

수자원시스템의 용수공급량 결정방법의 문제점 분석

Analysis of Problems of Water Supply Capacity Determination in Water Resources Systems

이 광 만* / 이 재 응**
Lee, Gwang-Man / Yi, Jaeeung

Abstract

In water resources planning, to decide proper water supply capacity is a very important task. Once water supply system such as a dam is decided, it will affect whole range of water resources circumstances for a long time. Even though systematic approaches have been implemented since 1980, many problems are still prevail in reality. Especially some issues related to the reliability analysis method used in planning dams in Korea have been persistently brought up. This study is to diagnose problems on the reliability criterion in water supply capacity assessment of water resources systems and discuss a valid method. As a result, the estimates by the different analysis time intervals, in case of the temporal reliability, show no large difference, but there is a large difference when assessment time intervals are differently applied. The volumetric reliability accounts for 2~3% higher than that of the temporal reliability, and resiliency and vulnerability also show large differences by the analysis time intervals.

Keywords : water resources system, water supply capacity, reliability, resiliency, vulnerability

요 지

수자원 계획에 있어 적정 용수공급량(계획공급량)을 결정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 댐과 같은 중요 수자원시설 물의 경우 한번 계획이 결정되면 이후 수십년간 국가 수자원 환경 전반에 영향을 미치게 된다. 실제 1980년대 이후, 보다 체계화된 수자원 계획이 시행되었음에도 여러 가지 문제점들이 내포되어 있는 것으로 지적되고 있다. 특히 대부분의 댐에 적용되어온 신뢰도 지표의 분석방법이나 기준에 대한 문제점이 지속적으로 제기되고 있다. 본 연구는 수자원시스템의 용수공급량 결정방법의 신뢰도 지표 문제점을 진단하고 적정 적용방안을 제시하고자 하였다. 분석결과, 기간신뢰도의 경우 분석시간단위에 따른 차이는 크지 않았으며, 분석시간단위와 평가단위시간을 달리할 경우 큰 차이를 보였다. 양적 신뢰도는 기간신뢰도보다 2~3% 큰 값을 보이며, 회복도와 취약도 역시 분석시간단위에 따라 차이를 보였다.

핵심용어 : 수자원시스템, 용수공급능력, 신뢰도, 회복도, 취약도

1. 서 론

우리나라는 1960년대 후반 이후부터 다목적댐을 중심

으로 한 수자원 인프라가 본격적으로 개발되었다. 네덜란드의 NEDECO(Netherlands Engineering Consultant)나 미공병단(US Army Corps of Engineer) 등의 지원을 받아 유역

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

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

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

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

조사 사업이 이루어졌고, 일본의 JICA (Japan International Cooperation Agency)의 원조를 바탕으로 많은 댐들이 계획되었다. 또한 80년대 이후는 자체 기술력과 자금으로 유역조사 및 댐 계획이 추진되어 왔다. 이런 과정에서 수자원시스템의 용수공급평가가 특정 기준 없이 임의적으로 적용되어 물 이용의 안전성이나 형평성에 대한 문제점이 나타나고 있다.

근래에는 수자원장기종합계획(MLTM, 2011)시 적용했던 물수지분석방법의 개선이나 기존댐의 실질적 용수공급능력을 판단하기 위한 재평가 등 물 이용 합리화가 강조되고 있다. 이런 배경에는 수자원의 지속가능성을 유지하면서 저영향개발(low impact development)을 동시에 추구하려는 페러다임 변화에 기인한다. 경제적인 측면에서 비용과 편익이 중요하지만 환경과의 균형이 필요하고, 이상가뭄 등의 기후변화 요인에 의한 적응능력에 많은 관심을 두고 있다. 따라서 수자원산업이 발전하기 위해서는 현재의 상황진단을 바탕으로 개선방향이 모색되어야 한다.

이런 이유의 중심에는 수자원계획과 관련된 기준이 국가적으로 정의되어 있지 못한 점도 있으나 논리적으로 증명하고자 하는 노력이 부족했다. 특히 우리나라의 수자원계획시 공급량 결정기준은 주로 신뢰도 지표를 적용하여 왔는데, 신뢰도 지표 분석 방법에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 미국의 경우 대부분 안전채수량(safe yield)의 기준을 수문자료(과거 극한가뭄년의 강우량이나 유량)를 바탕으로 정의하고, 주나 시의회의 동의를 거쳐 적용하고 있어 논란의 여지는 근본적으로 배제되고 있다. 일본의 경우도 이수안전도를 기준갈수량으로 정의하여 적용하고 있다.

예를 들면 미국 캘리포니아주의 St. Helena시의 경우 이수안전도위원회(safe yield committee)를 통해 용수공급 기준을 정의하고 있다(Safe Yield Committee of St. Helena City, 2011). 버지니아주의 경우는 주물조절위원회(State Water Control Board, 1985)가 극한가뭄기간을 정의하고 이때의 공급가능량을 안전채수량으로 결정하여 적용하고 있다. 일본의 경우는 10년빈도의 기준갈수량을 기준으로 하고 이상가뭄에 대한 갈수대책용량을 추가로 적용하는 계획을 시행하고 있다.

이에 반해 우리나라는 수자원시스템 해석을 통해 얻어진 모의결과를 확률개념으로 신뢰도만을 분석하고 있어 모의방법이나 확률해석 방법에 따라 차이가 날 수 있다(Lee et al., 2013). 이런 개념과 평가방법은 물 부족의 정도를 나타낼 수 없는 모호성을 내포하고 있어 개선이 필

요하며(Lee and Kang, 2006), 용수공급의 취약도나 이상가뭄에 대한 적응능력을 평가하기 어렵다는 문제점을 지니고 있다. 특히 용수공급량 결정방법에 대한 견해 차이는 기술자간에도 논쟁의 핵심주제로 나타나는 경우가 있다. 이런 점들은 용수공급의 안전성에 대한 평가가 부족할 뿐만 아니라 수자원 정책의 신뢰성을 저하시키는 요인으로 작용하고 있다.

실제 미국에서 많이 선택하고 있는 안전채수량은 신뢰도 개념에서는 No-failure라는 특수한 경우이다. 현재 우리나라 수자원계획에서는 신뢰도 지표를 적용하여 95% 이상의 값이 나오면 계획공급량으로 정하고 있다. 일부에서는 물 부족을 허용하는 기준으로 설명하고 있으나 물 부족 허용이 아닌 물 부족 위험도를 갖는 평가방법이라 할 수 있다. 이런 경우 물 부족 위험도의 수준에 대한 평가가 필요한데, 보통 물 부족이 발생하였다가 정상상태로 돌아가는 시간을 확률로 나타내는 회복도(resiliency)와 물 부족량의 부족심도를 취약도(vulnerability)로 나타내고 있다(Hashimoto et al., 1982). 그러나 실무자들이 이들 지표의 특성에 대한 이해가 부족하고 여러 지표를 적용할 경우 의사결정이 모호해지는 번거로움으로 인해 적극적으로 활용하고 있지는 않다.

