

통합수자원평가지수의 개발

Development of Integrated Water Resources Evaluation Index

이 동 루*/ 최 시 중**/ 문 장 원***

Lee, Dong-ryul / Choi, Si Jung / Moon, Jang Won

Abstract

The purpose of this research is to develop an Integrated Water Resources Evaluation Index (IWREI) which can be used to assess the performance of water resources projects in a regional perspective focusing on three major sectors including water use, flood, and river environment in water resources policies. The IWREI is estimated by integrating the Water Use Vulnerability Index (WUVI), the Flood Vulnerability Index (FVI), and the River Environment Vulnerability Index (REVI) which represent the vulnerability in each sector. These indices consist of total 26 indicators selected from the pressure indicators representing the causes of damages in water use, flood, and river environment, the state indicators and the response indicators. The estimated index describes the vulnerability and effectiveness of policies with five levels: Low, Medium Low, Medium, Medium High, and High. The results of evaluating total 115 hydrological units in Korea using the WUVI, FVI, REVI, and IWREI indicate that the project effectiveness in water resources policies is clearly verified by the improved index results compared to the past (early 1990s). Regional vulnerability and evaluation indices developed in this research could be used to establish goals of water resources policy and to select priority regions for project implementation.

Keywords : Integrated Water Evaluation Index, Water Resources Plan, Water Use Vulnerability Index, Flood Vulnerability Index, River Environment Vulnerability Index

요 지

본 연구의 목적은 물이용, 홍수 및 하천환경의 3개 수자원 정책 부문에서 수행한 사업성과를 지역별로 평가할 수 있는 통합수자원평가지수(Integrated Water Resources Evaluation Index, IWREI)를 개발하는 것이다. IWREI는 각 부문별 취약성을 나타내는 물이용취약지수(Water Use Vulnerability Index, WUVI), 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI), 하천환경취약지수(River Environment Vulnerability Index, REVI)를 통합하여 산정된다. 이들 지수들은 물이용, 홍수, 하천환경의 피해를 주는 압력지표(pressure indicators)와 이에 의한 피해 현상지표(state indicators) 및 피해의 대책지표(response indicators)에서 선정한 총 26개 지표로 구성된다. 산정된 지수는 Low, Medium Low, Medium, Medium High, 및 High의 5단계로 취약성 및 정책수행의 효과를 나타냈다. 우리나라 115개의 중권역에 대해 WUVI, FVI, REVI 및 IWREI

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원 (e-mail: dryi@kict.re.kr)

Corresponding Author, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology, Water Resources Research Division, 2311 Daehwa-dong, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: sjchoi@kict.re.kr)

Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Water Resources Research Division, 2311 Daehwa-dong, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: jwmoon@kict.re.kr)

Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Water Resources Research Division, 2311 Daehwa-dong, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do, Korea

을 분석한 결과, 1990년대 초반에 비해 2000년대 초반의 지수가 개선되어 수자원 정책의 사업효과를 확인할 수 있다. 본 연구에서 개발된 지역간 수자원의 취약지수와 평가지수는 수자원 정책목표의 설정과 사업이행의 우선지역을 선정하는데 이용할 수 있다.

핵심용어 : 통합수자원평가지수, 수자원계획, 물이용취약지수, 홍수취약지수, 하천환경취약지수

1. 서 론

우리나라는 물이용, 홍수 및 하천환경 관리 등을 위한 수자원계획을 수립하고 이를 이행하기 위한 많은 사업을 추진하고 있다. 이러한 계획 및 정책이행 과정에서 의사결정자들은 물 관련 사업의 성과를 정량적으로 평가하여 취약한 부분을 확인하고 새로운 사업의 2001우선순위를 평가할 수 있는 지표(indicator)와 지수(index)를 필요로 한다. 지표란 여러 부분의 관측값 중에서 현상을 가장 잘 기술해줄 수 있는 대표적인 값을 의미하며 대개는 비율 형태의 변수를 사용하며 시간과 공간적 비교가 가능한 실업률, 경제성장률 등이 대표적인 예이다(Matthew and Victoria, 2001). 또한 수자원과 관련해서는 상수도보급율, 하천개수율, 하수도보급율 등이 일반적이다. 지수(index)는 서로 다른 측정단위를 사용하거나 과학적인 연관성이 없는 둘 이상의 지표를 집계하여 하나의 지수로 정의하는 방법이다(Kim et al., 2007). 지수는 관련 지표 또는 자료가 제대로 표현하지 못하거나 모호하게 표현되는 속성을 보다 명확히 표현할 수 있어 사업성과를 얼마나 달성했는지 종합적으로 평가하는데 주로 사용된다. 물빈곤지수(Water Poverty Index, WPI), 인간개발지수(Human Development Index, HDI), 홍수피해잠재능(Potential Flood Disaster, PFD) 등이 대표적인 예이다(Lim et al., 2010).

기준에 이용하였던 사업성과의 지표로서 물이용의 경우는 수자원 확보량, 광역상수도 보급률, 홍수는 하천개수율, 상습침수구역, 하천환경은 자연형 하천개수구간 등 각 부분의 사업관련 지표 즉 대책지표를 주로 이용하였다. 그러나 대책지표 만의 평가는 물 관련 피해의 원인과 심도지표들과 연계성이 부족하여 성과평가에 한계가 있다. 예로 어느 지역의 제방축조, 통수능 확대, 홍수저류공간 확대 등 치수 대책지표는 우수하나 계획을 초과하는 홍수가 빈발하면 많은 대책에도 불구하고 피해는 커질 수밖에 없다. 현재 실무에서 이용하고 있는 성과지표는 피해의 원인과 심도 등의 지표와 연계되어 있지 않다. 또한 이수, 치수 및 하천환경에 대한 각 부문별 성과의 평가는 이루

어지고 있지만 이를 사업의 전체효과를 나타내는 통합지수가 부재한 실정이다.

국내에서 각 부문별로 피해의 원인, 심도 및 대책의 인과관계를 이용한 정책지표의 개발사례는 MLTM(2007, 2008, 2009, 2010)의 연구들이 있다. 이들 연구에서는 각 부문별 피해의 원인과 현황 및 저감노력 간의 인과관계를 PSR(Pressure-State-Response)체계에 맞추어 이수, 치수 및 하천환경의 정책지수로 각 부문별 취약지수를 개발하였다. Lim et al. (2010)은 홍수피해의 원인과 현황 및 저감대책 간의 인과관계를 위하여 지역의 치수현황을 평가할 수 있는 정책지수로서 홍수위험지수를 개발하였고 이 지수의 개발과정을 상세히 제시하고 있다.

본 연구의 목적은 물이용, 홍수 및 하천환경 정책의 3개 부문별 성과를 통합평가하기 위한 통합수자원평가지수(Integrated Water Resource Evaluation Index, IWREI)의 개발이다. 이를 위한 각 부문별 정책 관리지표를 선정하였고 이들 지표를 이용하여 각 부문별 통합지수를 산정하였으며, 이들 3개 지수를 다시 통합하여 최종적으로 통합수자원평가지수를 개발하였다. 통합지수는 각 중권유역별 수자원 관련 사업의 성과를 종합적으로 제시하여 시·공간적 사업의 성과를 상대적으로 비교할 수 있으며 수자원계획의 이행목표의 성과달성을 위한 정책지수로 활용할 수 있다.

