

# 실시간 물관리 시스템을 위한 최적 물배분 방식에 대한 연구

## Reserch on Optimal Water Allocation Methodology for Real Time Water Management System

이진희\*·이동률\*\*  
Jin-Hee Lee\*·Dong-Ryul Lee\*\*

### 요    지

한정된 수자원에 대한 수요가 급증하고 수질 및 환경문제가 대두되면서 수자원 계획 및 관리에 대한 관심이 많아지고 있는 실정이다. 이러한 수자원 계획 및 관리는 물리적으로 복잡해진 수자원 시스템 뿐만 아니라 사회적, 제도적 시스템을 반영할 필요성이 생겼으며 수자원 계획 및 관리자들의 의사결정에 도움을 주기 위하여 효율적인 여러 대안들의 평가나 수자원 관리(운영)가 필수적이다. 효율적인 수자원 계획 및 관리에 있어서 물배분은 매우 중요하며 이를 통해 급증하는 용수 수요에 효과적으로 대처하고 합리적인 수자원 관리(운영)을 실현할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 실시간 물관리 시스템을 핵심이라고 할 수 있는 물배분 방식에 대한 연구로서 최적 물 배분 연구를 수행하였으며 연구의 목적은 시간적, 공간적 물 부족량을 파악할 수 있는 모형을 바탕으로 현존하는 물배분 방식 즉, 선점주의(Prior Appropriation), 연안주의(Riparian), 공공 물배분, 경제적 물배분 등을 물배분 방식을 검토하고 수자원 관리자가 협업에서 효율적인 의사결정을 지원할 수 있는 최적 물배분 방식을 제시하는 것이다.

**핵심용어:** 물배분, 물수지, 최적 물배분, 실시간 물관리, 선점주의, 연안주의, 공공 물배분, 경제적 물배분

### 1. 서 론

한정된 수자원에 대한 수요가 급증하고 수질 및 환경문제가 대두되면서 수자원 계획 및 관리에 대한 관심이 많아지고 있는 실정이다. 이러한 수자원 계획 및 관리는 물리적으로 복잡해진 수자원 시스템 뿐만 아니라 사회적, 제도적 시스템을 반영할 필요성이 생겼으며 수자원 계획 및 관리자들의 의사결정에 도움을 주기 위하여 효율적인 여러 대안들의 평가나 수자원 관리(운영)가 필수적이다. 효율적인 수자원 계획 및 관리에 있어서 물배분은 매우 중요하며 이를 통해 급증하는 용수 수요에 효과적으로 대처하고 합리적인 수자원 관리(운영)을 실현할 수 있을 것이다.

기본적으로 수자원계획 분야에 있어서의 물수지분석 과정은 장래 용수 수요량에 대한 자연유량을 비교 검토하여 물부족량을 계산하는 과정과 용수 공급량을 이용하여 물부족량에 대한 공급능력을 검토하는 과정을 포함한다. 하지만 수자원 관리(운영) 측면에서의 단기적 물수지분석은 저수지 운영률, 지류의 자연유량, 용수수요가 예측된 가운데 유역내의 물부족을 평가하고 이를 해결하기 위한 대책 등을 검토하는 것을 의미하는 것으로 유역내에서의 효율적인 물배분 방법을 강구하는 것으로 요약될 것이다.

단기간의 실시간 물관리 시스템은 매우 복잡하고 규모가 큰 시스템적인 문제이므로 정교한 시뮬레이션 모델이 필요하다. 따라서 본 최적 물 배분 연구의 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다. 1) 시간적, 공간적 물 부족량을 파악할 수 있는 정교한 수학적 모형을 개발한다. 2) 현존하는 물배분 방식 즉, 선점주의(Prior Appropriation), 연안주의(Riparian), 공공 물배분, 경제적 배분 등을 반영할 수 있는 모형을 개발한다. 3) 위에서 언급된 모형을 결합하여 수자원 관리자가 협업에서 효율적인 의사결정을 지원할 수 있는 통합 물배분 모형을 제시한다. 4) 기본적인 물배분 방식에 대한 이해를 증진 시키고 향후 개발될 시스템에 기여한다.

