

수자원시스템의 용수공급 평가기준에 대하여

On the Water Yield Assessment Index in Water Resources System



이 광 만 |

Kwater연구원 수석연구원
lkm@kwater.or.kr

1. 서론

수자원 시스템의 용수공급 정도를 결정하는 기준을 통상 이수안전도 혹은 안전채수량(safety degree for water shortage or safe yield)이라 칭한다. 이수안전도는 용수수요를 충족시킬 수 있는 공급의 안정성 정도를 나타내는 지표라 할 수 있다. 실제 수자원 계획에서 용수공급의 안정성 정도를 어떤 기준이나 지표를 이용하여 결정하느냐가 관건인데 표준화되어 있는 방법은 없다. 다만 용수공급의 안정성을 평가하기 위해 공급측면에서 기준 갈수량, 공급신뢰도, 저수용량 등을 이용하며, 수요측면에서는 용수공급 보장일수, 최소 부족량, 갈수조정기간 및 용수부족에 따른 피해정도 등으로 나타낼 수 있다.

용수공급 안전도의 적용범위는 주로 수자원 시스템의 신규개발에 따른 계획이나 기존 댐을 취수원으로 하는 상수도 개발 계획, 기존 댐 취수에 대한 안전도 및 상수도 시설의 용수공급 안전도, 신규 댐

을 취수원으로 하는 상수도 개발 계획, 신규 댐 안전도와 이에 따른 상수도 시설의 용수공급 안전도 및 이상가뭄에 대비한 갈수대책용량의 확보 등 사업여건이나 조건에 따라 여러 가지 형태로 평가할 수 있다. 즉 용수공급의 안전도 평가는 해당 유역에서의 어떤 특정한 수자원 시스템이 특정 하천유량 조건하에서 연도별 목표 용수수요를 만족시키는 용수공급 신뢰도라 할 수 있다.

일반적으로 수자원 시스템의 이수안전도 기준을 결정하기 위해서는 많은 요소들을 검토하여야 한다. 어떤 요소는 여러 가지 효과를 반영하기 위하여 폭넓은 기준치를 필요로 하는 반면, 어떤 요소는 제한적으로 적용되기도 한다. 수자원 시설물이 설치된 경우 운영기능, 특히 조절기능이 있는 경우 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 어떤 경우는 실제 유입하는 유량에 의해 지배되는 경우가 있어 기상·수문조건 발생빈도가 절대적인 평가기준이 되기도 한다. 따라서 용수공급의 안전성 평가기준은 용수공급 서비스 분야별로 용수공급 부족이 미칠 수 있는 영향이나 피해정도를 고려하여 달리 적용될 수 있다.

우선 용수공급 안전도에 영향을 미치는 요소를 평가인자로 고려할 수 있다. 지표(index) 혹은 기준(criterion)은 평가대상 계획이 주어진 목표를 향해 개선되는 상태를 보여주거나 문제가 발생하면 반대의 변화정도를 나타낼 수 있어야 한다. 지표는 결과를 인증하는 판단기준이 되며(받아들일지, 거부할

지), 결과에 영향을 미치는 조건이나 특징을 나타낸다. 이들 지표는 안전도의 구조를 판단할 수 있는 정보를 제공하며, 산출지표(계획공급량 혹은 부족량 등)의 요소가 된다. 또한 배분된 물 공급과 같은 물리적 현상은 비용과 같은 경제적 지표와 같이 검토할 필요가 있다. 이는 안전도 수준에 따라 비용이 과대하게 발생할 수 있으며 적은 것을 얻기 위하여 큰 것을 소모하는 사례가 될 수 있다. 적정수준의 안전도를 정하기 위한 정책적 판단을 위하여 발생하는 비용에 대한 평가는 매우 중요한 항목이다. 따라서 안전도 수준에 따른 비용분석을 통해 최적의 대안이 무엇인지에 대한 해석이 필요하다. 실제 지표간에는 순응관계 혹은 대응관계에 있는 것들이 있어 이 지표들을 종합적으로 평가할 경우 절충(compromising)이 필요하다.

