

하천 치수관리를 위한 상·하류 지역 간 비용배분

Cost Allocation between Upstream and Downstream Regions for
Flood Mitigation Management

이충성 인하대학교 수자원시스템연구소 선임연구원(제1저자)
Yi Choongsung Senior Researcher, Inha Institute of Water
Resources System, Inha Univ.(Primary Author)
(sung@inha.ac.kr)

유재영 인하대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Yoo Jaeyoung MS Candidate, Graduate School of
Civil Engrg., Inha Univ.
(august6890@paran.com)

여규동 인하대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Yeo Kyudong Ph.D. Candidate, Graduate School of
Civil Engrg., Inha Univ.
(yeokd@inha.ac.kr)

이상원 인하대학교 경제학부 교수
Lee Sangwon Professor, Dept. of Economics, Inha Univ.
(swlee@inha.ac.kr)

목 차

I. 서론

II. 대상지역 비용배분의 기본환 경 분석

1. 대상지역의 현황
2. 비용배분의 요인
3. 관련 당사자들의 입장과 동기

III. 협조적 상황하의 비용배분 문제 구조화

1. 비용배분의 주체
2. 비용배분의 원칙 설정
3. 협조적 게임의 해법
4. 비용배분 방법론

IV. 하천 치수관리 비용배분

1. 대상 비용의 설정
2. 상·하류 간 비용배분
3. 재원조달 방안
4. 다지역 비용배분으로의 확장

V. 결론

※ 본 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

I. 서론

도시화로 인한 유역 내 불투수층의 증가는 자연상태의 보수(保水) 및 유수(遊水) 기능을 크게 저하시키게 되고, 총유출량 및 침투유출량의 증가, 홍수도달시간의 단축과 같은 유출양상의 변화를 초래해 하천의 치수능력을 저하시킨다. 반면 이에 대비한 치수사업은 막대한 비용을 필요로 하는데, 하천이 여러 지역에 걸쳐 흐른다면 치수관리 비용에 대한 지역 간 배분 문제가 발생하게 된다. 그러나 하천의 일반적 특성상 비용발생의 원인지역과 피해지역이 다르게 나타나므로 비용배분에 대한 각 지역의 입장은 상반된 경우가 많다. 이러한 지역이 기주되는 유역 전체적 차원에서 추진하여야 할 치수사업의 효율성을 저해하므로 결과적으로 총비용의 증가를 초래한다. 따라서 하천 치수관리의 효율화와 지역 간 분쟁 가능성 예방을 위해서도 합리적 비용배분 방법론이 필요하다.

비용배분 연구의 큰 흐름은 게임이론을 기반으로 이루어져 왔으며, 최근에는 공공사업들의 비용배분을 중심으로 협조적 게임이론의 적용이 주를 이루고 있다. 수자원사업 분야에서 게임이론을 이용한 비용배분의 초기 연구는 Tennessee Valley Authority(TVA) 사업과 관련하여 미국에서 활발히 수행되었다. Ransmeier(1942)와 Parker(1943)는 TVA 사업에 대해 게임이론을 적용하여 다양한 비용배분 연구를 수행하였다. 특히, Parker(1943)는 TVA 사업 관련 다목적댐의 비용배분을 연구하였는데, 총사업비 중 공통비용에 대한 배분의 차가 클수록 용수공급, 홍수조절, 발전 등과 같은 개별 목적에 부과되는 비용은 줄어든다는 결론을 얻었

다. 이러한 연구들을 통해 1940년대에 다목적댐 사업 비용배분과 관련하여 분리비용잔여편익법(Separable Costs Remaining Benefits: SCRB, 이하 SCRB법)이 사용되기 시작하였으며, Federal Inter-Agency River Basin Committee(1950)는 SCRB법의 유용성을 높이 평가하여 다목적댐 사업의 비용배분에 대해서는 이 방법을 추천하기도 하였다. 국내에서도 다목적댐의 비용배분을 위해 SCRB법을 원칙으로 하고 있다¹⁾. 한편 Loughlin(1977)은 기존 연구들이 비용배분 방법론별 결과값에 대한 비교만을 중시할 때, SCRB법의 효율성과 공정성에 대해 연구하였다.

협조적 게임이론을 바탕으로 한 수자원사업 비용배분은 Straffin and Heaney(1981)의 TVA 사업 관련 비용배분 연구를 그 시초로 볼 수 있다. Driessen(1988)은 τ -value, 중핵법, 샤플리법(Shapley method) 등을 이용하여 TVA 사업에 대한 비용배분 방법론을 연구하였으며, 이와 비슷한 연구가 다수 존재한다(Driessen and Tijs, 1986; Young, 1994a, 1994b). Serghini(2003)는 샤플리법과 중핵법을 적용한 FDC(Fully Distributed Costs) 모형을 개발하여 다목적댐 사업 비용배분을 연구하였다. 최근 연구로는 Wang et al.(2008)이 중핵법과 샤플리법을 이용하여 유역 내 이해당사자 간 수자원 재배분 문제를 다루었으며, Mahjouri and Ardestani(2009)는 SCRB법, 샤플리법, MCRS(Minimum Costs Remaining Savings)법 등을 유역 간 물 이전 및 배분 문제에 적용하였다. 한편, Sadegh et al.(2009)은 유역 간 물 배분 문제에 기존 샤플리법과 Fuzzy기법을 혼합한 모형을 사용하면 경기자(game players)들의

1) 1966년 제정된 「특정다목적댐법」에서는 다목적댐의 비용배분을 위해 SCRB법을 원칙으로 하였으며, 1999년 동법이 폐지되고 새로 제정된 「댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률」에서도 이 같은 원칙이 계속 유지되고 있음.

협조적 동기를 높일 수 있음을 보였다. 국내에서는 김상우·이정전(2006)이 SCRB법 및 샤플리법을 이용하여 광역상수도 건설의 비용배분 문제를 다룬 바 있다.

본 연구의 목적은 하천 치수관리를 위한 치수사업의 비용을 하천을 공유하는 상·하류의 각 지역에 합리적으로 배분하기 위한 방법을 제시하는 것이다. 이를 위해 본 연구는 한강 지류인 나진포천 및 계양천을 사례연구의 대상지역으로 선정하여 상류지역인 인천시와 하류지역인 김포시 간의 치수사업 비용배분 문제의 해법을 제시하였다. 비용

배분을 위한 이론적 전개는 협조적 게임이론을 바탕으로 하였고, 방법론 측면에서는 비교적 적용이 간편한 SCRB법 및 샤플리법을 사용하였다. 본 연구에서 제시한 치수관리 비용의 배분 방안은 향후 유역 내 치수사업을 두고 빈발할 것으로 예상되고 있는 지자체 간 분쟁을 예방하고 비용배분 문제 발생 시 타협안 마련에 기여할 수 있을 것이다.

II. 대상지역 비용배분의 기본환경 분석

1. 대상지역의 현황

계양천 및 나진포천은 한강의 지류인 지방하천으로서 상류인 인천시에서 하류인 김포시를 각각 유하하다가 나진포천이 계양천으로 합류하여 한강으로 유입된다. 유역 내 지형조건은 전반적으로 농경지가 많이 분포한 평야지대로서 하상경사가 완만하며, 중·하류부는 본류인 한강의 계획홍수

그림 1_ 대상지역의 하천, 도시개발, 치수사업 현황



위보다도 낮은 저지대로서 상습침수구역이다. 이 지역은 최근 인천시와 김포시의 신도시 개발로 인해 급격한 도시화가 진행되고 있다. 이에 따라 유역 전반에 걸쳐 수리·수문 특성 및 유출조건이 급변할 것으로 예상되고 있어 인천시와 김포시는 개별적인 치수대책을 수립하고 있다.

〈그림 1〉은 대상지역의 하천, 도시개발, 치수사업 현황을 나타낸 것인데, 본래 나진포천이 계양천과 합류하던 자연적인 유역과 달리 계양천 중·하류에 인공 방수로를 건설함으로써 유역은 하구의 배수펌프장을 출구로 하는 운양배수구역과 향산2배수구역으로 분리되어 있다. 신도시 개발은 인천시의 경우 나진포천과 계양천 상류지역에 검단신도시 1, 2지구를 개발 중이며, 김포시는 나진포천 하류지역에 한강신도시를 개발 중이다. 이에 따라 하류지역에 위치한 김포시는 증가하는 홍수량을 처리하기 위해 계양천 방수로에서 운양배수펌프장 구간의 하천정비와 더불어 운양배수펌프장 및 향

산2배수펌프장의 시설용량 확장과 나진 및 계양천 변저류지를 계획하고 있다.

