기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하기위한 로버스트 의사결정 기법의 개발 및 적용

Development and Application of Robust Decision Making Technique Considering Uncertainty of Climatic Change Scenarios

전 상 묵* / 정 은 성** / 이 상 호*** / 김 연 주 ****

Jun, Sang-Mook / Chung, Eun-Sung / Lee, Sang-Ho / Kim, Yeonjoo

Abstract

Climate change is expected to worsen the depletion of streamflow in urban watershed. In this study, we therefore considered the treated wastewater (TWW) use as an adaptation strategy and devised a framework to identify prioritized areas for TWW use. An integrated framework that includes hydrological factors as well as social and environmental components were employed to determine the criteria for decision making. Fuzzy theory was employed to consider the uncertainties in the climate change scenarios and the weights of the performance value. All alternatives were evaluated using the fuzzy TOPSIS method. In addition, statistical method and decision making methods under complete uncertainty were used for robust decision making. As a result, ranking the alternatives using the fuzzy TOPSIS method and robust approach such as maximin, maximax, Hurwicz and equal likelihood criterion mitigated the level of uncertainty and ambiguity in each alternative. The finding of this study can be helpful in prioritizing water resource management projects considering various climate change scenarios.

Keywords : Wastewater reuse, Fuzzy TOPSIS, Robust decision making, Fuzzy theory

요 지

기후변화에 따른 도시하천의 건천화 현상은 앞으로 더욱더 심각해질 것으로 예상되고 있다. 따라서 본 연구에서는 건천화의 적응전략으로서 하수처리수 재이용을 선정하였고 어느 지영기 우선적으로 선정되어야 하는가를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 평가기준은 수문학적인 요소뿐만 아니라 인문·사회적인 요소도 포함하였다. 평가치와 가중치의 불확실성을 고려하기 위해 퍼지 이론을 사용하여 기후변화로 인해 변화된 평가치와 평가기준에 대한 가중치의 불확실성을 완화하고자 하였다. Fuzzy TOPSIS 방법을 이용하여 각 대안을 평가하였다. 또한 로버스트한 의사결정을 위해서 통계적인 기법과 maximin, maximax, Hurwicz, equal likelihood criterion 방법을 사용하였다. 그 결과 Fuzzy TOPSIS를 통한 대안의 순위 선정과 로버스트 의사결정기법을 통해 불확실성과 순위의 애매모호함을 완화시켰다. 본 연구에서 제시한 방법은 하수처리수 재이용의 위치선정 뿐만 아니라 다양한 기후변화 시나리오를 고려한 수자원 사업의 우선순위를 결정하는데

* 서울과학기술대학교 건설시스템디자인학과 석사과정 (e-mail: jsm3141@seoultech.ac.kr)

Graduate student, Dept. of Civil Eng., Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인학과 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-9017)

Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*** 부경대학교 건설환경공학부 정교수 (e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Prof., Dept. of Civil Eng., Pukyung National University, 365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

**** 한국환경정책평가원 부연구원 (e-mail: yjkim@kei.re.kr)

Researcher, Korea Environmental Institute, 290 Jinheung-ro, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

사용될 수 있다.

핵심용어 : 하수처리수 재이용, Fuzzy TOPSIS, 로버스트 의사결정기법, 퍼지 이론

1. 서 론

지구 온난화로 인한 기후변화는 21세기 들어 날이 갈수록 강도 높은 자연 재해를 발생시키고 있다. 이로 인해서 세계 각국에서는 기후변화로 인한 피해와 손실에 대한 대책을 마련하고 있다. 최근 기후변화에 따른 수문영향분석, 수자원 분야의 취약성 정량화, 적응전략 수립 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 기후변화는 근본적으로 불확실성이 매우 크기 때문에 이러한 노력에도 불구하고 수자원 분야뿐만 아니라 다른 분야에서도 아직 적절한 적응전략을 수립할 수 있는 확실한 방법이 부족한 상태이다(Lempert and Schlesinger, 2000).

특히 수자원 분야에서 기후변화 관련 연구가 약 20년이 지났음에도 불구하고 기후변화 적응을 위한 수자원 계획 수립관련 기술의 발전이 더딘 이유는 기후변화의 비정상성(non-stationarity)과 불확실성(uncertainty)이라는 특성 때문으로 볼 수 있다. 비정상성이란 기후변화로 인해 기상 변수의 통계값이 시간에 따라 변하는 것을 의미한다. 불확실성이란 과거의 관측치를 기초하여 계획을 삼았던 기존의 방식과 달리 온실가스 배출시나리오와 기후모델 등에 의한 영향분석부터 의사결정까지의 전반적 과정이 이전보다 매우 복잡해지고 불확실한 상태를 의미한다(Kang et al., 2013). Ellsberg (2001)는 이러한 기후변화 연구의 불확실성을 Deep Uncertainty라고 표현하였는데 다음과 같은 세 개의 항목들에 대해 분석가가 거의 알지 못하거나 의사결정담당자들이 동의할 수 없는 상황을 의미한다: (1) 시스템 변수들 사이의 상호관계를 묘사할 수 있는 적절한 모형, (2) 모형 내에서 중요한 매개변수에 대한 불확실성을 나타내는 확률 분포, (3) 사업이나 대안의 성과에 대한 평가치를 도출하는 방법, 즉 기후변화와 수자원 계획 수립을 위한 의사결정은 상호관계를 규명할 수 있는 적절한 모형을 찾는 것이 거의 불가능하고 비교적 적당한 모형을 사용하더라도 정확한 모의를 위한 매개변수 추정은 현실적으로 매우 어려울 뿐만 아니라 미래 기후변화를 대비하여 적응전략으로 제안되는 수자원 관련 사업의 성과를 예측하는 것은 매우 어렵다. 기존의 기후변화에 관한 연구에서는 “미래에는 무엇이 일어날 것인가?”라는 전망에 기반을 둔 질문의 답을 정확하게 하는

