

국가 별 수자원 취약성 지수의 산정 Assessment of Water Resources Vulnerability Index by Nation

원 광 재* / 정 은 성** / 김 연 주*** / 홍 일 표****

Won, Kwyang Jae / Chung, Eun Sung / Kim, Yeon Joo / Hong, Il Pyo

Abstract

Discussions for water resources vulnerability and index development with sustainable concept are actively being made in recent years. Based on such index, water resources vulnerability of present and future is determined and diagnosed. This study calculated the water resources vulnerability rankings by 152 nations, using indicator related to water resources assessment that can be obtained from World Bank, VRI (Vulnerability Resilience Indicator), ESI (Environmental Sustainability Index). In order to quantitatively assess of water resources vulnerability based on this indicator, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) technique was applied to index water vulnerability and to determine the rankings by nations. As a results, South Korea was ranked as the 88th among the 152 nations including Korea. Among the continents, Oceania was the least vulnerable and Afirica was the most vulnerable in continents. WUnited State, Japan, Korea and China were vulnerable in order among the major countries. Therefore, water resources vulnerability rankings by nations in this study helps us to better understand the situation of South Korea and provide the data for water resources planning and measure.

Keywords : Water vulnerability index, TOPSIS, World Bank, VRI, ESI

요 지

최근 수자원 취약성에 대한 논의 및 지속가능한 개발 개념에 적합한 지수 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 지수를 바탕으로 현재 또는 미래의 수자원 취약성을 판단하고 진단하고 있다. 본 연구는 자료의 확보가 가능한 World Bank, 취약성-탄력성지수(Vulnerability Resilience Indicator, VRI), 환경지속가능성지수(Environmental Sustainability Index, ESI)에서 사용된 수자원 평가 관련 지표들을 활용하여 우리나라를 포함한 전 세계 152개 국가의 수자원 취약성 순위를 도출했다. 이러한 지표를 바탕으로 수자원 취약성의 정량적 평가를 위해 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 기법을 적용하여 국가 별 수자원 취약성을 지수화하고 취약성 순위를 도출하였다. 연구결과 우리나라는 152개국 중 88위로 나타났고, 대륙 별 비교 시 오세아니아가 취약성이 낮았고, 아프리카는 취약성이 심각한 것으로 나타났다. 주요 국가 비교 시, 미국, 일본, 우리나라, 중국 순으로 취약성의 정도가 심각했다. 따라서 본 연구는 국가 별 수자원 취약성 순위를 통해 우리나라의 상황을 파악하고 국가의 수자원 계획 수립 및 대책을 제시할 수 있는

* 서울과학기술대학교 일반대학원 건설시스템디자인공학과 석사과정 (e-mail: kjwon@seoultech.ac.kr)
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-9017)
Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

*** 한국환경정책평가연구원 부연구위원 (e-mail: yjkim@kei.re.kr)
Korea Environment Institute

**** 글로벌 녹색성장 연구소 선임연구원 (e-mail: ilpyo.hong@gmail.com.)
Global Green Growth Institute

자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 국가별 수자원 취약성 지수, TOPSIS, World Bank, VRI, ESI

1. 서 론

지속가능한 개발 개념은 세계적으로 1980년대 후반부터 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, 관련된 다양한 분야에 도입되고 있다(KRIHS, 2003).

수자원 취약성의 개념은 인간, 환경, 경제에 부정적인 영향을 미치지 않는 수준에서 수자원의 양과 질을 확보해야 한다는 것에서 시작된다. 즉, 가정생활이외의 물 수요자에게 영향을 미치지 않는 범위 내에서 모든 가정에서의 일상생활을 위해 필요로 하는 수준의 양호한 수질과 풍부한 수량의 물을 확보하는 것으로 정의내릴 수 있다(Calow et al., 2002).

국제기구 및 연구단체는 수자원 취약성 개념을 바탕으로 최근 신뢰할 수 있는 투명한 수자원 정책의 의사결정을 위해 일반대중이나 수자원 관련 분야의 의사결정권자들이 쉽게 이용할 수 있는 이수, 치수, 하천환경의 상황을 포괄하는 수자원 통합지수를 개발하고 있다. 수자원통합지수의 개발목적은 수자원 정책수립에 있어서 올바른 수자원 정책의 방향성을 제시해 줄 수 있을 뿐만 아니라, 정책의 정량적 목표 및 중점 과제 도출이 가능하기 때문이다(Kang and Lee, 2006).

수자원 취약성 관련 지수들 중 대표적인 국가 별 비교를 위한 지수로는 물부족 지수(Water Poverty Index, WPI), 사회적 적응력 지수(Social Water Stress Index, SWSI) 등이 있다. 물부족 지수는 수자원 이용에 관련된 사회, 경제, 환경 지표들을 통합하는 지수이다(Sullivan, 2001). 이는 해당 나라의 복지수준과 물 이용 상황에 있어서의 관계를 파악하는데 목적이 있다. 5개의 세부지수 즉, 자원(Resources), 접근(Access), 이용능력(Capacity), 이용(Use), 환경(Environment)으로 이루어져 있고 그에 해당하는 지표로 구성되어 있다. 사회적 적응력 지수로 Ohlsson (1999)은 경제 기술적 또는 기타 수단을 통한 스트레스에 적응하는 능력을 의미하는 적응능력을 설명함으로써 Falkenmark 지표를 수정했고 Falkenmark의 지

표들에 가중치를 주는 UNDP's Human Development Index 사용했는데 결국 이는 사회적 적응력 지수로 불리어 졌다. 즉, 사회적 적응능력을 평가하는 지수로서 WSI (Water Stress Index)를 HDI (Human Development Index)로 나눈 값이다.

