

수리계획기법을 이용한 금호강유역의 최적 물배분 시스템모델

Optimum Water Allocation System Model in Keumho River Basin with Mathematical Programming Techniques

안 승 섭* · 이 증 석*
Ahn, Seung Seop · Lee, Jeung Seok

Summary

This study aims at the development of a mathematical approach for the optimal water allocation in the river basin where available water is not in sufficient. Its optimal allocation model is determined from the comparison and analysis of mathematical programming techniques such as transportation programming and dynamic programming models at its optimal allocation models. The water allocation system used in this study is designed to be the optimal water allocation which can satisfy the water deficit in each district through inter-basin water transfer between Kumho river basin which is a tributary catchment of Nakdong river basin, and the adjacent Hyungsan river basin, Milyang river basin and Nakdong upstream river basin.

A general rule of water allocation is obtained for each district in the basins as the result of analysis of the optimal water allocation in the water allocation system. Also a comparison of the developed models proves that there is no big difference between the models. Therefore transportation programming model indicates most adequate to the complex water allocation system in terms of its characteristics. It can be seen, however, that dynamic programming model shows water allocation effect which produces greater net benefit more or less.

I. 서 론

도시팽창과 산업단지 조성 등으로 인하여 수자원 부족량이 한정된 유역에서는 용수수요가 가용 수자원량 보다 많게 되어 물 부족현

상이 발생하게 되므로, 물 부족현상을 해결하기 위해서는 유역내의 한정된 수자원이 보다 합리적으로 배분되어야 할 것이다. 최근에 물 부족이 발생하고 있는 유역에서는 대단위 용수개발사업을 실시하여 유역변경방식에 의한

* 경일대학교 공과대학

키워드 : 유역변경, 최적물배분, 수리계획기법

물 배분시스템의 개념을 도입한 광역용수관리 시스템을 도입하게 되었다. 물 배분을 보다 안정적이고 경제적으로 최적화한다는 것은 지역이나 국가적으로 매우 중요한 문제이며, 이러한 문제를 최적화하기 위한 수학적인 시스템모델의 개발이 절실히 필요하게 되었다 (Lee, S. T. & Ahn, S. S., 1986)⁶⁾.

과거의 물 배분계획기법은 주로 극히 제한된 유역에서 소규모 단위로 개발하여 이를 자연유하 방식으로 일괄 공급하는 단순한 배분 방식이었으나, 최근에 와서는 유역간의 상이한 수문학적 조건, 지역별로 상이한 경제수준 및 물 공급에 따른 경제적 파급효과 등의 다양한 요소들을 고려하여 물 배분시스템의 총 이익이 최대화될 수 있는 최적 물 배분방식이 필요하게 되었다. 그러므로 수자원계획에 있어서 과거에는 주로 지역주민소득과 수자원의 사용량에 의해서만 경제성을 검토하였으나, 70년대 초부터 Edward Kuiper(1971)¹⁰⁾, L. Douglas James & Robert R. Lee(1971)⁹⁾, Jelen, F. C.(1970)⁸⁾ 등에 의하여 수자원의 환경요인과 수자원개발에 필요한 직·간접 비용 및 유지관리비용을 고려한 연구가 시작되었다.

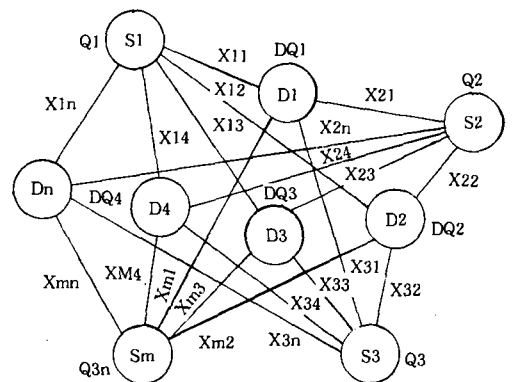
수자원 배분에 관한 선형계획법의 적용예로는 David Stephenson(1982)⁵⁾의 수질조건을 고려한 최적 물배분과 Ituji Miyoshi et al. (1978)⁷⁾의 일본 하천유역에 대한 물수지와 수자원배분 등이 있으며, 동적계획법은 Butcher et al.(1969)⁴⁾에 의한 동적계획법을 이용한 용수공급의 최적화, Bulas(1974)³⁾의 수자원개발에 대한 동적계획법의 적용 및 Lee (1981, 1985)^{1,2)}에 의한 한국 하천유역의 수자원시스템의 최적화 등의 연구가 있었다.

본 연구에서는 수자원의 이용과 배분에 관한 특수한 여건을 가지고 있는 금호강유역을 대상으로 유역변경방식에 의한 유역간의 물 배분량을 합리적으로 수송할 수 있는 최적 물 배분 시스템모델을 확립하고자 한다.

II. 최적 물 배분시스템 모델의 기본 이론

시스템의 최적화란 시스템 제약조건(Constraints)에 대한 목적함수를 최대화(최소화)하는 결정변수(Decision Variables)들을 찾는 방법 즉, 목적함수 $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 를 최대화(또는 최소화)하는 결정변수 $X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*$ 를 구하는 문제이다. 목적함수와 제약조건을 모두 선형으로 가정하여 문제를 해석할 경우와 비선형으로 가정하여 해석할 경우로 구분하여 선형계획법과 비선형계획법으로 구분되며, 시스템의 동적 거동에서 확률 개념의 도입 유무에 따라 확정론적 동적계획법과 추계학적 동적계획법으로 구분된다.

