



## 공공시설물 잠재홍수피해지수 체계 개발 및 평가

### Development and Evaluation of Potential Flood Damage Index for Public Facilities

김길호\* · 백승협\*\* · 정영훈\*\*† · 김경탁\*

Kim, Gilho · Baeck, Seung Hyub · Jung, Younghun · Kim, Kyungtak

#### Abstract

Since public facilities have high property values and are directly exposed to the flood hazard, they account for the highest share of disaster damages compared to other assets such as housing, industry, vehicle and agriculture in case of floods. Therefore, this study was conducted to develop and suggest the potential flood damage index for public facilities to evaluate potential flood damage of specific local government directly or indirectly as a tool for decision-making related to flood prevention, maintenance, management, and budget allocation. The flood damage assessment system proposed in this study was evaluated in 231 local governments nationwide. Evaluation results showed that higher values were obtained in Seoul metropolitan government, Gyeonggi-do (province), coastal areas in Gyeongsangnam-do (province), and Jeju island.

**Keywords:** Potential flood damage index; Flood damage; Public facilities

#### 1. 서 론

인류 문명의 발달지인 하천은 인간생활을 이롭게 하는 측면에서 많은 기능을 담당하나, 근래 이상기후에 따른 폭우, 국지성 호우, 태풍 등으로 인해 인간생활을 위협하는 위험인 홍수로 변모하기도 한다. 전 세계적으로 발생한 재해빈도를 살펴보면, 홍수재해는 가뭄, 태풍을 포함한 물 관련 재해 가운데 가장 높은 빈도를 차지하고 있으며, 발생 수 또한 급격하게 증가하는 추세이다 (Adhikari, 2009; WMO, 2014). 이와 함께 경제성장에 따른 산업화, 도시화로 하천변 토지이용이 고도화되고 자산가치가 증가됨에 따라 잠재적인 홍수위험도는 과거와는 비교가 안 될 정도로 증가하였다.

우리나라에서 발생한 자연재해 피해액 현황은 국민안전처 (Ministry of Public Safety and Security, MPSS)에서 매년 지자체 단위로 발표하는 재해연보에서 유일하게 확인이 가능하다. 여기서는 홍수, 태풍, 대설, 지진, 해일 등으로 인한 재난 피해를 조사하고 있으며, 건물, 선박, 농경지, 농작물 (피해액 계상 시 제외), 공공시설, 기타시설을 대상으로 한다. 2001년부터 2010년까지 재해연보 상에 기록된 “호우” (바람과 호우가 혼재된 태풍

재해는 제외)로 인한 피해액 현황을 정리해보면, 전체 피해액 (4.57조원) 가운데 상당부분인 84.9% (3.89조원)가 공공시설물에 집중되는 것을 알 수 있다 (Kim, 2013). 이는 홍수재난에 대비하여 공공시설물 피해저감을 위한 예방 및 유지관리가 중요하며, 이를 위한 지속적인 관심과 투자가 필요함을 시사한다.

한편, 국내외에서는 지속가능한 치수계획 수립을 위해 지표 (indicator) 혹은 지수 (index)를 목적에 맞게 개발하여 사용하고 있다. 이것들은 치수계획의 방향설정, 투자 우선지역 또는 투자사업 우선순위 결정, 자원배분 등의 의사결정 과정에 주로 활용된다. 국외의 경우 Tapsell et al. (2002)은 홍수가 사람에게 미치는 영향을 평가하기 위하여, 사회, 보건 및 건강에 미치는 충격을 요소 별로 분류한 취약성을 제시하였고, Ologunorisa (2004)는 홍수 취약성을 물리적 특성에 따라 구분하고 위험지역을 심각지역, 복구지역, 낮은 위험지역으로 분류하여 지역에 맞는 홍수완화 전략을 제시하였다. Birkmann (2006)에서는 재해위험관리 목적의 사회·경제적 지표를 개발하기 위해 취약성 지표의 측정방법에 대해 정립한 바 있다. UNDP (2004)에서는 국가 간의 재해 위험도 측정을 위한 재해위험지표 (Disaster Risk Index, DRI)를 개발하였고, Connor and Hiroki (2005)는 홍수취약성지수 (Flood Vulnerability Index, FVI)를 제시하여 홍수에 대한 경각심을 일반인들도 쉽게 이해할 수 있도록 하였다.

국내의 경우 Kim and Kim (2003), An et al. (2007)에서는 치수계획에 활용되는 홍수피해잠재능 (PFD)을 다루었고, Park et al. (2005)은 홍수피해 자료를 활용하여 홍수발생빈도와 피해액과의 관계를 분석하여 홍수피해지표를 개발하였다. Lim et al. (2010)은 홍수피해의 인과관계로부터 홍수위험지수를 개발하였으며, Jang

\* Korea Institute Of Civil Engineering and Building Technology, Hydro Science and Engineering Research Institute

\*\* K-water Institute, Water Resources Research Center

† Corresponding author

Tel.: +82-42-870-7473 Fax: +82-42-870-7499

E-mail: [younghun@kwater.or.kr](mailto:younghun@kwater.or.kr)

Received: July 7, 2016

Revised: July 14, 2016

Accepted: July 28, 2016

et al. (2010)은 홍수취약성 개념을 활용한 위험관리지수를 개발하였다. Baeck et al. (2014)은 홍수취약성 평가지수를 개발하여 유역단위의 홍수취약성 평가를 수행하였다. 최근에는 미래 기후변화 시나리오를 고려하여 홍수취약성 혹은 위험도를 제시한 사례도 있다(Cho et al., 2015; Lee et al., 2011; Kang and Lee, 2012). 이러한 지표 및 지수들은 대부분 평가목적과 관련 있는 각종 자료로부터 종합하여 표준화된 무차원의 정량적 수치로 표현되며, 이러한 수치는 특정 시기를 기준으로 지역 혹은 유역 간의 비교를 용이하게 하는 장점이 있기 때문에 정책적으로 활용도가 높다.

