

유역 물관리를 위한 최적 물배분 방식에 대한 연구

이진희⁺ / 이동률^{**} / 이충성^{***} / 문장원^{****}

A Research on Optimal Water Allocation Methodology for Water Management in River Basin

Lee, Jin-Hee⁺ / Lee, Dong-Ryul^{**} / Yi, Choong-Sung^{***} / Moon, Jang-Won^{****}

요약 : 인구가 증가하고 경제가 발전하면서 한정된 수자원에 대한 다양한 수요자의 수자원 확보 경쟁이 발생하고 있다. 이러한 현실로 인해 법과 제도에 의한 물배분에 대한 관심이 커지고 있는 실정이다. 본 논문에서는 한정된 수자원을 확보하기 위한 수요자에게 배분하기 위한 유역 전체를 고려한 최적의 물배분 기법을 개발하였다. 이러한 물배분 기법은 유역 전반에 걸친 분석을 고려할 때 최적화 기법에 의존할 수밖에 없으며 제시된 모형은 경제적 효율성, 형평성, 지속가능성의 목적을 달성하기 위하여 노력하였다. 적절한 사례연구를 통하여 기존의 수리권 시스템과 더불어 제시된 모형을 검토 되었다. 도출된 결과는 복잡한 수문학적 시스템뿐만 아니라 법적, 제도적 제약조건 하에서의 적용성을 보여 주고 있다.

핵심용어 : 물배분, 유역 물관리, 물수지, 최적물배분, 공공물배분, 경제적물배분

Abstract : As populations expand and economies develop, increasing competition for limited available water resources is occurring among many water users. This has brought greater attention to water allocation with legal and institutional constraints. This paper develops a optimal water allocation methodology to basinwide water resources allocation, which ensures that scarce water resources are allocated among competing water users. The methodology need to be based on optimization technique to allocate water resources due to an extended scaled of river basin. The recommended model is developed to accomplish economic efficiency, equity and sustainability objectives. The appropriate case study is tested with various existing water right system allocation model and the recommended model. The result shows the applicability of model to the complex hydrologic system with legal and institutional constraints.

Keywords : Water Allocation, Riverbasin Water Management, Water Budg et, Optimal Water Allocation, Public Water Allocation, Economic Water Allocation

1. 서 론

한정된 수자원에 대한 수요가 급증하고 수질 및 환경문제가 대두되면서 유역차원의수자원 계획 및 관리에 대한 관심이 커지고 있는 실정이다. 이러한 수자원 계획 및 관리는 물리적으로 복잡

해진 수자원 시스템뿐만 아니라 사회적, 제도적 시스템을 반영할 필요성이 생겼으며 수자원 계획 및 관리자들과 의사결정에 도움을 주기 위하여 효율적인 여러 대안들의 평가나 수자원 관리가 필수적이다. 효율적인 수자원 계획 및 관리에 있어서 물배분은 매우 중요하며 이를 통해 급증하는

+ Corresponding author : jinheelee@inha.ac.kr
* 정회원 · 교신저자 · 인하대학교 사회기반시스템공학과 연구교수
** 비회원 · 한국건설기술연구원 책임연구원
*** 비회원 · 인하대학교 수자원시스템연구소 선임연구원
**** 비회원 · 한국건설기술연구원 연구원

용수 수요에 효과적으로 대처하고 합리적인 수자원 관리를 실현할 수 있을 것이다.

일반적으로 수자원장기종합계획과 같은 장기간의 수자원계획 분야에 있어서의 수자원 관리는 물수지 분석으로 대별되며 그 과정은 장래 용수 수요량에 대한 자연유량을 비교 검토하여 물부족량을 계산하게 된다. 반면, 수자원 운영측면에서의 단기간의 유역 물관리는 법적, 제도적 현실하에서 실제 수요지점등을 반영한 정교한 모형의 구축하고 유역내의 물부족을 평가하기 때문에 보다 효율적인 물배분에 의한 영향을 검토할 필요성이 생긴다.

특히, 갈수 및 가뭄 등의 시기에 물이 심각하게 부족할 경우 하천유역의 각 물수요량을 상류에서 하류로의 단순한 물배분 방식은 상류단의 물수요량을 만족시킬 수 있지만 하류단의 물수요량을 전혀 만족시킬 수 없어 형평성에 문제가 발생할 수 있다. 이처럼 유역 물관리를 위해서는 물배분이 매우 중요하며 수문학적 제약 하에서 법적, 제도적 체제를 반영하여 공평하고 효율적이며 지속가능한 물배분이 유도되어야 한다.

일반적으로 유역차원의 물배분을 모의하기 위해서는 그 복잡성 때문에 외국의 경우WEAP(SEI, 2005)이나 MODSIM(KIWE, 2005)등의 물수지 모형을 사용하고 있다. 기본적으로 WEAP과 MODSIM은 모두 시물레이션 모형 내부에 최적화 기법이 포함된 형태의 물배분 모형으로 선형계획법(Linear Programming: LP)와 선형계획법의 한 형태인 네트워크 비용최소화 알고리즘을 사용하고 있다. 하지만, 이들 모형들은 주로 미국의 수리권에 기반을 두고 있기 때문에 다양한 물배분 방식을 적용시키기에는 그 한계가 있다.

