



Spatial prioritization of climate change vulnerability using uncertainty analysis of multi-criteria decision making method

Song, Jae Yeol^a · Chung, Eun-Sung^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 16-081

Received: 20 September 2016; Revised: 20 December 2016 / 19 January 2017; Accepted: 19 January 2017

Abstract

In this study, robustness index and uncertainty analysis were proposed to quantify the risk inherent in the process of climate change vulnerability assessment. The water supply vulnerability for six metropolitan cities (Busan, Daegu, Incheon, Gwangju, Daejeon, and Ulsan), except for Seoul, were prioritized using TOPSIS, a kind of multi-criteria decision making method. The robustness index was used to analyze the possibility of rank reversal and the uncertainty analysis was introduced to derive the minimum changed weights of the criteria that determine the rank reversal between any paired cities. As a result, Incheon and Daegu were found to be very vulnerable and Daegu and Busan were derived to be very sensitive. Although Daegu was relatively vulnerable against the other cities, it can be largely improved by developing and performing various climate change adaptation measures because it is more sensitive. This study can be used as a preliminary assessment for establishing and planning climate change adaptation measure.

Keywords: Climate change, Uncertainty, Water supply, Vulnerability, TOPSIS

다기준 의사결정기법의 불확실성 분석기법을 이용한 기후변화 취약성에 대한 지역별 우선순위 결정

송재열^a · 정은성^{a*}

^a서울과학기술대학교 건설시스템공학과

요 지

본 연구는 강건성 지수와 불확실성 분석기법을 활용하여 기후변화 취약성 평가과정에서 발생하는 불확실성을 정량화하였다. 본 연구는 우리나라의 6개 광역시(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산)를 대상으로 다기준 의사결정기법 중 하나인 TOPSIS 기법을 이용하여 용수공급 취약성 순위를 산정하였다. 강건성 지수는 두 대상 도시의 순위가 가중치의 변화로 인해 순위역전현상이 발생할 수 있는 가능성을 정량화하고 불확실성 분석 기법은 두 도시 사이에 순위역전이 발생할 수 있는 가중치의 최소 변화량을 산정한다. 그 결과 인천과 대구는 용수공급 측면에서 취약한 것으로 나타났으며, 대구와 부산은 용수공급 취약성에 민감한 것으로 나타났다. 따라서 대구는 다른 대안에 비해 상대적으로 용수공급이 취약한 지역으로 나타났으나, 취약성에 민감하기 때문에 기후변화 적응대책 수립 및 시행을 통해 취약성이 크게 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 기후변화와 용수공급 측면에서의 적응전략을 계획하고 수립하는데 있어서 우선적으로 고려해야하는 방향을 제안하는 데 사용될 수 있다.

핵심용어: 기후변화, 불확실성, 용수공급, 취약성, TOPSIS

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-9017
E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (E.-S. Chung)

1. 서론

도시화로 인해 도시 지역의 물 수요는 증가하고 있는 반면 한정된 수자원으로 인해 물부족 현상이 발생하고 있다. 특히, 기후변화로 인한 주기적인 가뭄발생으로 급수 제한, 하천 건천화 등 물 부족 관련 피해 및 건전한 물 순환 체계가 악화되고 있다. 수자원 측면에서 기후변화 영향에 효과적으로 대응하기 위해서는 용수공급 취약성을 신뢰성 있게 전망하고, 이를 근거로 취약한 지역을 파악하여 효과적인 대응책을 수립해야 한다 (Vorosmarty et al., 2000; Padowski and Jawitz, 2012). 여러 기후변화 연구(McCarthy et al., 2001; Fussel and Klein, 2006)에서는 취약성을 기후노출, 민감도, 적응능력을 통합한 개념이라고 정의하였으며, 이 기후변화 취약성 정의를 토대로 국내 수자원 취약성 연구가 다양하게 수행되었다(Kim et al., 2012; Kim and Chung, 2012; Kim and Chung, 2013a, b; Song and Chung, 2016). 정량적인 방법으로 취약성을 평가하기 위해서 다기준 의사결정기법이 사용되는데 대상지역의 선정, 평가지표의 선정, 가중치의 결정, 취약성 정량화 등의 과정으로 구성된다. 그 중에서도 지표에 대한 가중치의 결정은 다기준 의사결정 문제를 해결하는데 있어서 가장 중요한 요소로 여겨진다(Roy and Vincke, 1981).

