

# 강변여과수 개발전략 수립과 적지선정을 위한 게임이론의 적용

## Application of Game Theory to Development Strategy and Site Selection for Riverbank Filtration

이상신<sup>1)</sup>, 이상일<sup>2)</sup>  
Sangsun Lee, Sang Il Lee

### 요 지

강변여과는 인공함양을 활용한 대체수자원의 대표적 방법으로 하천수를 층적층으로 통과시켜 간접취수함으로써 오염저감과 수질사고 대처 능력의 장점을 가지고 있다. 유럽을 시작으로 많은 선진국에서는 150년 정도의 개발 역사를 가지고 있으며, 우리나라에서도 현재 낙동강을 중심으로 강변여과를 활용한 상수도 공급이 이루어지고 있다. 본 논문은 이러한 강변여과 개발을 위한 개발전 개발전략과 적절한 개발위치 선정에 대한 연구로서 게임이론적 접근을 시도하였다. 강변여과 개발을 위한 지자체간 협력 게임이론을 적용함으로써 협력관계를 통한 추가이익 발생이 가능하게 되어 강변여과 개발타당성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 입지 선정에서 대상 후보지의 인자비교를 위한 일부 항목의 자료 유무에 상관없이, 적지분석이 가능한 게임모형을 개발하고 그 적용성에 대해 검토하였다.

**핵심용어** : 강변여과, 게임이론, 적지분석, 개발전략, 내쉬균형

### 1. 서 론

강변여과는 하상퇴적층, 즉 층적층이 발달한 하천 주변에 우물을 설치하여 취수함으로써 하천 표류수를 지하의 모래, 자갈층으로 유도 함양시키는 방안이다. 하천 표류수가 지하 대수층을 통해 우물에 흡수되는 과정에서 자연적인 여과작용에 의하여 수질이 개선되는데, 이는 특히 탁질과 미생물, 자연유기물과 유기질 오염 물질 등의 제거에 탁월한 효과가 있는 것으로 알려져 있다(과학기술부, 2004). 서유럽 국가들과 미국에서는 이미 19세기 초부터 강변여과 방식의 물 공급이 시작되어 150여년 넘게 성공적으로 사용되고 있으며, 한국은 1990년대 이후 낙동강에서의 수질오염 사고 사례가 빈번히 발생하면서, 강변여과 취수 방식의 다변화된 수자원 공급에 대한 타당성이 검토되기 시작하였다. 창원시의 경우 한국 최초로 2001년부터 강변여과수를 이용하여 생활용수 공급하고 있으며, 2016년 240,000m<sup>3</sup>/day의 강변여과수 개발을 목표로 하고 있다(창원시 상수도 사업소, 2006).

게임이론은 경쟁주체가 대처행동을 고려하면서 자기의 이익을 효과적으로 달성하기 위해 수단을 합리적으로 선택하는 행동을 수학적으로 분석하는 이론으로 1950년 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 2000년대 들어 공유수자원의 물분쟁 분야에서 적용이 시작되었으나 다른 분야에 비해 아직 초기단계에 머무르고 있는 실정이다. 수자원분야에서의 적용사례는 다음과 같이 조사되었다. Rogers(1969)는 갠지즈-브라마푸트라 유역에서의 인도와 파키스탄의 물사용을 둘러싼 분쟁에 상호협력에 의한 협조게임을 적용하였다. Dufournaud(1982)는 협력게임이론을 이용하여 이스라엘과 이집트 사이에 수자원기술의 교환을 통해 생길 수 있는 경제적 이익과 그러한 이익들이 협조를 끌어내기 위해 어떻게 분배될 수 있을 것인가를 제시하였다. 또한, Rogers(1991)는 협력게임의 이론적 접근에 대한 논의를 보다 진전시켜 콜롬비아 유역에서의 미국과 캐나다의 수자원 공유, 네팔, 인도, 방글라데시 사이의 갠지즈-브라마푸트라 사례에 대한 깊이 있는 분석을 실시하였다. Netanyahu 등(1998)은 게임이론을 공유 대수층에 대해 적용하였으며, Hugo(2003)는 지속가능한 지하수사용 문제에 있어서 경제적 문제를 해법으로 게임이론을 적용하였다. 국내에서의 수자원 분야 적용은 미미한 상태이다. 김길호

1) 정회원·동국대학교 토목환경공학과 박사후과정·sinslee@dongguk.edu

2) 정회원·동국대학교 사회환경시스템공학과 교수·islee@dongguk.edu

등(2006)은 물분쟁 문제에 적용을 하였는데 교섭게임으로 지역간 가상의 물배분 해결 방안을 제시하였다. 최동진 등(2008)은 북한강의 임남댐 개발에 의한 남북한 물분쟁 문제를 해결하기 위해 협조게임으로서 남북한 협력가능성에 대해 분석하였다.

