

# 지하수와 지표수의 연계 개발 및 관리 방안

이 상 일

동국대학교 토목환경공학과 교수

## 1. 서 언

우리나라는 1990년대에 이미 1인당 물 사용 가능량  $1,472\text{m}^3$ 로 물 부족국가에 포함되었으며, 21세기 초에는  $1,258\text{m}^3$  정도까지 줄어 수자원 빈국이 될 것으로 전망되고 있다. 건설교통부가 2001년에 발표한 『수자원 장기종합 계획(WATER VISION 2020)』에 따르면 자연적인 인구증가, 급속한 도시화 및 경제 성장에 따른 산업활동 증가로 인해 국내 용수 수요는 지속적으로 증가하여, 2006년도에는 연간  $1\text{억}\text{m}^3$ , 2011년에는 연간  $18\text{억}\text{m}^3$ , 2020년에는 약  $26\text{억}\text{m}^3$ 의 물 부족 발생이 예상된다.

지역별로는 낙동강 권역을 제외한 한강, 금강, 영산강 및 섬진강 유역은 2006년까지는 댐의 연계 운영을 통해 물 부족 문제의 해결이 가능하나, 2011년부터는 댐연계를 통해 연간  $6\text{억}\text{m}^3$ , 해수의 담수화를 통해 연간  $8\text{백만}\text{m}^3$ 의 용수를 공급하더라도  $12.28\text{억}\text{m}^3$ 의 용수부족이 예상된다. 이는 장래 예상되는 물 부족 문제를 해소하기 위해서는 2011년까지  $12.3\text{억}\text{m}^3$ , 2016년까지  $16.6\text{억}\text{m}^3$ , 2020년까지는  $18.38\text{억}\text{m}^3$ 의 신규 수자원 확보가 요구됨을 의미한다.

장래 물부족에 대처하기 위한 신규 수자원 확보 방안으로 새로운 댐 개발 및 기존댐 재개발, 대체 수자원 개발, 우수 및 하수의 재이용 등 다양한 방안들이 고려되고 있으며, 수자원 확보와 효율적인 이용을 위한 다양한 노력의 하나로 지표수와 지하수의 연계이용에 관심이 모아지고 있다. 연계이용이란 기본적으로 지표수와 지하수를 하나의 수문학적 사이클로 연결된 자원으로 파악하고, 시공간적으로 적절한 배분을 통해 수자원을 효율적으로 활용하고자 하는 시도이다.

외국의 경우에는 과도하게 사용된 지하수를 보충하기 위해 지표수를 지하로 함양한다든지 혹은 수량이나 수질에 문제가 있는 지표수를 보완하기 위해 지하수를 활용하는 등 성공적인 지표수-지하수 연계 이용 사례를 다수 발견할 수 있다. 그러나 우리나라는 전반적으로 높은 지표수 의존도를 보이는 가운데, 국지적으로는 지하수를 과도하게 사용하는 양상을 보이는 실정이다. 따라서 아직까지 실질적인 지표수-지하수 연계이용의 사례도 존재하지 않고, 관련 기술도 확보되어 있지 않은 상태이다.

한편, 우리나라의 하천은 풍수기에 지표에 내린 강수가 지하로 함양되어 천부지하수(shallow groundwater)가 되었다가 갈수기에 이 천부지하수가 다시 하천으로 배출되는 기저유출(base flow)을 이루고 있어, 하천과 그 주변의 충적층 내에 저류된 천부지하수가 수리적으로 서로 직접 연결된 하천대수층계를 이루고 있다. 따라서 지표수-지하수 연계이용을 위한 자연적 여건을 갖추고 있다고 볼 수 있으며, 이제 수자원 빈국이라 할 수 있는 우리나라에서도 수자원의 효율적인 개발·이용과 관리를 위해서는 지표수의 직접취수에 의존해온 과거의 접근 방법을 지표수와 인근에 분포된 지하수를 서로 연계해

서 이용·관리하는 방향으로 전환해야 하며, 이를 위한 관련 기술의 개발을 서둘러야 할 때이다.

본 논문은 지표수-지하수 연계이용의 현황을 알아보고, 연계가능 지역을 어떻게 선정할 것인지에 관한 기술과 연계이용에 의한 용수공급능력을 평가하는 방법에 관해 국내 시범지역에 적용하였을 경우를 상정하여 소개하기로 한다.

## 2. 지표수-지하수 연계이용의 개념과 유형

지표수와 지하수 연계이용은 수자원 개발이 한계에 도달하거나 시공간적으로 수자원의 수요, 공급의 불균형이 심한 지역에서 유역내 지표수와 지하수를 단일 체계로 통합하여 계획적으로 운영함으로써 수자원의 가용량 증대와 용수공급의 안정성을 확보하는 방법이다.

지표수-지하수의 연계이용 유형으로는 댐, 보, 하천 등의 지표수 취수시설의 운영과 더불어 전형적인 지하수 취수시설인 우물의 개발, 인공함양(artificial recharge)에 의한 지하수 보충, 강변여과(bank filtration)에 의한 지표수/지하수 취수, 그리고 지하댐(underground dam)에 의한 지하수 확보 등으로 대별할 수 있다.

우리나라보다 산업화 과정을 먼저 거친 라인강변의 서유럽 국가들을 포함한 독일, 영국, 미국, 이스라엘, 일본 등 많은 국가에서는 오래 전부터 강변여과를 통한 취수로 저질화된 상수원수를 개선하고 수질 사고 등의 비상시를 대비하거나, 각종 인공함양을 실시하여 지하수의 저장, 지하수위 유지, 염수침입 방지 등의 효과를 거뒀다. 표 1은 외국의 지표수-지하수 연계이용 사례를 나타낸 것이다.

한편, 국내에서는 외국에서와 같은 다양한 목적과 형태의 지표수-지하수 연계이용 사례를 발견하기 어렵고, 지하댐의 건설을 통한 지하수의 이용과 강변여과수 개발 사례가 일부 존재할 뿐이며(표 2), 따라서 이와 관련된 기술의 확보도 매우 미미한 단계에 있다고 할 수 있다.

