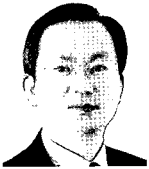


# 유역의 수자원 및 환경 평가를 위한 Index와 Indicator의 활용



강 민 구 |

한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원  
kmg90@kowaco.or.kr



김 우 구 |

한국수자원공사 기획조정실장  
wgkim@kowaco.or.kr

## 1. 서론

최근 공공투자부분의 사업이 대형화되고 사회적 갈등이 발생하고 있어 사업에 따른 영향평가를 거쳐야 한다. 평가는 대상을 세세하게 구분하여 구성된 평가항목을 사용하여 이뤄진다. 이러한 평가의 결과를 이용하여 대안들을 비교하고 적지를 선정하며 투자우선순위를 결정한다. 평가는 사전 평가에만 그치지 않는다. 추진 단계별로 평가가 실시되며, 그 결과는 문제가 발생할 경우 피드백하여 전 단계를 수정 및 보완하는 적응형 관리(Adaptive management)에 적용된다. 또한, 사후에도 사업으로 인한 영향을 지속적으로 모니터링하기 위해서 다양한 부분에 대하여 평가가 이뤄진다. 수자원 및 환경 분야에서도 국가간의 수자원 이용 특성이나 유역관리 상태를 분석하여 취약점을 파악하고 대안을 모색하기 위하여 평가지수를 사용하여 상태를 주기적으로 평가하고 있다(World Economic Forum, 2002; U.S. Environmental Protection Agency, 2002).

평가는 영어로는 Evaluation과 Assessment로 구분된다. Evaluation은 어떤 대상이나 현상의 질, 상태 등을 판단하는 과정이며, Assessment는 대상을 진단하여 문제점을 파악하고 대안을 제시하는 과정이다. 평가는 그림 1과 같이 목표나 비전에 기반하여 실시된다. 평가는 현재의 상태와 현상, 사업의 계획, 실행과 달성, 사업 후 관리에 단계별로 적용되며, 이들 단계는 순환적인 관계를 갖고 있다. 평가를 위해서는 척도가 필요하다. 이를 위해서 다양한 지수(Index)와 지표(Indicator)가 개발되어 적용되고 있다. 지표는 가장 단순한 측정항목이며, 지수는 여러 개의 지표들을 통합한 형태로서 다양한 부분을 종합적으로 평가하는데 적용된다. 예를 들어 하천의 수질을 평가할 때, 단일 지표인 BOD만으로는 평가하기 어렵기 때문에 다양한 지표로 구성된 수질 평가 지수가 적용되고 있다(최지용, 1996). 또한, 국제기구에서 개발되어 적용되고 있는 WPI(Water Poverty Index), ESI(Environmental Sustainability Index) 등도 이러한 개발 배경을 가지고 있다(World Economic Forum, 2002; Sullivan, 2002).

대상 시스템을 평가할 때에는 상태, 영향요인, 반응결과를 고려한다. 따라서 평가를 위해 개발된 지수들은 압력(Pressure)-상태(State)-반응(Response), 추진(Driving force)-상태(State)-반응(Response), 취약점(Vulnerability)-대응책(Countermeasure) 등과 같은 형태를 사용하고 있다. 이는 단일 지표만으로는 시스템을 종합적으로 평가하기 어렵기 때문이다. 예를 들어 유역의 수자원을 평가할 경우에 과거에는 수요와 공급의 과부족을 판단하는 물수지 기법, 최적화 기법, 모의 기법과 같은 공학적인 방법에 의존해왔다. 이들 방법들은 공급의 신뢰도, 부족심도, 시스

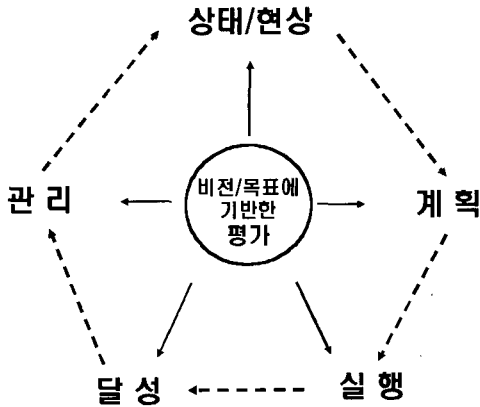


그림 1. 사업 단계별 평가

템의 복원도와 같은 단일 지표를 제공한다(Fowler, 2003). 그러나 이러한 단일 지표에 의한 평가는 수자원을 종합적으로 평가할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 국가, 유역, 지자체 등의 수문, 수질, 사회, 경제, 환경적 요인들을 고려한 다양한 지표들로 구성된 평가 지수를 이용하여 평가할 필요가 있다(강민구 등, 2005; Kranjnc, 2004).

최근 수자원에 대한 대중들의 관심이 높아지고 있다. 보다 질 높고 풍요로운 삶을 살기 위해서 수자원 이용의 양과 질적인 측면에 대하여 요구가 많아지고 있다(건설교통부와 한국수자원공사, 2003). 주민들이 거주하는 유역의 수자원 및 환경 상태를 파악하고 관리에 적극적인 참여를 유도하기 위해서는 객관적인 평가 수단이 필요하다. 또한, 수자원 정책의 실현 정도를 측정하기 위해서도 객관적인 평가 수단이 요구되고 있다. 근래에 안양천 복원 사업이 추진되고 있는데 안양천 유역의 이수, 치수, 수질을 평가하기 위하여 건천화지수, 홍수잠재능지수, 불투수면적율 등의 지수와 지표가 사용되었다(이길성 등, 2005).

본 고에서는 국내·외에서 적용되고 있는 수자원 및 환경과 관련된 평가지수에 대하여 고찰하고 개발배경과 방법에 대하여 조사하였다. 또한, 이들 지수들의 적용사례들을 조사하고 개선점을 분석했으며, 수자원 및 환경 분야에서 평가지수의 활용방안에 대하여 논하였다.