2. 비용배분의 요인

1) 직접적 요인: 검단신도시 1, 2지구 개발

비용배분의 직접적 요인은 두 가지를 들 수 있다. 첫째는 인천시가 상류에 개발 중인 검단 1, 2지구 신도시로 인한 홍수량 증가다. 이 신도시 사업은 인천도시개발공사와 한국토지주택공사가 각각 50%의 지분으로 참여하고 있으며, 총 547만 평의 규모로 이루어진다. 이에 따른 영향은 검단신도시 1지구의 경우 계양천 및 나진포천 모두에, 검단신도시 2지구의 경우 나진포천에 미치게 된다.

둘째는 인천시가 신도시 개발로 인한 상류 홍수 피해 위험을 저감하기 위하여 별도로 수행한 하천 정비 사업에 있다. 문제는 이 사업에 의해 더 많은 홍수량이 빠르게 유출되어 하류지역인 김포시의 부담을 더욱 가중시킨다는 것이다.

2) 부수적 요인: 한강신도시 개발

김포시가 개발 중인 한강신도시는 한국토지주택공사의 100% 지분 참여하에 이루어지는 사업으로서, 총 354만 평의 규모로 이루어진다. 이에 따라 나진포천으로 합류하는 고창천의 홍수량을 증가시켜 나진포천 하류 및 운양배수펌프장의 홍수량 부담을 증가시키게 된다.

3. 관련 당사자들의 입장과 동기

1) 김포시

김포시는 상류지역인 인천시의 검단신도시 개발이 홍수량 증가로 이어져 하류지역의 치수안전도 저하에 미치는 영향이 분명하므로 김포시가 추진 중인 치수사업에 대한 인천시의 비용분담이 필요하다는 입장이다.

2) 인천시(인천도시개발공사)

인천시는 검단신도시 개발로 인한 홍수량 증가분을 방어하기 위하여 인천시 관할구간에 대해 재해 영향평가와 하천기본계획에 따른 치수대책을 수행하고 있으므로 김포시에서 요구하는 비용분담에 대해 책임이 없다는 입장이다. 즉, 하류의 치수관리는 김포시의 책임사항이라는 입장이다.

3) 중앙정부(소방방재청, 국토해양부)

현행 제도에 의하면 기본적으로 중앙정부는 재해 위험지구 정비사업이나 생태하천 조성사업 등의 경우 지방하천 관리에 발생하는 비용의 일부를 부담할 수 있다. 다만, 협의 및 조정에 의해 인천, 김포 등 지방자치단체도 적절한 비용분담을 해야 한다는 입장이다.

4) 한국토지주택공사(한강신도시, 검단신도시)

한강신도시 개발을 전담하는 한국토지주택공사는 신도시로 인한 홍수량 증가에 대처하기 위한 방안으로 자체적인 치수사업 대신 김포시와의 협의를 통해 운양배수펌프장 확장 사업에 500억 원의 비용을 분담하는 것으로 합의하였다. 이는 김포시와 한국토지주택공사가 상호 이익이 되는 방향으로 협조적 합의를 이룬 결과다. 한편, 한강신도시와 함께 인천시의 검단신도시 개발에도 50%의 지분으

표 1_ 홍수량 증가요인별 비용배분 주체

홍수량 증가 요인		배분주체	비용분담 의사 및 제약	비고
S ₁	하류의 기존 홍수량과 자연적 홍수량 증가	김포시	치수관리 의무사항	상류에 비용분담을 요구할 수 없음
		중앙정부	예산보조 가능	치수관리 지원에 일정부분 책임
S ₂	한강 신도시 개발에 따른 홍수량 증가	김포시	치수사업을 위해 비용 투입	원인제공자로서 전액 책임이 있음
		한국토지주택공사	김포시에 500억 원의 비용분담 합의	
		중앙정부	예산보조 가능	치수관리 지원에 일정부분 책임
S ₃	검단 신도시 개발에 따른 홍수량 증가	인천시	하류에 대한 관리 책임이 없다는 입장	원인제공자로서의 책임은 있음
		김포시	원인제공자인 인천시와 비용을 분담하고자 함	홍수방어의 수혜자로서 비용분담의 주체로 볼 수 있음
		한국토지주택공사	인천시와 같은 상황에 놓여 있으며 의사 표명을 하지 않고 있음	원인제공자이며 한강신도시의 전례에 비추어 볼 때, 인천시의 분담액 중 일정액을 공동부담 가능
		중앙정부	예산보조 가능	치수관리 지원에 일정부분 책임

로 참여하고 있는 한국토지주택공사는 검단신도시 개발로 인한 홍수량 증가 분 처리에 대해서는 입장 표명이 없는 상태다.

III. 협조적 상황하의 비용배분 문제 구조화

1. 비용배분의 주체

비용배분의 직접적 주체는 하천 치수 관리 주체인 상류의 인천시와 하류의 김포시다. 또한 한국토지주택공사는 두 지자체의 신도시 개발에 모두 관여하고 있는 직접적 이해당사자로서 비용분담의 직접적 주체가 된다. 중앙정부는 넓은 의미에서 비용배분 주체이면서, 다른 주체 간 이견을 조정하는 제3자 역할도 수행할 수 있

표 2_ 신도시 개발에 따른 홍수량 증가

(단위: m³/s)

배수구역		홍수량산정지점	한강신도시	검단신도시
운양 배수구역	계양천	운양배수펌프장	2.03	10.92
		나진포천 합류 후	2.03	10.92
		나진포천 합류 전	0.00	0.00
	나진포천	나진포천 하구	2.03	10.92
		고창천 합류 후	2.03	10.92
		고창천 합류 전	0.00	10.92
		시경계	0.00	11.00
향산2 배수구역	계양천	향산2배수펌프장	0.00	2.47
		계양천교 지점	0.00	2.72
		풍무2교	0.00	2.33
		시경계	0.00	3.01

출처: 경기도, 2008. 계양천 및 나진포천 하천기본계획 보고서.

으므로 간접적인 이해당사자로서 비용배분에 참여하게 된다. 중앙정부의 소관부서는 배수펌프장 확

장사업의 경우 소방방재청, 천변저류지 사업과 계양천하류 개수공사의 경우 국토해양부다.

비용배분의 원인이 되는 상·하류 홍수량 증가 요인에 따른 비용배분 주체를 정리하면 <표 1>과 같다. <표 1>에서 S_1 은 신도시 개발이 없는 상황에서 기존 홍수량과 일반적(또는 소규모의 점진적) 도시화에 의한 자연적 홍수량 증가 요인을 의미한다. S_1 을 설정한 이유는 계양천 및 나진포천 하류 지역이 기존 홍수량에 의해서도 수해상습지로 지정되고 있기 때문에 김포시에서 계획 중인 치수사업이 이러한 요인까지 해결하는 것이라면 이는 상류의 비용분담 사항이 아니기 때문이다. S_2 와 S_3 는 각각 한강신도시와 검단신도시 개발에 의한 홍수량 증가요인을 나타내고 있다.

2. 비용배분의 원칙 설정

일반적으로 도시화에 따른 유출률 증가는 하류로 갈수록 홍수량 부담을 증가시키는 상·하류 간 일방적 구조로 나타나게 된다. 만일 상·하류가 각자의 영역에서 발생한 홍수량을 적절한 지체 및 저류시설물로 저감시킨다면 비용배분 문제는 발생하지 않는다. 그러나 상류측이 증가된 홍수량을 모두 하류로 유출시킨다면 결과적으로 하류가 상류의 홍수량 처리비용까지 떠안는 셈이 된다.

본 연구의 대상지역 상황은 후자의 경우에 해당한다. 따라서 하류의 비용에 대해 상류의 부담 원칙을 설정하기 위해서는 상·하류지역의 신도시 개발이 홍수량 증가에 미치는 영향을 분석해야 한다. <표 2>는 한강신도시 및 검단신도시 1, 2지구 개발에 따른 홍수량 증가를 배수구역별로 나타낸 것으로서 전체적으로 검단신도시가 홍수량 증가에 영향이 큰 것을 알 수 있다.

<표 2>에서 운양배수구역의 홍수량 증가는 고

창천 합류 전까지는 검단신도시 1, 2지구의 영향만을 받으며, 고창천 합류 후부터는 한강신도시의 영향도 받게 된다. 따라서 운양배수펌프장뿐 아니라 고창천 합류지점을 전후하여 건설될 예정인 나진천변저류지에 대한 비용은 인천시과 김포시가 모두 원인 제공자가 되므로 홍수량 증가에 기여한 정도에 따라 비용분담에 참여해야 한다. 한편 향산2배수구역에서는 검단신도시 1지구만이 홍수량 증가에 영향을 미친다. 이에 따라 홍수량 증가요인으로 본다면 계양천변저류지와 향산2배수펌프장 확장에 대한 비용은 인천시에 비용부담의 당위성이 있다고 판단할 수 있다.