또 하나 중요한 문제는 적용된 지표를 실제 산출 지표로 확인해 보는 것으로, 계획 당시 예측된 산출 지표는 실제 운영과정에서 차이를 보일 수 있다. 실제 운영과정에서 어떤 차이를 보였는지를 분석하고, 필요하면 안전도 기준을 재조정할 필요가 있다. 그러나 유역단위의 대규모 수자원시스템 평가에서는 안전도 기준의 변경은 쉽지 않으며 사회적 공감대를 필요로 한다. 이는 물 공급의 실질적 장애가 지속해서 발생하는 경우가 아니라면 가뭄 등에 의해 일시적으로 발생하는 물 공급부족 사태는 가뭄 종료와 동시에 회복될 수 있으므로 상황이 근본적으로 변하지 않는 한 한번 적용된 안전도 기준은 계속해서 유효하게 작용한다.

현대 사회에서 물 공급의 안전도는 물 부족에 의한 사회·경제적 피해를 최소화하고 수자원 시스템의 계획과 운영의 기준이 된다. 용수공급 안전도는 수자원 시스템이 실패하지 않을 확률만을 따지는 것이 아니라 수요자가 용수부족으로 인해 피해를 입지 않도록 하는데 의미가 있다. 실제 설계를 초과하는 수문사상의 불확실성 및 수리구조물의 불안정 등으로 물 공급의 위험도는 항시 발생할 수 있다. 또한 인구증가나 새로운 산업입지에 의한 물 수요

증가는 기존 시설물의 용량을 초과하여 물 공급의 안전도를 악화시킬 수 있어 추가공급에 따른 위험도를 분석하여야 한다.

따라서 수자원 시스템의 이수안전도 평가지표는 용수수요 조건과 댐 사업의 특성을 고려하여 신중하게 정해져야 한다. 이에 대해 본 논문에서는 수자원 시스템의 설계용수공급량을 정하는 기준, 즉 이수안전도를 결정하는 지표들에 대하여 알아보았다. 어느 지표를 선택하느냐에 따라 용수공급의 안정성은 달라질 수 있으며, 사업비의 증가 혹은 사회·환경적 영향을 받을 수 있다. 용수공급의 안전도 기준은 양과 질, 비용과 편익, 물 이용 분야별 공평성과 지역 혹은 유역별 평등성 등에 영향을 미친다. 합리적인 용수공급 안전도는 이와 같은 평가지표를 통해 사회적 수용이 가능한 용수공급 계획을 마련하는 것이다.

2. 이수안전도 평가지표

수자원 시스템 평가자는 이행도 평가를 실패기간의 통계적 특성을 활용하는 것이 일반적이다. 보통 그림 1과 같이 용수부족 발생빈도, 용수부족 지속기간 및 용수부족량의 크기 등 크게 3가지 요소를 대상으로 용수공급의 안전성 정도를 평가하게 된다(Kjeldsen and Rosbjerg, 2005). 즉, 수자원 시스템을 대상으로 수요를 만족시키는 신뢰도, 용수부

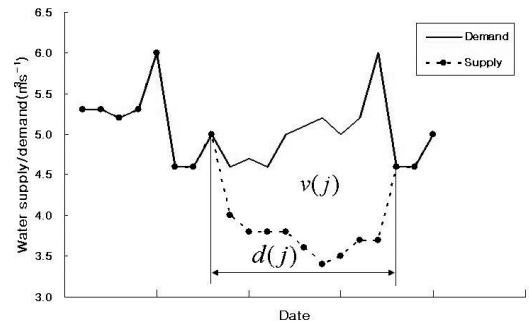


그림 1. 용수공급 부족기간과 부족량

족 발생 후 얼마나 빨리 만족조건으로 회귀하는지에 관한 회복도 그리고 용수부족의 양적 크기를 나타내는 취약도 등으로 정의할 수 있다.