2. 기존 수자원 관련 통합지수 현황

2.1 국외의 통합지수

국외에서 제시되고 있는 대표적인 수자원 관련 통합지수인 WPI, 환경지속성지수(Environmental Sustainability Index, ESI), 환경성과지수(Environmental Performance Index, EPI), 사회적 물부족지수(Social Water Stress/Scarcity Index, SWSI) 등이 있다.

WPI는 영국 생태환경 및 수문센터(Centre for Ecology & Hydrology, CEH)에서 개발한 지수로서 물과 빈곤의 연관성을 나타낼 수 있는 통합지수이다. 이 지수는 수자

원의 양(resource), 수자원 공급률(access), 수자원 관리능력(capacity), 수자원 이용의 효율성(use), 생태에 대한 물의 할당(environment) 등 다섯 개의 주요 구성요소로 구성되어 있고 각 구성요소를 전체 국가에 대한 상대적 순위를 나타냄으로써 지수를 구한다(Sullivan, 2001, 2002).

ESI는 현재의 사회, 경제, 환경 조건을 바탕으로 지속 가능한 성장을 할 수 있는 국가역량을 계량화·비교하는 국제평가지수로 세계경제포럼(WEF)의 후원으로 미국 예일대와 컬럼비아대학이 연구·개발하여 2001년과 2002년 발표하였으며 2005년은 다보스 포럼에서 발표하였다. ESI는 환경의 질, 환경오염 부하량, 환경위해 취약성, 사회·제도적 대응역량, 국제적 책임공유 부문에서 선정한 76개 지표로 구성된다. ESI는 지표별 현재치를 산출하고 이를 국가별로 순서화하여 상대적으로 비교·평가하였다. EPI는 기존 ESI가 지나치게 광범위하며 평가결과를 정책지침에 활용하기에는 미흡한 면이 있음에 착안하여 정책수립과 집행에 구체적인 도움을 줄 수 있도록 각국의 환경개선 정도를 계량화한 지수로 국가별 환경개선노력을 평가하는 지수이다(<http://epi.yale.edu>).

Ohlsson (1999)은 수자원에 대한 사회적 관리능력의 정도를 나타낼 수 있는 지수인 사회적 물부족 지수를 개발하였다. 이 지수는 물 스트레스 지수(Water Stress Index, WSI)를 HDI로 나눈 값이다. 물 스트레스 지수는 일 년간 재생가능한 물 백만m³를 사용할 수 있는 백명 단위의 인구수로 구한다. HDI는 수명, 교육수준, 생활수준을 토대로 UNDP에서 개발된 지표이다.

2.2 국내의 통합지수

국내에는 국제기구나 선진국과 같은 체계적인 지표의 개발은 미흡한 실정이다. 특히 수자원 분야에서는 개발된 지수는 많지 않으나 최근 들어 지수의 중요성 및 필요성이 대두되면서 이와 관련된 연구가 활발히 진행 중에 있다. 국내의 통합지수는 환경, 도시 등의 지속가능성 평가를 위하여 개발된 것이 대부분이다.

Han and Kwon (1995)은 전국을 대상으로 한 도시의 평가 지표로서 환경오염을 나타내는 도시의 오염, 자연을 나타내는 도시의 자연조건 및 경관, 도시를 나타내는 도시의 문화 등을 이용하여 도시평가지수를 제시하였다. Lee and Yoon (1998)은 지속가능한 도시개발을 위한 환경지표에 관한 연구에서 환경지표의 체계를 DPSR (Driver-Pressure-State-Response) 체계에 기초하여 원인지표는 인간의 도시 활동과 자원의 이용, 압력지표는 토지이용변화와 환경부하, 상태지표는 토지구조, 생물, 환경부하, 대응지표는

자원의 재이용, 환경질 향상, 시민활동 정책지원으로 구분하고 각각의 중간평가지표에 대해 개별지표들을 제시하였다. Yun (1999)은 인천광역시 각 자치단체의 환경에 대한 압력과 환경상태 그리고 이에 대한 대응정책을 평가하는데 적합한 환경지표를 PSR 체계에 근거하여 지표의 대표성, 신뢰성, 적절성, 효용성 등을 기준으로 환경질 개선 및 오염유발요인 억제 부문의 개별지표를 이용하였다. Choi and Lee (2005)는 국내 실정에 적합한 지속가능한 수자원 개발과 관리에 대한 지표를 개발하여 제시하였다. 지표를 산정하기 위해 필요한 자료의 조사 주기는 1년을 기준으로 하였으며, 지리적 경계는 행정구역을 기준으로 구분하였고 지표 구성을 위한 기본 체계는 수자원 관련 정보를 효과적으로 표현할 수 있도록 PSR 구조를 토대로 부분적인 DPSR 구조를 첨가하여 지표를 개발하였다. 또한 MLTM (2007, 2008, 2009, 2010)은 수자원과 관련된 다양한 정책 평가지수를 개발하였다.

3. 수자원 정책평가를 위한 통합수자원평가지수 (IWREI) 개발

3.1 IWREI개발의 기본방향

본 연구에서는 먼저 물이용, 홍수 및 하천환경의 각 부문의 정책평가를 위해 필요하고 WAMIS에서 획득 가능한 정책 관리지표들을 선정한다. 또한 우리나라 수자원계획의 기본단위인 115개 중권역을 대상으로 지표 자료를 가용기간인 1990~2004년의 자료를 수집한다. 두 번째는 각 부문별 관리지표를 이용하여 3개 부문의 취약지수를 115개 각 유역별 수집된 자료기간에 대해 매년 산정한다. 산정된 지수는 115개 각 유역별 15년간의 시계열로 나타나며, 이들 취약지수로 각 부문별 정책이행에 대한 연도별 평가를 수행할 수 있다. 최종적으로 3개 부문의 취약지수를 통합한 IWREI를 개발하여 하나의 지수로서 모든 부문에서 수행한 수자원 정책의 성과를 평가한다. 각 지수들은 등급으로 분류하여 정책성과를 정량화할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 각 지수들을 Low, Medium Low, Medium, Medium High 및 High의 5단계 구분을 적용하여 등급을 분류하였다. 이들 구분은 정책이행에 따른 성과가 낮은 단계에서 높은 단계의 상황을 나타낸다.

3.2 IWREI의 구성체계

IWREI는 국내 수자원 현황과 사업의 효과를 평가하기 위해 개발된 통합지수로서 물이용, 홍수, 하천환경의 취약 정도를 평가하는 각 부문별 취약지수로 구성된다. 지수의 구

성은 인과관계 접근방식(Cause-Effect Chain Framework)을 이용하였다. 인과관계 접근방식은 측정하고자 하는 현상, 이러한 결과를 나타나게 하는 요인, 이러한 현상을 완화 또는 강화하기 위한 노력 간의 상관성을 파악하여 지표를 도출하는 구조로 대표적인 구성체계로는 OECD에서 고안한 PSR (Pressure-State-Response) 구조가 있다. 본 연구에서는 인과관계 접근 방식의 대표적인 구성체계인 PSR 구성체계를 선정하였다. PSR 구조는 인간 사회의 기반활동과 자연적 요인이 수자원 관련 피해 및 위험성 증가에 압력(pressure)으로 작용하고 이로 인해 경제적·물리적 피해의 현상(state) 변화가 초래되면, 사회는 이러한 변화를 인식하여 대응(response)한다는 전제하에 수립되었다. PSR 구조는 현 수자원 관련 문제를 수자원 상태의 인과관계로 명확히 분석할 수 있어 효용성 측면에서 활용도가 매우 크며 사회, 경제 및 여타 쟁점사항 간의 상호 연관된 관점에서 파악이 가능하다(Lim et al., 2010).

