초시의 유동인구가 월평균 약 50만 명임을 감안할 때, 2010년 필요급수량을 약 50,000m<sup>3</sup>/day, 즉 현재 급수량 보다 약 40% 증가한 양으로 설정하였다.

## 5. 물 공급 시나리오 도출

### 5.1 연계방식

현재 속초시 용수의 84%를 공급하고 있는 쌍천 지하댐은 해안과 가까운 지역에 위치하여 지속적으로 대규모 양수를 실시하게 되면 지하수위 저하에 따른 지반침하와 염수침입의 문제가 우려된다(박창근 등, 2002). 일단 균형이 깨진 지하수는 수위를 회복하는데 많은 시간이 필요로 할 뿐만 아니라 수질 역시 막대한 비용을

투입하더라도 완전 회복이 거의 불가능하기 때문에 미연에 방지하는 것이 중요하다. 이같은 점을 고려할 때, 속초시는 쌍천 지하수자원의 보전을 위해 추가 수자원의 확보가 시급한 상황이다. 그러나 신규 댐 건설은 막대한 비용과 시간이 소요되며, 또한 적지의 부재 등과 같은 현실적 어려움 때문에 가능성이 낮고, 기존 수자원을 활용하는 방안의 모색이 요구된다.

속초시에는 농업용수를 공급하고 있는 학사평 저수지가 있다. 따라서, 기존 수자원을 활용하는 방안의 일환으로 학사평 저수지의 적절한 운영을 통한 생활용수 공급은 쌍천 지하댐에의 의존도를 낮추는 동시에 용수의 원활한 공급을 가능하게 한다. 연계운영 방식은 지표수원(학사평 저수지)과 지하수원(쌍천 지하댐)을 물리적으로 연결하여 물을 주고받는 직접연계방식이 이상적이겠으나, 두 유역이 수문기상학적 특성이 유사하여 저수지 유역이 홍수일 때 쌍천 지하댐 유역은 함양할 만큼 건조한 경우가 그리 흔하지 않을 것이다. 또한, 두 수원 사이에는 국립공원이 있어 수로나 관로를

건설하기가 쉽지 않을 것이며, 가능하더라도 비용에 대한 효과를 거두기는 어려울 것으로 판단된다. 이 같은 현실적인 측면을 고려해 지표수자원과 지하수자원을 물리적으로 연결하지 않고 탄력적 운영을 통하여 속초시에 평상시는 물론, 특히 비상(가뭄)시에 효율적인 물 공급이 가능하도록 하는 간접연계방식이 타당할 것으로 판단하였다.

## 5.2 물공급 시나리오

쌍천 지하댐은 속초시의 생활용수 공급을 위하여 쌍천 해안에서 약 300m 지점에 설치되었으며, 표 8은 쌍천 지하댐의 현황이다.

한편, 속초시와 고성군의 경계에 위치하는 학사평 저수지의 현황은 표 9와 같으며, 농업용 저수지이기 때문에 일일 취수하지 않고, 영농철인 4월에서 9월까지만 농업용수를 공급하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 속초시에서는 쌍천 지하댐에 의존률이 현재에도 지나치게 높고 2010년에는 물 수요가 현재보다 약 40% 정도 증가함에도 불구하고 추가 수원 확보의 계획이 없어 전량 쌍천 지하댐이 부담해야 하는 형편이다. 본 연구에서는 표 10과 같이 학사평 저수지가 속초시 용수공급량의 일부를 담당하는 시나리오를 도출

하였다. 지표수는 지하수에 비해 상대적으로 가뭄에 민감하게 반응하므로 가뭄이 지속될 때에는 유입량이 더 많이 감소할 것이다. 이를 반영하여 가뭄이 심화될수록 학사평 저수지가 담당하는 비율은 평상시에 비해 낮게, 쌍천 지하댐이 공급하는 비율은 높게 설정하여 운영방식에 있어서 탄력적인 물 공급을 시도하였다.

그림 4는 (a) 연계이용을 하지 않을 경우와 (b) 연계이용 할 경우 속초시 용수의 수원별 기여도를 나타낸 것이다. 학사평 저수지의 투입으로 평년의 경우, 쌍천 지하댐의 부담이 88%에서 70%로 감소하는 것을 보여 주고 있다.