본 연구에서는 유역 물관리에 적용하기 위한 물배분 방식에 대한 연구로서 법적, 제도적 체제를 반영하여 공평하고 효율적이며 지속가능한 물배분을 유도하고자 한다. 이를 위해서 먼저 물배분의 기본원리들을 살펴보고 현존하는 물배분 방식 즉, 선점주의(Prior Appropriation), 연안주의(Riparian), 수정 연안주의, 경제적 물배분 등을

검토하고자 한다. 검토된 모형들은 유역의 물관리에 적용하기 위해 각각 최적화 기법을 통해 모형을 구성하고 수자원 관리자가 현업에서 효율적인 의사결정을 지원할 수 있도록 최적 물배분 방식을 제시하고자 한다.

2. 물배분 메카니즘 연구

2.1. 물배분의 기본원리

물배분이란 기본적으로 다양한 용수 수요처가 한정된 물을 어떻게 공유할 것인가 하는 것으로 간단히 정의 할 수 있다. 좀 더 상세하게 물배분은 현존하는 수자원 시스템을 물리적, 제도적 체제하에서 수자원을 효율적으로 사용하기 위하여 수요자와 공급자간의 동적 상호작용으로 정의 할 수 있다. 포괄적으로 물배분의 목적은 공공의 이익을 향상시키는데 있지만 이를 세분하면 사회적, 경제적, 환경적 요소로 분류할 수 있다. 여기서 개개의 목적은 형평성(equity), 효율성(efficiency), 지속가능성(sustainability) 등의 분배 원칙을 포함하고 있다.

- **형평성(equity):** 형평성은 하천 유역의 수자원을 여러 이해당사자에 대하여 공평하게 분배하는 것을 의미하는 것으로 전통적으로 정부 주도하에 이루어져 오고 있다. 이런 형평성은 현재의 물 사용자뿐만 아니라 미래의 사용자에게도 적용되어야 하며 수량뿐만 아니라 수질의 문제도 고려 대상이 되어야 한다. 따라서 물배분 과정에 대한 사전에 협의된 규칙이 필요하게 되는데 특히 물이 부족한 지역이나 시기에 있어서 이런 물배분 협의는 매우 중요하다고 하겠다. 이런 물배분 방법이나 협의는 양적 질적으로 공평하게 관련 이해 당사자의 요구를 충분히 반영해야 한다. 이는 사회적 기본요구를 실현할 수 있는 청청수, 물에 대한 공중위생, 식량 확보 문제 등이 포함된다.

- **효율성(efficiency):** 효율성은 수자원의 경제적 가치에 의한 물 사용을 의미하며 비용의 최소화 와 편익의 극대화에 따른 분배를 추구한다. 이

를 실현하기 위해서는 물에 대한 공정한 양도가 보장되고 지속가능성과 수요관리가 가능하다면 가능하다. 하지만 효율성은 단순히 원수의 확보뿐만 아니라 물의 확보 지점에서 사용지점으로 물리적인 취수 및 전달 등이 고려되어야 하기 때문에 실현되기 매우 어렵다. 또한 이러한 원칙 하에서는 상대적으로 물의 가치가 낮은 농업용수의 공업용수나 생활용수로의 전용이 매우 쉽게 이루어지기 때문에 이를 충분한 보상할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 결과적으로 효율성은 생산물의 경제가치의 최대화를 의미하므로 농업 및 산업의 발전, 수력발전, 지역개발, 지역경제 등이 포함되어야 한다.

- **지속가능성(sustainability):** 지속가능성은 환경적으로 현재와 미래의 건전한 수자원 사용을 의미한다. 이런 지속가능성은 현재 수자원의 이용이 향후 수자원의 이용에 지장을 주지 않는다는 전제하에서 이루어져야 하며 환경적으로 수질의 보전, 하천 주변의 생물 및 서식지의 보호, 자연경관 등이 포함된다.

2.2. 물배분 기법

물배분에 있어서 가장 중요한 것으로 누구의 물인가 하는 것이다. 세계 각국은 각국 실정에 맞는 수리권 시스템을 보유하여 수자원 계획, 보전, 분배의 문제를 해결하고 있다. 최근 들어 수리권 시스템 이외에 경제적 효율성을 우선으로 하는 한계비용에 의한 분배나 물시장에 의한 분배 등이 연구되고 있다. 우선 수리권에 의한 물분배로 연안주의와 이에 파생된 수정 연안주의, 선점주의에 대하여 알아보고, 한계비용에 의한 분배와 물시장에 의한 분배를 알아보도록 한다.