최근에도 이러한 연구는 지속적으로 진행되고 있다. Vörösmarty et al. (2005)은 전 세계적으로 사용가능한 지구 시스템 과학 데이터 집합을 사용한 지형 지표를 이용하여 아프리카의 수자원 상태를 평가하였다. 사회, 경제, 공학적 관점과 연결 시켜 지형 지표를 개발하는 것은 수자원 평가에서 중요한 다음 단계를 구성한다고 하였다. 또한 Vörösmarty et al. (2010)은 인간의 수자원 취약성 위험을 계산할 수 있는 공급의 안정화, 향상된 수자원 서비스 및 수로에 대한 접근을 의미하는 투자 이익 계수를 도출하였다.

국내에서는 국가 차원에서 지속가능한 개발에 대한 논의가 이루어지고 있으나, 국제기구나 선진국과 같은 체계적인 지표의 개발은 거의 이루어지지 않고 있을 뿐만 아니라 지속가능성 평가 지표에 대한 개념도 상당히 부족한 편이다. 특히, 수자원 분야를 위한 지표의 개발은 더욱 부족한 실정이다. 하지만 최근 수자원에 대한 대중들의 관심이 높아지고 있고 보다 풍요로운 삶을 살기 위해서 수자원 이용의 양과 질적인 측면에 대하여 요구가 높아지고 있다(MCT and KWRA, 2003).

국내의 연구를 통한 수자원 통합지수의 분석정보는 과거에 대한 평가, 현 위치 진단 그리고 미래상황에 대한 예측을 가능케 하는 가장 객관적이고 명확한 척도라 할 수 있다. 여러 국제기구들은 수자원 및 환경 분야에서 국가 간의 수자원 이용 특성이나 유역관리 상태를 분석하여 취약점을 파악하고 대안을 모색하기 위하여 평가지수를 사용하여 상태를 주기적으로 평가하고 있다(World Economic Forum, 2001; U.S. Environmental Protection Agency, 2002).

우리나라의 경우 지수를 통한 국가 간 수자원 취약성 연구는 전무하고 지수화 과정에서 대부분 표준화 후 사용하는 WSM (Weighted Summation method)을 도입하고 있다. 따라서 본 연구는 수자원 취약성을 평가할 수 있는 지수인 World Bank, VRI (Vulnerability Resilience Indicator), ESI (Environmental Sustainability Index) 의 인

자들을 활용하여 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 기법의 적용을 통한 전 세계 152개 국가 별 수자원 취약성 순위를 도출하고 대륙 별, 주요 국가 별로 비교를 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구 방법

본 연구는 Fig. 1과 같이 4단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 여러 지수를 통해 본 연구에서 활용할 수 있는 수자원 취약성 관련 대용변수(proxy variable)를 선정하고 2단계에서는 자료의 표준화를 실시한다. 이 때, 각 인자별 자료의 크기가 클수록 더 선호되는 인자와 크기가 작을수록 더 선호되는 인자에 따라 표준화를 달리하였다. 3단계에서는 TOPSIS 기법을 적용하여, 국가 별 수자원 취약성 지수를 산정하고 이를 토대로 순위를 결정하였고, 마지막 단계에서는 대륙별, 우리나라와 주요 국가 별 수자원 취약성 순위를 비교하였다.

2.2 국가 수자원 취약성 평가인자 선정 방법

수자원 취약성 평가가 가능한 지표들에 대해 Table 1과 같이 World Bank, 취약성-탄력성지수(VRI), 환경지속성지수(ESI) 중 사회, 경제, 환경적인 요인에 따라 지표들을 선정하였다.

World Bank는 1944년 창립한 국제부흥개발은행(International Bank for Reconstruction and Development, IBRD)의 약칭이다. 모든 분야 개발도상국에 1,800개 이상의 프로젝트에 참여하고 있는 World Bank는 국제금융기관으로 빈곤을 줄이고 개발을 지원하는 기관이다. 즉, 개발

도상국에 대한 경제적 기술적 지원을 하고 있다. 여러 분야의 연구를 통해 수많은 지표가 존재한다. 1960년부터 2008년 동안의 조사를 바탕으로 World Bank의 지수는 18개의 세부지수와 331개의 세부지표로 구성되어 있다.

민감도와 적응능력 함수로 평가하는 취약성-탄력성 지표는 Moss et al. (2001)이 1999년 자료를 바탕으로 취약성 평가를 위해 취약성-탄력성 지표 원형 모형(Vulnerability-resilience indicator prototype model, VRIP model) 방법론을 사용하여 현재의 지수를 개발하였다. 최근 Kim et al. (2010)은 Moss et al. (2001)의 자료 및 모형을 기반으로 하여 국가별 기후변화 취약성을 분석하였다.

환경지속성지수를 나타내는 ESI는 경제문제에 관해 논의하는 세계경제포럼(혹은 다보스 포럼, World Economic Forum, WEF)에서 1999년부터 2005년까지의 조사결과를 토대로 환경과 경제와의 관계에 따라 환경시스템, 환경부하, 환경취약성, 사회적 제도적 대응역량, 지구환경관리 기여도를 고려하여 산정하였다. 본 연구에서는 이러한 지수들 중 수자원 취약성 평가가 가능한 지표들을 검토하였다.

2.3 TOPSIS

Hwang and Yoon (1981)이 개발한 TOPSIS 방법은 양의 이상적 해(Positive Ideal Solution)에 가깝고, 부의 이상적인 해(Negative Ideal Solution)에 먼 대안을 선택하는 개념이다. 즉, 거리를 통해 이상적인 해를 찾는 방식이다. TOPSIS 기법은 현실에서 발생하는 의사결정 문제를 선택하는데 유용한 기법으로 적용과정은 다음과 같다. Step 1. 표준화를 실시한다. 표준화된 행렬 R 은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.