본 연구에서는 우리나라에서 수자원계획시 적용하고 있는 평가지표와 기준에 대한 의문점을 도출하고 평가방법에 따라 나타날 수 있는 불확실성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 우리나라 수자원시스템의 설계 혹은 계획공급량 결정을 위해 지금까지 적용되어 오고 있는 평가방법에 대하여 i) 기존 15개 다목적댐을 대상으로 타당성, 기본설계 및 실시설계 보고서 등을 참조하여 정리하고, ii) 이들 자료를 바탕으로 신뢰도 지표의 적용 한계를 분석하였다. 아울러, iii) 과거 적용사례의 문제점을 분석하여 평가하였으며, iv) 현재 이와 관련 제기되고 있는 의문점에 대하여 상세한 사례분석을 실시하였다. 또한, v) 현재 수자원 평가와 관련, 논란이 되고 있는 신뢰도 지표 적용의 의문점에 대하여 심도 있는 분석을 통해 이수안전도 개선에 필요한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 과거 용수공급 평가방법의 문제점과 한계

2.1 과거 주요 적용 지표

과거 우리나라 수자원시스템의 용수공급 계획이나 저수용량 배분 사업에서 주로 적용된 이론은 보장공급량(firm supply) 기준을 제외하면 대부분 신뢰도 지표에 근거하고 있다. 이의 개념은 Kritskiy and Menkel (1952)가

정의한 신뢰도라 할 수 있다. 신뢰도는 적용이 간편하고 수요와 공급의 상호관계(수요가 증가하면 지표가 나빠지고 저수용량이 증가하면 지표가 좋아지는)를 잘 나타내고 있어 오래전부터 적용해 오고 있는 지표중 하나이다. 신뢰도를 평가하는 방법은 여러 가지가 있는데 크게 발생신뢰도, 시간신뢰도 그리고 양적신뢰도로 구분한다(Klemes, 1969).

Hashimoto et al. (1982)은 신뢰도 지표외에 회복도 및 취약도 지표를 제시하여 수자원시스템 용수공급 평가지표를 새롭게 정리하였다. 이후 여러 가지 변형된 지표들(Moy et al., 1986; Jinno et al., 1995; Kundzewicz and Laski, 1995; Vogel and Bolognese, 1995; Kundzewicz and Kindler, 1995; Srinivasan et al., 1999)이 제시되었다. 이들 지표는 기본적으로 통계적 해석에 근거한 지표로서 확률 혹은 양의 개념으로 나타낼 수 있다.

결국 우리나라에서 지금까지 적용해 오고 있는 신뢰도는 시간개념의 신뢰도라 할 수 있다. 이중 발생신뢰도(occurrence reliability)는 연도를 평가단위기간으로 설정하고 물 부족이 발생하지 않은 연을 전체 연의 비로 계산하는 것이다.

$$Rel_{occ} = \frac{\text{Number of Year enter Ssatisfactory State}}{\text{Total Number of Year Considered}} \quad (1)$$

$$= 1 - \frac{\text{Number of Year enter Nonsatisfactory State}}{\text{Total Number of Year Considered}}$$

시간신뢰도(temporal reliability)는 수자원시스템 모의 분석단위기간을 기준으로 용수공급이 만족상태에 있는 시간을 전체 시간의 비로 구하는 것이다.

$$Rel_{tem} = \frac{\text{Duration of Time of System Sojourn in the Satisfactory State}}{\text{Total Time Period Considered}} \quad (2)$$

$$= 1 - \frac{\text{Duration of Time of System Sojourn in the Nonsatisfactory State}}{\text{Total Time Period Considered}}$$

반면, 양적신뢰도(volumetric reliability)는 고려하는 기간 동안에 계획된 양이나 혹은 적게 공급된 양을 전체 계획공급량의 비로 계산한다.

$$Rel_{vol} = \frac{\text{Portion of Volume of Water Supplied}}{\text{Demanded Volume}} \quad (3)$$

$$= 1 - \frac{\text{Portion of Volume of Water Not Supplied}}{\text{Demanded Volume}}$$

이와 같은 신뢰도 지표는 앞에서의 설명과 같이 고전적인 것이지만 수요-공급관계의 용수공급 만족 상태를 수치적으로 명확하게 정의할 수 있다는 적용의 용이성과 이

에 대한 수자원시스템의 반응을 잘 나타낼 수 있다는 장점이 있어 지금도 많이 사용되고 있다. 다만 이들 신뢰도 지표의 장·단점에 대한 정확한 이해없이 적용의 편이성에 의존하여 이용해 온 측면이 있다.

한편 회복도와 취약도는 Hashimoto et al. (1982)과 Moy et al. (1986)가 제시한 것을 선정하였다. 우선 Hashimoto et al. (1982)가 제시한 회복도는 Eq. (4)와 같이 전체 용수 부족 발생사상을 대상으로 불만족 상태에서 보내는 시간 $\{d(j)\}$ 의 평균값의 역수로 계산하였다. Hashimoto et al. (1982)이 정의한 취약도는 각각의 물 부족 사상의 발생확률이 같다고 가정하는 것으로 Eq. (5)와 같이 용수부족사상(M) 전체의 부족량 $\{v(j)\}$ 을 평균값으로 취약도를 추정하였다.

$$Res_1 = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4)$$

$$Vul_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \quad (5)$$

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 각각 Eqs. (6) and (7)로 제시하였다.

$$Res_2 = \max_j \{d(j)\}^{-1} \quad (6)$$

$$Vul_2 = \max_j \{v(j)\} \quad (7)$$

2.2 과거 적용사례 평가

과거 우리나라 용수공급시설의 계획공급량 결정방법은 Table 1과 같이 1970년 이전에는 주로 갈수기준년을 적용하고 유역의 하류를 용수공급 대상지역으로 하는 유역전반에 대한 물 수지 분석 방법이었다. 갈수기준년의 설정은 용수공급의 이수안전도 측면에서 확보해야할 공급수준을 수문특성과 연계시킨 것으로 한정된 자료기간 중에서 최대갈수년 혹은 차하갈수년을 대상으로 정하게 된다. 갈수기준년도를 선정하여 보장량을 결정하는 방법은 주로 낙동강유역에서 1967~1968년의 가뭄을 30년 빈도 수준으로 평가하고 이를 적용한 경우가 많았다. 근래에는 저수지 운영기법을 주로 적용하고 있는데 대부분 모의기법을 이용하고 신뢰도 평가를 수행하고 있다. 그러나 신뢰도 평가방법은 가용자료의 제한으로 정상상태신뢰도

