우리나라 홍수 취약성 평가를 위한 Fuzzy TOPSIS 접근법

Fuzzy TOPSIS Approach to Flood Vulnerability Assessment in Korea

김 영 규* / 정 은 성** / 이 길 성***

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

Abstract

This study will be a new attempt to quantify flood vulnerability taking into account uncertainty. Information obtained from the real world has lots of uncertainties. Therefore, this study developed an approach to quantify spatial flood vulnerability of Korea using Fuzzy TOPSIS approach. Also, Fuzzy TOPSIS were compared with TOPSIS and weighted sum method. As a result, rankings of some areas were changed dramatically due to the uncertainty. Spearman rank correlation analysis indicated that the rankings of TOPSIS and weighted sum method were almost similar, but quite different from ranking of Fuzzy TOPSIS. In other words, because applying Fuzzy concept in regional vulnerability assessment may cause a significant change in priorities, the model presented in this study may be a method of vulnerability assessment.

Keywords : flood vulnerability assessment, uncertainty, Fuzzy TOPSIS

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. 서 론

세계적으로 기후변화로 인한 극한의 수문사상들이 발생하고 있으며 IPCC(2007)의 보고서에 의하면 미래의 기후변화에 가장 취약한 부문은 인간 환경의 영향중에서도

기후시스템 변화로 인한 강수패턴의 변화와 그에 따른 가용 수자원의 부족을 최우선으로 꼽고 있다. 실제로 국내의 경우 최근 50년간 강수일수는 감소한 반면 80 mm 이상의 호우일수의 발생빈도는 증가되었다고 보고되었다(Choi, 2002). 이는 가뭄과 홍수와 같은 극한 사상의 발생

* 서울과학기술대학교 건설시스템디자인학과 석사과정 (e-mail: ykkim0603@hanmail.net)

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, Korea

** 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 & Technology, Seoul, Korea

*** 서울대학교 건설환경공학부 교수 (e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

빈도와 강도가 동시에 증가될 가능성과 더불어 국내 유역 환경이 기후변화에 대한 취약성이 높다는 것을 시사하고 있으며 기후변화에 대한 유역관리상태를 평가하는 것이 중요한 연구주제임을 말해준다. 그러나 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.

국내에서 최시중과 이동률(2005)이 지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지수를 개발한 바 있고, 강민구와 이광만(2006)은 수자원 지속가능성 지수(Water Resources Sustainability Index, WRSI)를 개발하였고, 정은성과 이길성(2007)은 유역 상태를 평가하기 위한 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD), 건천잠재능(Potential Streamflow Depletion, PSD), 수질오염잠재능(Potential Water Quality Deterioration, PWQD) 등을 산정한 뒤 유역의 종합적인 수문학적 취약도를 정량화하기 위해 유역평가지수(Watershed Evaluation Index, WEI)를 개발한 바 있다. 이동률 등(2009)은 압력(Pressure), 상태(State), 반응(Response) 구성체계를 기반으로 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)를 개발하여 유역간 홍수에 대한 취약성을 비교, 분석하였다. 더 나아가 최근 지구온난화와 맞물려 큰 이슈가 되고 있는 기후변화를 고려한 연구들로는 유가영과 김인애(2008)는 우리나라의 지역별 기후변화 취약성을 평가할 수 있는 취약성-탄력성 지표(Vulnerability-Resilience Indicator, VRI)를 개발하고 이의 활용방안에 대한 방향성을 제시한 바 있다. 정일원 등(2008)은 기후변화 영향을 반영하여 홍수취약성을 민감도(Sensitivity), 노출(Exposure), 적응능력(Adaptation)의 함수로 정의하고 각 유역별 지표들을 이용하여 상대적인 취약도를 평가한 바 있다. 고재경과 김희선(2010)은 기후변화 취약성 평가 방법론을 검토하고 기초 지자체 단위 취약성 평가지표를 개발하여 적용가능성을 모색한 바 있다. 김병식 등(2011)은 기후변화가 한반도의 가뭄발생 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 RCM 강수모의 결과와 통계학적 축소기법에 의해 모의된 강수자료를 이용하여 표준강수지수를 산정한 후 변동성을 평가한 바 있다. 손민우 등(2011)은 기후변화로 인한 홍수피해의 증가 여부를 정량적으로 제시할 수 있는 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI)를 개발한 바 있고, 국립환경과학원(2012)은 미래 기후변화를 고려하여 치수, 이수, 수질에 대해 우리나라 232개 광역지방자치단체의 취약성 지수

