

# 게임이론을 활용한 강변여과 개발 적지선정

## Site Suitability Analysis for Riverbank Filtration Using Game Theory

이 상 일\* / 이 상 신\*\*

Lee, Sang Il / Lee, Sangsin

### Abstract

The tap water supply in Korea mainly depends on the surface water. However, the advanced water purification process becomes a necessity due to the deterioration of surface water quality and the risk of accidental spill. High cost of water treatment and public concerns make the decision makers turn to riverbank filtration as an alternative to the surface water. Riverbank filtration has been employed for water supply in many developed countries for more than 150 years. In Korea, riverbank filtration has drawn attention since 1990s as a supply source having potential to stably meet the ever-increasing water demand. Some cities located in the Nakdong River Basin are currently supplying water through riverbank filtration. This work studies the site suitability analysis for riverbank filtration using game theory. Theory of games, which is a branch of applied mathematics used in social sciences (most notably economics), biology, engineering and computer science, was applied to candidate locations for the selection of riverbank filtration site. We proposed a policy game model as a new method adopting a probabilistic approach. The model developed turned out to be an effective tool for site selection.

**Keywords** : Riverbank filtration, Game theory, Site suitability analysis, Han River

### 요 지

최근 지표수의 취수원 다변화 및 수질에 대한 불신 등으로 강변여과 개발에 관심이 모아지고 있다. 선진국에서의 강변여과 개발은 150년 정도의 역사를 가지고 있으며, 우리나라에서도 지속적으로 증가하고 있는 용수수요에 안정적으로 대처하기 위한 원수 확보방안으로 강변여과에 대한 조사가 1990년대부터 시작되었고, 현재 낙동강을 중심으로 몇몇 지자체에서는 강변여과를 활용한 상수도 공급이 이루어지고 있다. 그러나 지금까지는 강변여과에 의한 개발가능량 산정과 관정개발에 연구가 집중되어 개발가능지 선정에 관한 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 논문에서는 게임이론을 활용한 강변여과 개발 적지선정에 대해 연구하였다. 게임이론은 수학적 분석이론의 하나로 사회과학(특히 경제학)과 생물학, 공학, 컴퓨터과학 등에 적용되고 있으며, 본 연구에서는 강변여과 개발을 위한 적정 후보지 결정에 이용되었다. 제안된 정책모형은 확률적 접근을 시도한 새로운 방법론이며, 적지선정을 위한 효율적인 분석이 가능한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 강변여과, 적지분석, 게임이론, 한강유역

\* 동국대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수

Professor, Dept. of Civil and Environment Engineering, Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea

\*\* 교신저자, 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사후과정

Corresponding Author, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environment Engineering., Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea

(e-mail: sinslee@nate.com)

## 1. 서 론

일반적으로 지하수는 지표수보다 수질이 양호하고 수온이 일정하다는 장점을 가지고 있어 음용수로 선호되고 있으나, 수량이 제한적이어서 우리나라에서의 수돗물 공급은 대부분 지표수에 의존하고 있다. 그러나 지표수에서의 돌발적 수질오염 사고위험 및 수질 악화 등에 의해 고도정수처리가 불가피하게 되고, 이에 따른 고가의 시설비 및 운영비의 투자가 요구되는 사례가 빈번히 발생하고 있어 강변여과가 취수원의 다변화 측면에서 좋은 대안으로 거론되고 있다.

강변여과는 하천인근에 취수정을 설치하여 하천 방향의 지하수 흐름을 취수정 방향으로 유도하는 것으로, 지표수를 강변의 대수층에 통과시켜 자연 지층의 자체 정화능력을 이용하여 원수층의 오염물질을 상당량 저감한 후 양수하는 대체 수자원 이용 방식이다. 강변여과의 개념은 Fig. 1에 나타나 있다. 강변여과 방식의 효과를 증대시키기 위해 취수정의 배후지에 인공함양 분지를 설치하기도 하며, 지하수의 비율을 높이기 위해 취수정을 하천에서 비교적 먼 거리에 설치하고 하천과 취수정 사이에 함양 분지를 통한 직접인공함양을 하기도 한다.

독일, 네덜란드 등의 서유럽 국가들과 미국에서는 이미 19세기부터 강변여과 방식의 물 공급이 시작되어 150여년 넘게 성공적으로 사용되고 있다(Grischek *et al.*, 2002; Tufenkji *et al.* 2002). Table 1은 국내외의 주

요 강변여과 개발사례이다. 한국은 1990년대 이후 낙동강에서의 수질오염 사고 사례가 빈번히 발생하면서, 강변여과 취수 방식의 다변화된 수자원 공급에 대한 타당성이 검토되기 시작했다. 창원시의 경우 한국 최초로 2001년부터 강변여과를 이용하여 생활용수 공급하고 있으며, 2016년 240,000 m<sup>3</sup>/day의 강변여과 개발을 목표로 하고 있다(창원시 상하수도 사업소, 2004; 2009).

강변여과 개발은 기존의 지표수 취수와 달리 취수정에서의 수질 및 수량 변화를 예측하기 어렵다. 특히, 장기간 강변여과를 할 경우 수위변동이나 철, 망간 용출 등의 요인에 의해 관정의 막힘 현상이 발생하여 취수량 감소가 나타날 수 있다(Schubert, 2002). 따라서, 이러한 여러 조건들을 고려해 최적의 개발위치를 결정해야 한다. 개발위치는 자연환경조건이 최우선적으로 고려되어야 하며, 인문사회적 조건, 법제적 조건 등 기타 여러 조건들이 충족될 수 있는 논리적 방법론이 필요하다. 초기의 강변여과 적지선정은 강변여과 조사대상지구 선정을 위한 흐름도에 따라 결정되었으며(환경부, 1998), 영향인자를 체계적으로 분류하고 시스템으로 구성한 사례는 이상일과 이상신(2008)에서 찾아 볼 수 있다. 하지만 이 연구의 경우 누락된 정보를 보완한 후보지에 대한 고려가 불가능하고, 정보의 수정이 있거나 오류 발생시 전체 시스템 자체에 대한 분석이 다시 이루어져야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 게임이론을 적용한 새로운 방법론을 제시하게 되었다.

