

# 수자원의 지속가능성 평가 지수 개발과 구성 요소의 중요도 평가

## Development of Assessment Index for Water Resources Sustainability and Weights Evaluation of It's Components

강 민 구\* / 이 광 만\*\*

Kang, Min Goo / Lee, Gwang Man

### Abstract

To assess the water resources sustainability, many indicators and methodologies have been suggested by international organizations and developed in other countries. However, in the previous studies, some of indicators were unsuitable for assessing the sustainability of water use and management in Korea. Thus, in this study WRSI(Water Resources Sustainability Index), a multi-variable index, was created by consideration of environmental, social, and economical criteria. Relative weights for components, indicators and sub-indexes, were determined by employing the Analytic Hierarchy Process. In order to extract the indicators related with water resources sustainability, the data related with water resources and indicators suggested in various field were compared and thoroughly reviewed. These indicators were classified into four groups; Economic Efficiency Index, Social Equity Index, Environmental Conservation Index, and Maintenance Capability Index. The weight of each component were decided by the survey of 127 specialists in water resources and sustainability. The result of survey represented that efficiency and equity of water use and water quality for river restoration are major issues in enhancing the water resources sustainability. In addition, it was found that investment and public participation should be considered for sustainable water use.

**keywords** : Sustainability, Water resources, Indicator, Index, Relative weight, Analytic Hierarchy Process

### 요 지

지속가능한 수자원 이용과 관리를 위해서는 유역 내에서 진행되고 있는 수자원과 관련된 활동들이 지속가능한 개발의 개념에 부합하는지 여부를 판단해야 한다. 이를 위해서는 유역의 수자원 이용과 관리에 영향을 미치는 수문, 수질, 사회, 경제 및 환경 요인을 고려한 평가지수가 필요하다. 본 연구에서는 수자원의 지속가능성을 평가할 수 있는 지표들을 선정하고 이들을 통합한 수자원 지속가능성 지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)를 개발하였다. WRSI를 구성하는 구성요소의 중요도(Weight)는 계층적 분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 사용하여 결정하였다. 수자원의 지속가능성을 세부적으로 평가하기 위하여 WRSI를 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성, 유지관리능력 등 4개 세부기준으로 구분하였다. 세부지수의 구성 지표는 유역조사, 사회 및 경제 통계, 여

\* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원  
Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(KOWACO),  
Daejeon, Korea, 305-730 (e-mail: kmg90@kowaco.or.kr)

\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원  
Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(KOWACO),  
Daejeon, Korea, 305-730 (e-mail: lkm@kowaco.or.kr)

론조사 및 관련된 선행 연구결과를 분석하고 적합성을 평가한 후 선정하였다. WRSI 구성요소들의 중요도는 127명의 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하여 결정하였다. 세부지수와 구성 지표의 중요도 분석결과는 수자원의 지속가능한 이용을 위해서 수자원 이용의 효율성과 공평성 증대, 하천 수질을 향상시켜 친수기능의 복원이 중요하다는 것을 나타냈다. 또한, 수자원 분야에 지속적으로 적정 재원의 투입이 필요하며, 수자원 정책 결정에 대한 주민들의 참여가 필요하다는 것을 나타냈다.

**핵심용어** : 지속가능성, 수자원, 지표, 지수, 중요도, Analytic Hierarchy Process

## 1. 서론

지속가능한 개발 개념은 세계적으로 1980년 대 후반 부터 경제개발과 환경보전의 패러다임이 되어 왔다. 영국, 독일, 일본, 미국 등과 같은 선진국에서는 이 개념을 바탕으로 국토개발의 전략을 수립하고 있다. 우리나라에서도 지속가능한 개발 개념에 근거하여 국토개발계획을 수립하고 있으며, 다양한 분야에 도입되고 있다(국토개발연구원, 2003). 사회 인프라의 한 축인 수자원 분야에도 이 개념이 적용되어 수자원 개발과 관리의 기본 이념 역할을 하고 있다. 최근에는 지속가능한 개발 개념을 바탕으로 댐 건설, 치수, 하천환경, 수자원 이용, 수자원 관련 기술 개발 등의 문제점을 파악하고 향후 발전방향을 수립하고 있다.

지속가능한 개발 개념은 일반적으로 자원을 효율적으로 사용하고, 사회적으로 공평하게 분배하며, 후세대가 사용이 가능하도록 생태적 능력을 유지할 수 있는 범위 내에서 개발하는 것으로 정의된다. 수자원 분야에서 지속가능성은 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성을 기본으로 다양하게 정의가 되고 있다. 이들 정의의 공통점을 정리하면, 지속가능한 수자원 이용은 현 세대 뿐만 아니라 미래 세대들도 사용이 가능하도록 수자원을 재생이 가능하게 이용하며, 생태계를 고려하면서 사용자가 원하는 수준의 수량과 수질을 달성하도록 수자원을 관리하고, 수자원과 관련된 사회적 시스템을 유지 발전시키는 것이라 할 수 있다(ASCE, 1998; Cai et al., 2002; Huang et al., 1998; Loucks and Gladwell, 1999; Heathcote, 1998).

지속가능한 수자원 이용과 관리를 위해서는 유역 내에서 진행되고 있는 수자원과 관련된 활동들이 지속가능한 개발 개념에 부합하는지 여부를 판단해야 한다. 과거 유역의 수자원 평가는 수요와 공급의 과부족을 판단하는 물수지 기법, 최적화 기법, 모의 기법과 같은 공학적인 방법에 의존해 왔다. 이들 방법들은 공급의 신뢰도, 부족심도, 시스템의 복원도와 같은 단일 지표를 제공한다(Fowler et al., 2003). 그러나 이러한 단일 지

표에 의한 평가는 수자원의 지속가능성을 종합적으로 평가할 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 국가, 유역, 지자체 등의 수문, 수질, 사회, 경제, 환경적 요인들을 고려한 다양한 지표들로 구성된 평가 지수가 필요하다(Kranjnc and Glavic, 2004; 김대일 등, 2002; 김휘린 등, 2003).

