

# 이수평가지수 개발을 통한 유역별 물이용 특성 평가

백승협 · 최시중+

한국건설기술연구원 수자원연구실

## Evaluation of Basin-Specific Water Use through Development of Water Use Assessment Index

Seung Hyub Baeck · Si Jung Choi+

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyangsi, Gyeonggido, Korea

### 요 약

본 연구에서는 물이용특성을 평가할 수 있는 세부지표 및 주제별 중간지수를 과거자료 분석과 요인분석을 통하여 선정하고 주제접근방식의 구성체계로 구성하였다. 또한 이를 종합하여 유역의 물이용 특성을 평가할 수 있는 통합지수(이수취약성지수)를 개발하였다. 개발된 지수를 이용하여 1990년부터 2007년까지의 유관기관의 자료를 활용하여 북한을 제외한 812개의 표준유역에 대해 물이용 특성을 평가하였다. 지표산정에 있어 여러 표준화 및 가중치부여 방법 중 타당한 방법을 찾고자 민감도 분석을 실시하였으며 개발된 지표의 객관성을 높이고자 물이용 특성을 평가하기 위해 개발된 다른 지표와는 달리 피해이력을 세부지표에서 제외하였다. 또한 실증적인 지표 및 지수 개발과 신뢰성을 확보하기 위하여 피해이력 유무에 따른 결과 비교·분석과 2008년 강원지역에 현장 적용성 검토를 수행하였다. 이와 같은 지수의 검증 과정을 통하여 세부지표의 선정과 지수 산정 방법 및 산정식의 타당성을 확인하였다. 본 연구의 결과는 유역의 물이용 관련 취약성을 시·공간적으로 분석하고 이에 대한 관련 정보를 다양하게 제공함으로써 물이용 관련 사업이나 정책의 우선순위 결정, 취약부분에 대한 보완책 마련 등의 대책 및 수립을 지원하는 등 다양한 부분에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 지표, 지수, 물이용관리, 물이용취약성

### Abstract

In this study, sub-indicators, and thematic mid-indexes to evaluate the water use characteristics were selected through historical data analysis and factor analysis, and consisted of the subject approach framework. And the integrated index was developed to evaluate water use characteristics of the watershed. Using developed index, the water use characteristics were assessed for 812 standard basins with the exception for North Korea using data of 1990 to 2007 from the relevant agencies. A sensitivity analysis is conducted for this study to determine the proper way through various normalization and weighting methods. To increase the objectivity of developed index, the history of the damage indicators are excluded in the analysis. In addition, in order to ensure its reliability, results from index with and without consideration of the damage history were compared. Also, the index is also applied to real data for 2008 Gangwon region to verify its field applicability. Through the validation process this index confirmed the adequacy for the indicators selection and calculation method. The results of this study were analyzed based on the spatial and time vulnerability of the basin's water use, which can be applied to various parts such as priority decision-making for water business or policy, mitigations for the vulnerable components of the basin, and supporting measures to establishment by providing relevant information about it.

**Keywords** : indicator, index, water use management, water use risk

## 1. 서론

과거에 비하여 국민의 생활수준이 향상되고 사회가 발전함에 따라 물의 소비량은 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 이용 가능한 수자원은 한정되어 있고 지역적인 편차도 심하게 나타나 물 부족으로 인하여 많은 문제가 발생하고 있다. 또한 기후변화 등에 의한 주기

적인 가뭄발생으로 농작물피해, 제한급수, 지역적 물 부족 심화, 하천의 건천화 등 물이용 관련 피해가 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하고 한정된 수자원의 효율적 활용과 관리 및 장래의 물 수요에 효과적으로 대처하기 위해서는 피해의 일부분을 고려한 대책수립보다는 통합적인 유역관리 및 지역적 특성을 고려한 수자원 관련 계획이 필요하다. 유역의 수자원 관련 현황을 평가

+ Corresponding author : sjchoi@kict.re.kr

하고 시행된 관련 정책 및 행위 등의 효과를 판단하기 위한 명확한 기준이 있어야 한다. 이와 같은 평가 기준을 위하여 지표를 활용함으로써 그 목적을 달성할 수 있고 지표의 산정결과를 제시함으로써 이해당사자들의 의사결정을 위한 유용한 정보를 제공할 수 있다.

지표개발의 연구는 1990년대부터 그 필요성이 강조되면서 지표개발 방법론 전문가 워크숍을 개최하는 등 최근까지 활발히 진행 중에 있다. 개발된 물이용 관련 지표들 중 국외연구 사례를 보면, Falkenmark et al.(1989)의 연구에서는 1인당 이용할 수 있는 재생가능수자원량을 이용하여 WSI(Water Stress Index)를 개발하고 물 부족을 평가하였다. WSI는 계산이 간단하고 이해가 쉬워 국가 간 비교에도 사용되지만 강수량과 인구밀도로 지표가 결정되기 때문에 정책적 적용이 어려우며, 사회·경제적인 측면 등을 고려하지 못한다. Ohlsson(1999)은 WSI를 UNDP의 인간발전지수(Human Development Index, HDI)를 사용하여 수정하였으며 이를 SWSI(Social Water Stress Index)라 명명하였다. Raskin et al.(1997)의 연구에서는 이용가능한 수자원 중 실제 취수하는 양의 비율로 WRVI(Water Resource Vulnerability Index)를 제시하였다. 그러나 이러한 지표는 물의 재순환을 고려하지 못하고 물 압박에 대응하는 사회적 적응역량을 고려하지 않는다. Allan(1997)은 제품, 식량 생산에 필요한 물의 양을 가상수(virtual water)라는 이론을 정립하여 제시하였으며, 이는 생산에 들어가는 물의 양을 계산한 지표라 할 수 있다. Sullivan(2002)은 물 부족에 영향을 미치는 물리적, 사회·경제적인 인자들을 근거로 WPI(Water Poverty Index)를 개발하여 나라별 물 부족상태를 상대적으로 평가하였다.

국내에서도 물 부족 지수와 관련하여 Lim et al.(2005)의 연구에서는 한강유역에 대해서 물 부족 지수를 산정하여 적용시킨 사례가 있으며, Choi and Lee(2005)의 연구에서는 WPI에서 제시된 세부지표를 검토하여 국내 실정에 적합하도록 재구성하여 행정구역별 지속가능한 수자원개발과 관리에 대한 지표를 개발하였다. Hong et al.(2011)의 연구에서는 물 빈곤지수에 지역적 기후변동성 및 지역별 특성인자를 고려한 지수를 개발하여 국내에 적용하였다. Choi et al.(2009)의 연구에서는 유역의 물이용 특성을 평가하기 위해 개별지표를 압력-현상-대책 구조체로 구성하였으며 종합적인 현황을 파악할 수 있는 물이용 취약지수를 개발하였다. 그 밖에 수자원 평가를 위한 개별지표뿐만 아니라 통합지표 연구도 활발히 이루어지고 있으며 물이용, 치수, 하천환경 분야별 평가를 위한 지표 및 통합지수 개발 등의 노력이 있었다(MOCT, 2007; MLTM, 2008, 2009). Kang et al.(2008)의 연구에서는 유역관리를 위하여 한강유역의 이수, 치수, 환경의 상태를 평가하는 유역관리 평가지수를 개발하였으며, 최근 NIER(2012)에서는 전국 232개의 시군구별 맞춤형 기후변화 적응대책 수립을 위하여 GIS

기반 기후변화 적응도구(Climate Change adaptation toolkit based on GIS, CCGIS)를 개발하였다. CCGIS는 보건, 산림, 생태계, 물 관리, 농업, 해양/수산, 재해 등 7개 부문 32개 항목을 대상으로 실시하였고 이수 취약성을 현재 및 향후 취약성 경향을 정량적으로 분석하였다. 그러나 취약성을 절대 값으로 제한하였으므로 대응변수, 세부 항목 간의 비교가 어려우며 물 관리 특성을 고려한 유역 단위의 분석이 아닌 행정구역 단위의 취약성 평가라는 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 피해이력과 관련 기초 자료의 통계분석을 통하여 인자를 추출하고 유역단위의 분석을 위한 국내에 적합한 물이용 관련 평가지수를 개발하고자 한다. 개발된 지표 및 지수는 물이용 관련 현황 파악과 향후 수자원 계획 수립 및 관련 사업의 우선순위 결정 지원 등에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