그러나 비용배분 문제에 있어서 전술한 당위성은 원인자부담원칙의 관점에서는 논리적인 수 있으나, 수해자부담원칙의 관점으로 본다면 다른 설명이 가능하다. 즉, 과거 하류지역인 김포시가 수해상습지로서 잦은 홍수피해가 발생했던 것을 감안하면 치수사업에 의한 절대적 수해자는 김포시가 된다. 따라서 김포시의 입장에서 운양배수구역은 물론이고 원인제공이 없는 향산2배수구역의 사업들에 대해서도 단순히 홍수량 증가에 대한 기여도 이상의 부담이 요구될 수 있다.

3. 협조적 게임의 해법

협조적 게임에 의한 비용배분의 기본원리는 각 경기자가 단독으로 사업을 할 경우의 비용, 몇몇 경기자들 혹은 모든 경기자들과 공동으로 사업을 할 경우에 자신에게 할당되는 비용을 도출하여 서로 비교하면서, 모든 경기자가 참여할 때 각 경기자에게 가장 유리한 안을 제시하는 것이다. 따라서 협조적 상황이란 어떤 비용배분 주체의 이탈가능성도 배제되는 상황이며, 기본적으로 상·하류로 대표되는 관련주체가 모두 비용배분에 참여함을 뜻

한다. 그런데 전 절에서 언급하였듯이 원인자부담원칙에 따른다면 검단신도시의 원인제공 비중이 매우 커서 상류가 사업비용의 상당액을 지불하게 된다. 따라서 이러한 논리는 상류의 비용배분 이탈 동기를 부여하게 되어 협조적 게임을 성립시킬 수 없게 된다. 본 절에서는 상류의 이탈동기를 최소화하면서 상·하류 모두의 협조적 동기를 최대한 이끌어내기 위한 협조적 해법을 제시하고자 한다.

1) 협조적 게임 성립의 조건

비용배분의 대상이 되는 사업들의 총 사업비용은 <식 1>과 같이 표현할 수 있다.

$$C(p_i, S_1 + S_2 + S_3) \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

여기서, p_i 는 치수사업 추진 주체(또는 사업 대상지역)를 의미하는데 $i=1$ 은 상류로서 인천시와 한국토지주택공사(검단)의 연합, $i=2$ 는 하류로서 김포시와 한국토지주택공사(김포), 중앙정부의 연합으로 구성된다. S_1, S_2, S_3 는 <표 1>에서 제시한 홍수량 증가요인이며, $C(\cdot)$ 는 비용배분 주체와 홍수량 증가요인에 따른 비용을 의미한다.

이러한 총비용이 상·하류 각각에 대해 분리 가능하다고 가정한다면 <표 3>과 같이 독립적 혹은 부가적 건설 가정에 따라 분류할 수 있다. 독립적 사업비용이란 상·하류가 독립적으로 치수사업을 실시하여 자신의 지역에서 발생하는 홍수량 증가분을 처리하는 데 소요되는 비용을 의미한다. 즉, 현재 하류지역에서 추진 중인 치수사업이 상·하류 지역에서 각각 발생한 홍수량 증가분만을 처리할

표 3_ 하류의 치수사업에 대한 상·하류 간 비용의 분리

분류	상·하류	비용
독립적 사업비용	상류	$C(p_2, S_3)$
	하류	$C(p_2, S_1 + S_2)$
부가적 사업비용	상류	$C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_1 + S_2)$
	하류	$C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_3)$

수 있는 규모로 건설될 경우를 가정하여 독립적으로 비용을 산출하는 것이다.

반면, 부가적 사업비용이란 상·하류 지자체 중 한쪽이 총사업비용 $C(p_2, S_1 + S_2 + S_3)$ 에서 상대방의 독립적 사업비용을 제외한 만큼을 비용으로 계산하는 방식이다. <표 3>의 모든 비용에서 $p_i = p_2$ 인 것은 본 연구의 비용배분 대상 치수사업이 하류지역에서 실시되고 상류는 비용만을 분담하기 때문이다.

<표 3>과 같이 분리된 비용은 일반적으로 하위 가산적(sub-additive)²⁾ 비용인 경우가 대부분이다. 만일 비용의 성격이 하위가산적이라면, 이는 하천의 전형적 특성인 상·하류 간 일방적 구조에서 벗어나 협조적 게임 성립을 위한 출발점이 된다. 따라서 협조적 게임 성립을 위해서는 <식 2>의 조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 &C(p_2, S_3) + C(p_2, S_1 + S_2) \quad \langle \text{식 2} \rangle \\
 &> C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) \\
 &> C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_1 + S_2) \\
 &+ C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_3)
 \end{aligned}$$

<식 2>와 같은 조건의 성립 여부는 직관적으로도 해석될 수 있다. 즉, 독립적 사업비용이든지 부

2) sub-additive: 하위가산적. 두 요인의 효과가 각 요인의 효과를 더한 것에 못 미침.

가적 사업비용이든지 최종적으로 그 합에 의한 결과는 동일하게 홍수량을 저감시킬 수 있는 규모의 치수사업이다. 그러나 상·하류가 독립적으로 사업을 실시할 경우에는 사업에 투자되는 고정비용(fixed cost)이 중복될 가능성이 있으므로 일반적으로 부가적 사업비용보다 더 큰 비용을 발생시킨다. 따라서 독립적 사업비용의 합은 총사업비보다 크며, 부가적 사업비용의 합은 총사업비보다 작은 관계가 성립할 것이다.

〈식 2〉는 상·하류 전체적인 관점에서 협조적 게임의 성립을 위한 필요조건이다. 그러나 보다 근본적으로 본 연구의 비용배분 상황이 하류가 계획 중인 사업에 상류의 협조(비용분담)를 구하는 것인 만큼, 상류의 협조동기를 위한 조건이 전제되지 않으면 협조적 게임의 조건이 충분히 성립하였다고 할 수 없다. 따라서 협조적 게임을 위해서는 상류가 분담할 비용이 〈식 3〉과 같은 충분조건도 만족시켜야 한다.

$$C(p_1, S_3) \geq C(p_2, S_3) \quad \langle \text{식 3} \rangle$$

즉, 상류의 입장에서는 S_3 요인(상류의 집단신도시)에 따른 홍수량 증가 문제를 해결하기 위해 하류지역에서 계획 중인 사업에 독립적 사업비용만을 분담하고, 사업의 수행은 하류에 대행시키는 비용 $C(p_2, S_3)$ 가 상류지역에서 자체적으로 사업을 수행하는 비용 $C(p_1, S_3)$ 보다 작거나, 최소한 같아야 한다는 조건이다.

본 연구의 비용배분 상황에서 〈식 3〉의 조건은 충족할 가능성이 매우 크다. 왜냐하면 인천시는 집단신도시의 토지활용 고도화에 따른 지가상승으로 천변저류지와 같이 대규모 토지수용을 필요로 하는 사업안에 대한 비용이 높으며, 김포시와 같은 배수 펌프장은 자연적으로 이미 불가능한 안이기 때문이다. 만일, 제3의 대안으로 한강이나 인근의 굴포천

방수로에 연결수로를 건설하는 사업을 고려할 수는 있겠으나, 이는 더욱 큰 비용이 소요될 가능성이 크다. 따라서 충분조건 만족은 상·하류 간 비용배분 문제가 협조적 게임의 상태에 진입했다는 것을 의미한다. 이 경우에는 하천의 전형적 특성인 상류에 의한 일방적, 조건부적 협상의 모습이 현격히 약화될 가능성이 있는데, 이 같은 상황의 근본적 원인은 본 사안이 원인제공자 채무의무에 의한 상류의 제약을 기본 전제로 하고 있기 때문이다.

반면, 하류의 협조적 동기는 별다른 조건 없이도 상류에 비해 명확하다. 이는 하류가 홍수량 증가로 인해 대규모 피해발생 가능성이 높으므로 자체적인 독립적 건설의 필요성이 크기 때문이다. 따라서 어차피 수행되어야 할 독립적 건설비용에 비하면 하위가산성에 의해 규모의 경제가 적용되는 연합적 비용분담이 비용효과적(cost-effective)이라는 전제하에서 하류의 협조적 동기는 필연적으로 발생하게 된다.