한편, 지수개발에 있어 무엇보다 중요한 것은 평가지표의 선정이라 할 수 있다. 현재 홍수와 관련된 다양한 자료들이 유관기관에서 제공되고 있어 다양한 자료간의 대표성을 확보하고 상호관계를 정의할 필요가 있다. 특히, 홍수와 같이 매우 복잡한 현상에 영향을 미치는 요인들을 추출하기 위한 통계학적 도구로서 다변량분석 기법 중 요인분석(factor analysis)을 고려할 수 있다. 수자원분야에서 요인분석을 활용한 사례로 Kwon et al. (2000)은 금강하구를 대상으로 수질특성 및 수질변동에 관하여 요인분석을 적용하였고, Rim and Shin (2002)는 삼포호 수계의 수질자료로부터 요인분석을 실시하였다. KICT (2004)에서는 농경지 저류지 도입에 대하여 장애요인을 도출하기 위하여 요인분석을 적용하였으며, Kang et al. (2007)은 한강수계의 다목적댐 운영에 대한 영향요인 추출 및 수계관리 맥락에서 유역관리 상태를 평가하기 위한 통합지수 개발에 분야별 지표를 선정하는데 요인분석을 활용하였다. 또한, Baeck et al. (2014)은 유역별 홍수취약성평가 지수 개발에 세부지표를 선정하는데 요인분석을 사용하였다.

민간자산에 비해 대부분 공공시설물은 홍수에 직접적으로 노출되기 때문에 피해액이 매우 크고, 이로 인해 상당한 복구비가 투입되고 있다. 그동안 개발된 치수목적의 지수들은 대부분 민간 자산과 관련된 인자에 집중하고 있고 공공자산은 개략적인 공공시설물 현황정보만을 반영하는 수준이다. 그 동안의 경제성장으로 인하여 공공시설물 자산규모 또한 급격히 증가하였고, 향후 공공시설물의 홍수를 비롯한 자연재해 피해저감을 위한 예방, 유지 보수 및 관리에 많은 관심을 가질 필요가 있다. 본 연구는 정책적인 활용목적의 공공시설물 잠재홍수피해지수 평가 체계를 투입-상태-반응의 프레임워크와 지수개발의 기본원리를 준수하여 제시하고, 이를 전국 231개 시군 단위의 지자체를 대상으로 평가하는 것을 목적으로 한다.

## II. 이론적 배경 및 평가 방법

### 1. 이론적 배경

지수(index)란 일정한 방향과 목표 하에 어떠한 사물이나 현

상을 측정할 수 있게 하는 수단으로 넓은 의미에서 숫자로 표현된 복합지표 혹은 이상의 수준을 의미한다. 반면, 지표(indicator)는 현재의 위치, 방향, 목표 달성도 등을 정량적이고 단순하게 이해할 수 있도록 도와주는 비교적 단순한 정보이자 도구를 뜻하며, 다양한 연구에서 어떤 주제의 다양한 측면을 단적으로 나타내기 위한 도구로서 사용되고 있다(Aall, 2005). 이처럼 지수 자체도 지표의 속성을 가지고 있기 때문에 지표가 될 수도 있으나, 둘 이상의 지표에 기초하여 산출된다는 차별성과 궁극적인 목적을 위한 결과물이라는 측면에서 지수 혹은 통합지수라는 별도의 명칭을 일반적으로 사용한다. 이때의 지수는 기초자료와 지표들을 먼저 구성한 후, 합리적인 방법으로부터 집계, 종합하여 단일 값으로 정의되며, 이는 상위목표를 위한 계획 설정에 중요한 근거를 제공할 수 있다. 이러한 지표와 지수의 개념 및 관계는 문헌에 따라 정의하는 방식이 약간씩 차이는 있으나, 위계적으로 지수는 지표보다 상위개념으로 정의된다.

지수를 개발하기 위해서는 우선 합리적이고 체계적인 절차를 거쳐야 하는데, Nardo et al. (2005)에서는 (1) 프레임워크 선택, (2) 데이터 수집 및 평가지표 선택, (3) 다변량분석, (4) 누락된 자료 처리, (5) 자료 표준화, (6) 가중치 부여 및 집계, (7) 견고성 및 민감도, (8) 타 지표와의 연계성, (9) 세부사항 표출, (10) 발표 및 보급의 10 단계 순서로 구분하여 지표개발의 절차를 정의한 바 있다.

위 절차 가운데 Maclaren (1996)는 “평가지표의 결정”을 지수개발의 가장 중요한 단계라 언급하면서, 이를 위해 다음의 절차를 강조하였다. 우선, 개발목적을 정의하고, 시공간적 평가대상의 범위와 연관된 세부목표 등을 명확히 하여야 한다. 그리고 세부목표 별 지표 선택을 위한 개념적 프레임워크를 설정하여 지표 선택의 범위를 한정하여 연관되는 지표를 선택하기 위한 적절한 평가기준을 수립한다. 이로부터 잠재지표를 선택하고, 이 가운데 적절한 지표들을 최종 선별하여 결정한다. 선택한 지표를 이용해 분석하고 공표한 지표는 정의된 목표와의 비교를 통해 성능을 평가한다.

### 2. 평가체계 및 방법

본 연구는 위에서 언급한 지수개발의 기본원리를 최대한 준수하여 공공시설물 잠재홍수피해지수(P-PFDI)를 Fig. 1의 절차에 따라 개발하였다. 우선, 정의한 지수개발 프레임워크를 중심으로 공공시설물의 홍수피해에 대해 직·간접적으로 설명 가능한 잠재지표(latent indicator)를 결정하였다. 잠재지표는 획득 가능한 유관기관 별 DB 현황과 국내·외 기존 연구에서 개발된 유사지표를 참고하였다. 이렇게 결정된 각각의 지표값들은 단위와 분산이 상이하기 때문에 표준화(normalization) 과정을 필요로 하며, 표준화된 값을 기준으로 서로 간의 내제된 상관관계로부터 대표요인을 구하고 그룹에 적절한 의미를 부여하는 요인분석