일반적으로 수자원 배분 시스템은 수자원을 $i(i=1, \dots, m)$ 개의 수원지에서 $j(j=1, \dots, n)$ 개의 수요지로 배분하는 문제에서 각 수자원의 가능 공급량을 Q_i units라 하고 각 용수 수요지의 수요량을 DQ_j units라 할 경우 물 배분 문제의 적용을 위해서는 Fig. 1과 같은 물 배분모식도를 작성할 수 있다. Fig. 1은 i 수원지



Legend	
S_i : Water Source	D_i : Water Demand Area
Q_i : Available Water	DQ_j : Water Demand
G_u : Gross Net Benefit	X_u : Allocated Water (i to j)

Fig. 1. Conceptual Diagram of Water Allocation System

에서 j 수원지까지의 물 배분량을 X_{ij} , 이 때의 순이익을 G_{ij} 라고 할때 i 수원지의 가능공급량 Q_i 와 j 수요지의 용수수요량 DQ_j 의 관계를 도식화한 것이다.

따라서 본 연구에서는 최적 물 배분시스템 모델을 구축하기 위하여 선형계획법(Linear Programming, LP)의 응용형태인 수송계획기법(Transportation Programming, TP)과 동적계획기법(Dynamic Programming, DP)을 이용하였다.

1. 지역별 이익함수의 결정 기준

과거에는 수자원계획의 방법론 중의 하나로서 경제적인 문제를 고려하여 초기 목적함수를 지역의 주민총생산(GRP, Gross Regional Product)과 관련시켜 최적화에 응용해 왔다. 그러나 70년대에 이르러서는 지역의 주민총생산만으로 수자원의 경제성을 분석한다는 것은 연구 지역의 각종 변동요인(경제성, 사회적 요인 등)과 수원지의 위치 및 수질 등을 완벽하게 고려할 수 없으므로 합리적인 분석이 될 수 없음을 인식하게 됨으로써 수자원 경제분석에서는 GRP 이외의 다른 변수들을 고려해야 할 필요성이 발생하게 되었다(Loucks, 1981)¹¹⁾.

즉, 물 경제분석을 위한 자료는 일반화된 것이어야 하고 경제적인 측면에서 고려될 수 있는 것이어야 하며, 계획을 설정할 때에는 지역의 경제성장·장기개발계획·지역의 자치능력·수자원의 개발능력·인구제약의 범위 및 산업의 형태 혹은 주민의 건강과 같은 각각의 요소들 사이에서 미치는 영향을 고려해야 한다. 뿐만 아니라 물 배분에 관한 경제관련 인자외에도 Table-1과 같이 물 관리측면에서의 관리목표와 용도별 이용에 따른 상관관계에 대하여 고려해야 한다.

2. 수송계획(Transportation Programming, TP)모델

제한된 수자원을 각 용도별 수요에 어떻게 합리적으로 배분할 것인가를 결정하는 것은 중요한 문제로서 선형계획법은 이러한 최적화 문제를 해결하기 위하여 개발된 계획기법이라고 할 수 있다. 선형계획법이 수리계획법(Mathematical Programming)으로서 갖는 특징은 선형함수, 즉 1차함수로 표시되는 목적함수와 선형방정식으로 표현되는 제약조건을 가지고 수자원배분의 최적해를 찾는 데 있다.

즉, m 개의 제약조건식과 n 개의 결정변수로 설정되는 선형문제의 목표는 결정변수 x_i 의

Table-1. Water Management Goals and Interrelation

	Domestic	Industry	Agriculture	Benefit
Domestic	Safty Supply (including Protection of Water Resources)	--	--	--
Industry	Competition at the Water Resources	Optimal as Production Factor	--	--
Agriculture	Agriculture/Water Quality Protection : Groundwater Abstraction/Level Control, Sprinkling & Drought Damage of Vegetation		Optimal Production Circumstances through Level Control & Drainage	--
Benefit	Abstraction, Purification, Reservoirs, Distribution (including Transport)		Level Control : Sprinkling(including Transport)	Maximization of Benefits

선형식으로 성립되는 목적함수 Z를 최적화하는 것으로서, 선형계획법의 본질적인 특성을 가지고 있으면서도 m-n의 관계가 복잡한 형태로 나타날 경우에는 선형계획법의 응용형태인 수송계획법이나 배분기법(Allocation Method)을 사용하여 문제를 해석한다.

따라서 본 연구에서는 수송기법을 도입하여 각 수원지로부터 수요지까지 각 용도별로 가장 합리적이고 경제적으로 수자원을 배분하는데 이용하고자 한다.