Fig. 1. Procedure for Water Resources Vulnerability Index

Table 1. Available Water Resources Vulnerability Indicators

| Source | Name of Indicators |
|------------|--|
| World Bank | Population |
| | Improved water source, rural (% of rural population with access) |
| | Improved water source, urban (% of urban population with access) |
| | Improved water source (% of population with access) |
| | Scientific and technical journal articles |
| | Organic water pollutant (BOD) emissions (kg per day) |
| | Food production index (1999-2001=100) |
| VRI | Population at risk due to sea level rise |
| | Access to safe sanitation |
| | Crop land |
| | Protein demand (nutrition index) |
| | Birth rate |
| | Life expectancy |
| | Land use measure |
| | Fertilizer use land |
| | GDP per capita |
| | Equity index |
| | Dependency ratio |
| | Literacy |
| | Unmanaged land (%) |
| | Air pollution/km ² |
| | Population density |
| | Total managed land (%) |
| | Population at risk due to 1 meter sea level rise |
| | Water availability |
| ESI | Industrial organic water pollutant (BOD) emissions per available freshwater (kg per day) |
| | Pesticide consumption per hectare of arable land |
| | Percentage of population with access to improved drinking water |
| | Hydropower and renewable energy production as a percentage of total energy consumption |
| | Freshwater availability per capita |

$$R = [r_{ij}] \begin{matrix} (i = 1, 2, 3, \dots, m) \\ (j = 1, 2, 3, \dots, m) \end{matrix} \quad (1)$$

여기서, r_{ij} 는 표준화된 행렬을 의미하며, i 는 각 국가, j 는 수자원 취약성 평가를 위한 지표 속성의 개수를 의미한다. 이 때 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)에 따른 표준화를 달리 실시한다.

Step 2. 표준화된 데이터에 가중치를 곱해준다. 가중화된

표준화 값(v_{ij})은 다음 Eq. (2)와 같다.

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \begin{matrix} (i = 1, 2, 3, \dots, m) \\ (j = 1, 2, 3, \dots, m) \end{matrix} \quad (2)$$

여기서, w_j 는 지표의 가중치로 Eq. (2)와 같이 표준화된 행렬에 가중치를 곱하여 정리한다.

Step 3. 가중화된 표준화 값(v_{ij})으로부터 양의 이상적인 해(A^*)와 부의 이상적인 해(A^-)는 Eq. (3), (4)와 같이 정의된다.

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (3)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (4)$$

여기서, $v_j^* = \max v_{ij}$, $v_j^- = \min v_{ij}$ 이다.

Step 4. 각 대안에 대한 양의 i 이상적인 해의 거리(S_i^*)와 부의 이상적인 해의 거리(S_i^-)는 Eqs. (5) and (6)과 같이 정의한다.

$$S_i^* = \sqrt{\sum (v_j^* - v_{ij})^2} \quad (5)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum (v_j^- - v_{ij})^2} \quad (6)$$

Step 5. 각 대안별 양의 이상적인 해와 부의 이상적인 해의 거리를 통해 상대적 근접도 계수(C_i^*)를 도출한다.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad (7)$$

Step 6. 상대적 근접도 계수를 통해 각 대안별 순위를 도출한다. 본 연구에서는 상대적 근접도 계수가 작은 대안이 취약한 국가이고 큰 대안이 상대적으로 덜 취약한 국가를 의미한다.

2.4 대상국가

본 연구에서는 Table 1에서 구성한 지표를 바탕으로 자료의 확보 여부에 따라 Table 2와 같이 152개국을 선정하였다. 대륙별 포함된 국가의 수는 유럽은 35개국, 아시아는 41개국, 오세아니아는 2개국, 아메리카는 27개국, 아프리카는 47개국을 대상으로 수자원 취약성 평가를 실시하였다.

Table 2. 152 Countries for Water Resources Vulnerability Index Ranking

| | | | | | |
|------------------------|--------------------|----------------------|----------------|--------------------------|--------------|
| Europe | Russian Federation | Jordan | Oceania | Suriname | Jamaica |
| Albania | Serbia | Kazakhstan | Australia | Trinidad and Tobago | Kenya |
| Austria | Slovak Republic | Korea, Rep. | New Zealand | United States | Lesotho |
| Belarus | Slovenia | Kuwait | America | Uruguay | Liberia |
| Belgium | Spain | Kyrgyz Republic | Argentina | Venezuela, RB | Libya |
| Bosnia and Herzegovina | Sweden | Lao PDR | Barbados | Africa | Madagascar |
| Bulgaria | Switzerland | Lebanon | Belize | Algeria | Malawi |
| Croatia | Turkey | Macedonia, FYR | Benin | Angola | Mali |
| Czech Republic | Ukraine | Malaysia | Bolivia | Botswana | Mauritania |
| Denmark | United Kingdom | Mongolia | Brazil | Burkina Faso | Mauritius |
| Estonia | Asia | Myanmar | Canada | Burundi | Morocco |
| Finland | Afghanistan | Nepal | Chile | Cameroon | Mozambique |
| France | Armenia | Oman | Colombia | Cape Verde | Namibia |
| Germany | Azerbaijan | Pakistan | Costa Rica | Central African Republic | Niger |
| Greece | Bangladesh | Philippines | Cuba | Chad | Nigeria |
| Hungary | Bhutan | Qatar | Ecuador | Congo, Rep. | Rwanda |
| Ireland | Cambodia | Saudi Arabia | El Salvador | Cote d'Ivoire | Senegal |
| Italy | China | Sri Lanka | Guatemala | Djibouti | Sierra Leone |
| Latvia | Cyprus | Syrian Arab Republic | Guyana | Egypt, Arab Rep. | Somalia |
| Malta | Georgia | Tajikistan | Haiti | Eritrea | South Africa |
| Moldova | India | Thailand | Honduras | Ethiopia | Sudan |
| Netherlands | Indonesia | Turkmenistan | Mexico | Gabon | Tanzania |
| Norway | Iran, Islamic Rep. | United Arab Emirates | Nicaragua | Gambia, The | Togo |
| Poland | Iraq | Uzbekistan | Panama | Ghana | Tunisia |
| Portugal | Israel | Vietnam | Paraguay | Guinea | Uganda |
| Romania | Japan | Yemen, Rep. | Peru | Guinea-Bissau | Zambia |

