

물 부족 피해함수의 한계효용균등의 법칙 적용에 의한 효율적 용수배분

Efficient Water Allocation by Applying Law of Equimarginal Utility of Water Deficit Damage Functions

이충성* / 박교** / 최승안*** / 심명필****

Yi, Choong Sung / Park, Kyo / Choi, Seung An / Shim, Myung Pil

요 지

합리적인 용수배분 방안을 수립하는 것은 최근 증가일로에 있는 물 분쟁을 해결하는 데에 사전적 해소 차원에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 연구는 물 부족상황에서의 용수배분을 경제적 효율성과 사회적 효용극대화에 중점을 두었으며 이를 위해 각종 통계자료를 활용하여 물 부족에 따른 피해함수를 산정하였다. 산정된 물 부족 피해함수는 용도별로 물 가격이나 생산성 등의 차이가 현격하므로 그대로 비교하는 것은 불가능하다. 따라서 피해함수를 효용함수로 전환하였으며 ‘한계효용균등의 법칙’을 적용하여 사회적 효용을 극대화하고자 하였다. 이러한 용수배분방법을 한강권역에 적용한 결과, 생활용수의 배분량이 농업 및 공업용수에 비해 상대적으로 크게 산정되었다. 이는 생활용수의 경우 물 부족에 따른 사회적 효용감소가 타 용도에 비해 상대적으로 크다는 것을 나타낸다. 본 연구는 국내의 용수공급 체계상 어려움이 있는 경제학적 용수배분에 대한 하나의 대안을 제공한 것이라 하겠다.

핵심용어 : 용수배분, 한계효용균등, 피해함수, 효용함수

1. 서 론

수자원은 그 특성상 가변적이고 불확실하여 수요자간에 양질의 충분한 수량을 확보하고자하는 갈등 가능성이 상존하며, 분쟁이 발생하면 이해관계가 첨예하게 대립하여 조정이 어렵다. 따라서 이를 사전에 예방하기 위해 용수배분을 위한 여러 방안들을 시도해 왔다. 근래에는 경제적 효율성을 일차적인 기준으로 하여 ‘지역간 협약’이라는 제도적 틀을 이용하거나 유역통합관리에 의한 물 사용권의 거래과 보상을 설정하는 등의 방안이 연구되고 있다. 이밖에도 미국, 멕시코, 칠레, 호주 등은 시장주의적 경쟁원칙으로 효율성을 중시하는 ‘물시장’을 도입하고 있으며 물시장, 물은행, 물임대 등 다양한 형태로 적용되고 있다.

경제학적 관점에서 용수시장의 신호는 가격이지만 현실적으로 국내의 용수배분 상황은 국가 또는 공공기관에 의해 주도되고 있다. 심지어 농업용수의 경우에는 국가에 의해 무료로 공급되고 있는 실정이다. 따라서 물 가격이 시장상황을 반영하지 못하므로 가격에 기반한 배분은 불가능한 실정이다. 본 연구는 이에 대한 대안으로서 물 부족에 따른 용도별 피해함수를 이용하여 효용함수(utility function)를 도출하고 ‘한계효용균등의 법칙’에 의해 사회적 효용을 극대화하는 용수배분 방법을 제시하였다.

2. 물 부족 피해함수의 유도

본 연구에서는 생활용수의 경우 제한급수율별 지불의사에 따라 도출된 보상수요(hicksian demand)를 이용해 용수공급 감소에 따라 수요자가 추가로 부담할 지불의사액의 상승분을 피해로 정의하였다. 농업용수, 공업용

* 정회원.인하대학교 환경토목공학부 박사과정-E-mail : sung@inha.ac.kr
** 정회원.(주)삼안 수자원부 사원-E-mail : park@samaneng.com
*** 정회원.인하대학교 환경토목공학부 박사과정-E-mail : sachoi@inha.ac.kr
**** 정회원.인하대학교 환경토목공학부 교수-E-mail : shim@inha.ac.kr

수의 경우는 투입-산출의 물리적 연계모형으로서 용수공급 감소로 발생하는 생산액 차질을 피해로 정의하였다. 이는 경제학적 관점에서 다소 거시적인 접근방식으로서 피해 자체의 정량적 지표로 사용하기에는 한계가 있으나 효율함수 도출을 위한 과정으로는 의미가 있다고 볼 수 있다. 하천유지용수의 경우는 최소한의 보장된 수량으로 보아 본 연구의 배분대상에서는 제외하였다.