물 배분문제를 수송기법에 적용하기 위한 일반적인 식을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$\text{Max. } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot X_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq Q_i$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \geq DQ_j$$

$$x_{ij} \geq 0$$

이 물 배분시스템의 총배분량은 일반적으로 식 (2)의 관계가 성립한다.

$$\sum_{i=1}^m Q_i \geq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m X_{ij} \geq DQ_j \dots (2)$$

따라서, 물 배분문제의 선형해석을 위하여 Table-2와 같은 행렬을 작성할 수 있고 이 행렬로부터 기본해가 유도되며, 실행가능 기본해로부터 최적해를 계산할 수 있다. 즉, 주어진 조건하에서 최대이익이 발생하는 용도의 수요량을 우선적으로 배분하고 각 지구의 수요량에 대한 가능공급량은 단위 용수당 이익을 관련시켜 단계적으로 계산을 수행하면 i수원지에서 j수요지까지 최적배분을 계산할 수 있다.

Table-2. Transportation Matrix

i \ j		Area				Supply	U _i
		D ₁	D ₂	...	D _n		
Water Source	S ₁	a ₁₁ X ₁₁	a ₁₂ X ₁₂	...	a _{1n} X _{1n}	Q ₁	U ₁
	S ₂	a ₂₁ X ₂₁	a ₂₂ X ₂₂	...	a _{2n} X _{2n}	Q ₂	U ₂
	⋮	⋮	⋮
	S _m	a _{m1} X _{m1}	a _{m2} X _{m2}	...	a _{mn} X _{mn}	Q _m	U _m
Demand		DQ ₁	DQ ₂	...	DQ _n	Q ₁	-
v _i		v ₁	v ₂	...	v _n	-	-

3. 동적계획(Deterministic Dynamic Programming)모델

동적계획법(DP)은 시스템의 전체적인 효과를 극대화(혹은 극소화)하는 의사 결정을 종합하는 체계적인 방법으로서 해석 방법은 다단계 의사 결정 과정을 일련의 단단계 의사결정과정으로 변환하여 해석해야 한다. 이 기법은 다른 수리계획기법과는 달리 표준 수리모델(Standard Mathematical Model)이 존재하지 않고, 단지 어떤 문제들을 해결하는 일반적인 접근방법이므로 문제의 특성에 따라서 적합한 수리적 관계식을 개발하여 해석해야 한다는 어려움이 있다. 즉, 동적계획법의 목적은 여러 단계에서 일어나는 상호관계된 의사결정문제를 하나로 결합하여 전체적인 최적해를 추구함에 있으며, 그 계산기법은 순환최적원리(Recursive equation)에 기초를 두고 있다.

일반적인 형태로 동적계획문제를 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 m개의 수원지로부터 n개의 수요지로 공급할 수 있는 가용수자원량이 Q_i(i=1, 2, ..., m) units 이하이고 필요한 용수수요량이 DQ_j(j=1, 2, ..., n) units 이상일 경우에 자원을 최적배분시킴으로서 최대이익을 얻는 문제를 고려할 수 있다.

본 연구에서는 수원지와 수요지가 여러 개로 구성되는 물 배분시스템에 적용하기 위하여 m개의 수원지를 각각 별개의 수원지로 가정하여 순환원리에 의해서 해석하고 그 결과를 토대로 다계열 수원지군에 대한 배분량을 결정하기로 하였다. 또한 시스템 운영시에 용수공급 대상지역의 용수수요량은 지역의 수요하한선(DQ_{j,min})을 넘지 못하면 지역의 기능은 정체되고 수요 상한선(DQ_{j,max})을 초과하면 뚜렷한 이익의 증가 없이 물의 낭비만 초래하게 되므로 이러한 경우에는 배분된 양 X_{ij}를 재분배하도록 시스템을 구성하였다.

따라서 이 문제는 식 (3)과 같이 정의할 수 있으며, 여러 개의 공급원(수원지)으로 부터 공급되는 수량 X_{ij} units를 구하기 위하여 식 (4)와 같은 순환방정식으로 표현할 수 있다.

$$\text{Max. } f_{ij}(Q_{ij}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n G_{ij}(X_{ij}) \dots\dots\dots (3)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \leq Q_{ij}$$

$$x_{ij} \geq 0$$

$$f_{ij}(q) = \text{Maximize} \{G_{ij}(X_{ij}) + f_{i,j-1}(q - X_{ij})\} \dots (4)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq q$$

$$0 \leq q \leq Q_i$$

식 (4)에 의해서 배분되는 수요지별 배분량이 그 지역에서 필요한 최소한의 수요량(수요하한선) DQ_{min}을 넘지 못하면 지역의 기능이 정체되고, 수요상한선 DQ_{max}을 초과하면 뚜렷한 이익의 증가 없이 물의 낭비만을 초래하게 되므로(Kuiper, 1971, James, 1971), 식 (5)와 같이 각 수원지에서 배분된 배분량 X_{ij}를 조합(q_j)하여 잉여배분량 Δq_j 만큼을 순이익이 최소가 되는 수원지에서 D_{j,min}이하가 되

는 지역을 대상으로 순환방정식에 의해 재배분을 하여 최적배분량을 결정한다.

$$\sum X_{ij} = q_j$$

$$DQ_{j,min} \leq q_j \leq DQ_{j,max} \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta q_j = DQ_{j,max} - q_j$$

III. 최적 물 배분시스템 모델의 적용 및 결과의 검토

1. 유역의 특성 및 시스템의 구성

본 연구의 대상유역인 금호강유역(Fig. 2)은 낙동강유역의 중동부에 위치하고 있으며, 유역면적은 2,087.9km²이고 유로연장은 118.4km이다. 유역의 지리적인 특성을 검토해 보면 유역의 북쪽에는 반변천 유역, 남쪽으로는 밀양강 유역, 서쪽으로는 낙동강 본류 유역, 동쪽으로는 형산강유역과 접하고 있으며, 행정구역은 1개 광역시(대구)와 2개시(경산 및 영천)를 포함하고 있다.

