

낙동강 유역의 홍수위험지수 산정

Estimation of Flood Risk Index for the Nakdong River Watershed

송재하* / 김상단** / 박무종*** / 최현일****

Song, Jae Ha / Kim, Sangdan / Park, Moo Jong / Choi, Hyun Il

Abstract

The aim of study is to present how to estimate and use the FRI (Flood Risk Index) for classifying area zones based on regional flooding risk in terms of the integrated flood risk management. To estimate the FRI at a spatial resolution of city/county/town units for the Nakdong River Watershed, the 17 representative flood indexing factors are carefully selected for the three flood indexes, such as PI (Pressure Index), SI (State Index), and RI (Response Index) under the P-S-R (Pressure-State-Response) classification system. Because flood indexing factors are measured at different scales and units, they are transformed into a common domain by the T-Score normalization technique. The entropy weight coefficient method is also applied to calculate the weight of flood indexing factors in order to reduce subjective judgement on the effect of weight coefficients. The three flood indexes of PI, SI, and RI are integrated for an overall value of the FRI to evaluate the flood risk of districts. To examine the practical application of the proposed FRI, the FRI results with/without the weight coefficients are compared with flooding zones of natural disaster risk areas officially announced in 2010. It is expected that the FRI ensured by full verification can make regional protection plans against flooding disasters with respect to causes and characteristics of past floods.

Keywords : flood risk index, P-S-R, normalization, entropy

요 지

본 논문에서는 통합홍수위험관리 측면에서 지역의 홍수위험도에 따라 지구를 구분할 수 있는 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)의 산정 및 적용방안을 제시하고자 하였다. 낙동강 유역에 대하여 시·군·구 단위의 공간해상도로 홍수위험지수(FRI)를 산정하기 위해 P-S-R(Pressure-State-Response) 구조로 분류하여 3개의 홍수지수인 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)를 대표하는 총 17개 세부지표들을 엄선하였다. 세부지표들은 각기 다른 범위와 단위로 측정된 값이므로, T-Score 방법을 사용하여 동일한 범위로 변환되었다. 또한 엔트로피(Entropy) 가중치 산정방법에 의한 가중치를 사용하여 가중치 적용에 따른 주관적인 편정을 최소화하였다. 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)의 3개 지수를 통합하여 지역의 전반적인 홍수위험 상태를 파악할 수 있는 홍수위험지수(FRI)를 산정하고, 가중치 적용 유·무에 따른 홍수위험지수 산정결과와 2010년에 고시된 자연재해위험지구 중 침수위험지구와의 비교를 통해 제안된 홍수위험지수의 적용성을 검토하였다. 충분히 검증된 홍수위험지수를 활용하면 과거 홍수의 원인 및 현상별 홍수재해에 대하여 지역적 방재대책 수립이 가능할 것이라 기대된다.

*영남대학교 건설시스템공학과 석사 (e-mail: jhsong@ynu.ac.kr)
Master, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

**부경대학교 환경공학과 부교수 (e-mail: skim@pknu.ac.kr)
Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

***한서대학교 토목공학과 교수 (e-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)
Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

****교신저자, 영남대학교 건설시스템공학과 부교수 (e-mail: hichoi@ynu.ac.kr, Tel: 053-810-2413)
Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

1. 서론

최근 국·내외적으로 지속적으로 발생하고 있는 이상기후에 따른 설계빈도 이상의 집중호우로 인해 구조적인 홍수방어대책의 한계점을 극복하고자 비구조적인 대책에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라, 다양한 연구를 통해 과거의 홍수발생 원인과 현상을 종합하여 미래의 홍수위험발생 양상을 정량적인 수치로 나타낼 수 있는 다양한 지수가 개발되고 있다. 국내의 경우, 수자원장기종합계획(MLTM, 2001)에서는 치수안전도 설정을 위한 방향을 제시하여, 국내에 처음으로 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)라는 개념을 도입하였으며, 이후에 Kim and Kim (2003)는 기존 PFD의 구성요소 중 위험성 요소를 구성하는 부분요소인 가능성 요소와 방어능력 요소를 서로 독립적인 요소로 판단하여 사용하는 수정 PFD 방법을 제시하였다. 국토연구원(KRIHS, 2005)은 지표 개발을 위하여 자연적 요인, 사회적 요인, 정책적 요인, 시설적 요인으로 구분하여 232개 지역을 대상으로 잠재적 위험성을 나타내는 홍수피해지표를 개발하였다. 한편, 소방방재청(NEMA, 2006)에서는 지역의 자연재난 위험도를 사전에 파악하여 재난 저감대책 및 시설투자 사업 수립에 활용하기 위해 재난위험성, 재난피해규모, 재난피해저감능력의 각 평가항목을 통하여 지역안전도 평가기법을 개발하였다. 또한, 한국건설기술연구원(KICT, 2008)에서는 이상홍수취약성지수(Excess Flood Vulnerability Index, EFVI)를 개발하여 홍수위험관리 측면에서의 취약성 평가를 안정천과 한강유역에 수행한 바 있다. Lim et al. (2010)은 P-S-R 체계(OECD, 1991)에 의해 새롭게 개발된 주제별 치수특성평가 지수를 제시하고 분석하였다. 국외의 경우, UN의 ISDR (2004) 보고서에서는 위험은 위험성과 취약성을 그 지역의 역량으로 나누어 평가해야 한다고 기술하였고, Kron (2003)은 자연재해 중 홍수와 관련된 홍수사상 또는 홍수사상의 발생확률을 나타내는 재해위험성(hazard), 홍수위험지역에 있는 경제적 자산이나 인명의 노출성(exposure), 그리고 홍수방어능력의 부족을 의미하는 취약성(vulnerability) 등 세 가지 요소들의 곱으로 홍수 위험도(flood risk)를 표현할 수 있다고 하였다. 미국의 대표적인 평가기법인 FEMA (2011)의 홍수보험프로그램(National Flood Insurance Program, NFIP)에서는, 100년 빈도 홍수를 기준으로 홍수터를 설정하여 홍수터 밖의 지