지표에 대한 가중치는 대안의 최종 순위를 결정하는데 영향을 미치기 때문에 결정 과정이 매우 합리적이어야 한다. 지표의 가중치 결정 방법은 다양한 기법이 사용될 수 있으므로 동일한 지표에 대하여 서로 다른 값이 사용될 수 있다(Hobbs et al., 1992; Al-Kloub et al., 1997; Yeh et al., 1999). 수자원 측면의 취약성 연구에서는 델파이(Delphi) 기법이 여러 차례 사용되어 왔으나(Lee et al., 2013; Chung et al., 2014), 전문가 또는 이해당사자들에 대한 설문결과를 이용하므로 주관적인 방법으로 구분된다. 반면 엔트로피 또는 주성분분석기법(Principal Component Analysis)을 이용한 객관적 가중치 결정 방법이 제안되기도 하였으나(Soofi, 1990; Zeng et al., 2012; Won et al., 2015), 자료의 고유 특성으로부터 산정되기 때문에(대안별 수치의 차가 크면 엔트로피 값이 작아지고, 수치의 차가 작으면 엔트로피 값이 커짐) 평가지표에 대한 진정한 중요도가 정량화된다고 볼 수 없다.

이러한 이유로 정확한 가중치의 도출 보다 가중치에 대한 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통해 불확실성을 정량화하는 연구가 제안되었다(Barron and Schmidt, 1988). Guillen et al. (1998)이 제안한 강건성 지수(robustness index, RI)는 가중치의 변화로 인해 대안의 순위 역전이 어느 정도 가능한지 보여준다. 또한 Triantaphyllou and Sanchez (1997)는 각

평가기준의 가중치에 대한 민감도 분석을 통해 두 대안의 순위 역전을 위해 평가지표 별로 어느 정도 변화가 필요한지 정량화하는 방법을 제안하였다. 그러나 여러 기준의 가중치를 동시에 고려하지 않으므로 강건성 지수와 민감도 분석은 두 대안의 순위 변동을 위한 가중치의 최소변화량을 산정하는데 있어서 종합적인 불확실성을 정량화하지 못한다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 불확실성 문제를 해결하기 위해 Hyde et al. (2005)는 불확실성 정량화 기법을 개발하여 두 대안의 순위가 역전되는 모든 평가기준에 대한 가중치의 변화량의 합계가 최소가 되도록 최적화하는 방법을 제안하였다.

본 연구는 설문조사를 통해 조사된 평균값을 가중치로 사용하는 기존의 기후변화 취약성 연구를 보완하기 위해 가중치에 대한 불확실성을 종합적으로 정량화하는 방법을 제안하였다. 이때 강건성 지수와 Hyde et al. (2005)가 제안한 불확실성 정량화 기법을 사용하였다. 본 연구는 서울을 제외한 대한민국의 6개 광역시(인천, 부산, 대구, 대전, 광주, 울산)를 대상으로 기후변화를 고려한 용수공급 취약성 평가를 수행하였다. 서울은 대부분 지표에서 매우 큰 값을 보여서 다른 도시들의 비교에서 객관성을 저해할 수 있어서 제외하였다.

2. 이론적 배경

2.1 기후변화 취약성

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 향후 100년간 지구의 평균온도는 A1B시나리오의 경우 약 4.4°C가 증가할 것으로 예측하고 있으며, 우리나라의 경우에도 약 4°C가 상승할 것으로 예측하고 있다(NEIR, 2011). 본 연구는 IPCC에서 사용하는 기후변화 취약성에 대한 정의를 토대로 수행하였다. 취약성(Vulnerability, V)은 다양한 기후 관련 자극인 기후노출(climate exposure, CE), 기후 관련 자극에 의해 영향 받는 정도인 민감도(sensitivity, S), 그리고 위험한 환경 또는 정책의 변화를 유도할 수 있는 적응능력(adaptive capacity, AC)으로 구성되며(Adger, 2006), Eq. (1)을 통해 정량화할 수 있다.

$$V = \alpha \times CE + \beta \times S - \gamma \times AC \quad (1)$$

여기서, α , β , γ 는 각각 기후노출, 민감도, 적응능력에 대한 가중치를 의미한다.

본 연구에서 사용된 기후노출, 민감도, 적응능력에 따른 기준별 세부 지표들은 국립환경과학원(National Institute Environ-

mental Research, NIER)이 개발한 CCGIS (Climate Change Geographic Information System)의 2071~2100년에 해당하는 A1B시나리오에 근거하며, 3절(연구방법)에서 결정된 가중치와 함께 언급하였다(NEIR, 2011). 취약성 평가 모델을 사용하기 위해 기후노출, 민감도, 적응능력과 관련된 주요 지표들을 식별하고 정의되어야 하며(Hamouda et al., 2009), 지표들은 중요한 속성 정보를 포함하고, 평가방법은 투명하여 누구나 이해할 수 있어야 한다(Seager, 2001).