지금까지 제시된 이수안전도 평가기준이나 지표는 물 부족이라는 사상을 대상으로 하고 있어 위 그림을 기본개념으로 하고 있다. 그간 문헌을 통하여 제시된 수자원 시스템의 이행도 평가지표에 대하여 조사한 결과는 표 1과 같다. 기준갈수량이나 안전채수량을 기준으로 하는 경우 갈수빈도 개념으로 나타날 수 있으며, 물 부족량을 평가하는 방법의 경우 대부분 표 1의 지표를 선택적으로 이용하고 있다.

표 1에서 (제1군)에 속하는 위험도(risk)와 신뢰도(reliability)는 수자원 시스템의 이행도 평가를 위해 1세기 이상 이용되어온 가장 오래되고 널리 사용되고 있는 기준이다. 이 지표는 일정 기간을 대상으로 용수공급의 부족 혹은 만족여부만을 발생확률로 평가하는 방법이다. 따라서 적용이 간단하고 편리하다는 장점이 있으나 용수부족사상에 대한 세부 내용은 알 수 없으며, 특히 피해정도에 대한 평가는 불가능하다는 한계가 있다.

(제2군)에 속하는 회복도(Resilience)는 한번 시스템이 불만족 상태로 들어온 후 얼마나 빨리 만족

표 1. 대표적 용수공급 평가 지표

분 류	표현방법	지 표	정 의	출 처
(제1군) 용수부족 발생빈도 지표	발생빈도	위험도	$Rel_1 = P\{S \in NF\}$ 여기서, S는 고려하는 시스템의 상태변수이며 NF는 불만족 상태	
		신뢰도	$Rel_2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T}$ 여기서, M은 실패사상의 수이며, T는 시간단위의 전체 수	Hashimoto et al. (1982)
(제2군) 용수부족 지속기간 지표	지속기간	회복도	$Res_1 = P\{S(t+1) \in NF S(t) \in F\}$ 여기서, S(t)는 고려하는 시스템의 상태변수	
		평균 지속기간	$Res_2 = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1}$	Hashimoto et al. (1982)
		최대 지속기간	$Res_3 = \{ \max_j [d(j)] \}^{-1}$	Moy et al.(1986)
(제3군) 용수공급 부족량의 크기	부족크기	총 부족량	$Vul_1 = \sum_{j \in F} e(j) \cdot h(j)$ 여기서, h(j)는 불만족 상태로 있는 j 번째의 부족량이고 e(j)는 불만족 상태로 들어와 있는 상태에서 h(j)의 확률	Hashimoto et al. (1982)
		평균 부족량	$Vul_2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j)$ 여기서, $e(1) = \dots = e(M) = 1/M$	Moy et al.(1986)
		최대 부족량	$Vul_3 = \max_j \{v(j)\}$	
(제4군) 용수부족 지표 (경제적 피해)	부족량+ 지속기간	부족지수	$SI = \frac{100}{N} \sum \left(\frac{\text{Annual Water Deficit}}{\text{Designed Annual Water Supply}} \right)^2$ 여기서, N은 표본년의 수, \sum 는 모든 용수부족년에 대한 지표값의 합	미공병단(1975)
		부족량 + 지속기간	$DPD = \sum [\text{Daily Deficit Rate} \times \text{Number of Days}]$ 여기서, \sum 는 검토하는 기간 동안에 모든 용수부족사상에 대한 지표값의 합	일본수자원개발공단 (1977)
		빈도 + 부족량 + 지속기간	$GSI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{DPDa_i}{100 \times DY_i} \right)^k$ 여기서, N은 적용기간의 년수, k는 상수, DY _i 는 i 번째해의 날짜수(365 혹은 366), DPDA _i 는 i 번째 년의 DPDs의 합	Hsu(1993)

상태로 되돌아가는가를 평가하는 것이다. Hashimoto et al.(1982)가 제안한 이후 많은 연구자에 의해 유사한 형태의 지표들이 제시되었다(Fiering, 1982; Jinno et al., 1995; Kundzewicz and Laski, 1995; Vogel and Bolognese, 1995; Kundzewicz and Kindler, 1995; Srinivasan et al., 1999; Vogel et al., 1999). 이중 Moy et al. (1986)는 용수공급의 안정성 측면에서 평균개념의 회복도 평가보다는 전체 용수부족 발생사상중 불만족상태의 최대 연속기간을 회복도로 평가하는 방법을 제시하였다.