Table 1. Some Examples of Riverbank Filtration

Location	Well Field	Description	Production (m <sup>3</sup> /day)
Rhine River in Germany	Düsseldorf	70 vertical wells, 18 radial collector wells	357,600
Llobregat River in Spain	Cornellá	26 extracting wells, 7 recharge wells	62,000
Limmat River in Swiss	Hardhof	9 vertical wells, 4 radial collector wells	15,000
Donau River in Austria	Lobau	8 radial collector wells	136,000
Donau River in Hungary	Csepel	256 vertical wells, 30 radial collector wells	150,000
Missouri River in USA	Nearman	single radial collector well	120,000
Kansas River in USA	Kansas City	1 collector well	151,200
Ohio River in USA	Louisville	2 collector wells	75,600
Nakdong River in Korea	Chanwon	36 vertical wells, 1 radial collector well	240,000
Tan Cheon in Korea	Seongnam	vertical and collector wells	-
Han River in Korea	US Army Camp	21 vertical wells	10,000
Bukhan River in Korea	Gapyeong	infiltration gallery	15,400

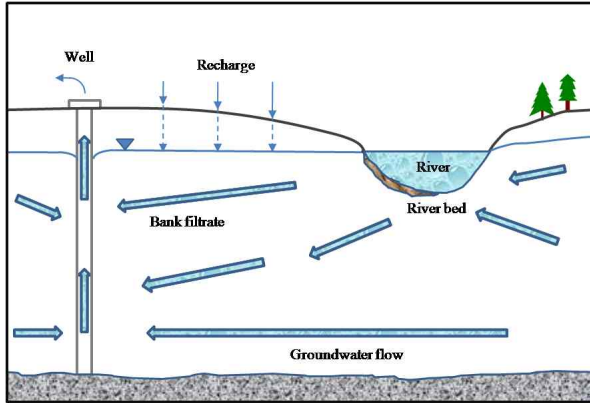


Fig. 1. Concept of Riverbank Filtration (Lee, 2009)

## 2. 게임이론

게임이론(theory of games)은 경쟁주체가 대처행동을 고려하면서 자기의 이익을 효과적으로 달성하기 위한 수단을 합리적으로 선택하는 행동을 수학적으로 분석하는 이론을 말하며, 1944년 수학자 노이만(J. von Neumann)과 경제학자 몰겐스텐(Morgenstern)에 의해 현대적인 게임이론이 정립되었다. 이후 경제학을 중심으로 발전하여 경영학, 정치학, 사회학 등 사회과학뿐만 아니라 자연과학분야에서도 활발히 연구되어 응용되고 있다. 특히 전략적 사고의 문제에서 많이 응용되고 있다.

수자원분야에서는 공유수자원의 물분쟁 분야 등에서 적용되었으나 다른 분야에 비해 아직 초기단계에 머무르고 있다. Rogers (1969)는 갠지즈-브라마푸트라 유역에서의 인도와 파키스탄의 물사용에 대한 분쟁 해결을 위해 적용하였다. Ketih *et al.* (1974)은 실제 세계 정치적 수자원분쟁의 분석을 위해 비양적인 문제에 기초를 둔 전통적 게임이론을 재구성한 메타게임 해석 알고리즘(metagame analysis algorithm)을 이용하여 댐문제에 적용하였다. Suzuki and Nakayama (1976)는 수자원개발에 있어서 비용분배문제를 이용하여 공동개발의 적합성을 판단하는데 게임이론을 적용하였다. Dufournaud (1982)는 이스라엘과 이집트간의 수자원기술 교환에 의한 이익과 분배문제에 있어 협력게임이론을 적용하였으며, Rogers (1991)는 기존의 협력게임을 발전시켜 콜롬비아 유역의 미국과 캐나다, 네팔, 인도, 방글라데시 사이의 갠지즈-브라마푸트라에 적용하였다. Netanyahu (1998)은 게임이론을 공유 대수층에 대해 적용하였으며, Hugo (2003)는 지속가능한 지하수사용에 있어서 경제성 문제에 게임이론을 적용하였다. 국내에서의 수자원 분야 적용은 미미한 상태이다. 김길호 등(2006)은 물분

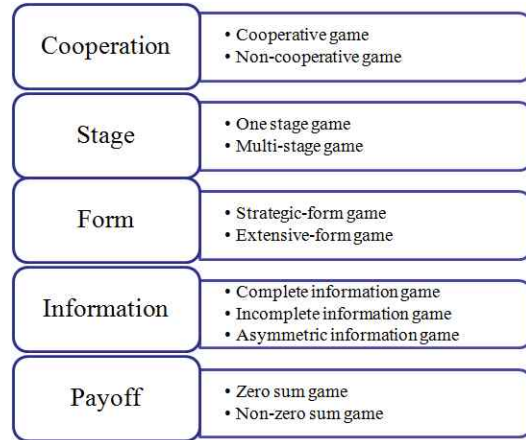


Fig. 2. Classification of Games

쟁 문제에 적용을 하였는데 교섭게임으로 지역간 가상의 물배분 해결 방안을 제시하였다. 최동진과 이미홍 (2008)은 북한강의 임남댐 개발에 의한 남북한 물분쟁 문제를 해결하기 위해 협조게임으로서 남북한 협력가능성에 대해 분석하였다.

