

이수안전도 평가방법의 개선 방향

Idea on the Improvement of Water Yield Evaluation Methodology



이재응 |

아주대학교 건설시스템공학과 교수
jeyi@ajou.ac.kr



이광만 |

Kwater연구원 수석연구원
lkm@kwater.or.kr



차기욱 |

Kwater 수자원사업처 수자원계획팀장
cku@kwater.or.kr

1. 서론

용수공급 시스템은 용수부족을 피하기 위하여 최적의 운영방안을 도출하여 적용하나 가뭄이 길어질 경우 용수를 공급할 수 있는 저수지의 물은 고갈되고, 공급이 수요를 충족시키지 못하는 용수부족 상황에 도달하게 된다. 용수부족에 대한 정확한 평가와 대처는 용수공급 가능량에 대한 정확한 평가 없이는 이루어 질 수 없고, 이를 위해서는 무엇보다 용수공급 가능량에 대한 정확한 평가기준 정립이

선행되어야 할 것이다. 지금까지 국내에서 용수공급 시스템 평가에 사용된 평가기준은 크게 보장공급량과 신뢰도 방식이 적용되어 왔지만 각각의 방법은 나름대로 문제점을 가지고 있다.

또한 신뢰도를 보완할 수 있는 평가지표로 거론되는 회복도와 취약도 역시 실제 적용에는 몇 가지 극복해야 할 문제점을 내포하고 있다. 물론 현재까지 제시된 지표 중 하나의 지표만을 이용하여 수자원시스템의 용수공급량을 완벽하게 평가한다는 것 자체가 불가능한 이야기일 수 있다. 또한 우리나라의 경우 물 공급의 안전성을 정책적 혹은 기술적으로 판단할 수 있는 기준이 제시되어 있지 못하다. 치수분야에서 비상여수로나 하천제방의 경우 홍수설계빈도가 설계지침으로 명확히 제시되어 있다는 점을 중시할 필요가 있다.

이런 측면에서 수자원시스템의 용수공급량 평가에 가장 중요한 요인은 갈수(가뭄)라 할 수 있다. 따라서 용수공급 목적이 포함된 수자원시스템의 계획이나 운영의 경우 정책적 판단기준이 되는 갈수빈도의 정의가 필요하다. 이를 바탕으로 개별시스템의 이수안전도를 평가할 수 있다. 이때 평가지표는 물 이용의 중요도나 물 부족에 따른 피해의 심각성을 고려하여 평가방법이나 수준을 달리할 수 있다.

특히 최근에 예기치 못하게 발생하는 기상이변으로 인해 가뭄 피해는 시간이 지날수록 심화되고 있으며, 도시화와 산업화뿐만 아니라 깨끗하고 질 좋

은 물에 대한 수요는 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 그러나 수자원시스템의 용수공급 이행도를 보다 합리적으로 평가할 수 있는 기준이나 지표가 제한적이고 이로 인해 물 이용의 안정성에 대한 확신이 불확실하다. 본 논고에서는 이런 줄거리를 바탕으로 이수안전도 평가방법의 개선방향을 제시하고자 하였다.

2. 이수안전도 평가지표의 문제점

2.1 보장공급량 (firm supply)

과거 적용되어 온 보장공급량 개념은 기록상의 최저 유량이 계속된 연도를 대상으로 갈수기준년을 설정하고 이로부터 결정된 1~2개년만을 대상으로 물수지분석을 실시하여 공칭공급량을 결정하게 된다. 여기서 공칭공급량이란 갈수기준년도의 개념으로 설계된 댐이 최대갈수년 동안에도 공급을 보장할 수 있는 최대공급량인 안전공급량(safe yield) 혹은 보장공급량(firm yield)을 의미한다. 우리나라의 경우 낙동강유역하구조사보고서(건설부, 1977)에서 낙동강 유역의 수자원 평가와 용수수급을 검토하기 위해 사용하였던 개념이었으나 현재는 신뢰도 지표와 함께 수자원 실무의 보편적 개념이 되었다.

