

수자원시스템의 회복도 및 취약도 증감현상 해석

Analysis of Non-monotonic Phenomena of Resilience and Vulnerability in Water Resources Systems

이 광 만* / 차 기 욱** / 이 재 응***

Lee, Gwang-Man / Cha, Kee-Uk / Yi, Jaeung

Abstract

Selecting the evaluation index to determine water resources system design yield is an important problem for water resources engineers. Reliability, resilience and vulnerability are three widely used indices for yield analysis. However, there is an overlap region between indices as well as resilience and vulnerability can show improvement in non-monotonic phenomena although yield condition becomes worse. These problems are usually not recognized and the decisions are made according to calculated estimates in real situation. The reason for this is caused by a diverse characteristics of water resources system such as seasonal variability of hydrologic characteristics and water demands. In this study, the applicability of resilience and vulnerability for multi indices application in addition to reliability which is applied generally is examined. Based on highly seasonal irrigation water demand ratio, the correlation and non-monotonic phenomena of each index are analyzed for seven selected reservoirs. Yongdam reservoir which supplies constant water supply showed the general tendency, but Chungju, Andong, Namgang and other reservoirs which supplies irrigation water showed clear non-monotonic phenomena in resilience and vulnerability.

Keywords : resilience, vulnerability, water resources system, evaluation index, correlation, non-monotonic Phenomenon

요 지

수자원시스템의 설계공급량을 결정하기 위한 평가지표의 선택은 수자원기술자가 직면한 중요한 문제이다. 대부분 신뢰도, 회복도 그리고 취약도를 대상으로 평가하게 된다. 그러나 각 지표 간에는 중복성이 있고 회복도와 취약도는 용수공급 여건이 나빠져도 개선되는 증감현상이 나타날 수 있다. 실제 적용에서는 이와 같은 문제점을 인지하지 못하고 한번 계산된 추정치로 판단하는 경우가 대부분이다. 이런 현상에 대한 원인은 수자원시스템의 다양한 특성에 의해 나타나고 있는데 수문 및 수요의 계절적 변동성이 대표적이다. 본 연구에서는 우리나라 댐 설계시 일반적으로 적용하고 있는 신뢰도 지표에 추가하여 다기준 적용을 위한 회복도 및 취약도의 적용성을 분석하였다. 분석방법은 계절적 변동성이 큰 농업용수의 구성비율을 기준으로 7개댐을 선정하여 각 지표 간 상관성과 증감현상을 분석하였다. 분석 결과, 연중 일정량을 공급하는 용담댐은 일반적 추세를 보였으나 농업용수를 공급하는 충주, 안동 및 남강댐 등은 회복도와 취약도에서 증감현상이 뚜렷이 나타났다.

핵심용어 : 회복도, 취약도, 수자원시스템, 평가지표, 상관성, 증감현상

* 교신저자, Kwater, Kwater연구원 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr, Tel: 042-870-7420)

Corresponding Author, Korea Institute of Water & Environment, Kwater, Jonmindong, Yoseung-gu, Daejeon 305-730, Korea

** Kwater, 수자원사업처, 수자원계획팀장 (e-mail: cku@kwater.or.kr)

Department of Water Resources Business, 200beon-gil, Sintanjin-ro, Daedeuk-gu, Daejeon 306-711, Korea

*** 아주대학교 건설시스템공학과 교수 (e-mail: jeyi@ajou.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

1. 서론

용수공급 시스템은 크게 하천이나 저류시설, 송수시설 그리고 정수처리시설 등으로 구분할 수 있다. 이 시스템의 구성요소 중 하천이나 저류시설을 수자원시스템이라 할 수 있다. 수자원시스템은 물의 이용관리를 위해 구성되며, 현대사회에서는 용수공급 목적이 가장 중요한 부분을 차지한다. 이때 수자원시스템의 계획과 관련된 용수공급 목적의 달성정도를 평가하기 위한 기준이나 지표가 주요 관심의 대상이다. 여기서 물 공급의 안전성 정도를 나타내는 지표를 이수안전도라 할 수 있는데, 어떤 가뭄조건하에서 용수수요를 충족시킬 수 있는 물 공급의 안정성 정도를 나타낸다. 즉, 수자원시스템 운영측면에서 용수공급의 장애가 발생하지 않는 혹은 적정 서비스를 제공하는 정도를 판단하는 기준이라 할 수 있다.

수자원시스템을 통한 물 공급의 안정성 혹은 피해정도를 평가하기 위한 지표는 다양한 형태로 제시되어 왔다. 이중 안전공급량(safe yield)은 과거 발생했던 최대가뭄 사상 조건에서도 용수공급이 가능한 양으로 정의하고 있다. 이에 더해 물 부족발생시 이용자에게 미치는 피해를 최소화하기 위해 용수공급 부족량의 크기, 빈도 및 기간 등을 분석하는 지표들이 적용되고 있다. 이들 지표는 궁극적으로 용수공급의 안정성 수준을 평가할 수 있는 기준이라 할 수 있는데, 우선 검토되어야 할 사항은 수자원시스템의 조건변화에 따른 평가지표들이 갖는 의미와 반응상태를 파악하는 것이다(Vogel and Bolognese, 1995; Kundzewicz and Laski, 1995).

과거 개발된 지표들의 대부분은 용수부족 발생여부와 지속기간 및 크기를 대상으로 통계적인 분석을 하고 있다. 즉, 오래전부터 가장 많이 이용되고 있는 신뢰도(reliability)는 용수공급부족 발생여부의 빈도를 평가하는 것이고, 회복도(resilience)는 주로 용수부족이 발생한 이후 얼마나 빨리 정상상태로 복귀하는지를 확률로 평가하는 방법이다. 또한 용수부족량 크기의 정도를 평가하는 지표로 취약도(vulnerability)가 이용되고 있는데 용수부족량의 크기에 따른 피해정도를 가늠해 볼 수 있다. 이와 같이 통계학적 분석방법으로 추정하는 지표는 주로 Hashimoto et al. (1982)가 제시한 방법이 가장 널리 적용되고 있다. 유사한 형태의 지표들이 다수 제시되어 왔으며(Fiering, 1982), 변형된 지표로는 평균개념의 회복도와 취약도의 평가방법 대신 용수부족 사상 중 최대 연속용수부족 발생기간과 최대 부족량을 지표로 적용하는 것이 있다(Moy et al., 1986). 또한 Kindler and Tyszewski (1989)

는 경험적 확률분포의 평가를 제안하였다. 이외의 대부분의 지표들은 주로 Hashimoto et al. (1982) 이후 회복도와 취약도에 관한 것들이다.

