



Development and assessment of water management resilience of mid–small scale tributaries

Park, Jung Eun^a · Lee, Eul Rae^{a*} · Lim, Kwang Suop^a

^aK-water Institute, Daejeon 34350, Korea

Paper number: 15-092

Received: 28 October 2015; Revised: 24 November 2015 / 3 December 2015; Accepted: 3 December 2015

Abstract

Water Management Resilience Index (WMRI) was developed as a policy measure of adaptability to withstand water stresses and to set up water management strategies mainly in mid-small scale tributaries, and then evaluated on 117 sub-basins in South Korea. The index consists of 3 sub-indices such as vulnerability, robustness and redundancy sub-indices, each including indicators of 3 sectors: water use, flood mitigation, and river environment. Total number of indicators selected for the index was 31. Taking into account the stream order and control capability of river flow discharge, sub-basins were categorized into 3: 1 for mainstreams of lower large dams, 2 and 3 for tributaries, respectively without and with flow discharge regulation. As a result of the evaluation, resilience index scores in Category 2 and 3 are much lower than that of Category 1, especially with very poor score of redundancy. Although there was no significant difference between mainstream and tributaries in vulnerability and robustness sub-indices, results of redundancy sub-index in tributaries were lower than those in mainstream. Thus, it is conceived that the variety of water management schemes should be considered to improve their resilience in the face of future uncertainty. Addressing comprehensive stability of river basin against internal and external impacts, WMRI in this study can also be used for the prioritization of water management plans.

Keywords: Resilience Index, Vulnerability, Robustness, Redundancy, Water Management

지류 중소하천의 물관리 탄력성 평가지수 개발 및 평가

박정은^a · 이을래^{a*} · 임광섭^a

^aK-water연구원 수자원연구소

요 지

지류 중소하천의 미래 물관리 정책방향을 수립하기 위한 자료로, 물관리 탄력성 지수를 개발하고 이를 117개 중권역에 적용하였다. 물관리 탄력성 지수는 취약성, 견고성, 다양성의 부지수로 구성하였으며, 각 부지수는 다시 이수, 치수, 하천환경 분야의 지표들로 총 31개의 지표항목으로 구성하였다. 중권역은 다목적댐 하류 본류유역(범주 1), 용수공급 및 유량조절이 불가능한 지류(범주 2)와 가능한 지류(범주 3)로 분류하여 적용한 결과, 지류 중소하천에서의 물관리 탄력성, 특히 이수 및 치수분야의 다양성이 본류에 비해 낮은 것으로 나타났다. 또한 취약성과 견고성에 있어서는 본류와 지류가 큰 차이를 보이지 않았으나 다양성에서 지류가 낮은 값을 나타내었다. 따라서 지류 중소하천의 다양성을 높이는 방향으로 물관리 정책의 수립이 필요하다. 본 연구에서 개발된 물관리 탄력성 지수는 내외부 충격에 대한 안정성을 종합적으로 제시하여 수자원 정책 및 계획의 우선지역 선정 등에 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어: 탄력성 지수, 취약성, 견고성, 다양성, 물관리

*Corresponding Author. Tel: +82-42-870-7433
E-mail: erlee@kwater.or.kr (E.R. Lee)

1. 서론

4대강 살리기 사업을 통해 이수 및 치수 용량이 추가로 확보되었으며, 하천의 수질 및 생태환경이 개선되는 효과를 거두었으나, 이는 주로 대하천 본류를 중심으로 이루어진 성과이다. 우리나라의 국가하천은 2,995.39 km인 반면, 지방하천은 26,822.23 km (2013.12.31. 기준, 한국하천일람)에 달하고, 소하천을 포함한 대부분의 지류 중소하천은 아직 이수적, 치수적 측면에서 취약성을 갖고 있는 것이 현실이다. 댐 저수지 등을 통한 수량 확보와 하천유량의 조절이 어려운 지류 중소하천의 경우 근래 들어 거의 매년 발생하는 가뭄에 대해 이수적인 측면뿐만 아니라 수질 및 생태 환경의 질이 저하되는 상황이 반복되고 있다. 따라서 앞으로는 지류 중소하천 중심의 이수 및 치수, 환경을 고려한 물관리 정책의 수립 및 시행이 필요한 단계이다.

일반적으로 하천의 물관리라 함은 홍수재해 예방을 위해 통수능을 확보하고 제방을 축조하는 등 치수 목적의 물관리와 각종 용수공급 뿐만 아니라 하천환경을 종합적으로 고려하여, 맑고 충분한 하천유량이 안정적으로 공급되도록 하는 이수 목적의 물관리를 계획하고 실행하는 것을 의미한다. 그러나 대규모 인프라 건설은 시민환경단체가 중심이 된 사회적 저항에 당면해 있고, 막대한 소요재원의 확보도 어려운 실정이다. 따라서 탄력적 물관리를 계획하는 노력이 필요한 시점이다.

Park et al. (2013)은 탄력적 물관리란 '용수수요와 하천기능을 유지하는 유량을 만족하기 위하여 물순환 복원 및 유연하고 다양한 수량 확보와 배분을 통해 기후변화 및 외부환경 변화에 대응함으로써 물안보를 확보하기 위한 미래 수자원 관리 전략'으로 정의하고, 적응성(Adaptation), 유연성(Flexibility), 다양성(Variety) 등 핵심 요소들을 제시한 바 있다.

우리나라의 지류 중소하천의 경우, 농업용수의 대량 취수 구간 및 자연하천 구간, 도심하천 구간이 혼재되어 있으며, 하천유량을 인위적으로 조절할 수 있는 대형 구조물이 없는 것이 전형적인 형태이다. 따라서 지류 중소하천의 각 구간별 특성이 반영된 하천관리유량을 만족시킬 수 있는 탄력적 대안 마련이 필요하다.

본 연구에서는 우리나라 지류 중소하천의 물관리 탄력성을 평가할 수 있는 지수를 개발하고, 이를 국가 표준유역 분할 체계인 수자원단위지도의 117개 중권역에 적용하였다. 또한 물관리 탄력성 지수를 산정하고, 다목적댐에 의한 유량조절 및 용수공급이 가능한 본류와 지류, 유량조절이 불가능한 지류의 3가지 분류로 구분하여 비교분석함으로써 우리나라 지류 중소하천의 물관리 탄력성을 평가하는 것을 목적으로 하였

다. 물관리 탄력성 지수는 내외부 충격에 대한 물관리 안정성을 종합적으로 제시하여 수자원 계획 및 정책이행 과정에서 의사결정자들에게 활용될 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 탄력적 물관리

기후변화는 전 세계적으로 가장 큰 이슈 중에 하나이다. 그러나 발생하는 현상의 심각성보다도 미래의 불확실성이 더욱 큰 난제이다. 예를 들어 향후 전망에 따르면 2061~2090년의 가뭄발생기간은 과거 1971~2000년에 비해 3.4배 증가하며 금강유역의 하천유량은 13.3% 감소할 것으로 예측되기도 하였다(MLTM, 2011). 그러나 어떠한 예측도 물관리를 계획하는데 있어서 실제 적용하기에는 불확실성이 너무 크다.