IWREI는 PSR 구성체계에 맞추어 국내 물이용, 치수, 및 하천환경의 피해 원인 및 영향인자를 검토하여 전체 수자원 특성을 분야별(물이용, 치수, 하천환경) 압력, 현상, 대책지수 등 3개 분야로 분류하여 개발하였다. 또한 유역별로 수자원 현황을 나타내는 여러 가지 정보 항목 중 지표화가 필요한 항목을 결정하여 제시하였다. 각 지수를 구성하는 세부지표는 Fig. 1과 같다. 3개 부문별 취약지수는 각 정책

에 압력으로 작용하는 지표와 이들 압력에 의한 피해 현상 지표 및 피해를 저감하기 위한 대응 지표들로 산정된다. 따라서 취약지수를 산정하기 위해서는 PSR의 각 부문별 지표들을 이용하여 먼저 압력지수(Pressure Index, PI), 현상지수(State Index, SI) 및 대책지수(Response Index, RI)를 산정한 후 이들을 통합한다.

Table 1은 각 부문별 취약지수를 구성하는 PSR구분과 이들에 속한 관리지표들과 이들 지표로서 평가할 수 있는 정책평가내용을 제시하였다.

각 분야별 압력지수(PI)는 유역의 수자원 특성을 지해하는 물리적, 환경적 압력을 평가하기 위한 지표로서 총 10개의 관리지표를 선정하였다. 산정된 지수가 높을수록 해당 지역의 수자원 특성이 각종 재해 상황에 취약한 것으로 판단할 수 있다. 현상지수(SI)는 유역의 가뭄, 홍수, 수질 오염 등에 노출되어 있는 정도판단 및 수자원 관련 피해현황을 파악할 수 있는 지표로서 6개의 관리지표로 구성된다. 현상지수(SI)를 지역별로 비교함으로써 각 지역의 수자원 관련 피해 가능성에 대한 수준을 파악할 수 있다. 대책지수(RI)는 수질오염, 홍수피해, 물 부족 등과 같은 각종 수자원 관련 피해 발생 시 이에 대응할 수 있는 능력을 판단하기 위한 기준으로서 10개의 관리지표로 구성하였다. 산정된 지수를 지역별로 비교함으로써 지역별 대응능력의 분포를 파악하고 상대적으로 대응 능력이 미

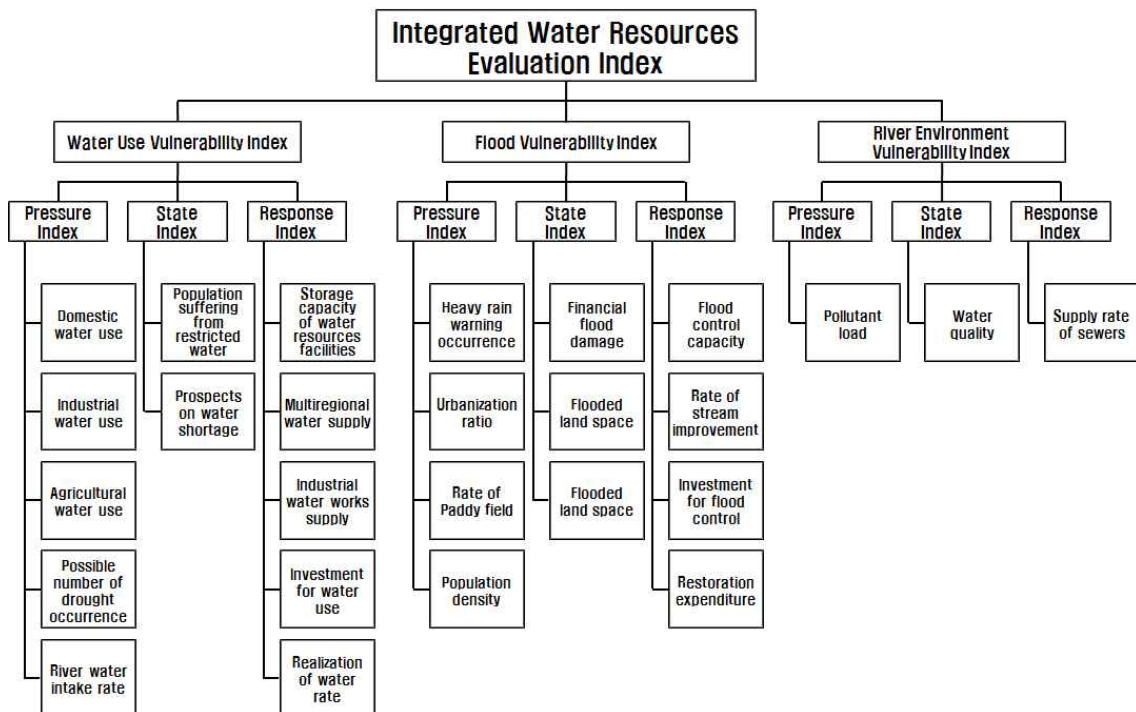


Fig. 1. Configuration of Integrated Water Resources Evaluation Index

Table 1. Configuration of Indicators according to Pressure–State–Response Frameworks for Integrated Water Resources Evaluation Index

Index	Frameworks	Policy evaluation	Indicator
Water Use Vulnerability Index	Pressure Index	Rational and appropriate use of a variety of water	Domestic water use ¹⁾
			Industrial water use ¹⁾
			Agricultural water use ¹⁾
			Possible number of drought occurrence ²⁾
			River water intake rate ¹⁾
	State Index	Equal use of water for the public	Population suffering from restricted water ¹⁾
			Prospects on water shortage ²⁾
	Response Index	Vulnerability to future water use	Storage capacity of water resources facilities ²⁾
			Multiregional water supply ³⁾
			Industrial water works supply ³⁾
Investment for water ³⁾			
Realization of water rate ³⁾			
Flood Vulnerability Index	Pressure Index	Exposure to flood risk	Heavy rain warning (> 80 mm/day) occurrence ⁴⁾
		Vulnerability to flood in physical and topographical characteristics of the watershed	Urbanization ratio ⁵⁾
			Rate of paddy field ¹⁾
	Vulnerability to flood in humanistic and social characteristics of the watershed	Population density ⁵⁾	
	State Index	Physical damage due to flood	Financial flood damage ⁶⁾
			Flooded land space ⁶⁾
			Population suffering from flood damage ⁶⁾
	Response Index	Comprehensive defense maintenance including flood control structure	Flood control capacity ²⁾
			Rate of stream improvement ²⁾
		Flood damage reduction efforts	Investment for flood control ²⁾
Restoration expenditure ²⁾			
River Environment Vulnerability Index	Pressure Index	Conservation of a rich ecosystem through providing clean water suitable for water quality standards	Pollutant load ¹⁾
	State Index	Management of appropriate water quality for stream ecosystem and water users	Water quality ¹⁾
	Response Index	Implementation of measures to improve water quality in river	Supply rate of sewers ⁷⁾

Sources : 1) WAMIS (Water Management Information System(<http://www.wamis.go.kr>))

2) National Water Resources Plan (2006–2020)

3) Statistics of Waterworks

4) KMA (Korea Meteorological Administration (<http://www.kma.go.kr>))

5) KOSIS (Korean Statistical Information Service (<http://kosis.kr>))

6) NDIC (National Disaster Information Center (<http://www.safekorea.go.kr>))

7) Statistics of Sewerage

흡한 지역을 알 수 있어 해당 지역에 대한 대책 마련 시 기초 정보로 활용이 가능하다.