국내·외에서 지속가능성을 평가하기 위해 개발된 지수를 살펴보면 수자원의 지속가능성을 집중적으로 평가할 수 있는 지수들이 많지 않다. 이는 지속가능성의 평가는 수자원 분야만을 고려하는 것이 아니라, 사회, 경제, 환경 등 다양한 분야를 고려해야 하기 때문이다. 수자원의 이용 및 관리 상태를 평가하기 위한 지수로는 WPI(Water Poverty Index), SWSI(Social Water Stress/Scarcity Index), ESI(Environmental Sustainability Index) 등이 있다(Sullivan; 2001, 2002; UNEP, 1988; UNCSD, 2001; OECD, 1998; EEA, 1999). 수자원의 지속가능성을 평가하는 지수는 수자원과 관련된 정보들을 단순화시키고 계량화하여 내포된 의미를 비전문가들도 이해하기 쉬워야 한다. 그러나 이들 지수를 구성하는 지표들 중에는 관련 자료를 우리나라에서 획득할 수 없는 것들도 있어 적용에 제약이 따른다. 그리고 지표들간의 중요도를 고려하지 않고 있어 현재의 수자원 이용 및 관리 상태를 평가하기 어렵다. 따라서, 주민, 지자체, NGO, 이해당사자들의 의견을 적절히 반영하지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 수자원 이용과 관리의 지속가능성을 평가할 수 있는 지표들을 선정하고 이들로 구성된 수자원 지속가능성 지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)를 개발하였으며, 세부지수들과 구성 지표들의 중요도를 평가하였다. WRSI를 구성하는 지표들은 유역조사, 사회·경제 통계를 분석하여 지표로서의 적절성을 평가한 후 선정하였다. 지표들의 중요도는 계층적 분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 사용하였으며, 수자원 관련 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 또한, 수자원 이용과 관리의 지속가능성을 향상시키기 위하여 필요한 항목을 도출하여 향후

수자원 분야의 발전방향으로 제시하였다.

## 2. 수자원 지속가능성 평가 지수 개발

지속가능성은 일반적으로 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성으로 대별되나 내포하는 의미가 광범위하다. 또한, 관련된 분야도 다양하므로 몇 가지의 지표만을 사용하여 지속가능성을 평가하기 어렵다. 수자원의 지속가능성도 관련된 요인들이 다양하고 내용이 광범위하므로 몇 개의 세부기준을 정하고 각 세부기준을 평가할 수 있는 지표들을 사용하여 분석하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 수자원 지속가능성 지수의 세부기준은 관련 연구와 여론조사 결과를 분석하여 선정하였다.

### 2.1 세부기준 선정

#### 2.1.1 관련 연구결과 분석

수자원 지속가능성 지수의 세부기준을 선정하고 각 세부기준의 구성 지표들을 추출하기 위하여 관련 연구결과를 분석하였다. 수자원 이용 및 관리 상태나 지속가능성을 평가하기 위하여 개발된 지수로는 WPI(Water Poverty Index), SWSI(Social Water Stress/Scarcity Index), ESI(Environmental Sustainability Index) 등이 있다. WPI는 수자원 이용에 관련된 수문, 사회, 경제, 환경 지표들을 통합한 지수이다(Sullivan; 2001, 2002). 이 지수는 수자원 양(Resource), 수자원 이용의 접근성(Access), 사회적 관리 능력(Capacity), 수자원 이용(Use), 환경(Environment)과 같은 세부지수로 구성되어 있다. 이들 세부지수들은 각각 세부 평가 지표들로 구성된다. WPI를 적용하기 위해서는 많은 양의 자료가 필요하며, 국내에서는 세부지수들의 구성항목을 재구성하여 적용된바가 있다(한국건설기술연구원, 2004). ESI는 국가가 감당할 수 없을 정도의 환경파괴를 유발하지 않으면서 경제성장을 이룰 수 있는 능력을 측정하는 지수이다. 이 지수는 다양한 지표들을 수질, 대기, 종다양성, 토지 등과 관련된 환경 시스템(Environmental Systems), 환경영향 요인 저감(Reducing Stresses), 인류 보건에 대한 취약성 저감(Reducing Human Vulnerability), 사회 및 제도적 능력(Social and Institutional Capacity), 국제사회 기여도(Global Stewardship)로 구분하여 환경의 지속가능성을 평가한다. SWSI는 수자원에 대한 사회적 적응력을 평가하는 지수로서 WSI(Water Stress Index)를 HDI(Human Development Index)로 나눈 것이다. 여기서 WSI는 1 년에 재생가능한 물 백만 톤을 사용할 수

있는 백 명 단위의 인구수를 의미하며, 인간발전지수는 국가 내에서 평균적인 인간발전에 대한 성취도를 장수 및 보건(Life Expectancy), 지식(Education), 생활수준(GDP)과 같은 세 가지 세부지수로 구분하여 측정한다(김휘린 등, 2003). WPI, ESI, SWSI와 같은 지수들은 국가들 간의 수자원 이용 상태나 환경적 지속가능성에 대한 상대평가를 위해 개발되었으며, 수자원의 지속가능성 평가를 위한 지수로 제한적으로 사용되었다. 국내에서는 완성단계의 지수 개발은 아직까지 이뤄지지 않았으며 방법론 개발에 그치는 수준이다. 지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지수로 압력, 상태, 반응을 평가할 수 있는 항목으로 구성된 지수가 개발된 바가 있다. 이 지수는 사회적 요인, 수자원의 이용 및 기상 현상, 토지이용 변화, 환경 부하, 경제 등으로 구분되는 압력지수, 수자원 현황, 토지구조, 경제, 환경부하 등으로 구분되는 상태지수, 수질향상, 수자원, 인간활동, 환경, 자연 등으로 구분되는 대응지수로 구성되어 있다. 위와 같이 국내외에서 개발된 지수들은 평가 대상의 내용이 광범위할 경우 몇 가지의 세부기준으로 구분하고 세부기준을 평가할 수 있는 지표들로 구성되어 있다(한국건설기술연구원, 2004).