## 2. 평가 지수

### 2.1 지수의 구성

대상을 평가하는 지수들은 일반적으로 세부기준이나 대상을 구성하는 요소와 이를 평가하기 위한 세부지표들로 구성된다. 세부지표는 단일 측정치를 사용하는 것이 일반적이거나 몇 개의 변수를 사용하여 측정하는 형태도 있다. 수자원 이용 및 관리 상태나 지속가능성을 평가하기 위하여 개발된 지수들인 WPI(Water Poverty Index), SWSI(Social Water Stress/Scarcity Index), ESI(Environmental Sustainability Index)들도 이러한 형태로 구성되어 있다.

WPI는 수자원 이용에 관련된 수문, 사회, 경제, 환경 지표들을 통합한 지수이다(Sullivan, 2002). 이 지수는 수자원 양(Resource), 수자원 이용의 접근성(Access), 사회적 관리 능력(Capacity), 수자원 이용(Use), 환경(Environment)와 같은 5개의 세부지수로 구성되어 있다. 이들 세부지수들은 각각 세부 평가 지표들로 구성된다. WPI를 적용하기 위해서는 많은 양의 자료가 필요하며, 국내에서는 세부지수들의 구성항목을 재구성하여 적용된 바가 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)과 같은 5개의 세부지수로 구분하여 환경의 지속가능성을 평가한다. 이들 세부지수는 총 21개의 지표로 구성되어 있다. 각 지표들은 몇 개의 변수로 구성되어 있으며, 다양한 항목에 대하여 평가가 가능하다.

SWSI는 수자원에 대한 사회적 적응력을 평가하는

지수로서 WSI(Water Stress Index)를 HDI(Human Development Index)로 나눈 것이다. 여기서 WSI는 1년에 재생가능한 물 백만 톤을 사용할 수 있는 백 명 단위의 인구수를 의미한다. 인간발전지수(HDI)는 국가 내에서 평균적인 인간발전에 대한 성취도를 장수 및 보건(Life Expectancy), 지식(Education), 생활수준(GDP)과 같은 세 가지 세부지수로 구분하여 산정된다.

WPI, ESI, SWSI와 같은 지수들은 국가들 간의 수자원 이용 상태나 환경적 지속가능성에 대한 상대평가를 위해 개발되었다. 이중 WPI와 SWSI는 수자원의 지속가능성 평가를 위한 지수로 국내에서 사용된 바가 있다. 국내에서는 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 기상현상, 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(한국건설기술연구원, 2004).

## 2.2 평가 지표 선정 기준

평가지표를 선정하기 위해서는 각 세부기준을 평가할 수 있는 지표들을 전문가들의 의견이나 통계적 방법을 사용하여 선정해야 한다. 수자원과 관련된 사회, 경제 분야의 통계자료와 유역조사 자료들은 다양하다. 그러나 수자원을 평가하는데 이러한 자료들을 전부 사용하는 것은 적절하지 않다. 이는 각 분야에서 실시하는 통계와 유역조사가 지표를 개발하는 목표를 염두해 두고 실시한 것이 아니기 때문이다. 따라서 이들 자료들을 가공하여 목적하는 평가를 할 수 있는 지표가 되도록 해야 한다. 이 때 각 지표들은 다음과 같은 선정 기준을 만족해야 한다.

- ① 목표와 연관성: 평가의 목표와 관련된 지표를 선정해야 한다.

- ② 단순성: 선정된 지표의 내용이 명확하고 간단하여 대중이 이해하기 쉬워야 한다.
- ③ 자료수집의 용이성: 자료의 수집과 가공이 쉽고, 비용과 시간이 효율적으로 이용되어야 한다.
- ④ 정량성: 수치적으로 계량화가 가능한 지표를 선정해야 한다.
- ⑤ 근거의 확실성: 개념적으로 근거가 확실한 지표를 선정해야 한다.
- ⑥ 종합성: 실용적 측면에서 종합적인 정보를 제공할 수 있어야 한다.
- ⑦ 민감성: 지표 내에 포함된 인자의 변화에 따라 지표의 변화가 수치적으로 나타나야 한다.

## 2.3 표준화

대상을 평가하기 위해서는 구성지표들을 표준화해야 한다. 지표들은 단위를 가지고 있어 이들을 직접적으로 비교하기 어렵다. 따라서 이들 자료들을 단위가 없는 무차원값으로 변환해서 상대적인 크기를 비교해야 한다. 지표를 표준화하는 방법에는 식 (1)과 같이 표준편차와 평균을 이용하는 방법(Z-score 법), 식 (2)이나 (3)과 같이 최대값과 최소값 차에 대한 최소값이나 최대값과 지표의 차의 비율을 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 표준화 방법에는 대상 자료들이 나타내는 적정확률분포를 선정하여 해당 확률분포에서 지표가 갖는 초과확률을 사용하여 표준화하는 방법도 있다(강민구, 2005).

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$Z = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

$$Z = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

여기서, Z는 지표의 표준화 값, X는 지표값,  $\mu$ 는 지표의 평균값,  $\sigma$ 는 지표의 표준편차,  $X_{\max}$ 는 최대값,  $X_{\min}$ 는 최소값을 나타낸다. 식 (2)는 해당 지표가 순기

능 지표일 경우 사용되며 식 (3)은 지표가 역기능 지표일 경우에 사용된다.