## 2. 개발전략을 위한 게임 모형

### 2.1 전략수립 배경

기존의 강변여과 개발방식을 살펴보면, 대부분의 많은 사회기반시설과 동일한 순서로 사업이 진행된다. 먼저 개발의 동기가 발생하게 되면 기초조사를 실시하고 사업타당성을 분석하여 사업을 시행한다. 강변여과개발의 경우 만약 사업시행을 계획하고 있는 지자체 내에 타당한 개발가능지가 없을 경우 기초조사 단계에서 개발을 포기하는 경향이 있으며, 개발가능지를 보유한 지자체의 경우도 사업타당성을 지자체 내부에서만 시행하게 되어 사업성이 떨어질 경우 개발을 포기하기도 한다. 이렇듯 기존의 개발전략은 하나의 지자체에서 단독으로 사업을 진행함으로써 인근 지자체와의 연계개발로 사업성이 충분한데도 개발을 포기하는 경우가 발생할 여지가 있다. 여기서 연계개발은 개발가능 후보지를 보유한 지자체간의 협력뿐만 아니라 후보지가 없는 지자체와 후보지를 보유한 지자체의 협력도 포함된다. 개발가능지 보유 지자체와 미보유 지자체의 협력에 의해 양쪽 지자체 서로간의 이익을 최대화하기 위한 방법론의 개발이 필요할 것이다. 편익(benefit)과 이익(payoff) 면에서 고려해보면 두 지자체는 공동개발에 의해 추가되는 편익과 이익이 발생할 것이다(Fig. 1). 즉, 두 지자체간 서로 협력에 의해 사업을 진행하게 되면 후보지를 보유한 지자체는 후보지 제공에 따른 이익을 추가적으로 획득하게 될 것이며, 후보지를 보유하지 못한 지자체의 경우도 사업 진행에 따라 제공되는 편익을 획득할 수 있을 것이다. 이러한 협력에서는 각 지자체간 개발전략이 필요한데 이러한 전략문제에 게임이론의 적용이 가능하다.

### 2.2 강변여과 개발전략

강변여과의 문제는 협력게임이면서 비제로섬 게임으로 해결이 가능하다. 주어진 문제의 게임은 비제로섬 게임의 유형을 가지며 Fig. 2와 같이 전개형 게임으로 설명이 가능해진다. 제시된 게임모형의 경우 개발가능 후보지를 보유한 D지자체에서 개발을 포기하게 되면 S지자체의 입장에서는 기존의 개발전략과 동일하게 사전조사단계에서 강변여과의 편익을 포기해야 하는 경우가 될 것이다. 이 게임의 의도는 두 지자체간의 협력에 의해 발생하는 이익이 다른 전략의 짝보다 커야 하므로 다음 식을 만족해야한다.

$a_2 \geq a_1, a_3$  and  $b_2 \geq b_1, b_3$  다시말해,  $a_2$ 와  $b_2$ 에서 내쉬균형이 발생하기 위해서는 여기서 이득이 많아야 한다. 여기서 목적함수 즉 내쉬균형  $N(e_D - \bar{e}_D)(e_S - \bar{e}_S)$ 를 최대로 하는 것이다.