## 2. 지표 개발의 필요성

### 2.1 기존 지표의 시사점

유역의 수자원 현황을 파악하고 특성을 평가하기 위하여 그동안 많은 지표개발의 노력이 있어왔다. 기존 선행연구에서 개발된 다양한 지표들을 검토하여 한계 및 시사점을 분석한 결과 다음과 같다. 첫 번째, 지표의 구성체계를 인과관계를 통하여 압력(pressure)-현상(state)-대책(response) 구조를 이용한 경우가 많다. PSR 구성체계는 각각의 지표가 어느 구성체계에 속하는지 명확히 구분하기 어려우며, 지표들 간의 인과관계가 복잡하게 얽혀 있고 인과관계를 가진 모든 지표를 고려하기에는 무리가 있어 최근 국외에서는 주제접근방식을 주로 이용하고 있는 실정이다. 두 번째, 선행연구의 경우 개발된 지표를 제시하는 수준에 그치는 경우가 많으며, 분석한 결과를 토대로 실제 현상과 비교하는 최종적인 검증이 이루어지지 않아 지표의 활용성 및 신뢰성이 떨어지는 한계점을 가지고 있다. 세 번째, 국내에서 제시되고 있는 통합지수의 경우 각 세부지표의 표준화 및 집계하는 과정에서 각 세부지표들의 특성이 결여되는 경향이 있다. 통합지수의 결과는 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있으나 보다 합리적이고 지속가능한 수자원관련 정책 및 계획을 수립하기 위해서는 가능한 모든 지표의 변화에 대한 분석결과를 포함시켜야 한다. 마지막으로, 지표 선정에 있어서 전문가들의 의견만을 수렴하여 지표를 선정하는 경우가 대부분이며 이는 참여한 전문가들의 관심분야 및 관점에 따라 많은 견해 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 전문가들의 의견을 수렴한 지표를 잠재지표로 선정하고 물이용 특성을 평가할 수 있는 모든 지표를 고려하여 추가적인 통계분석을 통한 최종적인 세부지표를 선정하고자 하였다.

## 2.2 국외 지표의 국내 적용성 평가

국제기구 및 국외에서 개발된 수자원 관련 지표들은 대부분 국가 간 비교를 통하여 상대적으로 취약성이 큰 나라에 대한 자국민의 경각심을 불러일으키고 이들 나라에 대한 국제적인 지원을 목적으로 개발된 것들이다. 따라서 이들 지표를 국내에 적용하는데 있어 지표의 개발 목적이 다를 뿐만 아니라 적용공간이 상이하어 국내 유역별 특성을 반영하는데 한계가 있다. 또한 지표산정에 이용되는 기초자료들에 대해 국내에서 유역별로 자료를 제공하지 않는 경우가 있어 지표산정의 불확실성이 크다.

Sullivan and Meigh(2005)의 연구에 따르면 지역적 특성 및 기후변동성을 평가하기 위해서는 그 지역에 맞는 세부항목을 추가로 고려할 필요가 있다고 강조한 바 있다. 국제기구 및 국외에서 개발된 지표를 통해 국내 유역의 특성을 평가하기 위해서는 지역적 특성을 반영할 수 있는 세부항목을 추가해야 하며, 또한 적절한 공간적 범위를 설정해야 한다. 따라서 국제기구 및 국외에서 개발된 지표를 그대로 국내에 적용하기보다는 지역별 특성을 적절히 반영할 수 있는 지표를 개발하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

## 3. 지표 선정

### 3.1 국내자료 제공 현황 조사 및 DB 구축

유관기관(국토해양부, 환경부, 행정안전부, 농림수산식품부 등)별 제공하고 있는 자료들과 각종 보고서 등에서 제시하는 자료들은 각각 목적, 방법, 조사시기, 공간범위 등이 다르며 이러한 자료들을 시·공간적으로 표준화하여 DB를 구축할 필요가 있다. 강우자료와 같은 시간단위부터, 통계연보와 같이 연단위로 제공하는 자료들에 대해 시간적 표준화가 필요하며, 본 연구에서는 수집한 자료들의 시간범위를 통일시키기 위하여 1990년부터 2007년까지 연단위로 자료를 구축하였다. 자료추정시기와 함께 상이한 자료의 공간적인 범위도 표준화 작업이 필요하

며 모든 자료는 유역단위 분석을 위하여 전국에 대해 표준유역단위로 구축하였다. 행정구역으로 제공하는 자료에 대하여는 조사·수집 가능한 최소단위의 행정구역 자료를 이용하였으며 표준유역으로의 변환은 인구 및 면적 변환비를 적용하여 수행하였다.

### 3.2 과거 데이터 분석

물이용 관련 취약성 평가를 위한 통합지수 개발에 있어서 우선적으로 물이용에 영향을 미치는 잠재지표의 선정이 필요하다. 잠재지표의 선정은 구축한 DB를 통해 선정할 수 있는 모든 지표를 잠재지표로 우선적으로 선정한 후 통계분석을 통해 이차적인 잠재지표를 선별하였다. 가뭄피해는 그 형태가 상이하며 피해가 발생하는 메커니즘이 워낙 복잡하고 다양하여 발생요인들을 정확히 파악하기에는 많은 제약과 한계가 따른다. 이에 몇 가지 핵심적인 요인들로 단순화된 모형을 구축하고 이를 통해 전체의 메커니즘을 이해하는 것도 중요한 의미를 가진다(Choi, 2004). 과거에 발생한 가뭄피해의 주요 요인들은 살펴보면 기상요인, 수문요인, 사회·경제 요인 등 다양하게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 물이용 관련 피해 즉 가뭄피해의 정량적 인자를 도출하기 위하여 주요 요인들을 설명할 수 있는 잠재지표를 인과관계를 이용하여 Table 1과 같이 선별하였다.

선정된 각 요인별 잠재지표들을 통해 가뭄피해에 어느 정도 영향을 미치는지를 알아보기 위해 통계분석인 다중회귀분석을 수행하였다. 회귀분석은 변수사이의 관계를 수학적 모형으로 구축하여 독립변수로부터 종속변수를 추정하는 통계방법이다. 가뭄피해는 크게 농작물피해와 제한급수 두 가지 범주로 나타낼 수 있다. 분석에 있어 기상, 수문, 사회·경제 및 대책 요인에 대한 각 잠재지표들을 독립변수군으로 하여 변수 간 상관관계 분석을 실시하고, 높은 상관성을 갖는 변수에 대하여는 피해 추정에 중복 우려가 있어 제외시켰다. UNDP(2004)의 DRI(Disaster Risk Index)에서 제시한 가뭄피해의 경우, 3, 6개월 지속기간 평균 강우량 대비 전체기간에 대한 지속기간별 강우량이 각각 50%, 75%, 90% 이하일 때에

Table 1. Causes and potential indicators regarding drought

Causes	Potential indicators regarding drought
Meteorological	annual rainfall, continuous no rainfall days, rainfall fluctuation
Hydrological	amount of river flow per capita, total amount of groundwater/water resources per water availability factors
Socio-economic	water usage, use of underground water, liters per capita per day, river withdrawal, gross regional domestic product (GRDP) per capita, water availability factor
Response	water supply ratio, related government official, amount of multi-regional water supply, water reserve rates, water supply and sewer financial soundness, water price, wastewater re-utilization

대해 통계분석을 수행하여 가뭄피해 현황을 적절히 표현해 주는 기상조건을 제시한다. 본 연구에서도 표준유역별 각 기상조건이 발생할 수 있는 횟수를 전체기간으로 나누어줌으로써 각 기상조건별 가뭄피해발생가능도를 고려할 수 있고, 여기에 가뭄에 의한 피해인자들인 농경지와 인구를 곱함으로써 가뭄피해에 대한 노출정도를 Eq. (1)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$PhExp = \sum F_i \cdot Factor_i \quad (1)$$

