韓國水資源學會論文集
第46卷 第2號·2013年 2月
pp. 99~109

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 46, No. 2:99-109, February 2013
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.2.99
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

홍수 취약성 평가를 위한 그룹 의사결정 접근법

Group Decision Making Approach to Flood Vulnerability Assessment

김 영 규* / 정 은 성** / 이 길 성*** / 김 연 주****

Kim, Yeong Kyu / Chung, Eun-Sung / Lee, Kil Seong / Kim, Yeonjoo

Abstract

Increasing complexity of the basin environments makes it difficult for single decision maker to consider all relevant aspects of problem, and thus the uncertainty of decision making grows. This study attempts to develop an approach to quantify the spatial flood vulnerability of South Korea. Fuzzy TOPSIS is used to calculate individual preference by each group and then three GDM techniques (Borda count method, Condorcet method, and Copeland method) are used to integrate the individual preference. Finally, rankings from Fuzzy TOPSIS, TOPSIS, and GDM are compared with Spearman rank correlation, Kendall rank correlation, and Emond & Mason rank correlation. As a result, the rankings of some areas are dramatically changed by the use of GDM techniques. Because GDM technique in regional vulnerability assessment may cause a significant change in priorities, the model presented in this study should be considered for objective flood vulnerability assessment.

Keywords : flood vulnerability assessment, Fuzzy TOPSIS, group decision making, rank correlation analysis

요 지

유역 환경에 대한 복잡성의 증가는 단일 의사결정자들이 의사결정문제의 모든 부분을 고려하는 것을 점점 더 불가능하게 만들기 때문에 불확실성은 더욱 증가하게 된다. 따라서 본 연구는 그룹의사결정기법을 사용하여 우리나라 공간적인 홍수 취약성을 정량화하는 접근법을 제시하였다. 개인의 선호도를 분석하기위해 Fuzzy TOPSIS를 사용하였고 개인 선호도의 통합을 위해 Borda count, Condorcet 그리고 Copeland 방법을 사용하였다. 마지막으로 도출된 결과를 Fuzzy TOPSIS 및 TOPSIS의 결과와 비교하였고 스피어만 순위상관계수와 켄달의 순위상관계수, Emond와 Mason이 제시한 순위상관분석을 이용하여 순위의 일치성을 검토하였다. 그 결과 일부 지역의 취약성 순위가 큰 폭으로 역전되는 현상을 보였다. 그룹의사결정 개념을 반영하여 지역별 취약성을 산정할 경우 우선순위의 변동이 클 수 있으므로 홍수 취약성 산정시 본 연구에서 제시된 모델을 고려할 필요가 있다.

핵심용어 : 홍수 취약성 평가, Fuzzy TOPSIS, 그룹의사결정, 순위상관분석

* 한국기후변화대응전략연구소 선임연구원 (e-mail: rnd004@kricccs.com)
Korea Research Institute of Climate Countermeasure Strategies
** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인학과 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-9017)
Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology
*** 서울대학교 건설환경공학부 교수 (e-mail: kilselee@snu.ac.kr)
Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University
**** 한국환경정책·평가연구원 부연구위원 (e-mail: yjkim@kei.re.kr)
Korea Environment Institute

1. 서 론

유역관리상태에 대한 평가는 수량, 수질 등과 같은 단일 지표만으로는 평가하기 어렵기 때문에 유역시스템을 구성하는 요소들을 종합적으로 평가할 수 있는 통합지수(Index)와 다양한 지표(Indicator)들이 필요하며 이와 관련된 연구들이 최근 이루어지고 있다(Ko and Kim, 2009; Chung and Lee, 2007; Chung et al., 2008; Jun et al., 2011; Jung et al., 2011; Son et al., 2011). 또한 지수를 개발함에 있어 다양한 속성의 평가 지표들을 통합하기위해 많은 연구들이 다기준 의사결정기법(Multi Criteria Decision Making, MCDM)을 사용하였다. 이러한 MCDM기법은 평가기준(Criteria)들의 상대적 중요도와 각 대안의 각 기준에 대한 선호도를 측정하는 것이 중요하다. 그러나 유역의 환경은 사회, 경제, 기후변화와 밀접한 인과관계를 맺고 있으며 이해관계자들의 갈등이 첨예하게 대립하고 있는 복잡한 시스템이다. 따라서 평가기준의 속성이 다양하고 기준별 선호도에 대한 정보의 척도나 가치가 다를 수밖에 없기 때문에 단일 의사결정자가 아닌 다수의 전문가가 참여하는 그룹 의사결정(Group Decision Making, GDM)을 함으로써 불확실성을 줄이고 합리적인 결과를 도출해야 한다. 따라서 최근에는 다기준 의사결정기법과 이와 결합된 접근법들이 다양한 분야에서 제안되고 있다.

Cho et al. (2006)은 각 의사결정자들의 주관적인 평가에 의한 의견을 효율적으로 수렴시켜 합의안을 찾는 문제를 해결하기 위해 최소 거리척도를 이용한 다기준 그룹 의사결정 기법을 제시한바 있다. Shih et al. (2007)은 인력채용을 위해 지원자들을 평가하는 GDM 문제에 대해 MCDM기법중 하나인 TOPSIS를 적용하였고 각 의사결정자들의 선호도를 고려하여 도출한 각 분리 측정치(Separation measures)를 산술평균과 기하평균을 이용하여 통합된 분리 측정치를 계산하였고 이를 통해 각 지원자의 순위를 산정한바 있다. Lin et al. (2008)은 하청업체 선정에 있어 Shih et al. (2007)과 같은 방법을 사용하였으나 불충분한 정보를 처리하기 위해 퍼지수(Fuzzy number)의 특별한 케이스인 grey number를 적용한바 있다. Ye and Li (2009)도 사업 파트너를 선정하는 그룹 의사결정문제에 TOPSIS를 적용한 바 있다. Huang and Li (2010)는 GDM 문제에 TOPSIS를 적용할 때 각 의사 결정자에 따른 이상해(Ideal solution)의 통합에 관해 연구한 바 있다.