지금까지 대부분의 물관리 사업은 공학적 설계에 전적으로 의존하여 왔으며, 공학적 설계는 과거 경험치를 바탕으로 안전도를 고려하는 방법으로, 결국 과거에 발생한 현상이 일정한 패턴을 가지고 재현될 것이라는 전제로부터 출발한 기술이다. 반면, 최근에 발생하는 현상들은 과거와는 전혀 다른 양상으로 나타나고 있다는 점에서 과거의 공학적 설계기술에서 벗어나 불확실성에 대비하기 위한 대안 마련이 요구되는 것이다. 이는 어떤 일이 발생했을 경우 이렇게 대응해야 한다는 확립되고 고정된 관리 방식의 당위성이 점차 약화되고 있는 것이다. 즉, 물관리에 대한 불확실성이 커진 동시에 대응 방식의 범위도 확장되어야 한다는 의미이다.

따라서, 외부충격 및 미래 불확실성, 시스템의 복잡성이 증가함에 따라 내·외부 변화에 대한 안정성을 의미하는 탄력성(Resilience)이 강조되고 있다. Wang et al. (2009)은 탄력성의 일반적인 개념을 복잡한 정도에 따라 공학 탄력성(Engineering Resilience), 시스템 탄력성(System Resilience), 복합적응시스템 탄력성(Resilience in Complex Adaptive System)의 3단계로 구분함으로써 다양한 분야에서 적용할 수 있도록 하였다. 이 중에서 복합적응시스템 탄력성은 사고를 미연에 방지하고 회피할 수 있는 시스템의 능력으로 정의하고 있으며, 적응능력(Adaptive Capacity), 변형가능성(Transformability), 학습(Learning), 혁신(Innovation) 등의 주요 개념을 제시하고 있다.

이런 관점에서 보았을 때 물관리에 있어서의 탄력성이란, 사후복구보다는 사전예방적인 능력을 향상시키고 유량을 확보함에 있어서 과거와 같이 구조물에만 의존하는 것이 아니라 다양한 방안을 도출하여 실행함으로써 인간 활동에 필요한

물을 안정적으로 공급할 뿐만 아니라 물관련 재해로부터 사회와 생태계를 보호할 수 있는 것을 의미할 수 있을 것이다.

2.2 기존 물관리 평가 지수

물을 둘러싸고 있는 여러 제반사항들의 변화와 최종 수요자라 할 수 있는 국민들의 인식이 증가됨에 따라 국내외적으로 물관리 현황과 정책을 평가분석하기 위해 각 목적에 따른 다양한 지수(Index)를 개발하는 노력이 지속되고 있다(Sullivan et al., 2002; Esty et al., 2005; ADB, 2013; Lee et al., 2013). 또한 어떤 사업의 의사결정을 내리는 데 있어 그 성과를 정량적으로 평가하고 취약한 부분을 확인하는 데에도 지수를 이용하는 경우가 많다(Nardo et al., 2005).

국제기구에서 제시하고 있는 대표적인 물관리 지수로 물빈곤 지수(Water Poverty Index, WPI), 국가물안보 지수(National Water Security Index), 환경지속성 지수(Environmental Sustainability Index, ESI), 환경취약성 지수(Environmental Vulnerability Index, EVI), 환경성과 지수(Environmental Performance Index, EPI), 사회적 물부족 지수(Social Water Stress/Scarcity Index, SWSI) 등이 있으며, 주기적으로 평가하여 국가간 비교 수치로 활용되고 있다.

지표(Indicator)란 여러 부분의 관측값 중에서 현상을 가장 잘 나타내줄 수 있는 대표적인 값을 의미하며 수자원과 관련한 것으로는 하상계수(River Regime Coefficient), 유출율(Runoff Rate)과 같은 자연조건과 관련된 지표와 이수안전도, 하천개수율, 상하수도 보급률과 같은 사업성과와 관련된 인위적 지표를 들 수 있다.

지수는 서로 다른 측정단위를 사용하거나 과학적인 연관성이 없는 둘 이상의 지표를 집계하여 하나의 지수로 정의하는 방법으로, 앞에서 언급한 물빈곤지수, 사회적 물부족 지수, 물안보지수 등이 물과 관련하여 국제적으로 많이 쓰이는 사례이다.

국내에서 물관리 지수에 관한 대표적인 연구로는 Lee et al. (2013)이 개발한 통합수자원평가지수(Integrated Water Resources Evaluation Index, IWREI)를 들 수 있다. IWREI는 물이용, 홍수 및 하천환경의 분야별 취약성을 나타내는 지수들을 통합하여 나타낸 것으로, 각각의 피해요인이 되는 압력 지표와 이에 의한 피해 현상지표 및 피해의 대책지표로 선정된 총 26개의 지표로 구성되었다. 이를 우리나라 물관련 모든 계획의 기본단위인 수자원단위지도의 116개 중권역에 대해 1990-2004년의 15년간의 자료를 이용하여 지수를 산정하고 각 5년 단위로 지수의 변화를 분석하여 그간 수자원 정책의 사업효과를 확인하였다.

Choi et al. (2009)은 이수분야 핵심지표로써 물공급 안전도, 가뭄시 물부족량, 물부족지역 비율, 물 자급율, 취수율, 환경유량 확보율, 물이용 공평성과 물재정 건전성 등을 선정하고, 이수분야의 수자원 정책을 국가, 유역별, 지역별 수준에서 평가하는 연구를 수행한 바 있다.

Kang et al. (2008)은 유역관리의 문제점 파악과 진행 상태를 평가하기 위해 요인분석기법(Factor Analysis)을 이용하여 이수관리, 홍수관리, 환경 및 생태계 관리 등 세부지수와 변수들로 구성된 유역관리평가지수(Index for Evaluating Watershed Management)를 개발한 바 있으며, 또한 수자원의 지속가능성평가지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)를 개발하고 계층화 분석기법(Analytical Hierarchy Process, AHP)을 이용하여 수자원의 지속가능성을 향상시키기 위해 필요한 사항을 도출하는 연구를 수행한 바도 있다(Kang and Lee, 2006).

3. 물관리 탄력성 지수 개발

3.1 물관리 탄력성 지표 선정

지금까지 우리나라의 물관리는 국가하천 분류만을 중심으로 정책이 수립되고 시행되어 왔으며, 대부분의 인프라들도 분류에 집중되어 있다고 해도 과언이 아니다. 또한 물관리 정책의 대부분도 댐 건설, 하천제방 축조, 환경기초시설의 건설 등 일변도로 되어 있어 지역의 자연조건 및 사회경제적 여건이 반영되어 있지 못해 다양성이 결여되어 있는 상황이다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 분류와 지류 유역 간에 물관리 불균형이 크게 심화되었으며, 지역간 편차도 매우 큰 것이 현실이다.

