

피해함수 산정을 통한 물 부족 상황에서의 용수배분 방안

Water Allocation by Estimation of Damage Function in a Water-Deficit Situation

이 충 성* / 박 교** / 최 승 안*** / 심 명 필****

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

Abstract

Recently, water conflicts are rapidly increasing and more serious. So, it needs to establish the reasonable water allocation rules and criteria. This study aims at performing inter-sectoral water allocation with a focus on economic efficiency and social utility. To allocate water among the sectoral water uses, water shortage damage functions were estimated and then converged to the utility functions. Finally, each sectoral water uses are allocated by applying 'law of equimarginal utility' to maximize social utility. Also weighting factor which reflects scale and characteristic of water demand in a region was estimated to perform the inter-regional water allocation. The water allocation rule was applied to the future water-deficit situation in Han-river basin. As a result, domestic water use was allocated more sufficient than agricultural and industrial water use. Also, the water shortage occurs severely in the rural area like Gangwon-do because of its low urbanization and industrialization. This study suggests a alternative view of the economic water allocation which have difficulty under water supply mechanism in Korea.

keywords : water allocation, damage function, water-deficit, equimarginal utility, utility function

요 지

최근 들어, 물 분쟁은 발생횟수 뿐만 아니라 그 심각성이 증대되고 있는 실정이다. 따라서 합리적인 용수배분 방안과 설득력 있는 기본원칙 수립 필요성이 부각되고 있다. 본 연구의 목적은 경제적 효율성과 사회적 효용을 중시한 용도간 용수배분을 실시하는 것이다. 용도간 배분을 위해서는 물 부족에 따른 피해함수를 산정한 후, 이를 효용함수로 전환하였으며 '한계효용균등의 법칙'을 적용하여 사회적 효용을 극대화하고자 하였다. 또한 지역의 용수수요 규모 및 특성을 반영한 가중치를 산정하여 지역간 용수배분에 적용하였다. 이러한 용수배분방법을 한강권역의 미래 물 부족상황에 적용한 결과, 생활용수의 배분량이 농업 및 공업용수에 비해 상대적으로 크게 산정되었다. 지역별로는 상대적으로 낮은 도시화, 공업화가 진행된 강원도 지역이 물 부족량의 상당부분을 부담하는 것으로 나타났다. 본 연구는 국내의 용수공급 체계상 어려움이 있는 경제학적 용수배분에 대한 하나의 대안을 제공한 것이라 하겠다.

핵심용어 : 용수배분, 피해함수, 물 부족, 한계효용균등, 효용함수

* 인하대학교 환경토목공학부 박사과정

Ph.D. Candidate, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: sung@inha.ac.kr)

** 인하대학교 환경토목공학부 석사과정

MS Candidate, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: pk4102@naver.com)

*** 인하대학교 환경토목공학부 박사과정

Ph.D. Candidate, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: sachoi@inha.ac.kr)

**** 인하대학교 환경토목공학부 교수

Prof., Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: shim@inha.ac.kr)

1. 서론

수자원은 그 특성상 가변적이고 불확실하여 수요자간에 양질의 충분한 수량을 확보하고자하는 갈등 가능성이 상존한다. 특히 수리권분쟁과 같은 이수측면의 분쟁은 이해관계가 첨예하게 대립하여 조정이 어렵기 때문에 이를 사전에 예방하기 위해서는 합리적 기준에 의한 용수배분이 매우 중요하다. 수자원개발의 역사가 오래된 서구 선진국에서는 이미 오래전부터 수리권과 관련된 분쟁에 직면해 왔으며, 이에 따라 각국의 상황을 고려한 현실적인 용수배분 기준들을 수립하고 있다.

용수배분에 관한 연구는 이론적 접근보다는 기존방법을 분류하고 고찰하는 것으로 시작되었다. 세계은행(World Bank, 1998; 1999), 뉴질랜드 농림부(MAF, 2001), Kärkkäinen(2001)은 세계 각지에서 적용중인 용수배분 체계를 유형별로 분류하고 장·단점을 기술하였으며, 정부의 역할과 제도적 보완을 전제로 경제적 효율성과 사회적 형평성을 상황에 따라 적절하게 조합할 수 있는 형태를 이상적인 방법으로 제시하였다.

용수배분에 있어 경제적 효율성은 일차적인 기준이 되므로 이와 관련한 연구는 활발하다. Rosegrant et al.(2000)은 유역단위의 경제·수문통합모델링 체계를 개발하여 물 배분과 이용의 효율성을 향상시키고자 하였고, Bennett et al.(2000)은 물 배분에 있어 '지역간 협약'이라는 제도적 틀을 이용하는 방안을 다루었는데 경제적 효율성에 중점을 두었다. Ringler(2001)는 메콩강 유역을 대상으로 효율성, 형평성, 지속가능성 기준을 바탕으로 제도적 보완 및 유역통합관리에 의한 거래방식과 보상방식을 설정하는 연구를 수행하였다. 이밖에도 미국, 멕시코, 칠레, 호주 등은 시장주의적 경쟁원칙으로 효율성을 중시하는 '물시장'을 도입하고 있으며 물시장, 물은행, 물임대 등 다양한 형태로 적용되고 있다.

국내의 경우 체계적 연구는 미진하지만 점차 연구가 활발해지고 있다. 한동근과 김종원(2000)은 보상적 인센티브에 의한 계량경제학적 모형을 지역간 용수배분에 적용하였으며, 물시장 도입도 검토된 바 있다(건설교통부, 2000a). 또한 김종원(2002)은 사회적 편익을 최대화하고 비윤배분, 고정배분을 고려한 용수배분모형을 제안 하였으며, 이현재(2003)는 조건부가치측정법(CVM, contingent valuation method)으로 지불의사(WTP, willingness to pay)의 보상수요함수를 도출한 결과와 계층화분석과정(AHP, analytic hierarchy process)을 이용하여 용수배분을 위한 저수지 운영을 실시하였다. 이충성 등(2004)과 Yi et al.(2005)은 경제적 효율성 이외에도 형평성, 지속가능성 기준에 의한 용도별, 지역별

가중치를 산정하여 용수배분에 활용한 바 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. 또한 지역적 특성을 반영하는 지역가중치를 적용하여 형평성을 고려한 지역간 배분이 이루어지도록 하였다. 산정된 피해함수와 지역가중치는 「수자원장기종합계획」(건설교통부, 2000b)에서 예상한 2011년 한강권역의 물 부족 상황에 대해 용수배분을 실시함으로써 적용성을 검토하였다.