2) 협조적 게임하의 협의대상 비용

앞에서 살펴본 필요충분조건들의 만족가능성을 감안한다면, 비용배분을 위한 협조적 게임의 양상은 상류인 인천시가 하류인 김포시에 사업대행을 요구하고, 김포시는 사업대행을 위해 인천시에 적절한 협의대상 비용을 제안하는 방식이 된다. 이러한 사업대행에 대하여 하류가 상류에 요구할 수 있는 비용분담액은 독립적 사업비용과 부가적 사업비용, 두 가지를 상정해 볼 수 있다. 하류의 입장에서는 독립적 사업비용을 제시하여 상류의 분담액을 최대로 하는 것이 가장 유리할 것인 반면, 상류는 부가적 사업비용을 선호할 것이다.

협조적 게임하에서 하류가 사용할 수 있는 이상적 전략은 부가적 사업비용을 협의대상 비용의 출

표 4_ 대상 비용배분문제에 대한 SCRB법 적용 절차

SCRB 절차	상류	하류
① 대체건설비(독립적 사업비용)	$C(p_2, S_3)$	$C(p_2, S_1 + S_2)$
② 분리비용(부가적 사업비용)	$C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_1 + S_2)$	$C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_3)$
③ 잔여편익 ①-②(분리불가능비용)	$C(p_2, S_3) - C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) + C(p_2, S_1 + S_2)$	$C(p_2, S_1 + S_2) - C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) + C(p_2, S_3)$
④ 잔여편익률(총 잔여편익에 대한 구성비율)	50%	50%
⑤ 분리비용 제외 부담액(총비용-②의 합)×④	$0.5[C(p_2, S_3) - C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) + C(p_2, S_1 + S_2)]$	$0.5[C(p_2, S_1 + S_2) - C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) + C(p_2, S_3)]$
⑥ 배분된 사업비 ②+⑤	$0.5[C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) + C(p_2, S_3) - C(p_2, S_1 + S_2)]$	$0.5[C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) + C(p_2, S_1 + S_2) - C(p_2, S_3)]$

발점으로 하여 협의에 따라 더 큰 비용분담의 가능성을 제시해 나가는 것이다. 그렇게 함으로써 상류의 협조 동기를 유지시키면서 하류의 입장도 최대한 반영할 유연성을 확보할 수 있기 때문이다. 따라서 협조적 게임하에서 협의대상이 되는 비용은 기본적으로 $C(p_2, S_3)$ 가 될 수는 없으며, <식 4>와 같이 최대 및 최소비용의 사이에서 탄력적으로 결정해야 한다.

$$C(p_2, S_3) > \text{상류부담액} > C(p_2, S_1 + S_2 + S_3) - C(p_2, S_1 + S_2) \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

4. 비용배분 방법론

1) SCRB법

SCRB법은 협조적 게임이론에 근거한 비용배분 방법론으로서 각 참여자가 자신에게 가장 유리한 조건의 한계비용을 먼저 부담하고 잔여 비용은 첫 번째 부담에 따라 얻게 된 이익에 비례해 부담하도록

표 5_ 대상 비용배분문제에 대한 샤플리법의 적용

구분	Shapley Value
상류	$\Phi_{(\text{상류})} = \frac{(0)!(1)!}{2!} [C(2, S_3) - 0] + \frac{(1)!(0)!}{2!} [C(2, S_1 + S_2 + S_3) - C(2, S_1 + S_2)]$
하류	$\Phi_{(\text{하류})} = \frac{(0)!(1)!}{2!} [C(2, S_1 + S_2) - 0] + \frac{(1)!(0)!}{2!} [C(2, S_1 + S_2 + S_3) - C(2, S_3)]$

배분한다는 논리다. <표 3>에서 제시한 바와 같이 총사업비용이 분리가능하다고 하면 본 연구의 비용배분 문제에 대해 <표 4>와 같은 절차에 따라 SCRB법을 적용할 수 있다. SCRB를 적용하기 위한 첫 단계는 총사업비에 대해 상·하류 각자가 독립적으로 대응하는 대체건설비를 산정하는 것이다. 두 번째 단계는 총사업비에서 상대방의 대체건설비를 제외한 분리비용을 산정하는 것인데, 이는 사업에 참여함으로써 자신이 부담하여야 할 최소의 비용이다. 따라서 분리비용은 상·하류가 각기 자신에게 유리한 부가적 사업비용을 자신의 부담액

으로 제시하는 과정으로 생각할 수도 있다.

그러나 상·하류 분리비용의 합은 <식 2>에서 나타내었듯이 총사업비보다 적게 되므로 추가적인 협상에 의해서 잔여액을 재배분하여야 한다. 이러한 잔여액을 SCRB법에서는 편익의 개념으로 해석한다. 즉, 자신의 대체건설비보다 적은 분리비용만을 부담함으로써 남는 액수를 잔여편익으로 보는 것이다. 따라서 세 번째 단계인 잔여편익은 각자의 대체건설비에서 분리비용을 제외하여 산정할 수 있다. 이러한 잔여편익은 협조적 게임이란 상황에서 부가적 사업비용을 통해 상대방이 계획 중인 사업에 나중에 참여함으로써(즉, 자신의 사업을 대행 시킴으로써) 최소의 한계비용을 지불함에 따라 얻게 되는 편익이다.

잔여편익이 산정되면 네 번째 단계로 이를 상·하류 모두의 잔여편익 합에 대한 백분율로 나타내어 잔여편익률을 계산하게 된다. 다섯 번째 단계에서는 이렇게 계산된 잔여편익률에 따라 총사업비용에서 분리비용의 합을 제한 나머지 비용을 배분하게 된다. 마지막으로 상·하류의 분리비용 제외 부담액과 분리비용을 합하여 최종적인 상·하류의 분담액을 결정할 수 있다. 최종적으로는 SCRB법을 적용하여 산정된 분담액 중에서 상류 분담액이 <식 4>의 조건을 만족하는지의 여부에 따라 도출된 해의 적합성을 검증할 수 있다. 즉, 상류부담액이 상류의 독립적 사업비용인 $C(p_2, S_3)$ 보다 적으면 도출된 해는 SCRB의 해로서 적합하다고 할 수 있다.

2) 샤플리법

샤플리법(Shapley method)은 협조적 게임의 하나로서 다수의 경기자가 사업에 참여할 때 이루어질 수 있는 모든 경우의 연합에 대한 한계비용을 고려

할 수 있다. 각 경기자에 대해 배분되는 비용분담액은 자신을 제외한 다른 경기자들의 가능한 모든 연합에 대해 자신의 참여로 인해 발생하는 한계비용의 가중평균치로서 계산되며, 그 가중치는 각 연합의 규모에 의해서 결정된다. 샤플리법을 이용한 비용배분은 <식 5>와 같은 샤플리 공식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\phi_i = \sum_{S \subset N, i \in S} \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!} [C(S) - C(S-i)] \quad \langle \text{식 5} \rangle$$

여기서, s 는 부분연합 S 의 경기자수, n 은 전체 연합 N 의 경기자수를 의미하며, $C(\cdot)$ 는 어떤 연합의 비용을 나타낸다.

<식 5>에 의해 결정되는 경기자 i 의 비용분담액 ϕ_i 는 샤플리 가치(Shapley value)로서 i 가 참여하는 특정연합 S 가 결성될 확률인 $(s-1)!(n-s)!/n!$ 에 연합 S 내에서 i 의 한계비용인 $[C(S) - C(S-i)]$ 를 곱한 것을 모든 연합에 대해서 합산하여 산정한다. 즉, 실질적인 의미는 경기자 i 가 참여하는 모든 연합에서 i 가 부담하는 한계비용의 기대가치(expected value)를 도출하는 것이다. 여기서, i 의 한계비용이란 부가적 사업비로서 SCRB법의 분리비용과 같은 개념이다. 다만 분리비용이 전체연합 N 에 대한 한계비용만을 의미하는 반면, 샤플리법에서는 특정연합 S 에 대한 한계비용이라는 점이 다르다. 위와 같이 도출되는 샤플리 가치(shapley value)는 비용배분의 결과가 파레토 효율적일 것, 배분된 비용과 총비용이 같을 것, 각 배분주체의 분담액은 비용에 대한 한계공헌(marginal contribution)에 근거해야 할 것 등을 모두 만족시키는 협조적 협상해다.