수자원시스템의 이행도 평가에 많이 적용되는 지표들은 대부분 저수지 모의결과 중 용수부족 사상에 대한 정보를 통계적으로 분석하고 있다. 이들 지표들은 단순히 수자원시스템의 이행도 평가뿐만 아니라 지속가능성 지표 또는 위험도 지표(Loucks, 1997), 저류량-신뢰도-공급량 관계 분석(Vogel et al., 1995) 등에 이용되고 있으며, 저류량-신뢰도-회복도-공급량 평가(Vogel and Bolognese, 1995) 등 다양하게 적용되고 있다. 예를 들면, Tajiro et al. (1997)은 수자원시스템의 신뢰도 평가를 위하여 복합지표를 적용하였고, Kundzewicz and Kindler (1995)는 다기준 적용을 위하여 각 지표간의 상관관계를 제시하였다. Maier et al. (2001)은 수질의 신뢰도, 회복도 및 취약도를 평가하였다. 국내에서는 Yi and Song (2002), Park et al. (2001) 및 Lee et al. (2012)이 신뢰도 기준을 적용하여 다목적댐의 공급량을 평가한 사례가 있으며, Lee and Kang (2006)은 보강공급량 개념을 적용하였다.

그러나 이들 지표 중 회복도와 취약도는 분석조건에 따라 증감현상(non-monotonic)이 나타나고 있으나 이런 현상에 대한 충분한 검토 없이 적용하고 있다. 즉, Hashimoto et al. (1982)이 제시한 평균개념의 추정치는 용수공급 조건이 한정되어 있을 때 수요가 증가함에 따라 나빠지는 것이 일반적이나 수요가 증가하여도 지표값이 개선되는 현상을 보이는 경우가 있다. 이와 관련하여 Kjeldsen and Rosbjerg (2004)는 R-R-V (Reliability-Resilience-Vulnerability)의 상호관계와 지표들의 증감현상을 분석하여 제시한바 있다. 회복도와 취약도의 증감현상은 수자원시스템의 특성에 따라 달리 나타날 수 있으며, 명확한 원인에 대하여 제시된 사례는 없다. 이와 같은 현상은 주로 수문의 계절적 조건이나 용수수요의 계절적 변동성에 의해 나타날 수 있는 것으로 추정되고 있다. 결국 이러한 현상은 수자원시스템의 이행도 평가에서 신뢰도를 선호하게 되는 이유가 될 수 있으며, 다중평가지표(multiple estimator)를 적용할 때 평가치의 왜곡문제가 발생할 수 있다.

따라서 수자원시스템의 이행도 평가를 위한 지표 선정에서 회복도와 취약도를 적용하기 위해서는 추정치 증감현상에 대한 정확한 이해가 필요하다. 실제 대부분의 사례에서 제시하고 있는 회복도와 취약도 평가치는 증감현상에 대한 분석없이 제시되고 있다. 본 연구에서는 수자원시스템 평가에서 대표적으로 적용되고 있는 신뢰도와 회복도 그리고 취약도를 대상으로 상호 상관성 분석을 실

시하고 계절적 변동성이 큰 농업용수를 기준으로 회복도와 취약도의 증감현상을 해석하고자 하였다. 이를 위해 기존의 15개 다목적댐을 대상으로 계획공급량의 농업용수 공급비율을 기준으로 7개댐을 선정하고 이들 댐을 대상으로 공급량을 변화시키면서 이들 지표의 변화추이와 증감현상을 분석하였다. 적용 결과 생활 및 공업용수와 같이 계절적으로 변동성이 없는 경우 지표치의 증감현상은 나타나지 않았으나 농업용수가 포함되어 계절적 변동성이 있는 경우 증감현상이 나타났다.

2. 수자원시스템 평가 지표

수자원시스템의 이행도 평가는 주로 용수부족 발생사상, 즉 실패상태의 통계적 특성을 활용하는 것이 일반적이다. 기본개념은 특정 시간축상에서 수요와 공급관계를 도시한 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

일반적인 수자원시스템은 정상적인 용수공급이 진행되다 이상가뭀에 의하여 용수부족 사상이 발생할 수 있다. 용수부족은 적용한 이수안전도의 수준에 따라 자주 혹은 한 번도 발생하지 않을 수 있다. 실제 어떤 경우에도 수요를 완전하게 보장하는 계획을 수립한다는 것은 경제적 측면에서 타당하지 않으므로 보통 어느 정도의 물 부족이 발생하는 것이 일반적이다. 이때 시스템이 시간 t 에서 $t+1$ 로 이동할 때 시스템은 정상상태(non-failure) 혹은 부족상태(failure)가 될 수 있다. Fig. 1과 같이 용수부족 발생사상이 여러 개 있을 경우(j), j 사상의 용수부족 지속시간을 $d(j)$ 로 하고 이에 대응하는 부족량을 $v(j)$ 로 하면 $v(j)$ 는 다음 식과 같이 수요와 설계공급량(designed water supply) 혹은 계획공급량의 차를 누계하여 나타낼 수 있다.

$$v(j) = \sum_{t=1}^{d(j)} [D(t) - Y(t)] \quad (1)$$

여기서, $D(t)$ 와 $Y(t)$ 는 이산화된 시간 t 에서의 수요와 설계공급량을 각각 나타낸다.