여기서,  $PhExp$  : 가뭄피해에 대한 노출정도,  $F_i$  : 가뭄피해발생빈도,  $Factor_i$  : 피해발생인자(표준유역별 인구 및 농경지)

대부분의 자료들은 0~∞ 값을 가지고 있으나 상수도 보급을 같이 0~1의 값을 가지는 자료들은 상수도보급율/(1-상수도보급율)과 같은 식으로 변환하여 0~∞ 값을 가지도록 변환하였다. 모든 자료를 대수 변환하여 다중회귀분석을 수행하였으며 분석방법은 Eq. (2)와 같다. 이는 DRI 산정에 적용하였던 방법을 그대로 적용한 것이다. 분석에 있어 대수 변환시킬 경우 자료의 분산이 적어져 보다 안정되게 계수를 추정할 수 있도록 해주며 많은 경우 이분산성의 문제도 해결할 수 있게 된다.

$$\ln(D) = \ln(C) + \alpha(PhExp) + \alpha_1 \ln(V_1) + \alpha_2 \ln(V_2) + \dots + \alpha_p \ln(V_p) \quad (2)$$

여기서,  $D$  : 가뭄피해(농작물피해, 제한급수인구수),

$C$  : 상수,  $PhExp$  : 가뭄피해에 대한 노출정도,  $V_i$  : 가뭄피해에 영향을 주는 잠재지표들,  $\alpha_i$  : 각 잠재지표에 대한 지수

분석결과, 가뭄에 의한 농작물피해에 대한 다중회귀식의 상관계수는 0.668, 제한급수피해의 경우 상관계수가 0.495로 나타났으며 다중회귀모형의 계수를 Table 2와 같이 정리하여 제시하였다. 가뭄피해에 미치는 영향을 각 독립변수들의 표준화계수로 살펴보면 농작물피해의 경우 6개월 지속기간 평균 강우량의 75% 이하인 빈도에 대한 농경지노출의 표준화계수가 가장 크다. 이는 농작물피해는 강우에 큰 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 용수이용량당 GRDP와 관계전율은 값이 클수록 농작물피해가 줄어든다는 것을 의미한다. 또한 경지면적당 농업용수이용량이 크면 클수록 농작물피해의 취약성이 증가하는 것으로 분석되었다. 제한급수의 경우 6개월 지속기간 평균 강우량의 75% 이하인 빈도에 대한 인구노출의 표준화계수가 가장 크며, 지하수이용률을 제외한 대부분의 변수들은 음의 부호를 가지고 있으며 이들 대부분은 대책과 관련된 것들임을 알 수 있다. 물이용 관련 대책이 많이 수립된 지역과 특히 상·하수도보급물이 크면 클수록 그만큼 가뭄피해로부터 안전했다는 것을 간접적으로 나타내고 있다.

가뭄은 발생시간과 그 강도를 정의하기가 어려우며 발생원인 또한 정확히 밝히기 무척 힘들다. 과거 데이터를 이용한 분석은 가뭄피해에 영향을 미치는 정확한 인자들을 찾아내고자 하는 것이 아니라 세부지표를 선정할 때 다중회귀분석 결과를 바탕으로 물이용 관련 취약성 평가에 영향을 미치는 인자들을 포함하고자 수행하였다.

Table 2. Multiple regression model coefficient summary for annual average crop damage and limited water supply

section	Variables	Unstandardization coefficient		Standardization coefficient	t	Significant probability	Collinear statistical amount	
		B	Standard error	β			Tolerance limit	VIF
Crop damage	(Constant)	-5.228	.651		-8.030	.000		
	Agricultural water usage per farm land	1.623	.207	.324	7.826	.000	.859	1.164
	GRDP per water usage	-.148	.058	-.104	-2.578	.010	.906	1.103
	Irrigated fields ratio	-.173	.058	-.120	-2.983	.003	.907	1.103
	Physical exposed farm land (6 months, 75%)	.975	.087	.475	11.175	.000	.816	1.225
Water supply restriction	(Constant)	1.296	.885		1.464	.144		
	Water supply ratio	-.173	.069	-.157	-2.502	.013	.410	2.441
	Sewer supply ratio	-.222	.075	-.168	-2.952	.003	.495	2.018
	GRDP per capita	-.209	.083	-.146	-2.530	.012	.485	2.062
	Underground water usage ratio	.301	.115	.130	2.621	.009	.653	1.532
	Multi-regional water supply ratio	-.014	.008	-.078	-1.661	.097	.734	1.363
Physical exposed population (6 months, 75%)	.645	.083	.542	7.804	.000	.335	2.989	

### 3.3 세부지표 선정

과거 데이터 분석을 통한 잠재지표들과 전문가들의 의견을 토대로 잠재지표를 재선정하였다. 이 때 다양한 잠재지표들 중 중복되거나 비슷한 내용의 지표들이 존재할 수도 있기 때문에 세부지표 선정에 요인분석을 적용하였다. 요인분석은 다수 변수들 간의 상관관계를 분석하여 변수들을 바탕으로 이루는 공통차원들로서 유사한 항목들끼리 묶어 적은 수의 요인으로 축소시키는 통계적 방법이다.

요인분석을 적용하기 전에 KMO 표본적합도 측정 및 Bartlett 검정을 실시하였으며 KMO는 0.650, Bartlett 검정 결과로 근사 카이제곱은 35814.491, 자유도 120, 유의확률 0.000으로 요인분석에 적합함을 확인하였다. 선정된 세부지표는 MSA와 요인공통분산의 총분산에 대한 비율 등을 고려하여 고유값이 1.0 이상인 8개의 요인으로 추출되었다. 총분산에 대한 이들 요인들의 누가 분산비율은 69.0%로 나타났으며 요인회전은 가장 많이 사용되고 있는 직각회전법 중 하나인 varimax법을 사용하였다. 요인분석 결과는 Table 3과 같이 정리하여 제시하였다.

Table 3. Factor Analysis result

Variable	Factor load	Factor No.	Accumulated variance(%)
Available water resources amount per water availability factor	.920	Factor 1	11.417
Available groundwater development per water availability factor	.885		
Water usage ratio	.771	Factor 2	23.955
Water availability factor	.725		
Groundwater development ratio	.679		
Water use related government official	.762	Factor 3	31.153
Fairness of water use	.525		
Continuous no rainfall days	.785	Factor 4	38.837
Rainfall fluctuation	.688		
Farm land damage	.699	Factor 5	46.168
Water supply restriction ratio	.756		
GRDP per unit water usage	.709	Factor 6	56.366
Multi-regional water supply ratio	.690		
Water supply and sewer financial soundness	.595		
Water reserve rates	.963	Factor 7	62.716
Wastewater re-utilization ratio	.990	Factor 8	69.028

