

로버스트 우선순위 결정을 위한 Fuzzy 다기준 의사결정기법의 적용

한봉구* · 정은성**

Bong Gu Han*, Eun Sung Chung**

Application of Fuzzy Multi-criteria Decision Making Techniques for Robust Prioritization

ABSTRACT

This study presents the feasibility of fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) techniques for the robust prioritization of projects. It is applied to water resources planning problem. Results from weighted sum method (WSM), analytic hierarchy process (AHP), revised analytic hierarchy process (R-AHP), and TOPSIS are compared with those from Fuzzy WSM, Fuzzy, AHP, Fuzzy R-AHP, and Fuzzy TOPSIS. For the calculation, all weights on criteria and the normalized data were obtained from the same investigation. As a result, the rankings from four MCDM techniques are slightly different while those from fuzzy MCDM show the comparatively consistent ranking. Therefore, it is desirable to use fuzzy MCDM technique when MCDM is used for the prioritization problem, since fuzzy MCDM can include the uncertain variability of input data and weighting values on criteria.

Key words : Fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) technique, Triangular fuzzy number, Robust prioritization, Water resource planning

초록

본 연구는 로버스트 우선순위 결정을 위한 퍼지 다기준 의사결정기법의 타당성을 수자원 계획수립 문제에 적용하여 제시하였다. 즉 일반적인 다기준 의사결정 기법인 가중합계법, 계층화분석과정, 수정계층화분석과정, TOPSIS 방법과 퍼지가중합계법, 퍼지계층화분석과정, 퍼지수정계층화분석과정, 퍼지 TOPSIS 방법을 사용하여 결과를 비교하였다. 이때 사용된 각 평가기준별 자료는 동일하게 표준화되었으며 각 가중치도 동일한 방법으로 결정되었다. 분석결과 다기준 의사결정방법에 따라 조금씩 다른 순위가 도출되었으나, 퍼지 다기준 의사결정기법을 사용할 경우 사업들의 순위 변동성이 퍼지를 사용하지 않을 때보다 크지 않아 보다 일관된 순위를 유도하였다. 따라서 사업의 우선순위를 결정하는 문제에서 자료와 가중치의 불확실성을 고려할 수 있는 퍼지 다기준 의사결정기법을 활용해서 방법의 변화로 인한 순위의 변동성을 최소화해서 로버스트 순위를 결정하는 것이 보다 효과적이다.

검색어 : 퍼지 다기준 의사결정기법, 삼각형 퍼지숫자, 로버스트 우선순위 결정, 수자원 계획

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM) 분야는 최근 40년간 지속적으로 발전되어 왔으며 수자원 분야 역시

* 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 (bkhan@seoultech.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 (Corresponding Author · Seoul National University of Science & Technology · eschung@seoultech.ac.kr)

Received July 7 2012, Revised August 29 2012, Accepted April 4 2013

1990년대 이후 MCDM의 적용에 대해 꾸준히 연구되어 왔다. 다기준 의사결정 기법은 다목적 의사결정모형(multi-objective decision making, MODM)과 다속성 의사결정모형(Multi-Attribute Decision Making, MADM)으로 구분될 수 있다 (Hwang and Yoon, 1981). MODM은 수학적 모형을 토대로 연속적인(continuous) 해의 공간을 찾아내는 도구로서 최적해(optimal solution)를 찾아내는데 유용하다. 반면에 이산(discrete) 의사결정 문제에 사용되는 MADM은 유한개의 대안이 존재하기 때문에 최적해를 찾지는 않지만 많은 대안들의 우선순위를 결정하는데 사용된다. 즉, 고려한 대안과 판단기준에 대해 가장 우선순위가 높은 대안들을 제시하기 때문에 현실에서 더 많은 문제를 해결할 수 있다. MCDM은 MADM과 엄격한 차이가 있음에도 불구하고 대부분의 MCDM 문제들이 MADM으로 해결되기 때문에 MCDM 용어는 MADM 문제에도 흔히 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 MADM 대신 보다 일반적인 용어인 MCDM을 사용하기로 한다.

국내의 경우 MCDM 기법을 수자원 계획 분야에 사용한 연구는 Ko 등(1992)이 댐 운영에 Compromise Programming(CP)을 적용하기 시작한 이후 지속적으로 적용되어 왔다. Lee 등(2005)은 치수사업의 계획시 MCDM 기법 중 하나인 계층분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)과 다속성효용이론 (multi-attribute utility theory, MAUT)을 이용하여 치수대안들의 우선순위를 제시하였고, Kim 등(2006)은 댐 사업의 투자우선순위를 결정하기 위해 ELECTRE I, II와 Compromise Programming을 사용하였다. Lim and Lee (2009)는 Compromise Programming과 GIS 기술을 결합하여 치수 저감 시설에 대한 우선순위를 분석한 바 있으며 Chung 등(2011)은 유역환경개선 사업들의 우선순위를 제시하기 위해 연속유출모의 모형인 SWMM 모형을 이용하여 사업의 효과분석을 실행하고 사회적, 경제적, 공학적 기준들을 고려하여 다양한 다기준 의사결정기법을 사용하였다.

국외의 경우 Raju 등(2000)은 물관리 시나리오에 대한 MCDM 평가를 수행하기 위해 PROMETHEE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, Compromise Programming 등을 사용한 바 있고, Ganoulis (2003)는 ELECTRE III, ELECTRE IV를 사용하여 하수처리수 재이용에 대한 전략을 평가하였고 Srdjevic 등(2004)은 TOPSIS 방법을 사용하여 물관리 시나리오들을 평가한 바 있다. Elshorbagy (2006)는 ELECTRE II와 Additive Value 함수를 이용해서 유역 관리 프로그램의 효과를 분석하였고 Levy 등(2007)은 AHP를 이용하여 홍수 위험도 저감을 위한 의사결정지원시스템을 구축하였고 Zardari 등(2010)은 ELECTRE 방법을 이용하여 농업용수 할당을 위한 의사결정을 수행하였다. 이렇듯 국내뿐 아니라 국외에서도 최근 MCDM 기법을 적용하여 다양한 분야에서 광범위 하게 사용되고 있다.