역을 각각 등급화하고, 이에 따라 하천공간의 개발여부 결정 및 지역의 위험도에 따른 요율을 조절하며, 주정부차원에서의 하천공간 및 홍수터에 대한 통합적관리가 이루어지고 있다. 유럽에서는 ESPON 1.3.1 Project (The European Spatial Planning Observation Network)를 통하여 지역별 위험 발생확률, 재난의 강도와 취약도를 조합한 위험도 지도를 제시하고, 취약성은 지역의 1인당 GDP, 인구밀도, 대응능력 등의 가중 합으로 계산하여, 유럽 전역을 지수화 하였다(GTK, 2004). Prakasa et al. (2005)은 위험관리 연구방향으로 인도의 Delta 유역에 취약성 지수를 산정하였으며 산정요소는 인구밀도, 토지이용, 해안과의 거리, 주요 태풍경로의 위치, 지표면 경사 등을 이용하였다. Merabtene et al. (2004)은 치수계획을 위하여, 인구, 재산, 도시화율, 사회기반시설 등의 잠재성 요소와 홍수피해 발생가능성 및 이에 대한 방어능력 정도를 나타내는 홍수피해액, 그리고 확률강우량, 하천개수율, 홍수조절용량 등의 위험성 요소로 구성되는 홍수위험도 지표를 제시하였고, Ogunorisa (2004)는 홍수취약성을 물리적 특성에 따라 구분하고 홍수위험지역을 심각한 지역, 복구된 지역, 낮은 홍수위험지역으로 분류하여 나이지리아 삼각주 지역에 맞는 홍수완화 전략을 제시하였다. 또한 UNDP (2004)에서는 국가간 자연재해에 노출된 정도, 취약성 및 위험도 사이의 비교평가를 위하여, 각종 자연재해로부터의 사망자수를 기초자료로 자연재해에 대응하는 국가 간의 상대적 취약성을 지수화한 재해위험지표(Disaster Risk Index, DRI)를 개발하였다.

본 논문에서는 낙동강 유역을 대상으로 홍수위험지구를 선정하기 위하여 시·군·구별 홍수위험도를 평가할 수 있는 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)의 산정체계를 수립하고, 세부지표별 가중치가 홍수위험지수(FRI) 산정 결과에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 하였다. 기존에 개발된 홍수피해잠재능(PFD)이 잠재성과 위험성으로 분류되어 홍수의 원인과 결과에 대한 해석력이 부족하고, 위험성 요소에 가능성과 방어능력을 합산하기 때문에 이들 중 어느 하나의 값이 0일 경우에는 위험성 값이 크게 낮아지거나 치수특성상 안전한 지역인데도 불구하고 상대적으로 위험성이 크게 나타날 수 있다. 이러한 단점을 보완하고 방재적 측면의 홍수관리에서 지역적 홍수특성을 고려하여, 홍수의 원인과 결과, 그리고 대책의 인과 관계적 접근방식으로 지표를 분류하는 P-S-R (Pressure-State-

Response) 구성 체계로 홍수위험도 세부지표를 분류하고, 이들의 가중평균에 의한 정량적인 홍수위험지수(FRI)를 제시하고자 하였다. 일반적으로 가중치 결정은 설문에 의해서 설정하는 방법과 사용되는 자료값의 영향력의 차이에 따라 설정하는 방법이 있다. 본 논문에서는 설문을 통한 방법이 개인의 주관적인 생각과 사상의 개입으로 인해 결과의 왜곡이 이루어질 수 있다고 판단하여, 정보이론에 근거한 엔트로피(Entropy) 가중치 추정방법을 이용하였다. 낙동강 유역을 대상으로 엔트로피 가중치 적용 유·무에 따라 산정된 홍수위험지수(FRI)를 2010년에 재 고시된 자연재해위험지구 중 침수위험지구와 비교하여, 제안된 홍수위험지수(FRI)의 적용성을 검토하였다.

2. 홍수위험지수의 산정기법

홍수위험지수(FRI)란 홍수재해로 인한 유역의 위험도를 정량적으로 파악할 수 있는 지수를 말한다. 본 논문에서 제안하는 홍수위험지수(FRI)의 기본 구성요소는 OECD (1991)에서 개발하여 국제기구나 각국의 지표설정에 주로 활용되고 있는 P-S-R 체계하의 각 특성을 나타내는 개개의 세부지표이다. 기존의 홍수피해잠재능(PFD)에서는 지표를 노출성, 민감도, 적응능력으로 나누어 구분하였으나, 지표 선정 시 그 구분이 모호할 수 있다는 단점이 있다. 그러나 P-S-R 체계는 각 지수의 특성이 명확하며 홍수의 원인, 결과, 예방의 유기적인 흐름의 지표수집이 가능하다는 장점이 있다. 홍수 피해의 원인에 해당하는 세부지표들은 압력지표(Pressure Factors, PF)로, 홍수피해로 인한 직·간접 현상을 설명할 수 있는 세부지표들은 현상지표(State Factors, SF)로, 그리고 홍수피해 저감을 위한 일련의 활동을 나타낼 수 있는 세부지표들은 대책지표(Response Factors, RF)로 각각 분류된다. 이들 세부지표들은 일반적으로 각각 단위가 다르므로 수집된 지표들에 대한 표준화가 필요하며, 표준화된 각 세부지표들은 P-S-R 구성요소별로 종합하여, 각각 압력지수(Pressure Index, PI), 현상지수(State Index, SI), 대책지수(Response Index, RI)를 산정한다. 이때 각 지수에 영향을 미치는 세부지표들의 기여도에 따른 가중치 산정을 위하여 엔트로피 방법을 적용한다. 마지막으로, 종합적인 홍수위험도를 평가하기 위하여 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)를 통합한 홍수위험지수(FRI)를 산정한다. 이와 같이 대상유역의 홍수위험지수(FRI)를 산정하기 위해서는 다음 Fig. 1과 같은 절차를 따른다.

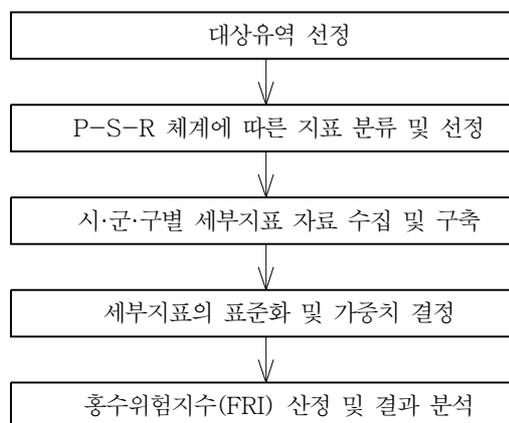


Fig. 1. Calculation Procedure for Flood Risk Index (FRI)

2.1 대상유역 선정 및 자료 수집

최근 낙동강 유역은 지속적인 도시화와 산업화로 인해 홍수에 대한 위험이 증가하고 있다. 따라서 홍수의 위험성 및 취약성을 파악하고, 이를 활용한 홍수방어대책을 수립하기 위하여, 낙동강 유역의 시·군·구 단위 공간 해상도에 대한 우선순위 지역을 예측하고자 70개 지구별 홍수위험지수 산정에 필요한 세부지표를 조사하여 수집하였다. 홍수위험도 평가 세부지표 구축을 위하여 홍수위험에 미치는 영향을 고려하고, 정기 측정성, 계량 가능성, 예측 가능성, 자료 구축의 용이성 등의 인자선정 원칙을 바탕으로 관련 정부기관 및 지자체에서 제공하는 각종 최신 통계자료를 수집하였다.