\* 정회원·인하대학교 수자원시스템연구소 선임연구원·E-mail: jhleehy@unitel.co.kr  
\*\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원·E-mail: dryi@kict.re.kr@kict.re.kr

## 2. 물배분

### 2.1 물배분의 기본원칙

물 배분이란 기본적으로 다양한 용수 수요처가 한정된 물을 어떻게 공유할 것인가 하는 것으로 간단히 정의 할 수 있다. 좀 더 상세하게 물 배분은 현존하는 수자원 시스템을 물리적, 제도적 체계하에서 수자원을 효율적으로 사용하기 위하여 수요자와 공급자간의 동적 상호작용으로 정의 할 수 있다. 물 배분은 단순하게 물사용자가 얼마만큼의 수량을 취수할 수 있는 권리이외에도 법적, 제도적, 경제적, 공공적인 성격 등을 포함한다. 물배분의 법적측면은 수리권 및 물사용과 관련된 법과 규제를 의미하고, 제도적 측면은 정부부처 및 비정부조직의 책임 소재 및 유용한 물사용을 증진 시키는 물관련 기관을 포함한다. 기술적인 측면은 모니터링, 수량 및 수질을 고려한 물관련 모델링을 포함한다. 경제적인 측면으로는 수리권의 양도 및 물사용으로 얻어지는 수익과 비용등이 결정되어야 하고 공공재적인 측면으로 사회, 환경적으로 계획되어함을 의미한다. 참여의식 측면으로 자신의 이익 추구를 위한 지역사회의 참여 및 각 기관들을 조정할 수 있는 메커니즘이 필요하다. 구조적 측면에서 물을 사용하는 기업과 물을 공급하고 운영하는 구조적 업무 등의 정의가 필요하다.

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 배분 원칙을 포함하고 있다.

1) 형평성(equity): 형평성은 하천 유역의 수자원을 여러 이해당사자에 대하여 공평하게 배분하는 것을 의미하는 것으로 전통적으로 정부 주도하에 이루어져 오고 있다. 이런 공평성은 현재의 물 사용자 뿐만 아니라 미래의 사용자에게도 적용되어야 하며 수량 뿐만 아니라 수질의 문제도 고려 대상이 되어야 한다. 따라서 물 배분 과정에 대한 사전에 협의된 규칙이 필요하게 되는데 특히 물이 부족한 지역이나 시기에 있어서 이런 물부족 협의는 매우 중요하다고 하겠다. 이런 물배분 방법이나 협의는 양적 질적으로 공평하게 관련 이해 당사자의 요구를 충분히 반영해야 한다. 사회적 기본요구를 제공을 의미하고 청청수, 물에 대한 공중위생, 식량확보문제등이 포함된다.

2) 효율성( efficiency): 효율성은 수자원의 경제적 가치에 의한 물 사용을 의미하며 비용의 최소화와 편익의 극대화에 따른 배분을 추구한다. 이는 물에 대한 공정한 양도가 보장되고 재정적으로 지속가능성과 수요관리에 대한 주의가 필요하다. 하지만 효율성은 물사용지점에 대하여 물리적인 취수 및 전달등을 고려 되어야 하기 때문에 실천하기 매우 어려운 실정이다. 또한 이러한 원칙 하에서는 농업용수의 공업용수의 전용이 매우 쉽게 이루어 지기 때문에 이에 대한 충분한 보상이 보장되어야 한다. 생산물의 경제가치의 최대화를 의미하고 농업 및 산업의 발전, 수력발전, 지역개발, 지역경제등이 포함된다.

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

앞서 설명된 세 가지 기본원리 이외에 다음과 같은 최적 물 배분의 고려사항으로 제시되고 있다( Howe 등 1986, Winpenny 1994).

- 물 배분의 유연성(flexibility): 한 사용자에서 다른 사용자로의 전환, 장소의 전환, 수요량의 전환 등이 허용됨으로서 사용자들간의 동등한 한계 비용이 이루어 지도록 한다.
- 기존 수리권자의 보호(security): 현재의 수자리권자들이 물을 효율적으로 사용하기 위한 수단을 강구 할 필요가 있다.
- 실제 기회 비용(real opportunity cost): 제3자효과 및 다른 수요를 고려하기 위한 사용자들이 지불 하는 물값을 현실화 할 필요가 있다.
- 예측가능성(predictability): 불확실성을 최소화 하는 물 배분의 결과를 도출하도록 한다.
- 정치적 및 공공적 수용가능성(potitical and public acceptability): 물 배분의 결과를 정치적으로나 사회적으로 이해 당사자들의 이해관계를 수렴할 수 있어야 한다.
- 효용성(efficacy): 최적 물 배분이 수행되고 향후로 이제도가 정착될 수 있는 여건을 의미한다.
- 행정상 실행가능성(feasibility): 최적의 물배분을 실행할 수 있는 법적 제도적 장치가 마련되어야 한다.

## 2.2 물배분 기법

수리권은 물배분에 있어서 가장 중요한 것으로 누구의 물인가 하는 것이다. 세계 각국은 각국 실정에 맞는 수리권 시스템을 보유하여 수자원 계획, 보전, 배분의 문제를 해결하고 있으며 이런 물배분 시스템은 다음과 같이 구분 할 수 있다.