- **연안주의(Riparian):** 연안주의는 물을 공공재로 취급하고 있으며 비교적 수량이 풍부한 지역에서 발달하였다. 수리이용권은 물과 인접하거나 물위에 속한 토지 소유주에게 주어진다. 연안주의는 합리적이용(reasonable use)에 근거한 순수 연안주의와 호혜적권리(correlative rights)를 바탕으로

로 한 수정 연안주의 두 가지 형태로 변화하였다. 합리적 이용은 물과 인접한 토지 소유주가 다른 소유주의 합리적 이용에 방해되지 않는 한도 내에서 자신의 합리적인 물사용에 제약을 받지 않는다. 따라서 물부족량에 대해서 부족량에 대한 형평성이 고려되지 못한다. 호혜적권리는 연안 토지 소유주의 하천에 인접한 땅의 비율만큼 물을 분배함으로써 물사용자 상호간의 형평성이 고려되고 있다. 미국의 몇몇 주의 경우 전통적인 연안주의에 허가시스템을 도입한 경우도 찾아 볼 수 있다.

- **선점주의(Prior Appropriation):** 물의 사유권을 인정하는 시스템으로 먼저 물을 사용함으로써 물에 대한 사용 권리를 갖게 되는 시스템으로 물부족이 많은 지역에서 형성되었다. 특히, 물부족에 대한 분배가 이루어지지 않아 하위수리권 소유자는 반드시 상위 수리권자의 물사용이 충족된 이후에 물사용이 가능하게 된다.

- **행정규제에 의한 공공 분배(Administrative Public Allocation):** 정부 주도하에 허가수리권을 발행하고 물배분을 실시한다. 분배원칙은 물을 공공재로 취급하며 사회적, 정치적 합의에 의한 분배가 이루어지도록 하고 있다. 이러한 분배 원칙의 장점으로는 형평성을 고려한 물배분을 가능하게 하여 물이 부족한 지역까지 물배분이 가능하도록 함으로서 극빈자와 환경용수의 확보 및 최소수량의 공급이 가능하도록 할 수 있다. 단점으로는 물이 효율성 보다는 수리권 위주로 분배되기 때문에 수자원 보존 및 물의 경제적 이용, 물이 최상의 편익을 발생시키도록 분배 되는 것이 어렵게 된다.

- **한계비용가격에 의한 분배(Marginal Cost Pricing: MCP):** 물이 분배되었을 때 한계비용이 같아지도록 물 값을 결정하여 물을 분배하는 것으로 이론적으로 물 값을 현실화하여 과도한 물사용을 억제하는 효과가 있어 물사용에 대한 효율성이 보장된다. 단점으로는 이러한 한계비용은 다양한 물사용자를 포함하고 있으며 시간에 대한 다른 값이 도출되기 때문에 고정된 한계비용을 구하는 것이 매우 어렵다. 또한 어떤 수준까지 물 가격이

상승하게 되면 저소득층에 대한 부정적 영향이 생기게 된다.

- **물시장에 의한 분배(Water Markets based Allocation):** 물시장에 의한 분배는 주어진 물 사용을 주변 물사용자와의 협의 하에 일시적으로 전환하는 것과 수리권의 영구적인 전매에 의한 분배를 의미한다. 일단 물시장이 형성되면 공급가가 싸게 책정된 수요처에서 물의 공급가가 비싸게 책정된 수요처로 전매가 이루어져 물의 매도자와 매수자는 모두 이윤을 증대시킬 수 있으며 물의 효율적인 이용에 도움이 될 수 있다. 단점으로는 물시장을 형성하기 위한 기존 수리권의 정의, 수리권 전매가 이루어질 수 있는 법적 제도적 틀의 마련, 물이동이 가능할 수 있는 수자원 인프라의 구축, 제3자효과와 파악 등이 선행되어야 한다.

3. 최적화를 기법을 이용한 최적 물배분 방법 제시

일반적으로 유역차원의 물배분을 모의하기 위해서는 그 규모와 법적 제도적 복잡성 최적화 기법을 이용한 물배분 모형이 필수적이다. 본 연구에서는 선형계획법(Linear Programming: LP)을 이용하여 수리권 및 물배분 기법들을 목적함수와 제약조건을 구성한 수학적 모형을 구축하고 이들을 바탕으로 최적 물배분 모형을 제시하고자 한다. 관련 항목 중 물시장에 의한 배분은 물사용자들의 자발적인 거래에 의한 것으로 적용상의 어려움으로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

우선, 연안주의의 경우 앞서 언급한 대로 순수 연안주의와 수정 연안주의에 나누어진다. 먼저 순수 연안주의 모형을 살펴보면 순수 연안주의의 특성상 상류의 수리권자가 먼저 취수 하게 되고 그 사용량에 대해서도 제약을 받지 않는다. 따라서 목적함수는 수요처 i의 취수량 W_i 에 대하여 상류(큰값)로부터 하류(작은값)로 우선순위 계수 P_i 를 부여하여 이들의 곱인 $P_i W_i$ 를 최대화하는 취수량 W_i 를 결정하게 된다. 제약조건으로는 하천의 주