Table 1. Decision Methods of Planned Water Supply Capacity for Existing Dams

	Item	Dam
Assessment Criteria	Base Dry Year	Andong, Hapchon, Yongdam, Soyanggang, Imha (old), Heongsung, Chungju
	Reliability	Buan, Milyang, Imha (Yongchon diversion), Bohyunsan, daechung, jangheong, Youngju, Boryung, Namgang, juam, Hwabuk, Buhwang, Hapchon (reassessment), Hapchon (design), sungduck
Inflow Data	11~15 year	Andong, Hapchon (reliability), Milyang, Hapchon (design)
	16~20 year	Imha (design), Namgang(old)
	20~25 year	Soyanggang, Heongsung, Boryung
	26~30 year	Buan, Yongdam, Daechung, Jangheong, Youngju, Juam, Hwabuk, Buhwang, hapchon (reassessment), Sungduck
	30~over	Imha (Yongchon diversion), Chungju, Bohyunsan
Inflow Investigation	Gaging Station	Milyang, Youngdam, Heongsung, Chungju, Daechung, Namgang, Juam, Hapchon (design)
	Rainfall-runoff Model	Jangheoung (Tank model), Hwabuk (Tank model), Buhwang (Tank model)
	Watershed Ratio	Andong, Hapchon, Bohyunsan, Youngju, Boryung
	Kajiyama	Buan, Imha (Yongchon diversion), Sungduk, Hapchon (reassessment), Imha, Soyanggang
Extreme Drought Year	Considered	Andong(67~68), Hapchon(67~68), Imha (Yongchon diversion), Youngdam(88), Imha (design), Daechung(88), Jangheoung(67~68), Boryung(88), Juam(67~68), Hwabuk(67~68), Buhwang(67~68, 94), Sungduk(67~68), Bohyunsan(94), Youngju(94), Hapchon (reassessment)(94)
	Unconsidered	Milyang, Soyanggang, Heongsung, Chungju, Namgang, Hapchon(design)
	Not Verified	Buan
Unit Period of Analysis	Monthly	Imha (Yongchon diversion), Soyanggang, Chungju, Bohyunsan, Daechung, Jangheoung, Boryung, Juam, Hwabuk, Buhwang, Hapchon (reassessment), Hapchon (design), Sungduk
	10-day	Milyang, Heongsung
	5-day	Andong, Hapchon, Buan, Youngdam, Imha (design)
	Daily	Youngju, Namgang
Decision Criterion for Water Supply	Firm Supply	Andong, Hapchon, Buan, Youngdam, Soyanggang, Imha (reliability), Heongsung, Boryung, Namgang, Juam
	Reliability (over 95%)	Chungju, Bohyunsan, Jangheoung, Hwabuk, Buhwang, Hapchon (reassessment), Hapchon (design), Sungduk
	Reliability (over 90%)	Milyang, Heongsung, Imha (Yongchon diversion), Daechung, Youngju
	Other	Milyang (firm supply for river maintenance & agriculture; reliability for domestic & industrial)

(steady-state reliability)를 구하는데 한계가 있었다.

과거 용수공급시설의 계획공급량 추정에 적용한 분석 단위기간도 천차만별로 나타났다. 실제 분석단위기간은

수문자료 조사단위기간과 밀접한 관계가 있으며 용수공급분석 단위기간과도 관계가 있다. 생·공용수의 경우 계절별 수요의 변동성이 적고 하천유지용수 또한 기준갈수

량 등으로 정하는 경우가 있어 보장량 개념으로 적용이 가능하다. 농업용수의 경우는 관계기의 기상상황 등에 영향을 받으나 계절별 성장단계에 따라 수요량이 변하므로 장기간 단위로 분석하기 어려운 점이 있다. 그럼에도 얻어진 수문자료계열 기간단위에 분석단위기간을 맞출 수밖에 없었다.

신뢰도 지표의 경우는 전체 수요에 대한 신뢰도 뿐만 아니라 분야별(생활, 공업, 농업 및 하천유지 등)로 구분하여 적용한 사례도 있었다. 어떤 경우는 공급량만 추정하고 공급의 신뢰도에 대한 수준을 평가하지 않았다. 신뢰도 기준 적용에서는 30년에 1회 물 부족이 발생하는 수준으로 평가된 경우가 많았다. 일부 댐들은 신뢰도가 95%를 하회하거나 용수공급의 효율성을 고려하여 극한가뭄년을 제외한 경우도 있었다.

유량자료를 선택할 경우 자료의 기간이 제한적일 수밖에 없다. 실제 근대적인 유량조사 사업이 진행된 것은 1960년대 이후이다. 따라서 계획 댐 인근지점에 수위관측소가 없는 곳이 많았으며, 대하천 본류가 아닌 지류의 경우 강우량 자료도 구하기 어려웠다. 이용 가능한 수위관측소가 없는 경우 강우 관측 자료의 신뢰도가 높은 경우에는 강우-유출 모형으로 모의하였고, 강우자료가 없는 경우는 유역면적비전이 등이 적용되었다. 특히 1980년 이전은 강우자료가 있는 경우 Table 1과 같이 강우-유출 경험식인 가지야마 공식이 적용된 경우가 많았다. 2006년 수자원장기종합계획(MOCT, 2006)에서는 한강은 1988년, 금강은 1988년, 낙동강은 1994년, 영산강·섬진강은 1967~1968년을 극한가뭄년으로 평가하고 있어 유역별로 적용해 보면 7개의 댐이 과거 기록 중 극한가뭄년을 포함하지 않았다.

수자원 시스템의 용수공급량 평가에서 분석단위기간 역시 중요한 요소이다. 분석단위기간은 정해진 규칙은 없으며, 당시의 여건을 고려하여 임의적으로 적용해 왔다. Table 1에서와 같이 비교적 월 단위가 많았고, 물 수지분석을 적용한 경우 5일 단위를 적용하였다. 순 단위나 일 단위 적용은 비교적 적은 것으로 나타났다. 수자원 시스템의 공급량 결정에 적용한 기준의 수준도 매우 다양하게 선정되었다. Table 1과 같이 보장공급량을 포함하여 신뢰도 95% 이상이 대부분을 차지하나 90~95%의 경우도 5개 댐에 적용되었다.