게임의 종류는 Fig. 2와 같이 분류할 수 있으며, 전략의 형태에 따라 여러 게임이 혼합되어 적용되어야 할 때도 있다.

의사결정에 있어서 경기자가 선택할 수 있는 대안들을 행동(action)이라 부른다. 이러한 행동들은 경기자의 전략(strategy)으로 나타나는데, 순수전략(pure strategy)이란 일어날 개연성이 있는 모든 경우에 대해서 해당 경기자가 취할 행동의 완전한 계획(complete contingent plan)으로 정의된다(Osborne, 2003). 혼합전략(mixed strategy)이란 경기자가 여러 개의 행동 가운데 하나를 선택되 주어진 확률분포에 따라 임의로 선택하는 것을 뜻한다.

게임에서 상대방이 어떤 전략을 선택하는 지에 관계없이 자신의 보수를 더 크게 만드는 전략을 우월전략(dominant strategy)이라 하며, 각 경기자가 상대방의 전략을 주어진 것으로 보고 자신에게 최적전략을 선택할 때 이 최적 전략의 짝을 내쉬균형(Nash equilibrium)이라 한다(Nash, 1953). 대부분의 이론적인 게임이론의 적용은 이 내쉬균형을 찾아가는 것이다. 하지만 일부 특수한 경우 내쉬균형이 아닌 곳에서 게임이 진행되기도 한다.

## 3. 적지분석을 위한 게임모형

### 3.1 모형의 기본가정

적지분석과정은 여러 가지 입지선정에 관한 인자가 고려되어야 하는 복잡한 의사결정과정으로 가능한 한

최대로 많은 관련항목들을 의사결정에 포함시켜 우선순위를 정하게 된다. 기존의 의사결정 방법론들은 각 대안의 우선순위를 위해 각 항목들에 대한 가중치나 확률치를 이용한 수치적 계산에 의한 방법들이 대부분이다. 또한, 각 후보지에 대해 동일한 항목에 대한 정보를 요구하게 되어 한 후보지라도 정보가 없는 경우 우선순위를 위한 계산과정에서 제외하거나 결정자의 경험 등에 의한 추정 값을 사용할 수밖에 없다. 이러한 이유로 본 논문에서는 입지선정에서 대상 후보지의 인자비교를 위한 각 항목의 자료 유무에 상관없이 적지분석이 가능하도록 게임이론을 적용하여 최적 후보지를 도출하기 위한 모형을 개발하고자 한다.

적지분석에 게임이론을 적용하여 두 후보지의 적지 분석을 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다.

- ① 각 후보지들은 전략을 선택할 수 있으나 정책결정자의 결정을 벗어날 수 없다.
- ② 각 후보지들은 선택되는 것을 최고의 목표로 한다고 가정한다.
- ③ 경쟁의 방식은 제로섬 게임이며, 한 후보지가 선택되면 다른 후보지는 자연스럽게 탈락된다.

### 3.2 기본형 게임모형

후보자 1, 2가 각각  $P(x_1)$ ,  $P(x_2)$  ( $0 \leq P(x_1) \leq 1$ ,  $0 \leq P(x_2) \leq 1$ )의 선택확률을 가질 때,  $P(x_1) + P(x_2) = 1$  이다. 여기서,  $x_i$ 는 각 후보지를 의미하며,  $P(x_i)$ 는 기존사업이나 계획에 의해 얻을 수 있는 선택확률이라 할 수 있다. 이 선택확률은 기존 정보가 없을 경우 각 후보지는 동일한 값(0.5)을 가질 것이다. 후보지 1, 2가 특정 정보를 보유함으로써 증가된 선택될 확률을 priority,  $P(k_i)$ 라 한다.

Table 2는 특정 정보에 대해 priority를 고려한 기본형 게임모형을 나타내고 있으며, 연산된 모든 선택확률은 0과 1사이의 값을 가져야 한다.

Table 2에서 볼 수 있듯이, 한 후보지에는 정보가 있고, 다른 후보지에는 없다면, 정보가 있는 후보지는 정

보의 가치만큼 선택확률이 높아지게 되는 반면 정보가 없는 후보지는 불이익을 받을 것이다. 예를 들어 후보지1만 특정 정보가 있다면, 후보지1의 선택확률은 원래의  $P(x_1)$ 에서  $P(x_1)P(k_1)$ 만큼 증가할 것이다. 반면, 정보가 없는 후보지2는 원래의  $P(x_2)$ 에서  $P(x_1)P(k_1)$ 만큼 감소될 것이다. 결국 Table 2에서 내쉬균형은 두 후보지 모두 정보가 있는 경우(④)에서 이뤄지게 된다. 다시 말해 각 후보지들은 정보가 많을수록 선택될 확률이 높아지게 되므로 많은 정보를 보유하기 위해 사전조사나 실험 등에 많은 비용을 지불하게 될 것이라는 것이 명백하다.