2. 용수배분의 경제적 효율성

합리적 용수배분을 위해서는 '물'이란 자원이 가지는 복잡한 사회·경제적 특수성이 모두 반영되어야 하겠지만 먼저 검토해야 할 부분은 경제체로서의 용수배분의 효율성(efficiency)이 될 것이다. 즉, 수자원이 갖는 공공성에 비해 가공되어진 '용수'의 공급은 수요량을 만족시킬 수 없는 경우에는 시장논리에 의한 경제체로서 파악되어야 한다는 것이다(이충성 등, 2004). 인간생명에 절대조건인 용수를 경제적 관점에서 배분한다는 것은 자칫 형평성과 분배적 정의의 관점에서는 비합리적일 수 있으나, 다수가 인정할 수 있는 일차적 판단기준은 역시 경제적 효율성이 될 것이다.

2.1 용수의 경제적 가치

오늘날 용수수요 급증과 수질오염 심화는 가용 수자원의 양을 점점 줄이고 있다. 특히 과거에 농업용수가 주를 이루던 물 수요는 시대의 변천에 따라 생활용수, 공업용수, 환경용수 등으로 바뀌어 가고 있다. 이는 곧 물의 경제적 가치에 대한 사회적 인식의 변화를 가져왔고 용수를 생산하기위해 자본이 투입됨으로써 용수는 '경제재'로서의 면모를 갖추게 되었다. 여기서 경제재(특히 일반적인 경쟁재)로서의 용수는 경제학에서 정의하는 '공공재'는 아니다. 다만 용수는 경제재이면서도 수요와 공급의 측면에서 공공적 논리를 강하게 갖는 재화이다.

경제체로서의 용수는 그 효율성 측면에서 경제적 효율성과 재정적 효율성으로 구분된다. 재정적 효율성은

단지 자본의 흐름과 관련된 것으로 재화와 서비스는 그것들이 교환되거나 소비될 때 자본이 교환되는 가치이다. 경제적 효율성은 재화와 서비스의 소비가 재정적 교환을 수반하는지의 여부와는 상관없이 대중이 가치를 부여한 모든 재화 및 서비스와 관련이 있다. 예를 들면 비용을 들이지 않고 사용이 가능한 레크리에이션용수는 재정적 효율성의 관점에서는 무시된다. 그러나 레크리에이션을 즐기는 사람들이 위락시설 사용을 위해 지불해야 하는 기회에 대하여 지불의사(WTP)가 있다면 경제적 효율성과 관련이 있다(한국수자원공사, 2002).

2.2 용수시장의 불균형

경제학에서 이상적인 '시장'의 역할은 다양한 형태의 불균형(disequilibrium)을 완전경쟁을 통한 조정으로 균형(equilibrium)에 다다르게 하는 것이다. 용수시장의 불균형도 일반적인 재화시장의 불균형과 마찬가지로 장기적 불균형(또는 평균적, 구조적 불균형)과 일시적 불균형(또는 분산적, 마찰적 불균형)으로 대별된다.

Fig. 1(a)는 장기적 불균형을 나타내며, 장기적인 용수수요와 공급전망을 비교할 때 평균적으로 불균형을 이룬 상태를 뜻한다. 즉, 장기적 불균형 상태에서는 임의의 고정된 가격에서 수요 D1이 공급 S1을 상회하게 되어 물 부족현상이 나타나며 그 차이는 D1을 D2로 낮추든지 S1을 S2로 확대함으로써 해소할 수 있을 것이다. Fig. 1(b)는 일시적 불균형을 나타내며 가격 이외의 외생변수(exogenous variable) 즉, 가뭄 등의 상황으로 인한 단기적 수급의 불균형을 뜻한다. 여기서 중요한 점은 일반적인 재화시장과 달리 일시적 불균형이 공급량(의도)의 감소에 의해 일어나는 것이 아니라 단기적 공급의 감소라는 것이다. 즉, S3에서 S4로 공급곡선이 이동(shift of the supply curve)하면 원래의 균형가격(equilibrium price) p 는 수요량의 감소에 따라 일시적으로 p' 에서 가격을 형성한다. 이때 높아진 가격에 의해 공급량(quantity supplied)은 다소 증가하게 되며, 이로 인해 낮아진 가격은 다시 수요량을 증가시키게 된다. 이처럼 반복적 과정에 의해 균형가격 p_e 에 도달하게 되는 것이다.

일반적으로는 두 가지 불균형이 복합적으로 작용하게 되지만 이렇게 분류하는 이유는 발생 원인이 다르므로 그 해소방안도 달리 접근해야 하기 때문이다. 즉, 양을 조절하여 불균형을 해소하거나 가격을 조절하여 불균형을 해소하는 것이 일반적인 경제학의 논리이다. 양에 의한 조절은 장기적 불균형에 대해 공급의 변화나 수요의 변화를 통틀어 이루어질 수 있다. 정부의 정책으로 말하면 공급정책(S1→S2)이나 수요관리정책(D1→

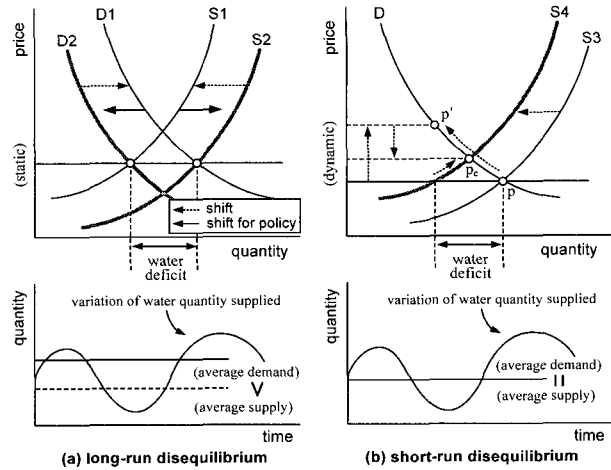


Fig. 1. Two types of disequilibrium in the water market

D2)을 말한다. 그러나 불균형이 일시적 특성을 갖는다면 평균공급이나 평균수요는 변화시키지 않고, 다른 나머지 수단인 가격을 이용하여 일시적 불균형을 해소하는 것이 가장 효율적 해결방법이 될 것이다.