2.2 P-S-R 구성 체계 분류

P-S-R 구조는 현 치수특성 평가문제를 인과관계로 분석할 수 있으며, 사회, 경제 및 여타 쟁점사항간의 상호 연관된 관점에서의 파악이 가능하다. 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI) 등 3개 지수의 평가를 위한 세부지표의 선정에 있어서 홍수위험도를 대표할 수 있는 지표를 선정하는 것이 중요하지만, 대상유역에 분석적용 가능한 자료를 수집하기는 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 앞서 기술한 지표의 선정기준과 기존의 연구들을 바탕으로 낙동강 유역 시·군·구별 자료의 수집이 가능하고, 홍수위험도 산정에 중요하다고 판단되는 총 17개의 세부지표를 Table 1과 같이 선정하였다. 압력지표(PF)는 유역의 홍수피해에 대한 물리·환경적 압력을 평가하기 위한 수단으로 1일 최대 강수량, 100mm/일 이상 강수일수, 경사도(Degree), 시가화율(%), 자산밀도(천원/m²), 인구밀도(인/km²) 등 총 6개의 세부지표(PF₁~PF₆)로 선정되었으며, 지표값이 높을수록

Table 1. Flood Indexing Factors for Pressure, State, and Response Indexes

유형	구분	세부지표명		출처	산정기준
압력 지수 (PI)	수문 특성	PF ₁	1일 최대강수량(mm)	기상청	2005~2009년
		PF ₂	100 mm/일 이상 강수일수(일)	기상청	2005~2009년
	유역 특성	PF ₃	경사도(degree)	환경부	2010년
		PF ₄	시가화율(%)	WAMIS	2000년
	사회 특성	PF ₅	자산밀도(천원/m ²)	부동산 가격공시에 관한 연차보고서	2009년
		PF ₆	인구밀도(인/km ²)	통계연보	2010년
현상 지수 (SI)	홍수 피해 위험 지역	SF ₁	홍수피해밀도(천원/km ²)	재해연보	2005~2009년
		SF ₂	침수면적밀도(%)	재해연보	2005~2009년
		SF ₃	인명피해자비율(%)	재해연보	2005~2009년
		SF ₄	홍수발생빈도(회)	재해연보	2005~2009년
대책 지수 (RI)	치수 대책	RF ₁	하천개수율(%)	수자원장기종합계획	2007년
		RF ₂	하수도 보급률(%)	하수도 통계	2007년
		RF ₃	양수량(m ³ /hr)	WAMIS	2007년
		RF ₄	응급의료시설(개/만명)	KOSIS	2007년
		RF ₅	재정자립도(%)	KOSIS	2010년
		RF ₆	치수사업투자비(%)	지방 구·군청 재정현황	2010년
		RF ₇	공무원 수(인)	KOSIS	2008년

해당 지역의 홍수재해 발생 시 홍수위험이 높은 것으로 판단할 수 있다. 압력지수에서 유출정보, 홍수량 및 홍수위 등과 같이 홍수와 밀접한 연관이 있는 자료들은 실측 자료의 부족으로 인해 분석단위인 시·군·구 행정구역별로 재분석할 경우 산정방법과 공간분포에 따라 홍수위험지수 결과에 미칠 민감성을 고려하여 배제하였으며, 가능한 원자료 수집이 가능한 지표들로 구성하였다. 홍수현상지표(SF)는 유역이 홍수에 노출되어 있는 수준 판단 및 홍수피해 현황을 파악할 수 있는 지수로서 홍수피해밀도(천원/km²), 침수면적밀도(%), 인명피해자비율(%), 홍수발생빈도(회) 등 4개의 세부지표(SF₁~SF₄)로 구성되었다. 현상지표를 비교하면 각 지역의 홍수피해에 대한 수준 파악이 용이하다. 대책지표(RF)는 홍수재해 발생 시, 이에 대응할 수 있는 능력을 판단하기 위한 기준으로서 하천개수율(%), 하수도 보급률(%), 양수량(m³/hr), 응급의료시설(개/만명), 재정자립도(%), 치수사업투자비(%), 공무원 수(인) 등 7개의 세부지표(RF₁~RF₇)를 선별하였다. 이러한 대책지표값이 높다는 것은 해당 지역이 홍수 및 각종 재해에 높은 방어 수준을 나타내고 있다고 판단할 수 있다. 선정된 홍수위험도 평가 세부지표들은 관련 정부기관 및 지자체에서 제공하는 각종 최신 통계자료를 바탕으로 GIS를 통하여 낙동강 유역의 시·군·구 행정구역별 자료로 데이터베이스화 하였다. 17개 세부지표들은 가능한 최

근의 공인자료를 바탕으로 구축하였고, 태풍이 많고 피해가 컸던 연도와 가뭄이 들었던 연도 등 비교적 연차별 변화가 많은 홍수의 특성을 나타내는 세부지표들의 경우에는, 큰 맥락에서 각 지표별 유역에 미치는 영향을 평가하기 위해 5년간(2005~2009년) 자료를 평균하여 세부지표를 산정하였다.

2.3 지표의 표준화

지표를 표준화하는 방법에는 다양한 방법이 있다. 가장 쉽게 산정할 수 있는 순위 방법은 순위 정렬(Ranking) 방법으로 단순 나열하는 방법이다. 이 방법은 이상치나, 자료의 분포 특성 등을 전혀 고려하지 않기 때문에 일반적인 통계분석에서는 잘 이용되지 않는다. Jain et al. (2005)은 지표의 표준화 방법들에 대해 설명하였으며 각 표준화 방법에 대한 비교를 통해 특징을 설명하였다. 가장 대표적으로 사용되는 표준화 방법에는 Z-Score 방법과 Re-Scaling 방법이 있다. Z-Score 방법은 원점수의 상대적 위치를 알려주는 표준점수의 일종으로 원점수를 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만드는 방법으로, 통계학적으로 표준정규분포의 의미로 Z값은 정규분포의 평균 μ 과 어떤 값인 x 사이의 실제 차이를 표준편차 σ 의 배수로 표현한 상대적인 가치 척도이며 이는 Eq. (1)로 표현된다.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Z-score 방법의 결과는 0을 중심으로 값의 분포가 이루어지므로 음수값이 발생하여 해당값의 수준을 직관적으로 파악하기 어려움이 있기 때문에, McCall (1923년)은 Z-Score에 10을 곱하고 50을 더해 주어 평균 50, 표준편차 10인 분포로 전환하는 T-Score를 제시하였다. Z-Score가 정상분포에 가까우면 주로 $-3 \leq Z \leq +3$ 의 값을 가지므로, 여기에서 얻어진 T-Score는 주로 20~80 사이의 값을 갖게 되어 전통적인 100점 단위와 유사하게 된다. 본 논문에서는 다음 Eq. (2)를 통한 T-Score를 산정하여 세부지표를 표준화하였다.