제시된 게임모형은 단일 정보에 대한 선택확률을 보여주고 있다. 따라서 정보가 하나이상일 경우는 다수의 정보 중 하나의 정보를 선택하고 이렇게 선택된 하나의 정보에서 특정 후보지가 선택될 확률의 문제로 생각할 수 있다. 각 정보가 선택될 확률이 동일하다고 가정하면 이는 전확률법칙(law of total probability)의 특수한 경우에 해당되며 후보지가 선택될 확률은 Eq. (1)로 표현 될 수 있다.

$$P(t) = \frac{1}{n} \times P(t_1) + \frac{1}{n} \times P(t_2) + \dots + \frac{1}{n} \times P(t_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(t_i) \quad (1)$$

여기서  $P(t_i)$ 는  $i$  번째 정보에서 선택될 확률  
 $n$ 은 정보의 개수

### 3.3 정책형 게임모형

기본형 게임모형은 몇 가지 현실적인 가정에 근거하여 설정된 모델이지만, Table 2의 가정은 다소 불충분하다. 왜냐하면 많은 정보를 가지는 후보지가 당연히 선택되므로 사전 조사에 투입된 비용이나 노력, 시간 등에 대한 고려가 이루어질 수 없다는 것이다. 따라서 현실적인 모델이 되기 위해서는 각 정보자체에 대한 penalty를 부여함으로써 각 후보지에 정당한 게임이 이

Table 2. Basic Game Model with Priority

		Candidate Location 2	
		w/o Information	w/ Information
Candidate Location 1	w/o Information	① $P(x_1)$ , $P(x_2)$	② $P(x_1) - P(x_2)P(k_2)$ , $P(x_2) + P(x_2)P(k_2)$
	w/ Information	③ $P(x_1) + P(x_1)P(k_1)$ , $P(x_2) - P(x_1)P(k_1)$	④ $P(x_1) + P(x_1)P(k_1) - P(x_2)P(k_2)$ , $P(x_2) + P(x_2)P(k_2) - P(x_1)P(k_1)$

Table 3. Policy Game Model with Penalty

		Candidate Location 2	
		w/o Information	w/ Information
Candidate Location 1	w/o Information	① $P(x_1), P(x_2)$	② $[P(x_1) - P(x_2)P(k_2)] + [P(x_2) + P(x_2)P(k_2)]\omega,$ $[P(x_2) + P(x_2)P(k_2)](1 - \omega)$
	w/ Information	③ $[P(x_1) + P(x_1)P(k_1)](1 - \omega),$ $[(P(x_2) - P(x_1)P(k_1)) + [P(x_1) + P(x_1)P(k_1)]\omega$	④ $[P(x_1) + P(x_1)P(k_1) - P(x_2)P(k_2)](1 - \omega)$ $+ [P(x_2) + P(x_2)P(k_2) - P(x_1)P(k_1)]\omega,$ $[P(x_2) + P(x_2)P(k_2) - P(x_1)P(k_1)](1 - \omega)$ $+ [P(x_1) + P(x_1)P(k_1) - P(x_2)P(k_2)]\omega$

루어지도록 만들어야 한다. 즉, 정보 자체에 대한 penalty( $\omega, 0 \leq \omega \leq 1$ )를 도입하면, 정보를 가짐으로써 증대된 선택 확률을 감소시킬 수 있다. 예컨대 정보를 취득하기 위해 많은 비용과 노력이 든다면  $\omega$  값이 1에 가까워져서 선택될 확률은 0에 가까워질 것이다. 반대로 정보를 추가로 얻을 필요가 없는 후보지는 그 만큼의 선택 가능성이 높아지게 된다. 이는 특정 후보지에서 부족한 정보를 위해 필요이상의 비용 지불을 억제하고, 확보된 정보의 사장을 막을 수 있는 장점이 있다. 이렇게 penalty를 고려할 때 각 후보지의 게임이론 모형은 Table 3과 같다.

Table 2의 기본형 모델과 달리 위 모델의 각 칸에 주어진 값의 크기는  $\omega$  값에 따라 변화한다. 만약 후보지2의 정보가 부족할 때, 후보지1은 정보를 추가하는 것이 유리한가에 대해 알아보자. 후보지1이 ③에서 게임이 진행되는 것을 원하게 되려면 ③에서 후보지1의 선택될 확률이 ①에서의 선택될 확률보다 커야한다. 따라서

$$P(x_1) < [P(x_1) + P(x_1)P(k_1)](1 - \omega) \quad (2)$$

$$\text{정리하면, } P(k_1) > \left(\frac{\omega}{1 - \omega}\right) \quad (3)$$

그런데

$$0 \leq \omega < 1/2 \text{ 일 때 } \frac{\omega}{1 - \omega} < 1 \quad (4)$$

$$1/2 \leq \omega < 1 \text{ 일 때 } \frac{\omega}{1 - \omega} > 1 \quad (5)$$

이므로  $\omega$ 의 값이 1/2을 넘으면 Eq. (3)은 만족될 수가 없다. 왜냐하면  $P(k_1)$ 은 확률이므로 1을 넘을 수 없기 때문이다. 따라서,  $\omega$ 가 1/2 보다 작은 경우에만 후보지1은 정보를 보유하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

선택의 논리에 따라 후보지의 입장을 바꾸더라도 마찬가지로의 경우가 되어,  $\omega$  값이 낮을수록 부족한 정보의 획득이 필요하다. 따라서  $\omega$ 는 정보 취득의 용이 정도와 비용 등이 포함된 함수이다.  $\omega$ 의 결정은 의사결정자에 따라 다양한 방법이 동원될 수 있을 것이다. 하나의 방법을 제시하자면, 비용만 고려하여 결정하는 방법이 있을 수 있다. 즉, 모든 정보들에 대해 그 정보를 취득하기 위해 필요한 비용을 환산한 후, 전체 비용에 대한 그 정보의 비용비율( $Cost(k)/\Sigma Cost(i)$ )을  $\omega$ 로 사용할 수 있다.

제시된 정책형 게임모형은 게임이론의 원리인 ‘각 게임자들은 최선의 목적을 위한 전략을 선택한다’라는 명제를, 본 문제의 해결을 위해 수정된 게임이론으로 적용해야 한다. 즉, 후보지들의 전략(의사결정)보다 정책결정자의 전략이 우선되며, 정책결정자는 최적의 목적 달성을 위해 게임을 진행 시키는 역할을 한다(Fig. 3).



