

Fuzzy TOPSIS를 사용한 홍수의 공간적 취약성 평가

Spatial Flood Vulnerability Using Fuzzy TOPSIS

김영규*, 전상목**, 이보람***, 정은성****

Kim Yeong Kyu, Jun Sang Mook, Lee Bo Ram, Chung Eun Sung

요 지

본 연구는 불확실성을 고려하여 홍수 취약성 평가를 정량화하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 현실 세계로부터 얻는 많은 정보들은 불확실성을 가지고 있으므로 본 연구는 우리나라의 공간적 홍수 취약성을 산정하기 위해 Fuzzy TOPSIS 기법을 사용하였다. 또한 Fuzzy TOPSIS의 결과를 TOPSIS 및 가중합계법을 적용한 결과와 비교하였다. 그 결과 일부 지역의 취약성 순위가 큰 폭으로 역전되는 현상을 보였다. Spearman 순위 상관분석을 실시한 결과 TOPSIS와 가중합계법의 순위는 높은 일치성을 보였으나 Fuzzy TOPSIS의 순위와는 상당히 일치하지 않은 결과를 나타냈다. 즉, Fuzzy 개념을 반영하여 지역별 취약성을 산정할 경우 우선순위의 변동이 크게 발생할 수 있으므로 본 연구에서 제시한 모형도 하나의 취약성 평가의 방법이 될 수 있다.

핵심용어 : 홍수 취약성 평가, 불확실성, Fuzzy TOPSIS

1. 서론

유역관리상태에 대한 평가는 수량, 수질 등과 같은 단일 지표만으로는 평가하기 어렵기 때문에 유역 시스템을 구성하는 요소들을 종합적으로 평가할 수 있는 통합지수(Index)와 다양한 지표(Indicator)들이 필요하며 이와 관련된 많은 연구들이 이루어지고 있다. 그러나 지금까지의 연구들은 지수를 산정하기 위해 입력되는 수문자료 및 인문사회 자료의 불확실성을 고려하지 않았다. 즉 자연 및 사회 시스템과 각 구성요소들 간의 인과관계는 매우 복잡하고 또한 시스템의 특성을 잘 반영할 수 있는 자료의 확보가 어렵기 때문에 기후 변화 영향을 고려하여 취약성을 평가하기 위한 지수 산정에는 많은 불확실성이 내재되어있다(Jones, 2000; Webster et al., 2003; Patt et al., 2005). 이러한 입력 자료의 불확실성을 해결하기 위해 많은 연구자들은 퍼지 개념(Zadeh, 1965)을 사용하였다. 따라서 본 연구는 불확실성을 고려한 새로운 홍수 취약성 평가방법의 하나로 Fuzzy TOPSIS 기법의 적용성을 16개 광역시도를 대상으로 평가하였다. 이를 위해 대응변수와 가중치는 국립환경과학원(2012)의 값을 사용하였다. 또한 각 대응변수의 값과 가중치 값을 Triangular fuzzy number (TFN)로 변환하여 TOPSIS에 적용하였고 Fuzzy TOPSIS의 적용성을 검토하기 위해 TOPSIS와 가중합계법을 적용한 결과와 비교하였다.

2. 연구방법

본 연구의 과정은 5단계로 구분될 수 있다. Step 1에서는 입력 자료의 히스토그램 분포를 확인하여 평가 기준의 변별성을 확인한 뒤 부족한 변수들은 로그 형태로 변환하여 다시 검토한다. 또한 각 대응변수의 측

* 학생회원 · 서울과학기술대학교 산업대학원 토목과 석사과정 · E-mail : ykkim0603@hanmail.net

** 학생회원 · 서울과학기술대학교 산업대학원 토목과 석사과정 · E-mail : ism3141@nate.com

*** 비회원 · 서울과학기술대학교 산업대학원 토목과 석사과정 · E-mail : unoxygen@naver.com

**** 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수 · E-mail : eschung@snut.ac.kr

정 단위가 다양하기 때문에 Noncommensurable(표준화) 한다. Step 2에서는 입력 자료와 가중치를 TFN으로 변환하고 Step 3에서는 서로 다른 축척의 TFN을 표준화한다. Step 4에서는 Fuzzy TOPSIS 기법을 사용하여 취약성을 산정하며 Step 5에서는 Spearman 상관분석을 실시하여 Fuzzy TOPSIS와 TOPSIS 및 가중합계법의 결과의 일치 정도를 확인한다.