반면에 적응에 기반을 둔 새로운 분석은 “미래에 예측할 수 없는 일에 대해서 우리는 어떠한 행동을 취해야하는가?”라는 질문을 더 중요시 여기고 있다(Lempert and Schlesinger, 2000).

기후변화에 따른 건천화 적응전략에는 저수지, 댐, 하수처리수 재이용 등이 있다. 저수지나, 댐의 경우 도시에 적용하기에는 공사비나 건설부지 등의 문제가 있으므로 본 연구에서는 기후변화 적응전략을 적용하기 위해 하수처리수 재이용을 선정하였다. 하수처리수 재이용 사업은 현재 다양한 나라에서 도시지역 하천에 적응을 위해 연구되고 있다(Mitchell et al., 2002; Belinda et al., 2006; Ioannis et al., 2007; Lee et al., 2010; Sa-nguanduan and Nititvattananon, 2011). 하수처리수 재이용의 우선순위를 선정하기위해 다음과 같은 의사결정결과정을 제시하였다. (1) 다양한 기후변화 시나리오뿐만 아니라 하나의 시나리오만을 고려하는 경우에도 연도별로 다를 수 있는 적응전략의 효과에 대한 불확실성을 고려하기 위해 삼각퍼지수(Triangular Fuzzy Number, TFN)를 사용하였다. (2) 의사결정 방법에 따라 적응전략의 우선순위가 달라질 수 있으므로 Fuzzy TOPSIS, TOPSIS, 가중합계법(Weighted Summation Method, WSM) 등의 Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) 기법을 이용하였다. (3) 로버스트 우선순위를 결정하기 위해 간단한 통계적 기법과 불확실성하에서 일반적으로 사용되는 다기준 의사결정기법을 활용하였다. 이와 같이 본 연구에서는 기후변화의 불확실성을 완화하고 의사결정의 신뢰성을 높일 수 있는 방법에 대해서 나타났다.

2. 이론적 배경

2.1 PSR (Pressure-State-Response) 체계

기후변화 적응전략은 상당히 광범위하고 과학적이지만 사회·경제적인 불확실성 또한 매우 크다. 따라서 인간의 사회경제활동과 환경과의 관계를 파악하여 미래의 지속가능한 개발을 위한 효율적이고 사회적으로 공평하게 분배하며, 후세대가 사용이 가능하도록 해야 생태적 능력을 유지할 수 있는 범위 내에서 개발이 필요하다. 즉 미래에도 지속가능한 수자원 재이용이 가능하도록 하며 현재에도

생태계를 고려하면서 사용자가 원하는 수준의 수량과 수질을 달성하도록 수자원을 관리하고 수자원과 관련된 사회시스템을 유지 발전시켜야한다(Hasimoto et al., 1982; ASCE, 1998; Cai and Lasdon, 2002).

본 연구에서는 사회, 경제, 환경 등의 다양한 분야를 고려하여 사업의 지속가능성을 평가하기 위해 OECD (1998)가 개발한 개념모형인 PSR 모형을 이용하였다. PSR 모형은 인간의 사회경제활동이 환경에 ‘압력(Pressure)’을 주며 자연자원의 질과 양에 영향을 미치는 ‘상태(State)’, 이러한 것에 대한 인식과 행동을 통해 사회의 정책과 제도 등이 ‘반응(Response)’한다는 것에 초점을 두었다. PSR 모형은 이러한 서로의 인과관계에 주목하므로 의사결정자들에게 도움이 될 뿐만 아니라 대중들이 환경과 자연 관련 요소들 사이에 직접적이지는 않지만 어느 정도 서로 연결되어 있음을 알 수 있다(Lee et al., 2006). PSR 모형은 사용목적에 따라 매우 다양하게 변화되어 적용되어 왔다. United Nations Commission on Sustainable Development (UNCSD)의 DFRS (Driver-Force-State-Response), European Environment Agency (EEA)의 DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response)과 같은 예가 있다.