요지점(합류지점, 취수지점, 회귀수의 회귀지점, 저수지)과 하천구간(각 주요지점의 연결 링크)에서의 연속 방정식과 취수지점의 취수량에 대한 최대수요량(D_i) 제약 및 저수지 방류량(r_k) 제약식으로 구성되며 다음과 같은 수학적 모형으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \max \quad & P_i W_i \\ \text{s.t.} \quad & NF_{i(in)} - NF_{i(out)} + NF_{i(return)} - W_i = 0 \\ & LF_{j(in)} - LF_{j(out)} - LF_{j(loss)} = 0 \\ & S_k - S_k' + i_k - r_k = 0 \\ & S_k' = S_{target} \\ & W_i \leq D_i \end{aligned}$$

여기서,

$NF_{(in)}$: 하천의 주요지점 i로의 유입량 (비저수지 지점)

$NF_{(out)}$: 하천의 주요지점 i에서의 유출량 (비저수지 지점)

$NF_{(return)}$: 하천의 주요지점 i로의 회귀량 (비저수지 지점)

W_i : 하천의 주요지점 i에서의 취수량

$LF_{(in)}$: 하천구간 j의 상류 유입량

$LF_{(out)}$: 하천구간 j의 하류 유출량

$LF_{(loss)}$: 하천구간 j의 손실량 (침투 손실)

D_i : 개별 수요처 i에서의 수요량

S_k : 저수지 k의 초기 저수량

S_k' : 저수지 k의 말기 저수량

S_{target}' : 저수지 k의 말기 목표 저수량

i_k : 저수지 k의 순유입량 (강수량, 증발량, 침투량 고려)

r_k : 저수지 k의 방류량

P_i : 상류(큰값)로부터 하류(작은값)로 주어지는 우선순위 계수

수정 연안주의 목적함수는 최종 수요충족률 FC를 최대화하는 것으로 최종 수요충족률 FC는 취수량 W_i 를 수요량 D_i 으로 나눈 개별 수요충족률 FC_i 의 최소값 중 최대값이다. 따라서 최종 수

요충족률 FC는 취수량 W_i 에 의해 결정되게 된다. 제약조건은 연안주의와 동일하며 최종 수요충족률과 개별 수요처의 수요충족률의 제약조건을 추가하면 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \max \quad & FC \\ \text{s.t.} \quad & NF_{i(\text{in})} - NF_{i(\text{out})} + NF_{i(\text{return})} - W_i = 0 \\ & LF_{j(\text{in})} - LF_{j(\text{out})} - LF_{j(\text{loss})} = 0 \\ & S_k - S_k' + i_k - r_k = 0 \\ & S_k' = S_{\text{target}} \\ & W_i \leq D_i \\ & FC_i = W_i/D_i \\ & FC \leq FC_i \end{aligned}$$

여기서, FC: 최종 수요충족률

FC_i : 개별 수요처의 수요충족률

선점주의 물배분의 경우 상위수리권자가 물사용의 우선순위를 갖게 되므로 순수 연안주의와 비슷하게 모형의 구축이 가능하다. 순수 연안주의 경우 상류의 수리권자가 보다 높은 가중치를 갖게 되지만 선점주의에서는 상위수리권 순서대로 큰 값의 우선순위 계수 P_i 를 분배하면 된다. 따라서 목적함수는 우선순위 계수와 취수량의 곱인 $P_i W_i$ 를 최대화하는 W_i 를 결정하게 된다. 다른 제약조건은 순수 연안주의와 동일하며 이를 수학적 모형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max \quad & P_i W_i \\ \text{s.t.} \quad & NF_{i(\text{in})} - NF_{i(\text{out})} + NF_{i(\text{return})} - W_i = 0 \\ & LF_{j(\text{in})} - LF_{j(\text{out})} - LF_{j(\text{loss})} = 0 \\ & S_k - S_k' + i_k - r_k = 0 \\ & S_k' = S_{\text{target}} \\ & W_i \leq D_i \end{aligned}$$

여기서, P_i : 수리권에 의해 주어지는 우선순위 계수(상위 수리권이 큰값)

한계비용가격에 의한 물배분의 경우 각 수요자에 대한 물의 단위가격에 대한 비용과 수익을 고려하여 가장 경제적으로 효율성을 구현할 수 있는

곳으로 물을 배분하는 것이다. 이때 선형계획법으로 이를 구현하기 위해서는 취수량에 대한 각 단위별 수익과 한계비용가격을 이용하여 순편익 곡선을 유도하고 유도된 곡선은 비선형이므로 구간선형화하여 각 구간에 대한 한계순편익 계수 B_i 를 구하는 것이 필요하다. 따라서 목적함수는 취수량에 대한 한계순편익계수의 곱인 $B_i W_i$ 를 최소화 하는 W_i 를 결정하게 된다. 다른 제약조건은 순수 연안주의나 선점주의와 동일하며 이를 수학적 모형으로 나타내면 다음과 같다. 이때 W_i 는 같은 지점에 취수되더라도 구간취수량으로 분리된 취수량이다.

$$\begin{aligned} \max \quad & B_i W_i \\ \text{s.t.} \quad & NF_{i(\text{in})} - NF_{i(\text{out})} + NF_{i(\text{return})} - W_i = 0 \\ & LF_{j(\text{in})} - LF_{j(\text{out})} - LF_{j(\text{loss})} = 0 \\ & S_k - S_k' + i_k - r_k = 0 \\ & S_k' = S_{\text{target}} \\ & W_i \leq D_i \end{aligned}$$

