

하류생태환경용수량을 고려한 하천류역 물자원의 합리적분배방법

김철우, 김성일

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《물자원을 적극 보호하고 효과적으로 리용하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제21권 193페이지)

지금까지 물자원의 최량배치를 위한 연구에서는 사회적, 경제적, 환경적효과의 최대화를 목표로 하고 물수요공급량을 조건으로 하는 최량배치모형[2, 5, 7], 지속적발전에 기초한 구역물자원최량배치의 내용과 원칙을 분석한 기초우에서 작성된 최량배치모형[6], 지역의 물자원량과 수요량이 시간에 따라 변화되는 조건에서 물자원을 합리적으로 분배하기 위한 선형계획모형[7], 물분배를 위한 AHP모형을 구성하고 물분배에 주는 지표들의 영향정도를 고려한 물분배방법[1, 4, 6] 등이 리용되어왔다.

론문에서는 모호형태식별교차반복모형과 모호계층분석법(F-AHP)을 결합하여 강하천하류의 생태환경용수량을 보장하면서도 상류의 물자원을 합리적으로 분배하기 위한 물분배방법에 대하여 고찰하였다.

1. 모호형태식별교차반복모형과 F-AHP에 의한 물분배무게평가모형

1) 하천에서 물자원의 합리적분배를 위한 지표체계

목표층은 지표체계의 제일 웃단위로서 이 층에는 류역내 각 지역의 사회, 경제, 인구, 자원, 환경 등의 호상련관성을 구체적으로 반영하여야 한다.

준칙층은 지표체계의 중간단위로서 이 층에는 물자원보장능력, 물리용수준, 우선권정도 등 체계의 호상발전을 반영하여야 한다.

지표층은 지표체계의 제일 낮은 단위로서 이 층에는 하천물자원의 합리적분배에 영향을 주는 물자원보장능력, 물리용수준, 우선권정도평가지표들을 반영하여야 한다.

론문에서는 물자원보장능력평가지표로서 년평균물자원량, 1인당 평균물자원량, 단위면적당 물자원량, 갈수년공급가능물자원량, 평수년공급가능물자원량을, 물리용수준평가지표로서 년평균취수량, 년평균물수요량, 1인당 평균오수배출량, 1인당 평균물리용량, 공업용수재리용률, 하천내 생태용수등급을, 우선권정도평가지표로서 하천의 년평균물공급기여률, 기타 수원부족정도, 하천의 자연지리적위치, 취수능력, 물자원보유정도, 생활 및 공업용수보유정도, 물자원개발잠재력지수, 오수처리률을 선정하였다.

2) 모호형태식별교차반복모형

① 지표특징값 및 표준지표특징값행렬[2, 3]

하천물자원의 합리적분배모임(A)에서 식별모임 즉 분배구역수를 n 이라고 하고 이 n 개

모임이 $X_j = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 으로 이루어졌다고 하자.

매개 모임이 m 개의 지표로 묘사된다고 하면 이 n 개 모임은 $m \times n$ 형의 지표값행렬 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 으로 표시된다.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 x_{ij} 는 모임 X_j 의 i 번째 지표값이다.

n 개 모임에 대하여 m 번째 지표의 c 개 등급표준지표특징값에 따라 식별을 진행한다. 즉 $m \times c$ 형의 표준지표특징값행렬 $Y = (y_{ih})_{m \times c}$ 를 만든다.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1c} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mc} \end{bmatrix} = (y_{ih}) \quad (2)$$

여기서 y_{ih} 는 등급 h 의 i 번째 표준지표특징값($h = \overline{1, c}$)이다.

② 지표의 상대종속도[9]

A 에 대한 지표의 상대종속도는 다음과 같다.

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq y_{ic} \quad \text{또는} \quad x_{ij} \geq y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{i1} > x_{ij} > y_{ic} \quad \text{또는} \quad y_{i1} > x_{ij} > y_{ic} \\ 1, & x_{ij} \geq y_{i1} \quad \text{또는} \quad x_{ij} \leq y_{i1} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 r_{ij} 는 A 에 대한 모임 X_j 의 i 지표값상대종속도이다.