(제3군)으로 분류한 취약도(vulnerability)도 역시 Hashimoto et al.(1982)가 정의한 것이 많이 적용되고 있는데 실패사상의 용수부족의 크기 정도를 측정하는데 이용된다. Kundzewicz과 Kindler (1995)와 Moy et al.(1986)는 전체 용수부족 사상중 최대치 사상은 각각의 사상별 최대값 보다 효과적이라고 주장했다. 이런 주장은 장래 수문의 불확실성 및 수요의 변동성을 고려하여 용수공급의 안정성을 최대로 확보하자는 의도이다.

(제4군)은 개별항목에 대한 평가보다는 용수부족 발생빈도, 지속기간과 부족량을 동시에 평가할 수 있는 지표들이다. 이 지표는 신뢰도와 같이 용수부족 발생빈도는 크기와 기간을 고려하지 않기 때문에 용수부족 발생빈도만을 적용하는 것보다 장점을 가지고 있다. 따라서 용수부족에 따른 피해정도를 알 수 있으면 용수부족지수는 피해와 관련된 개략적인 추정치를 얻는데 이용될 수 있다. 이들 지표는 용수부족 발생기간 동안 부족률을 곱해 전체 평가기간 중에 발생한 용수부족사상을 모두 합하여 평가하는 방법이다. 이 중에서 일본수자원개발공단이 제시하고 있는 평가기준은 용수부족 발생기간과 부족량의 크기에 따른 피해규모를 가름하는 기준값을 제시하고 있다. 이 기준값에 대한 조사를 통해 임계 DPD (Deficit Percent Day)를 공공용수공급에 대해서는 1,500%day, 공업용수에 대해서는 2,500%day를 제시하였다. 여기서 DPD의 임계치는 용수부족으로 인

해 발생할 수 있는 영향을 감내할 수 있는 수준으로 그 이상 지속되는 경우 피해가 급속히 확대된다. 여기서 1,500%day의 DPD 값이 의미하는 것은 30%의 용수공급부족률 상태가 50일 지속되는 경우와 50%의 용수부족사태가 30일 지속되는 것과 같다. SI(Shortage Index)와 GSI(Generalized Shortage Index)도 같은 개념이다.

그 밖에도 Shamir와 Howard(1981)는 신뢰도를 전체 양과 공급률 부족으로 정의하였고, Kindler와 Tyszewski(1989)은 특정 년에서 수요가 만족된 상대빈도(relative frequency)로 정의된 년 신뢰도(annual reliability)를 제시하였다. Plate(1989)는 용수공급 실패확률 P_f 는 일반적으로 시간단위와 관련이 있으며, 연과 같은 단위시간(Δt)내에서 실패할 확률로 나타낼 수 있고 시간단계 함수로 실패율 $\beta(t)$ 를 적분하여 구하는 방법을 제시하였다.

田尻 要 등(1996)은 취수장과 정수장의 확장, 10, 20 및 30년 가뭄빈도 그리고 급수인구 증가에 의한 수요량 증가 시나리오에 대하여 위험도 해석을 통한 대도시 용수공급의 이수안전도를 평가하였다. 위험도 해석은 신뢰도, 회복도, 취약도 그리고 이 3개의 지표를 가중선형화하여 가뭄위험도지표(DRI, Drought Risk Index)를 다음과 같이 제시하였다.

$$DRI(t) = w_1 [1 - REL(t)] + w_2 [1 - RES(t)] + w_3 \cdot VUL(t) \quad (1)$$

여기서 w_1, w_2, w_3 은 각 지표에 대한 가중치 계수이다. 평가 대상으로 하고 있는 수자원 시스템에 있어서, 어느 지표에 무게를 두는가에 따라 계수를 변화시킨 해석이 가능하다. 신뢰도, 회복도, 취약도의 어느 지표도 0에서 1의 사이의 값이다.