본 연구에서는 기후변화 및 지역 개발에 따른 토지이용 변화 등 내외부 환경변화에 대응하는 한편, 과거와 같이 인프라 건설 중심의 물관리가 어려운 여건 하에서 미래 물관리의 방향이 될 수 있는 지류 중소하천의 물관리 탄력성을 평가하고 각 지류유역별 정책의 방향을 도출하는데 필요한 물관리 탄력성 지수(Water Management Resilience Index, WMRI)를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 지수는 취약성(Vulnerability), 견고성(Robustness), 다양성(Redundancy)의 3가지 부지수(sub-index)로 구분하고, 관련 목표를 평가할 수 있는 지표에 대하여 검토하였다. 이때, 기후변화, 국내총생산액(GDP), 가상수, 수자원 분야의 공적투자비용 등과 같이 국가차원의 전체적인 특성을 나타내는 지표는 제외하였다. 취약성은 유역의

자연조건 및 사회경제적 여건에 따른 물관리 어려움을 의미하고, 견고성은 물관련 위기와 방해를 흡수하고 적응하여 견뎌내는 능력으로 취약성을 극복하고자 시행된 준비상황 또는 인프라의 성능을 의미하며, 다양성은 초과 능력을 보유하거나 예비시스템을 갖추으로써 사고시 주요 기능을 유지하게 하는 것으로 주요 수자원 인프라 시설의 중복성 및 다양한 해결방안이나 전략을 의미한다.

한편, 각각의 부지수는 이수, 치수, 하천환경 분야로 구성하였으며, Table 1에 나타낸 바와 같이, 취약성 13개, 견고성 11개 및 다양성 7개 등 총 31개의 지표항목을 선정하고 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)을 비롯하여 전국유역조사보고서(MLTM and K-water, 2012), 재해연보(NEMA, 2005~2014), 기상청 관측자료, 상수도 및 하수도 통계(ME, 2014a; ME, 2014b), 물환경 정보시스템, 2001년 가뭄기록조사보고서(MCT, 2002), 2008~2009 가뭄극복추진 성과보고서(NEMA, 2009), 환경공간정보서비스(EGIS), 국가환경지도시스템, 국가통계포털(KOSIS), 자연·사회환경 개선을 고려한 권역별 하천유지유량 평가, 산정 및 확보방안 보고서(MLTM, 2007~2011) 등으로부터 지표 자료를 추출하였다. 이수, 하천환경의 각 분야별 지수는 구성하고 있는 관리지표들을 통합하여 산정하고 다시 각 분야별 지수를 통합하여 물관리 탄력성 지수를 산정하였다.

3.2 물관리 탄력성 지수 산정

3.2.1 정규화

선정된 각 지표들은 크기와 단위가 다르기 때문에 서로 비교가능한 형태로 변환할 필요가 있다. 이러한 과정을 자료 정규화(Normalization)라고 하며 Ranking, Z-score, Min-Max, Distance to a reference country, Categorical Scales, Indicators above or below the mean, Cyclical Indicator, Balance of opinions 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Eq. (1)과 같이 Z환산법(Standardization 또는 Z-score)을 이용한 표준화 점수로 변환하였다. 단, 이 방법은 자료가 표준정규분포를 이루고 있다는 가정 하에 적용할 수 있으므로 각 지표를 구성하는 자료에 대하여 정규성 검정을 수행하였다. 일반적으로 많이 쓰이는 정규성 검정방법으로는 Kolmogorov-Smirnov (K-S) test, Shapiro-Wilk (S-W) test, Anderson-Darling (A-D) test, Lilliefors test, Ryan-Joiner (R-J) test 등이 있으며, 본 연구에서는 정확도가 높으면서 50~2000개의 자료일 때 추천되는 Anderson-Darling 방법을 적용하였다(Razali and Wah, 2011). A-D 검정은 경험적 누적분포함수(Empirical Distribution Function, EDF)에 기초한 검정법으로, 자료가 특정분포를 잘 따르는지의 여부

를 측정한다. A-D 검정법을 적용한 결과, 견고성 부지수의 지표인 수도요금과 하천개수율만 정규분포를 따르는 것으로 나타났다. 따라서 위 2개의 지표를 제외한 나머지 지표들은 Box-Cox 변환 후 정규성 여부를 재검토하였으며 Box-Cox 변환에도 정규성을 따르지 않는 100년 빈도 확률강우량, 논면적율, 인구밀도, 단위면적당 BOD 배출부하량, 수리전답 비율, 유지유량 만족도, 하수도 보급률, 목표수질 만족도, 추가수량 확보가능율, 생태자연도 면적율의 10개 지표는 Johnson 변환을 사용하여 표준정규분포로 변환하고 이를 다시 A-D검정을 수행함으로써 변환된 자료의 정규성을 확인하였다.

이와 같이 정규분포로 전환한 자료는 Eq. (1)에 의해 표준화된 자료로 변환함으로써 모든 지표를 상대적으로 비교할 수 있으며 Z값을 통해 특정 확률이 차지하는 비율을 판단할 수 있다.

$$\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_x} \tag{1}$$

여기서, i 는 각 중권역, Z_i 는 중권역 i 에 대한 해당 지표의 표준화된 값, X_i 는 중권역 i 에 대한 해당 지표의 값, \bar{X} 는 중권역 i 에 대한 해당 지표의 평균, 그리고 σ_x 는 중권역 i 에 대한 해당 지표의 표준편차를 의미한다.

3.2.2 가중치 부여

가중치는 지수를 구성하는 각 지표의 상대적인 중요도를 반영하기 위해 적용된다. 가중치는 최종 결과의 해석에 영향을 미치지만 현재까지 객관적인 해결방법이 발견되지 않았기 때문에 가중치 선정에 의한 차이는 지수 산정에 있어 주요한 결점 중 하나이다. 대체로 전문가나 지역주민 등의 선호도 조사를 통해 각 지표의 상대적인 중요도를 파악하고 이를 기초로 결정되는 방법이 사용되고 있으나 이는 주관적이고 임의적으로 선정되는 경향이 있다. 또한 이러한 방법을 이용한 결과와 동일 가중치를 적용한 결과의 차이가 거의 없는 것으로 보고되고 있으며 이는 실제 일본의 토지평가기준이나 우리나라의 산지전용기준 등과 같이 거의 대부분의 토지분류나 평가에서 쉽게 찾아볼 수 있다(Lim et al., 2010). 이러한 이유로 많은 연구에서 동일한 가중치가 자주 적용된 바 있다. 동일 가중치를 적용한 국외 관련지수로는 환경 지속성 지수(ESI)가, 국내 관련연구에서는 통합수자원평가지수(Lee et al., 2013), 홍수 위험지수(Lim et al., 2010) 산정시 동일 가중치를 적용한 바 있으며, 수자원의 지속가능성 평가지수에서는 AHP 기법을(Kang and Lee, 2006), 유역관리 평가 통합지수에서는 요인