2.3 한계효용균등의 법칙

경제학적으로 '용수'라는 재화의 가장 기본적인 특성은 '가분성(divisibility)'에 있다. 가분성은 경제학에서 효율성 논리의 기본인 한계법칙(law of marginality)을 적용할 수 있는 여지를 준다는 측면에서 매우 중요한 인식이 된다. 즉, 불가분적인 재화의 불균형 해소방법과는 달리 가분적 재화의 불균형 해소에는 한계법칙이 적용될 수 있다는 것이다.

가분적 재화로서 용수의 효율적인 불균형 해소는 사회 전체적인 후생(social welfare) 극대화를 목표로 한다는 가정 하에 Eq.(1)과 같은 한계효용균등의 법칙(law of equimarginal utility)을 적용할 수 있다. 경제학에서 한계효용균등이란 각 재화 한단위의 소비로 인한 효용의 변화율인 한계효용이 균등한 상태에서의 배분이 총 효용을 극대화하게 된다는 법칙이다.

$$U(\cdot) = U(X) + U(Y) + U(Z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial U(\cdot)}{\partial X} = \frac{\partial U(\cdot)}{\partial Y} = \frac{\partial U(\cdot)}{\partial Z}$$

여기서, $U(\cdot)$: 사회효용함수(총 효용)

X, Y, Z : 재화의 수요량

Eq.(1)을 현실적으로 적용하기 위해서는 최소한 용도별 용수를 결합한 사회효용함수를 정량적으로 규정하고 측정할 수 있어야 한다. 그러나 이러한 함수를 직접적으로 도출해 내는 것은 매우 어려운 일이다. 가능한 방

법으로는 용수사용간의 독립성 가정 하에 용도별 용수의 지불의사(혹은 수요함수)를 도출하여 각 용도별 수요량과 가격의 함수로서 효용을 표현하여야 한다. 그러나 전형적인 공공기관 주도의 용수배분체계를 갖추고 있는 우리나라에서는 용수시장의 수요함수를 도출한다는 것 자체가 쉬운 일이 아니다.

본 연구는 이러한 점을 감안하여 물 부족 상황에서 용수의 공급부족에 따른 피해발생 정도를 피해함수로 나타내고 이를 효용함수로 전환하는 방식을 사용하였다. 즉, Eq.(1)은 Eq.(2)와 같이 표현될 수 있으며 Fig. 2와 같이 한계효용균등의 법칙을 적용할 수 있다.

$$U(\cdot) = U(z_d) + U(z_i) + U(z_a) \quad (2)$$

$$\frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_d} = \frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_i} = \frac{\partial U(\cdot)}{\partial z_a}$$

여기서, z_d, z_i, z_a : 생활, 공업, 농업용수 부족량

$z_i = z_i^* + z_i^* + z_i^*$: 총 부족량

z_d^*, z_i^*, z_a^* : 용도별 부족량 배분값

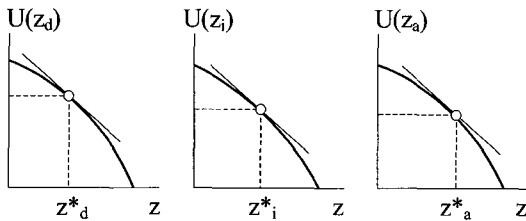


Fig. 2. Allocation of water shortage by law of equimarginal utility

3. 물 부족 피해함수의 유도

용수공급 부족으로 인한 피해는 그 기준과 산정방법이 명확하게 제시된 바가 없는 실정이다. 특히 생활용수나 하천유지용수의 경우는 무형의 피해가 대부분이어서 정량화하기가 더 어렵다. 본 연구에서는 생활용수의 경우 이현재(2003)가 제시한 제한급수율별 지불의사에 따라 도출된 보상수요(hicksian demand)를 이용해 용수공급 감소에 따라 수요자가 추가로 부담할 지불의사의 상승분을 피해로 정의하였다. 농업용수, 공업용수의 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 효용함수 도출을 위한 과정으로는 의미가 있다고 볼 수 있다. 하천유지용수의 경우는 최소한의 보장된 수량으로 보아 본 연구의 배분대상에서는 제외하였다.

3.1 생활용수

Fig. 3은 지불의사에 따른 보상수요함수로부터 피해함수를 유도하는 과정을 나타내고 있다. 용수공급량에 대한 보상수요함수를 피해와 연관시킨다면 용수 한 단위가 감소 할 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.

이현재(2003)는 가구당 월평균 19.2m³의 생활용수가 공급된다고 할 때, 동두천, 강남, 평촌의 제한급수율별 지불의사액을 Table 1과 같이 조사하였다. 세 지역 중 동두천은 2001년 5월의 심각한 가뭄으로 제한급수를 실제 경험하였다. 이러한 점이 반영된 듯 동두천과 가뭄을 경험하지 않은 지역들의 지불의사금액은 상당한 차이를 나타내고 있다. 반면에 강남과 평촌의 지불의사액 차이는 두 지역의 평균소득격차에 기인한 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 가뭄경험 및 소득 조건 등을 배제하고 상대적으로 일반성이 있다고 보아지는 평촌지역이 한강권역의 생활용수에 대한 지불의사를 대표한다고 가정하였다. 그러나 이는 편의를 위한 가정일 뿐, 정확한 측정을 위해서는 직접 용수배분 지역을 대상으로 수요함수를 도출하여야 할 것이다.