를 산정한 바 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 기후변화 영향을 고려하여 취약성을 평가하기 위한 지수 산정에는 많은 불확실성이 내재되어있다(Jones, 2000; Webster et al., 2003; Patt et al., 2005). 또한 손민우 등(2011)은 지표들에 대한 가중치는 사용하는 전문가마다 달라질 수 있고 가중치 산정에 대한 과학적인 접근법의 사용에 대한 연구가 요구된다고 하였다. 이러한 입력 자료의 불확실성을 해결하기 위해 많은 연구자들은 퍼지 개념(Zadeh, 1965)을 사용하였다. Hajkowicz and Collins (2007)는 물관리 연구에 적용된 많은 의사결정 기법들을 조사하였고 그 결과 각 지표들의 입력자료와 가중치의 불확실성을 해소하기 위해 다기준의사결정기법(Multi Criteria Decision Making, MCDM)에 퍼지개념을 결합하였으며 특히 TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution; Hwang and Yoon, 1981) 기법이 가장 많이 사용되었다고 보고한 바 있다. Ashtian et al. (2009)은 MCDM을 적용하여 지표의 가중치를 결정할 때 발생하는 불확실성을 해소하기 위해 구간 값을 이용한 Fuzzy TOPSIS 모델을 제안한 바 있다. SoltanPanah et al. (2011)은 기존의 MCDM은 불확실성 문제를 해결할 수 없으며 MCDM에 퍼지 이론을 결합함으로써 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있다고 하였고 대형교량들의 취약성 지수를 산정하기위해 Fuzzy TOPSIS를 적용한 바 있다. Farajzadeh et al. (2011)은 지진에 대한 취약성 지수를 산정하는데 선정된 지표들의 불확실성 때문에 퍼지수를 결합한 Fuzzy TOPSIS 모델을 개발한 바 있다. Yazdani et al. (2012)은 중요한 사회기반시설의 취약성 지수를 산정하는데 문제 자체가 복잡하고 고유의 불확실성 때문에 각 기준의 가중치를 정하는데 있어 Fuzzy TOPSIS를 사용한 바 있다.

더 나아가 취약성 지수 산정에 사용되는 지표들의 선정 과정에도 불확실성이 존재할 수 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해 유가영과 김인애(2008)는 델파이(Delphi) 조사가 전문가 의견을 수렴하여 적합한 취약성 지표를 추출하는데 중요한 방법임을 밝힌 바 있으며 김다운 등(2011)은 수자원 분야의 전문가들을 대상으로 우리나라 중소하천의 기후변화 취약성 분석을 위해 델파이 기법을 사용하여 지표를 선정한 바 있다.

따라서 본 연구는 불확실성을 고려한 새로운 홍수 취약

성 평가방법의 하나로 Fuzzy TOPSIS 기법의 적용성을 16개 광역시도를 대상으로 평가하였다. 이를 위해 대용 변수와 가중치는 국립환경과학원(2012)의 값을 사용하였다. 또한 각 대용변수의 값과 가중치 값을 삼각퍼지수 (Triangular fuzzy number, TFN)로 변환하여 TOPSIS에 적용하였고 Fuzzy TOPSIS의 적용성을 검토하기 위해 TOPSIS와 가중합계법을 적용한 결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구 방법

본 연구의 과정은 Fig. 1과 같이 크게 7단계로 구분될 수 있다. Step 1에서는 기후변화를 고려한 취약성을 정의하고 Step 2에서는 델파이 조사를 통해 대용변수(proxy variable) 및 가중치를 결정한다. Step 3에서는 입력 자료의 히스토그램 분포를 확인하여 평가기준의 변별성을 확인한 뒤 부족한 변수들은 로그 형태로 변환하여 다시 검토한다. 또한 각 대용변수의 측정 단위가 다양하기 때문에(Noncommensurable) 표준화한다. Step 4에서는 입력 자료와 가중치를 TFN으로 변환하고 Step 5에서는 서로 다른 축척의 TFN을 표준화한다. Step 6에서는 Fuzzy TOPSIS 기법을 사용하여 취약성을 산정하며 Step 7에서는 Spearman 상관분석을 실시하여 Fuzzy TOPSIS와 TOPSIS 및 가중합계법의 결과의 일치 정도를 확인한다. 본 연구에서는 이러한 7단계 중 Step 2의 대용변수들과 가중치에 대한 값들은 국립환경과학원(2012)의 결과를 사

용하였다.