물이용취약지수(Water Use Vulnerability Index, WUVI), 홍수취약지수(Flood Vulnerability Index, FVI) 및 하천환경취약지수(River Environment Vulnerability Index, REVI)는 각 분야별로 구성되는 PI, SI, RI를 통합하여 산정하고 각 부문별 지수를 통합하여 IWREI를 산정한다.

3.3 지표의 표준화 및 가중치 부여

선정된 관리지표들은 지표마다 크기와 단위가 다르기 때문에 지표 값들의 편차문제를 해소하기 위한 표준화 과정이 필요하다. 예로 물이용취약지수의 압력지표 중 농업용수의 이용량은 몇 백만 m^3 , 하천취수율은 몇 십%로서 크기와 단위가 상이하다. 이들 자료를 표준화하지 않으면 산정된 지수의 왜곡이 발생한다. 본 연구에서 표준화 방법은 통계학적으로 평균 0, 표준편차 1을 가진 좌우대칭형의 분포를 이루도록 표준화시킨 방법인 Eq. (1)을 이용한다.

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_x} \quad (1)$$

여기서, i 는 1에서 115개의 중권역을 의미하며, Z_i 는 중권역 i 에 대한 해당 관리지표의 표준화값, X_i 는 중권역 i 에 대한 해당 관리지표의 값, \bar{X} 는 중권역 i 에 대한 모든 관리지표의 평균, 그리고 σ_x 는 중권역 i 에 대한 모든 관리지표의 표준편차를 의미한다.

본 연구에서는 Eq. (1)과 같이 Z 값을 산정한 후 Yun (1999)에 의해 작성된 구간별로 점수를 부여하였다. 표준 정규분포도상의 Z 값에 따른 확률분포를 바탕으로 등급을 상위 20% 이상, 20~40%, 40~60%, 60~80%, 80% 초과 의 5등급으로 구분하고 이에 해당되는 Z 값의 범위를 산출 하였다. 각각의 등급에 대하여 100점, 80점, 60점, 40점, 20 점의 점수를 부여하였다.

또한 지수의 산정은 표준화된 관리지표들의 합산으로 산정되는데 이때 지수에 각 관리지표가 영향을 주는 정도 가 다를 수 있어 가중치의 부여가 필요하다. 가중치는 주로 전문가와 지역주민의 선호도 조사를 통하여 각 관리지 표의 상대적인 중요도를 파악하고 이를 기초로 결정하는 방법이 시도되고 있다. 그러나 이러한 방법을 이용한 결과 와 가중치를 적용하지 않은 경우의 평가결과에 있어서 차 이가 거의 없는 것으로 보고되고 있으며 이는 실제 일본의 토지평가기준이나 우리나라의 산지전용기준 등과 같이 거 의 대부분의 토지분류나 평가에서 쉽게 찾아볼 수 있다

(Chae and Oh, 2003). 부적절한 가중치의 적용은 평가결과 의 왜곡을 초래할 수 있어 본 연구에서는 각 지표와 지수 에 대해 동일 가중치를 부여하였다(Lim et al., 2010).

3.4 IWREI 산정모델

통합수자원평가지수(IWREI)를 산정하기 위해서는 물 이용, 홍수 및 하천환경의 각 PSR 관리지표를 이용하여 3개 부문별 PI, SI 및 RI를 산정하고 이들 지수를 이용하여 통합된 취약지수를 산정한다. 또한 3개 부문의 취약지 수를 이용하여 최종적으로 IWREI를 산정하게 된다. 각 분야별 취약지수는 HDI (UNDP, 2007), FVI (Connor and Hiroki, 2005), PFD (MLTM, 2006) 등 국내·외에서 널리 통용되고 있는 모델을 이용하였다. 각 분야별 평가지수는 Eqs. (2)~(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{물이용취약지수 (WUVI)} &= \\ WUVI_{PI}^{\alpha_1} \times WUVI_{SI}^{\alpha_2} \times WUVI_{RI}^{\alpha_3} &= \\ &= \sum_{i=1}^{n_1} [\beta_{WP_1} Z_{WP_1} + \dots + \beta_{WP_{n_1}} Z_{WP_{n_1}}]^{\alpha_1} \quad (2) \\ &\times \sum_{j=1}^{m_1} [\beta_{WS_j} Z_{WS_j} + \dots + \beta_{WS_{m_1}} Z_{WS_{m_1}}]^{\alpha_2} \\ &\times \sum_{k=1}^{o_1} [\beta_{WR_k} Z_{WR_k} + \dots + \beta_{WR_{o_1}} Z_{WR_{o_1}}]^{\alpha_3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{홍수취약지수 (FVI)} &= FVI_{PI}^{\alpha_4} \times FVI_{SI}^{\alpha_5} \times FVI_{RI}^{\alpha_6} \\ &= \sum_{i=1}^{n_2} [\beta_{FP_1} Z_{FP_1} + \dots + \beta_{FP_{n_2}} Z_{FP_{n_2}}]^{\alpha_4} \quad (3) \\ &\times \sum_{j=1}^{m_2} [\beta_{FS_j} Z_{FS_j} + \dots + \beta_{FS_{m_2}} Z_{FS_{m_2}}]^{\alpha_5} \\ &\times \sum_{k=1}^{o_2} [\beta_{FR_k} Z_{FR_k} + \dots + \beta_{FR_{o_2}} Z_{FR_{o_2}}]^{\alpha_6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{하천환경취약지수 (REVI)} &= REVI_{PI}^{\alpha_7} \times REVI_{SI}^{\alpha_8} \times REVI_{RI}^{\alpha_9} \\ &= \sum_{i=1}^{n_3} [\beta_{RP_1} Z_{RP_1} + \dots + \beta_{RP_{n_3}} Z_{RP_{n_3}}]^{\alpha_7} \quad (4) \\ &\times \sum_{j=1}^{m_3} [\beta_{RS_j} Z_{RS_j} + \dots + \beta_{RS_{m_3}} Z_{RS_{m_3}}]^{\alpha_8} \\ &\times \sum_{k=1}^{o_3} [\beta_{RR_k} Z_{RR_k} + \dots + \beta_{RR_{o_3}} Z_{RR_{o_3}}]^{\alpha_9} \end{aligned}$$

여기서, $WUVI_{PI}$, FVI_{PI} , $REVI_{PI}$ 는 3개 부문별 압력지수, $WUVI_{SI}$, FVI_{SI} , $REVI_{SI}$ 는 부문별 현상지수, $WUVI_{RI}$, FVI_{RI} , $REVI_{RI}$ 부문별 대책지수이며, Z_{P_i} , Z_{S_j} , Z_{R_k} 는 3개

부분별 관리지표의 표준화 값의 등급에 따라 부여한 점수이다. 또한, α 는 PI, SI, RI별 가중치, β 는 관리지표별 가중치이며, i, j, k 는 PI, SI, RI에 속한 관리지표 수이다.