## 3. 연계이용을 위한 적지 선정

다양한 시설 및 사업지역의 적절한 입지는 지역주민의 생활 또는 사업의 성공

표 1. 외국의 지표수-지하수 연계이용 사례

국가	지역	목적	유형
독일	루르 지방 외 전역	용수 공급	강변 여과
네덜란드	북해 해안 도시	염수 침입 방지	라인과 Mass 강물을 인공함양
이스라엘	해안 평야 및 국토 중앙부	용수 공급 및 염수 침입 방지	호소수를 우물을 통해 인공함양
영국	런던 테임즈 유역	용수 공급	겨울에 지표수를 전처리 후 우물을 통해 인공함양
캐나다	온타리오 주 Kichener	용수 공급	겨울과 봄에 지표수를 전처리 후 인공함양
미국	플로리다 동부 해안	용수 공급	대수층 함양 및 취수 검용 방식(ASR)
	하와이 오아후 섬	용수 공급 및 염수 침입 방지	생활폐수 처리 후 인공함양
	캘리포니아 남부	지표수 수질 관리 및 지하수 보전	생활폐수 처리 후 인공함양
	캘리포니아 중부	농업용수 확보	계절별 지표수-지하수 공급량 조절
	아칸소 남서부	지하수 보전	계절별 지표수-지하수 공급량 조절
호주	남동부 마운트 감비에르 시	용수 공급	카르스트 대수층에 강우 저장
일본	오키나와현 스나카와(砂川)	농업용수 확보	지하댐
	오키나와현 미나후쿠(皆福)	농업용수 확보	지하댐
	후쿠이현 쓰네카미(常神)	상수 공급	지하댐
	후쿠이현 오노노(大野)	지하수 보전	비관개 기간 논에 의한 지하수 함양
	구마모토현(熊本縣) 쿠마모토	지하수 보전	함양림 조성

표 2. 국내의 지하댐 및 강변여과 사례

유형	지역	목적	공급능력 (㎥/일)
지하댐	경북 상주 이안	농업용수	24,000
	경북 영일 남송	농업용수	27,000
	충남 공주 옥성	농업용수	27,900
	전북 정읍 우일	농업용수	16,200
	전북 정읍 고천	농업용수	25,110
	강원도 속초 쌍천	생활용수	43,000
강변 여과	낙동강 유역	생활용수	2,000/공
	경남 창원	생활용수	240,000 (2016년)
	충남 연기군 미호천	생활용수	pilot plant
	금강 부여	생활용수	pilot plant
	영산강 중하류	생활용수	약 94,500

등의 관점에서 합리적이고 체계적으로 결정되어야 한다. 따라서 체계적인 계획과 조사자료를 바탕으로 충분한 고려 하에 입지선정작업이 이루어져야 하며, 이를 위해 다양한 방법론들이 개발·적용되어 왔다.

이 중 입지선정과 같이 의사결정이 복잡하고 대안들간에 차이가 많은 경우에는 분석적 의사결정 (Analytical Decision-Making) 방법론이 주로 사용되며, 그 가운데에서도 계층분석과정 (Analytic Hierarchy Process, AHP)이 널리 쓰이고 있다. AHP는 1960년대에 Thomas Saaty에 의해 개발되었으며, 복잡한 의사결정문제를 계층적으로 나누어 분석하는 기법으로 의사결정의 전 과정을 다단계로 나눈 후, 이를 단계별로 분석·해결함으로써 최종적인 의사결정에 이르는 방법이다(Siddiqui, 1996). 최근에는 지리정보시스템(GIS)과 더불어 매립지와 같은 시설물의 적지선정에도 많이 이용되고 있다.

### 3.1 적지선정을 위한 계층분석과정

먼저 입지선정에 고려되어야 할 인자들을 도출하고, 이들을 가능성 측면, 시급성 측면, 효율성 측면의 인자들로 그룹화 하였다. 이들을 단계별 속성으로 세분화하여 총 4단계의 입지선정기준을 도출하였다 (그림 1).

입지선정인자간의 상대적 중요도(relative importance weights)를 산정하기 위해 이원비교법(pairwise comparison)에 의해 관련된 모든 속성에 대한 상호 순위를 비교한다. 각 계층조직 요소의 상대적 중요도는 의사결정 매트릭스의 고유요소(eigen-element)를 표준화함으로써 결정된다(이상일 등, 2002). 고유요소 EE는 매트릭스의 열에 해당하는 모든 요소를 곱하여 여기에 열의 요소의 개수만큼의 제곱근을 취함으로써 얻어진다. 상대적 중요도(RIW)는 EE 요소들의 합으로 각각의 요소를 나누어 얻어지며, 선호도가 좋을수록 해당인자의 상대적 중요도도 높아진다.

$$EE_i = \sqrt[n]{a_{i1} \times a_{i2} \times \dots \times a_{in}} \quad (i=1, \dots, n); \quad RIW_i = \frac{EE_i}{\sum EE}$$

이때,  $n$  은 각 매트릭스 내에서 고려되는 입지선정인자의 개수이며,  $a_{in}$ 은 입지선정인자간의 선호도이다. 입지선정인자간 선호도의 부여는 주관적 요소를 최소화하기 위하여 전문가 및 지역주민의 의견을 수렴하고, 관련 문헌의 면밀한 조사도 필요하다. 그림 1은 입지선정인자의 상대적 중요도를 나타낸 계층조직도이다.