Fig. 1에서 Hashimoto et al. (1982)이 제안한 용수공급이 충족된 경우를 대상으로 발생확률을 계산하면 다음 식과 같다.

$$Rel = P\{S \in NF\} \quad (2)$$

여기서, S 는 고려하는 시스템의 상태변수이며, NF 는 Non-failure 상태를 의미한다. 일반적으로 가장 널리 받아들여지고 있는 신뢰도는 다음과 같이 계산된다.

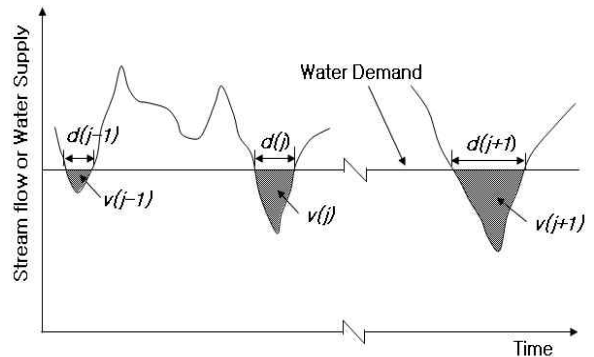


Fig. 1. Characteristics of Water Deficit Events in Water Resources System

$$Rel = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (3)$$

여기서, j 는 Fig. 1에서와 같이 용수부족사상($j = 1, 2, \dots, M$)을 나타내며, $d(j)$ 는 j 번째 용수부족사상의 용수부족 발생기간이다. T 는 분석 대상의 전체 기간을 의미한다.

한편 회복도는 한번 시스템이 불만족 상태로 들어온 후 얼마나 빨리 만족상태로 되돌아가는가를 평가하는 것으로 Hashimoto et al. (1982)은 다음과 같은 조건확률로 정의하였다.

$$Res = P\{S(t+1) \in NF | S(t) \in F\} \quad (4)$$

여기서, $S(t)$ 는 고려하는 시스템의 상태변수이며, 전체 용수부족 발생사상을 대상으로 불만족 상태에서 보내는 시간의 평균값의 역수와 같다.

$$Res_1 = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (5)$$

취약도 역시 Hashimoto et al. (1982)이 정의한 것이 많이 적용되고 있는데 실패사상의 심각성 정도를 측정하는데 이용되며, 다음과 같이 정의하였다.

$$Vul = \sum_{j \in F} e(j)h(j) \quad (6)$$

여기서, $h(j)$ 는 S 가 차분화된 상태변수이고 용수부족 상태에 있을 때 이에 대응하는 j 번째 용수부족 사상의 가장 심각한 결과(물 부족량, 피해액, 피해면적 등)라 할 수 있으며, $e(j)$ 는 $h(j)$ 의 발생확률이다. Hashimoto et al. (1982)와 Jinno et al. (1995)은 j 번째 용수부족사상의 기간 중에 발생한 전체 물 부족상태, 즉 용수공급 부족량에 근거

한 취약도 평가방법을 제시하였다. 이에 대한 보다 간단한 방법은 각 사상의 발생확률이 같다고 가정하는 것으로 $e(1) = \dots = e(M) = 1/M$ 와 같다. 따라서 그들은 용수부족사상 전체의 부족량을 평균값으로 취약도를 추정하였다.

$$Vul_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \quad (7)$$

이에 반해 Moy et al. (1986)은 용수부족 사상중 최대 연속 용수부족기간과 최대부족량이 저수지 운영 방법을 비교하는데 기준이 될 수 있기 때문에 사상별 최대값의 평균보다 합리적이라고 판단하고 회복도와 취약도를 다음과 같이 제시하였다.

$$Res_2 = \max_j \{d(j)\}^{-1} \quad (8)$$

$$Vul_2 = \max_j \{v(j)\} \quad (9)$$

수자원시스템의 평가지표는 공급이 감소하거나 수요가 증가할 경우 악화되는 것이 일반적 추세라 할 수 있다. 그러나 Eqs. (5) and (7)을 이용하여 수자원시스템을 통계적 방법으로 평가할 경우 지표값의 증감현상이 나타날 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 2와 같이(a)와 (b)를 비교하여 알 수 있다. (b)의 경우(a)에 비하여 용수부족 발생기간이나 양이 적은 것이 다수 포함되어 있어 전체 부족기간과 양은 위에 비하여 크지만 평균값은 작아진다. 실제 발생기간과 크기가 다른 사상들이 어떤 조합으로 발생하느냐에 따라 결과가 달라질 수 있다. 이런 현상 때문에 Kundzewicz and Kindler (1995)는 회복도와 취약도 지표 적용은 Eqs. (8) and (9)와 같이 최대치를 적용하는 것이 합리적이라고 주장하였다. 반면 Srinivasan et al. (1999)은 회복도 평가에서 최대 연속 용수부족기간을 적용하는 것은 나머지 용수부족사상의 회복도 정도를 평가하기 어렵다고 지적하였다.

따라서 수자원시스템의 이행도 평가를 위한 평가지표의 적용은 대상 지표의 추이에 대한 이해가 중요하다. 이와 같은 문제를 완화하기 위해서는 장기간의 수문샘플해석이 필요하며, Vogle and Bolognese (1995)은 10만년의 자료를 적용한 바 있다. Kjeldsen and Rosbjerg (2004)는 최소 1,000년 이상의 수문자료 적용이 필요한 것으로 평가하였다. 결국 수자원시스템의 회복도와 취약도 평가를 위해서는 다양한 해석을 통하여 적정수준을 판단하는 것이 중요하다.