MCDM 기법에서 사용되고 있는 가중치나 평가치에 대한 불확

실성이 내재되고 있기 때문에 최근에는 퍼지이론 중 Fuzzy 숫자와 MCDM 기법들을 결합하여 사용한 사례가 빈번해지고 있다. Raj and Kumar(1998)는 퍼지숫자 개념을 이용하여 유역 계획 수립에 MCDM 기법을 사용하여 사업의 우선순위를 제시한 바 있고, Gupta 등(2000)은 관계용수 공급계획 수립을 위해 작물의 종류를 선택하는 MCDM 문제에 퍼지 선형계획법을 사용한 바 있다. Hajkovicz and Collins(2007)는 물관리 연구에 적용된 많은 의사결정 기법들을 조사하였고 그 결과 각 지표들의 입력자료와 가중치의 불확실성을 해소하기 위해 MCDM에 퍼지개념을 결합하였으며 특히 TOPSIS 기법이 가장 많이 사용되었다고 보고한 바 있다. Ashtian 등(2009)은 지표의 가중치를 결정할 때 발생하는 불확실성을 해소하기 위해 구간 값을 이용한 Fuzzy TOPSIS 모형을 제안한 바 있다. Alipour 등(2010)은 취수 지점을 선택하기 위해 다섯 개의 후보지를 대상으로 8개의 선택기준에 대해 Fuzzy MCDM 기법을 적용한 바 있고 Afshar 등(2011)과 Krohling and Campanharo (2011)는 Fuzzy TOPSIS 방법을 이용하여 최적 위치선정 문제와 댐 운영 방안 수립 문제를 접근하였고 Kaya and Kahraman(2011)은 숲 관리를 위한 의사결정을 위해 VIKOR 방법과 AHP 방법을 결합한 Fuzzy 기법을 이용하였다. SoltanPanah 등(2011)은 기존의 MCDM은 불확실성 문제를 해결할 수 없으며 MCDM에 퍼지이론을 결합함으로써 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있다고 하였고 대형교량들의 취약성 지수를 산정하기위해 Fuzzy TOPSIS를 적용한 바 있다. Farajzadeh 등(2011)은 지진에 대한 취약성 지수를 산정하는데 선정된 지표들의 불확실성 때문에 퍼지수를 결합한 Fuzzy TOPSIS 모델을 개발한 바 있다. Yazdani 등(2012)은 중요한 사회기반시설의 취약성 지수를 산정하는데 문제 자체가 복잡하고 고유의 불확실성 때문에 각 기준의 가중치를 정하는데 있어 Fuzzy TOPSIS를 사용한 바 있다.

국내의 대부분의 연구에서는 소수의 일반적인 MCDM 기법들을 적용해서 도출한 결과를 제시한 연구가 대부분이지만 이럴 경우 결과에 대한 불확실성이 매우 높다. 특히 적용된 기법들 별로 다른 결과가 유도될 수 있으므로 적절한 MCDM 기법의 결정은 쉽지 않은 문제이다. 따라서 본 연구에서는 국내외에서 적용한 바 있는 4개의 MCDM 방법과 최근 많이 적용되고 있는 퍼지 가중합계법, 퍼지 계층분석기법, 퍼지 수정계층분석기법, 퍼지 TOPSIS 기법을 적용해서 순위 결과를 비교하였다. 본 연구는 이를 통해 퍼지 MCDM 기법들의 활용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구 절차

MCDM과 Fuzzy MCDM 방법은 Fig. 1과 같이 모두 6단계 과정을 거친다. 1단계 대안의 개발, 2단계 평가기준의 선택, 3단

계 평가기준 별 가중치 또는 Fuzzy 가중치의 결정, 4단계 의사결정을 위한 대안별 평가표(payoff matrix) 또는 퍼지 평가표의 도출, 5단계 MCDM 또는 Fuzzy MCDM 기법을 이용한 순위의 결정으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 두 연구결과와의 비교를 위해 6단계 두 결과의 비교 절차를 추가하였다. 본 연구는 Fuzzy MCDM 기법의 적용 결과의 도출이 주요 목표이므로 1, 2단계의 과정과 3단계 가중치 또는 퍼지 가중치는 일반적으로 고려될 수 있는 값을 가정하였고 4단계 MCDM 방법의 사용을 위한 대안별 평가표는 Chung 등(2008a)에서 도출한 값을 그대로 사용하였다. 따라서 본 연구는 Fuzzy MCDM을 위한 4단계, 5단계와 6단계를 수행하였다.

2.2 퍼지 다기준 의사결정기법

퍼지이론은 불확실성이 산재해 있고 애매모호한 문제를 다루기에 적합한 분야로 Zadeh(1965)에 의해 처음 소개되었고 Mamdani (1975)가 퍼지알고리즘과 복잡한 시스템의 언어모델링을 이용하여 제어에 응용하면서 퍼지이론이 본격적으로 이용되기 시작하였다.

일반적으로 공학분야에서 다루는 숫자는 명확한(crisp) 숫자이다. 가령 10이라면 정확히 10을 의미한다. 그런데 우리들 일상생활에서 쓰는 숫자는 이와 달리 정확하게 떨어지지 않는 대략 10 정도의 의미를 갖는 숫자도 있다. 수자원 공학 분야에서 사용되는 대부분의 숫자는 불확실성의 정도 차이가 있지만 이와 같은 의미를 갖고 있다. 모의하여 예측된 결과들은 대부분 이에 해당된다고 볼 수 있다.