$$T = 10\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) + 50 \quad (2)$$

한편, 대책지수(RI)의 세부지표(RF)는 높은 값일수록 홍수방어 능력이 좋은 것을 의미한다. 따라서 홍수위험지수(FRI) 산정시 대책지수(RI)의 값이 높을수록 홍수방어에 취약성을 나타내는 지표값으로 변경이 필요하므로, 지표의 표준화 과정에 앞서 모든 세부지표의 값을 0을 기준으로 한 단계씩 상향시킨 후, 역수를 취한 값에 대하여 T-Score 방법으로 지표를 표준화하였다.

2.4 엔트로피(Entropy) 가중치 산정

엔트로피 가중치 추정방법은 대안과 속성을 많이 포함하는 현실적인 다기준 의사결정 문제에 대해 의사결정권자가 비교적 이해하기 쉬운 정보이론 방법을 적용하는 것으로, 사용자 주관에 배제되고, 이용된 지표의 속성 정보만을 이용하여 가중치를 산정하는 방법이다. 본 논문에서는 평가자의 주관적 개입으로 인한 항목 간 평가의 왜곡을 방지하기 위하여 엔트로피 이론을 이용한 세부지표별 가중치를 다음 Fig. 2와 같은 절차에 의해 산정하였다. 각 세부지표의 구축된 값을 소유역별로 행렬을 구성하고, 구성된 지표별로 정규화된 속성정보를 이용하여 각 속성별 엔트로피를 산정한 후, 최종적으로 지표간의 가중치를 결정하게 된다.

2.5 지표평균법을 이용한 홍수위험지수 산정방법

세부지표를 더하거나 빼거나 곱하거나 하는 과정을 통하여 하나의 지수로 결과를 도출할 수 있으며, 이때 각 세부지표에는 가중치를 고려할 수 있다. 본 논문에서는 HDI (UNDP, 2008), FVI (Connor and Hiroki, 2005), PFD (MLTM, 2001) 등 국내·외에서 지수산정시 널리 통용되고 있는 Eq. (3)과 같은 지표평균법을 이용하여, P-S-R 구성 체계에 따른 3개의 평가지수인 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지

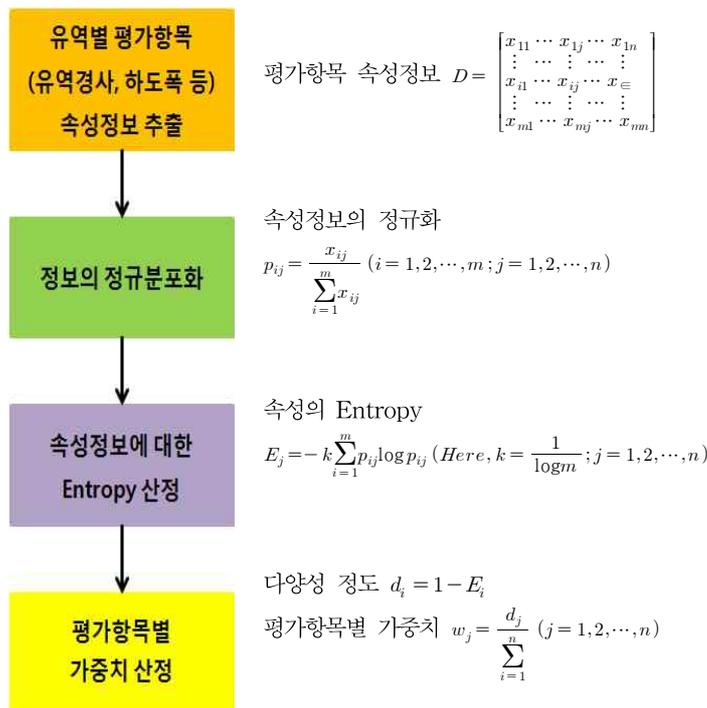


Fig. 2. Calculation Procedure for Entropy Weight Coefficients

수(RI)를 종합한 홍수위험지수(FRI)를 산정하였다.

$$FRI = PI^{\delta_1} \times SI^{\delta_2} \times RI^{\delta_3} \quad (3)$$

여기서, δ_1 , δ_2 , δ_3 는 각각 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)에 대한 가중치로 본 논문에서는 3개 지수의 중요성을 동등하게 간주하여 각각 1/3으로 가정하였다. 한편, 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)는 구성하는 각 세부지표들(PF, SF, RF)의 표준화 및 가중치(α , β , γ)의 부여 후, Eqs. (4)~(6)에 의해 산정된다.

$$PI = \sum_{i=1}^l \alpha_i PF_i \quad (4)$$

$$SI = \sum_{i=1}^m \beta_i SF_i \quad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n \gamma_i RF_i \quad (6)$$

여기서, l , m , n 은 각각 압력지표(PF), 현상지표(SF), 대책지표(RF)의 개수를 나타낸다.

2.6 지수의 평가등급 분류 방법

산정된 홍수위험지수는 홍수위험지구 구분을 위하여, 등간격법, 표준편차법, 분위법 및 자연적 구분법 등을 이용하여 등급 구간을 나눌 수 있다. 등간격법 분류법은 중권역 크기가 같고 지수들이 선형으로 분산되어 있는 경우에 적합한 방법이고, 표준편차법의 경우는 각 중권역의 지수집단이 정규분포를 하고 있는 경우에 적용하기 좋은 방법이며, 분위법은 각 등급에 같은 수의 중권역 수가 포함되도록 경계를 설정하여 불규칙한 간격의 등급구간의 경계의 중요성을 약화시키게 된다. Jenks and Caspell (1971)의 자연적 구분법의 기본개념은 중권역 내에서는 동질성을 유지하고 중권역간에서는 이질성을 최대화하여 그룹화하는 것으로 원하는 등급의 수에 따라서 최적의 등급구간의 경계를 설정할 수 있어, 중권역간 지수의 변화량이 큰 경우에 적합하다(SDI, 2006). 본 논문에서는 자연적 구분법의 개념을 이용하여, 홍수위험지수의 등급을 'Supreme', 'High', 'Medium', 'Low' 등의 총 4개로 분류하고, 홍수위험도에 따른 지구를 선별하였다.