## 2.4 가중치

가중치를 결정하는 방법에는 계층화 분석 기법 (Analytic Hierarchy Process, AHP)이 주로 적용되고 있다. 계층화 분석 기법은 여러 개의 평가기준에 따라 의사결정이 이루어질 경우 평가기준을 계층화하고, 계층에 따라 요인들의 중요도를 정해 나가는 다기준의사결정법 중의 하나이다. 계층화 분석 기법은 평가기준을 몇 개의 그룹으로 묶어 그룹에 포함된 요인들 간의 대표적 특성을 도출하는 방법이다. 이 방법은 문제의 식별이 용이하고 구성요소간의 복잡한 관계를 간단한 구조를 사용하여 분석이 가능하다는 특징이 있다. 또한, 계층화 분석 기법에서는 요인들 간의 영향을 상대적 크기나 강도로 표현하기 위해 숫자를 지표로 사용하기 때문에 요인들 간의 중요도는 의사결정시 객관적 지표로 사용이 가능하다. 계층화 분석 기법을 적용하기 위해서는 먼저 문제를 정확히 정의하고 최종 목표를 결정한 후 문제를 몇 개의 단계로 분류한다. 그 다음 각 단계별로 목표를 설정하고 해당 단계에 포함되는 요인을 설정하게 된다. 구성요소들의 상대적인 중요도는 대상자들에 대한 설문 조사를 통하여 결정되며, 이 때 구성요소간의 쌍대비교가 실시된다. 중요도는 응답의 일관성을 평가한 후 산정된다(강민구 등, 2005; 안장원 등, 2004; 이상일과 이상신, 2004; 박태선, 2002).

## 2.5 지표의 종합화

통합지수는 식 (4)와 같이 지표와 가중치를 이용하여 산정한다.

$$VI = f(W_i, I_i), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

여기서 VI는 통합지수, W는 항목별 가중치, I는 각

지표의 표준화된 값, n은 지표의 개수를 나타낸다. 지표들을 종합화하는 방법에는 다양한 방법이 있으며 대표적인 방법에는 식 (5)와 식 (6)과 같이 지표의 표준화 값에 가중치를 적용하여 합하는 방법과 가중치를 적용하여 곱하는 방법이 있다.

$$VI = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (5)$$

$$VI = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \quad (6)$$

여기서 가중치의 합( $\sum_{i=1}^n W_i$ )은 1이며, 자료의 특성에 따라 지표의 종합화 방법을 선정한다.

## 2.6 기개발된 지수들의 비교

평가를 위한 지수들은 여러 분야에서 다양한 형태로 개발되어 적용되고 있다. 예를 들어 국가의 지속가능성을 평가하기 위한 지수들은 선진국과 국제기구들에서 개발되어 자국의 국가 개발의 지속가능성을 평가하는데 사용이 되고 있다. 또한, 국제기구들에서는 국가간의 지속가능성을 비교하기 위하여 평가지수를 개발하여 적용하고 있다. 수자원 및 환경 분야에서도 평가 지표나 지수들이 다양하게 개발되어 적용이 되고 있다. 표 1은 수자원 및 환경을 평가하기 위해 개발된 지수들의 특징을 비교한 것이다. 여기서는 지수의 구성, 표준화 방법, 가중치 적용 방법, 적용사례를 비교하였다. 표 1에서 비교된 지수는 세부기준이나 구성요소를 먼저 선정한 후에 이들을 평가할 수 있도록 지표들을 선정하는 형태로 구성되어 있다. 지표들의 표준화 방법으로는 최대치와 최소치의 범위 내에서 선형적으로 점수를 부여하는 방법과 평균과 표준편차를 이용하는 Z-score법이 주로 사용되고 있다. 이러한 지수들 중에서 ESI는 지속적으로 문제점이 수정되고 있으며, 국제기구에서 주기적으로 비교 결과를 제시하고 있다.

표 1. 수자원 및 환경 관련 평가지수의 비교

지수	개발기관/개발자	목적	개발방법	구성	표준화	가중치	적용사례	적용한계	비고
• ESI (Environmental Sustainability Index)	• Center for International Earth Science Information Network (CIE SIN) • World Economic Forum	• 세계 각국의 환경에 대한 지속가능성 평가	• 세계 기구에서 발표되는 자료를 수집하여 평가 항목 선정	• 5개의 세부 지수 • 21개 지표 • 각 지표 당 2~12개 변수 사용 • 총 76개 세부 변수 사용	• 표준화점수 (Z-score) 환산법	• 지표별 가중치 적용 • 지표들을 평균하여 5개 요소값 산정	• 매년 세계 각국의 환경의 지속가능성 비교	• 데이터가 없는 경우는 평균 계산에서 제외	• 유역적용 사례 없음 • Cluster 분석을 통한 강점, 약점 비교
• WPI (Water Poverty Index)	• Centre for Ecology & Hydrology (CEH) -C. Surriyan	• 국민들의 복지수준과 물 이용 상황간의 관계 파악	• 수자원의 양, 수자원 이용의 접근성, 사회적 관리능력, 수자원 이용, 환경평가	• 각 세부 지수별 3~5가지 지표로 구성	• 최대치와 최소치를 이용 한 점수 부여법	• 균등 가중치 적용	• 국가별 물부족 지수를 0~100 사이의 값을 이용하여 비교	• 국가별 물 이용 능력, 상태 파악에 적용	• 국내 유역간 비교에 적용
• HDI (Human Development Index)	• United Nations Development Programme (UNDP)	• 인류의 발전 정도를 알아보기 위해 개발된 지표	• 수명, 교육수준, 생활수준으로 구성된 자료를 합성	• Life Expectancy index • Education index • GDP index	• 최저치와 최고치에 대한 비율로 결정 • 0~1.0 사이의 값	• Education index 산정시 가중치 부여 • 구성 세부 지수 간에 균등 가중치 사용	• UNDP는 총 173개국에 대해 인류발전지표를 적용	• 국가 단위의 발전 정도 비교	• 유역적용 사례 없음
• SWSI (Social Water Stress/Scarcity Index)	• L. Ohlsson	• 수자원에 대한 사회적 수용도 평가	• WSI (Water Stress Index)/ HDI (Human Development Index)	• 수명, 교육수준, 생활수준을 고려한 HDI • 일년간 재생가능한 물 백만 m <sup>3</sup> 를 사용할 수 있는 백만 단위의 인구수 (WSI)	• 최대치와 최소치를 정한 후 이에 대한 비율 적용	• HDI 산정시 균등 가중치 적용	• 국가별 지수 산정 후 비교	• 국가별 물 이용 능력, 상태파악에 적용	• 국내 행정 구역 간 비교에 적용
• 지속가능한 수자원개발과 관리를 위한 지수	• 한국건설기술연구원	• 사회, 경제적 요인, 환경적 요인을 고려한 수자원 평가	• 압력, 상태, 대응 지수로 구분하여 각각을 중간지표와 세부지수로 구성	• 지수별 사회적 요인, 수자원의 이용, 환경, 경제 등으로 구분 후 각각을 1~7개의 세부 지표로 구성	• 최대치와 최소치를 이용 한 점수 부여법	• 균등 가중치 적용	• 국내 행정구역, 대유역별 비교	• 대유역 비교에 적용	• 소유역간 비교 사례 없음
• WRSI (Water Resources Sustainability Index)	• 한국수자원공사	• 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경보전성, 유지관리 능력으로 수자원 평가	• 지속가능성 평가 가능 세부 지수 선정 후 지표들을 그룹화	• 4개의 세부 지수에 3~5개의 세부 지표 구성	• 지표의 적정 활용 분포 선정 후 초과확률을 이용한 점수 부여	• 수자원 분야 전문가들에 대한 설문 조사 후 가중치 적용 (AHP 기법)	• 소유역간 수자원 지속가능성 평가	• 수자원 이용과 관리에 국한된 지표 선정	• 대유역간 비교에 적용 사례 없음
• 댐 개발 우선순위 평가 지수	• 국토연구원	• 경제성, 환경성, 사회적 정정성으로 분류하여 댐 투자 우선순위 평가	• 대분류에 대한 세부 항목 선정	• 3개 대분류에 4~5개 지표 선정	• 표준화점수 (Z-score) 환산법	• 전문가들에 대한 설문 조사 후 가중치 적용 (AHP 기법)	• 댐 건설 예상기간의 점수 비교	• 비계량적인 항목 포함	• 시대 상황을 반영한 항목의 재구성 필요
• 유역수자원환경평가지표	• 건설교통부, 한국수자원공사	• 유역 수자원과 관련된 분야를 이수 지수, 하천환경으로 구분	• 하위 지표를 취약성 지표, 대응력 지표로 구성	• 3개 대분류에 4~6개의 취약성 지표, 대응력 지표로 구성	• 최대치와 최소치를 이용 한 점수 부여법	• 균등 가중치 적용	• 국내 대유역 수자원 평가	• 지표들을 종합한 결과를 제공하지 못함	• 사회, 경제, 생태환경과 관련된 항목 추가 필요