퍼지 숫자 10은 약 10을 의미하지만 10일 가능성이 가장 높고 10과 멀어질수록 상대적으로 가능성이 낮아진다. 이러한 퍼지숫자의 형태는 여러 가지가 있지만 그 중 삼각퍼지숫자(triangular

fuzzy number, TFN)의 사용 빈도가 가장 높다. TFN은 세 개의 점으로 표현할 수 있기 때문에 가장 간편하며, TFN, $A = (l, m, u)$ 와 같이 표현될 수 있고 소속함수(membership function)의 값은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\mu_m(x) = \begin{cases} \frac{1}{m-l}x - \frac{l}{m-l}, & \text{if } x \in [l, m] \\ \frac{1}{m-u}x - \frac{u}{m-u} & \text{if } x \in [m, u] \\ 0 & \text{if } x \in [0, l] \text{ or } [m, 1] \end{cases} \quad (1)$$

TFN 이외에 사다리꼴, 사각형 퍼지숫자 등이 있다. 퍼지 소속함수와 대부분의 다기준 의사결정기법들은 결합하여 사용가능하기 때문에 현재까지 WSM, AHP, TOPSIS 등과 결합되어 사용된 사례는 매우 많다. 최근에는 MCDM 기법들이 가지고 있는 불확실성을 접근하기 위해 다양한 Fuzzy 이론들과 결합하여 새로운 기술이 개발되고 있다. 각각에 대한 상세한 내용은 Makropoulos and Butler(2006)과 Alipour 등(2010)에 제시되어 있다.

각 대안에 있어 TFN에 대한 순위를 선정하기 위해서는 정량적인 비교가 필요하다. 순위를 비교하기 위해서 TFN을 이용해 비퍼지화(defuzzication)를 수행해야 한다. 비퍼지화는 TFN의 명확한 수인 Best Nonfuzzy Performance (BNP) 값으로 나타낸다. 비퍼지화의 가장 보편적인 방법으로는 최대평균법, 중앙면적법, alpha-cut이 있다 (Zhao and Govind, 1991). 본 연구에서는 간단하고 개인의 판단을 요구하지 않는 중앙면적법을 사용하였다. 중앙면적법은 다음 Eq. 2로 나타낼 수 있다.

$$BNP_{ij} = [(u_{ij} - l_{ij}) + (m_{ij} - l_{ij})]/3 + l_{ij} \quad (2)$$

2.3 다기준 의사결정기법의 종류

일반적으로 많이 사용하고 있는 기법 중 본 연구에서 제시하지 않은 방법으로는 복합계획법(Composite Programming; Bardossy and Bogadi, 1983)과 Promethee 방법 등이 있다. 복합계획법의 경우 의사결정을 위한 기준이 복잡해질 경우 Compromise Programming을 계층적으로 확장해서 사용한 기법이므로 본 연구의 문제와는 적합하지 않기때문에 제외하였고 Promethee 방법은 이론과 적용이 복잡하여 하나의 주제로 접근해야하므로 본 연구의 특성과 일치하지 않아 제외하였다.

2.3.1 가중합계법 (Weighted Sum Method, WSM)

가중합계법은 일반적으로 가장 쉽게 사용되는 방법으로 m 개의 대안과 n 개의 평가기준에 대해 다음과 같은 수식을 이용해서 값을 구한 후 최고값을 최고(best) 대안으로 선정한다.

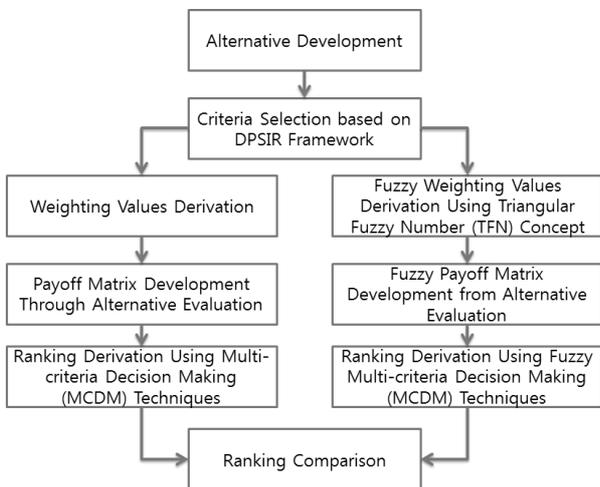


Fig. 1. Flowchart of This Study

$$P(i) = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j, \quad (\text{단, } i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3-1)$$

여기서 $P(i)$ 는 MCDM으로 산정한 대안 i 의 평가값이며 a_{ij} 는 대안 i 의 기준 j 에 대한 표준화된(normalized) 값이며 w_j 는 기준 j 에 대한 가중치이다.