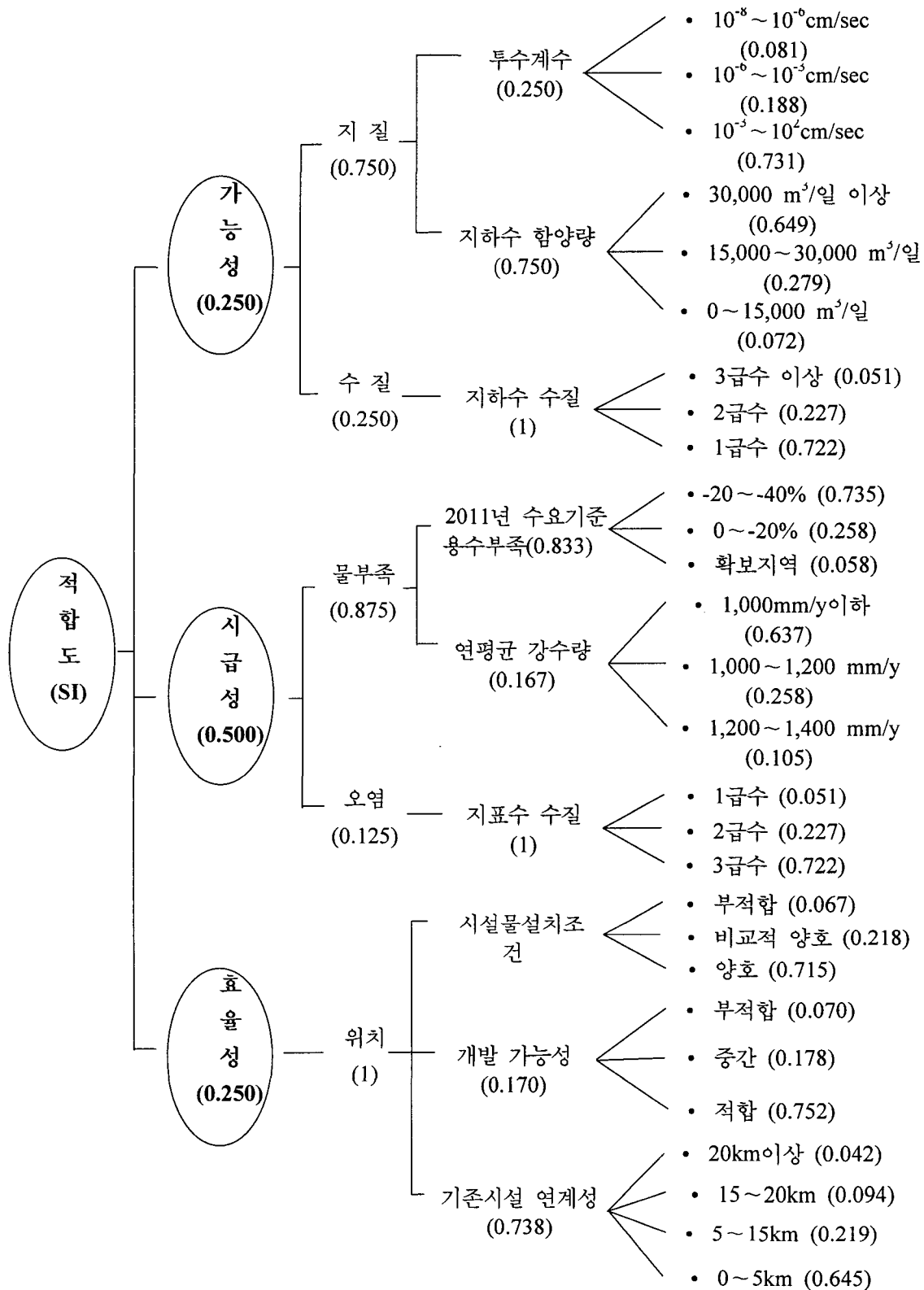


그림 1. 입지선정인자의 상대적 중요도를 나타낸 계층조직도

적합도(Suitability index)는 어느 지역에서 지표수-지하수 연계이용이 적합한 정도를 종합적으로 나타내는 척도이다. 적합도의 산정식은 분석유형에 따라 다양하나, 여기서는 계층조직이 4단계로 구성된 점을 감안하여 다음과 같이 설정하였다.

$$\text{적합도}(SI) = \sum \{RIW_1 \cdot \sum [RIW_2 \cdot \sum (RIW_3 \cdot RIW_4)]\}$$

여기서 RIWi는 각각 단계별 상대적 중요도를 나타내며, 적합도가 높을수록 대상지역이 연계이용에 더 적합함을 의미한다.

### 3.2 계층분석과정의 적용

본 절에서는 용수공급에 취약한 중소규모 댐과 상수원이 오염된 지역을 조사한 자료를 바탕으로 검토 대상지역을 도출한 다음, 앞서 제시한 계층분석과정을 이용하여 연계이용의 적합성을 평가·분석하였다. 검토 대상지역으로는 지형적 환경조건으로 인해 대하천이 발달하기 어렵고 대규모 저수시설이 부족하여 생활용수의 지하수 의존도가 높은 강원도 속초의 쌍천 유역과, 연강수량은 높지만 인근의 용수공급 시설의 부족과 지표수의 높은 오염도로 인해 충분한 물공급에 어려움을 겪고 있는 전라남도 영광의 도목제 유역을 선정하였다.

쌍천과 영광 도목제 유역의 지표수-지하수 연계이용 적지분석에 요구되는 입지선정인자 값은 각각 표 3과 표 4에 정리되어 있다.

표 3. 쌍천 유역의 입지선정인자

투수계수	지하수 함양량	지하수 수 질	2011년 기준 용수부족률	연평균 강우량	지표수 수 질	시설물 설치조건	개발 가능성	기존시설 연계성
양호	32,936m <sup>3</sup> /일	1급수	0~-10%	1,304mm	1급수	양호	적합	0~5km

표 4. 도목제 유역의 입지선정인자

투수계수	지하수 함양량	지하수 수 질	2011년 기준 용수부족률	연평균 강우량	지표수 수 질	시설물 설치조건	개발 가능성	기존시설 연계성
양호	3,100m <sup>3</sup> /일	3급수	-30~-40%	1,441mm	2급수	비교적 양호	부적합	5~8km