Fig. 3. Policy Game with Policy-maker's Coordination

Table 3의 게임모형을 후보지가 3개인 경우 Fig. 4와 같은 접근이 가능할 것이며, 같은 개념으로 그 이상의 다차원 게임모형도 가능하다.

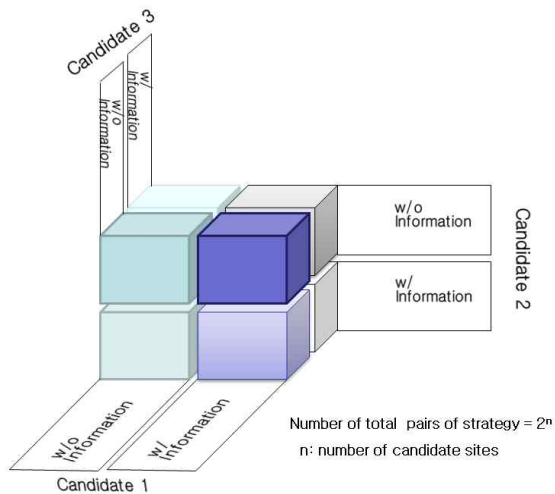


Fig. 4. Multidimensional Policy Game

#### 4. 적용

한강유역 서울구간에서의 강변여과개발은 한강이 도심을 통과하므로 둔치를 활용하는 방안을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 강변여과 개발을 위한 적지선정 대상지역으로 서울시 구간인 팔당대교부터 행주대교 구간

에 11곳의 둔치를 1차로 선택하였다(Fig. 5). 이들 후보지에 대해 서울시 지반정보관리 시스템의 시추공 자료를 활용하여 각 지구별 둔치 및 하상의 층적층 분포 현황에 대해서 검토하였다(Table 4).

서울특별시 상수도사업본부(2005)에 따르면 한강변 강변여과 개발 가능성 조사에서는 서울유역 5곳(Table 4에 ①로 표시)의 정수장 주변을 후보지로 선정하였으며, 동국대학교(2005)에서는 수리지질 조건, 적정개발가능량, 설치조건 등을 고려하여 자체 개발된 적지분석시스템(SASCU)을 통하여 4곳(Table 4의 ②)을 후보지로 선정하여 AHP기법을 이용한 적지분석시스템에 의해 광나루지구가 최적의 개발지로 선정되었으며, 양화지구는 광나루지구에 비해 근소한 차이로 2순위로 나타났다. 본 연구에서는 1, 2순위로 나타난 두 후보지에 대해 개발된 게임모형을 적용하였다. 기존의 방법론들은 특정 정보의 보유 여부에 따라 후보지 자체를 평가할 수 없는 단점이 발생하기도 한다. 이러한 이유로 정보의 보유여부에 크게 구속받지 않는 의사결정 방법이 필요하며, 본 논문에서 제시된 정책형 게임모형은 특정 후보지들에서 누락된 정보를 어떻게 처리할 것인가에 대한 결정이 가능하게 해주는 새로운 방법론이다.

Table 4. Terrace Lands of the Han River and their Characteristics

Location	Length (km)	Average Width (m)	Alluvial Thickness(m)			
			River Bed		Terrace Land	
			Average	Range	Average	Range
Kwangnaru <sup>①②</sup>	12.8	82	5.6	4.5 ~ 6.7	13.0	9.0 ~ 17.0
Jamsil <sup>①②</sup>	5.4	109	4.8	2.3 ~ 7.5	11.1	9.6 ~ 12.5
Ttukseom <sup>①</sup>	9.6	86	4.5	4.0 ~ 5.0	16.8	15.7 ~ 17.9
Jamwon	5.2	56	4.0	2.6 ~ 5.5	15.1	14.9 ~ 15.3
Banpo	6.4	89	3.7	2.3 ~ 5.1	-	-
Ichon <sup>①②</sup>	8.0	62	5.2	1.8 ~ 8.7	11.5	10.0 ~ 13.0
Yeouido	3.8	186	15.9	11.7 ~ 20.1	17.6	10.9 ~ 24.2
Yangwha <sup>①②</sup>	11.7	82	13.2	9.0 ~ 17.3	15.8	13.7 ~ 17.8
Mangwon	8.8	183	11.3	11.3	15.2	11.6 ~ 18.7
Nanji	3.2	242	20.2	14.0 ~ 30.0	15.7	10.0 ~ 21.3
Kangseo	2.0	170	29.1	27.0 ~ 31.2	28.6	27.0 ~ 30.2