퍼지 가중합계법은 다음과 Eq. 3-2와 같이 삼각퍼지수(\hat{a}_{ij}, \hat{w}_j)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\hat{P}(i) = \sum_{j=1}^n \hat{a}_{ij} \hat{w}_j, \quad (\text{단, } i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3-2)$$

2.3.2 계층화분석과정 (Analytic Hierarchy Process, AHP)

계층화분석과정(Saaty, 1980)은 사용상 편리함으로 인해 최근 가장 폭넓게 활용되고 있는 방법이다. 일반적으로 가중치 산정을 위해 빈번하게 사용되지만 같은 원리로 우선순위 결정을 위한 다기준 의사결정기법으로도 활용될 수 있다. WSM과 다른 점은 각 자료의 표준화를 위해 다음 Eq. 4-1과 같이 평가기준별 대안들의 평가값의 합으로 나누어서 사용한다는 점이다. 즉 각 기준에 대해 모든 대안들의 값을 더하면 1이 된다.

$$P(i) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^m a_{kj}} \right) w_j \quad (4-1)$$

퍼지 계층화분석과정은 다음 Eq. 4-2와 같이 삼각퍼지수(\hat{a}_{ij}, \hat{w}_j)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\hat{P}(i) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\hat{a}_{ij}}{\sum_{k=1}^m \hat{a}_{kj}} \right) \hat{w}_j \quad (4-2)$$

2.3.3 수정계층화분석과정 (Revised AHP, R-AHP)

Belton and Gear(1983)에 의해 개발된 수정 AHP 방법(R-AHP)은 다음 Eq. 5-1과 같이 기존의 AHP 방법에 존재하는 순위 불일치성(inconsistency)에 대해 일부 개선하도록 제시되었다. 즉 표준화를 위해 기존 AHP는 평가기준별 대안들의 값의 합으로 나누는데 반해 수정 AHP는 평가기준별 대안들의 값들 중 최고값으로 나누는 방법을 사용하였다. 따라서 각 기준에 대해 적어도 하나의 대안은 항상 1이 존재한다.

$$P(i) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\max_k a_{kj}} \right) w_j \quad (5-1)$$

퍼지 수정계층화분석과정은 다음 Eq. 5-2와 같이 삼각퍼지수(\hat{a}_{ij}, \hat{w}_j)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\hat{P}(i) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\hat{a}_{ij}}{\max_k \hat{a}_{kj}} \right) \hat{w}_j \quad (5-2)$$

2.3.4 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TOPSIS는 양의 이상적인 해(Positive Ideal Solution, PIS)로부터 가장 가까운 거리에 있고 음의 이상적인 해(Negative Ideal Solution, NIS)로부터 가장 먼 거리에 있는 대안을 선정하는 개념으로 최선의 대안과 최악의 대안을 동시에 고려하여 인간의 합리적 선택이 가능하도록 유도하는 기법이다. 또한 다속성 관점에서 모든 대안들에 대한 평가결과를 종합하여 정량화 할 수 있다. TOPSIS는 이러한 이유로 많은 수자원 의사결정문제에 사용되고 있다 (Kim et al., 2012).

Hwang and Yoon(1981)에 의해 제시된 TOPSIS 방법은 ELECTRE 방법의 대안으로 개발되었으며 최근에 사용빈도가 증가하고 있는 방법이다. TOPSIS 방법은 선택된 대안이 이상해(ideal solution)에서 가장 가깝고 음의 이상해(negative ideal solution)에서 가장 멀리 떨어져야 한다는 점에서 시작된다. TOPSIS 방법은 효용이 단조롭게(monotonically) 증가하고 감소하는 것으로 가정하며 이상해와 음의 이상해를 정의해야하고 Euclidean 거리 접근법을 통해 이상점과의 상대적 근접성을 평가하도록 되어 있다. TOPSIS 방법은 다음과 같이 총 6개 단계로 구성되어 있다. 1단계에는 자료를 Eq. 6를 이용하여 표준화한다.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad (6)$$

2단계에는 가중표준화값(weighted normalized value)을 구한다. 즉 표준화한 값에 가중치를 곱해서 Eq. 7을 이용해서 정리한다.

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m1} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3단계는 이상해와 음의 이상해를 구한다. 보통 최대값과 최소값을 이용한다. 4단계에서는 이상해로부터의 Euclidean 거리와 음의 이상해로부터의 Euclidean 거리를 Eq. 8을 이용해서 산정한다.

$$S_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j^*})^2} \quad (8)$$

$$S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j-})^2}$$

5단계에서는 다음 수식을 이용하여 이상점으로부터 상대적인 접근정도(closeness)를 계산한다.

$$C_{i^*} = \frac{S_{i-}}{S_{i^*} + S_{i-}} \quad (9)$$

6단계는 이상점으로부터 가장 가까운 곳에 있는 순서로 우선순위를 선정한다.

2.3.5 Fuzzy TOPSIS

TFN을 TOPSIS에 적용하기 위해 TFN의 서로 다른 축척을 TFN의 성질을 유지하면서 비교 가능한 축척으로 표준화해야 한다. 표준화된 퍼지 행렬 \tilde{R} 은 Eq. 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}], \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

여기서, \tilde{r} 은 표준화된 TFN을 의미하며 i 는 각 자자체, j 는 각 속성의 갯수를 의미한다. 또한 Eqs. 11~14의 B 와 C 는 각 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)의 집합이다.

$$c_j^* = \max_i c_{ij}, \quad \text{if } j \in B \quad (11)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), \quad \text{if } j \in B \quad (12)$$

$$a_j^* = \min_i a_{ij}, \quad \text{if } j \in C \quad (13)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^*}{c_{ij}}, \frac{a_j^*}{b_{ij}}, \frac{a_j^*}{a_{ij}} \right), \quad \text{if } j \in C \quad (14)$$

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 음의 이상적인 해 (Fuzzy Negative Ideal Solution, FNIS)는 Eq. 15와 같이 정의된다.

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+) \quad \text{또는} \quad A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \quad (15)$$

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 대안(i)과의 거리는 Eq. 16과 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 대안(i)과의 간격 d_i^+ 와 d_i^- 은 Eqs. 17, 18을 이용해 유도할 수 있으며 각 대안의 상대적 근접도 계수(similarity), C^+ 는 Eq. 19를 이용해서 도출할 수 있다.