Table 1. Indicators for water management resilience index

Sub-index		Indicator
Vulnerability (Natural condition)	Water use	Water demand sufficiency of precipitation (%) ^{1, 9)}
		Past limited water supply population ratio (%) ⁴⁾
		Water shortage prospect (m ³) ²⁾
	Flood mitigation	Occurrence frequency of heavy rain(more than 80mm) (%) ⁹⁾
		100-year return period probable precipitation amount (mm) ³⁾
		Urbanization rate (%) ¹⁰⁾
		Paddy area ratio (%) ¹⁾
		Population density (capita/km ²) ¹⁾
		Flood damage (10 ³ ₩) ¹⁾
		Past flooded area ratio (%) ¹¹⁾
	Past flood-population ratio (%) ¹¹⁾	
River environment	BOD pollution loads per unit area (kg/km ²) ¹⁾	
	T-P pollution loads per unit area (kg/km ²) ¹⁾	
Robustness (Existing infrastructure)	Water use	Water use reliance on external inflow (%) ¹⁾
		Water demand sufficiency of total water supply capacity (%) ¹⁾
		Irrigated paddy area ratio (%) ¹⁾
		Aged pipe ratio (%) ⁷⁾
		Capacity utilization of water supply facilities (%) ¹⁾
		Instream flow satisfaction (%) ⁵⁾
		Water rate (₩) ⁵⁾
	Flood mitigation	River improvement ratio (%) ¹⁾
		Subsidy for flood disaster recovery (₩) ¹¹⁾
	River environment	Sewer penetration (%) ⁸⁾
		Water quality target satisfaction (%) ⁶⁾
Redundancy (Future adaptability)	Water use	Water use reliance on auxiliary water resources (%) ¹⁾
		Additional water secure possibility (%) ⁵⁾
	Flood mitigation	Investment on structural measure against flood disaster (₩) ¹⁾
		Establishment of non-structural measure against flood disaster ¹⁾
	River environment	Aquatic ecosystem sanity ¹²⁾
		Class 1 area ratio on the ecological zoning map (%) ¹³⁾
		Algal and water quality forecasting or early warning system ⁶⁾

Data sources :

- 1) Water management information system (WAMIS)
- 2) National water resources plans (2011~2020)
- 3) Report on national monitoring of river basins
- 4) 2001 drought record monitoring report, performance report for overcoming 2008~2009 drought
- 5) Assessment, estimation and water securing measurement of instream flow considering natural and social improvement
- 6) Water information system
- 7) Statistics of waterworks
- 8) Statistics of sewerage
- 9) Korean meteorological administration (KMA)
- 10) Korean statistical information service (KOSIS)
- 11) National emergency management agency (NEMA)
- 12) Environmental analysis information system
- 13) Environmental geographic information service (EGIS)

분석을 적용하여 지표를 그룹화한 바 있다(Kang et al., 2008).

본 연구는 지류하천의 물관련 위기 적응력 및 다양한 물관리 해결방안과 사전예방능력을 평가하는 것을 목표로 하는 바, 견고성과 탄력성에 2, 취약성에 1의 가중치 시나리오를 적용했을 경우와 동일 가중치를 부여했을 경우를 비교하여 가중치 적용에 따른 민감도를 분석하였다.

3.2.3 (Aggregation)

지수는 다양한 지표로 구성되고 이를 결합하여 하나의 대표값으로 표현하게 된다. 따라서 어떠한 결합방법을 사용하는지도 가중치와 마찬가지로 최종 결과에 영향을 미치는 요인 중 하나이다.

일반적으로 여러 자료를 종합하여 하나의 지수로 표현할 때 많이 이용되는 방식은 가중치를 적용한 산술평균(Weighted Arithmetic Mean) 결합방식인 가중 합 방식(Weighted Sum Method)과 가중치를 적용한 기하평균(Weighted Geometric Mean)인 가중 곱 방식(Weighted Product Method)이 있다. Eq. (2)에 나타낸 바와 같이, 가중 합 방식은 각 지표의 정규화된 값에 가중치를 곱하고 모든 지표에 대하여 이 값을 더하는 방식(Additive Aggregation)이다. 동일한 가중치를 적용할 경우 단순 산술평균값을 취하는 것과 같으며, 물빈곤 지수(WPI), 환경지속성 지수(ESI), 환경성과 지수(EPI) 등에 사용되고 있다. 간단하고 이해하기 쉬워 널리 사용되고 있으나 반대적인 의미를 지닌 지표들이 결합될 경우 지표 점수가 서로 상쇄되어 최종 결과에 영향을 미칠 수 있다는 단점을 지닌다. 반면, 가중 곱 방식은 Eq. (3)에 제시한 것처럼 각 지표의 정규화 값에 그 지표의 가중치를 승하여 이 값을 모든 지표에 대하여 곱하는 방법(Multiplicative Aggregation)으로, 개별 지표의 점수가 서로 통합될 때 상쇄의 효과는 없으나 자료의 투명성은 감소될 수 있다. 지표 결합방식에 따른 지수 산정결과는 적용 대상지역이나 적용규모에 따라 영향을 받거나 그렇지 않을 수도 있으므로 민감성 분석이 선행되기도 한다(Singh et al., 2008; Garriga and Foguet, 2010).

$$I = \sum_{i=1}^n w_i Z_i = w_1 Z_1 + w_2 Z_2 + \dots + w_n Z_n \quad (2)$$

$$CI = \prod_{i=1}^n Z_i^{w_i} = Z_1^{w_1} \times Z_2^{w_2} \times \dots \times Z_n^{w_n} \quad (3)$$

여기서 CI는 통합 지수, n은 지수를 구성하는 지표의 개수,

Z_i 는 표준화된 지표값, w_i 는 가중치로 $\sum_{i=1}^n w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1$ 이다.

본 연구에서는 위 두 가지 방식을 혼합한 방식을 적용하였다. 즉, 이수, 치수, 하천환경 분야의 각각의 대표값을 산정할 때에는 가중 합 방식을 이용하였으며, 이 3가지 분야를 종합하여 취약성, 견고성, 다양성 부지수를 산정할 경우와 다시 이 3가지 부지수를 통합하여 최종적인 물관리 탄력성 지수를 산정할 경우에는 가중 곱 방식을 사용하였다. 이 방식은 인간개발지수(Human Development Index, HDI), 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI) 등의 산정에 활용되고 있으며, 국내 연구에서는 통합수자원평가지수(Lee et al., 2013) 산정에 활용된 바 있다. 또한 기하평균 또는 산술평균 방식만을 적용했을 경우와 비교하여 최종결과에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

3.2.4 지표별 평가등급 분류

기하평균 결합방식을 적용하여 물관리 탄력성 지수를 산정하기 위해서는 각 지표를 구성하는 자료들이 양수이어야 한다. 따라서 Z-score를 적용한 정규화 자료는 음수와 0을 포함한 자료가 있어 이를 그대로 적용할 수 없다. 또한 분야별 각 지표의 특성에 따라 부지수와 비례 혹은 반비례의 관계를 나타내므로 이들 관계에 기반하여 Yun (1999)이 제안한 구간별 점수 부여방법을 사용하였다. 그러나 Yun (1999)의 방법은 5단계로만 구분하므로 등급점수로 환산할 경우 자료의 왜곡을 초래할 수 있으므로, 본 연구에서는 지수의 범위를 20단계로 구분하고 각각의 등급에 대하여 5점에서 100점까지 5점 단위의 점수를 부여함으로써 자료의 왜곡을 최소화하여 자료를 변환하였다.