여기서, B_i : 한계 순편익 계수(구간별 수량에 대한 순편익)

앞서 언급된 물배분 기법들은 앞 절에서 살펴본 대로 각각 장단점이 있으며 물배분 기본원리 차원에서 살펴볼 필요가 있다. 지속가능성을 제외하고 형평성과 효율성을 고려해 보면 순수 연안주의, 선점주의, 한계비용가격에 분배의 경우는 상류의 수요자, 상위 수리권 소유자, 한계 순편익을 발생하는 곳으로 배분되기 때문에 형평성에 취약점이 나타날 수 있으며 수정 연안주의의 형평성이 매우 잘 고려되고 있으나 경제적으로 효율적인 물배분이라고 보기는 어렵다. 이에 대해 본 논문에서는 형평성과 경제적인 효율성을 동시에 고려한 물배분 모형을 제시하고자 한다.

목적함수는 개별 수요처의 최소 수요량에 대한 최종 수요충족률 FC를 최대화하는 것과 연안주의와 선점주의 물배분의 우선순위 계수 P_i 또는 한계비용가치 물배분의 한계 순편익 계수 B_i 와 나머지 충족되지 않은 수요량에 대한 곱인

$X_i(AW_i)$ 를 최대화하는 것의 두 가지로 나누어진 다. 이때 형평성이 우선 고려되어야 하기 때문에 FC에 대한 가중치 E에 X_i 보다 큰 값을 부여함으로써 최소 수요량을 먼저 충족시켜주게 되며 나머지 취수량에 대하여 물리적으로 물배분이 가능한 양 만큼 우선순위에 의해 분배되게 된다. 만일 나머지 수요량에 대해서 수정 연안주의가 적용되어야 하는 경우라면 X_i 에 0을 부여하고 MD_i 를 개별 수요처 i의 수요량 D_i 와 같게 함으로서 물배분이 가능해진다. 최종적으로 이들 목적함수를 최대화 하는 MW_i 와 AW_i 를 구할 수 있으면 수요처 i의 최종 취수량은 이들의 합으로 결정된다. 나머지 제약조건은 다른 물분배 기법에서 적용한 것과 동일하게 구성된다.

$$\begin{aligned} \max \quad & E(FC) + X_i(AW_i) \\ \text{s.t.} \quad & NF_{i(in)} - NF_{i(out)} + NF_{i(return)} - W_i = 0 \\ & LF_{j(in)} - LF_{j(out)} - LF_{j(loss)} = 0 \\ & S_k - S_k' + i_k - r_k = 0 \\ & S_k' = S_{target} \\ & AW_i \leq D_i - MW_i \\ & MW_i \leq MD_i \\ & W_i - MW_i - AW_i = 0 \\ & MFC_i = MW_i / MD_i \\ & FC \leq MFC_i \end{aligned}$$

- 여기서, MD_i : 개별 수요처 i에서의 최소 수요량
- MW_i : 개별 수요처 i에서의 최소 취수량
- D_i : 개별 수요처 i에서의 총 수요량
- AW: 최소수요량을 충족시킨 이후의 취수량
- MFC_i : 개별 수요처의 최소수요량에 대한 수요충족률
- FC: 최소수요량에 대한 최종 수요충족률
- X_i : 연안주의와 선점주의 물배분의 우선순위 계수
- P_i 또는 한계비용가치 물배분의 한계 순편익 계수 B_i
- E: 형평성을 우선 고려하기 위한 가중치 계수 ($E \gg X_i$ for all i)

4. 최적 물배분 방법의 적용

유역 물관리를 수행하기 위해서는 지류의 유입량, 저수지 운영률, 지류 및 본류의 용수 수요 및 순물 소모량 등의 기본 정보가 필요하다. 유역내의 저수지의 운영률은 적절한 저수량을 확보하여 장래에 용수수요 뿐만 아니라 치수의 목적, 레크리에이션, 수력발전, 어류 및 야생동물 보호하기 위해 사용할 필요성이 생긴다. 다목적으로 사용되는 저수지를 운영률을 계획된 저수량으로 고정시키고 특정한 상황이 발생하지 않는 한 유입량만큼 방류시킴으로서 저수지와 하류의 용수수요에 대한 방류량을 조정하게 된다.

이렇게 결정된 저수지의 방류량과, 지류의 유입량, 지류 및 본류에 대한 생활, 공업, 농업 용수 수요량(또는 허가량) 및 하천 유지유량을 설정하고 예측된 자연유량에 따라 각 지류 및 본류에 대한 순물소모량을 고려한 물수지를 적용하여 물부족량을 계산하게 된다. 물 부족 발생 시에는 다양한 물배분 방식을 적용하거나 저수지의 목표저수량을 일정한도 내에서 낮추는 방법 등을 검토하고 모의결과를 분석하게 된다. 본 연구에서는 목표저수량이 설정된 상태에서 물배분 기법에 따라 수요처에 대한 물배분이 이루어지는가를 살펴보고자 하였다.