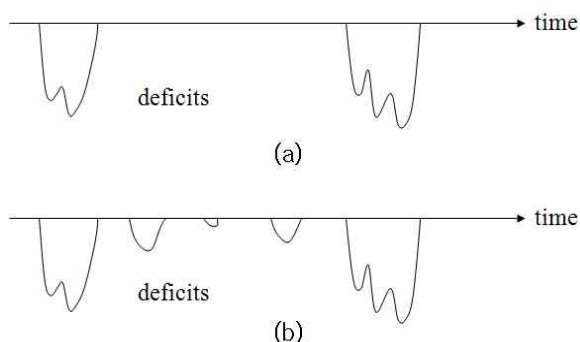


Fig. 2. A Reason for Non-monotonic Phenomena of Resilience and Vulnerability

3. 평가지표 간 상관성과 회복도 및 취약도의 증감현상 분석

3.1 분석 대상 댐의 선정

수자원시스템의 평가지표에 대한 추이분석을 위해 여러 가지 조건을 적용할 수 있다. 수자원시스템의 유량조건을 확정론적으로 처리하고 공급조건이 변하지 않는다면 수요조건 시나리오를 변경하여 적용할 수 있다. 과거 우리나라의 수요조건은 크게 생활 및 공업, 농업 그리고 유지용수로 구분된다. 이중생활 및 공업 그리고 유지용수는 연중 일정량을 공급하는 것으로 계획하나 농업용수는 계절적 변동성이 커 회복도와 취약도의 증감현상에 대해 어느 정도 영향을 미칠 것으로 판단하였다. 이를 위해 Table 1과 같이 15개 다목적댐을 대상으로 농업용수 공급 비율을 구하여 7개댐을 분석대상으로 선정하였다.

농업용수 시나리오의 구분은 농업용수공급 비율이 없는 경우와 1~3, 10, 20, 30 및 40%인 경우로 설정하고 이에 근사하는 댐을 선정하였다. 가상 댐에 대해 농업용수의 수요량을 변경하여 적용할 수도 있으나 실제 추세를 분석하기 위하여 기존 다목적댐을 대상으로 하였다. 이에 의거 선정된 분석 대상 댐은 생활 및 공업용수와 유지용수를 공급하는 용담댐과 농업용수비율이 극히 적은 소양강 및 보령댐, 10%에 근접하는 충주댐, 농업용수비율이 20%에 근접하는 대청, 및 30% 수준인 안동댐 그리고 40%에 근접하는 남강댐을 대상으로 하였다. 선정된 댐들의 주요 특징은 Table 2와 같고 농업용수의 계절적 분포는 Table 3과 같다.

3.2 평가 모형 및 적용 조건

본 연구에서는 각 댐을 단일운영조건으로 계획공급량의 충족여부를 판단하기 위해 모의모형을 개발하여 적용

Table 1. Choice of Target Dams for Analysis of Resilience and Vulnerability

Dam	Total Water Supply (m ³ /s)	Agricultural Water Supply (m ³ /s)	Percent (%)	Choice
Youngdam	20.60	0.00	0.00	⊙
Soyanggang	46.60	0.40	0.86	⊙
Boryung	3.40	0.10	2.94	⊙
Hapchon	19.00	1.00	5.26	
Imha	6.80	0.40	5.88	
Jangheung	4.06	0.24	5.91	
Juam	6.90	0.50	7.25	
Chungju	107.20	10.00	9.33	⊙
Heungsung	3.80	0.50	13.16	
Milyang	2.30	0.40	17.39	
Buan	1.10	0.20	18.18	
Daechong	52.20	11.00	21.07	⊙
Andong	29.40	9.50	32.31	⊙
Namgang	18.20	7.20	39.56	⊙
Sumjingang	13.14	11.10	84.47	

Table 2. Characteristics of Operation Conditions for the Selected Dams

Item	Yongdam	Chungju	Andong	Namgang	Soyanggang	Boryung	Daechung
Analysis Period	2001~2009	1986~2009	1977~2009	1976~2009	1974~2009	1998~2009	1981~2009
Water Demand Sector	Domestic, Industrial, Maintenance	Domestic, Industrial, Agricultural, Maintenance	Domestic, Industrial, Agricultural, Maintenance	Domestic, Industrial, Agricultural, Maintenance	Domestic, Industrial, Agricultural, Maintenance	Domestic, Industrial, Agricultural, Maintenance	Domestic, Industrial, Agricultural
Effective Storage (10 ⁶ m ³)	672.0	1,789.0	1,000.0	299.7	1,900.0	108.7	790.0
Annual Inflow (10 ⁶ m ³)	769.5	4,888.0	850.0	2,031.0	1,750.0	125.5	2,450.5
Annual Water Supply (10 ⁶ m ³)	650.4	3,380.0	926.0	573.3	1,213.0	106.6	1,649.0

하였다. 저수지 모의 운영을 위해서는 상태변수의 변화를 시간에 따라 추적하기 위한 상태방정식을 수립하여야 한다. 이는 전 단계의 운영 결과를 바탕으로 현 단계에서 변화하는 시스템의 상태를 파악해야 다음 단계의 운영조합을 구성할 수 있다. 본 연구에서 적용한 상태방정식은 저류량을 상태변수로 하여 Eq. (10)과 같이 정의하였다.

$$X_{t+1} = X_t + I_t - D_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - R_t \quad (10)$$

for $t = 1, \dots, T$

여기서, X_t 는 저류량, I_t 는 유입량, D_t 는 댐에서의 직접 취수량, E_t 는 증발손실량, R_t 는 방류량을 나타낸다. t 와 $t+1$ 은 운영단계 t 의 시작과 끝을 나타낸다. 댐의 손실량은 수면증발량이나 댐 체의 누수량 등이 있으나 댐에서

Table 3. Monthly Distributions of Agricultural Water Demands (Unit: m³/sec)

Month	Yongdam	Chungju	Andong	Namgang	Soyanggang	Boryung	Daechung
March	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0
April	0.0	9.1	0.9	1.0	1.0	0.0	1.1
May	0.0	21.8	13.8	1.2	1.0	0.0	4.8
June	0.0	28.0	29.4	21.4	1.0	0.7	47.6
July	0.0	18.0	20.6	24.7	1.0	0.4	30.4
August	0.0	23.7	30.3	26.1	1.0	0.4	26.5
September	0.0	10.6	16.5	11.4	1.0	0.3	22.6
October	0.0	8.0	2.1	0.0	0.6	0.0	0.0
Average	0.0	10.0	9.5	7.2	0.4	0.1	11.0

관측한 저수지 유입량 자료를 이용하고 누수량은 극히 미미하다고 판단하여 고려하지 않았다.