## 6. 연계이용 모의

### 6.1 저수지

학사평 저수지가 농업용수를 공급하는 기능을 상실하지 않고, 속초시에 생활용수 일부분을 공급가능한지 여부를 판단하기 위해 물수지 방법에 기초한 저수지 모의를 수행하였다(김수민, 2003).

$$V = I - O = I - (Q_{spl} + E_{va} + Q_{spp}) \quad (1)$$

표 8. 쌍천 지하댐 현황

지하수 저류형태	완전 지하저류형	물막이벽 길이(m)	800
용수 이용목적	생활용수	주요 취수시설	방사성집수정 4개소
축조목적	복합형	유역면적(km <sup>2</sup> )	65.33
물막이벽 설치형태	지류형	계획 취수량(m <sup>3</sup> /day)	27,000
물막이벽 시공방법	Cement Bentonite Slurry Wall	준공년도	1998

표 9. 학사평 저수지 수리시설물 현황

명칭	학사평	규모	길이(m)	294
유역면적(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	14,500		높이(m)	24.9
수혜면적(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	인가	사수위(m)/만수위(m)	형식	휠댐
	관개		1,440	118/135.6
유효저수량(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	1,249	관리기관	농업기반공사	
만수면적(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	164	준공년도	1963	

표 10. 쌍천 지하댐과 학사평 저수지의 물공급 비율

(단위: %)

운영방식	가뭄빈도	쌍천 지하댐	학사평 저수지
비탄력적	가뭄에 무관	80	20
	평년	80	20
	10년	85	15
	30년	90	10
	50년	95	5



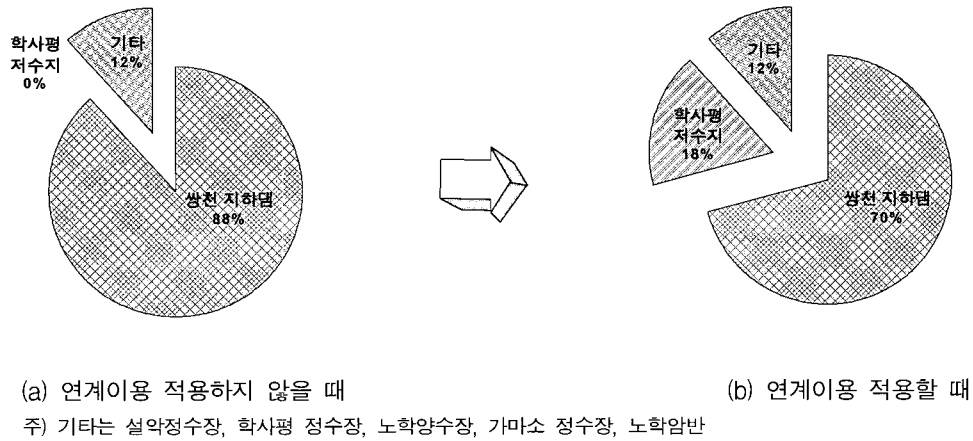


그림 4. 수원별 용수공급 기여도(2010년 물수요 기준, 평년 기준)

여기서,  $V$  : 저수지 저류량,  $I$  : 유입량,  $O$  : 유출량,  $Q_{spl}$  : 여수로 월류량,  $E_{va}$  : 평균증발 손실량,  $Q_{spb}$  : 용수공급량이다.

저류량이 사수위 아래로 내려가면 용수공급이 불가능함을 의미한다. 학사평 저수지로의 유입량은 계측치가 없기 때문에 가지야마 유출고 공식으로 산정하였으며, 여수로 월류량은 저수지 수위가 제당의 높이를 넘는 경우의 유량으로 계산하였다. 평균증발손실량은 수면증발고와 저수면적을 곱하여 산정하였고, 수면증발고는 접시증발고에 접시계수를 곱하여 구하였다. 용수공급량은 생활용수·농업용수·환경유지용수의 합으로 산정하였다.

가지야마 유출고 공식은 우리나라 1916~1927년까지 약 10년간 73개 지점의 강수량과 유출량 측정자료를 정리한 후, 그 중 자료가 정확하다고 판단되는 25개 지점의 자료를 분석하여 월강수량과 월유출고간의 관계식을 식으로 표현한 것이다(홍영하, 1983; 노재경, 1999).

$$R = \sqrt{P^2 + (138.6f + 10.2)^2} - 138.6f + E \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은 월 유출고(mm),  $P$ 는 월 강수량(mm),  $f$ 는 유출특성계수로 0.6~1.4의 범위( $f$ 값이 클수록 유역 내 강수량의 소비수량이 많음),  $E$ 는 월별 보정유량

(mm)이다.