2.2 수문모형

본 연구에서는 미래의 기상자료를 사용하여 기후변화에 따른 유출 및 수질 모의를 위해서 장기유출 모의가 가능한 모형인 Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)를 사용하였다. HSPF 모형은 유역에서 발생하는 유출수의 양과 질을 모의하기 위해 설계된 종합적(comprehensive), 개념적(conceptual), 연속적(continuous) 유역 모의 모형으로 1966년 개발된 스탠포드 유역 모형(stanford watershed model)에 기원을 두고 있다. 현재의 HSPF 모형은 1980년 미국 환경청에서 개발한 것으로 기존의 HSP (Hydrocomp Simulation Programming), ARM (Agricultural Runoff Management), NPS (NonPoint Source), SEDRATRA (SEDiment and RADionuclides TRANsport) 모형들에서 수행되는 다양한 모의 모듈을 새롭게 수정하여 보완한 프로그램이다.

HSPF 모형의 수량·수질 해석을 위해서는 기상자료(강수량, 온도, 풍속, 증발량, 일사량, 이슬점 온도, 운량), 수치표고자료, 토지이용도의 기본 입력자료가 필요하다. 필요한 입력자료를 HSPF 모형에 구축하여 투수지역, 불투수지역, 하천 및 저수지에서 발생하는 차단, 토양 수분, 지표면 유출, 중간 유출, 기저 유출, 적절심, 함수비, 융설, 증발, 증발산, 지하수 함양, 용존 산소, BOD, 온도, 농약,

대장균, 유사 추적, 하도 추적, 저수지 추적, pH, 암모니아, 유기 질소, 인산염, 유기 인, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤 등을 모의할 수 있으며, 모의되는 시간 간격은 1분부터 1일까지 가능하다. HSPF 모형은 일반적으로 토지이용 변화, 저수지 운영, 점오염 및 비점오염원 처리 대안 등을 평가하기 위해 사용되고 있다(Bicknell et al., 2001).

2.3 Fuzzy TOPSIS

TOPSIS는 최선의 대안과 최악의 대안을 동시에 고려하여 인간의 합리적 선택이 가능하도록 유도하는 기법이다. 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 선정하며, 다속성 관점에서 모든 대안들에 대한 평가 결과를 종합하여 정량화 할 수 있다. TOPSIS는 이러한 이유로 여러 분야에서 사용되고 있다(Awasthi et al., 2011a; 2011b; Kim et al., 2012). TFN을 TOPSIS에 적용하기 위해 TFN의 서로 다른 축척을 TFN의 성질을 유지하면서 비교 가능한 축척으로 표준화해야한다. 표준화된 퍼지 행렬 $\tilde{R}$ 은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서, $\tilde{r}$ 은 표준화된 TFN을 의미하며 i 는 각 지자체, j 는 각 속성의 갯수를 의미한다. 또한 Eqs. (2)~(5)의 B 와 C 는 각 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)의 집합이다.

$$c_j^* = \max_i c_{ij}, \quad \text{if } j \in B \quad (2)$$

$$\tilde{r}_{ij} = (\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}), \quad \text{if } j \in B \quad (3)$$

$$a_j^* = \min_i a_{ij}, \quad \text{if } j \in C \quad (4)$$

$$\tilde{r}_{ij} = (\frac{a_j^*}{c_{ij}}, \frac{a_j^*}{b_{ij}}, \frac{a_j^*}{a_{ij}}), \quad \text{if } j \in C \quad (5)$$

여기서, a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 는 삼각퍼지수로 변환된 행렬의 최소값, 최빈값, 최대값이다. $\tilde{r}_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$ 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. (6)과 같이 정의된다.

$$A+ = \tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+ \text{ 또는 } A- = \tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^- \quad (6)$$

여기서, $\tilde{v}_j^+ = (v_{ij}^+, v_{ij}^+, v_{ij}^+)$, $\tilde{v}_j^- = (v_{ij}^-, v_{ij}^-, v_{ij}^-)$ 이고 $v_j^+ = \max_i \gamma_{ij}$, $v_j^- = \min_i \alpha_{ij}$ 이다. $A+$ (FPIS), $A-$ (FNIS)와 각 대안(i)와의 거리는 Eq. (7)과 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)로 부터 각 대안(i)와의 간격 d_i^+ 와 d_i^- 는 Eqs. (8)과 (9)를 이용해 유도할 수 있으며 각 대안의 상대적 근접도 계수(Relative Closeness, RC), $RC+$ 는 Eq. (10)을 이용해서 도출할 수 있다.

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \quad (7)$$

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (8)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (9)$$

$$RC_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (10)$$

2.4 로버스트 의사결정기법

본 연구에서는 다양한 기후변화 시나리오를 사용함에 따른 의사결정의 불확실성을 줄이고자 두 가지 로버스트 의사결정기법을 제시하였다. 첫 번째 로버스트 의사결정기법은 긴 기간을 고려하는 기후변화 시나리오는 시간이 지날수록 순위의 변화가 발생할 수 있으므로 연별 순위의 표준편차를 이용하여 대안을 평가를 하였다. 또한 불확실한 상황에서의 의사결정자들은 서로 다른 상태에서의 발생에 대한 확률을 추정할 수 없거나 발생확률에 대한 확신이 부족한 이유로 이러한 불확실한 확률은 분석에는 포함하지 않는다(Stevenson and Ozgur, 2006). 따라서 두 번째 로버스트 의사결정기법은 이러한 상황에서의 의사결정을 위해 다음과 같이 네 가지 의사결정기법을 사용하였다.