이수목적의 저수지 평가 모의모형에서 적용하는 제약 조건은 유효저수용량의 적용 범위와 방류량의 범위이며 다음과 같다.

$$X_t^{\min} \leq X_t \leq X_t^{\max} \quad (11)$$

$$R_t^{\min} \leq R_t \leq R_t^{\max} \quad (12)$$

$$X_t \geq 0, R_t \geq 0 \quad (13)$$

여기서, X_t^{\min} 과 X_t^{\max} 는 운영단계 t 에서 저류량의 하한값과 상한값을 나타내며, R_t^{\min} 과 R_t^{\max} 는 운영단계 t 에서 방류량의 하한값과 상한값을 나타낸다. Eq. (13)은 저류량과 방류량의 비음 조건(non-zero)을 나타낸다.

적용조건은 각 댐의 모의기간은 정상적 운영 개시 시점부터 2009년 말까지 적용하였으며, 이 기간 동안 댐으로 유입된 유량을 수문조건으로 하였다. 모의기간단위는 회복도와 취약도의 증감현상을 용이하게 분석하기 위하여 일단위로 하였다. 용수수요조건은 각 댐의 월별 계획공급량을 일단위로 배분하여 적용하였다.

3.3 회복도 및 취약도 증감현상 분석

수자원시스템의 이행도 평가를 위하여 제 2장에서 제시하고 있는 지표들은 용수부족 발생빈도와 지속기간 그리고 크기를 인자로 하고 있다. 이들 인자들은 상식적으로 공급이 한정되어 있을 때 수요의 증가에 따라 점진적으로 악화되는 추세를 보이는 것이 일반적이다. 그러나 앞에서의 지적과 같이 단순 통계적인 분석을 통해 평가지표를 구할 경우 지표치가 증감현상을 보일 수 있다. 또한 수요 조건을 증가시켜도 특정 지표가 일정 방향으로 단조로운

추세를 보이지 않을 경우 일관성을 보이는 지표와의 상관성은 낮아질 것이다. 이를 증명하기 위하여 Hashimoto et al. (1982)가 제안한 Eqs. (4), (5) and (7)의 결과를 대상으로 지표간의 밀접성을 분석하기 위하여 Eq. (14)와 같은 상관계수식을 이용하였다.

$$r_{x,y} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} \quad (14)$$

또한 회복도와 취약도의 증감현상을 확인하기 위해 Table 2에서 제시된 각 댐의 계획공급량을 기준으로 생활, 공업, 농업 및 유지용수 등 모든 수요에 대해 2%씩 일정비율로 증·감을 시행한 후 용수부족이 발생하는 비율을 기준시점으로 정하고 공급량을 늘려 12개의 수요조건을 구성하였다. 즉 계획공급량 기준으로 충주댐, 안동댐, 대청댐은 88%로부터, 용담댐은 92%부터, 보령댐은 96%부터, 남강댐은 98%, 소양강댐은 126%부터 2%씩 수요를 증가시켜 분석하였다. 이와 같은 조건 설정은 공급조건을 일정하게 하고 수요조건을 변화시킴으로서 평가지표가 악화되는 반응을 평가하기 위해서다. 이때 댐의 규모에 따라 계획공급량의 규모가 다르고 용수부족이 발생하는 공급량의 수준이 달라 인위적인 동일 기준을 적용하지 않았다.

회복도와 취약도의 증감현상 분석에 앞서 적용된 7개 다목적댐의 현재 설정되어 있는 계획공급량을 대상으로 주요 평가지표의 추정치는 Table 4와 같다. 이중 신뢰도를 살펴보면, 소양강 댐의 경우 용수부족이 발생하지 않았고 남강댐의 경우 100%에 근접하고 있다. 또한 모든 댐들이 95% 이상의 값을 보여주고 있어 계획 당시 적용된 신뢰도 수준을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 회복도와 취약도는 안동과 대청댐이 낮은 값을 보여주고 있다. 용

수부족 발생사상 중에서 최대 물 부족이 발생한 기간이나 부족량, 그리고 모의 전체 기간에 발생한 전체 물 부족기간 및 부족량 등의 지표는 서로 용수공급 조건이 달라 상대적인 비교는 큰 의미가 없으나 계획공급량의 절대치에 비해 안동과 대청댐이 용수부족기간이나 부족량이 크게 발생하고 있다.

공급량이 일정할 때 수요량이 증가함에 따라 각 평가지표는 악화되는 추세를 보일 것이라는 일반적 현상을 지표간 상관관계 분석을 통해 확인하고자 하였다. 이는 항상 일반적 추세를 따르는 신뢰도와 상관성이 낮아질 경우 지표치의 증감현상이 나타나고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 이때 회복도의 경우 제2장에서 제시된 Eqs. (5) and (8)의 확률값으로 적용할 경우 값의 차이가 커 상관계수가 왜곡될 가능성이 있어 용수부족 지속기간으로 변환하여 적용하였다.

적용결과, Hashimoto et al. (1982)이 제시한 회복도와 취약도 지표(Eqs. (5) and (7))를 적용할 경우 Table 5에서와 같이 농업용수가 배분되지 않았거나 비중이 적은 용담, 소양강 및 보령댐의 경우 신뢰도-회복도, 신뢰도-취약도 및 회복도-취약도의 관계가 비교적 높은 0.86~0.99 사이의 상관성을 보여주었다. 반면 농업용수 비중이 10% 이상인 안동·대청 및 남강댐의 경우 신뢰도-회복도 및 신뢰도-취약도의 관계는 비교적 매우 낮은 상관성을 보

여주고 있다. 충주댐의 경우 전체공급량에서 농업용수 비중이 10% 수준이나 절대 양이 많아 모든 경우에서 낮은 상관성을 보여주고 있다. 결국 이와 같은 결과는 수자원 시스템 평가에서 수문의 변동성도 중요하지만 수요의 변동성에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다. 연중 일정량을 공급하는 수자원 계획의 경우 신뢰도와 함께 회복도 및 취약도를 동시에 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