주변 지형을 검토한 결과, 학사평 저수지의 제당을 2m 증고할 경우 유효저수량 352,850m<sup>3</sup>을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 그러한 전제하에 저수지 모의결과 표 11과 같이 4가지 경우로 나누어 실시하였다.

저수지 모의 결과는 표 12에 정리되어 있다. 평년에는 모든 경우에서 물 공급이 가능하다고 판명되었다. Case 1의 경우, 10년 빈도 가뭄에는 2개월 지속기간, 30~50년 빈도 가뭄에는 1개월 지속기간까지 물 공급이 가능한 반면, Case 2와 3은 10년 빈도 가뭄에는 3개월까지, 30~50년 빈도 가뭄에는 2개월 지속기간까지 가능하다. 그리고 Case 4의 경우에는 검토된 모든 가뭄상황에 대해서 시나리오에서 목표한 물공급이 가능함을 알 수 있다. 즉, 저수지의 증고와 탄력적 운영이 속초시의 물공급 측면에서 대단히 효과적임을 알 수 있다.

그림 5는 각 Case 별로 저수위 변화를 나타낸 것으로 50년 빈도 가뭄에도 Case 4에서는 사수위(118m) 아래로 내려가지 않음을 확인할 수 있다.

## 6.2 지하댐

2002년 현재 쌍천 지하댐에서는 6개의 취수정으로부터 30,289m<sup>3</sup>/day를 취수하고 있으며(속초시 홈페이지, 2004), 2010년 취수량 35,385m<sup>3</sup>/day(평년 기준)를 6개 취수정에 현재와 같은 비율로 배분하였다(표 13 참조).

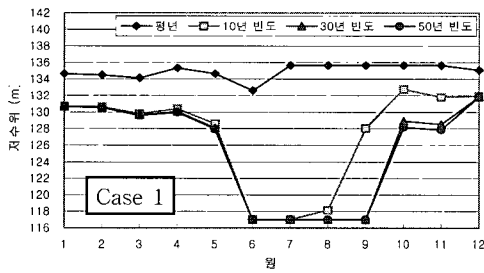
표 11. 학사평 저수지 모의 시나리오

	증고전	증고후
비탄력적	Case 1	Case 2
탄력적	Case 3	Case 4

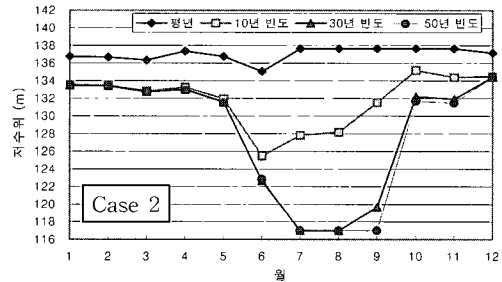
표 12. 비탄력적, 탄력적 운영(증고전/후의 저수지 모의 결과)

가뭄빈도	지속 기간	비탄력적 운영				탄력적 운영			
		Case 1(증고전)		Case 2(증고후)		Case 3(증고전)		Case 4(증고후)	
		물공급 가능여부	물공급 불가능	물공급 가능여부	물공급 불가능	물공급 가능여부	물공급 불가능	물공급 가능여부	물공급 불가능
평년	-	○	-	○	-	○	-	○	-
10년	1개월	○	-	○	-	○	-	○	-
	2개월	○	-	○	-	○	-	○	-
	3개월	×	6, 7월	○	-	○	-	○	-
	4개월	×	6~9월	×	6~7월	×	6, 7월	○	-
	5개월	×	6~10월	×	6~8월	×	6~8월	○	-
30년	1개월	○	-	○	-	○	-	○	-
	2개월	×	7, 8월	○	-	○	-	○	-
	3개월	×	6~9월	×	7~8월	×	8월	○	-
50년	1개월	○	-	○	-	○	-	○	-
	2개월	×	7, 8월	○	-	○	-	○	-
	3개월	×	6~9월	×	7~9월	×	8월	○	-

