

# Analytic Hierarchy Process 기법을 이용한

## 수자원 지속가능성 지수 개발

### Development of Index for Assessment of Water Resources Sustainability Using Analytic Hierarchy Process

강민구\*, 이광만\*\*

Min Goo Kang, Gwang Man Lee

#### 요 지

지속가능한 수자원 개발 및 관리를 위해서는 유역 내에서 진행되고 있는 수자원에 관련된 활동들이 지속가능한 개발의 개념에 부합하는지 여부를 판단해야 한다. 이를 위해서는 국가, 유역, 지자체 등의 수문, 수질, 사회, 경제, 환경적인 요인들을 고려한 다변수 평가 지수가 필요하다. 본 연구에서는 유역의 수자원을 평가할 수 있는 지표들을 선정하고 이들 간의 중요도는 계층적 분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 사용하여 산정하였으며 이들을 종합한 수자원 지속가능성 지수(WRSI, Water Resources Sustainability Index)를 개발하였다. WRSI는 경제적 효율성 세부지수, 사회적 공평성 세부지수, 환경 보전성 세부지수, 유지관리능력 세부지수로 구성하였다. 지표들과 세부지수들 간의 중요도는 전문가들에 대한 설문조사를 통하여 산정하였다. 개발된 WRSI 구성지표들의 표준화는 이들의 적정 확률분포를 선정한 후 누가확률을 사용하여 산정하는 방법을 개발하여 사용하였다.

**핵심용어** : Analytic Hierarchy Process, Assesment Index, Water Resources Sustainability

#### 1. 서 론

지속가능한 수자원 이용과 관리를 위해서는 유역 내에서 진행되고 있는 수자원에 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. 그러나 이러한 단일 변수에 의한 평가는 수자원의 지속가능성을 종합적으로 평가할 수 없으므로 국가, 유역, 지자체 등의 수문, 수질, 사회, 경제, 환경적인 요인들을 고려한 다변수 평가 지수가 필요하다. 또한, 수자원과 관련된 정보는 광범위하므로 이들을 단순화하고 계량화하여 내포된 의미를 대중들에게 전달할 수 있는 지수가 필요하다. 개발된 지수를 사용하여 유역관리나 수자원 관리에 적용하여 지속가능한 개발 여부를 판단하고 지속적으로 수자원을 평가할 수 있어야 한다. 또한, 지수는 정책시행의 우선순위를 결정하기 위한 정보를 제공할 수 있으며, 수자원 개발 계획을 수립할 경우 관련된 대안들을 실행함에 따른 결과를 평가하는데 사용이 가능하다.

국외에서 지속가능한 발전 상태를 평가하기 위해 개발된 지수를 살펴보면 수자원의 지속가능성을 평가하는 지수는 많지 않다. 이는 지속가능한 개발 개념이 수자원 한 분야만을 고려하는 것이 아니라, 사회, 경제, 환경 등의 다양한 분야를 고려해야 하기 때문이다. 국가 개발의 지속가능성을 평가하기 위한 지수는 주로 국제기구들에 의해 개발되고 적용되어 왔다. 국제적으로 사용되고 있는 지수들은 OECD, UN, EU 등에서 개발된 것들이며, 여러 국가들에 적용되어 국가별로 지속가능성을 상대적으로 평가하고 있다. 국내에서도 지속가능성을 평가하기 위한 지수들의 필요성이 대

\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원·kmg90@kowaco.or.kr

\*\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원·lkm@kowaco.or.kr

두됨에 따라 각 분야별 지수 개발이 진행되고 있다.

수자원 지속가능성 지수는 수자원의 지속가능성을 평가할 수 있는 항목으로 구성되어야 한다. 기존의 지수들을 비교해보면, WPI(Water Poverty Index), SWSI(Social Water Stress/Scarcity Index), ESI(Environmental Sustainability Index)와 같은 경우는 외국에서 개발되어 우리나라의 실정에 맞지 않는 경우가 있다. 이들 지수들의 세부 지표들은 우리나라에서 획득할 수 있는 자료가 모두 있는 것이 아니고 제한적이다. 또한, 세부 지표에 대한 가중치를 고려하지 않고, 다양한 항목을 사용하므로 수자원 지속가능성에 대한 집중된 평가가 어렵다. 따라서 우리나라의 실정에 맞는 지표들로 구성된 수자원 지속가능성 지수가 필요하다. 본 연구에서는 대상 지역의 수자원 지속가능성을 평가할 수 있는 지표들을 선정하고 이들 간의 중요도를 계층적 분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 사용하여 산정하고 이들을 종합한 통합지수를 개발하였다. 개발된 통합지수 구성지표들의 표준화는 이들의 적정 확률분포를 선정한 후 누가확률을 사용하여 산정하는 방법을 개발하여 적용하였다.