2.2 취약성 개념

취약성의 개념은 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있으며 정의 또한 하나로 규정되어 있지 않다. UNDP (2005)는 기후변동이나 스트레스에 대한 노출과 이에 대한 대처, 회복, 적응능력에 따른 노출단위의 위험에 대한 민감도로 취약성을 정의하고 기후변화 취약성을 시스템이 가지는 기후변화 자극에 대한 민감도와 적응능력의 함수로 표현하였다. IPCC (2007)는 기후변화 취약성을 시스템이 노출된 기후변화의 특성, 규모 및 속도, 기후변화에 대한 민감도, 적응능력의 함수로 이해하고 기후변동에 대한 시스템의 노출이라는 외부적인 요인과 이러한 스트레스 요인에 대한 민감도, 적응능력이라는 내부적인 요인을 포함해야 한다고 하였다. 또한 기후변화 적응은 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 예상되는 기후변화의 파급효과와 영향에 대해 자연, 인위적 시스템 조절을 통해 피해를 완화시키거나 더 나아가 유익한 기회로 촉진시키는 활동이라고 정의하였다. 또한 여러 기후변화 연구(Füssel and Klein, 2006; 유가영과 김인애, 2008; 고재경과 김희선, 2009)는 취약성 개념을 위해, 노출, 결과(영향), 적응능력 등을 통합한 개념으로 정의하였다. 본 연구에서는 Kelly and Adger (2000), Füssel and Klein (2006)의 문헌을 참조하여 기후변화 취약성을 한 시스템이 기후변화의 다양한 영향들에 노출되었을 때, 영향들에 대한 노출, 민감도, 적응능력으로 정의하고, 이때 노출과 민감도는 잠재적인

Fig. 1. Procedure of Flood Vulnerability Assessment

영향에 의해 결정되며, 이에 적응능력을 결합하는 것으로 정의하였다.

2.3 대용변수 및 가중치 결정

Delphi 방법은 Norman Dalk와 Olaf Helmer에 의하여 1953년에 처음 실시되었다(Dalky et al., 1973). 이 기법은 분야 별 전문가들을 대상으로 익명성을 보장하여 실시하며, 의견의 반복적인 수집과 교환을 통하여 현상을 예측하는 방법이다. 전문가들이 개인적으로 작성한 의견들을 다음 설문에 반영함으로써 의견 환류(feedback)의 과정을 거치게 된다. 이를 통하여 견해의 교류가 이루어지며, 이를 기반으로 자신의 의견에 대한 수정, 보완을 거치는 피드백 과정이 반복되며 의견의 합의가 이루어지게 된다. 그러므로 여러 전문가들의 다양한 의견을 수렴하기에 적합한 기법이라고 할 수 있다(김다운 등, 2011). 델파이 기법의 일반적인 절차는 먼저 사전 준비를 하고 다음으로 실제 설문조사를 실시하며, 마지막으로 여러 차례에 걸친 설문 조사를 분석하여 결론을 낸다. 또한 델파이 기법에서는 적절한 분야와 적당한 수의 전문가 선택이 중요하다. Dalky et al. (1973)은 전문가의 수가 많을수록 좋다고 주장하였지만 이성웅 등(1987)은 비용과 효율성을 고려하여 15명의 전문가 집단이라면 결과적으로 별 차이가 없다고 제시하였다.

2.4 대용변수 자료의 히스토그램 및 표준화

각 세부 대용변수의 자료는 히스토그램을 통해 자료의 분포 형태를 확인하여 분포가 고르지 않아서 변별력이 떨어지는 자료는 로그형태로 변환하였다. 계급값은 연구자의 주관적 판단에 의해 결정되기 때문에 적절한 히스토그램을 얻는데 장애가 될 수 있다(김승환과 전홍석, 1995). 따라서 본 연구에서는 일반적으로 계급구간의 수를 정하 데 있어 Eq. (1)과 같이 Panofsky and Brier (1968)가 제안한 다음 수식을 사용하였다.

$$k = 5 \log_{10} n \quad (1)$$

여기서, k 는 계급구간의 수이며 n 은 자료의 수이다. 또한 각 대용변수는 서로 다른 단위를 가지고 있기 때문에 통합 지수를 만들기 위해서는 다양한 값들을 표준화하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 Eq. (2)와 같이 자료를 전체 자료범위 내에서 표준화하여 0~1의 값을 갖도록 만드는 Re-scaling 방법을 사용하였다. 여기서 x_{qc} 는 c 지역의 지표 q 의 대용변수 값이다. $\min_c(x_q)$ 는 지표 q 의 전체 지역 ($\tilde{c}$)에 대한 대용변수 값 중 최소값을 의미하며 $\max_c(x_q)$ 는 지

표 q 의 전체 지역 ($\tilde{c}$)에 대한 대용변수 값 중 최대값을 의미한다.

$$I_{qc} = \frac{x_{qc} - \min_c(x_q)}{\max_c(x_q) - \min_c(x_q)} \quad (2)$$

2.5 Triangular fuzzy number

퍼지집합, 퍼지 수 이론의 기본적인 정의를 요약하면 다음과 같다. 퍼지집합은 집합 내의 원소가 애매모호한 경계를 갖고 있어 특정 부분집합에 속하는지에 대한 경계가 분명하지 않고 점진적으로 변화되는 원소를 갖는 집합이다. 퍼지집합 내에 포함되는 모든 원소는 소속 함수(membership function)로 표현되고, 소속정도가 1이라는 것은 퍼지집합에서 완전하게 소속되는 의미이며 경계영역은 소속정도가 1과 0사이의 값을 가지게 된다.