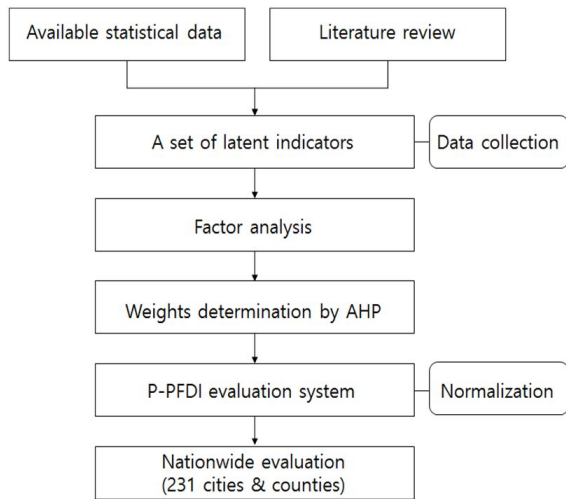


Fig. 1 Research flow chart

(factor analysis)을 수행하였다. 여기서, 요인분석은 독립변수와 종속변수가 없으며, 다수의 변수들의 정보손실을 최소화하면서 소수의 요인으로 축약하는 통계기법이다. 여기서  $p$ 개의 변수군  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$ 은  $k$ 개의 잠재요인군  $(f_1, f_2, \dots, f_k)$ 과  $p$ 개의 오차요소  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_p$ 로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \lambda_{11} f_1 + \lambda_{12} f_2 + \lambda_{13} f_3 + \dots + \lambda_{1k} f_k + \epsilon_1 \\
 x_2 &= \lambda_{21} f_1 + \lambda_{22} f_2 + \lambda_{23} f_3 + \dots + \lambda_{2k} f_k + \epsilon_2 \\
 &\vdots \\
 x_p &= \lambda_{p1} f_1 + \lambda_{p2} f_2 + \lambda_{p3} f_3 + \dots + \lambda_{pk} f_k + \epsilon_p
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, 상관계수  $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \dots, \lambda_{pk}$ 는 변수  $x$ 와 요인  $f$ 와 의 요인부하량 (factor loading)이며, 이는 각 변수와 요인간의 상관관계 정도를 의미한다. 요인분석 결과로부터 최종 선택된 변수들을 바탕으로 평가구조 (평가체계)를 확립하였으며, 추출한 변수들을 평가지표로 구성하였고, 각 요인들은 세부지수로 사용하였다. 다음으로 지표 간의 상대적 중요도 (weights)는 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기반의 전문가설문 (expert survey) 결과를 바탕으로 결정하였고, 추가적으로 검토한 표준화 방법을 반영하여 공공시설물 잠재홍수피해지수 체계를 확립하였다. 이러한 일련의 절차를 전국 231개 행정구역을 대상으로 P-PFDI를 평가하였다.

### III. 평가지표의 선정

#### 1. 잠재지표 및 데이터 수집

평가지표 결정에 앞서 본 연구와 같이 어떠한 위험 (risk) 혹은 위해 (hazard)는 다양한 인자들이 복합적으로 결부된 모호한 개

념이기 때문에 이를 구조적, 개념적으로 정립된 프레임워크 (framework)를 사용할 필요가 있다. 국내외에서 일반적으로 사용되는 지수개발 프레임워크는 (1) 투입-반응, (2) 상태, (3) 투입-상태-반응이 있으며, 본 연구는 IPCC (2001)에서 기후변화 취약성을 설명하는 데 사용한 바 있는, 외부적 스트레스에 대한 결과와 내적인 상태를 종합적으로 고려하는 “투입-상태-반응” 프레임워크를 기준으로 평가지표를 결정하였다.

투입-상태-반응 (dose-status-response) 프레임워크를 중심으로 공공시설물의 잠재적 홍수피해 정도를 설명하기 위해 투입 부분은 외부적 스트레스와 관계되는 기후노출요소, 상태부분은 해당지역의 현 상황과 관계되는 인문·사회, 지형·환경, 사회기반요소, 이로부터 부정적 영향으로 정의되는 반응부분은 재난피해요소로 구분하였다. 이를 기준으로 정량적이며 직·간접적으로 설명 가능한 잠재지표들을 검토하여야 하는데, 본 연구는 과거 연구에서 자주 언급된 기후노출의 경우 기존의 연구결과를 참고하여 검토과정을 간소화하였으나, 기존 연구에서 다루지 않은 공공시설물과 관련된 자료는 상관성, 중복성 제약 없이 검토하여 총 19개의 잠재지표를 선정하였다. 여기서의 잠재지표란 기존 유사 연구에서 사용된 지표와 획득 가능한 유관기관의 DB를 참고하여 선택한 P-PFDI 체계를 위한 잠재적인 지표를 의미한다.

구축하는 자료는 시간적 측면에서 최신의 자료를 활용할 지 혹은 사용가능한 전 기간 자료를 활용할 지, 그리고 공간적 측면에서 유역이나 행정구역과 같은 공간단위를 설정하여야 한다. 우리나라의 경우 재난발생시 국고보조를 지원하거나 특별재난구역을 선정하여 피해정도에 따라 지자체 단위로 지원규모를 결정하고 있으며, 공공시설물과 관련된 기존 자료가 대부분 행정구역을 기준으로 제공하는 점을 참고하여 분석단위를 전국 231개 시군을 대상으로 하였다. 현재 (2010년 기준) 전국의 시군구 현황은 230개이나, 자료의 일관성을 위하여 현 창원시 통합 전의 창원시, 마산시, 진해시를 구분하였고, 행정구역의 통합 혹은 분리가 잦았던 제주도는 현 2개 시군단위를 1개로 간주하여 데이터를 구축하였다.

시간적 측면에서는 자료의 측정기간의 차이 때문에 일단위, 월 단위 또는 연단위 등 동일한 범위로 통일시켜야 하는데, 본 연구는 연단위로 공표되는 자료가 많은 점을 고려하여 시간적 분석단위를 연단위로 하였다. 또한, 시계열 특성을 갖는 자료에 대해서는 데이터수집 시 가용자료의 시간적 범위를 결정할 필요가 있다. 우선, 자료의 변동성이 매우 큰 인자인 기후노출 요소에 대해서는 불확실성을 최소화하기 위해 보유하는 전 기간 자료를 이용하였고, 현 상황을 나타내는 상태부분의 세부요소들은 최신자료를, 마지막으로 반응과 관계되는 재난피해 요소는 지속적인 재해 예방 투자의 성과를 고려하여 2001년부터 2010년까지의 최근 10년 자료를 수집하였다. 19개 잠재지표에 대한 자료명세를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Data collected for latent indicator