3. 홍수위험도 평가결과

3.1 홍수위험도 평가지표 분석

낙동강 유역의 홍수위험도를 평가하기 위하여 자료구

축이 가능한 시·군·구 단위 공간적 분석을 실시하여, Fig. 3과 같이 6개의 압력지표(PF₁~PF₆), 4개의 현상지표(SF₁~SF₄), 그리고 7개의 대책지표(RF₁~RF₇)의 공간분포 자료를 구축하였다.

이와 같이 수집 분석된 각기 다른 단위 및 범위의 값을 갖는 총 17개의 세부지표들은 2.3절에서 설명된 T-Score 방법에 의해 동일 범위의 값으로 표준화하였다.

3.2 가중치 산정

엔트로피 가중치 추정 시, 지구에 따라 평가항목의 속성정보를 가지고 있지 않은 침수면적밀도, 양수량, 응급의료시설의 경우, 해당 지구의 속성정보가 0에 해당하여 log 계산이 이루어지지 않는 문제가 발생한다. 이와 같은 엔트로피 산정절차에 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 속성정보의 최소값을 0을 기준으로 자리 이동하여 0을 초과하는 속성정보로 변환시켰다. Table 2와 같이, 엔트로피 가중치 산정법에 의한 가중치 산정 결과를 보면, 인구밀도, 침수면적밀도와 하수도보급률의 가중치가 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 위 3개 지표의 최저값과 최고값의 편차가 크며 많은 자료가 낮은 값들에 몰려있어, 전체적으로 다른 세부지표들과 비교했을 때 가중치가 높게 산정되어 높은 변별력을 보였다.

3.3 압력, 현상, 대책 지수 산정결과

Table 1의 홍수위험도 평가 세부지표들을 Eqs. (4)~(6)을 적용하여 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)를 각각 산정하였다. 이때 Table 2의 가중치를 적용한 경우와 가중치를 동일하게 가정(가중치 미적용)한 경우에 대한 낙동강 유역의 3개 지수 산정결과는 Figs. 4~6과 같다. 지구별 홍수피해에 대한 물리적·환경적 압박을 평가하기 위한 수단으로, Fig. 4와 같이 가중치를 적용하여 산정한 압력지수(PI)의 결과를 권역별로 살펴보면 대구광역시, 부산광역시, 경상북도 구미시가 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 다른 유역과 비교해서 시가화율과 인구밀도가 높은 값을 나타내고, 해당지표의 가중치도 크게 산정된 것에 기인한다. 또한 Fig. 4의 두 결과를 비교해 보면, 가중치를 적용하지 않았을 때의 압력지수(PI)는 대구 및 경상북도 일부지역은 낮은 반면, 경상남도 지역은 높아지는 양상을 나타내고 있다.

지구별 홍수피해 가능성에 대한 수준을 판단할 수 있는 현상지수(SI)의 산정결과는 Fig. 5와 같이 경상북도 봉화군, 경상남도 진주시, 부산광역시 강서구 등이 높은 값을 보이고 있다. 경상북도 봉화군의 경우에는 다른 지역에

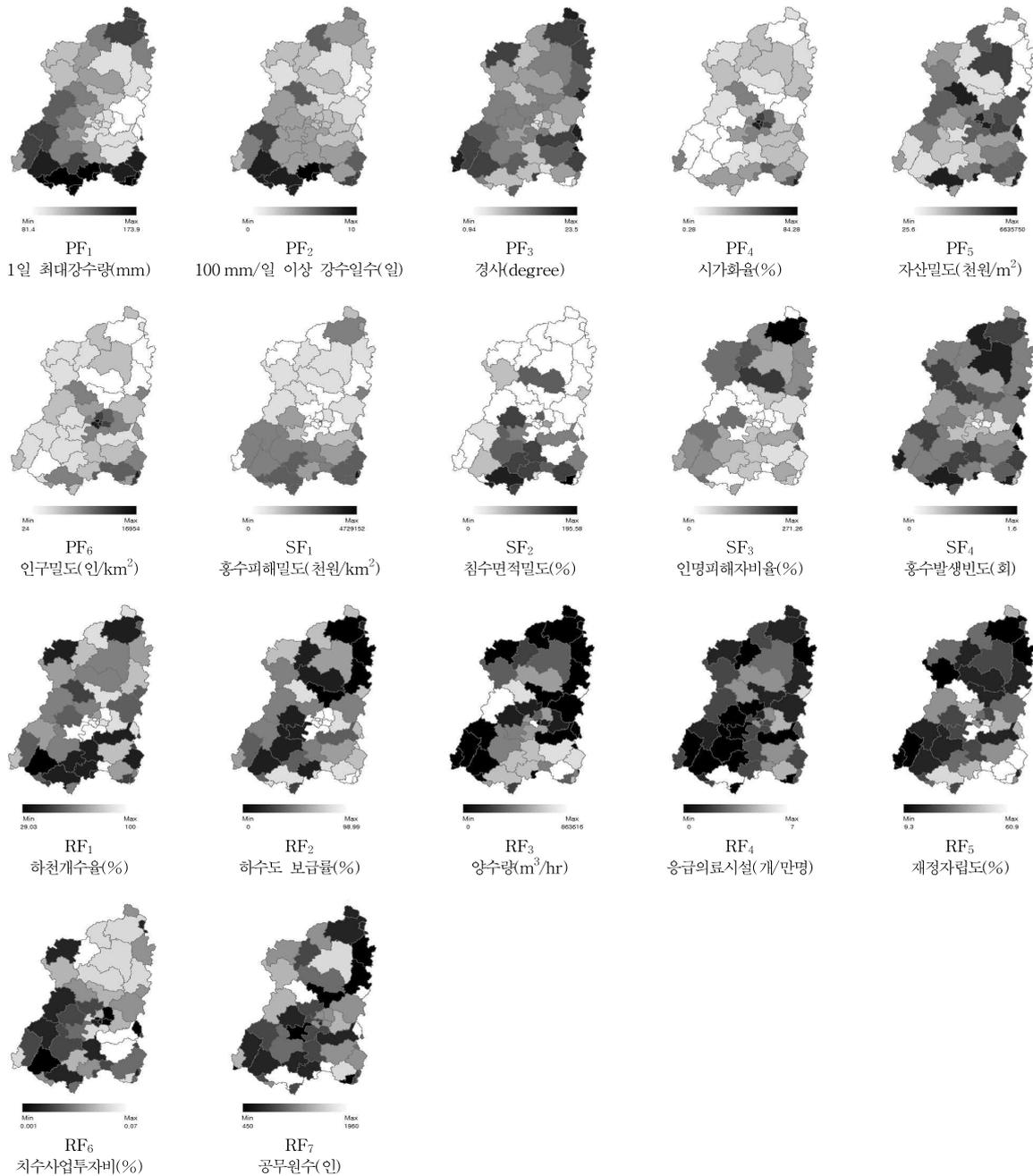


Fig. 3. Spatial Distribution of Flood Indexing Factors in the Nakdong River Watershed