2.3 과거 적용사례 문제점 정리

우리나라에서 수자원계획시 적용해온 이수안전도 결정 및 적용방법의 문제점을 실무경험이 있는 전문가 30인을 대상으로 설문조사를 한 결과 다음과 같은 결과를

얻었다.

주로 지적된 문제점은 i) 수자원시스템 평가모형에 적용되는 분석단위기간(일, 주, 순, 월 등)에 따라 평가 지표치(신뢰도, 회복도 및 취약도 등)가 큰 차이가 있다. ii) 기간신뢰도뿐만 아니라 양적신뢰도 역시 같이 평가되어야 한다. iii) 신뢰도 평가의 단점을 보완하기 위해 회복도나 취약도 등을 포함하는 복합지표를 적용하여야 한다. 그리고 iv) 보장공급량(firm yield)과 물 부족의 위험도를 포함하는 신뢰도 평가지표간의 상충 등 이었다. 이에 더해 수자원시스템 이행도 평가 기준으로 적용되고 있는 지표들의 특성이나 지표간 중복성 등 우리가 인지하지 못하고 있는 것을 포함하여 여러 가지 문제점이 제기되었다.

지금까지 수자원사업에 적용된 평가방법이나 신뢰도 지표를 살펴보면 직·간접적으로 인지할 수 있는 당연한 의문점들이었다. 앞에서의 지적과 같이 신뢰도 평가방법에서 가장 모호한 것은 신뢰도 평가기간단위이다. Table 1에서 알 수 있듯이 주로 적용된 분석단위기간은 일, 5일, 주, 순 및 월 등 취득된 수문자료나 적용모형의 한계, 수요의 특성 혹은 기술자의 선호 등에 따라 다양하게 분석되었다. 물수지분석이 적용된 경우 보장량 개념으로 5일 단위가 적용되었지만 저수지 모의운영 기법을 적용한 경우 일 단위 혹은 월 단위 분석을 실시하고 신뢰도는 연 단위로 평가한 경우가 있었다.

이런 경우는 직관적으로 Eqs. (1)~(3)의 관계에서 $Eq.(1) \leq Eq.(2) \leq Eq.(3)$ 의 관계가 성립하고 있어(McMahon et al., 2006) 신뢰도 추정치가 차이를 나타낼 수 있다. 즉, 동일조건에서 분석할 경우 용수공급이 충족되지 않더라도 공급량이 있을 경우 양적신뢰도가 기간신뢰도보다 크며, 년 중 몇 개월간 물 부족이 발생한 경우보다 그 해를 물 부족으로 처리하는 발생신뢰도는 기간신뢰도보다 적게 되는 것이다. 따라서 신뢰도 지표간 특성과 분석단위기간의 차이에 대한 정확히 이해가 필요하다.

신뢰도 지표의 경우 Eq. (1)을 기준으로 판단해 보면 어느 특정기간동안 전체 물 부족량이 동일하더라도 물 부족이 특정 년에 집중될 경우 신뢰도는 올라가지만 물 부족이 다년에 걸쳐 분산될 경우 낮아지는 효과가 있다. 이때 특정 년에 물 부족이 집중될 경우 물 부족심도(취약도)는 커지게 된다. 이와 관련 신뢰도와 취약도 지표 간에는 Tradeoff의 관계가 존재한다. 다시 말해 Eq. (3)을 기준으로 같은 양적신뢰도 값을 보이는 경우라도 신뢰도와 취약도는 대응관계에 있기 때문에 용수공급의 안정성을 위해서는 물 부족량 추이(회복도와 취약도)를 면밀히 분석할 필요가 있다.

3. 신뢰도 지표 적용방법에 대한 평가

3.1 평가모형 및 조건

본 연구에서는 각 댐을 단일운영조건으로 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. 이때 상태방정식에서 고려하는 변수는 저수지저류량을 상태변수로 하고 물수지에 영향을 미치는 인자들을 고려하게 된다. 이를 기본으로 본 연구에서 적용한 상태방정식은 저류량을 상태변수로 하여 Eq. (8)과 같이 정의하였다.

$$X_{t+1} = X_t + I_t - D_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - R_t \quad \text{for } t = 1, \dots, T \quad (8)$$

여기서, X_t 는 저류량, I_t 는 유입량, D_t 는 댐에bb서 의 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 관측한 저수지 유입량 자료를 이용하고 누수량은 극히 미미하다고 판단하여 고려하지 않았다.

이수목적의 저수지 평가 모의 모형에서 적용하는 제약 조건은 상태변수를 제약하는 유효저수용량의 적용범위와 결정변수를 제약하는 방류량의 상·하한 범위이며 다음과 같이 나타낸다.

$$X_t^{\min} \leq X_t \leq X_t^{\max} \quad (9)$$

$$R_t^{\min} \leq R_t \leq R_t^{\max} \quad (10)$$

$$X_t \geq 0, R_t \geq 0 \quad (11)$$

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. (11)은 저류량과 방류량의 비음 조건(non-zero)을 나타낸다. 이때 Eq. (9)에 대해서는 하절기 제한수위가 있는 경우 이를 고려하였다.

우리나라 저수지시스템의 용수공급 평가의 문제점을 분석하기 위하여 15개 다목적댐을 대상으로 적용하였다. 공급량은 각 댐의 월별 계획공급량을 순 및 일별로 배분하였으며, 유량자료는 댐 건설 이후부터 2009년까지의 일 유입량 자료를 이용하여 분석하였다. 각 댐의 주요 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. General Characteristics of Analysis Target Dams

Dam	Item	Inflow Data Period (year)	Watershed Area (km ²)	Annual Inflow (10 ⁶ m ³)	Effective storage (10 ⁶ m ³)	Planned Supply (10 ⁶ m ³ /year)	Planned Reliability (%)	Planned supply/ Effective storage
Namgang		34	2,285.0	2,158.2	299.7	573.3	100	1.91
Daechung		29	3,204.0	957.8	790.0	1,649.0	90	2.09
Milyang		9	95.4	113.3	69.8	73.0	93	1.05
Boryung		12	163.6	153.8	108.7	106.6	95	0.98
Buan		13	59.0	56.9	35.6	35.1	100	0.99
Sumjingang		35	763.0	552.3	370.0	350.0	90	0.95
Soyanggang		36	2,703.0	2,222.4	1,900.0	1,213.0	100	0.64
Andong		33	1,584.0	1,039.2	1,000.0	926.0	100	0.93
Youngdam		9	930.0	2,782.4	672.0	650.4	100	0.97
Imha		18	1,361.0	785.3	424.0	591.6	93	1.40
Jangheoung		8	193.0	175.9	171.0	127.8	96	0.75
Juam		19	1,010.0	689.2	352.0	270.1	100	0.77
Chungju		24	6,648.0	5,533.8	1,789.0	3,380.0	95	1.89
Hapchon		21	925.0	707.3	560.0	599.0	97	1.07
Heongsung		10	209.0	196.9	73.4	119.5	96	1.63