- 1) Maximin: 보편적인 의사결정기법으로서 각 대안의 기준에 대한 평가값 중에서 가장 적은 이득을 선택한 후 이들 중에서 가장 큰 평가값이 최적의 대안으로 선정된다.
- 2) Maximax: 각 대안의 기준에 대한 평가값 중에서 가장 큰 이득을 선택한 후 이들 중에서 가장 큰 평가값이 최적의 대안으로 선정한다. 이는 maximin과는 반대되는 방법으로 중요시 하는 기준이 다르기 때문에 발생하게 된다.
- 3) Hurwicz: 각 대안의 기준에 대한 평가값 중 최대 이

득을 취하는 평가값과 최소 이득을 취하는 평가값을 선택한 후 의사결정자에 의해 선정된 0과 1 사이의 α 값을 최대 평가값에 곱하고 1에서 α 값을 뺀 값을 가장 작은 평가값에 곱하여 둘의 합이 가장 큰 대안을 최적의 대안으로 선정하는 의사결정기법이다. 또한 α 값이 0일 경우에는 maximin이고 1일 경우에는 maximax이다. 따라서 α 값은 의사결정자의 주관적인 판단으로 대안의 선택이 가능하게 된다.

- 4) Equal Likelihood Criterion: 대안의 모든 평가값을 평균하여 가장 큰 값을 최적의 대안으로 선정하는 방법이다.

간단한 통계 방법과 불확실한 상황에서의 네 가지 의사결정기법은 fuzzy TOPSIS 순위의 로버스트 의사결정을 위해 사용되었다. 2.3절에서 언급되었듯이 fuzzy TOPSIS는 다양한 기후변화 시나리오로 인해 변화된 평가치와 평가기준에 대한 가중치의 불확실성을 고려하므로 이를 이용한 순위의 로버스트 의사결정기법의 적용은 의사결정자들에게 불확실하고 애매모호한 결정에 효과적일 것이다.

3. 연구방법

3.1 기후변화 시나리오

본 연구에서는 적응전략의 영향 평가를 위해서 IPCC 5차 보고서에서 선정된 Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5와 4.5 시나리오를 사용하였다. RCP는 이번 세기말까지의 잠재적 복사력에 따라 네 종류(8.5, 6.0, 4.5, 2.6)의 시나리오가 선정되었다(Dooley and Calvin, 2011). 본 연구에서는 가장 극심한 기후변화 상황과 평균적인 상황을 고려하기 위해 극심한 상황을 나타내는 RCP 8.5와 시나리오 중에서 평균적인 RCP 4.5시나리오를 선정하였다. RCP 8.5 시나리오는 오스트리아의 IIASA/MESSAGE에서 개발되었으며 온실가스 배출이 지속되어서 CO₂ 농도가 2100년까지 900 ppmv 이상 증가하는 시나리오이다. 반면에 RCP 4.5 시나리오는 미국의 PNNL/GCAM에서 개발되었다. 온실가스 배출이 지속되어서 2100년까지 525 ppmv 정도를 나타내는 시나리오이다.

본 연구에서는 RCP8.5와 4.5 시나리오를 바탕으로 기상청에서 기후시스템모형을 구동하여 산출한 강우, 기온 등의 일 자료를 이용하여 대상유역의 유량과 수질을 분석하였다.

3.2 대상유역

연구의 대상유역은 Fig. 1의 안양천 유역으로 국가하천

이며 한강의 제1지류로서 경기도 의왕시 백운산자락에서 발원하여 북류하면서 서울시 7개구(강서구, 양천구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구)와 경기도 7개시(과천시, 의왕시, 군포시, 안양시, 광명시, 시흥시, 부천시)를 경유하여 한강에 유입되는 대표적인 도시하천이다. 유역의 위치는 서울의 남서쪽으로 동경 126° 47' ~ 127° 04', 북위 37° 18' ~ 37° 33'이며 유역면적은 287.15 km²이다. 또한, 11개의 제1지류와 9개의 제2지류가 안양천 유역에 포함되고 있으며, 하천망과 DEM (Digital Elevation Model) 을 고려하여 20개의 중유역으로 구분된다.

본 연구에서는 Fig. 1안의 Table과 같이 이미 하수처리수 재이용 시설이 설치되어있는 목감천을 제외한 10개 유역(왕곡천, 당정천, 오전천, 삼봉천, 학의천, 수암천, 산본천, 삼성천, 삼막천, 도림천)을 선정하였다. 안양천 유역은 인구 집중과 유역의 도시화가 빠르게 진행돼 건천화가 증가하는 대표적인 도시하천으로서 본 연구에 적합한 유역으로 선정하였다.

