

지속가능성지수를 이용한 다목적댐의 용수공급 이행도 평가

Water Supply Performance Assessment of Multipurpose Dams Using Sustainability Index

이 광 만*

Lee, Gwang-Man

Abstract

The water resources sustainability is becoming an important issue in consideration of hydrologic uncertainty by global warming and climate change. This study is to assess the water supply performance for the major multipurpose dams using sustainability index. Parameters, mostly utilized in water resources system assessment, are selected in respect of applicability and flexibility, and those parameters are used as a variable of the composite index. In practice, the composite index including reliability, resiliency, vulnerability and maximum deficit are applied to 15 multipurpose dams and 4 major basins. And to conclude, Daechungdam in the Geum river basin and Imhadam, Hapchondam and Namgangdam in the Nakdong river basin show low sustainability comparing with other dams. The Nakdong river basin needs to develop alternatives to improve water supply stability because it indicates the most poor sustainability level.

Keywords : sustainability, reliability, resiliency, vulnerability, maximum deficit

요 지

지구온난화와 기후변화에 의한 수문사상의 불확실성이 커지고 있는 점을 고려하여 수자원의 지속가능성은 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구는 우리나라 주요 다목적댐을 대상으로 지속가능성지수를 이용하여 용수공급 이행도를 평가하였다. 수자원시스템 용수공급 평가에 많이 활용되고 있는 지표들을 대상으로 적용성과 유연성을 고려하여 선정하고, 선정된 매개변수로 구성된 복합지수를 이용하여 통합적으로 평가하는 방식이다. 실질적으로 신뢰도, 회복도, 취약도 및 최대물부족도 등을 기초 매개변수로 댐의 용수공급 지속가능성지수를 구성하고 15개 다목적댐을 대상으로 개별 댐과 유역별로 평가하였다. 평가결과, 금강유역의 대청댐과 낙동강 유역의 임하, 합천 및 남강댐이 취약한 것으로 나타났으며, 유역은 낙동강 유역이 가장 취약하여 용수공급 안전도 향상을 위한 대응방안이 필요한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 지속가능성, 신뢰도, 회복도, 취약도, 최대물부족도

1. 서 론

인구증가와 산업화 그리고 생태환경 등 물 수요의 증가는 이상가뭄시 발생할 수 있는 경제적 피해를 확대할 수

있다. 우리나라의 경우 저수지를 포함한 하천수의 이용률이 비교적 높아 정상적 상태(수문학적으로 가뭄이 아닌 기간)에서도 물 공급의 안전성에 대한 주의가 필요하다. 특히 정상적 상태보다 낮은 유량조건(수문학적으로 가뭄

* Kwater, Kwater연구원 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr, Tel: 82-42-870-7420)
Korea Institute of Water & Environment, Kwater, Jonmindong, Yoseungu, Daejeon 305-730, Korea

상태)에서는 지역적으로 용수공급 취약성이 나타날 수 있다. 현재 다목적댐 등 저류시설을 이용하여 하천수 부족분을 충족시키는 시스템이 고도화 되고 있으나 그 한계를 초과할 경우 특별한 대응수단이 없는 것이 문제점으로 지적되고 있다. 이런 이유로 용수공급의 안정성이 떨어지고 물 이용자간 경쟁과 대립이 심화될 수 있어 사전적 조치가 요구된다.

또한 지구온난화에 따른 기후변화 등으로 수자원전문가 사이에서 수자원 관리의 위기에 대한 생각이 광범위하게 제기되고 있다. 실제 많은 지역에서 수자원이 열악하게 관리되고 있는 것도 사실이며, 지역적으로 인구증가 및 산업화에 의해 적절한 물 이용이 제약되는 경우도 있다. 이런 상황은 어제 오늘날의 문제가 아니고 전혀 새로운 문제도 아니다. 이런 문제를 풀기 위한 노력이 지속되고 있으나 지난 수십년간의 성과를 돌아보면 기대했던 것만큼 성공적이지 못했다. 물 부족문제는 일부지역에서는 더욱 심화되고 있으며, 경제활동과 결부되어 더욱 확대되고 있다.

오늘날 물 문제와 관련하여 이상가뭄 등에 대한 적응능력이나 지속가능성 향상에 대한 논의가 각 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 특히 용수공급의 안정성에 대한 관심은 가장 중요한 이슈가 되고 있다. 따라서 우리나라와 같이 수자원 부족량에 비해 수요가 차지하는 비율이 상대적으로 큰 경우 용수공급의 지속가능성에 대한 평가는 중요한 의미를 갖는다. 물 문제의 형평성과 지속가능한 개발을 위해 수자원의 안정성 수준을 주의 깊게 살펴볼 필요가 있으며, 정책적 연결을 통해 물 부족에 의한 장애를 사전에 예방하는 조치를 취해야 한다.