비해 비교적 홍수발생빈도가 많고 이로 인해 침수면적밀도와 홍수피해밀도가 높으며 특히 인명피해자 비율이 다른 유역에 비해 매우 높게 나타나고 있다. 경상남도 진주시의 경우에는 인명 및 재산 피해는 평이하였으나 잦은 홍수발생 빈도와 침수면적밀도가 유독 높아 결과적으로 높은 현상지수(SI) 산정결과를 보이고 있다. 부산광역시 강서구의 경우에는 과거 홍수발생빈도는 상대적으로 적

으나 도심지역의 특성으로 인구가 밀집되고 자산가치가 높아, 적은 홍수발생에도 많은 인명과 재산피해를 유발시킨 것으로 보인다. 가중치를 적용하지 않았을 경우, 의령군과 창녕군을 비롯한 많은 지역에서 현상지수(SI)의 값이 한 단계 높게 나타나는 경향을 나타냈으며, 이러한 현상은 가중치가 낮은 홍수피해밀도와 홍수발생빈도가 가중치를 적용하지 않음으로서 현상지수에 미치는 영향이

Table 2. Entropy Weight Coefficient Results for 17 Flood Indexing Factors

지수	압력지수(PI)						현상지수(SI)			
세부 지표	1일 최대 강수량	100 mm/일 이상 강수일수	경사	시가지화율	자산밀도	인구밀도	홍수피해밀도	침수면적밀도	인명피해자비율	홍수발생밀도
지수별 가중치	1/3						1/3			
Entropy	0.008	0.049	0.023	0.322	0.099	0.499	0.176	0.395	0.423	0.007

지수	대책지수(RI)						
세부 지표	하천개수율	하수도보급률	양수량	응급의료시설	재정자립도	치수사업투자비	공무원수
지수별 가중치	1/3						
Entropy	0.016	0.489	0.329	0.070	0.029	0.046	0.019

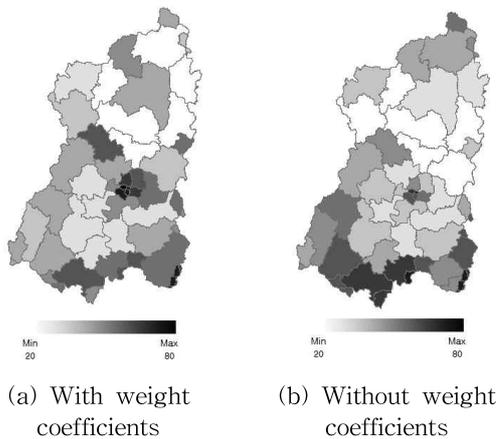


Fig. 4. Comparison of Pressure Index (PI) Results in the Nakdong River Watershed

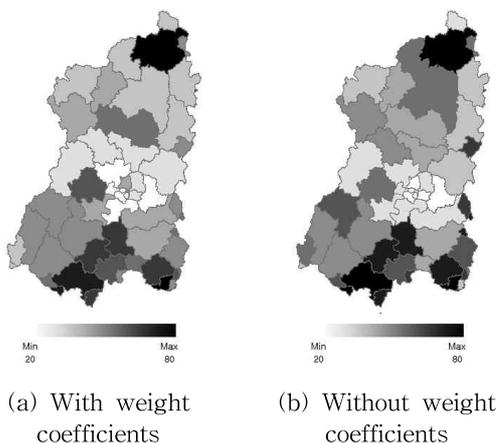


Fig. 5. Comparison of State Index (SI) Results in the Nakdong River Watershed

더욱 커졌기 때문이라 판단된다.

마지막으로 해당 지역에 대한 대책 마련 시, 기초 정보로 활용이 가능하며 지역에서 수행되어 온 홍수피해 저감 대책의 효과를 판단할 수 있는 대책지수(RI)의 경우, 2.3 절에서 언급한 것과 같이 수집한 자료값에 역수를 취하여 표준화하였으므로 지수의 값이 높을수록 홍수방어 능력이 적은 것을 의미한다. Fig. 6(a)의 가중치를 적용한 대책지수(RI) 산정결과를 살펴보면, 경상북도 군위군, 봉화군, 영양군의 값이 높게 산정되어, 다른 지역들에 비해 홍수대책이 미흡한 것으로 나타났다. 경상북도 봉화군의 경우에는 현상지수(SI)에서도 높은 값을 나타내고 있어, 과거 홍수피해에도 불구하고 대책이 아직 미흡한 것으로 분석되었다. Fig. 6(b)와 같이, 가중치 미적용 시에는 경

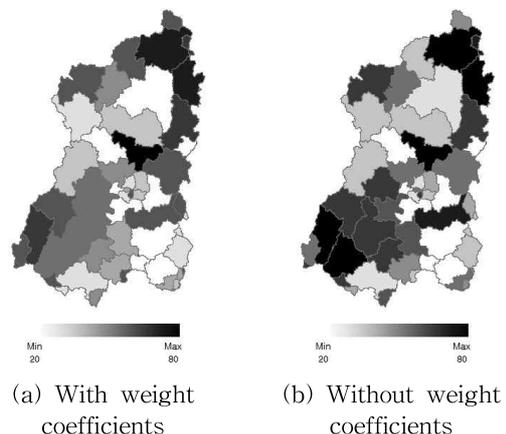


Fig. 6. Comparison of Response Index (RI) Results in the Nakdong River Watershed

상남도 지역의 대책지수(RI)가 더 크게 산정되는 양상을 보이며, 강원도 지역과 경주시의 경우에는 대책지수(RI)가 낮은 값을 나타내는 것을 살펴볼 수 있다.