Classification		Latent Indicator		Unit	Data Source	Data Period
Dose	Climate Exposure	P1	Annual average day more than 80 mm rainfall	days/year	Annual climatological report	1973–2010
		P2	Annual average day more than 150 mm rainfall	days/year	Annual climatological report	1973–2010
		P3	Annual mean occurrence of typhoon	times/year	Annual disaster report	1990–2010
Status	Humanity & Social	P4	Population intensity	1000 person/km <sup>2</sup>	Resident registration population	2010
		P5	GRDP per person	1,000,000 won/person	Statistics yearbook	2010
		P6	Number of establishments	number/1000 person	Statistics yearbook	2010
		P7	Worker density	person/km <sup>2</sup>	Statistics yearbook	2010
		P8	Motor vehicles registration per person	number/person	Statistics yearbook	2010
	Terrain & Environment	P9	Percent of urbanized areas	%	Statistics yearbook	2010
		P10	Percent of Public areas	%	Statistics yearbook	2010
		P11	Unimproved ratio	%	Water vision report	2006
	Infrastructure	P12	Road density	km/km <sup>2</sup>	Korean national traffic DB	2010
		P13	Stream density	km/km <sup>2</sup>	WAMIS	2010
		P14	Small stream density	km/km <sup>2</sup>	WAMIS	2010
P15		Railway density	km/km <sup>2</sup>	Korean national traffic DB	2010	
P16		Water treatment plant density	number/km <sup>2</sup>	WAMIS	2010	
Response	Disaster Damage	P17	Annual average damage density of public facilities	1,000,000 won/km <sup>2</sup>	Annual disaster report	2001–2010
		P18	Annual mean occurrence of flood disaster	times/year	Annual disaster report	2001–2010
		P19	Percent of Inundation area	%	Annual disaster report	2001–2010

## 2. 잠재지표 통계적 특성

231개 시군 단위 행정구역에 대하여 Table 2와 같이 산출된 잠재지표의 값들을 바탕으로 기초통계량을 산출하였고, 지역 별로 산출된 잠재지표의 결과는 Fig. 2와 같다. 각 잠재지표는 고유 특성과 단위가 상이하기 때문에 다양한 통계치를 나타냈으며, 지역 별 잠재지표값 또한 Fig. 2와 같이 다양한 분포를 보였다.

## 3. 요인분석에 의한 지표 선정

본 연구는 기존 홍수재난 관련 지수연구와 차별화된 공공자산에 한정된 것으로 상태, 반응부문에서의 특징적인 몇몇 잠재지표는 서로 간의 상관성과 중복성에 관계없이 검토하였다. 따라서 이들 간의 내제된 통계적 특성을 고려하여 대표성을 검토할 필요가 있다. 이를 위해 고려하는 잠재변수의 수가 많고 자료간의 차원의

확인과 축소가 용이하며, 측정변수들의 분산에 대해 설명이 용이한 요인분석을 활용하여 실제 P-PFDI의 평가지표를 결정하였다.

요인분석은 사용되는 입력변수들의 총분산을 이용하여 변수들 내부에 존재하는 구조를 발견하고, 많은 변수들을 몇 개의 요인으로 묶어 중요도가 낮은 변수를 제거할 경우에 사용되는 통계적 기법이다. 요인추출을 위한 방법에는 각회전방식과 직각회전방식이 있는데, 본 연구는 사용상의 편리성과 간편성, 해석의 용이성 때문에 많은 연구에서 채택하고 있는 직각회전방식의 베리맥스(varimax) 방법을 사용하였다. 요인을 몇 개까지 채택할 것인가에 대한 기준은 의견이 분분하나, 본 연구에서는 초기분석으로 KMO 표본적합도 측정 및 Bartlett 검정을 실시하여 요인분석에 적합성을 검토하였으며, 또한 고유값(eigenvalue) 1 이상, 요인부하량은 0.5 이상인 것을 우선 검토하였다.

전국 231개 지자체를 대상으로 요인분석을 실시하였으며,

Table 2 Summary statistic of latent indicator variable

Latent indicator	Mean	Min.	Max.	SD
P1	2,51	1,23	4,90	0,64
P2	0,38	0	0,93	0,30
P3	0,12	0	0,55	0,12
P4	3,864,91	17,72	27,548,21	6,132,73
P5	26,07	7,38	131,24	15,71
P6	32,48	15,52	251,84	20,09
P7	1,327,41	2,62	33,264,10	3,247,11
P8	0,37	0,21	0,56	0,06
P9	19,94	1,34	90,07	22
P10	11,53	2,28	54,09	9,04
P11	17,44	0	89,27	18,52
P12	3,81	0,28	24,96	5,06
P13	0,31	0	0,74	0,14
P14	1,8	0,02	3,57	0,82
P15	0,19	0	8,67	0,88
P16	0,046	0	0,29	0,04
P17	4,9	0	61,18	7,58
P18	0,45	0	2,00	0,34
P19	0,07	0	13,54	0,89