3.3 연구 절차

연구방법은 Fig. 2와 같이 크게 6단계로 구성되었다. (1) 다양한 적응전략을 찾는다. 어떠한 적응전략이 기후변화의 영향에 가장 효과적인지 여러 방안 중에서 선택한다. 본 연구에서는 하수처리수 재이용 시설을 적응전략으로 선택하였다. (2) 적응전략의 효과를 평가하기 위한 평가기준(criteria)을 공학적인 요소는 물론 사회, 경제적인 인자들도 포함할 수 있도록 선정한다. 이때 PSR 체계에

Fig. 1. Map of This Study

근거하여 평가 인자를 선택하였다. (3) 평가기준에 대한 중요도를 다수의 전문가들의 설문조사를 통해 수집한 뒤 삼각퍼지수로 제시한다. 설문조사의 결과는 어느 정도의 불확실성을 가지고 있다. 따라서 삼각퍼지수를 이용하여 불확실성을 줄여줄 수 있다. (4) 적응전략의 평가기준별 평가치(performance value)를 자료 조사 및 공학적 분석 등을 통해 수집하고 이를 분석하여 평가기준별 적응전략의 삼각퍼지수를 제시한다. 이 과정에서도 가중치 결정과 마찬가지로 불확실성이 존재하므로 이를 줄여주기 위해 삼각퍼지수를 이용하여 평가치를 나타낸다. (5) Fuzzy TOPSIS와 일반적인 다기준 의사결정기법을 이용하여 대상 기후변화 시나리오와 대상 연도에 대한 모든 적응전략의 우선순위를 결정한다. 이때 사용된 가중치와 평가값은 (3), (4)단계에서 산정된 값을 사용한다. (6) 통계적 기법과 완전한 불확실성하에서의 의사결정기법들을 사용하여

Table 1. Descriptions of Ten (H)TWW Uses

Watershed	Discharge (m ³ /day)	BOD concentration (mg/L)	
		HTWW	TWW
WG, SS	1,000	3.0	4.7
OJ, SB1	2,000		
SA, SM	4,000		
DJ	6,000		
SB	9,000		
HU	21,000		
DR	67,000		

Step 1	To derive various adaptation strategies
Step 2	To establish the evaluation criteria including environmental factors as well as anthropogenic issues
Step 3	To derive the triangular fuzzy number (TFN) of criteria using survey of expert
Step 4	To derive the TFN using data collections and the hydrological analyses from HSPF model
Step 5	To rank all adaptation strategies using Fuzzy TOPSIS and general MCDM
Step 6	To develop a robust approach for prioritization considering statistics and various MCDM

Fig. 2. Procedure of This Study

적응전략의 로버스트 우선순위를 결정하여 제시한다. 마지막 단계에서의 로버스트 의사결정기법은 (5)단계에서 결정된 순위에 대한 애매모호함을 완화하기 위하여 2.4절에서 소개된 방법으로 순위를 선정한다.

4. 연구결과

4.1 대안의 수립

본 연구에서는 대상유역인 안양천 유역의 10개 소유역을 선정하여 하수처리수 재이용 시설을 기후변화 적응전략으로 선정하였다. 하수처리수 재이용의 방출 유량을 선정하기 위해서 10개 소유역의 인구비를 사용하였다. 이는 각 유역의 유량의 수요와 공급을 조절하기 위함이다. 현재 하수처리수 재이용 시설이 설치되어있는 학의천(21,000 m³/day)을 기준으로 Table 1과 같이 각 유역의 방류 유량을 선정하였다. 또한 방류 BOD농도는 일반 고도하수처리(Treated Wastewater) 기준인 4.7 mg/L와 최고도 하수처

리(Highly Treated Wastewater) 기준인 3.0 mg/L로 선정하여 각 유역의 대안으로 선정하였다.

4.2 평가기준의 선정 및 가중치와 평가값의 결정

대안을 평가하기 위해 2.4절에서 언급한 PSR 체계를 사용하였다. PSR 구조는 인간의 활동(압력)이 환경(상태)에 영향을 미치고 환경은 다시 인간으로 하여금 압력을 줄이기 위한 활동(반응)을 촉진하게 한다. 하수처리수 재이용은 하천의 건천화 방지에 좋은 대안이지만 경우에 따라 하천의 수질을 악화시키는 대안이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 의사결정은 Table 2에서 나타난 것과 같이 하천의 유량과 수질에 대해 Chung and Lee (2009)에서 제안한 전문가들과 지역 공무원들에 의해 결정된 평가기준을 고려하였다. 하천 유량의 압력에 대한 인자로는 유역의 인구와 인구밀도가 있다. 상태의 인자로는 도시화 비율, 누수유무, 유역경사, 지하수 취수량, 갈수량, 저수량이 있다. 반응의 인자로는 갈수량의 증가비와 저수량의