3.2 기간신뢰도의 분석단위기간 차이

Table 1에서 알 수 있듯이 분석단위기간과 평가단위기간을 달리 적용한 사례를 여러 건 확인할 수 있다. 분석단위기간에 따라 평가지표치가 차이를 보일 것이라는 의문이 들 수밖에 없다. 실제 우리나라에서 지금까지 적용된 사례를 살펴보면, Table 1에서와 같이 주로 Eqs. (1) and (2)를 혼용하여 적용해 왔다. 적용방법은 수문자료의 조건이나 저수지 규모를 대상으로 적정 공급량을 충족시키는 대안을 찾는 방법이 주로 이용되었다. 이 과정에서 수자원시스템 해석조건이나 평가가 제 각각 이루어져 댐 간 혹은 유역간 상대적 비교가 불가능하고 일관성이 결여되어 있다. 이런 문제는 수자원 사업의 정책적 판단이나 기술적 분석 기준을 표준적으로 적용할 수 없었다.

지금까지 건설되었거나 건설 중인 다목적댐을 대상으로 분석단위기간을 분석해 보면, 주로 과거에 건설된 댐이나 자체 유역에 수문관측 자료가 없는 경우, 인근 유역에서

전이된 자료를 적용한 댐들은 월 단위 평가가 주를 이루고 있다. 또한 물 수지분석을 기본으로 한 경우나 자체 유역에 수문자료가 있는 경우 혹은 농업용수의 비중이 큰 경우 등은 5일 단위를 적용하였다. 영주댐이나 남강댐 재개발 등과 같이 최근에 검토된 댐들은 일 단위까지 적용하고 있다. 이에 따라 분석단위기간에 따른 신뢰도 지표값의 차이가 클 것으로 예상하는 전문가들이 많았다.

이를 확인하기 위하여 기존의 15개 다목적댐을 대상으로 분석단위기간별로 기간신뢰도를 추정하였다. 개별댐에 대한 상세 적용결과는 대청댐을 예로 들면 Table 3과 같다. 전체 댐에 대해서는 Fig. 1과 같으며, 일 단위 운영의 신뢰도 평균값은 97.3, 순 단위 운영은 96.9 그리고 월 단위 운영은 96.9%로 나타났다. 분석기간별 평균치의 차이는 0.4에 불과하며, 순 단위와 월 단위는 같은 값을 보였다. 댐별로는 합천댐, 횡성댐, 임하댐 및 밀양댐이 1% 이상의 차이를 보였으나 최대편차를 보인 횡성댐도 -2.8%를 나타내었다. 나머지 댐은 1% 이내의 차이를 보였다. 횡성댐, 점진

Table 3. One Case of Reliability Analysis for Daechung Dam

Time	No. of Water Shortage Event	Shortage Period	Shortage Duration	Shortage (10^6m^3)	Indicators
Monthly	1	94.11 ~ 95.07	9	718.2	$Rel_{tem}=1-16/348=0.95$ $Res_1=(16/3)^{-1}=0.19$ $Vul_1=1226/3=408.3$ $Rel_{vol}=46,631/47,832=0.97$
	2	02.02 ~ 02.03	2	61.9	
	3	09.02 ~ 09.06	5	444.9	
	Total		16	1225	
10-day	1	82.08.11 ~ 81.08.20	1	14.3	$Rel_{tem}=1-43/1,512=0.97$ $Res_1=(43/6)^{-1}=0.14$ $Vul_1=1370.1/6=228.4$ $Rel_{vol}=46,640/47,832=0.97$
	2	94.12.11 ~ 95.04.30	14	362.1	
	3	95.05.21 ~ 95.07.31	7	386.2	
	4	95.08.11 ~ 95.08.31	2	59.0	
	5	02.03.11 ~ 02.04.20	4	58.9	
	6	09.02.11 ~ 09.07.10	15	479.6	
Total		43	1,370.1		
Daily	1	94.11.22 ~ 95.04.22	152	388.2	$Rel_{tem}=1-427/10584=0.96$ $Res_1=(427/9)^{-1}=0.02$ $Vul_1=1386.6/9=154.1$ $Rel_{vol}=46,466/47,832=0.97$
	2	95.05.18 ~ 95.07.23	67	366.4	
	3	95.08.05 ~ 95.08.16	12	47.7	
	4	95.08.18 ~ 95.08.19	2	2.7	
	5	02.02.22 ~ 02.03.24	31	58.5	
	6	02.03.26 ~ 02.04.06	12	19.2	
	7	02.04.08 ~ 02.04.17	9	16.8	
	8	09.02.04 ~ 09.05.20	106	273.7	
	9	09.06.02 ~ 09.07.07	36	213.4	
Total		427	1,386.9		

강댐, 임하댐 및 남강댐의 경우는 월 단위 분석이 높은 값을 보여주고 있어 분석기간에 따른 기간신뢰도 값이 일관성을 보이지는 않았다. 즉, 다목적댐의 경우 분석단위기간이 짧을수록 기간신뢰도 값이 크지 않았으며, 이와 같은 결과는 대부분의 다목적댐이 생활 및 공업용수의 비중이 높고 연중 일정량을 공급하는 유지용수가 배분되어 있어 분석단위기간의 영향이 적은 것으로 판단된다.

3.3 분석단위기간과 평가단위기간의 차이

다음은 분석단위기간과 평가단위기간을 달리할 경우에 대해 분석하였다. 이와 같은 분석은 분석기간과 평가기간을 달리할 경우에 대한 결과치의 차이를 분석하기 위한 것이다. Fig. 2는 일 단위 모의 결과를 순, 월 및 연 기간으로 평가한 것이다. 15개 댐의 순 단위 기간신뢰도 평균치는 96.7, 월 기간은 95.8 그리고 연 기간은 87.0%로 나타났

다. 분석기간별 차이는(일)-(순)이 0.6, (일)-(월)이 1.4, (일)-(년)이 10.3%로 분석되었다. 순 기간 평가에 대한 댐별 결과는 합천댐 및 횡성댐이 1% 이상의 차이를 보였고, 월 기간 평가에서는 횡성댐, 합천댐, 충주댐, 임하댐, 보령댐 등이 2% 이상의 차이를 보였다. 연 기간 평가는 보령댐, 임하댐, 충주댐, 합천댐 및 횡성댐이 10% 이상의 차이를 보였다.