두 지역의 입지선정인자를 바탕으로 한 계층분석 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SI_{\text{쌍천}} &= [ \{ (0.731 \times 0.250) + (0.649 \times 0.750) \} \times 0.750 + (0.722 \times 1 \times 0.250) ] \times 0.250 \\ &\quad + [ \{ (0.258 \times 0.833) + (0.105 \times 0.167) \} \times 0.875 + (0.051 \times 1 \times 0.125) ] \times 0.500 \\ &\quad + [ \{ (0.715 \times 0.092) + (0.752 \times 0.170) + (0.645 \times 0.738) \} \times 1 ] \times 0.250 \\ &= 0.171 + 0.105 + 0.167 = 0.443 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SI_{\text{도목제}} &= [ \{ (0.731 \times 0.250) + (0.072 \times 0.750) \} \times 0.750 + (0.051 \times 1 \times 0.250) ] \times 0.250 \\ &\quad + [ \{ (0.735 \times 0.833) + (0.105 \times 0.167) \} \times 0.875 + (0.227 \times 1 \times 0.125) ] \times 0.500 \\ &\quad + [ \{ (0.218 \times 0.092) + (0.070 \times 0.170) + (0.219 \times 0.738) \} \times 1 ] \times 0.250 \\ &= 0.048 + 0.290 + 0.048 = 0.386 \end{aligned}$$

쌍천과 도목제에서의 적합도는 각각 0.443, 0.386로 쌍천 지역의 적합도가 도목제보다 높게 나타났다. 도목제가 쌍천에 비해 장래의 용수부족이 더 우려되고 지표수의 오염도가 높아 시급성은 다소 높게 나타났다으나, 기타 요소 즉, 지하수 함양량, 지하수 수질, 시설물 설치조건, 개발가능성, 기존시설과의 연계성 등에서 쌍천 지역이 더 높은 점수를 얻어 지표수-지하수 연계이용에 보다 적합한 지역인 것으로 분석되었다.

## 4. 속초시예의 모의 적용

현재 속초시의 취수원으로 사용되고 있는 쌍천 지하댐과 인근에 위치한 학사평 저수지(그림 2)를 연계이용 함으로써 이 지역의 효율적인 물 관리체제를 구축하는 방안을 검토하였다. 속초지역은 하천 경사가 급하고 유로연장이 짧아 강수량을 저류하기 어려운 지역 여건을 이루고 있어서, 매년 갈수기 때마다 심각한 물 부족 현상을 초래해 왔다. 비록 1998년 쌍천 지하댐의 건설로 물문제를 상당부분 해결하였으나, 앞으로의 용수수요를 감안하면 보다 효율적인 물관리가 요구되는 지역이다. 따라서 생활용수를 공급하는데 문제가 없는 수질을 갖고 있으나 현재 농업용 저수지의 역할만을 수행하고 있는 학사평 저수지를 활용하는 연계이용 방안을 검토하는 일은 의미 있다고 판단된다.

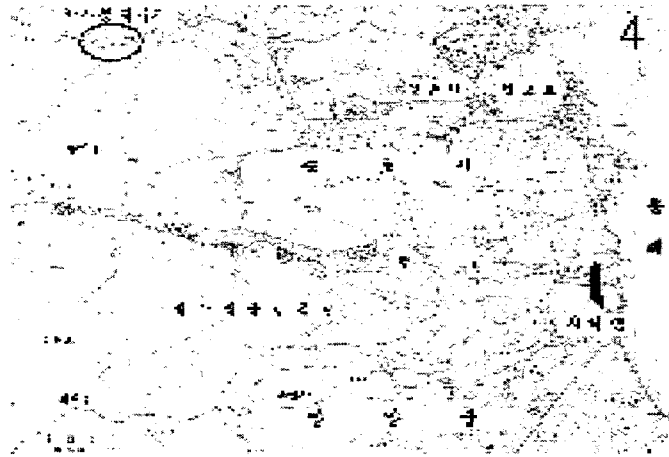


그림 2. 연계이용 연구지역(속초 쌍천-학사평)

### 4.1 연계 방식 및 운용 시나리오

지금까지 5년 여 동안 쌍천 지하댐은 속초시 용수공급에 중요한 역할을 담당해 왔으나, 과연 현재와 같은 상태로 얼마나 유지할 수 있는지는 불투명한 상황이다. 지하수자원의 보전을 위해서도 가용한 지표수자원(학사평 저수지)의 활용은 그 타당성을 인정받을 수 있다. 한편, 가능하면 함양을 통해 지하댐의 저류량을 증가시키는 방안도 검토해 볼 필요가 있다. 또, 심각한 가뭄이 닥쳤을 경우 얼마 정도까지의 추가 양수가 가능한지도 검토해 보아야 한다.

먼저, 두 개의 수원을 물리적으로 연결하여 운영하는 방안을 생각해 볼 수 있다. 즉, 학사평 저수지와 쌍천 지하댐을 연결하는 수로(혹은 관로)를 만들어 물을 주고받는 방식이며, 이는 일본 등지에서 사례를 볼 수 있는 유량조정하천의 경우와 같은 개념의 연계방식이라 할 수 있다.

홍수시 월류되어 바다로 유출될 물을 쌍천 지하댐 상류로 도수하여 함양시키고, 가뭄으로 학사평 저수지의 수위가 낮아질 때는 일시적으로 쌍천 지하댐의 양수량을 늘려 일부를 학사평 저수지로 보내는 방식이다(그림 3(a)). 이 안은 지표수원과 지하수원을 물리적으로 연결하여 이용하는 구조물적 연계방안이라 할 수 있다.

그러나 현실적인 여러 측면들은 이 안의 적용을 어렵게 할 수 있다. 먼저, 두 유역이 지리적으로 가깝고 또 수문기상학적 특성도 유사하기 때문에 학사평 저수지 유역이 홍수일 때 쌍천 지하댐 유역은 함양할 만큼 건조할 경우가 그리 흔하지 않을 것이다. 또, 국립공원을 사이에 끼고 있어 수로 혹은 관로를 건설하기가 쉽지 않고 환경적으로도 문제가 있을 수 있다는 점이다. 그리고 무엇보다도 수질이 양호한 두 개의 수원을 각각 운영하여도 될 터인데 굳이 연결수로를 건설해야 하는 현실적 타당성을 찾기가 어렵다는 판단이다.