현재 본 연구 대상유역내에 위치한 각 도시의 용수수요량은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 영천댐 하류의 금호강, 낙동강본류, 기타 유역내에 건설된 소규모 수원지 및 타유역인 밀양강 상류에 위치한 운문댐으로부터 공급받고 있는 실정이며, 특히 본 유역의 상류에 위치한 영천댐의 경우 형산강유역에 위치한 포항지역에 필요한 용수공급을 전담하고 있다. 또한 장래의 용수수요에 대비하기 위하여 낙동강 상류에 위치한 임하댐 저류량의 일부를 도수관로를 통해서 수송하고 있는 특수한 배분시스템을 형성하고 있으며, 각 수원지별 수자원 개발현황은 Table-3과 같다.

따라서 본 연구에서는 수리계획기법을 이용한 금호강 유역의 주요 도시에 대한 최적 물 배분 시스템 모델을 적용하기 위하여 용수공

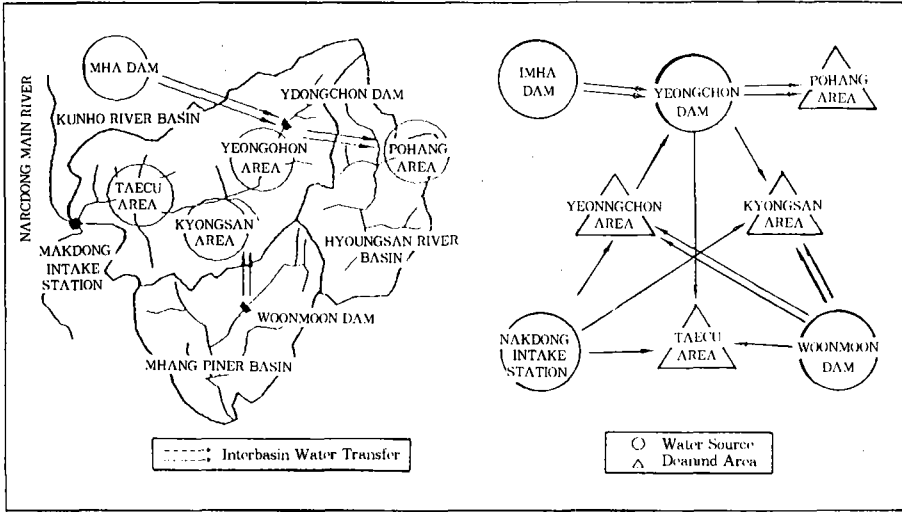


Fig. 2. Water Resources Allocation System in Kumho River Basin

Table-3. Present Situation of Water Supply Facilities

(Units : CMD)

Water Source		Capacity	Available Water	Remarks
Yeongchon Dam	Yeongchon Dam	320	280	Kumho river
	Yeongchon Systematic + Imha Dam	450	410	Kumho + Nakdong Main river
Woonmoon Dam		380	350	Milyang river
Nakdong river (1st~4th Expansion)		1,200	1,200	Nakdong Main river

급 가능 수원지를 금호강유역의 영천댐 계통(영천댐+임하댐), 밀양강 유역의 운문댐 및 낙동강 본류 수원지로 하였으며, 수요지를 대구지역, 포항지역, 경산지역 및 영천지역으로 구분하였다.

2. 유역내 용수수요량 추정

금호강 유역의 최적 물배분을 위하여 본 연구에서는 금호강 광역상수도 사업계획에 포함된 유역내의 3개 도시(대구, 영천, 경산지역)와 유역 외의 1개도시(포항지역)를 대상으로 장래 용수수요를 용도별로 추정하여 이들 도시에 대한 물배분시스템에 이용하였다. 그러

나, 유역외에 위치한 포항지역의 경우는 본 유역으로부터 실제로 공급받고 있는 생활용수와 공업용수에 한하여 추정하였으며, 그 결과는 Table-4와 같다.

Table-4에서 생활용수 수요량은 도시별 장래 계획인구(대구광역시 및 경상북도 개발연구원 자료 참조, 1996)에 보급율과 단위급수량(수자원 장기종합계획(안), 도시규모별 보급율 및 단위급수량 참조, 한국수자원공사, 1996)을 고려하여 추정하였으며, 공업용수 수요량은 각 도시별 특수성과 국토장기개발계획기준을 이용하여 추정하였다. 또한 농업용수 수요량은 지역별 과거년도별 토지이용상태를 조사하고 이를 국토장기개발계획기준과 비교·검토하여 토지이용 면적당 단위용수량을 고려하였으며, 수요량의 감소는 없는 것으로 하였다.