순 단위 모의결과를 월 및 연 기간으로 평가한 결과는 Fig. 3과 같다. 16개 댐의 평균치에 대한(순)-(월)은 1.5, (순)-(년)은 9.8%로 나타났다. 일 단위 운영에 의한 기간별 평가보다 차이는 줄었으나 월 기간에 대해서 1% 이상, 연 기간에 대해서는 9.8%의 값을 보여주고 있다. 댐별로는 임하댐, 충주댐, 합천댐, 횡성댐 및 대청댐이 큰 차이를 보였다. 대부분의 댐들에서 편차가 비교적 크게 나고 있음을 알 수 있다.

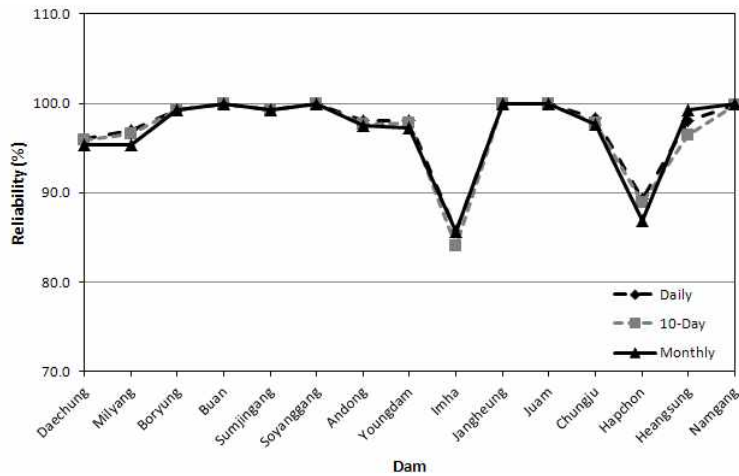


Fig. 1. Estimated Reliability for each Dam according to the Analysis Time Interval

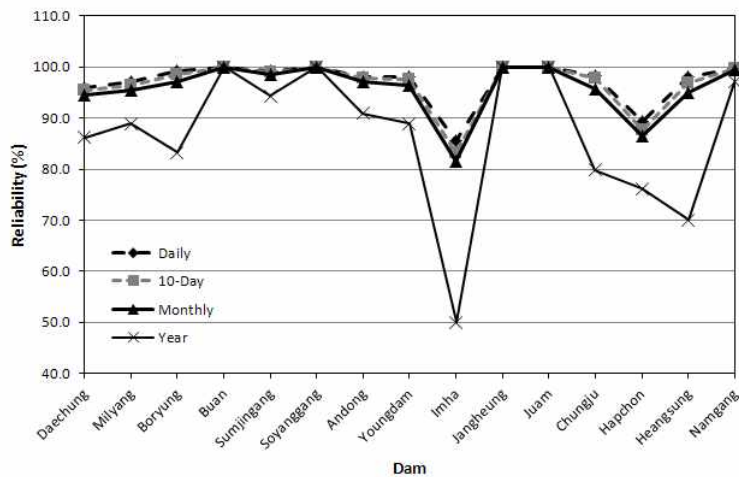


Fig. 2. Estimated Reliability of 10-day, Monthly and Yearly Time Interval using the Result of the Daily Analysis Time Interval

월 단위 운영의 결과에 대해서는 Fig. 4에 정리되어 있다. (월)-(년)은 6.6의 차이를 보였다. 댐별로는 대청댐, 임하댐, 충주댐 및 합천댐이 큰 차이를 보였다.

이상의 결과를 종합하면, 우선 분석단위기간에 따른 기간신뢰도의 평균치 차이는 0.4%에 불과하였다. Eq. (2)을 기준으로 하는 기간신뢰도 평가는 분석기간에 따른 차이가 거의 나타나지 않고 있어 특정 기간을 선호할 이유가 없는 것으로 판단된다. 따라서 수문자료의 취득 단위나 적용모형의 유연성 등을 고려하며 생·공용수와 같이 연중 큰 변화가 없는 용수공급을 평가할 때 타당할 것으로 판단된다. 분석기간과 평가기간에 따른 신뢰도의 계산값은 평가기간이 길어질수록 큰 차이를 보였다. 일 단위로 평가한 결과치와 일단위 운영 결과를 순 단위기간으로 평가한 결과치와는 0.6%의 차이에 불과하였다. 그 외의 경우

에는 1%이상의 차이를 보여 이와 같은 평가방법은 합리적이라 할 수 없다. 또한 어떤 경우에도 발생신뢰도, 즉 연 단위평가는 결과의 차가 크게 나타날 수 있으므로 주의하여야 한다.

3.4 기간신뢰도와 양적신뢰도의 관계

지금까지 적용된 신뢰도 평가방법 중 양적신뢰도를 적용한 경우는 발견되지 않았다. 양적신뢰도와 기간신뢰도의 상관관계는 Table 4에서 알 수 있듯이 0.98 이상의 높은 값을 보였다. 상관회귀식에 따르면 양적신뢰도가 기간신뢰도보다 일단위분석보다 2%, 순단위 운영은 3.5% 그리고 월 단위 운영은 5% 높은 값을 보였다. 즉 분석단위 기간에 상관없이 양적신뢰도의 값이 크게 나타났으며, 분석단위시간이 길어질수록 차이도 커지고 있다. 실제 Fig. 5

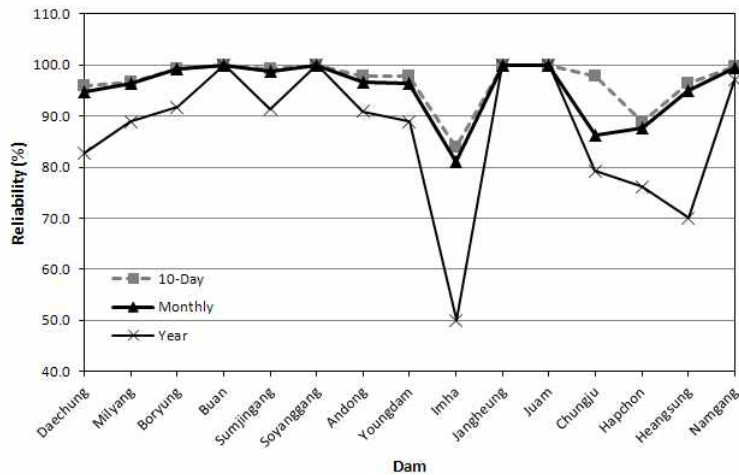


Fig. 3. Estimated Reliability of Monthly and Yearly Assessment Time Interval using the Result of the 10-day Analysis Time Interval