#### 2.1.2 여론 조사 결과 분석

수자원의 지속가능성은 현재뿐만 아니라 미래의 수자원 이용과 관리 상태의 발전방향을 나타낸다. 수자원의 지속가능성을 평가하기 위해서는 수자원 이용 및 관리의 목표가 설정되어야 한다. 여론조사는 수자원에 대한 일반 국민 및 수자원 관련 전문가들의 수자원에 대한 의식과 요구 사항을 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2003년 10월에 일반국민 1,000명과 수자원 관련 전문가 106명에 대하여 설문조사를 실시하여 물이용 실태와 수자원 이용의 문제점, 개선점 등을 조사·분석한 자료를 이용하여 향후 수자원 이용 및 관리의 발전방향을 고찰하였다(건설교통부, 한국수자원공사, 2003). 이 여론조사는 물 관련 일반 인식 및 수자원 개발 방안, 수해에 관한 인식 및 수해 방지 방안, 하천 환경에 대한 인식 및 하천 관리방안, 수자원 개발과 관리에 대한 향후 개선 방안과 같은 4개 분야로 나뉘어서 실시되었다. 특히, 수자원 개발과 관리에 대한 향후 개선 방안 분야에 대한 조사결과를 살펴보면, 안전하고 안정적인 물 이용을 위해서 필요한 항목으로 최대한 절수(48.3%), 세계 사용의 자제(27.3%), 물의 적극적인 재활용(9.8%), 하천·호수 정화활동에 적극 참가(7.0%), 물의 중요성에 대한 교육(5.2%), 우수활용(2.4%) 등이 있었다. 이는 미래에 안정적인 물 이용을 위해서는 절수, 우수이용 등을 통한

물 이용의 효율성 증대, 물의 중요성과 환경 보전에 대한 적극적인 참여와 교육이 필요하다라는 것을 나타낸다. 물과 관련된 풍요로운 생활을 위하여 정부에 바라는 점에 대하여 중복응답을 하는 항목에서는 재해방지시설의 정비(57.3%), 수도물의 수질개선(53.0%), 물 주변환경의 보전과 정비(43.6%), 댐, 저수지 등과 같은 물공급 시설물의 확충(43.1%)이 필요하다는 의견이 상대적으로 높게 나타났다. 위와 같은 결과는 지속가능한 수자원 이용과 관리를 위해서는 수자원 이용의 효율성, 공평성, 환경적 보전성을 향상시키는 것뿐만 아니라 이들을 유지하고 관리하기 위한 경제력, 기술력, 교육, 주민들의 참여가 필요하다라는 것을 나타낸다.

### 2.1.3 세부기준 선정

수자원 지속가능성 지수는 수자원의 이용과 관리 상태가 지속가능성에 대한 부합여부를 평가할 수 있어야 한다. 그러나 수자원의 지속가능성은 내용이 광범위하므로 앞에서 언급한 WPI, SWSI, ESI와 같이 몇 가지의 세부 평가 기준으로 구분하여 평가되어야 한다. 지속가능성은 일반적으로 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성을 세부기준으로 하여 평가된다. 경제적인 효율성 세부기준은 자원을 효율적으로 사용하는 가를 평가하며, 사회적 공평성 세부기준은 구성원들 사이의 형평성을 유지하면서 자원을 이용하는 가를 평가한다. 환경적 보전성 세부기준은 생태계를 유지하도록 환경을 관리하고 있는가를 평가한다. 지속가능한 수자원의 이용과 관리도 이러한 개념들을 바탕으로 하고 있으며, 위의 여론조사 결과와 같이 수자원의 지속가능성을 유지하고 향상시키기 위해서는 경제력, 기술, 교육 및 사회 구성원들의 적극적인 참여도 필요하다. 따라서 본 연구에서는 수자원 지속가능성 지수의 세부기준으로 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성, 유지관리 능력을 선정하였다. 이들 세부기준은 지수와 구성지표의 중간단계의 의미로 세부지수로 명하고 이를 평가할 수 있는 지표들로 구성하였다.

## 2.2 세부 지수별 구성 지표 선정

### 2.2.1 관련 자료의 분석 및 분류

수자원 이용과 관리의 지속가능성을 평가하기 위한 지표들을 선정하기 위하여 수자원과 관련된 사회 및 경제, 환경 분야의 통계자료와 유역조사를 통해 수집된 자료들을 수집하여 분석하였다. 정부기관에서 발행하는 사회 및 경제, 환경 분야의 통계자료들은 매우 다양하다. 이들 중 수자원의 이용 및 관리에 영향을 미치는 사회 및 경제, 환경 요인들을 추출하기 위하여 통계자료를 분석하였다. 정부에서 정기적으로 발행하는 사회, 경제 분야 통계자료는 인구, 경제활동, 산업활동, 국토이용, 분야별 세입 및 지출, 재해 피해 및 복구, 교육 등에 관련된 것이 있다. 유역조사는 유역의 지형 및 지리적 특성, 인문 및 경제활동, 수자원 양, 수자원 이용 상태, 수질, 하천유황, 하천 관리상태 등에 대한 자료를 수집하여 분석하기 위하여 시행된다. 유역의 지형 및 지리적 특성은 유역의 물리적 특성에 관련된 자료를 이용하여 분석되며, 인문 및 경제활동은 유역 내 사회, 경제활동에 관련된 자료들을 이용하여 분석된다. 수자원 양과 하천유황은 강수량, 수자원 부존량, 하천유출량 등에 관련된 자료를 이용하여 평가된다. 수자원 이용 상태는 용수수요량, 용수사용량, 용수배분상태, 수원 등에 관련된 자료를 이용하여 평가된다. 유역의 수질은 유역 내 지표수, 호소수, 지하수의 수질, 수질환경기준, 목표수질로 평가된다. 하천관리 상태는 홍수피해, 치수시설, 생태계 보전상태 등과 관련된 자료로 평가된다(건설교통부, 한국수자원공사, 2005). 본 연구에서는 이들 자료 중 중복된 것은 제외하고 수자원의 이용과 관리에 관련된 항목만을 선별하였다.

### 2.2.2 세부지수별 구성 지표

(가) 경제적 효율성 세부지수(Economic Efficiency Index)

경제적 효율성 세부지수는 수자원 이용의 경제적 효율성을 평가하는 기준이다. 이 지수는 Fig. 1과 같이 생

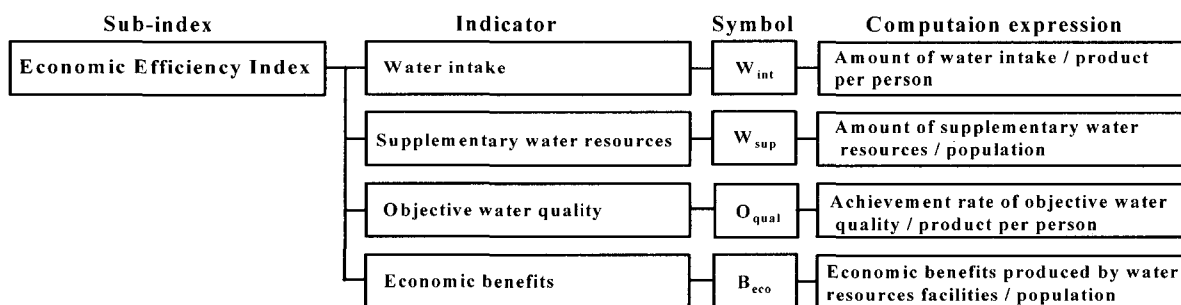


Fig. 1. Indicators consisting of economic efficiency index and their computation expressions