보장공급량의 경우 국내의 이수안전도 사례에서 각각의 지역마다 한발이 발생한 연도가 다르기 때문에 지역별로 최대갈수년이 상이하여 최대한발년 선정에 어려움이 있다. 과거 우리나라에서 하천유량자료가 충분하지 않았을 때 낙동강유역의 '67~'68 가뭄을 기준으로 용수공급능력을 평가하였다. 다수의 유역에서 '67~'68년 가뭄을 최대한발년의 기준으로 채택하는 것은 해당 유역에는 타당할 수 있지만 다른 유역에 동일한 기준을 적용하기 어려운 것이 사실이다. 수자원장기종합계획(국토해양부, 2006)에서, 한강과 금강은 '88, 영산강과 섬진

강은 '67~'68, 그리고 낙동강은, 94를 최대한발년으로 판단하고 있다. 그러나 유역에 따라 갈수기준년을 달리 하는 것은 모든 수계에 일관된 기준을 적용하여 수자원시스템을 평가할 수 있는 기준이 될 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 갈수기준년은 하천수를 사회·경제적으로 평가할 수 있는 객관적 지표로 사용하는 데 어려움이 있다. 따라서 선언적 의미의 갈수빈도 기준을 설정하고 이에 근거한 수자원평가가 합리적이라 판단된다.

또한 보장공급량은 물 이용 효율 측면에서 검토가 필요한 방법이다. 언제든지 이용 가능한 물이 충분할 경우 공급능력을 평가하는 자체가 무의미할 수 있으나 공급이 제한적일 경우 물 이용의 효율화가 중요하다. 이런 측면에서 수자원시스템을 보장공급량 개념으로 운영할 경우 이상가뭄 시에는 불합리한 결과를 나타낼 수 있다. 이에 대해 Moy et al.(1986)은 안전공급운영(safe yield operation)은 이상가뭄, 기후변화 및 급격한 물 이용의 변화에는 적절하지 않다고 지적하고 있다.

2.2 신뢰도(reliability)

소위 말하는 Hashimoto et al.(1982)가 정의한 신뢰도의 경우 전체 기간 대비 용수공급의 실패가 발생하지 않은 비율로 나타나기 때문에 발생한 용수공급 실패가 용수부족사상별로 어느 정도로 지속되었고 그 부족량이 얼마인지 표현할 수 없다. 예를 들면, Fig. 1에서 보는 바와 같이 30년의 분석기간 중 6개년에서 실패가 발생했을 경우, 두 그림 모두 신뢰도는 80%이지만 개별년으로 발생한 (Case 1)의 경우보다 6년간 지속된 (Case 2)에서 가뭄 피해는 더욱 커지게 된다. 이와 같이 신뢰도 지표방식은 용수공급의 실패와 지속기간을 표현할 수 없다는 것은 댐이 설치된 유역의 특성을 온전히 표현할 수 없다는 의미이고, 또한 신뢰도 지표만으로 용수공급능력을 표시하는데 한계가 있다는 것을 의미한다.

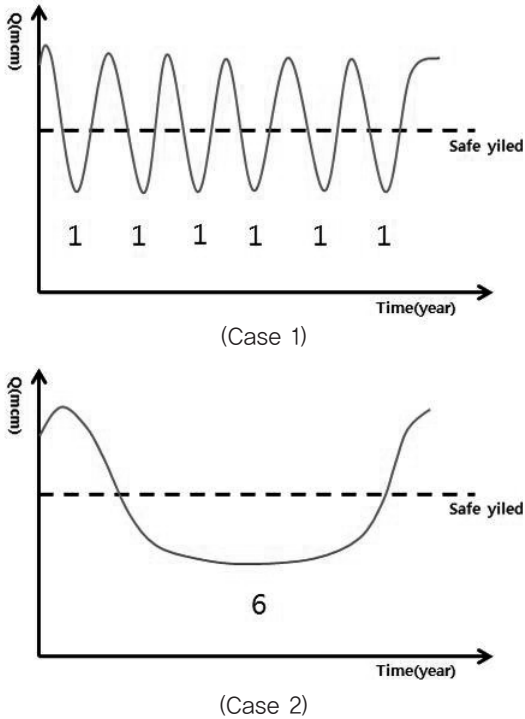


Fig. 1. 신뢰도 지표의 용수공급능력평가를 위한 비교도

2.3 회복도(resilience)

회복도는 용수공급을 할 수 없는 상황이 발생했을 때 실패로부터 얼마나 빨리 회복하는 지를 나타내는 지표이다. 회복도는 전체 실패가 일어난 기간 대비 실패 횟수의 비율로 나타나기 때문에 용수공급의 실패가 어느 정도로 지속되었는지는 표현할 수 있지만 전체 기간 중 실패 비율은 표현할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 특히 Hashimoto et al.(1982)가 제시한 회복도는 Fig. 2 (Case 3)과 (Case 4)에서와 같이 전체 용수공급기간이 30년이라고 가정했을 경우 (Case 3)은 3개년에서 용수부족이 발생하였고, (Case 4)는 1개년에서 용수부족이 발생하여 신뢰도 지표는 각각 90%와 97%의 신뢰도 값을 가지지만, 회복도 지표는 같은 값을 갖는다.