한편 신뢰도와 모든 지표의 값이 단조로운 추세를 보이는 Moy et al. (1986)이 제시한 Eqs. (8) and (9)와의 상관관계 분석결과는 Table 6에서 보여주고 있다. 이 표에서 최대 연속 부족기간 및 부족량은 Moy et al. (1986)의 개념이며, 전체부족기간과 부족량은 모의 대상기간 전체에 걸쳐 발생한 용수부족사상을 합한 것으로 수요량이 증가함에 따라 단조로운 추세를 보였다. 결과는 역시 용수공급량 중 농업용수배분이 없거나 적은 용담댐과 소양강 및 보령댐의 경우 -0.95 이상의 높은 상관관계를 보여주었다. 안동댐과 남강댐은 신뢰도-최대연속부족일 및 신뢰도-연속최대부족량의 관계에서 다른 댐에 비해 비교적 낮은 결과치를 보였으나 충주댐의 경우 Hashimoto et al. (1982)의 평가지표 결과보다는 높은 상관성을 보였다. 이와 같이 모든 지표값이 수요량이 증가함에 따라 단조로운 추세를 보이는 경우에도 농업용수의 비중이 클 경우 신뢰도와 상관성이 낮아짐을 알 수 있다.

Table 4. Estimates of Water Supply Assessment Indices for the Designed Water Supply Amounts

Items	Yongdam	Chungju	Andong	Namgang	Soyanggang	Boryung	Daechung
Reliability (%)	98.1	98.3	98.1	99.9	100.0	98.9	96.0
Resilience*	0.039	0.040	0.022	0.1000	1.000	0.085	0.021
vulnerability* (10 ⁶ m ³)	29.82	149.27	69.84	7.65	0.0	3.05	154.04
Resilience**	0.029	0.011	0.005		1.000	0.040	0.007
vulnerability**(10 ⁶ m ³)	51.72	542.40	257.07		0.00	6.79	388.20
Maximum Consecutive Duration of Deficit (day)	34	94	198	10	0	25	152
Total Deficit Duration (day)	64	149	233	10	0	47	427
Total Deficit Amount (10 ⁶ m ³)	89.46	895.63	349.18	7.65	0.00	12.19	1386.39

*Estimated by Hashimoto et al. (1982); **Estimated by Moy et al. (1986)

Table 5. Estimated Correlation Coefficients with Resilience transformed probability into Water Deficit Duration

Item	Yongdam	Chungju	Andong	Namgang	Soyanggang	Boryung	Daechung
Reliability-Resilience	-0.9882	-0.3714	-0.0817	0.1101	-0.8611	-0.9890	0.0341
Reliability-Vulnerability	-0.9954	-0.3893	-0.4538	0.0677	-0.8621	-0.9867	-0.2451
Resilience-Vulnerability	0.9876	0.5836	0.8887	0.9968	0.9886	0.9989	0.9587

한편 각 댐의 모의결과를 통해 회복도 및 취약도 추정치를 통해 증감현상을 분석하기 위하여 평가지표별로 7개 댐에 대하여 추정된 결과를 Figs. 3~7에 도시하였다. 이중 Fig. 3은 신뢰도를, Figs. 4~5는 Hashimoto et al. (1982)

이 제시한 Eqs. (5) and (7), 그리고 Figs. 6~7은 Moy et al. (1986)가 제안한 Eqs. (8) and (9)에 의한 결과이다.

그림을 살펴보면, 신뢰도의 경우 Fig. 3과 같이 모든 경우에서 수요량이 증가함에 따라 신뢰도가 낮아지는 일반

Table 6. Correlation Coefficients between Reliability, Maximum Consecutive Duration of Deficit, Maximum Consecutive Deficit Amount, Total Deficit Duration and Total Deficit Amount

Item	Yongdam	Chungju	Andong	Namgang	Soyanggang	Boryung	Daechung
Reliability-Maximum Consecutive Duration of Deficit (day)	-0.9914	-0.9332	-0.7739	-0.8237	-0.9931	-0.9993	-0.9289
Reliability-Maximum Consecutive Deficit Amount (10^6 m^3)	-0.9839	-0.9685	-0.8795	-0.8519	-0.9568	-0.9989	-0.9895
Reliability-Total Deficit duration (day)	-0.9999	-0.9999	-0.9998	-0.9997	-0.9990	-0.9999	-0.9999
Reliability-Total Deficit Amount (10^6 m^3)	-0.9962	-0.9985	-0.9940	-0.9948	-0.9946	-0.9983	-0.9970

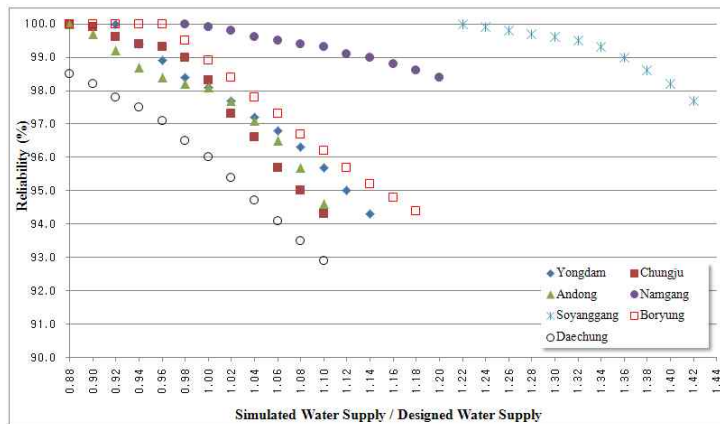


Fig. 3 Monotonic Behaviour of Reliability Index by Changing Water Supply Amount

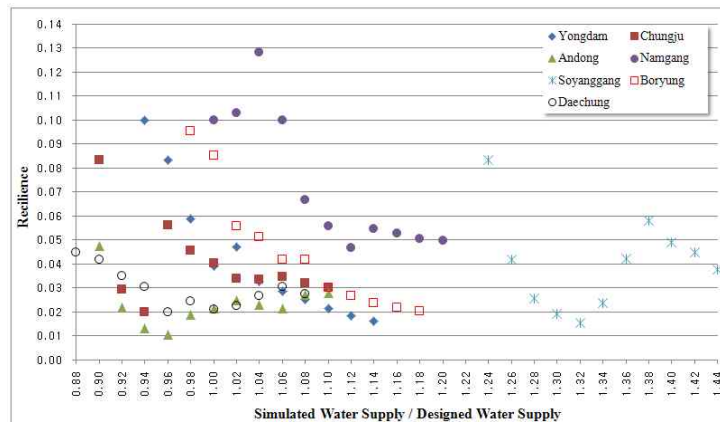


Fig. 4 Non-monotonic Behaviour of Hashimoto et al.'s Resilience Index by Changing Water Supply Amount