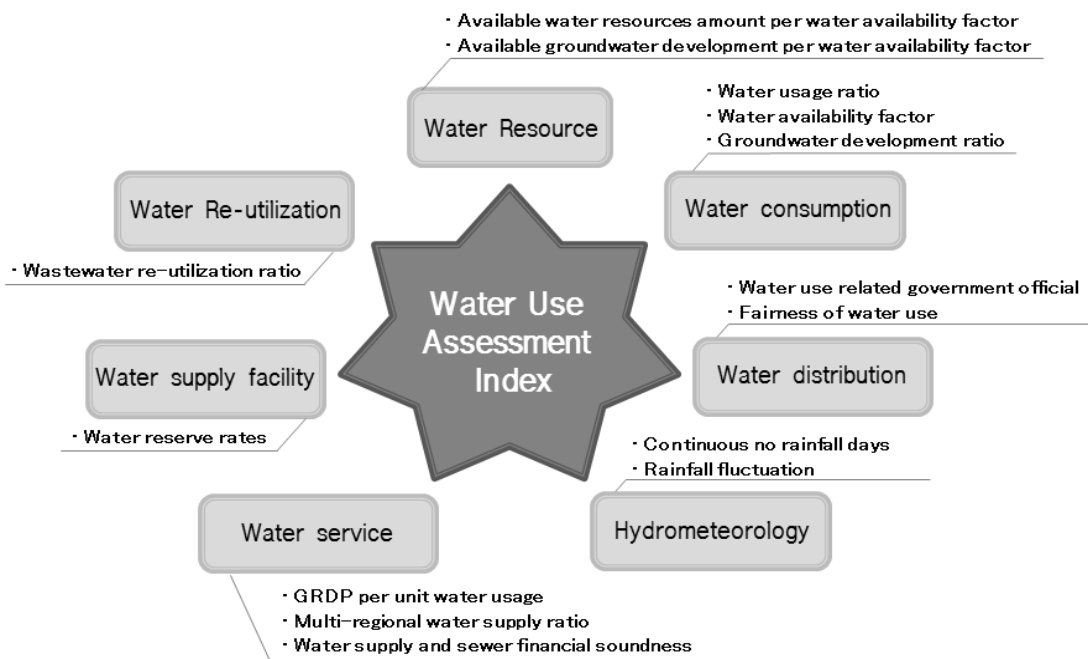


Fig. 1. Composition of water use assessment index

유역의 물이용 관련 취약정도를 파악하고 정책·대책 수립 및 사업의 우선순위 결정을 지원 할 수 있도록 개발된 통합지수는 이수취약성지수로 명명하였으며, 요인 분석 결과 선정된 16개 세부지표들이 8개의 요인으로 추출되어 각 요인들은 주제별 중간지수로 정하였다. 다만 요인 5에 포함된 농경지피해와 제한급수율은 피해이력으로 취약성 평가에 세부지표로 사용하게 되면 피해가 발생한 지역은 당연히 취약성이 높게 나타날 것으로 예상되고, 향후 미래자료를 이용하여 분석할 경우 피해이력을 예측하는 것은 무리가 있을 것으로 판단하여 최종 세부지표에서 제외하였다. 세부지표의 구성은 Fig. 1과 같다.

### 4. 분석 결과

#### 4.1 지표 산정 방법

지표 및 지수의 개발과정은 여러 선행연구에서 제시된 바 있으며 조금씩 과정상 차이를 보이고 있지만 대부분의 과정이 공통된 점을 가지고 있다. 우선 목표와 구성체계 설정한 다음 반드시 표준화(normalization), 가중치부여(weighting), 집계(aggregation) 등의 과정이 필요하다. 기초자료들의 시·공간적 단위를 동일하게 맞추었다고 하여도 선정된 세부지표들이 서로 다른 단위와 범위가 다르기 때문에 비교 가능하도록 무차원화를 시켜야하며 그 방법은 다양하다. 본 연구에서는 국내·외 지표개발에 많이 적용하고 있는 표준화 방법으로 Z-스코어, 스케일 재조정 및 범주스케일 방법을 이용하여 분석을 실시하였고 Table 4와 같이 정리하였다. 두 번째로 가중치 부여방법도 다양하게 제시되어 연구에 적용되고 있으며 본 연구에서는 동일가중치, 요인분석을 통한 가중치부여 및 엔트로피 방법을 통하여 가중치를 적용하

Table 4. Applied normalization method

Method	Equation
Z-score	$I_{qc}^t = \frac{x_{qc}^t - x_{qc}^t - \bar{c}}{\sigma_{qc}^t - \bar{c}}$
Re-scaling	$I_{qc}^t = \frac{x_{qc}^t - \min_c(x_q^{t_0})}{\max_c(x_q^{t_0}) - \min_c(x_q^{t_0})}$
Categorical scales	$I_{qc}^t = \begin{cases} 25 & \text{if } x_{qc}^t \in \{p^{25th}\}percentile \\ 50 & \text{if } x_{qc}^t \in \{p^{50th} - p^{25th}\}percentile \\ 75 & \text{if } x_{qc}^t \in \{p^{75th} - p^{25th}\}percentile \\ 100 & \text{if } x_{qc}^t \in \{p^{100th} - p^{25th}\}percentile \end{cases}$

【주】  $x_{qc}^t$  is the value of indicator for country  $c$  at time  $t$ ,  $\bar{c}$  is the reference country.

였다. 엔트로피 방법은 자료를 이용한 객관적 가중치 산정이 가능하고 계산이 비교적 간단하여 가중치를 부여하는 방법으로 사용된다. 요인분석을 통한 가중치 부여 방법은 자료의 객관적인 기술통계기법을 활용한 가중치 산정 방법으로 관측변수 자료의 통계학적 성질에 의거하여 합리적인 가중치를 산정하는 방법이다.

마지막으로 표준화 및 가중치부여 방법을 선정하였다면 이를 집계하여 지수를 산정하여야 한다. 대표적인 집계방법으로는 누적합산방법과 누적곱산방법이 있으며, 누적곱산방법의 경우 산정결과 범위가 넓은대신 표준화된 값이 0일 경우 집계된 지수 값이 0이 되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 누적합산방법을 사용하였고 이를 수식으로 표현하면 Eq. (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{주제별지수}_i &= \sum_{j=1}^n (\omega_j \times Z_{ij}), \\ \text{최종지수}_i &= \sum_{l=1}^o (\omega_l \times F_{il}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 주제별지수<sub>i</sub>: 표준유역  $i$ 에 대한 주제별지수 값,  $\omega_j$ :  $j$  세부지표에 대한 가중치,  $Z_{ij}$ : 표준유역  $i$ 에 대한  $j$  세부지표의 표준화값, 최종지수<sub>i</sub>: 표준유역  $i$ 에 대한 최종지수값,  $\omega_l$ :  $l$  기능별지수에 대한 가중치,  $F_{il}$ : 표준유역  $i$ 에 대한  $l$  주제별지수값

개발된 이수취약성지수의 결과를 기준으로 이를 상대적으로 평가하기 위한 기준을 설정하였다. 지수 산정결과를 총 5개의 등급으로 분류하였으며 상위 0~20%를 High(H), 상위 20~40% 구간을 Medium High(M·H), 상위 40~60%를 Medium(M), 상위 60~80%를 Medium Low(M·L), 나머지 구간을 Low(L) 구간으로 분류하였다. 이수취약성지수의 경우 물이용 관련 취약성을 평가하는 것이기 때문에 지수 값이 클수록 취약하다는 것을 의미한다.

#### 4.2 민감도 분석 결과

선정된 세부지표를 이용하여 이수취약성지수 결과가 표준화 및 가중치부여방법에 따라 어떠한 민감도를 가지고 있는지 분석하였다. 동일한 조건에서 표준화 방법을 Z-스코어 방법, 스케일 재조정 방법 및 범주 스케일 방법에 대한 지수결과를 산정하였다. 각각의 방법에 의해 산정된 연평균 지수 값을 이용해 표준유역별 순위를 산정하였다. Table 5는 결과의 상위 20위와 하위 20위를 분류하여 제시한 것이며, 표준화 방법에 따른 결과는 Fig. 2와 같이 나타났다. Table 5와 Fig. 2에서 알 수 있듯이 각각의 표준화 방법이 다르더라도 취약성이 높은

유역은 비슷하게 높게 나타나고 낮은 유역은 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Z-스코어 방법과 스케일 재조정 방법의 경우 전국 지수산정결과와 분포가 비슷한 경향을 나타내는 반면 범주 스케일 방법의 경우 세부지

표 값에 대한 범주를 정하고 각 범주에 속해 있는 모든 세부지표에 범주 값을 할당하기 때문에 각 세부지표의 특성을 제대로 반영하기 어려워 다른 방법과 다소 상이한 결과를 제시하고 있다.