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \quad (16)$$

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (17)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (18)$$

$$RC_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (19)$$

2.4 적용예제

본 연구의 대상유역은 안양천 유역(Fig. 2)으로 지난 40여년간 급격한 도시화로 인해 지천은 전천화되고 수질은 악화된 상태이다 (Chung 등, 2008a). 이를 위해 다양한 사업들이 지속적으로 추진되고 있는데 대부분 수량 개선 또는 수질 향상 등 단일 목적 사업들이 주를 이루고 있어 사업간 상호 우선순위 결정이 불가능한 상황이다. Chung 등(2008a)에서는 안양천 유역에 19개 사업을 제안하였고 이에 대한 수문학적 분석과 다기준 의사결정기법을 이용하여 사업의 우선순위를 제시한 바 있다. 하지만 수문학적 분석결과의 불확실성과 평가기준에 대한 가중치의 불확실성은 전혀 고려되지 않았으므로 본 연구에서는 이를 대상으로 Fuzzy 다기준 의사결정기법을 적용하였다.

본 연구는 Fuzzy MCDM의 타당성을 검증하기 위한 연구이므로 19개 사업 대신 기존 연구에서 상위 순위를 기록한 5개 대안을 선택하였다. 즉, 기존에 우수하다고 평가된 5개의 대안들 사이의 상대적인 평가를 수행하여 미세한 차이로 인한 우선순위의 변화를 확인하기 위함이다. 5개 대안에 대한 설명은 Table 1과 같고 위치는 Fig. 1에 사각형 박스로 표시되어 있다. 본 연구에서 고려한 대안들은 저수지 재개발(Alt 1), 복개하천 복원(Alt 2, 3, 4), 소규모

하수처리장 건설(Alt 5)이다.

대안들을 평가하는 평가기준은 DPSIR(driving force-pressure-state-impact-response; European Environmental Agency, 1999) 체계를 이용해서 Chung 등(2008a)에서 제안한 결과를 이용하였다. DPSIR 모형은 EEA(1999)가 기존의 OECD(1993)의 Pressure-State-Response(PSR) 모형을 개선하여 지속가능성(sustainability)을 지표화하기 위해 개발하였다. 기존의 PSR 모형은 복잡한 생태학적 과정과 인간 환경의 인과관계를 설명하지 못한다. 특히 상태의 변화로부터 생기는 영향(impact)을 전혀 설명하지 못하는 단점을 가지고 있을 뿐만 아니라 반응이 시스템에 영향을 미치는 상황을 반영하지 못한다. 즉 PSR 모형은 인간의 활동(pressure)이 환경(state)에 영향을 미치고 환경은 다시 인간으로 하여금 압력을 줄이

기 위한 활동(response)을 촉진하게 한다. 그러나 DPSIR 모형은 여기에 두 가지 개념이 추가되었다. 인간의 행복은 환경의 질과 관계가 있고 사회의 활동과 경제적 압력은 환경과 인간의 행복에 영향을 미친다는 것이다. 이러한 개념은 사회적 요인(driving force or drivers)과 영향(impact)에 반영되어 PSR 모형에 추가되었다. 따라서 DPSIR 모형은 사회의 사회적 요인이 인간 사회에 압력을 발생시키고 압력이 상태에 영향을 미침에 따라 상태가 반응을 야기하는 영향을 유발하며 다시 반응은 이상의 네 가지 요소에 각각 다시 영향을 미친다는 관계에 착안한다. 여기서 원동력은 환경에 영향을 미치는 사회경제적 요소로 일반적으로 인구, 자원의 사용량, 교육수준, 거주자수, 에너지 소비량 등이 있다. 압력은 환경의 상태에 직접적으로 영향을 미치는 자연적인 요소로 오염부하량, CO₂ 배출량 등이 있다. 상태는 환경의 질과 자연자원의 양을 정량적으로 측정하는 것으로 하천수질 농도, 오존의 농도 등이 있다. 영향은 환경의 상태가 인간, 동물, 생화학적 과정에 미치는 영향으로 질병의 정도, 생태계에 환경오염물질 배출량 등이 있다. 반응은 환경의 변화에 대한 사회의 반응으로 환경개선을 위한 다양한 활동 등이 이에 해당된다.

본 연구에서는 물순환에 가장 많은 영향을 미치는 근본적인 사회적 요인(D)을 인구와 인구밀도로 가정하였고 인간의 활동 중 물 순환에 부정적인 압력(P)을 미치는 요소로 이수 측면에서는 도시지역 비율과 하천수 누수 여부, 유역경사, 지하수 취수량을 사용하였으며 수질관리 측면에서는 BOD, COD, SS, TN, TP 부하량, 미처리 하수 유입여부, 복개구간 비율, 인구밀도를 가정하였다. 이러한 압력으로 인해 영향을 받는 자연상태 요소는 이수 측면에서 유휴곡선에서 평균 갈수량과 평균 저수량의 목표 수문학적 갈수량에 대한 비율로 가정하였고, 수질관리 측면에서는 목표 수질 대비 BOD 평균 농도, 일최대허용부하량(total maximum daily load, TMDL) 대비 BOD 평균 일총부하량으로 가정하였다. 물 순환의 악화로 인해 인간에게 나타나는 직접적인 영향은 이수 측면에서 연중 유지유량 부족일수, 수질측면에서는 연중 TMDL을 만족하지 못하는 일수로 가정하였다. 이러한 영향을 회복하기 위해 국가, 사회, 관리부처 등에서 시도하는 여러 대안들을 반응이라고