3.2.5 물관리 탄력성 지수 산정 함수

물관리 탄력성 지수를 산정하기 위해서는 각 이수, 치수, 하천환경 분야의 지표들을 통합하여 취약성, 견고성, 다양성의 3개 부지수를 산정하고, 다시 이들 부지수를 통합하여 물관리 탄력성 지수를 산정한다. 가중치는 3.2.3절에 제시한 바와 같이 동일한 값과 시나리오 값을 적용하여 가중치의 민감도를 분석하였으며 지수 통합방식은 가중 합 방법과 가중 곱 방법을 혼합하여 사용하였다.

$$Inerability \quad dex(VI) = \prod_{i=1}^3 VI^i = VI_{use}^{n_1} \times VI_{flood}^{n_2} \times VI_{env}^{n_3} \quad (4)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^{l_1} (w_{IV_i} \times Z_{VW_i}) \right]^{n_1} \times \left[\sum_{j=1}^{m_1} (w_{VIF_j} \times Z_{VIF_j}) \right]^{n_2} \times \left[\sum_{k=1}^{n_1} (w_{VIE_k} \times Z_{VIE_k}) \right]^{n_3}$$

$$\begin{aligned}
 \text{business} \quad dex(RoI) &= \prod_{i=1}^3 RoI^{\beta} = RoI_{use}^{\beta} \times RoI_{flood}^{\beta} \times RoI_{env}^{\beta} \\
 &= \left[\sum_{i=1}^{l_1} (w_{RoIU_i} \times Z_{RoIU_i}) \right]^{\beta} \times \left[\sum_{j=1}^{m_2} (w_{RoIF_j} \times Z_{RoIF_j}) \right]^{\beta} \times \left[\sum_{k=1}^{n_3} (w_{RoIE_k} \times Z_{RoIE_k}) \right]^{\beta}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Redundancy} \quad dex(ReI) &= \prod_{i=1}^3 ReI^{\gamma} = ReI_{use}^{\gamma} \times ReI_{flood}^{\gamma} \times ReI_{env}^{\gamma} \\
 &= \left[\sum_{i=1}^{l_1} (w_{ReIU_i} \times Z_{ReIU_i}) \right]^{\gamma} \times \left[\sum_{j=1}^{m_2} (w_{ReIF_j} \times Z_{ReIF_j}) \right]^{\gamma} \times \left[\sum_{k=1}^{n_3} (w_{ReIE_k} \times Z_{ReIE_k}) \right]^{\gamma}
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, I_{se} , VI_{flood} , VI_{env} 는 취약성 부지수의 이수, 치수, 하천환경 분야의 지수값이며, RoI_{use} , RoI_{flood} , RoI_{env} 와 ReI_{use} , ReI_{flood} , ReI_{env} 는 각각 견고성과 다양성 부지수의 3개 하위 분야의 지수를 나타낸다. w_{IU} , w_{VF} , w_{VE} 는 취약성 지수의 이수, 치수, 하천환경 분야의 가중치이며, 각 부문을 구성하는 지표 개수로 나눈 값으로 산술평균의 개념을 의미한다. w_{RoIU} , w_{RoIF} , w_{RoIE} 와 w_{ReIU} , w_{ReIF} , w_{ReIE} 는 견고성 지수와 다양성 지수의 3개 분야별 가중치이다. 또한 Z_{VI} , Z_{ReI} , Z_{RoI} 는 취약성, 견고성, 다양성 부지수를 구성하는 지표별 표준화된 값을 나타내며 l, m, n 은 이수, 치수, 하천환경 분야의 부지수를 구성하는 관리지표의 개수, α, β, γ 는 부지수별 가중치이다.

위와 같이 산정된 각 취약성, 견고성, 다양성 부지수는 동일 가중치 및 시나리오에 의한 가중치를 적용한 기하평균 결합형 식으로 물관리 탄력성 지수로 통합된다. 이때, 각 부지수는 5~100의 범위를 가지므로 물관리 탄력성 지수가 0~100의 범위를 갖도록 Eq. (7)과 같이 조정하였으며, 또한 취약성이 높을수록 탄력성 지수가 낮으므로 다른 부지수와의 관련성을 고려하여 (105-취약성 부지수)로 계산되도록 하였다. 물관리 탄력성 지수는 100에 가까울수록 탄력성이 높다는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 \text{Water Management Resilience} \quad dex(WMRI) \\
 = [(105 - VI)^{\alpha} \times RoI^{\beta} \times ReI^{\gamma} - 5] \times 100/95
 \end{aligned} \tag{7}$$

4. 적용 및 결과

4.1 중권역 구분

개발된 물관리 탄력성 지수는 국가 표준유역 분할 체계인 수자원단위지도의 117개 중권역에 적용하여 산정하였다. 그러나 117개 중권역이 모두 지류 증소하천 유역에 해당하는 것은 아니어서, 크게 분류 및 지류 유역으로 구분하고, 지류유역은 다시 상류로부터 유량 조절이 가능한 다목적댐이나 용수전

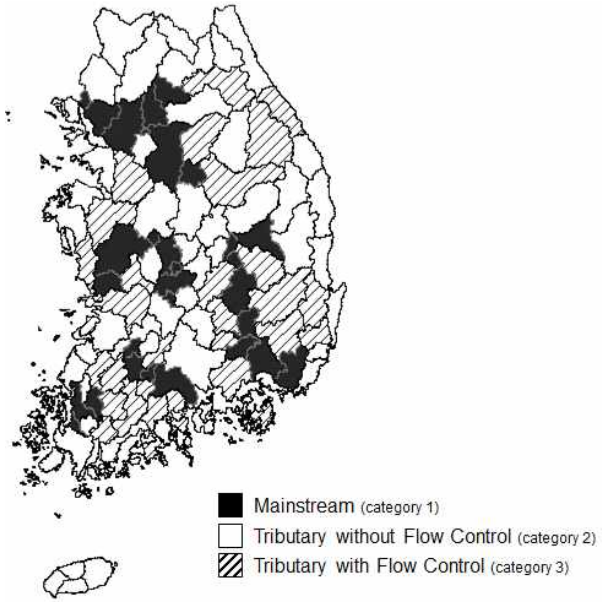


Fig. 1. Classification of sub-basins

용댐, 저수용량 100만 m³ 이상에 해당하는 농업용댐이 있는 유역과 없는 유역으로 구분하였다.

또한 발원지와 상관없이 다목적댐 하류유역을 분류로 가정하였으며(범주 1), 지류 유역 중 상류에 댐이 없는 경우를 범주 2, 댐이 있는 경우를 범주 3으로 구분하고, 분류와 지류, 댐에 의해 유량이 확보된 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 비교분석하였다(Fig. 1). 이때, 금강산댐, 고미탄천 중권역은 북한지역에 포함되므로 분석에서 제외하였다.