수자원의 지속가능성이나 취약성을 판단하는 기준은 딱히 정해진 것은 없으나 용수수요, 환경, 비용 및 사회적 선호 등을 고려하여 평가할 수 있다. 이때 지표의 선택기준은 수자원 환경과 사회적 기대조건 및 영향인자 등을 중심으로 구성될 수 있다. 지속가능성 지수는 물 이용 관점에서 수자원시스템의 용수공급 취약성을 저감시킬 수 있는 적응능력을 나타낸다고 할 수 있으며 수자원 계획의 대안이나 기존시스템을 평가하는데 이용되고 있다. 현재 수자원의 안정성 정도를 평가하는 방법은 확률적 지표라 할 수 있는 신뢰도, 회복도 및 취약도 등이 많이 이용되고 있다(McMahon et al., 2006). 이들 지표는 주로 개별적으로 적용되는데 수자원의 지속가능성에 대한 전반적인 판단이 어렵다. 결국 수자원 시스템의 용수공급 평가지표들을 종합하여 용수공급의 안전성 정도를 판단하는 정보가 필요하다(Loucks and Gladwell, 1999).

현재까지 수자원시스템의 이상가뭄 등에 대한 적응능력을 평가하기 위한 지속가능성지수(sustainability index)가 많은 연구를 통하여 제시되어 왔다. 대표적으로 Water Poverty Index (Sullivan, 2002), Canadian Water Sustainability Index (Policy Research Initiative, 2007), Watershed Sustainability Index (Chaves and Alipaz, 2007) 그리고 West Java Water Sustainability Index (Juwana et al., 2010) 등이 있으나 다양한 지표로 이루어진 이들 지수는 개별 지표의 정의와 적용이 복잡하여 널리 이용되고 있지는 않다. 이중 Loucks (1997)가 제시한 지속가능성지수는 Zongxue et al. (1996)의 가뭄위험도지수(drought risk index)와 같이 신뢰도, 회복도 및 취약도를 매개변수로 개발되어 적용이 용이하다는 장점이 있다.

이와 같이 기후변화 및 이상가뭄 등에 의한 용수공급 취약성 증대로 인해 장래 수자원시스템의 지속가능성을 평가하는 방법에 대한 논의가 매우 활발하다. 우리나라의 경우 과거 댐 개발시 적용된 기준이나 평가방법이 상이하여 댐간, 유역간 용수공급 불균형 및 지역적 취약성이 존재하고 있다. 결국 오늘날 수자원 이용관리 정책은 이런 역효과를 최소화 할 수 있는 대안을 찾는 것으로 수자원 시스템의 이행도를 평가하여 취약성을 분석하고 대책을 마련해야 한다. 본 연구에서는 지속가능성지수에 이용되는 확률개념의 이행도 평가(매개)변수를 소개하고 복합지수를 구성하여 15개 다목적 저수지시스템을 대상으로 개별 댐과 유역단위의 용수공급 지속가능성을 비교분석하였다.

2. 수자원 지속가능성 지수

2.1 개별지표

수자원 시스템의 이행도 관련 용수공급능력 평가는 매우 중요한 과제이다. 용수공급 신뢰성 평가측면에서 목표공급량의 이행도 수준을 달성하는데 필요한 저류량 규모 추정이나 주어진 규모를 이용하여 공급할 수 있는 양을 평가하는 것이다. 그러나 수자원시스템에 대한 현재의 추세가 댐 건설에서 저수지시스템 관리로 옮겨가고 있기 때문에 여러 가지 불확실한 조건에서 계획된 기존 시스템의 용수공급 능력과 관련된 이행도 평가가 강조되고 있다. 이런 문제는 2000년 이후 하천생태계 및 환경문제가 공론화되고 지속가능한 개발과 지역개발 개념의 도입으로 더욱 중요해지고 있다.

저수지시스템 계획의 중요한 관점은 이들 시스템을 운영하는 동안 예상되는 광범위한 조건에서 장래 이행도를

평가할 수 있는나이다. 지난 수 십년 동안 저수지 시스템의 이행도를 평가하기 위해 여러 가지 기준이 제시되어 왔지만 잠재적 운영조건에 대한 비교해석 방법을 충분히 제시하지는 못했다. 특히 기존 댐에 대한 이행도 평가는 평가지표 및 평가방법에 대한 명확한 기준이 정립되지 않았다.

지금까지 많이 이용되고 있는 저수지시스템의 이행도 평가지표는 시간기준 신뢰도(time-based reliability; monthly, annual), 양적신뢰도(volumetric reliability), 정상상태 신뢰도(steady state reliability), 회복도(resiliency) 및 취약도(vulnerability) 등이다. 이 지표들은 확률개념으로 평가할 수 있는데 차별화된 시간 t 동안에 i 시스템(혹은 대안)의 물 부족량 D_t^i 는 수요량($X_{Target,t}^i$)와 공급량($X_{Supplied,t}^i$)의 관계를 따져 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_t^i = \begin{cases} X_{Target,t}^i - X_{Supplied,t}^i & \text{if } X_{Target,t}^i > X_{Supplied,t}^i \\ 0 & \text{if } X_{Target,t}^i = X_{Supplied,t}^i \end{cases} \quad (1)$$