### 3. 수자원 및 환경 평가에 대한 지표 및 지수의 활용 사례

#### 3.1 국외 적용

##### (1) 환경 지속가능성 지수

(Environmental Sustainability Index, ESI)

ESI는 환경 시스템, 환경영향 요인 저감, 인류 보편에 대한 취약성 저감, 사회 및 제도적 능력, 국제사

회 기여도로 구분하여 환경의 지속가능성을 평가한다. 이 지수는 총 21개의 지표와 76개의 변수로 구성되어 있으며 가중치가 적용된다. ESI는 매년 각국의 자료를 수집하여 산정되며, 각국의 환경 지속가능성을 상대적으로 평가하는데 이용되고 있다. 그림 2는 2005년의 ESI를 국가별로 비교한 것이다. 2005년에 ESI가 가장 높은 나라는 필란드였으며, 우리나라는 146개국에서 122위를 나타냈다.

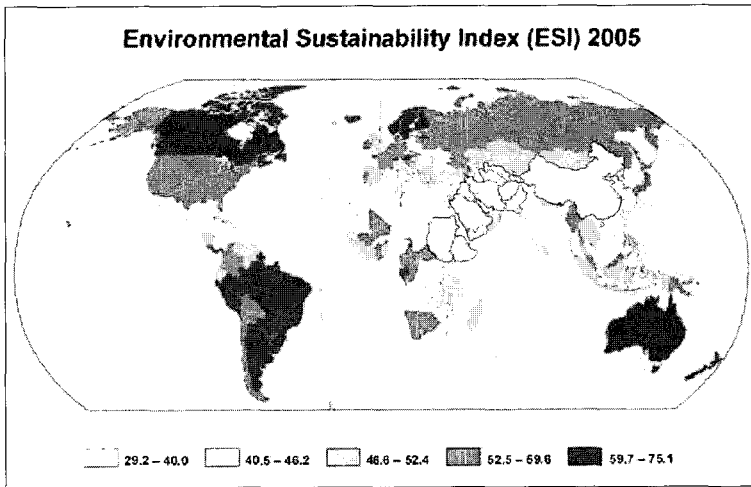


그림 2. 국가별 Environmental Sustainability Index(ESI) 비교

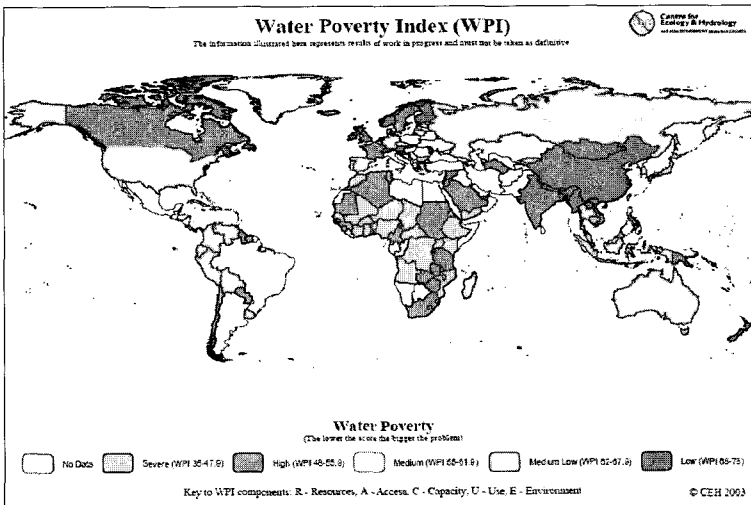


그림 3. 국가별 Water Poverty Index(WPI) 비교

(2) 물부족 지수(Water Poverty Index, WPI)