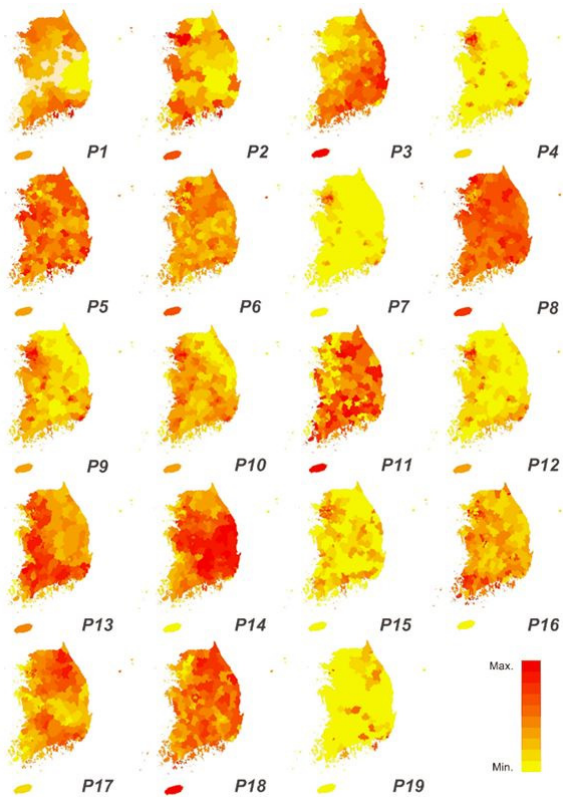


Fig. 2 Latent indicator value by 231 cities & counties

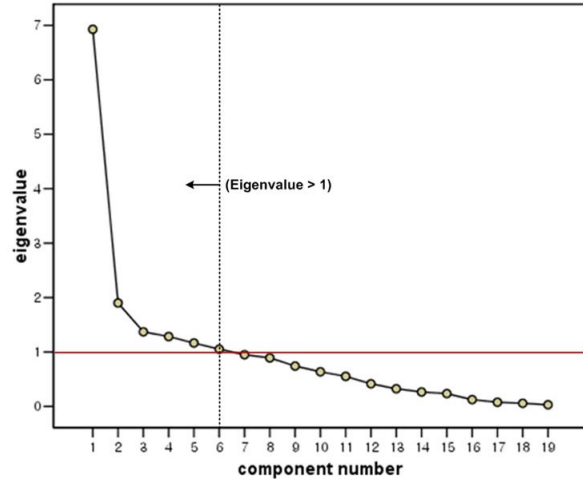


Fig. 3 Scree plot by principal component analysis

Fig. 3과 같이 고유값이 1 이상인 요인은 6개로 총 누적분산은 72.1%를 설명하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 잠재지표 가운데 1인당지역내총생산 (P5), 1000명당사업체수 (P6), 1인당자동차등록대수 (P8), 공공면적률 (P10), 미개수율 (P11), 철도밀도 (P15), 침수면적률 (P19)은 모든 성분에서 요인적재량이 0.5 이하로 다른 변수들에 비해 대표성이 떨어지는 것으로 나타났다. 세부지표의 선정은 요인부하량이 0.5를 기준으로 판단하였으며,

Table 3 Extracted specific indicators and factor loading

Sub-index	Specific Indicators		Factor loading
Climate Exposure	CE <sub>1</sub>	Annual average day more than 80 mm rainfall	0.874
	CE <sub>2</sub>	Annual average day more than 150 mm rainfall	0.731
Human Settlements	HS <sub>1</sub>	Road density	0.869
	HS <sub>2</sub>	Population intensity	0.802
	HS <sub>3</sub>	Worker density	0.739
	HS <sub>4</sub>	Percent of urbanized areas	0.645
Water Environment	WE <sub>1</sub>	Water treatment plant density	0.799
	WE <sub>2</sub>	Small stream density	0.612
	WE <sub>3</sub>	Stream density	0.539
Disaster Damage	DD <sub>1</sub>	Annual mean occurrence of typhoon	0.734
	DD <sub>2</sub>	Annual mean occurrence of flood disaster	0.726
	DD <sub>3</sub>	Annual average damage density of public facilities	0.607

통계적으로 유의하지 않은 변수들은 제외하였다. 결국, 잠재지표들 가운데 위 7개의 변수들을 제외한 나머지 12개의 변수들을 세부지표로 결정하였다.

요인분석을 통하여 최종적으로 추출한 4가지 요인은 기후노출, 인간정주, 물환경, 재난피해이며, 아래 포함되는 세부 평가지표는 Table 3과 같다. 첫 번째 요인인 기후노출에 포함된 세부지표로는 일강우량 80 mm 이상 연간일수와 일강우량 150 mm 이상 연간일수이며, 요인부하량은 0.874, 0.731로 나타났다. 두 번째 인간정주요인으로 묶인 세부지표는 도로시설밀도, 인구밀도, 종사자수 밀도, 시가화면적률 순으로 요인부하량은 0.869, 0.802, 0.739, 0.645로 나타났다. 세 번째 물환경 요인으로는 상수도시설밀도, 소하천연장밀도, 하천연장밀도이며, 부하량은 0.799, 0.612, 0.539이다. 마지막으로 태풍피해 연간횟수, 우심피해 연간횟수, 공공시설물 연간 홍수피해액밀도가 재난피해요인으로 추출되었고 요인부하량은 0.734, 0.726, 0.607로 나타났다.

#### 4. AHP에 의한 가중치 산정

AHP 기법에서 각 계층의 중요도는 평가항목 간 쌍대비교 질문에 대한 응답결과로 결정되며, 일반적으로 집단설문 방식으로 진행한다. 그러나 본 연구와 같이 일반인이 이해하기 어려운 기술적인 내용은 관련 전문가를 대상으로 설문을 하는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 수자원/방재 분야 전문가(8인)를 대상으로 일대일 대면 방식의 설문을 실시하였다. 쌍대비교는 1에서 9까지의 아홉 개 척도로 나누어 중요도를 정의하는 9점척도로 하였으며, Level 1 항목(투입, 상태, 반응)의 경우 전체 구조에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 보다 직접적인 질문방식인 100점 평점으로 질문하였다.

한편, AHP는 개인별 쌍대비교행렬의 기하평균을 이용하여

집단의 쌍대비교행렬을 구성한 다음, 집단의 우선순위벡터를 산정할 것인지, 혹은 개인별 응답결과로 나온 우선순위벡터를 가중 산술평균(weighted arithmetic mean)하여 집단의 우선순위벡터를 산정할 것인지에 따라 AIJ (Aggregate Individual Judgements) 방식과 AIP (Aggregate Individual Priorities) 방식으로 구분된다. 여기서, AIJ 방식은 의사결정에 관한 경험적인 자료나 선행연구가 부족하거나 이에 대한 정보가 부족한 비전문가집단에 의한 의사결정시에 주로 활용하는 반면, AIP 방식은 일반적으로 평가에 참여하는 개별평가자의 견해를 집단 의사결정에 종합적으로 반영하고자 할 때 주로 사용된다. 본 연구에서는 두 가지 방식 가운데, 설문대상자들이 비록 전문가라고 할지라도 AHP기법에 대해 생소하기 때문에 많은 수의 쌍대응비교 시 일관성을 유지하기가 쉽지 않고, 다양한 이해주체가 결부된 내용이 아닌 기술적 측면을 고려하여 응답자들의 판단행렬을 기하평균하는 AIJ 방식을 사용하였다. 한편, 설문과정에서 개인별 판단의 일관성이 만족하지 않은 경우(일관성비율 0.1 초과) 재설문하였다. 이러한 과정으로부터 결정된 가중치는 Table 4와 같다.