한편 Kundzewicz and Kindler(1995)는 두 가지 사례(Kindler and Tyszewski, 1989; Kundzewicz and Laski, 1995)를 분석하여 지표간의 상충 가능

표 2. 평가지표간의 관계

Indicator	Temporal reliability	Volumetric reliability	Resilience	Vulnerability
Temporal reliability		No conflict	No conflict	Conflict
Volumetric reliability	No conflict		No conflict	Conflict
Resilience	No conflict	No conflict		Conflict
Vulnerability	Conflict	Conflict	Conflict	

성을 표 2와 같이 제시하였다. 표에 따르면 발생신뢰도와 양적신뢰도 사이에는 순응관계를 보인다. 신뢰도와 회복도 간에는 상충관계가 아니나, 취약도와는 상충관계를 보인다. 또한 회복도와 취약도는 서로 상충관계에 있다. 따라서 이수안전도 지표 선택시 상충관계에 있는 지표에 대한 확인이 필요하다. 여기서 상충관계가 의미하는 것은 어떤 지표가 개선되면 상충관계에 있는 지표는 악화될 결과를 보인다는 것이다. 즉 용수공급 조건이 변하지 않을 경우 신뢰도나 회복도가 개선될 경우 취약도는 악화될 수 있다는 것이다.

3. 이수안전도 지표의 선택

미국의 많은 주나 도시에서는 용수공급 조례나 규정 등을 만들어 적용해 오고 있다. 특히 물이 부족한 서부지역의 캘리포니아 주는 한정되어있는 물과 기업의 생산성과 경제적 안정을 위해 재생 가능한 자원으로 안정된 용수공급을 정책목표로 정하고 있다. 장기 계획으로 모든 도시용수 공급자는 평수년, 갈수년 및 장기 갈수년을 대상으로 다양한 고객들의 요구를 만족시킬 수 있는 안정된 물 공급에 대한 신뢰성 확보에 모든 노력을 다해야 한다고 정하고 있다. 이는 수자원 시스템을 통한 용수공급계획의 수립이나 운영은 수요에 대처할 수 있는 충분한 신뢰도를 확보하여야 한다는 점을 강조한 것이다.

실제 어느 나라든 수자원 시스템의 이행도 평가와 관련한 특별한 기준은 정해져 있지 않다. 미국의

경우 안전채수량 개념을 적용하는 예가 많으나 동부와 서부의 물 사정이 다르며, 주나 도시마다 적용 방법을 달리하는 예가 많다. 일본의 경우 10년 갈수빈도에도 안정적으로 취수할 수 양으로 이수안전도를 정하고 있으나 이상가뭄에 의한 물 부족 피해가 자주 발생하고 있어 이수안전도를 초과하는 이상가뭄에 대비한 갈수대책용량을 추가로 확보하고 있는 실정이다.

우리나라의 경우 과거 적용된 이수안전도 기준 적용사례를 살펴보면 표 3과 같이 다양한 기준이 적용되었다. 과거 건설된 용수공급시설들에 대한 계획공급량 결정은 개별 사업마다 나름대로의 특징과 이유가 존재한다. 과거에는 수문조사가 제대로 이루어지지 못했고 이용 가능한 정보 역시 매우 제한적이었다. 이들 댐에 적용한 방법은 크게 보장공급개념과 신뢰도 개념만이 적용되었다. 이는 표 1에서 소개한 용수공급의 평가기준 중 신뢰도에 의한 평가방법만을 적용해 오고 있어 용수부족 발생기간이나 부족량의 크기에 대한 평가는 이루어 지지 못했다. 따라서 근래 대부분의 댐 사업에 적용하고 있는 신뢰도 개념의 평가방법은 용수공급의 안정성 측면에서는 상이한 결과를 보여줄 수 있다.