물배분을 실제 유역에 적용하고 이를 검증하는 것보다 간단하지만 수작업으로 계산하기 어려운 그림 1과 같은 가상 유역의 시스템을 모형화 하여 분석하기로 한다. 가상의 유역은 3개의 지류 유입과, 직렬, 병렬로 연결된 3개의 저수지와 5개의 수요처로 구성되어 있다. 앞서 언급한 대로 저수의 목표저수량은 일정하다고 가정하고 물배분 기법에 따른 효과만을 분석하기 위하여 저수지가 포함된 지점 1번부터 7번은 제약조건으로 저수지 운영률을 적용하였다.

그림 1에서 8번 지점은 7번 저수지의 방류량이 유입(20단위)되어 지점이고, 10번 지점은 상류 유입(10단위)이 발생하는 것으로 구성하였다. 유역내의 수요량은 9번 지점의 30단위가 공업용수로

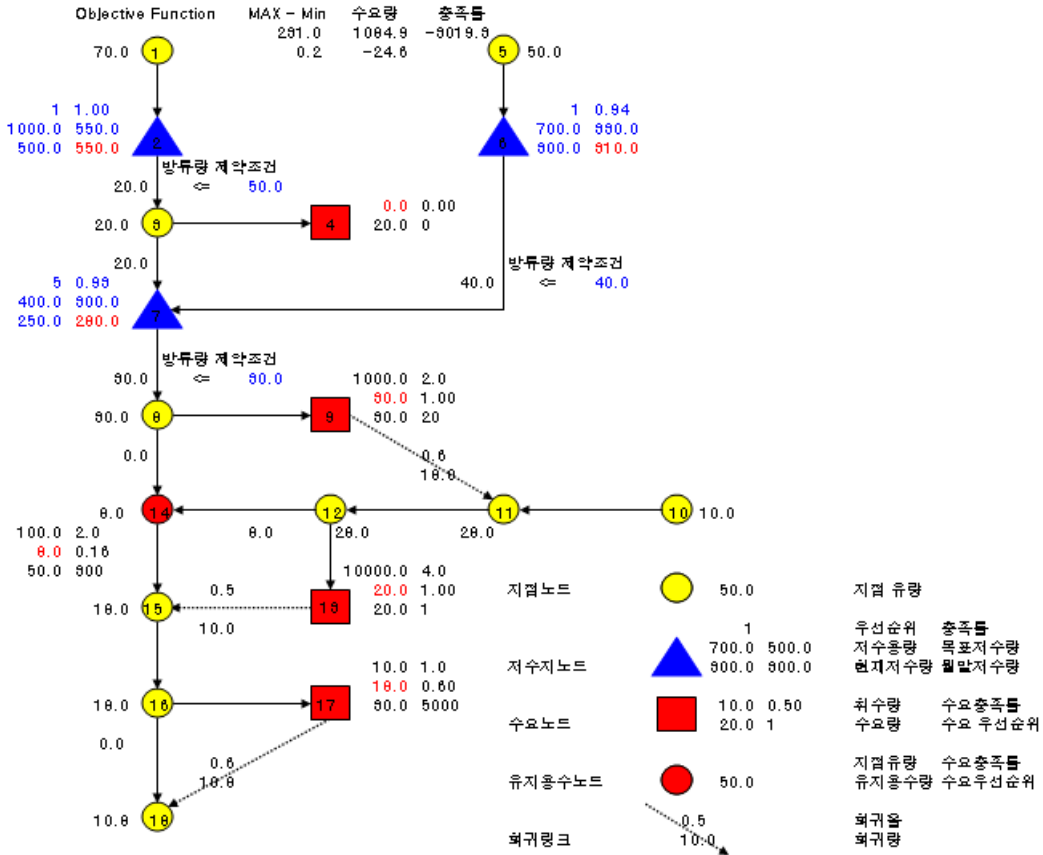


Figure 1. Schematic map of Artificial Watershed

Table 1. Input Data for Demand Node

Demand #	Usage (Amount)	Return Node (Return Rate)	Prior Appropriation (Priority)	Riparian (Priority)	Modified Riparian (Priority)	Marginal Cost Pricing (Marginal Net Benefit)
9	Industrial(30)	11(60%)	#3	#1	#1	200
13	Domestic(20)	15(50%)	#1	#1	#1	50
17	Agricultural(30)	18(60%)	#2	#3	#1	30
14	Instream(10)	15(100%)	#4	#2	#1	10

이용되고 사용량의 60%가 지점 11로 회귀되며, 13번 지점의 20단위가 생활용수로 이용되고 사용량의 50%가 지점 15로 회귀되며, 17번 지점의 30단위가 농업용수로 이용되고 사용량의 60%가 18번 지점으로 회귀되는 것으로 구성하였다. 하천의 유지용수를 고려하기 위하여 14번 지점에 10

단위를 설정하였다. 개별 물배분 기법을 평가하기 위한 우선순위의 한계 순편익에 대한 자료는 표 1과 같이 정의 하였다.