4.2 가중치 변화에 따른 결과 비교

취약성, 견고성, 다양성 부지수별 동일한 가중치를 부여하였을 경우와 물관리 정책결과를 나타내는 견고성 및 다양성 부지수에 높은 가중치를 부여했을 경우를 비교하여 가중치가 탄력성 지수 결과에 미치는 영향을 분석하였다. Table 2에 제시된 바와 같이, 수계권역 및 중권역 범주별 순위에는 변화가 없는 것으로 나타났다. 중권역별 개별 순위는 약간의 변동이 있었으나 가중치를 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 때의 평균 순위변동폭은 5로 나타나, 가중치가 탄력성 지수에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 판단하여 본 연구에는 동일 가중치를 적용한 결과를 채택하였다. 향후 주성분 분석(Principal Component Analysis)나 요인 분석, 설문조사를 통한 AHP 분석 등이 추가된다면 정밀한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Comparison of resilience index between applying equal weight and scenario weight

(a) Resilience index in each river basin

Basin	Index	Resilience Index	
		Equal weight	Scenario weight
Han river		54.3	51.1
Nakdong river		52.6	48.9
Geum river		51.8	48.0
Seomjin river		49.4	45.7
Youngsan river		42.4	38.7
Jeju		60.0	55.6

(b) Resilience index in each category of sub-basins

Category	Resilience index	
	Equal weight	Scenario weight
1	58.3	55.1
2	47.3	43.3
3	52.3	48.9

4.3 수계권역별 비교

Fig 2에서 보는 바와 같이, 중권역별 물관리 탄력성 지수가 산정되었으며, 이때 상위 20%, 40%, 60%, 80%, 80% 초과 의 5단계로 나누어 탄력성 지수의 분포를 구분하여 나타내었다. 탄력성 지수를 구성하는 취약성, 견고성, 다양성 부지수 결과 도 Fig. 2에 함께 제시하였다. Table 3에서 제시된 바와 같이, 수계권역별 물관리 탄력성 지수는 제주도가 60.0로 가장 높게 산정되었으며, 그다음이 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 의 순으로 나타났다. 특히, 영산강은 타 권역에 비해 비교적 큰 차이를 보이고 있는 바, 이는 권역 내 다목적댐이 없어 여러 가지 물관리의 어려움을 겪고 있는 현실이 잘 반영된 결과라고 판단되었다. 부지수별로 비교하였을 때 취약성도 영산강 권역이 가장 높고, 견고성이나 다양성 측면에서도 가장 낮은 지수 값을 나타내고 있다.

자연적 조건을 나타내는 취약성 부지수의 경우 28.6-45.9 로 범위를 보였으며, 강수량이 많은 제주도 권역의 경우 매우 취약한 것으로 나타났다. 견고성이나 다양성 측면에서 보면 다소 특수한 경우인 제주도 권역을 제외하고 수도권이 위치하고 있는 한강권역의 지수가 타 권역에 비해 상대적으로 크게 산정되어 지금까지의 물관리 투자와 다양성 확보를 위한 노력이 한강권역에 집중되어 왔음을 확인할 수 있었으며, 그다음으로 낙동강, 금강, 섬진강, 그리고 다소 큰 차이를 가지고 영산 강의 순으로 산정되었다.

Table 4은 수계권역별로 분류가 위치한 주권역과 대부분

바다로 바로 유입되는 주권역 외부의 물관리 탄력성 지수 산 정 결과이다. 제주도 권역을 제외하고 주권역내가 주권역외 보다 물관리 탄력성 지수가 높게 산정되었다. 그러나 한강과 낙동강수계의 경우 견고성은 주권역외가 다른 수계보다 다소 높게 산정되었는데, 이는 한강수계의 인천, 시화지구가 포함 된 한강서해 중권역과 낙동강수계의 울산, 포항 등 주요 산업 단지가 위치한 형산강, 그리고 태화강 중권역에서는 그 중요 성에 따라 물관리 투자가 상당히 이루어져 왔음을 보여주고 있다.

4.4 중권역 범주별 비교

Table 5에서 보는 바와 같이 분류에 해당하는 범주 1의 물관 리 탄력성이 지류 중소하천에 해당하는 범주 2 또는 3에 비해 월등히 높게 산정되었다. 또한 하천 유량의 조절이 가능한 범 주 3이 범주 2에 비해 높은 물관리 탄력성을 갖는 것으로 나타 났다.

취약성 및 견고성에 있어서는 그다지 큰 차이를 나타내지 않았으나, 다양성 부지수에 있어서는 분류 유역인 범주 1이 범 주 3 및 범주 2에 비해 월등히 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

다양성에 있어서는 범주 2 또는 3의 이수 및 치수 분야의 지표 값들이 범주 1에 비해 상당히 낮게 산정되어 물관리 탄력 성 전체의 값을 낮추는 것으로 분석되었다. 한편, 범주 2는 하 천환경의 취약성에 있어서는 범주 1에 비해 상대적으로 큰 편 차를 보이고 있다(Table 6).

또한 Fig 2에 제시된 다양성이 낮은 하위 20%의 중권역을 살펴보면 부남방조제 등 도서지역 또는 바다로 직접 유출되는 유역이 대부분을 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

4.5 지류 중소하천의 물관리 탄력성

본 연구의 대상인 지류 중소하천은 분류에 비해 물관리 탄 력성이 떨어지는 것으로 평가되었으며, 지류 중소하천 중에 서도 상류에 유량조절이 가능한 시설이 없는 경우가 있는 경 우보다 물관리 탄력성이 떨어지는 것으로 평가되었다. 특히, 이수 및 치수 분야의 다양성이 상대적으로 매우 낮은 것으로 평가되었다. 이는 현재 물관리에 어려움이 없다고 할지라도, 물관련 위기가 갑작스레 닥쳤을 경우 대처할 수 있는 역량이 나 정책 대응 전략이 부족함을 의미하므로 지류 중소하천의 물관리 탄력성을 높이기 위해서는 특히 이수 및 치수 분야의 다양성을 높이는 방향으로 물관리 정책이 수립되어야 한다.

이수분야에 있어서 신규 댐의 건설이 입지적 측면이나 사 회 경제적 측면에서 어려운 상황에서는 보조수자원, 즉, 지하 수 및 지하댐, 해수담수화 시설의 확보와 더불어, 농업용댐 등