여기서, 특정기간 T (월 혹은 년)에 대하여 물 부족사상의 수를 M 이라 하고 j 번째 사상의 물 부족 발생지속기간을 $d(j)$ 라 하면 용수공급의 만족 정도를 통계적으로 나타내는 신뢰도는 이 기간 동안 수요량이 만족된 기간을 확률 혹은 백분율(percentile)로 나타내면 다음과 같다(Hashimoto et al., 1982).

$$Rel^i = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (2)$$

수자원시스템 이행도 평가에 많이 이용되는 지표 중 하나인 회복도는 한번 시스템이 불만족 상태로 들어온 후 얼마나 빨리 만족상태로 되돌아가는가를 평가하는 것으로 Hashimoto et al. (1982)은 다음과 같이 조건확률로 정의하였다.

$$Res = P\{S(t+1) \in NF | S(t) \in F\} \quad (3)$$

여기서, $S(t)$ 는 고려하는 시스템의 상태변수이며, 전체 용수부족 발생사상을 대상으로 불만족 상태에서 보내는 시간의 평균값의 역수로 구할 수 있다.

$$Res^i = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4)$$

또 하나의 대표적 지표인 취약도는 실패사상의 심각성 정도를 측정하는데 이용되며, Hashimoto et al. (1982)의 정의에 따르면 다음과 같다.

$$Vul = \sum_{j \in F} e(j)h(j) \quad (5)$$

여기서, $h(j)$ 는 S 가 차별화된 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)과 Jinno et al. (1995)은 j 번째 용수부족사상의 기간 중에 발생한 전체 물 부족상태, 즉 용수공급 부족량에 근거한 취약도 평가방법을 제시하였다. 보다 간단한 방법은 각 사상의 발생확률이 같다고 가정하는 것으로 ($e(1) = \dots = e(M) = 1/M$), 용수부족사상 전체의 부족량을 평균값으로 취약도를 추정하는 것이다. 이때 부족량을 계획공급량이나 목표공급량으로 나누면 양적신뢰도의 의미를 갖는 무차원취약도를 얻을 수 있다.

$$Vul^i = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \right\} / Water\ Demand^i \quad (6)$$

취약도 지표 중 저수지 시스템의 용수공급 취약성을 평가하는데 많이 이용되고 있는 방법으로는 Moy et al. (1986)이 제시한 최대물부족도는 다음과 같다.

$$Max\ def^i = \frac{\max(D_{Annual}^i)}{Water\ demand^i} \quad (7)$$

한편, 수문자료를 대상으로 회복도를 평가하는 방법은 Vogel and Bolognese (1995)가 선호하고 있는 표준화순 유입량, m 이 있다.

$$m = \frac{1-\alpha}{Cv} \quad (8)$$

여기서, $\alpha = D/\mu$ 이고 연목표수요량(저수지용량을 연 유입량으로 나눈 비), μ 는 연평균유입량, 그리고 Cv 는 연유량자료의 분산계수이다. Vogel and Bolognese (1995)는 m 은 용수공급 실패 후 저수지 용량회복 확률과 관계된다고 주장하였다. 이 지표는 시스템 회복도라 할 수 있는데 m 은 저류량의 직접함수라 할 수 없으며, 저수지 특성에 민감하지 못해 회복도 지표로 적용하는 것은 무리라는 의견이 있다.

수자원시스템의 용수공급 안정성 정도를 통계적 방법으로 평가하는 또 다른 지표는 용수공급 표준편차이다. 용수공급의 목표치에 대한 공급의 변동성 정도를 알 수 있는 이 지표는 표준편차를 연간 수요량으로 나누어 무차원 표준편차(Cai et al., 2002)로 나타낼 수 있는데 무차원

취약도와 같은 의미로 해석할 수 있다.

$$\sigma^i = \frac{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^{t=n} (X_{Supplied,t}^i - \bar{X}_{Supplied}^i)^2 \right] / (n-1)}}{Water\ demand^i} \quad (9)$$

이 외에도 회복도 지표로 용수부족 발생사상 중 부족기간이 가장 긴 기간(maximum deficit period) (Moy et al., 1986)이 있으며, 취약도 지표를 추정하는 방법으로는 모든 연속적인 용수부족 기간에 대해 가장 큰 부족량의 평균(Hashimoto et al., 1982; McMahon et al., 2006)과 어떤 용수부족 기준량을 초과하는 확률(Mendoza et al., 1997) 등이 주로 쓰인다. 또한 실질적 물 부족피해를 이용한 물 부족지수(shortage index) (HEC, 1975; JWRDPC, 1977) 등을 개별지표로 적용할 수 있다(Lee and Yi, 2012).