3.4 홍수위험지수 산정결과

가중치 적용 및 미적용에 따라 각각 산정된 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)에 대해 Eq. (3)을 이용하여 최종적으로 홍수위험지수(FRI)를 산정한 결과는 Fig. 7과 같다. 엔트로피 가중치 방법을 적용한 결과를 보면 경상북도에서는 봉화군과 군위군, 대구광역시 중구와 서구, 부산광역시 동래구와 부산진구가 홍수위험지수(FRI)가 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 산정결과의 원인을 살펴보면, 봉화군의 경우 다른 유역보다 인명피해자 비율과 대책지수의 지표값들이 다른 지역에 비해 매우 높은 결과로 홍수위험지수(FRI)가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다. 군위군의 경우, 다른 지수의 값들은 상대적으로 다른 지역과 크게 차이가 없으나 대책지수값이 매우 높으며, 대구광역시의 경우에는 시가화율, 인구밀도, 치수사업투자비의 지표값이 다른 지역보다 높은 것을 볼 수 있다. 부산광역시의 경우에는 인구밀도, 시가화율, 1일 최대 강수량이 다른 지역보다 높아 홍수위험지수가 상대적으로 높은 결과를 보이는 것으로 분석된다. 또한 높은 가중치가 적용된 인구밀도, 시가화율, 침수면적, 인명피해자비율, 하수도 보급률 값들의 영향이 홍수위험지수(FRI) 산정결과의 분포 차이를 더욱 가중시킨 것으로 사료된다. 가중치를 적용하지 않은 분석결과를 보면, 경상남도의 경우에는 과거 홍수로 인한 피해를 나타내는 침수면적밀도와 홍수피해액이 다른 지역에 비해 전반적으로 높으므로, 이들 값이 가중치를 적용하지 않았을 때

오히려 중요하게 작용하여 홍수위험지수(FRI)를 높여주는 결과를 나타낸다. 가중치를 적용하지 않고 분석한 결과는 가중치를 적용한 분석결과보다 전반적으로 홍수위험지수(FRI)가 높게 산정된 것을 볼 수 있으며, 높은 홍수위험지수(FRI)가 특정유역에 편중되어 강원도, 경상남도, 전라북도, 부산광역시 지역에 주로 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 7에서 동일 지역의 가중치 적용 유·무에 따른 결과를 비교해 보면, 봉화군은 두 경우 모두 높은 홍수위험도를 보이지만 군위군과 대구 지역은 두 결과에 큰 차이를 보이고 있다. 또한 경상남도와 부산광역시의 경우 가중치를 적용하지 않고 분석한 결과가 가중치를 적용하여 분석한 결과보다 높게 산정된 것을 볼 수 있다. 낙동강 유역에 대한 전체적인 분석결과를 살펴볼 때, 가중치를 적용한 경우에는 경상북도 북부지역과 도시 지역을 중심으로 높은 홍수위험지수 산정결과를 보이며, 가중치를 적용하지 않은 경우에는 대체적으로 경상남도 지역이 다른 지역들에 비해 높은 홍수위험지수(FRI)를 나타낸다.

3.5 홍수위험지수 적용성 검토

본 논문에서 산정된 홍수위험지수(FRI)를 2010년에 특별 재고시된 자연재해위험지구와 비교하여 가중치 적용 및 미적용에 따른 홍수위험지수(FRI)의 적용성을 검토하였다. 자연재해위험지구란 태풍·홍수·호우·폭풍·해일·폭설 등 불가항력적인 자연의 힘에 의한 현상으로부터 안전하지 못하여 국민의 생명과 재산에 피해를 줄 수 있는 지역과 자연재해저감시설을 포함한 주변지역으로서 「자연재해대책법」 제12조의 규정에 의하여 지정된 지구를 말한다. 본 논문에서는 유형에 따라 6개로 분류되는 자연재해위험지구 중, 침수위험지구를 비교대상으로 선정하고, 원활한 비교를 위해 산정된 홍수위험지수(FRI)를 2.6절에서 설명한 자연적 구분법 개념을 이용하여 분류한 'Low' 등급을 제외한 나머지 등급을 홍수위험지구로 분류하였다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이, 홍수위험지수(FRI)를 바탕으로 선정한 홍수위험지구와 자연재해위험지구의 시·군·구별 비교결과를 살펴보면, 가중치를 적용하여 분석한 결과(20개소)가 가중치를 적용하지 않은 분석결과(18개소)보다 자연재해위험지구와 일치하는 지역이 다소 많았으며, 가중치를 적용한 결과는 낙동강 유역 내 홍수위험지구가 비교적 고르게 분포되어 있는 반면, 가중치를 적용하지 않은 경우에는 경상남도 지역에 다소 집중되는 경향을 보이고 있다.

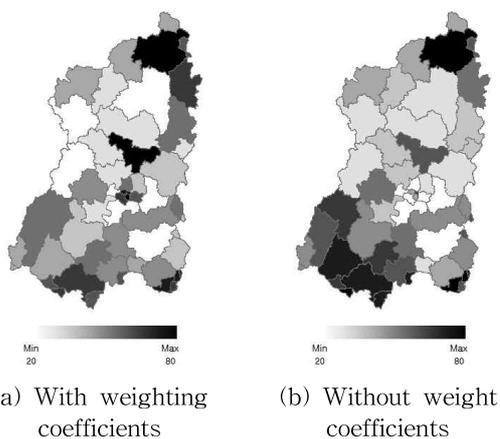
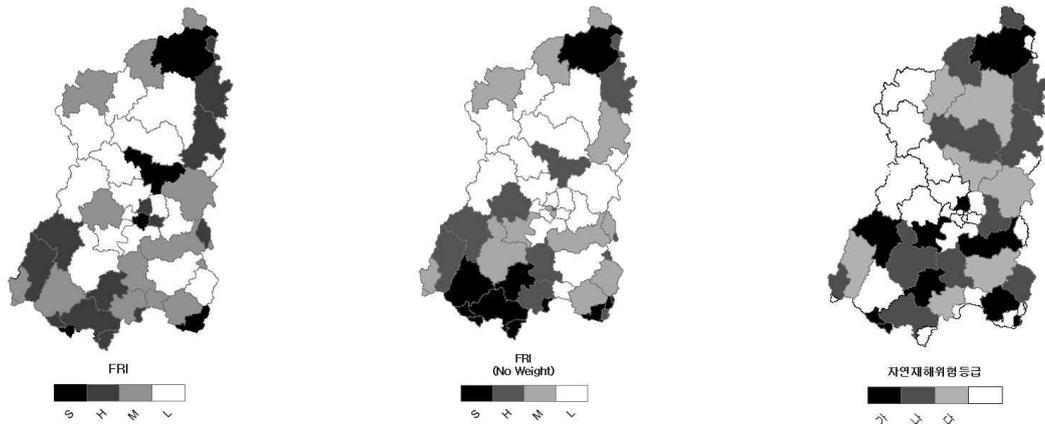


Fig. 7. Comparison of Flood Risk Index (FRI) Results in the Nakdong River Watershed



(a) Flood risk districts from FRI with weight coefficients (b) Flood risk districts from FRI without weight coefficients (c) Natural disaster risk areas officially announced in 2010

Fig. 8. Comparison of Flood Risk District Results from Flood Risk Index (FRI) and Natural Disaster Risk Areas in 2010

4. 결 론

본 논문에서는 통합홍수위험관리 측면에서 지역별 홍수방어대책 우선순위 선정에 위해, 홍수위험이 상대적으로 높은 지역과 낮은 지역을 평가할 수 있는 홍수위험지수(FRI)의 산정방법과 그 적용방법에 대해 설명하고자 하였다. 홍수위험지수(FRI)를 산정하기에 앞서 홍수위험도 지표의 분류방법 및 세부지표 설정의 중요성에 대해 검토하였으며, 세부지표별 가중치가 홍수위험지수 산정에 미치는 영향을 비교하여 제시하고자 하였다. 이를 위해 낙동강 유역을 대상으로 평가 세부지표를 설정하고, 지표의 표준화 및 가중치 산정을 통하여 홍수위험지수(FRI)를 산정한 후, 자연재해위험지구 현황과의 비교를 통하여 본 논문에서 제시한 홍수위험지수(FRI) 산정방법의 적용성을 평가하고자 하였다.