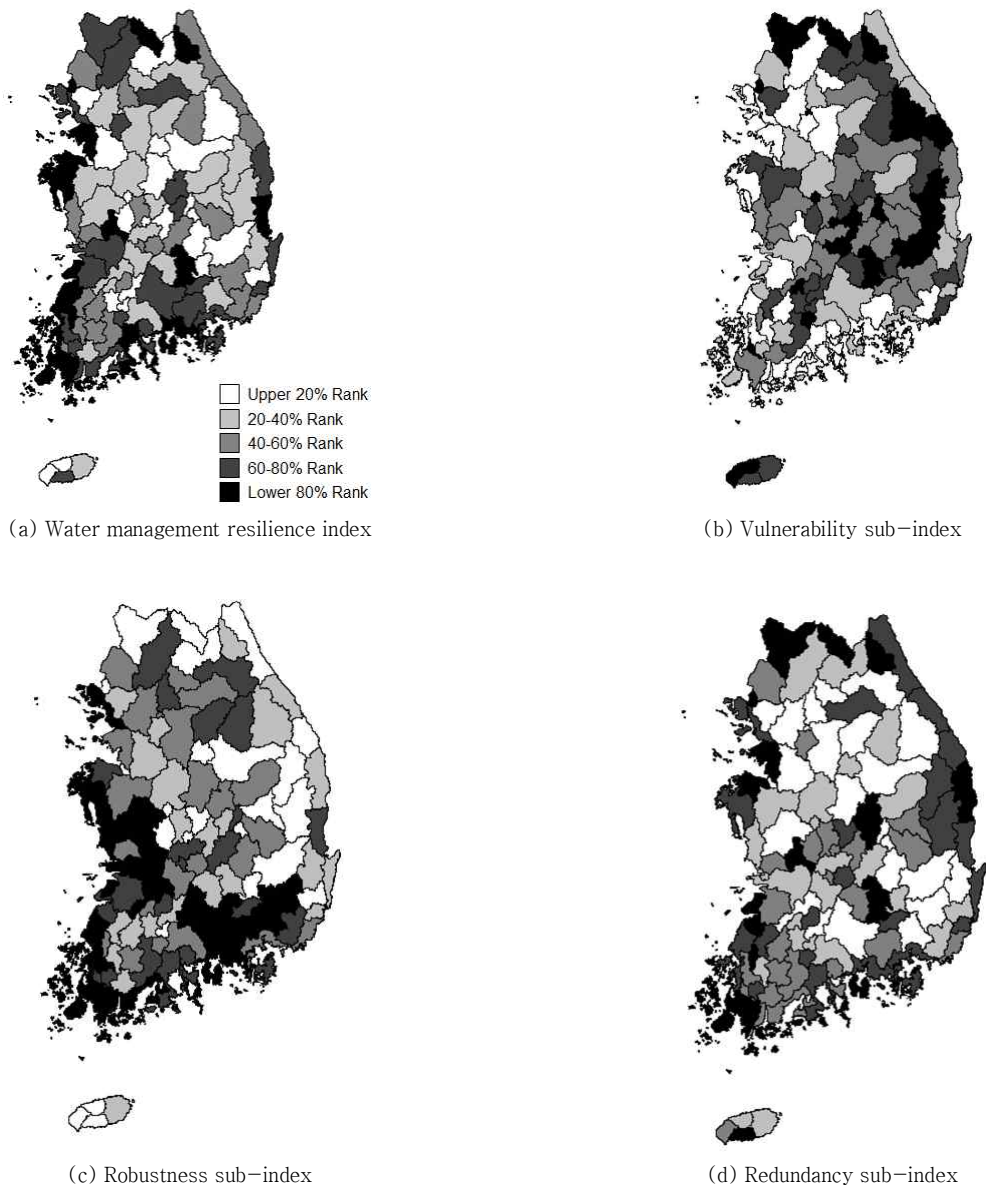


Fig. 2. Results of water management resilience index

Table 3. Results of water management resilience index in each river basin

Basin \ Index	Resilience	Vulnerability	Robustness	Redundancy
Han river	54.3	40.0	51.1	46.6
Nakdong river	52.6	39.1	48.2	42.2
Geum river	51.8	38.8	45.0	42.5
Seomjin river	49.4	42.7	42.2	40.7
Youngsan river	42.4	45.9	38.5	30.7
Jeju	60.0	28.6	61.5	41.1

Table 4. Comparison of water management resilience index between inside and outside of main river basins

Basin	Sub-Index	Inside of main basin				Outside of main basin			
		Resilience	Vulnerability	Robustness	Redundancy	Resilience	Vulnerability	Robustness	Redundancy
Han river		55.4	38.6	50.6	49.7	50.0	45.2	52.8	35.3
Nakdong river		55.0	36.7	48.3	46.9	47.9	44.2	47.9	32.7
Geum river		56.3	36.0	50.1	45.9	42.9	44.4	34.7	35.6
Seomjin river		57.5	33.7	47.0	50.5	37.3	56.2	35.0	26.0
Youngsan river		49.7	44.9	46.6	39.0	32.6	47.2	27.7	19.6
Jeju		60.0	28.6	61.5	41.1				
Average		55.7	36.4	50.7	45.5	42.1	47.4	39.6	29.8

Table 5. Results of water management index in each category of sub-basins

Category	Resilience	Vulnerability	Robustness	Redundancy
1	58.3	37.6	49.3	54.3
2	47.3	41.0	46.5	32.8
3	52.3	41.5	45.0	45.3

Table 6. Comparison of sub-indices in each sector of sub-basin category

Sub-index	Sector	Sub-basin category			Difference
		1	2	3	
Vulnerability	Water use	31.9	38.5	29.6	8.9
	Flood mitigation	49.5	46.6	52.3	5.6
	River environment	46.5	44.8	58.9	14.1
Robustness	Water use	49.7	47.7	50.1	2.3
	Flood mitigation	55.3	47.2	44.6	10.7
	River environment	48.6	48.4	46.9	1.7
Redundancy	Water use	61.9	41.9	44.6	20.1
	Flood mitigation	62.5	30.9	55.9	31.5
	River environment	46.2	38.2	46.5	8.3

기존 댐의 재평가를 통한 저수용량의 확대와 천변저류지, 수리권 조정은 물론 광역상수도 또는 도수관로를 이용한 타 수계로부터의 용수 유입 시설 등을 유역의 특성에 맞추어 검토하여 설치할 수 있을 것이다.

치수분야의 다양성 확보를 위해서는 천변저류지 등을 이용한 홍수조절용량의 확보, 재해위험지구 지정을 통한 지역 특성에 맞는 홍수피해저감 대책 수립, 지자체별 홍수재해관리 시스템 구축을 통해 예경보와 신속 대응을 할 수 있는 비구조적 대책의 적용이 바람직 할 것이다.

특히, 금강, 섬진강, 영산강주권역 외의 지류, 즉 주로 바다로 유입되는 단독 수계인 경우 주권역에 속한 지류하천보다 탄력성이 낮은 것으로 나타났다. 이는 주권역에 속한 지류는 본류와 연계되어 물관리가 이루어지거나 인프라가 건설된 경

우가 많아 견고성이 도서지역 지류에 비해 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이 지역들은 자연적인 취약성은 차별되지 않지만, 안성천, 형산강, 태화강과 같은 한강과 낙동강의 주권역 외 지류에 비해 물공급 인프라 구축이나 정책적인 지원 등이 미흡하여 물 위기가 발생하였을 경우 피해가 클 것으로 예상되므로 앞으로 도서지역 지류에 대한 물관리 투자가 우선될 필요가 있다. 그러므로 물관리 탄력성이 낮은 것으로 평가된 서해와 남해의 도서지역 지류 및 일부 지류하천에 대해서는 필요시 인근 하천 본류와 연계하여 안정적인 물공급 대책을 마련하거나 해수담수화 등 보조 수자원을 개발함으로써 물위기에 대응하기 위한 사전대응능력을 향상시키는 노력이 이루어져야 하겠다.