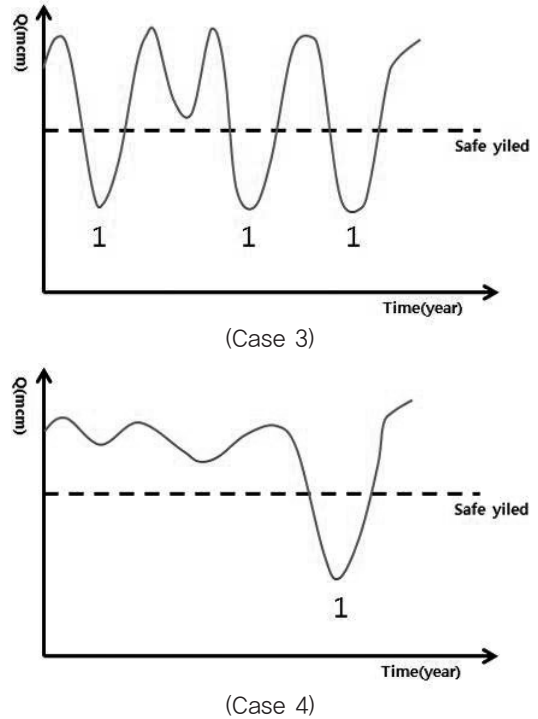


Fig. 2. 회복도 지표의 용수공급능력평가를 위한 비교도

2.4 취약도(vulnerability)

취약도는 용수부족량 크기의 정도를 평가하는 지표로 이용되고 있는데 용수부족량의 크기에 따른 피해정도를 가늠해 볼 수 있는 지표이다. 즉, 취약도는 정상적인 용수공급을 할 수 없는 상황이 발생하였을 때 부족량의 심도를 의미하며, 시스템의 실패가 얼마나 심각할 것인가를 나타낸다. 취약도 지표 중 Moy et al.(1986)가 제시한 식의 경우 Fig. 3에서 보는 바와 같이 (Case 5)의 경우 최대심도가 달라 어떤 경우가 더 심각한지를 평가할 수 있지만 (case 6)에서와 같이 용수부족량의 최대심도가 동일한 경우 실제 피해발생의 정도는 큰 차이가 있음에도 그 차이를 구분할 수 없다는 단점이 있다.

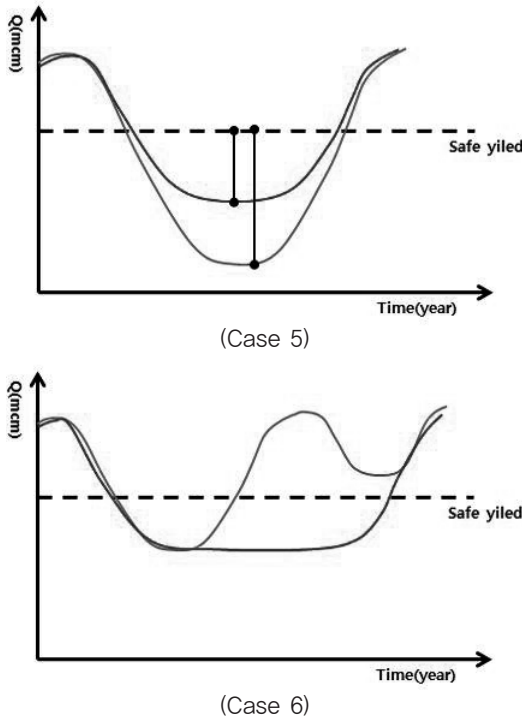


Fig. 3. 취약도 지표의 용수공급능력평가를 위한 비교도

3. 평가지표의 개선 방향

결국 Hashimoto et al.(1982)이나 Moy et al.(1986) 등이 제시하고 있는 통계적 분석방법은 장점도 많지만 단점도 내포하고 있다. 하나의 예를 들어 분석해 보면 Fig. 4와 같이 각각의 용수부족 사상의 부족량이 동일할 경우 어떤 경우가 물 부족에 따른 피해가 심각한지에 대해 판단해 보면 알 수 있다. (a)의 경우 물 부족심도는 낮지만 부족기간이 가장 긴 경우이며, (b)의 경우는 물 부족심도와 부