3. Fuzzy TOPSIS의 적용

3.1 대용변수

본 연구에서 사용한 국립환경과학원(2012)의 대용변수와 가중치는 Table 1과 같이 민감도 9개, 적응능력 7개, 기후노출 5개, 총 21개의 대용변수로 구성되어 있다.

Table 1. Proxy Variables for Flood Vulnerability Assessment (National Institute of Environmental Research, 2012)

Proxy Variable	Weights	Name of Specific Proxy Variables		Weights
Sensitivity	0.37	C1	Low-lying Area of less than 10 meters (km)	0.31
		C2	Low-lying household of less than 10 meters	0.23
		C3	Area ratio with the banks (%)	0.19
		C4	Population density (persons/km ²)	0.16
		C5	Total population	0.11
		C6	Regional average slope (deg)	0.10
		C7	Percentage of road area (%)	0.10
		C8	Flood damage cost (last three years) (10 ³ won)	0.07
		C9	Flood damage population (last three years) (10 ³ won)	0.12
		Sum	1	
Adaptive Capacity	0.30	C10	Financial Independence (%)	0.10
		C11	Civil servants per population (persons/10 ³ people)	0.11
		C12	GRDP (10 ⁶ won)	0.07
		C13	Number of civil servants related to water	0.16
		C14	Rivers Improvement rate (%)	0.15
		C15	Capacity of drainage Facilities (m ³ /min)	0.13
		C16	Flood control ability of reservoirs (10 ⁶ m ³)	0.07
		Sum	1	
Exposure	0.33	C17	Daily maximum precipitation (mm)	0.11
		C18	Days over 80 mm rainfall (day)	0.13
		C19	Maximum rainfall of 5 days period (mm/5 days)	0.14
		C20	Surface Runoff (mm/day)	0.21
		C21	Summer Precipitation (June to September) (mm)	0.21
				Sum

3.2 자료의 분포형태 확인 및 표준화

각 세부 대용변수의 자료는 히스토그램을 통해 자료의 분포 형태를 확인하여 분포가 고르지 않아서 변별력이 떨어지는 자료는 로그형태로 변환하였다. 또한 각 대용변수는 서로 다른 단위를 가지고 있기 때문에 통합 지수를 만들기 위해서는 다양한 값들을 표준화하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 Eq. (1)와 같이 자료를 전체 자료범위 내에서 표준화하여 0~1의 값을 갖도록 만드는 Re-scaling 방법을 사용하였다. 여기서 x_c 는 c 지역의 지표 q 의 대용변수 값이다. $\min_c(x_q)$ 는 지표 q 의 전체 지역 (c)에 대한 대용변수 값 중 최소값을 의미하며 $\max_{\tilde{c}}(x_q)$ 는 지표 q 의 전체 지역 (\tilde{c})에 대한 대용변수 값 중 최대값을 의미한다.

$$x_{qc} = \frac{x_{qc} - \min_c(x_q)}{\max_{\tilde{c}}(x_q) - \min_{\tilde{c}}(x_q)} \quad (1)$$

3.3 Triangular fuzzy number(TFN)

232개의 지자체를 16개 광역시도 단위로 취약성을 정량화하기 위해 각 16개 광역시도의 세부 대응변수 자료를 (Minimum, Mode, Maximum)형태의 TFN으로 변환하였다. 예를 들어 서울특별시의 경우 25개의 구로 구성되어있으며 각 세부 대응변수에 대한 25개구의 값을 대상으로 히스토그램을 그려 최소값과 최빈값, 최대값을 도출하여 TFN으로 사용하였다. 나머지 15개 광역시도의 경우도 동일하게 시군구의 각 세부 대응변수의 값을 TFN으로 변환하였다. 가중치의 경우도 11명의 전문가가 부여한 값을 대상으로 히스토그램을 통해 최소값과 최빈값, 최대값을 도출하여 삼각 퍼지수를 산정하였다.