2.2 강건성 지수

Guillen et al. (1998)이 제안한 강건성 지수는 Eq. (2)를 통해 산정되는데 2개의 대안에 대하여 어느 한 대안이 다른 대안보다 우월한 정도의 수준을 정량화한다.

$$r(a_1, a_2) = \frac{w_1 \times (x_{1,1} - x_{2,1}) + \dots + w_m \times (x_{1,m} - x_{2,m})}{w_1 \times |x_{1,1} - x_{2,1}| + \dots + w_m \times |x_{1,m} - x_{2,m}|} \quad (2)$$

여기서, $r(a_1, a_2)$ 는 대안1과 대안2 간에 강건성 지수, w_m 은 m 번째 지표의 가중치, $x_{1,m}$ 은 대안1의 m 번째 지표의 평가치다. $r(a_1, a_2)$ 는 -1에서 1 사이의 값을 가지며, a_1 이 a_2 보다 항상 우월할 경우, $r(a_1, a_2)$ 의 값은 1이며, 이를 강건하다고 한다.

2개의 대안을 대상으로 순위가 역전되는 각각의 가중치 (w^*)는 Eqs. (3a) and (3b)를 통해 산정할 수 있다.

$$\text{if } x_{1,1} > x_{2,1}, \text{ then } w^* = w_1 - w_1 \times r(a_1, a_2) \quad (3a)$$

$$\text{if } x_{1,1} \leq x_{2,1}, \text{ then } w^* = w_1 + w_1 \times r(a_1, a_2) \quad (3b)$$

강건성 지수 분석을 통해 변경된 가중치를 적용하면 2개 대안의 최종 평가치는 동일할 값을 갖게 된다. 강건성 지수는 다 기준 의사결정을 수행하는데 도움이 되지만, 초기 가중치에 동일한 값($r(a_1, a_2)$)을 적용하기 때문에 민감한 항목을 구별해 내기 어려우며, 변경 전의 가중치 합계와 변경 후의 가중치 합계가 동일하지 못한 한계점이 있다.

2.3 TOPSIS

TOPSIS (Hwang and Yoon, 1981) 방법은 여러 속성의 의사결정 문제를 해결하기 위해 사용되고 있으며, PIS (Positive Ideal Solution)와 NIS (Negative Ideal Solution)가 모든 속성에 대하여 가장 이상적이고 부정적인 수준을 가질 때, 기하학적 거리가 PIS에 가깝고 NIS에 멀수록 좋은 대안으로 평가된다. TOPSIS의 진행 과정은 Ye and Li (2014)에서 확인이 가

능하며, 최종적으로 Eqs. (4)~(6)을 이용하여 근접도계수 (closeness coefficient)를 구하고, 모든 대안의 순위를 도출할 수 있다.

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^m (a_{ij} - a_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^m (a_{ij} - a_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$C_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (6)$$

여기서, d_i^+ 와 d_i^- 는 대안 i 의 PIS와 NIS로부터 분리된 거리, a_{ij} 는 대안 i 의 j ($= 1, 2, \dots, m$) 번째 지표의 표준화된 평가치, a_j^+ 와 a_j^- 는 대안 i 에 대한 a_{ij} 의 최대·최소값, C_i^* 는 대안 i 의 근접도계수이다.

2.4 가중치 분석 방법

본 연구에서는 가중치에 대한 불확실성을 정량화하기 위해 두 대안 간에 순위역전이 발생하는 최소 가중치 변화량 합계를 산정하였다. 이 값은 최적화 기법을 이용하여 계산되는데 목적함수는 Eq. (7)과 같고 제약조건은 Eqs. (8a)~(8c)과 같다. 목적함수는 가중치 변화량의 제곱의 합계를 최소화하며, 제약조건은 모든 가중치의 합계가 변경 전·후에 같도록 하는 것과 두 대안의 평가치가 같아지는 것, 그리고 모든 가중치의 범위가 0~1에 있는 것을 만족하도록 구성하였다.

$$\min d_e = \sqrt{\sum_{m=1}^M (w_{mi} - w_{mo})^2} \quad (7)$$

$$\text{subject to } \sum_{m=1}^M w_{mi} = \sum_{m=1}^M w_{mo} \quad (8a)$$

$$V(a_x)_{opt} = V(a_y)_{opt} \quad (8b)$$

$$LL \leq w_{mo} \leq UL \quad (8c)$$

여기서, d_e 는 변경 전·후 가중치의 변화량 합계, w_{mi} 와 w_{mo} 는 지표 m ($= 1, 2, \dots, M$)에 대한 초기 가중치와 변경된 가중치, M 은 지표의 총 개수, $V(a_x)_{opt}$ 와 $V(a_y)_{opt}$ 는 변경된 두 대안의

평가치, LL 과 UL 은 변경된 가중치의 최소와 최대 경계치를 의미한다.