Table 5. Change of water use assessment index according to normalization method

Rank	Normalization method			Rank	Normalization method		
	Z-score	Re-scaling	Categorical scales		Z-score	Re-scaling	Categorical scales
1	201107	110104	201107	793	130305	200101	400904
2	100710	100710	100708	794	130301	101104	101011
3	100709	201107	100710	795	101201	100106	230101
4	200901	100703	120203	796	130106	100302	100310
5	530206	200901	200701	797	100109	130206	201903
6	320103	530203	100709	798	100103	101206	230201
7	201105	530206	120101	799	300804	100319	130107
8	201106	320103	100707	800	200101	200102	300601
9	410108	100709	530206	801	100105	130107	100610
10	410408	410408	200901	802	101101	101204	130302
11	202008	100714	200702	803	101204	120204	400704
12	310102	410410	200408	804	101205	101205	230102
13	310103	500603	100706	805	100106	101201	130204
14	200810	201307	201908	806	100302	100101	500204
15	410406	530205	320205	807	200102	130305	130207
16	410107	410108	200416	808	101103	130106	101207
17	301115	410107	201705	809	130107	101103	101302
18	410410	120101	200401	810	101302	100903	100105
19	100703	102211	301210	811	100101	101101	100101
20	100706	120203	202208	812	101207	101207	300804

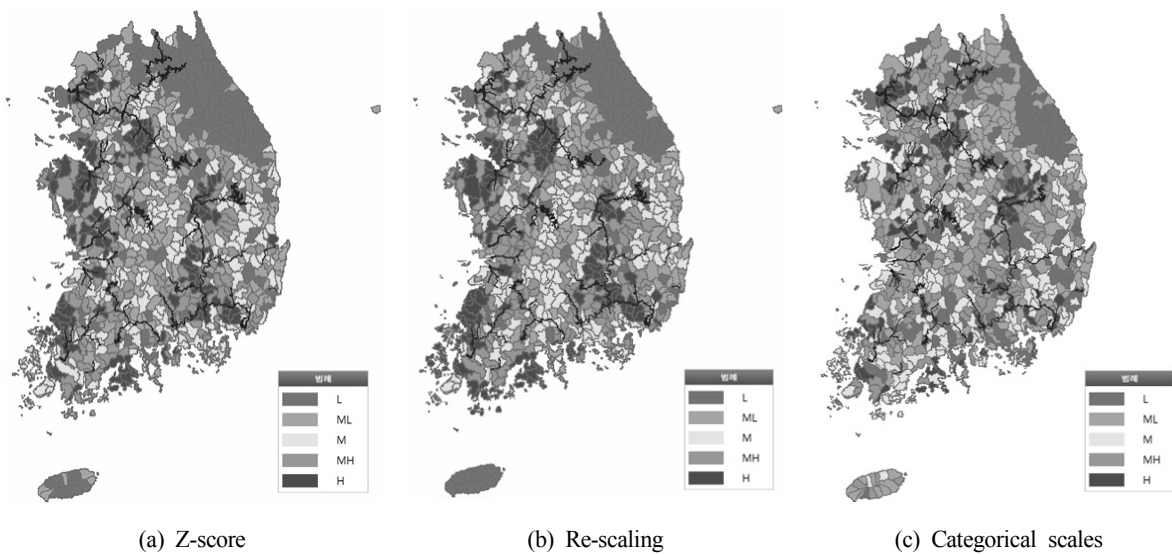


Fig. 2. Change of water use assessment index according to normalization method(90-07)

가중치 부여 방법의 경우 전문가들의 의견을 반영하거나 설문을 통하여 가중치를 산정하는 방법들도 있다. 그러나 이러한 방법들은 주관적 판단이 가중치 산정에 많은 영향을 주고, 지표의 수가 많은 경우 일관성을 유지하기 어려운 문제가 있으며 관점에 따른 상이한 결과

가 도출할 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 주관적인 가중치부여 방법을 제외한 동일가중치, 요인분석 및 엔트로피 방법에 따른 변화를 표준화방법과 동일하게 적용하여 분석하였으며 결과는 Table 6과 Fig. 3과 같다.

Table 6. Change of water use assessment index according to weighting method

Rank	Weighting method			Rank	Weighting method		
	Equal	Factor Analysis	Entropy		Equal	Factor Analysis	Entropy
1	201107	201107	201107	793	130305	100112	101202
2	100710	100710	202008	794	130301	101104	100103
3	100709	100709	250407	795	101201	300804	100102
4	200901	200901	201305	796	130106	101201	100111
5	530206	202008	202007	797	100109	100103	100108
6	320103	530206	201908	798	100103	100109	101201
7	201105	320103	201307	799	300804	130106	100112
8	201106	201106	202206	800	200101	101101	101206
9	410108	310103	201906	801	100105	200101	100201
10	410408	310102	200901	802	101101	100105	130106
11	202008	410108	201104	803	101204	101204	101104
12	310102	201104	201306	804	101205	101205	100105
13	310103	201105	201106	805	100106	100302	101205
14	200810	410408	201910	806	100302	100106	101204
15	410406	250407	202009	807	200102	200102	101103
16	410107	200810	201904	808	101103	101302	200101
17	301115	100703	201407	809	130107	101103	100109
18	410410	301115	202005	810	101302	130107	130107
19	100703	410107	230205	811	100101	100101	100101
20	100706	201908	201604	812	101207	101207	101207

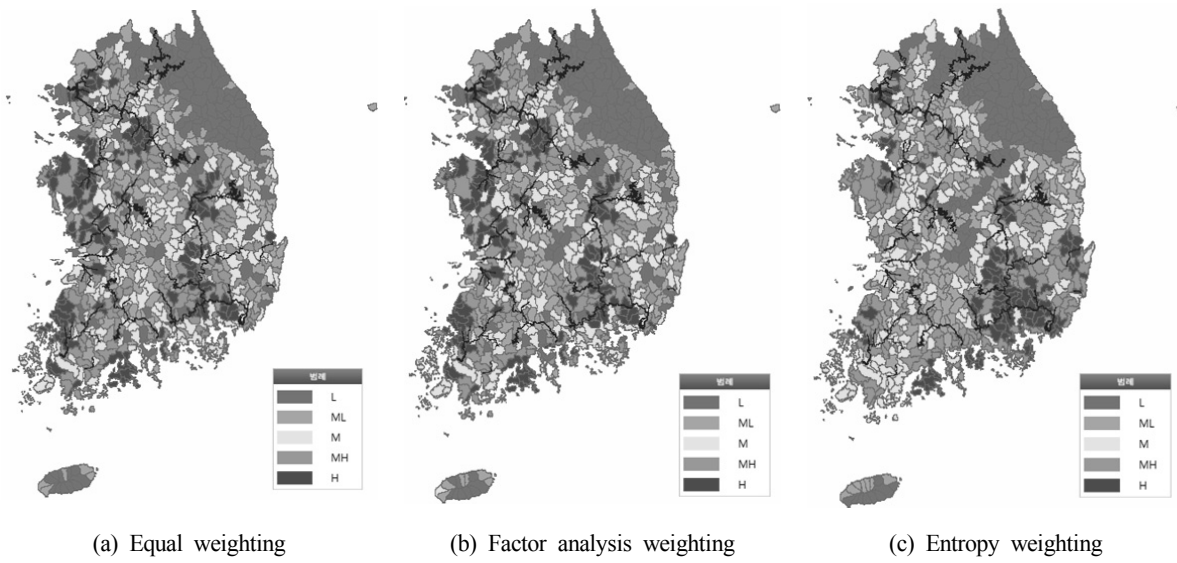


Fig. 3. Change of water use assessment index according to weighting method(90-07)



가중치부여 방법에 따른 이수취약성지수 변화도 마찬가지로 지수 값의 차이는 있지만 취약성등급의 결과는 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있다. 동일가중치와 요인분석을 통한 가중치부여 방법의 경우 대동소이한 결과를 나타내고 있고 엔트로피 방법에 의한 결과는 다소 차이를 보이고 있다. 엔트로피 방법은 각 자료의 빈도수를 기반으로 응집도가 높은 속성을 발견하여 가중치를 높게 부여하는 방법으로 자료의 특성에 따라 가중치가 극적으로 배분되는 특징이 있기 때문에 그런 결과가 나타난 것으로 판단한다.