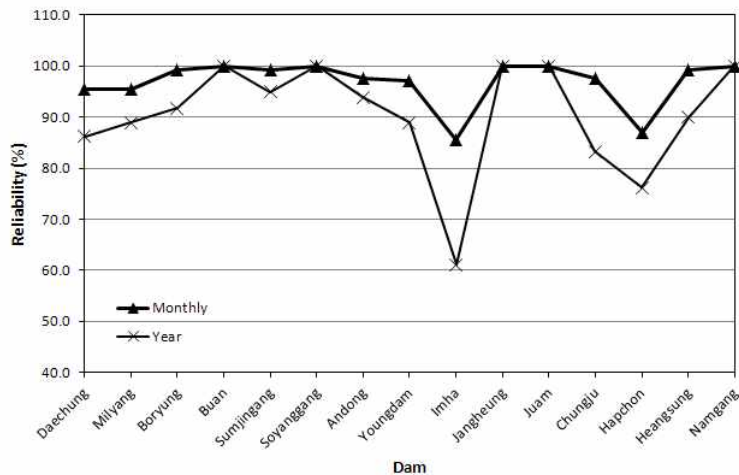
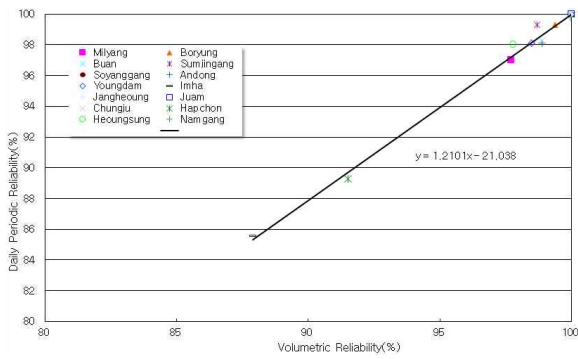


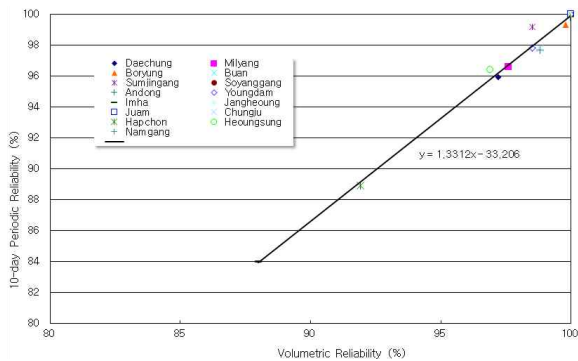
Fig. 4. Estimated Reliability of Yearly Assessment Time Interval using the Result of the Monthly Analysis Time Interval

Table 4. Regression Equation and Relation Coefficient between Temporal and Volumetric Reliability

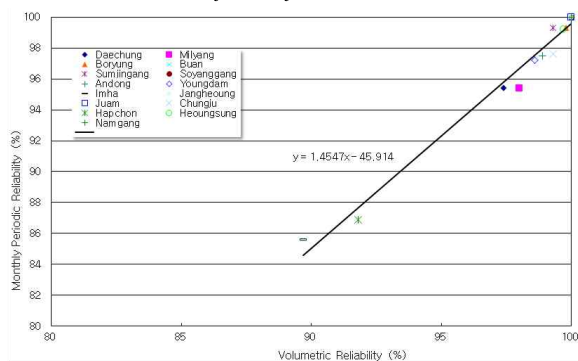
Analysis Period	Relationship Equation (x is the volumetric reliability)	Correlation Coefficient (r^2)
Daily	$y = 1.4547x - 45.914$	0.9912
10-day	$y = 1.3312x - 33.206$	0.9898
Monthly	$y = 1.2101x - 21.038$	0.9797



(a) daily analysis time interval



(b) 10-day analysis time interval



(c) monthly analysis time interval

Fig. 5. Relationship between Temporal and Volumetric Reliability

에서와 같이 일, 순 및 월단위로 모의된 기간신뢰도와 양적신뢰도 관계는 상관성이 매우 높게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 Eq. (1) ≤ Eq. (2) ≤ Eq. (3) 의 관계를 잘 보여주고 있어 기간신뢰도로 평가할 경우에는 양적신뢰

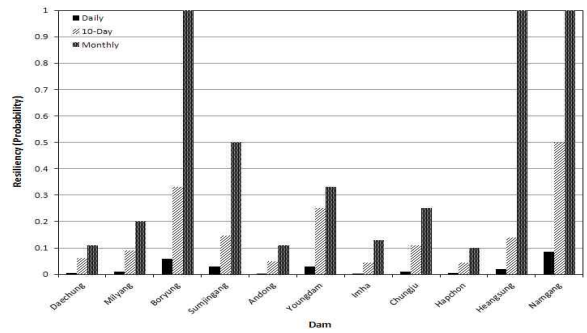


Fig. 6 Averaged Resiliency by Analysis Time Intervals Based on Hashimoto et al. (1982)

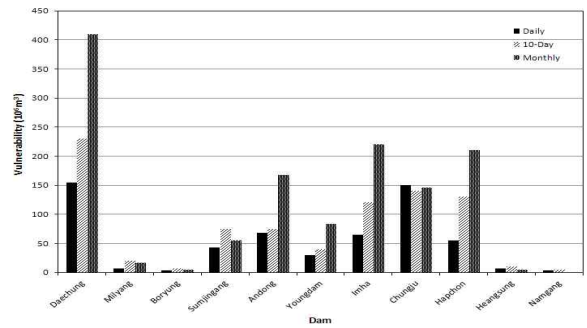


Fig. 7. Averaged Vulnerability by Analysis Time Intervals based on Hashimoto et al. (1982)

도의 평가는 의미가 없는 것으로 판단할 수 있다.

3.5 분석기간에 따른 회복도 및 취약도 차이

한편 분석단위기간에 따른 다목적댐의 용수공급 이행도를 종합적으로 평가하기 위하여 회복도와 취약도에 대한 분석을 실시하였다. Figs. 6 and 7은 Hashimoto et al. (1982)이 제안한 평균개념의 회복도와 취약도 평균 결과이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 평균개념의 회복도는 용수 부족이 발생하지 않은 댐을 제외하면 분석단위기간이 짧을수록(일 단위) 회복되는 확률이 낮으며, 월단위로 갈수록 빨라지는 것을 알 수 있다. 특히 보령댐, 황성댐 및 남강댐은 분석단위기간이 길어질수록 회복이 빠른 것으로 나타났다. 또한 Fig. 7에서 보여주듯이 취약도 역시 회복도와 같은 추세를 보이고 있다. 각 댐별로 용수공급에 차

이가 있어 절대적인 비교는 어려우나 용수부족이 발생한 댐에서는 큰 차이를 보였다.