더 나아가 물 관련 분야에서 개인의 선호도를 통합하기 위한 방법 중 Voting rule 기법을 적용한 접근법들이 연구된 바 있다(Smith, 1973; Armstrong et al., 1982; Forman and Peniwati, 1998; Cook, 2006). Srdjevic (2007)은 브라질의 60명의 6개 그룹으로 구성된 물 전문 위원회에서 물관리를 위한 5개의 계획 중 최선의 계획을 선정하는 문제에 AHP와 Borda, Plurality, Hare 등의 Voting rule 기법을 적용한바 있다. Morais and Almeida (2007)는 수자원 네트워크에서 누수 문제에 대해 PROMETHEE V 기법을 기반으로 하여 그룹 의사결정 기법을 적용한바 있다. Morais and Almeida (2010)는 수자원 관리를 위한 네트워크의 효율성을 증대시키는 그룹 의사결정문제에 대해 Condorcet 방법과 Borda 방법을 적용한바 있다. 또한 Morais and Almeida (2012)는 기존 Voting rule 기법의 단점을 보완한 새로운 모형을 브라질의 Hydrographic Basin에 적용하여 해당 유역의 등급이 저하되는 것을 방지하기 위한 대안들을 평가하였고 기존의 Borda 등의 방법과 비교한바 있다.

따라서 본 연구는 취약성을 평가할 때 다수의 의사결정자들이 부여한 가중치를 단순 평균하기보다 객관적으로 통합하기위해 그룹 의사결정 방법을 적용하였다. 본 연구에서 제시한 모형의 적용성 검토를 위해 Kim et al. (2012a)에서 실시한 우리나라 16개 광역시·도에 대한 홍수 취약성 문제에 적용하였으며 이 때 사용된 11명의 가중치를 11개 그룹이 부여한 가중치로 가정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구 방법

본 연구의 과정은 Fig. 1과 같이 크게 4단계로 구분될 수 있다. Step 1에서는 11개의 그룹이 각 대용변수(proxy variable)에 대해 부여한 가중치에 따라 11개의 취약성 결과를 도출한다. Step 2에서는 도출된 11개의 취약성 결과

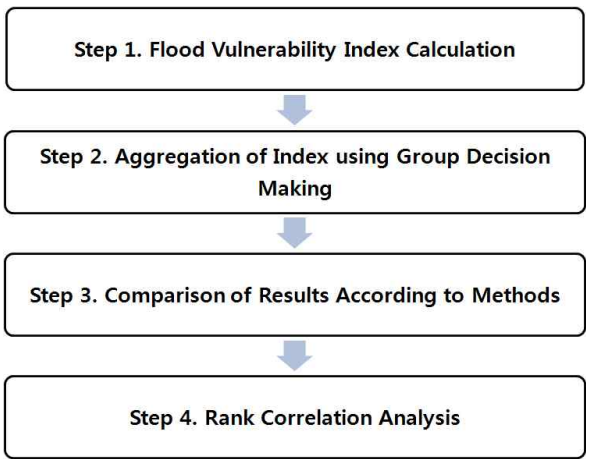

Fig. 1. Procedure of Flood Vulnerability Assessment using Group Decision Making Techniques

를 통합하기 위해 그룹 의사결정 방법을 적용한다. Step 3에서는 본 연구에서 사용한 모형의 적용성을 검토하기 위해 그룹의사결정기법을 적용한 취약성 결과와 기존의 Kim et al. (2012b)에서 Fuzzy TOPSIS, TOPSIS를 적용하여 산정한 취약성 결과를 비교한다. Step 4에서는 적용방법에 따른 결과의 차이를 정량화하기 위해 스피어만 순위상관분석, 켄달 순위상관분석, Emond와 Mason이 제시한 순위상관분석을 실시하여 결과의 일치 정도를 확인한다. 여기서 Step 1의 취약성 산정 방법은 Kim et al. (2012b)에서 제시한 Fuzzy TOPSIS 모형을 사용하였다. Fuzzy TOPSIS의 상세한 절차와 방법 및 적용과정은 Kim et al. (2012b)에 제시되어있다.

2.2 16개 광역시도와 대용변수 및 가중치

본 연구는 우리나라 232개의 기초지자체에 대한 21개 대용변수의 자료를 이용하여 16개 광역시도 단위로 취약성 순위를 산정하였다. 이 때 사용된 21개의 대용변수는 Kim et al. (2012b)에서 선정한 전문가의견을 반영하여 선정하였고 홍수 취약성 대용변수를 인용하였다. 홍수 취약성 대용변수는 크게 민감도(sensitivity)와 적응능력(adaptive capacity), 기후노출(climate exposure)로 구분된다. 여기서 민감도는 홍수 피해가 발생할 확률과 피해액이 커질 수 있는 대용변수들과 홍수가 발생할 수 있도록 유도하는 인자들 및 과거 홍수 피해 실적을 반영할 수 있는 총 9개의 대용변수들로 구성되어있으며 적응능력은 홍수가 발생할 경우, 적응할 수 있는 사회, 경제적인 요소들과 치수를 위해 설치된 대응책들이 반영된 7개의 대용변수들로 구성되어있다. 기후노출은 홍수 분야에서 취약성을 반영할 수 있는 대용변수들로서 강수량의 집중을 보여주는 5개로 구성되었다. 총 21개의 대용변수들에 대한 11개 그룹의 가중치는 Table 1과 같다. 민감도, 적응능력, 기후노출에 대한 가중치가 먼저 부여되고 21개의 각 세부 대용변수에 대한 가중치가 부여된다.