적인 추세를 잘 따르고 있다. 이런 결과는 신뢰도 추정방법이 용수부족 발생횟수만을 가지고 통계적으로 발생확률을 계산하고 있어 공급조건이 일정할 경우 수요량의 증가에 따라 결과치가 낮아지는 추세는 당연하다. Hashimoto et al. (1982)의 식에 의한 회복도의 경우 Fig. 4와 같이 용

담량을 제외하면 수요량이 증가하여도 추정치가 개선되고 악화되는 불규칙 한 증감현상이 나타나고 있다. Hashimoto et al. (1982)의 식에 의한 취약도의 경우도 Fig. 5와 같이 증감현상이 뚜렷이 나타나고 있다. 반면 Hashimoto et al. (1982)가 제시한 지표와 비교하기 위하여 적용한 Moy et

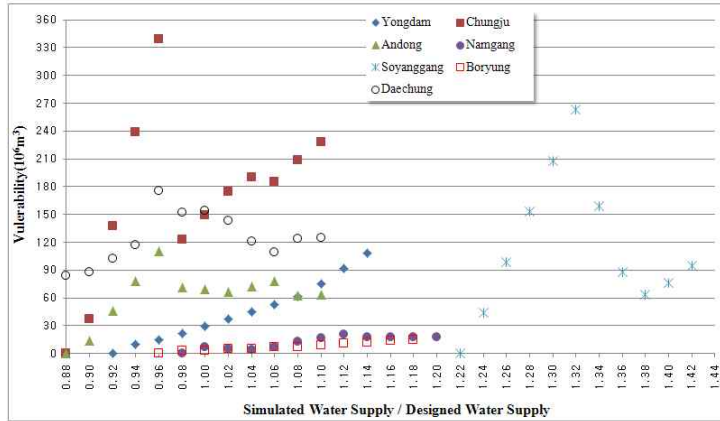


Fig. 5 Non-monotonic Behaviour of Hashimoto et al.'s Vulnerability Index by Changing Water Supply Amount

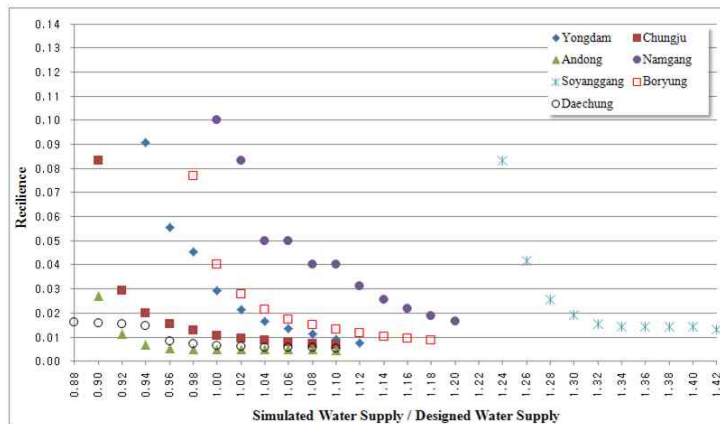


Fig. 6 Monotonic Behaviour of Moy et al.'s Resilience Index by Changing Water Supply Amount

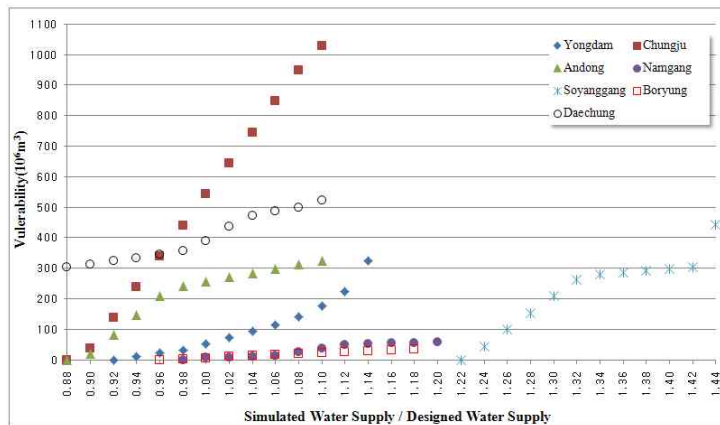


Fig. 7 Monotonic Behaviour of Moy et al.'s Vulnerability Index by Changing Water Supply Amount

al. (1986)이 제시한 Eqs. (8) and (9)에 의한 회복도와 취약도 지표에 대한 결과는 Figs. 6 and 7과 같이 단조롭게 감소하고 증가하는 추세를 보여주었다.

이상과 같이 본 연구에서 수자원시스템의 이행도 평가를 위해 선정된 지표와 연간 용수공급계획 중 계절적 변동성이 큰 농업용수를 기준으로 적용한 결과를 종합적으로 평가하면 다음과 같다.

우선 수자원시스템의 평가지표 중 Hashimoto et al. (1982)이 제시한 회복도와 취약도의 경우 추정치의 증감현상이 뚜렷이 나타났다. 이런 결과는 일정 추세를 보이는 신뢰도와 다른 지표 간의 상관성 분석을 통해서도 확인되었다. 즉, 용담댐이나 농업용수 비율이 적은 보령댐의 경우 연중 일정량을 공급하는 조건에서는 수요에 대한 반응이 단조로운 추세를 보였으나 수요량의 변동성이 있는 다른 댐들에서는 모두 증감현상을 나타내고 있다. 따라서 연중 수요량이 일정할 경우 각 지표들을 개별 혹은 다기준으로 적용할 수 있을 것으로 판단되나 농업용수와 같이 공급량의 계절적 변동성이 있는 경우 회복도와 취약도의 적용에 주의가 필요한 것으로 분석되었다.