한편 회복도와 취약도를 최대치 개념으로 평가하는 Moy et al. (1986)이 제시한 식에 따라 각 댐의 최대 물 부족 발생기간을 분석해 보면 월 단위분석기간이 비교적 회복력이 빠른 값을 보이고 있다. Fig. 8과 같이 전체적으로 보령댐, 황성댐 및 남강댐이 회복이 빠른 것으로 나타났다. 섬진강댐, 황성댐 및 남강댐은 순 단위 운영 결과가 회복력이 더딘 것으로 나타났다. 대청댐, 밀양댐, 안동댐, 임하댐 및 합천댐은 분석단위기간에 상관없이 회복이 늦은 것으로 분석되었다. 한편 취약도는 Fig. 9와 같이 평균개념보다는 편차가 작게 나타나고 있으나 절대량은 크게 평가되고 있다. 분석기간단위에 따라 추정치의 차이가 크게 나타나고 있는데 일, 순 및 월운영단위로 커지고 있다.

위의 분석과 같이 분석단위기간의 차이에 따른 회복도와 취약도의 변화 추세는 큰 차이를 보이고 있다. 이런 결과는 분석단위기간의 차이에 의한 결과를 절대 비교하는 것은 의미가 없으며, 어떤 분석기간을 선택하든 일관된 적용과 신뢰도의 단점인 취약성을 보완평가하는 방법으로 이용하는 것이 바람직하다.

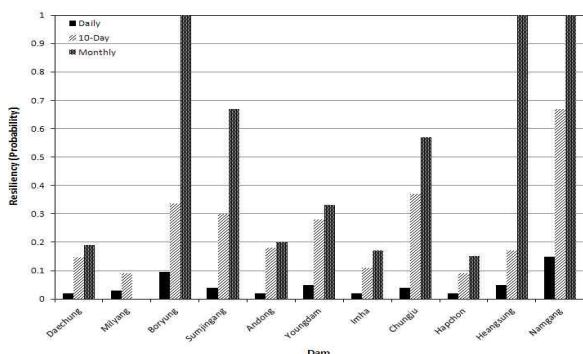


Fig. 8. Maximum Deficit Resiliency by Analysis Time Intervals Based on Moy et al. (1986)

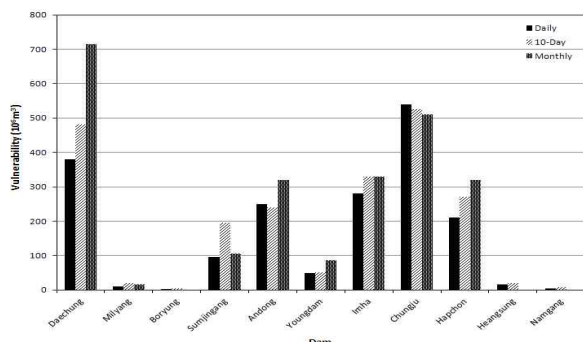


Fig. 9. Maximum Deficit Vulnerability by Analysis Time Intervals based on Moy et al. (1986)

4. 결론

과거 건설된 용수공급시설들에 대한 계획공급량 결정은 개별 사업마다 나름대로의 특징과 이유가 존재한다. 과거에는 수문조사가 제대로 이루어지지 못했고 이용 가능한 정보 역시 매우 제한적이었다. 그 결과 계획 시설물의 용수공급량을 정하는 방법이나 과정도 당시의 여건을 고려하여 이루어질 수밖에 없었다. 이러한 문제점들은 지금까지도 분석절차나 방법의 오류를 유발하고 이로 인해 용수공급량 결정에 문제점으로 작용하고 있다. 특히 우리나라 수자원 계획에서 가장 많이 적용되고 있는 신뢰도 지표는 통계적 해석에 근거하고 있어 분석방법이나 적용 기준에 따라 다른 결과를 보여준다. 결국 어떤 방법으로 해석하느냐에 따라 공급가능량 뿐만 아니라 공급의 안전성이 달라지고 그 결과는 수자원 계획 전반에 영향을 미치고 있다.

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 신뢰도 지표의 적용에 따른 문제점은 다음과 같다. 우선 신뢰도 지표 간에도 양적신뢰도는 기간신뢰도보다 2~3% 큰 값을 보이며, 기간신뢰도는 발생신뢰도보다 큰 값을 보이고 있다. 또한 분석단위기간을 달리할 경우 기간신뢰도의 결과는 큰 차이를 보이지 않았으나 평가단위기간을 달리할 경우 큰 차이를 보였다. 회복도는 분석단위기간이 길어질수록 정상상태로 회귀하는 확률이 높았으나 취약도는 반대로 물 부족량이 크게 추정되었다. 결론적으로 수자원시스템의 용수공급을 평가하기 위해 신뢰도 지표를 적용하는 경우 수요의 계절적 변동성 등 영향인자의 특성을 파악한 후 분석단위기간을 정하고 기간신뢰도와 발생신뢰도의 차이를 확인하고 적정 평가단위기간을 선정하여야 한다. 양적신뢰도는 기간신뢰도에 비해 큰 값을 보이므로 취약도가 평가될 경우 두 지표를 같이 비교하는 것은 중복이 될 것으로 판단되었다. 지금과 같이 신뢰도를 기본 지표로 사용할 경우 회복도와 취약도는 절대적인 판단기준보다는 상대적 판단기준으로 적용하는 것이 적절한 것으로 분석되었다.

References

- 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.
- Klemes, V. (1969). "Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input." *Journal of Hydrology*, Vol. 7, pp. 198-216.
- Kritskiy, S.N., and Menkel, M.F. (1952). *Water Management Computation*, GIMIZ, Leningrad, pp. 392.
- 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, G.M., Cha, K.U., and Yi, J. (2013). "Analysis of Non-monotonic Phenomena of Resiliency and Vulnerability in Water Resources Systems." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 2, pp. 183-193.
- 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.
- McMahon, T.A., Adedoye, A.J., and Zhou, S.L. (2006). "Understanding performance measures of reservoirs." *Journal of Hydrology*, Vol. 324, pp. 359-382.
- Ministry of Construction and Transportation. (2006). *National Water Resources Plan (Revision)*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2011). *National Water Resources Plan (2011~2020)*.
- 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.
- Safe Yield Committee. (2011). *Safe Yield Committee of St. Helena City*.
- 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.
- State Water Control Board. (1985). *Safe Yield of Municipal Surface Water Supply System in Virginia, Planning Bulletin No. 335*.
- 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.

논문번호: 14-016	접수: 2014.02.10
수정일자: 2014.03.03	심사완료: 2014.03.03