Table 1. Weighting Values for Flood Vulnerability Assessment

Criterion		GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9	GR10	GR11
Sensitivity		0.35	0.4	0.3	0.43	0.35	0.45	0.35	0.45	0.4	0.3	0.5
Adaptive Capacity		0.35	0.3	0.3	0.26	0.3	0.25	0.35	0.25	0.2	0.2	0.25
Exposure		0.3	0.3	0.4	0.31	0.35	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.25
C1	Low-lying Area of less than 10 meters (km^2)	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.05	0.05	0.15
C2	Low-lying household of less than 10 meters	0.1	0.12	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12	0.05	0.05	0.15
C3	Area ratio with the banks (%)	0.05	0.08	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.07	0.1	0.1	0.15
C4	Population density (persons/km^2)	0.1	0.15	0.05	0.13	0.2	0.15	0.1	0.14	0.1	0.15	0.1
C5	Total population	0.1	0.12	0.05	0.1	0.15	0.1	0.1	0.11	0.1	0.05	0.1
C6	Regional average slope (deg)	0.1	0.1	0.05	0.12	0.05	0.1	0.1	0.1	0.15	0.2	0.15
C7	Percentage of road area (%)	0.05	0.05	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.09	0.1	0.05	0.1
C8	Cost of flood damage last three years (10^3 won)	0.2	0.15	0.2	0.18	0.15	0.2	0.2	0.17	0.15	0.15	0.05
C9	Population of flood damage last three years (10^3 won)	0.2	0.13	0.2	0.1	0.15	0.15	0.2	0.08	0.2	0.2	0.05
C10	Financial Independence (%)	0.15	0.12	0.1	0.15	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.1
C11	Civil servants per population (persons/10^3 people)	0.05	0.08	0.1	0.07	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.1
C12	GRDP (10^6 won)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.11	0.1	0.1	0.15
C13	Number of civil servants related to water	0.1	0.1	0.05	0.08	0.1	0.15	0.1	0.08	0.3	0.25	0.1
C14	Rivers Improvement rate (%)	0.15	0.15	0.2	0.13	0.15	0.15	0.15	0.11	0.1	0.15	0.15
C15	Capacity of drainage Facilities (m^3/min)	0.25	0.23	0.2	0.22	0.25	0.2	0.25	0.2	0.15	0.15	0.2
C16	Flood control bility of reservoirs (10^6 m^3)	0.2	0.22	0.25	0.25	0.25	0.15	0.2	0.28	0.15	0.15	0.2
C17	Daily maximum precipitation (mm)	0.3	0.25	0.5	0.28	0.3	0.35	0.3	0.27	0.3	0.3	0.3
C18	Days over 80 mm rainfall (day)	0.3	0.25	0.15	0.25	0.2	0.25	0.3	0.25	0.2	0.25	0.1
C19	Maximum rainfall of 5 days period (mm/5 days)	0.2	0.2	0.15	0.21	0.25	0.2	0.2	0.22	0.1	0.1	0.25
C20	Surface Runoff (mm/day)	0.1	0.15	0.1	0.13	0.1	0.1	0.1	0.13	0.3	0.25	0.25
C21	Summer Precipitation (June to September) (mm)	0.1	0.15	0.1	0.13	0.1	0.1	0.1	0.13	0.1	0.1	0.1

2.3 그룹 의사결정(Group Decision Making)

의사결정자들은 한정된 시간과 비용 제약 요인에 따른 문제에 대한 정보의 부족, 정보 기억능력의 제한, 그리고 정보 처리능력의 한계 등으로 인해 합리적 의사결정모델(Rational Decision Making Model. Friedmen, 1957)에서 제시하는 최적 결정(Optimal Decision)을 이루는 것은 쉽지 않다(Simon, 1957). 또한 의사결정자들은 체계적인 데이터 분석에 의존하기 보다는 자신들의 직관적 판단에 더 의존하는 경우가 많다(Mintzberg, 1975). 따라서 복잡한 의사결정 문제일수록 다수의 인원이 참여하는 그룹 의사결정이 요구된다. 그룹 의사결정은 다수의 의사결정자들이 여러 대안을 평가하고 결과를 종합해서 합의안을 도출하는 과정이다. 이는 각 의사결정자들이 가지고 있는 다양한 정보와 지식들을 이용하여 더 나은 의사결정을 가능하게 할 뿐 아니라 의사결정의 결과에 대한 책임을 분담할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 기존의 단일 의사결정자 위주의 의사결정에서 그룹 의사결정으로의 전환은 많은 어려움이 존재한다. 즉, 개인 의사결정자의 선호도에 따라 가장 선호되는 대안을 선택하는 문제에서, 서로 다른 목적, 목표, 기준을 갖고 있는 상이한 이해당사자들 간에 일어나는 상호 마찰을 해결하는 문제를 고려해야 한다는 것이다. 이를 해결하기 위해 각 의사결정자들의 주관적인 평가에 의한 의견을 효율적으로 수렴시켜 합의안을 찾는 다양한 방법에 대한 연구들이 이루어져 왔다. 본 연구에서는 대표적인 그룹 의사결정 방법인 투표 기법(Voting rule) 중 Borda Count (William, 1978), Condorcet (McLean, 1990), Copeland (1951) 방법을 적용하였다. Voting rule은 그룹의 구성원 각자가 각 대안에 점수를 부여하는 방식으로 최종 결정된 대안에는 각 의사 결정자의 의견이 반영되게 된다.