SSF(Sustainable Society Foundation)(2008)에서 제시된 SSI(Sustainable Society Index) 분석에서도 가중치에 대한 확고한 과학적 근거가 존재하지 않다고 언급하였으며, 가중치 부여에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 가중치에 따라 지수 산정 결과가 큰 차이를 나타내고 있지 않으며 오히려 지표의 선정 및 지표의 구성체계에 따라 산정결과가 달라진다고 하였다. 또한 Chae et al.,(2003)의 연구에서는 가중치를 적용한 결과와 동일한 가중치를 부여한 평가결과에 있어 차이가 거의 없다고 하였으며, Baeck et al.,(2011)의 연구 결과에 따르면 표준화 및 가중치 부여방법에 따라 지수산정결과 값이 다르게 나타나지만 최종적으로 취약성은 크게 달라지지 않는다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연구결과들을 토대로 Z-스코어 방법과 동일한 가중치를 부여함으로써 지수산정을 수행하였다.

### 4.3 지표 산정 결과

물이용 관련 취약성을 분석을 위하여 유역관련 기초 자료를 수집하여 DB를 구축하고 지표의 표준화를 위해서는 Z-스코어 방법을 가중치 부여는 동일가중치 방법을 적용하여 누적합산방법을 이용한 이수취약성지수를 산정하였다. 표준유역별 연도별 지수 값을 산정하였으며 과거로부터 지수 값의 시간적 변화 특성을 파악하기 위하여 5년 단위(1990-1994년, 1995-1999년, 2000-2004년, 2005-2007년)로 구분하여 연도별 지수 값을 평균하여 Fig. 4와 같이 제시하였다.

각 주세별 중간지수의 산정결과 물소비의 경우 과거에 비해 최근 들어 증가하고 있으며, 수자원은 거의 비슷한 수준인 것으로 나타났다. 다만 지역적으로 한강하류와 금강하류유역 등의 도서해안 쪽과 낙동강상류유역이 다른 유역에 비해 인구, 농경지 등의 물을 이용할 수 있는 물이용인자당 수자원량이 적은 것으로 분석되었다. 물공급효율의 경우 과거에 비해 최근 들어 크게 취약성이 감소하였으며, 수문기상 측면에서는 눈에 띄게 취약성이 증가한 것으로 분석되었다. 물배분 측면에서도 과거에 비하여 취약성이 개선되었다고 분석되었으며 이는 상하수도 보급률의 증가와 관련 공무원 수의 증가로 인한 것이라 사료된다. 각 주세별 중간지수를 종합한 이수취약성지수의 분석결과는 과거에 비하여 최근 취약한 유역이 줄어든 것을 볼 수 있다. 이것은 과거에 비해 최근 들어 수문기상의 악화에도 불구하고 관련 정책이나 대책 및 관련 사업 등으로 인하여 이러한 결과가 나타났다고 간접적으로 이야기할 수 있다.

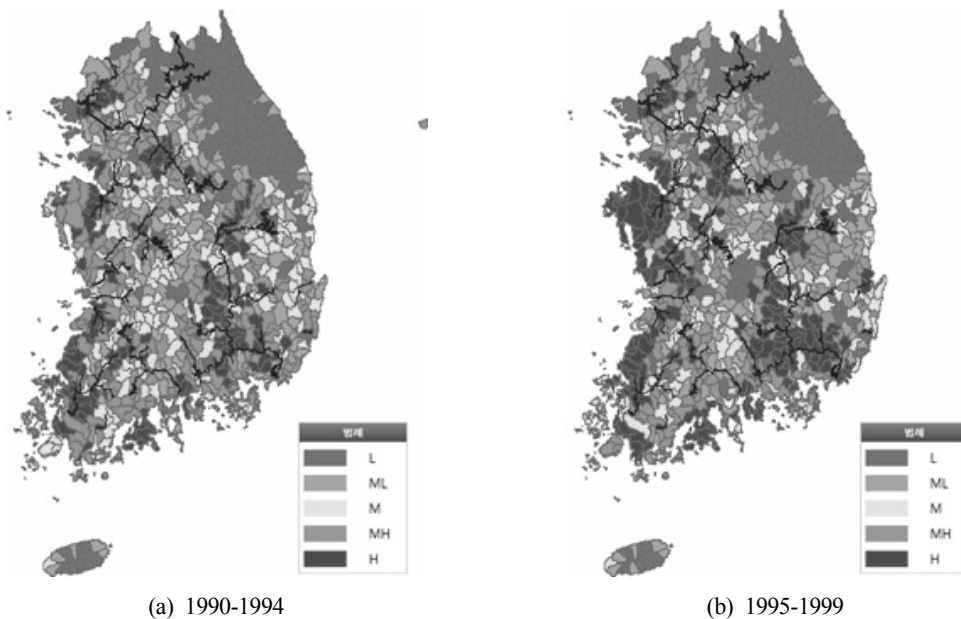


Fig. 4. Results of water use assessment index

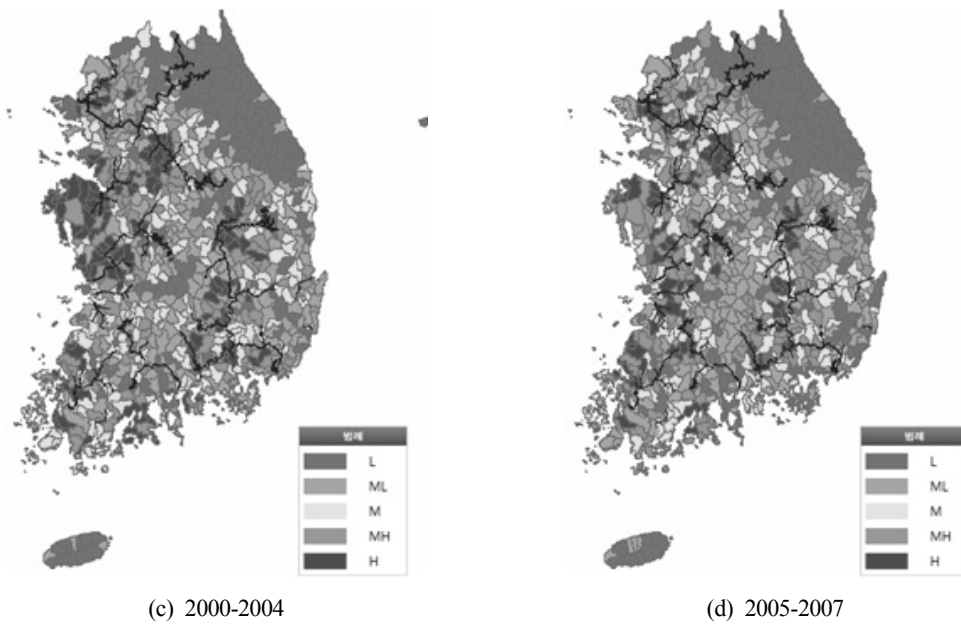


Fig. 4. Results of water use assessment index(continued)

#### 4.4 지수의 검증

##### 4.4.1 피해이력 유무에 따른 검증

대부분의 수자원관련 지표나 지수에는 과거 피해이력 자료를 사용하여 피해가 발생할 확률이 높다는 것을 의미하는 차원에서 지수에 포함시키는 경우가 많았다. 물 이용 관련 피해이력으로는 농작물피해, 제한급수 등과 같은 자료들이 있으며, 치수관련 피해이력으로는 홍수로 인한 사망자, 홍수피해액 등과 같은 자료들이 있다. 이러한 피해이력자료를 사용하게 될 경우 해당 유역의 위험성 또는 취약성이 크게 나타나는 것은 당연하며, 유역별 고유의 취약성을 평가하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 개발한 이수취약성지수를 제시만 하는 것이 아니