특히, 본 연구에서는 TOPSIS를 활용하여 가중치에 대한 불확실성을 정량화하기 위해, Eq. (8a)에서 두 대안의 변경 전·후 가중치 합계를 동일하게 1로 설정하고, Eq. (8b)에서 좌·우변 값에 Eq. (6)를 통해 산정된 두 대안의 근접도계수를 대입하고, Eq. (8c)에서 가중치 값의 범위를 0~1로 제약조건을 설정한 후, 최적화 기법을 통해 $\min d_c$ 를 구하였다. 최적화 기법을 통해 두 대안의 순위를 역전시키게 만드는 변경된 가중치 값을 얻을 수 있는데, 변경된 가중치와 초기 가중치의 차 (Eq. (9))의 결과를 통해 민감한 지표를 확인할 수 있게 된다.

$$\Delta w_m = w_{m_o} - w_{m_i} \tag{9}$$

3. 연구방법

본 연구는 6개 광역시를 대상으로 기후변화에 따른 용수공급 취약성 평가를 수행하였으며, 다기준 의사결정 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 고려하여 강건성 지수와 TOPSIS 방법을 함께 사용하였으며, 총 5단계의 절차로 진행되었다. 1단계에서는 연구 대상 지역을 선정하고, 2단계에서는 용수공급 취약성과 관련된 평가지표를 선정하고, 3단계에서는 모든 평가지표 대한 가중치를 결정하고, 4단계에서는 모든 도시의 강건성 지수를 산정하고, 5단계에서는 두 도시의 순위 역전이 발생하는 최소 가중치 변화량 합계($\min d_c$)를 산정하였다.

1단계에서는 도시별 객관적인 취약성을 산정하기 위해 매



Fig. 1. Location of six study cities

우 큰 대도시인 서울특별시(서울)를 제외한 6개의 광역시(부산(M01), 대구(M02), 인천(M03), 광주(M04), 대전(M05), 울산(M06))를 대상으로 하였다(Fig. 1). 2, 3단계에서는 다양한 객관적인 자료를 수집하여 정리한 NIER (2011)의 자료기반 시스템인 CCGIS의 결과를 이용하였다. 이때 기상 관련 자료는 A1B 시나리오의 결과를 사용하였다.

용수공급의 취약성 평가를 위한 지표의 결정은 IPCC의 기후변화 취약성 개념에 근거하여 Table 1과 같이 결정하였다. 또한, 델파이 기법을 활용하여 전문가들을 대상으로 두 차례에 걸친 설문조사와 의견 수렴을 통해 선정된 지표 및 가중치를

Table 1. Criteria for assessment of water supply vulnerability (NIER, 2011)

Criteria	Reference
Climate Exposure	
Maximum number of continuous non-rainy days (days)	
Precipitation (Dec, Jan, and Feb) (mm)	
Precipitation (Mar, Apr, and May) (mm)	
Evapotranspiration (Dec, Jan, and Feb) (mm)	
Evapotranspiration (Mar, Apr, and May) (mm)	
Underground outflow (mm)	
Sensitivity	
Population density (persons/km ²)	
Total population (persons)	
Water supply (L/person/day)	
Groundwater withdrawal (m ³ /year)	Chung and Lee (2007)
River water withdrawal (m ³ /year)	Koh (2009)
Agriculture water usage (10 ³ m ³ /year)	Son et al. (2011)
Industrial water usage (10 ³ m ³ /year)	Jung et al. (2011)
Household water consumption (10 ³ m ³ /year)	Jun et al. (2011)
Grain production per area (ton/km ²)	
Livestock production per area (EA/km ²)	
Adaptive Capacity	
Financial independence (%)	
GRDP (10 ⁶ Korean won)	
Civil servants (person)	
Water supply distribution ratio (%)	
Groundwater capacity (10 ³ ton/year)	
Recycled water usage per area (10 ³ ton/year)	
Number of civil servants related to water (person)	