퍼지숫자는 “대개 10정도”, “약 10”이라는 숫자를 의미한다. 즉, 퍼지숫자란 어떤 값이 될 가능성이 소속의 정도로 나타내어지는 숫자이다. 예를 들어 퍼지숫자 $A = [a_1, a_3]$, $(a_1, a_3 \in R, a_1 < a_3)$ 라고 하면 이 구간은 집합이라 생각할 수 있다. 따라서 구간 집합의 소속함수 $\mu_A(x)$ 로 표현하면 Eq. (3)과 같다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ 1 & a_1 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases} \quad (3)$$

이러한 소속함수를 표현하는 퍼지 숫자에는 여러 가지 형태가 있을 수 있다. 이 많은 형태의 퍼지숫자 중에서 TFN은 세 개의 점으로 표현할 수 있기 때문에 사용이 간편하다. 예를 들어 TFN A 를 $(a_1, a_2, a_3) \in R$ 라고 정의하면 Eq. (4)와 같이 되며 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & (x < a_1) \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & (a_1 \leq x \leq a_2) \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & (a_2 \leq x \leq a_3) \\ 0 & (x \geq a_3) \end{cases} \quad (4)$$

또한, 두 개의 TFN $\tilde{m} = [m_1, m_2, m_3]$, $\tilde{n} = [n_1, n_2, n_3]$ 의 곱셈은 Eq. (5)와 같다(Dubois and Prade, 1980).

$$\tilde{m} \otimes \tilde{n} = [m_1 n_1, m_2 n_2, m_3 n_3] \quad (5)$$

본 연구에서는 Table 1과 같이 232개 시군구의 세부대용변수 값을 16개 광역시도별로 단순 평균한 값을 사용할 경우 이 과정에서 불확실성이 발생할 수 있기 때문에 16개 광역시도의 각 세부대용변수 값과 11명이 부여한 가중

Fig. 2. Concept of Fuzzy Triangular Number

Table 1. Names and Symbols of 16 Local Governments and Number of Sub-Districts

Names and Symbols of 16 Local Governments		Number of Sub-Districts
Seoul	A1	25
Busan	A2	16
Daegu	A3	8
Incheon	A4	10
Gwangju	A5	5
Daejeon	A6	5
Ulsan	A7	5
Gyeonggi-do	A8	31
Gangwon-do	A9	18
Chungcheongbuk-do	A10	12
Chungcheongnam-do	A11	16
Jeollabuk-do	A12	14
Jeollanam-do	A13	22
Gyeongsangbuk-do	A14	23
Gyeongsangnam-do	A15	20
Jeju	A16	2
Total		232

치 값을 TFN으로 변환하여 사용하였다.

2.6 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 최악

의 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. TFN을 TOPSIS를 적용하기위해 TFN의 서로 다른 축척을 TFN의 성질을 유지하면서 비교 가능한 축척으로 표준화해야한다. 표준화된 퍼지 행렬 $\tilde{R}$ 은 Eq. (6)과 같이

나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\tilde{R} &= [\tilde{r}_{ij}], \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, n)\end{aligned}\quad (6)$$

여기서, $\tilde{r}$ 은 표준화된 TFN을 의미하며 i 는 각 지자체, j 는 각 속성의 갯수를 의미한다. 또한 Eqs. (7)~(10)의 B 와 C 는 각 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)의 집합이다.

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

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B \quad (8)$$

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

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^*}{c_{ij}}, \frac{a_j^*}{b_{ij}}, \frac{a_j^*}{a_{ij}} \right), j \in C \quad (10)$$

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.

$$\begin{aligned}A^+ &= \tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+ \\ A^- &= \tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\end{aligned}\quad (11)$$

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.

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

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (13)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (14)$$

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

2.7 Spearman rank 상관계수

본 연구에서는 각 방법에 따른 순위의 상관관계를 조사하기 위해 Spearman rank correlation coefficient (ρ)를 산정하였다. ρ 는 데이터가 순서에 의한 척도인 경우에 사용되며 표본의 크기가 작을 때 유용하게 사용되는 방법으로(정은성과 이길성, 2007; 이병욱, 2010) Eq. (16)과 같이 계산된다.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R(x_i) - R(y_i))^2}{n(n^2 - 1)} \quad (16)$$

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.