각 지역의 이익은 다음과 같이 나타낼 수 있다(이상신, 2009).

$$e_D = (\alpha Q p + \beta b - \gamma c), \quad e_S = [(1-\alpha)Q q + (1-\beta)b - (1-\gamma)c]$$

여기서,  $e_D$ : 개발시 D의 이익,  $\bar{e}_D$ : 개발이 없을 때 D의 이익,  $e_S$ : 개발시 S의 이익,  $\bar{e}_S$ : 개발이 없을 때 S의 이익,  $Q$ : 개발용량,  $p$ 와  $q$ 는 각 지역의 유량당 이익,  $b$ : 편익,  $c$ : 비용,  $\alpha$ : 개발된 유량의 분배비율,  $\beta$ : 비율

### 2.3 적용

현재 국내의 강변여과 개발은 지자체의 독자 사업으로 진행되어 제시된 게임모형의 적용이 불가능 하다. 따라서 게임모형을 가상의 두 지자체 D와 S에 대해 적용해 보았다. 적용시 조건들은 다음과 같다(Table 1). 개발유량이 300단위일 경우 유량당 이득은 2가 되고,  $p=1.8$ ,  $q=2.2$ ,  $\beta, \gamma=0.5$  가정하였다.

시설용량이 정해진 경우이므로, 이 문제의 경우 D지자체 입장에서는 생산된 유량의 25.9% ~ 77.3%를 S에 분배하게 되면 내쉬균형이 의도한 곳에서 이루어지게 된다. 실제 적용문제에서 비용과 편익이 조사되고 전체 효율에 대한 각 지역의 이익이 계산되면 유량의 분배를 결정하는 문제에 적용 될 수 있다. 반대로 유량의 분배가 결정되어 있을 때 적절한 비용부담에 대한 문제에도 적용할 수 있을 것이다.

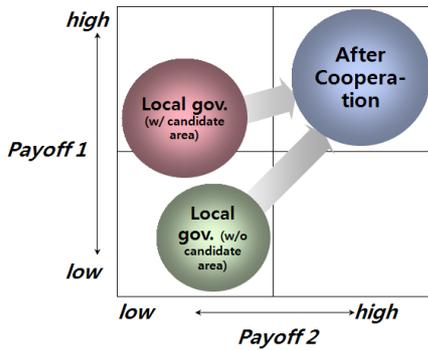


Fig. 1 Additional payoff by cooperative development

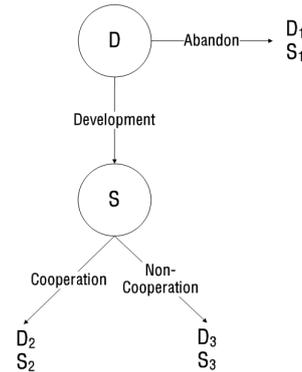


Fig. 2 Tree diagram for development of RBF

Table 1 B and C for each conditions

		Benefit	Cost
Surface water only	D	150	50
	S	250	50
Non-cooperative	D	290	50
	S	250	50
Cooperative	D+S	600	100

### 3. 적지분석을 위한 게임 모형

#### 3.1 배경

적지분석과정은 여러 가지 입지선정에 관한 인자가 고려해서 최대한 많은 관련항목들을 의사결정에 포함시켜 우선순위를 정하게 된다. 기존의 의사결정 방법론들은 각 대안의 우선순위를 위해 각 항목들에 대한 가중치나 확률치를 이용한 수치적 계산에 의한 방법들이 대부분이며, 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 기본 모형을 개발하고자 한다.

#### 3.2 정책형 게임모형

이상신(2009)에 제시된 기본형 게임모형은 몇 가지 현실적인 가정에 근거하여 설정된 모델이지만, 이 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 이루어지도록 만들어야 한다. 정보 자체에 대한 penalty를 확률  $p$ 로 가정하고( $0 \leq p \leq 1$ ), 이를 이용하여 priority를 가짐으로써 증대된 선택 확률을 감소시킬 수 있다. 예컨대 정보를 취득하기 위해 많은 비용과 노력이 든다면  $p$  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. 이러한 penalty를 고려할 때 각 후보지의 게임이론 모형은 Table 3과 같다.

Table 3. Game model using penalty (policy game model)

		Candidate location 2	
		w/ Information	w/o Information
Candidate location 1	w/ Information	$x_1, x_2$	$(x_1 - k_2) + p(x_2 + k_2), (x_2 + k_2)(1 - p)$
	w/o Information	$(x_1 + k_1)(1 - p), (x_2 - k_1) + p(x_1 + k_1)$	$(x_1 + k_1 - k_2)(1 - p) + (x_2 + k_2 - k_1)p, (x_2 + k_2 - k_1)(1 - p) + (x_1 + k_1 - k_2)p$

제시된 정책형 게임모형은 게임이론의 기본원리인 전략에 대해서 문제해결을 위한 분석을 위해 수정된 게임이론을 적용해야 한다. 즉, 후보지들의 전략(의사결정)은 정책결정자의 전략(의사결정)이 우선되며, 정책결정자는 최적의 목적 달성을 위해 게임을 진행 시킨다.