2.1 생활용수

그림 1은 지불의사에 따른 보상수요함수로부터 피해함수를 유도하는 과정을 나타낸다. 용수공급량에 대한 보상수요함수를 피해와 연관시킨다면 용수 한 단위가 감소할 때 상승되는 지불의사금액을 수요자의 피해라 할 수 있을 것이다. 즉, 평상시 배분량 Q_m 에서 Q_{m-i} 로 용수량이 감소하면 지불의사액은 $P(Q_m)$ 에서 $P(Q_{m-i})$ 로 상승할 것이고 증가된 지불의사액이 물 부족량 z_d 일 때의 피해액을 나타내게 된다. 그림 2와 식(1)은 이현재(2003)에 의한 평촌지역의 제한급수율별 지불의사액 조사를 기초로 보상수요함수곡선을 도출한 것이고 이로부터 공급부족에 따른 피해함수를 식(2)와같이 유도할 수 있다.

$$P(Q) = 1354.8 \times e^{-0.1161Q} \quad (1)$$

$$D_d(z_d) = N \times 1354.8 \left[e^{-0.1161 \frac{(Q_m - z_d)}{N}} - e^{-0.1161 \frac{Q_m}{N}} \right] \quad (2)$$

여기서, $z_d = Q_m - Q_{m-i}$ ($i=0, \dots, m-1$)(m^3), Q_m 은 평상시 배분량(m^3), N 은 급수대상 가구수 \times 용수공급기간(월), $D_d(z_d)$ 는 부족량 z_d 에 따른 피해함수(원)이다.

2.2 공업용수

공업용수의 피해함수는 「1998년 산업총조사보고서」(통계청, 1999)에 제시된 시·도 및 산업단지별 1일당 용수량대 생산액 자료로부터 생산함수를 도출하고 공업용수 투입량의 감소에 따른 생산액의 피해를 나타내는 방법으로 유도하였다. 그림 3은 공업용수 생산함수로 피해함수를 유도하는 과정을 나타내고 있으며 그림 4에서와 같이 연간 공업용수 투입량에 대한 공업생산량을 회귀식으로 유도하면 식(3)와 같은 공업용수 생산함수를 얻을 수 있다. 식(4)은 이로부터 유도된 피해함수이다.

$$P(Q) = (7 \times 10^7) \times Q^{0.6328} \quad (3)$$

$$D_i(z_i) = (7 \times 10^7) \times [(Q_m)^{0.6328} - (Q_m - z_i)^{0.6328}] \quad (4)$$

여기서, $z_i = Q_m - Q_{m-j}$ ($j=0, \dots, m-1$)(m^3)

Q_m : 평상시 배분량(m^3)

$D_i(z_i)$: 부족량 z_i 에 따른 피해함수(원)