Table 1에 제시된 자료를 기초로 Fig. 4와 같이 회귀식을 유도하면 보상수요함수인 Eq.(3)을 도출해 낼 수 있고 이로부터 공급부족에 따른 피해액을 나타내는 피해함수를 Eq.(4)와 같이 유도해 낼 수 있다.

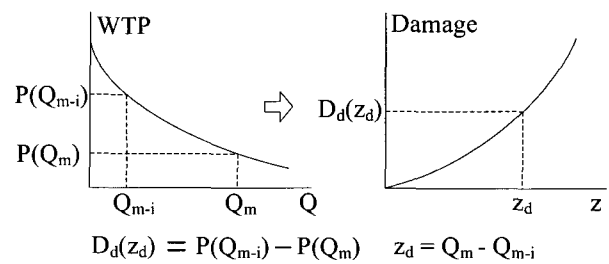


Fig. 3. Derivation of the damage function for domestic water use

Table 1. Average WTP of Domestic Water Use

Study Area	WTP by Water Rationing (₩)				
	10%	30%	50%	70%	100%
Dongducheon	518	1,414	2,612	3,323	6,144
Gangnam	182	565	1,123	1,532	3,009
Pyeongchon	156	302	517	750	1,185

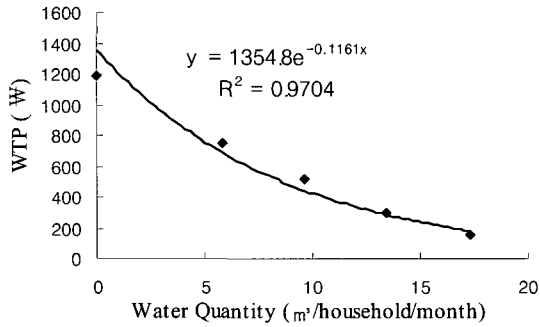


Fig. 4. Hicksian demand curve of Pyeongchon

$$P(Q) = 1354.8 \times e^{-0.1161Q} \quad (3)$$

$$D_d(z_d) = N \times 1354.8 \left[e^{-0.1161 \frac{(Q_m - z_d)}{N}} - e^{-0.1161 \frac{Q_m}{N}} \right] \quad (4)$$

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

Q_m : 평상시 배분량(m^3)

N : 급수대상 가구수 \times 용수공급기간(월)

$D_d(z_d)$: 부족량 z_d 에 따른 피해함수(원)

3.2 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. 다만 가격과 같이 투입된 용수량 이외에 생산액에 영향을 미칠 수 있는 요인들은 불변인 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 생산함수를 도출함에 있어서 특정지역의 다년간 용수량대 생산액 자료를 획득하기가 여의치 않은 관계로 1998년 1개년도의 전국적인 산업단지 자료를 사용하였다. 따라서 대상지역의 고유한 공업특성을 나타내기에 다소 문제점이 있으나 이는 향후 자료 축적이 되면 산업분류별로 생산함수를 도출함으로써 자연스럽게 해결될 것으로 기대된다.

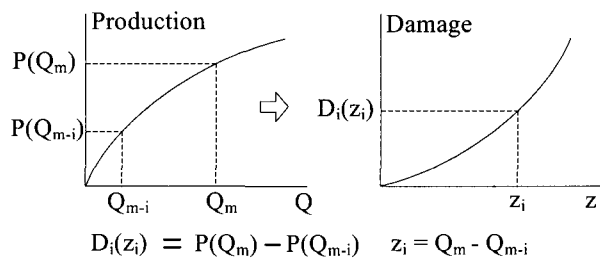


Fig. 5. Derivation of the damage function for industrial water use

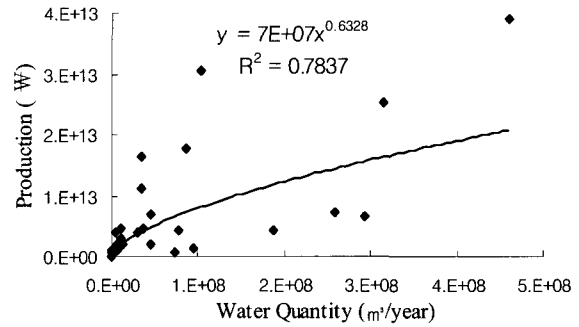


Fig. 6. Annual production curve by water input

Fig. 5는 공업용수 생산함수로 피해함수를 유도하는 과정을 나타내고 있으며 Fig. 6에서와 같이 연간 공업용수 투입량에 대한 공업생산량을 회귀식으로 유도하면 Eq.(5)와 같은 공업용수 생산함수를 얻을 수 있다. Eq.(6)은 이로부터 유도된 피해함수이다.

$$P(Q) = (7 \times 10^7) \times Q^{0.6328} \quad (5)$$

$$D_i(z_i) = (7 \times 10^7) \times [(Q_m)^{0.6328} - (Q_m - z_i)^{0.6328}] \quad (6)$$

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)

3.3 농업용수

농업용수의 피해함수는 연간 농작물(논벼)의 생육시기별 용수공급 부족으로 인한 수확량의 감소를 생산가격으로 환산하여 나타내었다. 대표작물로 논벼를 선택한 것은 농업용수의 대부분이 벼농사를 위해 사용되고 있기 때문이다. 실제로 용수공급 대상인 수리답, 관개전, 축산용수 중 수리답이 차지하는 비중은 연간 145.61억 m^3 의 약 97%인 141.91억 m^3 에 다다른 것으로 조사되어 있다(농림부, 1999). 벼 생육기간 중 필요한 평균 용수량은 Eq.(7)과 같다(농촌진흥청, 1999).

$$\begin{aligned} \text{용수량}(1,226m^3/10a) &= \text{증발산량}(863) + \text{담수량}(45) + \\ &\text{지하 침투량}(1041) + \text{지표유출량}(224) - \text{유효} \\ &\text{강우량}(947) \quad (\text{벼 재배기간 } 137\text{일 기준}) \quad (7) \end{aligned}$$

Eq.(7)의 용수량을 벼의 생육시기별로 나타내면 Fig. 7(농촌진흥청, 1999)과 같다. 이 중에서 용수부족으로 인해 벼의 생육 및 수확량에 큰 영향을 미치는 기간은 분얼기(tillering stage), 유수형성기(panicle formation stage), 수잉기(booting stage)로서 이 기간에 필요한 용수량은 각각 1,226 $m^3/10a$ 의 21%, 18%, 24%인 257.46, 220.68, 294.24 $m^3/10a$ 으로 계산된다.