## IV. P-PFDI 체계 및 평가

### 1. 평가식

공공시설물 잠재홍수피해지수(P-PFDI)는 서로 다른 단위와 성질을 지닌 평가지표들을 집계하여 0에서 1사이의 값으로 표현되며, 이를 위해서는 식(2)와 같이 12개 평가지표의 값을 표준화하여 변환한  $Z(I_i)$ 와 가중치  $W_i$ 의 연산과정을 필요로 한다. 이 식을 제2계층 인자를 사용하여 정리하면 식(3)과 같다. 여기서,  $CE$ 는 기후노출 점수,  $HS$ 는 인간정주 점수,  $WE$ 는 물환경 점수,  $DD$ 는 자연재난 점수를 의미하며, 식(3)에서의 가중치는 제2계



Table 4 Summary of weights by AHP

Level 1	Level 2	Level 3	Weights	Composite Weights
Dose			0.39	
	Climate Exposure		1.00	0.39
		CE <sub>1</sub>	0.34	0.13
		CE <sub>2</sub>	0.66	0.26
Status			0.28	
	Human Settlements		0.42	0.12
		HS <sub>1</sub>	0.22	0.03
		HS <sub>2</sub>	0.19	0.02
		HS <sub>3</sub>	0.27	0.03
		HS <sub>4</sub>	0.32	0.04
	Water Environment		0.58	0.16
		WE <sub>1</sub>	0.22	0.04
		WE <sub>2</sub>	0.37	0.06
		WE <sub>3</sub>	0.41	0.07
Response			0.33	
	Disaster Damage		1.00	0.33
		DD <sub>1</sub>	0.28	0.09
		DD <sub>2</sub>	0.26	0.09
		DD <sub>3</sub>	0.46	0.15
Sum				1.00

층의 복합가중치이다.

$$P-PFDI = \sum Z(I_i) \cdot W_i \quad (2)$$

$$P-PFDI = 0.39CE + 0.12HS + 0.16WE + 0.33DD \quad (3)$$

그리고 제2계층의 인자인 CE, HS, WE, DD는 식(4)와 같이 제3계층의 표준화된 평가지표의 값과 가중치로부터 결정되며, 여기에서의 가중치는 복합가중치가 아닌 제3계층의 평가지표 간 상호가중치를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 CE &= 0.34 Z_{CE1} + 0.66 Z_{CE2} \\
 HS &= 0.22 Z_{HS1} + 0.19 Z_{HS2} + 0.27 Z_{HS3} + 0.32 Z_{HS4} \\
 WE &= 0.22 Z_{WE1} + 0.37 Z_{WE2} + 0.41 Z_{WE3} \\
 DD &= 0.28 Z_{DD1} + 0.26 Z_{DD2} + 0.46 Z_{DD3}
 \end{aligned} \quad (4)$$

## 2. 표준화 방식에 따른 민감도 분석

평가지표가 가지는 값은 단위와 분포가 제각각이어서 직접적인 교환분석이나 연산을 어렵게 한다. 따라서 평가지표들을 동일한 기

준으로 종합하기 위한 표준화과정을 필요로 하는데, 일반적으로 자주 사용되는 표준화방법에는 z-score, re-scaling, categorical scale, distance to reference to country 방법 등이 있다(Nardo et al., 2005). 그러나 이렇게 자료가 변환(transform)되는 과정에서는 실제 값을 왜곡하는 경우가 종종 발생할 수 있는데, 본 연구는 z-score 방법, re-scaling 방법과 극단값 처리가 용이한 수정 re-scaling 방법을 대상으로 각 표준화 방법의 적절성을 평가하기 위해 경기도 지역을 대상으로 민감도를 분석하였다.

여기서, z-score 방법은 식(5)와 같이 모든 자료들을 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만들어 해당 자료의 수치가 그 분포의 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도나 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 표현한다.

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S} \quad (5)$$

re-scaling (스케일 재조정) 방법은 식(6)과 같이 자료의 범위에 기반을 둔 변환 방법으로, 표준화된 값을 0에서 1 사이의 범위를 갖기 때문에 음수가 발생하지 않아 해석과 연산과정에 용이하다. 하지만 기존의 자료에 극단값은 신뢰할 수 없는 이상치가 될 수도 있어서 이러한 요인들이 변환된 지표들에게 왜곡된 효과를 줄 수도 있다.

$$Z_i = \frac{x_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

마지막으로 수정 re-scaling 방법은 극단값에 따른 왜곡효과를 최소화하고자 자료의 기준치를 미리 설정하여 표준화과정에 반영하는 방법으로, 본 연구에서는 이상치 결정 시 박스도표(boxplot)에서 정의하는 이상점 보다 보수적인 극단이상점(extreme outlier)를 사용하였고, 여기서 극단이상점이란 Fig. 4와 같이 사분위수 범위(interquartile range; IQR)를 기준으로 박스 양끝에서 3IQR 경계를 벗어나는 자료를 의미한다.

이렇게 극단이상치를 제거한 re-scaling 방법을 적용하기 위해서는 식(7)과 같은 제거된 극단이상치에 대한 표준화값으로 정의되며, 여기서 X<sub>max</sub>와 X<sub>min</sub>은 극단이상점을 제거한 자료에서의 최댓값, 최솟값을 의미한다.

$$z_i = \begin{cases} 1 & (x_i > X_{\max}) \\ \frac{x_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & (X_{\min} \leq x_i \leq X_{\max}) \\ 0 & (x_i < X_{\min}) \end{cases} \quad (7)$$

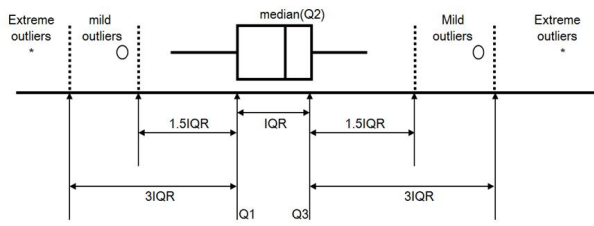


Fig. 4 Extreme outlier in boxplot

Table 5 Sensitivity by normalization method

	z-score	re-scaling	modified re-scaling
RMS (%)	1,760	1,832	2,396
MAD (%)	4,370	4,162	6,243