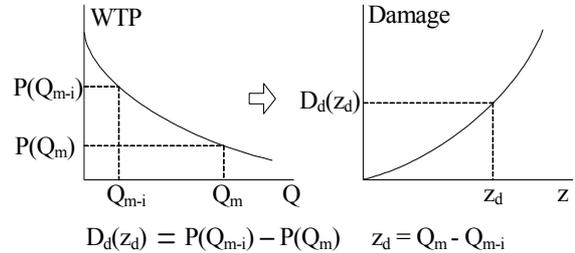


그림 1. 생활용수에 대한 피해함수 유도

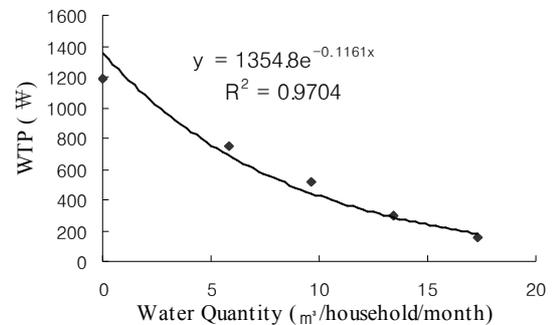


그림 2. 평촌지역의 보상수요곡선

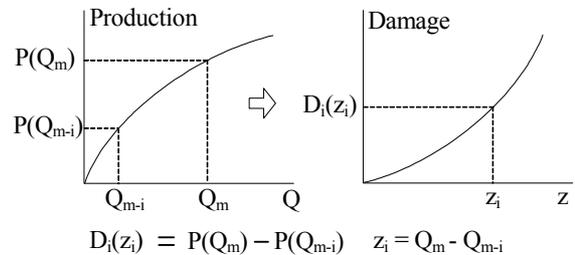


그림 3. 공업용수에 대한 피해함수의 유도

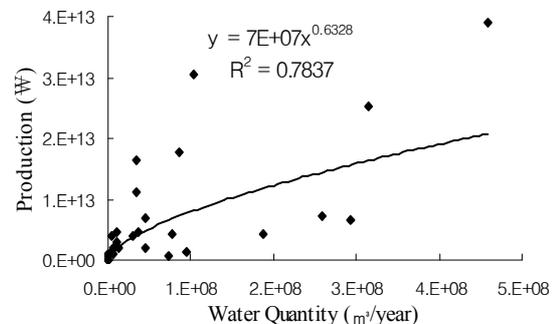


그림 4. 연간 공업용수 투입대비 공업생산량곡선

2.3 농업용수

농업용수의 피해함수는 연간 농작물(논벼)의 생육시기별 용수공급 부족으로 인한 수확량의 감소를 생산가격으로 환산하여 나타내었다. 대표작물로 논벼를 선정된 것은 농업용수의 대부분이 벼농사에 사용되고 있기 때문이다(농림부, 1999). 벼 생육기간 중 필요한 평균 용수량은 벼 재배기간을 137일로 할 때 1,226m³/10a로 제시되어 있고, 이 중에서 용수부족으로 인해 벼의 생육 및 수확량에 큰 영향을 미치는 기간은 분얼기, 유수형성기, 수잉기로서 이 기간에 필요한 용수량은 각각 21, 18, 24%인 257.46, 220.68, 294.24m³/10a이다(농촌진흥청, 1999).

그림 5는 농촌진흥청(1999)에 제시된 벼의 생육시기별 한발정도에 따른 증상 및 수확률을 참고로 하여 산정한 용수량 대비 농업생산량자료를 파레토 최적성(pareto optimality)을 만족하는 자료에 대해서 회귀식으로 유도한 것으로 식(5)와 같은 농업용수 생산함수를 얻을 수 있다. 식(6)은 이로부터 유도된 피해함수식을 나타내고 있다. 생산함수에서 피해함수를 유도하는 과정은 그림 3의 공업용수와 같다.

$$P(Q) = -1.47 \times 10^{-9}x^3 + 4.02 \times 10^{-6}x^2 - 2.88 \times 10^{-3}x + 0.687 \quad (5)$$

$$D_a(z_a) = A \times C \times \left[P\left(\frac{Q_m}{A}\right) - P\left(\frac{Q_m - z_a}{A}\right) \right] \quad (6)$$

여기서, $z_a = Q_m - Q_{m-i}$ ($i=0, \dots, m-1$)(m³)

Q_m : 평상시 배분량(m³)

A : 수리답 면적(10a), C : 생산가격(원/ton)

$D_a(z_a)$: 부족량 z_a 에 따른 피해함수(원)

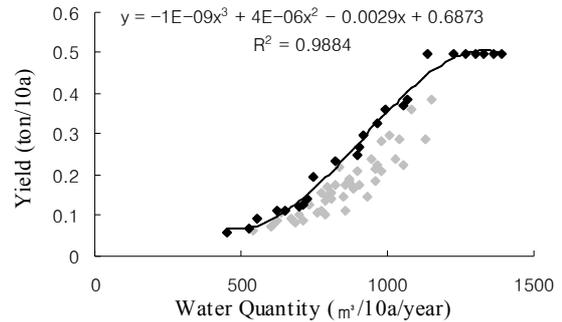


그림 5. 연간 농업용수 투입대비 농업생산량곡선

3. 적용 및 결과

3.1 피해함수 및 효용함수 설정

본 연구는 「수자원장기종합계획」(건설교통부, 2000)에서 예측한 2011년 물 부족 상황의 한강권역을 대상으로 용수배분 방안을 적용하였다. 한강권역은 서울, 경기, 강원, 인천, 충북, 경북과 안성천유역의 경기 및 충남(천안, 아산)지역을 포함한다. 표 1은 한강권역의 2011년 물 부족량을 나타낸 것이다.