산액당 용수 사용량(Water intake), 보조 수자원 사용량(Supplementary water resources), 수자원의 경제적 편익(Economic benefits), 생산액당 목표 수질 달성율(Objective waer quality)과 같은 4개의 지표로 구성되어 있다. 생산액당 용수 사용량은 생산액에 대한 용수 취수량(생활, 공업, 농업용수)으로 산정되며, 대상 지역의 생산액에 대한 수자원 이용량의 크기를 평가한다. 보조 수자원 사용량은 우수 이용, 중수도 이용, 하수 재처리수 이용 등과 같은 보조 수자원의 1인당 사용량으로 산정하며, 대상 지역의 보조 수자원 개발 및 이용 정도를 평가한다. 수자원의 경제적 편익은 유역내 수원공 개발 및 이용에 의해서 발생하는 1인당 경제적 편익을 나타내며, 댐, 저수지, 하천수의 개발 및 이용에 의한 경제적인 효과를 평가한다. 생산액당 목표 수질 달성율은 1인당 생산액에 대한 수자원의 목표 수질 달성정도를 나타내며, 대상 지역의 효율적인 수질개선 및 유지 정도를 평가한다.

(나) 사회적 공평성 세부지수 (Social Equity Index)

사회적 공평성 세부지수는 수자원 사용에 대한 사회적인 형평성 정도를 평가하는 기준이다. 이 지수는 Fig. 2와 같이 상수도 보급률(Waterworks diffusion), 하수도 보급률(Sewerage diffusion), 공업용수 이용률(Industrial water use), 관개답 비율(Agricultural water use), 하천유지유량 달성률(Instream flow)과 같

은 5개의 지표로 구성이 되어 있다. 상수도 보급률은 대상 지역의 인구에 대한 상수도 사용 인구 비율로 산정하며, 대상 지역 생활용수 사용의 편리성 정도와 도시화 정도를 평가한다. 하수도 보급률은 대상 지역의 인구에 대한 하수종말처리시설, 폐수종말처리시설 및 하수도를 통해 처리되는 하수처리인구 비율로 산정되며, 대상 지역의 하수 처리 능력과 도시화 정도를 평가한다. 공업용수 이용률은 전체 공업용수 사용량에 대한 유역별 공업용수 사용 비율로 산정하며, 대상 지역의 산업화 정도를 평가한다. 관개답 비율은 대상 지역의 논 면적에 대한 관개시설을 이용하는 논 면적의 비율로 산정하며, 대상 지역의 농업에 대한 관개 용수 이용의 편리성을 평가한다. 하천유지유량 달성률은 대상 지역의 하천유지유량에 대한 자연상태 유량(갈수량)의 비율로 산정하며, 대상 지역의 하천 유황을 평가한다.

(다) 환경적 보전성 세부지수 (Environmental Conservation Index)

환경적 보전성 세부지수는 유역 환경의 보전 정도를 평가하는 지수다. 이 지수는 Fig. 3과 같이 하천수 수질 상태(Streamflow quality), 지하수 수질 상태(Groundwater quality), 생태계 보전 정도(Eco-system conservation)와 같은 3개의 지표로 구성이 되어 있다. 하천수 수질 상태는 대상 지역의 하천수 수질측정항목을 사용하여 산정되며, 대상 지역의 지표수 수질 상태를

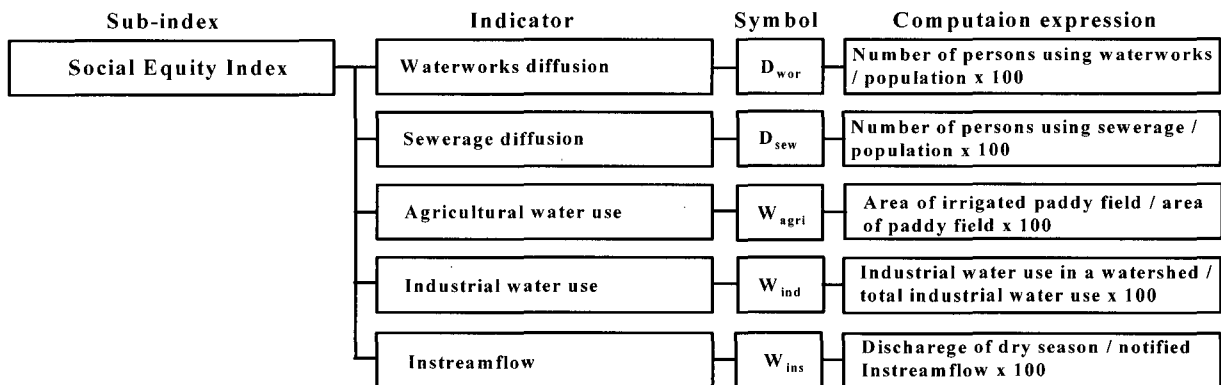


Fig. 2. Indicators consisting of social equity index and their computation expressions

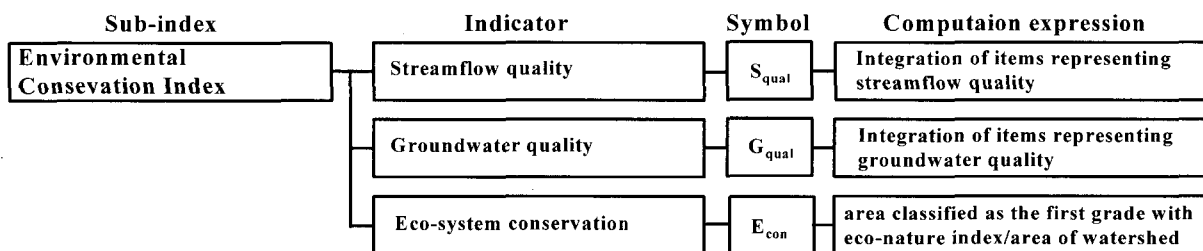


Fig. 3. Indicators consisting of environmental conservation index and their computation expressions