3. 연구 결과

3.1 Fuzzy TOPSIS의 적용

본 연구에서는 대용변수선정과 가중치 선정(step 2)에 대해 국립환경과학원(2012)에서 델파이조사를 통해 도출한 결과를 사용하였다. 국립환경과학원(2012)은 정은성과 이길성(2007), 정일원 등(2008), 고재경과 김희선(2009), 명수정(2011), 손민우 등(2011), Jung et al. (2011), Jun et al. (2011)의 연구를 참조하여 세부 대용변수의 목록을 구성하였으며 1차 델파이 조사를 통해 11명의 전문가에게 대용변수 목록의 선정 타당성을 질의한 후 Table 2와 같이 민감도 9개, 적응능력 7개, 기후노출 5개, 총 21개의 최종 대용변수를 선정하였다. 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 대용변수로 선정하였으며, 적응능력은 홍수가 발생할 경우, 적응할 수 있는 사회, 경제적인 요소들과 치수를 위해 설치된 대응책들이 반영된 대용변수를 선정하였으며, 기후노출은 홍수 분야에서 취약성을 반영할 수 있는 대용변수들로서 강수량에 대한 집중을 보여주는 변수들을 선정하였다. 또한 선정된 대용변수 목록에 대해 2차 델파이 조사가 진행되었으며 도출된 2차 델파이 조사 결과를 통해 3차 델파이 설문을 실시하였고 최종 가중치가 Table 2와 같이 결정되었다.

Table 2. Proxy Variables for Flood Vulnerability Assessment (National Institute of Environmental Research, 2012)

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

(a) Histogram of C3

(b) Histogram of C3 converted to log scale

Fig. 3. Histogram of Proxy Variable Converted to Log Scale

본 연구에서는 선정된 세부 대응변수 자료의 분포 형태를 확인하기 위해 232개 지자체의 세부 대응변수 자료에 대한 히스토그램을 분석하였다. 예를 들어 세부 대응변수

C3의 히스토그램을 확인한 결과 Fig. 3(a)와 같이 자료의 분포 형태가 고르지 않았고 Fig. 3(b)와 같이 로그형태로 변환하였을 때 자료의 분포가 고르게 변화됨을 확인할 수

있었다. 여기서 x축은 계급구간이며 y축은 빈도수를 의미한다. 모든 세부대용변수의 232개 지자체에 대한 히스토그램 분석 결과 여름철 강수량, 5일주기 최대강수량, 지역 평균경사도를 제외하고 나머지 자료들은 자료의 분포 형태가 고르지 않아 로그 형태로 변환하였다. 또한 각 세부대용변수는 측정 단위가 다르므로 0~1 사이의 범위로 표준화하였다(step 3).

또한 Table 1과 같이 232개의 지자체를 16개 광역시도 단위로 취약성을 정량화하기 위해 각 16개 광역시도의 세부 대용변수 자료를(Minimum, Mode, Maximum)형태의 TFN으로 변환하였다. 예를 들어 서울특별시의 경우 25개의 구로 구성되어있으며 각 세부 대용변수에 대한 25개구의 값을 대상으로 히스토그램을 그려 최소값과 최빈값,

최대값을 도출하여 TFN으로 사용하였다. 이 때 계급구간의 수는 Eq. (1)을 통해 산정하였다. 나머지 15개 광역시도의 경우도 동일하게 시군구의 각 세부 대용변수의 값을 TFN으로 변환하였다. 가중치의 경우도 11명의 전문가가 부여한 값을 대상으로 히스토그램을 통해 최소값과 최빈값, 최대값을 도출하여 삼각 퍼지수를 산정하였으며 TFN으로 변환된 민감도, 적응능력, 기후노출의 가중치를 Table 3에, 각 세부 대용변수의 가중치를 Table 4에 나타냈다(step 4). 그러나 TFN으로 변환이 불가능한 것도 있다. 예를 들어 10 m 이하 저지대면적에 대해 서울시의 경우 25개 구의 값이 모두 동일함으로 3개의 퍼지수 모두 동일한 값을 사용하였다.

TFN으로 변환된 각 세부 대용변수와 해당하는 가중치

Table 3. TFN of Weights to Sensitivity, and Adaptive Capacity, Exposure

Criterion	Triangular Fuzzy Number (Min, Mode, Max)		
Sensitivity	0.26	0.30	0.35
Adaptive Capacity	0.30	0.33	0.40
Exposure	0.30	0.37	0.43

Table 4. TFN of Weights to Specific Proxy Variables

Criterion		Triangular Fuzzy Number (Min, Mode, Max)		
Sensitivity	C1	0.05	0.10	0.15
	C2	0.05	0.10	0.15
	C3	0.05	0.06	0.15
	C4	0.05	0.12	0.20
	C5	0.05	0.10	0.15
	C6	0.05	0.12	0.20
	C7	0.05	0.06	0.10
	C8	0.05	0.20	0.20
	C9	0.05	0.18	0.20
Adaptive Capacity	C10	0.10	0.15	0.15
	C11	0.05	0.06	0.10
	C12	0.10	0.11	0.15
	C13	0.05	0.07	0.30
	C14	0.10	0.15	0.20
	C15	0.15	0.20	0.25
	C16	0.15	0.22	0.28
	C17	0.25	0.28	0.50
Exposure	C18	0.10	0.21	0.30
	C19	0.10	0.18	0.25
	C20	0.10	0.13	0.30
	C21	0.10	0.11	0.15