회복도와 취약도의 증감현상에 영향을 미치는 원인에 대한 정확한 연구는 이루어지지 않았다. 공급과 수요관계에서 물 부족현상이 발생할 조건은 무한의 조합이 가능하므로 특정 원인으로 결론짓기는 어려운 실정이다. 다만 본 연구에서와 같이 많은 원인 중에서 수요량의 계절적 변동성도 회복도와 취약도의 증감현상에 영향을 미치는 것으로 확인되어 이들 지표의 적용에 주의가 필요하다. 실제 적용에서 잘못 선정된 지표는 결과를 왜곡할 수 있으므로 지표값이 일정 추세를 보이는 신뢰도를 기준으로 하고, 회복도와 취약도는 증감현상을 확인한 후 적용하는 것이 필요하다.

4. 결 론

수자원시스템의 공급량 결정은 많은 이해관계자들이 관련되어 있어 합리적이고 정확한 근거에 의하여 분석되어야 한다. 오늘날 댐의 적정 용량배분 설계뿐만 아니라 수리권배분의 결정방법도 물 분쟁의 주요 쟁점이 되고 있다. 특히 어떤 평가지표를 적용하느냐에 따라 공급 가능량이 달라질 수 있으며, 궁극적으로는 용수공급의 안전성에 영향을 미친다. 본 연구에서는 현재까지 주로 적용해 오던 신뢰도 지표에 더해 다기준 평가지표를 구성할 때 가장 많이 선호되고 있는 회복도와 취약도의 적용성을 평가하였다. 분석 결과, 수요의 계절적 변동성이 큰 농업

용수가 포함되어 있을 경우 연중 일정량을 공급하는 경우보다 신뢰도-회복도, 신뢰도-취약도 및 회복도-취약도간의 상관성이 크게 떨어졌다. 또한 수요량의 증가에 따라 지표가 악화되는 일반적 현상과 달리 회복도와 취약도는 증감현상을 나타내었다. 반면 회복도와 취약도의 증감현상은 연중 일정량을 공급하는 용담댐에서는 나타나지 않았고 농업용수 비중이 극히 적은 보령댐에서는 미세한 현상을 보였다. 또한 지표간의 상관성도 용담댐은 모든 경우에 높게 나타난 반면 다른 댐들은 비교적 낮게 나타났다. 이런 결과를 종합하여 볼 때 수요량에 계절성이 있을 경우 회복도와 취약도의 평가는 신중을 기할 필요가 있으며, 증감현상에 대한 분석 후 판단이 요구된다.

참고문헌

- Fiering, M.B. (1982). "Alternative indices of resilience." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 33-39.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Jinno, K., Zongxue, X., Kawamura, A., and Tajiri, K. (1995). "Risk assessment of a water supply system during drought." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 185-204.
- Kindler, J., and Tyszewski, S. (1989). Multicriteria evaluation of decision rules in the design of a storage reservoir. In: *System Analysis for water Resources Management: Closing the Gap Between the Theory and Practice* (ed. by D.P. Loucks and U. Shamir) (Proceedings of Baltimore Assembly, May 1989), IAHS, Publication No. 180.
- Kjeldsen, T.R., and Rosbjerg, D. (2004). "Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems." *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, Vol. 49, No. 5, pp. 755-767.
- Kundzewicz, Z.W., and Kindler, J. (1995). "Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resources systems." *Modelling and management of Sustainable Basin-scale water Resources Systems* (proceedings of a Boulder Symposium), IAHS Publication, No. 231, pp. 217-224.

- Kundzewicz, Z.W., and Laski, A. (1995). *Reliability-related criteria in water supply system studies*. In: New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water resources (ed. by Z. W. Kundzewicz). Cambridge University Press.
- Lee, D.H., Choi, C.W., Yu, M.S., and Yi, J.E. (2012). "Reevaluation of Multi-Purpose Reservoir Yield" *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371.
- Lee, S.H., and Kang, T.U. (2006). "An Evaluation Method of Water Supply Reliability for a Dam by Firm Yield Analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 5, pp. 467-478.
- Loucks, D.P. (1997). "Quantifying trends in system sustainability." *Hydrology Science Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 513-530.
- Maier, H.R., Lence, B.J., Tolson, B.A., and Foschi, R.O. (2001). "First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability and resilience." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 779-790.
- Moy, W.-S., Cohon, J.L., and ReVelle, C. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resources Research*, Vol. 22, pp. 489-498.
- Park, S.S., Lee, D.Y., Kim, H.J., and Shin, Y.H. (2001). "Evaluation of Water Supply Capability on Multi-purpose Dam in Korea." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 533-538.
- Srinivasan, K., Neelakantan, T.R., Shyamnarayan, P., and Nagarajukumar, C. (1999). "Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 298-301.
- Tajiro, K., Jinno, K., and Kawamura, A. (1997). "Evaluation of Drought Remedial Policies Based by Risk Analysis." *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, Vol. 10, No. 3, pp. 259-269.
- Vogel, R.M., and Bolognese, R.A. (1995). "Storage-reliability-resilience-yield relation for over-year water supply systems." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 645-654.
- Vogel, R.M., Fennessey, N.M., and Bolognese, R.A. (1995). "Storage-Reliability-Resilience-Yield relations for Northeastern United States." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 365-374.
- Yi, J.E., and Song, J.W. (2002). "Evaluation of Water Supply Capacity for Multi-Purpose Dam Using Optimization" *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 22, No. 6-B, pp. 811-818.

논문번호: 12-086	접수: 2012.08.02
수정일자: 2012.09.18/10.09/10.12	심사완료: 2012.10.12