WPI는 수자원 이용에 관련된 수문, 사회, 경제, 환경 지표들을 통합한 지수이다(Sullivan, 2001, 2002). 이 지수는 수자원 양, 수자원 이용의 접근성, 사회적 관리 능력, 수자원 이용, 환경과 같은 세부지수로 구성되어 있다. 이들 세부지수들은 각각 세부 평가 지표들로 구성된다. 그림 3은 국가별 물부족지수를 나타낸 것이다. 물부족지수가 35~47.9인 상태는 물부족이 심각한 상태, 48~55.9인 상태는 물부족이 우려되는 상태, 56~61.9인 상태는 물부족이 중간정도인 상태, 62~67.9인 상태는 물부족이 중간이하인 상태, 68~78인 상태는 물부족을 우려하지 않아도 되는 상태를 의미한다. 물부족지수가 가장 높은 국가는 WPI가 78인 필란드이며, 우리나라는 62.4로 다른 나라와 비교했을 때 물부족이 중간 이하인 그룹에 포함된다.

3.2 국내 적용

(1) 사회적 물부족지수

(Social Water Stress/Scarcity Index, SWSI)

사회적 물부족지수(SWSI)는 수자원에 대한 사회적

수용도를 평가하는데 사용된다. 이 지표는 0~5일 경우 상대적으로 수자원이 풍부한 상태, 6~10일 경우 수자원에 대한 스트레스를 받는 상태, 11~20일 경우 수자원이 부족한 상태, 20 이상인 경우 수자원 이용에 지장이 많은 상태를 나타낸다. 그림 4는 시도별, 권역별 사회적 물부족지수(SWSI)를 나타낸 것이다. 그림 4와 같이 행정구역별로는 사회적 물부족지수(SWSI)가 크게 차이를 나타내지 않았다. 그러나 권역별로는 한강권역의 사회적 물부족지수 값이 다른 권역 보다 크게 나타나고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

(2) 수질 평가 지수

(Korean-Water Quality Index, K-WQI)

수질 평가지수는 수질을 평가하는 항목들을 종합하여 하천의 수질을 평가하기 위하여 개발되었다. 수질 평가지수는 여러 연구자들에 의해 개발되어 적용이 되고 있으며, 우리나라에서도 1996년부터 수질 평가지수를 개발하여 적용하고 있다(최지용 등, 1996). 수질 평가지수에 사용되는 항목은 BOD, pH, DOs, COD, SS, T-N, NH3-N, NO3-N, T-P, T-Coli이어서 총 10개 항목이다. 이 지수에서는 각 항목에 대해서

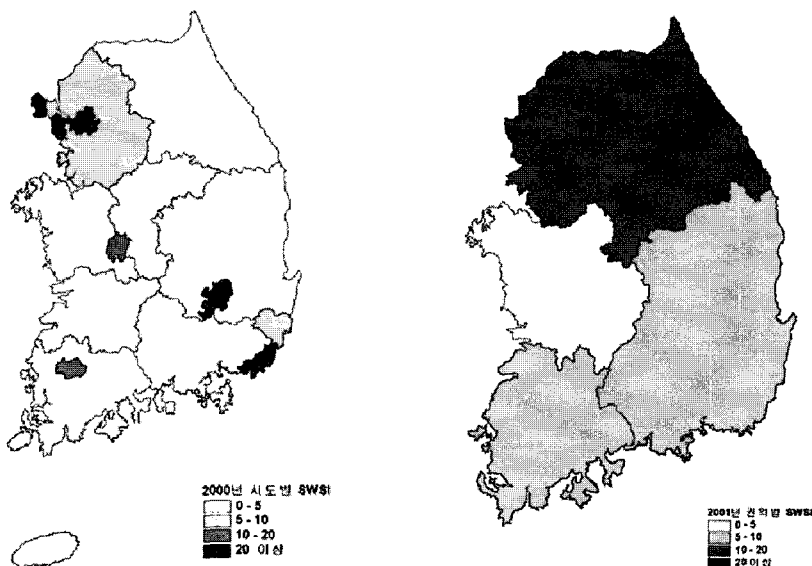


그림 4. 사회적 물부족지수(SWSI)를 이용한 수자원 분석(한국건설기술연구원, 2004)

가중치를 적용하고 가중 곱의 형태로 항목들을 종합하는 방법을 사용하였다. 그림 5는 한강권역의 수질을 K-WQI를 사용하여 평가한 결과를 공간적으로 비교한 것이다. 수질상태를 5개의 등급으로 구분하여 비교하였으며, 한강 수계에서 팔당댐 상류 유역의 수질상태가 하류 유역 보다 양호한 결과를 나타내고 있다.

(3) 수자원 지속가능성 지수

(Water Resources Sustainability Index, WRSI)

지속가능한 수자원 이용과 관리를 위해서는 유역 내에서 진행되고 있는 수자원과 관련된 활동들이 지속가능한 개발의 개념에 부합하고 있는가를 평가해야 한다. 이를 위해서는 유역의 수자원 이용과 관리에 영향

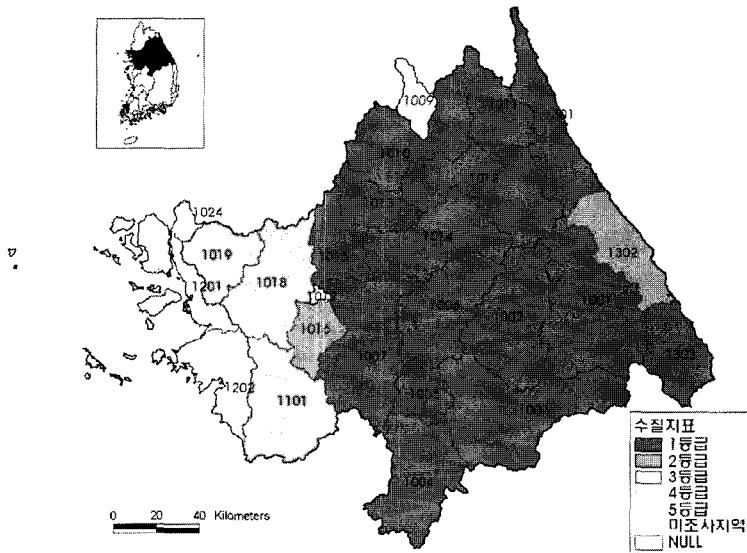


그림 5. K-WQI를 이용한 수질 평가(건설교통부와 한국수자원공사, 2005)