Table 5. Normalized Fuzzy Matrix

Symbols of 16 Local Governments	Sensitivity			Adaptive Capacity			Exposure		
	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)
A1	0.12	0.35	0.73	0.12	0.20	0.46	0.14	0.24	0.54
A2	0.08	0.44	0.91	0.12	0.27	0.69	0.33	0.56	0.97
A3	0.09	0.36	0.69	0.13	0.23	0.71	0.24	0.36	0.63
A4	0.06	0.46	0.90	0.12	0.25	0.68	0.06	0.22	0.59
A5	0.13	0.29	0.66	0.19	0.31	0.62	0.23	0.34	0.63
A6	0.15	0.31	0.61	0.19	0.31	0.62	0.16	0.26	0.48
A7	0.16	0.41	0.81	0.12	0.18	0.54	0.33	0.52	0.98
A8	0.06	0.28	1.00	0.11	0.18	0.52	0.05	0.22	0.77
A9	0.06	0.22	0.79	0.11	0.24	0.71	0.13	0.34	0.83
A10	0.07	0.29	0.69	0.10	0.24	0.59	0.18	0.33	0.81
A11	0.08	0.23	0.78	0.12	0.19	0.58	0.04	0.31	0.59
A12	0.05	0.21	0.90	0.12	0.23	0.68	0.16	0.35	0.72
A13	0.08	0.34	0.88	0.11	0.26	1.00	0.19	0.41	0.96
A14	0.04	0.21	0.83	0.10	0.25	0.69	0.16	0.36	0.87
A15	0.08	0.27	0.84	0.11	0.22	0.78	0.23	0.49	0.99
A16	0.14	0.30	0.53	0.19	0.25	0.60	0.41	0.59	1.00

Table 6. FPIS and FNIS

FIS	Sensitivity			Adaptive Capacity			Exposure		
	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)	(Min, Mode, Max)
A+	(0.35	0.35	0.35)	(0.40	0.40	0.40)	(0.43	0.43	0.43)
A-	(0.01	0.01	0.01)	(0.03	0.03	0.03)	(0.01	0.01	0.01)

는 Eq. (5)과 같이 퍼지 수의 산술 계산식에 의해 가중치가 곱해지며 가중화된 퍼지 행렬은 서로 다른 축척을 가지고 있기 때문에 비교 가능한 축척으로 표준화해야 한다. 본 연구에서는 최종 산출된 취약성 지수의 값이 클수록 가장 취약한 지역으로 나타내기 위해 민감도와 기후노출 대응변수를 편익기준으로, 적응능력은 비용기준으로 하여 Eq. (6)과 같이 표준화된 퍼지 행렬을 Table 5에 나타냈다(step 5).

이상의 결과를 이용해서 Fuzzy TOPSIS 기법을 적용할 수 있다. FPIS와 FNIS를 계산한 결과를 Table 6에 나타내었고 16개 광역시도의 각 대응변수(민감도, 적응능력, 기후노출)와 FPIS 및 FNIS의 각 대응변수간의 거리를 계산하여 Fig. 4와 같이 나타냈다. Fig. 4(a)의 경우 좌측하단으로부터 멀리 위치한 지역일수록 상대적으로 덜 취약하며 Fig. 4(b)의 경우에는 좌측하단으로부터 멀리 위치한 지역일수록 상대적으로 취약한 지역을 나타낸다. 이를 바탕으로 16개 광역시도의 근접도 계수와 홍수 취약성의

순위를 도출하여 Table 7과 같이 나타내었다. 그 결과 전라남도, 부산광역시, 경상남도가 홍수에 대해 가장 취약한 지역으로 선정되었고 서울, 대전광역시, 충청남도가 가장 덜 취약한 지역으로 나타났다(step 6).

3.2 TOPSIS와 가중합계법과의 비교

Fuzzy TOPSIS의 결과와 TOPSIS 및 가중합계법의 결과를 나타내면 Fig. 5와 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 가

(a) Distances to FPIS

(b) Distances to FNIS

Fig. 4. Distances of 16 Local Governments to FPIS & FNIS

Table 7. Similarity (C^+) and Rankings of 16 Local Governments

Symbols of 16 Local Governments	d^+	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

중합계법에서는 8, 11위로 순위가 변동되었으며 Fuzzy TOPSIS에서 13, 15위가 가중합계법에서 6, 12위로 순위가 변동되었다. 나머지 순위는 같거나 변동이 미소하게 나타났다.