샤플리법은 이론적으로 매우 합리적이지만, 발생 가능한 모든 연합을 고려하기 때문에 각각의 연

합에 대한 사업비용이 모두 존재해야 한다. 따라서 배분주체가 다수가 되면 가능한 연합의 수가 급격히 증가하기 때문에 산정절차가 매우 까다로워진다. 그러나 본 연구의 대상지역은 배분 주체가 상·하류 양자뿐이므로 발생가능 연합은 상·하류 각자의 독립적 사업과 공동사업 등 세 가지가 된다. 각 연합별 비용을 <표 3>에서 참조하여 <식 5>에 적용하면 각 배분주체별 비용분담액은 <표 5>와 같은 식에 의해 산정할 수 있다. 샤플리법에 의해 도출된 상류 분담액 또한 SCRB법의 결과와 마찬가지로 <식 4>의 조건을 만족해야 한다.

IV. 하천 치수관리 비용배분

1. 대상 비용의 설정

협조적 해 도출을 위해 필요한 <표 3>의 비용들을 정확히 산정하기 위해서는 세부적인 공학적 분석이 필요하다. 그러나 본 연구에서 이러한 분석을 수행하는 것은 한계가 있으므로 기존 자료들을 활용하여 개략적인 비용을 사용하였다. <표 6>은 계획된 치수 사업들의 사업비 현황을 나타내고 있다. 한편, 상·하류의 독립적 사업비용은 대상 치수사업을 가장 먼저 제안 하였던 “자연재해 위험지구 지정 타당성조사”(김포시, 2007)를 참고하여 <표 7>과 같이 나타내었다. <표 7>에서 제시된 사업비는 하천기본계획 수립 전의 내용으로서 세부 제원에서의 차이 등으로 <표 6>의 사업비와는 다소 차이가 있으나, 상대적 비율로 나타낸다면 적용에 문제는 없을

것으로 판단되었다. 다만 본 연구는 <표 7>의 자료를 사용함에 있어서 다음의 두 가지 가정을 전제로 하였다.

첫 번째 가정은 나진 및 계양천변저류지에 대한 독립적 사업비용이 제시되지 않은 문제에 대한 것이다. 이는 천변저류지의 경우 사업비의 대부분을 용지보상비가 차지하고 있어서 저류용량의 변화에 따른 비용 차이가 크지 않다는 점이 원인일 것으로 판단된다.

따라서 불가피하게 본 연구는 운양 및 향산2배수펌프장의 총사업비 대비 독립적 사업비용의 비율이 운양 및 향산2배수구역에 대표하는 것으로 가정하여 각 배수구역 내 천변저류지 사업에도 동일하게

표 6_ 대상지역 치수사업의 비용 현황

(단위: 백만 원)

배수구역	사업명	사업비
운양 배수구역	운양배수펌프장 확장공사	61,511
	나진포천 천변저류지 조성공사	65,069
	계양천하류 개수공사 ^{주)}	21,000
	소계	147,580
향산2 배수구역	향산2배수펌프장 확장공사	35,556
	계양천 천변저류지 조성공사	68,554
	소계	104,110
총사업비		251,690

주: 경기도, 2009. 계양천하류 개수공사 실시설계 보고서.

출처: 경기도, 2008. 계양천 및 나진포천 하천기본계획 보고서.

표 7_ 운양, 향산2배수펌프장의 독립적 사업비

(단위: 백만 원)

분류	$\alpha(p_2, S_3)$	$\alpha(p_2, S_1 + S_2)$	검단+한강
운양 배수펌프장	68,201	63,581	63,581
향산2 배수펌프장	35,049	0	35,049

출처: 김포시, 2007. 자연재해 위험지구 지정 타당성조사.

표 8 _ SCRB법에 의한 배수구역별 비용배분을 산정

(단위: 백만 원)

운양배수구역(총사업비: 63,581)			향산2배수구역(총사업비: 35,049)		
SCRB 적용절차	상류	하류	SCRB 적용절차	상류	하류
① 대체건설비	68,201	63,581	① 대체건설비	35,049	0
② 분리비용	0	-4,620	② 분리비용	35,049	0
③ 잔여편익(①-②)	68,201	68,201	③ 잔여편익(①-②)	0	0
④ 잔여편익률(%)	50%	50%	④ 잔여편익률(%)	50%	50%
⑤ 분리비용 제외 부담액	34,101	34,101	⑤ 분리비용 제외 부담액	0	0
⑥ 각 사업비	34,101	29,481	⑥ 각 사업비	35,049	0
⑦ 비용배분율	53.63%	46.37%	⑦ 비용배분율	100%	0%

적용하는 것으로 하였다. 이는 「계양천 및 나진포천 하천기본계획」에서 제시한 대안들 중에서 배수펌프장 확장과 천변저류지 병행안이 배수펌프장 단일안의 대체안으로 고려된 것이므로 나름대로 근거 있는 대안이 될 것으로 판단하였다.

두 번째 가정은 향산2배수펌프장의 경우 홍수량 증가요인이 검단신도시 1지구에만 국한되므로 인천시의 독립적 사업비용이 곧 총 사업비가 되는 문제에 대한 것이다. III장에서 비용배분의 원칙으로 설정하였듯이, 이 문제는 상류의 비용배분 참여 동기를 현저히 저하시킬 가능성이 있다. 따라서 상류의 이탈가능성을 감소시키기 위해서 하류도 비용분담에 참여하게 되는 수혜자 부담원칙을 고려할 필요가 있다. 이를 위해서는 상·하류 간 수혜의 정도를 측정하여야 하는데, 일반적으로 홍수피해 범위는 유역면적과 비례할 가능성이 많으므로 홍수방어로 인한 수혜도 많을 것으로 유추할 수 있다. 따라서 향산2배수구역의 경우는 협조적 해에 의한 배분뿐 아니라 상·하류 간 유역면적비를 이용한 비례배분법도 부수적 원칙으로 사용하여 상류의 이탈가능성을 감소시키는 것으로 하였다.

2. 상·하류 간 비용배분

전 절에서 제시한 첫 번째 가정에 의해 SCRB법을 운양과 향산2배수구역에 각각 적용하면 <표 8>과 같은 상·하류 간 비용배분율을 산정할 수 있다. 또한 샤플리법은 <표 5>에 의해 계산하면 <식 6>에서 <식 9>와 같은 결과를 얻을 수 있다. 두 방법에 의한 협조적 해를 구하기 위해 필요한 총사업비와 독립적 사업비는 전술한 바와 같이 <표 7>의 값을 이용하였다. 한편, 두 번째 가정에 따라 비례배분법을 사용하기 위해서 향산2배수구역의 상·하류 간 유역면적비를 구하면 <표 9>와 같다.

$$\Phi_{(운양상류)} = \frac{(0)!(1)!}{2!} [68,201 - 0] + \frac{(1)!(0)!}{2!} [63,581 - 63,581] = 34,101 \quad \langle \text{식 6} \rangle$$

$$\Phi_{(운양하류)} = \frac{(0)!(1)!}{2!} [63,581 - 0] + \frac{(1)!(0)!}{2!} [63,581 - 68,201] = 29,481 \quad \langle \text{식 7} \rangle$$

$$\Phi_{(향산2상류)} = \frac{(0)!(1)!}{2!} [35,049 - 0] + \frac{(1)!(0)!}{2!} [35,049 - 0] = 35,049 \quad \langle \text{식 8} \rangle$$

표 9_향산2배수구역의 상·하류 간 유역면적비

유역	상류(인천시)		하류(김포시)	
	면적(km ²)	비율(%)	면적(km ²)	비율(%)
향산2배수구역	8.67	39.14	13.48	60.86

출처: 경기도, 2008. 계양천 및 나진포천 하천기본계획 보고서.

$$\Phi_{(향산2하류)} = \frac{(0)!(1)!}{2!} [0-0] + \frac{(1)!(0)!}{2!} [35,049 - 35,049] = 0$$

〈식 9〉

〈표 8〉과 〈식 6〉에서 〈식 9〉의 결과를 비교해 보면, SCRB법과 샤플리법에 의한 비용배분율이 같은 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 비용배분 문제를 상·하류 양자 간 관계로 다루었기 때문이다. 즉, SCRB법과 샤플리법의 가장 큰 차이점이 자신을 제외한 다른 경기자들의 참여형태에 대해 가능한 모든 연합을 고려할 것인지(샤플리법), 아닌지(SCRB법)에 있는데, 경기자가 둘뿐이라면 그 차이가 나타나지 않기 때문이다.

SCRB법과 샤플리법 및 유역면적비에 의해서 산

정된 배수구역별 비용배분율을 〈표 6〉의 배수구역별 총사업비에 적용하여 운양배수구역 및 향산2배수구역에 대한 최종적인 비용배분을 결과를 나타내면 〈표 10〉과 같다. 향산2배수구역의 경우 유역면적비는 상류인 인천시의 입장에서 가장 유리한 조건이 되며, 반면에 SCRB모형 및 샤플리모형에 의한 비용배분은 가장 불리한 조건이 된다. 따라서 상·하류 양측의 협상에 의해 최대·최소 사이에서 조정될 수 있는데, 하류인 김포시가 상류의 이탈을 방지하는 수준에서 협상과정의 협의대상 비용으로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 평균적인 비율을 1차적인 조정안으로 제시하였다.