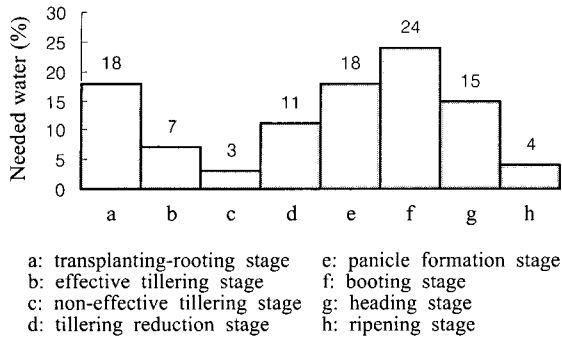


Fig. 7. Needed water during the growth period of rice

Table 2는 농촌진흥청(1999)에 제시된 벼의 생육시기별 한발정도에 따른 증상 및 수확률을 참고로 하여 생육시기별 필요 용수량을 잎과 토양의 증상에 따른 3단계 용수부족상황에 비례적으로 차감하여 용수부족량을 설정하였고, 이에 따라 용수부족 상황별로 수확기의 10a당 생산량(ton)을 나타낸 것이다. 생산량은 농림부에서 제시한 2004년 전국 쌀 생산량 5,000,149ton에 경지면적 1,001,159ha을 나누어 0.499ton/10a로 산정되었다.

이렇게 산정된 용수량과 생산량은 용수부족이 생육시기별로 중복 발생할 경우를 고려하여 총 64개 자료로 확대하였고 Fig. 8과 같이 파레토 최적성을 만족하는 자료에 대해서 회귀식으로 유도하면 Eq.(8)과 같은 농업용수 생산함수를 얻을 수 있다. Eq.(9)는 이로부터 유도된 피해함수식을 나타내고 있다. 생산함수에서 피해함수를 유도하는 과정은 Fig. 5의 공급용수와 같다.

$$P(Q) = -1.47 \times 10^{-9}x^3 + 4.02 \times 10^{-6}x^2 - 2.88 \times 10^{-3}x + 0.687 \quad (8)$$

$$D_a(z_a) = A \times C \times \left[P\left(\frac{Q_m}{A}\right) - P\left(\frac{Q_m - z_a}{A}\right) \right] \quad (9)$$

Table 2. Yield of Rice According to the Water Shortage

Growth Stage (Needed Water) (m/10a)	Apparent Symptoms	Water Shortage (m/10a)	Water Quantity (m/10a)	Rate of Yield (%)	Yield (ton/10a)
Tillering Stage (257.46)	None	-	1226	100	0.499
	I	85.82	1140	100	0.499
	II	171.64	1054	74	0.370
	III	257.46	969	65	0.325
Panicle Formation Stage (220.68)	None	-	1226	100	0.499
	I	73.56	1152	77	0.385
	II	147.12	1079	72	0.360
	III	220.68	1005	60	0.300
Booting Stage (294.24)	None	-	1226	100	0.499
	I	98.08	1128	58	0.290
	II	196.16	1030	48	0.240
	III	294.24	932	29	0.145

- I. Leaf apex wilting, slight soil cracking
- II. Half leaf wilting and discoloration, soil cracking
- III. Whole leaf wilting and discoloration, heavy soil cracking

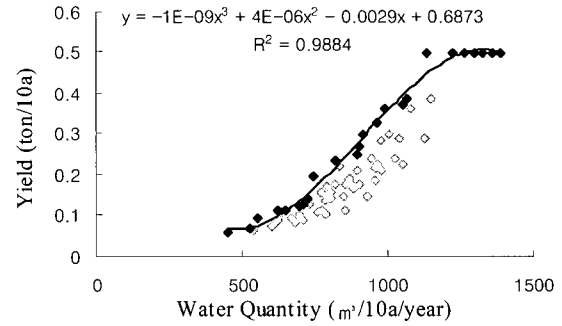


Fig. 8. Annual Yield Curve of Rice by Water Input

여기서, $z_a = Q_m - Q_{m-i}$ ($i = 0, \dots, m-1$) (m^3)
 Q_m : 평상시 배분량(m^3)
 A : 수리답 면적(10a), C : 생산가격(원/ton)
 $D_a(z_a)$: 공급부족량에 따른 피해함수(원)

4. 적용 및 결과

4.1 용수배분 상황 및 가정

「수자원장기종합계획」에서는 용수수요 증가를 고려할 때 2011년에는 물 부족 현상이 발생할 것으로 예상하고 있다. 따라서 본 연구는 2011년 물 부족 상황의 한강권역을 대상으로 용수배분 방안을 적용하였다. 한강권역은 서울, 경기, 강원, 인천, 충북, 경북과 안성천유역의 경기 및 충남(천안, 아산)지역을 포함한다.

용수배분에 앞서 피해함수 유도시 전제로 했던 가정들과 배분에 관련된 가정들은 다음과 같다.

- 가정1 : 용수배분은 행정구역 단위로 실시한다.
- 가정2 : 정상복도는 수요량이 미비하므로 배분대상에서 제외한다.