표 2는 한강권역의 물 부족시 용수배분을 위해서 앞에서 제시한 피해함수의 매개변수를 산정하여 나타낸 것이다. 평상시 배분량 Q_m 은 표 3에 제시된 용도별 용수수요량으로 설정하였고, 생활용수 피해함수의 특성매개변수인 N은 「수자원장기종합계획」에서 추정된 2011년 한강권역 인구수를 4인가족 기준으로 나누어 산정된 가구수 6,658,165가구와 용수수요기간 12개월을 곱하여 산정하였다. 농업용수 피해함수의 특성매개변수인 L과 P는 각각 2011년 한강권역의 수리답면적 추정치 190,161ha와 벼의 생산가격 1,955,725원/ton이다.

물의 공급과 수요에서 통일된 시장가격이 형성되어 있지 않으면 부문별 용수시장사이에 격차가 발생하게 된다. 결국 이러한 격차는 물 부족으로 인한 피해 산정시 피해 규모의 격차를 발생시키게 되고 이는 부문별 피해의 비교를 무의미 하게 만든다. 따라서 부문별 격차를 해결하면서 사회적 효용을 평가하는 방식으로 본 연구는 피해함수를 효용함수(utility function)로 전환하여 표 2에 나타내었다.

3.2 한계효용균등에 의한 용도간 용수배분

용수부족에 따른 효용을 극대화하기 위해서는 표 2의 효용함수들의 총효용(total utility)이 최대가 되어야 하는데 용도별 부족량의 합은 579,750 × 10³m³ 초과해서는 안된다. 즉, 식(7)과 같이 비선형 최적화문제가 된다.

$$\begin{aligned} \min f(z_d, z_i, z_a) &= 3 - U_d + U_i + U_a \geq 0 & (\because 0 \leq U_d, U_i, U_a \leq 1) \\ \text{subject to } g(z_d, z_i, z_a) &= z_d + z_i + z_a \leq \varepsilon & (\varepsilon = 579,750 \times 10^3) \end{aligned} \quad (7)$$

표 1. 2011년 한강권역 물 부족 상황 (10³m³)

용도별 용수	용수수요량	가용수량	물 부족
생활용수	4,490,000	7,623,000	579,750
공업용수	1,470,430		
농업용수*	2,242,320		
계	8,202,750	7,623,000	579,750

* 수리답의 용수수요량

표 2. 용도별 물 부족 피해함수와 효용함수

용도별 용수	피해함수 및 효용함수	매개변수	
		$Q_m(10^3 m^3)$	$N, A(10a), C(W/ton)$
생활용수	$D_d = [-15.8813 + 10,824.5783 \times e^{-6.5244 + 1.4531z_d \times 10^{-9}}] \times 10^7$ $U_d = 1.7564 - 515.5703 \times e^{-6.5244 + 1.4531z_d \times 10^{-9}}$	4,490,000	$N : 79,897,980^*$
공업용수	$D_i = 7[6.3264 \times 10^5 - (1,470,430 \times 10^3 - z_i)^{0.6328}] \times 10^7$ $U_i = -2.6786 + 5.8147(1,470,430 \times 10^3 - z_i)^{0.6328} \times 10^{-6}$	1,470,430	-
농업용수	$D_a = -7.9449z_a^3 \times 10^{-16} + 1.2142z_a^2 \times 10^{-6} + 9.0827z_a \times 10^2$ $U_a = 1.0188z_a^3 \times 10^{-27} - 1.5569z_a^2 \times 10^{-18} - 1.1647z_a \times 10^{-9} + 1$	2,242,320	$A : 1,901,610$ $C : 1,955,725$
생활용수 피해함수		공업용수 피해함수	
생활용수 효용함수		공업용수 피해함수	

$0 \leq z_d, z_i, z_a \leq 579,750 \times 10^3$
 * 6,658,165: (2011년 한강권역의 가구수 예측치) × 12개월

식(7)과 같은 ϵ -제약 형태의 최적화문제에 대하여 라그랑지 승수법(lagrangian multiplier method)에 의한 해법은 식(8)의 라그랑지 함수와 식(9), (10)의 정체점(stationary point)에 대한 Kuhn-Tucker 필요조건(Kuhn and Tucker, 1950)으로 전개할 수 있다. 여기서 λ 는 라그랑지 승수이다.

$$L(z_d, z_i, z_a, \lambda) = f(\cdot) + \lambda[g(\cdot) - \epsilon] \tag{8}$$

$$\frac{\partial L}{\partial z_d} = \frac{\partial U_d}{\partial z_d} + \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial z_i} = \frac{\partial U_i}{\partial z_i} + \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial z_a} = \frac{\partial U_a}{\partial z_a} + \lambda = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(\cdot) - \epsilon \leq 0, \quad \lambda[g(\cdot) - \epsilon] = 0, \quad \lambda \geq 0 \tag{10}$$