Table 2. Descriptions of Indicators and TFNs of Weights

Objective	PSR Component	Weights	Indicators	Weights	Min	Median	Max
Water quantity	Pressure	0.185	Population	0.2	0.1	0.2	0.3
			Population density	0.8	0.7	0.8	0.9
	State	0.372	Urban area ratio	0.187	0.087	0.187	0.287
			Streamflow seepage	0.109	0.009	0.109	0.209
			Slope of watershed	0.067	0	0.067	0.167
			Groundwater withdrawal	0.137	0.037	0.137	0.237
			Ratio of drought flow to hydrologic instreamflow	0.25	0.15	0.25	0.35
			Ratio of low flow to hydrologic instreamflow	0.25	0.15	0.25	0.35
	Responses	0.443	Ratio of increased drought flow to hydrological instreamflow	0.5	0.4	0.5	0.6
			Ratio of increased low flow to hydrological instreamflow	0.5	0.4	0.5	0.6
Water quality	Pressure	0.151	Population	0.2	0.1	0.2	0.3
			Population density	0.8	0.7	0.8	0.9
	State	0.345	Load of BOD	0.03	0	0.03	0.13
			Load of COD	0.03	0	0.03	0.13
			Load of SS	0.03	0	0.03	0.13
			Load of TN & TP	0.03	0	0.03	0.13
			Untreated wastewater intrusion	0.15	0.05	0.15	0.25
			Ratio of covered stream interval	0.09	0	0.09	0.19
			Population density	0.08	0	0.08	0.18
			Ratio of BOD average concentration to target quality	0.56	0.46	0.56	0.66
	Responses	0.504	Ratio of decreased BOD average concentration to target quality	1	1	1	1

증가비가 있다. 수질의 압력 인자는 유량과 마찬가지로 유역의 인구와 인구밀도가 있고 상태인자로는 BOD, COD, SS, TN & TP, 처리되지 않은 물의 유입, 복개된 하천비율, 인구밀도, 목표수질에 대한 BOD농도비가 있다. 반응의 인자로는 감소한 목표수질에 대한 BOD농도비가 있다.

평가기준에 대한 가중치는 불확실성을 고려하기 위해서 Table 2와 같이 기준에 결정된 가중치에 ± 0.1 씩 유의율을 고려하여 TFN값으로 사용하였다. 평가값 또한 10년 동안의 평균값을 사용하지 않고 값의 분포를 고려하고자 각 인자의 값을 최소값, 중간값, 최대값으로 나누어서 TFN값으로 사용하였다.

4.3 대안 평가

대안의 평가를 위한 압력과 상태의 일부 평가값은 사회경제적인 부분의 통계 자료이기 때문에 정부 보고서와 웹사이트(www.nso.go.kr)로 부터 확보하였다. 저수량이나 갈수량 등의 상태와 반응에 대한 평가값은 Kim and Chung (2012)에서 안양천 유역에 적용한 HSPF 모형을 이용하여 분석하였다.

10개유역의 유량과 수질의 모의 결과를 평균하였고 모든 기준에 대해 대안 적용 전과 후를 비교하였다. Table 3(a)은 유량에 대한 모의 결과를 나타낸다. 예상대로 모든 유역에서의 저수량과 갈수량은 증가하였다. 특히 저수량

Table 3. Averages of Indicators, Simulated by the HSPF Model without and with (H)TWW in Each Site

(a) Quantity

Watershed	Low flow (m^3/s)		Drought flow (m^3/s)	
	Without (H)TWW	With (H)TWW	Without (H)TWW	With (H)TWW
WG	0.06	0.192	0.027	0.160
OJ	0.064	0.202	0.029	0.165
DJ	0.063	0.263	0.027	0.231
SB	0.062	0.178	0.48	0.152
HU	0.591	1.044	0.259	0.731
SA	0.038	0.227	0.000	0.134
SM	0.085	0.28	0.037	0.234
SS	0.113	0.251	0.054	0.191
SB1	0.123	0.329	0.056	0.263
DR	0.336	0.771	0.128	0.562

(b) Quality

Watershed	BOD Concentration (mg/L)			Number of days to meet water requirement (day)		
	Without (H)TWW	With HTWW	With TWW	Without (H)TWW	With HTWW	With TWW
WG	1.473	2.387	2.904	339	337	335
OJ	1.690	2.542	3.027	365	364	363
DJ	3.126	4.480	5.246	204	87	77
SB	3.403	4.589	5.262	359	329	268
HU	2.135	2.476	2.668	360	358	350
SA	2.156	3.491	4.248	365	364	363
SM	1.558	2.533	3.085	365	365	365
SS	0.835	1.370	1.673	365	363	359
SB1	2.129	2.849	3.258	237	209	160
DR	2.473	3.021	3.333	365	363	354

과 갈수량이 가장 적었던 SA의 경우 가장 큰 증가율을 보였고 나머지 유역에서도 2배에서 3배 이상의 증가하였다.

Table 3(b)는 10개 유역의 고도하수처리와 일반하수처리의 모의 결과를 나타냈다. BOD 농도와 BOD 만족일수는 고도처리를 할 경우와 일반하수처리를 할 경우에 기존의 하천의 수질보다 더 악화되는 것을 볼 수 있다. 특히 DJ의 경우 하수처리수 대안을 설치하지 않았을 경우 204일 만족하지만 고도처리수를 방류한 경우 87일, 일반처리수를 방류한 경우에는 77일의 만족일수를 나타내 가장 큰 편차를 나타냈다. 이처럼 일반하수처리에 비해 고도하수처리는 수질에 더 효과적이지만, 하수처리수 재이용 사업은 아무리 고도의 하수처리를 하더라도 하수처리수가 방류되기 전에 비하여 수질이 나빠지는 경우가 발생하므로 수질 문제에 대한 각별한 주의가 필요하다.