3. 연구결과

3.1 대용변수 선정

수자원 취약성 평가를 위해 Table 1에서 선정한 지수들 중에서 자료의 확보가 용이한 지표들을 사회, 경제, 환경적인 요소별로 Table 3과 같이 구분하였고 이 때 사용된 지표는 World Bank (<http://www.worldbank.org>)에서의 정의를 사용하였다. 사회적 기준의 지표들은 출생률과 기대수명, 인구, 인구밀도를 선정하였고, 경제적 기준의 지표들은 전체 에너지 사용량 중 수력발전 및 재이용 가능한 에너지 생산비율, 인구당 GDP 지표들로 선정하였다. 마지막으로 환경적인 기준의 지표들은 인구 당 물 이용 가능량, 하수도시설 설치비율, 해수면 1m 상승 시 위협에 빠지는 인구수, 식량생산지수, 수원 공급처 증가비율, 과학/공학 논문 수를 선택하였다.

3.2 가중치의 결정

의사결정에 도움을 주기 위해 개발된 델파이 기법은 해당 분야의 전문가의 반복적인 의견 교류를 통해 미래를 예측하는 방법이다. Dalkey et al. (1970)은 전문가의 수가 많아야 신뢰도가 높아진다는 주장을 하였지만 Song and Yoon (1992)은 참여하는 전문가의 수가 작은 그룹이 효과적이라고 주장하였다. 따라서 수자원 취약성 평가를 위한 사회, 경제, 환경적 가중치 및 각각의 지수를 구성하는 지표의 가중치는 9명의 전문가 의견을 2번의 설문을 통해 결정하였다. 1차 설문조사를 통하여 전문가들의 주관적인 가중치를 선정하여 이 결과를 토대로 2차 설문조사를 통해 재산정하였다. 2차 설문조사의 분포는 Fig. 2와 같다. 수자원 취약성에 크게 영향을 미치는 지수로는 환경적인 요인으로 뽑았고 경제적인 요인이 사회적 요인보다는 영향력이 크다는 의견을 알 수 있었다. 이러한 의견을 통해

Table 3. Descriptions of all Indicators

| Criteria | Name of indicator | | Description of indicator |
|---------------|-------------------|--|---|
| Social | C1 | Birth rate | The number of live births occurring during the year, per 1,000 population estimated at midyear |
| | C2 | Life expectancy | The number of years a newborn infant would live if prevailing patterns of mortality at the time of its birth were to stay the same throughout its life |
| | C3 | Population | Total population |
| | C4 | Population density | A measurement of population per unit area or unit volume |
| Economic | C5 | Hydropower and renewable energy production as a percentage of total energy consumption | Clean energy is noncarbohydrate energy that does not produce carbon dioxide when generated. It includes hydropower and nuclear, geothermal, and solar power, among others |
| | C6 | GDP per capita | Gross domestic product divided by midyear population. |
| Environmental | C7 | Freshwater availability per capita | Internal renewable resources in the country (internal river flows and groundwater from rainfall) |
| | C8 | Access to safe sanitation | The percentage of the population using improved sanitation facilities |
| | C9 | Population at risk due to 1 m sea level rise | The percentage of the total population living in areas where the elevation is 1 meters or less |
| | C10 | Food production index (1999-2001=100) | Coverring food crops that are considered edible and that contain nutrients. Coffee and tea are excluded because, although edible, they have no nutritive value |
| | C11 | Improved water source (% of population with access) | The percentage of the population using an improved drinking water source |
| | C12 | Scientific and technical journal articles | The number of scientific and engineering articles published in the following fields: physics, biology, chemistry, mathematics, clinical medicine, biomedical research, engineering and technology, and earth and space sciences |

각각의 지수 및 지표별 전문가들이 부여한 가중치의 평균은 Table 4와 같다.

3.3 자료의 표준화

152개 국가의 대응변수 별 지표의 Q-Q plot을 통해 자료의 정규성을 판단하였다. 정규성에 벗어나는 지표는 로그형태로 변환하였다. 예를 들어 C12의 정규성을 Q-Q plot을 통해 확인해 본 결과, Fig. 3(a)와 같이 자료의 분포 형태가 직선에서 벗어났고, Fig. 3(b)와 같이 로그형태로 변환하였을 때 자료의 분포가 직선에 크게 벗어나지 않음을 확인할 수 있었다. 여기서 x축은 관측값이며 y축은 정

규 기댓값이다. 모든 대응변수 별 지표는 Q-Q plot을 통해 정규성을 판단하였다. 판단 결과, 출생률, 인구, 인구밀도, 총 에너지 소비량 중 수력발전 또는 재이용 에너지 생산 비율, 인구당 물 이용, 해수면 1m 상승으로 인해 위험에 빠지는 인구수, GDP, 과학, 공학 논문 수는 자료의 분포가 고르지 않아 로그형태로 변화하여 표준화를 실시하였다.