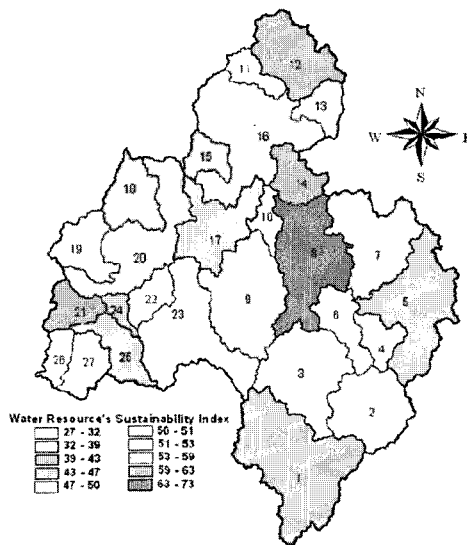


그림 6. 금강유역의 수자원 지속가능성(강민구 등, 2005)



을 미치는 수문, 수질, 사회, 경제 및 환경 요인을 고려한 평가지수가 필요하다. 따라서 강민구 등(2005)에 의해서 수자원 관리와 이용의 지속가능성을 평가하기 위한 지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)가 개발되었으며 금강수계의 소유역별 수자원 지속가능성이 평가되었다. WRSI를 구성하는 구성지표와 세부기준의 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, 여론조사 및 관련된 선행 연구결과를 분석하고 지표로서의 적합성을 평가한 후 선정되었다. 그림 6은 수자원 지속가능성 지수(WRSI)를 금강유역에 적용한 결과를 나타낸 것이다. 금강유역을 여러 개의 소유역으로 구분한 후 각 유역의 수자원 지속가능성 지수를 산정하고 지리정보시스템을 이용하여 공간적인 분포를 분석하였다.

**(4) 유역 수자원 환경 평가 지표**

유역관리 상태를 평가하고 취약한 부분을 파악하기

위해서는 유역의 수자원 환경에 대한 평가가 필요하다. 건설교통부와 한국수자원공사(2005)에서는 유역조사결과를 사용하여 유역의 수자원 환경을 이수, 치수, 하천환경으로 구분하고 이들의 취약성과 대응력을 평가할 수 있는 지표들을 개발하였다. 이수측면에서 취약성 지표는 1인당 수자원량, 농지당 수자원량, 용수이용률, 공급불안전율, 대응력 지표는 상수도 보급률, 개발저수용량, 상수도 누수율, 1인당 1일 물소비량을 사용하였다. 치수 측면에서 취약성 지표는 인구밀도, 도시화율, 도로밀도, 호우일수, 홍수피해밀도, 침수면적 밀도, 대응력 지표는 하천개수율, 재정자립도, 홍수조절용량, 내수배제시설을 구성지표로 사용하였다. 하천환경 측면에서는 취약성 지표는 수질, 환경오염 현황, 축산사육두수, 하천시설물 현황, 대응력 지표는 하수처리율을 구성지표로 사용하였다. 그림 7은 치수측면의 취약성 지표 중의 하나인 침수면적 밀도를 한강수계의 중권역별로 공간적으로 비교한 결과이다. 유역 수자원 환경 평가 지표는 구성지표들을 종합한 결과를 제시하지 못하였으며 단지 개별 지표들을 사용하여 유역별로 수자원 상태를 비교하였다. 향후에는 이들을 종합하여 유역의 수자원 환경을 평가할 수 있는 지수로 발전시킬 필요가 있다.

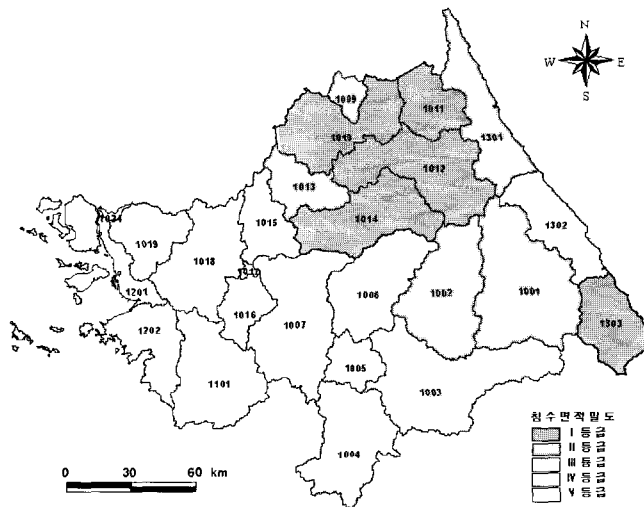


그림 7. 중권역별 침수면적 밀도(건설교통부와 한국수자원공사, 2005)