구성된 모형은 엑셀의 해 찾기 기능을 이용하여 선형계획법을 구성하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 목적함수(목표셀), 결정변수(값을 바꿀

셀), 제약조건(제한 조건)을 해 찾기 모델 설정을 통해 구현한 내용을 보여주고 있다. 본 연구에서는 편의상 엑셀의 선형모형을 사용하였으나 일반적인 선형계획법 상용 소프트웨어인 LINDO, CPLEX 등으로 모형의 구축이 가능하다.

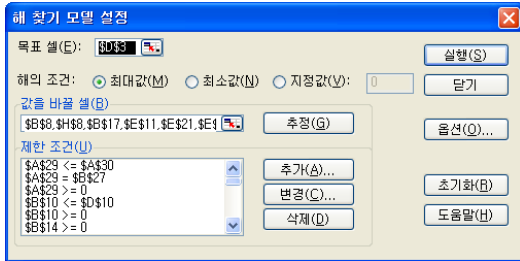


Figure 2. Setting for Water Allocation Model in Excel

엑셀의 해 찾기 기능을 사용하여 수행한 결과를 표 2에 최소 물배분을 고려하지 않고 수행한 것과 최소 물배분 30%를 고려한 결과를 표 3에 정리하였다. 우선 표 2에서 선점주의 물배분 결과를 보면 최상위 수리권(우선순위 #1) 수요처인 지점 13은 모든 수요가 충족되었으며 지점 9가 지점 17보다 우선순위가 낮았지만 수요충족률이 높게 배분 되었는데 이는 지점 9에서 쓰인 물의 60%가 회귀되어 지점 13에 쓰였기 때문이다. 하천유지 용수인 지점 14의 수요충족률이 가장 낮게 나타났다.

연안주의의 경우 상류우선 배분의 원칙에 따라 물을 분배한 결과 지점 9가 13보다 높은 충족률로 물이 배분되었으며 지점 17은 0.56의 수요충족률을 지점 14는 0.2의 수요충족률이 만족되는

것으로 나타났다. 수정 연안주의의 경우 유역내의 모든 수요처가 같은 우선순위를 부여하였고 최종 수요충족률 FC는 0.56으로 지점 13과 14는 각각 0.67과 1.00을 나타내었다. 이는 앞선 물배분에서 처럼 지류의 유입량과 회귀수의 영향으로 판단된다.

한계비용에 의한 배분의 경우 수요처의 수요량을 몇 개의 구간으로 나누어 각각의 한계순편익을 정의하여야 하나 본 연구에서는 수요처를 몇 개의 구간으로 나누고 이에 대한 각각의 한계순편익 값과 제약조건을 추가하는 부담 때문에 간략하게 총 수요에 대한 순편익으로 계산하였다. 계산결과는 한계순편익이 많이 발생하는 수요처에 물이 우선 배분되는 것을 확인할 수 있었다.

표 3의 경우 형평성을 고려하기 위해 각 수요처의 최소 물배분 30%를 고정으로 하여 각 물배분 기법을 적용하였다. 결과는 선점주의와 수정 연안주의 물배분은 같은 최소 물배분을 고려하지 않았을 경우와 같은 배분이 이루어졌으며 연안주의와 한계비용에 의한 물배분은 지점 14의 하천 유지유량이 만족되지 않았기 때문에 이들을 만족시킨 후에 각 물배분 기법에 의해 물배분이 이루어 졌다.

물배분 모의 결과는 선점주의, 연안주의, 수정 연안주의, 한계비용에 의한 배분등이 수학적 모형으로 가상이 유역에 적용하여 적절한 물배분이 모의 되는 것을 확인하였다. 특히 최소 물배분을 고려하여 수요처의 형평성을 고려하는 것이 수요처 한곳으로 편중되는 것을 어느 정도 보완하는 것으로 나타났다.

Table 2. Water Allocation Result without Minimum Water Supply

Demand #	Usage (Amount)	Return Node (Return Rate)	Prior Appropriation (Priority)	Riparian (Priority)	Modified Riparian (Priority)	Marginal Cost Pricing (Marginal Net Benefit)
9	Industrial(30)	11(60%)	16.7(#3)	20.0(#1)	16.7(#1)	20.0(200)
13	Domestic(20)	15(50%)	20.0(#1)	20.0(#1)	13.3(#1)	20.0(50)
17	Agricultural(30)	18(60%)	13.3(#2)	12.2(#3)	16.7(#1)	12.0(30)
14	Instream(10)	15(100%)	3.3(#4)	2.0(#2)	10.0(#1)	2.0(10)

Table 3. Water Allocation Result with 30% of Minimum Water Supply

Demand #	Usage (Amount)	Return Node (Return Rate)	Prior Appropriation (Priority)	Riparian (Priority)	Modified Riparian (Priority)	Marginal Cost Pricing (Marginal Net Benefit)
9	Industrial(30)	11(60%)	16.7(#3)	17.5(#1)	16.7(#1)	20.0(200)
13	Domestic(20)	15(50%)	20.0(#1)	20.0(#1)	13.3(#1)	19.0(50)
17	Agricultural(30)	18(60%)	13.3(#2)	13.0(#3)	16.7(#1)	12.5(30)
14	Instream(10)	15(100%)	3.3(#4)	3.0(#2)	10.0(#1)	3.0(10)