그럼 수자원 시스템의 용수공급량 결정을 위한 적절한 평가기준을 선택하는 방법은 무엇인가? 과거의 예에서와 같이 특정한 기준을 적시하기는 어려우나 몇 가지 고려사항을 평가해 볼 수 있다. 우선 수자원 계획이 일반적인 계획인지 이상가뭄과 같은 특이한 사상에 대한 평가인지 구분이 필요하다. 일

표 3. 우리나라 과거 용수공급량 결정을 위한 이수안전도 기준 적용 사례

구분	대상댐
보장공급량	안동댐, 합천댐, 부안댐, 용담댐, 소양강댐, 임하댐(타당성), 횡성댐, 보령댐, 남강댐, 주암댐
신뢰도 (95%이상)	충주댐, 보현산댐, 장흥댐, 화북댐, 부항댐, 합천댐(재평가), 합천댐(실시설계), 성덕댐
신뢰도 (90%이상)	밀양댐, 횡성댐, 임하댐(영천도수로), 대청댐, 송리원댐
기타	밀양댐(공업 및 하천유지 보장공급, 생활 및 공업 15개년중 1개년 물부족 허용)

반적인 계획의 경우 표 1에서 제시된 (제1군) ~ (제3군)의 기준을 선택하여 적용할 수 있다. 이중 통상적 용수공급계획을 위한 것이라면 (제1군)의 신뢰도 기준을 적용하는 것도 무난하다. 아울러 회복도와 취약도를 같이 평가할 경우 평균적 개념의 기준적용이 가능하다. 그러나 용수부족에 따른 피해의 범위가 특별히 중요한 경우 Moy et al.(1986)이 제시하고 있는 최소 회복도(최대 용수부족기간)와 최대 취약도(최대 부족량)를 고려할 필요가 있다.

용수공급 부족에 의한 피해규모를 추정할 수 있을 경우 (제4군)의 적용이 권장된다. 주로 이상가뭄에 대비한 용수공급 계획의 경우 일반적 평가기준의 적용은 실제 피해발생 정도를 평가하기 어려우므로 용수부족 발생빈도, 지속기간 및 부족량을 종합적으로 평가할 수 있는 용수부족지표의 적용이 바람직하다. 대만의 경우 기존 수자원 시스템에 용수수요의 증가로 인하여 추가적인 용수원이 필요한 경우 GSI값이 1을 초과하는 경우에 대하여 새로운 수자원 개발 계획을 수립하고 있다. 이는 GSI값이 1보다 커질 경우 용수부족에 의한 피해가 급격히 증가하는 경향을 바탕으로 하고 있다. 일본도 생활용수의 경우 DPD 값이 1,500%day를 초과하는 경우 피해가 급격히 증가하고, 공업용수에 대해서는 2,500%day를 임계치로 보고 갈수대책용량을 결정하는 기준으로 삼고 있다.

田尻 要 등(1996)이 제시한 식 (1)의 경우 논리적으로 가장 이상적인 지표로 인식되나 실제 적용에는 많은 어려움을 내포하고 있다. 우선 각 지표들 간의 가중치 결정문제와 신뢰도와 회복도는 순응관계에 있다는 점을 간과하고 있다. 즉 표 2에서의 관계를 고려하면 신뢰도와 회복도의 가중치가 클 경우 취약도가 나타내는 의미는 상대적으로 약화된다고 할 수 있다. 반대로 신뢰도와 회복도의 가중치가 반대로 될 경우 절충점을 정하기 어렵게 된다. 이에 대해 현재와 같이 (제1군) ~ (제3군)의 기준을 적용하고 (제4군)을 이용하여 용수부족 발생기간과 부족량을 같이 검토하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

결국 이수안전도 평가기준의 선택은 지표의 문제가 아니라 용수공급의 안정성을 어느 수준으로 결정할 것인가의 문제이다. 수문이나 저수지 조건이 변하지 않는다는 조건에서 신뢰도와 취약도의 관계는 합의의 문제(신뢰도를 낮추면 취약도는 개선되고 신뢰도를 높이면 취약도는 악화되는 관계)이며, 공급량 역시 수요량을 고려하여 용수부족 발생 위험을 어느 수준까지 감당할 것인가의 문제이다. 따라서 맹목적인 신뢰도 평가기준의 적용보다는 수요와 공급의 관계(특히 공급은 제한적이나 수요가 많은 경우)와 수자원 시스템의 이행도 수준을 고려하여 결정하는 것이 바람직하다.