1) 연안주의(Riparian): 연안주의는 물을 공공재로 취급하고 있으며 비교적 수량이 풍부한 지역에서 발달하였다. 수리용권은 물과 인접하거나 물위에 속한 토지 소유주에게 주어진다. 연안주의는 합리적이용(reasonable use) 근거한 순수 연안주의와 호혜적권리(corrrelative rights)를 바탕으로 한 수정 연안주의 두 가지 형태로 변화되었다. 합리적 이용은 물과 인접한 토지 소유주가 다른 소유주의 합리적 이용에 방해되지 않는 한도내에서 자신의 합리적인 물사용에 제약을 받지 않는다. 따라서 물부족량에 대해서 서로간의 부족량을 공유하지 않는다. 호혜적권리는 연안 토지 소유주의 하천에 인접한 땅의 비율만큼 물을 배분함으로써 물사용자 상호간의 부족량을 공유 하고 있다. 미국의 몇몇주의 경우 전통적인 연안주의에 허가시스템을 도입한 경우도 찾아 볼 수 있다.

2) 선점주의(Prior Appropriation): 물의 사유권을 인정하는 시스템으로 먼저 물을 사용함으로써 물에 대한 사용권리를 갖게 되는 시스템으로 물부족이 많은 지역에서 형성되었다. 특히, 물부족에 대한 배분이 이루어지지 않아 하위수리권 소유자는 반드시 상위 수리권자의 물사용 이후에 물사용이 가능하게 된다.

3) 행정규제에 의한 공공 배분(Administrative Public Allocation): 앞서 언급된 대로 정부 주도하에 허가수리권을 발행하고 물 배분을 실시한다. 배분원칙은 물을 공공재로 취급하며 사회적, 정치적 합의에 의한 배분이 이루어지도록 하고 있다. 이러한 배분 원칙의 장점으로는 형평성을 고려한 물 배분을 가능하게 하여 물이 부족한 지역까지 물 배분이 가능하도록 함으로서 극빈자와 환경용수의 확보 및 최소 수량의 공급이 가능하도록 할 수 있다. 단점으로는 물이 효율성 보다는 수리권 위주로 배분되기 때문에 수자원 보존 및 물의 경제적 이용, 물이 최상의 편익을 발생시키도록 배분 되는 것이 어렵게 된다. 따라서

4) 한계비용에 의한 배분(Marginal Cost Pricing: MCP): 물이 배분되었을 때 한계비용이 같아지도록 물값을 결정하여 물을 배분하는 것으로 이론적으로 물 값을 현실화하여 과도한 물사용을 억제하는 효과가로 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.

5) 물시장에 의한 배분(Water Markets based Allocation): 물시장에 의한 배분은 주어진 물 사용을 주변 물사용자와 협의하에 일시적으로 전환하는 것과 더불어 수리권의 영구적인 전매에 의한 배분을 의미한다. 일단 물시장이 형성되면 공급 가가 싸게 책정된 수요처에서 물의 공급가 비싸게 책정된 수요처로 전매가 이루어지므로써 물의 매도자와 매수자는 모두 이윤을 증대시킬 수 있으며 물의 효율적인 이용의 도움이 될 수 있다. 단점으로는 물시장을 형성하기 위한 기존 수리권의 정의, 수리권 전매가 이루어 질 수 있는 법적 제도적 틀의 마련, 물이동이 가능할 수 있는 수자원 인프라가 구축, 제3자효과의 파악등이 마련되어야 할 것이다.

## 3. 물배분 모형의 제시

유역 물배분에 있어서는 시뮬레이션(simulation)기법과 최적화(optimization)기법이 주로 사용되어 왔다. 여기서 시뮬레이션 기법은 사용자가 개개의 취수량을 정하고 이를 상류에서 하류로 순차적으로 물을 배분하는 방법으로 정해진 취수량에 따라 시스템의 운영결과를 모의할 수 있는 기법을 말한다. 반면 최적화 기법은 법적, 제도적, 사회적, 경제적 여건에 따라 목적함수와 제약조건을 설정하고 이에 대한 최적의 물배분을 찾아내는 것을 의미하며 일반적으로 주어진 시뮬레이션 기간내에서 연속된 물배분 결과를 찾아낼 수 있다. 물배분 문제에 있어서 시뮬레이션 기법과 최적화 기법은 상호 보완적인 관계가 있어서 최적화 모형 내에 시뮬레이션 요소가 포함되어 있거나 시뮬레이션 모형 내에 수리시설물 운영원칙과 물배분 원칙 등을 최적화 기법으로 공식화 되어 있는 것이 보통이다.