각 분야별 취약지수는 20~100의 범위를 가지며 이와 동일한 범위를 가지도록 IWREI를 변환하고 분야별 취약성 개념을 유역의 수자원 사업성과의 이행도를 제시하기 위해 Eq. (5)와 같은 방법으로 0~100의 범위를 갖도록 IWREI를 제시하였다.

$$\text{통합수자원평가지수 (IWREI)} = 120 - (WUVI^{\delta_1} \times FVI^{\delta_2} \times REVI^{\delta_3}) \quad (5)$$

여기서, δ 는 각 평가지수별 가중치로서 동일가중치를 부여하였다.

4. 중권역별 IWREI의 산정

4.1 분야별 취약지수

4.1.1 물이용 취약지수(WUVI)

115개 각 중권역에 대하여 1990~2004년까지 15년간의 WUVI 시계열을 구축하였다. 물이용의 안전성을 확보하기 위한 대응 사업은 매년 이루어지는 것이 아니며 연간 지수에 사업의 효과가 민감하게 반영되지 않기 때문에 정책이행의 효과를 지수의 변동성으로 파악하기가 곤란하다. 따라서 정책이행의 성과를 집약하기 위하여 5년 단위(1990~1994년, 1995~1999년, 2000~2004년)로 해당 년도의 지수 값을 산술평균하여 중권역별로 제시하였다.

WUVI는 분위법(Lee et al., 2006)을 이용하여 5개의 등급구간으로 분류되었다. 5개의 등급구간은 물이용에 대한

취약성에 따라 취약성이 가장 큰 High, 다소 큰 Medium High, 중간정도인 Medium, 조금 낮은 Medium Low, 낮은 Low 구간으로 나누었다. Fig. 2는 분위법을 이용하여 산정된 등급구간의 경계를 나타낸 것이다. Fig. 2의 가로축은 WUVI의 구간을 나타내며 세로축은 115개 중권역에 대해 1990~2004년까지 15년 동안 산정된 1,725개의 모든 취약지수 중 해당 지수구간에 포함되는 중권역의 수인 도수가 된다. 이들 취약지수 구간에 따른 중권역들이 차지하는 누적도수의 비율이 20%, 40%, 60%, 80% 및 100%, 즉 각 임의의 지수구간이 모두 1,725개의 취약지수중 20%가 되도록 지수등급을 설정한다. 예로 누적도수가 20%에 해당하는 지수구간은 최소지수 44.3에서 53.7로서 이 구간은 취약성이 낮은 Low 구간으로 분류된다. 또한 64.6에서 85.5의 구간도 산정된 총 취약지수에서 20%를 차지하며 이 구간에 속하는 중권역은 취약성이 큰 지역을 나타낸다.

Fig. 3은 중권역별 WUVI 산정 결과를 5년 단위로 평균하여 나타낸 공간분포이다. 전국적인 WUVI의 경향을 분석한 결과, 1990년대 초반보다 2000년대 들어서 115개 유역 총면적 중 물이용의 취약성이 큰 High 구간인 면적이 11.3%에서 8.0%로 감소하였으며 Medium High 구간도 29.0%에서 14.1%로 감소하였다. 따라서 취약성이 큰 High와 Medium High 구간의 면적률이 감소함에 따라 물이용에 대한 취약성이 점점 해소되고 있다는 것을 의미하며 이는 물이용 관련 사업 및 대책의 성과가 있었다는 것을 나타낸다. 또한 취약성이 작은 Low 구간의 경우 연도의 변화에 따라 아주 근소하게 감소하지만 Medium Low 구간이 12.6%에서 26.9%로 크게 상승함으로써 물이용 취약성이 감소하고 있음을 보여준다.

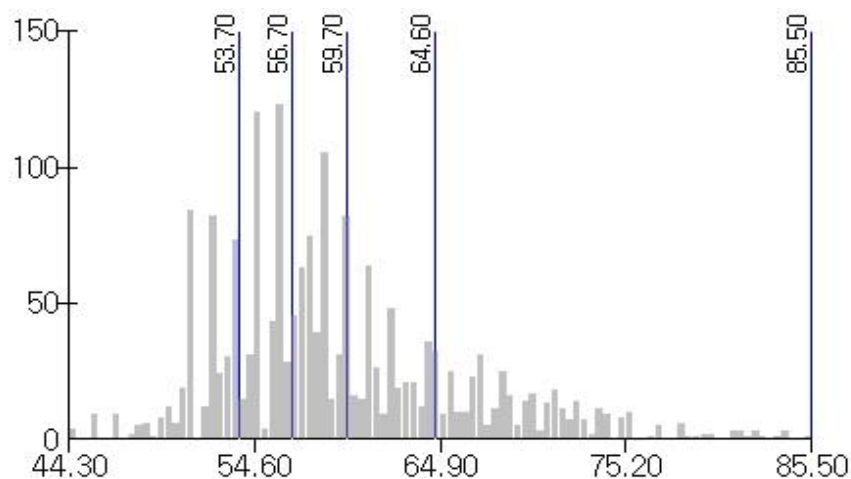


Fig. 2. Classification of Water Use Vulnerability Index

4.1.2 홍수취약지수(FVI)

WUVI와 같은 방식으로 FVI를 산정하여 Fig. 4에 제시하였다. 전국적인 분석결과, 1990년대 초반 위험성이 큰 High와 Medium High 구간의 면적이 35.3%에서 2000년대 들어 27.4%로 감소하였으며, 위험성이 작은 Low와 Medium Low 구간은 37.3%에서 38.8%로 큰 차이가 없었다. 전국적으로 홍수피해에 대한 위험성이 약간 감소하였지만 국지적인 홍수피해 특성을 고려할 때 전국적인 분석보다 작은 공간단위 분석이 필요하다. 이는 FVI의 경우 국지적으로 극심한 홍수의 피해에 영향이 크기 때문이다.

권역별로 살펴보면, 한강권역의 경우 위험성이 높은 High와 Medium High 구간이 46.5%에서 최근 들어 28.9%로 크

게 감소하였으며 Low와 Medium Low 구간도 1990년대 초반 28.5%에서 2000년대에는 38.2%로 증가하였다. 낙동강권역의 경우는 과거에 비해 크게 차이를 보이고 있지 않다. 금강권역의 경우는 1990년대 초반 2.2%였던 위험성이 큰 구간이 2000년대 들어 19.9%로 증가하였으며 위험성이 작은 구간도 60.8%에서 42.6%로 크게 감소한 것으로 분석되어 홍수 관련 대책 및 노력이 다른 권역에 비해 시급한 것으로 분석되었다. 섬진강 및 영산강권역의 경우도 위험성이 큰 등급구간에 속해 있는 중권역들이 점점 줄어들고 있으며 위험성이 작은 등급구간에 속해 있는 중권역들은 최근 증가하는 것으로 분석되었다.