(5) 하천 자연도 평가 지수

최근 고도성장, 산업화, 도시화에 의해서 하천 주변의 토지를 고도로 이용함에 따라 자연하천에서 인공하천으로 변하고 있다. 하천에 대한 접근성이 떨어지고 동식물의 서식처가 훼손되어 현재 하천 생태계 보전 필요성이 대두되고 있다. 따라서 하천 환경의 훼손 정도를 평가하여 하천 복원을 위한 대책을 제시하고 하천 정비 방향성을 제시할 필요가 있다. 이를 위한 평가방법들은 국외의 정부기관에서 개발하여 적용되고 있으며 국내에서는 박봉진 등(2005)이 하천 형태와 하천 환경으로 구분하여 14가지 지표를 사용한 하천 자연도 평가지수를 개발하여 적용한 바가 있다. 이 지수에서는 하천의 형태 세부지수의 구성지표로 수로의 굴곡, 종·횡 사주, 흐름의 다양성, 하상재료의 다양성, 저수로 폭의 다양성, 저수로 호안공, 제방 호안 재료를 선정하였다. 하천 환경 세부지수의 구성지표로 저수면 식생, 홍수로 식생, 제내지 수변구역 토지이용, 제외지 홍수터 이용, 횡방향 인공구조물, 수질, 수면폭 대 하천폭비를 사용하였다. 그림 8은 하천 자연도 평가지수를 이용하여 홍천강의 하천 자연도를 구간별로 평가한 것이다(건설교통부와 한국수자원공사, 2005). 이 지수는 생태계의 총체적인 상태를 정량적으로 평가하기 어렵고 주관적인 판단이나

전문가들의 경험에 의존해야 하는 단점이 있다.

4. 평가지수의 수자원 및 환경 분야에서 활용 방안

(1) 대안들의 비교

통합지수는 정책시행의 우선순위를 결정하기 위한 정보를 제공할 수 있으며, 사업 계획을 수립할 경우 관련된 대안들을 상대적으로 비교하는데 적용이 가능하다. 정책시행의 우선순위 결정시 평가항목을 다양하게 구성하여 해당 지역들을 평가함으로써 평가의 객관성을 보장할 수 있다. 예를 들어 공공투자 사업의 우선순위를 결정할 때 긴급성, 필수성, 필요성, 바람직성, 수용가능성, 연기가가능성 등을 주로 고려한다. 이러한 항목들을 정량적으로 측정할 수 있는 지표들로 구성된 평가지수를 개발하면 투자우선순위 결정에 적용할 수 있다. 또한, 시설물의 적지 선정에도 통합지수의 적용이 가능하다. 계층화 분석 기법을 적용하여 적지분석을 실시하여 적합도를 계산한 후 계량화된 값을 사용하여 대상지구들을 상대적으로 비교한다. 각 단계에서 산정된 중요도를 고려하여 계산된 적합도를 비교하여 대상지구들 간의 우위를 비교할 수 있다.

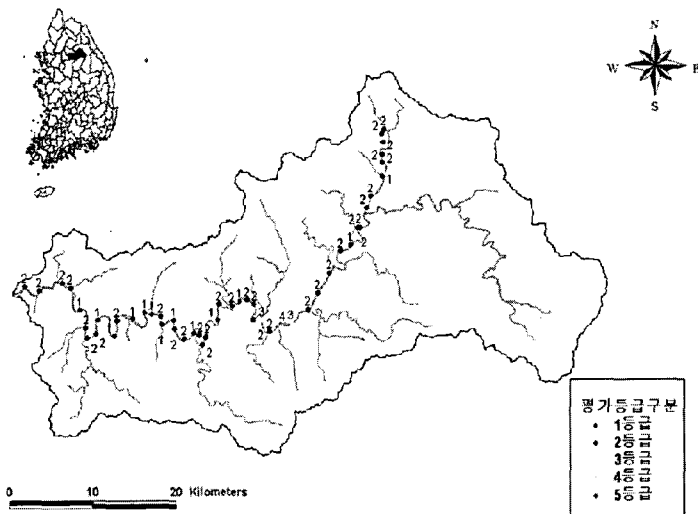


그림 8. 홍천강의 구간별 하천자연도(건설교통부와 한국수자원공사, 2005)

## (2) 유역의 상태 평가

통합지수는 지속적인 모니터링을 통하여 유역의 수자원 및 환경의 상태를 평가하는데 적용이 가능하다. 유역의 상태는 여러 가지 요인에 의해 변한다. 인간의 사회 및 경제 활동은 자연자원을 구성하는 토지와 하천의 변화를 초래하며, 이에 따라 생태계의 변화가 발생한다. 따라서 현재 유역 상황을 유역 시스템을 구성하는 요소들의 주기적인 평가를 통해서 점검할 필요가 있다. 유역 관리 상태가 지속가능하게 진행되고 있는가를 평가하고 취약점을 분석해야 한다. 유역에 영향을 미치는 요인들은 무수히 많기 때문에 단일 항목만으로는 평가하기 어렵다. 유역은 여러 가지 요소들을 고려해서 평가해야 한다. 또한, 유역의 변화는 반응 속도의 차이는 있으나 여러 요인에 의해서 발생한다. 따라서 지속적인 모니터링을 통하여 유역을 평가하고 상태를 점검해야 한다. 이를 통해서 유역 시스템의 문제점과 영향요인을 분석하고 진단하여 문제를 해결하기 위한 가능대안들을 비교하고 최적 관리 방안을 선택하여 시행하게 된다.

## (3) 정책의 가이드라인 제시

통합지수는 수자원관리와 이용, 유역관리, 정책시행 등의 가이드라인을 제공할 수 있다. 최근 국토개발은 지속가능성에 기초하여 진행되고 있다. 이 개념은 자원을 경제적으로 효율적으로, 사회적으로 공평하게, 후세대가 사용할 수 있도록 보전하면서 사용하자는 것이다. 이 개념은 초기에 선언적이고 정성적이며 내용이 모호하다라는 비판을 받았으나 최근에는 각 분야에서 구체적인 실천 방안을 수립하여 적용하고 있다. 수자원 분야에서도 이를 위한 많은 노력이 있었으며, 지속가능한 개발 개념을 바탕으로 과거의 수자원 이용의 문제점을 진단하고 향후 발전방향을 제시하고 있다. 그러나 구체적인 평가항목을 선정하여 현황을 파악하고 있는 단계는 아니다. 수자원 분야에서 지속가능성을 평가할 수 있는 통합지수를 개발하여 사용하면 현재 수자원 정책의 실현정도를 측정할 수 있다. 또한, 통합지수는 수자원 분야의 문제점을 진단하여 향후 발전방향을 제시하는데 활용이 가능하다.