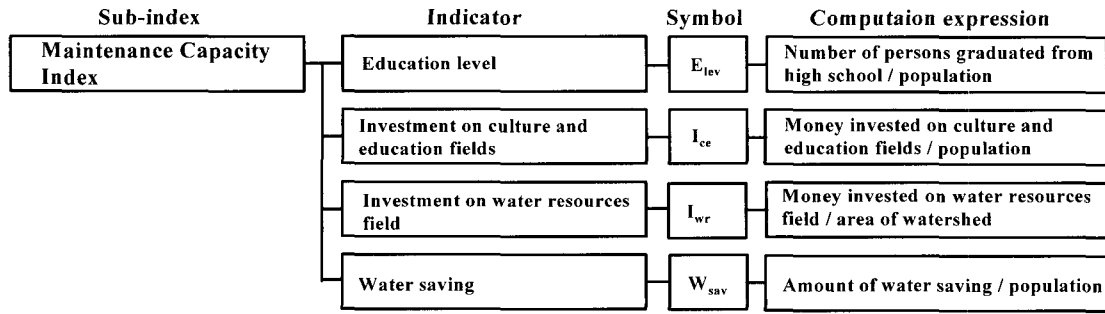


Fig. 4. Indicators consisting of maintenance capability index and their computation expressions

평가한다. 지하수 수질 상태는 대상 유역의 지하수 수질측정항목을 사용하여 산정하며, 대상 유역의 지하수 수질 정도 평가한다. 생태계 보전 정도는 멸종위기 야생 동·식물, 보호 야생 동·식물의 주된 서식지·도래지 및 주요 이동통로가 되는 지역, 생태계가 특히 우수하거나 경관이 특히 수려한 지역, 생물의 지리적 분포한계에 위치하는 생태계 지역, 주요 식생의 유형을 대표하는 지역, 생물다양성이 특히 풍부한 지역을 선정하여 부여한 생태자연도 I 등급 지역 면적을 유역면적으로 나눠서 산정한다. 이 지표는 대상 지역의 생태계 보호 상태를 평가한다.

(라) 유지관리 능력 세부지수(Maintenance Capability Index)

유지관리 능력 세부지수는 수자원 지속가능성의 유지 및 향상을 위한 인력, 재원, 기술력을 평가하는 지수이다. 이 지수는 Fig. 4와 같이 교육수준(Education level), 문화 및 교육 분야 투입액(Investment on water resources field), 수자원 분야 투입액(Investment on cultural and education fields), 수요 관리량(Water saving)과 같은 4개 지표로 구성된다. 교육수준은 단위 면적당 고등학교 졸업 이상 학력의 인구 비율로 산정하며 수자원의 지속가능성을 달성하기 위한 대상 유역의 인력 수준 상태를 평가한다. 문화 및 교육 분야 투입액은 유역내 문화 및 교육 분야에 대한 1인당 투입액으로 산정하며, 수자원의 지속가능성을 달성하기 위한 대상 유역의 교육 및 문화 분야 투자 상태를 평가한다. 수자원 분야 투입액은 국토자원 보전 개발 분야에 대한 단위면적당 투입액으로 산정하며, 수자원의 지속가능성을 달성하기 위한 대상 유역의 경제력 상태를 평가한다. 수요관리량은 대상 유역에서 절수기기를 이용하여 절수되는 1인당 절수량으로 산정하며, 용수 수요관리 정책의 실현 정도와 주민들의 수자원 정책에 대한 참여 정도를 평가한다.

### 2.3 수자원 지속가능성 지수(WRSI, Water Resources Sustainability Index)

수자원 지속가능성 지수는 4개의 세부지수들을 종합

하여 산정된다. 세부지수에 포함된 지표들은 정량적인 값을 가지고 있다. 따라서 이들의 상대적인 비교를 위해서는 지표들의 차원을 제거하는 표준화 과정을 거쳐야 한다. 무차원화된 지표 값에 가중치를 적용하여 Eq. (1)과 같이 세부지수 값을 산정한다.

$$SWR = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (1)$$

여기서 SWR은 세부지수의 값,  $w_i$ 는 구성 지표들의 가중치,  $Z_i$ 는  $i$  지표의 표준화된 값,  $n$ 은 세부지수의 구성 지표수를 나타낸다.  $Z_i$ 는 지표들의 적정 확률분포를 선정하여 해당 지표의 초과확률을 사용하여 산정하였다.

산정된 세부지수에 중요도를 적용하여 WRSI는 최종적으로 Eq. (2)와 같이 산정된다.

$$WRSI = \frac{w_1 EEI + w_2 SEI + w_3 ECI + w_4 MCI}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} \quad (2)$$

여기서  $w_1, w_2, w_3, w_4$ 는 세부지수들의 가중치, EEI는 경제적 효율성 세부지수, SEI는 사회적 공정성 세부지수, ECI는 환경적 보전성 세부지수, MCI는 유지관리능력 세부지수를 나타낸다. Eq. (1)과 Eq. (2)에서 구성지표들과 세부지수들의 가중치는 AHP 기법을 적용하여 결정하였다.

### 3. 구성요소의 중요도 산정

계층화 분석 기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)은 여러 개의 평가기준에 따라 의사결정이 이루어질 경우 평가기준을 계층화하고, 계층에 따라 요인들의 중요도를 정해 나가는 다기준 의사결정법 중의 하나이다. 이 기법은 문제 식별이 용이하고 구성요소간의 복잡한 관계를 간단한 구조를 사용하여 분석이 가능하다. 또한, 요인들 간의 영향을 상대적 크기나 강도로 표현하기 위해 숫자를 지표로 사용한다.