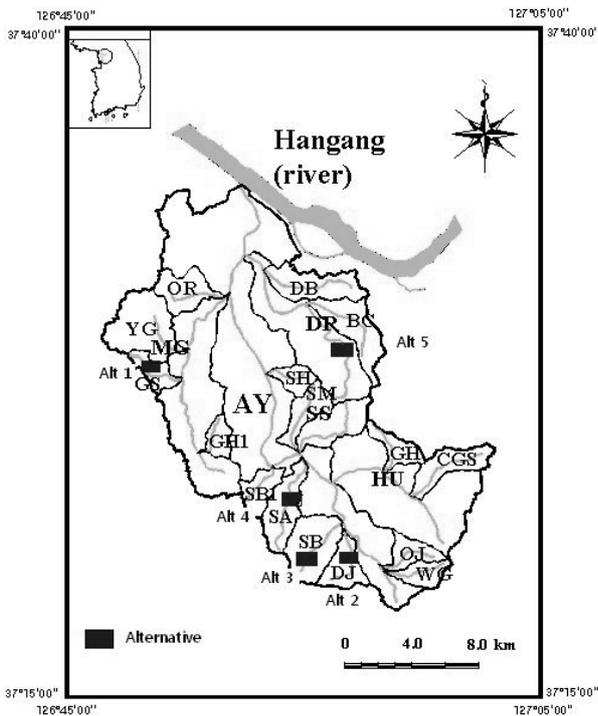


Fig. 2. Feasible Alternatives for This Study

Table 1. Specific Descriptions of Feasible Alternatives

Category of Alternatives	Name of sub-watershed	Description	Name
Reservoir redevelopment	GS	- Proper operation (release: 0.05 cms from Oct. to May)	Alt 1
	DJ	- To remove roads and restore the stream - Construction of sewers	- Covered length: 1.59 km Alt 2
SB	- Covered length: 2.74 km Alt 3		
SA	- Covered length: 0.645 km Alt 4		
Construction of small wastewater treatment	DR	- Capacity: 19,000 m ³ /day	Alt 5

하며 반응으로 인한 효과를 정량화하기 위해 선택된 각각의 기준들은 정량적 분석이 가능한 상태와 영향의 인자들의 변화값을 사용하였다. 여기서 반응의 효과를 정량화하기 위한 평가기준으로 D와 P를 사용하지 않는 이유는 D와 P 자체를 변화시키려는 대안을 설정하지 않는 한 직접적으로 이들과의 연관성을 규명하기 어렵기 때문이다.

또한 본 연구는 Chung 등(2008b)과는 다르게 비용(C)항목을 추가하여서 평가기준을 6개로 하였다. 비용 자료는 Chung 등(2008b)에 제시된 값을 이용하였다. 대부분 토목사업의 우선순위 결정은 B/C 비율의 크기로 결정되고 있으나 Chung 등(2008b)에서 이미 B/C는 도출하였으므로 본 연구에서는 퍼지 다기준 의사결정 기법의 적용 타당성에 대한 검증에 의해 비용항목을 평가기준으로 추가해서 상대적 우선순위만 제시하였다.

다기준 의사결정 기법을 적용하기 위한 표준화 전후의 자료는 Table 2에 제시되어 있다. 평가 인자별 가중치는 기존연구의 값과 새로 추가된 비용항목을 고려하여 다음과 같이 간략하게 가정하였다.

$$D(\text{사회적 요인}) = P(\text{압력}) = 0.1, S(\text{상태}) = I(\text{영향}) = 0.15, R(\text{반응}) = 0.2, \text{비용}(C) = 0.3$$

또한 퍼지 다기준 의사결정기법을 적용하기 위해 표준화한 자료를 삼각퍼지수를 이용하여 Table 3과 같이 가정하였다. 각 자료의 상위, 하위 경계는 최빈값(modal value)의 120% 값과 80% 값을 사용했다. 이때 0 이하 또는 1 이상일 경우 0과 1이라고 가정하였다.

3. 연구결과

3.1 다기준 의사결정기법의 적용

WSM의 경우 Eq. 1을 사용하여 계산될 수 있으며 결과 Table 4에 제시된 바와 같다. Alt 1과 Alt 4를 제외하고 나머지 대안들은 비교적 좁은 범위에 몰려 있으므로 가중치의 결정과 다기준 의사결정기법의 종류에 따라 상당한 변화가 있을 것으로 예상된다. WSM의 경우 MCDM의 기본 방법이면서 사용빈도가 절대적으로 높다. 따라서 다른 MCDM 방법들의 분석결과와 항상 비교되므로 가장 중요하다고 볼 수 있다.

WSM, AHP, 수정 AHP, TOPSIS 방법을 이용해서 도출한 대안들의 순위를 정리하면 Table 6과 같다. AHP 방법을 사용할 경우 WSM에서 비슷한 값을 보인 Alt 2, 3, 5의 순서가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 수정 AHP의 경우 WSM과 같은 결과를 보이는 것으로 나타났다.

TOPSIS 방법의 경우 Alt 1이 1등으로 도출된 결과는 다른 방법과 동일했으나 Alt 4가 5등으로 도출된 다른 방법들의 결과와는 다르게 4등으로 나타났으며 Alt 5가 5등으로 나타났다. 이상의 결과로부터 Alt 1이 1등인 점에 대해서는 대부분 동일한 결과가 도출되었다. 만약 1등을 결정해야하는 의사결정 문제라면 의사결정자들간 의견일치가 가능할 수 있다. 하지만 2-5등의 순위는 매우 혼잡한 상황으로 볼 수 있다. 대체로 Alt 4가 평균 4.8등, Alt 3은 평균 3.5등 이므로 다른 대안에 비해 상대적으로 열등하다고 볼 수 있다. 하지만 Alt 2와 Alt 5는 매우 비슷한 수준으로 2등급으로 평가할 수 있다. 또한 순위에 대한 표준편차를 구하여 각 대안에

Table 2. Original Calculated Data from Chung et al. (2008a) and Normalized Data for This Study