① The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2005

② Dongguk University, 2005

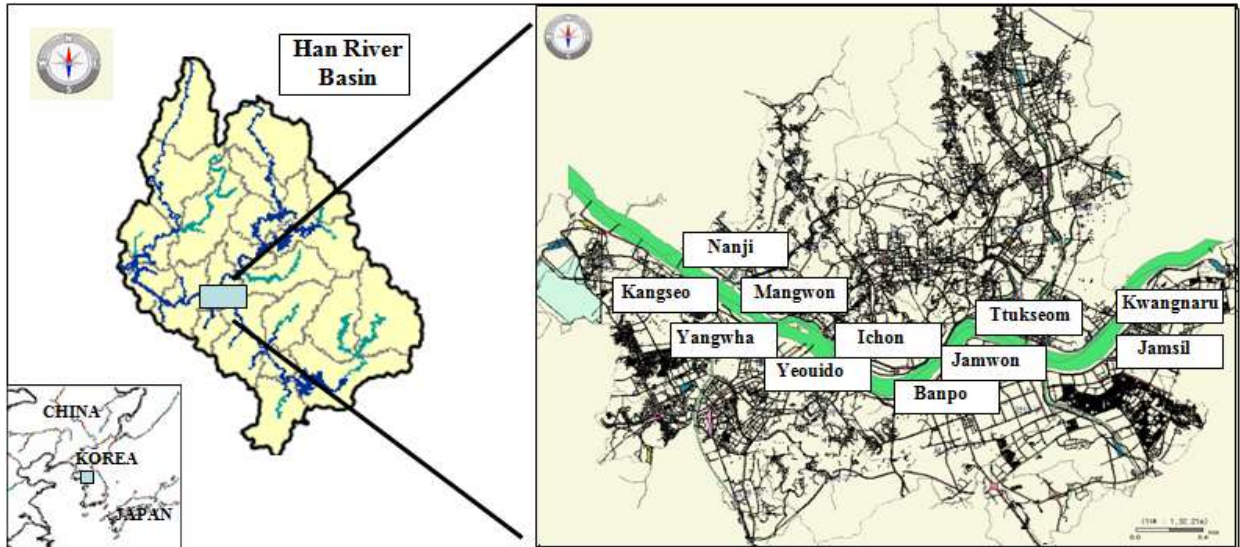


Fig. 5. Locations of Terrace Land of the Han River

Table 5. Preliminary Information for Game Theory

	Penalty	Yangwha (Y)		Kwangnaruru (K)	
	$w$	Information	$P(k_Y)$	Information	$P(k_K)$
(1) Aquifer Thickness	0.3	No	0.0115 <sup>①</sup>	Yes	0.1062
(2) Permeability	0.6	Yes	0.7235	Yes	0.7235
(3) Developable Amount	0.9	X	-	Yes	0.0833
(4) Water Quality	0.1	Yes	0.3	No	0.1 <sup>①</sup>
(5) Connectivity to Existing Facilities	0.1	Yes	0.3124	Yes	0.3458

① Priority from information newly acquired

Table 5에는 두 후보지의 개발위치 선정을 위해 동원될 정보를 5개로 한정하고 각 정보에 대한 보유여부와 penalty 및 priority가 나타나 있다. 적용된 priority는 AHP (Analytic Hierarchy Process, 계층분석과정)의 쌍대비교결과를 이용하였다(동국대학교, 2005). AHP는 여러 기준을 가장 잘 만족시키는 대안을 찾는 다기준 의사결정 방법 중 하나로, 다수의 속성들을 계층적으로 분류하여 각 속성의 중요도를 파악함으로써 최적 대안을 선정하는 기법이며 Saaty (1980)에 의해 개발되었다. Table 5는 정보의 누락 시에도 게임모형의 적용이 가능한지를 알아보기 위해 몇 가지 정보는 누락되었다고 가정하였다.

먼저, 두 후보지는 선행 연구가 없는 것으로 가정하면 선행적 확률은  $P(x_1) = P(x_2) = 0.5$ 가 될 것이다. Table 5와 같이 양화의 경우 대수층 두께에 대한 정보

가 누락되어 있으며, 따라서 개발가능량의 산정도 불가능하여 누락된 상태다. 광나루의 경우 지표수 수질정보가 누락되어 있다. 하지만, 앞 절에서 본 바와 같이  $w$ 가  $0 \leq w < 1/2$ 인 항목의 경우 누락된 지점에서 정보를 취득할 동기가 생기므로, 누락되지 않은 지점의 정보는 사장되지 않을 것이며 누락된 지점은 비교적 적은 비용으로 정보를 취득할 것이다. Table 5의 ①은 적은 비용을 투입하여 새로 취득한 priority를 나타낸다.

#### (1) 기본형 게임모형

두 후보지에서 추가 정보의 수집 없이 공통적으로 보유하고 있는 정보만으로 게임모형을 적용하였다. Table 2의 게임모형에서 정보가 누락된 항목인 Table 5의 (1), (3), (4)항을 제외한 게임모형의 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Result of Basic Game Model

2) Permeability			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.1383, 0.8617
w/		0.8617, 0.1383	<b>0.5000, 0.5000</b>	

5) Connectivity to Existing Facilities			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.3271, 0.6729
w/		0.6562, 0.3438	<b>0.4833<sup>①</sup>, 0.5167<sup>②</sup></b>	

\* Bold figures mean Nash equilibrium.

Table 7. Result of Policy Game Model

1) Aquifer Thickness			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.6128, 0.3872
w/		0.3540, 0.6460	<b>0.4812, 0.5189</b>	

2) Permeability			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.6553, 0.3447
w/		0.3447, 0.6553	<b>0.5000, 0.5000</b>	

3) Developable Amount			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.9458, 0.0542
w/		0.0500, 0.9500	<b>0.5333, 0.4667</b>	

4) Water Quality			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.5050, 0.4950
w/		0.5850, 0.4150	<b>0.5800, 0.4200</b>	

5) Connectivity to Existing Facilities			K	
			w/o Information	w/ Information
	Y	w/o	0.5000, 0.5000	0.3944, 0.6056
w/		0.5906, 0.4094	<b>0.4866<sup>①</sup>, 0.5134<sup>②</sup></b>	

\* Bold figures mean Nash equilibrium of information.