2.2 지속가능성지수

저수지 시스템의 수자원 지속가능성을 평가하기 위한 방법으로 여러 종류의 지수가 개발되었다. 본 연구에서는 앞에서 제시한 개별 지표의 활용을 고려하여 Loucks (1997)이 제시한 SI (Sustainability Index)를 적용하였다. SI는 기본적으로 확률개념의 양적인 평가가 가능한 신뢰도, 회복도 및 취약도를 묶은 복합지수 형태이다. 이 지수는 신뢰도의 역을 위험도로 해석할 수 있듯이 지속가능성의 역을 위험도로 볼 수 있어 Zongxue et al. (1998)이 제시한 위험도 평가 방법과는 반대 개념으로 다음과 같다.

$$SI = Rel \times Res \times (1 - Vul); \quad 0 < SI \leq 1 \quad (10)$$

여기서, SI 는 Eq. (10)은 Eqs. (2) and (4) 그리고 Eq. (6)를 통합한 것으로 각 지표의 확률값을 곱하고 있다. 취약도의 경우 값이 클수록 취약성이 크므로 다른 지표와의 연관성을 고려하여 $(1 - Vul)$ 을 취하고 있다. 이 식은 기본적으로 안정성을 평가하는 방법이다. 즉, 적용된 개별지표는 모두 확률(0~1 사이 값)로 계산되어 지속가능성 지수 역시 0~1 사이의 값을 갖고 1에 가까울수록 지속가능성이 크다는 것을 의미하며 시설이나 대안이 여러 개인 경우 비교평가를 위해 다음과 같이 계산한다.

$$SI^i = Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i) \quad (11)$$

SI^i 를 개별지표의 균등성을 고려하려면, 기하평균 $\left[\prod_{m=1}^N C_m^i \right]^{1/N}$ 으로 나타낼 수 있는데 $C_1^i = Rel^i$, $C_2^i = Res^i$ 및 $C_3^i = 1 - Vul^i$ 로 하여 Eq. (11)을 대체하면 다음과 같다.

$$SI^i = [Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i)]^{1/3} \quad (12)$$

Eq. (12)을 확장하여 개별단위의 수자원시스템이 아닌 그룹 혹은 유역단위의 수자원시스템의 지속가능성 지수를 구할 수 있는데 개별 지속가능성 지수(SI^i)에 각 시스템의 중요도 정도를 가중치(W^i)로 적용하여 구할 수 있다(Sandoval-Solis et al., 2011).

$$SG^k = \sum_{i=1}^{i=k} W^i \times SI^i \quad (13)$$

여기서, 각 수자원시스템의 중요도 정도를 용수수요량의 크기로 할 경우 k 그룹에 속하는 시스템의 전체 수요량 ($Water\ demand^k = \sum_{i=1}^{i=k} Water\ demand^i$)을 기준으로 각 시스템의 수요량 비를 적용하는 방법은 다음과 같다(Sandoval-Solis et al., 2011).

$$SG^k = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{Water\ demand^i}{Water\ demand^k} \times SI^i \quad (14)$$

서론에서도 지적하고 있듯이 수자원 지속가능성 평가는 한 두 개의 지표로 판단하기에는 다양한 영향인자들이 존재한다. 실제 문제에서는 앞에서 제시된 개별지표 외에도 하천환경이나 수질, 사회·경제적 인자 등 고려해야 할 범위가 넓어진다. 그렇다고 모든 영향인자를 고려하기 위해서 매개변수에 해당하는 모든 지표의 값을 추정할 수 없는 것이 현실이다. 다만 적용 가능한 매개변수를 정의할 수 있고, 각 지표간의 스케일을 통일시킬 수 있으며, 수자원 이용관리에 중요한 요소라면 Eq. (10)를 확대하여 적용할 수 있다. 즉 Eq. (15)와 같이 임의의 매개변수(Ran^i , 다른 지표와 독립적인 개별 평가가 가능한 지표)를 추가하는 복합지수 형식이 가능하다.

$$SI^i = Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i) \times \dots \times Ran^i \quad (15)$$

3. 수자원시스템 지속가능성 평가

3.1 평가지표의 선정

실제 어떤 저수지시스템을 계획할 때 적용한 유량자료는 수문시계열 측면에서 시간적으로 제한된 자료의 집합에 불과하다. 특히 20~30년의 과거유량자료계열을 이용하여 용수공급계획을 수립한 경우 이 시스템의 용수공급 신뢰도는 정상상태신뢰도(steady state reliability)로 보기 어렵고 준정상상태신뢰도(pseudo-steady state reliability)라 할 수 있

다. 지금과 같이 기후변화 등 수문사상의 불확실성이 증가하는 추세에서는 기존 저수지시스템의 지속가능성 정도를 평가하여 용수공급의 안정성을 판단해 보는 것이 중요하다.

본 연구에서는 우리나라 다목적댐 중 주요 수계의 대표 저수지를 선정하여 용수공급의 지속가능성 수준을 상대적 평가를 통해 판단하고자 위에서 제시된 지표들의 특성을 고려하여 Table 1과 같이 선정하였다. 우선 신뢰도 지표는 우리나라 댐 계획시 대부분 적용해 오고 있으며, 기존댐에 대한 평가시 일관성 유지를 위해 선정하였다. 회복도 지표는 신뢰도 지표와 함께 용수공급의 안정성을 평가할 수 있는 대표 지표이다. 취약도 지표는 신뢰도나 회복도와 대응관계에 있는 지표로 물 부족에 의한 취약성이나 물 부족지표를 대표할 수 있는 지표로 판단하였다. 최대물부족도는 이상가뭄 등 물 부족의 극한값을 나타낼 수 있다고 판단하여 선정하였다.