4. 결론

지금까지 이수안전도 기준에 대한 지표들을 살펴 보았다. 이수안전도는 용수공급부족으로 인해 물 이용자에게 미치는 영향을 최소화하기 위해 용수공급 부족량의 크기, 빈도 및 기간 등에 대하여 적정 기준을 정하여 적용하게 된다. 현대 사회에서 물 공급의 신뢰도는 수요와 공급관계에서 지켜야 할 기준이며, 수자원 시스템의 계획과 운영의 기본철학이다. 용수공급의 안전도는 수자원 시스템이 실패하지 않을 확률만을 따지는 것이 아니라 수요자가 물 이용에서 장애받지 않는 서비스를 어느 수준으로 유지해줄 것인가를 결정하는 기준이다. 실제 설계를 초과하는 수문사상의 불확실성 및 수리구조물의 불안정 등으로 물 공급의 위험도는 항상 발생할 수 있다. 또한 인구증가나 새로운 산업입지에 의한 물 수요증가는 기존 시설물의 용량을 초과하여 물 공급의 안전도를 악화시킬 수 있다. 그러나 수자원 시스템의 이수안전도를 평가하는 기준은 국내뿐만 아니라 외국에서도 명확히 정의된 기준이 없기 때문에 종종 사회적 논란거리가 되고 있다. 차제에 수자원 시스템 평가방법과 이수안전도 지표에 대한 논의가 활성화되기를 기대해 본다. 🍀

참고문헌

1. Fiering, M. B. (1982) "Alternative indices of resilience." *Water Resour. Res.* 18(1), pp.33-39.
2. Hashimoto, T., Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. (1982) "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Wat. Resour. Res.* 18, pp.14-20.
3. Hsu, S-K (1995) "Shortage Indices for Water-Resources Planning in Taiwan." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.121, No.2, pp.119-131.
4. Hydrologic Engineering Center (1975) "Hydrologic engineering methods for water resources development: Vol. 8, Reservoir Yield." US Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
5. Japan Water Resources Development Public Corp. (1977) "Drought Assessment." *Mizu To Tomoni*, No.159, Tokyo, Japan, 8.
6. Jinno, K., Zongxue, X. Kawamura, A. and Tajiri, K. (1995) "Risk assessment of a water supply system during drought." *Water Resour. Devel.* 11(2), pp.185-204.
7. 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 & U. Shamir) (Proc. Baltimore Assembly, May 1989). IAHS Publ. No. 180.
8. Kundzewicz, Z. W. and Kindler, J. (1995) "Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resources systems." In: *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resources Systems* (ed. by S. P. Simonovic, Z. Kundzewicz, D. Rosbjerg & K. Takeuchi) (Proc. Boulder Symp., July 1995), pp.217-224. IAHS Publ. 231. IAHS Press, Wallingford, UK.
9. 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 (in press).
10. Moy, W-S., J.L. Cohon and C.S. ReVelle (1986) "A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resour. Res.*, 22(4).
11. Srinivasan, K., Neelakantan, T. R., Shyam Narayan, P. and Nagarajukumar, C. (1999) "Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization." *J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE* 125(5), pp.298-301.
12. Vogel, R. M. and Bolognese, R. A. (1995) "Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water supply systems." *Water Resour. Res.* 31(3), pp.645-654.
13. Vogel, R. M., Lane, M., Ravindiran, R. S. and Kirshen, P. (1999) "Storage reservoir behaviour in the United States." *J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE* 125(5), pp.245-25.