마찬가지로 A 에 대한 h 등급의 표준지표특징값상대종속도는 다음과 같다.

$$s_{ih} = \begin{cases} 0, & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{i1} > y_{ih} > y_{ic} \quad \text{또는} \quad y_{i1} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1, & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 s_{ih} 는 A 에 대한 등급 h 의 i 표준지표특징값상대종속도이다.

식 (3), (4)로부터 평가지표의 상대종속도행렬 R 와 표준지표특징값의 상대종속도행렬 S 를 구할수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (5)$$

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} = (s_{ih}) \quad (6)$$

③ 각 등급에 대한 모임의 상대종속도행렬

모임의 우열정도는 지표에 관계되고 낮은 등급으로부터 높은 등급까지 c 개 등급으로 식별을 진행한다고 할 때 모임이 매개 등급에 속하는 상대종속도행렬을 $U=(u_{hj})$ 라고 하면 u_{hj} 는 등급 h 에 대한 모임 X_j 의 상대종속도이다.

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{c1} & u_{c2} & \cdots & u_{cn} \end{bmatrix} = (u_{hj}) \quad (7)$$

이때 행렬 U 는 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\begin{cases} \sum_{h=1}^c u_{hj} = 1, \quad \forall j \\ 0 \leq u_{hj} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0, \quad \forall h \end{cases} \quad (8)$$

행렬 S 로부터 등급 h 의 m 표준지표특징값의 상대종속도는 $S_h=(s_{1h}, s_{2h}, \cdots, s_{mh})^T$ 로 되며 상대종속도의 정의로부터 $s_{i1}=0$ (모임 X_j 가 제일 낮은 등급에 속할 때), $s_{ic}=1$ (모임 X_j 가 제일 높은 등급에 속할 때)이다.

④ 평가지표의 무게

일반적으로 형태식별에 주는 모임의 매개 지표들의 영향정도는 서로 다르기때문에 매 지표의 중요성정도를 무게로 표시할수 있다.

각 평가지표의 무게는 $W=(w_1, w_2, \cdots, w_m)$ 이며 정규화처리를 하여 $\sum_{i=1}^m w_i=1$, $0 < w_i < 1$ 을 만족시켜야 한다.

⑤ 모호형태식별교차반복모형[8]

모임 X_j 와 등급 h 와의 관계를 유클리드거리를 리용하여 표시하면 다음과 같다.

$$\bar{d}_{hj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - s_{ih})^2} \quad (9)$$

지표들의 무게를 고려하면

$$d_{hj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2} \quad (10)$$

으로 표시할수 있다.

모호무리리론에서 종속도는 무게로 정의할수 있으며 모임 X_j 와 등급 h 의 무게불은 유클리드거리는 다음과 같이 정의할수 있다.

$$D_{hj} = u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2} \quad (11)$$

목적함수를 작성하기 위하여 모임 A 의 전체 등급에 대한 무게불은 유클리드거리 최소제곱비선형계획모형을 작성하면 다음과 같다.

$$\min \left\{ F(U, w) = \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c \left\{ u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2} \right\}^2 \right\} \quad (12)$$

이때 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m w_i = 1, & 0 < w_i < 1 \\ \sum_{h=1}^c u_{hj} = 1, & \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0, & 0 < u_{hj} < 1 \end{cases} \quad (13)$$

식 (12), (13)에 기초하여 라그랑주함수를 만들면 함수의 극값리론으로부터 물자원분배에 대한 모임 X_j 의 등급평가를 위한 모호형태식별교차반복모형은 다음과 같다.

$$w_i = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj}(r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj}(r_{kj} - s_{kh})]^2} \right\}^{-1} \quad (14)$$

$$u_{hj} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ik})]^2} \right\} \quad (15)$$

일반적으로 표준지표특징값행렬을 확정하기 힘들며 따라서 등급수는 2로 취한다. 즉 모임 X_j 가 제일 높은 등급 $G = (g_1 \ g_2 \ \dots \ g_m)^T$ 와 제일 낮은 등급 $B = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m)^T$ 에 속하는 상대종속도행렬을 S' 로 표시하면 다음과 같다.

$$S' = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_m \\ g_1 & g_2 & \dots & g_m \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

식 (14), (15)를 모호교차최량화법으로 표시하면 다음과 같다.

$$w_i = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n [(1 - u_j)^2 (r_{ij} - b_i)^2 + u_j^2 (g_i - r_{ij})^2]}{\sum_{j=1}^n [(1 - u_j)^2 (r_{kj} - b_k)^2 + u_j^2 (g_k - r_{kj})^2]} \right\}^{-1} \quad (17)$$

$$u_j = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - b_i)]^2} \right\}^{-1} \quad (18)$$

여기서 u_j 는 모임 X_j 의 높은 등급에 대한 상대종속도이다.