Table 1과 같이 선정된 지표를 이용하여 Eq. (15)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$SI^i = Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i) \times (1 - Max def^i) \quad (16)$$

3.2 저수지시스템 모의모형

본 연구에서는 각 댐을 개별시스템으로 하고 단일운영 조건으로 용수공급 평가기준이라 할 수 있는 계획공급량의 충족여부를 판단하기 위해 모의모형을 개발하여 적용하였다. 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. (17)과 같이 정의하였다.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - D_t - E_t(S_t, S_{t+1}) - R_t \quad (17)$$

for $t = 1, \dots, N$

여기서, S_t 는 저류량, I_t 는 유입량, D_t 는 댐에서의 직접 취

수량, 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 관측한 저수지 유입량 자료가 이들 상태를 모두 반영하였다고 가정하고 누수량은 극히 미미하다고 판단하여 변수로 고려하지 않았다.

용수공급의 이행도 수준을 평가하기 위해 저수지 모의 모형에서는 운영률이나 특별한 조건이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 개별 댐의 현재 운영조건을 반영하고 다음과 같이 유효저수용량의 적용 범위와 방류량의 한계를 대상으로 제약조건으로 고려하였다.

$$S_t^{\min} \leq S_t \leq S_t^{\max} \quad (18)$$

$$R_t^{\min} \leq R_t \leq R_t^{\max} \quad (19)$$

$$S_t \geq 0, R_t \geq 0 \quad (20)$$

여기서, S_t^{\min} 과 S_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.

3.3 수자원 지속가능성 평가

우리나라 15개 다목적댐을 대상으로 앞에서 설명하고 있는 저수지시스템 모의 모형을 이용하여 용수공급 지속가능성을 평가하였다. 적용 방법은 댐이 준공되어 정상적인 운영이 시작된 이후부터 2012년 말까지 월단위로 모의 분석하였다. 이때 적용한 수요량은 댐의 계획공급량을 적용하였다. 저수지 운영조건은 정상적인 상태의 운영조건과 하절기 제한수위 조건을 충족토록 하였다.

이때 적용된 각 댐의 유입량 통계치는 Table 2와 같다. 이들 값을 무차원 표준편차로 변환하면 지속가능성지수의 매개변수로 평가가 가능하고 댐간 용수공급 변동성에 대한 상대비교가 가능하다(Table 3의 σ_1).

기존 다목적댐을 대상으로 정상운영 이후 2012년까지 유입량을 적용하여 각 댐의 용수공급 평가지표를 분석하

Table 1. Applicable Parameters and Selection Reasons

Parameter	Selection Reason	Remark
Reliability	which is mostly used in water resources planning in Korea, and to keep consistency with existing dam	Eq. (2)
Resiliency	which is a representative criterion for water supply stability	Eq. (3)
Vulnerability	which is a important criterion presenting water shortage intensity	Eq. (4)
Maximum Deficit	which is a criterion that presents the degree of extreme vulnerability	Eq. (5)

Table 2. Statistics of Inflow Data for Major Multipurpose Dams

Watershed	Dam	Monthly Inflow (m ³ /s)		
		Average	Deviation	Standard Dev.
Han River	Soyanggang	70.44	11,579.14	107.61
	Chungju	172.99	71,025.86	266.51
	Hoengseong	5.82	119.16	10.92
Nakdong River	Andong	32.21	1,930.77	43.94
	Imha	21.87	1,476.02	38.42
	Namgang	68.81	10,350.28	101.74
	Hapchon	21.51	1,067.62	32.67
	Milyang	3.26	35.28	5.94
Geum River	Daechung	85.52	15,324.89	123.79
	Youngdam	25.89	1,621.69	40.27
	Boryung	4.69	55.02	7.42
	Buan	1.65	6.22	2.49
Seomjin River	Seomjingang	17.74	692.63	26.32
	Jangheung	5.20	59.93	7.74
	Juam	21.76	1,374.90	37.08

Table 3. Estimated Individual Index Value for Each Dam

Dam	Planned Water Supply (10 ⁶ m ³)	Data Period (year)	<i>Rel</i>	<i>Res</i>	<i>Vul</i>	σ_1	<i>Max def</i>
Soyanggang	1,476.0	39	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
Chungju	3,380.4	27	0.852	0.571	0.044	0.029	0.151
Hoengseong	119.2	13	0.923	1.000	0.025	0.007	0.025
Andong	927.8	36	0.944	0.200	0.178	0.044	0.248
Imha	589.8	21	0.571	0.220	0.253	0.171	0.568
Namgang	572.8	37	0.784	0.391	0.069	0.036	0.148
Hapchon	599.6	24	0.750	0.128	0.335	0.160	0.513
Milyang	72.8	12	0.917	0.200	0.179	0.010	0.179
Daechung	1,649.4	32	0.875	0.188	0.186	0.081	0.081
Youngdam	649.6	12	0.833	0.500	0.111	0.044	0.129
Boryung	106.6	15	0.933	1.000	0.023	0.006	0.023
Buan	35.1	16	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
Seomjingang	416.6	38	0.947	0.667	0.126	0.041	0.250
Jangheung	127.8	8	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
Juam	270.1	22	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000

σ_1 =estimated standard deviation by monthly inflow (Table 2)

었다. 분석을 위해 앞에서 개별지표로 제시된 변수를 대상으로 분석한 결과는 Table 3과 같다.