Table 6의 ①, ②항의 선택확률 계산과정을 예시하면 다음과 같다.

$$\textcircled{1} P(x_1) + P(x_1)P(k_1) - P(x_2)P(k_2) = 0.5 + 0.5 \times 0.3124 - 0.5 \times 0.3458 = 0.4833$$

$$\textcircled{2} P(x_2) + P(x_2)P(k_2) - P(x_1)P(k_1) = 0.5 + 0.5 \times 0.3458 - 0.5 \times 0.3124 = 0.5167$$

기본형 게임모형에서의 내쉬균형은 두 후보지 모두가 정보를 보유하는 곳에서 발생하게 된다. 따라서, 두

후보지 모두 정보를 보유한 투수계수와 기존시설 연계성의 내쉬균형에서 선택확률로 각 후보지의 선택확률  $P(t)$ 을 계산할 수 있으며, 광나루지구(0.5084), 양화지구(0.4826)로 광나루지구가 선택된다. 광나루지구의 선택확률 계산과정은 다음과 같다.

$$P(t) = \frac{1}{n} \times P(t_1) + \frac{1}{n} \times P(t_2) = \frac{1}{2} \times 0.5 + \frac{1}{2} \times 0.5167 = 0.5084$$

(2) 정책형 게임모형  
특정 지점에서 누락된 정보가 있을 경우 정보가 있



는 다른 지점의 정보를 사장시키지 않고 이용 가능하도록 penalty를 고려한 게임모형(Table 3)을 적용하였다. penalty가 1/2이 넘는 양화지구의 3)항목(개발가능량)만 정보 취득을 포기하고 게임이 진행된다. 누락된 정보인 양화지구의 2)투수계수와 광나루지구의 4)수질은 penalty가 1/2 보다 작으므로 정책결정자 입장에서는 정보 취득 후 게임에 참여하게 할 것이며, 3)개발가능량 항목은 정책결정자 입장에서 고가의 비용과 노력이 필요하므로 양화지구는 정보 없이, 즉 개발가능량 정보에 대한 조사 없이 게임에 참여하도록 할 것이다. 각 정보에 대한 게임모형 적용 결과는 Table 7과 같다.

Table 7의 ①, ②에서 선택확률 계산과정을 예시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \textcircled{1} [P(x_1) + P(x_1)P(k_1) - P(x_2)P(k_2)](1-\omega) \\ & \quad + [P(x_2) + P(x_2)P(k_2) - P(x_1)P(k_1)]\omega \\ & = [0.5 + 0.5 \times 0.3124 - 0.5 \times 0.3458] \times (1-0.1) \\ & \quad + [0.5 + 0.5 \times 0.3458 - 0.5 \times 0.3124] \times 0.1 = 0.4866 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textcircled{2} [P(x_2) + P(x_2)P(k_2) - P(x_1)P(k_1)](1-\omega) \\ & \quad + [P(x_1) + P(x_1)P(k_1) - P(x_2)P(k_2)]\omega \\ & = [0.5 + 0.5 \times 0.3458 - 0.5 \times 0.3124] \times (1-0.1) \\ & \quad + [0.5 + 0.5 \times 0.3124 - 0.5 \times 0.3458] \times 0.1 = 0.5134 \end{aligned}$$

각 정보에 대해 선택될 확률인 내쉬균형의 값을 이용하여 후보지의 선택될 확률( $P(t)$ )을 계산할 수 있다. 개발가능량에 대한 내쉬균형은 정보의 penalty( $\omega$ )가 1/2이상이므로 광나루지구는 정보를 보유한 상태에서, 양화지구는 정보가 없는 상태에서 발생하며, 나머지 4개의 정보들은 두 후보지 모두 정보를 보유하는 곳에서 내쉬균형이 발생하게 된다. 따라서 모든 정보들의 내쉬균형에서 선택될 확률을 이용하여 각 후보지의 선택확률을 결정할 수 있으며, 결정된 선택확률은 광나루지구(0.4013)와 양화지구(0.5987)로 양화지구가 선택 될 것이다. 양화지구에 대한 선택확률의 계산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{1}{n} \times P(t_1) + \frac{1}{n} \times P(t_2) + \\ & \quad \frac{1}{n} \times P(t_3) + \frac{1}{n} \times P(t_4) + \frac{1}{n} \times P(t_5) \\ &= \frac{1}{5} \times 0.4812 + \frac{1}{5} \times 0.5000 + \frac{1}{5} \times 0.9458 \\ & \quad + \frac{1}{5} \times 0.5800 + \frac{1}{5} \times 0.4866 = 0.5987 \end{aligned}$$

개발가능량 정보의 penalty가 0.9로 정보 취득을 위한 비용이 상대적으로 높기 때문에 양화지구는 정보취

득 없이 게임에 참여하게 된다. 광나루지구는 보유한 개발가능량 정보가 오히려 불리하게 작용하게 되어 광나루지구 입장에서는 보유한 정보를 포기하고 게임에 참여하는 것이 유리할 것이나, 정책결정자 입장에서는 불리한 정보조차도 정책결정에 큰 영향을 미치므로 정보를 포기하고 게임에 참여하도록 방관하지 않을 것이다. 다시 말해, 정책결정자의 입장에서 개발가능량 정보를 취득하기 위해 총사업비의 많은 부분을 사용하게 된다면 굳이 정보를 취득해서 개발적지 선정에 사용할 이유가 없으며, 또한 고가의 비용이 투입되어 산정된 광나루지구의 개발가능량 정보를 개발적지 선정에 사용하지 않을 이유가 없다.

기본형 게임모형과 정책형 게임모형의 결과 상이한 결과가 나타나고 있는데, 누락된 정보로 인해 단지 두 가지의 정보항목만으로 적지선정이 이루어진 기본형 게임모형 보다 모든 정보항목을 사용하여 적지선정을 실시한 정책형 게임모형의 결과를 최종적으로 선택하는 것이 바람직할 것이다.