이용하였다(NIER, 2011). 기후노출(0.31)과 관련된 지표들은 용수공급 취약성을 반영할 수 있는 강수량의 균등한 분포를 보여주는 요소들로 선정되었으며, 2071~2100년에 A1B 시나리오에 해당하는 자료로, 연속적인 무강우일수의 최대값(0.222), 12~2월 강수량(0.182), 3~5월 강수량(0.212), 12~2월 증발산량(0.101), 3~5월 증발산량(0.131), 지하유출(0.152)이 이에 해당된다. 특히, 우리나라의 기후 특성인 장마철에 강우가 많고, 봄·겨울의 강우량이 적음을 고려하여 용수 확보가 어려운 봄과 겨울철의 강수량과 증발산량을 이용하였다. 민감도(0.31)와 관련된 지표들은 용수공급이 원활하지 않을 경우에 피해가 예상되는 요소들로 선정되었으며, 인구밀도(0.11), 총인구(0.10), 상수도 급수량(0.07), 지하수 이용량(0.08), 하천수 이용량(0.09), 농업용수 사용량(0.13), 공업용수 사용량(0.14), 생활용수 사용량(0.15), 면적당 곡물생산(0.07), 면적당 축산물생산(0.06)이 이에 해당된다. 적응능력(0.38)과 관련된 지표들은 용수공급이 취약할 경우, 적응할 수 있는 사회·경제적인 요소들과 대응책들이 반영된 요소들로 선정되었으며, 재정자립도(0.14), 지역내 총생산(GRDP, 0.105), 공무원수(0.058), 상수도 보급률(0.174), 지하수 가용량(0.244), 면적당 물재이용량(0.174), 물관리 공무원 수(0.105)가 이에 해당된다.

4. 연구결과

4.1 강건성 지수 산정 결과

6개 광역시를 대상으로 두 도시 간의 강건성 지수는 Eq. (2)를 통해 계산할 수 있었으며, 그 결과는 Table 2에서 확인할 수 있다. 또한, Eqs. (3a) and (3b)를 바탕으로 두 도시 간에 순위변동이 발생하는 변경된 가중치에 대한 상세결과를 Table 3에서 확인할 수 있다. 총 15쌍의 경우 중에서 두 쌍의 경우(M03 and M04, M04 and M05)가 1과 -1의 강건성 지수를 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 가중치에 변화를 주어도 두 쌍의 도시 간에는 순위변동이 일어나지 않을 것으로 나타났다. Table 3에

Table 2. Robustness index among six metropolitan cities

	M01	M02	M03	M04	M05	M06
M01	-	-0.151	-0.274	0.434	-0.255	-0.087
M02		-	-0.059	0.992	0.034	0.164
M03			-	1.000	0.168	0.427
M04				-	-1.000	-0.646
M05					-	0.313
M06						-

의하면, 경우1 (M02 and M05)의 강건성 지수가 0.034로 가장 작은 값을 보이고 있으며, 이는 가중치에 작은 변화를 통해 두

Table 3. Detail results of robustness index

No.	Alt1	Alt2	RI	Criteria	Initial Criteria Weight	Changed Criteria Weight
1	M02	M05	0.034	CE	0.31	0.299
				S	0.31	0.299
				AC	0.38	0.366
2	M02	M03	-0.059	CE	0.31	0.328
				S	0.31	0.328
				AC	0.38	0.402
3	M01	M06	-0.087	CE	0.31	0.336
				S	0.31	0.336
				AC	0.38	0.412
4	M01	M02	-0.151	CE	0.31	0.356
				S	0.31	0.356
				AC	0.38	0.437
5	M02	M06	0.164	CE	0.31	0.259
				S	0.31	0.259
				AC	0.38	0.317
6	M03	M05	0.168	CE	0.31	0.257
				S	0.31	0.257
				AC	0.38	0.316
7	M01	M05	-0.255	CE	0.31	0.388
				S	0.31	0.388
				AC	0.38	0.476
8	M01	M03	-0.274	CE	0.31	0.395
				S	0.31	0.395
				AC	0.38	0.484
9	M05	M06	0.313	CE	0.31	0.213
				S	0.31	0.213
				AC	0.38	0.261
10	M03	M06	0.427	CE	0.31	0.177
				S	0.31	0.177
				AC	0.38	0.217
11	M01	M04	0.434	CE	0.31	0.175
				S	0.31	0.175
				AC	0.38	0.215
12	M04	M06	-0.646	CE	0.31	0.510
				S	0.31	0.510
				AC	0.38	0.625
13	M02	M04	0.992	CE	0.31	0.002
				S	0.31	0.002
				AC	0.38	0.003

도시 간의 순위가 바뀔 수 있음을 나타낸다. 반면, 경우13 (M02 and M04)의 강건성 지수는 0.992로 높은 값을 보이고 있으며, 이는 두 도시 간에 순위 변동이 쉽게 일어나지 않을 것임을 보여주고 있다. 또한, 강건성 지수의 값이 커질수록 초기 가중치와 변경된 가중치의 차이가 점차 커지며, 변경된 가중치의 합계가 1에서 점차 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 강건성 지수는 두 도시 간에 순위변동 여부를 결정하는데 쓰일 수 있지만, 순위변동을 위한 가중치 결정에는 적합하지 않음을 확인할 수 있다.