라 지수의 타당성을 검증하고자 피해이력을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대한 지수결과를 비교하였다. Table 3에 제시된 피해이력의 주제별 중간지수를 포함하여 이수취약성지수를 다시 산정하여 Fig. 5와 같이 제시하였으며 피해이력 유무에 따른 결과를 보다 쉽게 비교하기 위하여 지수등급별 포함되는 표준유역 개수를 Table 7과 같이 정리하였다. 분석결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 선정한 이수취약성지수 산정결과와 피해이력을 포함하여 재산정한 결과는 대동소이한 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 이수취약성지수는 향후 피해이력의 산정이 어려운 기후변화관련 미래 시나리오를 통한 장래 물이용 관련 취약성을 평가 시 활용하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 7. Comparison of water use assessment index due to the presence of damage history

(unit: the number of standard basin)

Section	Grade	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2007
Water use assessment index	Low	131	145	164	175
	Medium Low	141	136	186	184
	Medium	183	152	196	179
	Medium High	215	173	149	189
	High	142	206	117	85
Water use assessment index(included damage history)	Low	131	145	157	179
	Medium Low	137	135	182	191
	Medium	188	158	201	177
	Medium High	200	170	147	189
	High	156	204	125	76

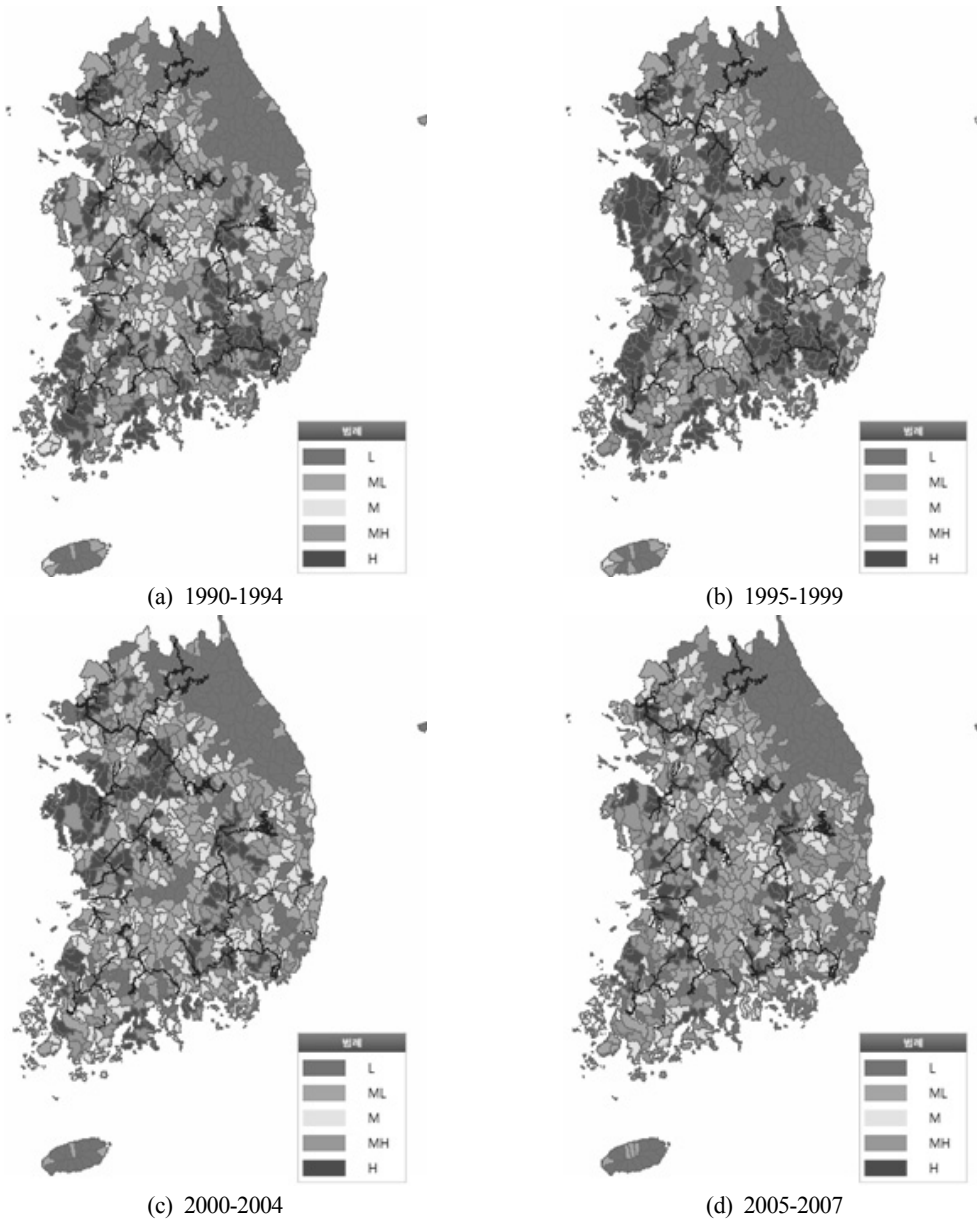


Fig. 5. Results of water use assessment index(included damage history)

#### 4.4.2 2008년 강원도 지역의 검증

강원도 산간지역에서 2008년 9월부터 2009년 3월까지 심각한 가뭄이 발생하였고 그로인해 장시간에 걸친 제한급수가 실시되는 등 물 부족으로 생활뿐만 아니라 각종 산업이 위축되면서 경제적 피해와 주민이 불편을 겪는 사상 초유의 사태가 일어났다(Taebaek-si, 2009). 본 연구에서는 강원도 지역에 이수취약성지수의 현장 적용성 검토를 통하여 선정된 지수의 타당성을 입증하고자 하였다. 2008년 강원도 지역의 기초자료를 1990년부터 2007년까지 구축한 DB와 동일한 출처의 자료를 수집하였으며 강원도에 해당하는 표준유역은 100101부터 200102까지 122개의 유역이 해당하지만, 경기도, 충청북

도, 경상북도를 제외한 순수 강원도 지역인 100개의 표준유역에 대해서 동일한 지수산정 방법을 통하여 분석을 수행하였다.

2008년 강원지역에 대한 이수취약성지수의 결과 중 취약성이 높은 High와 Medium High 등급에 속해 있는 상위 10개의 표준유역을 Table 8과 같이 정리하였다. Fig. 6에서 나타나는 취약성이 높은 등급의 표준유역과 환경부에서 발표한 보도자료('09.01.08, '09.02.09기준)에 나타난 2008년 운반 및 제한급수가 시행되었던 행정구역(홍천, 춘천, 정선, 평창, 태백 등)이 대부분 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 선정한 이수취약성지수는 현장 적용성 및 분석결과의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8. Water use assessment index using data of Gangwon-do in 2008

Rank	High vulnerability (H)		Medium high vulnerability (M-H)	
	Basin	Administrative districts	Basin	Administrative districts
1	101408	Hongcheon-gun	100903	Chorwon-gun, Hwacheon-gun
2	100301	Yeongwol-gun	101407	Hongcheon-gun
3	101301	Chuncheon-si	101007	Hwacheon-gun
4	100117	Yeongwol-gun, Pyeongchang-gun, Jeongseon-gun	101412	Chuncheon-si, Hongcheon-gun
5	101409	Chuncheon-si, Hongcheon-gun	100212	Yeongwol-gun
6	100603	Hongcheon-gun, Hoengseong-gun	101402	Hongcheon-gun
7	101406	Hongcheon-gun	100303	Yeongwol-gun
8	102202	Chorwon-gun	101008	Hwacheon-gun
9	101411	Hongcheon-gun	100116	Yeongwol-gun, Jeongseon-gun
10	101405	Hongcheon-gun	100302	Taebaek-si