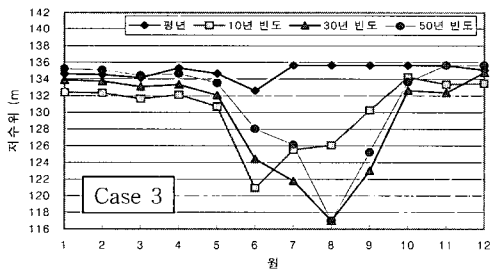
증고전 90일 지속기간 저수지분석



증고후/비탄력적인 경우 90일 지속기간 저수지 분석



증고전/탄력적 90일 지속기간 저수지분석



증고후 90일 지속기간 저수지 분석

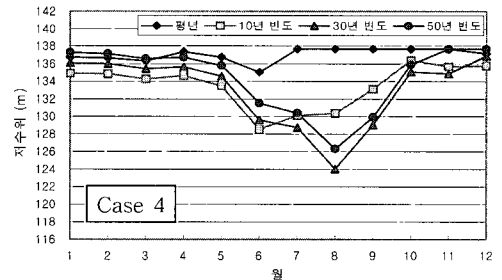


그림 5. 학사평 저수지 운영 모의 예(3개월 가뭄지속)

표 13. 쌍천 지하댐의 취수량(평년 기준)

(단위: m<sup>3</sup>/day)

취수정	2002년		2010년		정수장	수원 형태	
	1일평균취수량	총취수량	1일평균취수량	총취수량			
도문1(dw-1)	6,534(21.6%)	30,289 (100%)	7,633(21.6%)	35,385 (100%)	대포 정수장	하천복류수	
도문2(dw-2)	1,054(3.5%)		1,231(3.5%)				
쌍천	cw-1		7,323.3(24.2%)				8,556(24.2%)
	cw-3		4,394.9(14.5%)				5,134(14.5%)
	cw-4		2,928.4(9.9%)				3,421(9.9%)
cw-5	8,054.3(26.6%)	9,410(26.6%)					

쌍천 지하댐에서 2010년 취수량이 미치는 영향을 파악하기 위해 지하수 모의를 수행하였다. 사용된 지하수 유동 수치모델은 Visual MODFLOW(Walton과 Tomas, 1996)이다. 그림 6은 모의를 위해 구성한 쌍천 유역의 해석구간 및 경계조건이다. 해안은 일정수두, 대수층 남

북경계는 불투수, 그리고 상류는 일반수두 경계조건을 설정하였다. 쌍천은 River Package를 사용하였고, 지하댐은 HBF(Horizontal Flow Barrier Boundary)로 처리하였다(임형준, 2003). 30일, 120일, 240일, 360일 취수의 결과 얻어지는 등수두선의 변화는 그림 7과 같다.