결과를 분석해 보면 부안댐, 소양강댐, 장흥댐 및 주암댐은 물 부족이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 신뢰도 측면에서는 용담댐, 대청댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 등이 적은 값을 보였으며, 취약도는 임하댐과 합천댐이 큰 것으로 추정되었다. 회복도 역시 대청댐, 밀양댐, 임하댐, 안동댐과 합천댐이 적은 값을 보였다. 유입량 무차원 표준편차는 임하댐과 합천댐이 크게 추정되었다. 최대물부족도는 임하댐, 안동댐, 합천댐 및 섬진강댐이 큰 것으로 나타났다. 이런 결과는 개별 댐에 대한 개별 평가지표를 유역별로 구분하여 도시한 Fig. 1을 통해서도 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 낙동강 유역에 위치한 댐들의 개별지표가 상대적으로 가장 낮게 나타났으며, 한강유역과 섬진강유역이 상대적으로 좋게 나타났다. 금강유역의 경우는 대청댐이 용수공급 취약성이 큰 것으로 나타났다.

개별 댐에 대한 개별지표의 용수공급 이행도를 평가한

Table 3의 결과를 이용하여 개별 댐에 대한 용수공급 지속가능성 수준을 평가하였다. 평가결과는 Table 4와 같으며, 신뢰도, 회복도 및 취약도 지표로 구성된 지수 SI_3 의 경우, 임하댐, 합천댐, 안동댐 및 대청댐이 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 각 개별지표간의 편차를 상대적으로 비교 평가할 수 있는 기하평균개념의 $SI_3^{1/3}$ 는 대청댐, 밀양댐, 안동댐, 합천댐이 낮게 나타났다. 한편 SI_3 에 포함된 지표에 최대물부족도를 추가하여 평가한 SI_4 의 경우 대청댐, 밀양댐, 안동댐, 임하댐, 남강댐 및 용담댐 등이 낮게 나타났다. $SI_4^{1/4}$ 는 임하댐과 합천댐이 낮게 나타났다.

개별 댐에 대한 이상의 분석결과를 종합적으로 판단해 보면 지속가능성 지수의 값이 절대적인 물 부족상태를 나타내는 것은 아니지만 물 부족 발생기간과 부족량이 다른 댐들에 비하여 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 대청댐, 밀양댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐 및 남강댐의 경우는 물 부족 발생빈도가 높고 부족량도 크게 발생하고 있다. 이런 상태는 기후변화 등에 의한 이상기후에 대한 적응능