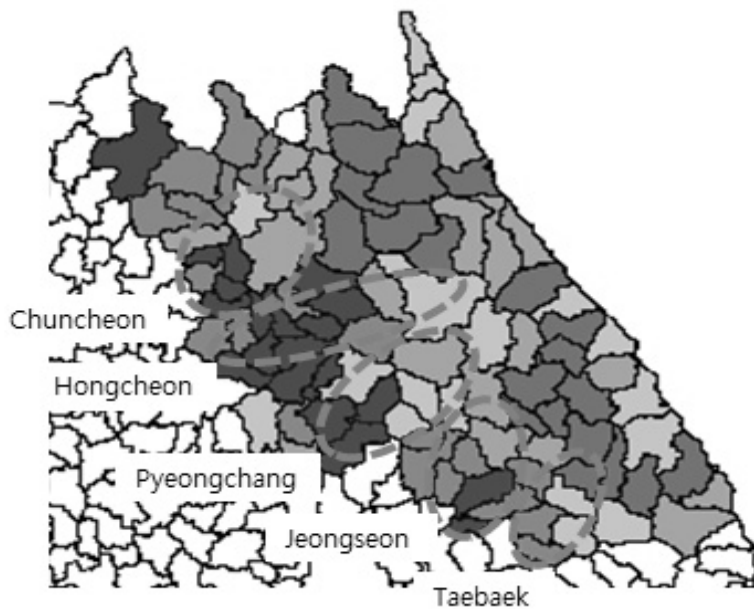


Fig. 6. Water use assessment index (Gangwon-do, 2008)

### 5. 결 론

과거에 비하여 최근 기후변화 등 여러 요인으로 수자원 관련 피해가 증가하고 있다. 예상되는 피해를 최소화하기 위해서는 유역통합관리가 필요하며 통합관리를 위해 지속적인 모니터링과 평가할 수 있는 도구 및 체계가 필요하다. 국내·외에서 유역을 평가하기 위해 다양한 지표 및 평가기법이 개발되어 왔으며 본 연구에서는 선행연구에서 제시된 지표 및 지수의 산정방법 및 관련 자료 조사 체계 등을 검토하여 국내 실정에 맞는 물이용 관련 취약성 평가를 위한 지수를 개발하였다. 분석에 사용된 자료는 1990년부터 2007년까지의 유관기관에서 제공하는 자료들을 사용하였으며, 공간범위는 북한을 제외한 812개의 표준유역을 대상으로 이수취약성지수를

산정하여 분석하였다.

수문, 기상, 사회·경제 등의 다양한 요인들을 고려하여 과거의 피해이력과의 분석을 통해 잠재지표를 선정하였고 전문가들의 의견을 수렴함과 동시에 통계분석인 요인분석을 실시하여 최종적으로 14개의 세부지표와 7개의 주제별 중간지수를 추출하였다. 통합지수인 이수취약성지수뿐만 아니라 주제별 중간지수에 대해서도 연단위의 분석을 통하여 시·공간적 특성을 고려한 경향 분석도 가능하며 다양한 정보를 제공하려고 노력하였다.

지표의 산정방법으로 표준화 및 가중치부여 방법에 따른 결과변화를 분석하였다. 표준화 방법으로는 Z-스코어, 스케일재조정, 범주스케일 방법을 적용하였으며, 가중치부여 방법으로는 동일가중치, 요인분석 가중치, 엔트로피 가중치 방법을 적용하였다. 표준화 방법 중 범주

스케일 방법과 가중치부여 방법 중 엔트로피 가중치부여 방법의 경우 다소 차이가 나지만 결과적으로 취약성의 상위와 하위의 변화는 크게 나타나지 않는 것을 확인하였다. 지표 및 지수의 산정결과는 표준화 및 가중치부여 방법보다는 어떤 세부지표를 분석에 포함시키느냐에 따라 결과가 더 크게 변할 것으로 판단된다.

이수취약성지수의 경우 보다 유역 고유의 취약성을 평가하기 위해 관련 피해이력을 제외하여 지수를 산정하였으며 타당성 검증을 위하여 피해이력을 포함한 결과와 비교하였다. 또한 2008년 강원도 지역의 물이용 관련 자료들을 구축하고 현장 적용성 검토를 통하여 피해이력을 제외하고도 가뭄피해를 입은 지역이 속한 표준 유역의 지수 값들이 다른 유역보다 높게 나타나 지수 산정결과의 신뢰성을 확보하였다.

본 연구결과를 통하여 유역의 물이용 관련 취약성을 분석하고 이에 대한 관련 정보를 다양하게 제공함으로써 투자 우선순위 결정이나 취약부분에 대한 보완책 마련 등의 대책을 수립하는데 지원하는 등 다양한 부문에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립재난안전연구원 ‘원격탐사기반 선진형 홍수관리 및 가뭄대응 기반기술 구축’ 용역의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Allan, T (1997). Virtual water: a long-term solution for water short Middle Eastern economies, *Proceedings of the 1997 British Association Festival of Science*, University of Leeds, UK.
- Baeck, SH, Choi, SJ, Hong, SJ and Kim DP (2011). A study on comparison of normalization and weighting method for constructing index about flood, *J. of Korean Wetlands Research*, 13(3), pp. 411-426. [Korean Literature]
- Chae, MO and Oh, YJ (2003). A study on land suitability factors and their weights, *J. of the Korean Geographical Society*, 38(5), pp. 725-740. [Korean Literature]
- Choi, CI (2004). Panel models about determining factors of urban flood damages, *J. of Korea Planners Association*, 39(7), pp. 49-67. [Korean Literature]
- Choi, SJ and Lee, DR (2005). Indicators for evaluation of sustainable water resources development and management, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(9), pp. 779-790. [Korean Literature]
- Choi, SJ, Lim, KS, Lee, DR and Moon, JW (2009). Development of indicator for water use characteristic evaluation, *Proceedings of the 2009 Conference of the Korean Water Resources Association*, Korean Water Resources Association, pp. 1707-1711. [Korean Literature]
- Falkenmark, M, Lundqvist, J and Widstrand, C (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development, *Natural Resources Forum*, 13(4), pp. 258-267.
- Hong SJ, Choi, SJ, Baeck, SH and Kang SK (2011). Analysis of regional water resources characteristics through applying the water poverty index and the climate variability index, *J. of Korean Wetlands Research*, 13(3), pp. 427-441. [Korean Literature]
- Im, SJ, Kim, HJ, Jang, CH and Kim, CG (2005). Estimation of watershed-scaled water poverty index in the Han river basin, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(6B), pp. 419-424. [Korean Literature]
- Kang, MG., Lee, KM, Ko, IH and Jeong, CY (2008). Development of a integrated indicator system for evaluating the state of watershed management in the context of river basin management using factor analysis, *J. of Korea Water Resources Association*, 41(3), pp.277-291. [Korean Literature]
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT) (2007). *Water Use Characteristic Evaluation Research*, Ministry of Construction & Transportation. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2008). *National Water Resources Management Indicators Setting Report*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2009). *River Environmental Characteristic Evaluation Research*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012). *Climate change sector's vulnerability map*, National Institute of Environmental Research [Korean Literature]
- Ohlsson, L (1999). *Environment, scarcity and conflict: A study of malthusian concerns*, Ph.D. Dissertation, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden.
- Raskin, P, Gleick, P, Kirshen, P, Pontius, G and Strzepek, K (1997). *Water Futures: Assessment of Long-range Patterns and Problems*. Stockholm Environment Institute, Box 2142, S-103 14 Stockholm, Sweden,

- Stockholm, Sweden.
- Sullivan, C (2002). Calculating a water poverty index, *World Development*, 30(7), pp. 1195-1210.
- Sullivan, C and Meigh, J (2005). Targeting attention on local vulnerability using an integrated index approach: the example of the climate vulnerability index, *Water Science & Technology*, 51(5), pp. 69-78.
- Sustainable Society Foundation (SSF) (2008). *Sustainable Society Index SSI-2008*, <http://www.sustainablesocietyindex.com>
- Taeback-si (2008). *Drought white paper*, Taeback-si. [Korean Literature]
- United Nations Development Programme (UNDP) (2004), *Reducing Disaster Risk: a Challenge for Development*, UNDP, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York, USA.
- 논문접수일 : 2013년 05월 28일
- 심사의뢰일 : 2013년 05월 29일
- 심사완료일 : 2013년 06월 26일