4.2 불확실성 분석 결과

근접도계수와 Eq. (7)을 활용하여 산정한 두 도시 간의 순위 변동을 위한 $\min d_c$ 와 각 도시의 용수공급 취약성 순위는 Table 4에서 확인할 수 있다. 도시 M03이 용수공급 측면에서 가장 취약한 지역으로 나타났으며, M02, M05, M06, M01이 그 뒤를 이었으며, M04가 가장 취약하지 않은 것으로 나타났다. Table 4에서 N/A (M03 and M04, M04 and M05)는 Eqs. (7) and (8)을 만족하는 값이 없어서 두 도시 간에 순위변동을 가능하게 하는 $\min d_c$ 가 계산되지 않음을 의미하며, 강건성 지수를 통해 분석했을 경우와 똑같은 경우의 쌍에서 순위변동이 불가능함을 의미한다. Table 5는 TOPSIS를 활용한 불확실성 분석의 상세 결과를 보여주고 있다. 가장 작은 $\min d_c$ 는 0.006 (M02 and M05)으로, 두 도시 간에 순위가 쉽게 바뀔 수 있음을 보여준다. 예를 들어, 경우1에서 도시 M02와 M05의 순위를 역전시키기 위해서는 초기 가중치에 각각 기후노출 (CE)+0.001, 민감도(S) -0.004, 적응능력(AC)+0.004 만큼의 변화를 주면 된다. 또한, 분석 결과에 따르면 경우2 (M02 and M06)가 두 번째로 작은 $\min d_c$ 값인 0.033을 보이지만, 강건성 지수 결과(Table 2)에 따르면 도시 M02와 M06은 다섯 번째로 작은 값을 보였다. 이와 같이, TOPSIS에 대한 불확실성 분석 시, $\min d_c$ 가 커질수록 순위변동을 위한 가중치 변화량도 증가하여 강건성 지수 분석 결과와 비슷한 결과를 보이는 반면, 변동된 가중치의 합이 초기 가중치의 합과 동일하게 유지되는

차이점을 보였다. 그러므로 의사결정 과정에서 발생하는 불확실성을 고려하기 위해 두 가지 기법을 함께 활용해야 한다.

Table 5. Detail results of uncertainty analysis

No.	Alt1	Alt2	$\min d_c$	Criteria	Initial Criteria Weight	Optimized Criteria Weight	Δw_m
1	M02	M05	0.006	CE	0.31	0.309	0.001
				S	0.31	0.314	-0.004
				AC	0.38	0.375	0.004
2	M02	M06	0.033	CE	0.31	0.295	0.014
				S	0.31	0.336	-0.026
				AC	0.38	0.368	0.011
3	M02	M03	0.039	CE	0.31	0.304	0.005
				S	0.31	0.285	0.024
				AC	0.38	0.409	-0.029
4	M01	M02	0.043	CE	0.31	0.285	0.024
				S	0.31	0.344	-0.034
				AC	0.38	0.370	0.009
5	M05	M06	0.049	CE	0.31	0.278	0.031
				S	0.31	0.304	0.005
				AC	0.38	0.417	-0.037
6	M01	M05	0.059	CE	0.31	0.265	0.044
				S	0.31	0.317	-0.007
				AC	0.38	0.417	-0.037
7	M01	M06	0.062	CE	0.31	0.259	0.050
				S	0.31	0.340	-0.030
				AC	0.38	0.400	-0.020
8	M03	M05	0.069	CE	0.31	0.281	0.028
				S	0.31	0.36	-0.056
				AC	0.38	0.351	0.028
9	M01	M03	0.082	CE	0.31	0.244	0.065
				S	0.31	0.353	-0.043
				AC	0.38	0.402	-0.022
10	M03	M06	0.093	CE	0.31	0.236	0.0738
				S	0.31	0.363	-0.053
				AC	0.38	0.400	-0.020
11	M01	M04	0.149	CE	0.31	0.431	-0.121
				S	0.31	0.238	0.071
				AC	0.38	0.329	0.050
12	M04	M06	0.230	CE	0.31	0.497	-0.187
				S	0.31	0.211	0.098
				AC	0.38	0.291	0.088
13	M02	M04	0.832	CE	0.31	0.009	0.300
				S	0.31	0.987	-0.677
				AC	0.38	0.003	0.376