각 지표들은 다른 단위를 보이므로 Re-scaling 방법을 통해 정리를 하였다. Yoon and Hwang (1995)이 제시한 각 인자별 자료의 크기가 클수록 더 선호되는 인자와 크기가 작을수록 더 선호되는 인자에 따라 서로 다른 표준

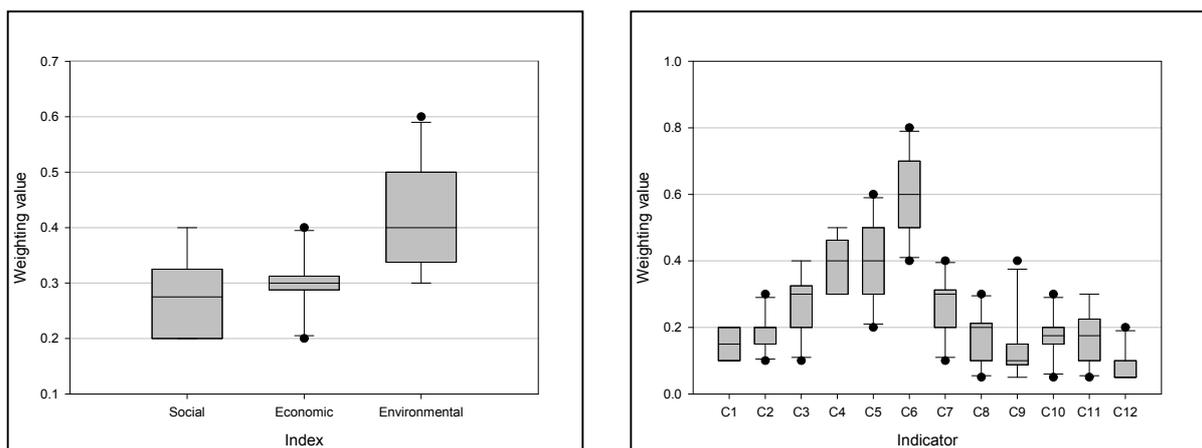
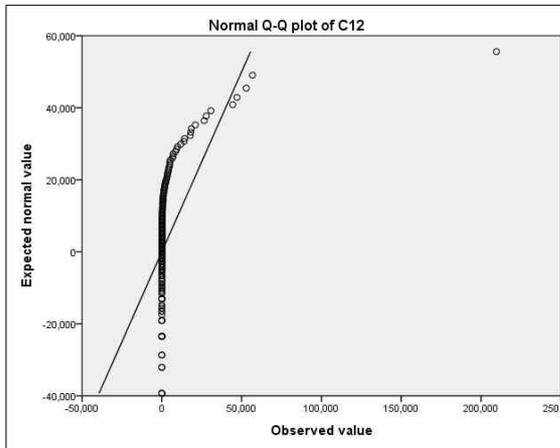


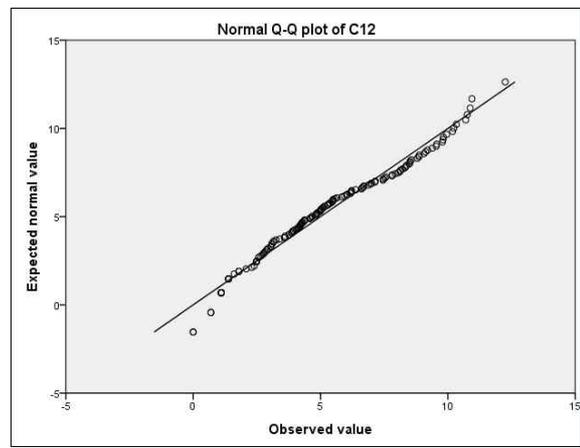
Fig. 2. Weighting Values Distrivution from Survey

Table 4. Weighting Values of Indeies and Indicators

| Criteria | 1 st Weighting value | 2 rd Weighting value | Name of indicator | | 1 st Weighting value | 2 rd Weighting value |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Social | 0.27 | 0.28 | C1 | Birth rate | 0.17 | 0.15 |
| | | | C2 | Life expectancy | 0.20 | 0.19 |
| | | | C3 | Population | 0.20 | 0.28 |
| | | | C4 | Population density | 0.43 | 0.40 |
| Economic | 0.27 | 0.30 | C5 | Hydropower and renewable energy production as a percentage of total energy consumption | 0.38 | 0.39 |
| | | | C6 | GDP per capita | 0.62 | 0.61 |
| Environmental | 0.46 | 0.43 | C7 | Freshwater availability per capita | 0.30 | 0.27 |
| | | | C8 | Access to safe sanitation | 0.21 | 0.18 |
| | | | C9 | Population at risk due to 1 m sea level rise | 0.11 | 0.13 |
| | | | C10 | Food production index (1999-2001=100) | 0.14 | 0.18 |
| | | | C11 | Improved water source (% of population with access) | 0.16 | 0.17 |
| | | | C12 | Scientific and technical journal articles | 0.08 | 0.08 |



(a) Scientific and technical journal articles



(b) log (Scientific and technical journal articles)

Fig. 3. Quantile Plots for Indicators

화 방법을 사용하였다. 즉, 본 연구에서는 자료의 크기가 클수록 선호되는 인자들로 인구 당 물 이용 가능량, 인구 당 국내 총생산, 전체 확보 수원 증가율, 과학, 공학 논문 수, 물 위생 접근가능률이다. 그 외의 지표들은 자료의 크기가 작을수록 더 선호되는 인자이다. 자료 크기별 인자의 표준화 과정은 Eqs. (8) and (9)와 같다.

자료의 크기가 클수록 선호되는 지표의 표준화 과정은 Eq. (8)과 같다. 이는 자료의 크기가 클수록 수자원 취약성에 긍정적인 영향을 미친다는 의미이다.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (8)$$

반대로 자료의 크기가 작을수록 더 선호되는 표준화 과정은 Eq. (9)와 같다. 이는 자료의 크기가 클수록 수자원 취약성에 부정적인 영향을 미친다는 의미이다.

$$r_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (9)$$

3.4 TOPSIS기법을 적용한 수자원 취약성 순위

수자원 취약성 평가를 위해 152개 대상국에 대해 TOPSIS 기법을 활용하여 각 지표별 PIS와 NIS의 거리를 산정한 후 상대 근접도 계수를 도출하였다. 상대 근접도 계수가 작은 국가일수록, 수자원이 취약한 국가이다.