이러한 순위변동의 원인을 알아보기 위해 순위변동이 큰 A5, A14에 대해 Fuzzy TOPSIS의 민감도, 적응능력, 기후노출의 TFN과 TOPSIS의 민감도, 적응능력, 기후노출 값을 Fig. 6과 같이 비교하였다. 그 결과 A5의 경우 Fuzzy

TOPSIS의 민감도와 기후노출 TFN 분포가 TOPSIS의 값보다 작은 값의 분포를 반영하고 있고 반대로 적응능력은 평균한 값보다 큰 값의 분포를 반영하는 것으로 나타났다. 앞서 민감도와 기후노출이 클수록, 적응능력이 작을수록 취약성이 커지는 것으로 정의하였으므로 따라서 A5는 TOPSIS에서의 6위가 Fuzzy TOPSIS에서는 13위로 취약성이 낮아지는 방향으로 순위 변동이 발생한 것으로 판단된다. A14의 경우는 민감도가 평균값보다 큰 분포를 반

Fig. 5. Results of Fuzzy-TOPSIS, TOPSIS and Weighted Sum Method

Fig. 6. Differences of Sensitivity, Adaptive Capacity and Exposure Values between Fuzzy TOPSIS and TOPSIS

Table 8. 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

영하고 적응능력은 평균값보다 작은 분포를 반영하고 있다. 따라서 TOPSIS에서의 11위가 Fuzzy TOPSIS에서 6위로 취약성이 높아진 순위 변동을 보이는 것으로 판단된다. 즉, 232개 시군구의 값을 16개 광역시도별로 단순 평균한 값을 사용하는 TOPSIS에 비해 자료의 분포를 반영하는 TFN을 사용한 Fuzzy TOPSIS의 결과가 분명히 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

더 나아가 각 적용방법에 따른 순위의 상관분석을 위해

Spearman rank 상관계수(ρ)를 계산하였으며 그 결과는 Table 8과 같다. Fuzzy TOPSIS와 TOPSIS는 상관계수가 0.69로 낮은 일치성을 보였으며, Fuzzy TOPSIS와 가중합계법의 결과와는 상관계수가 0.81, 가중합계법의 결과와 TOPSIS와의 결과는 0.94로 매우 높은 일치성을 나타냈다.

즉 동일한 자료와 가중치 결과를 사용하여 Fuzzy TOPSIS의 결과와 Fuzzy 개념을 결합하지 않은 일반적인 MCDM

방법들의 결과는 자료의 불확실성으로 인해 본 연구와 같이 크게 다를 수 있으므로 취약성 산정을 위해서는 대응변수의 자료와 가중치의 불확실성을 고려하기 위해 TFN을 사용하는 것이 필요하다(step 7).

4. 결 론

본 연구는 Fuzzy TOPSIS와 델파이 조사를 토대로 불확실성을 고려할 수 있는 홍수 취약성 평가 방법을 우리나라 16개 광역시도에 적용하였다. 본 연구의 홍수 취약성 평가는 7단계로 구성되어 있는데 Step 1에서는 기후변화를 고려한 취약성 정의, Step 2에서는 델파이 조사를 통해 대응변수 및 가중치의 선정, Step 3에서는 입력 자료의 히스토그램 분포를 확인 및 입력 자료 표준화, Step 4에서는 입력 자료와 가중치의 TFN 변환, Step 5에서는 퍼지행렬의 표준화, Step 6에서는 Fuzzy TOPSIS 기법을 사용한 취약성 산정, Step 7에서는 Spearman 순위 상관분석을 실시하였다.

Fuzzy TOPSIS의 결과를 TOPSIS와 비교한 결과 Fuzzy TOPSIS에서 1위를 했던 전라남도가 TOPSIS의 경우 5위로 나타났고 반대로 5위를 했던 제주도가 1위로 나타나는 역전현상이 발생하였다. 이러한 순위 변동의 원인을 확인하기 위해 순위변동이 크게 나타난 대표적인 A5와 A14에 대해 민감도, 적응능력, 기후노출의 TFN과 TOPSIS에서 사용한 단순 평균한 값을 비교하였다. 그 결과 모형에 반영된 자료의 분포 형태에 따라 결과가 다르게 도출됨을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 현상을 정량적으로 확인하기 위해 Spearman 상관분석을 실시한 결과 Fuzzy TOPSIS와 TOPSIS는 상관계수가 0.69로 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.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강민국, 이관만 (2006). “수자원의 지속가능성 평가 지수 개발과 구성요소의 중요도 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 59-68.
- 고재경, 김희선 (2009). 경기도 기후변화 취약성 평가 연구, 경기개발연구원, 정책연구 2009-37, pp. 67-92.
- 고재경, 김희선 (2010). “지방자치단체 기후변화 취약성 평가에 관한 연구: 경기도 기초지자체를 중심으로.” **한국환경정책학회지**, 한국환경정책학회, 제18권, 제2호, pp. 79-105.
- 국립환경과학원 (2012). 기후변화 부문별 취약성 지도, NIER 2011-04-1290, pp. 5-19.
- 김다은, 정용, 박무중, 윤재영, 김상단, 최민하 (2011). “기후변화를 고려한 수자원 분야의 취약성 분석.” **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제13권, 제1호, pp. 25-33.
- 김병식, 권현한, 김형수 (2011). “기후변화가 가뭄 위험성에 미치는 영향 평가.” **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제13권, 제1호, pp. 1-11.
- 김승환, 전홍석 (1995). “최적의 히스토그램 구현.” **한국통계학회 추계학술대회 논문집**, 한국통계학회, pp. 165-167.
- 명수정 (2011). “공간분석을 활용한 기후변화 취약성 평가.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제44권, 제2호, pp. 57-62.
- 손민우, 성진영, 정은성, 전경수 (2011). “기후변화를 고려한 홍수취약성지표의 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제3호, pp. 231-248.
- 유가영, 김인에 (2008). “기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안.” **한국환경정책 평가연구원**, RE-05, pp. 4-21.
- 이동률, 임광섭, 최시중 (2009). “치수특성평가를 위한 홍수 위험지수 개발.” **한국수자원학회 2009년 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 342-346.
- 이병욱 (2010). “스피어만 상관계수를 이용한 디지털 융합 강의 전략 시스템.” **한국 인터넷정보학회논문집**, 한국인터넷정보학회, 제11권, 제6호, pp. 8-9.
- 이성웅 (1987). 델파이 기술예측방법의 유용성에 관한 연구, 전북대학교 대학원 박사학위논문.
- 정은성, 이길성 (2007). “다기준 의사결정기법을 이용한 공간위험 순위산정.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자