본 연구에서 검토하고자 하는 3가지 표준화 방법의 적절성을 평가하기 위해 본 연구에서 제시한 P-PFDI를 경기도 지역을 대상으로 평가하였고, 그 결과로부터 표준화 방법 간의 민감도를 순위변동 정도를 중심으로 확인하였다. 여기서 민감도를 측정하기 위한 평가함수는 지나친 순위변동을 고려하기 위한 제곱평균 제곱근 (Root-Mean Square, RMS) 형태의 식 (8)과 전반적인 민감도를 고려하기 위한 평균절대편차 (Mean Absolute-Deviation, MAD) 형태의 식 (9)를 설정하여 비교하였고, 이는 평가대상의 변화가 있을 시 기존 평가대상의 순위(rank)가 변동되는 정도를 바탕으로 측정되며, 민감도 값이 적은 표준화 방법일수록 합리적인 표준화 방법이라 할 수 있다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(\Delta rank)^2}{total\ rank}} \quad (8)$$

$$MAD = \frac{\sum(\Delta rank)}{total\ rank} \quad (9)$$

경기도 내 31개 지자체를 대상으로 위 3가지 방법으로 표준화 (한정적인 대상의 간접 표준화)하였고, 평가집단을 달리하여 전국 231개 지자체 (모든 대상의 직접 표준화)에 대해서 같은 방법으로 분석하였다. 분석 결과, RMS의 경우 Table 5와 같이 z-score 방법과 re-scale 방법은 비교집단 변화에 따른 민감도가 1.760%, 1.832%로 나와 매우 유사한 반면, 수정 re-scale 방법의 경우 2.396%로 앞의 두 방법에 비해 다소 높은 민감도를 보였다. 반면, MAD의 결과는 RMS와 마찬가지로 수정 re-scaling 방법이 가장 민감도가 높았고, 4.162%를 보인 re-scaling 방법이 가장 낮은 변동성을 보였다. 따라서 본 연구의 대상집단에 한 해 결론을 내린다면, z-score 방법은 대상의 높은 순위변동을 억

제하기는 하나, 전반적인 순위변동은 re-scaling 방법에서 가장 우수했다. 특히, 표준화 결과값이 양 (+)의 값으로 제시되는 re-scale 방법의 장점을 고려하여 P-PFDI에서의 표준화 방법으로 re-scale 방법을 채택하였다. 반면, 수정 re-scale 방법은 상당히 보수적인 관점에서 이상점을 처리하여 기준치를 결정했음에도 불구하고 민감도가 가장 높게 나타나, 대상으로 하는 자료의 오류가 불분명할 시에는 표준화 작업 시 원자료를 적극적으로 활용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

### 3. 전국 P-PFDI 평가

re-scale 방법은  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ 와 같은 기준치를 필요로 하는데, 대부분의 연구에서는 쉽고 간결하게 분석되는 장점을 고려하여 자료의 표준화 시 대상으로 하는 지역이나 집단에 대하여 간접표준화 방식을 고수하는 편이다. 즉, 대상집단의 자료만을 대상으로 하기 때문에 분석상의 용이함은 있으나, 대상집단의 규모가 작아서 자료의 양이 부족할 경우 왜곡된 기준치를 제공하게 된다. 또한, 같은 분석을 다른 집단에 적용하거나, 대상 집단을 확대할 경우 또한 적용 시마다 기준치가 달라기 때문에 상대적인 비교에만 활용이 가능하다. 따라서 본 연구는 참고가능한 모든 대상, 즉 전국 지자체 (231개)를 기준으로 하는 직접표준화를 채택하였고, 이때 기준치는 간접표준화 방식 보다 절대적인 의미를 가질 수 있다. Table 6은 전국 231개 지자체를 기준으로 결정된 re-scaling 방법에 필요한 기준치이다.

본 연구에서 설정한 평가지표 모두 평가목적에 양 (+)의 방향을 가지며, Fig. 2로부터 평가된 지자체별 평가지표 값으로부터 표준화된 값과 AHP로부터 결정된 가중치를 바탕으로 식 (2), (3), (4)에 의한 P-PFDI를 전국 231개 지자체를 대상으로 평가하였다. Fig. 5와 같이 서울특별시 내 15개 지자체와 그 외 거제시, 구리시, 의정부시, 함안군, 안양시가 P-PFDI 상위 20개 지역에 포함되어 공공시설물 잠재홍수피해가 높은 것으로 평가되었다. P-PFDI가 0.4를 기준으로 높은 위험도를 보인 지역을 광역시도 단위로 구분하면 서울특별시 내 24개 지자체, 경기도 내 12개 지자체, 경상남도 내 5개 지자체, 전라남도 내 1개 지자체, 제주도 (전체) 1개로 평가되어, 서울·경기권과 제주도를 포함한 영동해안도시에서 높은 값을 보였다.

### V. 요약 및 결론

본 연구에서는 공공시설물의 잠재홍수피해지수 (P-PFDI) 개발을 위해 이를 직·간접적으로 설명가능한 평가지표를 선별하였고, 요인분석, 가중치 결정, 표준화방법을 검토하여 P-PFDI 평가 체계를 제시하였다. 본 연구로부터 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.



Table 6 Reference value for generalization

Indicator	Reference value	
	$X_{min}$	$X_{max}$
CE1	1,23	4,90
CE2	0	0,93
HS1	17,72	27,548,21
HS2	2,62	33,264,10
HS3	1,34	90,07
HS4	0,28	24,96
WE1	0	0,74
WE2	0,02	3,57
WE3	0	0,29
FD1	0	61,18
FD2	0	0,55
FD3	0	2,00

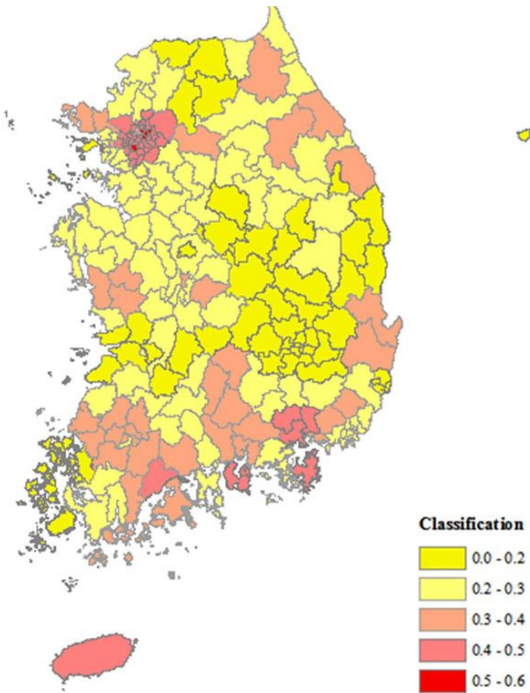


Fig. 5 Results of P-PFDI Evaluation

1. “투입-상태-반응”를 기준으로 마련한 평가체계 “기후노출-상태-재난피해”에서 대부분의 전문가들은 기후노출 요소에 가장 높은 가중치를 부여했으나, 나머지 상태, 재난피해와 비교했을 때 큰 차이는 보이지 않았다.
2. 표준화방식 (z-score, re-scaling, 수정 re-scaling) 에 따른 민감도를 분석한 결과 re-scaling 방법이 가장 우수하게 평가되었고, re-scaling 방법을 적용하는 데 필요한 기준치는

전국 지자체를 대상으로 제시함으로써 직접표준화가 가능하도록 하였다.