연구결과 152개국 수자원 취약성순위는 Table 5와 같다. 가장 취약한 국가는 에티오피아였으며, 반대로 가장 취약하지 않은 국가는 오스트레일리아로 나타났다. 에티오피아는 환경적, 경제적 요소에서 152위, 151위로 취약함

을 보였다. 그 중 환경적 요소의 세부 지표인 하수도시설 설치비율이 152위로, 경제적 요소 세부 지표인 인구당 GDP가 152위로 취약함을 보였다. 오스트레일리아는 환경적 요소에서 1위를 나타냈다. 그 세부 지표 중 하수도 설치비율과 수원 공급처 증가비율이 1위를 차지하여 깨끗한 물 이용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 우리나라의 경우 88위를 차지하였고, 일본과 미국의 경우 107위, 130위로 우리나라에 비해서 수자원 취약성 수준이 높은 것으로 나타났다. 하지만 중국의 경우 17위로 수자원 취약성이 취약하다는 결과를 볼 수 있다.

3.5 국가 별 수자원 취약성 비교

3.5.1 대륙 별 비교

152개국을 대륙 별로 구분하면 오세아니아 2개국, 유럽 35개국, 아메리카 27개국, 아시아 41개국, 아프리카 47개국으로 나타났다. 대륙별 평균을 제시하면 Table 6과 Fig. 4와 같다. 오세아니아, 유럽, 아메리카, 아시아, 아프리카 순으로 수자원이 취약하지 않음을 알 수 있다. 오세아니아와 유럽의 사회, 경제, 환경적 요인들이 다른 대륙에 비해 안정적인 것으로 나타났다. 반면, 아시아의 경우 사회적 요인이 대륙 중에서 가장 불안정했고, 아프리카의 경우 경제, 환경적 요인이 대륙 중에서 가장 불안정함에 따라 수자원 취약성이 취약하다는 것을 알 수 있다. 아메리카의 경우 환경적인 요인의 수준은 안정적이었지만 경제적인 요인의 수준은 아프리카 다음으로 불안정함을 알 수 있다.

Table 5. World Water Resources Vulnerability Ranking

| Name of Country | Ranking | Name of Country | Ranking | Name of Country | Ranking | Name of Country | Ranking |
|--------------------|---------|----------------------|---------|--------------------------|-----------|--------------------------|---------|
| Ethiopia | 1 | Togo | 39 | Barbados | 77 | United Kingdom | 115 |
| Haiti | 2 | Sri Lanka | 40 | Lebanon | 78 | Kazakhstan | 116 |
| Nigeria | 3 | Egypt, Arab Rep. | 41 | Central African Republic | 79 | Cyprus | 117 |
| Pakistan | 4 | Chad | 42 | Cuba | 80 | Portugal | 118 |
| India | 5 | El Salvador | 43 | South Africa | 81 | Oman | 119 |
| Bangladesh | 6 | Gambia, The | 44 | Mexico | 82 | Argentina | 120 |
| Cambodia | 7 | Tajikistan | 45 | Jamaica | 83 | Spain | 121 |
| Ghana | 8 | Syrian Arab Republic | 46 | Iraq | 84 | France | 122 |
| Sierra Leone | 9 | Liberia | 47 | Moldova | 85 | Qatar | 123 |
| Vietnam | 10 | Cote d'Ivoire | 48 | Thailand | 86 | Denmark | 124 |
| Mozambique | 11 | Malawi | 49 | Bhutan | 87 | Mongolia | 125 |
| Kenya | 12 | Djibouti | 50 | Korea, Rep. | 88 | United Arab Emirates | 126 |
| Tanzania | 13 | Mauritania | 51 | Suriname | 89 | Czech Republic | 127 |
| Madagascar | 14 | Honduras | 52 | Costa Rica | 90 | Greece | 128 |
| Afghanistan | 15 | Lao PDR | 53 | Zimbabwe | 91 | Gabon | 129 |
| Guinea | 16 | Myanmar | 54 | Malaysia | 92 | United States of America | 130 |
| China | 17 | Saudi Arabia | 55 | Panama | 93 | Latvia | 131 |
| Burkina Faso | 18 | Uzbekistan | 56 | Malta | 94 | Belarus | 132 |
| Somalia | 19 | Azerbaijan | 57 | Ukraine | 95 | Bulgaria | 133 |
| Rwanda | 20 | Guatemala | 58 | Colombia | 96 | Switzerland | 134 |
| Eritrea | 21 | Cameroon | 59 | Brazil | 97 | Russian Federation | 135 |
| Burundi | 22 | Lesotho | 60 | Congo, Rep. | 98 | Slovak Republic | 136 |
| Senegal | 23 | Armenia | 61 | Israel | 99 | Uruguay | 137 |
| Benin | 24 | Zambia | 62 | Namibia | 100 | Guyana | 138 |
| Niger | 25 | Venezuela, RB | 63 | Kuwait | 101 | Croatia | 139 |
| Philippines | 26 | Nicaragua | 64 | Bolivia | 102 | Serbia | 140 |
| Morocco | 27 | Belize | 65 | Poland | 103 | Botswana | 141 |
| Yemen, Rep. | 28 | Libya | 66 | Macedonia, FYR | 104 | Austria | 142 |
| Sudan | 29 | Tunisia | 67 | Italy | 105 | Ireland | 143 |
| Cape Verde | 30 | Jordan | 68 | Trinidad and Tobago | 106 | Slovenia | 144 |
| Iran, Islamic Rep. | 31 | Albania | 69 | Japan | 107 | Hungary | 145 |
| Guinea-Bissau | 32 | Turkmenistan | 70 | Georgia | 108 | Sweden | 146 |
| Angola | 33 | Kyrgyz Republic | 71 | Paraguay | 109 | New Zealand | 147 |
| Nepal | 34 | Mauritius | 72 | Bosnia and Herzegovina | 110 | Finland | 148 |
| Uganda | 35 | Peru | 73 | Germany | 111 | Estonia | 149 |
| Romania | 36 | Ecuador | 74 | Belgium | 112 | Norway | 150 |
| Mali | 37 | Turkey | 75 | Chile | 113 | Canada | 151 |
| Indonesia | 38 | Algeria | 76 | Netherlands | 114 | Australia | 152 |