Table 4. Closeness coefficients of all pairs for rank reversal

	M01	M02	M03	M04	M05	M06	Rank
M01	-	0.043	0.082	0.149	0.059	0.062	5
M02		-	0.039	0.832	0.006	0.033	2
M03			-	N/A	0.069	0.093	1
M04				-	N/A	0.230	6
M05					-	0.049	3
M06						-	4

전반적인 평가 결과, 도시 M03과 M02는 용수공급에 취약한 것으로 나타났으며, 도시 M04와 M01은 취약도가 낮은 것으로 나타났다. 또한, 도시 M02와 M01은 용수공급 취약성 측면에서 타 도시에 비해 민감하고, 도시 M04는 용수공급 취약성에 대한 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 이를 통해 도시 M02는 상대적으로 타 도시에 비해 취약하지만 대응대책 수립 및 관리를 통해 취약함이 나아질 것으로 보이며, 도시 M01은 상대적으로 타 도시에 비해 덜 취약하지만 순위가 역전 당하기 쉬운 지역으로 나타났다. 또한, 도시 M04는 다른 도시에 비해 상대적으로 용수공급 측면에서 취약하지 않으며, 민감도 또한 높지 않기 때문에 순위가 역전되기 어려울 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구는 강건성 지수와 TOPSIS 방법에 대한 불확실성 분석을 통해 우리나라의 6개 광역시를 대상으로 기후변화에 따른 용수공급 취약성 평가를 수행하였다. M03 (인천)과 M02 (대구)는 타 지역에 비해 용수공급 취약성이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, M02 (대구)와 M01 (부산)은 타 지역에 비해 상대적으로 용수공급 취약성에 민감한 것으로 나타났다. M02 (대구)는 용수공급 측면에서 취약한 하지만 대응대책 수립 및 관리를 통해 취약함이 나아질 수 있을 것으로 예상된다. 반면에 M01 (부산)은 타 지역에 비해 용수공급의 취약함이 덜하지만 타 도시에 비해 취약성 순위가 쉽게 바뀔 수 있을 것으로 예상되기 때문에 꾸준한 관리가 예상된다. 강건성 지수는 각 대안의 순위변화 가능성 검토를 위해 활용할 수 있는 다기준 의사결정 방법이지만, 일부 측면에서 한계를 보인다. 따라서 TOPSIS를 활용한 불확실성 분석에서는 대안의 순위변동 여부 측면에서 강건성 지수와 동일한 결과를 보이지만, 순위변동을 위한 가중치 결정 과정에서 강건성 지수보다 투명한 결과를 보여준다. 본 연구에서 용수공급 취약성 평가를 위해 사용한 두 가지 의사결정 불확실성 분석기법은 상호 단점을 보완하며 기후변화의 불확실성을 고려한 대안들의 가중치 분석을 수행가능하게 해준다.

본 연구는 미래 기후 시나리오를 반영한 용수공급 취약성을 공간적으로 정량화하였으므로 각 지자체가 기후변화에 대한 적응전략을 수립하는데 중요한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단하며, 향후 현재와 미래의 용수공급 취약성 비교 연구를 수행한다면 지자체에서 보다 구체적인 기후변화 적응전략을 수립하는데 도움이 될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adger, W. N. (2006). "Vulnerability." *Global Environmental Change*, Vol. 16, pp. 268-281.
- Al-Kloub, B., Al-Shemmeri, T., and Pearman, A. (1997). "The role of weights in multi-criteria decision aid, and the ranking of water projects in Jordan." *European Journal of Operational Research*, Vol. 99, pp. 278-88.
- Barron, H., and Schmidt, P. (1988). "Sensitivity analysis of additive multiattribute value models." *Operations Research*, Vol. 36, pp. 122-27.
- Chung, E.-S., and Lee, K. S. (2007). "Identifying Spatial Hazard Ranking Using Multicriteria Decision Making Techniques." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 40, No. 12, pp. 969-983.
- Chung, E.-S., Won, K., Kim, Y., and Lee, H. (2014). "Water resource vulnerability characteristics by district's population size in a changing climate using subjective and objective weights." *Sustainability*, Vol. 6, pp. 6141-6157.
- Fussler, H. M., and Klein, R. J. T. (2006). "Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking." *Climatic Change*, Vol. 75, pp. 301-329.
- Guillen, S. T., Trejos, M. S., and Canales, R. (1998). "A robustness index of binary preferences." 14th International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Charlotte, Virginia.
- Hamouda, M. A., Nour el-Din, M. M., and Moursy, F. I. (2009). "Vulnerability assessment of water resources system in the Eastern Nile basin." *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 2697-2725.
- Hobbs, B. F., Chankong, V., Hamadeh, W., and Stakhiv, E. Z. (1992). "Does choice of multicriteria method matter? An experiment in water resources planning." *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 1767-1779.
- Hwang, C. L., and Yoon, K. (1981). "Multiple attribute decision making: Methods and applications." New York: Springer-Verlag.
- Hyde, K. M., Maier, H. R., and Colby, C. B. (2005). "A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making." *Journal of Environmental Management*, Vol. 77, pp. 278-290.
- Jun, K.-S., Chung, E.-S., Sung, J.-Y., and Lee, K. S. (2011). "Development of spatial water resources vulnerability index using climate change index." *Science of The Total Environment*, Vol. 409, pp. 5228-5242.
- Jung, I.-W., Bae, D.-H., and Kim, G. (2011). "Recent trends of mean