3. 지역별 이익함수의 결정

물의 경제적인 가치는 수자원의 배분에 따른 순이익(Gross Net Benefit, GNB)으로 정의하며, 순이익은 수자원배분에 따른 총이익(Gross Benefit, GB)에서 수자원의 개발과 이용에 소요되는 총비용(Gross Cost, GC)을 뺀

Table-4. Estimated Water Demand^{12,13)}

(Units : 10³m³/day)

Target Years	Classification	Taegu			Pohang			Kyongsan			Yeongchon		
		D	I	A	D	I	A	D	I	A	D	I	A
1996 Present	E.D.	1,285	104	162	73	220	20	5	157	27	6	48	
	S.L.A.	150	60	67	60	40	-	-	78	-	-	9	
	D.A.	1,135	44	95	13	180	20	5	79	27	6	39	
	T.D.A.	1,274			193			104			72		
2001	E.D.	1,310	118	162	248	250	68	6	157	61	7	48	
	S.L.A.	150	60	67	60	40	-	-	78	-	-	9	
	D.A.	1,160	58	95	188	210	68	6	79	61	7	39	
	T.D.A.	1,313			398			153			107		
2006	E.D.	1,404	132	162	303	278	88	6	157	73	8	48	
	S.L.A.	150	60	67	60	40	-	-	78	-	-	9	
	D.A.	1,254	72	95	243	238	88	6	79	73	8	39	
	T.D.A.	1,421			481			173			120		
2011	E.D.	1,510	146	162	357	305	112	7	157	98	9	48	
	S.L.A.	150	60	67	60	40	-	-	78	-	-	9	
	D.A.	1,360	86	95	297	265	112	7	79	98	9	39	
	T.D.A.	1,541			562			198			146		

Notes : D : Domestic Water Uses,
 I : Industrial Water Uses, A : Agricultural Water Uses
 E.D. : Estimated Water Demand,
 S.L.A. : Water Supply Amount from Local Area,
 D.A. : Demand for Allocation,
 T.D.A. : Total Demand for Allocation

값으로 결정한다. 여기서 총이익은 주로 지역의 경제성장과 지역개발계획에 따른 지역 주민총생산으로 결정하고, 총비용은 지역수자원의 환경오염정도에 따라 소비되는 모든 처리비용과 처리에 따른 손실비용 및 지역의 지형 상태에 따른 동력비용, 시설의 유지·관리비용 등을 고려하여 결정해야 할 것이다. 이러한 여러 가지 요소들을 고려하여 순이익함수(Net Benefit Function)를 정의하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$GNB(X) = GB(X) - GC(X) \dots\dots\dots (6)$$

그러나 본 연구에서는 용수공급과 이익의 관계는 농업용수의 이용에 있어서는 최대수요량(Q_{max})을 충족시킬 때 최대순이익(G_{max})이 발생하지만 Q_{max} 이상을 공급할 경우 순이익

은 감소하며, 공업 및 생활용수의 이용에 있어서는 최대수요량을 충족시킬 때 최대순이익이 발생하나 Q_{max} 이상을 공급한다고 하더라도 순이익이 증감되지 않는 것으로 하였다 (Kuiper, 1971, James, 1971).

4. 지역별 최적 물배분 및 결과의 검토

본 연구에서는 금호강유역 광역상수도 사업 계획에 의하여 시행하고 있는 수원지별로 수요지에 대한 최적 물 배분을 위하여 수리계획 기법에 의한 최적물배분 시스템 모델을 구성 하였으며, 적용 결과를 검토하면 다음과 같다.

가. 최적물배분 시스템모델의 적용

먼저, TP 모델을 이용한 최적 물배분을 위해서는 각 수요지별 단위 unit 당 이익(a_{ij}, i=1, m(공급지), j=1, n(수요지))을 구하여 Table-2와 같은 수송 Matrix를 작성하고, 이 결과를 이용하여 목적함수와 제약조건식을 수립하면 식 (7)~(8)와 같다. 여기서, 목적함수(식 (7))에서 상수값은 각 수원지에서 수요지로 용수배분을 실시할 경우에 단위 Unit당 이익을 나타낸 것이며, X_{mn}은 m-수원지에서 n-수요지로의 최적배분량을 나타낸 것이다. 또한 식 (8a)~(8c)에 대한 제약조건식은 용수배분 Matrix(Table-2)의 횡축을 합한 값 즉, 각 수원지로부터 수요지로의 배분되는 총량이 각 수원지의 공급가능 수량(410, 350 및 1,200m³/day)을 초과할 수 없음을 나타낸 것이며, 식 (8d)~(8g)에 대한 제약조건식은 용수배분 Matrix(Table-2)의 종축을 합한 값 즉, 각 수원지로부터 수요지로의 배분되는 수량이 각 수요지의 목표년도별 수요량(1996년 현재의 경우 1,274, 193, 104 및 72m³/day이고, (...)내의 값은 각각 목표년도인 2001, 2006 및 2011년에 대한 수요량 임)을 충족시킬 수 있도록 최적배분하기 위한 제약조건을 수립한 것이다.