3.4 Fuzzy TOPSIS

TFN을 TOPSIS를 적용하기위해 TFN의 서로 다른 축척을 TFN의 성질을 유지하면서 비교 가능한 축척으로 표준화해야한다. 표준화된 퍼지 행렬 은 Eq. (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{R} [r_{ij}], \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, \dots, m) \\ (j = 1, 2, \dots, n) \end{matrix} \quad (2)$$

여기서, 은 표준화된 TFN을 의미하며 i 는 각 지자체, j 는 각 속성의 갯수를 의미한다. 또한 Eqs. (3)~(6)의 B 와 C 는 각 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)의 집합이다.

$$c_j^* = \max_i c_{ij}, \text{ if } j \in B \quad (3)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B \quad (4)$$

$$a_j^* = \min_i a_{ij}, \text{ if } j \in C \quad (5)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^*}{c_{ij}}, \frac{a_j^*}{b_{ij}}, \frac{a_j^*}{a_{ij}} \right), j \in C \quad (6)$$

여기서 $\tilde{r}_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$ 라 할 때 표준화된 퍼지 행렬 R 로부터 퍼지 양의 이상적인 해(Fuzzy Positive Ideal Solution, FPIS)와 퍼지 부의 이상적인 해(Fuzzy Negative Ideal Solution, FNIS)는 Eq. (7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} A^+ &= (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) \\ A^- &= (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $v_j^+ = (v_j^+, v_j^+, v_j^+)$, $v_j^- = (v_j^-, v_j^-, v_j^-)$ 이고, $v_j^+ = \max_i \gamma_{ij}$, $v_j^- = \min_i \alpha_{ij}$ 이다. A^+ (FPIS), A^-

(FNIS)와 각 지자체(i)와의 거리는 Eq. (8)와 같이 TFN $m = (m_1, m_2, m_3)$ 과 TFN $n = (n_1, n_2, n_3)$ 의 거리를 구하는 방법으로 계산할 수 있다. 또한 A^+ (FPIS)와 A^- (FNIS)로 부터 각 지자체(i)와의 간격 d_i^+ 와 d_i^- 은 Eqs. (9) 과 (11)을 이용해 유도할 수 있으며 각 대안의 상대적 근접도 계수, C^+ 는 Eq. (11)를 이용해서 도출할 수 있다. 여기서 1위는 가장 취약한 지역이며 16위는 가장 덜 취약한 지역을 의미한다. 이를 바탕으로 16개 광역시도의 근접도 계수와 홍수 취약성의 순위를 도출하여 Table 7과 같이 나타내었다.

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2] \quad (8)$$

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(r_{ij}, v_j^+) \quad (9)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (10)$$

$$d_i^{+-} = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (11)$$

Table 2. Similarity (C^+) and Rankings of 16 Local Governments

Symbols of 16 Local Governments	C^+	d^-	C^+	RANK
A1	0.87	0.38	0.30	16
A2	0.75	0.60	0.45	2
A3	0.82	0.46	0.36	9
A4	0.85	0.48	0.36	10
A5	0.81	0.43	0.35	13
A6	0.84	0.38	0.31	15
A7	0.77	0.54	0.41	4
A8	0.87	0.49	0.36	11
A9	0.84	0.52	0.38	7
A10	0.83	0.47	0.36	12
A11	0.87	0.43	0.33	14
A12	0.84	0.51	0.38	8
A13	0.79	0.64	0.45	1
A14	0.83	0.53	0.39	6
A15	0.79	0.59	0.43	3
A16	0.75	0.51	0.40	5

3.5 TOPSIS와 가중합계법과의 비교

Fuzzy TOPSIS의 결과와 TOPSIS 및 가중합계법의 결과를 나타내면 Fig. 1과 같다. Fuzzy TOPSIS에서 1위를 했던 전라남도가 TOPSIS에서 4위로 나타났고 반대로 Fuzzy TOPSIS에서 5위를 했던 제주도가 TOPSIS에서 1위로 나타났으며 Fuzzy TOPSIS에서 6, 7위였던 경상북도와 강원도는 TOPSIS에서 11, 12위를 하였고 Fuzzy TOPSIS에서 13, 15위였던 광주광역시와 대전광역시가 TOPSIS에서는 6, 8위를 하였다. 그 외의 순위는 같거나 변동이 미소하게 나타났다. Fuzzy TOPSIS와 가중합계법을 비교한 결과 전라남도과 제주도는 가중합계법에서 4위와 1위로 나타났다. 또한 Fuzzy TOPSIS에서 6, 7위가 가중합계법에서는 8, 11위로 순위가 변동되었으며 Fuzzy TOPSIS에서 13, 15위가 가중합계법에서 6, 12위로 순위가 변동되었다. 나머지 순위는 같거나 변동이 미소하게 나타났다.