2.3.1 Borda Count Method

Borda Count Method는 1781년 프랑스 수학자 Jean-Charles de Borda에 의해 제안된 투표 방법이며 각 투표자가 모든 대안들에 대해 선호 순위를 형성하는 절차이다. 이 방법은 순위를 합산하는데 필요한 계산 과정이 단순하다는 장점을 가지고 있으며 또한 의사결정자 그룹이 매우 방대한 경우에 많이 사용되고 있다. Borda 방법을 적용하기 위해서는 먼저 의사결정자들이 대안에 대한 자신의 선호도에 따라 순위를 정해야 한다. 전체 대안이 m개라고 했을 때 각 대안들이 순위를 부여받게 되면 전체 대안 중 가장 선호되는 대안이 가장 높은 점수인(m-1) 점을 받게 되고 그 다음 선호되는 대안은 (m-2)점을 받게 되며 가장 낮은 순위의 대안이 0점을 받게 된다. 각 대안이 의사결정자들에 의해 부여 받은 점수는 합산되며 이중 가장 높은 점수를 받은 대안이 가장 높은 순위를 받게 된다. 예를 들어 대안 $A_i(i=1,...,m)$가 있을 때 의사결정자 $DM_j(j=1,...,n)$에 의해 부여 받은 순위를 R_{ij}라 하면 R_{ij}의 Borda 점수는 Eq. (1)과 같다.

$$B_{ij} = m - R_{ij} \tag{1}$$

이때 각 의사결정자의 선호도를 종합한 대안 A_i의 Borda 점수, $\overline{B_i}$는 Eq. (2)와 같다.

$$\overline{B_i} = \sum_{j=1}^{n} B_{ij} \tag{2}$$

2.3.2 Condorcet

Condorcet 방법은 1299년 Ramon Llull에 의해 개발 되었으나 18세기 프랑스 수학자이자 철학자인 Marquis de Condorcet에 의해 Condorcet이란 이름으로 불려지게 되었다. 이 방법에 의하면 Condorcet winner는 일련의 쌍별 경쟁에서 모든 다른 대안들을 제압하는 한 대안이 된다. 예를 들어 대안 $A_i(i=1,...,m)$가 의사결정자 $DM_K(K=1,...,n)$에 의해 부여 받은 순위를 R_i^K라 할 때 Table 2와 같이 (R_i^K, R_j^K)의 쌍별 비교 행렬을 정의한다($j=1,...,m$). 쌍별 비교에서 이기면 1을 지면 0을 부여 받게 된다. 만일 모든 DM에 대한 쌍별 비교를 실시하여 A_i의 순위가 A_j의 순위에 대해 과반수이상 이기면 1을 부여 받게 되고 반대로 과반수가 안 되면 0을 받게 된다. 결국 최종적으로 가장 많이 승리한($\sum W$가 가장 큰) 대안이 1위를 하게 된다.

2.3.3 Copeland

Condorcet 방법은 최종 산정된 순위가 순환하여 가장 선호되는 대안이 발생하지 않는 "Condorcet paradox"가 발생할 수 있는데 이러한 문제를 해결하기 위하여 Copeland (1951) 방법이 제안되었다. Copeland 방법은 Condorcet 방법과 같은 행렬을 사용하며 차이점은 Table 2와 같이 각 대안이 쌍별 비교에서 이긴 횟수($\sum W$)에서 진 횟수($\sum L$)의 차이를 계산하여 가장 큰 값을 가지는 대안이 선택된다. 비록 Borda 방법보다 더 많은 계산 소요가 필요하지만 "Condorcet paradox"를 해결할 수 있는 장점이 있으며 (Gomes et al., 2004) Borda와 Condorcet 방법의 장점을 적절히 결합한 방법이다.

Table 2. Example of Condorcet Decision Making Matrix and Copeland Decision Making Matrix

Condorcet DM_k		R_1^k	R_2^k	⋯	R_m^k
A_1	R_1^k	-	1	⋯	0
A_2	R_2^k	0	-	⋯	1
⋯	⋯	⋯	⋯	-	⋯
A_m	R_m^k	1	0	⋯	-

Copeland DM	A_1	A_2	⋯	A_m	$\sum W$
A_1	-	0	⋯	1	3
A_2	1	-	⋯	1	5
⋯	⋯	⋯	-	⋯	⋯
A_m	0	0	⋯	-	4
$\sum L$	1	4	⋯	5	
$\sum W - \sum L$	2	1	⋯	-1	

2.4 순위상관분석

본 연구에서는 각 방법에 따른 순위의 상관관계를 조사하기 위해 가장 많이 사용 되는 스피어만 순위상관계수(ρ)와 Kendall (1948)이 제시한 τ_b와 Emond and Mason (2002)이 제시한 τ_x를 산정하였다.

ρ는 데이터가 순서에 의한 척도인 경우에 사용되며 표본의 크기가 작을 때 유용하게 사용되는 방법으로(Chung and Lee, 2007) Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n}(R(x_i) - R(y_i))^2}{n(n^2-1)} \tag{3}$$

여기서, 적용방법 x의 i번째 관측치의 순위를 R_{xi}로 나타내고 적용방법 y의 i번째 관측치의 순위를 R_{yi}로 나타낸다. n은 변수의 총 개수이다.