본 연구에서는 자연조건의 취약성, 물관리 인프라 구축의

견고성, 그리고 다양한 물위기 대응정책 확보를 주요 인자로 선정하여 중권역별 물관리 탄력성을 평가하였다. 그러나 지역사회 및 이해관계자와의 거버넌스 구축 노력 등과 같은 인문학적 요소는 못하였다. 물관리에 있어 거버넌스의 역할이 점차 증대되고 있는 추세를 미루어볼 때(OECD, 2014; OECD, 2015), 향후 관련 자료가 구축된다면 지류하천 물관리의 취약성을 좀더 정확히 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

대하천 분류에 비해 상대적으로 물관리의 취약성이 높은 지류 중소하천의 미래 물관리 정책 방향을 수립하는데 유용한 자료로써 지류 중소하천의 물관리 탄력성 지수를 개발하고 이를 국가 표준유역 분할체계인 수자원단위지도의 117개 중권역에 적용하였다. 물관리 탄력성 지수는 취약성과 견고성, 다양성의 3개 부지수로 구성하였으며, 각각의 부지수는 다시 이수, 치수, 하천환경 분야의 지표들로 구성하여 총 31개의 지표항목으로 구성하였다.

117개의 중권역은 다목적댐 하류 본류유역(범주 1)과 지류유역으로 구분하였으며, 지류 유역은 다시 상류에 용수공급 및 유량조절이 가능한 유역(범주 3)과 그렇지 않은 유역(범주 2)으로 구분하였다.

수계권역별 물관리 탄력성 지수 산정 결과, 100을 기준으로 하였을 때 제주도가 57.5로 가장 높게 산정되었으며, 한강, 낙동강, 금강, 섬진강 수계의 순으로 45.9~49.7의 분포를 보였고, 영산강 수계는 38.9로 상대적으로 큰 차이를 가지고 최하위를 차지하였다. 특히, 다양성에 있어서 타 수계에 비해 큰 차이를 가지고 최하위로 분석되었는 바, 이는 수계내 다목적댐이 없어 여러 가지 물관리 어려움을 겪고 있는 현실이 잘 반영된 결과인 것으로 판단되었다.

유역 범주별 비교결과는 본류에 해당하는 범주 1의 물관리 탄력성이 지류 중소하천에 해당하는 범주 2 또는 3에 비해 월등히 높게 산정되었으며, 또한 지류 유역중에서 용수공급 및 하천유량 조절이 가능한 범주 3이 범주 2에 비해 높은 물관리 탄력성을 갖는 것으로 나타났다. 특히, 미래 물관리 재해나 사고시 대응할 수 있는 예비 능력을 나타내는 다양성 지수에 있어서 지류 중소하천에 해당하는 범주 3 및 2가 본류인 범주 1에 비해 상대적으로 큰 차이를 보이며 낮게 분석되었다.

또한 서해 및 남해의 단독 지류하천이 주요 권역에 속한 지류하천보다 탄력성 지수가 낮아 이 지역에 대한 물관리 대책이 우선될 필요가 있다.

따라서 지류 중소하천의 물관리 탄력성을 높이기 위해서는 특히 이수 및 치수 분야의 다양성을 높이는 방향으로 물관리 정책이 수립되어야 한다. 다양한 보조수자원의 개발 및 기존 시설물의 재평가, 수리권 조정을 통한 하천수이용 효율성 향상, 그리고 타 수계와의 연계를 통한 안정적인 용수 확보 대책과 더불어 지역 특성에 맞는 홍수피해저감 대책의 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Asian Development Bank (2013). *Asian Water Development Outlook 2013: Measuring Water Security in Asia and the Pacific*. Mandaluyong City, Philippines.
- Choi, D.J., Park, D.H., and Kim, S.M. (2009). "Development of Water Policy Indicators : Water Use Indicators." *Journal of Wetlands Research*, Korean Wetlands Society, Vol. 11, No. 3, pp. 153-160.
- Esty, D.C., Levy, M.A., Srebotnjak, T., and de Sherbinin, A. (2005). *2005 Environmental Substantiality Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*. Yale Center for Environmental Law and Policy, New Haven, CT.
- Garriga, R.G., and Foguet, A.P. (2010). "Improved Methods to Calculate a Water Poverty Index at Local Scale." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 136, No. 11, pp. 1287-1298.
- Kang, M.G., and Lee, G.M. (2006). "Development of Assessment Index for Water Resources Sustainability and Weights Evaluation of its Components." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 1, pp. 59-68.
- Kang, M.G., Lee, K.M., Ko, I.H., and Jeong, C.Y. (2008). "Development of a Integrated Indicator System for Evaluating the State of Watershed Management in the Context of River Basin Management Using Factor Analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 3, pp. 277-291.
- Lee, D., Choi, S.J., and Moon, J.W. (2013). "Development of Integrated Water Resources Evaluation Index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 10, pp. 1017-1028.
- Lim, K.S., Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2010). "Development of Flood Risk Index Using Casual Relationships of Flood Indicators." *Journal of the Korean Society of*

- Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30 No. 1B, pp. 61-70.
- MCT (Ministry of Construction and Transportation). (2002). *2001 Drought Record Monitoring Report*.
- ME (Ministry of Environment). (2014a). *2013 Statistics of Water-works*.
- ME (Ministry of Environment). (2014b). *2013 Statistics of Sewerage*.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2007-2011). *Assessment, Estimation and Water Securing Measurement of Instream Flow Considering Natural and Social Improvement*.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2011). *National Water Resources Plan(2011-2020)*.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) and K-water. (2012). *Report on National Monitoring of River Basins*.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., and Giovannini, E. (2005). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Statistics Working Paper, OECD, Statistics Directorate, Paris.
- NEMA (National Emergency Management Agency). (2005-2014). *Yearbook of Natural Disaster*.
- NEMA (National Emergency Management Agency). (2009). *Performance Report for Overcoming 2008-2009 Drought*.
- OECD. (2014). *The Governance of Water Regulators : OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy*. OECD Publishing.
- OECD. (2015). *Stakeholder Engagement for Inclusive Water Governance, OECD Studies for Water*. OECD Publishing, Paris.
- Park, J.E., Kim, J., Kim, H.S., and Koh, D.K.. (2013). "Resilience, Resilient Water Management and Water Security-1. Concept of Resilience and Appearance of Resilient Water Management." *Water for Future*, KWRA, Vol. 46, No. 5, pp. 55-64.
- Razali, N.M., and Wah, Y.B. (2011). "Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests." *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, Vol. 2, No. 1, pp. 21-33.
- Singh, R.P., Nath, S., Prasad, S.C., and Nema, A.K. (2008). "Selection of Suitable Aggregation Function for Estimation of Aggregate Pollution Index for River Ganges in India." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 451-455.
- Sullivan, C.A., Meigh, J.R., Fediw, T. (2002). *Developing and Testing the Water Poverty Index: Phase I Final Report*. Report to Department for International Development. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, U.K.
- Wang, C.H., Blackmore, J.M., Wang, X., Yum, K.K., Zhou, M., Diaper, C., McGregor, G.B., and Anticev, J. (2009). *Overview of Resilience Concepts, with Application to Water Resources Systems*. eWater CRC Technical Report, eWater CRC, Canberra, pp. 3-11.
- Yun, H.Y. (1999). *Development and Application of Environmental Indicators of Incheon*. Incheon Development Institute. pp. 1-51.