### 3.3 적용

서울특별시 상수도사업본부(2005)의 한강변 강변여과 개발 가능성 조사에서는 6개의 정수장 주변을 후보지로 선정하였다. 이를 바탕으로 수리지질 조건, 적정개발 가능량, 설치조건 등을 고려할 때 암사정수장과 영등포 정수장이 시범 개발지로 적정할 것으로 판단된다(동국대학교, 2005). 두 후보지에 게임이론을 적용하여 강변여과 개발 적지를 선정할 수 있을 것이다. 서울시 두후보지에 적용해 본 결과 모든 정보가 있을 경우 기존의 적지분석 방법론과 유사한 결과를 얻었으며, 기본형 게임모형에서는 한 후보지의 정보가 누락되면 다른 후보지의 정보가 사장되는 경우가 발생하고, 만약, 누락된 정보가 특정후보지를 선택시키기 위해 의사결정자가 의도적으로 누락시킬 경우의 위험도 있다. 따라서 penalty를 고려한 게임모형을 적용하면 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 강변여과 개발시 개발전략 및 적지선정에 적용가능한 게임모형을 개발하고 개발된 모형의 적용성을 검토했다. 개발전략면에서는 적용가능한 협력-제로섬게임의 전개형 게임 모형을 제시하고 적용했다. 이 모형은 비용과 편익이 조사되고 전체 효용에 대한 각 지역의 이익이 계산된다면 유량의 분배를 결정하는 문제에 적용할 수 있고, 반대로 유량의 분배가 결정되어 있을 경우 적절한 비용부담에 대한 문제에 적용가능할 것이다. 이를 활용하여 지자체간 공동개발로 인한 추가이익이 발생하여 강변여과 개발타당성을 확고히할 것이다. 적지선정면에서는 게임이론의 확률적 접근을 시도하여 정책형 게임모형을 제시하고 적용했다. 제시된 정책형 게임모형은 앞으로 많은 적지분석 방법론으로 사용될 수 있을 것이다. 물론 본 연구에서의 결과를 다른 분야에 즉시 사용하기에는 무리가 있다. 앞으로 각 적용분야에 따른 priority와 penalty에 대한 연구가 더 진행되고 좀 더 객관성이 확보가 된다면 많은 장점을 가진 정책형 게임모형의 이용이 활발해질 것이다.

### 감 사 의 글

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

### 참 고 문 헌

1. 과학기술부 (2004), 지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발 보고서
2. 창원시 상하수도사업소 (2006.5.10). <http://sudo.changwon.go.kr>
3. Rogers, P. (1969). "A game theory approach to the problems of international river basins.", *Water Resources Research*, 5, pp. 749-760
4. Dufournaud, C. (1982). "On the mutually beneficial cooperative scheme: dynamic change in the payoff matrix of international river basin schemes.", *Water Resources Research*, 18 (4), pp. 764-772
5. 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
6. Netanyahu, S. (1998). Bilateral water policy coordination. R.E. Just and S. Netanyahu (eds.) *Conflict and Cooperation on Trans-Boundary Water Resources*, Boston
7. 김길호, 이명호, 이충성, 심명필 (2006). "게임이론을 이용한 물 분쟁 해결의 조정안 도출.", **한국수자원학회학술대회**, 한국수자원학회. pp.1352-1356
8. 최동진, 이미홍 (2008), "게임이론을 통한 남북 공유하천 관리 전략 도출.", **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 4호, pp. 353-363
9. 이상신 (2009). 강변여과를 활용한 상수원 개발 및 운영에 관한 연구. 동국대학교, 박사학위논문.
10. 서울특별시 상수도사업본부 (2005). 간접취수 도입을 위한 기초조사 보고서
11. 동국대학교 (2005). 인공함양을 활용한 한강 및 낙동강 유역 수도공급 방안 연구 1차년도 요약보고서