## 5. 고찰 및 결론

기존의 거의 모든 게임이론은 경제성 문제의 비용, 편익 관점에서 접근하여 분석이 이루어져 왔으나, 본 연구에서는 게임이론을 확률문제로 접근을 시도하였다. 대부분의 게임모형들은 게임자의 전략에 따른 내쉬균형을 찾는 문제에 관심을 가지고 있으나, 본 연구에서 제안된 정책형 게임모형의 경우 게임자를 통제하여 의도하는 지점에서 내쉬균형이 이루어지도록 정책결정자를 게임에 참여시킴으로써 사회기반시설에 대한 효율적이고 타당한 문제해결이 가능하도록 하였다.

적지분석 방법론에 있어서 기존의 방법들과 비교하면 다음과 같은 장점을 가진다.

- ① 여러 후보지 중 특정 후보지의 정보가 누락되더라도 나머지 정보를 보유한 후보지의 정보 사장을 막을 수 있어 정보취득에 투자된 비용의 낭비를 막을 수 있다.
- ② 누락된 정보 취득을 위해 투자를 할 것인지 정보가 누락된 상태에서 게임을 진행할 것인지에 대해 정책결정자가 결정할 수 있다.
- ③ 다른 방법론에 비해 기존의 정보만으로, 혹은 최소의 비용으로 정책결정이 가능하다.
- ④ 각 정보별로 게임이 진행되므로 정보의 수정이나 오류 수정시 특정 정보만 다시 산정 후 적용하게 되므로 수정보완이 용이하다.
- ⑤ 특정 후보지를 선택시키기 위해 정책결정자가 의도적으로 누락된 정보를 사용하여 전혀 다른 결

과를 초래할 수 있는 위험을 줄이거나 사전에 차단할 수 있다. 즉, 정책결정자와 특정후보자의 유착에 의한 비리를 사전에 막을 수 있는 안전장치의 역할이 가능하다.

본 연구에서는 강변여과 개발 적지선정을 위해 게임이론을 활용한 정책형 모형을 제시하고, 이를 한강 서울 유역에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 그 결과 강변여과 분야에서의 개발적지선정을 위한 새로운 방법론이 될 수 있음을 확인하였다. 제시된 정책형 게임모형은 앞으로 다른 적지분석 문제에도 적용할 수 있을 것이다. 각 적용분야에 따른 priority와 penalty에 대한 연구가 더 진행된다면 정책형 게임모형은 기존의 적지분석 도구에 대한 대안으로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

김길호, 이명호, 이충성, 심명필 (2006). “게임이론을 이용한 물 분쟁 해결의 조정안 도출.” 한국수자원학회 학술대회, 한국수자원학회. pp. 1352-1356.

동국대학교 (2005). 인공함양을 활용한 한강 및 낙동강 유역 수도공급 방안 연구 1차년도 요약보고서.

서울특별시 상수도사업본부 (2005). 간접취수 도입을 위한 기초조사 보고서.

이상일, 이상신 (2008). “한강에서의 강변여과수 개발을 위한 적지선정 및 개발가능량 산정(I).” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 8호, pp. 825-834.

이상신 (2009). 강변여과를 활용한 상수원 개발 및 운영에 관한 연구. 동국대학교, 박사학위논문. p. 5.

창원시 상하수도사업소 (2004). 강변지하수 개발사업의 추진현황과 개발방향.

창원시 상하수도사업소 (2009.8.26). <http://sudo.changwon.go.kr>, 자료실-강변지하수 개발사업의 추진현황과 개발방향.

최동진, 이미홍 (2008). “게임이론을 통한 남북 공유하천 관리 전략 도출.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 4호, pp. 353-363.

환경부 (1998). 이룡지구 강변여과수 시범개발 조사사업 실증실험보고서.

Dufournaud, C. (1982). “On the Mutually Beneficial Cooperative Scheme: Dynamic Change in the

Payoff Matrix of International River Basin Schemes.” *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 764-772.

Grischek, T., Schoenheinz, D., Worch, E. and Hiscock, K.M. (2002). “Bank filtration in Europe - An overview of aquifer conditions and hydraulic controls, In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability.” Dillon, P.(ed.) *Swets Zeitlinger*, Balkema, Lisse, pp. 485-488.

Hugo, A.L. (2003). Sustainability and groundwater. *IUGG2008 at Sapporo*.

Keith, W. Hipel, R.K. Ragade and T.E. Unny (1974). “Metagame Analysis of Water Resources Conflicts.” *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 100, No. 10, pp. 1437-1455.

Nash, J. (1953). “Two-person cooperative games.” *Econometrica*. Vol. 21, No. 1, pp. 128-140.

Netanyahu, S. (1998). Bilateral water policy coordination. R.E. Just and S. Netanyahu (eds.) *Conflict and Cooperation on Trans-Boundary Water Resources*, Boston.

Osborne, M.J. (2003). *An Introduction to Game Theory*. Oxford Univ Press.

Rogers, P. (1969). “A game theory approach to the problems of international river basins.” *Water Resources Research*, Vol. 5, pp. 749-760.

Rogers, P. (1991). International river basins: Pervasive unidirectional externalities. *Paper presented at a conference on the Economics of Transnational Commons*, April 25-27, Universita di Siena, Siena, Italy.

Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

Schubert, J. (2002). “Hydraulic aspects of riverbank filtration-Field studies.” *Journal of Hydrology* 266, pp. 145-161.

Suzuki, M. and Nakayama, M. (1976). “The Cost Assignment of the Cooperative Water Resource Development: A Game Theoretical Approach.” *Management science*, Vol. 22, No. 10, pp. 1081-1086.

Tufenkji, N., Ryn, J. N. and Elimelech, M. (2002). “The promise of bank filtration.” *Environ. Sci. Technol.* Vol. 36, No. 21, pp. 423-428.

논문번호: 09-065	접수: 2009.06.08
수정일자: 2009.10.29/11.30	심사완료: 2009.11.30