그런데 상대종속도의 정의로부터 $s_{i1} = b_i = 0$ (모임 X_j 가 제일 낮은 등급에 속할 때), $s_{i2} = g_i = 1$ (모임 X_j 가 제일 높은 등급에 속할 때)이므로 식 (17), (18)은 다음과 같이 쓸수

있다.

$$w_i = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n [(1-u_j)^2 r_{ij}^2 + u_j^2 (1-r_{ij})^2]}{\sum_{k=1}^m [(1-u_k)^2 r_{ik}^2 + u_k^2 (1-r_{ik})^2]} \right\}^{-1} \quad (19)$$

$$u_j = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1-r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2} \right\}^{-1} \quad (20)$$

⑥ 모호형태식별교차반복모형의 계산순차

우선 지표상대종속도행렬을 계산하고 반복계산정확도 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 를 설정한다.

다음으로 초기지표무계벡토르(w_i^0)를 설정하고 식 (20)에 대입하여 초기모임상대종속도행렬(u_j^0)을 계산한다.

다음으로 u_j^0 을 식 (19)에 대입하여 w_i^1 을 계산한 다음 w_i^1 을 식 (20)에 대입하여 u_j^1 을 계산한다.

만약 $\max |w_i^1 - w_i^0| \leq \varepsilon_1$, $\max |u_j^1 - u_j^0| \leq \varepsilon_2$ 이면 반복은 끝나고 u_j^1 , w_i^1 은 요구하는 모임상대종속도행렬, 지표무계벡토르로 된다. 그렇지 않으면 반복계산정확도를 만족시킬 때까지 반복을 계속 진행한다.

3) F-AHP에 의한 물분배무계평가모형

물수요대상들의 상대종속도는 F-AHP에 의하여 물수요대상들에 대한 물분배무계로 전환시킬수 있다. F-AHP는 인자들의 상대적중요성평가에서 모호성을 고려하는 우월한 방법이다.[1, 6]

① 1~9기준과 지수기준의 결합에 의한 판단행렬작성방법

만약 어떤 인자가 체계에서 《중요하지 않다》는것을 1로 표시하고 그 인자가 《대단히 중요하다》는것을 9로 표시하면 $9^{2/9}, 9^{4/9}, 9^{6/9}$ 은 각각 《비교적 중요하다》, 《중요하다》, 《아주 중요하다》로 표시할수 있다. 이것을 구간에서 표시하면 다음과 같다.(표 1)

표 1. 인자중요성표시

종속도(u_j)	의미	중요성정도(Z_j)
0.0~0.2	중요하지 않다	1
0.2~0.4	비교적 중요하다	$9^{2/9}$
0.4~0.6	중요하다	$9^{4/9}$
0.6~0.8	아주 중요하다	$9^{6/9}$
0.8~1.0	대단히 중요하다	9

② 인자의 상대무계계산[10]

판단행렬을 얻고 아래의 특징값을 구한다.

$$Z_v = \lambda_{\max} v \quad (21)$$

얻어진 v 를 정규화한 다음에 원소 Z_1, Z_2, \dots, Z_n 의 무계순서로 한다.

③ 하류생태환경용수량계산모형

하천의 일정한 구간에 류입되는 오염물질이 혼합 및 희석되는 조건에서 자체정화하는데 필요한 생태환경용수량은 다음과 같다.

$$Q_0 = q \cdot \frac{C_i - C}{C - C_0} \quad (22)$$

여기서 Q_0 은 자체정화에 필요한 물량(m^3/s), q 는 오염물량(m^3/s), C_0 은 하천구간웃단면 오염물농도(배경농도), C_i 는 구간에 흘러드는 오염물농도, C 는 수역의 허용기준농도이다.