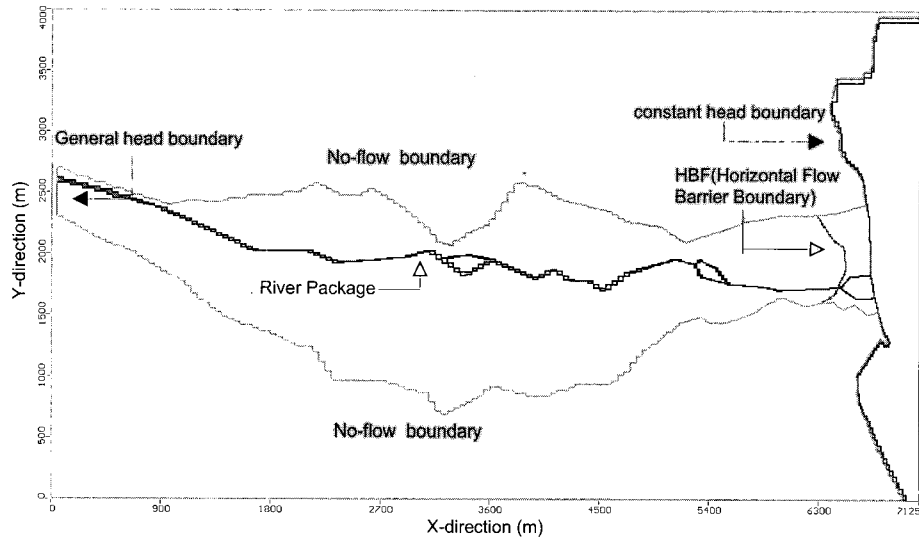


그림 6. 쌍천 유역의 지하수 흐름 모의의 경계조건

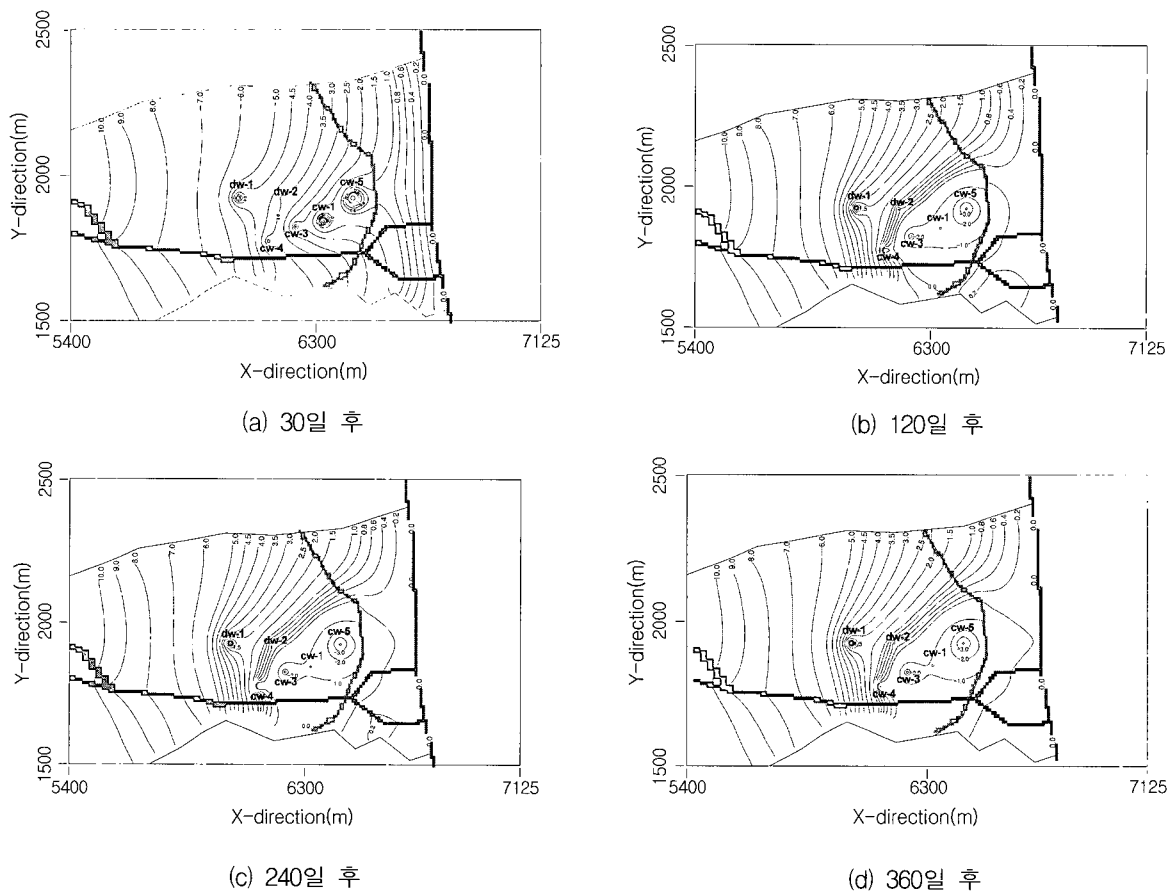


그림 7. 시간 경과에 따른 수두변화(2010년)

취수 시작일부터 120일까지는 등수두선의 변화가 발생하나, 240일 이후에는 등수두선의 변화가 상대적으로 적게 발생하여 거의 정상류 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 수위강하량은 cw-1 취수정에서 가장 많은 약 3.6m, dw-1 취수정에서는 가장 적은 0.98m 정도가 나타났다. 가뭄시 시나리오에 따른 일시적 양수량 증가에도 2개월까지는 수위강하량에 특별한 변화는 나타나지 않았고, 염수침입의 우려도 없는 것으로 예측되었다.