## 2. 수자원 지속가능성 지수 개발

### 2.1 수자원 지속가능성 지수 개발 절차

수자원 지속가능성 지수를 개발하기 위하여 먼저 개발 원칙과 전문가들에 대한 조사계획을 수립하였다. 두 번째, 수자원 지속가능성을 나타낼 수 있는 자료들을 수집하고 지표선정 기준을 고려하여 평가하였다. 세 번째, 선정된 지표들을 지속가능한 개발 개념인 ‘경제적 공평성’, ‘사회적 공평성’, ‘환경적 보전성’과 이들을 유지 및 향상시키기 위해 필요한 지역 거주민의 참여 정도, 경제력, 기술력을 평가하기 위한 ‘유지관리 능력’으로 그룹화하였다. 선정된 지표와 세부지수간의 중요도는 상이하므로 전문가들에 대한 설문조사를 실시하여 중요도를 산정하였다. 개발된 지수의 적용성은 대상지역을 선정하여 소유역간의 수자원 지속가능성을 상대적으로 비교하여 평가한다.

### 2.2 지표 선정 방법 및 기준

수자원 이용과 관리의 지속가능성 지수의 구성 지표들을 선정하기 위하여 수자원과 관련된 사회, 경제, 환경 분야의 통계자료와 유역조사를 통해 수집된 자료, 여론조사결과, 기존 연구결과들을 수집하였다. 수자원과 관련된 사회 및 경제분야의 통계자료는 인구, 토지이용, 지역내 경제활동, 생산량, 교통, 공업, 농업, 재해 피해 현황, 사회시설 등으로 구별할 수 있다. 지역내 경제활동과 관련된 통계값으로는 지역내 총생산(GRDP), 1인당 총생산, 지역내 순생산, 1인당 개인 소비액, 실업률 등이 있다. 수자원과 관련된 환경분야의 통계값은 상수도, 하수도, 산업폐수, 축산, 폐기물, 오염원, 생태 등으로 구분할 수 있다. 하수도와 관련된 통계값으로는 하수 발생량, 하수 처리량, 하수처리시설 처리용량, 하수 처리율, 하수도 보급률, 하수도 요금, 하수도 관련 지출액등이 있다. 수자원 이용 및 관리 상태를 나타내는 유역 조사결과로는 강수량, 유출율, 1인당 사용가능량, 용수 수요량(생·공·농업용수), 용수 취수량(생·공·농업용수), 수자원 부족량, 지하수 사용량, 지하수 개발량, 하천유량(평, 평, 저, 갈수량), 하천유지유량, 하천수 수질, 지하수 수질, 하천의 목표 수질 및 환경 기준 등이 있다. 여론조사는 수자원에 대한 일반 국민 및 수자원 관련 전문가들의 물이용 상태, 수자원에 대한 의식과 요구 사항을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 건설교통부와 한국수자원공사에서는 2003년 10월에 일반국민 1,000명과 수자원 관련 전문가 106명에 대하여 설문조사를 실시하여 물이용 실태, 수자원의 문제점 및 개선점 등을 조사·분석한 자료를 이용하여 향후 수자원 이용 및 관리의 발전방향으로 선정하였다. 수자원 지속가능성 평가에 대한 기존 연구결과로는

WPI, SWSI, ESI 등과 같은 외국 선진국과 국제기구에서 개발된 지수가 있다. 국내에서는 최종적인 지수의 개발은 아직까지 이뤄지지 않았으며 방법론 개발에 그치는 수준이다. 이들 연구 결과에 사용된 자료들을 비교하여 수자원 지속가능성 평가에 사용할 수 있는 지표들을 추출하였다. 이러한 방법으로 수집된 자료들은 목표와의 연관성, 단순성, 용이성, 정량성, 확실성, 종합성, 민감성과 같은 지표 선정 기준을 사용하여 지표로서의 적절성을 평가하였다.

### 2.3. 수자원 지속가능성 지수의 구성

수자원 지속가능성 지수(WRSI, Water Resources Sustainability Index)는 수자원 이용의 경제적인 효율성, 수자원 이용의 공평성, 수자원의 환경 보전성, 이들을 확보하기 위한 유지·관리를 위한 능력을 평가할 수 있는 세부지수로 구분하였다. 각 세부지수와 구성항목에 대한 자세한 내용은 다음과 같다.

#### (1) 경제적 효율성 세부지수(Economic Efficiency Sub-Index)

경제적 효율성 지수는 수자원을 얼마나 경제적으로 사용하는가를 평가하는 세부 지수이다. 이 지수는 생산액당 용수 사용량, 보조 수자원 사용량, 수자원의 경제적 편익, 생산액당 목표 수질 달성율과 같은 지표로 구성이 되어 있다.