4.4 Fuzzy TOPSIS 적용 결과

본 연구에서는 퍼지 이론을 적용하여 두 개 기후변화 시나리오에 대한 사업별 평가값의 불확실성을 완화하기 위해 퍼지 이론과 다기준 의사결정기법 중 하나인 TOPSIS를 결합한 fuzzy TOPSIS를 사용하였다. 퍼지의 적용 결과를 비교하고자 많이 사용되고 있는 가중합계법과 TOSIS의 순위를 Fig. 3과 같이 비교하였다. Fig. 3의

네 가지 그래프는 시나리오별 유량의 순위와 하수를 고도 처리하였을 경우(BOD 3.0 mg/L)의 순위, 일반 처리하였을 경우(BOD 4.7 mg/L)의 순위의 조합(유량의 순위와 수질의 순위의 평균)을 나타낸 순위이다. Fig. 3(a)의 경우 RCP 4.5 시나리오에서 유량과 고도처리의 순위에 조합을 나타낸 순위이다. DJ, SM은 순위의 차이가 확연하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 나머지 순위 조합에서도 fuzzy TOPSIS와 두 개의 다기준 의사결정기법과는 순위의 차이가 나타남을 알 수 있다. 이처럼 퍼지 이론을 결합한 순위의 결과와 그렇지 않은 경우에 차이가 있음을 보여주고 있다. 따라서 퍼지 이론을 사용하여 의사결정을 할 경우에는 일반적인 다기준 의사결정기법에 비해 평균값 사용으로 인한 불확실성을 줄여주는 의사결정이 될 수 있다(Kim et al., 2012).

4.5 로버스트 의사결정

본 연구에서는 두 가지 방법을 통한 로버스트 의사결정을 수행하였다. 첫 번째는 간단한 통계기법인 순위의 표준편차를 이용한 로버스트 의사결정이다. 표준편차를 계산하기 위해서 우선 RCP 시나리오 별로 10년 동안의 순위 평균(2011~2020, 2021~2030, ..., 2090~2099)을 이용하였다. 총 18개 기간의 순위 평균에 대한 표준편차를 구하면

(a) Flow & HTWW with RCP 4.5

(b) Flow & TWW with RCP 4.5

(c) Flow & HTWW with RCP 8.5

(d) Flow & TWW with RCP 8.5

Fig. 3. Ranking of Fuzzy-TOPSIS, WSM, and TOPSIS

Table 4와 같다. 고도하수처리와 유량의 순위를 고려하여 표준편차를 구하였을 경우 WG, OJ, SM, DR의 소유역에서는 표준편차가 0으로 나타났다. 즉, 고도처리를 하였을 경우에 네 개의 소유역은 순위의 변화가 없어 순위의 애매 모호함이 거의 없다는 의미이다. 반면에 DJ, SA, SB1의 소유역은 표준편차가 다른 소유역에 비해서 크게 나타나 이 지역의 순위는 다시 고려해봐야 한다는 결론을 낼 수 있다. 이와 마찬가지로 일반하수처리와 유량과의 순위를 고려한 표준편차에서는 앞의 경우와는 다르게 순위의 변화가 적었다. 두 경우를 고려하였을 때 가장 최적의 위치는 fuzzy TOPSIS에서 1위를 나타내고 순위의 표준편차에서도 1위를 나타낸 DR인 것으로 나타났다.

두 번째 로버스트 의사결정 기법은 불확실성하에서의 다기준 의사결정기법이다. 2.4절에서 언급하였듯이 로버스트한 순위를 확인하기 위해서 완벽한 불확실성하에서의 네 가지 다기준 의사결정기법을 적용하였다. Fig. 4에 고도하수처리와 일반하수처리로 나누어서 순위를 나타냈

다. 네 가지 의사결정기법의 순위를 비교해보면 DR, SB, DJ는 두 경우 모두 상위권을 나타냈다. 반면에 WG와 SM은 두 경우에서 모두 하위권을 나타냈다. 또한 모든 의사결정 기법의 적용 결과 DR, SS, SB, WG와 같이 순위의 일치를 나타내는 대안이 있는 반면에 SB1과 DJ는 순위의 차이가 나타났다. 특히 SB1의 경우 maximin, maximax, Hurwicz ($\alpha=0.5$)의 순위는 3위에서 4위를 나타내는 반면에 equal likelihood criterion의 순위는 10위를 나타내 순위의 차이가 극명하게 나타났다. 즉, SB1과 DJ는 변동성이 큰 대안인 반면에 대부분의 대안들은 기후변화의 불확실성하에서의 로버스트한 순위를 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 의사결정문제에서 발생하는 불확실성을 고려한 기후변화 적응전략의 우선순위를 결정하기 위해 새로운 로버스트 의사결정체계를 제안하였다. 첫 번째로 미래의 기후변화 시나리오에 대한 변화폭이 큰 사업의 영향분석결과를 사용하기 위해 퍼지 개념을 사용하였다. 두 번째로 로버스트 의사결정을 하기 위해 통계 기법과 불확실성하에서의 다기준 의사결정기법을 사용하였다. 새로 제안된 체계는 6단계로 구성되었으며 이를 안양천 유역의 물 순환 복원을 위한 하수처리수 재이용 시설의 적응전략을 평가하기 위해 적용하였다.