3. 231개 전국 지자체를 대상으로 P-PFDI를 평가한 결과, 서울·경기권과 제주도를 포함한 영동 해안도시를 중심으로 공공시설물 잠재홍수피해가 높은 것으로 나타났다. 특히, 극한기후에 취약하다고 알려진 제주도와 영동 해안도시의 경우 기후노출과 재난피해 요소에서 높은 값을 보였으며, 공공시설물의 자산가치가 높은 서울특별시, 경기도, 경상남도에 속한 몇몇 대도시는 상태부문에서 높은 값을 보였다.
4. 본 연구에서 제시한 P-PFDI는 추세적, 그리고 지역적 현황을 비교·분석하는 데 수월한 장점이 있으며, 직접적 표준화 방식을 채택하여 국가 전체적인 비교·평가에 용이할 수 있다. 특히, 재난에 그대로 노출된 공공시설물에 대한 유지관리, 피해저감대책 수립 등 의사결정 상황에서 자원배분의 근거자료로 활용할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원 (13건설연구S01)에 의해 수행되었으며, 아울러 소중한 시간을 할애하여 논문을 심사해주시고 귀한 의견을 주신 익명의 심사위원들께도 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Adhikari Y., Yoshitani J. 2009. Global trends in water-related disasters: An insight for policy makers, The United Nations World Water Assessment Programme, UNESCO, France.
2. Aall, C. 2005. The concept of indicators, Paper Presented at a Seminar Within the EU Project Capacity Building to Enable the Incorporation of Urban Sustainability Parameters in Spatial Urban Development and Planning Policy Practices Through the Use of Indicators (URBANGUARD). Nicosia. Cyprus. 8-9 August 2005.
3. An, J. H., D. S. Gang, Y. N. Yun, 2007. A study on the improvement of potential flood damage estimate, *Magazine of Korea water resources association*, 40(11): 42-49 (in Korean).
4. Birkmann, J. 2006. *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*, United Nation University.
5. Baeck, S. H., S. J. Choi, G. W. Choi, and D. R. Lee, 2014. A study of evaluating and forecasting watersheds using the flood vulnerability assessment index in Korea, *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 5(3): 208-231.
6. Connor, R. F. and Hiroki K. 2005, Development of a method for assessing flood vulnerability, *Water Science & Technology*,

- 51(5): 61-67.
7. Cho, H. J., K. B. Kim, 2015. Assessment of the social vulnerability in the climate change induced - flood risk : focused on the city of Incheon. *Journal of climate research* 10(4): 341-354 (in Korean).
  8. Jang, D. W. 2010. Development and application of risk management index for selective flood prevention alternatives, Ph.D. Dissertation, Inha university, Incheon, Korea (in Korean).
  9. Kim, G. H. 2013. A study on estimation of flood damage and development of flood damage index on public facilities, Ph.D. Dissertation, Inha university, Incheon, Korea (in Korean).
  10. Kim, J. H., and Y. H. Kim, 2003. Improving potential flood damage, Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conference 2003, *Korean Society of Civil Engineers*, 2373-2378 (in Korean).
  11. Kang, M. G., C. Y. Jung, and G. M. Lee, 2007. Extraction of primary factors influencing dam operation using factor analysis, *Journal of Korea Water Resources Association*, 40(10): 769-781 (in Korean).
  12. Kang, J. E., M. J. Lee, 2012. Assessment of flood vulnerability to climate change using fuzzy model and GIS in Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(3): 119-136 (in Korean).
  13. Kwon, J. N., J. G. Kim, and S. J. You, 2000. Characteristics of water quality and factor analysis on the variations of water quality in coastal sea around the Keum River estuary in Summer, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 3(4): 3-22 (in Korean).
  14. Korea Institute of Construction Technology (KICT). 2004. Development of watershed assessment techniques for healthy water cycle (in Korean).
  15. Lee, M. H., I. W. Jung, and D. H. Bae, 2011. Korean flood vulnerability assessment on climate change. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(8): 653-666 (in Korean).
  16. Lee, Y. J. 2002. Factor analysis, Sukjung (in Korean).
  17. 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 the Korean Society of Civil Engineers B*, 30(1B): 61-70 (in Korean).
  18. Nardo, M., M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantila, A. Hoffman, and E. Giovannini, 2005. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide, OECD Statistics Working Papers, OECD, Italy.
  19. Maclaren, V. W. 1996, Urban sustainability reporting, *Journal of the American Planning Association*, 62(2): 184-203.
  20. Ologunorisa, E. T. 2004, An assessment of flood vulnerability zones in the Niger Delta, *International journal of environmental studies* 61(1): 31-38.
  21. Park, T. S., G. M. Kim, Y. S. Yoon, and S. B. Lee, 2005. Analysis of Flood Damage Characteristics and Development of Flood Damage Index, *Korea Research Institute for Human Settlements*, 2005-6 (in Korean).
  22. Rim, C. S. and J. K. Shin, 2002. cluster and factor analyses using water quality data in the Sapkyo reservoir watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 35(2): 149-159 (in Korean).
  23. Tapsell, E. C., Penning-Rowsell, Tunstall, S. M. and Wilson, T. L. 2002. Vulnerability to flooding: health and social dimensions, Philosophical. Transactions of the Royal Society of London-Series, A 360: 1511-1525.
  24. United Nations Development Programme(UNDP). 2004. Reducing disaster risk: a challenge for development, UNDP, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York.