목적함수

$$\begin{aligned} \text{Max. } G(x) = & \text{Max.} [0.419X_{11} + 0.679X_{12} \\ & + 0.162X_{13} + 0.221X_{14} + 0.423X_{21} + 0.001X_{22} \\ & + 0.181X_{23} + 0.161X_{24} + 0.580X_{31} + 0.001X_{32} \\ & + 0.086X_{33} + 0.096X_{34}] \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

제약조건

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} = 410 \dots\dots\dots (8a)$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} = 350 \dots\dots\dots (8b)$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} = 1,200 \dots\dots\dots (8c)$$

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} = 1,274$$

$$(1,313, 1,421, 1,541) \dots\dots\dots (8d)$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} = 193(398, 481, 562) \dots\dots\dots (8e)$$

$$X_{13} + X_{23} + X_{33} = 104(153, 173, 198) \dots\dots\dots (8f)$$

$$X_{14} + X_{24} + X_{34} = 72(107, 120, 146) \dots\dots\dots (8g)$$

이와 같은 관계식을 이용하여 제약조건을 만족시키는 범위내에서 목적함수를 최대화시키면서 최적배분량 $X_{11}, X_{12}, X_{13}, \dots, X_{32}, X_{33}, X_{34}$ 를 결정한다.

다음으로, 본 연구 대상유역의 물 배분 시스템은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 3개의 수원지로부터 4개의 수요지로 배분되는 특수한 형태이므로, DP모델에 의한 최적물 배분량 결정을 위해서 크게 2단계의 계산 알고리즘을 구성하였다. 즉, 제1단계 계산과정에서는 식 (3)~(4)에 의해 각 수원지별로 수요지에 대한 최적배분을 실시하고, 제2단계 계산과정에서는 제1단계에서 배분된 지역별 배분량의 총화(q_j')가 $DQ_{j,\min}$ 이하일 경우에는 Δq_j 만큼의 추가배분을 필요로하지만 q_j' 가 $DQ_{j,\max}$ 이상일 경우에는 Δq_j 만큼을 j 지역에서 i 수원지로 순환방정식에 의해 재배분(Reallocation)을 실시하였으며, 계산과정은 Fig. 3과 같다.

또한, DP모델에 의한 물배분시에 제약조건(식 5)의 하나인 지역별 최소 및 최대수요량($DQ_{j,\min}$ 및 $DQ_{j,\max}$)의 결정은 UNDP/FAO 낙동강유역 조사단¹⁴⁾에서 제안한 범위의 값을

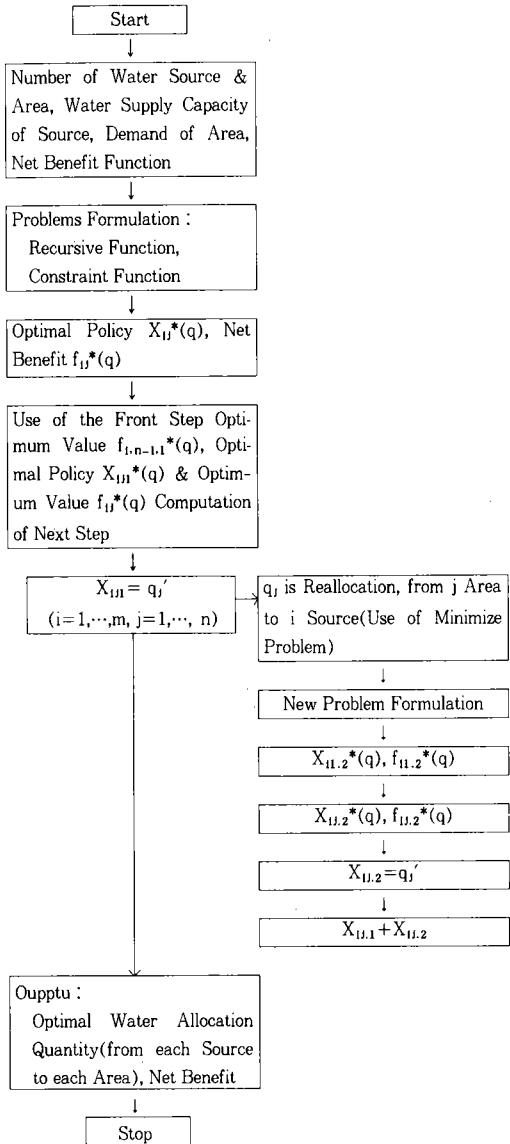


Fig. 3. Flow Chart for the Optimal Water Allocation System

이용하였다. 즉, 생활·공업용수 수요는 0.88~1.19의 변동범위를 가지며, 농업용수는 한발(旱魃)시에 벼 생육에 필요한 최소한의 용수는 최대수요량의 약 15%로 제한한 바 있으므로 이들 계수를 추정된 수요량에 곱하여 지역별 용수수요량의 범위로 하여 분석에 적용하였다.

나. 최적물배분 시스템모델의 적용결과의 검토

금호강유역내의 각 수원지로부터 수요지에 대한 최적 물 배분방식을 결정하기 위하여 TP 모델과 DP 모델에 적용한 결과 다음과 같다.

먼저, 수원지별 공급가능 수자원량을 검토하면 Table-3에서 나타낸 바와 같이 영천댐 계통은 댐하류의 하천유지용수(40,000m³/day)를 제외하면 410,000m³/day, 운문댐은 댐하류의 농업용수 및 하천유지용수(30,000m³/day)를 제외하면 350,000m³/day 및 낙동강 본류 계통은 1,200,000m³/day로서 총 이용가능 수자원량이 1,960,000m³/day로 조사되었다. 그러나 이러한 수자원총량은 유역내의 수

자원을 이용하고 있는 4개 지역의 목표년별 용수수요총량(Table-4 참조)인 1996년 현재의 1,643,000m³/day, 2001년의 1,971,000m³/day, 2006년의 2,195,000m³/day 및 2011년의 2,447,000m³/day와 비교할 때 2001년에 11,000m³/day, 2006년에 235,000m³/day 및 2011년에 487,000m³/day가 부족한 것으로 분석되어 대체수자원 개발이 절실한 실정이다.