본 논문에서는 우리나라의 홍수피해에 영향을 미치는 요인들을 P-S-R 구성 체계로 분류하여 3개의 치수특성 평가지수인 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RI)를 대표하는 총 17개 세부지표들을 선정하여 낙동강 유역 내 시·군·구 공간단위의 자료를 구축하였다. 또한 홍수위험지수(FRI)산정에 있어서 가중치를 산정하는 방법은 매우 중요하고 신중해야 하므로, 사용자의 주관을 배제하기 위해 정보이론에 근거한 엔트로피 가중치 추정방법을 적용하여 지표의 속성 정보만을 이용한 가중치를 산정하였다. 잘못된 가중치 산정은 선정된 평가지표의 값을 왜곡하고 잘못된 분석결과를 도출하게 되어 최종 의사결정에 있어서 부적절한 선택을 유발하는 요인이 되므로, 엔트로피

가중계수의 적용 유·무에 따라 각각 산정된 홍수위험지수(FRI)를 비교·검토하였다. 또한 산정된 홍수위험지수(FRI)에 근거하여 선정한 홍수위험지구를 자연재해위험지구 중 침수위험지구 현황과 비교하여 본 논문에서 제시한 홍수위험지수(FRI) 산정방법의 적용성을 검토한 결과, 가중치를 고려한 홍수위험지구가 자연재해위험지구와 보다 잘 일치하는 양상을 나타내었다.

본 논문에서 제시한 홍수위험지수(FRI)는 홍수의 원인, 피해 및 대응에 관한 역학관계의 결과로서, 홍수위험 관련 정보를 공간적으로 분석하여 정부 및 지자체의 홍수방재 관련 정책수립 등의 업무수행을 위한 보다 효과적인 의사결정에 도움을 줄 것으로 기대한다. 향후 연구에서는 최근 홍수양상과 지역적 특성을 충분히 반영하는 객관적이고 대표적인 고해상도의 홍수위험도 평가지표 자료를 구축할 필요가 있으며, 본 논문에서 수행한 가중치의 적용유무에 따른 결과비교와 더불어 본 논문의 한계점인 가중치가 홍수위험지수(FRI) 산정결과에 미치는 영향에 대한 정량적인 민감도 분석이 요구된다. 또한 현재 수집 자료의 제한성 등으로 인해 홍수위험지수(FRI)가 시·군·구 단위로 산정된 한계점이 있으므로, 치수사업 우선순위 선정 등 방재대책 수립 시 제안된 홍수위험지수(FRI)를 실질적으로 활용하기 위해서는, 유역단위의 신뢰성 있는 세분화된 자료의 확보 및 분석이 절실히 요구된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발 사업인

‘중·소하천 홍수 예·경보 체계 구축’ 과제[NEMA-Nature-2011-45]의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

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

FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2011). National flood insurance program: Flood insurance manual. Washington, DC., USA.

GTK (Geological Survey of Finland). (2006). Project 1.3.1 : The spatial effects and management of natural and technological hazard in general and in relation to climate change. Final Report, European Spatial Planning Observation Network.

Jain, A., Nandakumar, K., and Ross, A. (2005). “Score normalization in multimodal biometric systems.” *Pattern Recognition*, Vol. 38, pp. 2270-2285.

Jenks, G.F., and Caspell, F.G. (1971). “Error in choroplethic maps: definitions, measurement and reduction.” *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 61, No. 2, pp. 271-244.

Kang, M.G., and Kim, W.G. (2006). “Use of index and indicator for assessment on water resources and environment in a watershed.” *Water and Future*, Vol. 39, No. 3, pp. 37-48.

KICT (Korea Institute of Construction Technology). (2008). Development of evaluation technique on the abnormal flood. 3rd interim report.

Kim, J.H., and Kim, Y.H. (2003). “Improving potential flood damage.” *Proceedings 2003 Annual Conference*, KSCE, pp. 2373-2378.

KRIHS (Korea Research Institute for Human Settlements). (2005). Analysis of flood damage characteristics and development of flood damage index. HRIHS 2005-6.

Kron, W. (2003). *Flood risk=hazard×exposure× vulnerability*. Flood Defence, Edited by Wu et al., Science Press, New York. N.Y., pp. 82-97.

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 Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70.

McCall, W.A. (1923). “Science of Education.” *The Journal of Educational Research*, Vol. 7, No. 5, pp. 384-396.

Merabtene, T., Yoshitani, J., and Kuribayashi, D. (2004). Managing Flood and Water-related Risks: A challenge for the future. *AOGS 2004 Joint 1st Annual Meeting & 2nd APHW Conference*, Singapore, pp. 1-8.

MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2001). “Water vision 2020.”

NEMA (National Emergency Management Agency). (2006). Construction of regional safety assesment system.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (1991). Environmental indicators. A preliminary set. Paris, France.

Ologunorisa, E.T. (2004). “An assessment of flood vulnerability zones in the Niger Delta.” *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 61, No. 1, pp. 31-38.

Prakasa, B.S., Rao, K.S., Murty, R., and Amminedu, E. (2005). “Estimation of Flood Vulnerability Index for Delta Area through RS and GIS.” *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS '05. Proceedings, IEEE International, pp. 3611-3614.

SDI (Seoul Development Institute). (2006). Development of the regional safety assesment model in Seoul. SDI2006-R-37.

UNDP (United Nations Development Programme). (2004). “Reducing disaster risk : A challenge for development.” New York, NY., USA.

UNDP (United Nations Development Programme). (2008). “Fighting climate change; Human solidarity in a divided world.” Human Development Report 2007/2008.

UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). (2004). Living with risk : A global review of disaster reduction initiatives. Geneva. Swiss.

논문번호: 12-091	접수: 2012.08.08
수정일자: 2012.09.17/09.19	심사완료: 2012.09.19