대표적인 범용 물배분모형으로는 MODSIM, WEAP, CALSIM (II), MIKE BASIN, Riverware, Waterware 등이 있다. 이러한 모형들은 통합수자원관리(integrated water resources management)와 지속가능한수자원관리(sustainable water resources management)의 개념으로 수자원관리를 수행하도록 확장되고 있다. 이러한 맥락에서 지리정보시스템(Geographical Information System)의 도입하거나 그래픽 유저 인터페이스(GUI)기능 강화하여 사용자가 수자원 시스템을 보다 용이하게 작성하고 이해 할 수 있도록 기능이 강화되고 있으며 용수수요의 변화와 수자원 시설물, 운영원칙 등의 변화등을 쉽게 고려할 수 있도록 모형이 발전하고 있다. 더불어 기존의 수량 관리 뿐만 아니라 수질을 통합적으로 관리할 수 있도록 모형이 확장되어 가고 있으며 최근들어 기후변화, 물의 경제적 가치, 환경용수 등의 시나리오의 영향을 평가할 수 있도록 운영되고 있다.

앞절에서 언급된 물배분원칙과 관련된 물배분 방법들을 최적화 기법을 사용하여 목적함수와 제약조건을 살펴보기로 한다. 관련 항목 중 물시장에 의한 배분은 물사용자들의 자발적인 거래에 의한 것으로 적용상의 어려움으로 본 연구에서는 고려하지 않도록 한다.

### 1) 연안주의

$$\max P_i W$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & LF_{in} - LF_{out} - LF_{loss} = 0 \\ & NF_{in} - NF_{out} - NF_{return} - W = 0 \\ & S' = S + i - r \\ & W \leq D \end{aligned}$$

여기서, LF: 하천구간(링크)의 흐름(Link Flow)

NF: 하천지점(노드)의 흐름(Node Flow)

W: 취수량(Withdrawal)

D: 수요량(Demand)

S': 월(일)말 저수량

S: 월(일)초 저수량

i: 저수지 순 유입량(강수량, 증발량, 침투량 고려)

r: 저수지 방류량

Pi: 상류(큰값)로부터 하류(작은값)로 주어지는 우선순위 계수

### 2) 수정연안주의

$$\max FC$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & LF_{in} - LF_{out} - LF_{loss} = 0 \\ & NF_{in} - NF_{out} - NF_{return} - W = 0 \\ & S' = S + i - r \\ & W \leq D \\ & FC = W/D \end{aligned}$$

여기서, FC: 최종총족률( $0 < FC < 1$ )

### 3) 선점주의

$$\max P_i W$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & LF_{in} - LF_{out} - LF_{loss} = 0 \\ & NF_{in} - NF_{out} - NF_{return} - W = 0 \\ & S' = S + i - r \\ & W \leq D \end{aligned}$$

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

### 4) 한계비용에 의한 배분

$$\max C_i W$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & LF_{in} - LF_{out} - LF_{loss} = 0 \\ & NF_{in} - NF_{out} - NF_{return} - MW - W = 0 \\ & S' = S + i - r \\ & W \leq D \end{aligned}$$

여기서, Ci: 한계비용 계수(물의 경제적 가치 계수)

MW: 최소 취수량(Minimum Withdrawal)

### 5) 최적 물배분(제안)

$$\max E(MFC) + P_i [AW - (D - MD)]$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & LF_{in} - LF_{out} - LF_{loss} = 0 \\ & NF_{in} - NF_{out} - NF_{return} - MW - AW = 0 \\ & S' = S + i - r \\ & W \leq D \\ & MFC = MW/D \\ & E \gg P_i \end{aligned}$$

여기서, MFC: 최소수요량에 대한 최종총족률

Pi: 수리권(연안주의, 수정연안주의, 선점주의) 또는 물의 경제적 가치 계수

AW: 최소수요량을 충족시킨 이후의 취수량

## 4. 결 론

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

또한, 하천의 물배분 모형에 있어서 하천내(instreamflow)와 하천외(offstream) 사용에 대한 구분은 매우 중요하다고 하겠다. 일반적으로 하천외 사용은 소모적 사용으로 사용 후에 물의 절대량이 줄어 들고 사용지점과 회귀지점이 다르며 수질의 변화가 일어난다. 반면 하천내 사용은 비소모적 사용으로 물의 사용후에 물의 절대량, 사용지점과 회귀지점, 수질등이 변화하지 않지만 회귀지점이나 수질의 변화가 생기는 경우도 있다. 따라서, 최적물배분의 경우 회귀수의 문제와 수질의 악화등의 제3자효과 또는 외부효과등이 고려되어야 현재의 물배분원칙하에서 가능할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 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.
2. 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.
3. Matoussi, Mohamed Salah. "Modeling a Centralized Water Resources Allocation", World Conference Econometric Society, 2000, Seattle.
4. Winpenny, James. Managing water as an economic resource, Routledge/ODI, 1994
5. Howe, Charles W., Schurmeier, Dennis R., and Shaw, William D. "Innovations in water management: lessons from the Colorado-Big Thompson Project and Northern Colorado Water Conservation District", in Frederick, ed., 1986.