계층화 분석 기법을 적용하여 분석 대상의 관련 요인들 간의 중요도를 평가한 사례는 여러 가지 지수개발

Table 1. Evaluation scale for pairwise comparisons

| Comparative importance | Definition  |
|------------------------|---|
| 1                      | Equally important   |
| 3                      | Moderately more important   |
| 5                      | Strongly more important   |
| 7                      | Very strongly more important  |
| 9                      | Extremely more important  |
| 2, 4, 6, 8             | Intermediate judgment values  |
| Reciprocals            | If K is the judgement when i is compared to j, then 1/K is the judgment value when j is compared to i |

에서 찾을 수 있다. AHP 기법은 국토 개발에 대한 지속가능성 평가나 SOC 사업에 대한 투자지표 개발에 적용된 바가 있다(국토개발연구원, 2002; 2003). 또한, AHP 기법은 환경오염의 정도를 모니터링하기 위하여 환경압력지수(EPI)를 개발하는데 적용된 사례가 있다(서현교, 1998). 수자원 개발 및 운영 분야에서는 AHP 기법은 주로 수자원 시설물의 적지선정에 적용되었으며, 그 예로는 지하담의 적지선정, 강변 여과수 시설의 적지선정, 지표수-지하수 연계 시스템의 적지선정 등이 있다(이상일과 김병찬, 2003; 심정보 등, 2004; 이상일과 이상신, 2004). 또한, 이 기법은 가뭄에 댐 용수 분배의 우선순위 결정(이현재와 심명필, 2002), 하천의 중요도 평가(박태선, 2002) 등에 적용된 바가 있다.

3.1 쌍대비교

계층화 분석 기법을 적용하기 위해서는 먼저 의사결정 문제를 의사결정 요인과 계층으로 분류한 후, 각 요인들을 비교하여 행렬을 구성한다. 각 계층(단계)에서 요인들 간의 비교는 쌍대비교(pairwise comparison)가 필요하며, 주로 이용되는 방법은 Saaty의 쌍대비교이다(Saaty, 1980). 이 방법은 두 요인 간의 상대적 중요도를 Table 1과 같이 9 점 척도를 이용하여 평가한다.

3.2 중요도 산정과 응답의 일관성(consistency) 평가

각 요인들의 상대적인 중요도는 우선순위 벡터(priority vector, P)로 나타낸다. 우선순위 벡터를 구하기 위해서 각 행의 기하평균이나 산술평균을 계산하며, 이 값이 각 행의 고유벡터(eigen-vector)가 된다. 우선순위 벡터는 각 행의 고유벡터를 전체 고유벡터의 합으로 나누어 표준화시켜 산정한다.

주어진 요인들에 대한 중요도 평가의 논리적 일관성은 일관성 비율(Consistency Ratio : CR)을 산정하여 평가한다. 응답의 일관성은 일관성 지수(Consistency Index : CI)와 무작위 지수(Random Index : RI)의 비를 사용하여 평가한다. 일관성 비율이 10 % 이하 인 경우 설문조사에 대한 응답에 일관성이 있다고 판단할 수 있다. 일관성 지

수는 응답의 일관성 정도를 나타내는 지표로서 Eq. (3)과 같이 쌍대비교 행렬의 최대고유치와 행렬의 크기 n을 사용하여 산정한다. 일관성 지수는 행렬의 최대고유치가 행렬의 크기 n에 근접할수록 작은 결과를 나타낸다. 무작위 지수는 1~9 점까지의 점수들을 무작위로 추출하여 생성된 평가 행렬의 일관성 지수를 의미한다. 이 지수는 행렬의 크기에 따라 다른 값을 나타내며, 관련된 요인들이 많아짐에 따라 크기가 증가한다.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{3}$$

여기서  $\lambda_{max}$ 는 행렬의 최대 고유치를 나타내며, 행렬의 크기가 n x n이라면 가중치 벡터(W)와 우선순위 벡터(P)를 사용하여 Eq. (4)와 같이 계산한다(서현교, 1998).

$$\lambda_{max} = (W_1/P_1 + W_2/P_2 + \dots + W_n/P_n) / n \tag{4}$$

4. 세부지수와 구성 지표의 중요도 평가

4.1 설문조사 방법

수자원 지속가능성 지수의 지표와 세부지수들의 중요도를 평가하기 위하여 수자원관련 전문가 집단에 대한 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 농업기반공사, 한국수자원공사, 엔지니어링 분야에 종사하는 전문가 8명, 대학교수 48명, 시민단체 소속 전문가 5명, 한국건설기술연구원, 수자원연구원, 농어촌연구원, 국토연구원, 환경정책평가연구원에 근무하는 전문가 60명, 농림부, 건설교통부, 환경부에 근무하는 공무원 6명 등 총 127명을 대상으로 하였다. 설문조사는 WRSI 구성요소의 쌍대비교를 위한 설문지를 개인별로 배포 후 수거하여 분석하는 방법을 적용하였다.

4.2 평가 지표의 중요도

구성요소들의 중요도는 AHP 기법을 사용하여 일관성을 평가한 후 일관성 비율이 10 %을 넘지 않는 응답 결과를 사용하여 산정하였다. Table 2와 Table 3은 세부지수와 구성지표들 사이의 중요도를 산정한 결과이다.

Table 2. Relative weight of each sub-index

| Sub-index                        | Relative weight |
|----------------------------------|-----------------|
| Economic efficiency index        | 0.333           |
| Social equity index              | 0.192           |
| Environmental conservation index | 0.321           |
| Maintenance capability index     | 0.154           |

Table 3. Relative weight of each indicator

| Sub-index                        | Indicator                                 | Relative weight |
|----------------------------------|---|-----------------|
| Economic efficiency index        | Water intake                              | 0.331           |
|                                  | Supplementary water resources             | 0.170           |
|                                  | Objective water quality                   | 0.245           |
| Social equity index              | Economic benefits                         | 0.255           |
|                                  | Waterworks diffusion                      | 0.293           |
|                                  | Sewerage diffusion                        | 0.216           |
|                                  | Industrial water use                      | 0.129           |
|                                  | Agricultural water use                    | 0.110           |
| Environmental conservation index | Instreamflow                              | 0.252           |
|                                  | Streamflow quality                        | 0.435           |
|                                  | Groundwater quality                       | 0.291           |
| Maintenance capability index     | Eco-system conservation                   | 0.274           |
|                                  | Education level                           | 0.184           |
|                                  | Investment on culture and education field | 0.214           |
|                                  | Investment on water resources field       | 0.338           |
|                                  | Water saving                              | 0.264           |

세부지수 사이의 중요도의 크기는 수자원 이용의 효율성, 환경적 보전성, 수자원 이용의 공평성, 유지관리 능력 순으로 나타났다. 특히, 수자원 이용의 효율성과 환경적 보전성 지수의 중요도는 평균값을 상회하는 값을 나타냈고, 유지관리 능력과 수자원 이용의 공평성 지수의 중요도는 평균값 보다 작은 값을 나타냈다.