### 7. 추가 수자원확보량 산정

앞 절에서 학사평 저수지로부터 추가로 확보되는 수자원량은 증고와 탄력적 운영에 기인함을 보인 바 있다. 물공급 측면에서 가장 불리한 Case 1과 가장 유리한 Case 4를 비교하여 표 14에 나타내었다. 음영이 있는 부분은 저수지의 기능을 상실한 것을 뜻하며, (-)는 부족량을 나타낸 것이다. 학사평 저수지에서 연계이용의 효과로서의 추가 수자원확보량은 Case 1과 Case 4의 차로 정의할 수 있으며, 이를 연간 수자원확보량으

로 환산하여 표 15에 나타내었다.

학사평 저수지라는 새로운 수원을 활용함으로써 속초시에 공급해야 하는 전체 물공급량을 늘리면서도 쌍천 지하댐의 지하수자원을 보전하는 측면에서 긍정적인 효과가 발생하게 됨을 지하수 흐름 해석 결과로부터 알 수 있었다. 쌍천 지하댐 측면에서의 추가 수자원확보량은 학사평 저수지가 속초시에 공급하는 생활용수 만큼이 될 것이며, 이 양만큼 양수하지 않음으로써 지하수자원 보전 효과를 얻게 된다.

지표수-지하수 연계를 통해 얻어지는 종합적 효과는 쌍천 지하댐과 학사평 저수지에서의 추가 수자원 확보량의 합이 된다. 학사평 저수지의 경우는 가뭄빈도, 지속기간에 따라 추가 수자원확보량이 다르기 때문에(표 15 참조), 여기에서는 증가된 양수량에도 지하수에 부정적 변화를 보이지 않는 경우 즉, 가뭄이 2개월 지속되었을 경우의 추가 수자원확보량을 기준으로 산정하였다. 이렇게 정의된 추가 수자원 확보량은 표 16과 같다.

표 14. 10년 빈도 가뭄시 물공급 가능량

(단위: 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/month)

Case	일	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
Case 1	60	780	695	667	737	529	131	226	413	934	1,053	937	830
	90	580	571	486	546	376	-171	-28	1	330	826	706	720
	120	470	372	364	367	187	-323	-157	-223	-77	225	625	635
	150	386	263	166	246	10	-510	-157	-223	-78	-100	24	410
Case 4	60	1,267	1,175	1,146	1,219	1,009	609	704	893	1,419	1,537	1,422	1,315
	90	1,131	1,119	1,033	1,088	922	372	516	544	874	1,377	1,257	1,272
	120	1,088	983	977	976	793	286	279	357	527	833	1,241	1,250
	150	1,067	941	842	921	681	157	194	122	341	489	697	1,091

주) 물공급 가능량 저류량과 월류량의 합

표 15. 학사평 저수지에서 추가 확보되는 수자원

(단위: 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/year)

지속기간 \ 가뭄빈도	10년 빈도	30년 빈도	50년 빈도
2개월	3,445(7~8월)	3,815(6~7월)	4,109(6~7월)
3개월	3,804(5~7월)	4,281(4~6월)	4,956(4~6월)
4개월	3,927(6~9월)	-	-
5개월	3,922(6~10월)	-	-

주) ( )은 가뭄이 발생한 월

표 16. 추가 수자원확보 총량(2개월 가뭄지속)

(단위: 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/year)

가뭄빈도 \ 확보량	쌍천 지하댐	학사평 저수지	추가 확보총량
평년	3,185	4,199	7,384
10년 빈도	2,388	3,445	5,833
30년 빈도	1,592	3,815	5,407
50년 빈도	796	4,109	4,905

최종적으로 확보되는 추가 수자원량은 평년일 때 연간 약 740만  $m^3$ , 10년, 30년, 50년 빈도 가뭄일 때 각각 580만, 540만, 490만  $m^3$ 으로 추산되었다. 평년일 때가 가장 많은 물이 확보되며, 가뭄이 심화될수록 물 확보량이 줄어드는 것으로 나타난 바 이는 합리적인 결과로 판단된다.