다음으로, 이들 공급가능 수자원량을 이용한 금호강유역의 최적 물배분 시스템모델을 선형 계획법(LP Model)의 하나인 수송계획모델(TP 모델)과 동적계획모델(DP 모델)을 이용하여 분석한 결과 Table-5와 같이 분석되었다.

Table-5의 분석 결과를 검토할 때, 목표년도에 대한 TP 모델이나 DP 모델의 물배분 결과

Table-5. Results of the Optimal Water Allocation by TP & DP Model

		(Units : 10 ³ m ³ /day)				
Target Year	Classification	Taegu	Pohang	Kyongsan	Yeongchon	Supply
1996 (Present)	Yeongchon+Imha Dam	—	193(193)	—	72(72)	410
	Woonmoon Dam	74(74)	—	104(104)	—	350
	Nakdong Main River	1,200(1,200)	—	—	—	1,200
	Total Supply	1,274(1,274)	193(193)	104(104)	72(72)	1,960
	Total Demand	1,274	193	104	72	1,643
	Excess and Deficiency	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	+317
2001	Yeongchon+Imha Dam	—	387(397)	—	23(12)	410
	Woonmoon Dam	113(113)	—	153(153)	84(84)	350
	Nakdong Main River	1,200(1,200)	—	—	—	1,200
	Total Supply	1,313(1,313)	387(398)	153(153)	107(96)	1,960
	Total Demand	1,313	398	153	107	1,971
	Excess and Deficiency	0(0)	-11(0)	0(0)	0(-11)	-11
2006	Yeongchon+Imha Dam	—	410(410)	—	—	410
	Woonmoon Dam	91(221)	—	153(129)	106(120)	350
	Nakdong Main River	1,200(1,200)	—	—	—	1,200
	Total Supply	1,291(1,421)	410(410)	153(129)	106(120)	1,960
	Total Demand	1,421	481	173	120	2,195
	Excess and Deficiency	-130(0)	-71(-71)	-20(-44)	-14(0)	-235
2011	Yeongchon+Imha Dam	—	410(410)	—	—	410
	Woonmoon Dam	157(341)	—	175(9)	18(--)	350
	Nakdong Main River	1,200(1,200)	—	—	—	1,200
	Total Supply	1,357(1,541)	410(410)	175(9)	18(--)	1,960
	Total Demand	1,541	562	198	146	2,447
	Excess and Deficiency	-184(0)	-152(152)	-23(-189)	-128(-146)	-487

Note : (...) indicate water allocation by DP Model

를 검토하면 다음과 같다.

먼저, TP 모델의 분석결과 대구지역은 목표년도인 2011년에는 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으나 2006년 및 2011년에는 각각 130,000m³/day, 184,000m³/day가 부족하게 배분되었고, 포항지역은 목표년도인 2001년에는 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으나 2006년 및 2011년에는 각각 71,000m³/day, 152,000m³/day가 부족하게 배분되었다. 또한 경산지역은 목표년도인 2001년에는 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으나 2006년 및 2011년에는 각각 20,000m³/day, 23,000m³/day가 부족하고, 영천지역은 목표년도인 2001년, 2006년 및 2011년에는 각각 11,000m³/day, 14,000m³/day, 128,000m³/day가 부족하게 배분되었다.

다음으로, DP 모델의 분석결과 대구지역은 목표년도인 2001년, 2006년 및 2011년은 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으며, 포항지역은 TP 모델의 운용결과와 같이 목표년도인 2001년에는 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으나 2006년 및 2011년에는 각각 71,000m³/day, 152,000m³/day가 부족하게 배분되었다. 또한, 경산지역은 목표년도인 2001년에는 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으나 2006년 및 2011년에는 각각 44,000m³/day, 189,000m³/day가 부족하고, 영천지역은 목표년도인 2001년과 2006년에는 수요를 충족시킬 수 있도록 배분되었으나 2011년에는 각각 146,000m³/day가 부족하게 배분되었다.

따라서 TP 모델과 DP 모델에 의한 배분 결과를 볼 때, 1996년 현재를 제외하고는 상이한 결과를 나타내고 있으므로 모델별 이익 함수를 비교한 결과 Table-6과 같이 DP 모델에 의하여 물을 배분시킬 때 TP 모델에 의한 물 배분 보다 이익이 큰 것으로 분석되었다.