3. 재원조달 방안

큰 틀에서 상·하류에 대한 비용배분액이 결정되었으면 상·하류에 속해 있는 각 비용배분 주체를 대상으로 사업시행을 위한 재원에 대해 논의해야 한다. 따라서 도출된 비용배분율을 기본으로 해서

표 10_비용배분율에 따른 상·하류 비용분담액

(단위: 백만 원)

유역	대상사업	사업비	상류(인천시)	하류(김포시)	비고
운양배수구역(나진포천)	운양배수펌프장 확장 + 나진천변저류지 + 계양천하류개수공사	147,580	79,147 (53.63%)	68,433 (46.37%)	
향산2배수구역(계양천)	향산2배수펌프장 확장 + 계양천변저류지	104,110	104,110 (100%)	- (0%)	상류 최대분담
			40,749 (39.14%)	63,361 (60.86%)	상류 최소분담
			72,429 (69.57%)	31,681 (30.43%)	최대치와 최소치 평균

주: 향산2배수구역의 경우 인천시의 최대 분담률은 100%, 최소 분담률은 39.14%임.

그림 2_운양배수펌프장 확장사업의 자원조달 방안

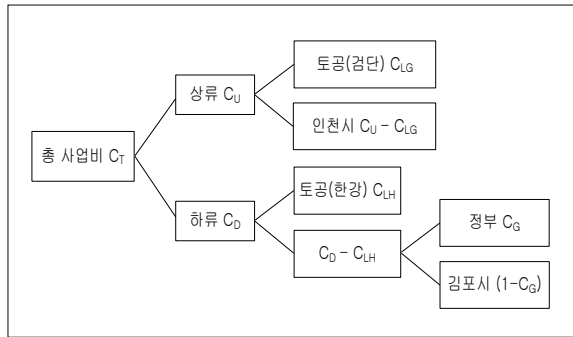


그림 3_운양배수펌프장 외 4개 사업의 자원조달 방안

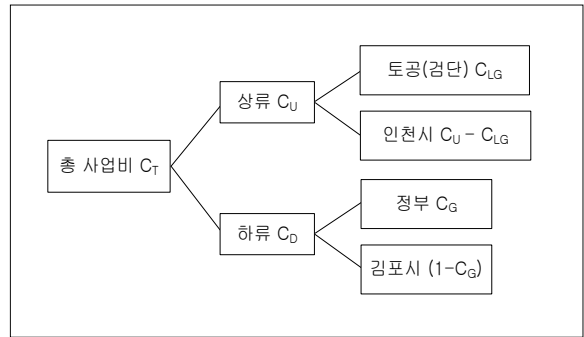


표 11_비용배분 대상사업별 자원조달 방안

배수구역	대상사업	중앙정부 소관부서	자원조달 방안			
			비용배분 주체	비용배분율		
운양 배수구역	운양배수 펌프장 확장사업	소방방재청 재해위험지구 정비사업	상류	한국토지주택공사(검단)	$k_1 \times 53.63\%$	
				인천시	$(1 - k_1) \times 53.63\%$	
			하류	한국토지주택공사(한강)	500억 원	
				중앙정부	$k_2 \times (46.37\% - 500\text{억 원})$	
		나진천변 저류지 건설사업	국토해양부 생태하천정비 사업	상류	한국토지주택공사(검단)	$k_1 \times 53.63\%$
					인천시	$(1 - k_1) \times 53.63\%$
				하류	중앙정부	$k_3 \times 46.37\%$
					김포시	$(1 - k_3) \times 46.37\%$
		계양천하류 하천 개수사업	국토해양부 재해예방사업, 경기도 하천정비사업	상류	한국토지주택공사(검단)	$k_1 \times 53.63\%$
					인천시	$(1 - k_1) \times 53.63\%$
				하류	중앙정부	$k_3 \times 46.37\%$
					김포시	$(1 - k_3) \times 46.37\%$
향산2 배수구역	향산2배수 펌프장 확장사업	소방방재청 재해위험지구 정비사업	상류	한국토지주택공사(검단)	$k_1 \times 39.14\%$	
				인천시	$(1 - k_1) \times 39.14\%$	
			하류	중앙정부	$k_2 \times 60.86\%$	
				김포시	$(1 - k_3) \times 60.86\%$	
		계양천변 저류지 건설사업	국토해양부 생태하천정비 사업	상류	한국토지주택공사(검단)	$k_1 \times 39.14\%$
					인천시	$(1 - k_1) \times 69.57\%$
				하류	중앙정부	$k_3 \times 30.43\%$
					김포시	$(1 - k_3) \times 30.43\%$

중앙정부의 재정보조 및 신도시 개발에 관련된 한국주택토지공사의 비용분담액을 고려하여 재원조달 방안을 결정할 수 있다. <그림 2>와 <그림 3>은 총사업비를 상·하류의 비용배분율에 따라 분담한 후, 관련된 비용배분 주체 간의 분담체계를 순차적으로 나타낸 것이다.

<그림 2>와 <그림 3>의 분담체계에 따라 본 논문에서 최종적으로 제안하는 사업별 재원조달 방안은 <표 11>과 같다. 표에서 k_1 은 한국토지주택공사(검단)와 인천시의 비용배분액에 대한 한국토지주택공사(검단)의 분담률이며 k_2, k_3 는 각각 소방방재청과 국토해양부의 김포시에 대한 재정보조 비율을 나타낸다. 이 비율들은 각 사업별로 비용배분 주체 간에 협의·조정될 수 있다. 향산2배수구역의 비용배분율은 잠정적으로 <표 10>에서 제시한 평균치를 이용하였다.

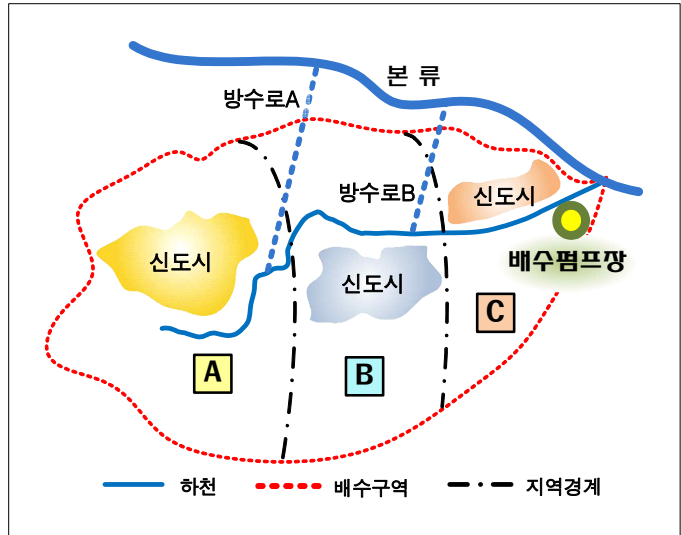
4. 다지역 비용배분으로의 확장

전절에서 기술하였듯이 본 연구의 비용배분 문제는 상·하류 양자 간 문제를 다루었기 때문에 SCRB법과 샤플리법에 따른 비용배분 결과가 같게 산정되었다. 따라서 본 절에서는 상·하류에 3개의 지역이 관계한 비용배분 상황을 가정하여 보다 일반적인 문제로 확대하는 동시에 두 방법에 의한 결과를 비교·검토함으로써 장·단점을 논의하고자 한다.

1) 3개 지역 간 가상 시나리오

3개 지역 간 가상의 비용배분 시나리오는 <그림 4>와 같이 A, B, C, 3개의 지자체가 하천을 공유한 상황을 가정하였다. 또한 가상의 유역은 김포시와

그림 4_3개 지역 간 비용배분의 가상 시나리오



인천시의 경우와 같이 각 지자체의 개발사업에 의해 홍수량이 증가할 것으로 예상된다. 증가된 홍수량 처리를 위한 홍수저감시설로는 A와 B지역의 경우 방수로를, C지역의 경우 배수펌프장을 고려할 수 있으며, 가장 효율적인 사업은 C지역이 계획하고 있는 배수펌프장이다.