## 8. 결 론

지표수-지하수 연계이용은 대규모 수자원 개발이 가능하지도 바람직하지도 않은 시대에 요구되는 중요한 수자원 확보방안이다. 본 논문에서는 선행 논문에서 개발된 지표수-지하수 연계이용 방법론의 적용성을 현장 적용을 통해 검토하였다. 신규 수자원 확보가 어려운 5곳의 후보지역을 대상으로 계층분석과정을 적용, 먼저 지표수-지하수 연계이용이 우선적으로 시행되어야 할 지역을 선정하였다. 선정된 지역의 기상자료를 분석하고, 인구 및 물 수요를 추정하여 가뭄시 원활한 급수량을 획득하기 위한 물공급 시나리오를 도출하였다. 지표수-지하수 연계 시나리오에 따른 저수지 및 지하수 운영모의를 통해 연계이용의 효과, 즉 추가로 확보되는 수자원의 양을 정량화 하였다.

지하댐이라는 하나의 수원에 지나친 의존도를 갖고 있는 강원도 속초시가 적지로 선택되었고, 쌍천 지하댐과 학사평 저수지의 연계를 통하여 생활용수 공급을 다원화 시키기 위한 운영 시나리오가 도출되고, 그 효용성이 모의를 통해 검토되었다.

그 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 객관적 지표에 의해 지표수-지하수 연계 가능지역의 우선 순위를 정량화 할 수 있도록 계층분석과정을 확립하였고, 이를 바탕으로 5개 후보지역에 적지분석을 수행한 결과, 속초시의 우선 순위가 가장 높은 것으로 나타났다.
- (2) 가뭄지수 SPI 분석에 따르면 속초시는 10년에 한번 꼴로 가뭄을 겪는 것으로 나타났으며, 이를 바탕으로 하여 탄력적 물공급 시나리오의 수립이 가능하였다.
- (3) 지표수-지하수 연계이용의 효과는 시설 증설과 탄력적 운영에 의해 극대화되며, 속초시의 경우 가뭄 빈도에 따라 490만~740만  $m^3/year$ 의 추가 수자원이 확보될 수 있는 것으로 산정되었다.
- (4) 선행 및 본 연구에서 개발된 지표수-지하수 연계이용 방법론은 신규 수자원 확보가 어려운 지역에 효율적 물관리를 위한 대안의 수립 및 운영을 위한 유용한 도구가 될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부 (2001). 수자원장기종합계획(Water Vision 2020), p. 17.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (1988). 지표수 및 지하수 연계사업 기본조사.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (2001). 지하수조사연보.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (2002). 지하댐 개발방안 수립조사 보고서.
- 기상청 홈페이지 (2004). <http://www.kma.go.kr/index.html>
- 김수민 (2003). 지표수-지하수 연계이용을 고려한 저수지 운영. 석사학위논문, 동국대학교, pp. 49-63.
- 노재경 (1999). "가지야마 월유출량 공식의 일반화." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 221-226.
- 박창근, 신윤창, 박재현 (2002). "지하댐에 의한 추가 수자원 확보 가능량 평가." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 703-709.
- 속초시 (1998). 속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서.
- 속초시 (2001). 속초통계연보.
- 속초시 홈페이지 (2004). <http://sokcho.gangwon.kr/section/water/main.html>.
- 이상일, 김병찬, 김수민 (2004). "지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용 - (I) 방법론." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제37권, 제10호, pp. 789-798.
- 이재웅, 위희상, 유동훈, 박창근 (2000). "지표수와 지하수의 최적 연계운영." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 495-500.
- 임형준 (2003). 지하댐이 있는 유역의 지하수 흐름에 관한 연구. 석사학위논문, 동국대학교, pp. 64-79.
- 홍영하 (1983). "저수지 유효저수용량 결정에 있어서 가지야마의 월유출고공식 사용의 문제점 제기." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제16권, 제1호, pp. 30-35.
- Emch, P.G., and Yeh, W.G. (1998). "Management Model for Conjunctive Use of Coastal Surface Water and Ground Water." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, No. 2, pp. 129-139.

Fredericks, J.W., Labadie, J.W., and Altenhofen, J.M. (1998). "Decision Support System for Conjunctive Stream-Aquifer Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, No. 2, pp. 69-78.

Muhammad, S.E., and Richard, C.P. (1995). "Maximizing Conjunctive Use of Surface and Ground Water under Surface Water Quality Constraints." *Advances in Water Resources*, Vol. 18, No. 2, pp.

67-75.

Saaty, T. L. (1999). "The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process." *5th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kobe, Japan*.

Walton, G., and Tomas, F. (1996). *Visual MODFLOW User's Guide*, Waterloo Hydrogeologic.

(논문번호:04-27/접수:2004.03.10/심사완료:2004.08.30)