식(9), (10)에 의해 총효용 $U(\cdot) = U(z_d) + U(z_i) + U(z_a)$ 의 효용극대화 조건은 용도별 효용함수들의 1차 편미분 값이 동일한 식(11)과 같은 형태로 나타나며 이것을 ‘한계효용균등의 법칙’이라고 한다. 즉, 한계효용균

등에서의 부족량 z_d^* , z_i^* , z_a^* 을 구할 수 있다. 식(12)는 용도별 효용함수의 편미분식을 나타낸 것이다.

표 3. 한계효용균등에 의한 용도간 용수배분 결과 (m³)

용도별 용수	2011년 용수수요량 (a)	배분된 부족량 (b)	용수배분량 (a)-(b)	충족률(%)
Domestic	4,490,000,000	273,036,049	4,216,963,951	93.92
Industrial	1,470,430,000	122,551,226	1,347,878,774	91.67
Agricultural	2,242,320,000	184,162,725	2,058,157,275	91.79
Sum	8,202,750,000	579,750,000	7,623,000,000	92.93

$$\frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_d} = \frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_i} = \frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_a} \quad , \quad z_d + z_i + z_a = 579,750,000 \quad (11)$$

$$\frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_d} = -7.4918 \times e^{-6.5244 + 1.4531z_d \times 10^{-9}} \times 10^{-7} \quad (12)$$

$$\frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_i} = -3.6795(1,470,430 \times 10^3 - z_i)^{-0.3672} \times 10^{-6}$$

$$\frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_a} = 3.0564z_a^2 \times 10^{-27} - 3.1138z_a \times 10^{-18} - 1.1647 \times 10^{-9}$$

식(12)를 풀면 z_d , z_i , z_a 는 용도별 효용함수들의 한계효용(편미분값) $-1,634,485.3073 \times 10^{-15}$ 에서 효용극대화 부족량 z_d^* , z_i^* , z_a^* 가 결정된다. 산정된 부족량과 충족률은 표3과 같다. 여기서 충족률이란 2011년 용도간 수요량에 대한 최종 배분량의 비이다.

4. 결 론

본 연구에서는 경제적 관점에서 효율성과 사회적 효용을 증시한 용도간 용수배분을 실시하였다. 한계효용균등의 법칙을 적용한 용도간 용수배분결과 각 용도별 충족률은 생활용수 93.92%, 공업용수 91.67%, 농업용수 91.79%로 생활>농업>공업 순으로 생활용수의 충족률이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 경제적 효율성과 사회적 효용 극대화를 증시한 배분 결과로 생활용수의 경우 물 부족에 따른 사회적 피해가 타 용도에 비해 상대적으로 크다는 것을 의미한다.

피해함수를 이용한 본 연구의 용수배분 방안은 기반자료의 미비로 어려움이 있었던 경제적 효율성에 의한 용수배분에 대한적 방법론을 제공한 것이라 할 수 있다. 특히, 현재 용수수요의 증가로 인해 많은 분쟁이 발생하고 있는 상황에서 물 분쟁을 사전적으로 해소하거나 혹은 분쟁 발발 사후에라도 합의형성에 유용한 잣대를 제공할 수 있을 것이다. 본 연구의 용수배분 방안은 물 부족상황과 같은 일시적 불균형의 해소 방안으로서 적합하다. 따라서 장기적 수급 불균형 상황에서는 정책적으로 수유관리뿐만 아니라 신규수자원의 개발이나 지역간 물 이전(water transfer) 등의 공급관리가 함께 병행되는 것이 바람직할 것이다.

참고 문헌

이현재 (2003). 가뭄시 용수배분을 고려한 저수지 운영. 박사학위논문, 인하대학교, pp. 63-81.

통계청 (1999). 1998년 산업총조사보고서.

농림부 (1999). 농촌용수 수요량조사 종합보고서.

농촌진흥청 (1999). 주요 농작물 기상재해 경감기술: '98 작황분석 및 기상재해 유형별 경감대책 중심.

건설교통부 (2000). 수자원장기종합계획.

Kuhn, H.W., and Tucker, A.W. (1950). "Nonlinear programming", *Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, University of California Press, Berkeley, CA, pp. 481-492.