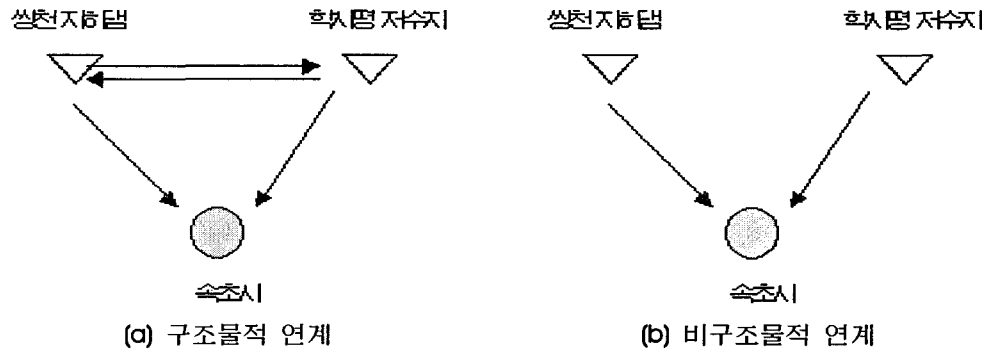


그림 3. 두 개의 수원을 이용한 지표수-지하수 연계이용 방식

한편, 두 개의 수원을 물리적으로 연결하지 않고 물공급을 탄력적으로 하는 방안을 생각할 수 있다 (그림 3(b)). 학사평 저수지라는 새로운 수원을 활용하되, 수문기상학적인 상황에 따라 탄력적으로 물공급량을 조정하는 것이다. 이로써 전체 물공급량을 늘리면서도 쌍천 지하댐의 지하수자원을 보전하는 소기의 목적을 달성할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

예를 들면 평상시 속초시로의 물공급량을 80(지하댐) : 20(저수지)으로 담당하다가, 가뭄심각도에 따라 10년 빈도 가뭄에는 85 : 15로 변경하고, 20년 빈도 가뭄에는 90 : 10, 50년 빈도에는 95 : 5로 운영하는 등이다. 이 경우 추가 수자원확보량은 학사평 저수지가 담당하는 '20' 즉, 속초시 물수요량의 20%와 그만큼 사용되지 않은 지하수량으로 간주될 수 있을 것이다. 저수지의 '20'에 해당하는 양은 증고로 인해 바다로 유실되지 않고 확보된 양에 해당되며, 그만큼 지하수자원이 사용되지 않고 보전되었으므로 물공급이라는 형태로 계량되지는 않지만 지속가능한 수자원을 위한 효과 또한 유발된다고 볼 수 있다.

학사평 저수지를 증고하기 전과 증고한 후로 나누어 각각의 경우에 대해 지표수 및 지하수원의 용수공급능력을 모의를 통해 해석하고, 그로부터 추가 수자원확보가능량을 산정하는 내용이 다음 절에 기술되어 있다.

#### 4.2 지하 및 지표수원의 용수공급능력 해석

인구예측 결과를 바탕으로 하고, 관광도시인 속초시의 유동인구 월 50만명을 감안할 때 2010년의 필요급수량은 약 50,000m<sup>3</sup>/day로 추정된다. 현재 쌍천 지하댐의 취수량을 기준으로 산정한 지하댐 관정의 가뭄 시나리오별 양수량은 표 5와 같다.

표 5. 지하댐 관정의 시나리오별 양수계획

취수정	평년(m <sup>3</sup> /d)	10년 빈도(m <sup>3</sup> /d)	30년 빈도(m <sup>3</sup> /d)	50년 빈도(m <sup>3</sup> /d)	
도문 1(dw-1)	7,632.54	8,109.46	8,586.58	9,063.50	
도문 2(dw-2)	1,231.40	1,308.34	1,385.32	1,462.26	
쌍천	cw-1	8,555.69	9,090.29	9,625.13	10,159.72
	cw-3	5,134.48	5,455.30	5,776.27	6,097.09
	cw-4	3,421.22	3,634.99	3,848.86	4,062.63
	cw-5	9,409.67	9,997.62	10,585.85	11,173.80
총량	35,385.00	37,596.00	39,808.00	42,019.00	

양수가 대수층에 미치는 영향을 파악하기 위하여 쌍천 일대 유역면적 65.33km<sup>2</sup> 중 주 대수층으로서

층적층이 넓게 분포되어 있는 하류구간 약 28km<sup>2</sup>를 모델링 대상지역으로 선정하고 3차원 지하수흐름해석 해석을 실시하였다. 그림 4에는 모델링 영역의 경계 및 투수계수가 나타나 있다.

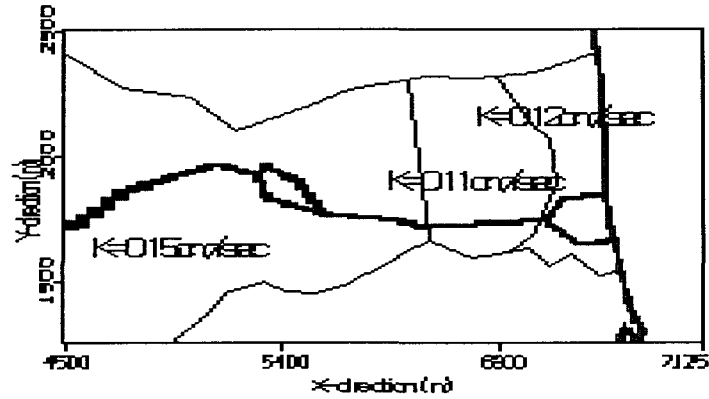


그림 4. 해석영역의 경계 및 투수계수

정상류 해석 결과 지하수가 남쪽과 북쪽의 경계에서 중앙의 쌍천으로 유동하여, 쌍천을 따라 서쪽에서 동쪽으로 흘러 바다로 배출되는 양상을 보였다. 지하수의 유동 양상은 지하댐 설치 전·후가 대동소이하며, 지하댐 설치 후 지하댐 부근에서 수위 상승효과를 나타냈다(그림 5).