τ_b는 Kendall (1948) τ의 확장된 형태로 같은 순위가 존재할 경우 발생하는 τ의 한계점을 개선하기 위해 제안된 방법이다. 예를 들어 A에 대한 n개의 순위가 존재할 경우 $n \times n$ 행렬 $\{a_{ij}\}$를 정의하고 τ_b는 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$\tau_b = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}b_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a^{2_{ij}} \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b^{2_{ij}}}} \tag{4}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 \\ -1 \\ 0 \end{cases}$$

i가 j보다 순위가 앞설 때
j가 i보다 순위가 앞설 때
i의 순위와 j의 순위가 같거나 또는 $i=j$일 때

Emond and Mason (2002) 가 제시한 τ_x는 같은 순위가 존재할 경우 상관관계를 구하는 또 다른 순위상관분석방법으로 Kendall (1948)이 제시한 τ_b가 전체의 상관정도에서 동일한 순위의 상관정도를 배제하여 상관계수를 추정하는 반면 τ_x는 동일한 순위의 상관정도를 고려하여 전체 순위에 대한 상관계수를 추정한다. τ_x는 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$\tau_x = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}b_{ij}}{n(n-1)} \tag{5}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & i\text{가 } j\text{보다 순위가 앞서거나 또는 } i\text{의 순위와 } j\text{의 순위가 같을 때} \\ -1 & j\text{가 } i\text{보다 순위가 앞설 때} \\ 0 & i=j\text{일 때} \end{cases}$$

2.5 Fuzzy TOPSIS

TOPSIS는 양의 이상적인 해(Positive Ideal Solution, PIS)로 부터 가장 가까운 거리에 있고 부의 이상적인 해(Negative Ideal Solution, NIS)로 부터는 가장 먼 거리에

있는 대안을 선정하게 하는 개념으로 최선의 대안과 최악의 대안을 동시에 고려하여 인간의 합리적 선택이 가능하도록 유도하는 기법이다. 또한 다속성 관점에서 모든 대안들에 대한 평가결과를 쉽게 계산해서 나타낼 수 있다. 이러한 이유로 많은 수자원 의사결정문제에 사용되고 있다. Triangular Fuzzy Number (TFN)를 TOPSIS를 적용하기위해 TFN의 서로 다른 축척을 TFN의 성질을 유지하면서 비교 가능한 축척으로 표준화해야 한다. 표준화된 퍼지 행렬 $\tilde{R}$은 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{R}=[\tilde{r_{ij}}],\ (i=1,2,...,m)\ (j=1,2,...,n) \tag{6}$$

여기서, $\tilde{r}$은 표준화된 TFN을 의미하며 i는 각 지자체, j는 각 속성의 갯수를 의미한다. 또한 Eqs. (7)~(10)의 B와 C는 각 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)의 집합이다.

$$c_j^* = \max_i\ c_{ij}, \text{if } j\in B \tag{7}$$

$$\tilde{r_{ij}}=(\frac{a_{ij}}{c_j^*},\frac{b_{ij}}{c_j^*},\frac{c_{ij}}{c_j^*}),\ j\in B \tag{8}$$

$$a_j^* = \min_i\ a_{ij}, \text{if } j\in C \tag{9}$$

$$\tilde{r_{ij}}=(\frac{a_j^*}{c_{ij}},\frac{a_j^*}{b_{ij}},\frac{a_j^*}{a_{ij}}),\ j\in C \tag{10}$$

여기서 $\tilde{r_{ij}}=(\alpha_{ij},\beta_{ij},\gamma_{ij})$라 할 때 표준화된 퍼지 행렬 $\tilde{R}$로부터 퍼지 양의 이상적인 해(Fuzzy Positive Ideal Solution, FPIS)와 퍼지 부의 이상적인 해(Fuzzy Negative Ideal Solution, FNIS)는 Eq. (11)과 같이 정의된다.

$$A+=\tilde{v_1^+},\tilde{v_2^+},...\tilde{v_n^+} \tag{11}$$

$$A-=\tilde{v_1^-},\tilde{v_2^-},...\tilde{v_n^-}$$

여기서, $\tilde{v_j^+}=(v_j^+,v_j^+,v_j^+)$, $\tilde{v_j^-}=(v_j^-,v_j^-,v_j^-)$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. (12)와 같이 TFN $\tilde{m}=(m_1,m_2,m_3)$과 TFN $\tilde{n}=(n_1,n_2,n_3)$의 거리를 구하는 방법으로 계산할 수 있다. 또한 $A+$(FPIS)와 $A-$(FNIS)로부터 각 지자체 (i)와의 간격 d_i^+와 d_i^-은 Eqs. (13) and (14)를 이용해 유도할 수 있으며 각 대안의 상대적 근접도 계수, $C+$는 Eq. (15)를 이용해서 도출할 수 있다. 여기서 1위는 가장 취약한 지역이며 16위는 가장 덜 취약한 지역을 의미한다.

$$d(\tilde{m},\tilde{n})=\sqrt{\frac{1}{3}[(m_1-n_1)^2+(m_2-n_2)^2+(m_3-n_3)^2]} \tag{12}$$

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{r_{ij}},\tilde{v_j^+}) \tag{13}$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{r_{ij}},\tilde{v_j^-}) \tag{14}$$

$$C_i+= \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \tag{15}$$

3. 연구 결과

3.1 취약성 지수 산정

본 연구에서는 취약성 지수의 산정을 위해 Kim et al. (2012b)에서 사용한 Fuzzy TOPSIS 모형의 절차를 적용하였다. 본 연구에서 사용한 Fuzzy TOPSIS 모형은 TOPSIS에 Fuzzy 이론을 결합한 것으로 입력자료를 모형에 적용하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 줄이기 위해 TFN으로 변환하여 TOPSIS에 적용한 방법이다. 본 연구에서는 동일한 절차를 적용하되 11개의 가중치를 개별적으로 적용하여 11개의 취약성 산정 결과를 Table 3과 같이 도출하였다(Step 1).