④ 하천물자원의 합리적인 분배계산방법

만일 하천의 물자원량을 W , 구간분배량을 $D=[d_1, d_2, \dots, d_n]^T$ (d_i 는 i 구역 물분배량)라고 하자. 이때 하류물리용구역의 물분배량 d_n 은 하류지역의 물수요량과 생태환경용수량에 근거하여 확정한다. 결국 상류지역의 최대가능물분배총량은 $W'=W-d_n$ 이다.

하천물자원량의 합리적분배지표체계와 현지조사와 계획자료 등을 통하여 각 구역에 대응하는 지표값들을 확정하고 하천물자원량의 합리적분배평가체계행렬 X 를 구성한 다음 식 (3)에 의하여 그것을 상대종속도행렬 R 로 전환하고 식 (19), (20)에 의하여 각 구역의 물분배방안종속도 $U=(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 을 확정한다.

각 구역의 물분배방안종속도와 표 1, F-AHP를 리용하여 판단행렬을 작성하고 식 (21)에 의하여 각 구역의 물분배량무게 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 을 확정한다. V 를 정규화하여 각 구역의 물자원분배비례 $B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 을 얻는다. 이때 $\sum_{i=1}^n b_i=1$ 을 만족시켜야 한다.

하천의 각 구역(하류구역 제외)의 물자원분배량 $D=W'B$ 를 계산한다.

2. L지구 물자원의 합리적분배

연구지역의 한해강수량은 821.58mm로서 우리 나라에서 강수량이 비교적 적은 지역이다. 연구지역의 한해강수량은 약 $97\ 223 \times 10^4 \text{m}^3$ 이고 총지표수자원량은 $1495\ 801 \times 10^4 \text{m}^3$ 이며 단위면적당 지표수자원량은 평균 $43.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}^2$ 이다. 총지표수자원량가운데서 자체류역에서 조성되는 물자원량은 $36\ 362 \times 10^4 \text{m}^3$ 이고 린점(대동강상류)에서 흘러드는 물자원량은 $1459\ 439 \times 10^4 \text{m}^3$ 이다. 즉 총물자원량가운데서 자체류역에서 조성되는 물자원량은 2.4%밖에 되지 않으며 나머지는 대동강류역에서 조성되는 물자원량이다.

연구지역도는 그림과 같다.

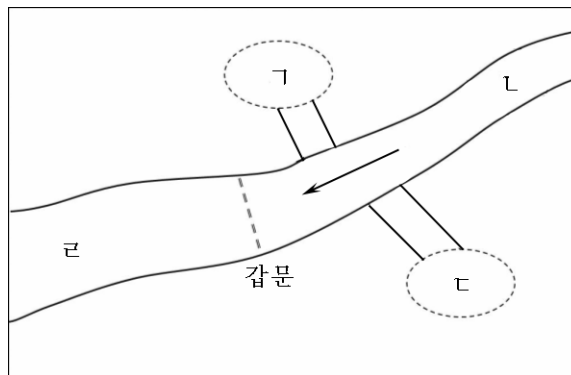


그림. 연구지역도

그림에서 ㄱ, ㄷ지역은 대동강 좌우안의 물수요대상지역이고 ㄴ지역은 상류물수요대상지역이며 점선은 갑문을 표시한다. 결국 대상지역은 갑문에 의하여 상류 물리용지역과 하류 물리용지역으로 구분된다. 그러면 하천과 린점한 ㄱ, ㄷ지역과 ㄴ지역에서 요구하는

물량을 충분히 보장하면서도 근지역의 생태환경에 부정적영향을 주지 않도록 하천의 물자원을 합리적으로 분배하는 문제가 제기된다.

다시말하면 상류의 물수량과 하류의 생태환경용수량을 보장하면서도 하류의 물수량을 충분히 보장할수 있도록 하천류역의 물자원을 ㄱ, ㄴ, ㄷ지역에 합리적으로 분배하는 문제라고 볼수 있다.

연구지역의 대동강 물자원량은 보장률 98%일 때 $106.275 \times 10^4 \text{m}^3$ 이며 하류지역 물수량은 $34.661 \times 10^4 \text{m}^3$, 식 (22)에 의하여 계산된 하류생태환경용수량은 $11.132 \times 10^4 \text{m}^3$ 이다. 결국 상류지역물리용가능량은 $60.482 \times 10^4 \text{m}^3$ 이며 이 물량을 ㄱ, ㄴ, ㄷ지역에 분배하여야 한다.