5. 결 론

유역 차원의 수자원 관리를 수행하기 위하여 물리적으로 복잡해진 수자원 시스템과 더불어 법적 제도적 시스템을 반영할 수 있도록 선형계획법을 이용하여 보다 정교한 물배분 모형을 개발하였다. 지금까지 형평성, 효율성, 지속가능성의 기본 원칙들에 대한 이야기가 많이 나왔지만 실제로 이를 적용 하는 연구는 미흡한 편이었다. 본 연구에서 제시한 모형이 비록 간단한 유역 물분배 문제에 적용되었지만 이를 통해 유역 차원의 수자원 관리에 적용될 수 있는 방법론이 될 수 있을 것으로 기대한다.

수자원은 다른 재화에 비하여 수자원에 대한 개발이나 관리에 있어서 공공재적인 특징을 가지고 있기 때문에 물 수요에 대한 공급은 이런 공공재적 성격을 반영하는 최적 물배분 방법을 제안하였다. 각 수요처별로 최소 취수량을 설정함으로써 형평성 문제를 고려하는 동시에 수리권 또는 물의 경제적 가치에 따라 분배 가능 하도록 하였다. 이는 기존 수리권 소유자에 대해서도 과거의 기득권을 최대한 인정할 수 있으며 경제적 효율성에 근거한 물배분이 가능할 것이다.

본 연구에서 제시할 수 있는 정책대안을 몇 가지 요약할 수 있다. 첫째, 물부족시 물분배의 형평성을 고려하기 위해서 법적 제도적 상황에 따라 몇몇 수요자에게 편중될 수 있는 것을 방지하는 것이 필요하다. 현재 우리나라는 허가수리권을 통해 물배분이 이루어지고 있는 실정으로 허가수리

권을 가진 상류의 수요자에게 보다 많은 혜택이 돌아갈 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 모형과 같이 최소 수요량을 정하여 준다면 어느 정도 형평성을 고려한 물 배분이 이루어 질 수 있을 것이다.

둘째, 수자원 관리자에 의해 제시된 물배분의 결과를 정치적으로나 사회적으로 이해당사자들의 이해관계를 조정할 필요성이 생긴다. 본 연구에서 제시한 모형은 유역 차원의 물분배를 모의하기 위하여 회귀수 등을 고려함으로써 취수량의 조정에 대한 제3자효과 등을 고려할 수 있고 선형계획법을 사용하였으므로 복잡한 유역의 경우에도 적용이 가능하다. 따라서 유역 차원의 이해당사자들의 이해관계를 수렴과 이들을 설득하기 위한 도구로 활용성이 기대된다.

셋째, 물배분은 단순하게 물사용자가 얼마만큼의 수량을 취수할 수 있는 권리이외에도 법적으로 수리권 및 물사용과 관련된 법과 규제를 조정할 필요성이 생긴다. 현재의 허가시스템을 향상시키기 위해서는 정부부처 및 비정부조직의 책임 소재 및 물을 유용하게 사용하기 위한 제도적 정비와 더불어 기술적으로 모니터링과 수량 및 수질을 고려한 모델링의 적극적인 활용을 통한 규제를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

김종원. 2002. 합리적 수자원 배분모형 설정에 관한 연구. 국토연 2002-2. 국토연구원.

- Sax, J. L, Thompson Jr., B. H., Leshy, J. D., Abrams, R. H. 2006. Legal Control of Water Resources: Cases and Materials, Forth Edition, Thomson/West.
- SEI(Stockholm Environment Institute), 2005, WEAP User Guide.
- KIWE(KWATER), 2005, KMODSIM Users Manual.
- Labadie, J. W., Fontane, D. G., Lee, J. H., and Ko, I. H.(in press). "Decision Support System for Adaptive River Basin Management: Application to the Geum River Basin, Korea." Water International.
- Ariel Dinar , Mark W. Rosegrant and Ruth Meinzen-Dick, 1997, "Water Allocation Mechanisms: Principles and Examples", World Bank Policy Research Working Paper No. 1779, World Bank - Agriculture and Rural Development Department.
- Matoussi, Mohamed Salah. "Modeling a Centralized Water Resources Allocation", World Conference Econometric Society, 2000, Seattle.
- Savenije, H.H.G., and P. van der Zaag, "Conceptual framework for the management of shared river basins; with special reference to the SADC and EU", Water Policy, Vol 2, Iss 1-2, pp 9-45, 2000
- SEI, WEAP21 - A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model:. Part 1- Model Characteristic. s. 489. IWRA, Water International, Volume 30, Number 4, December 2005.
- UN-ESCAP, 2000, Principles and Practices of Water Allocation among Water-Use Sectors, ESCAP Water Resources Series No. 80, Bangkok, Thailand