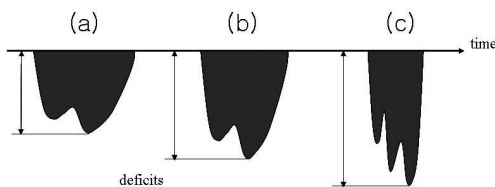


Fig. 4. 물 부족 심도와 지속기간의 상대적 비교

족기간이 중간인 경우, 그리고 (c)의 경우는 물 부족 심도는 가장 크지만 부족기간이 짧은 경우이다.

이와 같은 문제에 대해 통계적 개념에 근거한 평가는 Table 1과 같이 추정할 수 있으나 정성적 판단에 그쳐 실제 피해규모에 대한 판단은 불가능하다. 특히 신뢰도와 회복도의 경우 물 부족의 심각성에 대한 양적인 판단이 어렵고 기준을 정하기도 애매모호한 점이 있다. 취약도의 경우는 Hashimoto et al.(1982)가 언급하고 있듯이 물 부족사상에 대응하는 변수를 추정할 수 있을 경우 심각성이나 피해정도를 추정할 수 있다. 이때에도 지표치의 증감 현상에 대해서도 유의하여야 한다.

Table 1. Hashimoto et al.(1982)이나 Moy et al.(1986) 식에 의한 각 지표의 상대적 비교

구분	(a)	(b)	(c)
신뢰도	하	중	상
회복도	하	중	상
취약도	상	중	하

4. 개선 방향

앞에서의 분석과 같이 현재 사용되고 있는 이수 안전도 평가지표들은 각기 강점과 약점을 가지고 있다. 따라서 특정 지표만을 이용하여 이수안전도 기준을 마련하는 것은 쉽지 않다. 그렇다고 지금처럼 신뢰도 지표만을 적용하는 것은 더욱 문제가 될 수 있다. 현실적인 대안으로 장래 용수공급의 안전도를 확보하고 물 이용 효율을 최대화할 수 있는 대안 개발이 필요하다. 본 장에서는 각각의 지표가 가지고 있는 문제를 극복하기 위하여 다음과 같은 개선방안을 제시하고자 한다.

우선 개선방향의 기본골격은 Fig. 5와 같이 집합의 형태로 나타낼 수 있다. 이수안전도 평가의 가장 중요한 핵심은 수자원시스템을 대상으로 정책적 판단이나 기술적 분석 수준을 제시하는 수문학적 지표라 할 수 있는 갈수빈도의 표준화이다. 국내에서

검토되는 용수공급 수자원시설물의 1차적 설계기준으로 갈수빈도를 사용하는 것이다. 즉 우리나라의 수자원시스템 계획 시 최소한으로 검토해야 할 수준을 갈수빈도로 제시하는 것이다. 이러한 갈수빈도 조건에서 신뢰도나 회복도 등과 같은 통계적 분석방법이나 물 부족에 따른 피해액 등 경험적 지표를 기준으로 하는 물 부족지표를 이용하여 이수안전도 수준을 평가하는 것이다. 이러한 접근 방법은 큰 틀에서의 수문학적 조건을 바탕으로 물 부족에 대한 세부 평가가 가능하다.

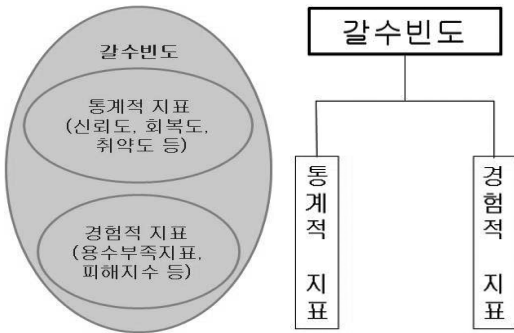


Fig. 5. 수자원시스템의 용수공급 평가 구조 및 지표

3.1 갈수기준년 적용 방법을 갈수빈도로 표준화하는 방안

지금까지 건설된 우리나라 댐의 이수안전도는 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 첫 번째 평가기준은 이전까지 기록된 최악의 갈수 시에도 공급이 가능한 보장공급량 기준이다. 앞서 설명한 바와 같이 1970년대까지 건설된 댐의 경우 관측된 수문 자료가 부족하여 이전까지 발생한 최대 한발('67~'68)의 유입 조건을 100% 보장하는 조건인 갈수기준년을 기준으로 평가하였고, 1980년대 이후 20개년 내의 유입 조건을 100% 보장공급하는 다년기준으로 평가하였으며, 최근에는 30년 이상의 관측자료를 기준으로 신뢰도 지표를 이수안전도 기준으로 적용해 오고 있다.