3.2 그룹의사결정기법의 적용

Step 1에서 산정한 11개 그룹의 취약성 결과를 통합하기 위해 Borda Count Method, Condorcet, Copeland 기법을 각각 적용하였다(Step 2). 그 결과 Table 4에서 알 수 있듯이 Borda를 제외한 두 방법의 적용 결과는 동일하게 나타났으며 A2~A5, A10의 순위에서 Borda와 1개 순위의 차이를 보이는 것을 제외하고 나머지 대안에서의 순위는 모두 동일함을 보였다. 이 결과를 기존의 Fuzzy TOPSIS를 적용한 결과와 비교하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다(Step 3).

Fuzzy TOPSIS와 GDM을 비교해 본 결과 A5의 경우 Fuzzy TOPSIS에서는 13위를 했고 Borda에서는 7위 Condorcet에서는 6위로 큰 차이를 보였다. A16의 경우도 큰 차이를 보였는데 Fuzzy TOPSIS에서는 5위로 나타났고 Borda와 Condorcet에서는 동일하게 1위로 나타났다. 그 다음으로 A8, A13의 경우에서 결과를 차이를 두드러지게

Table 3. Flood Vulnerability Rankings According to 11 Group Weighting Values

Name of Province	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9	GR10	GR11
A1	15	15	15	14	14	15	15	15	15	15	15
A2	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2
A3	6	7	6	7	7	7	6	7	6	8	8
A4	11	12	7	8	9	12	11	12	14	13	13
A5	7	6	8	6	6	6	7	6	10	10	6
A6	14	13	13	11	13	13	14	13	12	12	12
A7	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	3
A8	13	14	12	15	15	14	13	14	13	14	14
A9	9	10	11	12	11	9	9	10	8	7	9
A10	12	11	14	13	12	11	12	11	11	11	11
A11	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
A12	10	9	10	10	10	10	10	9	9	9	10
A13	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	5
A14	8	8	9	9	8	8	8	8	7	6	7
A15	5	5	5	5	5	5	5	5	4	3	4
A16	2	1	2	2	1	1	2	1	1	4	1

Table 4. Flood Vulnerability Rankings of GDM Methods

Name of Province	Borda	Condorcet	Copeland
A1	15	15	15
A2	1	2	2
A3	6	7	7
A4	11	12	12
A5	7	6	6
A6	13	13	13
A7	3	3	3
A8	14	14	14
A9	9	9	9
A10	12	11	11
A11	16	16	16
A12	10	10	10
A13	4	4	4
A14	8	8	8
A15	5	5	5
A16	1	1	1

확인할 수 있었다. TOPSIS와 GDM을 비교해 본 결과 A6의 경우가 8위에서 13위로 가장 큰 변동을 보였으며 그 다음으로 A9, A14에서 두드러진 순위 변동을 확인할 수 있었다. 전체적으로는 TOPSIS의 결과보다 Fuzzy TOPSIS의 결과가 GDM을 적용할 때 순위 변동이 많았다. GDM을 적용한 결과와 그렇지 않은 결과의 순위 변동 원인을 살펴보기 위하여 가장 순위변동이 두드러지는 A5에 대해 살펴보았다. Table 3과 같이 A5에 대한 11개 그룹의 취약성 순위는 9개가 6, 7위를 하였고 나머지 2개는 10위를 하여 11개 그룹의 모든 순위가 Fuzzy TOPSIS 보다 취약성

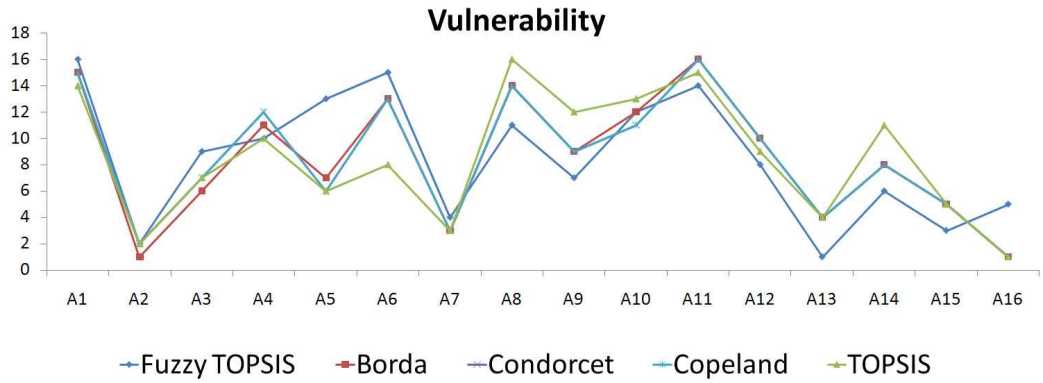

Fig. 2. Flood Vulnerability Votings of Fuzzy-TOPSIS, TOPSIS, and GDM

이 상당히 증가하였음을 알 수 있었다. 구체적으로 각 방법에 따라 민감도, 적응능력, 기후노출 대용변수가 취약성에 기여하는 정도의 차이를 비교하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. 이때 GDM의 전체 순위와 유사한 GR1의 결과를 사용하였다. GR1의 적응능력은 Fuzzy TOPSIS와 비슷한 수준이지만 민감도와 기후노출은 Fuzzy TOPSIS보다 크게 반영되어 취약성이 증가하였다고 판단된다. TOPSIS는 Fuzzy TOPSIS보다 적응능력이 작아졌고 민감도는 비슷한 수준을 유지하였지만 기후노출이 상대적으로 크게 반영되어 취약성이 증가하였다고 판단된다. TOPSIS는 GR1보다 민감도가 작아졌지만 적응능력이 작아지고 기후노출이 커졌으므로 GR1보다 취약성이 다소 증가한 것으로 판단된다.