Fig. 5는 지표들의 중요도를 상대적으로 비교하기 위하여 세부지수를 구성하는 지표들의 중요도를 도식적으로 나타낸 것이다. 경제적 효율성 세부지수를 구성하는 지표들 간의 중요도는 생산액당 용수 사용량, 수자원의 경제적 편익, 생산액당 목표수질 달성 정도, 보조 수자원 사용량 순으로 나타났다. 생산액당 용수사용량 지표가 가장 큰 중요도를 나타냈고, 수자원의 경제적 편익 지표와 생산액당 목표수질 달성 정도 지표가 중요도의 평균에 근사한 값을 나타냈다. 사회적 공평성 세부지수를 구성하는 지표들의 중요도의 크기는 상수도 보급률, 하천유지유량 달성률, 하수도 보급률, 공업용수 이용률, 관개답 비율 순으로 나타났다. 상수도 보급률, 하천유지유량 달성률, 하수도 보급률의 중요도가 평균값을 상회하는 값을 보였으며, 공업용수 이용률, 관개답 비율 지표는 평균값 보다 작은 값을 나타냈다. 환경적 보전성 세부지수를 구성하는 지표들의 중요도는 하천수 수질

상태, 지하수 수질 상태, 생태계 보전 정도 순으로 나타났다. 하천수 수질 상태 지표가 평균값을 상회하는 중요도를 나타냈으며, 지하수 수질 상태 지표와 생태계 보전 정도 지표는 평균값 보다 작은 값을 나타냈다. 유

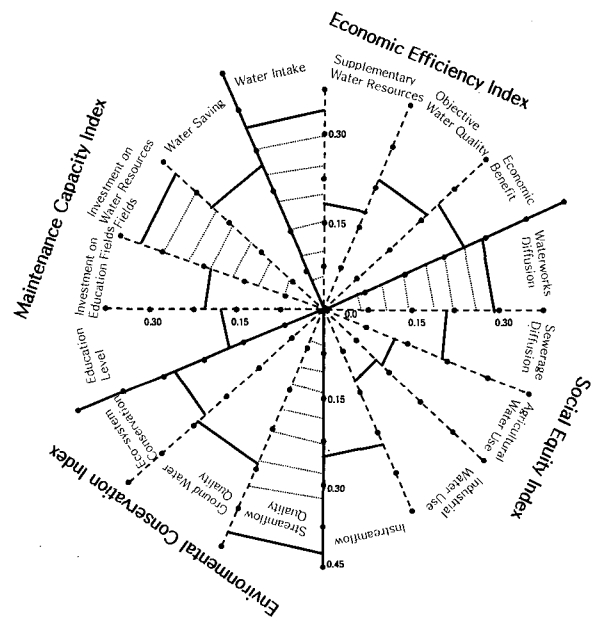


Fig. 5. Comparison of relative weight of each indicator consisting of WRSI



지관리 능력 세부지수를 구성하는 지표들의 중요도는 수자원 분야 투입액, 수요 관리량, 문화 및 교육 분야 투입액, 교육수준 순으로 나타났다. 수자원 분야 투입액과 수요 관리량 지표가 평균값을 상회하는 값을 나타냈으며, 문화 및 교육 분야 투입액과 교육수준 지표가 평균값 보다 작은 값을 나타냈다.

### 4.3 중요도 산정 결과 고찰

4가지 세부지수들의 중요도를 비교해 보면 수자원 이용의 경제적 효율성 지수와 환경적 보전성 지수의 중요도가 높은 결과를 나타냈다. 이는 우리나라 수자원 이용 및 관리 상태의 문제점을 해결하기 위해서는 수자원의 효율적인 이용이 선행되어야 한다는 것에 공감하는 전문가들이 많다는 것을 의미한다. 또한, 환경적 보전성의 중요도가 높게 나타난 것은 수자원 분야에서 환경문제가 많이 발생하고 있으므로 환경 분야에 대한 관심이 높아진 상태가 반영된 것으로 판단된다. 또한, 이러한 결과는 수자원의 지속가능성을 향상시키기 위해서는 환경 요인들의 질을 향상시켜야 한다는 것을 나타낸다.

경제적 효율성 평가지수를 구성하는 지표들의 중요도를 비교해 보면 생산액당 용수사용량 지표가 가장 큰 중요도를 나타냈으며, 수자원의 경제적 편익 지표가 그 다음으로 큰 값을 나타냈다. 이는 적은 비용을 지불하여 많은 양의 수자원을 이용하는 것이 효율적이며, 수자원으로부터 더 많은 경제적 편익을 생산한다는 것을 나타낸다. 생산액당 목표수질 달성 정도 지표의 중요도도 평균값에 근사한 값을 나타냈으며, 이는 비용을 적게 투입하여 목표수질을 달성하는 것도 수자원의 효율적인 이용을 위해서 중요하다는 것을 나타낸다.

사회적 공평성 평가지수를 구성하는 중요도를 비교해 보면 상수도 보급률, 하천유지유량 달성률, 하수도 보급률이 평균값을 상회하는 값을 나타냈으며, 공업용수 이용률, 관개답 비율 지표는 평균값 보다 작은 값을 나타냈다. 이는 수자원 이용의 사회적 공평성이 수자원 이용의 편리성을 나타내는 상·하수도 보급률에 크게 좌우된다는 것을 나타낸다. 하천유지유량 달성률 지표가 높은 중요도를 나타낸 것은 수자원과 관련된 환경문제가 대두됨에 따라 하천의 친수기능에 대한 관심이 높아졌기 때문으로 판단된다. 또한, 주민이 거주하는 유역의 지리적인 위치에 따라 하천유지유량 달성율이 다르게 나타날 수 있기 때문에 이 지표가 수자원 이용의 사회적 형평성을 평가하는데 주요 지표가 될 수 있음을 간접적으로 나타낸다.

환경적 보전성 평가지수를 구성하는 지표들 중에서 하천수 수질 상태 지표가 평균값을 상회하여 가장 큰

값을 나타냈으며, 지하수 수질 상태 지표와 생태계 보전 정도 지표는 평균값 보다 작은 값을 나타냈다. 이는 하천의 수질 상태 지표가 다른 지표들 보다 유역주민들이 직접 체감할 수 있기 때문에 중요도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 하천수 수질은 수자원에 직접적인 영향을 미치기 때문에 다른 지표들 보다 중요도가 높은 결과가 나타났다고 판단된다.