이 중 갈수기준년은 유역을 전국으로 확대하여

보편적인 기준으로 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 예를 들면, '67~'68년 한발을 최대 한발년의 기준으로 삼은 것이 낙동강 유역에서는 타당할 수는 있었지만 다른 유역에서는 낙동강과 동일한 기준을 적용하기에는 무리가 있었다는 것이다. 또한 낙동강 유역도 2012년까지의 자료를 살펴볼 때 '67~'68년의 가뭄이 최대 한발이 아니라는 점이다. 이는 결과적으로 갈수기준년은 시간적, 공간적으로 이수안전도를 평가하는 일정한 기준이 되기 어렵다는 것을 의미한다.

이수안전도를 평가할 수 있는 일관된 기준의 적용은 안정적인 용수 공급을 위한 필수조건이라고 할 수 있다. 갈수기준년은 수문자료가 부족했던 댐 건설 당시에는 합리적인 기준이 될 수 있었지만 보편적 기준으로 삼기에는 부족한 점이 많이 있으며 이러한 문제를 해결하기 위하여 이수안전도 기준을 Fig. 5와 같이 갈수빈도로 객관화하는 방안이 해결책 중 하나가 될 수 있다고 판단된다. 갈수빈도를 도입하는 것은 수문사상이 가지고 있는 무작위성을 대표하며 또한 하천수를 사회·경제적으로 평가할 수 있는 기준을 제시한다는 특징을 가지고 있다. 갈수빈도 개념을 도입할 경우 모든 수계를 일관된 기준을 적용하여 이수안전도를 평가할 수 있다.

3.2 통계적 지표와 경험적 지표의 결합 방안

일반적으로 수자원 시스템의 안정성을 평가하는 지표는 Hashimoto et al.(1982)이 제안한 신뢰도, 회복도, 취약도 지수이다. 이러한 지표는 통계학적 분석에 근간을 두고 있기 때문에 이수안전도를 초과하는 물 부족이 발생하였을 때 발생할 수 있는 피해규모를 평가하기에는 한계가 있다. 따라서 이상 가뭄으로 인한 피해규모를 평가하기 위해서는 피해 사례를 기초로 산정한 경험적 용수부족 혹은 피해 지표의 사용이 보다 현실적이다.

이의 예로 미공병단(1975)은 평균용수공급부족률(average water shortage rate)과 최대용수공

급부족률(maximum water shortage rate)을 개발하여 사용하고 있고 일본 수자원개발공단(1977)은 부족량과 지속기간을 평가하기 위하여 일일용수공급부족지표(Water Deficit Per day, DPD)를 개발하여 적용해 오고 있다. Huang(1986)은 이들 단일지표의 약점을 보완한 복합용수공급부족 지표를 개발하여 대만의 저수지 운영 계획에 적용한 바 있다. Hsu(1993)는 이들 지표를 종합한 용수공급부족지표(Generalized Shortage Index, GSI)를 개발하여 제시하였다.

이들 경험적 지표는 신뢰도, 회복도 및 취약도와 같은 통계적 지표와 달리 물 부족에 따른 피해유발 기준과 물 부족사상의 핵심적인 요소인 지속기간과 크기의 상대적 비교가 가능하다는 특징이 있다. 또한 일정 수준의 물 부족의 경우 갈수조정이나 수요관리 등을 통해 실질적 피해가 발생하지 않을 수 있다는 점이다. 따라서 가뭄에 의한 사회·경제적 피해를 최소화 할 수 있는 수자원 시스템 구축을 위해서는 과거 발생한 물 부족에 의한 피해규모를 바탕으로 산정된 경험적 지표의 사용이 도움이 될 수 있다고 판단된다.