3.3 순위상관분석

각 적용방법에 따른 취약성 순위의 차이를 정량화하기 위해 스피어만 순위상관계수(ρ)와 Kendall (1948)이 제시한 τ_b와 Emond and Mason (2002)이 제시한 τ_x를 계산하였으며 그 결과는 Table 5와 같다(Step 4). Table 5(a)의 Borda 및 Condorcet과 Fuzzy TOPSIS의 ρ는 0.84과 0.83으로 나타났고 Borda 및 Condorcet과 TOPSIS의 ρ는 0.92과 0.91로 나타났다. Table 5(b)의 τ_b와 Table 5(c)의 τ_x는 동일한 결과를 보였는데 이것은 Borda 방법의 A2와 A16을 제외하고 동일한 순위가 없기 때문인 것으로 판단된다. Borda 및 Condorcet과 Fuzzy TOPSIS의 τ_b (또는 τ_x)는 0.68과 0.63으로 나타났고 Borda 및 Condorcet과 TOPSIS의 τ_b (또는 τ_x)는 0.79와 0.80로 ρ의 값들보다 작게 나타났다. 즉 11명이 부여한 가중치를 그룹의사결정 기법을 통해 수렴한 취약성 순위와 그렇지 않고 3개의 구간 값이나 1개의 평균한 값을 적용한 기존 방법들의 취약성 순위는 본 연구와 같이 다를 수 있으므로 본 연구에서

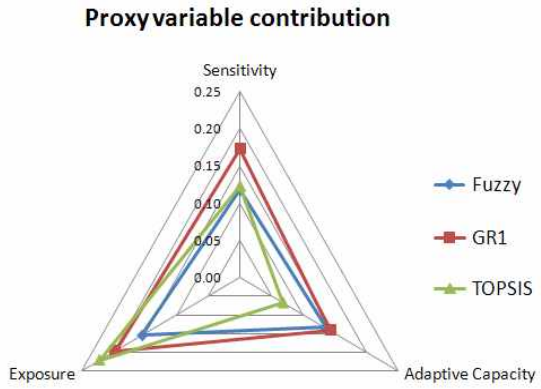

Fig. 3. Proxy Variable Contribution of A5 Flood Vulnerability according to Methods

제시한 모형은 다양한 그룹의 의견을 수렴하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 고려한 하나의 의사결정 방법이 될 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 기존의 방법보다 우수한 취약성 평가 방법을 제시하는데 있는 것이 아니라 취약성을 산정시 가중치의 불확실성을 고려하기위한 하나의 방법으로써 그 적용성을 검토하는데 있다. 따라서 다수의 의사결정자들의 의견을 수렴할 때 발생할 수 있는 불확실성을 고려하기위한 모형을 제시하고자 그룹 의사결정 방법을 사용하여 우리나라 16개 광역시·도의 홍수 취약성 평가를 실시하였다. 본 연구의 홍수 취약성 평가는 4단계로 이루어지는데 Step 1에서는 11개 그룹이 부여한 가중치에 따른 11개 그룹의 취약성 순위를 산정하고 Step 2에서는 11개 그룹의 취약성 순위를 통합하기 위해 대표적인 GDM 방법인 Voting rule기법 중 Borda, Condorcet, Copeland 기법을 적용하였

Table 5. Results of Rank Correlation Analysis

(a) Spearman Rank Correlation Coefficients (ρ) according to MCDM techniques

MCDM technique	Fuzzy TOPSIS	Borda	Condorcet	Copeland	TOPSIS
Fuzzy TOPSIS	1	0.84	0.83	0.83	0.69
Borda	-	1	0.99	0.99	0.92
Condorcet	-	-	1	1	0.91
Copeland	-	-	-	1	0.91
TOPSIS	-	-	-	-	1

(b) Kendall τ_b according to MCDM techniques

MCDM technique	Fuzzy TOPSIS	Borda	Condorcet	Copeland	TOPSIS
Fuzzy TOPSIS	1	0.68	0.63	0.63	0.47
Borda	-	1	0.96	0.96	0.79
Condorcet	-	-	1	1	0.80
Copeland	-	-	-	1	0.80
TOPSIS	-	-	-	-	1

(c) τ_x according to MCDM techniques

MCDM technique	Fuzzy TOPSIS	Borda	Condorcet	Copeland	TOPSIS
Fuzzy TOPSIS	1	0.68	0.63	0.63	0.47
Borda	-	1	0.96	0.96	0.79
Condorcet	-	-	1	1	0.80
Copeland	-	-	-	1	0.80
TOPSIS	-	-	-	-	1

다. Step 3에서는 GDM을 사용한 결과와 그렇지 않은 기존 방법의 결과를 비교하였다. Step 4에서는 방법에 따른 취약성 순위의 차이를 정량화하기 위해 Spearman, Kendall τ_b, Emond and Mason (2002)이 제시한 τ_x의 값을 계산하였다.

연구결과 Fuzzy TOPSIS에서는 A13이 가장 취약하고, A1이 가장 덜 취약한 지역으로 선정 되었으나 그룹의사결정 기법을 적용했을 때 A16이 가장 취약하고, A11이 가장 덜 취약한 지역으로 나타났다. 또한 그룹의사결정 기법을 적용했을 때 일부 지역에서 Fuzzy TOPSIS의 경우 최고 6개 등급이, TOPSIS에서는 5개 등급의 순위 변동이 발생했다. 순위상관분석에서는 스피어만 순위상관분석의 경우 GDM과 Fuzzy TOPSIS가 0.83~0.84, GDM과 TOPSIS는 0.91~0.92로 나타났고 Kendall의 τ_b (또는 τ_x)에서는 GDM과 Fuzzy TOPSIS가 0.63~0.68, GDM과 TOPSIS는 0.79~0.80으로 스피어만 순위상관분석보다 낮게 나타났다. 즉 GDM을 적용한 결과와 GDM의 개념을 적용하지 않은 방법들의 결과는 본 연구와 같이 다를 수 있으므로 향후 수자원과 관련된 다양한 취약성 산정 연구에서 다양한 의사결정자들의 의견이나 그룹의 의견을 수렴하여 의사결정을 할 경우, 발생할 수 있는 불확실성을 고려하기 위해 그룹 의사결정 방법을 사용하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Armstrong, R.D., Cook, W.D., and Seiford, L.M. (1982). "Priority ranking and consensus formation: the case of ties." *Management Science*, Vol. 28, No. 6, pp. 638-645.