3개 지역의 신도시 개발에 의한 홍수량 증가요인을 각각 S_A, S_B, S_C 라고 한다면, A와 B지역에서 자체적으로 사업을 수행하는 비용은 $C(p_A, S_A) = 700$ 억 원, $C(p_B, S_B) = 600$ 억 원, $C(p_B, S_A + S_B) = 900$ 억 원으로 산정되었다. 반면, C지역에서 모든 홍수량 증가분을 처리할 수 있도록 배수펌프장을 건설하는 비용은 $C(p_C, S_A + S_B + S_C) = 1$ 천억 원으로 산정되었다. 이제 세 지자체가 각기 연합하여 가장 효율적인 사업인 C지역의 배수펌프장 사업을 수행한다고 하자. 이때의 총사업비용 $C(p_C, S_A + S_B + S_C)$ 을 가능한 연합별로 독립적 사업 비용과 부가적 사업비용으로 분리하면 <표 12>와 같다.

가상 비용배분 시나리오의 협조적 게임 성립을 위해서는 III장의 3절에서 제시한 <식 2>와 <식 3>을 3자 게임으로 확장하여 <식 10>과 같은 필요조건

표 12_ 배수펌프장 사업에 대한 지역 간 비용의 분리

분류	지역	비용 (단위: 억 원)	
총비용		$C(p_C, S_A + S_B + S_C)$	1,000
독립적	A	$C(p_C, S_A)$	600
	B	$C(p_C, S_B)$	550
	C	$C(p_C, S_C)$	450
사업비용	A+B	$C(p_C, S_A + S_B)$	900
	A+C	$C(p_C, S_A + S_C)$	850
	B+C	$C(p_C, S_B + S_C)$	800
부가적	A	$C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_B + S_C)$	200
	B	$C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A + S_C)$	150
	C	$C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A + S_B)$	100
사업비용	A+B	$C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_C)$	550
	A+C	$C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_B)$	450
	B+C	$C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A)$	400

과 <식 11>과 같은 충분조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned}
 & C(p_C, S_A) + C(p_C, S_B) + C(p_C, S_C) = 1600 \\
 & > C(p_C, S_A) + C(p_C, S_B + S_C) = 1400 \\
 \text{and } & C(p_C, S_B) + C(p_C, S_A + S_C) = 1400 \\
 \text{and } & C(p_C, S_C) + C(p_C, S_A + S_B) = 1450 \\
 & > C(p_C, S_A + S_B + S_C) = 1000 \\
 & > C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_B + S_C) \\
 & + C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A) = 600 \\
 \text{and } & C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A + S_C) \\
 & + C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_B) = 600 \\
 \text{and } & C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A + S_B) \\
 & + C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_C) = 650 \\
 & > C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_B + S_C) \\
 & + C(p_C, S_A + S_B + S_C) - C(p_C, S_A + S_C) \\
 & + C(p_C, S_A + S_B + S_C) - \\
 & C(p_C, S_A + S_B) = 450 \qquad \langle \text{식 10} \rangle
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & C(p_A, S_A) \geq C(p_C, S_A) \\
 & C(p_B, S_B) \geq C(p_C, S_B) \\
 & C(p_B, S_A + S_B) \geq C(p_C, S_A + S_B) \\
 & \qquad \qquad \qquad \langle \text{식 11} \rangle
 \end{aligned}$$

2) SCRB법 및 샤플리법에 의한 비용배분액의 비교

<표 12>의 배수펌프장 사업비용을 바탕으로 SCRB법을 적용하여 각 지자체의 비용 배분액을 산정하면 <표 13>과 같다. SCRB법은 비용배분 주체가 3개 지역으로 증가하였음에도 그 산정절차가 비교적 간단하다. 다음으로 샤플리법에 의한 A, B, C 지역의 비용배분액은 각각 <식 12>에서 <식 14>와 같다.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{(A)} &= \frac{(0)!(2)!}{3!} [600 - 0] + \frac{(1)!(1)!}{3!} [900 - 550] \\
 &+ \frac{(1)!(1)!}{3!} [850 - 450] + \frac{(2)!(0)!}{3!} [1000 - 800] \\
 &= 391.67 \qquad \langle \text{식 12} \rangle
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{(B)} &= \frac{(0)!(2)!}{3!} [550 - 0] + \frac{(1)!(1)!}{3!} [900 - 600] \\
 &+ \frac{(1)!(1)!}{3!} [800 - 450] + \frac{(2)!(0)!}{3!} [1000 - 850] \\
 &= 341.67 \qquad \langle \text{식 13} \rangle
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{(C)} &= \frac{(0)!(2)!}{3!} [450 - 0] + \frac{(1)!(1)!}{3!} [850 - 600] \\
 &+ \frac{(1)!(1)!}{3!} [800 - 550] + \frac{(2)!(0)!}{3!} [1000 - 900] \\
 &= 266.67 \qquad \langle \text{식 14} \rangle
 \end{aligned}$$

샤플리법의 적용 결과를 살펴보면, 계양천 및 나진포천의 비용배분 사례와 비교할 때, 배분주체가 1지역 증가하였지만 고려되는 연합의 수는 3개(상류, 하류, 상류+하류)에서 7개(A, B, C, A+B,

표 13 _ SCRB법에 의한 비용배분액 산정

(단위: 억 원)

배수펌프장(총사업비: 1,000)			
SCRB 적용절차	A	B	C
① 대체건설비	600	550	450
② 분리비용	200	150	100
③ 잔여편익	400	400	350
④ 잔여편익률(%)	34.78	34.78	30.43
⑤ 분리비용 제외 부담액	191.30	191.30	167.39
⑥ 각 사업비	391.30	341.30	267.39

A+C, B+C, A+B+C)로 증가하였다. 즉, 샤플리법은 비용배분 주체가 늘어날수록 고려해야 할 연합의 수가 크게 증가하므로 독립적 사업비용의 산정이나 계산식이 까다로워지는 단점이 있다. 그러나 협조적 동기가 가장 강한 배분주체들 간에 선배분 후 순차적으로 나머지 배분주체들을 포함시켜 배분한다면 고려해야 할 연합이 단순화되므로 이러한 단점을 해결할 수 있다. 두 방법에 의한 비용배분액을 비교하면, 각 지역별 비용배분액의 차이가 SCRB법보다 샤플리법에서 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 SCRB법보다 샤플리법에서 보다 많은 연합의 형성을 고려하여 각 연합으로 인해 발생하는 한계비용의 가중평균값을 각 비용배분 주체의 부담액으로 산정하기 때문이다.

본 가상 시나리오는 지역별 독립적 사업비용의 차이가 크지 않아 SCRB법에 비해 두드러진 효과가 나타나지는 않았으나, 지역별로 비용배분액의 차이가 클 경우에는 SCRB법보다 샤플리법을 사용하는 것이 높은 비용을 부담하게 되는 배분주체 또는 배분연합의 이탈을 방지할 수 있는 장점이 있다. 따라서 하천 치수관리를 위한 상·하류 비용배분 문제해결에 있어서 샤플리법을 사용하는 것이 더 바람직할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구의 대상지역인 계양천 및 나진포천 유역은 한강신도시 및 검단신도시 등의 신도시 개발로 급격한 도시화가 진행되고 있다. 이에 따라 유역 전반에 걸쳐 홍수유출량이 급증할 것으로 예상되므로 이를 위해 계획된 치수사업에 대한 상·하류 지자체 간 비용배분의 문제가 제기되고 있다. 본 연구는 김포시가 추진하는 계양천 및 나진포천 치수사업의 비용에 대해 상류인 인천

시 및 중앙정부 등 관련 당사자들 간의 비용분담 방안 도출을 목적으로 하였다. 이를 위해 협조적 상황하에서 대상 비용배분 문제를 정의하였고, 협조적 게임이론에 근거한 SCRB법 및 샤플리법을 적용하고 상·하류 간 비용배분 결과를 제시하였다.

SCRB법과 샤플리법은 비용배분 과정에서 각 주체별 이익을 계량화할 필요 없이 상대적으로 산정이 쉬운 비용만으로도 적용이 가능한 장점이 있어 향후 비슷한 유형의 비용배분 문제에 손쉽게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 두 방법은 각 배분 주체의 한계비용을 고려한다는 점에서는 매우 유사하지만 양자 이상이 참여하는 비용배분 문제에서는 다양한 비용배분 연합을 고려할 수 있는 샤플리법이 더 적절한 방법인 것으로 판단되었다.

한편, 하천치수나 수질관리와 같은 공공재의 문제에 있어서는 소비의 비배재성(non-exclusion)으로 인해 비용분담에 참여 여부가 매우 중요한 전략변수가 될 수 있다. 하천 치수관리를 예로 들면, 상류지역이 하천 상·하류 간 일방적 구조를 이용해 비용배분 협상을 장기화하거나 소극적으로 임하는 전략적 행태를 보일 경우 상대적으로 홍수피해 위험이 클 수밖에 없는 하류지역의 협상력은 저하되고 더 많은 비용을 부담할 수밖에 없게 된다.