FVI의 전국적인 분석에 의하면 전국적으로 과거에 비해 최근 들어 홍수 피해에 대한 위험성이 다소 감소한 것으로

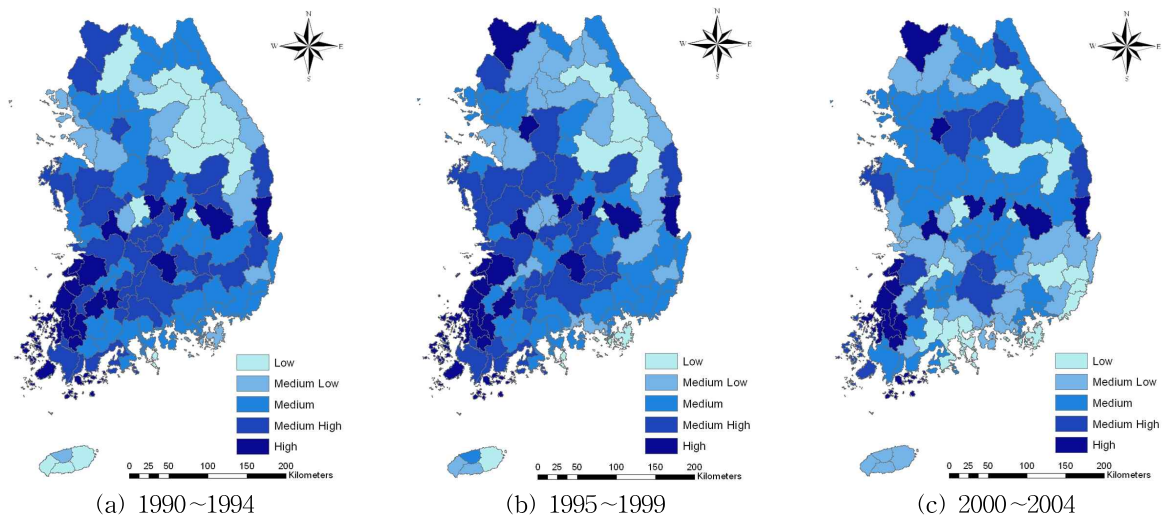


Fig. 3. The Results of Water Use Vulnerability Index in Each Watershed

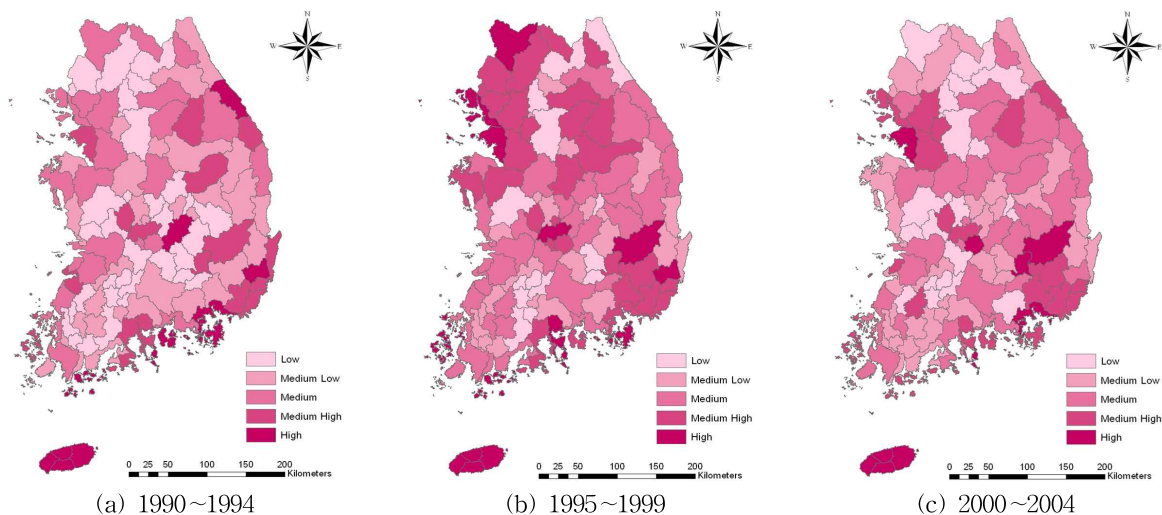


Fig. 4. The Results of Flood Vulnerability Index in Each Watershed

분석되었지만 권역별 분석을 통해 금강권역은 위험성이 큰 등급구간이 상승하는 것으로 분석되었다. 유역별로 홍수 관련 많은 대책과 노력에도 불구하고 FVI의 개선이 미미하고 오히려 위험성이 증가한 경우는 계획홍수를 초과하는 빈번한 홍수의 발생에 기인한다. 실제로 과거 집중호우 발생 횟수는 1979~1997년 11회/년에서 1998~2006년 20회/년로 약 1.8배 증가하였다(MLTM, 2011). 중권역별 홍수 피해 위험성이 높은 High와 Medium High 구간은 보다 세심한 대책 및 노력이 필요한 지역으로 사료된다.

본 연구를 통해 산정된 홍수취약지수와 MLTM (2006)에서 제시한 수해상습지역을 비교·분석하였다. 홍수취약지수의 경우 홍수피해에 영향을 주는 압력, 홍수피해 저감을 위한 대책지수를 포함하고 있어 빈번하게 홍수피해를 입은 지역만을 표현하는 수해상습지역과 정확하게 일치하지는 않지만 전국적으로 비슷한 패턴을 보이고 있어 홍수취약 특성을 대체적으로 잘 반영하고 있다고 할 수 있겠다.

4.1.3 하천환경취약지수(REVI)

REVI를 115개 중권역에 대해 분석하여 Fig. 5에 제시하였다. 분석 결과, 1990년대 초반은 Low 구간을 제외한다면 나머지 4개의 구간이 거의 비슷한 면적률을 나타내고 있다. 1990년대 후반에는 과거에 비해 High, Medium High와 Medium 구간이 감소하는 반면 Medium Low와 Low 구간이 상대적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 2000년대 들어서면서 High, Medium High와 Medium 구간이 현저하게 감소하였으며, Low 구간은 크게 증가한 것으로 나타났다. 과거보다 최근 들어 REVI가 현저하게 감소하

고 있어 하천환경 피해 및 악화 위험성이 감소하고 하천환경 관련 사업 및 대책의 성과를 보여주고 있다.

4.2 중권역별 통합수자원평가지수(IWREI)

IWREI는 물이용, 홍수 및 하천환경의 각 분야별 취약지수를 통합한 지수로써 수자원 정책 이행도를 측정하기 위해 개발된 지수이다. IWREI가 높게 산정되었다는 것은 수자원 정책의 이행성도가 높다는 것을 의미하고 적게 산정된 경우는 성과가 낮다는 것을 의미한다. IWREI는 수자원에 대한 통합적인 특성을 평가하기 위해 개발된 것이며 보다 상세한 정보를 얻기 위해서는 3개 분야별 취약성지수를 살펴봄으로써 중권역별 세부 취약부분을 평가할 수 있다.

IWREI는 Eq. (5)를 이용하여 분야별 각 취약성지수 값에 동일한 가중치를 부여하여 산정하였다. 1990~1994년, 1995~1999년, 2000~2004년도로 분류하여 해당 년도의 지수 값을 산술평균한 중권역별 지수를 Fig. 6에 제시하였다. 2000년대의 IWREI 지수 값이 1990년대 초반의 지수보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 몇몇 중권역에서는 1990년대 초반보다 1990년대 후반의 지수 값이 작은 곳도 있지만 대부분 지수 값이 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 2는 IWREI의 등급별 면적비율을 나타낸 것이다. 1990년대 초반은 IWREI가 높은 High 구간의 차지면적이 8.1%, Medium High 구간이 12.5%였으며, IWREI가 낮은 Low와 Medium Low 구간은 57.4%나 차지하였다. 1990년대 후반에는 점점 IWREI가 높은 구간이 차지하는 면적이 증가하였으며 2000년대에는 IWREI가 높은 High와 Medium High 구간의 차지면적이 68.6%로 1990년대 초반에 비해 48.0%나 상승하였으며 Low와 Medium Low