#### (2) 사회적 공평성 세부지수(Social Equity Sub-Index)

사회적 공평성 지수는 수자원 사용에 대한 사회적인 형평성 정도를 평가하는 세부지수이다. 이 지수는 상수도 보급률, 하수도 보급률, 공업용수 이용률, 관개답 비율, 하천유지유량 달성율과 같은 지표로 구성이 되어 있다.

#### (3) 환경 보전성 세부지수(Environmental Conservation Sub-Index)

환경 보전성 지수는 유역 환경의 보전 정도를 평가하는 세부지수이다. 이 지수는 하천수 수질 상태, 지하수 수질 상태, 생태계 보전 정도와 같은 지표로 구성이 되어 있다.

#### (4) 유지관리 능력 세부지수(Maintenance Capability Sub-Index)

유지관리 능력 지수는 수자원 지속가능성의 유지 및 향상을 위한 인력, 자원, 기술력 평가하는 세부지수이다. 이 지수는 교육수준, 문화 및 교육 분야 투입액, 수자원 분야 투입액, 수요관리량으로 구성된다.

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

수자원 지속가능성 지수에 포함된 항목들은 정량적인 값을 가지고 있다. 따라서, 각기 다른 차원을 갖는 항목들의 조합으로 다변수 평가 지수를 개발하기 위해서는 각각의 항목 값을 표준화하여 무차원화해야 한다. 이와 같이 무차원화된 항목 값에 가중치를 고려하여 평가 지수를 산정한다. 각 항목의 가중치는 균등한 가중치를 적용하거나, 적절한 방법을 통해 얻어진 불균등 가중치를 적용할 수 있다. 식 (1)은 불균등한 가중치가 고려된 평가 지수를 나타낸 것이다.

$$WRSI = \frac{w_1EEI + w_2SEI + w_3ECI + w_4MCI}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} \quad (1) \text{ 여기}$$

서  $w_1, w_2, w_3, w_4$ 는 세부지수들의 가중치, EEI는 경제적 효율성 세부지수, SEI는 사회적 공평성 세부지수, ECI는 환경 보전성 세부지수, MCI는 유지관리능력 세부지수를 나타낸다. EEI, SEI, ECI, MCI는 식 (2)와 같이 구성지표들을 이용하여 산정된 세부지수들이다.

$$SWR = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (2) \text{ 여}$$

기서 SWR은 세부지수의 값,  $w_i$ 는 선정된 지표들의 가중치,  $Z_i$ 는  $i$  지표의 표준화된 값,  $n$ 은 세

부지수의 구성 지표수를 나타낸다.

### 3. 지표의 표준화

수자원 지속가능성 지수를 구성하는 지표들은 서로 다른 단위(unit)를 가지고 있어 이들을 직접적으로 비교할 수 없다. 따라서, 지표들을 단위가 없는 무차원값으로 변환하는 표준화과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 자료의 무차원화를 대상 자료들이 나타내는 적정확률분포를 선정하여 확률분포에 해당 자료가 갖는 초과확률을 사용하여 표준화하였다. 지표의 적정 확률 분포형을 검정하는 적합도 검정 중 일반적으로 많이 사용하는 K-S 검정과  $\chi^2$  검정을 사용하였다. 그림 1은 표준화 방법별 무차원값을 도식적으로 비교한 것이다.