Original calculated data						
Name of Alternative	D	P	S	I	R	Cost
Alt 1	0.063	0.323	0.682	0.488	0.674	0.989
Alt 2	0.394	0.4385	1	1	0.312	0.100
Alt 3	0.086	0.1315	0.42	0.326	0.3525	0.956
Alt 4	0.226	0.211	0.0365	0.064	0.385	0.978
Alt 5	0.761	0.6325	0.501	0.1435	0.557	0.357
Normalized Data						
Name of Alternative	D	P	S	I	R	Cost
Weights	0.1	0.1	0.15	0.15	0.2	0.3
Alt 1	0.083	0.511	0.682	0.488	1.000	0.989
Alt 2	0.518	0.693	1.000	1.000	0.463	0.100
Alt 3	0.113	0.208	0.420	0.326	0.523	0.956
Alt 4	0.297	0.334	0.037	0.064	0.571	0.978
Alt 5	1.000	1.000	0.501	0.144	0.826	0.357

Table 3. Data for Fuzzy MCDM

Name of Alternative	Driving Force			Pressure		
	Lower	modal	Upper	Lower	modal	Upper
Weights	0	0.1	0.25	0	0.1	0.25
Alt 1	0.066	0.083	0.099	0.409	0.511	0.613
Alt 2	0.414	0.518	0.621	0.555	0.693	0.832
Alt 3	0.090	0.113	0.136	0.166	0.208	0.249
Alt 4	0.238	0.297	0.356	0.267	0.334	0.400
Alt 5	0.800	1.000	1.000	0.800	1.000	1.000
Name of Alternative	State			Impact		
Weights	0	0.15	0.3	0	0.15	0.3
Alt 1	0.546	0.682	0.818	0.390	0.488	0.586
Alt 2	0.800	1.000	1.000	0.800	1.000	1.000
Alt 3	0.336	0.420	0.504	0.261	0.326	0.391
Alt 4	0.029	0.037	0.044	0.051	0.064	0.077
Alt 5	0.401	0.501	0.601	0.115	0.144	0.172
Name of Alternative	Response			Cost		
Weights	0.05	0.2	0.35	0.15	0.3	0.45
Alt 1	0.800	1.000	1.000	0.791	0.989	1.000
Alt 2	0.370	0.463	0.555	0.080	0.100	0.120
Alt 3	0.418	0.523	0.628	0.765	0.956	1.000
Alt 4	0.457	0.571	0.685	0.783	0.978	1.000
Alt 5	0.661	0.826	0.992	0.286	0.357	0.429

Table 4. Preferences from WSM

Name of Alternative	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5
Preference	0.732	0.544	0.535	0.486	0.569

Table 5. Summary of Alternative Rankings and Standard Deviation from Various MCDM Techniques

Name of Alternative	WSM	AHP	R-AHP	TOPSIS	Ave.	STDEV
Alt 1	1	1	1	1	1	0
Alt 2	3	2	3	3	2.8	0.43
Alt 3	4	4	4	2	3.5	0.87
Alt 4	5	5	5	4	4.8	0.43
Alt 5	2	3	2	5	3	1.22

대한 표준오차를 구한 결과 Alt 5의 경우 1.22로 다른 대안에 비해서 높게 나와 오차의 크기가 가장 큰 것으로 나타났으며 Alt 1은 오차가 0으로 1위 선정에는 모든 MCDM 기법의 순위에서 같은 값이 나오는 것으로 나타났다.

3.2 퍼지 다기준 의사결정기법의 적용

퍼지 이론의 적용을 위해서는 대안별 효과지수에 대한 값의 모호함과 가중치의 모호함을 모두 고려해야 한다. 따라서 Table 3에서 가정한 퍼지 값을 이용하였다. Fuzzy MCDM 방법을 적용하기 위해 Fuzzy WSM, Fuzzy AHP, Fuzzy 수정 AHP, Fuzzy TOPSIS에 대해 분석하였으며 결과는 Table 6과 같다. Fuzzy WSM과 Fuzzy 수정 AHP, Fuzzy TOPSIS는 같은 결과를 보였는데 기존의 WSM, 수정 AHP 등과 동일하였으며 Fuzzy AHP는 기존의 AHP와 다른 순위를 보였다. 이상의 결과로부터 Alt 1이 1등이고 Alt 3가 4등, Alt 4가 5등으로 모두가 동일하게 제시되었으나 Alt 2와 Alt 5는 다른 MCDM 방법들과 같이 순위의 변동이 심했다. 또한 MCDM 기법과 마찬가지로 표준편차를 구하여본 결과 Alt 3과 4는 표준편차가 0으로 산출되어 모든 Fuzzy MCDM 기법에서 대안의 순위는 각각 4등과 5등을 나타낼 수 있었다. 또한 기존의 MCDM 기법과는 다르게 Alt 1에서 순위의 변동이 생겨 1위 선정시에 다른 Fuzzy MCDM을 고려하는 것이 바람직하다.

Table 6. Summary of Alternative Rankings and Standard Deviation from Various Fuzzy MCDM Techniques

Name of Alternative	Fuzzy-WSM	Fuzzy AHP	Fuzzy-R-AHP	Fuzzy TOPSIS	Ave. *	STDEV
Alt 1	1	2	1	1	1.25	0.43
Alt 2	2	1	2	3	2	0.71
Alt 3	4	4	4	4	4.0	0
Alt 4	5	5	5	5	5.0	0
Alt 5	3	3	3	2	2.75	0.43