이러한 비협조적 상황이 전개될 경우 원인자부담 원칙이나 수혜자부담원칙과 같은 당위적 주장들은 순수하게 이해관계에 따른 전략적 행태하에서 지지될 수 없기 때문에 경제적 효율성도 저하될 것이다. 물론 이 같은 비협조적 게임의 예는 원인제공자 채무의무에 의한 상류의 제약조건이 없다는 가정에서 가능하다. 이러한 비협조적 상황에서는 중앙정부의 조정 및 통제라는 변수가 합의 도출에 중요한 역할을 할 수 있다. 즉, 상·하류에 대한 유출 홍수량 제한과 같은 정책변수를 통해 자발적인 협동은 아니더라도 상호 의존적인 상황을 연출하여 해를 도출할 수 있다.

본 연구와 같은 비용배분 문제는 과거에도 다수 발생되었던 사례이나 중앙집권적 행정체제에서는 대개 중앙정부에 의해 내부적으로 조정되었기 때문에 크게 부각되지 않았을 뿐이다. 하도정비 위주의 선적인 치수개념과 행정구역 단위의 제도적 관리 체계가 과거 수십 년간 지속되어 오면서 하천관리에서의 문제점들은 계속 누적되어 왔다.

그러나 최근 들어 홍수량의 유역분담 원칙을 확립하고자 하는 노력이 경주되고 있는 반면, 지방자치는 더욱 고도화되고 있어 자연적인 유역의 특성과 행정적인 관리체계가 모순되는 상황이 불거지고 있다. 계양천과 나진포천의 하천관리 비용배분 문제는 이와 같은 상황의 전형으로서 향후 중앙정부, 지자체, 사회단체들 간에 비슷한 유형의 크고 작은 갈등이 끊이지 않을 것으로 우려된다. 우리는 본 연구가 이 같은 비용배분 문제를 해결하는 데 활용될 것과, 지역 간 물 분쟁이나 비용배분 문제의 해결을 위한 관련 연구가 더욱 활성화되기를 기대한다.

참고문헌

- 경기도. 2008. 계양천 및 나진포천 하천기본계획 보고서.
 ———. 2009. 계양천하류 개수공사 실시설계 보고서.
 김상우·이정전. 2006. “광역상수도 비용배분문제에 대한 게임 이론접근법 도입방안 연구”. 대한·국토도시계획학회 지 제41권 제3호. 서울 : 대한·국토도시계획학회. pp203-216.
 김포시. 2007. 자연재해 위험지구 지정 타당성조사.
 Driessen, T. S. H. 1988. *Cooperative Games, Solutions and Applications*. Massachusetts : Kluwer Academic Publishers.
 Driessen, T. S. H. and Tijs, S. H. 1986. “The Cost Gap Method and Other Cost Allocation Methods for Multipurpose Water Projects”. *Water Resources Research* vol.21, no.10. Washington, DC : American Geophysical Union. pp1469-1475.
 Federal Inter-Agency River Basin Committee. 1950. *Proposed Practices for Economic Analyses of River Basin Projects*. Washington, DC : Federal Inter-Agency River Basin Committee.
 Loughlin, J. 1977. “The Efficiency and Equity of Cost Allocation Methods for Multipurpose Water Projects”. *Water Resources Research* vol.13, no.1. Washington, DC : American Geophysical Union. pp8-14.
 Mahjouri, N. and Ardestani, M. 2009. “A Game Theoretic Approach for Interbasin Water Resources Allocation Considering the Water Quality Issues”. *Environmental Monitoring and Assessment Published Online*. doi:10.1007/s10661-009-1070-y.
 Parker, T. 1943. “Allocation of the Tennessee Valley Authority Projects”. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* vol.108. Virginia : ASCE Publications. pp174-187.
 Ransmeier, J. S. 1942. *The Tennessee Valley Authority; A Case Study in the Economics of Multiple Purpose Stream Planning*. Nashville(Tennessee) : Vanderbilt University Press.
 Sadegh, M. Mahjouri, N. and Kerachian, R. 2009. “Optimal Inter-Basin Water Allocation Using Crisp and Fuzzy Shapley Games”. *Water Resources Management Published Online*. doi:10.1007/s11269-009-9552-9.
 Serghini, M. 2003. “La Problematique de l'Allocation des Coûts de Mobilisation des Ressources en Eau”.

- Hommes Terre & Eaux* vol.32, no.124, Morocco : ANAFIDE, pp20-24.
- Shapley, L. S. 1953. "The Value of an n-Person Game". Kuhn, H. W. and Tucker, A. W(eds). *Contributions to the Theory of Games* vol.2, Princeton : Princeton University Press, pp307-317.
- Shapley, L. S. and Shubik, M. 1954. "A Method for Evaluating the Distribution of Power in a Committee System". *American Political Science Review* vol.48, Washington, DC : American Political Science Association, pp787-792.
- Straffin, P. and Heaney, J. 1981. "Game Theory and the Tennessee Valley Authority". *International Journal of Game Theory* vol.10, no.1, Vienna : Physica Verlag, pp35-43.
- Wang L, Fang L, and Hipel K. W. 2008. "Basin-wide Cooperative Water Resources Allocation". *European Journal of Operational Research* vol.190, no.3, Amsterdam : Elsevier Science, pp798-817.
- Young, H. P. 1994a. "Cost Allocation". eds. Aumann, R. J. and Hart, S. *Handbook of Game Theory* vol.2, Amsterdam : Elsevier Science, pp1215-1217.
- _____. 1994b. *Equity: in Theory and Practice*. New Jersey : Princeton University Press.

-
- 논문 접수일: 2010. 1.11
 - 심사 시작일: 2010. 1.20
 - 심사 완료일: 2010. 2. 3

ABSTRACT

Cost Allocation between Upstream and Downstream Regions for Flood Mitigation Management

Keywords: Cost Allocation, Flood Mitigation, SCRB, Shapley Value, Cooperative Game Theory

Since the river usually flows over several regions, there may have the cost allocation issues for constructing flood protection measures in flood mitigation management. The purpose of this study is to suggest an alternative for the solution of a cost allocation issue that usually occurs at planning projects for flood mitigation management. As a case study, we selected the cost allocation issue in constructing flood protection measures in Najinpo and Gyeoyang rivers, which are tributaries of Han river and flow through Incheon in upstream and Gimpo in downstream, and suggested the inter-regional cost allocation method from the case study. The theoretical approach for the cost allocation was based on the cooperative game theory, and in terms of methodology, we used the SCRB (Separable Cost Remaining Benefit) and Shapley value method which are comparatively easy to apply. From the study, the cost allocation ratio between upstream and downstream regions are approximately 54% vs. 46% in Najinpo river basin and 70% vs. 30% in Gyeoyang river basin respectively. This study is expected to provide an alternative for solving the similar cost allocation problems for flood mitigation management which may be occurred frequently in the future between two or more regions, especially upstream and downstream.

하천 치수관리를 위한 상·하류 지역 간 비용배분

주제어: 비용배분, 치수, 분리비용잔여편익법, 샤플리법, 협조적 게임이론

일반적으로 하천은 여러 지역에 걸쳐 흐르기 때문에 하천 치수관리를 위한 홍수방어시설물들을 건설할 때에 대해 발생하는 비용에 대하여 상·하류 지역 간 비용배분의 문제가 발생하게 된다. 본 연구의 목적은 유역 내 치수관리를 위한 사업계획 시 발생하는 비용배분 문제해결의 대안을 제시하는 것이다. 이를 위한 사례연구로서 본 연구는 한강 지류인 나진포천 및 계양천의 홍수방어 시설 건설에 따른 비용배분 문제를 선정하였고, 상류인 인천시와 하류인 김포시 간의 지역 간 비용배분 방안을 제시하였다. 비용배분의 해법을 위한 이론적 전개는 협조적 게임이론을 바탕으로 하였고, 방법론 측면에서는 비교적 적용이 간편한 분리비용잔여편익법 및 샤플리법을 사용하였다. 분석결과, 상류와 하류 간의 비용배분 비율은 나진포천 유역에서 약 54% : 46%, 계양천 유역에서 약 70% : 30%로 각각 나타났다. 본 연구는 둘 이상의 지역 간, 특히 상류와 하류 간에 향후 빈번하게 발생할 것으로 보이는 유사한 하천 치수관리 비용배분 문제의 해결을 위한 대안을 제시할 것으로 기대된다.