3.5.2 주요 국가 비교

우리나라의 관련 깊은 국가인 일본, 중국, 미국과의 비교를 위해 사회, 경제, 환경적인 요소에 따라 해당 국가의 순위를 나타내면 Tables 7 and 8과 같다. 우리나라의 경우 사회적 요소는 152개국 중에서 불안정적이라 할 수 있지만 주요 국가 비교 시 안정적이다. 그 중 인구는 주요 국가 중에서 가장 안정적이었지만 인구 밀도에서는 가장 불안정한 것으로 나타났다. 경제적 요소는 152개국, 주요 국가 사이에서도 안정적이라 할 수 있다. 그 중 총 에너지 소비량 중 수력발전 또는 제이용 에너지 생산 비율은 주요 국가 중에서 가장 안정적이다. 환경적인 요소는 사회적 요소와는 반대로 152개국 중에서 안정적이라 할 수 있지만 주요 국가 비교 시 불안정하다는 것을 알 수 있다. 그 중 인구 당 물 이용량은 주요 국가 중 가장 낮은 순위를 보였다. 이를 비추어 우리나라의 경우 평가 기준 국가에 따라 중요도가 다를 수 있다. 전체 국가 비교 시

수자원 취약성 평가 기준 중 사회적 요소가 취약한 반면, 주요 국가 비교 시 환경적 요소가 취약하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 우리나라의 경우 수자원 취약성 극복을 위해서는 사회, 환경적인 측면에 큰 관심을 가지고 노력해야 한다고 판단된다.

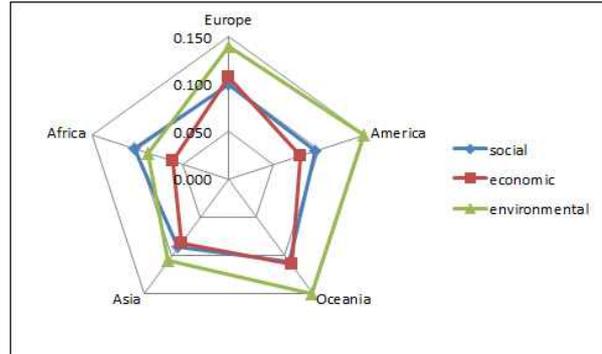


Fig. 4. Comparison of Water Resources Vulnerability Index by Continent

Table 6. Water Resources Vulnerability Index by Continent

| Name of continent | Social | Economic | Environmental | Water resources vulnerability index |
|-------------------|--------|----------|---------------|-------------------------------------|
| Europe | 0.099 | 0.107 | 0.139 | 0.574 |
| America | 0.096 | 0.080 | 0.149 | 0.480 |
| Oceania | 0.108 | 0.112 | 0.149 | 0.615 |
| Asia | 0.089 | 0.083 | 0.107 | 0.466 |
| Africa | 0.103 | 0.061 | 0.088 | 0.420 |

Table 7. Ranking Comparison of Korea Rep, Japan, China and United states of America by Criteria

| Criteria | Name of indicator | Korea. Rep | Japan | China | United states of America |
|---------------|--|------------|-------|-------|--------------------------|
| Social | Birth rate | 22 | 16 | 45 | 52 |
| | Life expectancy | 122 | 152 | 82 | 130 |
| | Population | 128 | 143 | 152 | 150 |
| | Population density | 148 | 146 | 126 | 45 |
| Economic | Hydropower and renewable energy production as a percentage of total energy consumption | 12 | 69 | 79 | 64 |
| | GDP per capita | 25 | 1 | 91 | 6 |
| Environmental | Freshwater availability per capita | 133 | 105 | 119 | 64 |
| | Access to safe sanitation | 45 | 1 | 115 | 1 |
| | Population at risk due to 1 m sea level rise | 104 | 69 | 138 | 79 |
| | Food production index (1999-2001=100) | 33 | 15 | 108 | 61 |
| | Improved water source (% of population with access) | 48 | 1 | 85 | 36 |
| | Scientific and technical journal articles | 10 | 3 | 2 | 1 |

Table 8. Water Resources Vulnerability Indies of Korea Rep, Japan, China and United states of America

| Criteria | Index | | | | Ranking | | | |
|---------------|------------|-------|-------|--------------------------|------------|-------|-------|--------------------------|
| | Korea. Rep | Japan | China | United states of America | Korea. Rep | Japan | China | United states of America |
| Social | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.08 | 3 | 4 | 7 | 130 |
| Economic | 0.23 | 0.24 | 0.10 | 0.24 | 141 | 146 | 61 | 147 |
| Environmental | 0.25 | 0.31 | 0.15 | 0.33 | 91 | 126 | 41 | 133 |
| WRVI | 0.53 | 0.58 | 0.29 | 0.64 | 88 | 107 | 17 | 130 |

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 개발된 수자원 관련 지수와 World Bank의 지표를 사용하여 다기준의사결정 기법 중 하나인 TOPSIS 기법의 적용을 통해 국가 별 수자원 취약성 순위를 산정하였다. 산정과정은 총 4단계로 1단계에서는 World Bank, 취약성-탄력성지수, 환경지속성지수에서 사용된 물 관련 지표를 활용하여 사회, 경제, 환경적 요소 별로 수자원 취약성 평가를 위한 지표 값을 선정하였고, 2단계에서는 선정된 자료의 표준화를 실시하였다. 3단계에서는 TOPSIS 기법을 적용하여, 국가 별 수자원 취약성 순위를 산정하였고, 마지막 단계에서는 우리나라와 국가 별 수자원 취약성 순위를 비교하였다.