* Fuzzy WSM, AHP, 수정 AHP, TOPSIS 방법만 평균하였음

4. 결론

본 연구는 로버스트 우선순위 결정을 위한 퍼지 다기준 의사결정 기법 적용의 타당성을 제시하기 위해 수자원 계획수립 문제에 적용하였다. 대상 대안들의 평가기준에 대한 자료의 표준화, 가중치의 결정이 동일하게 수행되었더라도 선택한 다기준 의사결정기법의 차이로 인해 결과가 확연하게 달라질 수 있음이 확인하였다. 하지만 퍼지 다기준 의사결정기법을 이용할 경우 의사결정에 사용된 자료의 불확실성과 평가기준에 대한 가중치의 불확실성을 모두 고려하여 대안들의 우선순위를 제시할 수 있으므로 비교적 안정적인 사업의 순위를 도출할 수 있다. 따라서 사업의 우선순위를 결정하는 문제에서 자료와 가중치의 불확실성을 고려할 수 있는 퍼지 다기준 의사결정기법을 활용할 경우 방법의 변화로 인한 순위의 변동성을 최소화하여 일관된 순위를 제시하는 것이 보다 효과적일 수 있다. 향후 다양한 적용 사례가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Afshar, A., Marino, M. A., Saadatpour, M., and Afshar, A. (2011). "Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun reservoirs system." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 2, pp. 545-563.

Alipour, M. H., Shamsai, A., and Ahmady, N. (2010). "A new fuzzy multicriteria decision making method and its application in diversion of water." *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 8809-8813.

Ashitian, B., Haghghirad, F., Makui, A., and Montazer, GA. (2009). "Extension of fuzzy TOPSIS method based on interval-valued fuzzy sets." *Applied Soft Computing*, Vol. 9, pp. 457-461.

Bardossy, A., and Bogardi, I. (1983). "Network design for the spatial

estimation of environmental variables." *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 12, pp. 339-369.

Belton, V., and Gear, T. (1983). "On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies." *Omega*, pp. 228-230.

Chung, E. S., Hong, W. P., Lee, K. S., Burian, S. (2011). "Integrated use of a continuous simulation model and multi-attribute decision making for ranking urban watershed management alternatives." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 2, pp. 641-659.

Chung, E. S., Kong, K. S., Lee, K. S., Yoo, J. C. (2008b). "Evaluation of alternative benefit using choice experiment method and alternative evaluation index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 1, pp. 101-113 (in Korean).

Chung, E. S., Lee, K. S., Park, K. S. (2008a). "Development of alternative evaluation index using multicriteria decision making techniques." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 1, pp. 87-100 (in Korean).

Elshorbagy, A. (2006). "Multicriterion decision analysis approach to assess the utility of watershed modeling for management decisions." *Water Resources Research*, Vol. 42, W9407.

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.

Ganoulis, J. (2003). "Evaluating alternative strategies for wastewater recycling and reuse in the mediterranean area." *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 3, No. 4, pp. 11-19.

Gupta, A. P., Harboe, R., and Tabucanon, M. T. (2000). "Fuzzy multiple-criteria decision making for crop area planning in Narmada river basin." *Agricultural Systems*, Vol. 64, pp. 1-18.

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. S. (1981). *Multiple attribute decision-making: Methods and Applications*, Springer, Berlin Heidelberg.

Kaya, T., and Kahraman, C. (2011). "Fuzzy multiple criteria forestry decision making based on an integrated VIKOR and AHP approach." *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 6, pp. 7326-7333.

Kim, W. G., Lee, G. M., Park, D. H. (2006). "Investment ranking decision using MCDA in dam projects." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 12, pp. 1067-1080 (in Korean).

- Kim, Y. K., Chung, E. S., and Lee, K. S. (2012). "Fuzzy TOPSIS approach to flood vulnerability assessment in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 901-913 (in Korean).
- Ko, S. K., Lee, K. M., Ko, I. H. (1992). "Comparative evaluation of multipurpose reservoir operating rules using multicriterion decision analysis techniques." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 25, No. 1, pp. 83-92 (in Korean).
- Krohling, R. A., and Campanharo, V. C. (2011). "Fuzzy TOPSIS for group decision making: A Case Study for Accidents with Oil Spill in the Sea." *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 4190-4197.
- Levy, J. K., Hartmann, J., Li, K. W., An, Y., and Asgary, A. (2007). "Multi-criteria decision support systems for flood hazard mitigation and emergency response in urban watersheds." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, 346-358.
- Lim, K., and Lee D. R. (2009). The spatial MCDA approach for evaluating flood damage reduction alternatives. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 359-369 (in Korean).
- Mamdani, E. H., and Assilian, S. (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller." *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13.
- Markropoulos, C. K., and Butler, D. (2006). "Spatial ordered weighted averaging: Incorporating Spatially Variable Attitude Towards Risk in Spatial Multi-Criteria Decision Making." *Environmental Modelling and Software*, Vol. 21, pp. 69-84.
- Raj, P. A., and Kumar, D. N. (1998). "Ranking multi-criterion river basin planning alternatives using fuzzy numbers." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 100, pp. 89-99.
- Raju, K. S., Duckstein, L., and Arondel, C. (2000). "Multicriterion analysis for sustainable water resources planning: A Case Study in Spain." *Water Resources Management*, Vol. 14, pp. 435-456.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- 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.
- Srdjevic, B., Medeiros, Y. D. P., and Faria, A. S. (2004). "An objective multi-criteria evaluation of water management scenarios." *Water Resources Management*, Vol. 18, pp. 35-54.
- 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.
- Yi, C. S., Choi, S. A., Shim, M. P., Kim, H. S. (2005). "Multi-criteria decision making model for flood control project 2. selection of most preferable alternative and determination of investment priorities." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, No. 5B, pp. 347-354 (in Korean).
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets." *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.
- Zardari, N. H., Cordery, I., and Sharma, A. (2010). "An objective multiattribute analysis approach for allocation of scarce irrigation water resources." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 412-428.
- Zhao, R., and Govind, R. (1991). Algebraic characteristics of extended fuzzy number, *Information Science*, 54, pp. 103-130.