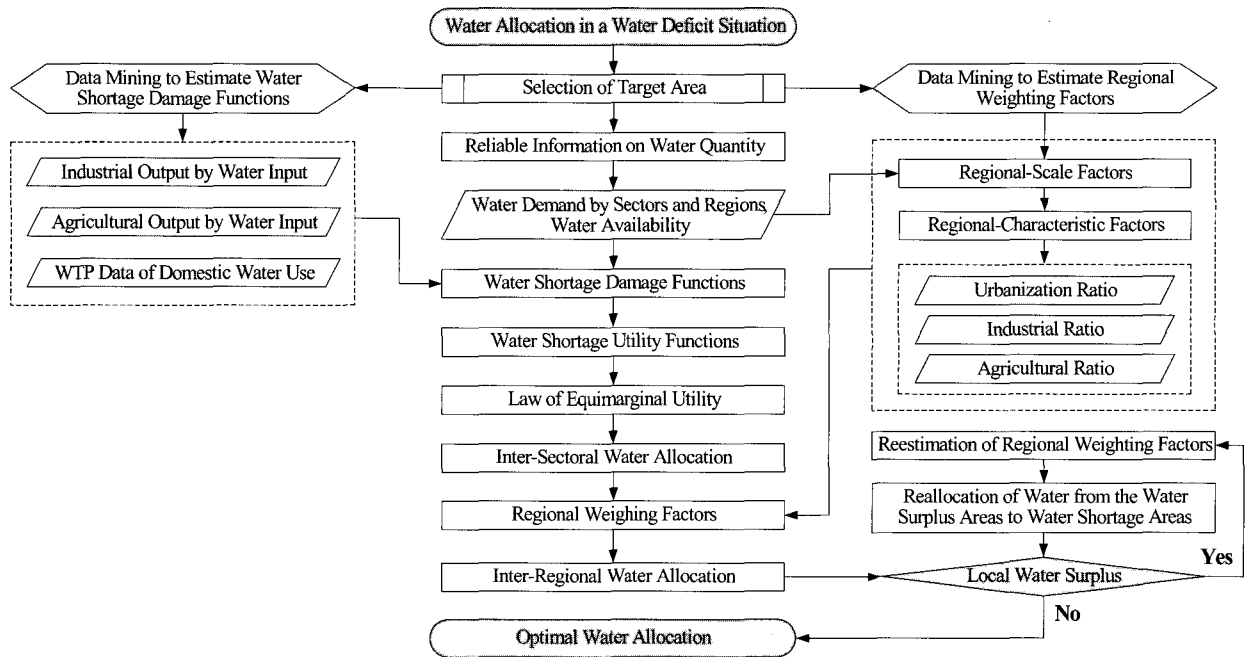


Fig. 9. Flow chart of the water allocation rule in this study

- 가정3 : 생활용수의 경우 평촌지역의 지불의사함수가 한강권역 전체를 대표한다.
- 가정4 : 전국자료로 산정한 공업용수 피해함수는 한강유역에도 적용 가능하다.
- 가정5 : 수리답이 농업용수 공급량의 약 97%를 차지하므로 전체 농업 피해를 대변한다.
- 가정6 : 하천유지용수는 보장수량으로 생각하여 배분 대상에서 제외한다.

Fig. 9는 본 연구에서 제시된 용수배분 방안의 적용 절차를 순서대로 나타낸 것이다. 한편, 「수자원장기종합계획」에서 예측한 한강권역의 2011년 용도별 용수수요량과 가용수량, 이에 따른 물 부족량은 Table 3과 같다.

4.2 용도간 용수배분

4.2.1 피해함수 및 효용함수 도출

Table 4는 적용을 위해 필요한 매개변수를 산정하여 3절에서 제시한 피해함수를 도출한 것이다. 평상시 배분량 Q_m 은 Table 3에 제시된 용도별 용수수요량으로 설정하였고, 생활용수 피해함수의 특성매개변수인 N 은 「수자원장기종합계획」에서 추정된 2011년 한강권역 인구수를 4인가족 기준으로 나누어 산정한 가구수 6,658,165과 용수수요기간 12개월을 곱하여 산정하였다. 농업용수 피해함수의 특성매개변수인 L 과 P 는 각각 2011년 한강권역의 수리답면적 추정치 190,161ha와 벼의 생산가격 1,955,725원/ton이다.

Table 3. Water-Deficit Situation in 2011 ($10^3 m^3$)

Sectoral Water Use	Water Demand	Water Availability	Water Deficit
Domestic	4,490,000	7,623,000	579,750
Industrial	1,470,430		
Agricultural*	2,242,320		
Sum	8,202,750	7,623,000	579,750

* Water use of irrigated paddy field

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

일반적으로 불확실성하의 의사결정을 위해 사용하는 효용함수는 본 연구와 같은 확실성하의 의사결정을 위해서는 가치함수(value function), 순서 효용함수(ordinal utility function), 선호함수(preference function) 또는 효용함수라고도 한다(강명규, 1990). 본 연구에서는 '효용함수'라는 용어를 사용하였다. 효용함수를 부과하는 여러 가지 방법 중 가장 널리 사용되는 방법은 중간가치 분할법(Mid-value Splitting Technique)으로 다음과 같은 절차를 통해 산정된다.

단계1 : x 의 구간 $[x^0, x^*]$ 을 결정하고 $U(x^0) = 0$, $U(x^*) = 1$ 로 설정한다.

Table 4. The Sectoral Water Shortage Damage Functions and Utility Functions

Sectoral Water Use	Water Shortage Damage Function & Utility Function	Parameter	
		Q_m (10^3 m ³)	$N, A(10a), C(\text{₩/ton})$
domestic	$D_d = [-15.8813 + 10,824.5783 \times e^{-6.5244 + 1.4531z_d \times 10^{-9}}] \times 10^7$ $U_d = 1.7564 - 515.5703 \times e^{-6.5244 + 1.4531z_d \times 10^{-9}}$	4,490,000	$N : 79,897,980^*$
industrial	$D_i = 7[6.3264 \times 10^5 - (1,470,430 \times 10^3 - z_i)^{0.6328}] \times 10^7$ $U_i = -2.6786 + 5.8147(1,470,430 \times 10^3 - z_i)^{0.6328} \times 10^{-6}$	1,470,430	-
agricultural	$D_a = -7.9449z_a^3 \times 10^{-16} + 1.2142z_a^2 \times 10^{-6} + 9.0827z_a \times 10^2$ $U_a = 1.0188z_a^3 \times 10^{-27} - 1.5569z_a^2 \times 10^{-18} - 1.1647z_a \times 10^{-9} + 1$	2,242,320	$A : 1,901,610$ $C : 1,955,725$
Domestic Damage Function		Industrial Damage Function	
		Domestic Utility Function	

$0 \leq z_d, z_i, z_a \leq 579,750 \times 10^3$

* 6,658,165: (estimated number of households of the Han-river basin in 2011) \times 12(number of months)

단계2 : 구간 $[x^0, x^*]$ 의 중간가치점을 결정하여 이를 $x_{0.5}$ 라 하고 $U(x_{0.5}) = 0.5$ 를 부과한다.