- 원학회, 제40권, 제12호, pp. 969-983.
- 정일원, 이병주, 김광천, 배덕호 (2008). “기후변화에 따른 홍수 피해 취약성 평가.” **한국수자원학회 2008년 학술 발표회**, 한국수자원학회, pp. 289-293.
- 최시중, 이동률 (2005). “지속가능한 수자원 개발과 관리를 평가하기 위한 지표.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 779-790.
- Ashtian, B., Haghighirad, F., Makui, A., and Montazer, G.A. (2009). “Extension of fuzzy TOPSIS method based on interval-valued fuzzy sets.” *Applied Soft Computing*, Vol. 9, pp. 457-461.
- Choi, Y.E. (2002). “Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in Korea.” *Journal of the Korean Data Analysis Society*, Vol. 4, No. 3, pp. 269-282.
- Dalky, N., Rourke, D.L., Lewis, R., and Snyder, D. (1973). *Studies in the quality of life: Delphi and decision making*, Lewington: D. C. Helath & Co.
- Dubois, D., and Prade, H. (1980). *Fuzzy sets and systems: Theory and applications*. New York, Academic Press Inc.
- Farajzadeh, M., Ahadnezhad, M., and Amini, J. (2011). “The vulnerability assessment of urban housing in earthquake against(A case study: 9th district of Tehran municipality).” *Urban-Regional Studies and Research Journal*, Vol. 3, No. 9, pp. 19-36.
- Füssel, H.M., and Klein, R.J.T. (2006). “Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking.” *Climate Change*, Vol. 75, No. 3, pp. 301-329.
- Hajkowicz, S., and Collins, K. (2007). “A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management.” *Water Resources Management*, Vol. 21, No. 9, pp. 1553-1566.
- Hwang, C.L., and Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making an introduction*. Sage Publications, Thousand Oaks London New Delhi, pp. 38-45.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability*, IPCC contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, R.N. (2000). “Managing uncertainty in climate change projections: Issues for impact analysis.” *Climate Change*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 403-419.
- 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.
- Kelly, P.M., and Adger, W.N. (2000). “Theory and practice assessing vulnerability to climate change and facilitation adaptation.” *Climatic Change*, Vol. 47, No. 4, pp. 325-352.
- Panofsky, H.A., and Brier, G.W. (1968). *Some applications of statistics to meteorology*. Pennsylvania State University Press, University Park.
- Patt, A., Klein, R.J.T., and Vega-Leinert, A. (2005). “Taking the uncertainty in climate-change vulnerability assessment seriously.” *Computers Rendus*, Vol. 337, pp. 411-424.
- SoltanPanah, H., Farughi, H., and Heshami, S. (2011). “Ranking repair and maintenance projects of large bridges in Kurdistan province using fuzzy TOPSIS method.” *Journal of American Science*, Vol. 7, No. 6, pp. 227-223.
- UNDP (2005). *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures*. Cambridge University Press, USA.
- Webster, M., Forest, C., Reilly, J., Babiker, M., Kicklighter, D., Mayer, M., Prinn, R., Srofim, M., Sokolov, A., and Wang, C. (2003). “Uncertainty analysis of climate change and policy response.” *Climate Change*, Vol. 61, pp. 295-320.
- Yazdani, M., Alidoosti, A., and Basiri, M.H. (2012). “Risk analysis for critical infrastructures using fuzzy topsis.” *Journal of Management Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-19.
- Zadeh, L.A. (1965). “Fuzzy sets.” *Information and Control*, Vol. 8, Issue 3, pp. 338-353.

논문번호: 12-022	접수: 2012.02.27
수정일자: 2012.04.16/06.15	심사완료: 2012.06.15