수자원 취약성 결과에 따르면, 수자원이 가장 취약한 국가는 에티오피아이고, 반대로 가장 취약하지 않은 국가는 오스트레일리아로 나왔다. 우리나라의 경우 152개국 중 88위를 차지하였고, 일본과 미국의 경우 107위, 130위로 우리나라에 비해서 수자원 취약성 수준이 심각하지 않은 것으로 나왔다. 하지만 중국의 경우 17위로 수자원이 취약하다는 결과를 볼 수 있다. 대륙 별 평균을 제시하여 비교 시 오세아니아, 유럽, 아메리카, 아시아, 아프리카 순으로 수자원이 덜 취약하다고 산정되었다. 사회, 경제, 환경적인 요소로 비교 시 오세아니아가 가장 높은 수치를 보였다. 하지만 사회적인 요소 경우 아시아가 가장 낮은 수치를 보였고, 경제, 환경적인 요소는 아프리카가 가장 낮은 순위를 나타냈다. 전체 국가 비교 시 수자원 취약성 평가 기준 중 사회적 요소가 취약한 반면, 우리나라와 연관된 주요 국가인 일본, 중국, 미국과 사회, 경제, 환경적인 요소로 분류하여 비교한 결과 우리나라의 경우 환경적인 요소가 불안정한 것으로 나타난다. 이를 비추어 우리나라의 경우 수자원 취약성 극복을 위해서는 사회적, 환경적인 측면에 큰 관심을 가지고 노력해야 한다.

수자원 취약성의 객관적 비교를 위해 여러 측면에서의

검토가 필요하지만 지표의 객관적 자료 부족으로 인해 수질, 재해관련 등 여러 측면을 비교하는 데는 한계를 보였다. 하지만 급변하는 기후변화로 인한 수자원에 대한 관심은 국제적으로 고조되고 있다. 또한 수자원에 관한 여러 조건들을 판단하고 진단하는 일은 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 추세는 경제적, 사회적 여러 조건들을 고려한 수자원을 평가하는 지표 및 지수를 개발하는데 많은 연구가 진행 중이라는 뜻일 것이다. 이러한 의미에서 본 연구 결과는 현 우리나라의 국제적 수자원 취약성 수준 파악을 통해 향후 수자원 관련 계획을 수립하고 대책을 마련하는데 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2013년 IHP 사업의 일환으로 수행되었으며, 본 연구에 대한 국토해양부와 한국수자원학회의 지원에 감사드립니다. 또한 본 연구는 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 과제번호(NRF2011K1A2000)).

References

Calow, R.C., MacDonald, A.M., Nicol, A.L., Robins, N.S., and Kebede, S. (2002). *The struggle for water: drought, water security and rural livelihoods*. Groundwater Systems and Water Quality Programme Commissioned Report CR/02/226N. British Geological Survey Technical Report. Wallingford, UK: BGS.

Dalkey, N., Brown, B., and Cochran, S. (1970). "Use of self-rating to improve group estimates: experimental evaluation of Delphi procedures." *Technological Forecasting* Vol. 1, pp. 283-291.

Hwang, C.L., and Yoon, K.S. (1981). *Multiple attributes*

- decision making methods and applications*. Springer, Heidelberg
- Kang, M.G., and Lee, G.M. (2006). "Development of assessment index for water resources sustainability and weights evaluation of it's components." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 39, No. 1, pp. 59-68.
- Kim, Y., Jeon, S., Chae, Y., and Choi, H. (2010). *Reviewing the national-level indices to climate change impact, adaptation and vulnerability with focusing on South Korea's current state*. Korea Environment Institute. Korea Research Institute of Human Settlements. (2003). *Indicator of sustainable national territorial development*.
- Ministry of Construction & Transportation and Korea Water Resources Association. (2003). *The national survey on water issues*.
- Moss, R.H., Brenkert, A.L., and Malone, E.L. (2001). *Vulnerability to climate change: A quantitative approach*. Pacific Northwest National Laboratory Operated by Batelle for the United States Department of Energy.
- Ohlsson, L. (1999). *Environment, Scarcity and Conflict : A study of malthusian concerns*. Ph.D. dissertation, Dept. of Peace and Development Research, University Goteborg.
- Song, S.J., and Yoon, D.G. (1992). "A study on the pro-
spection of long term care facilities by Delphi technique." *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 8, No. 7, pp. 85-93.
- Sullivan, C.A. (2001). "The potential for caculating a maeaningful water poverty index." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 471-480.
- U. S. Environmental Protection Agency (2002). *Index of watershed indicators: An overview*.
- Vörösmarty, C.J., Douglas, E.M., Green, P.A., and Revenga, C. (2005). "Geospatial indicators of emerging water stress: an application to Africa." *Ambio*, Vol. 34, pp. 230-236.
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P.A., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Reidy Liermann, C., and Davies. P.M. (2010). "Global threats to human water security and river biodiversity." *Nature*, Vol. 467, pp. 555-561.
- World Bank: <http://www.worldbank.org/indicator>
- World Economic Forum (2002). *Environmental sustainability index*
- Yoon, K.P., and Hwang, C.A. (1995). *Multiple attribute decision making: An introduction*. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, Sage, Thousand Oaks, CA.

| | |
|-----------------------------|------------------|
| 논문번호: 13-084 | 접수: 2013.10.10 |
| 수정일자: 2013.12.10/2014.01.09 | 심사완료: 2014.01.09 |