Cho, N.W, Kim, J.G., and Kim, S.K. (2006). "An Interactive Multi-criteria Group Decision Making with the Minimum Distance Measure." *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers,* Vol. 32, No. 1, pp.

483-486.

Chung, E.S., and Lee, K.S. (2007). "Identifying Spatial Hazard Ranking Using Multicriteria Decision Making Techniques." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences,* Vol. 40, No. 12, pp. 969-983.

Chung, E.S., Lee, K.S., and Park, K.S. (2008). "Development of Alternative Evaluation Index Using Multicriteria Decision Making Techniques." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences,* Vol. 41, No. 1, pp. 87-100.

Cook, W.D. (2006). "Distance-based and ad hoc consensus models in ordinal preference ranking." *European Journal of Operational Research,* Vol. 172, No. 2, pp. 369-385.

Copeland, A.H. (1951). A reasonable social welfare function. Seminar on Applications of Mathematics to Social Sciences, University of Michigan, Ann Arbor.

Emond, E.J., and Mason, D. (2002). "A new rank correlation coefficient with application to the consensus ranking problem." *Journal of Multi Criteria Decision Analysis,* Vol. 11, No. 1, pp. 17-28.

Forman, E., and Peniwati, K. (1998). "Aggregation of individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process." *European Journal of Operational Research,* Vol. 108, No. 1, pp. 165-169.

Friedman, M. (1957). A theory of consumption function, Princeton University Press, Princeton, N. J.

Gomes L., Araya, M., and Carignano, C. (2004). *Decision making in complex scenarios*, Sǎo Paulo, Brazil: Ed. Pioneria.

Huang, Y.S., and Li, W.H. (2010). "A study on aggregation of TOPSIS ideal solutions for group decision-making." *Group Decision and Negotiation,* Published Online: 01 December 2010, pp. 1-13,

Jun, K. S., Chung, E. S., Sung, J. Y., and Lee, K. S. (2011). "Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts." *Science of the Total Environment,* Vol. 409, pp. 5228-5242.

Jung, I.W., Bae, D.H., and Kim, G.S. (2011). "Recent trend of mean and extreme precipitation in Korea." *International Journal of Climatology,* Vol. 31, Issue 3, pp. 359-370.

Kendall, M. (1948). *Rank correlation methods*. Charles Friffin and Company Limited, London.

Kim, Y.K., Yoo, J.A., and Chung, E.S. (2012a). "Water Management Vulnerability Assessment Considering Climate Change in Korea." *Climate Change Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-12.

Kim, Y.K., Chung, E.S., and Lee, K.S. (2012b). "Fuzzy TOPSIS Approach to Flood Vulnerability Assessment in Korea." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences,* Vol. 45, No. 9, pp. 901-913.

Ko, J.K., and Kim, H.S. (2009). *A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Gyeonggi-do. Gyeinggi Research Institute,* Research Policy, 2009-37, pp. 67-92.

Lin, Y.H., Lee, P.C., Chang, T.P., and Ting, H.I. (2008). "Multi-attribute group decision making model under the condition of uncertain information." *Automation in Construction*, Vol. 17, pp. 792-797.

McLean, I. (1990). "The borda and condorcet principles: Three medieval applications." *Social Choice and Welfare*, Vol. 7, No. 2, pp. 99-108.

Mintzberg, H. (1975). *The nature of managerial work*. Harper & Row, New York.

Morais, D.C., and Almeida, A.T. (2007). "Group decision-making for leakage management strategy of water network." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, Issue 2, pp. 441-459.

Morais, D.C., and Almeida, A.T. (2010). "Water network rehabilitation; a group decision-making approach." *Water SA*, Vol. 35, No. 4, pp. 487-493.

Morais, D.C., and Almeida, A.T. (2012). "Group decision making on water resources based on analysis of individual rankings." *Omega*, Vol. 40, Issue 1, pp. 42-52.

Shih, H.S., Shyur, H.J., and Lee, E.S. (2007) "An extension of TOPSIS for group decision making." *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 45, pp. 801-813.

Simon, H.A. (1957). Models of man, Wiley, New York.

Smith, J.H. (1973). "Aggregation of preferences with variable electorate." *Econometrica*, Vol. 41, No. 6, pp. 1027-1041.

Son, M.W., Sung, J.Y., Chung, E.S., and Jun, K.S. (2011). "Development of Flood Vulnerability Index Consi-

dering Climate Change." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.

Srdjevic, B. (2007). "Linking analytic hierarchy process and social choice methods to support group decision-making in water management." *Decision Support Systems*, Vol. 42, Issue 4, pp. 2261-2273.

William, G.L. (1978). "Strategic voting and the borda method." *Public Choice*, Vol. 33, No. 1, pp. 85-90.

Ye, F., and Li, Y.N. (2009). "Group multi-attribute decision model to partner selection in the formation of virtual enterprise under incomplete information." *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 9350-9357.

논문번호: 12-047	접수: 2012.05.03
수정일자: 2012.07.09/09.27	심사완료: 2012.09.27