이상과 같은 분석 결과로 볼 때, 목표년도

Table-6. Gross Net Benefit form Water Allocation

(Unit : 10⁷ Won)

Model	Target Years			
	1996	2001	2006	2011
TP Model	877.173	1,052.956	1,057.748	1,075.392
DP Model	877.173	1,057.994	1,110.662	1,120.262

인 2006년과 2011년의 경우에 각 지역의 용수수요량에 비하여 공급량이 절대적으로 부족하게 되므로 용수부족지역이 발생하게 되며, 이에 따른 용수개발 사업이 선행되어야 할 것이다. 특히 유역 외에 위치한 포항지역으로의 용수공급은 국가적인 차원에서 금호강 유역에 위치한 영천댐 계통의 수자원량을 모두 배분하게 되므로써 영천댐의 수자원량을 유역의 중·하류부에 위치한 영천 및 경산지역에 용수를 공급하지 못하는 모순이 발생하므로 장래에는 수권문제가 제기될 우려를 내포하고 있어 이에 따른 대체수자원의 개발이 절실히 필요할 것으로 판단된다. 또한 TP 모델은 모델의 구성 형식이 일반화된 반면에 DP 모델은 계산단계가 복잡하고 시스템의 변동형태에 따라서 모델을 다시 수정해야 하는 단점이 있으며, 컴퓨터 실행시간으로 볼 때에도 TP 모델이 DP 모델 보다는 단축되는 것으로 분석되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 수자원의 이용과 배분에 관한 특수한 여건을 가지고 있는 금호강유역을 대상으로 수리계획기법을 이용한 지역간 최적 물 배분 시스템모델을 확립하기 위하여 TP Model과 DP Model을 개발하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 총이용가능 수자원량을 이용한 금호강유역의 최적 물배분 시스템모델을 선형계획법의 하나인 TP Model과 DP Model을 이용하여

물 배분을 시킨 결과 LP Model 보다 DP Model을 이용한 물 배분 결과가 이익이 큰 것으로 분석되었다.

2) TP Model은 모델의 구성 형식이 일반화된 반면에 DP 모델은 계산단계가 복잡하고 시스템의 변동형태에 따라서 모델을 다시 수정해야 하는 단점이 있으며, 컴퓨터 실행시간으로 볼 때에도 TP 모델이 DP 모델 보다는 단축되었다. 그러므로, 본 연구 대상유역과 같이 물배분 시스템이 복잡한 경우에는 TP Model이 DP Model 보다는 이익 측면에서는 다소 떨어지나 모델의 이용측면에서 효용성이 큼을 알 수 있었다.

3) 지역간 최적 물 배분을 위한 장래 용수 수요와 수원지별 공급가능 수자원량을 검토한 결과 총이용가능 수자원량은 1,960,000m³/day로서 1996년 현재의 수요-공급은 균형을 이루고 있으나 목표년도인 2001년, 2006년 및 2011년에는 각각 11,000m³/day, 235,000m³/day 및 487,000m³/day가 부족하므로 이에 대비한 대체수자원을 개발해야 하는 것으로 나타났다.

그러나, 본 연구에서는 금호강유역 광역상수도사업계획(운문댐에서 포항지구로의 물배분과 낙동강본류계통에서 포항·영천 및 경산지구로의 물배분은 제약을 가하고 있음)에 의하여 용수배분시스템을 구성하였으므로, 계속되는 연구에서는 신규사업계획에 의한 공급 route변경시에 예상되는 추가공사비 및 유지관리비를 고려하는 방법에 대한 연구와 각 시기별 강우조건에 따른 추계학적변수를 적용한다면 더욱 효과적인 물배분시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이순탁, 배상근(1981). “동적계획법에 의한 용수공급시설의 최적화”, 한국수문학회

지, 제14권, 제 2호.

2. 이순탁, 이진우(1985). “동적계획법에 의한 물배분에 관한 연구”, 한국수문학회지, 제18권, 제2호.
3. Bulas, N. (1974). “Dynamic Programming in Water Resource Development”, Advance in Hydrosience, Vol. 5, pp. 367 ~409.
4. Butcher, W. S., Y. Y. Hames and W. A. Hall (1969). “Dynamic Programming for the Optimal Sequencing of Water Supply Projects”, Water Resources Research, Vol. 5, No. 6.
5. David Stephenson (1982). “Optimum Allocation of Water Resources Subject to Quality Constrains”, Optimal Allocation of Water Resources, Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS Publ., No. 135.
6. Lee, Soontak and Seungseop Ahn (1986). “A System Model for Optimal Water Allocation through Inter-Basin Water Transfer”, 5th Congress Asian & Pacific Regional Division IAHR, Vol. 1, pp. 571~582.
7. Miyoshi, I., et al. (1978). “A Study on Water Budget and Water Resources Allocation in a Basin”, J. of the Japan Society of Civil Engin., No. 269, pp. 121 ~133.
8. Jelen, F. C. (1970). Cost and Optimization Engineering, McGraw-Hill, pp. 272 ~280.
9. James, L. D. and R. R. Lee (1971). Economic of Water Resources Planning, McGraw-Hill, pp. 161~194.
10. Kuiper, E. (1971). Water Resource Project Economics, Butterworth & Co. Ltd., pp. 61~107.

11. Loucks, D. P., et al. (1981). Water Resource Systems Planning and Analysis, Prentice-Hall, Inc..
12. 대구광역시 및 경상북도 개발연구원(1996). 대구광역시 및 경상북도 장기발전계획(안).
13. 한국수자원공사(1996.1). 수자원장기종합 개발계획(안), 도시규모별 보급율·단위급수량편.
14. UNDP/FAO/NEDECO(1977). 낙동강유역하구조사보고서.

(접수일자 : 1996년 7월 9일)