단계3 : 구간 $[x^0, x_{0.5}]$, $[x_{0.5}, x^*]$ 의 중간가치점을 결정하여 각각 $x_{0.25}$, $x_{0.75}$ 라 하고 $U(x_{0.25}) = 0.25$, $U(x_{0.75}) = 0.75$ 를 부과한다.

단계4 : 정밀한 곡선을 구하기 위해서는 위의 단계를 반복하여 더 많은 중간가치점을 구한다.

본 연구에서는 x^0, x^* 가 용수부족량 z^0, z^* 로 대응되고 피해가 낮을수록 효용이 높아지므로 $U(z^0; 0) = 1$, $U(z^*; 579,750 \times 10^3) = 0$ 으로 설정된다. 다음 단계의 중간가치점들은 앞서 산정된 피해함수에 의해 결정된다. 산정된 효용함수와 효용곡선은 Table. 4에 피해함수와 같이 제시되어 있다.

4.2.2 한계효용균등에 의한 용도간 용수배분

용수부족량의 효용극대화 배분은 총 효용에 대한 용도별 1차 편미분 값이 동일한 점 즉, 한계효용균등에서의 부족량 z_d^*, z_i^*, z_a^* 이 된다. Eqs.(10)~(12)는 용도별 효용함수의 편미분식을 나타낸 것이다.

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

$$\frac{\partial U}{\partial z_i} = -3.6795(1,470,430 \times 10^3 - z_i)^{-0.3672} \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z_a} = 3.0564z_a^2 \times 10^{-27} - 3.1138z_a \times 10^{-18} - 1.1647 \times 10^{-9} \quad (12)$$

위의 편미분식들과 제약조건을 이용하면 용도별 부족량 배분의 효용극대화 조건은 Eq.(13)과 같다.

Table. 5 Water Allocation among the Sectoral Water Uses (m³)

Sectoral Water Use	2011 Water Demand (a)	Water Shortage (b)	Water Allocation (a)-(b)	Sufficient Rate (%)
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

$$\partial U / \partial z_d = \partial U / \partial z_i \quad (13)$$

$$\partial U / \partial z_d = \partial U / \partial z_a$$

$$z_d + z_i + z_a = 579,750,000$$

Eq.(13)을 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 Table 5와 같다. 여기서 충족률이란 2011년 용도간 수요량에 대한 최종 배분량의 비이다.

4.3 지역간 용수배분

피해함수를 이용한 용도별 용수배분은 사회적 효용극대화 측면에서는 중요하지만 일반적으로 용수는 지역 또는 집단을 대상으로 배분되는 것이 현실이다. 따라서 지역내 경제구조상 특정용도의 수요가 편중된 지역은 지나치게 과대 혹은 과소 배분될 여지가 있으므로 지역 특성 반영에 의한 형평성을 고려하지 않을 수 없다. 지역간 용수배분은 본 연구의 부수적인 부분이므로 자세한 내용은 이충성 등(2004)을 참고하기 바란다.

4.3.1 지역가중치 산정

지역가중치는 지역규모가중치와 지역특성가중치로 구분되어지는데, 지역규모가중치로 사용되는 지역내 용수 수요량은 지역의 인구나 경제적 규모를 반영하고 있으므로 이를 통해 지역규모에 따른 용도별 수요량의 상대적 비율을 감안할 수 있게 된다. 지역특성가중치는 지역의 도시화율, 공업화율 및 농업화율을 계산하여 지역간 용수수요의 절대적 규모와는 상관없이 지역내에서 우월적 중요도를 갖는 용도에 대한 형평성 차원의 고려를 하기 위함이다. Table 6은 이렇게 산정된 지역가중치를 나타내고 있다.

4.3.2 지역가중치에 의한 지역간 용수배분 결과

지역간 용수배분은 용도별로 각각 진행된다. 적용순서는 용도별 배분량에 대하여 지역가중치를 적용하여 배분한 후 수요량을 충족한 지역을 제외하고 나머지 지역들에 대해 가중치를 정규화 하여 재계산하며, 이를 잔여수량에 대해 다시 적용하는 방식이다. 총 4회에 걸친 반복적 배분과정을 통해 용도별, 지역별로 산정된 배분량은 Table 7과 같다.

Table 6. Estimated Regional Weighting Factors

Sectoral Water Use	Regional Weighting Factor							
	Gangwon	Gyeonggi	Seoul	Incheon	Chungbuk	Cheonan	Asan	Sum
Domestic	0.0034	0.1253	0.8137	0.0517	0.0033	0.0023	0.0003	1.0000
Industrial	0.0263	0.7206	0.0488	0.1726	0.0186	0.0098	0.0034	1.0000
Agricultural	0.0120	0.8018	0.0014	0.0938	0.0300	0.0228	0.0383	1.0000

Sectoral sum of regional weighting factors always should be 1

Table 7. Regional Water Allocation by the Regional Weighting Factors (m³)