- and extreme precipitation in Korea." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 359-370.
- Kim, Y., and Chung, E.-S. (2012). "Integrated assessment of climate change and urbanization impact on adaptation strategies: A case study in two small Korean watersheds." *Climatic Change*, Vol. 115, pp. 853-872.
- Kim, Y., and Chung, E.-S. (2013a). "Assessing climate change vulnerability with group multi-criteria decision making approaches." *Climatic Change*, Vol. 121, pp. 301-315.
- Kim, Y., and Chung, E.-S. (2013b). "Fuzzy VIKOR approach for assessing the vulnerability of the water supply to climate change and variability in South Korea." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, pp. 9419-9430.
- Kim, Y.-K., Yoo, J.-A., and Chung, E.-S. (2012). "Water management vulnerability assessment considering climate change in Korea." *Climate Change Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-12.
- Koh, J. K. (2009). *A study on vulnerability assessment to climate change in Gyeonggi-do*. Gyeonggi Research Institute.
- Lee, G. M., Jun, K.-S., and Chung, E.-S. (2013). "Integrated multi-criteria flood vulnerability approach using fuzzy TOPSIS and Delphi technique." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, pp. 1293-1312.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., and White, K. S. (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- National Institute Environmental Research (2011). *Sectoral climate change vulnerability map for guiding the development of climate change adaptation action plan at district level*, NIER, Incheon, South Korea.
- Padowski, J. C., and Jawitz, J. W. (2012). "Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States." *Water Resources Research*, Vol. 48, pp. 1-6.
- Roy, B., and Vincke, P. (1981). "Multicriteria analysis: Survey and new directions." *European Journal of Operational Research*, Vol. 8, pp. 207-218.
- Seager, J. (2001). "Perspectives and limitations of indicators in water management." *Regional Environmental Change*, Vol. 2, pp. 85-92.
- Son, M., Sung, J.-Y., Chung, E.-S., and Jun, K.-S. (2011). "Development of flood vulnerability index considering climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.
- Song, J. Y., and Chung, E.-S. (2016). "Robustness, uncertainty and sensitivity analyses of the TOPSIS method for quantitative climate change vulnerability: A case study of flood damage." *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 13, pp. 4751-4771.
- Soofi, E. S. (1990). "Generalized entropy-based weights for multi-attribute value models." *Operations Research*, Vol. 38, pp. 362-363.
- Triantaphyllou, E., and Sanchez, A. (1997). "A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision-making methods." *Decision Sciences*, Vol. 28, No. 1, pp. 151-194.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R. B. (2000). "Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth." *Science*, Vol. 289, pp. 284-288.
- Won, K., Chung, E.-S., and Choi, S.-U. (2015). "Parametric assessment for water use vulnerability using fuzzy entropy-coupled TOPSIS method." *Sustainability*, Vol. 7, No. 9, pp. 12052-12070.
- Ye, F., and Li, Y. (2014). "An extended TOPSIS model based on the possibility theory under fuzzy environment." *Knowledge-Based Systems*, Vol. 67, pp. 263-269.
- Yeh, C.H., Willis, R.J., Deng, H., and Pan, H. (1999). "Task oriented weighting in multi-criteria analysis." *European Journal of Operational Research*, Vol. 119, pp. 130-146.
- Zeng, F., Jai, C., and Wang, Z. (2012). "Flood risk assessment based on principal component analysis for Dongjiang river basin." 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, Nanjing, China.