## (4) 대중에 대한 정보 제공 및 정책에 대한 참여유도

통합지수는 유역의 수자원 및 환경 상태를 대중이 이해하기 쉽도록 수치정보를 제공한다. 주기적인 평가를 통하여 유역의 상태를 과거와 비교하면서 숫자로 제시하면 문제의 심각성을 빨리 인식할 수 있다. 또한, 다른 유역과 상대적인 비교 결과는 해당 유역의 문제점을 인식하는데 기여할 수 있다. 통합지수의 가중치 결정시 대중들의 의견을 반영할 수 있어 정책에 대한 대중들의 참여를 유도할 수 있다. 시스템을 평가하는 지수를 구성하는 요소들은 각기 상이한 중요도를 갖는다. 예를 들어, 국가의 지속가능성을 평가할 경우, 국민들이 지향하는 방향이 상이하므로 구성요소들의 중요도는 공간적, 시간적으로 다르게 나타날 수 있다. 또한, 가중치는 대상자들의 가치관에 따라 상이한 값이 나타나게 된다. 유역관리를 평가하는 지수에서도 유역의 현재 상태, 지역 및 개인적인 이익, 시스템을 구성하는 인간의 가치관에 의해서 다르게 나타나므로 다양한 전문가와 지역주민들의 의견을 수렴하여 적용해야 한다. 최근 국제기구에서 개발하는 지수들에도 구성요소간의 중요도를 고려하여 지수를 산정하고 국가 간에 상대적인 크기를 비교하고 있다. 따라서 통합지수의 가중치를 결정할 때 대중들의 의견을 반영할 수 있어 수자원정책에 대한 대중들의 참여를 유도할 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

최근에는 수자원을 이용하는 수요자들의 관심이 높아지고 있으며 요구 사항이 많아지고 있다. 이는 경제발전예 따라 국민소득이 향상되어 수자원 이용의 편리성 증대와 양질의 물을 사용하길 원하기 때문이다. 또한, 일반 국민들은 물과 관련된 환경을 개선하여 보다 많고 질 높은 혜택을 받기를 원하며, 각종 물 관련 재해에 대한 안전성을 요구하고 있다. 이러한 물에 대한 국민들의 요구를 해결하기 위해서는 수자원을 이용하고 관리할 때 수량뿐만 아니라, 수질, 생태를 고려해야 한다. 이를 위해서 세계적으로 수자

원의 통합운영에 대한 관심이 집중되고 있다. 또한, 1980년대 후반부터 지속가능한 개발 개념이 새로운 패러다임이 되어 왔으며, 여러 나라에서 이를 근거로 하여 국가 개발 전략을 수립하고 있다. 우리나라에서도 수자원 개발에 이 개념을 도입하여 문제점을 분석하고 있으며, 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 같이 수자원과 관련된 국제적, 사회적, 경제적 주변 환경이 변하고 있기 때문에 수자원과 관련된 다양한 여건의 변화와 문제점을 고려해서 앞으로의 수자원 이용과 관리의 발전 방향을 수립할 필요가 있다. 미래 수자원 이용과 관리의 발전 방향을 수립하기 위해서는 수자원과 관련된 제반 여건들의 변화를 분석하고 이에 따른 영향을 먼저 고려해야 한다. 이를 위해서는 유역이나 수계의 수자원 및 환경을 종합적으로 평가할 수 있는 도구가 필요하며 이를 사용하여 문제점을 진단하고 대책을 수립하여 개선하고, 상태를 지속적으로 모니터링해야 한다. 또한, 미래 세대가 사용할 수 있도록 수자원을 보전하기 위해서는 평가지수의 결과를 사용하여 미래를 내다보는 계획을 수립하고 이에 대한 실천계획(action plan)을 수립하여 적극적으로 실천해야한다. 따라서 평가 지수나 지표는 수자원과 환경에 관련된 구체적인 문제점 진단과 향후 개선방안을 수립하는데 적용이 가능할 것으로 사료된다. ㉓

### 참고문헌

1. 강민구, 이광만, 김정곤(2005). 통합지수를 이용한 유역의 수자원 지속가능성 평가, 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
2. 건설교통부, 한국수자원공사(2005). 전국유역조사-한강, 낙동강 유역.
3. 건설교통부, 한국수자원공사(2003). 물에 관한 국민 여론조사.
4. 안장원, 차철, 권석현, 서성한(2004). 철도노선 계획 시 VE 평가를 위한 AHP 기법의 활용, 대한토목학회지, 제 52권 제 12호, pp. 38-43.
5. 이길성, 정은성, 김영오(2005). 안양천 유역의 물순환 건전화를 위한 통합관리방안(I) : 현황 파악, 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
6. 이상일, 이상신(2004). 지표수-지하수 연계 운영을 위한 적지분석 시스템 개발, 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
7. 박봉진, 신종이, 정관수(2005). 하천의 생물서식처 복원을 위한 하천자연도 평가 : I. 평가방법의 제안, 한국수자원학회 논문집, 38(1), pp. 37-48.
8. 박태선(2002). 계층화 분석법을 이용한 하천의 중요도 평가 비법, 한국수자원학회 논문집, 35(6), pp. 685-692.
9. 최지용(1996). 종합수질지표의 개발, 한국환경기술개발원.
10. 한국건설기술연구원(2004). 유역통합 물수지 분석 및 수자원 계획기술의 개발.
11. Cai X., McKinney, 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.
12. 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.
13. Saaty, T. L.(1980). Analytic hierarchy process: Planning, priority setting, and resource allocation, McGraw-Hill, New York.
14. Sullivan C. A.(2002). Calculating a Water Poverty Index, World Development, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210.
15. U. S. Environmental Protection Agency(2002). Index of watershed indicators: An overview.
16. World Economic Forum(2002). 2002 Environmental Sustainability Index.