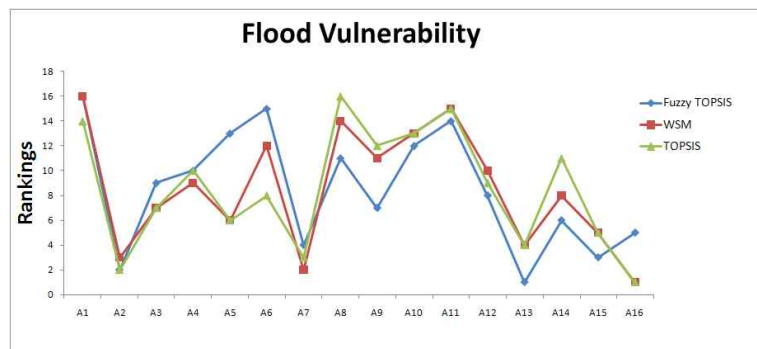


Fig. 1 Results of Fuzzy-TOPSIS, TOPSIS and Weighted Sum Method

3.6 Spearman rank 상관계수

본 연구에서는 각 방법에 따른 순위의 상관관계를 조사하기 위해 Spearman rank correlation coefficient ρ 를 Eq. (12)과 같이 계산하였다. 여기서 변수 x 의 i 번째 관측치의 순위를 $R(x_i)$ 로 나타내고 변수 y 의 i 번째 관측치의 순위를 $R(y_i)$ 로 나타낸다. n 은 변수의 총 개수이다. 각 적용방법에 따른 순위의 상관분석을 위해 Spearman rank 상관계수(ρ)를 계산하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R(x_i) - R(y_i))^2}{n(n^2 - 1)} \quad (12)$$

Fuzzy TOPSIS와 TOPSIS는 상관계수가 0.69으로 낮은 일치성을 보였으며, Fuzzy TOPSIS와 가중합계법의 결과와는 상관계수가 0.81, 가중합계법의 결과와 TOPSIS와의 결과는 0.94로 매우 높은 일치성을 나타냈다.

Table 3. Spearman Rank Correlation Coefficients (ρ)

ρ	Fuzzy TOPSIS	TOPSIS	Weighted sum method
Fuzzy TOPSIS	1	0.69	0.81
TOPSIS	-	1	0.94
Weighted sum method	-	-	1

4. 결론

본 연구는 Fuzzy TOPSIS와 델파이 조사를 토대로 불확실성을 고려할 수 있는 홍수 취약성 평가 방법을 우리나라 16개 광역시도에 적용하였다.

Fuzzy TOPSIS의 결과를 TOPSIS와 비교한 결과 Fuzzy TOPSIS에서 1위를 했던 전라남도 TOPSIS의 경우 5위로 나타났고 반대로 5위를 했던 제주도가 1위로 나타나는 역전현상이 발생하였다. 또한 이러한 현상을 정량적으로 확인하기 위해 Spearman 상관분석을 실시한 결과 Fuzzy TOPSIS와 TOPSIS는 상관계수가 0.69으로 낮게 나타났으며, 가중합계법의 결과와는 상관계수가 0.81로 비교적 낮게 나타났다. 따라서 Fuzzy TOPSIS의 결과와 Fuzzy 개념을 결합하지 않은 일반적인 MCDM 방법들의 결과는 입력하는 자료의 불확실성으로 인해 본 연구와 같이 크게 다를 수 있으므로 취약성 산정을 위해서 불확실성을 고려하기 위해 Fuzzy TOPSIS 방법을 사용하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

더 나아가 본 연구에서는 소속함수를 삼각형으로 정의하여 TFN을 사용하였으나 그 외의 다양한 소속함수를 비교하여 최적의 소속함수를 적용함으로써 모형의 효율성을 높일 수 있다. 따라서 Fuzzy TOPSIS 방법을 사용하는 것은 향후 수자원과 관련된 다양한 취약성 산정 연구에서 평가기준의 선정과 가중치의 결정 및 입력자료, 특히 미래 기후자료 등의 불확실성을 고려하기 위해 신뢰성 있는 하나의 방법이 될 수 있다.