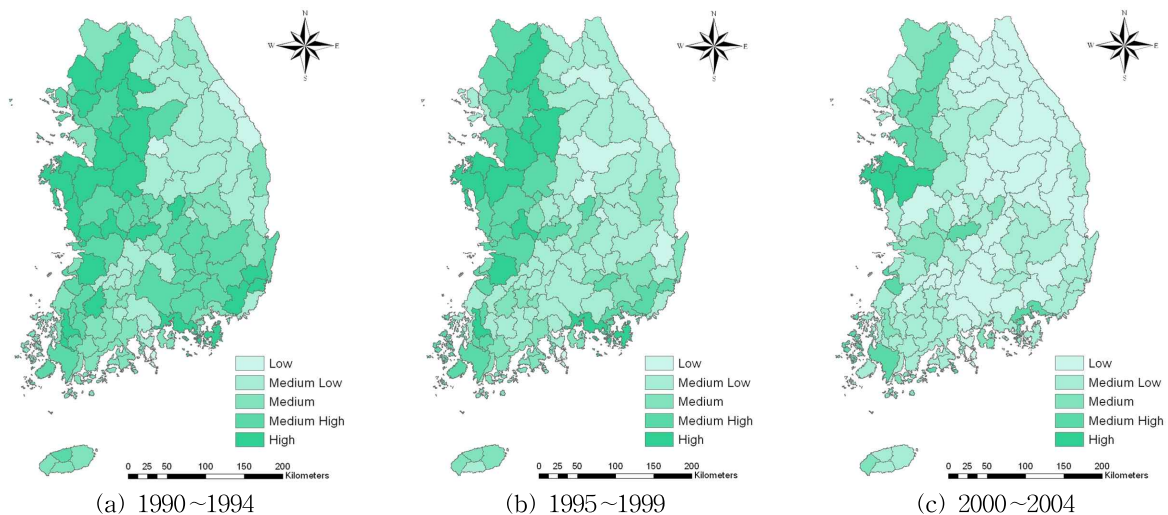


Fig. 5. The Results of River Environment Vulnerability Index in Each Watershed

구간도 17.8%로 과거에 비해 39.6%나 감소한 것으로 분석되었다. 이는 과거보다는 최근의 수자원 정책의 이행성 과가 크게 증가하였다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 IWREI 값의 변화를 도시한 결과이다. 그림을 통해 1990년대 초반에 비해 1990년대 후반의 지수 값이

크게 산정되었으며 이보다는 2000년대 지수 값이 더 크게 분석된 것을 쉽게 알 수 있다. 그 중 낙동강권역에 속해 있는 중권역과 금강에 속해 있는 중권역이 과거에 비해 큰 폭으로 정책이행의 성과가 높아지고 있다.

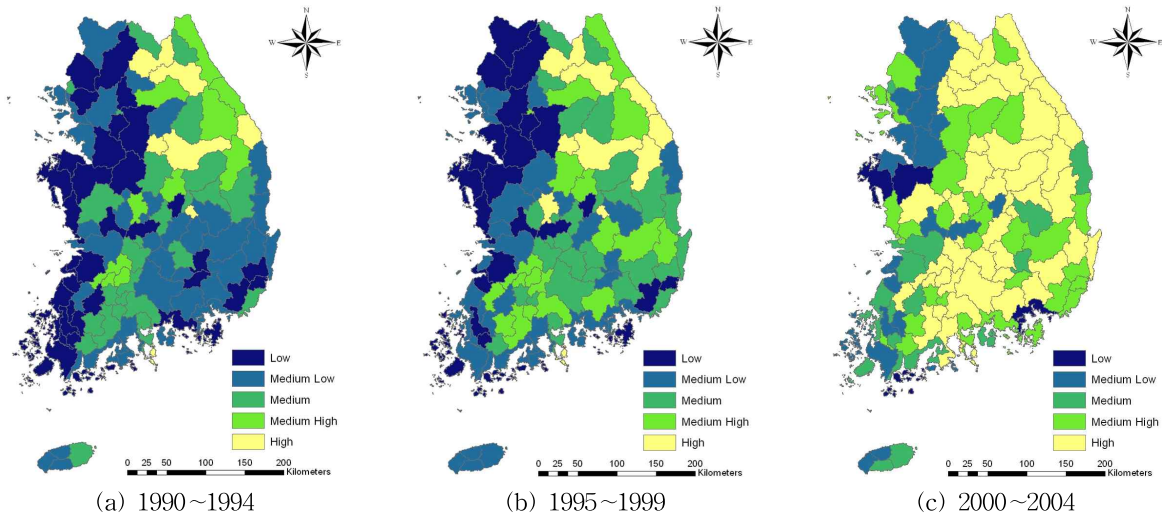


Fig. 6. The Results of Integrated Water Resources Evaluation Index in Each Watershed

Table 2. Analysis Results of the Classified Area Ratio of Integrated Water Resources Evaluation Index

Classification	1990~1994	1995~1999	2000~2004
High	8.1%	12.2%	43.0%
Medium High	12.5%	17.9%	25.6%
Medium	22.0%	29.0%	13.7%
Medium Low	30.5%	21.4%	13.8%
Low	26.9%	19.5%	4.0%



Fig. 7. Change in Value of Integrated Water Resources Evaluation Index in Each Watershed

4.3 통합수자원평가지수(IWREI)의 한계와 개선방향

본 연구에서 개발된 IWREI의 관리지표들은 현재 국가 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공되거나, 수자원장기종합계획 등 자료 수집의 용이성, 신뢰성 등이 확보된 것들로만 구성되어 있다는 한계점을 가지고 있다. 특히, 하천환경취약지수(REVI)의 경우 관리지표의 수가 각각 하나씩으로만 구성되어 있어 타 분야 평가지수의 관리지표들과 큰 차이를 보이고 있어 향후 일관성이 요구된다. 또한 앞서 살펴본 국외의 통합지수처럼 현재 지수는 수자원과 관련된 관리지표만을 고려한 것이 아니라 인문, 사회적인 측면도 함께 포함하여 분석하고 있는 추세이다. 따라서 향후 IWREI의 관리지표에 인문, 사회적인 측면도 고려할 필요가 있다고 판단된다.

현재까지 수자원 관련 정보를 제공하려는 많은 노력들이 있었으나 자료의 가용기간이 짧아 과거 자료들을 조사, 분석하기에는 많은 어려움이 따른다. 특히, 하천환경 분야의 경우 특성상 조사시기와 범위 등을 결정하기가 힘들기 때문에 관련 정보 수집에 큰 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서 개발한 IWREI를 구성하는 관리지표의 경우 자료의 유무 등에 따라 선정되었기 때문에 향후 수자원 관련 자료 DB 구축 여부에 따라 지속적인 수정 및 보완이 요구된다. 물이용취약지수(WUVI)의 경우 갈수예경보 발령횟수 등을 추가로 고려할 수 있을 것이며, 홍수취약성지수(FVI)에 대해서는 홍수예경보 발령횟수 등 관련 자료 수집 여부에 따라 보다 많은 부분에 대한 지표 개발이 요구된다. 자료 DB 구축 상황이 가장 취약한 하천환경취약지수의 경우 수질뿐만 아니라 하천환경 특성을 평가할 수 있는 다양한 관련 자료 DB 구축이 요구되며 이를 평가할 수 있는 하천유지유량 관련 지표(하천유지유량 확보일수 또는 저수량 확보일수 등), 하천시설물 현황(낙차공, 콘크리트 고수부지, 주차장 이용 등), 하천문화재 관련 지표, 하천의 건강성 관련 지표(하천의 자연성, 수생태 건강성, 생태하천의 비율 등) 및 생태환경 관련 지표(어류 중수, 중 풍부도, 식생지표 등) 등의 개발이 절실히 필요하다.