유지관리 능력 평가지수를 구성하는 지표들 중에서 수자원 분야 투입액 지표와 수요 관리량 지표가 평균값을 상회하는 값을 나타냈으며, 문화 및 교육 분야 투입액과 교육수준 지표의 중요도가 평균값 보다 작은 값을 나타냈다. 이는 수자원의 지속가능성을 유지 및 향상시키기 위해서는 경제력이 가장 중요한 요소라는 것을 나타낸다. 또한, 수요관리 지표는 유역 거주민들의 수자원 정책에 대한 참여 정도를 나타내므로 수자원의 지속가능성을 유지 및 향상시키기 위해서 경제력뿐만 아니라 관련된 정책에 대한 주민들의 적극적인 참여가 필요하다는 것을 나타낸다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 수자원 지속가능성 지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)을 개발하고, 구성지표들의 중요도를 계층적 분석기법(AHP)를 사용하여 산정하였다. 또한, 지표들 간의 중요도 산정 결과를 고찰하여 수자원의 지속가능성을 향상시키기 위해 필요한 사항을 도출하였다. 수자원의 지속가능성을 평가하기 위한 세부기준과 구성 지표를 선정하기 위하여 유역조사, 사회 및 경제 통계, 여론조사, 관련 선행 연구결과를 종합적으로 분석하였다. 세부기준은 관련 연구결과와 여론조사 결과를 토대로 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성, 유지관리능력 세부지수로 구분하였다. 세부 평가지수들의 중요도는 수자원 이용의 효율성 평가지수와 환경적 보전성 세부지수가 다른 세부지수들 보다 큰 값을 나타냈다. 세부지수의 구성지표들 중 생산액당 용수 사용량, 상수도 보급률, 하천수 수질 상태, 수자원 분야 투입액을 평가하는 지표들의 중요도가 다른 지표들 보다 상대적으로 높은 결과를 나타냈다. 세부지수들과 구성지표들의 중요도 고찰 결과는 수자원의 지속가능한 이용 및 관리를 위해서 수자원 이용의 효율성을 향상시키고, 상수도 보급률을 향상시켜 수자원 이용의 편리성과 공평성을 증대시키고, 하천의 수질을 향상시켜 친수기능의 복원이 중요하다는 것을 나타냈다. 또한, 수자원 분야에 지속적으로 적정 재원을 투입하고, 수자원 정책 결정에 대한 주민의 참여가 필요하다는 것을 나타냈다. 따라서 본 연구에 의해 개

발된 수자원 지속가능성 평가지수는 수자원 이용 및 관리 분야의 상대적인 평가에 다양하게 적용될 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부, 한국수자원공사 (2005). **전국유역조사-한강, 낙동강 유역.**
- 건설교통부, 한국수자원공사 (2003). **물에 관한 국민 여론조사.**
- 국토개발연구원 (2003). **지속가능한 국토개발지표 설정에 관한 연구.**
- 국토개발연구원 (2002). **SOC 투자지표 개발에 관한 연구-AHP 기법을 통한 투자지표 설정방향을 중심으로..**
- 김대일, 이종호, 박희경, 이동률 (2002). **유역통합수질 관리를 위한 지속가능개발 지표의 개발-통계적 기법의 적용을 중심으로, 상하수도학회지, 16(3), pp. 322-332.**
- 김휘린, 이동률, 최시중 (2003). **사회적 적응능력 지표에 의한 지역별 수자원 평가. 2003년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 2011-2014.**
- 박태선 (2002). **계층화 분석법을 이용한 하천의 중요도 평가 방법, 한국수자원학회 논문집, 35(6), pp. 685-692.**
- 이상일, 김병찬 (2003). **계층분석 과정을 이용한 지하댐 적지분석, 한국지하수 토양환경학회지, 8(4), pp. 36-44.**
- 이상일, 이상신 (2004). **지표수-지하수 연계 운영을 위한 적지분석 시스템 개발, 2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집.**
- 이현재, 심명필 (2002). **계층분석과정에 의한 가뭄시 용수배분 우선순위 의사결정, 2002년 한국수자원학회 논문집, 35(6), pp. 703-714.**
- 서현교 (1998). **환경압력지수개발 및 그 적용에 관한 연구-서울과 전국의 비교를 중심으로, 서울대학교 도시계획과 석사학위 논문.**
- 심성보, 김병찬, 이상일 (2004). **AHP를 이용한 강변여과수 개발지역 선정, 2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집.**
- 한국건설기술연구원 (2004). **유역통합 물수지 분석 및 수자원 계획기술의 개발.**
- ASCE Task Committee on Sustainability Criteria (1998). *Sustainability criteria for water resource systems.* Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va.
- Cai X., M. and Lasdon L. S. (2002). **A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin, Water Resour. Res., Vol. 39, No. 8, pp. 1085-1098.**
- European Environment Agency (1999). *Environmental indicators: Typology and overview,* Copenhagen, Denmark.
- Fowler H. J., Kilsby, C. G., and OConnell P. E. (2003). **Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. Water Resour. Res., Vol. 39, No. 8, pp. 1222-1232.**
- Heathcote, I. W. (1998). *Integrated Watershed Management,* John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Huang, S., Wong J., and Chen, T. (1998). **A framework of indicator system for measuring Taipei's urban sustainability. Landscape and urban planning, Vol. 42, pp.15-27.**
- Kranjnc, D. and Glavic, P. (2004). **A model for integrated assessment of sustainable development, Resources, Conservation and Recycling, No. 43, pp. 189-208.**
- Loucks, D. P. and Gladwell, J. S. (1999). *Sustainability Criteria for Water Resources System,* Cambridge University Press.
- OECD (1998). *Towards Sustainable Development: Environmental Indicators.*
- Sullivan C. A. (2002). **Calculating a Water Poverty Index, World Development, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210.**
- Sullivan, C. A. (2001). **The Potential for Calculating a Meaningful Water Poverty Index. Water International, Vol. 26, No. 4, pp.471-480.**
- UN Commission on Sustainable Development (UNCSD) (2001). *Indicators of sustainable development framework and methodologies,* United Nations, New York, U.S..
- UNEP (1988). *Training Guidance for the Integrated Environmental Evaluation of Water Resources Development Projects,* UNESCO.
- World Economic Forum (2002). *2002 Environmental Sustainability Index.*

(논문번호:05-75/접수:2005.05.27/심사완료:2005.11.11)