3.3 다기준 또는 다변량 평가방향

이수안전도는 용수수요를 충족시킬 수 있는 공급의 안정성 정도를 나타내는 지표이다. 이수안전도에서 안정성만을 고려한다면 절대 용수 부족이 발생하지 않을 정도로 충분히 큰 댐 건설을 통해 용수공급 가능량을 확보하는 것이 가장 이상적인 방안이 될 수 있다. 그러나 현실적으로 수자원 이용의 효율을 고려한다면 일정 부분 감당할 수 있는 물 부족을 허용하는 신뢰도의 적용이 타당하다고 판단된다.

그러나 신뢰도의 경우 일, 순, 월과 같이 평가단위가 변화할 경우 공급능력과 이수 안정성이 변화하여 평가자의 선택에 따라 그 결과가 달라질 수 있다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 신뢰도는 실패의 빈

도만을 표현할 수 있을 뿐 실패가 발생했을 때의 심도나 발생 빈도를 표현할 수 없다. 수자원시스템을 운영하는 관리자의 입장에서 용수공급의 실패 빈도를 줄이는 것은 의심할 여지없이 중요한 요소이지만 실패의 심도와 발생 후 회복 정도 또한 간과할 수 없는 요소이다. 동일한 용수공급 실패가 발생한다고 하여도 부족량이 큰 경우 그 피해는 커질 수 있고, 또한 동일한 기간과 동일한 부족량으로 실패가 발생한다고 하여도 실패의 발생 빈도가 잦은 경우 더 큰 피해가 발생할 수 있기 때문이다. 회복도는 용수공급을 할 수 없는 상황이 발생했을 때 실패로부터 얼마나 빨리 회복하는 지를 나타내는 지표로 용수공급의 실패가 어느 정도로 지속되었는지는 표현할 수 있지만 전체 기간 중 실패 비율과 실패의 심도는 표현할 수 없다는 단점이 있다. 취약도는 정상적인 용수공급을 할 수 없는 상황이 발생하였을 때 부족량의 심도를 의미하는 것으로 시스템의 실패가 얼마나 심각할 것인지를 나타낼 수 있지만 동일한 심도로 용수공급실패가 계속되는 경우에는 그 차이를 구분할 수 없다는 단점이 있다.

따라서 이수안전도의 평가는 단일 기준만으로 이루어질 수 없고 신뢰도, 회복도 및 취약도를 함께 고려하는 다기준 평가 방법이 타당하다고 판단된다. 다기준 평가 방법은 하나의 지표를 기준으로 삼는 것이 아니기 때문에 각 지표 상호간의 상관관계가 중요한 의미를 가진다. 그러나 지금까지 각 지표의 관계를 규명하는 연구는 부족한 실정이다. 향후 이에 대한 연구가 추가로 진행되어 이수안전도 평가를 위한 객관적 기준 마련이 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 글에서는 지금까지 대표적으로 적용되어 오고 있는 이수안전도 평가지표를 대상으로 장·단점을 비교하고 개선방향을 논의하였다. 현재 주로 적용

되고 있는 신뢰도 지표에 근거한 용수공급량 결정은 물 공급의 안전도 수준을 담보하기에는 부족한 점이 있는 것이 사실이다. 이의 개선방향으로 갈수록 빈도 표준화를 통해 수자원시스템의 설계기준을 설정하고 경험적 용수부족지표의 개발을 통해 통계적 평가방법을 보완하는 방법을 제시하였다. 그리고

개별 지표의 한계성을 고려하여 다중지표의 적용을 권장하였다. 이와 같은 제안은 개념적으로 이해가 용이하고 적용의 편리성에 근거한 보장공급량 또는 신뢰도와 같은 평가지표에서 벗어나 물 이용의 안전도 수준을 실질적으로 제고하자는 의도에서 제시되었다. ☞

참고문헌

1. 건설부/산업기지개발공사 (1977). “낙동강유역하구조사 기술보고서” 한국건설기술연구원.
2. 국토해양부 (2006). “수자원장기종합계획”.
3. 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.
4. 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.
5. Hydrologic Engineering Center (1975). “Hydrologic engineering methods for water resources development: Vol. 8, Reservoir Yield.” *US Army Corps of Engineers*, Davis, CA.
6. Japan Water Resources Development Public Corp. (1977). “Drought Assessment.” *Mizu To Tomoni*, No. 159, Tokyo, Japan, pp. 8.
7. 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.