대안을 두 개의 로버스트 의사결정기법으로 평가한 결과 통계적 방법을 통한 순위는 DR, SM, OJ가 가장 안정적인 대안으로 평가되었고 반면에 DJ, HU 대안은 불안정한 대안으로서 이 유역에 대해서는 다른 유역에 비해서 더 고려되어야 할 것이다. 불확실성하에서의 다기준 의사결정기법의 순위 또한 DR, SS, SB, WG와 같이 순위의 일치를 나타내는 대안이 있는 반면에 SB1과 DJ는 순위의 차이가 나타났다. 두 가지 방법을 통한 로버스트한 대안

Table. 4 Robustness Ranking of Ten (H)TWW Uses Using Standard Deviation

Watershed	HTWW		TWW	
	STDV	Rank	STDV	Rank
WG	0.000	1	0.323	7
OJ	0.000	1	0.000	1
DJ	0.970	9	0.323	6
SB	0.323	5	0.000	1
HU	0.323	6	0.485	8
SA	0.647	8	0.000	1
SM	0.000	1	0.000	1
SS	0.323	6	0.511	9
SB1	0.970	9	0.511	10
DR	0.000	1	0.000	1

Fig. 4. Rankings of Ten (H)TWW Uses from four MCDM Techniques under Complete Uncertainty

으로는 DR이 최적의 대안으로 선정되었으며 DJ, SB1의 경우에는 로버스트한 순위를 나타내지 못해 이 지역에 대한 하수처리수 재이용 사업은 신중한 판단이 필요할 것이다.

본 연구에서 제시한 새로운 분석 체계는 하수처리수 재이용의 위치선정 뿐만 아니라 무수히 많은 기후변화 시나리오의 불확실성을 최대한 반영하여 물 순환, 물 관리 계획 그리고 환경적인 문제와 관계된 다양한 위치선정에 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)(70%)과 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0010609)의 지원(30%)을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- ASCE Task Committee on Sustainability Criteria (1998). "Sustainability criteria for water resource system." *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA.
- Awasthi, A., Chauhan, S.S., and Omrani, H. (2011a). "Application of fuzzy TOPSIS in evaluation sustainable transportation systems." *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 12270-12280.
- Awasthi, A., Chauhan, S.S., Omrani, H., and Panahi, A. (2011b). "A hybrid approach based on SERVQUAL and fuzzy TOPSIS for evaluating transportation service quality." *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 61, pp. 637-646.
- Belinda, H., Ana, D., and Tim, D.F. (2006). "Integrated treatment and recycling of stormwater: A review of Australian practice." *Journal of Environmental Management*, Vol. 79, No. 1, pp. 102-113.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobes, T.H., and Donigan, A.S. (2001). *Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. US Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- Cai, X.M., and Lasdon, L.S. (2002). "A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 8, pp. 1085-1098.
- Chung, E.S., and Lee, K.S. (2009). "Prioritization of water management for sustainability using hydrologic simulation model and multi-criteria decision making techniques." *Journal of Environmental Management*, Vol. 91, pp. 1502-1511.
- Dooley, J.J., and Calvin, K.V. (2011). "Temporal and spatial deployment of carbon dioxide capture and storage technologies across the representative concentration pathways." *Energy Procedia*, Vol. 4, pp. 5845-5852.
- Ellsberg, D. (2001). *Risk, Ambiguity, and Decision*. Garland Publishing, New York.
- Hasimoto, T., Loucks, D.P., and Stedinger J.R. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Ioannis, K., and Charis, A. (2007). "An Integrated environmental plan for the reuse of treated wastewater effluents from WWTP in urban areas." *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 1862-1868.
- Kang, N.E., Kim, Y.O., Jung, E.S., and Park, J.H. (2013). "Applicability of robust decision making for a water supply planning under climate change uncertainty." *Climate Change Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-26.
- 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, No. 3-4, pp. 853-872.
- 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.
- Lee, J., Pak, G., Yoo, C., Kim, S., and Yoon, J. (2010). "Effects of land use change and water reuse options on urban water cycle." *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 22, No. 6, pp. 923-928.
- Lee, K.S., Chung, E.S., Kim, Y.O., and Cho, T.G. (2006). "Sustainable water resources planning to prevent streamflow depletion in an urban watershed: 1. Methodology." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 11, pp. 935-946.

Lempert, R.J., and Schlesinger, M.E. (2000). "Robust strategies for abating climate change." *Climatic Change*, Vol. 45, No. 3, pp. 387-401.

Mitchell, V.G., Mein, R.G., and McMahon, T.A. (2002). "Utilising stormwater and wastewater resuouces in urban areas." *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 6, No. 1, pp. 31-43.

OECD (1998). *Towards Sustainable Development: Environmental Indicators*.

Sa-nguanduan, N., and Nitivattananon, V. (2011). "Strategic

decision making for urban water reuse application: A case from Thailand." *Desalination*, Vol. 268, pp. 141-149.

Stevenson, W., and Ozgur, C. (2006). *Introduction to Management Science with Spreadsheets*. McGraw-Hill International Edition.

논문번호: 13-018	접수: 2013.02.15
수정일자: 2013.05.01/07.04	심사완료: 2013.07.04