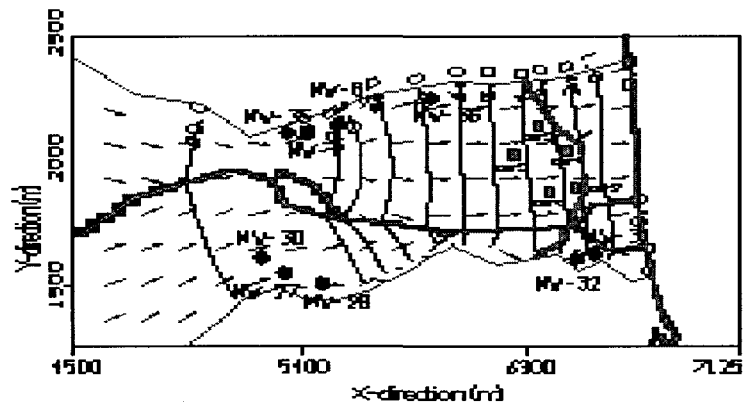


그림 5. 지하댐 설치 후의 정상류 유동

정상류 상태에서의 관측수위와 계산수위를 비교한 결과 거의 차이가 없었으며, 지하댐 설치 전·후의 물수지를 분석한 결과도 모두 오차범위 1% 이내에 존재하는 것으로 나타나 모델링에 대한 보정 및 검증은 성공적으로 이루어진 것으로 판단되었다.

다음으로, 대수층이 양수에 어떻게 반응하는지를 파악하기 위해 표 5에 제시된 양수계획에 따라 10년, 30년, 50년 빈도의 가뭄이 30일, 60일, 90일, 120일, 150일 동안 지속되는 시나리오에 대하여 쌍천 지하댐 유역의 지하수위 변화를 검토하였다.

그림 6은 속초시에 10년 빈도의 가뭄이 6월 1일부터 각각 (a) 60일과 (b) 120일간 지속될 때, 학사평 저수지의 저류량 저하를 고려하여 지하댐에서의 양수량을 증가시킬 경우 나타나는 대수층 내 등수두선을 도시한 것이다. 가뭄기간이 길어질수록 양수의 영향이 넓게 나타나지만, 일부 관정에의 dewatering 현상을 제외하고는 대수층에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.



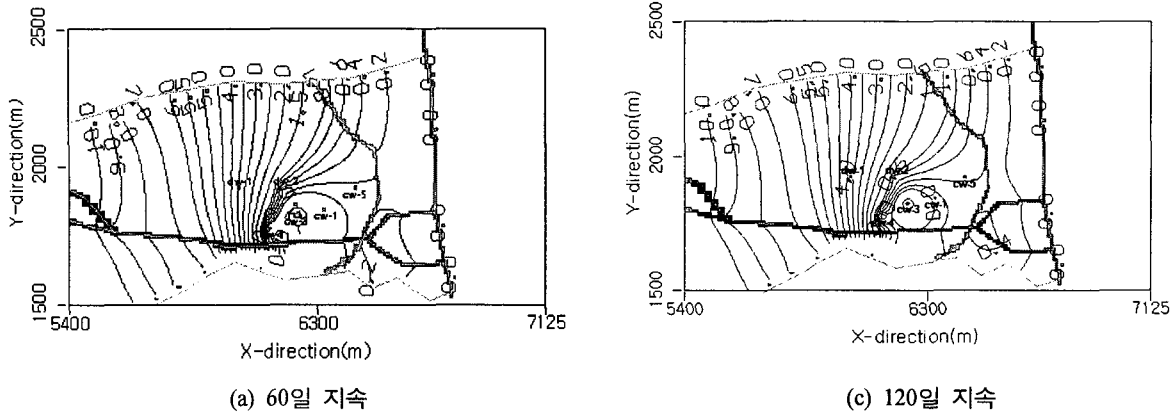


그림 6. 10년 빈도 가뭄에 대응하여 양수량을 증가시킬 경우의 등수두선

시나리오에 따라 가뭄 심각도를 변화시킨 상태에서의 모의 결과 현재의 쌍천 지하댐은 50년 빈도의 가뭄이 150일간 계속되어도 수량적인 측면에서는 속초시 물 공급에 큰 무리가 없는 것으로 나타났다. 그러나 일부 구간에서의 해수침투가 우려되는 측면이 있어 120일 이상의 양수량 증가는 바람직하지 않은 것으로 판단되며 이에 관한 연구가 현재 진행 중이다.

갈수시의 저수지 모의를 위하여는 미계측 유역인 학사평 저수지 수계의 유출량을 확보하는 것이 필요하다. 유입량은 실측자료를 이용하는 것이 이상적이나, 소규모 저수지에는 실측자료가 거의 없는 실정이고 이 경우 간접적인 방법으로 유입량을 산정해야 한다. 간접적인 장기유입량 산정 방법에는 수위-유량관계식 이용, 저수지 유입량 자료 이용, 비유량법, 가지야마 방법, KRISH 방법, Tank 모형, NWS-PD 모형 등이 있다. 여기서는 우리나라의 강우와 지형특성을 고려한 일유출량 모형인 DAWAST 모형(김태철, 1996)을 활용하였다. 그림 7은 10년과 30년 빈도 갈수년의 강수량 및 유출량을 예시한 것이다.

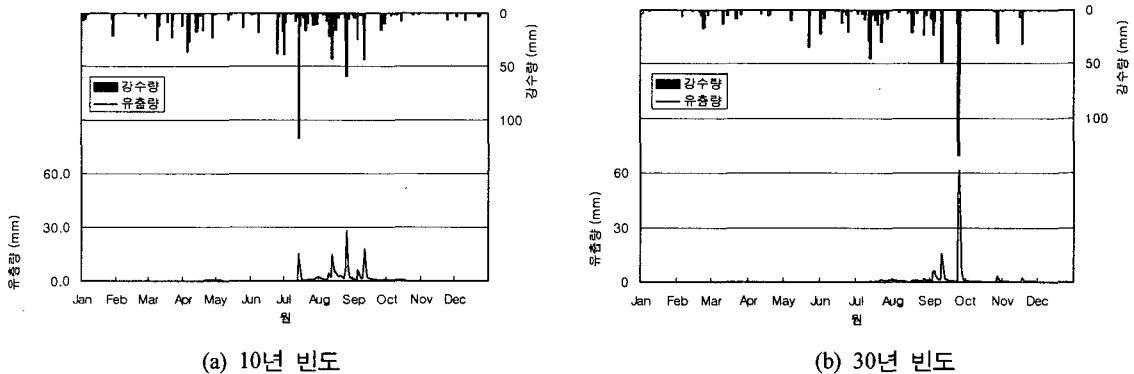


그림 7. 빈도별 갈수년의 강수량 및 유출량

시나리오별로 학사평 저수지가 공급해야 할 용수는 표 6에 월별로 제시되어 있다. 증고 전과 후, 그리고 고 가뭄에 탄력적으로 운영할 경우와 그렇지 않을 경우로 나누어 저수지 모의를 실시하였다.