하천물자원량의 합리적분배지표체계에 기초하여 모호형태식별교차반복모형과 F-AHP를 결합한 물분배방법으로 물분배비례와 물분배량을 계산한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 지역별물분배량

지역	종속도	중요성표시	물분배비례	물분배량/ $\times 10^4 \text{m}^3$
ㄱ	0.4	$9^{2/9}$	0.304	18.386
ㄴ	0.8	$9^{6/9}$	0.517	31.269
ㄷ	0.2	1	0.179	10.827

표 2에서 보는바와 같이 연구지역의 총물자원량 $106.275 \times 10^4 \text{m}^3$ 중에서 하류지역 물수량 $45.793 \times 10^4 \text{m}^3$ 를 제외한 상류지역 물리용가능량 $60.482 \times 10^4 \text{m}^3$ 를 ㄱ지역에 $18.386 \times 10^4 \text{m}^3$, ㄴ지역에 $31.269 \times 10^4 \text{m}^3$, ㄷ지역에 $10.827 \times 10^4 \text{m}^3$ 를 분배하여야 한다.

이것을 일반적인 계층분석법[10]에 의한 물자원분배결과와 비교하면 표 3과 같다.

표 3. 우의 방법과 AHP에 의한 물분배결과비교

지역	AHP		우의 방법	
	물분배비례	물분배량/ $\times 10^4 \text{m}^3$	물분배비례	물분배량/ $\times 10^4 \text{m}^3$
ㄱ	0.241	14.576	0.304	18.386
ㄴ	0.625	37.801	0.517	31.269
ㄷ	0.134	8.105	0.179	10.827

표 3에서 보는바와 같이 모호형태식별교차반복모형과 F-AHP를 결합한 물분배방법에 의한 물분배량은 AHP에 의한 물분배량보다 ㄱ, ㄷ지역에서는 증가하고 ㄴ지역에서는 감소하였다.

그것은 모호형태식별교차반복모형과 F-AHP에 의하여 물분배에 영향을 주는 지표들의 모호성과 방안비교의 모호성이 고려되어 물분배비례벡토르가 결정되기때문이다.

맺 는 말

모호형태식별교차반복모형과 F-AHP를 결합한 하천물자원분배방법은 하천류역뿐아니라 시, 군과 같은 일정한 지역의 물자원분배에도 효과적으로 리용할수 있다. 앞으로 하류생태환경용수량뿐아니라 경관풍치용수량도 다같이 고려한 하천물자원분배방법을 해결하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] B. Srdjevic et al.; Water Resour. Manag., 22, 877, 2008.
- [2] M. J. Bender et al.; Fuzzy Sets and Systems, 115, 1, 35, 2000.
- [3] A. Karnib; Water Resour. Manag., 18, 13, 2004.
- [4] A. P. Singh et al.; Water Resour. Manag., 21, 515, 2007.
- [5] L. Wang et al.; Water Resour. Manag., 20, 701, 2006.
- [6] A. Azarnivand et al.; Environmental Earth Sciences, 73, 1, 13, 2015.
- [7] L. Yang et al.; Water Resour. Manag., 10, 686, 1996.
- [8] C. Shou Yu; Journal of Fuzzy Mathematics, 2, 261, 1993.
- [9] L. Dang Feng; Fuzzy Sets and Systems, 106, 113, 1999.
- [10] D. Y. Miao et al.; Journal of Environmental Informatics, 24, 1, 11, 2014.

주체107(2018)년 7월 5일 원고접수

Water Resources Distribution Method in Streams and Rivers of Considering Ecological Water

Kim Chol U, Kim Song Il

We proposed the method of distributing water to make rational allocation of water resources in rivers and streams together with provision of water needed for aquatic ecosystem by coupling cross-repetition modeling of identifying fussy patterns and fussy analysis of hierarchical process. This method can be effectively applied not only to catchment areas but also to administrative areas.

Key words: identifying fussy patterns, fussy analysis of hierarchical process, water resources