또한 본 연구에서는 분석을 위한 공간단위를 중권역으로 선정하였다. 이는 관련 자료 조사, 수집 및 분석이 수자원 특성상 유역단위로 수행하는 것이 합리적이라 판단하였기 때문이다. 하지만 최근에 지역별 수자원 개발과 정책 추진의 정도가 다르며 지역별 수자원 관련 사업의 성과를 평가하기 위해서는 행정구역별 분석이 필요하다. 따라서 향후 물이용, 치수, 하천환경 관련 기초자료 조사, 수집 및 분석을 행정구역별로 수행함으로써 행정구역별 지표 및

지수 산정 결과를 제시할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 수자원 현황 및 수자원관리 목표를 평가하고 수자원 관련 정책 수립 및 사업의 우선순위 평가에 유용한 도구로서 분야별(물이용, 치수, 하천환경) 특성을 평가할 수 있는 지수로 구성되는 수자원 통합지수를 개발하였다.

이수 사업의 수자원 확보량과 광역상수도 보급률, 치수사업의 하천개수율과 상습침수구역 해소 및 하천환경사업의 자연형 하천개수 등의 성과지표로 수자원 관련 정책의 이행 성과를 평가하는 것은 한계가 있다. 따라서 이들 사업의 성과를 지수화하여 수자원 정책과 사업의 효과를 평가할 수 있는 통합수자원평가지수(IWREI)를 개발하였다. IWREI는 물이용의 취약정도를 평가하는 물이용취약지수와 홍수취약성을 평가하는 홍수취약지수 및 하천환경 취약정도를 평가하는 하천환경취약지수로 구성된다. 물이용, 홍수, 하천환경의 피해 요인이 되는 압력지수, 이에 의한 피해현상지수와 피해 대책 및 예방 노력을 나타내는 대책지수 등 3개 부분에 대해 총 26개의 관리지표를 선별하여 지수를 작성하는데 사용하였다. 물이용취약지수는 지역별 상대적인 물이용의 불안정성을 나타내며, 홍수취약지수는 홍수의 위험정도, 하천환경취약지수는 하천환경의 쾌적성을 나타낸다.

지수산정 결과를 토대로 취약성과 위험성에 대해 5개의 구간(High, Medium High, Medium, Medium Low, Low)으로 분류하여 제시하였다. 개발된 IWREI로 우리나라 115개의 중권역에 대해 비교 분석한 결과, 과거에 비해 수자원 정책의 이행성과가 높아져 지금까지 정부가 추진한 물이용, 치수 및 하천환경 사업의 효과가 나타나고 있다는 것을 알 수 있었다. 하천의 상류유역보다는 하류유역의 물에 대한 IWREI가 대부분 낮게 평가되었는데 이는 대도시들이 하류유역에 위치하고 있어 많은 물이용에 의한 물 부족 피해의 잠재성이 크고, 과도한 오염부하량 배출, 수질 악화 및 홍수 피해 위험성 증가 등이 요인으로 판단된다. 물이용취약지수(WUVI)는 지속적인 수자원 확보 사업으로 과거에 비해 풍부하고 안정된 물을 이용할 수 있는 환경이 조성되었음을 보여주고 있다. 홍수취약지수(FVI)는 최근의 빈번한 홍수의 발생에도 불구하고 지속적인 치수사업으로 과거에 비해 전국적으로 취약성이 감소하였음을 나타내고 있다. 하천환경취약지수(REVI)는 수질개선 사업 등의 영향으로 하천환경이 개선되고 있다는 것을 알 수 있었다.

IWREI는 여러 가지 수자원 관련 정책의 기초정보만으로는 판단하기 어려운 수자원 현황 및 변화를 하나의 수치로 판단할 수 있는 척도를 제공할 수 있다. 또한 연도별 분석을 통해 수자원 현황 및 특성 경향을 파악할 수 있고, 등급구간 분류분석에 의해 수자원 관련 정책 수립 시 각 지역별 과거에서부터 현재까지의 연도별 수자원 특성을 반영한 대책을 세울 수 있을 것이다. IWREI 산정 결과를 토대로 국내 수자원 현황을 분석하고 국가 수자원 정책과 사업성과에 대한 평가가 가능할 것이며 수자원 정책 수립 지원을 위한 기반 정보를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수예경보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Chae, M.O., and Oh, Y.J. (2003). "A study on land suitability factors and their weights." *Journal of Korean Geographical Society*, KGS, Vol. 38, No. 5, pp. 725-740.

Choi, S.J., and Lee, D.R. (2005). "Indicators for Evaluation of Sustainable Water Resources Development and Management." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 9, pp. 779-790.

Connor, R.F., and Hiroki, K. (2005). "Development of a method for assessing flood vulnerability." *Water Science & Technology*, Vol. 51, No. 5, pp. 61-67.

Han, P.H., and Kwon, O.H. (1995). *A Study on the Development of Urban Indicators and Their Application*. Korea Research Institute for Local Administration.

Kim, H.S., Song, Y.I., Kim, L.J., and Lim, Y.S. (2007). *Linking environmental assessment and sustainable development indicators*. KEI-2007-RE-08, Korea Environment Institute.

Lee, C.H., Lee, S.M., and Yeo, C.G. (2006). Development of the Resional Safety Assessment Model in Seoul-Focusing on Flood-. SDI 2006-R-37, Seoul Development Institute.

Lee, D.K., and Yoon, S.W. (1998). "A study on Environmental Indicators for Sustainable City Development -The case of Coexistent Indicators between Men and

Nature-." *Journal of Environmental Impact Assessment*, KSEIA, Vol. 7, No. 1, pp. 93-107.

Lim, K.S., Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2010). "Development of Flood Risk Index using causal relationships of Flood Indicators." *Journal of Korean Society of Civil Engineer*, KSCE, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70.

Matthew S.W., and Victoria, A.V. (2001). *Urban indicators for managing cities: Cities Data Book*, Asian Development Bank.

MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2006). National water resources plan (2006-2020).

MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2011). National water resources plan (2011-2020).

MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2007). The Study of Water Use Characteristic Evaluation.

MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2008). The Study of Flood Control Characteristic Evaluation.

MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009). The Study of River Environment Characteristic Evaluation.

MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010). The Study of Water Resources Evaluation Indicator Expansion.

Ohlsson, L. (1999). *Environment, Scarcity and Conflict : A study of Malthusian Concerns*. Ph.D. dissertation, Dept. of Peace and Development Research, University Göteborg.

Sullivan, C.A. (2001). "The Potential for Calculating a Meaningful Water Poverty Index." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 471-480.

Sullivan, C.A. (2002). "Calculating a Water Poverty Index." *World Development*, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210. <http://epi.yale.edu/>

UNDP. (2007). *Human Development Report 2007/2008*.

Yun, H.Y. (1999). *Development and application of environmental indicators of Incheon*. Incheon Development Institute. pp. 1-51.

논문번호: 13-054	접수: 2013.07.02
수정일자: 2013.07.26/09.02	심사완료: 2013.09.02