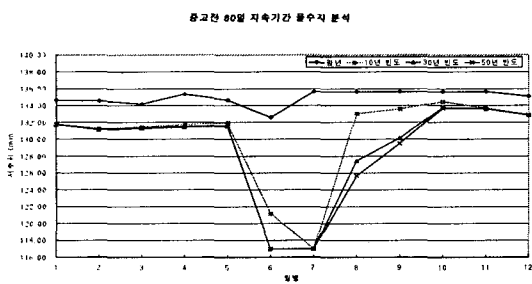
먼저, 학사평 저수지가 현상태(증고 전)에서 농업용수에 추가하여 생활용수와 환경유지용수를 공급하였을 때 월별 저수지 수위를 가뭄 빈도별, 지속기간별로 모의하였다. 현 상태의 사수위는 118.0m(저수량 0.1 천 $m^3$ ), 만수위는 135.6m(저수량 1,249 천 $m^3$ )이다.

현재 상태에서도 가뭄이 1개월 지속되었을 경우에는 50년 빈도의 가뭄에도 용수공급이 가능한 것으로 나타났다. 그러나, 2개월 지속되는 가뭄에는 (i) 일정량을 공급할 경우(비탄력적 운용, 그림 8(a))에는 10년 빈도 가뭄에도 6, 7월에 사수위 이하로 수위가 내려가며, (ii) 탄력적 운용을 할 경우(그림 8(b))에는 30년과 50년 빈도의 가뭄에서 7월의 저수위가 사수위 이하로 낮아지는 현상을 나타냈다. 결

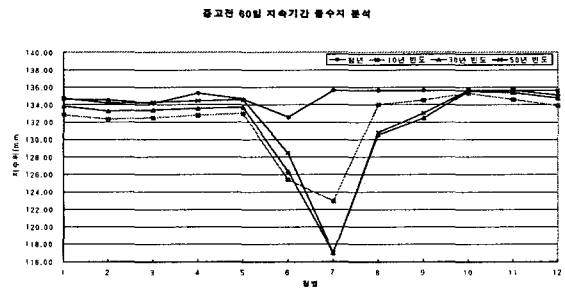
국, 1개월 미만의 가뭄이 도래할 경우에만 평년과 같은 물공급이 가능할 뿐, 가뭄 정도에 따라 생활용수 공급량을 축소시켜도 10년 빈도의 가뭄에는 2개월까지 무리 없이 운영이 가능하지만, 30년과 50년 빈도에서는 물공급에 장애가 발생하기 때문에 용수원으로서의 신뢰도에 취약성을 드러내었다. 여기에서 증고를 통한 저수용량의 증대 필요성이 제기된다.

표 6. 학사평 저수지의 시나리오별 용수공급계획 (m<sup>3</sup>/월)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
농업용수	0	0	0	21,200	158,700	528,500	411,000	479,000	74,800	0	0	0	
생활용수	평년	274,226	247,688	274,226	265,380	274,226	265,380	274,226	274,226	265,380	274,226	265,380	274,226
	10년 빈도	205,685	185,780	205,685	199,050	205,685	199,050	205,685	205,685	199,050	205,685	199,050	205,685
	30년 빈도	137,113	123,844	137,113	132,690	137,113	132,690	137,113	137,113	132,690	137,113	132,690	137,113
	50년 빈도	68,572	61,936	68,572	66,360	68,572	66,360	68,572	68,572	66,360	68,572	66,360	68,572
하천유지용수	83,700	75,600	83,700	81,000	83,700	81,700	83,700	83,700	81,700	83,700	81,700	83,700	



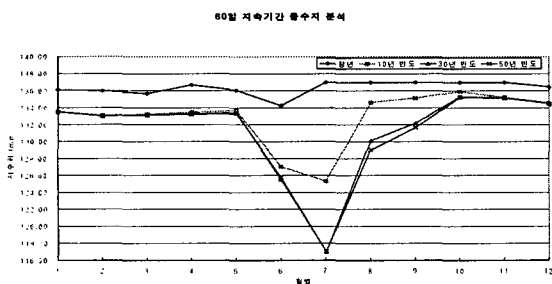
(a) 비탄력적 운영(2개월 지속기간)



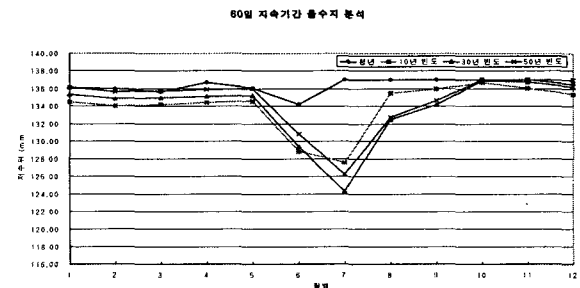
(b) 탄력적 운영(2개월 지속기간)

그림 8. 가뭄 시나리오별 저수위 변화(증고 전)

다음으로, 학사평 저수지를 2m 증고한 후 저수지 수위 및 저수량을 모의하였다. 증고 후의 저수지 제원은 만수위 137.0m(저수량 1480.3천m<sup>3</sup>), 사수위 118.0m(저수량 0.1 천m<sup>3</sup>)이다. 2개월 지속기간 가뭄시 저수지 모의 결과를 살펴보면 비탄력적으로 용수를 공급할 경우에도 10년 빈도 가뭄에 용수를 공급할 수 있게 개선되었으며, 가뭄 빈도별로 용수공급량을 탄력적으로 변화시킬 경우에는 50년 빈도의 가뭄에서도 용수공급이 가능한 것으로 나타났다(그림 9). 그러나 30년 이상 빈도의 가뭄이 90일 이상 지속될 경우에는 증고 후에도 8월부터 10월 사이에 용수공급에 차질을 빚는 것으로 나타났다.