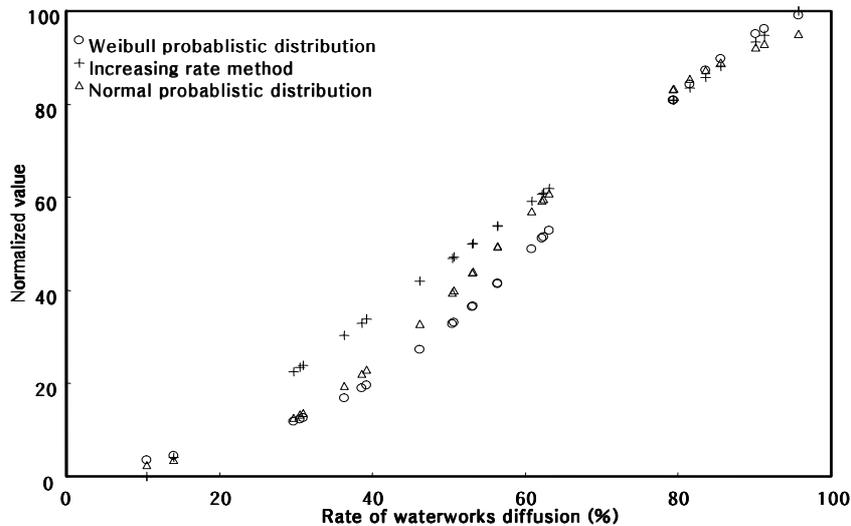


그림 1. 표준화 방법별 무차원값 비교

### 4. Analytic Hierarchy Process를 이용한 중요도 산정

수자원 지속가능성 지수의 세부지수간의 중요도와 세부지수를 구성하는 세부항목간의 중요도를 산정하기 위하여 계층적 분석기법(AHP)을 사용하였다. 계층적 분석기법을 적용하기 위해서 세부지수 간과 세부지표 간을 쌍대비교하며, 결과의 일관성을 평가한 후 중요도를 산정한다.

#### 4.1 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)법을 사용하며, 주로 Saaty의 쌍대비교가 사용된다. 이 방법은 두 요인 사이의 상대적 중요도를 9 점 척도를 이용하여 평가하는 방법이다.

#### 4.2 중요도 산정

각 요인들의 상대적인 중요도는 요소들의 우선순위벡터(Priority Vector)를 계산하여 산정한다. 우선순위 벡터를 구하기 위해 기하평균이나 산술평균을 계산하며, 이는 쌍대비교 행렬의 각 행의 고유벡터(Eigen-vector)가 된다. 고유벡터를 표준화시켜 우선순위 벡터(Priority Vector)를 산정하며, 산정된 우선순위벡터가 각 단계의 요인들에 대한 중요도가 된다.

### 4.3 응답의 일관성(consistency) 평가

주어진 요인들에 대한 평가에 대하여 논리적 일관성이 있는가를 조사하기 위하여 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 산정하여 평가하는 방법을 사용한다. 응답의 일관성 평가는 일관성 지수(Consistency Index, CI)와 무작위 지수(Random Index, RI)의 비를 사용하여 나타낸다. 산정된 일관성 비율(CR)은 쌍대비교 행렬의 일관성을 평가하는 기준으로써 10 % 이하 일 경우 설문조사에 대한 응답에 일관성이 있다고 판단할 수 있다.

### 4.4 중요도에 대한 설문조사

수자원 지속가능성 지수의 세부지수와 지표들간의 중요도를 산정하기 위하여 수자원관련 전문가 집단에 대한 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 업계 8명, 학계 48명, 시민단체 5명, 연구기관 60명, 공무원 6명의 수자원관련 분야에 종사하는 전문가들을 대상으로 하였다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 유역의 수자원 지속가능성을 평가할 수 있는 통합지수를 개발하였다. 개발된 수자원 지속가능성 지수(WRSI, Water Resources Sustainability Index)는 경제적 효율성 세부지수, 사회적 공평성 세부지수, 환경 보전성 세부지수, 유지관리능력 세부지수로 구성하였다. 각 세부지수를 구성하는 지표들은 수자원과 관련된 사회, 경제, 환경 분야의 통계자료와 유역조사를 통해 수집된 자료, 여론조사결과, 기존 연구결과들을 수집하여 비교·분석한 후 지표로서의 적절성을 평가하여 선정되었다. WRSI의 세부 지수와 지표들 간의 중요도는 계층적 분석기법(Alytic Hierarchy Process, AHP)을 사용하여 산정하였으며 이들을 종합하여 WRSI를 산정한다. 지표들과 세부지수들 간의 중요도는 전문가들에 대한 설문조사를 통하여 조사하였다. 개발된 통합지수의 지표들의 표준화는 지표들의 적정 확률분포를 선정한 후 누가확률을 이용하여 산정하는 방법을 개발하여 사용하였다.

## 참 고 문 헌

1. ASCE Task Committee on Sustainability Criteria, 1998. *Sustainability criteria for water resource systems*. Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va.
2. Cai X., Rosegrant M. W., and Ringler C., 2003. Physical and economic efficiency of water use in the river basin: Implications for efficient water management, *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 1, pp. 1013-1024.
3. Lee, D. R. and Choi, S. J., 2003. Water resource assessment considering hydrological, social, economic, and environmental indicators, *Proc. Kor. Soc. of Civ. Eng.*, pp. 2006-2010 (in Korean).
4. Ministry of Construction and Transportation, 2000. *Long-term national water resources plan: Water vision 2020* (in Korean).
5. OECD, 1998. *Towards Sustainable Development: Environmental Indicators*.
6. Saaty, T. L., 1980. *Analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*, McGraw-Hill, New York.
7. World Commission on Environment and Development, 1987. *Our common future*, Oxford Univ. Press, New York.