Sectoral Water Use	Regional Water Allocation (Sufficient Rate, %)							Sectoral Sum
	Gangwon	Gyeonggi	Seoul	Incheon	Chungbuk	Cheonan	Asan	
Domestic	59,128,921 (20.86)	1,974,845,989 (100)	1,691,819,270 (100)	407,385,353 (100)	56,312,136 (53.60)	22,376,684 (100)	4,469,362 (100)	4,216,337,715 (93.92)
Industrial	78,502,000 (100)	885,526,000 (100)	154,395,774 (55.75)	180,422,000 (100)	28,720,000 (100)	10,107,000 (100)	2,610,000 (100)	1,340,282,774 (91.62)
Agricultural	362,457,275 (66.31)	1,130,570,000 (100)	8,560,000 (100)	148,660,000 (100)	262,460,000 (100)	53,800,000 (100)	74,670,000 (100)	2,041,177,275 (91.72)
Regional Sum	500,088,196 (55.04)	3,990,941,989 (100)	1,854,775,043 (93.80)	736,467,353 (100)	347,492,136 (87.70)	86,283,684 (100)	81,749,362 (100)	7,597,797,764 (92.91)

Gyeongbuk is excluded because of its small water demand

2011 water demand in Gyeongbuk : domestic 626,236 / industrial 7,596,000 / agricultural 16,980,000 / regional sum 25,202,236

5. 분석 및 고찰

한계효율균등의 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 중시한 배분 결과로 생활용수의 경우 물 부족에 따른 사회적 피해가 타 용도에 비해 상대적으로 크다는 것을 나타낸다.

지역간 형평성을 고려하기 위해 실시한 지역간 용수 배분 결과는 생활용수의 경우 도시화율이 낮은 강원과 충북이 낮은 충족률을 보였으며 공업용수는 서울시, 농업용수는 강원도가 낮은 충족률을 보였다. 전체적으로는 도시화, 공업화가 높은 경기도나 인천광역시에 비해 강원도가 상대적으로 낮은 충족률을 나타냈다.

지역간 용수배분 방법은 가중치에 의한 배분방식을 택하고 있는데, 배분결과를 보면 가중치가 높은 용도의 용수가 우선충족 되는 현상이 나타나고 있다. 이러한 현상은 가중치가 높은 지역이 수요량보다 큰 배분을 받을 수 있으므로 잔여수량을 계속 재배분하는 과정에서 발생하는 것인데 물 부족이라는 비상상황에서 고통분담 차원으로 접근한다면 바람직하지 않은 결과일 수 있다. 따라서 용수배분시 사회적 합의에 의해 용도별로 상·하한값이 적절하게 설정되는 것이 바람직할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 경제적 관점에서 효율성과 사회적 효용을 중시한 용도간 용수배분을 실시하였다. 또한 지역간 형평성을 고려하기 위해 가중치에 의한 지역간 용수 배분도 실시하였다. 이러한 과정을 통해 도출된 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 피해함수를 이용한 용수배분은 기반자료의 미비로 어려움이 있었던 경제적 효율성에 의한 용수배분에 대안적 방법론을 제공한 것이라 할 수 있다.
- (2) 현재 용수수요의 증가로 인해 많은 분쟁이 발생하고 있는 상황에서 피해함수를 통한 용수배분은 간소한 과정을 통해 효과적으로 용수배분 문제를 해결할 수 있는 잣대를 제공할 것으로 사료된다.
- (3) 피해함수와 지역가중치를 통한 배분 방안은 물 부족상황과 같은 일시적 불균형의 해소 방안으로서 적합하다. 그러나 장기적 수급 불균형 상황에서는 정책적으로 수요관리뿐만 아니라 신규수자원의 개발이나 지역간 물 이전(water transfer) 등의 공급 관리가 함께 병행되는 것이 바람직할 것이다.

참고 문헌

강맹규 (1990). 불확실성하의 의사결정론. 화중당.

건설교통부 (2000a). 수리권 거래제도 도입방안 연구.

건설교통부 (2000b). 수자원장기종합계획.

김종원 (2002). 합리적 수자원 배분모형 설정에 관한 연구. 국토연2002-2, 국토연구원.

농림부 (1999). 농촌용수 수요량조사 종합보고서.

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

이충성, 최승안, 심명필, 정관수 (2004). "가중치산정을 통한 다목적댐 용수의 배분 방안." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제8호, pp. 663-674.

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

통계청 (1999). 1998년 산업조사보고서.

한국수자원공사 (2002). 기존댐 합리적 용수배분을 통한 수리권 조정방안 연구.

한동근, 김종원 (2000). "유수자원(流水資源)의 지역간 배분보상." 자원·환경경제연구, 한국환경경제학회, 제9권, 제4호, pp. 621-639.

Bennett, L.L., Howe, C.W., and Shope, J. (2000). "The Interstate River Compact as a Water Allocation Mechanism: Efficiency Aspects." *American Journal of Agricultural Economics*, AAEA, Vol. 82, No. 4, pp. 1006-1015.

Kärkkäinen, T. (2001). *Pricing Irrigation Water(With a focus on developing country)*. Research Report 2001, Helsinki University of Technology.

MAF (2001). *Economic Efficiency of Water Allocation*. MAF Technical Paper No:2001/7, Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand.

Ringler, C. (2001). *Optimal Allocation and Use of Water Resources in the Mekong River Basin: Multi-Country and Intersectoral Analyses*. Peter Lang., Germany, pp. 5-14.

Rosegrant, M.W., Ringler, C., McKinney, D.C., Cai, X., Keller, A., and Donoso, G. (2000). "Integrated Economic-Hydrologic Water Modeling at the Basin Scale: The Maipo River Basin." *Agricultural Economics*, IAAE, Vol. 24, No. 1, pp. 33-46.

World Bank (1998). *Water Allocation Mechanisms Principles and Examples*. Washington, D.C.

World Bank (1999). *Inter Sectoral Water Allocation, Planning and Management*. Washington, D.C.

Yi, C.S., Choi, S.A., Shim, M.P., Kim, H.S., and Kim, B.S. (2005). "Water Allocation by Weighting Factors Considering Multiple Criteria." *Water Science and Technology: Water Supply*, IWA, Vol. 5, No. 3-4, pp. 105-114.

(논문번호:06-22/접수:2006.01.27/심사완료:2006.04.04)