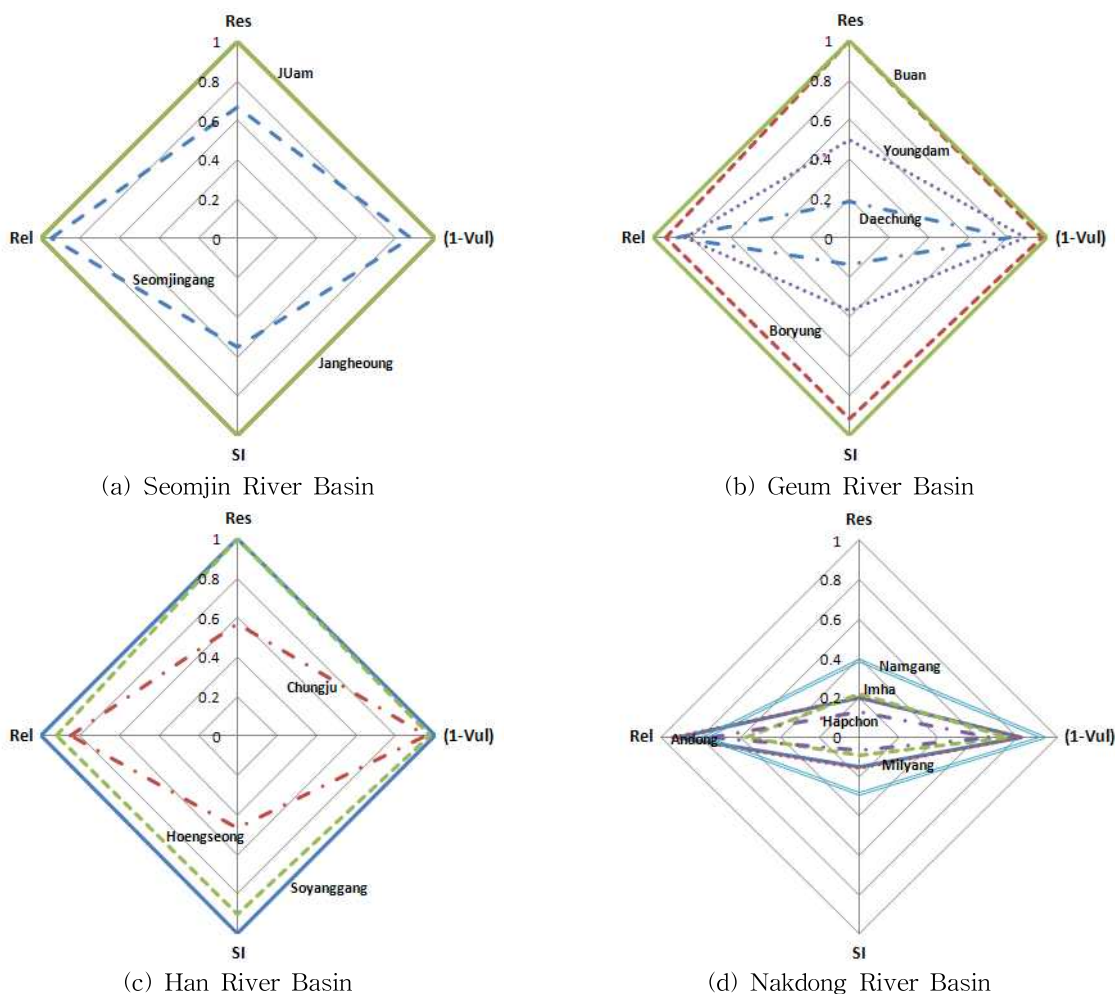


Fig. 1. Diamond Diagram of Individual Parameters according to Basins

력이 떨어진다는 것을 의미하며, 용수공급을 위한 수자원 지속가능성도 낮다고 추론할 수 있다. 결국 이와 같이 지속가능성 지수가 현저히 낮게 평가된 댐들에 대해서는 용수공급의 안전성 향상을 위한 대안이 필요하며, 수자원장기종합계획이나 개별유역 혹은 권역별 수자원 평가에 반드시 고려되어야 할 사항이다.

마지막으로 유역과 권역의 종합적 수자원 이용현황을 판단하기 위하여 권역별 지속가능성 분석을 실시하였다. 이를 위해 4대강 유역단위를 기본으로 하고 이들 유역이 부담하고 있는 권역의 댐들을 포함시켰다. 이때 적용한 각 댐의 계획공급량을 가중치로 적용하였는데 Table 5와 같다.

분석결과는 Table 6과 같으며, 권역별 해당 댐의 수가

Table 4. Water Resources Sustainability Index Value for Assessing Vulnerability of Each Dam

Dam	SI_3	$SI_3^{1/3}$	SI_4	$SI_4^{1/4}$
Soyanggang	1.000	1.000	1.000	1.000
Chungju	0.465	0.775	0.395	0.793
Hoengseong	0.899	0.965	0.877	0.968
Andong	0.155	0.537	0.117	0.584
Imha	0.094	0.454	0.041	0.449
Milyang	0.151	0.533	0.124	0.593
Hapchon	0.064	0.400	0.031	0.420
Namgang	0.285	0.658	0.243	0.702
Daechung	0.134	0.511	0.123	0.592
Youngdam	0.370	0.718	0.323	0.754
Boryung	0.912	0.970	0.891	0.971
Buan	1.000	1.000	1.000	1.000
Seomjingang	0.552	0.820	0.414	0.802
Jangheoung	1.000	1.000	1.000	1.000
Juam	1.000	1.000	1.000	1.000

Table 5. Weighting Value for Each Watershed based on Planned Water Supply

Watershed	Total Planned Water Supply ($10^6 m^3$)	Dam	Water Supply ($10^6 m^3$)	Weight (W)
Han River	4,975.6	Soyanggang	1,476.0	0.297
		Chungju	3,380.4	0.679
		Hoengseong	119.2	0.024
Nakdong River	2,762.8	Andong	927.8	0.336
		Imha	589.8	0.213
		Namgang	572.8	0.207
		Hapchon	599.6	0.217
		Milyang	72.8	0.027
Geum River	2,439.1	Daechung	1,649.4	0.676
		Yongdam	649.6	0.266
		Boryung	105.8	0.044
		Buan	34.7	0.014
Seomjin River	816.4	Seomjingang	416.6	0.510
		Jangheoung	128.0	0.156
		Juam	272.8	0.334

Table 6. Group Sustainability for Each Water Supply Area

Water Supply Area	Dams belonging to the Area	Group Sustainability
Han River	Soyanggang (0.297), Chungju (0.679), Hoengseong (0.024)	0.634
Geum River	Youngdam (0.266), Daechung (0.676), Boryung (0.045), Buan (0.013)	0.243
Seomjin River	Seomjingang (0.511), Juam (0.157), Jangheoung (0.332)	0.771
Nakdong River	Andong (0.336), Imha (0.213), Namgang (0.207), Hapchon (0.217), Milyang (0.027)	0.149

※ () : weighting value

3~5개로 다루기는 하나 용수공급 지속가능성은 한강권역과 섬진강권역이 상대적으로 높은 값을 보여주고 있으며, 금강권역과 낙동강권역이 적은 값을 나타냈다. 특히 낙동강권역은 가장 적은 값을 보이고 있어 극한가뭄이나 기후변화 등에 의한 이상가뭄 발생시 용수공급 적응 능력이 가장 취약한 것으로 평가되었다. 이런 현상은 개별 댐의 지속가능성 평가 결과와 마찬가지로 낙동강 유역의 경우 용수공급 측면에서 취약성이 큰 것으로 추정할 수 있다. 또한 금강유역도 상대적으로 지속가능성이 낮게 나타나 안정적 용수공급을 위한 특별한 대책이 필요한 것으로 판단되었다.