(a) 비탄력적 운영(2개월 지속기간)



(b) 탄력적 운영(2개월 지속기간)

그림 9. 가뭄 시나리오별 저수위 변화(증고 후)

결국, 속초시로서는 학사평 저수지의 2m 증고와 쌍천 지하댐과의 연계이용을 통해 가뭄이 발생해도 평년과 같은 정상적인 물공급을 받을 수 있는 기간이 10년 빈도 가뭄일 때는 150일, 30년 및 50년 빈도에는 60일까지인 것으로 나타났다.

계획된 물공급 기간을 초과하는 가뭄이 지속될 경우에는 먼저 학사평 저수지로부터의 용수공급량을 축소하고 쌍천 지하댐의 양수량을 추가로 증가시킬 수 있는지 여부를 탐색해 보아야 한다. 만약 쌍천 지하댐의 양수량 증가가 대수층의 지하수위 과다 저하 혹은 염수침입 가능성을 유발할 것으로 예측된다면, 다음 단계로는 용수공급량 자체를 줄이는 조치를 취해야 할 것이다. 그러나 이 같은 상황은 지하댐 자체에만 의존하거나, 또는 지표수원을 사용하더라도 탄력적 운영을 하지 않을 경우에 비하면 월등히 유리한 상황임이 분명하며, 따라서 연계이용의 효과가 입증된다 할 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

물수요는 갈수록 증가하고 있으나 기존의 용수공급 시설로는 늘어나는 용수수요를 충족할 수 없어 계절별 및 지역별로 심각한 용수 부족현상이 발생하고 있다. 특히 전국 28개 시·군의 상습가뭄지역과 낙동강, 영산강, 섬진강 유역과 동남해안 및 도서지역은 최근 10년 사이에 발생한 빈번한 가뭄과 이상기온으로 인해 기존의 용수공급 시설의 안정성이 매우 취약함이 드러난 바 있다.

댐 개발 적지의 부족과 환경보전에 대한 국민적, 사회적인 관심이 고조됨에 따라 앞으로 기존시설의 효율적 이용, 보조수자원의 개발, 수요관리 및 절수기기의 사용 등 다양한 수자원 확보대책이 추진되어야 할 것으로 예상되며, 이와 아울러 지표수-지하수의 수질과 수량을 동시에 고려한 계획과 관리의 필요성이 강력히 대두될 것으로 전망되어 관련 기술의 개발 필요성이 높다.

본 논문에서는 지표수-지하수 연계이용의 적지를 어떻게 평가하고 선정할 것인지에 대한 방법론을 소개하고, 이를 국내 후보지역에 적용하여 연구대상지역으로 속초시를 선정하였다. 국내에서는 유일하게 속초시에 생활용수의 대부분을 공급하는 쌍천 지하댐은 인근의 학사평 저수지와 연계하여 이용될 경우 물 공급 부담을 분산시킴으로써 수량의 추가확보, 수자원 보전효과 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다. 두 개의 수원을 어떻게 활용할 것인가에 대한 체계적 운영 관련 기술의 일부로서 지표수 및 지하수 모의를 가뭄 시나리오에 따라 수행하였다.

현재까지의 연구에 의하면 속초시는 지표수원을 추가로 활용하고 증고를 통하여 2010년 현재보다 용수수요가 증가하여도 가뭄 빈도별로 60일에서 150일까지 평시와 다른없는 물공급이 가능할 것으로 예측되었다. 이는 지표수-지하수 연계이용의 직접적 효과이다. 연계를 통해 확보되는 수자원의 양은 가장 단순한 측면에서 볼 때는 현재 물사용량과 2010 물사용량의 차가 될 것이나, 가뭄 심각도에 따라 그 양이 다르고, 또 실제로는 공급 가능하나 확보만 하고 사용하지 않는 양을 고려할 때 더욱 늘어날 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 수자원 추가확보량의 개념을 정립할 필요성이 제기되고, 여기에는 직접적으로 공급된 양 이외에도 사용되지는 않았으나 확보되어 수자원 보전에 기여한 양도 포함되어야 할 것으로 판단된다. 이를 위해 가상 물(virtual water) 개념을 도입하는 것에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이는 연계이용을 통해 수자원의 직접적인 개발효과 외에 수자원의 보전효과를 정량화 할 수 있음을 의미하고, 수자원 정책 및 사업성 평가에 새로운 도구를 제공할 수 있을 것으로 전망되고 있다.

## 참고문헌

- 건설교통부 (2001) 수자원장기종합계획, p. 41.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (1998) 지표수 및 지하수 연계사업 기본조사 보고서.
- 김태철 (1996) 한국하천의 일유출량 모형, 한국수자원학회지 29(5), 223-233.
- 속초시 (1998) 속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서.
- 이상일, 서혜경, 손상철 (2002) “지표수-지하수 연계이용을 위한 지역 적합도 평가,” 한국지하수토양 환경학회 추계학술대회 논문집, 171-174.
- 환경부, 부산광역시, 경상남도 (1996) 부산·경남지역 복류수 및 강변여과수 개발 타당성 조사 보고서.
- 國民交通省 (2001) 平成13年度日本の水資源.
- Hanson, G. and Nilsson, A. (1986) Groundwater dams for rural water supplies in developing contries, Ground Water, Vol. 24, No. 4, pp. 497-506.
- Lau, L. S. (1994) Artificial recharge of ground water for all purpose, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, II, ASCE, pp. 761-760.
- Siddiqui, M. Z., Everett, J. W. and Vieux, B. E. (1996) Landfill siting using geographic information systems, Journal of Environmental Engineering, Vol. 122, No. 6, pp. 515-523.