4. 결 론

수자원 시스템의 용수공급능력은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 건설되어 수십 년 이상 운영되어 온 경우 사회·경제적 변화와 기후사상의 변화 등으로 지속가능성에 대한 평가는 중요한 의미를 갖는다. 실제 기존 댐의 이상가뭄에 대한 대응능력의 수준은 예기치 못한 상황에서 수자원 인프라 시설로 사회안전망의 역할을 담당한다. 이런 측면에서 주요 수자원시스템에 대한 용수공급 안정성 평가는 물 안보를 확고히 할 수 있는 시발점이다. 이런 관점에서 지속가능성지수를 이용하여 기존댐의 용수공급 이행도 수준을 평가하고 문제점을 제시하는 연구는 큰 의미가 있다 하겠다.

연구결과를 살펴보면, 우리나라 대표적인 다목적댐을 대상으로 평가한 용수공급 지속가능성은 신뢰도 측면에서는 높은 값을 보이고 있으나 합천댐, 밀양댐, 안동댐 및 임하댐의 경우 물 부족 취약성이 큰 것으로 분석되었다. 이중 임하댐과 합천댐은 모든 지표에서 가장 낮은 값을 보이고 있어 용수공급 지속가능성이 가장 취약한 댐으로 분석되었다. 대청댐 역시 대부분의 지표가 낮게 나타났다.

권역별로는 낙동강권역과 금강권역의 그룹지속가능성지수가 0.149 및 0.243로 나타나 한강권역 0.634와 섬진강권역 0.771에 비해 낮은 값을 보여 용수공급 지속가능성이 취약하여 물 이용관리에 주의가 필요한 지역으로 판단되었다. 우리나라 전체적으로는 지역별 편차가 심하여 비교적 낮은 값을 보이고 있는 지역에 대해서는 국가 수자원 계획 수립 시 더욱 세심한 주의가 필요한 것으로 판단되었다.

References

Cai, X., MacKinney, D.C., and Lasdon, L.S. (2002). "A framework for sustainability analysis in water resources management application to the Syr Darya basin." *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 1085-1098.

Chaves, H.M.L., and Alipaz, S. (2007). "An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index." *Water Resources Management*, Vol. 21, No. 5, pp. 883-895.

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.

HEC. (Hydrologic Engineering Center). (1975). *Hydrologic engineering methods for water resources development: Vol. 8, Reservoir Yield*. US Army Corps of Engineers, Davis, Calif.

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.

- JWRDPC. (Japan Water Resources Development Public Corporation). (1977). *Drought Assessment*. Mizu To Tomoni, No. 159, Tokyo, Japan.
- Juwana, I., Perera, B., and Muttill, N. (2010). "A water sustainability index for West Java-Part 2: refining the conceptual framework using Delphi technique." *Water science and technology. Journal of the International Association on Water Pollution Research*, Vol. 62, No. 7, pp. 1641-1652.
- Lee, G.M., and Yi, J. (2012). "Analysis of Emergency Water Supply Effects of Multipurpose Dams using Water Shortage Index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 11, pp. 1143-1156.
- Loucks, D.P. (1997). "Quantifying trends in system sustainability." *Hydrological Science Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 513-530.
- Loucks, D.P., Stakhiv, E.Z., and Martin, L.R. (2000). "Sustainable water resources management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, No. 2, pp. 43-47.
- Loucks, D.P., and van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris.
- McMahon, T.A., Adedoye, A.J., and Zhou, S.L. (2006). "Understanding performance measures of reservoirs." *Journal of Hydrology*, Vol. 324, pp. 359-382.
- Mendoza, V.M., Villanuave, E.E., and Adem, J. (1997). "Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change." *Climate Research*, Vol. 9, pp. 139-145.
- 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.
- Policy Research Initiative. (2007). *Canadian Water Sustainability Index* Retrieved 5 July 2007, from http://policyresearch.gc.ca/doclib/SD_PR_CWSI_web_e.pdf.
- Sandobal-Solis, S., MaKinney, D.C., and Loucks, D.P. (2011). "Sustainability Index for Water Resources Planning and Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 137, No. 5, pp. 381-390.
- Sullivan, C. (2002). "Calculating a Water Poverty Index." *World Development*, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210.
- 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.
- Zongxue, X., Jinno, K., Kawanura, A., Takesaki, S., and Ito, K. (1998). "Performance risk analysis for Fukuoka watersupply system." *Water Resources Management*, Vol. 12, pp. 13-30.

논문번호: 14-024	접수: 2014.03.04
수정일자: 2014.03.20/03.26	심사완료: 2014.03.26